

博士論文

渦流発生による夾雑物の  
越流抑制効果に関する研究

Study on the effect of floatables overflow prevention  
by producing vortex

岩 佐 行 利



# 渦流発生による夾雑物の越流抑制効果に関する研究

## 目 次

<b>第1章 序論</b> .....	<b>1-1</b>
1.1 背景 .....	1-1
1.2 本研究の目的 .....	1-1
1.3 本論文の構成 .....	1-2
1.4 論文に使用する用語 .....	1-5
参考文献 .....	1-6
<b>第2章 合流式下水道の課題と既往の取組み</b> .....	<b>2-1</b>
2.1 合流式下水道の採用経緯 .....	2-1
2.1.1 近代的下水道の始まり .....	2-1
2.1.2 神田下水の概要 .....	2-2
2.1.3 合流式下水道の採用 .....	2-3
2.1.4 雨水量の算定方法の決定 .....	2-5
2.1.5 遮集倍率の決定経緯 .....	2-7
2.2 合流式下水道の仕組み .....	2-9
2.3 合流式下水道が抱える課題と改善への取組み .....	2-9
2.3.1 下水道の役割の変遷 .....	2-9
2.3.2 合流式下水道の課題と対策 .....	2-10
2.3.3 お台場漂着物による社会問題化 .....	2-12
2.3.4 開発プロジェクト（SPIRIT21）の取組み .....	2-13
2.4 合流式下水道の改善策の実施状況 .....	2-15
2.4.1 合流式下水道の改善目標 .....	2-15
2.4.2 合流改善の取組み状況 .....	2-16
2.4.3 ろ過スクリーンの設置状況 .....	2-16
2.4.4 東京都が進めてきた合流改善 .....	2-17
参考文献 .....	2-27
<b>第3章 水面制御装置の開発と標準設計法の提案</b> .....	<b>3-1</b>
3.1 水面制御装置の開発 .....	3-1
3.1.1 実験の目的と実験方法 .....	3-1

3.1.2	装置の概要	3-5
3.1.3	夾雑物の捕捉結果	3-10
3.2	装置の選定と結論	3-62
	参考文献	3-65
3.3	雨水吐き室の水流特性	3-66
3.3.1	目的	3-66
3.3.2	各ケースの水理特性	3-66
3.3.3	水流特性と装置設置による影響	3-114
3.3.4	まとめ	3-114
	参考文献	3-115
3.4	標準設計法の設定	3-116
3.4.1	目的	3-116
3.4.2	実験条件と結果	3-117
3.4.3	標準設計法の提案	3-125
3.4.4	標準設計法の課題	3-130
	参考文献	3-132
<b>第4章</b>	<b>装置の効果確認と設計評価方法の提案</b>	<b>4-1</b>
4.1	目的	4-1
4.2	水面制御装置の性能確認調査	4-1
4.3	実験の事前検討	4-7
4.4	模型実験と結果	4-8
4.5	簡易な設計評価指標の提案	4-14
4.5.1	限界捕捉水位と遮集量の関係	4-14
4.6	設計事例の適合性	4-17
4.6.1	性能確認調査結果への適合性	4-17
4.6.2	設計事例の整理	4-20
4.6.3	設計事例の適合性	4-22
4.7	「簡易な設計評価指標」の評価方法	4-22
4.7.1	条件設定	4-22
4.7.2	評価方法	4-23
4.8	まとめ	4-24
	参考文献	4-25

<b>第5章 渦流メカニズムの解明と設計法の提案</b>	<b>5-1</b>
5.1 渦流の概念	5-1
5.2 メカニズム解明の目的と検証方法	5-4
5.2.1 目的	5-4
5.2.2 検証方法	5-4
5.3 模型実験による渦流の生成と消滅	5-5
5.3.1 実験の目的と模型装置	5-5
5.3.2 実験における渦流発生状況の分析結果	5-8
5.3.3 まとめ	5-22
5.4 渦径についての検証	5-23
5.4.1 レイノルズ数による渦流発生状況の評価	5-23
5.4.2 雨水吐き室における渦径の評価	5-27
5.4.3 まとめ	5-37
5.5 流体解析による浮遊物の引込みに関する検証	5-38
5.5.1 目的	5-38
5.5.2 解析モデルと解析条件	5-38
5.5.3 流体解析結果	5-42
5.5.4 浮遊物の引込み能力の評価	5-48
5.5.5 まとめ	5-53
5.6 渦糸に関する検証	5-54
5.6.1 雨水吐き室における引込みの検証	5-54
5.6.2 まとめ	5-57
5.7 結論と設計法の提案	5-58
参考文献	5-65
<b>第6章 水面制御装置の新たな活用方策の提案と検証</b>	<b>6-1</b>
6.1 機械式スクリーンとの併設利用	6-1
6.1.1 目的	6-1
6.1.2 機械式スクリーンの整備	6-1
6.1.3 調査方法	6-2
6.1.4 調査期間と降雨状況	6-5
6.1.5 雨水吐き室の水流と浮遊物の挙動	6-7
6.1.6 水面制御装置の併設による効果	6-9
6.1.7 簡易な設計評価指標による評価	6-10
6.1.8 まとめ	6-12

6.2	海外（欧州）での利用	6-13
6.2.1	背景	6-13
6.2.2	普及拡大における技術的課題	6-14
6.2.3	提案する装置と期待する効果	6-21
6.2.4	まとめ	6-28
6.3	今後の事業戦略に向けての提案	6-29
6.3.1	国内事業への普及拡大に向けて	6-29
6.3.2	海外への普及拡大に向けて	6-30
6.4	下水道事業以外への利用提案	6-32
6.4.1	目的	6-32
6.4.2	河川や用水路への設置提案	6-32
6.4.3	ダム湖への設置提案	6-34
6.5	雨水吐き室での安全作業への展開	6-36
	参考文献	6-42
<b>第7章</b>	<b>結論</b>	<b>7-1</b>

謝辞

# Study on the effect of floatables overflow prevention by producing vortex

Yukitoshi Iwasa

Combined sewer system, a sewer collection and drainage system, has a structural problem that sewer including debris is discharged into the public water bodies such as the river in wet weather. This problem has been recognized as a social issue because it gives negative impact on not only ecological system and hygienic environment but also landscape.

In this study, it was summarized how combined sewer system was adopted in some cities, and the issues it has. It was also summarized how the outflow control device, water surface control device, has been developed under such circumstance.

Floating debris can be collected and drawn into the interceptor sewer by the vortex in the CSO chamber. Its mechanism was clarified, and the water surface control device for debris and its design method were proposed in this study. Also, experimental result taken in the development phase of the device was resorted as the basic data. Based on that data, field experiment was conducted, and the results were analyzed in this study.

Following conclusions were obtained in this study.

(1) The control device for controlling outflow of debris utilizing swirling phenomenon was developed and its design method was proposed.

(2) "Simple design evaluation index" which can estimate the introduction effect of the water surface control system in the design stage was proposed, and its effectiveness was verified by the field experiment.

(3) The phenomenon that a vortex guides the floating debris into the interceptor sewer was examined in three steps. The area which vortex can guide the floating debris can be evaluated by Reynolds number. In case the speed of vertical dictional vortex flow is larger than that of surfacing speed of floating debris, the debris is drawn into the interceptor sewer. It is also confirmed that it is possible to evaluate the full-in force of the vortex which draws the debris in the same evaluation method of suction swirl of a pump.

(4) It was proposed to introduce the water surface control device together with other debris reduction devices so that it contributes to functional improvement of those debris reduction devices as reducing the load on them and reduction of the amount of overflow debris. These effects were examined by the field test.

## 第1章 序論

### 1.1 背景

下水道はその役割から今や重要な社会インフラとなっており、令和元年度末における全国の下水道普及率は79.7%（下水道利用人口/総人口）となっている。この下水道の排除方式には合流式下水道と分流式下水道とがある。東京都など下水道整備に早くに着手した大都市が採用したのは合流式下水道である。

合流式下水道の特徴の一つとして、雨天時に遮集管の能力を超えた汚水混じりの下水を公共用水域に放流させるという構造的な宿命を有し、生態系のみならず、衛生学的、景観確保上からの課題が社会問題化してきた。特に、下水道の普及に伴い水質改善が図られてきた河川などが雨天時に下水道を原因として汚濁することは、大きな問題でもある。

平成12（2000）年に合流式下水道管きょから流出したオイルボールと呼ばれる白色固形物が東京のお台場海岸に多数漂着し、大きな社会問題となった。

このような中、国土交通省は「下水道技術開発プロジェクト（SPIRIT21）」において、合流改善に関わる技術に関する研究開発を平成14（2002）年度に立ち上げ、平成17（2005）年に24技術の技術評価を行うことで完了した<sup>1) 2)</sup>。一方、計画的な合流式下水道改善対策を推進するために、平成14年度には「合流改善緊急整備計画事業」<sup>3)</sup>を創設し、地方自治体への財政的な支援を行うとともに、平成15（2003）年に下水道法施行令を改正した。改正された「下水道法施行令」<sup>3)</sup>では、雨水吐き室にスクリーンの設置やその他の措置を講じることで夾雑物の流出を最小限度とする旨、規定された。

東京都では、合流改善対策の効果的な施策として合流改善クイックプラン<sup>4)5)</sup>を平成13（2001）年に策定し、簡易処理施設やスクリーンなどのハード対策や家庭で調理後の油の投棄自粛要請などのソフト対策を講じてきている。

筆者らは、ハード対策の一環として雨水吐き室からのオイルボールなどの夾雑物の流出抑制技術の開発に取り組んできた。この技術は水面制御装置と称され、現在、都内733カ所の雨水吐き室の98%に設置され、効果を発揮している。

### 1.2 本研究の目的

水面制御装置は、発案時から今日まで非常に多くの実験と検証を実施し、設計法を提案し多くの雨水吐き室に設置してきた。

本研究では、これまでの実験結果を再評価したうえで現行の設計法の妥当性を検証するとともに、更なる利活用につなげるための技術データとして再整理することとした。

さらに、実機の設計にあたって設計者は定められた設計法と多くの設置事例などの知見を踏まえ、個々に構造が異なる雨水吐き室に応じた水面制御装置のガイドウォールと制御板の位置や大きさ等を定めている。しかし、その効果を確認するためには、設計者や発注者は事後調査としてTVカメラの設置や雨天時に現場に出向き、その効果を見極め、場合によ



っては制御板の位置を微調整するなどを行っている。

以上のことから、本研究では以下の項目を研究目的とする。

- (1) これまでの実験データや実機のデータを整理し、浮遊性夾雑物（浮遊物）の捕捉効果が高い装置を選定するとともに、その装置の標準設計法を提案する。
- (2) 渦流の水理特性である限界捕捉水位と遮集量などに着目し、当該の雨水吐き室に設計した段階で水面制御装置の効果をより簡便に見極める手法を提案し、検証する。
- (3) 水面制御装置の設置により渦流が生成されることを確認しているが、渦流の生成から消滅までのメカニズムについては解明していない。そこで、渦流の生成から消滅までのメカニズムを解明し、合理的な設計法を提案する。
- (4) これまで合流式下水道の改善策として各自治体が採用してきた機械式ろ過スクリーンなど他の夾雑物削減装置は、その維持管理上の課題を抱えている。そこで、他の夾雑物削減装置に水面制御装置を併設することを提案し、実現場で設置した事例からその効果を検証する。

これらの研究成果は、水面制御装置の効果と渦流のメカニズム解明から新たな利活用の指針を提案し、結果として公共用水域の水質改善の進展に寄与できるものとする。

### 1.3 本論文の構成

本論文は7章から構成される。各章の概要は以下のとおりである。

第1章「序論」では、合流式下水道が抱える課題の一つである雨天時に雨水吐き室から浮遊性夾雑物が公共用水域に放流することがあげられる。この対策の一つとして開発されたのが水面制御装置である。本研究では、この水面制御装置の特性を把握し、より効果的な設計手法を提案することの目的と本論文の構成を述べる。

第2章「合流式下水道の課題と既往の取組み」では、我が国が合流式下水道を採用した経緯と合流式下水道の仕組み、更には合流式下水道が抱える課題を整理する。そのうえで、合流式下水道の改善対策の必要性を述べるとともに、国や各自治体が取組みできた各種の対策や取組み事例を整理する。

第3章「水面制御装置の開発と標準設計法の提案」では、実験結果を再整理したうえで、浮遊性夾雑物の捕捉効果が認められる装置を選定し、その設計法を提案する。

これまでは、水面制御装置として「ガイドウォール」「制御板（縦型または横型）」の組合せを5パターンとして設計法が設定され、装置選定は設計者の判断に委ねられている。

本研究では、これまでの実験結果を再評価し、遮集管への捕捉効果の高い装置を選定するとともに、実験結果から装置が及ぼす上流への影響を再整理し、水理特性を把握する。そのうえで、選定した装置の標準的な設計法を提案する。

第4章「装置の効果確認と設計評価法の提案」では、水面制御装置を設置した雨水吐き室の捕捉調査結果から、装置の効果を確認する。

また、雨水吐き室の流入量に応じた水位と遮集管の遮集能力に着目することにより、設計した制御板が渦流を生成させ浮遊性夾雑物を遮集管に捕捉できるかを簡易に見極める指標を提案する。あわせて、装置を設置した現場のデータにより簡易に見極める指標の妥当性を検証する。

第5章「渦流メカニズムの解明と設計法の提案」では、水面制御装置で生成される渦流に浮遊物が引込まれるメカニズムを解明するために、大型実験装置により得られた渦の水理特性と実現場での実測データを分析し、渦の生成から消滅までを分析する。また、浮遊物が遮集管に引込まれる現象を渦径、エアコアを含むロート、ロートからつながる渦糸の3つにモデル化し、解析した結果と実験結果や現場での観測結果から検証する。

この結果を踏まえ、設計の合理化・省力化に貢献でき、効果検証を可能とする手法を提案する。

第6章「水面制御装置の新たな活用方策の提案と検証」では、第4章と第5章の研究成果を踏まえ、水面制御装置の新たな活用方法を提案する。

一つには、既に雨水吐き室に設置されている機械式スクリーンが抱える課題解決のために水面制御装置を併用設置することを提案し、現場でその効果を検証する。

また、欧州などで水面制御装置の普及を進める中で、日本とは異なる降雨形態であることや、すでに普及している夾雑物削減対策を理解した上で、本研究で得られた知見を踏まえた水面制御装置の併設利用について提案する。

さらに、水面制御装置の特性を下水道事業以外への利用方策について提案する。

第7章「結論」では、本研究で得られた知見をまとめる。

図1.1に本論文の構成を示す。

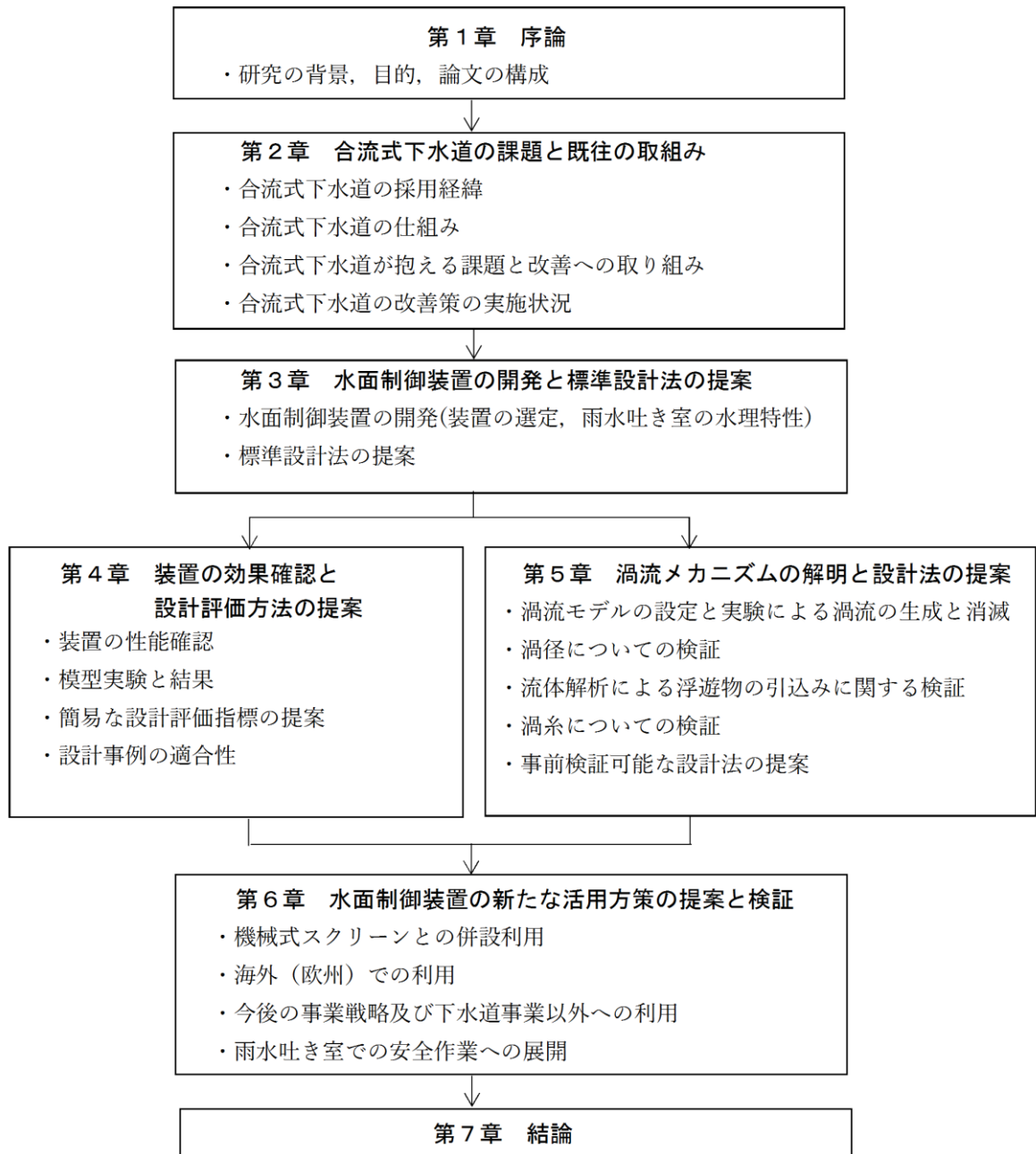


図 1.1 本論文の構成

#### 1.4 論文に使用する用語

本論文中に使用する用語は以下の通り，下水道用語集（社団法人 日本下水道協会）2000年版に準ずるものとする。

表 1.1 用語一覧

雨水吐き室	遮集管きよ	管きよ	合流管きよ
放流管きよ	きょう雑物（「夾雑物」も可） 本論では夾雑物	白色固形物（オイルボール）	吐口
マンホール	雨水管きよ	越流ぜき（堰）	合流下水
雨天時越流水	雨天時越流水対策	雨天時計画汚水量	雨天時下水量
雨天時放流負荷量	越流水	完全越流ぜき（堰）	合流式下水道越流水

本論文で用いる用語を以下のとおり定義する。

- ・夾雑物と浮遊物：夾雑物（下水中に含まれる固形物）には沈降性の夾雑物（比重が 1.0 以上の物：ゴム，合成樹脂，木片，皮革類など）と浮遊性の夾雑物（比重が 1.0 未満の物：ビニール，スポンジ，固形油，紙類，枯葉等）があり，本論では浮遊性の夾雑物を浮遊物という
- ・渦流：装置により生成される水面の渦をいう
- ・旋回流：雨水吐き室の水面に生じる不安定な回転流をいう
- ・エアコア：渦中心部に形成されるロート状の空気の空間を示す
- ・ロート：渦流の生成において，中心部には空気を含むエアコアと共にコマ状の螺旋回転をしている状態をロートという
- ・渦糸：引込み力によりロート状の螺旋となってねじれながら遮集管口に導かれる状態が，その断面の径を無限小にした極限の状態をいう<sup>6)</sup>
- ・引込み：装置により生成される渦流を下方向にロート状で螺旋となってねじれながら，遮集管口に導く状態をいう
- ・吸込み：雨水吐きの下水や制御板により生成された渦流により遮集管口に引込まれた浮遊物が遮集管を流れる状態をいう
- ・捕捉：遮集管に浮遊物が吸込まれる状態をいう
- ・限界捕捉水位：制御板で生成される渦により遮集管口に浮遊物を引込むことができる限界の水位をいう
- ・遮集量：遮集管を流れる下水量をいう

<参考文献>

- 1) 国土交通省ホームページ：「SPIRIT21 合流式下水道改善に向けて 8 技術が実用化」都市・地域整備局下水道部下水道企画課，平成 16 年 6 月 16 日公表 (<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/index.html>)，2020 年 1 月 24 日閲覧
- 2) 堀江信之：「SPIRIT21 による合流式下水道改善技術の開発経緯」環境技術 Vol.34, No.10 (2015) ,pp686～690
- 3) 国土交通省ホームページ：「合流式下水道の改善」都市・地域整備局下水道部下水道企画課 (<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/index.html>)，2020 年 1 月 24 日閲覧
- 4) 東京都下水道局：「合流改善クイックプラン」平成 13 年 3 月発行
- 5) 東京都下水道局：「新合流改善クイックプラン」平成 16 年 9 月
- 6) 木田重雄・柳瀬眞一郎著：「乱流力学」朝倉書店，2018 年 9 月 25 日第 10 版，p18

## 第2章 合流式下水道の課題と既往の取組み

### 2.1 合流式下水道の採用経緯

#### 2.1.1 近代的水道の始まり<sup>1)2)</sup>

明治維新は政治的な変革のみならず、都市インフラや社会生活にまで大きな転機となった。明治5（1872）年、皇居和田倉門前の兵部省ぞいの屋敷から出火し、銀座・京橋・築地（現・中央区）まで延焼した。これを機に、銀座を洋風の不燃建築物による近代的な都市化とする機運が高まった。明治8（1875）年に洋風の街並みが誕生した。このレンガ街の道路は、表通り（現・銀座通り）が幅十五間（約27m）で、裏通りが幅三間（約6m）とし、裏通り以外は車馬道と人道に分けられ、雨水排除の側溝が道路両脇に整備された。この側溝は洋風の石造りで、車馬道と人道との境界石の下に暗きょが設置され、数条の支溝が縦横に通じていた。裏通りの溝渠は蓋のない、U字型の溝が設置された。レンガ家屋にはトイレや台所が設置されていなかったため、入居者は別に木造家屋を設置し、トイレは汲み取り式で、台所からの汚水は支溝に排水しU字溝や暗きょを通過して河川などに排除した。しかし、本格的な上下水道整備にまでは至らなかった。



図 2.1 三代歌川広重「東京名所乃内 銀座通レンガ造鉄道馬車往復図 明治 15（1882）年」<sup>3)</sup>

明治10（1877）年、東京にコレラが大流行したことから、上下水道の整備など都市衛生の重要性が認識された。明治16（1883）年、東京府に対して内務卿山形有朋から上下水道等の改良についての示達「水道溝渠等改良ノ儀」があった。示達を受けた東京府は、内務省備工師ヨハネス・デ・レーケ（オランダ人）の意見を聞き、明治17（1884）年に東京府知事芳川顕正は、「府下溝渠改良ノ儀ニ付伺」を提出し、直ちに許可された。これが、いわゆる「神田下水」であり、日本人の手により計画、設計、敷設された我が国初の近代下水道の始まりとなった。

なお、ヨハネス・デ・レーケは日本に招聘され、砂防や治山の土木工事を体系づけたことから「砂防の父」と称されている。

表 2.1 明治期におけるコレラの流行（死者 5,000 人以上の大流行のみ，全国値）<sup>4)</sup>

年	患者数（人）	死亡者数（人）	死亡率（%）
明治 10（1877）年	13,710	7,967	58.1
〃 12（1879）年	162,637	105,786	65.0
〃 14（1881）年	9,328	6,197	66.4
〃 15（1882）年	51,638	33,784	65.4
〃 18（1885）年	13,772	9,310	67.6
〃 19（1886）年	155,923	108,405	69.5
〃 23（1890）年	46,019	35,277	76.7
〃 24（1891）年	11,142	7,760	69.6
〃 28（1895）年	55,144	40,154	72.8
〃 35（1902）年	13,362	9,226	69.0

### 2.1.2 神田下水の概要<sup>2)</sup>

神田下水の第一期工事は、明治 17（1884）年暮れに現在の JR 神田駅周辺を対象に着手した。レンガ造りの暗きよである本管約 0.6km，分管約 1.95 kmを敷設し、明治 18（1885）年に完了した。東京府は引き続き、第二期工事に着手すべく、内務省に対して前年度同様の 5 万円の補助金交付を申請したが、3 万円しか交付されなかった。このため、第一期工事の東側に本管約 0.4km，分管約 1.17km を敷設した。

明治 19（1886）年、東京府は第三期工事の補助金申請を行ったが、補助金の不交付通知を受け、第三期工事は中止に至った。以降、当時の国家財政上、補助金の交付が打ち切られたことから、神田下水の工事再開はかなわなかった。

神田下水は、当時の事業として行われたのは管渠の敷設だけであったことから、各戸の排水設備との接続も不十分であり、また、末端は未処理のまま河川に放流されていた。

その後、下水道の本格的な整備をする中で、下水道ネットワークに組いられることとなり、何回かの改良や補修工事を行い、現在も現役で機能している。

なお、この神田下水は平成 6（1994）年東京都指定史跡に、土木学会より 2013 年度土木学会選奨土木遺産に選奨されている。

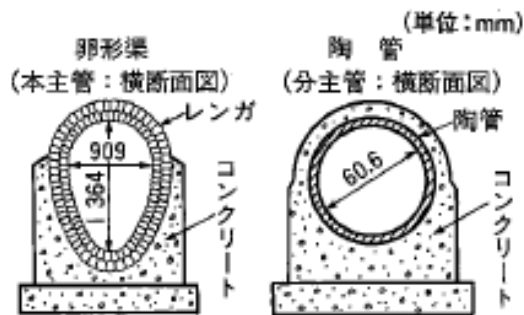


図 2.2 神田下水の竣工図



写真 2.1 神田下水の現況

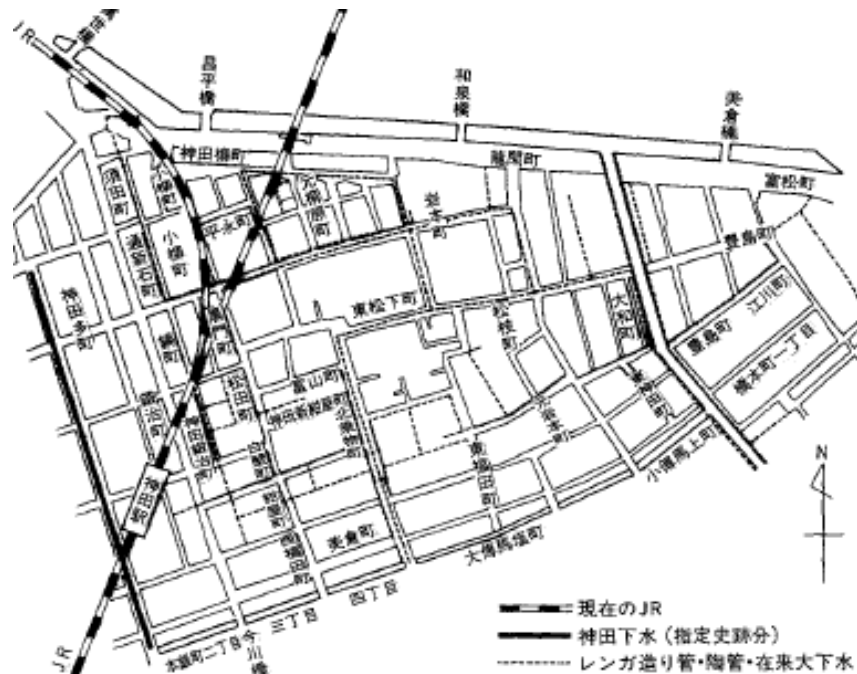


図 2.3 竣工当時の神田下水設計図

### 2.1.3 合流式下水道の採用<sup>1)5)</sup>

下水道の処理方式には「合流式下水道」と「分流式下水道」がある。

下水道法第二条第一項に「生活若しくは事業（耕作の事業を除く。）に起因し、若しくは付随する廃水（以下「汚水」という。）又は雨水をいう」に示されているように、下水とは汚水と雨水のことである。この汚水と雨水を同一の管渠で速やかに排除する合流式下水道と、それぞれ別の管渠で排除する分流式下水道の2つの方式がある。

合流式下水道を採用するか、分流式下水道を採用するか議論は、首都東京の近代化を検討していた明治21（1888）年にさかのぼる。

東京府知事芳川顕正を委員長とする市区改正委員会の下部組織として「上水下水調査委



員会」が設置された。その委員長は内務省衛生局長の長与専齋である。長与専齋は医師・衛生行政家である。万延元（1860）年長崎に赴き、ポンペに師事して蘭医学を学んだ。明治4（1871）年上京し、文部少丞となり岩倉遣欧使節団に随行して渡欧、西欧の医学教育を視察、調査した。明治6（1873）年に帰国後、文部省医務局長。明治8（1875）年内務省衛生局長の初代局長となり、わが国衛生行政の基礎を築いた。委員には、我が国の衛生工学の始祖と言われる英国人お雇い工師ウイリアム・K・バルトンがいた。この委員会が翌年の明治22（1889）年にまとめた「東京市下水設計第一次報告書」には、雨水は汚水と混合しないこと等が書かれている。つまり、分流式下水道を採用するということであつた。長与専齋は東京の地勢上、汚水をポンプアップする必要があつたので、水量を最小限にしたいこと。降雨量は欧米に比べ2～3倍も多いことから、分流式を採用したと言っている。また、東京は江戸時代から物資の輸送を主として舟運に頼っていたことから、水路や掘割が発達しており、当時の市街地状況から流出係数も小さく、雨水は在来の側溝を改良することで河川や運河に放流することが可能であり、かつ、汚濁上の問題も特になかつたものと考えられる。しかし、当時の東京府はこの計画を実施するための財源350万円を確保することができず、結果としてこの案は見送られた。

明治30年代になると先行していた水道事業がひと段落したこともあり、東京市は再び下水道計画を策定することを決定し、下水道の調査が再び始まつたのは、明治32（1899）年になってからである。調査の責任者は、東京大学教授で東京市技師長を兼ねていた中島鋭治博士が就任した。この調査結果が、まとめられたのは、明治40（1907）年の「東京市下水設計調査報告書」<sup>1)</sup>である。

この報告書において、雨水、雑排水とし尿を一つの管で流す合流式が採用された。報告書によると、以下の理由が記載されている。

「東京市においては降雨量が多いにも拘らず、雨水を排除するのに十分な雨水溝が設置されていない。したがって、汚水と同時に雨水排除を図ることは極めて急務である。しかも、街路は一派的に狭隘で屈曲している。都心の主だった区のように、市区改正を行つてやや広くなつた道路もないわけではない。しかし、電車軌道をはじめ水道、ガス、電話地下線等がすでに敷設されているもので、現在の道路幅員を拡張しないで下水道を設置するのは決して容易なことではない。もし、分流式を採用して雨水と汚水の2本を平行して、あるいは上下に重ね合わせて敷設しようとするれば、施工上の困難さはさらに増大する恐れがある。また、合流式は分流式よりもいくつか優れた利便性がある。（抜粋）」

この優れた利便性としては、「工費が低廉であること」、「洗滌維持が容易であること」をあげている。

この調査報告書は、その後の東京の下水道計画の基本計画となっている。また、昭和30（1955）年代まで、下水道整備に着手した名古屋市や大阪市などの大都市にも、その考え方が引き継がれた。

ただ、終戦直後に、全国レベルで分流か合流かが検討されたことがある。昭和22（1947）

年、日本水道協会が戦後の荒廃する中で下水道事業をどのように進めるべきかの指針として「下水道普及方策」を取りまとめた。検討する中で、排除方式としては分流・合流共に一長一短があり、どちらかに統一することはかえって不合理であることが分かった。

しかし、指針としてはどちらかを示す必要があったことから、実施のしやすさという観点から工事費を節約するために、なるべく在来溝きよを併用した分流式を推奨することになった。現実には、合流式を採用する都市が多く、分流式を採用した都市は神戸や鹿児島等の数都市に過ぎなかった。その理由は、多くの都市が、在来水路が未整備であり浸水被害に悩まされており、合流式の採用により早期の効果を期待したことによるものであった。

日本経済は昭和 48 (1973) 年の第 1 次石油危機 (オイルショック) の発生まで、高度経済成長を続け、1960 年代後半の実質経済成長率は 10% を超えていた。この時期は、大気汚染のみならず、水質汚濁、自然破壊、新幹線などによる騒音・振動などが、日本各地で顕在化し、大きな社会問題化した。特に、昭和 43 (1968) 年には、厚生省よりイタイイタイ病の原因は、三井金属鉱業株式会社の排水によるものとする見解が発表された。また、水俣病については、熊本県水俣湾周辺で発見されたものは、新日本窒素肥料 (株) (チッソ (株) の前身)、新潟県阿賀野川流域で発見されたものは、昭和電工 (株) の工場排水であるとする政府統一見解が発表され、これらの健康被害が産業型の公害によるものであることが明らかになった。

このような社会問題を受け、経済成長と環境保全とを両立させるべきとの機運が高まり、公害対策に関する施策が総合的に進められることとなった。

そのような中、昭和 45 (1970) 年の水質汚濁防止などの公害法が整備されたことに伴い、公共用水域の環境基準を達成する必要性が出てきた。このため、合流式下水道のシステムでは、雨天時に雨水吐き室やポンプ場などから処理場で処理しきれない下水を河川や海などの公共用水域に放流することから、分流式下水道の採用が主流となった。

現在、合流式を採用している都市は、全国で 195 都市 (分流式を含めた 2,188 都市の 9%)、処理面積は約 229 千ヘクタール程度 (分流式を含めた 1,618 千ヘクタールの 14%) である。

#### 2.1.4 雨水量の算定 (実験式と合理式) 方法の決定<sup>5)</sup>

下水道計画の中で雨水量を算定する計算式には、実験式と合理式がある。

2.1.3 で述べたように、明治 22 年「東京市下水設計第一次報告書」が「水上下水調査委員会」から提出された。この報告書には以下の記述がある。

「雨水量は地理局の調査によると、明治 10 年以降 10 ヶ年間の平均 1 年の総量は大体 57 インチ (1,448 mm)、明治 14~18 年の 5 年間の 24 時間内の最多雨量の平均は 4.3 インチ (109 mm) であり、欧米諸都市に比較すると、非常に多量である。(1 ヶ年の雨水量についてみると、ロンドン は 22 インチ (559 mm)、ベルリンは 23.5 インチ (597 mm)、パリは 20 インチ (508 mm)、ワシントンは 38 インチ (965 mm) である。) したがって、雨水は汚水に混合しないで各々別に排除する。」

この報告書では、分流式を採用し污水管を先行させるという趣旨から、雨水管の設計には触れていないため、雨水量の算出についての記述はない。

雨水量の算出については、明治 37 年から東京大学教授中島鋭治博士を中心に調査が進められた。この調査は 4 年の歳月を費やして終了した。排除方式は合流式とし、雨水量の算定は「ビュルクリ・チーグラ公式」という、いわゆる実験式が採用された。

以下、その抜粋である。

「本市の最大降雨量は 1 時間に 1 インチ 1/4 (31.7 mm) と推定した。しかし、下水管内に流入する雨水量は道路の幅員、路面の性状、住宅、空地の多寡、土質などによって蒸発、浸透に差があり、更に市街地全体の地表勾配もまた雨水流出に大きく関係する。そのため、雨水流量の算定に当たっては大いに考慮を払わなければならない。

ドイツのベルリンにおいては、全降雨量を 1 時間当たり 7/8 インチ (22.2 mm) と定めた。その 2/3 は蒸発、浸透するものとし、残りの 1/3 (7.4 mm) は下水管に到達するものとして管の大きさを算出した。しかし、流量を算出するにあたっては、ビュルクリ・チーグラ公式を用いることが最適であるとしたので、本計画における雨水流出量の算出は全てこの公式によることとした。

ビュルクリ・チーグラ公式は以下の式で表せる。

$$Q=1.25Cr^4\sqrt{\frac{1,000S}{A}}$$

公式中

Q=1 秒間に 1 エーカーの面積より流れて来る雨水量 (立法フィート)

S=土地の表面勾配

r = 1 時間の降雨量 (インチを単位とする)

A=排水すべき面積 (エーカーを単位とする)

C=係数 (通常 0.5, 但し土質により 0.25~0.6 の間で変化する.)

日本においては面積の単位に坪を用いるので、これを換算するときは

$$Q=1.0212Cr^4\sqrt{\frac{1,224S}{A}}$$

Q=1 秒間に 1,000 坪の面積より流れて来る雨水量 (立法坪)

S=土地の表面勾配

r = 1 時間の降雨量 (インチを単位とする)

A=排水すべき面積 (1,000 坪を単位とする)

C=係数 (通常 0.5)

しかしながら、本市の最大降雨量は 1 時間当たり 1 インチ (約 25.4 mm) である。また、通常は C を 0.5 とするので、本計画においては次式のようなになる。

$$Q=0.6383Cr^4\sqrt{\frac{1,224S}{A}}$$

現在、その計算の複雑さを避けるために曲線図表を作成中である。」とある。

以上から、ビュルクリ・チーグラ公式は当時のヨーロッパの各都市で採用実績があり、かつ適用地が比較的平坦であることから採用されたものである。

また、計画降雨強度の1時間当たり1.25インチ(31.7mm)は、過去30年間の降雨データから10年に1回の確率とされた。

その後、明治末期になると雨の降り方が変化し、強い強度の降雨が頻発するようになった。明治39(1906)年から同44(1911)年の6年間に、1.25インチ(31.7mm)/時以上の降雨が6回にも及び、当初計画の確率年は1年未満になることが判明した。

そこで、大正2(1913)年に降雨量を1時間当たり最大50mm(約2インチ)とすることとした。更に、欧米の留学から帰国した米本晋一が中心となり、明治30年～大正10年までの降雨記録を調査し、大正10(1921)年10月に「東京市降雨量調書」として取りまとめた。その内容は、標準降雨量としては1時間2インチ(50mm)であることや、雨水流出量の算定は、欧米で採用が強まっている合理式を採用することとした。

$$I = \frac{5000}{40 + t}$$

I = 降雨強度 (mm/時)    t = 降雨継続時間 (分)

この公式は、現在も東京都下水道局で採用されている。

### 2.1.5 遮集倍率の決定経緯<sup>5)</sup>

合流式は、汚水と雨水を同一の管きよで収容するが、その量を終末処理場まで送り処理するには、その規模に伴う費用面などから現実的ではない。このため、管きよの途中で余水吐(現在は「雨水吐」)を設けて、終末処理場には一定量を送るといった考えとなった。

合流式下水道が抱える雨天時の対応については、明治40(1907)年の「東京市下水設計調査報告書」においてもすでに考えられていた。

以下がその内容である。

「合流式では、雨水を放流した後に管内を流れる下水は単純に汚水だけといっても、実際には降雨の際の初期雨水は路面の不潔なものを洗滌しながら流入するので、敢えていえば汚水と変わるものではない。したがって、これを直ちに河川や濠、溝渠に放流するのは衛生上不安がある。欧米の実例を見ると1時間に1/100インチ(0.25mm)未満の雨は全て汚水と同様に排除している都市が多い。この数値は路上の不潔物を洗滌するのに十分な雨量であるとされている。そこで、本計画においてもすべてこの例に倣い、1時間に1/100インチまでの雨水はこれを汚水と同様に処分することとした。(抜粋)」また、「汚水及び1/100イン

予相当の雨水を除き余剰雨水はこれを超えて河川や堀に流出する。汚水は種々の不純物を含むのでその比重は雨水よりも重い、そのため、比較的底部に沈下するので雨水渠を超えて流出するような恐れはない（抜粋）」とも記述している。

さらに、上記報告書には、「水雪隠（水洗便所）を設置する家も近年増加する傾向にある。本計画においてはこれを収容することに支障はない。また、糞尿の取り組みを計画すると否とに関わらず管中の不潔度には大差ないことは欧米の実利から見ても明らかである。」としている。

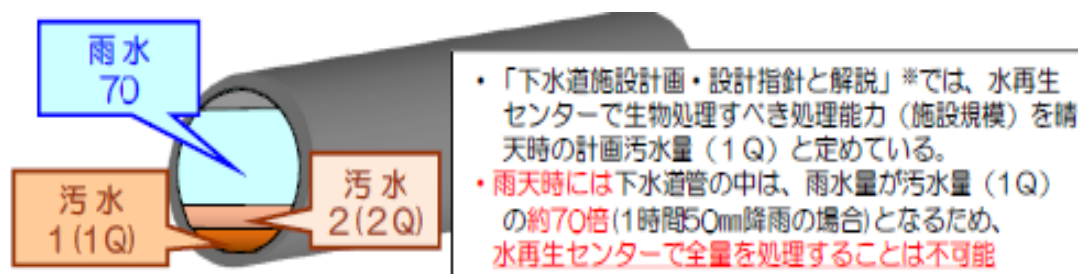
このことから、雨天時に越流水に伴う水質汚濁への対応は、時間最大汚水量に 0.25 mm/時を加えた量）を遮集量とした。

大正 2（1913）年 5 月の東京市区改正事業の変更の中で、「汚水量は 1 人 1 日平均 6 立法尺の半量を 8 時間で排出するものとする。雨水量は 1 時間の最大降雨量を 2 インチ（約 50 mm）とする。ただし、合流式により排水される地域では雨水量が最大汚水量に達するまでは汚水と同様に処分する。」という記述がある。つまり、時間最大汚水量の 2 倍を遮集量としたということである。

一方、東京市下水道改良実施調査報告書（大正 13 年）では、余水吐の雨水放流量について検討しており、以下の記述がある。

「本市の最初の計画である市区改正委員会案は、放流開始点は汚水に加えるに 100 分の 1 時の雨水をもってとした。また、欧米における標準は様々で一様ではないが、大体 6 倍以下の希釈度をもって放流開始点としている。これらの標準を本市の場合に適用して放流量及び残留量を比較すると（途中省略）、希釈度 3 倍以上において溢流を開始する。しかし、その回数及び溢流量並びに希釈の割合は 5 倍以上の場合に比較して著しく増加することはない。また、あわせて経済上の問題を考慮すれば、この程度の溢流汚水は、河海の新陳代謝並びに自浄作用で衛生上許容できないことではない。」

昭和 49（1974）年には、公共用水域の水質保全に寄与すべきであるとの判断により、遮集量を 2 倍から 3 倍に引き上げることとし、現在も引き継がれている。



※公益社団法人日本下水道協会が下水道事業の計画及び下水道施設、設備など全般の設計をするための技術指針としてとりまとめたものであり、全国の自治体が本指針を基に下水道施設の整備を行っている。

図 2.4 汚水量と雨水量のイメージ<sup>6)</sup>

## 2.2 合流式下水道の仕組み

下水道の流下システムには、合流式下水道と分流式下水道の2通りがある。合流式下水道については 2.1 でも記述したが、その特徴を簡潔に示すと以下のとおりである。

- ・雨水と汚水を同一の管で流す
- ・長所としては、建設費が割安であり、降雨初期の地表面汚濁（ファーストフラッシュ）を処理場で処理できる
- ・短所としては、ある降雨強度以上の降雨の際には、未処理下水が公共用水域に放流される一方、分流式下水道は、雨水と汚水を別の管で流し、その特徴は以下のとおりである。
- ・長所としては、汚水はすべて処理場で処理され、雨水のみが公共用水域に放流される
- ・短所としては、建設費が割高。地表面の汚濁が公共用水域に放流される

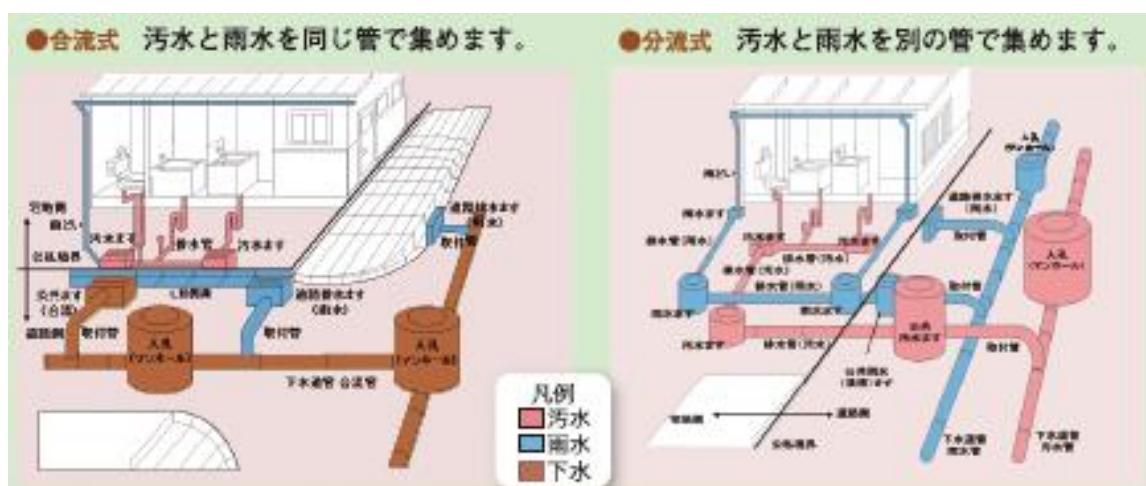


図 2.5 合流式下水道と分流式下水道のシステム 7)

## 2.3 合流式下水道が抱える課題と改善への取組み

### 2.3.1 下水道の役割の変遷

明治になり欧米との交流が盛んになると、技術や文化が導入されたが、同時に欧州で大流行していたコレラなどの伝染病も全国に大流行した。明治政府は明治 16 (1833) 年東京府に「水道溝渠改良の儀」を示達した。これを受け、オランダ人ヨハネ・デ・レーケの指導の下、レンガ積みの「神田下水」が明治 17 (1884) 年に建設されたのが始まりである。しかし、当時の財政事情などから下水道事業の継続はできなかった。

本格的に取り組まれるようになったのは、明治 41(1908)年に策定された「東京市下水道設計」からのことになる。この計画では、汚水の排除と合わせて雨水排除も可能な合流式下水道を採用した。さらに、放流先の河川や海域の汚濁防止にも配慮し、管渠と処理施設を一体的に整備するという、当時では画期的な内容である。この方針は、以降、大正、昭和へと踏襲されてきた。

戦後の経済復興と高度成長期には、東京をはじめ大阪などの大都市に人口や産業が集中し、社会資本整備が国策としても重要課題となってきた。特に、オリンピックの招致が決定したことを受け、東京都では下水道整備は最重要施策として位置づけられ、整備普及が図られた。

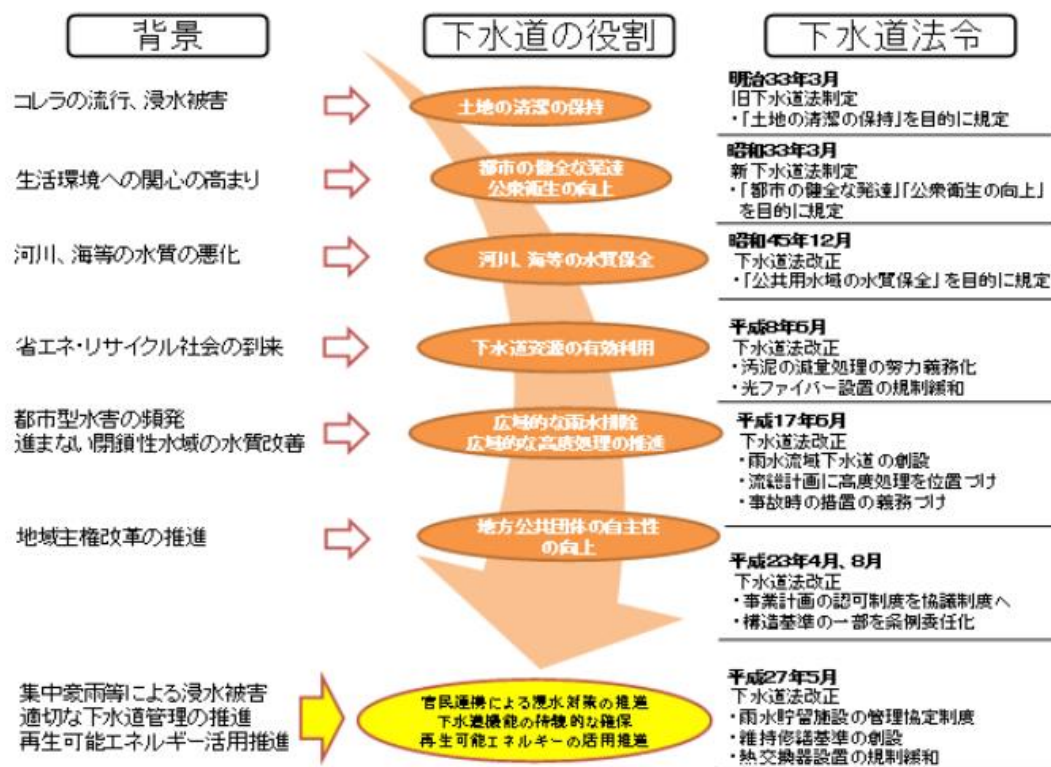


図 2.6 下水道の役割の変遷<sup>8)</sup>

### 2.3.2 合流式下水道の課題と対策

合流式下水道の構造的な宿命から、雨天時には遮集量を超えた下水が未処理で公共用水域に越流する。明治、大正、昭和初期は衛生上の課題があることは認識されていたものの、水洗化率がまだ低かった時代でもあり、放流先の公共用水域において希釈されることを鑑みて、大きな社会問題化はされていなかった。

しかし、昭和 20 年代半ばの戦後復興に伴い、東京への人口や産業が集中した結果、急速に隅田川などの河川や東京湾などの汚染が進んだ。昭和 30 年代に入り東京へのオリンピック招致が決定すると建設ラッシュが加速し、下水も必然的に増加した。東京の都心部は合流式を採用していたことから、汚水量の増に対してはある程度の量は吸収することができた。しかし、30 年代後半からの汚水量の増加に対しては合流管とはいえ、その遮集管の流下能力の限度を超え、晴天日でも合流管の越流堰から河川などの公共用水域に流出するという事故が発生するようになった。

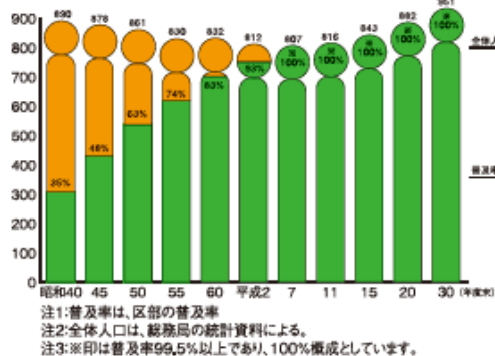
隅田川は江戸時代から続く花火・釣り、遊泳、舟遊びなどの水文化が発達していたものの、

昭和 30 年代半ばには「死の川」とまで言われるまでに汚染が進んだ。このため、両国の花火大会は昭和 36（1961）年を最後に中止となった。

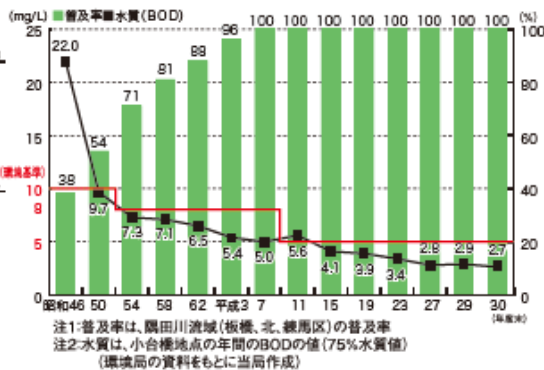
この対策としては、まずは下水道の整備促進を図り、区部の普及率を高めることが必要であった。

## 区部

### 全体人口と下水道普及率の推移

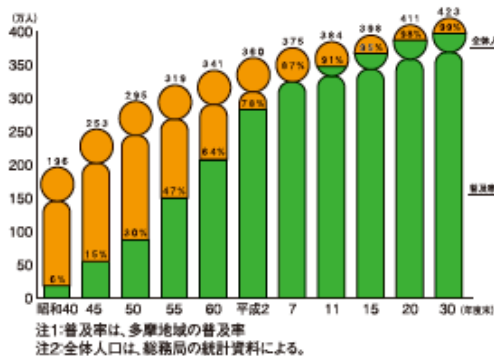


### 隅田川の水質と下水道整備



## 多摩地域

### 全体人口と下水道普及率の推移



### 多摩川の水質と下水道整備

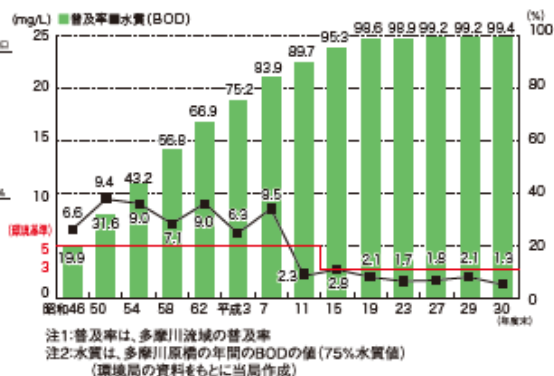


図 2.7 東京都の普及率と整備による効果<sup>9)</sup>

下水道整備が進むと隅田川や多摩川の水質改善に代表されるように、水質改善が著しく効果として現れた。

しかし、一定量以上の降雨時には、合流式下水道の構造的宿命ではあるが、雨水吐き室から汚水混じりの雨水やごみが、河川に流出する現象が大きな課題として残っていた。

東京都下水道局は昭和 46 年から谷端川、桃園川、立会川などで流量及び水質の現地観測を行うなど、合流改善に向けた調査を開始した。この調査では、雨水流出モデル並びに汚濁負荷流出モデルの確立に向けた検討を行った。



### 2.3.3 お台場漂着物による社会問題化

合流式下水道から雨天時越流水の問題は、平成 12（2000）年にオイルボールがお台場海浜公園の海岸に漂着し、マスコミに報道されたのがきっかけとなり社会問題化した。



図 2.8 新聞記事<sup>10)</sup>



写真 2.2 管内に付着した油・ラード(左)とお台場海浜公園に漂着したオイルボール(右)

これは、下水道管に油を流すと管の中で固まり、下水が流れにくくなるほか、悪臭のもととなる。また、大雨が降るとこの固まった油が剥がれ、下水管を流れる間に白い塊（オイルボール）となり、雨水吐口から河川や海に流出することとなる。写真 2.2 は、お台場海浜公園に漂着したオイルボールである。

翌年の平成 13（2001）年に、国土交通省は「合流式下水道改善対策検討委員会」<sup>11)12)</sup>を設置し、合流式下水道の雨水吐口や雨天時越流水の実態調査を実施した。その結果、合流式下水道の採用都市数は全国で 191 都市、自然吐き口が 2,420 箇所、ポンプ場が 544 箇所、計 2,964 箇所であり、そこから排出される雨天時越流水が放流水域の水質に影響を与えている実態が明らかにされた。

検討委員会ではこの実態を改善するための目標について検討を行い、平成 14（2002）年 2 月に「合流式下水道の改善対策に関する基本的な考え方」<sup>13)</sup>をとりまとめ、おおむね 10 年間で達成可能な当面の改善目標として以下のように定めた。

(1) 汚濁負荷量の削減

分流式下水道と置き換えた場合に排出する汚濁負荷量と同程度以下とする。

(2) 公衆衛生上の安全確保

全ての吐口において未処理放流水等の放流回数を半減する。

(3) 夾雑物削減

全ての吐口で夾雑物の流出を極力防止する。

### 2.3.4 開発プロジェクト（SPIRIT21）の取組み

国のプロジェクトとして SPIRIT21（Sewage Project Integrated and Revolutionary Technology for 21 century）が設置された。合流式下水道の改善対策は重要かつ緊急的な課題であることから、「合流式下水道の改善に関する技術」が最初の技術開発テーマとして選定され、研究期間は平成 14 年度から 3 ヶ年と設定された。

合流改善に関連する新技術を募集したところ、24 技術が民間 24 社より提案された。24 技術は夾雑物除去、高速ろ過、凝集分離、消毒及び計測・制御に区分され、平成 17（2005）年 3 月に開催された SPIRIT21 委員会において、提案された 24 技術全てが実用化対象として認められるとの結論が出され研究開発が完了した。

民間 24 社から提案のあった 24 技術内容は、「夾雑物除去」「高速ろ過」「凝集分離」「消毒及び計測・制御」の分野に分類される。これら提案された技術は、プロジェクトに参加した都市のフィールドにおいて実規模施設又はテストプラントにより検証された。具体的には、実際の雨天時下水を対象に性能を調査し、評価した結果は SPIRIT21 委員会から技術評価書として公表された。

表 2.2 SPIRIT21 で実用化された合流式下水道改善技術

区分	No	技術名
夾雑物除去 (スクリーン)	1	ブラシスクリーン
	2	雨天時越流スクリーン
	3	CSO スクリーン
	4	ディスクスクリーン
	5	ストームスクリーン
	6	微細目テーパ穴式メッシュパネルを用いた除塵機
	7	The Copa Raked Bar Screen
	8	ロータリースクリーン

高速ろ過	9	雨天時高速下水処理システム (簡易処理の高度化および未処理放流水の簡易処理)
	10	高速ろ過装置 (繊維ろ材)
	11	特殊スクリーン月スワール及び沈降性繊維ろ材を用いた上下向流可変式高速ろ過法
	12	雨天時未処理放流水等の超高速繊維ろ過技術
	13	高速ろ過プロセス
凝集分離	14	高速凝集沈殿処理 (アクティブプロセス)
	15	特殊スクリーン付きスワールによる高速凝集分離システム
消毒	16	二酸化塩素を用いた高速消毒技術
	17	スワールによる高速凝集と中圧紫外線による消毒
	18	二酸化塩素を用いた消毒の高速化
	19	高濃度オゾンを応用した高速消毒技術
	20	臭素系消毒剤を用いた消毒技術
	21	オゾンによる効率的消毒技術
	22	紫外線消毒技術 (UV システム)
計測・制御	23	浸漬タイプ紫外線吸光度計
	24	大腸菌自動測定装置

本研究に関連する「夾雑物除去 (スクリーン)」は、自然吐口あるいはポンプ場から排出される夾雑物を除去する技術として評価された。これらの技術は、いずれもスクリーンで補足した夾雑物の掻き取りのための機能がある。また、形式には「ブラシ型」「多孔板型」「円板型」「バースクリーン型 (水平配置)」といった技術である。動力は越流水により水車を回すものや電動機を用いるものなどがある。

スクリーンの性能を表す指標としては、英国で採用されている次式で示す SRV を用いている。

$$SRV (\%) = \frac{A1-A0}{100-A1} \times 100$$

SRV : 夾雑物補足値 (Screening Retention Value) (%)

A1 : スクリーンが存在する場合の除去率 (%)

A0 : スクリーンが存在しない場合 (堰のみ) の除去率 (%)

また、共通の開発目標 (必要性能) は、  
 ・合流式下水道において、雨天時に自然吐き口、ポンプ場から排出される下水中の景観上不

快な物質を防止する

- ・スクリーンの夾雑物補足値 SRV（5.6mm 以上の夾雑物を対象）で 30%以上の除去率を有するものとする

としており、8 技術の全てが対象降雨 10 mm/hr（日本では、降雨強度 10mm/hr までの降雨が総降雨数の約 80%を占めている。これにより対象降雨を 10mm/hr に設定している）において 60%以上の除去率を有していることが確認された。

## 2.4 合流式下水道の改善策の実施状況

### 2.4.1 合流式下水道の改善目標

合流式下水道の改善（以下「合流改善」という）目標としては、「合流式下水道改善対策指針と解説」<sup>15)</sup>では、以下の 3 項目としている。

#### (1) 汚濁負荷量の削減

当該合流式下水道を分流式下水道と置き換えた場合において排出する汚濁負荷量と同程度以下となることを目標とする。

#### (2) 公衆衛生上の安全確保

原則として、合流式下水道のすべての吐き口からの未処理下水の放流回数を少なくとも半減させることを目標とする。

#### (3) 夾雑物の削減

原則として、合流式下水道のすべての吐き口において、夾雑物の流出を極力防止することを目標とする。

これらの目標を達成するための対策としては、以下の取り組みがあげられる。

#### 1) 汚濁負荷量の削減対策

- ・高級処理量の増大
- ・雨水吐き室の改造（堰のかさ上げ）
- ・処理場での簡易処理の高度化

#### 2) 公衆衛生上の安全確保対策

- ・遮集管の能力増強
- ・団地など一部地域での分流化
- ・雨水浸透事業の促進

#### 3) 夾雑物の削減対策

- ・雨水吐き室にろ過スクリーンの設置

## 2.4.2 合流改善の取組み状況

合流改善については、平成 15（2003）年の下水道法施行令改定により、処理区規模の大きい個所については 20 年以内（平成 35 年まで）に改善対策を実施することとしている。しかし、平成 31（2019）年度下水道事業予算においてはこの「合流式下水道緊急改善事業」の実施期間を平成 35（2023）年度まで延伸<sup>16)</sup>されている。

合流式下水道改善対策の実施都市を見ると、191 都市のうち 171 都市で分流式下水道並みの汚濁負荷対策を完了している（平成 31 年度下水道事業予算の概要より）。

計画どおりに改善事業が進捗していないと評価される都市数（C 及び D 評価）が、全体の 4 割を占めているものの、前回（平成 18（2002）年度末）から 4 都市減少し、76 都市となっている。その中でも、D 評価されていた都市数については、23 都市から 7 都市に大幅に減少している。

国交省としては、平成 19（2007）年度に作成した「効率的な合流式下水道改善計画策定の手引き（案）」<sup>17)</sup>を活用した「合流式下水道緊急改善計画」の見直しを促進し、改善対策の低コスト化、SUPIRIT21 などの新技術の導入を図り、効率的・効果的に改善対策が推進されるよう支援している。

表 2.3 合流式下水道の改善状況（191 都市）<sup>18)</sup>

評価 カテゴリ		A 目標達成に向け順調な 実施状況。事業の効率 化により、目標達成の 前倒しも可能	B 新技術の導入や適切な 対策手法の選定等で目 標達成可能。	C 計画通りに事業が進 捗しておらず、目標 達成がやや困難。	D 事業がほとんど実施 されておらず、現状の ままでは目標達成が 困難。
都 市 数	H18 年度末	83	28	57	23
	H19 年度末	81	34	69	7
前年度からの増減		-2	6	12	-16

## 2.4.3 ろ過スクリーンの設置状況

本研究は、浮遊性夾雑物（浮遊物）を雨水吐き室から河川などの公共用水域への越流量削減を目的としていることから、ろ過スクリーンを取り上げる。

ろ過スクリーンが我が国に初めて導入<sup>15)</sup>されたのは、平成 2（1998）年仙台市が初めてであり、以降、京都市での導入が続き、その後の SPIRIT21 の報告や国の方針などから、急速に設置された。

平成 15（2003）年 4 月の資料では 68 基設置されているが、これらはスイスのメーカーが開発し、日本のメーカーが実施権を取得した技術である。その後、一部の機器においては我が国仕様に改良されたものもある。

しかし、ろ過スクリーンは設置コストが一基当たり数千万円を要するほか、既設雨水吐き

室の一部改良工事が必要なことや電源ケーブルの確保などの物理的な制約も課題となっている。さらに、かなり頻繁に機器類の点検や修理が必要なこともあり、維持管理面での課題もあったことから、地方自治体では採用に難色を示すところとなった。

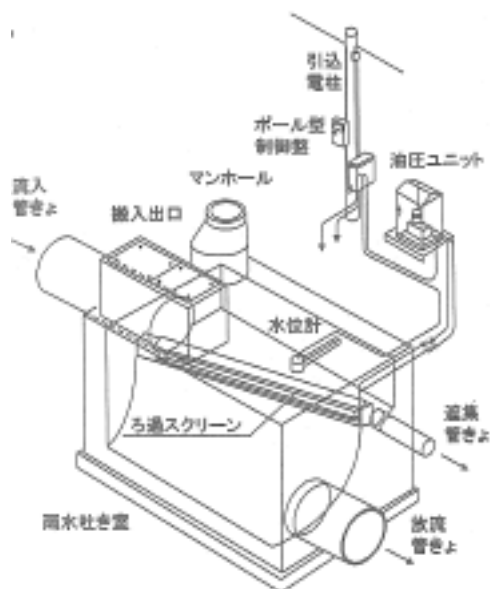


図 2.9 ろ過スクリーン設置事例 <sup>19)</sup>

#### 2.4.4 東京都が進めてきた合流改善

東京都区部の合流式臨海部など一部地域が分流式を採用している。

これら地域を除き、その面積は約 80%である。



図 2.10 東京都区部の分流式区域 <sup>20)</sup>

### (1) 下水道普及時の合流改善

東京都区部の下水道整備においては、合流式下水道の構造的宿命でもある雨天時下水に対しての配慮は、明治41年の「東京市下水道設計」で合流式を採用した経緯の中でも触れられている。

つまり、降雨初期の雨水は、路面などの汚濁物質を洗い流して下水管渠に流入してくる。この降雨初期の雨水を雨水吐き室やポンプ場からそのまま公共用水域に放流したのでは、衛生上の問題があることなどから、これを汚水と同様に処理することとした。この考えは、その後の計画変更に際しても受け継がれてきた。

降雨初期の雨天時下水を処理場に導き処理する遮集量は、当初、時間最大汚水量に0.25 mm/hrの雨水量を加えた量であった。これを大正2年に時間最大汚水量の2倍とした。

昭和49(1974)年には公共用水域の水質保全に寄与すべきことが、下水道の新たな役割に加わったこともあり、遮集量を2倍から3倍に引き上げる遮集量の3倍化をはかることとし、遮集幹線の建設などを進め、公共用水域の水質保全に努めてきた。

その結果、隅田川などの公共用水域の水質が目に見えて改善効果が表れてきた。しかし、その反面、雨天時には雨水吐き室からの雨天時下水が、放流される場面が都民の目にも触れられることもあり、より一層の公共用水域の水質改善が求められるようになった。



写真 2.3 雨水吐き室の晴天時（左）と雨天時の未処理下水放流状況（右）<sup>21)</sup>

### (2) 第二世代下水道マスタープランの合流改善

「第二世代下水道マスタープラン」<sup>22)</sup>は区部下水道の100%普及達成を目前にした平成4(1992)年7月にそれまでの下水道の基礎的な役割をより一層充実するとともに、新たな視点から多面的に事業や施策を展開するための計画として策定し、発表された。

「合流式下水道改善」は、この計画の10の施策の一つとして位置づけられている。

<長期目標>以下抜粋

快適な水辺環境を創出するため、以下の目標をもって合流式下水道の改善をより一層推進する。

- (a) 雨水吐き室およびポンプ所からの越流負荷量を削減し、放流先河川や運河の快適な水辺環境の創出に寄与する。

(b) 雨天時における，雨水吐き室，ポンプ所および処理場からの総放流負荷量を削減し東京湾の浄化を進める。

＜基本方針＞以下抜粋

雨天時における，公共用水域の水質改善をはかるため，以下の基本方針のもとに合流式下水道の改善や分流式区域の雨天時放流負荷量の削減対策を進める。

(遮集量の引き上げ)

- ・遮集量の3倍化を引き続き推進する。
- ・それに合わせて，ポンプ所および簡易処理施設の能力増加を引き続き推進する。

(雨天時下水の貯留)

- ・遮集量を超えて公共用水域に越流する雨天時下水のうち，雨水吐き室およびポンプ所に係る流域面積に対して，区部で8ミリ分に相当する降雨初期の雨水を貯留する施設を建設する。
- ・遮集した雨天時下水のうち，区部平均で時間最大汚水量の2倍を1時間程度貯留する施設を処理場に建設する。
- ・貯留した雨天時下水を的確に処理する。

(簡易処理の高度化と越流対策)

- ・処理場の簡易処理水質をより一層向上させるため，技術開発を進め，施設の建設を推進する。
- ・越流水を処理する施設として，スワール分水層のほかに，新たな高効率の処理施設の技術開発を進め，施設の建設を推進する。

(分流式下水道区域の雨天時放流負荷量の削減)

- ・分流式雨水管渠の初期雨水の貯留，処理施設についても技術開発を進めるとともに，整備処方についても検討し，施設の建設を推進する。

以上が合流式下水道の改善についての長期目標と基本方針であり，現在もこの施策は受け継がれている。

具体的な目標としては，1年間に放流される総汚濁負荷量を分流式下水道と同程度まで削減するとしている。また，その対策としては，遮集管の3Q化（晴天時の時間最大汚水量を1Qとして，雨天時にはその3倍の量（3Q分）を雨水吐き室から処理場に送ること）を進めるとともに雨水貯留池の整備を図るとしている。

### (3) クイックプランによる合流改善

東京都下水道局では，都民であるお客様に施策の効果を短期間に実感してもらえることを目標に「浸水対策」「老朽化施設の再構築」「合流式下水道の改善」の3つの施策を「クイックプラン」として，平成12（2000）年度から平成20（2008）年度頃までを計画期間として策定し，事業実施してきた。



<合流改善クイックプラン（平成13年3月発行）<sup>21)</sup>>

お台場公園に下水道由来のオイルボール（白色固形物ともいう。動植物油等の構成成分である高級脂肪酸を主成分とする油の塊）が漂着し、大きな社会問題となった。

このことを機に、これまで進めてきた合流改善をクイックプランとして、新たな目標を設定し、具体的な対策を講ずることとした。

主な対策は表 2.4 のとおりである。

表 2.4 合流改善クイックプランの主な対策

対 策	内 容	
課題別の対策	①白色固形物の流出防止対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>・雨水吐口へのろ過スクリーンの設置</li> <li>・処理場、ポンプ所のスクリーンの目幅縮小、オイルフェンスの設置</li> <li>・施設の清掃</li> </ul>
	②ゴミなどの流出防止策	<ul style="list-style-type: none"> <li>・雨水吐口の廃止</li> <li>・雨水吐口へのろ過スクリーン、小型スワール等の設置</li> <li>・施設の清掃</li> </ul>
	③雨の日の放流水質の改善対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>・消毒施設の改良（処理場）、消毒設備の設置（ポンプ所）</li> <li>・簡易処理施設の設置（ポンプ所）、技術開発（管路施設）</li> </ul>
	④雨水浸透による流出負荷量削減対策	宅地内での雨水浸透施設の設置を促進するため、区や指定工事事業者と連携した仕組み構築
共通の対策	⑤計画的な維持管理による油やごみを下水道管等に貯めない対策	現況調査に基づき、白色固形物の付着やゴミなどの滞留が多い個所を計画的に清掃
	⑥技術開発の推進	変動の大きい雨天時の流入水質・水量に対応し、安定した処理を行う新技術の開発など
	⑦都民や道路管理者等への協力要請	<ul style="list-style-type: none"> <li>・油やゴミを下水道に流さないなどを都民への協力要請</li> <li>・路面や道路雨水ますの清掃の充実を道路管理者等に要請</li> </ul>

このうち、本研究テーマに関連する「白色固形物（油の塊）」と「ゴミ」などの流出防止対策については、以下の対策を示している。

・管路施設については、管路内調査に基づき、白色固形物の付着が多い個所を重点化した上

で、ろ過スクリーン等を設置し、白色固形物の流出を抑制する。雨水吐口へのろ過スクリーンの設置は、目幅 0.4 mm とし、神田川、渋谷川、古川、目黒川の各下流域を重点整備箇所として 30 か所設置するとした

- ・ゴミなどの流出防止対策としては、ポン排水区への切り替えによる雨水吐口の廃止を 23 か所、雨水吐口へのろ過スクリーン、小型スワールなどの設置は 112 箇所、ゴミなどの滞留箇所の清掃・除去は、点検調査に基づく滞留の多い箇所とする
- ・計画期間は平成 12 年度から平成 16 年度までの 5 カ年とした

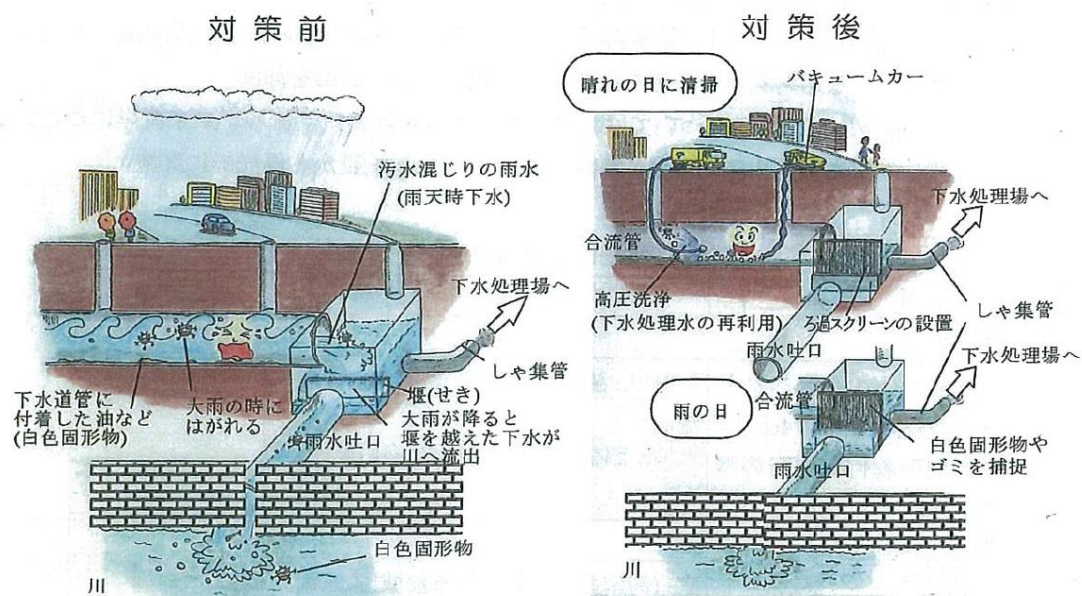


図 2.11 白色固形物の流出防止対策イメージ図

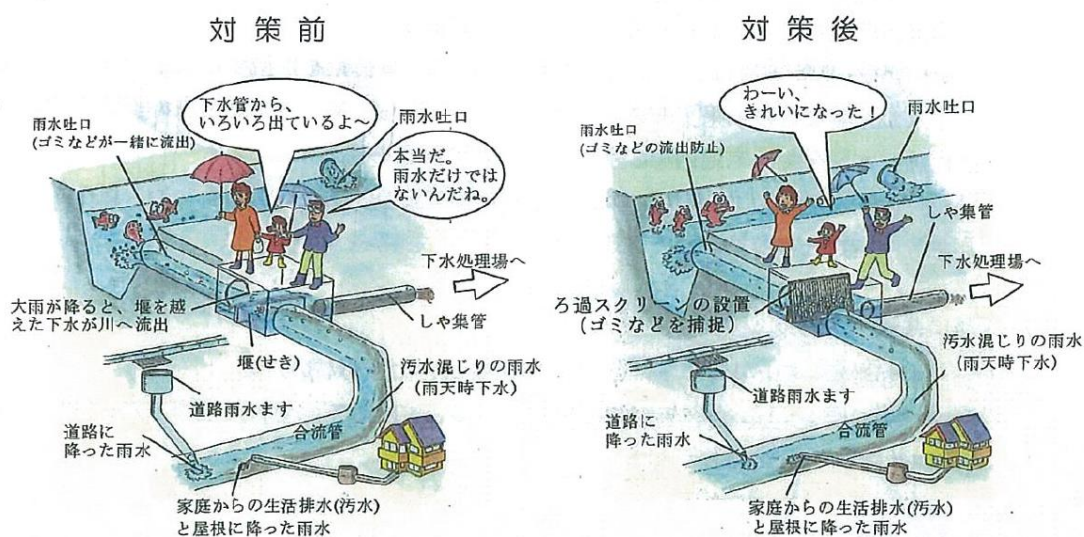


図 2.12 ゴミなどの流出防止対策イメージ図

<ろ過スクリーンの稼働状況と課題>

合流改善クイックプランに基づき、東京都区部で設置されたろ過スクリーンは、平成 12 年度に善福寺川への雨水吐口に設置した事例を含め、平成 15 年度までの設置数は延べ 32 基である。ろ過スクリーンをタイプ別に分類すると、かき取り刃式が 27 基、スクリー式が 5 基となっている。

これらスクリーンのうち、平成 30 年度末現在で稼働しているろ過スクリーンは、かき取り刃式が 2 基、スクリー式が 3 基の計 5 基である。故障中は 27 基あり、稼働率は 15.6% である。その故障原因は、表 2.5 に示すとおりであり、操作盤の故障や油圧ケーブルのオイル漏れが多い。なお、稼働中のスクリー式のうち、2 基は補修済みである。

表 2.5 スクリーンの故障原因

ろ過スクリーンの型式	故障原因	故障数	備考
かき取り刃式	油圧ユニット	1	
	動作盤オイル漏れ	4	
	操作盤故障	1 1	
	停止スイッチ故障	1	
	シリンダー故障又はオイル漏れ	3	
	油圧ケーブルオイル漏れ	6	
スクリー式	油圧ケーブルオイル漏れ	3	

※ 複数の故障原因があるろ過スクリーンを含む

設置したろ過スクリーンの維持管理状況から、故障につながる要因として以下のことが考えられる。

- ・設置したろ過スクリーンは駆動部があることから、長年の使用により錆やごみ（オイルボールなども）の付着などにより機能停止が生じている
- ・ろ過スクリーンの稼働状況や状態確認、点検などを行っていない。または行わない（ドイツなどでは直営職員が降雨後に必ず、稼働状況を点検し、絡みついたごみ等の除去作業や補修作業を実施している）
- ・管路施設の維持管理担当者に設備職を配置しておらず、施設の点検知識が少ないために、十分な維持管理を実施していない。

などが故障の原因となっているといえる。

<水面制御装置の開発>

東京都などでは、スクリーンなどを既設の雨水吐き室に設置するには電源確保の他、既存構造物を大幅に改造する必要があり、設置する適地が非常に少ないという課題があった。また、設置後のメンテナンスが必要となるが、管路施設の維持管理を担う職種は土木職である

ことから設備職の協力を得る必要があり、組織を横断しての対応となること等の課題もあった。なお、東京都下水道局管内には雨水吐き室は約 733 カ所ある中で、スクリーンなどの設備は 61 箇所設置された。しかし、平成 30 (2018) 年度末現在、稼働している設備は数カ所となっている。

以上のことから、国が進める計画を実施するには実務上からの課題も浮き彫りになり、雨水吐き室に簡便に設置できる装置で効果的に夾雑物が除去でき、維持管理も容易な装置の開発が求められた。

東京都下水道局は、雨水吐き室に簡易に設置でき、維持管理が容易なうえ、夾雑物の流出が削減できる設備の開発などについて、平成 13 (2001) 年に東京都の監理団体である東京都下水道サービス(株) (以下「TGS」) に調査を委託した。TGS は、日本工営(株)を協力会社として調査を進める中で、局職員、TGS 社員や日本工営(株)社員から、多くの新たな装置の提案が寄せられた。その中で、日本工営(株)社員の小松寛 (元東京都職員) 氏が、雨水吐き室に板 (後に制御板と命名) を遮集管の前あたりの位置に設置すると、渦が発生し、その渦に浮遊性夾雑物が吸い寄せられ、遮集管に引込まれることを提案した。

この仕組みが渦流式夾雑物越流抑制装置、後に「水面制御装置」と命名して特許取得し、全国に普及する装置となった。

なお、「水面制御装置」は特許権が発生している技術であり、東京都下水道局、東京都下水道サービス(株)、日本工営(株)の 3 社が有している。なお、筆者は東京都下水道局と東京都下水道サービス(株)に勤務し、本技術の開発当初から携わるとともに、長年にわたり国内外への技術紹介に関わっていることから、本研究ではこれまでの調査結果や技術を取り扱うことに対して、特許権者の 3 者からの了解を得ている。さらに、本論を記述するにあたって得られた知見に対しては、新たな知的財産が生ずるものではなく、かつ、これまでの知的財産に支障を及ぼすものではない。

本装置は「ガイドウォール」と「制御板」の二つの部材で構成されており、構造は可動部が無く、既設の雨水吐き室の改造を必要とすることなく設置できることから、工事期間が短く設置コストも安価で、メンテナンスフリーという特性を有している。

#### ①ガイドウォール

ガイドウォールは、夾雑物が雨水吐き室の堰を越えて公共用水域に流出することを抑制する役割を担う部材である。

#### ②制御板

制御板は、雨水吐き室内にある遮集管の管口付近に設置され、渦を生成する役割を持つ。生成した渦できょう雑物を遮集管に導く機能を担う部材である。

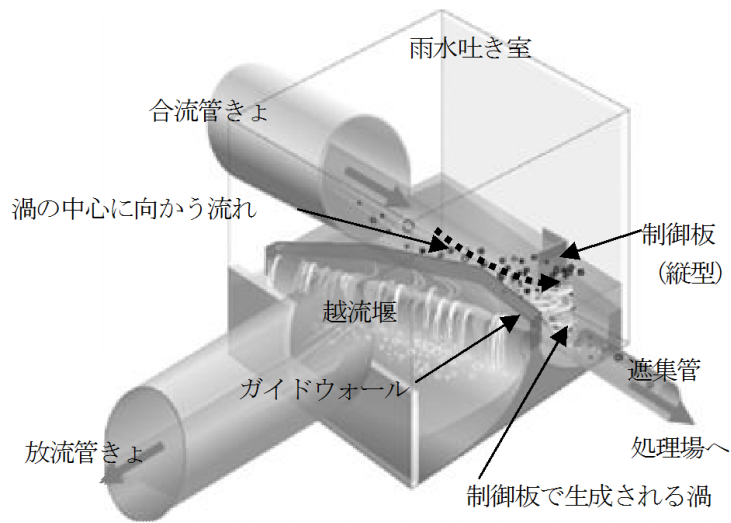


図 2.13 雨水吐き室に設置する水面制御装置の概念図

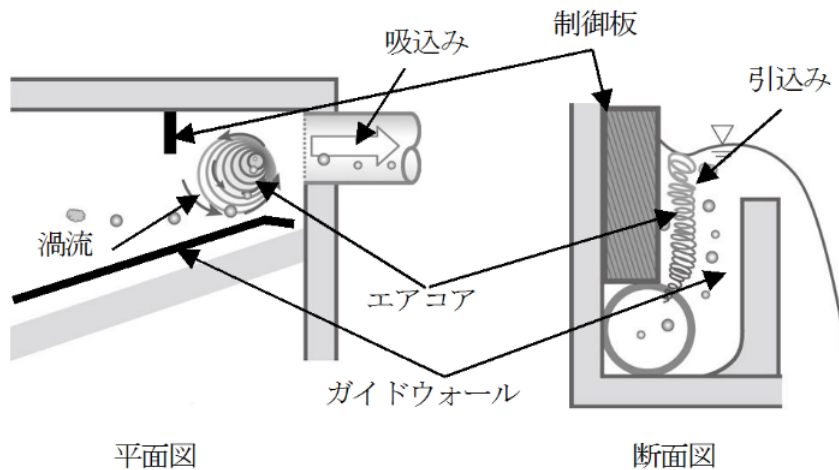


図 2.14 制御板とガイドウォールの概略図

#### <ソフト対策の導入>

表 2.4 で示した「合流改善クイックプランの主な対策」の中の「⑦都民や道路管理者等への協力要請」は、これまでのハード対策に対してソフト対策を盛り込んでいる。

具体的な事例として、平成 13 年 11 月から「油・断・快適！下水道」とのスローガンを掲げた取り組みである。局職員が都民であるお客様や事業所を訪問し、直接、趣旨と効果を説明して協力を求めるものである。従来とは異なる新たな取り組みとして注目を集め、現在も引き継がれている。

<[新]合流改善クイックプラン（平成19年6月発行）<sup>23)</sup>>

新クイックプランでは、オイルボールの原因となる油やごみなどを「下水道に入れない」「下水道にためない」「下水道から出さない」ことを基本方針として、これまでのクイックプランによる事業効果や費用を精査したうえで、重点的に対策を実施するモデル地域の設定や部分分流の導入などの新たな取り組みを加え、対策を充実している。

本研究のテーマである雨水吐き室からのオイルボールやごみの流出抑制についての具体的な対策としては、水面制御装置の設置などを善福寺川などの9河川に300箇所設置することとしている。

「水面制御装置」が計画に位置づけられたのは、この新合流改善クイックプランが初めてである。水面制御装置は「合流改善クイックプラン」の計画期間中の平成13年に開発された技術であり、この計画期間中に既に設置され、その効果を発揮している。

なお、クイックプランで実施した効果については、図2.15で雨水吐き室のごみの流出抑制対策の効果、図2.16でスクリーンの目幅縮小による効果について示している。また、図2.17でお台場へのオイルボール漂着日数の減少を示している。

これらの取り組み結果より、クイックプランの実施による効果が実証された。

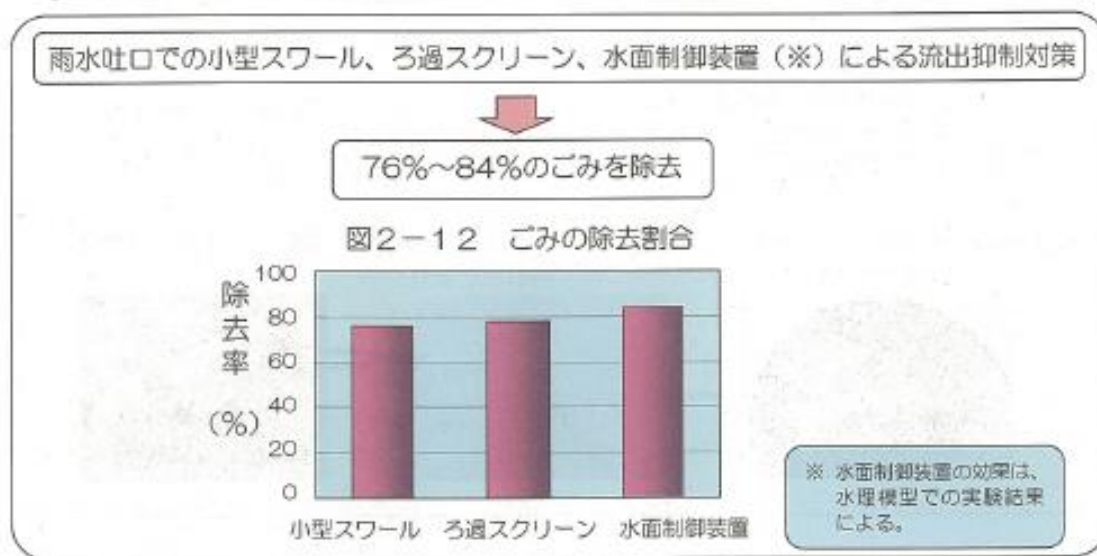


図 2.15 雨水吐口でのごみの流出抑制対策

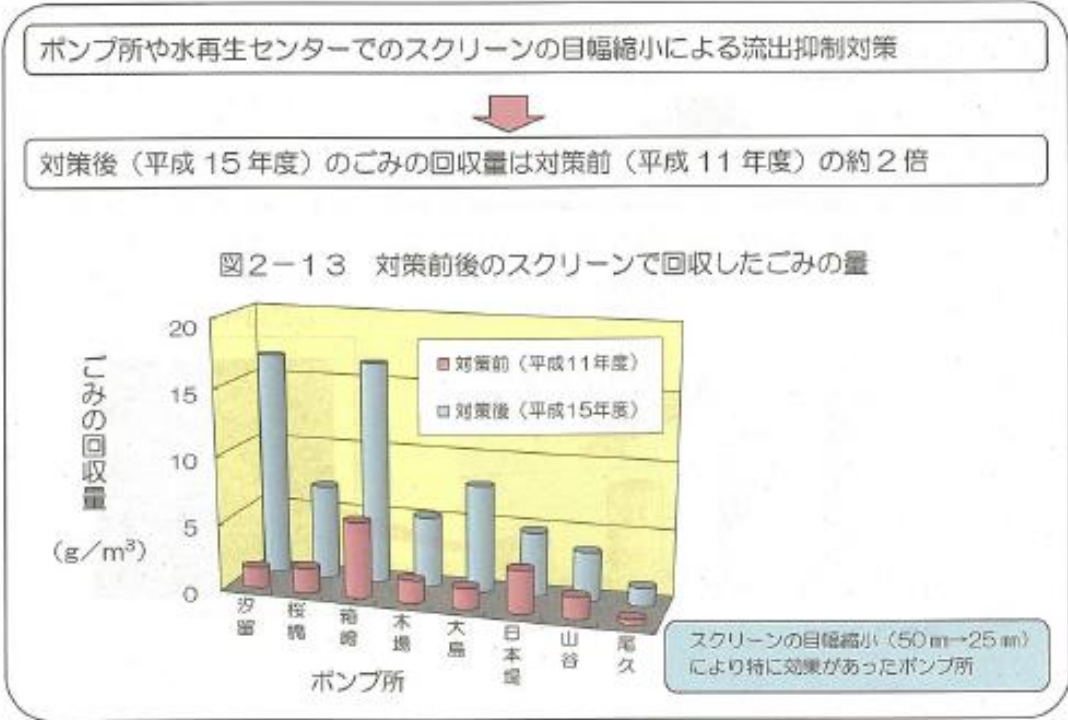


図 2.16 スクリーンの目幅縮小

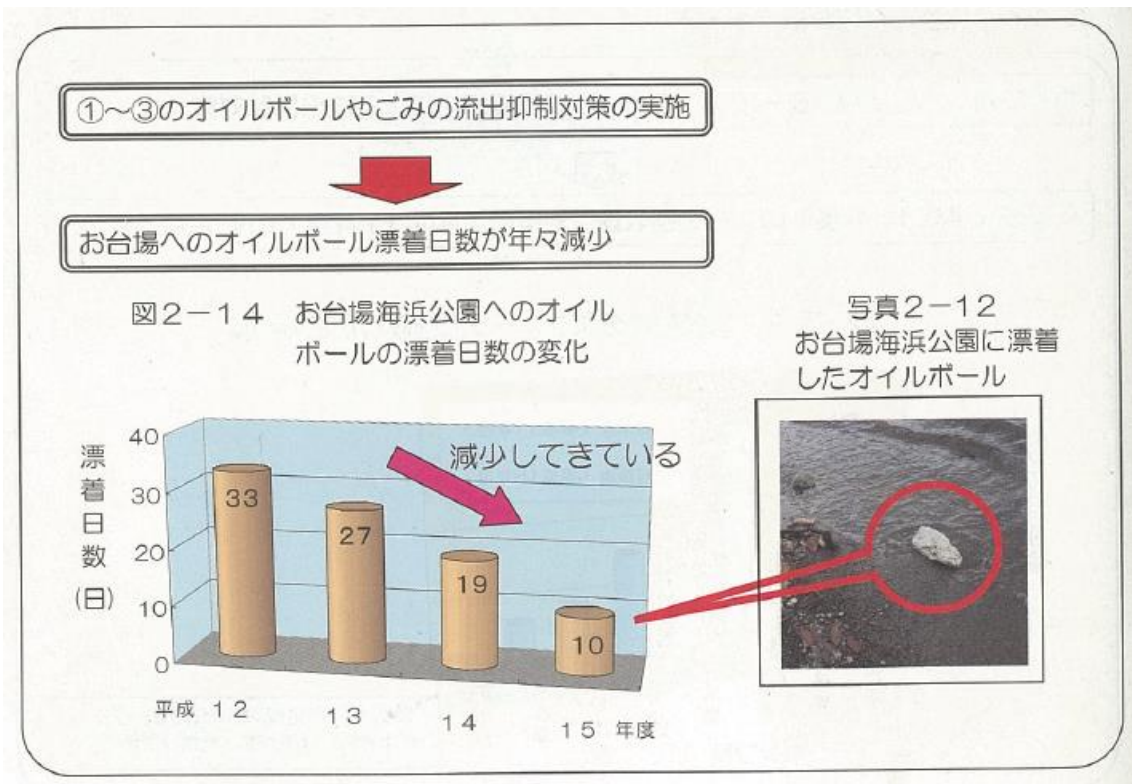


図 2.17 お台場へのオイルボールの漂着日数の減少

計画期間は、これまでのクイックプランの平成 16（2004）年度分の事業を取り込み、平成 20（2008）年度までの5 ヶ年としている。

<合流改善クイックプラン終了後の取り組み<sup>24)</sup>>

平成 12（2000）年度から 20（2008）年度までの短期間に事業効果を実感できる「合流改善クイックプラン」を実施したことから、オイルボールやごみ等の流出抑制対策が具体的に効果を発揮した。このごみなどの流出抑制対策は、平成 22（2010）年度までにおおむね終了させることとしている。

しかし、下水道法施行令では、平成 35（2023，令和 5）年度までに処理区からの雨天時放流水質を BOD で 40 mg/l以下にすることが求められており、引き続き貯留施設の整備を建設するなどの施策を講じていくこととしている。

#### <参考文献>

- 1) 東京都下水道サービス株式会社発行：「東京市下水道沿革誌」平成 24 年 3 月（口語訳版）pp.76, 77, 79, 89
- 2) 東京都下水道局：「下水道 100 年史」，下水道東京 100 年史編纂委員会，1989 年 3 月 pp.110～135
- 3) 山口県立萩美術館・浦上記念館：「明治絵・文明開化の世界展」平成 17 年 6 月 18 日発行，pp.55「三代歌川広重 東京乃内 銀座通煉瓦造鉄道馬車往復図明治 15 年（1882）」
- 4) 東京都下水道局：「下水道 100 年史」，下水道東京 100 年史編纂委員会，1989 年 3 月，pp.116・117
- 5) 東京都下水道サービス株式会社発行：「東京市下水道改良実施調査報告書」平成 19 年 3 月（口語訳版）pp.8, pp.386
- 6) 東京都下水道局ホームページ：  
<https://www.gesui.metro.tokyo.lg.jp/about/pdf/currentproblem.pdf#search=%27%E6%9D%B1%E4%BA%AC%E9%83%BD%E4%B8%8B%E6%B0%B4%E9%81%93%E5%B1%80%EF%BC%93Q%27>，2020 年 1 月 13 日閲覧
- 7) 東京都下水道局：「東京都の下水道 2019」令和元年度 12 月発行，pp.2
- 8) 国土交通省ホームページ：  
[https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo\\_sewerage tk\\_000601.html](https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage tk_000601.html)，2020 年 7 月 17 日閲覧
- 9) 東京都下水道局：「東京都の下水道 2019」令和元年 12 月発行，pp.8・9
- 10) 朝日新聞：「2001 年 6 月 14 日記事」
- 11) 国土交通省下水道部：「合流式下水道改善対策検討委員会報告概要」，平成 14 年 2 月 27 日



- 12) 松田尚之：「合流式下水道改善対策委員会報告について」，建設マネジメント技術，2002年4月号，pp.20～25
- 13) 国土交通省都市・地域整備局下水道部,財団法人下水道新技術推進機構：「合流式下水道の改善対策に関する調査報告書」平成14年3月
- 14) 堀江信之：「SPIRIT21による合流式下水道改善技術の開発経緯」環境技術 Vol.34 No.10(2015)pp686～690
- 15) 社団法人日本下水道協会：「合流式下水道改善対策指針と解説 2002年版」，平成14年6月27日発行
- 16) 国土交通省ホームページ：  
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd.sewerage.tk.000136.html>，2020年3月20日閲覧
- 17) 国土交通省ホームページ：  
<https://www.mlit.go.jp/common/000023037.pdf>，2020年3月20日閲覧
- 18) (財)下水道新技術推進機構合流改善スクリーン研究会：「ろ過スクリーンで浮遊物除去」平成15年7月1日発行，pp.5
- 19) 社団法人日本下水道協会：「合流式下水道改善対策指針と解説 2002年版」，平成14年6月27日発行，pp.189
- 20) 東京都下水道局ホームページ：  
<https://www.gesui.metro.tokyo.lg.jp/business/plan/quickplan/inex.html>，20200720閲覧
- 21) 東京都下水道局：「合流改善クイックプラン」，平成13年3月発行
- 22) 東京都下水道局発行：「第二世代下水道マスタープラン」平成4年7月
- 23) 東京都下水道局発行：「[新]合流改善クイックプラン」平成16年9月発行
- 24) 東京都下水道局発行：「事業概要（平成22年版）」平成22年9月24日発行 pp.39

### 第3章 水面制御装置の開発と標準設計法の提案

東京都下水道局は、合流改善対策の夾雑物削減策を実施するに際し、既存技術であるろ過スクリーンや小型スワールなどの対策を実施するに際し課題が生じていた。これら技術は工事や維持管理に多くの費用が必要であること、既設の施設の改造が必要となる他、雨水吐き室の設置状況から電源確保が困難であることなどから、思うように対策を進めることができなかった。

そこで、形状が異なる数多くの雨水吐き室においても、夾雑物対策を短期間で進められ、維持管理が容易で既存の雨水吐き室に簡易に取り付けが可能となり、浸水被害の原因とならない装置の開発を開始した。開発に当たっては、遮集管の前に板を設置することで渦が発生し、この渦に浮遊物を取り込まれるという基本的なアイデアを持っていた日本工営(株)と東京都下水道局、東京都下水道サービス(株)の3社により平成12年度より研究開発に取り組むこととなった。

開発者3者では遮集管の前に板を設置することで渦が生成され、この渦に浮遊物を取り込まれるという提案について、その効果の見極めと設計手法の確立に必要な水理的な資料収集のための実験を数多く実施した。

一方、東京都下水道局や(社団法人)下水道新技術推進機構では水面制御装置を構成するガイドウォールと制御板の組合せを5タイプとし、技術資料や設計法<sup>1)</sup>を設定している。

しかし、ガイドウォールや制御板(横型、縦型)の設置位置や寸法などの詳細は、設計者の経験や知見に委ねられており、現地に設置後の確認(夾雑物の捕捉調査やビデオカメラによる映像)を行い効果を見極め、効果が十分でない場合には設置位置の調整などを行っている。

本研究では、これまでの実験成果<sup>2)</sup>を踏まえ、ガイドウォールと制御板の横設置(横型制御板)と縦設置(縦型制御板)の装置を再評価し、捕捉効果の高い装置を選定するとともに、溢水の視点からガイドウォールや制御板が及ぼす流入管きょ上流部への影響について考察する。これらの結果を踏まえ、選定した装置の標準設計法を提案する。

#### 3.1 水面制御装置の開発

##### 3.1.1 実験の目的と実験方法

###### (1)現況雨水吐き室の状況

現況の雨水吐き室では、雨天時において遮集管口の水位上昇に伴い、浮遊性夾雑物が遮集管に捕捉されにくくなる。これは越流堰を超える水位上昇に伴い水面勾配が形成され、表面流速が増大することにより浮遊性夾雑物のほとんどが放流管側に越流する状況(図3.1)になる。

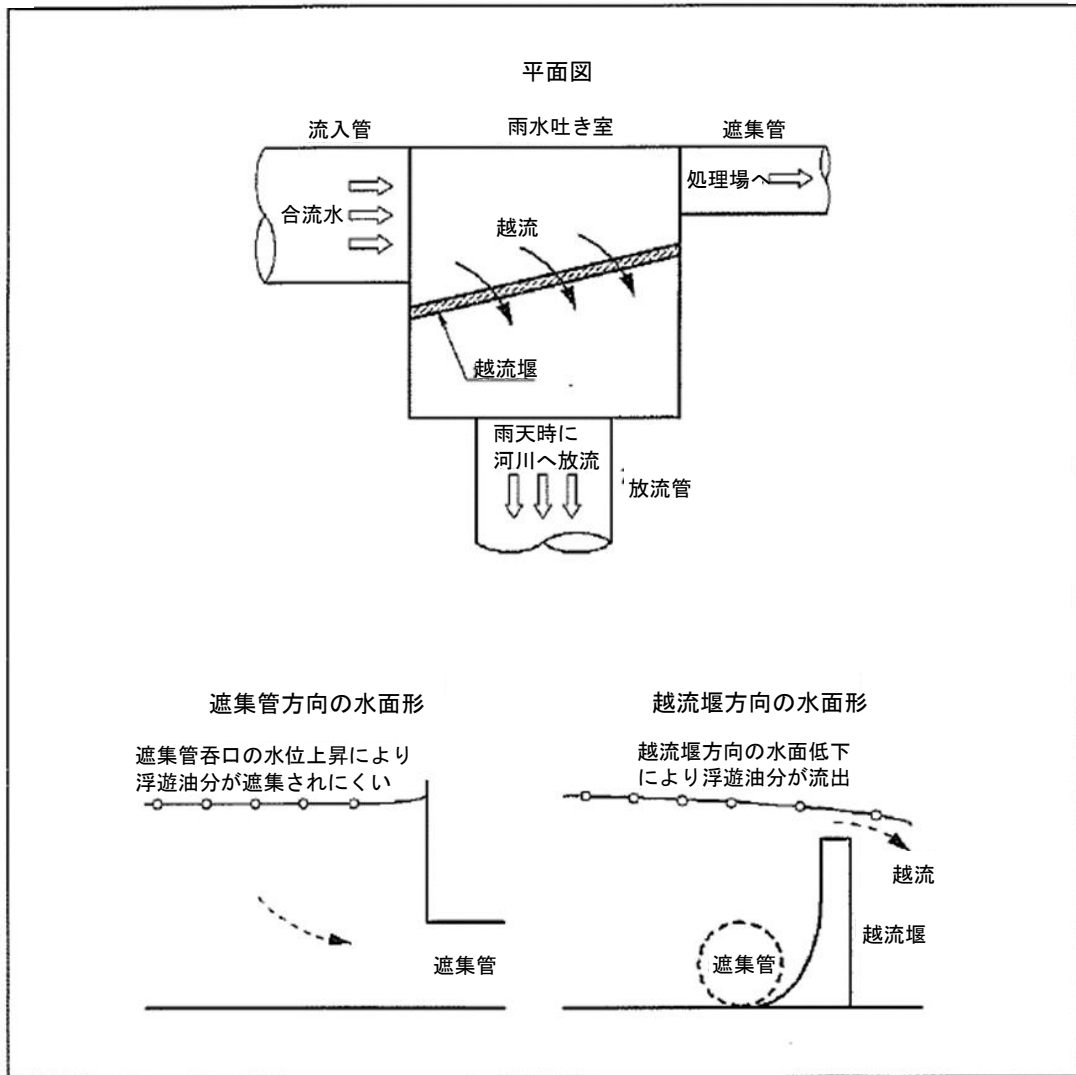


図 3.1 現況雨水吐き室の状況

## (2)実験の目的

水面制御装置の機能を有効に発揮させるためには、制御板の配置や規模を適切に選定することが重要である。また、雨水吐き室の形状は様々であり、遮集管の取り付け位置などによっては制御板とガイドウォールの配置に工夫が必要である。

については、雨水吐き室の形状には大きく分けて横越流型と正面越流型があり、更に一般的な形状を勘案して横越流型を4タイプ、正面越流タイプ4タイプ、更に複合タイプとして1タイプの計9タイプとした。それぞれに制御板とガイドウォールの組み合わせから35ケース(表3.1)について、水面制御装置の配置形状と浮遊性夾雑物の遮集状況や水理特性などを把握するために実施した。

具体的な目的は、以下のとおりである。

### 1)横越流型の雨水吐き室

- ・雨水吐き室内の流況、夾雑物の遮集機能、流入管の背水状況などの確認実験

- ・遮集管径による影響の検討
- ・雨水吐き室の規模による影響の検討
- ・制御板並びにガイドウォールの配置状況の検討
- ・渦流式及び流速式水面制御装置の推奨諸元の提案

## 2) 正面越流型の雨水吐

- ・雨水吐内の流速，夾雑物（浮遊性夾雑物，沈降性夾雑物）の遮集管への捕捉機能，流入管の背水状況の確認実験
- ・制御板並びにガイドウォールの配置形状の検討
- ・渦流式及び流速式水面制御の推奨諸元の提案

なお、「流速式水面制御」と「渦流式水面制御」は，以下のとおりである。

### <流速式水面制御（図 3.2）>

流速式水面制御は，横型制御板とガイドウォールで構成する。

機能は，遮集管の全面で越流させることで遮集管方向の水面低下と表面流速を増大させることを期待するものである。これにより，浮遊性夾雑物は表面流に乗って遮集管方向へ移動する。

ガイドウォールは，越流堰方向の水面低下を抑制して浮遊性夾雑物が越流堰方向に移動しにくくするとともに，壁構造により浮遊性夾雑物の流出を防止することを期待している。

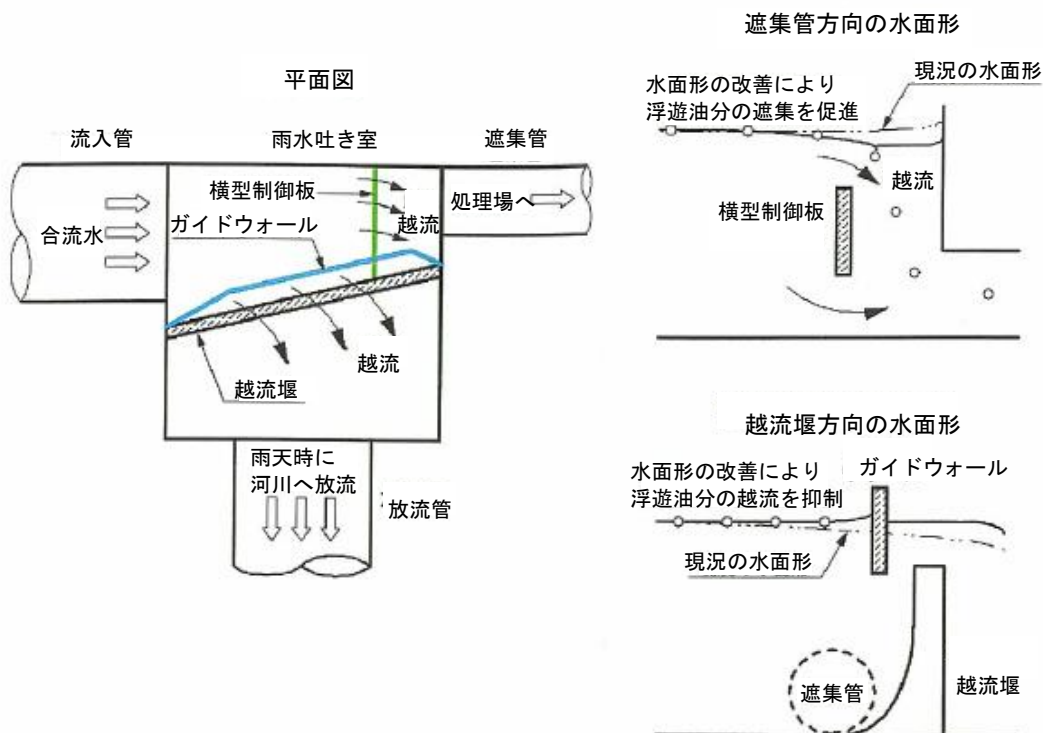


図 3.2 流速式水面制御の特徴

<渦流式水面制御（図 3.3）>

渦流式水面制御は、縦型制御板とガイドウォールで構成する。縦型制御板は遮集管へ向かう流れの一部を阻害することで、制御板の下流側に剥離渦を発生させることを期待するものである。この渦の発生により、遮集管方向の水面低下が生じ、浮遊性夾雑物が表面流に乗って遮集管方向に移動しやすくなる。また、この渦流の作用により浮遊性夾雑物が遮集管へ容易に引込まれるようになると考えた。

ガイドウォールの機能は、流速式と同じである。

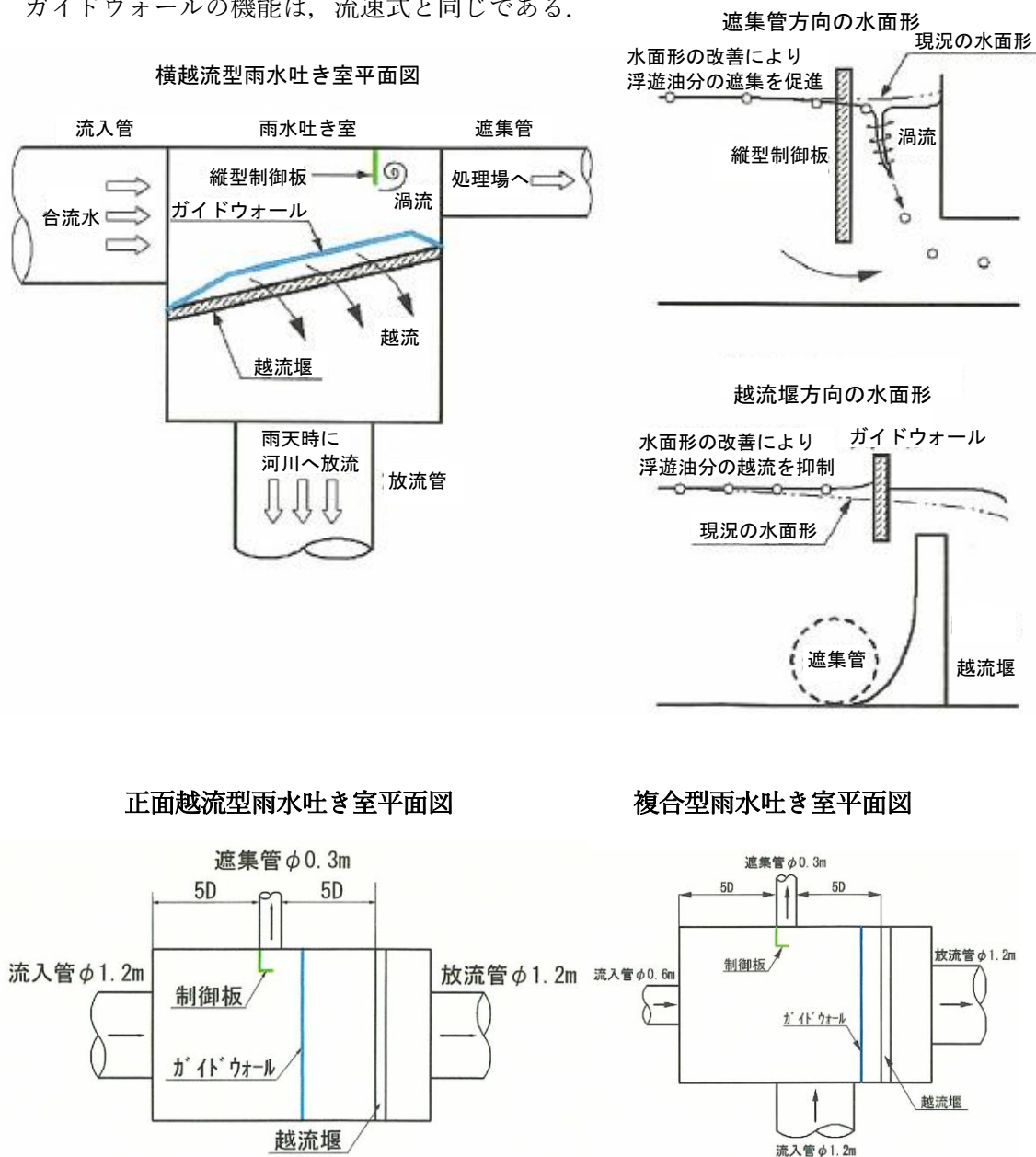


図 3.3 渦流式水面制御の特徴

また、制御板だけを設置した水面制御装置を「制御板方式」、制御板とガイドウォールの双方を設置した水面制御装置を「ガイドウォール方式」とする。

実験の結果から設定した装置の夾雑物の捕捉効果は、下水道技術開発プロジェクト（SPIRIT21）委員会ので定めた浮遊性夾雑物の流出抑制効果を「10mm/hr で 60%以上」に準ずることとした。

### 3.1.2 装置の概要

#### (1) 実験の基本条件

都内に設置されている雨水吐き室から、以下の基本諸元を設定した。

また、この基本諸元に基づき流量と水位を表 3.1, 3.2 に設定した。

表 3.1 雨水吐き室及び管渠の基本諸元

項目	設定値	備考
雨水吐き室	矩形 幅 2.4m×長さ 2.4m	・流入管径の 2 倍
流入管	直径 1.2m, 勾配 2.0%	・管径は都内に設置されているモデルの実績値 ・勾配は設計資料から設定
遮集管	直径が標準的な場合 直径 0.6m, 勾配 2.2%	・管径はモデルの実績値 ・遮集管が開水路流になる場合 ・勾配は設計資料から設定
	管径が小さい場合 直径 0.3m, 勾配 4.0%	・管径が小さく遮集管が満管流になる場合 ・勾配は設計資料から設定
放流管	直径 1.2m, 勾配 2.0%	・流入管渠と同一とする
越流堰高	計画遮集管（3Q）対応	・計画遮集管に対応する堰高とする

表 3.2 流量及び水位の条件設定

項目	設定値	備考
計画流量	1.453 m <sup>3</sup> /s ※1	・流入管の満管流量の 1/1.2
計画遮集量	0.071 m <sup>3</sup> /s ※2	・3Q, モデルの流域面積から設定
遮集管 H・Q	D=0.6m の場合, 等流条件	・遮集管は開水路流 ・遮集管の関係, 勾配に応じた等流条件とした
	D=0.3m の場合, 被り水深 1D	・遮集管は満管流 ・現況の雨水吐き室では夾雑物が遮集管に捕捉されにくい状況

※1 管径 1.2m, 勾配 2.0%,  $n = 0.013$  の管渠の満管流量は  $1.744 \text{ m}^3/\text{s}$  である。管渠の流下能力は総流出量の 2 割増しとし, 本実験では  $1.744 \text{ m}^3/\text{s}/1.2$  より,  $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$  を計画流量と設定した。

※2 単位汚水量はモデルの平均的な数値である  $0.0035 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ha}$  を適用する。

計画流量 (雨水量+汚水量) は,  $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$  となる流域面積は  $6,717\text{ha}$  が求められる。

降雨強度式:  $I=5000/t+40$       合理式:  $Q=C/I/A$

より求めると,

$$1 Q=0.0035 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ha} \times 6,717\text{ha}=0.0235 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$3 Q=3 \times 0.0235 \text{ m}^3/\text{s}=0.071 \text{ m}^3/\text{s}$$

## (2)実験のケース

表 3.1, 3.2 より, 制御板とガイドウォールの設置条件による効果確認を行うために, 35 ケース (表 3.3) を設定した。なお, 実験の形状に設定するパラメータを図 3.4 とした。結果, 35 ケースのそれぞれのパラメータは表 3.3 のとおりである。

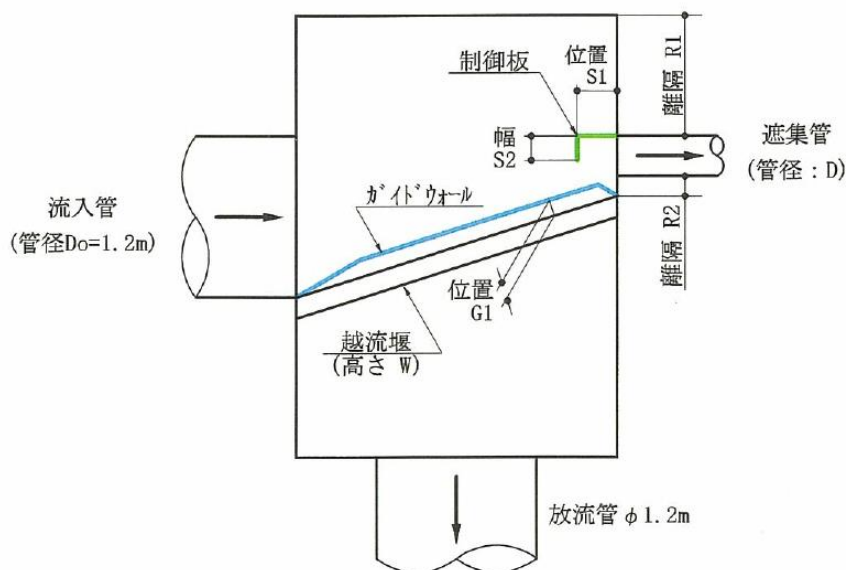
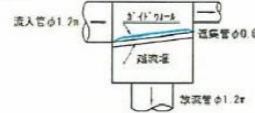
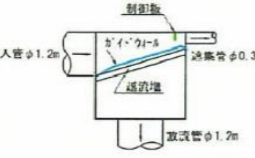

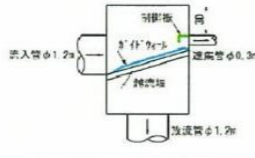

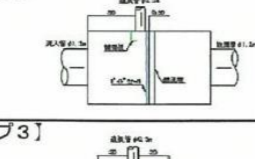


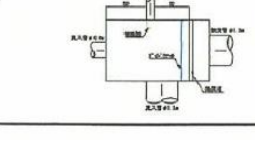


図 3.4 実験に用いる形状のパラメータ

表 3.3 実験ケースの一覧

越流形式	ケース番号	雨水吐き室の平面形状	主な検討事項	区分	遮集管および越流堰				渦流式水面制御				流速式水面制御				夾雑物の種類	
					遮集管			堰高 W	縦型制御板		カイトウォール		横型制御板		カイトウォール		浮遊性	沈降性
					管径 D	隔離 R1	隔離 R2		位置S1	幅S2	位置G1	高さG2	位置S1	幅S2	位置G1	天端高		
横越流タイプ	1	 <p>【横越流タイプ1】</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>標準的な遮集管径の場合 ⇒遮集管は開水路流</li> <li>流況、遮集機能、背水状況</li> <li>カイトウォールの支持構造の検討</li> <li>カイトウォールの設置効果</li> <li>夾雑物の種類による比較検討</li> </ul>	現況	0.6m	0D	0.50D	0.37D	-								4タイプ	4タイプ
	2								改善形状	0.10D <sub>0</sub> (支柱:有)	10mm/hr 越流水位	4タイプ	4タイプ					
	3											0.10D <sub>0</sub> (支柱:無)	10mm/hr 越流水位	4タイプ	4タイプ			
	4	 <p>【横越流タイプ2】</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>遮集管径が小さい場合 ⇒遮集管は満管流</li> <li>流況、遮集機能、背水状況</li> <li>制御板規模の比較検討</li> <li>カイトウォールの設置効果</li> <li>夾雑物の種類による影響</li> </ul>	改善形状	0.3m	0D	0.50D	2.00D	-								1タイプ	1タイプ
	5								1.00D	0.83D	-		1タイプ	1タイプ				
	6										1.00D	0.83D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位	1タイプ	1タイプ		
	7								1.00D	0.50D	-		-	1タイプ	1タイプ			
	8								1.00D	0.50D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位		1タイプ	1タイプ			
	9								 <p>【横越流タイプ3】</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>遮集管径が小さい場合 ⇒遮集管は満管流</li> <li>人孔壁との隔離が大きい場合</li> <li>流況、遮集機能、背水状況</li> <li>制御板規模の比較検討</li> <li>カイトウォールの設置効果</li> <li>夾雑物の種類による影響</li> </ul>	改善形状	0.3m	5.00D	0.50D	2.00D	-		
	10	1.00D	0.83D	-		1タイプ	1タイプ											
	11			1.00D	0.83D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位	1タイプ								1タイプ		
	12	1.00D	0.60D	-		-	1タイプ	1タイプ										
	13	1.00D	0.60D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位		1タイプ	1タイプ										
	14	 <p>【横越流タイプ4】</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>遮集管径が小さい場合 ⇒遮集管は満管流</li> <li>人孔壁との隔離が中位の場合</li> <li>流況、遮集機能、背水状況</li> <li>制御板規模の検証</li> <li>カイトウォールの設置効果</li> <li>夾雑物の種類による影響</li> </ul>	改善形状	0.3m	3.00D	0.50D	2.00D	-								1タイプ	1タイプ
	15								1.00D	0.83D	-		1タイプ	1タイプ				
	16										1.00D	0.83D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位	1タイプ	1タイプ		
	17								1.00D	0.60D	-		-	1タイプ	1タイプ			
	18								1.00D	0.60D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位		1タイプ	1タイプ			
正面越流タイプ	19	 <p>【正面越流タイプ1】</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>遮集管径が小さい場合 ⇒遮集管は満管流</li> <li>流況、遮集機能、背水状況</li> <li>制御板規模の比較検討</li> <li>カイトウォール平面形の比較検討</li> <li>カイトウォールの設置効果</li> <li>夾雑物の種類による影響</li> </ul>	改善形状	0.3m	5.00D	5.00D	2.00D	-								1タイプ	1タイプ
	20								1.00D	0.83D	-		1タイプ	1タイプ				
	21										1.00D	0.83D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位	1タイプ	1タイプ		
	22								1.00D	0.60D	-		-	1タイプ	1タイプ			
	23								1.00D	0.60D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位		1タイプ	1タイプ			
	24	 <p>【正面越流タイプ2】</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>遮集管径が小さい場合 ⇒遮集管は満管流</li> <li>流況、遮集機能、背水状況</li> <li>カイトウォールの設置効果</li> <li>夾雑物の種類による影響</li> </ul>	改善形状	0.3m	5.00D	0.50D	2.00D	-								1タイプ	1タイプ
	25								1.00D	0.83D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位	1タイプ	1タイプ				
	26												1.00D	0.60D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位	1タイプ	1タイプ
	27	 <p>【正面越流タイプ3】</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>遮集管径が小さい場合 ⇒遮集管は満管流</li> <li>流況、遮集機能、背水状況</li> <li>カイトウォールの設置効果</li> <li>夾雑物の種類による影響</li> </ul>	改善形状	0.3m	3.00D	3.00D	2.00D	-								1タイプ	1タイプ
	28								1.00D	0.83D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位	1タイプ	1タイプ				
29	1.00D												0.60D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位	1タイプ	1タイプ	
30	 <p>【正面越流タイプ4】</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>遮集管径が小さい場合 ⇒遮集管は満管流</li> <li>流況、遮集機能、背水状況</li> <li>カイトウォールの設置効果</li> <li>夾雑物の種類による影響</li> </ul>	改善形状	0.3m	3.00D	0.50D	2.00D	-								1タイプ	1タイプ	
31								1.00D	0.83D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位	1タイプ	1タイプ					
32												1.00D	0.60D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位	1タイプ	1タイプ	
複合	33	 <p>【複合型タイプ】</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>遮集管径が小さい場合 ⇒遮集管は満管流</li> <li>流況、遮集機能、背水状況</li> <li>カイトウォールの設置効果</li> <li>夾雑物の種類による影響</li> </ul>	改善形状	0.3m	5.00D	5.00D	2.00D	-								1タイプ	1タイプ
	34								1.00D	0.83D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位	1タイプ	1タイプ				
	35												1.00D	0.60D	0.10D <sub>0</sub>	10mm/hr 越流水位	1タイプ	1タイプ



### (3) 実験方法

#### 1) 相似律と模型縮尺

雨水吐内の流れに対しては、水の粘性・表面張力に比較して重力に起因する慣性力の影響が卓越することから、実現場と模型のフルード数を等しくする「フルードの相似律」<sup>3)</sup>に従って実験を行う。フルードの相似率による諸量の縮尺は次のとおりとする。

長さの縮尺 =  $K_1$

時間の縮尺 =  $K_T = K_1^{1/2}$

流速の縮尺 =  $K_V = K_1^{1/2}$

圧力水頭の縮尺 =  $K_P = K_1$

現象の相似性、実験施設の規模、測定精度及び模型材料の規格を考慮し、長さの縮尺を  $K_1 = 1 \cdot 4.29$  とした。これにより、諸量の縮尺値は表 3.4 のとおりとした。

表 3.4 縮尺値の一覧

項目	縮尺値
長さ	1/4.29
時間	1/2.07
流速	1/2.07
流量	1/38.2
圧力水頭	1/4.29

#### 2) 実験装置

実験装置の配置を写真 3.1、図 3.5 に示す。

模型の各部構造は、以下のとおりである。

- ・管渠模型：透明アクリル製
- ・雨水吐き室模型：外壁は透明アクリル製、越流堰とインバートなどの内部構造は木製
- ・付帯装置：給水装置、水位調整装置を付帯



写真 3.1 実験模型

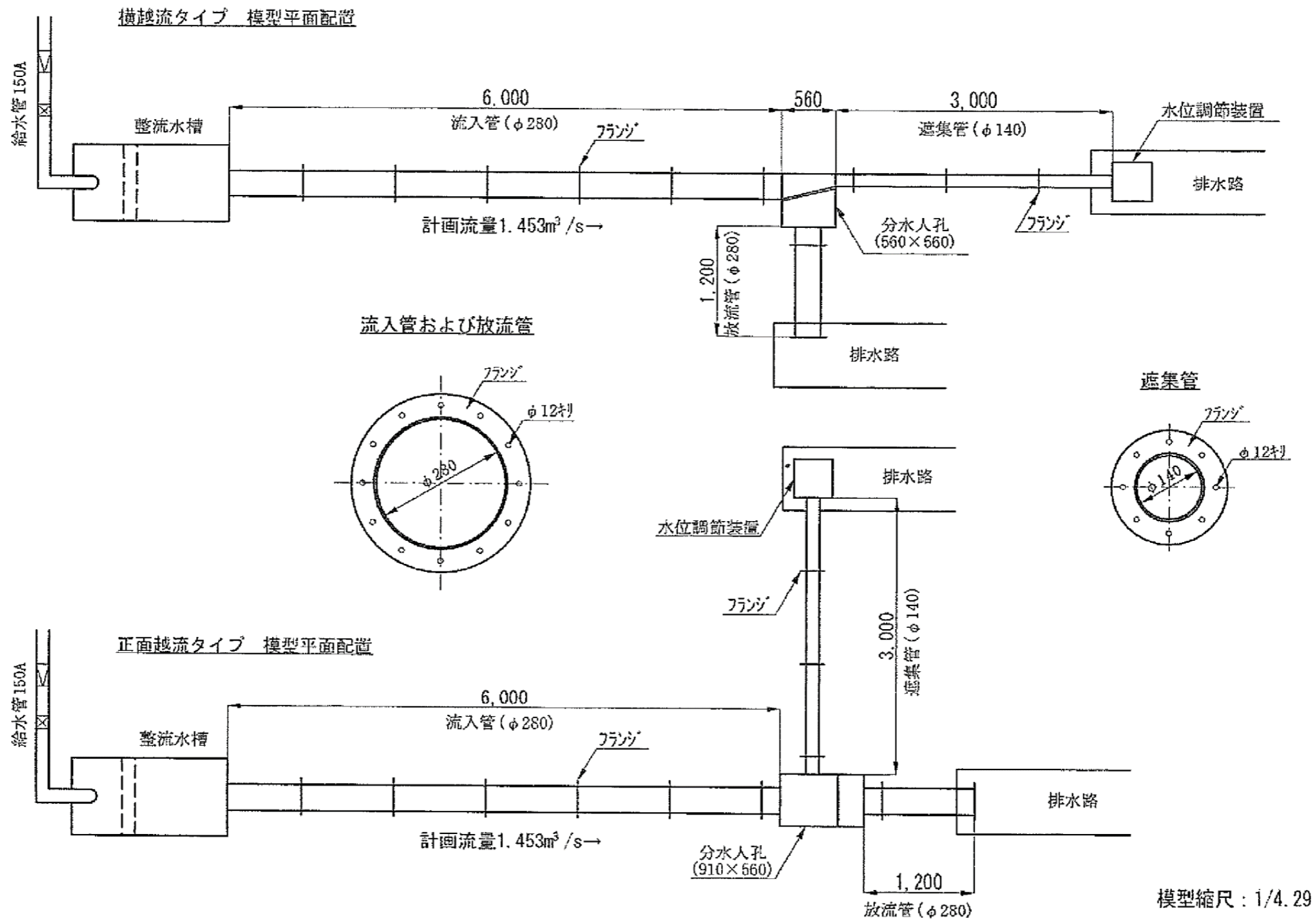


図 3.5 実験装置の配置

### 3) 夾雑物モデル

実験に用いる夾雑物は、浮遊性と沈降性を考慮し、以下のようにモデル化した。

#### <浮遊性夾雑物>

- ・白色固形物：市販のスーパーボール（白色固形物と同様の比重 0.90）を用いた  
大きさは、ソフトボール大として  $\phi$  9 cm 相当を基本とした  
また、参考として  $\phi$  5 cm 相当（小と表記）についても用いる
- ・固化油：植物油を固化剤で固めたもの（比重 0.92）を用い、大きさは  $\phi$  9 cm 相当とした
- ・スポンジ：ウレタンフォーム（比重 0.39）を用い、大きさは  $\phi$  9 cm 相当とした

#### <沈降性夾雑物>

- ・ひも：製本用の綴りひも（スフ糸：比重 1.5）を用い、長さは 20 cm 相当とした
- ・木片：割り箸を用い、十分に含水させ（比重 1.5）、大きさは 2 cm 角の立方体とした
- ・布：木綿布（比重 1.54）を用い、大きさはタオル大とし、78 cm  $\times$  33 cm 相当とした
- ・布（小）：木綿布（比重 1.54）を用い、上記の 1/4 程度とし、18 cm  $\times$  8 cm 相当とした

### 4) 測定方法

測定方法は、以下のとおりとした。

- ・流量：給水槽に設置する流量計を用いた
- ・水位：ポイントゲージを用いた
- ・捕捉率：浮遊性夾雑物について、100 個を流入管に投入し、遮集管に捕捉される個数の割合を求める同一の条件で実験を 3 回繰り返し、その平均値を捕捉率（%）とした
- ・流況：色素を投入し、浮遊性夾雑物の移動と合わせてカラー写真とビデオに記録した

#### 3.1.3 夾雑物の捕捉結果

35 ケースの実験結果より、夾雑物の捕捉効果について以下に整理する。

##### (1) 横越流タイプ 1（ケース 1, 2, 3）

###### 1) ケース 1 の実験結果

雨水吐き室の現状を評価するために、対策を講じないケースに浮遊性夾雑物と沈降性夾雑物による違いを把握する実験を行ったものであり、結果を図 3.6.1、写真 3.2.①～3.2.⑫に示す。なお、本実験結果の捕捉効果を見極めるために、目標である「10 mm/hr, 69% 以上の捕捉」範囲を「流量と捕捉率の関係」図にバックライトとして示した。

#### <浮遊性夾雑物>

3Q では4種類の夾雑物とも100%が遮集管に捕捉される。5Q では80%以上が遮集管に捕捉されるが、10Q 以上では70%前後に低下する。浮遊性夾雑物の種類による差は小さい。捕捉されない浮遊性夾雑物の大部分は堰を超える現象を確認した。

#### <沈降性夾雑物>

3Q では4種類の沈降性夾雑物が遮集管に捕捉される。

5Q では90%以上の高い割合で遮集管に捕捉される。しかし、10Q 以上になると急にその割合が低くなり、特に布やひものように管底を移動する沈降性夾雑物の捕捉率は40%以下となる。捕捉されない沈降性夾雑物の多くは雨水吐き室に漂い、堰を超える現象は確認できなかった。

### 2) ケース 2.3 の実験結果

流速式水面制御でガイドウォールだけを設置したケース2、3の場合の結果を図3.6.2、写真3.3.①~3.4.⑥に示す。なおケース2にはガイドウォールの支柱あり、ケース3にはガイドウォールの支柱なしとしている。

#### <浮遊性夾雑物>

3Q から10Q、更には10 mm/hr 相当までは、4種類の浮遊性夾雑物は100%遮集管に捕捉される。15Q 以上ではその量は下がり始めるものの、20Q では60%~70%の高い捕捉率が認められる。捕捉されない浮遊性夾雑物の一部は堰を超える現象を確認した。

#### <沈降性夾雑物>

3Q では6種類の沈降性きょう雑物が100%遮集管に捕捉される。しかし、5Q から徐々に下がり、種類による違いはあるものの20Q 程度までは布やひも類は20%程度、木片などの比重が軽いものは70%程度の捕捉効果が認められる。なお、捕捉されない沈降性夾雑物は雨水吐き室に漂い、堰を超える現象は確認できなかった。

### 3) 対策効果の考察

#### <浮遊性と沈降性の違い>

3Q では、浮遊性も沈降性も遮集管に100%捕捉されるが、3Q を超えると浮遊性の方が沈降性に比べ、遮集管に捕捉される割合は大きい。特に、流量が大きいほどその傾向は大きい。また、写真3.2.①~⑫からわかるように捕捉されない浮遊性夾雑物は堰を超えて流出するが、捕捉されない沈降性夾雑物の多くは堰を超えず、雨水吐き室を漂っていることが分かった。

夾雑物の種類による違いを見ると、浮遊性夾雑物は種類による違いは小さい。一方、沈降性夾雑物は、水中の中間を移動する木片と管底近くを移動する布などでは、大きな違いが生じた。

今後の実験を進めるにあたり、今回実験に用いた浮遊性夾雑物と沈降性夾雑物の8種類

と対策無しの場合（計 10 種類）をそれぞれ実施するには、定められた実験期間での実施は困難であるとの判断から、浮遊性夾雑物として「スーパーボール（大）」、沈降性夾雑物として「ひも」を代表として実験を進めることとした。また、沈降性夾雑物はいずれのモデルも堰を超えることを確認できなかったことから、本実験の目的は堰を超える夾雑物を遮集管に捕捉することを目的としていることから、3Q、5Q、10Q までは実験を行わず、10mm/hr 以上の流量に対しての挙動や捕捉状況を確認することとした。

#### <ガイドウォールの設置効果>

対策が無いケース 1 に比べ、ガイドウォールを設置したケース 2、3 では、浮遊性夾雑物でその設置効果が大きい。特に、15Q までは捕捉効果が顕著である。また、捕捉されない浮遊性夾雑物はガイドウォールの効果により堰を越流することなく雨水吐き室を漂っている（写真 3.3.⑤）。ガイドウォールの支柱ありとなしとの差は明確にはなかった。

しかし、沈降性夾雑物のうち、管底を移動する布やひもでは大きな効果は認められないものの、中間を移動する木片などでは 15Q までは捕捉効果が確認できた。なお、いずれのケースでも堰を超えることはなかった。

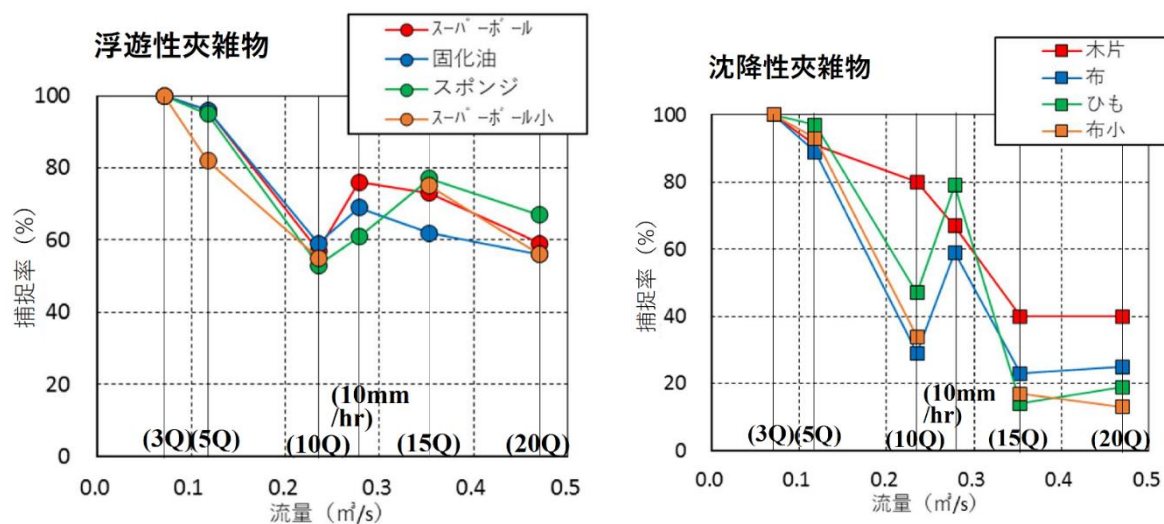


図 3.6.1 流量と捕捉率の関係（横越流タイプ 1, ケース 1）

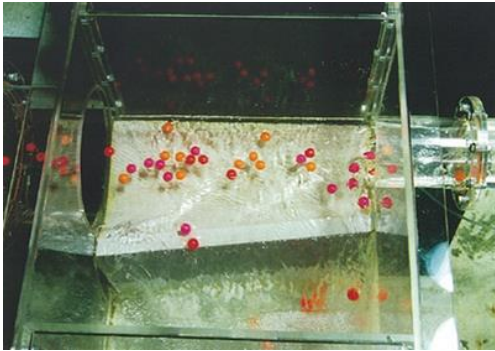


写真 3.2.① ケース 1,10 mm/hr,スパーボール

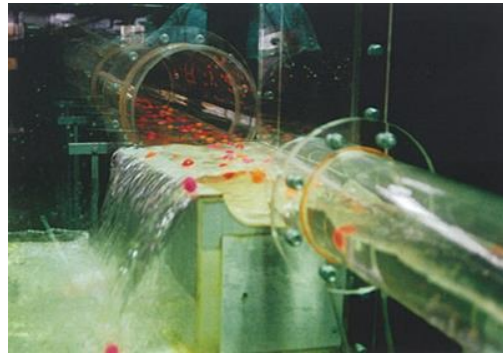


写真 3.2.② ケース 1,10 mm/hr,スパーボール

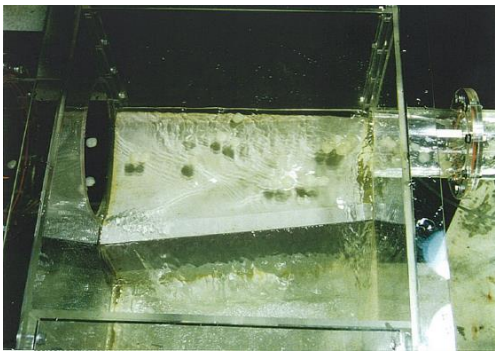


写真 3.2.③ ケース 1,10 mm/hr,固化油



写真 3.2.④ ケース 1,10 mm/hr,固化油

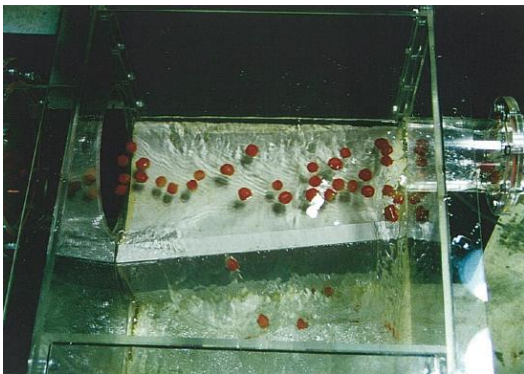


写真 3.2.⑤ ケース 1,10 mm/hr,スポンジ

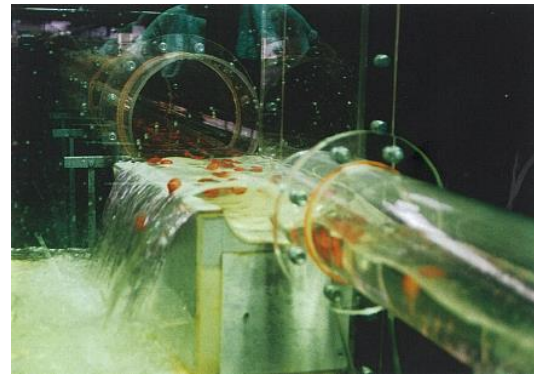


写真 3.2.⑥ ケース 1,10 mm/hr,スポンジ

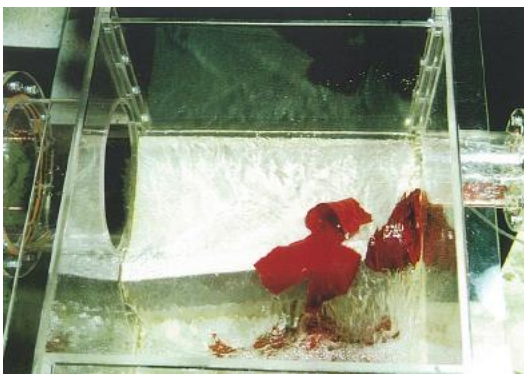


写真 3.2.⑦ ケース 1,10 mm/hr,布

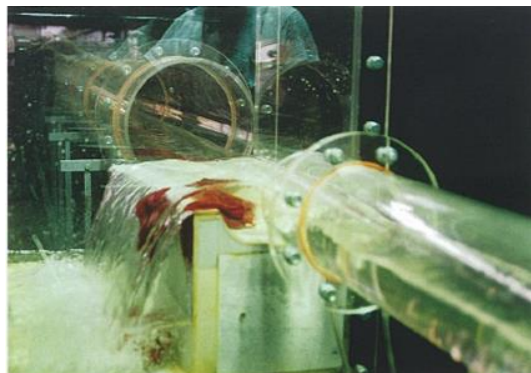


写真 3.2.⑧ ケース 1,10 mm/hr,布

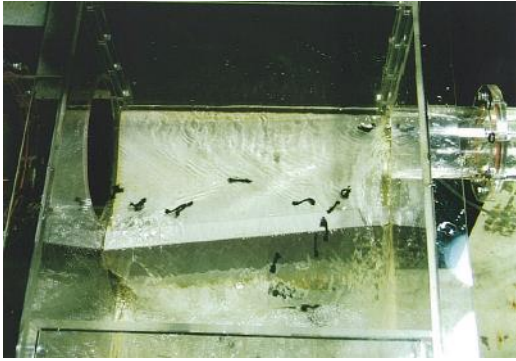


写真 3.2.⑨ ケース 1, 10 mm/hr, ひも

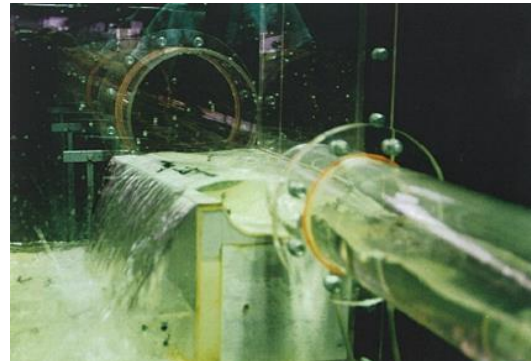


写真 3.2.⑩ ケース 1, 10 mm/hr, ひも



写真 3.2.⑪ ケース 1, 10 mm/hr, 木片

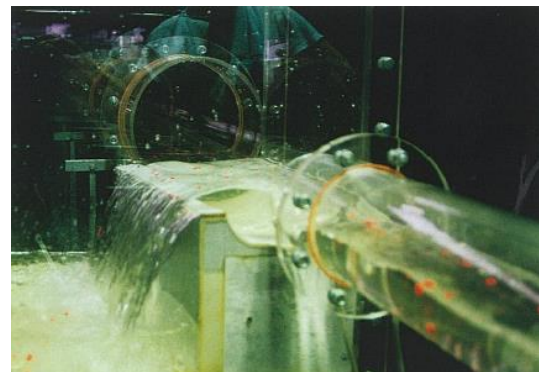


写真 3.2.⑫ ケース 1, 10 mm/hr, 木片

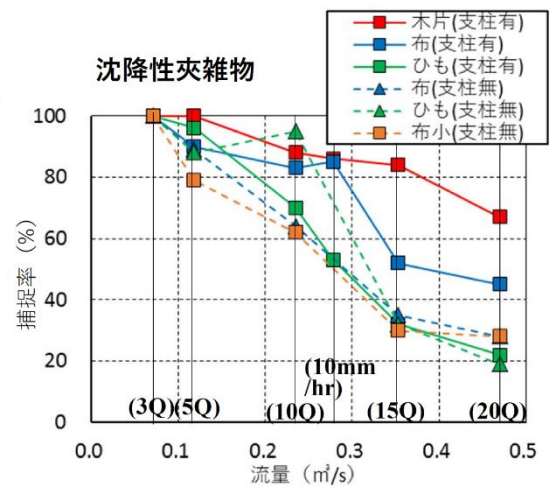
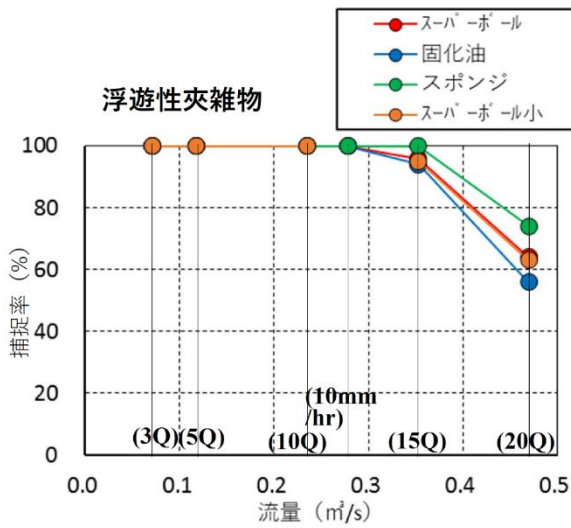


図 3.6.2 流量と捕捉率の関係 (横越流タイプ 1, ケース 2, 3)

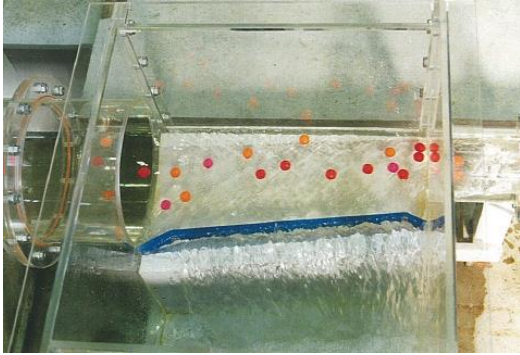


写真 3.3.① ケース 2,10 mm/hr,スパーボール

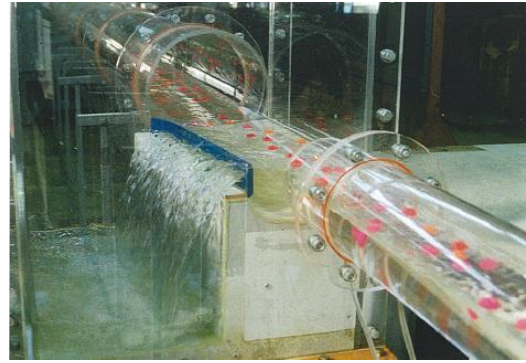


写真 3.3.② ケース 2,10 mm/hr,スパーボール

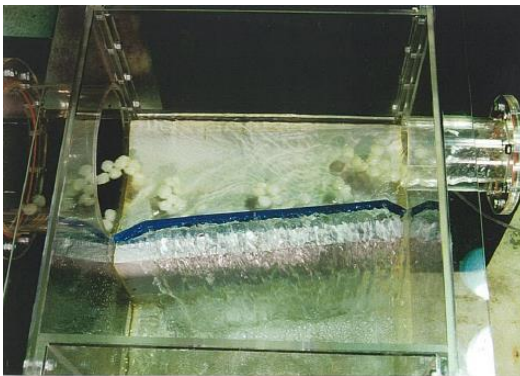


写真 3.3.③ ケース 2,10 mm/hr,固化油

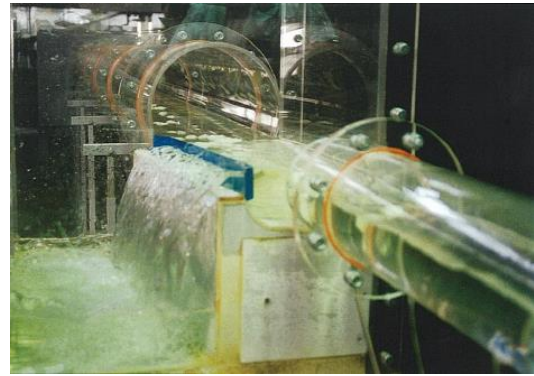


写真 3.3.④ ケース 2,10 mm/hr,固化油

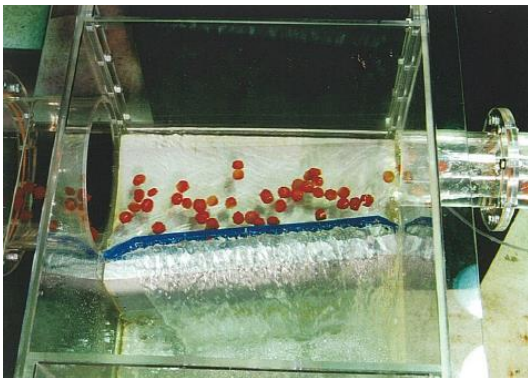


写真 3.3.⑤ ケース 2,10 mm/hr,スポンジ

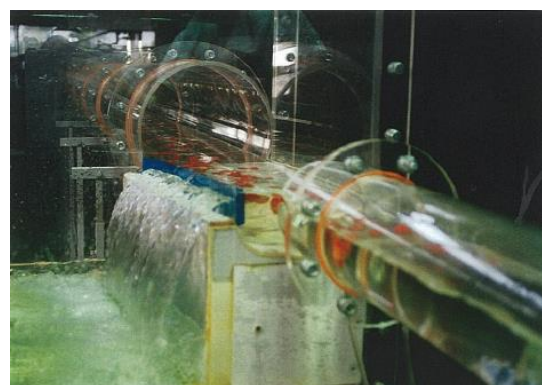


写真 3.3.⑥ ケース 2,10 mm/hr,スポンジ



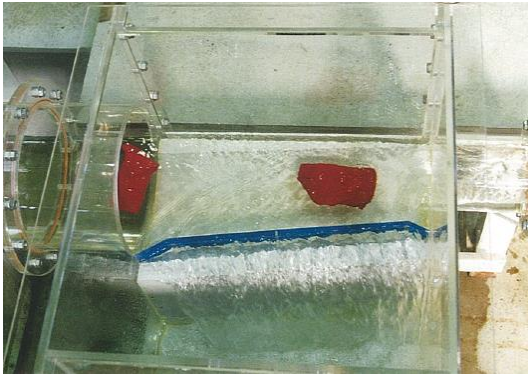


写真 3.3.⑦ ケース 2,10 mm/hr,布

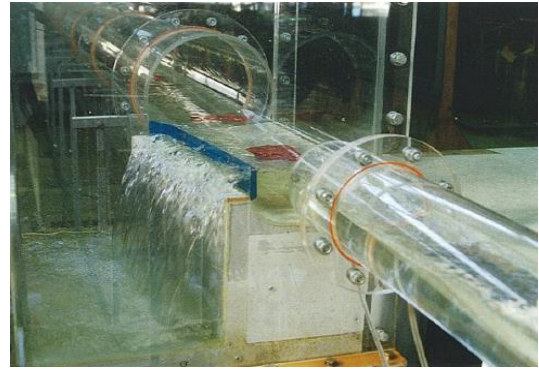


写真 3.3.⑧ ケース 2,10 mm/hr,布

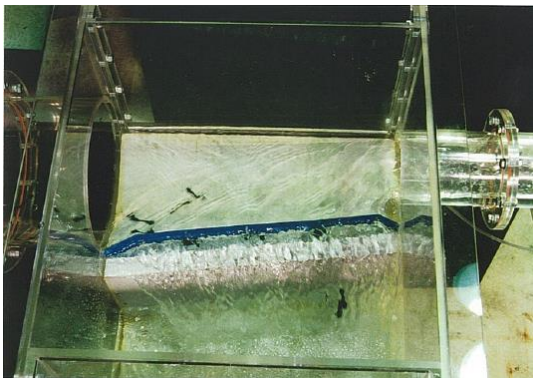


写真 3.3.⑨ ケース 2,10 mm/hr,ひも

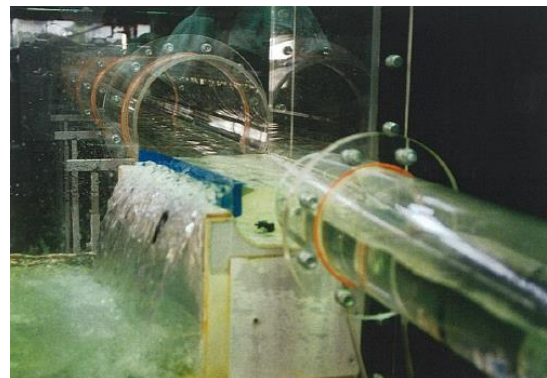


写真 3.3.⑩ ケース 2,10 mm/hr,ひも

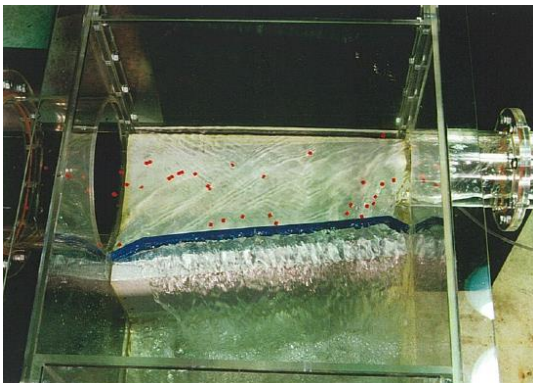


写真 3.3.⑪ ケース 2,10 mm/hr,木片

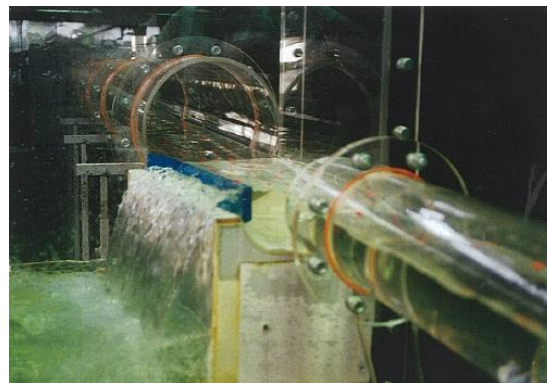


写真 3.3.⑫ ケース 2,10 mm/hr,木片

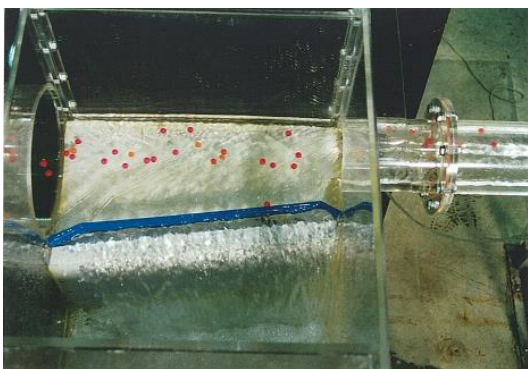


写真 3.4.① ケース 3,10 mm/hr,スパーボール

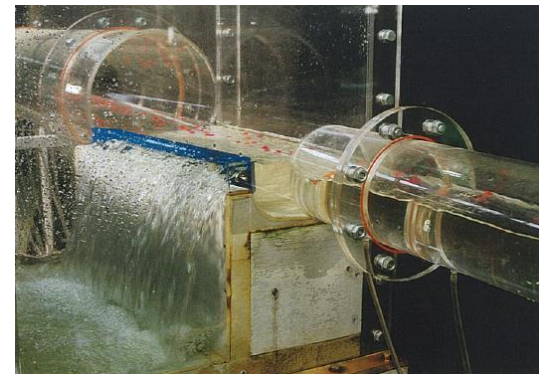


写真 3.4.② ケース 3,10 mm/hr,スパーボール

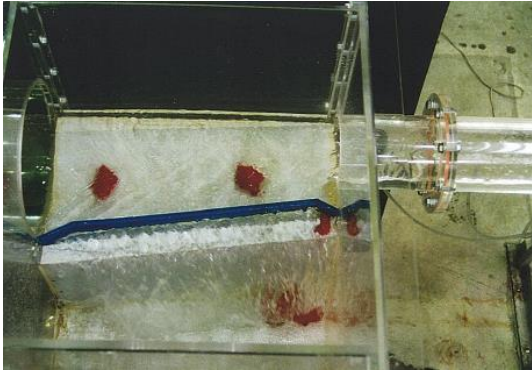


写真 3.4.③ ケース 3,10 mm/hr,布

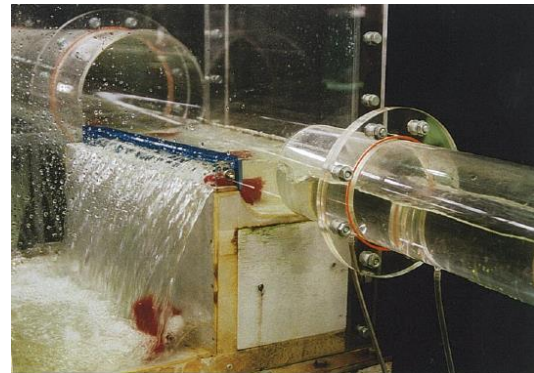


写真 3.4.④ ケース 3,10 mm/hr,布

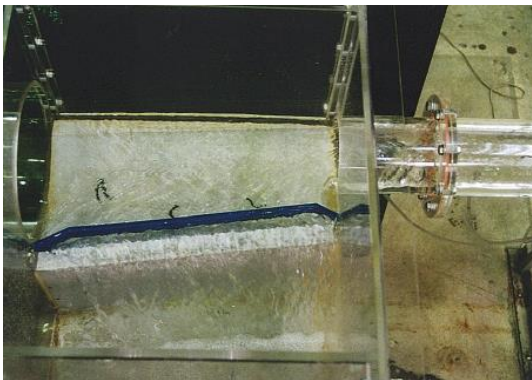


写真 3.4.⑤ ケース 3,10 mm/hr,ひも

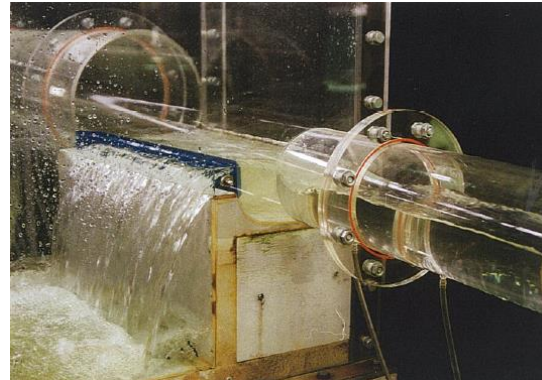


写真 3.4.⑥ ケース 3,10 mm/hr,ひも

## (2) 横越流タイプ2 (ケース4,5,6,7,8)

### 1) ケース4,5,6の実験結果

対策なしのケース4を流速式水面制御の横型制御板方式(ケース5:横型制御板単独)とガイドウォール方式(ケース6:横型制御板とガイドウォール)について、浮遊性夾雑物(スーパーボール)と沈降性夾雑物(ひも)の捕捉率を図3.7.1, 写真3.5.①~3.7.④に示す。

なお、沈降性夾雑物(ひも)の3Q, 5Q, 10Qは実験を行っていない。

### 2) ケース7,8の実験結果

渦流式水面制御の縦型制御板方式(ケース7:縦型制御板単独)とガイドウォール方式(ケース8:縦型制御板とガイドウォール)について、浮遊性夾雑物(スーパーボール)と沈降性夾雑物(ひも)の捕捉率を、比較のためにケース4を加えて図3.7.2, 写真3.8.①~3.9.⑤に示す。なお、沈降性夾雑物(ひも)の3Q, 5Q, 10Qは実験を行っていない。

### 3) 対策効果の考察

現状(ケース4)の対策なしでは、浮遊性夾雑物の場合、すべての流量で浮遊性夾雑物が堰を越流して放流管へ流出(捕捉率0%)する。沈降性夾雑物の場合は、10 mm/hrから15Qは50%程度が遮集管に捕捉される結果が出たものの、20Qでは捕捉率0%であった。なお、

捕捉されない沈降性夾雑物は堰を越流せず、雨水吐き室内に漂っている。

<流速式水面制御：ケース 5,6>

制御板方式（横型制御板単独）では、浮遊性夾雑物の場合 3Q で 100%遮集管に捕捉されるが、5Q で 37%、10Q 以上では 0%と捕捉効果は見られない。また、沈降性夾雑物の場合、15Q で 96%の捕捉率となったが、5Q と 20Q は 10%と非常に低い捕捉率であった。

ガイドウォール方式（ガイドウォールと横型制御板）では、浮遊性夾雑物の場合 3Q で 100%、5Q では 95%の捕捉率となり高い効果があるものの、10Q 以上の流量では捕捉効果は見られない。また、沈降性夾雑物の場合、10 mm/hr で 10%、15Q で 38%と低い、20Q では 99%と高い捕捉率であった。

<渦流式水面制御：ケース 7,8>

制御板方式（縦型制御板）では、10 mm/hr までの流量に対して渦流は生成されている。

浮遊性夾雑物の場合 3Q では 100%であるが、5Q で 18%、10Q で 6%、10 mm/hr 以上の流量で 0%と急激に効果が下がる。沈降性夾雑物では、10 mm/hr で 21%、15Q で 45%、20Q で 59%と流量の増加と共に捕捉率が増加している。

ガイドウォール方式（ガイドウォールと縦型制御板）では、10 mm/hr までの流量に対して渦流は生成されている。

浮遊性夾雑物の場合 3Q で 100%、5Q で 95%と高い捕捉率であるが、10 mm/hr 以下では 0%となり、捕捉効果がない。沈降性夾雑物の場合は、10 mm/hr で 10%、15Q で 38%、20Q で 99%と流量の増加と共に捕捉率が高くなる。

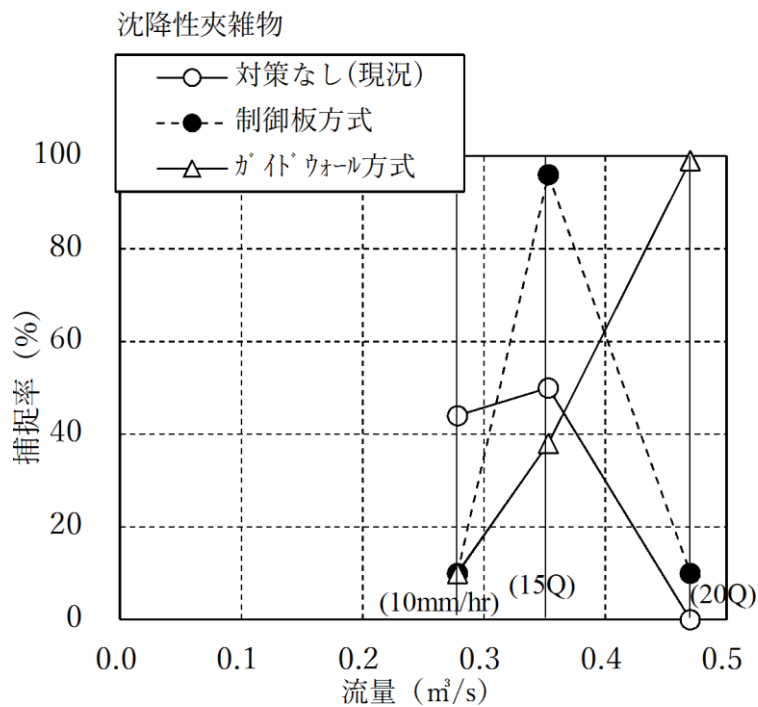
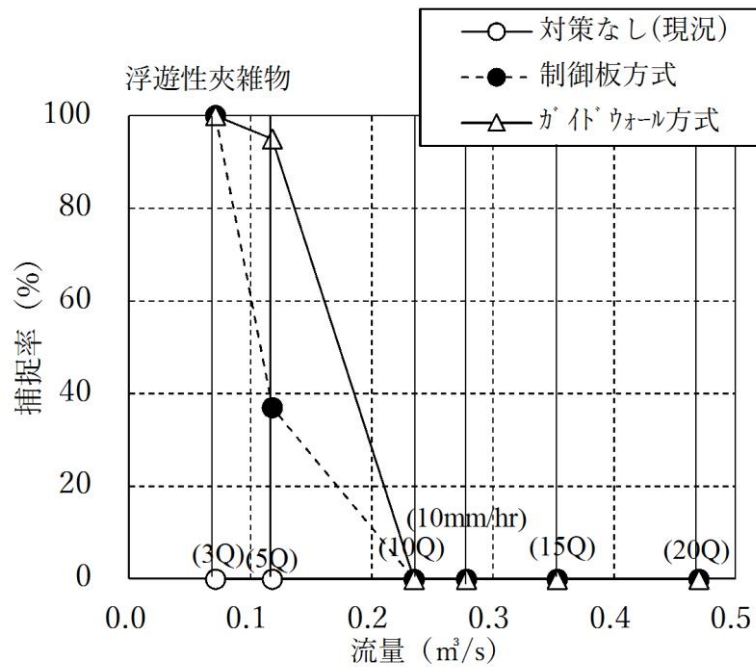


図 3.7.1 流量と捕捉率の関係 (横越流タイプ2, ケース 4,5,6)

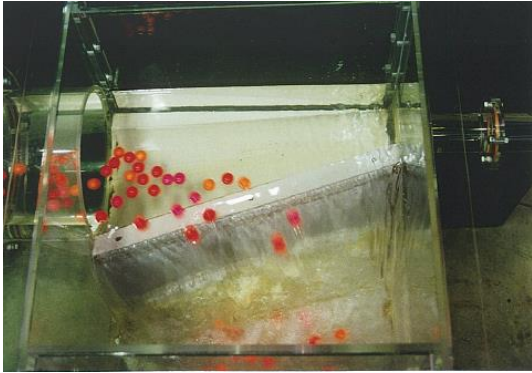


写真 3.5.① ケース 4, 10 mm/hr, スーパーボール

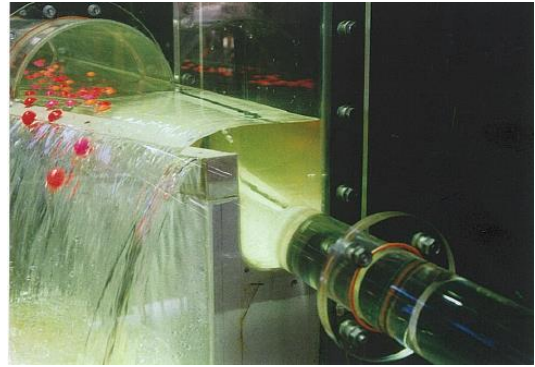


写真 3.5.② ケース 4, 10 mm/hr, スーパーボール



写真 3.5.③ ケース 4, 10 mm/hr, ひも

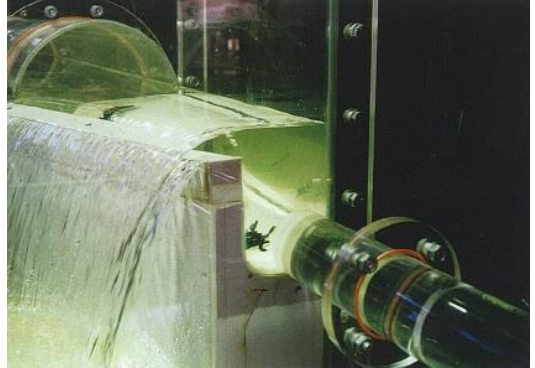


写真 3.5.④ ケース 4, 10 mm/hr, ひも

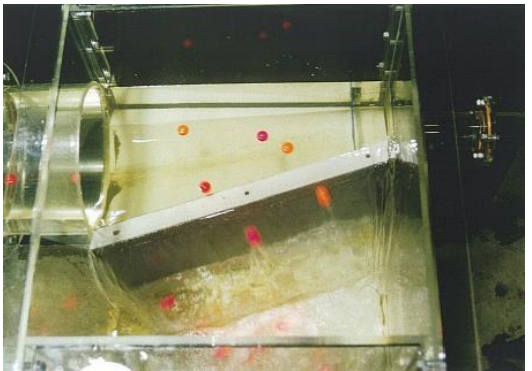


写真 3.6.① ケース 5, 10 mm/hr, スマートボール

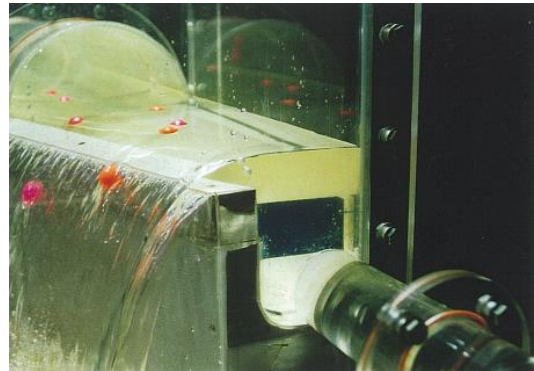


写真 3.6.② ケース 5, 10 mm/hr, スマートボール

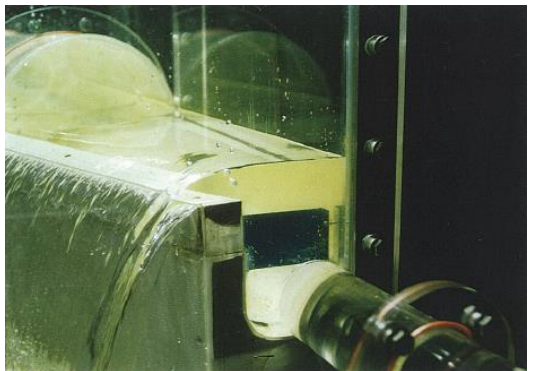
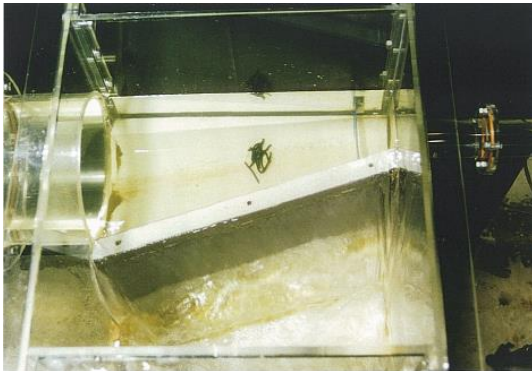


写真 3.6.③ ケース 5,10 mm/hr,ひも

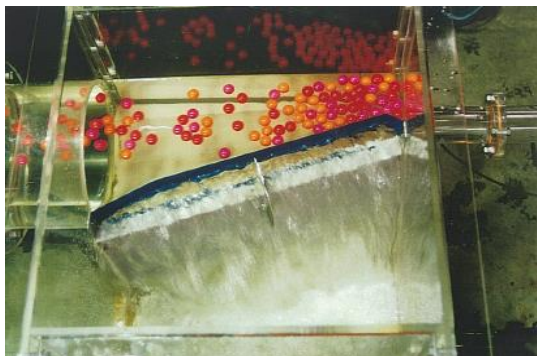


写真 3.6.④ ケース 5,10 mm/hr,ひも



写真 3.7.① ケース 6,10 mm/hr,スマートボール

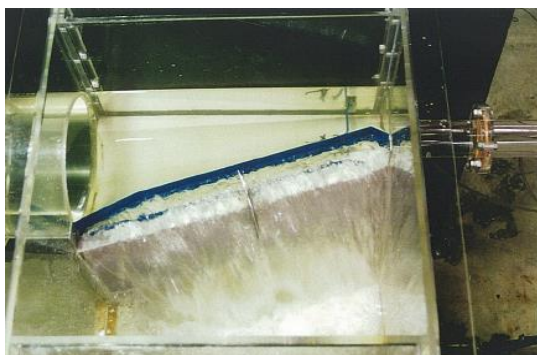


写真 3.7.② ケース 6,10 mm/hr,スマートボール



写真 3.7.③ ケース 6,10 mm/hr,ひも

写真 3.7.④ ケース 6,10 mm/hr,ひも

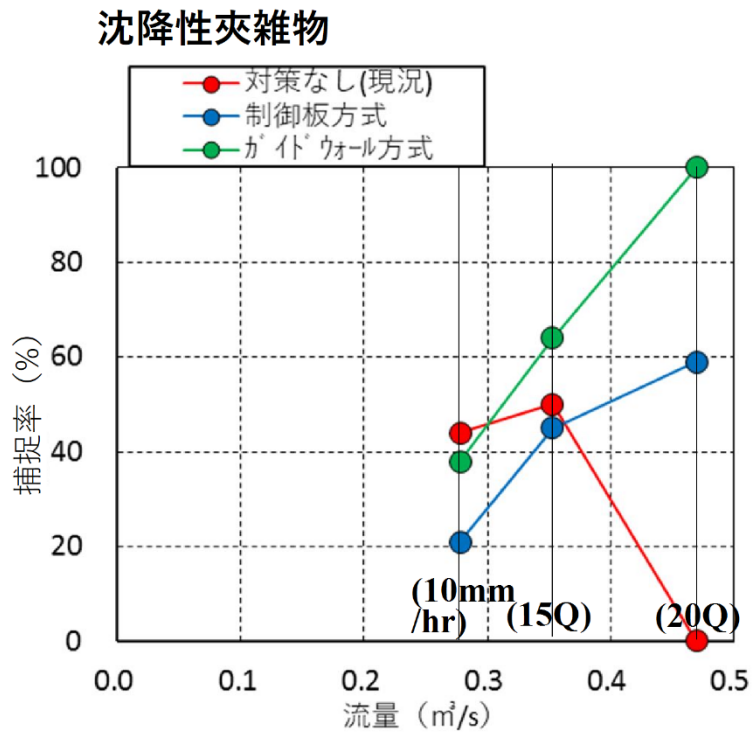
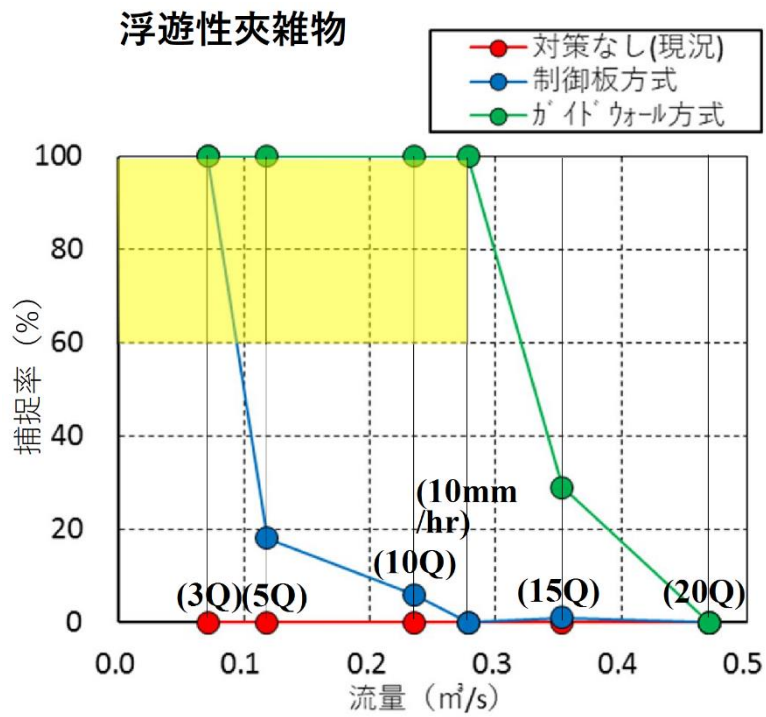


図 3.7.2 流量と捕捉率の関係 (横越流タイプ 2, ケース 7,8)

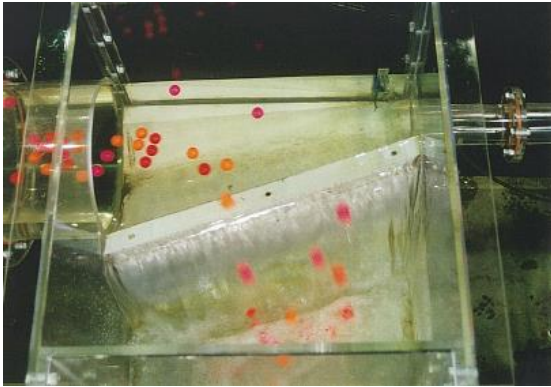


写真 3.8.① ケース 7,10 mm/hr,スマートボール

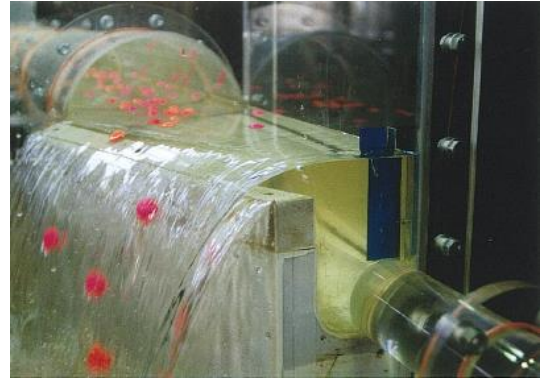


写真 3.8.② ケース 7,10 mm/hr,スマートボール

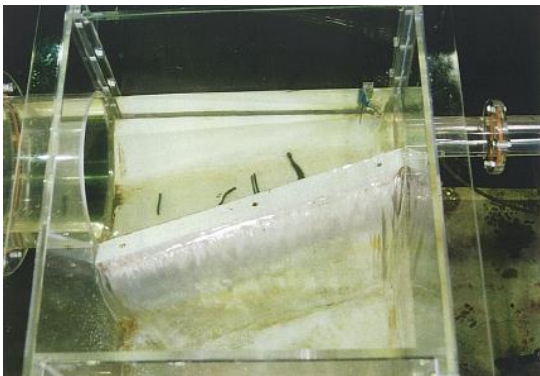


写真 3.8.③ ケース 7,10 mm/hr,ひも

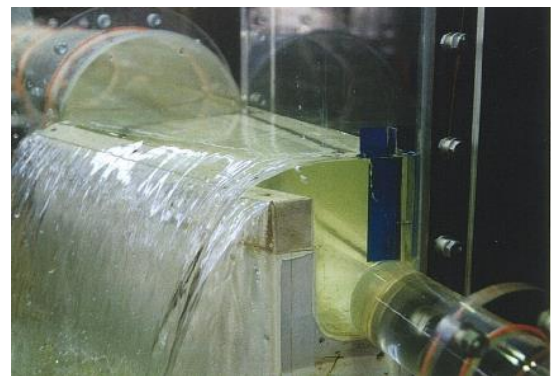


写真 3.8.④ ケース 7,10 mm/hr,ひも

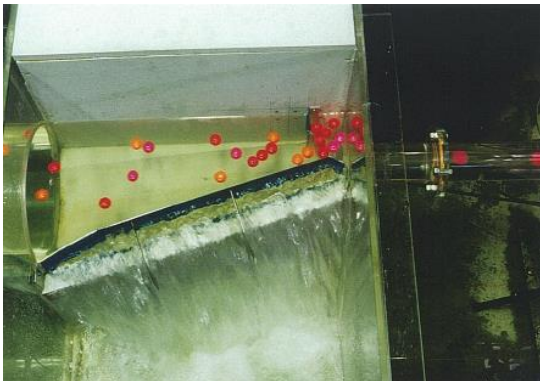


写真 3.9.① ケース 8,10 mm/hr,スマートボール

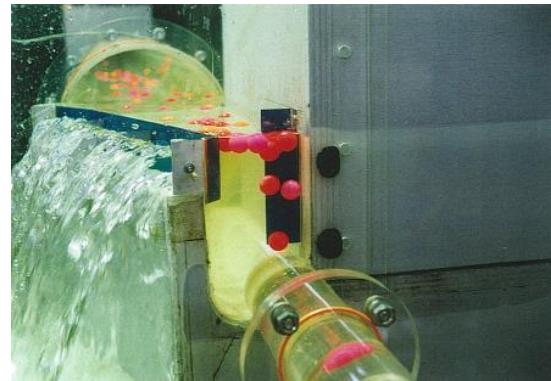


写真 3.9.② ケース 8,10 mm/hr,スマートボール

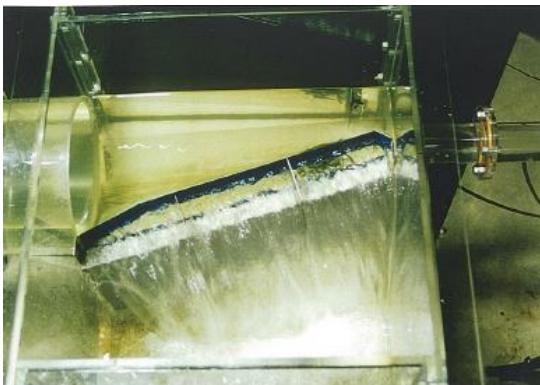


写真 3.9.④ ケース 8,10 mm/hr,ひも

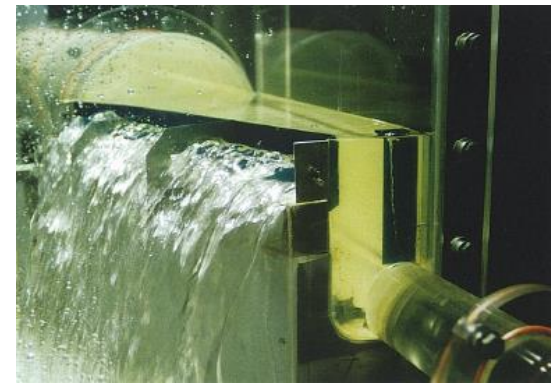


写真 3.9.⑤ ケース 8,10 mm/hr,ひも



### (3) 横越流タイプ3 (ケース 9,10,11,12,13)

#### 1) ケース 9,10,11 の実験結果

対策なしのケース 9 と流速式水面制御の横型制御板方式 (ケース 10: 横型制御板単独), ガイドウォール方式 (ケース 11: 横型制御板とガイドウォール) について浮遊性夾雑物 (スーパーボール) と沈降性夾雑物 (ひも) の捕捉率を図 3.8.1, 写真 3.10.①~3.12.④に示す.

なお, 沈降性夾雑物 (ひも) の 3Q, 5Q, 10Q は実験を行っていない.

#### 2) ケース 12,13 の実験結果

渦流式水面制御の縦型制御板方式 (ケース 12: 縦型制御板のみ) とガイドウォール方式 (ケース 13: 縦型制御板とガイドウォール) について, 浮遊性夾雑物 (スーパーボール) と沈降性夾雑物 (ひも) の捕捉率を, 比較のためにケース 9 を加えて図 3.8.2, 写真 3.13.①~3.14.④に示す. なお, 沈降性夾雑物 (ひも) の 3Q, 5Q, 10Q は実験を行っていない.

#### 3) 対策効果の考察

現状 (ケース 9) の対策なしでは, 浮遊性夾雑物の場合, すべての流量で浮遊性夾雑物が堰を越流して放流管へ流出 (捕捉率 0%) する. 沈降性夾雑物の場合は, 10 mm/hr から 20Q まで 100%遮集管に捕捉される.

##### <流速式水面制御: ケース 10,11>

制御板方式 (横型制御板単独) では, 浮遊性夾雑物の場合 3Q で 100%遮集管に捕捉されるが, 5Q で 5%, 10Q 以上の流量では 0%と捕捉効果は見られない. また, 沈降性夾雑物の場合, 10 mm/hr で 68%, 15Q で 100%, 20Q で 99%と高い捕捉率であった.

ガイドウォール方式 (ガイドウォールと横型制御板) では, 浮遊性夾雑物の場合 3Q で 100%あったが, 5Q で 16%, 10 mm/hr 以上の流量では捕捉効果は見られない. また, 沈降性夾雑物の場合, 10 mm/hr で 45%, 15Q で 85%, 20Q で 100%と流量の増加と共に高い捕捉率であった.

##### <渦流式水面制御: ケース 12,13>

制御板方式 (縦型制御板) では, 10 mm/hr までの流量に対して渦流は生成されている.

浮遊性夾雑物の場合 3Q では 100%あるが, 5Q で 36%, 10Q で 6%, 10 mm/hr 以上の流量で 0%と急激に効果が下がる. 沈降性夾雑物では, 10 mm/hr で 68%, 15Q と 20Q で 100%と高い捕捉率となっている.

ガイドウォール方式 (ガイドウォールと縦型制御板) では, 10 mm/hr までの流量に対して渦流は生成されている.

浮遊性夾雑物の場合 3Q で 100%, 5Q で 93%, 10 mm/hr で 83%と高い捕捉率であるが, 15Q と 20Q では 0%と効果がない. 沈降性夾雑物の場合は, 10 mm/hr, 15Q, 20Q とともに 100%と共に高い捕捉効果が出ている.

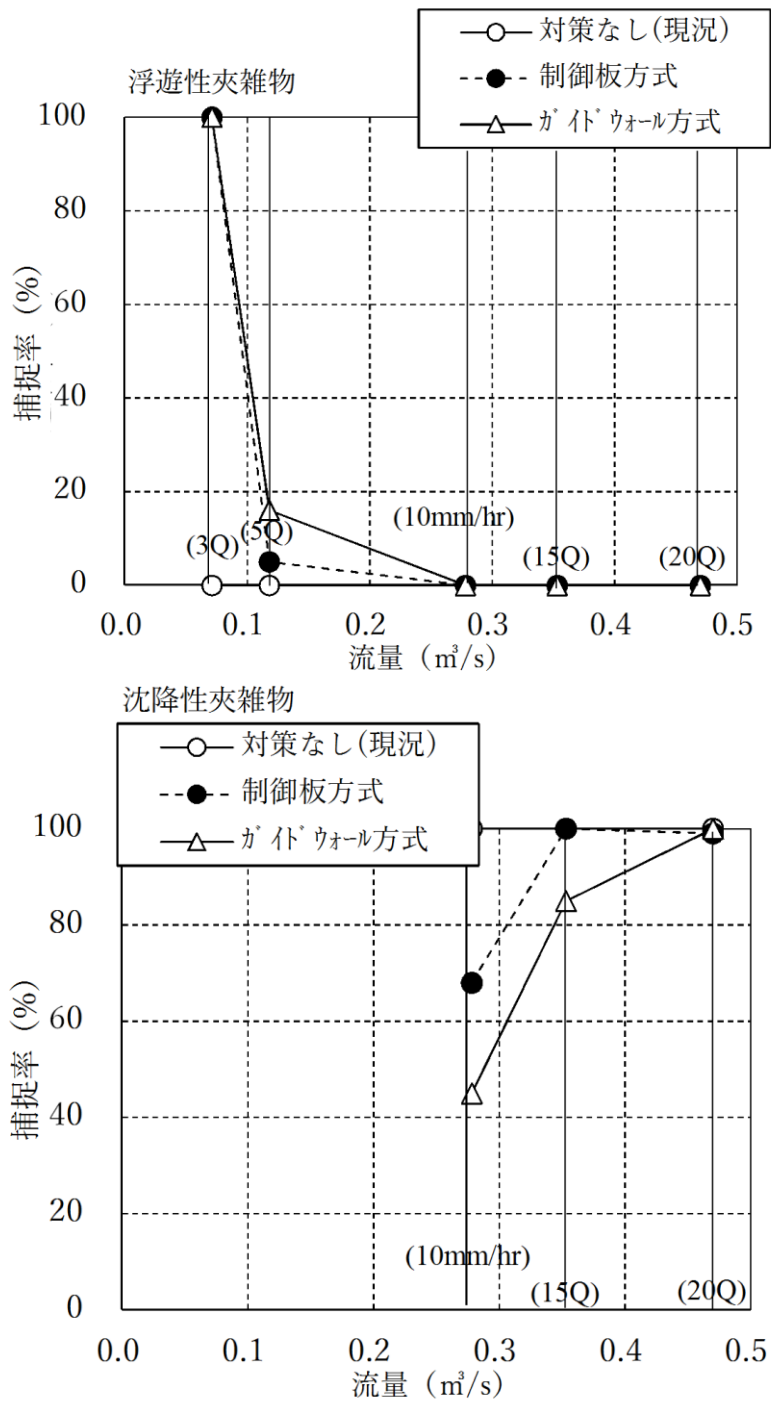


図 3.8.1 流量と捕捉率の関係 (横越流タイプ3, ケース 9,10,11)

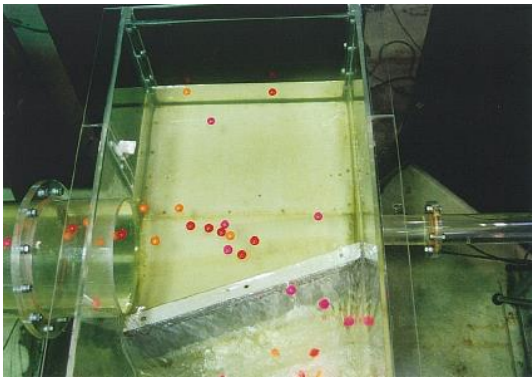


写真 3.10.① ケース 9,10 mm/hr,スパーボール

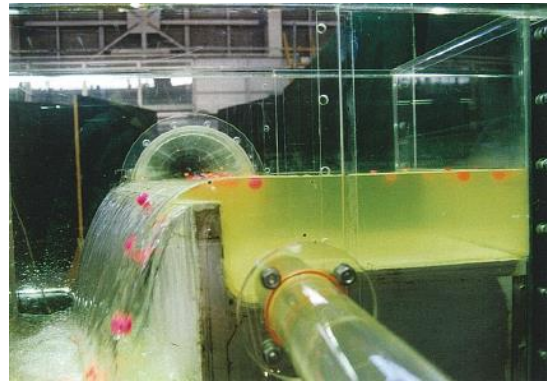


写真 3.10.② ケース 9,10 mm/hr スパーボール

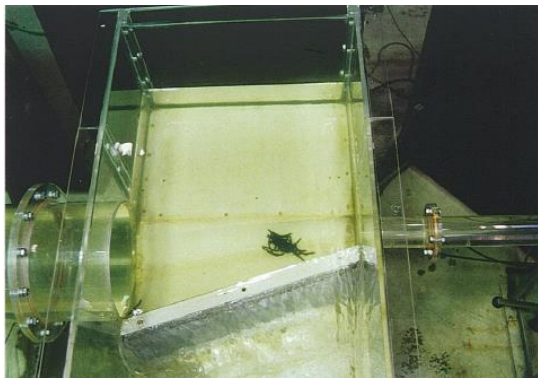


写真 3.10.③ ケース 9,10 mm/hr,ひも



写真 3.10.④ ケース 9,10 mm/hr,ひも

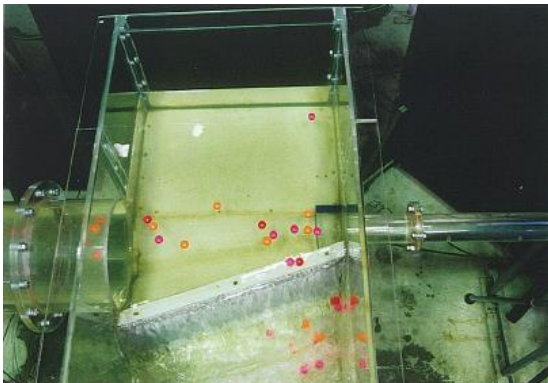


写真 3.11.① ケース 10,10 mm/hr,スパーボール

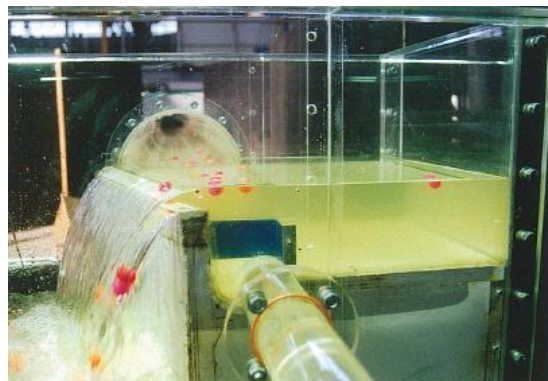


写真 3.11.② ケース 10,10 mm/hr,スパーボール

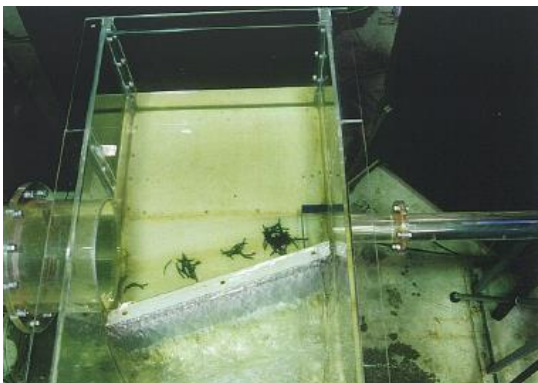


写真 3.11.③ ケース 10,10 mm/hr,ひも

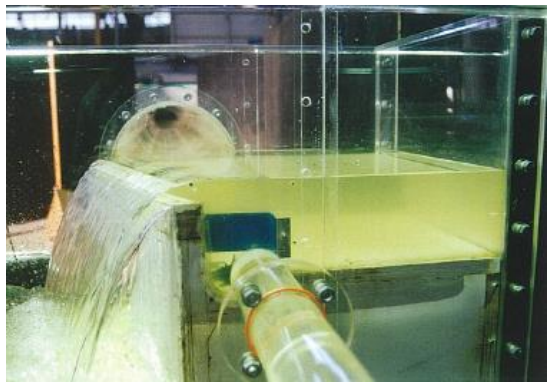


写真 3.11.④ ケース 10,10 mm/hr,ひも

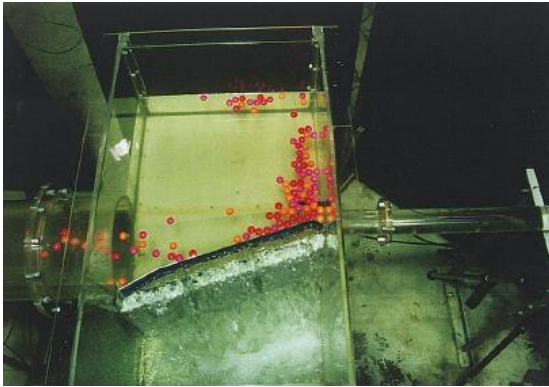


写真 3.12.① ケース 11,10 mm/hr,スーパースポール

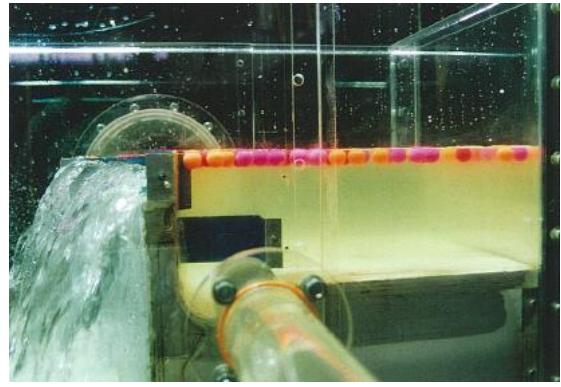


写真 3.12.② ケース 11,10 mm/hr,スーパースポール



写真 3.12.③ ケース 11,10 mm/hr,ひも

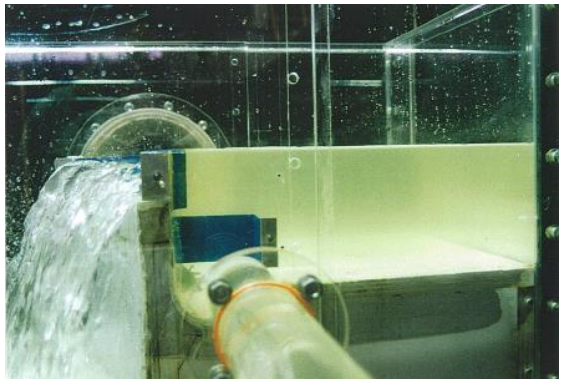


写真 3.12.④ ケース 11,10 mm/hr,ひも

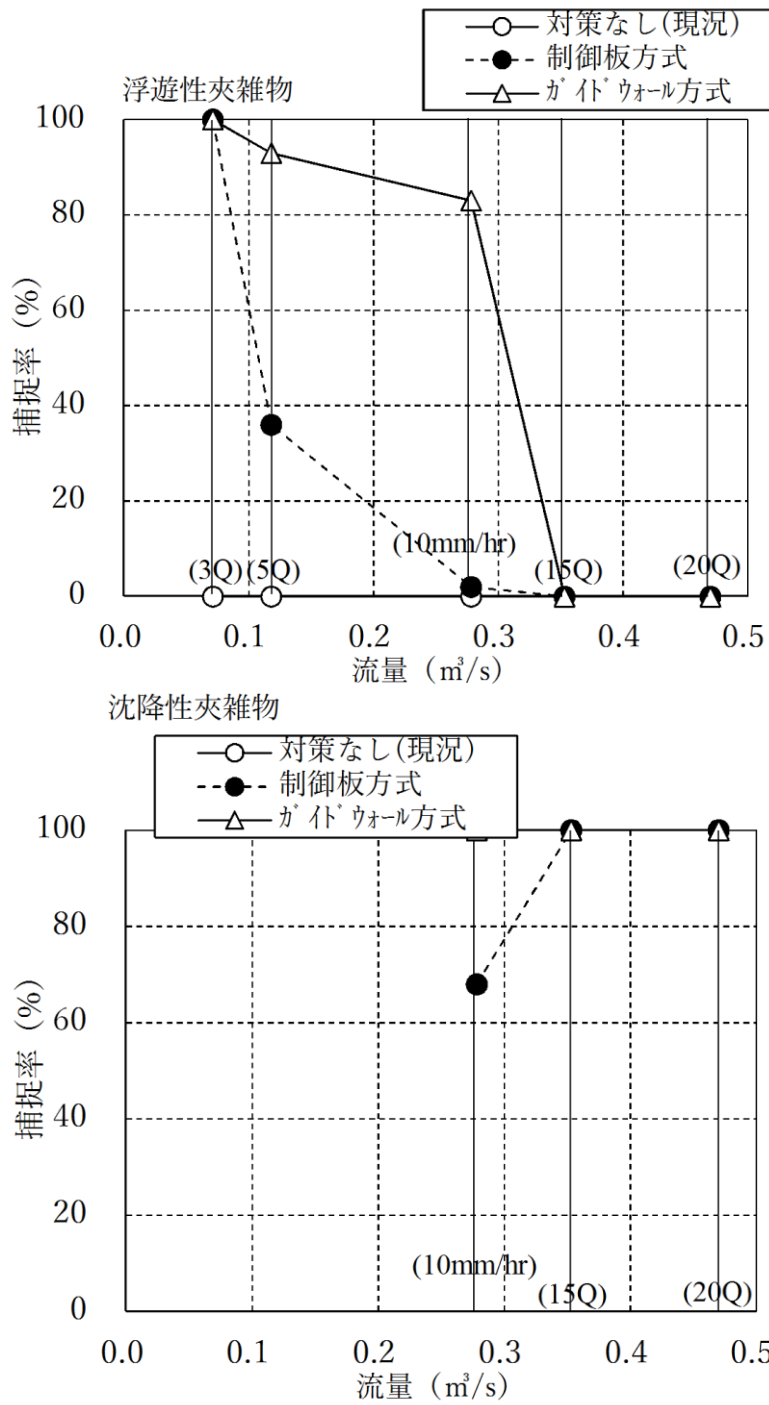


図 3.8.2 流量と捕捉率の関係 (横越流タイプ3, ケース 9,12,13)

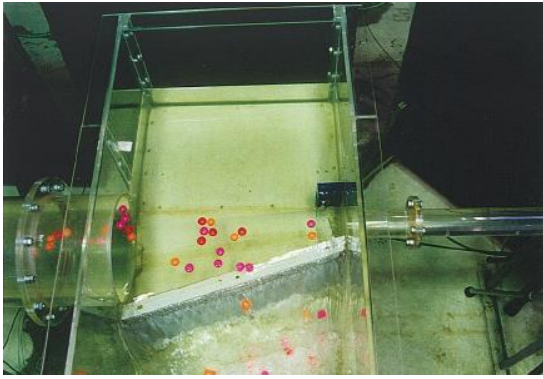


写真 3.13.① ケース 12,10 mm/hr,スパーボール

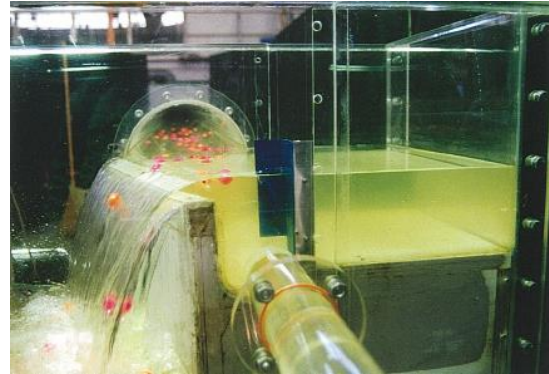


写真 3.13.② ケース 12,10 mm/hr,スパーボール

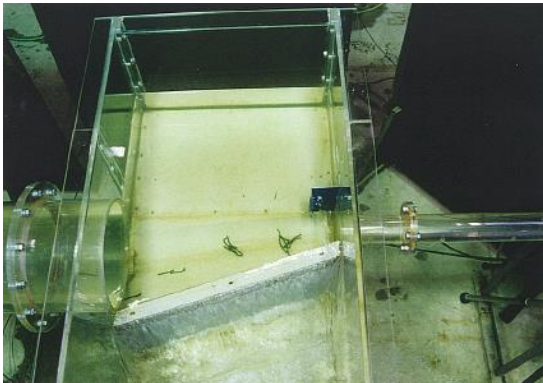


写真 3.13.③ ケース 12,10 mm/hr,ひも

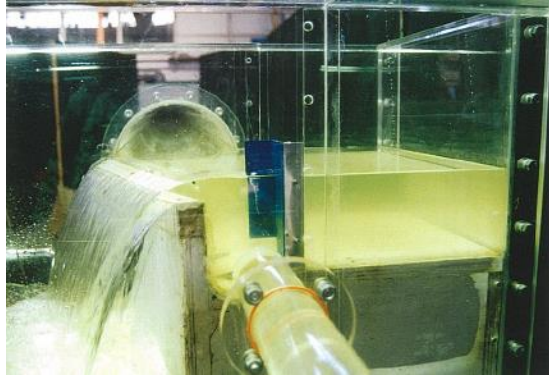


写真 3.13.④ ケース 12,10 mm/hr,ひも



写真 3.14.① ケース 13,10 mm/hr,スパーボール

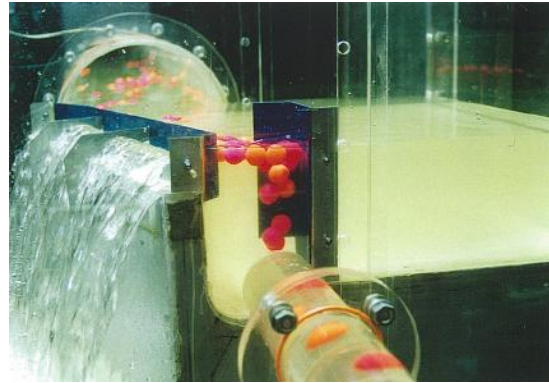


写真 3.14.② ケース 13,10 mm/hr,スパーボール



写真 3.14.③ ケース 13,10 mm/hr,ひも

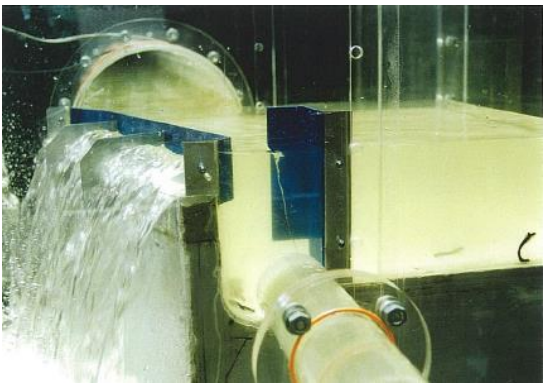


写真 3.14.④ ケース 13,10 mm/hr,ひも

#### (4) 横越流タイプ4 (ケース 14,15,16,17,18)

##### 1) ケース 14,15,16 の実験結果

対策なしのケース 14 と流速式水面制御の制御板方式 (ケース 15: 横型制御板単独), ガイドウォール方式 (ケース 16: 横型制御板とガイドウォール) について浮遊性夾雑物 (スーパーボール) と沈降性夾雑物 (ひも) の捕捉率を図 3.9.1, 写真 3.15.①~3.17.④に示す.

なお, 沈降性夾雑物 (ひも) の 3Q, 5Q, 10Q は実験を行っていない.

##### 2) ケース 17,18 の実験結果

渦流式水面制御の制御板方式 (ケース 17: 縦型制御板単独) とガイドウォール方式 (ケース 18: 縦型制御板とガイドウォール) について, 浮遊性夾雑物 (スーパーボール) と沈降性夾雑物 (ひも) の捕捉率を, 比較のためにケース 14 (対策なし) を加えて図 3.9.2, 写真 3.18.①~3.19.④に示す. なお, 沈降性夾雑物 (ひも) の 3Q, 5Q, 10Q は実験を行っていない.

##### 3) 対策効果の考察

現状 (ケース 14) の対策なしでは, 浮遊性夾雑物の場合, すべての流量で浮遊性夾雑物が堰を越流して放流管へ流出 (捕捉率 0%) する. 沈降性夾雑物の場合は, 10 mm/hr では 95%, 15Q, 20Q では 100%と高い率で遮集管に捕捉される.

###### <流速式水面制御: ケース 15,16>

制御板方式 (横型制御板単独) では, 浮遊性夾雑物の場合 3Q で 95%遮集管に捕捉されるが, 5Q で 24%, 10Q 以上の流量では 0%と捕捉効果は見られない. また, 沈降性夾雑物の場合, 10 mm/hr で 70%, 15Q で 94%, 20Q で 100%と高い捕捉率であった.

ガイドウォール方式(ガイドウォールと縦型制御板)では, 浮遊性夾雑物の場合 3Q で 96%あったが, 5Q で 4%, 10 mm/hr 以上の流量では捕捉効果は見られない. また, 沈降性夾雑物の場合, 10 mm/hr で 11%と低いが, 15Q で 99%, 20Q で 100%と高い捕捉率であった.

###### <渦流式水面制御: ケース 17,18>

制御板方式 (縦型制御板単独) では, 10 mm/hr までの流量に対して渦流は生成されている.

浮遊性夾雑物の場合 3Q では 95%あるが, 5Q で 29%, 10Q で 3%, 10 mm/hr 以上の流量ではほぼ 0%と急激に捕捉効果が下がる. 沈降性夾雑物では, 10 mm/hr で 93%, 15Q と 20Q で 100%と高い捕捉率となっている.

ガイドウォール方式 (ガイドウォールと縦型制御板) では, 10 mm/hr までの流量に対して渦流は生成されている.

浮遊性夾雑物の場合 3Q で 100%, 5Q で 98%, 10Q で 99%, 10 mm/hr で 100%と高い捕捉率であった. しかし, 20Q では 0%と急激に捕捉効果がなくなった. 沈降性夾雑物

の場合は、10 mm/hr で88%、15Q で96%、20Q で95%と共に高い捕捉効果が出ている。

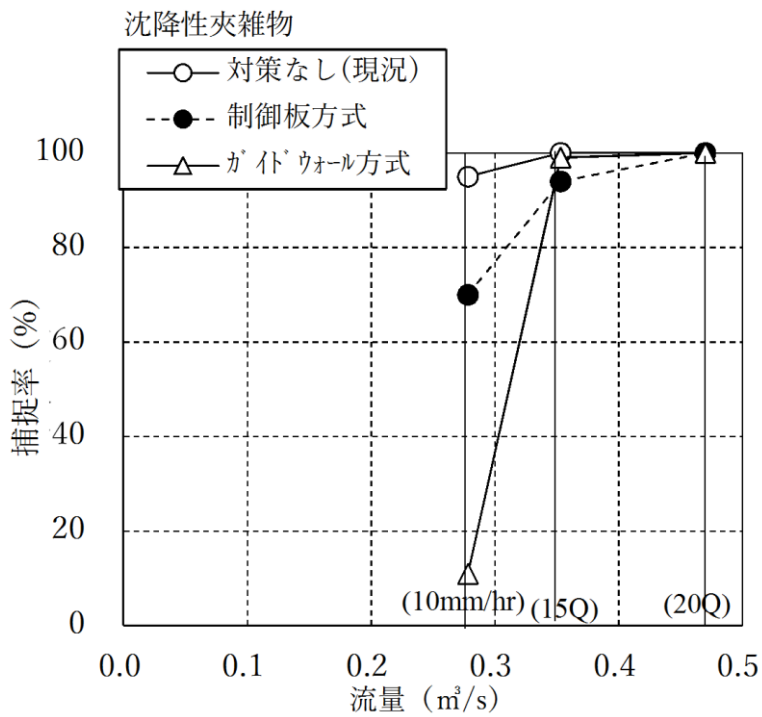
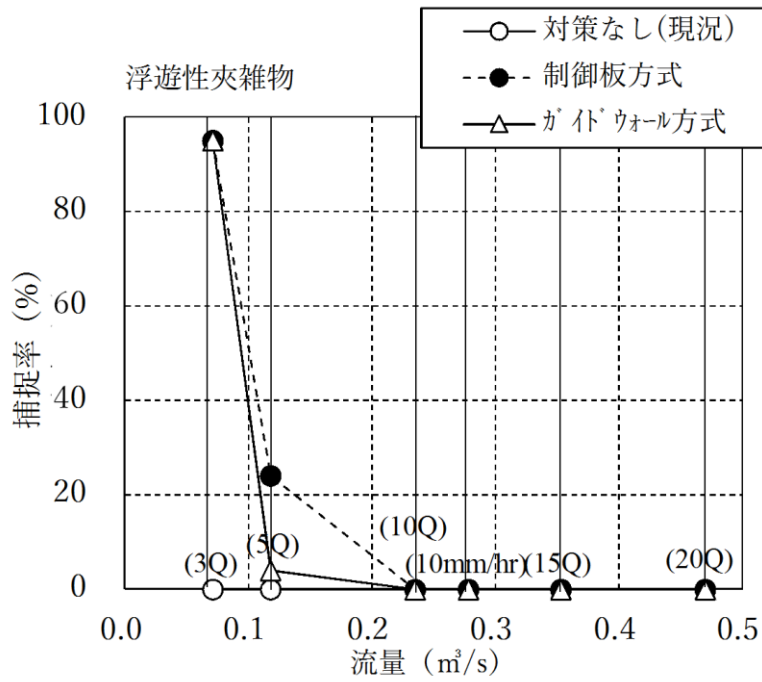


図 3.9.1 流量と捕捉率の関係 (横越流タイプ4, ケース 14,15,16)



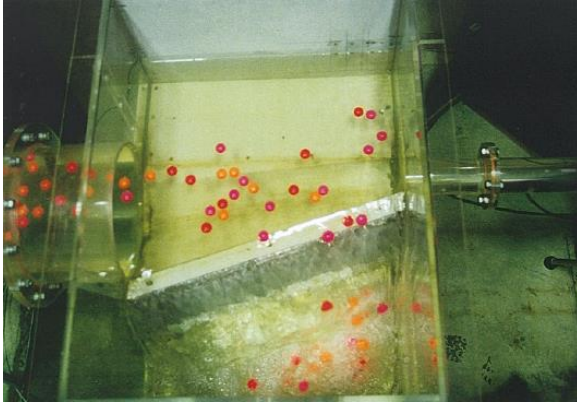


写真 3.15.① ケース 14,10 mm/hr,スパーボール

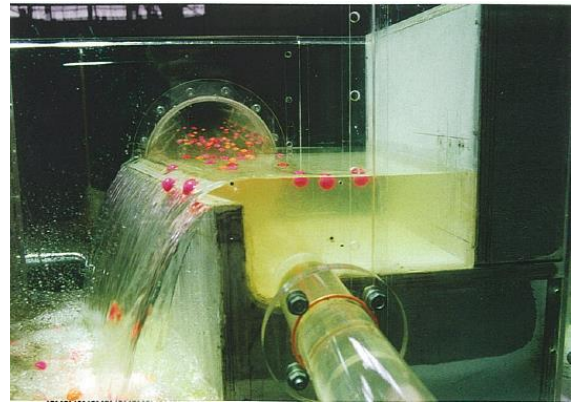


写真 3.15.② ケース 14,10 mm/hr,スパーボール

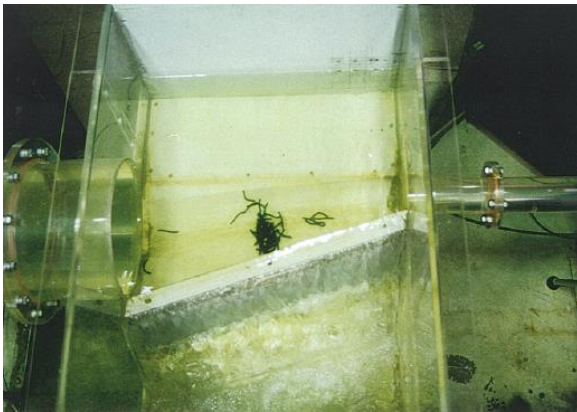


写真 3.15.③ ケース 14,10 mm/hr,ひも

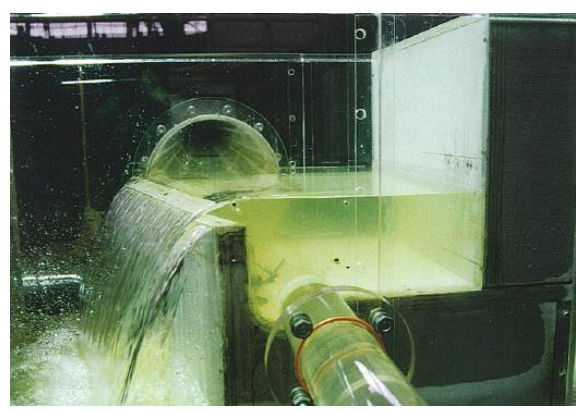


写真 3.15.④ ケース 14,10 mm/hr,ひも

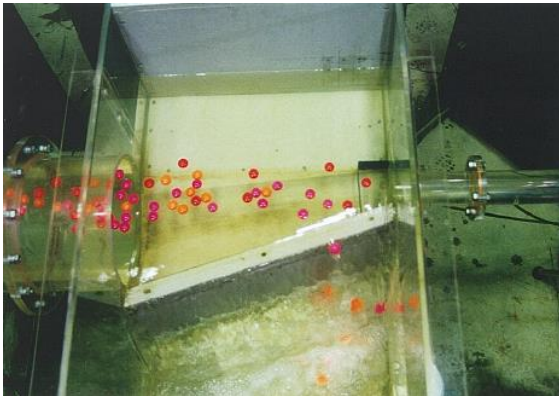


写真 3.16.① ケース 15,10 mm/hr,スパーボール

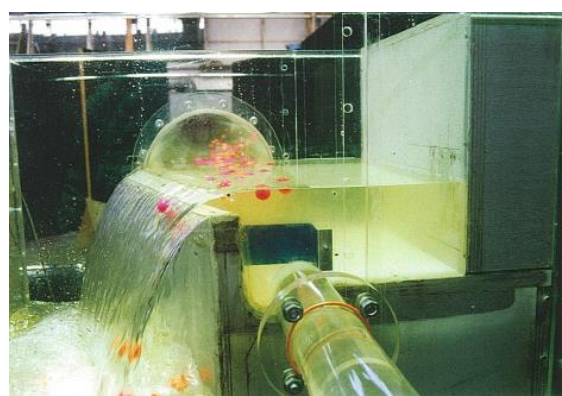


写真 3.16.② ケース 15,10 mm/hr,スパーボール



写真 3.16.③ ケース 15,10 mm/hr,ひも



写真 3.16.④ ケース 15,10 mm/hr,ひも

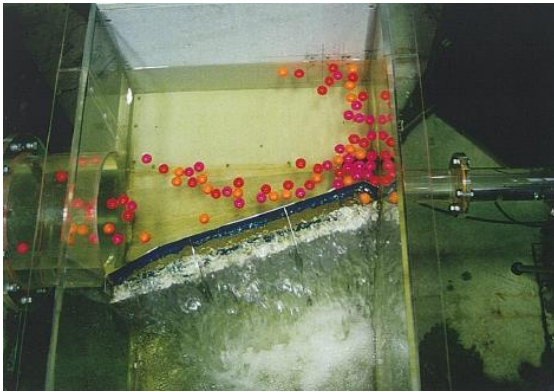


写真 3.17.① ケース 16,10 mm/hr,スパーホール

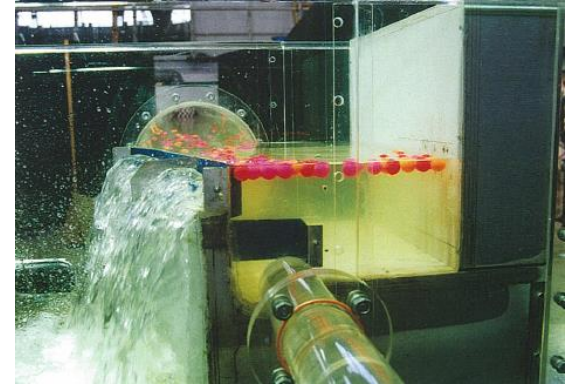


写真 3.17.② ケース 16,10 mm/hr,スパーホール



写真 3.17.③ ケース 16,10 mm/hr,ひも



写真 3.17.④ ケース 16,10 mm/hr,ひも

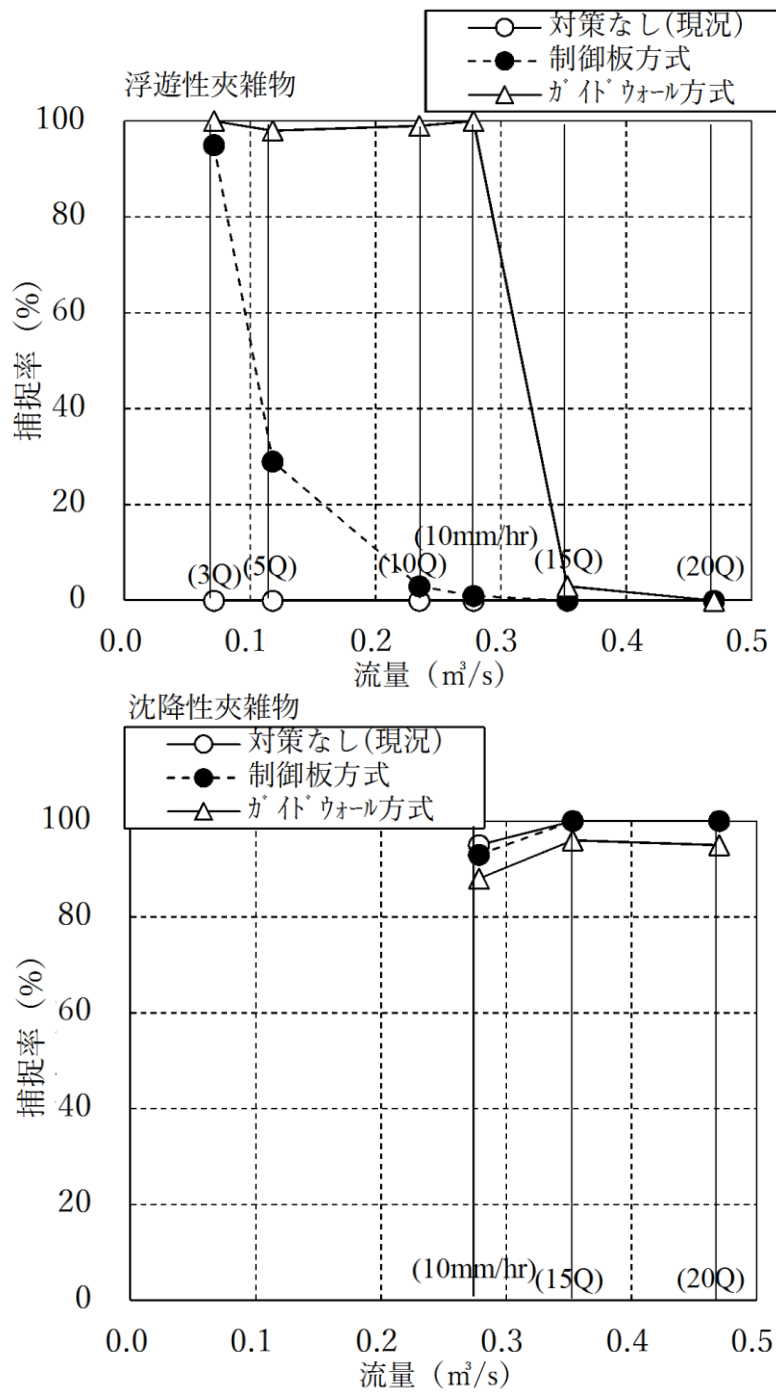


図 3.9.2 流量と遮集率の関係 (横越流タイプ 4, ケース 14, 17, 18)

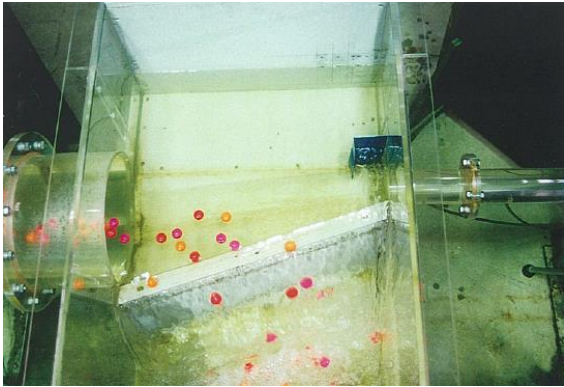


写真 3.18.① ケース 17,10 mm/hr,スパーボール

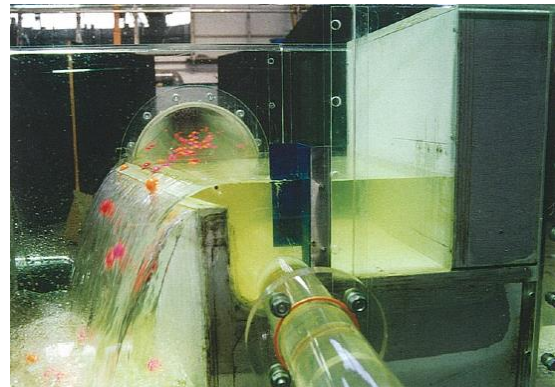


写真 3.18.② ケース 17,10 mm/hr,スパーボール



写真 3.18.③ ケース 17,10 mm/hr,ひも



写真 3.18.④ ケース 17,10 mm/hr,ひも

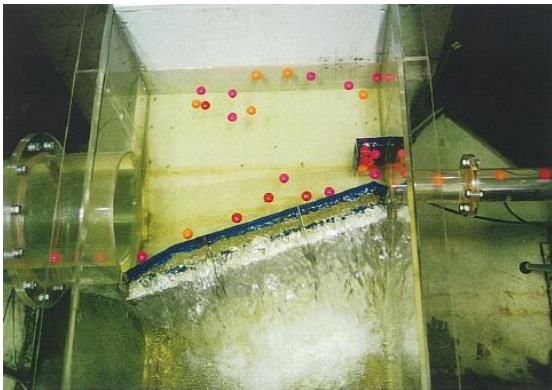


写真 3.19.① ケース 18,10 mm/hr,スパーボール



写真 3.19.② ケース 18,10 mm/hr,スパーボール



写真 3.19.③ ケース 18,10 mm/hr,ひも

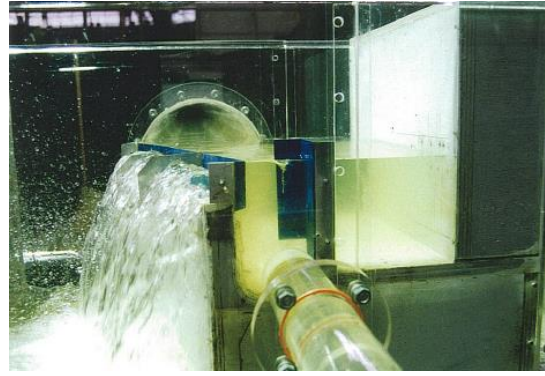


写真 3.19.④ ケース 18,10 mm/hr,ひも

(5) 正面越流タイプ1 (ケース 19,20,21,22,23)

1) ケース 19,20,21 の実験結果

対策なしのケース 19 と流速式水面制御の制御板方式 (ケース 20: 横型制御板単独), ガイドウォール方式 (ケース 21: 横型制御板とガイドウォール) について, 浮遊性夾雑物 (スーパーボール) と沈降性夾雑物 (ひも) の遮集率を図 3.10.1, 写真 3.20.①~3.22.④に示す. なお, 沈降性夾雑物 (ひも) の 3Q, 5Q, 10Q は実験を行っていない.

2) ケース 22,23 の実験結果

渦流式水面制御の制御板方式 (ケース 22: 縦型制御板単独) とガイドウォール方式 (ケース 23: 縦型制御板とガイドウォール) について, 浮遊性夾雑物 (スーパーボール) と沈降性夾雑物 (ひも) の遮集率を, 比較のためにケース 19 を加えて図 3.10.2, 写真 3.23.①~3.24.④に示す. なお, 沈降性きょう雑物 (ひも) の 3Q, 5Q, 10Q は実験を行っていない.

これまで進めてきた実験から, ガイドウォールの設置角度により浮遊性夾雑物の捕捉に影響があるのではないかという課題があった. このことから, ガイドウォールの角度を 0 度, 15 度, 30 度の 3 通りについて, 制御板長を 0.5D, 0.6D でそれぞれの捕捉量の違いを実験で確認した.

結果は, 表 3.6 のとおりであり, ガイドウォールの角度による違いはないものと判断し, 角度をつけな (0 度) として, 実験を継続することとした.

表 3.6 ガイドウォールの角度による遮集量の違い

制御板長	ガイドウォールの角度		
	0 度	1 5 度	3 0 度
0. 5 D	9 3 %	9 1 %	9 6 %
0. 6 D	9 2 %	9 5 %	9 6 %

### 3)対策効果の考察

現状（ケース 19）の対策なしでは，浮遊性夾雑物の場合，すべての流量で浮遊性夾雑物が堰を越流して放流管へ流出（捕捉率 0%）する．沈降性夾雑物の場合は，10 mm/hr では 57%，15Q，20Q では 98%と高い率で遮集管に捕捉される．

<流速式水面制御：ケース 20,21>

制御板方式（横型制御板単独）では，浮遊性夾雑物の場合 3Q で 75%遮集管に捕捉されるが，5Q 以上の流量ではほぼ 0%と捕捉効果は見られない．また，沈降性夾雑物の場合，10 mm/hr で 30%であったが，15Q で 96%，20Q で 100%と高い捕捉率であった．

ガイドウォール方式（ガイドウォールと横型制御板）では，浮遊性夾雑物の場合 3Q で 76%あったが，5Q 以上の流量では 0%と捕捉効果は見られない．また，沈降性夾雑物の場合，15Q で 97%，20Q で 95%と高い捕捉率であった．

<渦流式水面制御：ケース 22,23>

制御板方式（縦型制御板単独）では，10 mm/hr までの流量に対して渦流は生成されている．

浮遊性夾雑物の場合 3Q では 83%あるが，5Q で 39%，10Q 以上の流量では 10%程度と低い捕捉率であった．沈降性夾雑物では，10 mm/hr で 92%，15Q で 98%，20Q で 95%と高い捕捉率となっている．

ガイドウォール方式（ガイドウォールと縦型制御板）では，10 mm/hr までの流量に対して渦流は生成されている．

浮遊性夾雑物の場合 3Q で 93%，5Q で 94%，10Q で 88%，10 mm/hr で 93%，15Q で 70%と高い捕捉率であった．しかし，20Q では 13%と急激に捕捉効果がなくなった．沈降性夾雑物の場合は，15Q，20Q で 93%と共に高い捕捉効果が出ている．

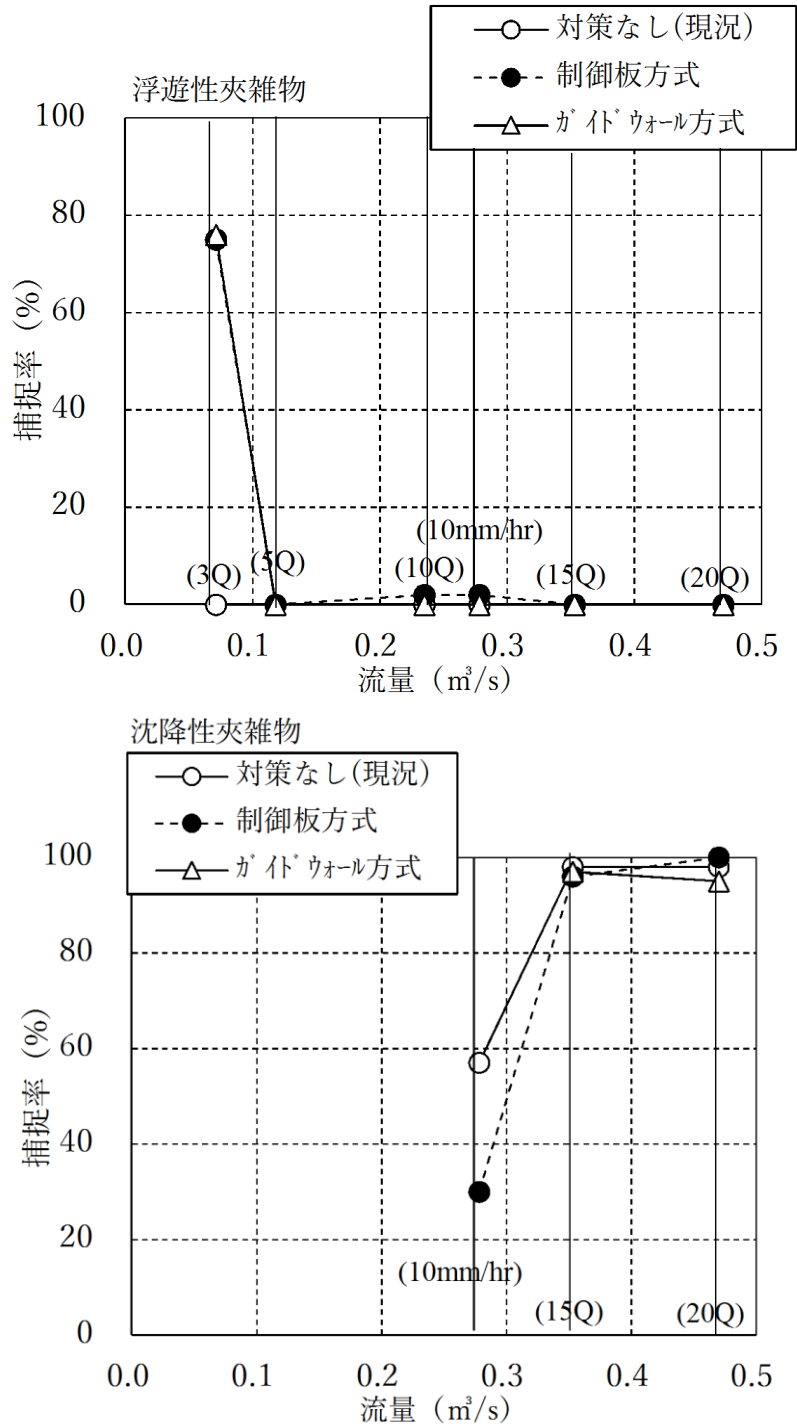


図 3.10.1 流量と捕捉率の関係 (正面越流タイプ1, ケース 19,20,21)

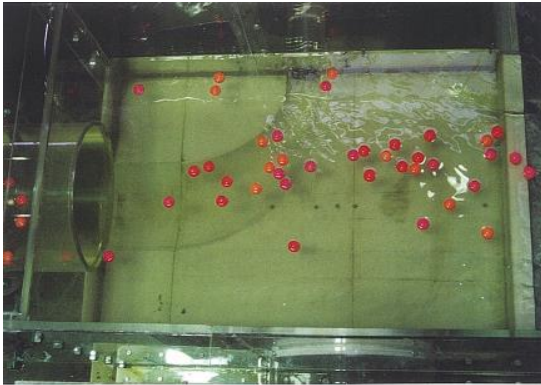


写真 3.20.① ケース 19,10 mm/hr,スパーボール

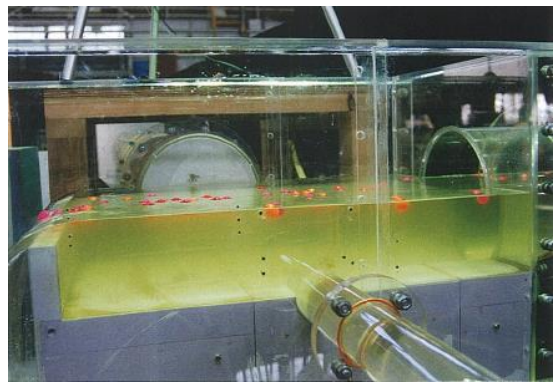


写真 3.20.② ケース 19,10 mm/hr,スパーボール

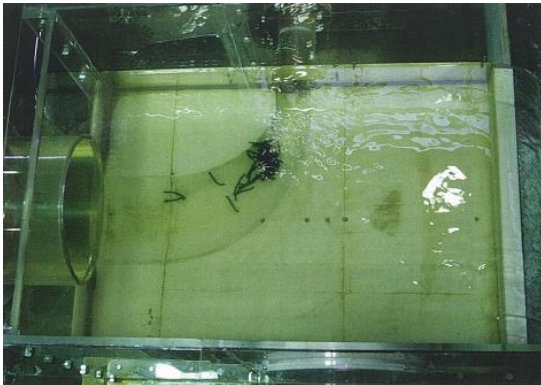


写真 3.20.③ ケース 19,10 mm/hr,ひも

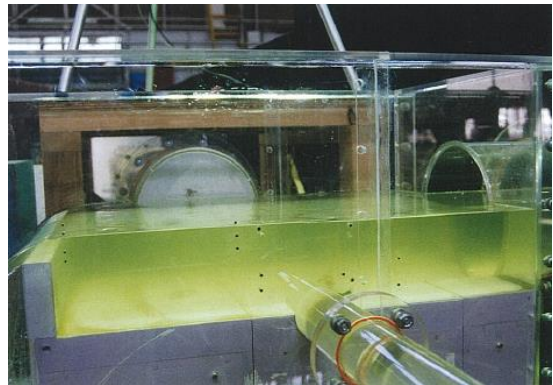


写真 3.20.④ ケース 19,10 mm/hr,ひも

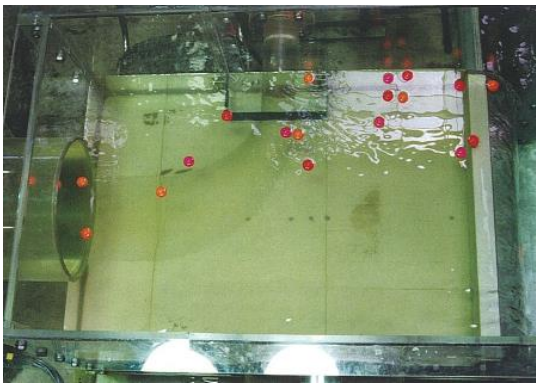


写真 3.21.① ケース 20,10 mm/hr,スパーボール

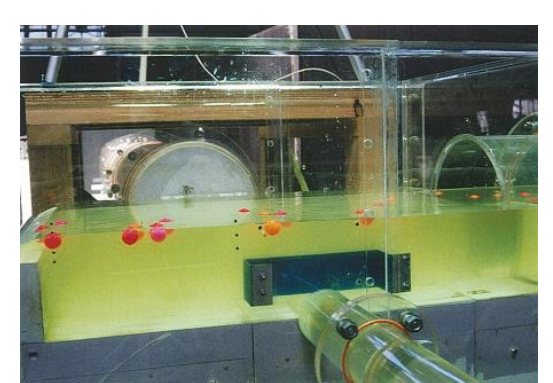


写真 3.21.② ケース 20,10 mm/hr,スパーボール

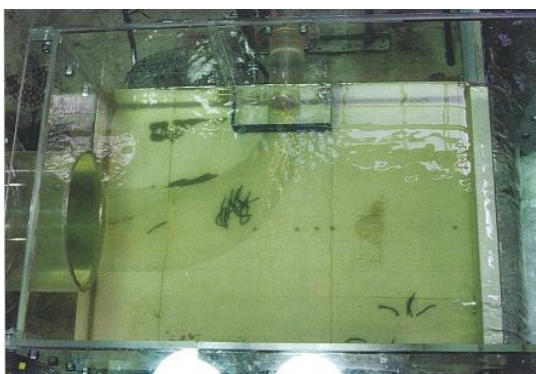


写真 3.21.③ ケース 20,10 mm/hr,ひも

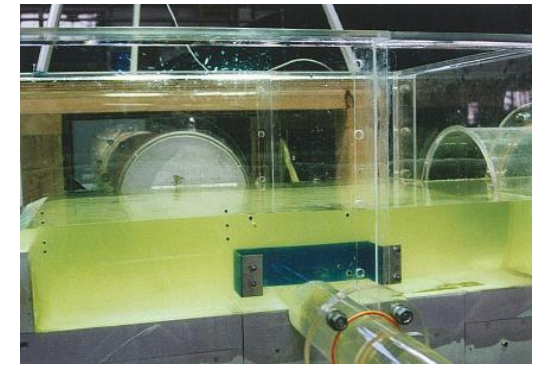


写真 3.21.④ ケース 20,10 mm/hr,ひも



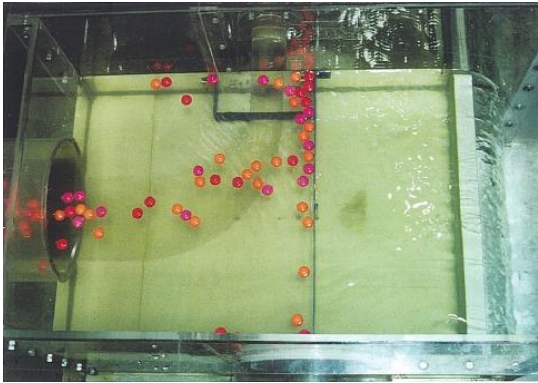


写真 3.22.① ケース 21,10 mm/hr,スーパースポール

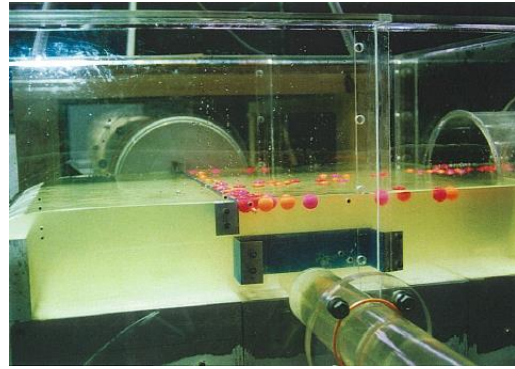


写真 3.22.② ケース 21,10 mm/hr,スーパースポール

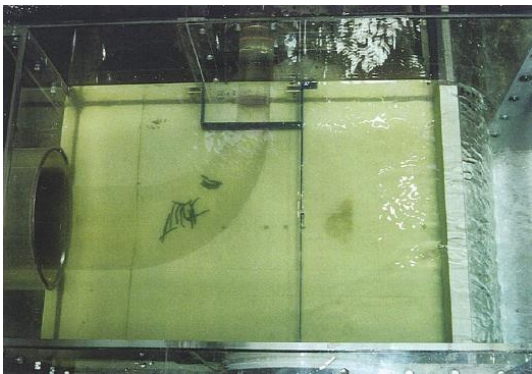


写真 3.22.③ ケース 21,10 mm/hr,ひも

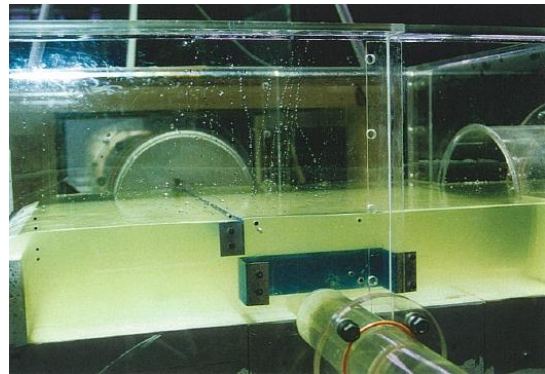


写真 3.22.④ ケース 21,10 mm/hr,ひも

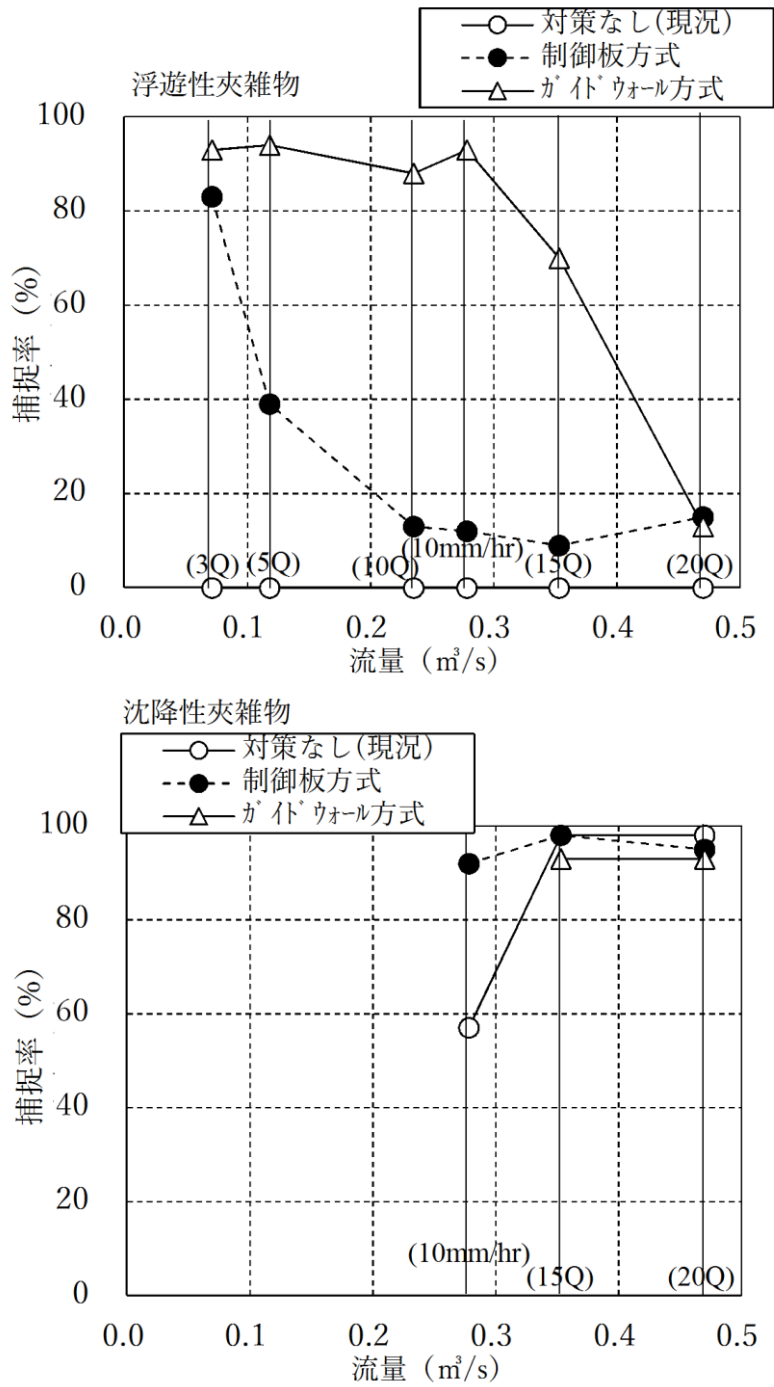


図 3.10.2 流量と捕捉率の関係 (正面越流タイプ1, ケース 19,22,23)

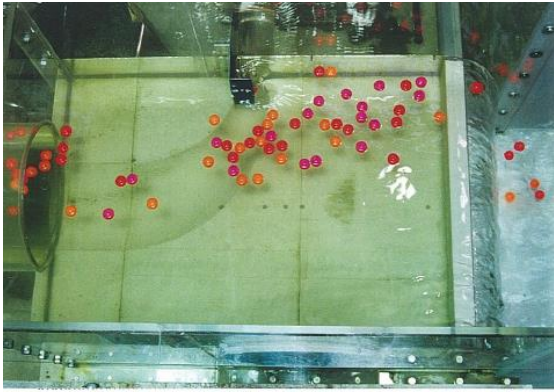


写真 3.23.① ケース 22,10 mm/hr,スーパードール

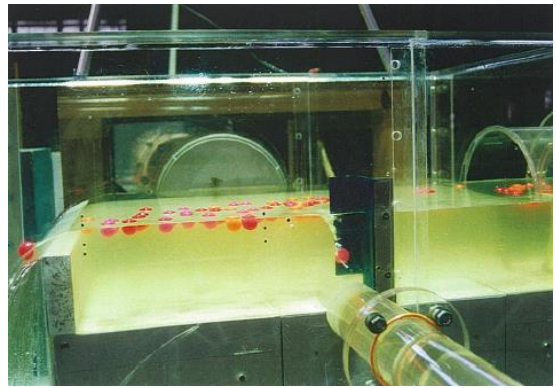


写真 3.23.② ケース 22,10 mm/hr,スーパードール

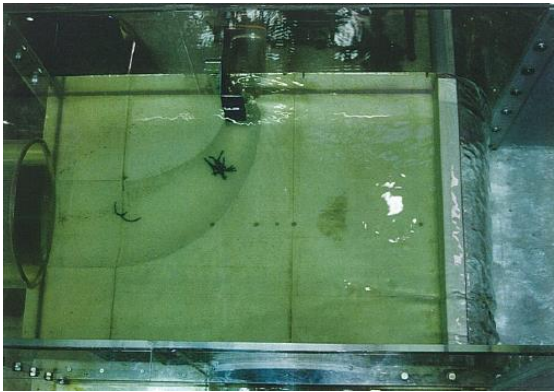


写真 3.23.③ ケース 22,10 mm/hr,ひも

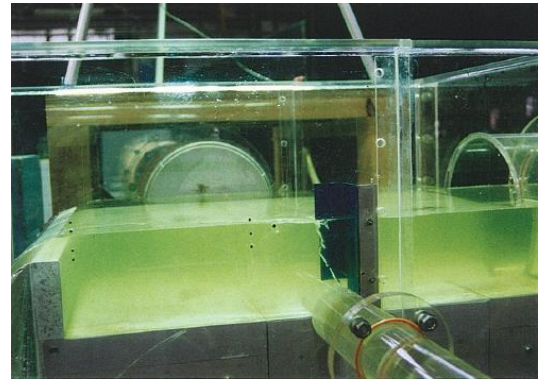


写真 3.23.④ ケース 22,10 mm/hr,ひも

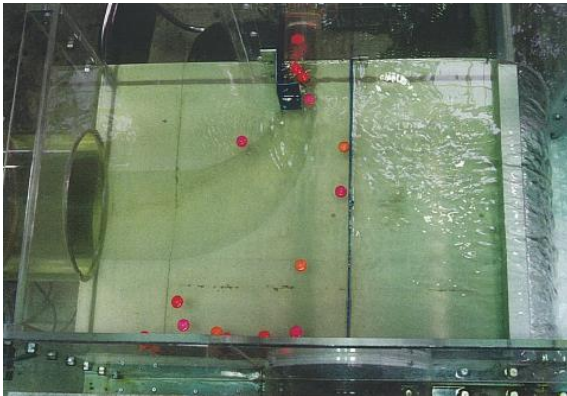


写真 3.23.① ケース 23,10 mm/hr,スーパードール

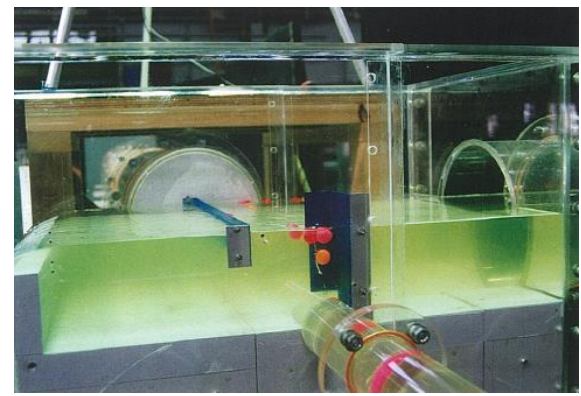


写真 3.24.② ケース 23,10 mm/hr,スーパードール

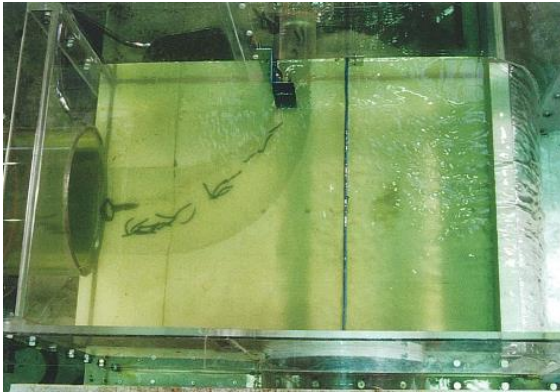


写真 3.24.③ ケース 23,10 mm/hr,ひも

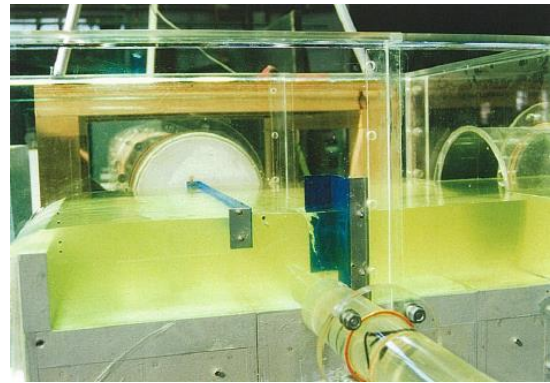


写真 3.24.④ ケース 23,10 mm/hr,ひも

## (6) 正面越流タイプ2 (ケース 24,25,26)

### 1) ケース 24,25 の実験結果

対策なしのケース 24 と流速式水面制御のガイドウォール方式 (ケース 25: 横型制御板とガイドウォール) について浮遊性夾雑物 (スーパーボール) と沈降性夾雑物 (ひも) の捕捉率を図 3.11.1, 写真 3.25.①~3.26.④に示す. なお, 沈降性夾雑物 (ひも) の 3Q, 5Q, 10Q は実験を行っていない.

### 2) ケース 26 の実験結果

渦流式水面制御のガイドウォール方式 (ケース 26: 縦型制御板とガイドウォール) について, 浮遊性夾雑物 (スーパーボール) と沈降性夾雑物 (ひも) の捕捉率を, 比較のためにケース 24 を加えて図 3.11.2, 写真 3.27.①~3.27.④に示す. なお, 沈降性夾雑物 (ひも) の 3Q, 5Q, 10Q は実験を行っていない.

### 3) 対策効果の考察

現状 (ケース 24) の対策なしでは, 浮遊性夾雑物の場合, すべての流量で浮遊性夾雑物が堰を越流して放流管へ流出 (捕捉率 0%) する. 沈降性夾雑物の場合は, 10 mm/hr では 66%, 15Q と 20Q では 98% と高い率で遮集管に捕捉される.

#### <流速式水面制御: ケース 25>

ガイドウォール方式 (ガイドウォールと横型制御板) では, 浮遊性夾雑物の場合 3Q で 100% あったが, 5Q で 29%, 10Q 以上の流量では 0% と捕捉効果は見られない. また, 沈降性夾雑物の場合, 10 mm/hr で 47%, 15Q で 80%, 20Q で 76% と高い捕捉率であった.

#### <渦流式水面制御: ケース 26>

ガイドウォール方式 (ガイドウォールと縦型制御板) では, 10 mm/hr までの流量に対して渦流は生成されている.

浮遊性夾雑物の場合 3Q で 95%, 5Q で 96%, 10Q で 71%, 10 mm/hr で 74% と高い捕

捉率であった。しかし、15Q、20Qでは0%と急激に効果がなくなった。沈降性夾雑物の場合は、10 mm/hrで53%、15Qで82%、20Qで97%と共に高い捕捉効果が出ている。

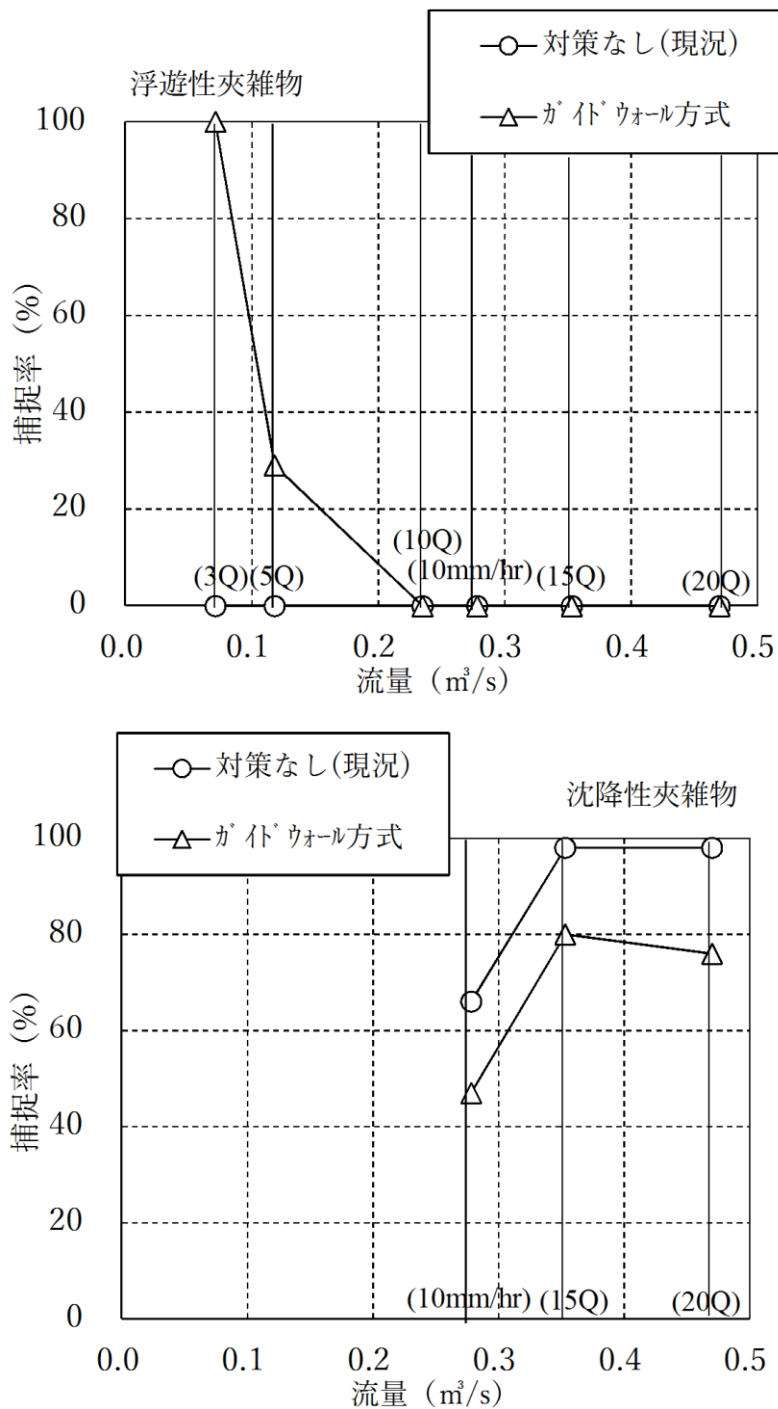


図 3.11.1 流量と捕捉率の関係 (正面越流タイプ2, ケース 24,25)

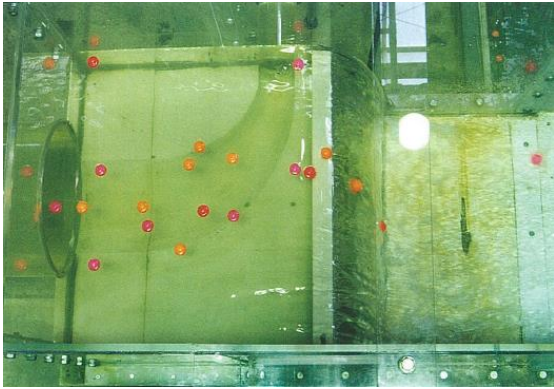


写真 3.25.① ケース 24,10 mm/hr,スパーボール

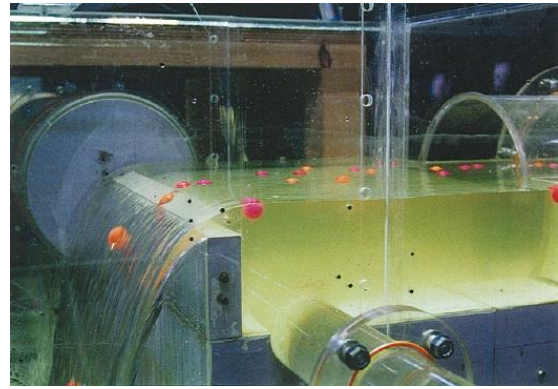


写真 3.25.② ケース 24,10 mm/hr,スパーボール

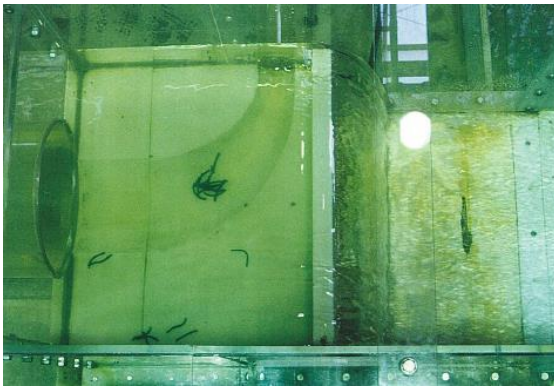


写真 3.25.③ ケース 24,10 mm/hr,ひも

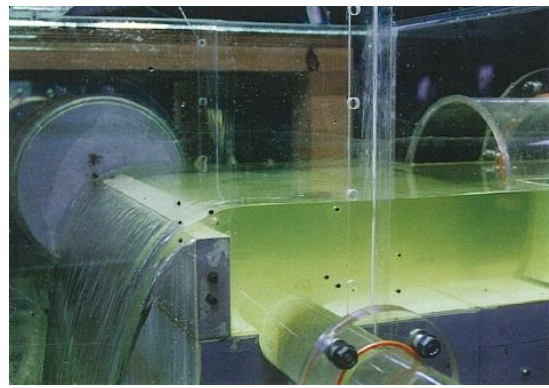


写真 3.25.④ ケース 24,10 mm/hr,ひも

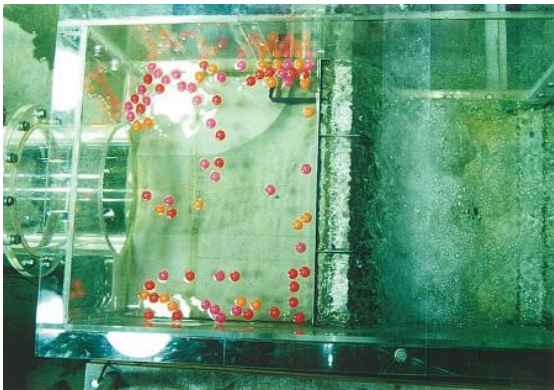


写真 3.26.① ケース 25,10 mm/hr,スパーボール

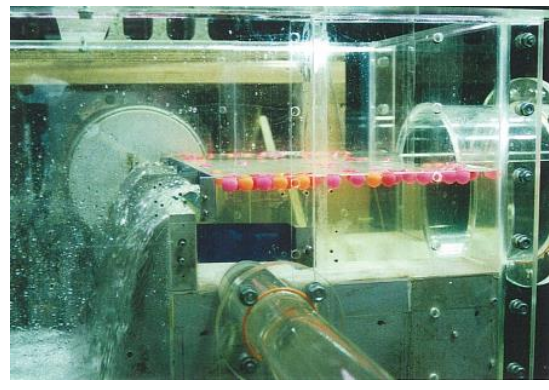


写真 3.26.② ケース 25,10 mm/hr,スパーボール

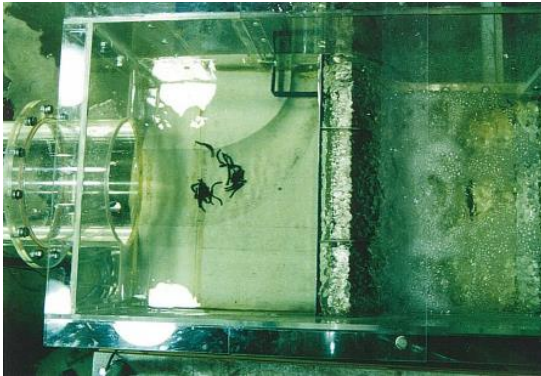


写真 3.26.③ ケース 25,10 mm/hr,ひも

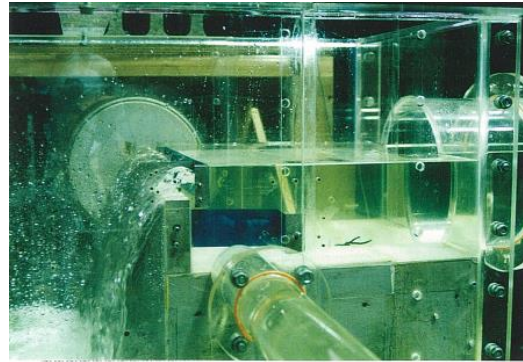


写真 3.26.④ ケース 25,10 mm/hr,ひも

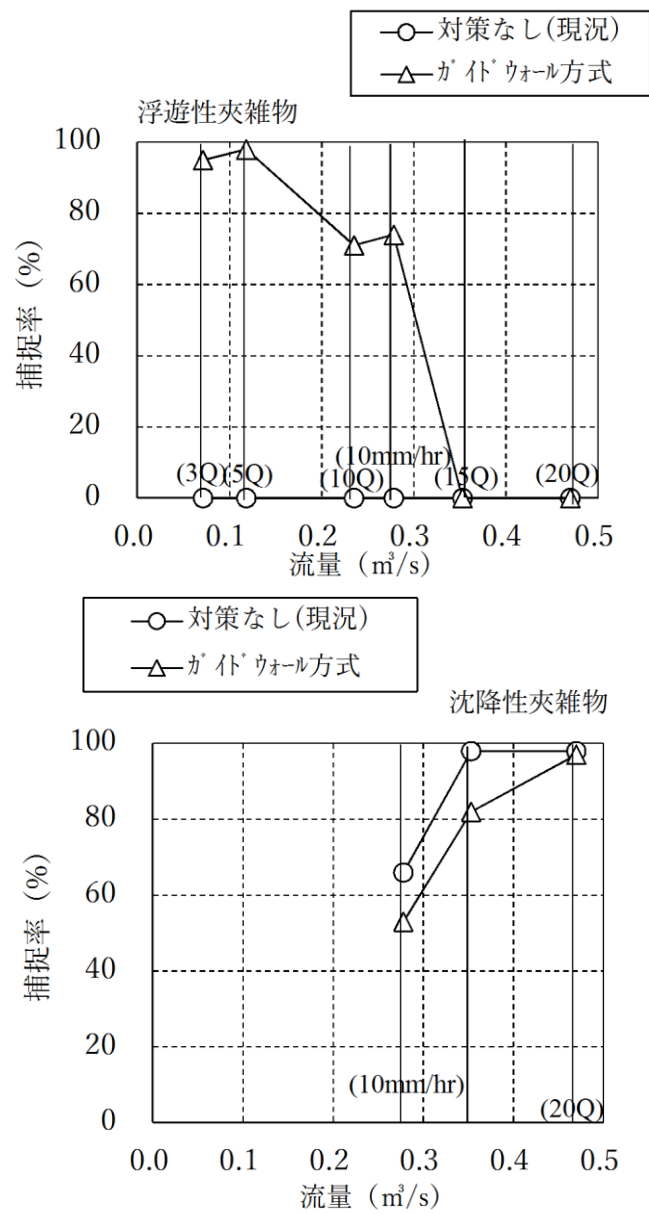


図 3.11.2 流量と捕捉量の関係 (正面越流タイプ 2, ケース 24,26)

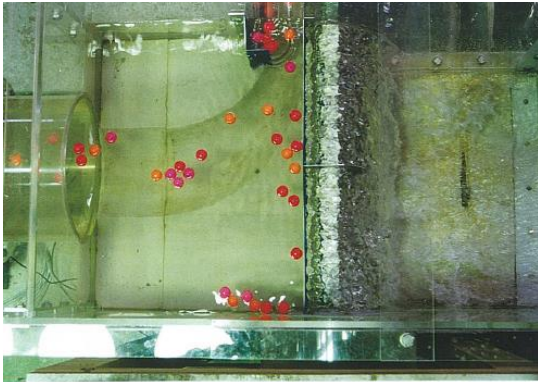


写真 3.27.① ケース 26,10 mm/hr,スーパーボール

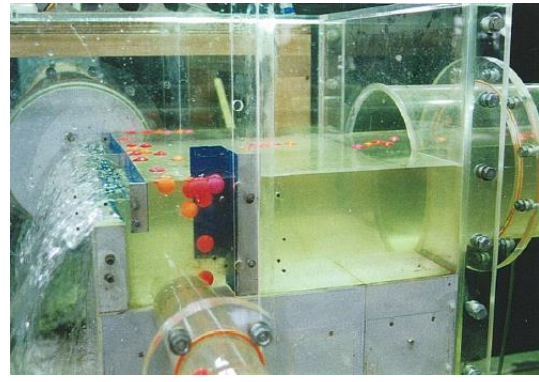


写真 3.27.② ケース 26,10 mm/hr,スーパーボール

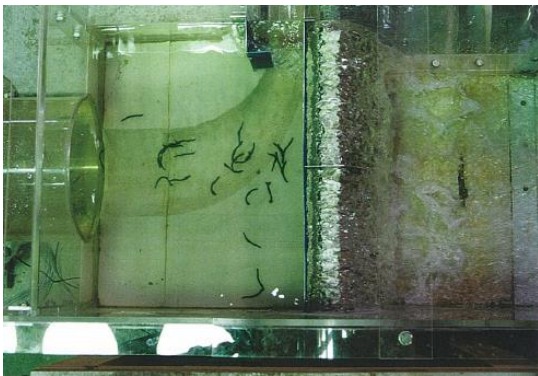


写真 3.27.③ ケース 26,10 mm/hr,ひも

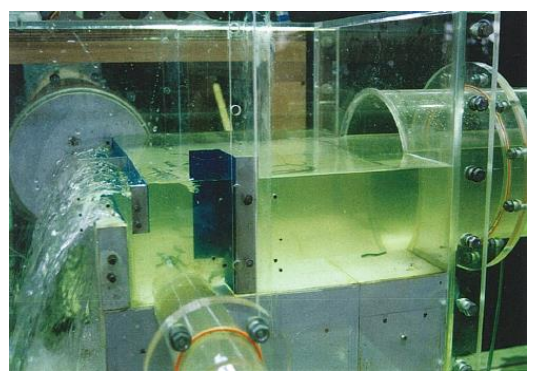


写真 3.27.④ ケース 26,10 mm/hr,ひも

### (7) 正面越流タイプ3 (ケース 27,28,29)

#### 1) ケース 27,28 の実験結果

対策なしのケース 27 と流速式水面制御のガイドウォール方式 (ケース 28: ガイドウォールと横型制御板) について、浮遊性夾雑物 (スーパーボール) と沈降性夾雑物 (ひも) の捕捉率を図 3.12.1, 写真 3.28.①~3.29.④ に示す。なお、沈降性夾雑物 (ひも) の 3Q, 5Q, 10Q は実験を行っていない。

#### 2) ケース 29 の実験結果

渦流式水面制御のガイドウォール方式 (ケース 26: ガイドウォールと縦型制御板) について浮遊性夾雑物 (スーパーボール) と沈降性夾雑物 (ひも) の捕捉率を、比較のためにケース 27 を加えて図 3.12.2, 写真 3.30.①~3.30.④ に示す。なお、沈降性夾雑物 (ひも) の 3Q, 5Q, 10Q は実験を行っていない。

#### 3) 対策効果の考察

現状 (ケース 27) の対策なしでは、浮遊性夾雑物の場合、すべての流量で浮遊性夾雑物が堰を越流して放流管へ流出 (捕捉率 0%) する。沈降性夾雑物の場合は、10 mm/hr では 92%, 15Q と 20Q ではほぼ 100% と高い率で遮集管に捕捉されている。



<流速式水面制御：ケース 28>

ガイドウォール方式（ガイドウォールと横型制御板）では，浮遊性夾雑物の場合 3Q で 93%あったが，5Q 以上の流量では，0%と捕捉効果は見られない．また，沈降性夾雑物の場合，10 mm/hr で 74%，15Q で 97%，20Q で 88%と高い捕捉率であった．

<渦流式水面制御：ケース 29>

ガイドウォール方式（ガイドウォールと縦型制御板）では，10 mm/hr までの流量に対して渦流は生成されている．

浮遊性夾雑物の場合 3Q で 97%，5Q で 94%，10Q で 73%，と高い捕捉率である．10 mm/hr では 45%，15Q で 57%の捕捉率であるが，20Q では 1%と急激に捕捉効果がなくなった．沈降性夾雑物の場合は，10 mm/hr で 76%，15Q で 93%，20Q で 97%と共に高い捕捉効果が出ている．

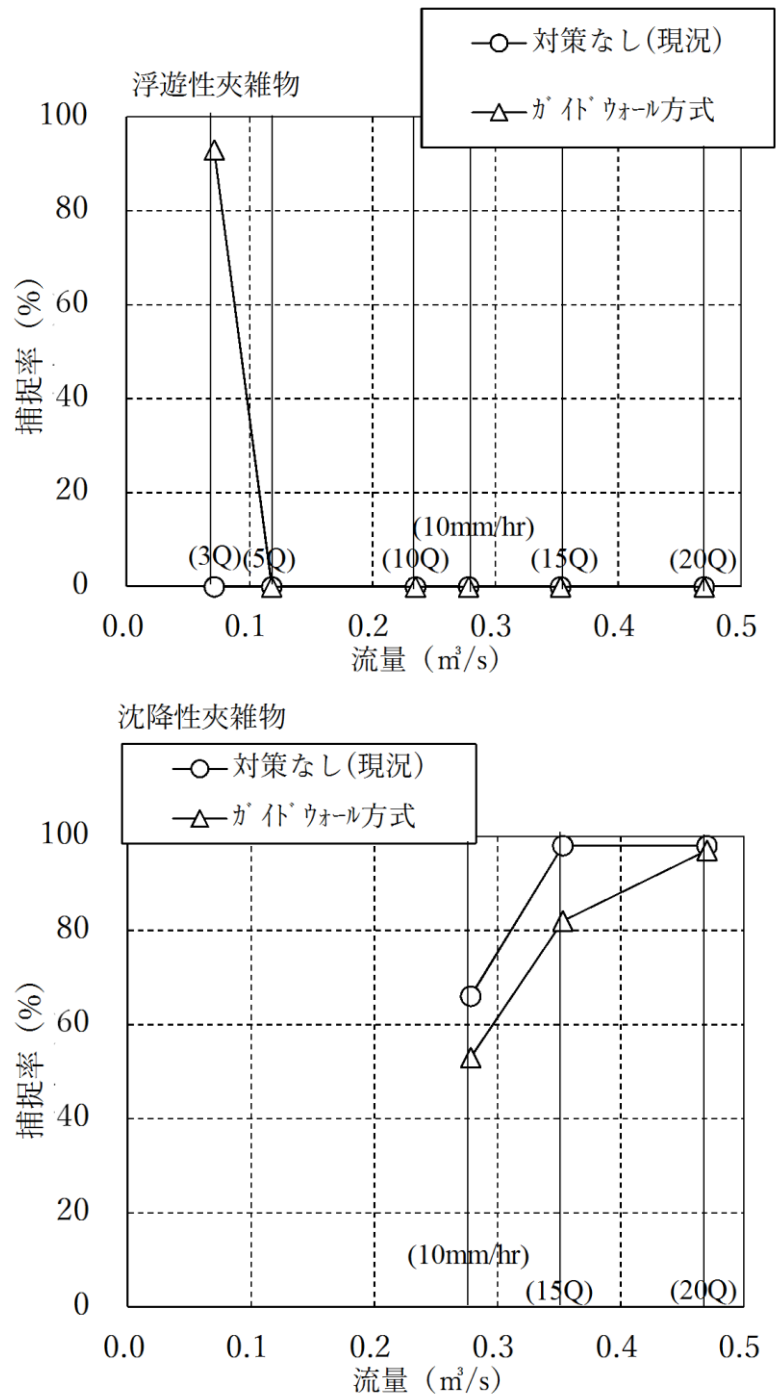


図 3.12.1. 流量と捕捉率の関係 (正面越流タイプ3, ケース 27,28)

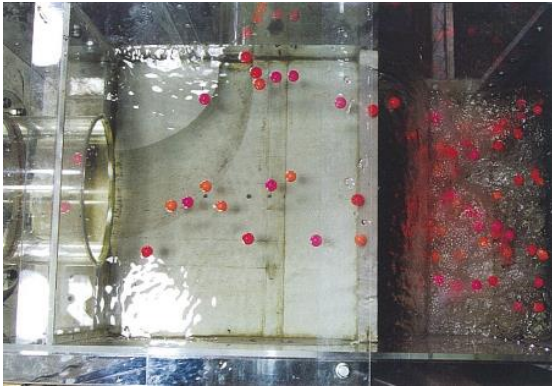


写真 3.28.① ケース 27,10 mm/hr,スパーボール

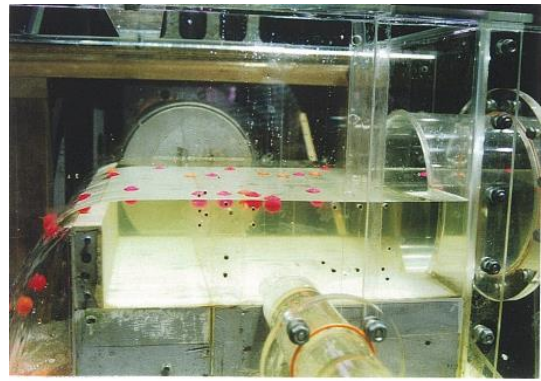


写真 3.28.② ケース 27,10 mm/hr,スパーボール

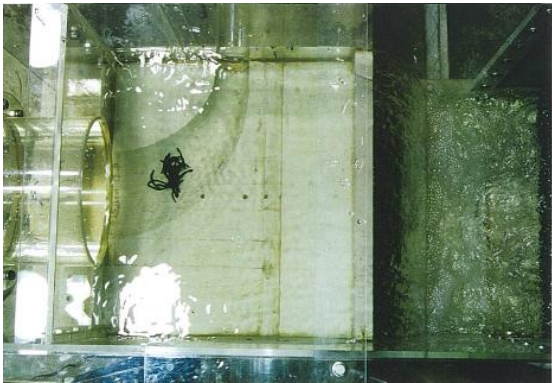


写真 3.28.③ ケース 27,10 mm/hr,ひも

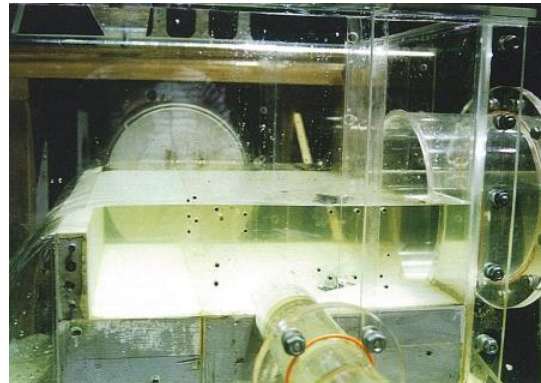


写真 3.28.④ ケース 27,10 mm/hr,ひも



写真 3.29.① ケース 28,10 mm/hr,スパーボール

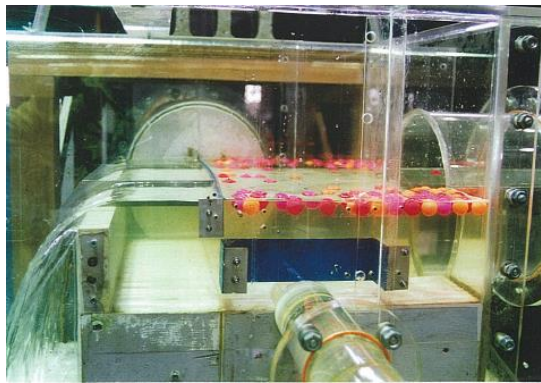


写真 3.29.② ケース 28,10 mm/hr,スパーボール

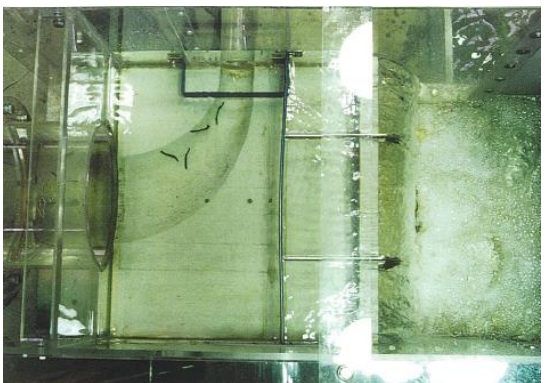


写真 3.29.③ ケース 28,10 mm/hr,ひも

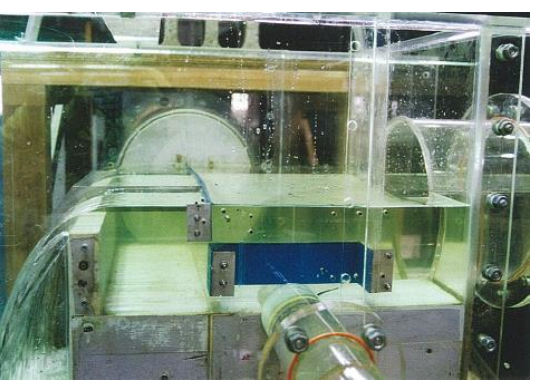


写真 3.29.④ ケース 28,10 mm/hr,ひも

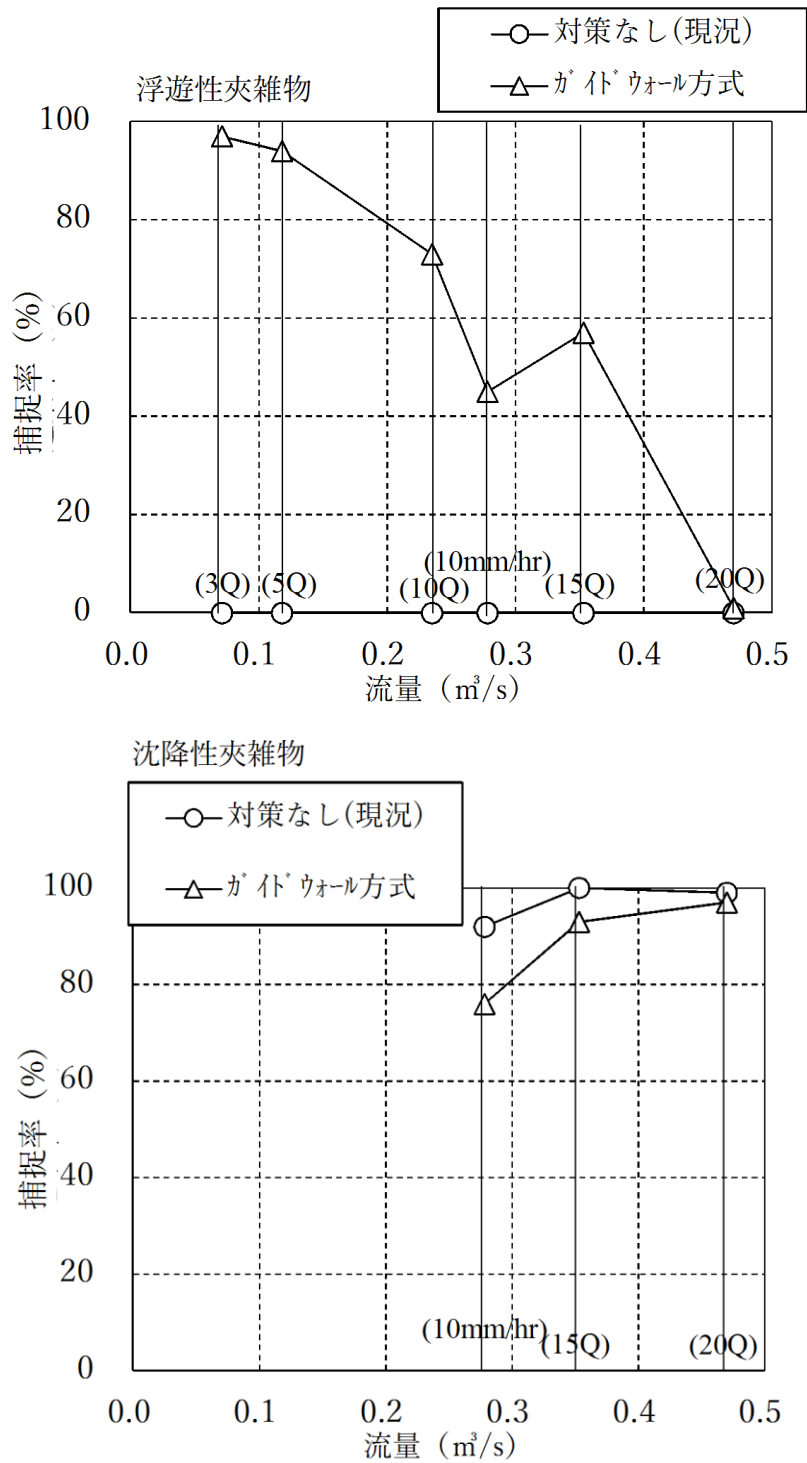


図 3.12.2 流量と捕捉率の関係 (正面越流タイプ3, ケース 27,29)

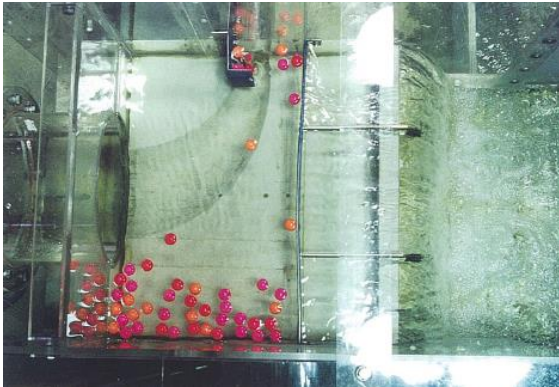


写真 3.30.① ケース 29,10 mm/hr,スマートボール

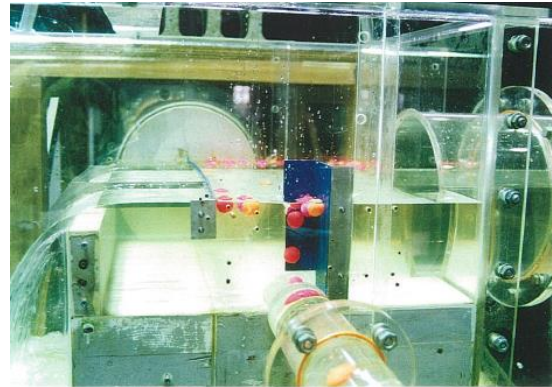


写真 3.30.② ケース 29,10 mm/hr,スマートボール

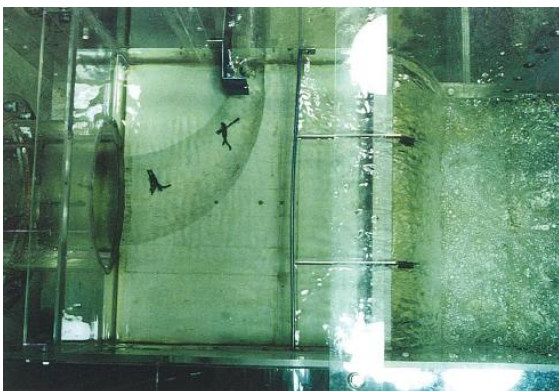


写真 3.30.③ ケース 29,10 mm/hr,ひも

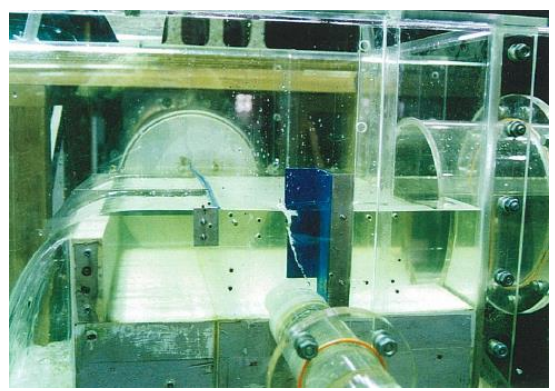


写真 3.30.④ ケース 29,10 mm/hr,ひも

## (8) 正面越流タイプ4 (ケース 30,31,32)

### 1) ケース 30,31 の実験結果

対策なしのケース 30 と流速式水面制御のガイドウォール方式 (ケース 31: ガイドウォールと横型制御板) について、浮遊性夾雑物 (スーパーボール) と沈降性夾雑物 (ひも) の捕捉率を図 3.13.1, 写真 3.31.①~3.32.④に示す。なお、沈降性夾雑物 (ひも) の 3Q, 5Q, 10Q は実験を行っていない。

### 2) ケース 32 の実験結果

渦流式水面制御のガイドウォール方式 (ケース 32: ガイドウォールと縦型制御板) について、浮遊性夾雑物 (スーパーボール) と沈降性夾雑物 (ひも) の捕捉率を、比較のためにケース 30 を加えて図 3.13.2, 写真 3.33.①~3.33.④に示す。なお、沈降性夾雑物 (ひも) の 3Q, 5Q, 10Q は実験を行っていない。

### 3) 対策効果の考察

現状 (ケース 30) の対策なしでは、浮遊性夾雑物の場合、すべての流量で浮遊性夾雑物が堰を越流して放流管へ流出 (捕捉率 0%) する。沈降性夾雑物の場合は、10 mm/hr では

21%, 15Q と 20Q ではほぼ 100%と高い率で遮集管に捕捉されている。

<流速式水面制御：ケース 31>

ガイドウォール方式（ガイドウォールと横型制御板）では，浮遊性夾雑物の場合 3Q で 98%，5Q で 82%あったが，10Q 以上の流量では，0%と捕捉効果は見られない。また，沈降性夾雑物の場合，10 mm/hr で 8%，であったが，15Q で 77%，20Q で 91%と高い捕捉率であった。

<渦流式水面制御：ケース 29>

ガイドウォール方式（ガイドウォールと縦型制御板）では，10 mm/hr までの流量に対して渦流は生成されている。

浮遊性夾雑物の場合 3Q で 97%，5Q で 94%，10Q で 60%，10 mm/hr で 53%と高い捕捉率である。15Q で 3%，20Q では 0%と急激に捕捉効果がなくなった。沈降性夾雑物の場合は，10 mm/hr で 22%，15Q で 82%，20Q で 96%と共に高い捕捉効果が出ている。

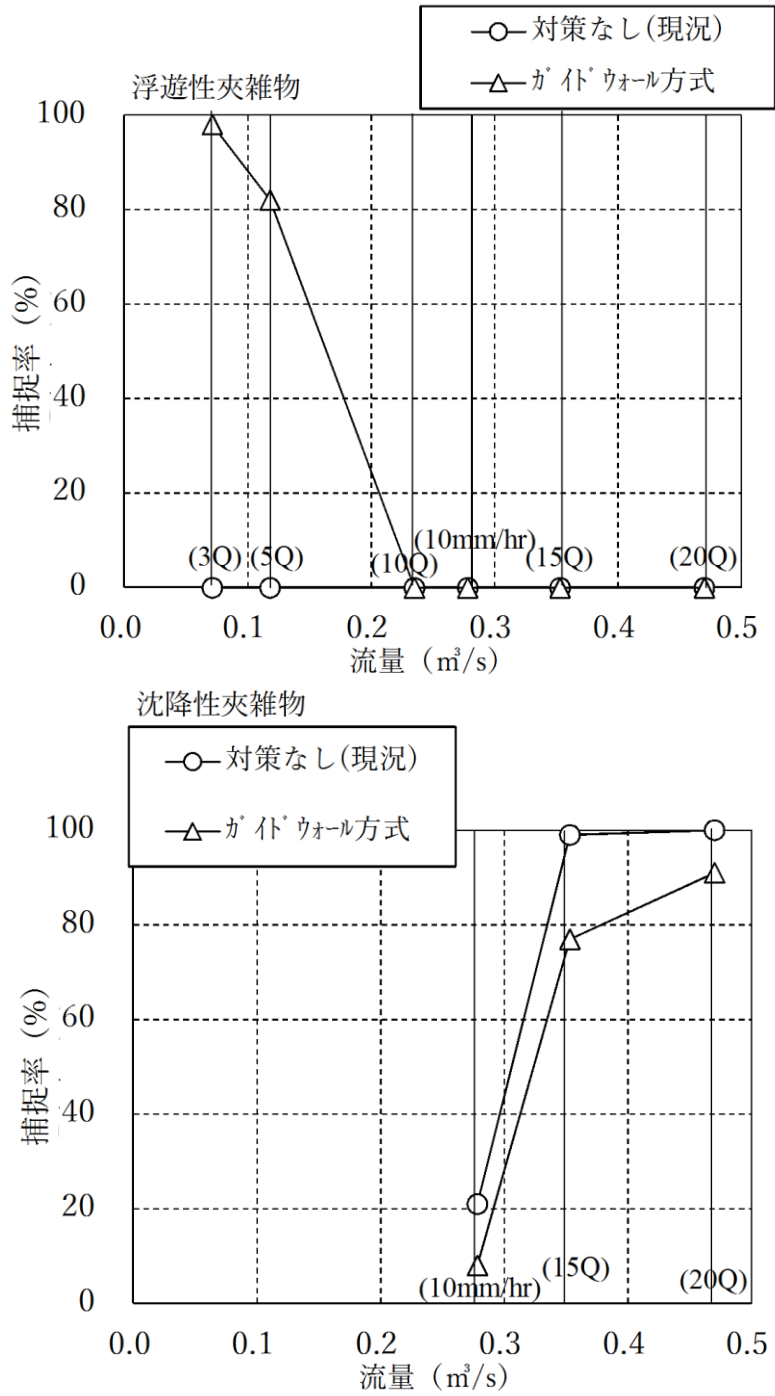


図 3.13.1 流量と捕捉率の関係 (正面越流タイプ4, ケース 30,31)

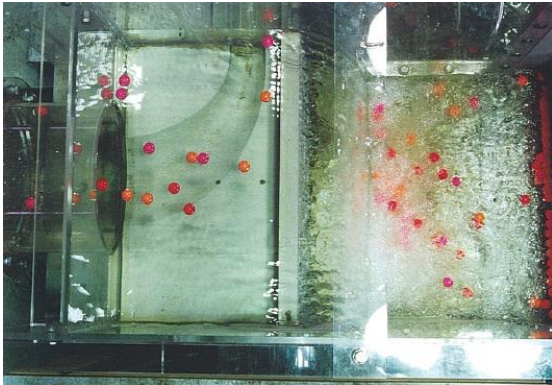


写真 3.31.① ケース 30,10 mm/hr,スパーホール

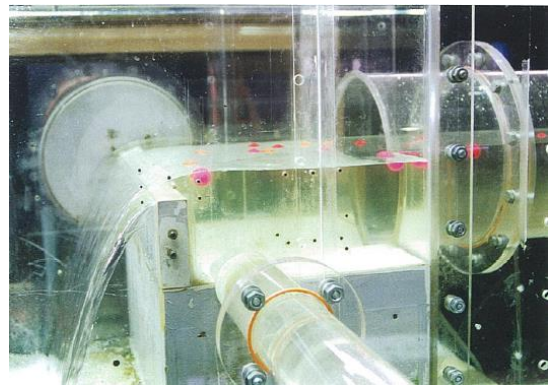


写真 3.31.② ケース 30,10 mm/hr,スパーホール

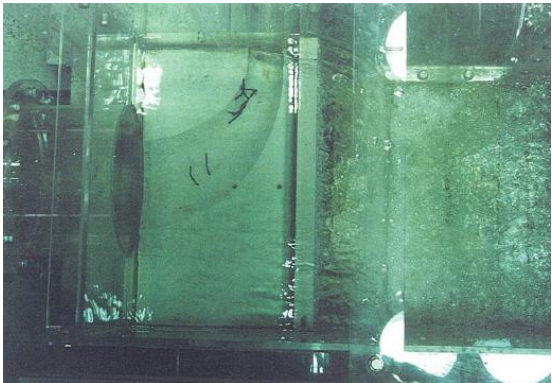


写真 3.31.③ ケース 30,10 mm/hr,ひも

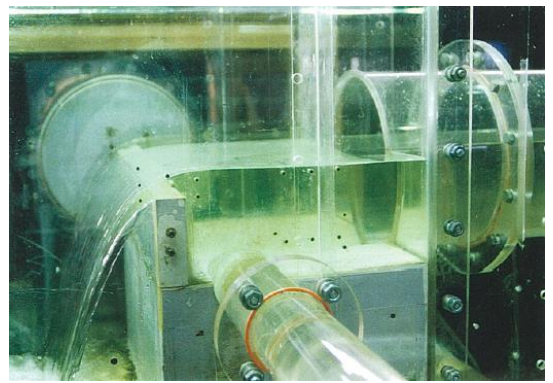


写真 3.31.④ ケース 30,10 mm/hr,ひも

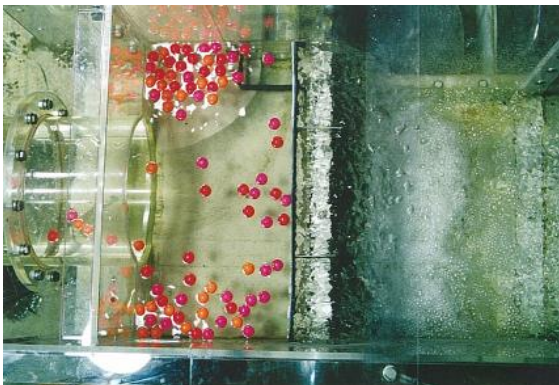


写真 3.32.① ケース 31,10 mm/hr,スパーホール

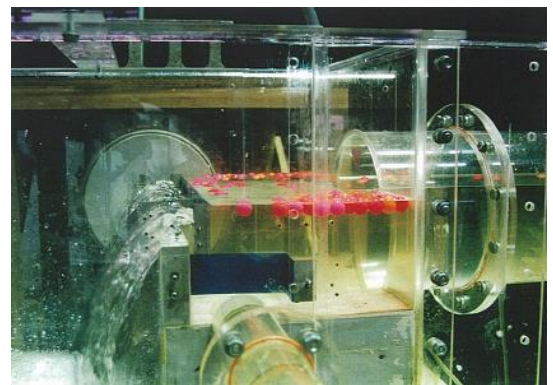


写真 3.32.② ケース 31,10 mm/hr,スパーホール



写真 3.32.③ ケース 31,10 mm/hr,ひも

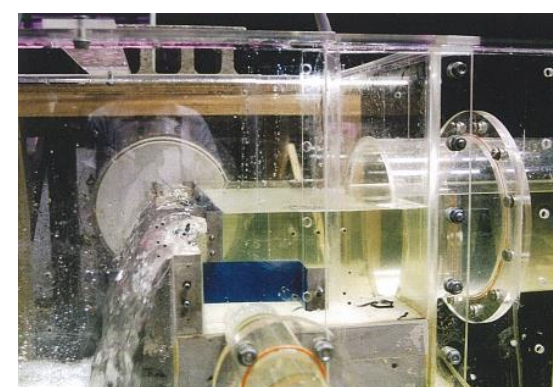


写真 3.32.④ ケース 31,10 mm/hr,ひも



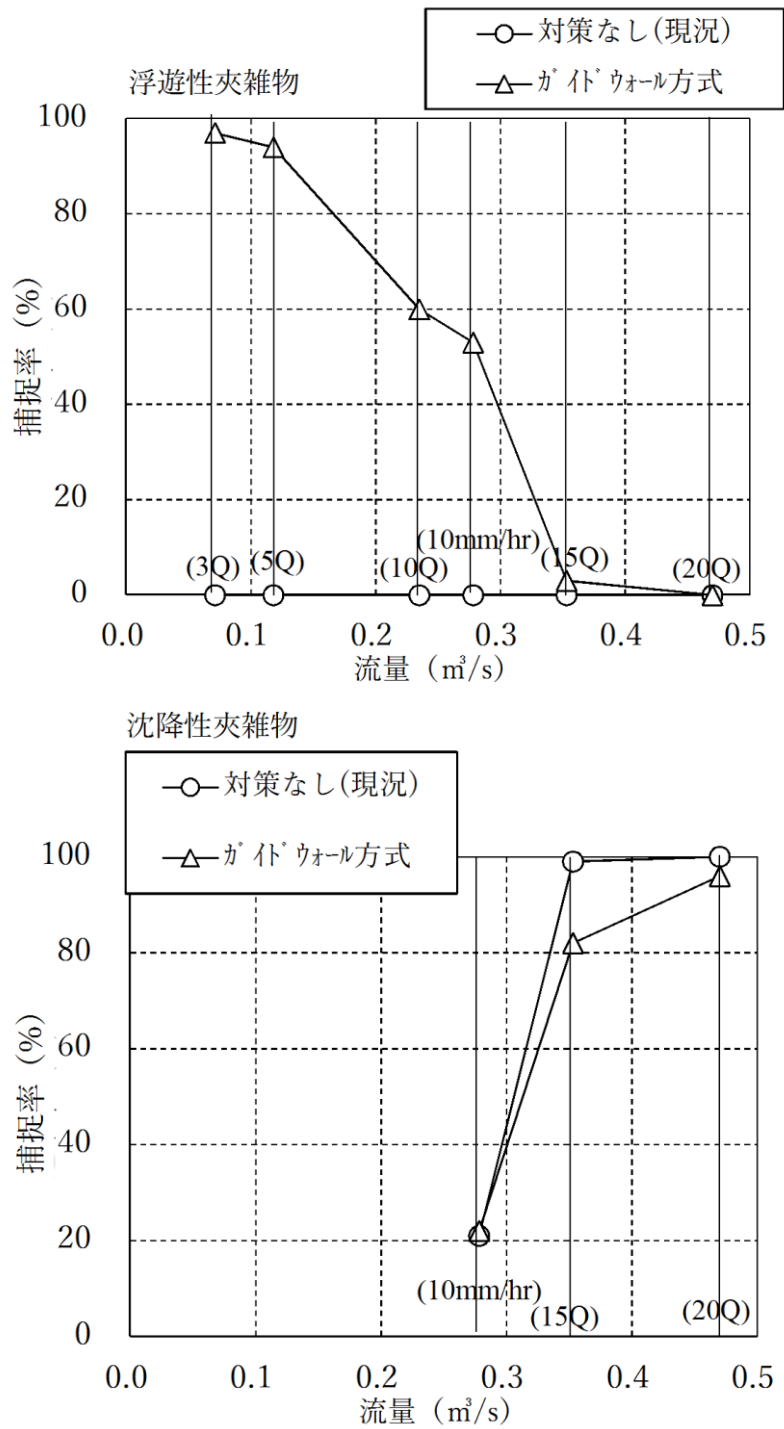


図 3.13.2 流量と捕捉率の関係 (正面越流タイプ4, ケース 30,32)

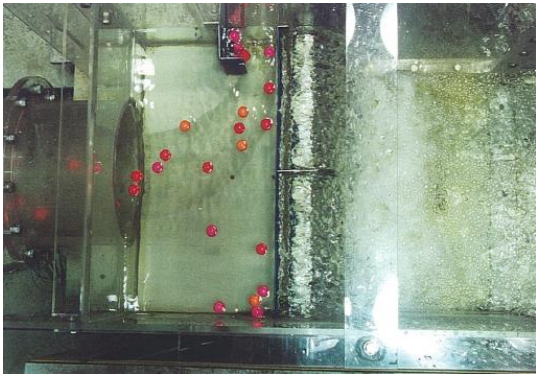


写真 3.33.① ケース 32,10 mm/hr,スーパースーパーボール

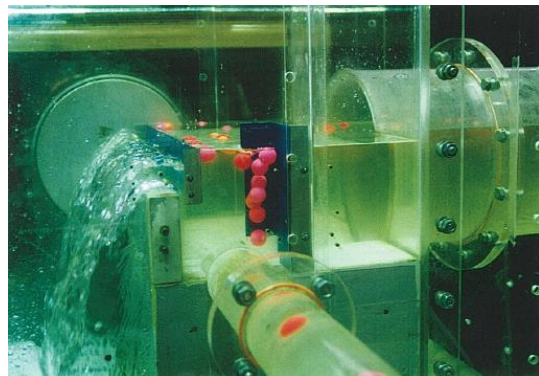


写真 3.33.② ケース 32,10 mm/hr,スーパースーパーボール

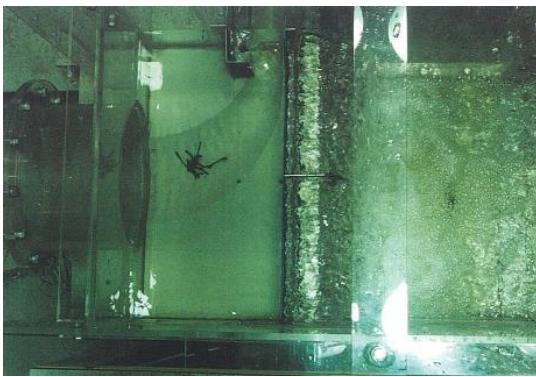


写真 3.33.③ ケース 32,10 mm/hr,ひも

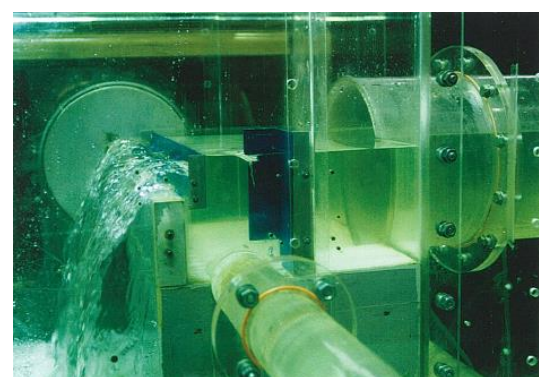


写真 3.33.④ ケース 32,10 mm/hr,ひも

### (9) 複合型タイプ (ケース 33,34,35)

#### 1) ケース 33,34 の実験結果

対策なしのケース 33 と流速式水面制御のガイドウォール方式 (ケース 34: 横型制御板とガイドウォール) について、浮遊性夾雑物 (スーパーボール) と沈降性夾雑物 (ひも) の捕捉率を図 3.14.1, 写真 3.34.①~3.35.④ に示す。なお、沈降性夾雑物 (ひも) の 3Q, 5Q, 10Q は実験を行っていない。

#### 2) ケース 35 の実験結果

渦流式水面制御のガイドウォール方式 (ケース 35: 縦型制御板とガイドウォール) について、浮遊性夾雑物 (スーパーボール) と沈降性夾雑物 (ひも) の捕捉率を、比較のためにケース 33 を加えて図 3.14.2-2, 写真 3.36.①~3.36.④ に示す。なお、沈降性夾雑物 (ひも) の 3Q, 5Q, 10Q は実験を行っていない。

#### 3) 対策効果の考察

現状 (ケース 33) の対策なしでは、浮遊性夾雑物の場合、すべての流量で浮遊性夾雑物が堰を越流して放流管へ流出 (捕捉率 0%) する。沈降性夾雑物の場合は、10 mm/hr で 0%,

15Q で 1 %， 20Q で 14%と共に低い捕捉率である。

<流速式水面制御：ケース 34>

ガイドウォール方式（ガイドウォールと横型制御板）では，浮遊性夾雑物の場合 3 Q で 80%と高い捕捉率であるが， 5 Q 以上の流量では 0 %と捕捉効果は見られない。また，沈降性夾雑物の場合， 10 mm/hr， 15Q が 0 %で， 20Q で 20%といずれも低い。

<渦流式水面制御：ケース 35>

ガイドウォール方式（ガイドウォールと縦型制御板）では， 10 mm/hr までの流量に対して渦流は生成されている。

浮遊性夾雑物の場合 3 Q で 73%， 5 Q で 57%， 10Q で 71%と高く， 10 mm/hr で 36%， 15Q で 34%と低くなり， 20Qdeha 0 %となった。沈降性夾雑物の場合も， 10 mm/hr で 0 %， 15Q で 1 %， 20Q で 19%と共に捕捉効果がなかった。

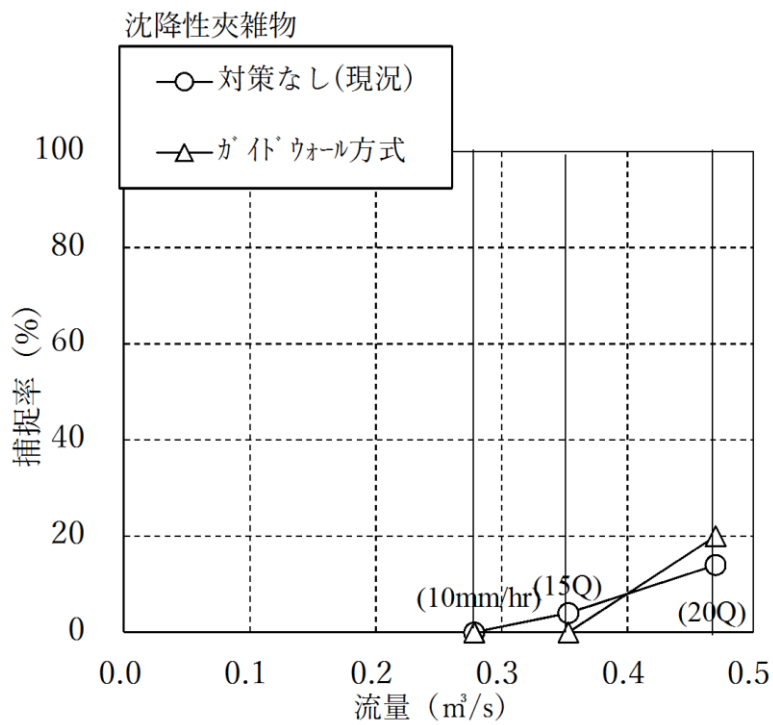
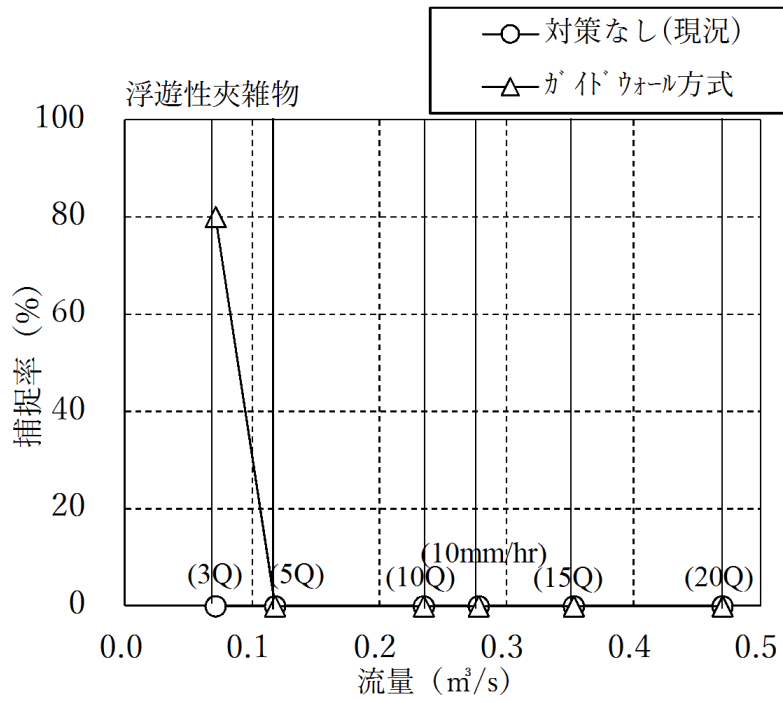


図 3.14.1 流量と捕捉率の関係 (複合型タイプ, ケース 33,34)

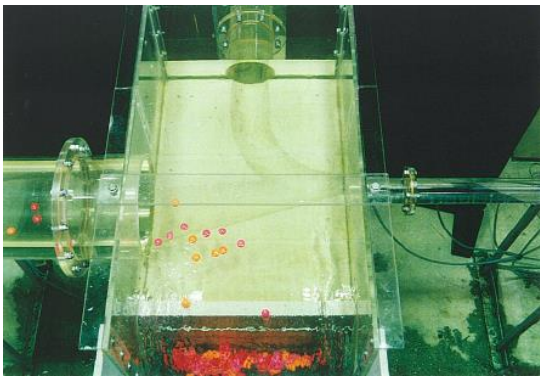


写真 3.34.① ケース 33,10 mm/hr,スパーボール

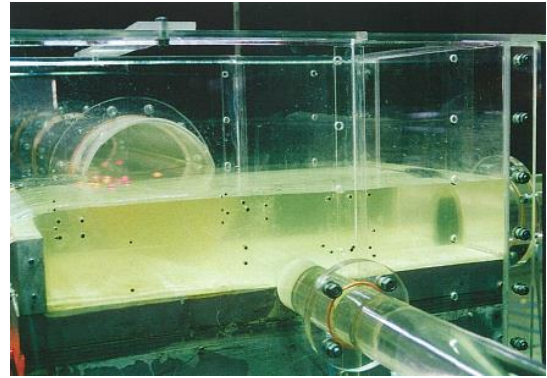


写真 3.34.② ケース 33,10 mm/hr,スパーボール



写真 3.34.③ ケース 33,10 mm/hr,ひも

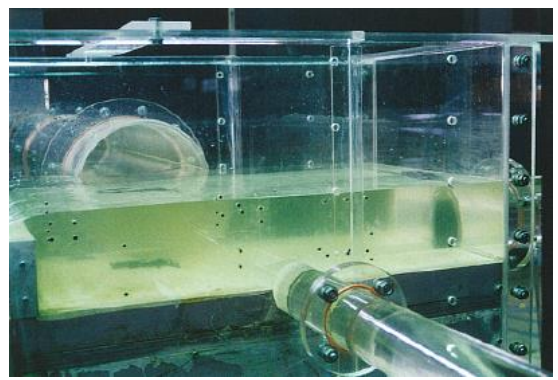


写真 3.34.③ ケース 33,10 mm/hr,ひも

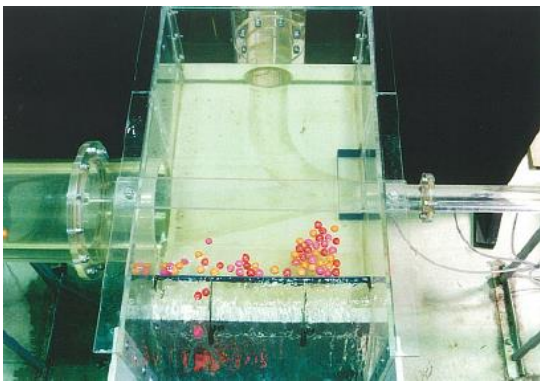


写真 3.35.① ケース 34,10 mm/hr,スパーボール

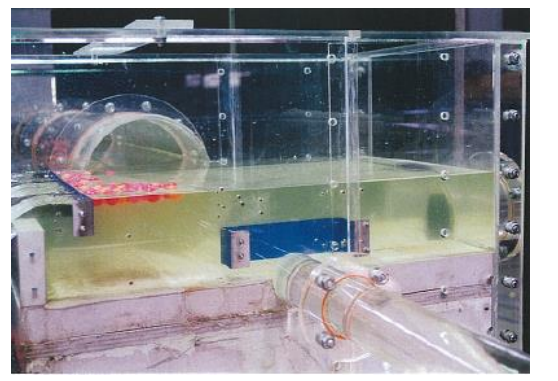


写真 3.35.② ケース 34,10 mm/hr,スパーボール



写真 3.35.③ ケース 34,10 mm/hr,ひも

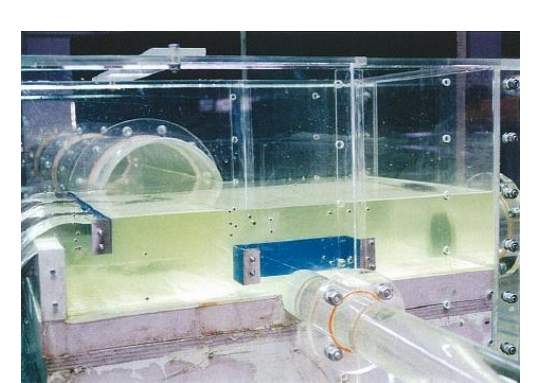


写真 3.35.④ ケース 34,10 mm/hr,ひも

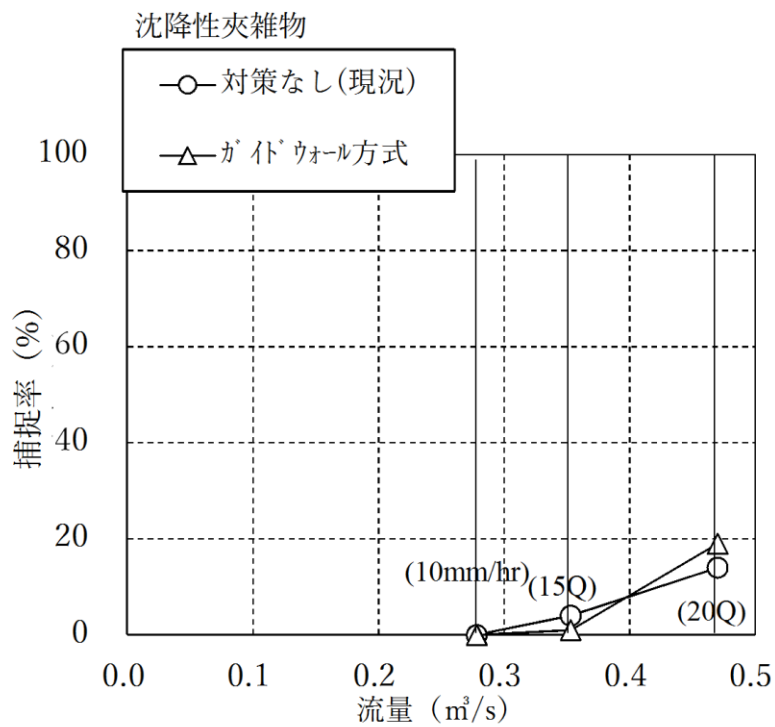
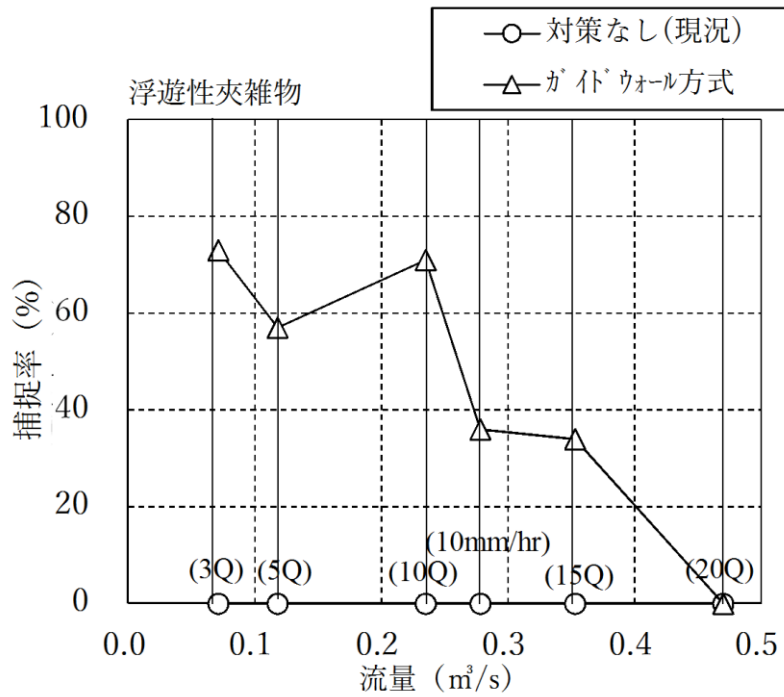


図 3.14.2 流量と捕捉率の関係 (複合型タイプ, ケース 33,35)

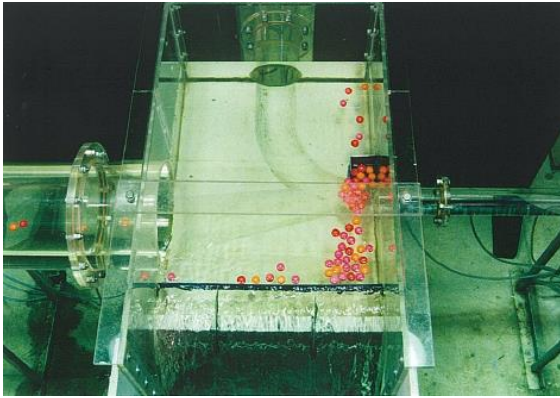


写真 3.36.① ケース 35,10 mm/hr,スパーホール

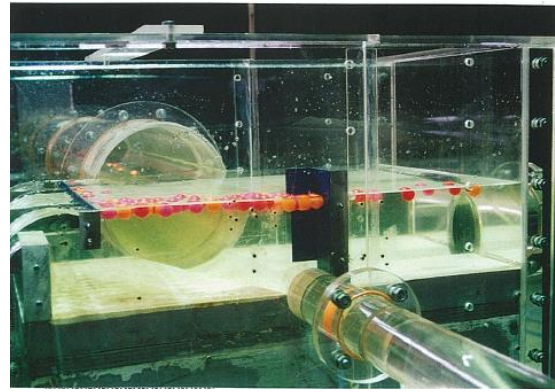


写真 3.36.② ケース 35,10 mm/hr,スパーホール

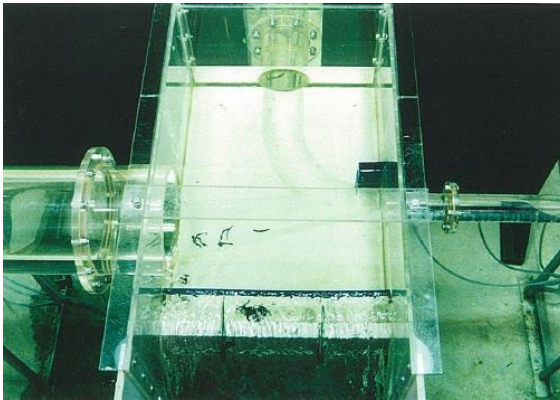


写真 3.36.③ ケース 35,10 mm/hr,ひも

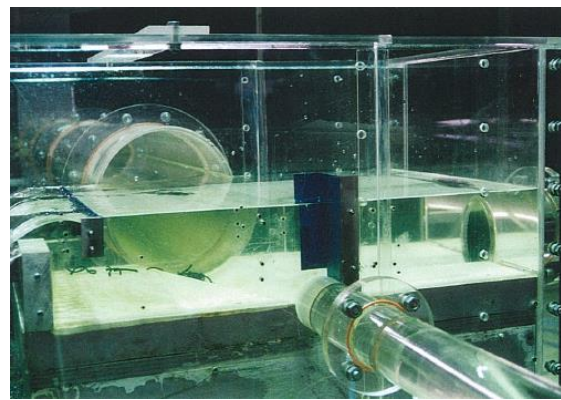


写真 3.36.④ ケース 35,10 mm/hr,ひも

### 3.2 装置の選定と結論

雨水吐き室の形状から横越流型と正面越流型に区分し、一般的な形状を勘案して横越流型を4タイプ、正面越流タイプ4タイプ、更に複合タイプとして1タイプの計9タイプとした。それぞれに制御板とガイドウォールの組み合わせから、35 ケースについて実施した実験結果の「流量と捕捉率の関係」を図 3.15.1 に「渦流式：ガイドウォール+縦型制御板」の浮遊性夾雑物と沈降性夾雑物に整理した。図 3.15.2 に「渦流式：縦型制御板単独」の浮遊性夾雑物と沈降性夾雑物に整理した。図 3.15.3 に「流速式：ガイドウォール+横型制御板」の浮遊性夾雑物と沈降性夾雑物に整理した。図 3.15.4 に「流速式：横型制御板単独」の浮遊性夾雑物と沈降性夾雑物に整理した。

評価に当たっては、合流改善の目的は雨天時に浮遊性夾雑物が雨水吐き室の堰を超えて公共用水域に越流する量を削減することである。現実的には降雨初期にファーストフラッシュとして高濃度の夾雑物が流入してくることと、下水道施設の構造を勘案すると 10 mm/hr までの降雨に対応する必要がある。15Q 以上の降雨時に対応することまでは期待することはないと考える。このことは、SPIRIT21<sup>4)</sup>でも 10 mm/hr を夾雑物の流出抑制対象としていることから言える。また、夾雑物の捕捉効果を 60%以上あるものとして評価している。

本実験では、対象夾雑物を浮遊性夾雑物の代表としてオイルボールをモデルとしたスマートボールで行い、その効果を発揮する装置を設定することを目的とした。沈降性夾雑物が堰を超える現象は実際の雨水吐き室からの越流も問題になっておらず、本実験でも堰を超える現象は確認できなかった。

図 3.15.1～3.15.4 の結果を見ると効果が高い装置は図 3.15.1 に示すように雨水吐き室の形状の違いや越流タイプの違いにより、若干の効果の違いは見られたものの、渦流式水面制御装置「ガイドウォール方式（ガイドウォールと縦型制御板）」といえる。

一方、渦流式水面制御装置の縦型制御板単独では 10 mm hr までの流量に対して渦の生成は確認できたもののスマートボールの捕捉効果は低い結果となった。この原因は実験の観測で明らかのようにスマートボールが渦流に流集される前に堰からの越流の力に引込まれてしまった結果である。ガイドウォールの機能と効果が確認された結果でもあった。

なお、東京都下水道局並びに財団法人下水道新技術推進機構では、別の実験結果と雨水吐き室の様々なタイプを勘案し、水面制御のタイプをガイドウォールと制御板（縦型と横型）の組合せを①ガイドウォールのみ、②ガイドウォールと縦型制御板、③縦型制御板単独、④ガイドウォールと横型制御板、⑤横型制御板単独、の 5 種類として整理<sup>5) 6)</sup>され、水面制御装置として技術資料や設計法を設定している。

本研究の結論としては、実験結果を踏まえ渦流式水面制御装置としては図 3.15.1 に示すガイドウォールと縦型制御板の装置が、浮遊性夾雑物の流出抑制効果が高い装置と判断した。このことから、「ガイドウォールと縦型制御板」を水面制御装置の基本装置として本研究を進めることとする。

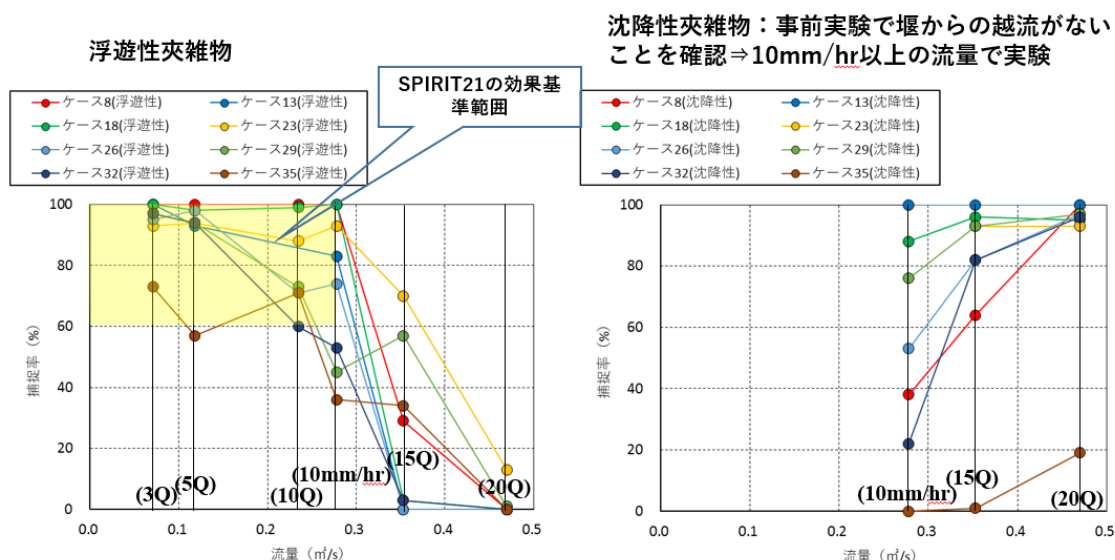


図 3.15.1 「渦流式：ガイドウォール+縦型制御板」による浮遊性夾雑物と沈降性夾雑物の捕捉効果



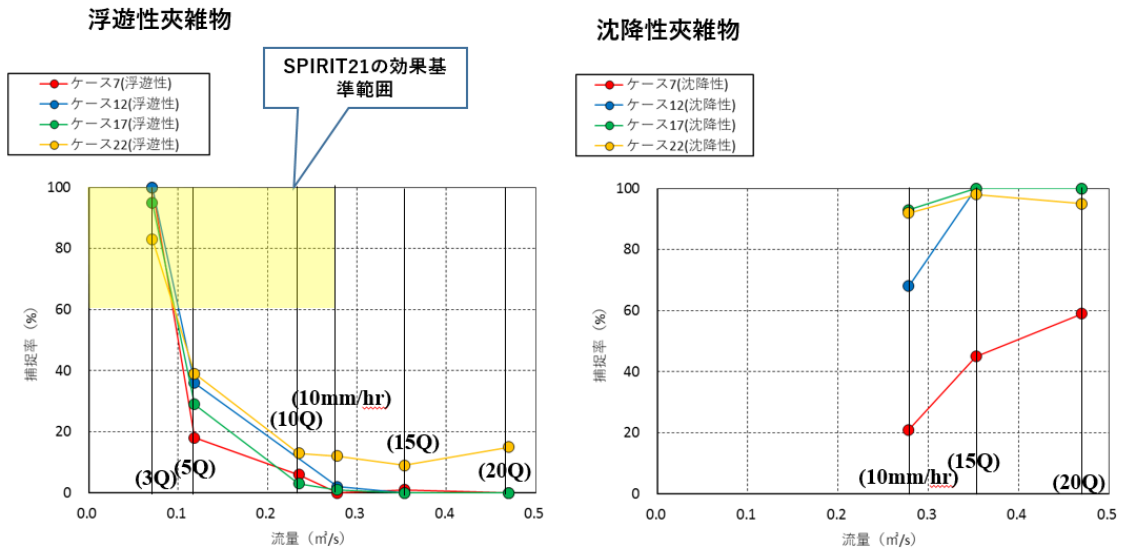


図 3.15.2 「渦流式：縦型制御板単独」の浮遊性夾雑物と沈降性夾雑物の捕捉効果

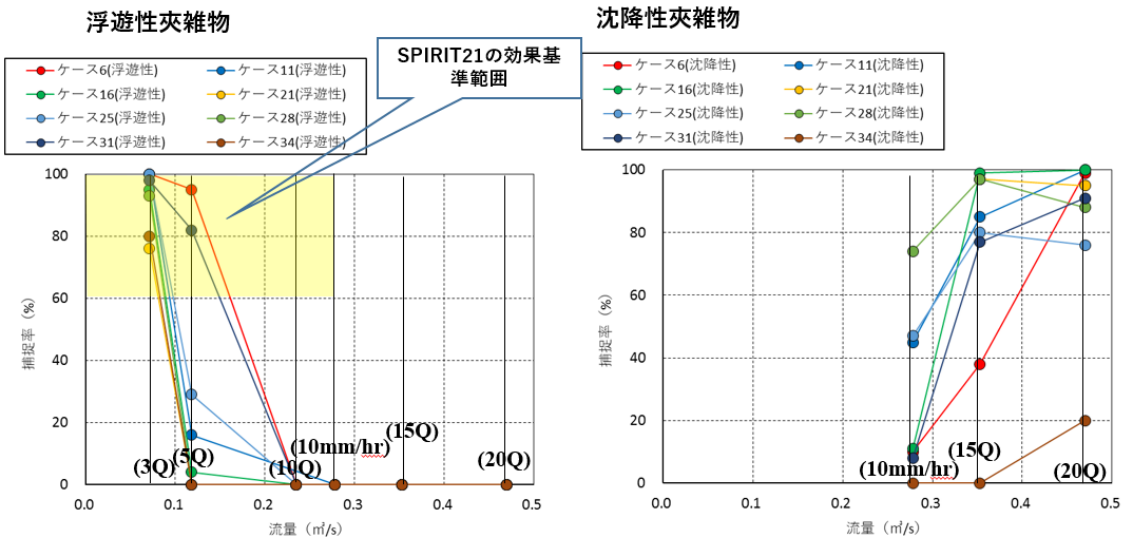


図 3.15.3 「流速式：ガイドウォール+横型制御板」の浮遊性夾雑物と沈降性夾雑物の捕捉効果

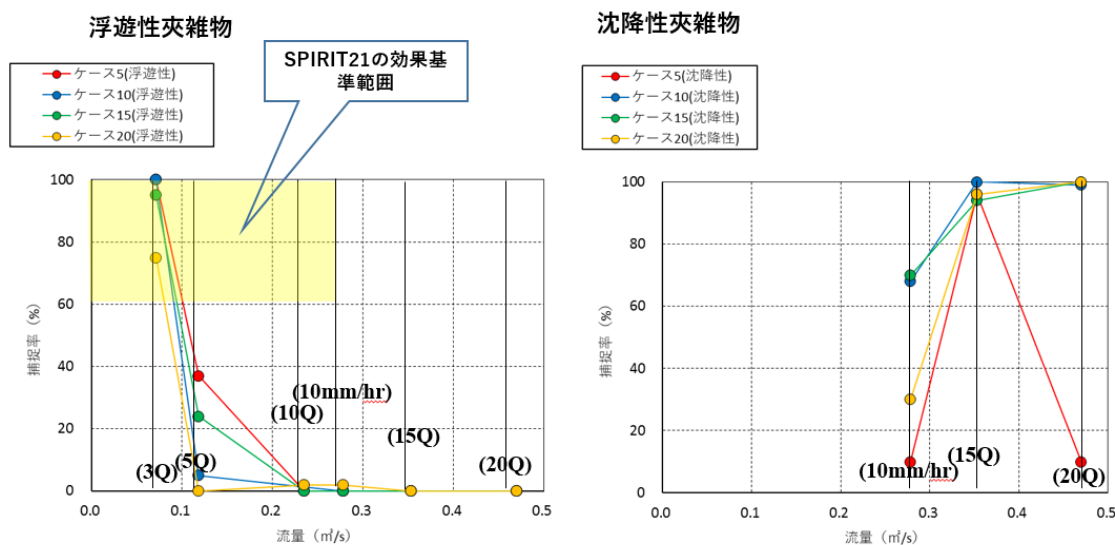


図 3.15.4 「流速式：横型制御板単独」の  
浮遊性夾雑物と沈降性夾雑物の捕捉効果

#### [参考文献]

- 1) 財団法人下水道新技術推進機構：合流式下水道の改善における夾雑物対策を対象とした水面制御装置の技術資料，2009年3月
- 2) 東京都下水道局南部建設事務所・東京都下水道サービス株式会社：芝浦処理区及び森ヶ崎処理区簡易合流改善施設検討及び追跡調査設計報告書（2/2）水理模型実験編，平成15年3月
- 3) 尾崎晃：「急勾配開水路関係模型実験におけるフルード相似律の意義について」土木學會北海道支部技術資料，第18号
- 4) 財団法人下水道新技術推進機構：「合流式下水道の改善における夾雑物を対象とした水面制御装置」技術資料，pp35，2009年3月
- 5) Shigeru THUKADA, Tethuya NAKAMUA, Yukitoshi IWASA：「Debris Separation Technology in Combined Sewer System」，ater Environment Federation's Annual Technical Exhibition and Conference(2010 WEFTec)，pp.3008～3028，2010年10月5日
- 6) Tethuya NAKAMURA, Osamu MATHUSHIMA, Shizuo YOSHIKAWA, Yukitoshi IWASA, Toshimithu WATANABE：「Study of Water Surface Control as a Debris Reduction Measure for the Improvement of the Combined Sewer System」，都市雨水排除の新技术に関する国際会議（2010 NOVATECH），NOVATECH 研究発表，電子論文集のため全体頁なし，2010年6月28日

### 3.3 雨水吐き室の水流特性

#### 3.3.1 目的

雨水吐き室に水面制御装置の制御板やガイドウォールを設置した場合、流入管からの流入量と遮集管の遮集量の関係から雨水吐き室の水流にどのような違いがあるのかを把握する必要がある。また、これら装置の設置により流量阻害を生じさせ、雨水吐き室の水位が上昇することにより、上流部にバックウォーターの影響を及ぼし、溢水などの事故となることが危惧されることから、雨水吐き室から流入管内の上流部の水位についても実験から考察することとした。

35 ケースの実験結果<sup>1)2)</sup>より、雨水吐き室の水流特性については、以下に整理した。なお、対象とする降雨強度は、3Q, 10Q, 10 mm/hr (SPIRIT21 では 10 mm/hr を夾雑物流出抑制の対象としている)、15Q, 20Q, 50 mm/hr (東京都の計画降雨強度)としている。

#### 3.3.2 各ケースの水理特性

##### (1) 横越流タイプ1 (ケース1,2,3) の水流特性

横越流タイプ1は、遮集管径が $\phi 0.6\text{m}$ と比較的大きいため、10 mm/hr 相当以下の流量条件では遮集管は開水路流になる。計画遮集量 (3Q,  $0.071\text{ m}^3/\text{s}$ ) から計画流量 (50 mm/hr 相当,  $1.453\text{ m}^3/\text{s}$ ) の範囲においての流量特性を把握する。

##### 1) 雨水吐き室の水流特性

###### ①ケース1の実験結果

現況の雨水吐き室における流入量と遮集量の関係を図 3.15.1 に示す。

流入量が  $0.75\text{ m}^3/\text{s}$  までは、遮集管径  $\phi 0.6\text{m}$  は開水路となることから、遮集管に流れる遮集量は3倍以上となっている。  $0.75\sim 1.00\text{ m}^3/\text{s}$  では遮集管の流れが開水路から満管流に移行すると考えられるので遮集量の伸びが小さい。  $1.00\text{ m}^3/\text{s}$  を超える流入量では圧力管となり遮集量も大きくなることが確認された。

###### ②ケース2, 3の実験結果

流速式水面制御でガイドウォールのみでの流入量と遮集量の関係を現況のみの結果 (ケース1) を対比して図 3.15.2 に示す。なお、ケース2はガイドウォール (支柱あり)、ケース3はガイドウォール (支柱なし) である。

ガイドウォールの設置により、遮集量が増加する傾向になるが、計画流量 (50 mm/hr) に対しては3%程度の増加にとどまっている。また、支柱ありとなしとの差は明確にはない。

##### 2) 流入管上流部への影響

5Q 相当から計画流量 (50 mm/hr) の範囲における流入管の上流部の水位変化を調べた。

###### ①現況雨水吐き室の場合

流入管の縦断方向における水位変化を図 3.15.3 に示す。

流入管から雨水吐き室に流入する際に水位が低下している。これは支配断面\*が生じているものと考えられる。

※支配断面とは、開水路の不等流の計算の際、常流では下流端、射流では上流端が境界条件となる。途中で常流から射流に変わる場合には、その断面で限界流速・限界水深が生じ流量が規定され、上流側の常流と下流側の射流に対する共通の境界条件となる。このような断面のことを流況が支配するという意味で支配断面いう。（「用語集 Biglobe」より）

20Q 相当以下の流量では、遮集管天端以下の水位であることから、開水路流の状態で流下する。

それ以上の計画流量（50 mm/hr 相当，1.453 m<sup>3</sup>/s）では遮集管が満管状態となり、遮集管口では水位が上昇するものの、流入管接続部付近では支配断面となるために、上流部への水位上昇は生じない。

## ②流速式水面制御のガイドウォールのみの場合（ケース 2）

流入管の縦断方向における水位変化を、現況雨水吐き室の場合と対比させて図 3.15.4 に示す。

20Q 相当ではガイドウォールの設置により、流入管の水位が若干上昇する。

しかし、計画流量（50 mm/hr 相当，1.453 m<sup>3</sup>/s）では流入管と雨水吐き室との接続部付近が支配断面となるために、ガイドウォールを設置しても上流部への水位上昇は見られない。

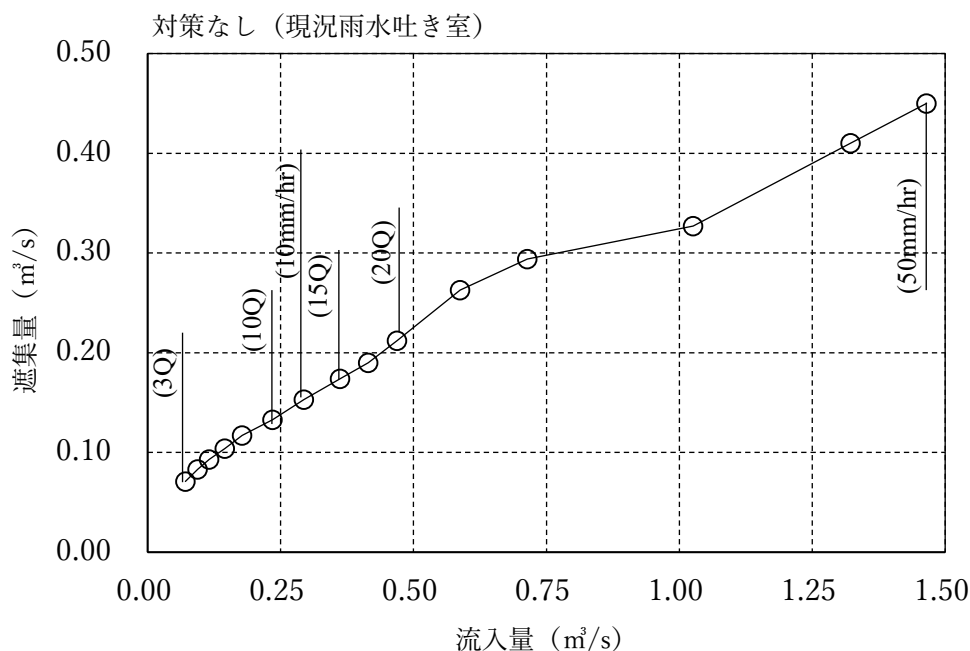


図 3.15.1 流入量と遮集量の関係（横越流タイプ 1, ケース 1）

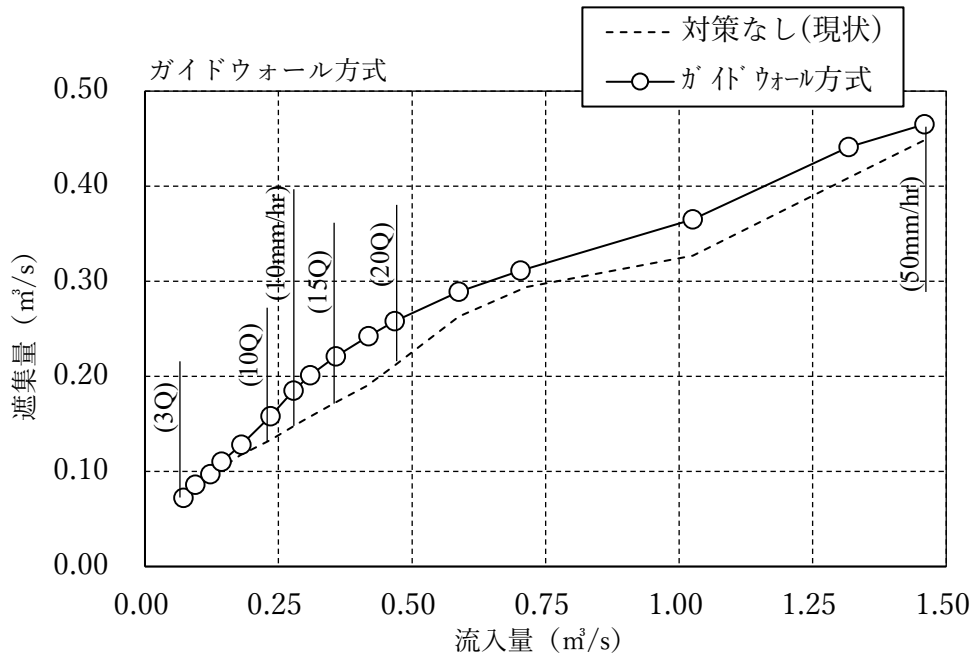


図 3.15.2 流入量と遮集量の関係 (横越流タイプ1, ケース 1,2)

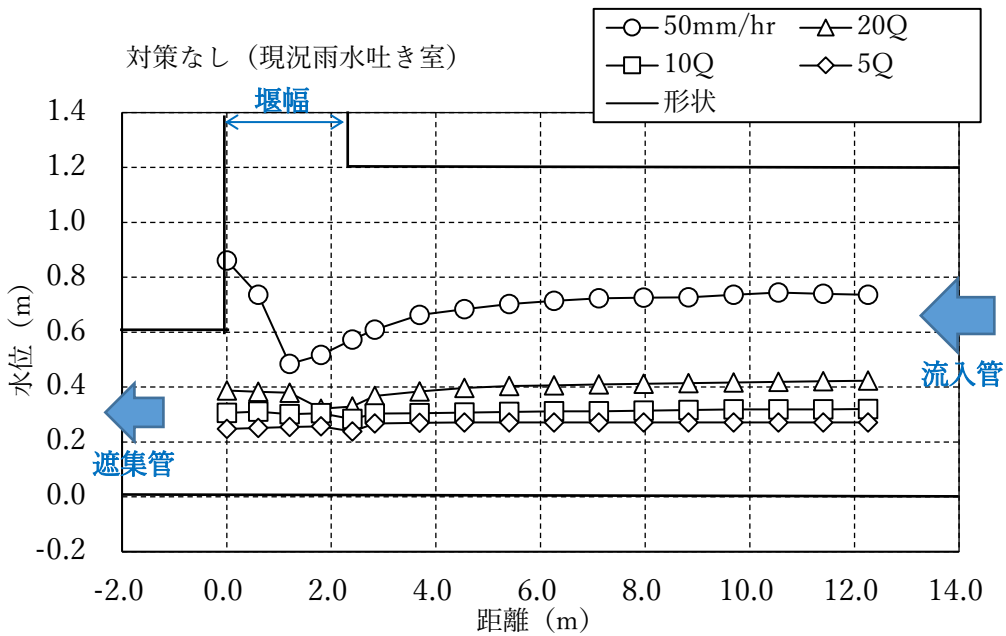


図 3.15.3 流入管の縦断水位変化 (横越流タイプ1, 現況雨水吐き室)

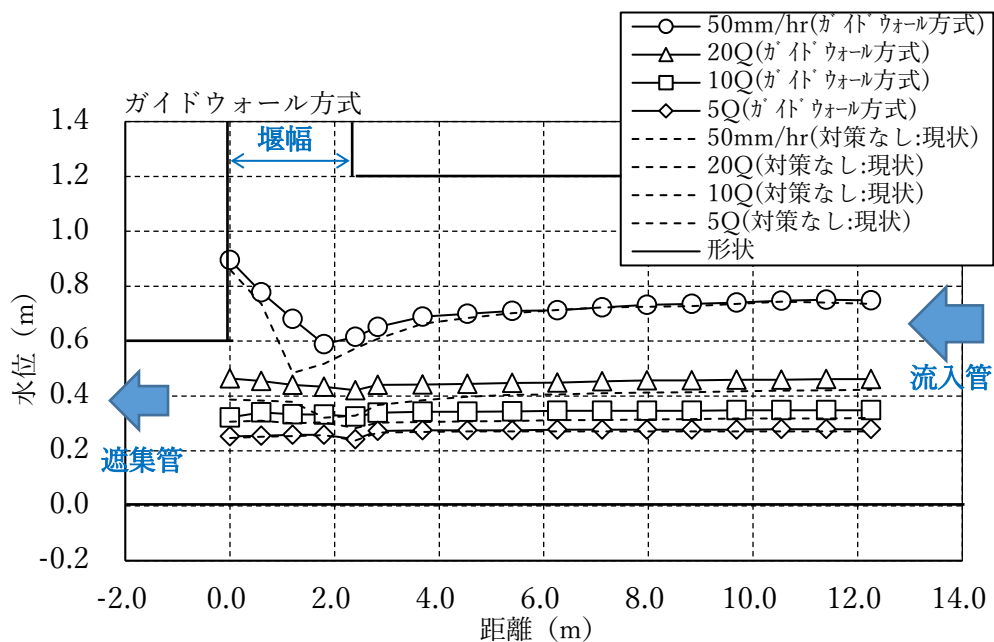


図 3.15.4 流入管の縦断水位変化（横越流タイプ1,流速式水面制御方式）

## (2) 横越流タイプ2（ケース4,5,6,7,8）の水流特性

横越流タイプ2は、遮集管径が $\phi 0.3\text{m}$ で、雨天時の $3Q$ 以上の流量に対しては、遮集管は満管となる。このため、遮集管方向の水面低下を発生させる制御板を設置する「制御板方式」と制御板とガイドウォールを設置する「ガイドウォール方式」で実験を行った。

計画遮集量（ $3Q$ ,  $0.071\text{ m}^3/\text{s}$ ）から計画流量（ $50\text{ mm/hr}$ 相当,  $1.453\text{ m}^3/\text{s}$ ）の範囲においての流量特性を把握する。

### 1) 雨水吐き室の水流特性

#### ① ケース4の実験結果

現況の雨水吐き室における流入量と遮集量の関係を図3.16.1に示す。

$3Q$ 以上では遮集管の流れが満管となるため、流入量の増大とともに遮集量も徐々に増加傾向を示している。

#### ② ケース5（横型制御板のみ）、ケース6（横型制御板とガイドウォール）の実験結果

流速式水面制御の流入量と遮集量の関係を、現況と対比させて図3.16.2に示す。

制御板方式（ケース5）では、遮集管前面に横型制御板が設置されていることから、遮集量がわずかに減少傾向を示すものの、その影響は少ない。

ガイドウォール方式（ケース6）では、ガイドウォールの設置により遮集量が増加傾向を示すが、その量は計画流量（ $50\text{ mm/hr}$ 相当,  $1.453\text{ m}^3/\text{s}$ ）に対して3%程度である。

③ケース 7（縦型制御板のみ）、ケース 8（縦型制御板とガイドウォール）の実験結果  
渦流式水面制御の流入量と遮集量の関係を、現況と対比させて図 3.16.3 に示す。

流速式と同様に制御板方式（ケース 7）では、遮集量はわずかに減少し、ガイドウォール方式（ケース 8）では計画流量（50 mm/hr 相当、 $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$ ）に対して 5%程度増加する。

## 2) 流入管上流部への影響

5Q 相当から計画流量（50 mm/hr 相当、 $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$ ）の範囲における流入管上流部の水位変化を調べた。

### ①現況雨水吐き室の場合

流入管の縦断方向における水位変化を図 3.16.4 に示す。

20Q 以下の流量ではほぼレベルの水位が形成されている。

計画流量（50 mm/hr 相当、 $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$ ）では、遮集管口の水位上昇がみられるが、流入管の上流部に及ぼす水位上昇の影響は小さい。

### ②流速式水面制御

流速式水面制御の流入管上流部の水位変化を、現況雨水吐き室と対比して図 3.16.5、図 3.16.6 に示す。

制御板方式（ケース 5）については、計画流量（50 mm/hr 相当、 $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$ ）までは流入管の上流部への影響は生じない。ガイドウォール方式（ケース 6）では、ガイドウォールの設置によって越流水位が上昇することにより、10Q 以上では流入管の上流への水位上昇がみられるようになる。計画流量（50 mm/hr 相当、 $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$ ）における水位上昇は 0.16m 程度である。

### ③渦流式水面制御

渦流式水面制御の流入管上流部の水位変化を、現況雨水吐き室と対比して図 3.16.7、図 3.16.8 に示す。

制御板方式（ケース 7）については、計画流量（50 mm/hr 相当、 $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$ ）まで流入管上流部への影響は生じない。

ガイドウォール方式（ケース 8）では、ガイドウォールの設置により越流水位が上昇するため、10Q 以上の範囲では流入管上流部への水位上昇がみられる。計画流量（50 mm/hr 相当、 $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$ ）における水位上昇は 0.16m 程度である。

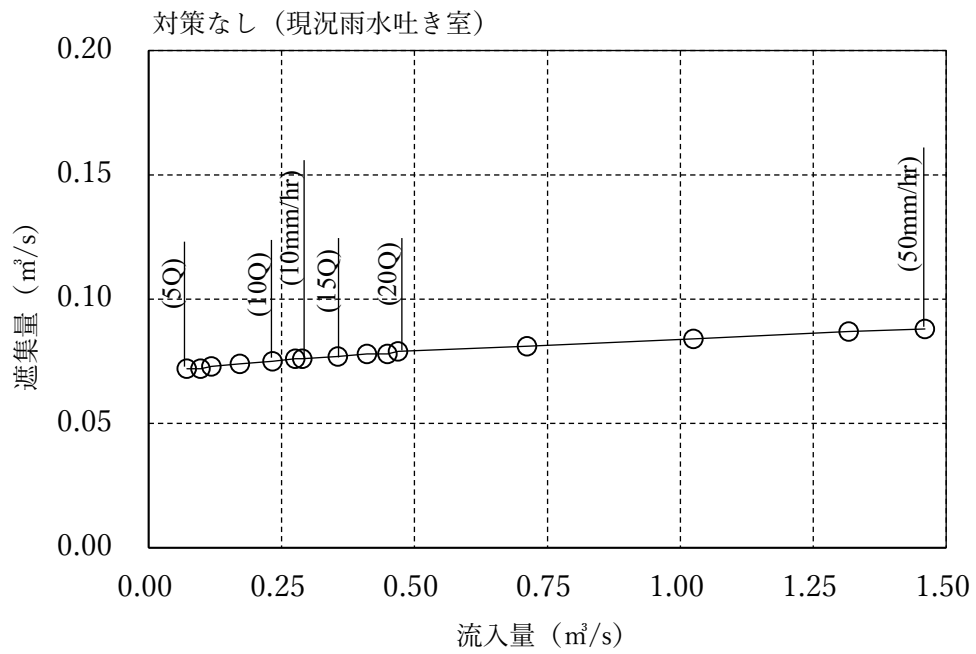


図 3.16.1 流入量と遮集量の関係（横越流タイプ2, ケース4）



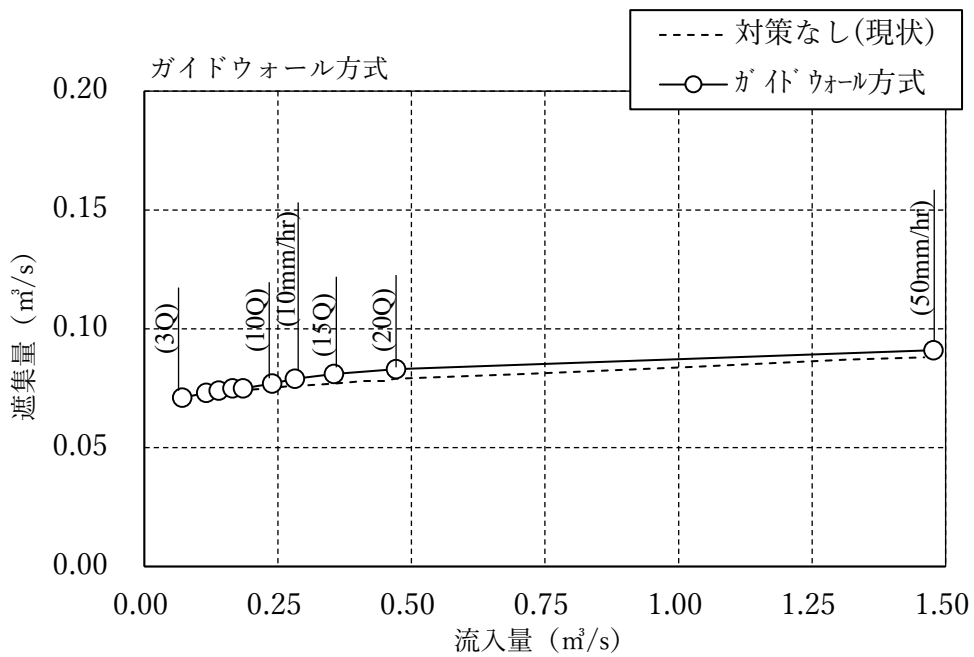
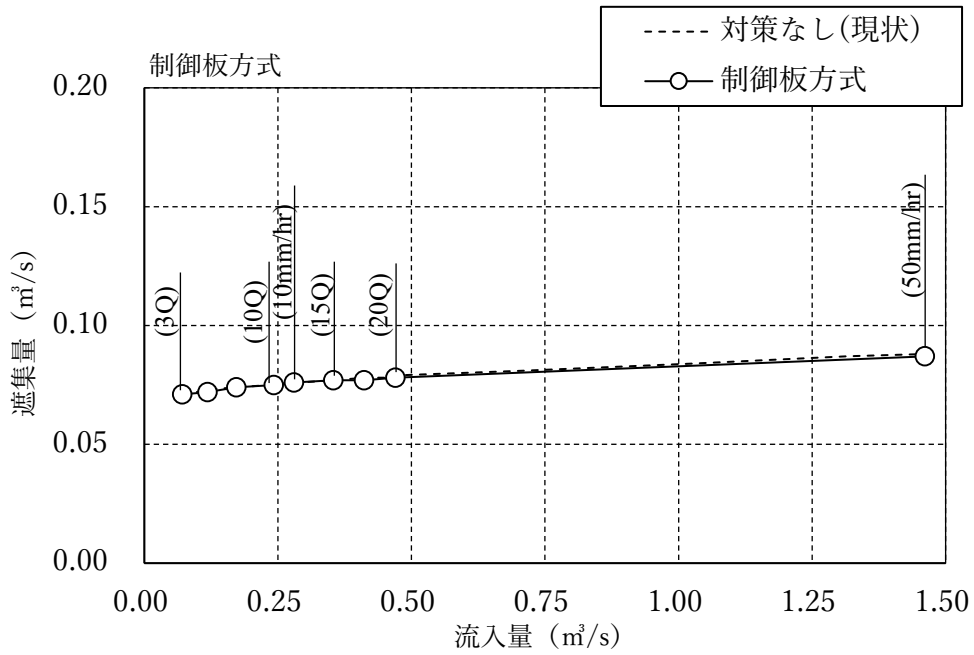


図 3.16.2 流入量と遮集量の関係 (横越流タイプ2, ケース 5,6)

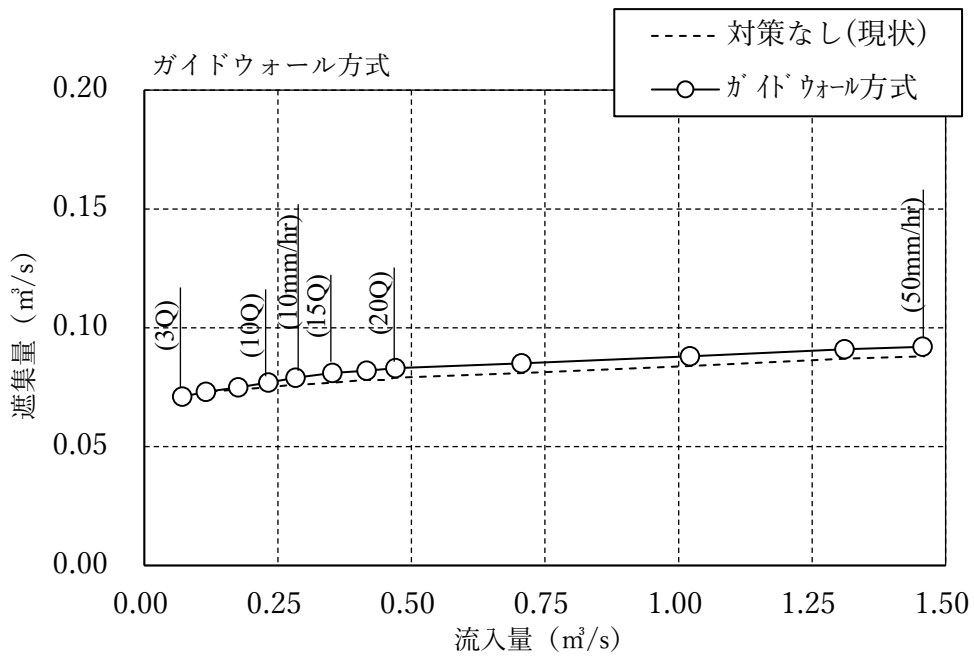
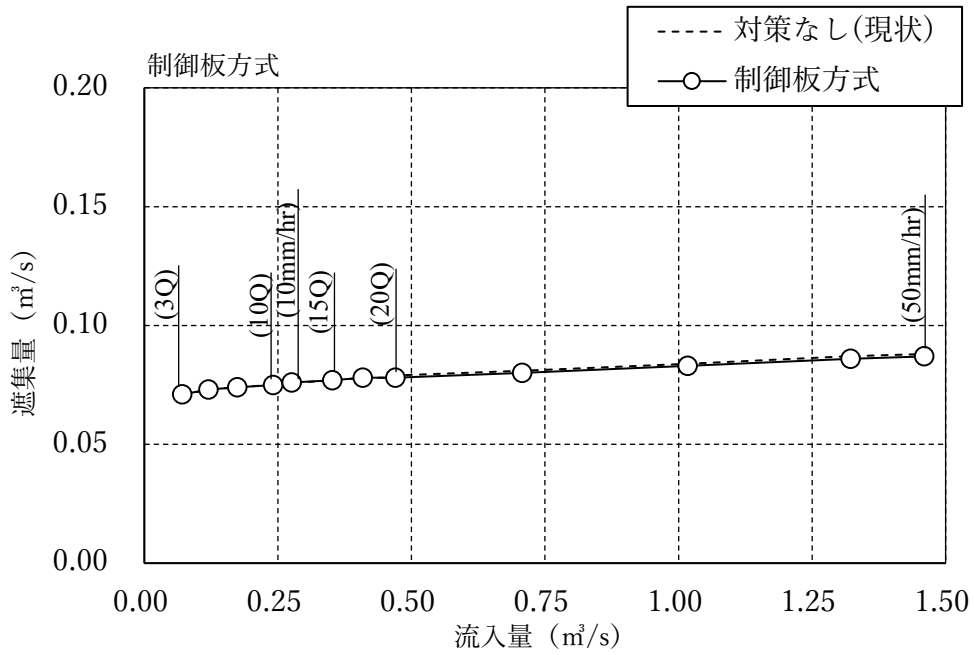


図 3.16.3 流入量と遮集量の関係 (横越流タイプ2, ケース7,8)

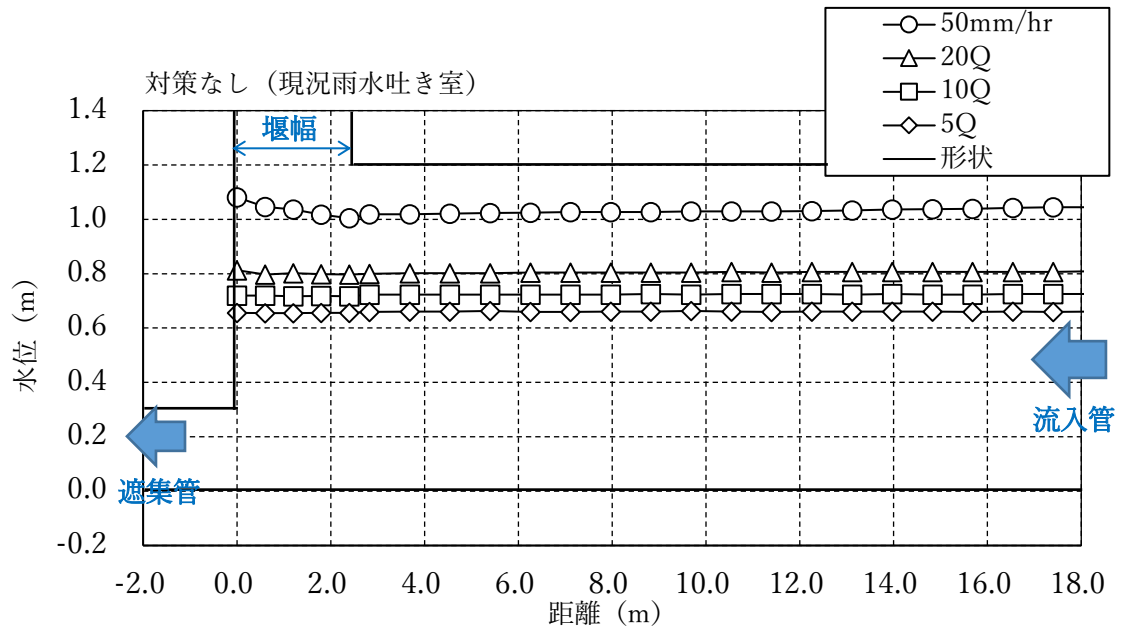


図 3.16.4 流入管の縦断水位変化 (横越流タイプ 2, 現況雨水吐)

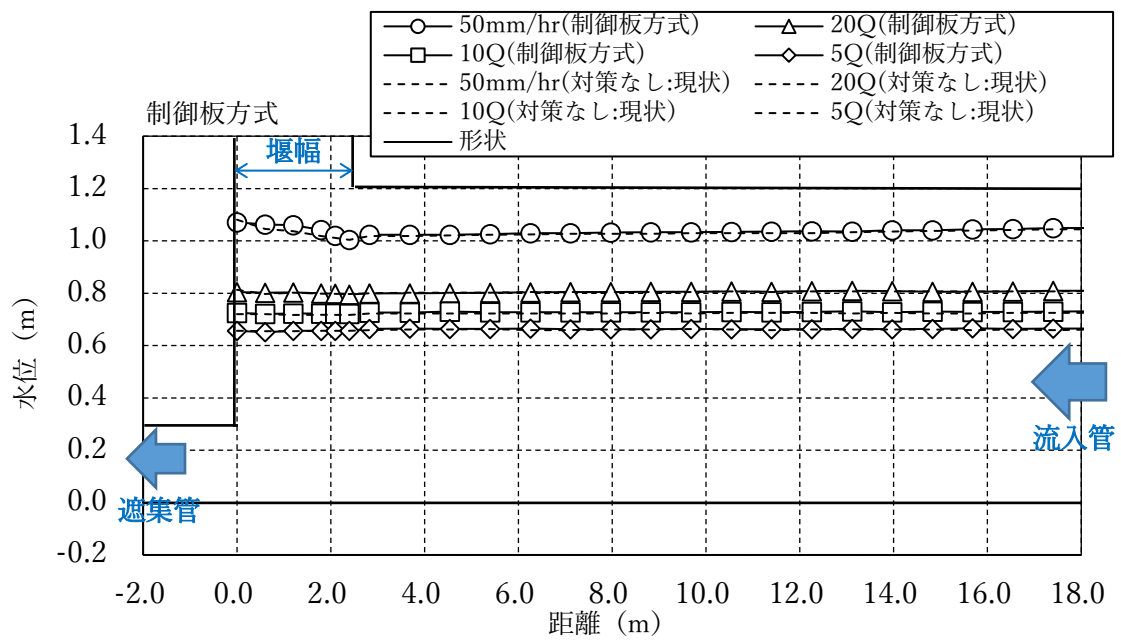


図 3.16.5 流入管の縦断水位変化 (横越流タイプ 2, 流速式, 制御盤方式: ケース 5)

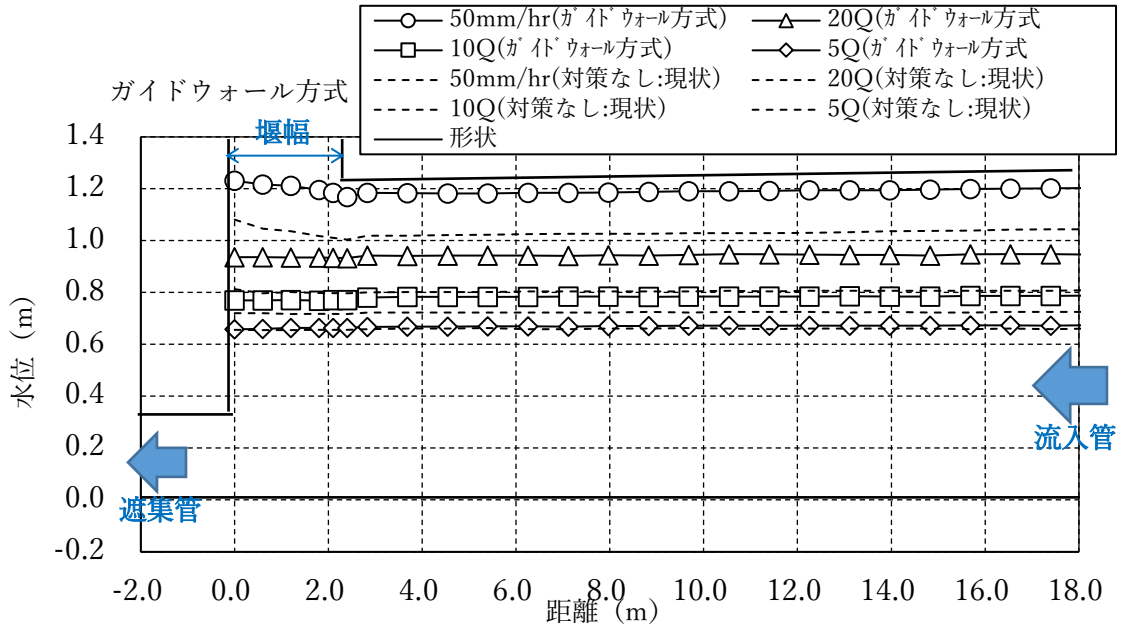


図 3.16.6 流入管の縦断水位変化 (横越流タイプ 2,流速式,ガイドウォール方式:ケース 6)

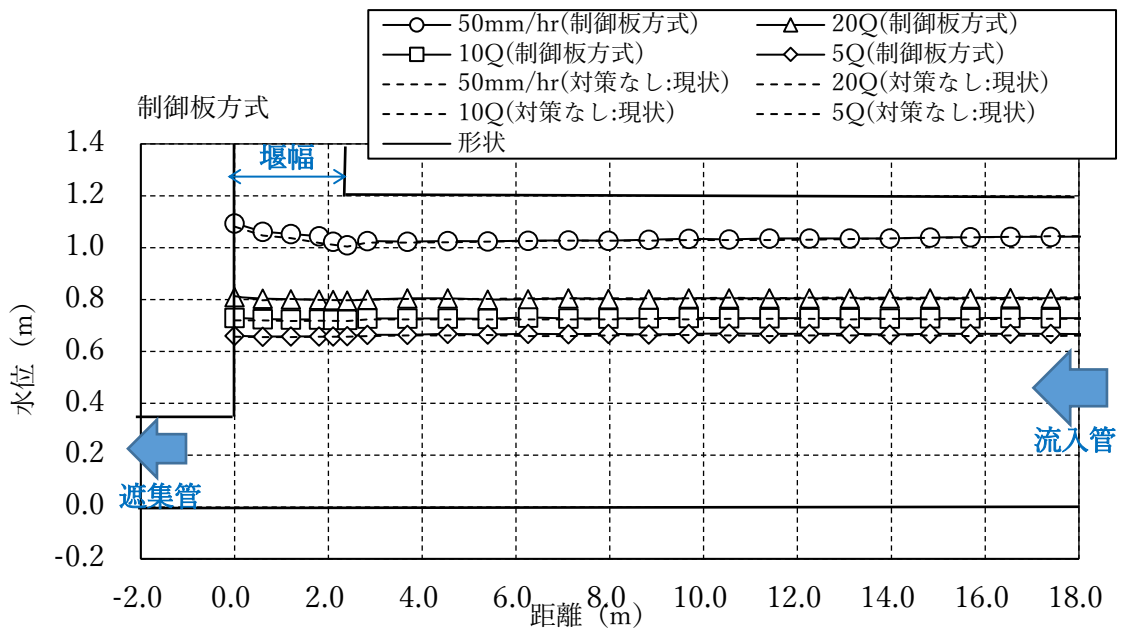


図 3.16.7 流入管の縦断水位変化 (横越流タイプ 2,渦流式,制御盤方式:ケース 7)

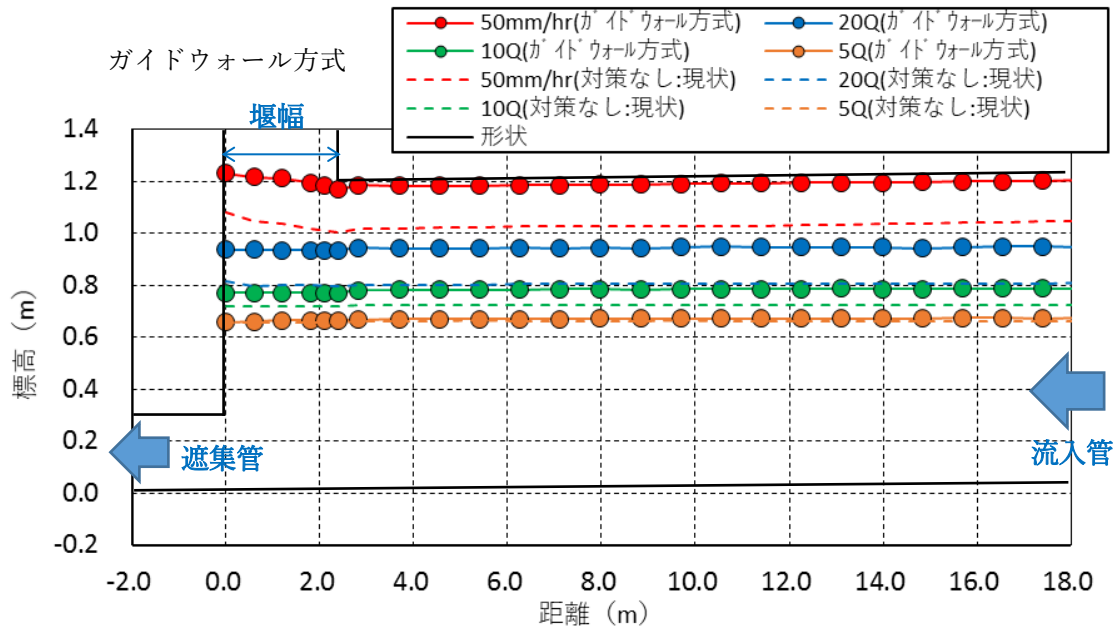


図 3.16.8 流入管の縦断水位変化(横越流タイプ2,渦流式,ガイドウォール方式:ケース8)

(4) 横越流タイプ3 (ケース9,10,11,12,13) の水流特性

横越流タイプ3は、遮集管と人工壁との離隔が大きい条件として5D離れた場合を想定し、制御板の配置による実験を行った。

計画遮集量(3Q, 0.071 m<sup>3</sup>/s)から2Q相当の範囲においての流量特性を把握する。

なお、ケース9は対策なし、ケース10は横型制御板のみ、ケース11は横型制御板とガイドウォール、ケース12は縦型制御板のみ、ケース13は縦型制御板とガイドウォールである。

1)雨水吐き室の水流特性

①ケース9の実験結果

現況の雨水吐き室における流入量と遮集量の関係を図3.17.1に示す。

3Q以上では遮集管の流れが満管となるため、流入量の増大とともに遮集量も徐々に増加傾向を示している。

②ケース10,11の実験結果

流速式水面制御の流入量と遮集量の関係を、現況と対比させて図3.17.2に示す。

ケース10では、遮集量は現況と同様である。

ケース11では遮集量が若干増加するが、増加量は2Q相当で5%程度である。

③ケース12,13の実験結果

渦流式水面制御の流入量と遮集量の関係を、現況と対比させて図3.17.3に示す。

制御板方式（ケース 12）では、遮集量は現状と同等とみなせる。

ガイドウォール方式（ケース 13）では遮集量は若干増加するが、その増加量は  $2Q$  で 6% 程度である。

## 2) 流入管上流部への影響

### ① 現況雨水吐き室

現況雨水吐き室の流入管の縦断方向における水位変化を図 3.17.4 に示す。

$15Q$  以下ではほぼレベルの水面が形成されている。

### ② 流速式水面制御

流速式水面制御の流入管縦断水位を、現況雨水吐き室と対比させて図 3.17.5, 図 3.17.6 に示す。

制御板方式（ケース 10）では、 $15Q$  相当までは流入管上流部への影響は生じない。

ガイドウォール方式（ケース 11）では、ガイドウォールの設置により越流水位が上昇するため、 $5Q$  を超える範囲では流入管上流部に水位上昇がみられる。 $15Q$  相当における水位上昇は  $0.12\text{m}$  程度である。

### ③ 渦流式水面制御

渦流式水面制御の流入管縦断水位を、現況雨水吐き室と対比させて図 3.17.7, 図 3.17.8 に示す。

制御板方式（ケース 12）では、 $15Q$  相当までは流入管上流部への影響は生じない。

ガイドウォール方式（ケース 13）では、ガイドウォールの設置により越流水位が上昇するため、 $5Q$  を超える範囲では流入管上流部に水位上昇がみられる。 $15Q$  相当における水位上昇は  $0.12\text{m}$  程度である。

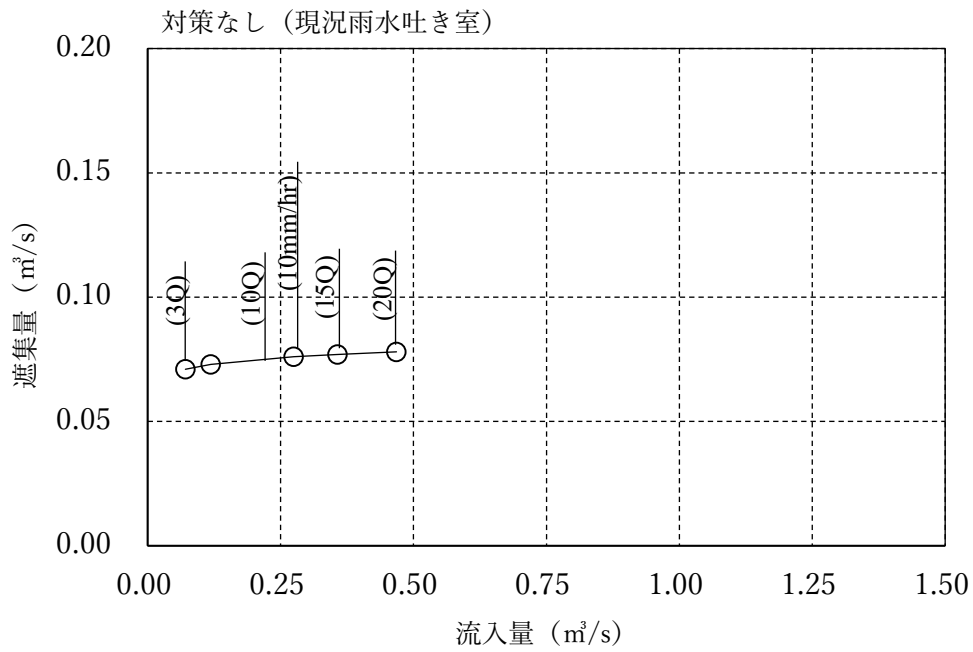
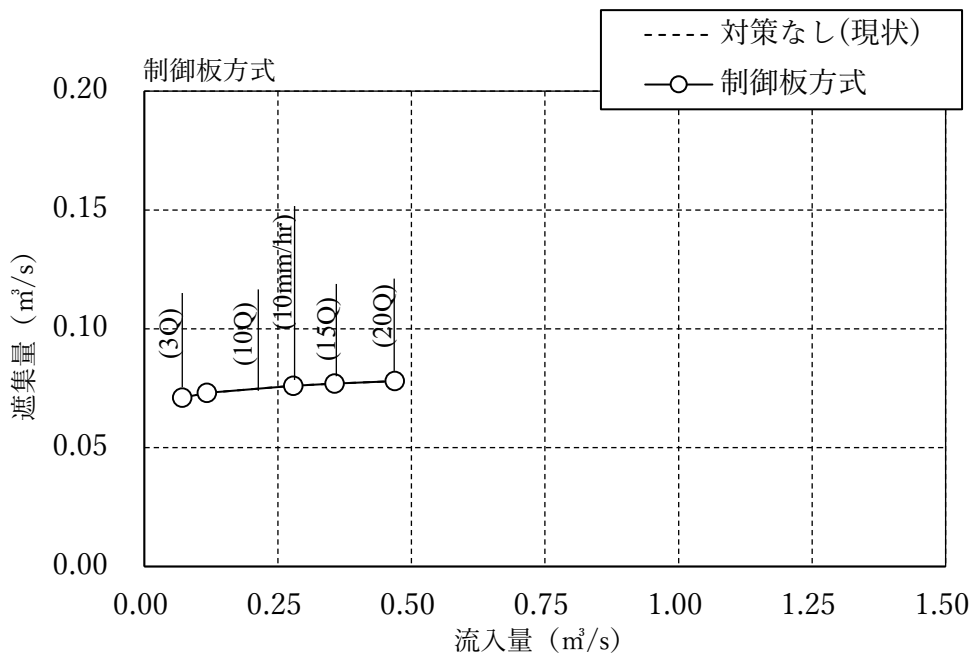


図 3.17.1 流入量と遮集量の関係（横越流タイプ3, ケース9）



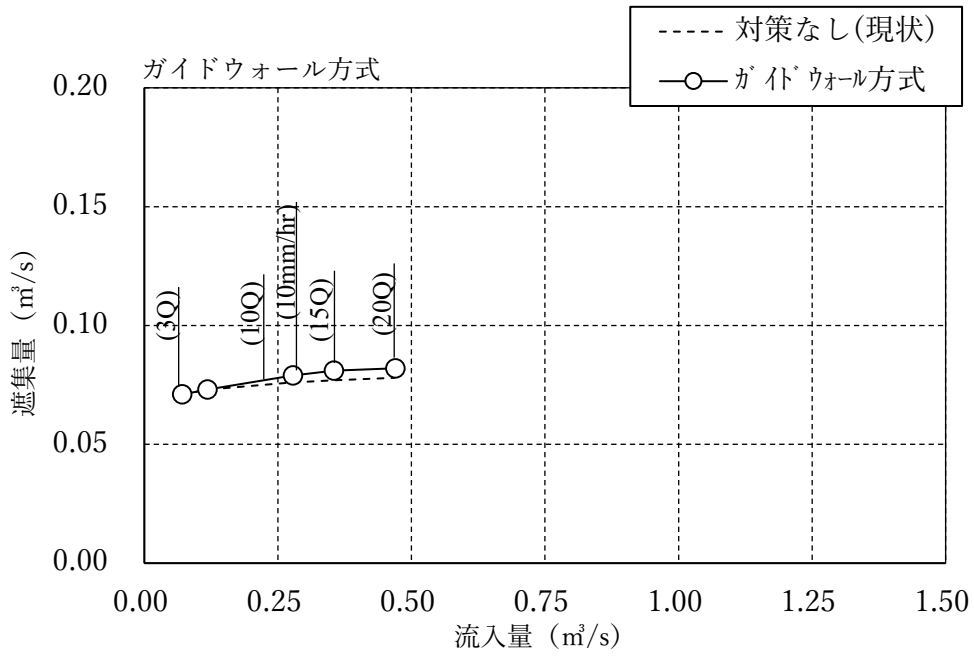
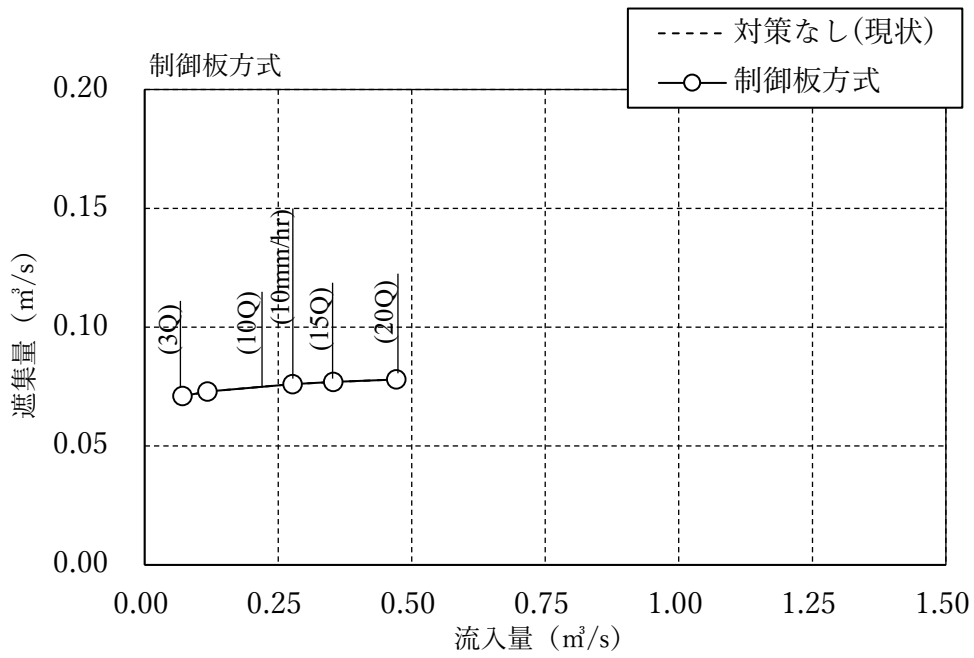


図 3.17.2 流入量と遮集量の関係 (横越流タイプ 3, ケース 10, 11)





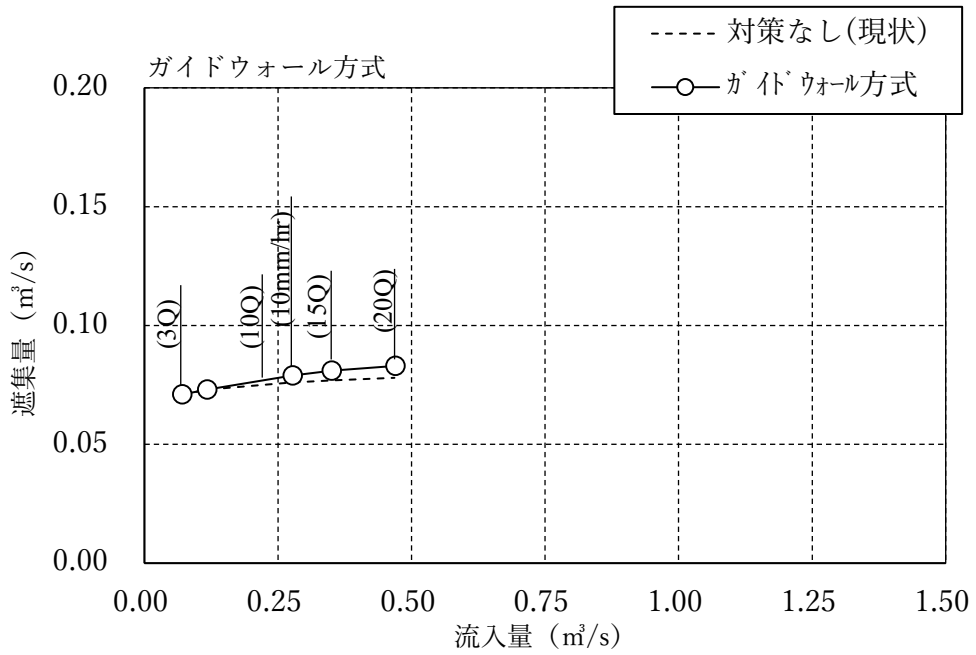


図 3.17.3 流入量と遮集量の関係 (横越流タイプ 3, ケース 12, 13)

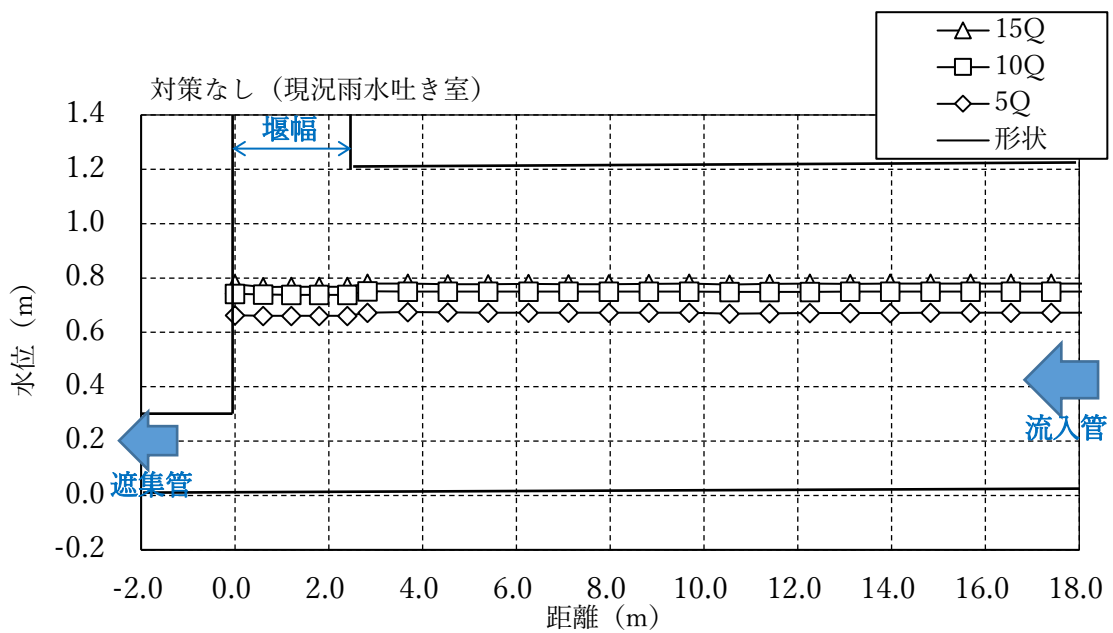


図 3.17.4 流入管の縦断水位変化 (横越流タイプ 3, 現況雨水吐: ケース 9)

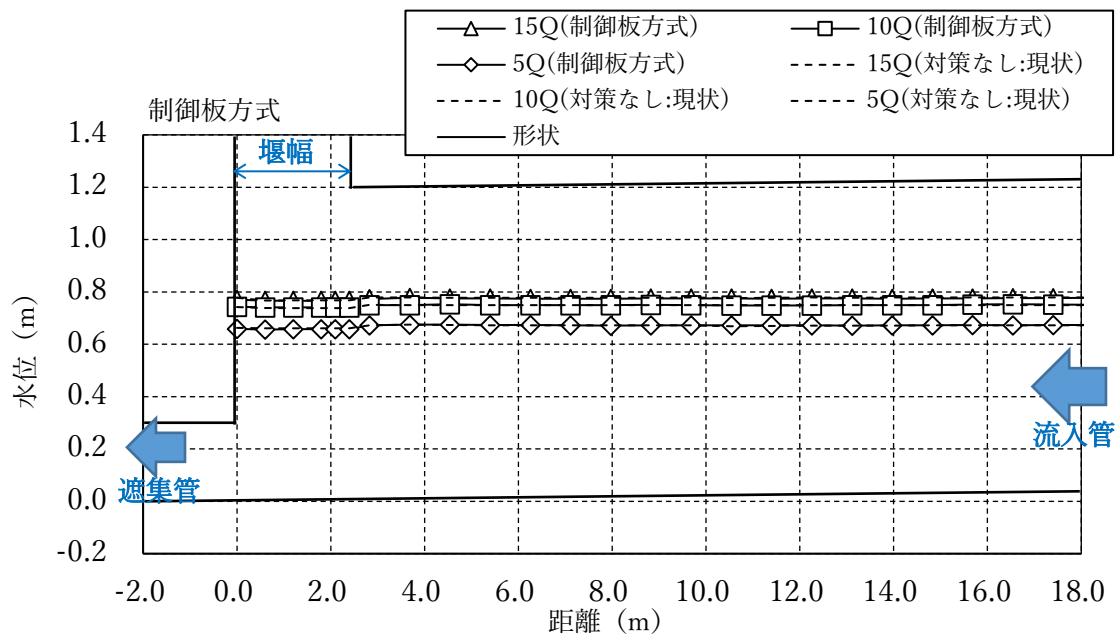


図 3.17.5 流入管の縦断水位変化 (横越流タイプ3,流速式,制御盤方式:ケース10)

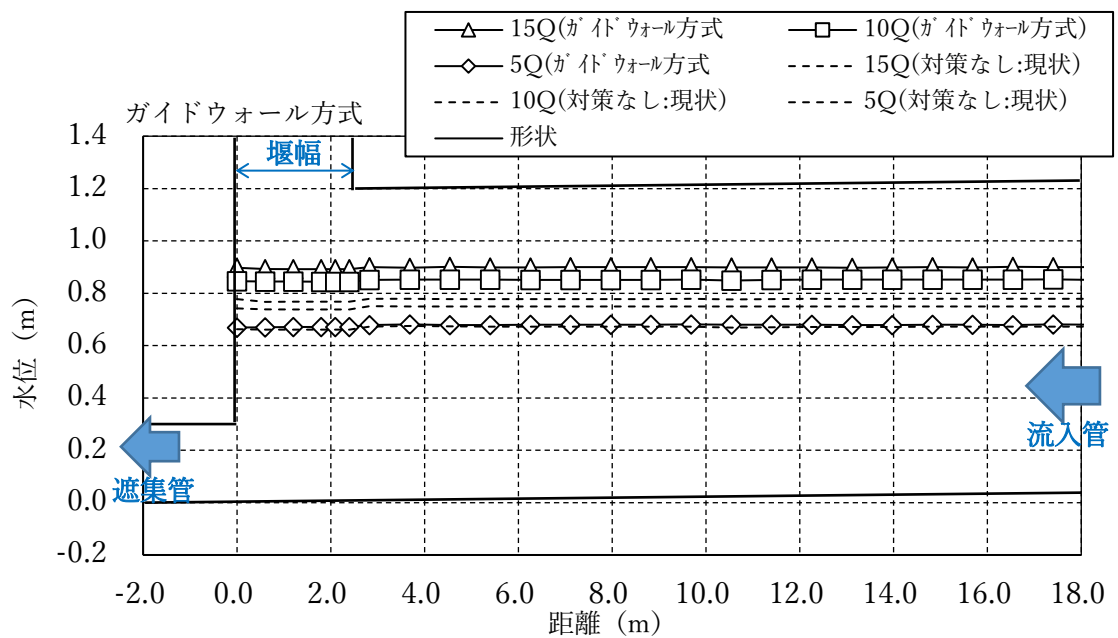


図 3.17.6 流入管の縦断水位変化 (横越流タイプ3,流速式,ガイドウォール方式:ケース11)

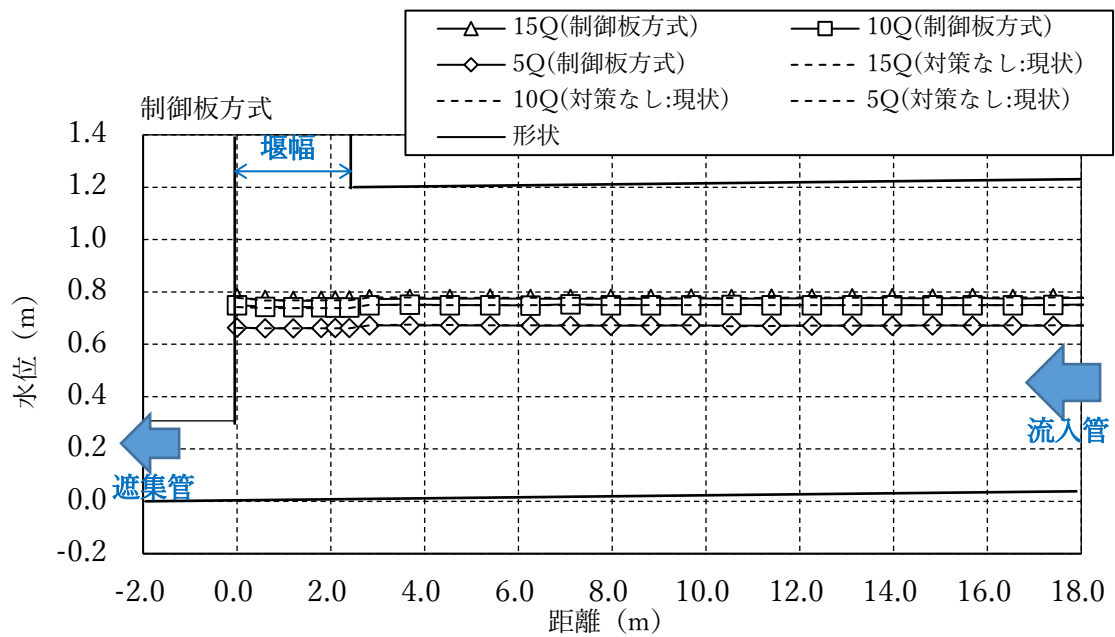


図 3.17.7 流入管の縦断水位変化 (横越流タイプ 3,渦流式,制御盤方式:ケース 12)

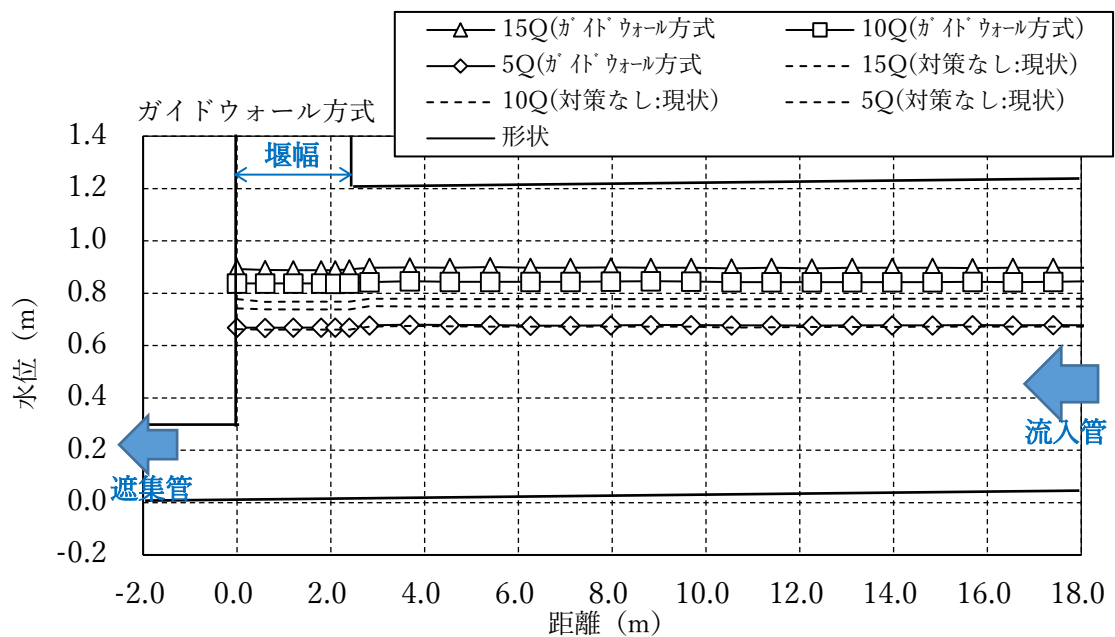


図 3.17.8 流入管の縦断水位変化 (横越流タイプ 3,渦流式,ガイドウォール方式:ケース 13)

(5) 横越流タイプ 4 (ケース 14,15,16,17,18) の水流特性

横越流タイプ 4 は、遮集管と人工壁との離隔の影響を把握するために、3D 離れた場合

を想定し実験を行った。

計画遮集量（ $3Q$ ,  $0.071 \text{ m}^3/\text{s}$ ）から計画流量（ $50 \text{ mm/hr}$ ,  $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$ ）の範囲においての流量特性を把握する。

なお、ケース 14 は対策なし、ケース 15 は横型制御板のみ、ケース 16 は横型制御板とガイドウォール、ケース 17 は縦型制御板のみ、ケース 18 は縦型制御板とガイドウォールである。

## 1) 雨水吐き室の水流特性

### ①ケース 14 の実験結果

現況の雨水吐き室における流入量と遮集量の関係を図 3.18.1 に示す。

$3Q$  以上では遮集管の流れが満管となるため、流入量の増大とともに遮集量も徐々に増加傾向を示している。

### ②ケース 15,16 の実験結果

流速式水面制御の流入量と遮集量の関係を現況と対比させて図 3.18.2 に示す。

制御板方式（ケース 15）では、遮集量は現況と同様である。

ガイドウォール方式（ケース 16）では遮集量が若干増加するが、増加量は計画流量で 3% 程度である。

### ③ケース 17,18 の実験結果

渦流式水面制御の流入量と遮集量の関係を、現況と対比させて図 3.18.3 に示す。

制御板方式（ケース 17）では、遮集量は現状と同等とみなせる。

ガイドウォール方式（ケース 18）では遮集量は若干増加するが、その増加量は計画流量（ $50 \text{ mm/hr}$  相当,  $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$ ）の 6% 程度である。

## 2) 流入管上流部への影響

### ①現況雨水吐き室

現況雨水吐き室の流入管の縦断方向における水位変化を図 3.18.4 に示す。

$20Q$  以下ではほぼレベルの水面が形成されている。計画流量（ $50 \text{ mm/hr}$  相当,  $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$ ）では、遮集管口の水位上昇がみられるが、流入管上流部への水位上昇に及ぼす影響は少ない。

### ②流速式水面制御

流速式水面制御の流入管縦断水位を、現況雨水吐き室と対比させて図 3.18.5, 図 3.18.6 に示す。

制御板方式（ケース 15）では、計画流量規模までは流入管上流部への影響は生じない。

ガイドウォール方式（ケース 16）では、ガイドウォールの設置により越流水位が上昇するため、 $10Q$  以上の範囲では流入管上流部に水位上昇がみられる。計画流量（ $50 \text{ mm/hr}$  相当,  $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$ ）における水位上昇は  $0.16\text{m}$  程度である。

### ③渦流式水面制御

渦流式水面制御の流入管縦断水位を、現況雨水吐き室と対比させて図 3.18.7, 図 3.18.8 に示す。

制御板方式（ケース 17）では、計画流量規模までは流入管上流部への影響は生じない。

ガイドウォール方式（ケース 18）では、ガイドウォールの設置により越流水位が上昇するため、10Q 以上の範囲では流入管上流部に水位上昇がみられる。計画流量（50 mm/hr 相当、1.453 m<sup>3</sup>/s）による水位上昇は 0.15m 程度である。

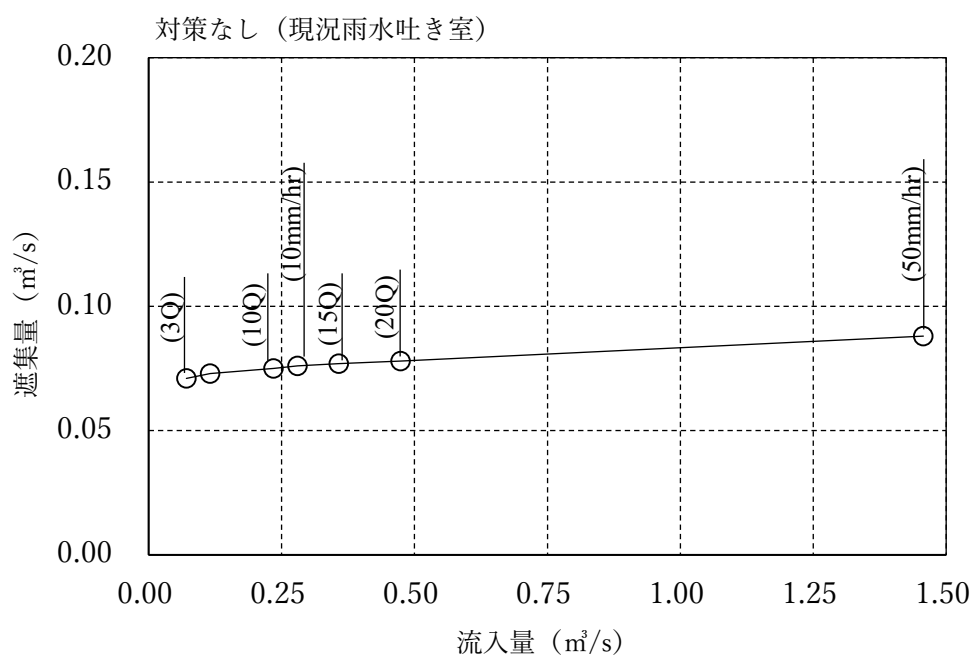


図 3.18.1 流入量と遮集量の関係（横越流タイプ 4, ケース 14）

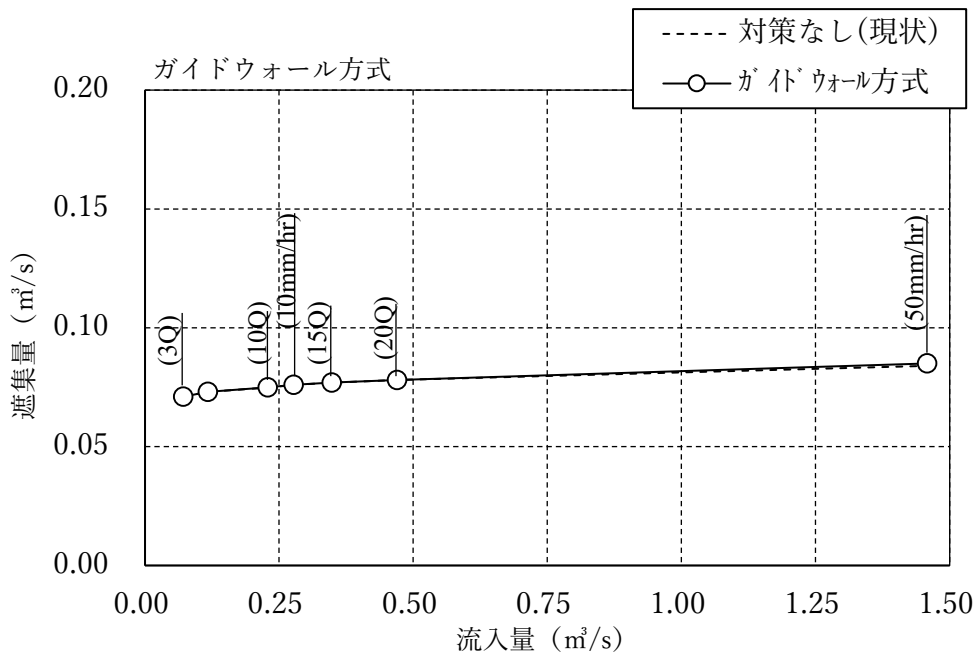
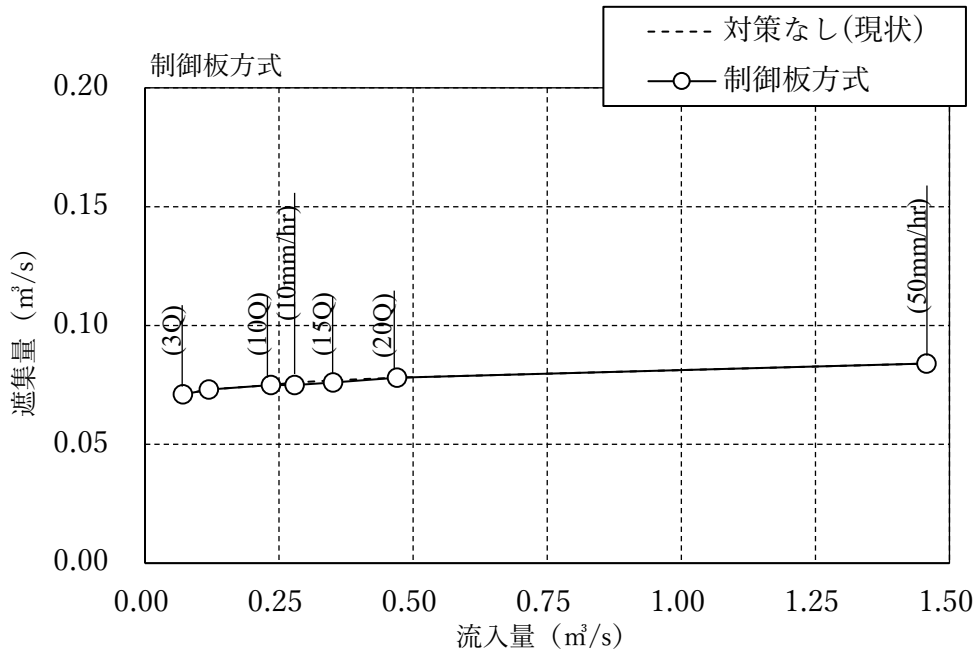


図 3.18.2 流入量と遮集量の関係 (横越流タイプ 4, ケース 15, 16)

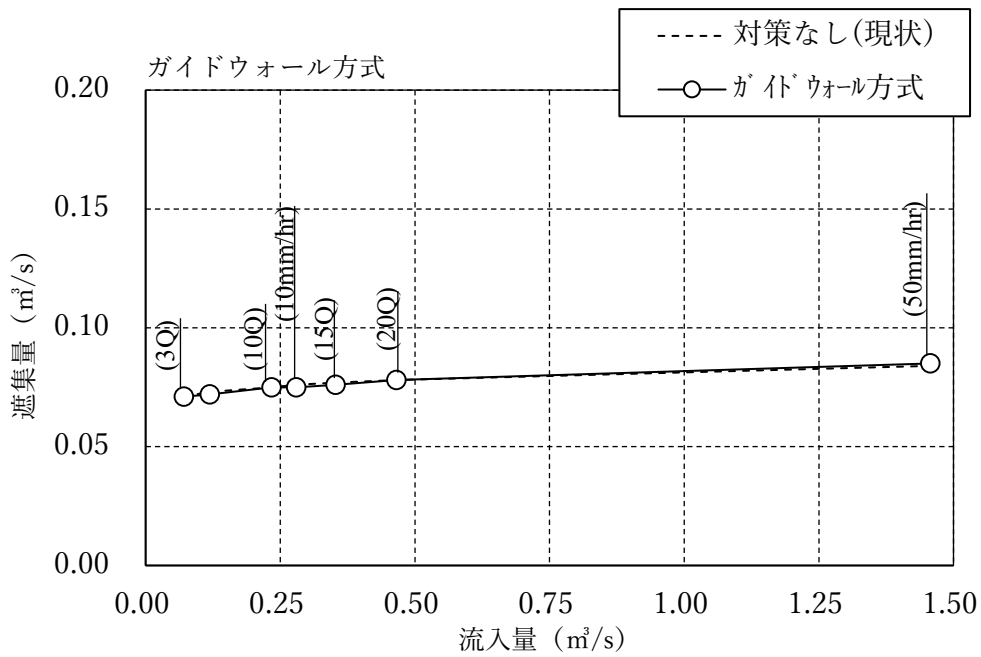
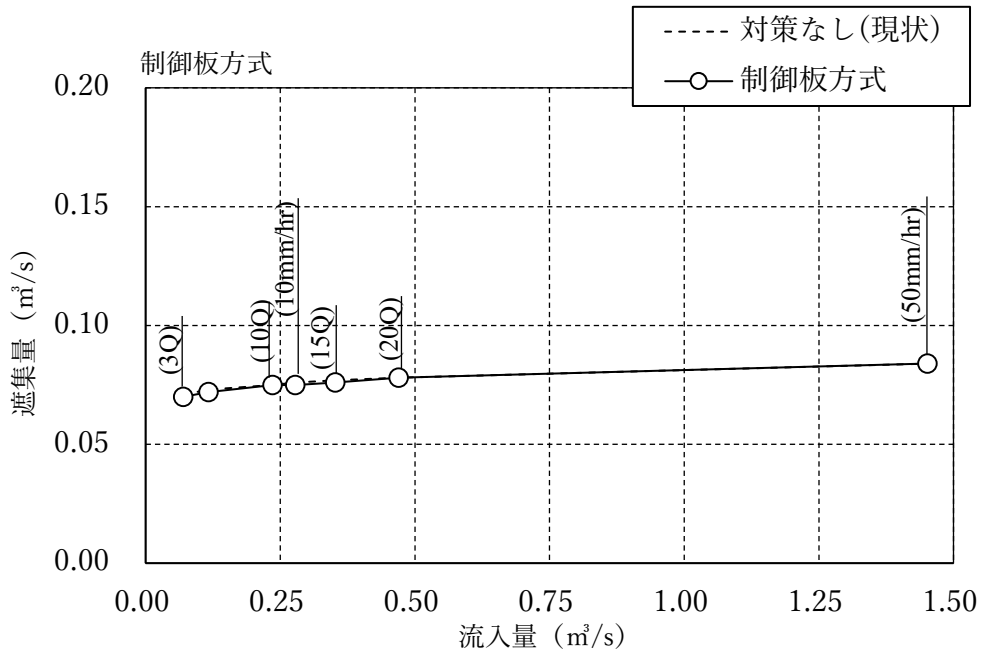


図 3.18.3 流入量と遮集量の関係 (横越流タイプ 4, ケース 17, 18)

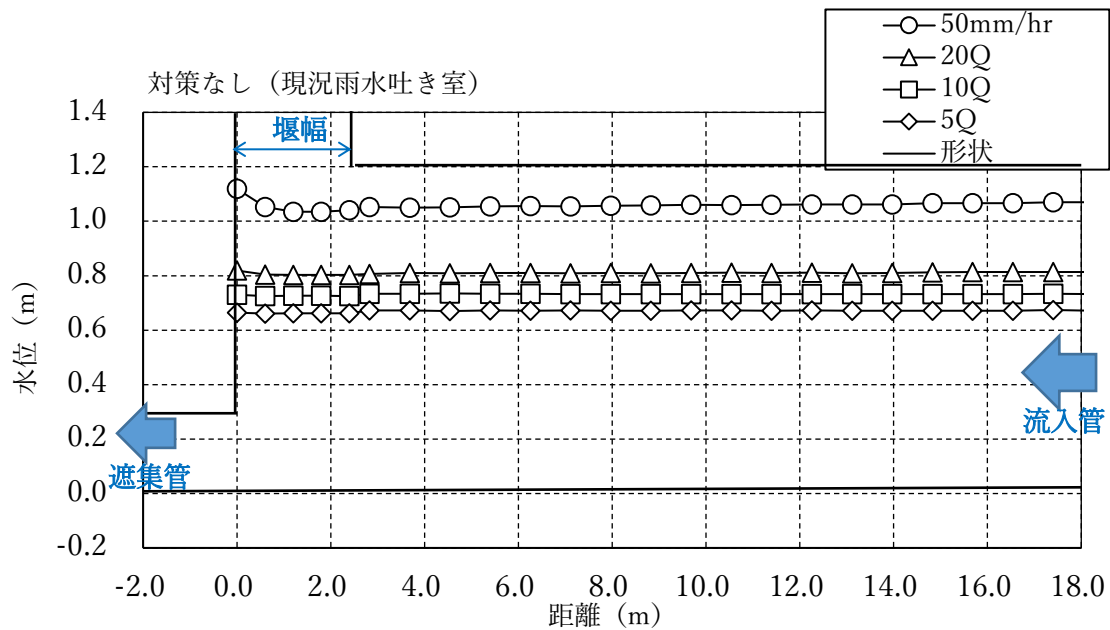


図 3.18.4 流入管の縦断水位変化（横越流タイプ4,現況雨水吐；ケース14）

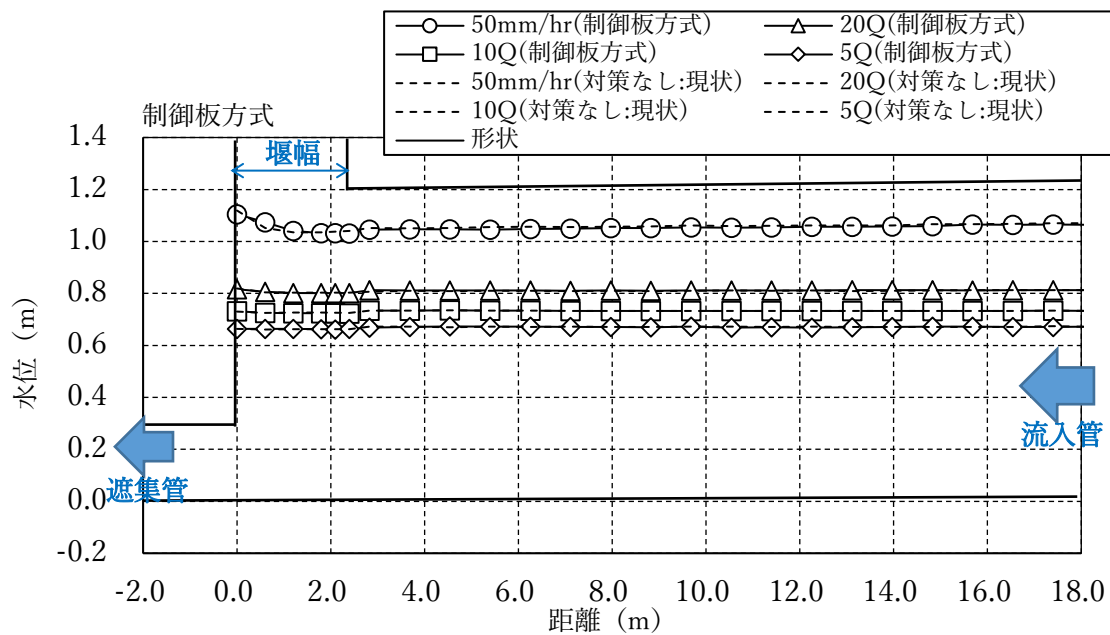


図 3.18.5 流入管の縦断水位変化（横越流タイプ4,流速式,制御板方式；ケース15）



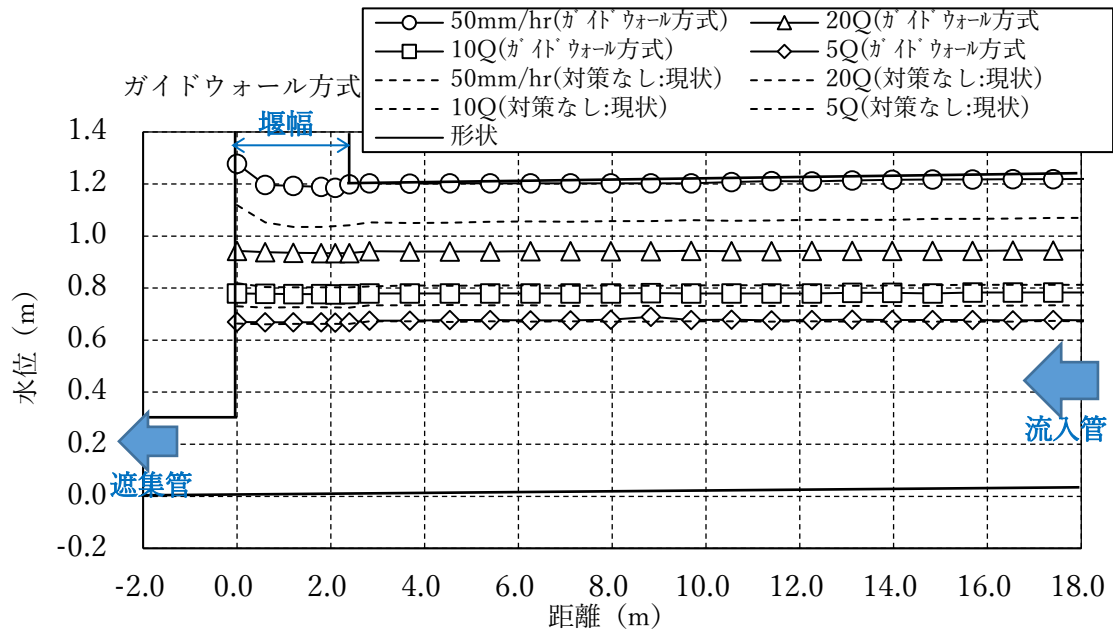


図 3.18.6 流入管の縦断水位変化 (横越流タイプ 4,流速式,ガイドウォール方式:ケース 16)

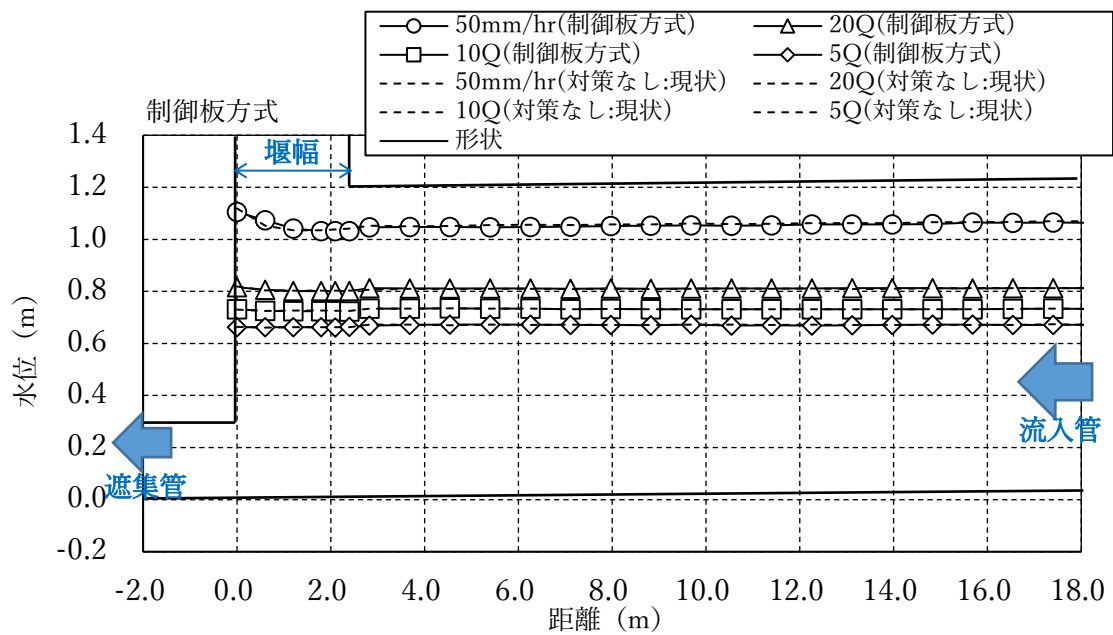


図 3.18.7 流入管の縦断水位変化 (横越流タイプ 4,渦流式,制御板方式:ケース 17)

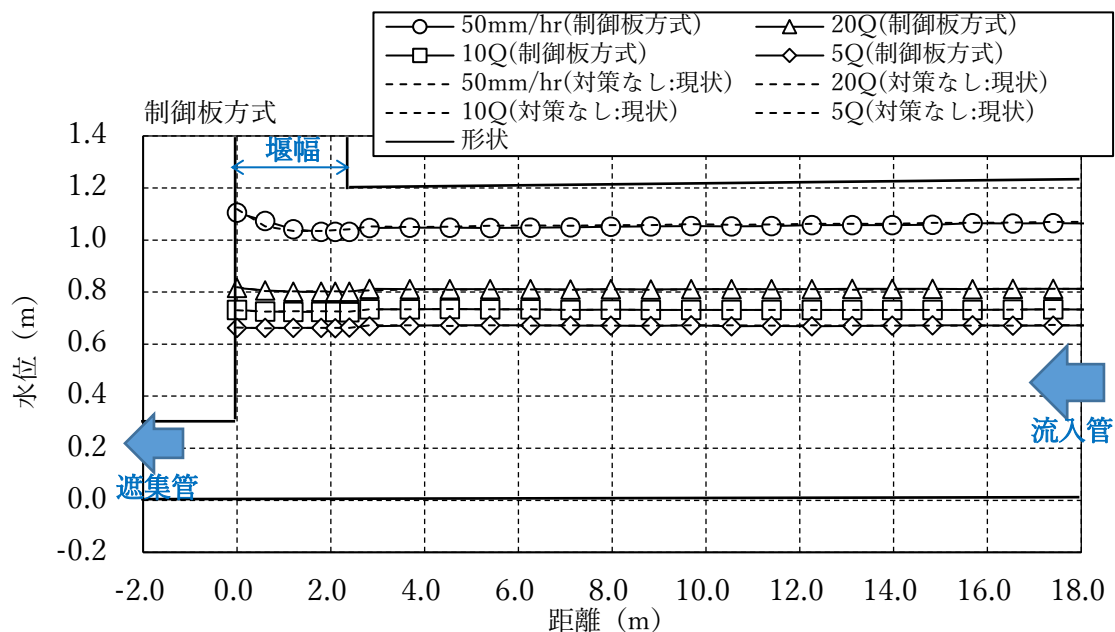


図 3.18.8 流入管の縦断水位変化(横越流タイプ4,渦流式,ガイドウォール方式:ケース18)

(6) 正面越流タイプ1 (ケース19,20,21,22,23) の水流特性

正面越流タイプ1について「制御板方式」と「ガイドウォール方式」についての実験を行った。

計画遮集量 (3Q, 0.071 m<sup>3</sup>/s) から計画流量 (50 mm/hr, 1.453 m<sup>3</sup>/s) の範囲においての流量特性を把握する。

なお、ケース19は対策なし、ケース20は横型制御板のみ、ケース21は横型制御板とガイドウォール、ケース22は縦型制御板のみ、ケース23は縦型制御板とガイドウォールである。

1) 雨水吐き室の水流特性

① ケース19の実験結果

現況の雨水吐き室における流入量と遮集量の関係を図3.19.1に示す。

3Q以上では遮集管の流れが満管となるため、流入量の増大とともに遮集量も徐々に増加傾向を示している。

② ケース20,21の実験結果

流速式水面制御の流入量と遮集量の関係を現況と対比させて図3.19.2に示す。

制御板方式(ケース20)とガイドウォール方式(ケース21)ともに、現況と同様の流量特性である。

### ③ケース 22,23 の実験結果

渦流式水面制御の流入量と遮集量の関係を、現況と対比させて図 3.19.3 に示す。

制御板方式（ケース 22）とガイドウォール方式（ケース 23）ともに、現況と同様の流量特性である。

#### 2) 流入管上流部への影響

##### ① 現況雨水吐き室

現況雨水吐き室の流入管の縦断方向における水位変化を図 3.19.4 に示す。

20Q 以下ではほぼレベルの水面が形成されている。計画流量（50 mm/hr 相当、1.453 m<sup>3</sup>/s）においても、遮集管口の水位上昇がみられず、一様勾配の水面形が形成されている。

##### ② 流速式水面制御

流速式水面制御の流入管縦断水位を、現況雨水吐き室と対比させて図 3.19.5、図 3.19.6 に示す。

制御板方式（ケース 20）及びガイドウォール方式（ケース 21）ともに、現況雨水吐き室と同様の水面形であり、流入管上流部への影響は生じない。

##### ③ 渦流式水面制御

渦流式水面制御の流入管縦断水位を、現況雨水吐と対比させて図 3.19.7、図 3.19.8 に示す。制御板方式（ケース 22）及びガイドウォール方式（ケース 23）ともに、現況雨水吐き室と同様の水面形であり、流入管上流部への影響は生じない。

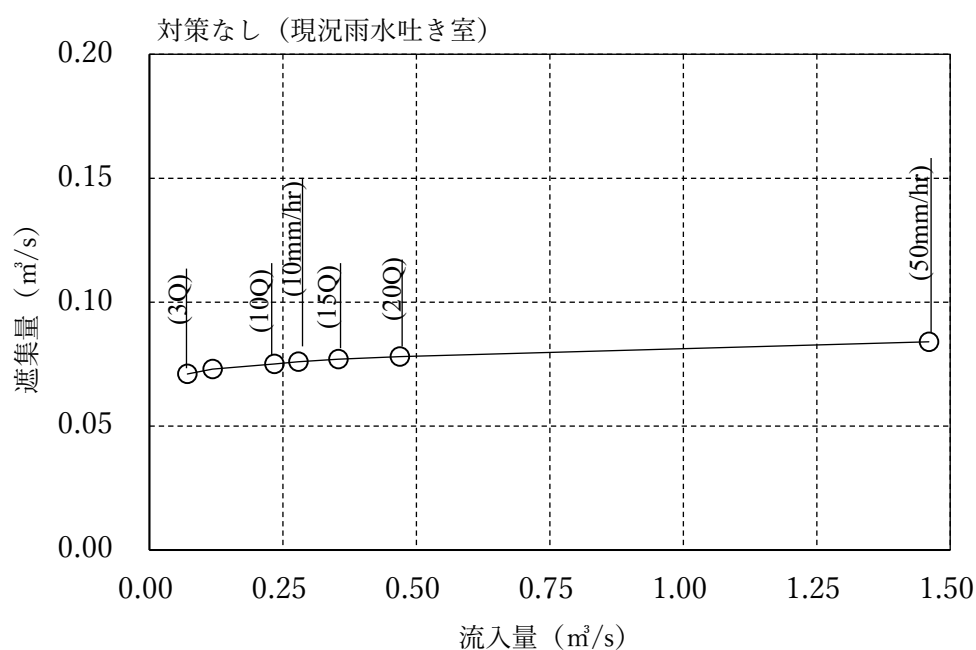


図 3.19.1 流入量と遮集量の関係（正面越流タイプ 1, ケース 19）

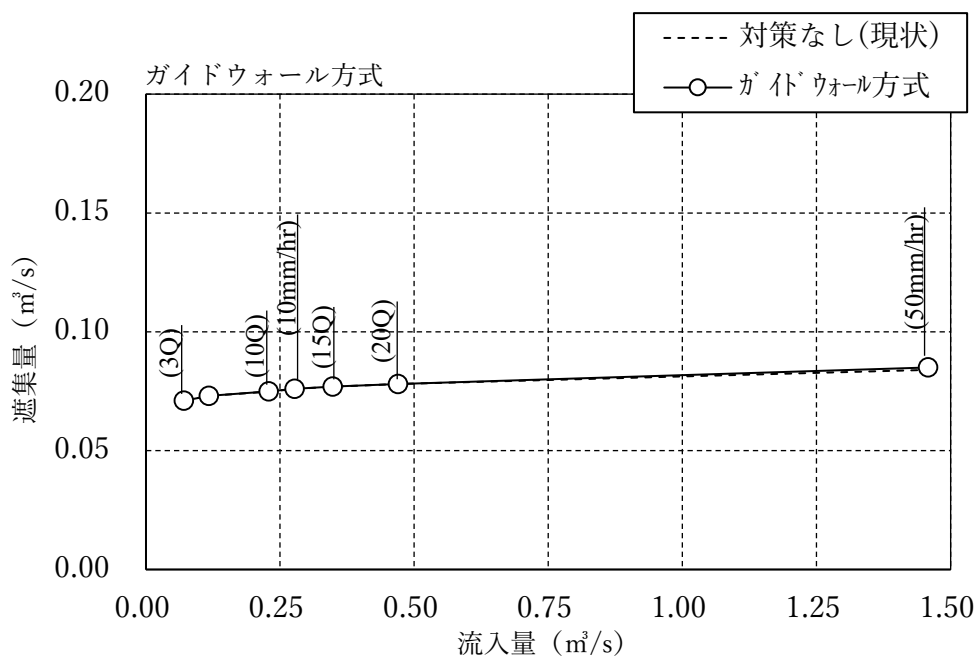
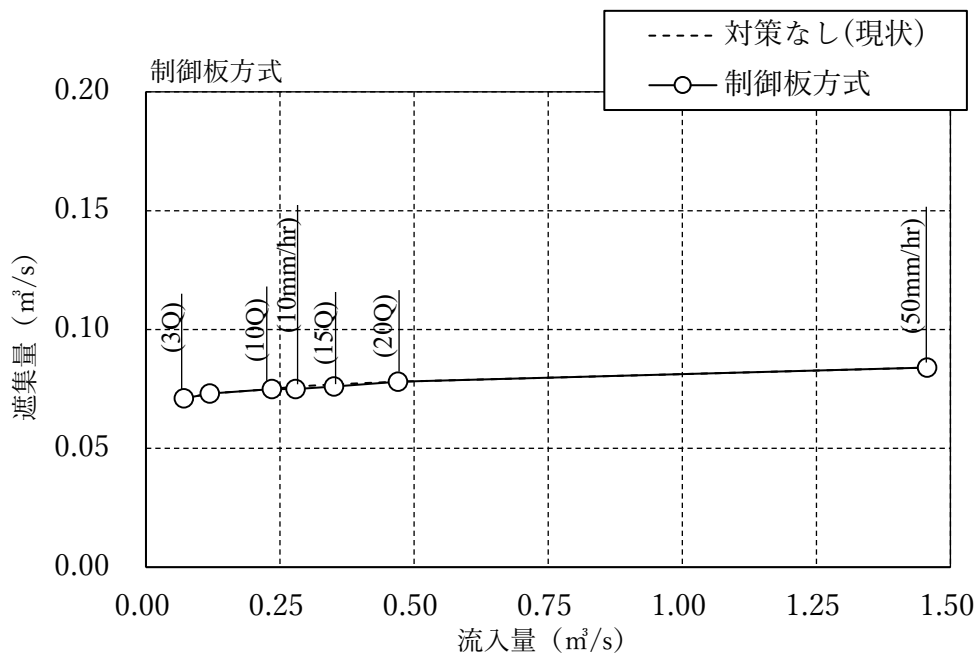


図 3.19.2 流入量と遮集量の関係 (正面越流タイプ1, ケース 20,21)

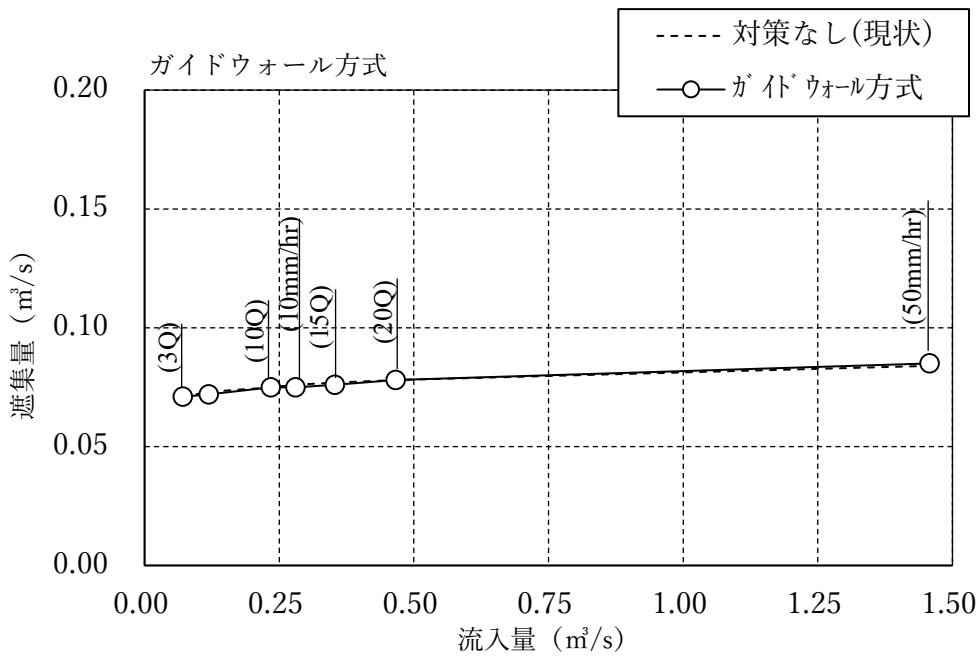
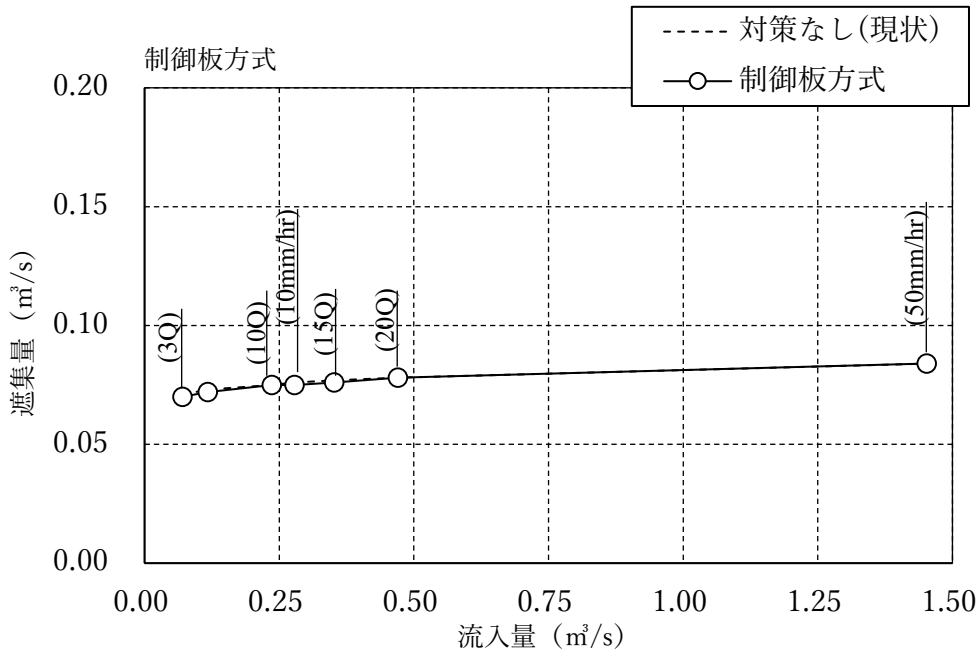


図 3.19.3 流入量と遮集量の関係 (正面越流タイプ1, ケース 22,23)

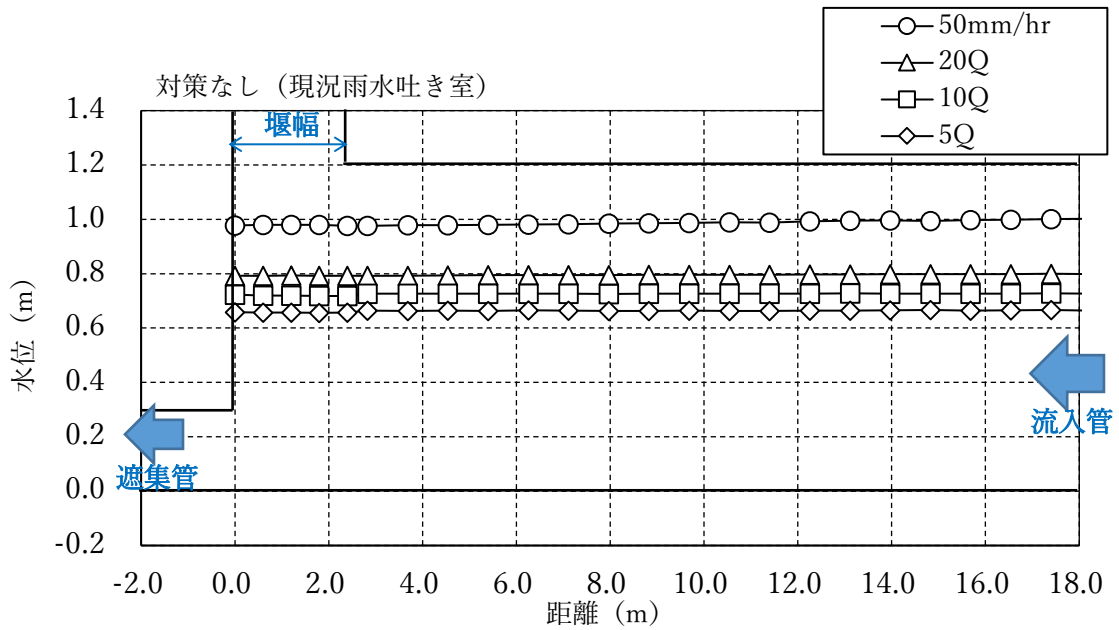


図 3.19.4 流入管の縦断水位変化（正面越流タイプ1,現況雨水吐：ケース19）

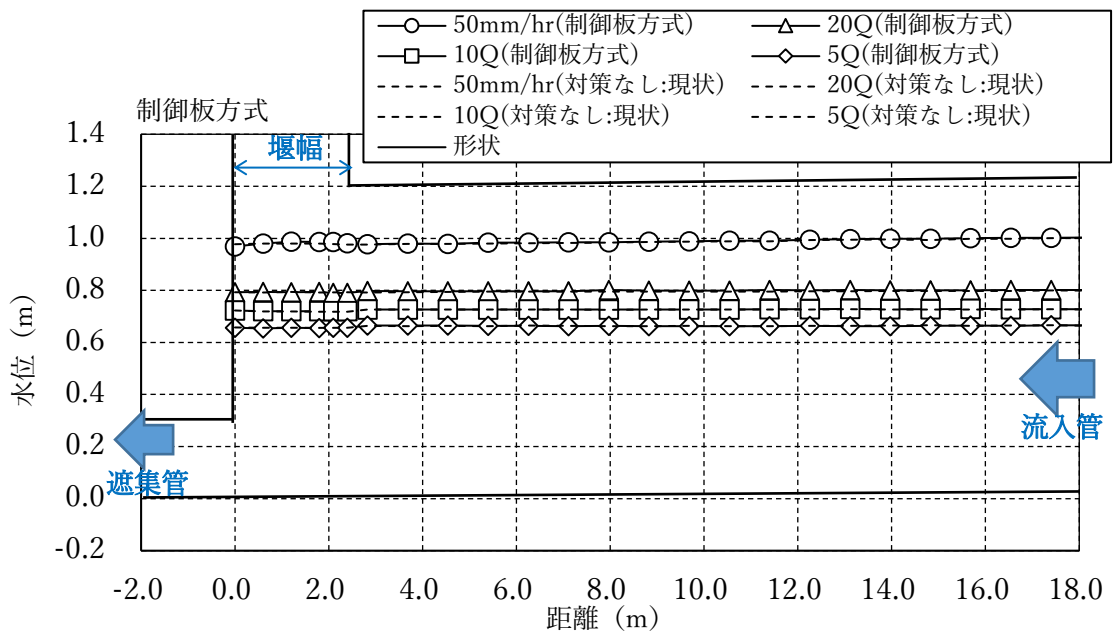


図 3.19.5 流入管の縦断水位変化（正面越流タイプ1,流速式,制御板方式：ケース20）

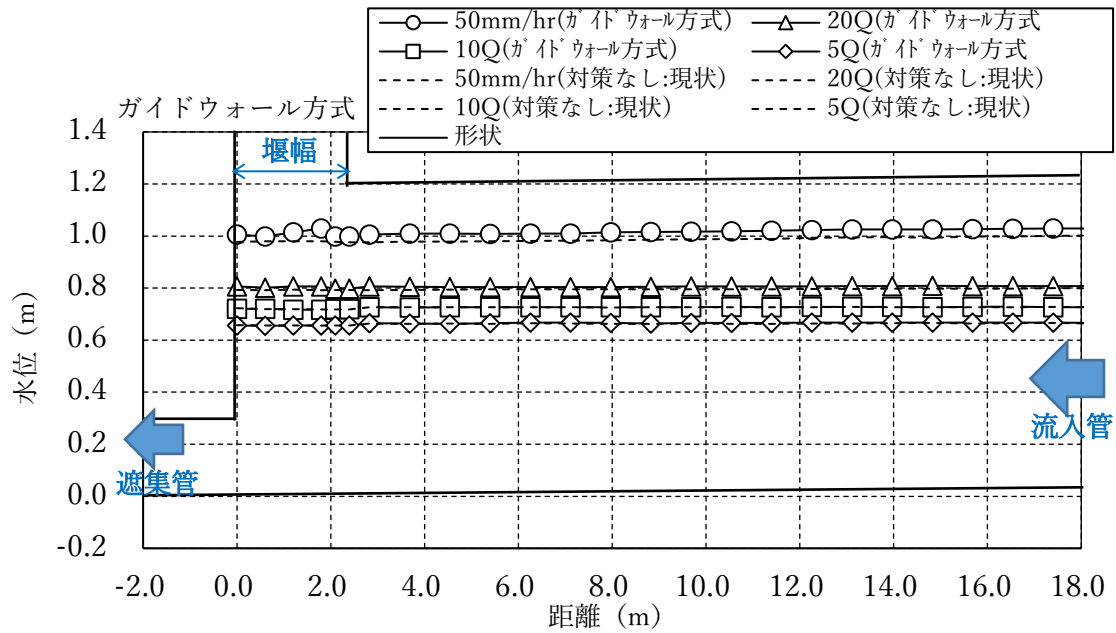


図 3.19.6 流入管の縦断水位変化 (正面越流タイプ1,流速式,ガイドウォール方式:ケース 21)

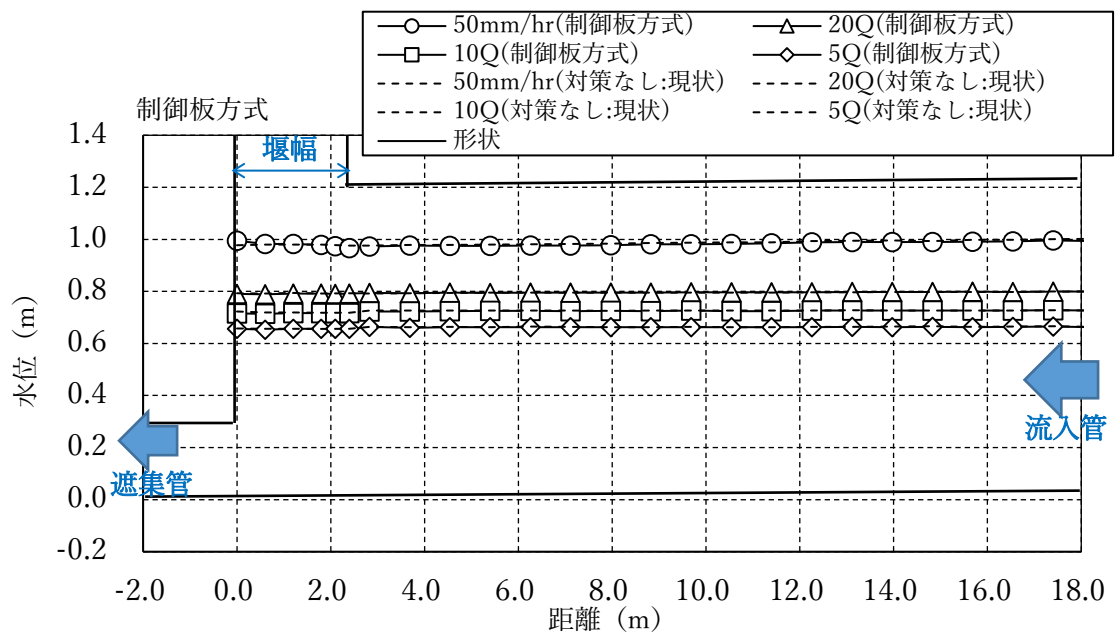


図 3.19.7 流入管の縦断水位変化 (正面越流タイプ1,渦流式,制御板方式:ケース 22)

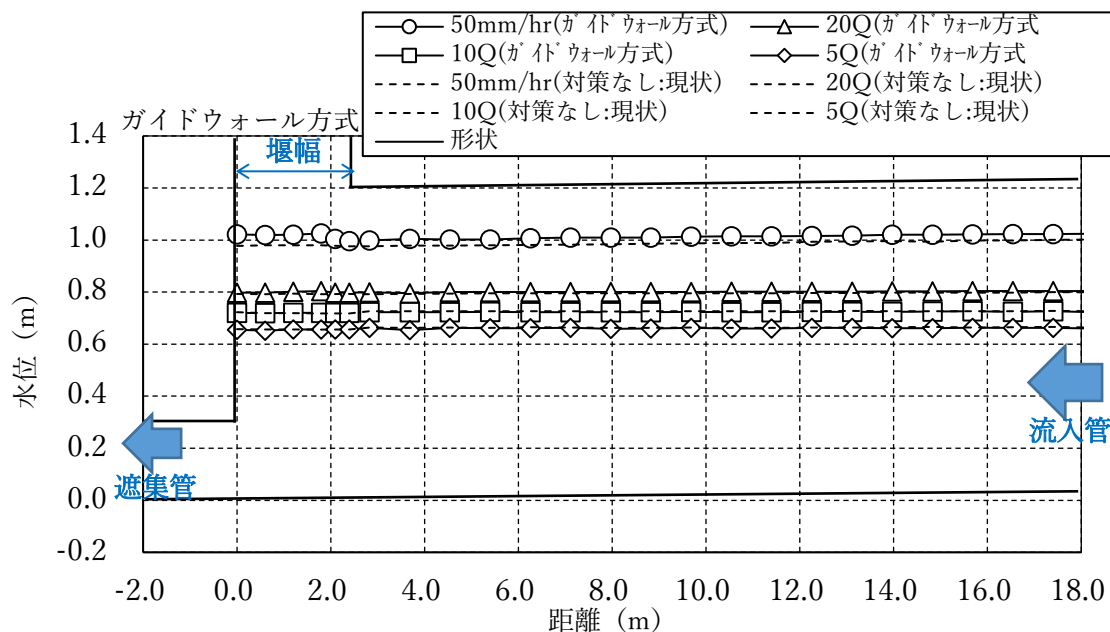


図 3.19.8 流入管の縦断水位変化 (正面越流タイプ 1, 渦流式, ガイドウォール方式: ケース 23)

(7) 正面越流タイプ 2 (ケース 24, 25, 26) の水流特性

正面越流タイプ 2 について「ガイドウォール方式」についての実験を行った。

計画遮集量 (3Q, 0.071 m<sup>3</sup>/s) から計画流量 (50 mm/hr, 1.453 m<sup>3</sup>/s) の範囲においての流量特性を把握する。

なお、ケース 24 は対策なし、ケース 25 は横型制御板とガイドウォール、ケース 26 は縦型制御板とガイドウォールである。

1) 雨水吐き室の水流特性

① ケース 24 の実験結果

現況の雨水吐き室における流入量と遮集量の関係を図 3.20.1 に示す。

3Q 以上では遮集管の流れが満管となるため、流入量の増大とともに遮集量も徐々に増加傾向を示している。

② ケース 25 の実験結果

流速式水面制御のガイドウォール方式についての流入量と遮集量の関係を、現況と対比させて図 3.20.2 に示す。

ガイドウォールの設置により遮集量は若干増加するが、増加量は計画流量 (50 mm/hr 相当, 1.453 m<sup>3</sup>/s) の 4% 程度である。

③ ケース 26 の実験結果

渦流式水面制御のガイドウォール方式の流入量と遮集量の関係を、現況と対比させて図



3.20.3 に示す。

ガイドウォールの設置により遮集量は若干増加するが、増加量は計画流量（50 mm/hr 相当，1.453 m<sup>3</sup>/s）の6%程度である。

## 2) 流入管上流部への影響

### ①現況雨水吐き室

現況雨水吐き室の流入管の縦断方向における水位変化を図 3.20.4 に示す。

20Q 以下ではほぼレベルの水面が形成されている。計画流量（50 mm/hr 相当，1.453 m<sup>3</sup>/s）では、遮集管口の水位上昇がみられるが、流入管上流部への水位上昇は小さい。

### ②流速式水面制御

流速式水面制御（ガイドウォール方式）の流入管縦断水位を、現況雨水吐き室と対比させて図 3.20.5 に示す。

ガイドウォールの設置によって越流水位が上昇するため、10Q 以上の範囲では、流入管上流での水位上昇がみられる。計画流量（50 mm/hr 相当，1.453 m<sup>3</sup>/s）における水位上昇は 0.16m 程度である。

### ③渦流式水面制御

渦流式水面制御（ガイドウォール方式）の流入管縦断水位を、現況雨水吐き室と対比させて図 3.20.6 に示す。

ガイドウォールの設置によって越流水位が上昇するため、10Q 以上の範囲では、流入管上流での水位上昇がみられる。計画流量（50 mm/hr 相当，1.453 m<sup>3</sup>/s）における水位上昇は 0.17m 程度である。

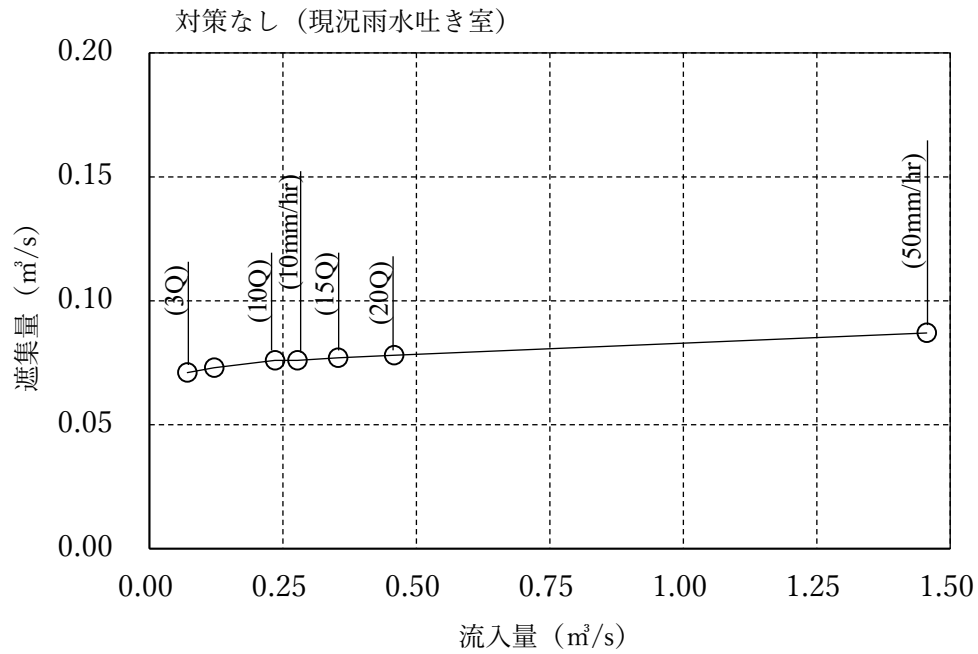


図 3.20.1 流入量と遮集量の関係 (正面越流タイプ2, ケース 24)

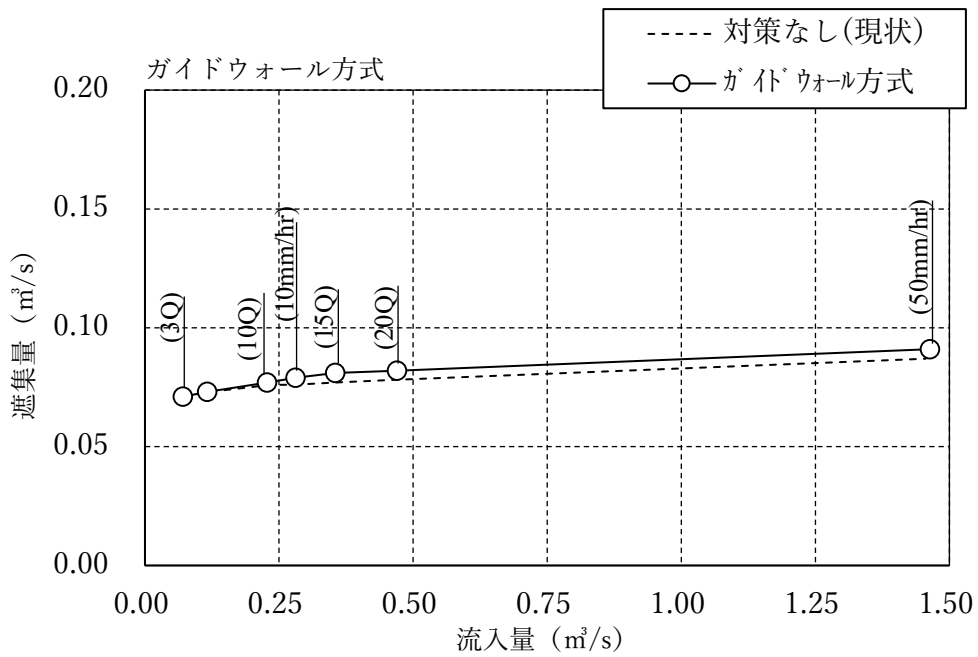


図 3.20.2 流入量と遮集量の関係 (正面越流タイプ2, ケース 25)

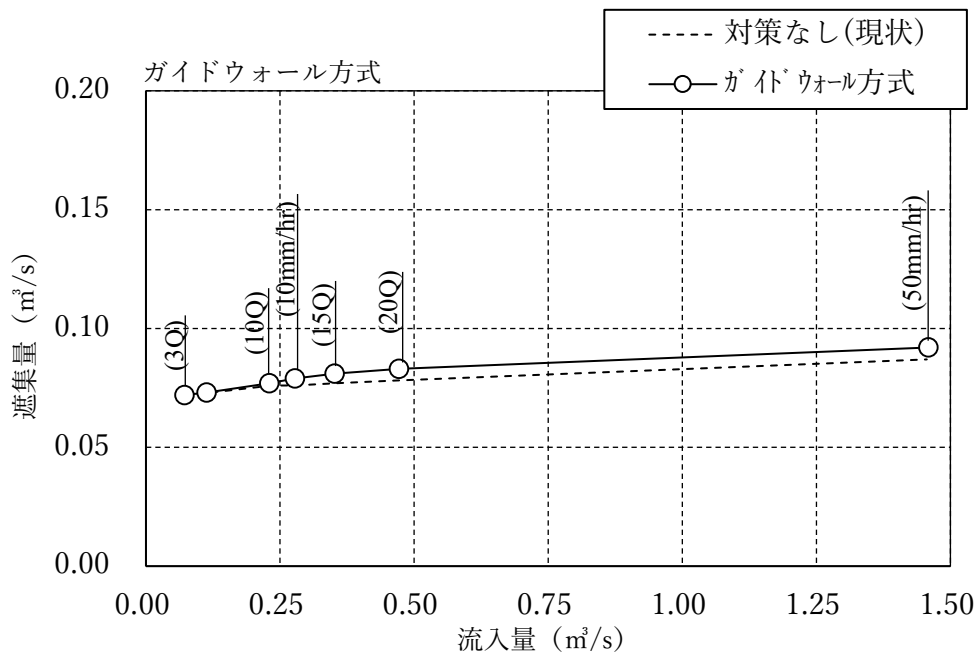


図 3.20.3 流入量と遮集量の関係 (正面越流タイプ 2, ケース 26)

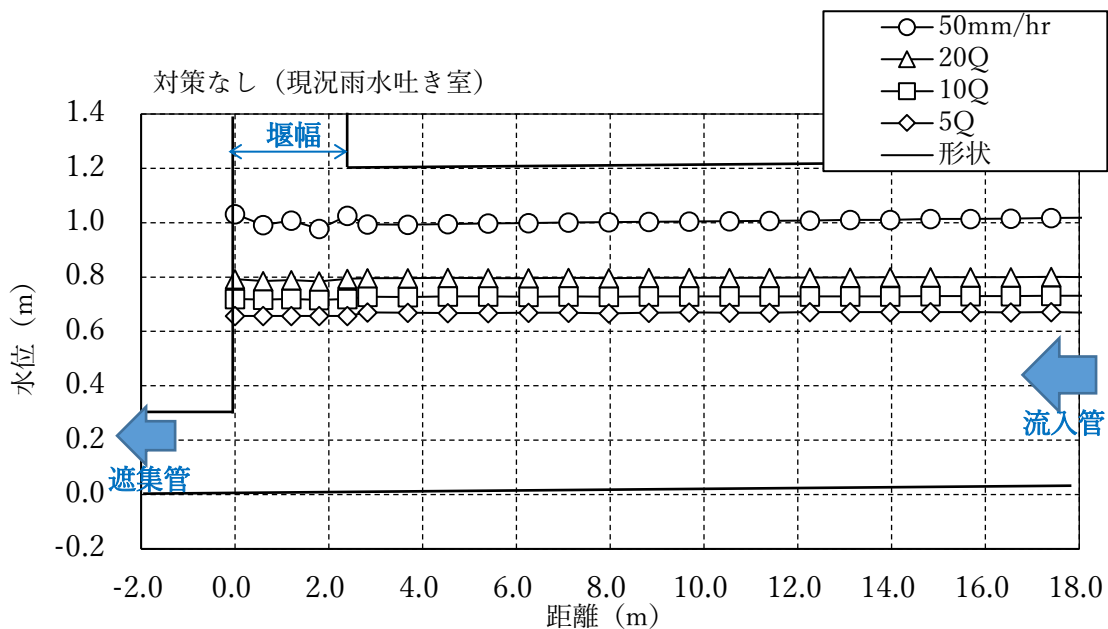


図 3.20.4 流入管の縦断水位変化 (正面越流タイプ 2, 現況雨水吐: ケース 24)

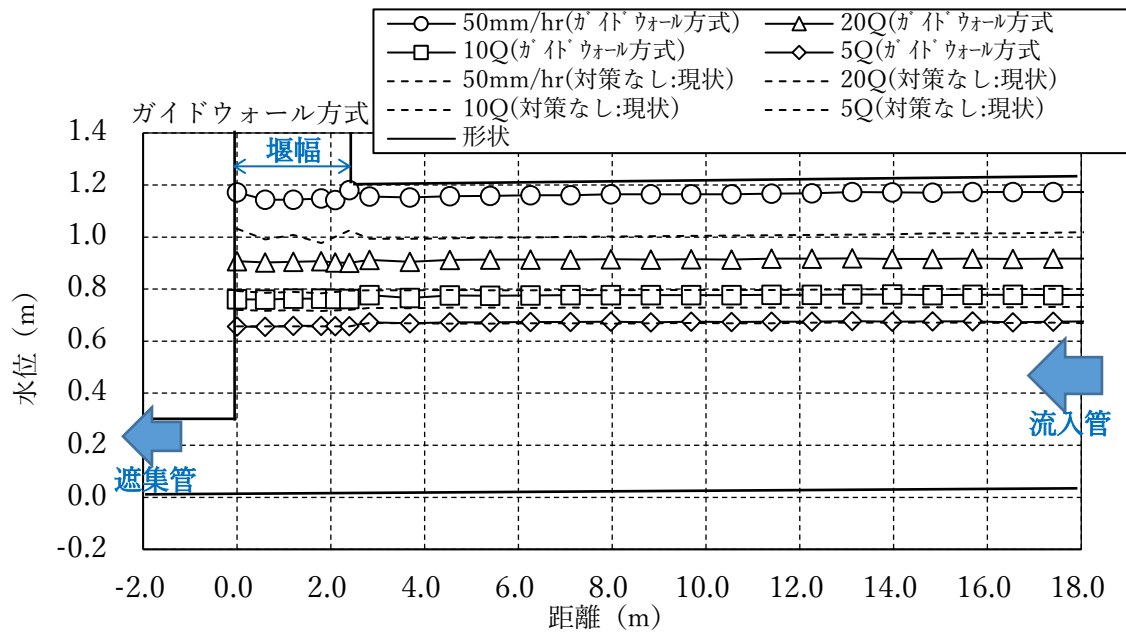


図 3.20.5 流入管の縦断水位変化 (正面越流タイプ2,流速式,ガイドウォール方式:ケース 25)

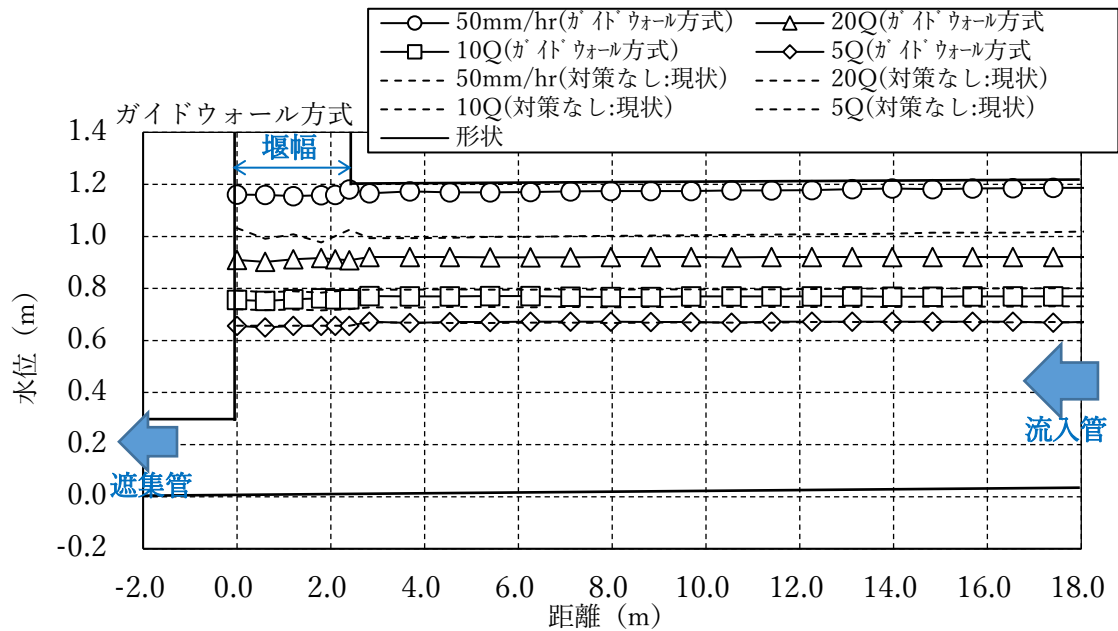


図 3.20.6 流入管の縦断水位変化 (正面越流タイプ2,渦流式,ガイドウォール方式:ケース 26)

## (8) 正面越流タイプ3（ケース 27,28,29）の水流特性

正面越流タイプ3について「ガイドウォール方式」についての実験を行った。

計画遮集量（ $3Q$ ,  $0.071 \text{ m}^3/\text{s}$ ）から計画流量（ $50 \text{ mm/hr}$ ,  $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$ ）の範囲においての流量特性を把握する。なお、ケース 27 は対策なし、ケース 28 は流速式で横型制御板とガイドウォール、ケース 29 は渦流式で縦型制御板とガイドウォールである。

### 1) 雨水吐き室の水流特性

#### ①ケース 27 の実験結果

現況の雨水吐き室における流入量と遮集量の関係を図 3.21.1 に示す。

$3Q$  以上では遮集管の流れが満管となるため、流入量の増大とともに遮集量も徐々に増加傾向を示している。

#### ②ケース 28 の実験結果

流速式水面制御のガイドウォール方式についての流入量と遮集量の関係を、現況と対比させて図 3.21.2 に示す。

ガイドウォール方式は現況の流量と同等である。

#### ③ケース 29 の実験結果

渦流式水面制御のガイドウォール方式の流入量と遮集量の関係を、現況と対比させて図 3.21.3 に示す。

ガイドウォール方式は現況の流量と同等である。

### 2) 流入管上流部への影響

#### ①現況雨水吐き室

現況雨水吐き室の流入管の縦断方向における水位変化を図 3.21.4 に示す。

$5Q$  から計画流量（ $50 \text{ mm/hr}$  相当,  $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$ ）の範囲については、ほぼレベルの水面が形成されている。

#### ②流速式水面制御

流速式水面制御（ガイドウォール方式）の流入管縦断水位を、現況雨水吐き室と対比させて図 3.21.5 に示す。

ガイドウォールの設置によって越流水位が上昇するため、 $20Q$  以上の範囲では、流入管上流での水位上昇がみられる。計画流量（ $50 \text{ mm/hr}$  相当,  $1.453 \text{ m}^3/\text{s}$ ）における水位上昇は  $0.05\text{m}$  程度である。

#### ③渦流式水面制御

渦流式水面制御（ガイドウォール方式）の流入管縦断水位を、現況雨水吐き室と対比させて図 3.21.6 に示す。

ガイドウォールの設置によって越流水位が上昇するため、10Q以上の範囲では、流入管上流での水位上昇がみられる。計画流量における水位上昇は0.15m程度である。

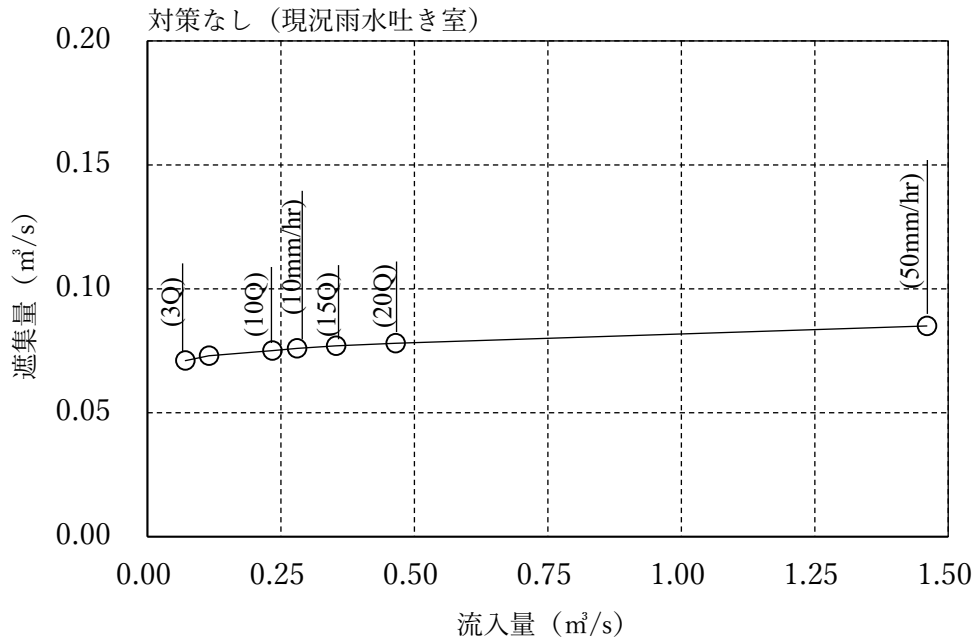


図 3.21.1 流入量と遮集量の関係（正面越流タイプ3, ケース 27）

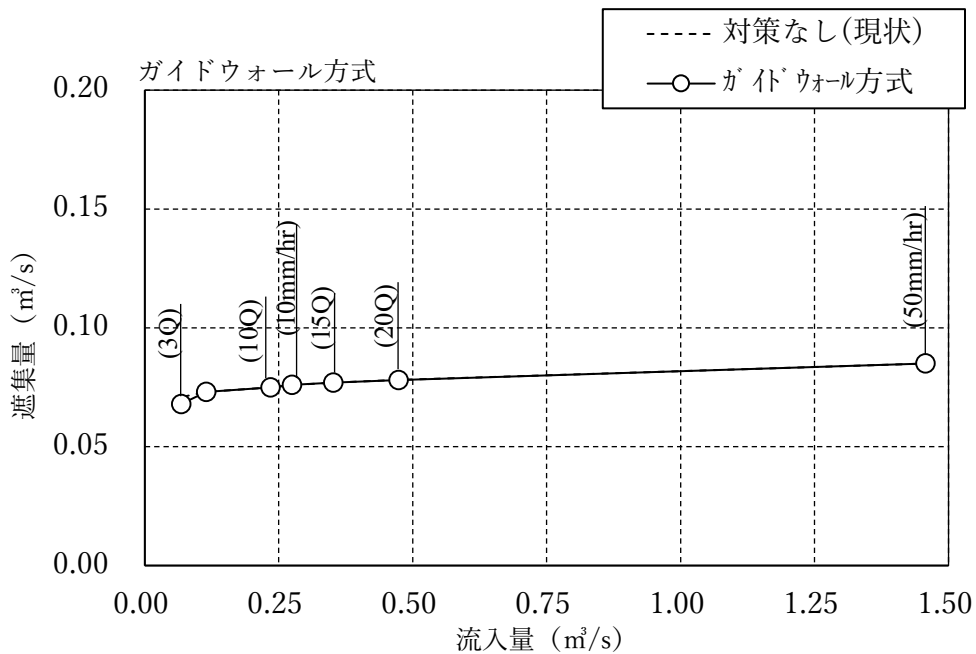


図 3.21.2 流入量と遮集量の関係（正面越流タイプ3, ケース 28）

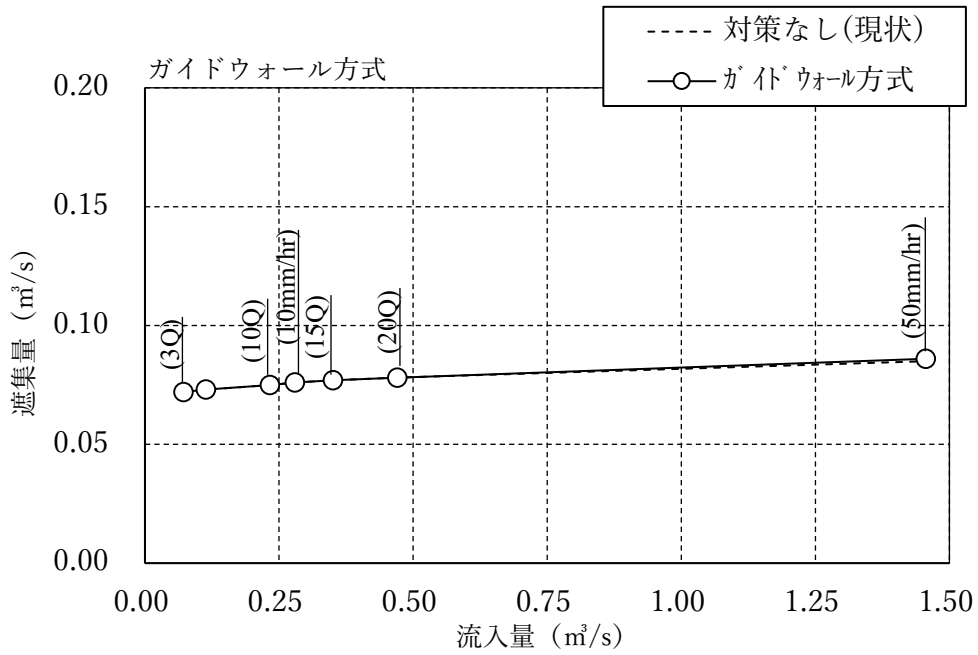


図 3.21.3 流入量と遮集量の関係 (正面越流タイプ3, ケース 29)

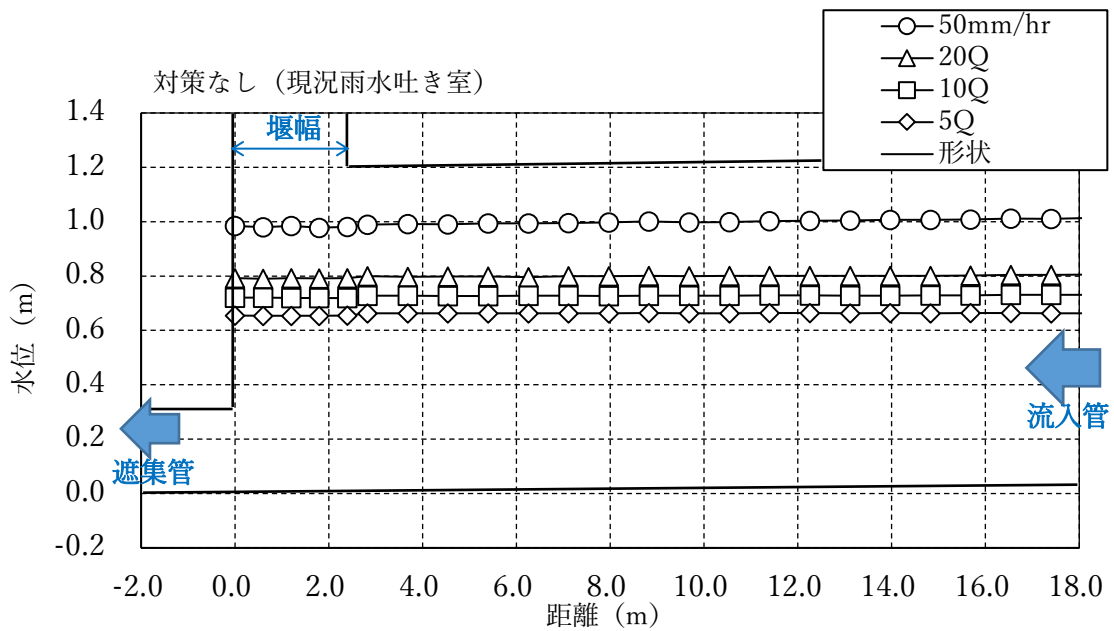


図 3.21.4 流入管の縦断水位変化 (正面越流タイプ3, 現況雨水吐: ケース 27)

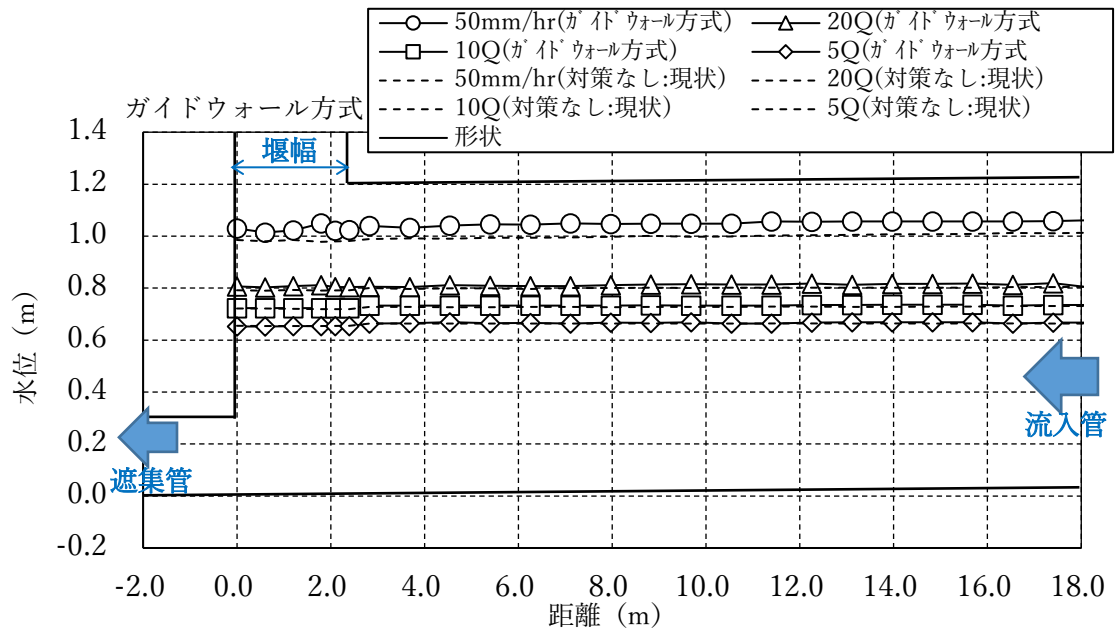


図 3.21.5 流入管の縦断水位変化（正面越流タイプ3,流速方式,ガイドウォール方式：ケース 28）

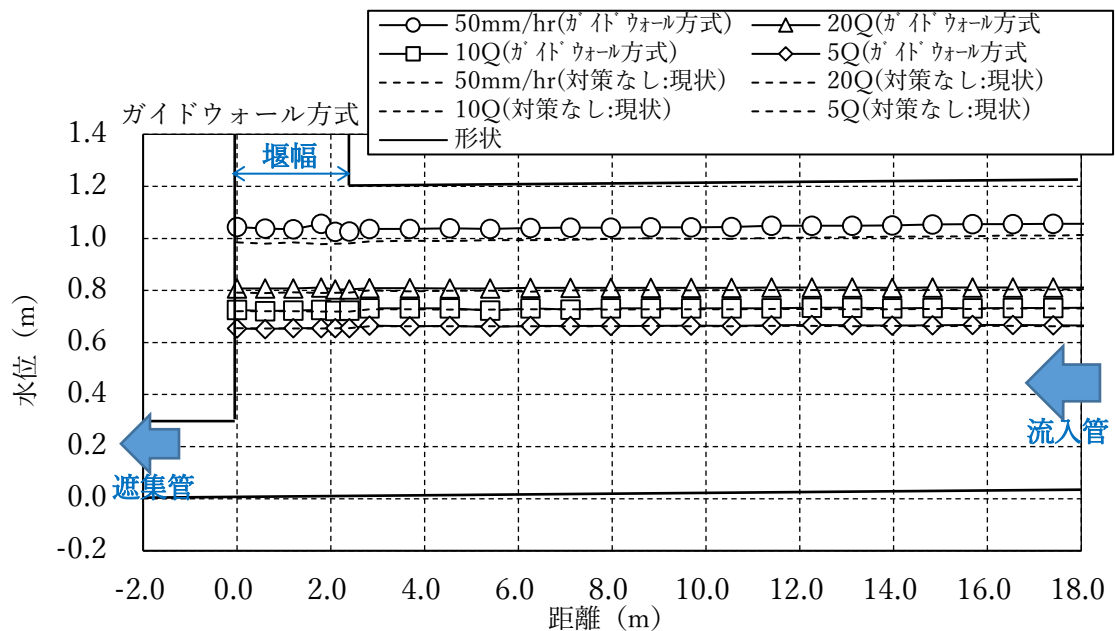


図 3.21.6 流入管の縦断水位変化（正面越流タイプ3,渦流方式,ガイドウォール方式：ケース 29）



#### (9) 正面越流タイプ4 (ケース 30,31,32) の水流特性

正面越流タイプ4について「ガイドウォール方式」についての実験を行った。

計画遮集量 (3Q, 0.071 m<sup>3</sup>/s) から計画流量 (50 mm/hr, 1.453 m<sup>3</sup>/s) の範囲においての流量特性を把握する。なお、ケース 30 は対策なし, ケース 31 は流速式でガイドウォール式 (横型制御板とガイドウォール), ケース 32 は渦流式でガイドウォール式 (縦型制御板とガイドウォール) である。

##### 1) 雨水吐き室の水流特性

###### ①ケース 30 の実験結果

現況の雨水吐き室における流入量と遮集量の関係を図 3.22.1 に示す。

3Q 以上では遮集管の流れが満管となるため、流入量の増大とともに遮集量も徐々に増加傾向を示している。

###### ②ケース 31 の実験結果

流速式水面制御のガイドウォール方式についての流入量と遮集量の関係を現況と対比させて図 3.22.2 に示す。

ガイドウォール方式は遮集量が若干増加するが、その増加量は計画流量 (50 mm/hr 相当, 1.453 m<sup>3</sup>/s) の 6%程度である。

###### ③ケース 32 の実験結果

渦流式水面制御のガイドウォール方式の流入量と遮集量の関係を、現況と対比させて図 3.22.3 に示す。

ガイドウォール方式は遮集量が若干増加するが、その増加量は計画流量 (50 mm/hr 相当, 1.453 m<sup>3</sup>/s) の 6%程度である。

##### 2) 流入管上流部への影響

###### ①現況雨水吐き室

現況雨水吐き室の流入管の縦断方向における水位変化を図 3.22.4 に示す。

20Q 以下ではほぼレベルの水面計が形成される。計画流量 (50 mm/hr 相当, 1.453 m<sup>3</sup>/s) では、遮集管口の水位上昇がみられるが、流入管上流部への水位上昇は小さい。

###### ②流速式水面制御

流速式水面制御 (ガイドウォール方式) の流入管縦断水位を、現況雨水吐き室と対比させて図 3.22.5 に示す。

ガイドウォールの設置によって越流水位が上昇するため、10Q 以上の範囲では、流入管上流での水位上昇がみられる。計画流量 (50 mm/hr 相当, 1.453 m<sup>3</sup>/s) における水位上昇は 0.19m程度である。

###### ③渦流式水面制御

渦流式水面制御 (ガイドウォール方式) の流入管縦断水位を、現況雨水吐き室と対比させて図 3.22.6 に示す。

ガイドウォールの設置によって越流水位が上昇するため、10Q以上の範囲では、流入管上流での水位上昇がみられる。計画流量（50 mm/hr 相当、1.453 m<sup>3</sup>/s）における水位上昇は0.19m程度である。

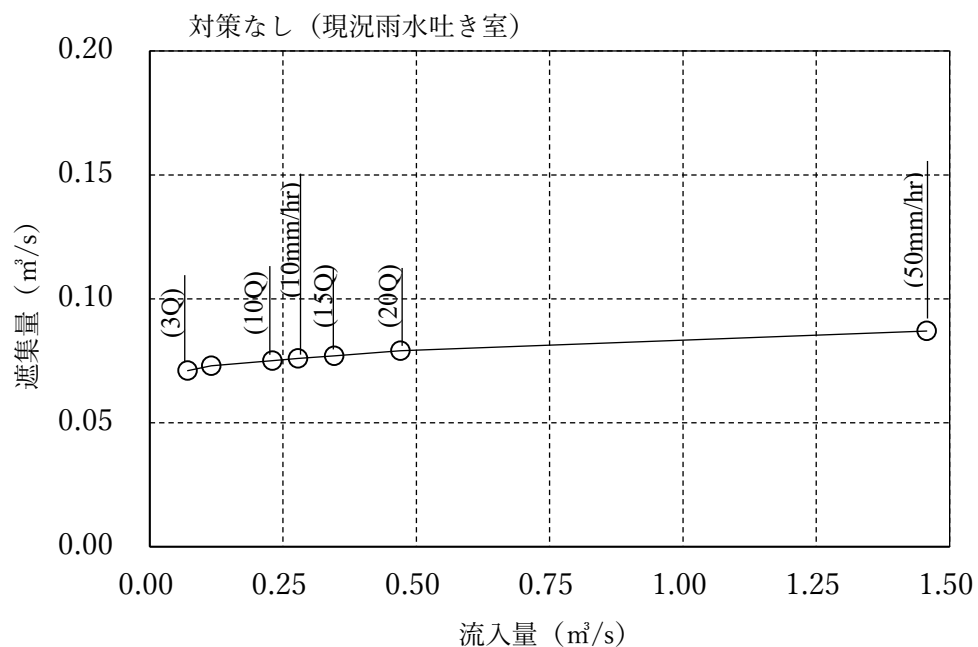


図 3.22.1 流入量と遮集量の関係（正面越流タイプ4,ケース30）

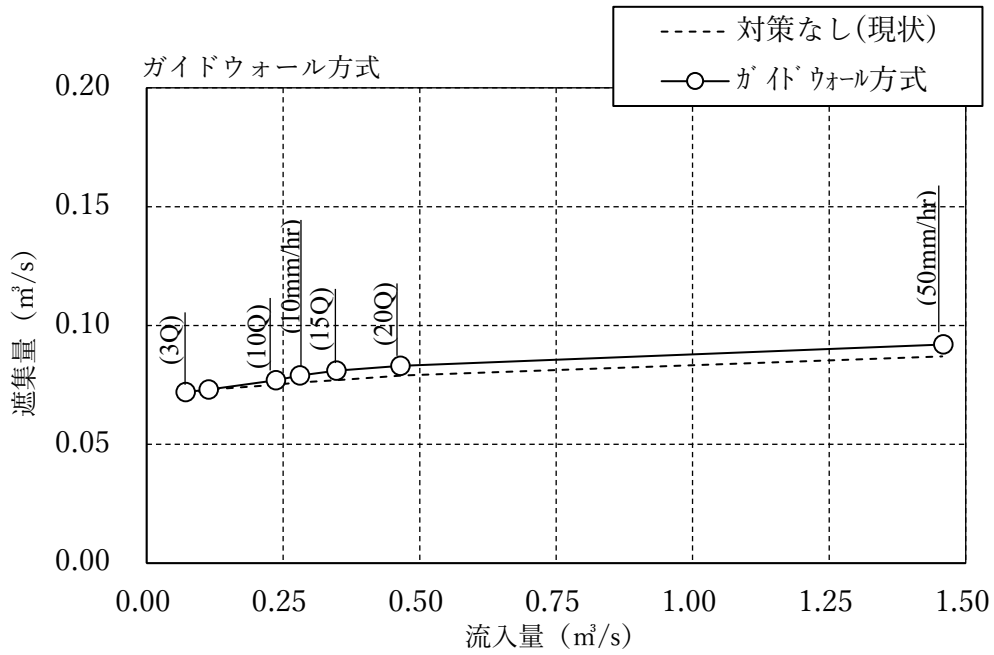


図 3.22.2 流入量と遮集量の関係 (正面越流タイプ4, ケース 31)

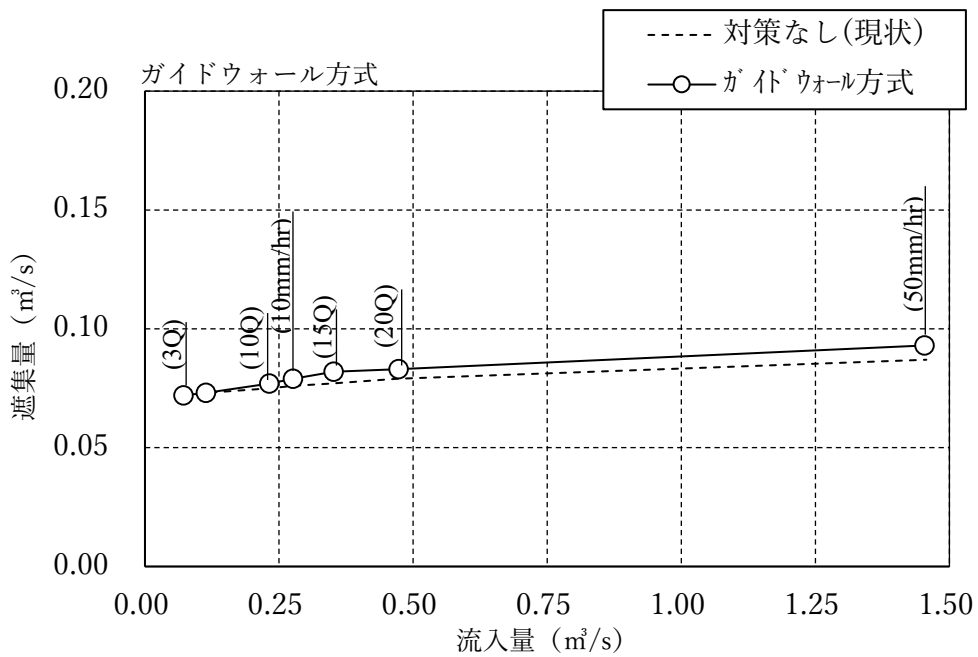


図 3.22.3 流入量と遮集量の関係 (正面越流タイプ4, ケース 32)

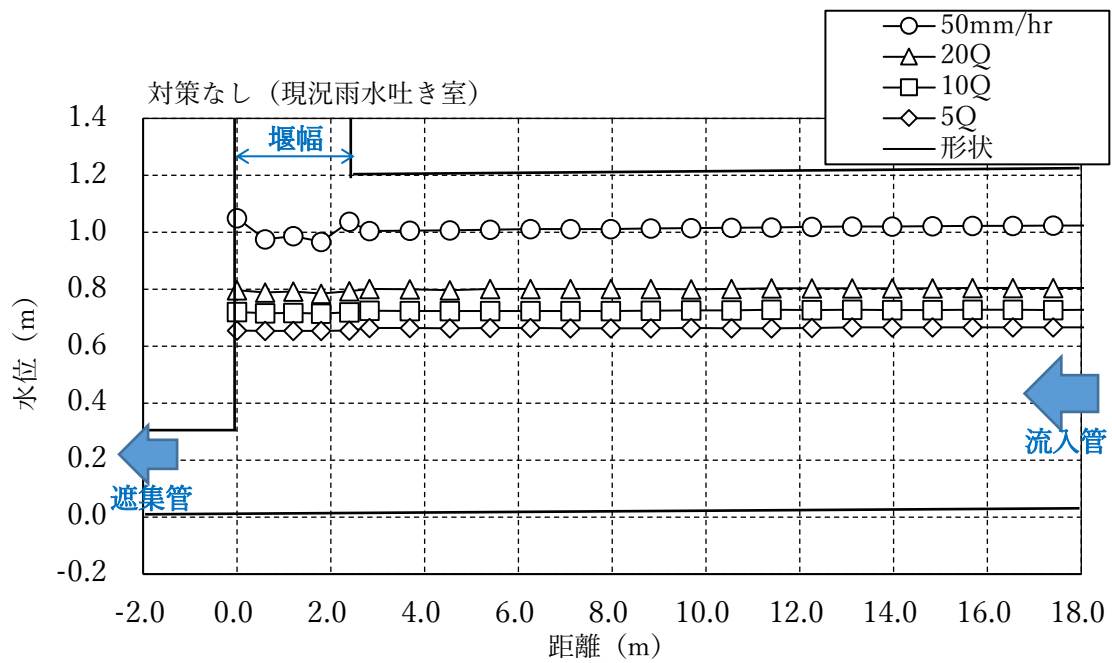


図 3.22.4 流入管の縦断水位変化 (正面越流タイプ4, 現況雨水吐き室: ケース 30)

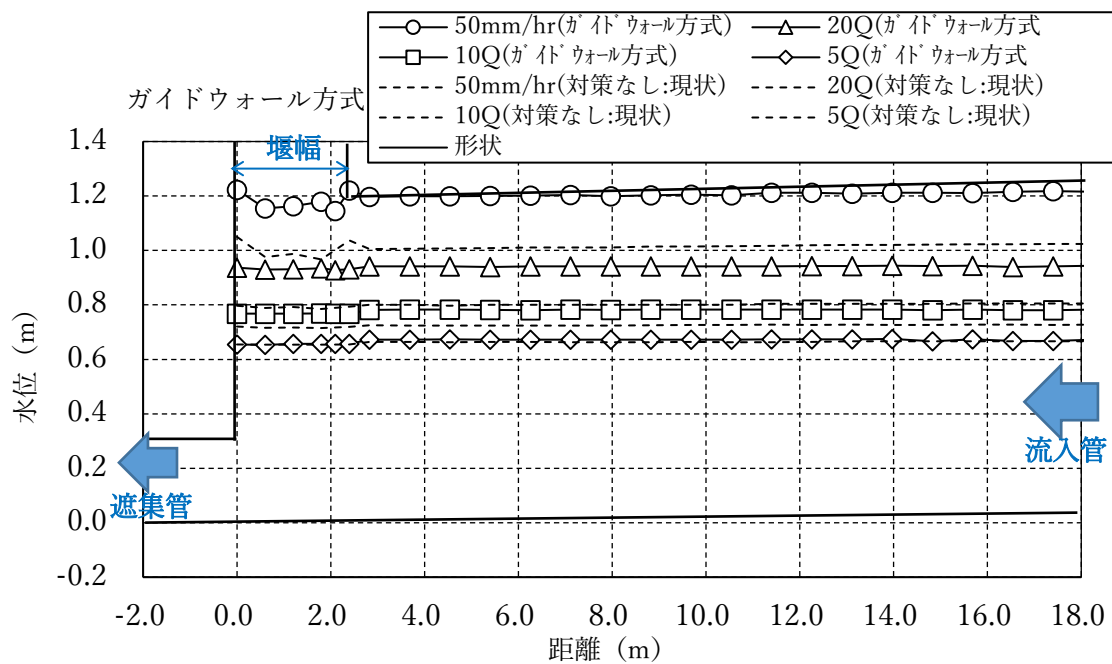


図 3.22.5 流入管の縦断水位変化 (正面越流タイプ4, 流速方式, ガイドウォール方式: ケース 31)

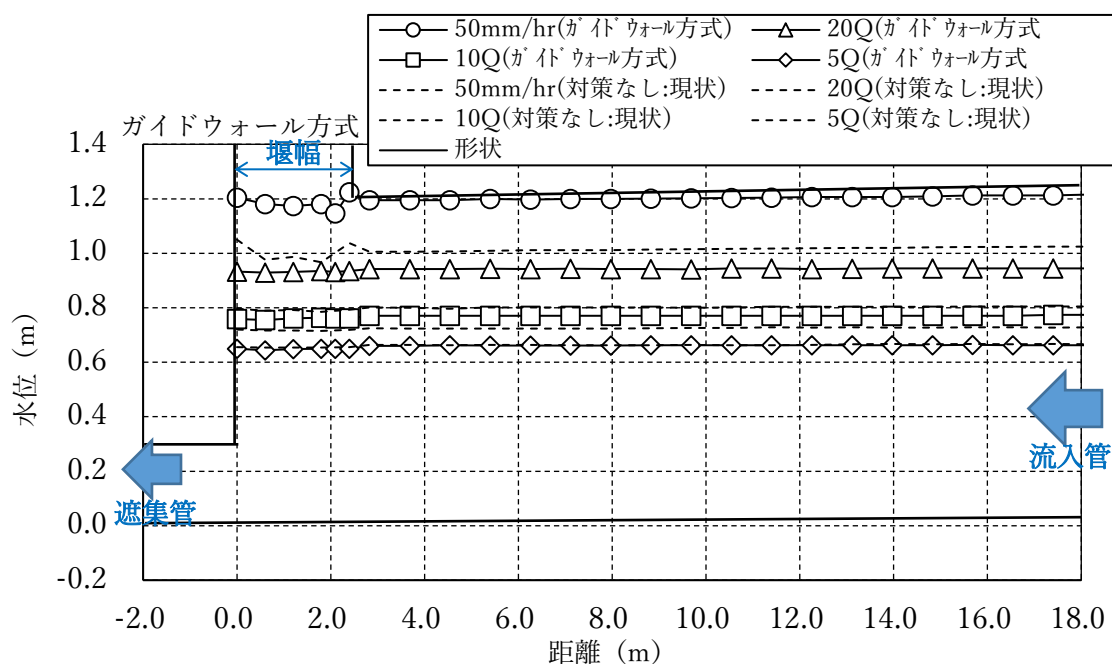


図 3.22.6 流入管の縦断水位変化（正面悦雄タイプ4,渦流方式,ガイドウォール方式：ケース 32）

(10) 複合型タイプ（ケース 33,34,35）の水流特性

複合型タイプについて「ガイドウォール方式」についての実験を行った。

計画遮集量（3Q, 0.071 m<sup>3</sup>/s）から計画流量（50 mm/hr, 1.453 m<sup>3</sup>/s）の範囲においての流量特性を把握する。なお、ケース 33 は対策なし、ケース 34 は流速式でガイドウォール式（横型制御板とガイドウォール）、ケース 35 は渦流式でガイドウォール式（縦型制御板とガイドウォール）である。

1) 雨水吐き室の水流特性

①ケース 33 の実験結果

現況の雨水吐き室における流入量と遮集量の関係を図 2.23.1 に示す。

3Q 以上では遮集管の流れが満管となるため、流入量の増大とともに遮集量も徐々に増加傾向を示している。

②ケース 34 の実験結果

流速式水面制御のガイドウォール方式についての流入量と遮集量の関係を、現況と対比させて図 3.23.2 に示す。

ガイドウォール方式は現況と同様の流量特性を示している。

③ケース 32 の実験結果

渦流式水面制御のガイドウォール方式の流入量と遮集量の関係を、現況と対比させて図 3.23.3 に示す。

ガイドウォール方式は現況と同様の流量特性を示している。

## 2) 流入管上流部への影響

### ① 現況雨水吐き室

現況雨水吐き室の流入管の縦断方向における水位変化を図 3.23.4, 図 3.23.5 に示す。

流入管 1 では, 20Q 以下ではほぼレベルの水面形が形成される。流入管 2 では, 満干となっており, 20Q 以下ではほぼレベルの動水勾配線が形成される。計画流量 (50 mm/hr 相当, 1.453 m<sup>3</sup>/s) では, 流入管 1, 流入管 2 共に遮集管口の水位上昇がみられるが, 流入管上流部への水位上昇は小さい。

### ② 流速式水面制御

流速式水面制御 (ガイドウォール方式) の流入管縦断水位を, 現況雨水吐き室と対比させて図 3.23.6, 図 3.23.7 に示す。

流入管 1, 流入管 2 共にガイドウォールの設置によって越流水位が上昇するため, 10Q 以上の範囲では, 流入管上流での水位上昇がみられる。計画流量 (50 mm/hr 相当, 1.453 m<sup>3</sup>/s) における水位上昇は流入管 1 で 0.03m 程度, 流入管 2 で 0.04m 程度である。

### ③ 渦流式水面制御

渦流式水面制御 (ガイドウォール方式) の流入管縦断水位を, 現況雨水吐き室と対比させて図 3.23.8, 図 3.23.9 に示す。

流入管 1, 2 共にガイドウォールの設置によって越流水位が上昇するため, 10Q 以上の範囲では, 流入管上流での水位上昇がみられる。計画流量における水位上昇は流入管 1 で 0.03m, 流入管 2 で 0.04m 程度である。

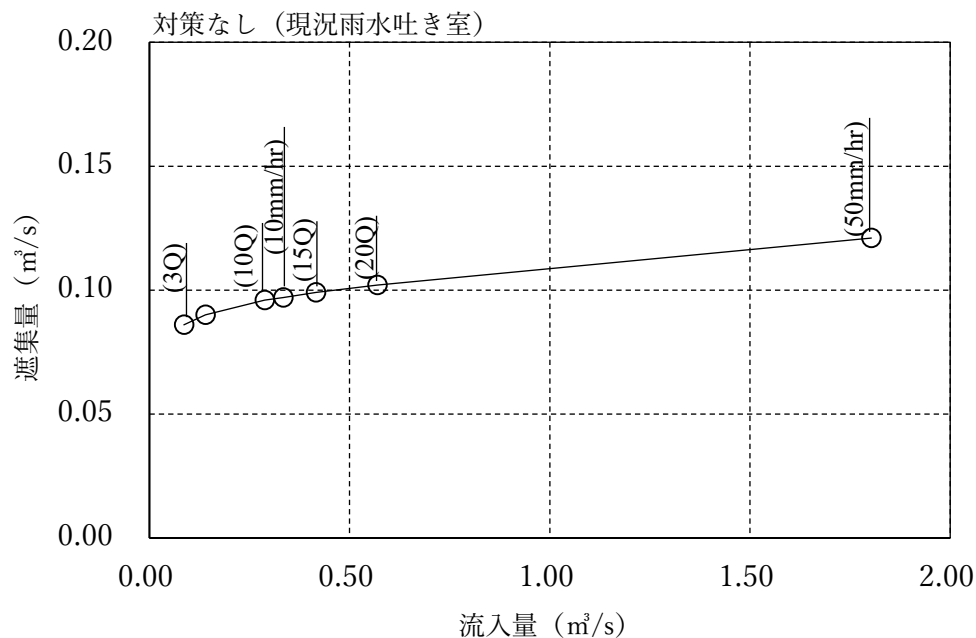


図 3.23.1 流入量と遮集量の関係 (複合型タイプ, ケース 33)

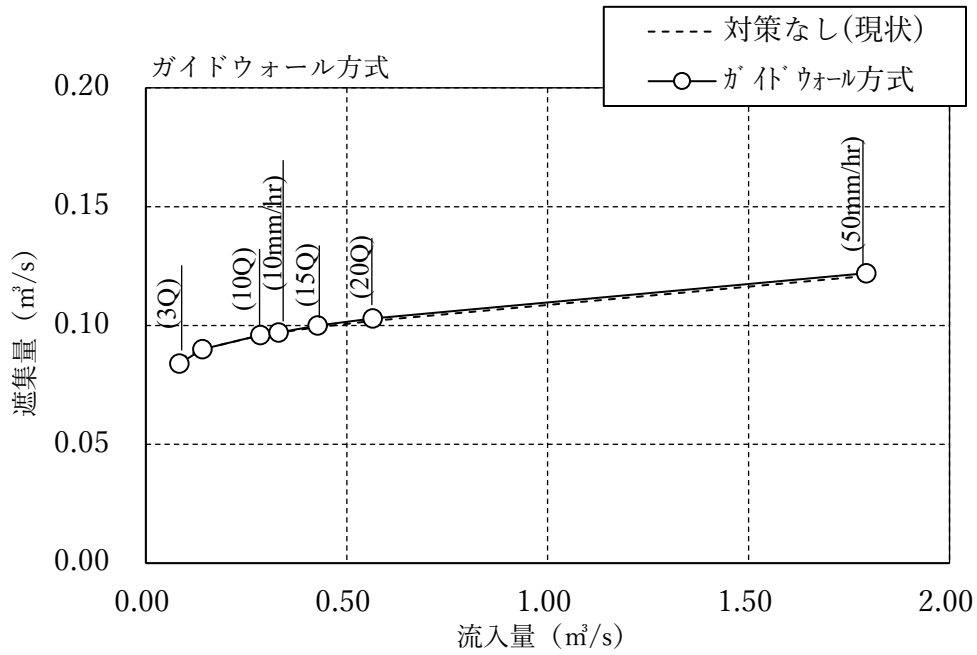


図 3.23.2 流入量と遮集量の関係 (複合型タイプ, ケース 34)

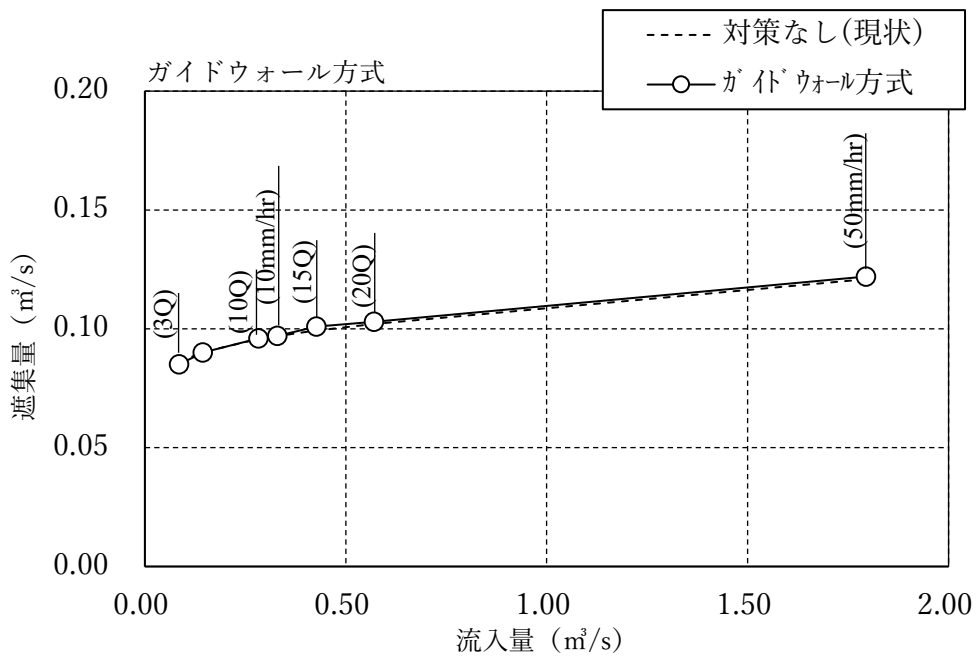


図 3.23.3 流入量と遮集量の関係 (複合型タイプ, ケース 35)

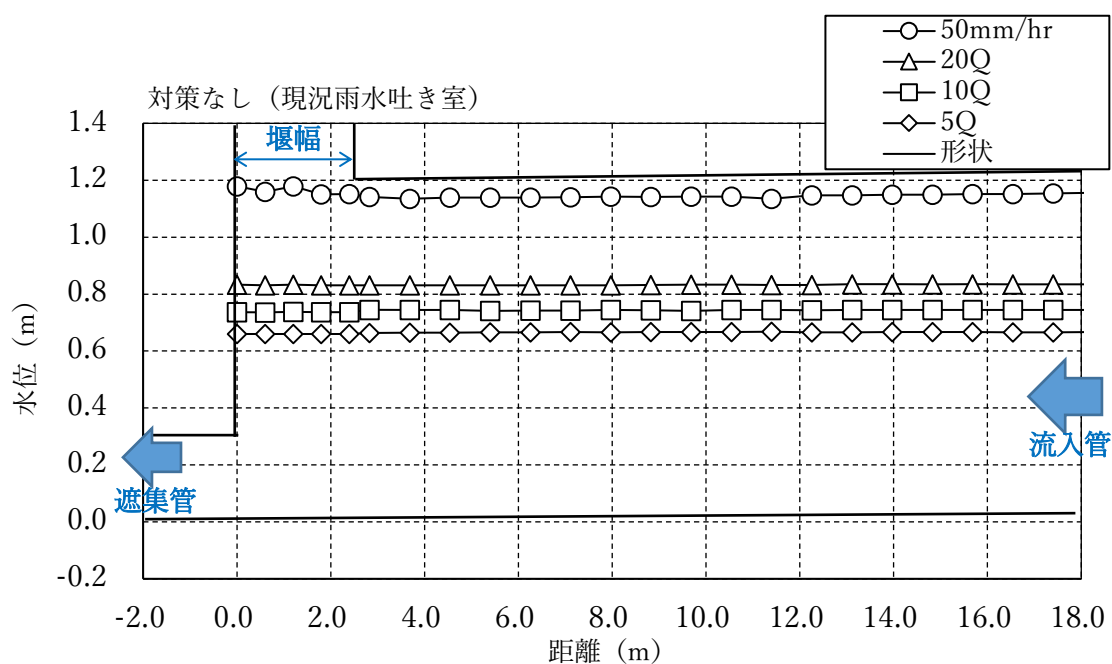


図 3.23.4 流入管の縦断水位変化(複合タイプ,現況雨水吐:ケース 33,流入管 1)

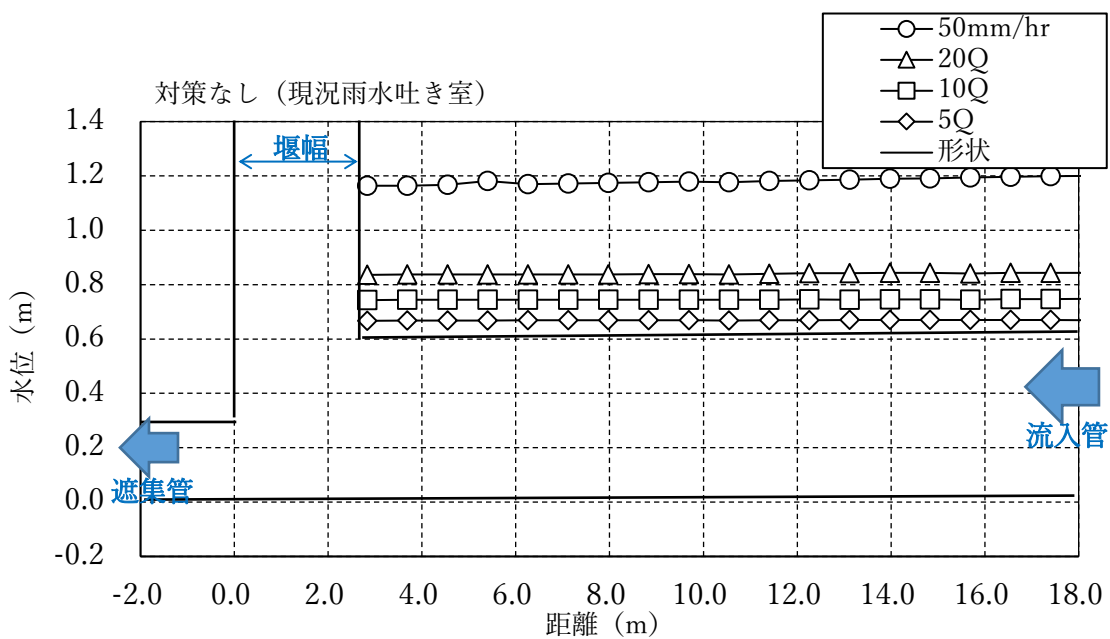


図 3.23.5 流入管の縦断水位変化(複合タイプ,現況雨水吐:ケース 33,流入管 2)



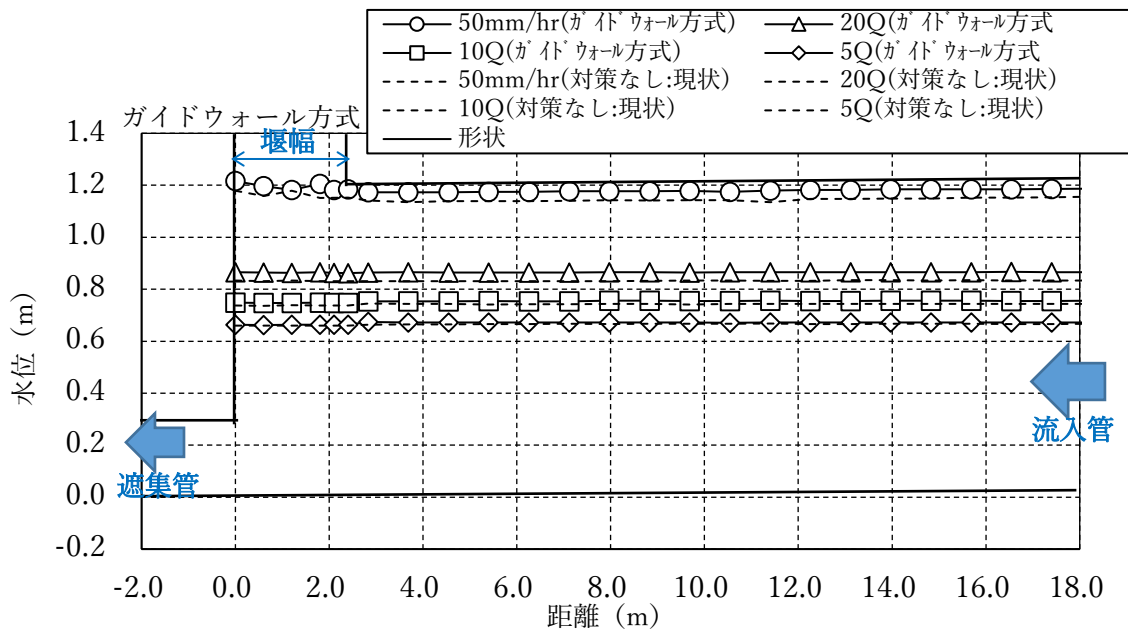


図 3.23.6 流入管の縦断水位変化 (複合タイプ, 流入管 1, 流速式, ガイドウォール方式: ケース 34)

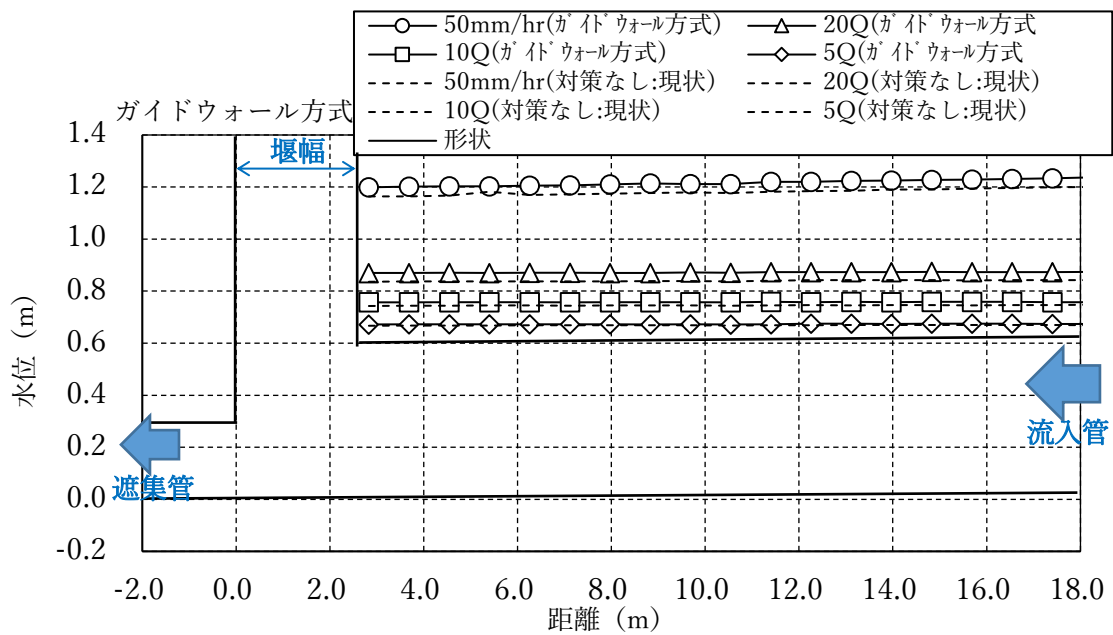


図 3.23.7 流入管の縦断水位変化 (複合タイプ, 流入管 2, 流速式, ガイドウォール方式: ケース 34)

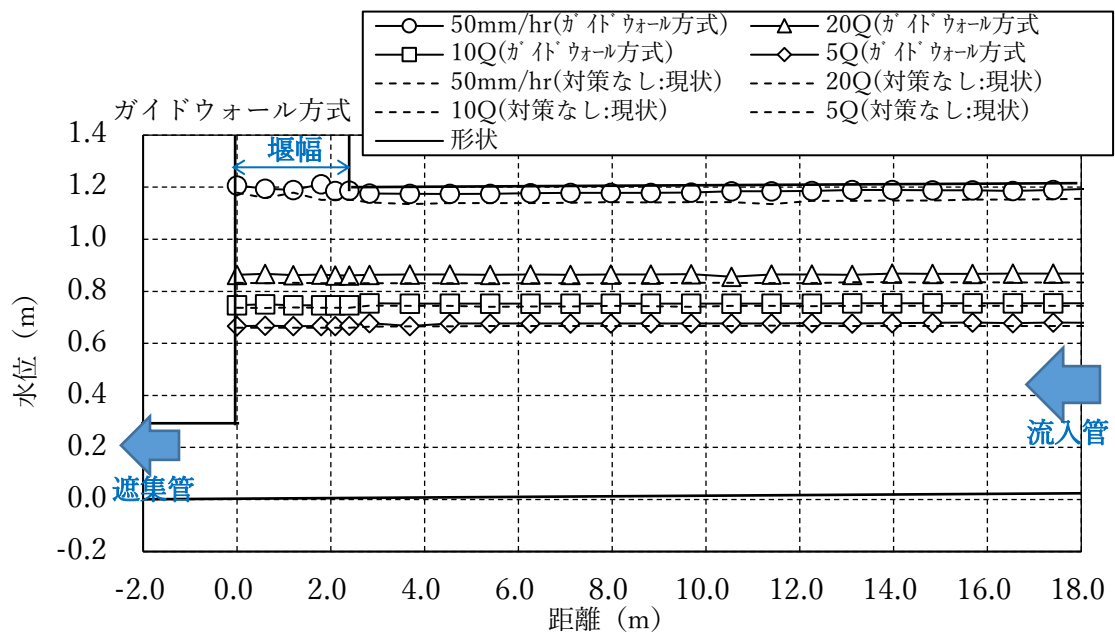


図 3.23.8 流入管の縦断水位変化 (複合タイプ, 流入管 1, 渦流式, ガイドウォール方式 : ケース 35)

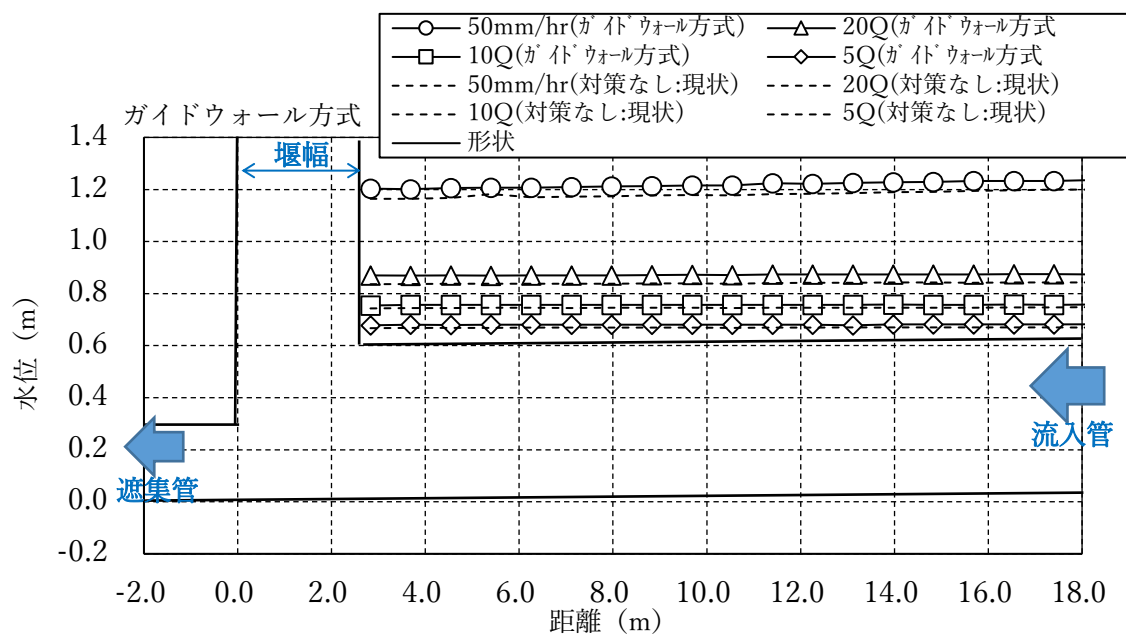


図 3.23.9 流入管の縦断水位変化 (複合タイプ, 流入管 2, 渦流式, ガイドウォール方式 : ケース 35)

### 3.3.3 水流特性と装置設置による影響

#### (1) 雨水吐き室の水流特性

いずれのケースにおいても、流入量の増加に対して遮集管の遮集量も増加する。これは、遮集管の設計能力  $3Q$  (マニング式) を超えると圧力管となる。流入量が増加すると堰高 (一般的には  $3Q$  を超える量を設定) から越流してしまうものの、雨水吐き室の水位は増加する。したがって、遮集管はオリフィスとなり、オリフィス式 ( $V=C(2gH)^{0.5}$ ) からわかるように水位高 ( $H$ ) に大きな変化が生じると、遮週間の遮集量も増加する。

例えば「横越流タイプ2,渦流式,ガイドウォール方式, ケース8 (図 3.16.8)」の事例では、遮集管口の水位は  $5Q=0.65m$ ,  $20Q=0.92m$ ,  $50mm/hr=1.25m$  である。この現象は他の事例でも同様である。

なお、このことについては、第5章で詳細な検討を行うこととする。

#### (2) 流入管上流部への影響

いずれのケースにおいても、18m 上流を想定した実験では、装置の制御板やガイドウォールの影響による大きな水位上昇は見られなかった。

### 3.3.4 まとめ

3.2 で研究の対象としたガイドウォールと縦型制御板を設置する水面制御装置では、雨水吐き室及び流入管上部に大きな影響がないとの結果が出た。

しかし、現実の雨水吐き室はその構造、流入管の大きさや方向、更には複数の流入管がある場合など、個々に条件が異なることから、一概に安全とは言えない。したがって、複雑な構造を有する雨水吐き室に水面制御装置を設置する場合には、模型実験などから水位上昇による影響の有無を検討することが必要と考える。

また、万が一にもガイドウォールと既設の堰との隙間に夾雑物が詰まり、既設堰高がガイドウォール高になることを想定した場合、ガイドウォールの堰高が流入管の上流部に影響をおよぼし、溢水事故を引き起こす可能性があることも否定できない。

このことから、ガイドウォールと雨水吐き室の壁面との間に所定の離隔距離を取る必要がある。また、リスク管理上から、実際の雨水吐き室に水面制御装置を設計する場合には、既設の堰高とガイドウォール高とを比較し、ガイドウォール高が高ければ、そのガイドウォール天端高で流入管上流部の影響水位を検討し、安全を確認しておく必要がある。

なお、この多くの実験から渦流の発生は、遮集管の管頂から水面までの深さや遮集量、さらには制御板の下端などが影響していることを観察した。

雨水吐き室内の水位は流入する下水量により変化する。その水位は雨水吐き室の構造 (堰高や遮集管能力等) により異なる。雨水吐き室の水位が上昇すると、マニング式で設計した  $3Q$  の遮集管は圧力管となり、オリフィス式で算定するとその能力は同じ管径でも大きくなる。

**[参考文献]**

- 1) 財団法人下水道新技術推進機構：合流式下水道の改善における夾雑物対策を対象とした水面制御装置の技術資料，2009年3月
- 2) 東京都下水道局南部建設事務所・東京都下水道サービス株式会社：芝浦処理区及び森ヶ崎処理区簡易合流改善施設検討及び追跡調査設計報告書（2/2）水理模型実験編，平成15年3月

### 3.4 標準設計法の設定

#### 3.4.1 目的

第3章 3.1, 3.2 及び 3.3 で整理したように浮遊性夾雑物の越流対策としては、渦流式の水面制御装置（縦型制御板とガイドウォール）が効果を発揮することが分かった。

自治体の設計担当者が、多くの越流対策技術から水面制御装置を選択する場合には、他技術との比較や具体的な仕様書、設計基準、積算資料などの客観的な判断資料が必要となる。このため、財団法人下水道新技術推進機構は「合流式下水道の改善における夾雑物対策を対象とした水面制御装置」の技術資料<sup>1)</sup>として取りまとめ、現在、標準的な設計として用いられている。

一方、東京都下水道局では、局が採用する水面制御装置の設計法<sup>2)</sup>として定めており、その根拠となる実験を実施している。この東京都の設計法は、財団法人下水道新技術推進機構が定めた技術資料の設計法とは大きく異なることはなく、装置を5タイプ（図3.4.1）としている。ガイドウォール・制御板の設置位置、寸法の詳細は設計者が設置する雨水吐き室の構造などから判断し、現地に設置後にビデオカメラの撮影映像で効果を見極め、必要に応じて位置や寸法などの調整を行っている。

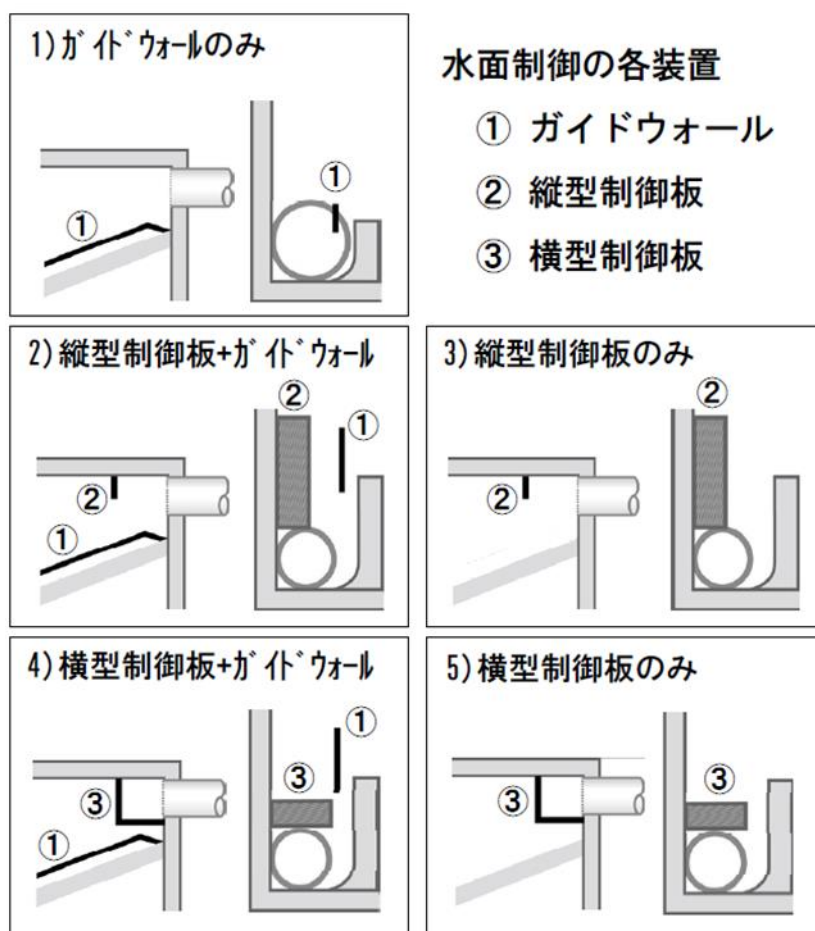


図 3.4.1 水面制御装置の5タイプ

### 3.4.2 実験条件と結果

研究の実験対象とする雨水吐き室の構造は、第3章 3.1 で実験したタイプを踏襲し、以下の2通りとした。

また、実験の流入量は、SPIRIT21 で 10 mm/hr を夾雑物流出抑制の対象としていることから、本実験も 10 mm/hr 時の流入量とした。

(1) 遮集管と壁との距離が 0 D (0m) の場合 (図 3.4.2)

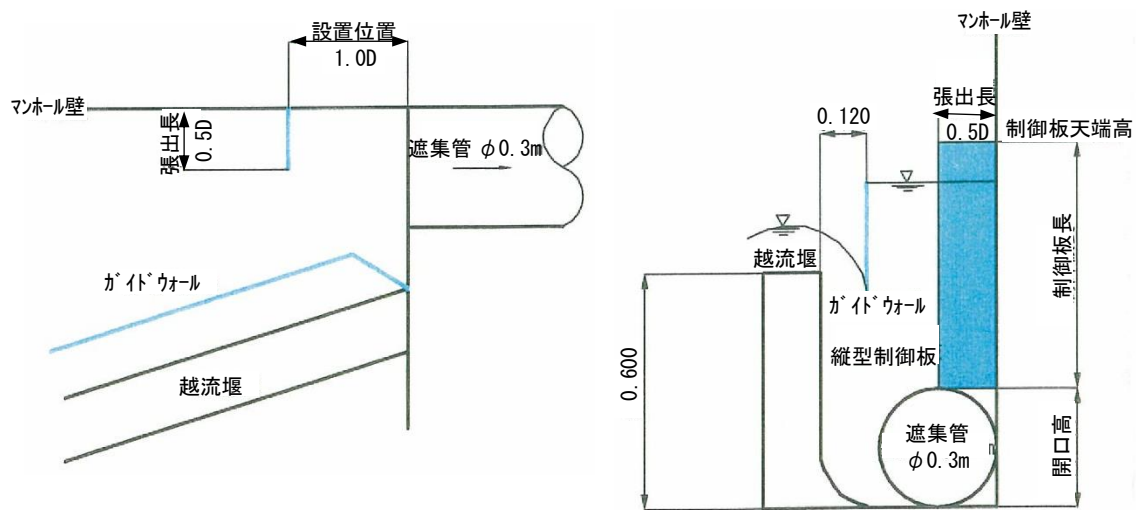


図 3.4.2 雨水吐き室の水面制御装置位置図 (0 D の場合)

<実験条件>

1)制御板の天端高の設定

- ・ 10 mm/hr の雨水吐き室水位高 + 0.1m 程度 (水面変動などを勘案した余裕高)

2)制御板の開口高 (下端位置)

- ・ 遮集管天端と一致 = 1 D

3)制御板の位置

- ・ 遮集管入り口から 0.83D (0.25m), 1 D (0.3m), 1.5D (0.45m), 2.0D (0.6m)

4)制御板の張出し長

- ・ 0.3D (0.09m), 0.4D (0.12m), 0.5D (0.15m), 0.6D (0.18m), 0.7D (0.21m)

5)ガイドウォールの天端高

- ・ 10 mm/hr の雨水吐き室水位高

<実験結果; 表 3.4.1>

- ・ 制御板の位置を 1 D よりも大きくした場合には、渦の生成が弱く浮遊物が遮集管に捕捉されにくい

- ・張出し長については、設置位置 1 D の場合は 0.5D 以上、0.83D の場合は 0.7D 以上となる。なお、張出し長が小さいとして設置位置 = 1 D，張出し長 = 0.5D を選定した

表 3.4.1 遮集管と壁との距離が 0 D の結果 (参考: P3-119~122)

位置 \ 張出し長	0.3D (0.09m)	0.4D (0.12m)	0.5D (0.15m)	0.6D (0.18m)	0.7D (0.21m)
0.83D (0.25m)	×	×	△	△	○
1 D (0.3m)	×	△	○	○	○
1.5D (0.45m)	×	△	△	△	△
2.0D (0.6m)	×	×	×	×	×

凡例：○連続的に遮集管に流入，△徐々に遮集管に流入，×遮集管に流入しない

(2) 遮集管と壁との距離が 5 D の場合 (図 3.4.3)

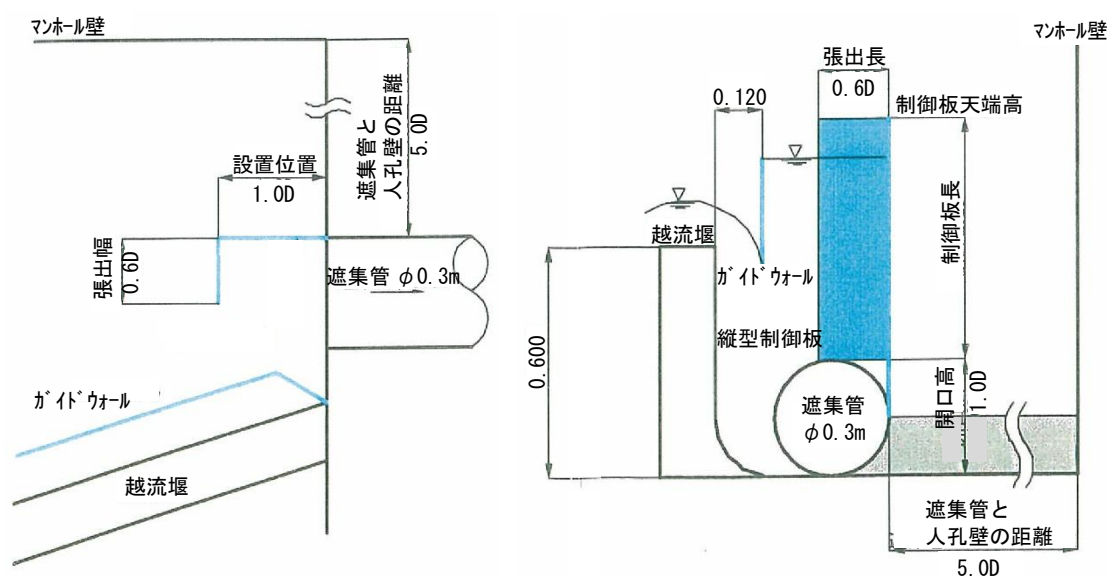


図 3.4.3 雨水吐き室の水面制御装置位置図 (5 D の場合)

1) 制御板の天端高の設定

- ・ 10 mm/hr の水位高 + 0.1m 程度 (水面変動などを勘案した余裕高) ⇒

2) 制御板の開口高 (下端位置)

- ・ 遮集管天端と一致 = 1 D (比較実験から 0.25m との差は小さい。浮遊物の流下阻害防止の観点から 0.3m。ただし、設置位置壁は開口しない)

3) 制御板の位置

- ・ 遮集管入り口から 1.0D (遮集管と壁の距離が 0 D の場合から)

4) 制御板の張出し長

- ・ 0.4D (0.12m), 0.5D (0.15m), 0.6D (0.18m)

5) ガイドウォール天端高

- ・ 10 mm/hr の雨水吐き室水位高

<実験結果；表 3.4.2>

・制御板の設置位置は 1.0D

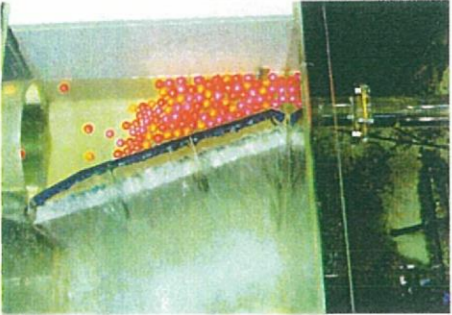
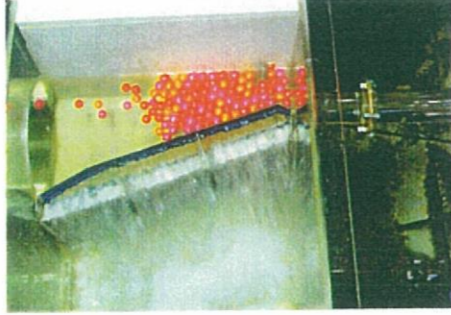
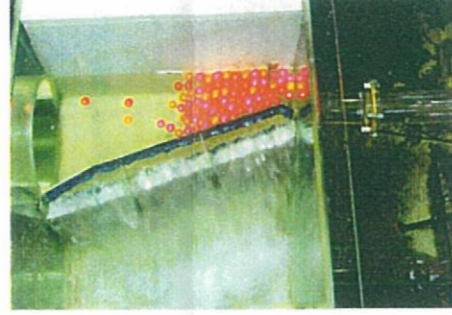
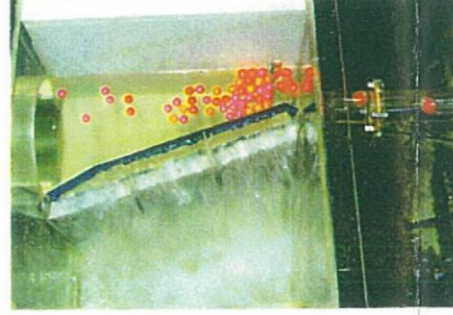






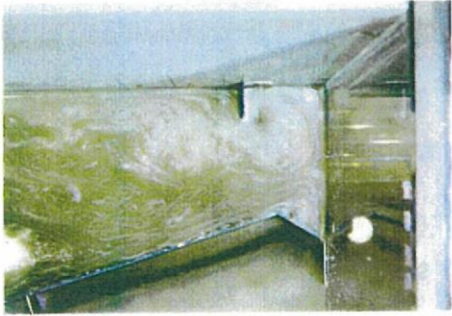

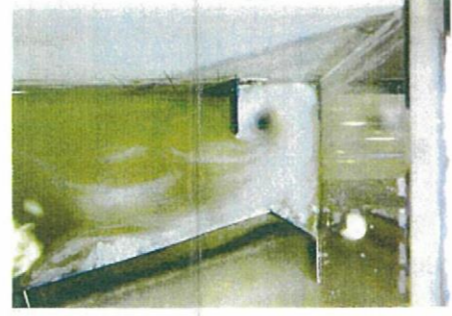
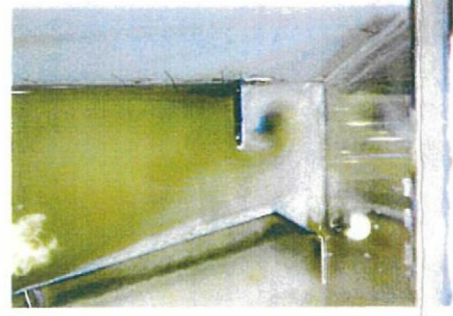
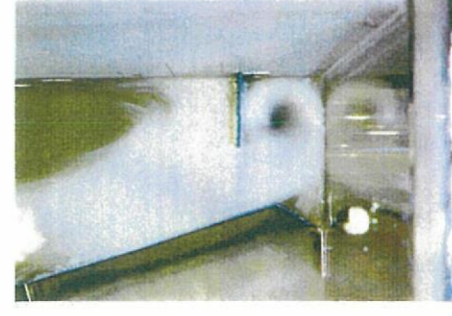
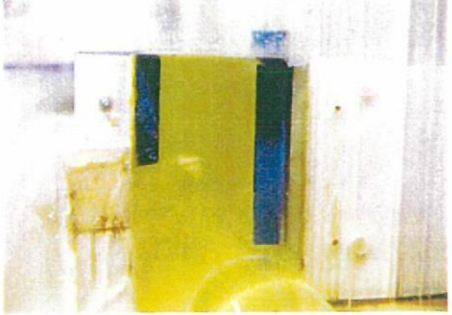
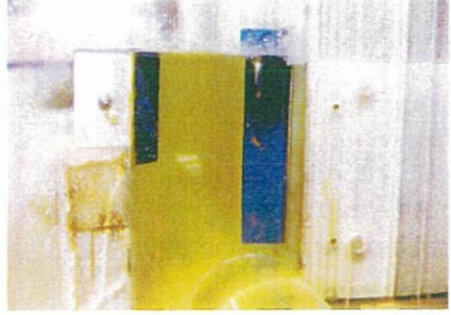
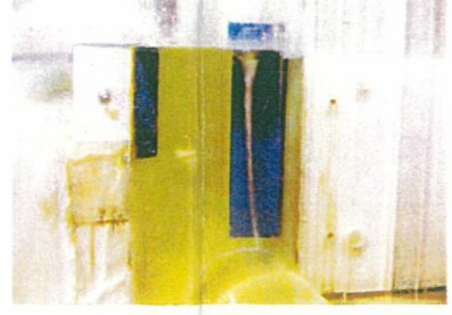

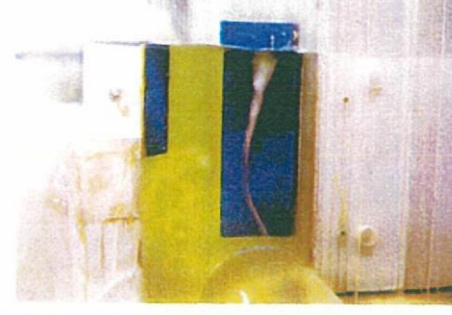
表 3.4.2 遮集管と壁との距離が 5 D の場合 (参考：P123)

位置 \ 張出し長	0.4D (0.12m)	0.5D (0.15m)	0.6D (0.18m)
1.0D (0.30m)	×	△	○


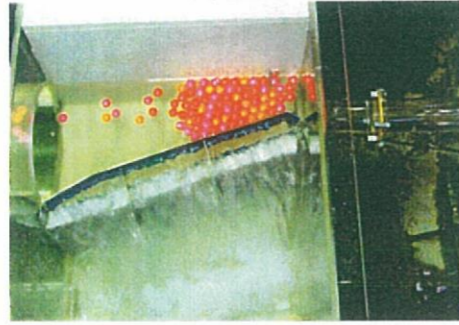






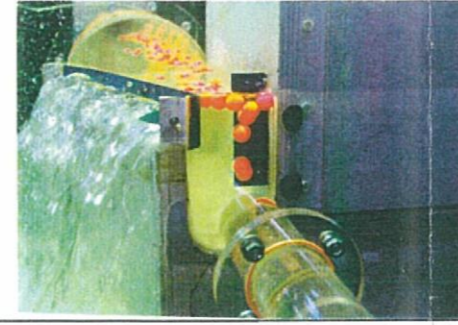
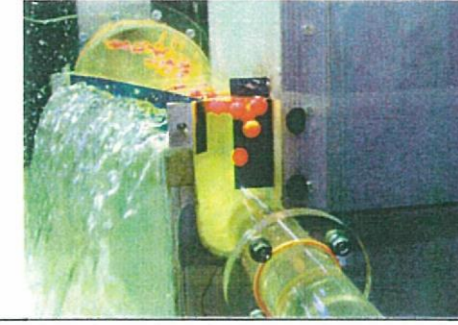


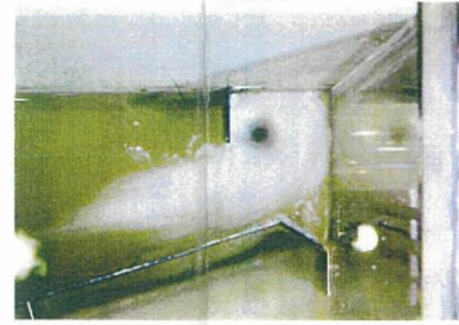
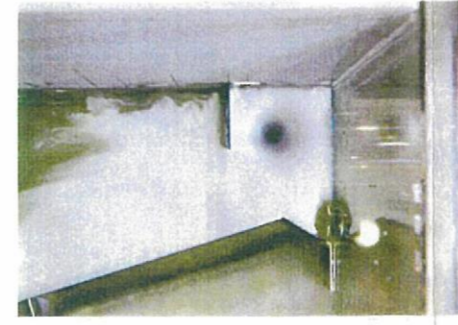

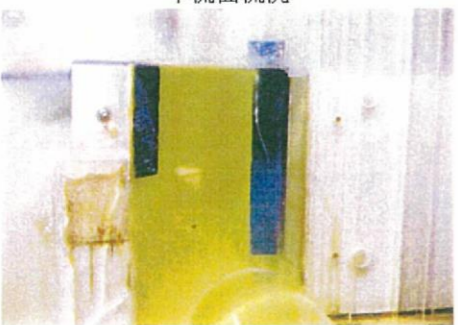

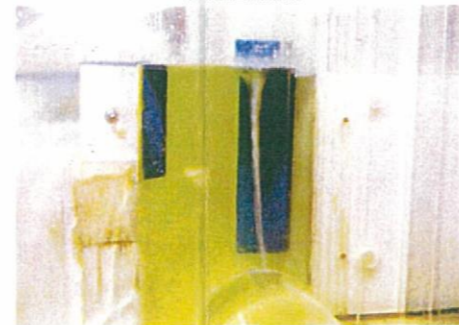
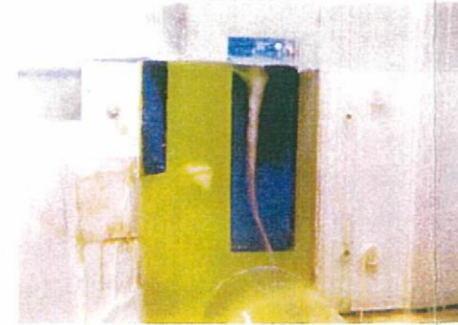
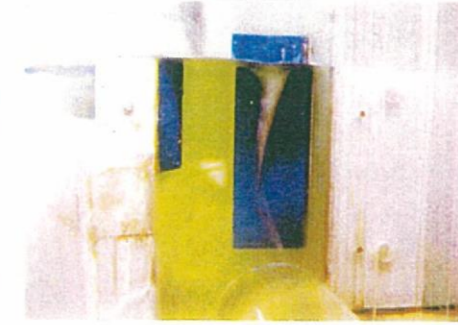
凡例：○連続的に遮集管に流入，△徐々に遮集管に流入，×遮集管に流入しない



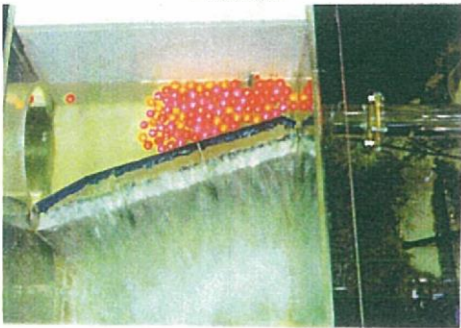
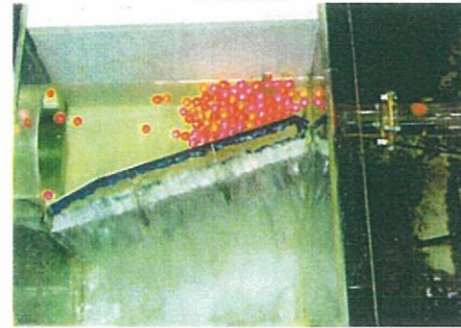
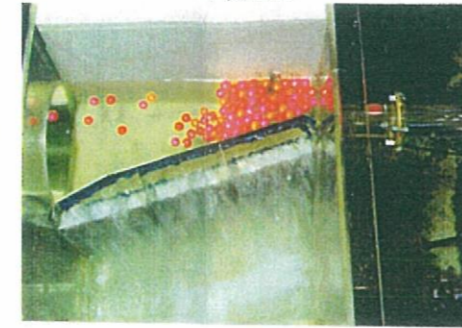

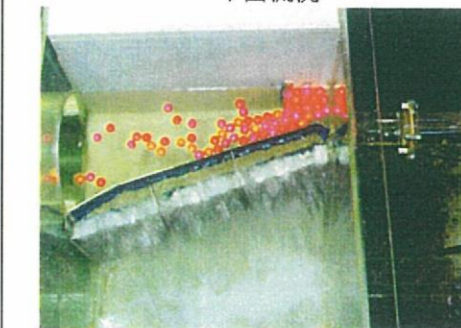
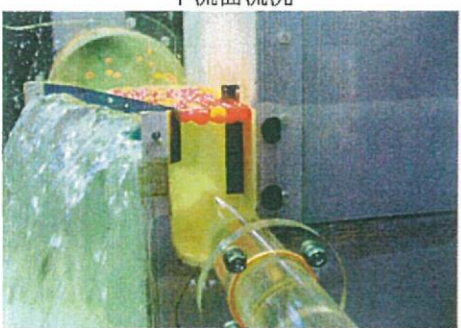

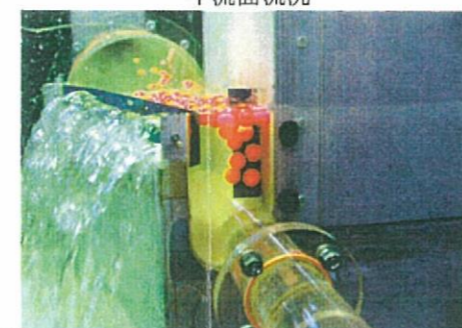
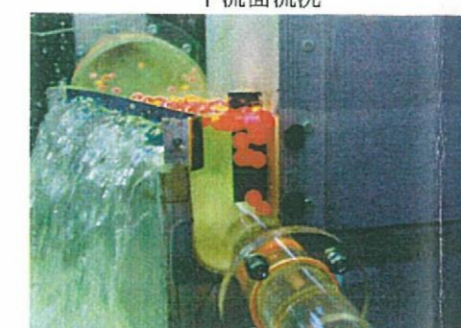

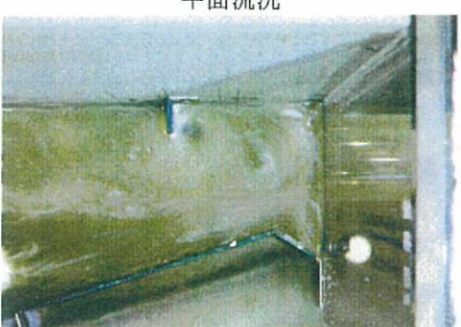

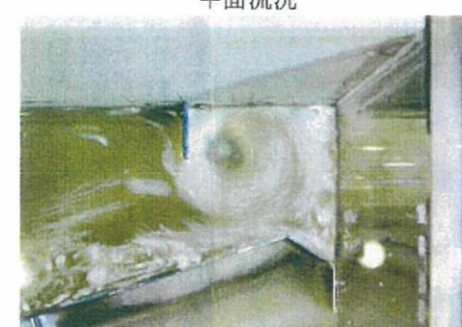







<参考：実験結果写真>

雨水吐き室形状：遮集管と壁の離れ 0D の場合														
位置：0.83D	張出長：0.3D	評価：×	位置：0.83D	張出長：0.4D	評価：×	位置：0.83D	張出長：0.5D	評価：△	位置：0.83D	張出長：0.6D	評価：△	位置：0.83D	張出長：0.7D	評価：○
遮集状況：遮集管に流入しない			遮集状況：遮集管に流入しない			遮集状況：徐々に遮集管に流入する			遮集状況：徐々に遮集管に流入する			遮集状況：連続的に遮集管に流入する		
平面流況			平面流況			平面流況			平面流況			平面流況		
														
下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況		
														
渦の生成状況														
平面流況			平面流況			平面流況			平面流況			平面流況		
														
下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況		
														


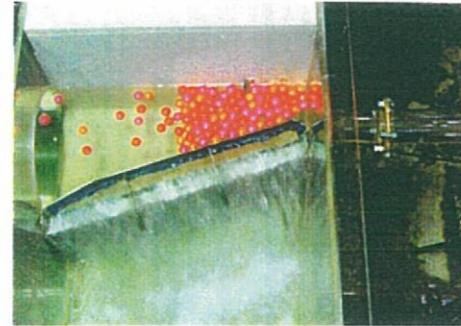
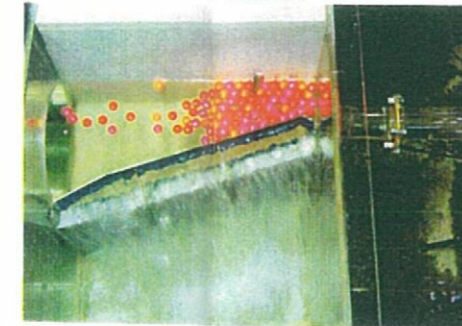



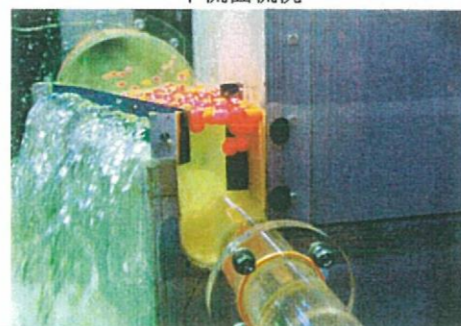
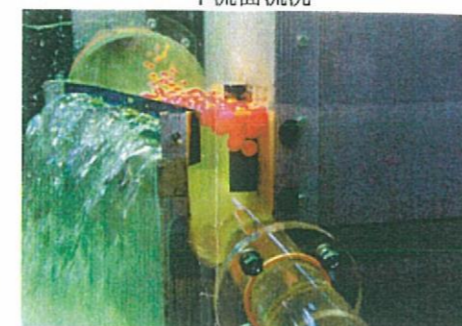
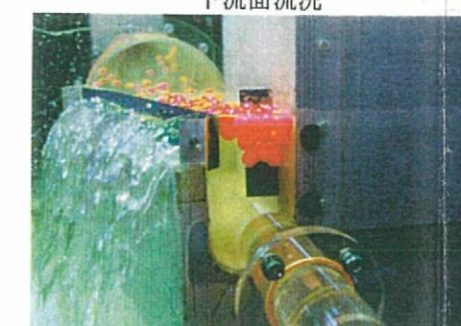


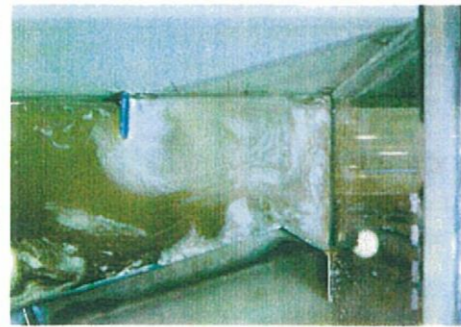
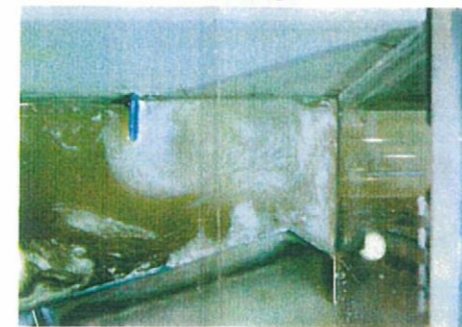



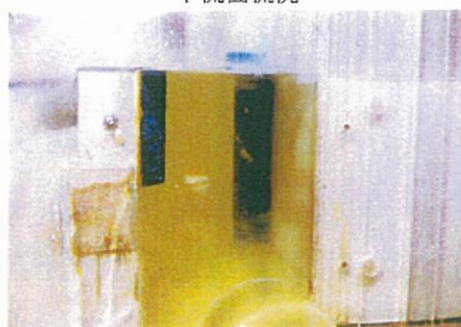



雨水吐き室形状: 遮集管と壁の離れ OD の場合

位置: 1.0D	張出長: 0.3D	評価: ×	位置: 1.0D	張出長: 0.4D	評価: △	位置: 1.0D	張出長: 0.5D	評価: ○	位置: 1.0D	張出長: 0.6D	評価: ○	位置: 1.0D	張出長: 0.7D	評価: ○
遮集状況: 遮集管に流入しない			遮集状況: 徐々に遮集管に流入する			遮集状況: 連続的に遮集管に流入する			遮集状況: 連続的に遮集管に流入する			遮集状況: 連続的に遮集管に流入する		
平面流況			平面流況			平面流況			平面流況			平面流況		
														
下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況		
														
渦の生成状況														
平面流況			平面流況			平面流況			平面流況			平面流況		
														
下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況		
														

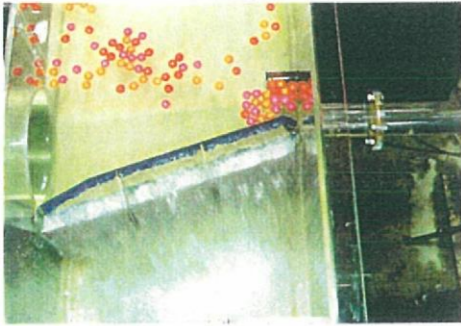
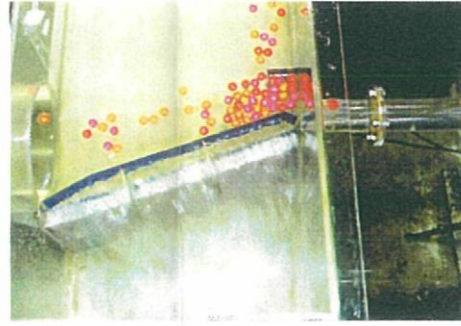

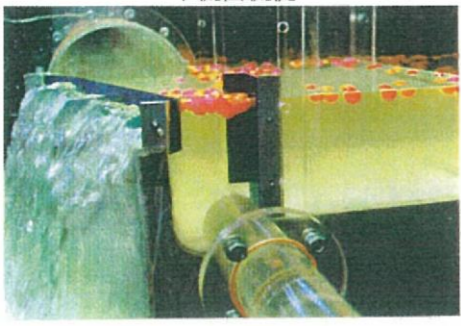
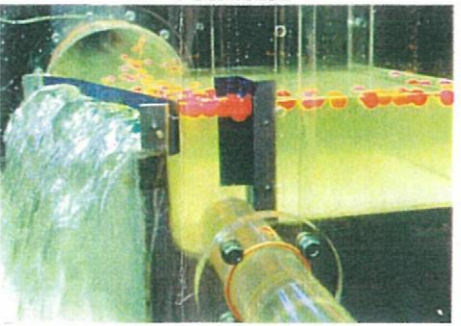
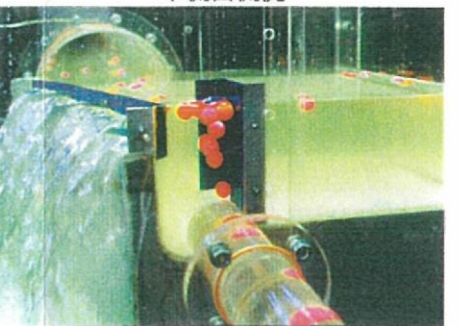
雨水吐き室形状:遮集管と壁の離れ OD の場合

位置:1.5D	張出長:0.3D	評価:×	位置:1.5D	張出長:0.4D	評価:△	位置:1.5D	張出長:0.5D	評価:△	位置:1.5D	張出長:0.6D	評価:△	位置:1.5D	張出長:0.7D	評価:△
遮集状況:遮集管に流入しない			遮集状況:徐々に遮集管に流入する			遮集状況:徐々に遮集管に流入する			遮集状況:徐々に遮集管に流入する			遮集状況:徐々に遮集管に流入する		
平面流況			平面流況			平面流況			平面流況			平面流況		
														
下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況		
														
渦の生成状況														
平面流況			平面流況			平面流況			平面流況			平面流況		
														
下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況		
														

雨水吐き室形状:遮集管と壁の離れ 0D の場合

位置: 2.0D	張出長: 0.3D	評価: ×	位置: 2.0D	張出長: 0.4D	評価: ×	位置: 2.0D	張出長: 0.5D	評価: ×	位置: 2.0D	張出長: 0.6D	評価: ×	位置: 2.0D	張出長: 0.7D	評価: ×
遮集状況: 遮集管に流入しない			遮集状況: 遮集管に流入しない			遮集状況: 遮集管に流入しない			遮集状況: 遮集管に流入しない			遮集状況: 遮集管に流入しない		
平面流況			平面流況			平面流況			平面流況			平面流況		
														
下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況		
														
渦の生成状況														
平面流況			平面流況			平面流況			平面流況			平面流況		
														
下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況			下流面流況		
														

雨水吐き室形状: 遮集管と壁の離れ 5D の場合

位置: 1.0D	張出長: 0.4D	評価: ×	位置: 1.0D	張出長: 0.5D	評価: △	位置: 1.0D	張出長: 0.6D	評価: ○
遮集状況: 遮集管に流入しない			遮集状況: 徐々に遮集管に流入する			遮集状況: 連続的に遮集管に流入する		
<p>平面流況</p> 			<p>平面流況</p> 			<p>平面流況</p> 		
<p>下流面流況</p> 			<p>下流面流況</p> 			<p>下流面流況</p> 		

### 3.4.3 標準設計法の提案

3.2 で示した結論と 3.4.2 の実験結果を踏まえ、水面制御装置の「縦型制御板とガイドウォール」の標準設計として以下に提案（図 3.4.4）する。

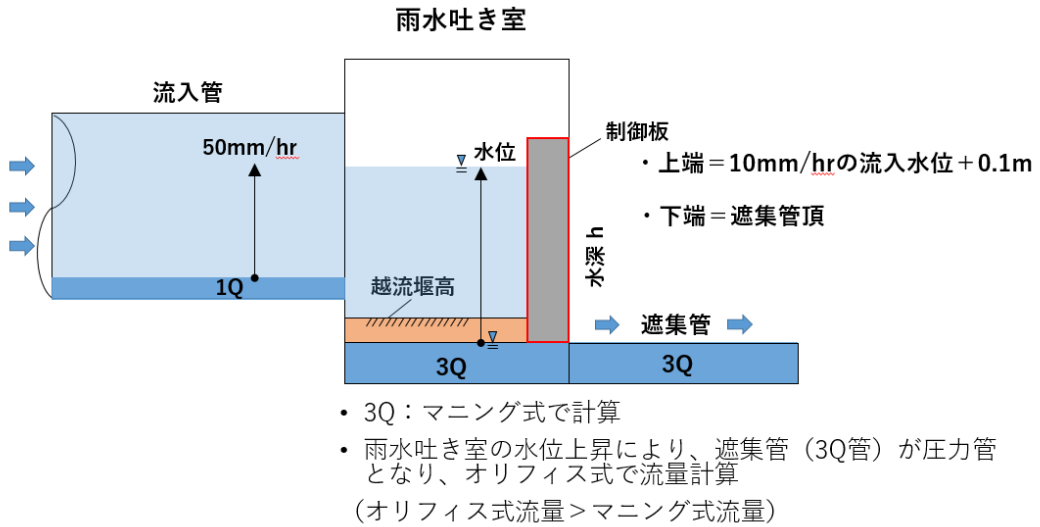


図 3.4.4 提案する標準設計のイメージ

なお、東京都下水道局が定めている標準設計法と、財団法人下水道新技術推進機構が定めている標準設計法（技術資料「合流式下水道の改善における夾雑物対策を対象とした水面制御装置（2009年3月）」<sup>1)</sup>）がある。これらの設計法では、「縦型制御板とガイドウォール」、「縦型制御板単独」、「横型制御板とガイドウォール」、「横型制御板単独」（図 3.4.5(1)(2)参照）の他、「ガイドウォール単独」の5パターンを設定<sup>1)4)</sup>している。

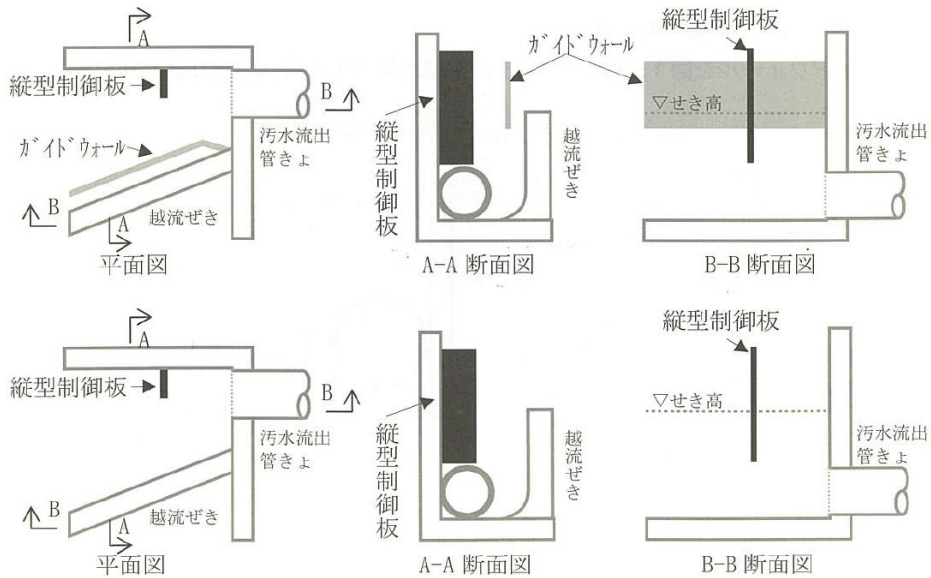


図 3.4.5(1) 上図：縦型制御板とガイドウォール 下図：縦型制御板単独

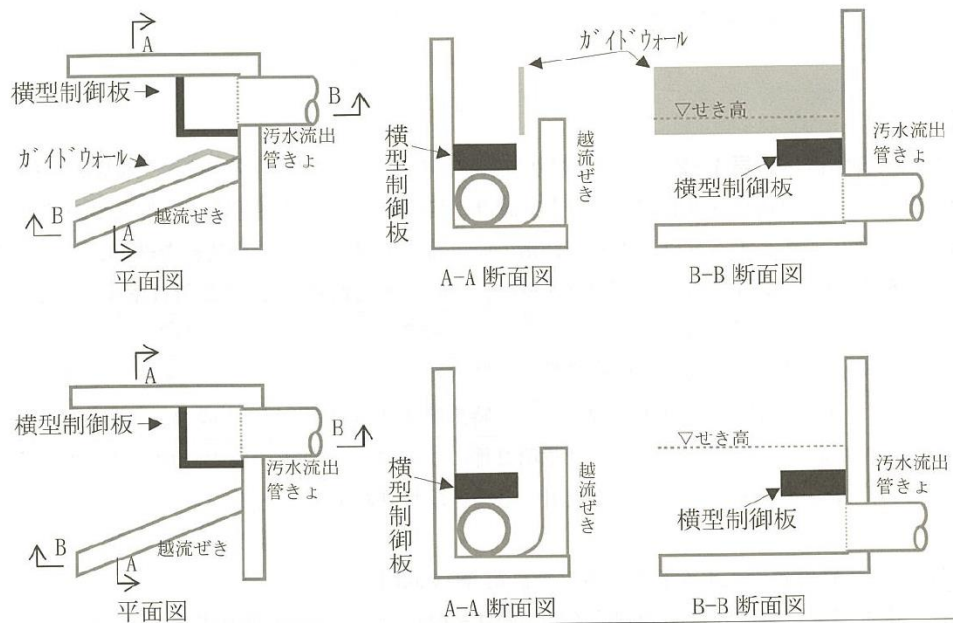


図 3.4.5(2) 上図：横型制御板とガイドウォール 下図：横居た制御板単独

(1) 平面形状の設定

縦型制御板の平面形状は、遮集管と雨水吐壁の位置関係によって定める。

<遮集管と壁とが接近している場合>

遮集管口と雨水吐壁が近接している場合は、遮集管口から 1.0D の場所に雨水吐き室の壁から 0.5D の長さで張り出す。(D=遮集管径)

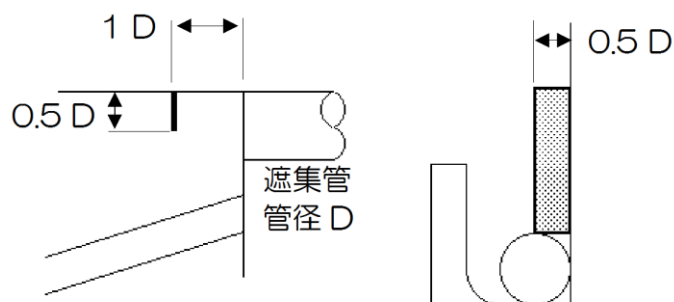


図 3.4.6 制御板平面位置図

<遮集管と雨水吐壁が離れている場合>

遮集管口と雨水吐き室の壁が離れている場合は、遮集管口から  $1.0D$  の場所に雨水吐き室の壁から  $0.6D$  で張り出す。(  $D$  = 遮集管径)

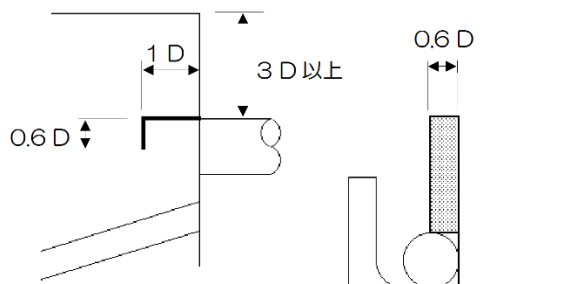


図 3.4.7 制御板平面位置図

(2) 下端高さの設定

縦型制御板の下端高さは、遮集管頂部に設定する。

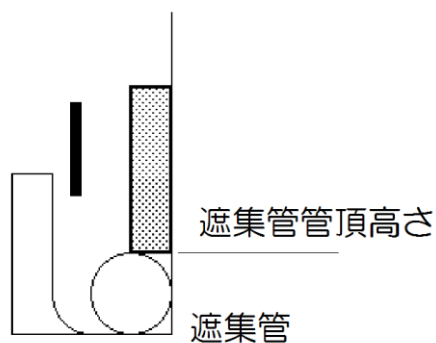


図 3.4.8 下端高さの設定

(3) 上端高さの設定

制御板の上端高さは、雨水吐き室の  $10\text{mm/hr}$  流入時の水位高に余裕高 (水面変動への対応) を考慮し  $0.1\text{m}$  を加えることを原則とする。

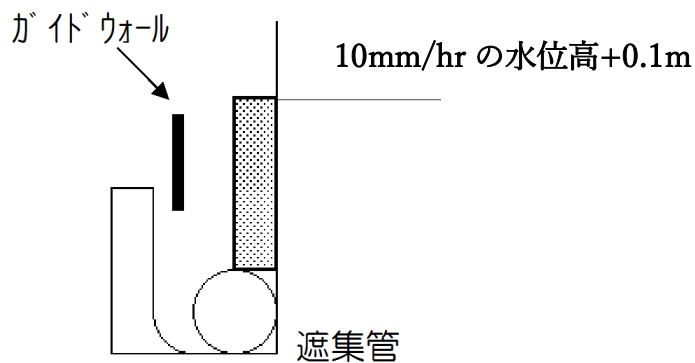


図 3.4.9 上端高さの設定



#### (4)ガイドウォールの位置設定

ガイドウォールは、浮遊物を越流水と共に堰から公共用水域に流れ出ることを防ぐとともに、制御板で生成される渦方向に浮遊物を誘導する役割を有している。

そこで、ガイドウォールは越流堰の前面に設置し、上端は越流堰よりも高く雨水吐き室の10mm/hr 流入時の水位高とし、下端は越流堰よりも低く設置する。

また、雨水吐き室の底盤や越流堰との最小離隔は150mm 以上確保することとした。これは、夾雑物などが挟まれることにより、流入管上部への水位上昇などの影響から溢水事故などを危惧してのことである。また、下水が越流堰を超えることを阻害しないように配慮したものである（図 3.4.10）。

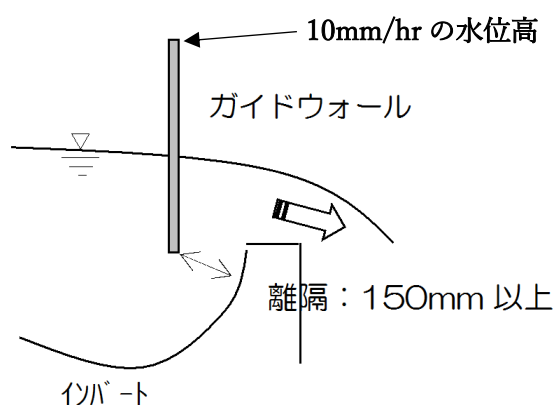


図 3.4.10 ガイドウォールと側壁との離隔

なお、ガイドウォールを設置する際、上流管渠の影響を確認するために動水勾配による計算を行うことを前提条件とする。

以下にその例を示す<sup>3)</sup>。

動水勾配の計算は、50 mm/hr 降雨時の越流水位と流入管の管頂高さを比較して判定する。

- ・ガイドウォールを設置する雨水吐き室において、流量計算表を作成して 50 mm/hr 降雨における流量を求める
- ・ガイドウォールの天端を堰高とした場合において、50 mm/hr 降雨時の雨水吐き室内越流水位を求める
- ・50 mm/hr 降雨時の越流水位と流入管の管頂高さを比較する

結果、

- ・「越流水位 < 流入管の管頂高さ」の場合

ガイドウォール設置による溢水の恐れはないとして判断できるため、流入管上流部への影響を確認したものとする

- ・「越流水位 > 流入管の管頂高さ」の場合

ガイドウォール設置による溢水の恐れが懸念されるため、動水勾配の計算を行うことと

する

動水勾配の計算が必要と判断された場合、当該雨水吐き室の幹線網を調査し動水勾配の計算を行ったうえで判断する。

基本的には動水勾配線が地表面を超えない場合には、ガイドウォールの設置を可能と判断する。これは、ガイドウォールと既存の堰や雨水吐き室の壁との隙間が閉塞されることがあっても、この現象は一時的であり、かつ 50 mm/hr の降雨と時間が合致する確率は非常に少ないとの判断による。

また、計算結果から動水勾配線が地表面を超える場合であっても、図 3.4.12 のようにガイドウォールの設置前において既に動水勾配線が地表面を超えているスパンがある場合は、ガイドウォールを設置したからと言って溢水箇所の動水位が高くなることはない。この場合にはガイドウォールを設置する。

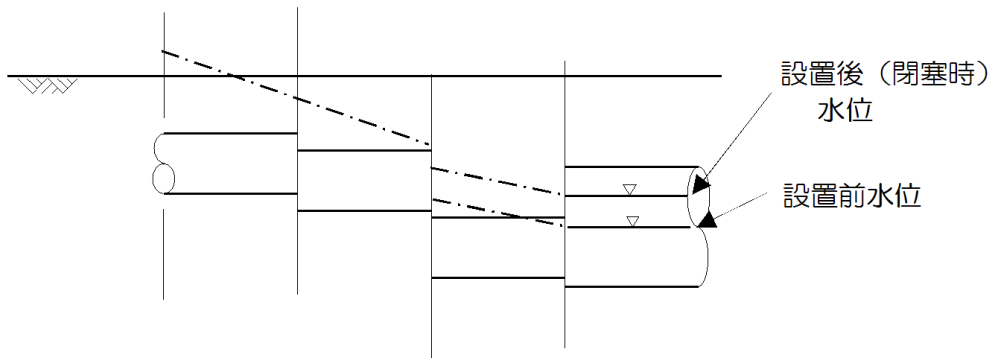


図 3.4.11 動水勾配線が地表面を超える場合（ガイドウォールの設置ケース 1）

ただし、図 3.4.12 のようにガイドウォールを設置する前に動水勾配線が地表面を超えるスパンがあり、ガイドウォールを設置することで溢水箇所の動水勾配線が更に上昇する場合には、ガイドウォールの天端高さと堰高さを同一とする。

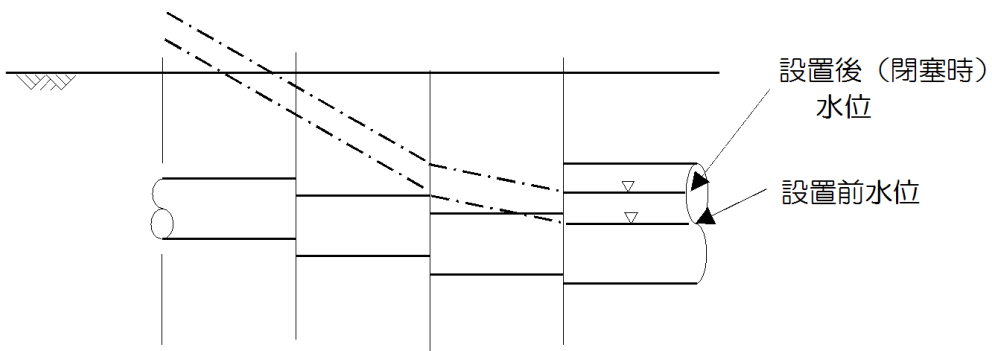


図 3.4.12 動水勾配線が地表面を超える場合（ガイドウォールの設置ケース 2）

### 3.4.4 標準設計法の課題

対象となる雨水吐き室の構造には、複数の流入管やその規模の違い、あるいは遮集管の規模と設置位置の違い、更には堰の方向や高さの違いなど、同一構造をもつものはないともいえる。

このため、制御板の大きさや設置位置、ガイドウォールの設置位置などを提案する標準設計法に基づき設定するものの、技術者の経験則的な判断に頼らざる面があり、成果品の品質にばらつきが生ずる可能性は否定できない。このため、設置後にテレビカメラを用いて降雨後の効果を見極めるなどにより確認を行っているが、これら調査により水面制御装置による浮遊物の流出抑制効果が十分に発揮されない場合には、制御板の位置や大きさを変更するなどの改良が伴うこととなる。表 3.4.3 に、設置後の調査で明らかとなった、効果的な渦流の発生が期待できない事例を示す。

表 3.4.3 設置後の調査における効果的な渦流の発生が期待できない事例

※D：遮集管径

	雨水吐き室における状況	雨水吐き室における対応
①	遮集管の管頂から越流水面までの水深が深い場合 (H=3.5D 程度以上) 【写真 3.4.1, 写真 3.4.2】	技術者の経験則的な判断で、設置位置を修正したうえで、渦流の発生状況を確認する
②	遮集管の管頂から越流水面までの水深が浅い場合 (H=0.5D 程度以下) 【図 3.4.13】	
③	遮集量が少ない、すなわち流速が小さい場合	設置可能な付近の位置に配置したうえで、渦流の発生を状況確認する
④	標準設計法の設置位置 (1.0D)、幅 (0.5D) の制御板が、雨水吐き室の構造と干渉するなど、最適位置に設置できない場合 【図 3.4.14】	



写真 3.4.1 水深が深い場合に渦流が縮小 (H=3.2D)



写真 3.4.2 水深が深い場合に渦流が消滅 (H=3.5D)

効果的な渦流の発生が期待できない事例への対応として、②遮集管の管頂から越流水面までの水深が浅い場合 (H=0.5D 程度以下) において、制御板の下端を遮集管の 1/2 の高さまで下げることで事例が挙げられる (図 3.4.13)。

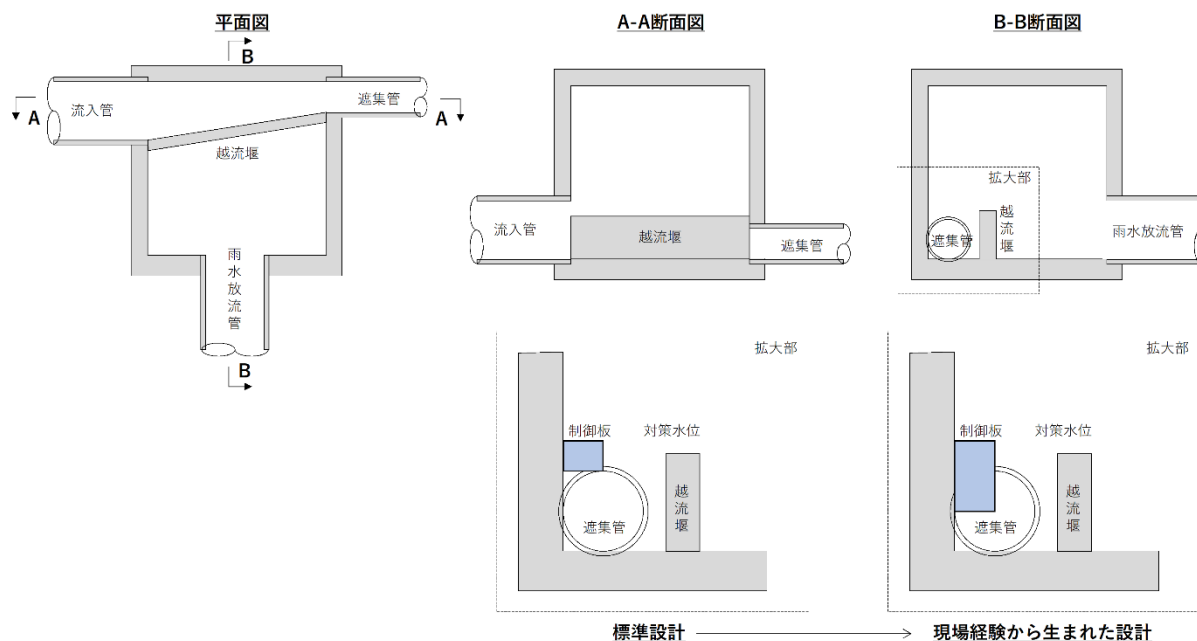


図 3.4.13 ②遮集管の管頂から越流水面までの水深が浅い場合の対応事例

また、④雨水吐き室の構造と干渉するなど、最適位置に設置できない場合、具体的には、遮集管が雨水吐き壁の角部分に配置されていない場合には、制御板で囲まれる渦流領域の平面積が大きくなり渦の発達が不十分になることが現場における事後調査により明らかとなってきた。そこで、渦の領域を拘束することで渦の発達を十分なものとするために、制御板の形状を工夫した（図 3.4.14）。

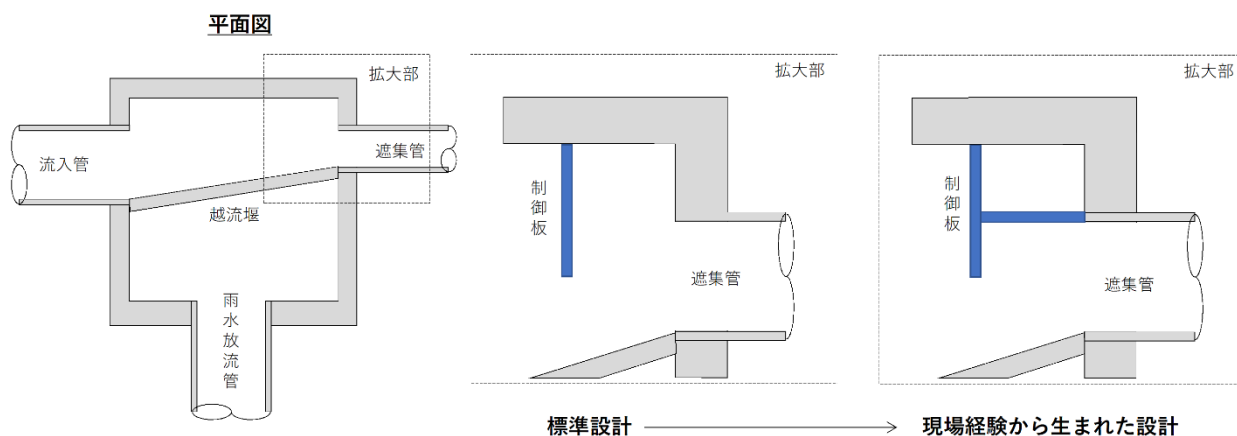


図 3.4.14 ④雨水吐き室の構造と干渉するなど、最適位置に設置できない場合の対応事例

このように、雨水吐き室の状況に応じて、技術者の経験則的な判断で、設置位置を修正したうえ、渦流の発生状況を確認している。こうしたなか、表 3.4.3 のうち①②③については、水深や遮集量の水理特性を指標として、効果的な渦流の発生状況を評価し、適用範囲を整理

及び検証し得るものと考えられた。

このことで、設計段階では標準設計法で定めた制御板が、渦流を生成し、所定の効果を発揮できるかについて、簡易な方法で評価できる方法や設計段階でより効果のある設計法が求められることから、本研究で提案することが目的でもある。

なお、3.4 で実施した実験結果（表 3.4.1, 表 3.4.2）及び標準設計法の課題（表 3.4.3）から、渦が生成され浮遊物を引込む条件としては、「遮集管の管頂から水面までの水深」「遮集管の流速」「制御板の下端高さ」などが示唆される。

#### [参考文献]

- 1) 財団法人下水道新技術推進機構「合流式下水道の改善における夾雑物を対象とした水面制御装置」技術資料 2009年3月
- 2) 東京都下水道局建設部：「簡易合流改善施設設計の手引き（案）」平成18年3月
- 3) 東京都下水道局建設部・日本工営株式会社：「神田川外3流域簡易合流改善式施設設置実施設計」報告書 平成31年3月
- 4) Tethuya Nakamura, Osamu Mathushima, Shizuo Yoshikawa, Yukitoshi Iwasa, Toshimithu Watanabe：「Study of Water Surface Control as a Debris Reduction Measure for the Improvement of the Combined Sewer System」, 都市雨水排除の新技術に関する国際会議（2010NOVATECH）, 2010年6月28日, 電子論文集のため全体頁なし

## 第4章 装置の効果確認と設計評価方法の提案

### 4.1 目的

水面制御装置の設計者は、第3章 3.3 に示した標準設計法とこれまでの経験則に基づいて水面制御装置の制御板の大きさや設置位置を定めている。しかし、設計した装置が渦を生成し、浮遊性夾雑物（以下「浮遊物」）が遮集管に捕捉される機能が発揮しているかを確認するためには、現地の雨水吐き室に TV カメラを設置しての確認や雨天時に現地に出向いての目視確認などをする必要がある。この調査作業が、本装置の設置に際しての課題となっている。

本研究では、これまで水面制御装置を設置した雨水吐き室で、雨天時において設置前と設置後の夾雑物の流入量と堰の越流量を測定する調査を行い、夾雑物の遮集管への捕捉効果を把握しているので、この調査結果を整理する。

この設置後の機能確認調査の課題に対応するために、標準設計に基づいて定めた制御板の設置位置や大きさが、渦を発生させ浮遊物を遮集管に捕捉されるかについて、簡易に評価できる指標を検討することとした。

これまでの実験や実施事例から、渦の発生は「遮集管の管頂から水面までの水深」「遮集管の能力による遮集量」「制御板の下端高さ」が大きく影響することが重要であることの知見を得ている<sup>1)2)</sup>。そこで、「模型実験による確認」と「設計事例」から水面制御装置の適用範囲を整理及び検証したうえで、新たな評価方法を導き出し提案することとした。

### 4.2 水面制御装置の性能確認調査

#### (1)調査目的と対象施設

雨水吐き室の水面制御装置について、その効果を検証することを目的として現地調査を実施<sup>1)</sup>した。対象施設は、東京都下水道局が管理する水面制御装置（渦流式）が設置された雨水吐き室4箇所とした（表4.1）。

表 4.1 調査対象の雨水吐き室の諸元

調査対象	雨水吐き室の平面寸法	遮集管径	越流開始時の水位（遮集管底から）	10mm/hr 降雨時の水位（遮集管底から）
呑川①	3.00m×2.83m	300mm	350mm	505mm
呑川②	1.80m×1.80m	250mm ※径 150mm オアリス有	500mm	645mm
石神井川①	2.00m×1.50m	250mm	470mm	687mm
善福寺川①	2.30m×1.95m	350mm	970mm	1105mm

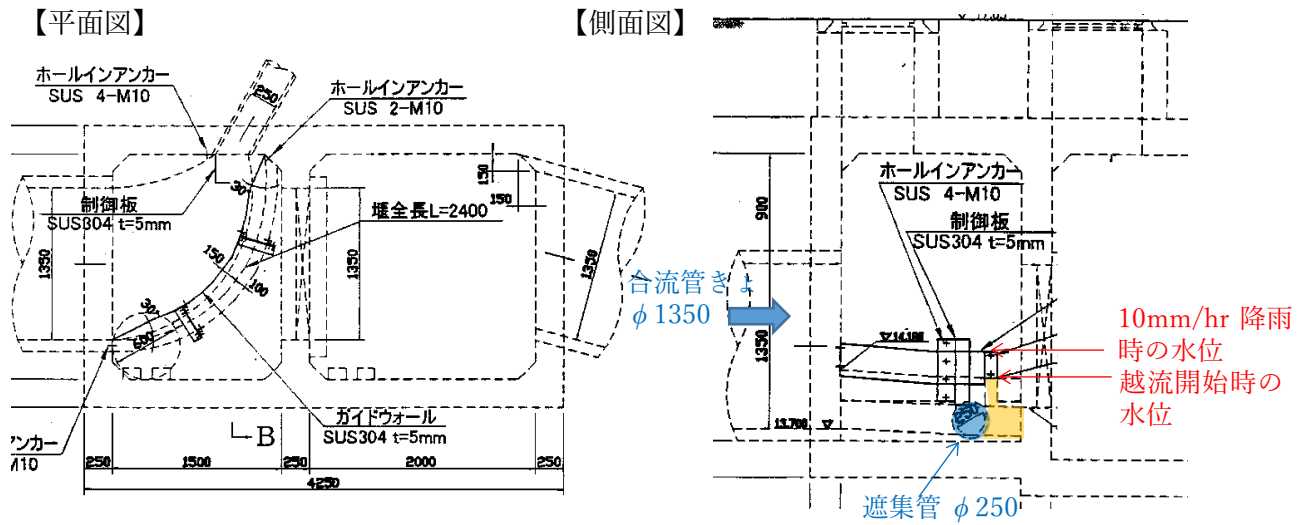


図 4.1 調査対象の雨水吐き室の構造（石神井川①）

(2)調査方法と評価指標

採水及び浮遊物採取は図 4.2 に示す a, b の場所で実施した。採水は 1 降雨につき 15 ㍺を 5 回（合計 75 ㍺）に分けて行い、目幅 4mm のフルイによって夾雑物とろ液に分けた。浮遊物は組成ごとの乾燥重量を計測した。

評価指標（※ a～b は図 4.2 における採水位置それぞれの雨天時下水 15 ㍺に含まれる夾雑物の重量）は下記に示す、捕捉率を用いた。

・水面制御装置設置後の捕捉率 
$$= \frac{a-b}{a} \times 100 \quad (\%)$$

ここに、a：越流前の浮遊物乾燥重量

b：越流後の浮遊物乾燥重量

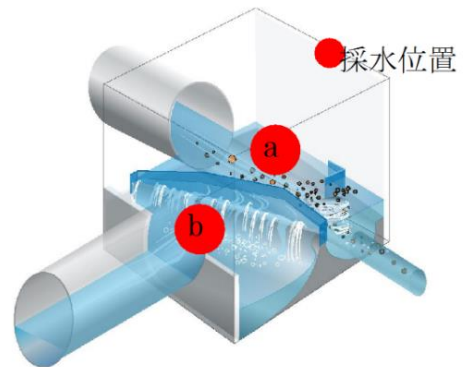


図 4.2 調査における採水、浮遊物採取箇所



写真 4.1 調査における採水状況



写真 4.2 現場における渦流発生状況

### (3)浮遊物の捕捉率の結果

調査結果による浮遊物の捕捉率の結果は表 4.2 に示すとおりである。捕捉率の結果は、最低値は 30%を超えており、平均値で 85.3%となった。

対策前の除去率はほぼゼロと考えられるため、表 4.3 に示す捕捉率が SPIRIT21 の中で定義されている「捕捉値」とみなすことができる。SPIRIT21 では「最低限達成すべき捕捉率は英国でのスクリーン採用の目安である 30%を採用した。」とされているため、水面制御装置（渦流式）は必要性能を達成していると判定できる。

表 4.2 浮遊物の捕捉率の結果

水面制御装置	調査箇所	夾雑物捕捉率			平均値
		1 回目	2 回目	3 回目	
渦流式	呑川①	99.0%			85.3 %
	呑川②	99.3%	98.3%		
	石神井川①	48.4%	96.4%	93.4%	
	善福寺川①	90.8%	56.8%		

### (4)他の調査結果による捕捉率

同様の調査を（財団法人）下水道新技術推進機構が行い、「合流式下水道の改善における夾雑物対策を対象とした水面制御装置技術資料（2009 年 3 月）」で報告<sup>3)</sup>している。

調査は、「縦型制御板+ガイドウォール」「ガイドウォール単独」を設置している 16 都市 36 カ所で行っている。調査結果は、夾雑物捕捉値（SRV）は 33.1%～99.3%であり、必要性能を有するものとして認めている（表 4.3, 表 4.4）。

また、捕捉した浮遊物夾雑物の分類結果を見ると、一番多いのが草木類であり、糞類、紙類、厨芥類が多く捕捉されている。他には毛髪類やビニール類なども少量ではあるが捕捉されている。

表 4.3 夾雑物捕捉値（SRV）調査結果（その 1）<sup>3)</sup>

整理番号	TSRE <sub>without</sub> (%)	TSRE <sub>with</sub> (%)	夾雑物捕捉値 SRV (%)	水面制御の種類
1	0.665	0.776	33.1	縦型制御板+カイトウォール
2	0.445	0.669	40.4	縦型制御板+カイトウォール
3	0.316	0.634	46.5	縦型制御板+カイトウォール
4	0.089	0.683	65.2	縦型制御板+カイトウォール
5	0.000*	0.668	66.8	カイトウォール
6	0.225	0.756	69.0	縦型制御板+カイトウォール
7	0.627	0.892	71.0	カイトウォール
8	0.685	0.911	71.7	縦型制御板+カイトウォール
9	0.460	0.850	72.2	カイトウォール
10	0.000*	0.738	73.8	縦型制御板+カイトウォール
11	0.616	0.911	76.8	カイトウォール
12	0.119	0.812	78.7	カイトウォール
13	0.000*	0.794	79.4	縦型制御板+カイトウォール



表 4.4 夾雑物捕捉値 (SRV) 調査結果 (その 2) <sup>3)</sup>

整理番号	TSRE <sub>without</sub> (%)	TSRE <sub>with</sub> (%)	夾雑物捕捉値 SRV (%)	水面制御の種類
14	0.109	0.830	80.9	縦型制御板+カイトウォール
15	0.452	0.908	83.2	縦型制御板+カイトウォール
16	0.000	0.836	83.6	縦型制御板+カイトウォール
17	0.316	0.893	84.4	縦型制御板+カイトウォール
18	0.336	0.897	84.5	縦型制御板+カイトウォール
19	0.766	0.966	85.5	縦型制御板+カイトウォール
20	0.000 <sup>※</sup>	0.880	88.0	カイトウォール
21	0.000	0.893	89.3	カイトウォール
22	0.000	0.920	92.0	カイトウォール
23	0.000	0.932	93.2	縦型制御板+カイトウォール
24	0.000 <sup>※</sup>	0.937	93.7	横型制御板+カイトウォール
25	0.000	0.938	93.8	カイトウォール
26	0.423	0.971	95.0	カイトウォール
27	0.351	0.977	96.5	カイトウォール
28	0.122	0.972	96.8	縦型制御板
29	0.295	0.978	96.9	縦型制御板+カイトウォール
30	0.000 <sup>※</sup>	0.974	97.4	横型制御板+カイトウォール
31	0.582	0.990	97.6	縦型制御板+カイトウォール
32	0.340	0.992	98.8	縦型制御板+カイトウォール
33	0.000 <sup>※</sup>	0.988	98.8	縦型制御板+カイトウォール
34	0.000 <sup>※</sup>	0.990	99.0	縦型制御板+カイトウォール
35	0.000 <sup>※</sup>	0.991	99.1	カイトウォール
36	0.302	0.995	99.3	カイトウォール

<参考：SRV<sup>3)</sup>とは>

水面制御装置設置による夾雑物流出抑制の改善率をあらわす指標。

その算定式を示す。式中の TSRE<sub>with</sub> は、水面制御装置設置時の夾雑物の除去率を、TSRE<sub>without</sub> は、水面制御装置未設置時の越流ぜきによる夾雑物の除去率を、それぞれ表す。

$$SRV(\%) = \frac{TSRE_{with} - TSRE_{without}}{1 - TSRE_{without}} \times 100$$

$$TSRE_{with} = \frac{\text{遮集下水夾雑物量}_{with} + \text{水面制御装置設置時の捕捉夾雑物量}}{\text{遮集下水夾雑物量}_{with} + \text{越流夾雑物量}_{with} + \text{水面制御装置設置時の捕捉夾雑物量}}$$

$$TSRE_{without} = \frac{\text{遮集下水夾雑物量}_{without}}{\text{遮集下水夾雑物量}_{without} + \text{越流夾雑物量}_{without}}$$

ここに、

遮集下水夾雑物量<sub>with</sub> : 装置設置時に遮集される乾燥夾雑物重量

水面制御装置設置時の捕捉夾雑物量 : 装置設置時に捕捉<sup>※</sup>される乾燥夾雑物重量

越流夾雑物量<sub>with</sub> : 装置設置時の放流側に流出する乾燥夾雑物重量

遮集下水夾雑物量<sub>without</sub> : 装置未設置時に遮集される乾燥夾雑物重量

越流夾雑物量<sub>without</sub> : 装置未設置時に放流側に流出する乾燥夾雑物重量

※水面制御装置においては夾雑物は遮集されるため、捕捉することはないが SPIRIT21 との整合を図るために同様の定義とした。

(5)浮遊物の成分分析の結果

採取した浮遊物を組成（紙類，毛髪類，ビニール類，金属類，草木類，厨芥類，糞類，その他）の9種類に分類し，それぞれの乾燥重量を計測した。

表 4.5 に示す本調査の3回の結果の組成分類より，草木類が非常に多く，続いて，ビニール類や紙類の割合が多くなっている。

表 4.5 成分分析結果より浮遊物の組成

組成名	呑川①				呑川②（1回目）				呑川②（2回目）			
	越流前		越流後		越流前		越流後		越流前		越流後	
	乾燥重量 (mg)	組成比 (%)	乾燥重量 (mg)	組成比 (%)	乾燥重量 (mg)	組成比 (%)	乾燥重量 (mg)	組成比 (%)	乾燥重量 (mg)	組成比 (%)	乾燥重量 (mg)	組成比 (%)
<b>紙類</b>	<b>321</b>	<b>5</b>	5.1	7.7	<b>325</b>	<b>7.1</b>	5.2	15.7	4.9	0.1	7.7	11.9
毛髪類	0.1	0	0	0	0	0	0.1	0.3	1.7	0	1.4	2.2
<b>ビニール類</b>	<b>606.5</b>	<b>9.4</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
金属類	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>草木類</b>	<b>5382.1</b>	<b>83.3</b>	60.5	91.1	<b>3851</b>	<b>83.5</b>	16.7	50.5	<b>3864.1</b>	<b>99.6</b>	51	78.9
厨芥類	26.8	0.4	0.8	1.2	3.4	0.1	9.8	29.6	0	0	0	0
糞類	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
その他	125.3	1.9	0	0	430.3	9.3	1.3	3.9	7.5	0.2	4.5	7
乾燥重量 合計	6461.8		66.4		4609.7		33.1		3878.2		64.6	
	除去率99.0%				除去率99.3%				除去率98.3%			

次に，表 4.6 に代表的な浮遊物組成の比重を示す。本調査で多く採取された草木類，ビニール類，紙類に加え，下水道新技術推進機構の調査<sup>3)</sup>で多く捕捉された糞類や厨芥類，さらにオイルボールについて整理した。

この結果より，代表的な浮遊物の比重は 0.55～0.90 であることが確認された。

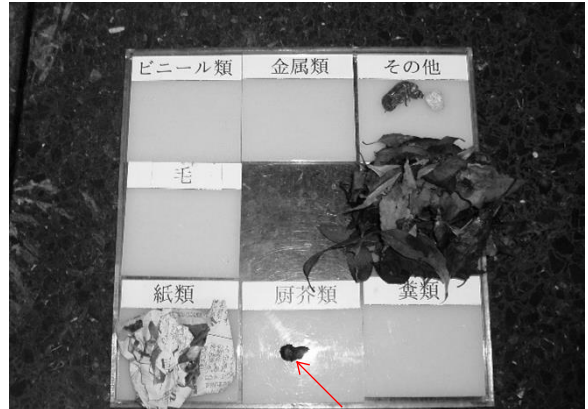
表 4.6 代表的な浮遊物組成の比重

組成名	比重	備考
紙類	0.8程度	水中における比重0.6～1.0の中央値
ビニール類	0.9程度	ポリエチレンの比重
草木類	0.55	産業廃棄物種類別重量換算係数より
厨芥類	0.8	〃
糞類	0.8程度	水中における比重0.6～1.0の中央値
オイルボール	0.9	



木くず(草木類) 葉(草木類)

写真 4.3 本調査で採取された浮遊物



厨芥類

写真 4.4 下水道新技術推進機構の調査<sup>3)</sup>で捕捉された浮遊物

(6)様々な浮遊物の捕捉状況

雨水吐き室の調査結果の組成分類では、草木類や紙類、ビニール類の浮遊物が採取されている。そこで、小型の装置模型を用いて、比重や形状が様々な浮遊物の捕捉状況について確認を行った。

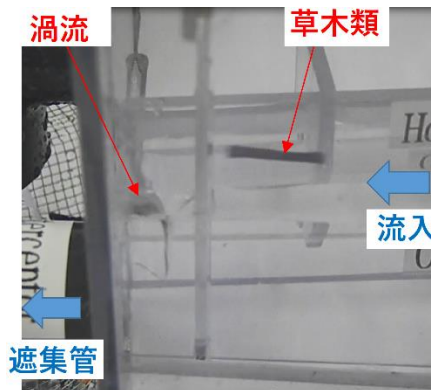
写真 4.5 に、草木類を想定した浮遊物モデルの（比重：0.5，実物換算寸法：35～40cm，浮遊物モデル寸法：21～25mm）の捕捉状況を、写真 4.6 に、紙類を想定した浮遊物モデルの（比重：0.8，実物換算寸法：12～13cm，浮遊物モデル寸法：7～8mm）の捕捉状況を示す。

草木類および紙類を想定した浮遊物モデルの確認結果より、両者のモデルは、渦流によって捕捉されている状況を確認した。

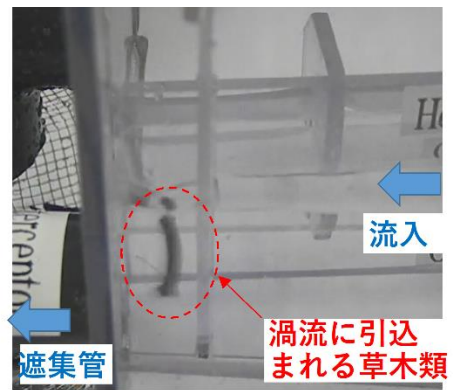


・比重：0.5  
・寸法：実物換算35～40cm  
(モデル21～25mm)

(a)夾雑物モデル



(b)捕捉前の状況



(c)捕捉中の状況

写真 4.5 草木類を想定した浮遊物モデルの捕捉状況

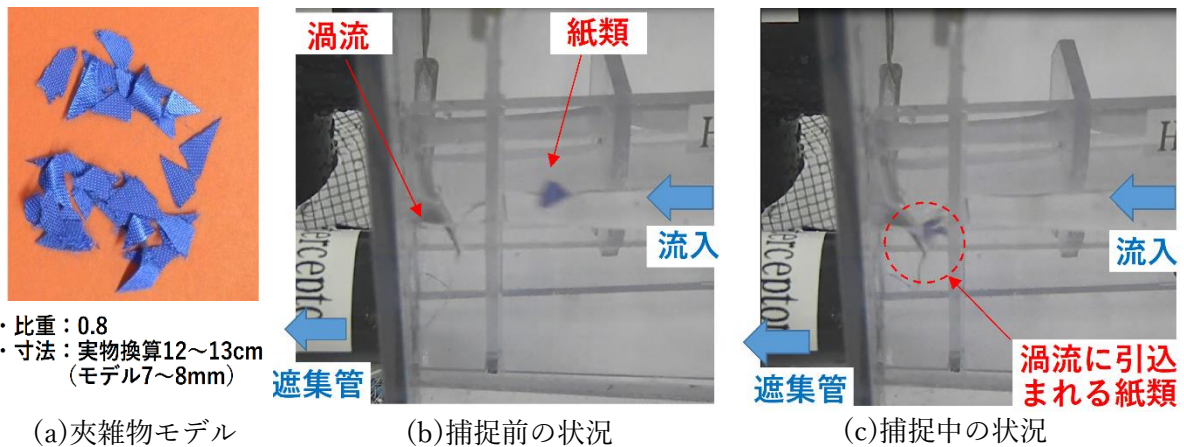


写真 4.6 紙類を想定した浮遊物モデルの捕捉状況

### 4.3 実験の事前検討

#### (1) 遮集管の管頂から水面までの水深

制御板の背面で発生する渦は、遮集管の管頂から水面までの水深が深いほど発達しにくく、水深が浅いほど発達しやすいと、これまでの実施事例から観察されている。水面制御装置が想定する降雨強度（夾雑物の流出抑制を期待する降雨）は、10 mm/hr と SPIRIT21 で整理されていることから、本論でも採用する。しかし、雨水吐き室の構造や流域の条件から 10 mm/hr 降雨時の雨水吐き室の水位は様々である。

したがって、遮集管の管頂から水面までの水深を変化させた実験を行い確認することで、浮遊物を捕捉できる限界の水深を見出すこととする。

#### (2) 遮集量

制御板の背面で発生する渦は、遮集管の流下能力が小さいほど発達しにくく、流下能力が大きいほど発達しやすい。これは、既往の水理模型実験において遮集管の流下能力が大きいほど、制御板先端付近の流速が高まり、渦が発生しやすい現象が確認されている。

したがって、遮集管の遮集量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) を変化させた実験を行うことで、浮遊物を捕捉できる限界の遮集量を見出すことが可能と考える。

#### (3) 制御板下端高さ

標準的な設計においては、制御板の下端を遮集管の管頂高さに合わせることをしている。しかし、遮集管の流下能力が比較的小さい場合には、これまでの設計経験から制御板の下端高さを遮集管の 1/2 程度まで下げることにより、効果的な渦の発生が期待できる。

下端高さを決定するにあたっては、これまでの経験的な判断に委ねざるを得ないことから、定量的な基準が求められる。このため、制御板下端高さを変化させた実験を行うことで、制御板下端を遮集管の管頂よりも下げるなどの効果的な条件を見出すこととする。

#### (4)効果指標のイメージ

以上の(1)(2)(3)の事前検討の結果, 図 4.3 のイメージに基づく効果指標を作成することにより, 設計時に渦が生成され浮遊物を遮集管に捕捉できるかについて判断できるものとした. このイメージ図の作成に向けて実験を実施することとした.

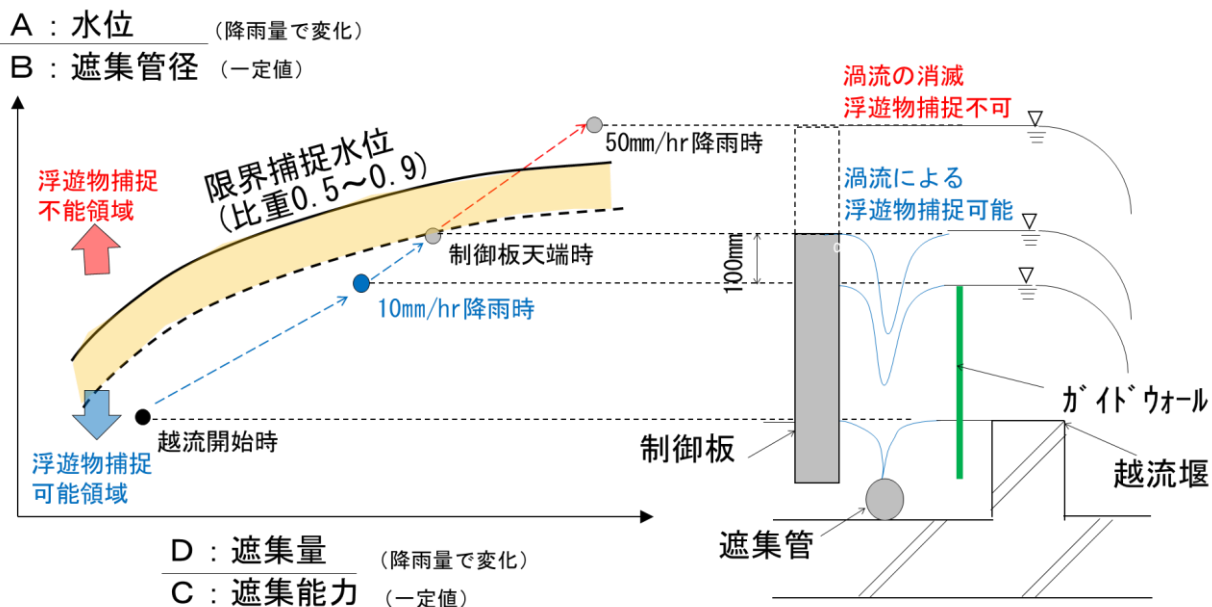


図 4.3 効果指標のイメージ図

#### 4.4 模型実験と結果

##### (1)使用する模型

第3章で実験を行った模型を使用した(写真4.7, 図4.4参照)。

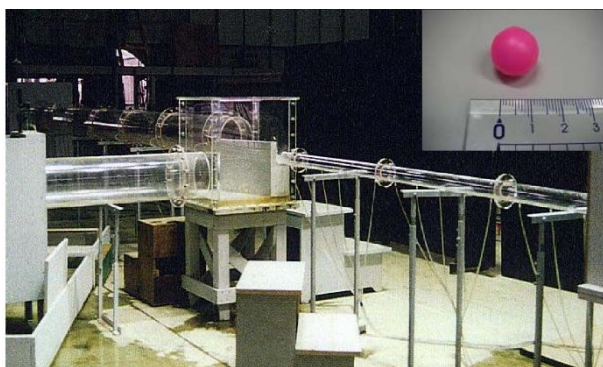


写真 4.7 実験装置と浮遊物(スマートボール)

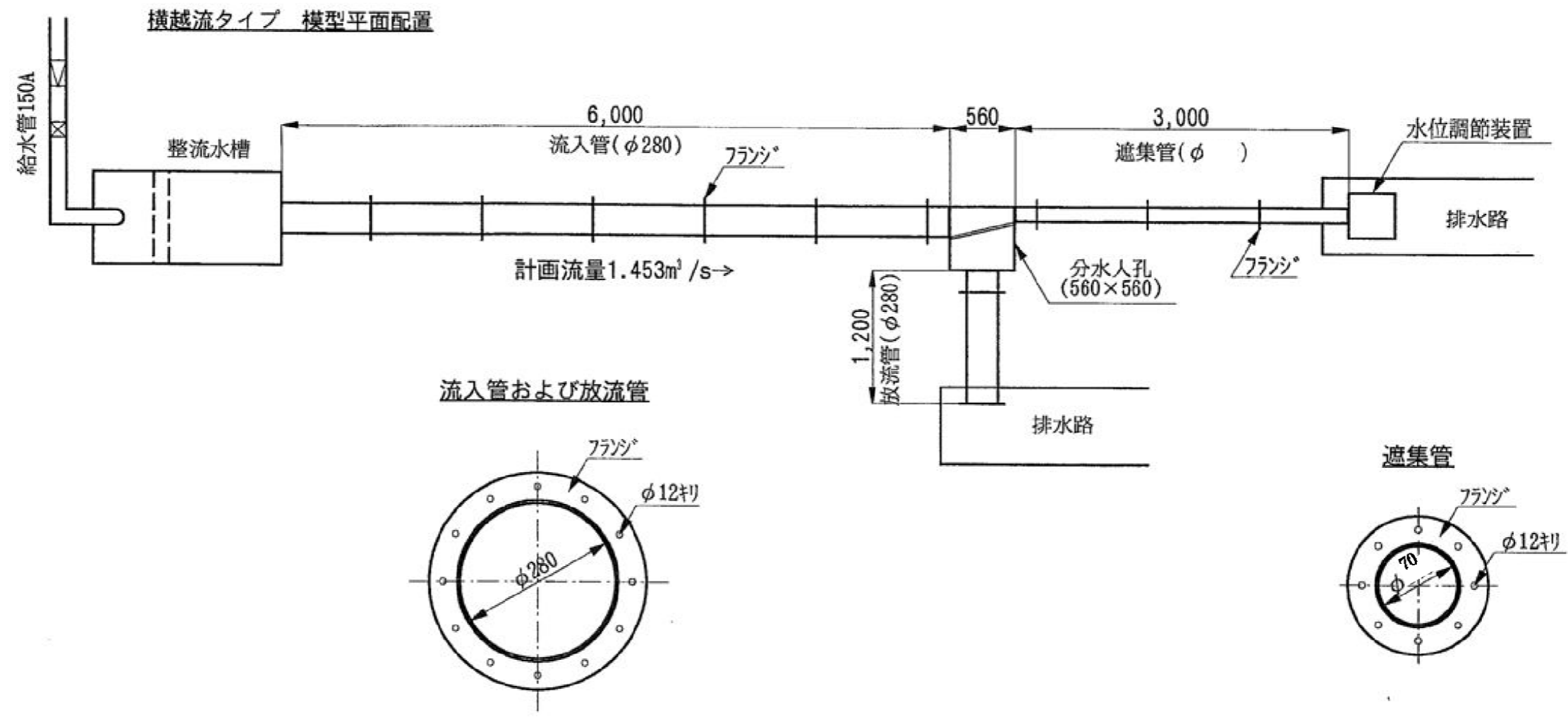


図 4.4 実験装置の平面図

## (2) データ測定の見測方法

測定項目及び観測項目は、遮集量、雨水吐き室水位、浮遊物捕捉状況とした。なお、浮遊物はオイルボールを想定しスマートボールを使用した。

遮集量は  $Q_{S1} \sim Q_{S5}$  (模型値; 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 l/sec) の5ケースについて実験を行った。遮集量ごとに水位調整装置を操作し、100%の浮遊物を遮集管で捕捉できる限界の水位 (以下「限界捕捉水位」という) を測定した。

また、限界捕捉水位は浮遊物の比重により異なることが想定されるため、比重が異なるスマートボール (比重; 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9) を流し、上記遮集量 ( $Q_{S1} \sim Q_{S5}$ ) ごとに限界捕捉水位を測定した (図 4.5, 図 4.6)。なお、スマートボールの比重は、現地調査で捕捉された夾雑物の比重を勘案し設定した。

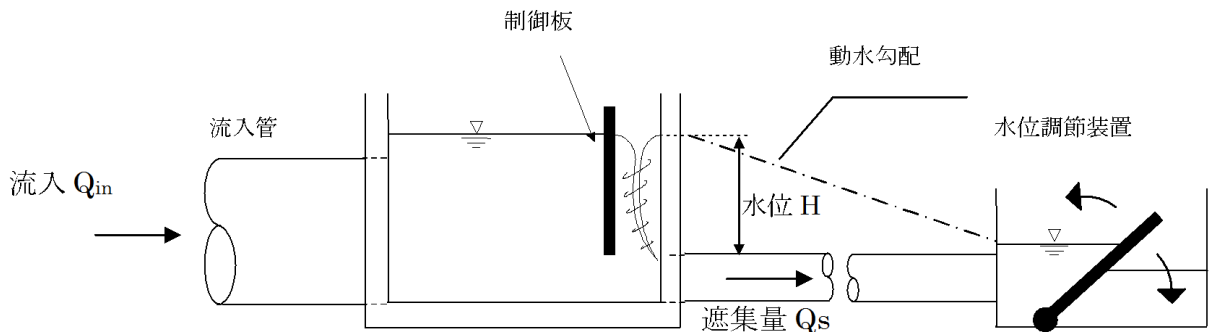


図 4.5 水位調整の概念図

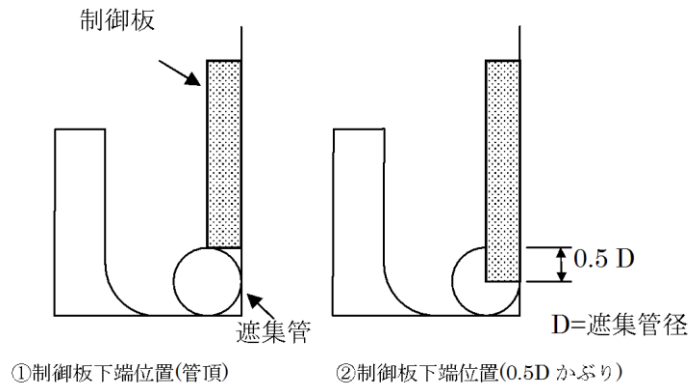


図 4.6 制御板下端高さの概念図

## (3) 実験ケース

実験は表 4.7 に示す 50 ケースとした。

なお、この実験は浮遊物の捕捉能力を把握することを目的としていることから、越流を発生させない状態で実験を行った。したがって、実験条件の遮集量に見合った水量を流入させた。

浮遊物モデルは、採取された夾雑物の組成（表 4.6）を参考に 0.5～0.9 のスマートボール（ $\phi$  13 mm）で行った。

表 4.7 実験ケース（浮遊物の比重の違いによる）

浮遊物の比重	遮集量	制御板下端位置	想定夾雑物
0.9	$Q_{S1} \sim Q_{S5}$	2 ケース	オイルボール
0.8	$Q_{S1} \sim Q_{S5}$	2 ケース	紙類, 厨芥類
0.7	$Q_{S1} \sim Q_{S5}$	2 ケース	紙類, 厨芥類
0.6	$Q_{S1} \sim Q_{S5}$	2 ケース	厨芥類
0.5	$Q_{S1} \sim Q_{S5}$	2 ケース	草木類

- ・比重（5 ケース）×遮集量（5 ケース）×制御板下端位置（2 ケース）  
=測定数（50 ケース）
- ・想定夾雑物は、表 4.5 を参考に設定した

#### (4)相似律と模型縮尺

模型内の流れに対しては、重力に起因する慣性力の影響が卓越することから、実物と模型のフルード数を等しくする「フルードの相似律」<sup>4)</sup>に従って実験を行った。

本実験で用いる水理模型の遮集管の管径は  $\phi$  70 であり、実物では  $\phi$  250 の遮集管を対象としていることから、長さの縮尺は 1/3.571 である。これにより、諸量の縮尺値は表 4.8 に示す通りとなる。

遮集量については、模型値と実物値の関係を表 4.9 に対比して示す。

表 4.8 諸量の縮尺値

項目	式	縮尺
長さの縮尺	$\lambda_L$	<b>1/3.571</b>
時間の縮尺	$\lambda_T = \lambda_L^{1/2}$	1/1.890
流速の縮尺	$\lambda_V = \lambda_L^{1/2}$	1/1.890
流量の縮尺	$\lambda_Q = \lambda_L^{5/2}$	1/24.105
圧力水頭の縮尺	$\lambda_P = \lambda_L$	1/3.571
粗度係数の縮尺	$\lambda_n = \lambda_L^{1/6}$	1/1.236



表 4.9 遮集量の対比

模型値		実物値	
( $\ell/s$ )	( $m^3/s$ )	( $\ell/s$ )	( $m^3/s$ )
2	0.002	48	0.048
2.5	0.0025	60	0.060
3	0.003	72	0.072
3.5	0.0035	84	0.084
4	0.004	96	0.096

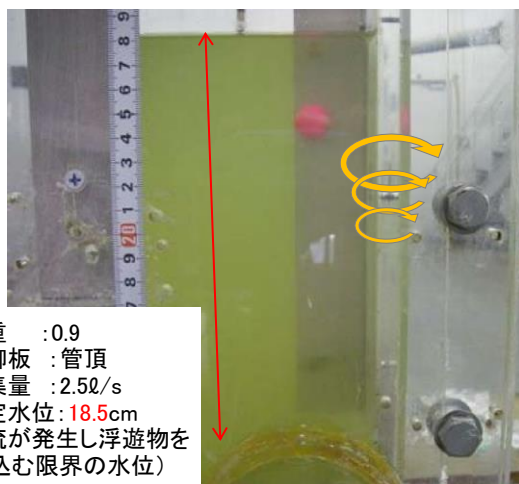
(5)測定結果

水理模型実験で行った 50 パターンの限界捕捉水位（100%の浮遊物を捕捉できる限界の水位）の結果は、表 4.10 のとおりである。写真 4.8 に比重 0.9・管頂の遮集量 2.5  $\ell/s$  および 4.0  $\ell/s$  の計測状況を、写真 4.9 に比重 0.5・管頂の遮集量 2.5  $\ell/s$  および 4.0  $\ell/s$  の計測状況を示す。

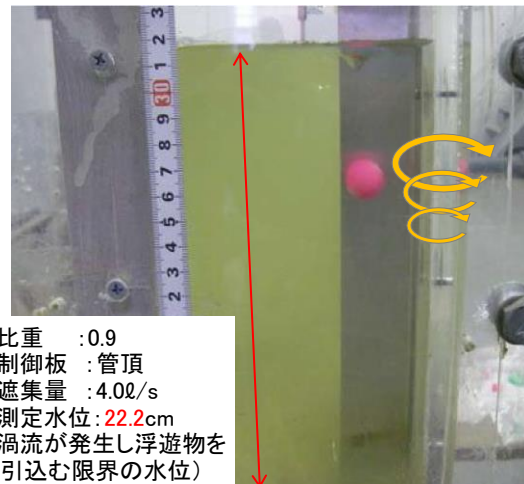
表 4.10 限界捕捉水位（模型実験結果）

比重 制御板	0.9		0.8		0.7		0.6		0.5	
	管頂	0.5D	管頂	0.5D	管頂	0.5D	管頂	0.5D	管頂	0.5D
2.0	15.0	17.4	14.0	15.4	13.0	14.7	12.4	13.6	11.6	12.9
2.5	18.5	19.9	17.3	18.0	16.0	17.6	15.7	17.0	14.5	16.4
3.0	20.1	21.2	19.1	20.1	18.1	19.2	17.7	18.5	17.3	18.1
3.5	21.6	21.9	20.6	21.2	19.7	20.3	19.4	19.8	18.9	19.5
4.0	22.2	22.6	21.3	21.8	20.8	21.3	20.0	20.8	19.8	20.6

単位：cm



- ・比重 :0.9
- ・制御板 :管頂
- ・遮集量 :2.5 $\ell/s$
- ・測定水位:18.5cm  
(渦流が発生し浮遊物を引込む限界の水位)



- ・比重 :0.9
- ・制御板 :管頂
- ・遮集量 :4.0 $\ell/s$
- ・測定水位:22.2cm  
(渦流が発生し浮遊物を引込む限界の水位)

写真 4.8 限界捕捉水位の計測（比重 0.9）

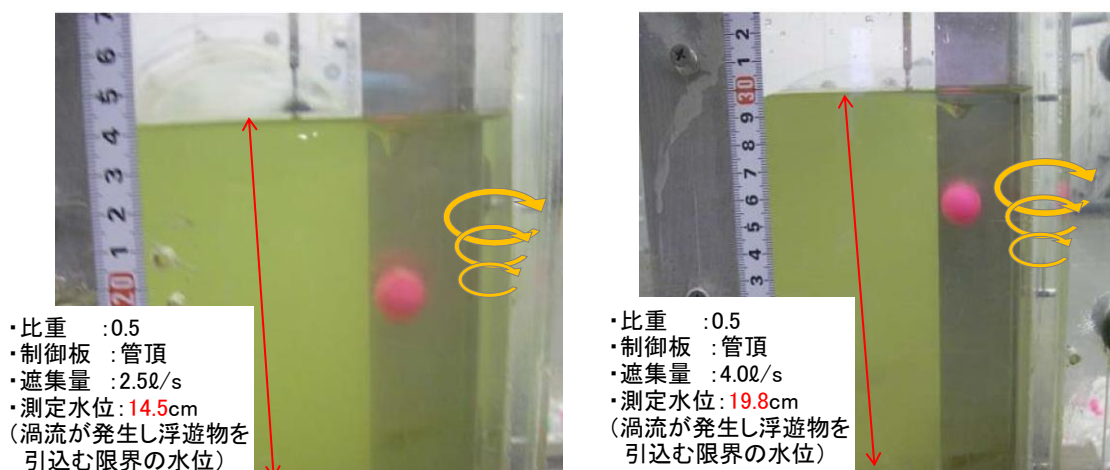


写真 4.9 限界捕捉水位の計測 (比重 0.5)

この実験で得られた値 (表 4.10) を, 実物大の  $\phi 250$  遮集管の値に換算した値を表 4.11 に示す.

表 4.11 限界捕捉水位 (換算値)

比重 制御板	0.9		0.8		0.7		0.6		0.5	
	管頂	0.5D	管頂	0.5D	管頂	0.5D	管頂	0.5D	管頂	0.5D
遮集量 (m <sup>3</sup> /s)										
0.048	53.6	62.1	50.0	55.0	46.4	52.5	44.3	48.6	41.4	46.1
0.060	66.1	71.1	61.8	64.3	57.1	62.9	56.1	60.7	51.8	58.6
0.072	71.8	75.7	68.2	71.8	64.6	68.6	63.2	66.1	61.8	64.6
0.084	77.1	78.2	73.6	75.7	70.4	72.5	69.3	70.7	67.5	69.6
0.096	79.3	80.7	76.1	77.9	74.3	76.1	71.4	74.3	70.7	73.6

単位 : cm

#### (6)測定結果の無次元化

得られた限界捕捉水位の結果（表 4.11）を様々な遮集管径をもつ雨水吐き室に適用できるように、無次元化<sup>5)</sup>した。

測定した限界捕捉水位を無次元化する方法としては、限界捕捉水位を遮集管の管径（φ 250）で割ることとした。また、遮集量  $Q_s$  は遮集管（φ 250）が持つ流下能力で割ることによって無次元化となる。

遮集管の流下能力は遮集管が満管の時の遮集量である。流下能力は勾配 10‰（φ 250 の管の標準勾配）、粗度係数は 0.013（鉄筋コンクリート管を想定）として以下の式で求めた。その結果、遮集能力は 0.059（m<sup>3</sup>/s）となった。

$$Q_s = A' \cdot (1/n \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2})$$

A'；遮集管流入面積（満管） n；粗度係数 R；径深 I；管きょ勾配

測定結果を無次元化した結果を表 4.12 に示す。

表 4.12 限界捕捉水位（無次元）

比重 制御板 遮集量 /遮集能力	0.9		0.8		0.7		0.6		0.5	
	管頂	0.5D	管頂	0.5D	管頂	0.5D	管頂	0.5D	管頂	0.5D
0.814	2.14	2.49	2.00	2.20	1.86	2.10	1.77	1.94	1.66	1.84
1.017	2.64	2.84	2.47	2.57	2.29	2.51	2.24	2.43	2.07	2.34
1.220	2.87	3.03	2.73	2.87	2.59	2.74	2.53	2.64	2.47	2.59
1.424	3.09	3.13	2.94	3.03	2.81	2.90	2.77	2.83	2.70	2.79
1.627	3.17	3.23	3.04	3.11	2.97	3.04	2.86	2.97	2.83	2.94

#### 4.5 簡易な設計評価指標の提案

##### 4.5.1 限界捕捉水位と遮集量の関係

限界捕捉水位は雨水吐き室に 10mm/hr の流入があった時の水位において制御板により渦流が生成され、浮遊物が遮集管に捕捉されるか、捕捉されないかを示すものである。

表 4.12 中に示す水位以下であれば、浮遊物の捕捉が可能な領域であり、この水位以上であれば浮遊物の捕捉が不可能な領域であることを示している。この表 4.12 より「比重 0.9」「管頂」の場合で「水位/遮集管径」と「遮集量/遮集能力」の関係を図 4.7 に示す。「水位/遮集管径」の水位は、3Q～50 mm/hr の雨水吐き室水位であり、「遮集量/遮集能力」の遮集量は 3Q～50 mm/hr の雨水吐き室水位において遮集管を流れる流量、遮集能力は設計時の 3Q が流れる流量である。

この図が示すように、図中のラインより下は「浮遊物捕捉可能領域」であり、ラインより

上は「浮遊物捕捉不能領域」となる。また、遮集量/遮集能力が増加するほど限界捕捉水位は上昇する傾向にあることを示している。

この「水位/遮集管径」と「遮集量/遮集能力」の関係図により、設計時の条件から浮遊物の捕捉判断ができる。については、この図 4.7 を「簡易な設計評価指標」として提案する。

ここで、実験結果は 100% 捕捉が可能な水位とし、これ以上の水位では 100% 捕捉できなくなる水位として計測した値であるが、図中のラインを「簡易な設計評価指標」として適用するに当たっては、実験と現場の条件や水の流れ、浮遊物の形状などの違いを勘案し、「60% 以上の捕捉可能な領域」としたものである。

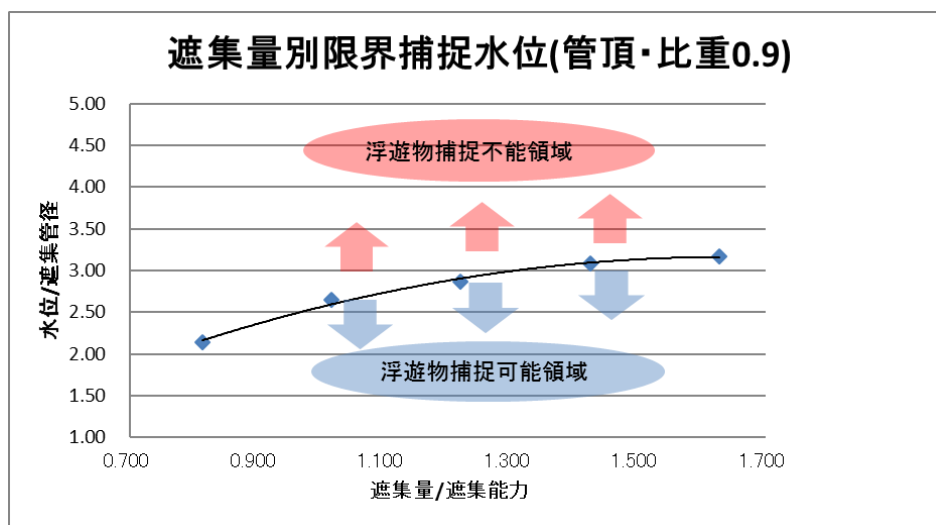


図 4.7 簡易な設計評価指標

表 4.12 の無次元化した限界捕捉水位を管頂と 0.5D について、図 4.7 と同様にそれぞれを簡易な設計評価指標として図 4.8 に示した。この図のラインの下側は浮遊物捕捉可能な領域であり、上側は浮遊物捕捉不可能な領域である。この図を見ると「管頂」「0.5D」ともに浮遊物の比重が小さいほど、限界捕捉水位が低くなる。

また、表 4.12 より浮遊物の比重別に「管頂」と「0.5D」を比較するために図 4.9 に示した。この図 4.9 から、制御板の下端が「0.5D」のほうが「管頂」よりも浮遊物捕捉領域の水位が高い。また、「遮集量/遮集能力」が大きくなると限界捕捉水位の差が小さくなる。これは、「0.5D」と「管頂」の制御板の上端が同じ高さであることから、水位が高くなると「遮集量/遮集能力」の差がなくなるものと考えられる。

なお、指標で「遮集管/遮集管能力」を 1.0 以下を表示したのは、遮集管の流下先（例えば遮集幹線）の能力が 3Q を満たしていない場合には、遮集幹線の背水からの影響が遮集量に及ぶ。その場合、遮集量は遮集管単体としての流下能力（満管等流の流下能力）を下回ってしまうことになる。このような現場が現実として実在するため、実務者としては、「遮集管/遮集管能力」が 1.0 以下となるような現場にも適用できるようにした。

また、その場合の水位が 1.00 以上を設定しているかの判断については、上記と同様に遮集管の流下先の能力が  $3Q$  を満たしていない場合には、流下先の管渠が圧力状態となる。遮集管の水位は流下先の水位の影響を受けるので、遮集管自体も圧力流れ（動水位が遮集管管頂以上）となる。この結果、雨水吐き室の水位も遮集管管頂以上（1.00 以上）となることから設定したものである。

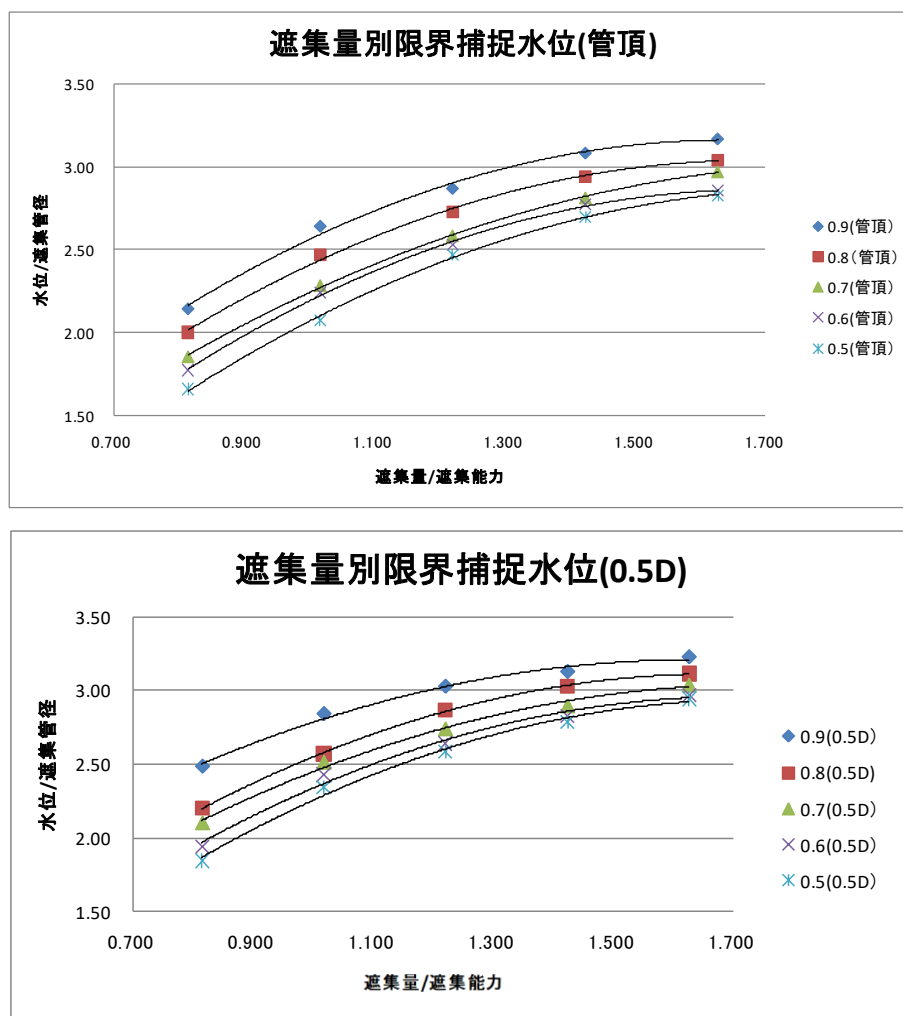


図 4.8 遮集量別限界捕捉水位（上図：管頂，下図：0.5D）

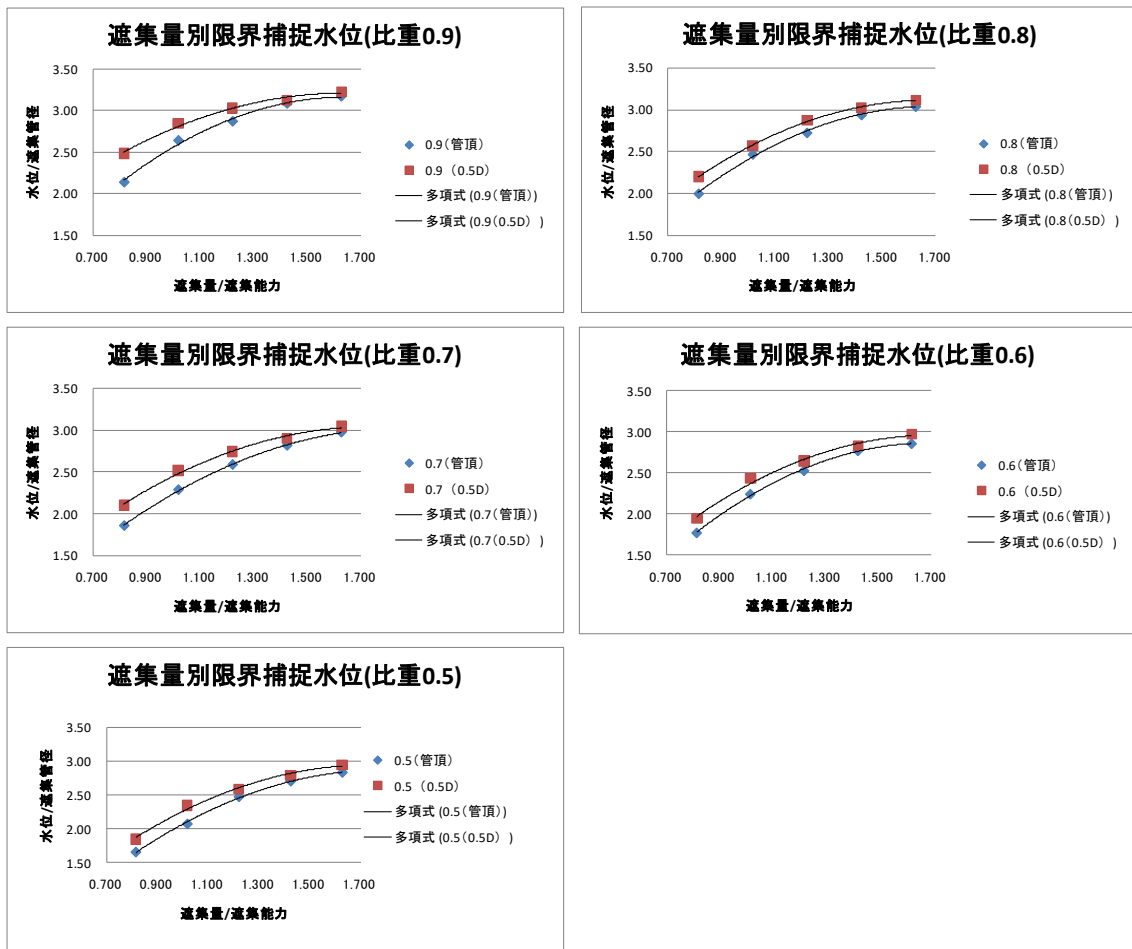


図 4.9 遮集量別限界捕捉水位（比重別）

## 4.6 設計事例の適合性

### 4.6.1 性能確認調査結果への適合

水理模型実験で明らかになった限界捕捉水位について、本論 4.2 の雨水吐き室での性能確認調査結果との比較を行うことで、簡易な設計評価指標への適合性について検証する。

#### (1) 雨水吐き室の条件設定

調査対象の雨水吐き室の設計条件を基に、(a)越流開始時と、(b)10mm/hr 降雨時の場合について、水位、遮集管の流下能力、遮集量について整理を行った。

(a)越流開始時の水位は、遮集管底から越流堰端までの高さであり、(b)10mm/hr 降雨時の水位は遮集管底からガイドウォール天端までの高さである。また、D：遮集量は、オリフィスの流量計算式を用いて、それぞれの水位の値を入力し算出している。

C：流下能力については、遮集管が満管状態におけるオリフィス計算によって算出する。ここで、善福寺川①は、雨水吐き室の構造図（図 4.10）から、 $\phi 500\text{mm}$  の下流側管きよ（ $\phi 500$ ）のマニング式による流下能力評価を合わせて行うこととした。

整理した結果は、表 4.13 のとおりである。

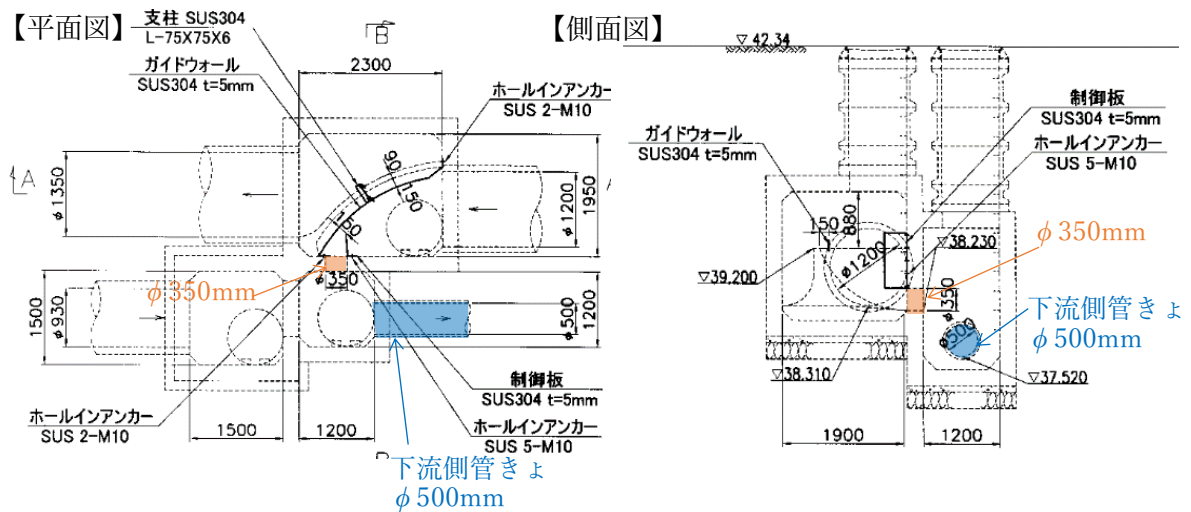


図 4.10 善福寺川①雨水吐き室の構造図

表 4.13 調査対象の雨水吐き室の条件設定

調査箇所	対象水位	A:水位(m)	B:遮集管径(m)	C:流下能力(m <sup>3</sup> /s)	D:遮集量(m <sup>3</sup> /s)	D/C	A/B
呑川①	(a)越流開始時	0.350	0.300	0.073	0.042	0.578	1.167
	(b)10mm/hr降雨時	0.505			0.085		
呑川②	(a)越流開始時	0.500	0.250	0.046	0.065	1.411	2.000
	(b)10mm/hr降雨時	0.645			0.082		
石神井川①	(a)越流開始時	0.470	0.250	0.046	0.061	1.326	1.880
	(b)10mm/hr降雨時	0.687			0.086		
善福寺川① ※オフィス計算	(a)越流開始時	0.970	0.350	0.107	0.201	1.879	2.771
	(b)10mm/hr降雨時	1.105			0.222		
善福寺川① ※マンング計算	(a)越流開始時	0.970	0.500	0.282	0.357	1.266	1.940
	(b)10mm/hr降雨時	1.105			0.405		

(2) 簡易な設計評価指標への適合性の検証

雨水吐き室の条件設定の結果について、比重別の限界捕捉水位との比較を行った。

図 4.11 は善福寺川①の C：流下能力をオリフィス計算（φ350mm）として評価した場合の結果である。呑川①、呑川②、石神井川①の結果は、10mm/hr 降雨時まで限界捕捉水位以下、すなわち捕捉可能領域となった。一方、善福寺川①は、越流開始時には、限界捕捉水位以下となるが、10mm/hr 降雨時には、限界捕捉水位と同程度となった。





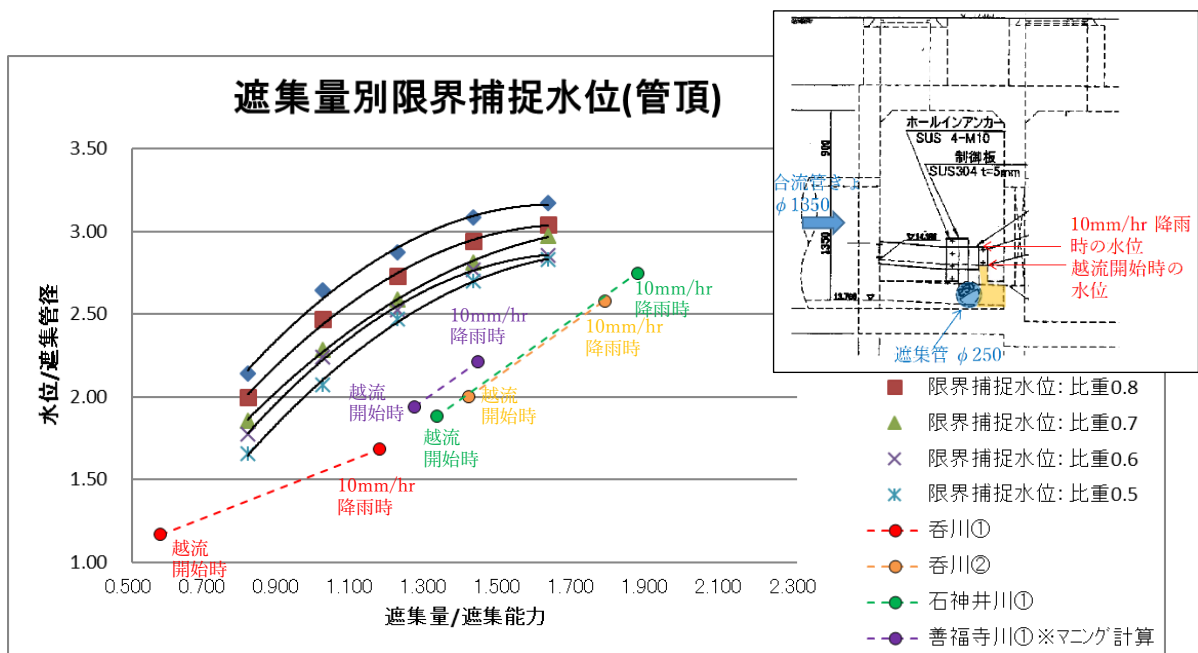


図 4.12 雨水吐き室での性能確認調査結果との比較  
 (善福寺川①のC：流下能力をマンング計算 (φ500mm))

#### 4.6.2 設計事例の整理

水理模型実験で明らかになった限界捕捉水位と、過去に実施した設計事例とを比較し、簡易な設計評価指標を活用することで、設計の妥当性を検証するために、過去の設計事例を整理した。

##### (1)比較対象とする設計事例の抽出

標準設計基準により設計した事例は、平成22年までに実施した件数が約1,300件におよぶ。この事例すべてを対象に整理するには相当の時間を必要とすることから、平成22年に実施した事例の中から、代表的な事例として30カ所(X市, Y市, Z市から4カ所, 東京都下水道局区部から24カ所)を抽出し、この事例を整理した。この抽出した事例は全て制御板を設計したものである。

##### (2)制御板の下端高さ

抽出した箇所における制御板の下端を整理した。

##### (3)遮集管の流下能力

抽出した箇所における遮集管の流下能力を整理した。なお、流下能力は箇所ごとの遮集管径, 勾配を基にマンング式により算定した。

##### (4)降雨10mm/hrの水深と遮集量

東京都の3カ所については、流量式計算から10mm/hrの流量を算出し、堰の越流公式から水深を求めた。

X市, Y市, Z市については、現地水位観測を行い箇所ごとに「雨水吐水位と降雨強度」

の相関から 10 mm/hr 降雨の水深を求めた。

また、10 mm/hr 降雨の遮集量は、上記の 10 mm/hr 降雨時の水深と遮集管の管径、延長から求められる動水勾配からマンニング式を用いて算出した。

(5)整理結果

整理した結果は、表 4.14 のとおりである。

表 4.14 設計事例の整理結果  
(東京都区部)

A 10mm/h水位(m) 遮集管管底を基準	B 遮集管径 (m)	C 流下能力 (m <sup>3</sup> /s)	D 遮集量 (m <sup>3</sup> /s)	D/C	A/B
0.700	0.25	0.053	0.263	4.962	2.800
0.562	0.45	0.801	0.891	1.112	1.249
0.741	0.30	0.130	0.277	2.131	2.470
0.560	0.35	0.086	0.138	1.605	1.600
0.915	0.35	0.206	0.385	1.869	2.614
1.318	0.30	0.061	0.128	2.098	4.393
1.035	0.40	0.081	0.244	3.012	2.588
0.811	0.30	0.135	0.250	1.852	2.703
0.326	0.25	0.042	0.088	2.095	1.304
1.113	0.50	0.151	0.843	5.583	2.226
0.767	0.24	0.176	0.310	1.761	3.196
0.793	0.50	0.230	0.396	1.722	1.586
0.532	0.30	0.047	0.083	1.766	1.773
0.838	0.70	0.859	1.050	1.222	1.197
1.286	0.38	0.141	0.262	1.858	3.384
0.552	0.25	0.052	0.083	1.596	2.208
0.456	0.35	0.102	0.236	2.314	1.303
0.729	0.30	0.075	0.198	2.640	2.430
0.463	0.35	0.103	0.126	1.223	1.323
0.999	0.40	0.132	0.373	2.826	2.498
0.413	0.30	0.086	0.104	1.209	1.377
0.489	0.35	0.103	0.155	1.505	1.397
0.494	0.25	0.070	0.096	1.371	1.976
0.784	0.60	0.363	0.533	1.468	1.307
0.508	0.25	0.065	0.078	1.200	2.032
0.444	0.25	0.188	0.199	1.059	1.776
0.323	0.25	0.082	0.121	1.476	1.292
0.389	0.25	0.053	0.066	1.245	1.556
0.463	0.35	0.103	0.126	1.223	1.323
0.999	0.4	0.132	0.373	2.826	2.498
0.413	0.3	0.086	0.104	1.209	1.377
0.489	0.35	0.103	0.155	1.505	1.397
0.494	0.25	0.07	0.096	1.371	1.976
0.784	0.6	0.363	0.533	1.468	1.307
0.508	0.25	0.065	0.078	1.200	2.032
0.444	0.25	0.188	0.199	1.059	1.776
0.323	0.25	0.082	0.121	1.476	1.292
0.389	0.25	0.053	0.066	1.245	1.556

(X市, Y市, Z市)

A 10mm/h水位(m) 遮集管管底を基準	B 遮集管径 (m)	C 流下能力 (m <sup>3</sup> /s)	D 遮集量 (m <sup>3</sup> /s)	D/C	A/B
0.245	0.20	0.080	0.089	1.117	1.225
0.336	0.20	0.016	0.026	1.613	1.680
0.283	0.25	0.042	0.054	1.284	1.132
0.293	0.25	0.036	0.059	1.630	1.172

#### 4.6.3 設計事例の適合性

模型実験の結果から求めた浮遊物捕捉領域(図4.7の管頂)のグラフに、設計事例を整理した諸元をプロットすると図4.13になる。

東京都区部の事例を見ると一部を除き、大部分が浮遊物の捕捉可能領域に入っている。また、X市, Y市, Z市の4カ所すべての事例が浮遊物捕捉を可能とする領域に入っており、水面制御装置の機能が発揮されていると判断できる。

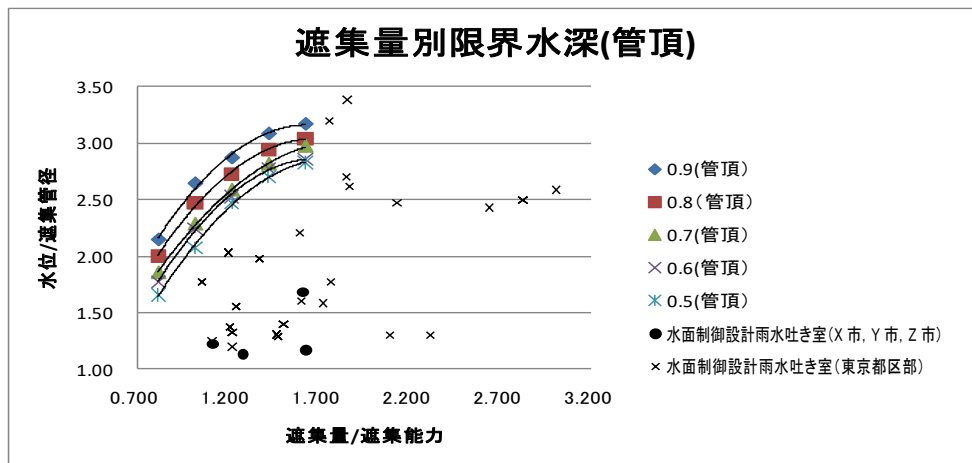


図 4.13 既存結果による浮遊物捕捉領域比較

#### 4.7 「簡易な設計評価指標」の評価方法

本論4.5で「簡易な設計評価指標」を提案し、その検証を行った。この限界捕捉水位を利用して、10mm/hr降雨に対する水面制御装置の設置前後の浮遊物の挙動予測に利用する方法を以下に述べる。

##### 4.7.1 条件設定

(1)第1段階：堰天端高から雨天時下水が越流し始める状態

遮集管の管底と堰天端高から「水位/遮集管径」の値を求める。

この水位は、堰天端高から雨天時下水が越流し始める状態の水位を示す。

次に、「遮集量/遮集能力」の遮集能力は、背水を生じさせない定常状態を条件として遮集管の流量を算定（一般的には自然流下状態としてマニング式）する。さらに、水位が堰天端に達した状態での遮集量を算定（一般的には圧力管となることからオリフィス式）し、「遮集量/遮集能力」を設定する。

#### (2)第2段階：ガイドウォール天端高から越流され始める段階

「水位/遮集管径」の水位は、遮集管底とガイドウォール天端までの水位差として「水位/遮集管径」の値を求める。

「遮集量/遮集能力」の遮集量は、ガイドウォール天端高における水深における遮集管の流量（一般的には圧力管となることからオリフィス式）を算定し、「遮集量/遮集能力」の値を設定する。なお、遮集能力は上記(1)と同様である。

### 4.7.2 評価方法

限界捕捉水位のグラフを、雨水吐き室の構造と併記して示した（図 4.14）。

設計段階において、雨水吐き室の構造・水理条件から、A：水位、B：遮集管径、C：遮集能力、D：遮集量が算出され、限界捕捉水位のグラフに重ねることができる。

ここで、B：遮集管径、C：遮集能力は構造から算出される一定値であるが、A：水位、D：遮集量は降雨量により変化する値である。

雨水吐き室の算定結果を、限界捕捉水位のグラフに重ねることで、降雨量と限界捕捉水位の関係を把握することが可能となる。

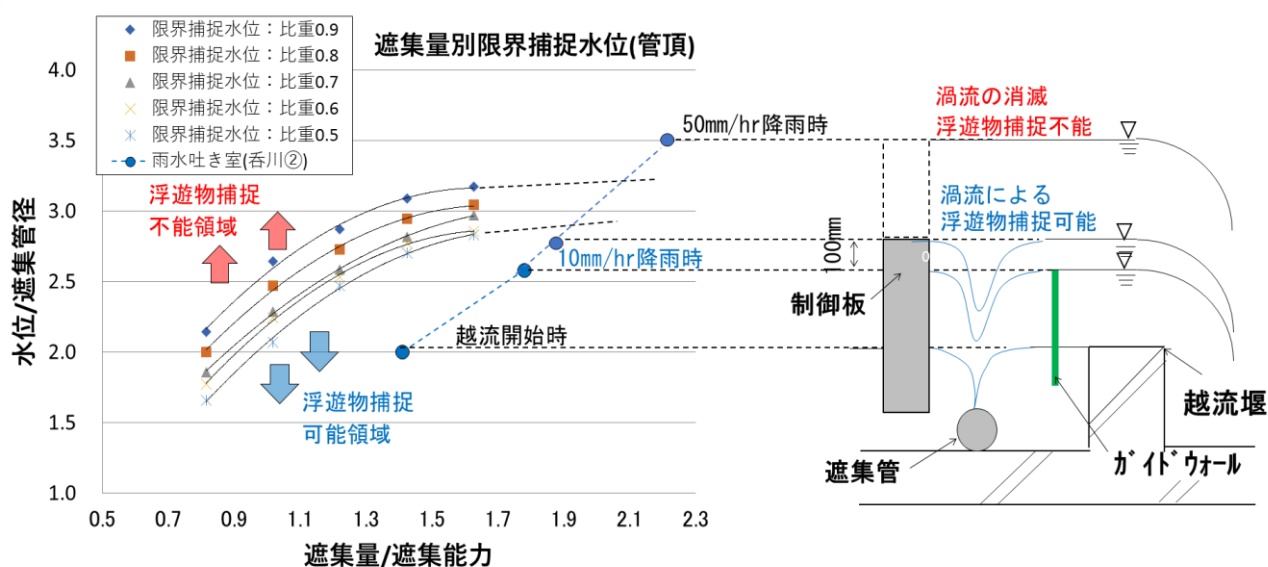


図 4.14 「簡易な設計評価指標」(限界捕捉水位) の評価方法

降雨の開始から、降雨量の増加に伴い、A：水位、D：遮集量が増加していく。4.6項で前述した雨水吐き室の調査事例から示したとおり、越流開始時、10mm/hr 降雨時（ガイドウォール天端高）においては、限界捕捉水位以下、すなわち捕捉可能領域となっている。

また、制御板の天端高さは、ガイドウォール天端高+10cmとして設計されるが、この高さにおいても限界捕捉水位以下となる。

その後、降雨量が20mm/hr,30mm/hr,40mm/hr,50mm/hrと増加することに伴い、何れかの段階で限界捕捉水位を上回る。雨水吐き室において、水位の上昇に伴い渦流が消滅し、捕捉機能が失われることとなる。すなわち、10mm/hrを超えた降雨でも渦流が持続し、制御板の効果を発揮できる降雨量を把握することができる。

なお、雨水吐き室の構造・水理条件によっては、10mm/hr 降雨の段階で限界捕捉水位に近くなり、捕捉不可となるケースもあり得る。そうしたケースにおいても、雨水吐き室に流入する浮遊物の大部分は、降雨の初期段階で流入し、遮集管に吸込まれることで、10mm/hr以上の降雨量の段階で、公共水域に越流する浮遊物の量は多くないものと考えられる。

以上のように、限界捕捉水位のグラフを用い、標準設計で求めた諸条件を重ねることで、本図のラインより上か下かで水面制御装置の効果を設計段階で評価できる。

#### 4.8 まとめ

これまで標準設計に基づき雨水吐き室に設置した水面制御装置（特に制御板）の効果を、設置後に見極めるためには、動画撮影や降雨時の目視などを行い把握してきたが、この評価方法は作業量が膨大で、効率化が求められていた。

本論で提案したように、実験結果から遮集量別限界水深のグラフを設定した図4.7,4.8に、標準設計で求めた諸条件を重ねることで、本図のラインより上か下かで水面制御装置により60%以上の捕捉効果を設計段階で評価できることが分かった。

また、標準設計では制御板の下端は遮集管の管頂より上に設置することとしているが、遮集管の径が大きく、降雨強度が小さい（10 mm/hr 以下）雨水吐き室の場合や、表3.4.3（P3-129）に示した遮集管の管頂から越流水面までの水深が浅い場合には、遮集管径の0.5Dまで下端を下げて渦の生成を早めたほうが、より浮遊物の捕捉効果を発揮できるものと推察する。

以上から、設計段階にこのグラフを簡易な判断指標として利用できるものとする。なお、より精度を上げるには、遮集量が大きい条件での実験や浮遊物モデルの形状や大きさを変えての実験などを今後実施することが必要とする。

#### [参考文献]

- 1) 東京都下水道サービス株式会社・日本工営株式会社：「水面制御装置の水理特性に関する共同研究」平成 23 年 3 月
- 2) Motonobu Ito, Mamoru Kamiyama, Yukitoshi Iwasa, Jorg Steinhardt：「Applicability of Water Surface Control Device which is Debris Separation Technology in Combined Sewer System」8<sup>th</sup> International Conference of Sewer Processes and Networks August 31-September 2,2016,Rotterdam,The Netherlands
- 3) (財団法人) 下水道新技術推進機構：「合流式下水道の改善における夾雑物対策を対象とした水面制御装置技術資料」2009 年 3 月発行
- 4) 尾崎晃：「急勾配開水路関係模型実験におけるフルード相似律の意義について」土木學會北海道支部技術資料, 第 18 号
- 5) 小松光：「数値モデルの利用・理解を容易にする無次元化—多層植被モデルを題材として—」水文・水資源学会誌第 17 巻第 4 号,pp401~413,2004 年

## 第5章 渦流メカニズムの解明と設計法の提案

### 5.1 渦流の概念

渦流は自然界において数多く存在し、古代より身近な存在であると同時に、その解明には至っていない面が多い。

いくつかの事例を挙げると、天体の星雲は渦巻の螺旋運動により創造されているし、台風は巨大な空気の渦巻きである。これらの現象は、いまだにきちんと解明されているわけではない。台風の発生には地球の自転が深く関わっている。そのことを最も端的に表しているのが、渦巻きの向きが北半球と南半球では異なる。もし、北極上空や南極上空の宇宙空間から地球が回転する様子を眺めるとすれば、地球はそれぞれ反時計回り、時計回りに1日にほぼ1回転というペースで回転している様子が見えるはずである。写真5.1は、赤道をはさんで北半球側と南半球側にほぼ同時に発生した熱帯低気圧の雲画像である。北半球の熱帯低気圧（台風）は反時計回りに、南半球の熱帯低気圧（サイクロン）は時計回りに渦を巻いている。



写真 5.1 日本に大きな被害を及ぼした台風 19 号  
(2019.10.6~13) VIIRS image captured by NOAA's NOAA-20 satellite

また、鳴門の渦潮が有名である。鳴門海峡に渦が発生する要因の一つに海水の流れがある。潮の満ち引きは、月や太陽の引力により海水面の上下動が周期的に起こる現象である。鳴門海峡の幅は 1.3km と急に狭くなっており、高い方から低い方へと海水が一気に流れ込み、潮流が速くなる。また、大鳴門橋の真下は V 字型に深く落ち込み、最深部は 90m にも達している。潮流は抵抗が少ない深部では速く流れ、抵抗が多い浅瀬ではゆるやかに流れる。このため、速い潮流と遅い潮流がぶつかり合うことで渦が発生するといわれている。



写真 5.2 鳴門の渦潮（「渦の道」ホームページより）

このように、自然界の渦は気体や流体の流れにより発生し、そのメカニズムには種々の条件が重なり合い、エネルギーが渦という現象となって発生しているようである<sup>1)</sup>。

渦流や乱流を人工的に生み出し、利用している事例として「鼻ぐり井手」を以下に紹介する。今から 400 年以上も前からの施設である。

戦国武将の加藤清正は治山や治水で多くの偉業を残したことで知られている。その中の一つに新田開発を目的に整備した「馬場楠井手<sup>※1</sup>の鼻ぐり（通称：鼻ぐり井手）」がある（写真 5.3, 5.4 参照）。熊本県菊水町のパンフレット<sup>2)</sup>から以下にその内容を抜粋する。

「阿蘇に源を発する白川水系は、火山灰土壌のためヨナ（土砂等）の堆積がひどく、井手の管理が悩みの種でした。この馬場楠井手の曲手～辛川区間は岩盤を掘削すれば、両岸は切り立ち地上から井手底の土砂などを排出することは極めて困難と思われました。しかし、その課題を解決したのが水力を利用して土砂を次々に下流へ排出させる「鼻ぐり」という独特の仕組みです。構造の概要は約 2～5メートル間隔に幅約 1メートル、高さ約 4メートルの岩盤を壁のように残し、その下辺にカマボコ形の直径約 2メートルの水流穴（鼻ぐり穴）をくり貫いたものです。この水流穴が、牛の鼻輪を通す穴（鼻ぐり）に似ていることから、この名が付いたと伝えられています。

さらに、この区間は水量調整機能も備えており、増水時には白川左岸の分水路へ増水を導き、分水路に設けた「吐<sup>はき</sup>」と呼ばれる遺構で白川へ落とす技法が用いられています。」

※1 井手とは人工的に作られた水路のことで、田畑に水を届ける役割がある重要な施設





写真 5.3 鼻ぐりと渦を巻く状況<sup>2)</sup>



写真 5.4 鼻ぐりの内部<sup>2)</sup>

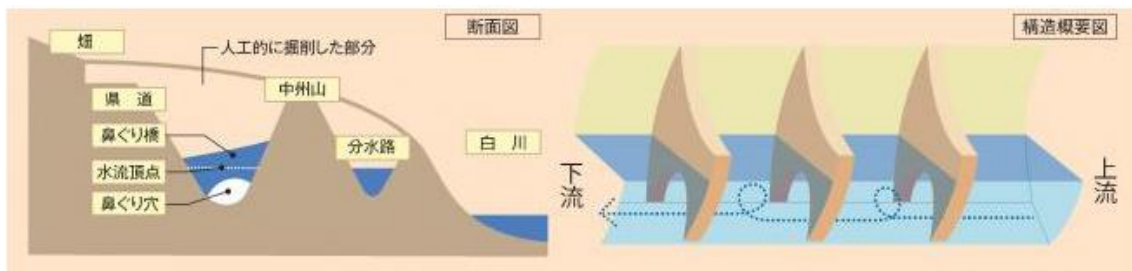


図 5.1 鼻ぐりの構造説明<sup>2)</sup>

つまり、鼻ぐりを設置することで水は狭いところを通り、広く貯留されるところで渦流が発生し、流入する火山灰はこの渦流に混ざり下流に流されることで堆積されない。このことにより、地上から川底まで 20m もある水路での土砂の除去作業がなくなるという構造である。当初は約 80 基あったが、江戸末期にこの水理特性と効果を知らない役人により約 50 基が破壊された他、災害などもあり、現在は 24 基が存在している。現在もその機能を発揮しており、約 181 ヘクタールの田畑を潤している。

以上のように渦流の特性を人工的に作り出した「鼻ぐり」のように、渦流のメカニズム<sup>3)</sup>を利用した装置の研究開発に今後も可能性があるものと考えられる。

## 5.2 メカニズム解明の目的と検証方法

### 5.2.1 目的

水面制御装置は、雨水吐き室に制御板を設置することで渦流を生成させ、その渦により浮遊性の夾雑物（浮遊物）を流集し、遮集管へと引込む機能を有している。

制御板で生成された渦の機能は、数多くの水理模型実験と制御板を設置した 1,700 か所に及ぶ雨水吐き室の観測で確認されている。しかし、制御板で生成された渦がどのように浮遊物を集めて、遮集管へと引込み、流すのかのメカニズムは解明されていない。このため、制御板の標準設計法を設定したものの、過去の実績を既定とした経験則に基づいて行わざるを得ない状況である。

筆者は、制御板により生成された渦が浮遊物を集めて遮集管へと流すメカニズムの解明を行い、得られた知見により新たな設計法を提案する。これにより、設計段階で渦流の発生状況、浮遊物の引き込み状況を把握することが可能となり、水面制御装置の設計の合理化・省力化、夾雑物削減効果の向上、事後検証の合理化に貢献できることを目的に研究を行うものである。

### 5.2.2 検証方法

制御板で雨水吐き室の水面に生成され、浮遊物を遮集管へと引込む渦を、渦径、エアコア（ロートの中心部に空気がロートと共に螺旋状に回転）を含むロート（コマ状で螺旋回転）、ロートから繋がる渦糸で構成されるモデルとして設定した(図 5.2 参照)。

そこで、浮遊物を遮集管へと集めて、引込む渦の機能とそのメカニズムの解明に関しては、水理模型実験及び実際の雨水吐き室の映像観測の結果をもとに渦を構成する要素を図 5.2 に示すモデルの通り、3つに分類して行う。

- (1)制御板で生成される渦の中心に向かう旋回流に乗って浮遊物が集められる範囲に着目し、その範囲を決定する要因を水理模型実験によって解明する。
- (2)渦中央に生成されるロートに浮遊物が引込まれる現象に着目し、渦に取り込まれた浮遊物を安定して水中に引込むために必要な要因を流体解析の実施により解明する。
- (3)ロート底部を通過して水中に引込まれた浮遊物が遮集管へと吸込まれる現象に着目し、ロート底部から遮集管へと繋がる渦糸に乗って浮遊物を運ぶ作用に影響を及ぼす要因を水理模型実験および雨水吐き室における観測から明らかとする。



実験で観測された渦流 (p3-121)

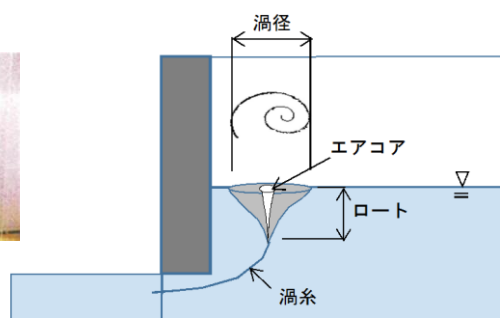


図 5.2 渦流モデル

## 5.3 模型実験による渦流の生成と消滅

### 5.3.1 実験の目的と模型装置

#### (1)実験の目的

制御板で生成される渦は、雨水吐き室の水位や流入流速の違いで形状を大きく変化させることが雨水吐き室の渦の状況から確認される。そこで、水深と流量をパラメータとした水理模型実験を実施して、水深と流量を変化させたケースにおける制御板で生成される渦の性状を検証するとともに、渦の生成と成長、さらに、消滅に至るメカニズムを解明する。

#### (2)実験の基本条件

都内に設置されている大宮橋雨水吐き室を参考に、基本諸元を表 5.1 のとおり設定した。実際の雨水吐き室において生成される渦に近い状況を再現するため、模型縮尺は 1/1 としている。浮遊物モデルはオイルボール（比重 0.90）を想定した市販ゴム製ボール（ $\phi 21\text{m}$ 、比重 0.947）を用いている。（写真 5.5、写真 5.6、図 5.3 参照）

表 5.1 水理模型実験の基本諸元

	設定値	備考
模型縮尺	1/1	
雨水吐き室	矩形 幅 1.08m×長さ 1.20m	透明アクリル製
遮集管	直径 0.25m=D	
制御板	長さ L1=0.25m 長さ L2=0.125m	
浮遊物モデル	オイルボールを想定した市販ゴム製ボール( $\phi 21\text{m}$ 、比重 0.947)	



写真 5.5 水理模型実験施設の全景

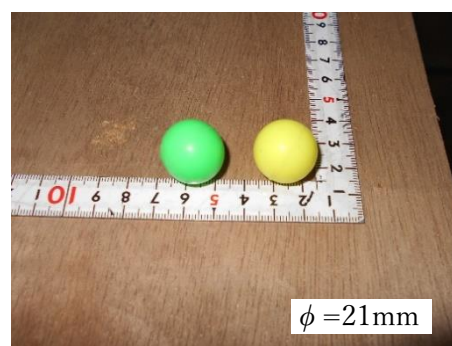


写真 5.6 実験で用いた浮遊物モデル  
(市販ゴム製ボール)

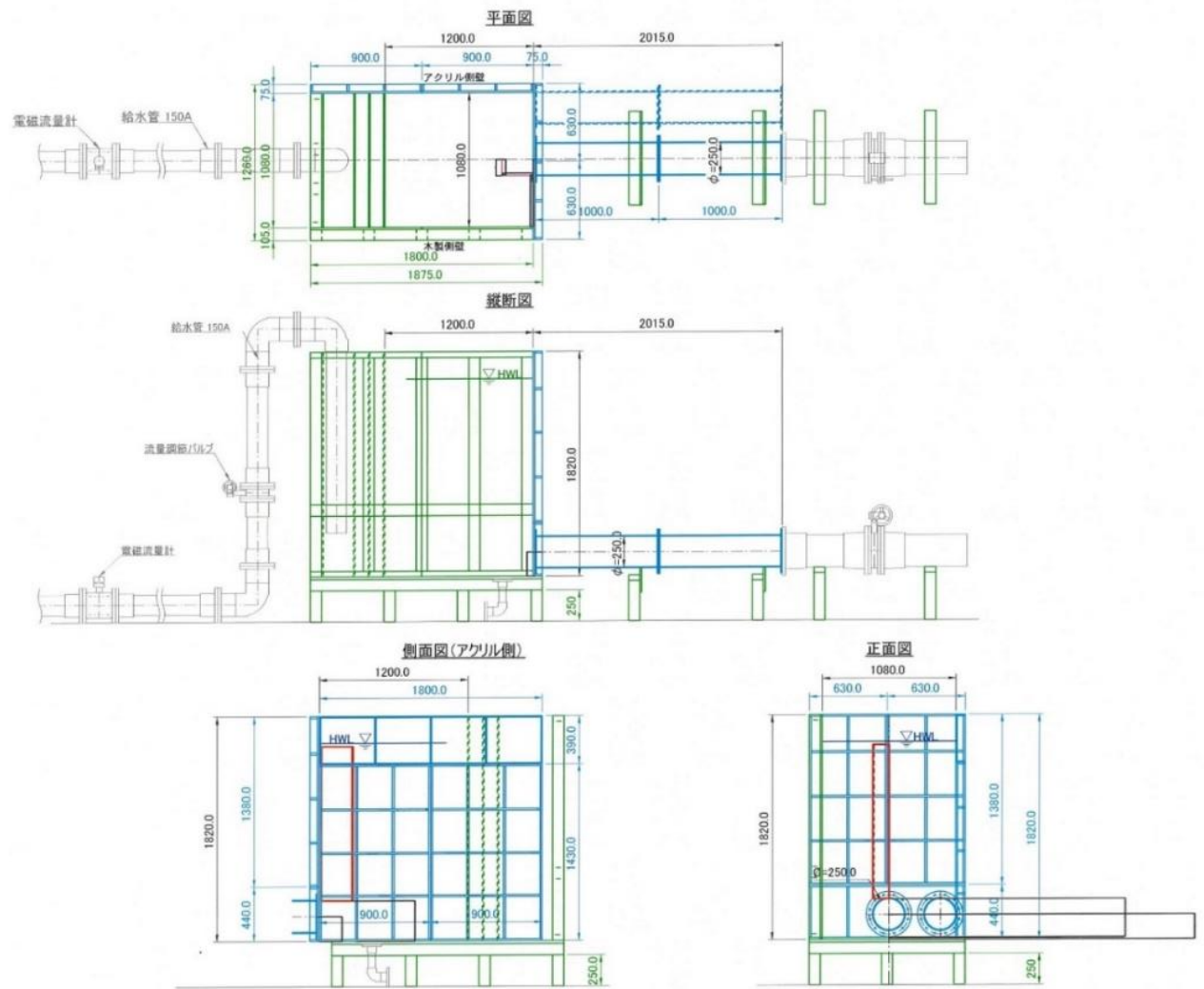


図 5.3 水理模型実験施設図

(3)実験のケース

実験においては、流量および水槽水深をパラメータとして表 5.2, 図 5.4 に示す 12 ケースを設定した。

表 5.2 水理模型実験ケース

		流量	水槽水深
ケース 1	40L・1D	40 ℓ / 秒	1D(遮集管管頂から水深 0.25m)
ケース 2	40L・2D		2D(遮集管管頂から水深 0.50m)
ケース 3	40L・3D		3D(遮集管管頂から水深 0.75m)
ケース 4	40L・4D		4D(遮集管管頂から水深 1.00m)
ケース 5	60L・1D	60 ℓ / 秒	1D(遮集管管頂から水深 0.25m)
ケース 6	60L・2D		2D(遮集管管頂から水深 0.50m)
ケース 7	60L・3D		3D(遮集管管頂から水深 0.75m)
ケース 8	60L・4D		4D(遮集管管頂から水深 1.00m)
ケース 9	80L・1D	80 ℓ / 秒	1D(遮集管管頂から水深 0.25m)
ケース 10	80L・2D		2D(遮集管管頂から水深 0.50m)
ケース 11	80L・3D		3D(遮集管管頂から水深 0.75m)
ケース 12	80L・4D		4D(遮集管管頂から水深 1.00m)

D : 遮集管の径 = 250 mm (0.25m)

側面図

平面図

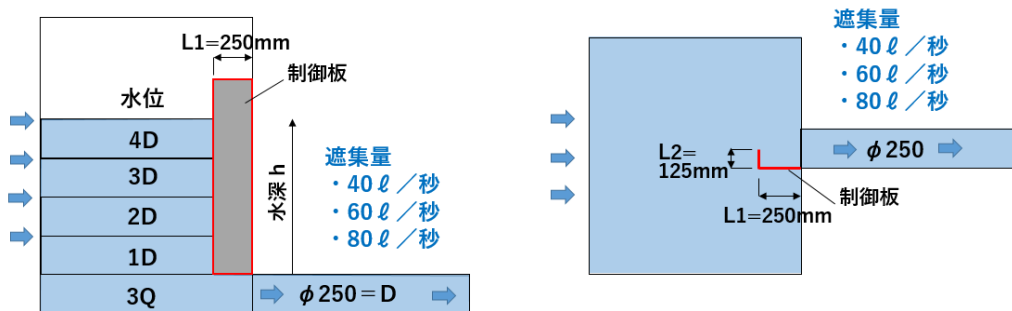


図 5.4 実験ケースのイメージ図

(4)実験方法

諸量の測定方法は次のとおりとした。

- ①流量：給水管に設置する流量計を用いた
- ②渦の発生状況および浮遊物引込み状況

水理模型実験施設の上方および側面からビデオカメラを用いて撮影を行う。映像を用い

て、図 5.2 に示した渦流モデルより、渦径およびロートの寸法、エアコアおよび渦糸の生成有無について評価を行う。また、上方からの映像については画像解析ソフトウェア「Move-Tr/2D Flow-PTV」<sup>4)</sup> (以降 PTV と表記) を用いて、水面における流速分布を作成している。

### 5.3.2 実験における渦流発生状況の分析結果

#### (1) ケース 1~4 : 流量 40 ℓ / 秒

渦流発生状況の分析結果として、表 5.3 には 40L・1D, 40L・2D のケースの結果を、表 5.4 には 40L・3D, 40L・4D の結果を示す。観察結果から、制御板によって渦流が発生し、上方からの渦巻きの大さきとしての渦径が観察され、この渦径のなかに、浮遊物が流速を早めて流れ込む状況が確認された。

水深が 1D から 4D に 1D ずつ増えるに従って、渦径は 6.0cm, 4.5cm, 3.0cm, 1.5cm と徐々に小さくなった。ロートの寸法は 12.5cm, 32.5cm, 22.5cm, 2.5cm と水深が 2D のときに 32.5cm で最大となった。

渦流発生状況としてエアコアを含むロート、渦糸が観察され、浮遊物が螺旋状のロートへ引込まれて下降する状況が確認された。その後、浮遊物は最終的に、遮集管へと続く渦糸に沿って吸込まれた。

水深が 1D から 2D の際には、エアコアおよび渦糸の存在が確認されており、特に水深 2D では安定したエアコアが確認された。水深 3D では、エアコアは存在するが、渦糸は消滅した。水深 2D に比べ、渦流の勢いは低下した。水深 4D では、エアコアおよび渦糸ともに確認されない。水深 3D に比べ、更に渦流の勢いは低下し、旋回流に近い渦の性状となった。また、渦糸に着目すると、水深が 1D から 2D の際には、鉛直方向に 60° 程度の角度を有して生成された。

表 5.3 渦流発生状況の分析結果(40L・1D, 40L・2D)

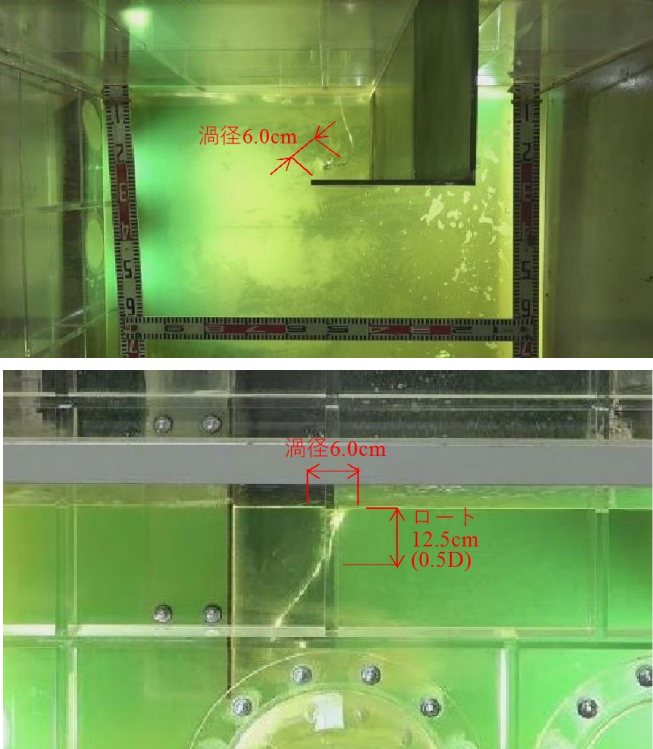
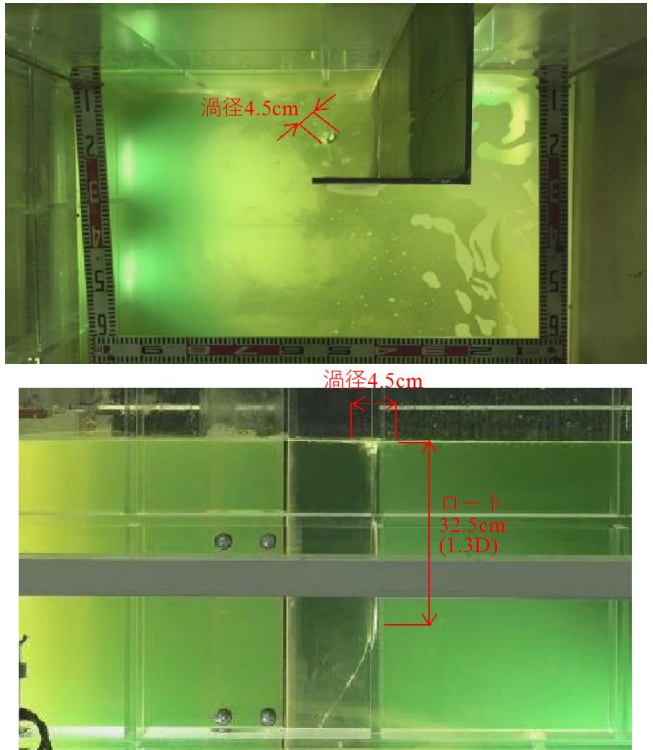
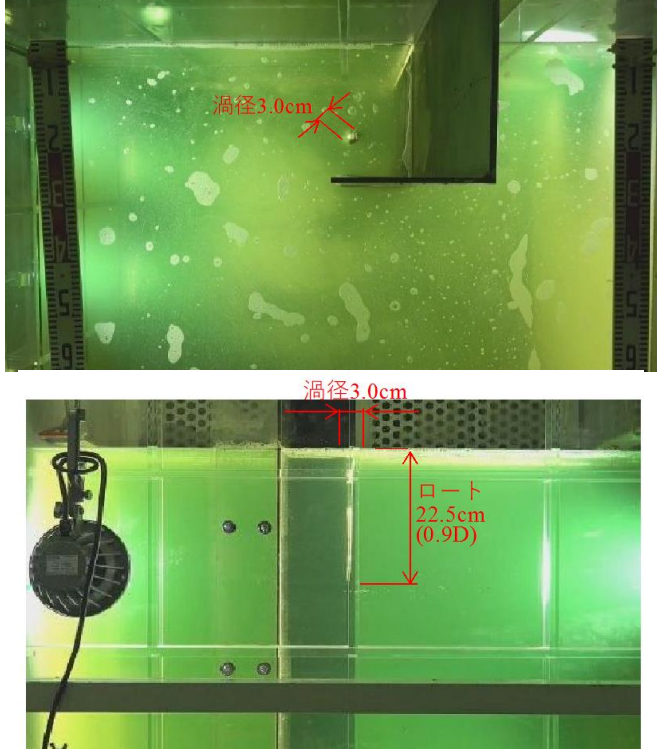
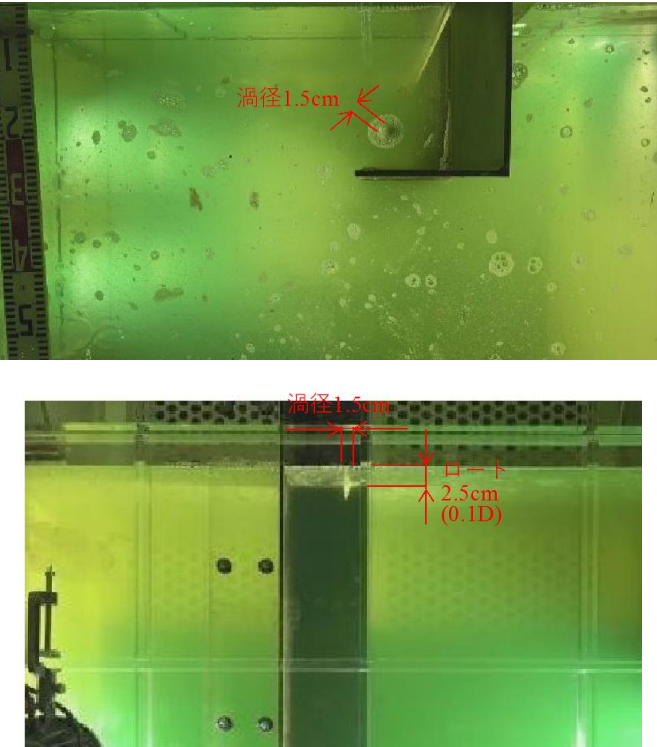
ケース	写真	計測値
40L 1D	 <p>渦径6.0cm</p> <p>渦径6.0cm</p> <p>ロータ 12.5cm (0.5D)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 渦径 : 6.0cm</li> <li>・ I7コ7 : 有</li> <li>・ ロータ : 12.5cm (0.5D)</li> <li>・ 渦糸 : 有</li> </ul>
40L 2D	 <p>渦径4.5cm</p> <p>渦径4.5cm</p> <p>ロータ 32.5cm (1.3D)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 渦径 : 4.5cm</li> <li>・ I7コ7 : 有</li> <li>・ ロータ : 32.5cm (1.3D)</li> <li>・ 渦糸 : 有</li> </ul>

表 5.4 渦流発生状況の分析結果(40L・3D, 40L・4D)

ケース	写真	計測値
40L 3D	 <p>渦径3.0cm</p> <p>渦径3.0cm</p> <p>ポート 22.5cm (0.9D)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 渦径 : 3.0cm</li> <li>・ 1707 : 有</li> <li>・ ポート : 22.5cm (0.9D)</li> <li>・ 渦糸 : 無</li> </ul>
40L 4D	 <p>渦径1.5cm</p> <p>渦径1.5cm</p> <p>ポート 2.5cm (0.1D)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 渦径 : 1.5cm</li> <li>・ 1707 : 無</li> <li>・ ポート : 2.5cm (0.1D)</li> <li>・ 渦糸 : 無</li> </ul>



(2) ケース 5~8：流量 60 l / 秒

渦流発生状況の分析結果として、表 5.5 には 60L・1D, 60L・2D のケースの結果を、表 5.6 には 60L・3D, 60L・4D の結果を示す。観察結果から、制御板によって渦流が発生し、上方からの渦巻き大きさとしての渦径が観察され、この渦径のなかに、浮遊物が流速を早めて流れ込む状況が確認された。

水深が 1D から 4D に 1D ずつ増えるに従って、渦径は 9.0cm, 5.0cm, 3.5cm, 2.5cm と徐々に小さくなった。ロートの寸法は 22.5cm, 25.0cm, 15.0cm, 2.5cm と水深が 2D のときに 25.0cm で最大となった。

渦流発生状況としてエアコアを含むロート、渦糸が観察され、浮遊物が螺旋状のロートへ引込まれて下降する状況が確認された。その後、浮遊物は最終的に、遮集管へと続く渦糸に沿って吸込まれた。

水深が 1D から 3D のケースでは、エアコアおよび渦糸の存在が確認された。水深 2D のケースでは、安定したエアコアや渦糸が遮集管中心まで連続して観察されるなど、勢いのある渦流が観察された。

水深が 3D となると、渦糸が不連続的になるなど、渦流の勢いは低下した。水深 4D では小さなエアコアは確認されるものの、渦糸は消滅した。渦糸に着目すると、水深が 1D では鉛直方向に 60° 程度の角度を有して生成されているが、水深が 2D から 3D となると、垂直に生成されている。

表 5.5 渦流発生状況の分析結果(60L・1D, 60L・2D)

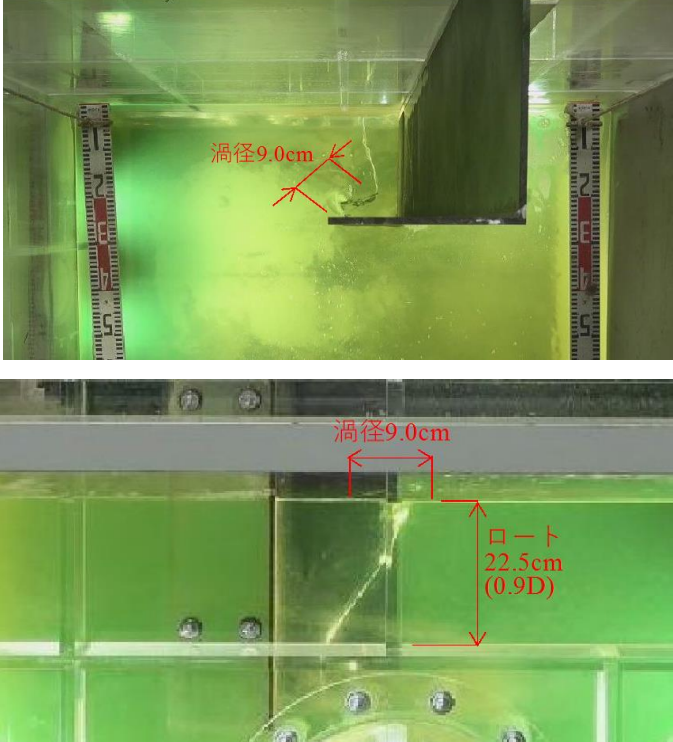
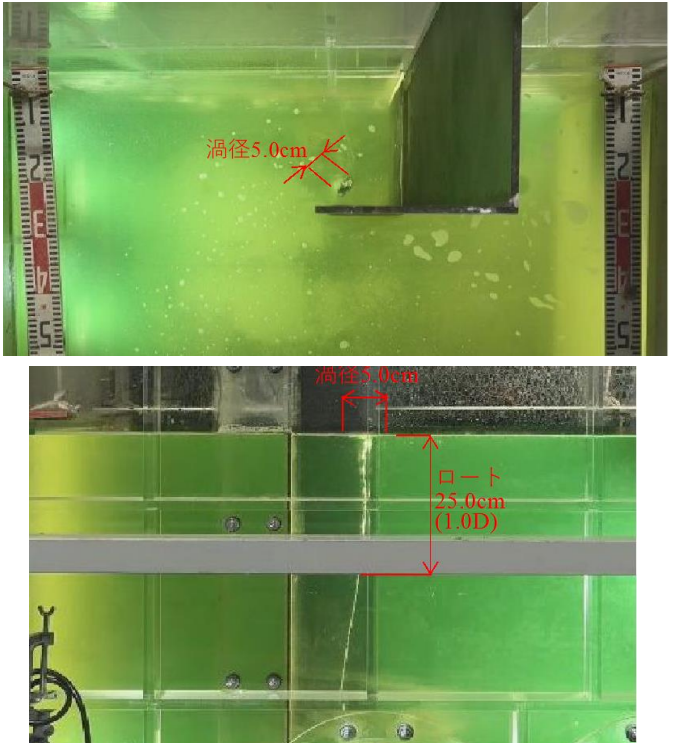

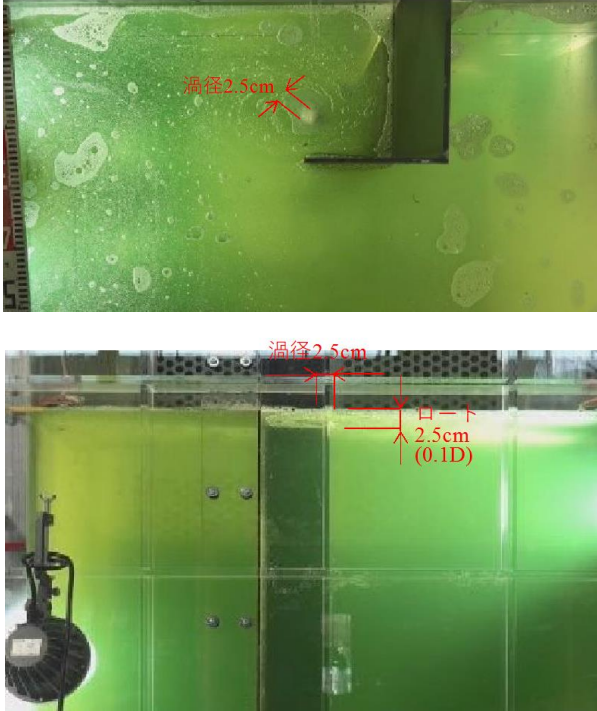
ケース	写真	計測値
60L 1D	 <p>渦径9.0cm</p> <p>渦径9.0cm</p> <p>口ト 22.5cm (0.9D)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 渦径 : 9.0cm</li> <li>・ I7コ7 : 有</li> <li>・ 口ト : 22.5cm (0.9D)</li> <li>・ 渦糸 : 有</li> </ul>
60L 2D	 <p>渦径5.0cm</p> <p>渦径5.0cm</p> <p>口ト 25.0cm (1.0D)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 渦径 : 5.0cm</li> <li>・ I7コ7 : 有</li> <li>・ 口ト : 25.0cm (1.0D)</li> <li>・ 渦糸 : 有</li> </ul>

表 5.6 渦流発生状況の分析結果(60L・3D, 60L・4D)

ケース	写真	計測値
60L 3D	 <p>渦径3.5cm</p> <p>渦径3.5cm</p> <p>ポート 15.0cm (0.6D)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 渦径 : 3.5cm</li> <li>・ I707 : 有</li> <li>・ ポート : 15.0cm (0.6D)</li> <li>・ 渦糸 : 有</li> </ul>
60L 4D	 <p>渦径2.5cm</p> <p>渦径2.5cm</p> <p>ポート 2.5cm (0.1D)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 渦径 : 2.5cm</li> <li>・ I707 : 有</li> <li>・ ポート : 2.5cm (0.1D)</li> <li>・ 渦糸 : 無</li> </ul>

(3) ケース 9～12：流量 80 ℓ / 秒

渦流発生状況の分析結果として、表 5.7 には 80L・1D, 80L・2D のケースの結果を、表 5.8 には 80L3D, 80L4D の結果を示す。観察結果から、制御板によって渦流が発生し、上方からの渦巻き大きさとしての渦径が観察され、この渦径のなかに、浮遊物が流速を早めて流れ込む状況が確認された。

水深が 1D から 4D に 1D ずつ増えるに従って、渦径は 15.0cm, 18.5cm, 9.0cm, 5.5cm と水深が 2D のときに最大となった。ロートは水深 1D では確認されず、水深 2D から 4D では、37.5cm, 8.7cm, 5.0cm と水深が 2D のときに 37.5cm で最大となった。

渦流発生状況としてエアコアを含むロート、渦糸が観察され、浮遊物が螺旋状のロートへ引込まれて下降する状況が確認された。その後、浮遊物は最終的に、遮集管へと続く渦糸に沿って吸込まれた。

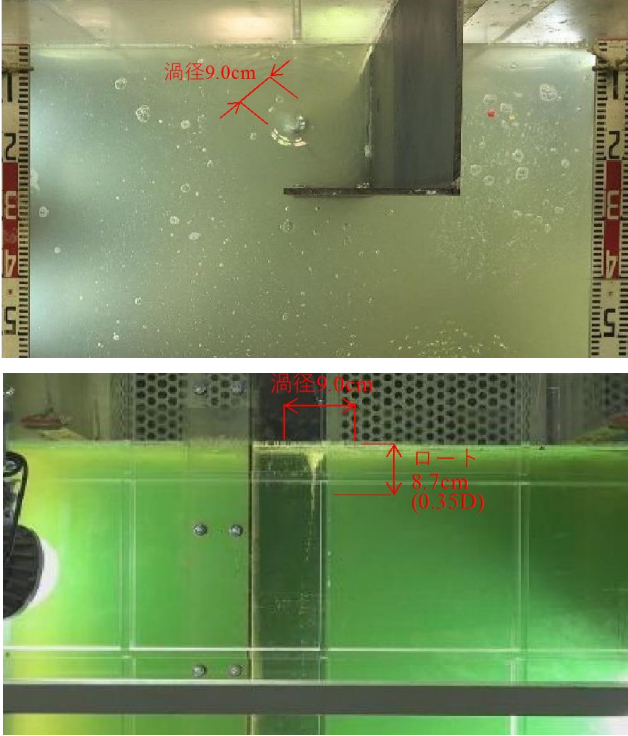
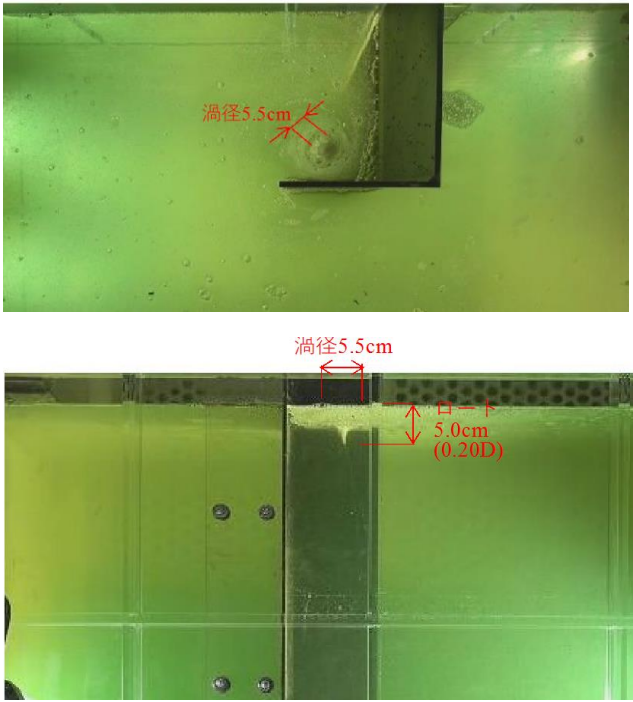
流量に対して水深が著しく小さい場合、例えば、流量 80 ℓ / 秒で、水深 1D では、ロート内部にエアコアは生じず安定した渦は生成されない。さらに、ロート底部から連なる渦糸は認められなかった。水深 2D から 4D のいずれのケースにおいても、エアコアおよび渦糸の存在が確認されたが、水深 2D のケースで勢いのあった渦流が、水深 3D から 4D となると、渦流の勢いは低下した。

ロート底部から遮集管に繋がる渦糸は、水深が浅い時には遮集管の吸込み力の影響を受けて斜め方向で遮集管に接合する。しかし、この渦糸と遮集管頂との接合角度は、水深が大きくなるのにもともない小さくなり、水深 3D から 4D に増加するとほぼ垂直となる。

表 5.7 渦流発生状況の分析結果(80L・1D, 80L・2D)

ケース	写真	計測値
80L 1D	<p>渦径15.0cm</p> <p>渦径15.0cm</p> <p>ポートなし</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 渦径 : 15.0cm</li> <li>・ I707 : 無</li> <li>・ ポート : 無</li> <li>(0D)</li> <li>・ 渦糸 : 無</li> </ul>
80L 2D	<p>渦径18.5cm</p> <p>渦径18.5cm</p> <p>ポート 37.5cm (1.5D)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 渦径 : 18.5cm</li> <li>・ I707 : 有</li> <li>・ ポート : 37.5cm</li> <li>(1.5D)</li> <li>・ 渦糸 : 有</li> </ul>

表 5.8 渦流発生状況の分析結果(80L・3D, 80L・4D)

ケース	写真	計測値
80L 3D	 <p>渦径9.0cm</p> <p>渦径9.0cm</p> <p>ポート 8.7cm (0.35D)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 渦径 : 9.0cm</li> <li>・ I7コ7 : 有</li> <li>・ ポート : 8.7cm (0.35D)</li> <li>・ 渦糸 : 有</li> </ul>
80L 4D	 <p>渦径5.5cm</p> <p>渦径5.5cm</p> <p>ポート 5.0cm (0.20D)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 渦径 : 5.5cm</li> <li>・ I7コ7 : 有</li> <li>・ ポート : 5.0cm (0.2D)</li> <li>・ 渦糸 : 有</li> </ul>

(4)計測された渦径と流量の関係

水理模型実験結果から、制御板で生成される渦流発生状況は、流量と水深に相関して変化することが観察された。

各ケースの実験結果より、水深と渦径の関係を表 5.9 および図 5.5 に示す。水理実験で観測される渦の大きさである渦径は水深に反比例し、流量 80 ℓ /秒のケースを除いて、水深が 1D から 4D へと増大するのに従って縮小した (表 5.9, 図 5.5)。流量 80 ℓ /秒のケースでは水深 2D における渦径が、水深 1D に比べ大きくなるものの、水深が 3D から 4D に増えるとともに、渦径は小さくなっている。

表 5.9 水深と渦径(cm)の関係

水深※ 流量	1D (h=0.25m)	2D (h=0.50m)	3D (h=0.75m)	4D (h=1.00m)
40L	6.0	4.5	3.0	1.5
60L	9.0	5.0	3.5	2.5
80L	15.0	18.5	9.0	5.5

※遮集管頂からの水深 h

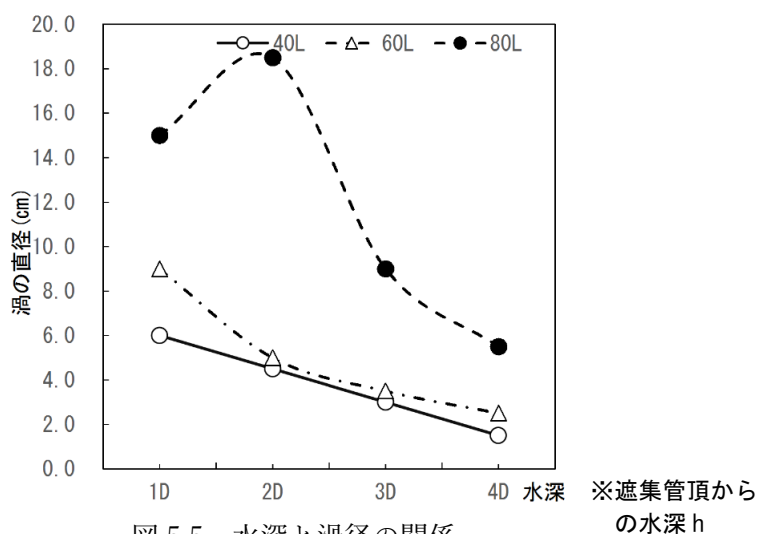


図 5.5 水深と渦径の関係

#### (5)浮遊物の引込み状況

80L・1D, 80L・2D, 80L・3D, 80L・4D の各ケースにおける浮遊物の引込み状況を表5.10(a)に示す.

各ケースにおける上面からの観察結果より, 渦流の大きさとしての渦径が確認できる. この渦径のなかに, 浮遊物が流れ込んでいる.

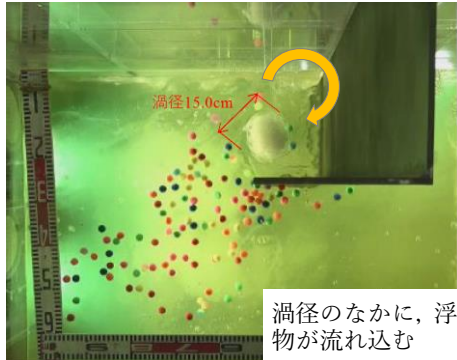
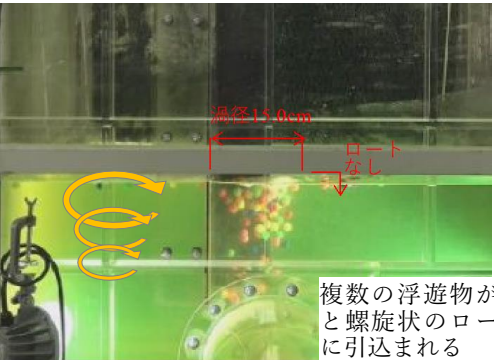
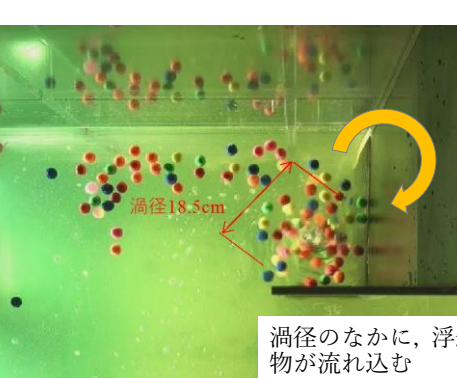
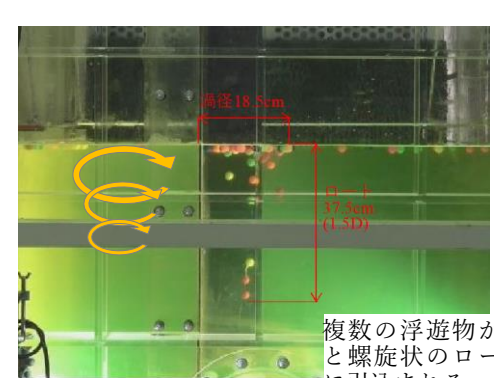
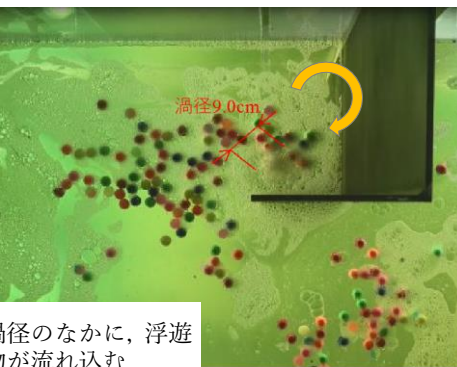
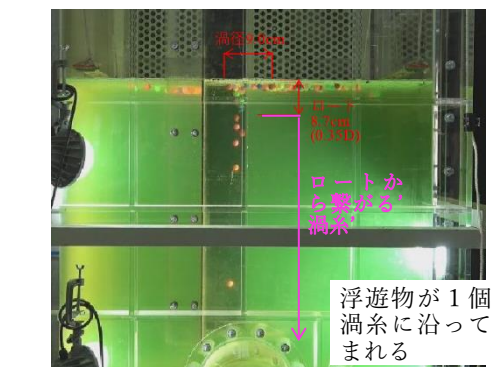
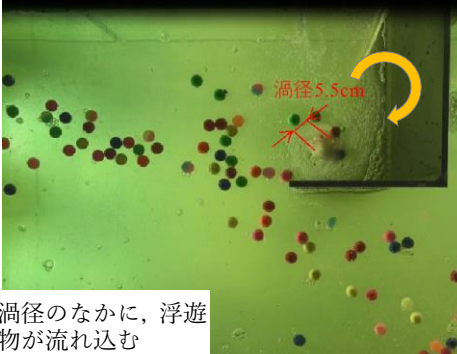
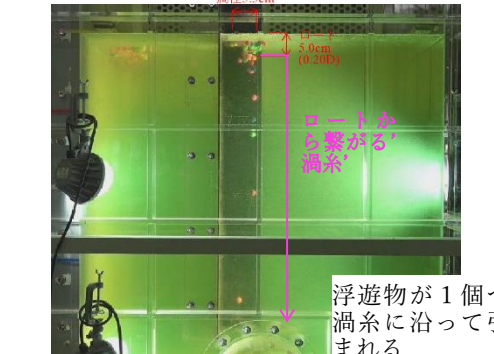
次に, 各ケースにおける側面からの観察結果より, 渦流発生状況としてエアコアを含むロート, 渦糸が確認できる. 浮遊物は螺旋状のロートへ引込まれて下降している. その後, 浮遊物は最終的に, 遮集管へと続く渦糸に沿って吸込まれた.

各ケースにおける浮遊物の引込み状況を比較すると, 水深 1D および 2D のケースでは, 勢いのある渦流が, 複数の浮遊物を次々に遮集管に引込んでいる. 水深 3D から 4D となると, 渦流の勢いは低下するが, 渦糸に沿って浮遊物が 1 個ずつ遮集管に引込まれている.

水面を漂う浮遊物の遮集管への引込みは, 水深が増大して渦径が縮小するのに伴って少なくなるが, 渦が発生している限り引込みは継続される. なお, 渦糸の存在が目視で確認されない水深 (3D 以上) であっても, 浮遊物の引込みは確認された.



表 5.10(a) 浮遊物の引込み状況 (80L・1D, 80L・2D, 80L・3D, 80L・4D)

ケース	写真	
80L 1D	 <p>渦径15.0cm</p> <p>渦径のなかに, 浮遊物が流れ込む</p>	 <p>渦径15.0cm</p> <p>ロートなし</p> <p>複数の浮遊物が次々と螺旋状のロート部に引込まれる</p>
80L 2D	 <p>渦径18.5cm</p> <p>渦径のなかに, 浮遊物が流れ込む</p>	 <p>渦径18.5cm</p> <p>H=37.5cm (0.5D)</p> <p>複数の浮遊物が次々と螺旋状のロート部に引込まれる</p>
80L 3D	 <p>渦径9.0cm</p> <p>渦径のなかに, 浮遊物が流れ込む</p>	 <p>渦径9.0cm</p> <p>H=8.2cm (0.27D)</p> <p>ロートから繋がる渦系</p> <p>浮遊物が1個ずつ渦糸に沿って引込まれる</p>
80L 4D	 <p>渦径5.5cm</p> <p>渦径のなかに, 浮遊物が流れ込む</p>	 <p>渦径5.5cm</p> <p>H=5.0cm (0.20D)</p> <p>ロートから繋がる渦系</p> <p>浮遊物が1個ずつ渦糸に沿って引込まれる</p>

目視による浮遊物の引込み状況の観察から、渦内に浮遊物が引込まれている場合には、渦の勢い(回転速度)が低下している状況が確認された。そこで、上方からの浮遊物の引込み状況の映像をもとに、2/30秒間の浮遊物の速度変化の算定を行った(表 5.10(b), 表 5.10(c)).

80L・2D の浮遊物の速度変化の算定結果より、渦内に浮遊物がない場合の速度  $v=0.28\text{m/秒}$  に対し、浮遊物がある場合の速度は  $v=0.21\text{m/秒}$  となり、25%の減少が確認された。また、80L・4D の浮遊物の速度変化の算定結果より、渦内に浮遊物がない場合の速度  $v=0.09\text{m/秒}$  に対し、浮遊物がある場合の速度は  $v=0.05\text{m/秒}$  となり、45%の減少が確認された。この結果より、渦内に引込む浮遊物の量が多い、あるいは、引き込む浮遊物が大きい場合には、渦の勢い(回転速度)は低下することが認められた。

表 5.10(b) 浮遊物の速度変化による渦の回転速度の算定 (80L・2D)

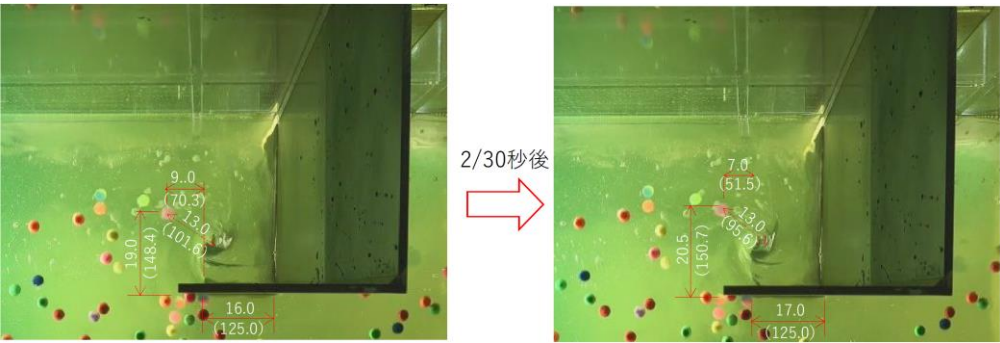
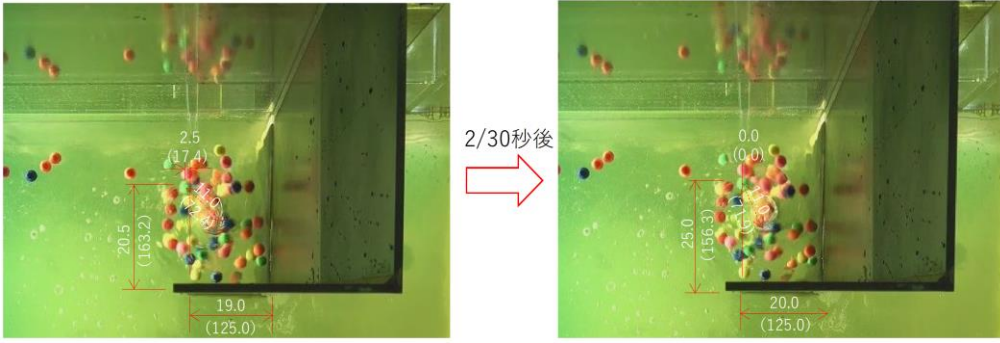
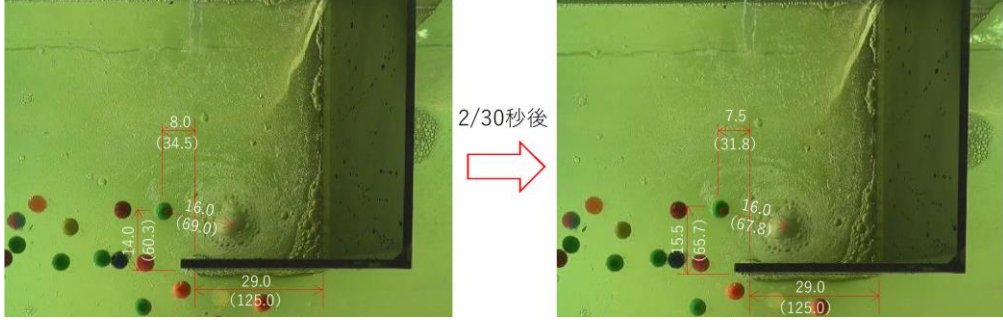
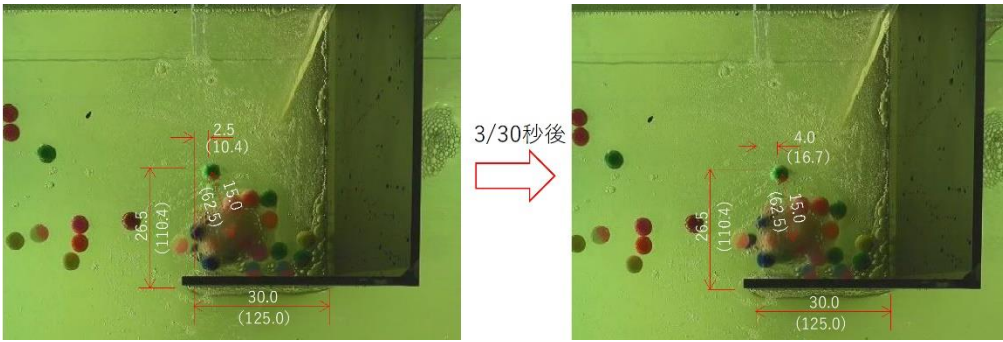
<p>渦内に 浮遊物 がない 場合</p>	 <p>2/30秒後</p> <p>①移動距離(2/30秒後)  <math>L = \{ (70.3-51.5)^2 + (150.7-148.4)^2 \}^{1/2}</math>  <math>= 18.9\text{mm}</math></p> <p>②流速  <math>V = 18.9 \times (1/2/30)</math>  <math>= 284.1\text{mm/秒} = \underline{0.28\text{m/秒}}</math></p>
<p>渦内に 浮遊物 がある 場合</p>	 <p>2/30秒後</p> <p>①移動距離(2/30秒後)  <math>L = \{ (0.0-17.4)^2 + (163.2-156.3)^2 \}^{1/2} = 18.7\text{mm}</math></p> <p>②流速  <math>V = 18.7 \times (1/2/30) = 284.1\text{mm/秒} = 0.28\text{m/秒}</math></p> <p>③渦中心からの距離(旋回半径)の違いによる補正  (比較半径)  ・浮遊物を捕捉していない場合 <math>\frac{1}{2}(101.6 \times 95.6) = 98.60</math>  ・浮遊物を捕捉している場合 <math>\frac{1}{2}(72.4 \times 71.9) = 72.25</math>  (補正した後の浮遊物を捕らえた場合の渦速度)  <math>V = (72.2/98.6) \times 0.28 = \underline{0.21\text{m/秒}}</math> (半径98.6mmの渦周速度に換算)</p>

表 5.10(c) 浮遊物の速度変化による渦の回転速度の算定 (80L・4D)

<p>渦内に 浮遊物 がない 場合</p>	 <p>①移動距離(2/30秒後)  <math>L = \{ (34.5-31.8)^2 + (60.3-65.7)^2 \}^{1/2}</math>  <math>= 6.0\text{mm}</math></p> <p>②流速  <math>V = 6.0 \times (1/2/30)</math>  <math>= 90.0\text{mm/秒} = \underline{0.09\text{m/秒}}</math></p>
<p>渦内に 浮遊物 がある 場合</p>	 <p>①移動距離(3/30秒後)  <math>L = \{ (10.4-16.7)^2 + (110.4-110.4)^2 \}^{1/2}</math>  <math>= 6.3\text{mm}</math></p> <p>②流速  <math>V = 6.3 \times (1/3/30)</math>  <math>= 63.0\text{mm/秒} = 0.06\text{m/秒}</math></p> <p>③渦中心からの距離(旋回半径)の違いによる補正          (比較半径)          ・浮遊物を捕捉していない場合  <math>\frac{1}{2}(69.0 \times 67.8) = 68.4</math>          ・浮遊物を捕捉している場合  <math>\frac{1}{2}(62.5 + 62.5) = 62.5</math>          (補正した後の浮遊物を捕らえた場合の渦速度)  <math>V' = (62.5/68.4) \times 0.06 = \underline{0.05\text{m/秒}}</math>          (半径68.4mmの渦周速度に換算)</p>

### 5.3.3 まとめ

渦径やエアコアを含むロート，渦糸などの渦流発生状況を詳細に検証することを目的として実施した水理模型実験から，以下の知見が得られた。

- (1)水理模型実験の観察結果から，制御板によって渦流が発生し，上方からの渦巻きの大きさとしての渦径が観察され，この渦径のなかに，浮遊物が流速を早めて流れ込む状況が確認された（表 5.3～表 5.8，表 5.10(a)）。
- (2)渦流発生状況としてエアコアを含むロート，渦糸が観察され，浮遊物が螺旋状のロートへ引込まれて下降する状況が確認された。その後，浮遊物は最終的に，遮集管へと続く渦糸に沿って吸込まれた（表 5.10(a)）。
- (3)水理実験で観測される渦の大きさである渦径は水深に反比例し，流量 80 ℓ /秒のケースを除いて，水深が 1D から 4D へと増大するのに従って縮小した（表 5.9，図 5.5）。
- (4)流量に対して水深が著しく小さい場合，例えば，流量 80 ℓ /秒で，水深 1D では，ロート内部にエアコアは生じず安定した渦は生成されない。さらに，ロート底部から連なる渦糸は認められなかった（表 5.7）。
- (5)ロート底部から遮集管に繋がる渦糸は，水深が浅い時には遮集管の吸込み力の影響を受けて斜め方向で遮集管に接合する。しかし，この渦糸と遮集管頂との接合角度は，水深が大きくなるのにもない小さくなり，水深 3D から 4D に増加するとほぼ垂直となる（表 5.3）。
- (6)水面を漂う浮遊物の遮集管への引込みは，水深が増大して渦径が縮小するのに伴って少なくなるが，渦が発生している限り引込みは継続される。なお，渦糸の存在が目視で確認されない水深（3D 以上）であっても，浮遊物の引込みは確認された（表 5.8，表 5.10(a)）。
- (7)浮遊物の引込み状況から，渦内に引込む浮遊物の量が多い，あるいは，引き込む浮遊物が大きい場合には，渦の勢い(回転速度)の低下が認められた（表 5.10(b)）。これは，浮遊物が引込まれることでロート内を螺旋状に旋回して流れる水の流速である接線速度が，浮遊物により制動の影響を受けることで低下するためであると考えられる。浮遊物を遮集管へと引込む能力は，ロートの立体的な大きさ（渦径と水深方向の高さ）と浮遊物の量の二つの要因の影響を受けていると推察される。
- (8)すでに引込まれて，ロート中を下降している浮遊物が再び上昇に移行する現象が確認された。この状態でロート中に引込まれている浮遊物の量が減少した場合には，渦の回転は回復して勢いを取り戻し，ロート中の浮遊物は再度下降して遮集管に吸込まれる（表 5.10(a)，表 5.10(b)）。

## 5.4 渦径についての検証

### 5.4.1 レイノルズ数による渦流発生状況の評価

#### (1) 表面旋回流のレイノルズ数と渦径の関係

水の流れの状態を評価する指標である「レイノルズ数」に着目し、渦流発生状況の評価を行う。

水の流れの状態を示す指標としてのレイノルズ数(Re)は、一般に式 5.1 あるいは動粘性係数を用いた式 5.2 で表される。しかし、送風ダクトのように囲まれた空間を流れる流体に対しては、流体を取り囲む周囲の影響を考慮した式 5.3 が用いられる<sup>5)</sup>。

制御板の影響の下に水が流れる範囲は図 5.6(a)で示されるが、一般的な雨水吐き室に設置した制御板による影響範囲を勘案すると図 5.6 (b) に示す通りであり、接触長さで全周の 2/3 をほぼ占め、囲まれている空間と仮定できる。そこで、式 5.3 を用いてレイノルズ数を算出し、レイノルズ数により渦の状況の評価することとした。

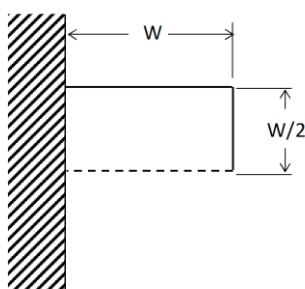
$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad \text{式 5.1}$$

$$Re = \frac{v L}{\nu} \quad \text{式 5.2}$$

$$Re = \frac{v D H}{\nu} \quad \text{式 5.3}$$

ここで  $DH = \frac{4A}{P}$

Re:レイノルズ数  
 v: 相対的な平均流速(m/s)  
 ρ: 密度(kg/m<sup>3</sup>)  
 L: 物体が流れた距離(m)  
 μ: 粘性係数(kg/ms)  
 ν: 動粘性係数(0.01 cm<sup>2</sup>/s → 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s)  
 A: 流下断面積(m<sup>2</sup>) → 制御板で囲まれた矩形面積  
 P: 潤辺(m) → 制御板に流れる水の経路長



制御板の辺長: W=250mm (水理模型実験)  
 制御板で囲まれた範囲の面積: A=W × W/2

図 5.6(a) 制御板で囲まれた範囲 (制御板の辺長の定義)

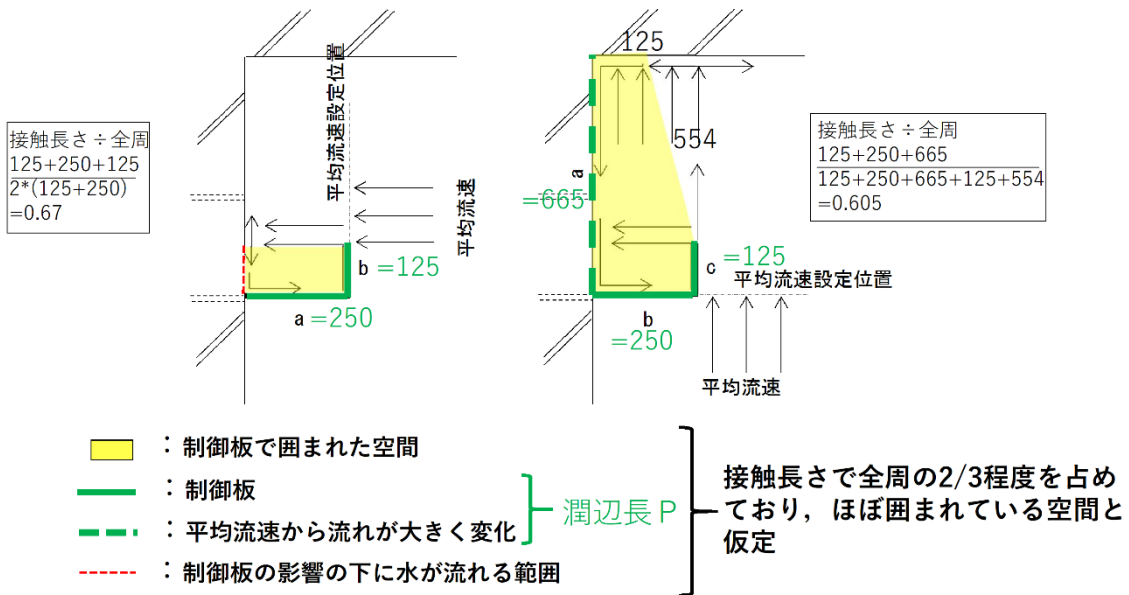


図 5.6 (b) 制御板近傍の水の流れの方向と潤辺の長さ

今回の水理模型実験では、有孔板を有する整流装置を用いることで、装置内の流れは平均化されている。このため、レイノルズ数の算出にあたっては、装置に流入する流量について、深さと装置幅で除した値を流速値（遮集管接近流速）として用いることとした（表 5.11）。

$$\text{遮集管接近流速 } v = \frac{\text{流量 } Q}{\text{装置幅 } B \times \text{水深 } h} = \frac{0.040 \text{ m}^3/\text{s} (40\ell)}{1.08 \text{ m} \times 0.50 \text{ m} (1D)} = 0.0741 \text{ m/s}$$

表 5.11 水深と遮集管接近流速(m/秒)の関係

水深※ 流量	1D (h=0.25m)	2D (h=0.50m)	3D (h=0.75m)	4D (h=1.00m)	※遮集管頂からの水深 h
40L	0.0741	0.0494	0.0370	0.0296	
60L	0.1111	0.0741	0.0556	0.0444	
80L	0.1481	0.0988	0.0741	0.0593	

表 5.12 に式 5.3 を用いて算出したレイノルズ数(Re)の結果をまとめた。レイノルズ数(Re)は 40 ℓ /秒, 60 ℓ /秒, 80 ℓ /秒の流量とも水位の上昇につれて遮集管へ向かう水の流れの平均流速が低下するため、レイノルズ数(Re)は減少する。水深の増加に伴うレイノルズ数(Re)の減少の割合は、平均流速が高いほど大きく、流速が低いほど水深の増加による流速の減少割合は小さくなる。

図 5.7 の水深とレイノルズ数(Re)の関係をふまえて作成した図 5.8 のレイノルズ数(Re)と渦径の関係においては相関が確認された。レイノルズ数(Re)が 30,000 を越えるとレイノルズ数(Re)と渦径の関係のバラツキが大きくなるが、これは渦流を観察した水位の変動幅である 1 D よりも小さな幅の水位の変動によって生じる流速の変化で、渦流の形が大き

変わるためによるものと考えられる。

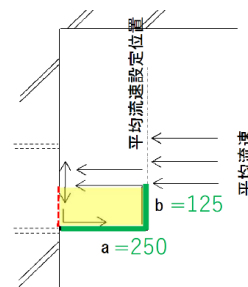
さらに、水深の増加で流速が変化し、制御板を流れる水のレイノルズ数が  $Re=40,000$  程度になると、制御板で生成される渦径は最も大きな状態となる。

また、このような渦流の変化は、実際の雨水吐き室の検証結果からも確認されており、流速の僅かな変化とそれによるレイノルズ数( $Re$ )の変化で、渦流発生状況は大きく変化するものと推測される。

表 5.12 水深とレイノルズ数( $Re$ )の流量毎の関係

水深* 流量	1D (h=0.25m)	2D (h=0.50m)	3D (h=0.75m)	4D (h=1.00m)
40L	24,691	16,461	12,346	9,877
60L	37,037	24,691	18,519	14,815
80L	49,383	32,922	24,691	19,753

※遮集管頂からの水深 h



$$Re = \frac{vDH}{\nu} = 4 \frac{vA}{\nu P}$$

Re : レイノルズ数

v : 遮集管接近流速 (m/s) …表 5.11 より

$\nu$  : 動粘性係数 … $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

A : 流下断面積 … $0.25 \times 0.125 = 0.03125 \text{ m}^2$

P : 潤辺 … $0.25 + 0.125 = 0.375 \text{ m}$

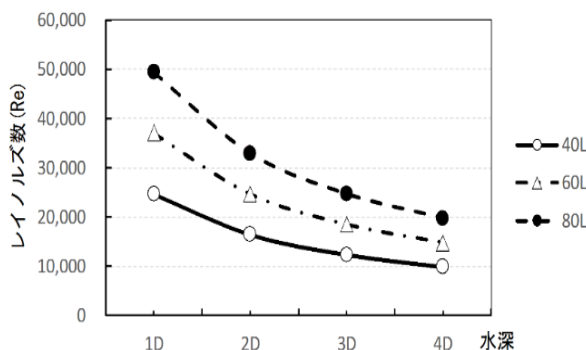


図 5.7 水深とレイノルズ数( $Re$ )の関係

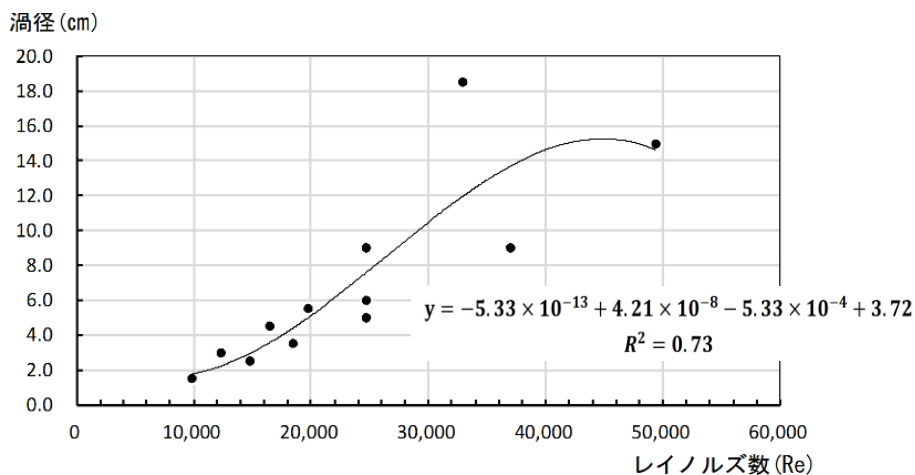


図 5.8 レイノルズ数( $Re$ )と渦径の関係

## (2)まとめ

水理模型実験で観測された渦の性状と水深の関係から、以下の結果が導き出された。

- 1)流量を水槽の水断面積で除した平均流速を制御板近傍の水の流速(接近流速)とし、制御板と壁に囲まれた範囲を水の流れとしてのレイノルズ数(Re)を算出した。  
結果、レイノルズ数(Re)と制御板で生成される渦の大きさには相関が確認された。
- 2)制御板と壁で囲まれた範囲の水の流れのレイノルズ数(Re)が  $Re=10,000$  を下回ると、制御板で生成される渦の大きさは直径 1.5 cm と非常に小さくなる。これは、制御板への接近流速が渦の生成に大きく影響するためと言える。
- 3)レイノルズ数(Re)と渦径の関係では、 $Re=30,000$  を超えるとレイノルズ数(Re)と渦径の関係にバラツキが生じる。さらに、 $Re=40,000$  付近では渦径が最も大きくなることが確認された。
- 4)レイノルズ数(Re)が、 $Re=30,000$  から  $Re=40,000$  の範囲では、わずかな水深の差による接近流速の変化で渦径は大きく変動することが確認された。ここで、水理模型実験における水深の差は、制御板への接近流速の違いとなり、算出されるレイノルズ数(Re)が変化したものである。
- 5)レイノルズ数(Re)が  $Re=50,000$  に近い値となると制御板と壁で囲まれた範囲の水の流れは乱れた状態となり、制御板による旋回流の生成は確認されるものの、エアコアを包含する安定したロートの生成は確認されない。
- 6)水理模型実験における観測から、制御板と壁で囲まれた範囲の水の流れが  $Re=50,000$  に近づくと、水面からロート中心に向かって流れる水平の旋回流の他に、ロート中心部に水中から水面に向かって流れる鉛直方向の旋回流が発生する。この鉛直方向の旋回流は、ロート中心に向かう旋回流と水面で衝突し、これにより渦は不安定な状態となることが確認された。
- 7)制御板により水面付近で生成される渦は、水中の流れが水面の流れに影響を及ぼしていない。水面と水中の流れが混じり合わない範囲では、制御板への接近流れの速さに合わせて大きくなるが、水中の流れと水面の流れが混じり合った状態となると制御板で生成された渦は不安定な状態となる。水理模型実験の観測から渦が不安定となる状態は、制御板と壁で囲まれた範囲の水の流れのレイノルズ数が  $Re=50,000$  を超えたあたりとなるものと推測される。



## 5.4.2 雨水吐き室における渦径の評価

本論文「5.4.1 レイノルズ数(Re)による雨水吐き室での渦流発生状況の評価」において、水理模型実験を考察した結果、レイノルズ数(Re)と渦の大きさ(渦径)には相関関係が存在することが導き出された。

そこで、水理模型実験で行った解析と同様に、実際の雨水吐き室の観測結果をモデル化し、制御板と壁で囲まれた範囲の水の流れについて、レイノルズ数(Re)を算出して評価する。なお、雨水吐き室の評価にあたっては、後述するとおり、画像から観測される渦が浮遊物を流集する範囲を「渦径」と定義している。

### (1) 評価手法

雨水吐き室に流入する浮遊物を渦で流集して遮集管に引込むには、二次元的な広がりを持つ渦の中心部に向かって浮遊物を集める機能を向上させることが、水面制御装置の効果を発揮させる重要な要素となる。

対象とした渦流は、後述する第6章6.1で扱った大宮橋雨水吐き室を対象としているので、雨水吐き室の形状や水面制御装置、観測条件などの記述については省略する。

渦の流集機能の平面的な広がり进行评估するために、制御板の真上から下方を撮影した画像データを用いた。画像解析では、観測点として特定した浮遊物の移動速度に着目して、渦が水位の変動により浮遊物を集める範囲がどのように変化するかを検討した。検討では水面を流れる観測点(浮遊物)の1/30秒毎の移動距離を画像から計測し、観測点の速度が変化する位置を渦による浮遊物の流集範囲とした。その渦による浮遊物の流集範囲を設定する手法は、図5.9のとおりである。

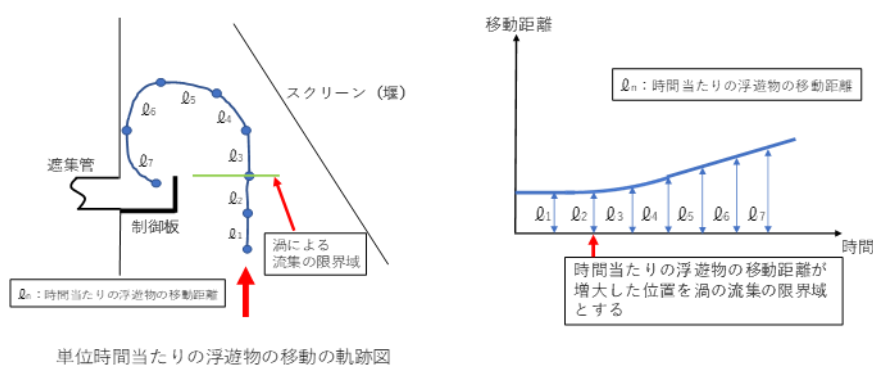


図 5.9 制御板で制御された渦の表面流集機能の評価手法

雨水吐き室の水面は、流入する時に伝播する波や、堰や側壁に衝突することで生じる波などの影響を受けて上下に変動する。このため、画像解析に当たっては、この水面の上下動が及ぼす影響を排除する必要がある。

本研究では、図5.10に示す現象ととらえ、上下する表面波の影響を最小限に押さえた上で画像解析を行った。

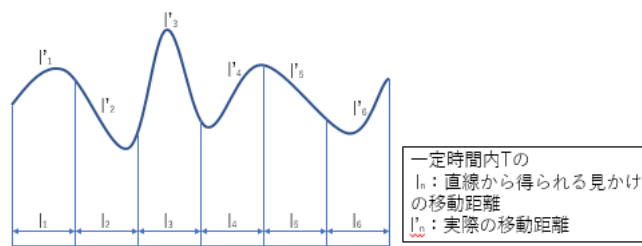


図 5.10 雨水吐き室の波の影響

渦による浮遊物の流集範囲を設定するにあたっては、水面を流れる浮遊物の見掛けの単位時間(1/30 秒)当たりの移動距離（見掛けの移動速度）と実際の単位時間当たりの移動距離（実際の移動速度）との差を排除する必要がある。そこで、単位時間当たりの移動距離の差の正を「加速」に、負を「減速」に分けて、それぞれ積算した値の絶対値を比較し、「加速」が「減速」を上回った位置を「その水位における渦の浮遊物流集範囲」として設定した。この「加速」と「減速」を用いた渦の浮遊物流集範囲の設定結果は、図 5.11 の(1)～(3)に示すとおりである。なお、渦に向って浮遊物が流れる移動の軌跡と速度の変化の分析には、画像解析ソフトウェア「Move-Tr/2D Flow-PTV」<sup>4)</sup>を使用した。

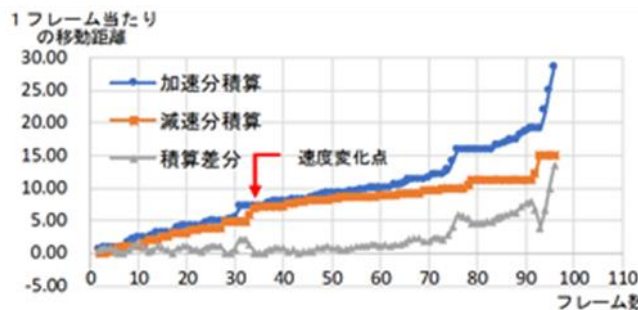


図 5.11(1) 速度傾向による渦の浮遊物流集範囲の設定 (H=0.527m)

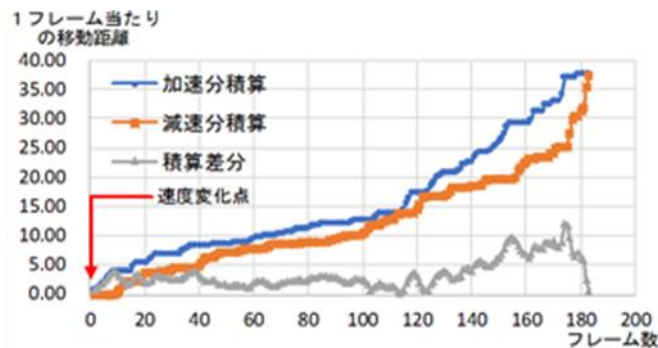


図 5.11(2) 速度傾向による渦の浮遊物流集範囲の設定 (H=0.536m)

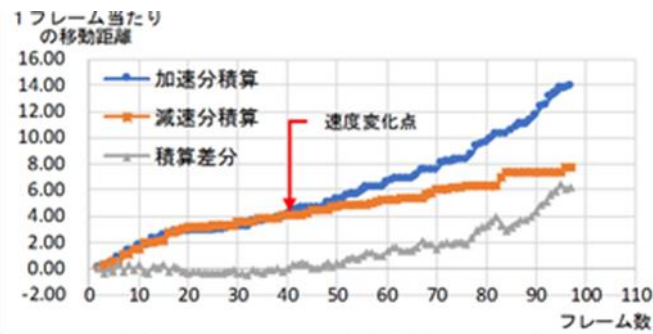


図 5.11(3) 速度傾向による渦の浮遊物流集範囲の設定 (H=0.536m)

## (2) 画像解析による渦の流集機能

時系列的に変化する「加速」と「減速」の発現傾向を考慮して設定した水位と制御板で生成された渦の画像解析結果を写真 5.7, 5.8, 5.9 に示す。これらの写真は、ともに雨天時下水がスクリーンを通過して放流される水位である  $H=0.470\text{m}$  より高い水位で撮影された結果である。撮影時の水位は越流堰を越えて雨天時下水を放流しつつ雨天時下水を遮集している状態である。

画像解析から得られた水深、渦の流集範囲と流集速度は表 5.13 に示す通りである。水深  $H=0.527\text{m}$  と  $H=0.536\text{m}$  では水深の増大による流集範囲の拡大が確認されたが、水深が  $H=0.778\text{m}$  に増えると渦の流集範囲は  $28.5\text{ cm}$  と  $H=0.536\text{m}$  の  $30.8\text{ cm}$  に比較して  $2.3\text{ cm}$  の減少が確認された。

制御板で生成される渦に向かって流れる浮遊物の速さを算出した結果は、表 5.13 より写真 5.7 で  $0.81\text{m/秒}$ 、写真 5.8 で  $0.73\text{m/秒}$ 、写真 5.9 で  $1.24\text{m/秒}$  であった。 $H=0.527\text{m}$  と  $H=0.778\text{m}$  の間には水深の増加に伴う流集速度の増加が確認されるが、 $H=0.527\text{m}$  と  $H=0.536\text{m}$  の間には水深の増大に伴う渦中心方向への速度の増加は確認されず、逆に減少を示した。

画像解析の結果から、渦中心方向へと浮遊物を集める範囲と渦に捕らえられた浮遊物が渦の中心に向う速さには相関は認められなかった。なお、制御板で生成された渦が浮遊物をとらえる範囲を生成される渦の大きさに比例すると仮定した場合、渦の影響範囲を制御板で生成される渦の大きさとして評価することが可能である。

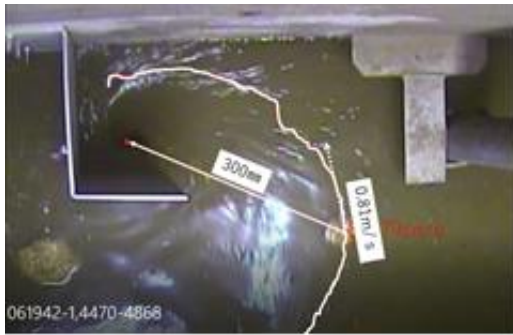


写真 5.7 ケース B 浮遊物を渦中心に引き込む  
(L=300 mm H=0.527m)

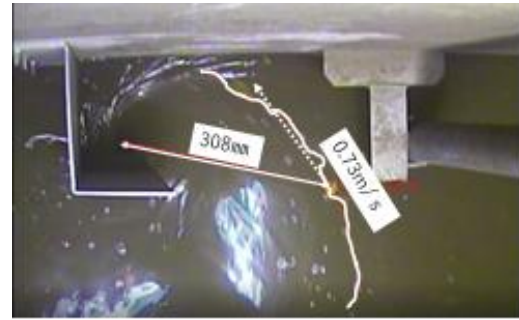


写真 5.8 ケース B 浮遊物を渦中心に引き込む  
(L=308 mm H=0.536m)

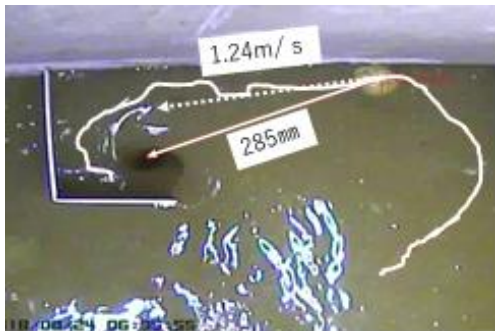


写真 5.9 ケース B 浮遊物を渦中心に引き込む (L=285 mm H=0.778m)

表 5.13 渦の流集範囲と流集速度

水深	渦の流集範囲 (渦径)	流集速度
H	cm	m/秒
0.527	30.0	0.810
0.536	30.8	0.730
0.778	28.5	1.240

### (3) レイノルズ数による雨水吐き室での渦流発生状況の評価

雨水吐き室での渦流発生状況の評価として、写真 5.7, 5.8, 5.9 のケースで、画像から観測される渦が浮遊物を流集する範囲を「渦径」と定義して、レイノルズ数(Re)の関係で評価することとする。

雨水吐き室に設置した制御板で生成される渦の性状は、解析により渦の流集範囲を算定した表 5.13 に示す 3 種類の水深の他に、任意の水位で制御板が生成した渦も併せて評価する。なお、雨水吐き室の平均流速の設定では、雨水吐き室の水位から流入する下水道管の水位を想定し、管勾配と管径から下水の流入量を定めた。

さらに、下水流入量と雨水吐き室の水深をもとに制御板の設置位置の平均流速(接近流速)を求めてレイノルズ数(Re)を算出した。また、レイノルズ数(Re)を評価した渦の径と併せて

レイノルズ数(Re)の算出結果を表 5.14 に示す。平均流速(接近流速)の算定は、図 5.12 に示す位置で行った。

次に、レイノルズ数(Re)の計算に必要な潤辺の算定は、対象とする雨水吐き室の遮集管の接合位置と下水の流入方向から図 5.6 (b) に示した「流れが制御板に平行の場合」として図 5.13 に示した長さとした。

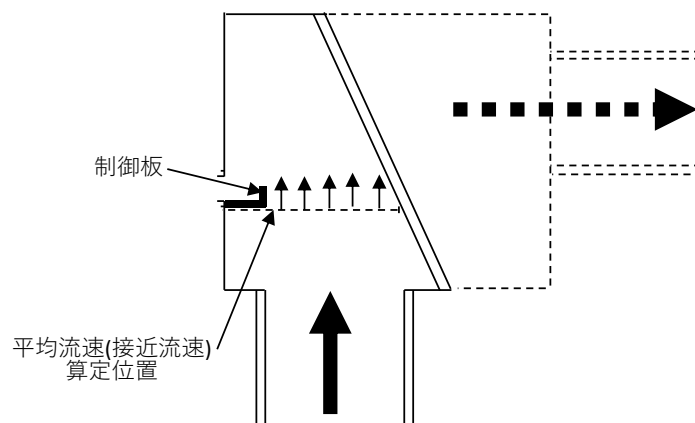


図 5.12 制御板を設置した位置の平均流速(接近流速)算定位置図

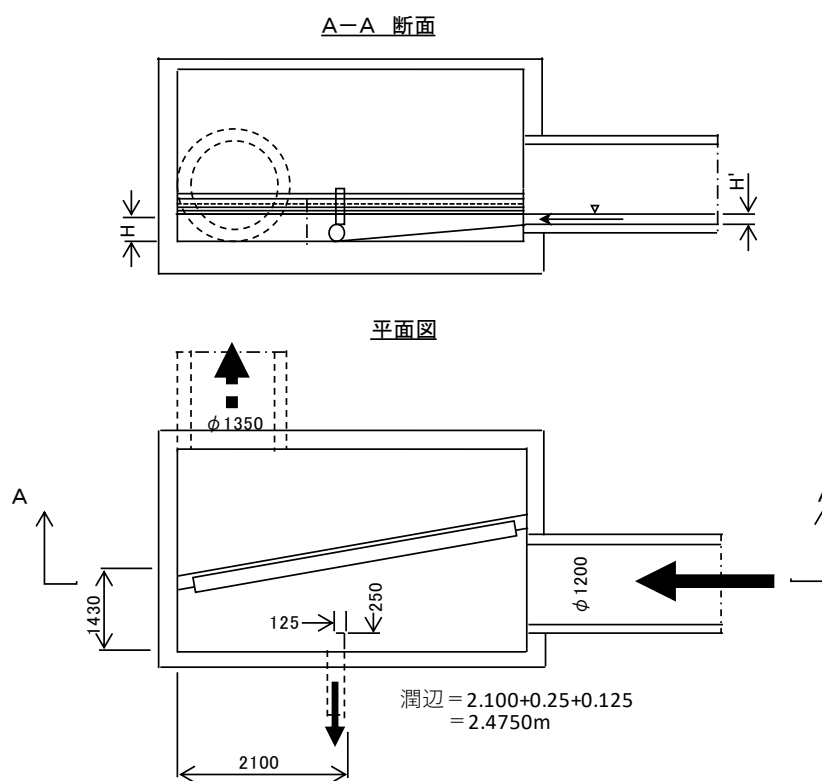


図 5.13 雨水吐き室の構造と水の流れ(潤辺長の設定)

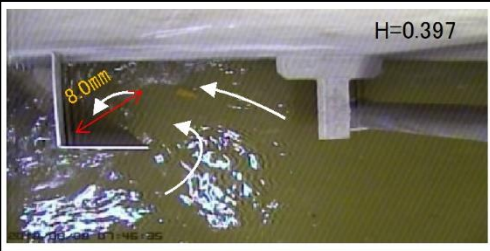
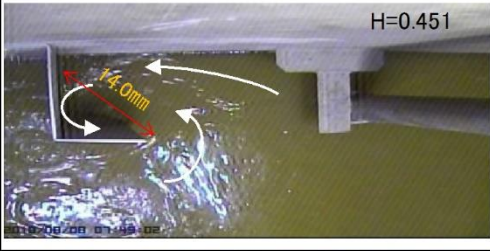




レイノルズ数(Re)との関連性の評価に用いた渦径は、画像中の制御板の一辺(12.5 cm)を基準とし、比例法を用いて渦径を算定した。表 5.15 と表 5.16 に静止画像と基準線を用いた渦径の算定結果を画像解析から流集範囲を求めた渦の水深(表 5.13 に記載)と併せて示した。

表 5.14 画像から観測される渦径とレイノルズ数(Re)の算出結果

雨水吐への流入する水量の算出							制御板と壁で囲まれた部分を流れる水のレイノルズ数(Re)					
流入管φ1200		粗度経緯数n=0.013			流入管の勾配i=2%		平均流速 (接近流速)	レイノルズ数	潤辺	通過断面積	渦径 ( )内は渦 の影響範囲	渦の性状
水深	管内水深	潤辺	流下面積	径深	流入流速	流入量						
H	H'	S	A	R	V1	Q						
0.527	0.437	1.5548	0.3723	0.2395	1.3267	0.4939	0.6554	33,100	2.4750	0.03125	19.0(30.0)	渦
0.536	0.446	1.5735	0.3827	0.2432	1.3403	0.5129	0.6692	33,796	2.4750	0.03125	17.5(30.8)	渦
0.778	0.688	2.0616	0.6707	0.3253	1.6272	1.0914	0.9810	49,545	2.4750	0.03125	8.0(28.5)	渦・旋回流
0.858	0.768	2.2255	0.7644	0.3435	1.6873	1.2898	1.0512	53,093	2.4750	0.03125	15.5	旋回流・消滅
0.922	0.832	2.3614	0.8368	0.3544	1.7228	1.4416	1.0934	55,222	2.4750	0.03125	-	消滅
0.796	0.706	2.0981	0.692	0.3298	1.6421	1.1363	0.9983	50,417	2.4750	0.03125	6.0	旋回流
0.673	0.583	1.851	0.5451	0.2954	1.5227	0.83	0.8624	43,557	2.4750	0.03125	12.5	渦
0.726	0.636	1.957	0.6087	0.311	1.5791	0.9612	0.9259	46,760	2.4750	0.03125	9.0	旋回流
0.397	0.307	1.2727	0.2284	0.1795	1.0947	0.25	0.4404	22,241	2.4750	0.03125	9.5	渦
0.451	0.361	1.3933	0.2865	0.2056	1.1984	0.3433	0.5323	26,884	2.4750	0.03125	14.5	渦
0.505	0.415	1.5088	0.3471	0.2301	1.2918	0.4484	0.6209	31,360	2.4750	0.03125	16.5	渦




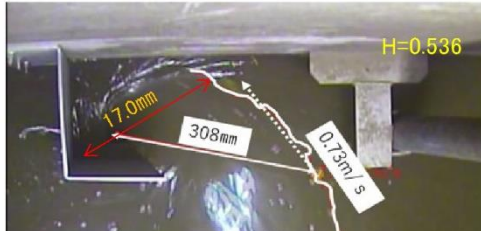
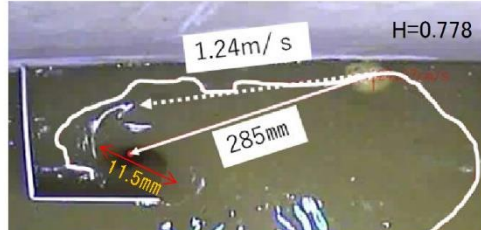
φ1200の管から流入する下水量の算出は、雨水吐水位を用いて流入下水管水位を設定しマニング式を用いて算出

表 5.15 雨水吐き室で発生した渦流の渦径（1）

 <p>H=0.397</p>	<p>基準線125mm            画像基準線長 = 10.5mm            換算倍率 = <math>125.0/10.5 = 11.9</math>倍            画像渦径 8.0mm            渦径 = <math>8.0\text{mm} \times 11.9\text{倍} \doteq 9.5\text{cm}</math></p>
 <p>H=0.451</p>	<p>基準線125.0mm            画像基準線長 = 12.0mm            換算倍率 = <math>125.0/12.0 = 10.4</math>倍            画像渦径 14.0mm            渦径 = <math>14.0\text{mm} \times 10.4\text{倍} \doteq 14.5\text{cm}</math></p>
 <p>H=0.505</p>	<p>基準線125.0mm            画像基準線長 = 12.0mm            換算倍率 = <math>125.0/12.0 = 10.4</math>倍            画像渦径 16.0mm            渦径 = <math>16.0\text{mm} \times 10.4\text{倍} \doteq 16.5\text{cm}</math></p>
 <p>H=0.673</p>	<p>基準線125.0mm            画像基準線長 = 14.0mm            換算倍率 = <math>125.0/14.0 = 8.9</math>倍            画像渦径 14.0mm            渦径 = <math>14.0\text{mm} \times 8.9\text{倍} \doteq 12.5\text{cm}</math></p>
 <p>H=0.726</p>	<p>基準線125.0mm            画像基準線長 = 13.5mm            換算倍率 = <math>125.0/13.5 = 9.2</math>倍            画像渦径 10.0mm            渦径 = <math>10.0\text{mm} \times 9.2\text{倍} \doteq 9.0\text{cm}</math></p>
 <p>H=0.858</p>	<p>基準線125.0mm            画像基準線長 = 13.0mm            換算倍率 = <math>125.0/13.0 = 9.6</math>倍            画像渦径 16.0mm            渦径 = <math>16.0\text{mm} \times 9.6\text{倍} \doteq 15.5\text{cm}</math></p>

※渦径は、2捨3入、7捨8入で0.5cm単位で設定する

表 5.16 雨水吐き室で発生した渦流の渦径 (2)

 <p>H=0.922</p>	<p>渦は消失する</p>
 <p>H=0.796</p> <p>7.0mm</p>	<p>基準線125mm            画像基準線長 = 14.0mm            換算倍率 = 125.0/14.0 = 8.9倍            画像渦径 7.0mm            渦径 = 7.0mm × 8.9倍 ≒ 6.0cm</p>
 <p>H=0.527</p> <p>18.5mm</p> <p>300mm</p> <p>0.81m/s</p>	<p>基準線125mm            画像基準線長 = 12.0mm            換算倍率 = 125.0/12.0 = 10.4倍            画像渦径 18.5mm            渦径 = 18.5mm × 10.4倍 ≒ 19.0cm</p>
 <p>H=0.536</p> <p>17.0mm</p> <p>308mm</p> <p>0.73m/s</p>	<p>基準線125mm            画像基準線長 = 12.0mm            換算倍率 = 125.0/12.0 = 10.4倍            画像渦径 17.0mm            渦径 = 17.0mm × 10.4倍 ≒ 17.5cm</p>
 <p>H=0.778</p> <p>1.24m/s</p> <p>285mm</p> <p>11.5mm</p>	<p>基準線125mm            画像基準線長 = 12.0mm            換算倍率 = 125.0/18.0 = 6.9倍            画像渦径 11.5mm            渦径 = 11.5mm × 6.9倍 ≒ 8.0cm</p>

※渦径は、2捨3入、7捨8入で0.5cm単位で設定する



雨水吐き室に設置した制御板により生成した渦の径と制御板と壁で囲まれた範囲を流れる水のレイノルズ数(Re)の関係を図 5.14 に示す。レイノルズ数が  $Re=20,000$  から  $Re=35,000$  の間では、制御板と壁で囲まれた部分を流れる水のレイノルズ数(Re)が増加するにつれて生成される渦の径が大きくなることが認められる。

しかし、レイノルズ数(Re)が  $Re=40,000$  を超えるとレイノルズ数(Re)と渦径の相関のバラツキが顕著なものとなり、 $Re=50,000$  付近に達すると渦は旋回流(表 5.14 の渦の性状)を伴う不安定な状況となる。さらに、 $Re=55,000$  を超えると旋回流は形状を保持することが困難となり、ついに渦は消滅する。

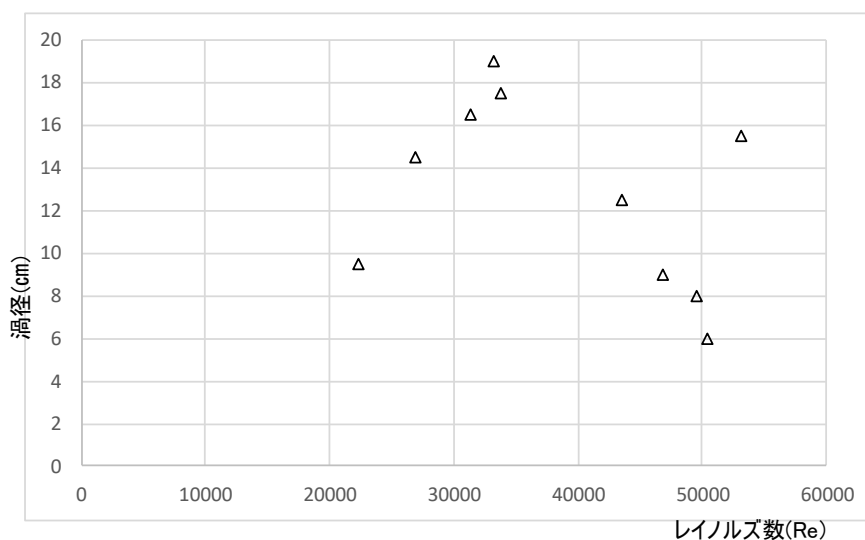


図 5.14 雨水吐き室の渦径とレイノルズ数(Re)の関係

次に、図 5.15 に、雨水吐き室の渦径とレイノルズ数(Re)の関係について、図 5.8 に示した水理模型実験における結果と併記して示す。雨水吐き室の結果は、水理模型実験から得られたレイノルズ数(Re)と渦径の関係と一致した傾向を示している。

このことから、制御板で生成される渦の性状は、制御板と壁で囲まれた範囲の水の流れのレイノルズ数(Re)によって評価することが可能であると考えられる。

なお、画像撮影の対象とした雨水吐き室では、水深が  $H=0.700\text{m}$  より大きくなるとスクリーンの天端を越えた越流が開始される。このため、水深  $H=0.700\text{m}$  を越えると制御板近傍の平均流速の実際値と設定値との差異が大きくなり、渦径とレイノルズ数(Re)の関係においてばらつきが生じることとなった。

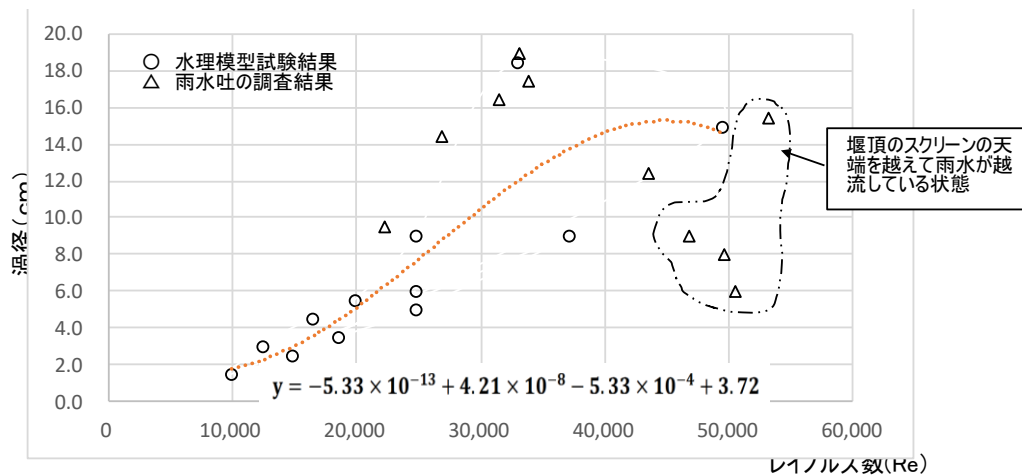


図 5.15 雨水吐き室と水理模型実験の渦径とレイノルズ数(Re)の関係

渦の流集範囲と渦径を示した表 5.14 より、レイノルズ数(Re)が  $Re=30,000$  から  $Re=35,000$  の間ではばらつきを示すが、レイノルズ数(Re)を  $Re=10,000$  程度の刻みで評価する場合、渦の流集範囲は、渦径と同じ傾向を示すものと考えられる。したがって、渦による浮遊物の流集が可能な範囲は、制御板で生成される渦の大きさと比例するものと考えられる。このことから、制御板で大きな渦を生成することが雨水吐き室からの浮遊物放流の抑制には効果的であることが導き出された。

また、対象施設の雨水吐き室の構造から雨水は、水深が  $H=0.470\text{m}$  を超えるとスクリーンを通った越流堰から放流され始める。さらに、水深が  $H=0.700\text{m}$  を超えるとスクリーン天端からの放流が開始される。これらの雨水吐き室の構造的な特性から、浮遊物を公共用水域に流出することなく遮集管へと引込むためには、堰からの放流が始まる直後の水位で遮集管に引き込むことが重要となる。

雨水吐き室の水深とレイノルズ数(Re)の関係から、越流前の水深( $H=0.470\text{m}$  未満)の制御板と壁で囲まれた範囲を流れる水のレイノルズ数(Re)は、 $Re=27,000$  程度である。越流開始直後に公共用水域へと放流される浮遊物を可能な限り遮集管へと引込むためには、制御板と壁で囲まれた範囲のレイノルズ数(Re)を大きな渦を生じさせる状態である  $Re=35,000$  から  $40,000$  程度となる様に手段を講じることが有効であるものとする。

### 5.4.3 まとめ

水理模型実験の結果分析と画像撮影の対象とする雨水吐き室の結果分析をもとに制御板で生成される渦の大きさである渦径と制御板と壁で囲まれた範囲の水の流れのレイノルズ数(Re)の関係から以下の結果を導き出した。

- (1)画像撮影の対象とした雨水吐き室の画像から、下水が雨水吐きに流入する際の波の影響を取り去ることで、浮遊物を渦の流れで集めることができる範囲を渦に浮遊物を取り込まれることで生じる速度の増加から把握することが可能である。なお、渦の流集範囲は、渦に向かって流れ込む浮遊物の速さの影響は受けない。
- (2)水理模型実験と画像撮影の対象とした雨水吐き室の分析結果から、制御板で生成される渦の大きさである渦径は制御板と壁で囲まれた範囲の水の流れのレイノルズ数(Re)との相関が確認された。
- (3)浮遊物を取り込むことができる渦の流集範囲は、 $Re=30,000$  から  $Re=40,000$  の間ではらつきはあるものの、概ね渦の大きさに比例して拡大する。
- (4)水理模型実験と画像撮影の対象とした雨水吐き室の分析結果から、レイノルズ数(Re)が  $Re=40,000$  程度で流集効果のある渦は最大の大きさとなる。
- (5)画像撮影の対象とする雨水吐き室からの浮遊物の放流を抑制するためには、越流開始直後( $H=0.470\text{m}$ )に浮遊物を引込むことが可能な大きな渦を生成させられるように制御板の設計・施工段階で、制御板と壁で囲まれた部分の水の流れのレイノルズ数(Re)を  $Re=35,000$  から  $40,000$  程度とするような構造とすることが望ましいと考えられる。
- (6)しかし、レイノルズ数の算定に用いた式 5.3 (本稿 pp5-23) はダクトなどの閉鎖空間を想定した式であることから、制御板で囲まれた中での渦流の評価に適用することについての、更なる研究が必要とした。

## 5.5 流体解析による浮遊物の引込みに関する検証

### 5.5.1 目的

本稿 5.3 の水理模型実験の結果を元に、流体解析手法を用いて制御板の近傍の水の流れとその流れの速度の状況を再現することを試みた。渦流発生状況を再現した上で、水平 2 方向に加え鉛直方向の速度分布など、3次元の水の流れを把握することで、渦流の発生状況やきょう雑物の引込み状況について評価を行うことを目的とする。

### 5.5.2 解析モデルと解析条件

#### (1) 検討フロー

流体解析実施の検討フローを図 5.16 に示す。

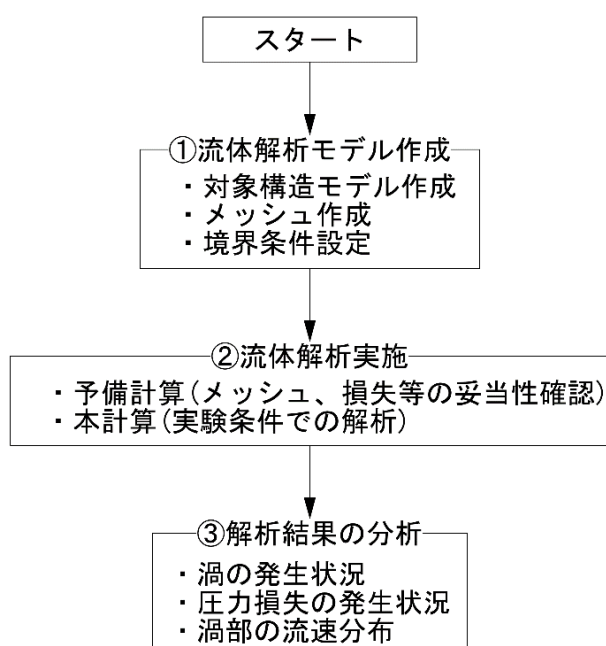


図 5.16 流体解析の検討フロー

#### (2) 解析ソフト

解析を行うに当たっては、3次元流体ソフト「PHOENICS」<sup>6)</sup>を使用し、VOF法を用いた自由表面モデルを適用した。

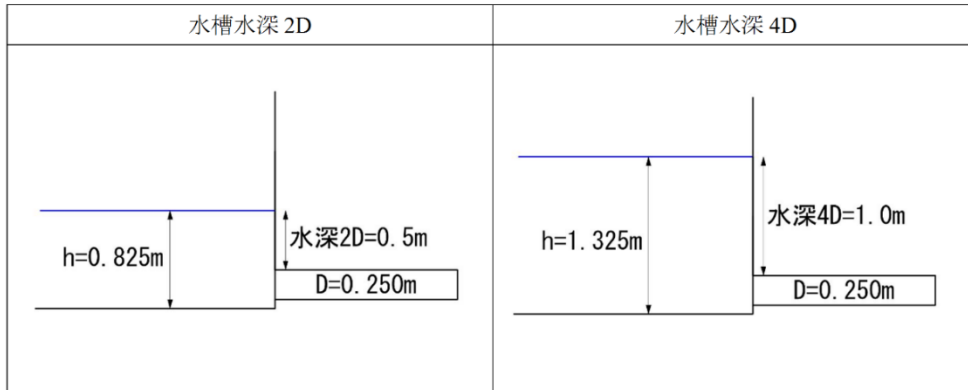
#### (3) 流体解析の実施ケース

解析対象とする水理条件は、実験結果をもとに「渦の安定性」、「引込み力の強さ」を考慮して、渦流の勢いが顕著なケース 80L・2D（ケース 1）および渦流の勢いが低下したケース 80L・4D（ケース 2）の 2 ケースを解析対象として選定した（表 5.17, 表 5.18）。

表 5.17 解析ケース

	流量	水槽水深	計算時間
ケース 1	80 l/s	2D(遮集管管頂から水深 0.5m)	2 分程度
ケース 2	80 l/s	4D(遮集管管頂から水深 1.0m)	3 分程度

表 5.18 水槽水深



(4)流体解析モデル作成

解析対象とする水面制御装置は、水理模型実験により水理的機能を検証した施設形状とする。作成した構造モデルを図 5.17 に示す。検討ケースにより水槽側（上流側）水深が異なるため、構造モデルもケースごとに作成した。

メッシュ作成においては、メッシュ間隔が細かいほど水理現象の再現性は向上する一方で、解析時間が長くなるため、適切なメッシュ間隔の設定が必要となる。そのため、渦の発生する範囲においては細かく、その他の範囲においては粗くするように設定した。メッシュの最大・最小間隔を表 5.19 および表 5.20 に示す。

また、構造モデルと同様にケース 1 とケース 2 では、水槽水深が異なるため、メッシュ構造もそれぞれ設定した。ケース 1 のメッシュ構造を図 5.18 に示す。

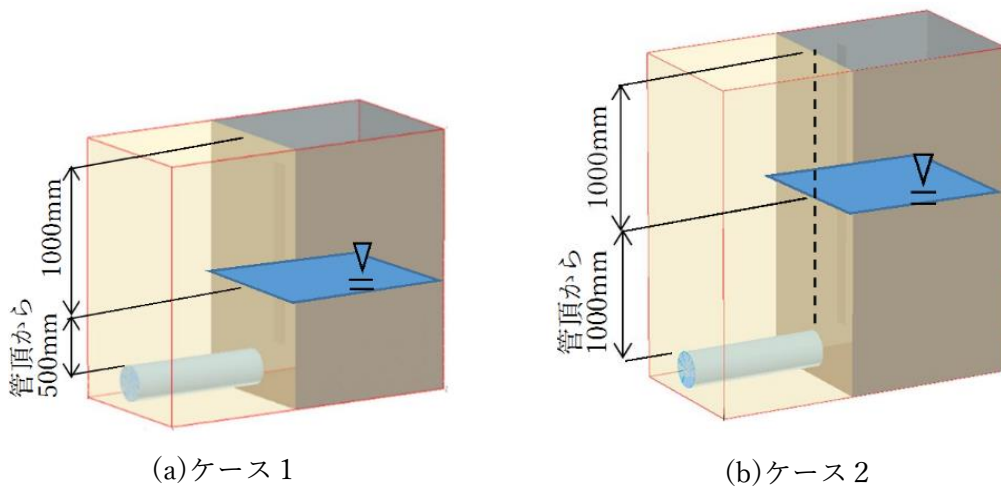


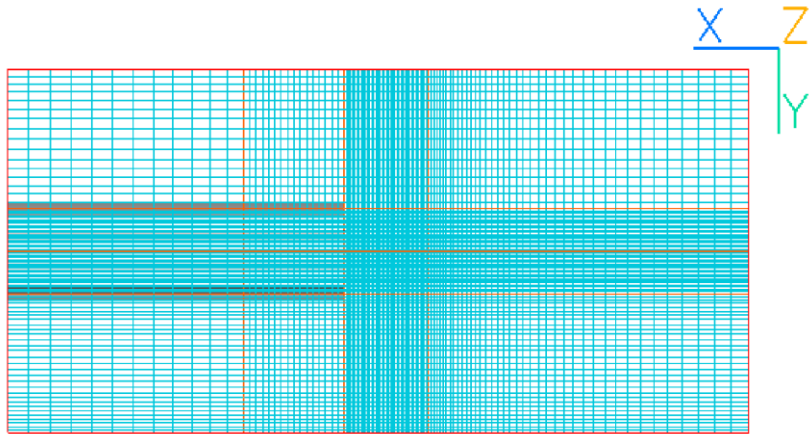
図 5.17 作成した構造モデル

表 5.19 メッシュ分割数と最大・最小間隔 (ケース 1)

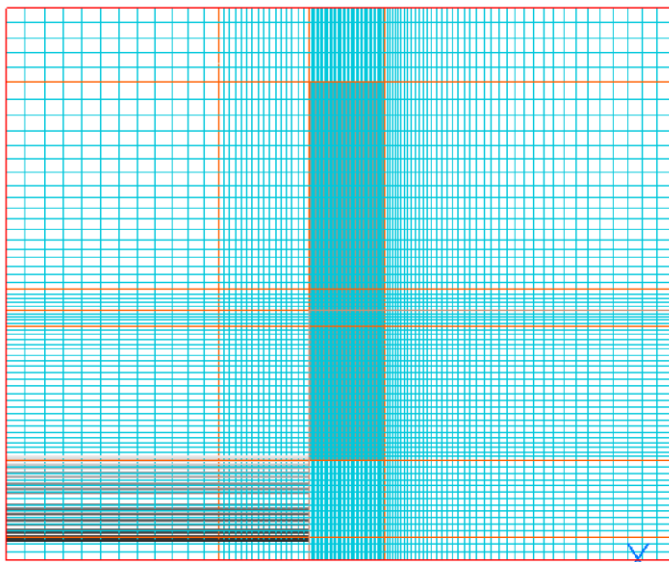
	分割数	最小メッシュ間隔	最大メッシュ間隔
x 方向 (流下方向)	108	5 mm	52mm
y 方向 (幅方向)	86	6mm	31mm
z 方向 (鉛直方向)	72	10mm	56mm

表 5.20 メッシュ分割数と最大・最小間隔 (ケース 2)

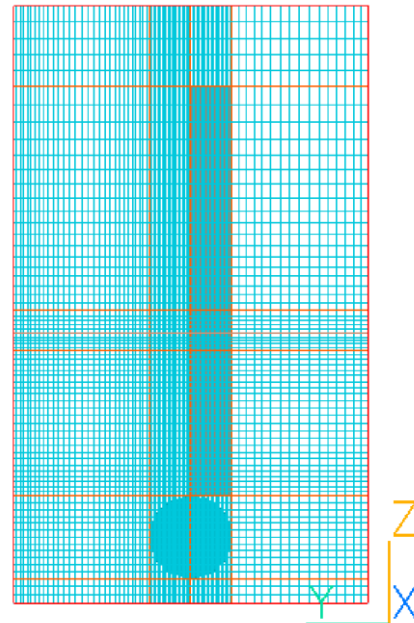
	分割数	最小メッシュ間隔	最大メッシュ間隔
x 方向 (流下方向)	108	5mm	52mm
y 方向 (幅方向)	86	6mm	31mm
z 方向 (鉛直方向)	84	10mm	56mm



(a)X-Y 方向



(b)X-Z 方向



(c)Y-Z 方向

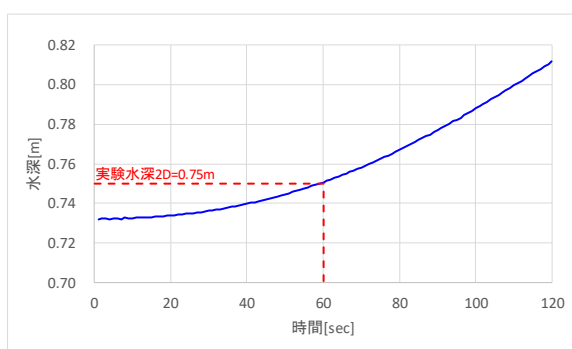
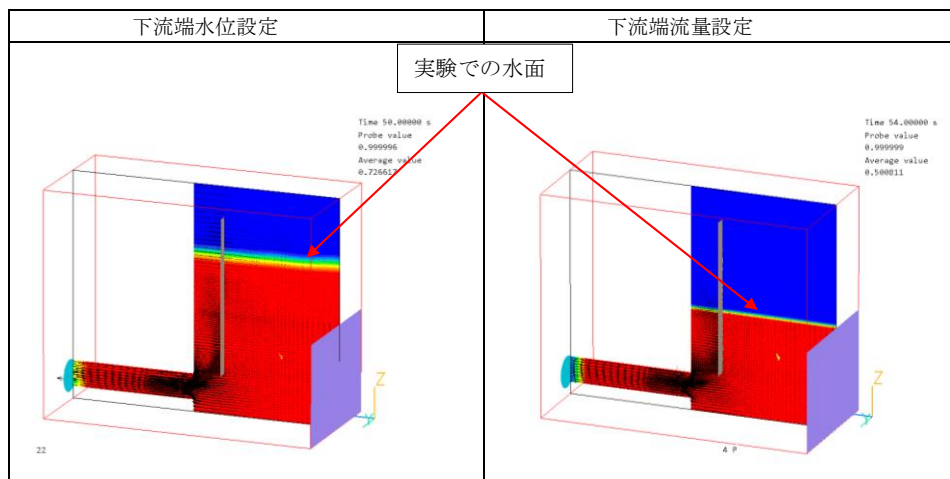
図 5.18 ケース 1 のメッシュ分割

(5)解析条件の設定

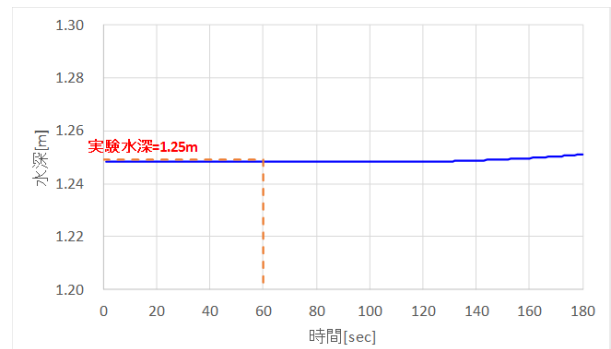
解析では、上流端で流量、遮集管下流部で実験水位を与えて解析を実施した。結果として、計算時間を長くしても、水槽水深が大きくなりすぎ、実験結果との比較検証ができない結果となった(表 5.21)。そのため、下流端条件を水位設定ではなく、上流端での流量と同じ流量が流下する条件として解析を実施した。

下流端を流量設定とした場合、下流端水位設定とした場合に比べて、水槽水深の過剰な上昇は低減されることが確認された。一方で、下流端流量設定とした場合において、時間とともに水槽水深は上昇してしまうことが確認された。理由としては、解析内での誤差が累積してしまうためと考えられる。解消するための対策としては、圧力の収束精度(反復計算回数)をより高精度とする必要があるが、解析時間が非常に長くなるため、以下の検討では、下流端流量設定とし、水槽水位が概ね実験と同程度となった場合(ケース 1, ケース 2 ともに 60 秒後)の計算結果をもとに、実験との比較検証及び解析結果の分析を行った(図 5.19)。

表 5.21 下流端条件の設定の違いによる計算結果



(a)ケース 1



(b)ケース 2

図 5.19 水槽水深の時間変化(下流端流量設定)

### 5.5.3 流体解析結果

#### (1) 渦流発生状況

渦流発生状況については、水面における流速分布を実験と解析で比較検証した。水理模型実験時の流速分布については、実験時の映像を画像解析ソフトウェア「Move-Tr/2D Flow-PTV」<sup>4)</sup> (以降 PTV と表記) を用いて、あるタイミングでの各メッシュ (座標データ) の流速 (X,Y 方向) を数値データとして取り出した。

図 5.20 および図 5.21 に水理模型実験映像及び解析モデルより取り出したデータのイメージを記載する。

始点x	始点y	終点x	終点y	速度:cm/s	角度:度	X速度:cm/s	Y速度:cm/s
55	40	54.996	40.87	3.397	90.263	-0.016	3.397
730	40	727.765	39.92	8.737	182.043	-8.732	-0.311
40	55	39.996	55.855	3.339	90.237	-0.014	3.339
715	55	713	55	7.812	180.000	-7.812	0
865	55	864.021	55.131	3.859	172.355	-3.824	0.513
880	70	879.019	70.166	3.886	170.370	-3.831	0.65
880	75	879.035	85.144	3.811	171.499	-3.760	0.533
95	75	957.93	85.024	11.444	0.468	11.444	0.468
97	75	973.487	85.014	13.619	0.238	13.619	0.238
985	85	988.104	85.017	12.127	0.311	12.126	0.066
460	100	453.702	100.107	24.606	179.027	-24.602	0.418
475	100	466.167	100.066	34.506	179.573	-34.505	0.257
610	100	608.832	100.095	4.577	175.370	-4.562	0.369
625	100	627.341	99.632	9.257	351.066	9.145	-1.438
640	100	642.183	99.657	8.633	351.063	8.528	-1.341

図 5.20 FolwPIV による水理模型実験測定結果 (数値データ)

ZPOS	0.8687				
XPOS	YPOS		UP	VP	WP
7.88E-01	4.18E-01	0.00E+00	1.18E-02	2.03E-02	-3.03E-04
7.88E-01	4.24E-01	0.00E+00	1.24E-02	2.09E-02	-2.89E-04
7.88E-01	4.31E-01	0.00E+00	1.29E-02	2.14E-02	-2.93E-04
7.88E-01	4.37E-01	0.00E+00	1.35E-02	2.19E-02	-2.91E-04
座標データ	1	0.00E+00	1.35E-02	2.19E-02	-2.91E-04
	1	0.00E+00	1.35E-02	2.19E-02	-2.91E-04
7.88E-01	4.56E-01	0.00E+00	1.52E-02	2.32E-02	-9.07E-04
7.88E-01	4.62E-01	0.00E+00	1.58E-02	2.37E-02	-7.70E-04
7.88E-01	4.68E-01	0.00E+00	1.63E-02	2.42E-02	-4.89E-04
7.88E-01	4.74E-01	0.00E+00	1.68E-02	2.45E-02	-3.14E-04
7.88E-01	4.81E-01	0.00E+00	1.74E-02	2.47E-02	-2.61E-04
7.88E-01	4.87E-01	0.00E+00	1.79E-02	2.49E-02	-2.70E-04

図 5.21 解析モデルでの測定結果



図 5.20 及び図 5.21 に示す実験での数値データ及び解析モデルでの数値データより、流速分布図を作成したものを図 5.22 および図 5.23 に示す。各ケースにおける解析モデル及び水理模型実験の流速コンターの比較から、渦の生成位置及び渦径（遮集域）については、解析によっても実験の流況を概ね再現できていることが分かる。

流速分布に一部差異がみられる原因としては以下の要素が考えられる。実験時の動画について PTV 解析を行う際に、真上から撮影した動画においても歪みが生じるため、スケール換算時にやや精度を欠いている（図 5.24）。模型への給水の際に発生してしまう流入流速の及び波の影響により、計測流速に乱れが生じている。これらの要素から、やや流速値に差はみられるものの、概ね渦の発生状況は再現できていると、定性的な評価は可能であると考えられる。

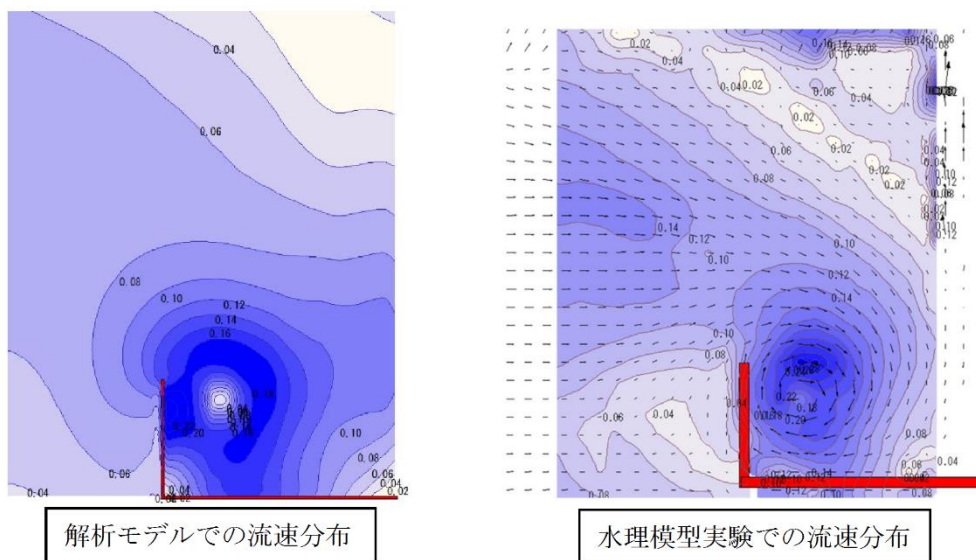


図 5.22 水面付近の流速分布コンター（ケース 1）

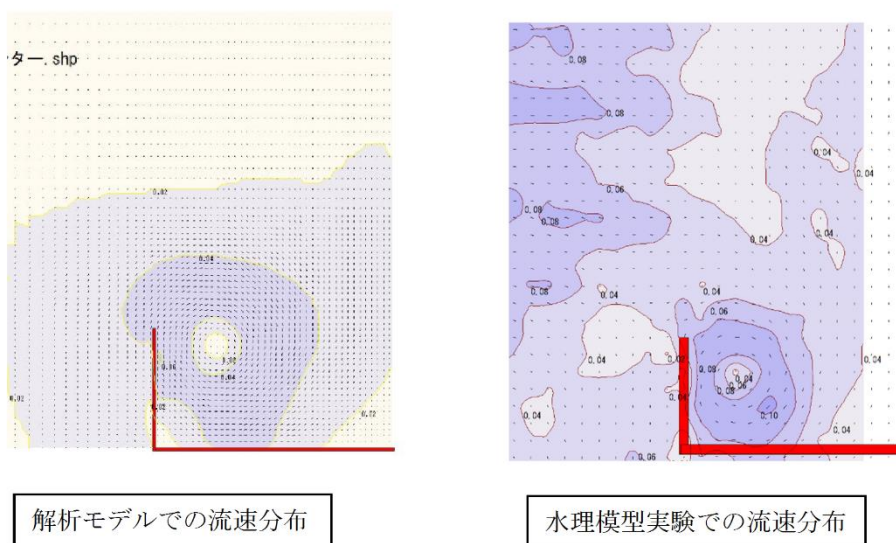


図 5.23 水面付近の流速分布コンター（ケース 2）

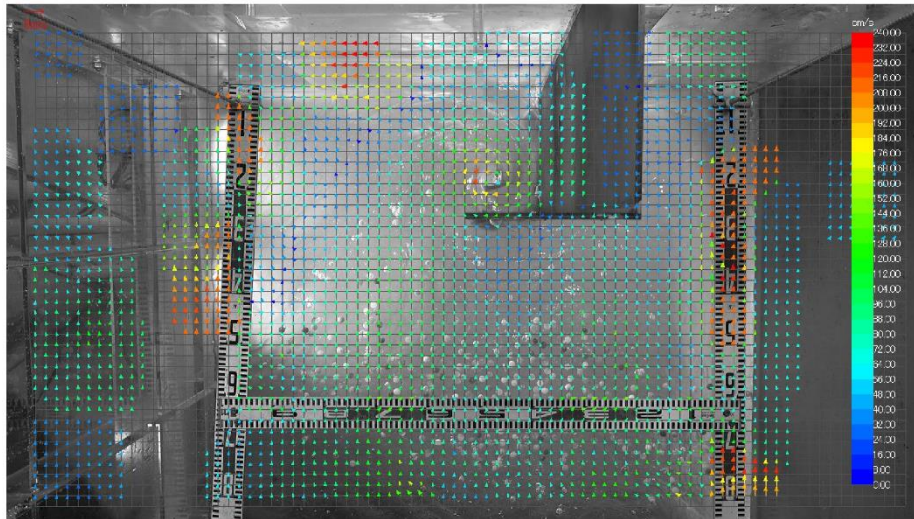


図 5.24 実験動画の PTV による解析結果

(2) ケース 1 (80L・2D), ケース 2 (80L・4D)の流速分布

解析結果による各メッシュ中央部の流速データを整理し、水槽水深の違い(2D と 4D)による鉛直方向の渦の流速分布特性を整理した。

整理の方法は、解析結果の水面近傍での水平流速分布から、渦の中心を推定し(図 5.25)、渦中心から制御板までがおよそ 5cm であることから、渦の中心を中心とする 1 辺 10cm 範囲を対象に(図 5.26)、高さ z ごとの鉛直流速平均値および水平流速平均値を算定した。

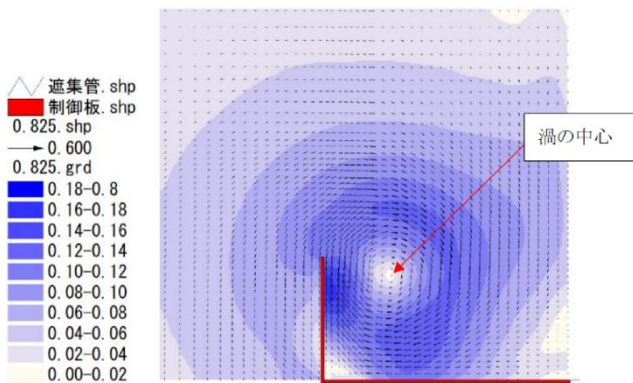


図 5.25 CFD 解析結果による水面の水平流速分布

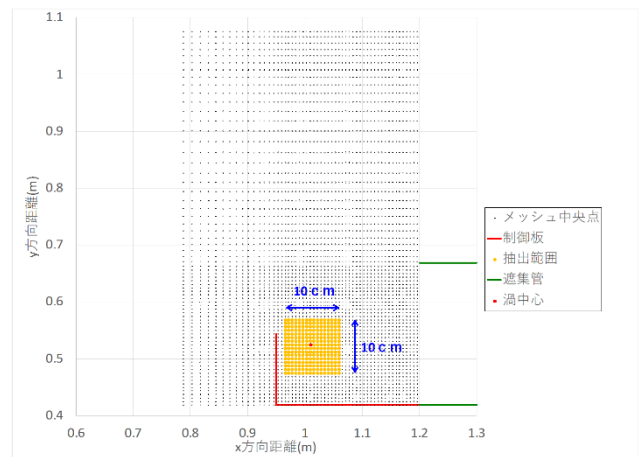


図 5.26 対象範囲

ケース1 (80L・2D)における，鉛直流速および水平流速の鉛直分布を図 5.27 に示す．鉛直流速は，水面から遮集管に向かい増加する傾向が見られる．標高 0.30m 以下で鉛直流速が低減するのは，渦の位置が遮集管方向へシフトし（表 5.22），鉛直流速の主流部が抽出した範囲外となるためと考えられる．

また，水平流速についても同様に，水面から遮集管に向かい増加する傾向が見られる．ここで，水平流速  $uv$  とは，水平流速  $u$  と  $v$  を合成した流速値である．

$$uv = \sqrt{u^2 + v^2}$$

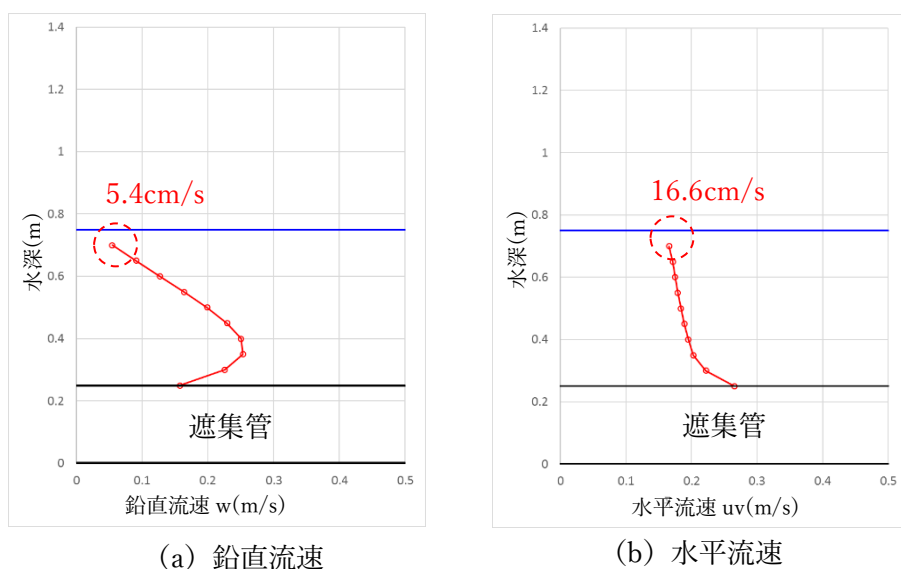
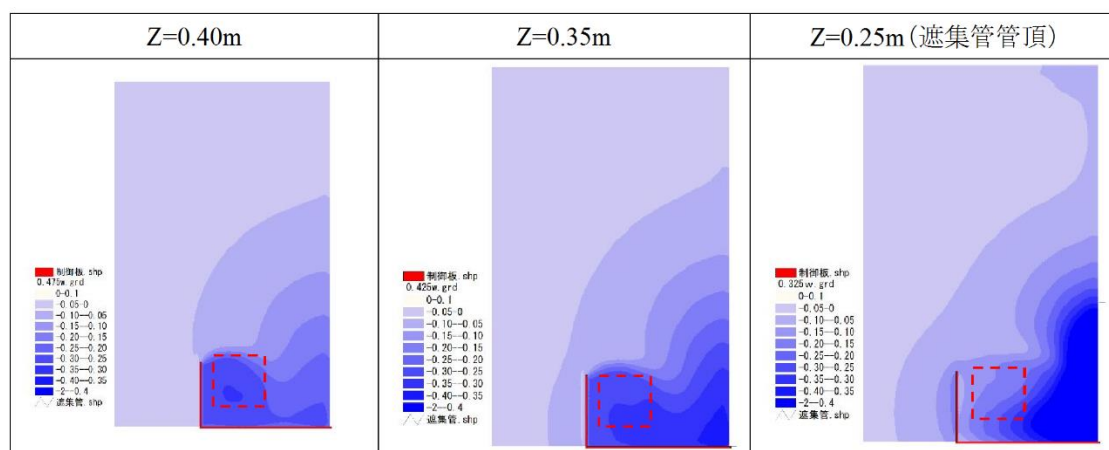


図 5.27 高さ Z ごとの鉛直流速および水平流速分布（ケース 1）

表 5.22 高さごとの鉛直流速分布（ケース 1）



ケース 2 (80L・4D)における鉛直流速，および水平流速の鉛直分布を図 5.28 に示す．鉛直流速は，水面から遮集管に向かい増加する傾向が見られる．

標高 0.30m 以下で鉛直流速が低減するのは，渦の位置が遮集管方向へシフトし，鉛直流速の主流部が抽出した範囲外となるためと考えられる．

また，水平流速についても，同様に水面から遮集管に向かい増加する傾向が見られる．

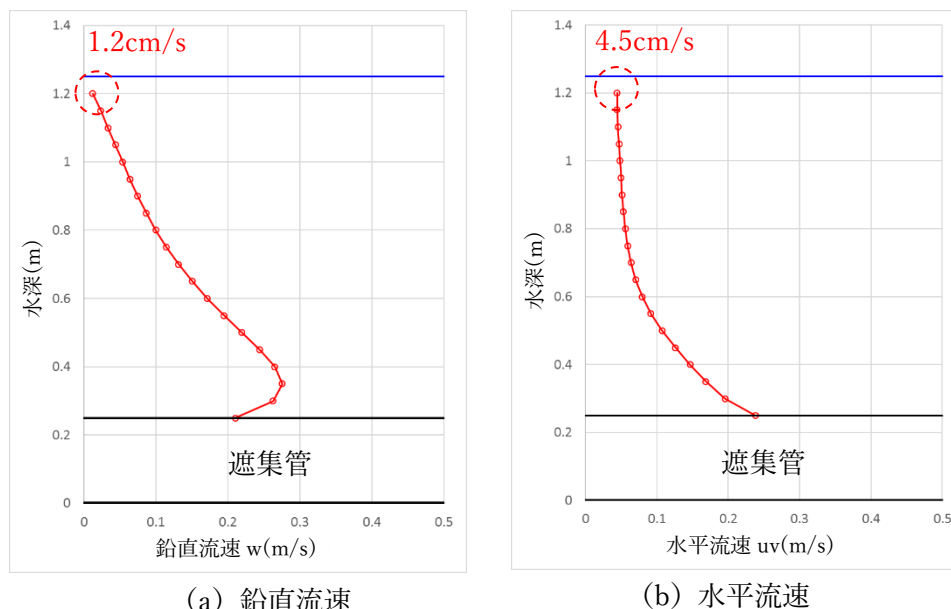


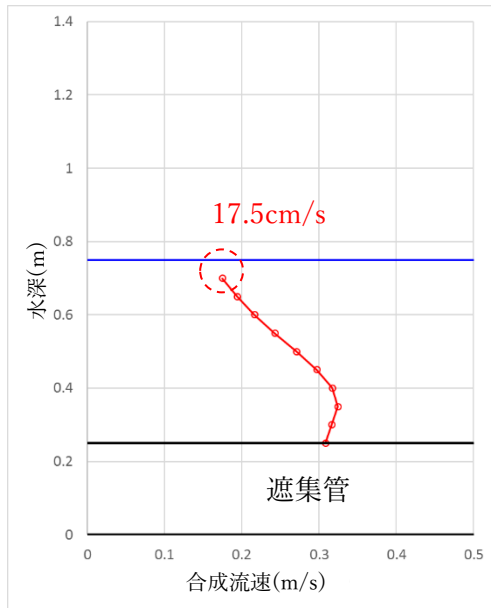
図 5.28 高さ Z ごとの鉛直方向流速および平面方向流速分布 (ケース 2)

ケース 1 (80L・2D)，ケース 2 (80L・4D)での高さごとの鉛直流速を比較すると，どちらのケースにおいても，水面付近から下方部に向けて流速が増加する傾向で概ね一致している．

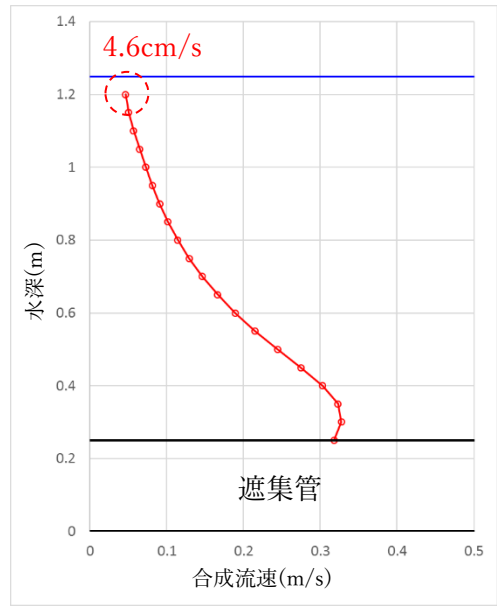
ケース 1 (80L・2D)の方がやや流速が小さいのは，水位が上昇中の結果を整理しているため (前述の境界条件設定を参照)，流量，流速が本来の流量，流速よりやや小さいことが原因で，本来は一致するものと考えられる．

水平流速を比較してみると，浮遊物の吸込み能力の高いケース 1 (80L2D)の方が，水面近くにおいても，水平流速が大きく保たれていることが確認できる．このことは，浮遊物を十分に吸込むための渦を発生させるためには，水面付近においてもある程度の水平流速を有していることが重要であると考えられる．

また，渦により螺旋状に遮集管に向かって降下していく流速 (以降「斜降流速」という)を表すためにケース 1 (80L・2D)，ケース 2 (80L・4D)での高さ Z ごとの鉛直流速と水平流速から合成流速を求め，その合成流速を斜降流速として図 5.29 に示す．ケース 1 (80L2D)の方が，水面近くにおいても斜降流速が大きく保たれていることが確認できる．



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図 5.29 高さ Z ごとの斜降流速の分布 (ケース 1、2)

### 5.5.4 浮遊物の引込み能力の評価

#### (1) 浮遊物の浮上速度の算定

浮遊物の引込み能力の評価にあたり、実験で使用した浮遊物モデルの沈降速度を算出した。球体としての一般的な沈降速度算定式としてストークス式 (式 5.4) <sup>7)8)9)</sup> やインパクト式 (式 5.5) <sup>7)8)9)</sup> が提案されている。球体の粒径が大きい場合にはインパクト式が適用される。

実験で使用した浮遊物モデル (直径 21mm, 比重 0.947) の沈降速度は、式 5.5 により、-0.181m/s と計算される。マイナスに計算さえることから、速度は浮上側に働くこととし、浮遊物モデルの浮上速度を 0.181m/s として評価することとした。(表 5.24, 図 5.30)

(ストークス式)

$$V = \frac{D^2(\rho_i - \rho_w)g}{18\mu} \quad \text{式 5.4}$$

(インパクト式)

$$V = \sqrt{\frac{3D(\rho_i - \rho_w)g}{\rho_w}} \quad \text{式 5.5}$$

V(m/s) : 沈降速度、D(m) : 浮遊物の直径

$\rho_w$ (kg/m<sup>3</sup>) : 水の密度、 $\rho_i$ (kg/m<sup>3</sup>) : 浮遊物の密度

g(m/s<sup>2</sup>) : 重力加速度、 $\mu$  (Pa・s) : 水の粘度

表 5.23 算定条件 (水温 10°Cでの条件)

$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	999.7
$\rho_i$ (kg/m <sup>3</sup> )	900.0
g(m/s <sup>2</sup> )	9.81

表 5.24 粒径ごとの浮上速度

粒径	ストークス式	インパクト式
D(m)	Vu1(m/s)	Vu2(m/s)
0.002	0.09	0.056
0.004	0.35	0.079
0.006	0.80	0.097
0.008	1.41	0.112
0.010	2.21	0.125
0.012	3.18	0.137
0.014	4.33	0.148
0.016	5.66	0.158
0.018	7.16	0.168
0.020	8.84	0.177
0.021	9.75	0.181
0.022	10.70	0.185
0.024	12.73	0.194
0.026	14.94	0.202
0.028	17.33	0.209
0.030	19.89	0.217

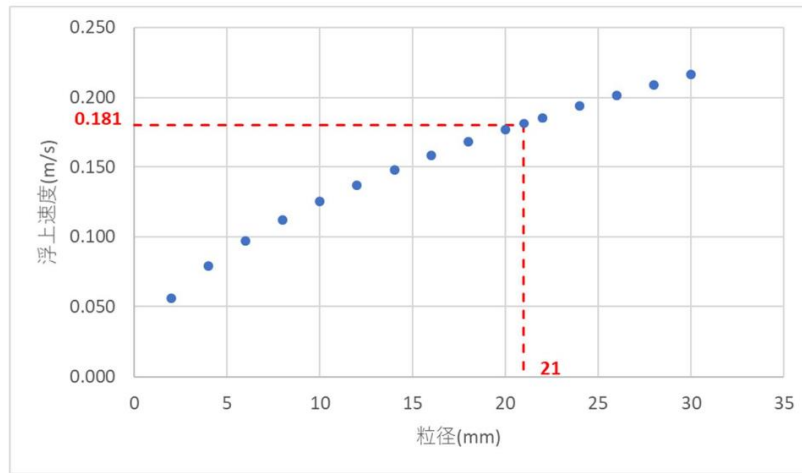


図 5.30 想定される粒径ごとの浮上速度 (インパクト式)

## (2)鉛直方向の流速（斜降流速）と浮遊物の浮上速度の関係

理論式（インパクト式）から算出した浮遊物モデルの浮上速度と、鉛直方向の流速（斜降流速）を比較することで、浮遊物が浮力により上昇する領域（上昇域）と下降流により沈降する領域（下降域）を表示した（図 5.31）。

水理模型実験において、浮遊物は、渦流内を螺旋状に旋回しながら、斜め下方向に引き込まれる状況を確認している（表 5.10(a)）。そこで、浮遊物は、鉛直方向の流速の他に水平方向の流速の影響を受けるものと考え、鉛直方向と水平方向から算出する合成方向の流速（斜降流速）によって引き込み能力を評価するものとした。

水理模型実験における、浮遊物の引き込み状況を写真 5.10 に示す。ケース 1 では、水面から遮集管までの全ての領域がほぼ下降域となり、水理模型実験において、多数の浮遊物が水面付近から次々に引込まれた現象と一致した。

遮集管から水面までの全水深において水深方向の速度が低下したケース 2 では、水深  $D_p=0.60\text{m}$  までは浮遊物に作用する浮力が卓越する上昇域となった。水理模型実験では、多数の浮遊物が遮集管にまで運ばれず、水面付近に漂っている現象が確認されたが、この現象は浮上方向の速度成分によるものと考えられる。

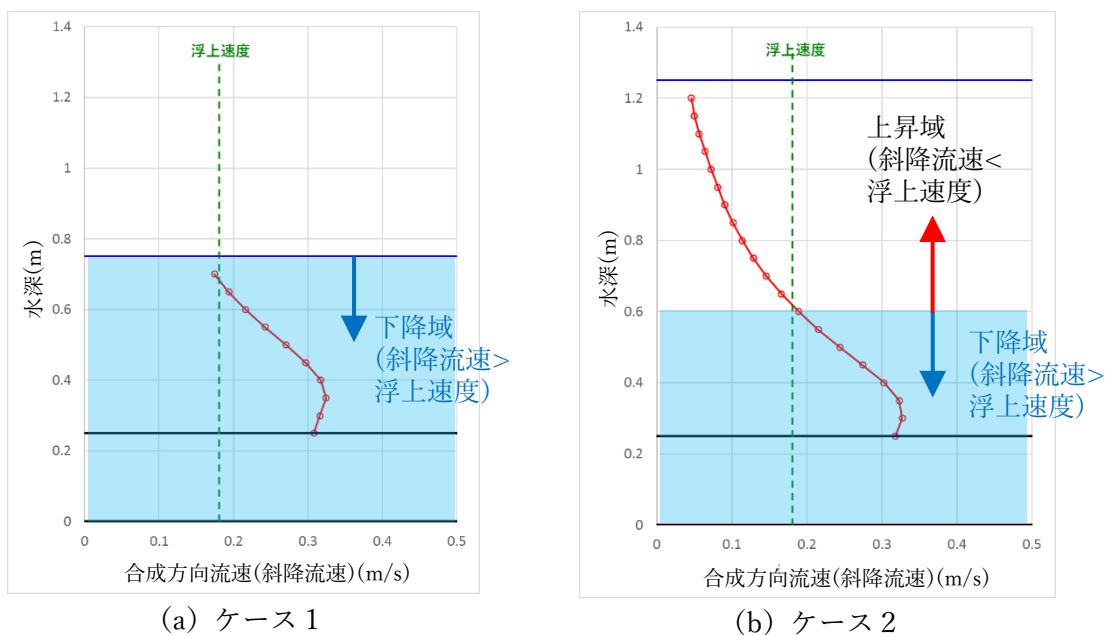
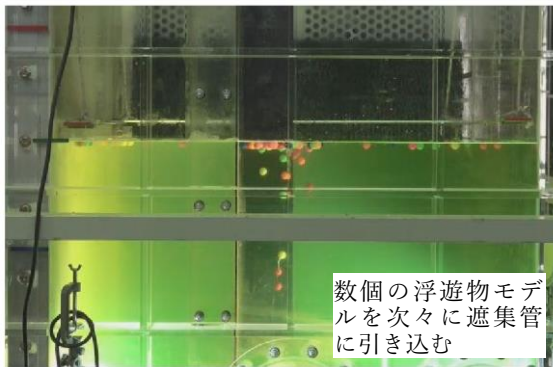
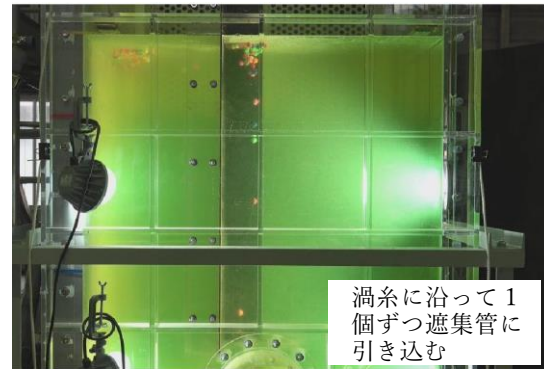


図 5.31 浮遊物モデルの上昇域と下降域





(a) ケース 1



(b) ケース 2

写真 5.10 水理模型実験における浮遊物モデルの引込み状況

### (3)水理模型実験結果における鉛直方向の速度分布との比較

流体解析結果より求めた鉛直方向の速度（斜降流速）について、水理模型実験結果から画像解析により求めた速度との比較を行った。

画像解析の方法は、前述した 5.4.2 雨水吐き室における渦径の評価と同様の方法とし、浮遊物の 1/30 秒毎の鉛直方向の移動距離を画像から計測している。

図 5.32 に、60L・2D、80L・2D、80L・4D のケースの水理模型実験結果における高さ Z ごとの鉛直方向の流速分布を示す。いずれのケースにおいても、鉛直方向の流速は、水面から遮集管に向かい増加する傾向が見られる。

次に、図 5.33 に実験結果と解析結果の比較を示す。ケース 1（80L・2D）では水面から 0.4 まで、ケース 2（80L・4D）では水面から 0.6 までほぼ重なっており、実験結果と流体解析結果の分布は近い傾向が認められる。

しかし、それ以降の水深では実験結果では引込み流速が大きくなるのに比べ、流体解析結果では引込み流速が小さくなっている。これは、遮集管の吸込み流速が実験では顕著に現れているものの、流体解析では条件に反映できていないことが大きな原因であると推察している。

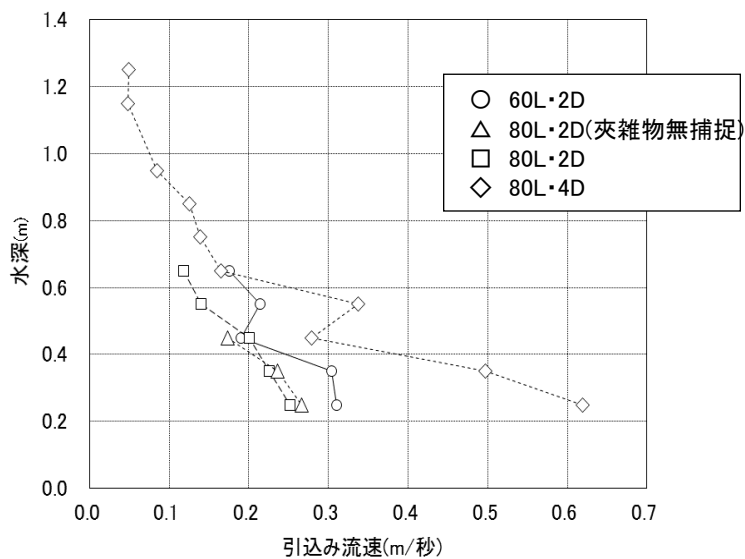


図 5.32 水理模型実験結果における高さ Z ごとの鉛直方向流速

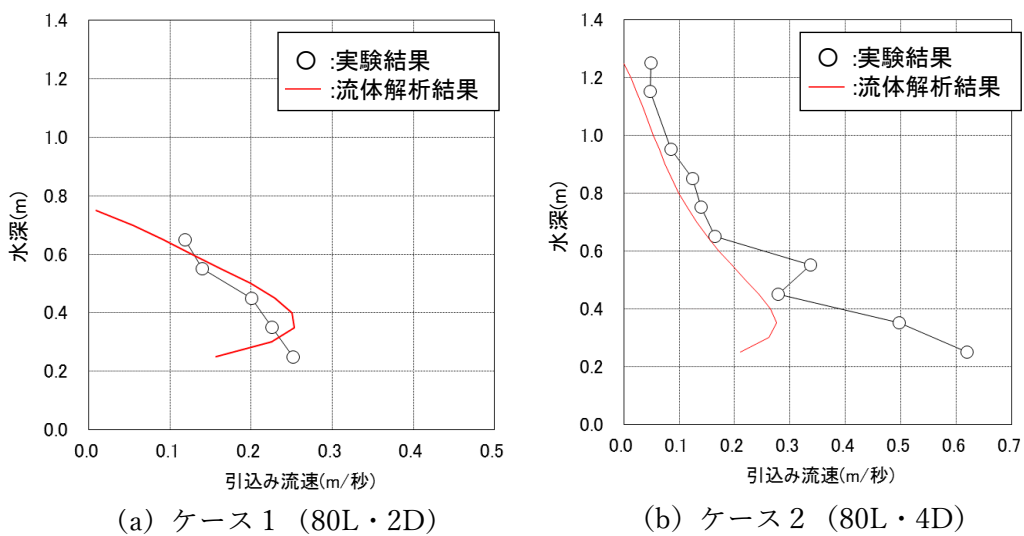


図 5.33 実験結果と解析結果の鉛直方向流速分布

#### (4) エアコア及び渦糸による浮遊物の引込みに関する考察

鉛直方向の速度による下降域が、浮遊物の引込み状況に影響を及ぼすことを評価した。しかし、水理模型実験では、上昇域がロートの底部以下に存在する場合でも、ロートの下部に生成される渦糸に沿って、浮遊物モデルは1個ずつ、遮集管に引込まれていることが観察された(写真 5.10(b))。これは、エアコアにつながる渦糸の内部では、空気が気泡として水に混じることで、見掛けの水の比重が低下し、浮遊物に作用する浮力が低下することで、上昇域を超えて浮遊物が遮集管へと引込まれるためと考えられる。

ここで、エアコアにつながる渦糸の長さなどは、下降域の大きさのほかに遮集管の吸込み速度に依存しているものと推察される。渦糸の生成は、浮遊物の引込み能力に大きく影響を及ぼすため、渦糸生成のメカニズムをさらに究明していくことが、渦流によって浮遊物を遮集管へと集め、送りこむための機能には重要な課題のひとつであると考えられる。

#### 5.5.5 まとめ

本節では、3次元で流体解析を行い、水理模型実験で観察された渦流発生状況を再現するとともに、その結果から、渦流の3次元の水の流れについて、詳細な分析を行った。

以下に分析から得られた事項を述べる。

- (1)渦流の勢いが顕著なケース1(80L2D)、渦流の勢いが低下したケース2(80L4D)を対象に実施した。解析結果は、水理模型実験で観察された渦流の生成位置や渦径などの発生状況と一致する傾向を示し、制御板で生成される渦と渦の近傍の水の流れが解析により明らかとなった。
- (2)解析結果より、水深方向の流速は、水深が深くなるほど(遮集管に近づくほど)鉛直方向の流速、水平方向の流速ともに大きくなる傾向を示すことが確認された。
- (3)また、ケース1の水面における水平方向の流速は、水位が高いケース2の3.5倍を超える流速であり、両ケースの浮遊物の引込み性能には大きな差が確認された。
- (4)次に、浮遊物の浮上速度を理論式から算出し、鉛直方向の速度分布と比較することで、浮遊物の上昇域と下降域の存在を提案した。なお、浮遊物の上昇域と下降域の区分は、水理模型実験における浮遊物モデルの引込み状況と整合することが確認できた。

本節の研究結果により、3次元流体解析を用いることで、制御板で生成された渦が浮遊物を集めて遮集管へと引き込む状況を評価することが可能であると言える。なお、3次元流体解析に遮集管の吸込み流速の条件を加味した研究を行うことで、更なる精度の高い検証ができ、浮遊物の削減効果が高い制御板の設置位置を設計段階で設定することを可能とするものと考えられる。

## 5.6 渦糸に関する検証

### 5.6.1 雨水吐き室における引込みの検証

水面制御装置の制御板で生成された渦流により浮遊物の遮集管への流集効果は、遮集管の管底と水面までの距離（水位）に大きく影響を受けることが推測された。このことは、Durgin,W,W と Hecker,D,E による「渦タイプ」の分類<sup>10)</sup>を基に渦流の輸送能力（渦の深さ方向の引込み力）の推定を試みた N.Voßwinkel の「渦の輸送能力は流出管中心から水面までの距離と水が流下する管のフルード数に依存する」<sup>11)</sup>とした研究結果からも類推された。

遮集管の吸込みによる渦流の生成から消滅までの現象は、ポンプの吸込水槽内に発生する空気吸込み渦の現象と類似している。

水槽で発生する渦は、ポンプ吸込み量の増大と水槽の水位（没水深）の低下で発生することが知られている。また、雨水吐き室に設置した制御板で生成される渦は、水深が漸増すると最大の渦径を示して徐々に縮小し、最後には消滅することが本研究より明らかとなった。本研究では、制御板による渦の生成には、制御板と壁で囲まれた部分の水の流れが大きく影響し、さらに生成される渦の状態はレイノルズ数(Re)で評価できることを明らかとした。

そこで、本研究から得られた知見が吸水槽で発生するポンプ吸込み渦の発生に関する研究に応用可能であるかの検討を目的として、ポンプ吸込み渦に関する既往の研究成果を吸水槽の水の流れをレイノルズ数(Re)変動の観点で整理した。

①レイノルズ数の値が高い場合：( )内は近藤ら<sup>13)</sup>の研究結果

制御板近傍の水の流れは激しい乱流状態となり渦は乱流により消滅する。もしくは生成困難な状態となる。（吸込み管に後壁を近接した場合、吸水管と後壁の間の水の流れが激しい乱流状態となり渦の生成に対する臨界水深が下げられる。）

②レイノルズ数の値が低い場合：( )内は近藤ら<sup>13)</sup>の研究結果

水深（没水深）が大きい場合、水の流れは穏やかであり、流出量（吸込み量）が変化しない状態では、水槽内の平均流速の増加が抑えられ、水面は渦が生成されるような状態とはならない。

①と②の整理結果より、吸水槽の内部に発生する渦は、水槽内の水の流れとの関連性が確認され、その特性は制御板近傍の水の流れと似た挙動を示すものと考えられる。

また、このポンプ吸込み管の近傍に発生する渦流の研究は、渦流で形成されるエアコアからの空気をポンプ内に吸込むことを防ぐ目的で行われている。ポンプ吸込み量（流速）とポンプ吸込管の水深の関係により渦流発生に及ぼす影響を近藤ら<sup>13)</sup>は、模型実験で検証した。図 5.34 に示す長方形吸水槽を用いた模型実験で図 5.35 の臨界没水深（渦流が発生しなくなる水位で、遮集管径の倍数で表している）と吸込管の流入速度及び後ろ壁までの距離の関係を提案した。さらに、模型の吸込管流入速度から実物の吸込管流入速度を予想する実験式<sup>13)</sup>を導き出している。

近藤らが導き出した実験式を用いて制御板により生成し消滅する渦流についての検討を試みた。

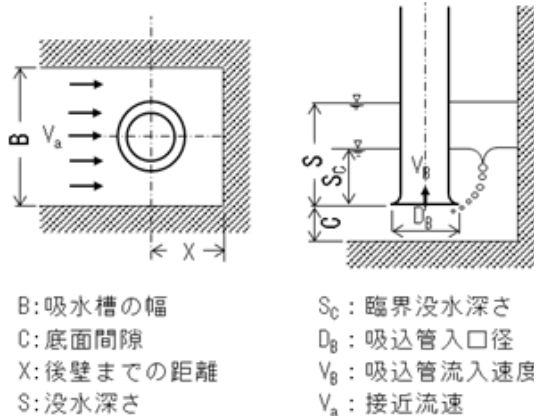


図 5.34 長方形吸水槽

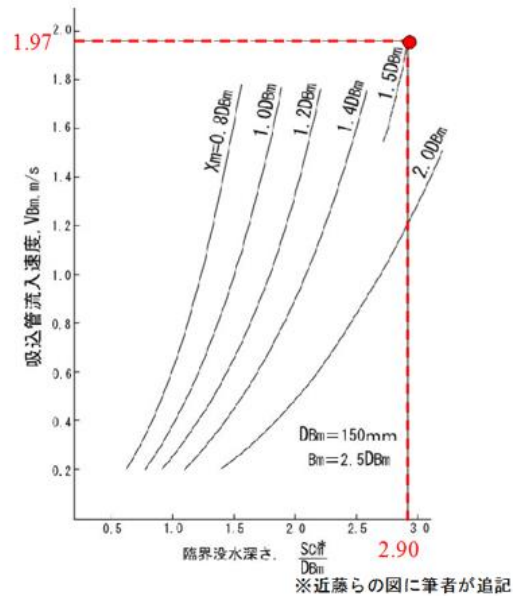


図 5.35 臨界没水深さと吸込管流入速度および後壁までの距離の関係

### (1) 遮集管の流量

ポンプ吸込み量（流速）とポンプ吸込管の水深の関係により渦流発生に及ぼす影響の実験式を適用するために、雨水吐き室の制御板、遮集管の構造形状を考慮し、図 5.36 に整理した。これを踏まえ、以下の条件で設定した。

- ・ 構造：オリフィス( $\phi 250$  mm) 吸込管径
- ・ 流量：オリフィス中心から水面までの距離

$H=0.675$ m で管内流速は  $2.18$ m/s, 流量は  $0.1072$  m<sup>3</sup>/s, 流出係数は  $C=0.6$  とした。

- ・ 模型と実物吸水槽の寸法変換

$$\frac{V_{Bm}}{V_{Bp}} = \left(\frac{D_{Bp}}{D_{Bm}}\right)^{-0.2} \quad (\text{A})^{13}$$

$V_{Bm}$ ：模型の吸込管流入速度

$V_{Bp}$ ：実物の吸込管流入速度

$D_{Bm}$ ：模型の吸込管流入径

$D_{Bp}$ ：実物の吸込管流入径

- ・ 後壁までの距離： $X=0.375$ m(制御板と遮集管口との離隔距離に遮集管の半径を加えたもの)
- ・ 計算の手順：実物と模型の管径比率を用いて試験で利用した模型の流速を算出し、吸水管流入速度から臨界没水深さを求めている
- ・  $X_m=X/D_{Bp}$ : 図 5.35 の  $X_m$  ラインから求める
- ・ ポンプの吸込み実験条件と雨水吐き室の制御板設置条件の関係を図 5.36 に示す。この図

より(A)式の係数を雨水吐き室の水面制御板の係数とする。

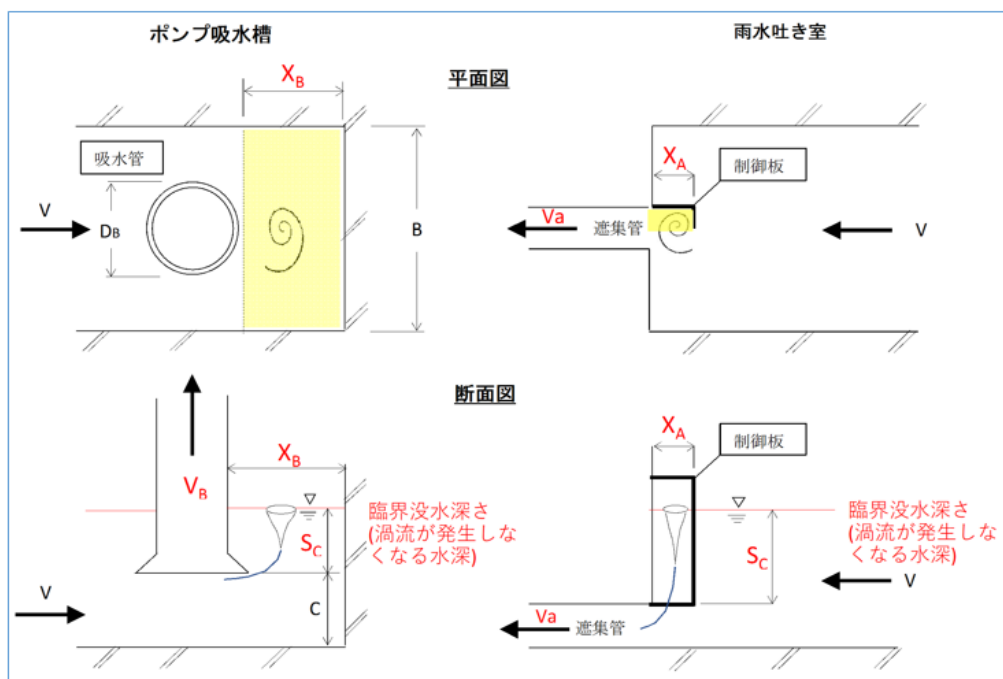


図 5.36 ポンプ吸込み実験条件と制御板設置条件の関係

## (2) 臨界没水深さと渦流の生成の相関に関する検討

近藤らの研究成果を用いた検討より導き出された結果は以下の通りである。

式(1)による結果は、吸込管流入速度  $V_{Bm}=1.970\text{m/s}$ 、 $X_m=1.50B_m$  となった。しかし、この結果は図 5.35 中に適用できる  $X_m=1.50B_m$  ラインがないことから、ラインの近似値を求め  $X_m=1.50B_m$  ラインを新たに推定し図 5.35 中に追加した。

本装置により生成される渦流が消滅する水位は管径の約 2.9 倍となった。つまり、渦流消滅の水位は遮集管の中心から水面までの距離  $=0.725\text{m}$  となり、遮集管底からの水位は  $H=0.850\text{m}$  となった。これは画像で確認される渦流が消滅した水位 (写真 5.11 参照) である  $H=0.800$  (遮集管底) とほぼ近い値を示している。

以上により、制御板で生成された渦流の消滅水位と遮集管の吸込能力 (オリフィス計算による流速) との関係については、ポンプにおける水位と吸込流速の関係に類似していることが示唆された。

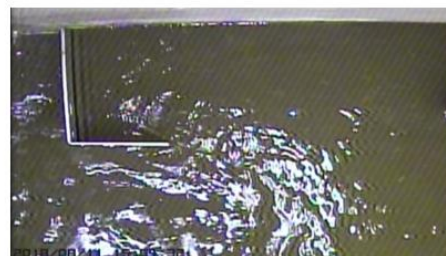


写真 5.11 渦流が消滅 ( $H=0.800$ )

### 5.6.2 まとめ

本節の雨水吐き室での検証より，以下の結果を導き出した<sup>13)</sup>。

- ・本装置により生成され，消滅する渦流の水位と遮集管の関係は，ポンプによる吸込み水槽で発生する空気吸込み渦についての多くの研究成果<sup>11)</sup>と類似することが分かった。これは，今後本装置による浮遊物の流出抑制機能の向上を設計段階で検討を可能とすることを示唆している。
- ・吸込管流入速度を予想する実験式で求めた遮集管の吸込み流速は，渦糸の引込み力として取扱うことが可能と考える。

## 5.7 結論と設計法の提案

実験やこれまで設置した水面制御装置から、制御板により生成された渦流（渦の大きさを渦径とする）に浮遊性のきょう雑物（浮遊物）が流れ込み、さらに螺旋状のロートに引込まれて下降し、渦糸（引込み力）により浮遊物が遮集管に吸込まれることを確認した。

この現象を踏まえた渦流モデル（図 5.37）を設定し、渦流の3段階ごとに検証した結果は以下に示す。

### (1) 浮遊物が渦径に流集される検証結果

- ・制御板で生成される渦流は、水深が増加するとともにその大きさ（渦径）は減少すること、水量の増加に伴い水位が上昇することにより平均流速も減少することなど、水量と水深が相関して変化することを実験で確認された。
- ・水の流れの状態を評価するレイノルズ数 (Re) により、渦流の発生状況を評価することを試みた。その結果、水位の上昇に伴い平均流速が減少することによりレイノルズ数は減少し、レイノルズ数と渦径の大きさの変化に相関があることを確認した。
- ・レイノルズ数 (Re) = 30,000~40,000 では、流集効果のある安定した渦径であると評価できる。また、Re=50,000 では、渦径は不安定な状態となる。
- ・既設の雨水吐き室では、水面は波により上下に変動していることから画像処理を行い、渦径の大きさを把握した。この渦径と実験から求めたレイノルズ数と相関があることが確認できた。浮遊物を取り込める渦の大きさは Re=30,000~40,000 と判断され、実験で求めた流集効果のある安定した渦径と評価できるレイノルズ数と同様の結果である。
- ・制御板の設計に際しては、壁と制御板とで囲まれる水の流れを Re=40,000 程度にすることが望ましい。

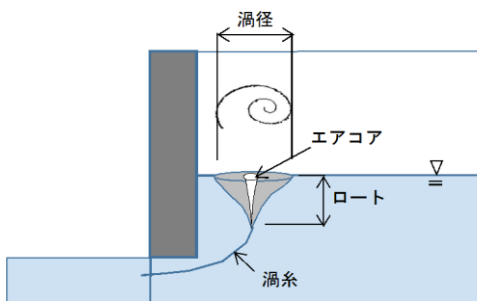
### (2) 浮遊物が螺旋状のロート部に引込まれる検証結果

- ・実験からロートの中心部にはエアコアがあり、このエアコアの周辺を浮遊物が螺旋状に下降していくことを確認した。
- ・渦流の発生状況や浮遊物の引込み状況を把握するために、3次元流体解析モデルを設定した。結果は以下のとおりである。
- ・水深方向の流速は、水深が深くなるほど（遮集管に近づくほど）鉛直方向流速と水平方向流速ともに大きくなる傾向にある。
- ・浮遊物の浮上速度を算出し、鉛直方向の流速と比較した結果、浮遊物の上昇域と下降域が求められる。つまり、浮遊物が下降する条件としては「流速（引込み力）>浮上速度（浮遊物の浮力）」であり、「流速（引込み力）<浮上速度（浮遊物の浮力）」の場合、浮遊物はロート底部に留まるか、あるいは水中へと引込まれて沈降と浮上を繰り返すことになる。
- ・3次元流体解析を用いることで、制御板と壁で囲まれた部分の流れのベクトルを明らかとすることができる。さらに、流れのベクトルの鉛直方向成分を評価することで上昇域と降下域を区分することが可能となる。

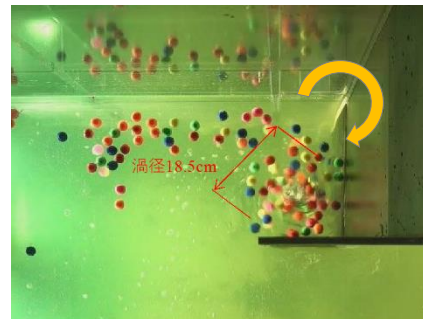


### (3) ロート部に引込まれた浮遊物を遮集管に吸込む渦糸の検証結果

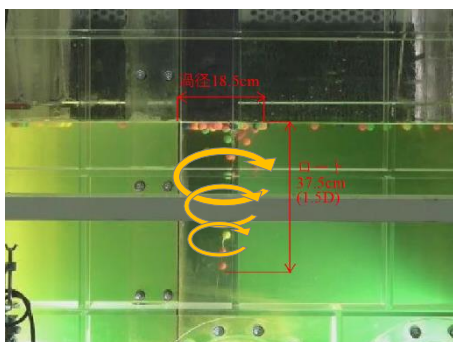
- ・ロート底部に浮遊物モデルが達するとロート底部に繋がった渦糸に引き込まれて一個ずつ、あるいは連なって、遮集管へと運び込まれていく。なお、浮遊物がロート内に捕らえられると渦糸の引込み力が低下して、降下沈降中の浮遊物が上昇に転じるといった現象が確認された。
- ・エアコアに繋がる渦糸は高速で回転しているため、エアコアにある空気を内部に気泡状に連行する。このため、旋回する渦糸周辺の水の見掛けの比重は軽くなり、浮遊物の浮力を低下させることになる。浮力の低下は、浮遊物の遮集管への送り込みを容易なものとするとの考察を行った。
- ・遮集管に吸込む力は、ポンプの吸込み水槽内に発生する空気吸込み渦の現象と類似していると想定し、提案されている吸込み管の流入速度を予測する実験式で検証した。
- ・結果、遮集管の吸込み流速や渦流の消滅水位高の算出には、提案されている実験式を適用することが可能であり、水面制御装置の設計段階で渦糸の引込み力を算定し、その効果を検討することが可能であることが示唆された。
- ・渦ロートに繋がる渦糸の引込み力を渦の回転速度(接線)と制御板周辺の水の流れとの相関から明らかにすることで、渦が安定して浮遊物を遮集管へと送り込む手法を確立する必要がある。



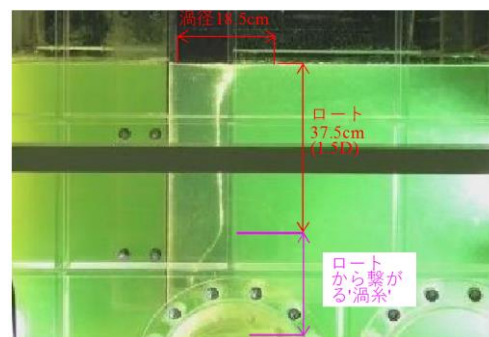
(a) 渦流モデル



(b) ①浮遊物が渦径に流集される



(c) ②浮遊物が螺旋状のロート部に引込まれる



(d) ③ロート部に引込まれた浮遊物を遮集管に吸込む渦糸

図 5.37 渦流による浮遊物の引込みメカニズム

#### (4)提案する新たな設計法

渦流の生成と浮遊物の引込みメカニズムにより新たな設計法を以下に提案する。

この設計法により設計段階で渦流の発生状況，浮遊物の引き込み状況が把握でき，設計の合理化・省力化，きょう雑物削減効果の向上が図られ，事後検証の合理化に貢献できるものとする。

#### <設計法>

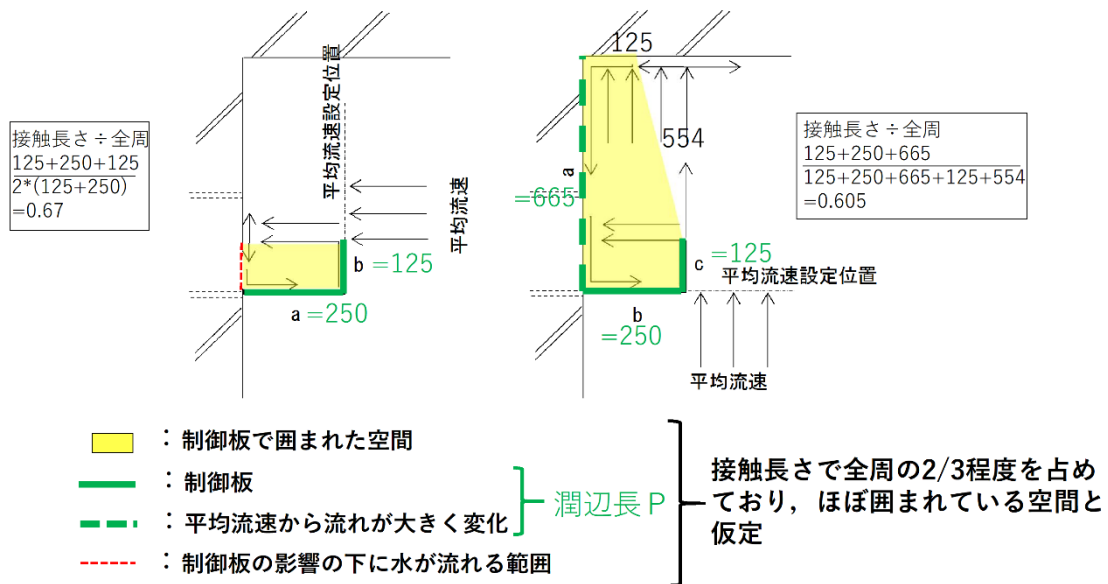
第3章の3.4.3で示した標準設計法で制御板の大きさ（幅，長さ）や位置を基本設計し，以下の設計法で検証する。

1) 制御板の設計に際しては，壁と制御板とで囲まれる水の流れをレイノルズ数(Re) 35,000から40,000程度となるよう，下記式により制御板の位置や幅を設計，又は標準設計による制御板の効果を確認する。

$$Re = \frac{vDH}{\nu}$$

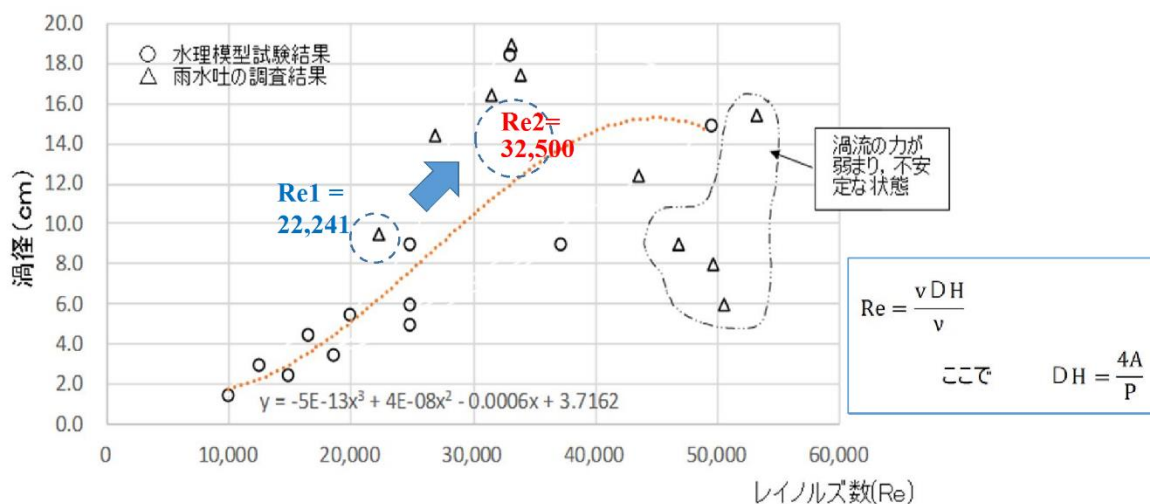
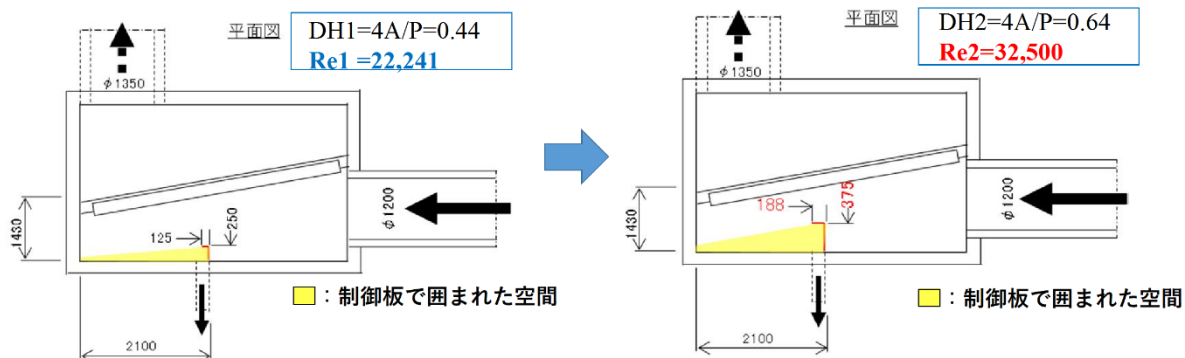
ここで  $DH = \frac{4A}{P}$

- Re：レイノルズ数
- v：相対的な平均流速(m/s)
- $\rho$ ：密度(kg/m<sup>3</sup>)
- L：物体が流れた距離(m)
- $\mu$ ：粘性係数(kg/ms)
- $\nu$ ：動粘性係数(0.01 cm<sup>2</sup>/s→10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s)
- A：流下断面積(m<sup>2</sup>)→制御板で囲まれた矩形面積
- P：潤辺(m)→制御板の断面長



5.4.2 雨水吐き室における渦径の評価の内容で、具体例を示す。

雨水吐き室には、 $L1=250\text{mm}$ ,  $L2=125\text{mm}$  の制御板が設置されており、水深  $H=0.397\text{m}$  のときのレイノルズ数  $Re1=22,241$  である。例えば、制御板寸法を  $L1=375\text{mm}$ ,  $L2=188\text{mm}$  とすることで、レイノルズ数  $Re2=32,500$  となり、渦径を大きくする、すなわち浮遊物の遮集効果を高めることが可能となる。



2) 浮遊物の浮上速度と鉛直方向の流速と比較し、「流速（引込み力）＞浮上速度（浮遊物の浮力）」となるように水面制御装置を設計，又は標準設計による制御板の効果を確認する。

ア) 浮遊物の浮上速度

浮遊物の浮上速度は以下の沈降式として提案されているストークス式又はインパクト式で算定する。なお，ストークス式は浮遊物の流径が 63 μm 以下の場合，インパクト式は浮遊物の流径が 2 mm 以上の場合に適用されることから，雨水吐き室に流入する浮遊物の大きさ（3 mm 以上）を勘案するとインパクト式が該当する。

算出結果はマイナスとなるので，浮上方向の流速とする。

$$\begin{array}{ll}
 \text{(ストークス式)} & \text{(インパクト式)} \\
 V = \frac{D^2(\rho_i - \rho_w)g}{18\mu} & V = \sqrt{\frac{3D(\rho_i - \rho_w)g}{\rho_w}}
 \end{array}$$

ここで、Vu(m/s)は浮上速度、D(m)は夾雑物の直径、ρw(kg/m3)は水の密度、ρi(kg/m3)は夾雑物の密度、g(m/s<sup>2</sup>)は重力加速度、μ(Pa・s)は水の粘度である。

水温 10°C の場合，以下の条件となる。

ρw(kg/m3)	999.7
ρi(kg/m3)	900.0
g(m/s <sup>2</sup> )	9.81

参考：流径ごとの浮上速度は以下のとおりである。

粒径	ストークス式	インパクト式
D(m)	Vu1(m/s)	Vu2(m/s)
0.002	0.09	0.056
0.004	0.35	0.079
0.006	0.80	0.097
0.008	1.41	0.112
0.010	2.21	0.125
0.012	3.18	0.137
0.014	4.33	0.148
0.016	5.66	0.158
0.018	7.16	0.168
0.020	8.84	0.177
0.021	9.75	0.181
0.022	10.70	0.185
0.024	12.73	0.194
0.026	14.94	0.202
0.028	17.33	0.209
0.030	19.89	0.217

4)鉛直方向の流速

鉛直方向の流速は以下の「吸込み管の流入速度を予測する実験式」で算定する。

$$\frac{VBm}{VBp} = \left( \frac{DBp}{DBm} \right)^{-0.2}$$

VBm：模型の吸込管流入速度

VBp：実物の吸込管流入速度

DBm：模型の吸込管流入径

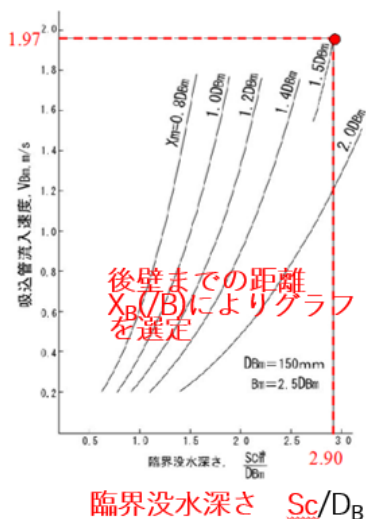
DBp：実物の吸込管流入径

- ・ X：後壁までの距離(制御板と遮集管口との離隔距離に遮集管の半径を加えたもの)
- ・ 計算の手順：実物と模型の管径比率を用いて試験で利用した模型の流速を算出し、吸水管流入速度とから臨界没水深さを求める
- ・  $Xm = X / DBp$

VBp を雨水吐き室の遮集管吸込速度とし、下図から臨界没水深さとの関係から読み取り、この速度を鉛直方向の流速（引き込み力）とする。また、読み取った臨界没水深さの数値に遮集管の径を掛けることで、渦流の消滅水位が求められる。

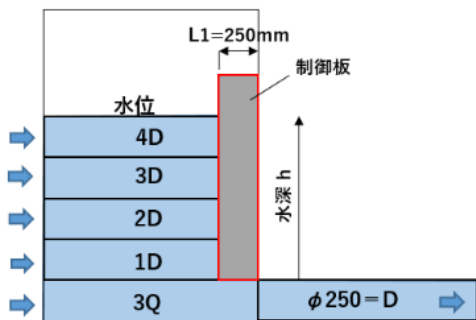
臨界没水深さと吸込み管流入速度  
および後壁までの距離の関係

吸込管流入速度  $V_B$

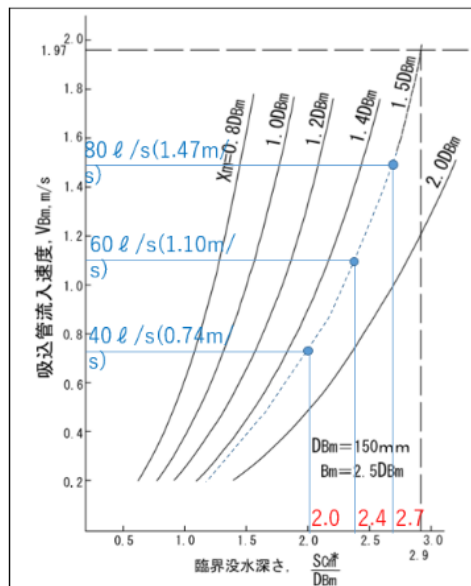


なお、水理模型実験で行った条件により渦流の消滅水深を求めた。結果は、以下に示す図のとおりである。

側面図



- | 遮集量        | 遮集管流速(150mm管変換)    |
|------------|--------------------|
| ・ 40 l / 秒 | → 0.82m/s(0.74m/s) |
| ・ 60 l / 秒 | → 1.22m/s(1.10m/s) |
| ・ 80 l / 秒 | → 1.63m/s(1.47m/s) |



## [参考文献]

- 1) 木田重雄・柳瀬眞一郎：「流体力学」，朝倉商店，2018年9月第10刷
- 2) 菊陽町教育委員会：「菊陽の文化財」 p 8-9，平成21年3月
- 3) 大本照憲：「加藤清正の遺構「鼻繰り井手」の流水制御」，水工学論文集第42巻，pp.283～288，1998年2月
- 4) T,Okamura,K,Kamemoto,J,Matsui.”CFD SIMULATION OF FLOW IN MODEL PUMPSUMP FOR DETECTION OF VORTICES”，8th Asian International Fluid Machinery Conference October12-15,2005,Yichang,China.
- 5) Frank M. White：「Fluid Mechanics」，McGraw Hill Higher Education，2011年4月
- 6) Concentration Heat and Momentum Ltd.，流体解析ソフト PHOENICS マニュアル，2020年
- 7) 芦澤尚子，松川正樹：「沈降速度を用いた地層の体積時間の見積もりとその教材化」，地学教育，第59巻(通巻300号)第1号，2006年1月25日
- 8) 野田篤：「沈降法による粒子径測定」，<https://staff.aist.go.jp/a.noda/memo/settle/settle/settle.html>，2020年6月閲覧
- 9) 大西外明，江原昌彦，森竜馬，瀬間浩二：「狭いスリット内の水中における気泡上昇に関する水理的研究」土木学会論文集 No691/11-57，53-62，2001年11月
- 10) Durgin,W.W. und Hecker,G.E.；The Modeling of Vortices at Intake Structures, Proc.IAHR-ASME-ASCE Joint Symposium on Design and Operation of FluidMachinery,Vol.1, p.381-391,1978
- 11) Nina Voßwinkel；「Transportvermögen von Einlaufwirbeln」，2017
- 12) 亀本喬司：「流れにおける渦の生成」，鉄と鋼,76,(3),p.320-328,1990
- 13) 近藤正道，丸三郎：「ポンプ吸込管の長方形吸水槽における最小没水深さ」，日立評論，VOL54 NO6，p.29-33，1972.
- 14) 田籠雅：「空気吸込渦の発生に及ぼす諸要因と渦防止方法」，ターボ機械，第9号巻第8号，p.42-49，1981年8月.
- 15) 岩佐行利，佐藤誠，塚田繁，佐藤克己，森田弘昭：「画像解析による水面制御装置で生成される渦と浮遊性夾雑物の流集特性」，環境情報科学. 50巻1号，2021年3月号

## 第6章 水面制御装置の新たな活用方策の提案と検証

### 6.1 機械式スクリーンとの併設利用

#### 6.1.1 目的

雨水吐き室の越流堰上部に取り付けられた機械式スクリーンは、堰を越流する浮遊性のきょう雑物（浮遊物：紙類，ビニール類，毛，厨芥類，草木類，糞類，その他）を濾し取ることができる。しかしながら機械式スクリーンは、この浮遊物を除去する過程で浮遊物による目詰まりにより、安定した除去機能を長期間維持することが課題である。例えば、東京都下水道局管内には雨水吐き室は約730カ所あり、その内機械式スクリーンは61個所設置された。しかし、平成30（2018）年度末現在、稼働している設備は数カ所となっているのが実態である。

一方、水面制御装置は制御板で雨水吐き室の水中に渦を発生させ、渦の流集効果で浮遊物を遮集管へと誘導・除去する技術である。水面制御装置にはろ過部分がないため、浮遊物を遮集管へと長期的に安定して集めることができる。

そこで、水面制御装置を機械式スクリーンと併設設置することで目詰まりを抑制してスクリーンの浮遊物除去機能を長期的に維持させる手法を提案するとともに、その効果をスクリーンに付着した浮遊物の分析を行うことで水面制御装置の効果を確認した<sup>1)2)</sup>。

#### 6.1.2 機械式スクリーンの整備

我が国における機械式スクリーンの整備は、1998年仙台市に機械式のろ過スクリーンが設置されたのを始めとして<sup>3)</sup>、多くの自治体で採用されている。

その後、国交省は2002年3月に下水道事業における種々の課題を民間主導による技術開発を誘導・推進し、開発した技術を早期に実用化することを目的に「SPIRIT21」を展開した。その中で「合流式下水道の改善対策に関わる技術」を最初の課題として選定し、技術比較検討を行った結果から浮遊物の除去技術として8種類の機械式スクリーンの技術(表6.1)を実用的であるとして認められた<sup>4)</sup>。これら技術はすべて海外で開発され、日本に導入された技術でもある。



表 6.1 SPIRIT21 で実用化された浮遊物除去技術<sup>2)</sup>

※筆者が一部加工

No.	技術名	フィールド提供者	実用化評価年月
1	ブラシスクリーン	大阪市	平成 16 年 (2004) 6 月
2	雨天時越流水スクリーン	苫小牧市	
3	CSO スクリーン	仙台市	
4	ディスクスクリーン	京都市	
5	ストームスクリーン	京都市	
6	微細目テーパ穴式メッシュパネルを用いた除塵機	西宮市	
7	The Cope Raked Bar Screen	千葉市	
8	ロータリースクリーン	東大阪市	

### 6.1.3 調査方法

#### (1)調査対象施設

東京都下水道局が管理する大宮橋雨水吐き室を調査対象とした。既に機械式スクリーンが設置されており、ここに新たに水面制御装置を設置する（写真 6.1,6.2）。

雨水吐き室は、縦 3,060 mm×横 3,200 mm×深さ 1,930 mmのコンクリート構造物（図 6.1）である。この雨水吐き室には、 $\phi 1,200$  mmの合流管きょ（マニング公式による流量=1.909 m<sup>3</sup>/s）、 $\phi 1,350$  mmの放流管きょ、 $\phi 250$  mmの遮集管（マニング公式による流量=0.039 m<sup>3</sup>/s）、それに公共用水域に放流される越流水と遮集管に取り込まれる汚水を分離する長さ 3,200 mm、高さ 470 mmの堰が設置されている。

堰上に設置されている機械式スクリーンの目幅（あき）は 4 mmである。スクリーンにはレーキ（掻き取刃）が取り付けられ、これがスクリーンの目に沿って左右に往復運動することで絡みついた浮遊物をすき取る機能（写真 6.3）を発揮させる。

新たに設置する水面制御装置の制御板とガイドウォールは、設計基準を基本<sup>3)</sup>にした形状として、後施工アンカーボルトで雨水吐き室の内壁、あるいは越流堰の側面に固定した。



写真 6.1 都下水大宮橋雨水吐き室の設置場所 写真 6.2 都下水大宮橋雨水吐き室の吐口

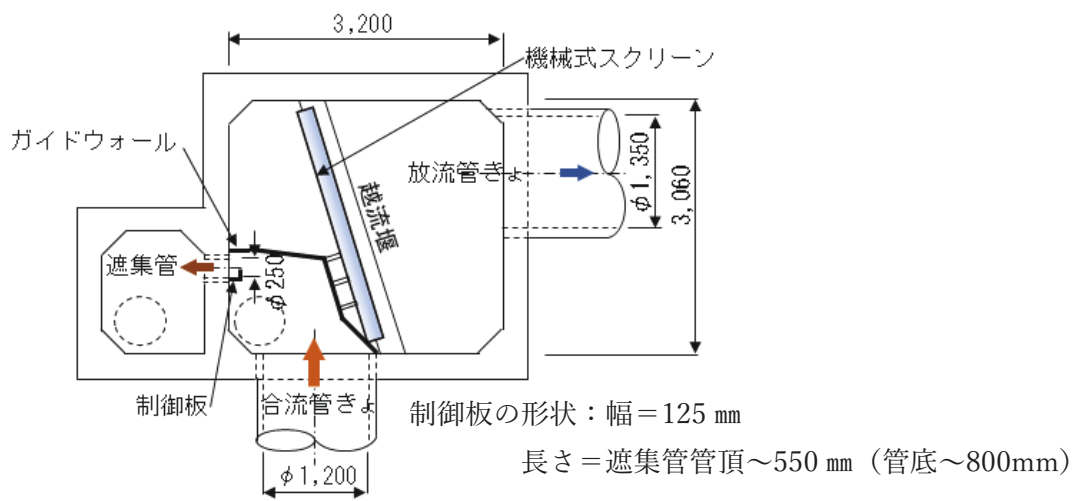


図 6.1 調査対象とした雨水吐き室の状況図

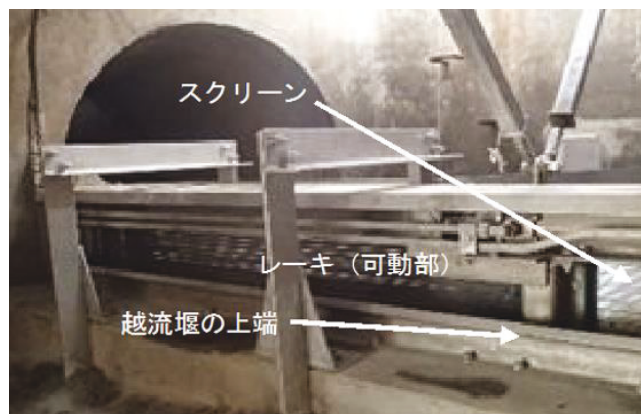


写真 6.3 機械式スクリーンの設置状況



写真 6.4 機械式スクリーンに水面制御装置を設置

## (2) 撮影方法及び水位と浮遊物の計測

### 1) 撮影方法

雨天時に流入する浮遊物の挙動は、雨水吐き室の内部に取り付けた LED 照明及び CCD カメラで動画として撮影し、データロガーに記録した (図 6.2)。

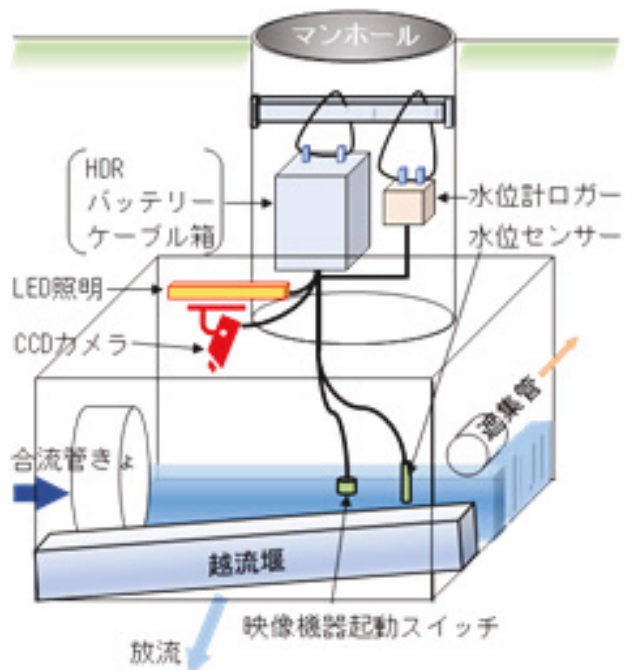


図 6.2 設置した機器類の模式図

### 2) 撮影条件

水位計類は、雨水吐き室の壁に設置 (図 6.2) した。撮影は越流堰の天端から 5cm 低い水位で開始し、越流している間は撮影を継続する。水位が堰天端よりも低くなった時点でスイッチが切れ撮影を終了する。すなわち、越流開始から越流終了直後までの間を撮影対象 (図 6.3) としている。

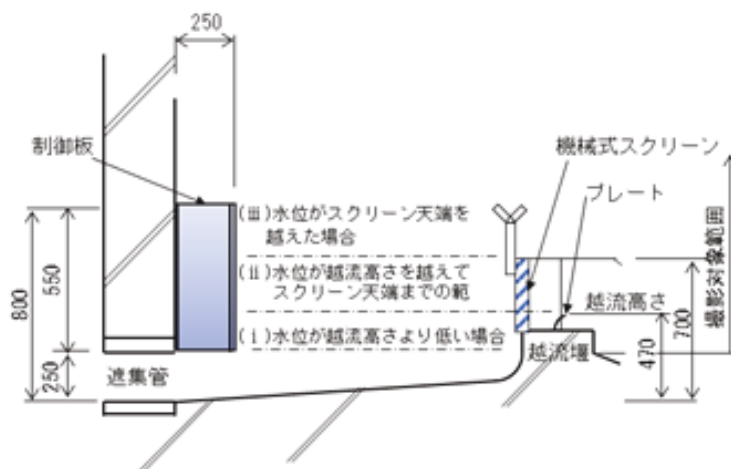


図 6.3 雨水吐き室の水位位置

### (3)浮遊物の計測調査

浮遊物の採取調査にあたっては事前にスクリーンに付着している浮遊物を取り除いておく。降雨後に付着した浮遊物をブラシとヘラを用いて採取し、その組成を分類するとともに乾燥重量を計測した。

#### 6.1.4 調査期間と降雨状況

調査は、雨水吐き室にケースA「機械式スクリーンだけが設置されている場合」を2018年7月10日から1ヶ月間(図6.4(a))、ケースB「機械式スクリーンと水面制御装置(制御板とガイドウォール)を設置した場合」を9月から2ヶ月間実施(図6.4(b))した。その後、ケースAに戻して5ヶ月間(図6.4(c))実施した。

調査期間と降雨回数、降雨量は表6.2に示すとおりである。

表 6.2 調査条件

	ケース A 機械式スクリーンのみ	ケース B 水面制御装置 +機械式スクリーン
調査期間 (2018)	7/10~8/6 11/8~3/25 1ヶ月+5ヶ月	9/6~11/8 2ヶ月
調査期間中の降雨回数	3降雨 総降雨量 69 mm	9降雨 総降雨量 139 mm
期間中の主な降雨	7/29~29日 54 mm (最大 14 mm/hr)	9/26~27 46 mm (最大 9 mm/hr)
雨水吐からの越流量	4,400 m <sup>3</sup>	19,600 m <sup>3</sup>

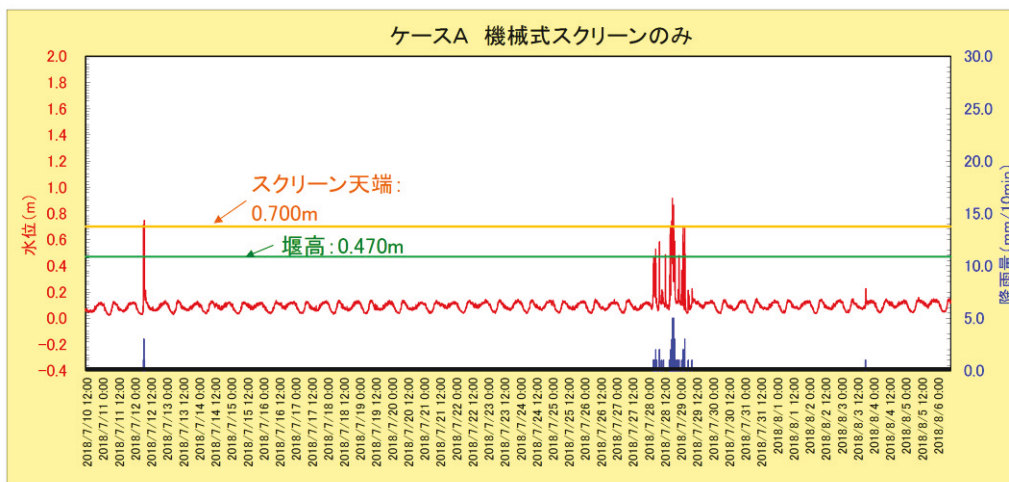


図 6.4(a) ケース A の調査期間の雨水吐き室の水位 (左軸) , 降雨 (右軸)

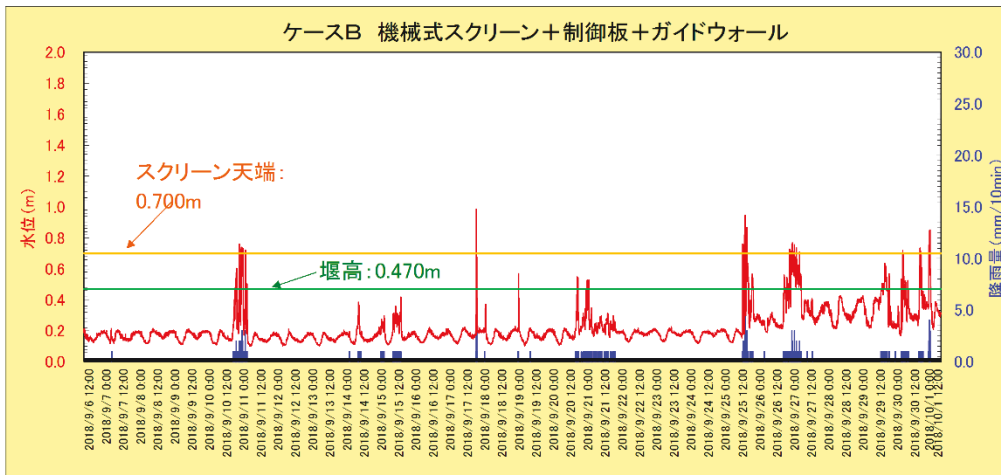


図 6.4(b) ケース B の調査期間の雨水吐き室の水位 (左軸), 降雨 (右軸)

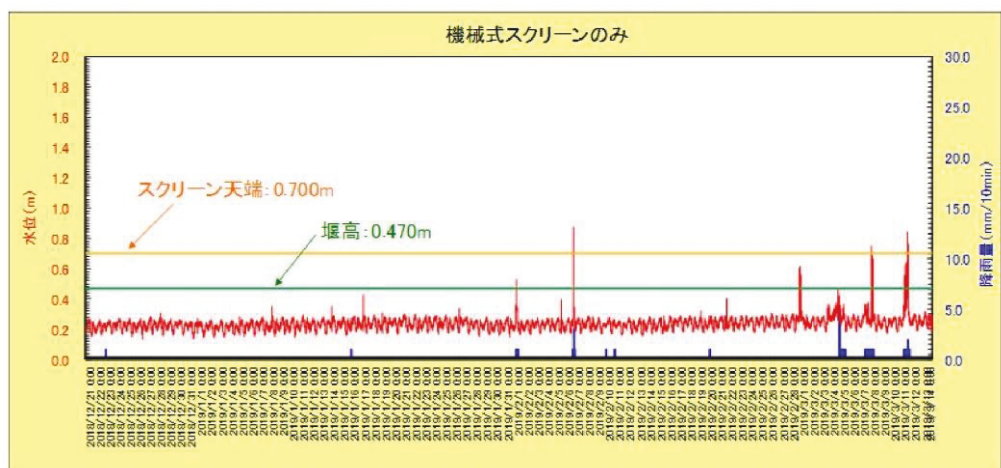
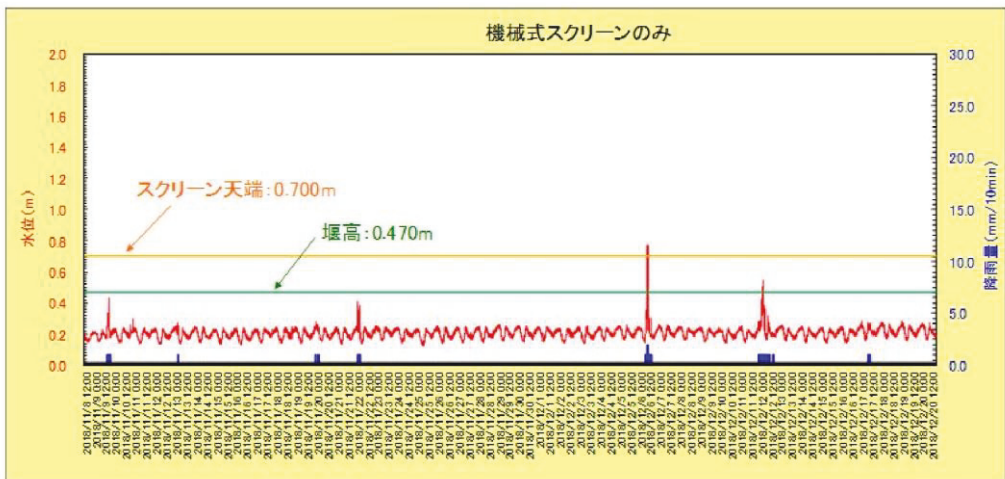


図 6.4(c) ケース A の調査期間の雨水吐き室の水位 (左軸), 降雨 (右軸)

### 6.1.5 雨水吐き室の水流と浮遊物の挙動

#### (1) ケース A (機械式スクリーンのみ) の場合

機械式スクリーンだけの場合、降雨開始後に雨水吐き室の水位が上昇し、遮集管の管頂に達するまでは、遮集管に吸込まれる (写真 6.5)。遮集管の管頂を水位が上回ると、浮遊物は遮集管に吸込まれず (写真 6.6)、スクリーンに引込まれるものと停滞するものとに分かれる (写真 6.7)。さらに水位が上昇し、越流堰を超える場合には漂っていた浮遊物は公共用水域に流出した (写真 6.8)。

なお、雨水吐き室に漂っていた浮遊物は越流堰を超えずに水位が低下した場合には遮集管に捕捉される。



写真 6.5 遮集管に吸込まれる浮遊物 (ケース A)

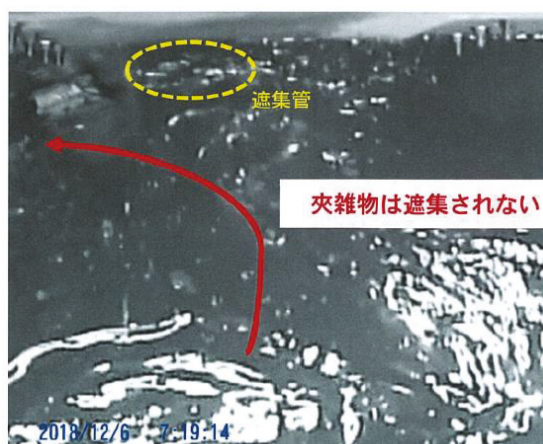


写真 6.6 浮遊物の流れ (ケース A)

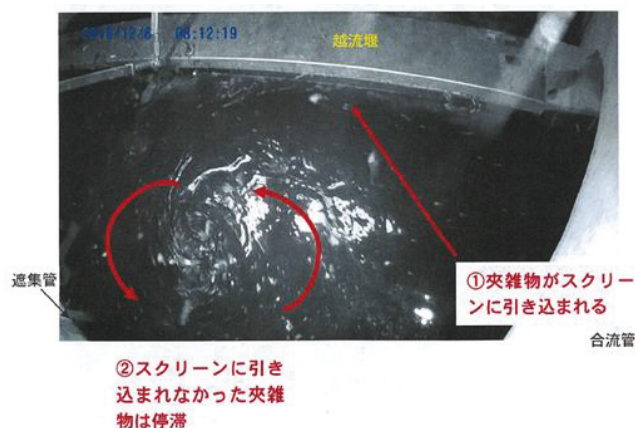


写真 6.7 浮遊物の挙動 (ケース A)

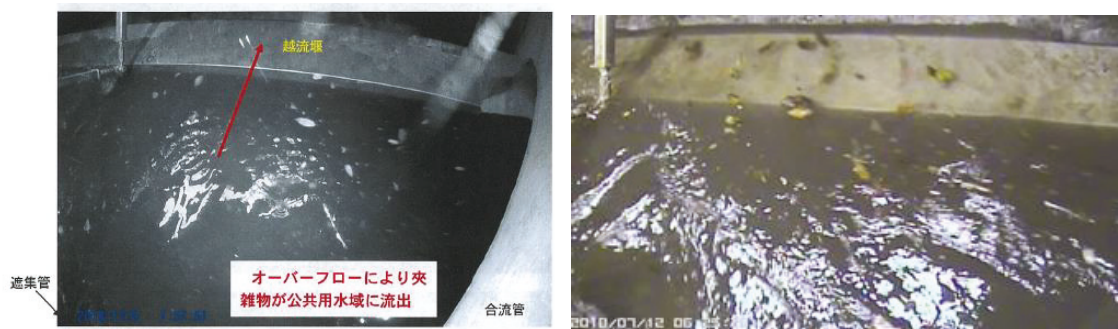


写真 6.8 公共用水域に流出する浮遊物きょう雑物（ケース A）

(2) ケース B（水面制御装置を併設）の場合

雨水吐き室の水位が遮集管の管頂を超えると、制御板に囲まれた範囲に渦が生成され、浮遊物が遮集管に引込まれることが確認できた（写真 6.9）。また、雨水吐き室には浮遊物の停滞は確認されなかった（写真 6.10）。

なお、ガイドウォール側に流れた浮遊物は、スクリーンに引込まれずに遮集管の方向（渦流の方向）に誘導されることが確認できた（写真 6.11）。

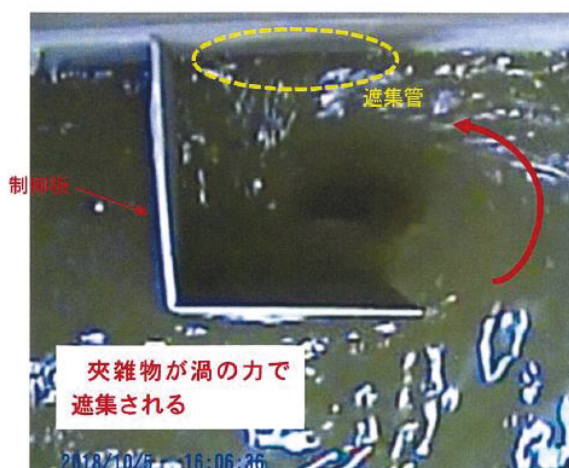


写真 6.9 渦流に引込まれる浮遊物（ケース B）

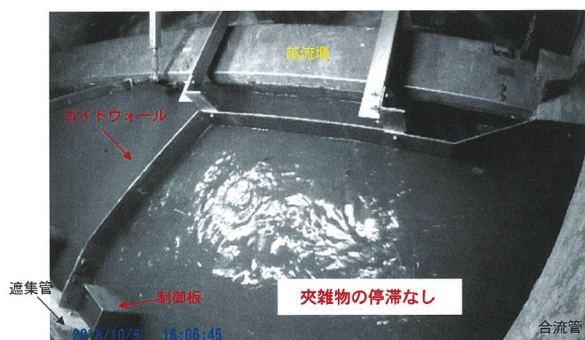


写真 6.10 浮遊物の挙動（ケース B）

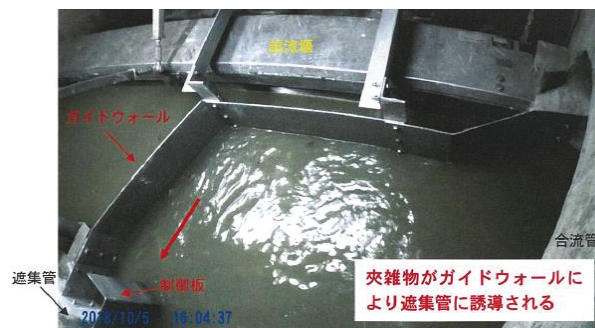


写真 6.11 遮集管に誘導される浮遊物（ケース B）

## 6.1.6 水面制御装置の併設による効果

### (1)スクリーンの浮遊物付着状況

ケースAおよびケースBのスクリーンに付着した浮遊物を採取し、その組成を分類、乾燥重量を計測した。なお、浮遊物の採取期間は、ケースAは2018年7月10日から8月6日迄、ケースBは9月6日～11月8日迄である。

ケースAの状態において、降雨後のレーキの作動でスクリーンに付着した浮遊物の多くは取り除かれる。しかし、レーキ作動範囲外にある浮遊物や雨水吐き室の壁面に付着した浮遊物は、次の降雨まで残るため、悪臭のもととなるほか、機械式スクリーンが故障する原因ともなりやすい。調査時の降雨で採取されたスクリーンに付着した浮遊物は、乾燥重量で136.5gであり、内訳は紙類と厨芥類が主であった(図6.5, 写真6.12)。

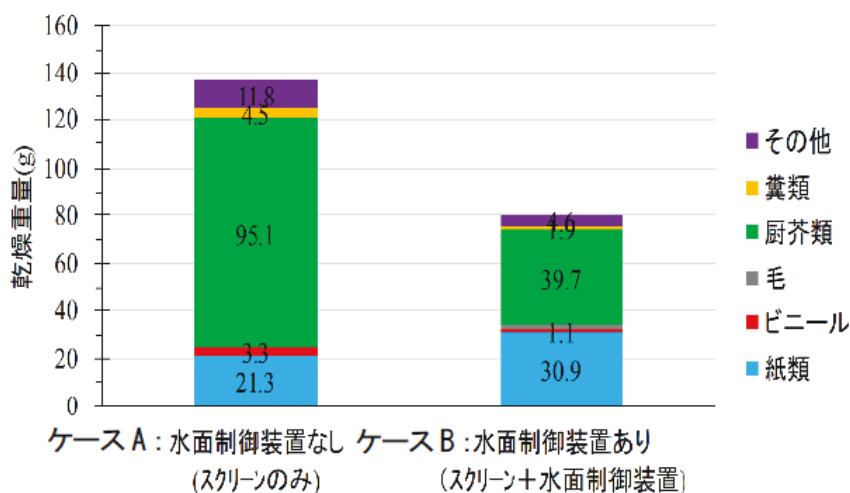


図 6.5 ケース A とケース B のスクリーン付着物の成分比較



写真 6.12 ケース A のスクリーン付着状況

### (2)水面制御装置併設による浮遊物付着状況



機械式スクリーンに水面制御装置を併設したケース B では、スクリーン部に付着する浮遊物の乾燥重量は 80.4g であり、ケース A の場合に比べて約 41% 減少した。なお、浮遊物の内訳はケース A と同様に紙類と厨芥類が主であった（図 6.5、写真 6.13）。

ケース A とケース B の水位変化ときょう雑物の挙動は、表 6.3 に示すとおりである。



写真 6.13 ケース B のスクリーン付着状況

表 6.3 ケース A とケース B の特性比較

項目		ケース A	ケース B
水位変化と浮遊物の挙動	(i) 遮集管に吸込まれる浮遊物量	多い	ケース A よりも多い
	(ii) 遮集管に吸込まれる浮遊物量	少ない	多い
	(iii) 放流される浮遊物量	多い	少ない
	水流の特徴	・水位上昇に伴い遮集管から越流堰側への水面勾配が形成される	・水位上昇に伴い制御板の設置高の範囲において渦流が発生 ・制御板高を超えると渦流は消滅
	雨水吐内の表面水流	・水位上昇に伴い不安定な旋回流、多くの停滞域が発生	・渦流の生成中は安定した水流 ・停滞域は少ない
スクリーン付着浮遊物量 (乾燥重量)		136.3g	80.4g

### 6.1.7 簡易な設計評価指標による評価

第 4 章で提案した「簡易な設計評価指標」は、雨水吐き室の水位と遮集管の流量から、制御板による渦流の生成に伴う浮遊物の捕捉限度を示したものである。つまり、縦軸には雨天時の流入時における雨水吐き室水位を遮集管の管径で除した比率を、横軸にはその時の遮集管に流れる流量を遮集管流下能力で除した比率を示している。この提案した指標のラインより、下側にある場合は浮遊物の捕捉可能領域にあるとし、また、上側にある場合は捕捉不能領域にあるとした。

機械式スクリーンに水面制御装置を併設した雨水吐き室における各水位を図 6.6 に示した。この雨水吐き室に設置した機械式スクリーンは 10mm/hr の流入時に夾雑物の堰流出抑

制効果を目的とした設置となっていることから、その天端高は遮集管管底より 700mm (10mm/hr 流入時の雨水吐き室水位) となっている。一方、制御板の天端高は、標準設計により雨水吐き室の 10mm/hr 流入時の水位に 100mm 加えることとしていることから、遮集管管底より 800mm とした。

図 6.6 より、①の 10mm/hr 時の水深と②の機械式スクリーン天端高の水深は、ともに浮遊物捕捉可能領域に入っている。一方、制御板の天端での水深は可能領域と不能領域の境界にあり、効果は微妙となっている。

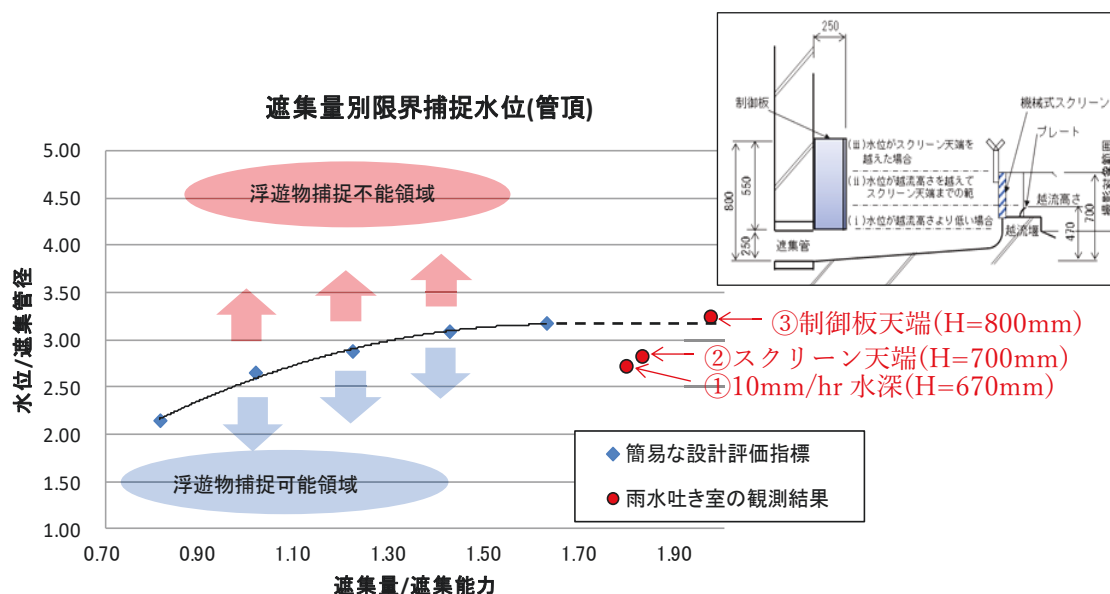


図 6.6 簡易な設計評価指標による評価

なお、③に相当する撮影写真を 6.14 に示す。

制御板の上端 (H=800 mm) までの水位変動や水流の変化に対して安定した渦流を生成し、浮遊物を遮集管に導く効果を発揮できた。しかし、これを超える水位 (H=800 mm 以上) では渦流が消滅することを確認している。

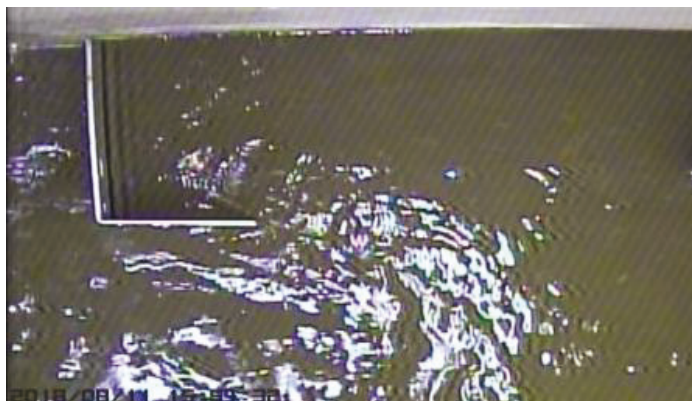


写真 6.14 制御板の上端 (H=800 mm) の渦流状況

### 6.1.8 まとめ

雨水吐き室に設置してある機械式スクリーンに水面制御装置を併設することを提案し、表面水の流れや浮遊性夾雑物（浮遊物）の挙動、並びに機械式スクリーンへの浮遊物の付着状況を確認することで、その効果を検証した。

本研究では、以下の結果を導き出した。

(1)機械式スクリーンに本装置を併設することによって、雨天時に浮遊物が公共用水域に流出抑制できることを確認した。あわせて、スクリーン部に付着する浮遊物は約 41%削減したことから、機械式スクリーンの機能向上に寄与できることを確認できた。

(2)本装置の構成材料であるガイドウォールは、浮遊物を制御板が生成する渦流に誘導し、機械式スクリーンの目詰まり抑制に寄与できることを確認した。なお、寄与できる水位はガイドウォールの設置高さまでである。

(3)機械式スクリーンだけの設置では、そのスクリーン天端を超えるまでの水位において、中心が移動する旋回流が生じ、浮遊物がこの旋回流上に漂っていることを確認した。

スクリーン天端を超える水位になると、漂っていた浮遊物の一部が越流水とともに、公共用水域に流れ出ることを確認した。

(4)本装置では、制御板で囲まれた範囲において水面まで到達する渦流が生成され、その中心は移動することがない。また、遮集管に向うエアコアを確認した。

この現場では、制御板の上端（ $H=800$  mm）までの水位変動や水流の変化に対して安定した渦流を生成し、浮遊物を遮集管に導く効果を発揮できた。しかし、これを超える水位では渦流が消滅することを確認した。但し、水位が制御板の上端以下に低下すると渦が再生成され、水面に浮遊する浮遊物が遮集管に吸込まれることを確認した。

(5)提案した「簡易な設計評価指標」は、機械式スクリーンに水面制御装置を併設した場合でも適用できることを確認した。

本研究で得られた知見を踏まえ、これまで機械式スクリーンが設置された雨水吐き室に本装置を併設することで、機能の改善や越流負荷の削減に貢献できるものとする。

しかし、雨水吐き室の構造は一定ではなく、多方向からの流入や遮集管の取り付け位置や方向の違いなどがある。さらには、越流堰からの放流条件などの要因で水位や流況が複雑に変化する。また、機械式スクリーンには様々なタイプがあることから、個々の条件に応じた最適な制御板やガイドウォールの設置位置を検討する必要がある。

## 6.2 海外（欧州）での利用

### 6.2.1 背景

海外でも水質汚濁に対する関心が高まり、EU では 2000 年に排水規制が制定された。合流式下水道を歴史的に採用している国や地域を中心に、改善対策が積極的に講じられている。特に、ドイツやフランスでは、雨水吐き室からの越流水対策の実施が迫られている。そこで、水面制御装置の開発 3 社（東京都下水道局、東京都下水道サービス株、日本工営株）は日本での実績を踏まえ、2010 年 6 月にドイツ国のエンジニアリング会社で下水道関連機器の開発メーカーでもある Steinhardt 社（以下「ST 社」）とライセンス契約を締結した。

EU 圏内での普及拡大に向け、ST 社に技術移転を行ったものの、国内で短期間に普及が図られることとなった強力なインセンティブ（法規制や補助金制度、競合技術に対するコスト優位など）の事例は参考にはならず、発注者である自治体やコンサルタントなどへの理解が得られにくく、結果として発注につながらなかった。

その要因を探ると、EU 圏内の発注形態や商習慣、PR 方法などが各国や地域で大きく異なることが明らかとなった。また、降雨の違いや当該国の雨水吐き室の状況も異なるなど、当該国の状況に合わせた実証実験データがないことなども普及拡大の阻害要因の一つでもある。

EU での水面制御装置の普及状況は、ドイツ 25 箇所、フランス 4 箇所、ベルギー 2 箇所、イギリス 1 箇所の計 32 箇所（2019 年 3 月現在、図 6.7 参照）である。



図 6.7 水面制御装置の欧州での設置状況（2019 年 3 月現在）

## 6.2.2 普及拡大における技術的課題

国内仕様に基づく設計法をドイツなどの欧州に適用させるには、いくつかの技術的課題を整理する必要がある。

### (1) 降雨特性の違いを踏まえた目標設定

水面制御装置の適用対象とする降雨は、各地域の降雨特性の整理結果に基づき、下水道管理者によって決定される。図 6.8 に 2013 年における日本（東京）とドイツ（ベルリン）の月間降雨量の比較を示す。日本はドイツと比較して年間総降雨量が多く、月間雨量格差が大きい。一方、冬季では両者の差はない。

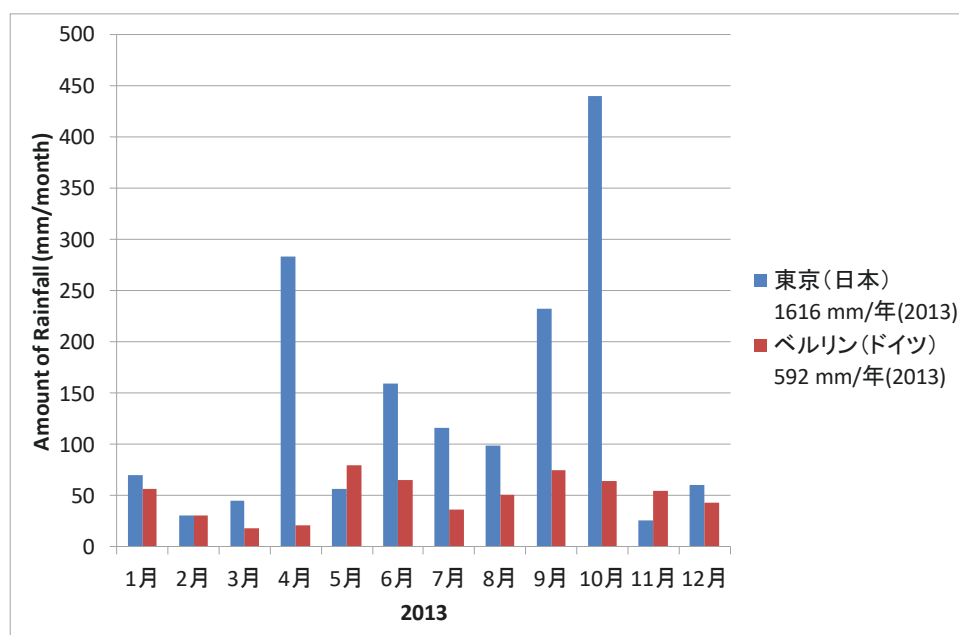


図 6.8 日本とドイツの月間降雨量比較（2013 年）

図 6.9 に、日本とドイツの降雨強度分布の一例を示す。日本では、降雨強度 10mm/hr までの降雨が総降雨数の約 80%を占めている。これより、水面制御装置の適用範囲を最大 10mm/hr に設定している。一方、ドイツを見ると、日本に比べて総降水量が少ないことに加え、降水量 1mm/hr までの降水量が総降水量の約 80%を占めている。この場合、水面制御装置の適用にあたっては対象降雨を日本よりも低い降雨強度に設定する必要がある。

このように、日本以外の地域で水面制御装置を適用するのにあたっては、当該地域の降雨特性を分析し、適切な目標設定を行うことが重要となる。

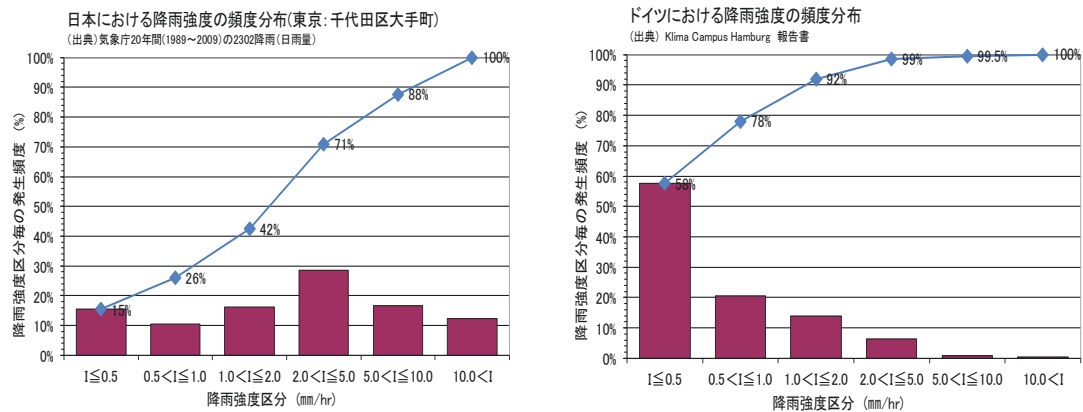


図 6.9 日本とドイツの降雨強度の頻度分布

水面制御装置の適用対象とする降雨（ターゲット降雨）を定めるとともに、そのターゲット降雨における雨水吐き室の水位を求める必要がある。この水位を基準にガイドウォールの高さや制御板の天端高さを決定する。ターゲット降雨に対応する雨水吐き室の水位は、それぞれの雨水吐き室で異なるため、地点ごとに定める必要がある。算定方法としては、流量計算書等に基づきターゲット降雨に対応する流量を求め、流入管における等流水深を仮定して求める方法があるが、遮集管側から背水の影響がある場合や雨水吐き室で大きく流況が変化する場合には採用できない。最も確実な方法は、当該雨水吐き室の水位観測を行い、降雨強度と水位との相関を求めて決定するものであり、図 6.10 に解析例を示す。

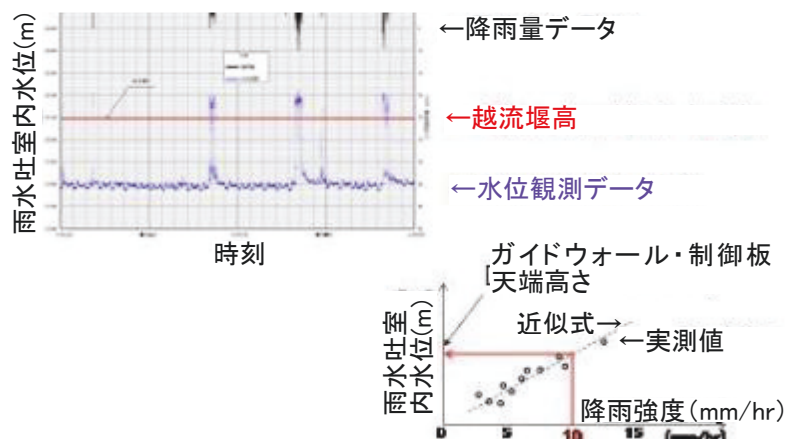


図 6.10 水位観測とガイドウォール高さの決定例

雨水吐き室へ流入する下水のハイドログラフをもとに水面制御装置の機能を説明したものを図 6.11, 6.12 に示す。両図ともガイドウォール・制御板天端の高さは、水面制御装置のターゲット降雨と一致している。図 6.11 は降雨規模が水面制御装置の対象降雨よりも小さい場合の例である。降雨規模が水面制御装置のターゲット降雨の規模（降雨強度）よりも低い場合、雨水吐き室の水位はガイドウォール・制御板天端の高さよりも低いため、越流水

発生時間の全てにおいて雨水吐き室に流入する浮遊性夾雑物（浮遊物）は、完全に制御（抑制）される。

一方、図 6.12 に示すように降雨規模が水面制御装置のターゲット降雨の規模（降雨強度）よりも高い場合には、雨水吐き室の水位はガイドウォール・制御板天端よりも高くなる時間帯があり、水面制御装置は雨水吐き室に流入する夾雑物を制御（抑制）できない時間帯が生じることになる。しかし、前述のようにターゲット降雨を適切に定めることでその頻度は少ないこと、さらに、流量増加時の初期汚濁雨水は適切に対応できていることから実用上の問題は生じない。

以上のように、水面制御装置を欧州に適用する場合には、各国の合流改善対策の考え方を踏まえて、降雨特性に応じた適切な目標を設定することが重要となる。

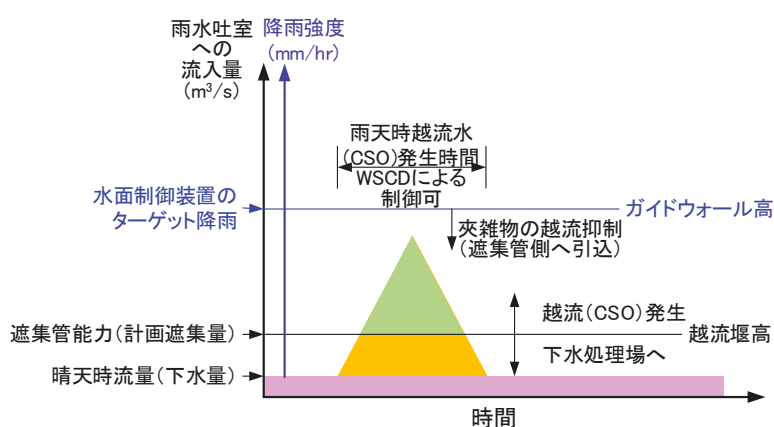


図 6.11 ハイドログラフと水面制御装置の機能の説明 (1)・降雨規模が水面制御装置 (WSCD) の対象降雨よりも小さい場合

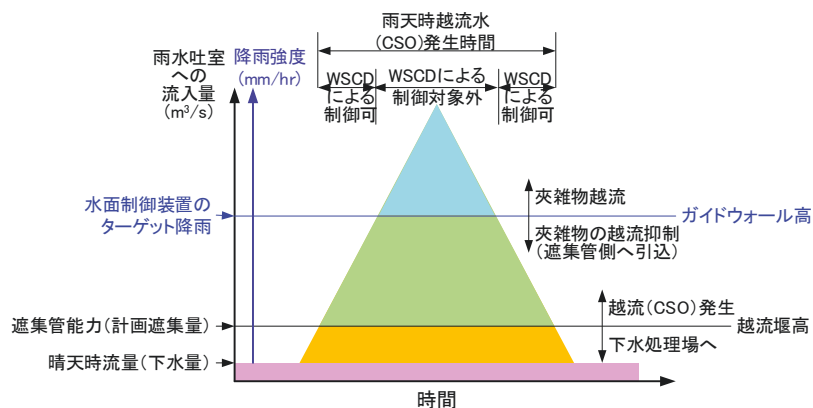


図 6.12 ハイドログラフと水面制御装置の機能の説明 (2)・降雨規模が水面制御装置 (WSCD) の対象降雨よりも大きい場合

## (2)雨水吐き室の構造上の違い

合流式下水道における雨水吐き室は、晴天時においては流入下水量の全量を、雨天時にあっては計画遮集量までを下水道終末処理場へ流下させる。計画遮集量を上回る流入がある場合には横越流堰等により越流させ、公共用水域へと放流するための施設である。計画遮集量は、雨天時越流水対策（CSO：Combined sewer Overflow Control）による汚濁負荷量や越流回数に加えて投資効果を勘案して、各下水道管理者が定めている。日本では、東京都をはじめとして、計画遮集量は3Q相当（Qは計画時間最大汚水量）としている場合が多い。また、雨水吐き室への流入下水量は、計画時間最大汚水量に雨水流出量を加えて算定される。雨水流出量は対象とする確率年に対する降雨強度式から合理式で求めるのが一般的であるが、東京都の場合3年確率に対する降雨強度式（ $I=5000/(t+40)$ 、Iは降雨強度（mm/hr）、tは流達時間（分））を用いており50mm/hr相当の規模である。ここで計画時間最大汚水量（1Q）は降雨規模に換算すると1mm/hr程度、計画遮集量（3Q）も3mm/hr程度であり、雨水流出量の50mm/hr相当と比較して極めて少ない。

このように、日本では雨水吐き室への流入下水量に対して、遮集量が十分に小さいことが多く、越流堰高は流入管径と比較して相当に低い（1/2以下）のが一般的である。

欧州の雨水吐き室もその機能は日本と同一である。例えば、英国の設計基準<sup>※(A)</sup>では、雨水吐き室への流入水量は5年確率降雨規模相当とすることが記載されており、この点も日本と同等といえる。しかし、前項で述べたように日本と欧州では降雨規模が大きく異なる。

※(A) WaPUG Guide : The Design of CSO Chambers to Incorporate Screens

英国 WaPUG (Wastewater Planning Users Group) によるスクリーンを含む CSO Chamber 設計ガイドライン

2019年における欧州と日本の降雨実績の比較を表6.4に示す。また、降雨日数の比較を図6.13に、降雨量（月間雨量）の比較を図6.14に、降雨量（日雨量の月間最大値）の比較を図6.15に、降雨量（日雨量の回数平均値）を図6.16に示す。欧州は水面制御装置の設置実績のある国からイギリス、フランス、ドイツを抽出し、それぞれ代表的な都市を選定した。

降雨日数は、日本は月間格差が大きいのに対し、欧州は比較の日数が一定している。また、年間の合計日数では日本が131日だったのに対し、欧州は151～166日といずれも多くなっている。日本の降雨量（月間雨量）実績は1月と12月を除き欧州のそれを大きく上回っていることがわかる。特に日本の10月の実績が530mmと突出しているが、これは大規模災害を引き起こした台風19号によるものである。年間の総雨量は、日本が1874mmであるのに対し、欧州の都市は523～649mmと1/3以下であり、日本の実績が台風の影響等を受け例年より多いことを踏まえても大きな差異がある。欧州における降雨量（日雨量）は、月間最大値が最も大きいドイツ・ベルリンで41mm/日、回数平均値は年間平均で4.0mm/日程度であり、いずれも日本と比較して少ない。これらは下水道施設の設計に用いる短時間雨量のデータではないが、欧州の降雨特性として、日本と比較して降雨日数は多く、小規模な降雨が多いといえ、前項に示した図6.9からも裏付けられている。単位面積当たりの雨水流出



量は降雨強度，流出係数から算定されるが，欧州では日本と比較して降雨規模が小さいことから，算定される雨水流出量も少ないといえる。

表 6.4 欧州と日本の降雨実績の比較（2019年1月～12月）

国名<都市名>	イギリス<ロンドン>				フランス<パリ>				ドイツ<フランクフルト>				ドイツ<ベルリン>				日本<東京>			
緯度/経度	51.47° N / 0.45° W				48.72° N / 2.38° E				50.03° N / 8.58° E				52.55° N / 13.30° E				35.69° N / 139.75° E			
標高	24m				89m				112m				36m				25m			
	降雨日数 (日)	降雨量 (mm)	最大雨量 (mm/日)	平均雨量 (mm/日)	降雨日数 (日)	降雨量 (mm)	最大雨量 (mm/日)	平均雨量 (mm/日)	降雨日数 (日)	降雨量 (mm)	最大雨量 (mm/日)	平均雨量 (mm/日)	降雨日数 (日)	降雨量 (mm)	最大雨量 (mm/日)	平均雨量 (mm/日)	降雨日数 (日)	降雨量 (mm)	最大雨量 (mm/日)	平均雨量 (mm/日)
1月	10	28	9	2.8	20	40	10	2.0	16	44	6	2.7	18	40	9	2.2	2	16	16	8.0
2月	11	37	9	3.4	8	40	10	5.0	9	10	4	1.1	10	20	10	2.0	6	42	23	7.0
3月	14	48	9	3.4	15	42	9	2.8	17	44	9	2.6	19	65	14	3.4	10	118	32	11.8
4月	8	13	4	1.6	8	15	4	1.9	11	35	10	3.2	6	8	3	1.3	10	91	30	9.1
5月	9	35	18	3.9	14	100	34	7.2	13	74	20	5.7	13	40	15	3.0	6	121	82	20.1
6月	14	82	33	5.9	12	54	22	4.5	10	43	11	4.3	7	65	38	9.2	13	225	93	17.3
7月	10	52	11	5.2	2	9	5	4.3	9	44	15	4.9	10	94	41	9.4	22	193	39	8.8
8月	12	32	12	2.7	7	65	29	9.3	13	53	14	4.1	7	22	11	3.1	12	110	20	9.2
9月	11	63	27	5.7	8	25	10	3.2	11	53	17	4.8	12	56	19	4.6	11	197	119	17.9
10月	20	89	14	4.5	24	58	12	2.4	18	77	23	4.3	13	48	10	3.7	17	530	210	31.1
11月	26	78	12	3.0	23	103	23	4.5	19	48	8	2.5	18	38	8	2.1	12	157	61	13.0
12月	18	91	14	5.1	19	87	11	4.6	20	65	10	3.2	18	29	5	1.6	10	77	36	7.7
合計	163	649	33	4.0	160	637	34	4.0	166	588	23	3.5	151	523	41	3.5	131	1,874	210	14.3

(注記)データは気象庁 HP (Climat View) による。ロンドンヒースロー空港，パリはオルリー空港，ベルリンはテーゲル空港。平均雨量は，降雨量を降雨日数で除して算定した回数平均値。日本（東京都）の10月の降雨量が530mmと極端に大きくなっているのは，台風19号の影響（10月12日の降雨量は210mm）によるものである。

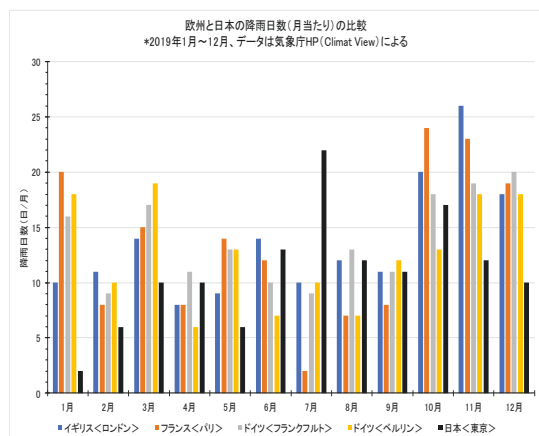


図 6.13 欧州と日本の月別降雨日数の比較

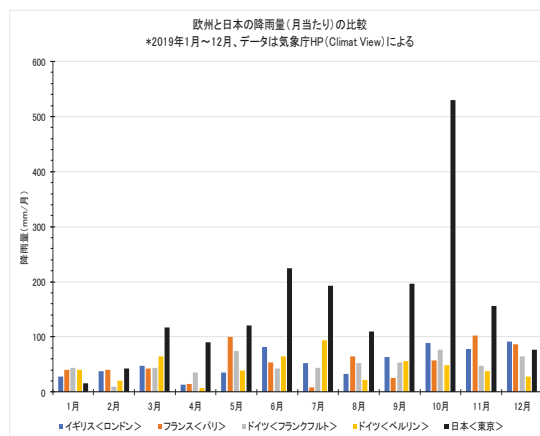


図 6.14 欧州と日本の降雨量（月間雨量）の比較

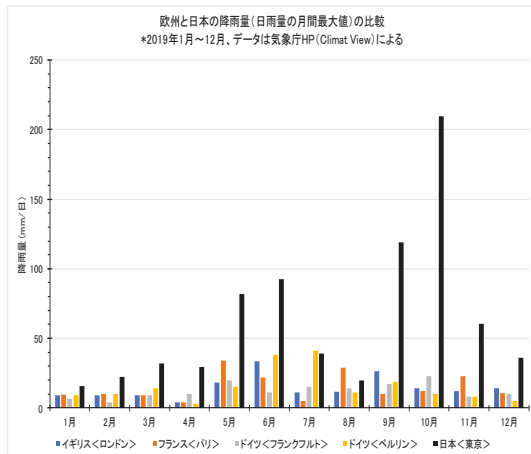


図 6.15 欧州と日本の降雨量（日雨量の月間最大値）の比較

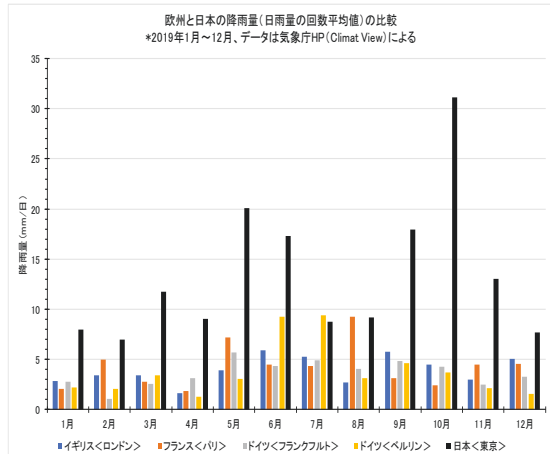


図 6.16 欧州と日本の降雨量（日雨量の回数平均値）の比較

したがって、同一の流域面積として比較すると、欧州における雨水吐き室へ流入する計画下水量は、日本よりも少ない。一方で、汚水量は降雨規模ほどの差異は生じない。したがって、日本では、「雨水吐き室へ流入する計画下水量 >> 計画遮集量」であるのに対し、欧州では、「雨水吐き室へ流入する計画下水量 > 計画遮集量」となり、この違いは堰高の差となって表れている。

前述した英国の設計基準<sup>※(A)</sup>には、流入管径の最小口径を求める方法として、式(1)が提示されており、またK値を与える図表として図6.17が与えられている。図6.17では、流入管径を基準にした堰高を基にK値を定めるものであるが、堰高/流入管径比は0.6~1.0の範囲で作図されており、これからも日本と比較して堰高が高いことがわかる。また、同図から堰の高さが低いほどK値が大きくなるため、流入管径をより大きくする必要がある。

$$D_{min} = K \cdot Q^{0.4} \quad (1)$$

ここに、 $D_{min}$ ：流入管の最小口径、 $Q$ ：5年確率相当流量、 $K$ は定数（図6.16による）

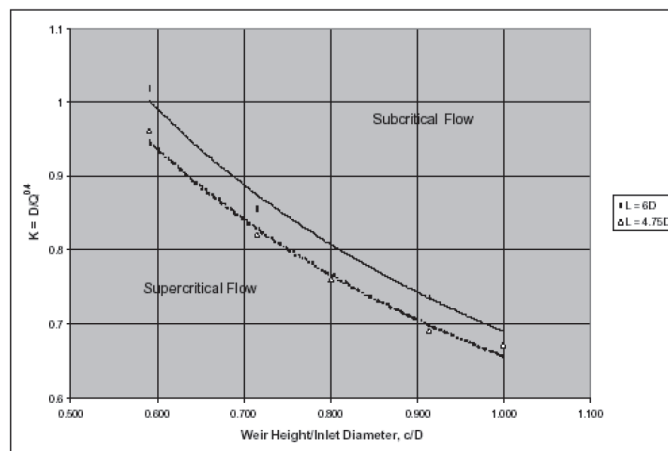


図 6.17 英国の設計基準に示された式(1)に適用するK値の相関図

さらに設計基準<sup>※(A)</sup>では、雨水吐き室では、越流堰と遮集管側の流量制御を組み合わせることを要求している。流量制御装置については他種多様なものの中から適切なものを選定するが、標準的なものとして遮集管口に設置するオリフィスプレートとペンストック（スルースゲート）が例示されている。日本でも遮集量の適正化は課題になっており、ヴォルテックスバルブ等の技術が導入されている雨水吐き室もあるが、その数は極めて少ない。日本の雨水吐き室の大半は、遮集管側の流量調整装置は設置されていないと考えてよい。



雨水吐き室の水位が上昇すると遮集管断面が縮小し遮集量は一定となる  
写真 6.15 フローレギュレーター（ドイツ Steinhardt 社パンフレットより）

以上より、欧州の雨水吐き室の構造的な特徴として、日本と比較して越流堰高が高いこと、遮集管側に流量調整装置が設置されている施設が多いことの2点が挙げられる。よって、欧州の雨水吐き室では、流量調整装置の機能により雨水吐き室の水位が高くなりやすく、さらに越流堰高が高いため水面制御装置のターゲット水位も高くなる。水面制御装置は、雨水吐き室の水位が高く、かつ遮集量が少ないと渦流の発生にとって不利な条件となることから、欧州の雨水吐き室は日本よりも不利な水理学的な条件が多いと推察される。したがって、欧州における水面制御装置の導入や展開にあたっては、事前の機能評価が重要となり、第4章で筆者が提案した簡易設計評価指標の活用が期待される。

### 6.2.3 提案する装置と期待する効果

#### (1)提案する装置

欧州における合流式下水道の夾雑物対策は、スクリーン技術が基本となっており、日本の「SPIRIT21」で審査された技術は欧州等から導入した技術で構成されていた。欧州では国ごとに雨天時越流水対策（CSO：Combined sewer Overflow Control）の夾雑物に関する規制が異なるが、英国における基準を表 6.5 に示す。英国では放流先水域の景観保持の観点から、アメニティ区分と CSO の越流頻度に応じて、CSO への要求性能を定めている。CSO への要求性能はスクリーン技術が前提となっており、6mm もしくは 10mm の固形物分離が一般的な設計となっている。なお、英国では Environment Agency（環境庁）が CSO に関する規制を行うとともに、下水道管理者に対して計画策定と履行義務を課している。

このように国の規制基準がスクリーン技術を前提としている場合にあっては、水面制御装置が同等以上の性能を有することを証明するためには、相当の期間と費用が必要となる。したがって、欧州地域における水面制御装置の展開は 6.1 項で検証したようにスクリーン技術との併設利用が最も現実的である。水面制御装置とスクリーンとの併設利用では、水面制御装置によってスクリーンへの負荷を減少させることで維持管理性を向上させるとともに、越流水のきょう雑物除去性能についてはスクリーンの構造と目幅で担保するものである。

表 6.5 英国における CSO への要求性能<sup>※(A)</sup>

アメニティ分類	CSO の越流頻度	CSO への要求性能(基準)
高アメニティ <sup>※①</sup> ※①公立の公園に続く水域、ピクニックエリア、水辺や水に浸かるウォータースポーツが行われるエリア、甲殻類や貝等が生息するエリア	>年 1 回	6mm 固形物分離
	≦年 1 回	10mm 固形物分離
中アメニティ <sup>※②</sup> ※②ボートが使用される水域、水流に隣接した人間が通る道、住宅や市街地に続く水流、水に浸からないが接触するレクリエーションやスポーツが行われるエリア	>年 30 回	6mm 固形物分離
	≦年 30 回	10mm 固形物分離
低アメニティ <sup>※③</sup> 、アメニティなし <sup>※④</sup> ※③必要最低限な施設の使用のみ、限定的かつ接触の頻度の少ない川辺、 ※④施設や住居が全く、またはほとんどない、遠隔地または立入り不可能なエリア	—	雨水吐室の適切な設計により達成できる固形物分離

(注記)

1. 設計流量内の排出に関しては、放流水からの分離は、二次元における 6mm 以上の大きさの固体を意味する。設計流量を超える排出量に関しては 10mm の固形物が対象である。
2. 5 年に 1 回の最大雨水による流量内に関する分離は、10mm のバースクリーンと同等の性能を意味する。
3. 時系列データがある場合は、6mm 固形物分離の設計流量は、年間の時系列において放流される流量の 80% に相当する。時系列データがない場合は、6mm 固形物分離の設計流量は、1 年に 1 回の最大流量で、放流される流量の 50% に相当する。

CSO スクリーンには、様々な種類のスクリーンが存在するため、欧州の雨水吐き室で設置されている CSO スクリーンを分類整理した上で、水面制御装置の組み合わせを検討する方針とした。

CSO スクリーンは、スクリーン面の向きから垂直型と水平型に大別される。垂直型は越流堰の直上に設置される。水平型は越流堰を挟んで流入管側に設置する場合と放流管側に設置する場合の 2 通りがあるが、ここでは欧州での採用事例の多い流入管側に設置するケースを対象とした。水平型スクリーンでは雨水吐き室の水位が一旦越流開始水位を上回ると、越流水はスクリーン面の全断面を通過する。一方、垂直型スクリーンは越流開始水位を超過してから水位の上昇とともに、スクリーンの通水断面積が増加する。よって、水平型スクリーンは、垂直型スクリーンよりもスクリーンへの負荷が少なく、また、スクリーン故障時（目詰まり等発生時）における背水影響も少ないとされている。加えて、その他のタイプとしてサイクロンスクリーンを抽出した。サイクロンスクリーンは、メッシュ構造の外胴内部に回転体を有しており、これが越流時に回転することでスクリーン面に付着する夾雑物を引きはがすセルフクリーニング機能を有しており、水面制御装置と同様に無動力が特徴の装置となっている。また、欧州では、スクリーンの設置に合わせて、大きな夾雑物のスクリーンへの付着や保護を目的としたスカムボードが設置される場合があるが、ガイドウォールのように水面を浮遊する夾雑物を遮集管方向へ誘導する機能はない。

上述した垂直型、水平型、その他の 3 種類のスクリーンに水面制御装置を適用した場合の配置例を表 6.6 に示す。いずれのケースも制御板は必須で遮集管口に設置する必要があるが、ガイドウォールの設置はケースバイケースとなる。垂直型スクリーンの場合、ガイドウォールを設置して夾雑物が越流部へ達しないように防止（スカムボードの機能も含む）するとともに流入した夾雑物を遮集管側へ誘導する。一方、水平型スクリーンの場合は、スクリーンを構成する垂直部材が遮集管側へ夾雑物を誘導するため、原則としてガイドウォールは不要である。また、その他（サイクロンスクリーン）については、雨水吐き室の配置の関係からガイドウォールを設置できない可能性が高い。これらは雨水吐き室のスクリーンの設置位置等から個別に検討することになる。

表 6.6 代表的な CSO スクリーンに対する水面制御装置の適用方法

	平面図	断面図
垂直型 スクリーン		
水平型 スクリーン		
その他 (サイクロン スクリーン)		

## (2) 欧州における効果検証

水面制御装置とスクリーンとの組合せのうち垂直型スクリーンについては、東京都下水道局大宮橋雨水吐き室での実証実験を実施しており、その結果については 6.1 に述べた通りである。一方、水平型スクリーンとの組合せについては、スクリーンを構成する垂直部材がガイドウォールの機能を担うと想定できる。そこで、その他として示したサイクロンスクリーンと組合せについて、欧州の雨水吐き室で効果検証を行うものとした。

実証実験の実施場所は、英国 W 社（英国の場合、スコットランドと北アイルランドを除き、下水道管理者は民間水会社である）が管理する雨水吐き室とした。対象の雨水吐き室には、サイクロンスクリーンが 2 基設置されている。そのため、水面制御装置を単純にサイクロンスクリーンに設置した場合、スクリーンが制御板付近の流れによって干渉されてしまうため、夾雑物はスクリーン側に引き込まれる可能性がある。そこで、図 6.18 に示すように、2 つのうち 1 つのサイクロンスクリーンを取り外せば、分水人孔内の夾雑物は制御板に

向かって直線的に誘導される。このようにサイクロンスクリーンに水面制御装置を適用させる場合は、制御板付近の夾雑物の流況をまず予測し、スクリーンへの干渉の有無を調査する必要がある。

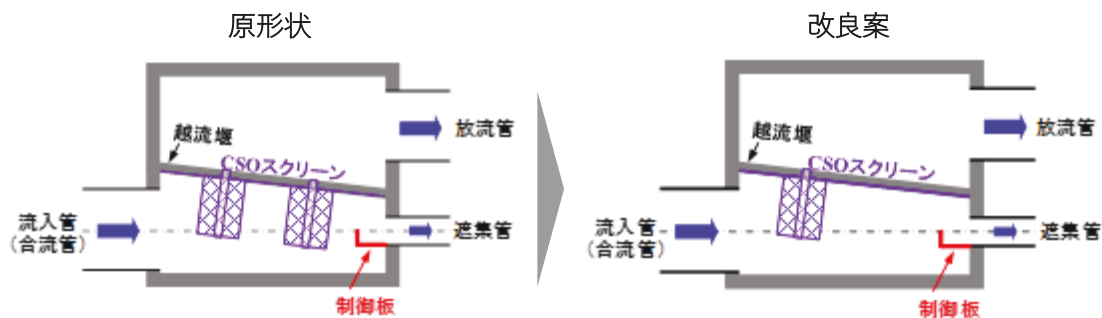


図 6.18 サイクロンスクリーンと水面制御装置の組合せにおける改良

現場実証実験では、既設サイクロンスクリーン（2基）を1基取り外し、開口部をプレートで塞ぐとともに、スカムボードの設置と堰の高上げを実施した。制御板は、標準設計通りに遮集管（D=200mm）から1 D（200mm）離れた位置に0.5 D（100mm）の長さとした。設置工事の概要を図 6.19、写真 6.16 に示す。

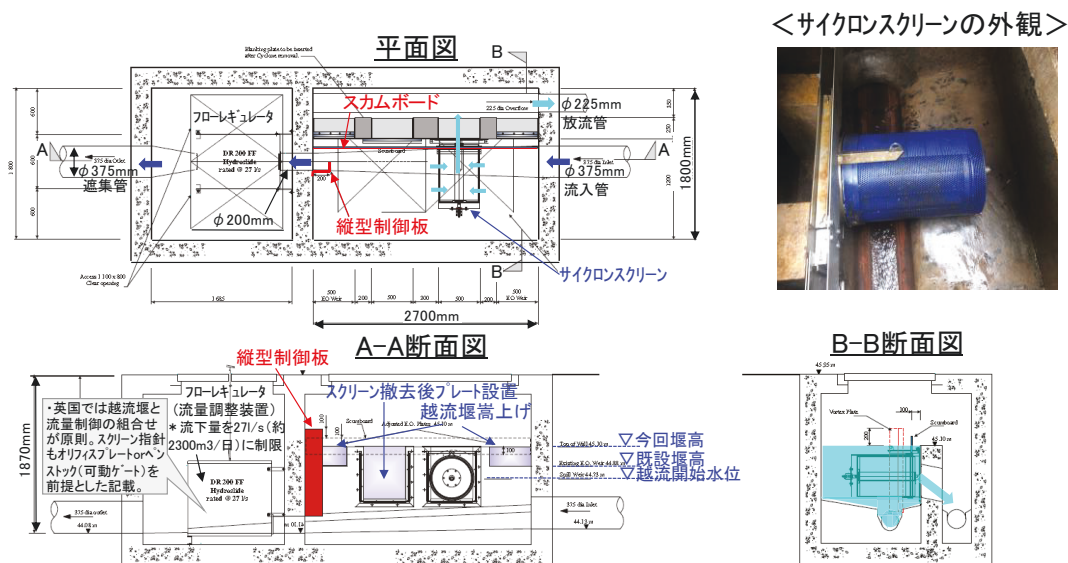


図 6.19 実証実験における水面制御装置の設置工事の概要



写真 6.16 実証実験における水面制御装置の設置工場の状況

設置後、雨水吐き室に設置されている既設超音波水位計（W 社が放流監視用に設置し、テレメータで W 社事務所に伝送されている）のデータを定期的に入手し、越流発生状況を整理した。水面制御装置設置以降の約 8 か月間の雨水吐き室水位の経時変化を図 6.20 に示す。計測期間中、越流発生水位を超える降雨が約 60 回観測された。よって、計測期間中に水面制御装置を含むスクリーンが機能を発揮した回数は約 60 回あったことになる。

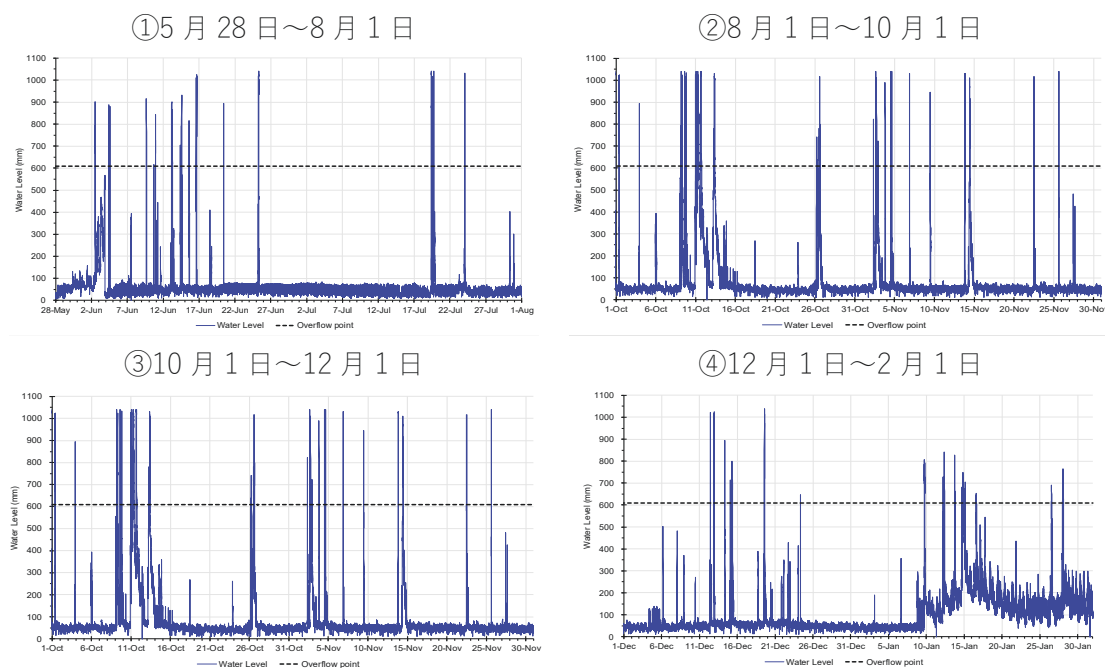


図 6.20 実証実験対象雨水吐き室の水位の経時変化



水面制御装置設置前/後におけるサイクロンスクリーンの外観を写真 6.17 に示す。水面制御装置設置後は、約 8 か月間で 60 回程度の越流が発生していたにもかかわらず、スクリーン表面への夾雑物の付着量が極めて少ないことが確認できた。このことから、垂直型スクリーンと同様にサイクロンスクリーンについても水面制御装置と組み合わせることで、スクリーンの維持管理性の向上に寄与することが可能であると確認した。また、管理者である W 社からの確認と評価を得ている。



写真 6.17 水面制御装置設置前/後のサイクロンスクリーンの外観

### (3)簡易な設計評価指標による評価

欧州の雨水吐き室の特徴としては、遮集管側に流量調整装置が設置されているケースが多い。そこで、流量調整装置の機能（発現）により、雨水吐き室の水位が上昇した場合を想定して、第 4 章で提案した簡易な設計評価指標を用いて水面制御装置の適用性の検討を行う。

本検討で想定した雨水吐き室の諸元を表 6.7 に示す。また、遮集管側に設置される流量調整装置は、単純なオリフィスを想定した。

表 6.7 雨水吐き室の諸元（遮集管口に流量調整装置あり）

項目		記号	単位	設定値	
遮集管	直径	D	mm	400	
			m	0.400	
	断面積	A	m <sup>2</sup>	0.126	
	満管流速	V	m/s	1.00	
	流下能力	Q <sub>full</sub>	m <sup>3</sup> /s	0.126	Q <sub>full</sub> =A・V
	計画遮集量	Q	m <sup>3</sup> /s	0.205	
Q/Q <sub>full</sub>		-	1.628		
雨水吐室	水深	H	m	1.123	遮集管の管頂から水面までの距離 但し、水深は流量調整オリフィスの 動作前（全開）の値として
		H/D	-	2.808	1.123/0.400=2.808

遮集管φ400mmの管口に設置した流量調整装置を単純なオリフィスと仮定して、その開口率（断面積比率）とオリフィス流量との関係を図6.21に示す。なお、オリフィス流量 $Q$ は、オリフィス作用水深を $h$ 、断面積を $a$ 、流量係数を $C$  ( $=0.6$ )として、 $Q=C a \sqrt{2gh}$ として算定した。流量調整装置（オリフィス）がない場合は、雨水吐き室の水位が上昇すると、その分遮集量も増加する。一方、流量調整装置（オリフィス）がある場合は、雨水吐き室への流入量の増加とともに、雨水吐き室の水位が上昇し、オリフィスの開口率（断面積）は減少するため、遮集量は一定値に保たれる。

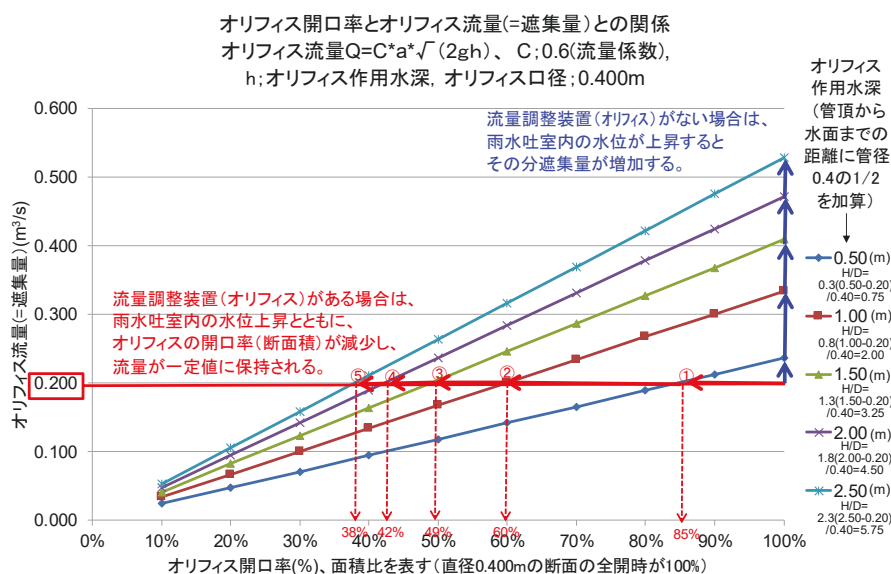


図 6.21 オリフィス開口率とオリフィス流量との関係

このように流量調整装置が機能すると、水位が上昇するにも関わらず、遮集量は一定であることから、水面制御装置の機能維持にとっては厳しい方向（水位上昇しても遮集管が圧力管とならず、浮遊物を吸込む力が增加しない）へ移行することになる。

図 6.21 に示した雨水吐き室の水位の上昇とともにオリフィスの開口率が減少し、遮集量が一定値に保持される現象の各段階における水面制御装置の機能（夾雑物の引込み能力）について、簡易設計評価指標を用いて検討する。検討結果を図 6.22 に示す。

雨水吐き室への流入量が増加すると、雨水吐き室の水位は上昇するが、遮集量は一定に保持されるため、表 6.7 並びに図 6.21 を再現したプロットは、図 6.22 中で縦軸方向に移動し、簡易な設計評価指標の浮遊物捕捉可能領域から不能領域に移動する。これより、表 6.7 の条件（遮集管頂から水面までの距離が 1.123m）では浮遊物の捕捉が可能、図 6.20 の③の条件（遮集管頂から水面までの距離が 1.3m）では浮遊物の捕捉が不能であることがわかる。このように、流量調整装置が設置されている場合は一定の水位条件までしか浮遊物を捕捉することができないが、その流量規模が当該水面制御装置に適用したターゲット降雨を上回っている場合は問題ない。

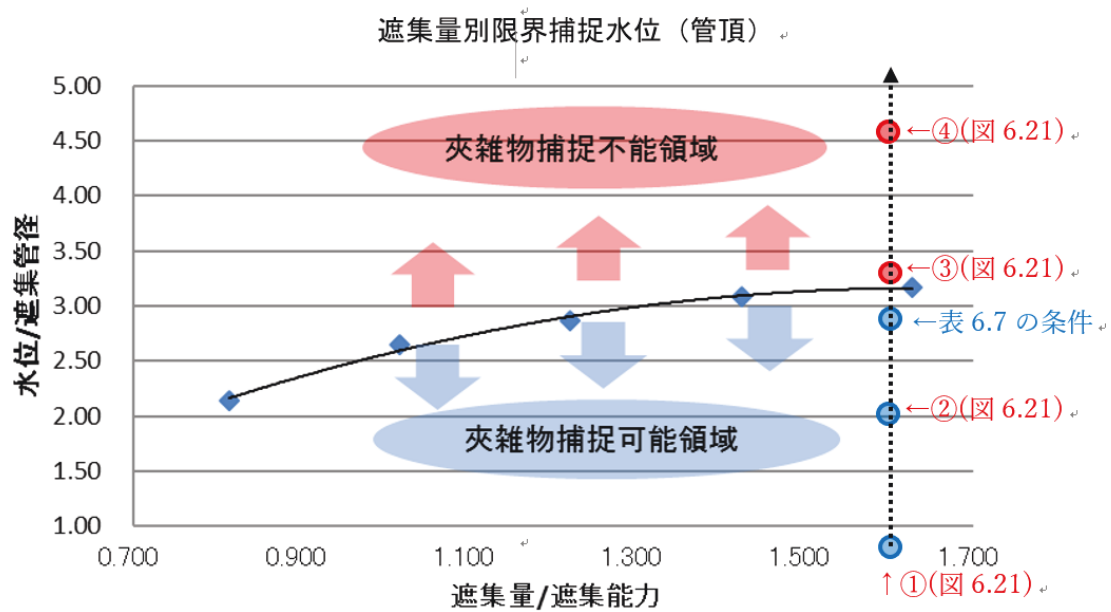


図 6.22 流量調整装置がある雨水吐き室に水面制御装置を適用した場合

#### 6.2.4 まとめ

第 4 章で提案した簡易な設計評価指標は、流量調整装置を有する雨水吐き室に水面制御装置を適用する場合にも適用可能であるといえる。

ただし、今回の検討は海外の 1 事例であることから、国内の事例なども含めて多くの事例で検証することが必要と考えている。

## 6.3 今後の事業戦略に向けての提案

### 6.3.1 国内事業への普及拡大に向けて

水面制御装置の特徴は、1) 取付けが容易で経済性に優れる 2) 維持管理が容易 3) 電力を使用しないため環境に優しい等があげられる。2009年に(財)下水道新技術推進機構から「新技術研究成果証明書」において、その性能を評価、確認された。また、地方自治体でも機械式スクリーンなどと水面制御装置をコスト面や効果などを比較し、その優位性を認めている<sup>7)</sup>。

一方、2004年の下水道法施行令の改正により、吐き口部からの夾雑物対策の義務化とその対策期間が明示された。これを受け、各自治体は緊急改善計画を作成し、これに基づく補助金が交付されることとなった。この事業は、通常の下水道事業に加え「合流式下水道緊急改善計画」に位置付けられた越流水の夾雑物・水質改善対策（雨水吐き室に設置する夾雑物等の除去施設）、越流量の抑制（雨水滞水池・雨水貯留管の設置、遮集管の増強、合流改善のための施設より経済的な分流化に係る管渠）等の事業についても期間事業の交付対象事業とされている。なお、制度期間は図6.23にあるように5年間延ばされ、平成35(2023)年度（令和5年度）には対策を完了することとしている。

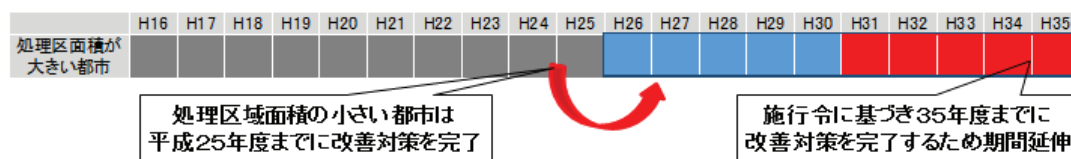


図 6.23 合流式下水道緊急改善事業の制度期間（H31 年度要望事項）

国交省ホームページより<sup>8)</sup>

これらのこともあり、水面制御装置は開発後 20 数年で国内の雨水吐き室約 1,700 カ所（2019 年度末）に設置され、高い評価を受けている。

水面制御装置が早くに設置した実例を見ると、設置後 20 年以上経過しているにも関わらず制御板やガイドウォールの材料劣化は見られず、当初の機能を果たしていることが確認されている。

水面制御装置の単体での設置は概ね普及したものと考えられる。しかし、本論の 6.1 で提案しているように、機械式スクリーンが抱える課題や電気・機械設備であることから耐用年数等を勘案すると、水面制御装置への取り換えや併設等の対応が考えられる。

ついでに、改めて水面制御装置の特徴と設置後の状況を整理し、下水道管理者である各自治体に対して普及活動することが肝要と考える。

## 6.3.2 海外への普及拡大に向けて

### (1)背景

海外でも水質汚濁に対する関心が高まり、EU では 2000 年に排水規制が制定され、合流式下水道を歴史的に採用している国や北米では放流式下水道からの越流対策についての指針を定める<sup>7)</sup>など、改善対策が積極的に講じられている。特にドイツやフランスでは、雨水吐き室からの越流水対策の実施が迫られている。

そこで、開発 3 社は日本での実績を踏まえ、2010 年 6 月にドイツ国のエンジニアリング会社で下水道関連機器の開発メーカーでもある Steinhardt 社（以下「ST 社」）とライセンス契約を締結した<sup>9) 10) 11)</sup>。

### (2)欧州における販売戦略

#### 1)開発 3 社による支援

EU 圏内での普及拡大に向け、ST 社に技術移転を行ったものの、国内で短期間に普及が図られることとなった強力なインセンティブ（法規制や補助金制度、競合技術に対するコスト優位など）の事例は参考にならず、発注者である自治体やコンサルタントなどへの理解が得られにくく、結果として発注につながらなかった。その要因を探ると、EU 圏内の発注形態や商習慣、PR 方法などが各国や地域で大きく異なることが明らかとなった。

そこで、開発 3 社としては、国内での実績データや知見などを ST 社に提供するほか販売促進に繋がる PR 活動についても積極的に支援を行うこととし、2014 年 4 月に覚書 (LOI) を締結した。（写真 6.18 参照）

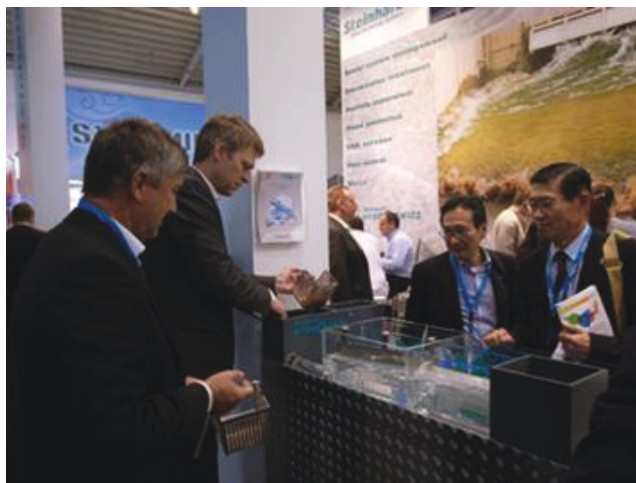


写真 6.18 IFAT2014 の ST 社ブースで開発 3 社による PR 支援

また、当該国での実証実験データがないことなども普及拡大の阻害要因の一つであることから、2018 年 5 月に開発 3 社と ST 社とでドイツ国内の下水道管理者や研究機関（ミュンスター大学）の評価を受けるために共同研究を進める覚書を締結した。

## 2)これまでの経験から

筆者は水面制御装置の開発時並びに ST 社とのライセンス契約締結時から関わっているが、東京都下水道局 OB であり、国内はもとより海外ビジネスは全くの門外漢であった。言葉の問題もあり、当初はヨーク社長との意思疎通もうまく図ることはできない状態であった。この間、契約破棄につながるような大きな課題が生じたことも、何度かあった。そのたびに、開発 3 社の考えや思いを伝え、ヨーク社長の話を真摯に聞くということを重ねるうちに、信頼関係が築けたと考えている。また、ヨーク社長は最重要課題については、会議の冒頭に行い、解決してからその他の案件を議論しようと提案してくる（我々日本人からすると、起承転結的な流れで進め、双方の意見がぶつかり合うような案件は会議の半ば、あるいは後半にと考えてしまうが）。「嫌なことは早くすまし、楽しい話をその後しようじゃないか」というのが彼の考え方である。会議冒頭からエキサイトした議論には、毎回堪えるが、最近その通りだと感じている。

EU での水面制御装置の販売実績は、ドイツ 25 箇所、フランス 4 箇所、ベルギー 2 箇所、イギリス 1 箇所の計 32 箇所（2019 年 3 月現在、写真 6.19、20 参照）であり、まだ少ない状況である。ライセンス契約の時にヨーク社長は、この技術は素晴らしい。しかし、普及のための第 1 ステップは種まき期間であり、10 年の歳月が必要であることを理解してほしい旨の話があった。確かにこの 10 年は、手探りの中で開発 3 社と ST 社とで取り組んできた。いよいよ第 2 ステップとして、この技術を育てる時期が来たといえる。



写真 6.19 ドイツ・設置状況の確認 (筆者)



写真 6.20 ドイツ・水面制御装置の設置状況(写真 6.19 同様)

さらに、国土交通省の「平成 30 年度下水道技術海外実証事業 (WOW TO Japan プロジェクト)」において、英国での実証事業を採択された。本論で提案したように設置済みの機械式スクリーンと水面制御装置を組み合わせることで、相乗効果を発揮させることが狙いであり、英国のみならず EU 圏内や米国などへの新たなビジネス戦略として期待できると考えている。

我が国には世界に誇れる素晴らしい技術や運転・運営ノウハウがたくさんある。それらを先進国や新興国に提供し貢献していくには、まず、相手国の文化・国民性、商習慣や法制度などを理解することが重要である。さらに、技術面から、当該国での適用性についての検討

を日本チームと相手国チームとで本音で意見交換し理解しあうことにより、信頼関係が醸成され、息の長い「海外水ビジネス」が成立するのではと考える。結果が出るまでの期間、担当者の熱意に加え組織の理解と協力を継続することが、何よりも大切であることをこれまでの経験から実感している。

## 6.4 下水道事業以外への利用提案

### 6.4.1 目的

水面制御装置は、浮遊性夾雑物を制御板で生成する渦流に向かってガイドウォールで誘導させ、渦流により遮集管に取り込むという特性がある。湖沼、河川、用水路などの施設が抱える課題の一つに浮遊物の除去作業や沈殿物の除去作業があることから、水面制御装置の特性を活用することで、これら作業を軽減できるのではと考え、以下に2例を提案する。

### 6.4.2 河川や用水路への設置提案

落ち葉などの浮遊物による景観上の問題や河川水の利活用への機能阻害、更には海洋ゴミの発生源といった課題を抱えている河川<sup>12)</sup>や用水路などに、ゴミ回収方策として水面制御装置を設置することで寄与できるものとする。

<提案：水力発電所の取水口への設置>

エネルギー資源の需要が高まる中で、再生可能エネルギーとして古くから活用されている水力発電が見直されている。その発電設備には図6.24に示すように取水設備と水圧管路を設置してタービンを回す方式が多くある。その取水設備には、ゴミなどがタービンに取り込まれないようにスクリーンや除塵装置が設置されている。しかし、このスクリーンや除塵装置のメンテナンスには相当の手間がかかり、特に秋などには落葉の流入が多くあり、その除去作業が膨大となることから、発電機能に支障を及ぼすことが危惧される。

そこで、図6.25(a), (b)に示すように取水口に水面制御装置のガイドウォールと制御板を設置することで、落ち葉などの浮遊物を除去するスクリーンや除塵装置の負荷を軽減させることが可能であると考え、提案する、

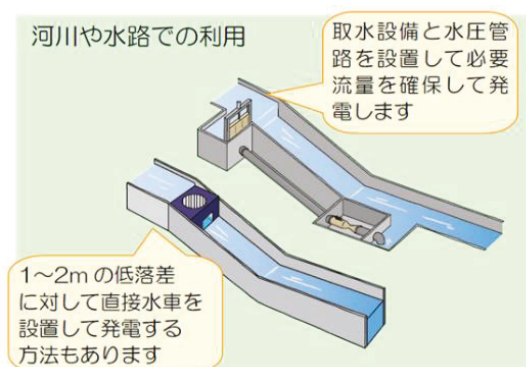


図 6.24 発電設備導入イメージ<sup>13)</sup>

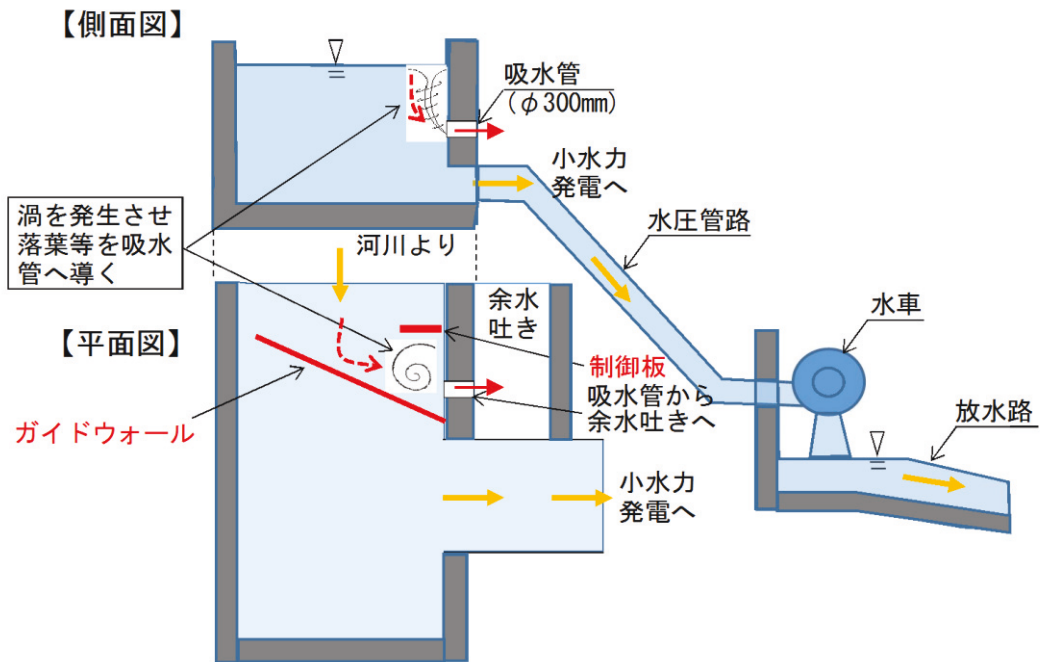


図 6.25(a) 水面制御装置を設置した場合の概念図

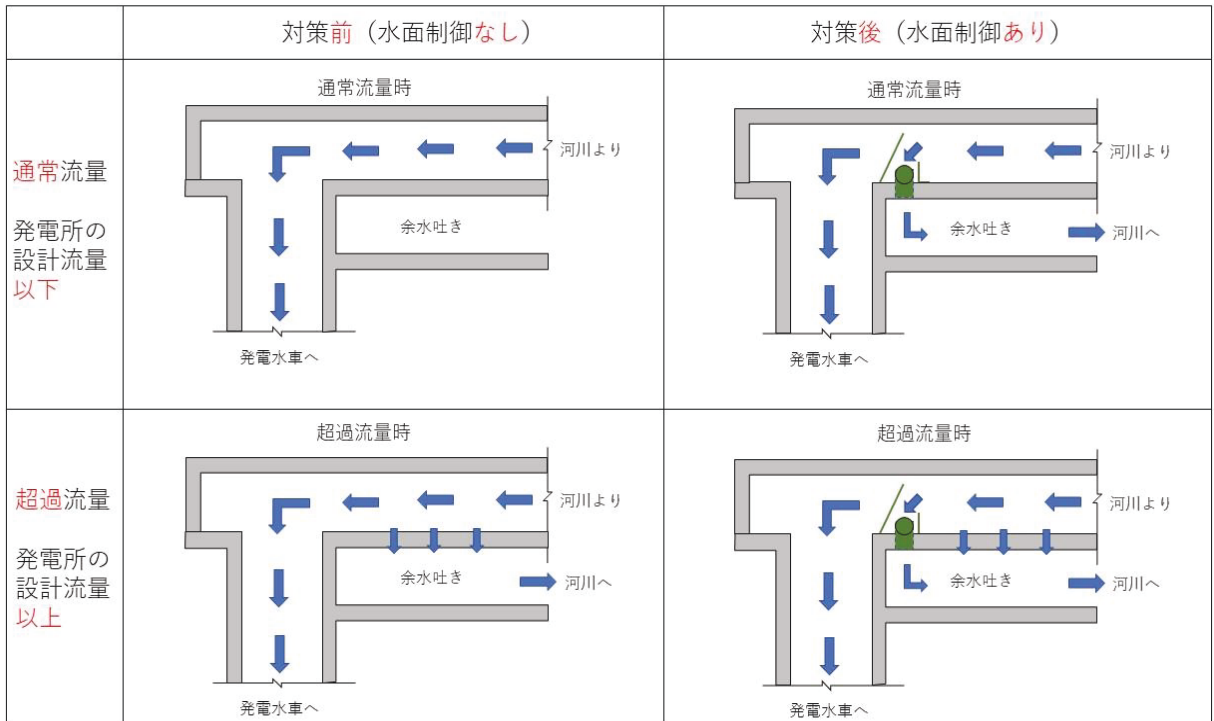


図 6.25(b) 小水力発電の取水口に水面制御装置を設置する場合の概念図



### 6.4.3 ダム湖への設置提案

ダム湖などの湖沼は、本来の役目の他に観光資産としての価値がある。しかし、湖面に流木や落葉、ペットボトルなどのゴミが漂着（写真 6.21 参照）している場合には、本来の機能である水力発電への障害（発電停止，ゲート閉塞等）をおよぼすのみならず，観光や環境保全の面からも大きな課題となっている<sup>14)</sup>。

このため，作業船により作業員がタモ網による手作業（写真 6.22 参照）での回収などが主な対策<sup>14)</sup>になっているのが実態である。



台風通過後に漂着した流芥（津久井湖）



写真 6.21 神奈川県ホームページより<sup>14)</sup> 写真 6.22 タモ網による浮遊ゴミ回収作業<sup>15)</sup>

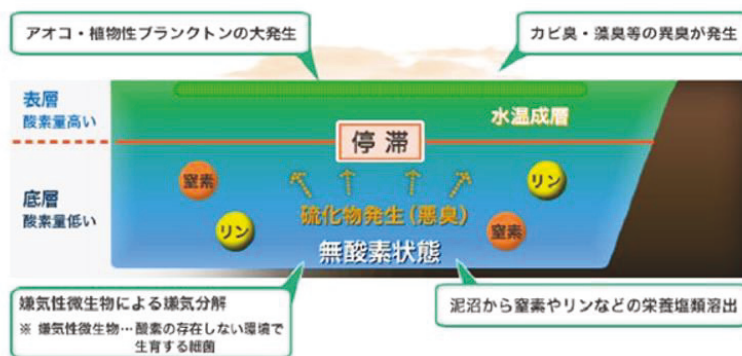


図 6.26 閉鎖性水域（ダム湖等）の夏場の状況<sup>16)</sup>

<提案：水流発生装置と水面制御装置の設置>

渦を発生（写真 6.23 参照）させることで落葉などの浮遊ゴミを収集する目的で水面制御装置を設置する。しかし，ダム湖などの表面水は停滞していることから，浮遊ゴミを水面制御装置に誘導する必要がある。このため，移動式の水流発生装置「ジェット・ストリーマー」を活用し，加えて浮遊性ごみを水面制御装置の方向に誘導する浮遊式ガイドウォールを設置することで，水面制御装置の機能を発揮できるものとする（図 6.27 参照）。

この水流発生装置「ジェット・ストリーマー」<sup>15)</sup> (写真 6.24 参照) は、イービストレード(株)が開発した装置であり、溶存酸素濃度の高い表層の水を噴流ポンプの駆動水として底層にジェット流を起こすことで、酸素を補給して魚類をはじめ海洋生物の生息環境を保持すると同時に嫌気性分解を抑え、鉄、マンガン等をはじめ、栄養塩類の溶出を防ぎ、汚濁の進行を防止する装置である。なお、筆者らはエビスマリン(株)と共に下水処理場の油性浮遊物質(一般的には浮渣、またはスカムという)の除去を目的に、この技術を応用した導水無閉塞水流発生装置(アクアストリーマー)<sup>16)</sup>についての共同開発を実施している。

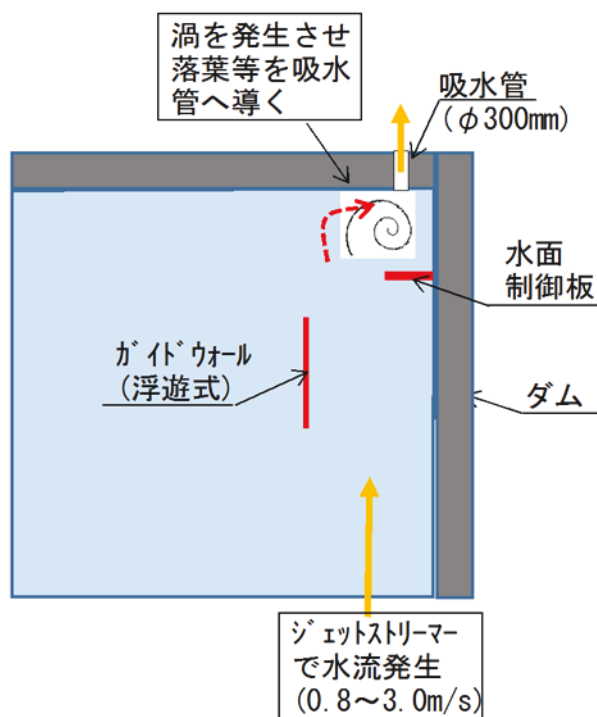


図 6.27 提案装置の配置図

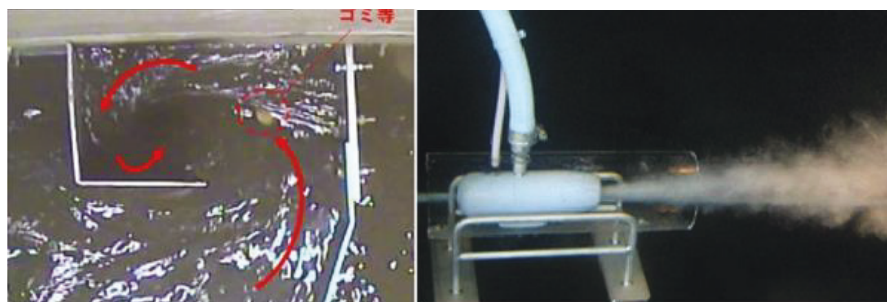


写真 6.23 水面制御装置による渦の発生      写真 6.24 ジェットストリーマー<sup>15)</sup>

以上 2 例を提案したが、今後具体的に設置可能な現場があれば、当該事業者と協議した上でその効果を検証したいと考える。

## 6.5 雨水吐き室での安全作業への展開

下水道の雨水吐き室などの管路施設内で調査や作業を実施する際は、連続して換気することが義務付けられている。下水道の管路施設は、労働安全衛生法施行令で硫化水素中毒又は酸素欠乏症にかかるおそれのある場所とされている。下水構内のガスの有害性は古くから認識されており、1892年(明治25年)に欧米各国の都市において、下水構内に悪気排除対策が施されていることが調査報告されている<sup>18)</sup>。このため、管路内に立ち入って点検作業や補修作業、清掃作業などを実施する場合「下水道維持管理指針((社)日本下水道協会)」<sup>19)</sup>や酸素欠乏症等防止規則などの法規制に基づき、十分な換気を行うなどの安全対策を講じることが義務づけられている。

これまでも年に数回、管路内調査や作業において、十分な換気を行わないことを原因とする人命事故が生じている。

これまでの換気は、ファン式の換気装置(写真6.25)が使用されている。この装置は送風機とダクトにより構成されており、ダクトがマンホール入口を塞いでの設置、運転となる。このため、作業従事者は自由に管路内の出入りや緊急時の避難に支障をおよぼす他、資機材の搬出入時に作業効率が悪いなどの課題がある。

そこで、筆者らは連続送風が可能な換気装置である「無翼扇型送風機」<sup>20)</sup>を開発した。



写真 6.25 従来のファン式換気装置

### (1)送風原理

過去の硫化水素発生要因に関する考察<sup>21)</sup>から、管路内に十分な換気を行うことができれば、下水道の管路内に発生する硫化水素濃度は安全上影響のない低レベルに留まるとされている。

「無翼扇型送風機(ホールエアストリーマ)」(以下「HAST」という)は、管路内への作業従事者の出入りや資機材の搬出入を妨げず、かつ連続送風するために、マンホールの外周部に沿ったリング型の送風パイプにノズルを取り付けて送風する方式として開発した(写真6.26,27)。このため、常時、マンホール入口を解放でき、作業に支障を及ぼすことはない。また、緊急時においても、管路内やマンホールより速やかに脱出することができる(図6.26)。

コンプレッサー式 HAST のノズルは、コンプレッサーからの圧縮空気を高圧、高速で送

り込むことができるノズルを設置する。さらに、リング型の送風パイプにノズルを複数設置することで、中心点に向かって送風させる個々のノズルからの送風（一次導風）が、新たにマンホール上部の空気も引き込む導風作用（二次導風）を発生させることができる（図 6.29(a), 写真 6.28), これにより、少ないエネルギーで効率的に、 $200 \text{ m}^3/\text{min}$  の大風量をマンホール内に送り込むことができる。

一方、電動式 HAST-e は、コンプレッサーの代わりに 100V 発電機でノズル内に収納されている電動ファンを動かし、コンプレッサー式と同様に複数のノズルから空気を中心点に向かって噴射させる構造となっており、 $80 \text{ m}^3/\text{min}$  の風を送風することができる。



写真 6.26 HAST (コンプレッサー式)

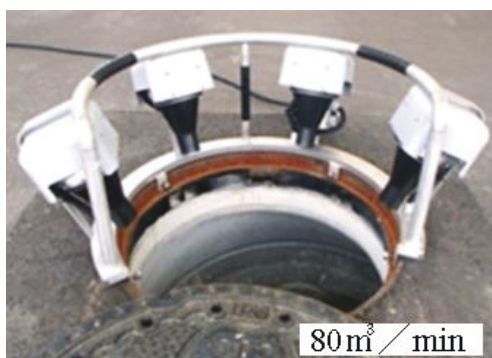


写真 6.27 HAST (電動式)

## (2) 導風効果の検証

筆者らの過去の研究より、コンプレッサー式 HAST において、風源から送出された空気流量に対して管内で風量が増幅される倍率（導風効果）について、実験により確認を行っている。この結果から、風源から送り込まれる空気量に対して、約 100 倍の空気を送風できることが確認されている<sup>22)</sup>。同様に、電動式 HAST-e における導風効果（写真 6.28）を、実験および流体解析によって検証した。

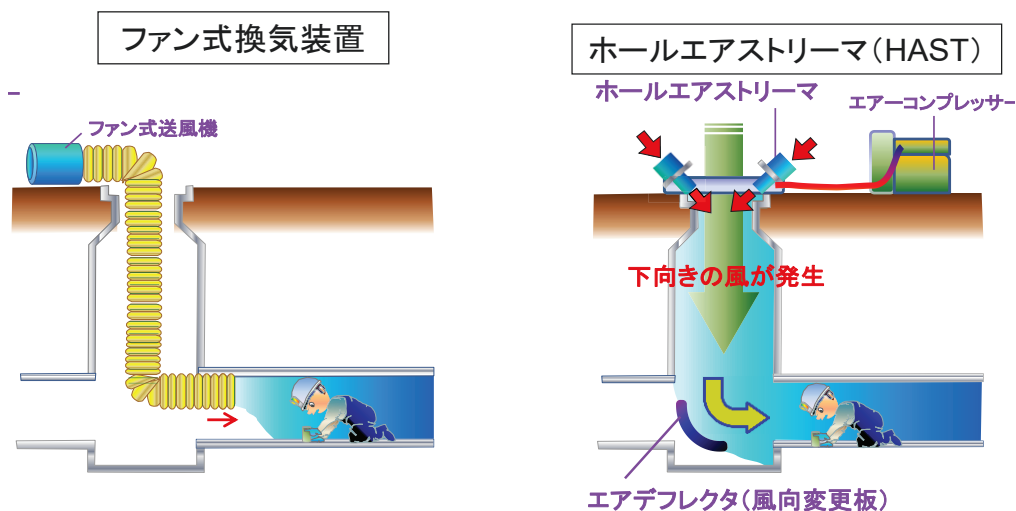


図 6.28 送風装置配置図

1)実験による検証

導風効果は、個々のノズルからの送風の交点（マンホール口から  $L=0.64\text{m}$ ）の周辺部で起こる現象と考えられる。実構造物における送風性能の確認は、後述する現場検証実験により別途行うこととし、送風機の基本性能、導風効果の確認は、 $L=2.0\text{m}$  の塩化ビニル管（ $\phi=600\text{mm}$ ）を用いた室内実験により実施した。

塩化ビニル管片端に送風機を設置し、リング状に4本のノズルから送風する（図 6.29(b)）。測定点は、管の出口断面の風速分布を確認するため、1 か所当たり面積が同等となるよう 22 箇所の熱線式風速計を設置した。5 分間連続的に計測し、10 秒ごとの計測値の平均値を測定値とした。風源からの風速は、断面に 5 箇所のノズル先端断面（ $\phi=40\text{mm}$ ）の圧力を測定し、ベルヌーイの計算式より風速を算出した（図 6.29(c)）。

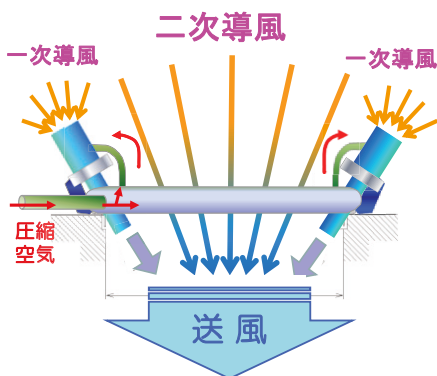


図 6.29(a) 送風原理



写真 6.28 二次導風の発生

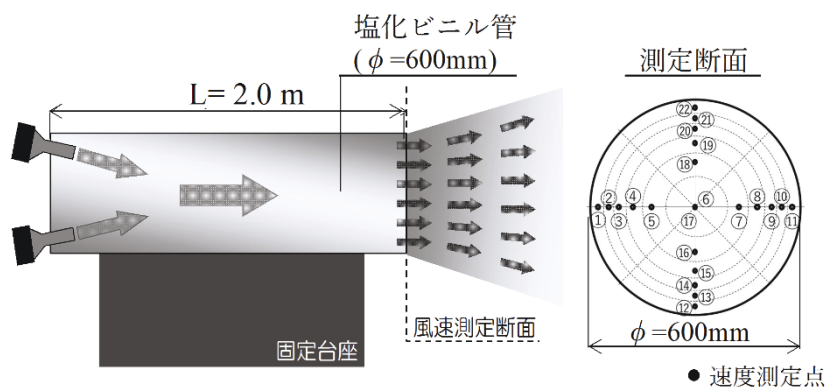


図 6.29(b) 実験装置

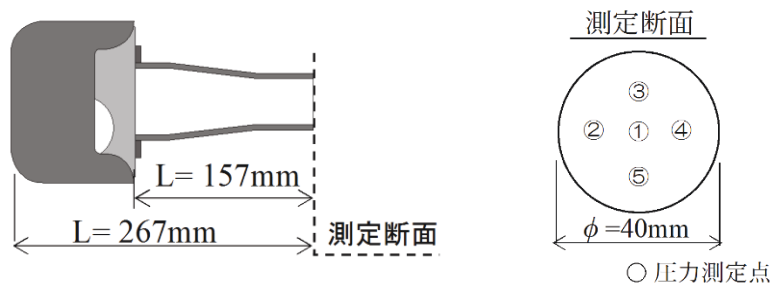


図 6.29(c) 風源の風速測定

$$Q_a = V_a \times A_a = 28.0 \times \frac{\pi}{4} (0.04)^2 = 0.035 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_b = V_b \times A_b = 4.88 \times \frac{\pi}{4} (0.6)^2 = 1.379 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{増幅率 } \eta = \frac{Q_b}{4 \times Q_a} = 9.85 \approx 10 \text{ 倍}$$

式 - 1

$Q_b$  : 塩化ビニル管出口断面の風量  
 $V_b$  : 塩化ビニル管出口断面の風速値  
 $A_b$  : 塩化ビニル管直径

風源ノズル先端断面で計測した風速の平均値は、 $V_a=28.0\text{m/s}$ であった。また、2 m管の出口断面の22箇所で計測した平均風速は、 $V_b=4.88\text{m/s}$ となった。この結果から、風源から送り込まれる空気量の約10倍の空気を送風できることが確認できた（式-1）。

## 2) 流体解析による検証

解析モデルは、図 6.30 に示すように、3次元で2 m管の実験装置をモデル化した。装置周辺の空気の影響を把握するため、3次元の各方向に2 m管の寸法に加え1 mずつの空間までを計算範囲とし、空間端部に大気圧の境界条件を設定している。管の入口断面からの送風は、電動式 HAST-e の形状や角度を再現したノズルをモデル化し、ノズル先端から事前計測された風速値  $V_a=28.0\text{m/s}$  を入力しとして送風した。解析条件を表 6.8 に示す。3次元汎用熱流体解析コード PHOENICS Ver.2019 を用いた定常計算として実施し、塩化ビニル管の摩擦係数  $n=0.010$  は考慮し、管の変形および重力の影響は考慮していない。

解析結果として、図 6.31 に風速コンター図を図 6.32 に、 $L=1.0\text{m}$ 、 $L=2.0\text{m}$  地点の風速分布図を示した。図 6.32 の風速分布は解析値と実験値で概ね一致している。また、図 6.31 の風速コンター図では風速  $v=1.0\text{m/s}$  以上を着色しているが、管の入口付近で周辺の空気を引き込む導風効果が確認できる。風速分布は上下方向に非対称となったが、送風機の4つの風源は作業性を考慮して、偏心した配置になっているためである。

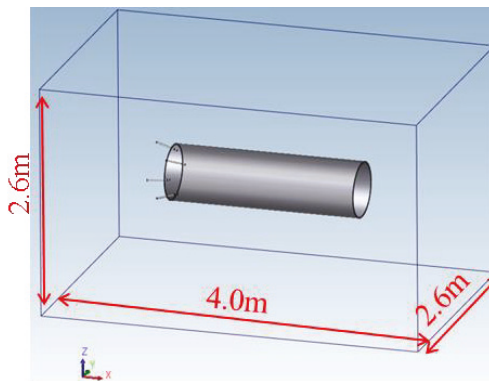


図 6.30 解析モデル

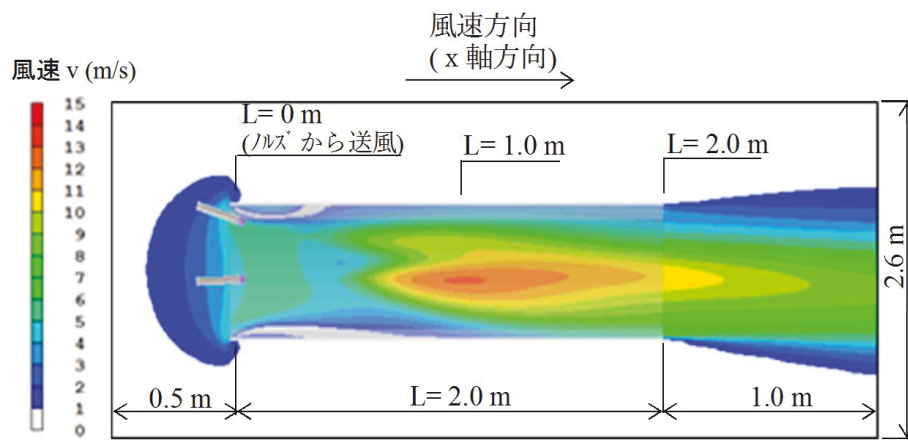
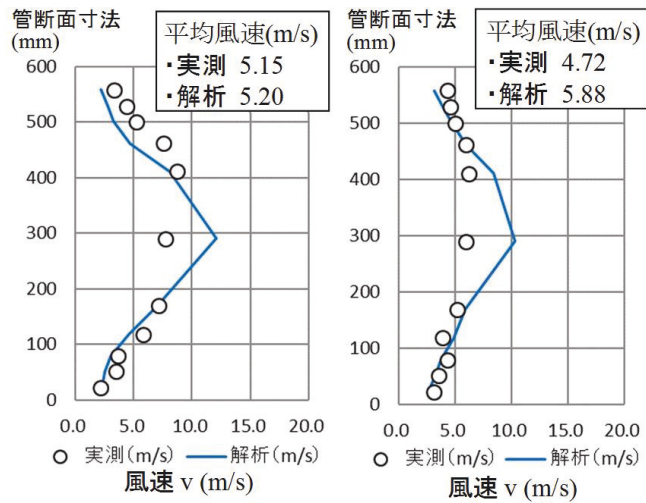


図 6.31 風速コンター図

表 6.8 解析条件

解析コード	PHOENICS
座標系	3次元直行座標軸
時間依存性	定常計算
乱流モデル	Chen-Kim ke 乱流モデル
密度	等エントロピ変化式による
入力するノズル速度	$V_a=28.0\text{m/s}$
メッシュ分割	140万メッシュ



(a)L=1.0m

(b)L=2.0m

図 6.32 断面の風速分布の比較

### (3)まとめ

ホールエアストリーマ (HAST) は、マンホールの空間を常時確保し、連続送風が可能となる換気装置である。このことから、管路内作業の安全性向上に大きく貢献できる技術であると考えている。

本研究では、供用中の現場管路での実証実験や流体解析を通じて、管路内の送風特性の事例を示した。しかし、マンホールの形状や深さ、管路の断面や取付管の存在など、下水道の管路の形状は非常に多様である。そのため、様々な形状の施設において、流体解析等の手法を用いて、管路内の送風特性を把握していくことが必要と考えている。

このように、管路内の送風特性を把握し、実際に作業従事者へ達する送風量を精度よく確認することで、安全な換気方法の提案が可能となると考えられる。したがって、雨水吐き室での調査や水面制御装置の設置工事においても、開発したホールエアストリーマを安全で安心な換気装置として活用していく。



## [参考文献]

- 1) 東京都下水道サービス株式会社・日本工営株式会社：「水面制御装置と機械式スクリーンの組合せによる効果検証に係る共同研究」調査報告書，平成31年3月
- 2) Yukitoshi Iwasa, Motonobu Ito, Chikao Okuda, Jog Steinhard and Hiroaki Morita：「Combined Effect of CSO Screen and Water Surface Control Device on Floatables Removal」9th International Conference on Sewer Processes and Networks, August 27-30, 2019, Aalborg Denmark.
- 3) (財)下水道新技術推進機構合流改善スクリーン研究会：「ろ過スクリーンで浮遊物除去—研究開発の歩み—」(財)下水道新技術推進機構合研究第二部，p5，平成15年7月発行
- 4) 堀江信之：「SPIRIT211による合流式下水道改善技術の開発評価」環境技術 Vol.34 No.10 p.686-690，2005年
- 5) 国土交通省国土技術制作総合研究所・独立法人土木研究所：「第10回日独排水及びスラッジ処理についてのワークショップ会議録」，国土技術政策総合研究所資料・土木研究所資料，p20，平成18年10月
- 6) 村上佳生：「水面制御装置による合流式下水道改善と維持管理」下水道協会誌 Vol.50, No.612, p22-24, 2013年10月号
- 7) United States Environmental Protection Agency:「Combined Sewer Overflows Guidance For Nice Minimum Controls」EPA 832-B-95-003k, 1995
- 8) 国土交通省ホームページ：  
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd.sewerage.tk.000136.html>，2020年3月20日閲覧
- 9) 神山守・岩佐行利・井藤元暢：「海外水ビジネス-海外企業と水面制御装置の共同研究成果を SPN8 で発表-新たな取り組みで水環境改善に貢献」，環境新聞社/月刊下水道 Vol.39 No.14, pp.75~80, 2016年12月
- 10) 岩佐行利：「水面制御装置の欧州における販売戦略」公益社団法人雨水貯留浸透技術協会，水循環 Vol.113, p12-17, 2019年
- 11) 松岡孝・岩佐行利・塚田繁：「合流改善のための水面制御装置の海外展開」日本下水道協会/第49回下水道研究発表会 2012, pp.115~117, 2012(平成24)年7月25日
- 12) 原田禎夫：「海ごみの発生抑制策としての河川の漂着ごみ対策の現状と課題」水資源・環境研究 VOL.28, No.1, p46-51, 2015年
- 13) 北海道経済部：「中小水力発電導入の手引き」 p 6, 平成24年12月
- 14) 神奈川県ホームページ：「ダムに流れ着く流芥の処理について」2020年3月18日掲載
- 15) 町田輝次・関拓夢：現場解決型「ダム湖等浮遊ごみ回収装置(水面清掃船)」の開発・活用について，独立行政法人水資源機構，NPO法人地域リサイクル推進機構，イノベーション部門II，No.21

- 16)イービストレード株式会社ホームページ：  
<https://ebistrae.com/environment/jetstreamer.html>, 2020年4月5日閲覧
- 17)小高勇・三牧大朗・清水雅之・中村光：「水処理施設におけるスカム堆積抑制の取り組み」  
環境システム計測制御学会学会誌, 24巻2/3号, 2019年
- 18)東京都下水道サービス株式会社：欧米各国市街下水溝管渠改良方按（口語訳版），  
2014/04/30
- 19)（公社）日本下水道協会：下水道維持管理指針，2014年版
- 20)岩佐行利，内田智文，清水雅之，中村光，森田弘昭：無翼扇型送風機の適用拡大に向けた開発，下水道協会誌 Vol.57, No.698, pp.108-115, 2020/12
- 21)森田弘昭，高橋正宏，森一夫，島田明夫：下水管渠内維持管理作業における硫化水素発生要因に関する一考察，下水道協会誌 Vol.41, No.496, pp.95-101, 2004/02
- 22)玉本博之，曾根啓一，阿部健，葛西宏直，大堀照生：管路内作業安全性向上のための無翼扇型送風機（ホールエアストリーマ）の開発，第49回下水道研究発表会講演集，pp.808-810, 2012/07

## 第7章 結論

合流式下水道の構造的な宿命として、雨天時に夾雑物を含む下水を公共用水域に越流させるという課題がある。

本研究では、この対策として開発した水面制御装置により生成される渦流が浮遊性の夾雑物を遮集管に引き込む機能に着目し、そのメカニズムの解明と公共用水域への越流抑制効果の検証について取り組み、その結果より設計法を提案した。

本章では、本研究で得られた成果について述べる。

第1章「序論」では、合流式下水道の構造的な課題として、雨天時に遮集管の能力を超えた下水を公共用水域に放流させるため、衛生上、環境景観上から社会問題化した背景を述べ、国や都などが取り組んできた改善策などの背景を述べた。

その上で、本研究の目的と構成について述べた。

第2章「合流式下水道の課題と既往の取り組み」では、明治期にコレラ対策として導入した近代的な下水道システムと合流式下水道を採用した経緯、設計に当たっての雨水量の算定や遮集倍率の決定経緯などについて整理した。

また、合流式下水道の課題、その改善策を法制度面や施策面について、国や東京都の取り組み経緯をまとめ、水面制御装置の開発に至る背景について整理した。

第3章「水面制御装置の開発と標準設計法の提案」では、東京都下水道局、東京都下水道サービス(株)、日本工営(株)の3社が開発した水面制御装置である。東京都下水道局や(社団法人)下水道新技術推進機構では水面制御装置を構成するガイドウォールと制御板の組合せを5タイプとし、その技術資料や設計法を設定している。

筆者は改めて既存の実験結果を再整理する中で、浮遊性夾雑物の越流抑制効果に着目して、「ガイドウォールと縦型制御板」で構成する装置の効果を確認し、この装置を研究対象装置とすることとした。あわせて、実験結果から雨水吐き室に水面制御装置を設置することによる上流部への水位上昇は少なく、大きな影響をおよぼさないことを確認した。しかし、実現場の状況を勘案し、上流部への水位上昇について設計時には検討すべきとの結論とした。以上の実験結果を踏まえ、標準設計法として提案した。

また、対象となる既設の雨水吐き室は構造や流入管の位置及び流量、遮集管の位置や流量、越流堰の位置、越流水位高などが異なることから、設置後に水面制御装置としての機能が発揮しているかについて、テレビカメラによる映像確認や目視などにより効果確認を行い、必要に応じて再設計を行っているなどの課題があることを明らかにした。

第4章「装置の効果確認と設計評価方法の提案」では、提案する標準設計法により雨水吐き室に設置した効果を見極めるために、雨天時に流入した夾雑物と堰を越流する夾雑物を回収するなどの調査を踏まえ、「ガイドウォールと縦型制御板」の装置は高い捕捉率があることを確認した。

また、筆者はこれまでの実験結果や実施事例などから、渦の発生は「遮集管の管頂から水面までの水深」「遮集量」「制御板」の3項目が大きく影響していることを知見として有している。このことを踏まえ、遮集管に浮遊物を捕捉できる限界の水位を表すグラフを作成するために実験を行った。このグラフを「簡易な設計評価指標」として提案し、標準設計の制御板により浮遊物を60%以上捕捉できるか、あるいは捕捉できないかを評価することが可能となった。さらに、水面制御装置を設置し、効果を発揮している1,300件の中から30カ所を抽出し、「簡易な設計評価指標」の妥当性を検証した結果、適用できることを確認した。

第5章「渦流メカニズムの解明と設計法の提案」では、制御板により雨水吐き室に生成される渦が浮遊物を引込む現象を踏まえ、引込む渦を「渦径」、コマ状の螺旋回転をする「ロート」(ロートには中心部に空気がロートと共に螺旋状に回転するエアコア)、さらにロートから遮集管に浮遊物を引き込む「渦糸」の3つに分類した渦流モデルを設定した。

雨水吐き室と同等スケールでの実験結果と水面制御装置が設置されている雨水吐き室の観測データ、流体解析などによる分析でメカニズムの解明を試みた。これらの知見による新たな設計法を提案した。

#### (1) 浮遊物が渦径に流集される検証結果

- ・制御板で生成される渦流は、水深が増加するとともにその大きさ(渦径)は減少することや、水量の増加に伴い水位が上昇することにより水面の平均流速も減少することなど、水量と水深が相関して変化することを実験で確認した。
- ・制御板とガイドウォールや雨水吐き室の壁で囲まれる範囲の水深と流速に着目し、水の流れの指標として用いられるレイノルズ数で評価することを検証した。
- ・実験結果並びに既設の雨水吐き室によれば、レイノルズ数(Re) = 35,000 から 40,000 では、流集効果のある安定した渦径であると評価できる。また、Re=50,000 では、渦径は不安定な状態となる。
- ・しかし、レイノルズ数の算定に用いた式はダクトなど閉鎖空間を想定した式により検証していることから、適用するにはさらなる研究が必要との結論とした。

#### (2) 浮遊物が螺旋状のロート部に引込まれる検証結果

- ・渦流の発生状況や浮遊物の引込み状況を把握するために、3次元流体解析モデルの設定により渦の下降流速(斜降流速)を算定し、算定した浮遊物の浮上速度とで比較した。
- ・浮遊物の上昇域と下降域が求められ、浮遊物が下降する条件としては「引込み力 > 浮遊物の浮力」であり、「引込み力 < 浮遊物の浮力」の場合、浮遊物はロート底部に留まるか、あるいは水中へと引込まれる沈降と浮上を繰り返すことになる。

### (3) ロート部に引込まれた浮遊物を遮集管に吸込む渦糸の検証結果

- ・ロート底部に浮遊物モデルが達するとロート底部に繋がった渦糸に引き込まれて一個ずつ、あるいは連なって、遮集管へと運び込まれていく。なお、浮遊物がロート内に捕らえられると渦糸の引込み力が低下して、降下沈降中の浮遊物が上昇に転じるといった現象が確認された。
- ・遮集管に吸込む力は、ポンプの吸込み水槽内に発生する空気吸込み渦の現象と類似していると想定し、提案されている吸込み管の流入速度を予測する実験式で検証した。
- ・結果、遮集管の吸込み流速や渦流の消滅水位高の算出には、提案されている実験式を適用することが可能であり、水面制御装置の設計段階で渦糸の引込み力を算定し、その効果を検討することが可能であると結論した。

本章で得られた渦流による浮遊物の引込みメカニズムにより、制御板の果たす役割が明確となるとともに、設計段階で渦流の発生状況、浮遊物の引込み状況が把握でき、水面制御装置の設計の合理化・省力化、夾雑物削減効果の向上、事後検証の合理化に貢献できるものと考えられる。

第6章「水面制御装置の新たな活用方策の提案と検証」では、水面制御装置の特性を活かすべく、他の用途への利用を提案した。

既に雨水吐き室に設置されている機械式スクリーンとの併設利用を提案し、実現場での測定データからスクリーンに付着する浮遊物の削減効果を確認するとともに、第4章で提案した「簡易な設計評価指標」が適用できることを検証した。

また、海外（欧州）での事業展開を進めている中で、日本と欧州との降雨状況の違いや雨水吐き室の構造上の違いなどが明らかとなった。この違いを踏まえ、欧州で一般的に設置されているスクリーン装置との併設を提案し、その効果検証を行った。結果、効果を確認するとともに第4章の「簡易な設計評価指標」も適用できることを確認した。

あわせて、これまで筆者が欧州での事業展開に取り組んできた経験などをとりまとめた。

その他、河川や用水、並びにダム湖などでのごみ回収作業の軽減策として水面制御装置の特性を活用する提案を行った。

さらに、雨水吐き室などの下水管路内で作業を行う場合、連続して送風換気することが定められている。筆者らが開発した連続送風が可能な換気装置について、実験や流体解析による検証結果を述べている。

以上、本研究で渦のメカニズムを明らかにし、実設計での適用について示唆したが、今後は実務でその有用性を確認したい。また、比重の異なる液体の分離技術としての応用や渦流特性を活用した新たな装置の開発についても取り組んで参りたい。

## 謝 辞

人生100年の時代、70歳を迎えこれからの人生をどのように過ごすかを考えた時に、これまで携わった多くの業務体験と知識を下水道界に恩返しをすべきではとの思いに至りました。その中で、筆者は水面制御装置の技術開発から普及拡大、更には海外展開に至る20数年に渡って携わった経緯を集大成としてまとめておくとともに、いくつかの課題を研究テーマとして整理しておくべき使命があるのではとの思いが、大学院入学の動機でもあります。また、「夕日は最後に最も輝く」という言葉を胸に、与えられた命の定めの中でこの技術のみならず、下水道への熱い思いと共に学位取得の姿を若い世代に伝えたいとの高慢な思いで、この研究に取り組んで参りました。

本論文は、筆者が東京都下水道局並びに東京都下水道サービス(株)に在職中および平成31(令和元)年4月からの日本大学大学院の在学中に行った研究を取りまとめたものです。

研究を進めるにあたり、多くの方々から様々な面でご指導、ご協力、ご鞭撻を賜りました。

研究の担当教授として、本論文の主査として、非常に多忙な中にもかかわらず多大な助言とご指導をいただきました日本大学大学院生産工学研究科主任教授森田弘昭先生に心より感謝しますとともに、深くお礼を申し上げる次第です。

本論文の審査に当たりましては、御多忙な中、副査をお引き受けいただき専門的見地から貴重なご意見、ご助言をいただきました生産工学部土木工学科小田晃教授、環境安全工学科保坂成司教授、理工学部土木工学科齋藤利晃教授に深く感謝申し上げます。

本論文に関連する実験とその取りまとめ、学会などへの投稿論文の作成に多大なご協力をいただきました東京都下水道サービス(株)技術部長家壽田昌司様、技術開発課長杉本克美様、同課長代理内田智文様、日本工営(株)上下水道部長塚田繁様、同副技師長佐藤誠様、同専門部長井藤元暢様、同高部一彦様、同廣川真理子様には厚くお礼を申し上げます。

このほか、研究並びに論文作成に当たっての御助言や励ましをいただきました日本大学生産工学部前学部長(前副学長)落合実先生、名誉教授工藤勝輝先生、教授秋葉正一先生、教授高橋岩仁先生、准教授佐藤克己先生、客員教授(元東京都下水道サービス(株)社長)前田正博先生、東京都下水道局技監神山守様、東京都下水道サービス(株)技術顧問高橋良文様、本装置の発明者でもある日本工営(株)理事小松寛様に厚くお礼を申し上げます。

研究にあたり、これまでの関連実験データ並びに報告書等の提供をいただきました東京都下水道局の関係者にお礼を申し上げます。

筆者の研究にご支援をいただきました東京都下水道サービス(株)代表取締役社長岸本洋一様、前東京都下水道サービス(株)代表取締役社長渡辺志津男様、東京都下水道サービス(株)技術専務池田匡隆様、前東京都下水道サービス(株)技術専務宇田川孝之様に感謝申し上げます。

最後に、筆者の研究において業務との両立などに対して健康を気遣い、励まし、支えてくれた妻と3人の息子家族に感謝して、本論文の謝辞とさせていただきます。

岩佐 行利