

高性能振動水柱型波力発電装置のシステム設計法
に関する研究

平成 28 年 1 月

日本大学大学院理工学研究科博士後期課程
海洋建築工学専攻

木原 一禎

目 次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	2
1.2	研究目的	5
1.3	システム設計法の構築	6
1.4	本論の概要	7
第 2 章	Stage1 コンセプトの構築	10
2.1	Stage 1 コンセプトの概要	11
2.1.1	廉価型システムの考案（装置の建造費用低減）	11
2.1.2	装置の高性能化	11
第 3 章	Stage1 振動水柱型波力発電装置の原理と発電電力・建造費用推定法	15
3.1	PW-OWC のメカニズム	16
3.1.1	押し波時のメカニズム	17
3.1.2	引き波時のメカニズム	19
3.1.3	二次変換メカニズム	21
3.2	一次変換の推定法	23
3.2.1	基本仮定ならびに座標系	24
3.2.2	境界条件	24
3.2.3	積分方程式	27
3.2.4	一次変換係数	29
3.2.5	の算定	30
3.3	二次変換と一次変換の連成推定法	31
3.3.1	タービン特性の計算	32
3.3.2	一次,二次マッチングの連成図式解法	34
3.4	概略設計による発電コスト試算（B/C）	36
3.4.1	OWC の幾何学形状の設定	36
3.4.2	OWC の諸元決定	37
3.4.3	波力発電装置の設計例	39
3.4.4	発電システムの経済性の検討	41
3.5	まとめ	43
第 4 章	Stage1 振動水柱型波力発電装置の構造設計法	44
4.1	概要	45
4.2	PW に作用する波圧強度	45
4.3	OWC 部の作用圧力	47

目 次

4.4	安定計算（安全率）	48
4.5	構造設計の順序	49
4.6	まとめ	50
第5章	Stage2,3（水槽実験）による	51
5.1	Stage2, Stage3 の概要	52
5.2	安全性の検証方針	52
5.3	Stage 2 小型模型による二次元水路実験	54
5.3.1	実験ケース	55
5.3.2	実験結果	56
5.4	Stage 2 平面水槽実験とシミュレーション検証	58
5.4.1	実験概要	59
5.4.2	水槽実験と数値計算結果	59
5.5	Stage 3 大規模模型による水槽実験	61
5.5.1	実験方法	61
5.5.2	実験ケース	64
5.5.3	実験結果	65
5.6	まとめ	71
第6章	Stage4 実海域実験の概要	72
6.1	消波ケーソンを利用した PW-OWC 装置	73
6.2	単独で発電装置を設置する場合の特性	73
6.3	有孔ケーソン利用の概要	75
6.4	水槽実験によるエネルギーロス特性確認	77
6.4.1	実験模型	77
6.4.2	実験方法	77
6.4.3	実験結果	77
6.5	水槽実験と MPS 解析の検証（エネルギーロスの検討）	79
6.5.1	OWC の水面変動	79
6.5.2	消波孔のエネルギーロスについて	80
6.6	港内波/港外波のエネルギー比及び頻度分布	81
6.6.1	波高比の算定	81
6.6.2	港内の波エネルギー算定結果	84
6.7	発電コストの検証	85
6.8	まとめ	86

目 次

第 7 章	Stage4 実証実験装置の設計法および施工法	87
7.1	実証実験装置の設計	88
7.1.1	概要	88
7.1.2	設計フロー	88
7.1.3	設計条件および設計方針	90
7.1.4	設計条件	91
7.1.5	設計検討手順	92
7.2	有孔ケーソン強度照査	93
7.2.1	設計作用荷重	94
7.2.2	安定性照査	96
7.2.3	ケーソン部底版の配筋照査	99
7.3	波力発電装置の躯体の強度検討	104
7.3.1	設計作用荷重	104
7.3.2	許容応力度	105
7.3.3	部材の検討	105
7.4	波力発電装置の防食検討	107
7.5	電気制御設計	107
7.5.1	概要	107
7.5.2	駆動装置の仕様	108
7.5.3	発電装置の仕様	109
7.5.4	発電制御装置の仕様	110
7.5.5	操作，監視装置	110
7.5.6	誘導発電機制御盤	110
7.5.7	発電電力吸収負荷抵抗器(温水器)	111
7.6	構造イメージ図	112
7.7	まとめ	113
第 8 章	Stage4 波力発電装置の施工	114
8.1	概要	115
8.2	施工手順	115
8.3	施工上の留意点	117
8.3.1	許認可	117
8.3.2	品質管理基準	117
8.3.3	製作ブロック単位	118

目 次

8.4	施工状況	118
8.4.1	輸送	118
8.4.2	中部ロック据付	118
8.4.3	最下部ブロック設置	119
8.4.4	ブロック設置	119
8.4.5	タービン・発電機設置	120
8.4.6	電気設備	120
8.4.7	計測機器設置	120
8.5	まとめ	121
第9章	Stage4 実証機の発電性能検証	122
9.1	発電状況	123
9.1.1	計測装置配置	123
9.1.2	発電特性	125
9.1.3	発電特性まとめ	132
9.2	衝動タービン特性	133
9.2.1	衝動タービン概要	133
9.2.2	衝動タービン実証実験結果	139
9.2.3	衝動タービン特性まとめ	143
9.3	一次,二次変換における実証実験結果との整合性	143
9.3.1	タービンの回転数毎の特性	143
9.4	まとめ	146
第10章	Stage4 シミュレーション検証	147
10.1	概要	148
10.2	一次変換係数に関する数値解析	148
10.3	二次変換特性計算	150
10.4	連成図式解法の妥当性の検証	151
10.4.1	図式解法(タービン特性との連成)	151
10.5	まとめ	153
第11章	結論	154
11.1	結論	155
11.1.1	Stage1 コンセプトの提案	155
11.1.2	Stage 2,3 水槽実験による技術課題の検証	156
11.1.3	Stage 4 実証実験によるシステム設計法の妥当性の検証	157

目 次

謝辞	160
参考文献	162

付録1 : PW-OWC 型波力発電装置図面

付録2 : 酒田港 PW-OWC 設置に伴う有孔ケーソンの安定計算および設
備構造計算書

付録3 : PW-OWC 型波力発電装置施工写真

第1章 序論

1.1 研究背景

海洋再生可能エネルギーの活用は、古く 1965 年にさかのぼり、海上保安庁の航路標識ブイの電源として実用化された。当時は小規模で補助的な電源であったが、1977 年のイギリスのソルターダックの発明後、OWC (Oscillating Water Column : 振動水柱) 型発電装置は十数 kW まで出力が可能となった。

日本における波力発電の歴史は同じく 1970 年代後半に、世界に先がけて様々な型式の装置が提案された^{1),2),3),4),5)}。特に、OWC 形式については図 1.1 に示すように国が主体となって研究開発を支援し、世界に先駆けて実用化の目処をつけた。しかしながら、高価な発電費用 (kWh あたりの発電費用)、電力の安定供給がしづらい点、原子力シフトの社会情勢により、海洋をはじめとする海洋再生可能エネルギーに対する関心が薄れていった。このため、当時から積極的に技術開発を推進した欧州諸国に比べ、日本における波力発電の研究開発は周回遅れと言われるまで衰退した。

現在、温室効果ガスの増大は世界的に深刻で、2015 年 6 月ミュンヘンで開催された G7 サミットにおいて、温室効果ガスを「世界全体で 2050 年までに 10 年で 40 ~ 70% の幅の上方で削減する」目標を支持することで合意され、世界一丸となってこの問題に取り組んでいる状況である。

この目標を達成するにあたり、四方を海に囲まれ、世界第 6 位の EEZ (排他的経済水域) を有する我が国にとって、海洋再生可能エネルギーの有効利用は必要不可欠である。このエネルギーの有効利用が可能になれば、持続可能な低炭素化社会への転換と新たな産業基盤のイノベーション創出によるグリーン・イノベーションの経済的効果に寄与できる。

また、東日本大震災を契機とし、原子力発電を主体としたエネルギー政策の見直しが急務となり、自然再生可能エネルギーの重要度が高まっている。

日本における海洋再生可能エネルギーの技術開発は、新成長戦略 ~ 「元気な日本」復活のシナリオ ~ (平成 22 年 6 月 18 日閣議決定) のグリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国戦略に位置づけられ、2012 年度から「海洋再生可能エネルギー等の開発・普及の推進」計画が立案され実施されている。さらに、海洋再生可能エネルギーは、分散型エネルギー源として離島などの地域の活性化との両立が可能であり、国内外への普及を目的とした海洋再生可能エネルギー開発技術として、洋上風力発電装置、波力を有効利用する発電装置、潮流・海流を利用する発電装置の実用化が急がれている。

2015 年現在、日本のエネルギー政策によれば、徹底した省エネルギー社会の

実現，再生可能エネルギーの導入加速化などが主要項目となっている。

NEDO（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）は，波力発電などの海洋再生可能エネルギーについて，発電単価を 2015 年までに 40 円 / kWh とする装置の開発目標を示し，これを実証することにより，我が国における海洋再生可能エネルギーの発電技術の復活と国内外に向けた装置の普及・展開を推進している。

現状の我が国の海洋エネルギー利用型発電装置の開発研究は，図 1.2 に示すように様々な研究開発が行われているが，洋上風力発電以外に事業化が進んでいない実態がある。洋上風力発電の事業化が進む理由としては，風力発電 2MW/基以上の大型化が可能であること，構造がシンプルである点が挙げられる。一方，その他の発電装置は，大型化や発電効率などの技術開発の難しさにより，発電コストの廉価化が難しく，事業者の参入を妨げている。以下に示すような事項は，発電コストを上昇させる要因や検討項目を複雑化させる要因になっている。



図 1.1 日本の開発状況

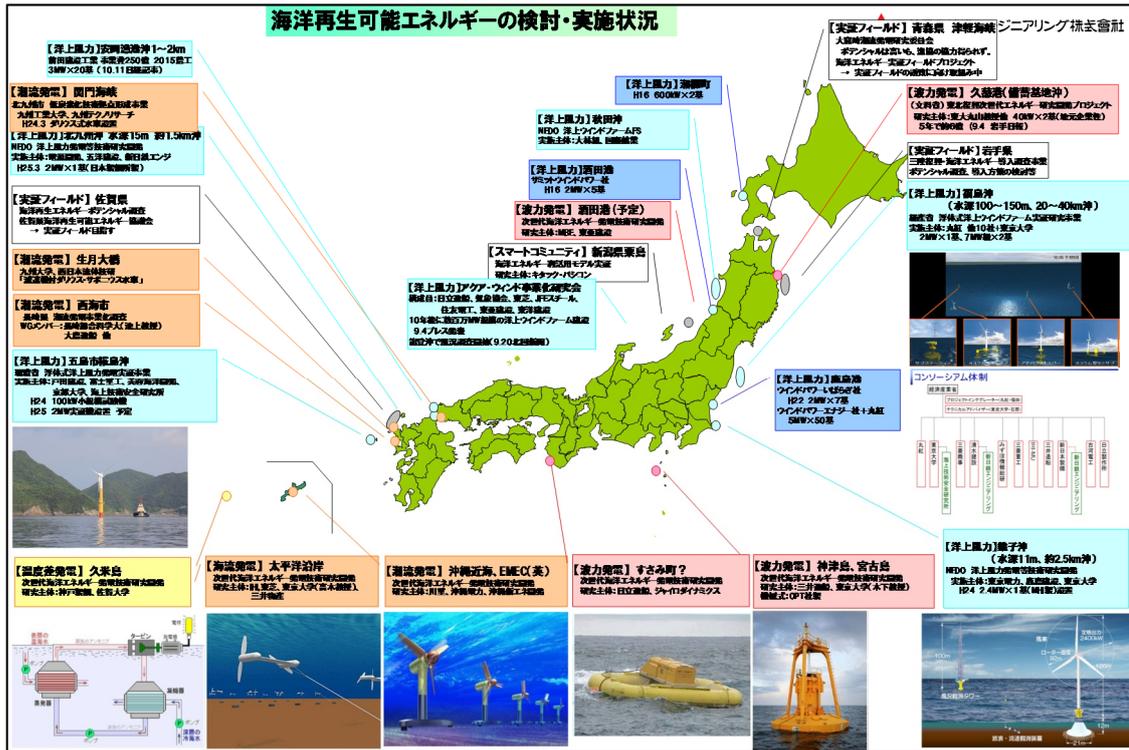


図 1.2 2015 年現在の日本の開発状況

発電装置の構造：波エネルギーの変換方法は，図 1.3，図 1.4 の海外事例のように機械式が提案されているが，機械部の摩耗，腐食問題など陸上構造物に比べて過酷な条件下での対策が必要になる．固定式においても，荒天時に波パワーを受け止めるため強度に配慮が必要である．

装置のメンテナンス：装置の大半が洋上に設置される場合が多く，故障や点検には作業船が必要な場合が多く，荒天時を避けての作業となり，点検の効率化と作業船の費用に課題がある．

電送：大半が海底ケーブルでの電送になる．そのため，水圧に耐えうる特殊ケーブルが必要となり，付加価値のための費用が増大する

インストール（建設）：発電装置の設置に際して，海上作業船が必要である場合が大半である．海上起重機の作業効率は，海上波浪の状況によっては，作業工程の遅延など稼働率が陸上起重機に比べて小さい．そのため，インストールに関する費用が増大する．

知見・技術の不足：原子力・火力発電所は，発電形式によって様々であるが，建設の際の土木・建築技術の他，電気，機械，原子力，化学などの知見や技術が必要である．波力発電装置には，上述の知見・技術以外に船舶，海洋建築などの海洋技術の知見が必要である．

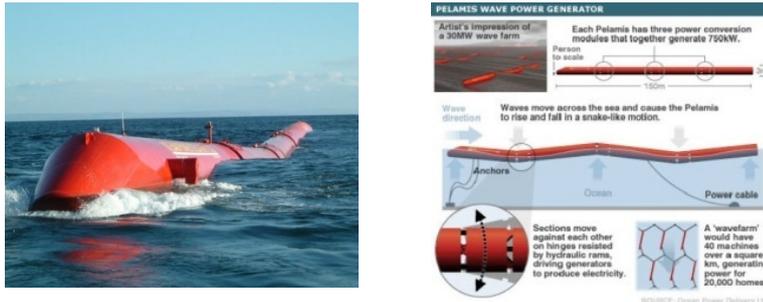


図 1.3 ペラミス (Pelamis Wave Power)

出典 <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>

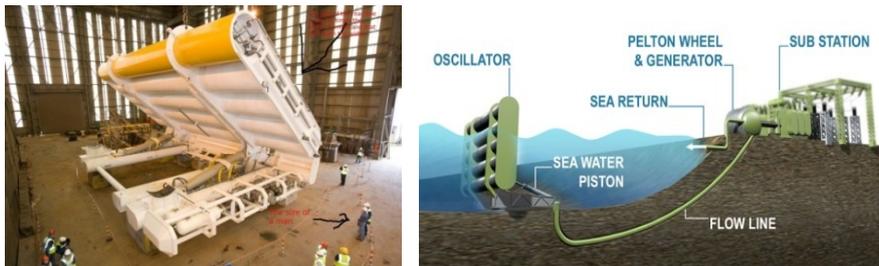


図 1.4 オイスター (Aquamarine Oyster Power)

出典: <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>

以上のことから，これらの発電コスト上昇要因の複雑さを出来るだけ低減させる発電装置の開発が重要となってくる。

著者は，そのような背景を踏まえ，外洋波浪の影響が小さく，比較的容易に設置することが可能な固定式の振動水柱型（OWC）波力発電装置に着目した。

また，発電コストに着目するとこれまで日本で研究開発された OWC 型波力発電装置（図 1.1）の発電コストは，いずれのタイプも 120 円～150 円/kWh と高価である。しかし，現代社会において実用化を推進していくためには，他の自然再生可能エネルギーと遜色ない発電コストを設定する必要がある。

そこで，発電単価の目標値は，現状の風力・太陽光発電を参考にして，既存の波力発電の 1/3 以下の費用である 40 円/kWh 以下とするのが妥当であると考え，これを発電単価の目標値とし，研究開発を進めることとした。

1.2 研究目的

発電単価の目標値である 40 円/kWh を満足させる発電装置を開発するためには，装置の製作・設置に加え維持管理などの費用を極力低減させるとともに，発電効率を向上させる必要がある。

さらに，これまで様々な波力発電装置が実証されてきたにも関わらず，発電

技術の設計標準（設計ガイドライン）が、いまだ十分に整備されていない状況にある。この要因として、波力発電装置の技術開発が、未だ研究開発の段階に位置づけられているために、実用化（商用）ベースで稼動する技術がほとんど存在せず、実海域におけるデータや知見が限定的であることが挙げられる。

以上のことから、本研究の目的は 40 円 / kWh の目標達成のための克服すべき技術課題の解決を図ることと、実用化を想定した開発ガイドライン（システム設計法の構築）を示すことである。

1.3 システム設計法の構築

本研究の目的は、波力発電装置の実用化を実現させるためのガイドラインを示すことである。

そのためには、発電システムの水槽実験による技術検証、実用化する想定海域での海象条件（自然条件）や環境影響の把握、装置の設計法の妥当性の検証等を行った後に、実海域での最終検証を行うなど、検討の主要段階ごとに、技術の妥当性を検証していく必要があり、それが結果的に実用化に向けた近道であると考えている。そこで、具体的な開発ステップとして、NASA の TRL（Technology Readiness Level）や EU の Stage-Gate の技術成熟度評価手法を参考に研究開発ガイドラインを研究開発ステップとして設定した。（図 1.5 右図及び図 1.6）TRL や Stage-Gate 手法は、プロジェクトの技術判断根拠を様々な視点（office 研究部門、研究機関等の連携組織）から確認することにより透明化を図り、技術の成熟度評価を行うものである⁶⁾。

本研究では、図 1.6 に示すように、Stage1～Stage5 までシステム設計における各 Stage 設定し、各 Stage 毎に Stage-Gate 評価を行うシステム設計フローを構築した。研究対象範囲は、設定した 5 段階の Stage のうち、商用機運用（実用化）が可能なレベルまでの開発が可能となる Stage4 までとした。

Stage1 では、発電単価を下げるためのコンセプトの考案、Stage 2,3 では、小規模、大規模水槽実験による技術課題の検証とシミュレーションの考案、Stage4 では、実用化に向けた最終検証として、実海域における実機レベルでの最終実験を行うこととした。このような Stage によるシステム設計評価手法を適用した研究開発は、初めての試みである。この設計システムが確立できれば、波力発電装置実用化に向けた、技術課題の早期解決が促進され、今後の波力発電装置の普及に寄与していくものと考えられる。

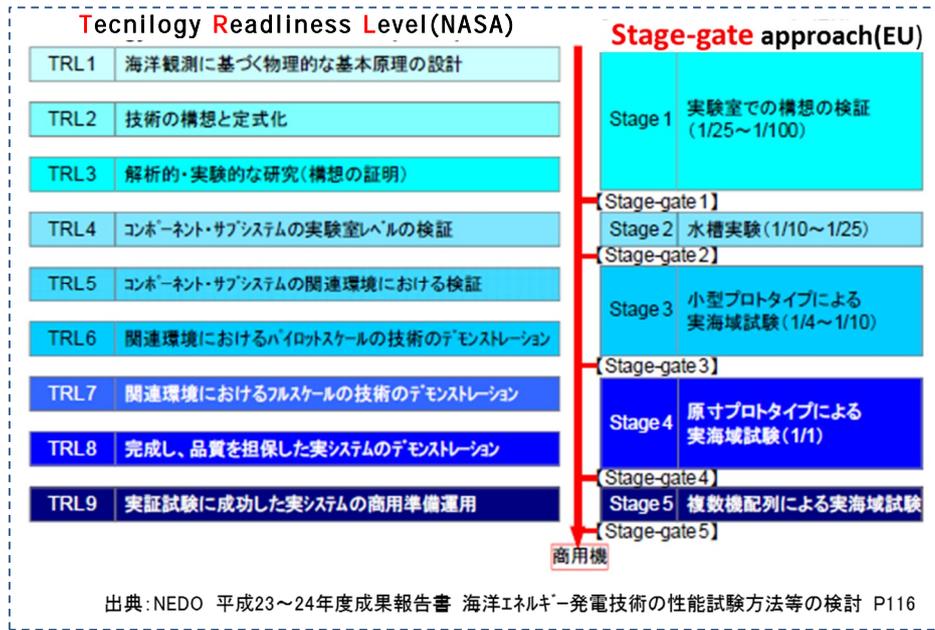


図 1.5 発電装置開発における開発ガイドライン例⁶⁾

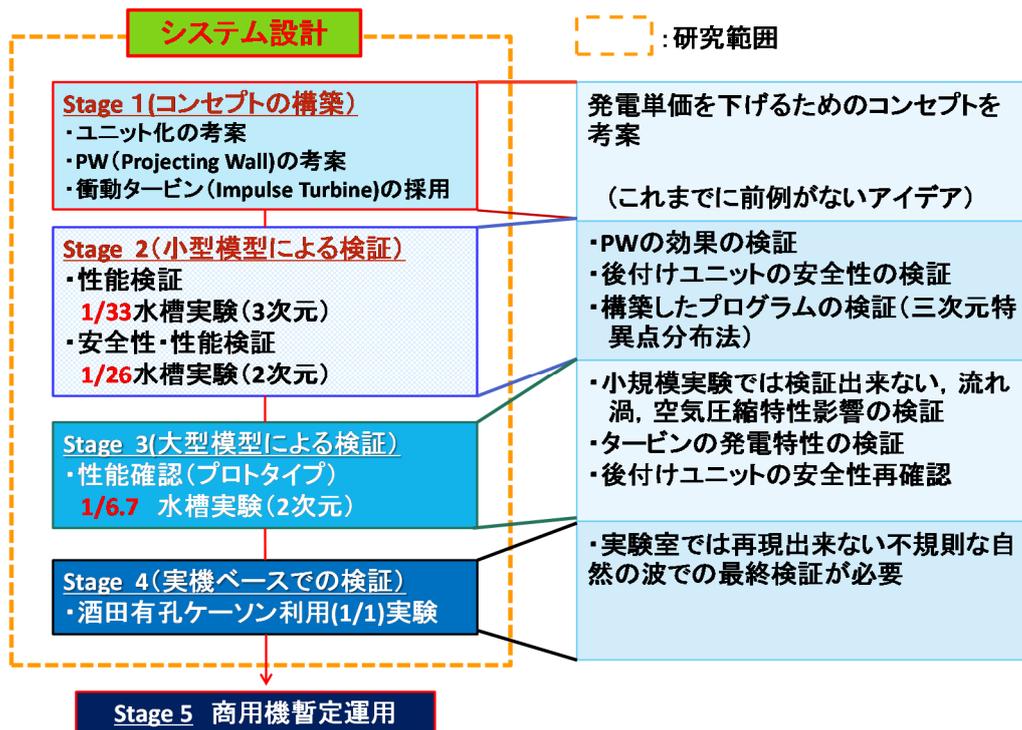


図 1.6 本研究におけるシステム設計方針

1.4 本論の概要

本章では、研究およびシステム設計法構築の背景、システム設計法の内容について述べた。

次章以降は、高性能振動水柱型波力発電装置の実用化を目指し、本章で構築

したシステム設計法 (Stage 1 ~ Stage4) に準拠して, 技術課題の解決を図り研究開発を進め, システム設計法が実用化できる妥当な手法であることを証明する。このシステム設計法の成果により, 今後, 様々な海域で波力発電装置の実用化が加速する事を強く望んでいる。

各章の構成との概要は下記のとおりである。

(1) 2 章 (Stage1 コンセプトの構築)

目標発電単価 40 円/kWh を実現するために, 高性能振動水柱型波力発電装置 (PW-OWC 型波力発電装置) のコンセプトを構築し, 克服すべき課題と解決策について述べる。

(2) 3 章 (Stage1 発電装置原理の説明と建造費用試算)

発電原理に基づいた設計ツールと建造費用に関する B/C について説明している。具体的には, 一次変換の推定法として完成させた, 三次元特異点分布法による推定プログラムの構築について, 二次変換推定におけるタービン特性の推定法として開発した, 様々なタービンの特性を外挿するプログラムの構築につて, 2つの解法のマッチングを図るため行った図式解法による方法について述べる。

また, 目標単価である 40 円/kWh を達成するための建設投資について検討した結果を説明する。

(3) 4 章 (Stage1 発電装置の構造設計法について)

振動水柱型波力発電方式の後付け構造方式の構造設計の説明を行う。

また, 装置に作用する設計外力の算定法, 装置への荷重載荷方法について説明し, 構造設計の手順を整理し, 提案した設計法について述べる。

(4) 5 章 (Stage2,3 水槽実験による課題検証)

1/25 小型模型, 1/6.7 大型模型の 2 段階の規模の水槽実験のそれぞれの実験概要を述べる。そして, 水槽実験をとおして, 技術課題を検証した成果について説明する。

(5) 6 章 (Stage4 実海域実験の概要)

Stage 4 として, 山形県酒田市酒田港の護岸ケーソン上に OWC 装置の設

置後の発電特性について検証を行った。実証実験で使用した護岸ケーソンは、前後に遊水室をもつ消波ケーソン（有孔ケーソン）であったことから、消波孔におけるエネルギーロスや 3 章で構築したシミュレーションの適用可否についても検討を行った。

(6) 7 章（Stage4 実験装置の設計・施工法）

酒田港内の護岸（有孔ケーソン）に設置する波力発電装置の設計法及び施工法（製作・据付）についての検討結果を述べる。検討に当たって留意した、発電装置の小ブロック化、陸上架設、輸送などのコスト低減策について説明する。

(7) 8 章（Stage4 発電装置の実施工）

発電装置の製作、施工状況について説明する。また、7 章で検討したコスト低減策の効果について検証を行った結果、想定通り廉価化が図れたことを述べる。

(8) 9 章（Stage4 発電性能検証）

装置を設置してから、発電終了までに得られた発電データについての解析結果について報告する。考察は、入射波高の傾向について、空気室内の波振幅と発電量の関係性、シミュレーションプログラムにより算出した一次変換係数の整合性、空気室内の面積による発電特性への影響、今回採用した衝動タービンのマッチングについてである。

(9) 10 章（Stage4 シミュレーション検証）

Stage 1～Stage 4 の検証結果に基づき、システム設計の要であるシミュレーションの妥当性の検討を行う。検討は、Stage 3 までに構築したプログラムツールが Stage 4 の実証実験の結果と整合性がとれているか否かである。新規性として、従来の性能評価では別々に行われていた一次変換と二次変換の検討をマッチングするための方法について述べる。

(10) 11 章 結論

本研究の総括を示す。

第2章 Stage1 コンセプトの構築

2.1 Stage 1 コンセプトの概要

目標発電単価 40 円/kWh 以下の達成のためには、従来の OWC 発電装置に比べて、廉価で、高性能な発電装置の開発研究を行うことが最重要課題である。

そのため、建造費を低減すること、発電装置の波エネルギー変換効率を向上させることの 2 点に注力した技術開発が必要である。

2.1.1 廉価型システムの考案（装置の建造費用低減）

廉価型発電システムとして、図 2.1 に示すような既設の防波堤や護岸に後付けのユニットタイプの発電装置を考案した。既設の防波堤や護岸の上に発電装置を搭載することで、装置の建造および設置費用の低減化が図れる。

しかし、搭載される側の防波堤、護岸の下部の構造体の安全性については、このような構造物の大半が、公共構造物であるため、慎重に検証していく必要がある。

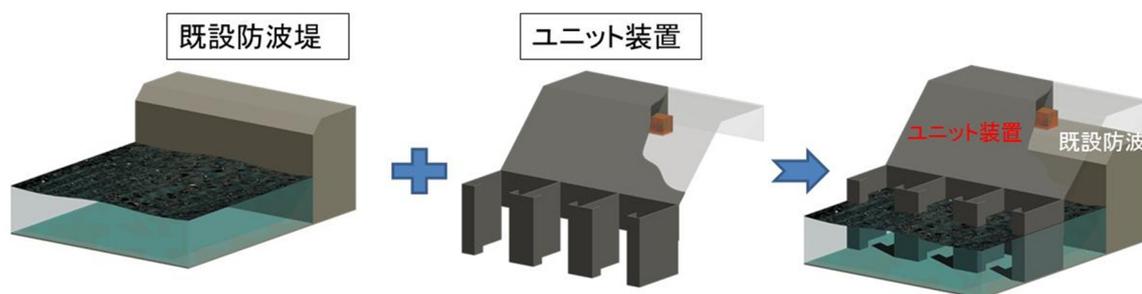


図 2.1 後付けユニット概念図

2.1.2 装置の高性能化

OWC 型波力発電装置は、空気室内の水面の波による上下振動を空気の流れに変換（一次変換）し、空気の流れによってタービン・発電機を回転させることで発電（二次変換）するシステムである。一次、二次エネルギー変換効率を従来の OWC 型に比していかに大きくするかがポイントである。

(1) 一次変換の広帯域化

空気室の後ろ側には、空気の出入りのための穴が空いており、その穴から圧縮された空気が出入りする。圧縮空気は、装置に進入する波により生じた空気室内の水面（水線面）の上下運動で発生した空気流が、装置後方の壁の $1/70 \sim 1/300$ （装置に

よって最適値が異なる)に絞り込まれた孔(ノズル)を通過する際に生じる。いわば、水線面が自動車のエンジンのピストンの役割をする。その圧縮空気の流れを用いて、タービンを回転させて、タービンに接続された発電機を回転させて発電を行う。図 2.2 に一次変換を高效率化した PW-OWC 型波力発電装置の概要図を示す。この装置は高性能化のために、装置前面に PW (Projecting Wall) という壁を設置している。この壁は、著者らが考案したコンセプトである⁵⁾。この壁の効果は、空気室内の波周期と OWC の固有周期の共振点を増大させる(一次変換の広帯域化)。すなわち、OWC の固有周期、PW-OWC 連通全体の固有周期の多重共振効果により、共振点を複数生じさせる効果がある。この効果により、波エネルギー吸収特性の周波数依存性を従来の OWC 型より弱め(広帯域化)、一次変換効率を向上させることができる。

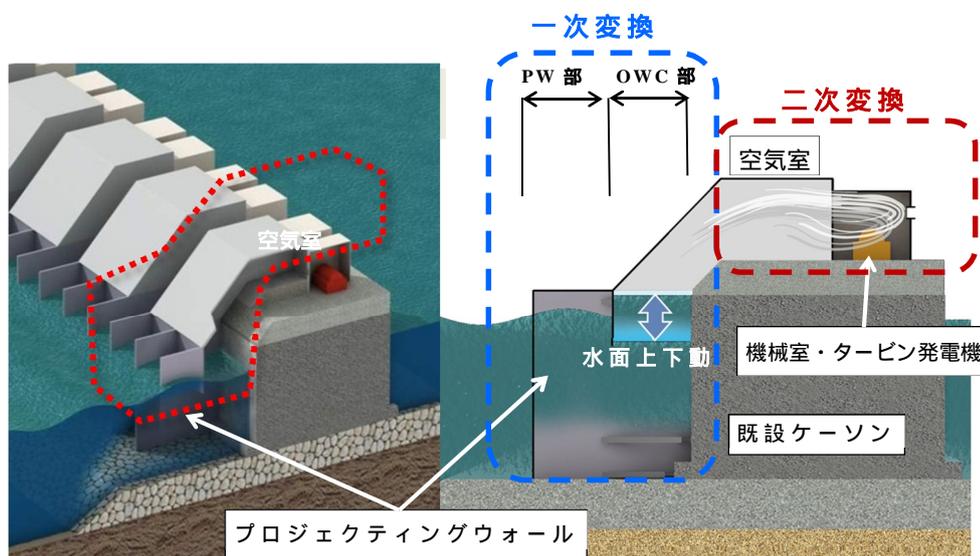


図 2.2 PW-OWC 発電装置の概要

(2) 二次変換の広帯域化

国内外の多くの発電プラントでは、二次エネルギー変換装置である往復流式空気タービンとしてウエルズタービン(図 2.3)^{7),8)}が採用されている。

しかし、ウエルズタービンは、構造が簡素である利点を有する一方、流量係数(軸流速度 V_a / タービン翼端周速度 U_T)が大きくなると失速現象を生じて、タービン効率が低下する問題がある(図 2.4)。タービンの高効率範囲が狭いため、回転制御が難しい。

一方、数値シミュレーションにおいても発電プラントの総合エネルギー変換効率が著しく低下することが確認されており、結果として発電プラン

トの総合エネルギー変換効率も低下してしまう^{9),10)}。

また，往復流式衝動タービン^{10),11)}（図 2.5）は，現在主流のウエルズタービンに比べて低回転域で高トルクが得られ，大きい流量係数でも高効率を維持することがモデル実験により実証されている（図 2.4）。

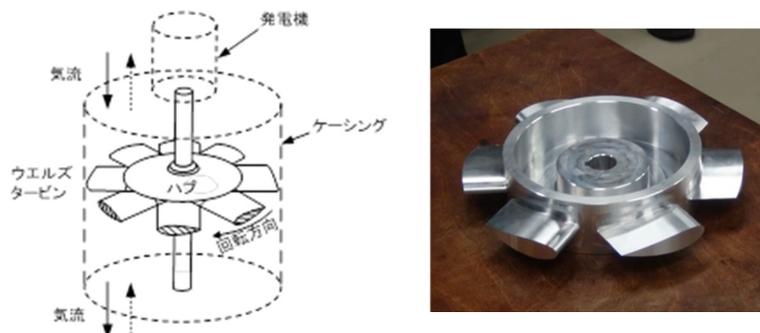


図 2.3 ウェルズタービン

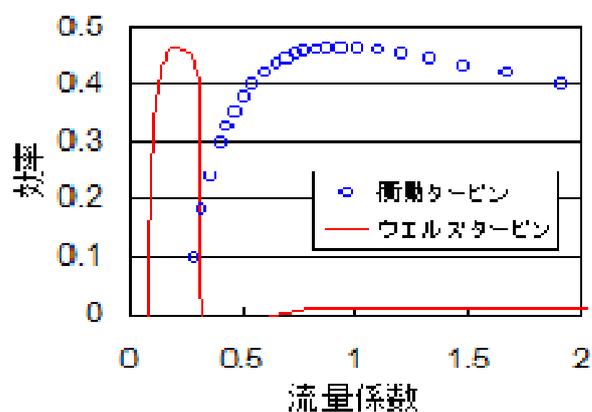


図 2.4 風洞実験による波力発電用タービンの性能比較^{8),10)}

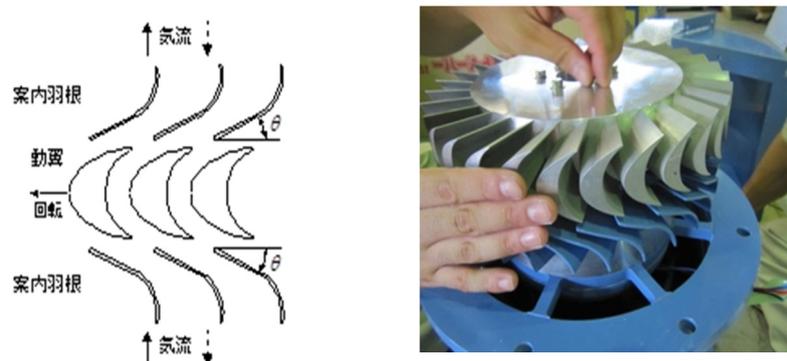


図 2.5 往復流式衝動タービン

瀬戸口，高尾ら⁹⁾が実施した数値シミュレーションの結果では，実際の海洋で発生する不規則波においてウエルズタービンよりも衝動タービンの方が高効率であり，起動特性も優れていることが示されている。衝動タービン

よりも高速型であるウエルズタービンは、OWC 型波力発電の実証実験の際に騒音問題が指摘されている。衝動タービンは、低騒音で作動することが既往の研究により示されている¹¹⁾。2002 年に運輸省第一港湾局が新潟西海外公園で実施した実験結果（図 2.6）では、低波浪時において、図 2.7 に示すように、衝動タービンを設置した発電プラントの出力が、ウエルズタービンを設置した場合の出力より、2 倍以上高効率であることが確認された^{12),13)}。

以上より、本研究では、これまで OWC 型発電装置の二次変換装置として主流であったウエルズタービンではなく、様々な利点が見込まれる衝動タービンを採用した。

衝動タービンの実用化は、世界でも初めての試みとなるが、システム設計法に準拠し開発研究を行うこととする。



図 2.6 新潟実験波力発電プラントの外観^{12),13)}

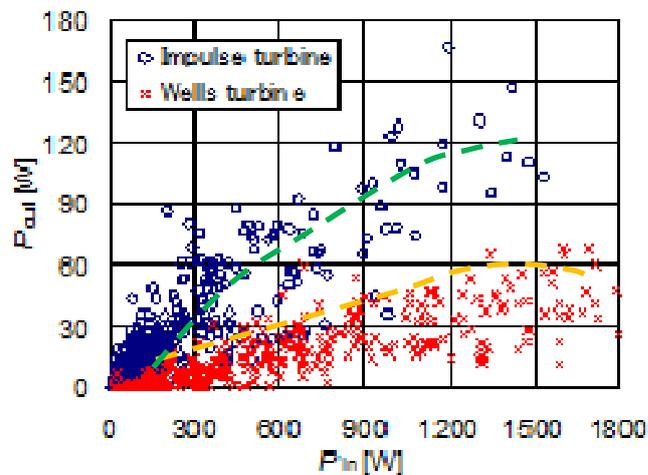


図 2.7 低波浪パワー時の実験結果^{12),13)}

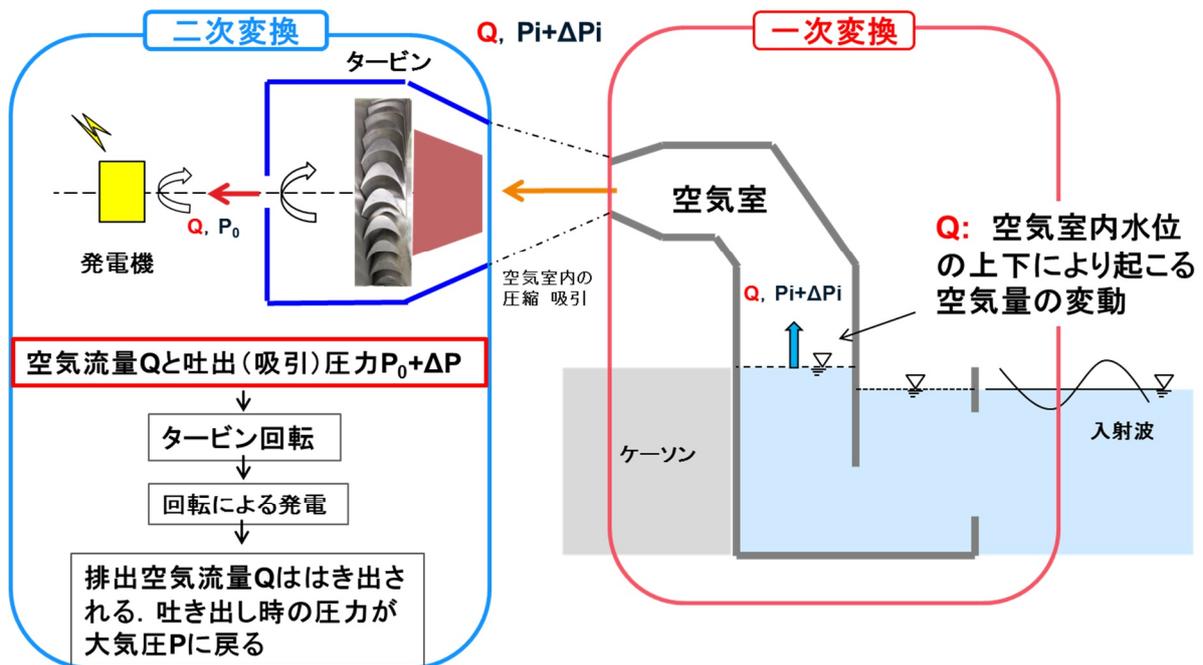
第3章 Stage1 振動水柱型波力発電装置の 原理と発電電力・建造費用推定法

本項では, Stage1 における装置のエネルギー変換のメカニズムと変換におけるエネルギー推定法について説明する. さらに, 推定法の結果を用いて, 発電費用の試算を行う.

3.1 PW-OWC のメカニズム

図 3.1 に PW-OWC 型発電装置のエネルギー変換模式図を示す. 装置に生じる波エネルギーを空気エネルギーに変換するエネルギー変換を一次エネルギー変換 (一次変換) とし, 空気エネルギーをタービン・発電機の回転により電力に変換するエネルギー変換を二次エネルギー変換 (二次変換) とする. 一次変換から二次変換へのエネルギーの受渡しにおいて, 出入りする空気流量 Q と圧縮空気 P が共通のパラメータとなる. そのため, PW-OWC 型の発電特性では, 空気室内の水面振動によるエネルギーがオリフィス (空気室に備えた小径の孔) から出る圧縮空気の流速と流量の関係式をタービンに流入する圧縮空気の流速と流量の関係式 (ベルヌーイの法則) から表すことができる.

振動水柱の運動を考えるにあたり, ここでは, 圧縮空気の流場は 2 次元問題として考える.



Q と ΔP とが 一次系と二次系で共通のパラメータとなる

図 3.1 PW-OWC 模式図

3.1.1 押し波時のメカニズム

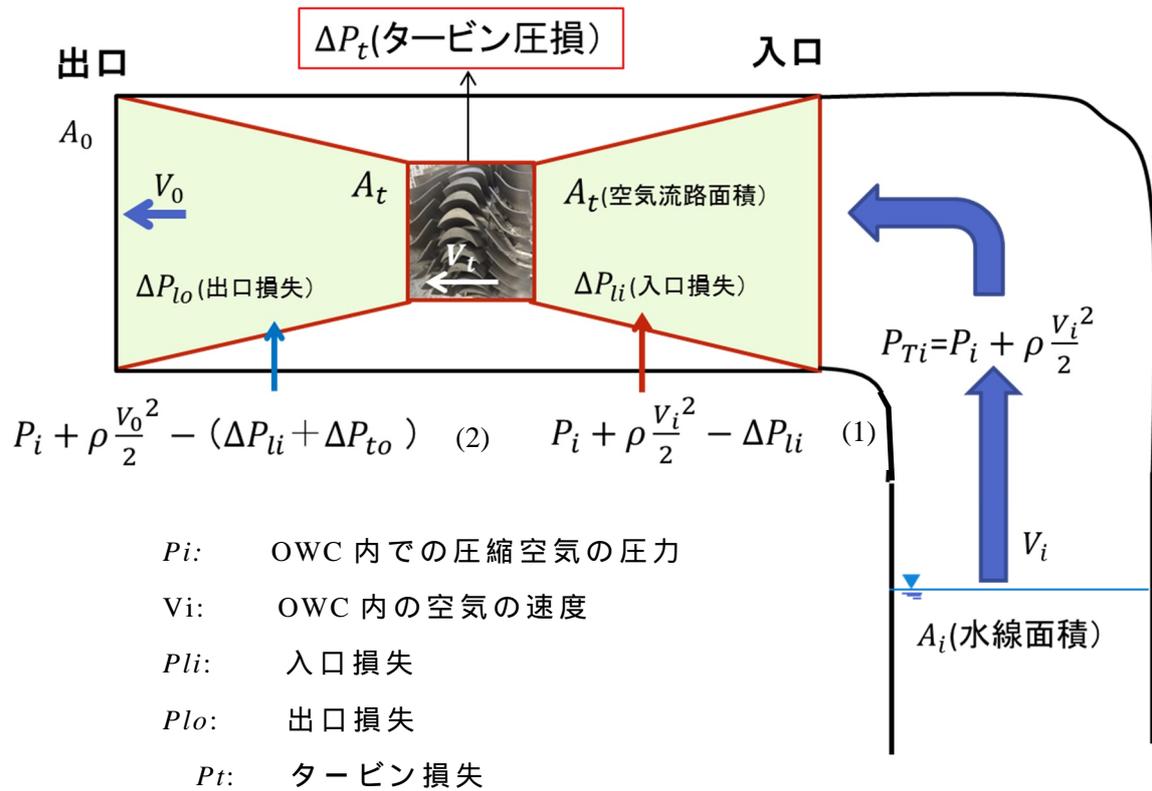


図 3.2 押し波時模式図

この関係は、ベルヌーイの法則で説明ができ、(3)式で表される。

$$P_i + \rho \frac{V_i^2}{2} - \Delta P_{li} = P_0 + \rho \frac{V_0^2}{2} \quad (3)$$

(空気- ΔP_t - ΔP_{lo} 出入口釣合)

一方、タービンを回転させるエネルギーは、(4)式のとおりである

$$E_T = Q \cdot \Delta P_t = A_t \cdot V_t \cdot \Delta P_t \quad (4)$$

この時のタービン入口出口の空気流速は、(5)、(6)式となる。

$$V_i = \frac{A_t}{A_i} \cdot V_t \quad (5)$$

$$V_0 = \frac{A_t}{A_0} \cdot V_t \quad (6)$$

(5)、(6)式を(3)式に代入すると(7)式になる。

$$P_i + \frac{\rho}{2} \left(\frac{A_t}{A_i} \right)^2 V_t^2 - \Delta P_{li} - \Delta P_t - \Delta P_{lo} = P_0 + \frac{\rho}{2} \left(\frac{A_t}{A_0} \right)^2 V_t^2 \quad (7)$$

(7)式を整理する。

$$\frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{A_t}{A_0} \right)^2 - \left(\frac{A_t}{A_i} \right)^2 \right] \cdot V_t^2 = (P_i - P_0) - (\Delta P_{li} + \Delta P_{lo}) - \Delta P_t \quad (8)$$

この(8)式を V_t^2 について整理する .

$$V_t^2 = \{[(P_i - P_0) - (\Delta P_{li} + \Delta P_{lo})] - \Delta P_t\} / \left\{ \frac{\rho}{2} \cdot A_t^2 \left[\left(\frac{A_t}{A_0} \right)^2 - \left(\frac{A_t}{A_i} \right)^2 \right] \right\} \quad (9)$$

ここで , (4)式を二乗する .

$$E_T^2 = Q^2 \cdot \Delta P_t^2 = A_t^2 \cdot V_t^2 \cdot \Delta P_t^2 \quad (10)$$

(10)式の V_t^2 に(9)式を代入する .

$$E_T^2 = A_t^2 \cdot \Delta P_t^2 \cdot \{[(P_i - P_0) - (\Delta P_{li} + \Delta P_{lo})] - \Delta P_t\} / \left\{ \frac{\rho}{2} \cdot A_t^2 \left[\left(\frac{A_t}{A_0} \right)^2 - \left(\frac{A_t}{A_i} \right)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

ここで , $\Delta P_t = x$, $[(P_i - P_0) - (\Delta P_{li} + \Delta P_{lo})] = A$, $\left\{ \frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{1}{A_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{A_i} \right)^2 \right] \right\} = B$ と置き換えると

(12)式のように x の 3 次関数となる .

$$E_T^2 = f(x) = \frac{-x^3 + Ax^2}{B} \quad (12)$$

(12)式の極値を考えるため , (12) 式を x で微分すると

$f(x)' = \frac{-3x^2 + 2Ax}{B} = (2A - 3x)x = 0$ と $x = \frac{2A}{3}$ の時極値をとり , $x = \frac{2A}{3}$ の時タービンエネルギーが最大となる . A は OWC が発生させた圧力とタービンを通じた後の空気の圧力差である . このことから , タービンエネルギーは , OWC の水面の運動エネルギーの 66.7% の変換が理論的に可能であることがわかる .

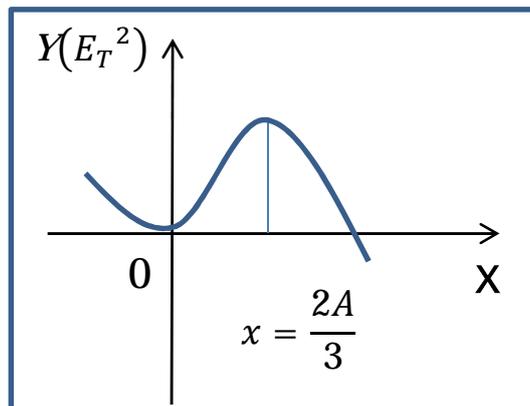


図 3.3 3 次関数

3.1.2 引き波時のメカニズム

引き波時（OWC 水面下降時）は，図 3.4 に示すように水面 A_o の移動により，OWC 内の空気が吸い出されて集められ空気が圧縮空気としてタービンに流入してタービン・発電機を回転させる．水面の上昇により，発生した圧縮空気のエネルギーについては，前述した通りである．

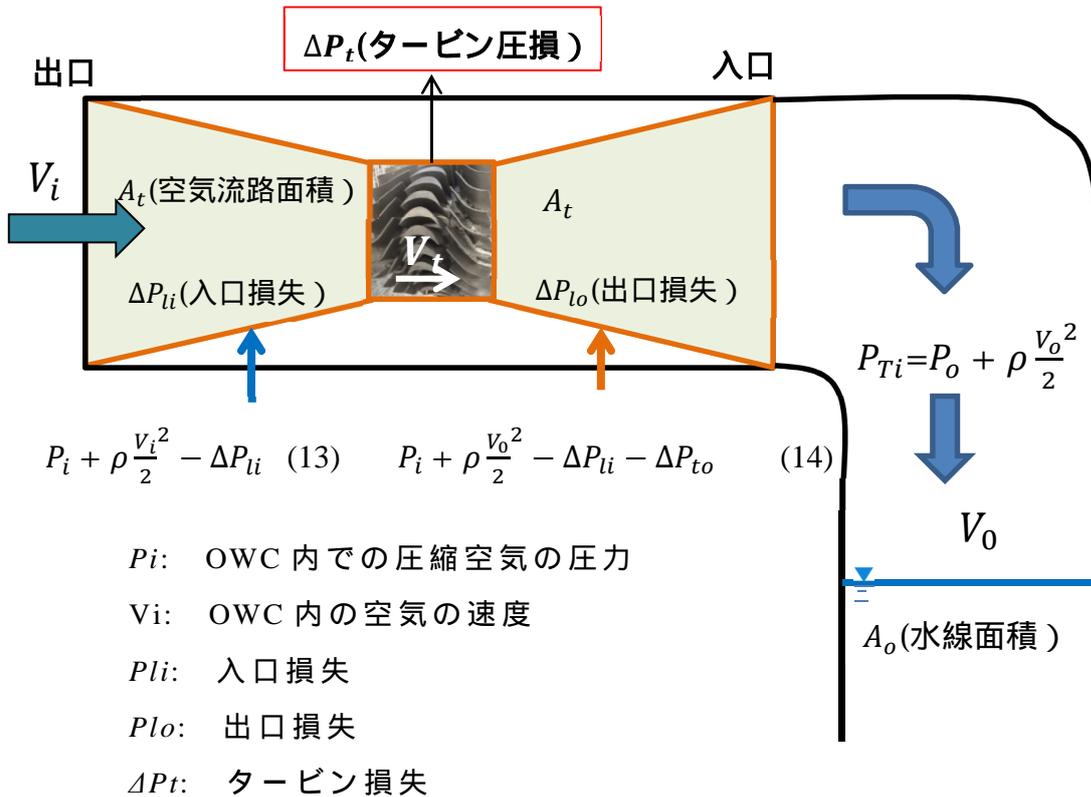


図 3.4 引き波時模式図

この関係は，ベルヌーイの法則で説明が出来，下記(15)式で表される．

$$P_i + \rho \frac{V_i^2}{2} - \Delta P_{li} = P_o + \rho \frac{V_0^2}{2} \quad (15)$$

(空気- $\Delta P_t - \Delta P_{lo}$ 出入口釣合)

一方，タービンを回転させるエネルギーは，(16)式のとおりである．

$$E_T = Q \cdot \Delta P_t = A_t \cdot V_t \cdot \Delta P_t \quad (16)$$

この時のタービン入口出口の空気流速は，(17)，(18)式となる．

$$V_i = \frac{A_t}{A_i} \cdot V_t \quad (17)$$

$$V_0 = \frac{A_t}{A_o} \cdot V_t \quad (18)$$

(17), (18)式を(15)式に代入すると(19)式になる .

$$P_i + \frac{\rho}{2} \left(\frac{A_t}{A_i}\right)^2 V_t^2 - \Delta P_{li} - \Delta P_t - \Delta P_{lo} = P_0 + \frac{\rho}{2} \left(\frac{A_t}{A_0}\right)^2 V_t^2 \quad (19)$$

(19)式を整理する .

$$\frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{A_t}{A_0}\right)^2 - \left(\frac{A_t}{A_i}\right)^2 \right] \cdot V_t^2 = (P_i - P_0) - (\Delta P_{li} + \Delta P_{lo}) - \Delta P_t \quad (20)$$

この(20)式を V_t^2 について整理する .

$$V_t^2 = \{ [(P_i - P_0) - (\Delta P_{li} + \Delta P_{lo})] - \Delta P_t \} / \left\{ \frac{\rho}{2} \cdot A_t^2 \left[\left(\frac{A_t}{A_0}\right)^2 - \left(\frac{A_t}{A_i}\right)^2 \right] \right\} \quad (21)$$

ここで, (16)式を二乗する .

$$E_T^2 = Q^2 \cdot \Delta P_t^2 = A_t^2 \cdot V_t^2 \cdot \Delta P_t^2 \quad (22)$$

(22)式の V_t^2 に(21)式を代入する .

$$E_T^2 = A_t^2 \cdot \Delta P_t^2 \cdot \{ [(P_i - P_0) - (\Delta P_{li} + \Delta P_{lo})] - \Delta P_t \} / \left\{ \frac{\rho}{2} \cdot A_t^2 \left[\left(\frac{A_t}{A_0}\right)^2 - \left(\frac{A_t}{A_i}\right)^2 \right] \right\} \quad (23)$$

ここで, $\Delta P_t = x$, $[(P_i - P_0) - (\Delta P_{li} + \Delta P_{lo})] = A$, $\left\{ \frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{1}{A_0}\right)^2 - \left(\frac{1}{A_i}\right)^2 \right] \right\} = B$ と置き換えると

(24)式のように x の 3 次関数となる .

$$E_T^2 = f(x) = \frac{-x^3 + Ax^2}{B} \quad (24)$$

(24)式の極値を考えるため, (24)式を x で微分すると

$$f(x) = \frac{-3x^2 + 2Ax}{B} = (2A - 3x) \quad (25)$$

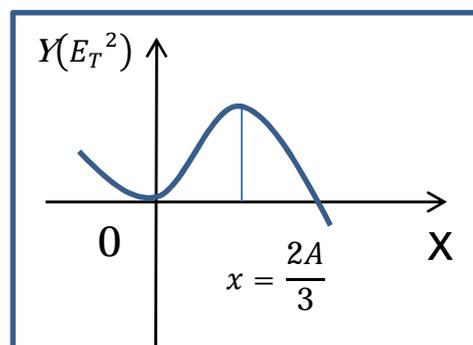


図 3.5 3 次関数

$x = 0$ と $x = \frac{2A}{3}$ の時極値をとり, $x = \frac{2A}{3}$ の時にタービンエネルギーが最大となる。(図 3.5) 結果は押し波時と同じ結果となった。

図式の A は OWC が発生させた圧力とタービンを通過した後の空気の圧力差である。

以上のことから, タービンエネルギーは OWC の水線面の運動エネルギーの 66.7%の変換が理論的に可能であることがわかる。

3.1.3 二次変換メカニズム

波エネルギー変換装置のエネルギー変換の流れは, 波エネルギー, OWC 内の水面変動による空気エネルギー, タービンの回転による電気エネルギー, そして最終的に空気が大気放出される。(図 3.6)

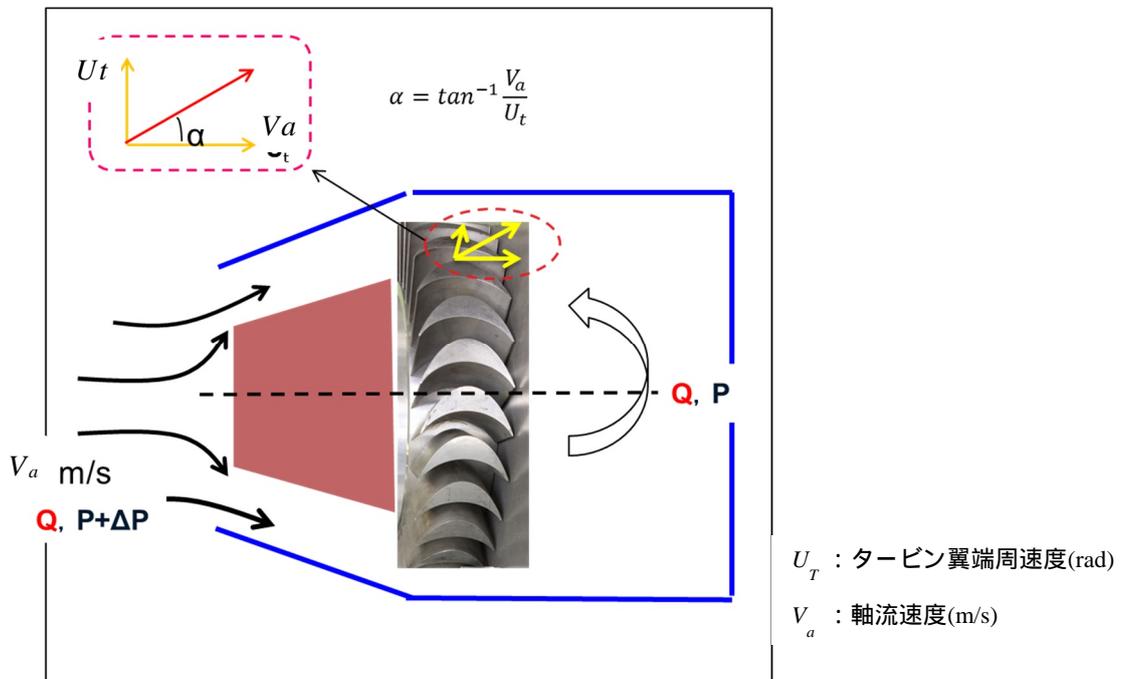


図 3.6 タービン部模式図

(1) 空気室 (OWC) 内部の差圧 (P)

OWC 内の水面運動によりタービンに流入する空気速度, 圧力は右記のパラメータを仮定すると次の(26)~(29)式で表される .

$$A_a = \frac{a_c}{a_i} \quad (26)$$

$$P_a = \frac{P_c}{a_i} \quad (27)$$

$$V = \frac{\omega A_a H_{1/3}}{2} \quad (28)$$

$$\Delta P = \frac{P_a H_{1/3}}{2} \quad (29)$$

A_a : 波高振幅比
 P_a : 圧力振幅比
 a_c : 空気室内水面振幅 (m)
 a_i : 入射波振幅 (m)
 p_c : 圧力振幅 (m)
 V : 空気室水面速度 (m/s)
 ΔP : 全差圧 (Pa)
 ω : 入射波角周波数 (1/s)
 $H_{1/3}$: 入射波有義波高 (m)

(2) タービンに生じる P

タービンの特性について以下数式で解説する .

(30)~(33)式にタービンに流入する空気速度(V_a), 回転の自転速度の関係を示す .

$$\omega_T = \frac{2\pi N}{60} \quad (30)$$

$$U_t = \frac{D_t}{2} \omega_t \quad (31)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{V_a}{U_t} \quad (32)$$

$$\bar{V} = \sqrt{U_t^2 + V_a^2} \quad (33)$$

ΔP : 全差圧 (Pa)
 N : タービン回転数 (rpm)
 ω_T : タービン角速度 (rad)
 U_T : タービン翼端周速度 (rad)
 V_a : 軸流速度 (m/s)
 α : 相対流入角度

(27), (30), (31), (33)式を用いると P, Q は(34)式, (37)式で表すことができる .

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_a \bar{V}^2 \psi \quad (34)$$

$$T_t = \frac{1}{2} \rho_a \bar{V}^2 A \left(\frac{1}{2} D_t \right) C_t \quad (35)$$

$$\psi = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho_a \bar{V}^2} \quad (36)$$

$$Q = \frac{T_t \omega_t}{2 \Delta P \eta_t} \quad (37)$$

ψ : 差圧係数
 T_t : タービントルク (Nm)
 A : タービン環状流路断面積 (m²)
 D_T : タービン直径 (m)
 C_t : タービントルク係数
 η_t : タービン効率
 Q : 空気流量 (m³)
 W_t : タービン出力 (W)
 U : OWC 水面変動速度

(3) タービンの効率

タービンの変換効率 () は , トルク係数 (C_T) , 入力係数 (C_A) を用い (40) 式で示す事ができる . ここで , 流量係数 (ϕ) は , タービンに入射する軸流速度をタービン翼端周速度で除した係数で (41) 式である . タービンの流路面積 (A_T) , OWC 内部の水面速度 (U) , タービン出力 (W_T) とする .

$$C_T = T_0 / \{ \rho (v^2 + u^2) Ar / 2 \} u \tag{38}$$

$$C_A = \frac{\Delta p Q}{\left\{ \frac{\Delta P (v^2 + u^2) A v}{2} \right\}} = \left\{ \frac{\Delta p}{\frac{v^2 + u^2}{2}} \right\} \tag{39}$$

$$\eta = T_0 \omega / (\Delta p Q) = C_T / (C_A \phi) = W_T / (\Delta P Q) \tag{40}$$

$$\phi = V_a / U_T \tag{41}$$

軸流速 V_a は Q/A_T で表わせる . このときの OWC の水面速度は (42) 式となる .

$$u = \frac{Q}{A_w} \tag{42}$$

3.2 一次変換の推定法

本研究の遂行にあたって , PW-OWC 型のシミュレーションプログラムを構築した . PW-OWC 型波力発電装置の一次変換係数に関する数値解析法は , 三次元特異点分布法に基づく定式化を行った . 定式化にあたっては , これまでに提示してきている理論解析手法 ^{14),15),16)} を基に , PW の影響を取り込むための定式化を追加し , 波力発電装置の空気室内の空気の体積変化と圧力変化の関係を表す複素係数である α について , 空気の流速に基づいて算定する手法を採用した . 理論解析手法は , 流体領域を外部と内部に分け , 双方の領域の共通境界の両面に特異点を分布させ , 領域間の相互作用はそれらの共通境界を介してのみ生じるとする . いわゆる領域分割法を採用しているが , PW の影響を取り込むために空気室と PW 部の間に新たに共通境界を追加することとした . 以下に数値解析法の概要について記す .

3.2.1 基本仮定ならびに座標系

静水面を原点にとり，図 3.7 のように座標系ならびに構造物の動揺変位を定義する．流場を外部領域： Ω_e ，空気室： Ω_A ，PW 部： Ω_M の 3 つの領域に分割する．ただし，PW 部とは空気室入口両側に設けられた PW で挟まれた流体領域を指す．

上記各領域の境界を次のように定義する．

Γ_e ：外部領域の物体表面

Γ_A ：空気室内の物体表面ならびに自由表面

Γ_M ：PW 部の物体表面ならびに自由表面

また，共通境界を以下の通りに定義する．

Γ_{eA} ：空気室入口の外部領域側の面

Γ_{Ae} ：空気室入口の空気室側の面

Γ_{eM} ：PW 部入口の外部領域側の面

Γ_{Me} ：PW 部入口の PW 部側の面

共通境界は領域間の相互作用を司る境界であり，境界面の両側に特異点を分布させることになる．共通境界は空気室入口及び PW 部入り口のみで，他は独立な境界とする．

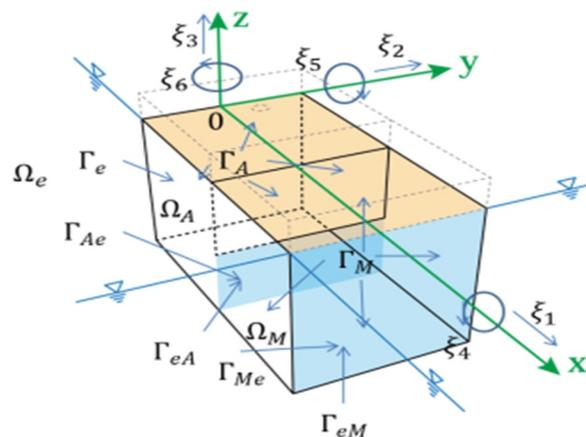


図 3.7 座標系

3.2.2 境界条件

ϕ_0 ：入射波ポテンシャル， ϕ_i ：発散波ポテンシャル， ϕ_7 ：散乱波ポテンシャルとすると，前節で定義した各境界の条件は，以下のように記述することができる．

(1) 構造物表面条件

構造物の表面で構造物内部から流体領域に向く単位法線ベクトルを

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} \quad (43)$$

とすると，Diffraction 問題において，外部領域と境界をなす構造物表面においては，

$$\frac{\partial \phi_7}{\partial n} \equiv \frac{\partial \phi_D}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} \quad \text{on } \Gamma_e - \Gamma_{eA} - \Gamma_{eM} \quad (44)$$

であり，運動しない固定された壁面においては，

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_7}{\partial n} \equiv \frac{\partial \phi_D}{\partial n} &= 0 \\ \text{on } (\Gamma_A - \Gamma_{Ae} - \Gamma_{FA}) \cup (\Gamma_M - \Gamma_{Me} - \Gamma_{FM}) \end{aligned} \quad (45)$$

となり，外部領域のディフラクションポテンシャルとしては ϕ_D と表記することとする．共通境界における圧力と流速の連続条件は以下の通りである．

$$\phi_M|_{\Gamma_{eA}} = \phi_A|_{\Gamma_{Ae}} \quad (46)$$

$$\phi_0|_{\Gamma_{eM}} + \phi_D|_{\Gamma_{eM}} = \phi_M|_{\Gamma_{Me}} \quad (47)$$

$$\frac{\partial \phi_M}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{eA}} = -\frac{\partial \phi_A}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{Ae}} \quad (48)$$

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial n} + \frac{\partial \phi_D}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{eM}} = -\frac{\partial \phi_M}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{Me}} \quad (49)$$

ただし，空気室内部ならびに PW 部内部のポテンシャルをそれぞれ ϕ_A ， ϕ_M で表記した．

(2) 空気室ならびに PW 部の自由表面条件

空気室ならびに PW 部においては，空気の体積変化が断熱的に行われ Poisson の関係式が成り立つものとする．

$$\bar{P} = P_0 + \alpha\gamma(P_0/V_0)v \quad (50)$$

ここで P_0 , V_0 は静止時の空気の圧力および体積 , γ は比熱比 , v は相対水位の変化による空気の体積の減少を表す . α は $0 < |\alpha| \leq 1$ になる空気室内の空気の体積変化と圧力変化の関係を表す複素係数である . 自由表面条件は , 空気室内の水位変動と圧力の関係から

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi + \alpha\gamma P_0 / (\rho g V_0) \int_A \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} + i\omega \Delta z \right) dA = 0 \quad (51)$$

となる . ここに Δz は構造物に固定して考えた静水面の , 構造物の動揺による上下変位である . α は先述の通り空気室内の空気の体積変化と圧力変化の関係を表す複素係数であり , 著者らは空気の流速に着目して α を算定する手法を採用した . 空気室内空気の運動方程式 , 連続の式及びに空気断熱変化の式は次式で表わされる .

$$\frac{1}{S} \frac{d(\rho_1 U_1)}{dt} (V_0 - v) = -(P_2 - P_1) \quad (52)$$

$$\frac{d}{dt} \{ \rho_1 (V_0 - v) \} - \rho_2 U_2 \varepsilon S = 0 \quad (53)$$

$$\frac{P_1}{\rho_1^\gamma} = \frac{P_0}{\rho_0^\gamma} \quad (54)$$

ここで V : 体積 , v : 変動体積 , S : 断面積 , P : 空気圧力 , U : 空気流速 , ρ : 空気密度 , ε : ノズルにおける絞り比 , γ : 比熱比であり , 添え字 1 は空気室 , 添え字 2 ならびに $nz1$ はノズル部 , 添え字 0 は静止状態のそれぞれに関する変数であることを表している . (52) ~ (54) 式に , 圧力勾配に関する境界条件として , ノズル部にオリフィスを仮定した場合の以下の圧力勾配の条件を適用する . なお c は絞り係数である .

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho_2}{2c^2} U_2^2 \quad (55)$$

$$c = c(\varepsilon); \quad \varepsilon \equiv \frac{S_{nz1}}{S} \quad (56)$$

(52) 式において各変数を平均成分と変動成分に分離し , 変動成分のみを抽出すると , 以下を得る . なお Δ は時間変動項であることを表し , $\bar{\quad}$ は時

間平均項であることを表す .

$$\frac{1}{S} \rho_0 \frac{d(\Delta U_1)}{dt} (V_0 - \bar{v}) = \Delta P_1 - \frac{\rho_0}{2c^2} |\Delta U_2| \Delta U_2 \quad (57)$$

$$\varepsilon S \rho_0 \Delta U_2 - S \rho_0 \Delta U_1 = 0 \quad (58)$$

$$\frac{\Delta P_1}{\rho_0^\gamma} - \frac{\gamma P_0 \Delta \rho_1}{\rho_0^{\gamma+1}} = 0 \quad (59)$$

$$-\rho_0 \frac{\partial \Delta v}{\partial t} + V_0 \frac{\partial (\Delta \rho_1)}{\partial t} - \rho_0 \Delta U_2 \varepsilon S = 0 \quad (60)$$

調和振動の仮定の下 , (57) ~ (60) 式を連立方程式として解くことにより , 空気室の変動圧力 ΔP_1 に関して以下の関係式を得る .

$$H(-i\omega) \equiv \left[\frac{\Delta P_1}{\Delta v} \right] (-i\omega) = \left. \begin{aligned} & \left[\begin{array}{cc} -2 \frac{\rho_0^2 \gamma P_0 V_0 \omega^2 \varepsilon c^2 q_1 + \rho_0^4 \gamma P_0 S^2 |\Delta U_2|^2 \omega^2 V_0}{q_2} & q_2 \\ +i \left(-\frac{\rho_0^2 \gamma P_0 S |\Delta U_2| \omega q_1 - 2 \rho_0^4 \gamma P_0 V_0^2 \omega^3 \varepsilon c^2 |\Delta U_2| S}{q_2} \right) & q_2 \end{array} \right] \\ & \left. \begin{array}{l} q_1 = -2V_0^2 \omega^2 \rho_0^2 \varepsilon c^2 - 2S^2 \rho_0 \varepsilon \gamma P_0 c^2 \\ q_2 = q_1^2 + V_0^2 \omega^2 \rho_0^4 |\Delta U_2|^2 S^2 \end{array} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (61)$$

$$\alpha = \frac{V_0}{\gamma P_0} H(-i\omega) \quad (62)$$

ここで $H(-i\omega)$ は体積変化 Δv の単位入力に対する ΔP_1 の出力を表す複素係数であり , これにより空気室内部の圧力変動値を知ることができる .

3.2.3 積分方程式

ポテンシャルの解法には Green 関数¹⁴⁾を用いる . Green 関数を用いたポテンシャルの解法としては , Green の定理を用いて積分方程式に帰着させて解くことになる . j モードのポテンシャル ($j=1, \dots, 7$) に対応する外部 , 空気室 , PW 部 , 各領域の特異点の分布密度を σ^D , σ^A , σ^M とすると , 外部領域のポテンシャルは ,

$$\phi_D(P) = \iint_{\Gamma_e} \sigma^D(Q) G(P, Q) dS_Q, \quad P \in \Omega_e \quad (63)$$

と書ける . 両辺を面の法線方向に微分し , P を面に近づけると ,

$$\begin{aligned}
 -2\pi\sigma^D(P) + \iint_{\Gamma_e} \sigma^D(Q) \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) dS_Q &= \frac{\partial\phi_j}{\partial n}, \\
 P \in \Gamma_e - \Gamma_{eA} - \Gamma_{eM}
 \end{aligned} \tag{64}$$

となり，同様に，空気室ならびに PW 部の境界においては，

$$\begin{aligned}
 -2\pi\sigma^x(P) + \iint_{\Gamma_x} \sigma^x(Q) \frac{\partial}{\partial n} G_0(P, Q) dS_Q &= \frac{\partial\phi_x}{\partial n}, \\
 P \in \Gamma_x - \Gamma_{xe} - \Gamma_{Fx} \\
 x = A \text{ or } x = M
 \end{aligned} \tag{65}$$

となる．共通境界においては，空気室と PW 部とがある場合，(46)～(49)式に対応して，

$$\begin{aligned}
 \iint_{\Gamma_M} \sigma^M(Q) G(P, Q) dS &= \iint_{\Gamma_A} \sigma^A(Q) G_0(P', Q) dS \\
 P \in \Gamma_{MA}, \quad P' \in \Gamma_{AM}
 \end{aligned} \tag{66}$$

$$\begin{aligned}
 \phi_0(P) + \iint_{\Gamma_e} \sigma^D(Q) G(P, Q) dS &= \iint_{\Gamma_M} \sigma^M(Q) G_0(P', Q) dS \\
 P \in \Gamma_{eM}, P' \in \Gamma_{Me}
 \end{aligned} \tag{67}$$

$$\begin{aligned}
 -2\pi\sigma^M(P) + \iint_{\Gamma_M} \sigma^M(Q) \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) dS &= \\
 + 2\pi\sigma^A(P') - \iint_{\Gamma_e} \sigma^A(Q) \frac{\partial}{\partial n} G_0(P', Q) dS \\
 P \in \Gamma_{eM}, P' \in \Gamma_{Me}
 \end{aligned} \tag{68}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\phi_0(P)}{\partial n} - 2\pi\sigma^D(P) + \iint_{\Gamma_e} \sigma^D(Q) \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) dS &= \\
 + 2\pi\sigma^M(P') - \iint_{\Gamma_M} \sigma^M(Q) \frac{\partial}{\partial n} G_0(P', Q) dS \\
 P \in \Gamma_{eM}, P' \in \Gamma_{Me}
 \end{aligned} \tag{69}$$

ただし P と P' は同じ位置を持つ共通境界の両面の点である．空気室及び PW 部の自由表面における条件から，

$$-2\pi\sigma^A(P) + \iint_{\Gamma_A} \sigma^A(Q) \frac{\partial}{\partial n} G_0(P, Q) dS + \frac{\omega^2}{g} \iint_{\Gamma_A} \sigma^A(Q) G_0(P, Q) dS - C_A = 0 \tag{70}$$

$$P \in \Gamma_{FA}$$

$$-2\pi\sigma^M(P) + \iint_{\Gamma_M} \sigma^M(Q) \frac{\partial}{\partial n} G_0(P, Q) dS + \frac{\omega^2}{g} \iint_{\Gamma_M} \sigma^M(Q) G_0(P, Q) dS - C_M = 0 \quad (71)$$

$$P \in \Gamma_{FM}$$

ただし,

$$C_A = \alpha_A \gamma P_{A0} / (\rho g V_0) \iint_{\Gamma_{FA}} \left(\frac{\partial \phi_A}{\partial z} \right) dA \quad (72)$$

$$C_M = \alpha_M \gamma P_{M0} / (\rho g V_0) \iint_{\Gamma_{FM}} \left(\frac{\partial \phi_M}{\partial z} \right) dA \quad (73)$$

である。(64)~(73)式の積分方程式により σ^D , σ^A , σ^M が定められる。

3.2.4 一次変換係数

単位面積当たりの波のエネルギーは,

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho g \xi_0^2 \quad (74)$$

また, 単位幅当たりの波のエネルギー・フラックスは,

$$\frac{d\bar{E}}{dt} = \frac{\rho g^2}{32\pi} C_H H_W^2 T \quad (75)$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned} H_W &= 2\xi_0 \\ C_H &= \{(kh)^2 - (Kh)^2 + Kh\} / kh \end{aligned} \right\} \quad (76)$$

また, (50)式は,

$$\text{Arg} \alpha_A = -\epsilon_\alpha \quad (77)$$

$$C_a = |\alpha_A| \gamma P_0 / V_0 \quad (78)$$

とすると,

$$P - P_0 = C_a v_a \cdot e^{-i(\omega t + \epsilon_v + \epsilon_\alpha)} \quad (79)$$

$$v = v_a \cdot e^{-i(\omega t + \epsilon_v)} \quad (80)$$

空気室内の水面変動による仕事は，

$$\begin{aligned}
 dW &= Pd\bar{\eta} \cdot S = P \cdot dv & (81) \\
 &= -P_0 \cdot dv \\
 &+ C_a v_a \cos(\omega t + \epsilon_v + \epsilon_\alpha) \cdot (-v_a \cdot \omega) \sin(\omega t + \epsilon_v) dt
 \end{aligned}$$

従って一周期の平均をとると単位時間あたりのエネルギー吸収量は，

$$\begin{aligned}
 \bar{W} &= \frac{1}{T} \int_0^T C_a v_a^2 \omega \{-\sin 2(\omega t + \epsilon_v) \cos \epsilon_\alpha + & (82) \\
 &\sin^2(\omega t + \epsilon_v) \sin \epsilon_\alpha\} dt = \frac{1}{2} C_a v_a^2 \omega \cdot \sin \epsilon_\alpha
 \end{aligned}$$

空気室入口の幅を B とすれば，(74)式，(81)式から一次変換効率は，

$$\bar{\eta} = \frac{\frac{1}{2} C_a v_a^2 \sin \epsilon_\alpha \cdot 2\pi/T}{\frac{\rho g^2}{32\pi} C_H H_W^2 T \cdot B} = \frac{32\pi^2 C_a v_a^2 \sin \epsilon_\alpha}{C_H \rho g^2 H_W^2 T^2 B} \quad (83)$$

となる．

3.2.5 α の算定

(50)式における α は，空気室に出入りする水の量と圧力とを関係づける無次元化された伝達関数であり，単純な一定の係数ではなく，空気室の幾何学条件，波の周波数，空気室に出入りする水の量，ノズルの開口面積，ノズルを通る空気の流れの流量係数，Reynolds 数など様々な因子に依存する．

α の計算には空気室に出入りする水の体積 v が必要になるが， v は流場のポテンシャルから計算され，一方そのポテンシャルの計算には α が必要となる．すなわち， α と v は相互に依存するため，Iteration を用いた収束計算で両者を算定する手法を採用した．算定手法の流れは以下の通りである．

から の計算過程を繰り返すことにより α と v を算定する．

v の初期値 v_0 を決める．

α 計算ルーチンに v_0 を与え， α を求める．

Green 関数とその法線微分， $G(P,Q)$ ， $G(P,Q)/n$ を計算する．

定数ベクトル(境界値)設定．

係数マトリクスを求める．

複素連立 1 次方程式を解く(吹出し密度 σ を決定) .

吹出し密度 σ からポテンシャル ϕ を計算する .

ポテンシャルから空気室内の平均水位を求め出入りする水の量 v_1 と圧力を計算する .

$v_1=v_0$ ならば計算終了 , でなければ初期値再設定 .

3.3 二次変換と一次変換の連成推定法

二次変換に関しては , 一次変換側とマッチングを図るため , 一次変換側で設定した絞り (ノズル) が最適になるようタービンの回転数を調整し , タービン効率が最も高くなるよう設計する .

衝動タービンの特性は , 佐賀大学瀬戸口¹⁷⁾らが , 細部にわたるため形状の検討を行い , 大型の基本形状が確立されている .

図 3.8 は , 衝動タービンの特性である . この特性カーブは , タービン径 1500 のものである . 衝動タービンについては , タービンの径別に特性可能な外挿計算プログラムを開発し , 特性図が容易に作成できる . 作成された特性曲線をベースに算出した空気流量から水面速度と差圧 , 水面速度とタービン出力の特性曲線図を作成することにより , 一次変換側とのマッチングをはかる . 以下に連成方法について述べる .

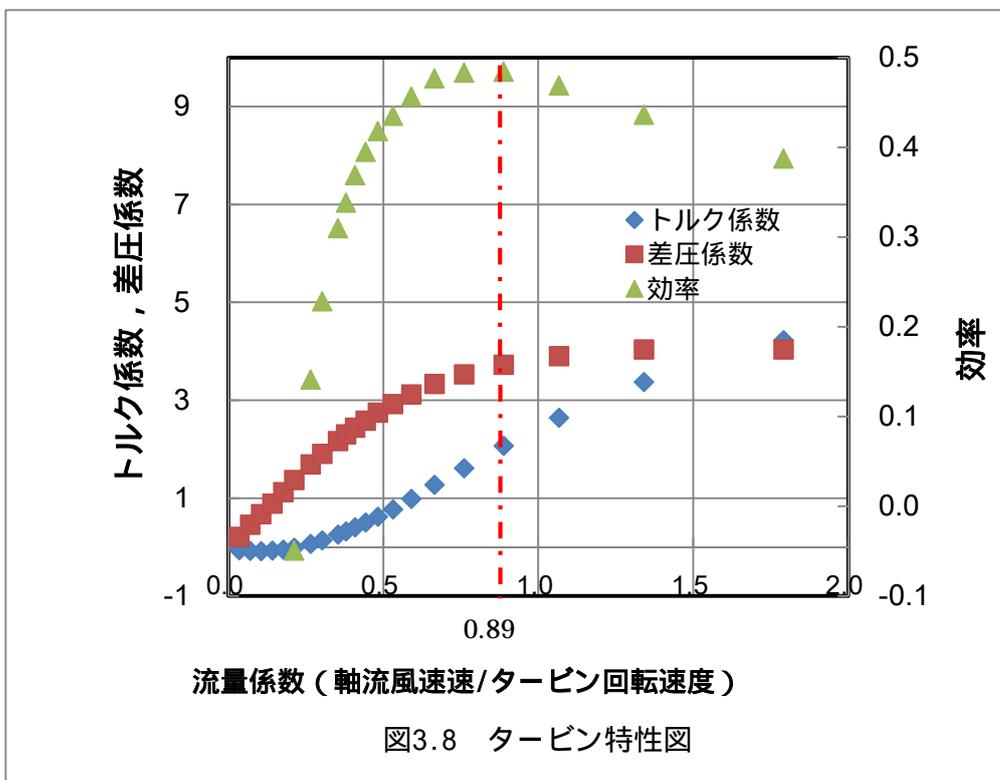


図3.8 タービン特性図

3.3.1 タービン特性の計算

(1) タービンに生じる P

タービンの特性について以下数式で算出出来る．

(84)~(87)式にタービンに流入する空気速度(V_a)，回転の自転速度の関係を示す．

$$\omega_T = \frac{2\pi N}{60} \quad (84) \quad U_t = \frac{D_t}{2} \omega_t \quad (85)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{V_a}{U_t} \quad (86) \quad \bar{V} = \sqrt{U_t^2 + V_a^2} \quad (87)$$

ΔP : 全差圧 (Pa) , N : タービン回転数 (rpm) , ω_T : タービン角速度 (rad)

U_T : タービン翼端周速度 (rad) , V_a : 軸流速度 (m/s) a : 相対流入角度 (度)

(84) , (85) , (87)式を用いると P , Q は(88)式 , (91)式で表すことが出来る．

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_a \bar{V}^2 \psi \quad (88) \quad T_t = \frac{1}{2} \rho_a \bar{V}^2 A \left(\frac{1}{2} D_t \right) C_t \quad (89)$$

$$\psi = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho_a \bar{V}^2} \quad (90) \quad Q = \frac{T_t \omega_t}{2 \Delta P \eta_t} \quad (91)$$

ψ : 差圧係数 , T_t : タービントルク (Nm) , A : タービン環状流路断面積 (m²) , D_t : タービン直径 (m) , C_t : タービントルク係数 , η_t : タービン効率 , Q : 空気流量 (m³) , W_t : タービン出力 (W) , U : OWC 水面変動速度 , ρ_a : 海水の密度

(2) タービンの効率

タービンの変換効率 () は , トルク係数 (C_T) , 入力係数 (C_A) を用い(94)式で示す事ができる . ここで , 流量係数 (ϕ) は , タービンに入射する軸流速度をタービン翼端周速度で除した係数で (95)式である . タービンの流路面積 (A_T) , OWC 内部の水面速度 (U) , タービン出力 (W_T) とする .

$$C_T = T_0 / \{ \rho (v^2 + u^2) A r / 2 \} u \quad (92)$$

$$C_A = \frac{\Delta p Q}{\left\{ \frac{\Delta P (v^2 + u^2) A v}{2} \right\}} = \left\{ \frac{\Delta p}{\frac{v^2 + u^2}{2}} \right\} \quad (93)$$

$$\eta = T_0\omega/(\Delta pQ) = C_T/(C_A\Phi) = W_T/(\Delta PQ) \tag{94}$$

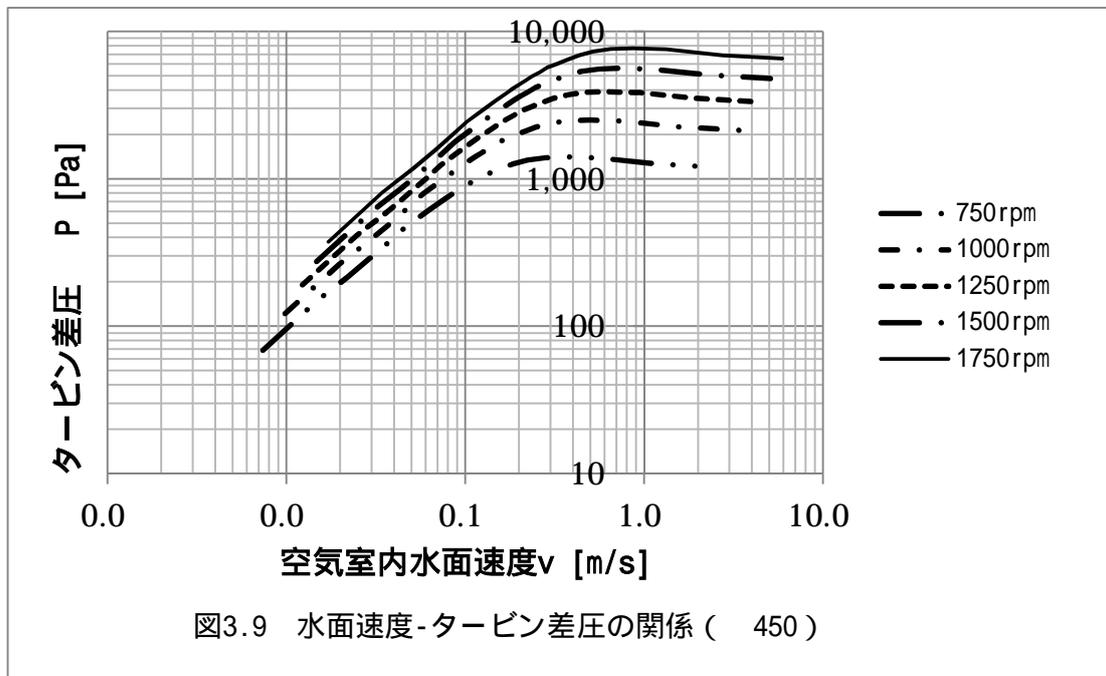
$$\phi = V_a/U_T \tag{95}$$

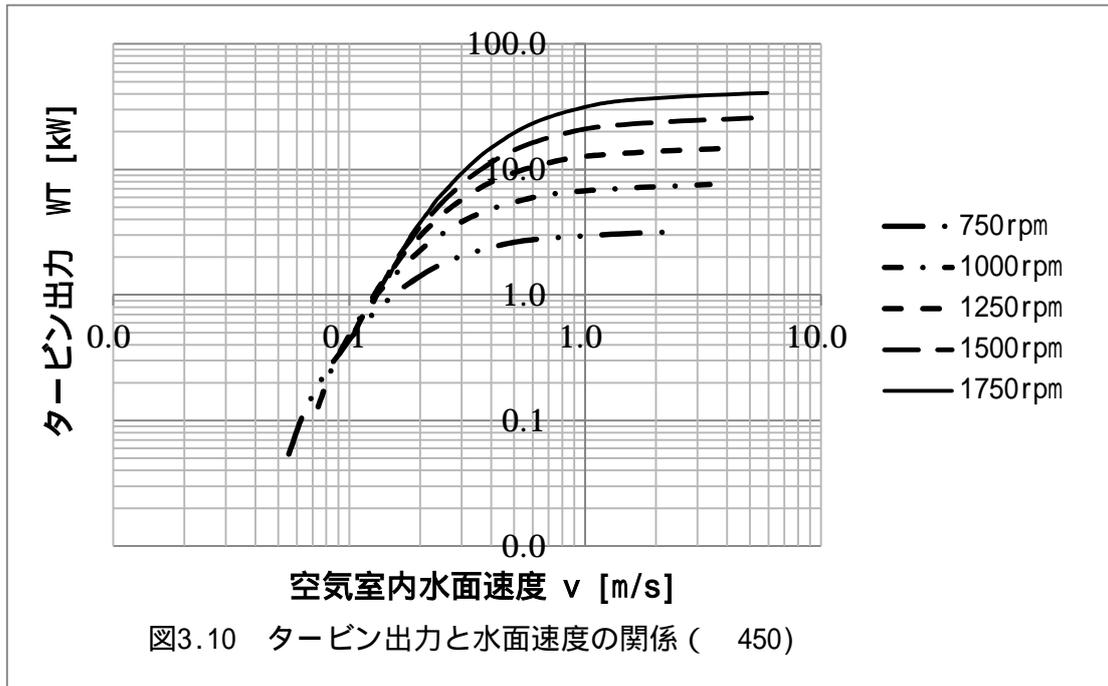
軸流速 V_a は Q/A_T で表わせる．このときの OWC の水面速度は(96)式となる．

$$u = \frac{Q}{A_w} \tag{96}$$

(3) タービン特性図

タービンに入射する空気の相対流入角とタービンの回転数によるタービン翼端速度を設定し，(91)式を OWC の水線面で割り戻すことにより，OWC の水面速度が算出出来る．この水面速度と(88),(91)式より算出できるタービン差圧の関係を求めると図 3.9 (450 タービンの例)が得られる．さらに，タービントルクと角回転数をかけ合わせる，すなわち，出力の関係を図 3.10 に示す．





3.3.2 一次,二次マッチングの連成図式解法

OWC 内の水面運動によりタービンに流入する空気速度，圧力パラメータを仮定すると次の(97)～(100)式で表される．

波高振幅比，OWC 内の水面振幅比は，3.2 節で構築した特異点分布法による PW-OWC 型の一次変換計算プログラムにより，計算しておく．表 3.1 に特異点分布法における計算条件例を示す．波高，周期，タービン出入り口の絞り（ノズル）別に OWC の水面上下運動速度，差圧について出力する．

この水面速度と差圧 P を図 3.3 にプロットし，その交点が各回転数におけるマッチング点である．回転数毎に水面速度を整理し，次に図 3.10 水面速度よりタービンの出力を算出する．この図式解法により，最も効率が良く，出力がでるマッチングポイントを見つけ出すことが可能となる．

$$A_a = \frac{a_c}{a_i} \quad (97) \quad P_a = \frac{P_c}{a_i} \quad (98)$$

$$V = \frac{\omega A_a H_{1/3}}{2} \quad (99) \quad \Delta P = \frac{P_a H_{1/3}}{2} \quad (100)$$

A_a : 波高振幅比， P_a : 圧力振幅比， a_c : 空気室内水面振幅 (m)， a_i : 入射波振幅(m)
 P_c : 圧力振幅(m)， V : 空気室水面速度(m/s)， P : 全差圧(Pa)， ω : 入射波角周波数(1/s)
 $H_{1/3}$: 入射波有義波高(m)

表 3.1 特異点分布法計算条件表

H _{1/3} (m)	ノズル比																																													
	1/50					1/100					1/150					1/200					1/250					1/300					1/300															
周期 (s)	4.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
	5.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
	6.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
	7.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
	8.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
	9.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5

3.4 概略設計による発電コスト試算 (B/C)

波エネルギーは、短周期より長周期が大きいことは広く知られている。発電装置の実用化を考えた場合、設置場所の選定と設置における建造コスト、維持管理コストの低減は、発電単価目標 (40 円/kWh 以下) 達成のためには、非常に重要な要因である。そのため、日本近海で波エネルギーが大きい太平洋沿岸、日本海沿岸に発電装置を設置することが望ましい。

また、それらの海域の波浪条件は、波周期 7~9 秒が卓越していることから、従来の 6 秒程度の共振域をもつ単一 OWC より、より長周期の波エネルギーが取得出来る PW-OWC は有効である。

PW 部と OWC の二つの遊水室による多重共振効果の周期レンジ 6~9 秒で従来単一 OWC の 1.5 倍程度の高効率化が図れる。¹⁶⁾

本項では、目標値 40 円/kWh を満足するために発電装置の概略設計を行い、発電事業の費用便益分析を行った結果を以下に述べる

3.4.1 OWC の幾何学形状の設定

単一 OWC において幾何学的形状から決まる空気室内 OWC の固有周期は既往の研究結果より¹⁶⁾以下のように求められる。

$$T_{OWC} = 2\pi \sqrt{\frac{L_a \left(\frac{L_a}{2} + d_c + \frac{d_1}{2} \right) + \frac{\pi}{2} \left(\frac{d_1}{2} \right)^2}{gL_a}} \quad (101)$$

ここで g は重力加速度である。

また、PW を取り付けしたことによる PW 付装置全体の OWC の固有周期は(101)式に PW の長さによる質量項を付加することにより以下のように表現できる。

$$T_{PW-OWC} = 2\pi \sqrt{\frac{L_a \left(\frac{L_a}{2} + d_c + \frac{d_1}{2} \right) + L_p d_1 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{d_1}{2} \right)^2}{gL_a}} \quad (102)$$

このように共振周期を設定することにより、多重共振型機波力発電装置は既存の単一 OWC 型波力発電装置に比べ、空気出力である一次変換性能は格段に向上することが水槽実験により確認している¹⁵⁾。その際、特に長周期域での性能が向上するため、より広帯域での波エネルギー取得が可能である。



図 3.11 PW-OWC 仕様

3.4.2 OWC の諸元決定

多重共振型波力発電装置の諸元を設定するための手順を検討した。諸元設定のフローを図 3.12 に示す。これをもとに装置を設定する。

尚、諸元の決定は、以下の手順で行った。

装置を設置する海域の波浪頻度分布表より、入射波パワーの期待値を算出する。

入射パワー最大期待値の周波数特性を算出する。

入射パワー最大期待値のピーク周期に OWC 固有周期 T_{OWC} が合うように装置の OWC 寸法 (L_a, B, d, d_l) を設定する。

PW 長 L_p を調整して PW-OWC の固有周期 T_{PW-OWC} を波パワー頻度の最長周期に合うように設定する。

入射パワー期待値の周期特性と照合し、過去の OWC 型波力発電装置の最適化研究の成果を用い、発電効率向上のため以下に示すパラメータの系統計算により、装置の諸元を決定する。

- a) L_a/L_p (OWC と PW の長さ比) : 1.0 程度
- b) V_a/V_p (OWC と PW の体積比) : 1.0 程度
- c) L_a は最多頻度入射波長の 10-20%
- d) 空気室高さ $D_0 = H.W.L + 0.5H_{max}$ (最大設計波高)
- e) カーテンウォール高さ $d_c = L.W.L - 0.25H_{max}$
- f) その他の要因

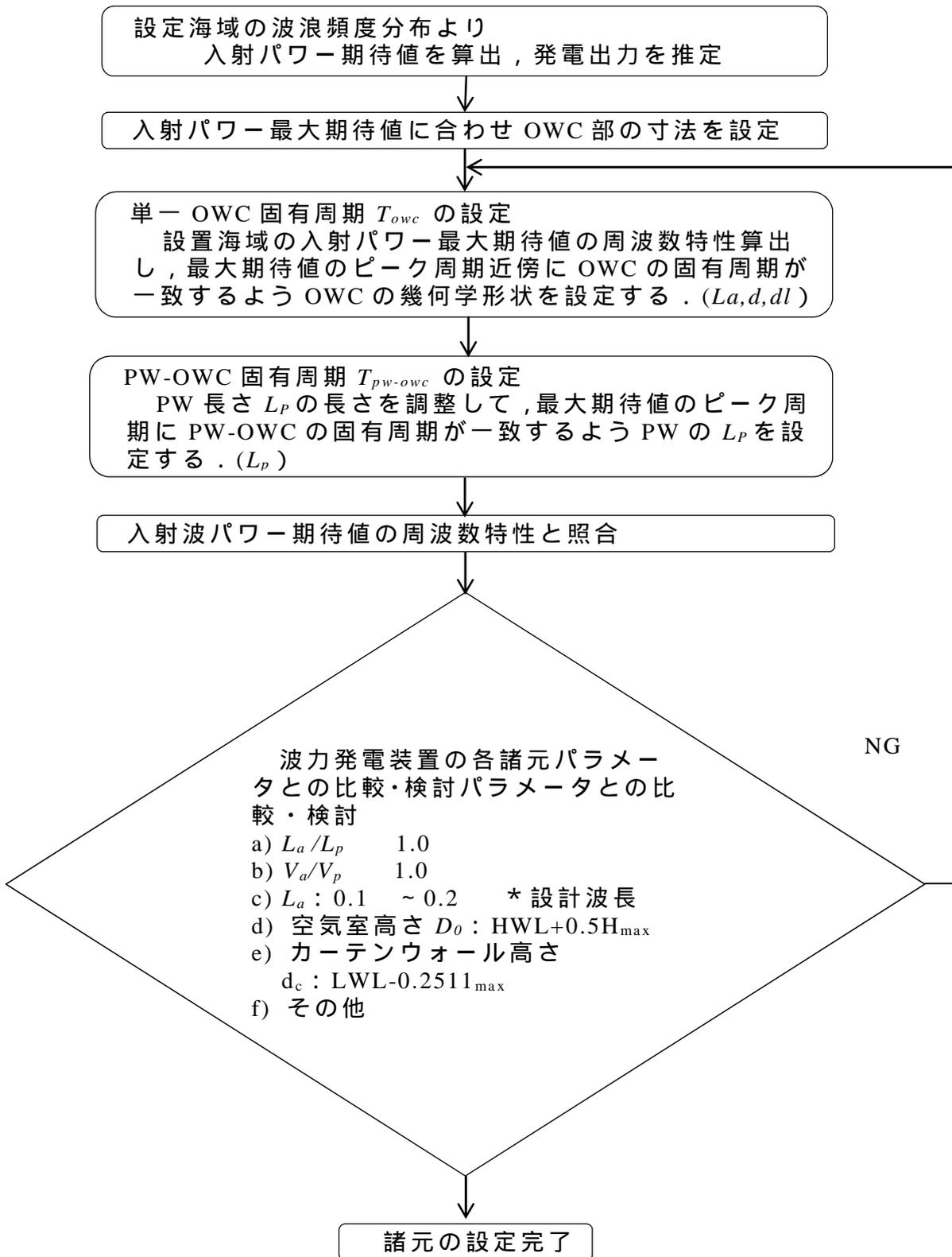


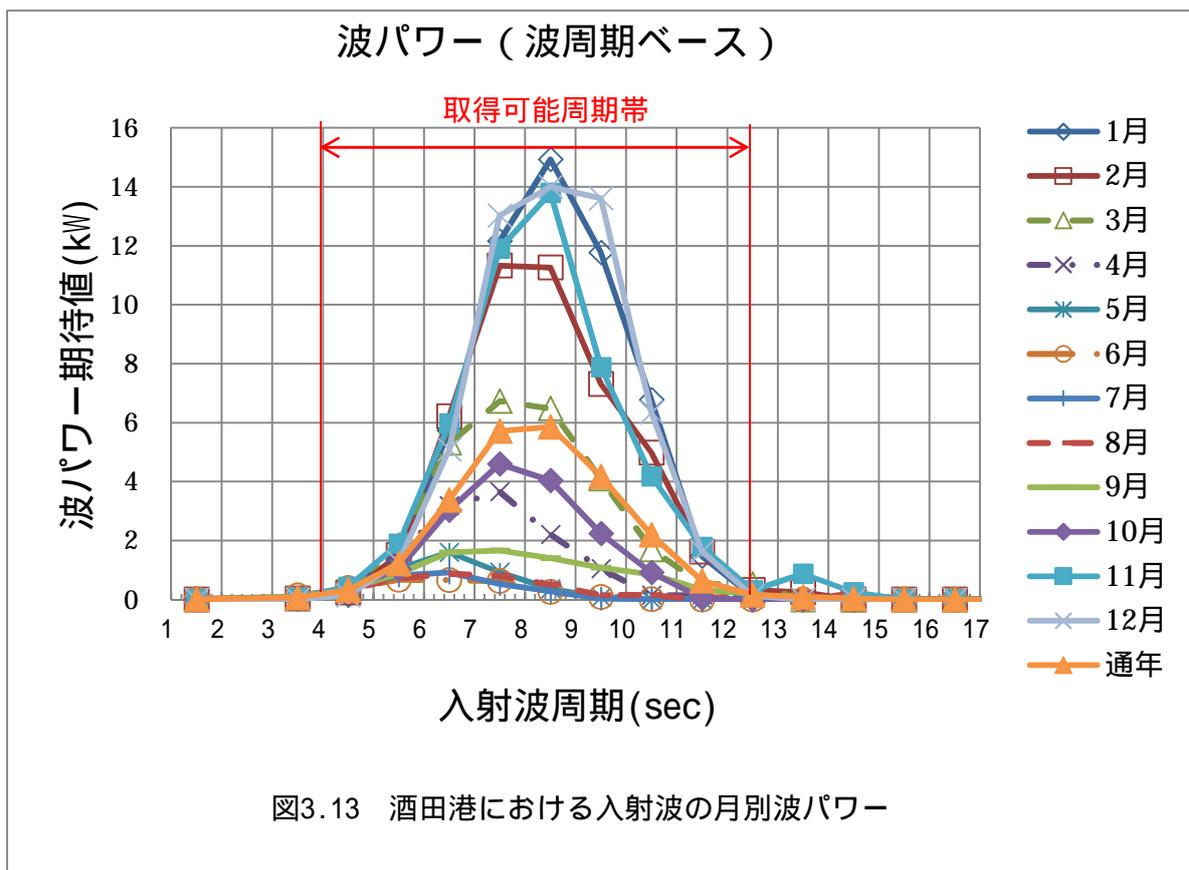
図 3.12 発電装置の設計諸元決定フローチャート

3.4.3 波力発電装置の設計例

設計海域の例として，1980 年代後半に国土交通省が一線防波堤に組込型装置で実海域実験を行った酒田港を対象として装置の検討を行った¹⁸⁾。

(1) 入射波パワーの推定

酒田港の 1992 年から 2007 年までの 16 年分の NOWPHAS 波浪出現頻度分布データ¹⁹⁾より，入射波パワーの周期ベース，各月別の期待値を計算した結果を図 3.13 に，計算シートを表 3.2 に示す。図 3.13 より波力発電装置のエネルギー取得可能な周期帯として，波周期 4.0 秒～12.5 秒であることがわかる。通年の入射波パワー期待値のピークとなる波周期は 8.5 秒であり，この時の単位幅当たりの入射波パワー期待値を波浪頻度分布より計算すると 11.7kW/m となる。



OWC 固有周期 T_{owc} を波パワー期待値がピークとなる波周期 8.5 秒に設定する。OWC 固有周期 T_{owc} を計算する前提として，酒田港の防波堤の諸元より装置深さ d : 14.5m (現地水深 19m，ケーソンのマウント高さを 4.5m 程度) とした。

(2) 装置諸元の決定

3.4.1 の(101)式により，共振によるエネルギー吸収効率を最大にするため OWC 単体の固有周期 T_{OWC} をピーク周期 8.5 秒付近に合わせるように，空気室長さ L_a ，装置深さ d ，開口高さ d_1 によるパラメータ計算を行った．

表 3.2 周期帯ベース波パワー計算結果

波高階級	周期階級 波高階級	1.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	Total
		3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
12.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0000
11.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.027473	0	0	0	0	0	0	0.0275
10.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0000
9.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01736	0.009374	0.010069	0	0	0	0	0	0.0368
8.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.057535	0.027795	0.007505	0.00806	0	0	0	0	0	0.1009
7.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.054531	0.099541	0.021639	0	0	0	0	0	0	0	0.1757
6.75	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0.016651	0.139873	0.088691	0.004382	0	0	0	0	0	0	0	0.2496
6.25	0.5	0	0	0	0	0	0	0.002555	0.074235	0.265082	0.031107	0.003757	0	0	0	0	0	0	0	0.3767
5.75	0.5	0	0	0	0	0	0	0.004325	0.239247	0.253747	0.023403	0.00318	0	0	0	0	0	0	0	0.5239
5.25	0.5	0	0	0	0	0	0	0.057682	0.439188	0.167002	0.004878	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6687
4.75	0.5	0	0	0	0	0	0.007812	0.330526	0.519486	0.098429	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9563
4.25	0.5	0	0	0	0	0	0.074003	0.634342	0.374949	0.049613	0.003196	0	0	0	0	0	0	0	0	1.1361
3.75	0.5	0	0	0	0	0	0.005626	0.284828	0.706309	0.220992	0.02613	0.001244	0	0	0	0	0	0	0	1.2451
3.25	0.5	0	0	0	0	0.067087	0.646079	0.548477	0.10191	0.0128	0.000935	0	0	0	0	0	0	0	0	1.3773
2.75	0.5	0	0	0	0.007361	0.27647	0.788128	0.34769	0.044774	0.00611	0.000669	0.000727	0	0	0	0	0	0	0	1.4719
2.25	0.5	0	0	0	0.046488	0.46408	0.51941	0.154284	0.009251	0.001636	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.1951
1.875	0.25	0	0	0.000487	0.079295	0.255115	0.186031	0.043455	0.005396	0.001704	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5715
1.625	0.25	0	0	0.00512	0.101798	0.207335	0.140492	0.028322	0.001351	0.000427	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4848
1.375	0.25	0	0.000204	0.019049	0.114568	0.15516	0.089024	0.008408	0.000553	0.000764	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000851	0.3886
1.125	0.25	0	0.001022	0.038386	0.098813	0.113931	0.044404	0.00298	0.000185	0.000102	0.000224	0.000122	0.000131	0	0	0	0	0	0.00019	0.3005
0.875	0.25	0.000221	0.007464	0.040107	0.078017	0.072482	0.0167	0.001252	5.6E-05	6.19E-05	0.000135	0	0	0	0	0	0	0	0.000115	0.2166
0.625	0.25	0.001785	0.014253	0.035434	0.053012	0.031198	0.003787	0.000639	5.71E-05	9.47E-05	3.46E-05	3.76E-05	0	0	0	0	0	0	0.000234	0.1406
0.4	0.2	0.001703	0.010845	0.018652	0.01933	0.005977	0.000776	0.00022	0.00014	9.05E-05	1.42E-05	1.54E-05	0	0	0	0	0	0	2.4E-05	0.0578
0.15	0.3	5.61E-05	0.001062	0.002593	0.001795	0.000258	4.15E-05	2.06E-05	3.29E-06	3.64E-06	1.99E-06	0	0	0	0	0	0	0	1.35E-05	0.0058
Total		0.0038	0.0349	0.1598	0.6005	1.6547	2.8015	2.8715	2.0484	1.0782	0.3116	0.0790	0.0445	0.0181	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0014	11.708

その結果，空気室長さ $L_a = 7.0\text{m}$ ， $B = 7.0\text{m}$ ， $d_1 = 9.5\text{m}$ で固有周期 T_{OWC} は 8.6 秒となることが判った．さらに，この空気室長さ $7.0\text{m} \times$ 幅 7.0m をベースに $L_p = 7.0\text{m}$ とすると PW-OWC 固有周期 T_{PW-OWC} は 10.6 秒となり，入射波パワーが存在する周期帯を概ねカバーできる．

また，これまでに固定式波力発電装置の諸元決定パラメータとして用いられている指標を参考にすると，空気室高さ D_0 とカーテンウォール高さ d_c はそれぞれ約 10.0m ， 5.0m となる．ユニット数は，設置想定海域の入射波エネルギー量より，装置全体の幅は 1 ユニット 7m として，2 ユニットで 14m とした．表 3.3 に上記フローにより計算された多重共振型波力発電装置の代表的な諸元の一覧を示す．次に，この諸元を基に発電単価の数値目標に対する経済性の検討を行う．

表 3.3 PW-OWC 装置の諸元

$L_a \times L_p \times B(\text{m})$	$d(\text{m})$	$d_1(\text{m})$	$T_{owc}(\text{s})$	T_{pw-owc}
$7 \times 7 \times 7$	14.5	9.5	8.6	10.6

3.4.4 発電システムの経済性の検討

(1) 発電量の試算

発電装置の経済性に関して、発電単価 40 円/kWh の発電単価を達成するために発電システムの費用便益分析を行った。

想定海域に設置する多重共振型波力発電装置の諸元は、設置海域の波浪条件から、従来型の OWC 波力発電装置の設計法で設計した。装置の取得エネルギー量は、設置海域の過去数年の波浪分布期待値より算出し、耐用年数期間発電電力量の合算とした。発電電力量の試算は以下の仮定、手順に基づき行った。

波力発電装置は固定式とする。

波力発電装置の波エネルギーの一次変換効率は、これまでの水槽実験における基本性能で得られた値を基に補間して適用する。(長周期帯は実験データがないため、単調に減少するものと仮定して補間した。)タービン・発電機を含む二次変換効率に関しては、「マイティーホエール」²⁾での実績等を参考に、波周期に関わらず一定とし 0.35 と想定する。

入射波波高 0.5m 以下と 5.0m 以上の範囲については発電を行わないカットオフを想定し、エネルギー取得計算量には含めないものとする。波力発電装置の想定寿命(耐用年数)は 30 年と仮定する。

発電電力量は、設置海域の波浪出現確率表を基に、設置海域の単位長さ当たりの入射波パワーの期待値を算出する。次いで、一次変換効率と二次変換効率を用いて発電電力量の期待値を算定した。さらに、年間積算発電電力量、設置期間から総発電電力量の期待値を算出した。

表 3.4 に PW-OWC 型と OWC 型のそれぞれの発電電力量の期待値の結果を示す。双方を比較すると発電積算電力量(積算量)の期待値で約 2 倍の違いがあることがわかる。

表 3.4 単一 OWC と PW-OWC の発電量

	波パワー	発電量	年間発電量	積算量
PW-OWC	163.8kW (11.7kW/m)	39.2kW (2.8kW/m)	345.2MWh	10,355MWh
単一 OWC		18.2kW (1.3kW/m)	161.7MWh	4,839MWh

以上より，多重共振型波力発電装置は，従来の OWC 装置に比べて一次変換効率の低下が少なく，PW の効果によって，長周期波側で有利になっていることが示された。

(2) 装置の建設コスト

次に建造コストに対する発電単価の変動試算を行った。表 3.4 の積算電力量（積算量）のそれぞれの結果を用い，建造コストをパラメータとした時の発電単価として試算した。今回の検討においては建造コストを 100 百万円から，100 百万円刻みで変化させた。

経済性の試験は〔建造コスト＝（建造費＋設置費＋維持管理費＋その他）〕として発電単価〔（円/kWh）＝建造コスト（円）／発電電力量（kWh）〕の式で計算し，建造コストに対する発電単価の変動シミュレーションを実施した。結果を図 3.8 に示す。図より，建造コストと発電単価の関係が明白となった。

単価 40 円/kWh の場合，従来型 OWC の場合建造コストは 2 億円程度にとどめる必要があり非現実的である。PW-OWC の場合はほぼ 4 億円程度と建造可能な範囲となっていることが確認できる。

NEDO（国立研究法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）があげている「2020 年までに発電単価 20 円/kWh」の長期目標に対しては，多重共振型波力装置（PW 付 OWC）の場合で概ね設置費用 250 百万円，従来型 OWC の場合で概ね 100 百万円以下にすることが必要である。

建造コスト（建造費，設置費，維持管理費含む）は，建造費や設置費，維持管理だけでなく，現状では予測が困難な要因などの全てが含まれるため，削減を検討することで，最終的に発電単価を低減させることに繋がるため非常に重要な検討項目である。

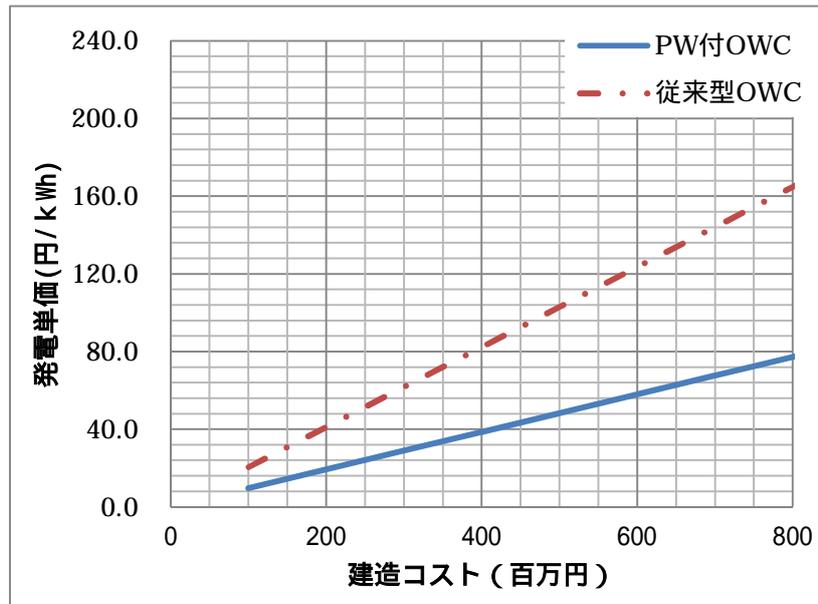


図 3.8 建設費用比較

3.5 まとめ

本章では，PW-OWC の発電メカニズムと従来の単一 OWC 型波力発電装置に比して高性能である PW-OWC 型波力発電装置について，新たに構築した発電電力の推定手法（シミュレーション手法）について説明した．

また，酒田港の一線防波堤をケーススタディとして，B/C 分析を行い，建造にかかる想定費用を算出した．

本章の成果を下記に列記する．

多重共振型波力発電装置の発電出力の推定において，特異点分布法による一次変換推定プログラムを構築した．

二次変換に関し，衝動タービン特性曲線を径別に外挿可能なプログラムを開発し，これをベースに特異点分布法により算出した一変換結果のマッチングを図り，OWC 内の水面上下運動の速度と差圧を図式解法によりマッチングさせる方法を構築した．

諸元設計の結果に基づいて，数値目標である発電単価 40 円/kWh を達成するための多重共振波力発電装置のコスト試算を行い，建造コストは 4 億円程度に抑える必要があることを確認した．

建造コストに対する発電単価の変動試算を行った結果，発電単価の低減において，従来の発電効率重視の検討に加えて初期設計の段階から建造コストの低減策を考慮した装置の検討が重要であることを確認した

第4章 Stage1 振動水柱型波力発電装置の 構造設計法

4.1 概要

本章では, Stage1 における後付発電装置ユニットを設計するにあたっての構造設計法について検討を行った. PW-OWC のユニットは, 既設の公共防波堤, 護岸に設置するこれまでに実施例がない構造である. PW-OWC への作用荷重の分布は, 図 4.1 に示すとおりである. 構造設計においては, 後付けユニットの強度設計の他, 発電装置が搭載される下部のケーソンなどの既設の防波堤, 護岸の安定性の照査が必要である.

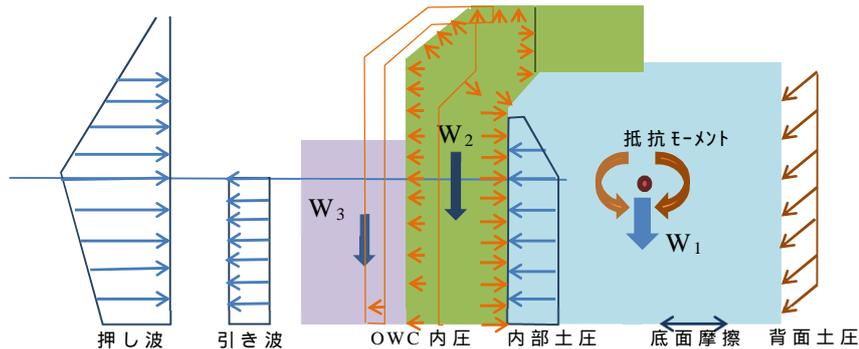


図 4.1 PW-OWC 外力作用図

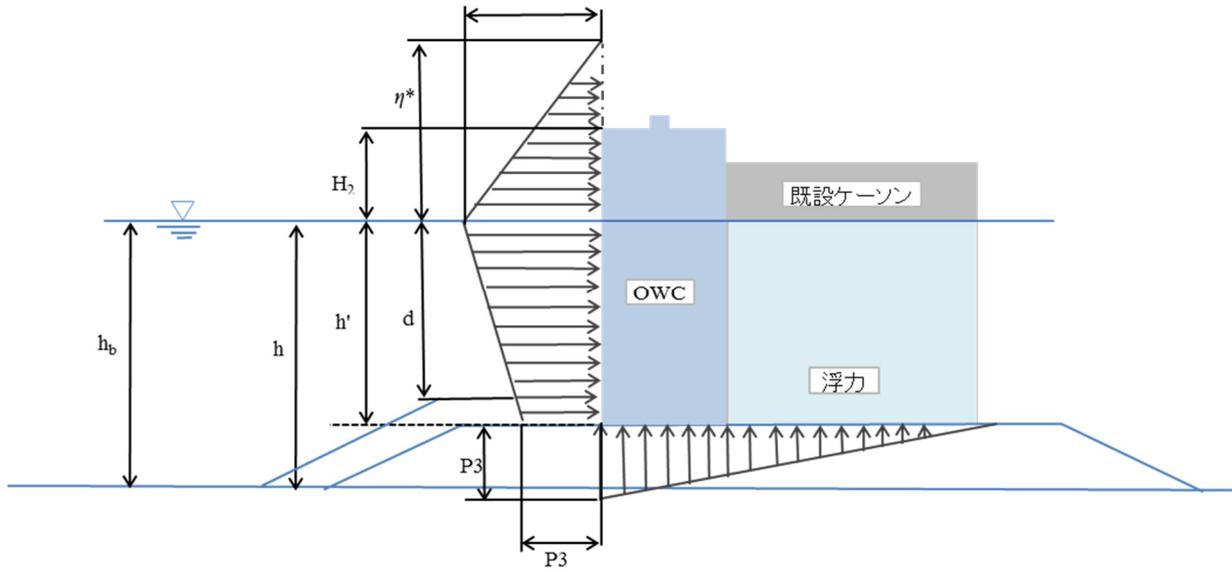
OWC 波力発電装置の設計については, 旧運輸省が酒田で実証した防波堤一体型 OWC 発電装置の報告書が参考に出来る. 安定計算については, 『波エネルギー吸収型防波堤実証実験調査—函体の細部設計—』(昭和 63 年 3 月 運輸省第一港湾建設局, (財)沿岸開発技術研究センター)の「第 3 章 堤体の安定検討」にとりまとめられている²⁰⁾.

また, 入射波による波力に加え, 発電実験運転時に空気室内面に作用する空気圧, 波力により前壁, 側壁, 隔壁等に生ずる断面力については, 有限要素法(FEM)を用いた弾性応力解析による検討もなされており, 『波エネルギー吸収型防波堤実証実験調査—函体の応力解析—』(昭和 63 年 3 月 運輸省第一港湾建設局, (財)沿岸開発技術研究センター)にとりまとめられている²¹⁾. これらを参考に設計手法を決定した.

4.2 PW に作用する波圧強度

設計に用いる波圧強度については図 4.2 に示す合田波圧を考慮する方針とする. 合田波圧は, 波が壁にあたる波圧強度を評価出来る式として, ケーソン, 浮桟橋などの港湾構造物に幅広く適用出来る評価式である.

また, 発電装置の上方斜壁に作用する波圧は, 図 4.3 に準じる. ただし, 合田式の適用検証については, Stage2 の水槽実験結果を踏まえ, 次章に詳述する.



$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta)\lambda_1 H_{\max}$$

$$P_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)(\alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 \cos^2 \beta)\lambda_1 w_0 H_{\max}$$

$$P_3 = \alpha_3 P_1$$

$$P_u = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)\lambda_1 \alpha_3 w_0 H_{\max}$$

ここに

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right\}^2$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_{\max}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{\max}} \right\}$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right\}$$

η^* : 静水面上波圧強度が 0 となる高さ (m)

P_1 : 静水面における波圧強度 (tf/m²)

P_3 : ケーソン下端における波圧強度 (tf/m²)

h : ケーソン前面における水深 (m)

h_b : ケーソン前面から沖側へ有義波高の 5 倍だけ離れた地点での水深 (m)

h' : ケーソンの基面水深 (m)

d : 根固め工またはマウンド被覆工天端のいずれか小さい方の水深 (m)

w_0 : 海水の単位体積重量 (1.03 tf/m³)

H_{\max} : 設計計算に用いる最高波高 (m)

L : 水深 h における設計計算に用いる波長 (m)

β : 防波堤法線の垂線と、波の主方向から $\pm 15^\circ$ の範囲で最も危険な方向とのなす角度 (度)

λ_1, λ_2 : 直立消波ケーソンの構造等による波圧の補正係数

$\lambda_1 = 1.0, \lambda_2 = 0$ とする。

図 4.2 作用波圧式 (合田波圧)²²⁾

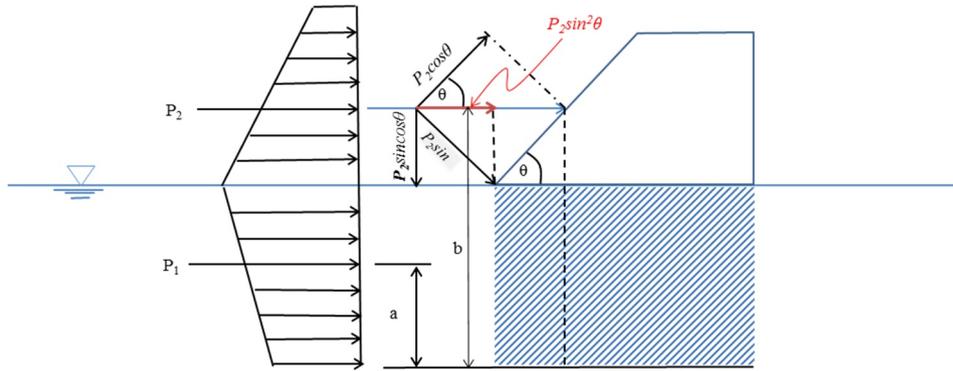


図 4.3 斜面壁に作用する波力モデル²³⁾

4.3 OWC 部の作用圧力

空気室に作用する波力（波圧）パターンは，大きく分けると波の山が当たる場合と谷の当たる場合があり，荷重ケースは図 4.4 の 3 ケースが考えられる．

このうち，空気室に波の山が当たる場合，空気室前壁（装置頂部の斜め壁）斜面打ち込み波圧（case 1）と押し波による OWC の内圧が上昇する（case 2）同時作用が考えられるが，壁に生じる波圧の位相や荷重作用方向が逆であることを考慮し，より安全側の個別に考えることとする．

また，図 4.4 の設計荷重値については，高橋²⁰⁾らが実験結果に基づき検討しておりこれを採用することとした．高橋らの論文によれば，空気室とカーテンウォールの没水水深の和（ D_0+D_c ）を 7m 以上にすれば，OWC の衝撃空気圧は $1.0W_0H_{max}$ 以下となる．

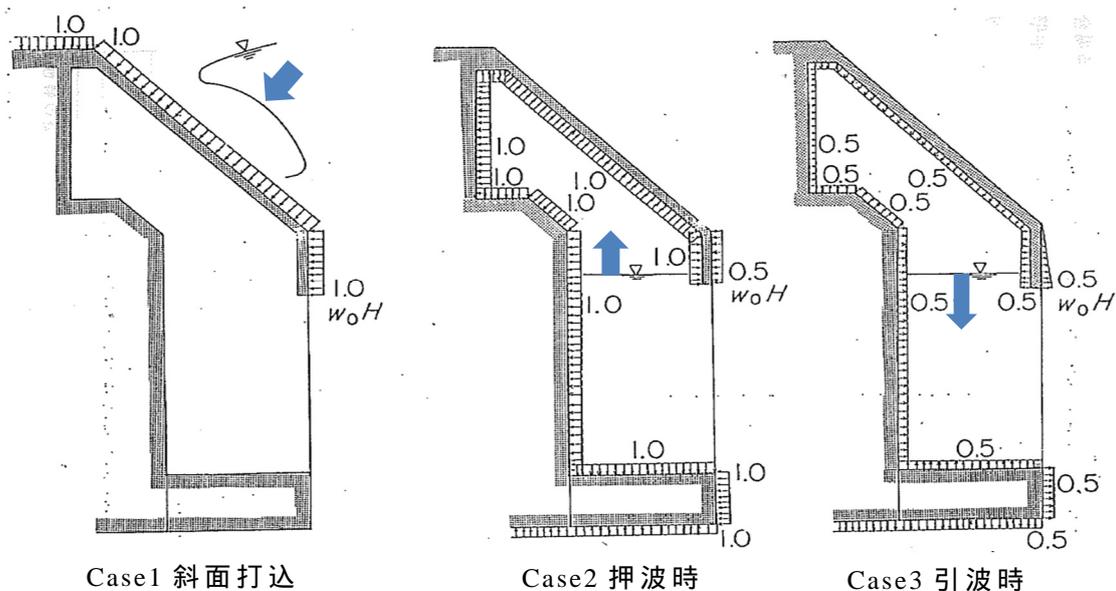


図 4.4 OWC 作用圧力²³⁾

4.4 安定計算（安全率）

ユニット型発電装置を長期にわたって供用する場合は，完成断面とみなし，確保すべき安全率は表 4.1 の通りとする．

表 4.1 完成断面の安全率

滑動	1.2
転倒	1.2
支持力（波圧時）	1.2(1.0)
円形滑り <修正フェルニウス法(チホ ^ホ 列刃法)> 砂層と粘性土層の互層となった場合	1.2
上記以外の場合	1.1
<ビ ^シ ョッフ ^フ 法>	1.3

() は引き波時

ユニット型発電装置を実証実験期間などの短期間で既設防波堤から撤去することを前提としている場合は，実証実験期間を暫定期間とみなし，暫定断面における安全率は表 4.2 の通りとする．

表 4.2 暫定期間安全率

滑動	1.0
転倒	1.1
支持力（波圧時）<ビ ^シ ョッフ ^フ 法>	1.0(1.0)
円形滑り <修正フェルニウス法(チホ ^ホ 列刃法)> 砂層と粘性土層の互層となった場合	1.2
上記以外の場合	1.1
<ビ ^シ ョッフ ^フ 法>	1.3

() は引き波時

4.5 構造設計の順序

PW-OWC の構造設計を整理すると図 4.5 の設計フローで表すことができる。検討項目をフローで示す通常の OWC と同じ内容を照査していくことになる。

また、構造設計において重要なのは、発電装置ユニットの既設構造物の固定法である。PW や装置の気中部分（機械室、電気室など）の突出があるため、既設ケーソンなどではあまり問題とならない護岸方向荷重への対処である。

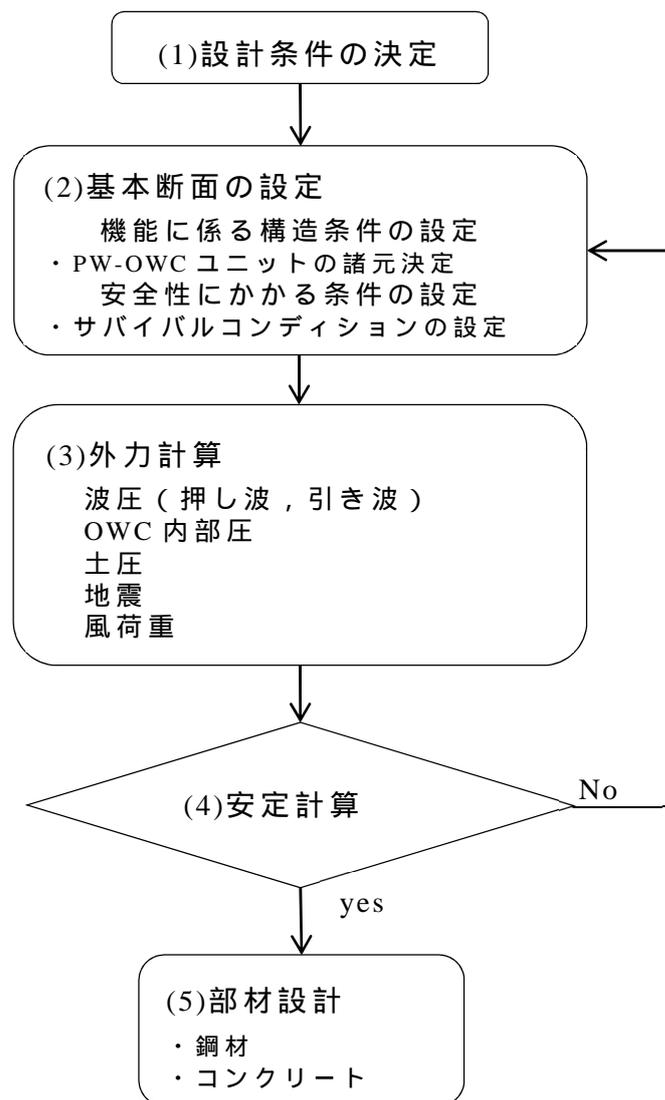


図 4.5 構造設計フロー

4.6 まとめ

既往の振動水柱型波力発電システムの研究事例を参考に PW-OWC の設計法について整理を行った。

発電装置ユニットの波圧強度については、港湾基準に準拠し、合田波圧が適用出来ると考える。ただし、これについては、次項の水槽実験の検証結果で最終決定する。

OWC 内の波の上限運動による衝撃空気圧は、既往の研究成果より $1.0W_0H_{\max}$ とする。

第5章 Stage2,3 (水槽実験) による 技術課題の検証

5.1 Stage2, Stage3 の概要

Stage 1 で考案したコンセプトを, システム設計法に沿って課題解決を図るため, 酒田港一線防波堤への装置搭載をケーススタディとして, 発電装置の小型模型実験 (Stage 2) と大型模型実験 (Stage 3) による検証を行い, 課題解決を図る必要がある。検証すべき技術課題は, 具体的には以下に示すとおりである。

そこで, Stage 2 では, 主に後付け PW ユニットの安全性の検証を, Stage 3 では, 主に Stage 2 の小規模実験では, 相似則が成立しない空気圧や渦の影響が実験スケールにどれだけ影響を与えているのかを把握するとともに, タービンの発電特性の検証を行う。

(1) 装置の安全性

波力発電装置のコンセプトは, 既存防波堤に後付に設置する構造であるため, 既設防波堤の天端より高い位置に構造体に取り付けられる。そのため, エネルギー変換特性の把握のみならず, 暴風時, 波浪時などのサバイバルコンディションにおける安全性の検証が重要である。

(2) OWC 発電装置の高性能化検証

PW-OWC のエネルギー変換特性について, 従来の単一 OWC より想定したとおりの高性能化が出来るか否かの検証を行う。

(3) 衝動タービン発電システム

実証予定の二次変換システムは, 衝動タービンと発電装置を直結した誘導発電システムを想定している。そのため, 同じ誘導発電システムでの発電性能を検証する必要がある。

5.2 安全性の検証方針

図 5.1 に通常の防波堤の設計と後付けユニットが設置された場合の防波堤の設計フローを示す。構造設計においては, 細部の部材設計前に安定性(安全性)を港湾基準²²⁾に沿って照査する方針とした。(図 5.1)

一方, 後付けユニットの OWC の設計においては, 入射波による水面の上下振幅による圧力変動などの影響が未確認である。そのため, 後付けユニットが搭載された場合の安定性の確保についての検証が必要である。

また, ユニットに作用する波圧については, 合田波圧で計算された波圧を設

計に適用しても問題が無いか確認をしておく必要がある。

そこで、実海域実験候補の中で波浪条件が厳しい山形県酒田市酒田港の沖合一線防波堤をケーススタディとして、水槽実験による検証を行った。

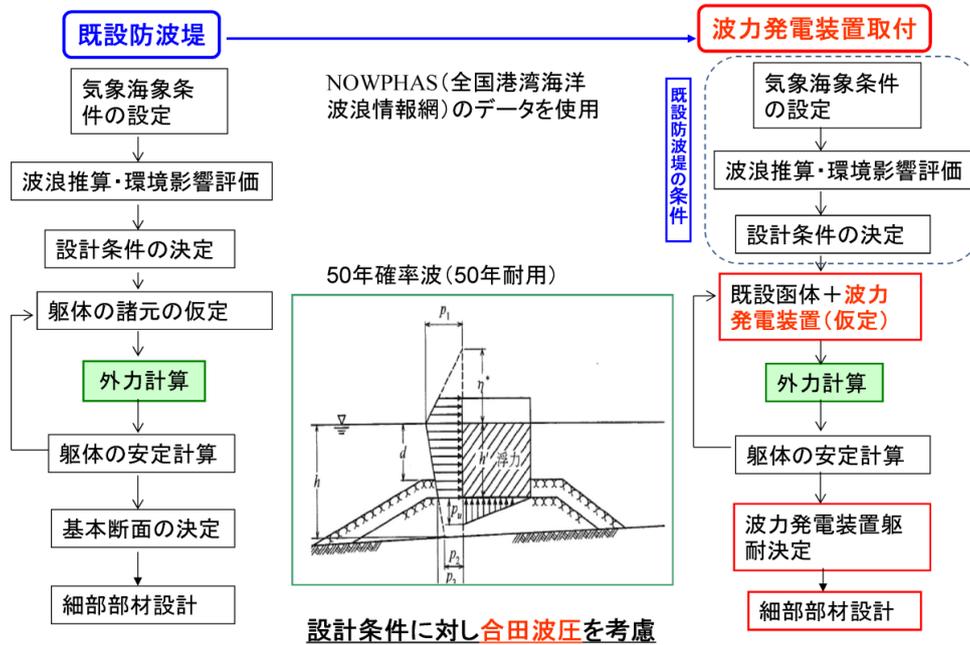
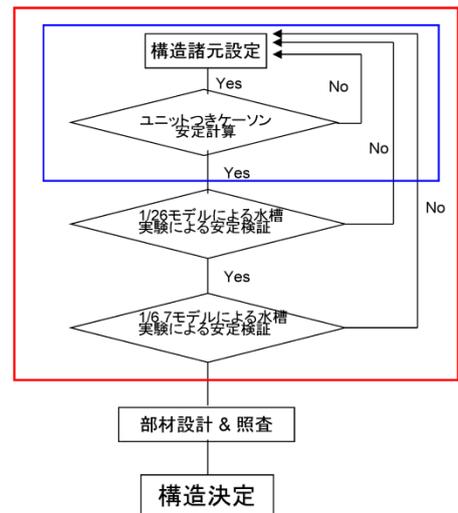


図 5.1 装置躯体の設計フロー

発電装置の構造体の設計条件は、「防波堤利用による波力発電の実用化に関する研究」²³⁾を参考にして設定した。発電装置搭載時の影響について、安全性を担保するための検証範囲は、図 5.2 のとおりである。

通常の色枠に加え、Stage 2, Stage 3 に該当する 2 段階の模型実験を実施し、課題の検証を行う。以下の条件は、酒田の一線防波堤の設計条件である。冬季の波高が極めて高く、過酷な条件である。

- 設計波 (50 年確率波)
- 設計波高 $H_{1/3}=10.2\text{m}$ ($H_{\text{max}}=15.325\text{m}$)
- 設計周期 $T_{1/3}=14.5\text{sec}$
- 設計波向 $\theta=25.0^\circ$
- 設計潮位
- H.W.L CDL+0.5m
- L.W.L CDL+0.0m



- 通常の照査範囲
- 今回の照査範囲(リスクヘッジ)

図 5.2 照査検証範囲

材料仕様及び許容値

- ・ 鋼材 (SM400 , SD295) =176N/m
- その他材質は港湾基準に準拠
- ・ コンクリート設計強度 $c_k=24\text{N/mm}^2$
- 許容曲げ圧縮応力度 容曲=9N/mm²

5.3 Stage 2 小型模型による二次元水路実験

実験水槽は、港湾空港技術研究所の 105m 長水路二次元水槽である(図 5.3)。水槽実験では、一次変換特性と荒天時のサバイバルコンディションにおける安定性の確認、及びユニットに生じる波圧強度を確認した。実験水槽の状況を写真 5.1 に示す。

なお、発電装置の模型寸法は、実機の 1/26 で図 5.3 の下図とした。

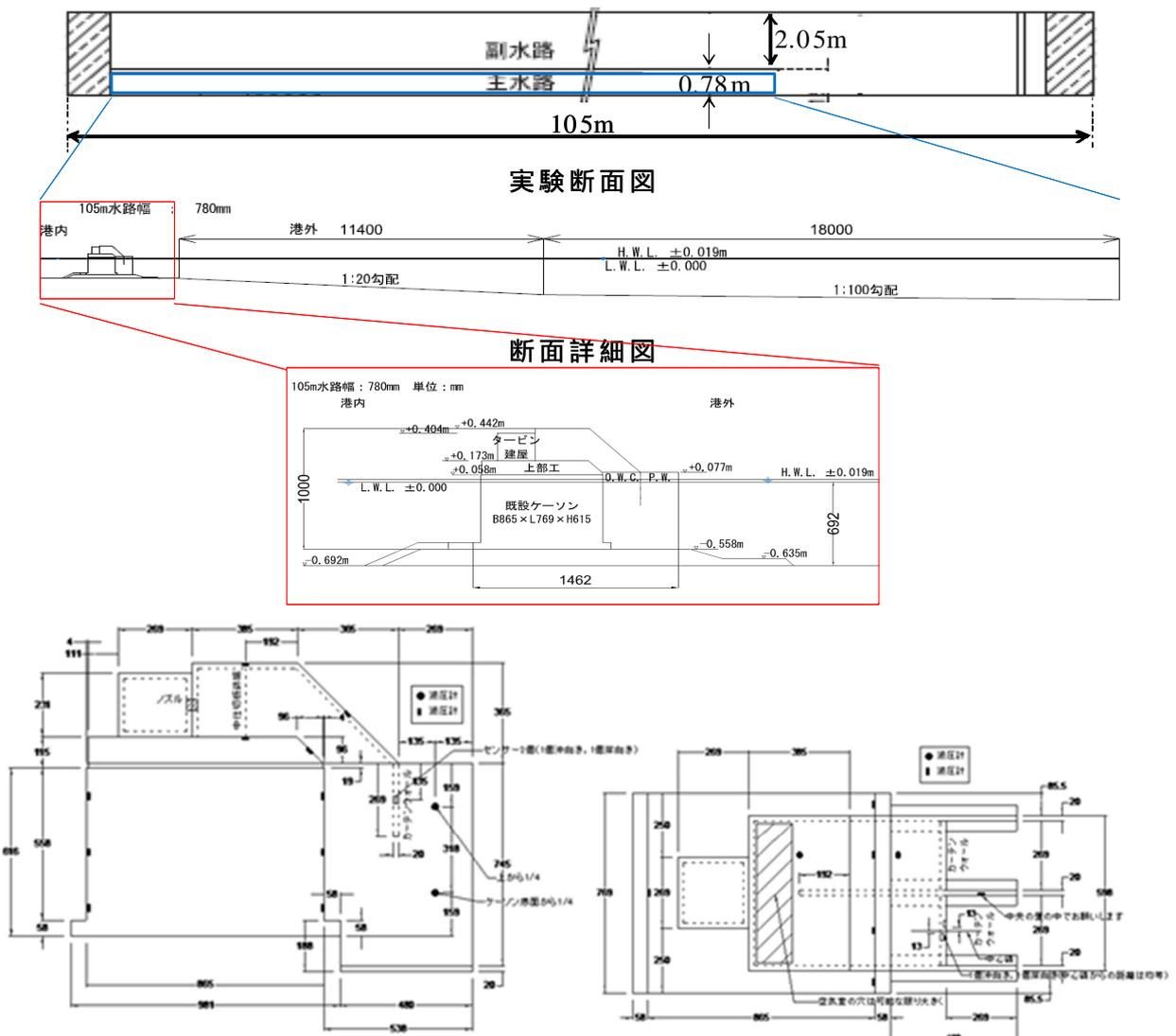


図 5.3 実験水路 (105m 造波水路) 及び模型概要

表 5.1 実験模型寸法 (mm)

空気室長さ : L_a	538
空気室幅 : B_0	598
カーテンウォール長さ : d_1	269
水深 : h	692
PW 長さ : L_p	269
装置側面ウイングタンク幅 : W	538



写真 5.1 水槽実験状況

5.3.1 実験ケース

実験ケースは、表 5.2 に示すよう、設計条件と発電条件の 2 つのケースを設定した。

表 5.2 実験ケース

設計条件					設計条件(実機換算)					
潮位		0.019			0.494			m		
周期		2.840	2.270	3.410	14.481			11.575	17.388	s
波高	規則波	0.589	0.472	0.707	15.314			12.272	18.382	m
	不規則波 有義波高	0.392		0.471	10.192			12.246	m	
発電条件					発電条件(実機換算)					
潮位		0			0			m		
周期		1.27	1.37	1.47	6.476			6.986	7.496	s
波高	規則波	0.048	0.077	0.106	1.248			2.002	2.756	m
	不規則波 有義波高	0.077		0.106	2.002			2.756	m	

□ : 実験仕様

□ : 実機換算値

5.3.2 実験結果

(1) 空気孔 (ノズル) の違いによる変換係数

図 5.4 に空気孔の大小による一次変換係数を示す。今回の実験条件では、すべての一次変換係数は、 $h/L=0.1 \sim 0.13$ あたりで極大値をとることが判明した。(図 5.4 ~ 図 5.6)

また、入射波高が大きくなるほど一次変換係数が大きくなる傾向が見られた。低い波高の場合も含めて、PW を有する方が、PW 無しよりも、全体的に 10% 程度一次変換係数がよくなっていることが分かる。しかし、図 5.4、図 5.5 より、空気穴の大小による一次変換係数の違いはほとんど見られなかった。なお、小島ら(1983)の実験結果²⁴⁾では、入射波高が大きくなるほど一次変換係数が大きくなるという傾向が見られる。

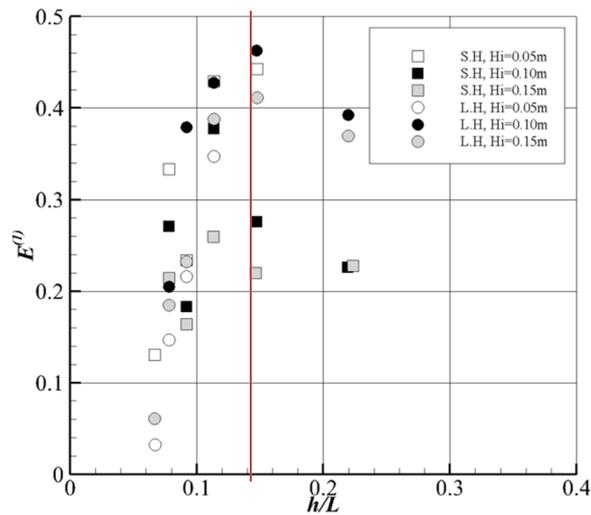


図 5.4 空気穴の形状の違いによる一次変換係数の違い

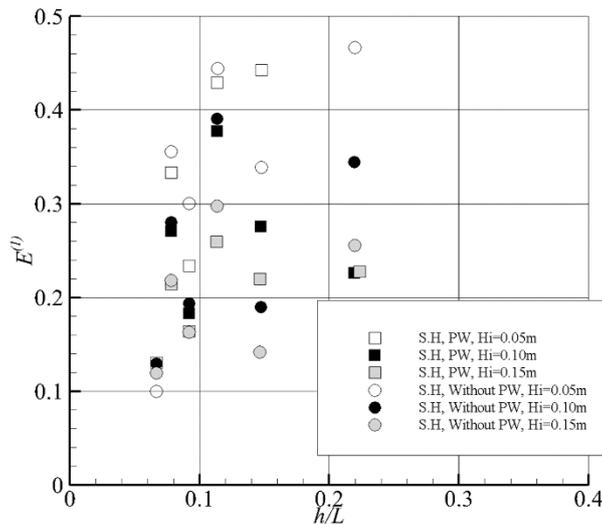


図 5.5 PW の有無による一次変換係数の違い (SH)

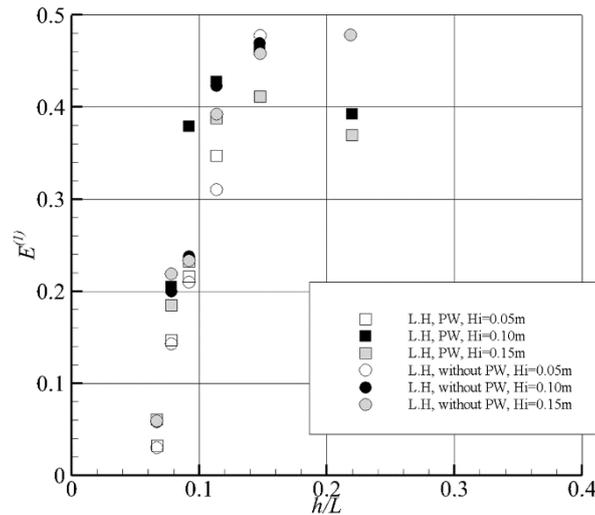
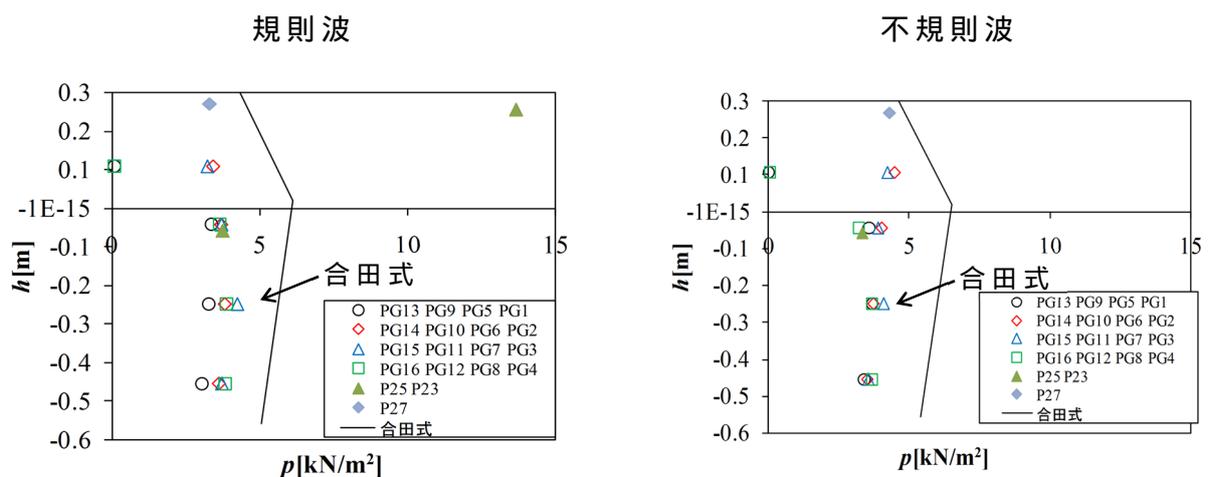


図 5.6 PWの有無による一次変換係数の違い(LH)

(2) 安定性結果

1/26 模型による 2 次元水槽実験の結果，ケーソンの安定性は，十分確保されていることが確認できた。

また，ケーソン前面壁に生じる水槽実験の波圧分布状況結果を図 5.7 に示す．図より，測定した壁面に生じる波圧力は，港湾基準に定める合田式で求めた波圧強度（合田波圧）を下回っており，合田波圧を装置の構造設計に適用できることを確認した．



実験：H=0.63m T=2.84s

現地：H=16.6m T=14.5s

実験：H1/3=0.43m T=2.84s

現地：H1/3=11.2m T=14.5s

図 5.7 多重共振型波力発電装置設置時の波圧分布

5.4 Stage 2 平面水槽実験とシミュレーション検証

5.2 項の水槽実験は，二次元水槽での実験であるため，実海域のような 3 次元効果の反映が難しく，一次変換係数が実際より小さくなる．変換エネルギーの三次元特性については，大森^{25),26)}らが，本実験と併行して日本大学海洋建築工学科のテクノプレースの平面水槽で確認実験を行っている．

その結果，1/25 の水槽実験と，三次元特異点分布法によるシミュレーションの検証により，単一 OWC 型に比して PW-OWC 型のエネルギー変換係数が 1.5 倍～2.0 倍程度向上することを確認している．図 5.8 は，入射波 0 度(装置正面)の OWC の一次変換係数の計算結果である．PW と OWC の長さは 1:1 (PW 長さ 7.0m) の時，PW の効果は歴然で最も一次変換係数が高くなる．

また，図 5.9 は，PW が 7m の時の射波角度別の一次変換係数である．

この結果から，入射波角度が 0 度(正面から)の入射波に対して変換係数が大きい事がわかる．このことから，PW の効果は立証されている．

一方，Stage 2 では，本研究で構築した三次元特異点分布法のシミュレーションについて，検証を行うことも目的である．

本項では，大森らが行った酒田港一線防波堤の 1/24 縮尺模型実験結果を元に三次元特異点分布法シミュレーションの検証を行った結果を以下に述べる．

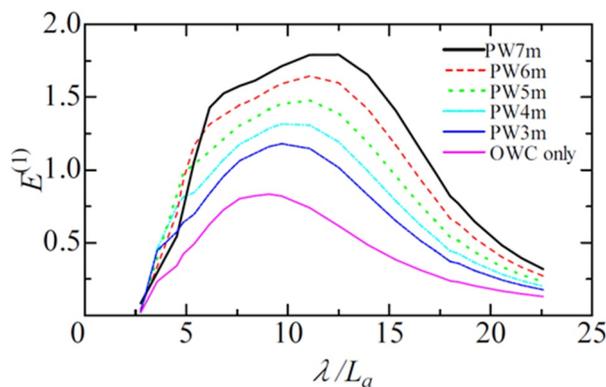


図 5.8 PW-OWC の PW 長さ別の一次変換係数^{25,26)}

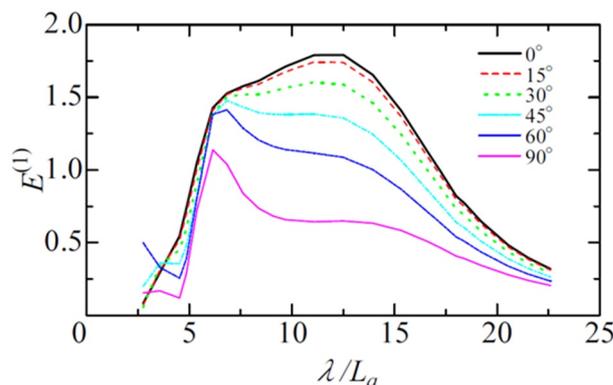


図 5.9 PW-OWC の入射波角度別一次変換係数^{25,26)}

5.4.1 実験概要

図 5.10 に示すような PW-OWC 型波力発電装置モデルの一次変換性能について、数値解析と模型実験²⁷⁾を比較した。PW-OWC 発電装置は、下部工を含めて、海底に着底した波力発電装置を想定した。実験時の模型の想定縮尺は 1/24 で、模型寸法は図 5.10 の通りである。

模型の右側から波が入射し、PW 部背後の OWC 部で波エネルギーを空気エネルギー（水面の振幅）に変換する。空気室内水面面積に対するノズル開口面積の比率（以下、ノズル比）を 1/100 とした場合と 1/300 とした場合について、水槽実験と数値解析の照合を行った。

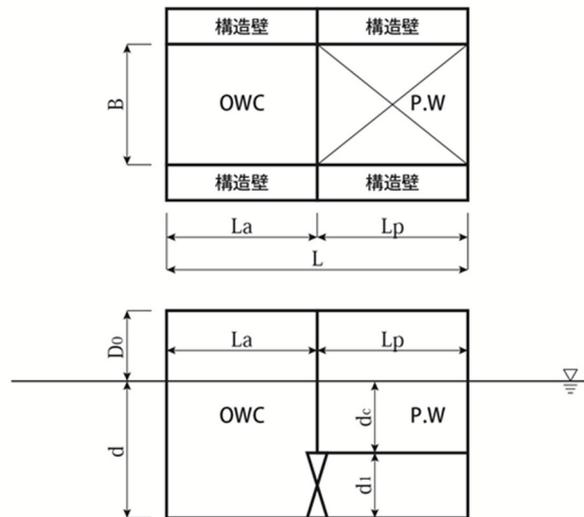


図 5.10 実験模型概要

表 5.3 模型寸法 (mm)

空気室長さ : L_a	300
空気室幅 : B	300
カーテンウォール長さ : d_c	85
水深 : $h(d)$	300
PW 長さ : L_p	300
装置側面ウイングタンク幅 : L	600

5.4.2 水槽実験と数値計算結果

水槽実験ならびに数値解析を行った。結果を図 5.11、図 5.12 に示す。

グラフはそれぞれ、無次元化された空気室内圧力と空気室内水面変位、ならびに、一次変換効率を横軸に無次元化された入射波波長をとって示してい

る。グラフから、数値計算結果と実験結果は、空気室内圧力と空気室内水面変位、ならびに一次変換効率のいずれに関しても良好な相関を示している。

このことから、構築した三次元特異点法プログラムは、解析に有用なプログラムであることがわかる。

また、一次変換効率のグラフに着目すると、ノズル比 1/100, 1/300 の双方とも、PW のない OWC のみの場合によくみられる狭い波長域での共振が現れず、幅広い波長域における波エネルギー吸収が期待できる結果をシミュレートできている。次にノズル比を変化させた場合の一次変換性能に及ぼす影響について、考察する。ノズル比 1/300 の結果は、同 1/100 の結果に比較して、全波長域を通じて空気室内圧力が高く水面変動が低くなっている傾向が見とれる。これは、ノズル比 1/300 の場合には 1/100 に比較してノズル開口面積が小さいため、1/100 の場合に比べて、空気室内水面の動きに対して、ノズルからの空気の流入出が抑えられて空気室内圧力変動が大きくなって、その結果、空気室内水面の変位が抑えられたためだと考えられる。

一次変換効率に着目し、例えば一次変換効率が 0.6 以上の値を示している波長域をみると、1/300 の場合が無次元化波長で 2~4 程度の範囲なのに対して、1/100 の場合は 2~5 程度の範囲と、1/100 の方が、より広い波長域で高い一次変換効率特性、すなわち波エネルギー吸収特性を有していることを示す結果となった。

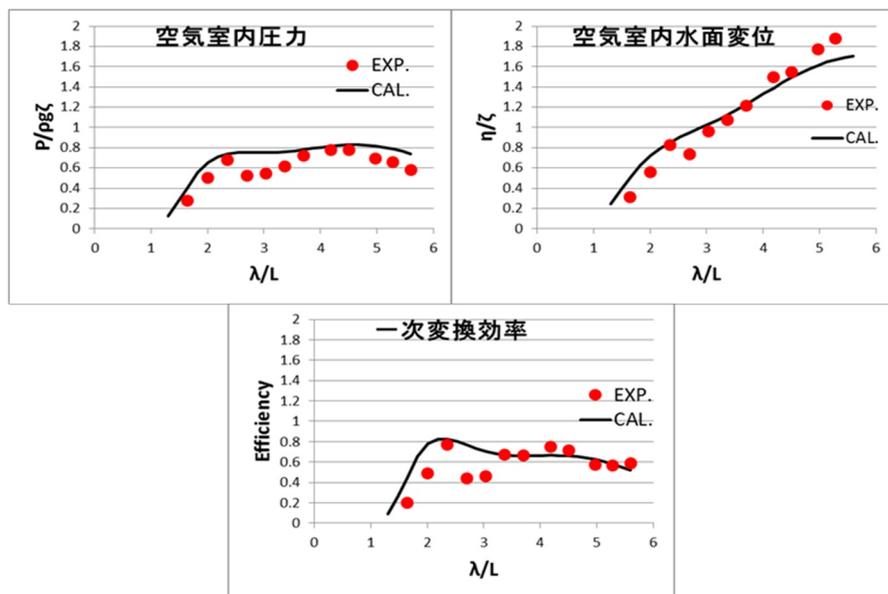


図 5.11 実験と計算値比較 (ノズル 1/100)

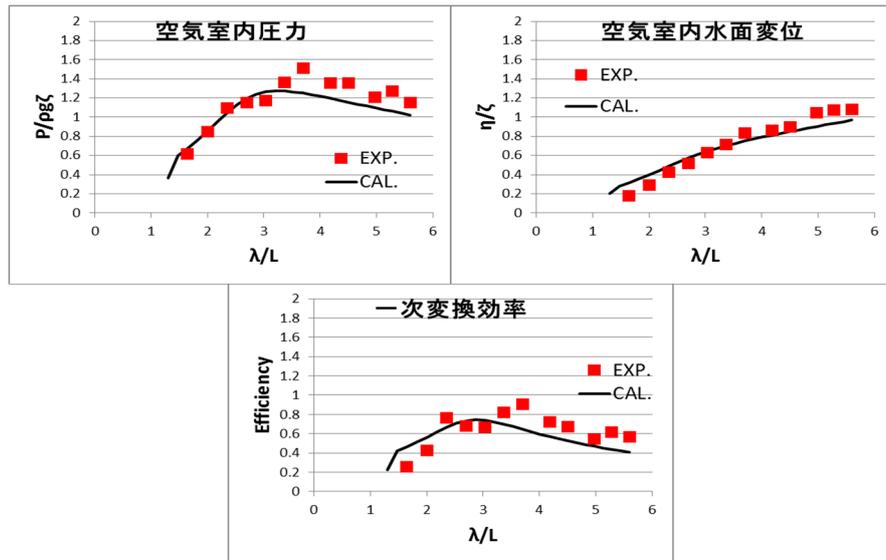


図 5.12 実験値と計算値比較 (ノズル 1/300)

実際の装置設置海域の入射波の波長すなわち周期と波高に関する出現頻度に大きく依存するところではあるが、この結果から、PW-OWC 波力発電装置の諸元を適切に設計することにより、幅広い波長域の入射波に対して効率よく波エネルギーを吸収する装置を設計することが可能になった。

5.5 Stage 3 大規模型による水槽実験

Stage 2 の検証結果を踏まえ、大型水槽 (港湾空港技術研究所大規模波動地盤総合水槽) に実海域の 1/6.7 縮尺モデルの模型を設置して、水槽実験を実施した。本実験の目的を整理すると、次の 2 点があげられる。

スケール効果の検証。(安全性の最終確認)

タービン、誘導発電機搭載による発電状況確認。

5.5.1 実験方法

実験模型図を図 5.13 に示す。既設ケーソンは、コンクリートブロック、発電装置を鋼材で構築した。模型の総重量は約 70t と模型としてはかなり大規模な模型である。ケーソン部はコンクリート製で延長 3.8 m × 幅 3.0 m × 高さ 2.9 m、空気室部及び PW 部は鋼製で延長 3.9 m × 幅 2.3 m × 高さ 3.9 m である。実験模型の製作過程の詳細は武田ら (2013)²⁷⁾ が詳しく述べている。

図 5.14 に示すタービン、発電機ユニットを写真 5.3 に示すように模型上面に搭載した。空気室の上部に面積比 1/100(LH) と 1/300(SH) のオリフィスなら

びにタービンを設置し実験を行った。実験水路は長さ 184 m , 深さ 12 m , 幅 3.5 m であり , 水路中央部には , 長さ 67 m , 深さ 4 m の砂地盤を有している。

この砂地盤上に帆布を敷設し , 基礎捨石投入後に模型を設置した。基礎捨石が動かないよう被覆ブロックなどを設置した。計測器は波高計 , 流速計 , 波圧計及び間隙水圧計を取り付けた。(図 5.15) 波高計(WG)は水路の各位置に設置したほか , 空気室内の平均波高を計測するため楕形波高計を設置した。波圧計(PG)はケーソンの前面・背面・上面 , PW , 空気室前面・上面に設置し , 空気室内の圧力を計測するために , 空気室内に設置した。タービンは 175mm の衝動タービンであり , 諸元は図 5.16 の通りである。このタービンに 750W のモーターを設置し , 誘導発電機としてデータを取得した。

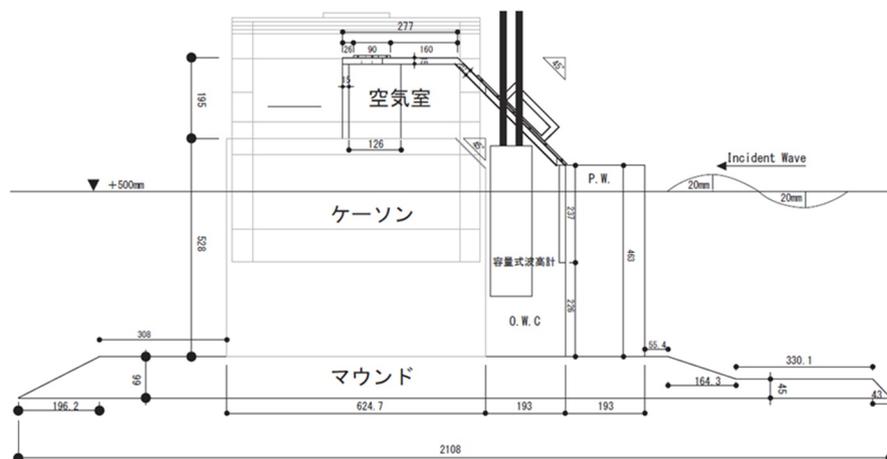


図 5.13 水槽実験模型概要

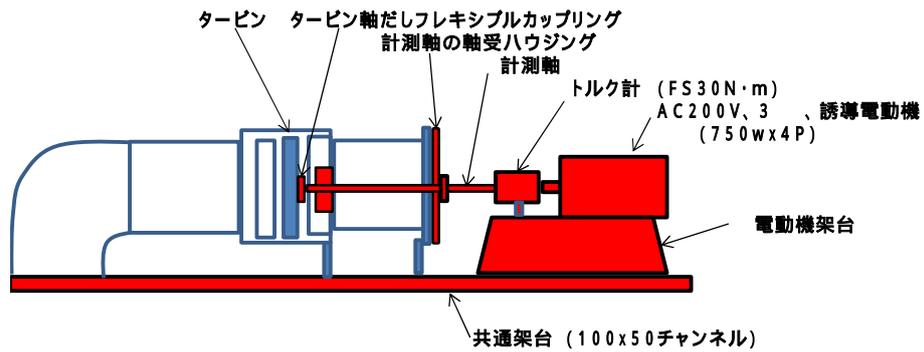


図 5.14 タービン発電機接続概要

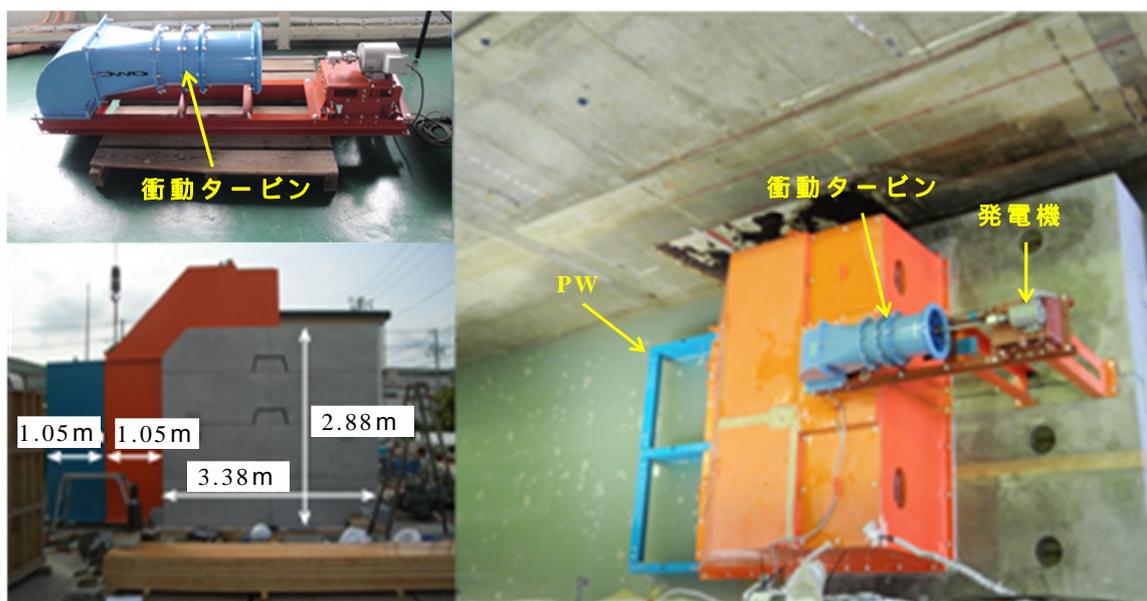


写真 5.3 大型水槽実験状況

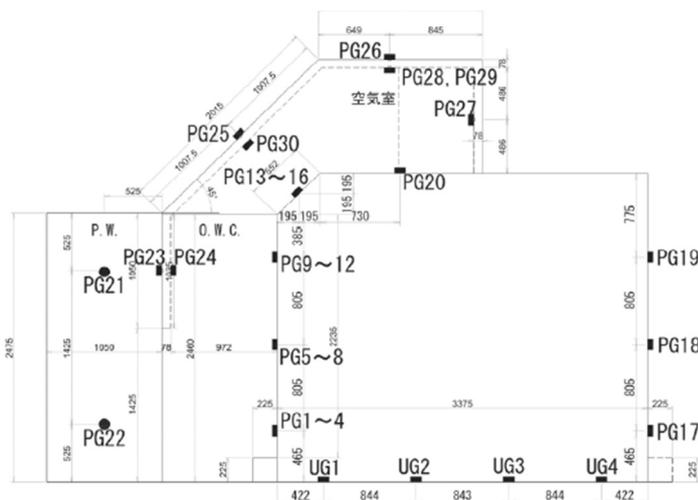


図 5.15 波圧計設置断面図 (単位 mm)

< 衝動タービン諸元 >

- ケーシング直径 : $D = 250(\text{mm})$
- 翼先端直径 : $249.2(\text{mm})$
- ハブ直径 : $d = 175(\text{mm})$
- ハブ比 : 0.7
- 翼先端すき間 : $0.4(\text{mm})$
- ロータ弦長 : $l_r = 43.2(\text{mm})$
- ロータ出口 (入口) 角 : $60(^{\circ})$
- 案内羽根弦長 : $l_g = 70(\text{mm})$
- 案内羽根設定角 : $30(^{\circ})$
- ロータ平均半径 : $r = (D+d)/4 = 0.106(\text{m})$
- タービン流路断面積 : $A = \pi(D^2-d^2)/4 = 0.0250(\text{m}^2)$
- ロータ翼枚数 : $z_r = 30$
- 案内羽根翼枚数 : $z_g = 26$
- ロータ弦節比 : $\sigma_r = l_r z_r / (2\pi r) = 2.02$
- 案内羽根弦節比 : $\sigma_g = l_g z_g / (2\pi r) = 2.27$

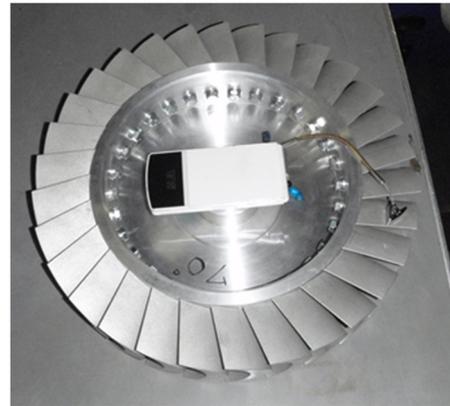


図 5.16 衝動タービン諸元 (250)

5.5.2 実験ケース

実験ケースを表 5.4 に示す。空気孔は LH(1/100), SH(1/300)を設定し, タービン設置時は, SH で実験を行った。

表 5.4 1/6.7 モデル実験 実験ケース

水位	空気孔 (ノズル比)	周期 T(s)	波力 H(m)		
			0.2	0.4	0.6
L.W.L (WL+2.70)	LH (1/100)	3	0.2	0.4	0.6
		4	0.2	0.4	0.6
		5	0.2	0.4	0.6
		6	0.2	0.4	0.6
	SH (1/300)	3	0.2	0.4	0.6
		4	0.2	0.4	0.6
		5	0.2	0.4	0.6

5.5.3 実験結果

(1) パワー吸収量時系列

図 5.17 に、空気室内の水位、圧力の平均値ならびに下式(104)～(105)を用いて計算した波パワー吸収量(1)の時系列図である。これを見ると、空気室内の水位の上昇、下降に応じて、空気室内の圧力が上昇、下降し、それに応じて波パワー吸収量がでていることがわかる。

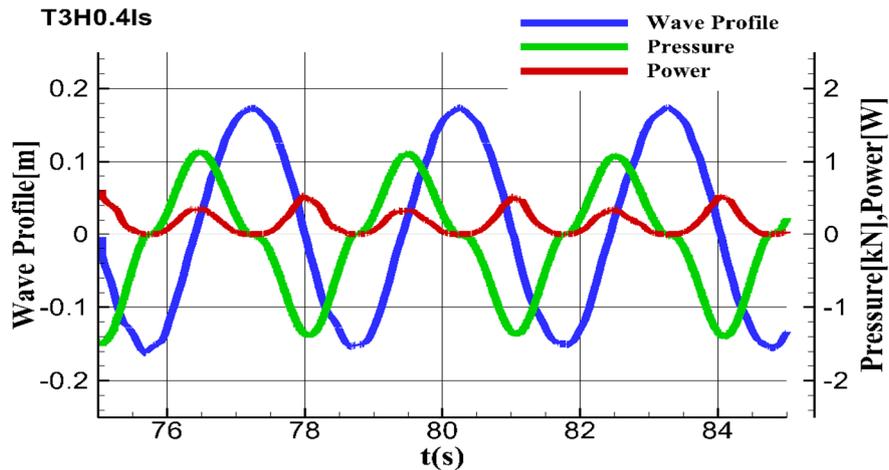


図 5.17 空気室の水位・圧力・波パワー吸収量の時系列

1次変換効率 $E^{(1)}$ の計算

$E^{(1)}$ は、波パワー変換量 P_A と入射波パワー P_I との比率である。

$$E^{(1)} = \frac{P_A}{P_I} \quad (103)$$

規則波の入射波パワー P_I は式(2)で表される。

$$P_I = \frac{\rho g^2 a^2}{8\pi} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right) (\tanh k) TB \quad (104)$$

波パワー変換量 P_A は波1周期分の空気室内部圧力と内部水面変動の時間微分を積分し、空気室内部の水線面積で乗ずることで式(105)により算出できる。

$$P_A = \frac{AW}{T} \int_0^T P(t) \frac{\partial \eta(t)}{\partial t} dt \quad (105)$$

ρ : 水の密度, a : 入射波の振幅, B : 空気室幅, T : 周期, η : 内部水面変動

h : 水深, k : 波数, Aw : 水線面積, P : 空気室内圧力

(2) 空気孔 (オリフィス) の違いによる変換係数

図 5.18 に、空気穴の大きさによる一次変換係数の違いを示す。これを見ると、大きな穴(1/100, LH)の方が、小さな穴よりも効率がよく、中規模実験の結果とも傾向がほぼ一致している。

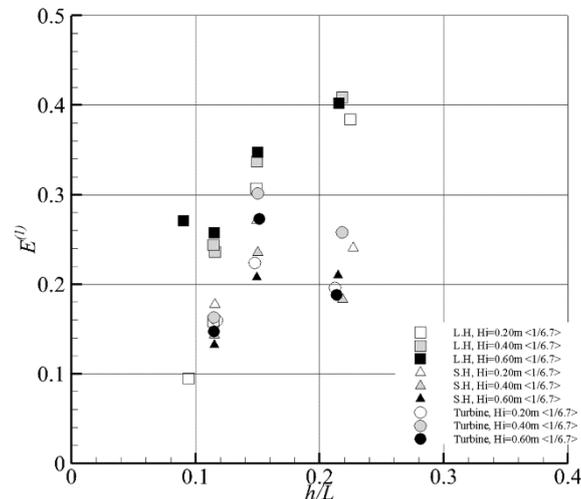


図 5.18 空気穴の形状の違いによる一次変換係数の違い

空気穴の大小とタービンを取り付けた場合(凡例：turbine)の 1 次変換係数を比較したものである。これを見ると、今回のタービン特性は空気穴の小さいほうに特性が持っている。後述する実海域実験に向けた衝動タービンの特性実験で判明したことではあるが、衝動タービンでは、ハブ比 0.7 で効率が最大である。逆算するとノズル比は 1/100 ~ 1/200 が最適であることから、妥当な値と言える。

図 5.19, 図 5.20 は、中規模実験との比較であり、これを見ると、大規模実験の結果のほうが、中規模実験よりも 2 割 ~ 3 割程度効率が悪いことがわかる。これは、小嶋ら(1983)²⁴⁾の考察とも一致しており、小嶋らの算定方法を用いて、スケール効果を検討することの妥当性を示した。

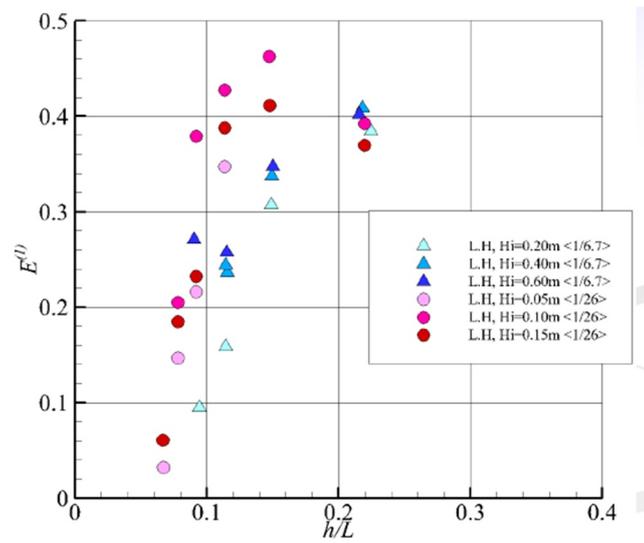


図 5.19 空気穴の形状の違いによる一次変換係数の違い

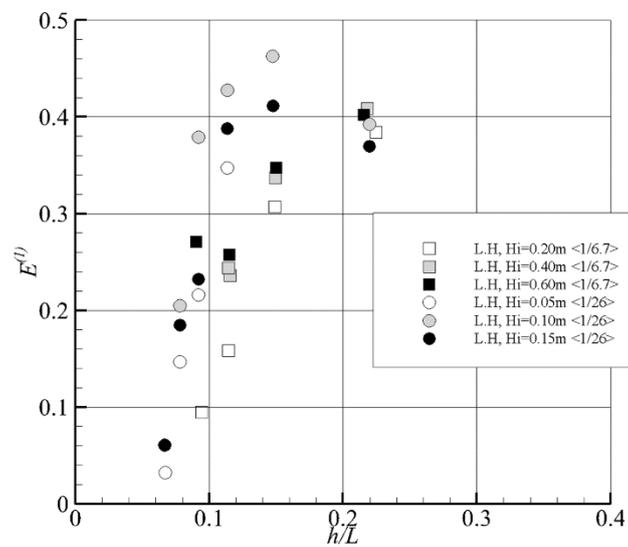


図 5.20 中規模実験との比較 (<1/6.7>が大規模実験)

(3) タービン設置時の発電効率

発電効率実験の内，現地で想定している形式のタービン模型を設置した．

図 5.21 は空気室に連結したタービン回転数とトルクの測定値および発電ワット数の時系列の例を示したものである．

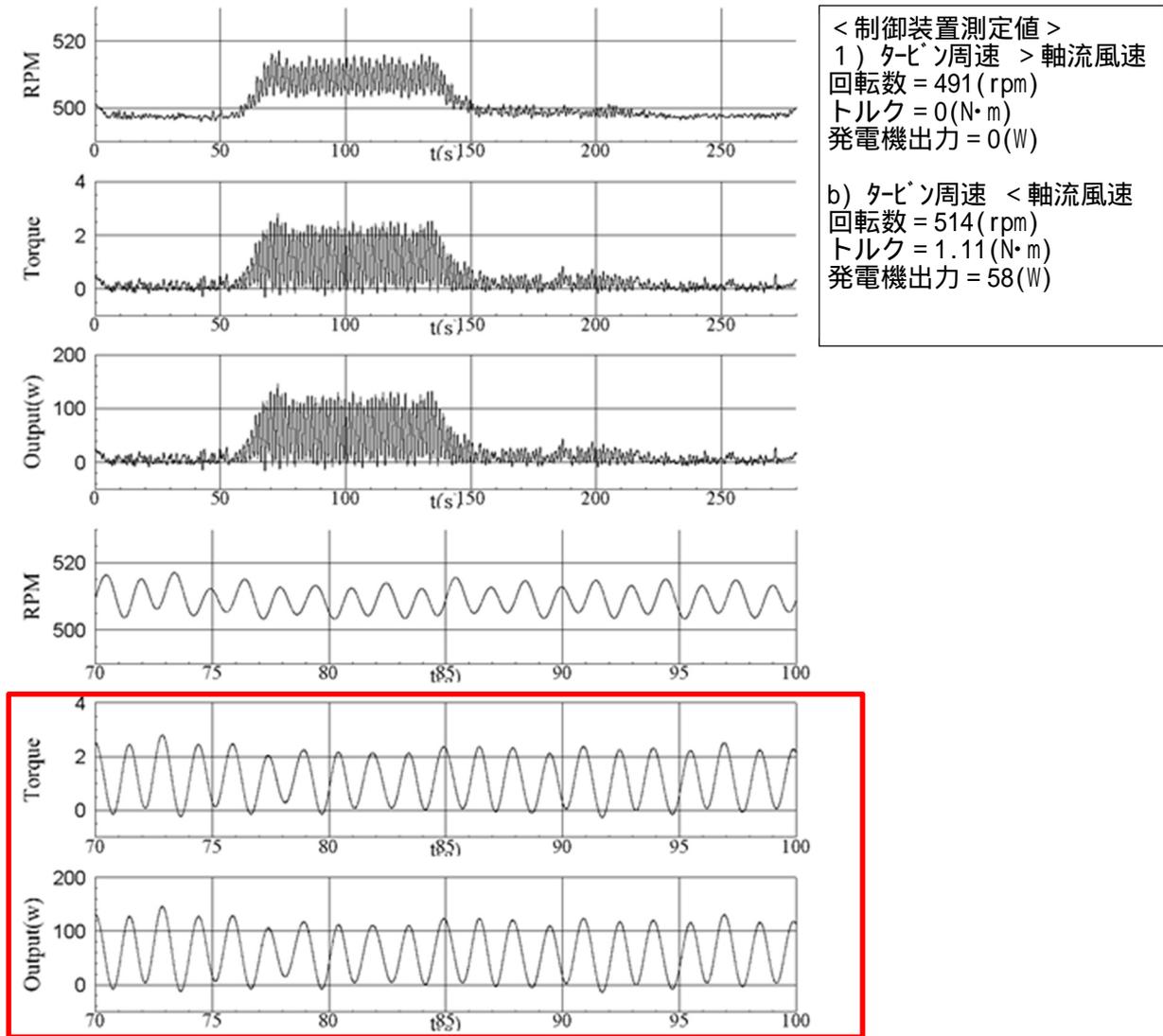


図 5.21 電力取り出し部での応答の例 (H=0.4m , T=3.0sec)

空気室に連結したタービン回転数とトルクの入射波周期 3 秒 (実海域約 8 秒) の結果である．図中の上段の 3 図は，造波開始から造波終了し水路内の水面が静穏になるまでの約 250 秒間の実測値．下段の 3 図は，造波した波が装置に到達しタービンが安定して回転していた時間 (造波 70 秒後から 100 秒後までの 30 秒間) について高周波ノイズを除去したものである．

タービンを周期的 (空気の出入りの双方で駆動するため周期 1.5 秒での回転) に駆動し発電機を回していることがわかる。ここでは、誘導発電機を用いているため、外部からの定速の同期回転 (500rpm) を与えて (運転制御) 発電している。ここで設置したタービンや発電機は、この装置に見合った適切な能力のものではなかったが、測定した回転数やトルクから発電量が算定でき、同時に電氣的に測定した発電量と比較ができるため用いた。

時間平均した算定値は電氣的に測定した値 (58W) とほぼ合致していた。来襲波によって作られる空気室の水面変動から、空気室上部孔を通して空気の出入りを引き起こし、タービンを回転させ発電していることがわかる。「流体動力系」「電力取り出し系」「制御系」を組み合わせた一連のシステムでも、動作が確認できた。また、図 5.21 下段の 2 図では、往復流に対しタービンが正のトルクを発生させていることが分かる。このことより、往復流の変動に対し発電ロスが非常に少なくなっており、発電効率を高めている。タービン出力を(106)式にて計算した。

$$\text{Output(w)} = \text{回転数(RPM)} \times \text{トルク(Torque)} / 9.55 \quad (106)$$

これより得られた出力を波パワー吸収量(PA)で除した二次変換係数を図 5.22 に示す。これをみると、タービンの二次変換係数は、平均的には 0.35 程度であるが、周期が短く、波高が高くなるにつれて値が低くなっていることがわかる。これは、上述したように実験工期の制約により、この OWC 装置に見合った適切なタービンではないものを使用して実験を行ったため、OWC とのマッチングが図れていなかったためである。

本実験に用いたタービンの特性を図 5.23 に示す。タービンの特性は、流量係数が 0.7 前後で効率が最大になり、効率は 0.48 程度である。

前述したような制約を考えず、想定していたタービンを用いて、流量係数 (軸流速 / タービン端回転速度) を 0.7 付近で運転できるような設定をすれば変換係数の向上が図れると考えられる。

タービン径や回転数などのマッチングについては、後述する章で検討を行っている。

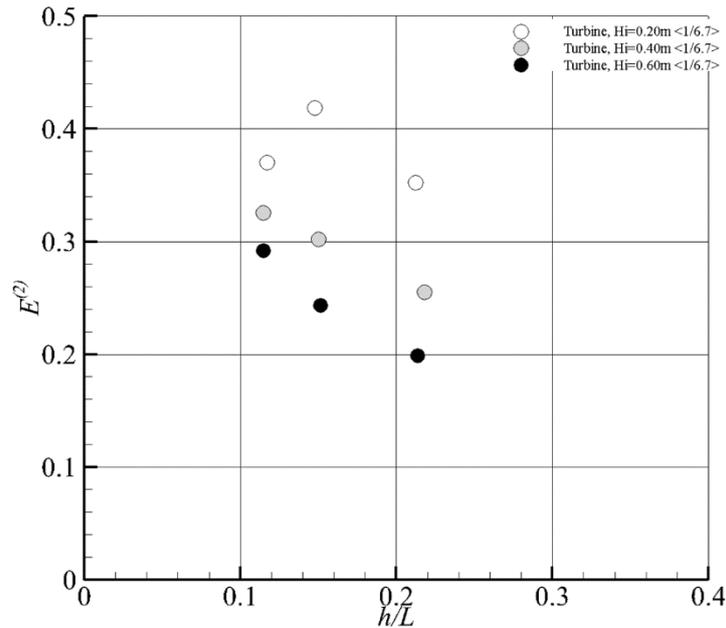


図 5.22 タービン出力から計算される 2 次変換係数

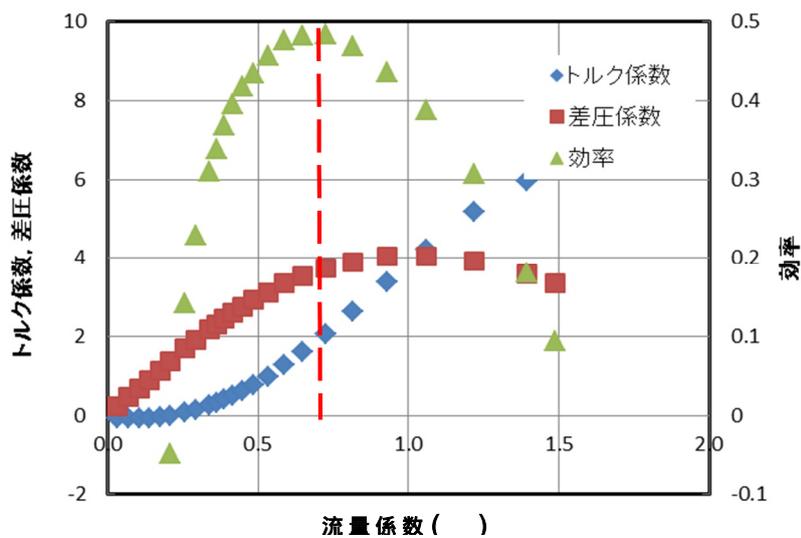


図 5.23 衝動タービン特性 (250)

(4) 安全性の結果

1/26 模型実験では，サバイバルコンディション下においても安定性が確保されており，作用する波圧強度について，合田波圧を用いても問題がないことが確認できる．1/6.7 の大型模型実験結果を図 5.24 に示す．図より大型模型実験でも安全性が確保されていることを確認した．また，スケールエフェクトの確認では，同じ傾向を示し模型の縮尺を考慮するとほぼ同等の結果であることがわかる．

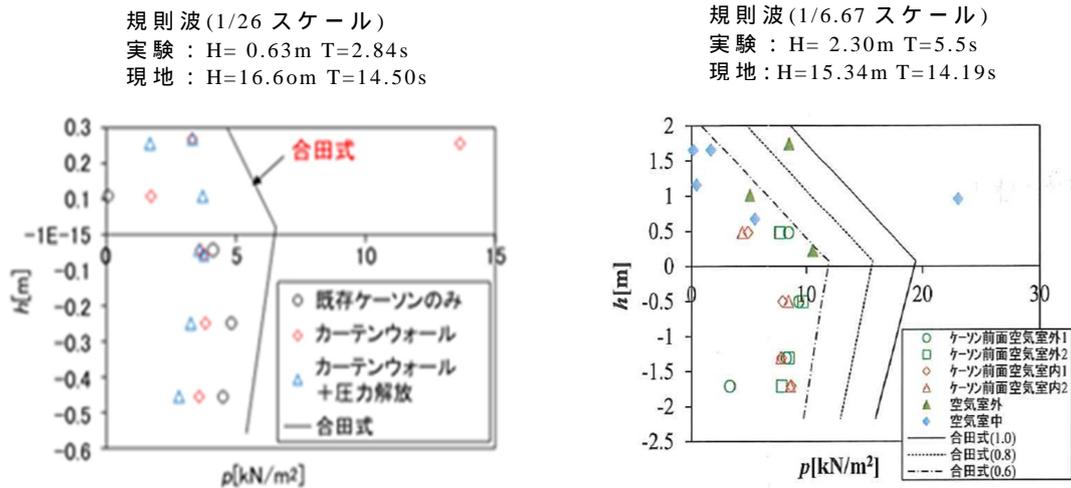


図 5.24 波圧力比較結果 (1/26 模型 1/6.67 模型)

5.6 まとめ

本章では，システム設計法の Stage 2，Stage 3 に沿って，PW-OWC 装置のエネルギー変換特性及び安全性の検証を目的に，1/26 小規模模型及び 1/6.7 大規模模型による水槽実験により，技術課題の解決を図った。

また，水槽実験の結果をもとに三次元特異点分布法の有用性を確認した．本章の結果を下記の通り列記する．

水槽実験により，PW-OWC 波力発電装置搭載状態での安全性の確認を行い，これまでの港湾基準に従った設計法が出来ることを確認した．

装置の設計外力評価法として，合田式が適用出来る事を確認した．

PW-OWC は OWC のみと比較し一次変換係数が 10% 程度大きくなる結果となった．本水槽実験では，3次元効果が反映できないため，大森らが別途実施した水槽実験の結果では，PW-OWC 型は単一 OWC 型より，1.5～2.0 倍の一次変換効果があることが示された．

大規模実験の結果と中規模実験の結果から，その縮尺効果を考慮しても，波圧強度は，既存の合田式を設計法に適用できる．

一次変換係数は，大規模実験の結果のほうが，中規模実験よりも 2 割～3 割小さくなる傾向を示した．このことから，小型模型実験では，変換係数を過大に見積もる可能性があるので注意が必要である．

衝動タービンは，往復流においてトルクが安定し，本装置の発電システムとして有効な機器である．

第6章 Stage4 実海域実験の概要

(有孔ケーソンを利用した波力発電装置の
エネルギーロス及び発電コストの検証)

6.1 消波ケーソンを利用した PW-OWC 装置

システム設計における技術課題については、Stage 2、Stage 3 の水槽実験により検証した。本研究の最終目的であるユニット型 PW-OWC 型波力発電装置の実用化に向けた最終検証として、Stage 4 の実海域実験を実施した。

実験場所は酒田港内の護岸ケーソン（有孔ケーソン）への搭載を予定し、搭載した場合の発電装置の特性について検討を行った。本章では、有孔ケーソン上に発電装置を搭載した場合の特性及び費用試算について述べる。

6.2 単独で発電装置を設置する場合の特性

実証実験は、山形県酒田港の外郭一線防波堤を利用する方針で実証実験の計画を進めた。将来の建造計画を想定した場合、設置する発電装置は、図6.1のように防波堤に連続設置するが、実証実験は、図6.2のように1基のみの設置となる。

しかし、実証実験海域の詳細条件で、最終確認検証を行ったところ、ある波周期帯で発電装置の性能が著しく低下する現象が確認された。この現象は、水槽実験²⁸⁾や本研究で開発した数値計算法でも明らかとなった。

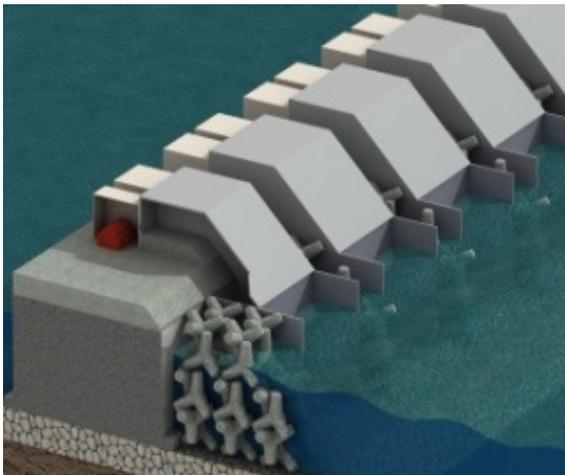


図 6.1 連続設置（計画）

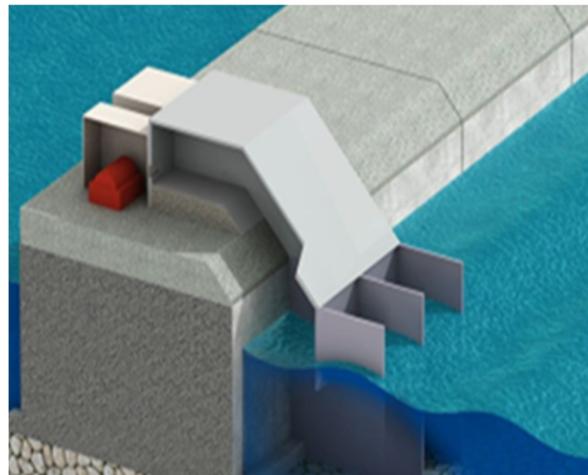


図 6.2 単独設置（実験）

シミュレーションと実験結果を図6.3に示す。なお、モデル寸法は、前章の大規模水槽実験と同じ1/6.7モデル（表6.1）である。図より、波周期7.5秒程度で一次変換係数が著しく減少していることがわかる。水槽実験映像及びシミュレーションで検証したところ、背後の防波堤の反射波の重畳影響であることが判明した²⁹⁾。

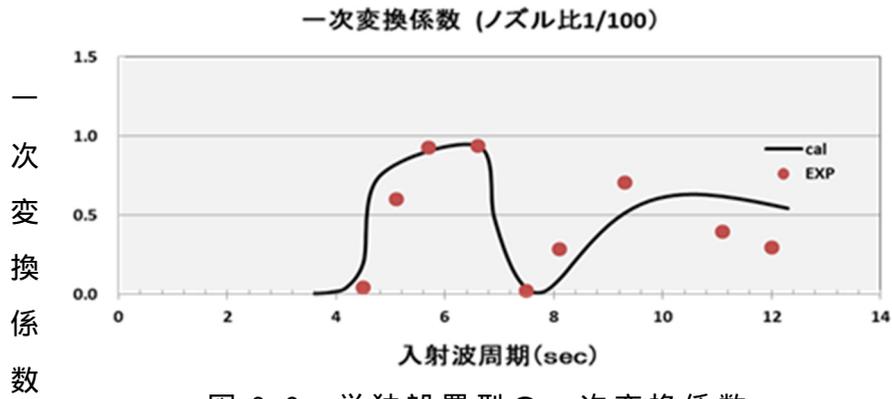


図 6.3 単独設置型の一次変換係数

表6.1 実機寸法

空気室長さ : L_a (m)	7.0
空気室幅 : B_0 (m)	11.6
空気室開口部深さ : d_1 (m)	9.7
水深 : h (m)	14.6
PW長さ : L_p (m)	7.0
装置側面ウイングタンク幅 : W (m)	9.6

そこで，図6.4に示すような消波工により反射波を防ぐことで，エネルギー変換効率の低下対策を考案した。

しかし，対策工の製作，設置費用を試算すると発電装置本体の4倍以上となることが予測され，冬場に荒天日が多い酒田港では工事待機の日数が増えることが予測された。これにより工事の稼働率が低下し，実験工程が半年以上遅れるリスクや設置費がさらに増大することが明らかとなった。

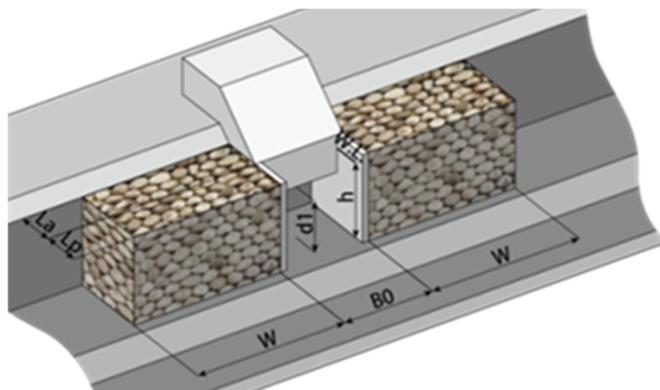


図 6.4 消波工の設置による反射波対策

以上のような背景を踏まえ，実海域実験の場所を変更することとした。場所は，港内の既設の消波護岸である。

6.3 有孔ケーソン利用の概要

上述の反射波影響を克服するため、酒田港内にある消波ケーソン（有孔ケーソン）に着目した。全国に多く点在している有孔ケーソンの中で、酒田港は40基の有孔式消波ケーソンを有していることから、防波堤の影響を受けにくいと考えられる。

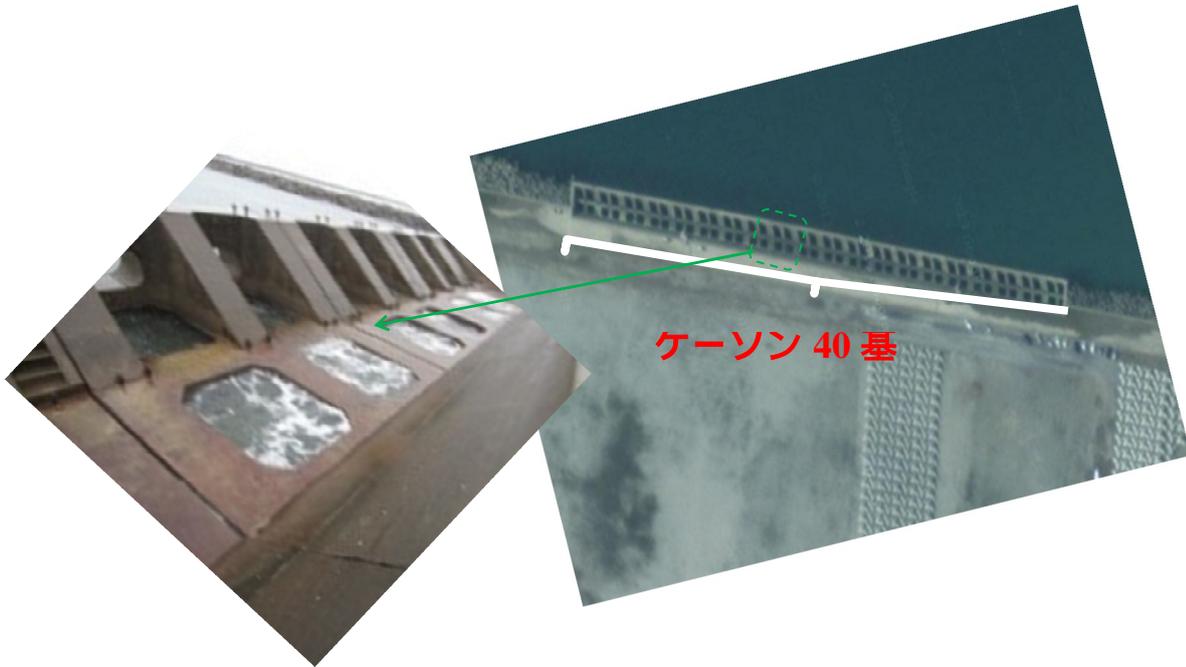


写真 6.1 有孔ケーソン配置

この消波ケーソンは岸壁からの反射波による重複波を発生させることで、港内で航行中あるいは停泊中の小型船舶の転倒を防止するために設置されたケーソンである。写真6.1は酒田港の消波ケーソンの航空写真である。本有孔ケーソンの形状は、二つの遊水室が海に対し直列し、その遊水室同士、前面の遊水室と海が海面下でそれぞれ2つの穴で繋がっている形状をしている。

本研究では、図6.5に示すような岸壁側をOWC、海側をPWと想定し、PW-OWC装置を模擬できると想定した。

また、PWの開口部が限定されていることからEnd Wall式と同様の特性²⁵⁾を持っていることが考えられる。このような特徴を有する有孔ケーソンを改良することでPW-OWC型発電装置としての機能が期待された。防波堤を利用した波力発電装置は、一線防波堤および有孔ケーソンで共通した課題として、消波機能によりエネルギー変換時にロスが発生し変換性能が低くなることで結果的に発電出力が小さくなることが挙げられる。

一方、この装置の利点として、以下 ~ が挙げられる。

図 6.1 のように装置すべてを建設する必要のある従来の防波堤設置と比べ、空気室のみの建設で OWC 装置として利用できるため建設コストが大幅に低減できる。

護岸近傍のため、設置及び維持管理の際は陸側からアクセス可能となり、イニシャル、メンテナンスコストとも低減可能となる。

海底ケーブルが不要となるため、コスト低減が可能となる。

既設の有孔ケーソンはすでに複数設置されていることにより、防波堤や岸壁による反射波の影響を受けにくい。

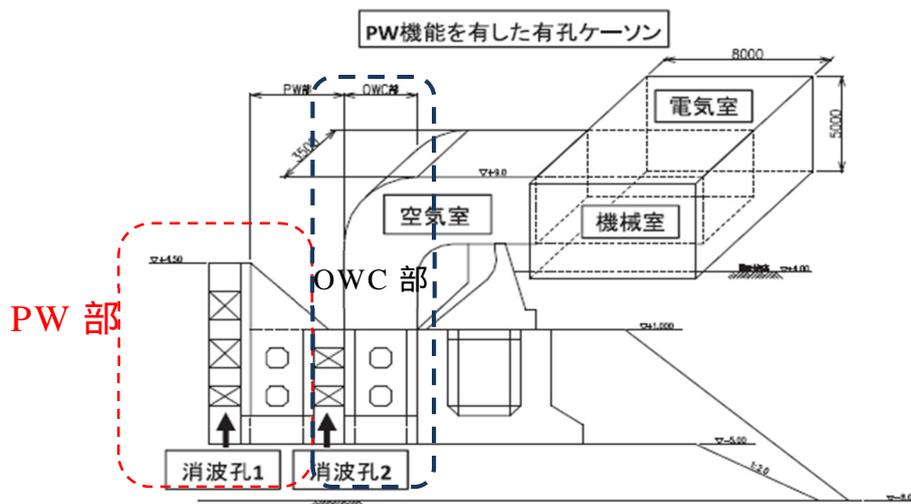


図 6.5 PW-OWC 波力発電装置有孔ケーソン設置イメージ
(構造物左が海側，右が陸側)

6.4 水槽実験によるエネルギーロス特性確認

有孔ケーソンでの OWC の一次変換係数を把握するため、1/20 スケールモデルによる水槽実験を実施した。水槽規模は長さ 30m × 幅 0.6m、実験水深は模型の開口部に合わせて 0.215m とした。

6.4.1 実験模型

水槽実験模型を図 6.6 に示す。模型は、実機スケールの 1/20 とし、幅 57.5cm × 長さ 50.3cm × 高さ 46cm とした。

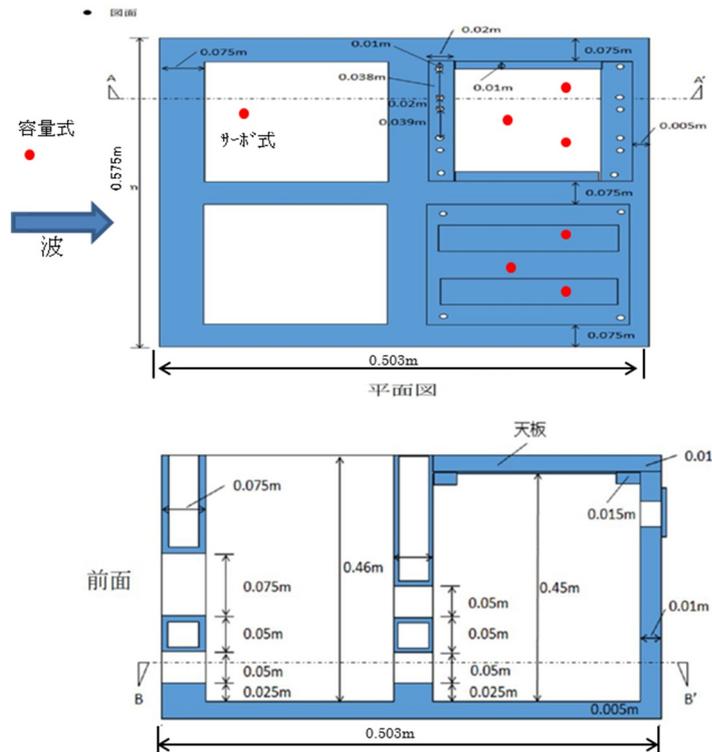


図 6.6 実験模型概要

6.4.2 実験方法

実験は、模型を二次元水槽に設置し、正面より規則波を入射させた。一次変換係数を算出するために OWC 内の水位変動、圧力変動を計測した。

また、空気の吐き出し孔(オリフィス)は、水線面積比(ノズル比)で 1/100、1/200、1/300 の 3 ケースと全開放の計 4 ケースとした。波高は造波機の最大波高 0.02m (実機 0.4m) で入射波周期は実海域で 4.5 ~ 9.5 秒に設定した。

6.4.3 実験結果

一次変換係数の結果を図 6.7 に示す。図より、6 秒より長周期側の一次変換係数が 0.6 ~ 0.7 であることがわかる。これまでの知見から、消波機能がない場合の OWC の一次変換係

数は通常 0.8~0.9 程度であることから、有孔ケーソンのエネルギーロスが長周期帯で 2 割程度であると推察できる。

また、本装置の共振周期は 2 点あり、5 秒~7 秒前後であることが確認できる。

なお、一次変換係数 $E^{(1)}$ は、波パワー変換量 P_A と入射波パワー P_I との比率で下記のとおりであり、有孔ケーソンの特性については田口³⁰⁾、居駒ら³¹⁾の論文に詳細が述べてある。

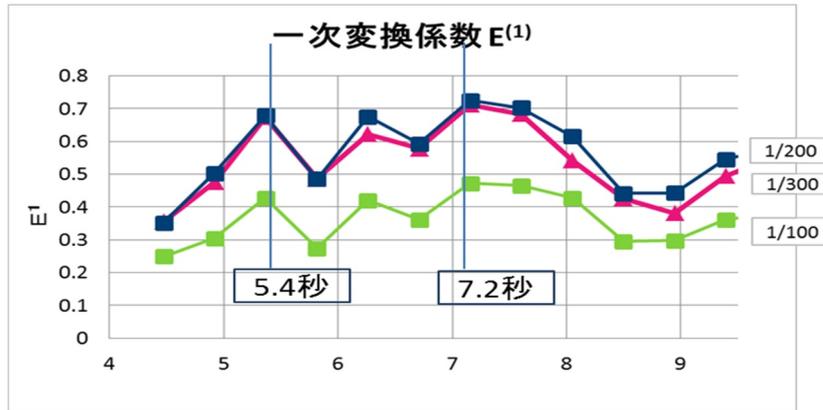


図 6.7 一次変換係数

一次変換係数 $E^{(1)}$ は、5.5.3 で示したように波パワー変換量 P_A と入射波パワー P_I との比率で下記のとおりである。

$$E^{(1)} = \frac{P_A}{P_I} \tag{107}$$

規則波の入射波パワー P_I は (108) 式で表される。

$$P_I = \frac{\rho g^2 a^2}{8\pi} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right) (\tanh k) TB \tag{108}$$

波パワー変換量 P_A は波 1 周期分の空気室内部圧力と内部水面変動の時間微分を積分し、空気室内部の水線面積で乗ずることで (109) 式により算出できる。

$$P_A = \frac{AW}{T} \int_0^T P(t) \frac{\partial \eta(t)}{\partial t} dt \tag{109}$$

ρ : 水の密度, a : 入射波の振幅, B : 空気室幅, T : 周期, η : 内部水面変動

h : 水深, k : 波数, A_w : 水線面積, P : 空気室内圧力

6.5 水槽実験と MPS 解析の検証（エネルギーロス の検討）

6.5.1 OWC の水面変動

酒田港においては夏場の発電が期待出来ないことから、秋口～春先にかけての比較的周期の長い 7～9 秒の波エネルギーに着目して数値モデルによる解析を行った。図 6.8 に水槽実験における空気室全開放，図 6.9 に MPS（粒子法）における OWC の水面変動の計算結果を示す。図 6.8 より，無負荷（全開放）では，波周期 7 秒以上で波高比が 2.5 程度とよく振動していることが分かる。図 6.9 に示す MPS 法の計算結果においては波高比が 1.5 となり，減衰の効果（水の動粘性の与え方）が実測より厳しめに設定されているのでは無いと思われる。ただし，長周期側の波高比の傾向は，水槽実験とほぼ同じである。

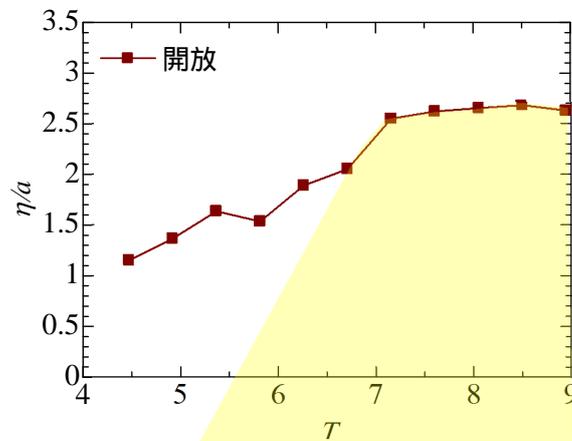


図 6.8 水槽実験水面振幅比結果（全開放）

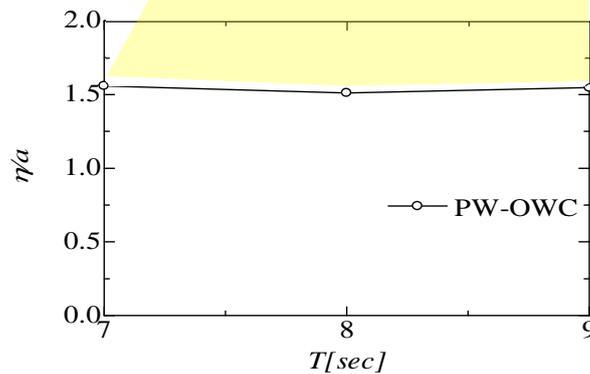


図 6.9 MPS 法による水面振幅比計算結果

6.5.2 消波孔のエネルギーロスについて

有孔ケーソンは、図 6.10 に示すように有孔壁 1, 2 部が全開放の大口径孔ではなく、消波を行うために小径孔となっていることから、一次変換係数が通常の OWC に比して低下する。この消波孔のエネルギーロスの影響の度合いを調べるため、MPS 法により入射エネルギーと反射、透過エネルギーを推定し、エネルギーロスについて検証を行った。

モデルは、図 6.10 に示すとおり、図の右側から波を進入させ計算機上でシミュレーションを行った。波周期は 7, 8, 9 秒の 3 種類を想定した。波高は規則波 0.5m と 1.0m の 2 ケースとした。

周期 7 秒、波高 0.5m, 1.0m の結果を図 6.11, 図 6.12 に示す。波高が 0.5m 程度では、エネルギーロスが 50% を超える。

一方、波高 1.0m 程度では、その割合は 30% 程度となる。周期 7, 9 秒でも同じような傾向である。前述したように、MPS の計算結果が厳しめであることから、この周期帯 (7~9 秒) でのエネルギーロスは、20% 前後と考えるのが妥当である。

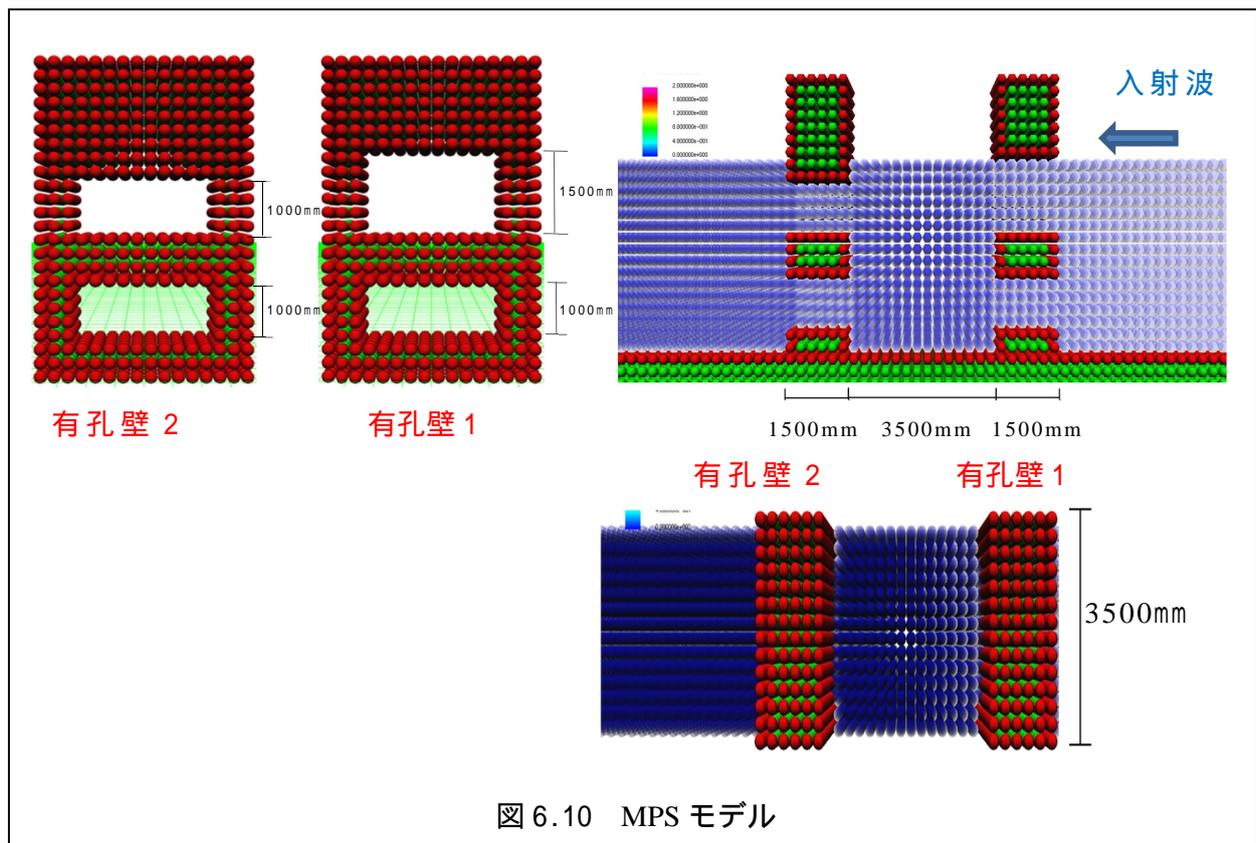


図 6.10 MPS モデル

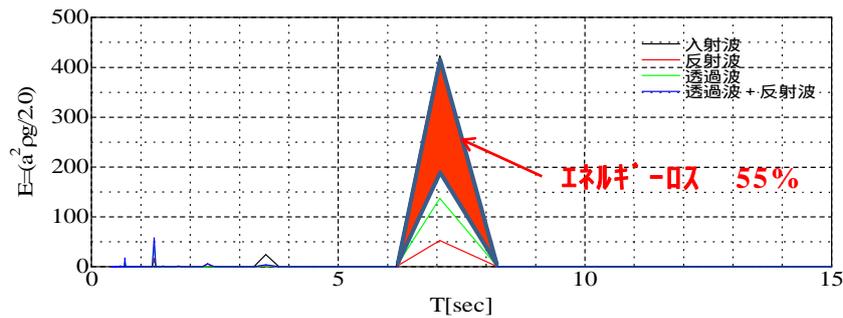


図 6.11 H=0.5m T=7s

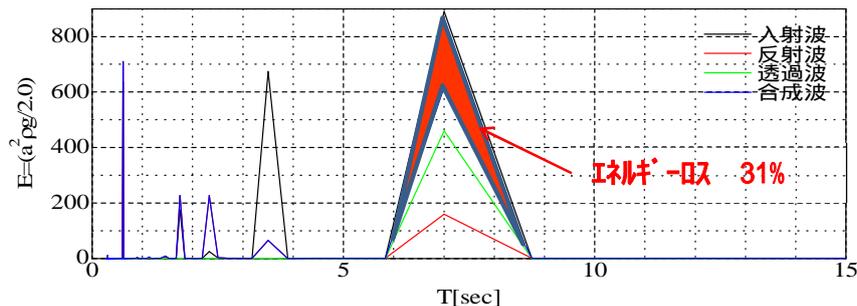


図 6.12 H=1.0m T=7s

6.6 港内波/港外波のエネルギー比及び頻度分布

有孔ケーソンは港内に整備されているため、入射エネルギーが一線防波堤に比べて大幅に低減する。一線防波堤の入射波（沖波）については、NOWPHAS³²⁾の観測データをもとに波浪分布表を整理している(表 3.2)。

酒田港内港の護岸については、一線防波堤により沖波のエネルギーは減衰する。波力発電装置は、入射波エネルギーを 2 段階で電気エネルギーに変換するため、港内波の予測は重要である。しかしながら、港内の波高は、長期間の観測データがないため、NOWPHAS データをもとに酒田港の過去の波浪推算結果から予測を行った。

6.6.1 波高比の算定

「酒田港港湾計画資料 - 改訂 - (1993 年 3 月)」の静穏度解析³³⁾(図 6.13~図 6.15)より、波高比を算出した。結果を表 6.2、表 6.3 に示す。

表 6.2 波向き別波高比

波向	波高比
SW	0.56
WSW	0.47
W	0.29
WNW	0.17
その他	0.13

表 6.3 港口の波浪と有孔ケーソン前面の波浪の関係

港口の波浪条件				対象地点の波浪	
波浪条件	波向	有義波高	有義波周期	波高	波高比
通常時 (通年)	SW	4.0	8.2	2.3	0.58
	WSW	4.0	8.2	1.7	0.43
	W	4.0	8.2	1.2	0.30
	WNW	4.0	8.2	0.7	0.18
通常時 (冬期)	SW	4.3	8.7	2.3	0.53
	WSW	4.3	8.7	2.2	0.51
	W	4.3	8.7	1.2	0.28
	WNW	4.3	8.7	0.7	0.16
異常時 (30年確率波浪)	NからW方向に7.45°	10.2	14.6	1.3	0.13
	W	8.6	13.0	2.0	0.23

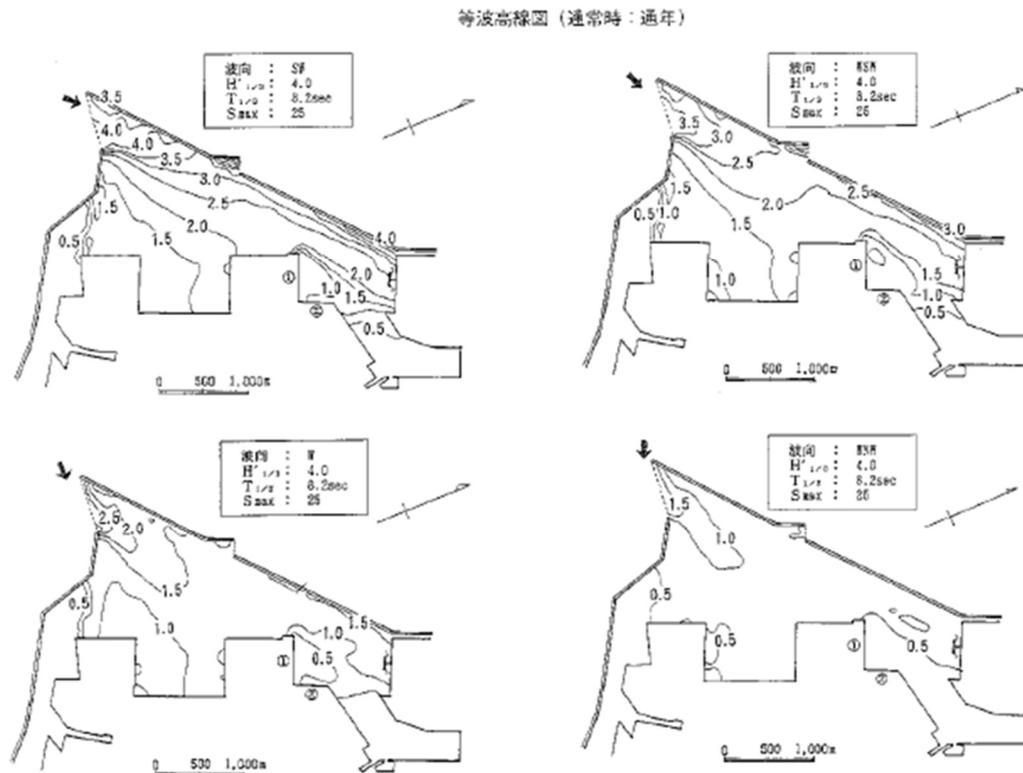


図 6.13 沖波 4.0m 時の波浪推算結果

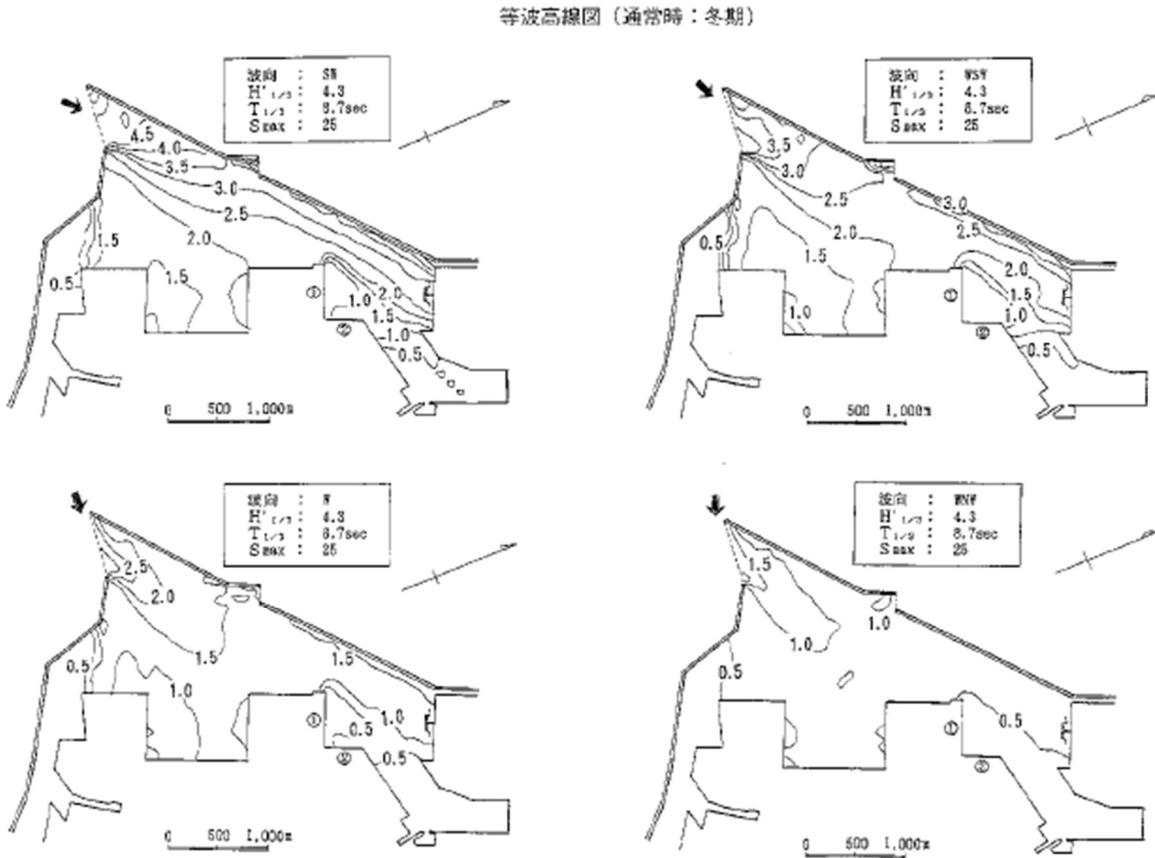


図 6.14 沖波 4.3m 時の波浪推算結果

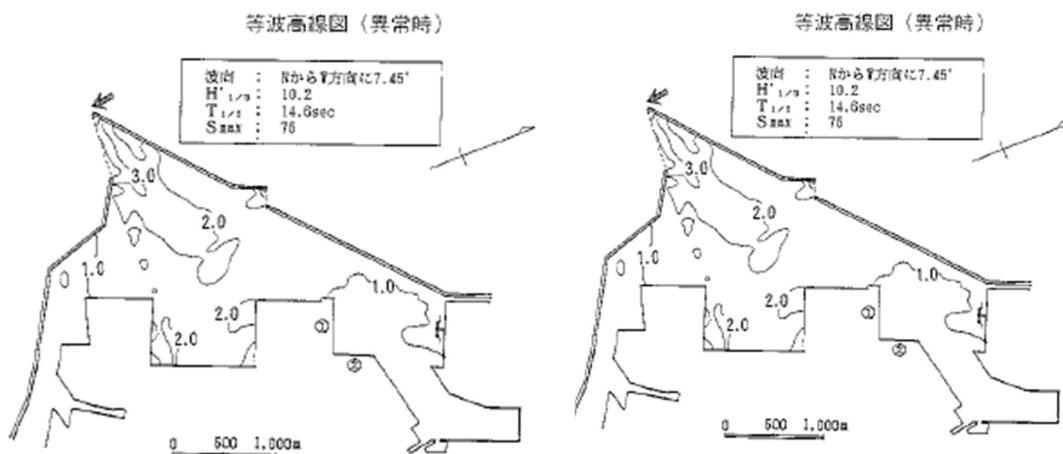


図 6.15 沖波 10.2m 時の波浪推算結果

6.6.2 港内の波エネルギー算定結果

NOWPHAS の観測記録に , 表 6.3 で設定した波向別の波高比を乗じて出現頻度を算定すると , 表 6.4 , 図 6.16 のようになる . なお , NOWPHAS の波向別のデータは , 周期 7 秒以上のデータのみであり , 周期 7 秒以上の頻度分布とした .

以上の検討結果より , 対象地点の通年の波エネルギーは , 港外波高を 20% に低減して求められる値と同程度になるものと考えられる .

表 6.4 波高別出現頻度 (波周期 7 秒以上)

(観測期間: 1992年~2011年)

波向 月	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	合計
1月			46	502	710	415	197	13	2	1,885
	(0.0)	(0.0)	(2.4)	(26.6)	(37.7)	(22.0)	(10.5)	(0.7)	(0.1)	(100)
2月	2	2	17	213	511	273	125	9		1,152
	(0.2)	(0.2)	(1.5)	(18.5)	(44.4)	(23.7)	(10.9)	(0.8)	(0.0)	(100)
3月			11	205	291	170	126	10		813
	(0.0)	(0.0)	(1.4)	(25.2)	(35.8)	(20.9)	(15.5)	(1.2)	(0.0)	(100)
4月		1	44	134	68	19	17	2	3	288
	(0.0)	(0.3)	(15.3)	(46.5)	(23.6)	(6.6)	(5.9)	(0.7)	(1.0)	(100)
5月		2	6	35	8	2	18			71
	(0.0)	(2.8)	(8.5)	(49.3)	(11.3)	(2.8)	(25.4)	(0.0)	(0.0)	(100)
6月		2	8	18	2					30
	(0.0)	(6.7)	(26.7)	(60.0)	(6.7)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(100)
7月			2	2			3			7
	(0.0)	(0.0)	(28.6)	(28.6)	(0.0)	(0.0)	(42.9)	(0.0)	(0.0)	(100)
8月			4	14	3	4	17			42
	(0.0)	(0.0)	(9.5)	(33.3)	(7.1)	(9.5)	(40.5)	(0.0)	(0.0)	(100)
9月			20	53	61	30	61	1		226
	(0.0)	(0.0)	(8.8)	(23.5)	(27.0)	(13.3)	(27.0)	(0.4)	(0.0)	(100)
10月			21	184	241	119	52	2		619
	(0.0)	(0.0)	(3.4)	(29.7)	(38.9)	(19.2)	(8.4)	(0.3)	(0.0)	(100)
11月			22	377	457	242	149	1	1	1,249
	(0.0)	(0.0)	(1.8)	(30.2)	(36.6)	(19.4)	(11.9)	(0.1)	(0.1)	(100)
12月			45	486	808	532	199	1		2,071
	(0.0)	(0.0)	(2.2)	(23.5)	(39.0)	(25.7)	(9.6)	(0.0)	(0.0)	(100)
合計	2	7	246	2,223	3,160	1,806	964	39	6	8,453
	(0.0)	(0.1)	(2.9)	(26.3)	(37.4)	(21.4)	(11.4)	(0.5)	(0.1)	(100)

上段: 出現度数 下段: 出現率(%)

波向	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	NNE	合計
出現頻度	0.0	0.1	2.9	26.3	37.4	21.4	11.4	0.5	0.1	100
波高比	0.13	0.56	0.47	0.29	0.17	0.13	0.13	0.13	0.13	0.20

↑
荷重平均波高比

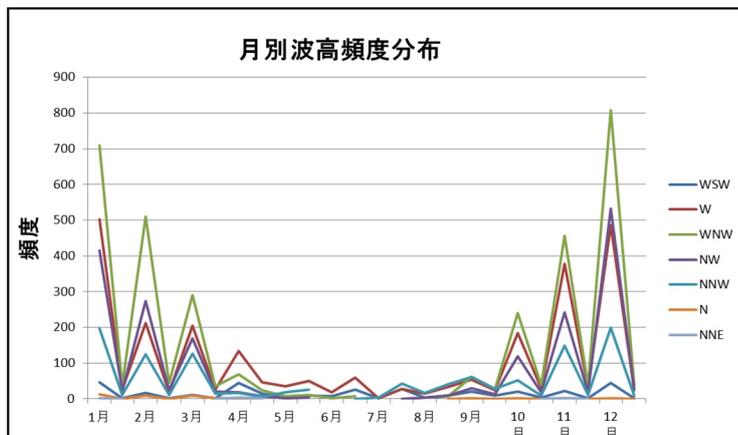


図 6.16 酒田港波高別出現頻度 (波周期 7 秒以上)

6.7 発電コストの検証

実証実験に際し、発電単価のコスト分析を実施した。試算結果を図 6.17、図 6.18 に示す。発電単価は 39.7 円/kWh となり、港内においても 40 円/kWh 以下となった。

コストは 30 年間運用した場合の維持管理費を考慮した。コストの大半は、製作、設置にかかるイニシャルコストであることから、発電装置の製作、設置費用を出来るだけ抑える工夫が重要である。

港内の波高は、港外の 20% 程度であり、波の入射エネルギーは 4% とかなり低いが、陸上からの据付作業が可能となることで、m あたりの据付け費用が一線防波堤の 1/10 以下となる。維持管理費は、陸上からのアクセスが容易となることから、費用は一線防波堤の 1/20 以下となる。このようなことから、発電コストは、40 円/kWh を満足出来る結果となった。また、港内の最大波高は、最大で 2.5m であり、発電のカット OFF もほとんど無いことにより、発電単価は目標値を満足出来る結果となった。

事業化想定時発電単価三種

システム価格(円/kW)	((1. 調査費)+(2. 商用機製造費)+(3. プラント建設費)+(4. インストール費)+(6. 撤去費)) / 定格出力(kW)	
	= 1,743,788,000	/ 152
	= 11,472,289	
年経費率	$r / (1 - (1+r)^{-n})$	$r = 0.03$
	= 0.051019259	$n = 30$
	≒ 0.0510	
発電コスト(円/kWh)	= (システム価格(円/kW) × 年経費率 + (5. 維持管理費)) / 年間発電量(kWh)	
	= (458,891,579 × 0.0510 + 24,250,000) /	1,200,960
	= 39.7	

図 6.17 発電単価試算

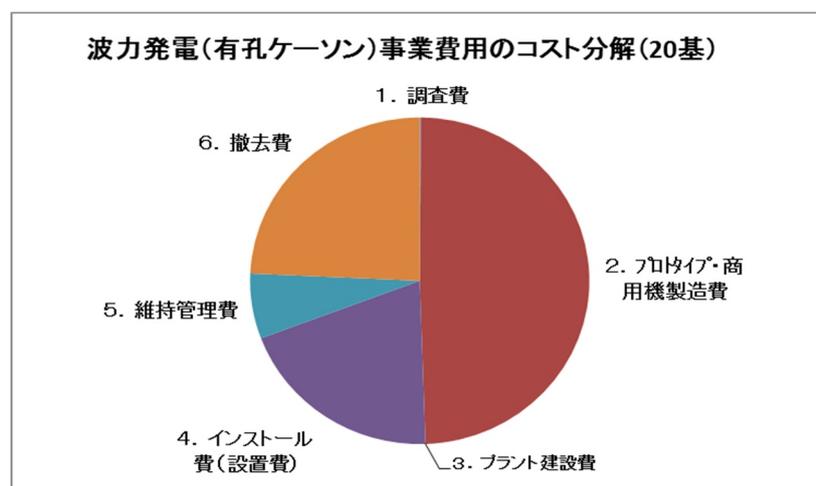


図 6.18 発電コスト分析

6.8 まとめ

遊水室を有する有孔ケーソンに OWC 装置を設置した場合の発電特性について検証を行った。結果をまとめると以下ようになる。

PW-OWC 型波力発電装置のユニットを既設の有孔ケーソン（消波護岸）に設置するコンセプトを構築した。（遊水室の有効活用）

有孔ケーソン設置型の OWC 発電装置は、これまでの PW-OWC 型と同様に多重共振する事を確認した。

有孔ケーソンの遊水室の貫通部の小孔の影響（エネルギーロス）は、7 秒以上の長周期の入射波に対し、孔が大きい場合（開放）の場合の 20% 程度であることが明らかになった。

有孔ケーソン付近の波浪状況は、一線防波堤の 20% 程度に減衰するが、発電装置の発電コストは 40 円/kWh を満足する。

有孔ケーソンを利用した発電装置に関して、発電コスト低減の有効な施策としては、製作・据付などのイニシャルコストを出来るだけ抑えることが重要である。

第7章 Stage4 実証実験装置の設計法および施工法

7.1 実証実験装置の設計

7.1.1 概要

実証実験の OWC 装置（空気室部分）は，図 7.1 の有孔ケーソン上に取り付ける．概略重量は約 30t で有孔ケーソン上に 7m 躯体を立ち上げ，陸側へ OWC 内の圧縮空気を誘導し，陸側の水平部分に設置したタービン，発電機で発電を行う計画である．図では反映していないが，この発電装置を監視する監視室をこの装置の近傍に設けた．

本発電装置の設計・施工においては，有孔ケーソン設置基盤の安定性に関する港湾土木技術，躯体製作など鋼構造技術，タービン設計製作における機械技術，装置制御および電気配線などのエレクトロニクス技術など大規模プラントに匹敵するような多岐にわたる技術が必要とされる．本章では，この小規模プラントを建造するにあたり，行った様々な検討内容について述べる．

なお，発電性能にかかるタービンの選定については 8 章で詳しく述べる．

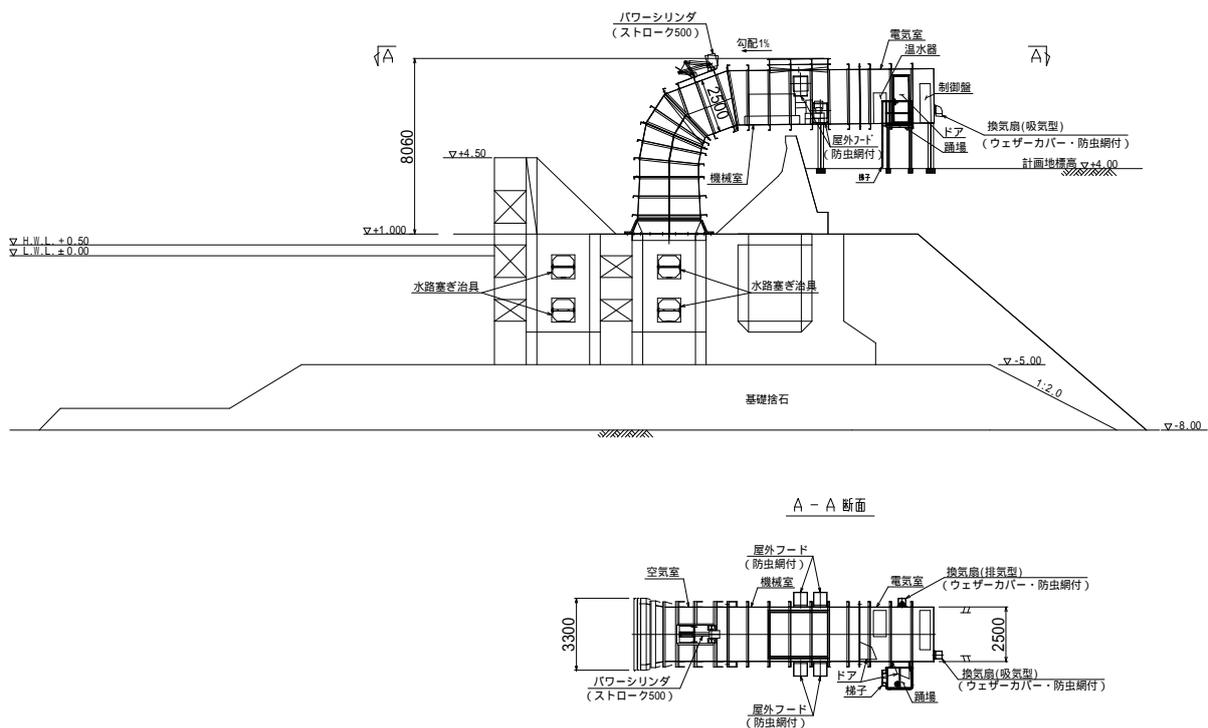


図 7.1 波力発電装置の概要

7.1.2 設計フロー

装置の詳細設計フローを図 7.2 に示す．前章までに，波浪条件，基本諸元の設定は完了している．本項で該当する項目は赤枠で囲った部分の内容である．

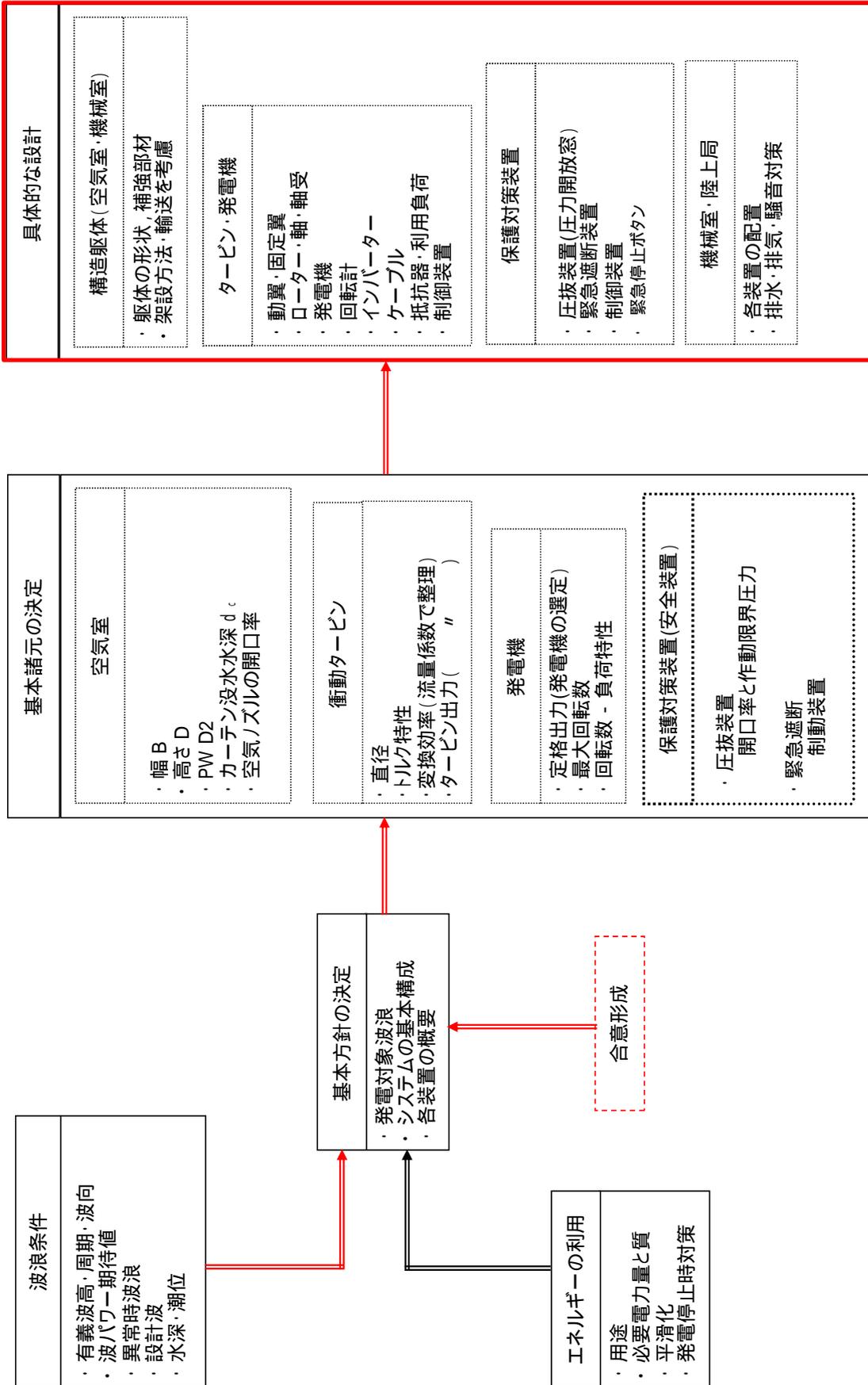


図 7.2 PW-OWC 波エネルギー変換装置の設計フロー

7.1.3 設計条件および設計方針

検討方法および設計条件は，酒田港設計計算書³⁴⁾の酒田港湾計画および有孔ケーソンの条件を参考に下記のとおり設定した．下部の有孔ケーソンと上部躯体についての設計方針は以下のとおりである．

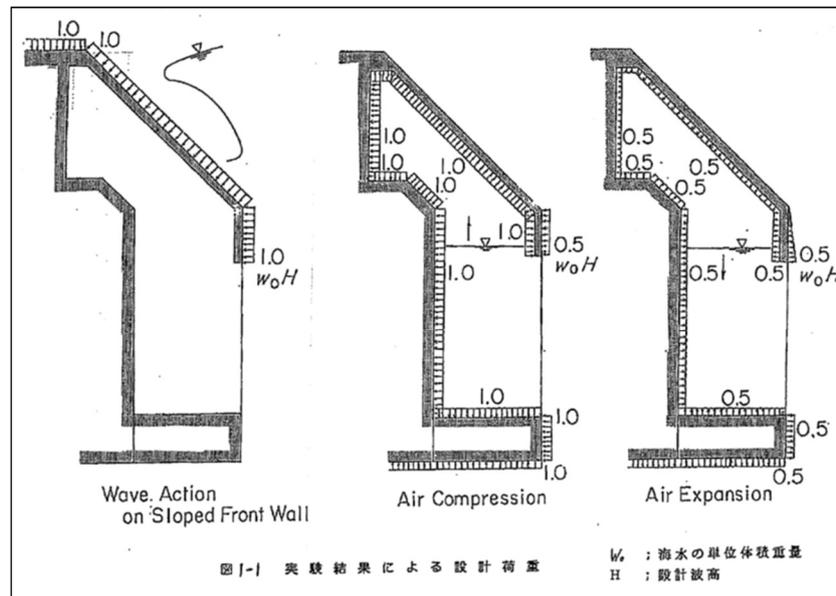
有孔ケーソンの上部躯体の影響の照査

波力発電装置設置前および設置後の全体安定の検討および底版の配筋照査を行う．本検討では，堤体の滑動および転倒に対する安定性の検討に加え，下部工地盤支持力に対する検討として Bishop 法を用いた偏心傾斜荷重に対する検討を行う．

なお，波力発電装置の実験期間が 1 年にも満たないことから，安定性検討では安全率を用いた手法で検討を行うものとする．配筋照査については，許容応力度法により行うものとする．

上部躯体の設計方針

躯体の強度検討は，発電時に内圧が発生するため，『波エネルギー吸収型防波堤実証実験調査-函体の応力解析-』³⁵⁾より，図 7.3 の状態にて部材設計を行う．



出典：『波エネルギー吸収型防波堤実証試験調査—函体の応力解析—』
 Wave Action on Sloped Front Wall . . . 波圧は下部有孔ケーソンと前面フラットがうけるため，装置には，外圧は風荷重が作用し，内部はOWCの内圧が作用する。
 Air Compression... 空気室の設計荷重として検討を実施する。
 Air Expansion... 機械室の設計荷重として検討を実施する。
 (実際は換気口があるため圧力は小さくなるが安全側で設計を行う。)

図 7.3 OWC 部の内，外圧に関する設計方針

7.1.4 設計条件

設計条件は、既設有孔ケーソンの設計計算書「酒田港設計計算書 北港地区・埋立護岸（昭和 57 年 3 月）」³⁶⁾を参考に決定した。

(1) 自然条件

① 設計波

計算波高 $H_{1/3}$: 5.4m
最大波高 H_{\max}	: 6.6m
最大波向 β	: 15.1°
最大周期 $T_{1/3}$: 15.1sec

② 潮位

H.W.L.	: +0.5m
L.W.L.	: ±0.0m

③ 残留水位

R.W.L.	: +1.0m
--------	---------

④ 原地盤

飽和重量	: 20.0kN/m ³
内部摩擦角	: 45°

(2) 材料

① 捨石マウンド

飽和重量	: 20.0kN/m ³
粘着力	: 20.0kN/m ²
内部摩擦角	: 35°

② 裏込砂

気中重量	: 20.0kN/m ³
水中重量	: 10.0kN/m ³
内部摩擦角	: 30°

③ 他の材料の単位体積重量

鉄筋コンクリート	: 24.0kN/m ³
無筋コンクリート	: 22.6kN/m ³
中詰砂（飽和）	: 20.0kN/m ³
裏込石（飽和）	: 20.0kN/m ³

中詰石（飽和）	: 20.0kN/m ³
海水	: 10.1kN/m ³

④ 許容応力度

鉄筋の許容引張応力度 σ_{sa}	: 176N/mm ²
コンクリートの許容圧縮応力度 σ_{ca}	: 9N/mm ²
コンクリートの許容せん断応力度 τ_a	: 0.45N/mm ²
コンクリートの許容付着応力度 τ_{oa}	: 1.6N/mm ²

⑤ 摩擦係数

壁体と捨石マウンドの摩擦係数	: 0.6
----------------	-------

⑥ 設計震度

設計震度	: 0.1
------	-------

7.1.5 設計検討手順

本装置は酒田港内の既設有孔ケーソンに設置する。そのため、新設する OWC 装置の設計に先がけて、空気室部分から伝達される躯体重量、波浪荷重（波圧）、風荷重、地震荷重（慣性力）が作用する。それらの荷重に対し、安定性が確保されることを前提に上部 OWC の設計を行うこととなる。設計途中に荷重精算を行いながら、繰り返し設計検討を進めることになる。

装置の設計に関するフローを図 7.4 に示す。図に示すよう、設計においては、下部ケーソン、本体の強度照査の他、防食、電気制御関係の設計も並行して行う必要がある。

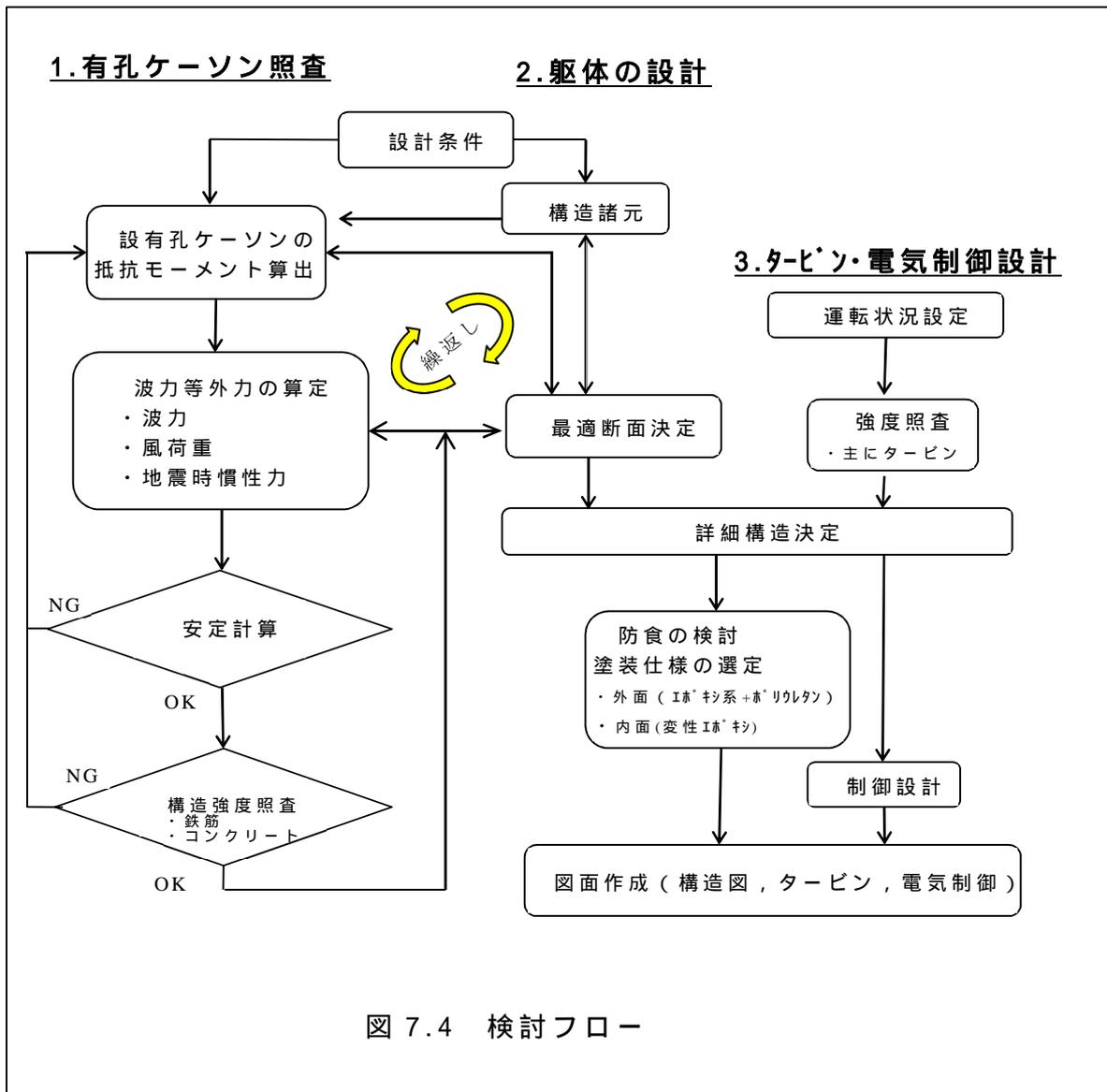


図 7.4 検討フロー

7.2 有孔ケーソン強度照査

波力発電装置を設置した場合の護岸の安定性の検討およびケーソン部底版の配筋照査を行った。波力発電装置の設置に伴い、鉛直荷重の増加、風荷重および地震時の影響等が考えられるため、既設護岸の安定性の検討およびケーソン部底版の配筋照査を行った。既設護岸の標準断面図を図 7.5 に示す。波力発電装置設置後の護岸断面図は図 7.1 に示すとおりである。

審査規準である安全率に関しては、表 7.1 に示すとおりである。

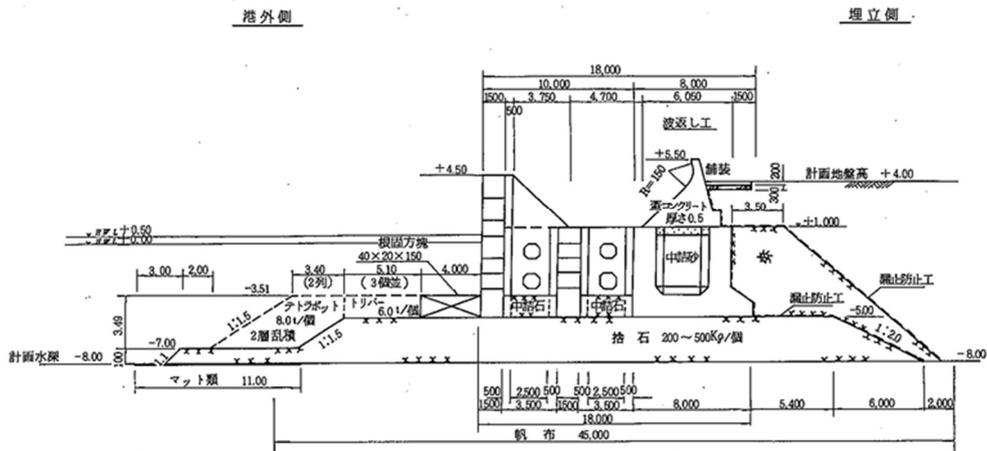


図 7.5 既設護岸標準断面図

表 7.1 検討項目と必要安全率

		常時	地震時	波の谷の場合
必要 安全率	滑動	1.2	1.0	1.2
	転倒	1.2	1.1	1.2
	支持力	1.2	1.0	1.0

設計計算の詳細については、付録 1 に示す。本論では重要項目のみ抜粋し概説する。

7.2.1 設計作用荷重

重力式護岸の場合、背後土圧が陸側から海側に作用するため、引き波時が転倒、滑動に対して最も厳しくなる。

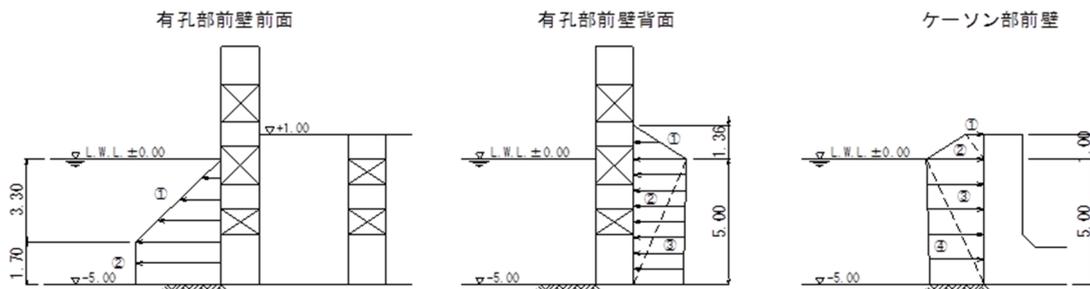


図 7.6 波力分布図

図 7.7 に引き波によって作用する，波圧，吸引力の分布図を示す．

この荷重に土圧，上部工から作用する海側方向の作用力（図 7.8）が同時に作用する場合は最も過酷な条件となる．

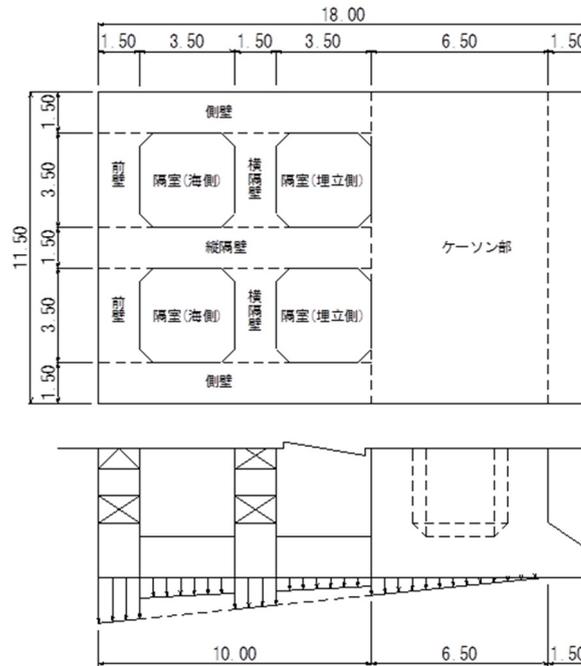


図 7.7 ケーソンによる吸引力分布

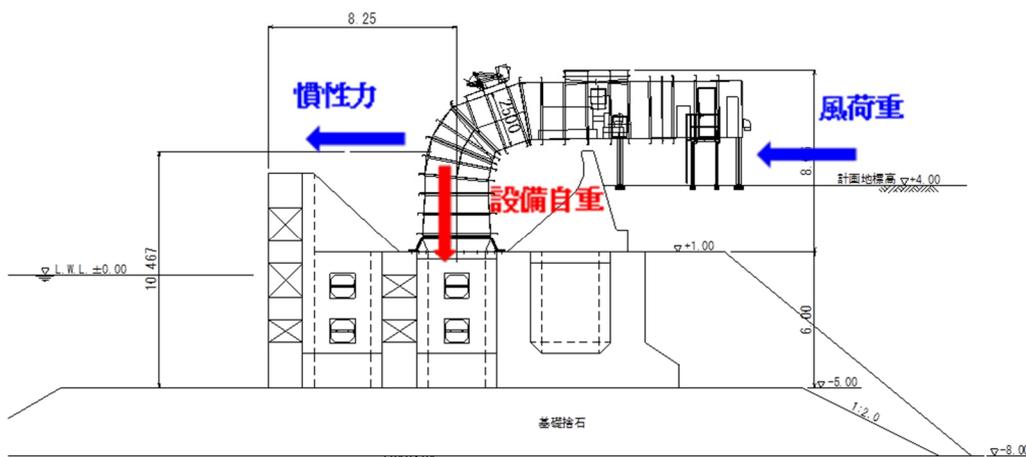


図 7.8 上部 OWC 装置（空気室部分）からの荷重

7.2.2 安定性照査

以下は引き波時の検討結果である。波の谷，地震時については，付録 1 を参照願う。

(1) 滑動に対する検討

常時の滑動に対する検討における荷重条件を表 7.2 に示す。検討結果を以下に示す。

表 7.2 滑動検討における荷重条件（常時）

名 称	水平力 H (kN)	名 称	鉛直力 V (kN)
水平土圧	2,108.47	壁体重量	29,337.99
残留水圧	638.83	浮 力	-9,330.48
		鉛直土圧	564.96
合 計	2,747.30	合 計	20,572.47

滑動に対する検討： $F_s = 0.6 \times V/H = 0.6 \times 20572.47 / 2747.30 = 4.49 > 1.2$ **OK**

(2) 転倒に対する検討

常時の転倒に対する検討における荷重条件を表 7.3 に示す。なお，有孔型ケーソンの中詰石は，転倒に対しては抵抗しないため，鉛直モーメントには含めないものとする。検討結果を以下に示す。

表 7.3 転倒検討における荷重条件（常時）

名 称	水平モーメント $H \cdot y$ (kN)	名 称	鉛直モーメント $V \cdot x$ (kN)
水平土圧	7,033.69	壁体重量	284,164.59
残留水圧	1,761.61	浮 力	-91,883.09
		鉛直土圧	10,169.32
合 計	8,795.30	合 計	202,450.82

転倒に対する検討： $F_s = V \cdot x/H \cdot y = 202450.82 / 8795.30 = 23.02 > 1.2$ **OK**

(3) 支持力に対する検討

支持力に対する検討は，原設計計算書と同様に端趾圧を算定し，その端趾圧を基に Bishop 法を用いた偏心傾斜荷重に対する検討を行う。端趾圧の算定式を以下に示す。なお，鉛直力および鉛直モーメントには中詰石を含まないものとする。表 7.4 に計算した支持力検討における荷重条件を示す。

$$q_{\min}^{\max} = \frac{V}{A} \pm \frac{V \cdot e}{I} \cdot y_0$$

ここに，

- V : 鉛直力(kN)
- A : 有孔型ケーソンの底面積(m²)
- e : 偏心距離(m)
- y₀ : 図心から縁端までの距離(m)
- I : 有孔型ケーソン底面の断面 2 次モーメント(m⁴)

表 7.4 支持力検討における荷重条件（常時）

名 称	水平モーメント H・y (kN)	名 称	鉛直力 V (kN)	鉛直モーメント V・x (kN)
水平土圧	7,033.69	壁体重量	27,927.99	284,164.59
残留水圧	1,761.61	浮 力	-8,618.43	-91,883.09
		鉛直土圧	564.96	10,169.32
合 計	8,795.30	合 計	19,874.52	202,450.82

- ・ 荷重作用位置 : $x = (V \cdot x - H \cdot y) / V = (202450.82 - 8795.30) / 19874.52 = 9.74\text{m}$
- ・ 図心位置 : $y_0 = 9.95\text{m}$
- ・ 偏心距離 : $e = y_0 - x = 9.95 - 9.74 = 0.21\text{m}$

・ 端趾圧の算定

$$q_{\max} = 19874.52 / 160 + 19874.52 \times 0.21 / 4608.01 \times 9.95 = 133.23 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{\min} = 19874.52 / 160 - 19874.52 \times 0.21 / 4608.01 \times 9.95 = 115.20 \text{ kN/m}^2$$

・ 換算等分布荷重の算定（支持力検討用）

鉛直力 : $V = 19874.52 \text{ kN}$

載荷幅 : $B' = B - 2e = 18.0 - 2 \times 0.21 = 17.58 \text{ m}$

有効面積 : $A' = A - 2e \times 11.50 = 160 - 2 \times 0.21 \times 11.50 = 155.17 \text{ m}^2$

等分布荷重 : $q = V/A' = 19874.52 / 155.17 = 128.08 \text{ kN/m}^2$

水平力 : $H' = H/11.50 = 2747.30 / 11.50 = 238.90 \text{ kN/m}$

支持力に対する検討結果を以下に示す . 検討結果図を図 7.9 に示す .

支持力に対する検討 : $F_s = M_R/M_D = 144356.0 / 55237.8 = 2.61 > 1.0$ **OK**

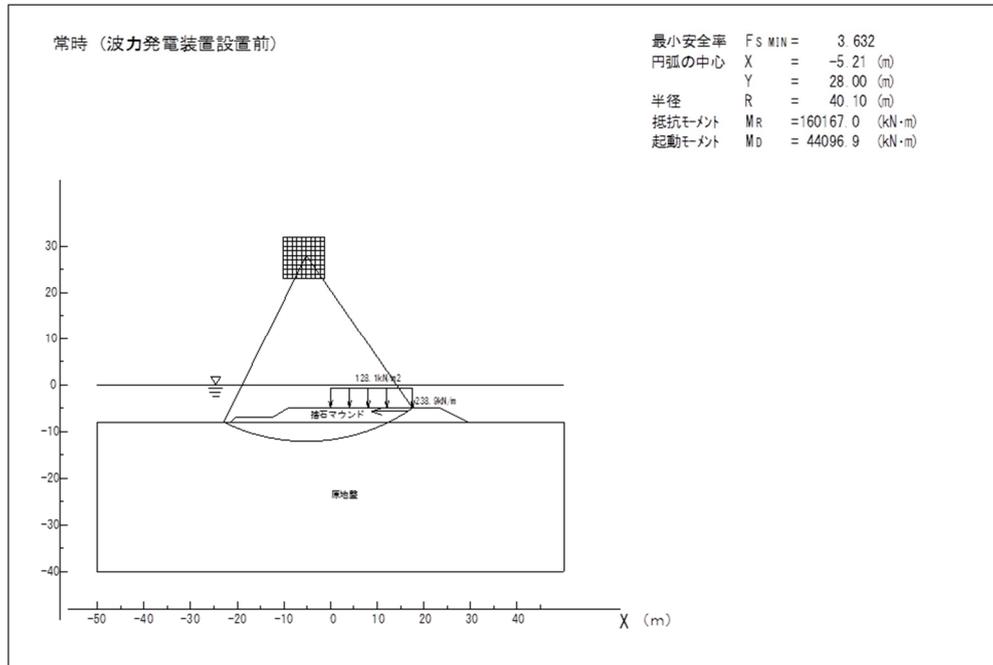


図 7.9 支持力の検討結果(常時)

波力発電装置設置前後の護岸の安定性について、他の 2 ケースを含む検討結果のまとめを表 7.5 に示す . OWC 装置設置後は、設置前と比較して鉛直荷重が増加するため、常時の滑動・転倒および地震時の滑動に対する安全率が若干大きくなっている . 常時の支持力、地震時の転倒・支持力については、波力発電装置の設置に伴って重心の位置が高くなるとともに、海側へ移動したことにより安全率が若干低下している . 波の谷の場合は、風荷重の影響により全ての項目で安全率が若干低下する結果となった . しかし、波力発電装置設置による影響は小さく、全ての状態において所要の安全率を満足しており、安定性は確保されている .

表 7.5 安定検討結果まとめ

		設置前			設置後		
		常時	地震時	波の谷の場合	常時	地震時	波の谷の場合
安全率	滑動	4.49 > 1.2	1.91 > 1.0	3.61 > 1.2	4.54 > 1.2	1.92 > 1.0	3.57 > 1.2
	転倒	23.02 > 1.2	9.16 > 1.1	20.40 > 1.2	23.23 > 1.2	9.14 > 1.1	19.14 > 1.2
	支持力	3.63 > 1.2	2.62 > 1.0	3.10 > 1.0	3.62 > 1.2	2.61 > 1.0	3.07 > 1.0

7.2.3 ケーソン部底版の配筋照査

(1) 設計荷重の算定

ケーソン部底版に作用する荷重モデルを図 7.10 に示す。波力発電装置設置前後における底面反力の設計値を表 7.6～表 7.8 に示す。他の荷重の設計値を以下に示す。

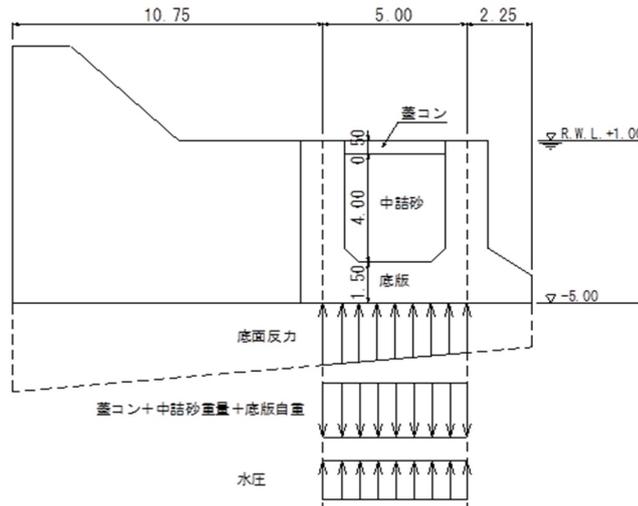


図 7.10 荷重モデル図

表 7.6 底面反力 (常時)

	ケーソン (前趾)	底版		ケーソン (後趾)
		海側	陸側	
距離 (m)	0.00	10.75	15.75	18.00
反力 (kN/m ²)	設置前	133.23	122.46	117.45
	設置後	135.21	123.80	118.50

表 7.7 底面反力 (地震時)

	ケーソン (前趾)	底版		ケーソン (後趾)
		海側	陸側	
距離 (m)	0.00	10.75	15.75	18.00
反力 (kN/m ²)	設置前	160.39	118.91	99.61
	設置後	163.11	120.10	100.09

表 7.8 底面反力 (波の谷作用時)

	ケーソン (前趾)	底版		ケーソン (後趾)
		海側	陸側	
距離 (m)	0.00	10.75	15.75	18.00
反力 (kN/m ²)	設置前	184.16	137.00	115.06
	設置後	188.02	137.97	114.70

底版自重	: 1.5m×24.0kN/m ³ =36.0kN/m ²
中詰砂重量	: 4.0m×20.0kN/m ³ =80.0kN/m ²
蓋コン重量	: 0.5m×22.6kN/m ³ =11.3kN/m ²
水圧	: 6.0m×10.1kN/m ³ =60.6kN/m ²

各検討状態における合成荷重を表 7.9～表 7.11 に示す。鉛直上向きを正とする。

表 7.9 合成荷重（常時）

		荷重値(kN/m ²)			
		設置前		設置後	
		海側	陸側	海側	陸側
自重	底版	-36.00	-36.00	-36.00	-36.00
	中詰砂	-80.00	-80.00	-80.00	-80.00
	蓋コン	-11.30	-11.30	-11.30	-11.30
		-127.30	-127.30	-127.30	-127.30
底面反力		122.46	117.45	123.80	118.50
静水圧		60.60	60.60	60.60	60.60
合成荷重		55.8	50.8	57.1	51.8

表 7.10 合成荷重（地震時）

		荷重値(kN/m ²)			
		設置前		設置後	
		海側	陸側	海側	陸側
自重	底版	-36.00	-36.00	-36.00	-36.00
	中詰砂	-80.00	-80.00	-80.00	-80.00
	蓋コン	-11.30	-11.30	-11.30	-11.30
		-127.30	-127.30	-127.30	-127.30
底面反力		118.91	99.61	120.10	100.09
静水圧		60.60	60.60	60.60	60.60
合成荷重		52.2	32.9	53.4	33.4

表 7.11 合成荷重（波の谷作用時）

		荷重値(kN/m ²)			
		設置前		設置後	
		海側	陸側	海側	陸側
自重	底版	-36.00	-36.00	-36.00	-36.00
	中詰砂	-80.00	-80.00	-80.00	-80.00
	蓋コン	-11.30	-11.30	-11.30	-11.30
		-127.30	-127.30	-127.30	-127.30
底面反力		137.00	115.06	137.97	114.70
静水圧		60.60	60.60	60.60	60.60
合成荷重		70.3	48.4	71.3	48.0

(2) 曲げモーメントの算定

底版に発生する曲げモーメントは，計算数表を利用し四辺固定版として算定する(図 7.11) .算定方法を以下に示す .計算表は表 7.12 に示す .

・ $\lambda \leq 1$ の場合 : $M_x = Xql_x^2, M_y = Yql_x^2$
 ・ $\lambda > 1$ の場合 : $M_x = Xql_y^2, M_y = Yql_y^2$

ここに，

- λ : 辺長比 ($\lambda = l_x / l_y$)
- M_x : 求める点での x 方向 (短辺方向) の曲げモーメント (kN m/m)
- M_y : 求める点での y 方向 (長辺方向) の曲げモーメント (kN m/m)
- X, Y : x 方向 (短辺方向), y 方向 (長辺方向) の曲げモーメント係数
- l_x, l_y : x 方向 (短辺方向), y 方向 (長辺方向) のスパン長 (m)
- q : 等分布荷重強度 (kN/m²)

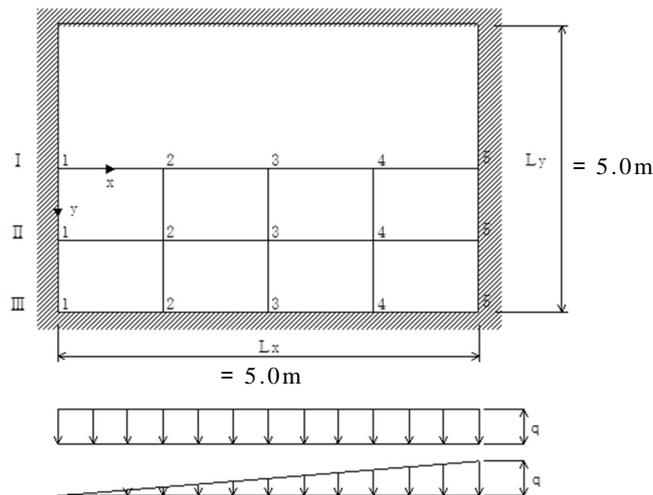


図 7.11 四辺固定版

表 7.12 計算数表

	荷重	係数	座標	1	2	3	4	5
1.00	等分布荷重	X		-0.0513	0.0096	0.0206	0.0096	-0.0513
				-0.0324	0.0059	0.0116	0.0059	-0.0324
				0	-0.0054	-0.0086	-0.0054	0
		Y		-0.0086	0.0116	0.0206	0.0116	-0.0086
				-0.0054	0.0059	0.0096	0.0059	-0.0054
				0	-0.0324	-0.0513	-0.0324	0
	三角形分布荷重	X		-0.0179	0.0015	0.0103	0.008	-0.0334
				-0.0101	0.0006	0.0058	0.0052	-0.0223
				0	-0.0019	-0.0043	-0.0036	0
		Y		-0.003	0.0047	0.0103	0.0069	-0.0056
				-0.0017	0.0018	0.0048	0.004	-0.0037
				0	-0.0116	-0.0257	-0.0208	0

(3) 配筋照査

版の配筋照査は、鉄筋およびコンクリートに発生する応力が許容応力以下であることを確認する。鉄筋およびコンクリートに発生する応力の計算方法を以下に示す。

$$p = \frac{A_s}{bd}$$

$$k = \sqrt{2pn + (pn)^2} - pn$$

$$z = jd = d - \frac{x}{3}$$

$$x = kd$$

$$\sigma_s = \frac{M}{A_s(d - x/3)} = \frac{M}{A_s jd}$$

$$\sigma_c = \frac{2M}{kbjd^2}$$

ここに、

p : 鉄筋比	z : 全圧縮応力の作用点から引張鉄筋までの距離(mm)
A_s : 引張鉄筋量 (mm ²)	x : 部材の圧縮縁から中立軸までの距離(mm)
b : 部材幅 (mm)	σ_s : 鉄筋引張応力度 (N/mm ²)
d : 有効高(mm)	σ_c : コンクリートの圧縮応力度 (N/mm ²)
k : 中立軸比	M : 曲げモーメント (kN・m)
n : 鉄筋とコンクリートのヤング係数比	

設計計算書より、底版の配筋は以下のとおりとなる。配筋の照査結果を表 7.13、表 7.14 に示す。

法線直角方向 下側 D16@200 芯かぶり 100 mm
上側 D16@200 芯かぶり 80 mm

法線平行方向 下側 D16@200 芯かぶり 100 mm
上側 D16@200 芯かぶり 80 mm

表 7.13 配筋照査結果 (設置前)

項 目			法線直角方向				法線平行方向			
			下 側 鉄 筋		上 側 鉄 筋		下 側 鉄 筋		上 側 鉄 筋	
断面力	曲 げ モ ー メ ン ト	M (kN・m)	80.36		30.57		76.14		30.57	
断面形状	部 材 幅	b (mm)	1,000		1,000		1,000		1,000	
	部 材 厚	h (mm)	1,500		1,500		1,500		1,500	
	鉄 筋 の 芯 か ぶ り	d' (mm)	100		80		100		80	
	有 効 高	d (mm)	1,400		1,420		1,400		1,420	
許 容 応 力 度	鉄筋の許容引張応力度	sa (N/mm ²)	176		176		176		176	
	コンクリートの許容圧縮応力度	ca (N/mm ²)	9		9		9		9	
	コンクリートの許容せん断応力度	a (N/mm ²)	0.45		0.45		0.45		0.45	
	コンクリートの許容付着応力度	oa (N/mm ²)	1.6		1.6		1.6		1.6	
必 要 鉄 筋 量	A's (mm ²)	335.2		124.4		317.4		124.4		
実配筋量	鉄 筋 呼 び 径	D (mm)	D 16		D 16		D 16		D 16	
	配 筋 本 数	n (本)	5 (@200)		5 (@200)		5 (@200)		5 (@200)	
	鉄 筋 公 称 断 面 積	a _s (mm ² /本)	198.6		198.6		198.6		198.6	
	鉄 筋 公 称 周 長	u (mm/本)	5.0		5.0		5.0		5.0	
	配 筋 量	A _s (mm ²)	993.0 OK!		993.0 OK!		993.0 OK!		993.0 OK!	
	鉄 筋 比	p (%)	0.071		0.070		0.071		0.070	
	弾 性 係 数 比	n	15		15		15		15	
		k	0.1356		0.1347		0.1356		0.1347	
発 生 応 力 度	鉄筋の引張応力度	s (N/mm ²)	60.5 OK!		22.7 OK!		57.4 OK!		22.7 OK!	
	コンクリートの圧縮応力度	c (N/mm ²)	0.63 OK!		0.20 OK!		0.60 OK!		0.20 OK!	

表 7.14 配筋照査結果 (設置後)

項 目			法線直角方向				法線平行方向			
			下 側 鉄 筋		上 側 鉄 筋		下 側 鉄 筋		上 側 鉄 筋	
断面力	曲 げ モ ー メ ン ト	M (kN・m)	81.02		30.72		76.53		30.72	
断面形状	部 材 幅	b (mm)	1,000		1,000		1,000		1,000	
	部 材 厚	h (mm)	1,500		1,500		1,500		1,500	
	鉄 筋 の 芯 か ぶ り	d' (mm)	100		80		100		80	
	有 効 高	d (mm)	1,400		1,420		1,400		1,420	
許 容 応 力 度	鉄筋の許容引張応力度	sa (N/mm ²)	176		176		176		176	
	コンクリートの許容圧縮応力度	ca (N/mm ²)	9		9		9		9	
	コンクリートの許容せん断応力度	a (N/mm ²)	0.45		0.45		0.45		0.45	
	コンクリートの許容付着応力度	oa (N/mm ²)	1.6		1.6		1.6		1.6	
必 要 鉄 筋 量	A's (mm ²)	338.0		125.0		319.0		125.0		
実配筋量	鉄 筋 呼 び 径	D (mm)	D 16		D 16		D 16		D 16	
	配 筋 本 数	n (本)	5 (@200)		5 (@200)		5 (@200)		5 (@200)	
	鉄 筋 公 称 断 面 積	a _s (mm ² /本)	198.6		198.6		198.6		198.6	
	鉄 筋 公 称 周 長	u (mm/本)	5.0		5.0		5.0		5.0	
	配 筋 量	A _s (mm ²)	993.0 OK!		993.0 OK!		993.0 OK!		993.0 OK!	
	鉄 筋 比	p (%)	0.071		0.070		0.071		0.070	
	弾 性 係 数 比	n	15		15		15		15	
		k	0.1356		0.1347		0.1356		0.1347	
発 生 応 力 度	鉄筋の引張応力度	s (N/mm ²)	61.0 OK!		22.8 OK!		57.7 OK!		22.8 OK!	
	コンクリートの圧縮応力度	c (N/mm ²)	0.64 OK!		0.20 OK!		0.60 OK!		0.20 OK!	

(4) 配筋照査結果

波力発電装置設置前後のケーソン部底版配筋の作用耐力比を表 7.15 に示す。装置設置後は設置前と比較して底面反力が増加したことにより、底版に発生する応力は若干増加している。

しかし、波力発電装置設置による影響は小さく、許容応力を満足しており、安全性は確保されている。

表 7.15 底版配筋の作用耐力比

		作用耐力比			
		設置前		設置後	
		鉄筋 σ_s/σ_{sa}	コンクリート σ_c/σ_{ca}	鉄筋 σ_s/σ_{sa}	コンクリート σ_c/σ_{ca}
法線直角 方向	下側	0.34	0.07	0.35	0.07
	上側	0.13	0.02	0.13	0.02
法線平行 方向	下側	0.33	0.07	0.33	0.07
	上側	0.13	0.02	0.13	0.02

7.3 波力発電装置の躯体の強度検討

躯体の設計は許容応力度法で行う方針とした。以下に強度設計の概要について概説する。

7.3.1 設計作用荷重

- ・空気室内気圧
 $W_0=1.0 \times 6.6 \times 9.80665$
 $=64.7 \text{ kN/m}^2$
- ・機械室内気圧
 $W_0=0.5 \times 6.6 \times 9.80665$
 $=32.4 \text{ kN/m}^2$
- ・空気室風荷重
基準風速 $U_d=40 \text{ m}$
空気密度 $P=1.23 \text{ kg/m}^3$
抗力係数 $C_d=1.3$
ガスト係数 $G=2.4$

$$P = \frac{1}{2} \cdot P \cdot U_d^2 \cdot C_d \cdot G = 3.070 \text{ N/m}^2$$

$$= 3.07 \text{ kN/m}^2$$

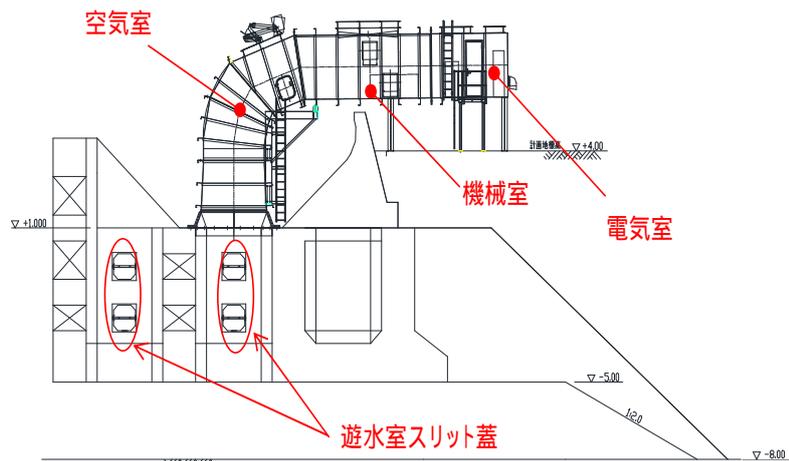


図 7.12 強度設計の概要

7.3.2 許容応力度

鋼板 SS400

許容引張応力度 $\sigma_a = 240 \text{ N/mm}^2$ (短期として設定)

7.3.3 部材の検討

(1) 空気室 (OWC 部)

鋼板厚 $t=12$ リブピッチ 1000mm として一方向板として検討

$$M = 1/12 \times 64.7 \times 1.0^2 = 5.39 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

$$\delta = 5.39 \times 10^6 / \left(\frac{1000 \times 12^2}{6} \right) = 225 \text{ N/mm}^3 \leq 240 \text{ N/mm}^3$$

補強リブ

両端支持梁として必要断面係数を求める。

$$M = 1/8 \times 64.7 \times 1.0^2 = 72.8 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

$$\begin{aligned} Z_{req} &= 72.8 \times 10^6 / 240 = 303333 \text{ mm}^3 \\ &= 303.3 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$L-250 \times 90 \times 9 \times 13$

を使用する。 $Z = 334 \text{ cm}^3$
 $W = 34.6 \text{ kg/m}$

(2) 機械室

鋼板厚 $t=9$ リブピッチ 1000mm として一方向板として検討

$$M = 1/12 \times 32.4 \times 1.0^2 = 2.7 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

$$\delta = 2.7 \times 10^6 / \left(\frac{1000 \times 9^2}{6} \right) = 200 \text{ N/mm}^3 \leq 240 \text{ N/mm}^3$$

補強リブ

両端支持梁として必要断面係数を求める。

$$M = 1/8 \times 32.4 \times 2.5^2 = 25.3 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

$$\begin{aligned} Z_{req} &= 25.3 \times 10^6 / 240 = 105417 \text{ mm}^3 \\ &= 105 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$L-250 \times 90 \times 9 \times 13$

を使用する。 $Z = 334 \text{ cm}^3$
 $W = 34.6 \text{ kg/m}$

(3) 電気室

鋼板厚 $t = 6$ リブピッチ 1000mm として

$$M = 1/12 \times 3.07 \times 1.0^2 = 0.26 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\delta = 0.26 \times 10^6 / \left(\frac{1000 \times 6^2}{6} \right) = 43 \text{ N/mm}^3 \leq 240 \text{ N/mm}^3$$

・補強リブ

$$M = 1/8 \times 3.07 \times 2.5^2 = 2.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Z_{rpq} = 2.4 \times 10^6 / 240 = 10000 \text{ mm}^3$$

$$= 10 \text{ cm}^3$$

∴ [L-250×90×13] を使用する .

$$Z = 334 \text{ cm}^3$$

$$W = 34.6 \text{ kg/m}$$

空気室と電気室の取付けボルトは
ダクト上下面のハッチングをかけた
部分の圧力差に対するせん断抵抗で
強度確認する。

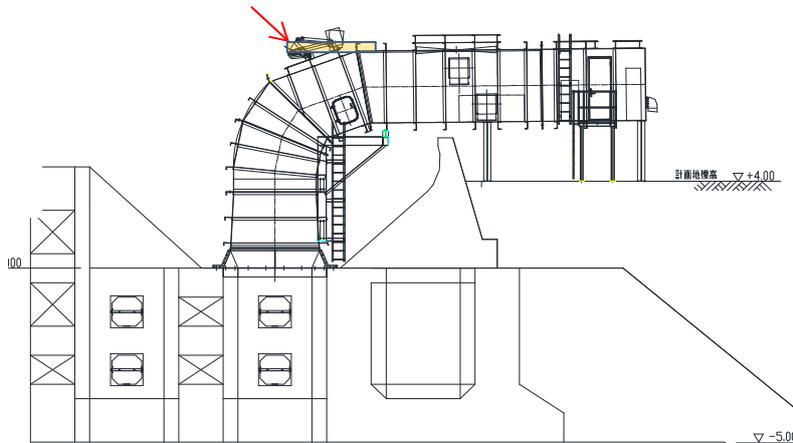


図 7.13 取り付けボルトの強度確認

$$\text{圧力差 } 2.5 \times 2.8 \times 64.7 = 452.9 \text{ kN}$$

使用ボルト M24

$$\text{有効断面積 } A = 352.5 \text{ mm}^2$$

$$\text{ボルトの許容せん断応力 } \tau_a = 138.6 \text{ N/mm}^2$$

必要本数

$$N_{req} = 452.9 \times 10^3 / (352.5 \times 138.6) = 9.27 \text{ 本以上}$$

7.4 波力発電装置の防食検討

現場での実証実験期間は、最長でも12ヶ月未満である。しかしながら、沿岸域であり塩害対策は必要であることから、鋼道路橋塗装便覧³⁷⁾を参考に30年対応塗装の半分の膜厚とし下記仕様を選定した。

また、内面はOWC内部と機械室および電気室の内部であるが、視認性を考慮して白色とした。外面は、海域で目立つ色彩としてブイなどに使用されているオレンジ色を選定した。

(外面) 動力工具処理 St3 + 変性エポキシ樹脂塗料(160 μ) + ポリウレタン樹脂塗料(40 μ)

(内面) 動力工具処理 St3 + 変性エポキシ樹脂塗料(120 μ)

7.5 電気制御設計

7.5.1 概要

現地実験装置(波力発電装置)は、装置の安全な運行、能力が十分に発揮できるための電気機器、装置を装備する必要がある。

また、装置の現地海域への設置にあたり保守点検、安全性を考慮する必要がある。そのため、JIS電気設備、JEM、電気設備規程、電気工事施工関係法規、および電力会社の電気設備、工事施工基準指針に準拠し、設計、施工を行い、電氣的障害および機械的障害を生じないように留意する。システム概念図は、図7.14に示すとおりであり、この概念図をもとに設計について設計検討を行った。

駆動装置、発電装置は、陸域の消波護岸に設置する。制御装置は、陸地海岸付近の建屋内に設置することを前提に耐塩害に特に注意して設計、施工をする。実証実験は、設計期間、工事期間、観測期間を含め、3年間として計画する。

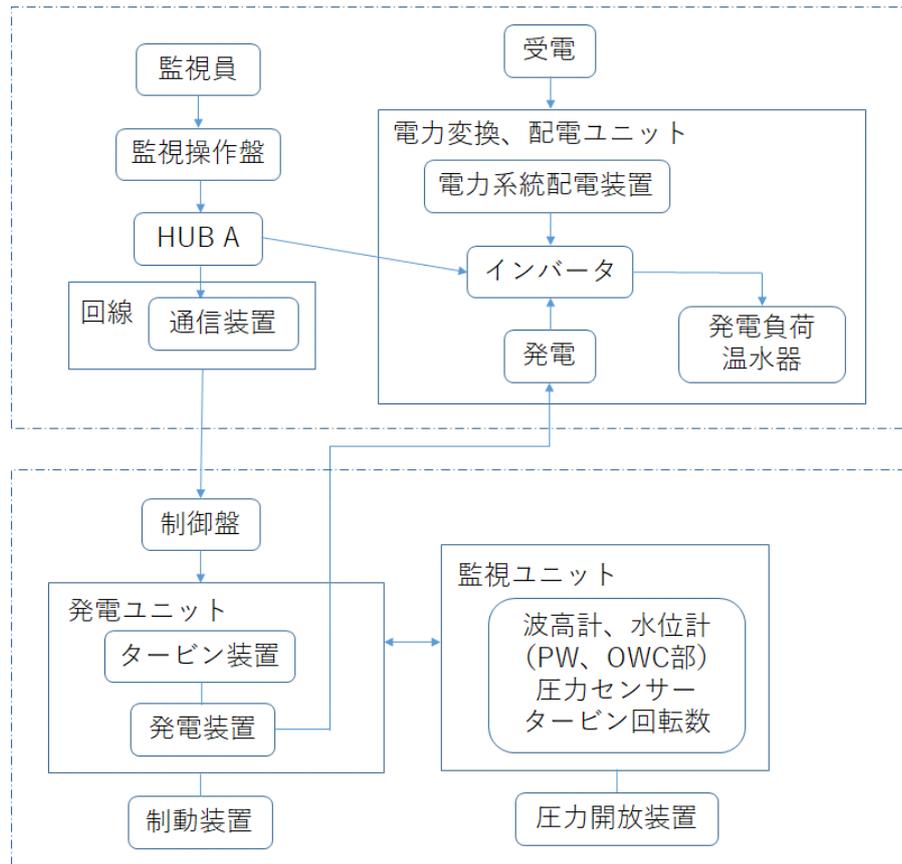


図 7.14 システム概念図

7.5.2 駆動装置の仕様

発電機を回転駆動するタービンは、衝動タービンで計画する。

駆動装置には、異常運転時に装置を保護するための緊急停止措置を施した。最悪の事態を想定し、1つはOWCの圧抜き、もう一つはタービン・発電機の制動の二重化の保護対策を行った。

なお、上述したようにタービンの出力を決定するタービン径などの選定については8章で詳述する。

衝動タービン

定格出力	: 15kW (ϕ 450)
定格回転数	: 1500rpm
運転回転数	: 500-2500 rpm

制動動機

停電時や荒天時の異常運転に対し、発電を直ちに中止するため、制動機をタービンと発電機の間設置した。

型 式	: ディスクブレーキ
最大運転回転数	: 2500rpm
動摩擦制動トルク	: 250N・m
取付構造	: 誘導発電機軸端取付

空気室圧力開放装置

通常の高圧開放システムは、圧抜き孔の開閉をスライド方式が採用される場合が散見される。スライド式は、高圧下でスライドドアが膨らみ、開放できない可能性が高い。過去の実証実験でドアが摩擦でスライド出来なかった事例があったようである。

ダンパー駆動方式	: パワーシリンダー (ツバキ E&M 製で計画)
電 源	: AC200V, 三相, 50Hz
閉検出外部取付リミットスイッチ	
開度検出ポテンシオメーター付	
手動操作ハンドル付	
過荷重スリップ機構付 (シリンダー引き込み)	

7.5.3 発電装置の仕様

誘導発電機 (籠型誘導電動機)

型 式	: 全閉自己通風冷却
定格出力	: 15kW, 連続定格
定格電圧	: 交流 200V, 3 相, 50Hz
定格回転数	: 1500rpm(4P)
運転回転数	: 750-2500rpm
定格周波数	: 50Hz
発電効率	: 約 90%

7.5.4 発電制御装置の仕様

過負荷によるトリップ防止に発電機出力より余裕を持たせ実証実験する。

発電機制御	: インバーター方式 (回生発電)
発電機制御盤	: 屋内自立閉鎖形 (インバーター組込)
定格容量	: 15kW , 連続定格
定格電源電圧	: 200V , 3Φ , 50Hz
過負荷耐力	: 150% , 1 分間
回生発電電力吸収装置	: 電力吸収装置 (温水器に電力放出) ヒータ 28kW
保護装置	: 過電圧 , 過電流 , 過回転
変換効率	: 約 95%

7.5.5 操作, 監視装置

- ・ 操作監視 : 陸上部の操作監視室からパソコン , モニターで行う
- ・ パソコン (データ集録) , プリンター
- ・ 発電装置の運転 / 停止操作 , 電源の操作 (パソコンのモニターで行う)
- ・ 誘電発電機制御盤 : 防波堤電気室に設置 (PLC (シーケンサー))
- ・ 発電制御 , 制動機制御 , 圧力開放装置制御

なお , 各種データの入出力 , 制御の誘電発電機制御盤とパソコン間の通信はイーサネット通信ケーブルによる。

7.5.6 誘導発電機制御盤

台数	: 1 面
型式	: 屋内自立閉鎖形 (W1800xD600xH1900)
インバーター	: 15kW (FRN-15VG1S-2 , HD 仕様) (富士電機) 150% 1 分間耐量 PLC 間 CC-Link データー通信
操作 , 制御	: 操作 , 制御については計装 , 制御点リスト表による
その他	: AC200V の受配電 , 空気室開放装置 , 換気扇制御 , 外部コンデンサ , PLC 等 盤内に組込

7.5.7 発電電力吸収負荷抵抗器(温水器)

台数	: 1 台
型式	: 屋内自立閉鎖形, 温水タワ本体は SUS304 とする
タンク 容量	: 700L ~ 1000L タンク外壁は断熱, 水温は大気圧沸騰蒸気温度
ヒーター容量	: 400V, 直流, 7KW × 4 台 (合計 28kW) フランジ型パイプヒーター
温水弁	: 金属製, 110 度の温水対応
タンク排水弁	: 金属製, 110 度の温水対応
温度計	: ダイアル式機側温度計 遠隔温度計(测温低抗)
沸騰蒸気放出	: SGP50A, 断熱する
タンク水位検出	: フロートスイッチ式(3 段) LL/L/H バルブ(L/H で警報 水中ポンプ自動発停 LL で発電停止)

7.6 構造イメージ図

下記に設計したユニットのイメージを図 7.15 に示す .非常にシンプルな構造となり , 発電装置の総重量は 37.7t になった .

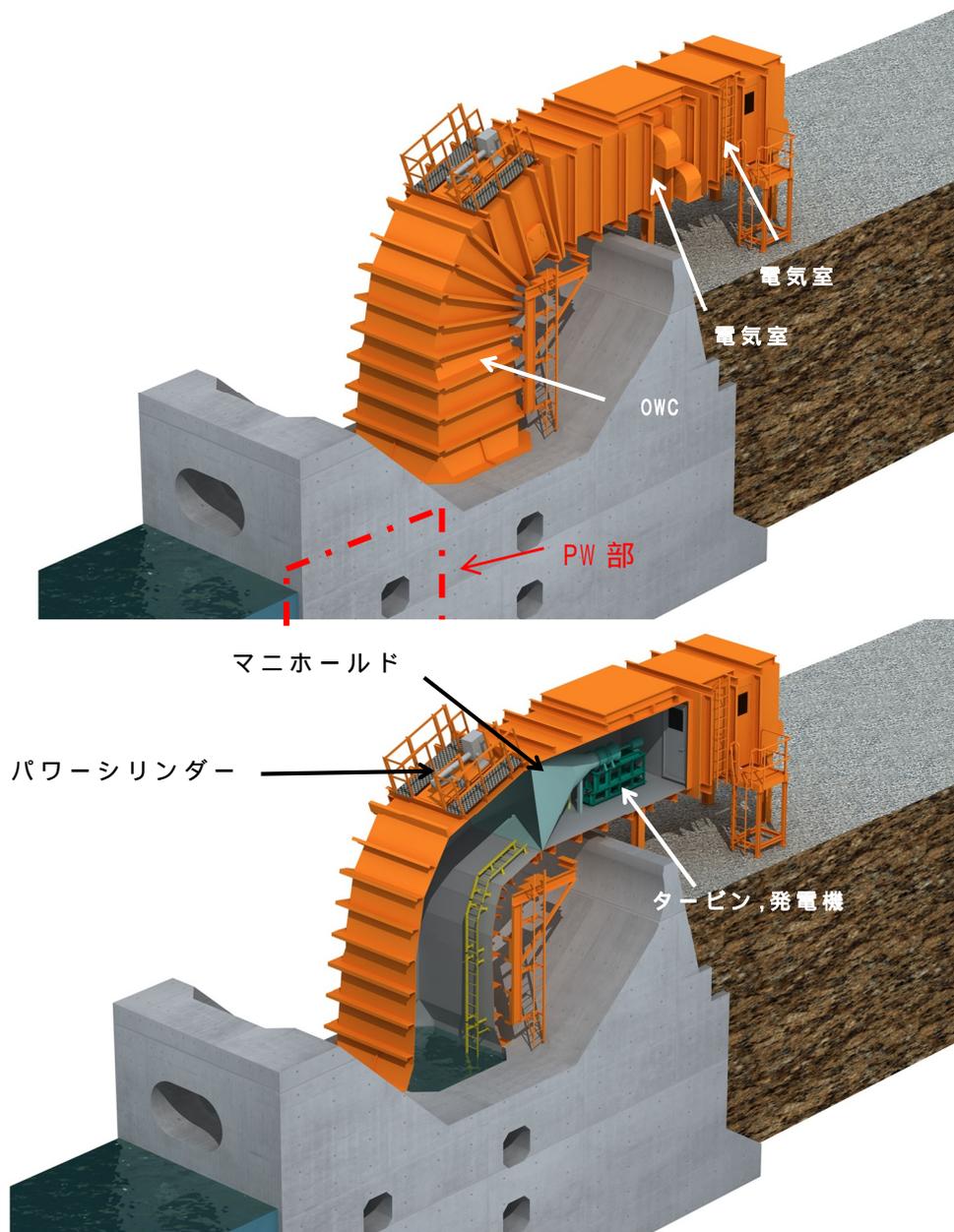


図 7.15 ユニットのイメージ図

7.7 まとめ

本章のまとめを以下に示す．また，実際に製作した設計図，数量計算書は付録 1,2 に添付する．

後付けユニットで固定式である発電装置の設計法を提案し，設計の妥当性を検証した．

設計に際しては，既設の港湾基準など既往のスペックを採用した．

既設有孔ケーソンにおいて，ユニットを搭載することで，風圧，波圧の受圧面積が増大するが，死荷重が増大するため，安全性が損なわれない結果となった．

構造決定において，最も過酷な荷重ケースは，引き波時である．

酒田港の有孔ケーソン設置型の OWC 装置の構造設計，電気制御設計を行い，製作図を作成した．結果，発電装置の総重量は 37.7t となった．

発電時の安全装置として，パワーシリンダーによる圧抜きと発電機・タービン制動装置の 2 重化機構を採用した．

付録1 : 酒田港 PW-OWC 設置に伴う有孔ケーソンの安定計算および発電設備構造計算書

付録2 : 空気タービン式波力発電装置（酒田実証機）図面

第8章 Stage4 波力発電装置の施工

8.1 概要

発電装置の現場設置にかかる費用は、図 6.18 に示したように発電装置の運営費用の 20% を占めるため、効率よく設置する必要がある。そのため、以下の項目について特に注力して検討した。発電装置の一般図を図 8.1 に示す。詳細な施工写真については、付録 2 に施工写真を添付する。

- 日本国内の法令に遵守した手続手順の確立。
- 安全で効率が良い施工法の選定。
- 製作工場からの陸上輸送の検討。

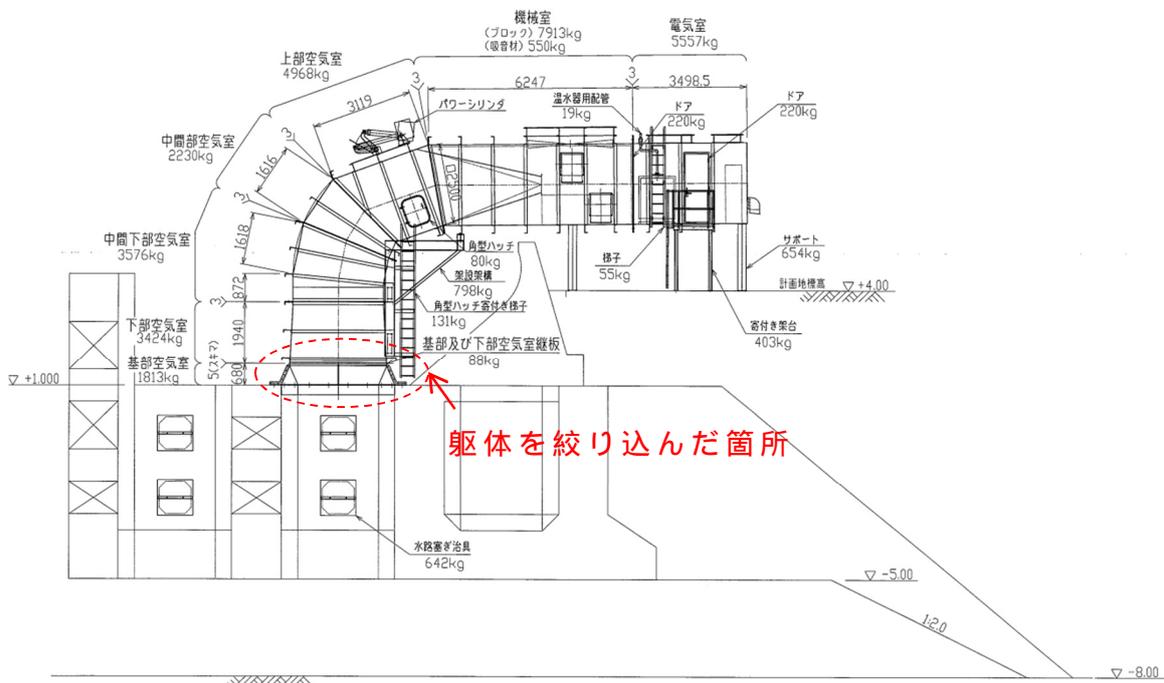


図 8.1 OWC 発電装置一般図

8.2 施工手順

図 8.2 に計画工程表、図 8.3 に施工フローを示す。

波力発電装置は製作・施工にあたっては、公共物性が極めて高いため、安全性には特に厳しい審査が要求される。

また、現状、電気事業法に波力発電のカテゴリーが整備されていなかったため、本実証実験のための手続きをとおして、手順が整理出来た。

以下に順を追って説明する。

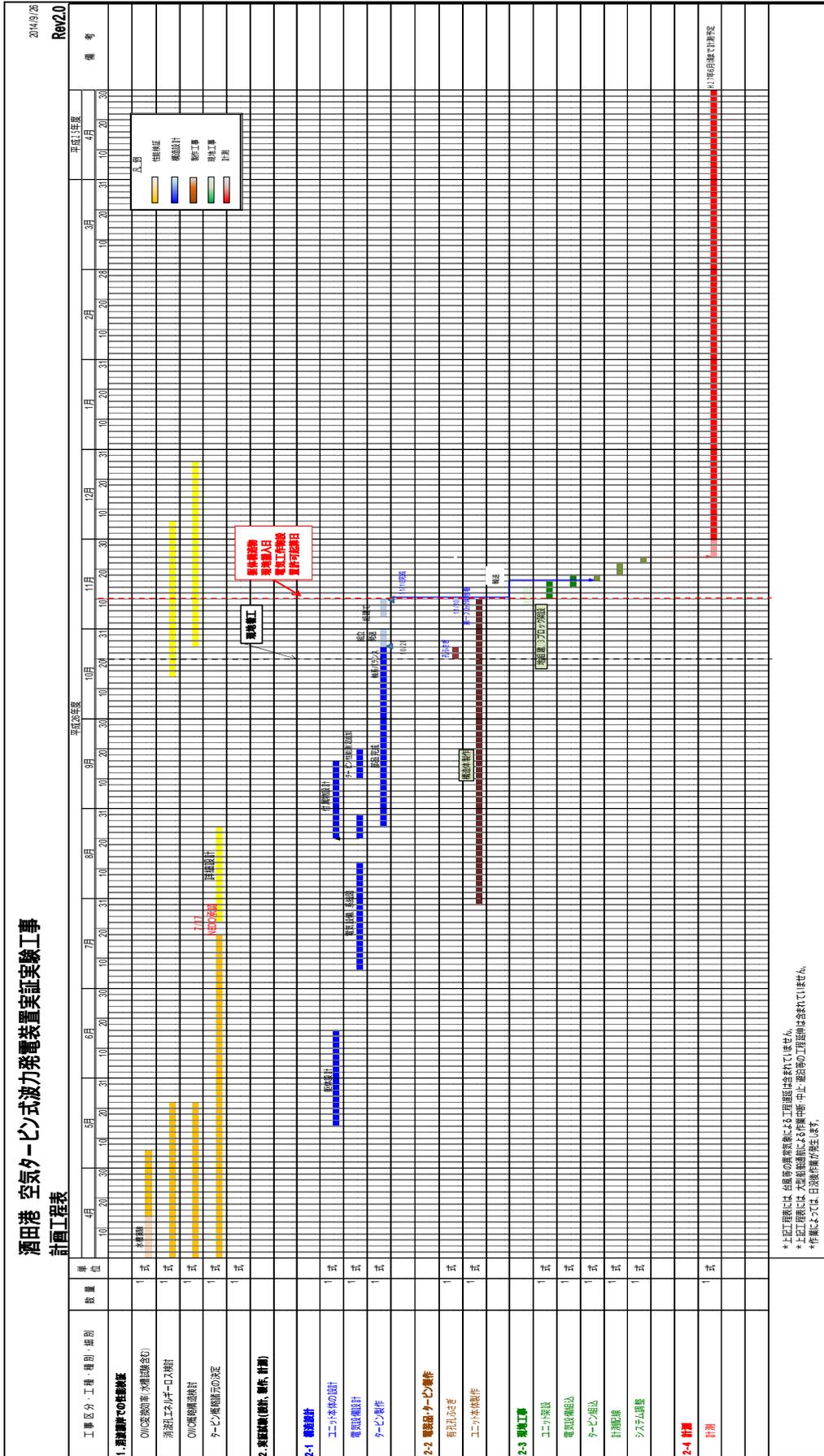


図 8.2 計画工程表

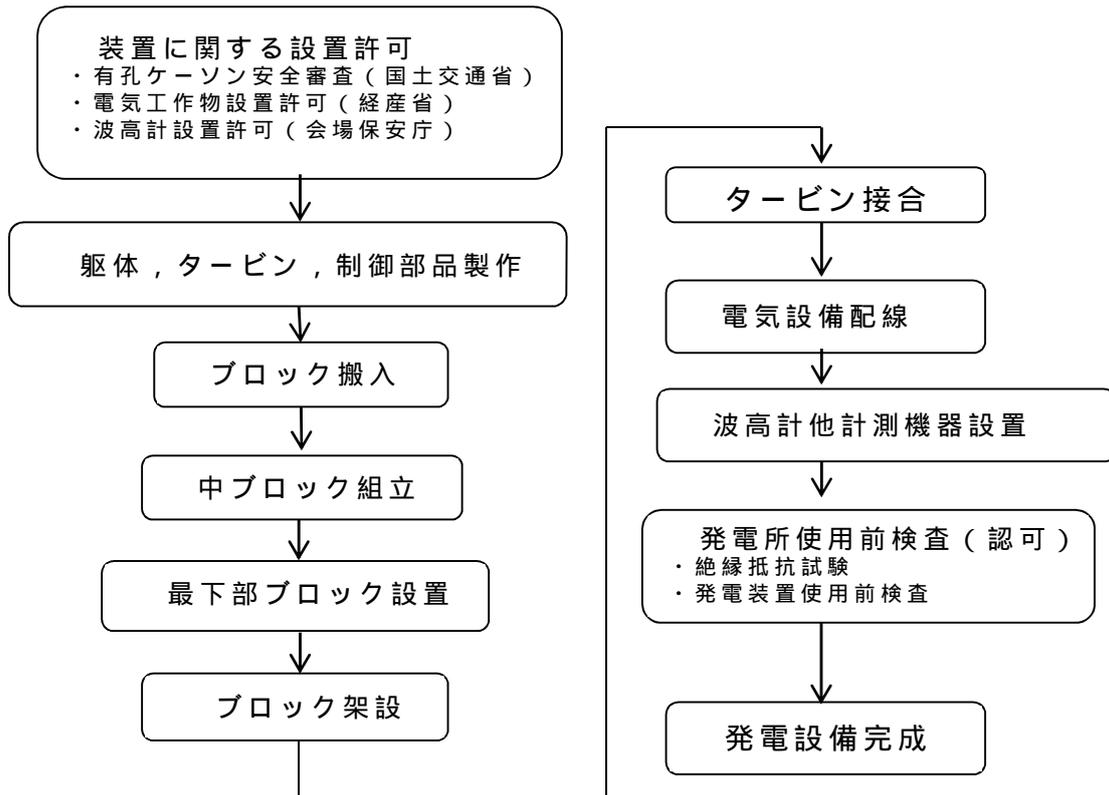


図 8.3 OWC 発電装置設置フロー

8.3 施工上の留意点

この発電装置は、製作・架設のハンドリングを考慮して7ブロックで構成している。

架設については、護岸であることから、陸側のみずたたき（背後のコンクリート床版）に架設用のクレーンを設置し、全て陸側から架設を行う計画とした。以下に施工状況について説明する。陸側架設により、荒天時の風の影響を受けるが波浪の影響を受けないため、稼働率が向上し、工程管理が容易となる。これにより、現場経費の大幅な節減が可能になる。

特に今回の架設時期は、当初計画の 2.5 ヶ月遅れとなったため、荒天日が多くなる秋口～冬場の設置作業となったため、省力化と安全性確保のため、様々な検討を行った。

以下に図 8.3 のフローの項目にそって留意すべき事項、検討結果を述べる。

8.3.1 許認可

装置の設置に際しては、日本の法律の認許が必要である。具体的には、港湾法、電気事業法などに準拠した認許届けである。これらの認許は、装置の製作に着手する前の図面製作段階で完了しておく必要がある。

8.3.2 品質管理基準

躯体、タービン、電気備品については、製作図面に従って製作工場で製作する。製作精度などの施工精度基準、溶接などの品質管理については、港湾工事共通仕様書、JIS に準拠し、出来型の精度管理を行った。

8.3.3 製作ブロック単位

本施工においては、トラックでの陸上輸送を考慮して、輸送ブロックの寸法を決定する必要がある。そのため、図 8.4 に示す輸送時の最大寸法制限値を満足する必要がある。例えば、図 8.1 に赤印で示す部分は、輸送時の制約により、OWC 躯体幅を 3.5m から 2.8m に断面を絞りこんだ構造とした。

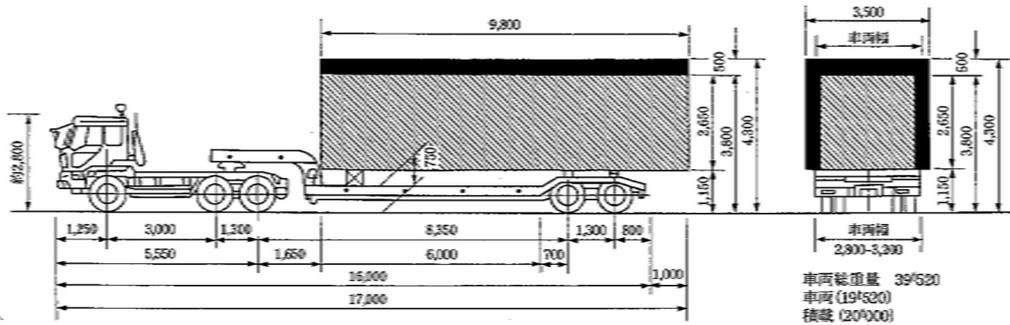


図 8.4 輸送最大寸法例

8.4 施工状況

8.4.1 輸送

図 8.5 に似姿図、写真 8.1 に搬入時の状況を示す。輸送は、図 8.4 のに準拠し、交通量の少ない夜間に輸送を行った。

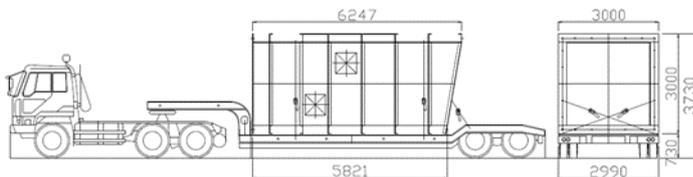


図 8.5 輸送最大寸法図



写真 8.1 輸送状況

8.4.2 中部ロック据付

不安定作業になる護岸での設置回数を減らすため、トラックで輸送したブロックを背後のヤードで中部ロック化した。その結果、中部ロックは 4 ブロックとなった。



写真 8.2 中部ロック施工状況

8.4.3 最下部ブロック設置

OWC の要となる最下部ブロックの設置状況を写真 8.3 に示す。最下部ブロックは、有孔ケーソンの遊水部の寸法に合わせるため、3.5m の幅広となるため、一体化でのトラック輸送が困難である。そのため、4 分割で現地に納入し、ヤードで一体化して、有孔ケーソン上にセッティングした。

また、このブロックは、OWC の内部の水面運動する場所であるため、設置直後のテストでコンクリート部と鋼殻部の間でエアールれが生じた。そのため、付け根部の隙間を水中硬化型シール剤で埋め、エアールれ対策を講じた。



写真 8.3 最下部ブロック施工状況

8.4.4 ブロック設置

ヤードで組み建てた 4 ブロックを順次架設した。作業時間は実質 5 日であったが、設置時期が 11 月末で荒天が続いたため、2 週間で設置完了となった。海上工事であれば、春まで工事中止の可能性があったが、陸上からの施工のため工事を遂行できた。



写真 8.4 ブロック架設状況

8.4.5 タービン・発電機設置

躯体架設後，タービンと発電機と接続した．工場内で一度芯出しを行い，回転バランスを調整して現場での作業を省力化した．

架台及びタービンを工場内で先行して設置する事により，発電の要となるタービン，発電機の結合が現地にも関わらず容易にできた．

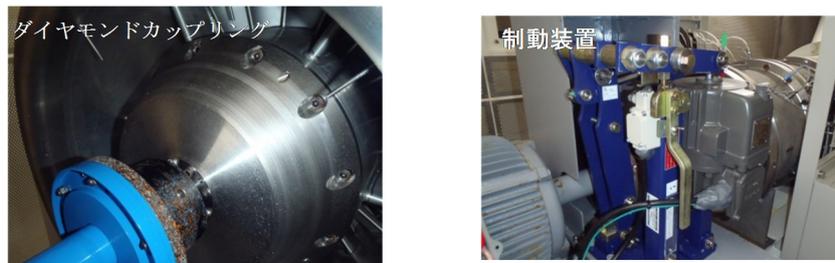


写真 8.5 タービン設置状況

8.4.6 電気設備

制御モニターと制御盤を写真 8.6 に示す．波力発電装置の運転は電気室の制御盤からインターネットで室内の制御 PC に状況を転送し，遠隔監視するシステムとした．

この作業終了後，電気関連の微調整は，約 4 日かけて行った．



写真 8.6 電気制御設備状況

8.4.7 計測機器設置

図 8.7 に波高計およびタービンに関する圧力測定の計器類の設置状況を示す．波高計は図 8.7 の 3 箇所の他，沖合 100m の水深 6m の海域に設置している．タービンの計測機については，主にタービン差圧を測定する目的で設置した．

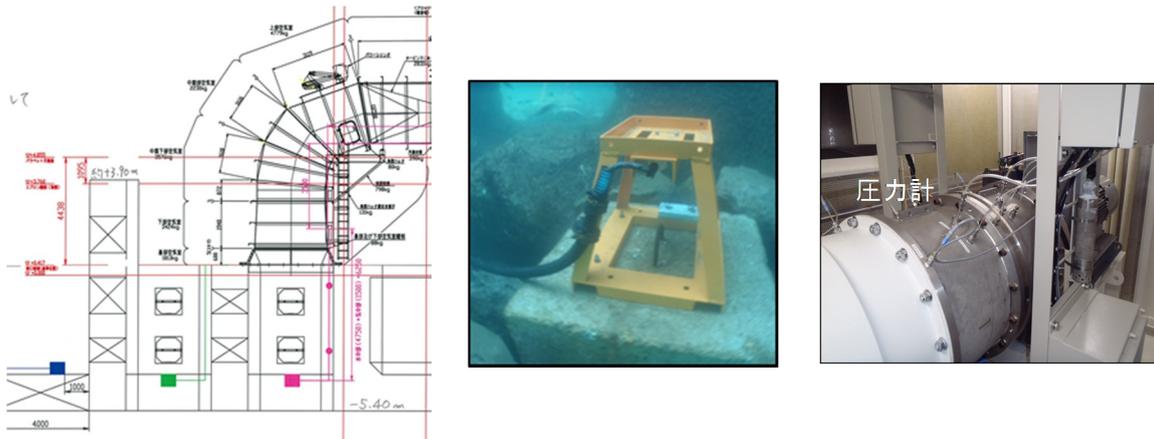


図 8.7 波高計・圧力計設置

8.5 まとめ

波力発電装置を既設ケーソン設置する試みは、世界でも初めての試みであったが、設計法・施工法を構築した。

実証機の設置に際し、国土交通省、経済産業省など関連監督官庁への様々な手続きが必要となる。特に波力発電装置は、電気事業法上の小規模発電所の認可が必要となり、これらの諸手続きは、前例がなく、手順手順が存在しなかったが、手順手順を構築した。陸上からの架設を前提に、波力発電装置の設計を行って、実際に装置を陸上から設置した。陸上架設は、荒天の影響を受けにくく、架設の効率が向上することを証明した。さらに、陸上架設は、海上起重機での施工に比して設置費用の大幅な低減が可能となった。

発電装置の躯体はブロックをトラック輸送が可能な単位のブロックとした。このことにより、架設ブロックの陸送が可能となり、荒天日数が多い、秋口～冬場にかけての海上輸送のリスクを回避できた。

年間を通して荒天日数が多くなる晩秋から初冬の設置工事となったが、上述のように設計および施工法を工夫することで、事故も無く安全に設置ができた。

付録 3 に施工写真を添付する。

付録 3 : PW-OWC 型波力発電装置施工写真

第9章 Stage4 実証機の発電性能検証

9.1 発電状況

躯体設置後にタービン，発電機制御設備の整備を行い，電気事業法における経済産業省の使用前検査合格後の平成 27 年 1 月 17 日から連続発電（運転）を開始した。

9.1.1 計測装置配置

(1) 波高計 & 大気圧計

図 9.1 に発電装置に設置した波高計の状況を，図 9.2 に断面設置位置を示す。図中の A は実証実験のために新たに設置した波高計で 4～6m の海底面に設置した。図中の B は国土交通省が設置している NOWPHAS 波浪観測ブイを示す。酒田港については，十数年の外洋波の蓄積データがあり，3 章で述べたように入射波エネルギーの推定などにこのデータを利用することができる。

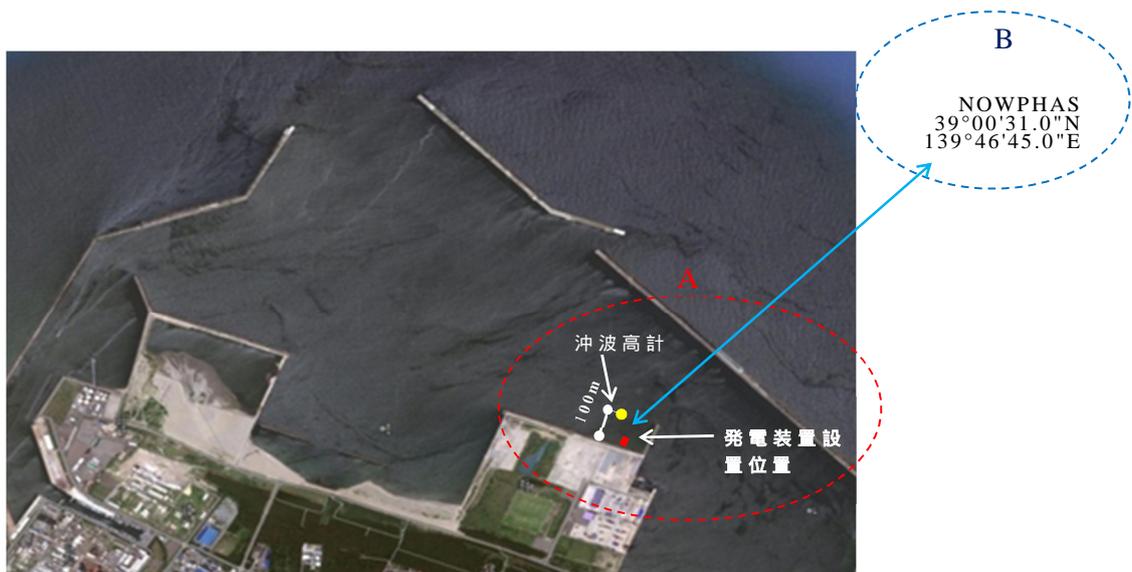


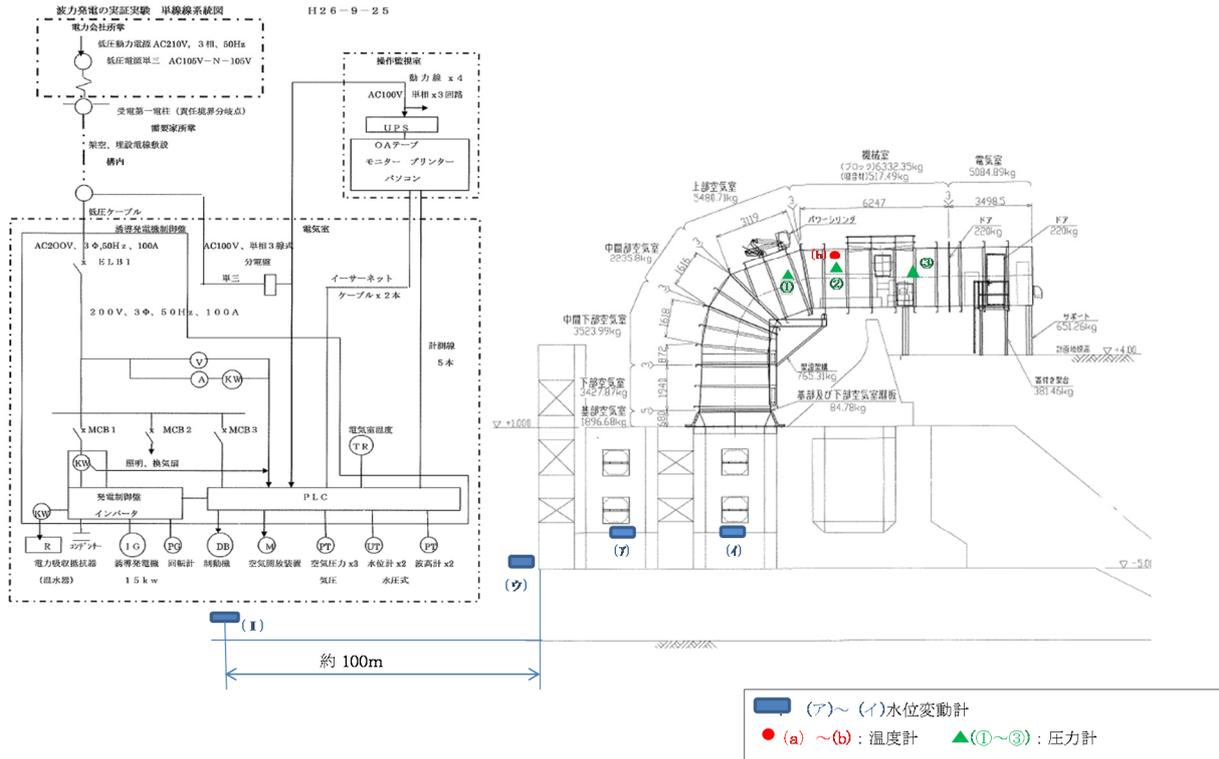
図 9.1 波高計設置位置図

(2) 計測機器概要

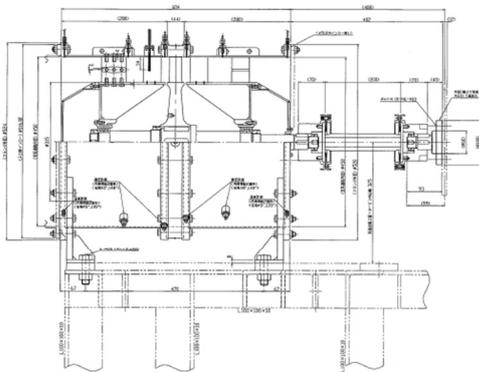
計測機器のリストを表 9.1 に，計測機器の配置を図 9.2 に示す。これらの測定機器の取得データをもとに発電装置の運転・監視および発電装置の発電評価を行う。今回の実証実験では，平成 27 年 1 月 17 日から 9 月 30 日まで，点検改良以外休止を除き，約 7 ヶ月間のデータを収集した。

表 9.1 計測機器リスト

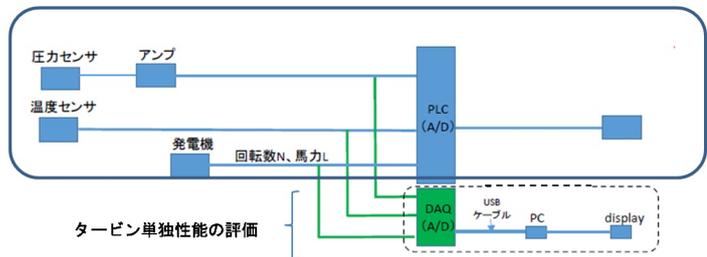
1.波高	4.タービン差圧関連
沖波高 (cm)	前部入全圧 (hPa)
側波高 (cm)	後部入全圧 (hPa)
PW水位 (cm)	前右出静圧 (hPa)
空気室水位 (cm)	右翼入圧 (hPa)
	右翼出圧 (hPa)
2.圧力	後右入静圧 (hPa)
空気室圧 (hPa)	前左出静圧 (hPa)
機械室圧 (hPa)	左翼入圧 (hPa)
大気圧 (hPa)	左翼出圧 (hPa)
	後左入静圧 (hPa)
3出力関連	5.温度
タービン出力 (W)	前右入温度 ()
発電出力 (W)	後右出温度 ()
発電電力 (A)	前左入温度 ()
タービン回転数 rpm	後左出温度 ()
タービントルク N・M	



(1) 波高計 & 圧力計設置



タービン発電機ユニット



(2) タービン計測機器配置図

図 9.2 計測機器配置図

9.1.2 発電特性

(1) 波の状況

データ計測開始後の 2017 年 2 月 13 日の外洋波 , 沖波 OWC の波浪振幅の状況を図 9.3 に示す . この日の最も波高が高い 4:00 ~ 8:00 の状況で防波堤の外の沖合で 6m の有義波高 (最大 11m) の波が港内で 2.0m 程度に減衰しているが , OWC 部では 2.4m で振動していることがわかる . 港内に回折した波が浅水変形効果で , 護岸付近で重複波となり , 波高が上昇するようである .

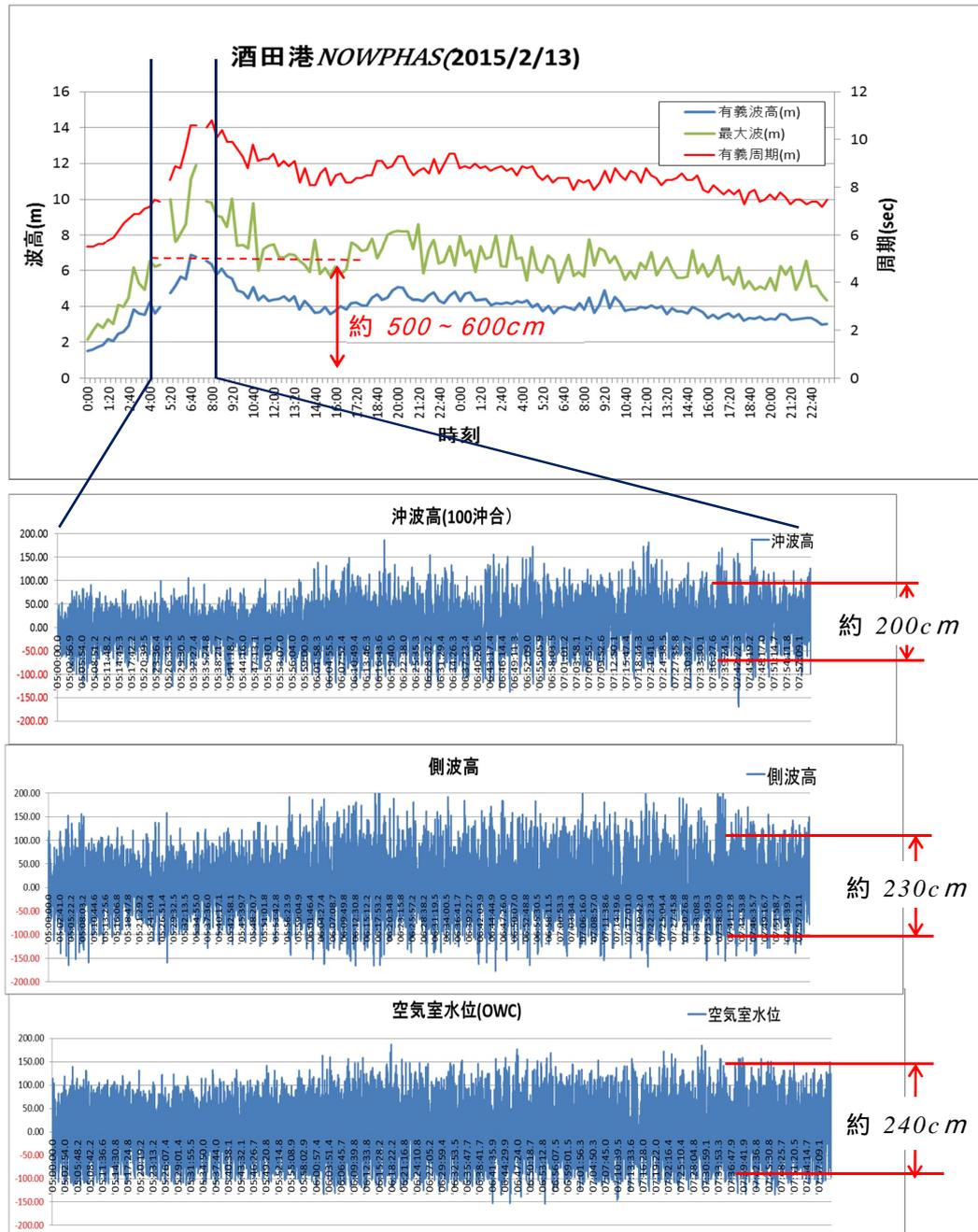


図 9.3 入射波の変動状況

(2) 発電状況

図 9.4 に平成 27 年 1 月 31 日に観測した波高とタービントルクの時系列変化の関係を示す。波高，発電量，タービントルクの収録データピッチは 10Hz (100msec) である。タービンは，水位上昇時 (押し波) でも下降時 (引き波) でも，正のタービントルク値が発生している。

一方，水位変化の転換時には，トルクが生じない (トルクゼロ) 時間が生じている。矢印のポイントは，特にトルクが低い時間帯である。このときの波高は，発電している時間帯に比べて波形が乱れ空気室の水位変化速度が緩くなっている。実海域では，実験水槽などとは違い，このような波のみだれにより発電出力が低下する時間帯がある。

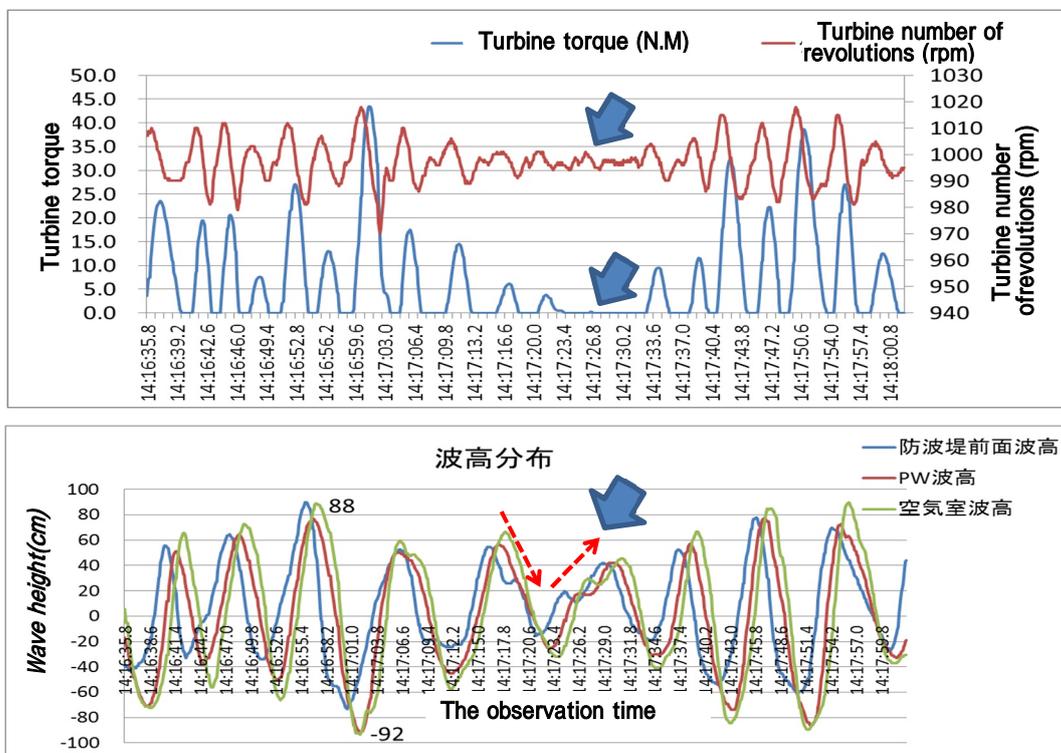


図 9.4 2017 年 1 月 31 日 14 時 ~ 約 20 分の波高分布とタービントルク回転数の比較

(3) 一次変換特性における設計・実測の比較

図 9.5 に平成 27 年 2 月 13 日に，観測した空気室内内部の水面変動による発生空気圧変動の実測値と計算値 (設計時想定値) の比較結果を示す。図より一次変換における OWC の発生空気圧変動は，実証実験を行う前に計算した値にほぼ一致している。このことから，一次変換については，Stage 2 で構築したシミュレーションプログラムで再現出来ることが分かった。³⁸⁾

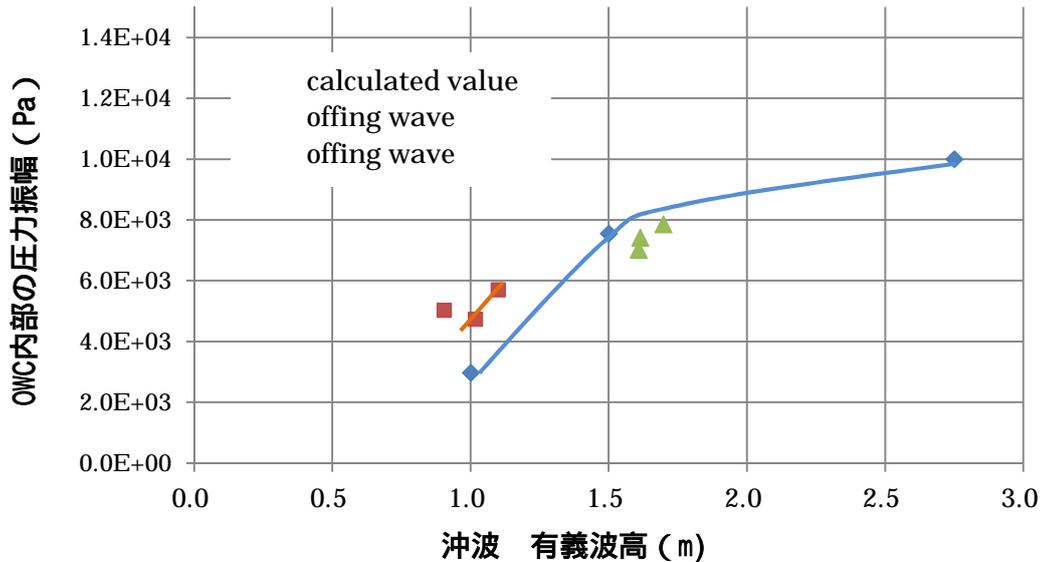


図9.5 沖波とOWC内部の差圧 比較

(4) OWC 空気室の圧力とタービン，発電量の関係

図 9.6，図 9.7 に平成 27 年 2 月 13 日図 9.8，図 9.9 に 1 月 31 日に観測された空気室圧力(hPa)と発電出力(W)，タービントルク(N・m)の散布図を示す．図の左が負圧，右が正圧すなわち左側が引き波，右側が押し波を表している．図 9.6 では，押し波時の発生トルク > 引き波時の発生トルクとなっている．このため，発電量も押し波時の方が大きい．

一方，図 9.8，図 9.9 では逆の傾向がうかがえる．

図 9.8，図 9.9 の観測時では， $H_{1/3}=0.7\text{m}$ ， $T_{1/3}=5.5$ 秒，図 9.6，図 9.7 の観測時では， $H_{1/3}=1.9\text{m}$ ， $T_{1/3}=7.1$ 秒である．入力波（沖波）エネルギーの強弱によって，装置の発電応答に違いがあることが分かった．

これは，3 章で示したように波力発電装置の空気の入出口の形状が海側，陸側で異なっており，この損失が影響しているのではないと思われる．

この傾向は，瀬戸口らの論文³⁸⁾においても，「マイティホエールや NIOT の実海域実験装置は，共に吸い込み時の最大速度は吐き出し時の最大値の 0.6 倍になっている」との記載があり，本実験においても同じような傾向を示した．

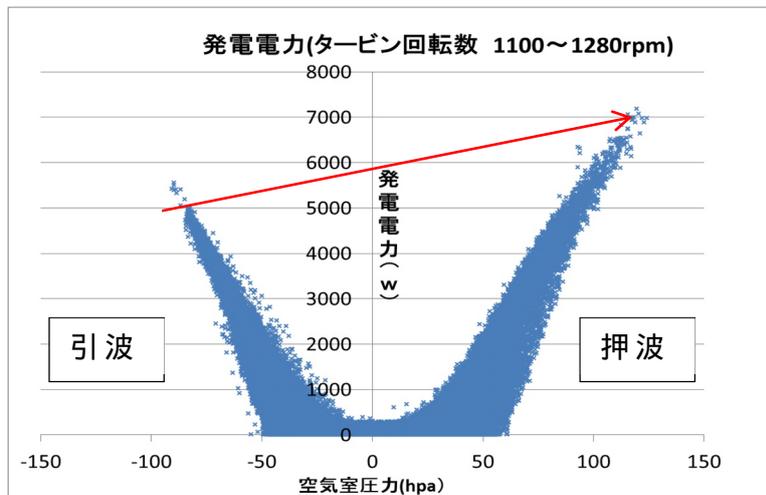


図 9.6 2015 年 2 月 13 日 OWC(空気室)差圧と発電出力

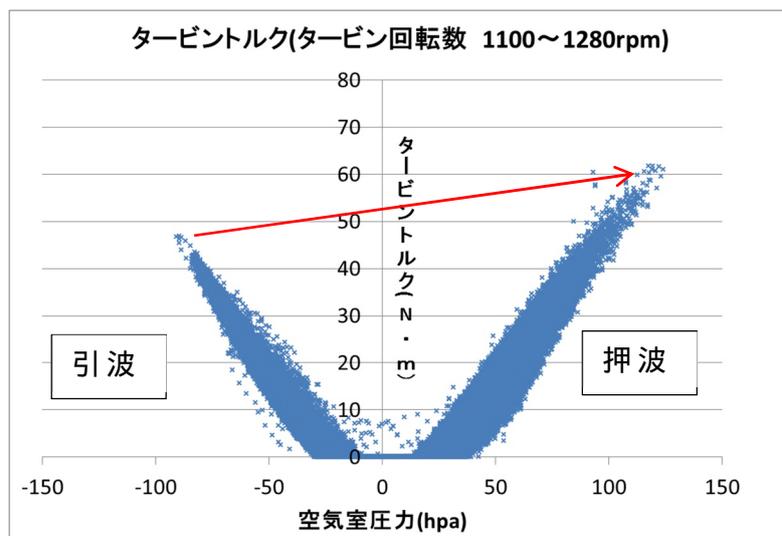


図 9.7 2015 年 2 月 13 日 OWC(空気室)差圧とタービントルク

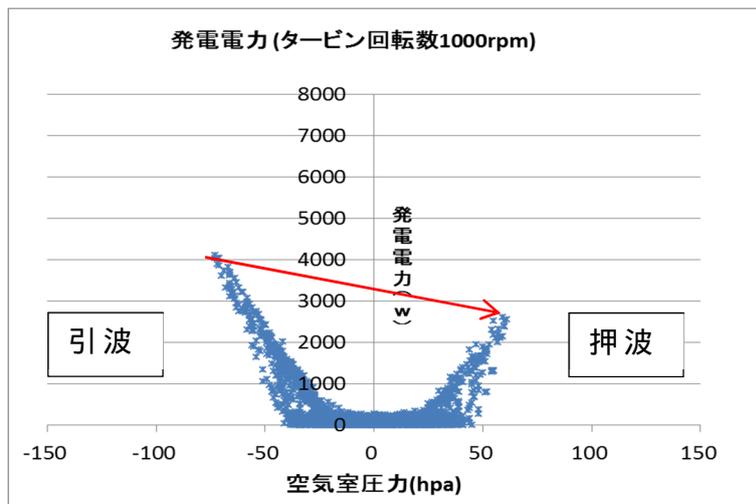


図 9.8 2015 年 1 月 31 日 OWC(空気室)差圧と発電出力

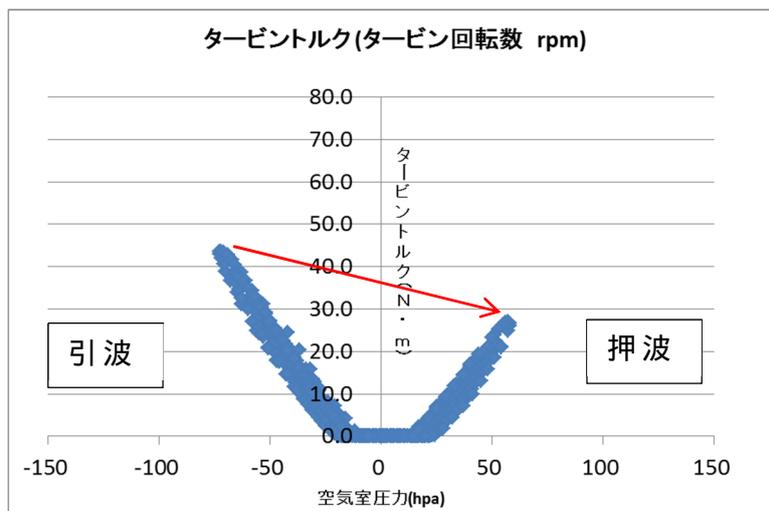


図 9.9 2015 年 1 月 31 日 OWC(空気室)差圧と発電出力

(5) OWC 空気室の圧力とタービン，発電量の関係

前項にも述べたが，発電量が押波，引波で異なる傾向が背後の空気の損失影響を受けている可能性があり，影響確認実験を行った．

これは，設置に際し，発電装置の音漏れ（騒音漏れ）に対する近隣住民の要望に配慮して，空気の流出入口を後方からサイド部のダクトに変更した．

この変更により，空気の出入り口の面積が当初計画の半分になっており，空気の吐き出し，吸い込みの影響が出ているのではないかと懸念されたからである．

写真9.1に機械室内部の状況を示す．右側写真上方がOWCから空気を取り入れるマニホールド，下方が発電機である．押し波時は空気がマニホールドを通して押し出され，引き波時は写真9.1の制動機の前にあるタービン（ $\phi 450$ ）から，空気が吸い込まれる．

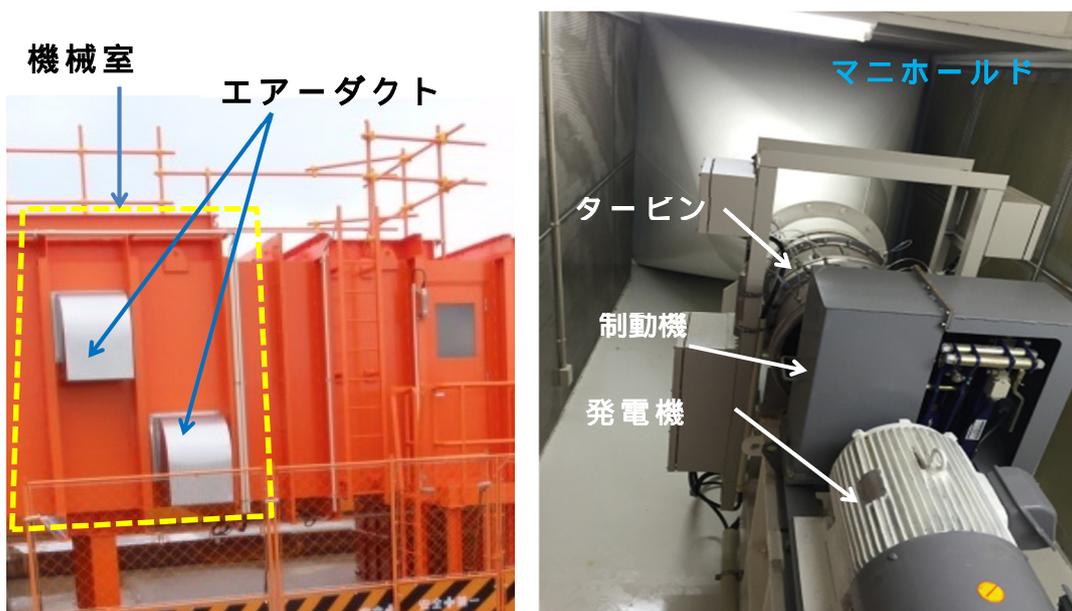


写真 9.1 機械室内部の状況

このとき空気は，写真9.1の左側のエアダクトをとおして移動するため，空気の流出入面積がOWCの運動に影響する可能性がある．そのため，機械室から大気への空気の出入り口面積を現状のシステムの2倍（当初計画で確保する面積）にしたときの影響について観測を行った．

機械室の空気の流出入口の面積を表9.2に示す．背後扉をあけると幾何学的に空気の流出入口が約2倍（空気ダクトの面積は，OWCの断面積の25%，ドア

を開けることにより50%)となる。

結果を図9.10示す。図より、扉開閉による発電出力への影響は特に認められない。

表 9.2 空気の排出入面積

Item	sign	m ²	Note
< Mashine room >			
OWC Area	A1	6.25	2.5m × 2.5m (output port 3.5m × 3.5m)
Air duct	A2	1.54	Duct 0.62 ² × 4(windows)
Machine room back door	A3	1.69	H 2.17m × W 0.78m
< Turbine >			
Turbine diameter	A4	0.16	450mm
Sloat area	A5	0.044	
Area ratio	A2/A1	0.25	1/4
Area ratio	A5/A1	0.00704	1/142

図9.10は、2月27日(H_{1/3}=0.8m, T_{1/3}=6.0)の結果である。3月5日(H_{1/3}=2.7m, T_{1/3}=5.0)にも同じ実験を行ったが結果は同じ傾向であった。(図9.11)

このことより、空気ダクトの面積がOWCの断面積の25%以上あれば、空気の流りが発電に大きく影響することはないことが判明した。

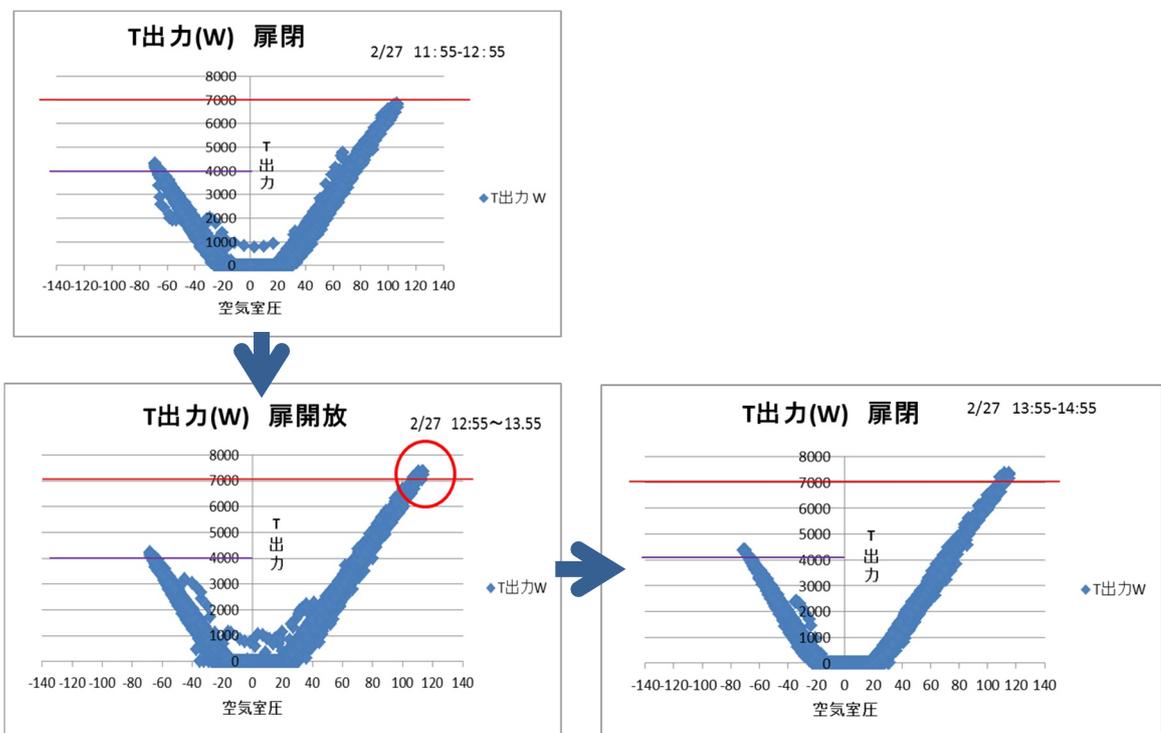


図 9.10 ドア開放試験結果 (10 分間隔) 2015 年 2 月 27 日

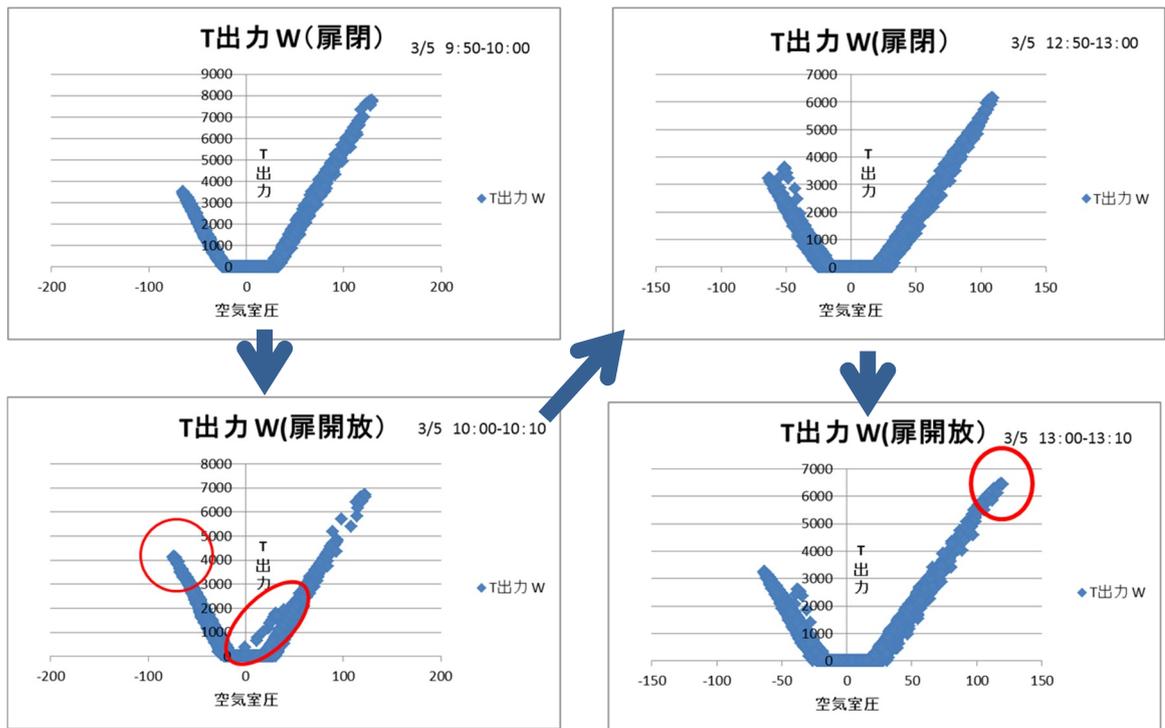


図 9.11 ドア開放試験結果 (10 分間隔) 2015 年 3 月 5 日

9.1.3 発電特性まとめ

発電装置の発電特性についてまとめると以下の点が明らかになった。

酒田港内の入射波高は、沖合から一線防波堤（外防波堤）で半分以下に減衰するが、OWC 設置地点で増幅する。

OWC の波振幅に乱れが生じると発電しない。

OWC における一次変換係数は、Stage 2 で構築検証したシミュレーションプログラムで再現できる。

発電特性は、押し波と引き波で発電特性が違う。これは、タービンへの空気の流出入部の形状の違いによるものであると考えられる。

機械室の空気の流出入面積が当初計画の半分になった影響が発電特性に影響を与えている可能性があったが、空気の出入口が機械室の断面積の 25% 確保されていれば影響はない。

9.2 衝動タービン特性

本研究における実証実験において，世界で初めて衝動タービンを本格採用した．採用するメリットは，Stage1（2章）で記述したように，従来のウエルズタービンに比べて幅広い周波数域で，低回転で高トルクを生み出せる点である．

また，今回のような護岸に設置する発電装置は，背後の居住区の騒音対策が必要不可欠だが，タービンが低回転なので対策がしやすい．

以上のように様々なメリットにより，衝動タービンは，今回のような護岸に設置する波力発電装置に有用な機械部品といえる．

9.2.1 衝動タービン概要

本実験では，タービンの機械特性の実海域での再現性を検証するため，タービン動翼（ブレード）の厚さを変えた特性の異なる二種類のタービンで比較実験を行った．

(1) タービン諸元

図 9.12 にタービン概要図，諸元を表 9.3 に，諸元に対応する断面図を図 9.13 に示す．タービン 1 は，佐賀大学の推奨するタービンを参考にして，後述する CFD 計算により最適化を目論んだタービンで，タービン 2 は佐賀大学が実験，解析をもとに推奨しているタイプである．

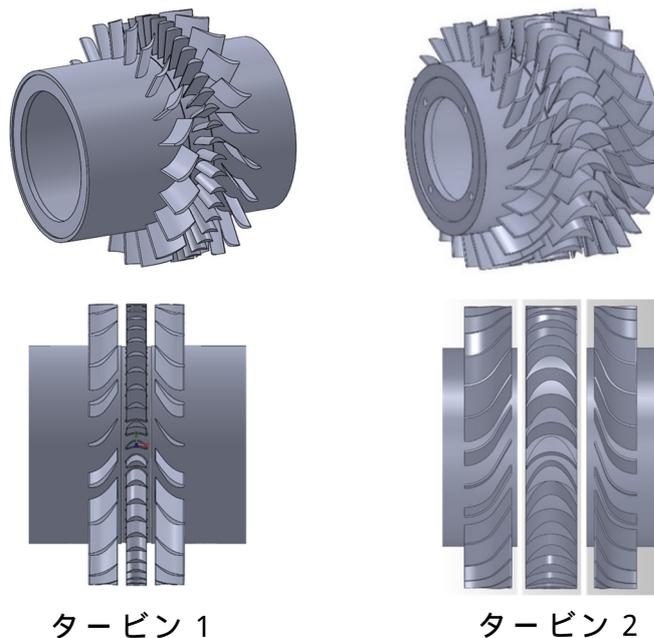


図 9.12 タービン概要

表 9.3 タービン諸元

1.固定翼(案内翼)	単位	タービン1	タービン2
外径	mm	450.0	450.0
ハブ径	mm	315.0	315.0
平均径	mm	382.5	382.5
翼枚数(Z)	枚	21.0	42.0
弦長(c)	mm	62.7	62.7
翼間ピット(P平均径)	mm	67.32	33.7
ソリディティ(平均径,C/P)	-	0.93	1.86
翼高さ(h)	mm	67.5	67.5
アスペクト比(h/c)	-	1.08	1.08
出口角度($\alpha 1$)	deg	30	30
2.動翼			
外径	mm	451	451
ハブ径	mm	31.4	31.4
平均径	mm	382.5	382.5
翼枚数(Z)	枚	45	53
弦長(c)	mm	32.12	41.17
翼間ピッチ(P平均径)	mm	26.7	22.67
ソリディティ(平均径,C/P)	-	1.20	1.82
翼高さ(h)	mm	68.5	68.5
アスペクト比(h/c)	-	2.13	1.66
入口出口角度($\beta 1, \beta 2$)	deg	38.4	60.00

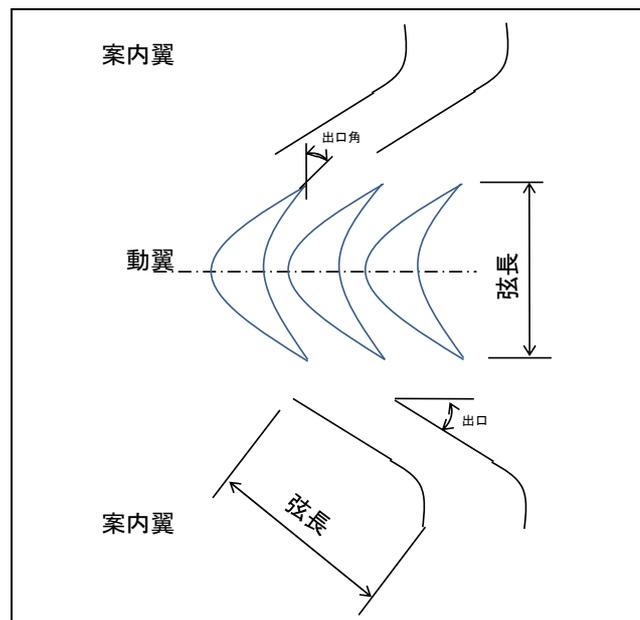


図 9.13 タービン断面図

(2) CFD によるタービン解析

図 9.12 に示すとおり，タービン 1 とタービン 2 の動翼の大きな違いは，出口角度（すなわち動翼の厚さ）と動翼枚数である。

設計時点の知見では，タービン 2 に比べて，タービン 1 のほうがタービンに入る圧縮空気を案内翼にいかにかスムーズに誘導でき，エネルギー変換効率

が向上する結果が得られると想定していた。設計時に実施した CFD (AXSTREAM) による計算結果では、タービン 2 の往復流の後翼となる羽根の間に渦損失が生じ、エネルギー変換効率が低下する。そのため、タービン 1 では、入口出口角度と静翼の弦長を、佐賀大学が推奨しているタービン³⁸⁾よりも短くする事で、損失を減少する対策を講じた。

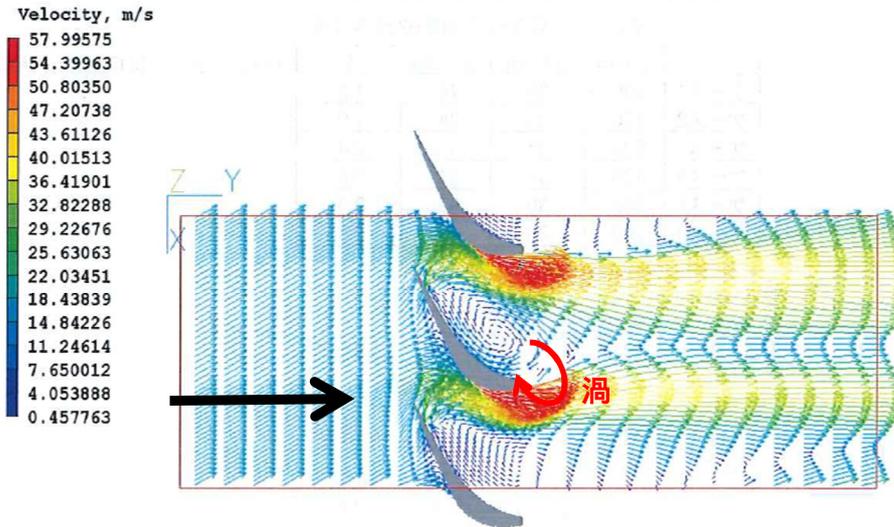


図2.2.3-3 $\alpha_1=25\text{deg}$ 、OGV流入角度 120deg におけるCFD解析結果(速度ベクトル分布)

図 9.14 AXSTREAM による計算結果

(3) 実海域実験時におけるタービン 1 の特性

タービン 1 の実海域実験結果を図 9.15 に示す。図は実験期間中で発電出力が大きかった 3 月 15 日の結果である。タービンの効率は、目論見とは異なり、0.13 前後と大きく目標値 (0.35 ~ 0.4) を下回る結果となった。

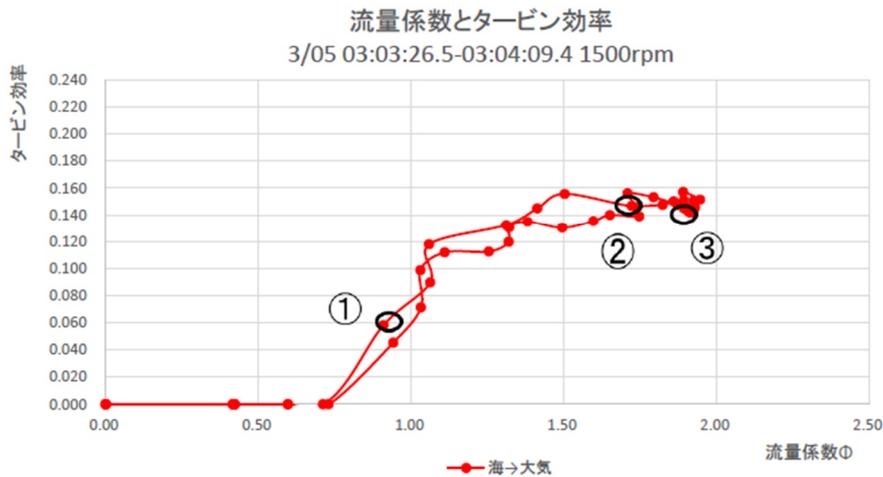


図 9.15 タービン効率 (2015 年 3 月 5 日)

考察を行った結果，AXSTREAM は，ジェットエンジンなど高速気流の計算には向いているが，衝動タービンのような低流速（10～40m/s）に対応していないことが分かった．そこで，CFD 計算ソフトを別の CFD ソフト（SCRYU/Tetra）に変更し再度検証を行った．

結果を図 9.16 に示す．タービン 1 では，図の ① の状況下では，空気の流れ角と動翼角が合っているが，圧損が大きい．右の ③ の状況下では，動翼角度と流れ角の差が大きく圧損が大きい．すなわち，タービン動翼と固定翼のバランスが悪く，圧損が大きい構造であることが分かった．

タービン 2 は，空気の流れと翼角度を合わせた構造であり，圧力損失の低減が図れる構造であることが分かった．

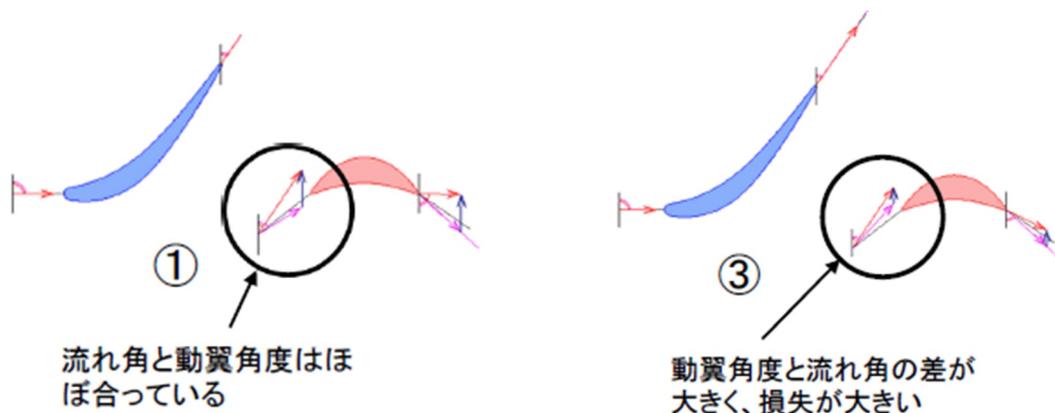


図 9.16 タービン効率（2015 年 3 月 5 日）

今回の実験と解析の照合をとおし，設計に CFD 計算を用いる場合，計算手法の適用範囲に注意が必要であることを痛感した．

(4) 風洞実験によるタービン 1 とタービン 2 の特性把握

上記結果を踏まえ，佐賀大学が推奨しているタービン 2 とタービン 1 の特性を再検討する必要性が生じた．

そのため，実海域のタービン径（450）の 1/1.5（ $\phi 300$ ）模型を製作し，特性を把握するため，風洞実験を行った．実海域（実機）のそれぞれのタービン諸元は，表 9.3 の通りである．

実験方法

実験は，佐賀大学所有の往復気流発生風洞（図 9.17 直径 1.4m，長さ 1.7m）にタービン実験装置（ケーシング直径： $D=300\text{mm}$ ）を接続して実

施した。実験は、定常流を発生させ、タービン回転数を一定に保って実験した。

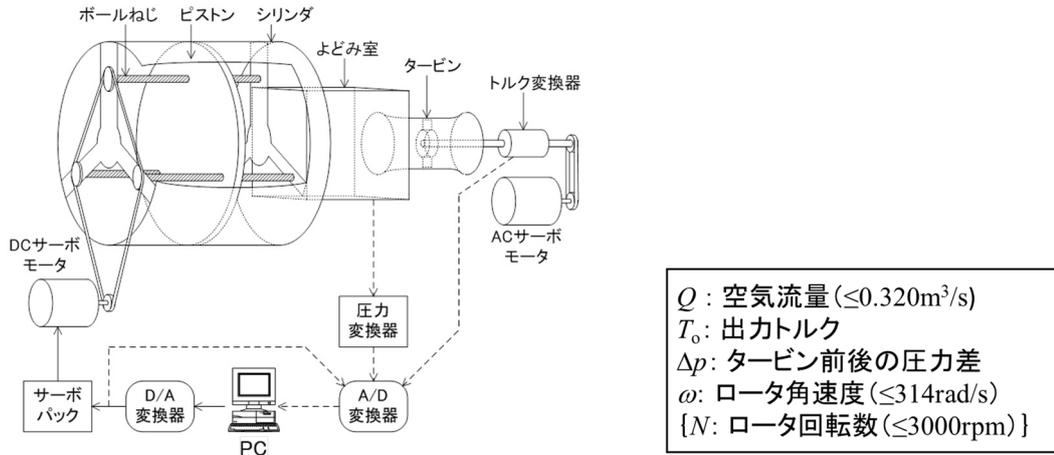


図 9.17 往復気流発生風洞

性能評価式

性能評価式は、以下のとおりである。

トルク係数 $C_T = T_0 / \{\rho(V^2 + U^2)Ar/2\}$
 入力係数 $C_A = \Delta p Q / \{\rho(V^2 + U^2)Av/2\}$
 $= \Delta p / \{\rho(V^2 + U^2) / 2\}$
 効率 $\eta = T_0 \omega / (\Delta p Q) = C_T / (C_A \phi)$
 流量係数 $\phi = v/u$

- A: 流路面積 $\{=pD(1-n^2)=0.0360m^2\}$
- r: 平均半径 $\{=D(1+n)/4\}$
- u: 平均半径におけるロータ周速度 $(=rw)$
- v: 流路断面平均軸流速度 $(=Q/A)$
- ρ : 空気密度

実験結果

図 9.18 は、両タービンのトルク特性の実験結果である。赤丸はタービンの効率が最大の時のトルクを示す。

タービン 2 のトルクは、タービン 1 と比較して流量係数が 1 前後で 2 倍強と改善している。流量係数が低い（風速がタービン回転数に比べて

小さい) 時, タービン 1 はトルクがマイナスであり, 低風速では出力が出ない.

また, トルクの最高点もグラフ右側にシフトしている.

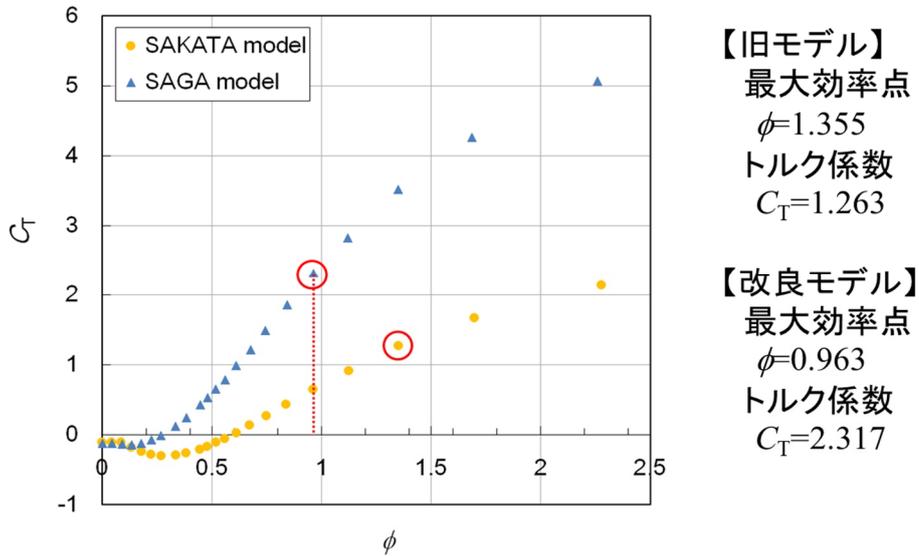


図 9.18 トルク係数-流量係数の関係

図 9.18 は, 入力特性を示す. 入力特性に関しては, 両タービンとも同じような傾向を示していることがわかる.

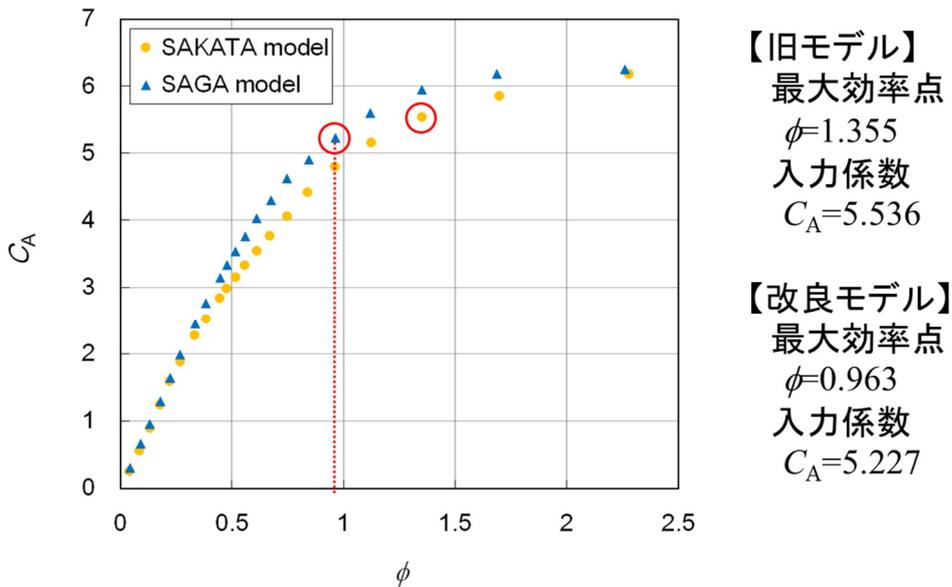


図 9.19 入力係数-流量係数の関係

図 9.20 は, 効率を示す. タービン 2 の最大高率は, タービン 1 の 3 倍の効率を示し, 大幅に改善していることが分かる.

タービン 2 では，流入風速（軸流速）に対し，タービン端回転速度が 0.9 近傍になるように制御すれば，効率が最高点に近づけることができる．

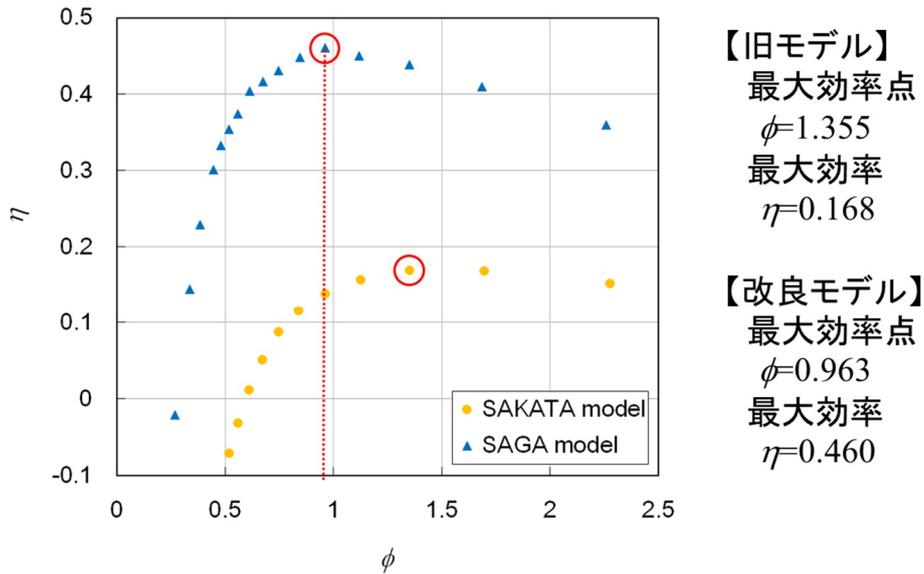


図 9.20 効率-流量係数の関係

以上により，タービン 2 は，タービン 1 の 3 倍の性能向上が見られる結果となった．

9.2.2 衝動タービン実証実験結果

(1) 実海域におけるタービン 2 の特性結果

膨張比に対するタービン効率，発電効率，流量係数，回転数の時刻変化を示す．

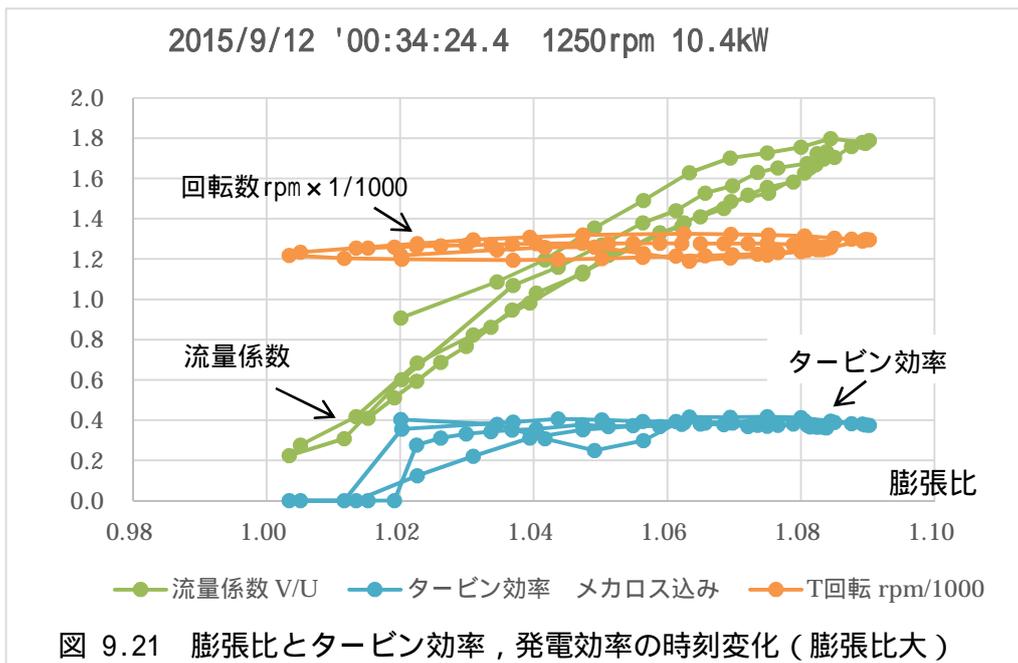


図 9.21 膨張比とタービン効率，発電効率の時刻変化（膨張比大）

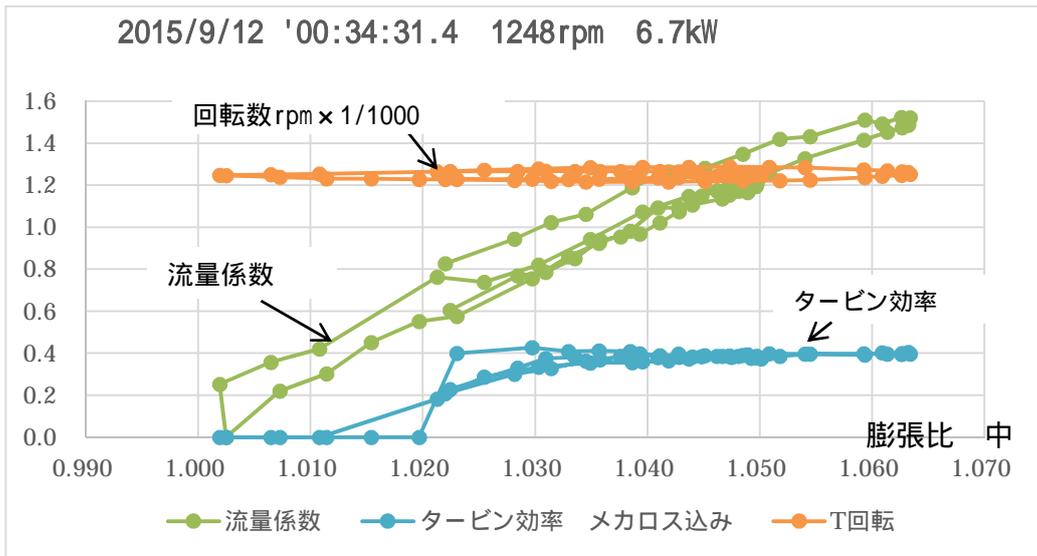


図 9.22 膨張比とタービン効率，発電効率の時刻変化（膨張比中）

図 9.21 は波が比較的高く発電しているときの結果で，波が比較的低い時の結果を図 9.22 に示す．膨張比の上昇・下降に対してタービン効率はほとんど変化しないが，発電効率は次第に増大している．流量係数は膨張比に対してほぼ線形に増加・減少している．膨張比の特性は，いずれも同じような傾向を示している．

また，タービン効率は，実験時計測した図 9.23 に示すメカロスを含んでいる．メカロスについては，発電量が少ない膨張比 1.02 程度以下において大きくなる．

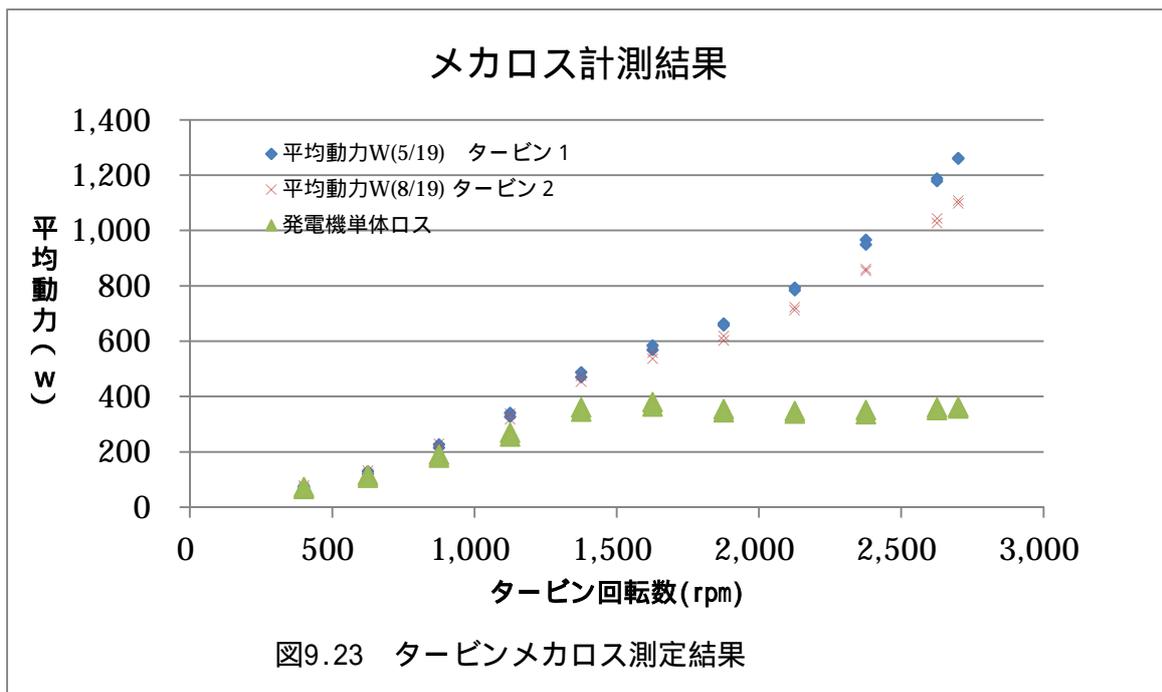


図9.23 タービンメカロス測定結果

以上より ,衝動タービンは ,波が比較的高く発電している状態においては ,効率は概ね 0.4 と高効率で維持できる .

(2) 実測データにおけるタービン出力 (パワーカーブ比較)

100msec の計測データを元に 27 分ごとの FFT 解析を実施し ,ゼロアップクロス法により波高 ,周期の有義値を算出し ,波力発電装置のパワーカーブを計算した . 図 9.24 にタービン 1 , 図 9.25 にタービン 2 のパワーカーブを示す . タービン 2 については , 初秋の 1 ヶ月の短い時期であり , 低波高時のデータしか取得できなかった .

そのため , 取得データより , 高波浪時の発電量を予測した .

予測結果を図 9.26 に示す . 図 9.26 より , タービン 2 の発電量は , タービン 1 の 3 倍の発電量となる . これは , 図 9.18 のトルク係数の倍率とも合致している .

このことは , 衝動タービンは , 実海域の不規則な波において , 常流での実験結果通りの特性を示す . そのため , 室内実験の特性を把握しておくだけで実海域のトルク (発電量) , 効率が予測できる .

このことから , 衝動タービンの設計検証においては , 定常流での特性曲線があれば , 実海域の二次変換係数は , 容易に算出できる .

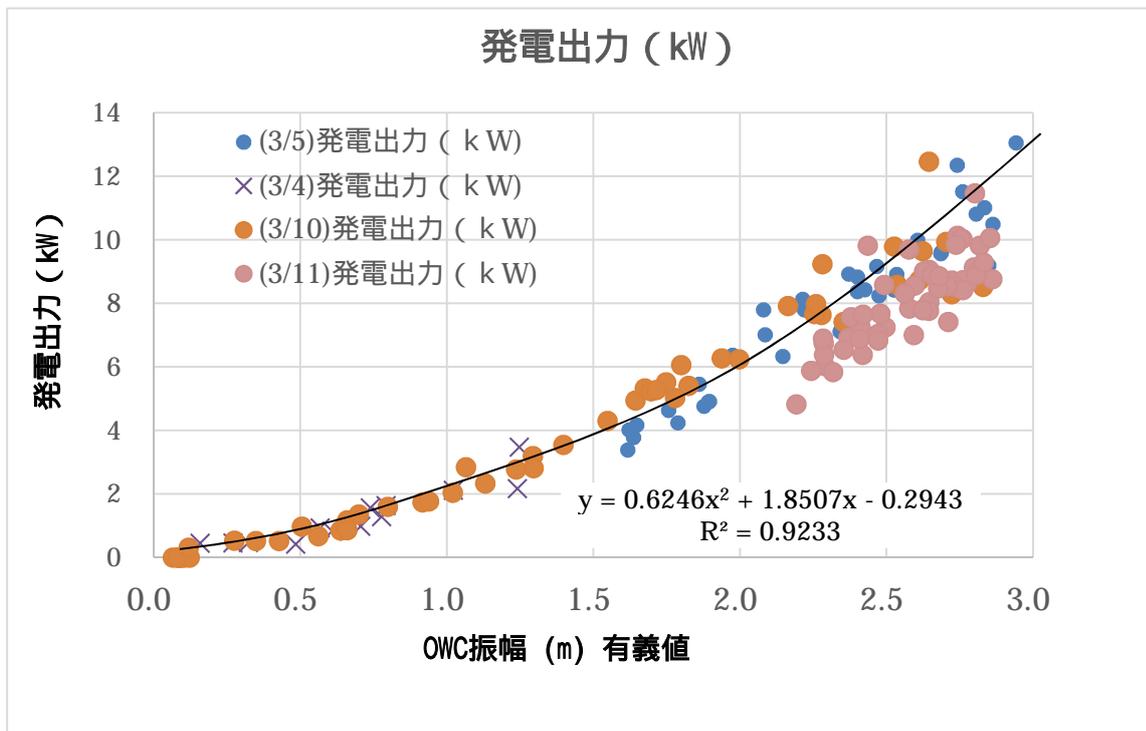


図 9.24 タービン 1 パワーカーブ

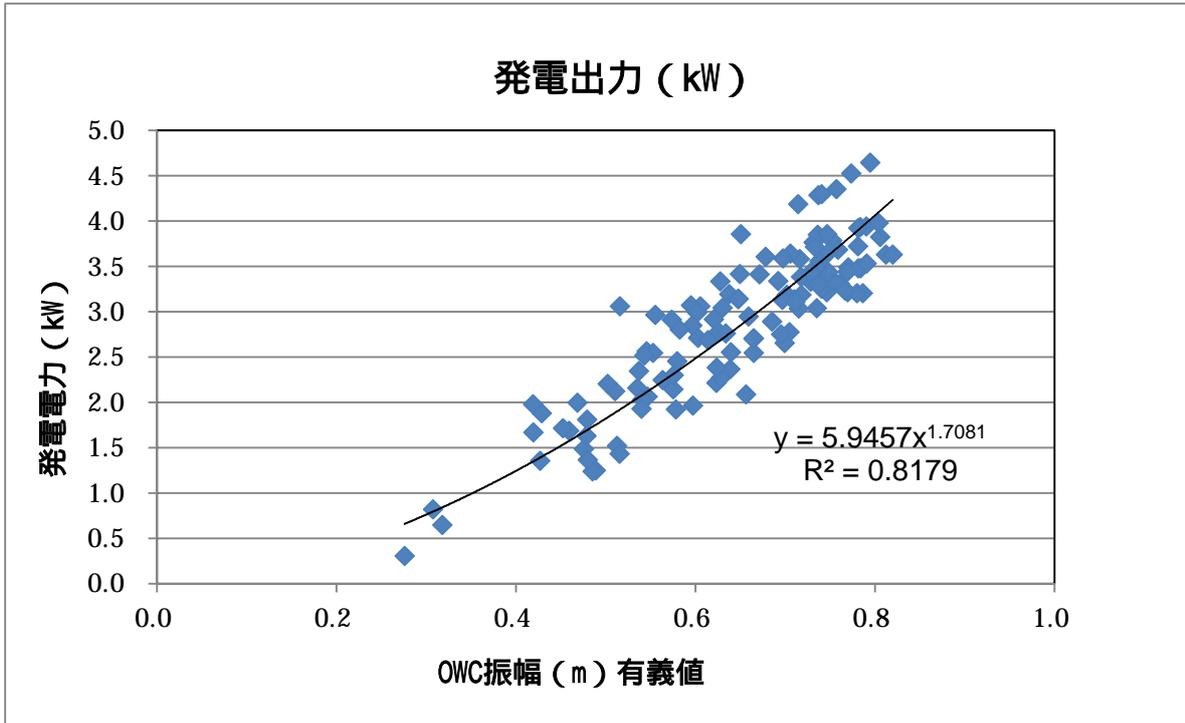


図 9.25 タービン 2 パワーカーブ

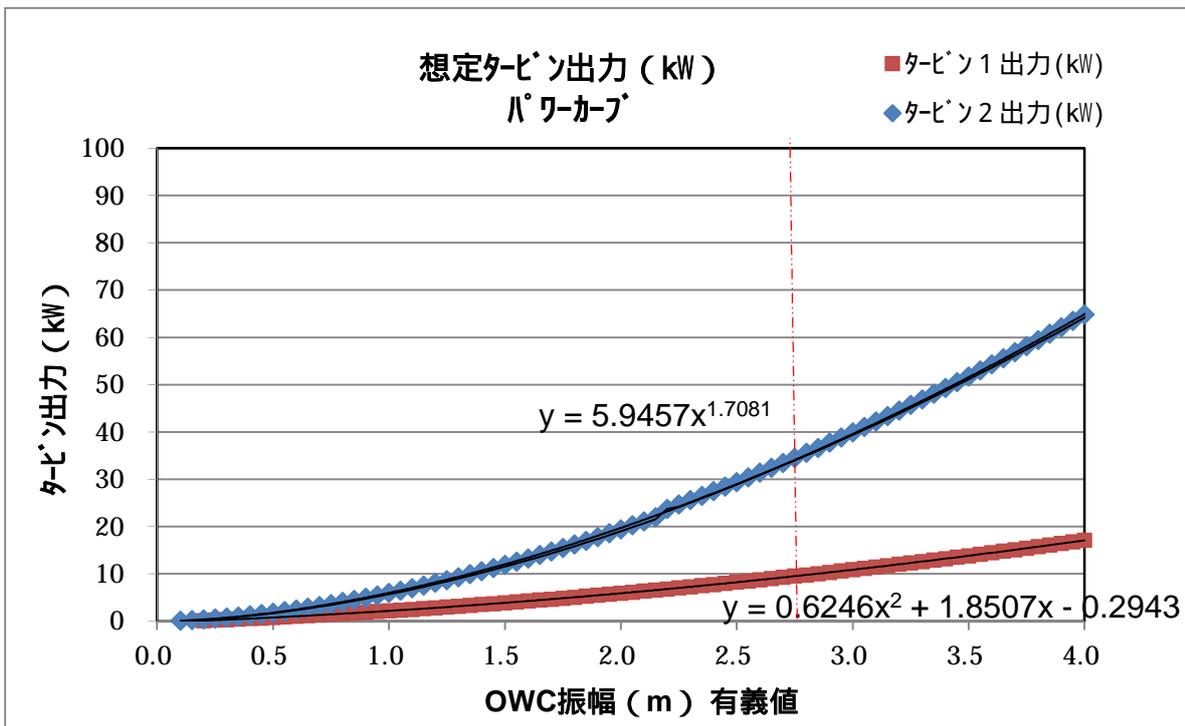


図 9.26 タービン 1 ・ タービン 2 パワーカーブ

9.2.3 衝動タービン特性まとめ

衝動タービンの特性に纏めると以下のことが言える。

CFD 解析で設計したタービンの性能が 1/3 であった。この教訓から CFD の評価には十分注意が必要である。

タービン 2 の性能は、設計で想定していた効率 0.4 を満足した。

また、この効率はある程度の風速があれば(膨張比の増減に対して)、ほぼ一定であり変動が少ない。

2 種類のタービン特性の比較から、タービン 2 のトルク係数と発電量比は 3.0 であった。すなわち、タービン 2 は、性能が 3 倍である。

タービン 2 のパワーカーブの想定曲線から、酒田の冬季において、最大 30kW 程度の高出力が期待出来る。(現 15kW タービンの最大許容出力は 27kW であるため、発電機は、1 ランク上を選定しても良い結果となった。)

9.3 一次,二次変換における実証実験結果との整合性

実海域実験において、タービン効率は、ほぼ想定どおり 0.4 程度であることが確認された。本研究での最重要課題は、一次変換、二次変換連成が適切であったかどうかである。すなわち、OWC 内の水線面の上下運動に対して、タービン差圧、タービン出力が計測結果と整合出来ているかどうかを検証する必要がある。

9.3.1 タービンの回転数毎の特性

タービンは誘導発電装置に直結しており、OWC 内の水位変動によって、維持する回転数を変動させている、波高が低い場合の 500rpm を最低回転数として、250rpm 毎に最大で 2500rpm まで上昇する。また、トルクが 100N・M に達したとき、回転数をトルク上昇に合わせて上昇させて、最大 2700rpm でカットオフになるように制御を行っている。タービン 2 の特性は、図 9.27 の通りである。この特性を用いて、500~2000rpm まで 250rpm 毎の特性を計算し、特性曲線を対数グラフで整理した。

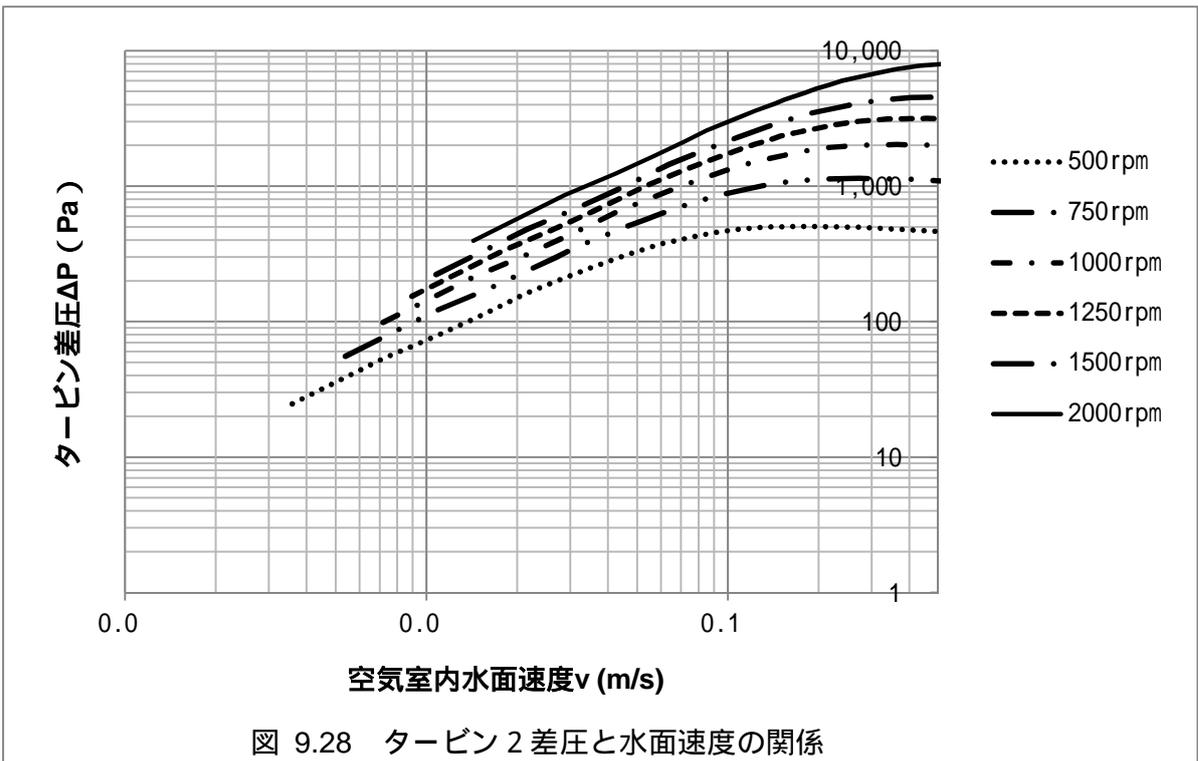
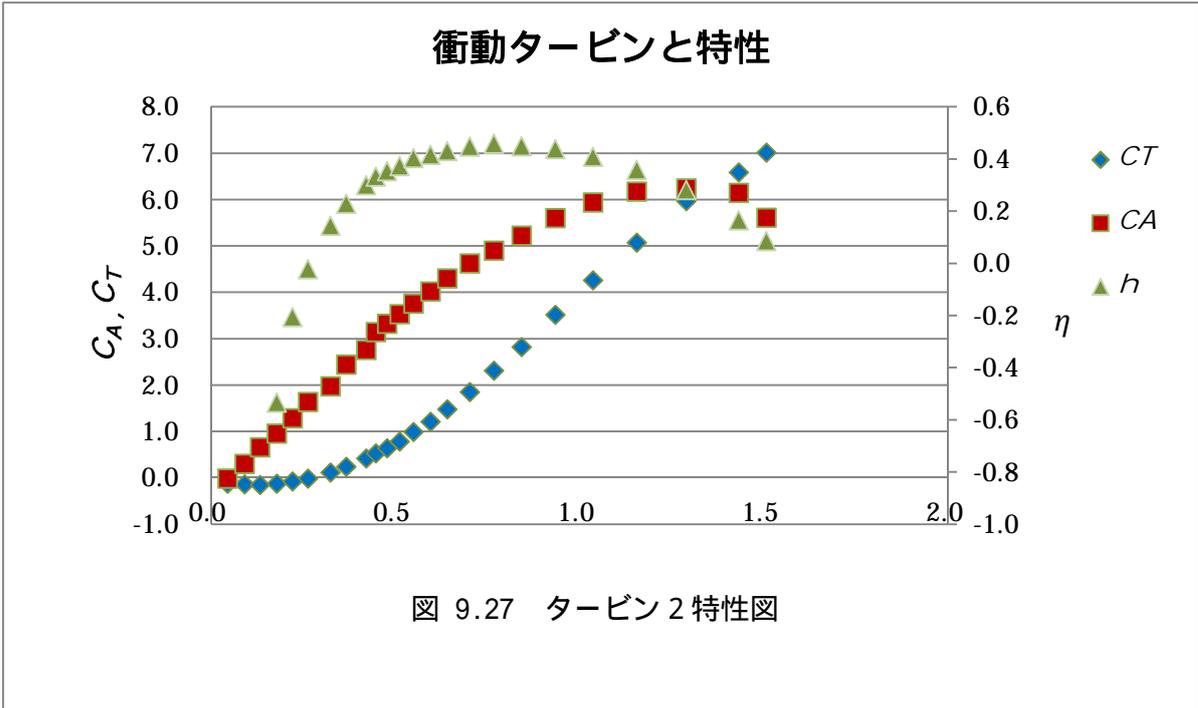


図 9.28, 図 9.29 に回転数毎の水面変動による差圧, タービンの出力を示す。横軸を OWC の水面変動速度, 縦軸をタービンに流入差圧, タービン出力で整理している。実海域のデータから水面変動を逆算し, この図に書き込めば, 実証海域データと整合がとれているか把握できる。

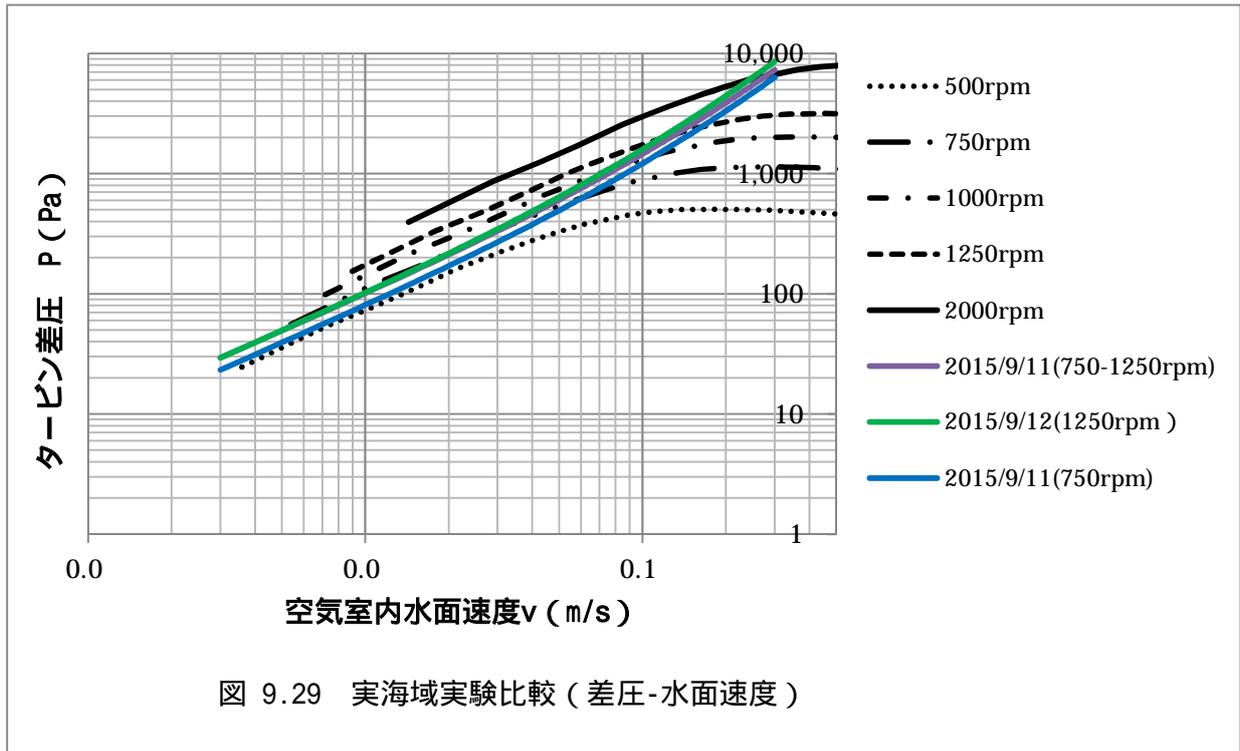
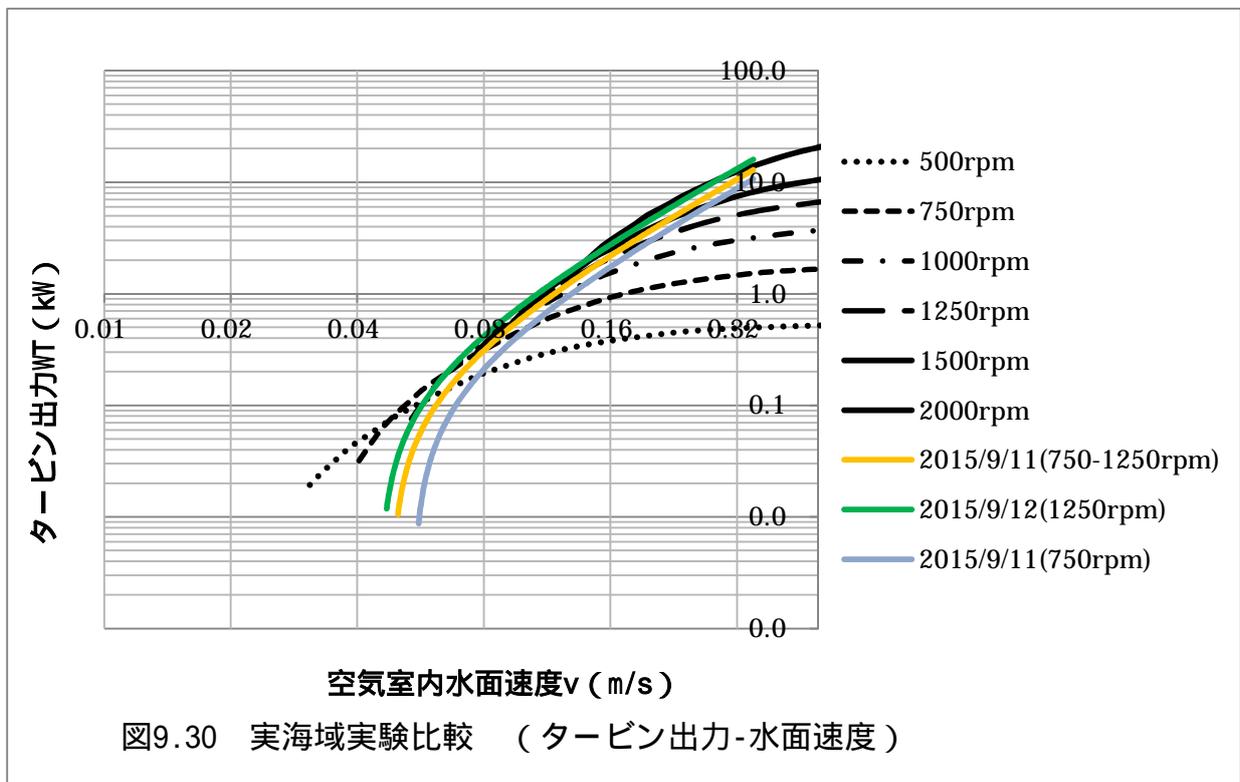


図 9.29 に差圧と水面速度の結果を示す。図より、タービンの特性は実測値と概ね整合がとれていることが分かる。図 9.30 に出力と水面速度の結果を示す。図より、特性実験値と整合しており、タービンは不規則波が混在する実海域においても実験値通りの性能を発揮していることがわかる。



9.4 まとめ

実海域実験における総括を以下に列記する。

酒田港内の入射波高は，沖合から一線防波堤（外防波堤）で半分以下に減衰するが，OWC 設置地点で増幅する。

OWC の波振幅に乱れが生じると発電量が大幅に低下する。

一次変換係数は，構築したシミュレーションプログラムで再現が可能。

発電特性は，押し波と引き波で発電特性が違ふ。これは，タービンへの空気の流出入部の形状の違いによる物であると考えられる。

機械室の空気の流出入面積が当初計画の半分になった影響が発電特性に影響を与えている可能性があったが，空気の出入口が機械室の断面積の 25% 確保されていれば影響はない。

衝動タービンの性能は，設計で想定していた効率 0.4 を満足した，

また，この効率はある程度の風速があれば（膨張比の増減に対して），ほぼ一定であり変動が少ない。

衝動タービンは，タービン径，OWC 流路面積に対し，流量係数が 1.0 前後で最高効率がだせるような設計をしておけば，回転数を調整して，OWC ノズルにマッチングが出来る。

縮小モデルの衝動タービンであっても，トルク係数 C_T ，入力係数 C_A ，効率 の関係が把握できていれば，タービン径の変化に対し，タービン特性が外挿できる。すなわち，設計における一次，二次変換の連成が，これまでの OWC の設計法に比べてかなり簡略化できる。

第10章 Stage4 シミュレーション検証

10.1 概要

前章までのシステム設計法 Stage 1~4 において，高性能波力発電装システムの最終目標値 40 円/kWh を達成できる目処がついた．

しかし，ケーススタディとした酒田港以外の場所を想定して発電装置を設計する場合，シミュレーションで発電量を試算し，発電装置の適用性を検証することが必要である．

一方，これまでの OWC 型波力発電装置における評価は，波エネルギーから空気エネルギーへの一次エネルギー変換側と空気エネルギーから発電への二次エネルギー変換側の検討を個別に行う手法が通例であった．この個別評価法は，最適値を見つけ出すシミュレーションが困難であった．

発電装置としては，発電出力の想定シミュレーションが最重要課題であり，一次変換側と二次変換側がマッチングするための設計ツールの開発が重要であった．

そこで，本章ではシステム設計法構築のための最終ツールである一次，二次連成シミュレーションを開発し，実海域実験結果と比較検証を行った．

10.2 一次変換係数に関する数値解析

Stage 2,3 で構築した PW-OWC の三次元特異点分布法シミュレーションプログラムを使用した理論解析により，実証実験を検証するため，表 10.1 に示すデータテーブルについて，OWC の水面速度と差圧を計算する．

この計算結果は，タービンの負荷を従来のノズルで規定し，装置の入射波（有義波高，有義周期）を想定した PW-OWC の特性である．

表 10.1 計算ケース

$H_{1/3}$ (m)	ノズル比																																			
	1/50				1/100				1/150				1/200				1/250				1/300															
周期 (s)	4.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
	5.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
	6.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
	7.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
	8.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
	9.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5

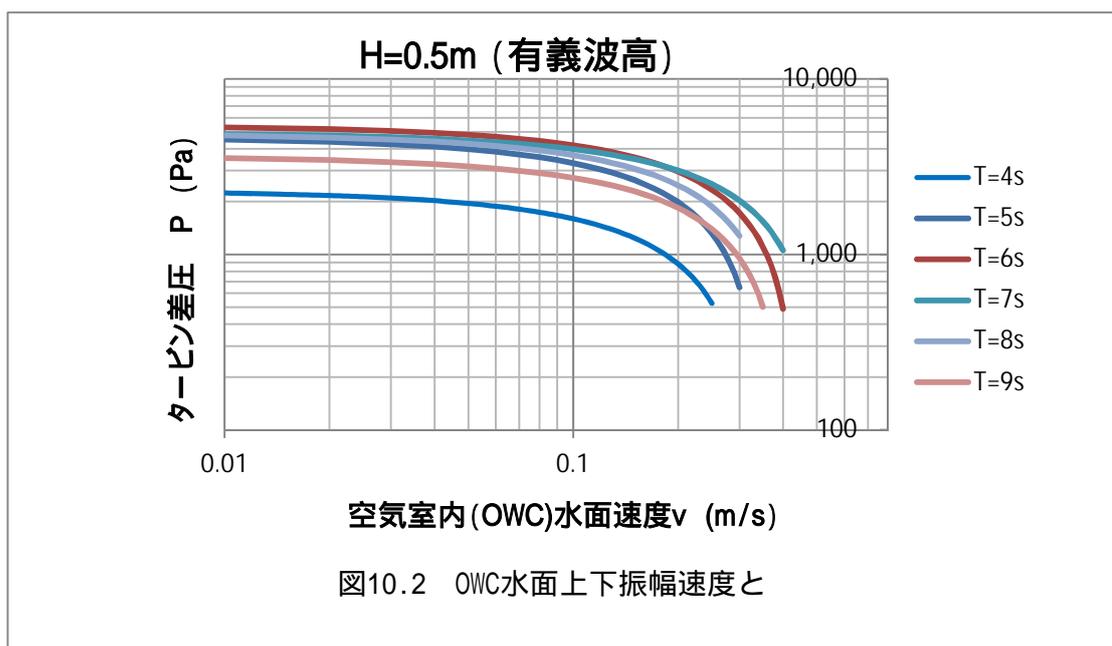
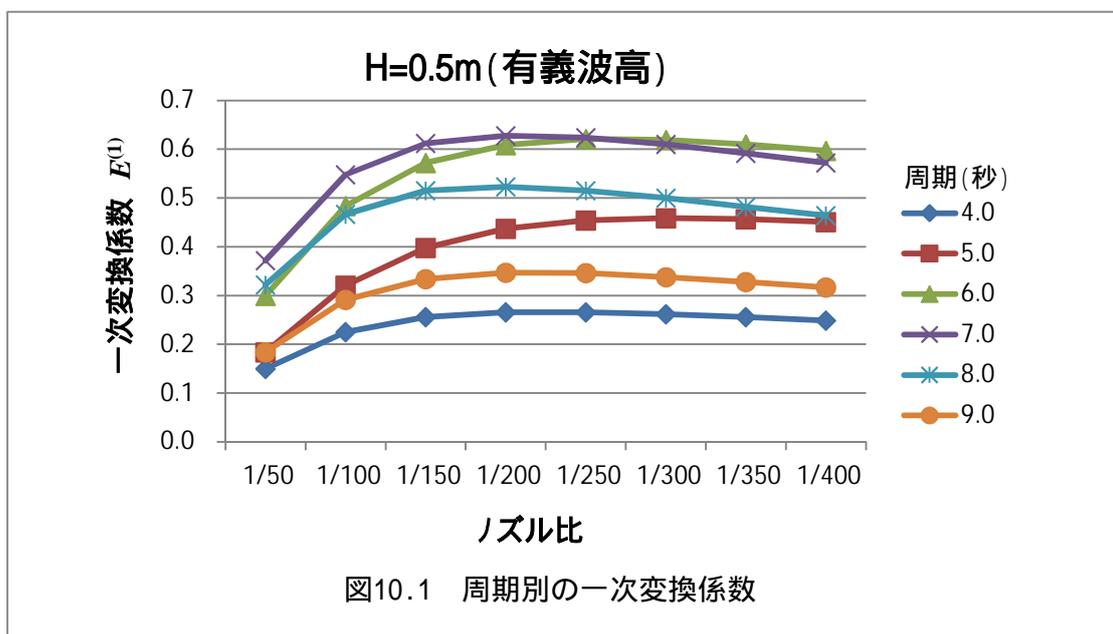
ここで，実海域データの比較については，タービン効率向上のためにタービンを改良した 8/26 以降に取得したデータで行うこととした．

平成 27 年 9 月の発電が認められる波浪条件は，沖波波高が， $H_{1/3}=0.5\text{m}$ ，周期 $T_{1/3}=3\sim 5.0$ 秒のデータが多く確認されている．

そのため，連成の検証については， $H_{1/3}=0.5\text{m}$ ・ $T_{1/3}=5\sim 7$ 秒について，試計算を行い検証する．

図 10.1 は，上述のプログラムを用いて計算した周期別の一次変換係数の結果である．この結果から，有孔ケーソンの PW-OWC の固有周期は 6，7 秒近傍にある．酒田に設置した PW-OWC の発電対象波の周期は，冬季の風浪を想定し 6 秒以上を想定しており，発電施設の計画の妥当性が示された．

また，図 10.2 は，OWC 内部の水面の上下振幅速度とタービンに流入圧(差圧)の計算結果である．

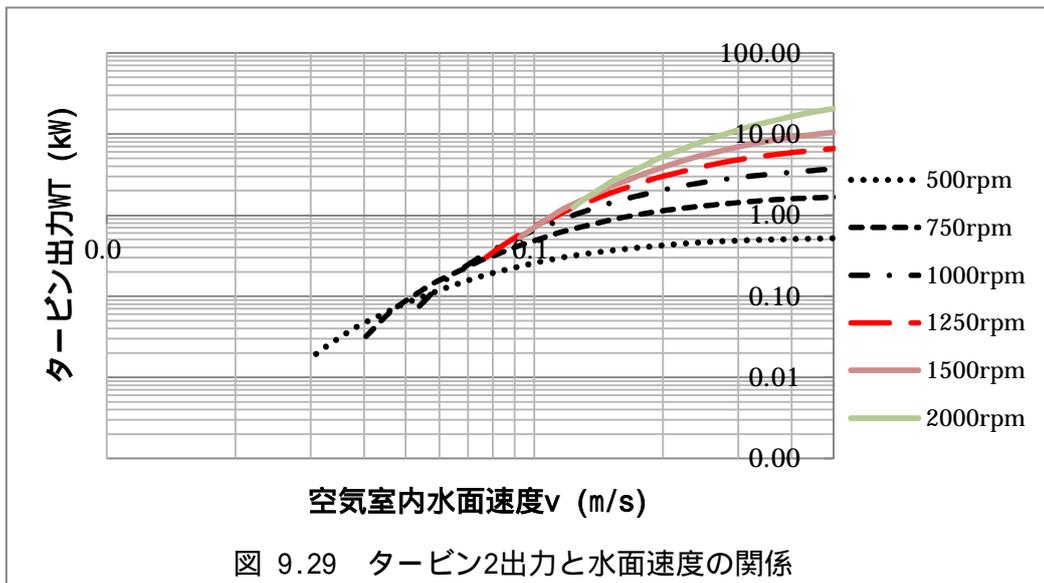
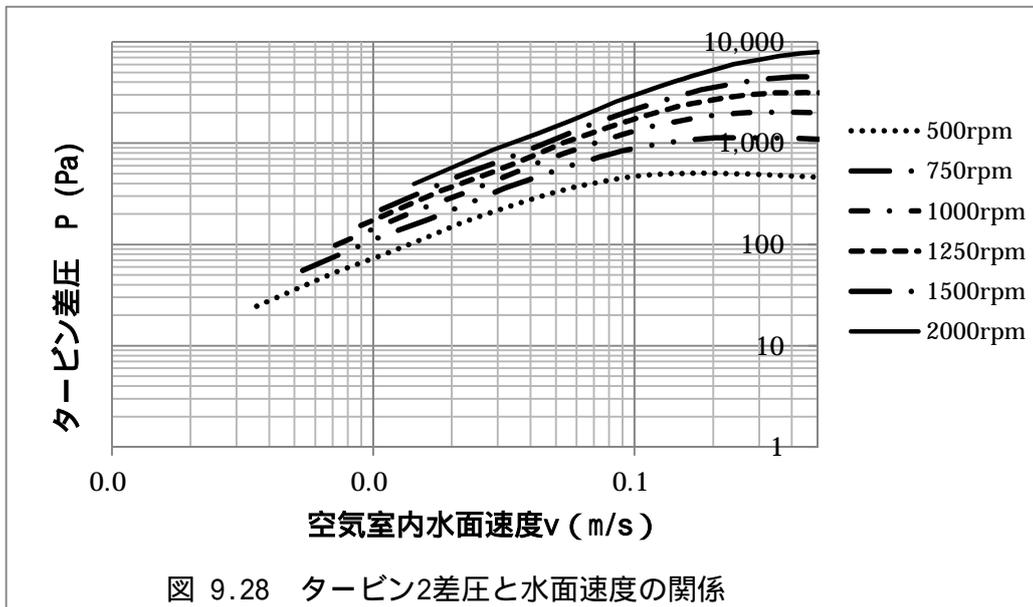


10.3 二次変換特性計算

二次変換に関しては，9章で使用した衝動タービン特性図 9.27 をベースとして算出した図 9.28 に示す水面速度と差圧，図 9.30 に示す水面速度とタービン出力の特性曲線がベースとなる．

この特性カーブは，タービン径 450 のものであるが，タービン径は外挿出来るため，タービン径別の特性図も容易に作成出来るシミュレーションツールを開発した．

衝動タービンについては，佐賀大学瀬戸口¹⁷⁾らが，細部にわたるため形状の研究を行い，大方の基本形状が確立されている．瀬戸口らの基本形状の特性をもとに，タービンの径別に外挿計算を行うことにより，特性が把握できる．



10.4 連成図式解法の妥当性の検証

10.4.1 図式解法（タービン特性との連成）

9月28,29日のデータをベースに図10.3に有義周期4秒,5秒6秒,7秒,8秒,における図式解法の結果を示す。タービンの性能曲線と特異点分布法で求めた曲線の交点水面速度を読み取り, 図10.4の出力図から出力を算出した。図式解法で求めたタービン出力の結果を表10.2に示す。

図10.5は, 実証実験データを用いてFFT解析を行い整理した沖波波高と発電出力である。この図は, 港内波高のため, ばらつきはあるものの図式解法で求めた発電出力とほぼ同等であることが分かる。

これにより, 衝動タービンにおいては, 連成ができており, 図式解法による出力推定法が妥当であることが示された。

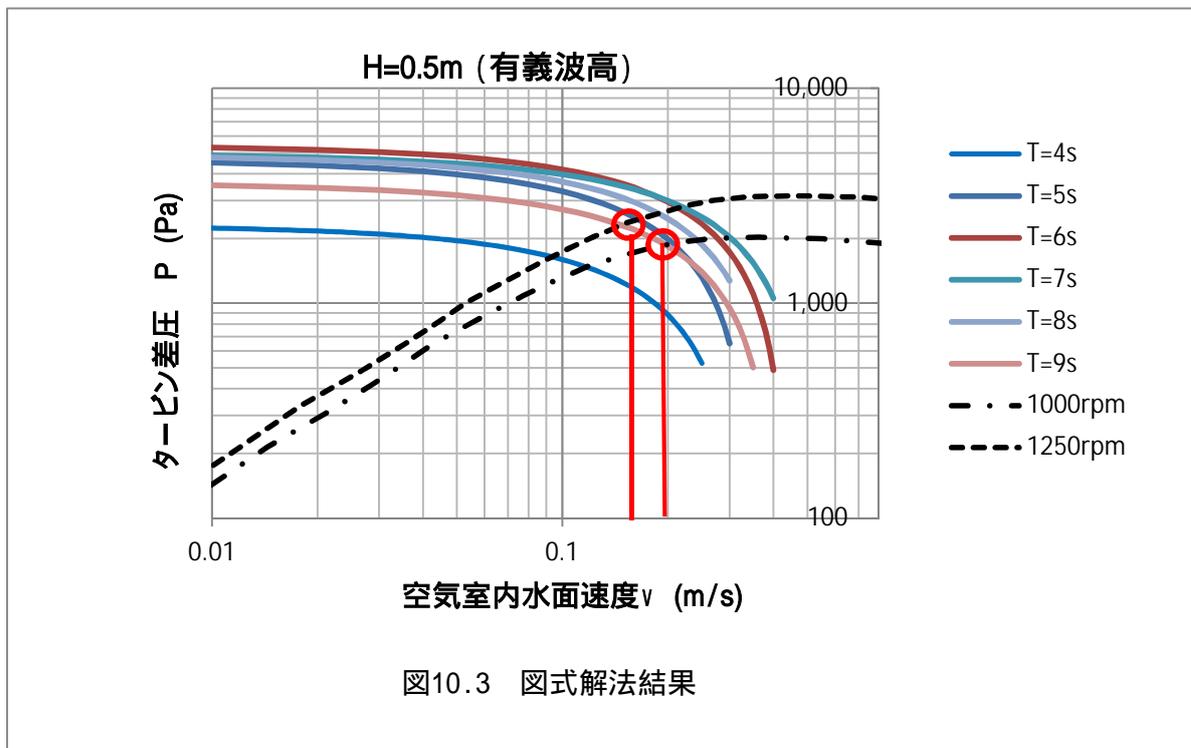
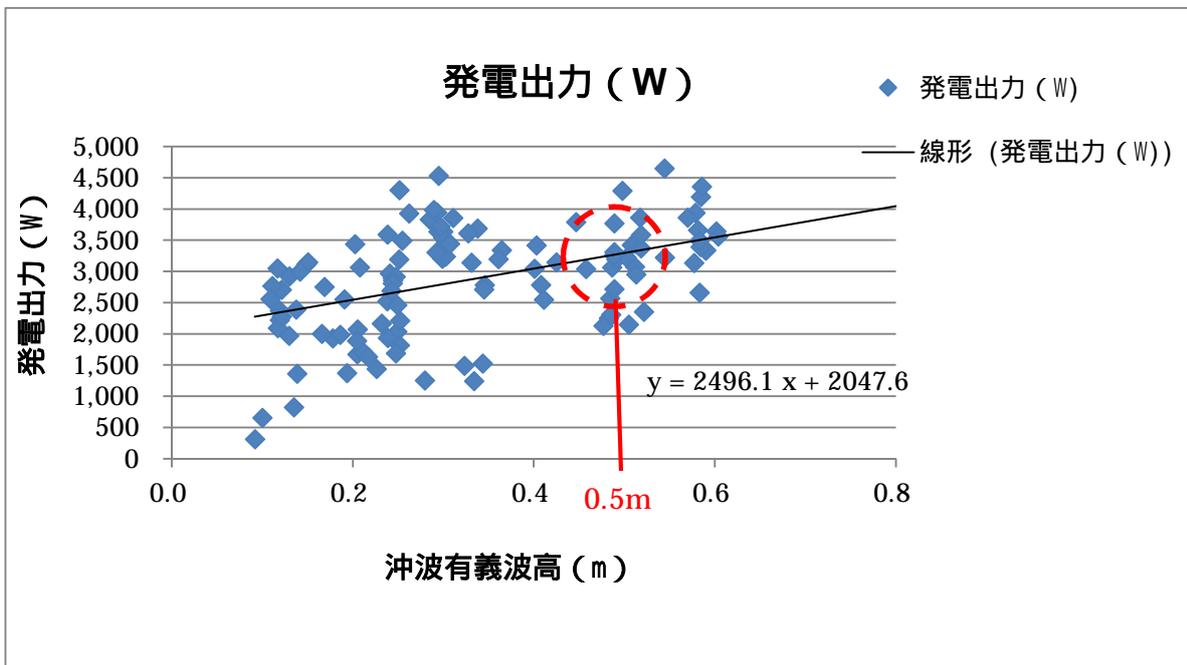
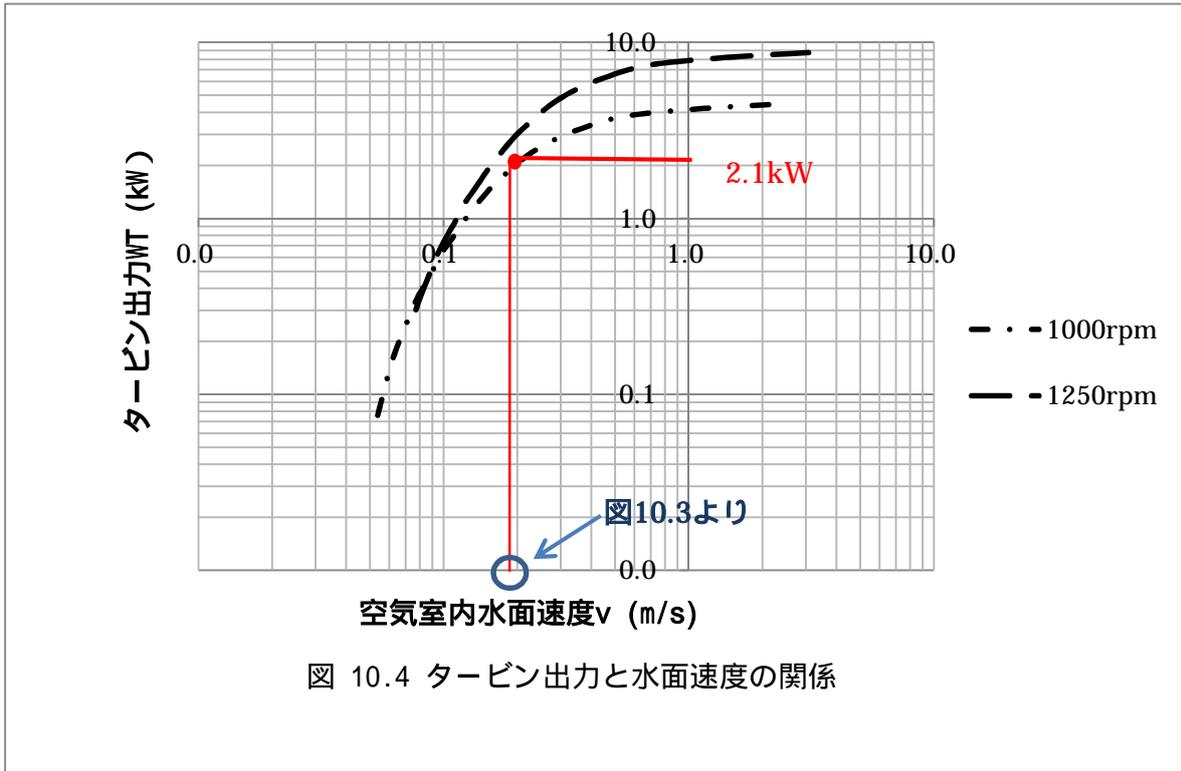


表 10.2 H1/3 の時の発電出力 (w)

	1000rpm	1250rpm
T=4s	720	500
T=5s	2100	2000
T=6s	2700	3050
T=7s	3000	3070
T=8s	2500	3000
T=9s	2100	1800



10.5 まとめ

酒田の実証実験の計測データをもとに開発した出力想定ツール(連成解析法)により、波浪データから発電装置の出力を容易に想定できる設計法を開発した。以下にまとめを列記する。

最適化された衝動タービンをベースに、その特性が外挿可能である。発電効率を向上させるためには、衝動タービンの効率、トルク係数が最大値に近づくように、タービンの回転数を制御することが重要である。PW-OWC の三次元特異点分布法のシミュレーションプログラムを完成させた。

三次元特異点分布法の結果より、有効ケーソン上の波力発電装置の固有周期は、6 秒前後である。

連成手法による実証実験との整合性の検討を行った結果、実海域のデータと合致していることを確認した。

三次元特異点分布法の計算結果と衝動タービンの特性を反映した図式解法で一次、二次変換を連成させる手法を確立した。この手法により、一次、二次連成系の最適設計が可能となった。

第11章 結論

11.1 結論

本研究では、従来の振動水柱（OWC）型波力発電装置に比べて、高性能な波力発電装置の実用化をめざした研究を行った。

実用化にあたっては、発電コストの低減と、OWC 型発電装置の高効率化が課題であった。

そこで、著者は、建造コスト廉価策としての後付けタイプの発電装置の提案を、発電効率向上対策としてのプロジェクティングウォールの提案を行って、この 2 つの課題の解決を図った。課題解決の施策としては、TRL や Stage Gate を参考としたシステム設計法の構築を研究課題として、Stage 1 から Stage 4 の 4Step で課題解決を図った。Step 1 では、コンセプトの構築、Step 2 では、小規模模型、Step 3 では、大規模実験、最終の Step 4 では、山形県酒田港において、実証機を設置して装置の検証実験を行い、種々の課題を克服した。

具体的には、PW-OWC 型波力発電装置のエネルギー変換性能、後付けユニットタイプの安全性、構造・システム設計、衝動タービン（二次変換）と一次変換側のマッチングの検討などである。

以上より、発電単価 40 円/kWh が達成可能な、高性能振動水柱型波力発電装置の実用化に関する、計画・設計、性能評価、架設、維持管理などの一連の技術課題の解決を図るためのシステム設計法が確立できた。

この成果により、今後、様々な海域において、高性能振動水柱型波力発電装置の計画に本システムが活用され、波力発電装置が普及（実用化）することを望む。本研究における各 Stage の検討結果を以下に記す。

11.1.1 Stage1 コンセプトの提案

本章では、従来の単一 OWC 波力発電装置に比して高効率である多重共振（PW-OWC）型波力発電装置について、その諸元設計方法を提案した。さらに諸元設計の結果を基に発電単価の数値目標に対する経済性の検討を行った。検討項目は以下のとおりである。

- ① 多重共振型波力発電装置の発電出力の推定において、特異点分布法による一次変換推定プログラムを構築した。
- ② 二次変換に関し、衝動タービン特性曲線を径別に外挿可能なプログラムを開発し、これをベースに特異点分布法により算出した一変換結果のマッチングを図り、OWC 内の水面上下運動の速度と差圧を図式解

法によりマッチングさせる方法を構築した。

- ③ 諸元設計の結果に基づいて、数値目標である発電単価 40 円/kWh を達成するための多重共振波力発電装置のコスト試算を行い、建造コストは 4 億円程度に抑える必要があることを確認した。
- ④ 建造コストに対する発電単価の変動試算を行った結果、発電単価の低減において、従来の発電効率重視の検討に加えて初期設計の段階から建造コストの低減策を考慮した装置の検討が重要であることを確認した。

11.1.2 Stage 2,3 水槽実験による技術課題の検証

Stage 2 では、PW-OWC 装置のエネルギー変換特性および安全性の検証を目的に行った 1/26 および 1/6.7 模型による検証実験について述べた。

結果を下記の通り列記する。

- ① 既往の振動水柱型波力発電システムの研究事例を参考に PW-OWC の設計法について整理を行った。
- ② 水槽実験により、多重共振型波力発電装置付加状態での安全性の確認を行い、これまでの港湾基準に従った設計法で問題が無いことを確認した。
- ③ OWC 内の波の上下運動による衝撃空気圧は、既往の研究成果より $1.0W_0H_{\max}$ とした。
- ④ 既存のケーソンに、PW-OWC を取りつけた際の性能について検討した。その結果、今回の条件下において、PW-OWC は OWC のみと比較し一次変換係数が 1.5 程度大きくなることがわかった。
- ⑤ 装置の波圧強度として合田式が適用出来る事を確認した。
- ⑥ 一次変換係数は、大規模実験の結果のほうが、中規模実験よりも 2 割～3 割小さくなる傾向を示した。このことから、小型模型実験では、変換効率を過大に見積もる可能性があるので注意が必要である。
- ⑦ 衝動タービンは、往復流においてトルクが安定し、本装置の発電システムとして有効な機器である。
- ⑧ 既存のタービンをを用い効率を検討した結果、OWC の形状に即したタービンの選定が臨まれる。

11.1.3 Stage 4 実証実験によるシステム設計法の妥当性の検証

(1) 装置の実証海域適用前の特性検証

酒田港内護岸にある既存の遊水室を有する有孔ケーソンに OWC 装置を設置する場合の発電特性について検証を行った。結果をまとめると以下ようになる。

- ① PW-OWC 型波力発電装置のユニットを既設の有孔ケーソン(消波護岸)に設置するコンセプトを構築した。(遊水室の有効活用)
- ② 有孔ケーソン設置型の OWC 発電装置は,これまでの PW-OWC 型と同様に多重共振する事を確認した。
- ③ 有孔ケーソンの遊水室の貫通部の小孔の影響(エネルギーロス)は,7 秒以上の長周期の入射波に対し,孔が大きい場合(開放)の場合の 20%程度であることが明らかになった。
- ④ 有孔ケーソン付近の波浪状況は,一線防波堤の 20%程度に減衰するが,発電装置の発電コストは 40 円/kWh を満足する。

(2) 発電装置の設計

酒田港の有孔ケーソン設置タイプの波力発電装置の設計について,検討を行った結果を以下に示す。

- ① 後付けユニットで固定式である発電装置の設計法を提案し,設計の妥当性を検証した。
- ② 設計に際しては,既設の港湾基準など既往のスペックを採用した。
- ③ 既設有孔ケーソンにおいて,ユニットを搭載することで,風圧,波圧の受圧面積が増大するが,死荷重が増大するため,安全性が損なわれない結果となった。
- ④ 構造決定において,最も過酷な荷重ケースは,引き波時である。酒田港の有孔ケーソン設置型の OWC 装置の構造設計,電気制御設計を行い,製作図を作成した。結果,発電装置の総重量は 37.7t となった。
- ⑤ 発電時の安全装置として,パワーシリンダーによる圧抜きと発電機・タービン制動装置の二重化を行った。

(3) 発電装置の施工

- ① 波力発電装置を既設ケーソン設置する試みは初めてであったが，事故も無く安全に設置ができた．
- ② 実証機の設置に際し，国土交通省，経済産業省など関連監督官庁への様々な手続きが必要となる．特に波力発電装置は，電気事業法上の小規模発電所の認可が必要となり，これらの諸手続は，前例がなく，手続手順が存在しなかったが，手続手順を構築した．
- ③ 陸上からの架設を前提に，波力発電装置の設計を行って，実際に装置を陸上から設置した．陸上架設は，荒天の影響を受けにくく，架設の効率が向上することを証明した．さらに，陸上架設は，海上起重機での施工に比して設置費用の大幅な低減が可能となった．
- ④ 発電装置の躯体はブロックをトラック輸送が可能な単位のブロックとした．このことにより，架設ブロックの陸送が可能となり，荒天日数が多い，秋口～冬場にかけての海上輸送のリスクを回避できた．
- ⑤ 年間を通して荒天日数が多くなる晩秋から初冬の設置工事となったが，上述の結果のように設計および施工法を工夫することで，事故も無く安全に設置ができた．

(4) 実海域における発電特性

有孔ケーソン上に波力発電装置を設置し，実証実験を行った．

- ① 酒田港内の入射波高は，沖合から一線防波堤（外防波堤）で半分以下に減衰するが，OWC 設置地点で増幅する．
- ② OWC の波振幅に乱れが生じると発電量が大幅に低下する．
- ③ 一次変換係数は，構築したシミュレーションプログラムで再現が可能．
- ④ 発電特性は，押し波と引き波で発電特性が違う．これは，タービンへの空気の流出入部の形状の違いによる物であると考えられる．
- ⑤ 機械室の空気の流出入面積が当初計画の半分になった影響が発電特性に影響を与えている可能性があったが，空気の出入口が機械室の断面積の 25%確保されていれば影響はない．
- ⑥ 衝動タービンの性能は，設計で想定していた効率 0.4 を満足した，
また，この効率はある程度の風速があれば（膨張比の増減に対して），
ほぼ一定であり変動が少ない．
- ⑦ 衝動タービンは，タービン径，OWC 流路面積に対し，流量係数が 1.0

前後で最高効率がだせるような設計をしておけば，回転数を調整して，OWC ノズルにマッチングが出来る．

- ⑧ 縮小モデルの衝動タービンであっても，トルク係数 C_T ，入力係数 C_A ，効率 の関係が把握できていれば，タービン径の変化に対し，タービン特性が外挿できる．すなわち，設計における，一次，二次変換の連成が，これまでの OWC の設計法に比べてかなり簡略化できる．

(5) 構築したシミュレーションの検証結果

Stage 1～4 のシステム設計法の検証の結果，システム設計法ならびにシミュレーションプログラムなどのツールが構築出来た．以下まとめを列記する．

適化された衝動タービンをベースに，その特性が外挿可能である．発電効率を向上させるためには，衝動タービンの効率，トルク係数が最大値に近づくように，タービンの回転数を制御することが重要である．PW-OWC の三次元特異点分布法のシミュレーションプログラムを完成させた．

三次元特異点分布法の結果より，有効ケーソン上の波力発電装置の固有周期は，6 秒前後である．

連成手法による実証実験との整合性の検討を行った結果，実海域のデータと合致していることを確認した．

三次元特異点分布法の計算結果と衝動タービンの特性を反映した図式解法で一次，二次変換を連成させる手法を確立した．この手法により，一次，二次連成系の最適設計が可能となる．

謝辞

本研究は、国立開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構の資金援助を受け、エム・エムブリッジ株式会社(旧 三菱重工鉄構エンジニアリング株式会社)と東亜建設工業株式会社を代表者とする波力発電コンソーシアムとの共同研究の成果の一部です。

最後に、本論文をまとめるに当たり、細部にわたってご指導を賜りました日本大学工学部 増田光一教授、理論の理解・計算についてのご指導を賜りました 居駒知樹教授、研究の真意をつく適格なご指導を賜りました 前田久明教授、恵藤准教授に、深く感謝申し上げます。

更に、私が有職者として研究を続けるうえで、多大なご協力とご理解を頂いた下記波力発電コンソーシアムの方々に心より感謝致します。

会社関係では、私の研究生活に深いご理解を承りましたエム・エムブリッジ株式会社の逸見社長、岸部長他社員の方々、そして、細川技術顧問及び小川主席には、同じ波力発電コンソーシアムのメンバーとして、研究及びコンソーシアムの運営に多大な協力を頂きました。コンソーシアムを運営した5年間の間には、分社、社名変更、株式譲渡による会社形態の変更など様々な境遇の中、コンソーシアムの責任会社として、NEDO 研究採択者で唯一実証実験にこぎ着けましたのは、両名の尽力が非常に大きかったと思います。誠にありがとうございます。

また、研究生活を進めるにあたり、社会人ドクターコースへの入学の勧め、5年前の平成23年から、様々なご助力を頂いた国立研究開発法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)海洋技術開発部大澤弘敬氏、宮崎剛氏に深く感謝致します。

最後になりましたが、本論文を作成するにあたり、忙しい時期にもかかわらず図の作成、体裁チェック等、さらには、発表パワーポイントの作成にご協力頂いた日本大学海洋空間利用研究室 D2 渡邊由香さん、村田一城くん、M2 高畠まどかさん、榎本修くん、清水研くん、星野智史くん、そして、FFT 解析などのデータ処理の手伝いをして頂いた、渋谷省吾くん他皆さまに心より感謝致します。

平成 26-27 年度 波力発電（空気タービン式発電）コンソーシアム 検討会

（ コンソーシアムリーダー）

細川 恭史	エム・エムブリッジ(株)	技術部	技術顧問
木原 一禎	〃		部長代理
古田 大介	〃		部長代理
小川 良亮	〃	営業部	部長代理
中村 忠之	有限会社 エムシーテック		担当部長
近藤 英章	三菱重工マシナリーテクノロジー		担当部長
泰 正成	〃		担当課長
遠藤 久美雄	東亜建設工業(株) 土木事業本部		副本部長
金谷 泰邦	〃		部長
坂本 辰哉	〃		部長
井上 博士	〃	設計部	部長
瀬戸口 俊明	佐賀大学 海洋エネルギー研究センター		教授
永田 修一	〃		教授
高尾 学	松江工業高等専門学校 機械工学科		教授
増田 光一	日本大学 理工学部 海洋建築工学科		教授
居駒 知樹	〃		教授
下迫 健一郎	国立研究開発法人 港湾空港技術研究所		特別研究官
大澤 弘敬	国立研究開発法人 海洋研究開発機構 運行管理部		部長
宮崎 剛	〃	海洋技術開発部	グループリーダー代理
菅原 禎	(株)本間組 東京本社 規格設計部		部長
五十嵐 秀樹	〃		部長代理
渡辺 匠	〃		部長代理
笛木 隆行	〃 東北支店 酒田営業所		所長
太田 豊彦	(株)エイ・エス・アイ総研 航空宇宙エンジングループ		グループ長
山口 広	〃		顧問
天沼 光博	〃		課長

参考文献

- 1) 高橋重雄, 安達宗, 中田博昭, 大根田秀明, 加藤久雄, 鹿籠雅純: 波力発電ケーソン防波堤の現地実証試験における観測データの解析結果, 港湾技術研究所, 港湾技術研究所報告, VOL.31, No.2, pp.21-54, 1992.6.
- 2) 大澤弘敬, 鷺尾幸久, 宮崎剛, 堀田平, 宮崎武晃: 波浪エネルギー利用技術の研究開発—沖合浮体式波力装置「マイティール」の開発—, 海洋科学技術センター (JAMSTEC), 2004.3.
- 3) 振動水柱型波力装置の技術マニュアル, 海洋科学技術センター (JAMSTEC), 2004.3.
- 4) 港湾技術研究所における波エネルギーに関する研究-波力発電ケーソン防波堤の開発, 運輸省港湾技術研究所水工部波エネルギー研究室, 1988.
- 5) 居駒知樹, 大澤弘敬, 増田光一, 富沢裕也: 人工ハーバー付 OWC 型波エネルギー吸収装置に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第8号, pp.119-122, 2009.5.
- 6) NEDO 平成 23~24 年成果報告書 海洋エネルギー発電技術の性能実験方法などの検討, pp.116, 2013.3.
- 7) S. Raghunathan, "The Wells Air Turbine for Wave Energy Conversion", Progress in Aerospace Sciences, Vol.31, pp.335-386, 1995.
- 8) 高尾学, 木上洋一, 瀬戸口俊明, 金子賢二, 永田修一: エンドプレートによるウエルズタービン性能の改善, 日本機械学会論文集(B編), 72巻, 722号, pp.2381-2385, 2006.10.
- 9) 瀬戸口俊明, 高尾学, 木上洋一, 金子賢二, 井上雅弘: 波力発電用衝動タービンに関する研究, 日本機械学会論文集(B編), 65巻, 629号, pp.255-261, 1999.1.
- 10) T. Setoguchi, M. Takao, S. Santhakumar and K. Kaneko, "Study of an Impulse Turbine for Wave Power Conversion: Effects of Reynolds Number and Hub-to-Tip Ratio on Performance", Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.126, No.2, pp.137-140, 2004.5.
- 11) M. Takao, T. Setoguchi, K. Kaneko, S. Raghunathan and M. Inoue, "Noise Characteristics of Turbines for Wave Power Conversion", Proceedings of the Institution on Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Vol.216, No.A3, pp.223-228, 2002.6.
- 12) 高尾学, 鈴木正己, 佐藤栄治, 永田修一, 豊田和隆, 瀬戸口俊明: 波力発電用衝動タービンの実海域実験, ターボ機械, Vol.36, No.12, pp.766-772, 2008.12.
- 13) Manabu Takao, Eiji Sato, Shuichi Nagata, Kazutaka Toyota, Toshiaki Setoguchi, "A Sea Trial of Wave Power Plant with Impulse Turbine", Proceedings of 27th

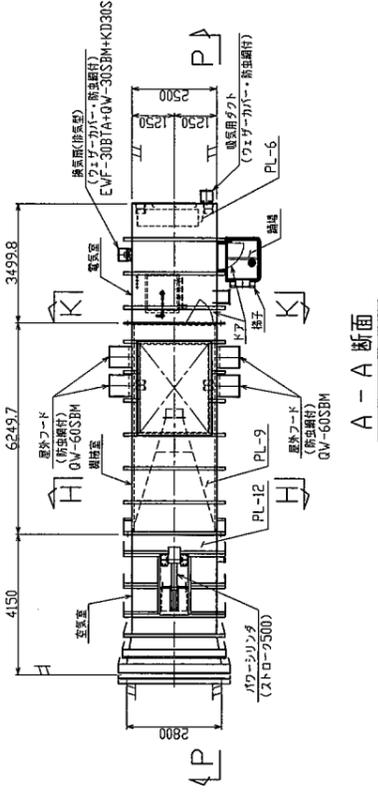
- International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2008), Estoril, Portugal, Paper No. OMAE2008-57535, 2008.6.
- 14) 大澤弘敬, 宮崎剛, 宮島省吾: 沖合浮体式波力装置「マイティ-ホエール」の流体力学的特性と発電出力特性, 日本造船学会論文集, 196号, pp.115-122, 2004.12.
 - 15) 大澤弘敬, 居駒知樹, 増田光一, 藤田裕貴, 生貝真理子, 市村将太: 人工ハーバー付 OWC 型波エネルギー吸収装置に関する研究-第2報 3次元影響とハーバーの効果-, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第10号, pp.263-266, 2010.5.
 - 16) 大澤弘敬, 鷲尾幸久, 宮崎剛, 堀田平, 宮崎武晃 (JAMSTEC): 波浪エネルギー利用技術の研究開発-沖合浮体式波力装置「マイティ-ホエール」の開発-, 海洋科学技術センター, 2004.3.
 - 17) T. Setoguchi, S. Santhalar, H. Maeda, M. Takao, K. Kaneko, "A review of impulse turbines for wave energy conversion", Renewable Energy 23, pp261-292, 2001.6.
 - 18) 運輸省港湾技術研究所水工部波エネルギー研究室監修: 港湾技術研究所における波エネルギーに関する研究-波力発電ケーソン防波堤の開発, 1988.
 - 19) 国土交通省 港湾局 全国港湾波浪情報, 1992~2007年データ
 - 20) 運輸省第一港湾建設局(財) 沿岸開発技術研究センター, 波エネルギー吸収型防波堤実証試験調査 函体の細部設計, 1988.3.
 - 21) 運輸省第一港湾建設局(財) 沿岸開発技術研究センター, 波エネルギー吸収型防波堤実証試験調査 函体の応力解析, 1988.3.
 - 22) 日本港湾協会 港湾施設の技術上の規準・同解説 平成19年9月
 - 23) (財) 沿岸開発技術研究センター 防波堤利用による波力発電の実用化に関する研究 報告書 1995年3月
 - 24) 小島朗史, 合田良実, 鈴村諭司: 波力発電ケーソンの空気出力効率の解析 - 波エネルギーに関する研究 第1報 -, 港湾空港技術研究所報告, Vol.022, No.03, pp.125-158, 1983.9.
 - 25) 大森光: OWC 型波エネルギー変換装置のプロジェクティングウォール効果に関する研究, 日本大学理工学部 海洋建築学科, 修士論文, 2012.
 - 26) 大森光, 増田光一, 居駒知樹, 大澤弘敬, 宮崎剛, 木原一禎: OWC 型波エネルギー変換装置のプロジェクティングウォールが一次変換性能に与える効果に関する研究: 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, PPI-120_I-125, 2013.9.
 - 27) 武田将英, 有川太郎, 窪田幸一郎, 下迫健一郎, 五十嵐学, 加藤大, 金谷泰邦: 波力発電装置波浪実験に関する大規模模型の製作過程, 土木学会論文集

- B3 (海洋開発) , Vol.69 , No.2 , pp I-103_I-108 , 2013.9.
- 28)宮崎剛 , 大澤弘敬 , 松浦正己 : プロジェクティングウォール付振動水柱型波力発電装置の一次変換性能に関する検討 , 日本船舶海洋工学会講演会論文集 , 第 16 号 , pp.437-440 , 2013.5.
- 29)木原一禎 , 細川恭史 , 大澤弘敬 , 宮崎剛 , 下迫健一郎 , 増田光一 , 永田修一 , 金谷泰邦 : ユニット型空気タービン式発電装置 (PW-OWC) の開発 , 土木学会論文集 B3 (海洋開発) , Vol.70(2) , No.2 , pp.1_97-1_102 , 2014.10.
- 30)田口裕之 : 防波堤に設置された振動水柱型波力発電装置の一次変換性能に関する研究 , 日本大学理工学部 海洋建築学科修士論文 , 2013.
- 31)居駒知樹 , 増田光一 , 惠藤浩朗 , 田口裕之 , 大澤弘敬 , 木原一禎 : プロジェクティングウォールが OWC 型波エネルギー変換装置の一次変換性能に与える効果 - 第 3 報 周辺護岸の影響 - , 日本船舶海洋工学会講演会論文集 , 第 18 号 , pp.555-558 , 2014.5.
- 32)国土交通省 港湾局 全国港湾波浪情報 1992 ~ 2007 年 データ
- 33)酒田港港湾計画資料 - 改訂 - , 1993.3.
- 34)運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所 酒田港設計計算書 北港地区・埋立護岸 昭和 57 年 3 月
- 35)運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所 波エネルギー吸収型防波堤実証試験調査 函体の応力解析 昭和 63 年 3 月
- 36)運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所 酒田港設計計算書 北港地区・埋立護岸 昭和 57 年 3 月
- 37)鋼道路橋塗装便覧 (社)日本道路協会 平成 26 年 3 月
- 38)瀬戸口俊明 , 高尾学 , 板倉邦輔 , 金太昊 , 金子賢二 , 井上雅弘 : 取付け角を有する波力発電用空気タービンに関する研究 , 日本機械学会論文集 (B 編) 67 巻 , 660 号 , pp.145-150 , 2001.8.

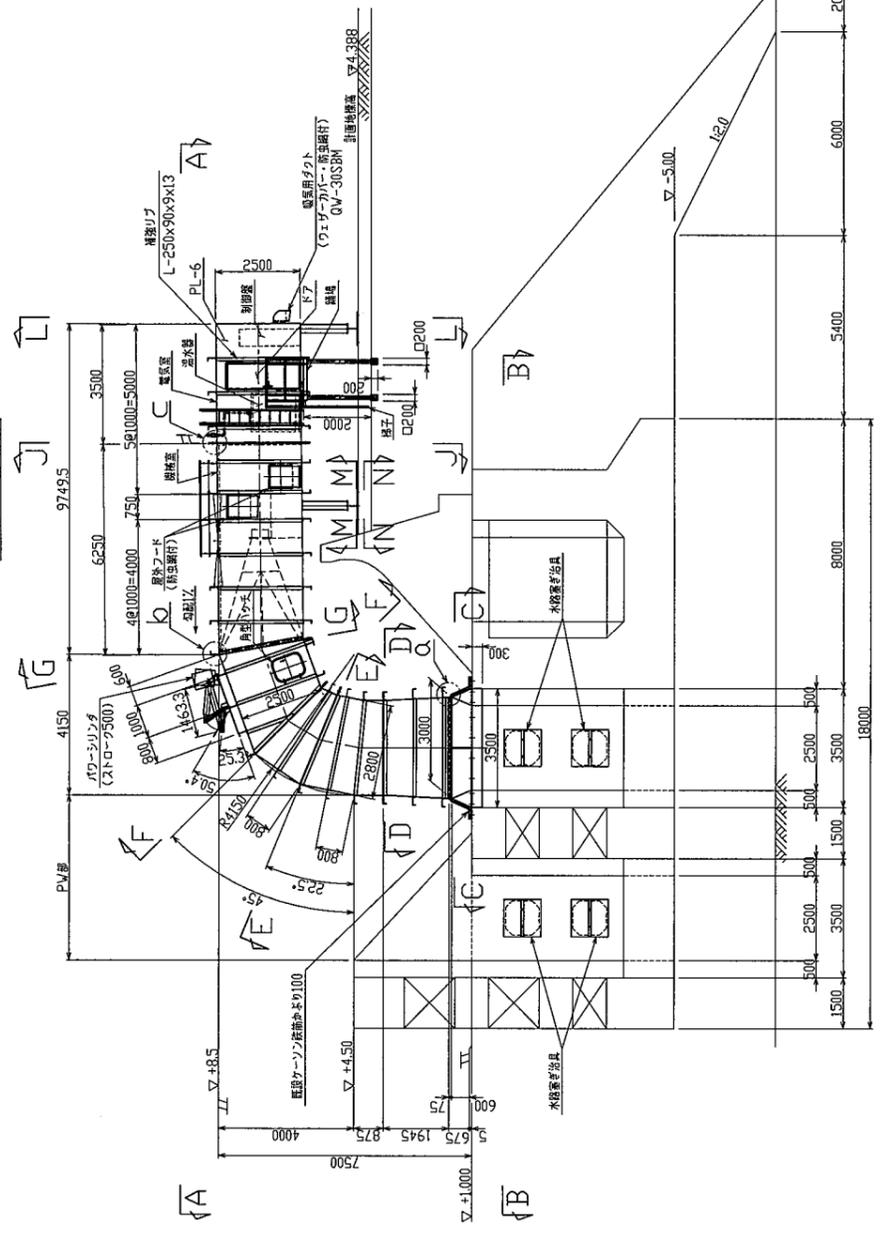
付録 1 PW-OWC 型波力発電装置図面

酒田空気タービン式波力発電装置 図面

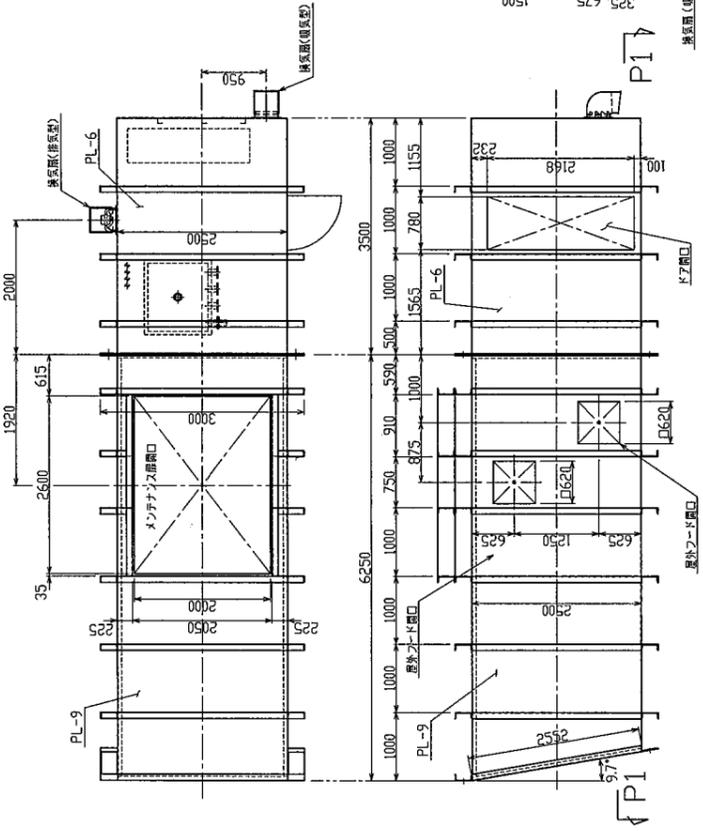
ページ	図面名称
1	躯体構造一般図(その1)
2	躯体構造一般図(その2)
3	躯体構造一般図(その3)
4	基部空気室及び下部空気室詳細図
5	中間下部空気室詳細図
6	中間部空気室詳細図
7	上部空気室詳細図
8	機械室詳細図(その1)
9	機械室詳細図(その2)
10	電気室詳細図(その1)
11	電気室詳細図(その2)
12	吸音材取付詳細図
13	架設架構詳細図
14	ドア詳細図
15	梯子踊場詳細図(その1)
16	梯子踊場詳細図(その2)
17	梯子踊場詳細図(その3)
18	サポート詳細図
19	水路塞ぎ治具詳細
20	計測器用座詳細図(その1)
21	計測器用座詳細図(その2)
22	計測器用座詳細図(その3)
23	躯体貫通材詳細図
24	点検梯子詳細図(基部、下部空気室)
25	点検梯子詳細図(中間下部、中間部空気室)
26	点検梯子詳細図(上部空気室)
27	パワーシリンダメンテナンスデッキ詳細図
28	制御盤及び温水器台座詳細
29	角型ハッチ詳細図
30	ゴムパッキン詳細図
31	温水器用配管詳細
32	アース用ボルト配置図
33	タービン・ブレイキ及び発電機共通台板詳細図(その1)
34	タービン・ブレイキ及び発電機共通台板詳細図(その2)
35	波力発電機装置(その1)
36	波力発電機装置(その2)
37	波力発電機装置(その3)
38	波力発電機装置(その4)
39	タービン本体図
40	タービンマニホールド詳細図
41	基部フランジ形状変更詳細図



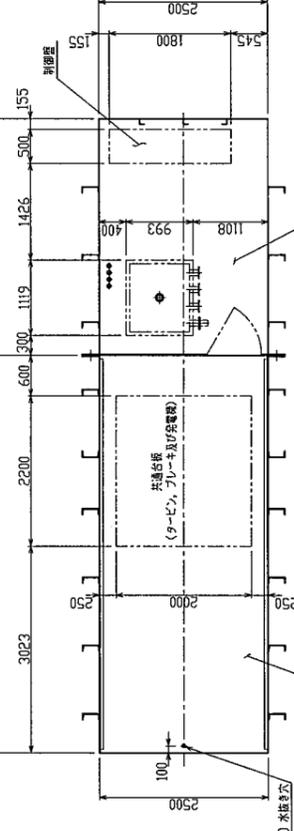
A-A断面



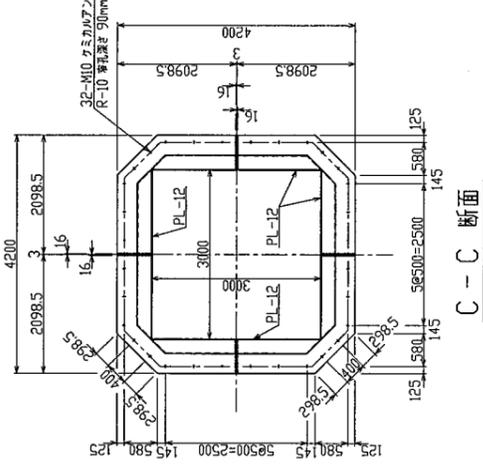
P-P断面



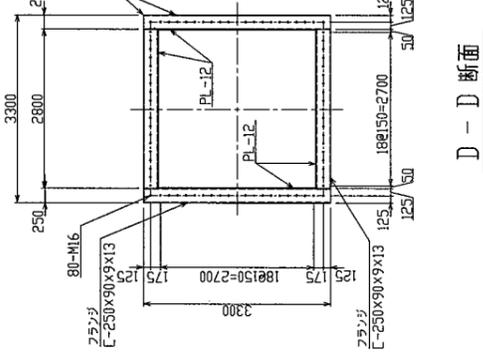
P1-P1断面



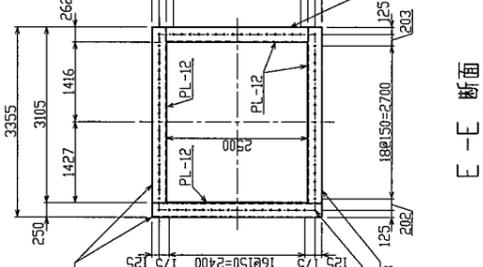
P2-P2断面



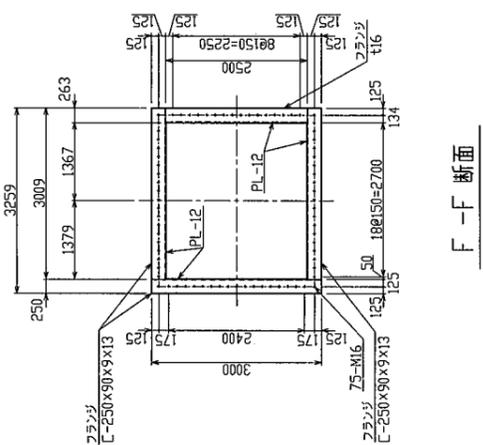
C-C断面



D-D断面

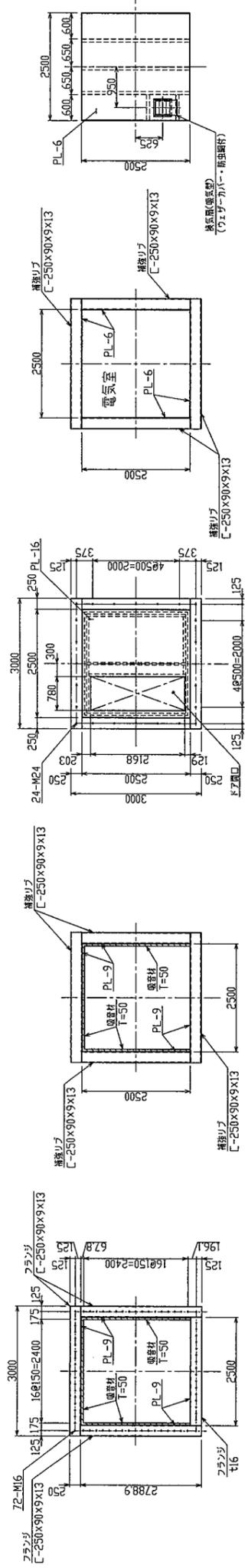


E-E断面



F-F断面

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)
図面タイトル	躯体構造一般図 (その1)
番号	1/41
担当	審査
承認	
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ設計



G-G 断面

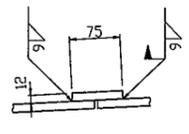
H-H 断面
機械室

J-J 断面
電気室

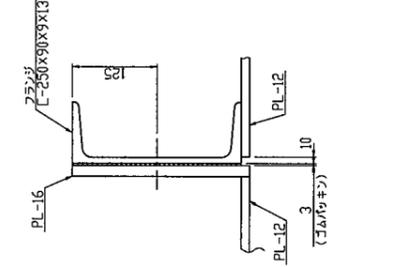
K-K 断面

L-L 断面

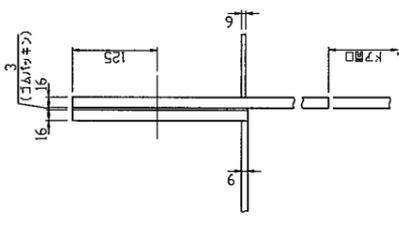
O 詳細



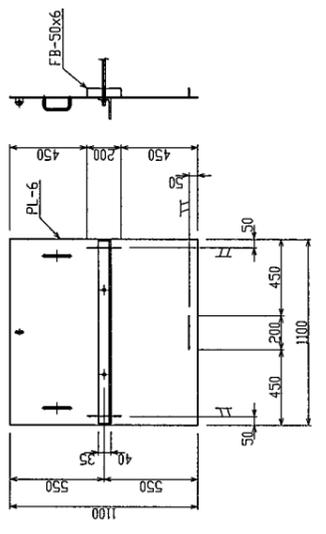
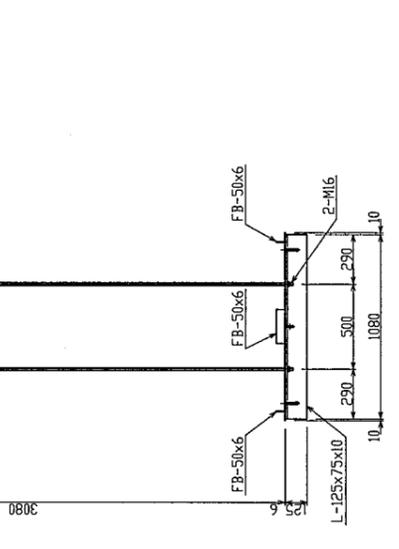
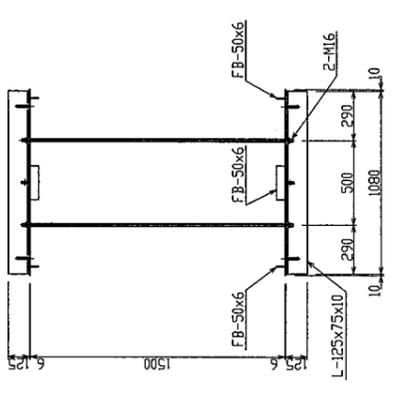
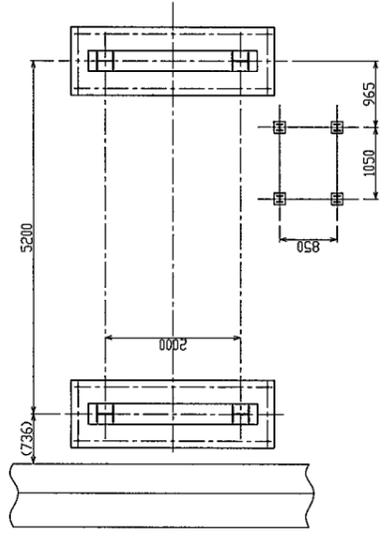
K 詳細



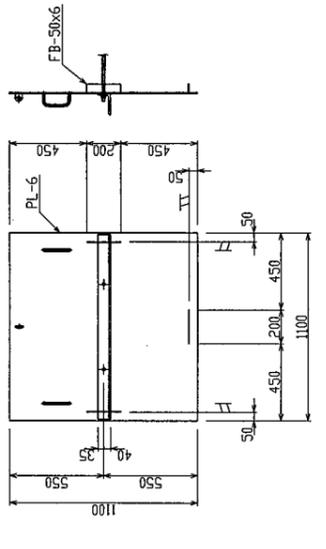
C 詳細



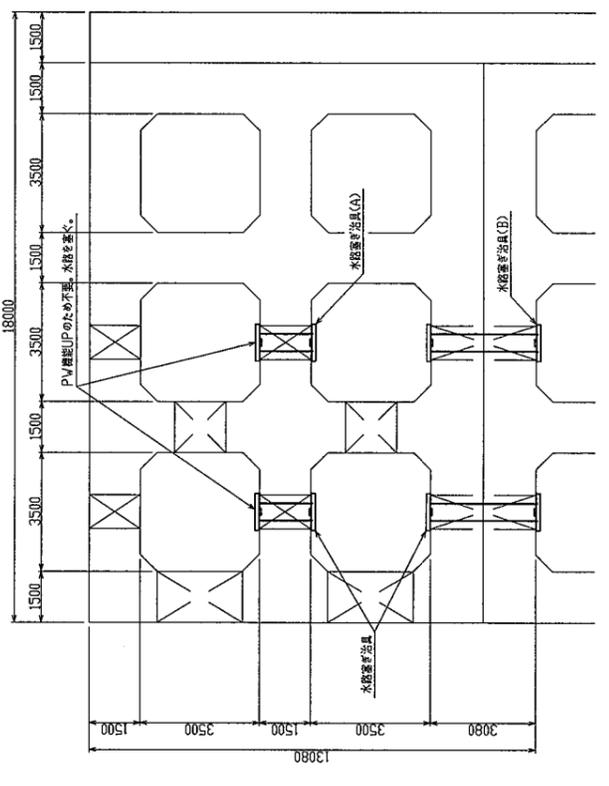
基礎配置



水路塞ぎ治具(A)詳細

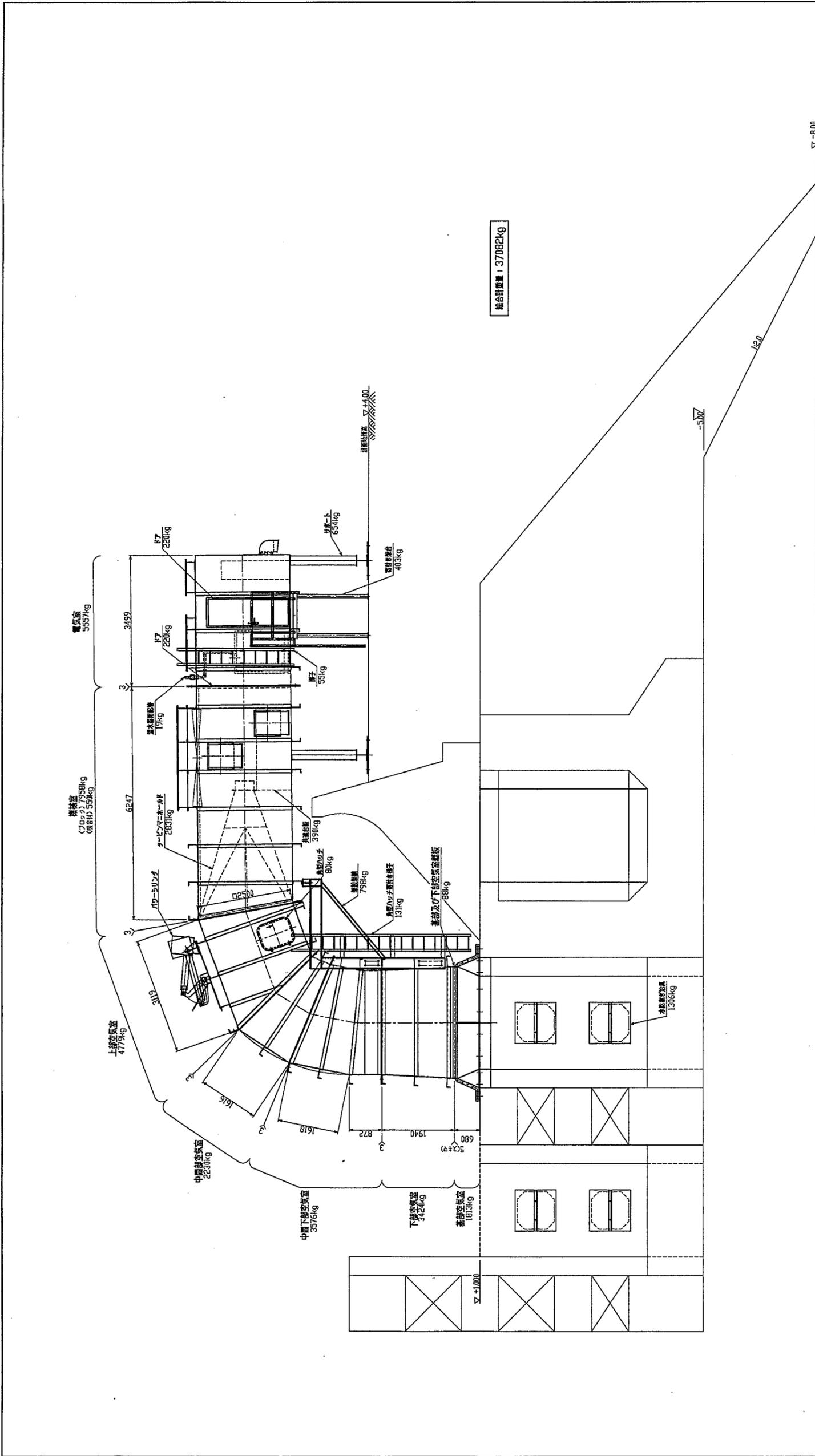


水路塞ぎ治具(B)詳細



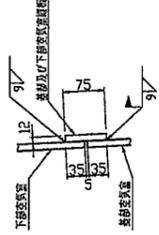
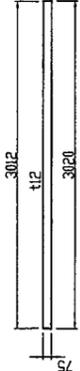
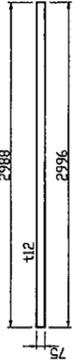
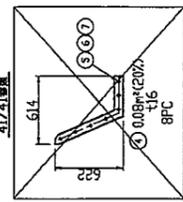
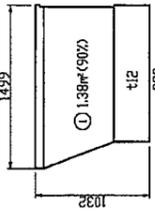
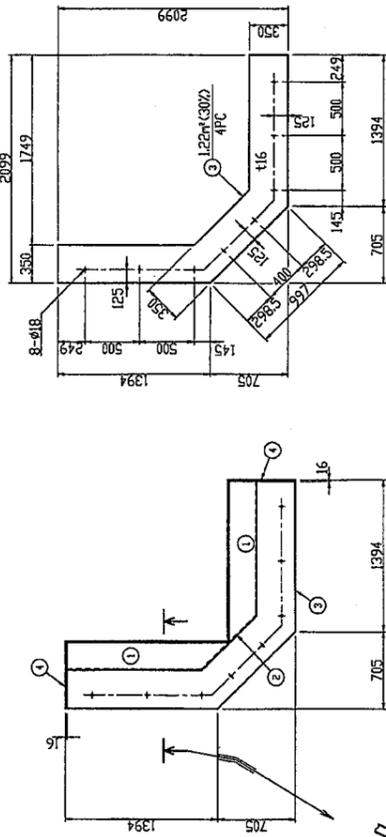
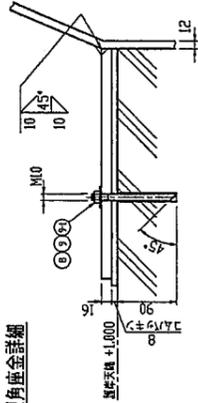
B-B 断面

工事名	平成26年度 空乏タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	躯体構造一般図 (その2)	番 号 2 / 41
担当	審査	承認
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本岡組 (株) エイ・エス・アイ総研	



工事名	平成26年度 空気タービン式液力発電装置 (酒田実証機)		
図面タイトル	躯体構造一般図 (その3)	番 号	3 / 41
担当	審査	承認	
施工者	三菱重工機械エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研		

※ ①～⑮の材料については現地計測の結果を反映して41/41基部フランジ形状変更詳細図に示す。



継取付詳細

基部及び下部空気室継取

注記

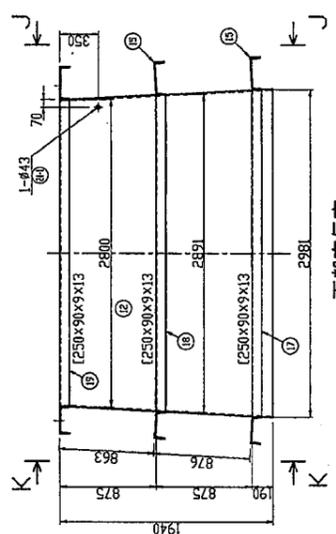
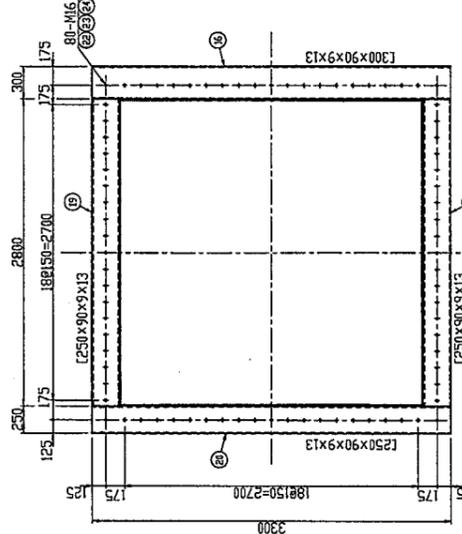
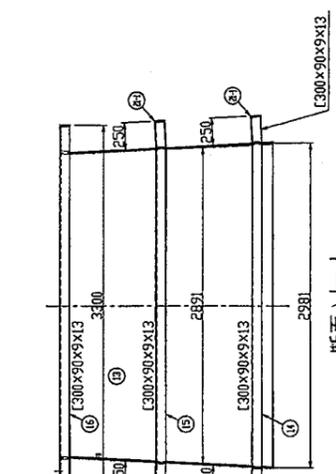
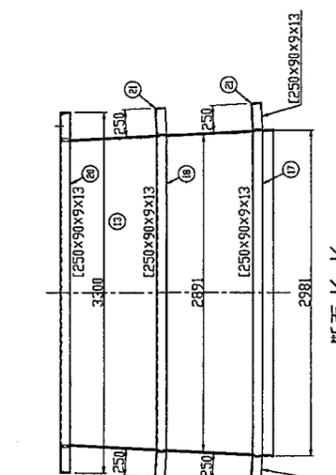
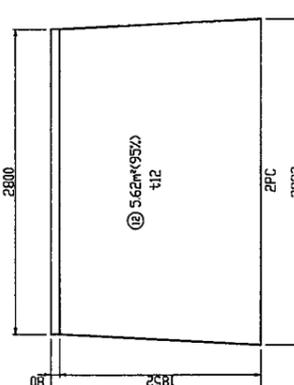
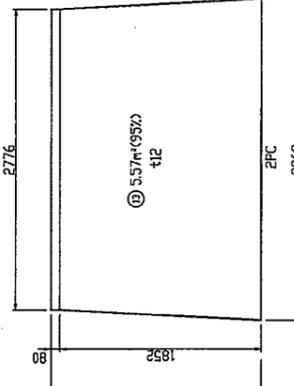
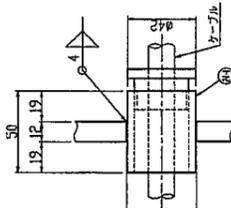
1. 材質はPL材はSM400A、形鋼はSS400とする。
2. 特記なき隅肉溶接脚長は、 \sqrt{t} 、 t ＝厚板割取厚以上とする。
3. 施工上必要な所には適宜スリップを設けること。
4. 空気室は完成系で気密性を必要とする。

① t12×1032×1499	132kg	8PC	1056kg	(952)
② t12×707×905	43kg	4PC	172kg	(702)
③ t12×209×209	125kg	4PC	500kg	(302)
④ 継取付金具	46kg	36/36個	80kg	6600#
⑤ 角材	M16×60	60/124個	28PC	3kg
⑥ ナット	M16	60/124個	28PC	1kg
⑦ 継ぎ	M16	60/124個	28PC	1kg
⑧ プラスチック	R10	-	32PC	-
⑨ アンカーボルト	M10×135	-	32PC	-
⑩ 大型角座金	t2.5×32×32	-	32PC	-
⑪ t12×75×3020	22kg	2PC	44kg	
⑫ t12×192×2992	518kg	2PC	1036kg	(952)
⑬ t12×192×2968	514kg	2PC	1028kg	(952)
⑭ [300×90×9×13	2.98t×38.1kg/m=114kg	1PC	114kg	
⑮ [300×90×9×13	2.89t×38.1kg/m=110kg	1PC	110kg	
⑯ [250×90×9×13	3.30t×38.1kg/m=126kg	1PC	126kg	
⑰ [250×90×9×13	2.98t×34.6kg/m=104kg	3PC	312kg	
⑱ [250×90×9×13	2.80t×34.6kg/m=97kg	2PC	194kg	
⑲ [250×90×9×13	3.30t×34.6kg/m=115kg	1PC	115kg	
⑳ [250×90×9×13	0.25t×34.6kg/m=9kg	4PC	36kg	
㉑ [250×90×9×13	0.25t×34.6kg/m=9kg	4PC	36kg	
㉒ 角材	M16×50	60/108個	80PC	9kg
㉓ ナット	M16	60/108個	80PC	3kg
㉔ 継ぎ	M16	60/108個	80PC	1kg
㉕ 甲板溶接用電線貫通金物	B-250 L=50	1PC	-	

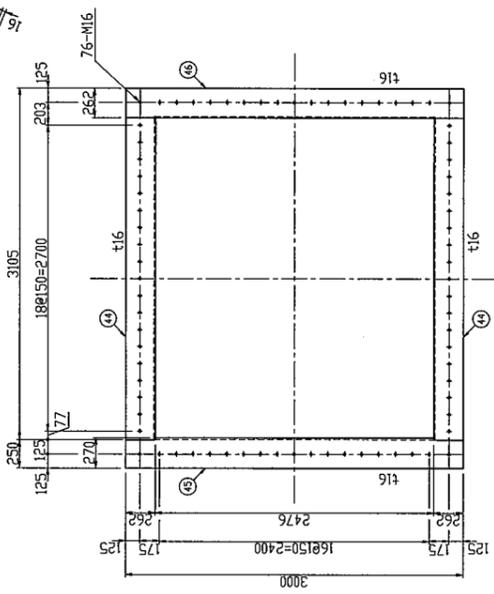
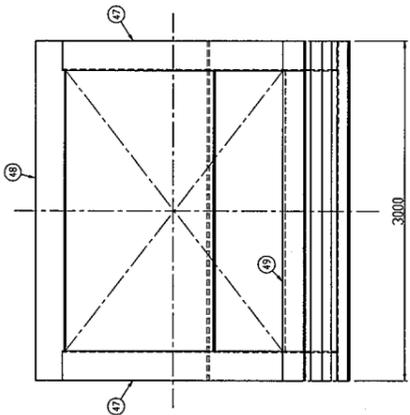
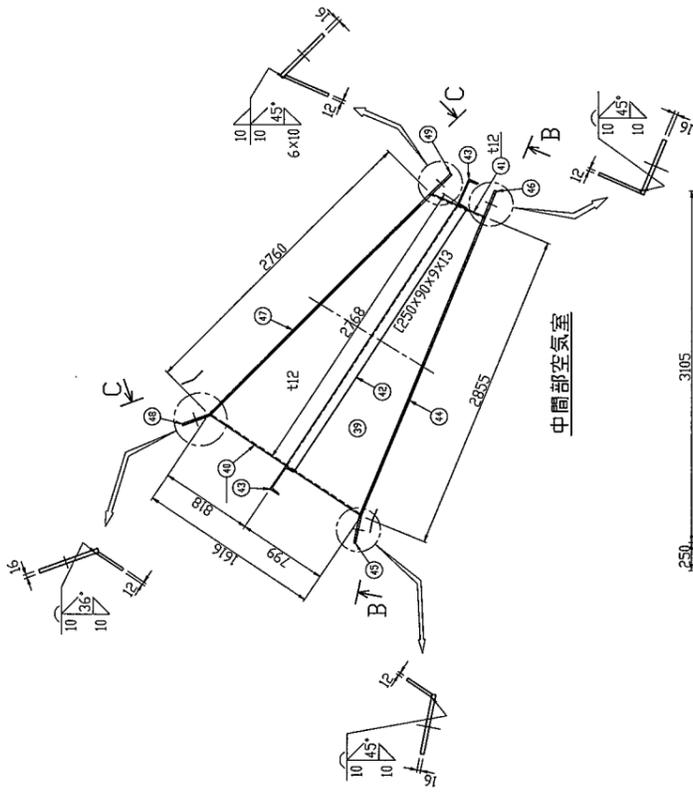
基部及び下部空気室継取
88 1013kg

基部及び下部空気室継取
88 108kg

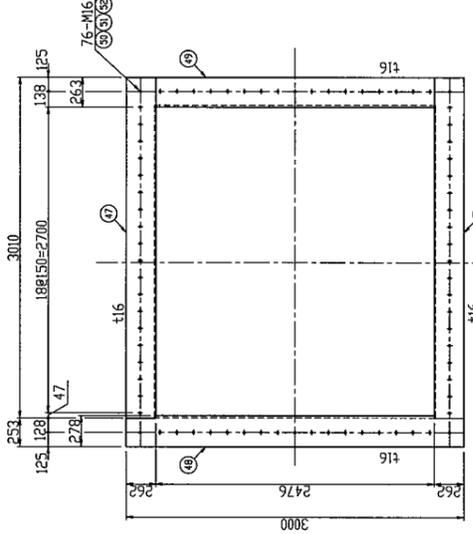
下部空気室
88 3424kg



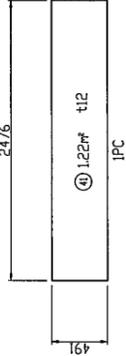
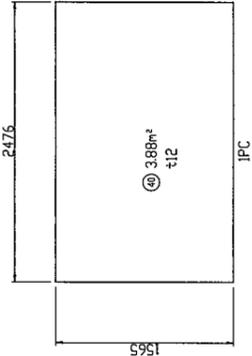
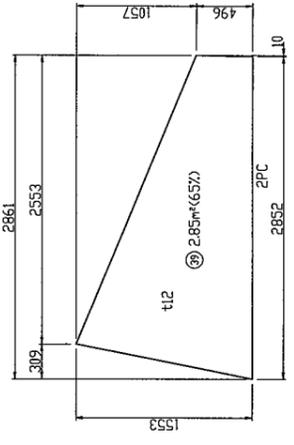
工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)
図面タイトル	基部空気室及び下部空気室詳細図
担当	審査
承認	承認
施工者	三菱重工統構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) (株)本間組 (株)エイ・エス・アイ総研



断面 B-B



断面 C-C

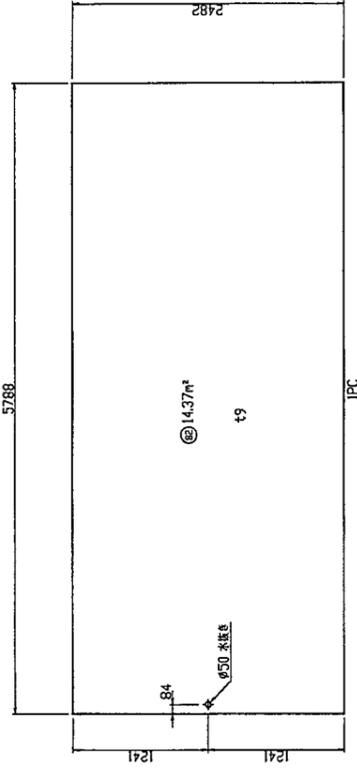
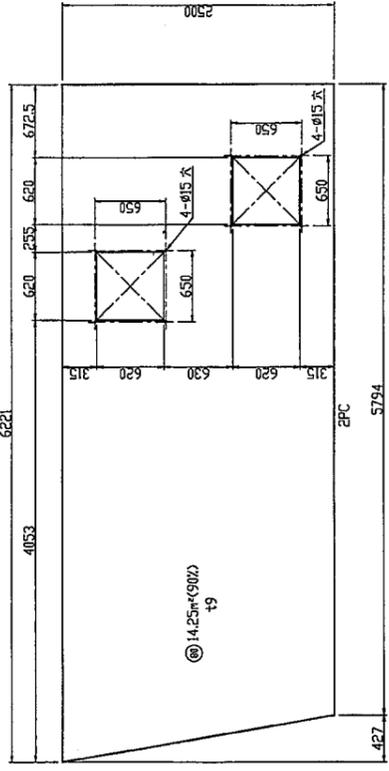
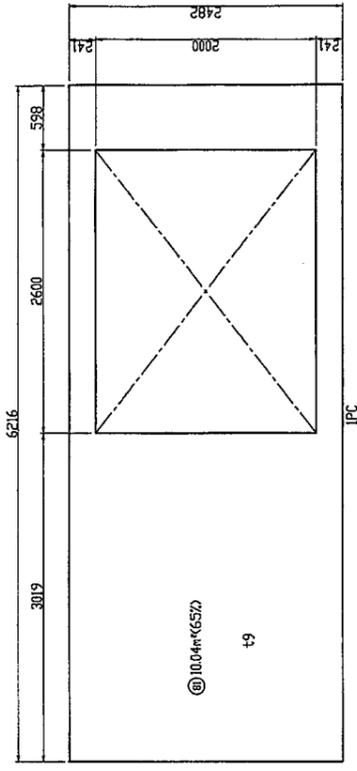
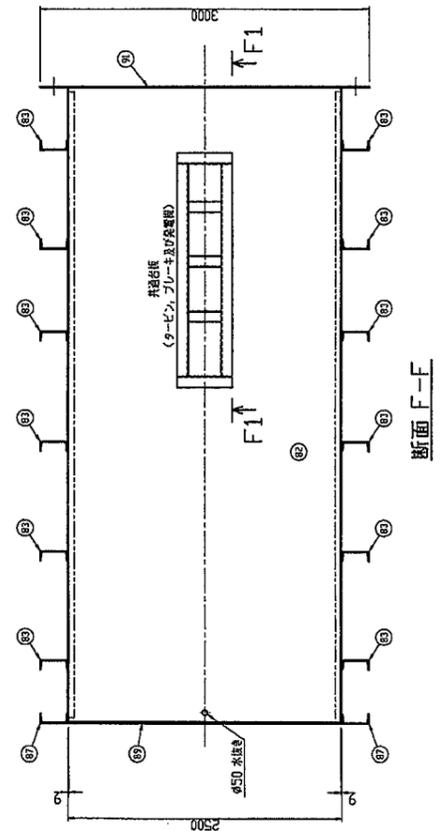
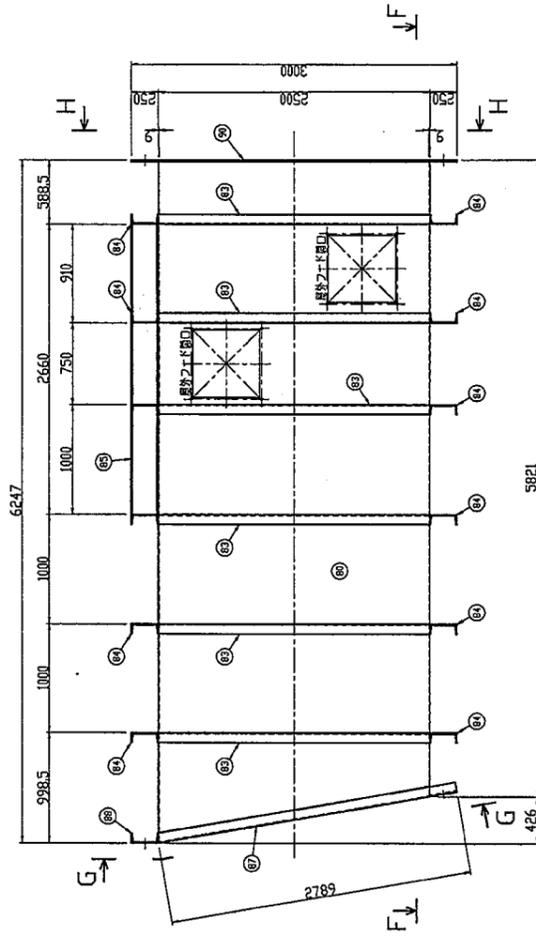
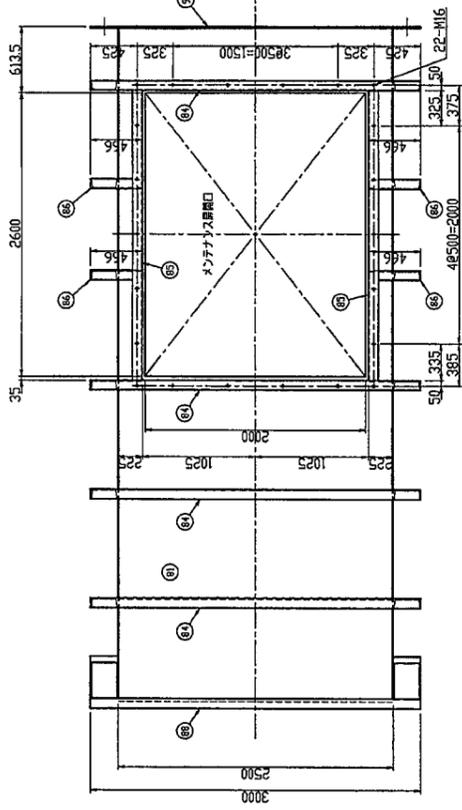


注記

1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
2. 特記なき隅肉溶接脚長は√s; t=厚板割取厚以上とする。
3. 施工上必要な所には通入スラップを設けること。
4. 空気室は完成系で気密性を必要とする。

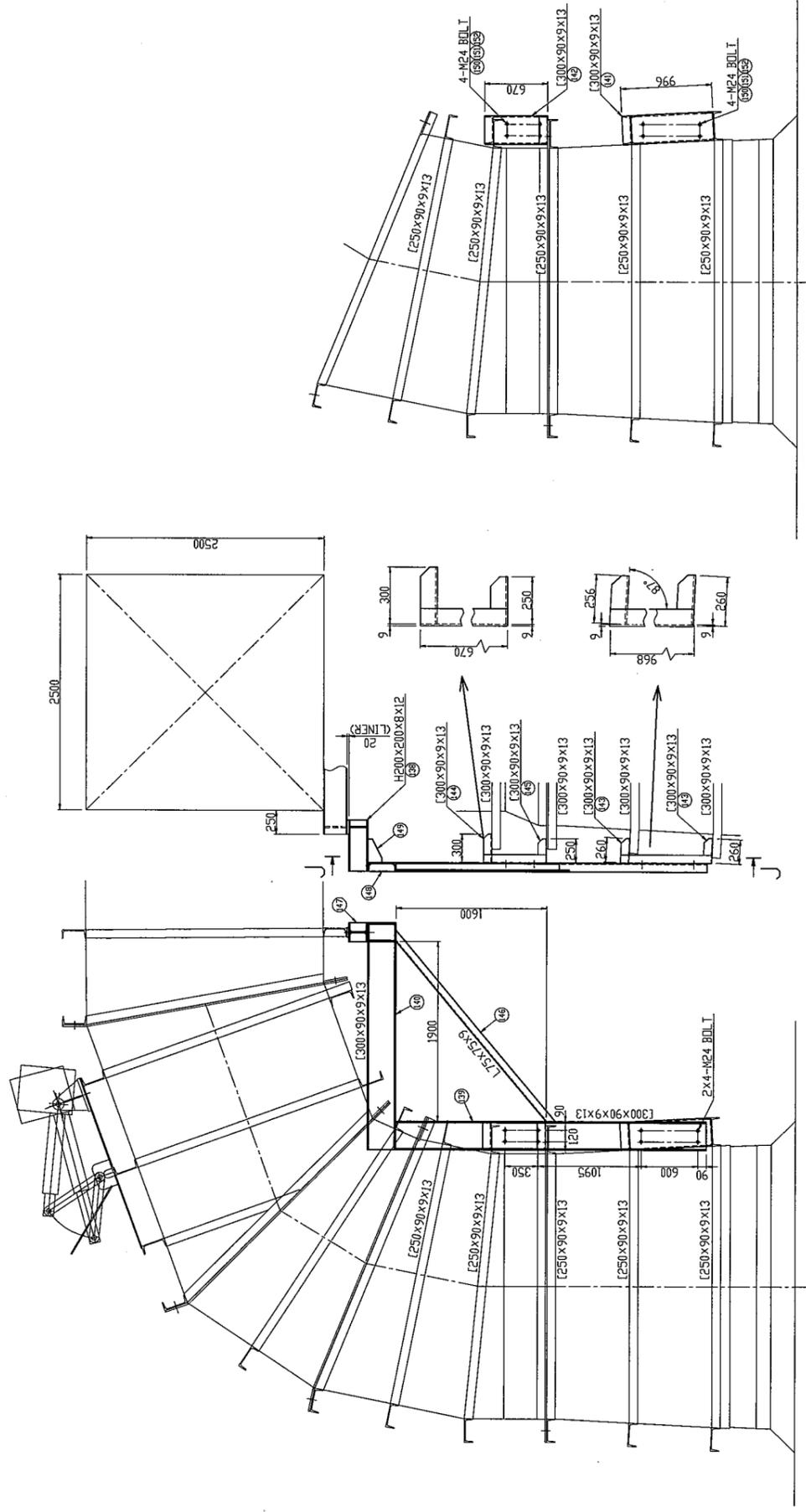
③ t12x1553x2852	272kg	2PC	544kg	(65%)
④ t12x1565x2476	366kg	1PC	366kg	
⑤ t12x491x2476	115kg	1PC	115kg	
⑥ t250x910x13	2,768kg	2PC	192kg	
⑦ t250x910x13	3,000kg	2PC	208kg	
⑧ t16x262x2843	94kg	2PC	188kg	
⑨ t16x270x3000	102kg	1PC	102kg	
⑩ t16x262x3000	99kg	1PC	99kg	
⑪ t16x262x3010	99kg	2PC	198kg	
⑫ t16x278x3000	105kg	1PC	105kg	
⑬ t16x263x3000	100kg	1PC	100kg	
⑭ 角材 M16x60	80.12kg	76PC	9kg	
⑮ ナット M16	80.03kg	76PC	3kg	
⑯ 重盤 M16	80.012kg	76PC	1kg	
				計 2230kg

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)		
図面タイトル	中間部空気室詳細図	番 号	6 / 41
担当	審査	承認	
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研		



注記
 1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
 2. 特記なき隅肉溶接脚底は、 ϕ 4; τ =厚板間隔厚以上とする。
 3. 施工上必要な所には適宜スカラップを設けること。

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	構構室詳細図(その1)	番 号 8 / 41
担当	審査	承認
施工者	三登重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ 総研	

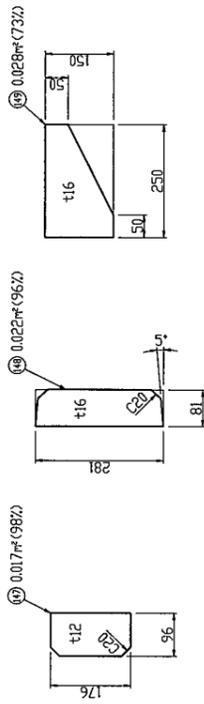


注記

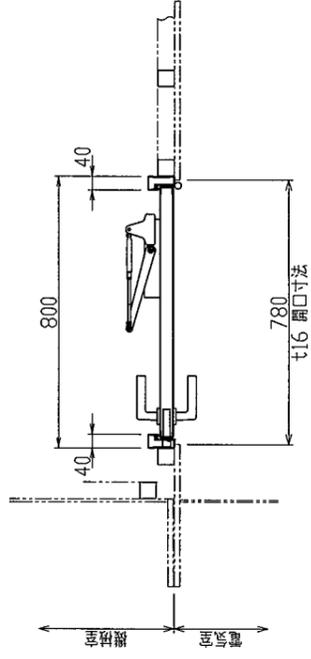
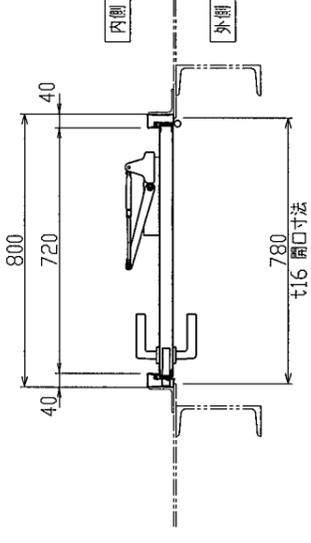
1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
2. 特記なき隅肉接合部は、 \sqrt{t} : \sqrt{r} =7=厚肉側板厚以上とする。
3. 施工上必要な所には適宜スカラップを設けること。

⑬	H200x200x8x12	0.540m ² x45.9kg/m=27kg	2PC	54kg
⑭	L300x90x9x13	3.300x38.1kg/m=126kg	2PC	252kg
⑮	L300x90x9x13	2.392x38.1kg/m=92kg	2PC	184kg
⑯	L300x90x9x13	0.966x38.1kg/m=37kg	2PC	74kg
⑰	L300x90x9x13	0.670x38.1kg/m=26kg	2PC	52kg
⑱	L300x90x9x13	0.260x38.1kg/m=10kg	4PC	40kg
⑲	L300x90x9x13	0.300x38.1kg/m=12kg	2PC	24kg
⑳	L75x75x9	2.636x9.96kg/m=27kg	2PC	54kg
㉑	t12x176x96	2kg	4PC	8kg
㉒	t16x281x81	3kg	4PC	12kg
㉓	t16x250x150	4kg	4PC	16kg
㉔	ボルト M24x55	80.297kg	16PC	5kg
㉕	ナット M24	80.11kg	16PC	2kg
㉖	重量 M24	20.041kg	16PC	1kg
				合計 798kg

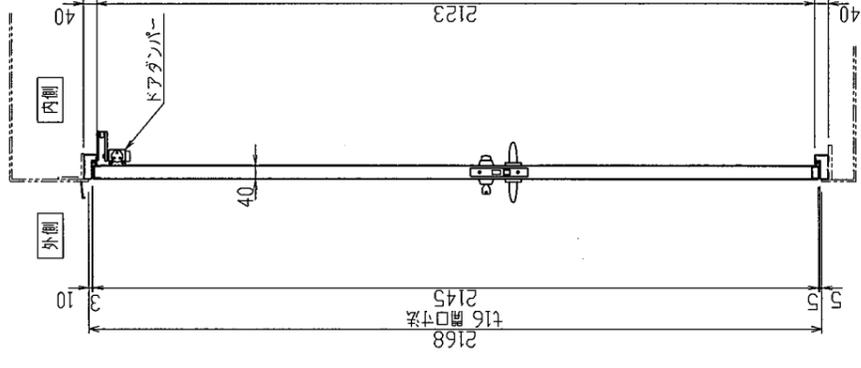
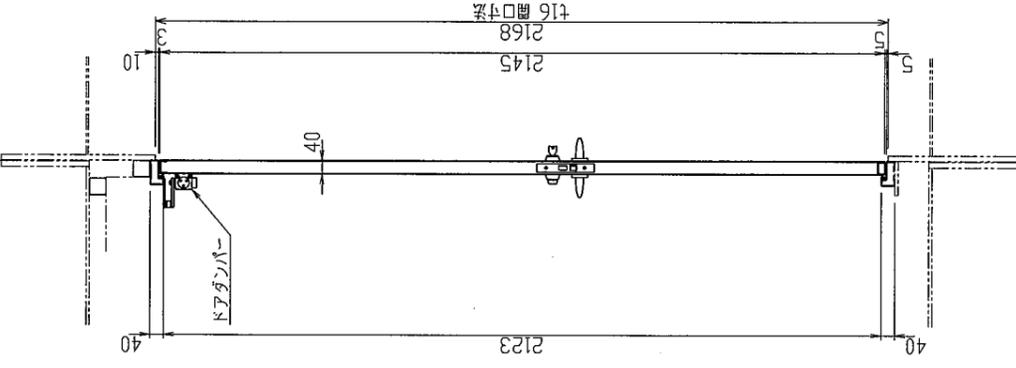
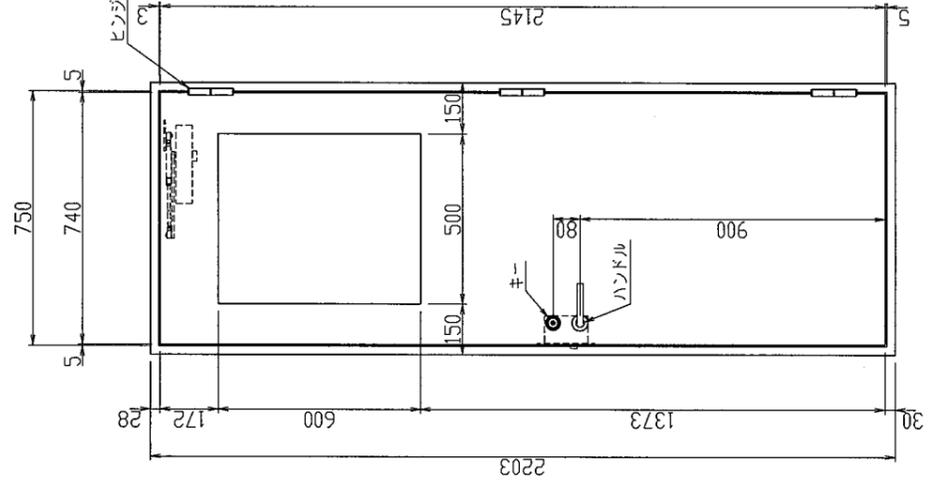
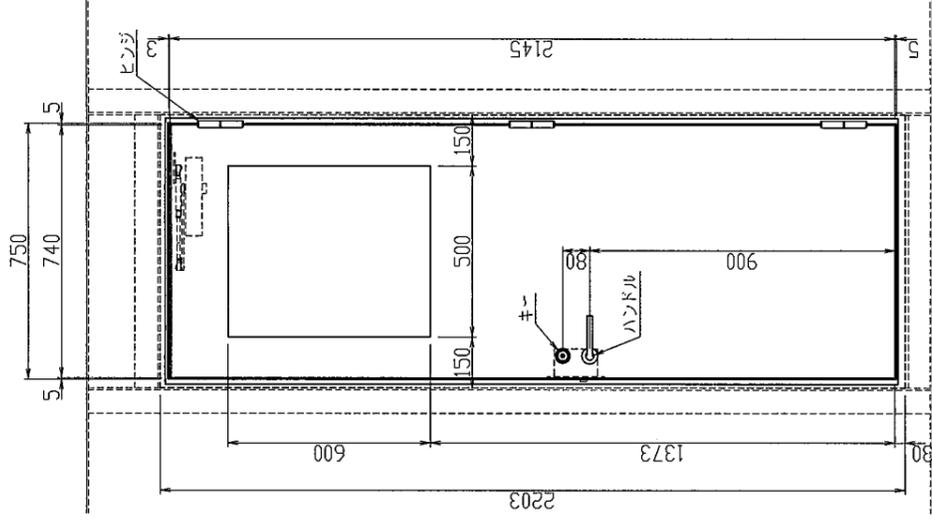
断面 J-J



工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	架設架構詳細図	番 13 / 号 41
担当	審査	承認
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) (株)本間組 (株)エイ・エス・アイ総研	



電気室
機械室



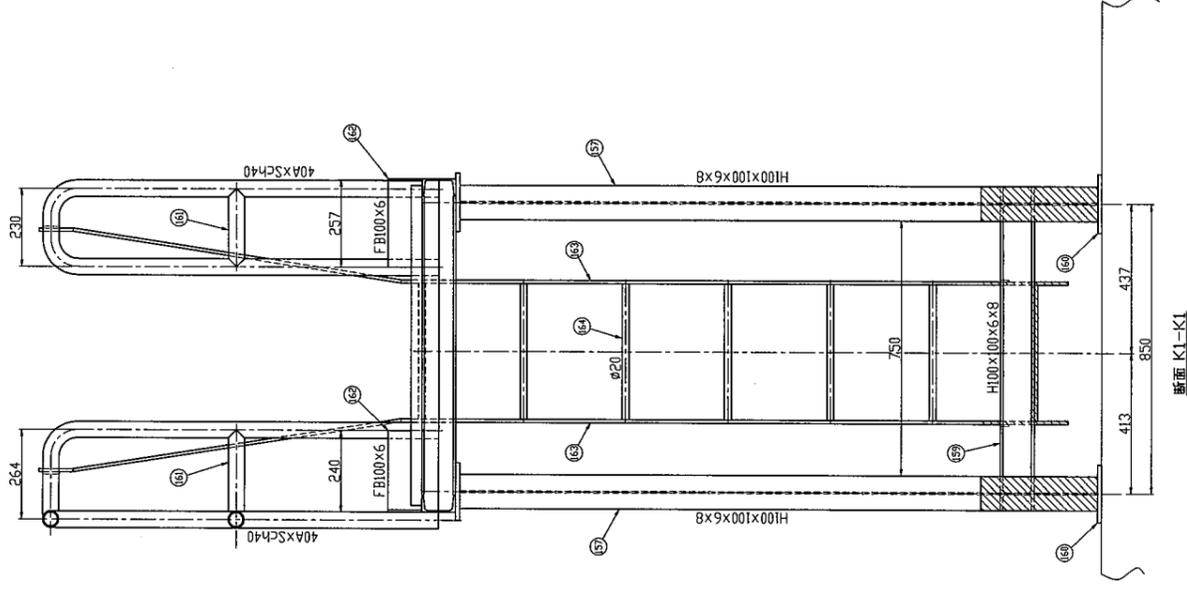
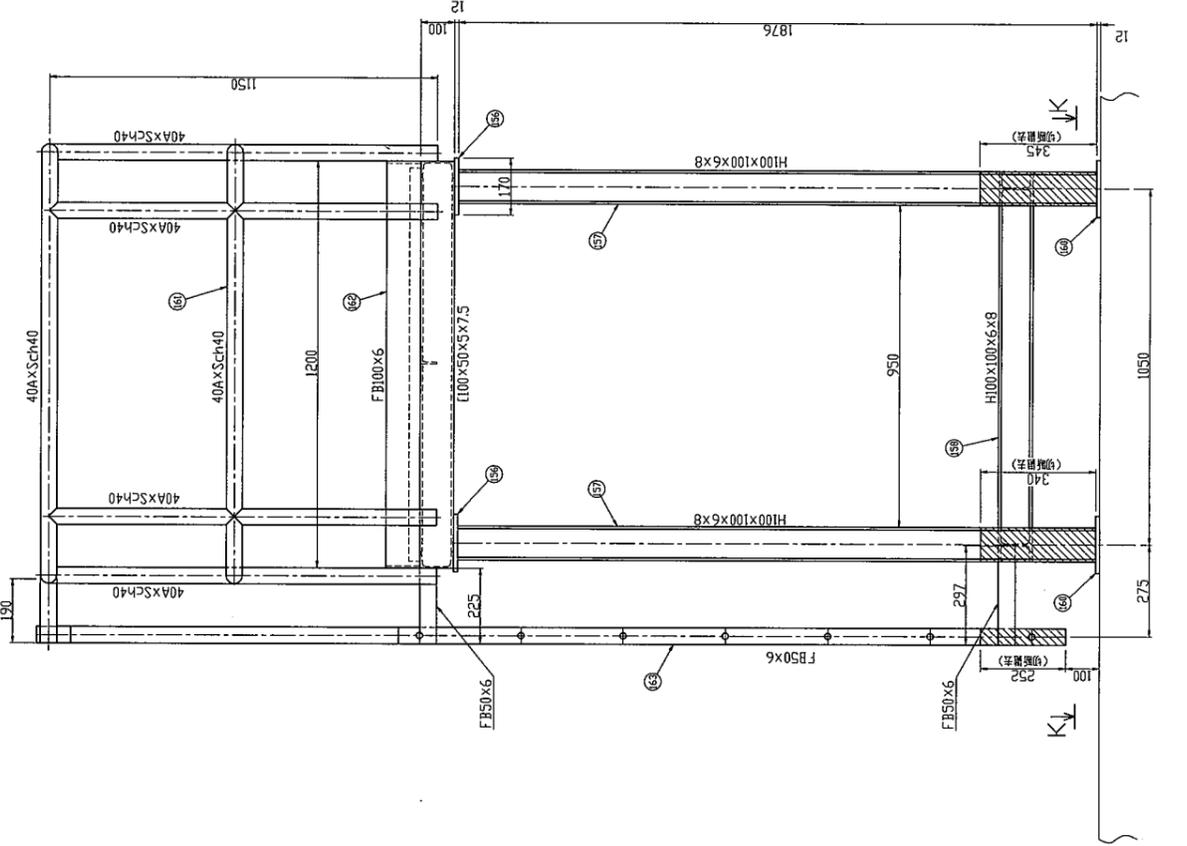
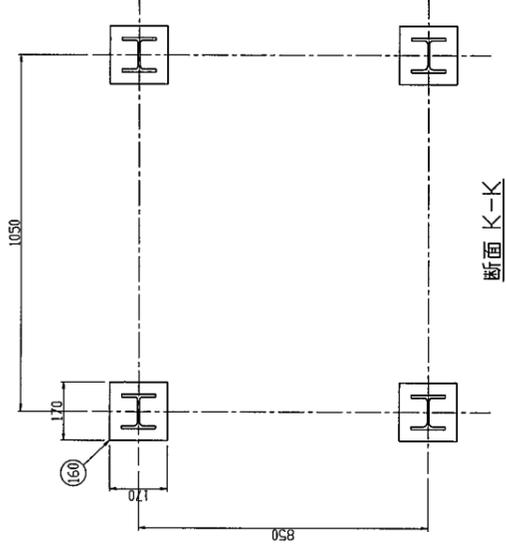
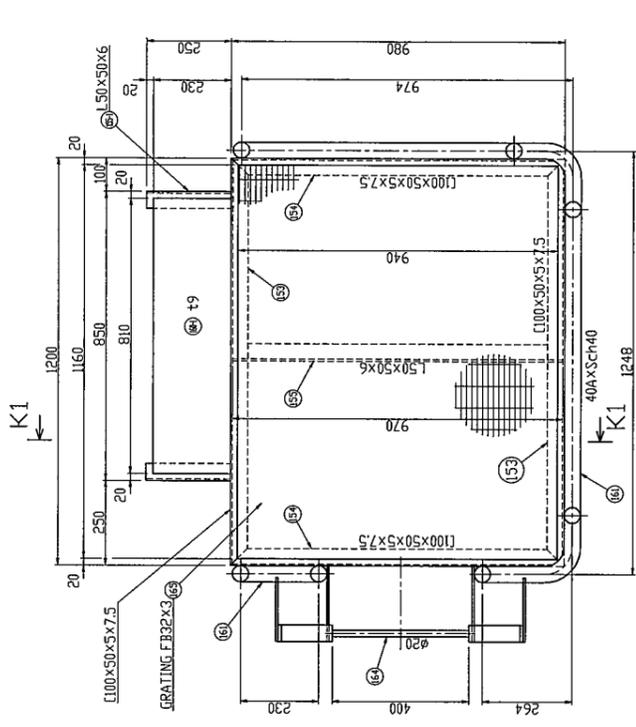
機械室・電気室間アクセスドア

電気室アクセスドア

注記

1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
2. 特記なき隅肉溶接脚長は√t; t=セ=厚板側板厚以上とする。
3. 施工上必要な所には適宜スカラップを設けること。

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	ドア詳細図	番 号 14 / 41
担当	審査	承認
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研	

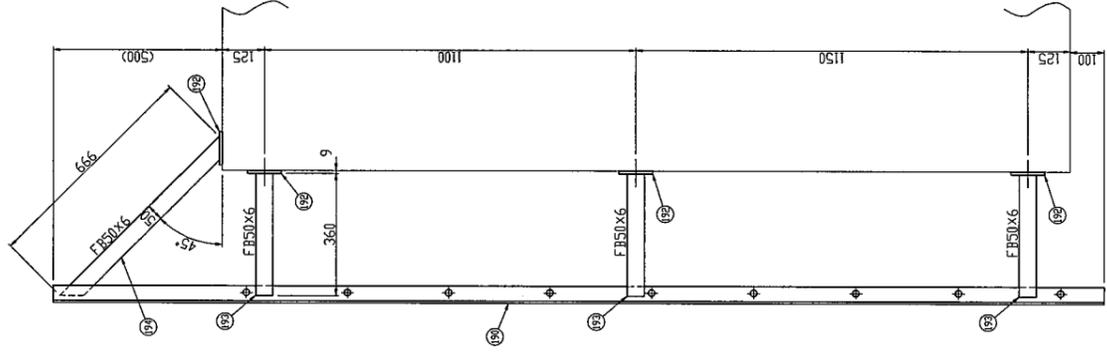
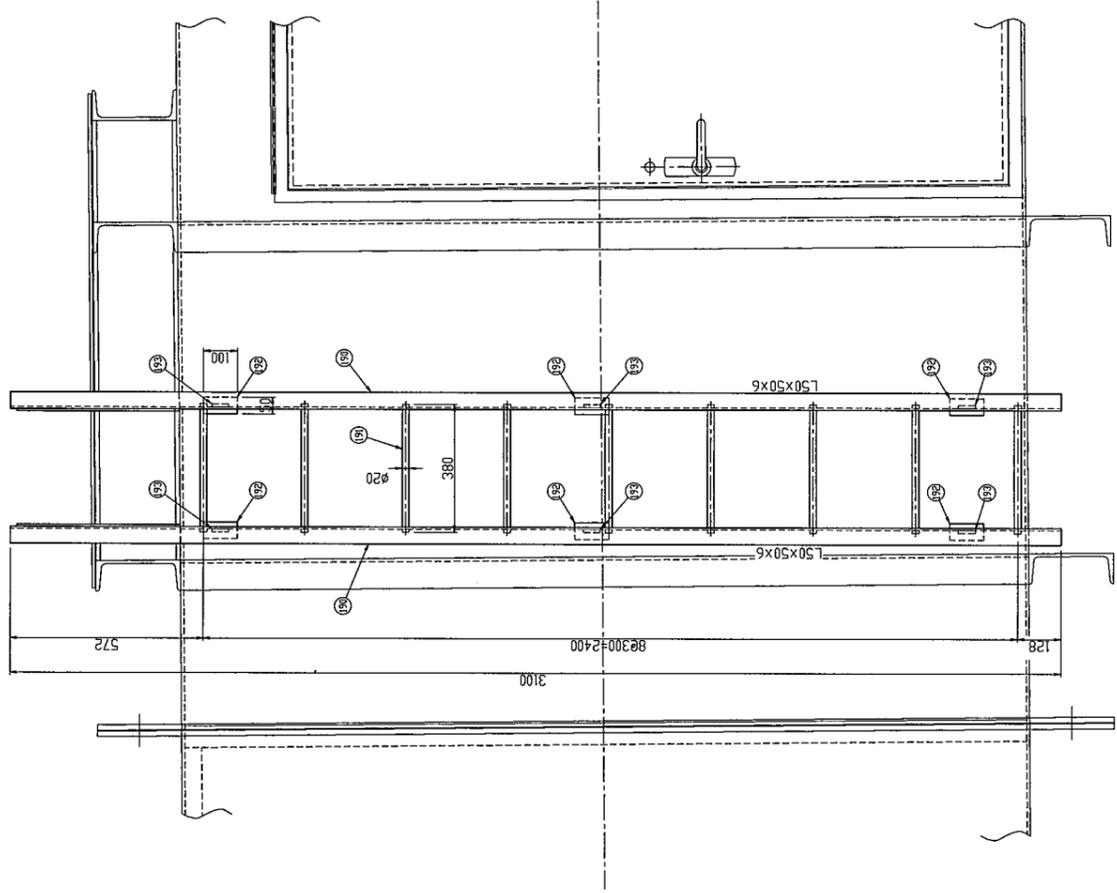
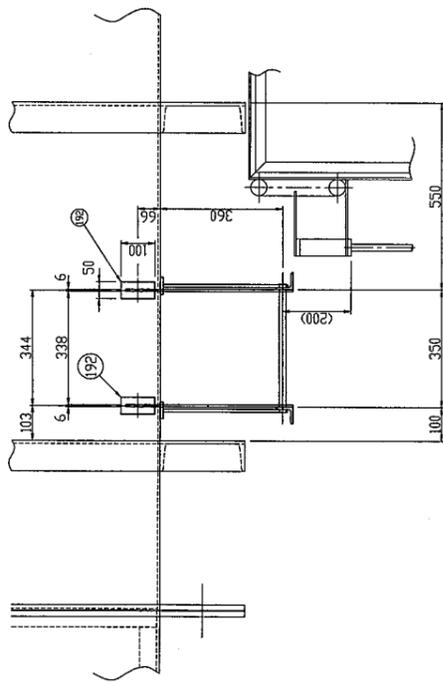


注記

1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
2. 特記なき場合内溶接脚長は、 \sqrt{t} 、 t は厚板脚長とする。
3. 施工上必要な所には適宜スラップを設けること。
4. ⑮部材切断撤去後、⑯を先継に取付のこと。
5. ⑰部材については345mm上に移動のこと。

⑮	L100x50x5x7.5	1.248x9.36kg/m=12kg	2PC	24kg
⑯	L100x50x5x7.5	0.974x9.36kg/m=10kg	2PC	20kg
⑰	L50x50x6	0.97x4.43kg/m=5kg	1PC	5kg
⑱	L50x50x6	0.25x4.43kg/m=2kg	2PC	4kg
⑲	t12x170x170	3kg	4PC	12kg
⑳	H100x100x6x8	1.876x16.9kg/m=32kg	4PC	128kg
㉑	H100x100x6x8	0.95x16.9kg/m=17kg	2PC	34kg
㉒	H100x100x6x8	0.75x16.9kg/m=13kg	2PC	26kg
㉓	t12x170x170	3kg	4PC	12kg
㉔	t9x230x810	14kg	1PC	14kg
㉕	40xSch40	13.482x3.89kg/m=53kg	1SET	53kg
㉖	FB100x6	2.659x4.71kg/m=13kg	1SET	13kg
㉗	FB50x6	7.518x2.36kg/m=18kg	1SET	18kg
㉘	φ20x400	1kg	7PC	7kg
㉙	GRATING FB32x3 (1160x940)x29.5kg/m ² =33kg		1PC	33kg
				合計 403kg

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)		
図面タイトル	梯子・踊場詳細図(その1)	番 号	15 / 41
担当	審査	承認	
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) (株)本間組 (株)エイ・エス・アイ総研		

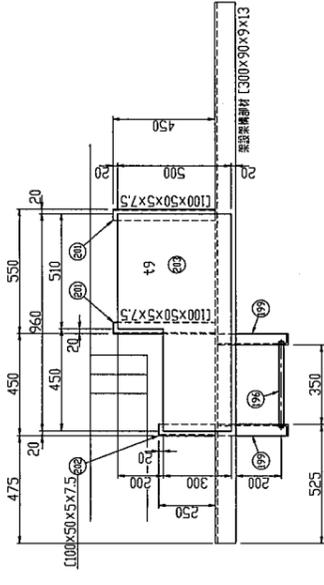


注記

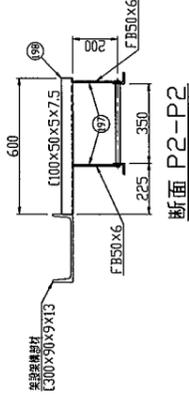
1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
2. 特記なき隅肉溶接脚長は、 \sqrt{b} 、 t は、 t は厚板制板厚以上とする。
3. 施工上必要な所には適宜スカラップを設けること。

⑮ L50x50x6	3.100x4.43kg/m=14kg	2PC	28kg
⑯ #20x380	1kg	9PC	9kg
⑰ #9x50x100	1kg	8PC	8kg
⑱ F150x6x360	1kg	6PC	6kg
⑲ F150x6x666	2kg	2PC	4kg
			合計 55kg

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)		
図面タイトル	梯子・踊場詳細図(その2)	番 号	16 / 41
担当	審査	承認	
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研		



断面 P1-P1

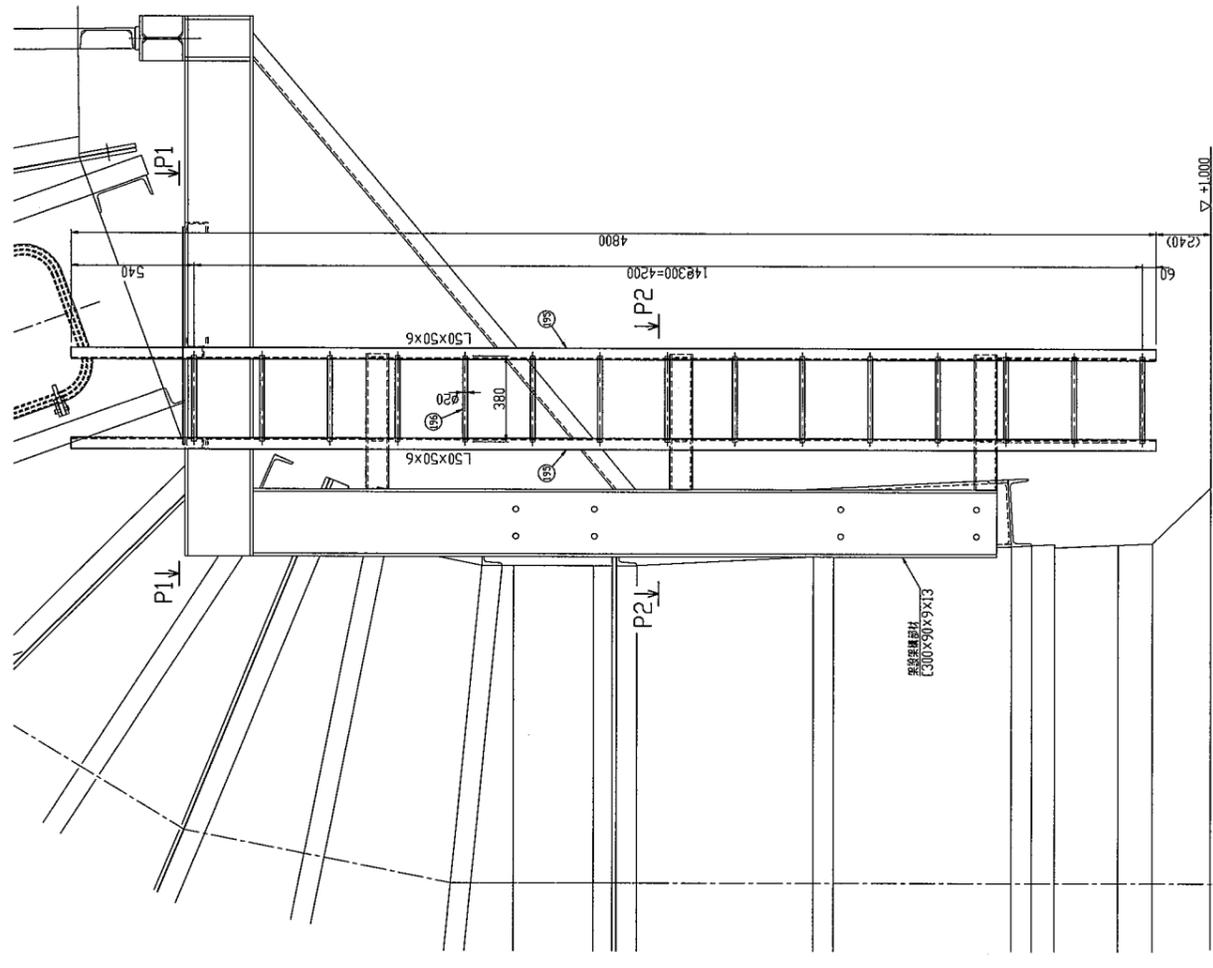
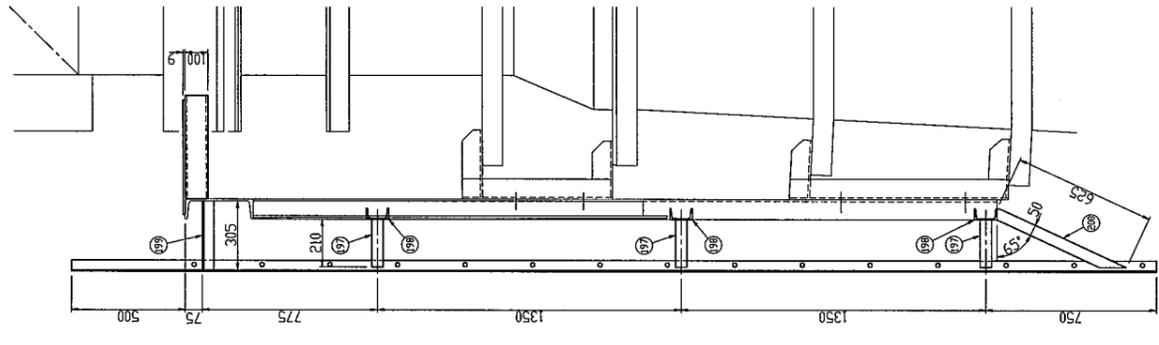


断面 P2-P2

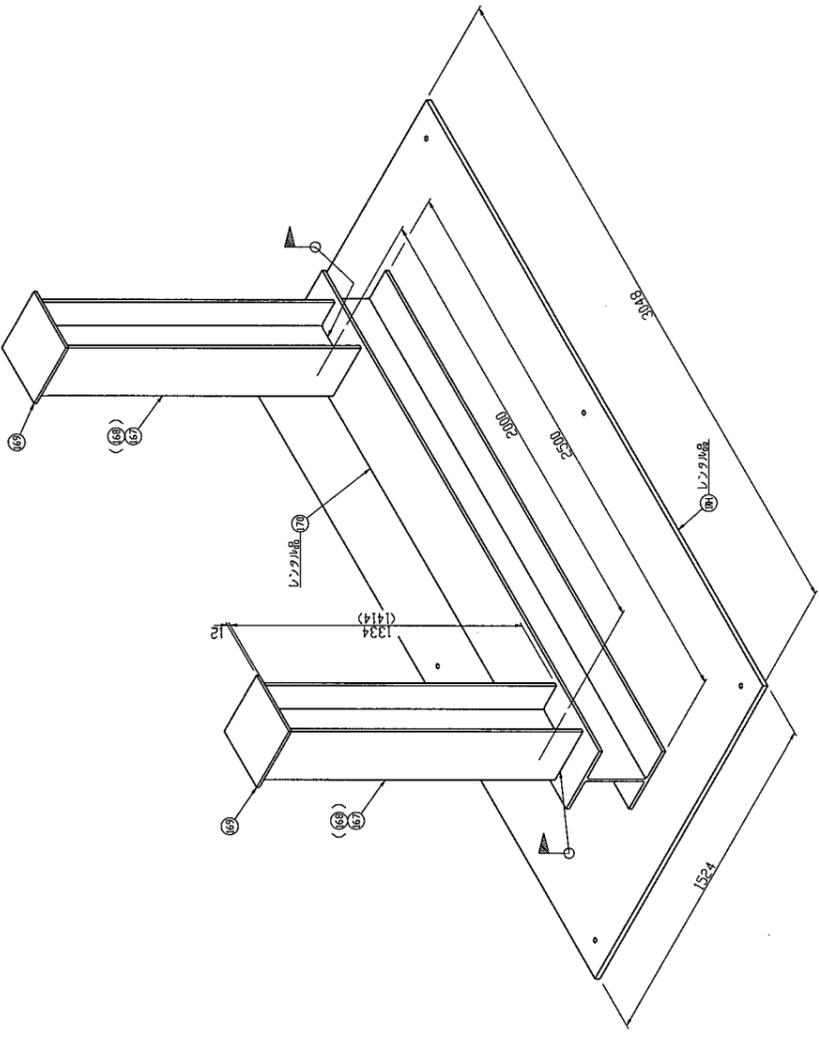
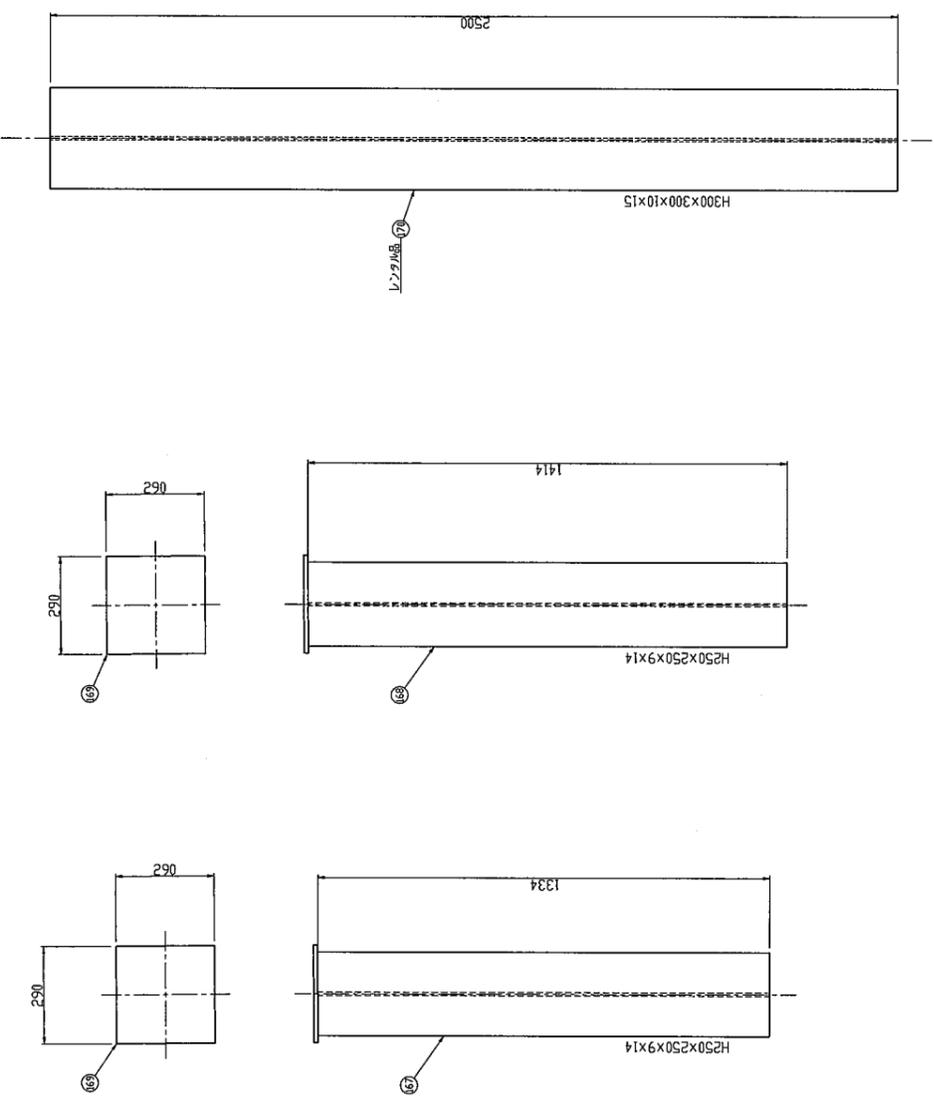
注記

1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
2. 特記なき隅肉溶接脚長は、 \sqrt{a} ; \sqrt{b} = 厚板副厚以上とする。
3. 施工上必要な所には適宜スカラップを設けること。

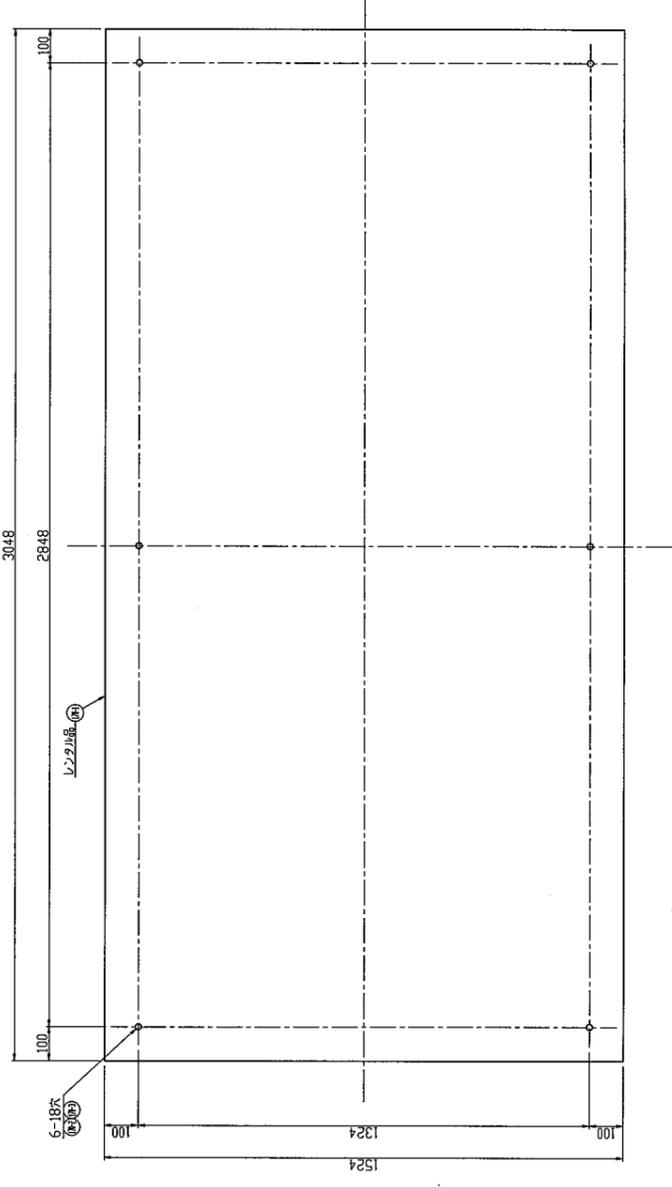
① L50x50x6	4.800x4.43kg/m=22kg	2PC	44kg
② φ20x380	1kg	15PC	15kg
③ F850x6x210	1kg	6PC	6kg
④ L100x50x5x7.5	0.600x9.36kg/m=6kg	3PC	18kg
⑤ L50x50x6	0.305x4.43kg/m=2kg	2PC	4kg
⑥ F850x6x625	2kg	2PC	4kg
⑦ L100x50x5x7.5	0.450x9.36kg/m=5kg	2PC	10kg
⑧ L100x50x5x7.5	0.250x9.36kg/m=3kg	1PC	3kg
⑨ φ9x500x950	28kg	1PC	27kg
		合計 131kg (80%)	



工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	梯子・踊場詳細図(その3)	番 号 17 / 41
担当	審査	承認
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本岡組 (株) エイ・エス・アイ総研	



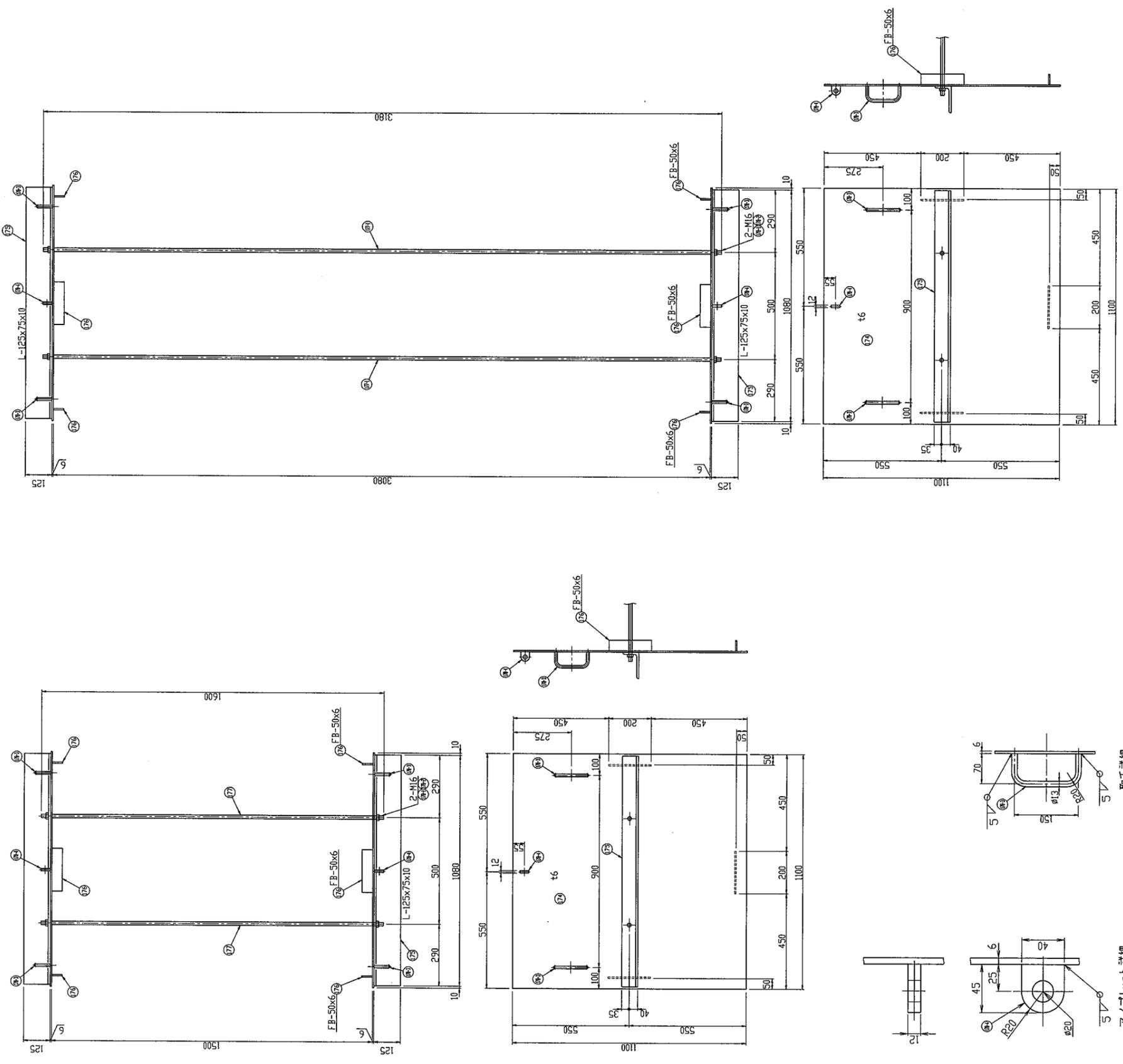
サポート組立



(67) H250x250x9x14	1.344x71.8kg/m=97kg	2PC	194kg
(68) H250x250x9x14	1.414x71.8kg/m=102kg	2PC	204kg
(69) t12x290x290	8kg	4PC	32kg
(70) t12x290x290	8kg	4PC	32kg
(71) H300x300x10x15	2.500x93.0kg/m=232.5kg	2PC	465kg
(72) t22x1000x3000	519kg	2PC	1038kg
(73) ミニカマルナー	R16	12PC	-
(74) アンカーボルト	M16x180	-	12PC
			合計 1933kg

注記
 1. 材質はPL材はSM400A、形鋼はSS400とする。
 2. 特記なき隅肉溶接脚長は4t、t=厚板鋼板厚以上とする。
 3. 施工上必要な所には適宜スカラップを設けること。

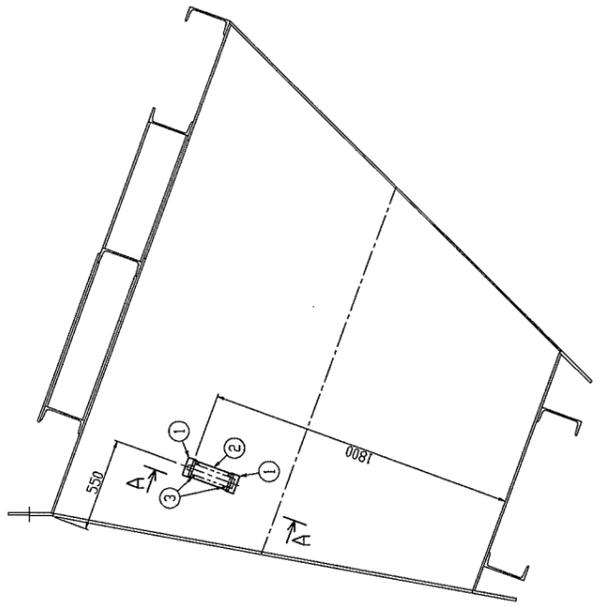
工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)		
図面タイトル	サポート詳細図	番 号	18 / 41
担当	審査	承認	
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研		



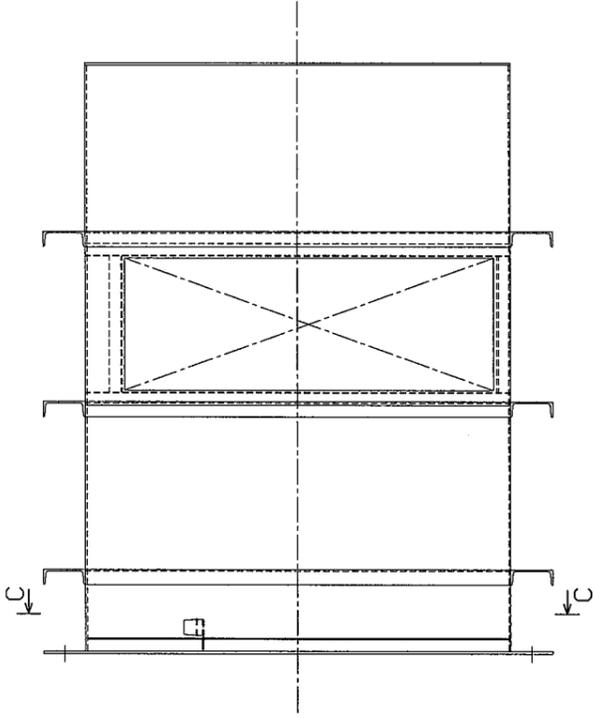
注記
 1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
 2. 特記なき隅肉溶接脚長は、 t : t = t 厚板割取厚以上とする。
 3. 施工上必要な所には適宜スカラップを設けること。

① t6×1100×1100	57kg	16PC	912KG
② L125×75×10	1.080×14.9kg/m=17kg	16PC	272KG
③ FB50×6	0.200×2.36kg/m=1kg	48PC	48kg
④ φ16×1600	3kg	8PC	24kg
⑤ φ16×3180	6kg	8PC	48kg
⑥ ナット M16	φ0.034kg	32PC	1kg
⑦ 母金 M16	φ0.012kg	32PC	1kg
⑧ 脚# φ13×70×150	0.265×φ0.617kg/m=0.2kg	32PC	7kg
⑨ アイプレート 0.5ton用	φ0.13kg	16PC	3kg
合計 1316kg			

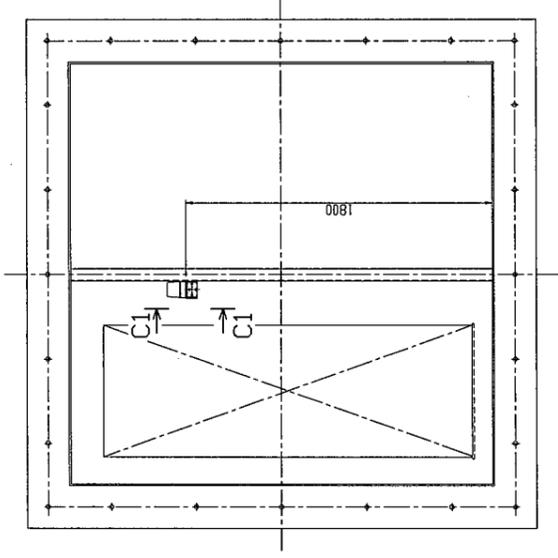
工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)		
図面タイトル	水路蓋ぎ治具詳細図	番 号	19 / 41
担当	審査	承認	
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) (株)本間組 (株)エイ・エス・アイ総研		



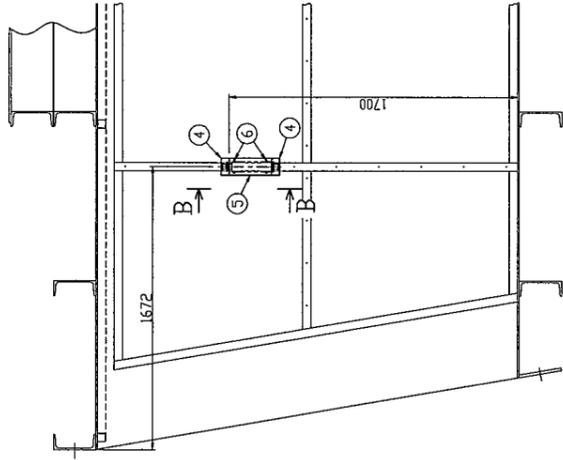
圧力センサ(上部空気室)



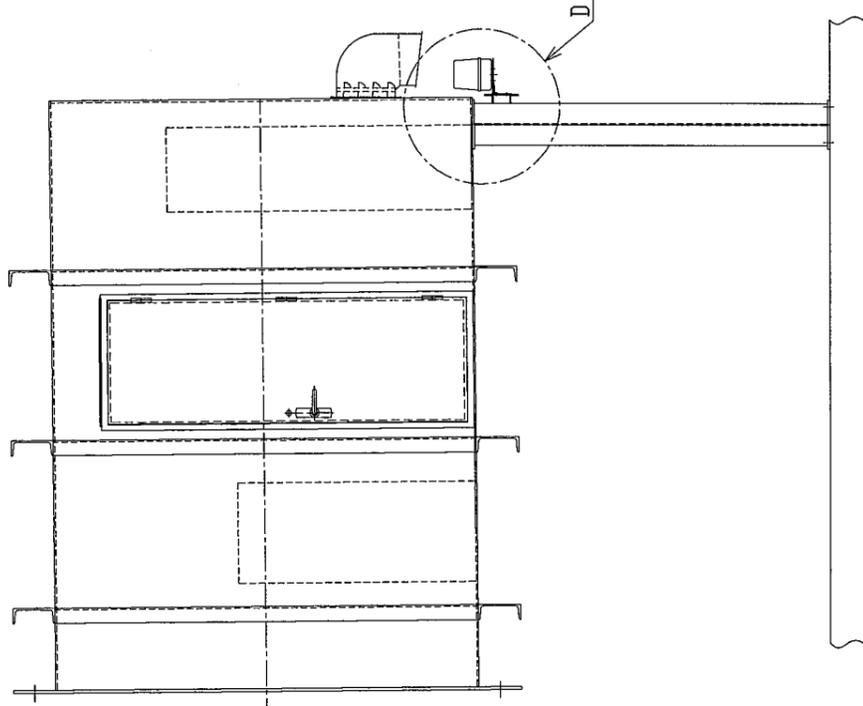
電気室内用運転中パトライト取付位置



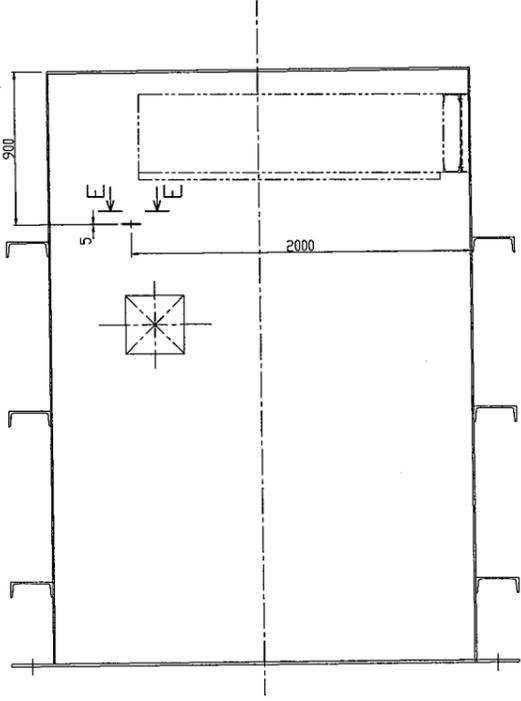
断面 C-C



圧力センサ(機械室)



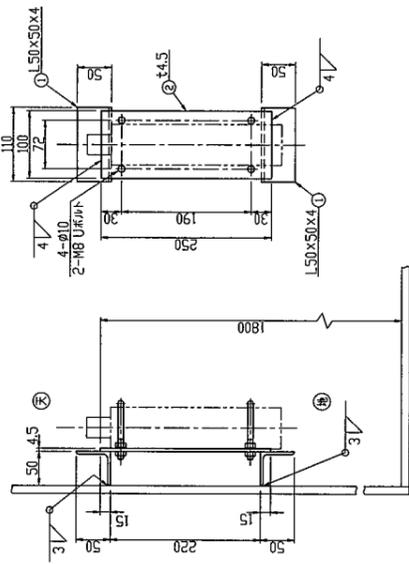
電気室外用運転中パトライト取付位置



電気室空気温度計取付位置

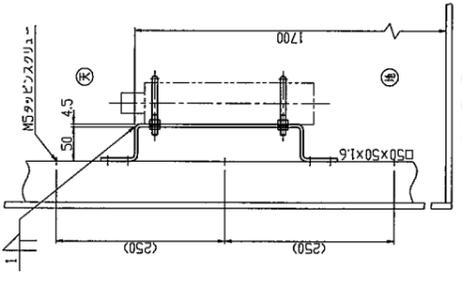
- 注記
1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
 2. 特記なき隠肉溶接脚長は、 t : $t=7$ 厚板脚長以上とする。
 3. 施工上必要な所には適宜スカラップを設けること。

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	計測器用座詳細図(その1)	番 号 20 / 41
担当	審査	承認
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 真田建設工業(株) (株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研	



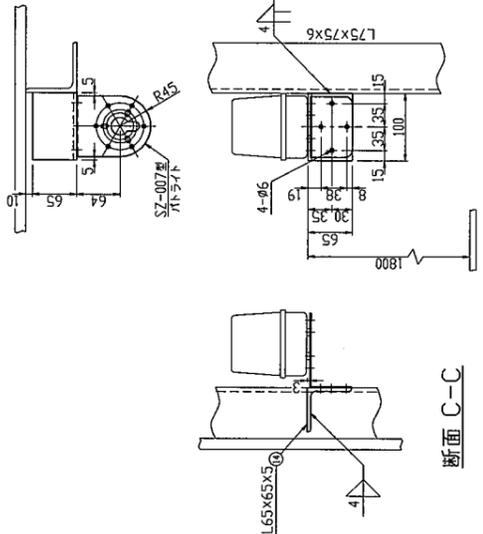
断面 A-A

① L50×50×4	0.110×3.06kg/m=1kg	2PC	2kg
② t4.5×250×100	1kg	IPC	1kg
③ 50A-11644-N0-45US	1kg	2PC	2kg
合計 3kg			



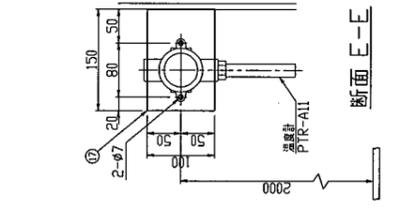
断面 B-B

① t4.5×450×100	2kg	IPC	2kg
② 50A-11644-N0-45US	1kg	2PC	2kg
③ カルビン222リュエ-M5	-	8PC	1kg
合計 3kg			



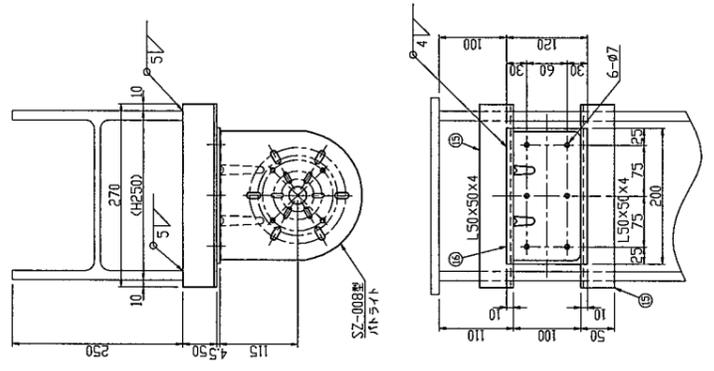
断面 C-C

① L65×65×6	0.100×5.0kg/m=1kg	IPC	1kg
② t4.5×200×120	1kg	IPC	1kg
合計 2kg			



断面 E-E

① t4.5×150×100	1kg	IPC	1kg
合計 1kg			

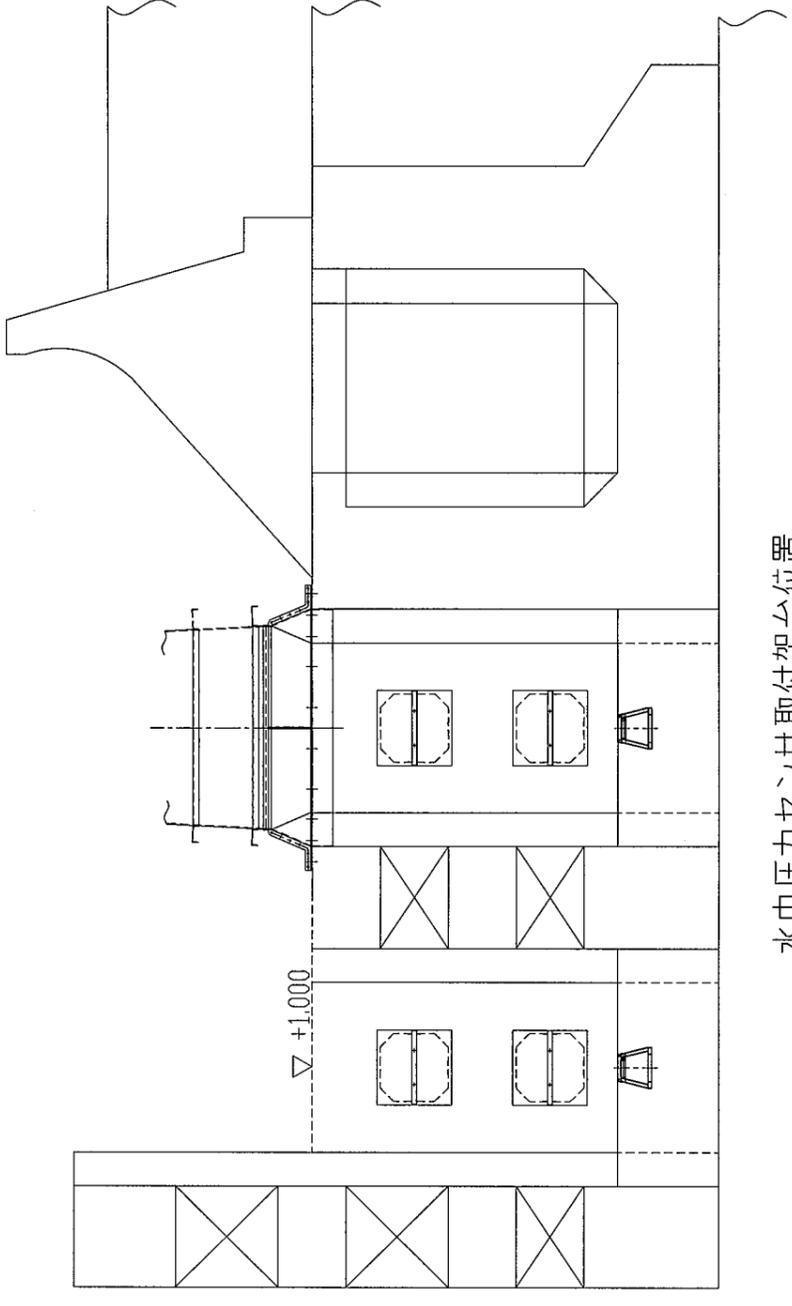


D部詳細

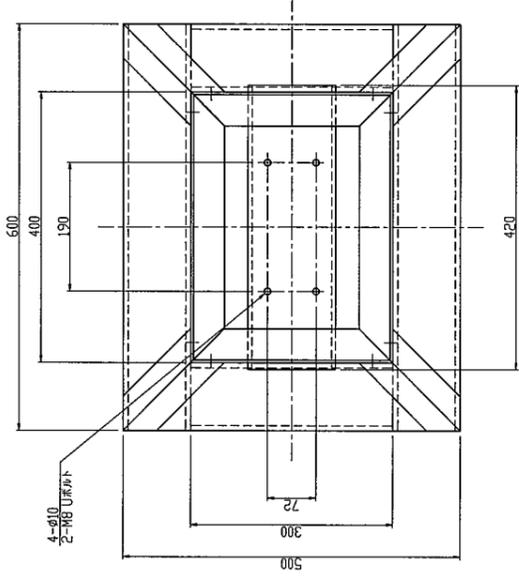
① L50×50×4	0.270×3.06kg/m=1kg	2PC	2kg
② t4.5×200×120	1kg	IPC	1kg
③ t4.5×200×120	1kg	IPC	1kg
合計 3kg			

注記
 1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
 2. 特記なき場合溶接脚長は-6; t=1mm厚板側板厚以上とする。
 3. 施工上必要な所には適宜スカラップを設けること。

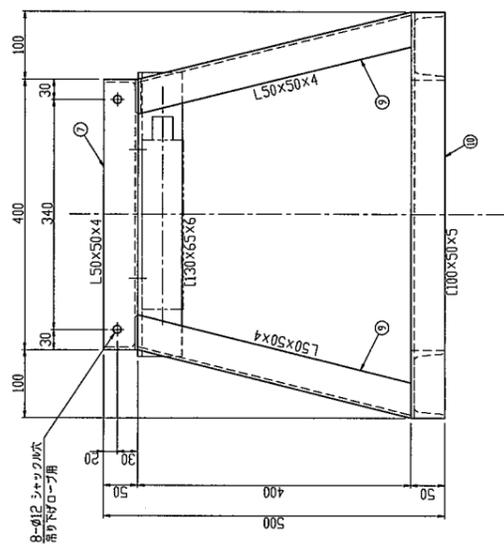
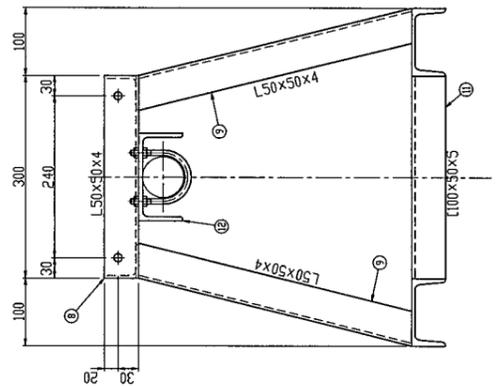
工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	計測器用座詳細図(その2)	番 号 21 / 41
担当	審査	承認
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 真田建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研	



水中圧力センサー取付架台位置
 (沖合海中部含め4基製作)

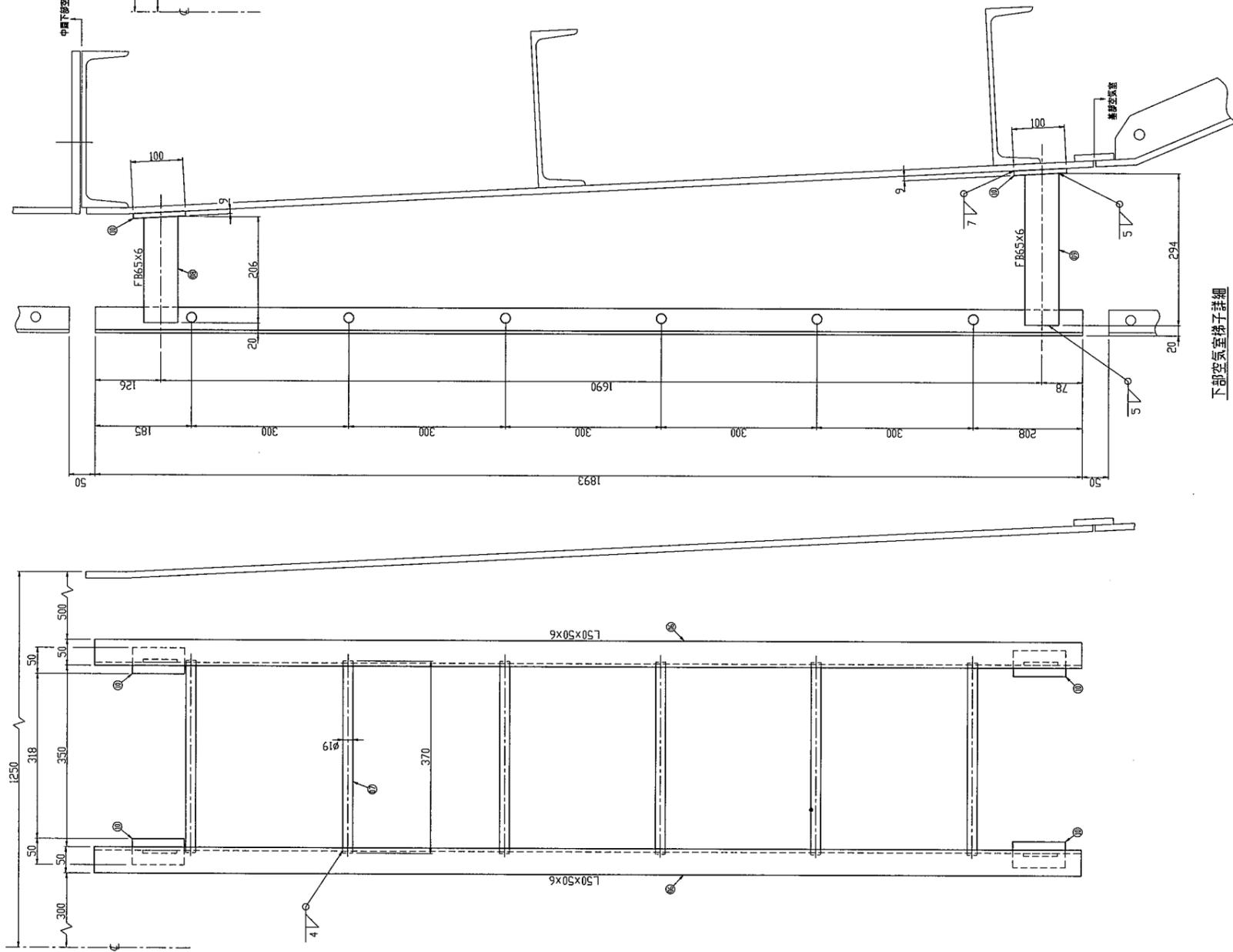


⑦ L50×50×4	0.400×3.06kg/m=1.2kg	8PC	10kg
⑧ L50×50×4	0.300×3.06kg/m=1kg	8PC	8kg
⑨ L50×50×4	0.425×3.06kg/m=1.3kg	16PC	21kg
⑩ L100×50×5	0.600×9.36kg/m=5.6kg	8PC	45kg
⑪ L100×50×5	0.300×9.36kg/m=2.8kg	8PC	23kg
⑫ L125×65×6	0.420×13.4kg/m=5.6kg	4PC	23kg
⑬ 50A-11#H-18(8H)		8PC	11kg
			8# 130kg



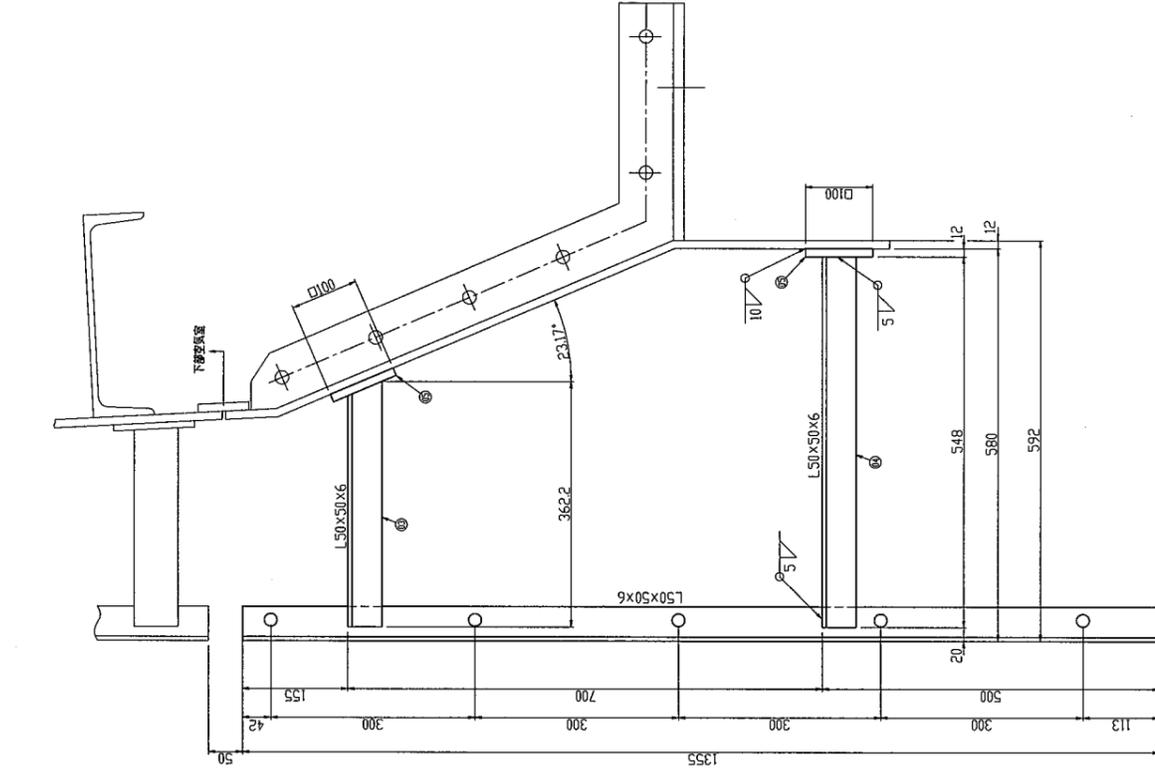
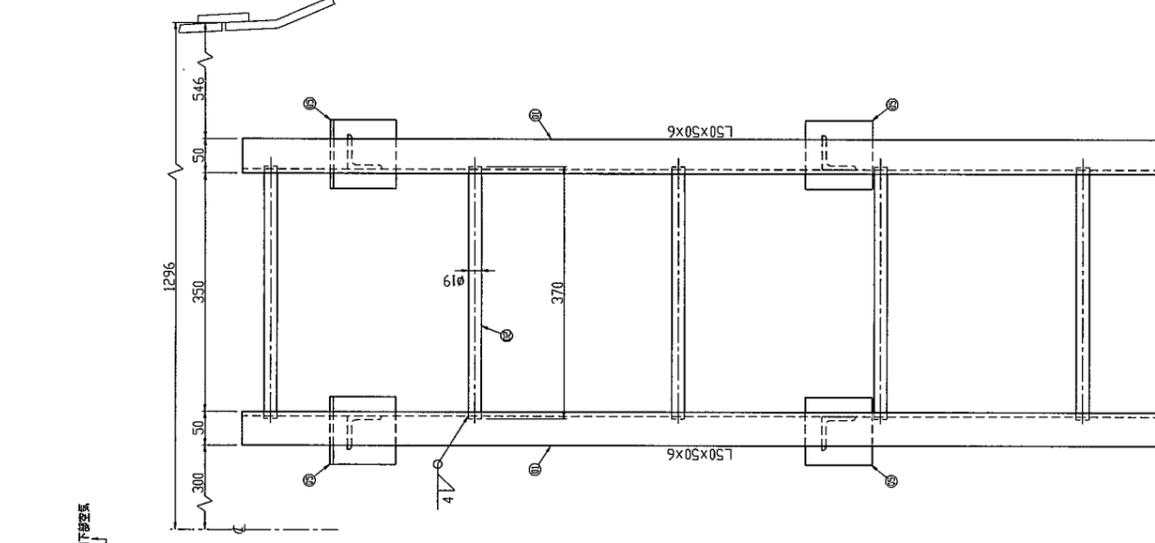
注記
 1. 材質はPL材はSM400A、形鋼はSS400とする。
 2. 特記なき隅肉溶接脚長は√6; t=7=厚板側板厚以上とする。
 3. 施工上必要な所には適宜スカラップを設けること。

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	計測器用座詳細図(その3)	番 号 22/41
担当	審査	承認
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研	



下部空気室構子詳細

① L50×50×6	1.893×4.43kg/m=9kg	2PC	18kg
② 19	0.37×2.23kg/m=1kg	6PC	6kg
③ FB65×6	0.206×3.06kg/m=1kg	2PC	2kg
④ FB65×6	0.294×3.06kg/m=1kg	2PC	2kg
⑤ 19×50×100	1kg	4PC	4kg
			計 32kg



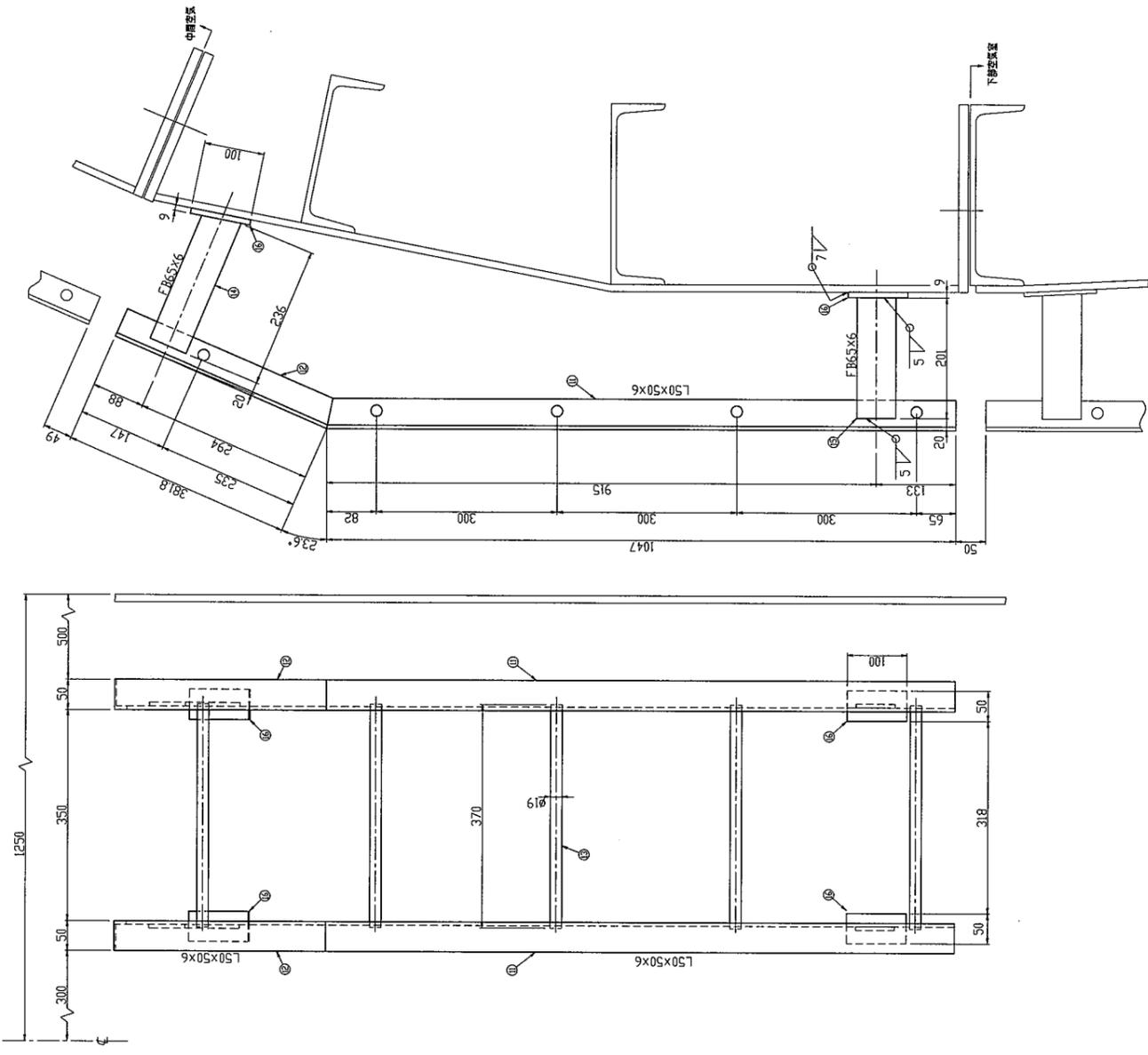
基部空気室構子詳細

① L50×50×6	1.355×4.43kg/m=7kg	2PC	14kg
② 19	0.37×2.23kg/m=1kg	5PC	5kg
③ L50×50×6	0.362×4.43kg/m=2kg	2PC	4kg
④ L50×50×6	0.548×4.43kg/m=3kg	2PC	6kg
⑤ 12×100×100	1kg	4PC	4kg
			計 33kg

注記

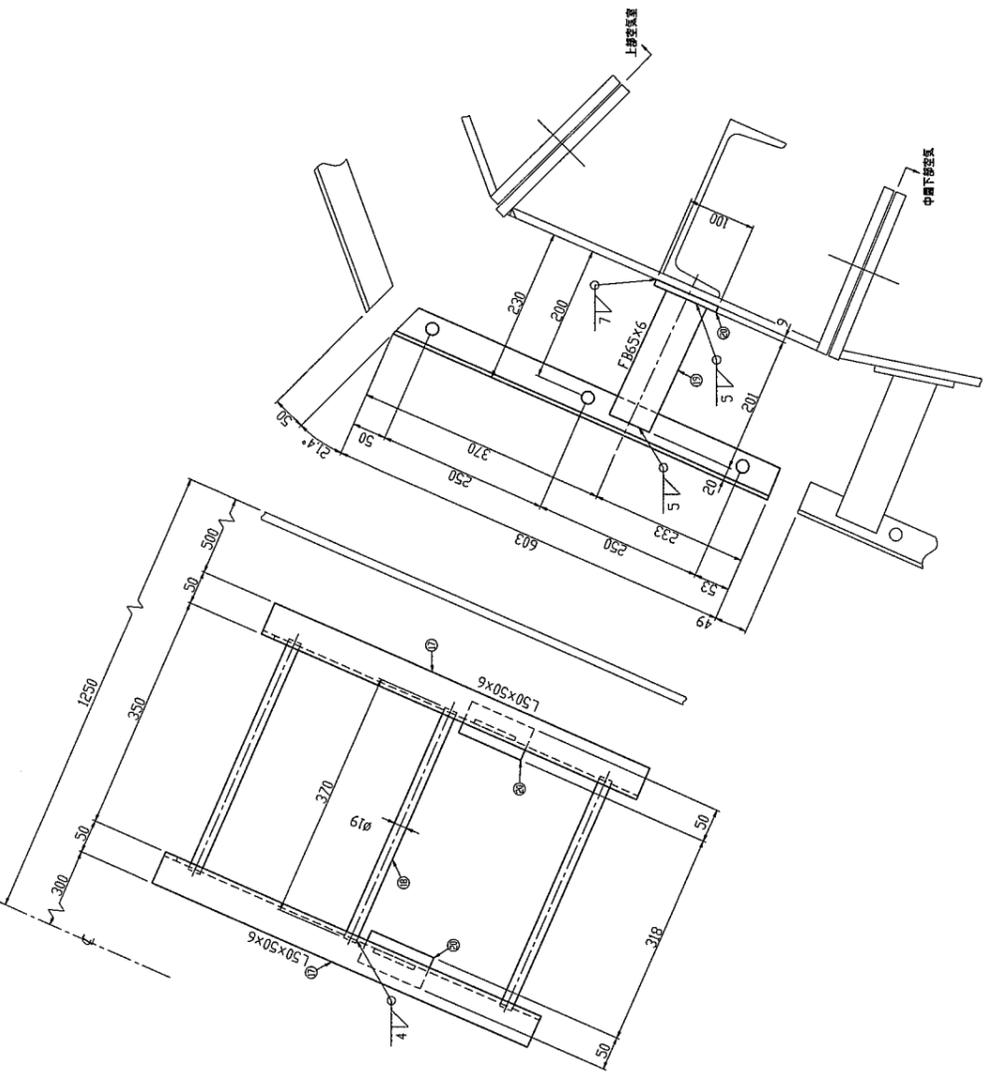
- 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
- 特記なき隅肉溶接脚座は、 ϕ 19mm厚板側板厚以上とする。
- 施工上必要な所には適宜スワラップを設けること。

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	点検構子詳細図(基部, 下部空気室)	番 号 24 / 41
担当	審査	承認
施工者	三菱重工結構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) (株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研	



中間下部空気室梯子詳細

① L50x50x6	1.047x4.43kg/m=5kg	2PC	10kg
② L50x50x6	0.382x4.43kg/m=2kg	2PC	4kg
③ φ19	0.37x2.23kg/m=1kg	5PC	5kg
④ FB65x6	0.236x3.06kg/m=1kg	2PC	2kg
⑤ FB65x6	0.201x3.06kg/m=1kg	2PC	2kg
⑥ t9x50x100	1kg	4PC	4kg
			合計 27kg

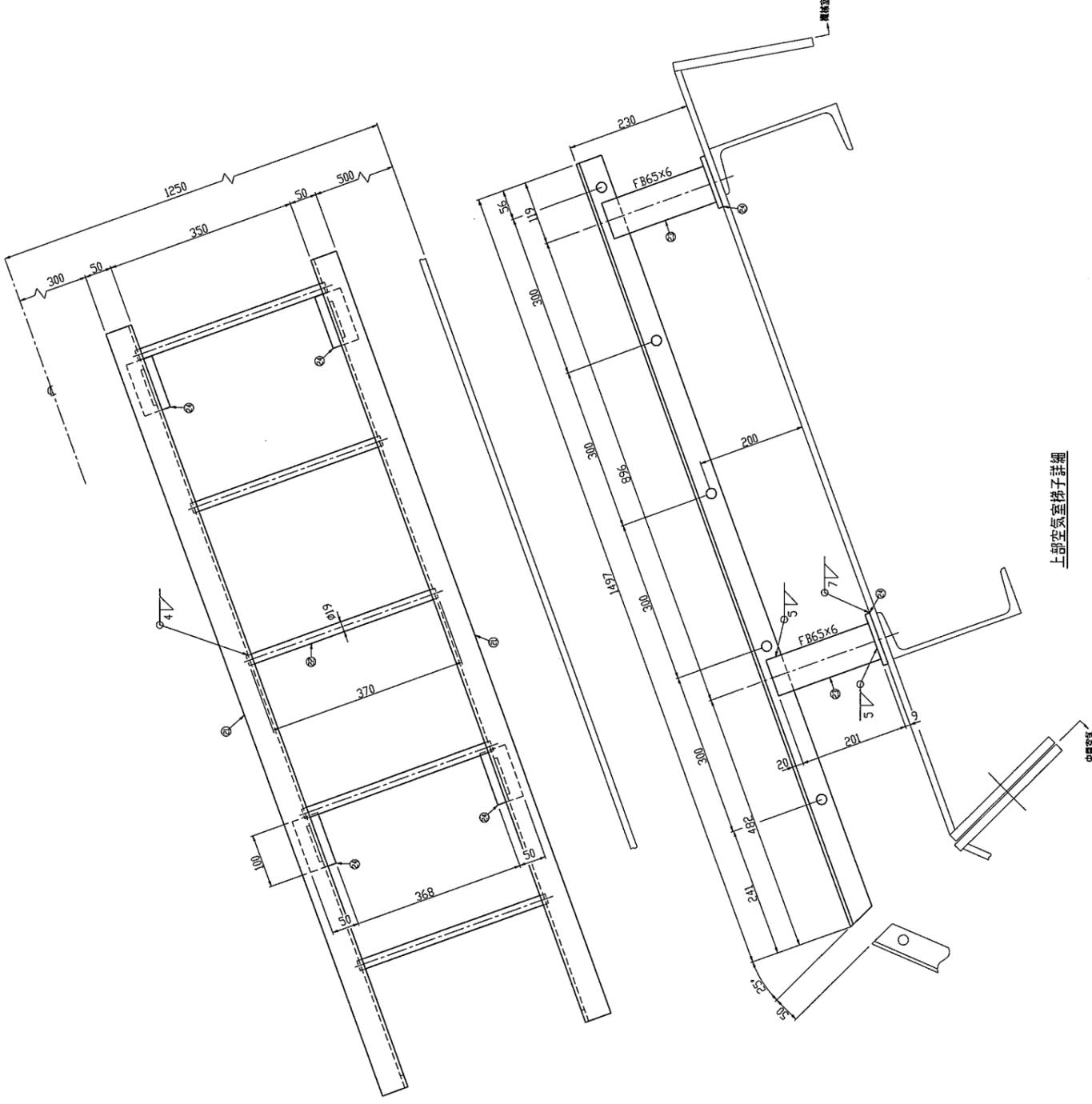


中間部空気室梯子詳細

① L50x50x6	0.603x4.43kg/m=3kg	2PC	6kg
② φ19	0.37x2.23kg/m=1kg	3PC	3kg
③ FB65x6	0.201x3.06kg/m=1kg	2PC	2kg
④ t9x50x100	1kg	2PC	2kg
			合計 13kg

- 注記
1. 材質はPL材はSM400A、形鋼はSS400とする。
 2. 特記なき場合は肉厚は、φは、7mm厚板鋼板厚以上とする。
 3. 施工上必要な所には適宜スカラップを設けること。

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)		
図面タイトル	点検梯子詳細図(中間下部、中間部空気室)	番 号	25 / 41
担当	審査	承認	
施工者	三菱重工設備エンジニアリング(株) 三菱建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研		



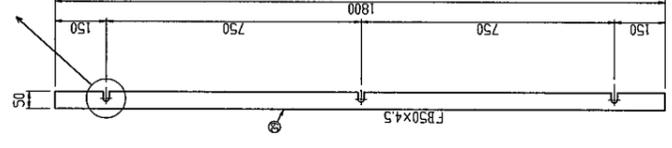
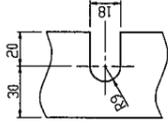
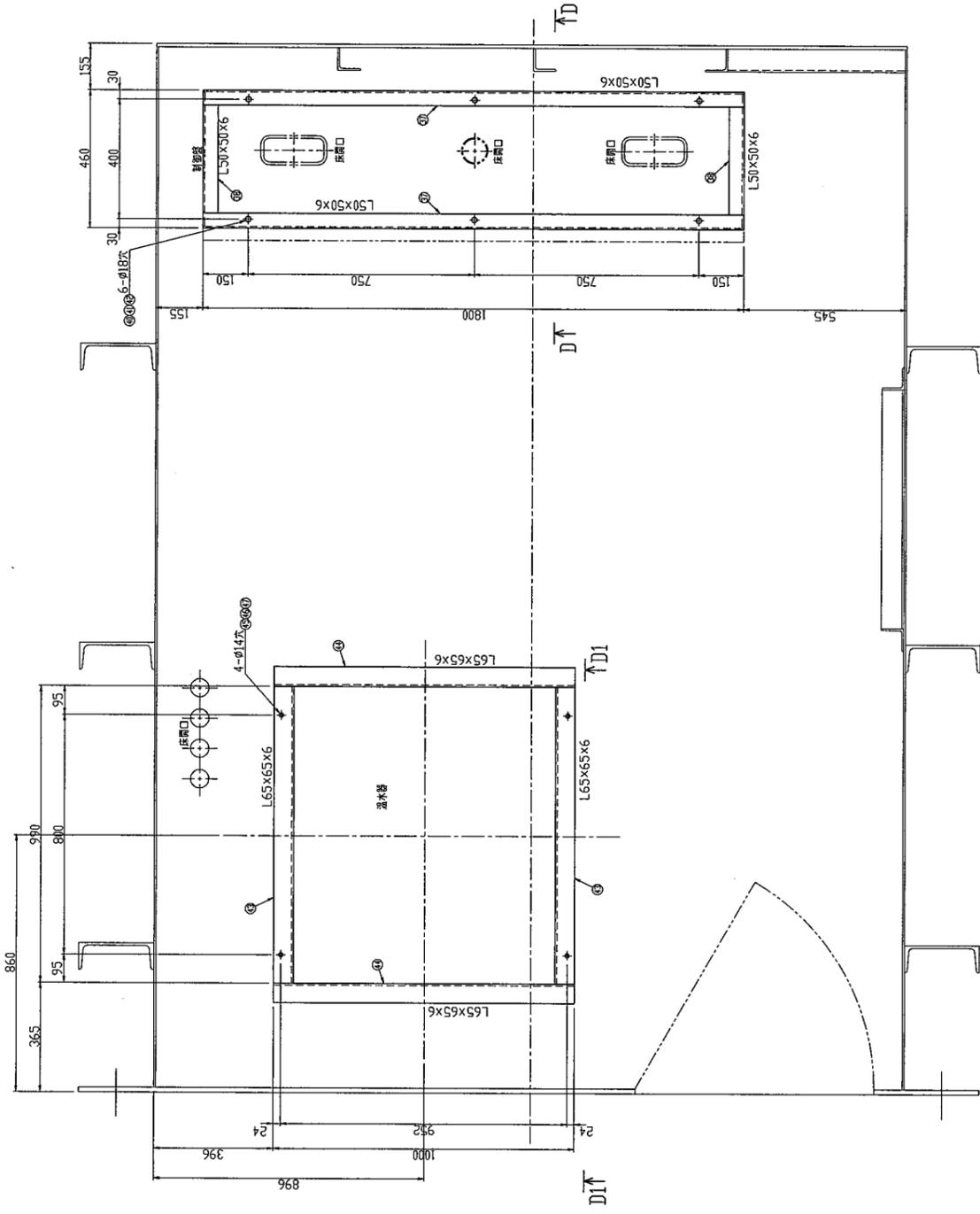
上部空気室梯子詳細

① 1.50x50x6	1.497x4.43kg/m=7kg	2PC	14kg
② φ19	0.37x2.23kg/m=1kg	5PC	5kg
③ F865x6	0.20x3.06kg/m=1kg	4PC	4kg
④ 19x50x100	1kg	4PC	4kg
			合計 27kg

注記

1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
2. 特記なき隅肉溶接脚長は√6t; t=7mm厚板則ち厚以上とする。
3. 施工上必要な所には適宜スカラップを設けること。

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	点検梯子詳細図(上部空気室)	番 号 26 / 41
担当	審査	承認
施工者	三菱重工設備エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) (株)本間組 (株)エイ・エス・アイ総研	

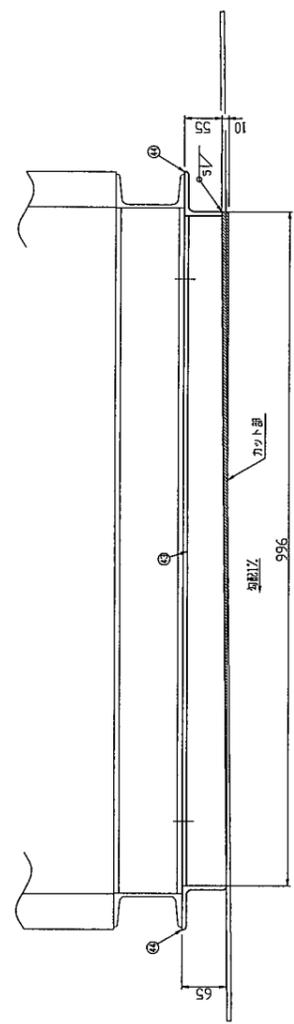


シムライナー詳細

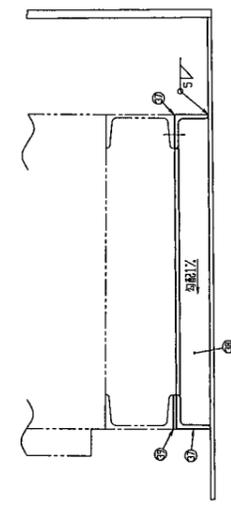
注記

1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
2. 特記なき鋼肉溶接脚長は、左：七=厚板脚長以上とする。
3. 施工上必要な所には適宜スカラップを設けること。

① L50x50x6	1.800x4.43kg/n=8kg	2PC	16kg
② L50x50x6	0.400x4.43kg/n=2kg	2PC	4kg
③ F80x4.5	1.800x1.77kg/n=3kg	1PC	3kg
④ 角ボルト M16x45	φ0.01kg	6PC	1kg
④ ナット	φ0.03kg	6PC	1kg
④ 溶接母線	φ0.03kg	6PC	1kg
④ L65x65x6	0.990x5.91kg/n=6kg	2PC	12kg
④ L65x65x6	1.000x5.91kg/n=6kg	2PC	12kg
④ 角ボルト M12x40	φ0.05kg	4PC	1kg
④ ナット	φ0.02kg	4PC	1kg
④ 溶接母線	φ0.02kg	4PC	1kg
			合計 53kg

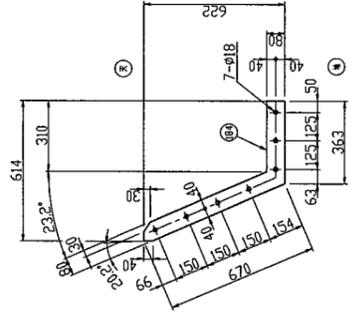


断面 D1-D1

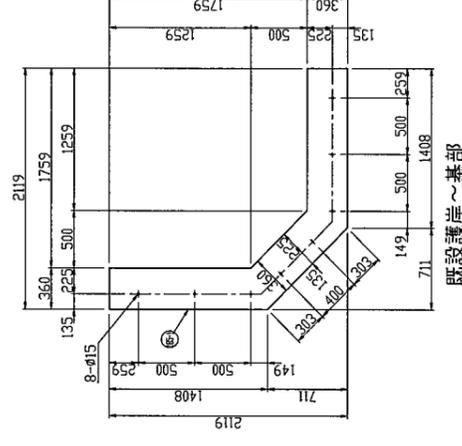


断面 D-D

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	制御盤及び温水器台座詳細図	番 号 28 / 41
担当	審査	承認
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研	

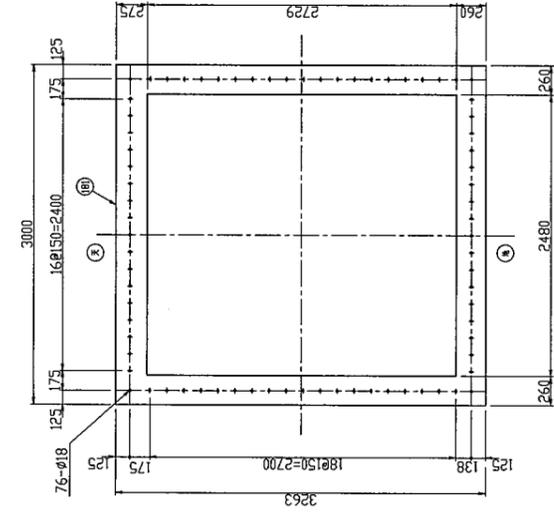


基礎分割部

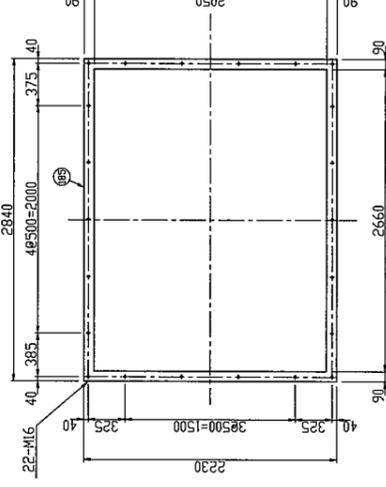


既設護岸～基部

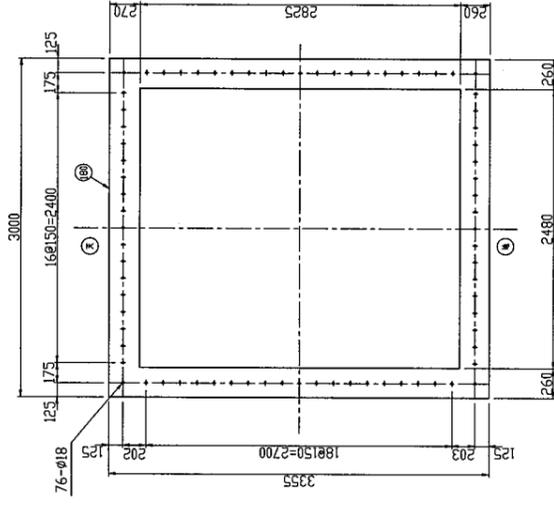
- ⑨ 314φ×27 (φ007)×21A) t3×3300×3350 IPC - kg
- ⑩ 314φ×27 (φ007)×21A) t3×3000×3355 IPC - kg
- ⑪ 314φ×27 (φ007)×21A) t3×3000×3263 IPC - kg
- ⑫ 314φ×27 (φ007)×21A) t3×3000×3039 IPC - kg
- ⑬ 314φ×27 (φ007)×21A) t3×3000×3000 IPC - kg
- ⑭ 314φ×27 (φ007)×21A) t3×614×622 (20Z) 4PC - kg
- ⑮ 314φ×27 (φ007)×21A) t3×2230×2840 IPC - kg
- ⑯ 314φ×27 (φ007)×21A) t8×2119×2119 4PC - kg



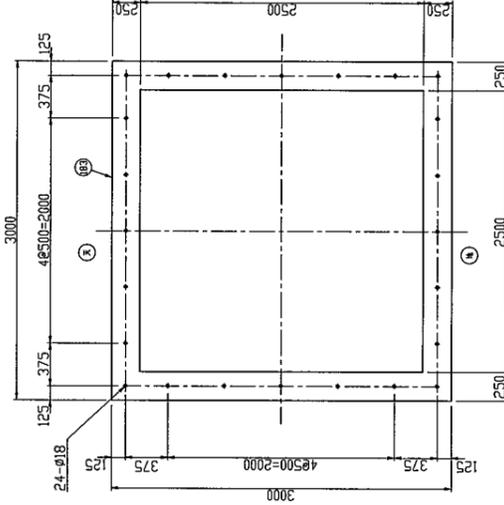
中間部～上部



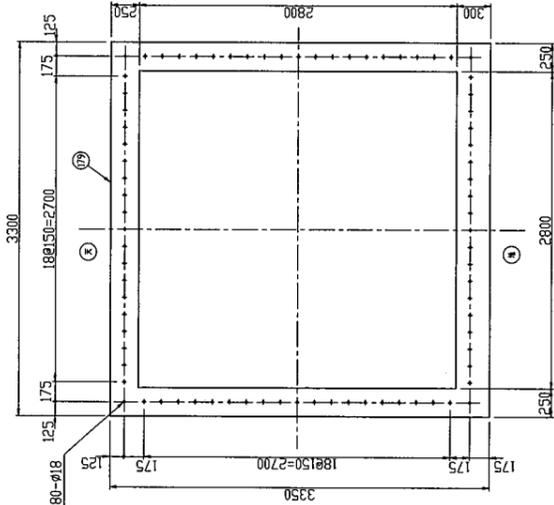
メンテナンス層



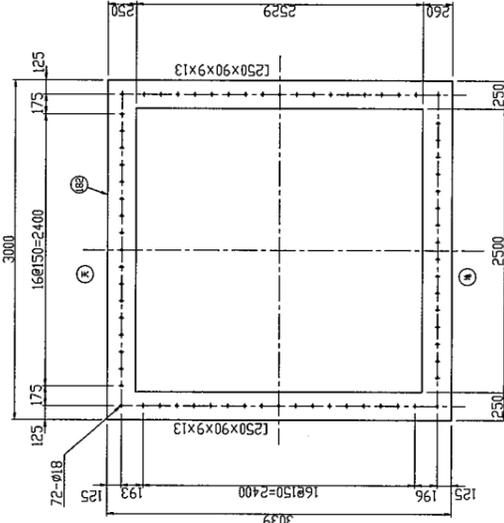
中間下部～中間部



機械室～電気室

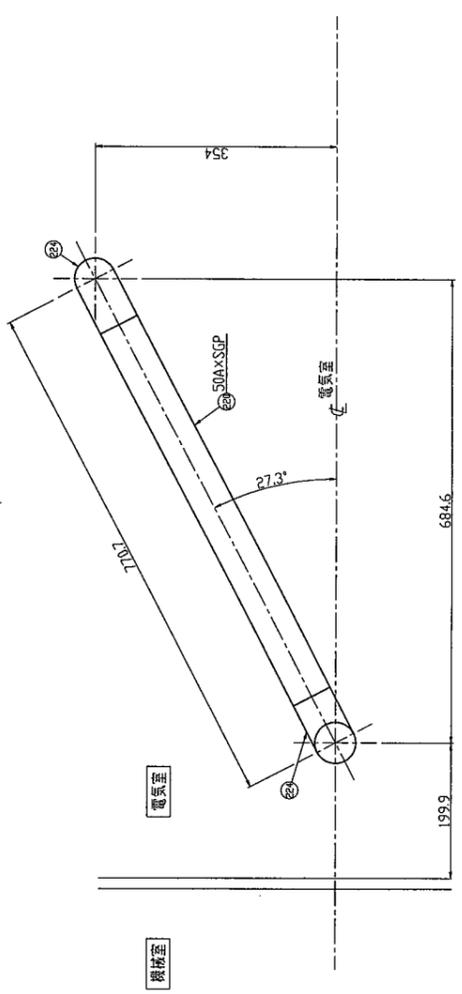
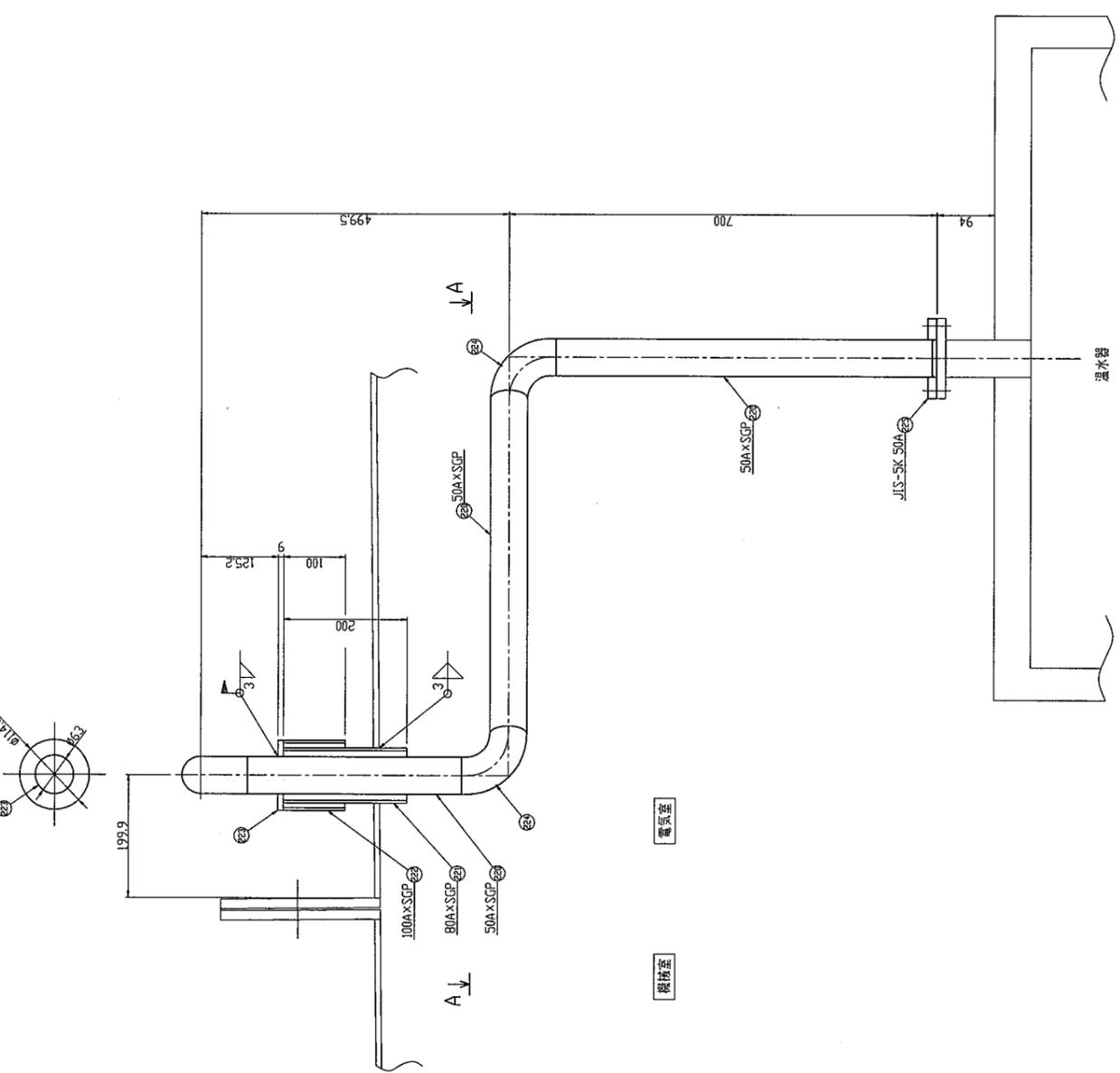
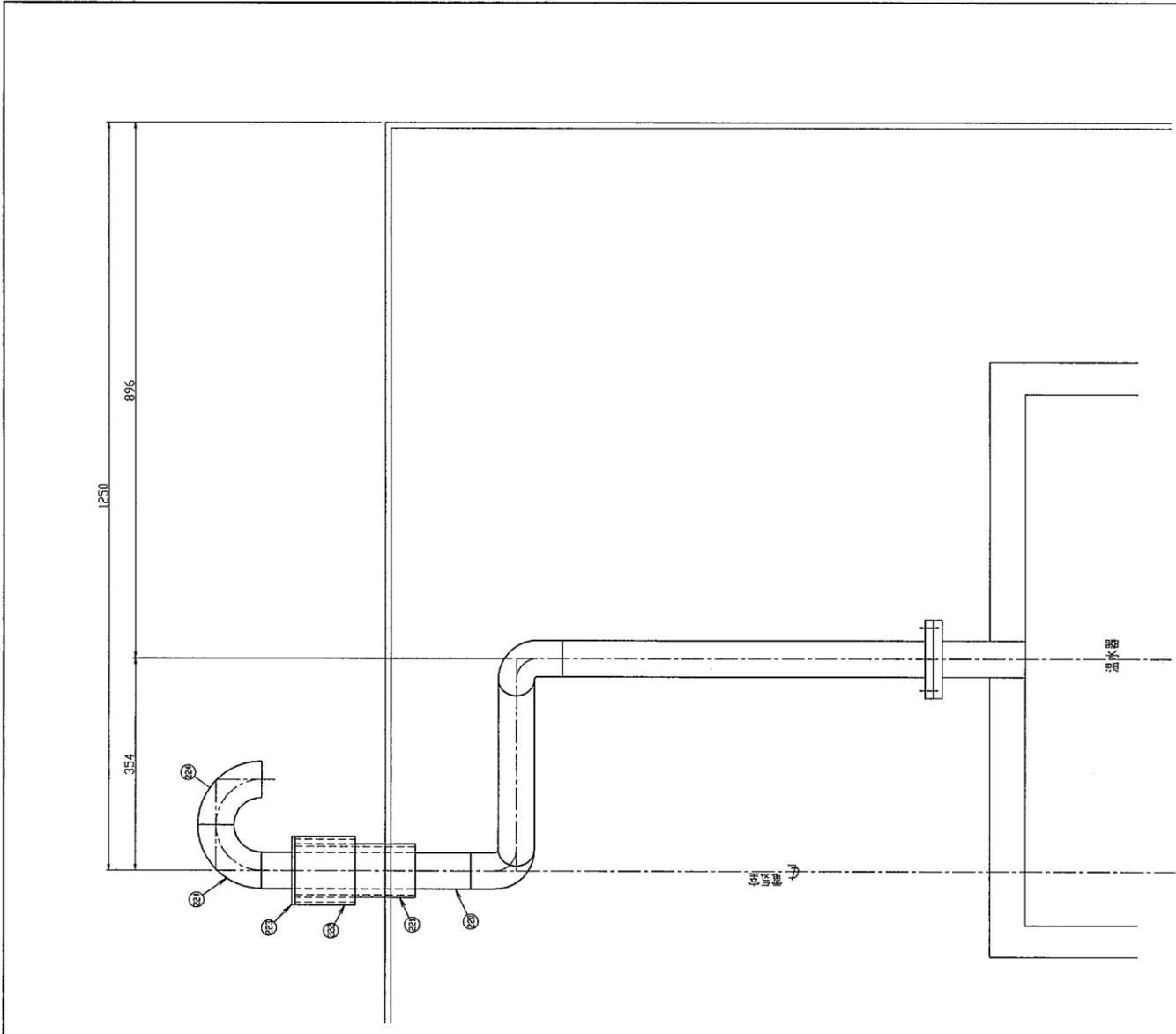


下部～中間下部



上部～機械室

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	ゴムパッキン詳細図	番 30 / 号 41
担当	審査	承認
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) (株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研	

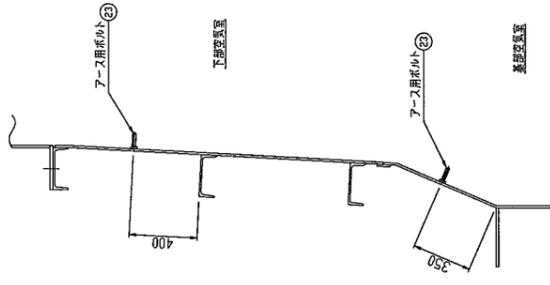


注記

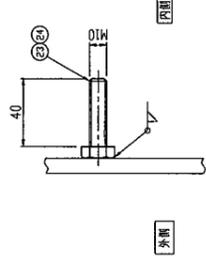
1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
2. 特記なき隅肉肉溶接脚長は、 \sqrt{a} : \sqrt{b} 厚板側板厚以上とする。

㉔ 50A×SGP	1.750×5.31kg/m=10kg	IPC	10kg
㉕ 80A×SGP	0.2×8.79kg/m=2kg	IPC	2kg
㉖ 100A×SGP	0.1×12.2kg/m=2kg	IPC	2kg
㉗ 19×#114.3	1kg	IPC	1kg
㉘ 50A エルブ	0.64	4PC	4kg
㉙ フランジ JIS-5K 50A	0.105	IPC	1kg
			計 20kg

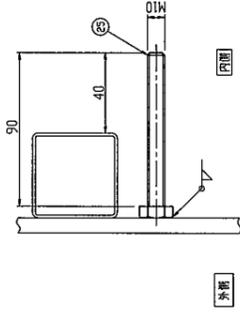
工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	温水器用配管詳細図	番 号 31 / 41
担当	審査	承認
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 西電建設工業(株) (株)本間組 (株)エイ・エス・アイ総研	



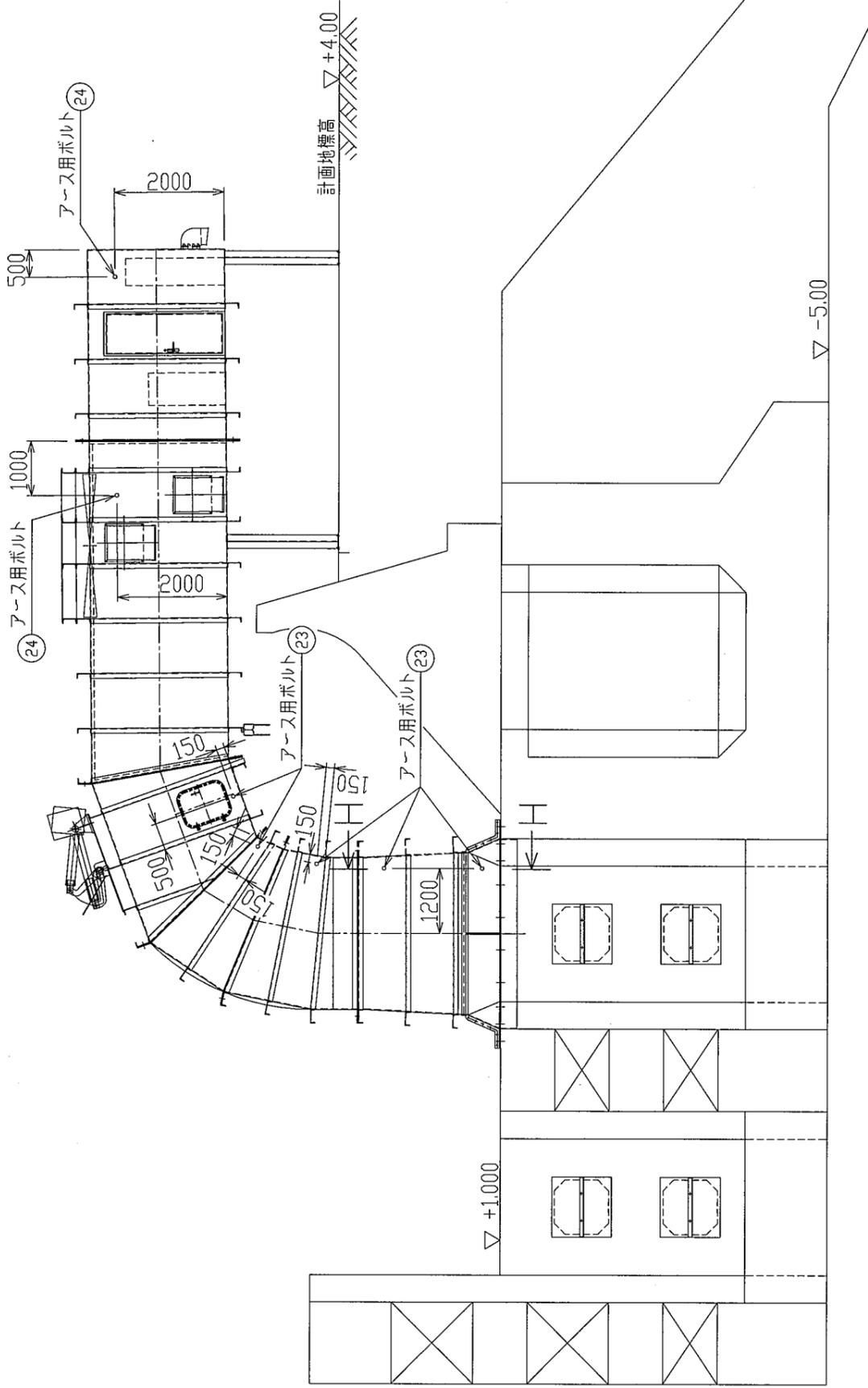
断面 H-H



アース用ボルト詳細
空室部、電線部



アース用ボルト詳細
電線部

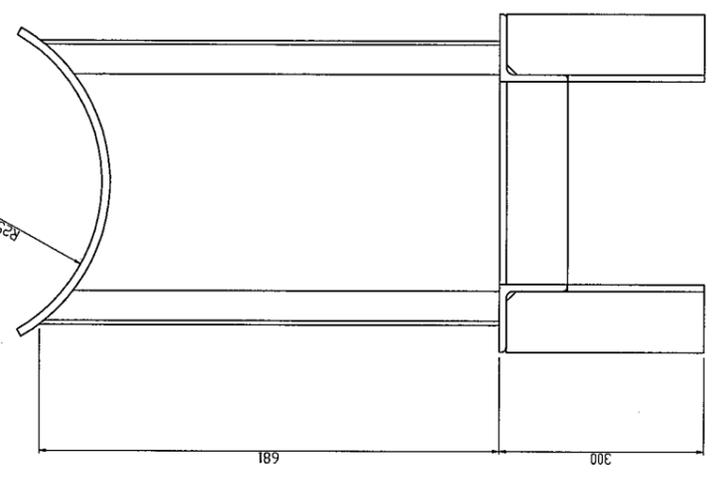
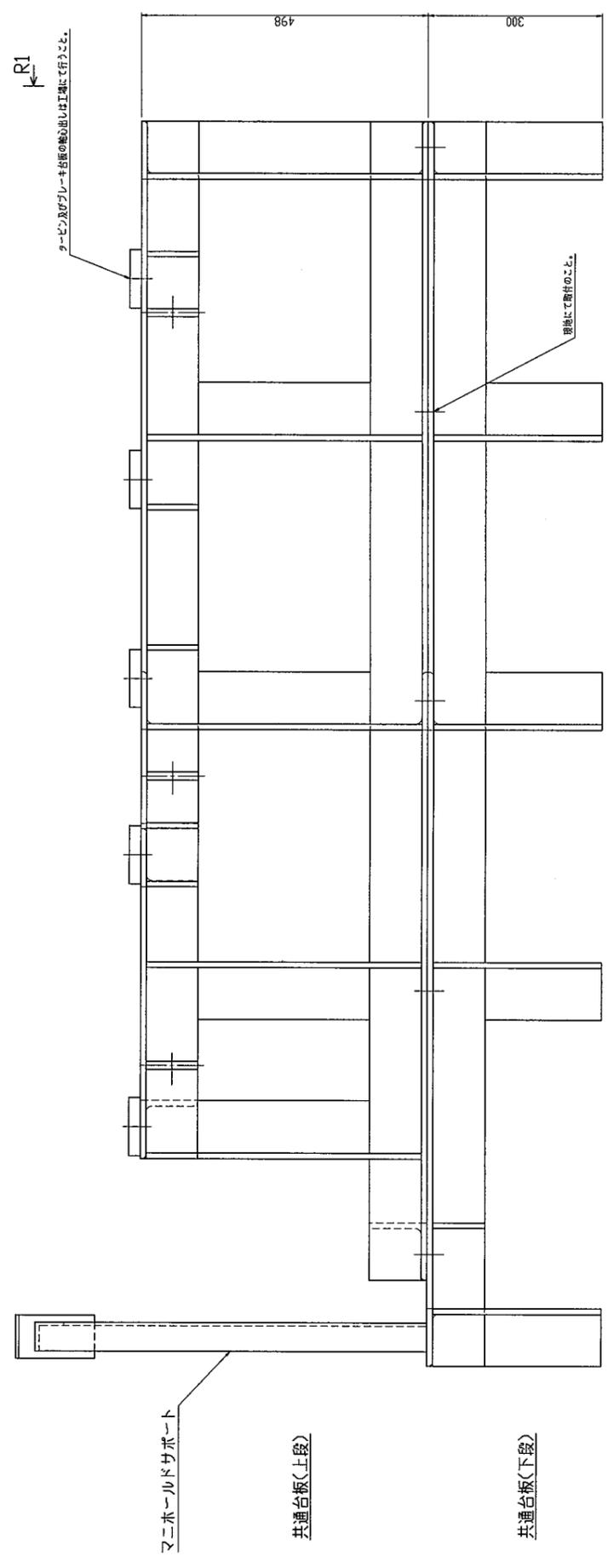
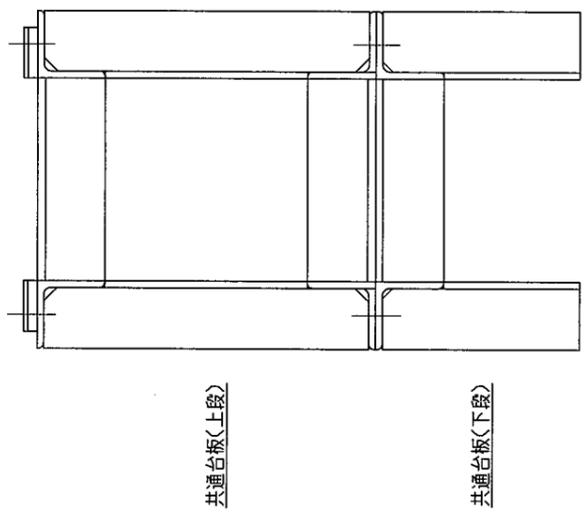
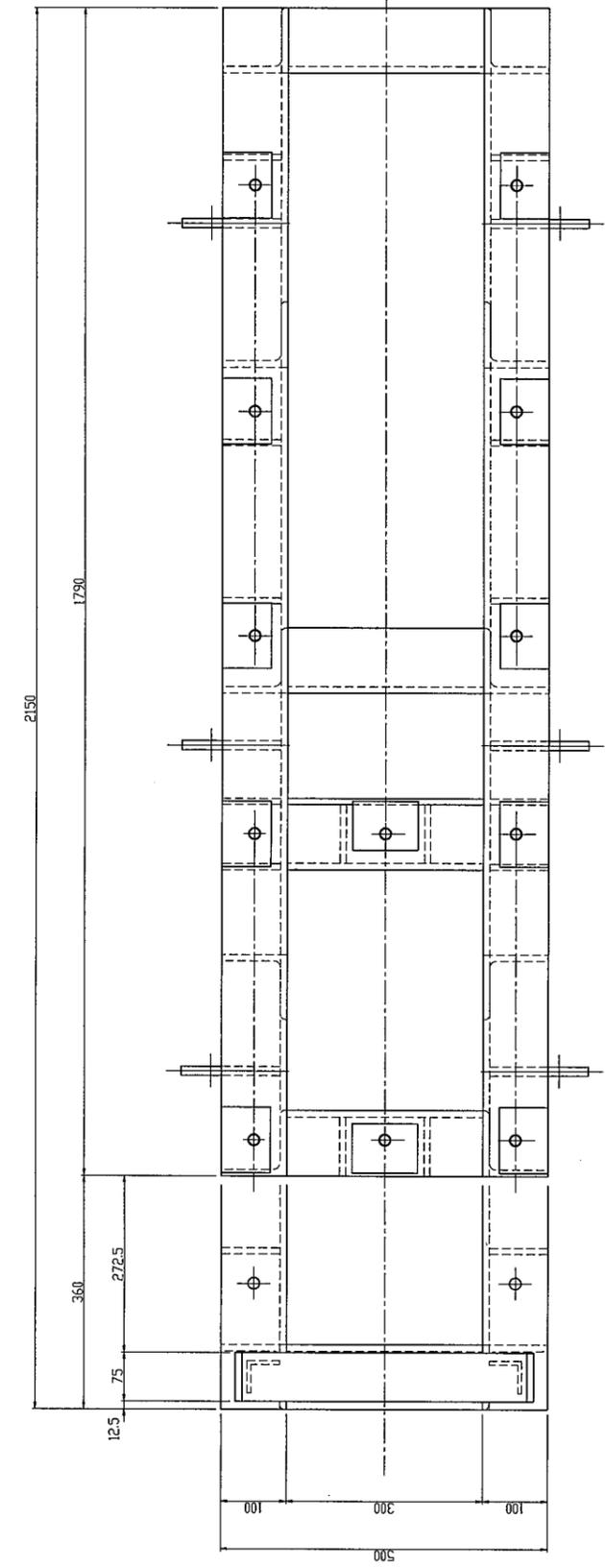


注記

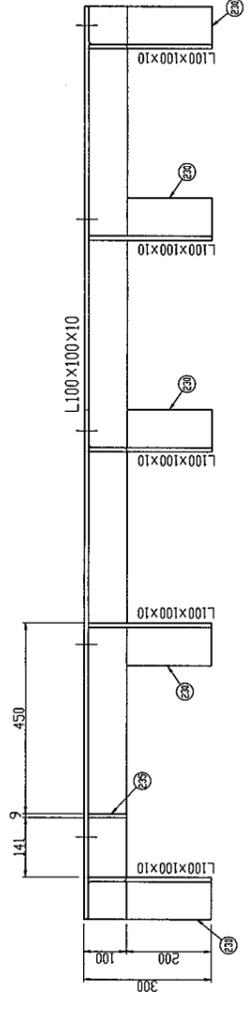
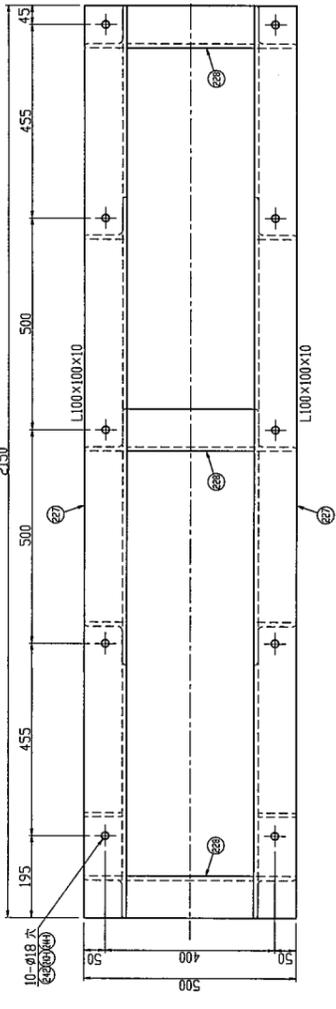
1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
2. 特記なき腫肉溶接脚長は、 \sqrt{t} ； t ＝厚板脚厚以上とする。

② ボルト M10×40	SS400 (メッキ施工)	SFC	1kg
③ 鋼管φ40	SS400 (メッキ施工)	IPC	1kg
④ ボルト M10×40	SS400 (メッキ施工)	IPC	1kg
⑤ ボルト M10×90	SS400 (メッキ施工)	IPC	1kg
			合計 3kg

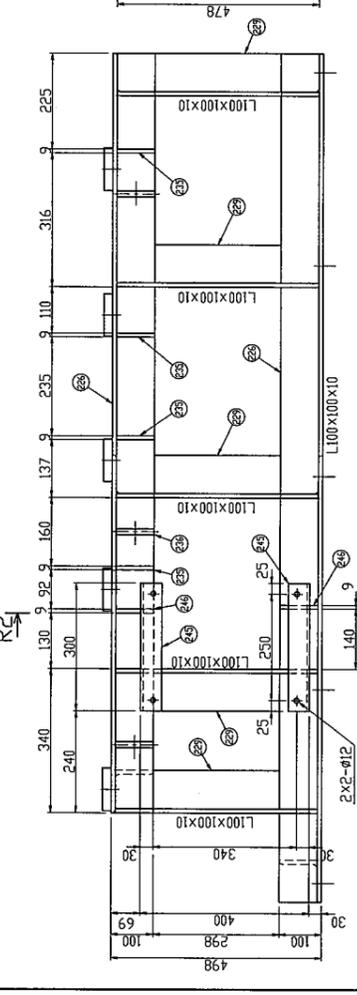
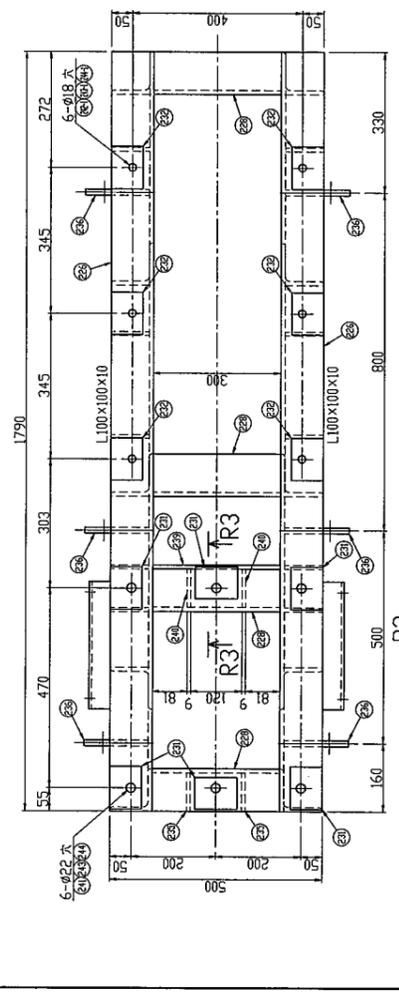
工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	アース用ボルト配置図	番 号 32 / 41
担当	審査	承認
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) (株)本間組 (株)エイ・エス・アイ総研	



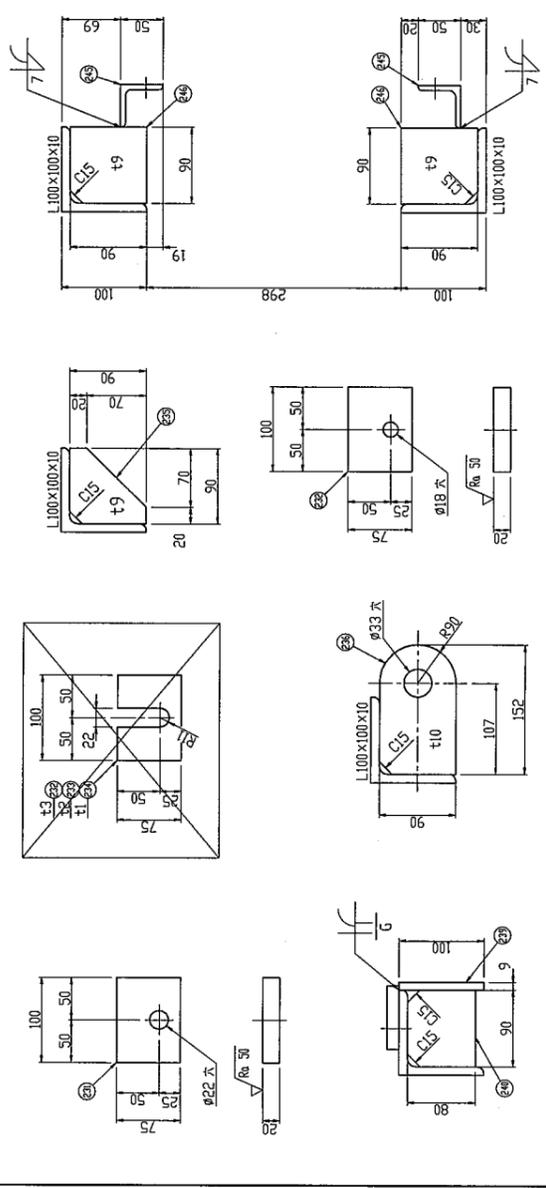
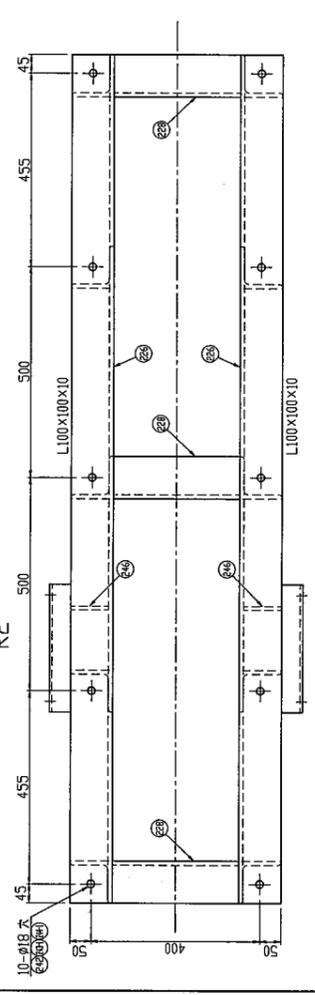
工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)		
図面タイトル	タービン、ブレーキ及び発電機 共通台板詳細図(その1)	番 号	33 / 41
担当	審査	承認	
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研		



共通台板(下段)



共通台板(上段)



断面 R2-R2

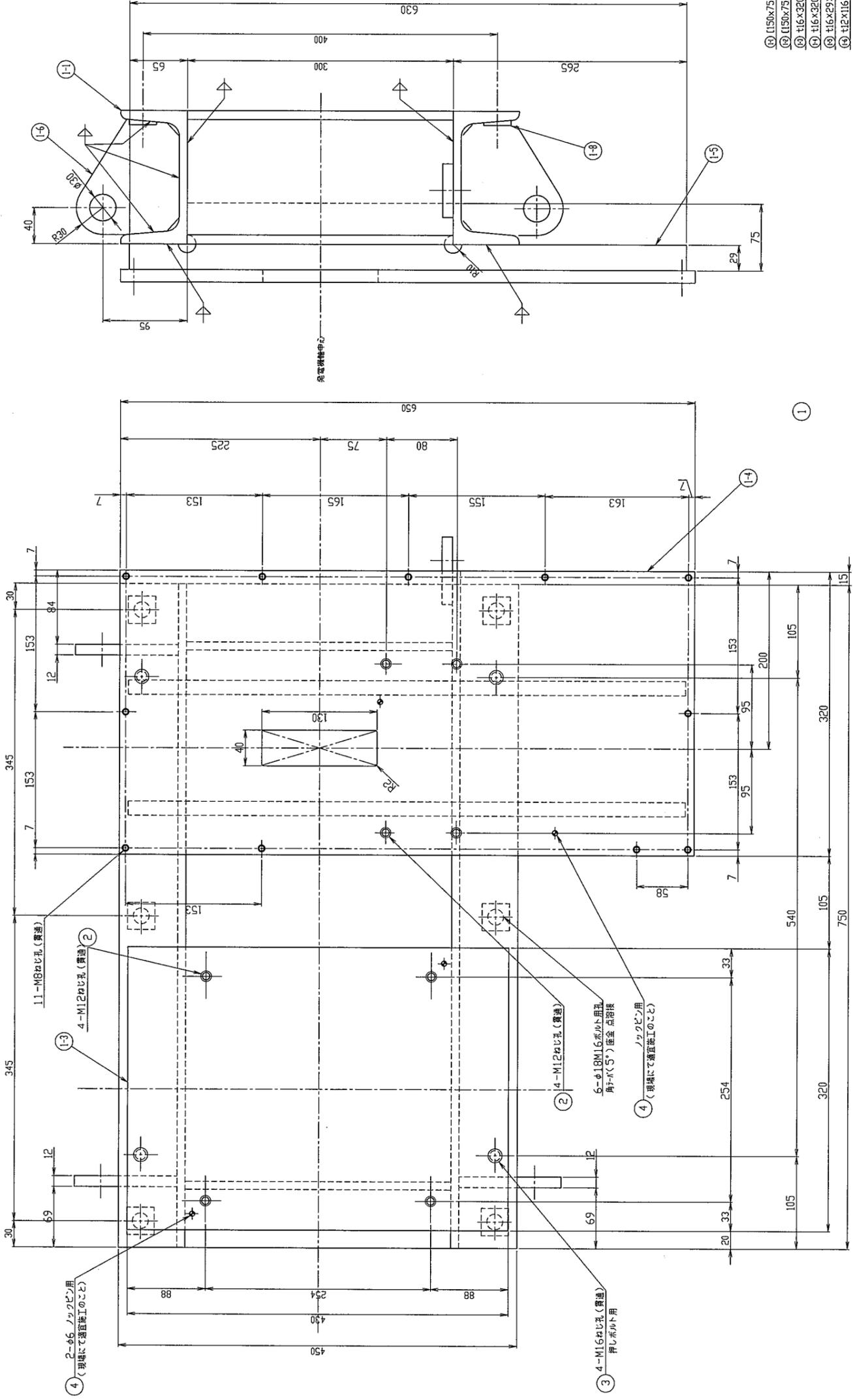
断面 R3-R3

① L100x100x10	1.790x14.9kg/n=27kg	4PC	108kg
② L100x100x10	2.150x14.9kg/n=33kg	2PC	66kg
③ L100x100x10	0.300x14.9kg/n=5kg	10PC	50kg
④ L100x100x10	0.239x14.9kg/n=4kg	10PC	40kg
⑤ L100x100x10	0.230x14.9kg/n=4kg	10PC	40kg
⑥ t22x75x100	2kg (標準加工 t20)	6PC	12kg
⑦ t22x75x100	2kg (標準加工 t20)	6PC	12kg
⑧ t22x75x100	1kg	24PC	24kg
⑨ t10x75x100	1kg	24PC	24kg
⑩ t9x80x90	1kg	12PC	12kg
⑪ t10x90x152	2kg	6PC	12kg
⑫ L50x50x6	0.731x4.43kg/n=4kg	2PC	8kg
⑬ t12x75x104	8kg	1PC	8kg
⑭ t9x100x300	3kg	1PC	3kg
⑮ t9x80x90	1kg	2PC	2kg
⑯ 角材 M20x65	φ0.221kg	6PC	2kg
⑰ 角材 M16x50	φ0.108kg	10PC	1kg
⑱ 角材 M16x65	φ0.132kg	6PC	1kg
⑳ ナット M20	φ0.064kg	6PC	1kg
㉑ ナット M16	φ0.034kg	16PC	1kg
㉒ ビス M20	φ0.023kg	6PC	1kg
㉓ ビス M16	φ0.012kg	16PC	1kg
㉔ L50x50x6	2kg	4PC	8kg
㉕ t9x90x90	1kg	4PC	4kg
			合計 392kg

注記
 1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
 2. 特記なき箇所は肉厚は4mm, 形鋼は7mm厚板厚以上とする。
 3. 施工上必要な所には適宜スカラーを設けること。

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)		
図面タイトル	タービン、ブレーキ及び発電機 共通台板詳細図(その2)	番 号	34/41
担当	審査	承認	
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研		

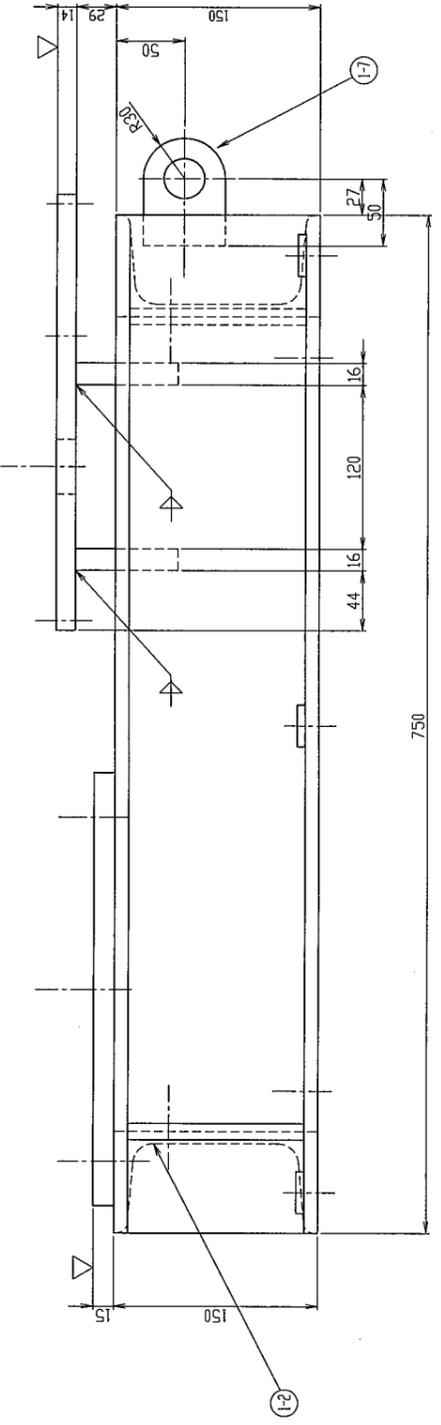
マニホールサポート

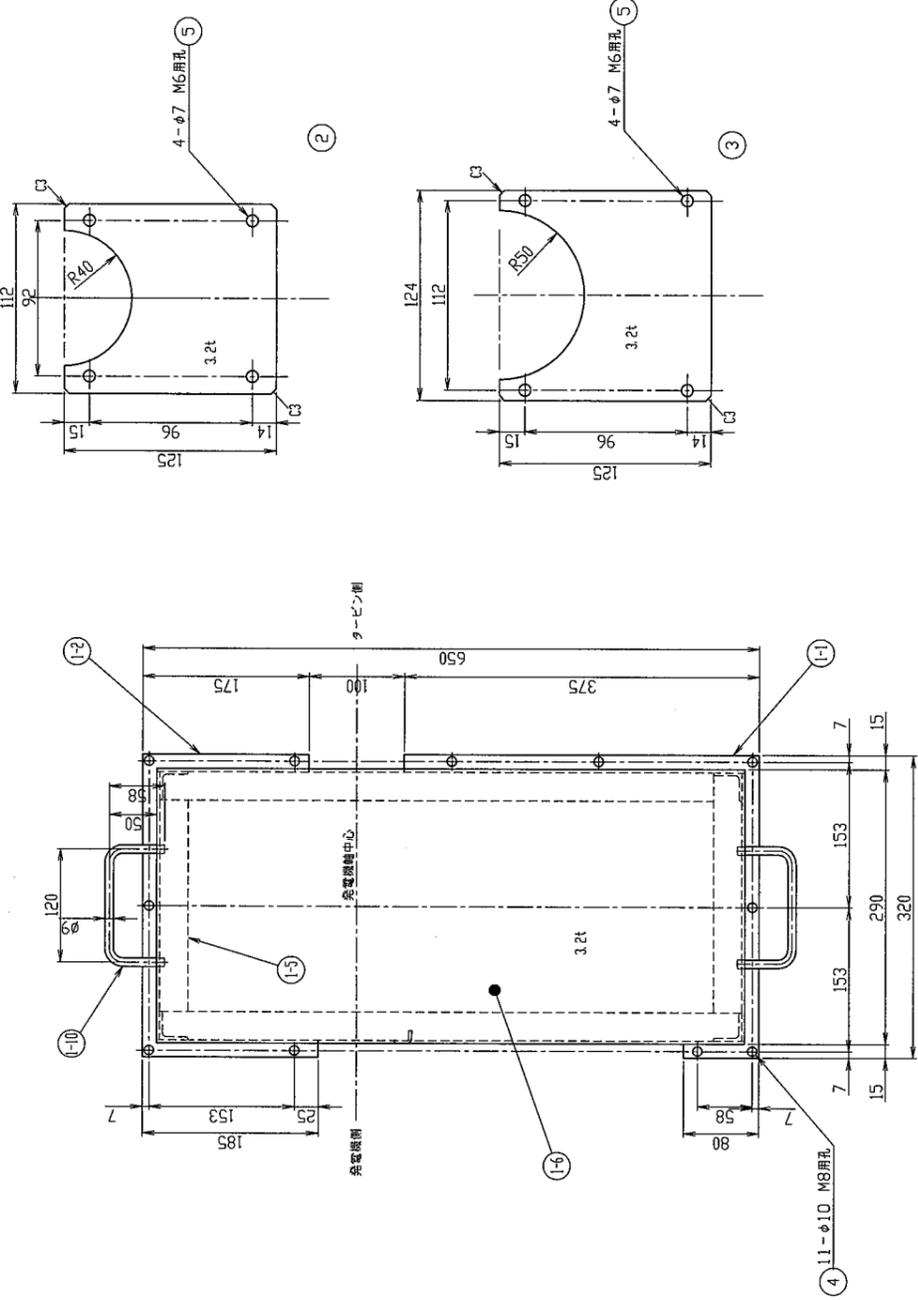


備考
 1. 指示無き箇所の図線は「V」のこと。
 2. 塗装：耐腐蝕塗装、N5塗装色

⑩	1150x75x9x12.5	0.750x24kg/m=18kg	2PC	36kg
⑨	1150x75x9x12.5	0.300x24kg/m=7.2kg	2PC	14.4kg
⑧	t16x320x430	15.1kg	IPC	15.1kg
⑦	t16x320x650	26.1kg	IPC	26.1kg
⑥	t16x29x730	6.9kg	2PC	6.9kg
⑤	t12x116x130	1.3kg	3PC	3.9kg
④	t12x60x80	0.5kg	IPC	0.5kg
③	角鉄片寸法φ M16	-	6PC	-
②	六角穴付きボルト(1本標準寸法) M12x35	-	8PC	-
①	ボルト・ナット(標準寸法) M16x60	-	4PC	-
①	ワッペン φ6x40	-	4PC	-
※計 103kg				

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)		
図面タイトル	波力発電機装置(その2)	番 号	36 / 41
担当	審査	承認	
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) (株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研		

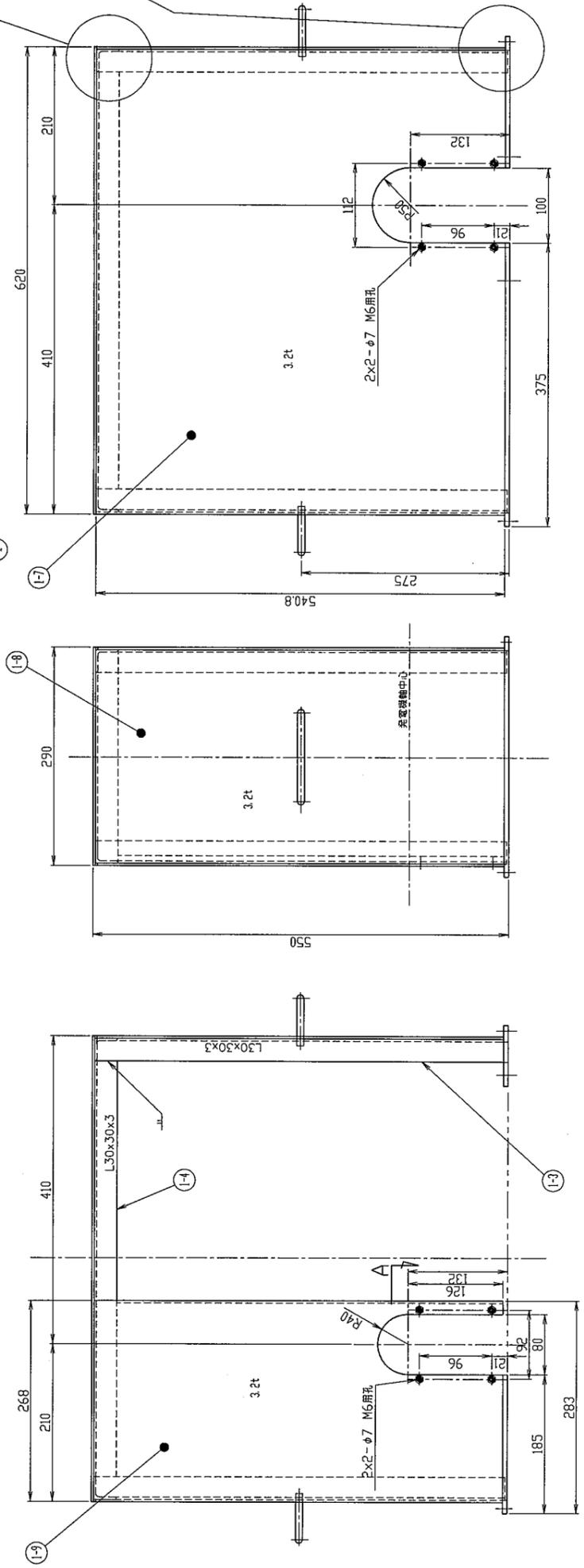




A 矢視

点溶接
他の箇所もこれに準ず

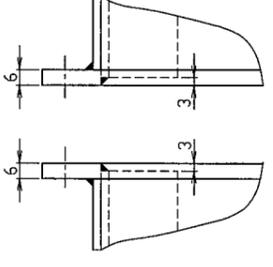
M6ナット (11)



備考
1. 指示線き箇所の溶接部は「V」のこと。
2. 塗装：耐塩塗装、N5塗装色

① 16x320x375	0.6kg	IPC	0.6kg
② 16x185x320	0.5kg	IPC	0.5kg
③ L30x30x3	0.5438x1.36kg=0.7kg	4PC	2.8kg
④ L30x30x3	0.6076x1.36kg=0.8kg	2PC	1.6kg
⑤ L30x30x3	0.2236x1.36kg=0.3kg	2PC	0.6kg
⑥ 13.2x540.8x620	4.5kg	IPC	4.5kg
⑦ 13.2x540.8x620	8.4kg	IPC	8.4kg
⑧ 13.2x283.6x540.8	3.8kg	2PC	7.6kg
⑨ 13.2x278x540.8	3.7kg	IPC	3.7kg
⑩ φ9xE35	0.1kg	2PC	0.2kg
⑪ ナット M6	-	8PC	-
⑫ 13.2x112x125	0.4kg	IPC	0.4kg
⑬ 13.2x124x125	0.4kg	IPC	0.4kg
⑭ 六角形きボルト(14mm全長計) M8x20	-	1IPC	-
⑮ ボルト(14mm全長計) M6x16	-	8PC	-
合計 31.3kg			

工事名	平成26年度 空気のタービン式波力発電装置 (酒田実証機)		
図面タイトル	波力発電機装置 (その3)	番 号	37 / 41
担当	審査	承認	
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研		

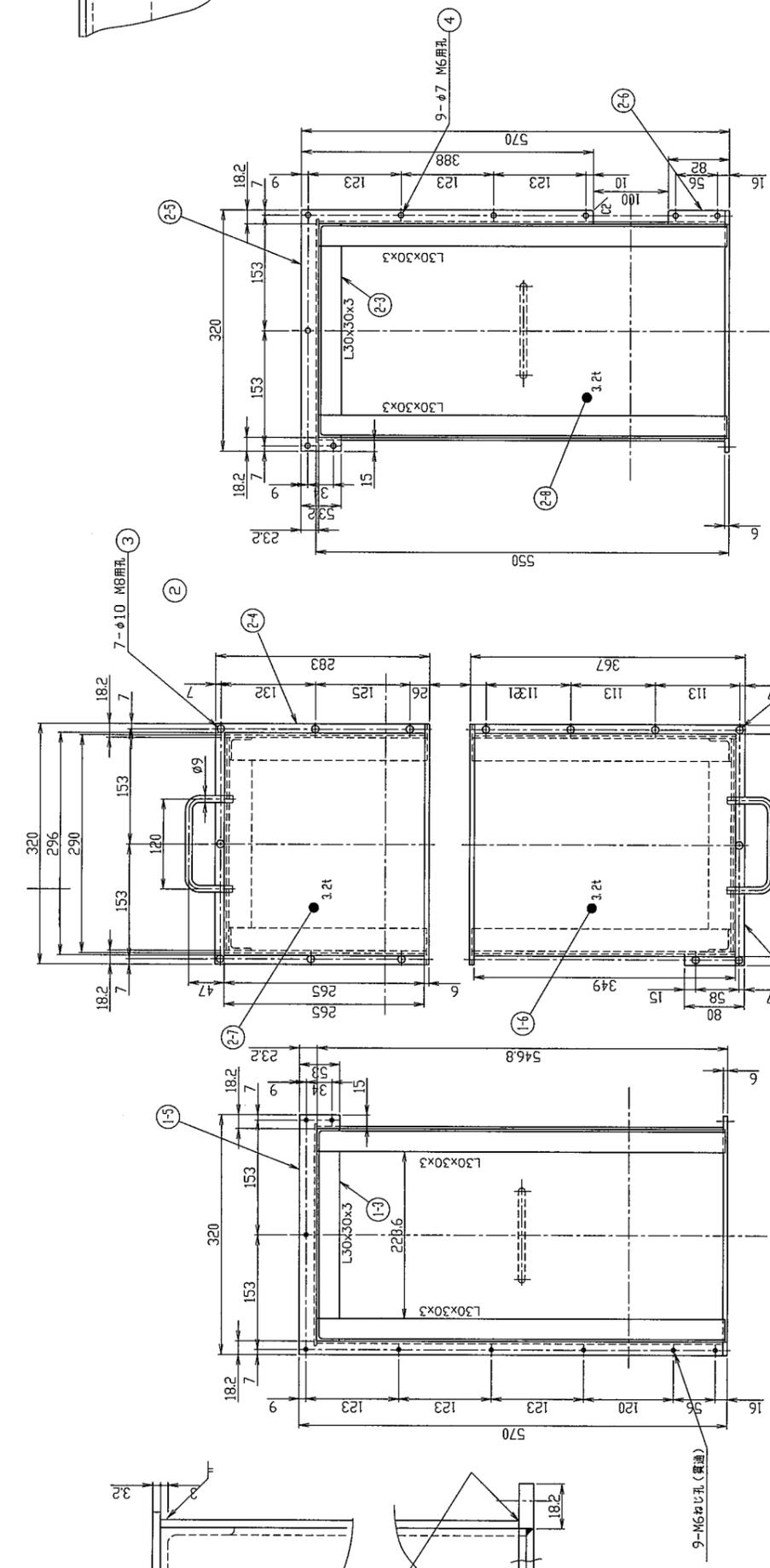


A部詳細

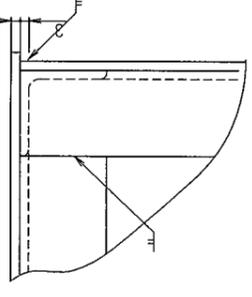
30 80
ボルト付近は図はる
他の箇所もこれに倣う

備考
1. 指示無き箇所の溶接部は▽のこと。
2. 塗装：防腐塗装、NS塗装色

① L30x30x3	0.5438x1.36kg=0.7kg	2PC	1.4kg
② L30x30x3	0.3458x1.36kg=0.5kg	2PC	1kg
③ L30x30x3	0.2236x1.36kg=0.3kg	1PC	0.3kg
④ 16x320x364	0.6kg	1PC	0.6kg
⑤ 16x320x564	0.8kg	1PC	0.8kg
⑥ t3.2x296x349	2.6kg	1PC	2.6kg
⑦ t3.2x283.6x540.8	3.9kg	1PC	3.9kg
⑧ t3.2x349x540.8	4.7kg	1PC	4.7kg
⑨ ø9x235	0.1kg	1PC	0.1kg
⑩ L30x30x3	0.5438x1.36kg=0.7kg	1PC	0.7kg
⑪ L30x30x3	0.2518x1.36kg=0.4kg	1PC	0.4kg
⑫ L30x30x3	0.2236x1.36kg=0.3kg	4PC	1.2kg
⑬ t6x280x320	0.7kg	1PC	0.7kg
⑭ t6x320x388	0.7kg	1PC	0.7kg
⑮ t6x182x82	0.1kg	1PC	0.1kg
⑯ t3.2x265x296	2kg	1PC	2kg
⑰ t3.2x283.6x337.8	3.8kg	1PC	3.8kg
⑱ t3.2x265x540.8	3.5kg	1PC	3.5kg
⑳ t3.2x270x540.8	3.6kg	1PC	3.6kg
㉑ ø9x235	0.1kg	1PC	0.1kg
㉒ 六角付きボルト(12mm径以下) M8x20	-	14PC	-
㉓ 六角(12mm径以下) M6x16	-	9PC	-
合計			15.4kg

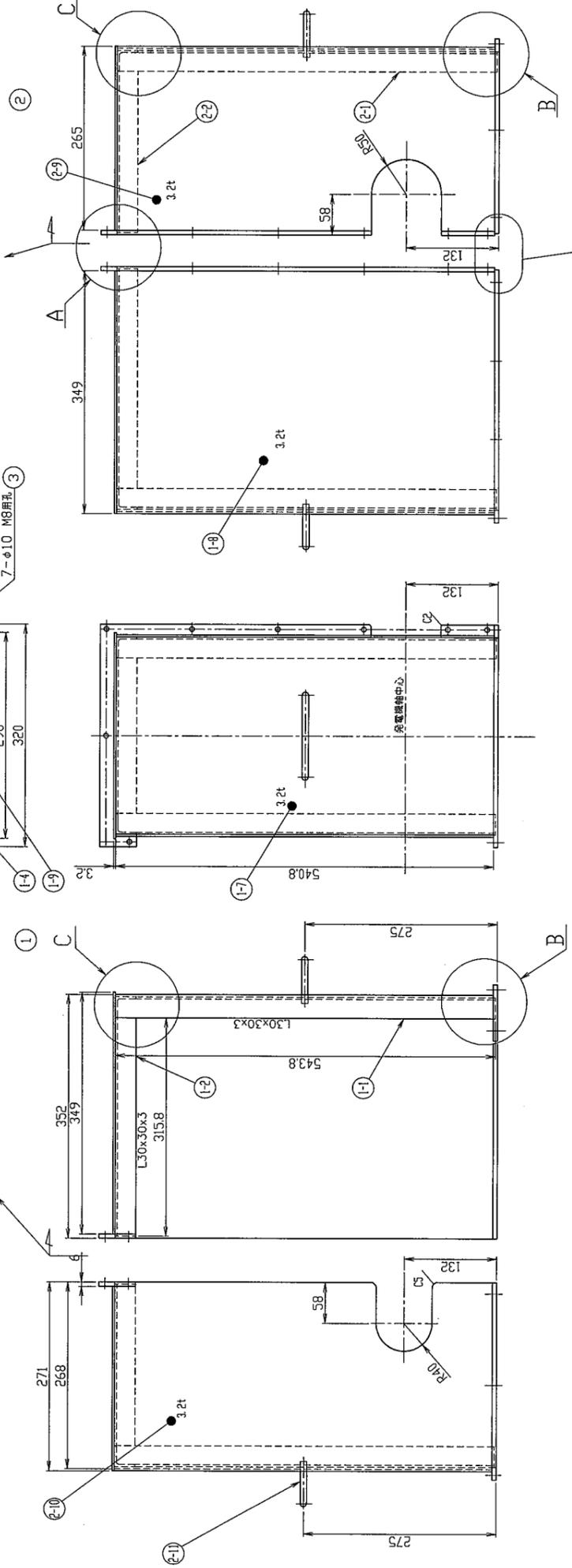
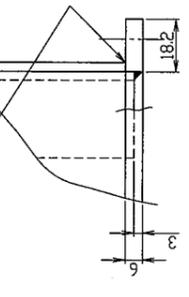


C部詳細

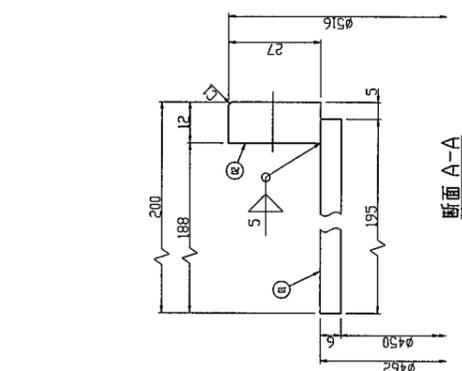
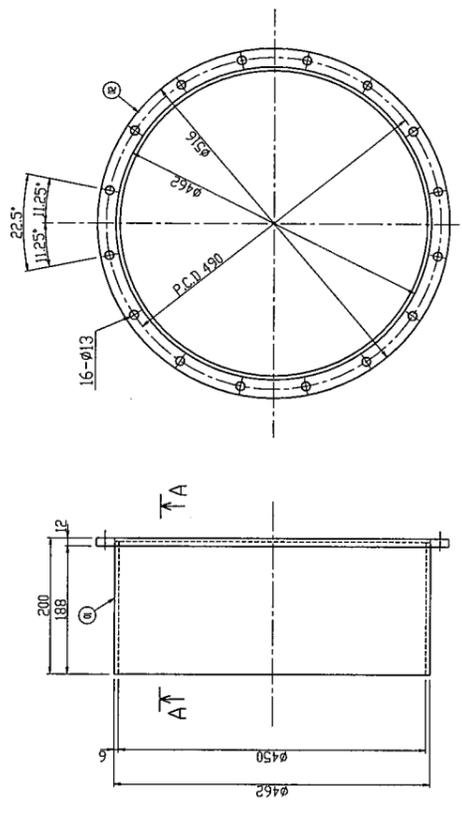
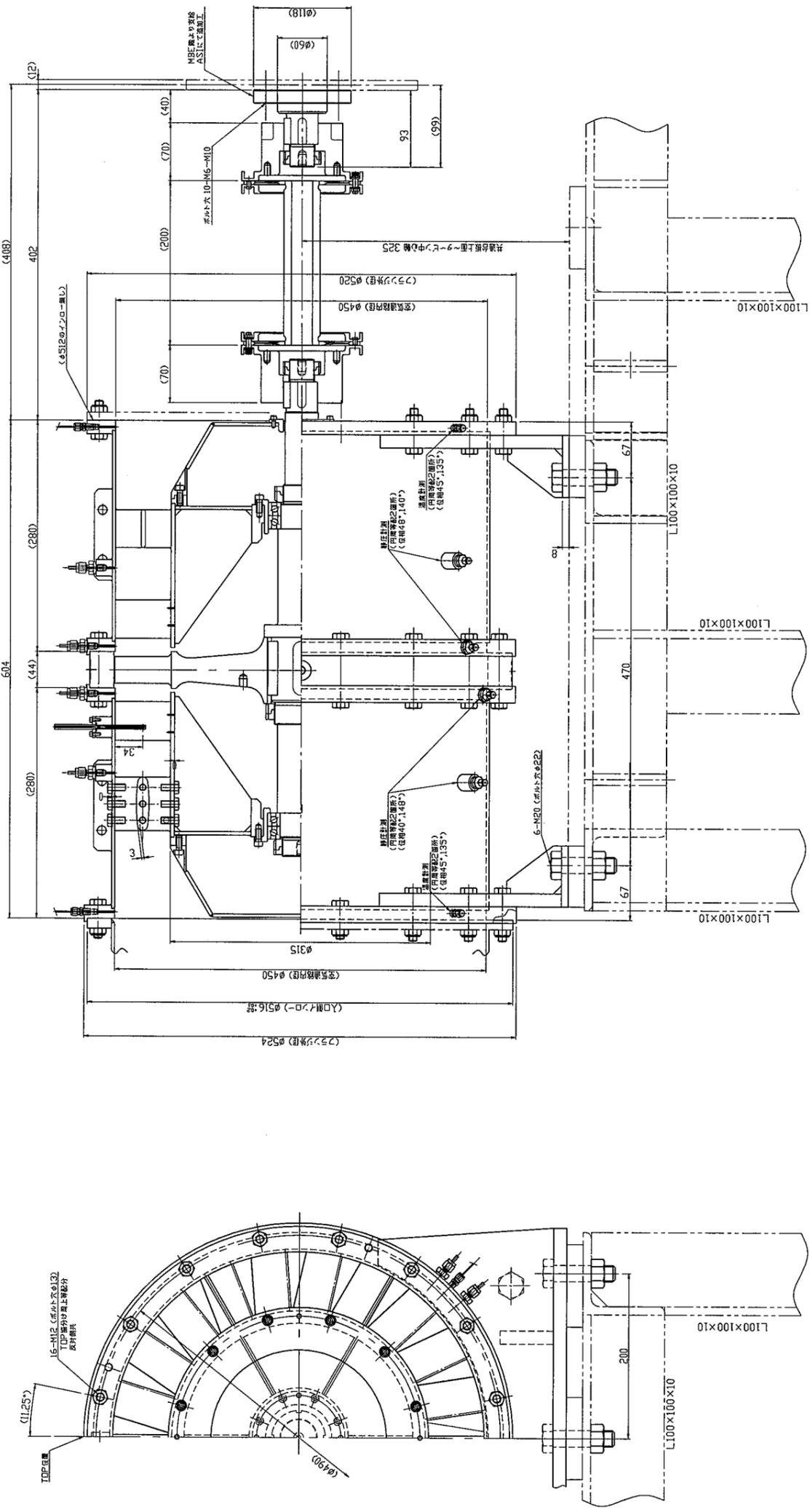


ボルト付近は図はる
他の箇所もこれに倣う
V30 80

B部詳細

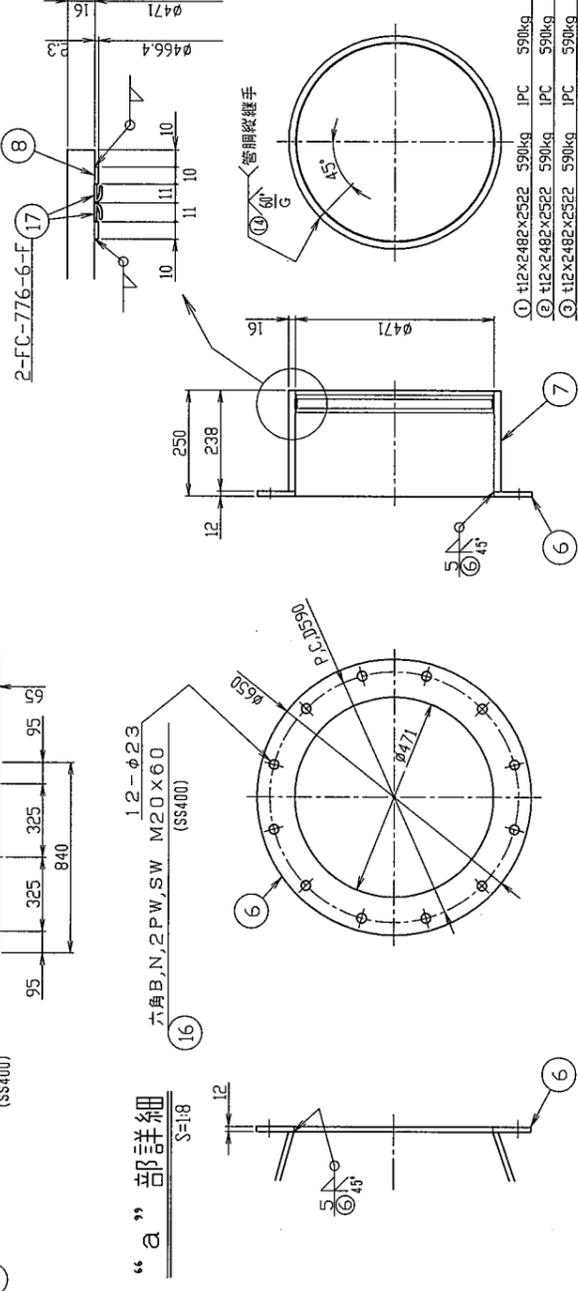
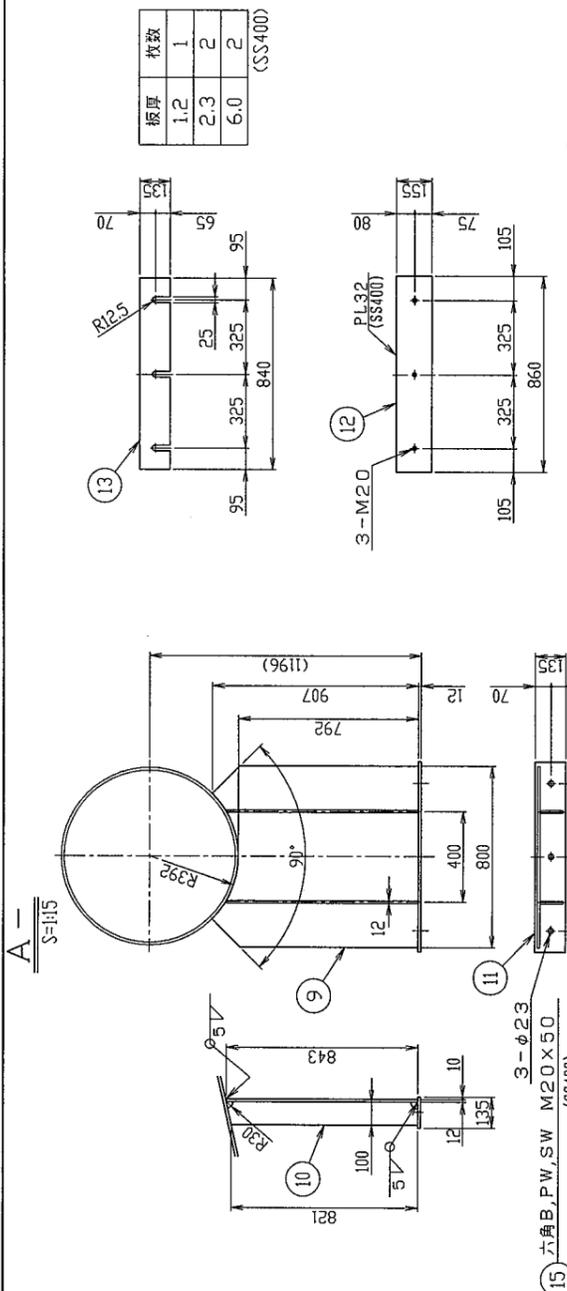
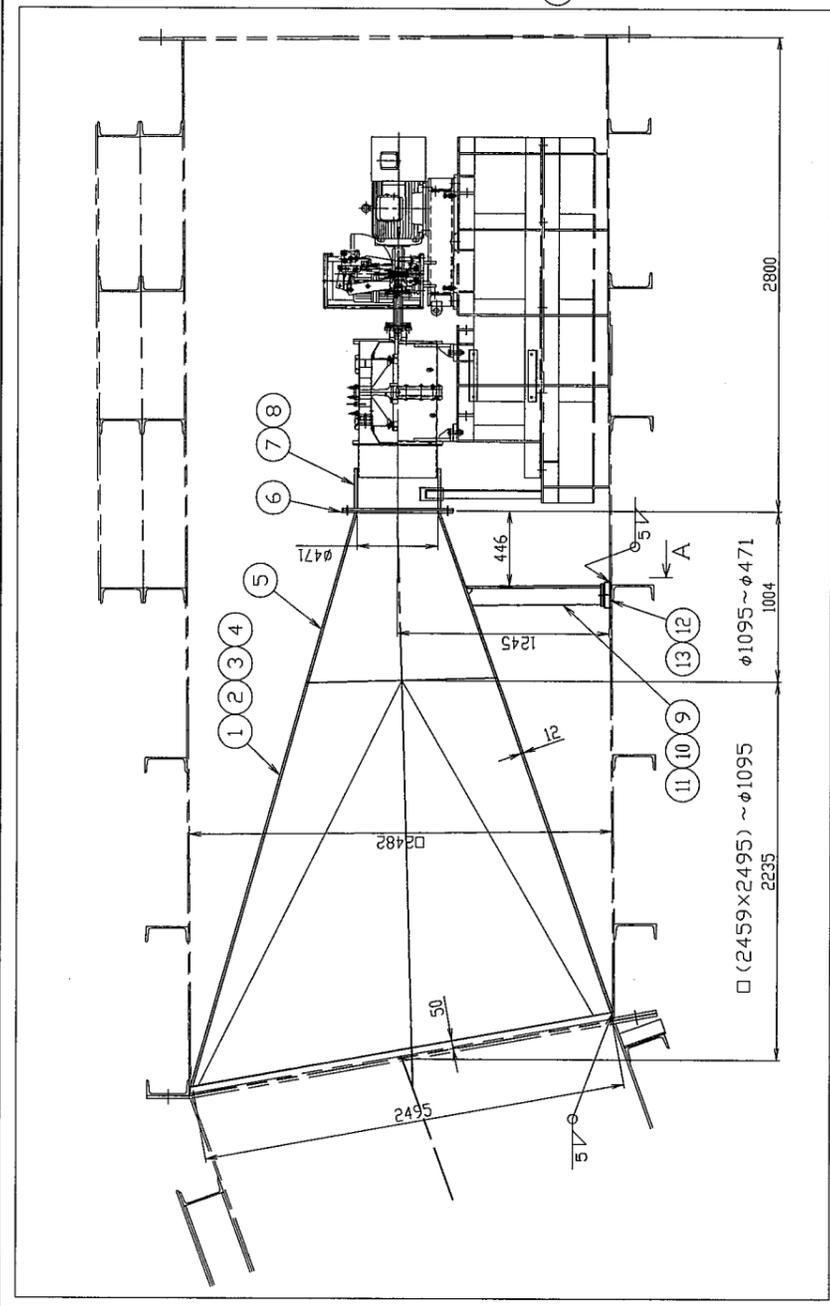


工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	番 号	38 / 41
図面タイトル	波力発電機装置 (その4)	承認	
担当	審査	承認	
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 黄華建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研		



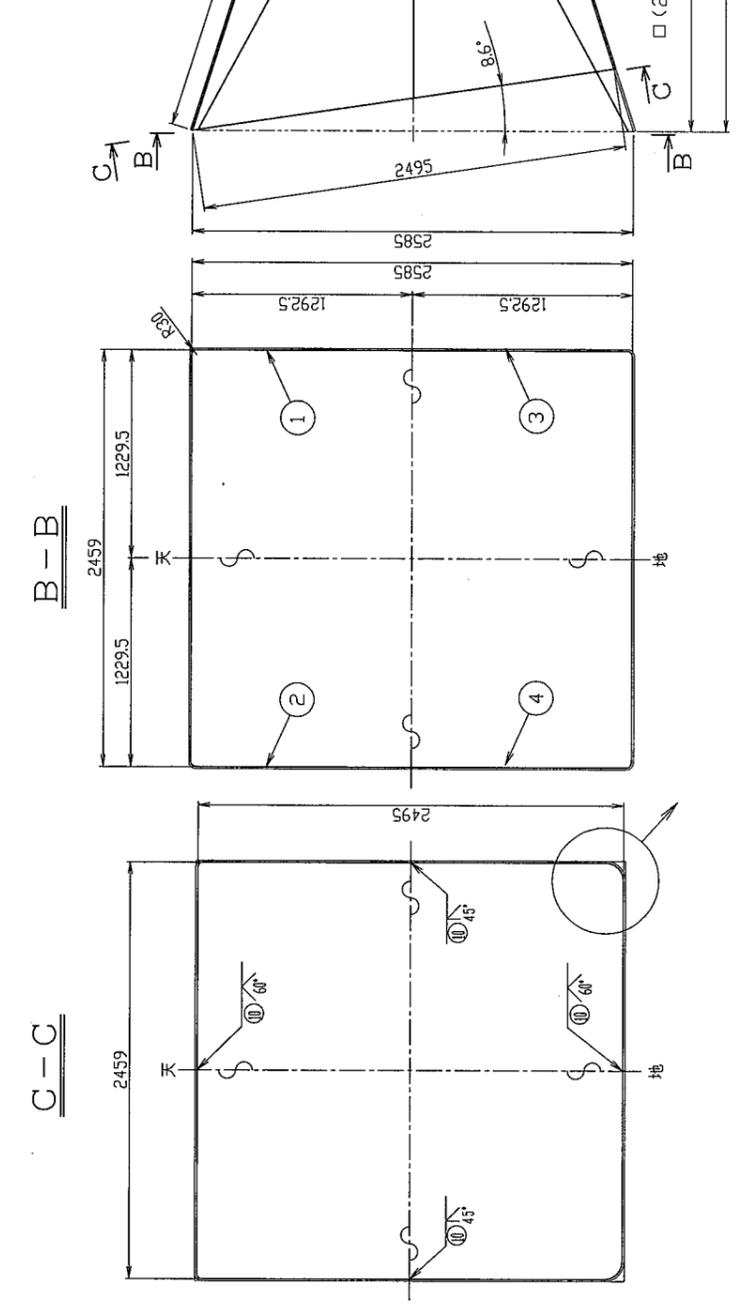
① 16xφ462x195 14kg IPC 14kg
 ② φ516x112 3kg IPC 3kg
 合計 17kg

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)		
図面タイトル	タービン本体図	番 号	39 / 41
担当	審査	承認	
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) (株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研		

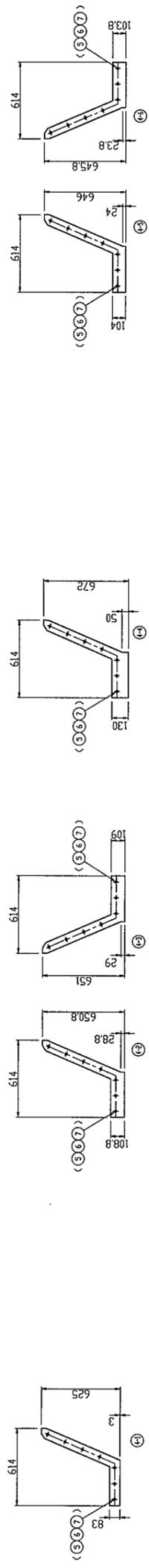


注記
 1. 材質はPL材はSM400A, 形鋼はSS400とする。
 2. 特記なき隅肉溶接脚底は-6; t=厚格割脚厚以上とする。
 3. 施工上必要な所には適宜スカラーを設けること。

- ① t12x2482x2522 590kg IPC 590kg
 ② t12x2482x2522 590kg IPC 590kg
 ③ t12x2482x2522 590kg IPC 590kg
 ④ t12x2482x2522 590kg IPC 590kg
 ⑤ t2x4095-4460x100 235kg IPC 235kg
 ⑥ t12xφ(650-471) 15kg 2PC 30kg
 ⑦ t16xφ471x238 46kg 2PC 2kg
 ⑧ t2.3xφ466.4x10 1kg 2PC 2kg
 ⑨ t12x800x907 69kg 2PC 69kg
 ⑩ FB100x12x843 8kg 2PC 16kg
 ⑪ t12x135x840 11kg 2PC 11kg
 ⑫ t32x155x860 34kg 2PC 34kg
 ⑬ t12x135x840 1kg 2PC 1kg
 ⑭ t6.0x135x840 6kg 2PC 12kg
 ⑮ t6x117x117 1kg 2PC 2kg
 ⑯ 六角B, V, SW M20x50 3SET 1kg
 ⑰ 六角B, N, 2W, SW M20x60 12SET 4kg
 ⑱ パンFC-776-6-F L=1480 2PC 2831kg



工事名	平成26年度 空圧タービン式波力発電装置 (酒田美浜橋)	番	40
図面タイトル	タービンマニホールド詳細図	号	38
担当	審査	承認	
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ設計		



基部フランジ展開図
(4/41参照)

①	t16x614x625	10kg	IPC	10kg	(20%)
②	t16x614x650.8	11kg	IPC	11kg	(20%)
③	t16x614x651	11kg	IPC	11kg	(20%)
④	t16x614x672	12kg	IPC	12kg	(20%)
⑤	t16x614x646	11kg	IPC	11kg	(20%)
⑥	t16x614x645.8	11kg	IPC	11kg	(20%)

工事名	平成26年度 空気タービン式波力発電装置 (酒田実証機)	
図面タイトル	基部フランジ形状変更詳細図	番 号 / 41 / 41
担当	審査	承認
施工者	三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 東亜建設工業(株) (株) 本間組 (株) エイ・エス・アイ総研	

付録2 酒田港 PW-OWC 設置に伴う有孔ケーソンの 安定計算及び発電設備の構造計算書

PW-OWC 設置に伴う有孔ケーソンの安定計算
及び発電設備構造計算書

平成 26 年 9 月

目 次

1. 検討概要	1-1
2. 検討条件	2-1
2.1 自然条件	2-1
2.2 材料	2-1
2.3 摩擦係数	2-2
2.4 設計震度	2-2
2.5 検討ケース	2-2
3. 設計外力の算出	3-1
3.1 壁体重量	3-1
3.2 浮力	3-4
3.3 地震時の慣性力	3-5
3.4 土圧	3-5
3.5 残留水圧	3-6
3.6 波力（波の谷作用時）	3-6
3.7 装置による荷重	3-8
4. 波力発電装置設置前の安定検討	4-9
4.1 常時	4-9
4.2 地震時	4-13
4.3 波の谷作用時時	4-16
5. 波力発電装置設置後の安定検討	5-19
5.1 常時	5-19
5.2 地震時	5-22
5.3 波の谷作用時時	5-25
6. 安定検討結果まとめ	6-27

7. ケーソン部底版の配筋照査	7-28
7.1 設計荷重の算定	7-28
7.2 曲げモーメントの算定	7-30
7.3 配筋照査	7-33
7.4 配筋照査結果まとめ	7-35
8. 波力発装置躯体の強度検討	8-36
8.1 概要	8-36
8.2 検討ケースの設定	8-36
8.3 躯体の強度計算	8-37
9. 防食	9-44
10. 防音対策	10-45

1. 検討概要

本検討書は、酒田港内の北港地区埋立護岸（有孔型ケーソン式護岸）に波力発電装置を設置した場合の護岸の安定性の検討及びケーソン部底版の配筋照査を行ったものである。波力発電装置の設置に伴い、鉛直荷重の増加、風荷重及び地震時の影響等が考えられるため、既設護岸の安定性の検討及びケーソン部底版の配筋照査を行った。既設護岸の標準断面図を図 1.1 に示す。波力発電装置設置後の護岸断面図を図 1.2 に示す。

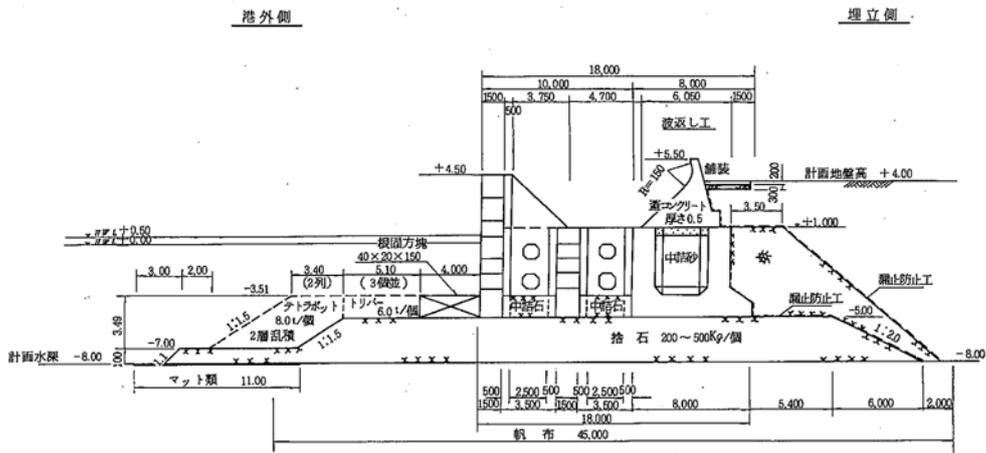


図 1.1 既設護岸標準断面図

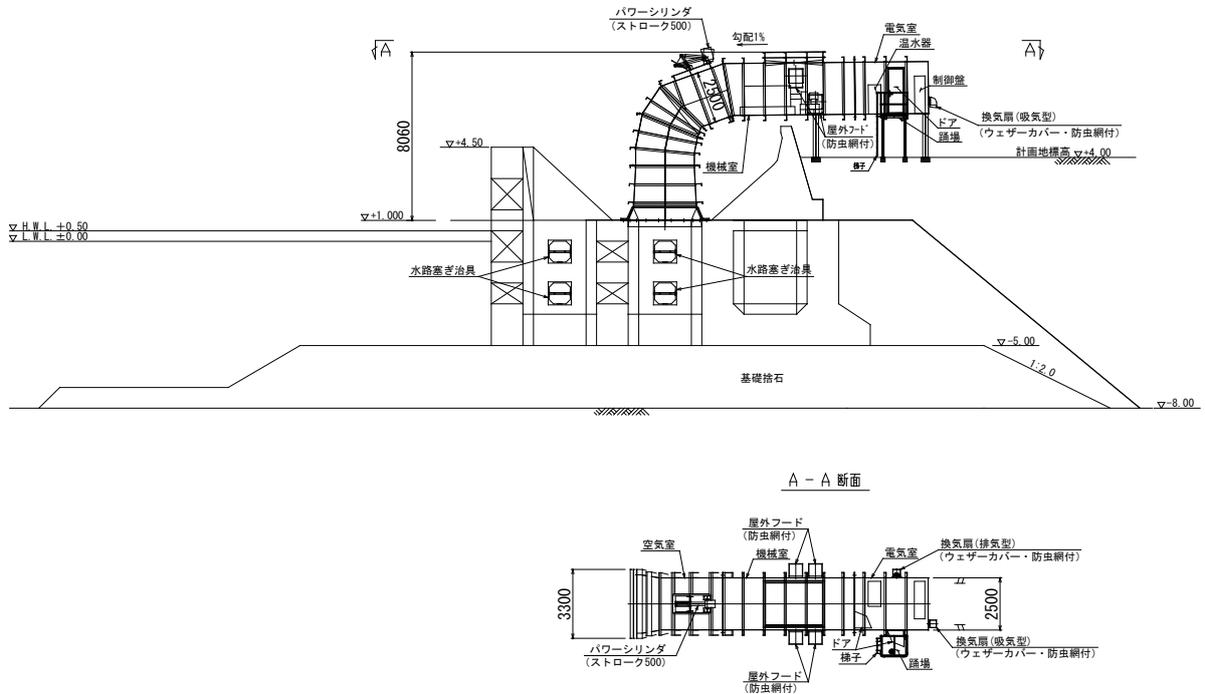


図 1.2 波力発電装置設置後の護岸断面図及び装置平面図

2. 検討条件

検討方法及び設計条件は、以下に示す原設計計算書と同様とし、波力発電装置設置前及び設置後の全体安定の検討及び底版の配筋照査を行う。本検討では、堤体の滑動及び転倒に対する安定性の検討に加え、支持力に対する検討として Bishop 法を用いた偏心傾斜荷重に対する検討を行う。なお、波力発電装置の設置期間が1年にも満たないことから、安定性検討では安全率を用いた手法で検討を行うものとする。配筋照査については、許容応力度法により行うものとする。

原設計計算書

運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所

「酒田港設計計算書 北港地区・埋立護岸（昭和57年3月）」

主な検討条件を以下に示す。

2.1 自然条件

(1) 設計波

計算波高	$H_{1/3}$: 5.4m
最大波高	H_{max}	: 6.6m
最大波向	β	: 15.1°
最大周期	$T_{1/3}$: 15.1sec

(2) 潮位

H. W. L.	: +0.5m
L. W. L.	: ±0.0m

(3) 残留水位

R. W. L.	: +1.0m
----------	---------

(4) 原地盤

飽和重量	: 20.0kN/m ³
内部摩擦角	: 45°

2.2 材料

(1) 捨石マウンド

飽和重量	: 20.0kN/m ³
粘着力	: 20.0kN/m ²
内部摩擦角	: 35°

(2) 裏込砂

気中重量	: 20.0kN/m ³
水中重量	: 10.0kN/m ³
内部摩擦角	: 30°

(3) 他の材料の単位体積重量

鉄筋コンクリート	: 24.0kN/m ³
無筋コンクリート	: 22.6kN/m ³
中詰砂（飽和）	: 20.0kN/m ³
裏込石（飽和）	: 20.0kN/m ³
中詰石（飽和）	: 20.0kN/m ³
海水	: 10.1kN/m ³

(4) 許容応力度

鉄筋の許容引張応力度 σ_{sa}	: 176N/mm ²
コンクリートの許容圧縮応力度 σ_{ca}	: 9N/mm ²
コンクリートの許容せん断応力度 τ_a	: 0.45N/mm ²
コンクリートの許容付着応力度 τ_{oa}	: 1.6N/mm ²

2.3 摩擦係数

壁体と捨石マウンドの摩擦係数 : 0.6

2.4 設計震度

設計震度 : 0.1

2.5 検討ケース

本検討での検討項目と必要安全率を表 2.1 に示す。

表 2.1 検討項目と必要安全率

		常時	地震時	波の谷の場合
必要 安全率	滑動	1.2	1.0	1.2
	転倒	1.2	1.1	1.2
	支持力	1.2	1.0	1.0

3. 設計外力の算出

3.1 壁体重量

既設護岸の標準断面図を図 3.1 に、構造図を図 3.2 に示す。

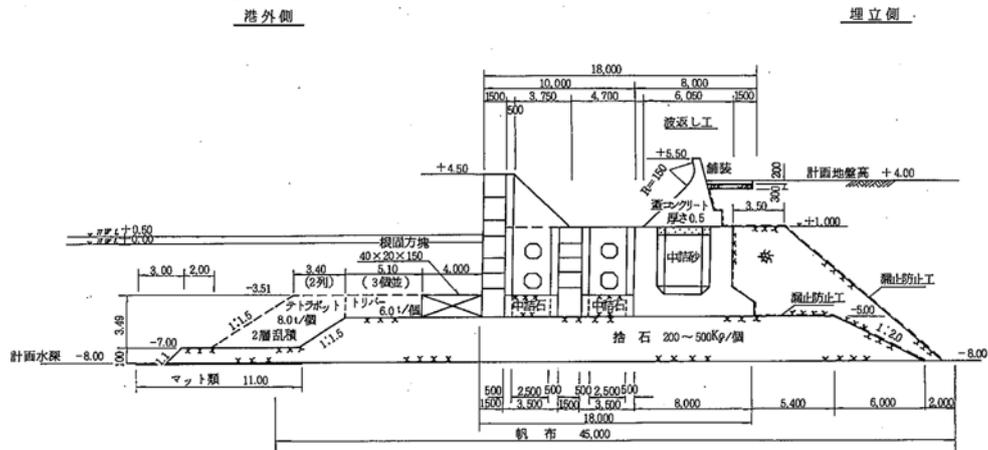


図 3.1 既設護岸標準断面図

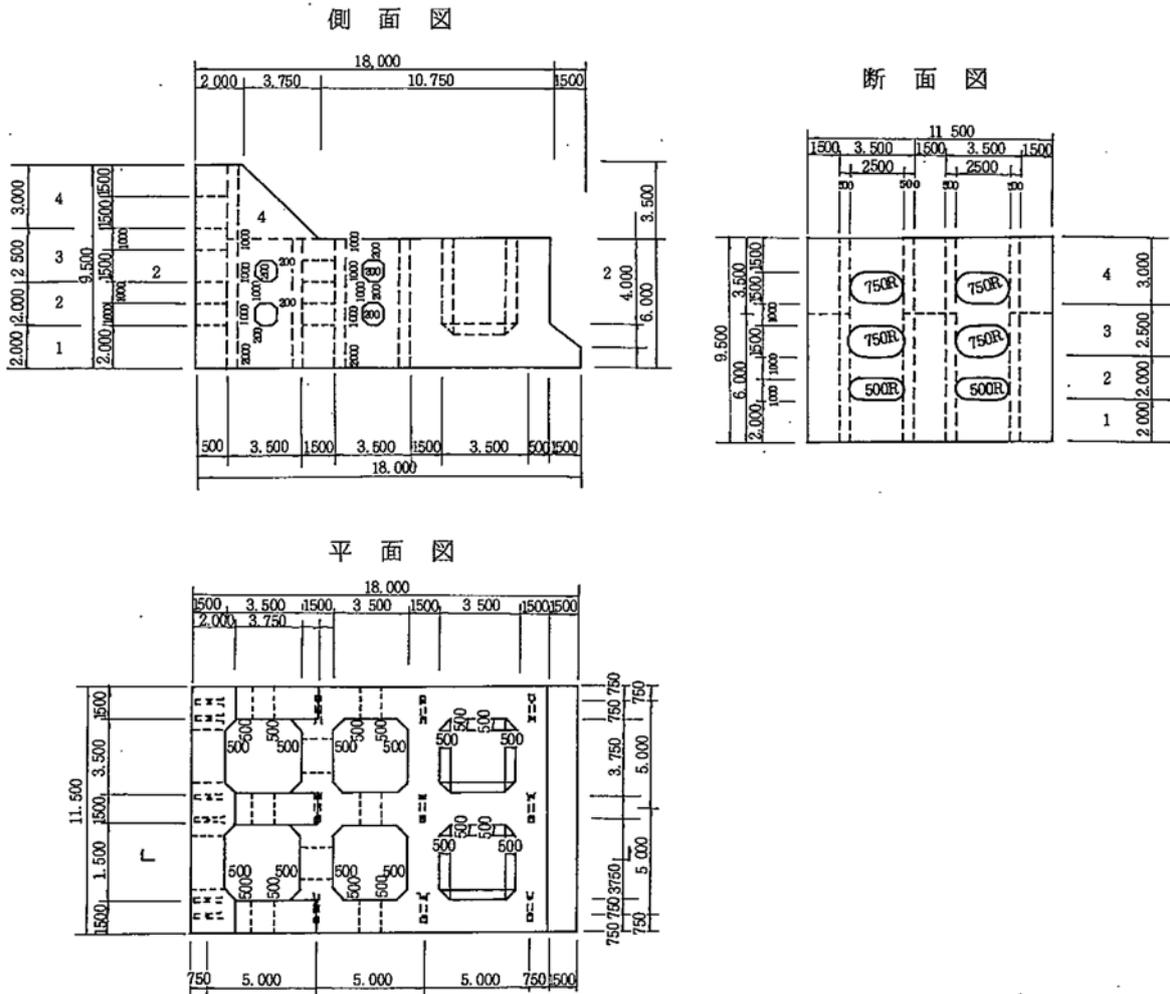


図 3.2 有孔型ケーソン構造図

(1) 有孔型ケーソン

有孔型ケーソンの1スパン当たりの重量及びそのモーメントを表 3.1 に示す。

表 3.1 有孔型ケーソンの重量及びモーメント

区分	計 算 式	個数	体積 V (m ³)	単位重量 γ (kN/m ³)	重量 W (kN)	作用位置		モーメント	
						x (m)	y (m)	Mx (kN・m)	My (kN・m)
有孔部									
前 壁	1.500 × 9.500 × 11.500	1	163.88	24.00	3,933.12	0.750	4.750	2,949.84	18,682.32
前壁孔①	1.500 × 1.500 × 2.500 (R0.75)	-4	-19.60	24.00	-470.40	0.750	6.000	-352.80	-2,822.40
前壁孔②	1.500 × 1.000 × 2.500 (R0.50)	-2	-6.86	24.00	-164.64	0.750	2.500	-123.48	-411.60
側 壁	1.500 × 6.000 × 8.500	2	153.00	24.00	3,672.00	5.750	3.000	21,114.00	11,016.00
側壁孔	1.000 × 1.500 × 1.000	-8	-12.00	24.00	-288.00	5.750	3.500	-1,656.00	-1,008.00
側壁孔ハチ	0.200 × 1.500 × 0.200 × 1/2	32	0.96	24.00	23.04	5.750	3.500	132.48	80.64
横 隔 壁	3.500 × 6.000 × 1.500	2	63.00	24.00	1,512.00	5.750	3.000	8,694.00	4,536.00
横隔壁孔	1.500 × 1.000 × 1.500	-4	-9.00	24.00	-216.00	5.750	3.500	-1,242.00	-756.00
横隔壁孔ハチ	0.200 × 1.500 × 0.200 × 1/2	16	0.48	24.00	11.52	5.750	3.500	66.24	40.32
縦 隔 壁	1.500 × 6.000 × 8.500	1	76.50	24.00	1,836.00	5.750	3.000	10,557.00	5,508.00
縦隔壁孔	1.000 × 1.500 × 1.000	-4	-6.00	24.00	-144.00	5.750	3.500	-828.00	-504.00
縦隔壁孔ハチ	0.200 × 1.500 × 0.200 × 1/2	16	0.48	24.00	11.52	5.750	3.500	66.24	40.32
垂直ハチ	0.500 × 6.000 × 0.500 × 1/2	16	12.00	24.00	288.00	5.750	3.000	1,656.00	864.00
控え壁①	0.500 × 3.500 × 1.500	3	7.88	24.00	189.12	1.750	7.750	330.96	1,465.68
控え壁②	3.750 × 3.500 × 1.500 × 1/2	3	29.53	24.00	708.72	3.250	7.170	2,303.34	5,081.52
控えハチ	0.500 × 3.500 × 0.500 × 1/2	4	1.75	24.00	42.00	1.667	7.750	70.01	325.50
小計					10,944.00	3.997	3.850	43,737.83	42,138.30
ケーソン部									
横側壁	1.500 × 4.500 × 11.500	2	155.25	24.00	3,726.00	13.250	3.750	49,369.50	13,972.50
縦側壁	3.500 × 4.500 × 1.500	2	47.25	24.00	1,134.00	13.250	3.750	15,025.50	4,252.50
隔壁	3.500 × 4.500 × 1.500	1	23.63	24.00	567.12	13.250	3.750	7,514.34	2,126.70
底板	6.500 × 1.500 × 11.500	1	112.13	24.00	2,691.12	13.250	0.750	35,657.34	2,018.34
垂直ハチ	0.500 × 4.500 × 0.500 × 1/2	8	4.50	24.00	108.00	13.250	4.000	1,431.00	432.00
水平ハチ	0.500 × 2.500 × 0.500 × 1/2	8	2.50	24.00	60.00	13.250	1.670	795.00	100.20
隅角部ハチ	0.500 × 0.500 × 0.500 × 5/6	8	0.83	24.00	19.92	13.250	1.725	263.94	34.36
フチソグ①	1.500 × 1.000 × 11.500	1	17.25	24.00	414.00	17.250	0.500	7,141.50	207.00
フチソグ②	1.500 × 1.000 × 11.500 × 1/2	1	8.63	24.00	207.12	17.000	1.333	3,521.04	276.09
小計					8,927.28	13.523	2.623	120,719.16	23,419.69
合 計	1スパン当たり		827.97		19,871.28	8.276	3.299	164,456.99	65,557.99

(2) 波返しパラペット

波返しパラペットの1スパン当たりの重量及びそのモーメントを表 3.2 に示す。

表 3.2 波返しパラペットの重量及びモーメント

区分	計 算 式	個数	体積 V (m ³)	単位重量 γ (kN/m ³)	重量 W (kN)	作用位置		モーメント	
						x (m)	y (m)	Mx (kN・m)	My (kN・m)
波返しパラペット	10.36m ² × 11.500	1	119.16	22.60	2,693.08	13.606	7.381	36,642.05	19,877.62
合 計	1スパン当たり		119.16		2,693.08	13.606	7.381	36,642.05	19,877.62

(3) 蓋コンクリート

蓋コンクリートの1スパン当たりの重量及びそのモーメントを表 3.3 に示す。

表 3.3 蓋コンクリートの重量及びモーメント

区分	計算式	個数	体積 V (m ³)	単位重量 γ (kN/m ³)	重量 W (kN)	作用位置		モーメント	
						x (m)	y (m)	Mx (kN・m)	My (kN・m)
蓋コンクリート	3.500 × 0.500 × 3.500	2	12.25	22.60	276.85	13.250	5.500	3,668.26	1,522.68
鉛直ハンチ控除	0.500 × 0.500 × 0.500 × 1/2	-8	-0.50	22.60	-11.30	13.250	5.500	-149.73	-62.15
合計	1スパン当たり		11.75		265.55	13.250	5.500	3,518.53	1,460.53

(4) 中詰砂

中詰砂の1スパン当たりの重量及びそのモーメントを表 3.4 に示す。

表 3.4 中詰砂の重量及びモーメント

区分	計算式	個数	体積 V (m ³)	単位重量 γ (kN/m ³)	重量 W (kN)	作用位置		モーメント	
						x (m)	y (m)	Mx (kN・m)	My (kN・m)
隔室	3.500 × 4.000 × 3.500	2	98.00	20.00	1,960.00	13.250	3.500	25,970.00	6,860.00
鉛直ハンチ控除	0.500 × 3.500 × 0.500 × 1/2	-8	-3.50	20.00	-70.00	13.250	3.750	-927.50	-262.50
水平ハンチ控除	0.500 × 2.500 × 0.500 × 1/2	-8	-2.50	20.00	-50.00	13.250	1.833	-662.50	-91.65
隅角ハンチ控除	0.500 × 0.500 × 0.500 × 5/6	-8	-0.83	20.00	-16.66	13.250	1.725	-220.75	-28.74
合計	1スパン当たり		91.17		1,823.34	13.250	3.552	24,159.25	6,477.11

(5) 裏込石

裏込石の1スパン当たりの重量及びそのモーメントを表 3.5 に示す。

表 3.5 裏込石の重量及びモーメント

区分	計算式	個数	体積 V (m ³)	単位重量 γ (kN/m ³)	重量 W (kN)	作用位置		モーメント	
						x (m)	y (m)	Mx (kN・m)	My (kN・m)
裏込石①	1.500 × 4.000 × 11.500	1	69.00	20.00	1,380.00	17.250	4.000	23,805.00	5,520.00
裏込石②	1.500 × 1.000 × 11.500 × 1/2	1	8.63	20.00	172.50	17.500	1.667	3,018.75	287.56
合計	1スパン当たり		77.63		1,552.50	17.278	3.741	26,823.75	5,807.56

(6) 中詰石

中詰石の1スパン当たりの重量及びそのモーメントを表 3.6 に示す。

表 3.6 中詰石の重量及びモーメント

区分	計算式	個数	体積 V (m ³)	単位重量 γ (kN/m ³)	重量 W (kN)	作用位置		モーメント	
						x (m)	y (m)	Mx (kN・m)	My (kN・m)
隔室	3.500 × 1.500 × 3.500	4	73.50	20.00	1,470.00	5.750	0.750	8,452.50	1,102.50
鉛直ハンチ控除	0.500 × 1.500 × 0.500 × 1/2	-16	-3.00	20.00	-60.00	5.750	0.750	-345.00	-45.00
合計	1スパン当たり		70.50		1,410.00	5.750	0.750	8,107.50	1,057.50

(7) 裏込砂

裏込砂の1スパン当たりの重量及びそのモーメントを表 3.7 に示す。

表 3.7 裏込砂の重量及びモーメント

区分	計算式	個数	体積 V (m ³)	単位重量 γ (kN/m ³)	重量 W (kN)	作用位置		モーメント	
						x (m)	y (m)	Mx (kN・m)	My (kN・m)
裏込砂①	0.570 × 2.000 × 11.500 × 1/2	1	6.56	18.00	117.99	15.060	8.333	1,776.93	983.21
裏込砂②	0.500 × 2.000 × 11.500	1	11.50	18.00	207.00	15.500	8.000	3,208.50	1,656.00
裏込砂③	2.250 × 3.000 × 11.500	1	77.63	18.00	1,397.25	16.875	7.500	23,578.59	10,479.38
合計	1スパン当たり		95.68		1,722.24	16.585	7.617	28,564.02	13,118.59

3.2 浮力

浮力は、有孔部はL.W.L.以下、ケーソン部は残留水位以下の部分に働くものとする。1スパン当たりの浮力及びそのモーメントを表 3.8 に示す。

表 3.8 浮力及びモーメント

区分	計算式	個数	体積 V (m ³)	単位重量 γ (kN/m ³)	重量 W (kN)	作用位置		モーメント	
						x (m)	y (m)	Mx (kN・m)	My (kN・m)
有孔部	10.000 × 5.000 × 11.500	1	575.00	-10.10	-5,807.50	5.000	2.500	-29,037.50	-14,518.75
前壁孔①	2.25m ² × 1.500	-2	-6.75	-10.10	68.18	0.750	4.534	51.14	309.13
前壁孔②	1.500 × 1.000 × 2.500 (R0.50)	-2	-6.86	-10.10	69.29	0.750	2.500	51.97	173.23
側壁孔	1.000 × 1.500 × 1.000	-8	-12.00	-10.10	121.20	5.750	3.500	696.90	424.20
側壁孔ハチ	0.200 × 1.500 × 0.200 × 1/2	32	0.96	-10.10	-9.70	5.750	3.500	-55.78	-33.95
横隔壁孔	1.500 × 1.000 × 1.500	-4	-9.00	-10.10	90.90	5.750	3.500	522.68	318.15
横隔壁孔ハチ	0.200 × 1.500 × 0.200 × 1/2	16	0.48	-10.10	-4.85	5.750	3.500	-27.89	-16.98
縦隔壁孔	1.000 × 1.500 × 1.000	-4	-6.00	-10.10	60.60	5.750	3.500	348.45	212.10
縦隔壁孔ハチ	0.200 × 1.500 × 0.200 × 1/2	16	0.48	-10.10	-4.85	5.750	3.500	-27.89	-16.98
隔室	3.500 × 5.000 × 3.500	-4	-245.00	-10.10	2,474.50	5.750	4.000	14,228.38	9,898.00
隔室ハチ	0.500 × 5.000 × 0.500 × 1/2	16	10.00	-10.10	-101.00	5.750	4.000	-580.75	-404.00
ケーソン部	8.000 × 6.000 × 11.500	1	552.00	-10.10	-5,575.20	14.000	3.000	-78,052.80	-16,725.60
小計			853.31		-8,618.43	10.661	2.365	-91,883.09	-20,381.45
中詰石部	3.500 × 1.500 × 3.500	4	73.50	-10.10	-742.35	5.750	0.750	-4,268.51	-556.76
中詰石部ハチ	0.500 × 1.500 × 0.500 × 1/2	-16	-3.00	-10.10	30.30	5.750	0.750	174.23	22.73
小計			70.50		-712.05	5.750	0.750	-4,094.28	-534.03
合計	1スパン当たり		923.81		-9330.48	10.286	2.242	-95977.37	-20915.48

3.3 地震時の慣性力

地震時における慣性力及びそのモーメントは、壁体の気中重量及びそのモーメントに設計震度を乗じて算定する。壁体の気中重量及びそのモーメントを表 3.9 に示す。慣性力の算定結果を以下に示す。

表 3.9 壁体の気中重量及びモーメント

区分	計算式	個数	体積 V (m ³)	単位重量 γ (kN/m ³)	重量 W (kN)	作用位置		モーメント	
						x (m)	y (m)	Mx (kN・m)	My (kN・m)
有孔型ケツ		1	827.97	24.00	19,871.28	8.276	3.299	164,456.99	65,557.99
波返しパラペット		1	119.16	22.60	2,693.08	13.606	7.381	36,642.05	19,877.62
蓋コンクリート		1	11.75	22.60	265.55	13.250	5.500	3,518.53	1,460.53
中詰砂		1	91.17	20.00	1,823.34	13.250	3.552	24,159.25	6,477.11
裏込石		1	77.63	20.00	1,552.50	17.278	3.741	26,823.75	5,807.56
中詰石		1	70.50	20.00	1,410.00	5.750	0.750	8,107.50	1,057.50
裏込砂		1	95.68	18.00	1,722.24	16.585	7.617	28,564.02	13,118.59
合計			1,293.86		29,337.99	9.962	3.864	292,272.09	113,356.90

地震時慣性力 : $29337.99 \times 0.10 = 2933.80 \text{ kN}$

慣性力モーメント : $113356.90 \times 0.10 = 11335.69 \text{ kN} \cdot \text{m}$

3.4 土圧

常時及び地震時における壁体に作用する 1 スパン当たりの土圧及びそのモーメントを表 3.10、表 3.11 に示す。

表 3.10 土圧及びモーメント (常時)

No	標高 (m)	有効上載圧 (kN/m ²)	主働土圧 (kN/m ²)	水平成分			鉛直成分		
				土圧合力 (kN/m)	作用位置 (m)	モーメント (kN・m/m)	土圧合力 (kN/m)	作用位置 (m)	モーメント (kN・m/m)
1	+4.00	5.00	1.46	2.19	8.00	17.52	0.59	18.00	10.56
	+1.00	59.00	17.17	25.76	7.00	180.29	6.90	18.00	124.22
2	+1.00	59.00	17.17	8.59	5.67	48.65	2.30	18.00	41.41
	±0.00	69.00	20.08	10.04	5.33	53.55	2.69	18.00	48.42
3	±0.00	69.00	20.08	50.20	3.33	167.33	13.45	18.00	242.12
	-5.00	119.00	34.63	86.58	1.67	144.29	23.20	18.00	417.56
合計				183.35		611.63	49.13		884.29
1スパン当たり				2108.47		7033.69	564.96		10169.32

表 3.11 土圧及びモーメント (地震時)

No	標高 (m)	有効上載圧 (kN/m ²)	主働土圧 (kN/m ²)	水平成分			鉛直成分		
				土圧合力 (kN/m)	作用位置 (m)	モーメント (kN・m/m)	土圧合力 (kN/m)	作用位置 (m)	モーメント (kN・m/m)
1	+4.00	2.50	0.89	1.34	8.00	10.68	0.36	18.00	6.44
	+1.00	56.50	20.06	30.09	7.00	210.63	8.06	18.00	145.13
2	+1.00	56.50	24.69	12.35	5.67	69.96	3.31	18.00	59.54
	±0.00	66.50	29.06	14.53	5.33	77.49	3.89	18.00	70.08
3	±0.00	66.50	29.06	72.65	3.33	242.17	19.47	18.00	350.40
	-5.00	116.50	50.91	127.28	1.67	212.13	34.10	18.00	613.86
合計				258.23		823.05	69.19		1245.44
1スパン当たり				2969.59		9465.08	795.7		14322.57

3.5 残留水圧

残留水圧の1スパン当たりの合力及びそのモーメントを表 3.12 に示す。

表 3.12 残留水圧及びモーメント

標高 (m)		層厚 (m)	水圧強度 P_w (kN/m ²)		水圧合力 P_w (kN/m)	作用高さ y (m)	モーメント $P_w \cdot y$ (kN・m/m)
上面	下面		上面	下面			
+1.00	±0.00	1.00	0.00	10.10	5.05	5.33	26.93
±0.00	-5.00	5.00	10.10	10.10	50.50	2.50	126.25
合計					55.55		153.18
1スパン当たり					638.83		1761.61

3.6 波力 (波の谷作用時)

(1) 水平波力

壁体に働く引波時の波力は、原設計計算書と同様とし、作用分布図を図 3.3 に示す。1スパン当たりの波力及びそのモーメントを表 3.13 に示す。

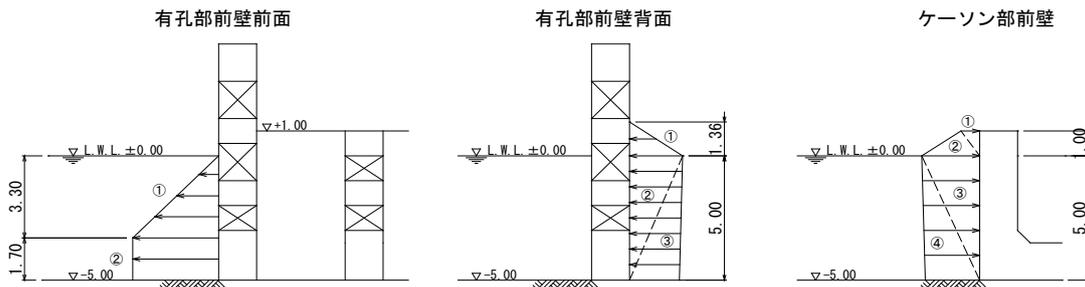


図 3.3 波力の作用分布図

表 3.13 波力及びモーメント

区分	計算式	波力 p (kN/m)	波力作用幅 (m)	波圧 P (kN)	作用位置 y (m)	モーメント M_y (kN・m)
有孔部前壁前面						
①	$33.34 \times 3.300 \times 1/2$	55.01	11.50	632.62	2.800	1,771.34
②	$33.34 \times 1.700 \times 1/1$	56.68	11.50	651.82	0.850	554.05
小計		111.69		1,284.44	1.810	2,325.39
有孔部前壁背面						
①	$20.59 \times 1.360 \times 1/2$	14.00	7.00	98.00	5.453	534.39
②	$20.59 \times 5.000 \times 1/2$	51.48	7.00	360.36	3.333	1,201.08
③	$19.32 \times 5.000 \times 1/2$	48.30	7.00	338.10	1.667	563.61
小計		113.78		796.46	2.887	2,299.08
ケーソン部前壁						
①	$7.26 \times 1.000 \times 1/2$	-3.63	7.00	-25.41	5.667	-144.00
②	$22.46 \times 1.000 \times 1/2$	-11.23	7.00	-78.61	5.333	-419.23
③	$22.46 \times 5.000 \times 1/2$	-56.15	7.00	-393.05	3.333	-1,310.04
④	$21.08 \times 5.000 \times 1/2$	-52.70	7.00	-368.90	1.667	-614.96
小計		-123.71		-865.97	2.873	-2,488.23
合計				1,214.93		2,136.24

(2) 吸引力

壁体底面に働く吸引力は、原設計計算書と同様とし、作用面積及び作用分布図を図 3.4 に示す。1 スパン当たりの吸引力及びそのモーメントを表 3.14 に示す。

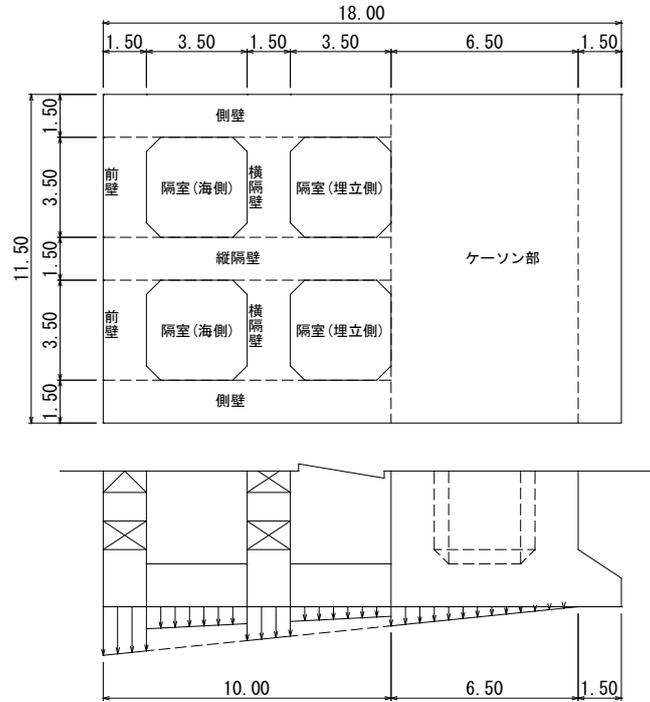


図 3.4 吸引力の作用面積及び作用分布図

表 3.14 吸引力及びモーメント

区分	計算式	個数	吸引力 P (kN)	作用位置 x (m)	モーメント Mx (kN・m)
有孔部					
前壁					
①	$33.34 \times 1.500 \times 3.500 \times 1/2$	2	175.04	0.500	87.52
②	$31.50 \times 1.500 \times 3.500 \times 1/2$	2	165.38	1.000	165.38
側壁					
①	$33.34 \times 10.000 \times 1.500 \times 1/2$	2	500.10	3.333	1,666.83
②	$21.08 \times 10.000 \times 1.500 \times 1/2$	2	316.20	6.667	2,108.11
縦隔壁					
①	$33.34 \times 10.000 \times 1.500 \times 1/2$	1	250.05	3.333	833.42
②	$21.08 \times 10.000 \times 1.500 \times 1/2$	1	158.10	6.667	1,054.05
横隔壁					
①	$27.21 \times 1.500 \times 3.500 \times 1/2$	2	142.85	5.500	785.68
②	$25.37 \times 1.500 \times 3.500 \times 1/2$	2	133.19	6.000	799.14
隔室[海側]					
①	$15.75 \times 3.500 \times 3.500 \times 1/2$	2	192.94	2.667	514.57
②	$13.61 \times 3.500 \times 3.500 \times 1/2$	2	166.72	3.833	639.04
隔室[埋立側]					
①	$12.69 \times 3.500 \times 3.500 \times 1/2$	2	155.45	7.667	1,191.84
②	$10.54 \times 3.500 \times 3.500 \times 1/2$	2	129.12	8.833	1,140.52
ケーソン部					
①	$21.08 \times 6.500 \times 11.500 \times 1/2$	1	787.87	12.167	9,586.01
合計	1 スパン当たり		3,273.01	6.285	20,572.10

3.7 装置による荷重

波力発電装置を設置することにより、既設護岸が新たに受ける荷重の作用モデル図を図 3.5 に示す。荷重の算定結果を以下に示す。

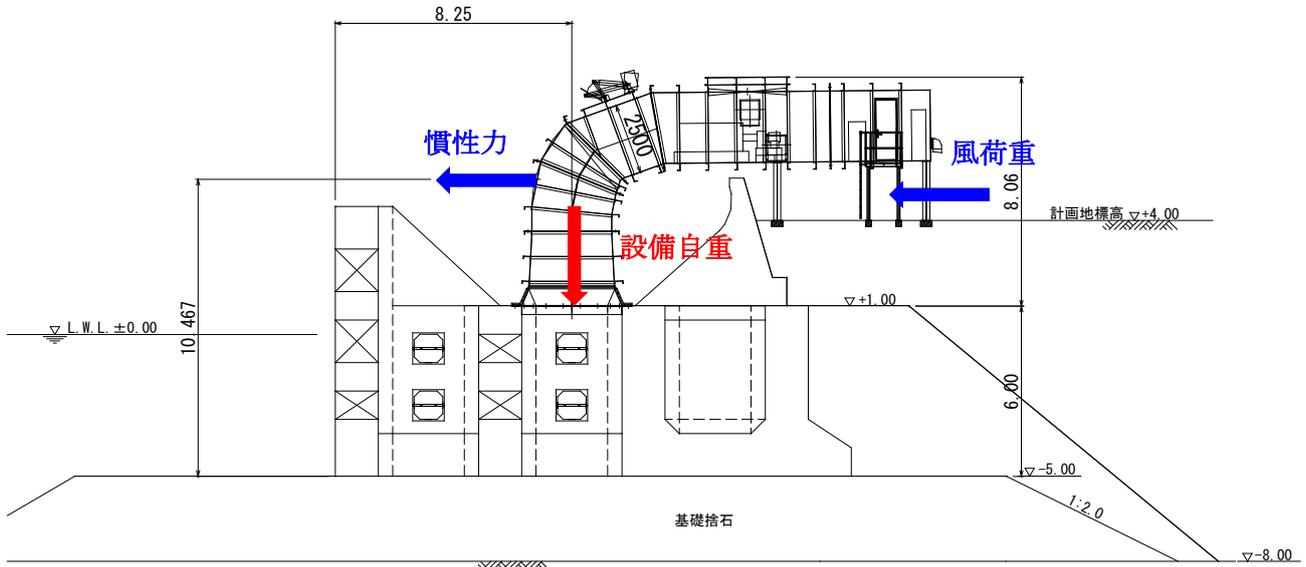


図 3.5 荷重の作用モデル図

鉛直荷重

- 荷重 : 231.14kN
- 作用位置 : 8.25m (既設護岸前趾からの水平距離)
- モーメント : 1906.91kN・m

地震時における慣性力

- 慣性力 : $231.14\text{kN} \times 0.1 = 23.11\text{kN}$
- 作用高さ : 10.467m
- モーメント : 241.89kN・m

風荷重

- 風荷重密度 : 3.07kN/m^2
- 受圧面積 : $3.30\text{m} \times 8.06\text{m} = 26.60\text{m}^2$
- 風荷重 : $3.07\text{kN/m}^2 \times 26.60\text{m}^2 = 81.66\text{kN}$
- 作用高さ : $8.06\text{m} \times 1/2 + 6.00\text{m} = 10.03\text{m}$
- モーメント : 819.05kN・m

4. 波力発電装置設置前の安定検討

4.1 常時

(1) 滑動に対する検討

常時の滑動に対する検討における荷重条件を表 4.1 に示す。検討結果を以下に示す。

表 4.1 滑動検討における荷重条件（常時）

名 称	水平力 H (kN)	名 称	鉛直力 V (kN)
水平土圧	2,108.47	壁体重量	29,337.99
残留水圧	638.83	浮 力	-9,330.48
		鉛直土圧	564.96
合 計	2,747.30	合 計	20,572.47

滑動に対する検討： $F_s=0.6 \times V/H=0.6 \times 20572.47 / 2747.30=4.49 > 1.2$ OK

(2) 転倒に対する検討

常時の転倒に対する検討における荷重条件を表 4.2 に示す。なお、有孔型ケーソンの中詰石は、転倒に対しては抵抗しないため、鉛直モーメントには含めないものとする。検討結果を以下に示す。

表 4.2 転倒検討における荷重条件（常時）

名 称	水平モーメント $H \cdot y$ (kN)	名 称	鉛直モーメント $V \cdot x$ (kN)
水平土圧	7,033.69	壁体重量	284,164.59
残留水圧	1,761.61	浮 力	-91,883.09
		鉛直土圧	10,169.32
合 計	8,795.30	合 計	202,450.82

転倒に対する検討： $F_s=V \cdot x/H \cdot y=202450.82 / 8795.30=23.02 > 1.2$ OK

(3) 支持力に対する検討

支持力に対する検討は、原設計計算書と同様に端趾圧を算定し、その端趾圧を基に Bishop 法を用いた偏心傾斜荷重に対する検討を行う。端趾圧の算定式を以下に示す。有孔型ケーソンの底面の図心位置及び断面 2 次モーメントの算定結果を表 4.3、表 4.4 に示す。端趾圧算定における荷重条件を表 4.5 に示す。なお、鉛直力及び鉛直モーメントには中詰石を含まないものとする。

端趾圧の算定式（原設計計算書より）

$$q_{min}^{max} = \frac{V}{A} \pm \frac{V \cdot e}{I} \cdot y_0$$

ここに、

V : 鉛直力 (kN)

A : 有孔型ケーソンの底面積 (m²)

e : 偏心距離 (m)

y₀ : 図心から縁端までの距離 (m)

I : 有孔型ケーソン底面の断面 2 次モーメント (m⁴)

表 4.3 図心位置の算定結果

区分	計 算 式	個数	面積 A (m ²)	作用位置 y ₀ (m)	A・y ₀
有孔型ケーソン	18.000 × 11.500	1	207.00	9.00	1,863.00
隔室(海側)	3.500 × 3.500	-2	-24.50	3.25	-79.63
隔室(埋立側)	3.500 × 3.500	-2	-24.50	8.25	-202.13
隔室ハンチ①	0.500 × 0.500 × 1/2	4	0.50	1.67	0.84
隔室ハンチ②	0.500 × 0.500 × 1/2	4	0.50	4.83	2.42
隔室ハンチ③	0.500 × 0.500 × 1/2	4	0.50	6.67	3.34
隔室ハンチ④	0.500 × 0.500 × 1/2	4	0.50	9.83	4.92
合計			160.00	9.95	1,592.76

表 4.4 断面 2 次モーメントの算定結果

区分	I ₀ (m ⁴)				A・y ² (m ⁴)		I (m ⁴)	
	b (m)	h (m)	n	=	A (m ²)	y (m)		
有孔型ケーソン	1/12 × 11.500	× 18.000 ³	× 1	= 5,589.00	207.00	× 0.95 ²	= 186.82	5,775.82
隔室(海側)	1/12 × 3.500	× 3.500 ³	× -2	= -25.01	-24.50	× 6.70 ²	= -1,099.81	-1,124.82
隔室(埋立側)	1/12 × 3.500	× 3.500 ³	× -2	= -25.01	-24.50	× 1.70 ²	= -70.80	-95.81
隔室ハンチ①	1/36 × 0.500	× 0.500 ³	× 4	= 0.01	0.50	× 8.28 ²	= 34.28	34.29
隔室ハンチ②	1/36 × 0.500	× 0.500 ³	× 4	= 0.01	0.50	× 5.12 ²	= 13.11	13.12
隔室ハンチ③	1/36 × 0.500	× 0.500 ³	× 4	= 0.01	0.50	× 3.28 ²	= 5.38	5.39
隔室ハンチ④	1/36 × 0.500	× 0.500 ³	× 4	= 0.01	0.50	× 0.12 ²	= 0.01	0.02
合計				5539.02			-931.01	4,608.01

表 4.5 支持力検討における荷重条件（常時）

名 称	水平モーメント $H \cdot y$ (kN)	名 称	鉛直力 V (kN)	鉛直モーメント $V \cdot x$ (kN)
水平土圧	7,033.69	壁体重量	27,927.99	284,164.59
残留水圧	1,761.61	浮 力	-8,618.43	-91,883.09
		鉛直土圧	564.96	10,169.32
合 計	8,795.30	合 計	19,874.52	202,450.82

・荷重作用位置： $x = (V \cdot x - H \cdot y) / V = (202450.82 - 8795.30) / 19874.52 = 9.74\text{m}$

・図心位置： $y_0 = 9.95\text{m}$

・偏心距離： $e = y_0 - x = 9.95 - 9.74 = 0.21\text{m}$

・端趾圧の算定

$$q_{\max} = 19874.52 / 160 + 19874.52 \times 0.21 / 4608.01 \times 9.95 = 133.23\text{kN/m}^2$$

$$q_{\min} = 19874.52 / 160 - 19874.52 \times 0.21 / 4608.01 \times 9.95 = 115.20\text{kN/m}^2$$

・換算等分布荷重の算定（支持力検討用）

鉛直力 ： $V = 19874.52\text{kN}$

載荷幅 ： $B' = B - 2e = 18.0 - 2 \times 0.21 = 17.58\text{m}$

有効面積 ： $A' = A - 2e \times 11.50 = 160 - 2 \times 0.21 \times 11.50 = 155.17\text{m}^2$

等分布荷重 ： $q = V / A' = 19874.52 / 155.17 = 128.08\text{kN/m}^2$

水平力 ： $H' = H / 11.50 = 2747.30 / 11.50 = 238.90\text{kN/m}$

支持力に対する検討結果を以下に示す。検討結果図を図 4.1 に示す。

支持力に対する検討 : $F_s = M_R / M_D = 160167.0 / 44096.9 = 3.63 > 1.2$ OK

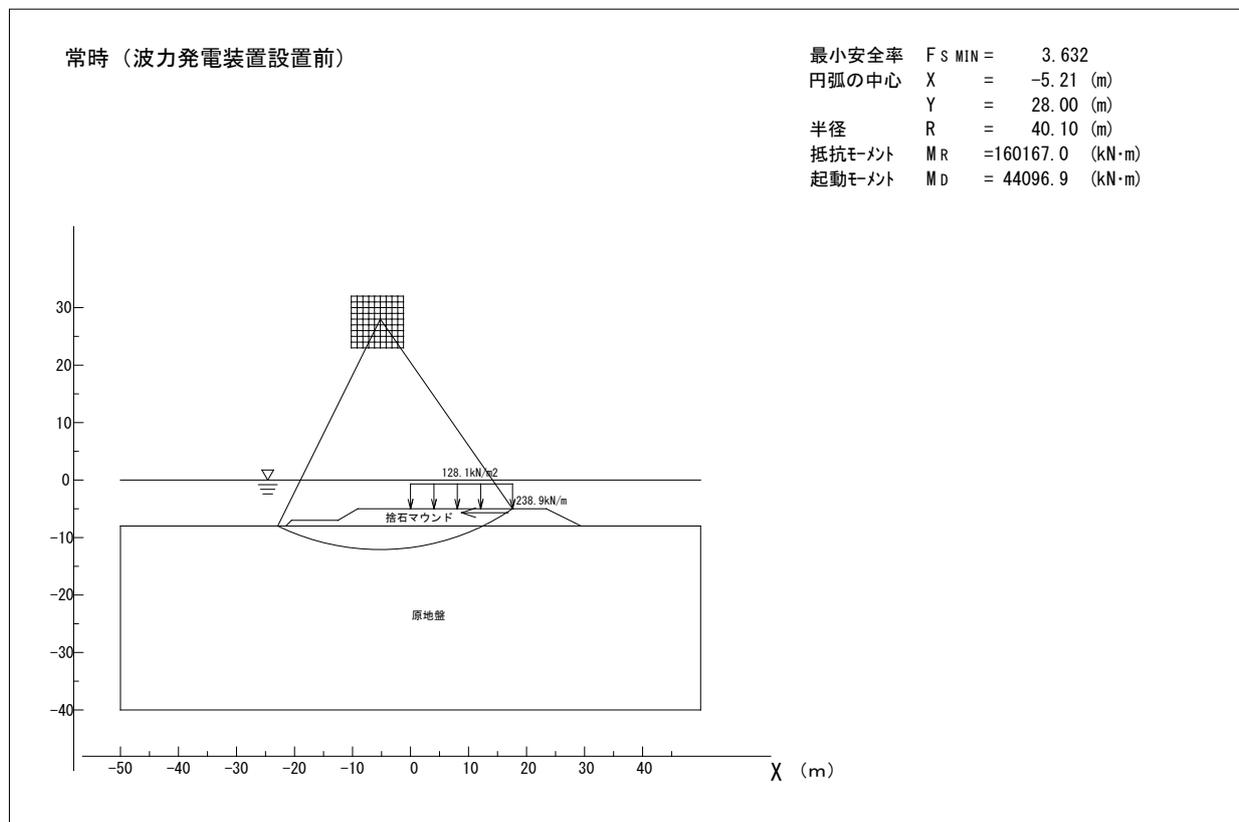


図 4.1 支持力の検討結果図（常時）

4.2 地震時

(1) 滑動に対する検討

地震時の滑動に対する検討における荷重条件を表 4.6 に示す。検討結果を以下に示す。

表 4.6 滑動検討における荷重条件（地震時）

名 称	水平力 H (kN)	名 称	鉛直力 V (kN)
壁体慣性力	2,933.80	壁体重量	29,337.99
水平土圧	2,969.59	浮 力	-9,330.48
残留水圧	638.83	鉛直土圧	795.70
合 計	6,542.22	合 計	20,803.21

滑動に対する検討： $F_s = 0.6 \times V/H = 0.6 \times 20803.21 / 6542.22 = 1.91 > 1.0$ OK

(2) 転倒に対する検討

地震時の転倒に対する検討における荷重条件を表 4.7 に示す。なお、有孔型ケーソンの中詰石は、転倒に対しては抵抗しないため、鉛直モーメントには含めないものとする。検討結果を以下に示す。

表 4.7 転倒検討における荷重条件（地震時）

名 称	水平モーメント $H \cdot y$ (kN)	名 称	鉛直モーメント $V \cdot x$ (kN)
壁体慣性力	11,335.69	壁体重量	284,164.59
水平土圧	9,465.08	浮 力	-91,883.09
残留水圧	1,761.61	鉛直土圧	14,322.57
合 計	22,562.38	合 計	206,604.07

転倒に対する検討： $F_s = V \cdot x / H \cdot y = 206604.07 / 22562.38 = 9.16 > 1.1$ OK

(3) 支持力に対する検討

支持力に対する検討は、原設計計算書と同様に端趾圧を算定し、その端趾圧を基に Bishop 法を用いた偏心傾斜荷重に対する検討を行う。端趾圧算定における荷重条件を表 4.8 に示す。なお、鉛直力及び鉛直モーメントには中詰石を含まないものとする。

表 4.8 支持力検討における荷重条件（地震時）

名 称	水平モーメント $H \cdot y$ (kN)	名 称	鉛直力 V (kN)	鉛直モーメント $V \cdot x$ (kN)
壁体慣性力	11,335.69	壁体重量	27,927.99	284,164.59
水平土圧	9,465.08	浮 力	-8,618.43	-91,883.09
残留水圧	1,761.61	鉛直土圧	795.70	14,322.57
合 計	22,562.38	合 計	20,105.26	206,604.07

・荷重作用位置： $x = (V \cdot x - H \cdot y) / V = (206604.07 - 22562.38) / 20105.26 = 9.15\text{m}$

・図心位置： $y_0 = 9.95\text{m}$

・偏心距離： $e = y_0 - x = 9.95 - 9.15 = 0.80\text{m}$

・端趾圧の算定

$$q_{\max} = 20105.26 / 160 + 20105.26 \times 0.80 / 4608.01 \times 9.95 = 160.39\text{kN/m}^2$$

$$q_{\min} = 20105.26 / 160 - 20105.26 \times 0.80 / 4608.01 \times 9.95 = 90.93\text{kN/m}^2$$

・換算等分布荷重の算定（支持力検討用）

鉛直力： $V = 20105.26\text{kN}$

載荷幅： $B' = B - 2e = 18.0 - 2 \times 0.80 = 16.40\text{m}$

有効面積： $A' = A - 2e \times 11.50 = 160 - 2 \times 0.80 \times 11.50 = 141.60\text{m}^2$

等分布荷重： $q = V / A' = 20105.26 / 141.60 = 141.99\text{kN/m}^2$

水平力： $H' = H / 11.50 = 6542.22 / 11.50 = 568.89\text{kN/m}$

支持力に対する検討結果を以下に示す。検討結果図を図 4.2 に示す。

支持力に対する検討 : $F_s = M_R / M_D = 143701.7 / 54849.5 = 2.62 > 1.0$ OK

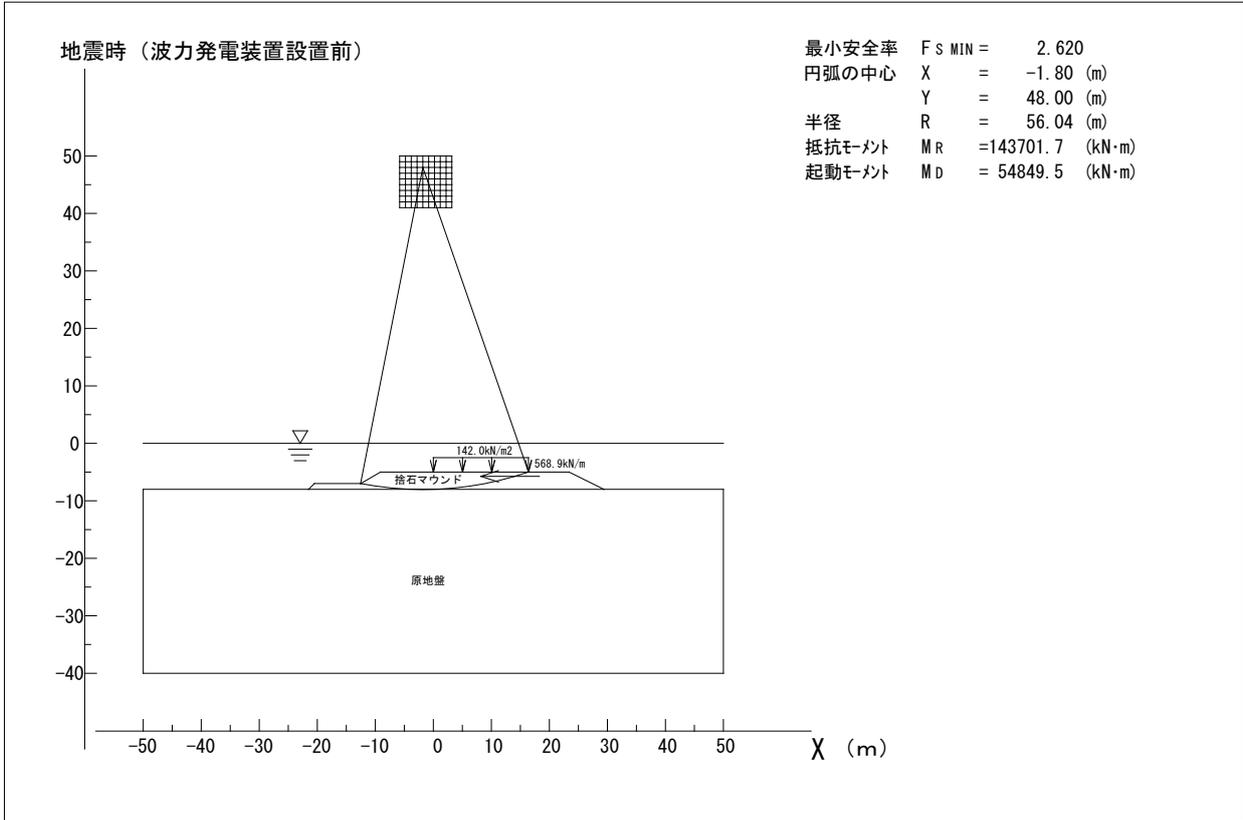


図 4.2 支持力の検討結果図 (地震時)

4.3 波の谷作用時

(1) 滑動に対する検討

波の谷作用時の滑動に対する検討における荷重条件を表 4.9 に示す。検討結果を以下に示す。

表 4.9 滑動検討における荷重条件（波の谷作用時）

名 称	水平力 H (kN)	名 称	鉛直力 V (kN)
水平土圧	2,108.47	壁体重量	29,337.99
残留水圧	638.83	浮 力	-9,330.48
波圧	1,214.93	鉛直土圧	564.96
		吸引力	3,273.01
合 計	3,962.23	合 計	23,845.48

滑動に対する検討： $F_s = 0.6 \times V / H = 0.6 \times 23845.48 / 3962.23 = 3.61 > 1.2$ OK

(2) 転倒に対する検討

地震時の転倒に対する検討における荷重条件を表 4.10 に示す。なお、有孔型ケーソンの中詰石は、転倒に対しては抵抗しないため、鉛直モーメントには含めないものとする。検討結果を以下に示す。

表 4.10 転倒検討における荷重条件（波の谷作用時）

名 称	水平モーメント H・y (kN)	名 称	鉛直モーメント V・x (kN)
水平土圧	7,033.69	壁体重量	284,164.59
残留水圧	1,761.61	浮 力	-91,883.09
波圧	2,136.24	鉛直土圧	10,169.32
		吸引力	20,572.10
合 計	10,931.54	合 計	223,022.92

転倒に対する検討： $F_s = V \cdot x / H \cdot y = 223022.92 / 10931.54 = 20.40 > 1.2$ OK

(3) 支持力に対する検討

支持力に対する検討は、原設計計算書と同様に端趾圧を算定し、その端趾圧を基に Bishop 法を用いた偏心傾斜荷重に対する検討を行う。端趾圧算定における荷重条件を表 4.11 に示す。なお、鉛直力及び鉛直モーメントには中詰石を含まないものとする。

表 4.11 支持力検討における荷重条件（波の谷作用時）

名 称	水平モーメント $H \cdot y$ (kN)	名 称	鉛直力 V (kN)	鉛直モーメント $V \cdot x$ (kN)
水平土圧	7,033.69	壁体重量	27,927.99	284,164.59
残留水圧	1,761.61	浮 力	-8,618.43	-91,883.09
波圧	2,136.24	鉛直土圧	564.96	10,169.32
		吸引力	3,273.01	20,572.10
合 計	10,931.54	合 計	23,147.53	223,022.92

・荷重作用位置： $x = (V \cdot x - H \cdot y) / V = (223022.92 - 10931.54) / 23147.53 = 9.16\text{m}$

・図心位置： $y_0 = 9.95\text{m}$

・偏心距離： $e = y_0 - x = 9.95 - 9.16 = 0.79\text{m}$

・端趾圧の算定

$$q_{\max} = 23147.53 / 160 + 23147.53 \times 0.79 / 4608.01 \times 9.95 = 184.16 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{\min} = 23147.53 / 160 - 23147.53 \times 0.79 / 4608.01 \times 9.95 = 105.19 \text{ kN/m}^2$$

・換算等分布荷重の算定（支持力検討用）

鉛直力： $V = 23147.53 \text{ kN}$

載荷幅： $B' = B - 2e = 18.0 - 2 \times 0.79 = 16.42 \text{ m}$

有効面積： $A' = A - 2e \times 11.50 = 160 - 2 \times 0.79 \times 11.50 = 141.83 \text{ m}^2$

等分布荷重： $q = V / A' = 23147.53 / 141.83 = 163.21 \text{ kN/m}^2$

水平力： $H' = H / 11.50 = 3962.23 / 11.50 = 344.54 \text{ kN/m}$

支持力に対する検討結果を以下に示す。検討結果図を図 4.3 に示す。

支持力に対する検討 : $F_s = M_R / M_D = 164448.2 / 53030.7 = 3.10 > 1.0$ OK

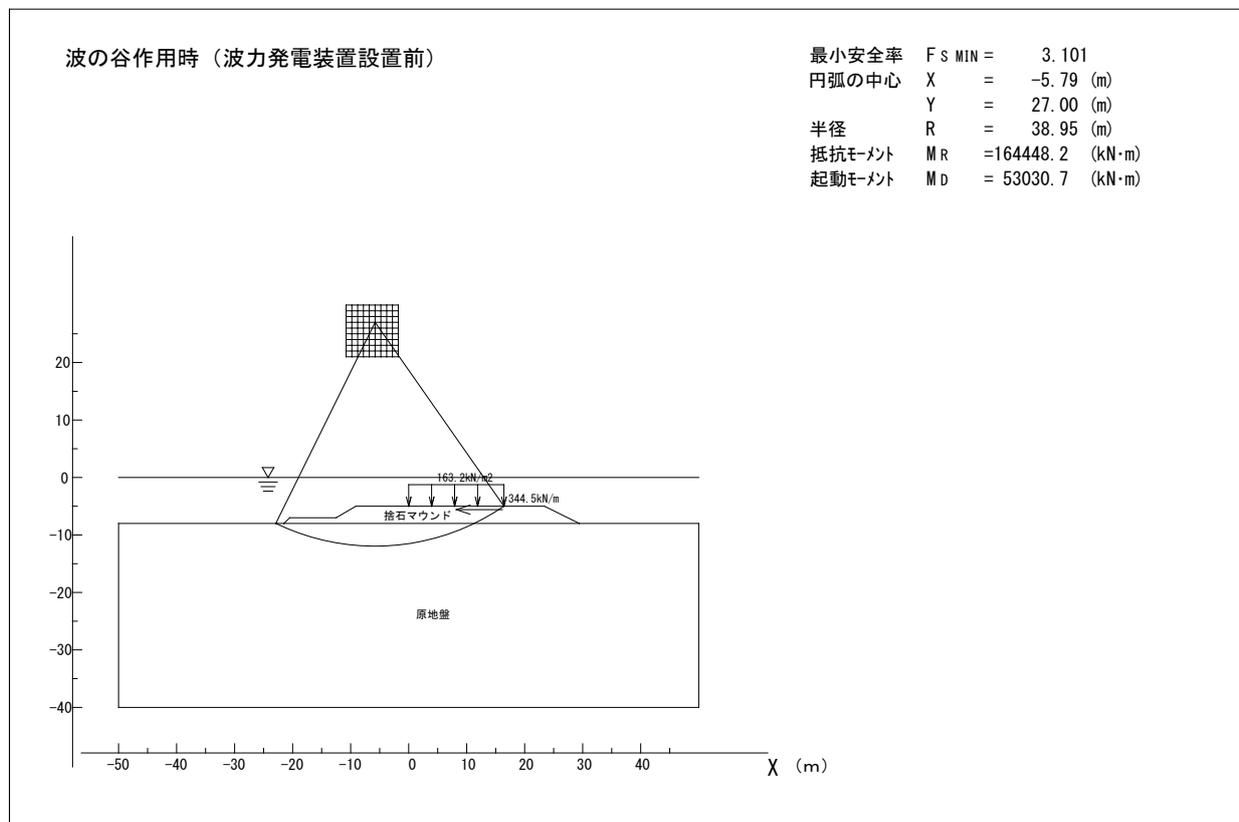


図 4.3 支持力の検討結果図（波の谷作用時）

5. 波力発電装置設置後の安定検討

5.1 常時

(1) 滑動に対する検討

常時の滑動に対する検討における荷重条件を表 5.1 に示す。検討結果を以下に示す。

表 5.1 滑動検討における荷重条件（常時）

名 称	水平力 H (kN)	名 称	鉛直力 V (kN)
水平土圧	2,108.47	壁体重量	29,337.99
残留水圧	638.83	浮 力	-9,330.48
		鉛直土圧	564.96
		設備荷重	231.14
合 計	2,747.30	合 計	20,803.61

滑動に対する検討： $F_s = 0.6 \times V/H = 0.6 \times 20803.61 / 2747.30 = 4.54 > 1.2$ OK

(2) 転倒に対する検討

常時の転倒に対する検討における荷重条件を表 5.2 に示す。なお、有孔型ケーソンの中詰石は、転倒に対しては抵抗しないため、鉛直モーメントには含めないものとする。検討結果を以下に示す。

表 5.2 転倒検討における荷重条件（常時）

名 称	水平モーメント $H \cdot y$ (kN)	名 称	鉛直モーメント $V \cdot x$ (kN)
水平土圧	7,033.69	壁体重量	284,164.59
残留水圧	1,761.61	浮 力	-91,883.09
		鉛直土圧	10,169.32
		設備荷重	1,906.91
合 計	8,795.30	合 計	204,357.73

転倒に対する検討： $F_s = V \cdot x/H \cdot y = 204357.73 / 8795.30 = 23.23 > 1.2$ OK

(3) 支持力に対する検討

支持力に対する検討は、原設計計算書と同様に端趾圧を算定し、その端趾圧を基に Bishop 法を用いた偏心傾斜荷重に対する検討を行う。端趾圧算定における荷重条件を表 5.3 に示す。なお、鉛直力及び鉛直モーメントには中詰石を含まないものとする。

表 5.3 支持力検討における荷重条件（常時）

名 称	水平モーメント $H \cdot y$ (kN)	名 称	鉛直力 V (kN)	鉛直モーメント $V \cdot x$ (kN)
水平土圧	7,033.69	壁体重量	27,927.99	284,164.59
残留水圧	1,761.61	浮 力	-8,618.43	-91,883.09
		鉛直土圧	564.96	10,169.32
		設備荷重	231.14	1,906.91
合 計	8,795.30	合 計	20,105.66	204,357.73

・荷重作用位置： $x = (V \cdot x - H \cdot y) / V = (204357.73 - 8795.30) / 20105.66 = 9.73\text{m}$

・図心位置： $y_0 = 9.95\text{m}$

・偏心距離： $e = y_0 - x = 9.95 - 9.73 = 0.22\text{m}$

・端趾圧の算定

$$q_{\max} = 20105.66 / 160 + 20105.66 \times 0.22 / 4608.01 \times 9.95 = 135.21\text{kN/m}^2$$

$$q_{\min} = 20105.66 / 160 - 20105.66 \times 0.22 / 4608.01 \times 9.95 = 116.11\text{kN/m}^2$$

・換算等分布荷重の算定（支持力検討用）

鉛直力： $V = 20105.66\text{kN}$

載荷幅： $B' = B - 2e = 18.0 - 2 \times 0.22 = 17.56\text{m}$

有効面積： $A' = A - 2e \times 11.50 = 160 - 2 \times 0.22 \times 11.50 = 154.94\text{m}^2$

等分布荷重： $q = V / A' = 20105.66 / 154.94 = 129.76\text{kN/m}^2$

水平力： $H' = H / 11.50 = 2747.30 / 11.50 = 238.90\text{kN/m}$

支持力に対する検討結果を以下に示す。検討結果図を図 5.1 に示す。

支持力に対する検討 : $F_s = M_R / M_D = 160975.3 / 44474.8 = 3.62 > 1.2$ OK

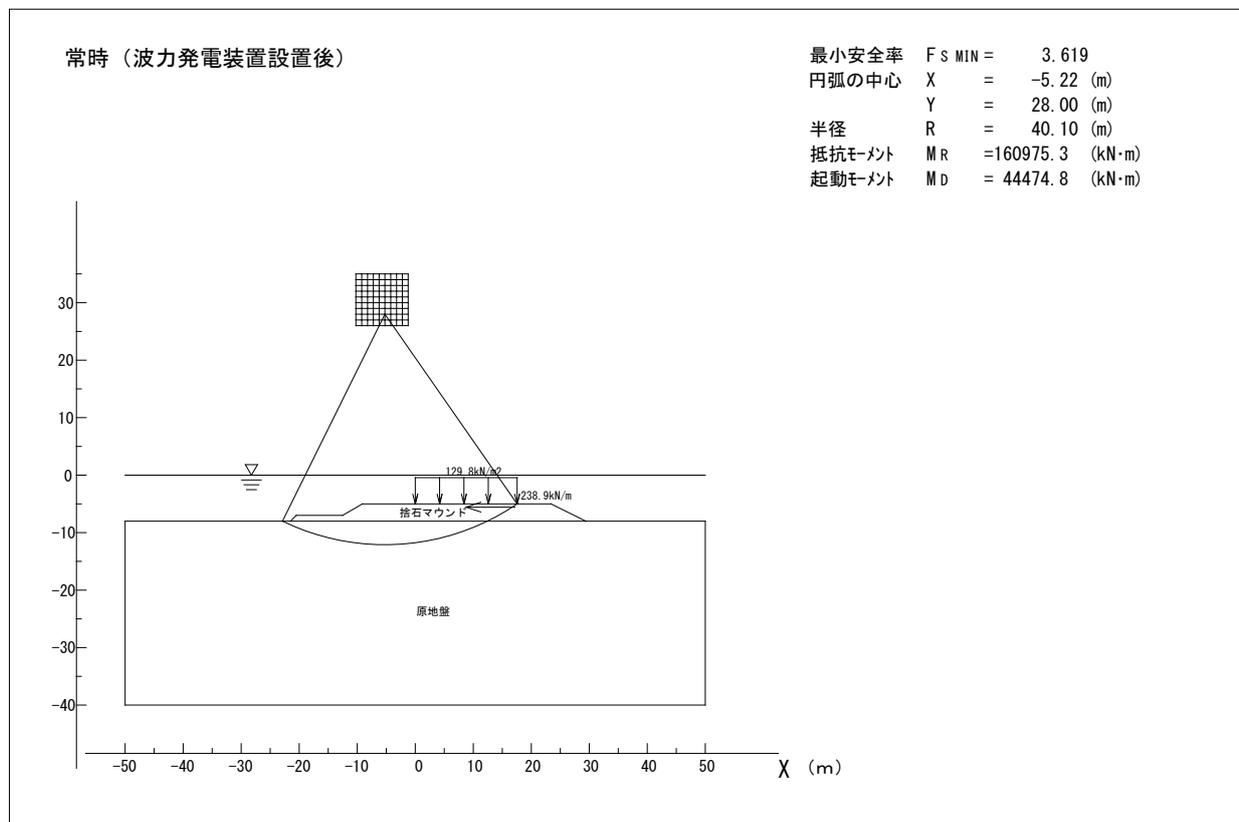


図 5.1 支持力の検討結果図（常時）

5.2 地震時

(1) 滑動に対する検討

地震時の滑動に対する検討における荷重条件を表 5.4 に示す。検討結果を以下に示す。

表 5.4 滑動検討における荷重条件（地震時）

名 称	水平力 H (kN)	名 称	鉛直力 V (kN)
壁体慣性力	2,933.80	壁体重量	29,337.99
水平土圧	2,969.59	浮 力	-9,330.48
残留水圧	638.83	鉛直土圧	795.70
設備慣性力	23.11	設備荷重	231.14
合 計	6,565.33	合 計	21,034.35

滑動に対する検討： $F_s = 0.6 \times V / H = 0.6 \times 21034.35 / 6565.33 = 1.92 > 1.0$ OK

(2) 転倒に対する検討

地震時の転倒に対する検討における荷重条件を表 5.5 に示す。なお、有孔型ケーソンの中詰石は、転倒に対しては抵抗しないため、鉛直モーメントには含めないものとする。検討結果を以下に示す。

表 5.5 転倒検討における荷重条件（地震時）

名 称	水平モーメント $H \cdot y$ (kN)	名 称	鉛直モーメント $V \cdot x$ (kN)
壁体慣性力	11,335.69	壁体重量	284,164.59
水平土圧	9,465.08	浮 力	-91,883.09
残留水圧	1,761.61	鉛直土圧	14,322.57
設備慣性力	241.89	設備重量	1,906.91
合 計	22,804.27	合 計	208,510.98

転倒に対する検討： $F_s = V \cdot x / H \cdot y = 208510.98 / 22804.27 = 9.14 > 1.1$ OK

(3) 支持力に対する検討

支持力に対する検討は、原設計計算書と同様に端趾圧を算定し、その端趾圧を基に Bishop 法を用いた偏心傾斜荷重に対する検討を行う。端趾圧算定における荷重条件を表 5.6 に示す。なお、鉛直力及び鉛直モーメントには中詰石を含まないものとする。

表 5.6 支持力検討における荷重条件（地震時）

名 称	水平モーメント $H \cdot y$ (kN)	名 称	鉛直力 V (kN)	鉛直モーメント $V \cdot x$ (kN)
壁体慣性力	11,335.69	壁体重量	27,927.99	284,164.59
水平土圧	9,465.08	浮 力	-8,618.43	-91,883.09
残留水圧	1,761.61	鉛直土圧	795.70	14,322.57
設備慣性力	241.89	設備荷重	231.14	1,906.91
合 計	22,804.27	合 計	20,336.40	208,510.98

・荷重作用位置： $x = (V \cdot x - H \cdot y) / V = (208510.98 - 22804.27) / 20336.40 = 9.13\text{m}$

・図心位置： $y_0 = 9.95\text{m}$

・偏心距離： $e = y_0 - x = 9.95 - 9.13 = 0.82\text{m}$

・端趾圧の算定

$$q_{\max} = 20336.40 / 160 + 20336.40 \times 0.82 / 4608.01 \times 9.95 = 163.11\text{kN/m}^2$$

$$q_{\min} = 20336.40 / 160 - 20336.40 \times 0.82 / 4608.01 \times 9.95 = 91.09\text{kN/m}^2$$

・換算等分布荷重の算定（支持力検討用）

鉛直力： $V = 20336.40\text{kN}$

載荷幅： $B' = B - 2e = 18.0 - 2 \times 0.82 = 16.36\text{m}$

有効面積： $A' = A - 2e \times 11.50 = 160 - 2 \times 0.82 \times 11.50 = 141.14\text{m}^2$

等分布荷重： $q = V / A' = 20336.40 / 141.14 = 144.09\text{kN/m}^2$

水平力： $H' = H / 11.50 = 6565.33 / 11.50 = 570.90\text{kN/m}$

支持力に対する検討結果を以下に示す。検討結果図を図 5.2 に示す。

支持力に対する検討 : $F_s = M_R / M_D = 144356.0 / 55237.8 = 2.61 > 1.0$ OK

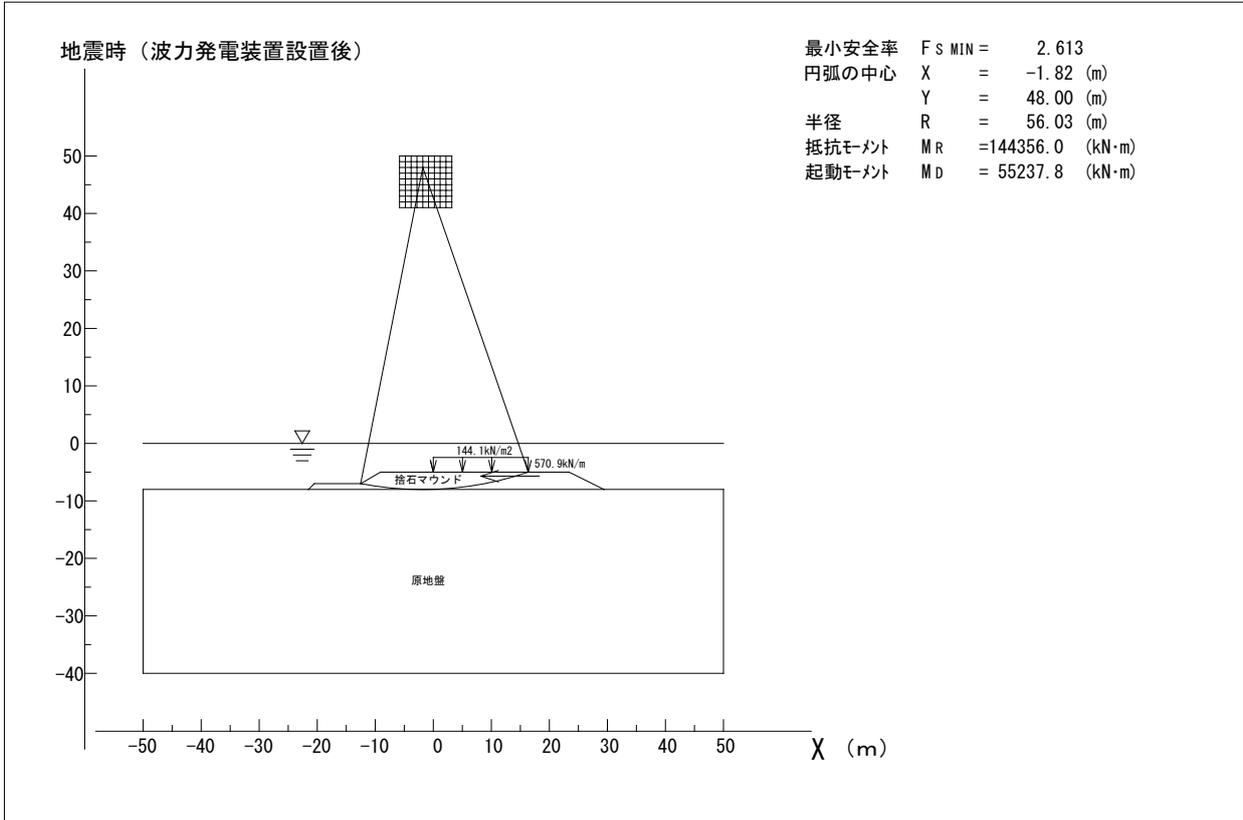


図 5.2 支持力の検討結果図 (地震時)

5.3 波の谷作用時

(1) 滑動に対する検討

波の谷作用時の滑動に対する検討における荷重条件を表 5.7 に示す。波の谷作用時には、波力発電装置に作用する風荷重も考慮するものとする。検討結果を以下に示す。

表 5.7 滑動検討における荷重条件（波の谷作用時）

名 称	水平力 H (kN)	名 称	鉛直力 V (kN)
水平土圧	2,108.47	壁体重量	29,337.99
残留水圧	638.83	浮 力	-9,330.48
波圧	1,214.93	鉛直土圧	564.96
風荷重	81.66	吸引力	3,273.01
		設備荷重	231.14
合 計	4,043.89	合 計	24,076.62

滑動に対する検討： $F_s = 0.6 \times V/H = 0.6 \times 24076.62 / 4043.89 = 3.57 > 1.2$ OK

(2) 転倒に対する検討

地震時の転倒に対する検討における荷重条件を表 5.8 に示す。なお、有孔型ケーソンの中詰石は、転倒に対しては抵抗しないため、鉛直モーメントには含めないものとする。検討結果を以下に示す。

表 5.8 転倒検討における荷重条件（波の谷作用時）

名 称	水平モーメント H・y (kN)	名 称	鉛直モーメント V・x (kN)
水平土圧	7,033.69	壁体重量	284,164.59
残留水圧	1,761.61	浮 力	-91,883.09
波圧	2,136.24	鉛直土圧	10,169.32
風荷重	819.05	吸引力	20,572.10
		設備荷重	1,906.91
合 計	11,750.59	合 計	224,929.83

転倒に対する検討： $F_s = V \cdot x / H \cdot y = 224929.83 / 11750.59 = 19.14 > 1.2$ OK

(3) 支持力に対する検討

支持力に対する検討は、原設計計算書と同様に端趾圧を算定し、その端趾圧を基に Bishop 法を用いた偏心傾斜荷重に対する検討を行う。端趾圧算定における荷重条件を表 5.9 に示す。なお、鉛直力及び鉛直モーメントには中詰石を含まないものとする。

表 5.9 支持力検討における荷重条件（波の谷作用時）

名 称	水平モーメント $H \cdot y$ (kN)	名 称	鉛直力 V (kN)	鉛直モーメント $V \cdot x$ (kN)
水平土圧	7,033.69	壁体重量	27,927.99	284,164.59
残留水圧	1,761.61	浮 力	-8,618.43	-91,883.09
波圧	2,136.24	鉛直土圧	564.96	10,169.32
風荷重	819.05	吸引力	3,273.01	20,572.10
		設備荷重	231.14	1,906.91
合 計	11,750.59	合 計	23,378.67	224,929.83

・荷重作用位置： $x = (V \cdot x - H \cdot y) / V = (224929.83 - 11750.59) / 23378.67 = 9.12\text{m}$

・図心位置： $y_0 = 9.95\text{m}$

・偏心距離： $e = y_0 - x = 9.95 - 9.12 = 0.83\text{m}$

・端趾圧の算定

$$q_{\max} = 23378.67 / 160 + 23378.67 \times 0.83 / 4608.01 \times 9.95 = 188.02\text{kN/m}^2$$

$$q_{\min} = 23378.67 / 160 - 23378.67 \times 0.83 / 4608.01 \times 9.95 = 104.22\text{kN/m}^2$$

・換算等分布荷重の算定（支持力検討用）

鉛直力： $V = 23378.67\text{kN}$

載荷幅： $B' = B - 2e = 18.0 - 2 \times 0.83 = 16.34\text{m}$

有効面積： $A' = A - 2e \times 11.50 = 160 - 2 \times 0.83 \times 11.50 = 140.91\text{m}^2$

等分布荷重： $q = V / A' = 23378.67 / 140.91 = 165.91\text{kN/m}^2$

水平力： $H' = H / 11.50 = 4043.89 / 11.50 = 351.64\text{kN/m}$

支持力に対する検討結果を以下に示す。検討結果図を図 5.3 に示す。

支持力に対する検討 : $F_s = M_R / M_D = 164826.1 / 53676.1 = 3.07 > 1.0$ OK

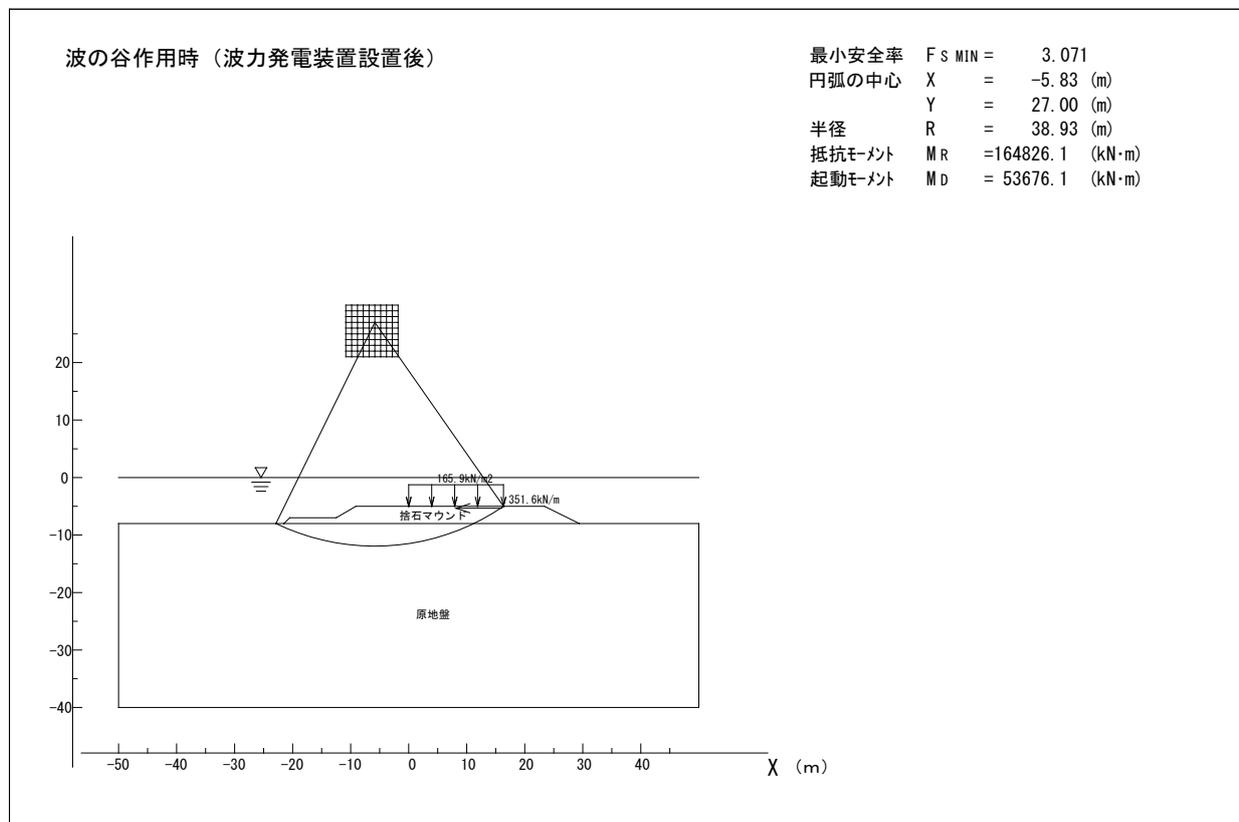


図 5.3 支持力の検討結果図（波の谷作用時）

6. 安定検討結果まとめ

波力発電装置設置前後の護岸の安定性についての検討結果まとめを表 6.1 に示す。波力発電装置設置後は、設置前と比較して鉛直荷重が増加するため、常時の滑動・転倒及び地震時の滑動に対する安全率が若干大きくなっている。常時の支持力、地震時の転倒・支持力については、波力発電装置の設置に伴って重心の位置が高くなるとともに、海側へ移動したことにより安全率が若干低下している。波の谷の場合は、風荷重の影響により全ての項目で安全率が若干低下する結果となった。しかし、波力発電装置設置による影響は小さく、全ての状態において所要の安全率を満足しており、安定性は確保される。

表 6.1 安定検討結果まとめ

		設置前			設置後		
		常時	地震時	波の谷の場合	常時	地震時	波の谷の場合
安全率	滑動	4.49 > 1.2	1.91 > 1.0	3.61 > 1.2	4.54 > 1.2	1.92 > 1.0	3.57 > 1.2
	転倒	23.02 > 1.2	9.16 > 1.1	20.40 > 1.2	23.23 > 1.2	9.14 > 1.1	19.14 > 1.2
	支持力	3.63 > 1.2	2.62 > 1.0	3.10 > 1.0	3.62 > 1.2	2.61 > 1.0	3.07 > 1.0

7. ケーソン部底版の配筋照査

波力発電装置設置前及び設置後のケーソン部における底版の配筋について照査を行う。照査方法は許容応力度法により行うものとする。

7.1 設計荷重の算定

ケーソン部底版に作用する荷重モデルを図 7.1 に示す。波力発電装置設置前後における底面反力の設計値を表 7.1～表 7.3 に示す。他の荷重の設計値を以下に示す。

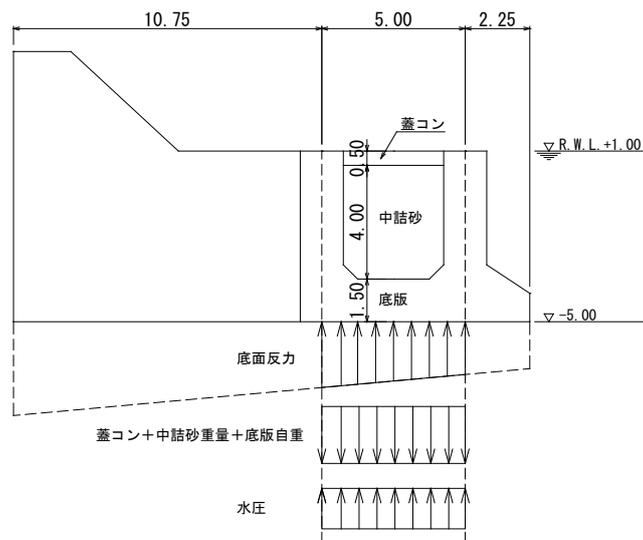


図 7.1 荷重モデル図

表 7.1 底面反力（常時）

	ケーソン (前趾)	底版		ケーソン (後趾)
		海側	陸側	
距離 (m)	0.00	10.75	15.75	18.00
反力 (kN/m ²)	設置前	133.23	122.46	115.20
	設置後	135.21	123.80	116.11

表 7.2 底面反力（地震時）

	ケーソン (前趾)	底版		ケーソン (後趾)
		海側	陸側	
距離 (m)	0.00	10.75	15.75	18.00
反力 (kN/m ²)	設置前	160.39	118.91	90.93
	設置後	163.11	120.10	91.09

表 7.3 底面反力（波の谷作用時）

	ケーソン (前趾)	底版		ケーソン (後趾)
		海側	陸側	
距離 (m)	0.00	10.75	15.75	18.00
反力 (kN/m ²)	設置前	184.16	137.00	105.19
	設置後	188.02	137.97	104.22

底版自重 : $1.5\text{m} \times 24.0\text{kN/m}^3 = 36.0\text{kN/m}^2$
 中詰砂重量 : $4.0\text{m} \times 20.0\text{kN/m}^3 = 80.0\text{kN/m}^2$
 蓋コン重量 : $0.5\text{m} \times 22.6\text{kN/m}^3 = 11.3\text{kN/m}^2$
 水圧 : $6.0\text{m} \times 10.1\text{kN/m}^3 = 60.6\text{kN/m}^2$

各検討状態における合成荷重を表 7.4～表 7.6 に示す。鉛直上向きを正とする。

表 7.4 合成荷重（常時）

		荷重値(kN/m ²)			
		設置前		設置後	
		海側	陸側	海側	陸側
自重	底版	-36.00	-36.00	-36.00	-36.00
	中詰砂	-80.00	-80.00	-80.00	-80.00
	蓋コン	-11.30	-11.30	-11.30	-11.30
		-127.30	-127.30	-127.30	-127.30
底面反力		122.46	117.45	123.80	118.50
静水圧		60.60	60.60	60.60	60.60
合成荷重		55.8	50.8	57.1	51.8

表 7.5 合成荷重（地震時）

		荷重値(kN/m ²)			
		設置前		設置後	
		海側	陸側	海側	陸側
自重	底版	-36.00	-36.00	-36.00	-36.00
	中詰砂	-80.00	-80.00	-80.00	-80.00
	蓋コン	-11.30	-11.30	-11.30	-11.30
		-127.30	-127.30	-127.30	-127.30
底面反力		118.91	99.61	120.10	100.09
静水圧		60.60	60.60	60.60	60.60
合成荷重		52.2	32.9	53.4	33.4

表 7.6 合成荷重（波の谷作用時）

		荷重値(kN/m ²)			
		設置前		設置後	
		海側	陸側	海側	陸側
自重	底版	-36.00	-36.00	-36.00	-36.00
	中詰砂	-80.00	-80.00	-80.00	-80.00
	蓋コン	-11.30	-11.30	-11.30	-11.30
		-127.30	-127.30	-127.30	-127.30
底面反力		137.00	115.06	137.97	114.70
静水圧		60.60	60.60	60.60	60.60
合成荷重		70.3	48.4	71.3	48.0

7.2 曲げモーメントの算定

底版に発生する曲げモーメントは、計算数表を利用し四辺固定版として算定する。算定方法を以下に示す。本検討における計算数表を表 7.7 に示す。

・ $\lambda \leq 1$ の場合： $M_X = Xql_x^2, M_Y = Yql_x^2$

・ $\lambda > 1$ の場合： $M_X = Xql_y^2, M_Y = Yql_y^2$

ここに、

λ : 辺長比 ($\lambda = l_x / l_y$)

M_X : 求める点での x 方向 (短辺方向) の曲げモーメント (kN m/m)

M_Y : 求める点での y 方向 (長辺方向) の曲げモーメント (kN m/m)

X, Y : x 方向 (短辺方向)、 y 方向 (長辺方向) の曲げモーメント係数

l_x, l_y : x 方向 (短辺方向)、 y 方向 (長辺方向) のスパン長 (m)

q : 等分布荷重強度 (kN/m²)

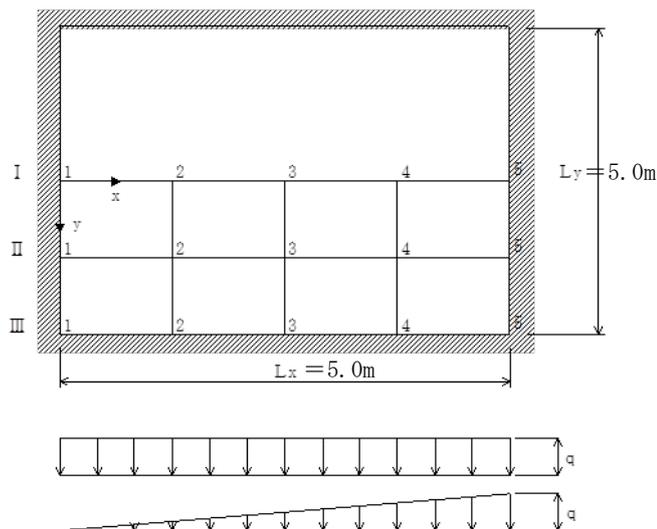


図 7.2 四辺固定版

表 7.7 計算数表

λ	荷重	係数	座標	1	2	3	4	5
1.00	等分布荷重	X	I	-0.0513	0.0096	0.0206	0.0096	-0.0513
			II	-0.0324	0.0059	0.0116	0.0059	-0.0324
			III	0	-0.0054	-0.0086	-0.0054	0
		Y	I	-0.0086	0.0116	0.0206	0.0116	-0.0086
			II	-0.0054	0.0059	0.0096	0.0059	-0.0054
			III	0	-0.0324	-0.0513	-0.0324	0
	三角形分布荷重	X	I	-0.0179	0.0015	0.0103	0.008	-0.0334
			II	-0.0101	0.0006	0.0058	0.0052	-0.0223
			III	0	-0.0019	-0.0043	-0.0036	0
		Y	I	-0.003	0.0047	0.0103	0.0069	-0.0056
			II	-0.0017	0.0018	0.0048	0.004	-0.0037
			III	0	-0.0116	-0.0257	-0.0208	0

(1) 波力発電装置設置前の底版に発生する曲げモーメント

曲げモーメントの算定結果を表 7.8～表 7.10 に示す。このうち最大となる曲げモーメントを設計曲げモーメントとする。設計曲げモーメントを表 7.11 に示す。

表 7.8 曲げモーメントの算定結果（常時）

		1	2	3	4	5
M _x (kN・m/m)	I	-67.39	12.38	27.45	13.19	-69.33
	II	-42.41	7.57	15.46	8.14	-43.94
	III	0.00	-7.10	-11.46	-7.31	0.00
M _y (kN・m/m)	I	-11.30	15.32	27.45	15.59	-11.62
	II	-7.07	7.72	12.79	7.99	-7.32
	III	0.00	-42.60	-68.36	-43.75	0.00

表 7.9 曲げモーメントの算定結果（地震時）

		1	2	3	4	5
M _x (kN・m/m)	I	-50.83	8.62	21.91	11.76	-58.31
	II	-31.52	5.14	12.34	7.36	-37.41
	III	0.00	-5.36	-9.14	-6.18	0.00
M _y (kN・m/m)	I	-8.52	11.81	21.91	12.87	-9.77
	II	-5.26	5.72	10.22	6.78	-6.23
	III	0.00	-32.25	-54.59	-36.69	0.00

表 7.10 曲げモーメントの算定結果（波の谷作用時）

		1	2	3	4	5
M _x (kN・m/m)	I	-71.87	12.44	30.57	16.00	-80.36
	II	-44.73	7.47	17.22	9.99	-51.41
	III	0.00	-7.57	-12.76	-8.50	0.00
M _y (kN・m/m)	I	-12.05	16.61	30.57	17.82	-13.48
	II	-7.46	8.13	14.25	9.33	-8.56
	III	0.00	-45.55	-76.14	-50.59	0.00

表 7.11 設計曲げモーメント（設置前）

	断面力	
	M _{max} (kN・m/m)	M _{min} (kN・m/m)
法線平行方向	30.57	-76.14
法線直角方向	30.57	-80.36

(2) 波力発電装置設置後の底版に発生する曲げモーメント

曲げモーメントの算定結果を表 7.12～表 7.14 に示す。このうち最大となる曲げモーメントを設計曲げモーメントとする。設計曲げモーメントを表 7.15 に示す。

表 7.12 曲げモーメントの算定結果（常時）

		1	2	3	4	5
M _x (kN・m/m)	I	-68.80	12.63	28.04	13.49	-70.86
	II	-43.30	7.72	15.79	8.33	-44.91
	III	0.00	-7.24	-11.71	-7.47	0.00
M _y (kN・m/m)	I	-11.54	15.64	28.04	15.93	-11.88
	II	-7.22	7.88	13.07	8.17	-7.48
	III	0.00	-43.50	-69.84	-44.72	0.00

表 7.13 曲げモーメントの算定結果（地震時）

		1	2	3	4	5
M _x (kN・m/m)	I	-51.79	8.77	22.35	12.02	-59.54
	II	-32.10	5.23	12.59	7.53	-38.20
	III	0.00	-5.46	-9.33	-6.31	0.00
M _y (kN・m/m)	I	-8.68	12.04	22.35	13.14	-9.98
	II	-5.36	5.83	10.42	6.93	-6.36
	III	0.00	-32.85	-55.69	-37.45	0.00

表 7.14 曲げモーメントの算定結果（波の谷作用時）

		1	2	3	4	5
M _x (kN・m/m)	I	-71.99	12.39	30.72	16.18	-81.02
	II	-44.76	7.43	17.30	10.11	-51.87
	III	0.00	-7.59	-12.82	-8.58	0.00
M _y (kN・m/m)	I	-12.07	16.66	30.72	17.94	-13.58
	II	-7.47	8.13	14.32	9.41	-8.64
	III	0.00	-45.64	-76.53	-51.00	0.00

表 7.15 設計曲げモーメント（設置後）

	断面力	
	M _{max} (kN・m/m)	M _{min} (kN・m/m)
法線平行方向	30.72	-76.53
法線直角方向	30.72	-81.02

7.3 配筋照査

底版の配筋照査は、鉄筋及びコンクリートに発生する応力が許容応力以下であることを確認する。鉄筋及びコンクリートに発生する応力の計算方法を以下に示す。

$$p = \frac{A_s}{bd}$$

$$k = \sqrt{2pn + (pn)^2} - pn$$

$$z = jd = d - \frac{x}{3}$$

$$x = kd$$

$$\sigma_s = \frac{M}{A_s(d - x/3)} = \frac{M}{A_s jd}$$

$$\sigma_c = \frac{2M}{kbjd^2}$$

ここに、

p : 鉄筋比	z : 全圧縮応力の作用点から引張鉄筋までの距離 (mm)
A_s : 引張鉄筋量 (mm ²)	x : 部材の圧縮縁から中立軸までの距離 (mm)
b : 部材幅 (mm)	σ_s : 鉄筋引張応力度 (N/mm ²)
d : 有効高 (mm)	σ_c : コンクリートの圧縮応力度 (N/mm ²)
k : 中立軸比	M : 曲げモーメント (kN・m)
n : 鉄筋とコンクリートのヤング係数比	

原設計計算書より、底版の配筋は以下のとおりとなる。配筋の照査結果を表 7.16、表 7.17 に示す。

法線直角方向	下側	D16@200	芯かぶり 100 mm
	上側	D16@200	芯かぶり 80 mm
法線平行方向	下側	D16@200	芯かぶり 100 mm
	上側	D16@200	芯かぶり 80 mm

表 7.16 配筋照査結果（設置前）

項 目			法線直角方向		法線平行方向	
			下 側 鉄 筋	上 側 鉄 筋	下 側 鉄 筋	上 側 鉄 筋
断面力	曲 げ モ ー メ ン ト	M (kN・m)	80.36	30.57	76.14	30.57
断面形状	部 材 幅	b (mm)	1,000	1,000	1,000	1,000
	部 材 厚	h (mm)	1,500	1,500	1,500	1,500
	鉄 筋 の 芯 か ぶ り	d' (mm)	100	80	100	80
	有 効 高	d (mm)	1,400	1,420	1,400	1,420
許容応力度	鉄筋の許容引張応力度	σ_{sa} (N/mm ²)	176	176	176	176
	コンクリートの許容圧縮応力度	σ_{ca} (N/mm ²)	9	9	9	9
	コンクリートの許容せん断応力度	τ_a (N/mm ²)	0.45	0.45	0.45	0.45
	コンクリートの許容付着応力度	τ_{oa} (N/mm ²)	1.6	1.6	1.6	1.6
必 要	鉄 筋 量	A's (mm ²)	335.2	124.4	317.4	124.4
実配筋量	鉄 筋 呼 び 径	D (mm)	D 16	D 16	D 16	D 16
	配 筋 本 数	n (本)	5 (@200)	5 (@200)	5 (@200)	5 (@200)
	鉄 筋 公 称 断 面 積	a _s (mm ² /本)	198.6	198.6	198.6	198.6
	鉄 筋 公 称 周 長	u (mm/本)	5.0	5.0	5.0	5.0
	配 筋 量	A _s (mm ²)	993.0 OK!	993.0 OK!	993.0 OK!	993.0 OK!
	鉄 筋 比	p (%)	0.071	0.070	0.071	0.070
	弾 性 係 数 比	n	15	15	15	15
		k	0.1356	0.1347	0.1356	0.1347
	j	0.9548	0.9551	0.9548	0.9551	
発 生 応 力 度	鉄 筋 の 引 張 応 力 度	σ_s (N/mm ²)	60.5 OK!	22.7 OK!	57.4 OK!	22.7 OK!
	コンクリートの圧縮応力度	σ_c (N/mm ²)	0.63 OK!	0.20 OK!	0.60 OK!	0.20 OK!

表 7.17 配筋照査結果（設置後）

項 目			法線直角方向		法線平行方向	
			下 側 鉄 筋	上 側 鉄 筋	下 側 鉄 筋	上 側 鉄 筋
断面力	曲 げ モ ー メ ン ト	M (kN・m)	81.02	30.72	76.53	30.72
断面形状	部 材 幅	b (mm)	1,000	1,000	1,000	1,000
	部 材 厚	h (mm)	1,500	1,500	1,500	1,500
	鉄 筋 の 芯 か ぶ り	d' (mm)	100	80	100	80
	有 効 高	d (mm)	1,400	1,420	1,400	1,420
許容応力度	鉄筋の許容引張応力度	σ_{sa} (N/mm ²)	176	176	176	176
	コンクリートの許容圧縮応力度	σ_{ca} (N/mm ²)	9	9	9	9
	コンクリートの許容せん断応力度	τ_a (N/mm ²)	0.45	0.45	0.45	0.45
	コンクリートの許容付着応力度	τ_{oa} (N/mm ²)	1.6	1.6	1.6	1.6
必 要	鉄 筋 量	A's (mm ²)	338.0	125.0	319.0	125.0
実配筋量	鉄 筋 呼 び 径	D (mm)	D 16	D 16	D 16	D 16
	配 筋 本 数	n (本)	5 (@200)	5 (@200)	5 (@200)	5 (@200)
	鉄 筋 公 称 断 面 積	a _s (mm ² /本)	198.6	198.6	198.6	198.6
	鉄 筋 公 称 周 長	u (mm/本)	5.0	5.0	5.0	5.0
	配 筋 量	A _s (mm ²)	993.0 OK!	993.0 OK!	993.0 OK!	993.0 OK!
	鉄 筋 比	p (%)	0.071	0.070	0.071	0.070
	弾 性 係 数 比	n	15	15	15	15
		k	0.1356	0.1347	0.1356	0.1347
	j	0.9548	0.9551	0.9548	0.9551	
発 生 応 力 度	鉄 筋 の 引 張 応 力 度	σ_s (N/mm ²)	61.0 OK!	22.8 OK!	57.7 OK!	22.8 OK!
	コンクリートの圧縮応力度	σ_c (N/mm ²)	0.64 OK!	0.20 OK!	0.60 OK!	0.20 OK!

7.4 配筋照査結果まとめ

波力発電装置設置前後のケーソン部底版配筋の作用耐力比を表 7.18 に示す。装置設置後は設置前と比較して底面反力が増加したことにより、底版に発生する応力は若干増加している。しかし、波力発電装置設置による影響は小さく、許容応力を満足しており、安全性は確保される。

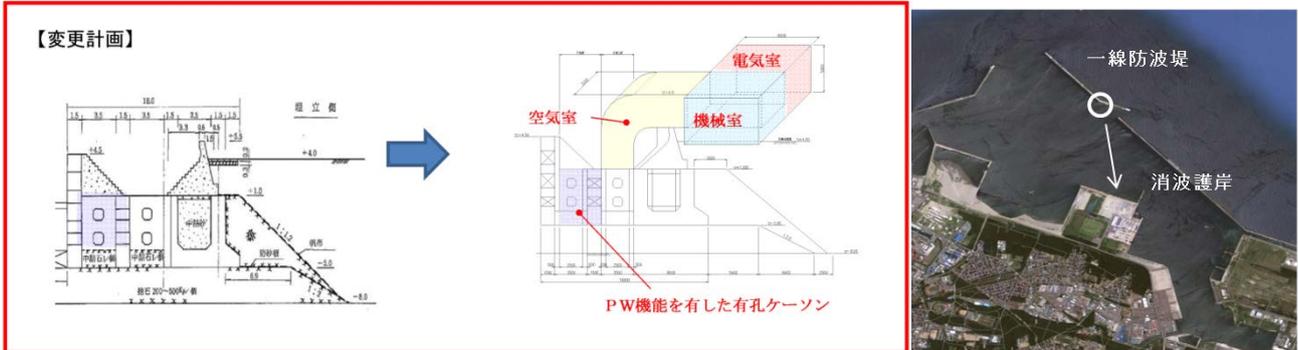
表 7.18 底版配筋の作用耐力比

		作用耐力比			
		設置前		設置後	
		鉄筋 σ_s/σ_{sa}	コンクリート σ_c/σ_{ca}	鉄筋 σ_s/σ_{sa}	コンクリート σ_c/σ_{ca}
法線直角 方向	下側	0.34	0.07	0.35	0.07
	上側	0.13	0.02	0.13	0.02
法線平行 方向	下側	0.33	0.07	0.33	0.07
	上側	0.13	0.02	0.13	0.02

8. 波力発装置躯体の強度検討

8.1 概要

本検討は、酒田港の消波ケーソン（以下有孔ケーソン）上に設置する波力発電装置の強度検討を実施したものである。



8.2 検討ケースの設定

躯体の強度検討は、昭和63年3月『波力エネルギー吸収型防波堤 実施調査：函体の細部設計』より、図 8.1 の状態にて部材設計を行う。

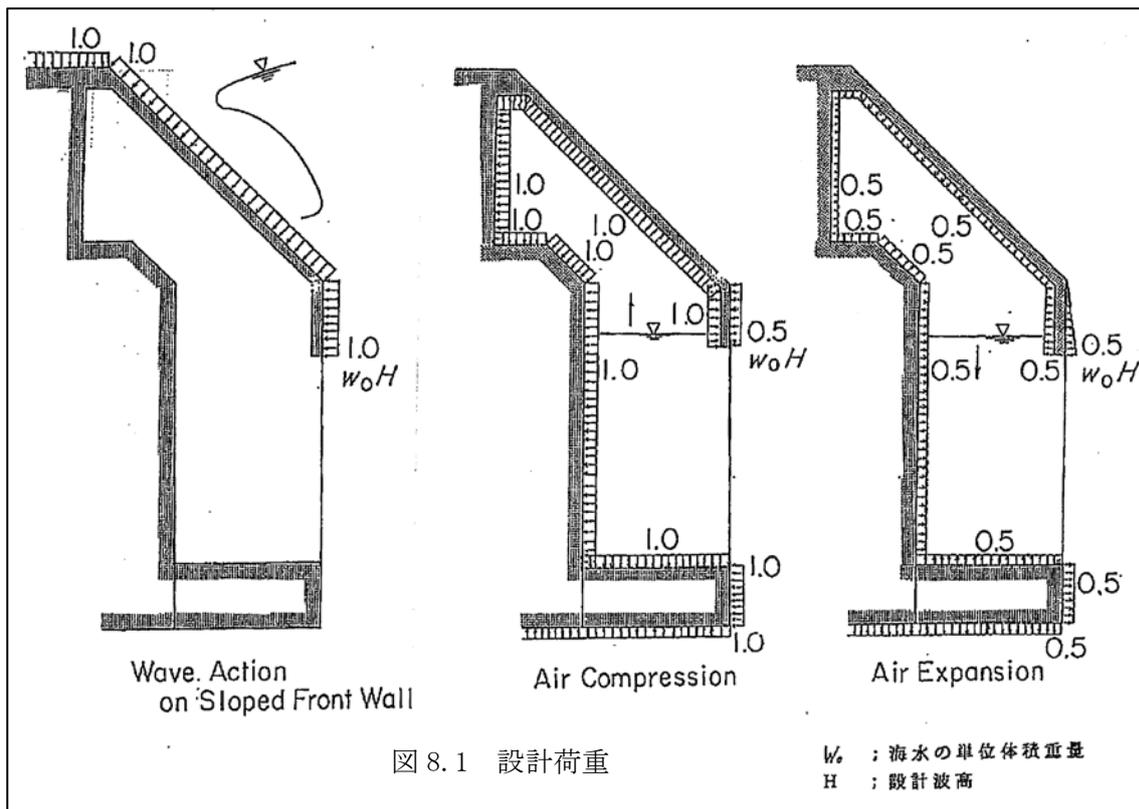


図 8.1 設計荷重

w_0 ; 海水の単位体積重量
H ; 設計波高

出典：『波エネルギー吸収型防波堤実証試験調査—函体の応力解析—』

Wave Action on Sloped Front Wall : 波圧は下部有孔ケーソンと前面パラペットが受けるため、装置には、外圧は風荷重が作用し、内部はOWCの内圧が作用する。

Air Compression : 空気室の設計荷重として検討を実施する。

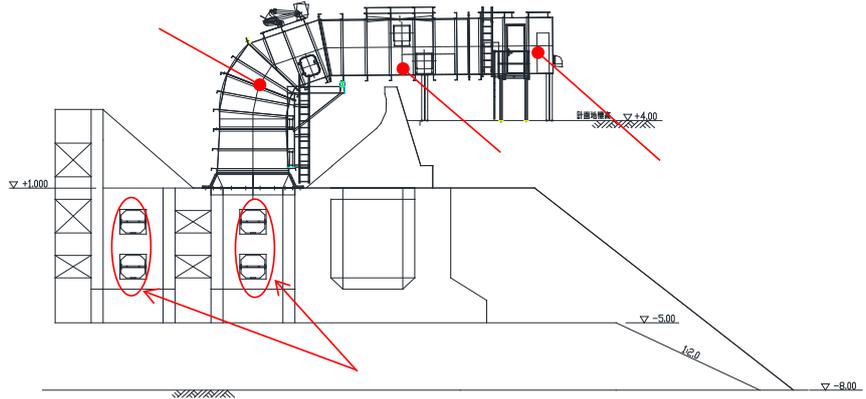
Air Expansion : 機械室の設計荷重として検討を実施する。

(実際は換気口があるため圧力は小さくなるが安全側で設計を行う。)

8.3 躯体の強度計算

7.3.1 設計荷重

- ・空気室内気圧
 $W_o=1.0 \times 6.6 \times 9.80665$
 $=64.7 \text{KN/m}^2$
- ・機械室内気圧
 $W_o=0.5 \times 6.6 \times 9.80665$
 $=32.4 \text{KN/m}^2$
- ・空気室風荷重
 基準風速 $U_d=40 \text{m}$
 空気密度 $P=1.23 \text{kg/m}^3$
 抗力係数 $C_d=1.3$
 ガスト係数 $G=2.4$



$$P = \frac{1}{2} \cdot P \cdot U_d^2 \cdot C_d \cdot G = 3.070 \text{ N/m}^2$$

$$= 3.07 \text{ KN/m}^2$$

7.3.2 許容応力度

鋼板 SS400

許容引張応力度 $\sigma_a=240 \text{N/mm}^2$ (短期として設定)

7.3.3 部材の検討

(1) 空気室

鋼板厚 $t=12$ リブピッチ1000mmとして一方向板として検討

$$M=1/12 \times 64.7 \times 1.0^2 = 5.39 \text{KN} \cdot \text{m}$$

$$\delta = 5.39 \times 10^6 / \left(\frac{1000 \times 12^2}{6} \right) = 225 \text{N/mm}^2 \leq 240 \text{N/mm}^2$$

・補強リブ

両端支持梁として必要断面係数を求める。

$$M=1/8 \times 64.7 \times 3.0^2 = 72.8 \text{KN} \cdot \text{m}$$

$$Z_{\text{req}} = 72.8 \times 10^6 / 240 = 303333 \text{mm}^3$$

$$= 303.3 \text{cm}^3$$

∴ [-250x90x9x13を使用する。 $Z=334 \text{cm}^3$
 $W=34.6 \text{kg/m}$

(2) 機械室

鋼板厚 $t=9$ リブピッチ1000mmとして

$$M=1/12 \times 32.4 \times 1.0^2 = 2.7 \text{KN} \cdot \text{m}$$

$$\delta = 2.7 \times 10^6 / \left(\frac{1000 \times 9^2}{6} \right) = 200 \text{N/mm}^2 \leq 240 \text{N/mm}^2$$

・補強リブ

$$M=1/8 \times 32.4 \times 2.5^2 = 25.3 \text{KN} \cdot \text{m}$$

$$Z_{\text{req}} = 25.3 \times 10^6 / 240 = 105417 \text{mm}^3$$

$$= 105 \text{cm}^3$$

∴ [-250x90x9x13を使用する。 $Z=334 \text{cm}^3$
 $W=34.6 \text{kg/m}$

(3) 電気室

鋼板厚 $t=6$ リブピッチ1000mmとして

$$M=1/12 \times 3.07 \times 1.0^2 = 0.26 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad 0.255833$$

$$\delta = 0.26 \times 10^6 / \left(\frac{1000 \times 6^2}{6} \right) = 43 \text{ N/mm}^3 \leq 240 \text{ N/mm}^3$$

・補強リブ

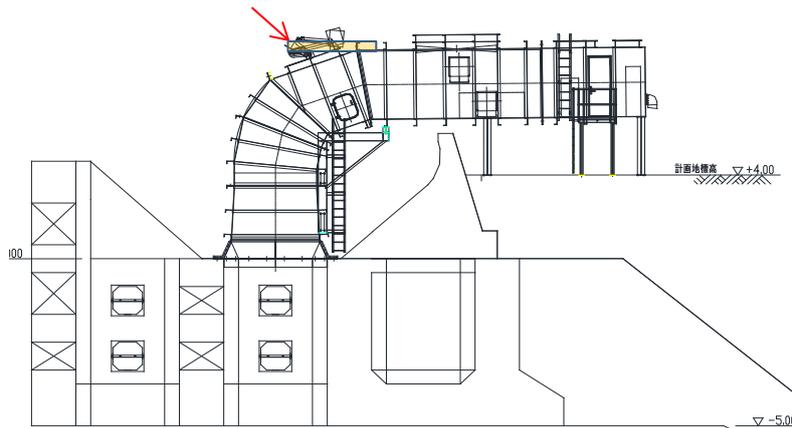
$$M=1/8 \times 3.07 \times 2.5^2 = 2.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Z_{\text{req}} = 2.4 \times 10^6 / 240 = 10000 \text{ mm}^3$$

$$= 10 \text{ cm}^3$$

∴ [-250x90x9x13を使用する。 $Z=334 \text{ cm}^3$
 $W=34.6 \text{ kg/m}$

空気室と電気室の取付けボルトは
ダクト上下面のハッチングをかけた
部分の圧力差に対するせん断抵抗で
強度確認する。



$$\text{圧力差 } 2.5 \times 2.8 \times 64.7 = 452.9 \text{ kN}$$

使用ボルト M24

$$\text{有効断面積 } A = 352.5 \text{ mm}^2$$

ボルトの許容せん断応力

$$\tau_a = 138.6 \text{ N/mm}^2$$

必要本数

$$N_{\text{req}} = 452.9 \times 10^3 / (352.5 \times 138.6)$$

$$= 9.27 \text{ 本以上}$$

(4) 遊水室スリット蓋

既存ケーソンの遊水室側面スリット部には、PWの効率UPのため、鋼板と形鋼を用いた蓋により内部水の流出によるエネルギー減少を防止する。

開口部の面積は 1.0m^2

空気室圧力と同等と考えて塞ぎ板の面圧は 64.7kN

ボルト2本で固定するものとする

$$A_{\text{req}} = 64.7 \times 10^3 / 240 = 270\text{mm}^2 / 2\text{本} \quad \rightarrow \text{M16 } A = 156\text{mm}^2$$

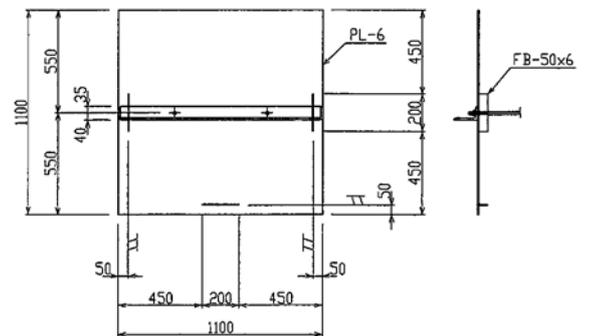
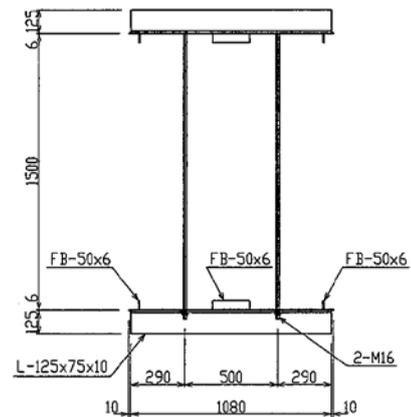
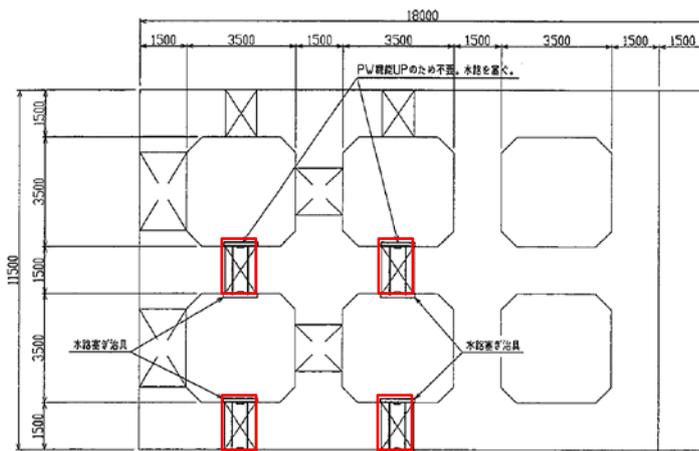
蓋の強度は、空気室と同等の圧力が作用した状態として開口部両端で支持した梁として板の補強材を検討する。

$$M = 1/8 \times 64.7 \times 1.0^2 = 8.09\text{KN}\cdot\text{m}$$

$$Z_{\text{req}} = 8.09 \times 10^6 / 240 = 33708\text{mm}^3 \\ = 33.7\text{cm}^3$$

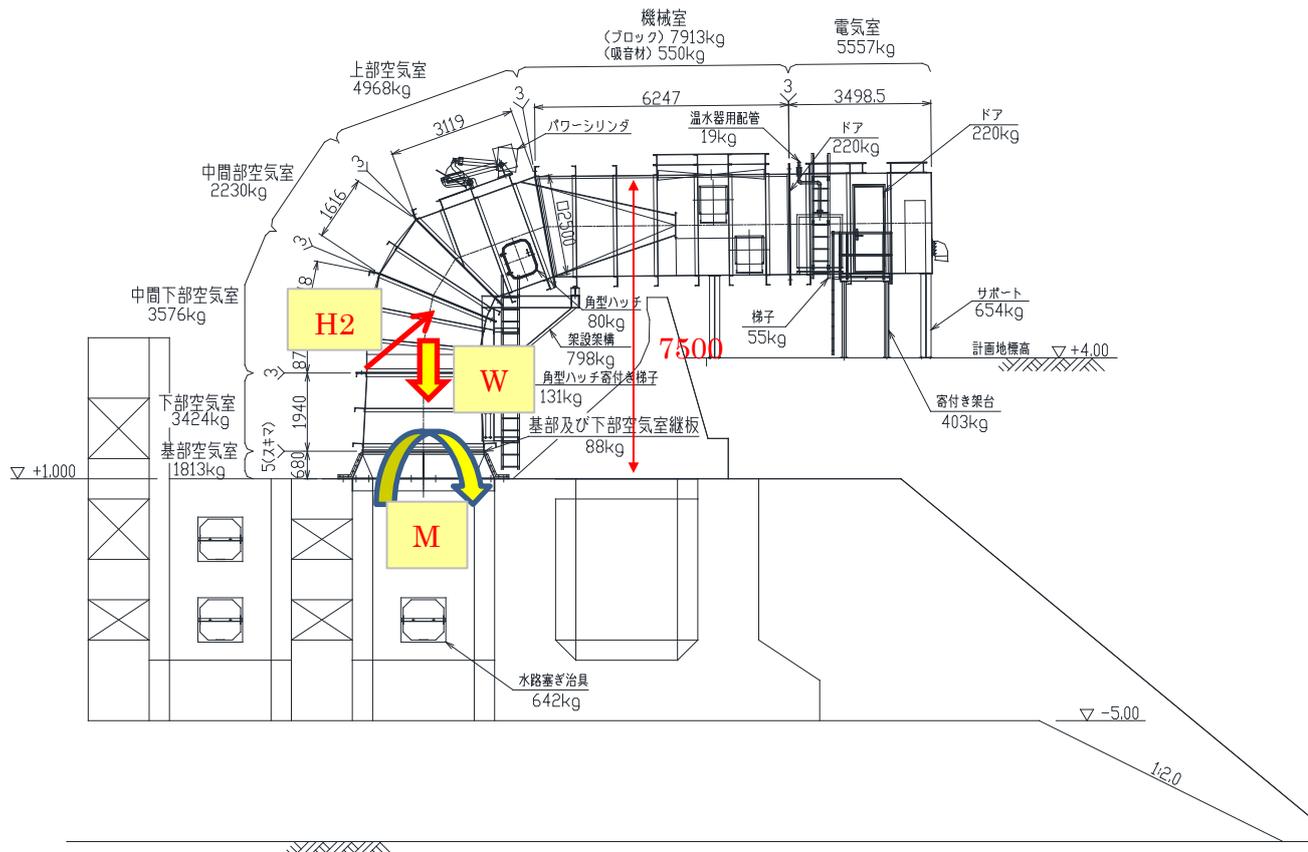
L-125x75x10を使用することとする。

$$Z = 36.1\text{cm}^3$$



(5) 脚部の水平力に対する検討

(a) 躯体に作用する地震慣性力



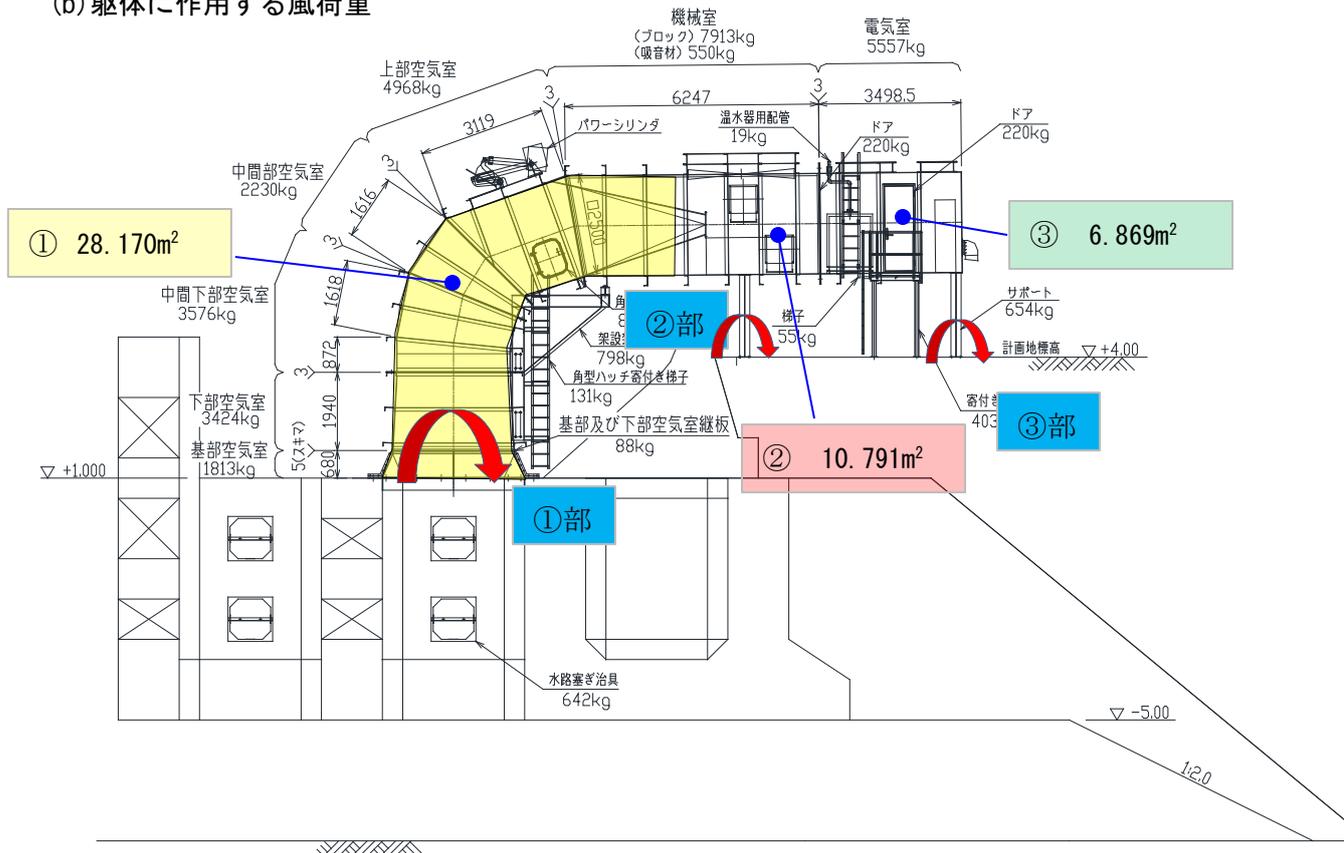
護岸に作用する地震慣性力

設計震度 $K_h = 0.1$ (外港地区埋立護岸図面より)

護岸に作用する地震慣性力は空気室の慣性力+機械室の半分の重量の慣性力とする。
 機械室重量には、室内のタービン関連の重量として5t程度を付加することとする。

		重量 (kg)	全重量 W(kg)	慣性力 H2 (kg)	作用高 (m)	モーメント M(kg・m)
空気室	基部空気室	1929	16808	1681	3.75	6303
	下部空気室	3443				
	中間下部空気室	3590				
	中間部空気室	2230				
	上部空気室	4826				
	架設架構	790				
機械室	機械室重量	8525	6763	676	6.25	4227
	タービン関連重量	5000				
護岸に作用する力			23570	2357		10529
			231.14 (kN)	23.11 (kN)	4.467 (m)	103.26 (kN・m)

(b) 躯体に作用する風荷重



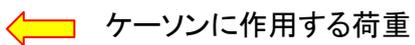
基準風速 : $U_d = 40 \text{ m/s}$
 空気密度 : $\rho = 1.23 \text{ kg/m}^3$
 抗力係数 : $C_d = 1.3$
 ガスト影響係数 : $G = 2.4$

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times U_d^2 \times C_d \times G \\
 = 3070.08 \text{ N/m}^2 \rightarrow 3.07 \text{ kN/m}^2$$

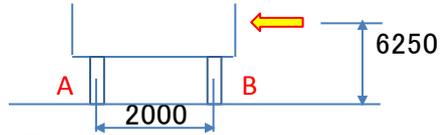
図面計測値より, 側面の受風面積		風荷重による水平力
①部	空気室基部負担分 28.170 m ²	86.482 kN
②部	機械室基礎負担分 10.791 m ²	33.128 kN
③部	電気室基礎負担分 6.869 m ²	21.088 kN

(c) 基礎部に作用する反力

①部 水平力 86.482 kN
 作用高 3.75 m
 モーメント 324.308 kN・m



②部 水平力 33.128 kN
 作用高 6.25 m
 モーメント 207.05 kN・m
 ②部サポートの負担する鉛直荷重W2
 W2 = 機械室重量 / 2 + 電気室負担分重量 (負担分740mm : 全長2500mm)



②部負担分

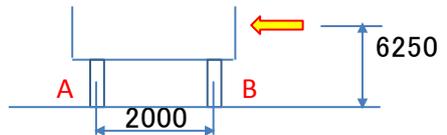
機械室重量:	13525 kg	→	6762.5
電気室重量:	5629.0 kg	→	1666.2
サポート自重:	654 kg		654
	合計		9082.7 kg
		→	89.1 kN

サポート1点当たりの反力

	鉛直力 (kN)	モーメントによる偶力 (kN)	合計 (kN)
A点	44.6	103.525	148.075
B点	44.6	-103.525	-58.975

→引抜き(-)に対してケミカルアンカM12 × 2本 = 58kN × 2 = 116kN

③部 水平力 21.088 kN
 作用高 6.25 m
 モーメント 131.8 kN・m
 ③部サポートの負担する鉛直荷重W3
 W3 = 電気室負担分重量 (負担分1760mm : 全長2500mm) + サポート重量



③部負担分

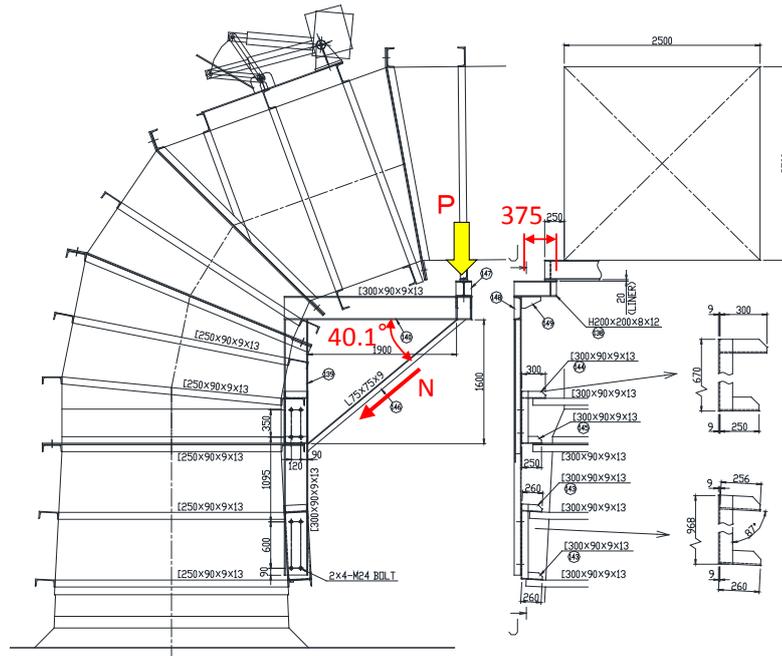
電気室重量:	5629.0 kg	→	3962.8
サポート自重:	654 kg		654
	合計		4616.8 kg
		→	45.3 kN

サポート1点当たりの反力

	鉛直力 (kN)	モーメントによる偶力 (kN)	合計 (kN)
A点	22.7	65.9	88.550
B点	22.7	-65.9	-43.250

→引抜き(-)に対してケミカルアンカM12 × 2本 = 58kN × 2 = 116kN

(6) 仮設架構の検討



仮設架構に作用する荷重

機械室重量の半分と上部空気室の重量を考慮する。

機械室重量	6850 kg
上部空気室重量	5481 kg
仮設架構の負担	8905.63 kg

架構1箇所の受ける荷重P = 4452.8 kg (仮設架構の負担重量の1/2)

(a) ブレースの照査

ブレース部の軸力 $N = P / \sin \theta = 4452.8 / \sin 40.1 = 6913 \text{ kg}$

L-75x75x9 断面積A = 12.69 cm²

ブレースの応力 $\sigma = N / A = 53 \text{ N/mm}^2 \leq 140 \text{ N/mm}^2$

(b) 張出し部の照査

張出し付根部に生じる曲げモーメント M

$M = P \times L = 4452.8 \times 0.375 = 1669.8 \text{ kg} \cdot \text{m}$

H-200x200x8x12 断面係数 Z = 472 cm³

張出し部の応力度 $\sigma = M / Z = 34.7 \text{ N/mm}^2 \leq 140 \text{ N/mm}^2$

(c) 取付ボルトの照査

使用ボルト M24 有効断面積 Ae 352.5 mm²

ボルト1本の受け持つせん断力 $S = 140 / \sqrt{3} \times Ae$

= 28492.2 N

架構1面あたりボルト本数 8 本

架構1面あたりボルトの受け持つせん断力 ΣS 227937.6 N

負担荷重 43667.1 N < ΣS OK

9. 防食

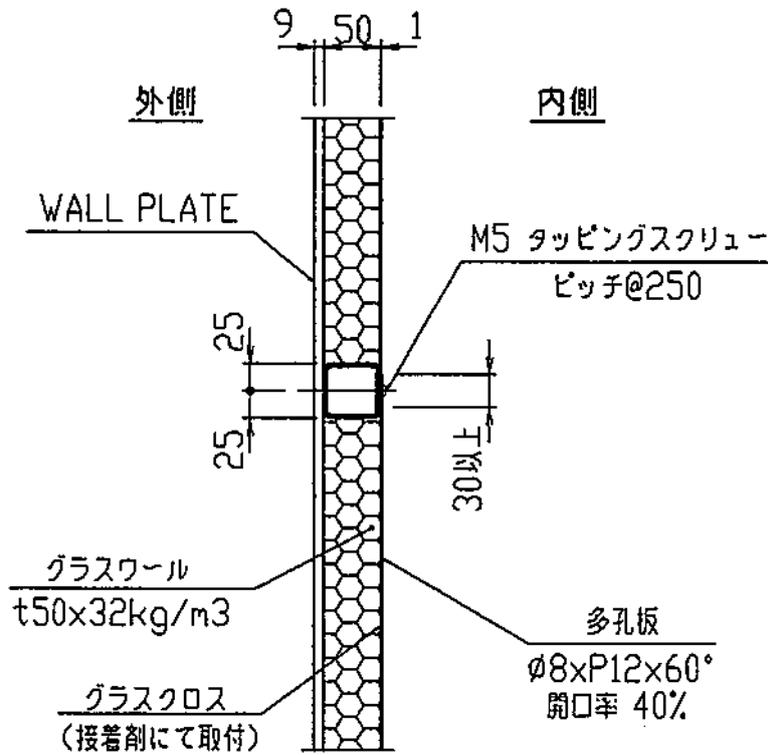
現場での実証試験期間は、最長でも 10 ヶ月未満である。しかしながら、沿岸域であり塩害対策は必要であることから、下記仕様とする。

(外面) 動力工具処理 St3+変性エポキシ樹脂塗料(160 μ) +ポリウレタン樹脂塗料 (40 μ)

(内面) 動力工具処理 St3+変性エポキシ樹脂塗料(120 μ)

10. 防音対策

機械室・電気室には吸音材（グラスウール）を施工する。施工は□50x50x1.6の角型鋼管（STKR400）を配置し、間にグラスウール（32K相当 50mm厚 JIS A 6301）を配置した後、パンチングメタル（多孔板）をタッピングする。



付録 3 PW-OWC 型波力発電装置施工写真

「酒田空気タービン式波力発電」

施 工 写 真



平成 27 年 1 月 完成

目次

ページ

1. 設置場所	1
2. 波力発電装置構造一般図	2
3. 波高計設置場所	3
4. 工事着手前	4
5. 準備工	5
6. 計測室等設置	6
7. 外部電源引込	7
8. 水路塞ぎ	9
9. 波高計設置	11
10. 基部・下部空気室設置	14
11. 中間下部・中間部・上部空気室及び架設架構設置	17
12. 機械室・電気室設置	19
13. 温水器・水槽設置	22
14. 電気配線	23
15. 後片付・外周フェンス設置・他	25
16. 波力発電装置完成	26

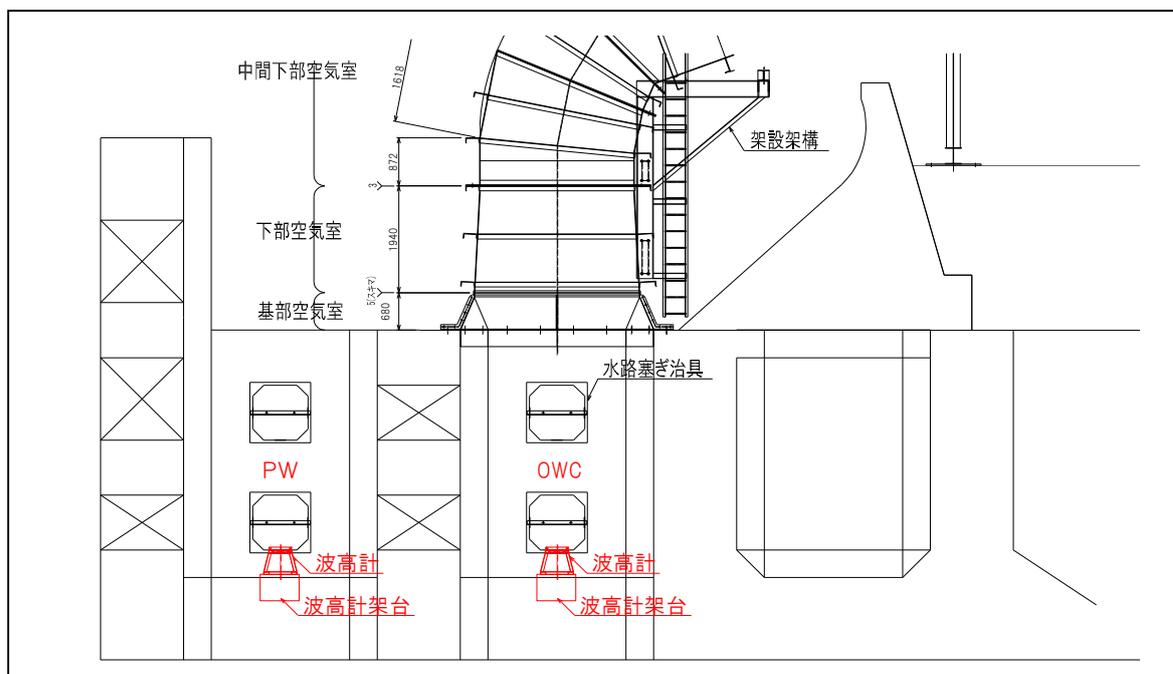
1. 設置場所

山形県酒田市高砂地先（直立消波型ケーソン）

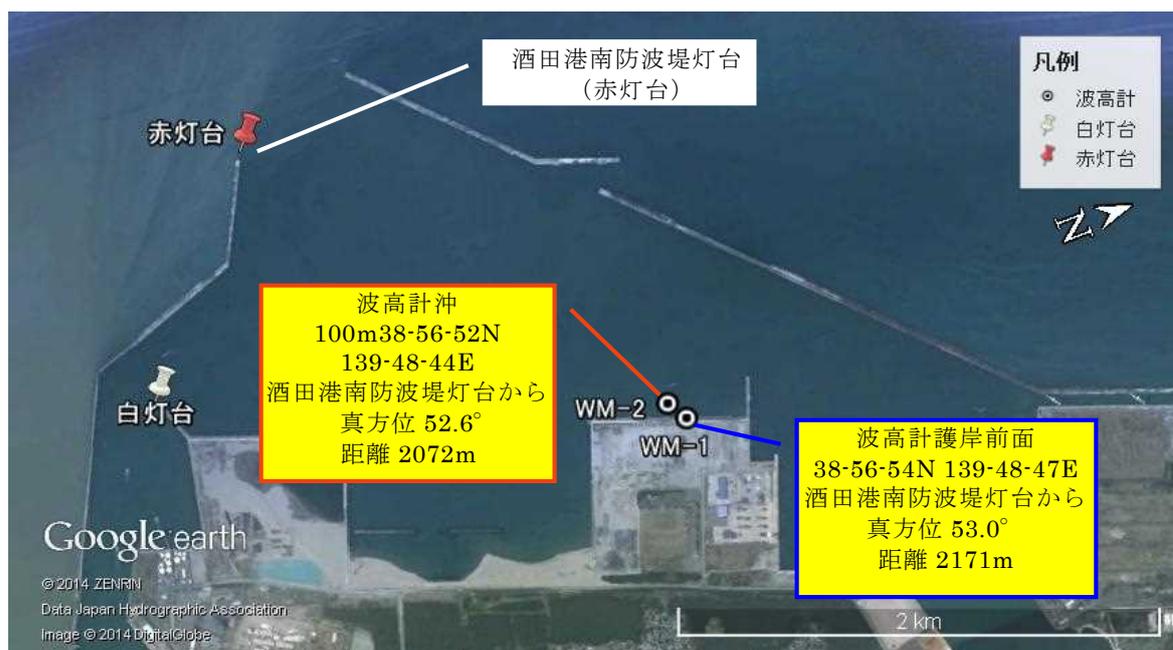


3. 波高計設置場所

- ・護岸内に2基、港内に2基設置。
- ・護岸内2基は直立消波型ケーソン海側のマス（PW）と陸側のマス（OWC）に設置。
- ・港内2基は直立消波型ケーソン前面の方塊上と沖合 100m の海底に設置。



護岸内波高計設置位置図



港内波高計設置位置図

4. 工事着手前



酒田港高砂地先 消波護岸・北側より



消波護岸・南側より



消波護岸・設置マス



使用陸上ヤード(酒田港湾事務所ブロック製作ヤード)



使用陸上ヤード(酒田港湾事務所ブロック製作ヤード)



基準点: 消波護岸南側端部
護岸天端(標高CDL+4.780m)

5. 準備工



オールテレーンクレーン(220t吊)搬入組立状況



オールテレーンクレーン搬入組立状況



オールテレーンクレーン搬入組立状況



発電装置組立架台搬入状況



発電装置組立架台(山留材)



発電装置組立架台

6. 計測室等設置



計測室(B4650*L2080*H2360)



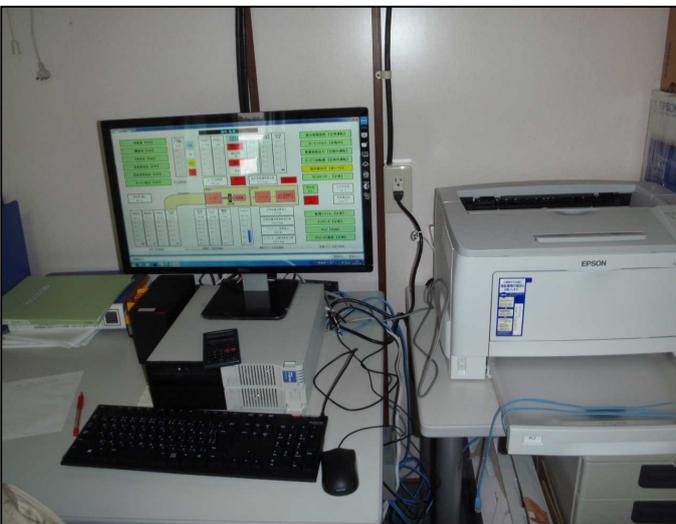
計測室、トイレ、資材倉庫(敷鉄板4枚)



計測室防犯対策・セコム設置状況



計測室防犯対策・セコム設置



計測室・波力発電管理用パソコン



計測室・タービン管理用パソコン

7. 外部電源引込-1



資材 (CVT100sq、CVT38sq)



建柱状況



建柱状況



建柱状況



支線アンカー打込状況



架線取付状況

7. 外部電源引込-2



架線取付状況



架線取付状況



架線取付状況



埋設配管 (FEP100φ、FEP50φ)



埋設配管埋戻し状況



分電盤取付状況

8. 水路塞ぎ-1



止水蓋搬入



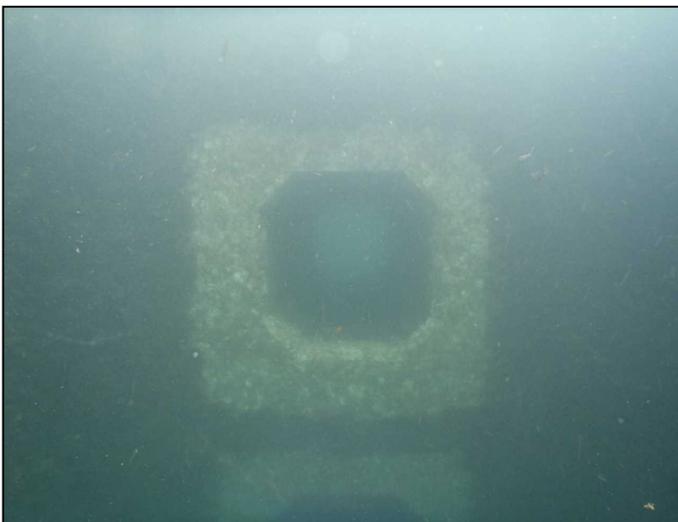
止水蓋仮置き



消波護岸水路 カキ落とし前



カキ落とし状況



カキ落とし完了



ラフテーンクレーンによる止水蓋吊り降ろし

8. 水路塞ぎ-2



止水蓋取付状況



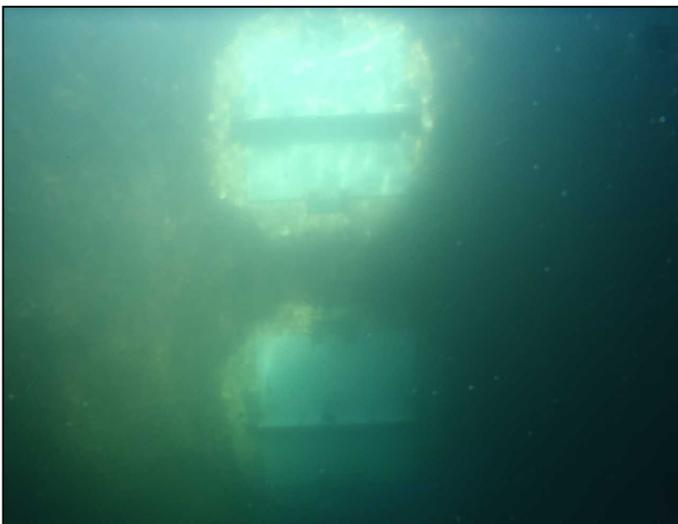
止水蓋取付状況



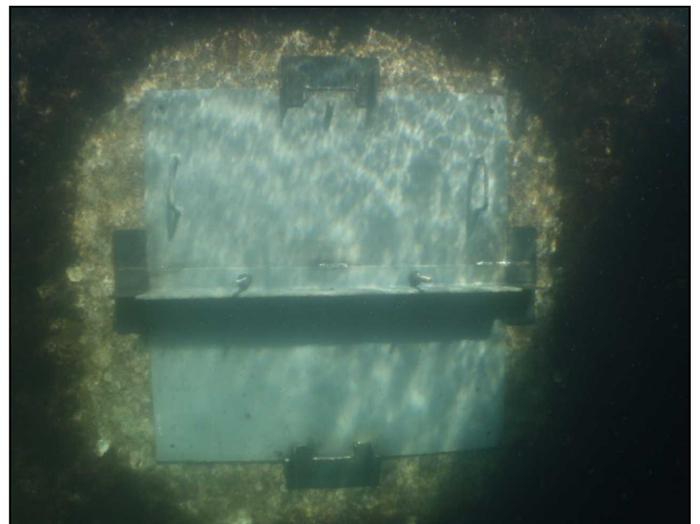
止水蓋取付状況



止水蓋取付完了



止水蓋取付完了



止水蓋取付完了

9. 波高計設置 - 1



波高計方塊架台(方塊0.9*0.9*0.9m)



波高計方塊架台設置状況



波高計方塊架台固定用間詰石(5m³)



間詰石設置状況



波高計保護管取付状況



OWC波高計設置状況

9. 波高計設置-2



OWC波高計設置完了



PW波高計設置完了



護岸前面波高計設置状況



沖波高計設置状況



ケーブル配線状況



護岸前面波高計設置完了

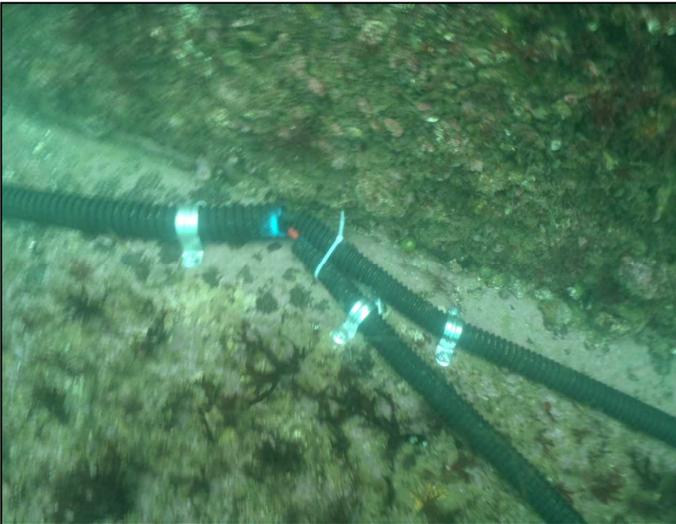
9. 波高計設置-3



沖波高計設置完了



沖波高計ケーブル配線固定状況



護岸前面方塊部ケーブル配線固定状況



護岸内壁面ケーブル配線固定状況

10. 基部・下部空気室設置－1



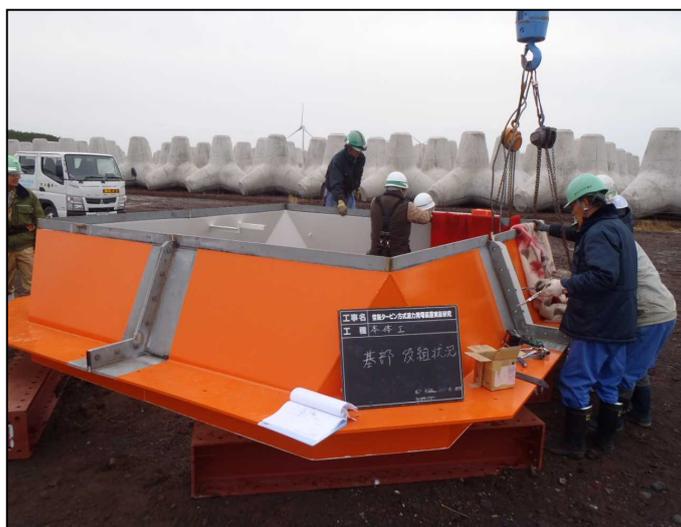
アンカー削孔状況



ケミカル注入、アンカー取付状況



基部・下部空気室搬入状況



基部組立状況



基部組立完了

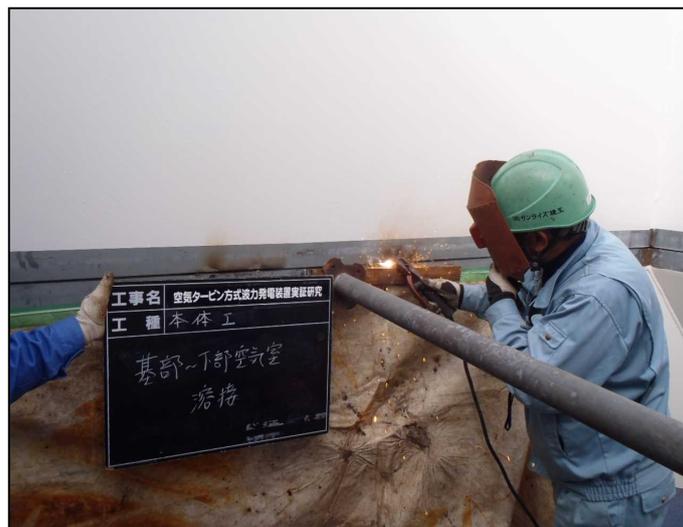


基部仮設置、アンカー位置確認

10. 基部・下部空気室設置-2



基部・下部空気室接続状況



基部・下部現場全周溶接状況(内側)



基部・下部現場全周溶接状況(外側)



全周溶接箇所塗装状況



全周溶接完了



基部・下部空気室接続完了

10. 基部・下部空気室設置－3



基部取付部ゴムパッキン取付状況



ゴムパッキンコーキング材塗布状況



基部・下部空気室設置状況



基部・下部空気室設置状況



基部・下部空気室設置状況



基部取付部コーキング状況(青色箇所)

11. 中間下部・中間部・上部空気室及び架設架構設置－1



上部空気室搬入状況



空気室荷卸状況



中間下部空気室設置状況



中間部・上部空気室接続状況



中間部・上部空気室接続、塗装状況



中間部・上部空気室設置状況

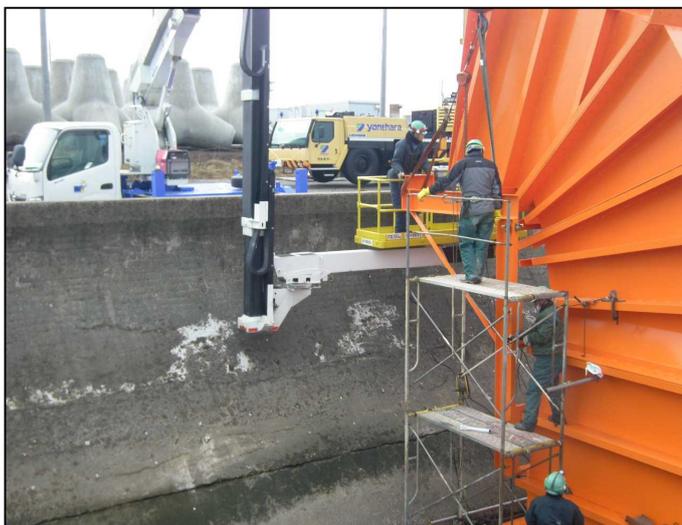
11. 中間下部・中間部・上部空気室及び架設架構設置－2



架設架構固定箇所塗装状況



架設架構設置状況



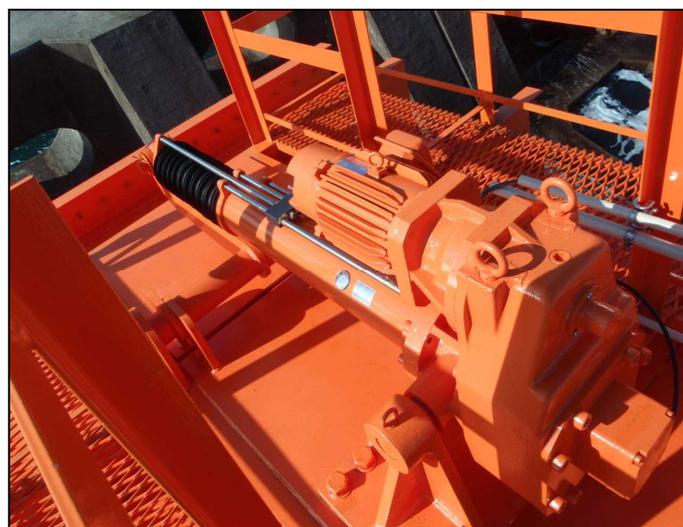
架設架構設置(溶接)状況



架設架構設置(溶接)状況



パワーシリンダ・メンテナンスデッキ組立



パワーシリンダ

12. 機械室・電気室設置－1



機械室搬入状況



電気室荷卸状況



機械室・電気室サポート



電気制御盤・温水器搬入状況



電気制御盤設置状況



屋外フード取付状況

12. 機械室・電気室設置－2



サポート取付状況



取付位置合わせ状況



機械室設置状況



機械室設置状況



機械室設置ボルト固定状況



電気室接続部ゴムパッキン取付状況

12. 機械室・電気室設置－3



電気室設置状況



電気室設置状況



電気室ボルト固定状況



電気室ボルト固定状況



サポート溶接状況



機械室・電気室設置完了

13. 温水器・水槽設置



水槽(5m³)設置状況



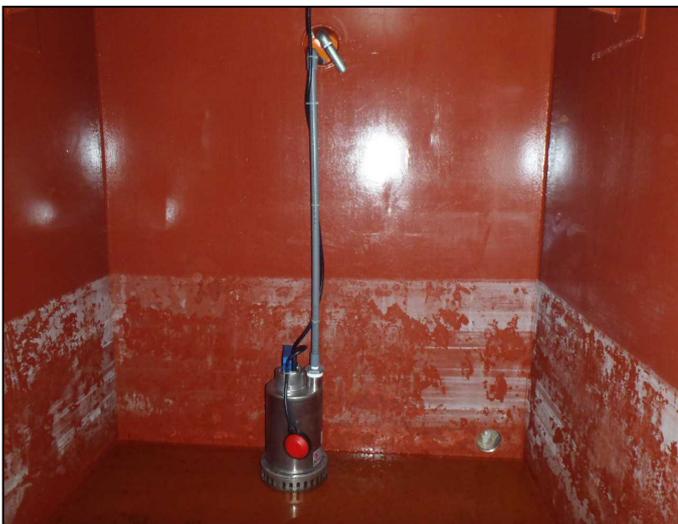
配管取付状況



配管取付完了



水槽内水中ポンプ取付状況



水槽内水中ポンプ取付完了



温水器・水槽設置完了

14. 電気配線-1



ケーブル資材搬入



外部配管・配線状況



外部配管・配線状況



機械室内配管・配線状況



電気室-計測室配線状況



電気室-計測室配線状況

14. 電気配線-2



接地棒打込、確認状況



電気室制御盤配線状況



電気室制御盤配線確認状況



電気保安協会定期点検状況

15. 後片付・外周フェンス設置・他



外周フェンス基礎(H形鋼)設置状況



外周フェンス設置完了



外周フェンス設置完了



オールクレーン(220t吊)解体搬出状況



敷鉄板搬出状況



計測室等バリケード設置

16. 波力発電装置完成-1



完成1



完成2



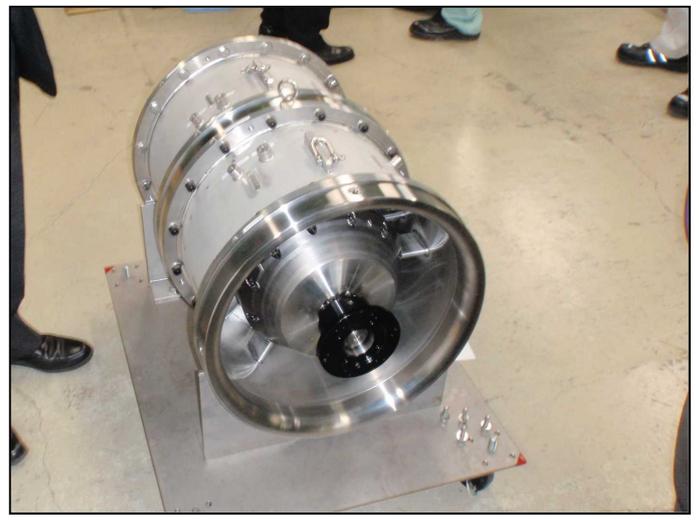
完成3



完成4



マニホールド



衝動タービン

16. 波力発電装置完成-2



衝動タービン



タービン回転部



制御機



発電機



経産省検査状況(電気室内)



経産省検査状況(会議室内)