

超音波による  
河川濁水の浮遊砂濃度と粒度分布の  
現地計測に関する研究

古川仁志





# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	はじめに .....	1
1.2	発電用貯水池・調整池の堆砂状況 .....	2
1.3	発電ダムの操作規程 .....	4
1.4	発電ダムの土砂管理の現状と課題 .....	5
1.5	研究の目的 .....	8
1.6	本論文の構成と概要 .....	9
	<b>参考文献</b>	<b>13</b>
<b>第 2 章</b>	<b>浮遊砂測定技術の現状と課題</b>	<b>17</b>
2.1	序論 .....	17
2.2	流砂観測 .....	17
2.3	浮遊砂測定方法 .....	19
2.4	結論 .....	24
	<b>参考文献</b>	<b>25</b>
<b>第 3 章</b>	<b>超音波減衰スペクトル法の測定原理</b>	<b>29</b>
3.1	序論 .....	29
3.2	測定原理 .....	30
3.3	浮遊砂測定のための準備 .....	34
3.4	結論 .....	34
	<b>参考文献</b>	<b>35</b>
<b>第 4 章</b>	<b>現場型超音波減衰スペクトル計の作製</b>	<b>37</b>
4.1	序論 .....	37
4.2	超音波減衰スペクトル計 .....	37
4.3	基準スペクトルの測定 .....	42
4.4	粒径 10 $\mu\text{m}$ 以上の球形粒子の測定 .....	48

4.5	粒径 10 $\mu$ m 未満の球形粒子の測定 .....	54
4.6	結論 .....	56
参考文献 .....		59
<b>第 5 章</b>	<b>基準スペクトル</b> .....	<b>61</b>
5.1	序論 .....	61
5.2	真水の基準スペクトルの測定 .....	61
5.3	塩水の基準スペクトルの測定 .....	69
5.4	フローセルの基準スペクトルの測定 .....	83
5.5	結論 .....	93
参考文献 .....		95
<b>第 6 章</b>	<b>非球形粒子に適用する実験モデル</b> .....	<b>97</b>
6.1	序論 .....	97
6.2	天然の細砂・シルトの減衰スペクトルの測定 .....	97
6.3	考察 .....	106
6.4	結論 .....	107
参考文献 .....		109
<b>第 7 章</b>	<b>河川の浮遊砂計測に用いる実験モデル</b> .....	<b>111</b>
7.1	序論 .....	111
7.2	浮遊砂計測に用いる実験モデル .....	111
7.3	粘性損失が支配的になる粒子(50% 粒径 10 $\mu$ m 未満)の測定 .....	112
7.4	散乱損失が支配的となる粒子(50% 粒径 10 $\mu$ m 以上)の測定 .....	118
7.5	結論 .....	126
参考文献 .....		129
<b>第 8 章</b>	<b>現場型超音波減衰スペクトル計による河川濁水の浮遊砂計測</b> .....	<b>131</b>
8.1	序論 .....	131
8.2	発電ダムの土砂スルーシング時の浮遊砂計測 .....	131
8.3	感潮河川の浮遊土砂の計測 .....	148
8.4	結論 .....	158
参考文献 .....		161
<b>第 9 章</b>	<b>結論</b> .....	<b>163</b>
9.1	各章の結論 .....	163

---

9.2	今後の展望 .....	166
-----	-------------	-----



# 目次

1.1	山地部から海岸までの総合的な土砂管理の推進.....	2
2.1	浮遊砂量と流量の関係(山本,2014).....	18
2.2	粒子による光散乱パターン.....	21
3.1	超音波減衰スペクトル法の測定原理(粘性損失).....	30
3.2	超音波減衰スペクトル法の測定原理(散乱損失).....	31
4.1	開発した現場型超音波減衰スペクトル計の構成とプローブ.....	39
4.2	現場型超音波減衰スペクトル計のシステム構成図.....	40
4.3	プラノコンケーブ形振動子と放射超音波の幾何学的焦点距離.....	41
4.4	振動子に印加するインパルス電圧.....	42
4.5	トランスデューサの受信波形と周波数スペクトル.....	43
4.6	実験装置の概略.....	44
4.7	基準スペクトルの測定結果.....	45
4.8	水温と基準スペクトルの振幅との関係(その1).....	46
4.9	水温と基準スペクトルの振幅との関係(その2).....	47
4.10	SEMによる粒径10 $\mu\text{m}$ 以上の球形粒子の粒子形状観察.....	49
4.11	球形粒子(GBL-30)の減衰係数の理論値と測定値との比較.....	51
4.12	粒径10 $\mu\text{m}$ 以上の球形粒子の減衰スペクトルの測定結果.....	52
4.13	粒径10 $\mu\text{m}$ 以上の球形粒子の減衰特性.....	53
4.14	SEMによる粒径10 $\mu\text{m}$ 未満の球形粒子の形状観察.....	55
4.15	粒径10 $\mu\text{m}$ 未満の球形粒子の減衰スペクトルの測定結果.....	56
4.16	粒径10 $\mu\text{m}$ 未満の球形粒子の減衰特性.....	57
5.1	現場型超音波減衰スペクトル計の基準スペクトルの測定方法.....	62
5.2	真水の基準スペクトルの測定結果.....	63
5.3	水温と基準スペクトルの振幅との関係(その1).....	64
5.4	水温と基準スペクトルの振幅との関係(その2).....	65
5.5	水温と水の音波吸収係数との関係、および水温と振動子が発信した基準スペク	



	トルの振幅との関係(その 1).....	66
5.6	水温と水の音波吸収係数との関係、および水温と振動子が発信した基準スペクトルの振幅との関係(その 2).....	67
5.7	塩水の基準スペクトルの測定結果.....	70
5.8	水温と塩水の基準スペクトルの振幅の関係(その 1).....	71
5.9	水温と塩水の基準スペクトルの振幅との関係 (その 2).....	72
5.10	塩分と基準スペクトルの振幅の関係(その 1).....	73
5.11	塩分と基準スペクトルの振幅との関係(その 2).....	74
5.12	水の密度と基準スペクトルの増幅係数との関係(その 1).....	76
5.13	水の密度と基準スペクトルの増幅係数の関係(その 2).....	77
5.14	音速と基準スペクトルの増幅係数との関係(その 1).....	78
5.15	音速と基準スペクトルの増幅係数の関係(その 2).....	79
5.16	基準スペクトルの増幅係数の解析結果(その 1).....	81
5.17	基準スペクトルの増幅係数の解析結果(その 2).....	82
5.18	水の密度、音速と基準スペクトルの増幅係数 $\psi$ との関係( $f = 6.5\text{MHz}$ ).....	83
5.19	フローセルの基準スペクトルの実験装置.....	84
5.20	フローセルおよびフローセルの断面図.....	84
5.21	フローセルの基準スペクトル.....	85
5.22	流速と超音波の音速との関係(マッハ数).....	86
5.23	マッハ数とフローセルの減衰係数との関係(その 1).....	87
5.24	マッハ数とフローセルの減衰係数との関係(その 2).....	88
5.25	レイノルズ数とフローセルの減衰係数との関係(その 1).....	89
5.26	レイノルズ数とフローセルの減衰係数との関係(その 2).....	90
5.27	マッハ数、レイノルズ数とフローセルの減衰係数との関係(その 1).....	91
5.28	マッハ数、レイノルズ数とフローセルの減衰係数との関係(その 2).....	92
6.1	SEM による天然の細砂・シルトの粒子形状観察.....	98
6.2	天然の細砂・シルトの減衰スペクトル測定結果 (その 1).....	101
6.3	天然の細砂・シルトの減衰スペクトル測定結果 (その 2).....	102
6.4	粒径 $10\ \mu\text{m}$ 以上の天然の細砂・シルトの減衰特性.....	103
6.5	減衰スペクトルの測定値と弾性体モデルによる理論値との比較.....	104
6.6	減衰スペクトルの測定値と剛体モデルによる理論値との比較.....	104
6.7	測定値と等価球形散乱体モデルによる理論値との比較.....	105
7.1	超音波減衰スペクトル法による浮遊砂の測定方法.....	113
7.2	SEM による 50%粒径 $10\ \mu\text{m}$ 未満のシリカ粒子の形状観察.....	114
7.3	50% 粒径 $10\ \mu\text{m}$ 未満のシリカ粒子の減衰スペクトルの測定結果.....	116

7.4	レーザー回折・散乱法で測定した 50% 粒径 10 $\mu\text{m}$ 未満のシリカ粒子の粒度分布.....	117
7.5	二峰性対数正規分布モデルによる粒度分布の近似(Silica-5).....	117
7.6	50% 粒径 10 $\mu\text{m}$ 未満のシリカ粒子の測定結果.....	118
7.7	MSP#250 シリカ粒子の形状観察.....	119
7.8	50% 粒径 10 $\mu\text{m}$ 以上のシリカ粒子の減衰スペクトルの測定結果.....	120
7.9	レーザー回折・散乱法で測定した 50% 粒径 10 $\mu\text{m}$ 以上のシリカ粒子の粒度分布.....	121
7.10	MSP#250 の減衰スペクトルから算定した等価粒径係数( $a_0=0.60$ ).....	124
7.11	シリカ MSP#250 の等価粒径係数の検討結果.....	125
7.12	浮遊砂測定に用いる実験モデルによるシリカ粒子の濃度測定.....	126
7.13	浮遊砂計測に用いる実験モデルによる 50% 粒径 10 $\mu\text{m}$ 以上のシリカ粒子の粒度 分布の測定結果(例) .....	127
8.1	平岡ダム の位置図.....	132
8.2	平岡取水口地点の浮遊砂の測定.....	134
8.3	平岡取水口地点の減衰スペクトルの測定結果 (その 1) .....	135
8.4	平岡取水口地点の減衰スペクトルの測定結果 (その 2) .....	136
8.5	水位低下から最大流入量発生時の平岡取水口地点の浮遊砂の粒度分布.....	137
8.6	最大流入量発生後から水位回復までの平岡取水口地点の浮遊砂の粒度分布 .....	138
8.7	SEM による土砂スルーシグ時の平岡取水口地点で採取した浮遊砂の形状観察....	139
8.8	平岡取水口地点の濃度補正係数.....	143
8.9	平岡調整池水位、流量および現場型超音波減衰スペクトル計で測定した濃度と 50%粒径.....	144
8.10	超音波減衰スペクトル計で測定した濃度とガラス繊維濾紙法で測定した濃度と の比較.....	145
8.11	超音波減衰スペクトル計で測定した粒度分布とレーザー回折・散乱法による測定 値との比較.....	146
8.12	出水時の平岡取水口地点の粒径集団別濃度の測定結果.....	147
8.13	六角川の位置図.....	148
8.14	六角川の測定地点(六角橋).....	148
8.15	六角橋地点の横断面図.....	149
8.16	六角川の浮遊土砂の測定.....	149
8.17	六角川の減衰スペクトルの測定結果(平成 26 年 6 月 12 日).....	150
8.18	六角川感潮部の浮遊土砂の粒度分布の測定結果 (平成 26 年 6 月 12 日) .....	151
8.19	SEM による六角川の浮遊土砂(ガタ土)の粒子形状観察.....	153
8.20	六角橋地点の濃度補正係数.....	155
8.21	六角橋地点の浮遊土砂の測定に適用した実験モデル $K_2(f, d)$ の一例.....	156
8.22	六角橋地点の水位、水温、流速、塩分と現場型超音波減衰スペクトル計による浮 遊土砂の濃度と 50%粒径の測定結果 .....	157

---

8.23	超音波スペクトル計で測定した濃度とガラス繊維濾紙法で測定した濃度との比較	158
8.24	超音波減衰スペクトル計で測定した粒度分布とレーザ回折・散乱法で測定した 粒度分布との比較 .....	159

# 表目次

1.1	総貯水容量内堆砂率の分布.....	3
1.2	総貯水容量内堆砂率 80%以上の貯水池・調整池.....	3
1.3	堆砂量 10 百万 m <sup>3</sup> 以上の貯水池・調整池.....	4
1.4	ダムの種類の定義.....	6
1.5	ダムの種類の指定.....	7
2.1	浮遊砂現場測定技術の比較.....	23
4.1	水温とプラノコンケーブ形超音波振動子の幾何学的な焦点距離との関係.....	42
4.2	粒径 10 μm 以上の球形粒子の密度と粒径.....	48
4.3	粒径 10 μm 以上の球形粒子の実験濃度.....	50
4.4	粒径 10 μm 未満の球形粒子の密度と粒径.....	54
5.1	真水の基準スペクトルの振幅の解析結果.....	69
5.2	塩水の基準スペクトル測定実験の概要.....	70
5.3	塩分による基準スペクトルの増幅係数 $\psi$ の解析結果.....	80
5.4	フローセルの基準スペクトル測定実験.....	85
5.5	フローセルの基準スペクトルの減衰係数の解析結果.....	93
6.1	実験用粒子の粒径および密度.....	99
6.2	実験用粒子の固体体積分率と水温の測定結果.....	100
7.1	50% 粒径 10μm 未満のシリカ粒子の粒度分布コード.....	115
7.2	実験モデル( $c_0=0.90$ )による 50% 粒径 10μm 未満のシリカ粒子の測定結果.....	115
7.3	50% 粒径 10μm 以上のシリカ粒子の 50%粒径、5%粒径、95%粒径.....	119
7.4	50% 粒径 10μm 以上のシリカ粒子の粒度分布コード.....	122
7.5	50%粒径 10μm 以上のシリカ粒子の濃度、固体体積分率.....	123
7.6	MSP#250 シリカ粒子の平均等価粒径係数.....	123
8.1	平岡取水口地点の浮遊砂の粒度分布コード.....	140
8.2	ガラス繊維濾紙法で測定した浮遊砂濃度と固体体積分率.....	141
8.3	平岡取水口地点の浮遊砂の等価粒径係数 ( $\alpha_0=0.70$ の場合) の算出結果.....	142

---

8.4	六角川の浮遊土砂の粒度分布コード .....	152
8.5	六角川の浮遊土砂の濃度と固体体積分率 .....	152
8.6	六角川の浮遊土砂の等価粒径係数 ( $c_0=0.85$ の場合) の算出結果 .....	154

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 はじめに

ダムは人類が作りだした最大の構造物であり、我々の生活に限りない恩恵を与えているが、それだけに自然環境に与える影響も大きく、環境との調和が求められる。ダムが河川の自然環境に及ぼす影響の一つにダムによる流砂の遮断の問題がある。そのため、ダム上流では堆砂して、貯水機能の低下や上流域の河床の上昇による種々の影響があらわれる。また、ダム下流では、土砂の流出が減少して河床低下や海岸の侵食などが生じる。堆砂には地域差があり、すべての場所で問題となっているわけではないが、中部地方や北陸地方の流砂の多い河川ではかなり深刻な問題になっているところもある[1]。

昭和 26 年（1951 年）、中谷宇吉郎[2]は文芸春秋に「ダムの埋没」と題する論文を発表してダム堆砂の進行を警告し、社会に衝撃を与えた。

堆砂の進行は上流域の河床を上昇させ、洪水による河川の氾濫や家屋の浸水などの原因となる。昭和 39 年、新河川法が制定され、水系一貫管理制度の導入など治水・利水の体系的な制度の整備が図られ、新たに河川の従前の機能の維持などの「ダムに関する特則」が定められた。これによって、堆砂によりその上流の河床が上昇したダムの設置者には、堆砂の掘削・浚渫や洪水被害の防止のための低地の盛土などを行い、また、洪水時においては貯水位を低下させてダムから放流を行い、上流域での災害を防止するための措置を講じる義務が課せられることとなった。

平成 9 年、河川法が改正され、河川環境の整備と保全が河川法の目的に追加されることになり、河川は治水・利水の機能をもつ施設としてだけでなく、豊かな自然環境を残し、うるおいのある水辺空間や多様な生物の生息・生育環境として捉えられるようになってきた。また、平成 10 年 7 月に河川審議会総合土砂管理小委員会の中間報告「流砂系の総合的な土砂管理に向けて[3]」がなされ、流域の源頭部から海岸までの一貫した土砂管理を推進するための具体的な施策が提言された。図 1.1[4]は山地から海岸までの総合的な土砂管理の施策を示す。ダムは流砂系における土砂の連続性を遮断し、下流への土砂供給量を減少される施設となっているため、ダムの所期の目的を損なうことなくダムから土砂を排出し、適正に土砂を流すための対策の実施が、総合的な土砂管理を進める上で必要不可欠な課題であるとされている。

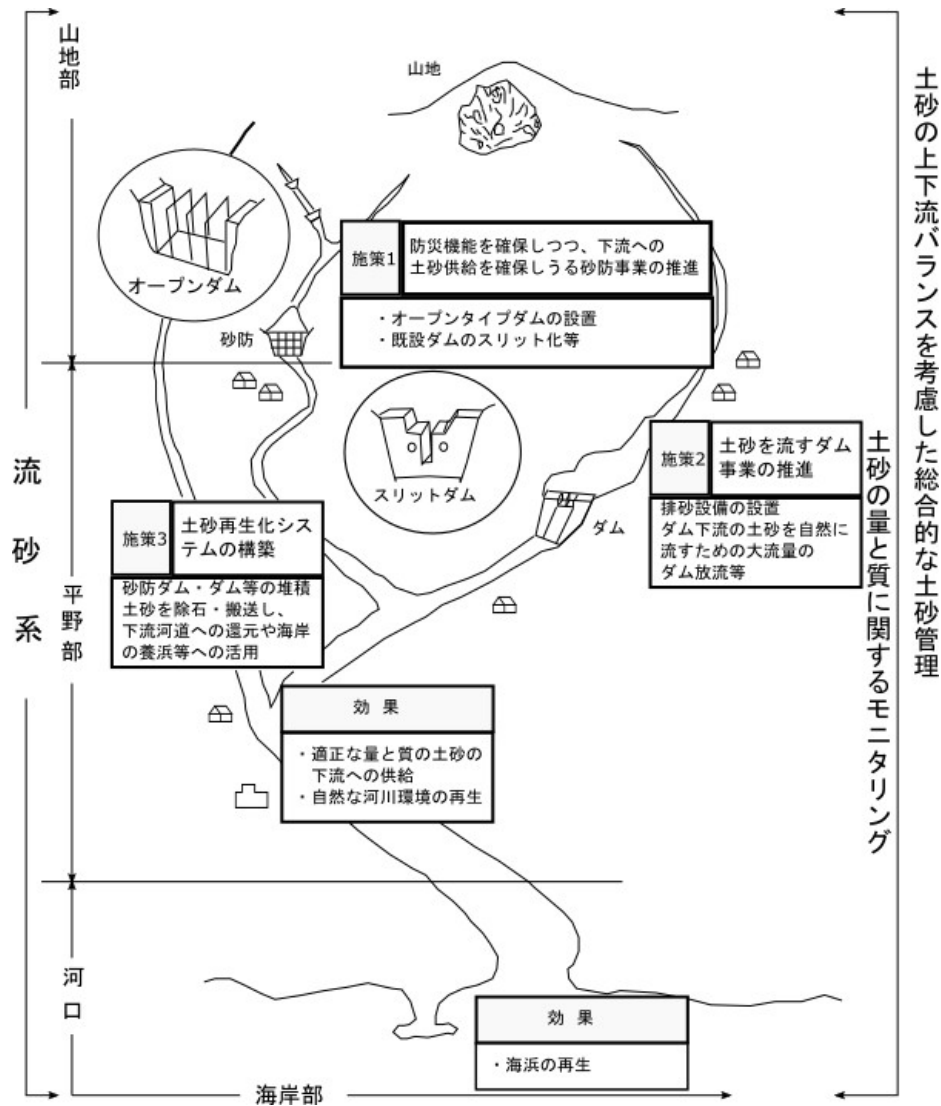


図 1.1 山地部から海岸までの総合的な土砂管理の推進

## 1.2 発電用貯水池・調整池の堆砂状況

平成 15 年度の発電用貯水池・調整池の堆砂状況[5]を表 1.1～表 1.3 に示す。総貯水容量 100 万  $\text{m}^3$  以上で高さ 15m 以上のダムを有する貯水池・調整池は 420 地点あり、これら貯水池・調整池の総貯水容量の総計は約 126 億 51 百万  $\text{m}^3$ 、堆砂量は約 11 億 60 百万  $\text{m}^3$ 、堆砂率は 9.2 %である。また、前年度からの増分堆砂量は約 65 百万  $\text{m}^3$  となっている。総貯水容量内堆砂率の分布を表 1.1 に示す。総貯水容量内堆砂率が 10 %未満のものは、全地点の過半数(57.1 %)を占め、全体的に見ると堆砂の進行している貯水池・調整池は少ない。一方、堆砂率が 80 %以上のものは 11 地点 (2.6 %) となっている。総貯水容量内堆砂率が 80 %以上進んでいる貯水池・調整池を

表 1.1 総貯水容量内堆砂率の分布

堆砂率	地点数	構成比率
10%未満	240	57.1
10%以上 20%未満	62	14.8
20%以上 30%未満	34	8.1
30%以上 40%未満	21	5.0
40%以上 50%未満	20	4.8
50%以上 60%未満	16	3.8
60%以上 70%未満	11	2.6
70%以上 80%未満	5	1.2
80%以上 90%未満	8	1.9
90%以上	3	0.7
	420	100.0

表 1.2 総貯水容量内堆砂率 80%以上の貯水池・調整池

貯水池 又は 調整池	水系	所有者	発電所	出力 kW	竣工年月	総貯水 容量 ×10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	堆砂量 ×10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	堆砂率 %
千頭	大井川	中部電力	湯山	22000	S10.10	4950	4838	97.7
大間	大井川	中部電力	大間	16500	S13.12	1519	1378	90.7
春別	静内川	北海道電力	春別	27000	S38.10	1430	1315	92.0
黒又	信濃川	東北電力	上条	6000	S2.2	1454	1302	89.5
西山	富士川	山梨県	西山	18400	S32.4	2400	2085	86.9
小屋平	黒部川	関西電力	黒部川第二	72000	S11.10	2122	1805	85.1
平岡	天竜川	中部電力	平岡	101000	S27.1	42425	35979	84.8
石徹白	九頭竜川	電源開発	長野	220000	S43.5	1030	866	84.1
雨畑	富士川	日本軽金属	角瀬	13000	S42.2	13650	11410	83.6
岩知志	沙流川	北海道電力	岩知志	13500	S33.7	5040	4229	83.9
黒部	利根川	東京電力	鬼怒川	127000	T1.12	2366	1915	80.9
泰阜	天竜川	中部電力	泰阜	52500	S11.1	10761	8449	78.5
大井	木曾川	関西電力	大井	48000	T13.11	29400	7531	74.4

表 1.2 に示す。表 1.2 に示す総貯水容量内堆砂率 80%以上の貯水池または調整池はその大部分が大正から昭和 30 年代に竣工した発電所が占めている。これら調整池では河床はほぼ平衡状態になり、上流から調整池に流入する土砂の多くは下流に通過する。しかし、支川から流入する土砂などもあり、局部的には堆砂の掘削や浚渫が必要な場合もある。

次に、総貯水容量内堆砂量が 10 百万 m<sup>3</sup> 以上の貯水池・調整池を表 1.3 に示す。表 1.3 には、総貯水容量 1 億 m<sup>3</sup> 以上の貯水池が 9 地点あるが、これらの大規模貯水池には、流水のみならず土砂が流入し、その多くが堆積する。その結果、佐久間ダム、秋葉ダム（天竜川）、風屋ダム、二



表 1.3 堆砂量 10 百万 m<sup>3</sup> 以上の貯水池・調整池

貯水池 又は 調整池	水系	所有者	発電所	出力 MW	竣工年月	総貯水 容量 ×10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	堆砂量 ×10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	堆砂率 %
佐久間	天竜川	電源開発	佐久間	350	S31.10	326848	113882	34.8
畑薙第一	大井川	中部電力	畑薙第一	137	S37.9	107400	62048	57.8
井川	大井川	中部電力	井川	62	S32.9	150000	38095	25.4
丸山	木曾川	関西電力	丸山	125	S29.4	59350	36524	61.5
平岡	天竜川	中部電力	平岡	101	S27.1	42425	35979	84.8
黒部	黒部川	関西電力	黒部川第四	335	S36.1	199285	28233	14.2
大井	木曾川	関西電力	大井	48	T13.11	29400	21869	74.4
相模	相模川	神奈川県	相模	31	S20.2	63200	18471	29.2
祖山	庄川	関西電力	祖山	54.3	S5.12	33850	18332	54.2
上椎葉	耳川	九州電力	上椎葉	90	S30.5	91550	8604	9.4
高瀬	信濃川	東京電力	新高瀬川	1280	S53.12	76200	15761	20.7
大夕張	石狩川	北海道電力	二股	14.7	S36.5	87205	14519	16.6
一ツ瀬	一ツ瀬川	九州電力	一ツ瀬	180	S38.8	261315	13161	5.05
風屋	新宮川	電源開発	十津川第一	75	S35.10	130716	13554	10.4
秋葉	天竜川	電源開発	秋葉第一他	127.1	S33.7	34703	12284	35.4
長安口	新那賀川	徳島県	日野谷	61	S30.10	54278	12654	23.3
奥只見	阿賀野川	電源開発	奥只見	360	S35.12	601000	12921	2.1
奈川渡	信濃川	東京電力	安曇	623	S44.6	123000	11446	9.3
雨畑	富士川	日本軽金属	角瀬	13	S42.2	13650	11410	83.6
二津野	新宮川	電源開発	十津川第二	58	S37.1	43791	10804	24.7
御母衣	庄川	電源開発	御母衣	215	S36.1	365780	10748	2.9

津野ダム（新宮川）、貯水容量は小さいが滝ダム（阿賀野川）等では、浚渫・掘削等による堆砂排除を実施しており、ダム下流への土砂排出と堆砂処理費用の削減が課題となっている。

## 1.3 発電ダムの操作規程

### 1.3.1 旧河川法および河川堰堤規則

発電ダムは、大正年間の大井ダム(関西電力,1924)、戦後の佐久間ダム(電源開発,1956)など、1950年代後半まで当時のダム建設の主流であった。これらのダムは旧河川法の時代に建設されたものである。昭和10年に制定された河川堰堤規則(内務省令第三六号)ではダム操作に関しては単にその規程の届出を義務づけたのみであって、ダム操作の規程を順守する義務的規定はなかった。このため、利水ダムでは、ダム上流部においては、貯水池の堆砂による河床の上昇、下流部においては河床の低下、河道調節効果の減少等、河川管理面に重大な影響を与えるようになってきたが、旧河川法と関係法令ではこれを規制するための規定は不十分なものであった[6]。

### 1.3.2 ダムに関する特則

昭和 39 年に制定された新河川法の第 44 条から第 51 条に至る「ダムに関する特則」の諸規定はいわゆるダム災害の発生を防止するためにダムの設置者がとらなければならない措置を整備したものである[7]。河川の従前の機能の維持（法第 44 条）は、ダムの設置によって洪水時における河川の従前の機能が減殺されることに対処するため、ダムの設置者に必要な施設の設置またはこれに代わるべき措置をとることを義務付けたものである。ダムの設置によるマイナス面の影響として、ダムの堆砂による河床の上昇や洪水位の上昇などがある。

次に、ダム操作に関しては、法第 47 条においてダムを設置する者はあらかじめ放流基準、ゲート操作方法、機械器具の点検等のダム操作の方法について定めたダム操作規程を定め、河川管理者の承認を受けなければならない旨を規定している。また、法第 47 条第一項の規程によりダムの設置者が操作規程を定め、または変更するときは、標準操作規程の例によってするものとされている。

### 1.3.3 ダムの種類

利水ダムが河川の従前の機能に与える影響は、ダムの態様や規模によって異なる。このため、「河川法第 2 章第 3 節第 3 款(ダムに関する特則)等の規程の運用について(最終改正昭和 51 年 10 月 26 日建設省河政発第 68 号)」では、法第二十六条の許可を受けて設置するダムで、基礎地盤から堤頂までの高さが十五メートル以上のもの(以下「ダム」という。)を表 1.4 のように分類している。また、第一類から第四類のダムを表 1.5 に示すように指定している[8]。なお、表 1.5 において、河川管理者から第一類ダムの指定を受けた滝ダム（阿賀野川水系）、秋葉ダム（天竜川水系）、二津野ダム（新宮川水系）は流量を調節するための容量を確保することが困難なため、必要な容量を上流の第一類ダム（田子倉、佐久間、風屋）で確保することとし、滝ダムと秋葉ダムは第三類、二津野ダムは第四類のダム操作を行っている。

## 1.4 発電ダムの土砂管理の現状と課題

### 1.4.1 発電ダムの土砂管理の現状

発電用貯水池・調整池では堆砂量を管理するため毎年 1 回、貯水池・調整池の堆砂測量が行われている。堆砂測量は通常湖面では深淺測量により、陸上部では横断測量によって行われる。これらの測量結果から貯水池・調整池の総貯水容量を求める。当初の総貯水容量と当該年度の総貯水容量との差が当該年度の累計堆砂量となる。当該年度と前年度の累計堆砂量と差が当該年度の堆砂量となる。また、堆砂対策が課題となっている佐久間ダムや秋葉ダム（天竜川水系）では、貯水池に計画維持河床高を設定して、この計画維持河床上の堆砂を排除するための対策を実施している。計画維持河床高は、河川の従前の機能を維持するために、貯水池上流部の低地の冠水、家屋の浸水被害が発生しない河床高を設定している。ダム貯水池の土砂管理を行うためには、ダ

表 1.4 ダムの種類の定義

第一類	その設置に伴い下流の洪水流量が著しく増加するダムで、これによつて生ずる災害を防止するため、当該増加流量を調節することができる容量を確保して洪水に対処する必要があるもの
第二類	堆砂によりその上流の河床が上昇したダム又はその設置者が貯水池の敷地として権原を取得した土地の広さが十分でないダムで、洪水時にその上流の水位が上昇することによつて生ずる災害を防止するため、貯水池の水位を予備放流水位として洪水に対処する必要があるもの
第三類	貯水池の容量に比して洪水吐の放流能力が大きいダム又は洪水吐ゲートの操作の方法が複雑であるダムで、貯水池の水位を予備放流水位として洪水に対処することが災害の発生の防止上適切と認められるもの
第四類	貯水池の水位を常時満水位として洪水に対処しても災害の発生の防止上支障がないダム

ムの堆砂量だけではなく貯水池に流入する土砂量やダムを通過する土砂量の調査が必要となるが、現状ではこれらの調査は行われていないのが実情である。

#### 1.4.2 ダムからの排砂の課題

大規模な人工構造物であるダムは、大量の水を貯めると同時に大量の土砂を貯めており、流砂系における土砂の連続性を遮断し、下流への土砂供給量を減少させる施設となっている。そのため、流砂系の総合土砂管理では、ダムから土砂を排出し、適正に下流に土砂を流すことが求められている。ダム排砂の本格的な取り組みが開始されたのは、昭和 60 年(1985 年)に完成した出し平ダム[9]からである。現在、黒部川水系の宇奈月・出し平ダムでは、連携排砂・通砂が定期的に行われている。ダムからの排砂は下流域に悪影響を及ぼさないように実施するため、排砂システムだけでなく、下流域の水質、底質等のモニタリングの実施がダム排砂の可否を左右する重要な課題となる。黒部川では、排砂に伴う下流域の影響を把握するため、水質・底質・水生生物・地下水調査が、海域、河川、ダム貯水池および黒部川から取水する用水路等において行われている。特に、水質は、排砂実施中、ダム直下および下流河川の主要地点において、水温、水素イオン濃度(pH)、生物化学的酸素要求量(BOD)、化学的酸素要求量(COD)、溶存酸素(DO)、浮遊物質(SS)、濁度、総窒素(T-N)、総リン(T-P)、浮遊物質の粒度分布が 1 時間間隔でモニタリングされている[10]。

河床を形成している土砂の粒径は一般的に上流ほど粗く、下流へ行くほど細くなるが、上流から河口までのほとんどの領域で様々な粒径が混在する。そして粒径分布や水量等に適した生態系や利用形態が存在する。したがって、ダムから土砂を排出して、望ましい河川の姿を維持していくためには、土砂の量的な管理のみならず、河道の形態や粒径等の質も考慮した管理が必要と

表 1.5 ダムの種類の指定

第一類	石狩川水系	雨竜第二	雨竜第一	鷹泊	大夕張	
	赤川水系利根	八久和				
	川水系阿賀野	須田貝				
	川水系	奥只見	田子倉	**滝	本名	
	庄川水系	御母衣				
	大井川水系	畑薙第一	畑薙第二	井川		
	天竜川水系	佐久間	**秋葉			
	木曾川	牧尾				
	熊野川水系	風屋	**二津野	池原		
	太田川水系	立岩	樽床	王泊		
	吉野川水系	長沢	大森川	大橋		
	耳川水系	塚原	上椎葉			
	一ツ瀬川水系	一ツ瀬				
	第二類	最上川水系	上郷			
天竜川水系		泰阜	平岡			
木曾川水系		落合	大井	笠置		
球磨川水系		瀬戸石	荒瀬			
第三類	信濃川水系	生坂	平	水内	笹平	小田切
	大井川水系	奥泉				
	江川水系	浜原				
	筑後川水系	夜明				

なる。

### 1.4.3 発電ダムの土砂管理の方向性

流砂の多い河川に設置した発電ダムは大量の土砂を貯めており、発電ダムにおける土砂排出は当該河川の総合的な土砂管理を行う上で必要不可欠な課題である。土砂排出の方法には大別して浚渫・掘削による方法と水位低下による排砂・通砂による方法があるが、土砂の排出は洪水時のダム操作方法と密接な関係があることから、発電ダムの土砂の排出はダムの種類別に検討する必要がある。

第一類ダムは、貯水容量、利用水深ともに大きく、その貯水位は年間運用計画に基づき運用される。山地で生産される土砂は、微細粒径の土砂（シルト、粘土）から礫まで、幅広い粒径で構成されている。これらの土砂は洪水とともに貯水池に流入し、その多くが貯水池に堆積する。流入する土砂のうち、どの粒径集団が捕捉され、貯水池からどの程度流出するかは、貯水池の回転

率(貯水池年流入水量/貯水容量)、ダム水位変動パターン、放流施設の放流機能、放流施設の位置、排砂施設形状とその機能、流入土砂の粒径別流入量に支配される[11]。

一方、第一類ダムでは河川の従前の機能を維持するため増加流量を調節して放流することが義務付けられており、この調節に必要な容量を確保して洪水に対処している。したがって、第二類ダムのような水位低下による排砂・通砂ができないため、堆砂対策は粒径集団別に検討する必要がある。砂・砂利は排砂設備や掘削による方法、シルト・細砂は水位低下による掃砂、粘土・シルトは洪水と一緒に下流の通過させる等の対策が必要となる。

第二類ダムは、堆砂によりその上流の河床が上昇したダムが指定されており、その対策として洪水時の水位を予備放流水位に低下させて土砂を下流に通過させる操作を行っている。表 1.2 に示す泰阜ダム、平岡ダム(天竜川水系)等ではダムの越流頂付近まで土砂が堆積した状態となっており、これらのダムではダム操作規程に基づいた洪水時のダム操作を行うことによって上流から流入する土砂を下流に通過させている。今後はダムを通過する土砂の量と質のモニタリングを行い、総合土砂管理との連携を図る必要がある。

第三類、第四類ダムにおいて堆砂が問題となっているダムの場合は、そのダムはもはや第三類、第四類に属するダムではなくなっており、操作規程を第二類のダム操作規程の変更するとともに、予備放流水位を土砂の排出が可能な予備放流水位まで低下するなどの措置を講じる必要がある。

しかし、多くの発電ダムは旧河川法時代に建設されており、現行標準操作規程に基づく操作を行うことを前提とした設計が行われているものではない。さらには、土砂排出を行う本格的な排砂設備を備えていないため、土砂排出のためにはダム操作方法の変更やダムの改造が必要であると考える。

## 1.5 研究の目的

河川における粒径別浮遊砂の輸送特性の検討はダムからの排砂による河川環境への変化やダム撤去後の干潟・沿岸環境に及ぼす影響評価のためには必須の項目である。また、河川環境を評価するためには、平水時から洪水時までの河川流況に対応した水温、水質、浮遊砂、揮発性浮遊物質(Volatile Suspended Solids、以下「VSS」という)等の幅広い測定が必要となる。

水温、水質、濁度に関しては連続観測可能な測定装置がすでに開発されており、河川や湖沼等の観測で成果を挙げている。しかし、浮遊砂の濃度と粒度分布の観測は浮遊砂サンプラーや河川濁水の採取後の分析を主としており、現場で瞬時に測定可能な計測器は現存せず、その開発が待望されている。洪水時の浮遊砂観測は多大な労力を必要とする。粒径区分ごとの浮遊砂量の測定では、数種類のガラス繊維濾紙を用いた濾過法や液体を分散媒体として用いる湿式フルイ分け法などが用いられ、観測から分析までには時間を要するために、分析体制の確保が大きな課題となる。

大槻ら[12]は荒瀬ダム撤去による環境回復効果を検討するために球磨川における洪水時の粒径別浮遊砂輸送特性を検討している。ガラス繊維濾紙法を用いてサンプルを濾過し、粘土から中砂( $0.05 \mu\text{m}$ ~ $214 \mu\text{m}$ )までの粒径を 6 種類に区分して、粒径区分ごとに負荷-流量( $L-Q$ )曲線を算

定して、ダムゲート全開時における浮遊砂輸送量の時間変化を算定している。このように河川環境を評価する際には浮遊砂の平均粒径や量のみならず粒径別土砂の質的な経時変化を同時に測定できるシステムの開発が必要となる。

また、平成 23 年(2011 年)3 月 11 日に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故による原子力災害の発生は記憶に新しい。事故から 6 年近くを経過した今では、放射能の自然減衰と福島県内を中心とした除染の効果により、避難指示解除準備区域への帰還が開始されている。しかし、事故によって放出された放射能は、今も、福島県の 70 %以上を占める森林域の落葉と腐葉土からなるリター層に蓄積しており、降雨による源頭部の崩壊や降雨流出により河川流域に放出している。現在検討対象となる放射性物質は半減期の比較的長い放射性セシウムの  $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  であり、いずれも粒径  $5\ \mu\text{m}$  以下の粘土鉱物に吸着しやすいため、河川流域では微細粒子に付着した懸濁態の放射性セシウムの動態の研究が必要とされている。

橋本ら[13]は低線量地域の一関市と気仙沼市を貫流する大川の洪水を対象とし本川および支川の 5 地点において、水文観測と浮遊砂採取を実施した。浮遊砂採取は洪水の開始期、上昇期、下降期および終了期に各 18ℓ とし、その後、ガラス繊維濾紙法により  $40\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$ 、 $0.3\ \mu\text{m}$  に区分して、土砂量と放射性セシウムを測定した。浮遊砂と放射性セシウム、流量の関係から洪水期間中の放射性セシウムに対する  $L-Q$  関係を提案した。

また、Tanakaetal[14]は放射能汚染の高い浪江町から流れる口太川の上流から 3 地点と下流の阿武隈川河口部までの 4 地点において、河床土砂を季節ごとに採取し、湿式フルイ分け法により、 $2\ \text{mm}$  以下の粒径を  $2\ \mu\text{m}$  通過粒径まで 11 粒径に区分して、粒径範囲に吸着する放射性セシウムの汚染源からの距離や季節変化の特性を示している。

上記に示すとおり、河川水中の浮遊砂の粒度分布と濃度の連続観測は極めて重要である。ダムからの排砂のみならず、河川流況に応じた浮遊砂の測定、河床変動計算による浮遊砂の算定および放射性セシウムのように懸濁態粒子に付着する物質の環境動態を明らかにする上で、この計測を実現する測定器の開発が待たれる。

本研究では、浮遊砂の質と量が現地で同時に連続計測可能な計測システムを開発し、これにより現地での計測を行い、その適用性と課題を検討することを目的とする。この計測システムに求められる計測性能は次のとおりである。

1. 浮遊砂の濃度と粒度分布を連続して計測できること。
2.  $0.1\sim 10\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (= $100\sim 10000\ \text{mg}\cdot\ell^{-1}$ )の範囲の濃度を計測できること。
3. 粒径  $0.1\ \mu\text{m}\sim 2\ \text{mm}$  の土砂の粒径の計測ができること。
4. 計測方法は自動計測とし、1 分間隔で計測できること。
5. 濃度の測定精度はフルスケール(FS= $10\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )の  $1\%$ ( $\pm 1\%\text{FS}$ )以内を目標とする。

## 1.6 本論文の構成と概要

第 2 章では、浮遊砂現場測定技術の現状と課題を述べる。採水による分析の代替技術として研究されている浮遊砂現場測定方法には、光学式後方散乱法[15–19]、レーザ回折・散乱法[20–22]、

音響式後方散乱法[23–29]、差圧法[30,31]、超音波減衰スペクトル法[32–41]がある。採水による分析では、ガラス繊維濾紙法による浮遊砂の濃度の測定と、レーザ回折・散乱法による浮遊砂の粒度分布の測定が行われており、その代替技術はこれらの測定ができるものでなければならない。このため、研究されている現場測定技術の中から濃度と粒度分布の同時測定が可能な測定方法を検討する。

第3章では、既往の研究[42–50]に基づいて超音波減衰スペクトル法の測定原理を述べる。超音波を懸濁液に放射すると、超音波は粘性損失、熱的損失、散乱損失、材料あるいは物質固有の特性に由来する損失などによって減衰する。粒子の半径を  $r$ 、超音波の波長を  $\lambda$  とすると、 $r \ll \lambda$  の領域(長波長域という)では粘性損失による減衰が支配的で、粒径が  $10\mu\text{m}$  以下の粒子はこの領域に属する。また、 $r \sim \lambda$  の領域(中間波長域)では散乱損失による減衰が支配的で、粘性損失は無視できるようになる。粒径が  $10\mu\text{m}$  以上の粒子はこの領域に属する。浮遊砂の粒径  $d$  は、 $0.1 \leq d \leq 2000\mu\text{m}$  に分布しており、その測定にはこれら二つの散乱理論を用いる。

第4章では、筆者らが開発した現場型超音波減衰スペクトル計の計測性能を検証する。このスペクトル計を用いて、粒径が  $30 \sim 200\mu\text{m}$  の6種類の球形粒子の懸濁液の減衰スペクトルを測定し、測定値が散乱損失による減衰係数の理論値と一致することを確認する。また、粒径が  $1 \sim 6\mu\text{m}$  の4種類の球形粒子の減衰スペクトルを測定し、測定値が粘性損失による減衰係数の理論値と一致することを確認する。

第5章では、現場型超音波減衰スペクトル計の基準スペクトルの実験式について述べる。減衰スペクトルを測定するためには基準スペクトルが必要となる。この基準スペクトルは濁りのない透明な水中で測定した周波数スペクトルを用いる。現場計測では水温や塩分を制御すること事実上困難なので、あらかじめ水温や塩分などの測定時の環境条件と周波数に依存する基準スペクトルの振幅を決定しておかなければならない。このため、本章では、基準スペクトルの測定結果から、河川やダム貯水池での浮遊砂の計測、感潮河川または海岸での浮遊砂の計測、およびフローセルによる浮遊砂の計測に適用する基準スペクトルの実験式を提案する。

第6章では、天然の細砂・シルトなどの不規則な形状をした非球形粒子の測定に適用できる散乱損失の実験モデルについて述べる。超音波減衰スペクトル法の測定原理である散乱理論は均質な球形粒子を対象とした理論であるため、不規則な形状をした粒子の測定には散乱理論ではなく実験モデルが用いられる。数多くの実験式が提案されているが、天然の細砂・シルトを測定するための実験式に SchaafamaandHay[51]の等価球形散乱体モデルがある。この実験式は二種類の等価粒径係数を散乱理論に適用した実験式であるため、球形粒子を対象とした散乱理論をそのまま用いることができる。現場型超音波減衰スペクトル計を用いて、天竜川で採取した細砂・シルト粒子の減衰スペクトルを測定し、非球形粒子に適用する等価球形散乱体モデルを検証する。

第7章では、浮遊砂計測に用いる散乱損失と粘性損失を考慮した実験モデルについて述べる。

等価球形散乱体モデルは、二つの等価粒径係数を導入することによって散乱理論を非球形粒子の測定に適用できる実験モデルである。しかし、この実験モデルは中間波長域の散乱損失の実験式であり、粒径が  $10 \mu\text{m}$  以下の粒子が含まれる場合は、長波長域の粘性損失を考慮できる実験式が必要である。本章では、浮遊砂計測に用いる実験モデルとして散乱損失だけでなく粘性損失を考慮した実験モデルを提案し、粘性損失が支配的となる粒径が  $10 \mu\text{m}$  以下、および散乱損失が支配的となる  $10 \mu\text{m}$  以上のシリカ粒子を用いた実験を行い、その実験モデルを検証する。

第 8 章では、超音波減衰スペクトル計を用いた実河川の浮遊砂濃度と粒度分布の現場測定について述べる。測定地点は、天竜川中流部に位置する平岡ダム（中部電力、長野県天龍村）および六角川（佐賀県）である。平岡ダムでは水位低下による土砂スルーシグ時に浮遊砂濃度と粒度分布を測定する。また、六角川での測定は汽水域での測定、高濃度の浮遊土砂の測定を目的として実施する。

第 9 章は、本論文の総括であり、各章の結論と今後の展望について述べる。





## 参考文献

- [1] 芦田和男；ダム堆砂対策の展望. ダム技術. No.58. 1991.
- [2] 中谷宇吉郎；ダムの埋没－これは日本の埋没にもなり得る. 文藝春秋.1951.
- [3] 流砂系の総合的な土砂管理に向けて；河川審議会総合政策委員会総合土砂管理小委員会. 1998.
- [4] 建設省河川局砂防部砂防課；山地部から海岸部までの総合的な土砂管理の推進. 河川.1998.6,p.20-21.
- [5] 原子力安全・保安院電力安全課；平成 15 年度発電用貯水池・調整池堆砂状況. 電力土木. No.313, 2004, pp.142-151.
- [6] 鮎川幸雄；日本河川協会. 水三法－水(湧水と洪水) との闘い－. 大成出版社,1983, p498.
- [7] 河川法研究会；[逐条解説] 河川法解説. 大成出版社,1994, p.587.
- [8] 建設省河川局開発課監修；ダム水源地環境整備センター編. 改訂新版, ダム管理例規集, 平成 5 年版. 山海堂,1994, p.776.
- [9] 小久保哲也, 板倉正和, 原田稔；貯水池の排砂実績と予測手法. 大ダム, No.162, pp.43-54, 1998.
- [10] 角哲也, 金澤裕勝；黒部川のフラッシング排砂における環境調査. 大ダム, No.197, pp.121-135, 2006.
- [11] 山本晃一編著；総合土砂管理計画流砂系の健全化に向けて. 技報堂出版,2014,p.386.
- [12] 大槻順朗, 川崎貴志, 二瓶泰雄, 鬼塚徳雄；出水時球磨川における粒径別浮遊土砂特性. 土木学会論文集 B1 (水工学) . Vol.69,No.4,pp.I\_1063-I\_1078, 2013.
- [13] 橋本達範, 横山勝英, 河野益近, 大野敦生；放射性セシウムの洪水時の粒径別輸送特性. 土木学会論文集 B1 (水工学) . Vol.71,No.4,pp.I\_1195-I\_1200, 2015.
- [14] Kazuya Tanaka, Hokuto Iwatani, Aya Sakaguchi, Qiaohui Fan and Yoshio Takahashi; Size-dependent distribution of radiocesium in riverbed sediments and its relevance to the migration of radiocesium in river systems after the Fukushima Daiichi Nuclear Plant accident. J. of Environmental Radioactivity.139,pp.390-397,2015.
- [15] 山地河道の流砂水文観測における濁度計観測実施マニュアル；国総研資料.No.792, 平成 26 年 3 月.
- [16] 横山勝英；濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察. 土木学会論文集. No.698, pp.93-98, 2002.

- [17] 水垣滋, 阿部孝章, 丸山政浩; 濁度計による高濃度濁水中の浮遊土砂濃度推定法. 寒地土木研究所月報. No.706, 2012.
- [18] 横山勝英, 藤塚慎太郎, 中沢哲弘, 高島創太郎; 多点濁度観測による筑後川水系の SS 流出・輸送特性に関する研究. 水工学論文集. 第 52 巻, pp.553-558, 2008.
- [19] 鈴木準平, 今村正裕; 土砂動態を把握するための水質システムの構築と試験運用. 電力中央研究所研究報告. V13007, 2014.
- [20] 中川康之, 桑江朝比呂; 有明海湾奥西部海域における懸濁物輸送に関する現地観測. 土木学会論文集 B2 (海岸工学) . Vol.66, No.1, pp.I\_966-I\_970, 2010.
- [21] 栗山善昭, 鈴木崇之, 柳嶋慎一, 石野芳夫, 坂本光; 粒径別の底質浮遊特性に関する現地観測. 土木学会論文集 B2 (海岸工学) . Vol.67, No.2, pp.I\_476-I\_480, 2014.
- [22] 小口哲史, 八木宏, 杉松宏一, 川俣茂, 宇田川徹, 中山哲巖, 鈴木彰; 濁度計・現場型レーザー粒度計・音響計測機器に基づく常磐沿岸域底層の懸濁物動態計測. 土木学会論文集 B2 (海岸工学) . Vol.70, No.2, pp.I\_066-I\_070, 2014.
- [23] 橘田隆史, 横山洋, 橋場雅弘, 新井励; ADCP の超音波反射強度を利用した濁度計測技術について. 河川流量の新時代, 第 2 巻, 2011.
- [24] 横山勝英, 宇野誠高, 森下和志, 河野史郎; 超音波流速計による浮遊土砂移動量の推定方法. 海岸工学論文集. 第 49 巻, pp.1486-1490, 2002.
- [25] 横山勝英, 金子祐, 長屋光彦, 山本浩一; 筑後川感潮河道の蛇行部横断面における SS 粒子の挙動とフラックスに関する考察. 水工学論文集. 第 53 巻, pp.1411-1416, 2009.
- [26] 橘田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 熊田康邦; ADCP を用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用観測事例. 河川技術論文集. 第 12 巻, 2006.
- [27] 川西澄, 横山智弥, 水野雅光, 福岡捷二; 超音波ドップラー流速分布計による干潟上の浮遊体積物の観測. 水工学論文集. 第 52 巻, pp.949-954, 2008.
- [28] 横山勝英, 梅田信, 和田昌行; 六角川における音響式 SS 測定装置の実用化試験. 河川技術論文集. 第 11 巻, pp.321-326, 2005.
- [29] 中川康之, 吉田秀樹, 谷川晴一, 黒田祐一; 超音波式流速ドップラー(ADCP) による浮遊泥輸送量の推定. 海洋開発論文集. 第 21 巻, pp.731-736, 2005.
- [30] 角哲也, 森田佐一郎, 越智隆志, 小宮英明; 差圧センサーを用いた河川・ダム貯水池における新しい浮遊砂濃度計測手法の開発. 水工学論文集. 第 46 巻, pp.779-784, 2002.
- [31] 角哲也, 森田佐一郎, 小宮英明; 水中型 SMDP を用いた黒部川ダム排砂時の高濃浮遊砂濃度連続観測. 水工学論文集. 第 54 巻, pp.1111-1116, 2010.
- [32] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; プラノコンケーブ形超音波振動子を用いた浮遊砂自動計測装置の開発. 電子情報通信学会技術報告. US2012-105, pp.93-100, 2013.
- [33] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 超音波減衰スペクトル法を用いた流水中の浮遊砂濃度と粒度分布の計測技術に関する研究. 河川技術論文集. 第 19 巻, pp.129-134, 2013.
- [34] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 超音波減衰スペクトル法による六角川感潮部の懸濁物質濃度と粒度分布の連続計測. 土木学会論文集 B1 (水工学) . 第 70 巻, No.4, pp.I\_607-I\_612, 2014.

- 
- [35] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 流水中の浮遊物質の連続計測に用いる超音波減衰スペクトル法の二種類の線形理論. 河川技術論文集. 第 20 巻, pp.1-6, 2014.
- [36] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 広帯域の超音波パルスを用いた浮遊砂濃度計測システムの開発. 電子情報通信学会技術報告. US2014-78, pp.21-26, 2015.
- [37] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 流水中の浮遊土砂の粒子形状が超音波減衰スペクトルに及ぼす影響. 土木学会論文集 B1 (水工学) . Vol.71,No.4,pp.I\_817-I\_822, 2015.
- [38] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 超音波減衰スペクトル計による SS 測定に用いる等価球形散乱体モデルの検証. 河川技術論文集. 第 21 巻, pp.55-60, 2015.
- [39] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; パスレングスを固定した超音波減衰スペクトル計の海水中の固有周波数応答. 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会講演論文集. pp.1115-1118, 2015.
- [40] 古川仁志, 前田修一, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 水位低下による土砂スルーシグ時の超音波を用いた SS 濃度と粒度分布の連続計測. 土木学会論文集 B1 (水工学) . Vol.72,No.4,pp.I\_919-I\_924, 2016.
- [41] 古川仁志, 河下重和, 田井秀一; 超音波減衰スペクトル計による SS 測定に用いる基準スペクトルの実験式. 電力土木. No.382,pp.31-39,2016.
- [42] D.J.McClements; Principles of Ultrasonic Droplet Size Determination in Emulsions. *Langmuir* Vol.12, pp.3454-3461, 1996.
- [43] P.S.Epstein and R.R.Carhart; The Absorption of Sound in Suspensions and Emulsions. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.25, pp.553-565, 1953.
- [44] J.R.Allegria and S.A.Hawley; Attenuation of Sound in Suspensions and Emulsions —Theory and Experiments. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.51, pp.1545-1564, 1972.
- [45] A.Richter,F. Babric and S.Ripperger; Polydisperse particle size characterization by ultrasonic attenuation spectroscopy for systems of diverse acoustic contrast in the large particle limit. *J. Acoust. Am.* Vol.118,No.3, 2005.
- [46] James J.Faran jr.; Sound scattering by solid cylinders and spheres. *J. Acoust. Am.* Vol.23, No.4, 1951.
- [47] Alex E.Hay and Douglas G.Mercer; On the theory of sound scattering and viscous absorption in aqueous suspensions at medium and short wavelengths *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.78,No.5, pp.1761-1771,1985.
- [48] J.Sheng and Alex E.Hay; An examination of the spherical scatterer approximation in aqueous suspensions of sand *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.83,No.2,pp.598-610,1988.
- [49] ISO 20998-1,2006; Measurement and characterization of particles by acoustic method—Part.1; Concepts and procedures in ultrasonic attenuation spectroscopy.
- [50] ISO 20998-2,2013; Measurement and characterization of particles by acoustic method—Part.2:Guidelines for linear theory.
- [51] S.Schaafsma and A.E.Hay; Attenuation in suspensions of irregularly shaped sediment particles; A two-parameter equivalent spherical scatterer model. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.102,No.3,

pp.1485-1502, 1996.

## 第2章

# 浮遊砂測定技術の現状と課題

### 2.1 序論

本章では現在研究が進められている現場での浮遊砂の濃度と粒度分布の測定技術の現状と課題を述べる。洪水時に河川を輸送される土砂は浮遊砂と掃流砂があり、浮遊砂は、浮流砂、浮遊土砂、ウォッシュロード、浮遊物質などの用語が用いられる。本研究ではこれらの土砂を「浮遊砂」と呼ぶものとする。また、浮遊砂の濃度の単位は $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ を用いる。

浮遊砂の濃度の測定方法は、環境庁告示第59号付表9(以下「環告59号付表9」という)に定められている。浮遊砂は2mmのフルイを通過したサンプルを孔径1 $\mu\text{m}$ 程度のガラス繊維濾紙でろ過し、ろ紙に捕捉された物質を105~110°Cで乾燥して質量を測定する。浮遊砂には細砂・シルトや粘土粒子だけでなく、植物片や動植物プランクトンなどの揮発性浮遊物質(VolatileSuspendedSolids、以下「VSS」という)も含まれる[1]。この測定方法は、サンプルの採水・運搬・輸送、容積の測定、ガラス繊維濾紙によるろ過、炉乾燥、質量の測定を行い、測定値が得られる方法で、多くの手間と時間と労力を要することから、自動計測が可能な代替技術の研究が進められている。

また、浮遊砂の粒度分布の測定方法はレーザ回折・散乱法が用いられており、この方法も同様に採取したサンプルを測定する方法である。

現在、わが国で研究されている浮遊砂の測定技術は以下のとおりである。

1. 光学式後方散乱法(Opticalbackscattersensor)
2. レーザ回折・散乱法(Laser-diffractionensor)
3. 音響式後方散乱法(Acousticbackscattersensor)
4. 差圧法(Pressuredifferencesensor)
5. 超音波減衰スペクトル法(Ultrasonicattenuationspectroscopy)

### 2.2 流砂観測

わが国においては、1960年代、河川の流砂量評価式の完成のために、浮遊砂および掃流砂の観測がなされたが(建設省土木研究所, 1971: 北海道開発局,1970)、掃流砂については、観測された資料の信頼性が乏しく、その後、実河川での観測は研究としてわずかになされたに過ぎない。浮遊砂についても同様で、河川での観測が行われなくなった。1960年代の観測データより浮遊

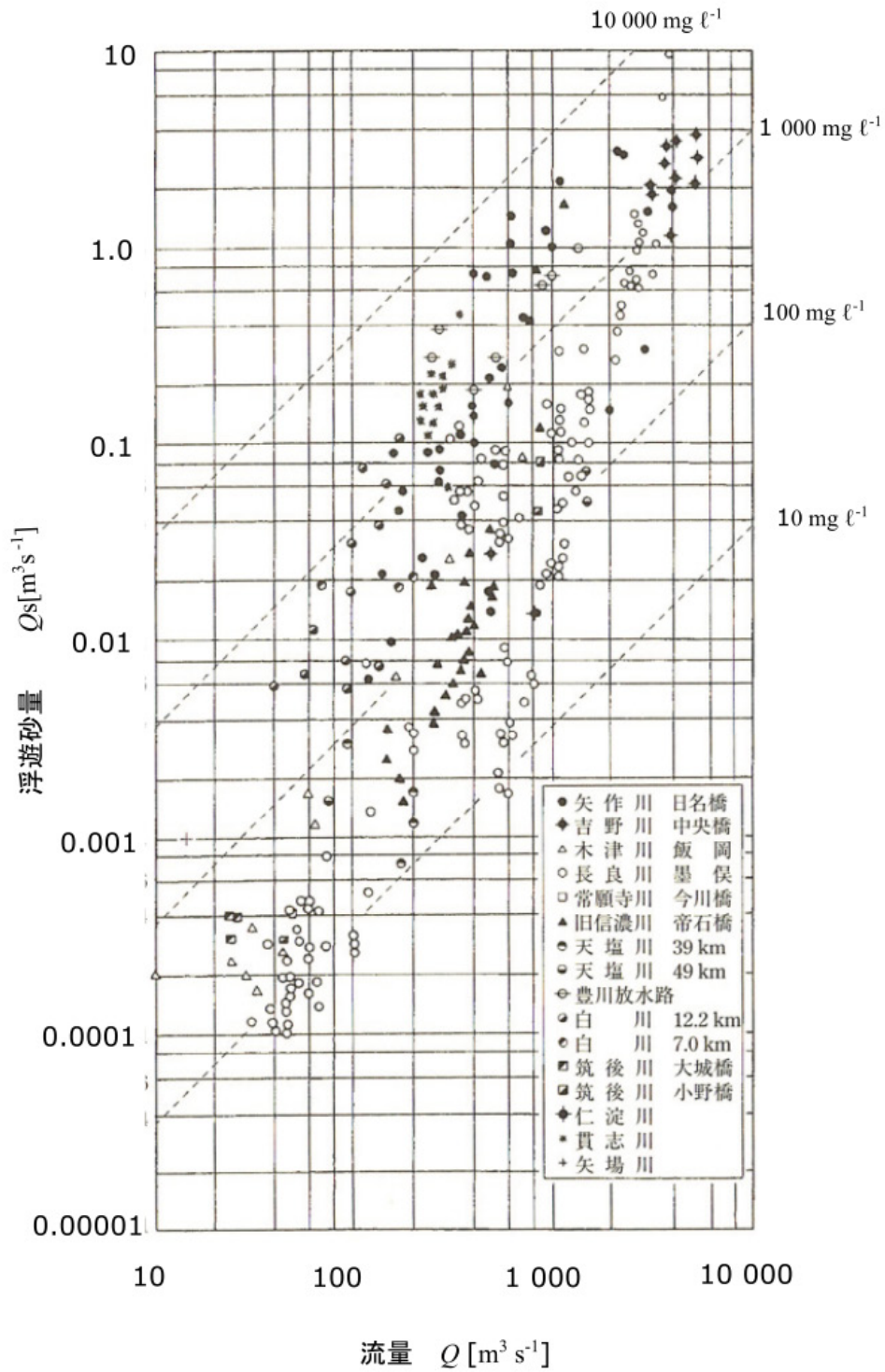


図 2.1 浮遊砂量と流量の関係(山本,2014)

砂量と流量の関係[2]を描いたものが図 2.1 である。横軸は流量  $Q[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ 、縦軸は浮遊砂量  $Q_s[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ を示す。図 2.1 に示すように、わが国において洪水時に観測された浮遊砂の濃度は  $10 \sim 10000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  の範囲にあり、濃度の単位を  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  とすると  $0.01 \sim 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  となる。したがって、浮遊砂測定装置は  $0.01 \sim 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  の測定範囲をもつ測定装置が必要である。

米国地質調査所では、国土の資源管理のため、河川を通過する浮遊砂量の観測を行政行為として行っており、また、中国長江水利委員会は、長年、長江の浮遊砂観測を行っている[2]。わが国においても、同様の観測を推進することが必要であり、そのためには、流量観測だけでなく浮遊砂観測システムの構築が必要である。

## 2.3 浮遊砂測定方法

### 2.3.1 光学式後方散乱法

浮遊砂の濃度測定に用いる濁度計は光学式後方散乱法(Optical Backscatter Sensor、以下「OBS」という)を用いた測定装置である。水中へ入射した光は懸濁粒子による散乱と吸収で減衰する。このとき発生する散乱光量および吸収光量は懸濁粒子の質および量に依存する[3]。これらの光学的性質を利用した濁りの測定方式の種類[4]は、散乱光測定方式、光束透過方式および透過・散乱光比較方式に分類できる。散乱光測定方式には後方散乱方式と側方散乱方式がある。後方散乱方式は光源と検出部を同一面に配置できる構造で設置が容易なことから、河川や貯水池の測定には最も多く用いられている。濁度計の測定原理はレーザ回折・散乱法の測定原理と同じで、ミーの散乱理論に基づいている。

光の波長が一定の場合、散乱強度は粒径に依存して変化するため、JISK-0102(工場排水試験法)では、カオリンを標準とするカオリン濁度と、ホルマジン標準とするホルマジン濁度の二種類を定めている。それぞれの物質  $1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  を含む溶液の濁度を 1 度としている。

濁度計による測定は連続した自動測定が可能であることから、わが国のみならず米国や中国などでも浮遊砂観測に用いられている。濁度は粒径依存性が高く、粒径が大きくなるほど出力値は小さくなる。また、赤外後方散乱方式濁度計の計測可能粒径[5]は、機種による差はあるが、大体の目安として  $0.42 \text{ mm}$  以下である。

水垣ら[6]は、鶴川・沙流川において河川内に水位計と二種類の後方散乱方式の濁度計を設置して流量観測と濁度測定を行い、採水して測定した浮遊砂の濃度と濁度の関係から、次式に示す濃度の推定式を提案している。

$$C = T_b(aQ^2 + bQ + c) \quad (2.1)$$

ここで、 $C$  は濃度  $[\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}]$ 、 $T_b$  は濁度  $[\text{ppm}]$ 、 $Q$  は流量  $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  は各地点での測定結果からキャリブレーションによって決定する係数である。測定に使用した濁度計は、赤外後方散乱方式のカオリン濁度計で、光の波長は  $880 \text{ nm}$ 、カオリンでの測定レンジは  $200 \sim 20000$  度、および  $0 \sim 100000$  度である。4～5 月の融雪出水時および 8 月の降雨出水時に測定し、沙流川流域では  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  を越える浮遊砂の濃度を測定している。採水して測定した濃度と濁度計の測定値との関係を解析し、濃度と濁度との比を流量の二次式で近似することによって、精度よく濃



度を推定できることを示している。

横山ら[7]は、筑後川流域に 17 地点に濁度計を配置して、浮遊砂の現地観測を行い、山地流域における浮遊砂の流出・輸送特性を検討している。観測に使用した濁度計は赤外後方散乱方式の濁度計で測定レンジは 0～5000 度である。濁度の測定値は最大約 1800 度、採水して分析した濃度の最大値は  $9.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  である。全 17 地点の観測データを 3 つのグループに分けて濁度と濃度との相関式を作成し、濃度  $C$  と濁度  $T_b$  との間には次式のような経験式が使用されている。

$$C = aT_b^n \quad (2.2)$$

ここで、 $a$  と  $n$  は測定データから決定する係数である。

また、鈴木・今村[8]はダム下流河川における浮遊砂の動態を把握することを目的とした水質観測システムを開発し、運用を行っている。この観測システムは宮崎県耳川水系の下流域の観測システムで、各観測地点には総合水質計(水温、電気伝導度、溶存酸素量、pH 等)、濁度計、自動採水器、水位計が設置されている。濁度計は後方散乱方式を採用している。自動採水器で採水したサンプルの浮遊砂の濃度と粒度分布の測定が行われており、採水による濃度と濁度との関係を求め、これらの関係を用いて濁度計の連続測定データから浮遊砂の濃度を推定している。

以上のように、近年では高濃度測定用の濁度計も開発されており、濁度計は土砂動態モニタリング装置として普及しつつある。しかし、濁度と濃度との関係は浮遊砂の粒径によって変化するため、同時に粒径の測定ができる装置の開発が待たれる。

### 2.3.2 レーザ回折・散乱法

レーザ回折・散乱法[9]は今日では最も一般的な粒度分布測定方法である。この方法では、散乱パターンから粒子の大きさを識別し、散乱光の強度から粒子の数を識別している。光の散乱のされ方は図 2.2 に示すように粒子の大きさによって異なっている。散乱光の強度分布は粒子の大きさによらずミーの式で表される。粒子による光散乱は粒子の大きさ  $d$  と光の波長  $\lambda$  の関係によって、レイリー散乱、ミー散乱、ブラウンホーファ回折と分類される。 $\pi d/\lambda \ll 2$  ではレイリー散乱、 $2 < \pi d/\lambda < 10$  の領域ではミー散乱、 $10 \ll \pi d/\lambda$  ではブラウンホーファ回折となる。レーザ光の波長  $\lambda$  は測定装置の機種によって異なるが、600～800nm の範囲にあり、粒子径が nm オーダ領域( $d \ll \lambda$ )になると、光は前にも後ろにも点対称状に散乱され、レイリーの式で表すことができる。粒子径が nm から  $\mu\text{m}$  のオーダ( $d \approx \lambda$ )になると、光は粒子径の増大とともに前方に多く散乱するようになり、複雑な散乱パターンを描く。この領域の散乱パターンはミーの式でしか表すことができない。粒子径が  $\mu\text{m}$  から mm のオーダ( $d \gg \lambda$ )になると、散乱現象は幾何光学的な回折現象として捉えることができ、狭い角度で前方にのみ散乱される。

このレーザ回折・散乱法を用いた現場用浮遊砂観測装置が、SequoiaScientificInc. の LISST(Laserinsituscatteringandtransmissometer)シリーズである。LISST は浮遊砂の粒度分布と体積濃度を測定することができる。Gray[10]によると、濃度の測定範囲は粒径や機種にもよるが、0～2  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  である。また、粒径の測定範囲は、1.25～500  $\mu\text{m}$  である。

中川・桑江[11]は、有明海湾奥西部の平均水深約 6.0 m の地点において、浮遊砂濃度とその粒

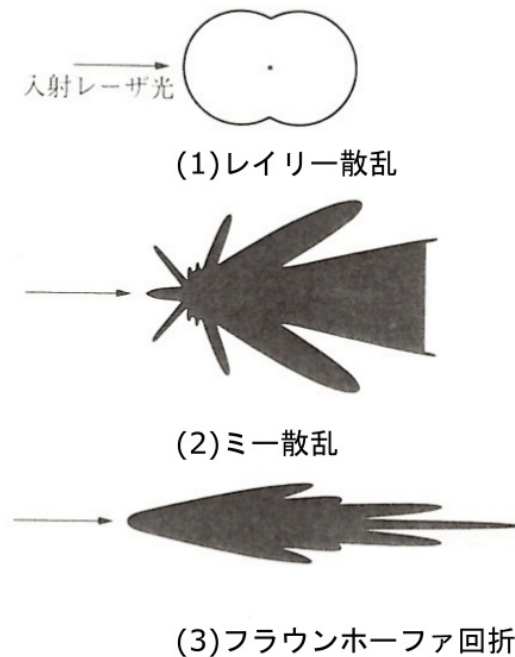


図 2.2 粒子による光散乱パターン

径を測定するため LISST-100X を用いている。測定時の濃度は  $0.1\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  程度である。LISST の測定では、粒径が  $1.25 \sim 250\mu\text{m}$  の範囲において各粒径の体積濃度を測定し、満潮時に粗粒化する傾向がみられた。また、50 %粒径の時系列の測定データをみると、満潮時の粗粒化、干潮時に向けて細粒化という周期的な変動が観測されている。

小口ら[12]は、福島県いわき市で実施した海底境界層観測で水深 30 m の海底上 0.5 m の位置に LISST-100X を設置し、海底懸濁物の体積濃度および粒度組成を測定している。粒径の測定レンジは  $2.5 \sim 500\mu\text{m}$  とした。観測位置の濁度は最大 30[FTU]、LISST で観測した懸濁物の平均粒径は  $200 \sim 300\mu\text{m}$  である。

以上のように、レーザ回折・散乱法は海域において浮遊砂の体積濃度と粒度分布の測定に用いられている。今後も海域の測定に使用されるものと考えられる。このレーザ回折・散乱法は、粒子濃度が高いと粒子によって散乱された光がセル内において二度三度と散乱される多重散乱が起きるので、高濃度の測定には適さない。河川の浮遊砂は海域と比較すると高濃度であり、レーザ回折・散乱法を用いて粒度分布を測定することはできない。

### 2.3.3 音響式後方散乱法

近年、超音波ドップラー式流速計(Acoustic Doppler Current Profiler、以下「ADCP」という)の反射強度から濁度を計測する技術が国内外で研究されている。この測定方法は音響式後方散乱法[13,14](Acoustic Backscatter Sensor、以下「ABS」という)と呼ばれている。この技術の特長は濁度の多層観測ができることにある。また、濁度から濃度への推定式を併用することで、浮遊砂濃度のモニタリングに応用できる。

横山ら[15]は、熊本県白川の感潮河川での1年にわたる現地計測結果から、NarrowBandタイプのADCP(NORTEX社 Aquadopp Narrow Band type,2 MHz)の反射強度を濃度に換算する式を作成して、感潮区間の堆積土砂量を推定している。また、横山ら[16]は筑後川の感潮部の測定では、ADCP(RDI製,周波数 1.2MHz)の反射強度  $EL(\text{dB})$  から実験式を用いて浮遊砂の濃度を推定している。この方法によって最大  $1.5\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  の浮遊砂濃度を測定している。

中川ら[17]は、有明海東部に位置する熊本港沖で、ADCP(RD-Instruments社製ワークホース 1.2MHzタイプ)を艀装した調査船を航行させ、ADCPの反射強度から浮遊砂の濃度を推定している。後方散乱強度  $PB$  と濃度  $C$  との関係は次式により表される。

$$\log C = A_n + B_n \cdot RB \quad (2.3)$$

ここで、 $A_n$  と  $B_n$  は、反射強度と浮遊砂の濃度の測定結果を用いたキャリブレーションによって決定される係数であり、キャリブレーションは汎用ソフト(DRL Software Ltd Sediview)を用いている。この結果、 $0 \sim 0.25\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  の範囲でADCP反射強度から濃度を推定できることが示されている。

岡田ら[18]は、四万十川の洪水時の浮遊砂の測定に周波数 1.2MHz のADCPを用いて、最大約  $0.35\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  の浮遊砂の測定を行っている。また、Moore and Coz[19]は、単一の周波数の測定では粒径が異なる粒子の測定ができないので周波数が 300kHz、600kHz および 1200kHz の三種類のADCPを用いて浮遊砂濃度を測定している。

上記に示すように、音響式後方散乱法は超音波ドップラー式流速計(ADCP)の反射強度から濁度や濃度の空間分布を推定する方法である。しかし、反射強度は浮遊砂の濃度だけでなく浮遊砂の粒径や水の音波吸収係数などの影響を受けるので、反射強度と濃度は明確な関係が得られないのが一般的である。また、超音波の減衰は距離に比例するので、河川の水深や幅によるが一般に高濃度の測定には適していない。

### 2.3.4 差圧法

差圧法は、高感度の圧力センサーを用いて流体の密度を直接測定することにより、浮遊砂の濃度を測定する方法である。差圧計を用いて洪水時の河川や貯水池において高濃度の浮遊砂の濃度を連続して計測することができる。角ら[20,21]は、黒部川の宇奈月、出し平ダムの連携排砂・通砂時において差圧計で浮遊砂濃度を測定し、最大  $50\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  の高濃度の浮遊砂濃度の連続計測を実現している。差圧計では粒度分布を測定することができないので、粒度分布の測定は採水による方法を併用する必要がある。

### 2.3.5 超音波減衰スペクトル法

超音波減衰スペクトル法[22–25]は、ECAH理論[26,27]やFaranモデル[28]などの散乱理論を測定原理とする懸濁液中の微粒子濃度と粒度分布の測定方法である。この方法は光学的に不透明な高濃度の測定が可能であり、希釈等の処理を必要としないのでリアルタイムで測定ができる。

表 2.1 浮遊砂現場測定技術の比較

測定項目	濃度	粒度分布	空間分布
光学式後方散乱法	◎	×	×
レーザ回折・散乱法	○	○	×
音響式後方散乱法	○	×	○
差圧法	◎	×	×
超音波減衰スペクトル法	◎	○	×

◎高濃度測定可能

超音波減衰スペクトルの測定方法[22]には、透過法、パルス反射法、干渉測定法がある。測定に用いる周波数は標準的には 0.1~100MHz の範囲であり、透過法、パルス反射法の場合では全周波数範囲を網羅するためには周波数の異なる 3~4 個のトランスデューサが必要となる。また、干渉測定法はトランスデューサと反射板との距離(以下「パスレングス」という)を変えて測定する方法で、この方法は単一のトランスデューサを用いて、広い周波数範囲にわたって測定することができるが、測定は個々の周波数ごとに行わなければならないので、パルス反射法の場合よりも時間と手間がかかる。

市販されている超音波減衰スペクトル計、DT-100(Dispersion Technology Inc)[29] は干渉測定法を用いた超音波減衰スペクトル計であり、高濃度の粒度分布測定装置として使用されている。この装置は、パスレングスを 0~20 mm の間で変化させ測定することによって、1~100MHz までの 18 周波数の測定を行い、粒径 0.005~1000 $\mu\text{m}$ 、体積濃度 0.1~50 %の高濃度の測定ができるが、測定に最大 10 min の時間がかかるので、現場の計測には適用できない。また、市販の超音波減衰スペクトル計に現場計測に使用できる装置はない。

古川ら[30,31]は、小林・田井[32-35]が開発したプラノコンケーブ形超音波振動子をトランスデューサに採用した現場型超音波減衰スペクトル計を試作し、この装置を用いてシリカ粒子の濃度と粒度分布の測定を実験水路で行っている。この装置はパルス反射法を採用しており、測定時間は約 1 min である。この超音波減衰スペクトル計で測定した 5~8MHz の周波数帯の減衰スペクトルから濃度と粒度分布の計測が同時にできることを示している。また、平均粒径が約 10 $\mu\text{m}$  のシリカ粒子の場合最大 50 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ の高濃度の測定ができることを示している。

上記に示すように、超音波減衰スペクトル法は土砂動態のモニタリングに必要とされる土砂の量(濃度)と質(粒径)を同時に現場で自動計測可能な測定方法であることから、浮遊砂測定では他の測定方法に比べて優位性のある測定方法である。

## 2.4 結論

各現場測定技術の性能を比較した結果を表 2.1 に示す。本章の結論は以下のとおりである。

- 浮遊砂現場測定方法には、光学式後方散乱法、レーザ回折・散乱法、音響式後方散乱法、差圧法、超音波減衰スペクトル法があり、これらの測定技術において濃度と粒度分布の現場測定が可能な測定技術はレーザ回折・散乱法および超音波減衰スペクトル法であることがわかった。
- レーザ回折・散乱法は海域において低濃度の測定に使用されている。しかし、河川での測定事例はなく、この方法では高濃度の測定ができない。
- 超音波減衰スペクトル法は、濃度と粒度分布の同時計測が可能な測定方法であり、特に高濃度の測定に適していることがわかった。しかし、市販されている超音波減衰スペクトル計は室内で使用する粒度分布測定装置であり、超音波減衰スペクトル法を用いて現場での測定を行うためには、新たに現場用の超音波減衰スペクトル計を開発する必要がある。

## 参考文献

- [1] 河川水質試験方法(案)；2008年版. 国土交通省水質連絡会. 平成21年3月.
- [2] 山本晃一編著；総合土砂管理計画流砂系の健全化に向けて. 技報堂出版,2014,p.386.
- [3] 菅野昭男；水質試験（濁度）の進歩. 工業用水.200,pp.54-61,1975.
- [4] 成田美穂, 荒川久幸, 宅和哲郎, 森永勤；現場用濁度計における性能の比較. 海洋調査技術.19(2),pp.1-10,2007.
- [5] 横山勝英；濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察. 土木学会論文集.No.698,pp.93-98,2002.
- [6] 水垣滋, 阿部孝章, 丸山政浩；濁度計による高濃度濁水中の浮遊土砂濃度推定法. 寒地土木研究所月報. No.706, 2012.
- [7] 横山勝英, 藤塚慎太郎, 中沢哲弘, 高島創太郎；多点濁度観測による筑後川水系のSS流出・輸送特性に関する研究. 水工学論文集. 第52巻, pp.553-558, 2008.
- [8] 鈴木準平, 今村正裕；土砂動態を把握するための水質システムの構築と試験運用. 電力中央研究所研究報告. V13007, 2014.
- [9] 椿淳一郎, 早川修；現場で役立つ粒子径計測技術. 日刊工業新聞社.2001, p.157.
- [10] John R.Gray, Jeffrey W.Gartner,*et al.* "Surrogate technologies for monitoring suspended-sediment transport in rivers". Sedimentology of Aqueous Systems. Edited by Cristiano Poletto, Susanne M. Charlesworth. John Wiley & Sons, 2010.
- [11] 中川康之, 桑江朝比呂；有明海湾奥西部海域における懸濁物輸送に関する現地観測. 土木学会論文集 B2 (海岸工学) . Vol.66,No.1,pp.I\_966-I\_970, 2010.
- [12] 小口哲史, 八木宏, 杉松宏一, 川俣茂, 宇田川徹, 中山哲巖, 鈴木彰；濁度計・現場型レーザー粒度計・音響計測機器に基づく常磐沿岸域底層の懸濁物動態計測. 土木学会論文集 B2 (海岸工学) . Vol.70,No.2,pp.I\_066-I\_070, 2014.
- [13] 橋田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 熊田康邦；ADCPを用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用観測事例. 河川技術論文集, 第12巻, 2006.
- [14] 橋田隆史, 横山洋, 橋場雅弘, 新井励；ADCPの超音波反射強度を利用した濁度計測技術について. 河川流量の新時代, 第2巻, 2011.
- [15] 横山勝英, 宇野誠高, 森下和志, 河野史郎；超音波流速計による浮遊土砂移動量の推定方法. 海岸工学論文集. 第49巻, pp.1486-1490, 2002.
- [16] 横山勝英, 金子祐, 長屋光彦, 山本浩一；筑後川感潮河道の蛇行部横断面におけるSS粒子

- の挙動とフラックスに関する考察. 水工学論文集. 第 53 巻, pp.1 411-1 416, 2009.
- [17] 中川康之, 吉田秀樹, 谷川晴一, 黒田祐一; 超音波式流速ドップラー(ADCP) による浮遊泥輸送量の推定. 海洋開発論文集. 第 21 巻, pp.731-736, 2005.
- [18] 岡田将治, 萬屋敦啓, 本永良樹, 橘田隆史; ADCP による洪水流況・掃流砂・浮遊砂量の同時計測技術構築のための基礎的検討. 土木学会論文集 B1(水工学).Vol.69,No.4,I\_751-I\_756,2013.
- [19] S.A.Moore and J. Le Coz; Using multi-frequency acoustic attenuation to monitor grain size and concentration of suspended sediment in rivers. *J. Acoust. Soc. Am.*Vol.133,No.4, pp.1959-1970, 2013.
- [20] 角哲也, 森田佐一郎, 越智隆志, 小宮英明; 差圧センサーを用いた河川・ダム貯水池における新しい浮遊砂濃度計測手法の開発. 水工学論文集. 第 46 巻, pp.779-784, 2002.
- [21] 角哲也, 森田佐一郎, 小宮英明; 水中型 SMDP を用いた黒部川ダム排砂時の高濃浮遊砂濃度連続観測. 水工学論文集. 第 54 巻, pp.1 111-1, 116, 2010.
- [22] D.J.McClements; Principles of Ultrasonic Droplet Size Determination in Emulsions. *Langmuir* Vol.12, pp.3454-3461, 1996.
- [23] A.Richter, F. Babric and S.Ripperger; Polydisperse particle size characterization by ultrasonic attenuation spectroscopy for systems of diverse acoustic contrast in the large particle limit. *J. Acoust. Soc. Am.*Vol.118,No.3, 2005.
- [24] ISO 20998-1,2006; Measurement and characterization of particles by acoustic method—Part.1: Concepts and procedures in ultrasonic attenuation spectroscopy.
- [25] ISO 20998-2,2013; Measurement and characterization of particles by acoustic method—Part.2:Guidelines for linear theory.
- [26] P.S.Epstein and R.R.Carhart; The Absorption of Sound in Suspensions and Emulsions. *J. Acoust. Soc. Am.*Vol.25,pp.553-565,1953.
- [27] J.R.Allegre and S.A.Hawley; Attenuation of Sound in Suspensions and Emulsions —Theory and Experiments. *J. Acoust. Soc. Am.*Vol.51,pp.1545-1564,1972.
- [28] James J.Faran jr.; Sound scattering by solid cylinders and spheres. *J. Acoust. Soc. Am.*Vol.23,No.4, 1951.
- [29] A.S.Dukhin and P.J.Goetz; Characterization of Liquids, Nano- and Microparticulates, and Porous Bodies Using Ultrasound. 2nd edition, ELSEVIER, 2010, 501p.
- [30] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; プラノコンケーブ形超音波振動子を用いた浮遊砂自動計測装置の開発. 電子情報通信学会技術報告. US2012-105, pp.93-100, 2013.
- [31] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 超音波減衰スペクトル法を用いた流水中の浮遊砂濃度と粒度分布の計測技術に関する研究. 河川技術論文集. 第 19 巻, pp.129-134, 2013.
- [32] Hidekazu Tai and Tsutomu Kobayashi; Broadband Transducer for Diagnostics Using a Plano-Concave Ultrasonic Transducer Driven by Chirp Wave. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.42, pp.3031-3035, 2003.
- [33] 加藤英, 田井秀一, 小林力; 集束性の超音波インパルスを用いた微粒子濃度測定. 電子情報通信学会技術報告. US2004-105, pp.19-24, 2005.

- [34] Tsutomu Kobayashi, Hidekazu Tai and Suguru Kato; Measurement method of particle concentration and acoustic properties in suspension using a focused ultrasonic impulse radiated from a plano-concave transducer. *Ultrasonics* 44. e491-e496, 2006.
- [35] 小林力, 田井秀一; 広帯域超音波パルスを用いた懸濁液の濃度測定. *日本音響学会誌*. 63 巻, 8 号, pp.434-441, 2007.





## 第3章

# 超音波減衰スペクトル法の測定原理

### 3.1 序論

本章では、超音波減衰スペクトル法の測定原理について述べる。超音波を粒子が懸濁している溶液に放射すると、粒子は溶媒に対して相対運動を起こし、その際、超音波と粒子との間には次の6つの相互作用[1]が生じ、音波の強度が減衰することが知られている。

1. 粘性損失 (viscous loss)
2. 熱的損失 (thermal loss)
3. 散乱損失 (scattering loss)
4. 材料あるいは物質固有の特性に由来する損失 (intrinsic loss)
5. 構造損失 (structural loss)
6. 動電氣的性質 (electrokinetic loss)

粘性損失は、超音波を放射することによって振動する粒子から発生するせん断波に由来する音響エネルギーの吸収損失のことで、このせん断波は粒子と溶媒との密度差により生じる。

熱的損失は、粒子表面近傍で生じる温度勾配によるものである。超音波を放射するとポリマー粒子やエマルション中の粒子が断熱圧縮・膨張を繰り返すが、その際、粒子-溶媒間で生じた温度勾配により熱移動が起こる。この熱移動に伴って失われるエネルギーの損失のことを指す。したがって、このエネルギー損失は超音波の放射に伴って断熱圧縮・膨張を起こすようなポリマー粒子やエマルションが主に関係し、硬質粒子の場合にはその寄与は無視される。

散乱損失は、粘性損失や熱的損失と全く異なったもので、光散乱に類似している。超音波散乱は音響エネルギーの散逸はなく、ただ粒子が一部の音響エネルギーの流れの方向を変えるため、音波の一部が受信機に到達しなくなるために生じる。散乱損失は、粒径が超音波の波長より相当小さい長波長域では無視できるが、粒径が超音波の波長と同程度の大きさのときは支配的になる。

材料あるいは物質固有の特性に由来する損失は均一相としてみた粒子や溶媒の物質そのものが音波と相互作用することにより生じる音波の損失である。

また、構造損失は構造をもった分散系において粒子間をつなぐネットワークの振動による損失で、系がどのような構造をもっているかに依存する。

最後に、動電氣的損失は、電荷を持った粒子に超音波を放射すると粒子は振動するが、この振動により交流電場が引き起こされる結果、音響エネルギーの一部が電気エネルギーに変換され、

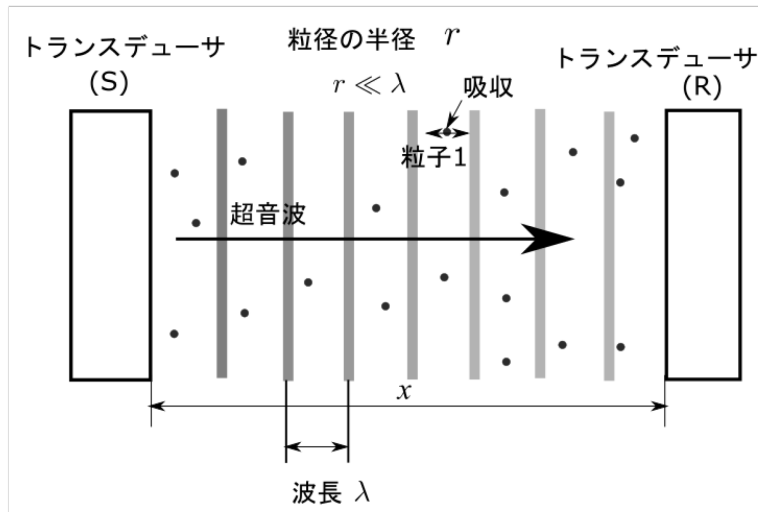


図 3.1 超音波減衰スペクトル法の測定原理(粘性損失)

非可逆的な熱として散逸されるために生じる損失である。1～4 の 4 つの損失が減衰スペクトルを粒度分布に変換する際に重要で、これらすべてを考慮した代表的な理論が ECAH 理論[2-4] である。

## 3.2 測定原理

### 3.2.1 粒径と超音波の波長との関係

超音波の減衰は粒径と超音波の波長との関係に依存するので、粒子の半径  $r$  と超音波の波長  $\lambda$  との関係から超音波の測定領域を以下のように区分することができる[4]。

- 長波長域 (Long wavelength regime)  $r \ll \lambda$
- 中間波長域 (Intermediate wavelength regime)  $r \approx \lambda$
- 短波長域 (Short wavelength regime)  $r \gg \lambda$

超音波の周波数 0.1～100MHz、粒径 0.1～1000  $\mu\text{m}$  の測定は、長波長域もしくは中間波長域に属する。長波長域では粘性損失と熱的損失が支配的となり、中間波長域では散乱損失が支配的になる。また、前述したように硬質粒子では熱的損失は無視できる。

### 3.2.2 粘性損失の線形モデル

超音波の減衰係数は物質を伝搬する超音波の単位距離当たりの減衰であり、図 3.1 に示すトランスデューサ(S)が発信した超音波の振幅を  $A_0$ 、トランスデューサ(R)が受信した超音波の振幅

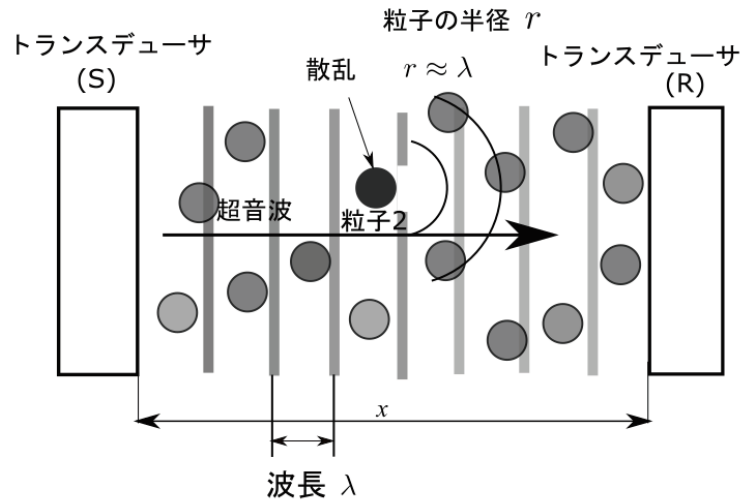


図 3.2 超音波減衰スペクトル法の測定原理(散乱損失)

を  $A_x$ 、超音波の伝搬距離を  $x$  とすると、減衰係数は次式で表される。

$$\alpha = -\frac{1}{x} \ln \frac{A_x}{A_0} \quad (3.1)$$

粘性損失は図 3.1 に示すように  $r \ll \lambda$  の均一粒径の球形粒子が溶液中に分散している懸濁液を超音波が伝搬するときの超音波の減衰であり、ECAH 理論[2-4] に基づき次式で算出することができる。

$$\alpha_{vis} = \frac{1}{2} \frac{\phi k s (\rho_2 - \rho_1)^2}{(\rho_2 + T \rho_1)^2 + s^2 \rho_1^2} \quad (3.2)$$

ここで、

$$s = \frac{9\delta_v}{4r} \left( 1 + \frac{\delta_v}{r} \right) \quad (3.3)$$

$$T = \frac{1}{2} + \frac{9\delta_v}{4r} \quad (3.4)$$

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\eta_1}{\omega\rho_1}} \quad (3.5)$$

$\alpha_{vis}$  は粘性損失による減衰係数 [ $\text{Np} \cdot \text{m}^{-1}$ ]、 $\phi$  は粒子の固体体積分率、 $k(=\omega/c)$  は波数 [ $\text{m}^{-1}$ ]、 $\omega(=2\pi f)$  は角周波数 [ $\text{s}^{-1}$ ]、 $c$  は音速 [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]、 $\rho_1$  は水の密度 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]、 $\rho_2$  は粒子の密度 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]、 $r(=d/2)$  は粒子の半径 [ $\text{m}$ ]、 $d$  は粒径 [ $\text{m}$ ]、 $\eta_1$  は水の粘度 [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ] である。このモデル[4]は周波数 0.1~100MHz、粒径 0.01~30  $\mu\text{m}$  の測定に適用できる。

### 3.2.3 散乱損失の線形モデル

散乱損失は図 3.2 に示すように  $r \approx \lambda$  の均一粒径の球形粒子が溶液中に分散している懸濁液を超音波が伝搬するときの超音波の減衰であり、次式[5-7]で算出することができる。

$$\alpha_{sc} = -\frac{3\phi}{2k^2 r^3} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(A_n) \quad (3.6)$$

ここで、 $\alpha_{sc}$ は散乱損失による減衰係数、 $A_n$ はFaran[7]の  $n$  次の散乱係数(以下「Franモデル」という)である。 $\operatorname{Re}(A_n)$ は  $A_n$ の実部を示す。このモデルはRichter *et al* [5]によって  $kr < 30$  の範囲での適用できることが示されており、周波数 1~10MHz の測定では粒径 2.0 mm 以下の粒子の測定に適用できる。

Faranモデル[7]を次式に示す。

$$A_n = -\frac{i \cdot \tan \eta_n}{1 + i \cdot \tan \eta_n} \quad (3.7)$$

$$\tan \eta_n = \tan \delta_n(kr) \frac{\tan \alpha_n(kr) - \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \tan \zeta_n(k_L r, k_T r)}{\tan \beta_n(kr) - \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \tan \zeta_n(k_L r, k_T r)} \quad (3.8)$$

$$\tan \delta_n(kr) = -\frac{j_n(kr)}{n_n(kr)}$$

$$\tan \alpha_n(kr) = -kr \cdot \frac{j_n'(kr)}{j_n(kr)}$$

$$\tan \beta_n(kr) = -kr \cdot \frac{n_n'(kr)}{n_n(kr)}$$

$$k_L = \frac{\omega}{c_L}, \quad k_T = \frac{\omega}{c_T}$$

$$k_L = \frac{\omega}{c_L}, \quad k_T = \frac{\omega}{c_T} \quad (3.9)$$

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho_2(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho_2(1+\nu)}} \quad (3.10)$$

$$\tan \zeta_n(k_L r, k_T r) = -\frac{\frac{(k_T r)^2}{2} \left[ \frac{\tan \alpha_n(k_L r)}{1 + \tan \alpha_n(k_L r)} - \frac{n^2 + n}{n^2 + n - 1 - (k_L r)^2/2 + \tan \alpha_n(k_T r)} \right]}{\left[ \frac{n^2 + n - (k_T r)^2/2 + \tan \alpha_n(k_L r)}{1 + \tan \alpha_n(k_L r)} - \frac{(n^2 + n)(1 + \tan \alpha_n(k_T r))}{n^2 + n - 1 - (k_T r)^2/2 + \tan \alpha_n(k_T r)} \right]}$$

ここで、 $i = \sqrt{-1}$ 、 $j_n$ と $n_n$ はそれぞれ  $n$  次の球形ベッセル関数と球形ノイマン関数、 $j_n'$ と $n_n'$ はこれらの一次導関数である。 $c_L$ と $c_T$ は粒子中の圧縮波とせん断波の速度[m·s<sup>-1</sup>]、 $E$ は粒子の弾性係数[GPa]、 $\nu$ はポアソン比である。

式(3.6)は、均質な弾性体、可動球形粒子の減衰係数を表すモデル(Elastic movable spheremodel)である。このモデルで減衰係数を算出するためには、媒質と粒子の密度、粒子の弾性係数およびポアソン比の物性値が必要である。

また、Sheng and Hay [8]は、粒子形状が不規則な粒子は共振による励起(resonance excitation)が発生しないため、天然砂の場合は弾性体モデルではなく剛体モデル(Rigid movable sphere model)の理論値が測定値と一致することを示している。完全な剛体では粒子中の圧縮波の速度  $c_L$  とせん断波の速度  $c_T$  は無限大になるので、剛体モデルの場合は  $k_L \rightarrow 0$ 、 $k_T \rightarrow 0$  として減衰係数を算出する。

### 3.2.4 超音波減衰スペクトル法

超音波減衰スペクトル法[4,5,9,10]は、ECAH 理論や Faran モデルなどの散乱理論に基づく超音波の減衰特性を利用して懸濁液中の微粒子濃度や粒度分布を測定する方法である。減衰スペクトルとは周波数の関数として測定した減衰係数をいう。超音波減衰スペクトル法では、逆解析によって減衰スペクトルの測定値から粒度分布と濃度を求めることができる。逆解析[4]では次式を用いて、減衰スペクトルの理論値を系統的に変化させ、減衰スペクトルの測定値とベストフィットする理論値を求める。

$$SSD = \sum_i [\alpha_{\text{theory}}(f_i) - \alpha(f_i)]^2 \quad (3.11)$$

ここで、 $SSD$  は残差平方和(sum of squares of differences)、 $\alpha_{\text{theory}}(f_i)$  は周波数  $f_i$  における減衰係数の理論値、 $\alpha(f_i)$  は減衰スペクトルの測定値を示す。

式(3.2)と式(3.6)は粒子の半径  $r$  が均一な粒径の分散粒子の減衰係数の理論値であるが、自然界では通常様々な粒径の粒子の集合体となる場合が多く、粒径の分布をもつ粒子の減衰係数の理論値は次式で与えられる。

$$\alpha_{\text{theory}}(f_i) = \phi \sum_{j=1}^m K(f_i, d_j) g(d_j) \Delta x \quad (3.12)$$

ここで、 $K(f_i, d_j)$  は周波数  $f_i$ 、粒径  $d_j$  の粒子による減衰係数で、カーネル行列と呼ばれている。 $j$  は粒径階級、 $m$  は粒径階級の総数、 $g(d_j) \Delta x$  は粒径  $d_j$  の体積比率を示す。粒径  $d_j$  の体積比率は対数正規分布モデル等を用いる。減衰係数は粒径階級が  $j=1$  から  $j=m$  までの各粒径の粒子による減衰係数の総和となる。

カーネル行列は周波数と粒径に依存する超音波の減衰特性をモデル化したもので、粘性損失と散乱損失を考慮したカーネル行列は次式で与えられる。

$$K(f_i, d_j) = \frac{1}{\phi} [\alpha_{sc}(f_i, d_j) + \alpha_{vis}(f_i, d_j)] \quad (3.13)$$

### 3.3 浮遊砂測定のための準備

#### 3.3.1 浮遊砂の粒度分布モデル

浮遊砂の粒径はサブミクロンから数 mm の範囲で分布しており、その粒度分布は横軸に粒径（対数）、縦軸に通過体積百分率をプロットした粒度分布曲線と、横軸に粒径（対数）、縦軸に各粒径階級の体積百分率をプロットした曲線で表される。この縦軸に各粒径階級の体積比率をプロットした曲線は二峰性対数正規分布などでモデル化することができる。二峰性対数正規分布関数を次式に示す。

$$g(d_j) = p_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{(x_j - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] + (1 - p_1) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left[-\frac{(x_j - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right] \quad (3.14)$$

ここで、 $g(d_j)$ は粒径  $d_j$  の頻度、 $g_1(d_j)$ 、 $g_2(d_j)$ は粒度分布 1 および 2 の粒径  $d_j$  の頻度、 $d_j$ は粒径階級  $j$  の粒径、 $x_j = \ln d_j$ 、 $\mu_1 = \ln \bar{d}_1$ 、 $\mu_2 = \ln \bar{d}_2$ 、 $\bar{d}_1$ 、 $\bar{d}_2$ は粒度分布 1 および 2 の平均粒径、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ は粒度分布 1 および 2 の粒径の標準偏差、 $p_1$ は比率である。

二峰性対数正規分布モデルは粒度分布を  $p_1$ 、 $\mu_1$ 、 $\sigma_1$ 、 $\mu_2$ 、 $\sigma_2$  の 5 個のパラメータで粒度分布を近似することができる。以下、この 5 個のパラメータを粒度分布コードと呼んでいる。

#### 3.3.2 浮遊砂の濃度

減衰係数の理論値は、式(3.12)に示すように固体体積分率  $\phi$  が用いられる。一方、濃度は単位体積当たりの浮遊砂量(質量)であり、その単位は  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  を用いる。したがって、濃度  $C$  は粒子の密度  $\rho_2$  を用いて次式で算出する。

$$C = \rho_2 \cdot \phi \quad (3.15)$$

### 3.4 結論

本章では、既往の研究に基づいて超音波減衰スペクトル法の測定原理を述べた。超音波の測定領域は、粒子の粒径と超音波の波長との関係から長波長域、中間波長、短波長域に区分することができる。本章で得られた結論は以下のとおりである。

- 長波長域では粘性損失が支配的となり、この粘性損失は ECAH 理論に基づき算出することができる。このモデルは周波数 0.1～100MHz、粒径 0.01～30  $\mu\text{m}$  の測定に適用できる。
- 中間波長域では散乱損失が支配的となり、散乱損失は Faran モデルに基づき算出することができる。このモデルは  $kr < 30$  の範囲での適用できることが示されており、周波数 1～10MHz の測定では粒径 2 mm 以下の粒子の測定に適用できる。
- 超音波減衰スペクトル法は、ECAH 理論や Faran モデルなどの散乱理論に基づく超音波の減衰特性を利用して懸濁液中の微粒子濃度や粒度分布を測定する方法である。

## 参考文献

- [1] 武田真一 ; ”液中高濃度における粒子径分布測定の動向”. 微粒子工学体系第 1 巻基本技術. 柳田博明監修. フジ・テクノシステム, 2001, p.327-330.
- [2] P.S.Epstein and R.R.Carhart; The Absorption of Sound in Suspensions and Emulsions. J. Acoust. Soc. Am.Vol.25, pp.553-565, 1953.
- [3] J.R.Allegra and S.A.Hawley; Attenuation of Sound in Suspensions and Emulsions —Theory and Experiments. J. Acoust. Soc. Am.Vol.51,pp.1545-1564, 1972.
- [4] D.J.McClements; Principles of Ultrasonic Droplet Size Determination in Emulsions. *Langmuir*.Vol.12, pp.3454-3461, 1996.
- [5] A.Richter,F.Babric and S.Ripperger; Polydisperse particle size characterization by ultrasonic attenuation spectroscopy for systems of diverse acoustic contrast in the large particle limit. J. Acoust. Am.Vol.118,No.3, 2005.
- [6] Alex E.Hay and Douglas G.Mercer; On the theory of sound scattering and viscous absorption in aqueous suspensions at medium and short wavelengths J. Acoust. Soc. Am.Vol.78,No.5, pp.1761-1771, 1985.
- [7] James J.Faran jr.; Sound scattering by solid cylinders and spheres. J.Acoust. Am. Vol.23, No.4, 1951.
- [8] J.Sheng and Alex E.Hay; An examination of the spherical scatterer approximation in aqueous suspensions of sand J. Acoust. Soc. Am.Vol.83,No.2, pp.598-610, 1988.
- [9] ISO 20998-1,2006; Measurement and characterization of particles by acoustic method— Part.1: Concepts and procedures in ultrasonic attenuation spectroscopy.
- [10] ISO 20998-2,2013; Measurement and characterization of particles by acoustic method— Part.2:Guidelines for linear theory.





## 第4章

# 現場型超音波減衰スペクトル計の作製

### 4.1 序論

本章では筆者らが開発した現場型超音波減衰スペクトル計の計測性能を検証する。現在、市販されている超音波減衰スペクトル計は試験室の粒度分析装置として用いられており、その特長は、高濃度の懸濁液(サスペンション)、乳濁液(エマルション)およびスラリーの粒度分布を測定することができ、希釈等の前処理を必要としないことにある。前述したように Dispersion Technology Inc.の DT-100[1] は、パスレングスを変えて減衰係数を測定する超音波スペクトル計で、1~100MHz間の18周波数を利用して0.005~1000  $\mu\text{m}$ の粒径の粒子を測定することができる。測定に要する時間は0.5~10 minである。

現場計測に用いる超音波減衰スペクトル計は、試験室用の計測装置と異なり、自動測定や連続測定の機能だけでなく堅牢な構造設計が要求される。また、土砂動態のモニタリングでは粒度分布だけでなく濃度測定も要求されるが、市販の超音波減衰スペクトル計には濃度測定の機能はない。さらに、連続測定の測定間隔は1 minの高速であることが望ましい。

これまでの超音波減衰スペクトル計では駆動周波数が異なる数~10個の超音波振動子と使用しており、構造および駆動装置が複雑かつ高価であった。これに対し、本論文で提案する現場型超音波減衰スペクトル計は、パルス反射法を用いて測定時間の短縮を図り、さらにトランスデューサには小林・田井[2-6]が開発したプラノコンケーブ形超音波振動子を採用した。この振動子はインパルス電圧を印加することによって1~10MHzの集束性のある広帯域の周波数の超音波が発信できるため、複数のトランスデューサを必要としないシステムが実現できる。しかし、測定周波数が制限されるのでその計測性能については十分検証する必要がある。

### 4.2 超音波減衰スペクトル計

#### 4.2.1 標準的な超音波減衰スペクトル計の構成

標準的な超音波減衰スペクトル計[7]は以下の装置で構成される。

1. 信号発生器
2. トランスデューサ
3. 試料セル
4. 信号受信機

信号発生器はトランスデューサを駆動するための電気信号を発生し、これをトランスデューサに印加することによって超音波が放射される。印加する電気信号としては、単一周波数の連続波、周波数掃引、1組のトーンバースト、ステップパルスまたは広帯域パルスなどがある。

トランスデューサは信号発生器から供給された電気振動を超音波に変換する装置で、圧電セラミックスまたは圧電ポリマーフィルム(PVDF など)製などがある。超音波透過法においては、透過超音波を検出し、それを電氣的信号に変換するためのもう1個のトランスデューサを用いる。また、パルス反射法では、超音波パルスの送受信に同一のトランスデューサを使用する。いずれの方法でも、トランスデューサのアラインメントが重要であり、超音波信号の帯域幅と信号強度が最大となるように調整する必要がある。アラインメントが正確でないと透過信号をひずませる原因となる。

試料セルは、粒子の分散を抑制し、トランスデューサをアラインされた状態に維持するために用いられる。プロセス容器に直接挿入されるプローブタイプや流体がセルを流れて流れるフローセル(flowcell)タイプの装置もある。

受信機は、トランスデューサによって検出された伝送信号の強さを測定する装置で、パルス波の場合は、受信波形全体を捕捉するため高速 A/D 変換器が用いられる。受信したパルス波は高速フーリエ変換装置により周波数分析される。

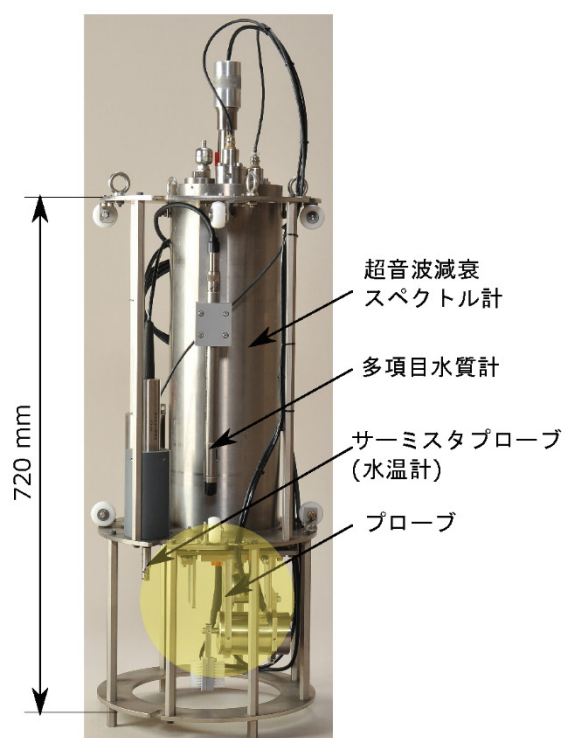
#### 4.2.2 開発した現場型超音波減衰スペクトル計の構成

筆者ら[8-10]が開発した現場型超音波減衰スペクトル計を図4.1に示す。図4.1(a)は超音波スペクトル計の全容、図4.1(b)はプローブの部分を示す。超音波減衰スペクトル計はスペクトル計本体、プローブ、サーミスタプローブ(水温計)、多項目水質計で構成される。また、図4.1(b)に示すプローブはトランスデューサと反射板および洗浄用ワイパーで構成されている。また、トランスデューサと反射板との距離は45 mmである。

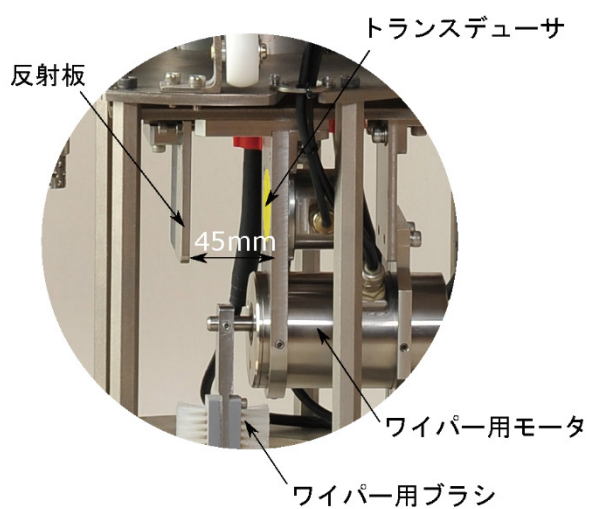
次に図4.2に現場型超音波減衰スペクトル計のシステム構成図を示す。スペクトル計はカプセル構造であり、カプセルの中には陸上部の測定制御機と各種信号やデータの送受信を行うデータ送受信機、測定したデータの高周波フーリエ変換(FFT)を行うCPU、トランスデューサにパルス電圧を印加するパルス発振器、トランスデューサが受信した信号をデジタルデータに変換するA/D変換器が収納されている。超音波減衰スペクトル計は、陸上に設置する測定制御機と防水コネクタ付きケーブルで接続されており、測定制御機は定時自動計測や手動計測等の測定制御、状態故障表示およびデータの収録を行う。また、測定制御機に伝送された測定データはPCに送信され、PCで専用のソフトウェアを用いて濃度と粒度分布に変換される。

#### 4.2.3 トランスデューサ

開発した超音波減衰スペクトル計のトランスデューサには小林・田井[2-6]が開発したプラノコンケーブ形超音波振動子を採用した。プラノコンケーブ形振動子は、厚み分極を施したチタン酸鉛(PZT)製の円形平板振動子(厚さ2 mm、直径20 mm)の一面を曲率半径 $r_p=30$  mmで凹



(a) 超音波減衰スペクトル計



(b) プローブ

図 4.1 開発した現場型超音波減衰スペクトル計の構成とプローブ

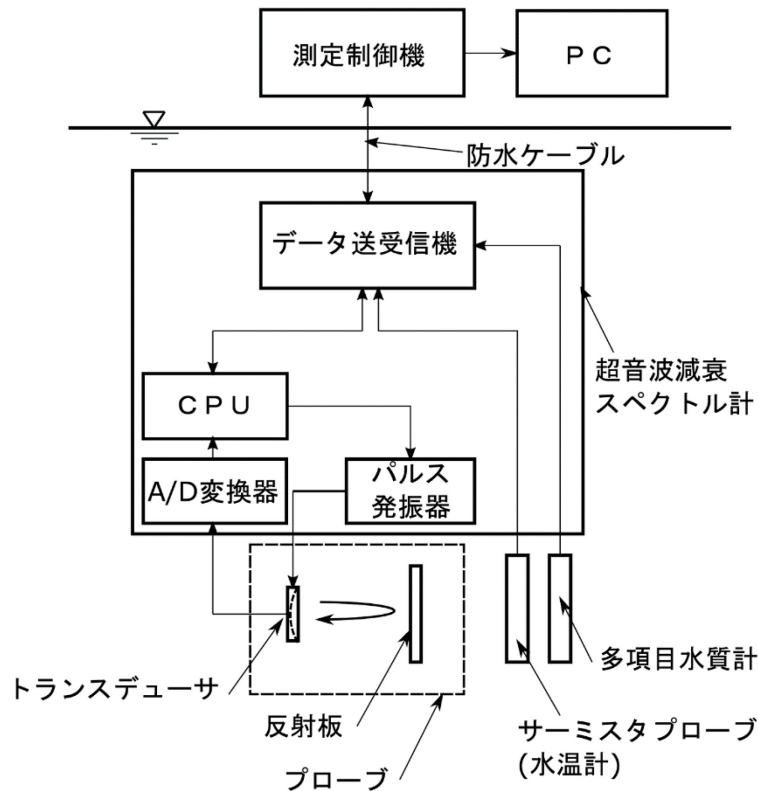


図 4.2 現場型超音波減衰スペクトル計のシステム構成図

面状に加工し、その両面に電極を蒸着させた振動子である。超音波振動子は、一般には厚さが一定の円板形であり、厚さで決まるただ一つの周波数で機械共振振動し、単一周波数の音波を発生する。これに対してプラノコンケーブ形振動子は、図 4.3 に示すように厚さが連続的に変化しているため、1~10MHz の広い周波数帯域で超音波振動させることができる。さらに放射面が凹面であるために集束した超音波を放射することができる。この振動子にインパルス電圧を印加すると、そのコンケーブ面から溶液中に広帯域性・集束性の超音波インパルスを放射できる。

この振動子にインパルス電圧を印加したときに凹面状の振動子表面から放射される主なパルス波①、②の伝搬経路[6]を図 4.3 に示す。その幾何学的な焦点距離  $f_1$ 、 $f_2$  はそれぞれ次式で与えられる。まず、振動子表面から直接媒質中に放射されるパルス波①の幾何学的な焦点距離  $f_1$  は振動子表面の曲率半径  $r_p$  に一致するので次式となる。

$$f_1 = r_p \quad (4.1)$$

次に、平坦な振動子裏面から振動子内部に放射され、凹面状の振動子表面において、スネルの法則にしたがって屈折して媒質中に放射されるパルス波②の幾何学的な焦点距離  $f_2$  は次式で与え

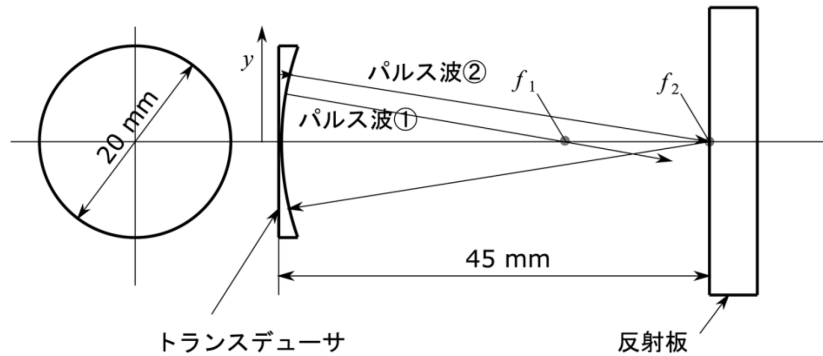


図 4.3 プラノコンケーブ形振動子と放射超音波の幾何学的焦点距離

られる。

$$f_2 = r_p - \sqrt{r_p^2 - y^2} + \frac{y}{\tan \left[ \sin^{-1} \left( \frac{y}{r_p} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{v_t}{v_i} \cdot \frac{y}{r_p} \right) \right]} \quad (4.2)$$

ここで、 $r_p$ は振動子表面の曲率半径、 $y$ は振動子の中心から超音波放射点までの距離、 $(0 < y < d_p/2)$ 、 $d_p$ は振動子の直径、 $v_i$ は振動子内部の縦波音速、 $v_t$ は放射媒質中の縦波音速である。式(4.2)を用いてプラノコンケーブ形振動子から放射されるパルス波②の水中における幾何学的な焦点距離 $f_2$ を求めると表 4.1 が得られる。水温が 20°C の場合、パルス波②の幾何学的な焦点距離 $f_2$ は約 45 mm となる。小林・田井[3] はプラノコンケーブ形超音波振動子を用いたマイクロスフェア微粒子の濃度測定を行い、パルス波②の焦点 $f_2=45$  mm 付近で最も大きな音圧が得られることを示している。そこで、図 4.3 に示すように振動子から放射された集束音波を反射させるための反射板をパルス波②の焦点距離に設置することにした。したがって、振動子から放射された超音波が反射板で反射されて再び振動子に到達するまでの伝播距離は焦点距離の 2 倍の 90 mm となる。また、この構造では振動子表面に取り付けた電極が直接媒質に接するため、電極と媒質間の絶縁と保護を目的として振動子表面と側面にはフッ素コーティング加工を施している。

次にこのトランスデューサに印加する励振電圧を図 4.4 に示す。電圧 5V、パルス幅 80ns の短いインパルスをも 1 ms 間隔で印加し、得られた 256 個の測定データの移動平均値を測定データとしている。

#### 4.2.4 トランスデューサのアラインメント

プローブの設計・製作においてはトランスデューサと反射板の相対的な位置関係が極めて重要で、トランスデューサが受信した超音波パルス波のスペクトル特性が良好になるように反射板の位置と角度を調整する必要がある。図 4.5 はトランスデューサが受信した超音波パルス波のスペクトル特性の一例を示す。図 4.5(a)は、トランスデューサが受信した超音波パルス波の時間波形で、横軸に時間、縦軸に振幅を示す。プラノコンケーブ形振動子の中心軸と反射体の角度を調

表 4.1 水温とプラノコンケーブ形超音波振動子の幾何学的な焦点距離との関係

$\theta$ [°C]	$v_i$ [m/s]	$v_r$ [m/s]	$f_2$ [mm]
5.0	4460	1426.16	44.01
10.0	4460	1447.95	44.33
15.0	4460	1466.84	44.61
20.0	4460	1483.18	44.85
25.0	4460	1497.28	45.06
30.0	4460	1509.38	45.24

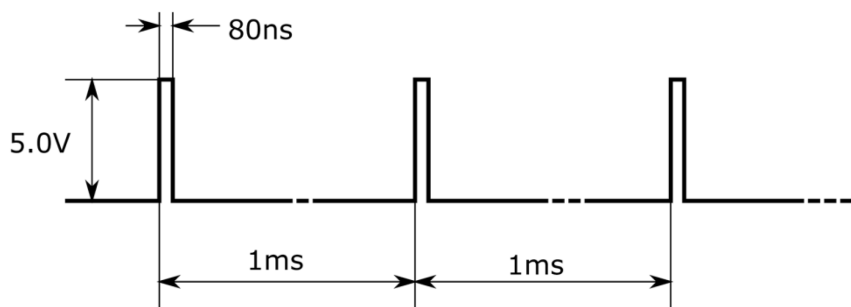


図 4.4 振動子に印加するインパルス電圧

整することによって、超音波パルス波はリングングが少ない波形を得ることができる。また、図 4.5(b)は図 4.5(a)に示す超音波パルス波を FFT 分析した周波数スペクトルを示す。プラノコンケーブ形振動子の中心軸と反射体の角度を調整することによって、中心周波数約 6MHz、最大振幅の 50%の振幅をもつ二つの周波数の差(「帯域幅」という)が約 6MHzの広帯域の超音波が得られる。

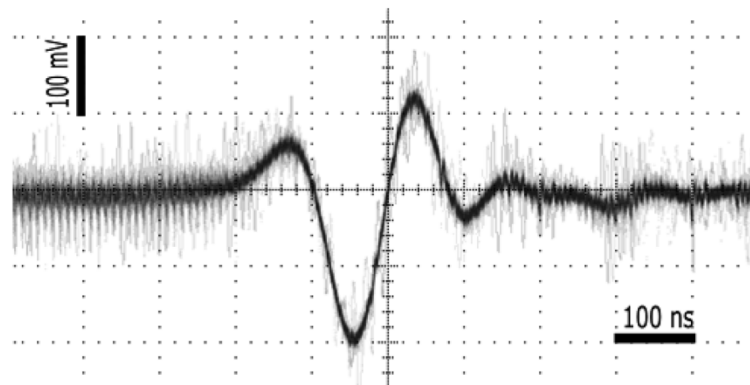
### 4.3 基準スペクトルの測定

#### 4.3.1 減衰係数

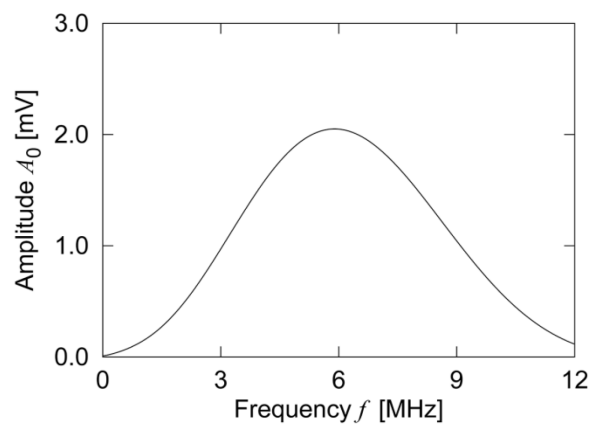
減衰係数は物質を通過する超音波の単位距離当たりの減衰を示す値であり、パルス反射法では次式を用いて減衰係数を算出する。

$$\alpha(f) = -\frac{1}{2L} \ln \frac{A(f)}{A_0(f)} \quad (4.3)$$

ここで、 $\alpha(f)$ は周波数  $f$  での減衰係数[Np・m<sup>-1</sup>]、 $L$ は振動子と反射板との距離[m]、 $A_0(f)$ は基準スペクトルの振幅[mV]、 $A(f)$ は第一反射波のスペクトルの振幅[mV]である。基準スペク



(a) トランスデューサが受信した超音波パルス波の波形



(b) トランスデューサの受信波形と周波数スペクトル

図 4.5 トランスデューサの受信波形と周波数スペクトル

トルとは微粒子を含まない水中において超音波減衰スペクトル計により得られたスペクトルをいう。

### 4.3.2 測定方法

本節では、筆者らが開発した超音波減衰スペクトル計を用いて、水温を変化させたときの各温度における基準スペクトルを測定する。基準スペクトルの測定は図 4.6 に示す実験装置を用いる。図 4.6 は測定装置の概略であり、攪拌容器とカプセル収納容器で構成されている。攪拌容器は小型攪拌機を取り付けた内径 300 mm×高さ 500 mm の透明アクリル製容器で、内側に 4 枚の邪魔板を取付け、容器の底部は円弧状に加工している。小型攪拌機はポータブルミキサー A720 (佐竹化学機械工業株式会社製) を使用し、インペラには中速用 P-36 (同上) を使用する。

基準スペクトルの測定方法は以下とおりである。

1. 水道水を入れたアクリル製カプセル収納容器 (内径 380 mm×高さ 1030 mm) の中に超音



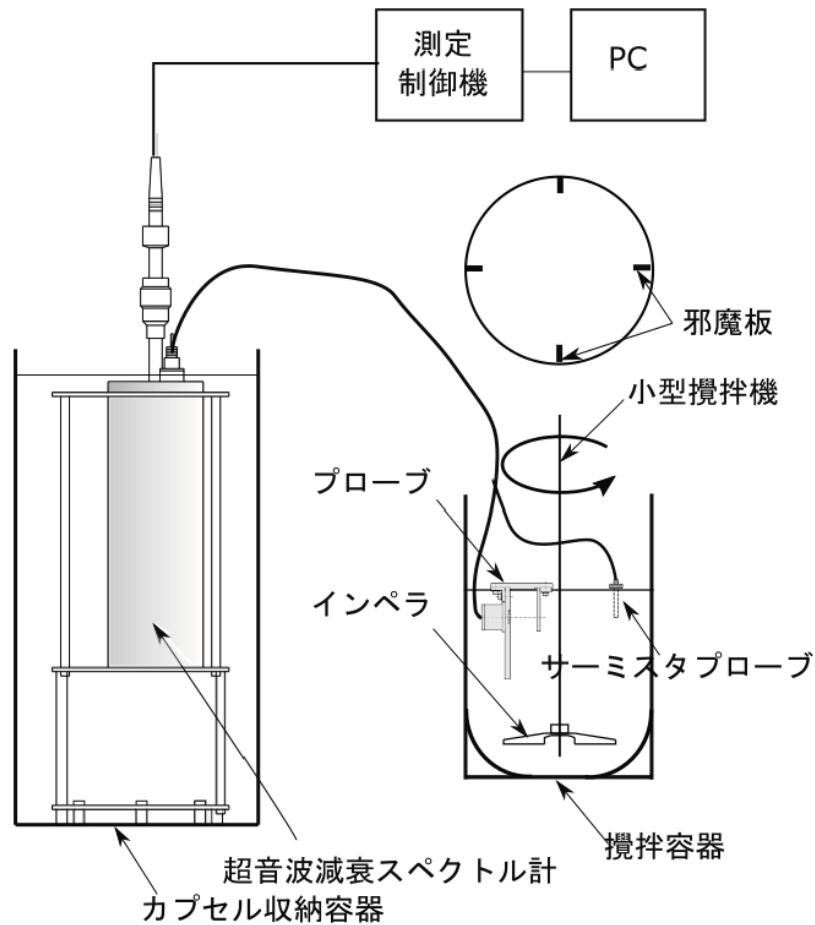


図 4.6 実験装置の概略

- 波減衰スペクトル計を設置して、水温が所定の温度（例えば 20°C）になるよう調整する。
2. 小型攪拌機を取り付けた内径 300 mm×高さ 500 mmの透明アクリル製の攪拌容器に脱気した純水 18ℓを入れて、所定の水温になるよう調整する。
  3. 超音波減衰スペクトル計のプローブ、サーミスタプローブ（水温計）をスペクトル計から取り外して攪拌容器に設置して、小型攪拌機を運転する。
  4. 20分経過した後、水温、周波数スペクトルを 10回測定する。
  5. 水温を変更して、上記の測定を繰り返す。

### 4.3.3 基準スペクトルの測定結果

各水温における基準スペクトルの測定結果を図 4.7 示す。横軸は周波数  $f$ 、縦軸は基準スペクトルの振幅  $A_0$  を示す。水温は 12°C、15°C、18°C、21°C、24°C とした。図 4.7 から明らか

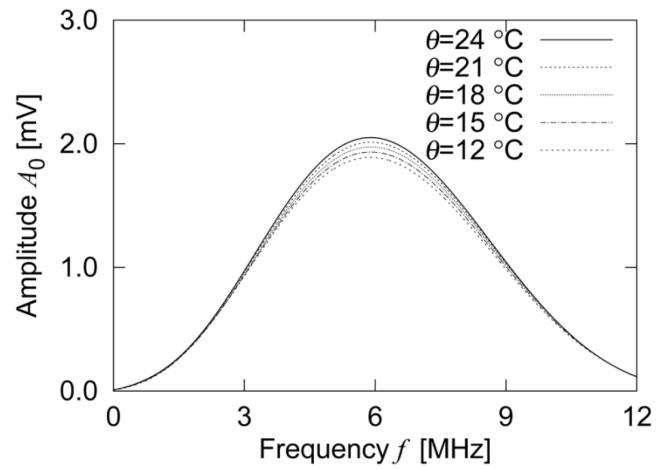


図 4.7 基準スペクトルの測定結果

なように、基準スペクトルの振幅は水温に依存して変化しており、水温が高くなるにしたがって基準スペクトルの振幅が大きくなることがわかった。次にこれを基に各周波数における水温と基準スペクトルの振幅との関係にまとめ直した。図 4.8～図 4.9 はその結果であり、周波数が 5.0～8.0MHz までの 11 周波数の水温  $\theta$  と基準スペクトルの振幅との関係を示す。これらの基準スペクトルの測定データは 1024 組の周波数と振幅で構成されており、すべての周波数において基準スペクトルの振幅は次式に示す水温の関数として決定できることがわかった。

$$A_0(f) = a\theta^2 + b\theta + c \quad (4.4)$$

ここで、 $A_0(f)$ は周波数  $f$ での基準スペクトルの振幅[mV]、 $\theta$ は水温[°C]、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ は実験によって決定する定数であり、各周波数での係数を図 4.8～図 4.9 の図中に示す。

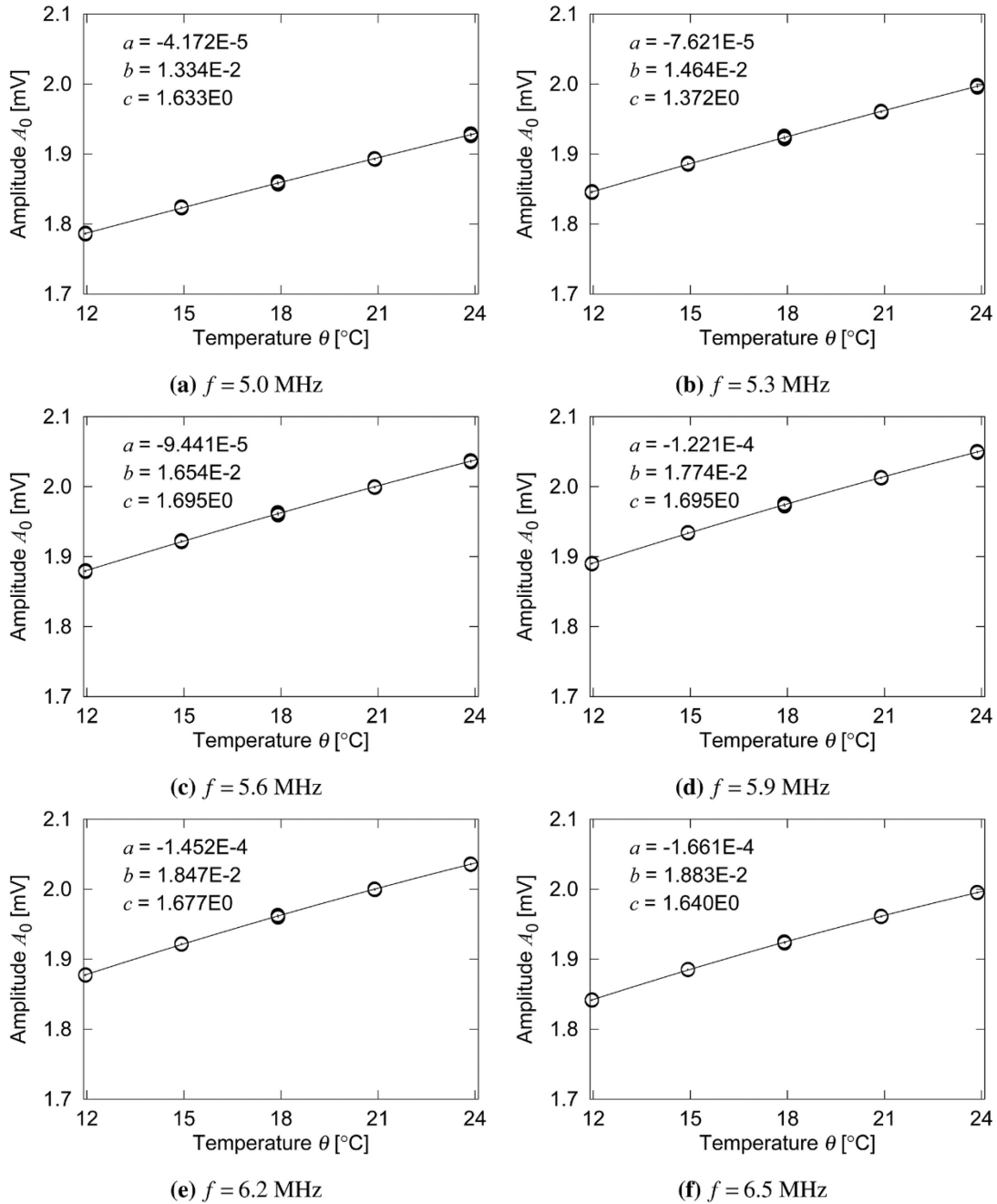


図 4.8 水温と基準スペクトルの振幅との関係(その1)

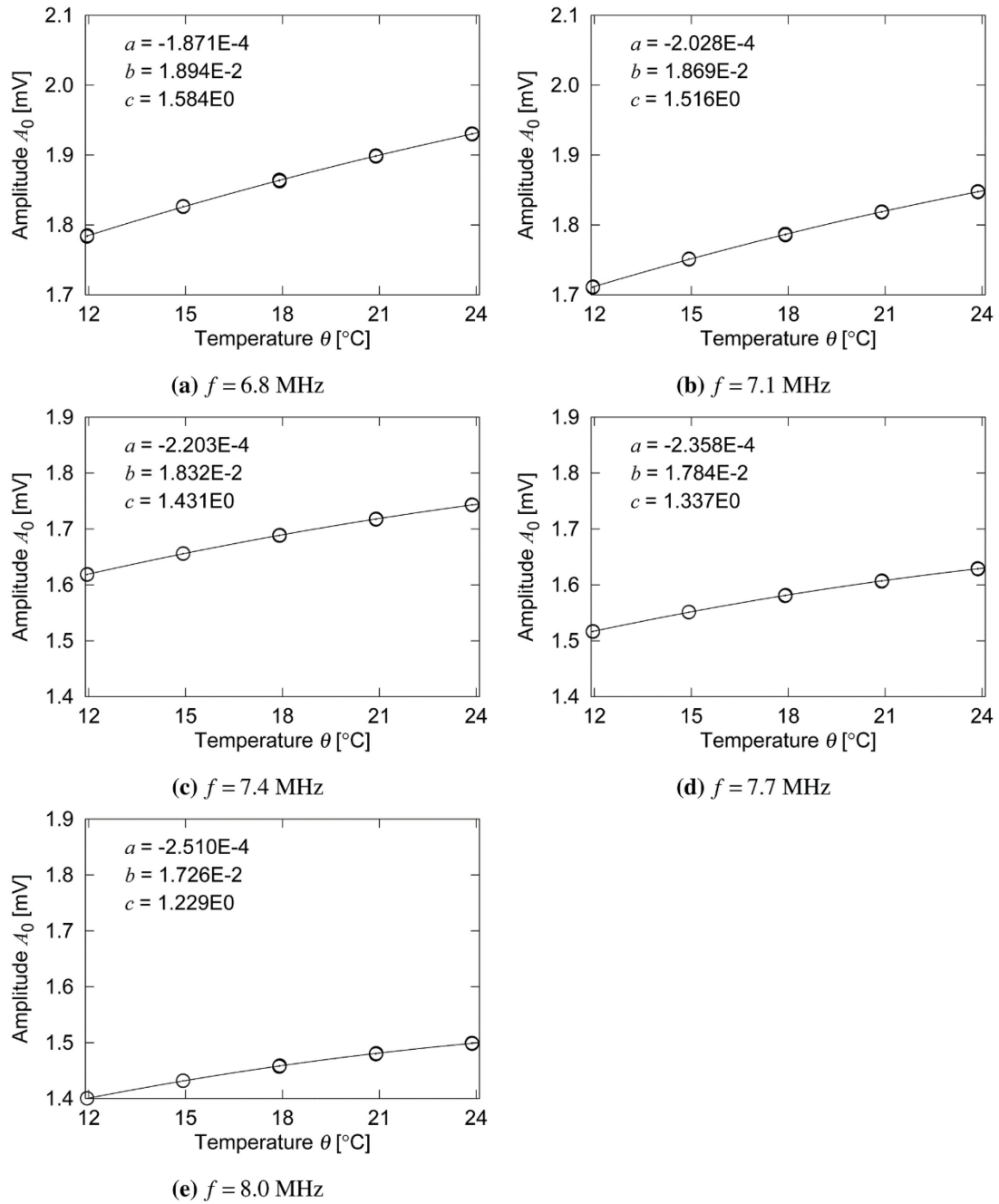


図 4.9 水温と基準スペクトルの振幅との関係(その 2)

表 4.2 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の球形粒子の密度と粒径

No.	Sample	$\rho_2$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	D50 $\mu\text{m}$	D10 $\mu\text{m}$	D90 $\mu\text{m}$
1	GBL-30	2500	29.7	27.4	31.8
2	GBL-40	2500	41.3	37.8	43.8
3	GBL-60	2500	58.4	55.8	61.8
4	GBL-100	2500	99.8	96.9	103
5	SPL-150	2500	149	145	154
6	SPL-200	2500	208	203	214

## 4.4 粒径 10 $\mu\text{m}$ 以上の球形粒子の測定

### 4.4.1 実験の目的

本節では粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の球形粒子の実験[11]を行い、減衰係数の測定値と散乱損失の理論値を比較して、超音波減衰スペクトル計の計測性能を検証する。

### 4.4.2 実験用粒子

実験用粒子の粒径と密度を表 4.2 に示す。GBL シリーズは日本粉体工業技術協会の JIS 試験用粉体 2(粒径 30~100  $\mu\text{m}$ )、SPL シリーズはユニチカのユニビーズ(粒径 150,200  $\mu\text{m}$ )である。各粒子の粒径と密度は各メーカーの実測値を示す。また、実験用粒子の走査型電子顕微鏡(Scanning electron microscope、以下「SEM」という)による粒子形状の観察画像を図 4.10 に示す。各粒子は粒径の揃った球形粒子である。

### 4.4.3 実験方法

減衰スペクトルの測定は図 4.6 に示す実験装置を用いる。実験用粒子を含む懸濁液を攪拌容器に入れて、攪拌しながら減衰スペクトルを測定する。また、攪拌中の懸濁液を採水して実験用粒子の濃度を測定する。実験方法は以下のとおりである。

1. 実験用粒子を計量して 500 ml のビーカーに入れ、純水 200 ml を加えて一様となるようにかき混ぜる。ガラス板でビーカーにふたをして、脱気のため  $110\pm 5^\circ\text{C}$  の恒温乾燥炉に入れる。
2. 約 1 時間後に恒温乾燥炉からビーカーを取り出し、15 時間以上放置して室温に戻した後、純水を加えて全体で 300 ml の懸濁液にする。
3. 攪拌容器に脱気した純水 18l を入れ、水温を  $20^\circ\text{C}$  に調節する。攪拌容器内の純水 300 ml

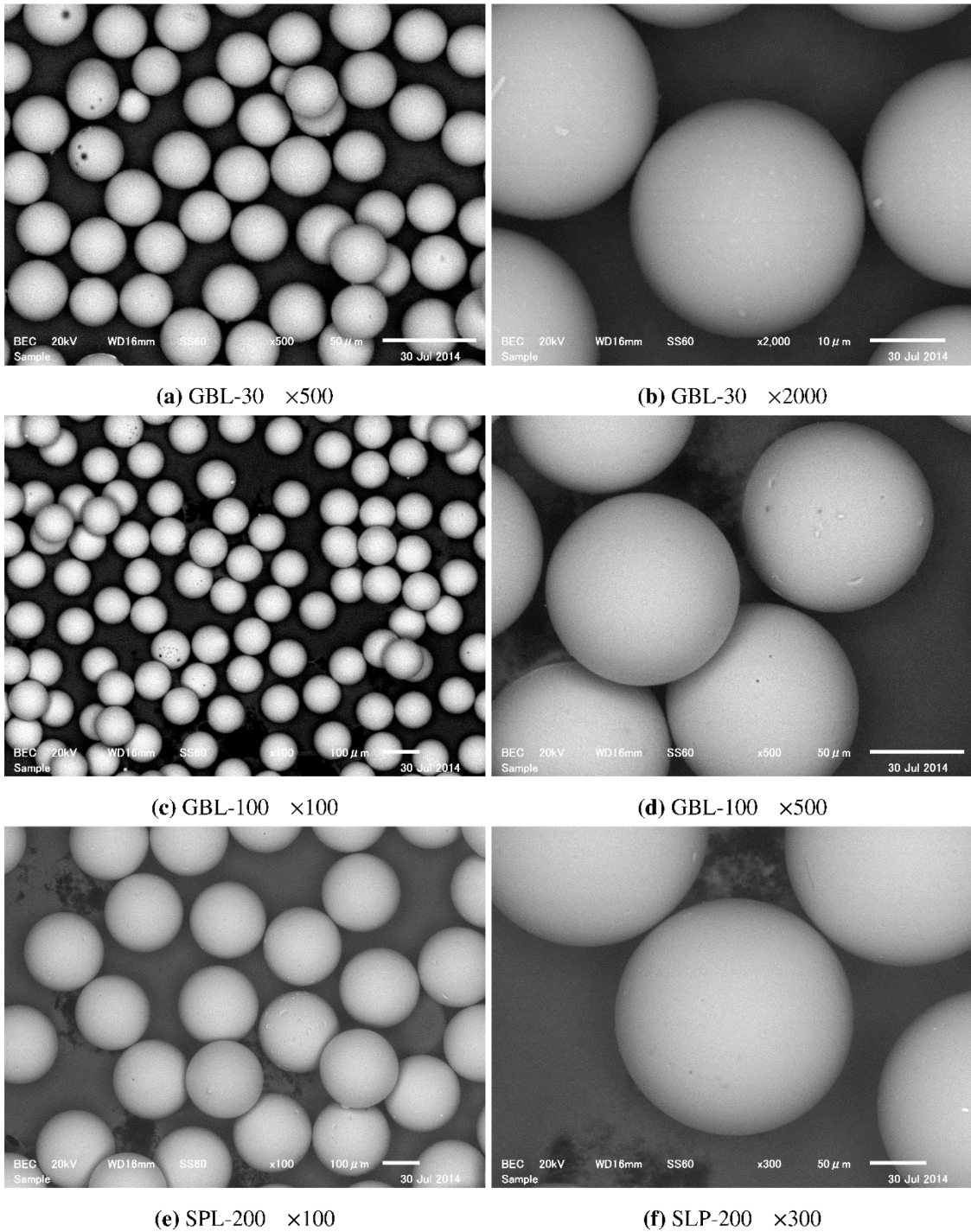
図 4.10 SEM による粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の球形粒子の粒子形状観察

表 4.3 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の球形粒子の実験濃度

No.	Date	Sample	$C_{\text{expt}}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\phi_{\text{expt}}$ $\times 10^{-6}$	$\theta$ $^{\circ}\text{C}$
1	20131220	GBL-30	2.00	800	19.46
2	20131220	GBL-40	2.00	800	20.17
3	20131219	GBL-60	2.00	800	19.80
4	20131219	GBL-100	1.95	780	19.48
5	20131217	SPL-150	1.80	720	19.27
6	20131217	SPL-200	1.63	652	18.92

を捨て、ビーカーに入れた懸濁液 300 ml を加えて 18 ml とする。

4. 攪拌容器にプローブ、サーミスタプローブ(水温計)と小型攪拌機を取り付けて 20 分間攪拌する。
5. 20 分経過後水温と透過スペクトルを 5 回測定する。
6. 懸濁液約 200 ml を 3 回採水してそれぞれの容積を計量して、アルミ容器に入れ 110 $\pm$ 5  $^{\circ}\text{C}$  の恒温乾燥炉で水分を蒸発させる。
7. 約 1 時間後に恒温乾燥炉から取り出し、15 時間以上放置して室温に戻した後、粒子の乾燥質量を計量して、これをそれぞれの懸濁液の容積で除して濃度を求め、3 回の濃度の平均値を  $C_{\text{expt}}$  とする。

#### 4.4.4 実験結果

各実験用粒子の懸濁液の濃度  $C_{\text{expt}}$  と固体体積分率  $\phi_{\text{expt}}$  および測定時の水温  $\theta$  を表 4.3 に示す。各粒子の平均濃度は 2.0  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  であるが、粒径が大きくなるにしたがって攪拌容器内で均一な分散ができず、プローブ位置の濃度が低下する結果となった。固体体積分率  $\phi_{\text{expt}}$  は次式で算出する。

$$\phi_{\text{expt}} = \frac{C_{\text{expt}}}{\rho_2} \quad (4.5)$$

ここで、 $C_{\text{expt}}$  は採水して測定した濃度、 $\rho_2$  は粒子の密度である。

次に、GBL-30 の減衰係数の測定値と理論値との比較を図 4.11 に示す。周波数は最大振幅の 50 % 以上の振幅をもつ 3~9 MHz までの 21 周波数である。基準スペクトルの振幅は式(4.4)から算出し、減衰係数は式(4.3)から算出する。また、減衰スペクトルの理論値は式(3.6)から算出する。ガラスの弾性係数とポアソン比[12] は  $E=71.6\text{GPa}$ 、 $\nu=0.23$  を用いる。図 4.11 から明らかなように周波数 5~8 MHz では減衰係数の測定値が理論値より大きく、その他の周波数帯では測定値が理論値より小さくなる傾向がある。したがって、測定値と理論値との差を小さくするため、測定に適用する周波数帯は 5~8 MHz までの 11 周波数を用いる。

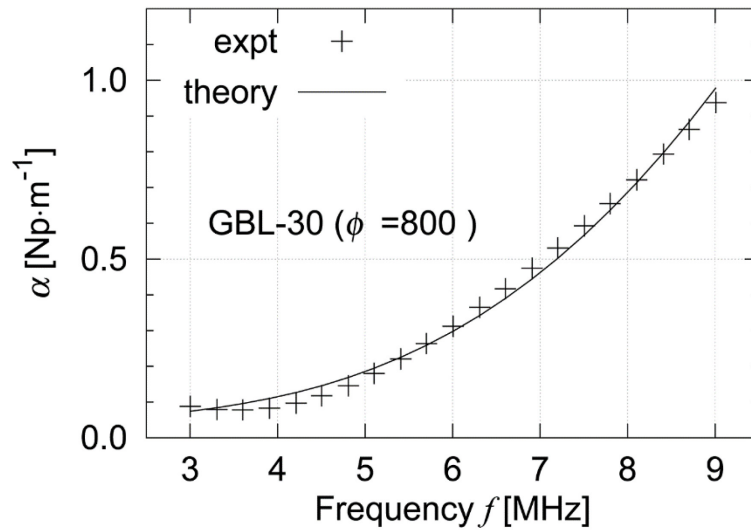


図 4.11 球形粒子(GBL-30)の減衰係数の理論値と測定値との比較

各粒子の減衰スペクトルの測定結果を図 4.12 に示す。横軸には周波数  $f$ 、縦軸には減衰係数  $\alpha/\phi$  を示す。基準スペクトルの振幅は式(4.4)から算出し、減衰係数は式(4.3)から算出した。図 4.12 に見られるように、微粒子による超音波の減衰スペクトルは粒径と周波数に大きく依存することが分かった。全粒子の懸濁液の減衰スペクトルを図 4.13(a)に示す。周波数  $f=5\text{MHz}$  では SPL-200 の減衰係数が最大となり、周波数  $f=8\text{MHz}$  では SPL-150 の減衰係数が最大値を示しており、各々の周波数では減衰係数が最大となる粒径がそれぞれ異なることがわかった。

#### 4.4.5 考察

粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の球形粒子の減衰係数の測定値と理論値との比較を図 4.13(b)に示す。図 4.13(b)の横軸は  $kr$ 、縦軸は  $\alpha/k\phi$  を示す。 $kr$ は無次元粒径パラメータ (dimensionless size parameter [13]) で次式で表される。

$$kr = \frac{\omega}{c} \cdot r = \frac{2\pi f}{c} r = \frac{\pi d}{\lambda} \quad (4.6)$$

また、縦軸は減衰係数  $\alpha$  ではなく、 $\alpha/k$  を用いる。式(3.6)の両辺を  $k$  で割ると次式が得られる。

$$\frac{\alpha_{sc}}{k} = -\frac{3\phi}{2(k \cdot r)^3} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(A_n) \quad (4.7)$$

この結果、 $\alpha_{sc}/k$  は  $kr$  の関数となる。図 4.13(b)は横軸  $kr$ 、縦軸  $\alpha/(k\phi)$  として減衰係数の測定値と理論値を示したものである。両者はよく一致しており、筆者らが開発した超音波減衰スペクトル計を用いて粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の球形粒子の減衰係数を正確に計測できることがわかった。



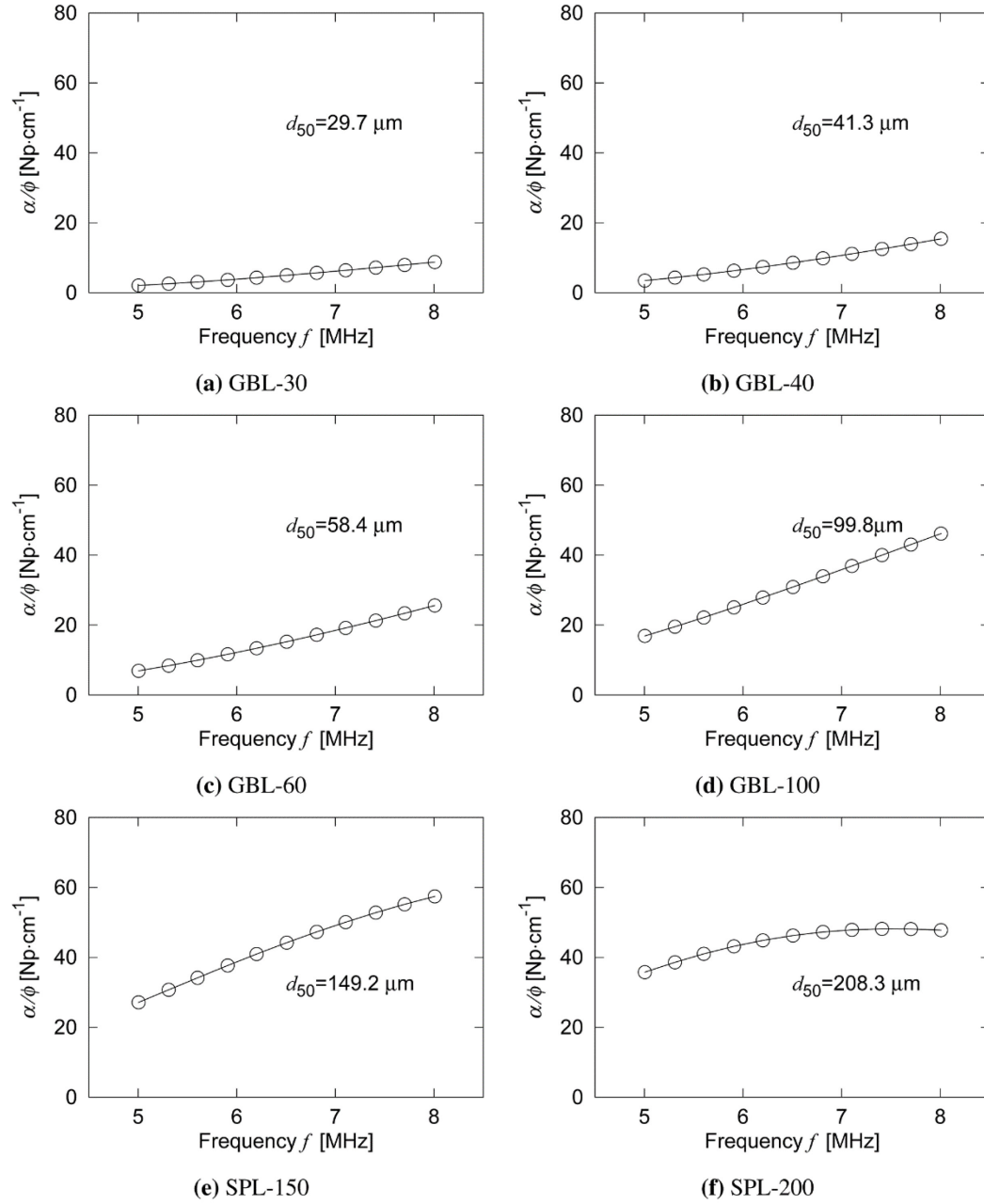


図 4.12 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の球形粒子の減衰スペクトルの測定結果

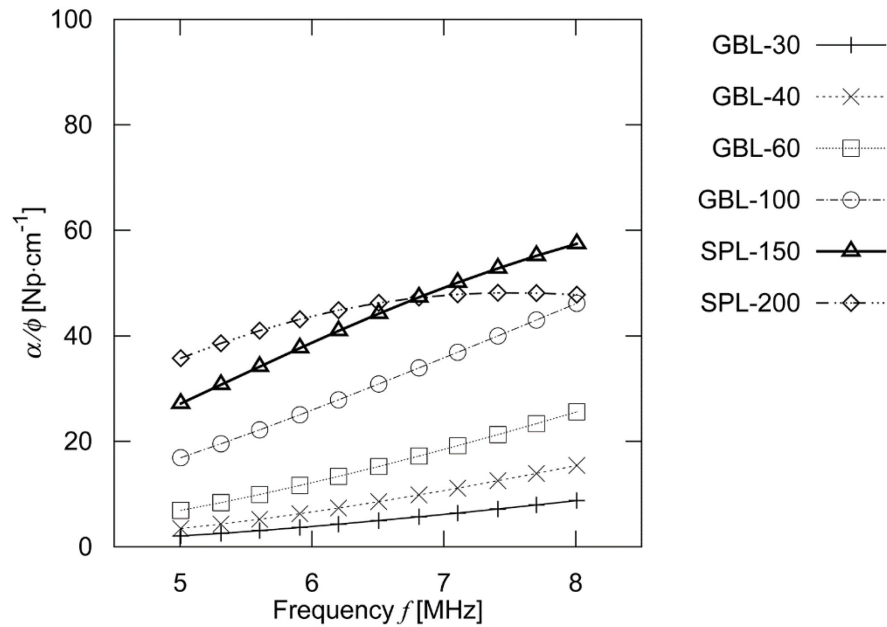
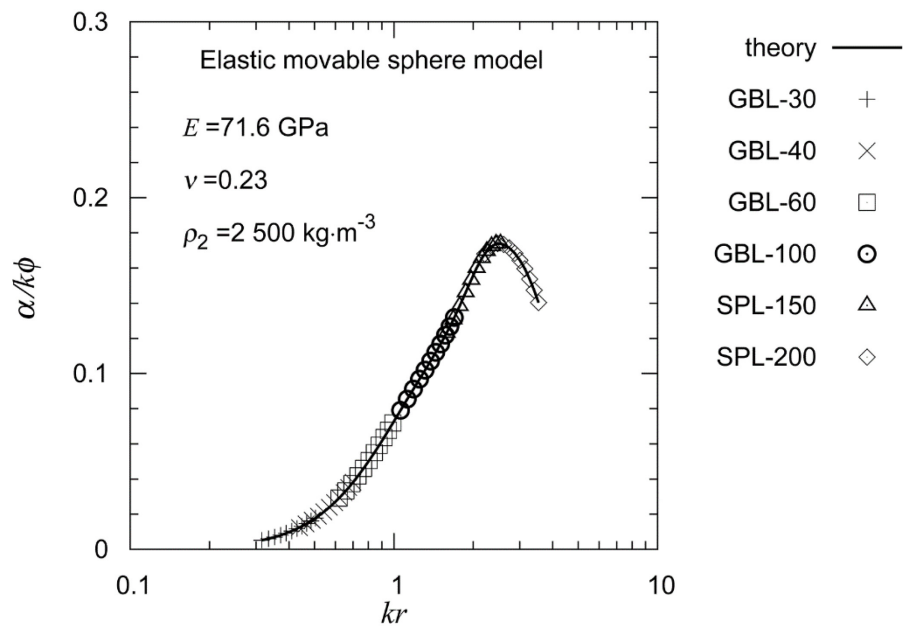
(a) 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の球形粒子の懸濁液の減衰スペクトルの測定結果(b) 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の球形粒子の懸濁液の減衰スペクトルの測定値と理論値との比較図 4.13 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の球形粒子の減衰特性

表 4.4 粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の球形粒子の密度と粒径

No.	Sample	$\rho_2$ Kg $\cdot$ m <sup>-3</sup>	meandiameter $\mu\text{m}$	CV %
1	FR-N2N-1	2220	0.98	3.67
2	FQ-N2N-2	2200	2.37	1.50
3	FQ-N2N-4	2190	4.01	1.11
4	FQ-N2N-6	2200	6.07	1.62

注) CV=標準偏差/平均粒径

## 4.5 粒径 10 $\mu\text{m}$ 未満の球形粒子の測定

### 4.5.1 実験の目的

本節では粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の球形粒子の実験[11]を行い、減衰係数の測定値と粘性損失の理論値を比較して、超音波減衰スペクトル計の計測性能を検証する。

### 4.5.2 実験用粒子

実験に用いた四種類の粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の球形粒子の密度と平均粒径を表 4.4 に示す。この球形粒子は宇部エクシモ株式会社のハイプレシカで、粒子の密度と粒径および CV 値はメーカーの測定値を示す。また、図 4.14 にこの粒子の SEM による粒子形状の観察画像を示しており、実験に用いた粒子はいずれも粒径の揃った球形粒子であることがわかる。

### 4.5.3 実験方法

実験方法は 4.4.3 項による。

### 4.5.4 実験結果

粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の四種類の球形粒子の減衰スペクトルの測定結果を図 4.15 に示す。基準スペクトルの振幅は式(4.4)から算出し、減衰係数は式(4.3)から算出する。また、固体体積分率は式(4.5)から算出する。実験濃度  $C$  は 1.0、2.0、3.0  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  とする。

図 4.15(a)は FR-N2N-1、図 4.15(b)は FQ-N2N-2、図 4.15(c)は FQ-N2N-4、図 4.15(d)は FQ-N2N-6 のそれぞれの減衰スペクトルを示す。それぞれの図において、濃度  $C$  が変化しても、単位濃度当たりの減衰係数  $\alpha\phi$  は一定となっており、減衰係数  $\alpha$  と固体体積分率  $\phi$  は線形関係にあることが分かった。

全四粒子の減衰スペクトルの測定値を図 4.16(a)に示す。横軸は周波数  $f$ 、縦軸は  $\alpha\phi$  を示す。粒径が 1~6  $\mu\text{m}$  の粒子の場合、周波数が 5~8MHz の帯域では、粒径が小さくなるにしたがって

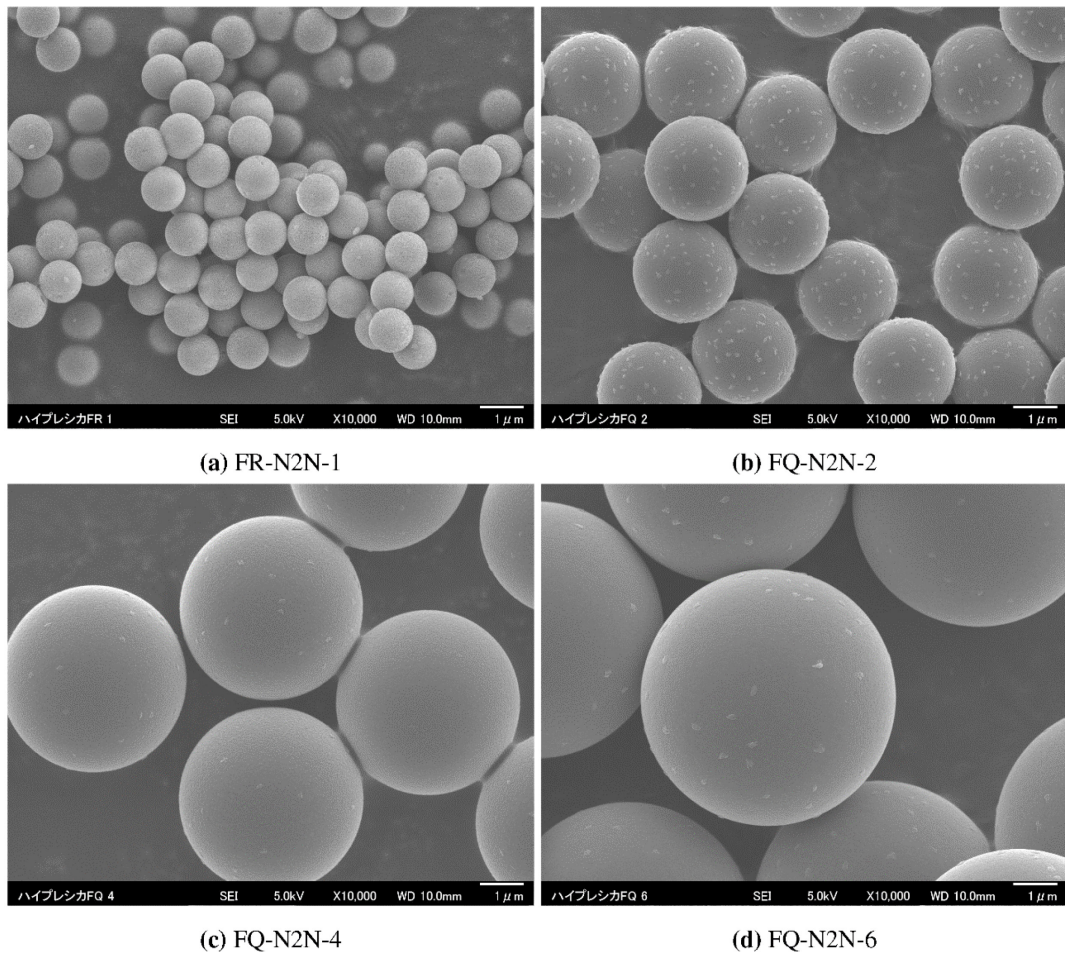


図 4.14 SEM による粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の球形粒子の形状観察

減衰係数が大きくなることが分かった。

#### 4.5.5 考察

粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の球形粒子の減衰スペクトルの測定値と理論値を比較した結果を図 4.16(b) に示す。減衰係数の理論値は式(3.2)から算出する。各粒子の密度が異なるため理論値は粒子の密度  $\rho_2=2200\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  を用いて算出する。実験値は粘性損失による減衰係数の理論値とよく一致することが分かった。図 4.16(b)は ECAH 理論に基づく粘性損失の特性曲線[14] で横軸は  $r f^{0.5}$ 、縦軸は  $\alpha\lambda\phi$  を示す。密度が同じ粒子の粘性損失は  $r f^{0.5}$  の関数となる。図 4.16(b)は、減衰係数の測定値が ECAH 理論による減衰係数の理論値と一致することを示しており、筆者らが開発した超音波減衰スペクトル計を用いて粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の球形粒子の減衰係数を正確に測定できることが分かった。

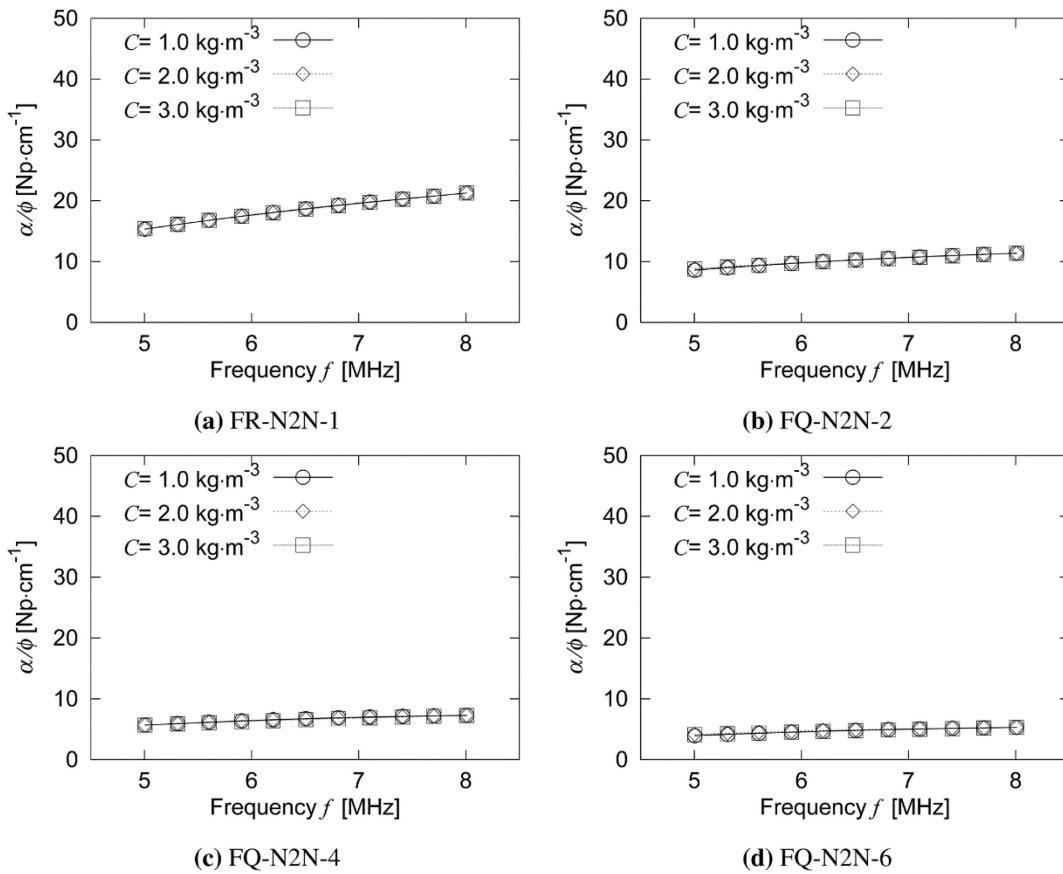
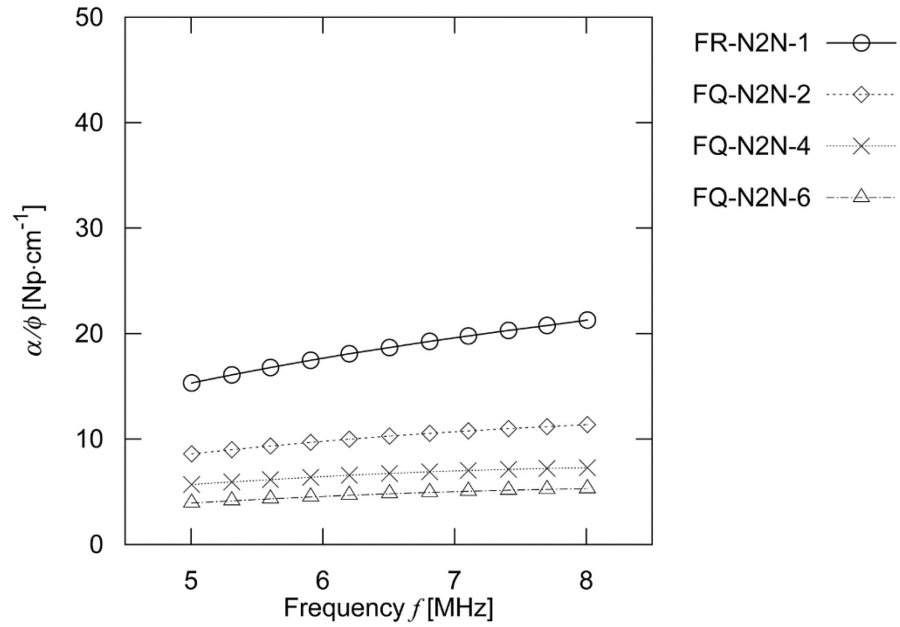
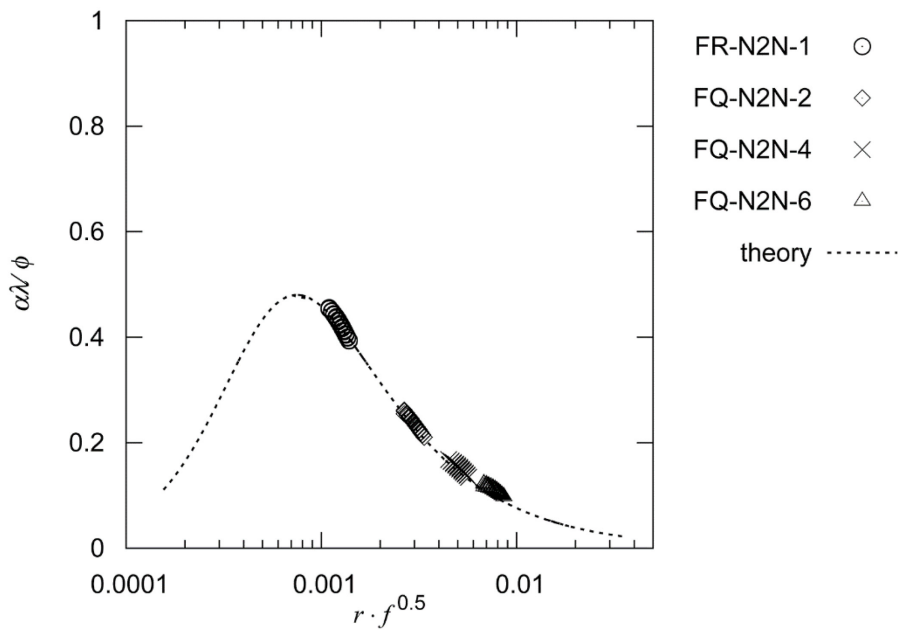


図 4.15 粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の球形粒子の減衰スペクトルの測定結果

## 4.6 結論

本章では、筆者らが開発した現場型超音波減衰スペクトル計を用いて球形粒子の減衰スペクトルを測定し、理論値と比較して超音波減衰スペクトル計の計測性能を検証した。本章で得られた結論は以下のとおりである。

- 現場型超音波減衰スペクトル計の測定周波数は減衰係数の理論値と測定値の差が小さい 5~8MHz の間の 11 周波数を用いた。
- 粒径 30  $\mu\text{m}$ 、40  $\mu\text{m}$ 、60  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{m}$ 、150  $\mu\text{m}$ 、200  $\mu\text{m}$  の六種類の球形粒子の減衰スペクトルを測定し、測定値が Faran モデルによる減衰係数の理論値と一致することを確認した。
- 粒径 1  $\mu\text{m}$ 、2  $\mu\text{m}$ 、4  $\mu\text{m}$ 、6  $\mu\text{m}$  の四種類の球形粒子の減衰スペクトルを測定し、測定値が ECAH 理論による減衰係数の理論値と一致することを確認した。

(a) 粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の球形粒子の減衰スペクトルの測定結果(b) 粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の球形粒子の減衰スペクトルの測定値と理論値との比較図 4.16 粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の球形粒子の減衰特性



## 参考文献

- [1] A.S.Dukhin and P.J.Goetz; Characterization of Liquids, Nano- and Microparticulates, and Porous Bodies Using Ultrasound. 2nd edition, ELSEVIER, 2010, 501p.
- [2] Hidekazu Tai and Tsutomu Kobayashi; Broadband Transducer for Diagnostics Using a Plano-Concave Ultrasonic Transducer Driven by Chirp WaveJpnJApplPhys., Vol.42, pp.3031-3035, 2003.
- [3] 田井秀一, 小林力; 集束性をもつ広帯域超音波を用いた微粒子濃度の測定.日本音響学会講演論文集.pp.1025-1026, 2003.
- [4] 加藤英, 田井秀一, 小林力; 集束性の超音波インパルスを用いた微粒子濃度測定.電子情報通信学会技術報告.US2004-105, pp.19-24, 2005.
- [5] Tsutomu Kobayashi, Hidekazu Tai and Suguru Kato; Measurement method of particle concentration and acoustic properties in suspension using a focused ultrasonic impulse radiated from a plano-concave transducerUltrasonics 44e491-e496, 2006.
- [6] 小林力, 田井秀一; 広帯域超音波パルスを用いた懸濁液の濃度測定.日本音響学会誌,63 巻,8号,pp.434-441,2007.
- [7] ISO 20998-1,2006;Measurement and characterization of particles by acoustic method—Part.1: Concepts and procedures in ultrasonic attenuation spectroscopy.
- [8] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; プラノコンケーブ形超音波振動子を用いた浮遊砂自動計測装置の開発.電子情報通信学会技術報告.US2012-105, pp.93-100, 2013.
- [9] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 超音波減衰スペクトル法を用いた流水中の浮遊砂濃度と粒度分布の計測技術に関する研究.河川技術論文集.第 19 巻,pp.129-134, 2013.
- [10] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 超音波減衰スペクトル法による六角川感潮部の懸濁物質濃度と粒度分布の連続計測.土木学会論文集 B1 (水工学) .第 70 巻,No.4, pp.I\_607-I\_612,2014.
- [11] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 流水中の浮遊物質の連続計測に用いる超音波減衰スペクトル法の二種類の線形理論.河川技術論文集.第 20 巻,pp.1-6, 2014.
- [12] [https://www.asahiglassplaza.net/catalogue/sougou\\_gi\\_2015/003a5\\_9p.htm](https://www.asahiglassplaza.net/catalogue/sougou_gi_2015/003a5_9p.htm).
- [13] ISO 20998-2,2013; Measurement and characterization of particles by acoustic method—Part.2:Guidelines for linear theory.
- [14] D.J.McClements; Principles of Ultrasonic Droplet Size Determination in Emulsions. *Lang-*



*muir*.Vol.12, pp.3454-3461, 1996.

## 第5章

# 基準スペクトル

### 5.1 序論

筆者らが開発した現場型超音波減衰スペクトル計を用いて減衰スペクトルを測定するためには、基準となるスペクトルが必要となる。基準となるスペクトルは濁りのない透明な水中で測定した周波数スペクトルを用いる。この周波数スペクトルが基準スペクトルである。Richards[1]は、濁りのない海水中を伝搬する超音波の減衰は第一に水温、次に塩分が影響すると指摘している。現場計測では水温や塩分を制御すること事実上困難なので、あらかじめ水温や塩分などの測定時の環境条件と周波数に依存する基準スペクトルの振幅を決定しておかなければならない。また、基準スペクトルの振幅は超音波減衰スペクトル計固有のものであり、その構造や使用条件にも依存する。本章では、次の条件での浮遊砂の計測に適用する基準スペクトルの振幅の実験式[2-4]を提案する。

1. 河川やダム貯水池での浮遊砂の計測
2. 感潮河川または海岸での浮遊砂の計測
3. フローセルによる浮遊砂の計測

河川やダム貯水池の計測では真水の基準スペクトル、感潮河川または海岸の計測では塩水の基準スペクトル、また、フローセルによる計測ではフローセルの基準スペクトルの実験式が必要となる。

### 5.2 真水の基準スペクトルの測定

#### 5.2.1 実験の目的

河川やダム貯水池において現場型超音波減衰スペクトル計を用いて浮遊砂を計測する場合は、水温と水圧の変化による影響を評価する必要がある。本節では真水の水温を変化させて基準スペクトルを測定し、水温の測定値から基準スペクトルの振幅を決定する実験式を求める。Richards[1]によれば水深が 100 m 以下では水圧が超音波の伝搬に与える影響は無視できるとされているが、実験に用いた超音波減衰スペクトル計のプロープはトランスデューサが直接水圧を受ける構造となっているため、基準スペクトルの振幅は水圧の影響を受ける。このため、本節では超音波減衰スペクトル計の測定範囲を水深 1~2 m とし、水圧が基準スペクトルの振幅に与える影響の評価については今後の課題とする。

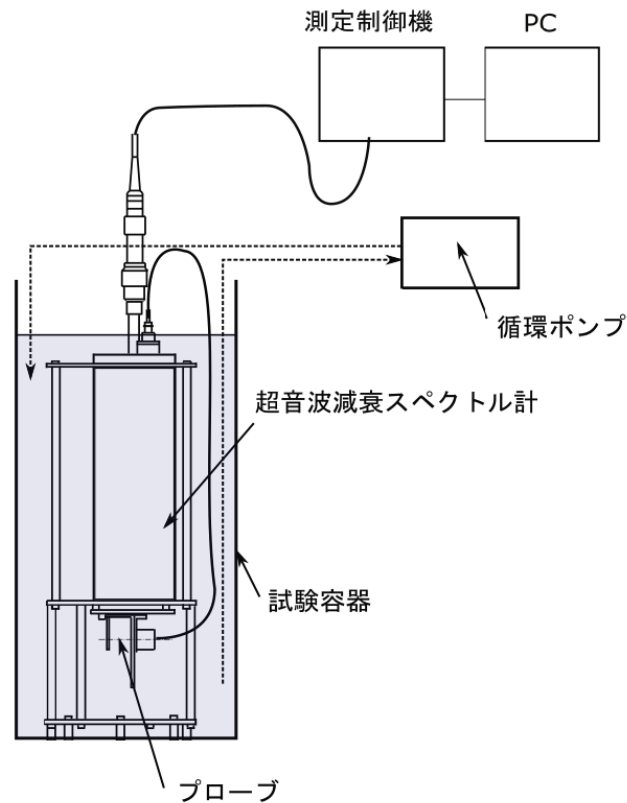


図 5.1 現場型超音波減衰スペクトル計の基準スペクトルの測定方法

## 5.2.2 実験方法

現場型超音波減衰スペクトル計の基準スペクトルの測定方法を図 5.1 に示す。試験容器は内径 380 mm、高さ 1030 mm の透明なアクリル製で、この容器に超音波減衰スペクトル計を設置して基準スペクトルを測定する。水中に含まれる微細な気泡が超音波の減衰に与える影響を防止するため、試験水は脱気水道水を使用する。水温は現場計測時の水温を考慮して決定する。カプセル・プローブ一体型の基準スペクトルの測定手順は以下のとおりである。

1. 脱気した水道水 120ℓ を試験容器に入れる。
2. 試験容器に超音波減衰スペクトル計を設置する。
3. 試験容器の試験水を循環ポンプで循環させながら水温を調整する。
4. 水温が所定の温度に達してから 60 分経過した後、基準スペクトルを 10 回測定する。
5. 3～4 を繰り返す。

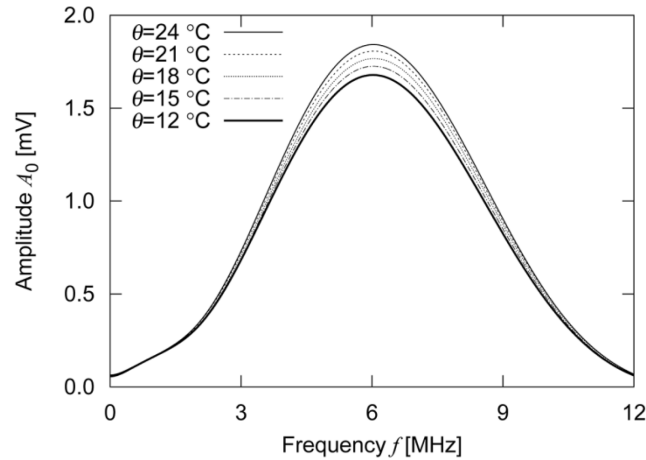


図 5.2 真水の基準スペクトルの測定結果

### 5.2.3 実験結果と考察

水温 12°C、15°C、18°C、21°C および 24°C の真水の基準スペクトルの実験結果を図 5.2 に示す。横軸は周波数  $f$ 、縦軸は基準スペクトルの振幅  $A_0$  である。基準スペクトルは中心周波数約 6MHz の対称な形となっており、水温が高くなるにしたがって基準スペクトルの振幅が増幅することがわかった。次に、5~8MHz まで 11 周波数帯での水温と基準スペクトルの振幅との関係を図 5.3~図 5.4 に示す。これらの図から基準スペクトルの振幅は周波数別に水温から決定することができることがわかった。

また、基準スペクトルの振幅は水温だけでなく超音波の伝搬距離と水の音波吸収係数およびトランスデューサの温度特性に依存するので、基準スペクトルの振幅  $A_0(\theta)$  は次式で表すことができる。

$$A_0(\theta) = A_{tr}(\theta) \cdot \exp(-2L \cdot \alpha_w) \quad (5.1)$$

ここで、 $A_{tr}(\theta)$  はトランスデューサが水温  $\theta$  の水中に発信した超音波の振幅[mV]、 $L$  は振動子と反射板との間の距離[m]、 $\alpha_w$  は水の音波吸収係数[Np・m<sup>-1</sup>]である。式(5.1)からトランスデューサが水中に発信した超音波の振幅は次式で算出することができる。ここでは、基準スペクトルの振幅に最も大きな影響を与えるトランスデューサが水中に発信した超音波の振幅  $A_{tr}(\theta)$  の実験式を検討する。

$$A_{tr}(\theta) = \frac{A_0(\theta)}{\exp(-2L \cdot \alpha_w)} \quad (5.2)$$

水温とトランスデューサが水中に発信した超音波の振幅  $A_{tr}(\theta)$  との関係を図 5.5~図 5.6 に示す。横軸は水温、縦軸はトランスデューサが水中に発信した超音波の振幅、第二縦軸は水の音波吸収係数を示す。これらの図から、水の音波吸収係数は周波数が大きくなるにしたがって増大するので、トランスデューサが水中に発信した超音波の振幅は周波数が高くなるにしたがって大きく減衰することがわかった。また、トランスデューサが水中に発信した超音波の振幅は水温に依

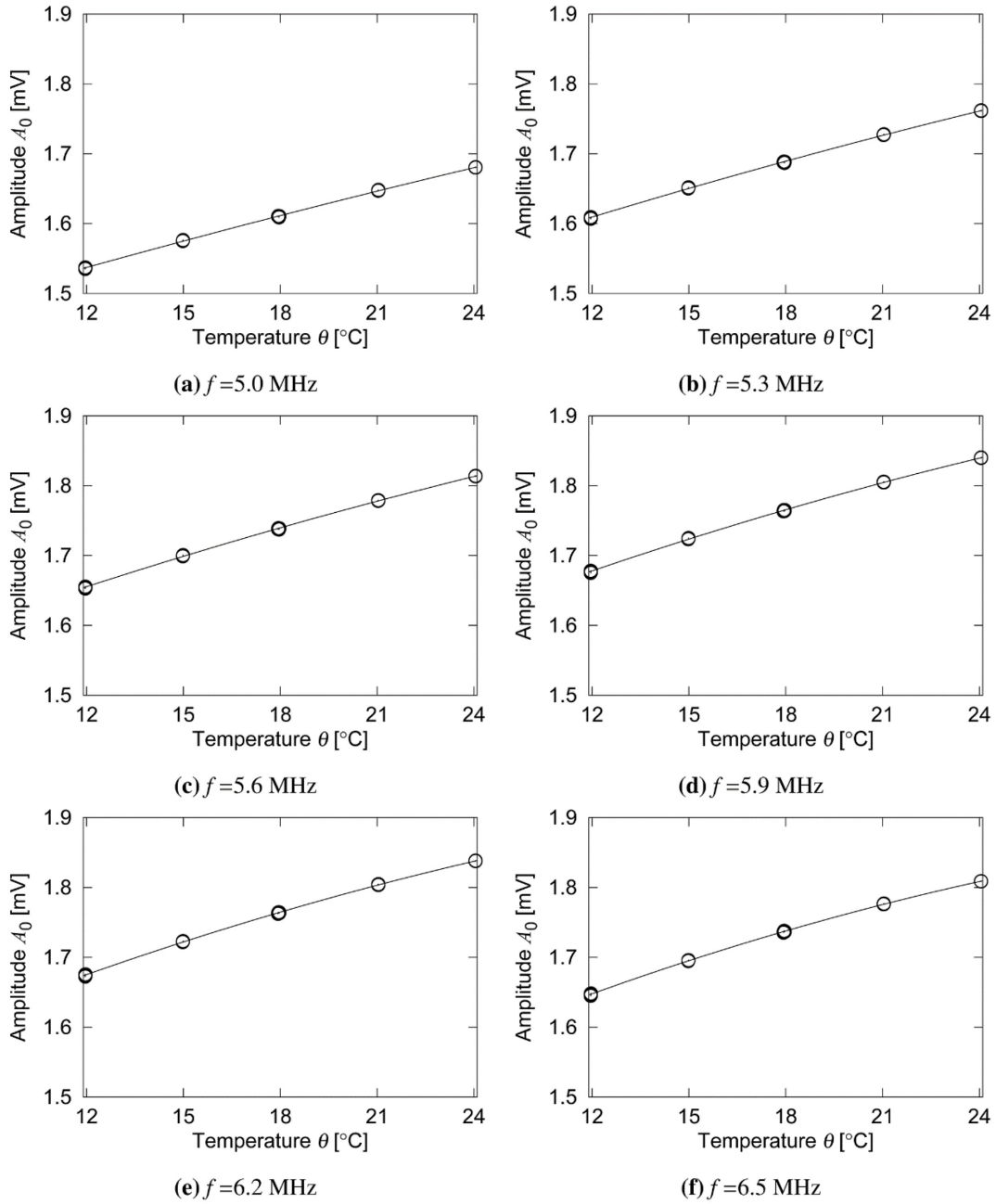


図 5.3 水温と基準スペクトルの振幅との関係(その1)

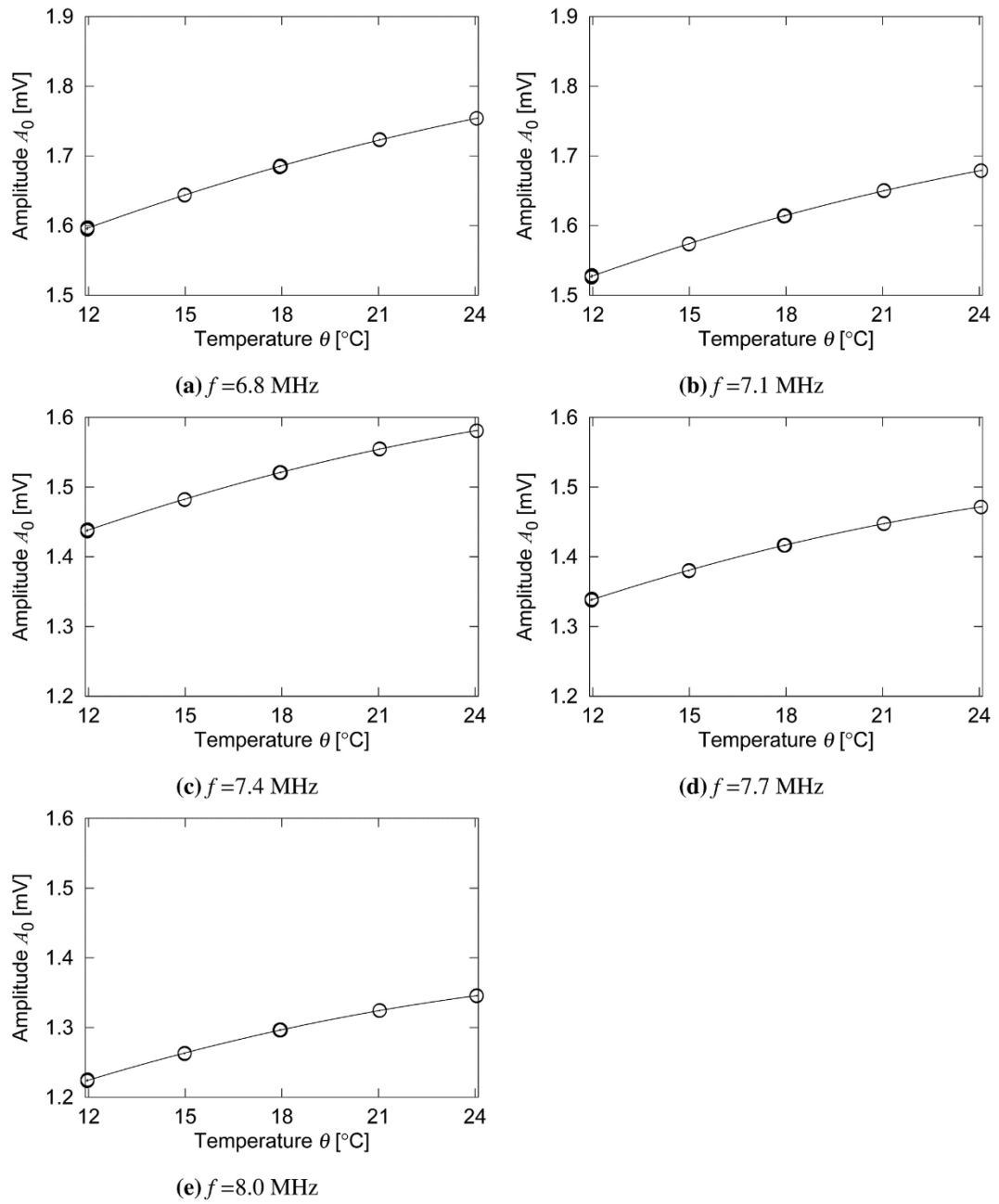


図 5.4 水温と基準スペクトルの振幅との関係(その 2)

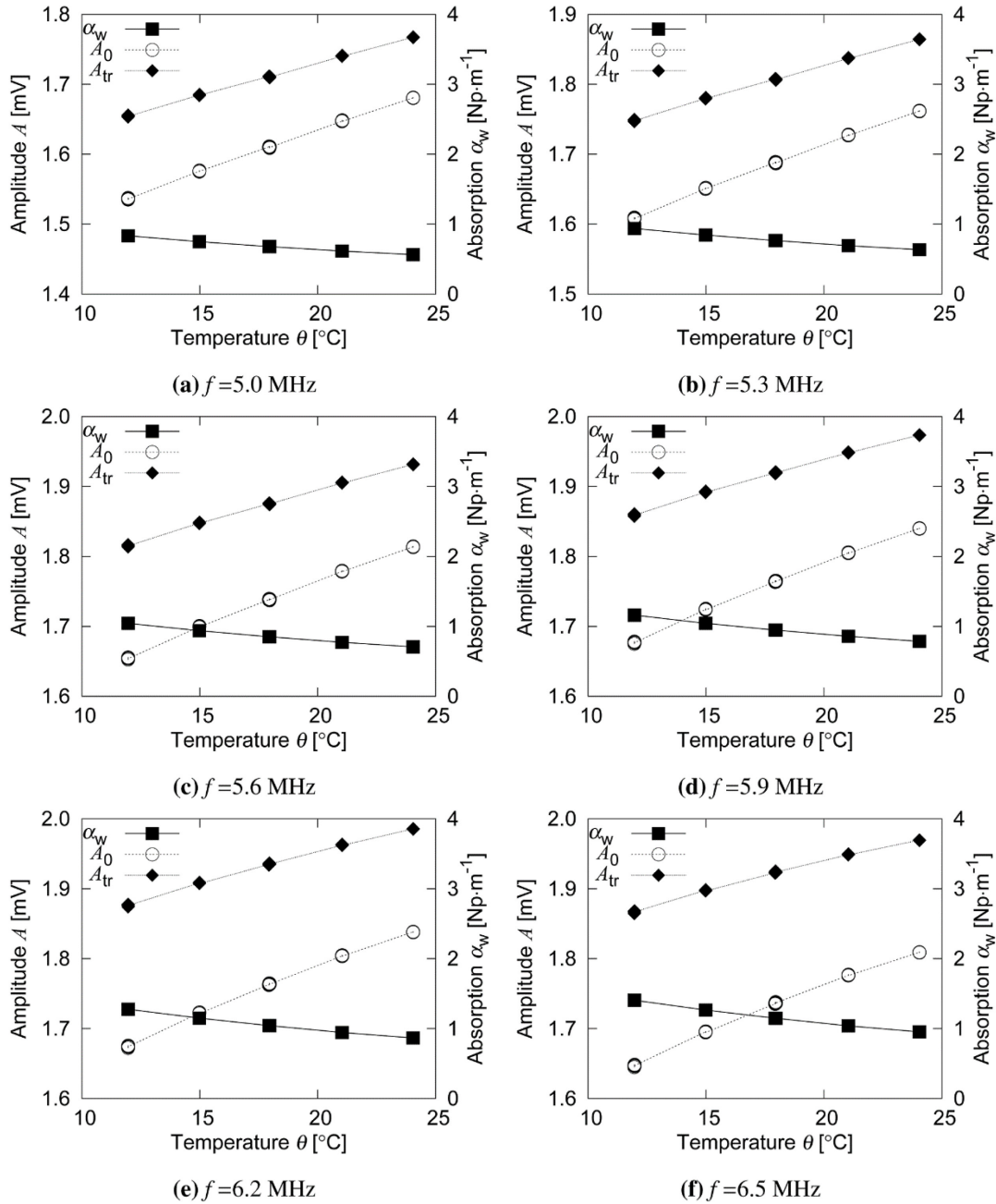


図 5.5 水温と水の音波吸収係数との関係、および水温と振動子が発信した基準スペクトルの振幅との関係(その1)

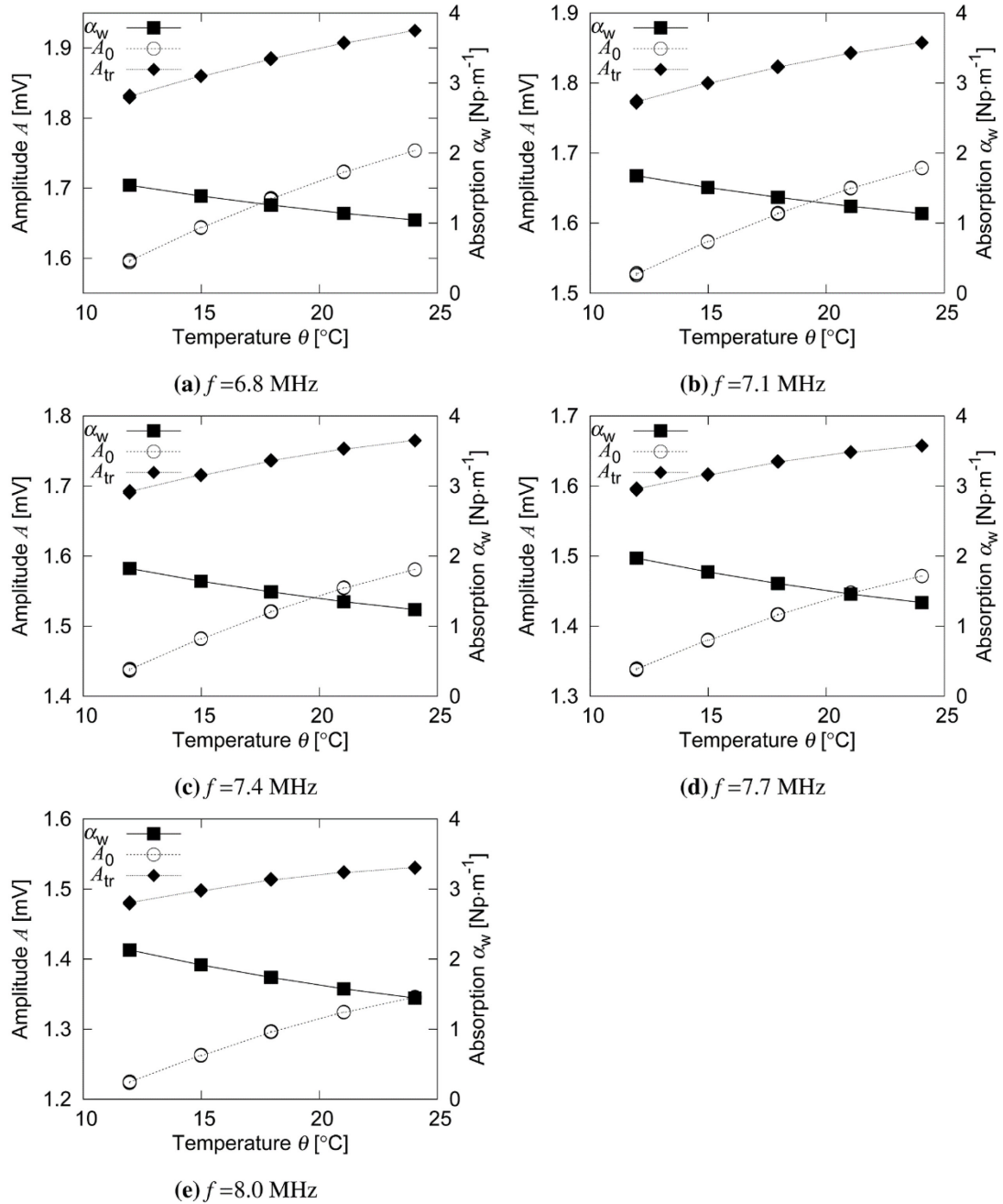


図 5.6 水温と水の音波吸収係数との関係、および水温と振動子が発信した基準スペクトルの振幅との関係(その 2)



存して変化していることがわかった。水の音波吸収係数は次式に示す Francois and Garrison の式[5]で算出する。

$$\alpha_w = \frac{A_1 P_1 f_1 f_i^2}{f_i^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f_i^2}{f_i^2 + f_2^2} + A_3 \cdot P_3 \cdot f_i^2 \quad (5.3)$$

ここで、

$$A_1 = \frac{8.86}{c} \times 10^{(0.78pH-5)}$$

$$P_1 = 1$$

$$f_1 = 2.8(S/35)^{0.5} 10^{(4-1245/(\theta+273))}$$

$$A_2 = 21.44 \frac{S}{c} (1 + 0.025\theta)$$

$$P_2 = 1 - 1.37 \times 10^{-4} D + 6.2 \times 10^{-9} D^2$$

$$f_2 = \frac{8.17 \times 10^{(8-1990/(\theta+273))}}{1 + 0.0018(S - 35)}$$

$$A_3 = 4.937 \times 10^{-4} - 2.59 \times 10^{-5} \theta + 9.11 \times 10^{-7} \theta^2 - 1.50 \times 10^{-8} \theta^3 (\theta \leq 20)$$

$$A_3 = 3.964 \times 10^{-4} - 1.146 \times 10^{-5} \theta + 1.45 \times 10^{-7} \theta^2 - 6.5 \times 10^{-10} \theta^3 (\theta > 20)$$

$$P_3 = 1 - 3.83 \times 10^{-5} D + 4.9 \times 10^{-10} D^2$$

$\alpha_w$  は音波吸収係数[ $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ ]、 $f$  は周波数[kHz]、 $\theta$  は水温[ $^{\circ}\text{C}$ ]、 $S$  は塩分[psu]、 $D$  は水深[m]である。式(5.3)の第一項は海水中のホウ酸の寄与、第二項は同じく硫酸マグネシウムの寄与、そして第三項は真水の音波吸収係数を示す。

#### 5.2.4 真水の基準スペクトルの実験式

真水の基準スペクトルの振幅  $A_0(\theta)$  はトランスデューサが水中に発信した超音波の振幅  $A_T(\theta)$ 、トランスデューサと反射板との距離  $L$ 、および水の音波吸収係数  $\alpha_w$  から式(5.1)を用いて算出する。トランスデューサが水中に発信した基準スペクトルの振幅  $A_T(\theta)$  は水温に依存することがわかったので、 $A_T(\theta)$  の実験結果に次式を適用して多変量解析を行い、実験式の係数を決定した。

$$A_T(\theta) = a_1 + a_2 \cdot \theta + a_3 \cdot \theta^2 \quad (5.4)$$

ここで、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  は実験によって決定する係数である。

真水の基準スペクトルの解析結果を表 5.1 に示す。全周波数において振幅の測定値と推定値との標準誤差は 1/1000 以下であり、この実験式を用いて基準スペクトルの振幅を正確に推定できることがわかった。

表 5.1 真水の基準スペクトルの振幅の解析結果

$i$	周波数 $f$ [MHz]	$a_1$	$a_2$	$a_3$	決定係数	標準誤差
1	5.0	1.538	0.00993	-1.797E-05	0.9994	0.00093
2	5.3	1.621	0.01121	-4.625E-05	0.9994	0.00096
3	5.6	1.679	0.01228	-7.529E-05	0.9994	0.00095
4	5.9	1.716	0.01332	-1.093E-04	0.9994	0.00092
5	6.2	1.728	0.01411	-1.415E-04	0.9994	0.00087
6	6.5	1.716	0.01467	-1.723E-04	0.9994	0.00081
7	6.8	1.680	0.01502	-2.013E-04	0.9994	0.00075
8	7.1	1.626	0.01490	-2.198E-04	0.9994	0.00071
9	7.4	1.552	0.01440	-2.309E-04	0.9992	0.00068
10	7.7	1.466	0.01361	-2.346E-04	0.9989	0.00071
11	8.0	1.363	0.01256	-2.326E-04	0.9981	0.00074

## 5.3 塩水の基準スペクトルの測定

### 5.3.1 実験の目的

感潮河川または海岸での浮遊砂の計測では、基準スペクトルの振幅は水温だけでなく塩分の影響を受ける。塩分は水の密度や音速にも影響を与えることから、基準スペクトルに大きな影響を与える要因となる。本節では、市販の食塩を加えた水道水を脱気した試験水を用いて基準スペクトルを測定し、塩水の基準スペクトルの実験式を求める。

### 5.3.2 実験方法

実験方法は 5.2.2 項による。

塩分は 0 psu、10 psu、20 psu、30 psu および 40 psu とし、水温は現場計測時の水温を考慮して決定する。塩水の基準スペクトルの測定実験の概要を表 5.2 に示す。

### 5.3.3 実験結果

水温 24°C で、塩分が 0 psu、10 psu、20 psu、30 psu および 40 psu の基準スペクトルの振幅の測定結果を図 5.7 に示す。水温が一定の場合、基準スペクトルの振幅は塩分の増加とともに増幅することがわかった。次に、5~8MHz までの 11 周波数帯の水温と基準スペクトルの振幅との関係を図 5.8~図 5.9 に示す。これらの図から水温一定の基準スペクトルの振幅は塩分の増加によって増幅するが、その増幅の大きさは水温が高くなるほど減少することがわかった。また、塩

表 5.2 塩水の基準スペクトル測定実験の概要

No	Date	Salinity[psu]	$\theta$ [°C]					Notes
1	20151006	40	24.0	21.0	18.0	15.0	12.0	degassedtap-water
2	20151007	30	24.0	21.0	18.0	15.0	12.0	degassedtap-water
3	20151008	20	24.0	21.0	18.0	15.0 <td 12.0	degassedtap-water	
4	20151009	10	24.0	21.0	18.0	15.0	12.0	degassedtap-water
5	20151013	0	24.0	21.0	18.0	15.0	12.0	degassedtap-water

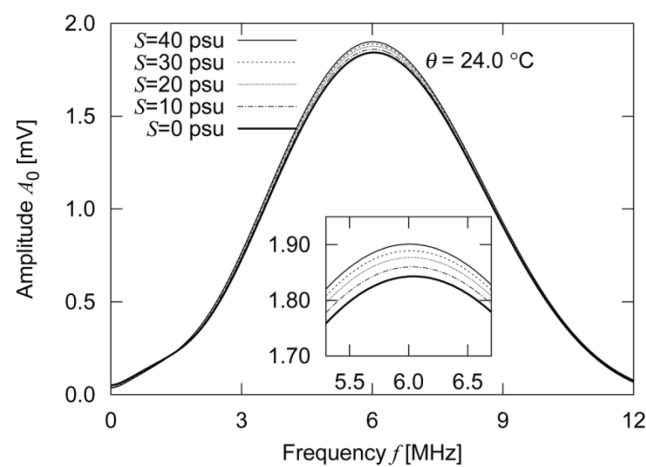


図 5.7 塩水の基準スペクトルの測定結果

分と基準スペクトルの振幅との関係を図 5.10～図 5.11 に示す。これらの図から塩分が高くなるにしたがって、基準スペクトルの振幅に与える水温の影響が小さくなる傾向があることがわかった。

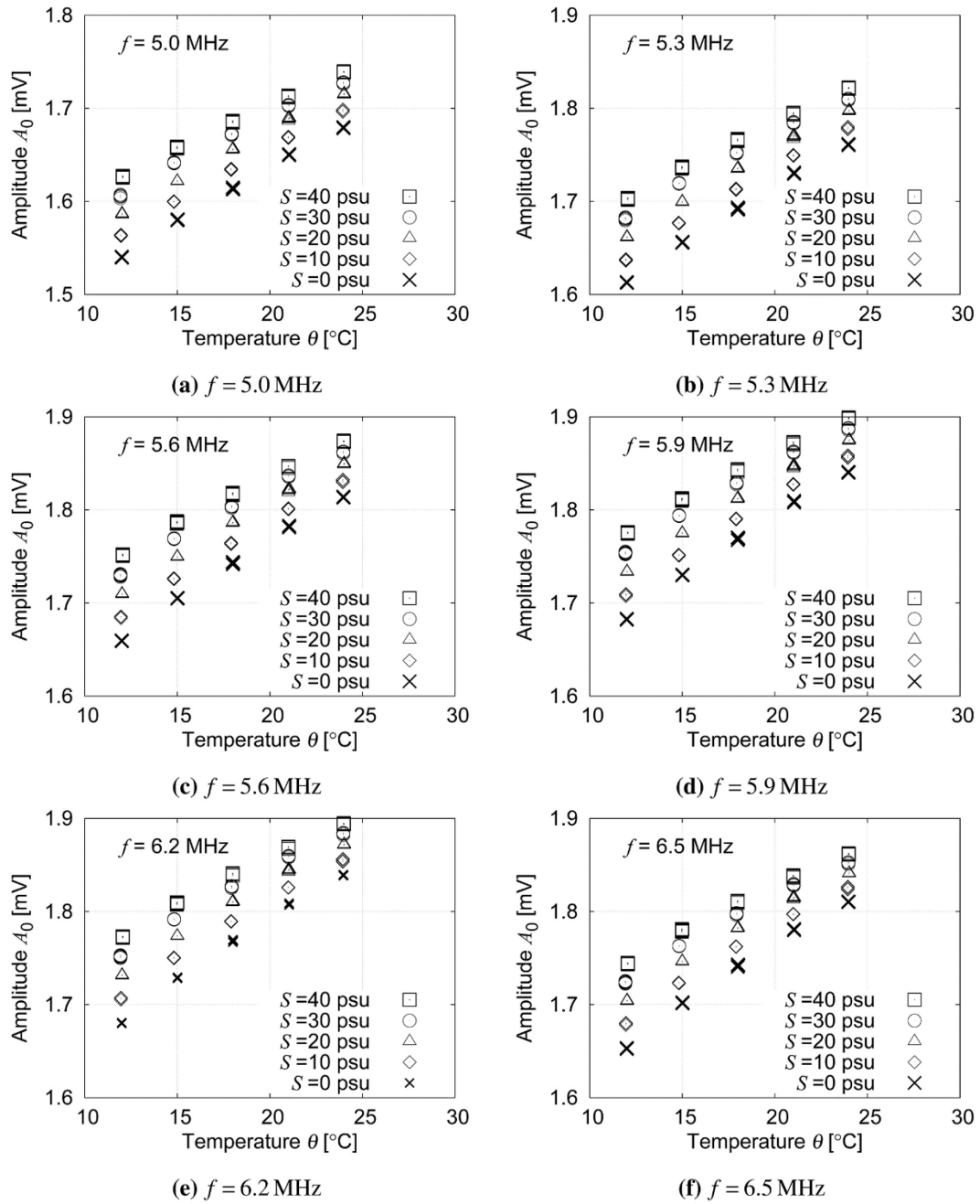


図 5.8 水温と塩水の基準スペクトルの振幅の関係(その1)

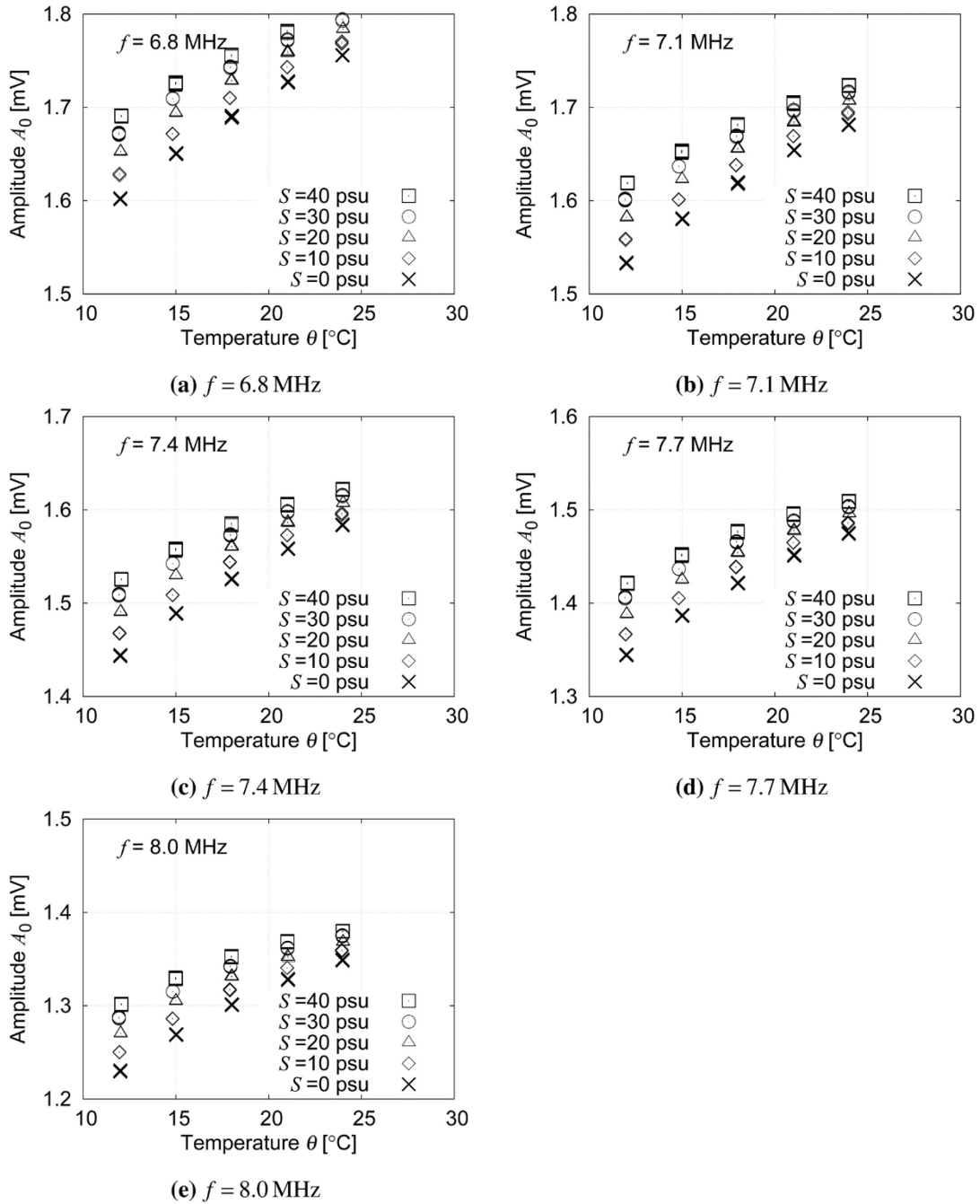


図 5.9 水温と塩水の基準スペクトルの振幅との関係(その 2)

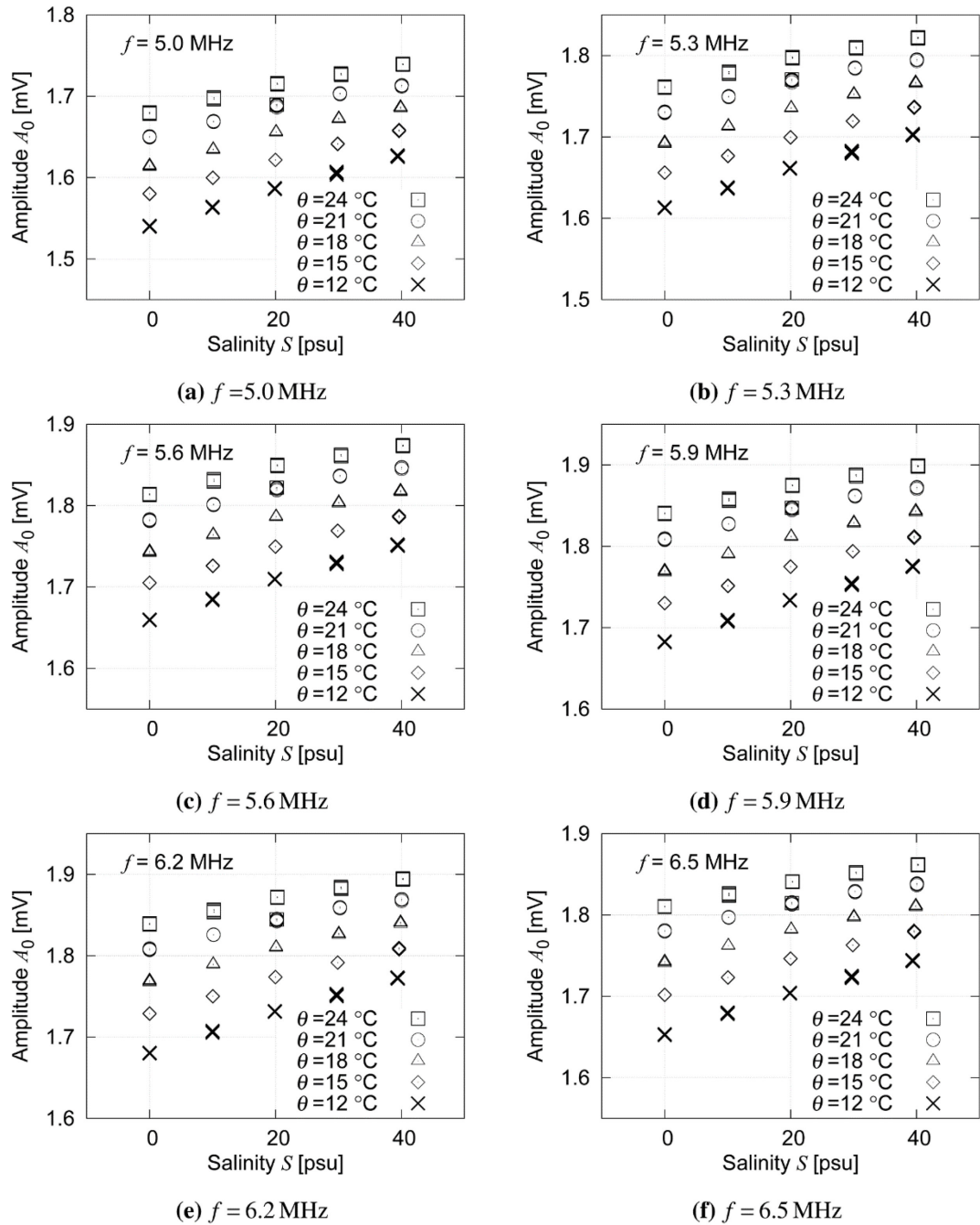


図 5.10 塩分と基準スペクトルの振幅の関係(その1)

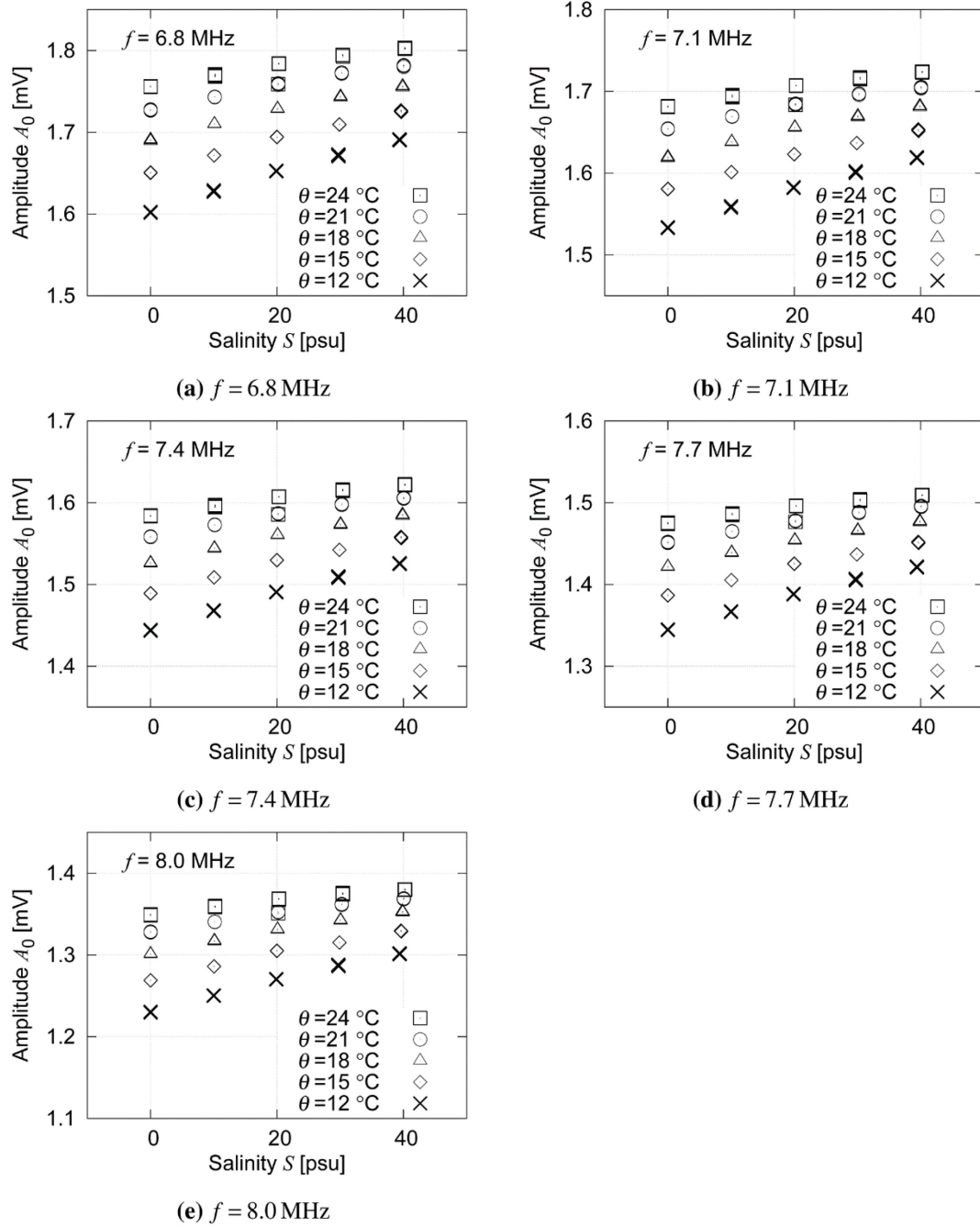


図 5.11 塩分と基準スペクトルの振幅との関係(その 2)

### 5.3.4 塩分による基準スペクトルの増幅係数

塩分による基準スペクトルの増幅係数  $\psi$  を次式で定義し、塩水の基準スペクトルの測定結果からこの増幅係数の実験式を検討する。

$$\psi = \ln \left( \frac{A_0(\theta, S)}{A_0(\theta, 0)} \right) \quad (5.5)$$

ここで、 $A_0(\theta, S)$  は水温  $\theta$ 、塩分  $S$  の基準スペクトルの振幅、 $A_0(\theta, 0)$  は水温  $\theta$ 、塩分  $S=0$  の真水の基準スペクトルの振幅である。

水温や塩分によって水の密度や水中の音速が変化するので、まず、水の密度と基準スペクトルの増幅係数との関係を検討する。水の密度は Fofonoff and Millard [6] の式から算出する。水の密度の算定式を次式に示す。

$$\rho_l = \rho_w + A_d S + B_d S^{1.5} + C_d S^2 \quad (5.6)$$

ここで、 $\rho_l$  は水の密度 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]、 $\rho_w$  は真水の密度 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]、 $A_d$ 、 $B_d$ 、 $C_d$  は定数で、それぞれの算定式は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \rho_w = & 999.842594 + 6.793952 \times 10^{-2} \theta - 9.095290 \times 10^{-3} \theta^2 \\ & + 1.001685 \times 10^{-4} \theta^3 - 1.120083 \times 10^{-6} \theta^4 + 6.536332 \times 10^{-9} \theta^5 \end{aligned}$$

$$A_d = 0.824493 - 4.0899 \times 10^{-3} \theta + 7.6438 \times 10^{-5} \theta^2 - 8.2467 \times 10^{-7} \theta^3 + 5.3875 \times 10^{-9} \theta^4$$

$$B_d = -5.72466 \times 10^{-3} + 1.0227 \times 10^{-4} \theta - 1.6546 \times 10^{-6} \theta^2$$

$$C_d = 4.8314 \times 10^{-4}$$

水の密度と基準スペクトルの増幅係数  $\psi$  との関係を図 5.12～図 5.13 に示す。水温が一定の場合は、すべての周波数において水の密度  $\rho_l$  と基準スペクトルの増幅係数  $\psi$  は正の相関があることがわかった。

次に、水中の音速と基準スペクトルの増幅係数との関係を検討する。水中の音速  $c$  は Chen and Millele [7] と Wong and Zhu [8] の式から算出する。水中の音速の算定式を次式に示す。

$$c = C_w(\theta, P) + A(\theta, P) + B(\theta, P) S^{3/2} + D(\theta, P) S^2 \quad (5.7)$$

ここで、 $c$  は音速 [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]、 $S$  は塩分 [psu]、 $\theta$  は水温 [ $^{\circ}\text{C}$ ]、 $P$  は水圧 [bar] を示す。

$$\begin{aligned} C_w(\theta, P) = & 1402.388 + 5.03711 \theta - 5.80852 \times 10^{-2} \theta^2 \\ & + 3.3420 \times 10^{-4} \theta^3 - 1.47800 \times 10^{-6} \theta^4 + 3.1464 \times 10^{-9} \theta^5 \\ & + (0.153563 + 6.8982 \times 10^{-4} \theta - 8.1788 \times 10^{-6} \theta^2 + 1.3621 \times 10^{-7} \theta^3 \\ & - 6.1185 \times 10^{-10} \theta^4) P + (3.1260 \times 10^{-5} - 1.7107 \times 10^{-6} \theta \\ & + 2.5974 \times 10^{-8} \theta^2 - 2.5335 \times 10^{-10} \theta^3 + 1.0405 \times 10^{-12} \theta^4) P^2 \\ & + (-9.7729 \times 10^{-9} + 3.8504 \times 10^{-10} \theta - 2.3643 \times 10^{-12} \theta^2) P^3 \end{aligned}$$



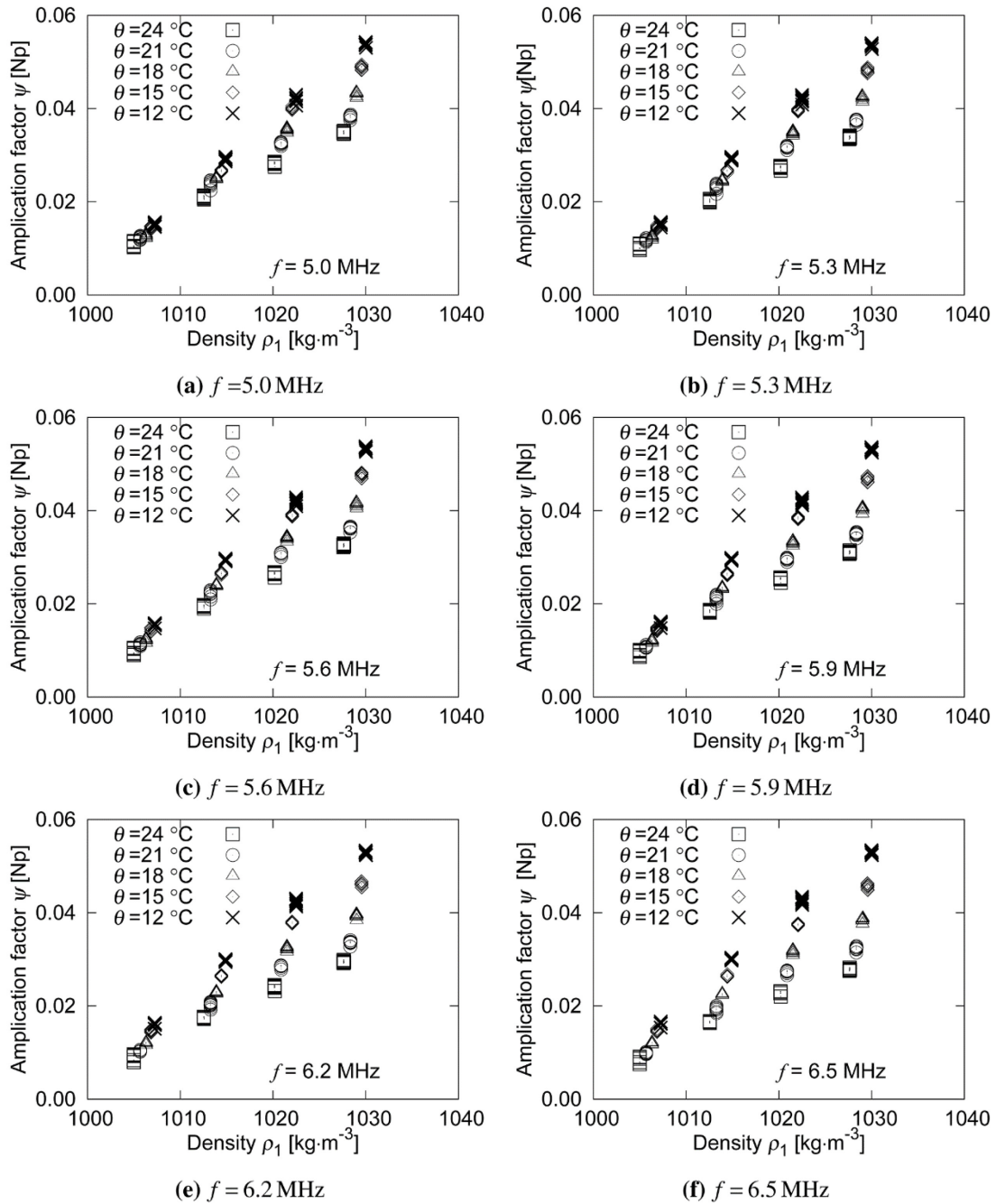


図 5.12 水の密度と基準スペクトルの増幅係数との関係(その1)

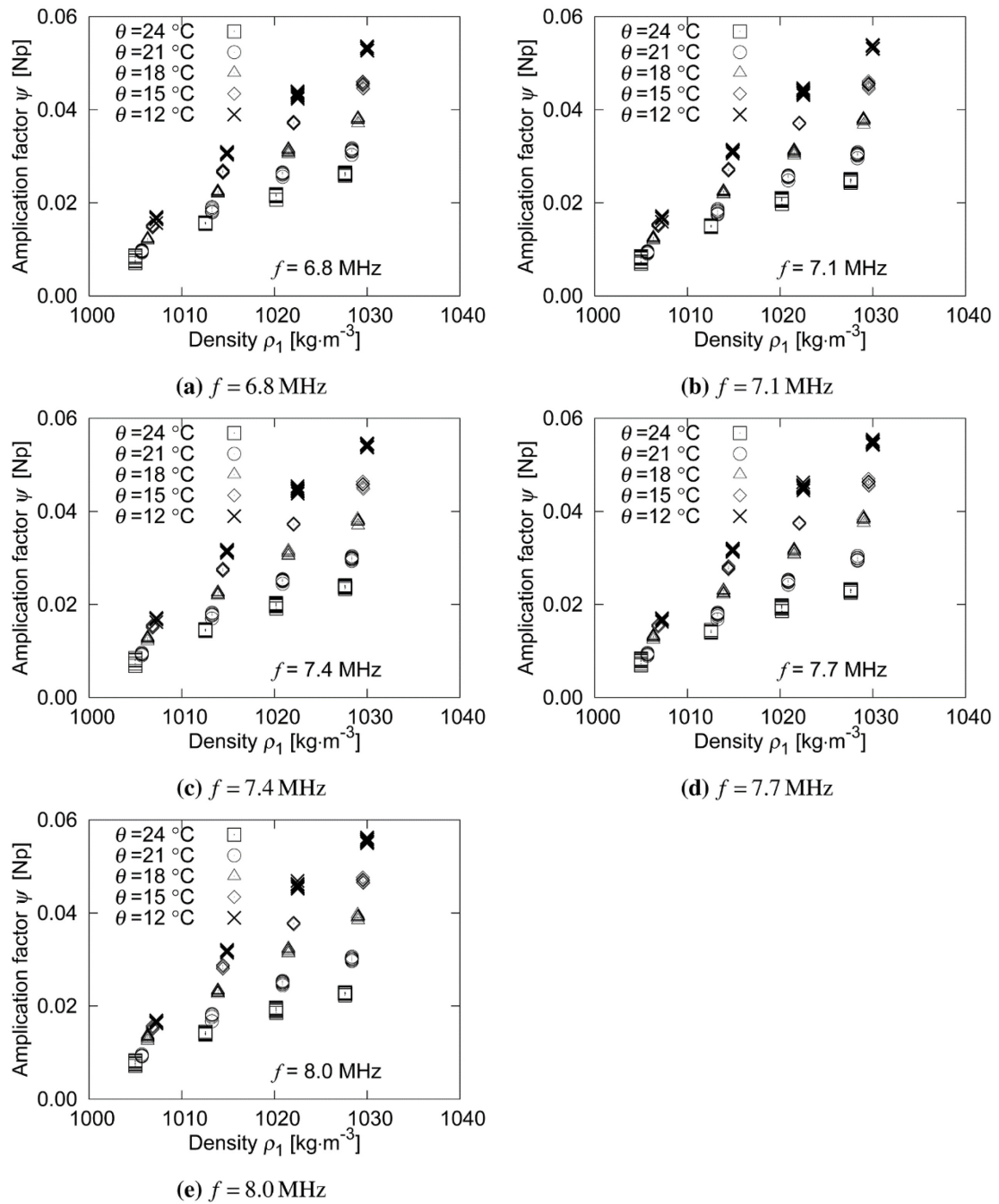


図 5.13 水の密度と基準スペクトルの増幅係数の関係(その 2)

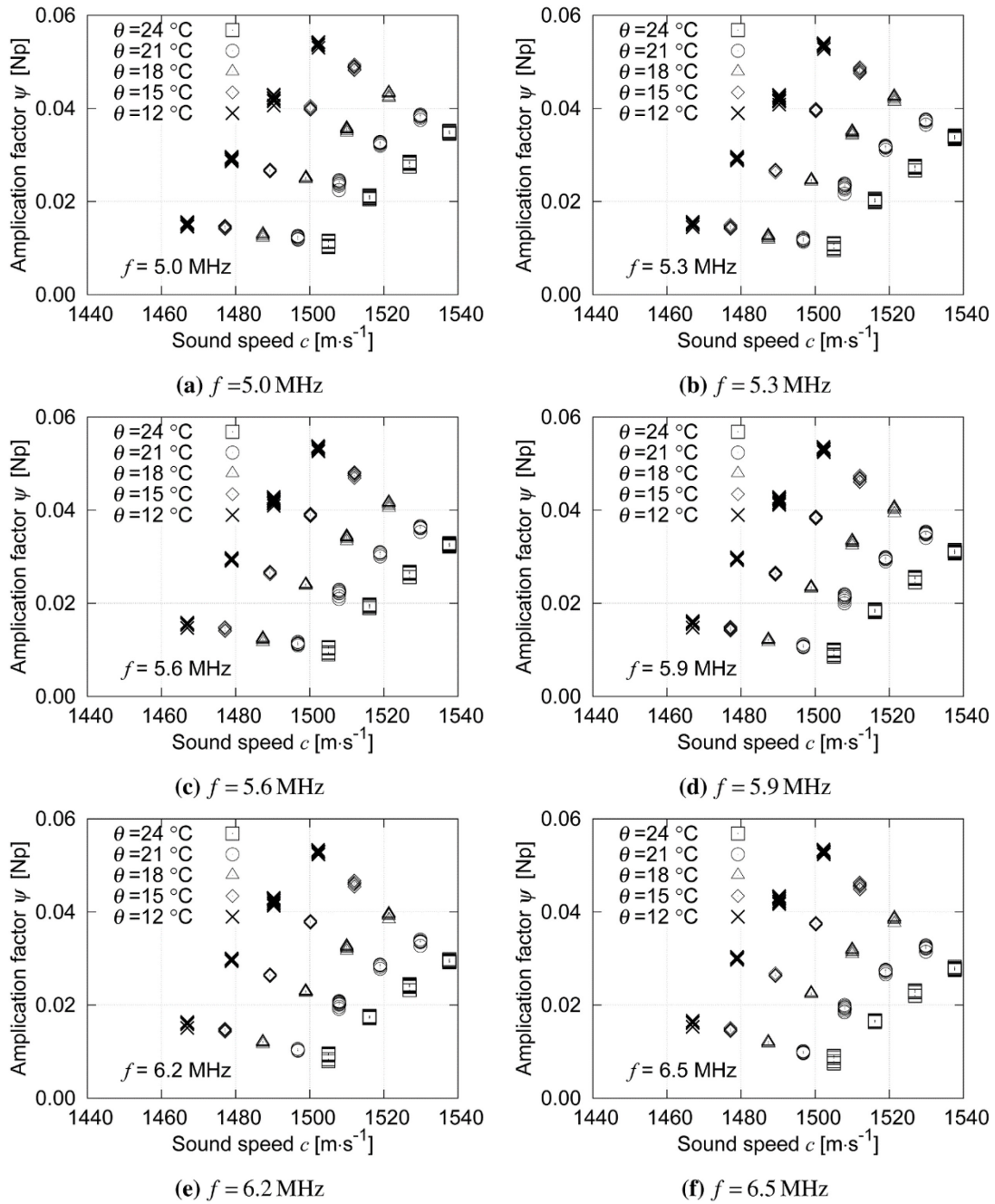


図 5.14 音速と基準スペクトルの増幅係数との関係(その1)

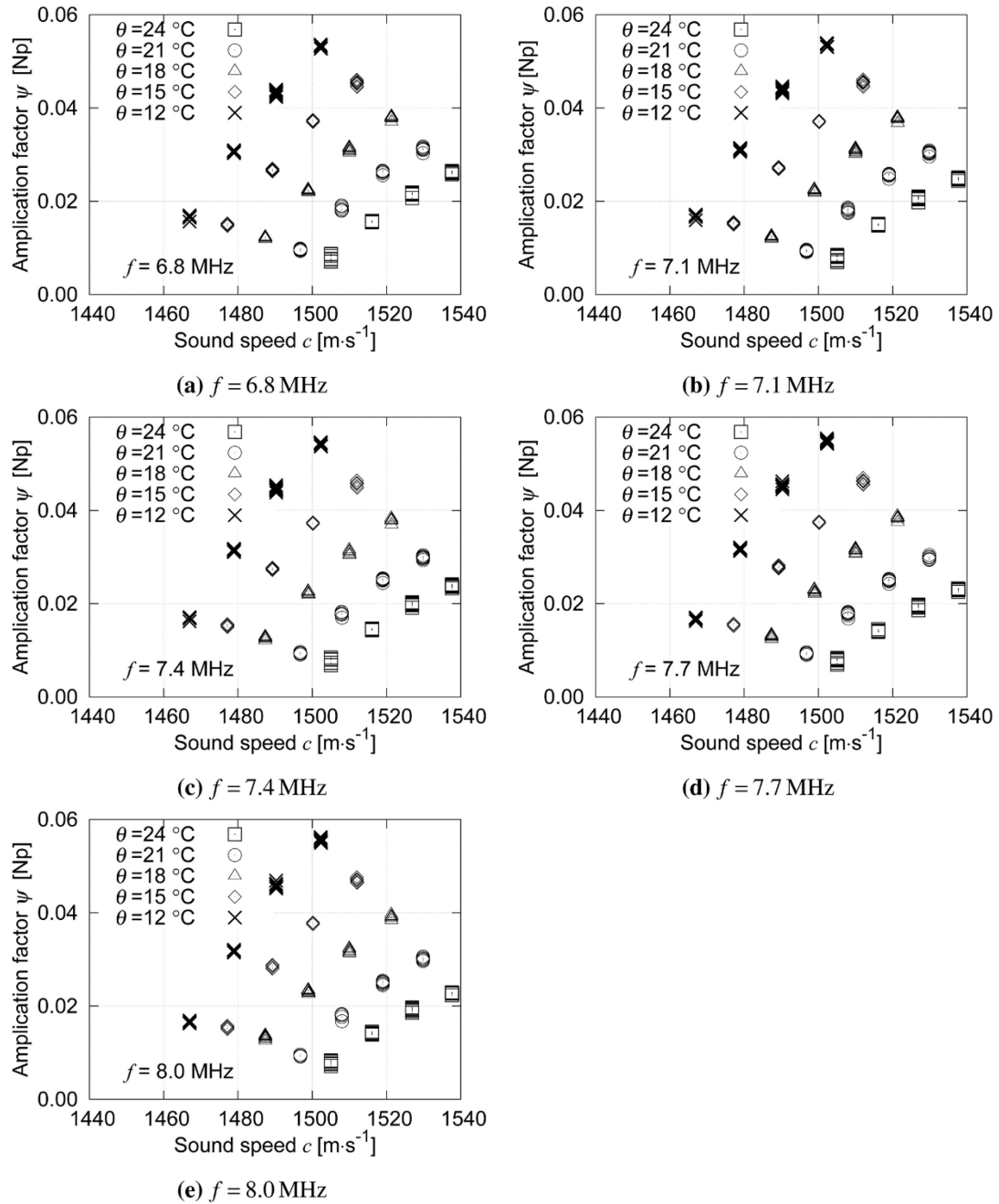


図 5.15 音速と基準スペクトルの増幅係数の関係(その 2)

表 5.3 塩分による基準スペクトルの増幅係数  $\psi$  の解析結果

周波数 $f$ MHz	$b_1$	$b_2$ $\times 10^{-5}$	$b_3$ $\times 10^{-2}$	$b_4$ $\times 10^{-5}$	決定係数	標準誤差
5.0	-15.329	1.5130	1.9510	-1.9374	0.9971	0.000667
5.3	-15.487	1.5315	1.9735	-1.9617	0.9975	0.000618
5.6	-15.654	1.5513	1.9976	-1.9879	0.9978	0.000565
5.9	-15.912	1.5804	2.0341	-2.0267	0.9983	0.000503
6.2	-16.302	1.6228	2.0882	-2.0831	0.9985	0.000462
6.5	-16.945	1.6901	2.1760	-2.1729	0.9987	0.000438
6.8	-17.831	1.7813	2.2958	-2.2944	0.9987	0.000431
7.1	-18.789	1.8784	2.4243	-2.4239	0.9986	0.000447
7.4	-19.921	1.9917	2.5754	-2.5751	0.9985	0.000485
7.7	-20.894	2.0884	2.7046	-2.7038	0.9978	0.000595
8.0	-21.806	2.1780	2.8248	-2.8229	0.9968	0.000735

$$\begin{aligned}
A(\theta, P) = & (9.4742 \times 10^{-5} - 1.2580 \times 10^{-5}\theta - 6.4885 \times 10^{-8}\theta^2 \\
& + 1.0507 \times 10^{-8}\theta^3 - 2.0122 \times 10^{-10}\theta^4)P + (-3.9064 \times 10^{-7} \\
& + 9.1041 \times 10^{-9}\theta - 1.6002 \times 10^{-10}\theta^2 + 7.988 \times 10^{-12}\theta^3)P^2 \\
& + (1.100 \times 10^{-10} + 6.649 \times 10^{-12}\theta - 3.389 \times 10^{-13}\theta^2)P^3
\end{aligned}$$

$$B(\theta, P) = (7.3637 \times 10^{-5} + 1.7945 \times 10^{-7}\theta)P$$

$$D(\theta, P) = -7.9836 \times 10^{-6}P$$

この公式は、 $0 \leq S \leq 40$  psu、 $0 \leq \theta \leq 40^\circ\text{C}$ 、 $0 \leq P \leq 100$  bars の範囲で適用できる。

音速と基準スペクトルの増幅係数との関係を図 5.14～図 5.15 に示す。塩分が一定の場合、基準スペクトルの増幅係数は音速の増大するにしたがって低下することがわかった。

以上の検討結果から、基準スペクトルの増幅係数は水の密度  $\rho_l$  と音速  $c$  に依存することがわかったので、基準スペクトルの増幅係数  $\psi$  の実験結果に次式を適用して多変量解析を行い、実験式の係数を決定する。

$$\psi = b_1 + b_2 \cdot \rho_l^2 + b_3 \cdot c + b_4 \cdot Z \quad (5.8)$$

ここで、 $Z(=\rho_l c)$  は水の固有音響インピーダンス、 $b_1 \sim b_4$  は実験から決定する係数である。基準スペクトルの増幅係数の解析結果を表 5.3 に示す。すべての周波数で係数  $b_2$  と  $b_3$  は正の値、 $b_4$  は負の値となり、増幅係数は水の密度の二乗と音速に比例して増加し、水の固有音響インピーダンスに比例して減少する結果が示された。図 5.16～図 5.17 は式(5.8)から求めた基準スペクトルの増幅係数の推定値( $\psi_c$ )と実験値との比較を示す。すべての周波数において、実験式を用いて水の密度と音速から塩水の基準スペクトルの増幅係数が推定できることがわかった。

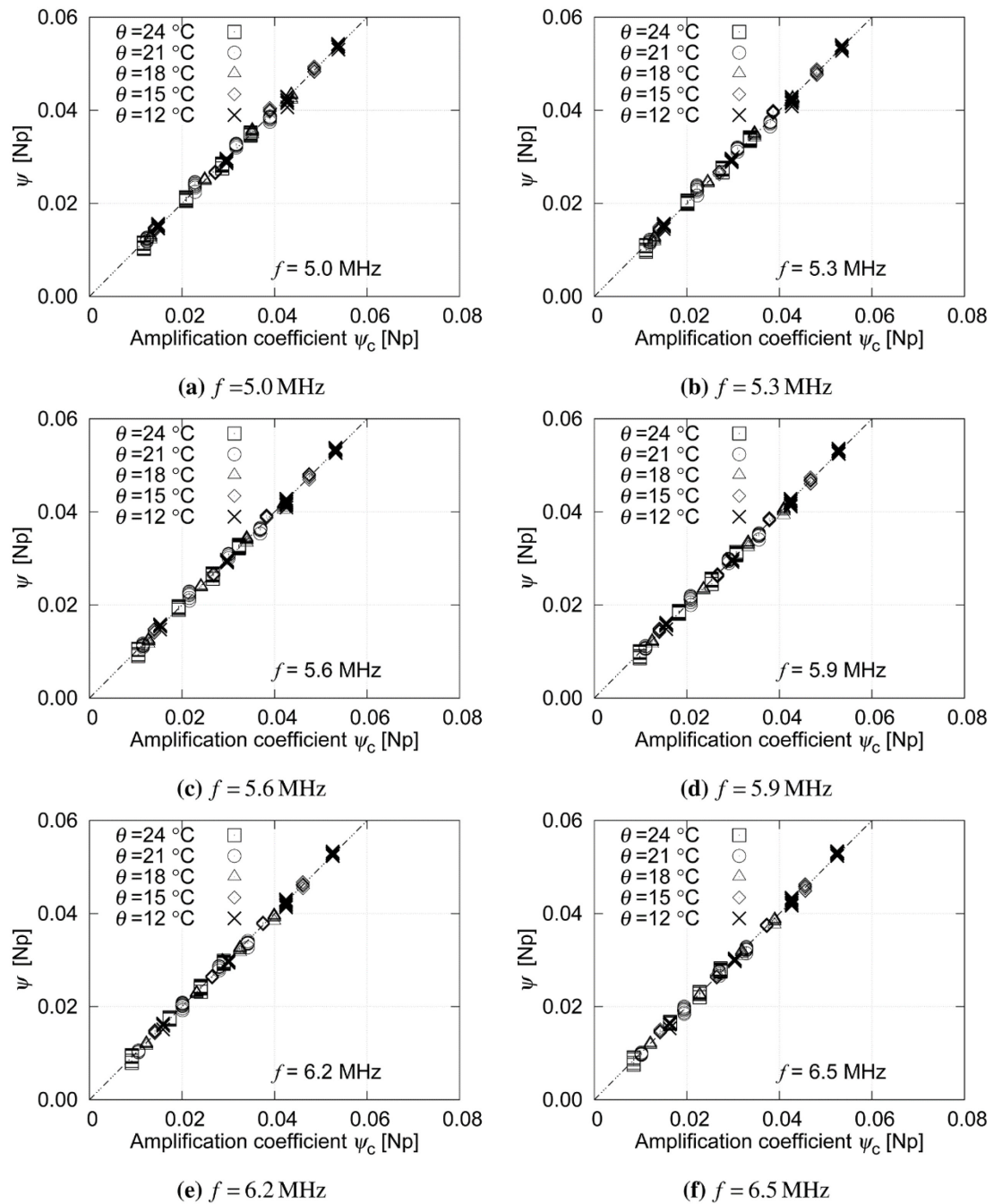


図 5.16 基準スペクトルの増幅係数の解析結果(その1)

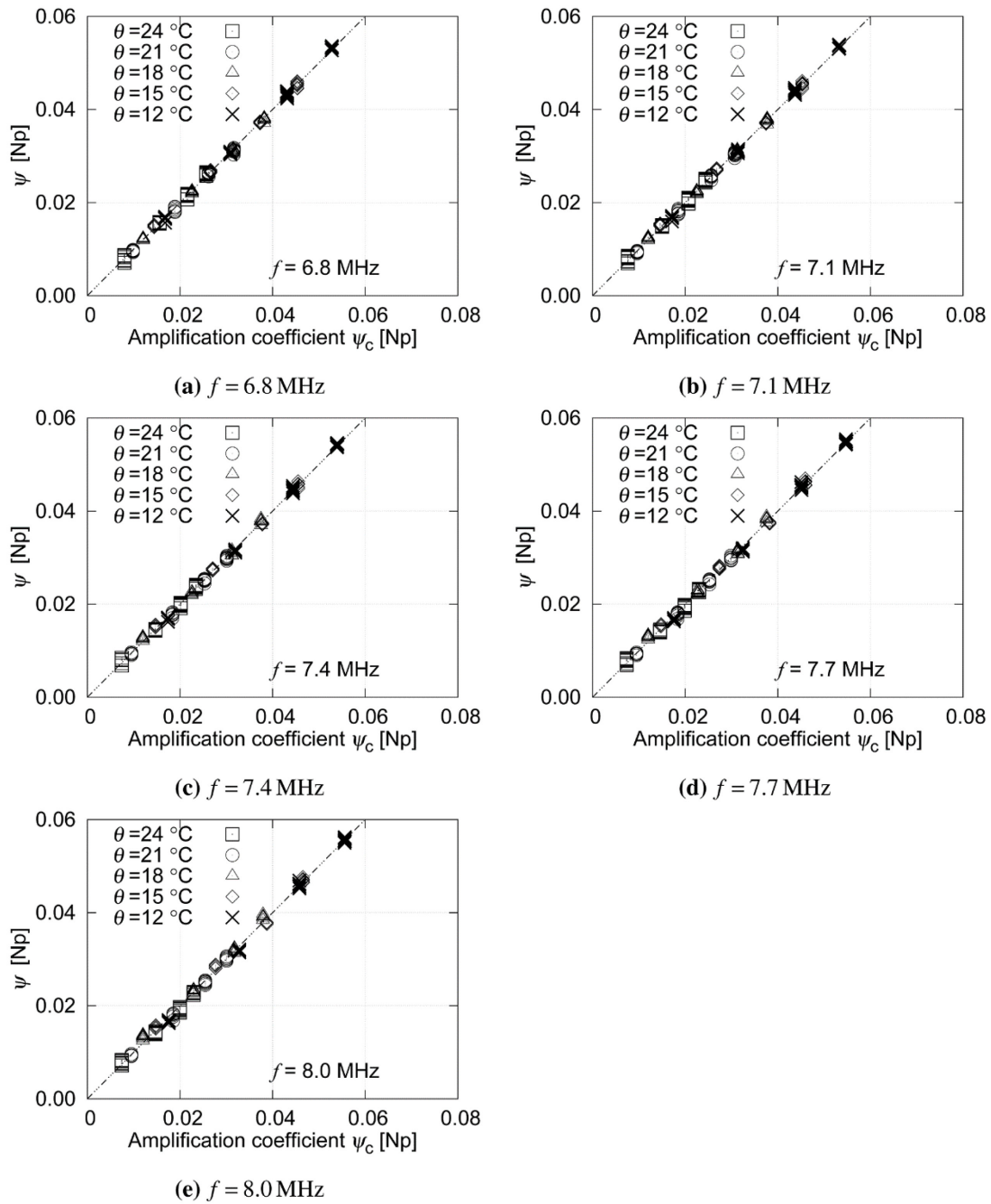


図 5.17 基準スペクトルの増幅係数の解析結果(その 2)

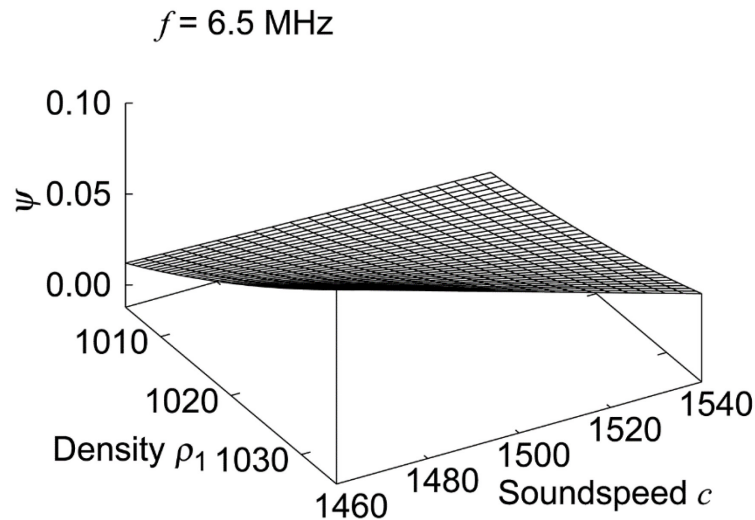


図 5.18 水の密度、音速と基準スペクトルの増幅係数  $\psi$  との関係( $f=6.5\text{MHz}$ )

次に図 5.18 に水の密度と超音波の音速と塩水の基準スペクトルの増幅係数との関係を示す。増幅係数  $\psi$  は水の密度の増加によって増大し、音速が速くなることによって低下することがわかった。

### 5.3.5 塩水の基準スペクトルの振幅の実験式

塩水の基準スペクトルの振幅は塩分  $S=0$  の真水の基準スペクトルの振幅に塩分による増幅係数を乗じて算出することができる。また、塩分による増幅係数は式(5.8)を用いて水の密度と音速から算出することができる。塩水の基準スペクトルの振幅  $A_0(\theta, S)$  を次式に示す。

$$A_0(\theta, S) = A_0(\theta, 0) \cdot \exp(\psi) \quad (5.9)$$

## 5.4 フローセルの基準スペクトルの測定

### 5.4.1 実験の目的

河川や海域では浮遊砂の濃度と粒度分布は流速に大きく依存するためその測定は流水中で行う必要がある。また、河川断面の平均浮遊砂濃度を測定するためには流心位置で測定も必要となってくる。さらには水深の浅い山地河川においても測定できる方法が必要である。これらの解決策として河川水をポンプで採水して管路に導き、流速を低下させることなく管路にとりつけたフローセルで浮遊砂を測定する方法がある。本節では、パイプフローの流速を変化させてフローセルの基準スペクトルを測定し、流速等の影響を考慮した基準スペクトルの実験式を求める。



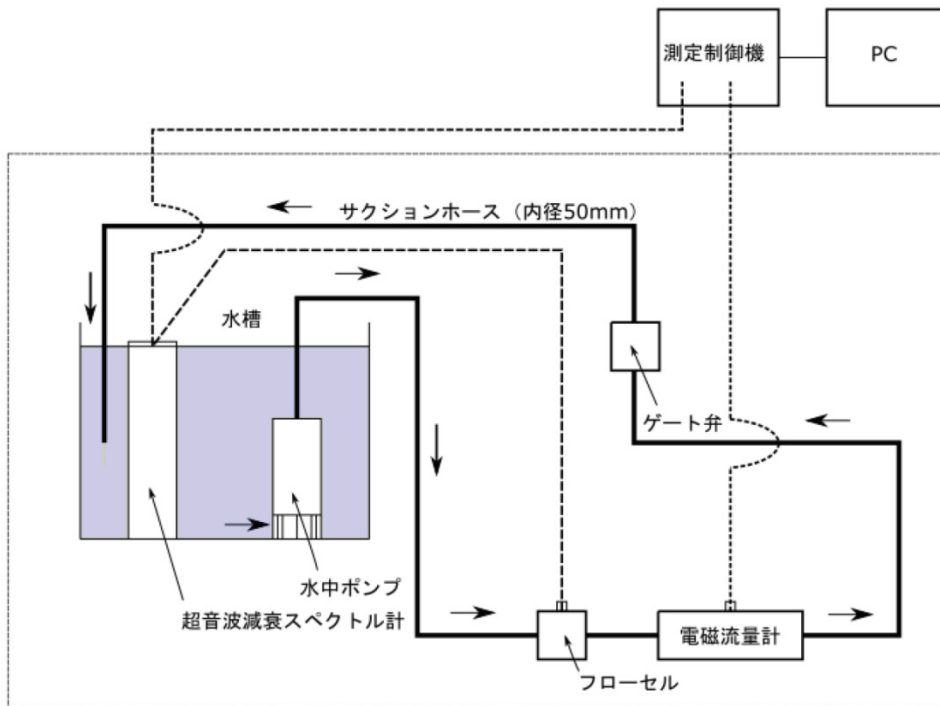


図 5.19 フローセルの基準スペクトルの実験装置

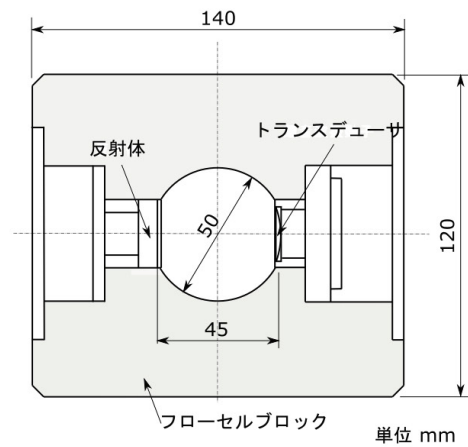


図 5.20 フローセルおよびフローセルの断面図

表 5.4 フローセルの基準スペクトル測定実験

No	Date	$\theta$ [°C]	$V$ [m·s <sup>-1</sup> ]
1	20160913	10.0	1.0 2.0 3.0
2	20160914	15.0	1.0 2.0 3.0
3	20160915	20.0	1.0 2.0 3.0
4	20160921	24.0 21.0 18.0	0

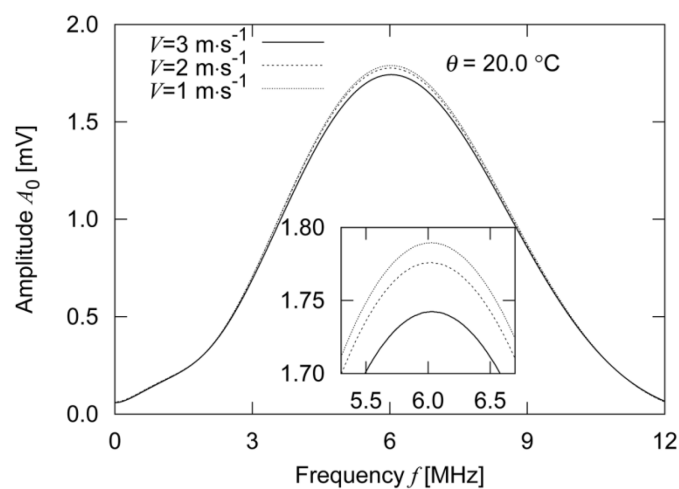


図 5.21 フローセルの基準スペクトル

#### 5.4.2 実験方法

フローセルの基準スペクトルの実験装置を図 5.19 に示す。実験装置は循環方式とし、容量 1.5 m<sup>3</sup> の水槽内に超音波減衰スペクトル計と水中ポンプを設置し、水槽の外にフローセルと電磁流量計および流速調整用のゲート弁を設置する。水中ポンプで取水した水は内径 50 mm のサクシオンホースを通してフローセル、電磁流量計およびゲート弁を通過して再び水槽に戻る。フローセルおよびフローセルの断面図を図 5.20 に示す。フローセルは内径 50 mm の管路を有するブロック構造とし、ブロック内にトランスデューサと反射体を取り付けている。水中ポンプは流速が 2.0 m·s<sup>-1</sup> および 3.0 m·s<sup>-1</sup> の場合は 1.5 kW (エバラ) を使用し、流速が 1.0 m·s<sup>-1</sup> の場合は 0.55 kW (鶴見製作所, HSD2.55S) を使用する。

表 5.4 はフローセルの基準スペクトル測定実験の概要を示す。実験は脱気水道水を使用し、水温は 10°C、15°C および 20°C、流速  $V$  は 1.0 m·s<sup>-1</sup>、2.0 m·s<sup>-1</sup> および 3.0 m·s<sup>-1</sup> とする。基準スペクトルの測定は、水温が所定温度に達してから水中ポンプの運転を開始し、20 分経過後、5 回測定する。

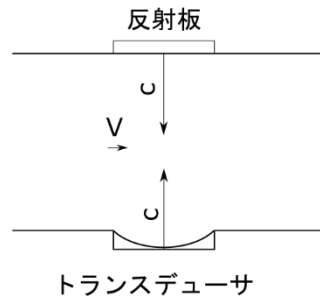


図 5.22 流速と超音波の音速との関係(マッハ数)

### 5.4.3 実験結果と考察

水温  $20^{\circ}\text{C}$  で、流速  $V=1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $V=2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $V=3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  の実験結果を図 5.21 に示す。図 5.21 からフローセルの基準スペクトルの振幅は流速に依存して低減することが分かったので、フローセルの減衰係数  $\alpha_f$  を次式で定義して、実験結果からフローセルの減衰係数の実験式を検討する。

$$\alpha_f = -\ln\left(\frac{A_0(\theta, V)}{A_0(\theta, 0)}\right) \quad (5.10)$$

ここで、 $A_0(\theta, V)$  は水温  $\theta$ 、流速  $V$  のフローセルの基準スペクトルの振幅、 $A_0(\theta, 0)$  は水温  $\theta$ 、流速  $V=0$  のフローセルの基準スペクトルの振幅である。

まず、フローセルを通過する流体の流速が基準スペクトルの振幅に与える影響を評価するため、マッハ数とフローセルの減衰係数との関係を検討する。マッハ数  $M$  は次式で与えられる。

$$M = \frac{V}{c} \quad (5.11)$$

ここで、 $V$  は流速 [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]、 $c$  は超音波の音速 [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] を示す。図 5.22 に示すように、フローセルの流速とトランスデューサから発信する超音波はその進行方向が互いに直交する関係にある。マッハ数  $M$  は音速  $c$  に対する流速  $V$  の比である。マッハ数とフローセルの減衰係数との関係を図 5.23～図 5.24 に示す。これらの図からフローセルの減衰係数はマッハ数に依存し、周波数が高くなるにしたがって相関が低くなることがわかった。

次に、レイノルズ数とフローセルの減衰係数の関係を検討する。レイノルズ数  $Re$  は次式で与えられる。

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (5.12)$$

ここで、 $d$  は管路の内径 [ $\text{m}$ ]、 $\nu(=\eta/\rho)$  は水の動粘度 [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ] を示す。レイノルズ数とフローセルの減衰係数との関係を図 5.25～図 5.26 に示す。これらの図からフローセルの減衰係数はレイノルズ数に依存し、周波数が高くなるにしたがって相関が高くなることがわかった。

以上の実験結果から、フローセルの減衰係数は、マッハ数とレイノルズ数に依存することがわかったので、フローセルの減衰係数の実験結果に次式を適用して多変量解析を行い、実験式の係数を決定する。

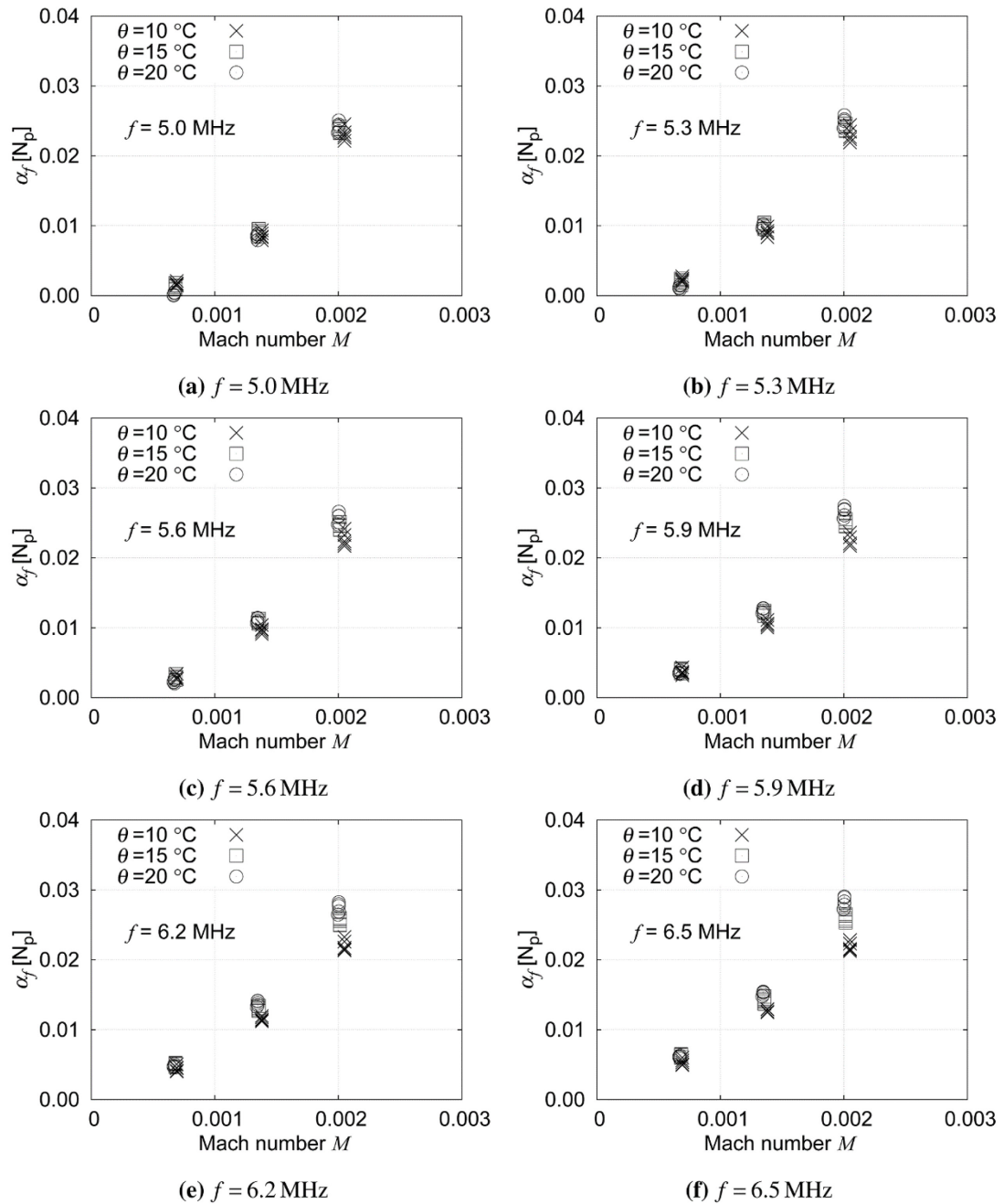


図 5.23 マッハ数とフローセルの減衰係数との関係(その1)

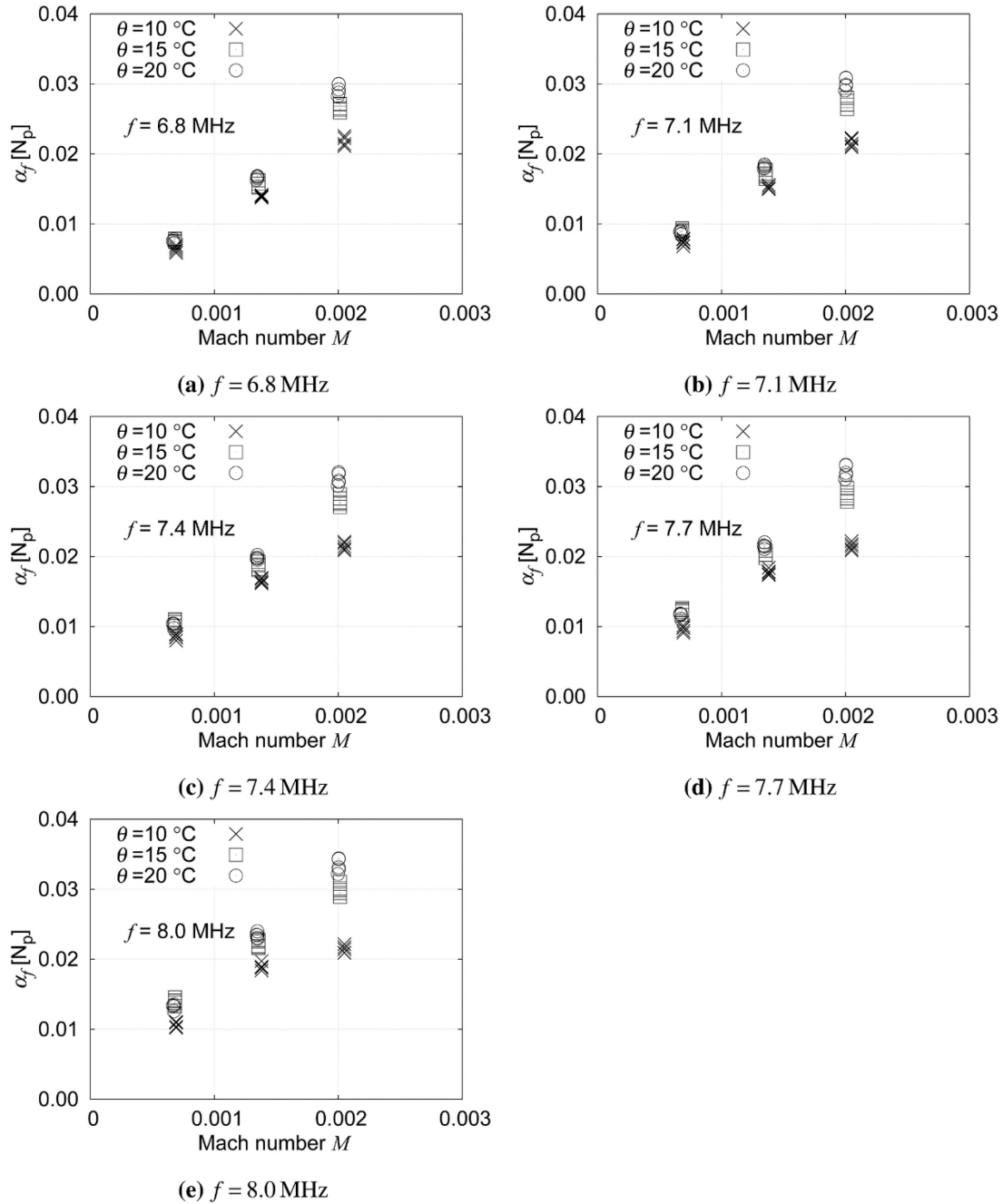


図 5.24 マッハ数とフローセルの減衰係数との関係(その 2)

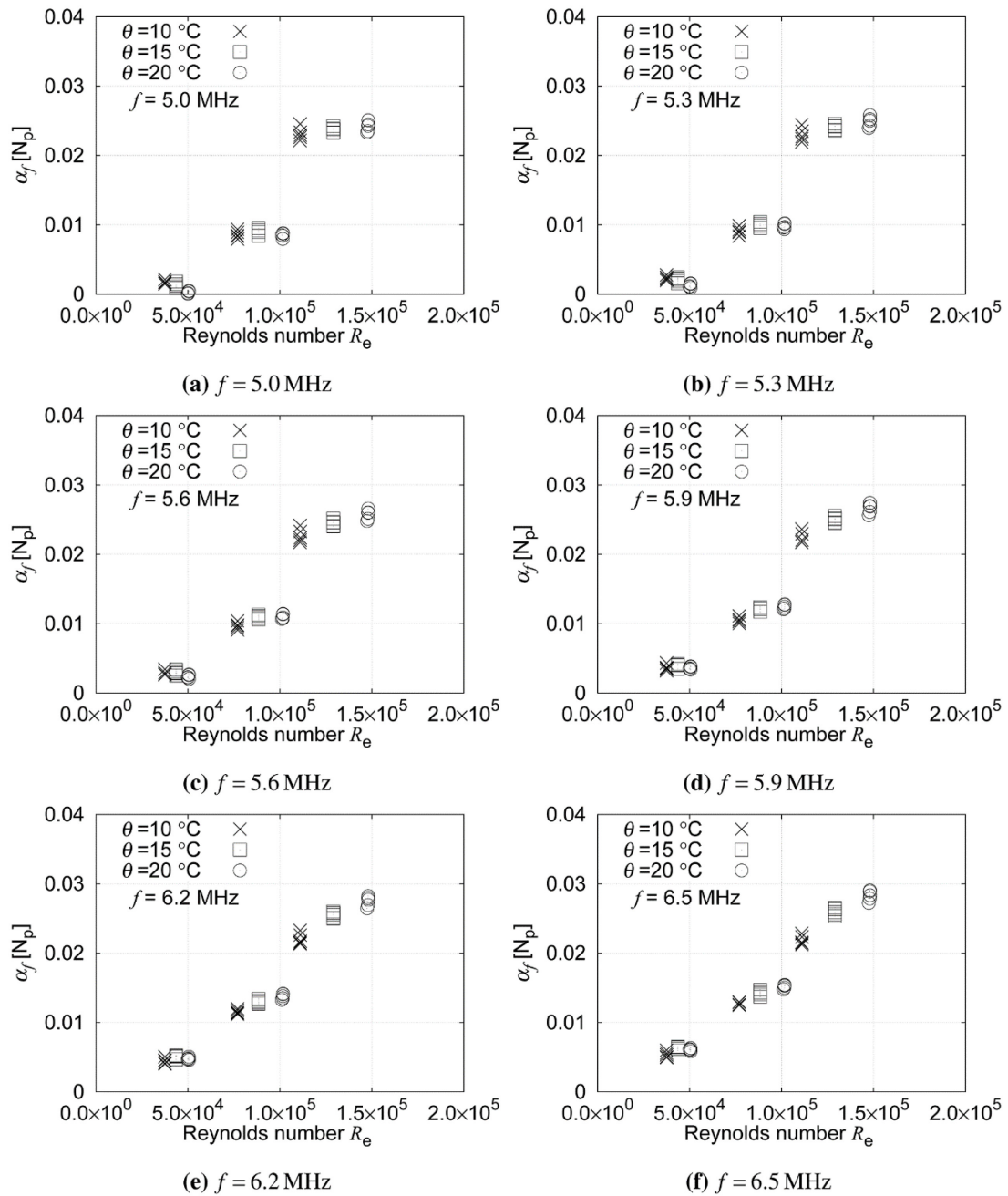


図 5.25 レイノルズ数とフローセルの減衰係数との関係(その1)

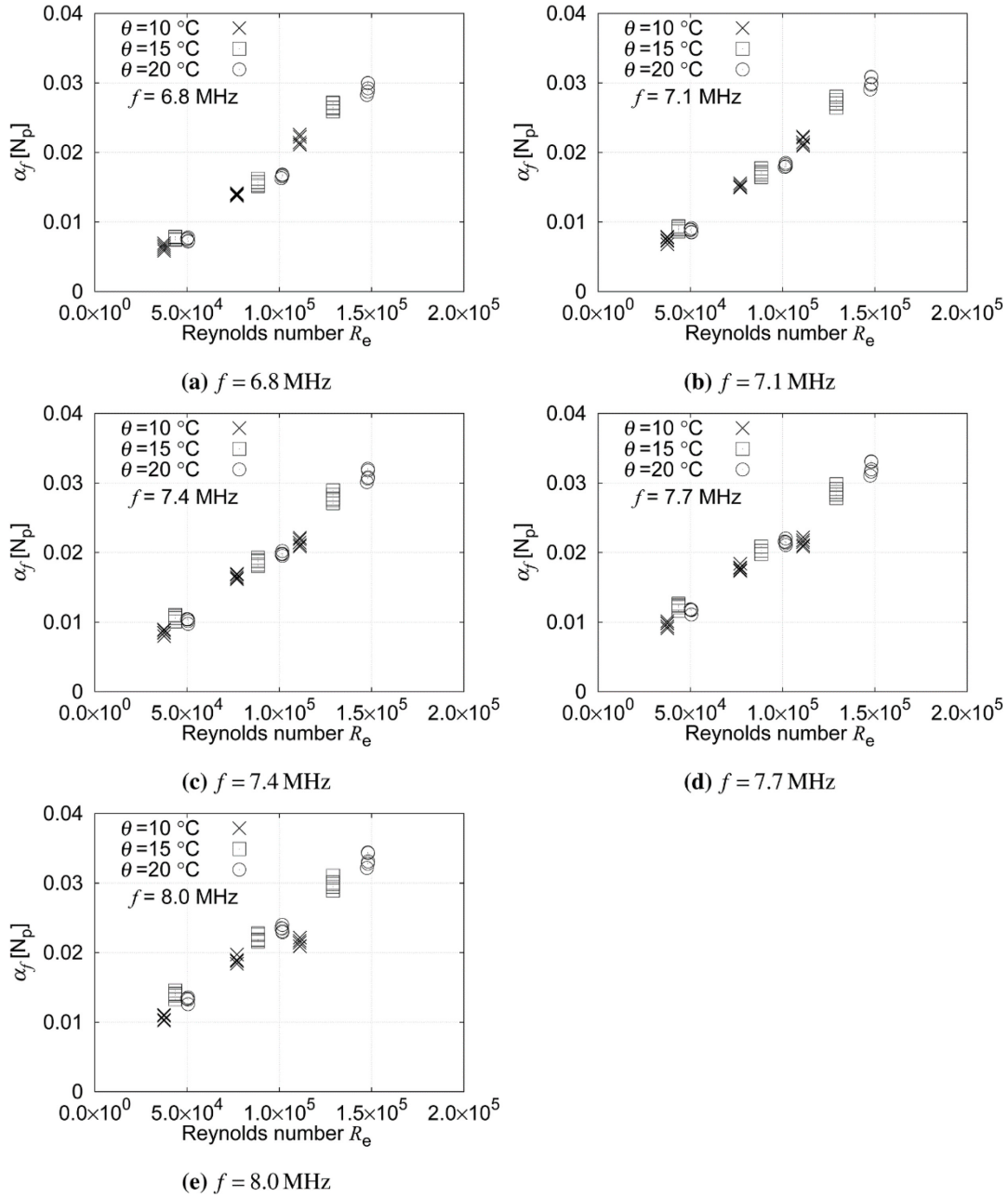


図 5.26 レイノルズ数とフローセルの減衰係数との関係(その 2)

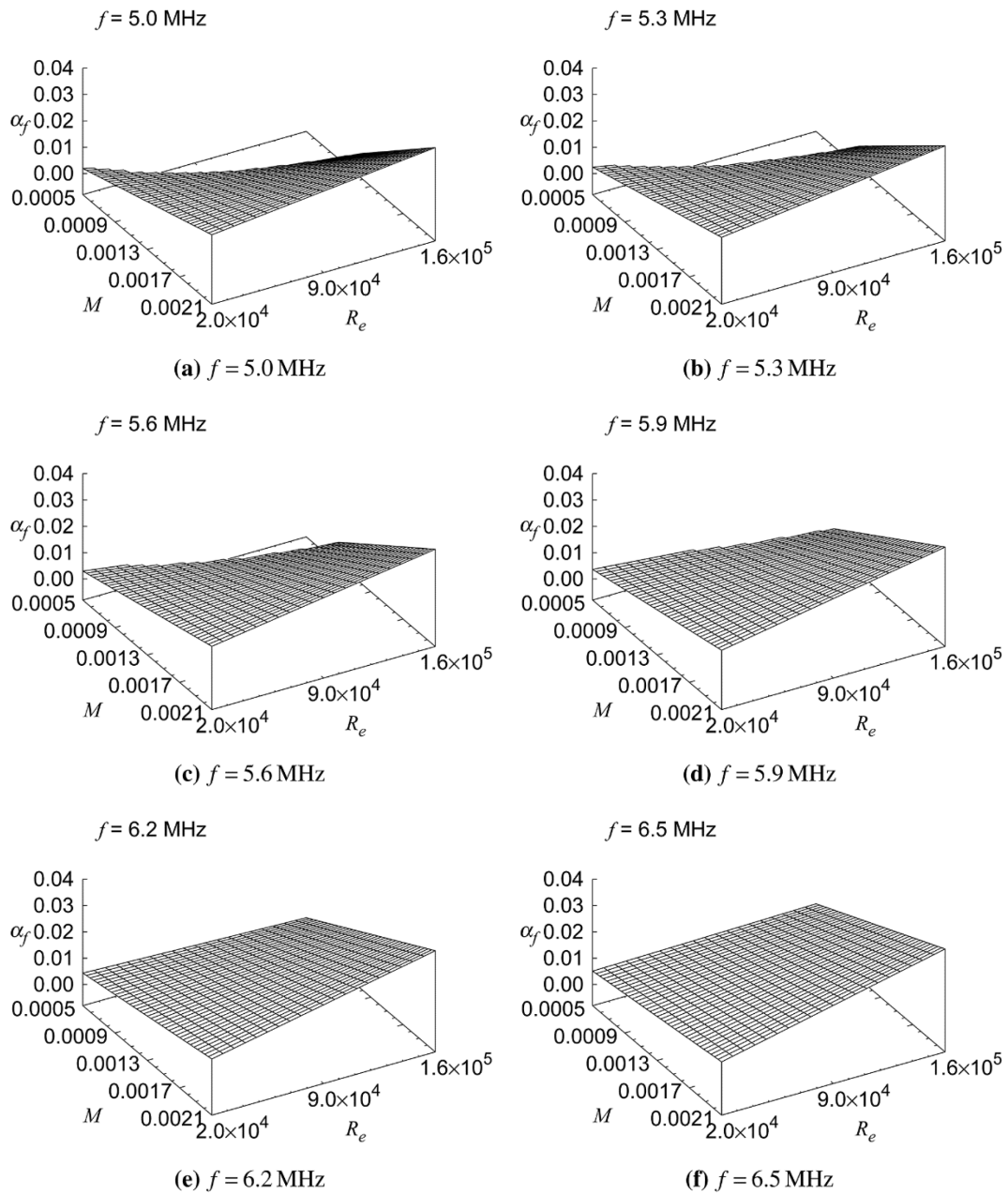


図 5.27 マッハ数、レイノルズ数とフローセルの減衰係数との関係(その1)



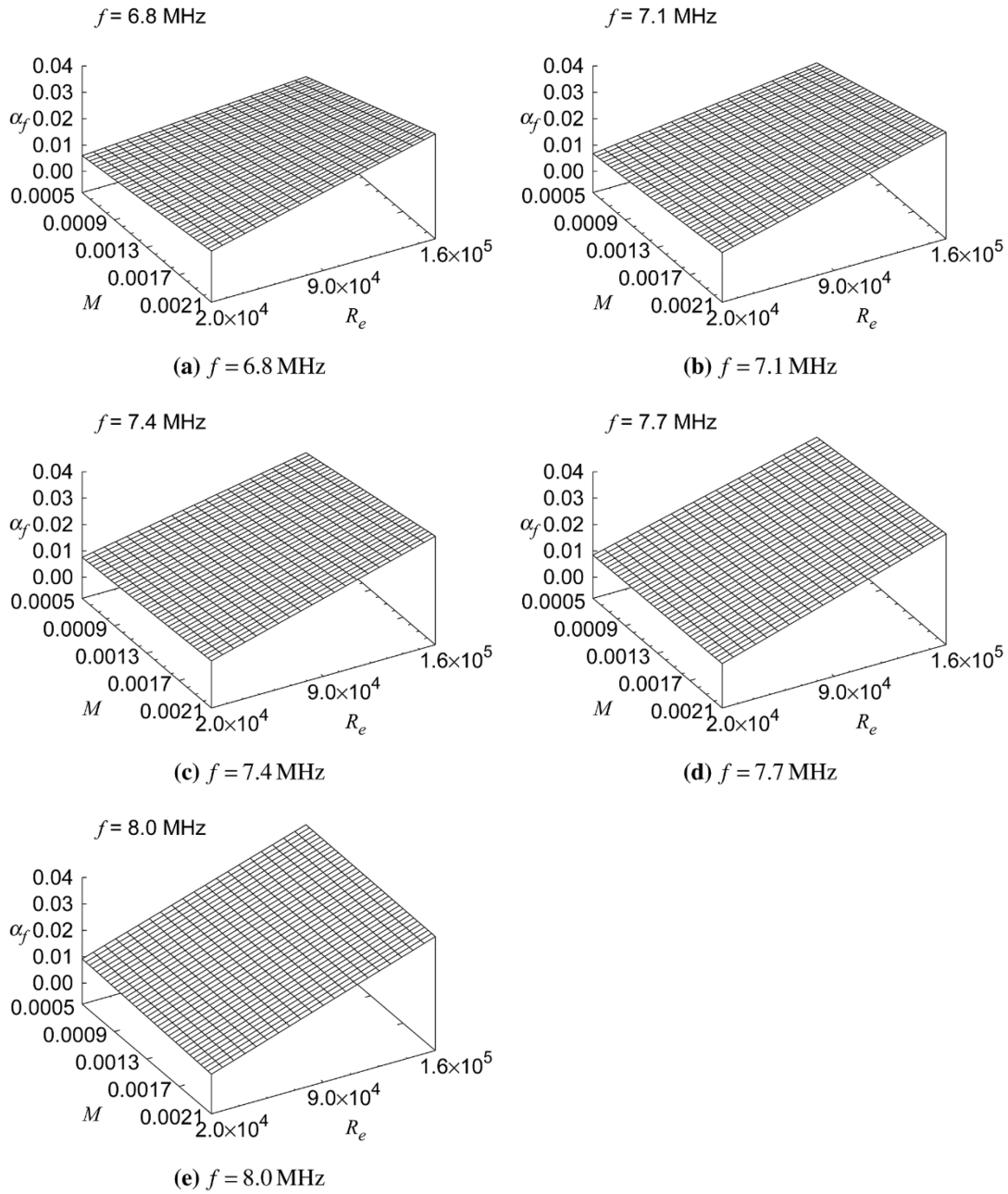


図 5.28 マッハ数、レイノルズ数とフローセルの減衰係数との関係(その 2)

表 5.5 フローセルの基準スペクトルの減衰係数の解析結果

周波数 $f$ MHz	$c_1$ $\times 10^{-3}$	$c_2$ $\times 10^{-7}$	$c_3$	$c_4$ $\times 10^{-4}$	決定係数	標準誤差 $\times 10^{-4}$
5.0	0.916	-2.076	7.672	1.299	0.997	5.51
5.3	1.201	-1.744	6.959	1.197	0.996	5.74
5.6	1.765	-1.425	5.925	1.116	0.997	5.48
5.9	2.285	-1.035	4.809	1.008	0.997	5.01
6.2	2.816	-0.6596	3.842	0.8953	0.997	5.16
6.5	3.390	-0.2746	2.933	0.7716	0.996	5.61
6.8	4.043	0.1041	2.103	0.6453	0.993	6.92
7.1	4.469	0.4945	1.571	0.4981	0.988	8.43
7.4	4.925	0.948	0.7755	0.3405	0.982	10.09
7.7	5.491	1.379	-0.1231	0.2008	0.974	11.79
8.0	6.075	1.888	-1.469	0.06041	0.965	13.49

$$\alpha f = c_1 + c_2 R_e + c_3 M + c_4 R_e \cdot M \quad (5.13)$$

ここで、 $c_1 \sim c_4$  は実験結果から決定する係数である。表 5.5 にフローセルの減衰係数の解析結果を示す。式(5.13)から求めたマッハ数、レイノルズ数とフローセルの減衰係数との関係を図 5.27～図 5.28 に示す。フローセルの減衰係数は周波数が高くなるにしたがって、レイノルズ数が支配的な要因となることがわかった。

#### 5.4.4 フローセルの基準スペクトルの算定式

式(5.10)からフローセルの基準スペクトルの振幅を求めると次式が得られる。

$$A_0(\theta, V) = A_0(\theta, 0) \cdot \exp(-\alpha_f) \quad (5.14)$$

フローセルの基準スペクトルの振幅は流速  $V=0$  の水の基準スペクトルの振幅にフローセルの減衰係数を乗じて算出することができる。また、フローセルの減衰係数は式(5.13)を用いてレイノルズ数とマッハ数から算出することができる。

## 5.5 結論

本章ではパルス反射法を採用した現場型超音波減衰スペクトル計の基準スペクトルを測定し、河川やダム貯水池、感潮河川または海域での浮遊砂の計測、また、フローセルによる計測に適用する基準スペクトルの実験式を提案した。本章の結論は以下のとおりである。

- 真水の基準スペクトルの振幅は、トランスデューサが水中に発信した超音波の振幅、トランスデューサと反射板との距離、水の音波吸収係数から算出することができる。トランスデューサが水中に発信した超音波の振幅は水温から実験式を用いて算出することができる。
- 塩水の基準スペクトルの振幅は真水の基準スペクトルの振幅に塩分による増幅係数を乗じて算出することができる。塩分による減衰係数は水の密度と音速から実験式を用いて算出することができる。
- フローセルの基準スペクトルの振幅は流速  $V=0$  の水の基準スペクトルの振幅にフローセルの減衰係数を乗じて算出することができる。フローセルの減衰係数はレイノルズ数とマッハ数から実験式を用いて算出することができる。

## 参考文献

- [1] Simon D.Richards; The effect of temperature, pressure, and salinity on sound attenuation in turbid seawater. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.103,No.1, pp.205-211, 1998.
- [2] 古川仁志, 河下重和, 田井秀一; 超音波減衰スペクトル計による SS 測定に用いる基準スペクトルの実験式. *電力土木*. No.382,pp.31-39,2016.
- [3] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 超音波減衰スペクトル計による管路を流れる浮遊物質の濃度と粒度分布のリアルタイム計測. *電子情報通信学会技術報告*.US2015-106, pp.129-134, 2016.
- [4] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; パスレングスを固定した超音波減衰スペクトル計の海水中の固有周波数応答. *日本音響学会 2015 年秋季研究発表会講演論文集*. pp.1115-1118, 2015.
- [5] R.E.Francois and G.R.Garrison; Sound absorption based in ocean measurements. Part; Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am.*Vol.72,No.6, pp.1879-1890, 1982.
- [6] N.P.Fofonoff and R.C.Millard Jr.; Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. UNESCO technical papers in marine science, No.44, Division of Marine Sciences, UNESCO, 53p.1983.
- [7] Chen-Tung Chen and Frank J. Millero; Speed of sound in seawater at high pressure, *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.62,No.5, pp.1129-1135, 1977.
- [8] Geoge S.K.Wong and Shi-ming Zhu; Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature, and pressure, *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.97,No.3, pp.1732-1736, 1995.



## 第 6 章

# 非球形粒子に適用する実験モデル

### 6.1 序論

本章では、細砂・シルトなどの不規則な形状をした非球形粒子の測定に適用できる実験モデルを検証する。超音波減衰スペクトル法の測定原理は ECAH 理論[1-3]や Faran モデル[4-7]などの散乱理論であるが、これらの理論は均質な球形粒子を対象としているため不規則な形状をした粒子の測定には実験式が用いられる。数多くの実験式が提案されているが、天然の細砂・シルトを測定するための実験式に Schaafama and Hay [8]の等価球形散乱体モデルがある。この実験式は二種類の等価粒径係数を散乱理論に適用した実験式であるため、球形粒子を対象とした散乱理論をそのまま用いることができる。本章では、天然の細砂・シルトをフルイ分けした粒子を用いた実験[9]を行い、非球形粒子に適用する減衰係数の実験モデルを検証する。

### 6.2 天然の細砂・シルトの減衰スペクトルの測定

#### 6.2.1 実験の目的

本節では粒径 34~340  $\mu\text{m}$  の天然の細砂・シルトの実験を行い、非球形粒子に適用する減衰係数の実験モデルを検証する。

#### 6.2.2 実験用粒子

実験用粒子は、佐久間貯水池上流部（長野県天龍村）で採取した土砂を 300  $\mu\text{m}$  から 20  $\mu\text{m}$  の 18 種類のフルイで分級した粒子である。実験用粒子の粒径と密度を表 6.1 に示す。粒度分布はレーザ回折・散乱法を用いて測定し、土粒子の密度は JISA1203 に基づき測定する。

SKM-1 は 300  $\mu\text{m}$  のフルイを通過し、250  $\mu\text{m}$  のフルイに残留したもので、レーザ回折・散乱法で測定した粒径は、50 %粒径が 340.1  $\mu\text{m}$ 、10 %粒径が 279.7  $\mu\text{m}$ 、90 %粒径が 404  $\mu\text{m}$  である。また、SKM-2 は、250  $\mu\text{m}$  のフルイを通過し、212  $\mu\text{m}$  のフルイに残留したもので、レーザ回折・散乱法で測定した 50 %粒径は 301.9  $\mu\text{m}$  である。このように、レーザ回折・散乱法で測定した粒径はフルイ分け試験の結果に比較して大きな値を示す傾向がある。

また、SKM-1、SKM-7 および SKM-16 の SEM による観察画像を図 6.1 に示す。SKM シリーズの粒子はすべて角張った丸味のない形状をしているが、その形状には粒径による顕著な違いは認められない。

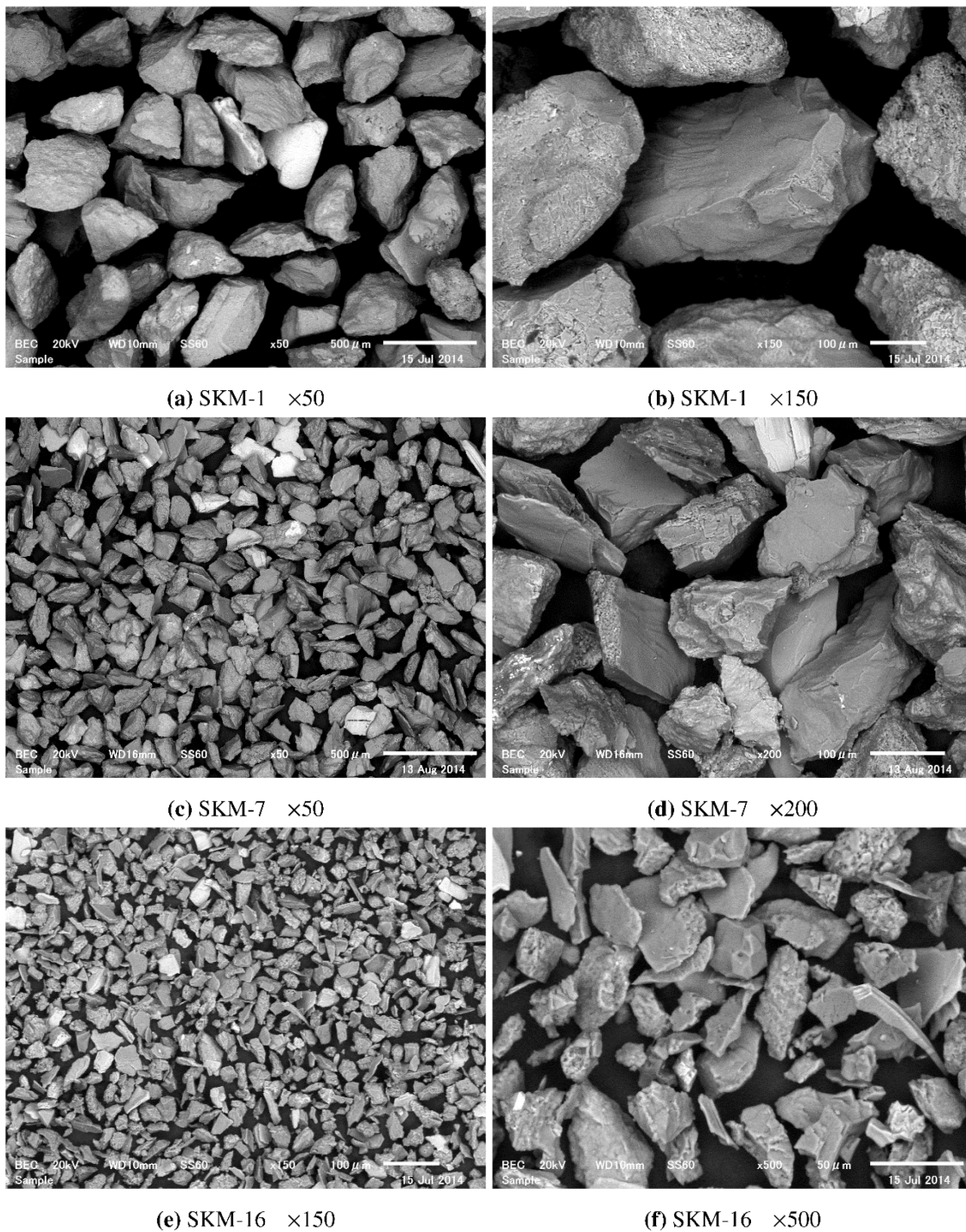


図 6.1 SEM による天然の細砂・シルトの粒子形状観察

表 6.1 実験用粒子の粒径および密度

No.	Sample	Sizefraction $\mu$	Laserdiffraction			$\rho_2$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
			D50 $\mu\text{m}$	D10 $\mu\text{m}$	D90 $\mu\text{m}$	
1	SKM-1	250-300	340	278	404	2700
2	SKM-2	212-250	302	241	381	—
3	SKM-3	180-212	266	206	333	2710
4	SKM-4	160-180	238	188	318	—
5	SKM-6	125-150	194	152	270	—
6	SKM-7	106-125	157	122	218	2730
7	SKM-10	75-90	112	87.3	147	—
8	SKM-13	45-53	65.0	50.5	81.8	2720
9	SKM-15	32-38	48.7	37.8	64.5	2720
10	SKM-16	25-32	33.6	22.2	45.4	2710

### 6.2.3 実験方法

実験方法は 4.4.3 項による。

### 6.2.4 実験結果

実験結果から以下の手順で単位体積分率当たりの減衰係数  $\alpha\phi$  を算出する。

1. 水温から式(4.4)を用いて基準スペクトルの振幅を算出する。
2. 超音波減衰スペクトル計の測定データから式(4.3)を用いて減衰係数を算出する。
3. 採水して測定した濃度と土粒子の密度から式(4.5)を用いて固体体積分率を算出する。
4. 減衰係数と固体堆体積分率から  $\alpha\phi$  を算出する。

実験用粒子の固体体積分率と測定時の水温を表 6.2 に示す。 $C_{\text{mean}}$  は平均濃度、濃度  $C_{\text{expt}}$  は採水して測定した濃度、 $\phi_{\text{expt}}$  は式(4.5)から算出した固体体積分率、 $\theta$  は測定時の水温を示す。土粒子の密度  $\rho_2$  は  $2700\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  である。

次に、各粒子の減衰スペクトルの測定結果を図 6.2～図 6.3 に示す。横軸は周波数、縦軸は  $\alpha\phi$  を示す。縦軸を減衰係数  $\alpha$  ではなく  $\alpha\phi$  とした理由は、表 6.2 に示すように懸濁液の濃度が各サンプルによって異なるため、単位体積分率当たりの減衰係数  $\alpha\phi$  を用いて各粒径の粒子の減衰係数を比較できるようにしたものである。図 6.2～図 6.3 に示す各粒子の減衰スペクトルの測定結果は、すべて一本の減衰スペクトル曲線を描いており、これは減衰係数  $\alpha$  が固体体積分率  $\phi$  に比例することを示すものである。また、全 10 粒子の減衰スペクトルの測定結果を図 6.4(a)と、図



表 6.2 実験用粒子の固体体積分率と水温の測定結果

No.	Date	Sample	$C_{\text{mean}}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$C_{\text{expt}}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\phi_{\text{expt}}$ $\times 10^6$	$\theta$ $^{\circ}\text{C}$
1			1.0	0.515	190	20.04
2	20140521	SKM-1	2.0	0.921	341	19.30
3			3.0	1.519	563	19.44
4			1.0	0.498	184	19.44
5	20140521	SKM-2	2.0	1.124	416	19.40
6			3.0	2.036	754	18.46
7			1.0	0.576	213	20.02
8	20140522	SKM-3	2.0	1.318	488	19.56
9			3.0	1.844	683	19.67
10			1.0	0.722	267	20.02
11	20140522	SKM-4	2.0	1.278	473	19.74
12			3.0	2.133	790	19.00
13			1.0	0.799	296	19.43
14	20140523	SKM-6	2.0	1.635	606	19.61
15			3.0	—	—	—
16			1.0	0.761	282	19.94
17	20140523	SKM-7	2.0	1.572	582	19.51
18			3.0	2.588	959	18.91
19			1.0	0.843	312	18.40
20	20140526	SKM-10	2.0	1.771	656	19.08
21			3.0	2.653	983	20.12
22			1.0	0.902	334	19.43
23	20140526	SKM-13	2.0	1.855	687	18.60
24			3.0	2.784	1031	17.93
25			1.0	0.959	355	18.06
26	20140527	SKM-15	2.0	1.918	710	18.76
27			3.0	2.906	1076	18.32
28			1.0	0.951	352	19.44
29	20140527	SKM-16	2.0	1.941	719	19.58
30			3.0	2.909	1077	19.87

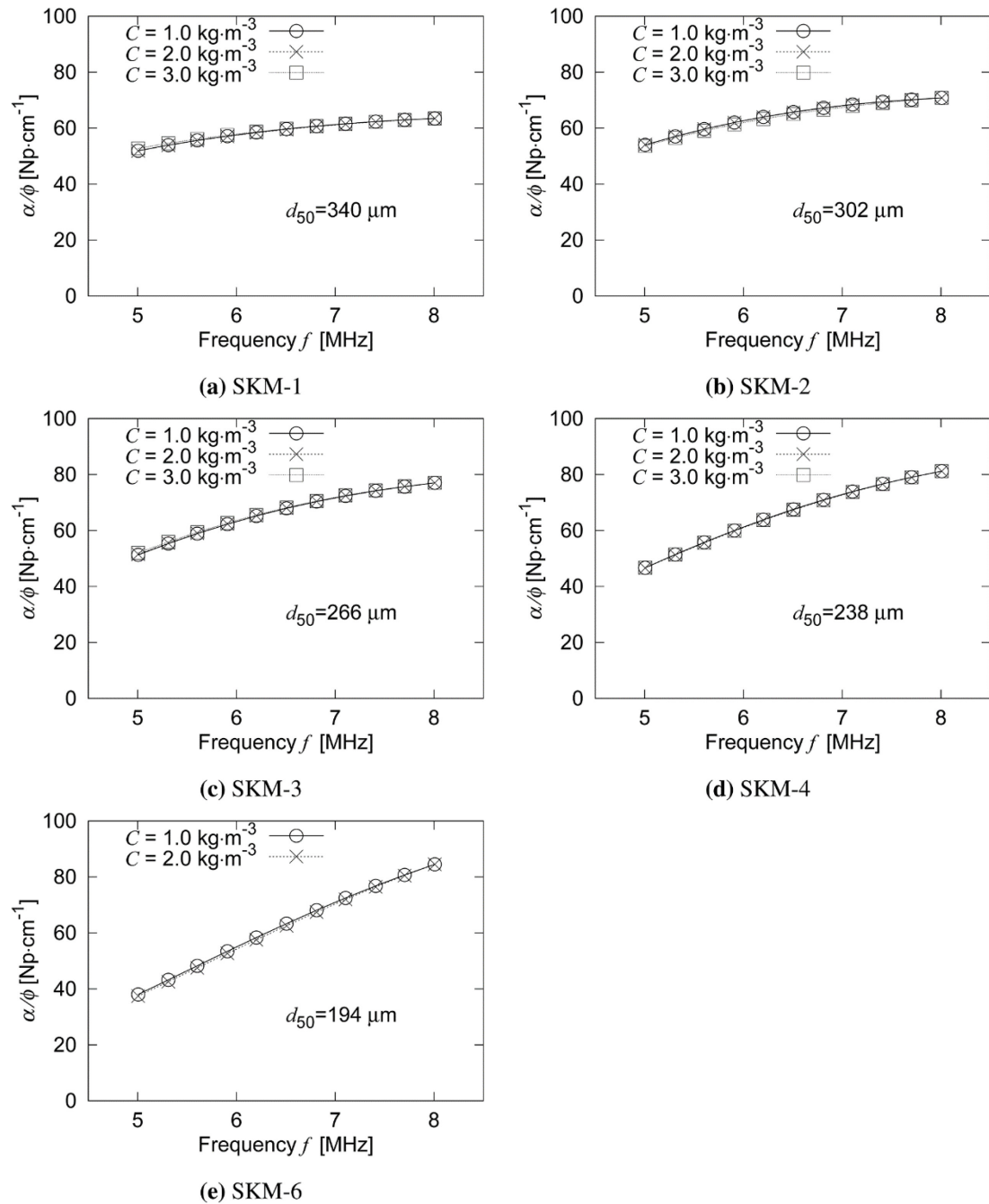


図 6.2 天然の細砂・シルトの減衰スペクトル測定結果(その 1)

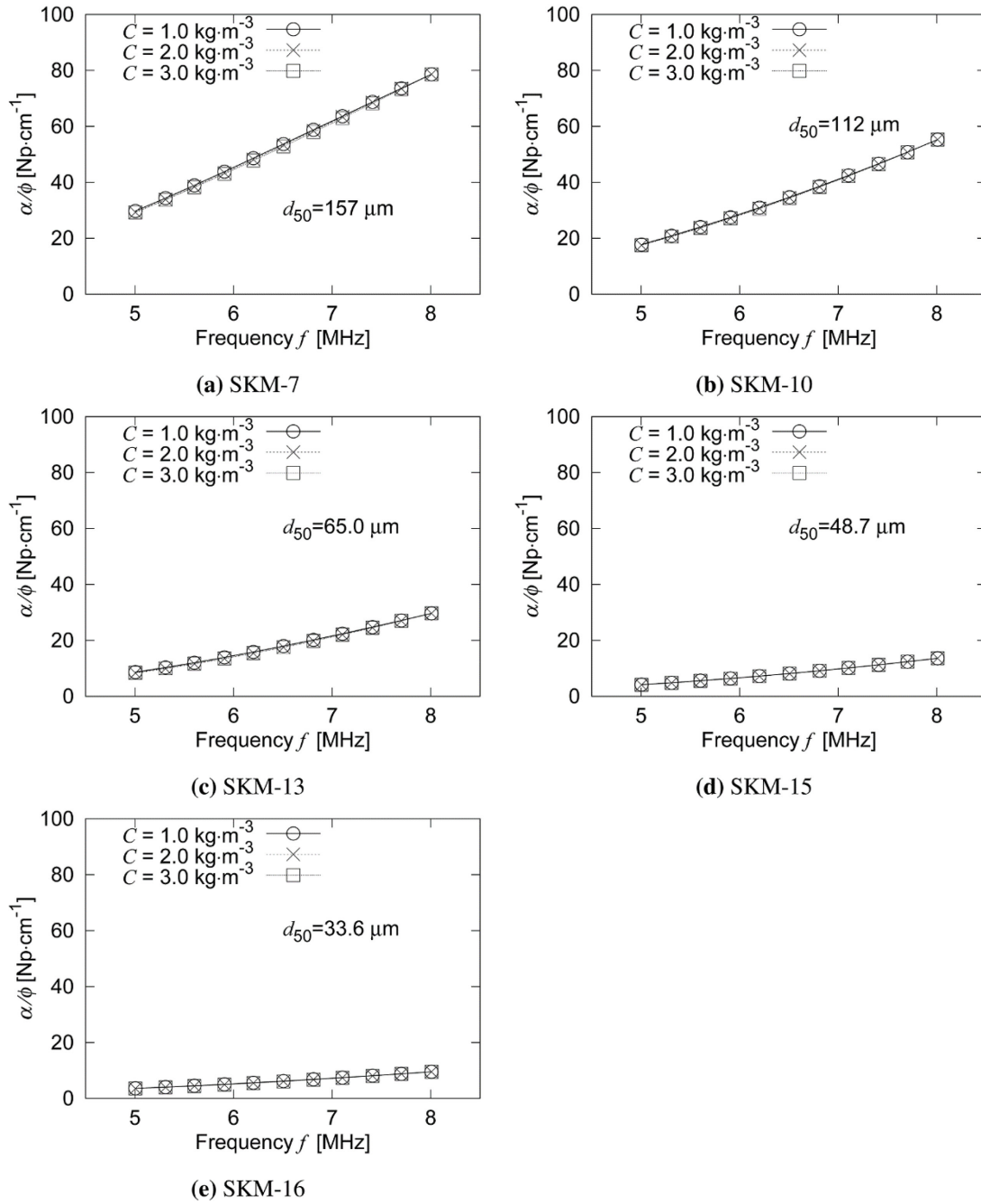
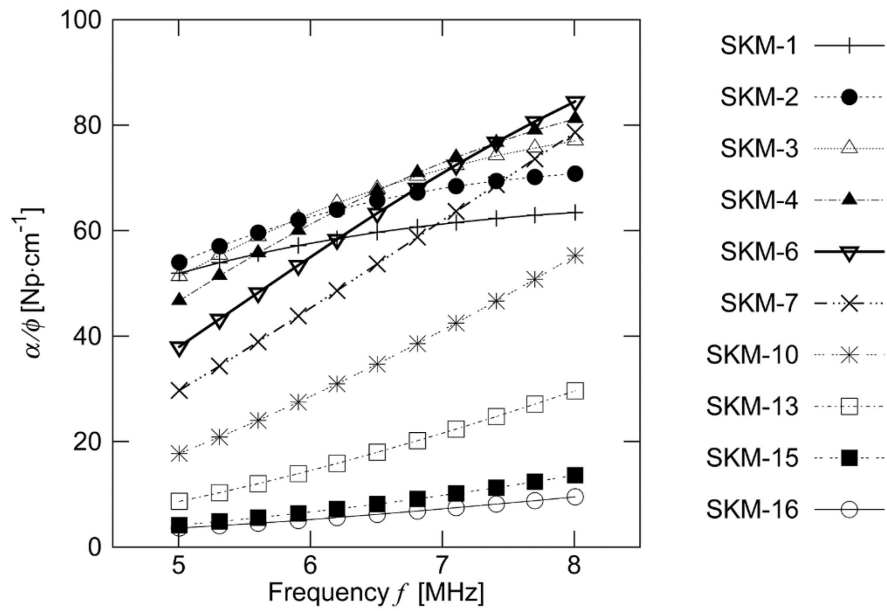
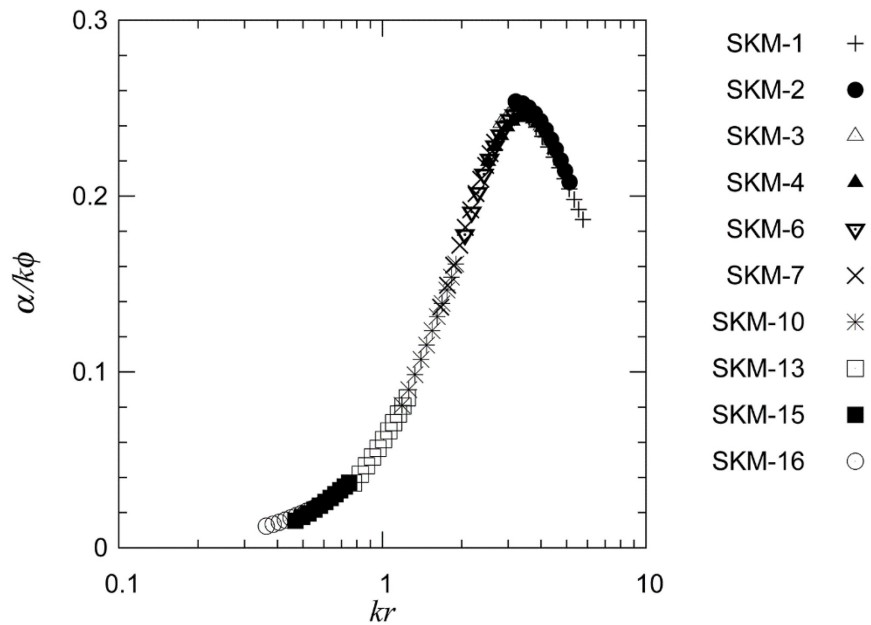


図 6.3 天然の細砂・シルトの減衰スペクトル測定結果(その2)



(a) 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の天然の細砂・シルトの減衰スペクトル測定値



(b) 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の天然の細砂・シルトの減衰特性

図 6.4 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の天然の細砂・シルトの減衰特性

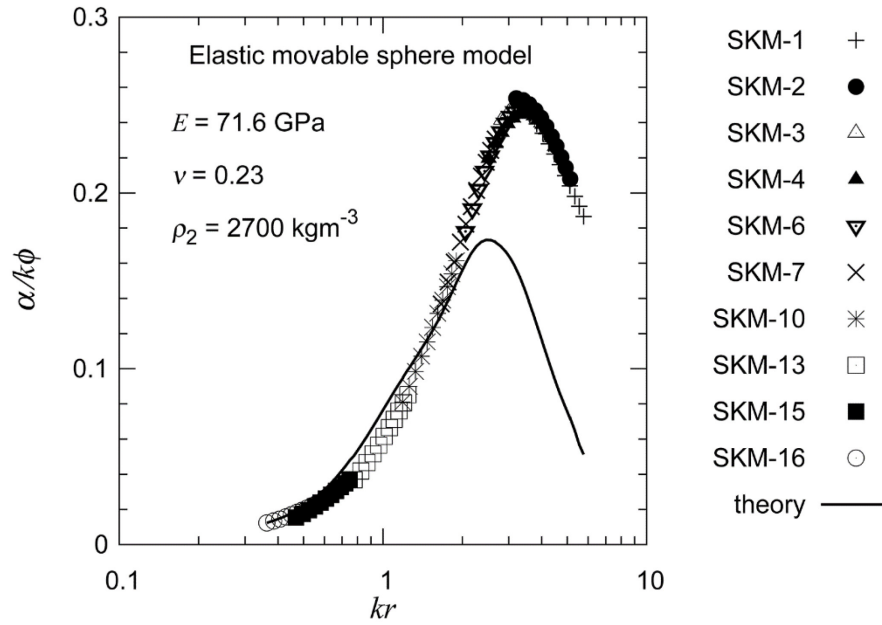


図 6.5 減衰スペクトルの測定値と弾性体モデルによる理論値との比較

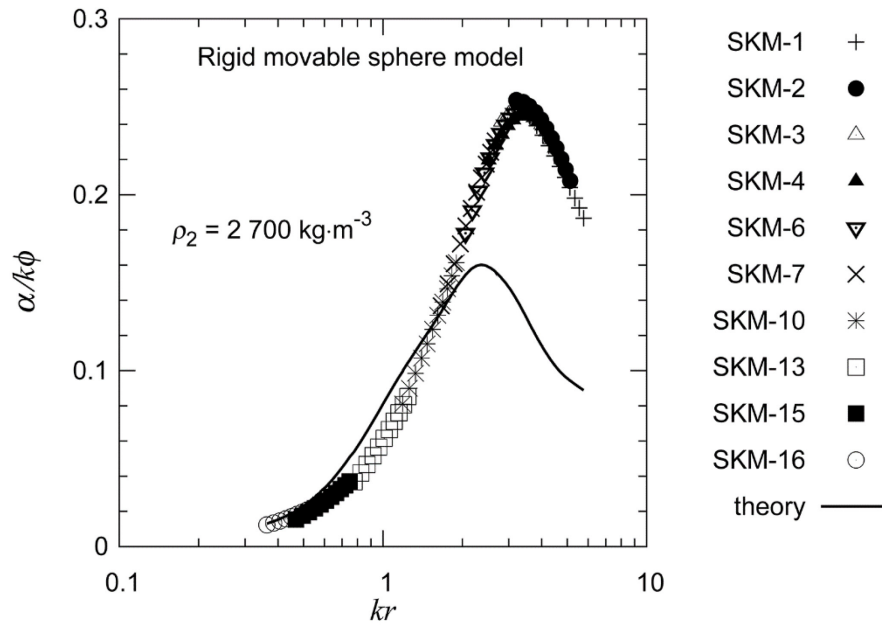


図 6.6 減衰スペクトルの測定値と剛体モデルによる理論値との比較

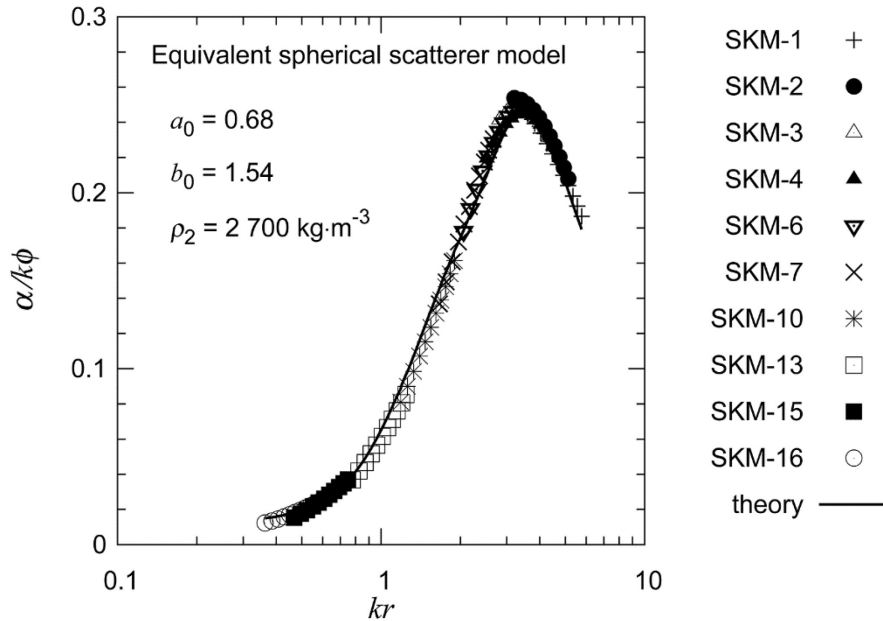


図 6.7 測定値と等価球形散乱体モデルによる理論値との比較

6.4(b)に示す。図 6.4(a)は周波数が 5~8MHz であり、球形粒子と同様に粒径の違いによって減衰スペクトルの形状が大きく変化することがわかった。図 6.4(b)は無次元粒径パラメータ  $kr$  と減衰係数  $\alpha(k, \phi)$  との関係を示すもので、この曲線が天竜川産の細砂・シルトの減衰係数の実験モデルとなる。

次に、減衰スペクトルの測定値と Faran モデルによる理論値との比較を図 6.5~図 6.6 に示す。図 6.5 は弾性体モデルによる理論値と実験値との比較を示しており、弾性係数とポアソン比はソーダライムシリケートガラスの弾性係数  $E=71.6\text{MPa}$  とポアソン比  $\nu=0.23$  を用いた。減衰係数の測定値を弾性体モデルによる理論値を比較すると、減衰係数の最大値は約 1.5 倍の値を示すことが分かった。また、減衰係数が最大となる  $kr$  の値は実験値と推定値で異なる値となることが分かった。また、図 6.6 は減衰係数の実験値と剛体モデルの理論値との比較を示しており、弾性体モデルとほぼ同様な結果となった。球形粒子を用いた実験では、減衰スペクトルの測定値は Faran の弾性体モデルによる理論値と一致したが、細砂・シルトの実験では、減衰スペクトルの実験値は Faran モデルによる理論値と一致しない結果が得られた。

## 6.3 考察

### 6.3.1 等価球形散乱体モデルと等価粒径係数

等価球形散乱体モデルは式(3.6)に示す線形モデルを  $r \rightarrow a_0 r$ 、 $\phi \rightarrow b_0 \phi$  に変換した比較的単純な線形モデルで次式で表される。

$$\alpha_{sc} = -\frac{3b_0\phi}{2k^2(a_0r)^3} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(A_n) \quad (6.1)$$

ここで、 $a_0, b_0$  は Schaafsma and Hay [8] の等価粒径係数 (equivalent sphere size parameter) で次式で定義される。

$$a_0 = \frac{r_G}{r_m}, \quad b_0 = \frac{V_G}{V_p}$$

$r_G$  は不規則な形状をした粒子の投影面積に等しい断面積をもつ球体の半径、 $r_m$  はレーザ回折・散乱法等で測定した粒子の半径、 $V_p$  は不規則な形状をした粒子の体積、 $V_G = 4\pi r_G^3/3$  は断面積の等しい球体の体積を示す。 $a_0$  は粒径を調整する係数、 $b_0$  は粒子の体積を調整する係数であり、Schaafsma and Hay は天然砂の実験から  $a_0 \leq 1, 1 \leq b_0$  の値を得ている。また、球形粒子の場合は、 $a_0 = 1.0$ 、 $b_0 = 1.0$  となる。

次に、減衰スペクトルの測定値と等価球形散乱体モデルで求めた減衰スペクトルの理論値との比較を図 6.7 に示す。天然の細砂・シルトなどの非球形粒子の減衰スペクトルは二種類の等価粒径係数をもつ等価球形散乱体モデルの理論値と一致することがわかった。また、等価粒径係数は、非球形粒子の粒径を減衰特性が同じ球形粒子の粒径に換算する係数  $a_0$  と、非球形粒子の体積を減衰係数が等しい球形粒子の体積に換算する係数  $b_0$  の二種類があり、これらの係数は粒径に依存しない定数であることがわかった。また、今回の実験から、天竜川産の細砂・シルトの等価粒径係数は  $a_0 = 0.68$ 、 $b_0 = 1.54$  であることがわかった。

### 6.3.2 等価球形散乱体モデルによる粒度分布の測定

粒度分布の測定方法には、レーザ回折・散乱法、コールターカウンター法、フルイ分け試験、沈降分析など数多くの方法があり、超音波減衰スペクトル法もまた粒度分布の測定方法の一つである。不規則な形状をした粒子の粒径は、測定方法によって粒径の測定値が異なることはよく知られており、例えば、表 6.1 に見られるように、レーザ回折・散乱法により測定した 50% 粒径はフルイ分け試験で求めた平均粒径より大きな粒径を示している。図 6.5～図 6.6 に示す減衰スペクトルの理論値  $\alpha(k \cdot \phi)$  の最大値は  $kr = 2.5$  付近にあるが、実験値では  $kr = 3.5$  付近にある。理論値の無次元粒径パラメータ  $kr$  は球形粒子の半径  $r$ 、実験値の  $kr$  はレーザ回折・散乱法で測定した粒子の半径  $r$  からそれぞれ算出した値であり、 $kr \rightarrow k \cdot a_0 r$  とすることによって、等価球形散乱体モデルで測定する粒子の粒径をレーザ回折・散乱法の測定値と一致させることができる。

## 6.4 結論

本章では、粒径 34~340  $\mu\text{m}$  の天然の細砂・シルトをフルイ分けした実験用粒子を測定し、非球形粒子に適用する減衰係数の実験モデルを検証した。本章で得られた結論は以下のとおりである。

- 天然の細砂・シルトなどの非球形粒子の減衰係数は二種類の等価粒径係数をもつ等価球形散乱体モデルの理論値と一致することを確認した。
- 第一の等価粒径係数は、非球形粒子の粒径を減衰特性が同じ球形粒子の粒径に換算する係数であり、第二の等価粒径係数は、非球形粒子の体積を減衰係数が等しい球形粒子の体積に換算する係数である。これらの係数は粒径に依存しない定数であることを確認した。





## 参考文献

- [1] P.S.Epstein and R.R.Carhart; The Absorption of Sound in Suspensions and Emulsions. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.25, pp.553-565, 1953.
- [2] J.R.Allegra and S.A.Hawley; Attenuation of Sound in Suspensions and Emulsions —Theory and Experiments. *J. Acoust. Soc. Am.*Vol.51, pp.1545-1564, 1972.
- [3] D.J.McClements; Principles of Ultrasonic Droplet Size Determination in Emulsions. *Langmuir*. Vol.12, pp.3454-3461, 1996.
- [4] James J. Faran jr.; Sound scattering by solid cylinders and spheres. *J. Acoust. Am.* Vol.23,No.4, 1951.
- [5] Alex E.Hay and Douglas G.Mercer; On the theory of sound scattering and viscous absorption in aqueous suspensions at medium and short wavelengths. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.78,No.5, pp.1761-1771, 1985.
- [6] J.Sheng and Alex E.Hay; An examination of the spherical scatterer approximation in aqueous suspensions of sand *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.83,No.2, pp.598-610, 1988.
- [7] A.Richter,F. Babric and S.Ripperger; Polydisperse particle size characterization by ultrasonic attenuation spectroscopy for systems of diverse acoustic contrast in the large particle limit. *J. Acoust. Am.* Vol.118,No.3, 2005.
- [8] S.Schaafsma and A.E.Hay; Attenuation in suspensions of irregularly shaped sediment particles;A two-parameter equivalent spherical scatterer model. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.102,No.3, pp.1485-1502, 1996.
- [9] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 流水中の浮遊土砂の粒子形状が超音波減衰スペクトルに及ぼす影響. 土木学会論文集 B1 (水工学) .Vol.71,No.4,pp.I\_817-I\_822, 2015.



## 第7章

# 河川の浮遊砂計測に用いる実験モデル

### 7.1 序論

本章では浮遊砂計測に用いる散乱損失と粘性損失を考慮した実験モデルについて述べる。Schaafsma and Hay [1]による等価球形散乱体モデルは、二つの等価粒径係数を導入することによって非球形粒子の測定に散乱理論を適用できる実験モデルである。しかし、この実験モデルは中間波長域の散乱損失の実験式であり、粒径が 10  $\mu\text{m}$  以下の粒子が含まれる場合は、長波長域の粘性損失を考慮できる実験式が必要である。本章では、浮遊砂計測に用いる実験モデルとして散乱損失だけでなく粘性損失を考慮した実験モデル[2,3]を提案し、粘性損失が支配的となる 50% 粒径 10  $\mu\text{m}$  未満、および散乱損失が支配的となる 50% 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の非球形粒子を用いた実験を行い、その実験モデルを検証する。

### 7.2 浮遊砂計測に用いる実験モデル

#### 7.2.1 超音波減衰スペクトル法による濃度と粒度分布の測定方法

超音波減衰スペクトル計で測定した減衰スペクトルから濃度と粒度分布を求める方法は逆解析法が用いられる。逆解析による濃度と粒度分布の測定方法[4]を図 7.1 に示す。

- 減衰スペクトルの測定値を算出するブロック①では、水温や塩分の測定値と超音波減衰スペクトル計の測定値である透過スペクトルから式(4.3)を用いて減衰スペクトルの測定値を算出する。

$$\alpha(f) = -\frac{1}{2L} \ln \frac{A(f)}{A_0(f)} \quad (4.3)$$

- 次に、減衰スペクトルの理論値を算出するブロック②では、水温や塩分の測定値から算出した粘性損失と散乱損失を合わせたカーネル行列、固体体積分率、および粒度分布から式(3.12)を用いて減衰スペクトルの理論値を算出する。

$$\alpha_{\text{theory}}(f_i) = \phi \sum_{j=1}^m K(f_i, d_j) g(d_j) \Delta x \quad (3.12)$$

- 最後に、減衰スペクトルの測定値から固体体積分率と粒度分布を決定するブロック③では、減衰係数の測定値と理論値との残差平方和  $SSD$ (sum of squares of differences)を式(3.11)を用いて算出する。そして、固体体積分率と粒度分布を系統的に変化させて反復計

算を行い、SSDが最少となる固体体積分率と粒度分布を求める。

$$SSD = \sum_i [\alpha_{\text{theory}}(f_i) - \alpha(f_i)]^2 \quad (3.11)$$

濃度  $C$  は土粒子の密度  $\rho_2$  と固体体積分率  $\phi$  から式(3.15)を用いて算出する。

$$C = \rho_2 \cdot \phi \quad (3.15)$$

## 7.2.2 浮遊砂計測に用いる実験モデル

粒径が  $0.1 \mu\text{m}$  から  $2 \text{mm}$  の浮遊砂を超音波減衰スペクトル法を用いて測定するためには散乱損失と粘性損失の二つの実験モデルが必要である。天然の細砂・シルトを測定する実験モデルに Schaafsma and Hay の等価粒径係数を用いた実験モデルがあるが、このモデルは散乱損失の実験モデルであり、粒径  $10 \mu\text{m}$  未満の粒子の測定ができない。

浮遊砂計測に用いる散乱損失と粘性損失を考慮した実験モデル  $K_2(f,d)$  を次式に示す。この実験モデルは粒径  $10 \mu\text{m}$  以上の非球形粒子の測定に適用する等価球形散乱体モデルと、粒径  $10 \mu\text{m}$  未満の非球形粒子の測定に適用する古川ら[2,3]の実験モデルを用いた浮遊砂計測のための実験モデルである。

$$K_2(f, d) = k_{\text{vis}}(f, d) + k_{\text{sc}}(f, d) \quad (7.1)$$

ここで、

$$k_{\text{sc}}(f, d) = -\frac{3b_0}{2k^2 (a_0 r)^3} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(A_n) \quad (7.2)$$

$$k_{\text{vis}}(f, d) = \frac{1}{2} \frac{k s(\rho_2 - \rho_1)^2}{(\rho_2 + T \rho_1)^2 + s^2 \rho_1^2} \quad (7.3)$$

$$s(f, d) = \frac{9\delta_v}{4c_0 r} \left(1 + \frac{\delta_v}{c_0 r}\right), \quad T(f, d) = \frac{1}{2} + \frac{9\delta_v}{4c_0 r}, \quad \delta_v = \sqrt{\frac{2\eta_1}{\omega \rho_1}} \quad (7.4)$$

$k_{\text{sc}}(f,d)$ 、 $k_{\text{vis}}(f,d)$  はそれぞれカーネル行列の散乱損失成分 [ $\text{Np} \cdot \text{m}^{-1}$ ]、粘性損失成分 [ $\text{Np} \cdot \text{m}^{-1}$ ]、 $c_0$  は粘性損失の理論式を非球形粒子に適用するための古川らの等価粒径係数を示す。式(7.1)に示す実験モデル  $K_2(f,d)$  は三種類の等価粒径係数をもつ実験モデルであり、これらの係数は測定データから決定する係数である。

## 7.3 粘性損失が支配的になる粒子 (50% 粒径 $10 \mu\text{m}$ 未満) の測定

### 7.3.1 実験の目的

本節では、現場型超音波減衰スペクトル計を用いて 50% 粒径  $10 \mu\text{m}$  未満のシリカ粒子の懸濁液の減衰スペクトルを測定し、実験モデル  $K_2(f,d)$  を用いて減衰スペクトルからシリカ粒子の濃度と粒度分布を算出して、実験モデルの適用性を検証する。

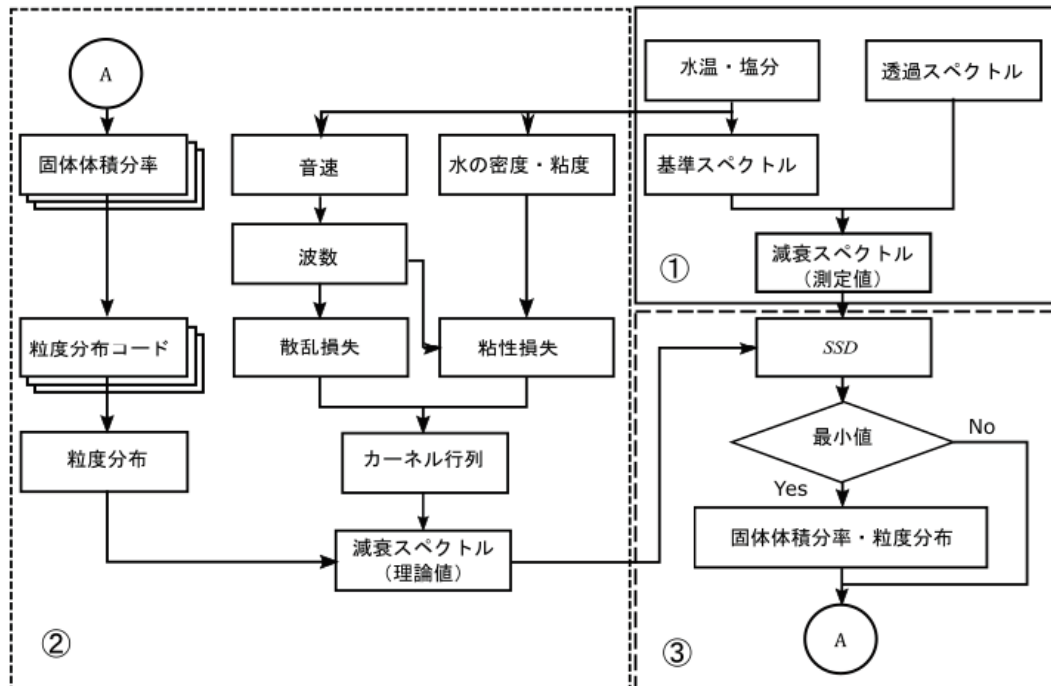


図 7.1 超音波減衰スペクトル法による浮遊砂の測定方法

### 7.3.2 実験用粒子

実験用粒子は、50% 粒径 1 μm、3 μm、5 μm の 3 種類のシリカ粒子である。実験用粒子の SEM による観察画像を図 7.2 に示す。また、シリカ粒子の密度はガス置換法（島津製作所—マイクロメリテックス社製、乾式自動密度計、アキュピック 1340TC10cm<sup>3</sup>モデル）を用いて測定する。

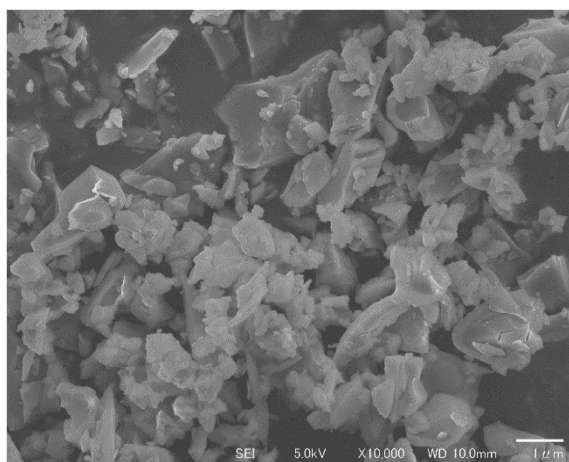
### 7.3.3 実験方法

実験方法は 4.4.3 項による。

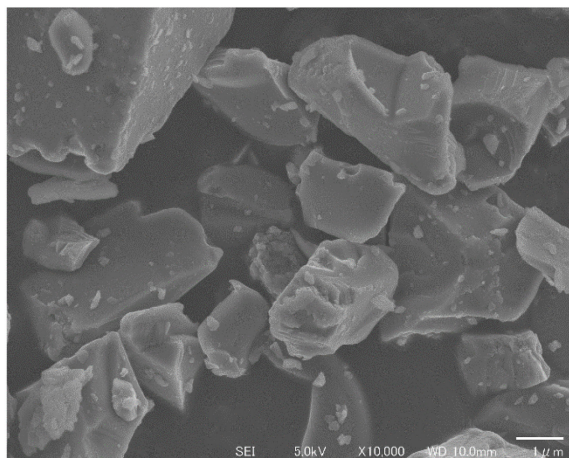
### 7.3.4 実験結果

減衰スペクトルの測定結果を図 7.3 に示す。Silica-1 の減衰スペクトルを図 7.3(a)、Silica-3 の減衰スペクトルを図 7.3(b)、Silica-5 の減衰スペクトルを図 7.3(c)に示す。濃度はそれぞれ  $C=1.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $C=2.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $C=3.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $C=4.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $C=5.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  の 5 濃度とした。各粒子の減衰係数を比較すると、図 7.3(a)に示す Silica-1 の減衰係数が最も大きな値を示しており、図 7.3(c)の Silica-5 の減衰係数が最も小さい。各々の粒子の減衰スペクトルを見ると、濃度  $C$  の増加によって減衰係数が等間隔で増幅していることがわかった。

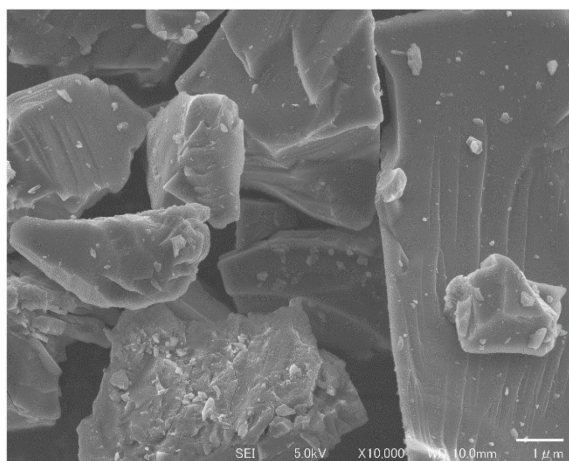
次に、採水してレーザ回折・散乱法で測定した実験用粒子の粒度分布を図 7.4 に示す。この粒



(a) Silica-1



(b) Silica-3



(c) Silica-5

図 7.2 SEM による 50% 粒径 10 μm 未満のシリカ粒子の形状観察

表 7.1 50% 粒径 10  $\mu\text{m}$  未満のシリカ粒子の粒度分布コード

No.	Sample	$p_1$	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$
1	Silica-1	0.28	-0.41	0.70	0.31	0.30
2	Silica-3	0.42	0.83	0.70	1.35	0.40
3	Silica-5	0.28	0.80	0.75	1.80	0.55

度分布の測定値を二峰性対数正規分布モデルで近似した粒度分布の粒度分布コードを表 7.1 に示す。また、二峰性対数正規分布モデルで近似した粒度分布とレーザ回折・散乱法で測定した粒度分布の比較を図 7.5 に示す。両者は非常によく一致しており、超音波減衰スペクトル法による測定ではこの二峰性対数正規分布モデルを適用する。

表 7.2 実験モデル( $c_0=0.90$ )による 50% 粒径 10  $\mu\text{m}$  未満のシリカ粒子の測定結果

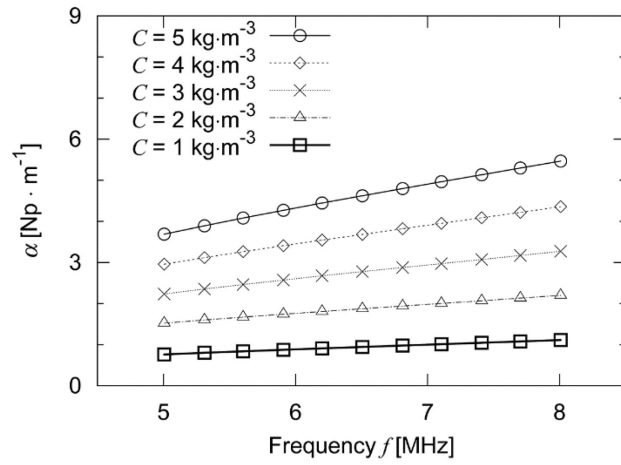
No.	Date	Sample	$\rho_2$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$C_{\text{expt}}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$C$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
1				0.903	0.965
2				1.890	1.920
3	20141204	Silica-1	2630	2.886	2.866
4				3.874	3.813
5				4.883	4.778
6				0.926	0.983
7				1.941	1.937
8	20141205	Silica-3	2650	2.871	2.880
9				3.881	3.826
10				4.854	4.780
11				0.991	1.007
12				1.957	1.987
13	20141208	Silica-5	2650	2.939	2.957
14				3.934	3.940
15				4.885	4.878

### 7.3.5 浮遊砂計測に用いる実験モデルによる濃度と粒度分布の測定

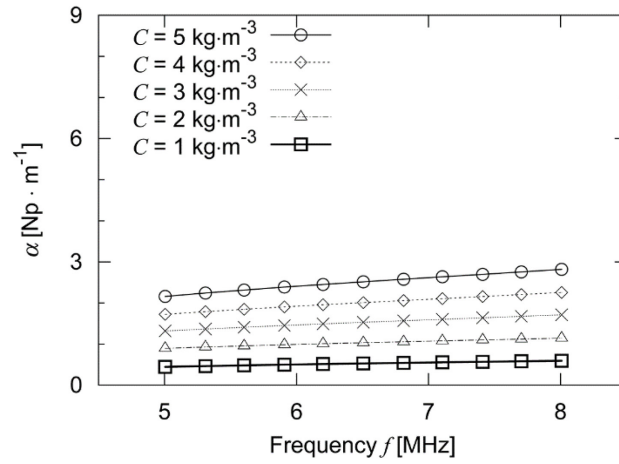
超音波減衰スペクトル計で測定した 50% 粒径 10  $\mu\text{m}$  未満のシリカ粒子の減衰スペクトルから実験モデル  $K_2(f,d)$  を用いて濃度と粒度分布を求める。

粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の粒子では散乱損失は無視できるので、実験モデルは式(7.1)の第一項のみを用いて濃度と粒度分布を測定する。測定に適用する粒度分布モデルは二峰性対数正規分布モデル

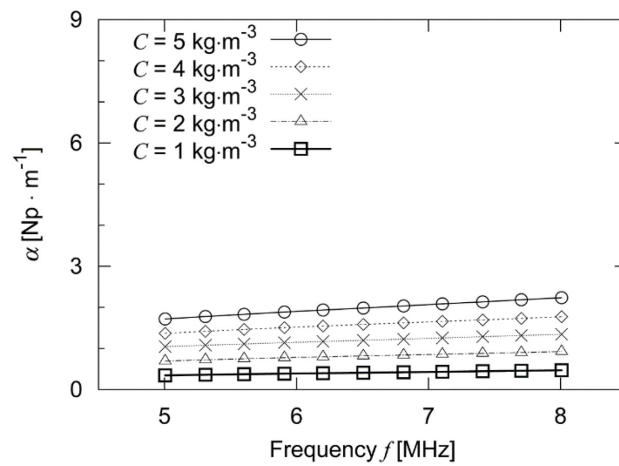




(a) Silica-1

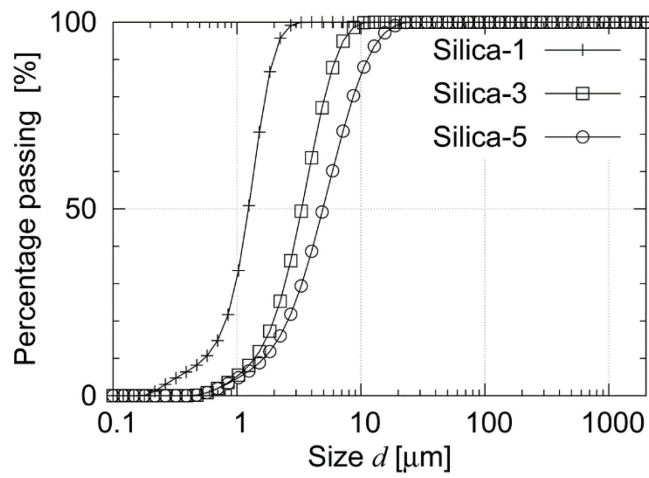


(b) Silica-3

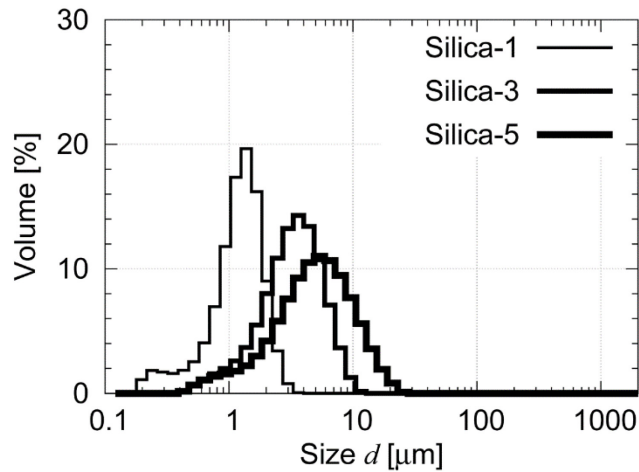


(c) Silica-5

図 7.350% 粒径 10  $\mu$ m 未満のシリカ粒子の減衰スペクトルの測定結果



(a)通過体積百分率



(b)体積百分率

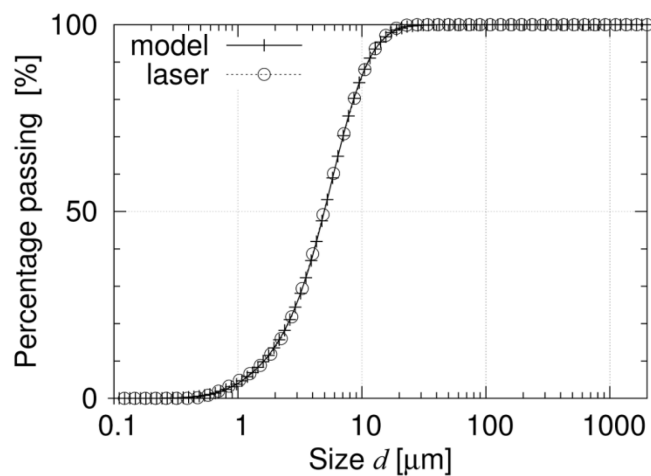
図 7.4 レーザ回折・散乱法で測定した 50%粒径 10  $\mu\text{m}$  未満のシリカ粒子の粒度分布

図 7.5 二峰性対数正規分布モデルによる粒度分布の近似(Silica-5)

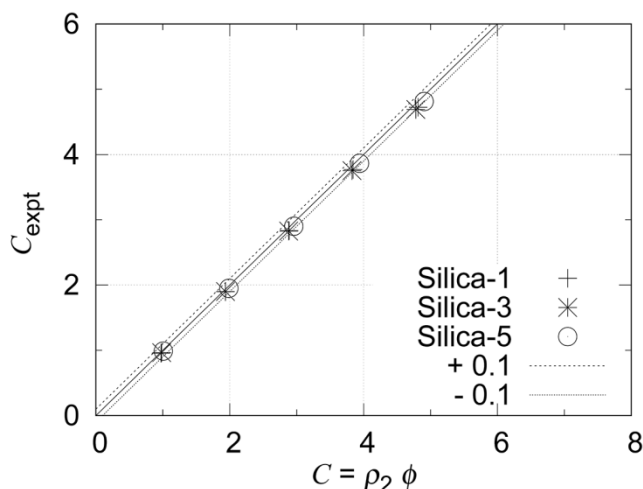


図 7.6 50% 粒径 10  $\mu\text{m}$  未満のシリカ粒子の濃度測定結果

とし、表 7.1 に示す三種類の粒度分布コードを用いる。

等価粒径係数を変化させて、シリカ粒子の濃度  $C (= \rho_2 \cdot \phi)$  と採水して測定した濃度  $C_{\text{expt}}$  が一致する等価粒径係数を求めると  $c_0 = 0.90$  が得られた。図 7.3 に示す減衰スペクトルの測定結果に等価粒径係数  $c_0 = 0.90$  をもつ実験モデルを適用して濃度を測定した結果を図 7.6 と表 7.2 に示す。 $C_{\text{expt}}$  と減衰スペクトルから実験モデルを用いて算出したシリカ粒子の濃度  $C$  との差異は  $\pm 0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ( $\pm 1\% \text{FS}$ ) 以内にあり、実験モデルは 50% 粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の異なる三種類のシリカ粒子の濃度を測定できるモデルであることがわかった。

次に、粒度分布の測定結果を述べる。今回の測定には表 7.1 に示す粒度分布分布コードを用いており、粒度分布の測定結果は各粒子の粒度分布を示す結果が得られた。超音波減衰スペクトル法を用いて粒度分布を測定する場合には、逆解析法が用いられるため粒度分布に関する情報が重要となる。粒度分布に関する情報には 50% 粒径や 90% 粒径などがあるが、最も有益な情報はレーザ回折・散乱法等で測定した粒度分布である。粒度分布曲線から求めた数多くの粒度分布コードを測定に適用することによって数多くの粒度分布の中から測定した減衰スペクトルにベストフィットする粒度分布を見つけることができる。

以上の結果から、実験モデル  $K_2(f, d)$  は 50% 粒径 10  $\mu\text{m}$  未満のシリカ粒子の測定に適用できることがわかった。

## 7.4 散乱損失が支配的となる粒子 (50% 粒径 10 $\mu\text{m}$ 以上) の測定

### 7.4.1 実験の目的

本節では、現場型超音波減衰スペクトル計を用いて 50% 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上のシリカ粒子の懸濁液の減衰スペクトルを測定し、実験モデルを用いて減衰スペクトルからシリカ粒子の濃度と粒度分布を算出して、実験モデルの適用性を検証する。

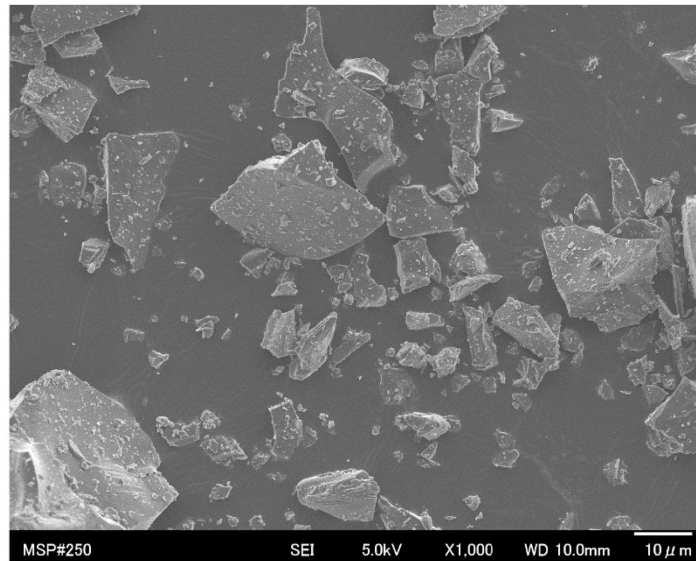


図 7.7MSP#250 シリカ粒子の形状観察

#### 7.4.2 実験用粒子

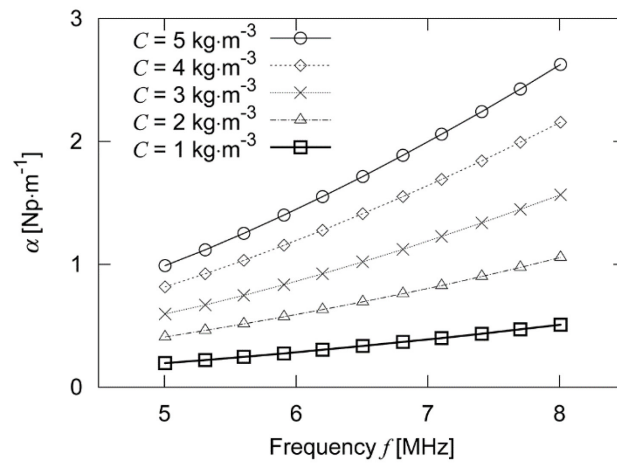
実験用粒子は、50% 粒径が約 10  $\mu\text{m}$ 、20  $\mu\text{m}$ 、30  $\mu\text{m}$  の三種類のシリカ粒子である。実験用粒子の SEM による観察画像を図 7.7 に示す。シリカ粒子は原石を粉砕してできた鋭角的な角をもつ粒子である。粒度分布の測定はレーザ回折・散乱法を用いる。また、シリカ粒子の密度は  $\rho_2=2600\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  である。

#### 7.4.3 実験方法

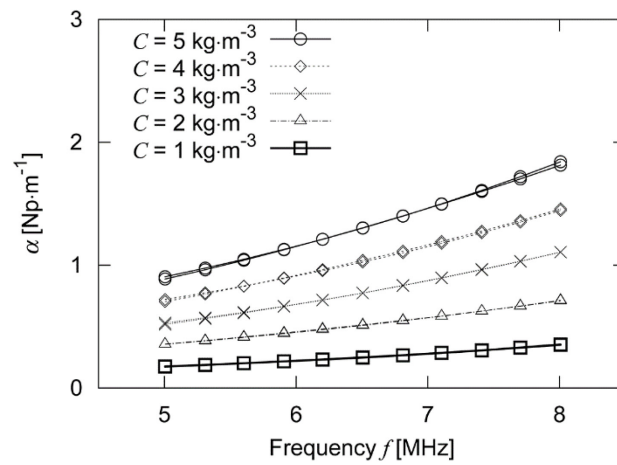
実験方法は 4.4.3 項による。

表 7.350%粒径 10  $\mu\text{m}$  以上のシリカ粒子の 50%粒径、5%粒径、95%粒径

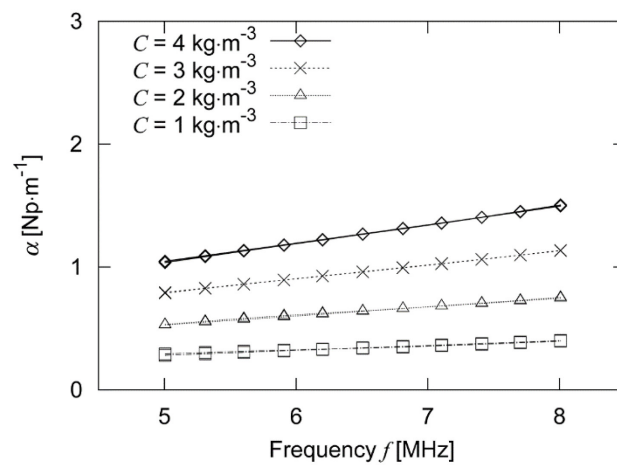
No.	Sample	Laserdiffracton		
		D50 $\mu\text{m}$	D05 $\mu\text{m}$	D95 $\mu\text{m}$
1	MSP#200	31.48	2.406	102.7
2	MSP#250	20.96	1.699	66.62
3	MSP#300	9.112	1.075	37.37



(a) MSP#200

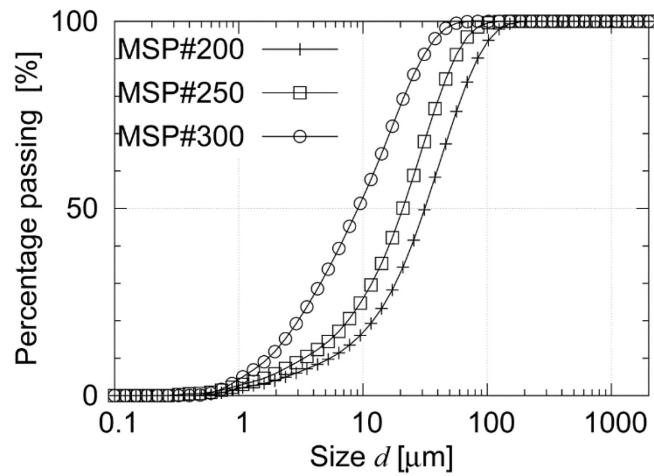


(b) MSP#250

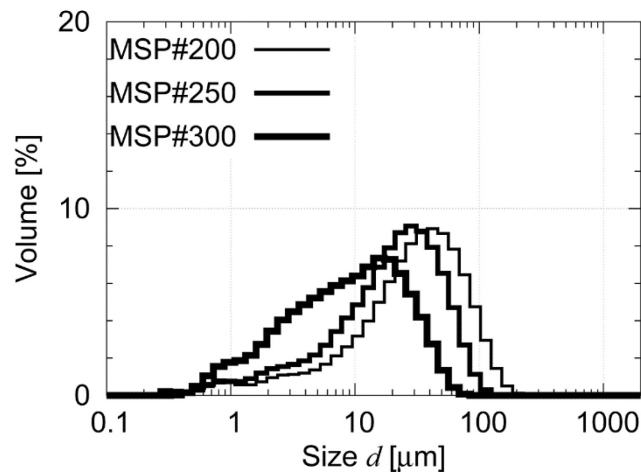


(c) MSP#300

図 7.850%粒径  $10 \mu\text{m}$  以上のシリカ粒子の減衰スペクトルの測定結果



(a)通過体積百分率



(b)体積百分率

図 7.9 レーザ回折・散乱法で測定した 50% 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上のシリカ粒子の粒度分布

#### 7.4.4 実験結果

各シリカ粒子の懸濁液の減衰スペクトルを測定結果を図 7.8 に示す。MSP#200 の減衰スペクトルを図 7.8(a)、MSP#250 の減衰スペクトルを図 7.8(b)、MSP#300 の減衰スペクトルを図 7.8(c) に示す。濃度はそれぞれ  $C=1.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $C=2.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $C=3.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $C=4.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $C=5.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  の 5 濃度とした。各粒子の減衰係数を比較すると、図 7.8(a) に示す 50% 粒径が約 30  $\mu\text{m}$  の MSP#200 の減衰係数が最も大きな値を示す。また、減衰スペクトルは 50% 粒径の変化によって大きく変化することがわかった。各々の粒子の減衰スペクトルを見ると、濃度  $C$  の増加によって減衰係数が等間隔で大きくなっており、減衰係数が濃度に比例して増加することがわかった。

次に、採水してレーザ回折・散乱法で測定した実験用粒子の粒度分布を図 7.9 に示す。また、

表 7.450 %粒径 10  $\mu\text{m}$  以上のシリカ粒子の粒度分布コード

No.	Sample	$C_{\text{mean}}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\rho_1$	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$
1		1.0	0.28	2.03	1.20	3.70	0.65
2		2.0	0.30	2.17	1.30	3.72	0.65
3	MSP#200	3.0	0.24	1.97	1.20	3.67	0.65
4		4.0	0.28	2.05	1.20	3.70	0.65
5		5.0	0.30	2.19	1.25	3.73	0.65
6		1.0	0.36	1.91	1.20	3.34	0.60
7		2.0	0.28	1.68	1.15	3.33	0.65
8	MSP#250	3.0	0.34	2.00	1.25	3.41	0.60
9		4.0	0.28	1.63	1.15	3.33	0.65
10		5.0	0.28	1.66	1.15	3.32	0.65
11		1.0	0.62	1.55	1.00	2.96	0.55
12		2.0	0.62	1.55	1.00	2.97	0.55
13	MSP#300	3.0	0.68	1.67	1.05	2.98	0.50
14		4.0	0.64	1.56	1.00	2.95	0.50
15							

各粒子の 50 %粒径、5 %粒径および 95 %粒径を表 7.3 に示す。表 7.4 は粒度分布の測定結果から求めた二峰性対数正規分布モデルの粒度分布コードを示す。

次に、採水して測定した懸濁液の濃度と固体体積分率を表 7.5 に示す。 $C_{\text{mean}}$  は平均濃度、 $C_{\text{expt}}$  は濃度の測定値、 $\phi_{\text{expt}}$  は固体体積分率である。固体体積分率  $\phi_{\text{expt}}$  は式(4.5)から算出する。シリカ粒子の密度は  $\rho_2=2600\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  である。

#### 7.4.5 等価粒径係数

図 7.9 に示すようにシリカ粒子の粒径は 1~100  $\mu\text{m}$  の範囲に分布しているため、粒子による超音波の減衰は散乱損失だけでなく粘性損失による減衰を考慮する必要がある。浮遊砂計測に用いる実験モデルの三種類の等価粒径係数は 7.2.1 項に示す測定方法を応用して算出することができる。濃度と粒度分布の測定では固体体積分率と粒度分布を未知数として反復計算を行ったが、等価粒径係数の算出では、固体体積分率と粒度分布に測定データを用いて、三種類の等価粒径係数  $a_0$ 、 $b_0$ 、 $c_0$  を未知数として反復計算を行い、測定値と理論値がベストフィットする等価粒径係数を決定する。

MSP#250 シリカ粒子の測定データから求めた等価粒径係数を図 7.10 に示す。等価粒径係数は  $a_0=0.60$  として他の二つの等価粒径係数を求めた。等価粒径係数は  $1.42 \leq b_0 \leq 1.67$ 、 $0.74 \leq c_0 \leq 0.83$  の範囲にあることがわかった。

表 7.5 50% 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上のシリカ粒子の濃度、固体体積分率

No.	Sample	$C_{\text{mean}}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$C_{\text{expt}}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\phi_{\text{expt}}$ $\times 10^6$
1		1.0	0.945	363
2		2.0	1.884	725
3	MSP#200	3.0	2.779	1069
4		4.0	3.770	1450
5		5.0	4.758	1830
6		1.0	0.919	353
7		2.0	1.880	723
8	MSP#250	3.0	2.856	1098
9		4.0	3.785	1456
10		5.0	4.744	1825
11		1.0	0.919	353
12		2.0	1.896	729
13	MSP#300	3.0	2.884	1109
14		4.0	3.842	1478
15		—	—	—

表 7.6 MSP#250 シリカ粒子の平均等価粒径係数

No.	$a_0$	$b_0$	$c_0$
1	0.60	1.55	0.80
2	0.65	1.32	0.80
3	0.70	1.15	0.82
4	0.75	1.03	0.85

次に、等価粒径係数を  $a_0=0.65$ 、 $a_0=0.70$ 、 $a_0=0.75$  に変えて、全測定データからに等価粒径係数  $b_0$ 、 $c_0$  を算出する。図 7.11(a) は等価粒径係数  $a_0$  と  $b_0$  との関係を示す。等価粒径係数  $a_0$  が小さくなるにしたがって等価粒径係数  $b_0$  は大きくなることがわかった。図 7.11(b) は等価粒径係数  $a_0$  と  $c_0$  との関係を示す。等価粒径係数  $c_0$  は等価粒径係数  $a_0$  に大きく影響されないことがわかった。

#### 7.4.6 考察

実験結果から得られた等価粒径係数を表 7.6 に示す。等価粒径係数  $a_0$  と  $b_0$  は Schaafsma and Hay[1] の実験から  $0.6 \leq a_0 \leq 1.0$ 、 $1.0 \leq b_0 \leq 1.8$  の値が示されている。 $a_0$  は粒径補正係数で



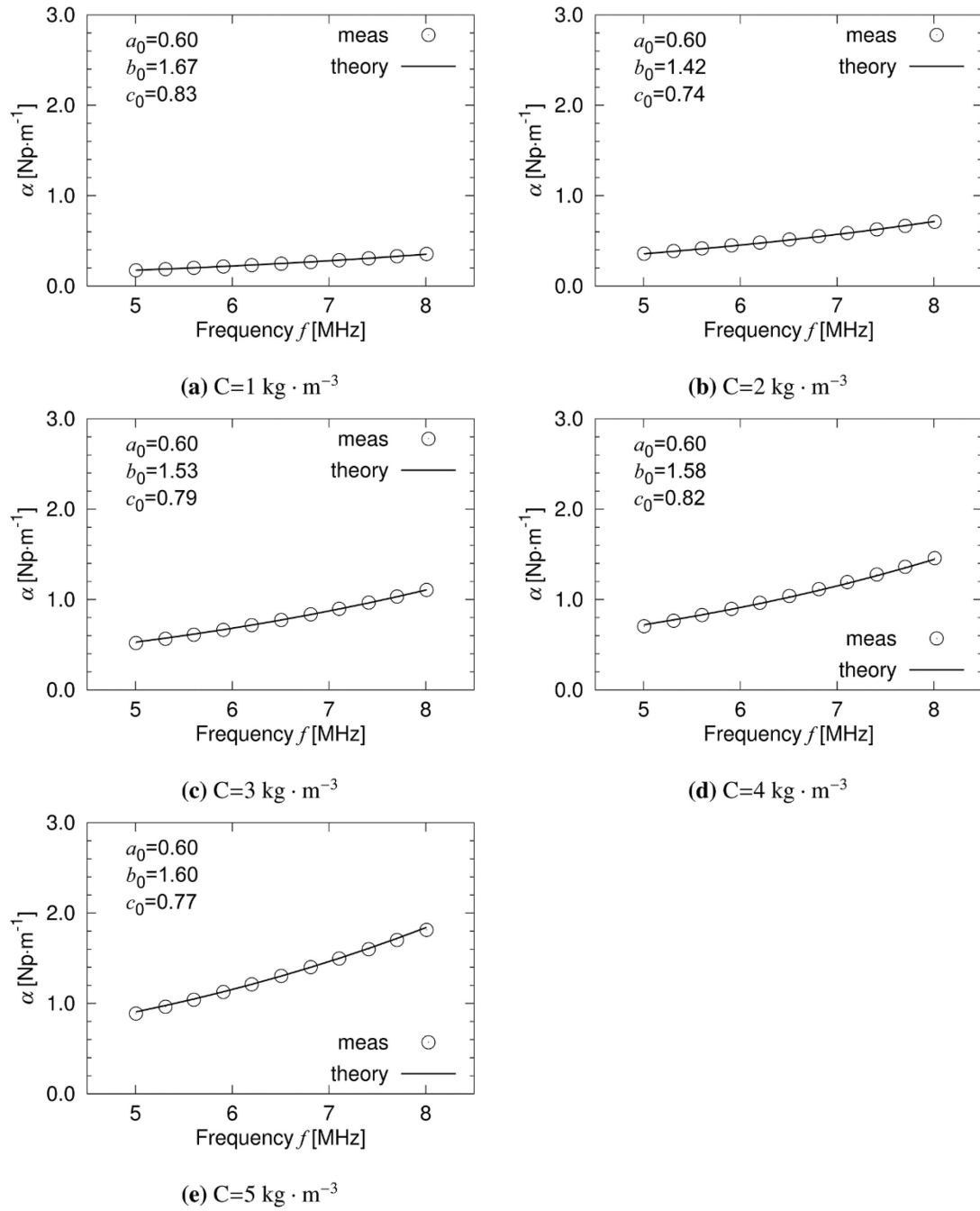


図 7.10 MSP#250 の減衰スペクトルから算定した等価粒径係数( $a_0=0.60$ )

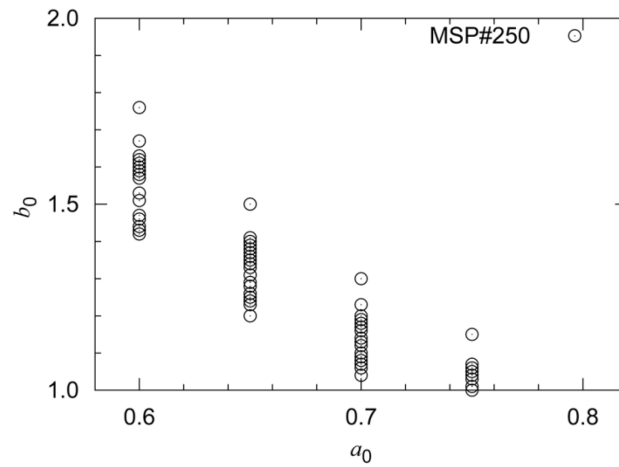
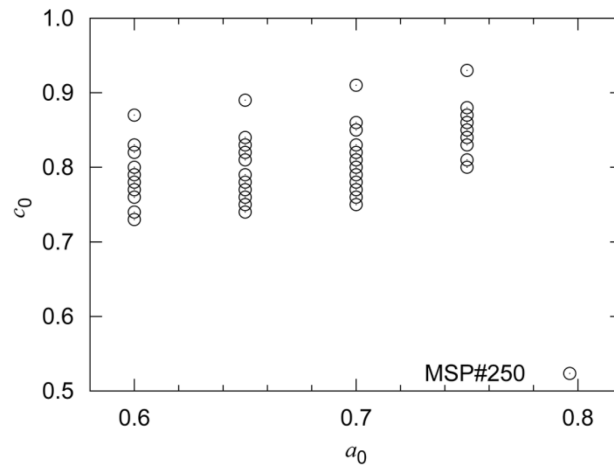
(a)等価粒径係数  $a_0$  と  $b_0$  との関係(b)等価粒径係数  $a_0$  と  $c_0$  との関係

図 7.11 シリカ MSP#250 の等価粒径係数の検討結果

あり、 $b_0$  は体積濃度の補正係数である。したがって、等価粒径係数  $a_0$  は粒子の形状から推定することができる。図 7.7 に示す MSP#250 シリカ粒子の形状と類似した粒子の等価粒径係数を Schaafsma and Hay [1] の実験結果から求めると、シリカ粒子の等価粒径係数  $a_0=0.63$  が得られる。これによって MSP#250 の等価粒径係数を  $a_0=0.60$  とし、表 7.6 から  $b_0=1.55$ 、 $c_0=0.80$  と決定した。

次に、これらの等価粒径係数を適用した実験モデルを用いて、図 7.8 に示す MSP#200、MSP#250 および MSP#300 のシリカ粒子の減衰スペクトルの測定結果から濃度と粒度分布を算出する。粒度分布コードは表 7.4 を適用する。濃度の測定結果を図 7.12 に示す。 $C_{\text{expt}}$  は採水して測定した濃度、 $C$  は減衰スペクトルから実験モデルを用いて超音波減衰スペクトル法で算出した濃度を示す。採水して測定した濃度と減衰スペクトルから実験モデルを用いて算出したシリカ粒子の濃度との差異は  $\pm 0.1 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ( $\pm 1\% \text{FS}$ ) 以内にある。実験モデルは 50 % 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の異なる三種

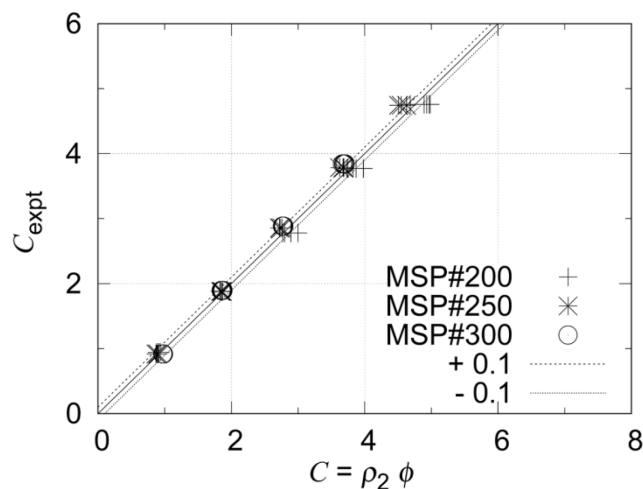


図 7.12 浮遊砂測定に用いる実験モデルによるシリカ粒子の濃度測定

類のシリカ粒子の濃度を測定できるモデルであることがわかった。

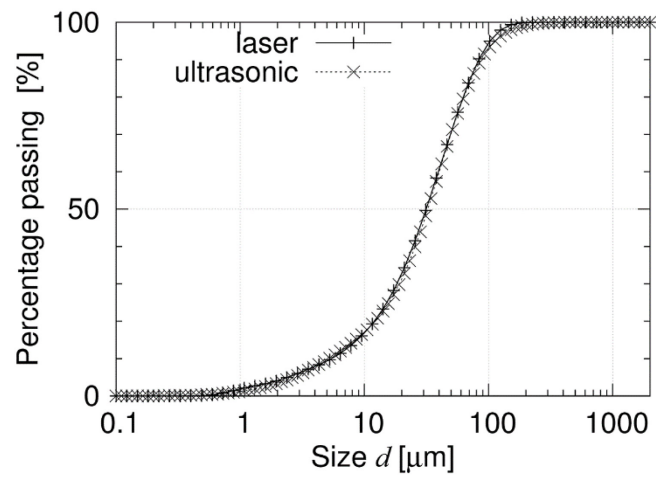
また、粒度分布の測定結果の一例を図 7.13 に示す。今回の測定では粒度分布モデルは表 7.4 に示す 14 の二峰性対数正規分布モデルを適用した。超音波減衰スペクトル法による粒度分布の測定方法はモデル依存の逆解析であり、粒度分布の異なる複数の粒度分布モデルの中からレーザ回折・散乱法で測定した粒度分布と一致する粒度分布を選択していることがわかった。

以上の結果から、散乱損失と粘性損失を考慮した実験モデル  $K_2(f,d)$  は、50 % 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上のシリカ粒子の濃度と粒度分布の測定に適用できることがわかった。

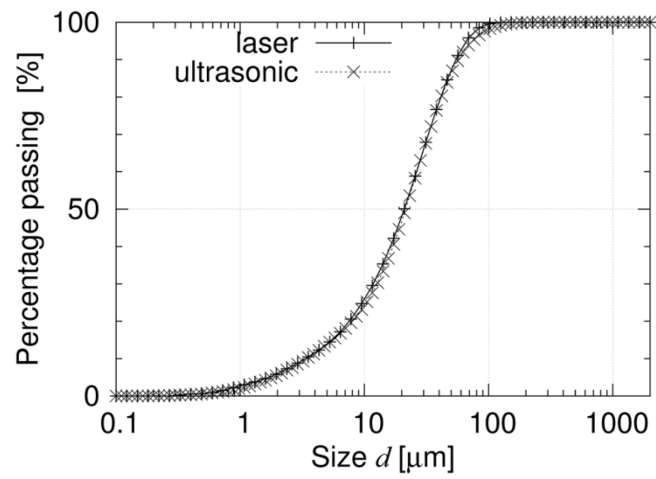
## 7.5 結論

本章では、浮遊砂計測に用いる実験モデルを提案した。また、50 % 粒径 10  $\mu\text{m}$  未満のシリカ粒子と 50 % 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上のシリカ粒子の濃度と粒度分布を測定して実験モデルを検証した。本章で得られた結論は以下のとおりである。

- 浮遊砂計測に用いる実験モデル  $K_2(f,d)$  は、粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の非球形粒子の測定に適用する等価球形散乱体モデルと、粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の非球形粒子の測定に適用する古川らの実験モデルを合わせた三種類の等価粒径係数をもつ実験モデルである。第三の等価粒径係数は粘性損失モデルに適用する係数である。
- 50 % 粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の三種類のシリカ粒子の測定を行い、この実験モデルを適用して濃度と粒度分布を同時に測定できることを確認した。
- また、50 % 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の三種類のシリカ粒子の測定を行い、この実験モデルを適用して濃度と粒度分布を同時に測定できることを確認した。



(a) MSP#200 ( $C = 1 \text{ kgm}^{-3}$ )



(b) MSP#250 ( $C = 1 \text{ kgm}^{-3}$ )

図 7.13 浮遊砂計測に用いる実験モデルによる 50% 粒径 10  $\mu\text{m}$  以上のシリカ粒子の粒度分布の測定結果(例)



## 参考文献

- [1] S.Schaafsma and A.E.Hay; Attenuation in suspensions of irregularly shaped sediment particles; A two-parameter equivalent spherical scatterer model. J. Acoust. Soc. Am. Vo.102, No.3, pp.1485-1502, 1996.
- [2] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 広帯域の超音波パルスを用いた浮遊砂濃度計測システムの開発. 電子情報通信学会技術報告. US2014-78, pp.21-26, 2015.
- [3] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 超音波減衰スペクトル計による SS 測定に用いる等価球形散乱体モデルの検証. 河川技術論文集. 第 21 巻, pp.55-60, 2015.
- [4] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 超音波減衰スペクトル法による六角川感潮部の懸濁物質濃度と粒度分布の連続計測. 土木学会論文集 B1 (水工学). 第 70 巻, No.4, pp.I\_607-I\_612, 2014.



## 第 8 章

# 現場型超音波減衰スペクトル計による 河川濁水の浮遊砂計測

### 8.1 序論

近年、ダムからの排砂による影響評価や流砂系の総合土砂管理のため土砂動態のモニタリングが行われており、採水分析に代わる浮遊砂の測定について多くの研究がなされてきた。たとえば、角ら[1,2]は黒部川のダム連携排砂による高濃度の浮遊砂を測定するため、差圧式浮遊砂濃度計を開発して連続観測を行っている。また、横山ら[3,4]は独自に開発した音響式浮遊砂測定装置を用いて、六角川で実証試験を行っている。これまでの研究では浮遊砂の濃度の連続測定に重点がおかれてきたが、流砂系の総合土砂管理では粒径集団別の土砂管理[5,6]が行われるので、浮遊砂の濃度だけでなく、粒度分布の測定が必要となる。

本章では、超音波減衰スペクトル計を用いた実河川の浮遊砂濃度と粒度分布の現場測定[7,8]について述べる。測定地点は、天竜川中流部に位置する平岡ダム（中部電力、長野県天龍村）、および六角川（佐賀県）である。平岡ダムでは水位低下による土砂スルーシング時に浮遊砂濃度と粒度分布を測定する。また、六角川では汽水域での測定、高濃度の浮遊土砂の測定を目的として実施する。

### 8.2 発電ダムの土砂スルーシング時の浮遊砂計測

#### 8.2.1 目的

本節は、発電ダムの土砂スルーシング時において超音波減衰スペクトル計で測定した減衰スペクトルに浮遊砂計測に用いる実験モデル  $K_2(f,d)$  を適用して浮遊砂濃度と粒度分布を測定し、超音波減衰スペクトル計による浮遊砂計測方法を検証する。

#### 8.2.2 概要

測定地点は図 8.1 に示す長野県天龍村に位置する平岡ダム（高さ 62.50m、中部電力）の上流約 100 m にある平岡発電所（同）取水口である。平岡ダムは天竜川水系天竜川の中流域にあり、平岡ダムから約 40km 下流に佐久間ダム（電源開発）が位置する。平岡ダムから佐久間ダムまでの区間には大きな支川の流入がなく、平岡ダムを通過する土砂は佐久間ダムに流入する土砂と



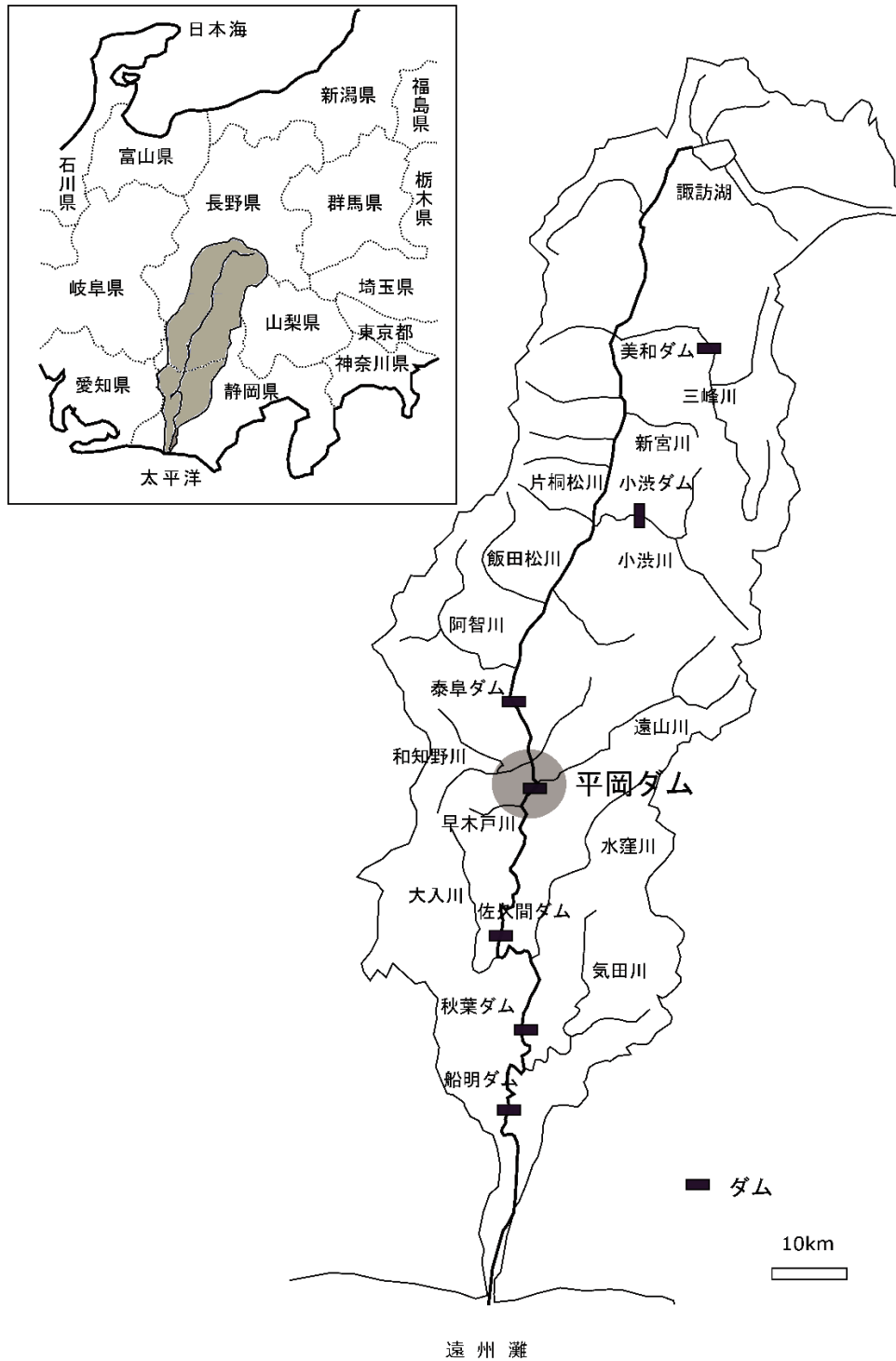


図 8.1 平岡ダムの位置図

なる。

測定期間は平成 26 年(2014 年)10 月 5 日から 7 日までの 3 日間、10 月 5 日 14 時からダム放流が開始された。この期間中の最大流入量・最大放流量は約  $1100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  であった。発電ダムの操作はダム操作規程に基づき行われる。平岡ダムは第二類に指定されたダムで、洪水警戒時には、調整池水位を予備放流水位まで低下し、洪水時にはダムの洪水吐ゲートを全開にして洪水を処理する操作が行われており、この運用は土砂スルーシグと呼ばれている。また、ダム操作規程によって予備放流水位は最低水位-4.2 m と定められている。

現場型超音波減衰スペクトル計による浮遊砂の測定は、平岡発電所取水口に手動式昇降装置を設置して、調整池の水深 1 m の位置に超音波減衰スペクトル計を吊り下げて 10 分間隔で自動計測を行う。超音波スペクトル計は陸上部に設置した測定制御機と防水ケーブルで接続されており、測定データは測定制御機を経由して浮遊砂自動観測装置(PC)に伝送される。平岡取水口地点の浮遊砂測定状況を図 8.2 に示す。平岡ダムの測定に使用した現場型超音波減衰スペクトル計を図 8.2(左)に示す。また、図 8.2(右上)には手動昇降装置、図 8.2(右下)には測定中の測定制御機と浮遊砂自動観測装置(PC)を示す。

また、市販の万能採水器(宮本理研工業、2ℓ 用)を用いて採水し、採取した河川水を分析機関に送付して粒度分布、浮遊砂の濃度および強熱減量を測定する。粒度分布の測定はレーザ回折・散乱法、浮遊砂の濃度の測定は環告 59 号付表 9、強熱減量の測定は JIS K0102(2013)による。また、SEM による土粒子の形状観察を行う。

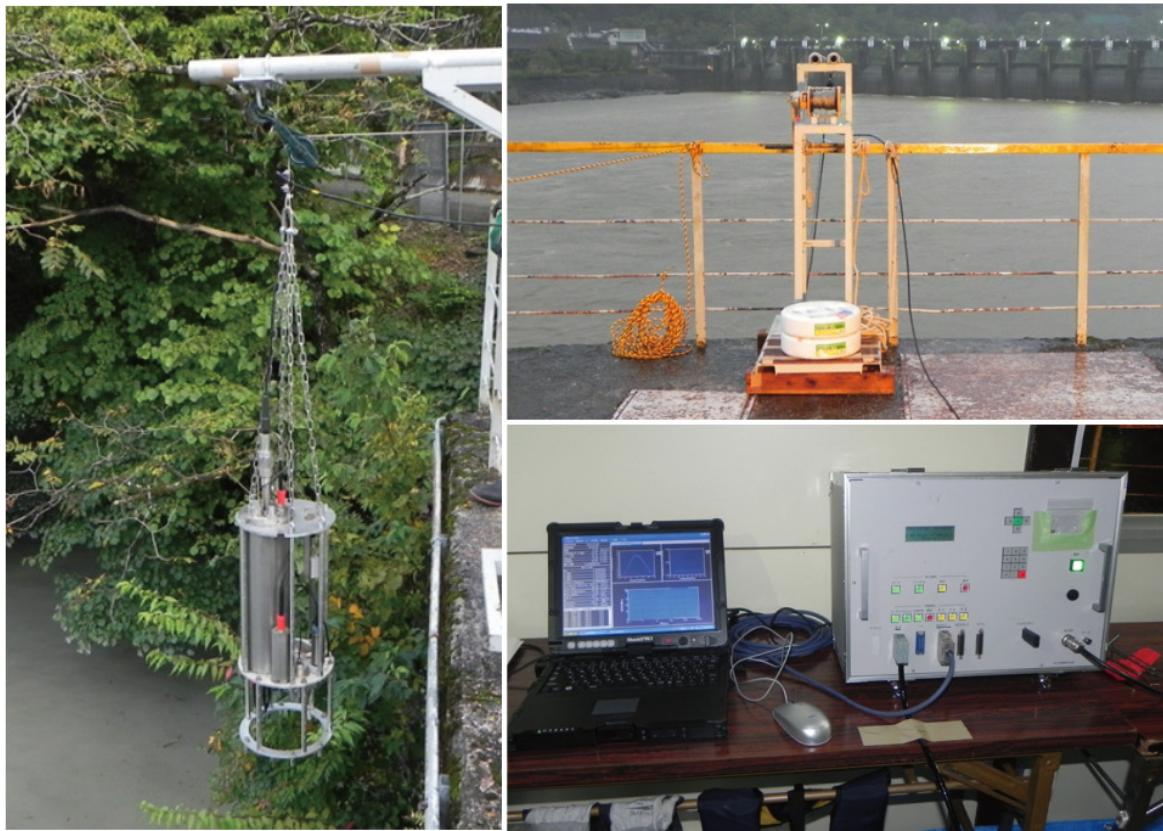
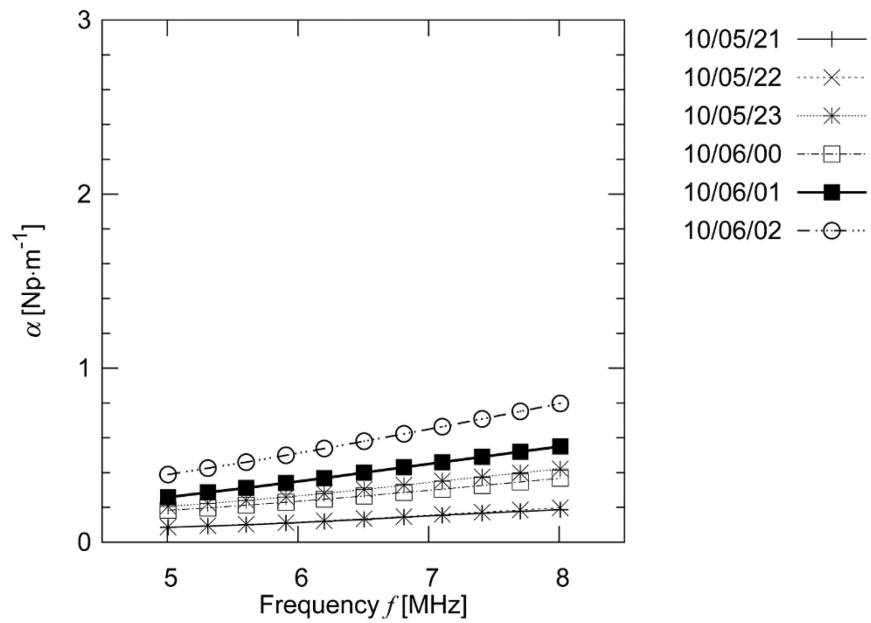


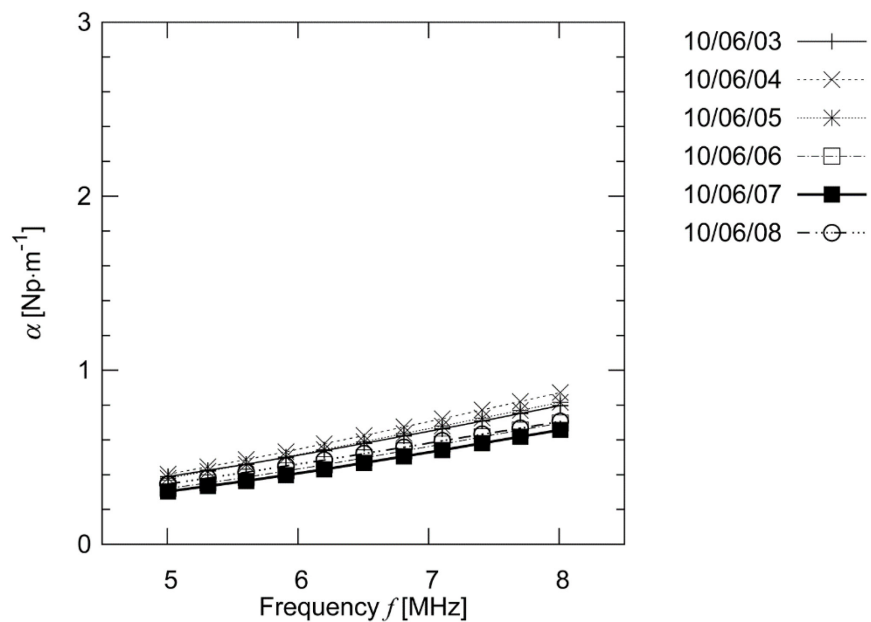
図 8.2 平岡取水口地点の浮遊砂の測定

### 8.2.3 実験結果

- 現場型超音波減衰スペクトル計で測定した減衰スペクトルを図 8.3～図 8.4 に示す。水位低下中に測定した減衰スペクトルを図 8.3(a)に示す。また、水位低下完了時に測定した減衰スペクトルを図 8.3(b)に示す。最大流入量発生時に測定した減衰スペクトルを図 8.4(a)に、また、水位回復中に測定した減衰スペクトルを図 8.4(b)に示す。これらの結果から、減衰スペクトルは水位の低下によって大きくなり、流入量のピーク時付近で最大値となり、水位回復とともに小さくなる傾向を示すことがわかった。
- 次に、レーザ回折・散乱法で測定した浮遊砂の粒度分布を図 8.5～図 8.6 に示す。水位低下中の浮遊砂の粒度分布は図 8.5(a)、(b)に示すように水位低下とともに浮遊砂の粒径が大きくなることがわかった。水位低下時の浮遊砂の粒径に大きな変化は見られないが、水位低下時には最大粒径約 500  $\mu\text{m}$ 、50%粒径が 30～40  $\mu\text{m}$ の土砂が洪水とともに下流に移動していることが分かった。水位回復中の浮遊砂の粒度分布は図 8.6(c)、(d)に示すように水位の上昇とともに浮遊砂の粒径が小さくなることがわかった。また、図 8.5～図 8.6 に示す粒度分布から求めた二峰性対数正規分布モデルの粒度分布コードを表 8.4 に示す。
- 次に、環告 59 号付表 9 によるガラス繊維濾紙法で測定した濃度と固体体積分率を表 8.2 に示す。最大は 1.2  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、最小濃度は 0.16  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ となった。固体体積分率は式

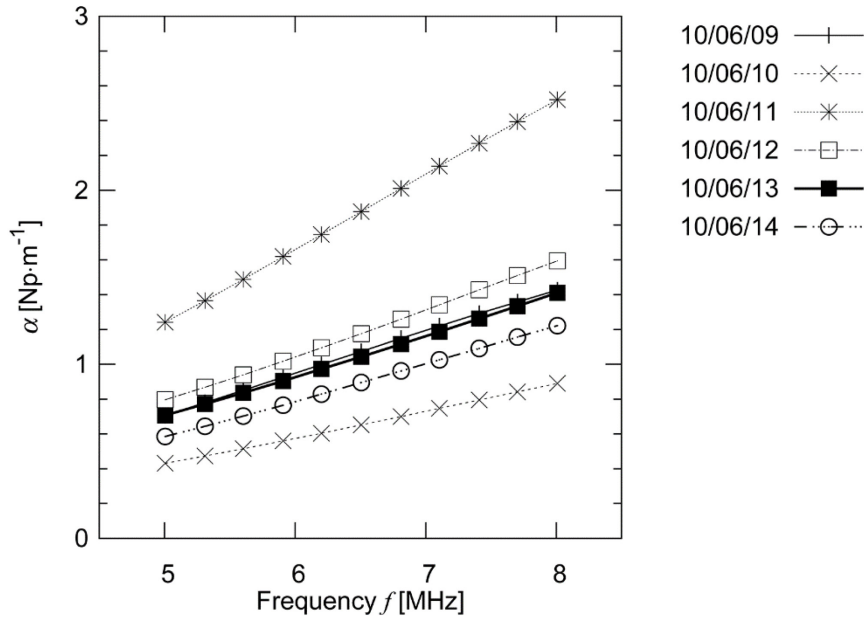


(a) 10/05/21:00～10/06/02:00

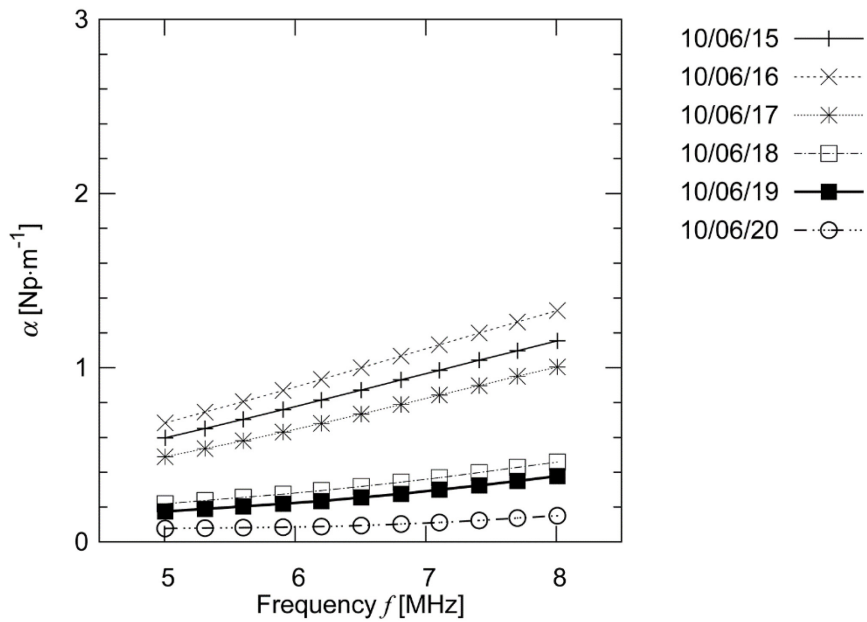


(b) 10/06/03:00～10/06/08:00

図 8.3 平岡取水口地点の減衰スペクトルの測定結果(その1)



(a) 10/06/09:00~10/06/14:00



(b) 10/06/15:00~10/06/20:00

図 8.4 平岡取水口地点の減衰スペクトルの測定結果(その 2)

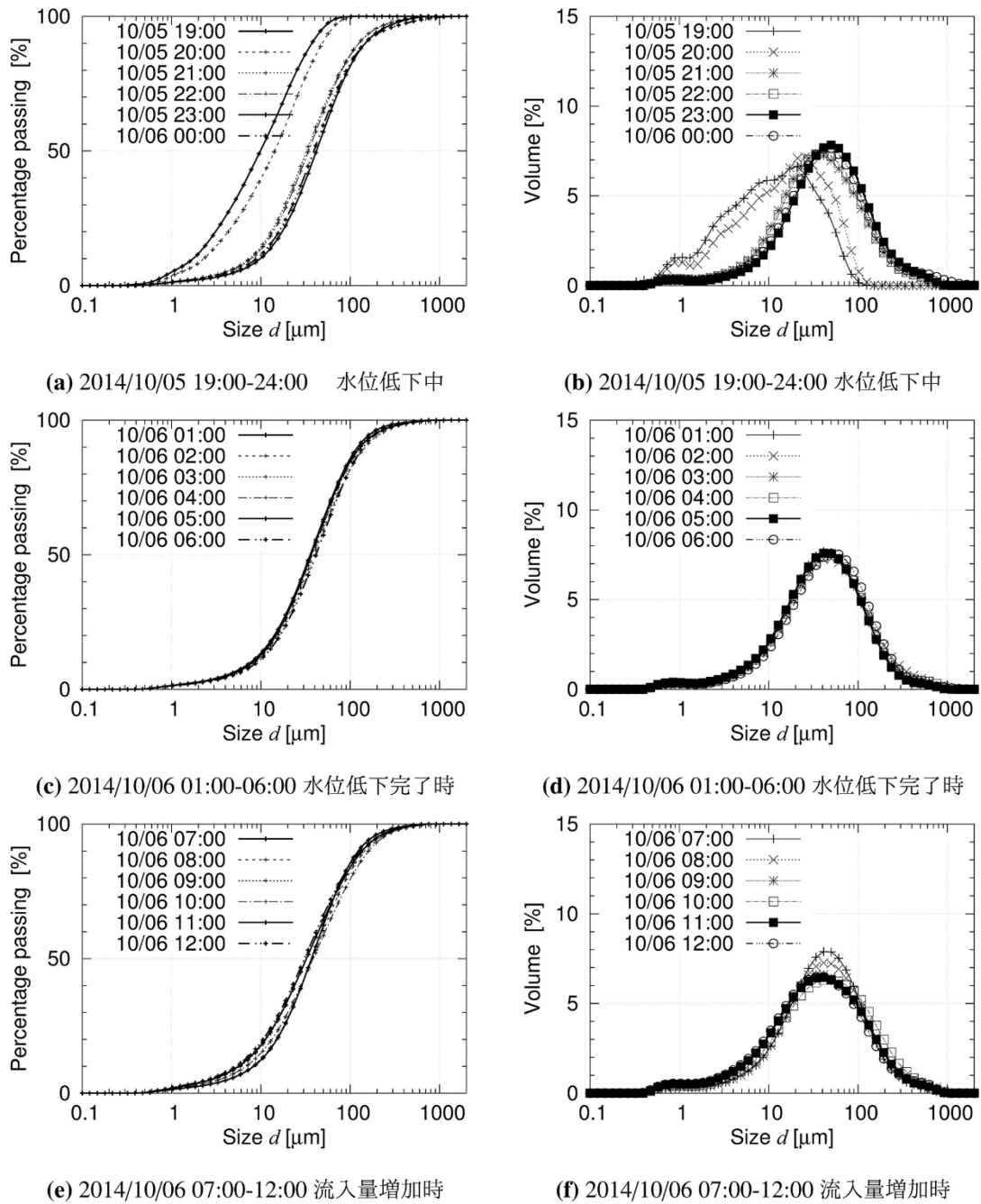


図 8.5 水位低下から最大流入量発生時の平岡取水口地点の浮遊砂の粒度分布

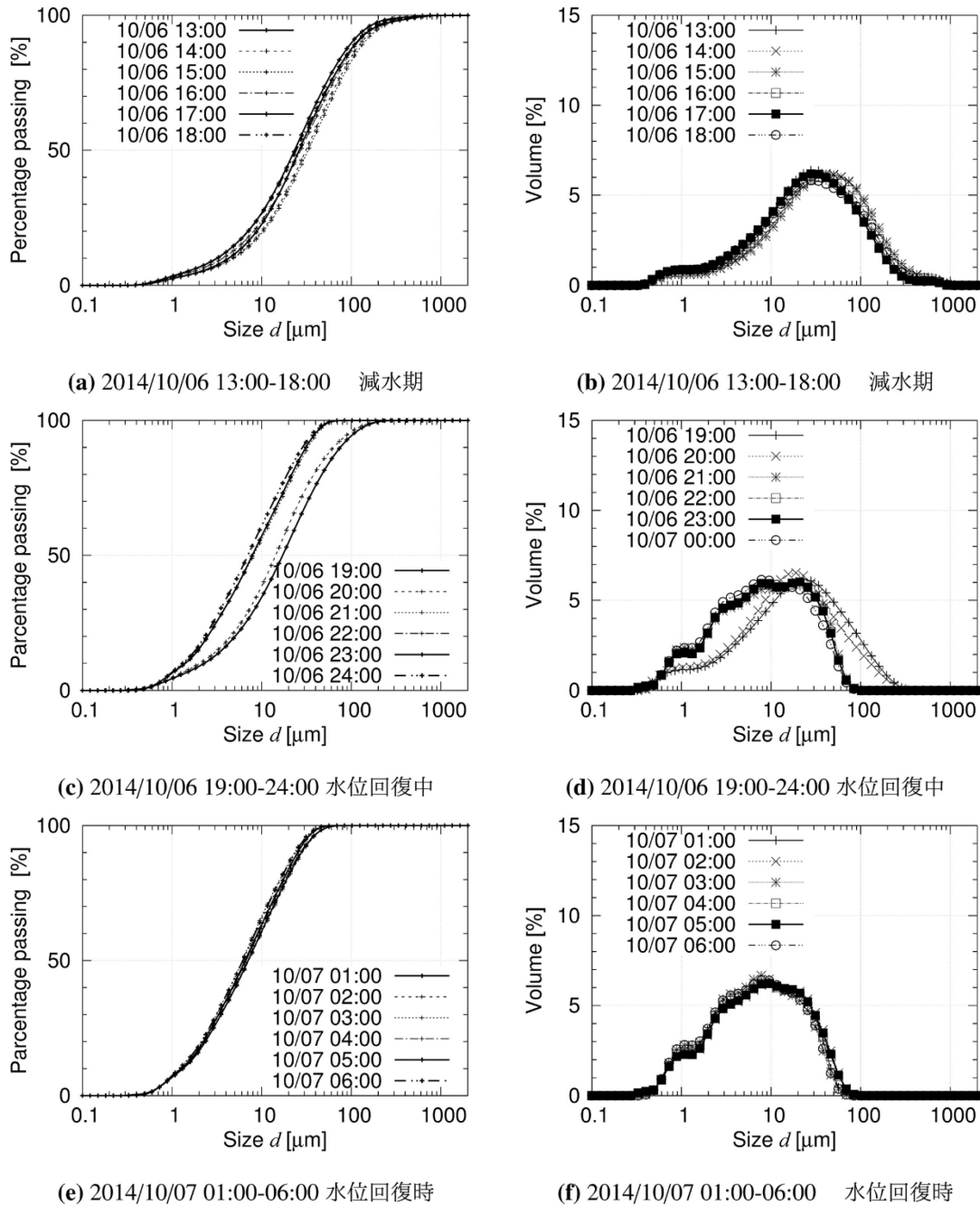
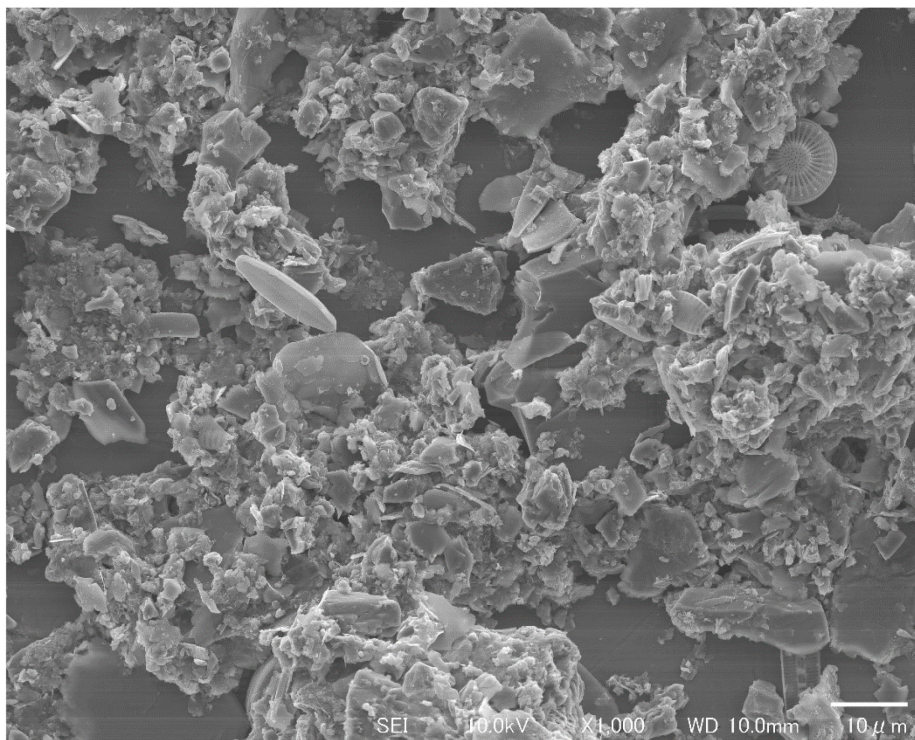
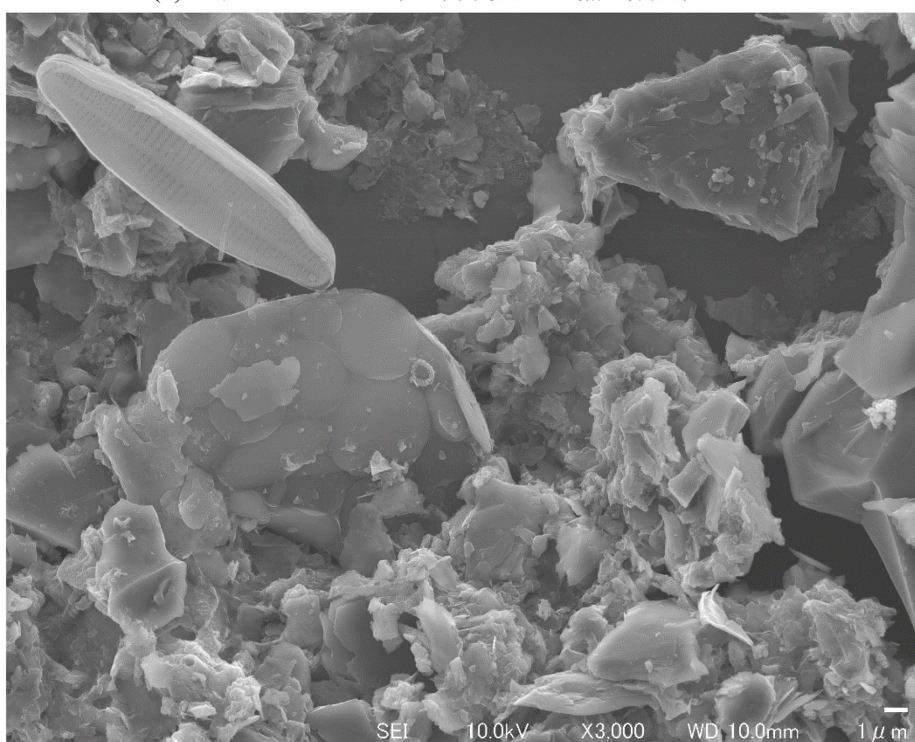


図 8.6 最大流入量発生後から水位回復までの平岡取水口地点の浮遊砂の粒度分布



(a) 土砂スルーシグ時の平岡取水口地点の浮遊砂 ×1000



(b) 土砂スルーシグ時の平岡取水口地点の浮遊砂 ×3000

図 8.7 SEM による土砂スルーシグ時の平岡取水口地点で採取した浮遊砂の形状観察



表 8.1 平岡取水口地点の浮遊砂の粒度分布コード

No.	Date	Time	$p_1$	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$
1	20141005	21:00	0.18	2.71	1.80	3.58	0.95
2	20141005	22:00	0.22	2.86	1.80	3.63	0.90
3	20141005	23:00	0.24	3.14	1.75	3.83	0.85
4	20141006	00:00	0.28	3.39	1.95	3.72	0.85
5	20141006	01:00	0.26	3.00	1.75	3.70	0.85
6	20141006	02:00	0.18	2.74	1.80	3.77	0.95
7	20141006	03:00	0.18	2.58	1.80	3.70	0.90
8	20141006	04:00	0.20	2.67	1.80	3.73	0.90
9	20141006	05:00	0.16	2.09	1.40	3.73	0.90
10	20141006	06:00	0.16	2.30	1.45	3.87	0.90
11	20141006	07:00	0.20	2.67	1.75	3.71	0.85
12	20141006	08:00	0.18	2.69	1.85	3.74	0.95
13	20141006	09:00	0.26	2.72	1.80	3.63	1.00
14	20141006	10:00	0.18	2.22	1.50	3.85	1.05
15	20141006	11:00	0.18	2.03	1.50	3.68	1.05
16	20141006	12:00	0.28	2.56	1.70	3.63	1.00
17	20141006	13:00	0.34	2.61	1.70	3.47	1.00
18	20141006	14:00	0.28	2.20	1.45	3.75	1.00
19	20141006	15:00	0.28	2.22	1.55	3.80	1.00
20	20141006	16:00	0.32	2.10	1.50	3.66	1.00
21	20141006	17:00	0.30	1.85	1.45	3.50	1.00
22	20141006	18:00	0.24	1.51	1.30	3.55	1.05
23	20141006	19:00	0.36	1.63	1.30	3.30	0.95
24	20141006	20:00	0.22	1.02	1.15	2.97	1.00

(4.5)で算出した。土粒子の密度は $\rho_2$ は $2.645\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ である。

- 最後に、図 8.7 に浮遊砂の SEM による粒子形状観察結果を示す。浮遊砂は 10 月 6 日の 0 時に採水した。図 8.7(a)は 1000 倍、図 8.7(b)は 3000 倍の観察結果を示す。これらの図から、鉱物粒子は鋭角な角をもつ粒子が多くみられること、個々の鉱物粒子が分離した状態ではなく団粒構造となっていることが分かった。図 8.7(b)には珪藻や有機物が見られる。

表 8.2 ガラス繊維濾紙法で測定した浮遊砂濃度と固体体積分率

No.	Date	Time	$C_{\text{GFP}}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\phi$ $\times 10^{-6}$
1	20141005	21:00	0.192	73
2	20141005	22:00	0.199	75
3	20141005	23:00	0.356	135
4	20141006	00:00	0.324	122
5	20141006	01:00	0.337	127
6	20141006	02:00	0.472	178
7	20141006	03:00	0.417	158
8	20141006	04:00	0.445	168
9	20141006	05:00	0.457	173
10	20141006	06:00	0.424	160
11	20141006	07:00	0.371	140
12	20141006	08:00	0.474	179
13	20141006	09:00	0.760	287
14	20141006	10:00	1.190	450
15	20141006	11:00	1.020	386
16	20141006	12:00	0.890	336
17	20141006	13:00	0.741	280
18	20141006	14:00	0.802	303
19	20141006	15:00	0.574	217
20	20141006	16:00	0.587	222
21	20141006	17:00	0.360	136
22	20141006	18:00	0.348	132
23	20141006	19:00	0.237	90
24	20141006	20:00	0.158	60

#### 8.2.4 実験モデルの等価粒径係数

実験モデル  $K_2(f,d)$  に適用する等価粒径係数は、7.4.5 項に基づき、現場の測定で得られた減衰スペクトル、粒度分布コードおよび固体体積分率のそれぞれの測定値を用いて算出する。平岡ダムの浮遊砂は粒径がサブミクロンから約 1 mm まで幅広い粒径の粒子が含まれるので、実験モデルは散乱損失と粘性損失を考慮する必要がある。

図 6.7 に示す天竜川産のシルト・細砂の実験から  $a_0=0.68$  が得られているので、ここでは  $a_0=0.70$  を固定値として、 $1.0 \leq b_0 \leq 1.8$ 、 $0.50 \leq c_0 \leq 1.00$  の範囲でこれらの値を 0.05 間隔で変化させて固体体積分率と等価粒径係数  $a_0$  と  $b_0$  を求めた。等価粒径係数と固体体積分率の算出結果を表 8.3 に示す。10月5日23時から10月6日15時までの等価粒径係数として  $a_0=0.70$ 、 $b_0=1.00$ 、

$c_0=0.50$  が得られた。

表 8.3 平岡取水口地点の浮遊砂の等価粒径係数( $a_0=0.70$ の場合)の算出結果

No.	Date	Time	$a_0$	$b_0$	$c_0$	$\phi$ $\times 10^{-6}$
1	20141005	21:00	0.70	1.15	0.70	110
2	20141005	22:00	0.70	1.05	1.00	129
3	20141005	23:00	0.70	1.00	0.50	233
4	20141006	00:00	0.70	1.00	0.50	209
5	20141006	01:00	0.70	1.00	0.50	326
6	20141006	02:00	0.70	1.00	0.50	442
7	20141006	03:00	0.70	1.00	0.50	509
8	20141006	04:00	0.70	1.00	0.50	468
9	20141006	05:00	0.70	1.00	0.50	407
10	20141006	06:00	0.70	1.00	0.50	353
11	20141006	07:00	0.70	1.00	0.50	419
12	20141006	08:00	0.70	1.00	0.50	817
13	20141006	09:00	0.70	1.05	0.50	489
14	20141006	10:00	0.70	1.00	0.50	1317
15	20141006	11:00	0.70	1.00	0.50	892
16	20141006	12:00	0.70	1.00	0.50	810
17	20141006	13:00	0.70	1.35	0.55	624
18	20141006	14:00	0.70	1.00	0.50	651
19	20141006	15:00	0.70	1.00	0.50	726
20	20141006	16:00	0.70	1.25	0.55	524
21	20141006	17:00	0.70	1.20	0.95	298
22	20141006	18:00	0.70	1.55	0.95	184
23	20141006	19:00	0.70	1.55	1.00	92
24	20141006	20:00	0.70	1.40	0.95	72

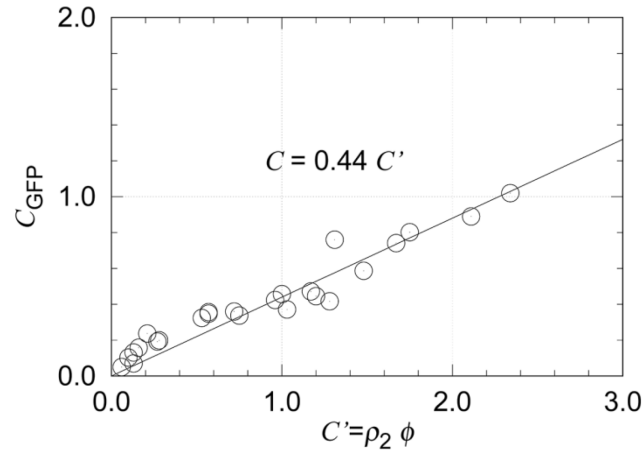


図 8.8 平岡取水口地点の濃度補正係数

### 8.2.5 濃度補正係数

次に、図 8.3～図 8.4 に示す減衰スペクトルに実験モデルを適用して求めた濃度とガラス繊維濾紙法で測定した濃度との関係を図 8.8 に示す。横軸は超音波減衰スペクトル法で測定した濃度  $C'$ 、縦軸はガラス繊維濾紙法で測定した濃度  $C_{GFP}$  を示す。測定に適用する粒度分布分モデルには表 8.1 に示す粒度分布コードを適用した。この結果からガラス繊維濾紙法で測定した濃度  $C (=C_{GFP})$  と超音波減衰スペクトル法で測定した濃度  $C' (=ρ_2 \cdot φ)$  との関係を次式に示す。

$$C = \varepsilon \rho_2 \cdot \phi \quad (8.1)$$

ここで、 $\varepsilon$  は濃度補正係数である。浮遊砂には図 8.7 に見られるように珪藻や有機物などの揮発性浮遊物質 (Volatile Suspended Solids、以下「VSS」という) が含まれているので、超音波減衰スペクトル法で算出した固体体積分率から濃度を求める場合は濃度補正が必要である。図 8.8 から平岡ダムの濃度補正係数  $\varepsilon=0.44$  が得られた。

### 8.2.6 実験モデルによる浮遊砂計測

現場型超音波減衰スペクトル計を用いて 10 分間隔で自動測定した減衰スペクトルの測定データに実験モデル  $K_2(f,d)$  を適用して濃度と粒度分布を求める。粒度分布分モデルは表 8.1 に示す粒度分布コードを適用する。計測結果は以下のとおりである。

平岡調整池水位、流入量・放流量および現場型超音波減衰スペクトル計で測定した濃度と 50 % 粒径の測定結果を図 8.9 に示す。図 8.9(a) は平岡調整池の運用水位を示す。10 月 5 日 14 時にダム放流が開始され、ダム水位を計画的に予備放流水位 (LWL-4.2 m) まで低下させ、ダム水位が予備放流水位に達した以降は洪水のおそれなくなるまで予備放流水位を維持し、洪水が発生するおそれなくなった時点で水位を回復する操作を行った。図 8.9(b) はこの期間中の流入量 (Inflow) とダム放流量 (Outflow) のハイドログラフを示す。10 月 6 日 11 時に最大流入量が

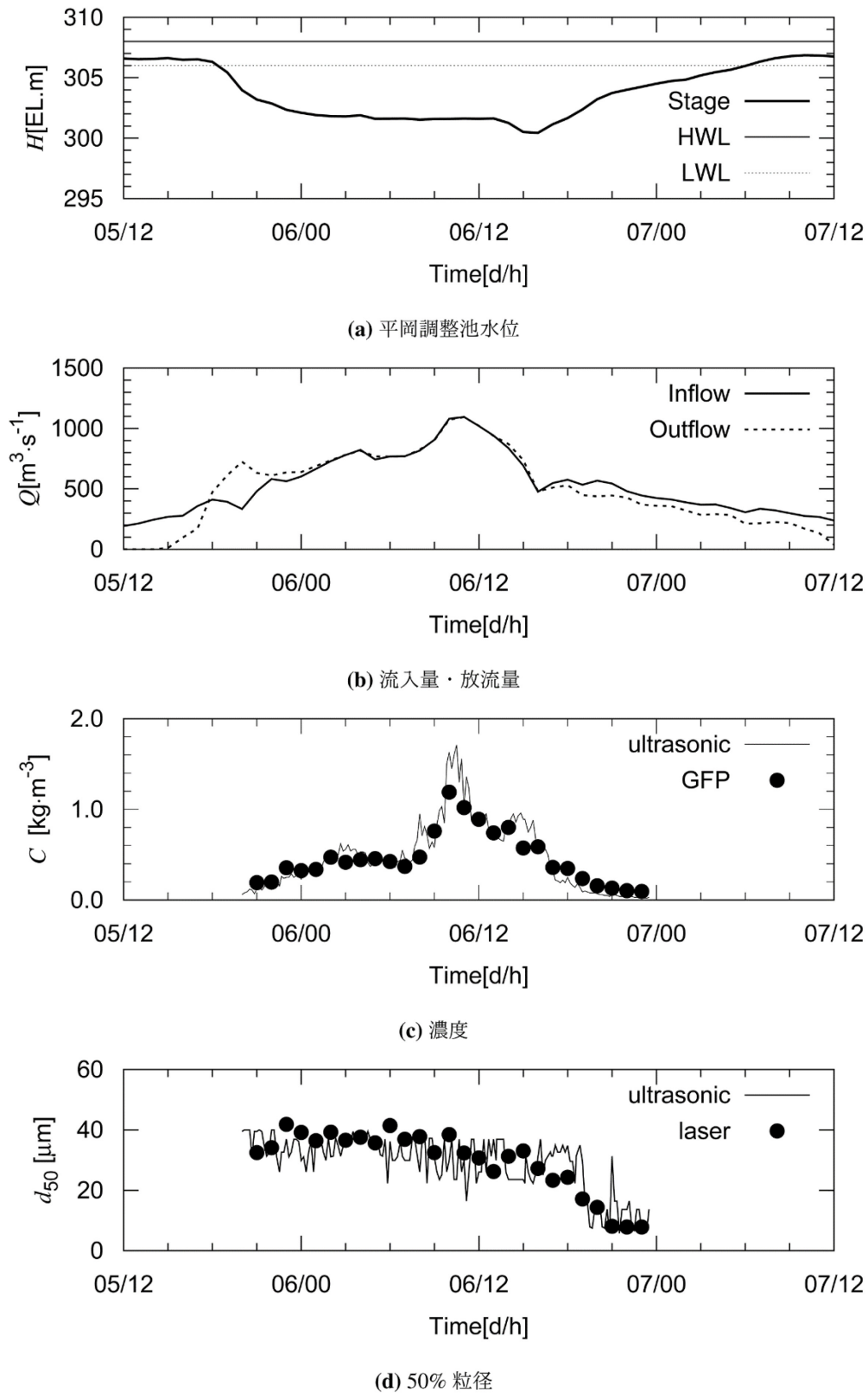


図 8.9 平岡調整池水位、流量および現場型超音波減衰スペクトル計で測定した濃度と 50% 粒径

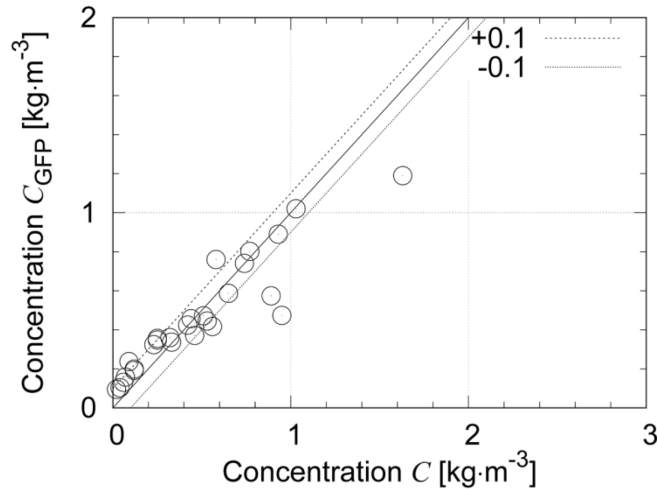


図 8.10 超音波減衰スペクトル計で測定した濃度とガラス繊維濾紙法で測定した濃度との比較

$1100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  となった。

超音波減衰スペクトル計で 10 分間隔で測定した濃度とガラス繊維濾紙法(GFP)で測定した濃度を図 8.9(c)に示す。減衰スペクトルの測定値から実験モデルを用いて求めた濃度はガラス繊維濾紙法の測定値とよく一致することが分かった。この期間中の最大濃度は約  $1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  であり、出水時の浮遊砂濃度として大きな値ではないが、 $1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  以下の濃度も十分測定できることが分かった。また、超音波減衰スペクトル計で測定した濃度とガラス繊維濾紙法で測定した濃度との比較を図 8.10 に示す。 $C_{\text{GFP}}$  はガラス繊維濾紙法で測定した濃度、 $C$  は減衰スペクトルから実験モデルを用いて超音波減衰スペクトル法で算出した濃度を示す。ガラス繊維濾紙法で測定した濃度と減衰スペクトルから実験モデルを用いて算出した浮遊砂の濃度との差異はそのほとんどが  $\pm 0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ( $\pm 1\% \text{ FS}$ ) 以内であり、実験モデル  $K_2(f, d)$  は浮遊砂の濃度を測定できるモデルであることがわかった。

次に、粒度分布の測定結果について述べる。超音波減衰スペクトル法による粒度分布の測定は粒度分布モデル依存の逆解析法を用いており、今回の測定では表 8.1 に示す 24 の粒度分布コードを適用した。超音波減衰スペクトル計による 50 % 粒径の測定結果を図 8.9(d)に示す。また、超音波減衰スペクトル計で測定した粒度分布とレーザ回折・散乱法による測定値との比較を図 8.11 に示す。超音波減衰スペクトル計で測定した粒度分布はレーザ回折・散乱法による測定値とほぼ一致することがわかった。この結果、超音波減衰スペクトル計を用いて浮遊砂の粒度分布の時間的な変化を連続して測定できることがわかった。

最後に、シルト ( $5 < d \leq 75 \text{ } \mu\text{m}$ ) と細砂 ( $75 < d \leq 250 \text{ } \mu\text{m}$ ) のそれぞれの粒径集団別濃度の経時変化を図 8.12 に示す。超音波減衰スペクトル計は濃度と粒度分布の同時計測ができるので、簡単に粒径集団別濃度を求めることができる。

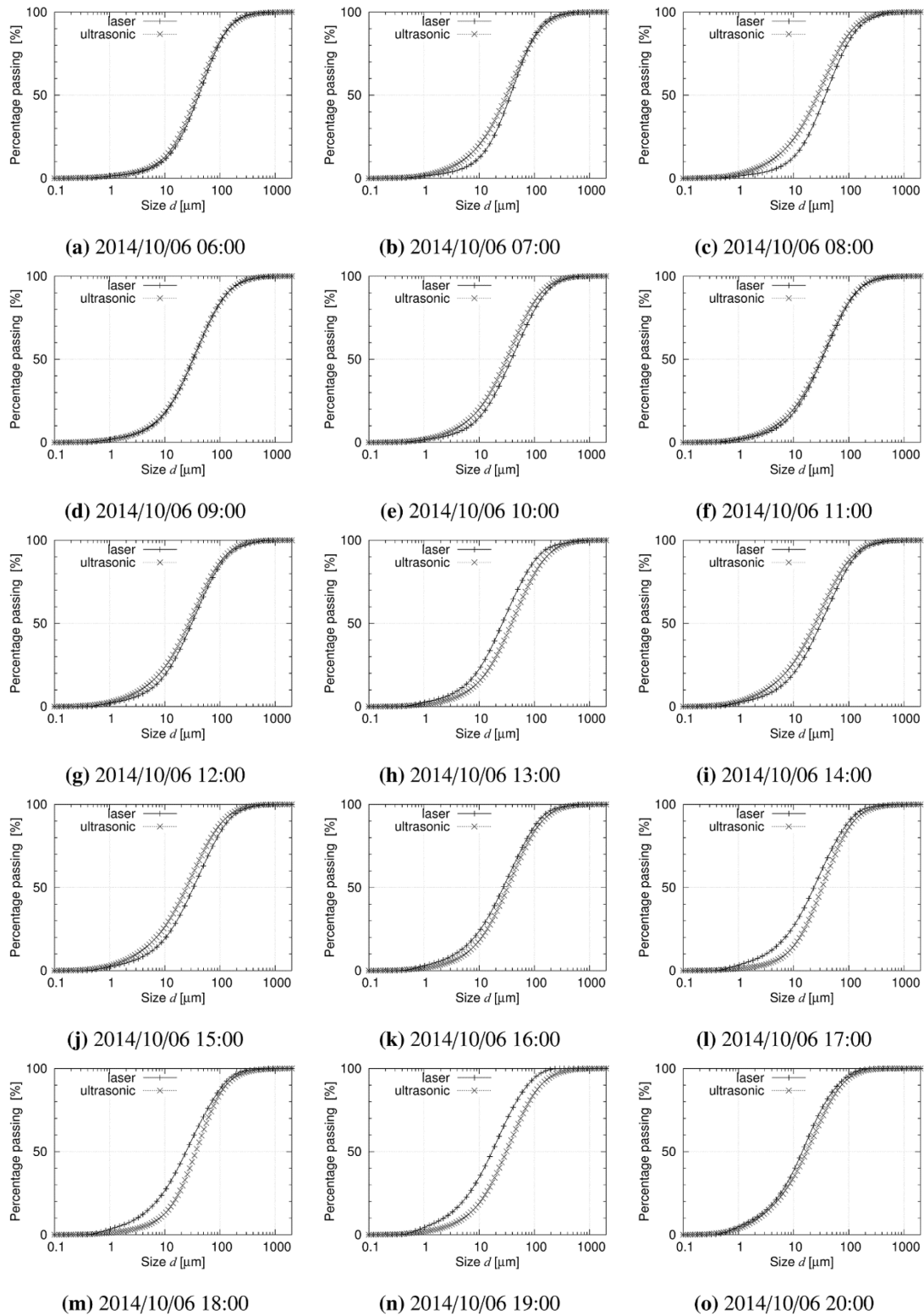


図 8.11 超音波減衰スペクトル計で測定した粒度分布とレーザ回折・散乱法による測定値との比較

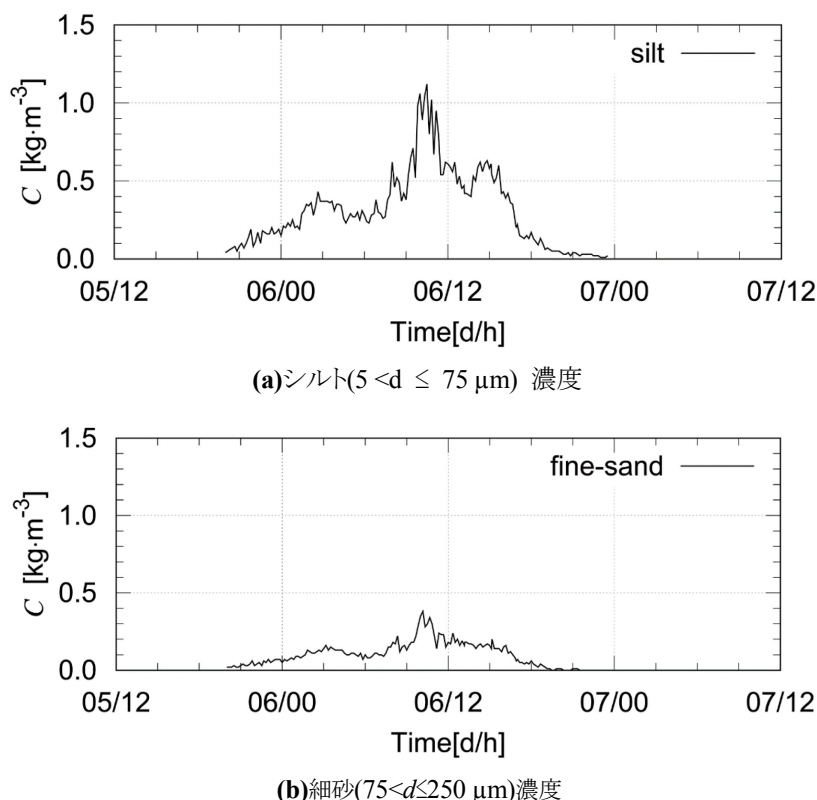


図 8.12 出水時の平岡取水口地点の粒径集団別濃度の測定結果

### 8.2.7 まとめ

上記に示すとおり、超音波減衰スペクトル計による浮遊砂計測では実験モデル  $K_2(f,d)$ 、濃度補正係数および粒度分布コードを用いる。実験モデル  $K_2(f,d)$ に適用する三種類の等価粒径係数は 7.4.5 項に基づき決定する。また、濃度補正係数は 8.2.5 項に基づき算出する。粒度分布コードにはレーザ回折・散乱法で測定した粒度分布を二峰性対数正規分布モデルで近似した粒度分布コードを適用する。

平岡ダムでは、最大濃度  $1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、粒径がサブミクロンから約  $1 \text{ mm}$ 、50%粒径が  $10 \sim 40 \mu\text{m}$  の浮遊砂の濃度と粒度分布を現場型超音波減衰スペクトル計を用いて測定した結果、その測定値はガラス繊維濾紙法で測定した濃度、またレーザ回折・散乱法で測定した粒度分布とよく一致することがわかった。

また、超音波減衰スペクトル計は濃度と粒度分布の同時計測ができるので、簡単に粒径集団別濃度を測定できることがわかった。

浮遊砂にはシルトや粘土粒子だけではなく、珪藻や有機物などの揮発性浮遊物質が含まれているので、超音波減衰スペクトル法で算出した固体体積分率から濃度を求める場合は濃度補正が必要であることがわかった。





図 8.13 六角川の位置図

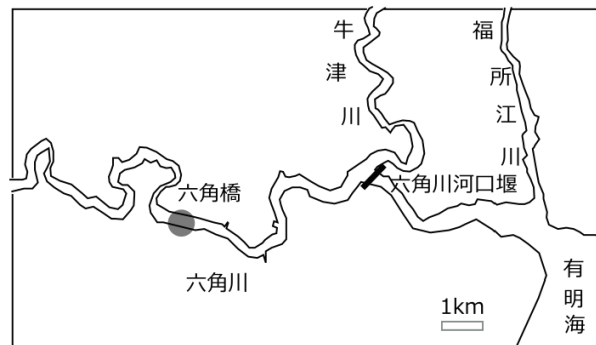


図 8.14 六角川の測定地点(六角橋)

## 8.3 感潮河川の浮遊土砂の計測

### 8.3.1 概要

佐賀県白石平野を流れる六角川は最大 6 m に及ぶ有明海の潮汐の影響を受ける感潮河川である。六角川下流部は、有明海の湾奥部特有の大きな干満差の影響が河口から約 29km 付近にまで及んでおり、この長い感潮区間の河岸には有明海より遡上する浮遊土砂（ガタ土）が堆積している。六角川の感潮部はこの影響を受けて日常的に高濃度濁水が発生しており、高濃度の測定実験地点として最適である。また、汽水域では海水が混合されて河川水は塩分を含むので、基準スペクトルは塩水の実験式を適用する。六角川的位置図を図 8.13、測定地点を図 8.14、測定地点の横断面図を図 8.15 に示す。測定地点は既往の研究[4,9]を参考にして河口から 11.2km 地点を選定

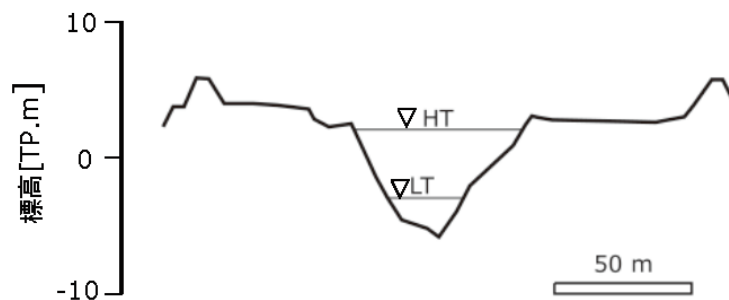


図 8.15 六角橋地点の横断面図



図 8.16 六角川の浮遊土砂の測定

した。

現場型超音波減衰スペクトル計を用いた測定実験は平成 26 年(2014 年)6 月 12 日の大潮の日に実施した。測定地点に小型作業船を係留し、作業船から河川中央部の水深 1 m または 2 m の位置に超音波減衰スペクトル計を吊り下げて、水温、塩分および減衰スペクトルを 10 分間隔で自動計測した。六角川の測定に使用した現場型超音波減衰スペクトル計を図 8.16(左)に示す。ま

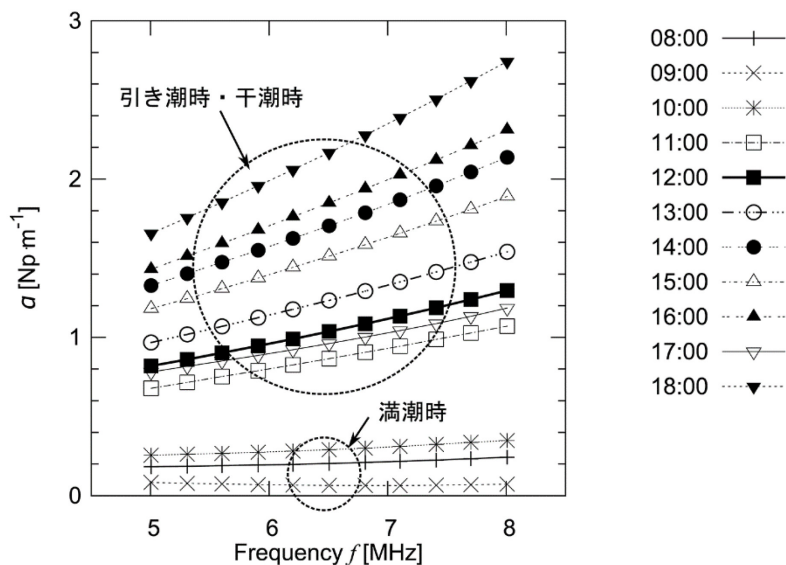


図 8.17 六角川の減衰スペクトルの測定結果(平成 26 年 6 月 12 日)

た、図 8.16(右上)には手動昇降装置を、図 8.16(右下)には測定中の状況を示す。また、市販の万能採水器(宮本理研工業、2ℓ用)を用いて採水し、採取した河川水を分析機関に送付して粒度分布、浮遊土砂の濃度および強熱減量を測定した。粒度分布の測定はレーザ回折・散乱法、濃度の測定は環告 59 号付表 9、強熱減量の測定は JIS K0102(2013)による。流速は、電磁流速計(JFE アドバンテック、AEM1-D)を用いて 10 分間隔で測定する。水位は六角橋水位観測所(国土交通省)のデータを入力する。土粒子の密度は「土粒子の密度試験(JISA1202)」に基づき測定する。また、土粒子の形状は SEM による観察を行う。

### 8.3.2 実験結果

- 現場型超音波減衰スペクトル計で測定した減衰スペクトルを図 8.17 に示す。六角川では潮汐の影響を受けて水位が周期的に変動しており、8 時から 10 時が満潮時、11 時から 14 時が引き潮時、15 時から 17 時が干潮時である。満潮時は流速が低下して浮遊土砂の濃度が低下するため、測定期間中で最も減衰スペクトルが低い値を示すことがわかった。
- 次に、レーザ回折・散乱法で測定した粒度分布を図 8.18 に示す。浮遊土砂の粒径はサブミクロンから 0.1 mm の範囲で分布しており、50 %粒径は 10  $\mu\text{m}$  程度である。満潮時、引き潮時および干潮時において粒度分布の時間的変化は認められない。また、表 8.4 には図 8.18 に示す粒度分布から求めた二峰性対数正規分布モデルの粒度分布コードを示す。
- 次に、環告 59 号付表 9 によるガラス繊維濾紙法で測定した濃度と固相体積分率を表 8.5 に示す。最大濃度は  $4.65\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、最小濃度は  $0.11\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  となった。固相体積分率は式(4.5)で算出する。土粒子の密度  $\rho_2$  は  $2430\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  である。

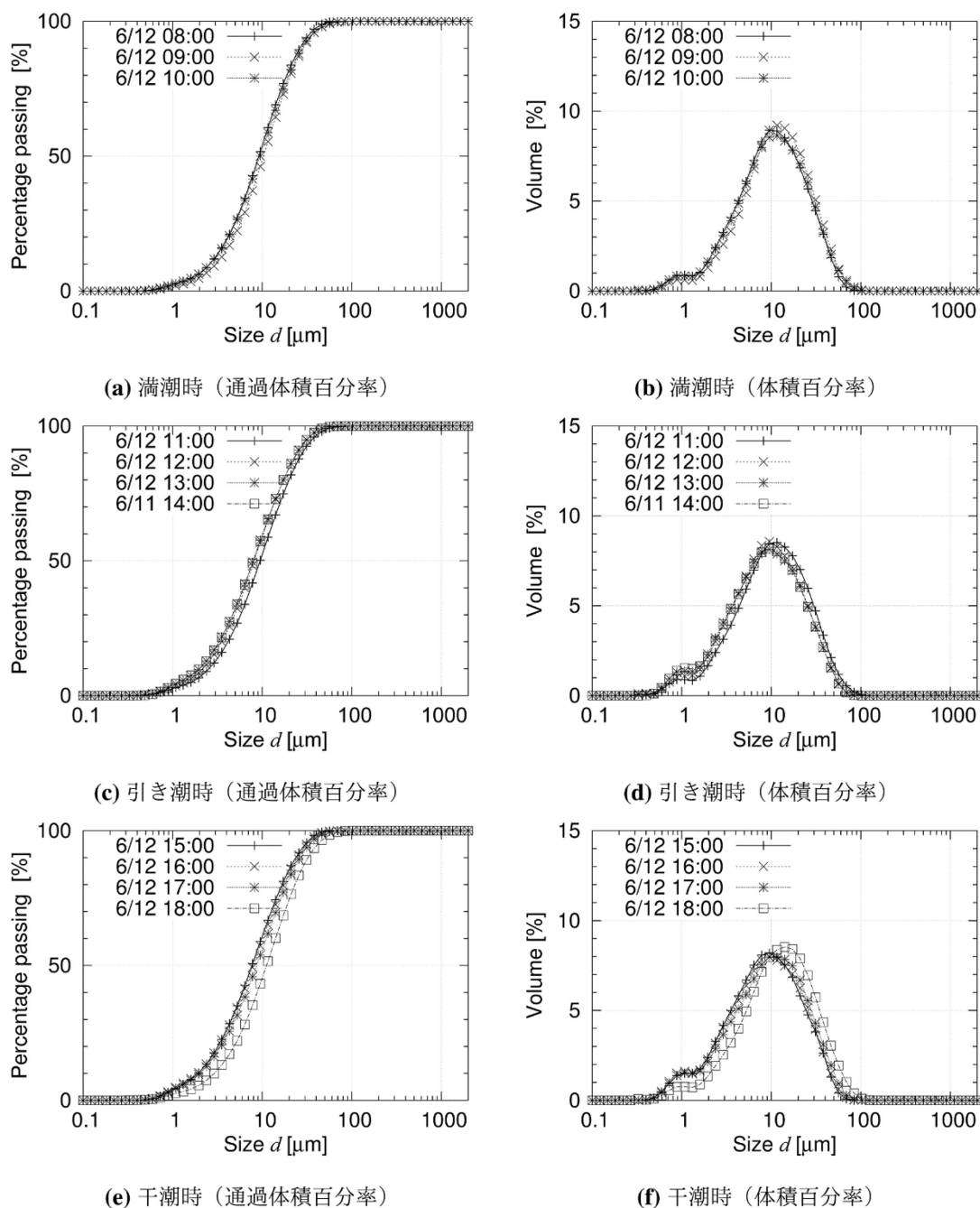


図 8.18 六角川感潮部の浮遊土砂の粒度分布の測定結果(平成 26 年 6 月 12 日)

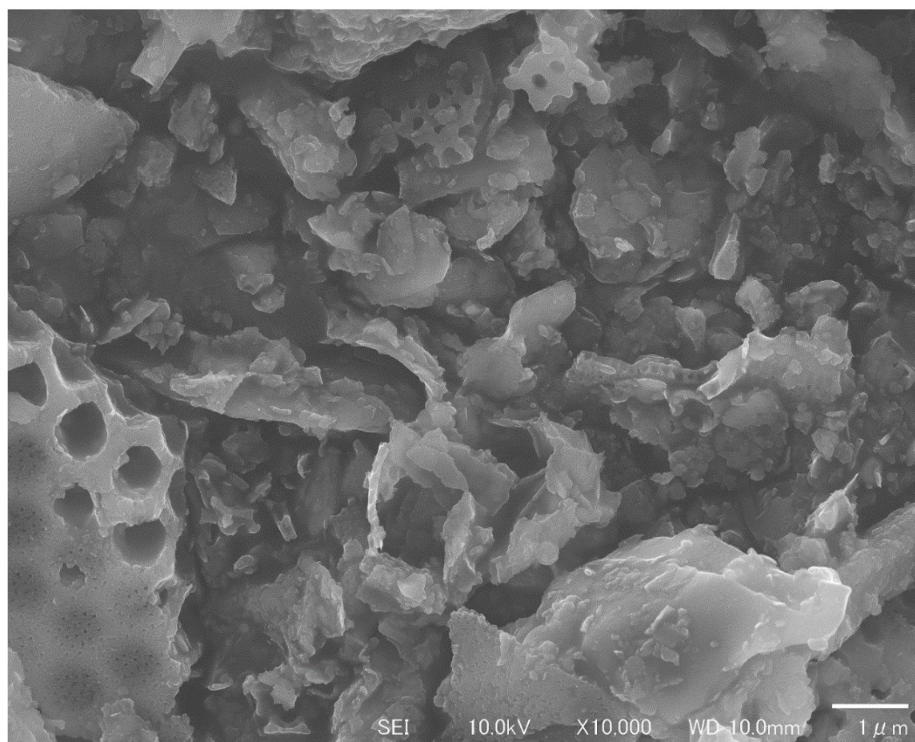
- 最後に、図 8.19 には六角川の河床で採取したガタ土の SEM による粒子形状観察結果を示す。図 8.19(a)には珪藻土および有機物が見られる。強熱減量はガラス繊維濾紙上の乾燥試料を 600 °C で 30 分間強熱し減量した割合を百分率で示すと、10~12%の範囲にありその平均値は 11.3%が得られた。図 8.19(b)に見られるように土粒子は図 7.7 に示すシリカ粒子に比較するとやや丸みがある。

表 8.4 六角川の浮遊土砂の粒度分布コード

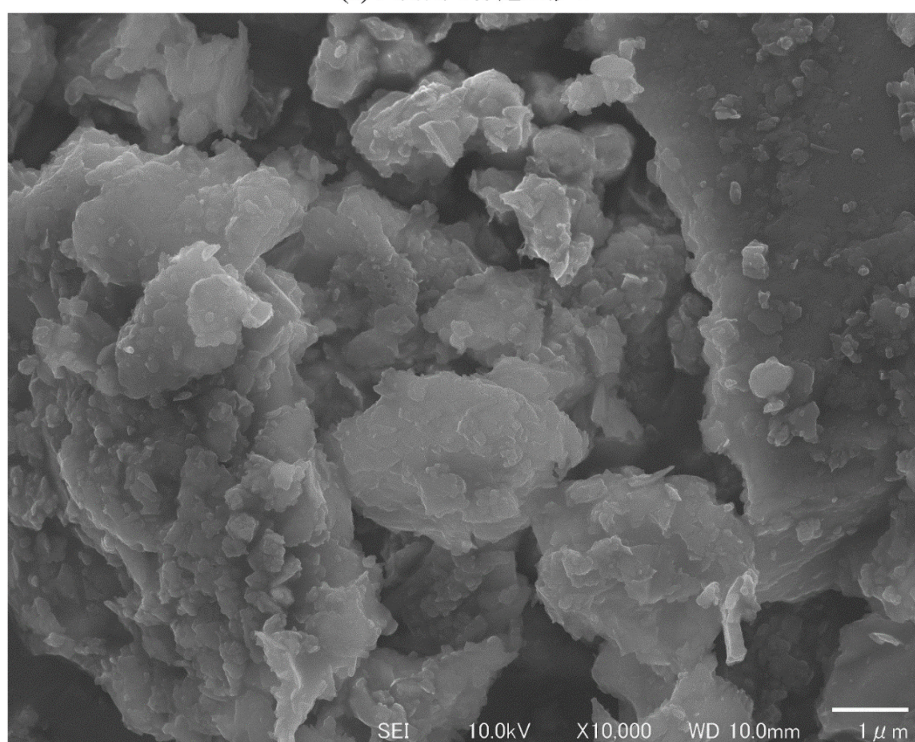
No.	Date	Time	$p_1$	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$
1	20140612	08:00	0.30	1.40	0.90	2.47	0.70
2	20140612	09:00	0.32	1.71	1.00	2.54	0.70
3	20140612	10:00	0.30	1.46	0.95	2.50	0.75
4	20140612	11:00	0.30	1.43	0.95	2.50	0.75
5	20140612	12:00	0.26	1.13	0.90	2.35	0.75
6	20140612	13:00	0.28	1.04	0.85	2.37	0.75
7	20140612	14:00	0.44	1.38	0.95	2.48	0.70
8	20140612	15:00	0.44	1.36	0.95	2.44	0.70
9	20140612	16:00	0.38	1.19	0.90	2.47	0.70
10	20140612	17:00	0.44	1.44	1.00	2.56	0.70
11	20140612	18:00	0.22	1.32	0.95	2.62	0.75

表 8.5 六角川の浮遊土砂の濃度と固体体積分率

No.	Date	Time	CGFP $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\phi$ $\times 10^{-6}$
1	20140612	08:00	0.349	144
2	20140612	09:00	0.111	46
3	20140612	10:00	0.588	242
4	20140612	11:00	1.830	753
5	20140612	12:00	2.170	893
6	20140612	13:00	2.600	1070
7	20140612	14:00	3.600	1481
8	20140612	15:00	3.380	1391
9	20140612	16:00	3.390	1395
10	20140612	17:00	1.350	556
11	20140612	18:00	4.650	1914



(a) 六角川の浮遊土砂 1



(b) 六角川の浮遊土砂 2

図 8.19 SEM による六角川の浮遊土砂(ガタ土)の粒子形状観察

表 8.6 六角川の浮遊土砂の等価粒径係数( $c_0=0.85$  の場合)の算出結果

No.	Date	Time	$\phi$ $\times 10^{-6}$	$a_0$	$b_0$	$c_0$	$\phi$ $\times 10^{-6}$	
1	20140612	08:00	369	0.50	1.00	0.85	144	
2	20140612	09:00	138	0.50	1.00	0.85	46	
3	20140612	10:00	528	0.50	1.00	0.85	242	
4	20140612	11:00	1364	0.50	1.65	0.85	753	
5	20140612	12:00	1443	0.75	1.65	0.85	893	
6	20140612	13:00	1627	0.85	1.60	0.85	1070	*
7	20140612	14:00	2222	1.00	1.40	0.85	1481	
8	20140612	15:00	1938	1.00	1.50	0.85	1391	
9	20140612	16:00	2369	1.00	1.45	0.85	1395	
10	20140612	17:00	1381	0.65	1.70	0.85	556	
11	20140612	18:00	3609	0.85	1.00	0.85	1914	

### 8.3.3 実験モデルの等価粒径係数

実験モデルに適用する等価粒径係数は、7.4.5 項に基づき、現場の測定で得られた減衰スペクトル、粒度分布コードおよび固体体積分率のそれぞれの測定値を用いて算出した。六角川の浮遊土砂は粒径がサブミクロンから約 0.1 mm までの粒子が含まれており、50 %は約 10  $\mu\text{m}$  であるので、減衰係数は粘性損失が支配的となる。古川らの研究[8]から六角川の浮遊土砂の粘性損失の等価粒径係数  $c_0=0.85$  が得られているので、 $c_0=0.85$  を固定値として、固体体積分率と等価粒径係数  $a_0$  と  $b_0$  を求めた。等価粒径係数と固体体積分率の算出結果を表 8.6 に示す。等価粒径係数は満潮時を除くと  $a_0=0.65\sim 1.0$ 、 $b_0=1.40\sim 1.70$  の範囲の値が得られた。満潮時は濃度が薄く、測定した減衰スペクトルは等価粒径係数の算出には適していないと考えられる。

以上の結果から、六角川の浮遊土砂の計測に用いる実験モデルの等価粒径係数は表 8.6 に示す 6 月 12 日 13 時の測定データ(\*)から得られた  $a_0=0.85$ 、 $b_0=1.65$ 、 $c_0=0.85$  を採用した。

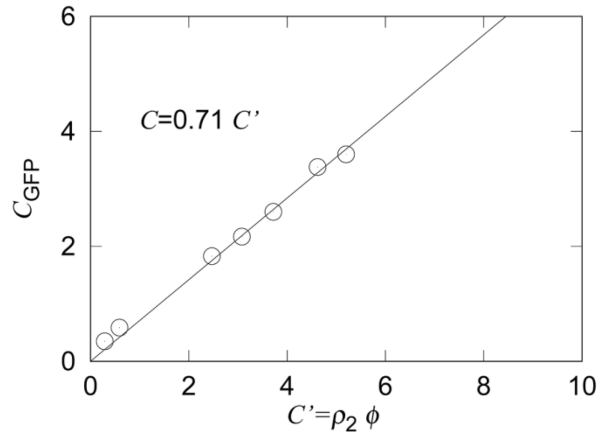


図 8.20 六角橋地点の濃度補正係数

### 8.3.4 濃度補正係数

次に、図 8.17 に示す減衰スペクトルに実験モデルを適用して求めた濃度とガラス繊維濾紙法で測定した濃度との関係を図 8.20 に示す。横軸は超音波減衰スペクトル法で測定した濃度  $C'$ 、縦軸はガラス繊維濾紙法で測定した濃度  $C_{GFP}$  を示す。測定に適用する粒度分布モデルとして表 8.4 に示す粒度分布コードを適用した。この結果から六角川の濃度補正係数  $\varepsilon=0.71$  が得られた。

### 8.3.5 実験モデルによる浮遊土砂の計測

現場型超音波減衰スペクトル計を用いて 10 分間隔で自動測定した減衰スペクトルの測定データに実験モデル  $K_2(f,d)$  を適用して濃度と粒度分布を求める。実験モデル  $K_2(f,d)$  の一例を図 8.21 に示す。

六角橋地点の水位、水温、流速、塩分と現場型超音波減衰スペクトル計で測定した浮遊土砂の濃度と 50 % 粒径の測定結果を図 8.22 に示す。図 8.22(a) は六角橋地点の水位の経時変化を示しており、満潮時と干潮時の水位差は約 4 m であった。図 8.22(b) は水温、図 8.22(c) は流速、図 8.22(d) は塩分のそれぞれの経時変化を示す。当日の水温は約 26°C と高く、塩分は満潮時に最大 16 psu、干潮時には約 1 psu まで低下した。引き潮時の最大流速は約  $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、上げ潮時の最大流速もまた約  $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  であった。

次に、超音波減衰スペクトル計で測定した濃度を図 8.22(e) に示す。濃度は式(8.1)を用いて算出する。満潮時を少し過ぎたところに濃度は最小となり、引き潮時には次第に濃度が増加して、干潮時に最大となった。超音波減衰スペクトル計で測定した濃度はガラス繊維濾紙法で測定した濃度とよく一致しており、10 分間隔の連続観測値に大きな変動は見られない。また、図 8.23 に超音波減衰スペクトル計で測定した濃度とガラス繊維濾紙法で測定した濃度との比較を示す。 $C_{GFP}$  はガラス繊維濾紙法で測定した濃度、 $C$  は減衰スペクトルから実験モデルを用いて超音波減衰ス



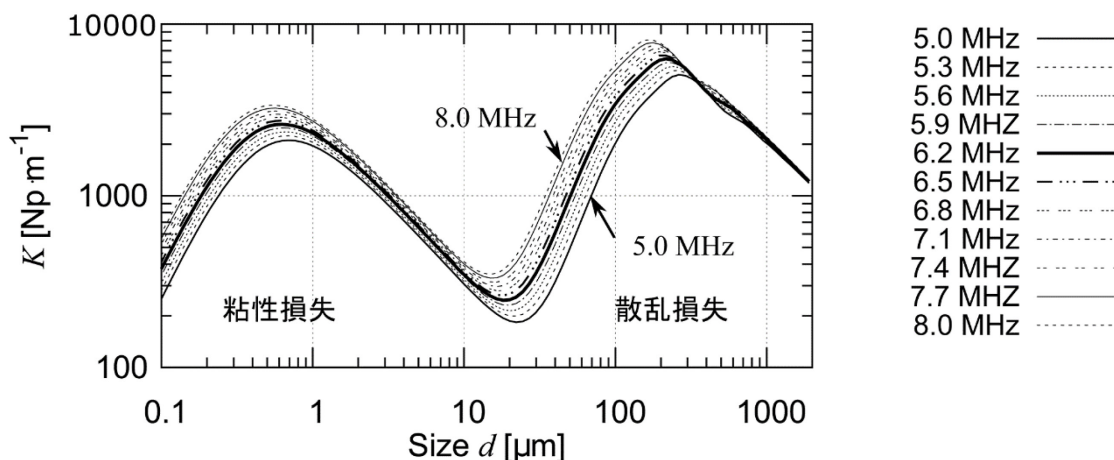


図 8.21 六角橋地点の浮遊土砂の測定に適用した実験モデル  $K_2(f,d)$  の一例

ペクトル法で算出した濃度を示す。ガラス繊維濾紙法で測定した濃度と減衰スペクトルから実験モデルを用いて算出した浮遊土砂の濃度との差異は  $\pm 0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ( $\pm 1\% \text{ FS}$ ) 以内にあり、実験モデル  $K_2(f,d)$  は汽水域でも高濃度の浮遊土砂の濃度を測定できるモデルであることがわかった。

次に、粒度分布の測定結果について述べる。超音波減衰スペクトル法による粒度分布の測定は粒度分布モデル依存の逆解析法を用いており、今回の測定では表 8.4 に示す 11 の粒度分布コードを適用した。図 8.22(f) に浮遊土砂の 50 % 粒径の測定結果を示す。また、超音波減衰スペクトル計で測定した粒度分布とレーザ回折・散乱法で測定した粒度分布の比較を図 8.24 に示す。六角川では堆積した浮遊土砂が潮汐の影響を受けて移動しているため、今回の測定では粒度分布にほとんど変化がみられなかった。このように粒度分布に大きな変動がない場合は、減衰スペクトルは濃度のみ依存して変化するので濃度の測定精度が高くなる。

上記に示すように、六角川の測定において現場型超音波減衰スペクトル計を用いて測定した濃度と粒度分布は、ガラス繊維濾紙法で測定した濃度、また、レーザ回折・散乱法で測定した粒度分布とよく一致することがわかった。

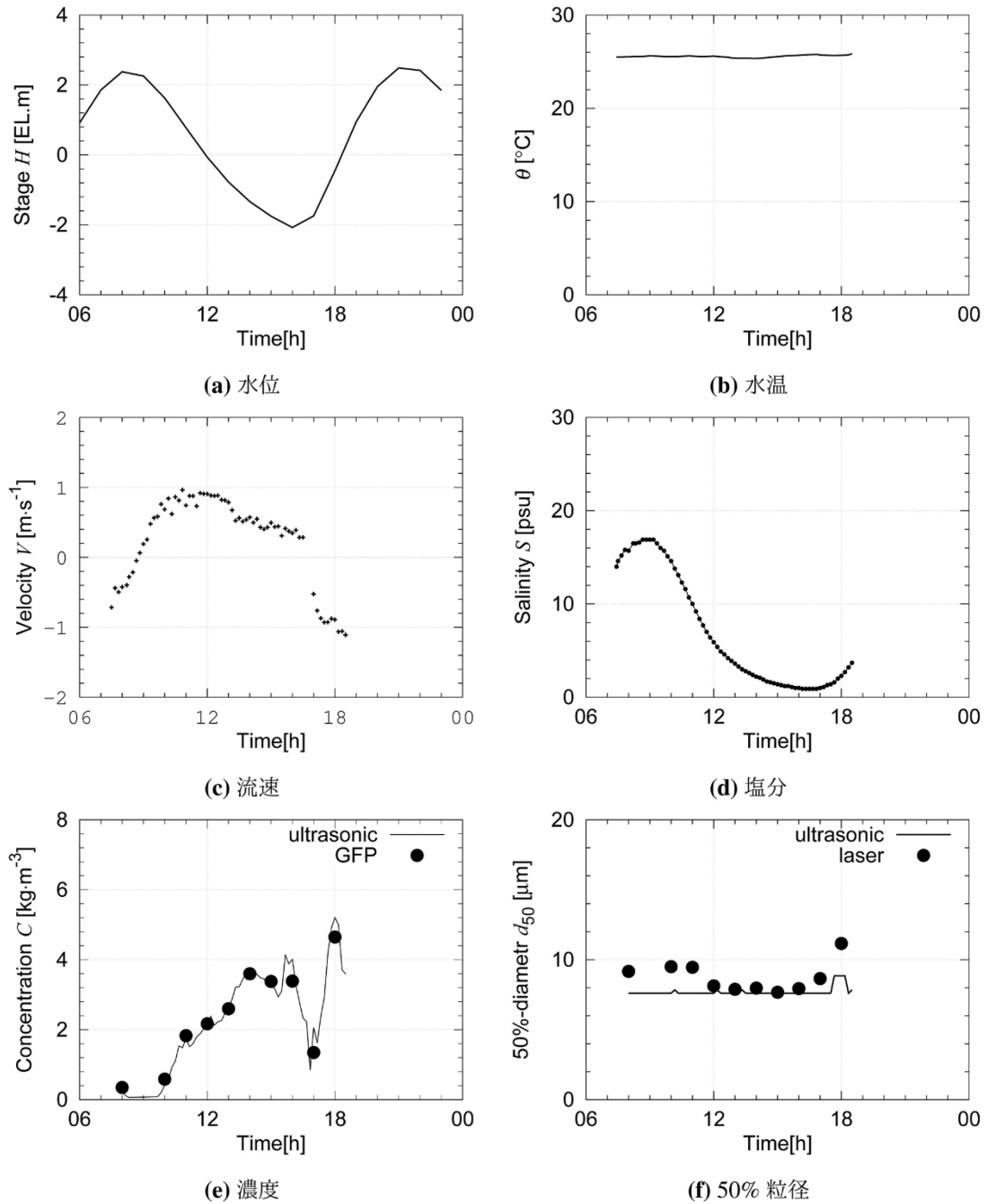


図 8.22 六角橋地点の水位、水温、流速、塩分と現場型超音波減衰スペクトル計による浮遊土砂の濃度と 50%粒径の測定結果

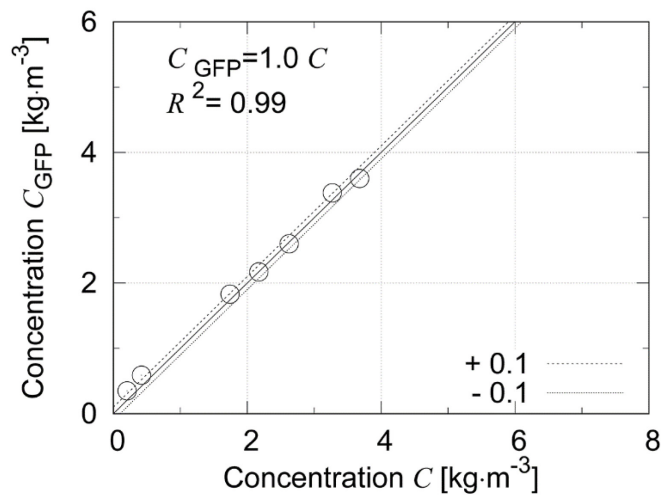


図 8.23 超音波スペクトル計で測定した濃度とガラス繊維濾紙法で測定した濃度との比較

## 8.4 結論

本章では、実河川において超音波減衰スペクトル計で測定した減衰スペクトルに実験モデル  $K_2(f,d)$  を適用して浮遊砂濃度と粒度分布を測定し、超音波減衰スペクトル計による浮遊砂計測方法を検証した。本章の結論は以下のとおりである。

- 平岡ダムでは、最大濃度  $1.2\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、粒径がサブミクロンから約  $1\text{mm}$ 、50%粒径が  $10\sim 40\ \mu\text{m}$  の浮遊砂の濃度と粒度分布を現場型超音波減衰スペクトル計を用いて測定した結果、その測定値はガラス繊維濾紙法で測定した濃度、またレーザ回折・散乱法で測定した粒度分布とよく一致することがわかった。
- 六角川の汽水域では、最大濃度  $4.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、粒径がサブミクロンから約  $0.1\text{mm}$ 、50%粒径が  $10\ \mu\text{m}$  の浮遊土砂の濃度と粒度分布を現場型超音波減衰スペクトル計を用いて測定した結果、ガラス繊維濾紙法で測定した濃度、またレーザ回折・散乱法で測定した粒度分布とよく一致することがわかった。
- また、超音波減衰スペクトル計は濃度と粒度分布の同時計測ができるので、簡単に粒径集団別濃度を測定できることがわかった。
- 浮遊砂にはシルトや粘土粒子だけではなく、珪藻や有機物などの揮発性浮遊物質が含まれているので、超音波減衰スペクトル法で算出した固体体積分率から濃度を求める場合は濃度補正が必要であることがわかった。

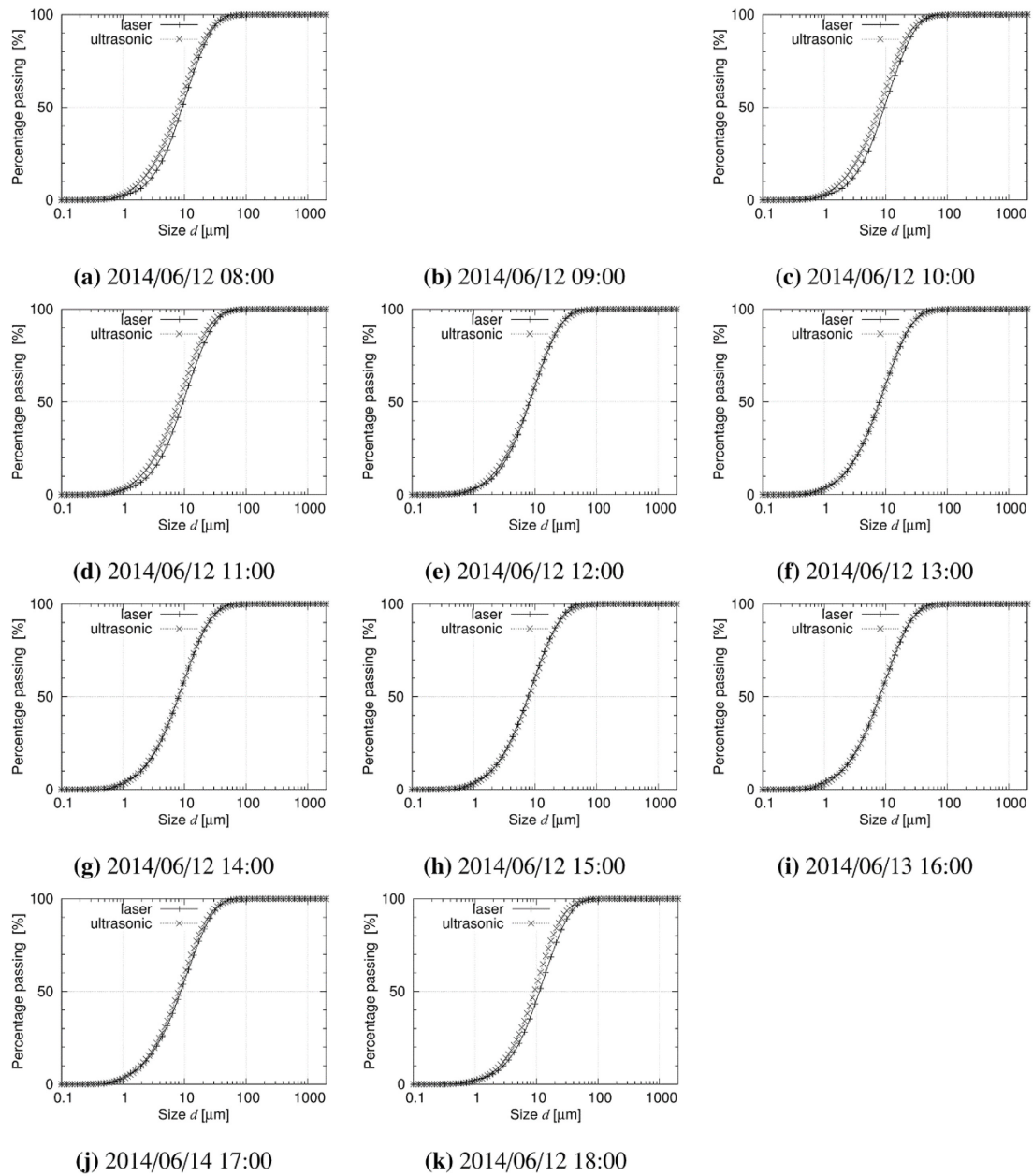


図 8.24 超音波減衰スペクトル計で測定した粒度分布とレーザ回折・散乱法で測定した粒度分布との比較



## 参考文献

- [1] 角哲也, 森田佐一郎, 越智隆志, 小宮英明; 差圧センサーを用いた河川・ダム貯水池における新しい浮遊砂濃度計測手法の開発. 水工学論文集. 第 46 巻, pp.779-784, 2002.
- [2] 角哲也, 森田佐一郎, 小宮英明; 水中型 SMDP を用いた黒部川ダム排砂時の高濃浮遊砂濃度連続観測. 水工学論文集. 第 54 巻, pp.111-116, 2010.
- [3] 横山勝英, 梅田信, 山崎久勝; 音響式 SS 測定装置の開発に関する研究. 水工学論文集. 第 49 巻, pp.547-552, 2005.
- [4] 横山勝英, 梅田信, 和田昌行; 六角川における音響式 SS 測定装置の実用化試験. 河川技術論文集. 第 11 巻, pp.321-326, 2005.
- [5] 山本晃一編著; 総合土砂管理計画流砂系の健全化に向けて. 技報堂出版, 2014, p.386.
- [6] 大槻順朗, 川崎貴志, 二瓶泰雄, 鬼倉徳雄; 出水時球磨川における粒径別浮遊土砂輸送特性. 土木学会論文集 B1 (水工学). 第 69 巻, No.4, pp.I\_1063-I\_1068, 2013.
- [7] 古川仁志, 前田修一, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 水位低下による土砂スルーシ  
ング時の超音波を用いた SS 濃度と粒度分布の連続計測. 土木学会論文集 B1 (水工  
学). Vol.72, No.4, pp.I\_919-I\_924, 2016.
- [8] 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力; 超音波減衰スペクトル計による SS 測定に用いる  
等価球形散乱体モデルの検証. 河川技術論文集. 第 21 巻, pp.55-60, 2015.
- [9] 二渡了, 楠田哲也, 大石京子; 強混合河川六角川感潮部における懸濁物質濃度の変動特性.  
土木学会論文集. No.452, pp.71-79, 1992.



## 第9章

# 結論

### 9.1 各章の結論

本論文は、新たに開発した現場型超音波減衰スペクトル計を用いた河川濁水の粒径別浮遊砂濃度の現地計測に関する研究をとりまとめたものである。各章の結論は以下のとおりである。

第1章では、本研究の背景と目的を述べた。

河川における粒径別浮遊砂の輸送特性の検討はダムからの排砂による河川環境への変化やダム撤去後の干潟・沿岸環境に及ぼす影響評価のためには必須の項目である。また、河川環境を評価するためには、平水時から洪水時までの河川流況に対応した水温、水質、浮遊砂、揮発性浮遊物質等の幅広い測定が必要となる。

水温、水質、濁度に関しては連続観測可能な測定装置がすでに開発されており、河川や湖沼等の観測で成果を挙げている。しかし、浮遊砂の粒度分布の観測は浮遊砂サンプラーや河川濁水の採取後の分析を主としており、現場で瞬時に測定可能な計測器は現存せず、その開発が待望されている。洪水時の浮遊砂観測は多大な労力を必要とする。粒径区分ごとの浮遊砂量の測定では、数種類のガラス繊維濾紙を用いた濾過法や液体を分散媒体として用いる湿式フルイ分け法などが用いられ、観測から分析までには時間を要するために、分析体制の確保が大きな課題となる。

また、平成23年(2011年)3月11日に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故による原子力災害の発生は記憶に新しい。事故から6年近くを経過した今では、放射能の自然減衰と福島県内を中心とした除染の効果により、避難指示解除準備区域への帰還が開始されている。しかし、事故によって放出された放射能は、今も、福島県の70%以上を占める森林域の落葉と腐葉土からなるリター層に蓄積しており、降雨による源頭部の崩壊や降雨流出により河川流域に放出している。現在検討対象となる放射性物質は半減期の比較的長い放射性セシウムの $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ であり、いずれも粒径 $5\ \mu\text{m}$ 以下の粘土鉱物に吸着しやすいため、河川流域では微細粒子に付着した懸濁態の放射性セシウムの動態の研究が必要とされている。

上記に示すとおり、河川水中の浮遊砂の粒度分布と濃度の連続観測は極めて重要である。ダムからの排砂のみならず、河川流況に応じた浮遊砂の測定、河床変動計算による浮遊砂の算定および放射性セシウムのように懸濁態粒子に付着する物質の環境動態を明らかにする上で、この計測を実現する測定器の開発が待たれる。

本研究では、浮遊砂の質と量が現地で同時に連続計測可能な計測システムを開発し、これにより現地での計測を行い、その適用性と課題を検討することを目的とする。



第2章では、浮遊砂現場測定技術の現状と課題を示した。浮遊砂現場測定方法には、光学式後方散乱法、レーザ回折・散乱法、音響式後方散乱法、差圧法、超音波減衰スペクトル法がある。これらの測定技術において濃度と粒度分布の現場測定が可能な測定技術はレーザ回折・散乱法および超音波減衰スペクトル法であることがわかった。レーザ回折・散乱法は海域において低濃度の測定に使用されているが、河川での測定事例はなく、しかもこの方法では高濃度の測定ができない。超音波減衰スペクトル法は、濃度と粒度分布の同時計測が可能な測定方法であり、特に高濃度の測定に適していることがわかった。しかし、市販されている超音波減衰スペクトル計は室内で使用する粒度分布測定装置であり、超音波減衰スペクトル法を用いて現場での測定を行うためには、新たに現場用の超音波減衰スペクトル計の開発が必要である。

第3章では、既往の研究に基づいて超音波減衰スペクトル法の測定原理を述べた。超音波の測定領域は、粒径と超音波の波長との関係から長波長域、中間波長域、短波長域に区分することができる。長波長域では粘性損失が支配的となり、この粘性損失はECAH理論に基づき算出することができ、周波数0.1~100MHz、粒径0.01~30 $\mu\text{m}$ の測定に適用できる。また、中間波長域では散乱損失が支配的となり、散乱損失はFaranモデルに基づきを算出することができる。このモデルは $kr < 30$ の範囲での適用できることが示されており、周波数1~10MHzの測定では粒径2.0 mm以下の粒子の測定に適用できる。超音波減衰スペクトル法は、ECAH理論やFaranモデルなどの散乱理論に基づく超音波の減衰特性を利用して懸濁液中の微粒子濃度や粒度分布を測定する方法である。開発した超音波減衰スペクトル計では、一つの超音波振動子で約1~10MHzの広帯域の超音波を発生するプラノコンケーブ形振動子を用いており、パルス反射法を採用している。

第4章では、筆者らが開発した現場型超音波減衰スペクトル計の計測性能を検証した。検証では5~8MHzまでの11周波数を用いて、粒径が30~200 $\mu\text{m}$ の六種類の球形粒子の減衰スペクトルを測定し、測定値がFaranモデルによる減衰係数の理論値と一致することを確認した。また、粒径が1~6 $\mu\text{m}$ の四種類の球形粒子の減衰スペクトルを測定し、測定値がECAH理論による減衰係数の理論値と一致することを確認した。

第5章では、開発した現場型超音波減衰スペクトル計の基準スペクトルとなる真水のスペクトルについて検討し、その実験式を提案した。基準スペクトルの振幅は、トランスデューサが水中に発信した超音波の振幅、トランスデューサと反射板との距離、水の音波吸収係数から算出する。また、トランスデューサが発信した超音波の振幅は水温より実験式を用いて算出できる。次に、塩水の基準スペクトルの振幅は真水の基準スペクトルの振幅に塩分による増幅係数を乗じて算出する。また、このときの増幅係数は水の密度と音速より実験式を用いて算出できる。さらに、フローセルの基準スペクトルの振幅は流速 $V=0$ の水の基準スペクトルの振幅にフローセルの減衰係数を乗じて算出する。なお、フローセルの減衰係数はレイノルズ数とマッハ数から実験式を用いて算出できる。

第 6 章では、粒径が 34~340  $\mu\text{m}$  の天然の細砂・シルトをフルイ分けした実験用粒子を測定し、非球形粒子に適用する減衰係数の実験モデルを検証した。その結果、天然の細砂・シルトなどの非球形粒子の減衰係数は二種類の等価粒径係数をもつ等価球形散乱体モデルの理論値と一致することを確認した。第一の等価粒径係数は、非球形粒子の粒径を減衰特性が同じ球形粒子の粒径に換算する係数であり、第二の等価粒径係数は、非球形粒子の体積を減衰係数が等しい球形粒子の体積に換算する係数である。これらの係数は粒径に依存しない定数であることを確認した。

第 7 章では、浮遊砂計測に用いる実験モデルを提案した。また、浮遊砂と密度・粒度分布がほぼ等しいシリカ粒子を測定して実験モデルを検証した。浮遊砂計測に用いる実験モデル(カーネル行列)は、粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の非球形粒子の測定に適用する等価球形散乱体モデルと、粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の非球形粒子の測定に適用する古川らの実験モデルを合わせた三種類の等価粒径係数をもつ実験モデルである。第三の等価粒径係数は粘性損失モデルに適用する係数である。50 %粒径 10  $\mu\text{m}$  未満の三種類のシリカ粒子の測定を行い、この実験モデルを適用して濃度と粒度分布を同時に測定できることを確認した。また、50 %粒径 10  $\mu\text{m}$  以上の三種類のシリカ粒子の測定を行い、この実験モデルを適用して濃度と粒度分布を同時に測定できることを確認した。

第 8 章では、実河川において超音波減衰スペクトル計で測定した減衰スペクトルに実験モデルを適用して浮遊砂濃度と粒度分布を測定し、超音波減衰スペクトル計による浮遊砂計測方法を検証した。平岡ダムでは、現場型超音波減衰スペクトル計を用いて、最大濃度  $1.2\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、最大粒径約 1 mm、50 %粒径 10~40  $\mu\text{m}$  の浮遊砂の濃度と粒度分布を測定した。また、六角川の汽水域では、最大濃度  $4.6\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、最大粒径約 0.1 mm、50 %粒径約 10  $\mu\text{m}$  の浮遊土砂の濃度と粒度分布を用いて測定した。いずれの測定においても、超音波減衰スペクトル計の測定値は、ガラス繊維濾紙法で測定した濃度、またレーザ回折・散乱法で測定した粒度分布とよく一致することを確認した。また、超音波減衰スペクトル計は濃度と粒度分布の同時計測ができるので、簡単に粒径集団別濃度を測定できることがわかった。

浮遊砂にはシルトや粘土粒子だけではなく、珪藻や有機物などの揮発性浮遊物質が含まれているので、超音波減衰スペクトル法で算出した固体体積分率から濃度を求めるためには濃度補正が必要であることがわかった。

## 9.2 今後の展望

現場型超音波減衰スペクトル計は、これまでガラス繊維濾紙法とレーザ回折・散乱法で採水したサンプルを測定していた浮遊砂の濃度と粒度分布を現場で瞬時に自動で連続して計測できる装置であり、この計測によって粒径集団別濃度まで計測できる高性能の浮遊砂計測装置である。今後、土砂災害の防止や生態系、景観等の河川・海岸環境の保全を目的とした総合的な土砂管理を行うため、現場型超音波減衰スペクトル計の積極的な導入によって土砂移動のモニタリングを推進することが望まれる。超音波減衰スペクトル計の計測データは、ダムからの排砂による河川や生態系への影響の評価、各種の河床変動計算の予測精度の向上、放射性セシウムなどの懸濁態粒子に付着する物質のモニタリングなどへの活用が期待される。

次に、超音波減衰スペクトル計による浮遊砂計測の要点と展望について述べる。超音波減衰スペクトル計では、実験モデル  $K_2(f,d)$ 、濃度補正係数および粒度分布コードを用いて、減衰スペクトルの測定値から浮遊砂濃度と粒度分布を求める。実験モデルと濃度補正係数は、減衰スペクトルの測定値、同時刻に採取した濁水のガラス繊維濾紙法で測定した濃度、およびレーザ回折・散乱法で測定した粒度分布から付属のソフトウェアを用いて決定する。実験モデルに適用する三種類の等価粒径係数と濃度補正係数は出水時の3つ以上の測定データがあれば簡単に決定することができる。

また、洪水によって河川を移動する浮遊砂の粒度分布は地形条件と水理条件に依存するので、類似した粒度分布を有する河川の既存の粒度分布のデータベースを構築することは粒度分布の適合精度の向上のために有効である。また、データベースを適用することによって、浮遊砂計測結果の検証のための採水やレーザ回折・散乱法で測定する粒度分布の測定数を大幅に減少することができる。

超音波減衰スペクトル計による現場計測は、設置場所や測定方法によって様々な形態があるので、今後、水深方向の濃度の鉛直分布の測定が可能な耐圧型、採水ポンプとセットにしたフローセル型の超音波減衰スペクトル計などの開発を進める計画である。

# 謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始懇切丁寧なご指導を賜りました日本大学工学部名誉教授小林力先生、日本大学工学部准教授田井秀一先生に深甚なる謝意を表します。また、日本大学工学部教授古河幸雄先生、日本大学工学部名誉教授長林久夫先生、日本大学工学部教授鋤野秀三先生、日本大学工学部准教授朝岡良浩先生、日本大学理工学部教授伊藤洋一先生、日本大学生産工学部教授小田晃先生には数多くのご指導と有益なご助言をいただきました。ここに感謝申し上げます。

また、本研究の内容は、計測装置の設計・製作、室内実験およびフィールドでの測定実験、さらにはプログラム開発と内容が多岐にわたり、各分野において数多くの方々のご指導、ご協力、ご支援をいただきました。計測装置の設計・製作では北斗理研株式会社社長山崎眞義氏、北斗理研株式会社開発部長猪股重光氏にご尽力をいただきました。感謝申し上げます。また、実験の実施は、開発設計コンサルタントの瀨上安信氏、渡辺泰秀氏、鈴木幸太氏、渡辺光意氏にご尽力いただきました。感謝申し上げます。プログラム開発では株式会社 JP ビジネスサービスの河下重和氏、上野好一氏にご尽力いただきました。感謝申し上げます。試験装置の設計・製作では丸東製作所の清水隆央氏から貴重なご助言をいただきました。感謝申し上げます。また、研究の基礎になった論文の著者である D. J. McClements 博士、A. Richter 博士、S. Schaafsma 博士に感謝申し上げます。

私は、昭和 49 年に電源開発株式会社に入社して以来、発電ダムと水力発電所の保守運用を中心とした業務を担当してきました。その間、天竜川、熊野川、只見川、球磨川、奈半利川などの堆砂対策や濁水長期化対策に関わってきました。そこで痛感したことは土砂の量と質のモニタリングができる計測システムの必要性でした。平成 18 年 1 月、山崎眞義氏と猪股重光氏からプランコンケープ形振動子を用いた実験結果の説明を受けたのが本研究の始まりでした。平成 28 年 12 月、本研究の成果であるフローセル型の超音波減衰スペクトル計を伊南川(福島県只見町)に設置しました。これが本格的な浮遊砂計測の始まりです。

最後に、電源開発株式会社と、ご指導、ご協力、ご支援を賜りました皆様方に心よりお礼申し上げます。