

超音波による農業用開水路の粗度係数計測手法の開発

Development of Measurement Method for  
Manning's Roughness Coefficient of  
Irrigation Open Channel Using Ultrasonic Wave

令和2年2月17日

三重大学大学院生物資源学研究科

長岡誠也

1 章	はじめに .....	1
1.1	開水路について .....	1
1.2	開水路の劣化, 摩耗について .....	2
1.3	ストックマネジメントにおける機能診断の役割 .....	6
1.4	摩耗計測に関する既往の研究 .....	11
1.5	研究課題と目的および論文の構成 .....	17
2 章	空中超音波センサの粗さ計測への有効性 .....	21
2.1	計測原理 .....	21
2.2.1	実験装置 .....	25
2.2.2	反復計測によるばらつき .....	32
2.2.3	粗さ計測への適用検証 .....	35
2.2.4	計測範囲 .....	37
2.2.5	Kirchhoff モデルとの比較 .....	41
2.2.6	まとめ .....	45

2.3	単眼センサ .....	46
2.3.1	実験装置 .....	46
2.3.2	反復計測によるばらつき .....	50
2.3.3	粗さ計測への適用検証 .....	52
2.3.4	乾湿の影響 .....	54
2.3.5	計測範囲 .....	56
2.3.6	まとめ .....	61
2.4	センサ法線と計測面のなす角が及ぼす影響による 複眼センサと単眼センサの比較 .....	62
3章	空中超音波センサの環境条件への適用性 .....	70
3.1	温度・湿度・大気圧の影響 .....	70
3.1.1	空気吸収減衰について .....	70
3.1.2	空気吸収減衰式 .....	72
3.1.3	実験概要 .....	81
3.1.4	温度・湿度・大気圧による最大振れ幅への影響 ..	87
3.1.5	理論式による補正 .....	92
3.1.6	増減率と温度の関係式による減衰補正案 .....	95
3.1.7	まとめ .....	98

3.2	風速の影響	99
3.2.1	超音波による風速について	99
3.2.2	実験概要	101
3.2.3	風洞装置稼働時に発生したノイズの処理方法	104
3.2.4	風速による最大振れ幅への影響	106
3.2.5	理論式の提案	109
3.2.6	理論値と計測値の比較	115
3.2.7	まとめ	118
4章	水中超音波の粗さ計測への有効性	120
4.1	実験装置	122
4.2	反復計測によるばらつき	124
4.3	粗さ計測への適用検証	127
4.4	計測範囲	130
4.5	計測距離による伝達損失	134
4.5.1	理論式について	134
4.5.2	理論値と計測値の比較	138
4.6	まとめ	140

5 章	水中超音波の環境条件への適用 .....	143
5.1	流速の影響 .....	143
5.1.1	実験概要と対象水路 .....	144
5.1.2	流速計測結果（対象水路 A） .....	150
5.1.3	計測値と理論値（静水）との比較（水路 A） ..	152
5.1.4	流速計測結果（対象水路 B） .....	154
5.1.5	計測値と理論値（静水）との比較（水路 B） ..	156
5.1.6	まとめ .....	159
5.2	濁りの影響 .....	160
5.2.1	実験装置 .....	162
5.2.2	濁度による影響評価 .....	165
5.2.3	透視度による影響評価 .....	168
5.2.4	まとめ .....	170
6 章	摩耗模型水理実験による粗度係数推定式の開発 .....	172
6.1	実験概要 .....	174
6.1.1	実験水路 .....	174
6.1.2	水深計測 .....	180
6.1.3	超音波センサ .....	182
6.1.4	粗度係数計測手順 .....	183

6.2	粗度係数計測結果	188
6.2.1	滑面	188
6.2.2	粗面 1	193
6.2.3	粗面 2	198
6.2.4	発泡 1	203
6.2.5	発泡 2	210
6.2.6	発泡 3	212
6.3	粗度係数推定式の作製	214
7 章	現場計測へ向けた接触型集音機の検討	220
7.1	計測設置における課題	220
7.2	実験装置	223
7.3	実験手順	225
7.4	接触型集音機を用いた粗さ計測への適用検証	226
7.4.1	円柱型 D20 の結果	226
7.4.2	円柱型 D30 の結果	228
7.4.3	円錐型 16° の結果	230
7.4.4	円錐型 20° の結果	232

7.5	最適な接触型集音機の選定 .....	234
7.5.1	円柱型の結果 .....	236
7.5.1	円錐型の結果 .....	238
7.6	まとめ .....	240
8章	結論 .....	241
	参考文献 .....	248
	謝辞	

# 1 章 はじめに

## 1.1 開水路について

農業用水路は農地に水を流す役割を担っており，時代の変化と共に様々な形態に進化し全国に水路網を形成している．

水路には，「開水路形式」と「管水路形式」がある．「開水路形式」は自由水面を持ち，水路底の勾配によって水が高い位置から低い位置へと重力によって流れる形式である．「管水路形式」は，管の中に水が充満した状態で，水にポンプ等の圧力が加えられることによって流れる形式である．

本論は，主にコンクリート製開水路に沿った研究である．開水路は役割を果たすため3つの機能を有し，これらの機能は水利用機能，水理機能，構造機能に分類される．また，これらの機能のほかに自然災害や事故等におけるリスクに対する安全性・信頼性や経済性，環境性といった社会的機能がある．開水路の目的は水利用機能の発揮であり，水理機能や構造機能は水利用機能の発揮を支える関係にある（農林水産省，2016）．



## 1.2 開水路の劣化，摩耗について

開水路は様々な要因の劣化によって性能低下を引き起こす。まず，コンクリート構造物として，中性化，塩害による鉄筋腐食，流水・流砂による摩耗などのコンクリート内部に関わるもの。また，基礎地盤の変状による不同沈下や寒冷地での凍害などの外的環境によるものなどがある。このように，開水路は多方面からの要因を受けて性能低下を引き起こし，劣化の進行具合も施工状況や環境によって大きく変化する。農林水産省（2016）農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」によると，開水路の主要な劣化および性能低下プロセスは **Fig. 1- 1** に示すようにまとめられている。特に，摩耗は開水路の粗度係数を増大させ，水理機能の低下および水利用機能の低下を引き起こすため重要な劣化因子であると言われている。東海農政局管内で2001年から2010年までに行われた水路補修工事の8水路の事例のうち，6水路においては，目視診断が行われ，結果として粗度係数の増大による通水性能を満たしていないという理由で補修工事が行われている（日本水土総合研究所，2012）。

摩耗の進行は，大きく2種類に分類することができる。①カルシウムイオン溶脱：水にコンクリートが長期間触れることによって，水和性成分のカルシウムイオンが水中に溶脱し，コンクリートの組織が粗になり，表面が欠損する化学的作用（森ら，2011）。②物理的摩耗：流水や流水に含まれる砂礫により，コンクリート表面が研磨される物理的作用。**Fig. 1- 2** に示すように，（a）脆弱なモルタル，細骨材から選択的に欠損が進む。（b）粗骨材が浮き出て

くる形で，粗骨材の剥離が発生する．（c）摩耗の進行により断面が減少し，構造機能を低下させる．構造機能の低下が著しく見られる水路は，ひび割れなどの発生を誘発し，直ちに補修を施す必要がある．（d）摩耗劣化による表面粗度の増大は，水利機能の低下を引き起こし，表面凹凸での摩擦損失により，通水機能が低下し，水路末端まで水を供給することができなくなる．これら一連のプロセスが知見されている．その他にも，施工時の状況，使用骨材，寒冷地などの要因が起因して摩耗の進行程度が変わってくる．

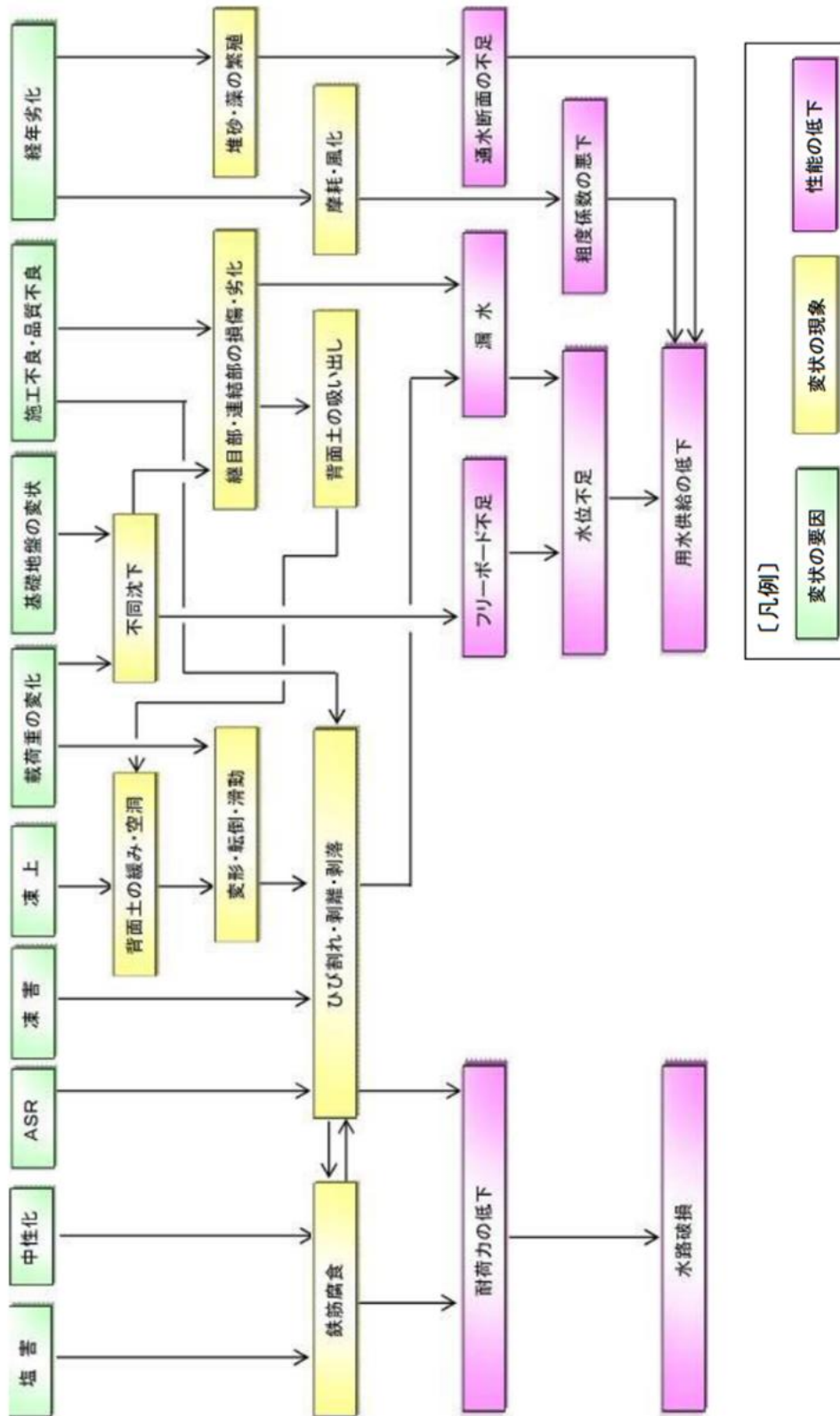


Fig. 1- 1 開水路の主要な劣化および性能低下プロセス

(農林水産省, 2016 より引用)

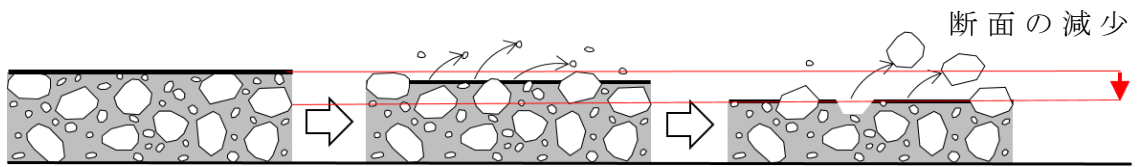


Fig. 1- 2 摩耗劣化の進行

### 1.3 スtockマネジメントにおける機能診断の役割

現在，農業用排水路は，総延長距離約 40 万 km で，基幹的な水路のみでも約 5 万 km を有し，巨大資本施設である．これらのほとんどは高度経済成長期に整備されたものが多く，耐用年数を超える施設が全体の 25% で，今後 10 年のうちに耐用年数を超過する施設が 40% とされている（農林水産省，2017）．しかし，これらの施設を一度に更新することは経済的に困難である．そこで，ストックマネジメントが推進されている．ストックマネジメントとは，「施設の機能がどのように低下していくのか，どのタイミングで，どのような対策を取れば効率的に長寿命化できるのかを検討し，施設の機能保全を効率的に実施することを通じて，施設の有効活用や長寿命化を図り，ライフサイクルコストを低減する取組み」のことをいう．具体的には，①管理者による適切な日常管理，②定期的な機能診断，③施設の劣化予測や工法等の比較検討による対策計画の作成，④同計画に基づく対策の実施，⑤これらの過程を通じて得られる施設状態や対策履歴等のデータの蓄積と利用，などのサイクルを繰り返すことにより実施される（Fig. 1- 3）．構造物に発生する劣化は一様ではなく，更新が必要な個所や，補修・補強で供用を続けられる箇所もある．

ストックマネジメントには，劣化状況を見極める適切な機能診断技術が必要不可欠である．機能診断手法は，Table 1- 1，Table 1- 2 に示すように，農林水産省が機能，性能，劣化区部に分けて調査項目，調査手法，記録手法をまとめている（農林水産省，

2016) . しかし，これまでに使われている機能診断技術では，全ての施設や劣化因子を調査することができない．特に調査手法に目視による有無と記載されている項目は，適切なセンシング技術が無く，定量的な評価ができていないことを意味する．そこで近年，多様な機能診断技術が提案されている．

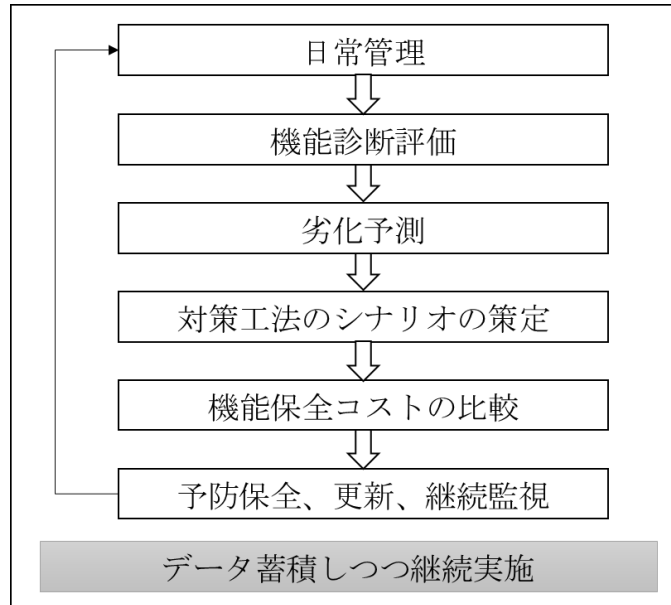


Fig. 1- 3 ストックマネジメントの実施サイクル

(農林水産省, 2016 より引用)

Table 1-1 機能診断手法①（農林水産省，2016より引用）

機能	性能	区分	調査項目	調査手法	記録手法	
構造	力学的安定性	ひび割れ	ひび割れ最大幅	定量計測 (クラックスケール)	定量記録、写真記録、 図化	
			ひび割れ延長	定量計測 (スケール)	〃	
			ひび割れタイプ	タイプ判別	〃	
		変形・歪み	変形・歪み量	目視による有無、簡易計測 (下げ振り、ボール、傾斜計)	定量記録、写真記録、 図化	
		圧縮強度	圧縮強度(反発強度)	簡易計測 (リバウンドハンマー法、機械インピーダンス法等)	定量記録、写真記録	
		耐久性	材料劣化	浮き	目視による有無、 打音調査	写真記録、図化
	剥離・剥落・ スケーリング			目視による有無、 簡易計測 (デプスゲージ等)	定量記録、写真記録、 図化	
	ポップアウト (析出物) エフロレッ センス			目視による有無	写真記録、図化	
	(析出物) ゲルの滲出			〃	〃	
	錆汁			〃	〃	
	変色			〃	〃	
	摩耗・風化			目視による有無、 簡易計測 (デプスゲージ等)	定量記録、写真記録、 図化	
	漏水 (痕跡)			目視による有無	写真記録、図化	
	鉄筋露出			〃	〃	
	中性化			中性化深さ/中性化 残り	ドリル法	〃
			鉄筋被り	設計図書の確認、 定量計測 (鉄筋探査)	定量記録、写真記録、 図化	
	安定性		地盤変化	背面土の空洞化	目視による有無、 打音調査	写真記録、図化
				不同沈下	目視による有無、 簡易計測 (スケール 等)	定量記録、写真記録、 図化
	上記性能を含む 構造性能		目地の劣化	目地の開き	目視による有無、簡易 計測 (スケール)	〃
		段差		〃	〃	
		止水板の破断		目視による有無	写真記録、図化	
		漏水 (痕跡)		〃	〃	
		周縁コンクリートの 欠損等		目視による有無、簡易 計測 (スケール等)	定量記録、写真記録、 図化	



Table 1-2 機能診断手法②（農林水産省，2016より引用）

機能	性能	調査項目	調査手法	記録手法	備考
水 利 用	・ 保守 保守 全管 理性	保守管理に必要な 施設（除塵・排砂施 設、管理用道路等） の有無、状態	目視による有無、 作動調査	状態記録、写真記録	非灌漑期
水 理	通 水 性	流量	定量計測結果より算定 （水位（スケール等）と 流速（電磁流速計等）を 計測し流量を算定する）	定量記録、写真記録	灌漑期
		水位（余裕高）	定量計測（スケール・ コンベックス等）	〃	灌漑期
		水路断面	定量計測（スタッフ等）	〃	非灌漑期
		ひび割れからの漏 水※	目視による有無	定量記録、写真記 録、 図化	〃
		不同沈下※	目視による有無 側壁高計測（レベル等） 縦断勾配計測（レベル 等）	〃	〃
		止水版の破断※	目視による有無	写真記録、図化	〃
		目地からの漏水※		〃	〃
		摩耗・すりへり※		〃	〃
		変形・歪みの有無※	目視による有無 定量計測（下げ振り等）	定量記録、写真記 録、図化	〃
		分 水 制 御 性 ・ 水 位 制 御 性	分 水 制 御 性 ・ 水 位 制 御 性	分水流量	定量計測結果より算定
分水位	定量計測（スケール・コ ンベックス等）			〃	〃
水位・流量制限施設 （ゲート等）の状態	目視による有無、 作動調査			状態記録、写真記録	非灌漑期

## 1.4 摩耗計測に関する既往の研究

摩耗による水利用機能の低下は粗度係数  $n$  によって評価することができる。この粗度係数は、マンニングの平均流速公式 (1-1) に用いられ、開水路の持つ通水性能の指標になっている。等流の場合、流速、径深、エネルギー勾配を計測することで、水路の粗度係数を計測することができる。

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I_e^{\frac{1}{2}} \quad (1-1)$$

ここで、 $v$ ：平均流速 (m/s)， $n$ ：粗度係数， $R$ ：径深 (m)， $I_e$ ：エネルギー勾配

しかし、竹村ら (2001) によると、現場水路で粗度係数を精確に測定することは、水面の波立ちなどの影響が加わり評価が困難であると報告されている。また、現場水路は、水路底の堆砂、水路壁面の植生、不同沈下などが影響しているため、現場で求めた粗度係数を摩耗劣化の指標にすることは難しいと考えている。そこで、粗度係数に起因するコンクリート表面粗度を計測することで、粗度係数の推定を試みる研究が進められた。マンニング-ストリクラー式 (1-2) 式では、粗度係数は相当粗度の 1/6 乗に比例するとしているが、開水路のコンクリート摩耗は、骨材の粒径に関わらず摩耗の進行状況によって表面に隆起する粗度が決定する。特に、摩耗の進行は一定ではなく、水路延長方向や壁面の深さ方向でも異なってく

る．したがって，骨材粒径を相当粗度に当てはめることができず，表面粗度を他の指標で定量化する必要がある．加藤ら（2008）や中矢ら（2008）は JIS B 0601 に規定されている算術平均粗さ  $Ra$ （mm）と最大高さ  $Ry$ （mm）を使用して摩耗による表面粗度を表している．

$$V = 7.66 \left( \frac{R}{k_s} \right)^{1/6} \sqrt{gRI} \quad (1-2)$$

ここで， $V$ ：平均流速， $R$ ：径深， $k_s$ ：相当粗度， $g$ ：重量加速度，

$I$ ：動水勾配

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{7.66 \sqrt{g}} \quad (1-3)$$

算術平均粗さは式（1-4）で求められる．**Fig. 1- 4** に示す粗さ曲線を  $f(x)$  としたとき，計測長  $l$ （mm）を抜き取り，一次近似直線を  $x$  軸とし， $x$  軸から平均した凹凸を表す．最大高さは粗さ曲線を  $f(x)$  の最大値と最小値の差である．したがって，算術平均粗さは，コンクリート表面の平均的な粗度の高さを表している．最大高さは，平均線を基準に頂点と底辺の差を表している．従って，概ね骨材の粒径の大きさ以内になる．

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (1-4)$$

以下に既往の粗さ測定手法について紹介する。

1) 型どりゲージ：この手法は，0.8mm程度の針金100本程度から構成されており，上下に可動できるよう設置されている．測定面に針金を押し当て，粗さの型をプロファイリングし，表面粗度を読み取る手法である（Abu-Tair AIら，2000）．しかし，この方法は作業が煩雑で解析に時間と手間がかかる．

加藤ら（2008）は，供用中の水路で型どりゲージ測定を行い，算術平均粗さ，最大高さと水路健全度の相互関係を評価した．これらの粗さ指標から相当粗度による粗度係数の推定を行っている．凹凸の底辺を基準として考え算術平均粗さの2倍を相当粗度として考えている．また，コンクリートの耐用年数である40年を迎えた算術平均粗さは，0.7程度になることを報告している．

川上ら（2017）は，表面被覆工法した水路を対象として，アンカーを設置することで標点を作り，摩耗の進行を定期的に簡易的に計測できる技術として型どりゲージを提案している．画像解析ソフトによる解析の簡略化についても提案している．

2) Concrete Surface Profiles：この手法は，土色を判定するために用いられる土色帖のように，粗さのレベル分けされた写真

と測定面の粗さを視覚的に比較して、粗さを定量化する手法である（Pedro M.D ら 2013）。この手法は、視覚に頼るため、個人差が生じる問題がある。

藤山ら（2017）は評価板を用いた粗度係数の計測を提案し、共用水路でレーザ変位計との結果を比較したところ、粗度係数の差異は 0.001 と精度よく評価できることを報告している。

3) レーザ距離計：この手法は、0.1mm 刻みでセンサとコンクリートまでの距離を計測し、粗さ曲線を直線状に連続でプロファイリングする技術である。計測原理は型どりゲージと同じであるが、読み取り間隔が細くなり計測精度の向上と、作業のデジタル化により簡易化している。

内田ら（2008）は粘土を用いてコンクリート表面の凸凹を型取り、レーザ距離計を用いて解析をする手法を提案している。しかし、この方法は屋内に一度戻ってからの測定になり時間と手間がかかる。

浅野ら（2014）は表面被覆工法した水路を対象として、アンカーを設置することで評点を作り、摩耗の進行を定期的に簡易的に計測できる技術としてレーザ距離計を提案している。

4) Sand patch test：規格で決められた砂の量を、測定面の上で円形に広げて、表面凹凸の溝に埋め、粗さが大きい場合は、溝に埋まる砂の量が大きくなるため、砂の直径が小さくなるという原理を利用した手法である（ASTM E 965, 1996）。この手法は簡易的であるが、水路壁面では、砂が流れ落ちるため適用できない。

5) Outflow Meter : Sand patch test と測定原理は似ているが、砂ではなく水を用いて、測定面に水を流し、水の流出量を測定して、粗さを評価する手法である (ASTM E, 2380) . Sand patch test 同様に、簡易的であるが、水路壁面では、水が流れ落ちるため適用できない。

6) 3次元画像解析 : デジタルカメラで測定面の画像を取得して、専用ソフトにより解析をする手法である (太田垣ら, 2012) . しかし、これは取得画像を解析するとき、計測線を対象とし、線情報を取得している。したがって、広域な水路の健全度を診断することは困難である。また、3次元画像解析ソフトが高価となり、経済的負担が大きい。

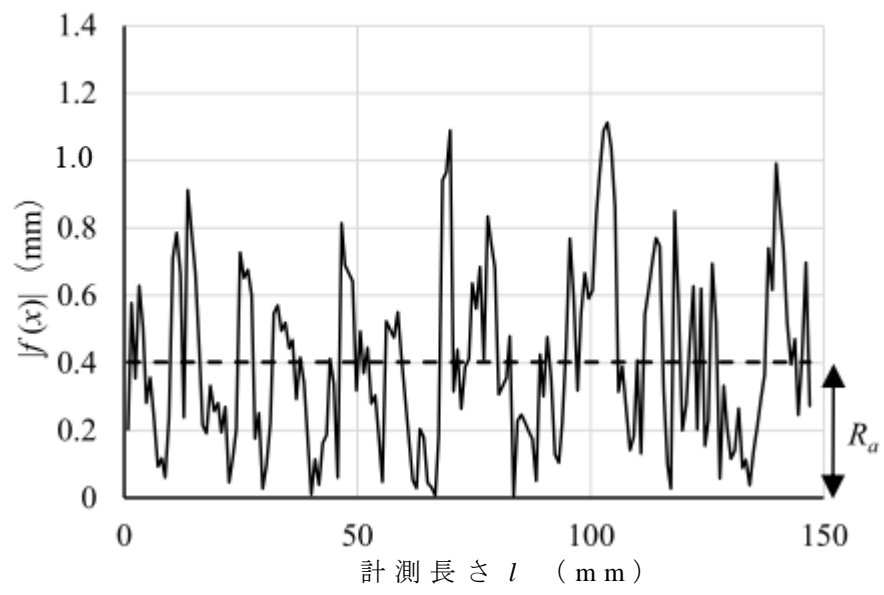


Fig. 1- 4 粗さ曲線

## 1.5 研究課題と目的および論文の構成

1.4 節で述べた既往の研究はいくつかの課題が挙げられる。農業用開水路における機能診断で要求される性能は、(1)簡易的、(2)面的、(3)安価な3つの条件が必要であると考えられる。

(1) 簡易的は、農業用開水路を機能診断する技術者は多岐に渡るため、誰でも扱えることが要求される。また、広域の水路網を形成するため簡易的だけでなく短時間で計測を完了する必要がある。

(2) 面的は、農業用開水路の粗さが一様でないため、線情報では特定の位置しか評価できない。そのため、複数回の計測から水路の平均的な情報を得ることになる。結果的に作業時間がかかることになる。

(3) 安価は、機能診断技術として普及されるかどうか大きく影響する。センサ価格による経済的な負担は、デメリットが大きく、結果的にセンサに頼らない目視に依存することになる。

上記の点を踏まえて1.4節で述べた既往の研究の課題を整理すると、簡易的でない技術は1)、4)、5)、6)であり、面的でない技術は1)、3)、6)であり、安価でない技術は3)、6)である。2)に関しては、目視と同様に作業者によって経験や感覚が異なるためデータの一貫性に欠ける。

このように、既往の研究には、課題が残されており、新たな手法の技術開発が望まれている。



そこで、本論では超音波法に着目をして農業用開水路の粗度係数計測技術の確立を目的に研究を進める。

なお、2、3、4章では筆者の原著論文および共同執筆論文に対応して記載している。

2章では、超音波法の計測原理を仮定し、空中超音波センサによる粗さ計測への適用検証をした。また、計測範囲を検証することで、面的な計測であることを明らかにする。これら一連の研究は、本論の基礎研究として位置付けられる（参考文献：(8)，(24)対応）。

3章では、現場での計測における、環境要因である温湿度・大気圧と風速の2つが空中超音波計測に与える影響について検討をした。すなわち、現場で発生する課題に対する研究となる（参考文献：(9)，(35)対応）。

4章では、超音波手法の対応範囲の拡大に向けて、新たに水中超音波による手法の開発をした。この技術の開発は、水中にあるコンクリートを対象としているため、非灌漑期や通年通水している水路の計測が可能となる。4章では、基礎研究を行った（参考文献：(36)対応）。

5章では、現場での計測における、環境要因である流速と濁りの2つが水中超音波計測に与える影響について検討をした。すなわち、現場で発生する課題に対する研究となる。

6 章では，6 種類の摩耗模型パネルを使用して水理実験を行い，粗度係数を計測した．相当粗度を經由することなく，最大振れ幅から直接粗度係数を推定することができる式を開発した．

7 章では，空中超音波の計測機の設置方法の簡易化に向け，接触型集音機の装着を検討した．接触型集音機の適用性や最適な形状について検討した．

## 2 章 空中超音波センサの粗さ計測への有効性

### 2.1 空中超音波と計測原理について

### 2.2 複眼センサによる実験

#### 2.2.1 実験装置

#### 2.2.2 反復計測によるばらつき

#### 2.2.3 粗さ計測への適用検証

#### 2.2.4 計測範囲

#### 2.2.5 Kirchhoff モデルとの比較

#### 2.2.6 まとめ

### 2.3 単眼センサによる実験

#### 2.3.1 実験装置

#### 2.3.2 反復計測によるばらつき

#### 2.3.3 粗さ計測への適用検証

#### 2.3.4 乾湿の影響

#### 2.3.5 計測範囲

#### 2.3.6 まとめ

### 2.4 センサ法線と計測面のなす角が及ぼす影響による

#### 複眼センサと単眼センサの比較

## 2 章 空中超音波センサの粗さ計測への有効性

### 2.1 計測原理

気体，液体，固体の中を変位または圧力が伝わる現象を音と言う．音が伝わる気体，液体，固体を媒質と呼び，音が伝わることを伝搬と言う（超音波技術入門，2016，a）．若い成人の可聴周波範囲は，20Hz～20kHz であって，20kHz 以上の音を超音波と呼ぶ．空中超音波とは，気体つまり空中を伝搬する超音波を意味する（超音波技術入門，2016，b）．

空中超音波による粗さ計測の計測原理については，本論では超音波の散乱現象を利用して仮定した．計測対象であるコンクリート構造物に超音波が垂直に入射した場合，反射と透過が起きる．反射率  $R_p$  と透過率  $T_v$  は媒質の固有音響インピーダンスから求められる．反射率と透過率は  $T_v = 1 - R_p$  の関係にある（海洋音響学会，2014，a）．

反射率は，

$$R_p = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2-1)$$

ここで，  $Z_1$  : 気体の固有音響インピーダンス ( $10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ )

$Z_2$  : コンクリートの固有音響インピーダンス

( $10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ )

透過率は、

$$T_v = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2-2)$$

音響インピーダンスは、気体から固体や液体への超音波の入り難さの指標である。コンクリートと空気の音響インピーダンスの差は非常に大きく、式(2-1)より反射率はほぼ1になり、透過率はほぼ0になる。つまり、コンクリートに超音波が垂直に入射した場合、ほぼ100%の超音波が反射されることになり、透過を考える必要がない。

コンクリートが完全に滑らかな平面境界で相接している場合の境界における反射は鏡面反射である。しかし、コンクリートに不規則な粗さ(凹凸)がある場合は、鏡面反射成分と不規則散乱成分を考える必要がある。鏡面反射成分は位相のコヒーレント加算によるもので、散乱成分は位相のインコヒーレント加算によるものである。コンクリート表面の凹凸が小さい場合はコヒーレント性が支配的になり、凹凸が大きいインコヒーレント性が支配的になる(海洋音響学会, 2014, b)。

つまり、超音波の散乱により凹凸の増加に伴い、受信波の反射強度は、低下する傾向にあると考えられる。コンクリートの摩耗が進展することで、細骨材の剥離、粗骨材の剥離および表面凹凸は次第に大きくなる。従って、本論では、超音波の反射波を受信し、反射

強度の最大振れ幅を解析することで、コンクリート表面の凹凸および摩耗の進行程度を予測可能と仮定した。計測原理のイメージ図を **Fig. 2- 1** に示す。

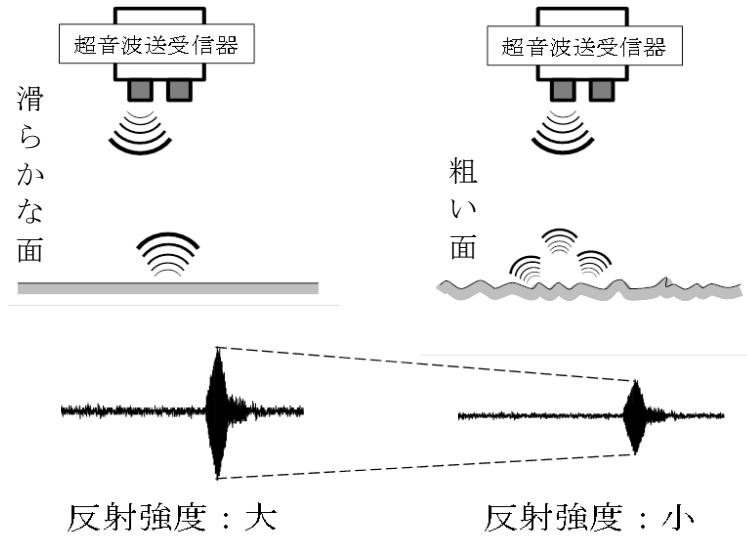


Fig. 2- 1 計測原理のイメージ

## 2.2 複眼センサ

### 2.2.1 実験装置

#### ① 空中超音波センサ

通常，空中超音波は，周波数が高くなるほど空気中の吸収損失による減衰が大きくなる．平岡ら（2011）は，比較的入手しやすい40kHz，95kHz，190kHzの空中超音波を用い，反射波の最大振幅について検討を行い，計測距離が20cmより短いと95kHz以上の高周波超音波センサが有効であることを報告している．

本論では，水路壁の現地計測を想定し，計測距離は500mmから2,000mm程度の範囲と考え，周波数は比較的減衰率の低い40kHzのセンサを使用した．40kHzの波長は8.5mmであるので，対象面の凹凸の波長が8.5mmの表面粗さがこのセンサの計測限界と推定できる．水路コンクリートでは，粒径20mmから40mmの骨材が使用されることが多く，粗度に影響を与えるような骨材の露出時には露出した骨材の頂部間隔は8.5mm以上と考えられる．このため，本論では40kHzのセンサでもコンクリートの粗さ計測が可能であると考えた．

本節で使用した空中超音波センサは，発信器・受信器に日本セラミック（株）製 T/R40-16 を使用した．このセンサは開口型超音波で，仕様を **Fig. 2- 2** にまとめた．

本節で使用した空中超音波センサの6dB減衰指向角は50度である．本節では面的な計測を目的としたため，ホーン等での超音波



の収束は行っていない。発信は、空中超音波センサにおいて 0.5ms 間に 40kHz で 9V 直流電圧を印加したものを 1 タイミングパルスとして発信した。発信間隔は 0.025s である。受信した反射超音波は、オペアンプ NJM4580 で  $-1\text{M}\Omega/10\text{k}\Omega$  の反転増幅によって 100 倍した値をデジタルオシロスコープ (Tektronix TBS1152, Fig. 2-3) で印加電圧とともに計測・記録した。記録間隔は  $1\mu\text{s}$  間隔とした。受信波の例を Fig. 2-4 に示す。最大振幅 mV は、受信波の最大電圧と最小電圧の差である。

## ②型どりゲージ

コンクリート表面の粗さをあらわす指標として使用されている算術平均粗さ  $R_a$  や二乗平方根粗さ  $R_q$  を求めるために、既往の研究である型どりゲージを用いた。対象となるコンクリート舗装材面に Fig. 2-5 に示す型取りゲージを当てて凹凸を取得した。取得した凹凸の高低差を型取りゲージの鋼棒の長短として Fig. 2-5 のように背景に方眼紙を置いて読み取った。読み取りの計測ピッチは鋼棒の幅 0.8mm とした。読み取った鋼棒の高さを  $Y_{(x)}$  とし、Fig. 2-6 のように  $Y_{(x)}$  の 1 次近似直線を作成した。 $Y_{(x)}$  の 1 次近似直線 (Fig. 2-6 中の破線) を x 軸とし、型取りゲージ 10 の凹凸が表す曲線を曲線  $f_{(x)}$  としたとき (Fig. 2-7), 算術平均粗さは、(2-3) 式で求められる。

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l [f(x)] dx \quad (2-3)$$

また，空中超音波を用いた不規則面計測で使用される粗さ指標に二乗平方根粗さ  $R_q$  があり，(2-4) 式のように表される．

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l f(x)^2 dx} \quad (2-4)$$

### ③ 計測面の選定

加藤ら(2008)は，供用されている水路の算術平均粗さを計測し，供用後約40年の2水路について， $R_a=0.4\sim 1.0\text{ mm}$ ， $0.3\sim 1.0\text{ mm}$ の範囲とし，供用後約10年の水路では $R_a=0.0\sim 0.3\text{ mm}$ の範囲と報告している．

そこで本節では，①反復計測によるばらつき，②粗さ計測への適用検証，の2つの検討項目の算術平均粗さの範囲を $0.05\sim 0.79\text{ mm}$ の範囲で8つの対象面を選定した．検討項目と対象面の関係を **Table 2-1** に示す．

中心周波数		40	k H z
音圧レベル		115 以上	d B
感度		-64 以上	d B
-6 d B 指向性		50	d e g
外寸寸法 (下図参照)	A	16.2	m m
	B	12.2	m m
	C	10.0	m m

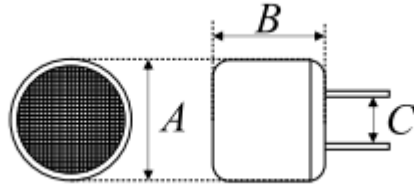


Fig. 2- 2 センサの仕様



Fig. 2- 3 オシロスコープ外観

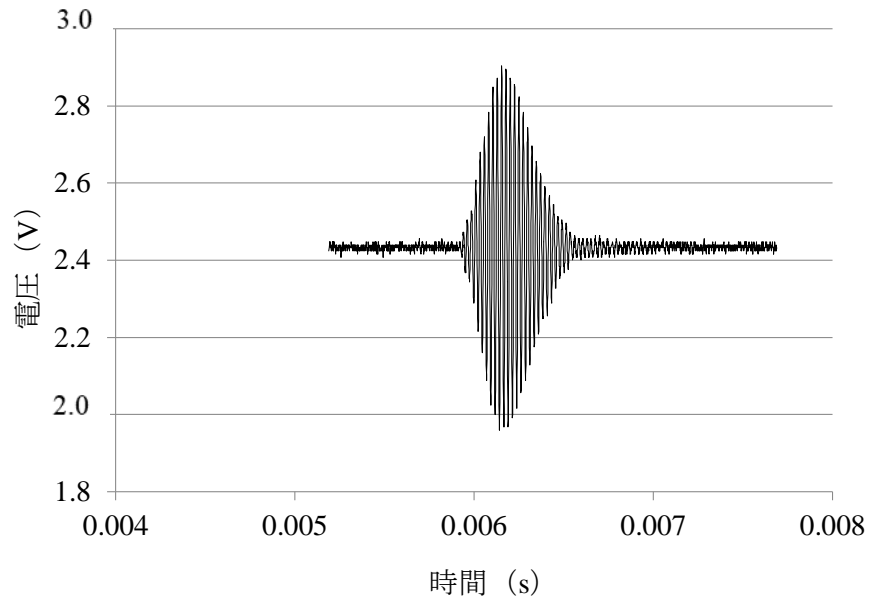


Fig. 2- 4 受信波の例

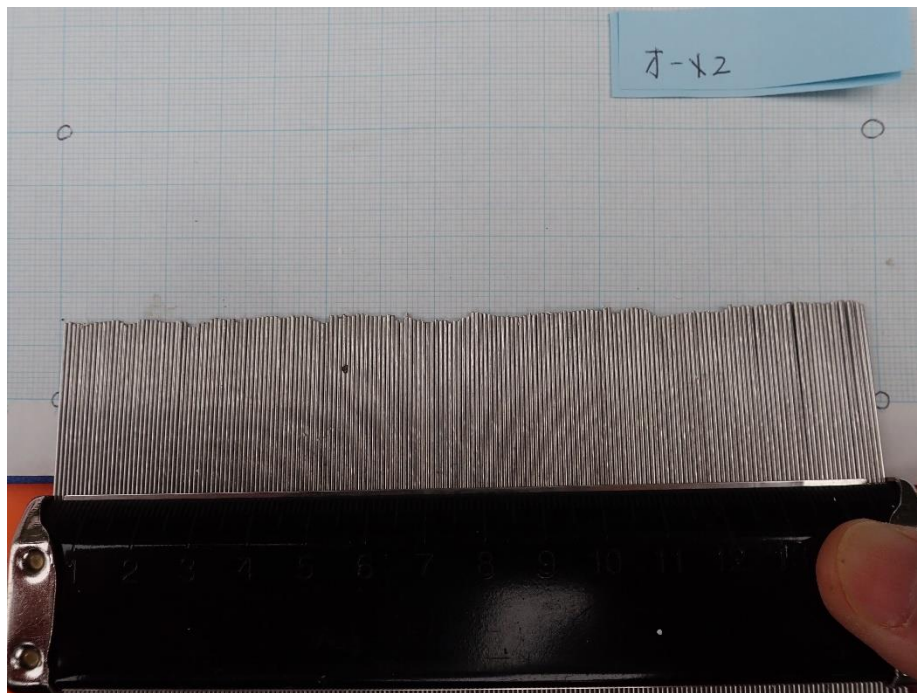


Fig. 2- 5 型どりゲージによる粗さの読み取り

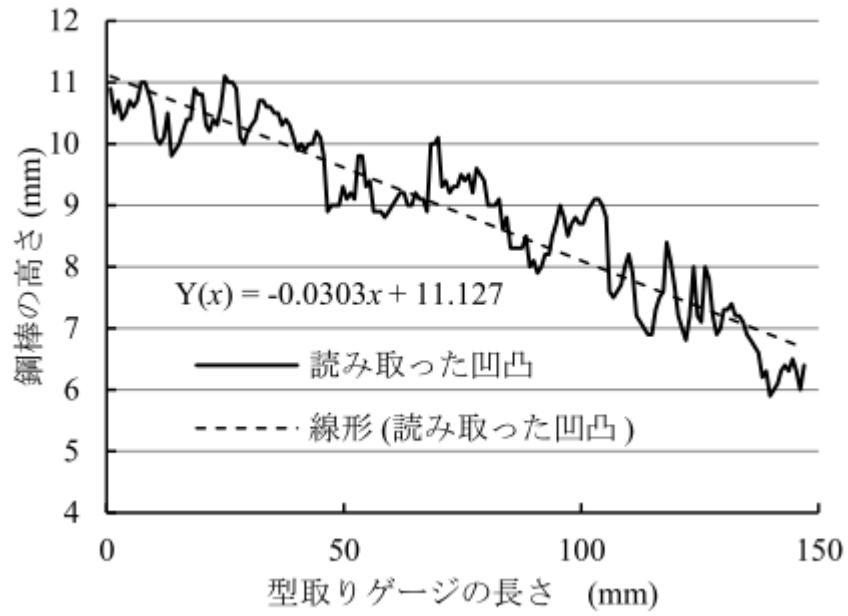


Fig. 2- 6 型どりゲージによる読み取り結果の例

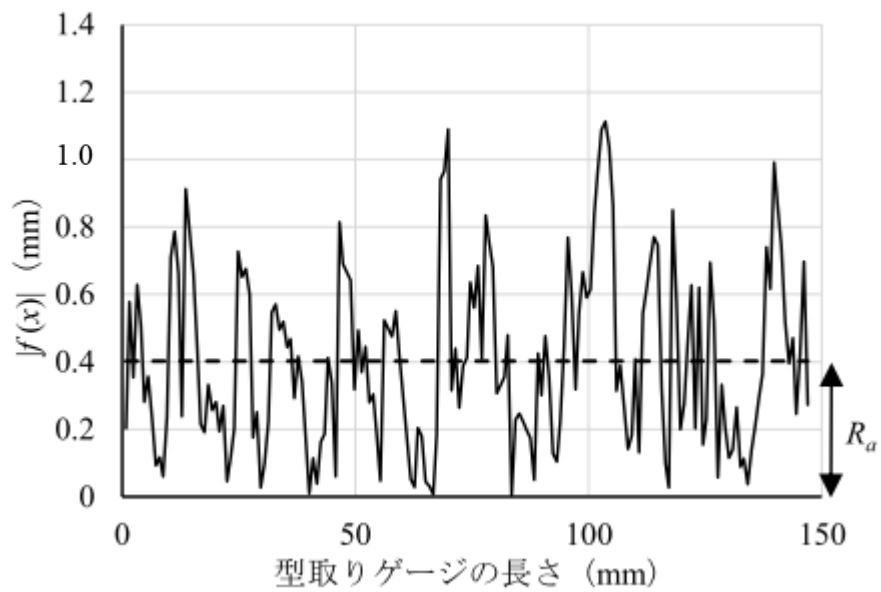


Fig. 2- 7 曲線の絶対値 ( $|f(x)|$ ) と算術平均粗さ

Table 2- 1 検討項目と対称面の算術平均粗さ

$R_a$ (mm)	$R_q$ (mm)	① ばらつき 2.2.2	② 適用検証 2.2.3
0.05	0.06	○	○
0.07	0.09		○
0.15	0.18		○
0.21	0.24		○
0.26	0.32		○
0.50	0.63	○	○
0.70	0.83	○	○
0.79	0.96		○

### 2.2.2 反復計測によるばらつき

同一計測点に対して連続的な反復計測をすることで、発生するばらつきを把握し、適切な平均回数を検討した。

実験は、晴れまたは曇りの屋外で、算術平均粗さ  $Ra = 0.05$ 、 $0.50$ 、 $0.72$  (mm) の 3 つの計測面を対象に行った。

それぞれの対象面で、空中超音波センサがコンクリート面から  $1,000$  mm と  $550$  mm の計測距離となるように設置し、1箇所当たり 125 個の最大振幅を得た。この計測結果を算術平均した個数と平均値のばらつきの関係を検討した。

125 個の計測結果に対して、1 個から 25 個の移動平均を計算し、各々の平均した個数につき 100 サンプルの移動平均値を得た。そして、各々の平均した個数について 100 サンプルの移動平均値の平均値 (mV) と 100 サンプルの移動平均値の標準偏差 (mV) を計算した。Fig. 2- 8 に平均した個数と 100 サンプルの移動平均値の平均値に対する 100 サンプルの移動平均値の標準偏差の割合を示した。

Fig. 2- 8 より 100 サンプルの移動平均値の標準偏差の割合は、計測した対象コンクリート面の算術平均粗さによって収束する粗さが異なるものの、算術平均粗さが粗くなるほど大きくなるといった傾向は見られなかった。そして、同じ算術平均粗さの面では、計測距離が遠い方が、ばらつきが若干高くなる傾向が見られた。

しかし，計測結果は 1 箇所の計測につき 1 つの計測結果でも 100 サンプルの計測結果の平均値の 4% 程度の標準偏差以内に収まることが明らかとなった．また，1 箇所の計測につき 10 個以上の計測結果の平均をとれば，その値は 100 サンプルの移動平均値の平均値の 1% 以下の標準偏差に抑えることができることが分かった．このため，本節では以下の計測結果は 10 回の計測結果の平均値で議論した．本節で使用した空中超音波センサの発信間隔は 0.025 s であり，1 秒間に 40 回の計測が可能である．計測結果を 1% 程度の標準偏差に抑えるために 10 回の平均値が必要とすると，0.25 s 程度の計測時間となることが分かった．



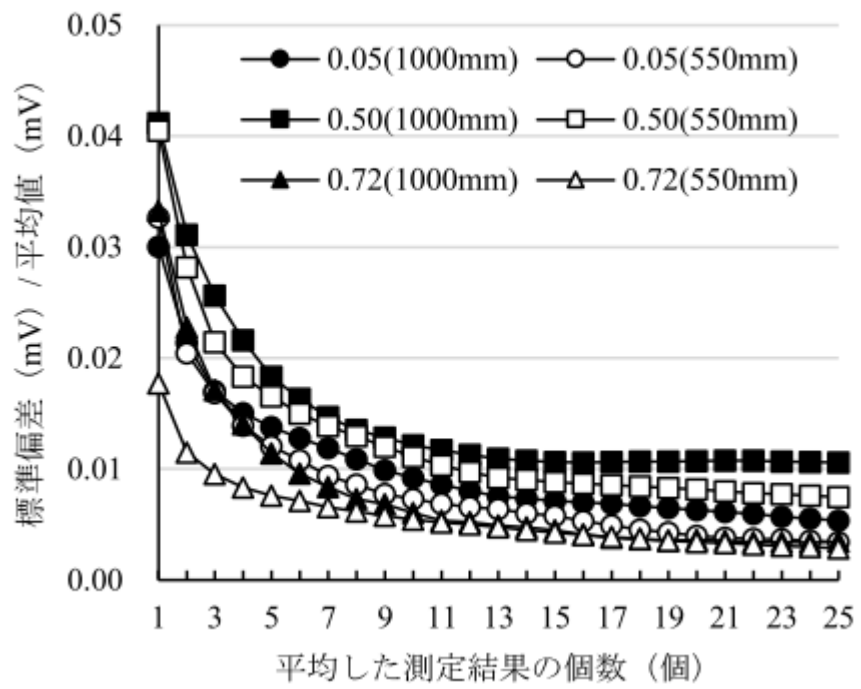


Fig. 2- 8 計測値の移動平均のばらつき

### 2.2.3 粗さ計測への適用検証

粗さ計測への適用検証は、晴れまたは曇りの屋外で、Table 2-1 に示す、算術平均粗さ  $R_a = 0.05 \text{ mm}$  から  $0.79 \text{ mm}$  までの 8 つの面すべてを対象として行った。

本実験に用いた空中超音波センサの発信側と受信側の配置間隔は  $25.0 \text{ mm}$  である。実験において、この影響が小さくなるように空中超音波計測器とコンクリート面との計測距離が  $400 \text{ mm}$  以上に設定した。計測距離は、 $550 \text{ mm}$  をコンクリート面から最も近い計測距離とし、 $1,000 \text{ mm}$  と  $1,500 \text{ mm}$  で計測した。計測した最大振れ幅は、2.2.2 項より計測値のばらつきが 1% 程度となるように、それぞれの距離で 10 回の計測値の平均を、その計測距離の最大振れ幅とした。

算術平均粗さと最大振れ幅の関係を Fig. 2-9 に示す。Fig. 2-9 より、計測距離  $550 \text{ mm}$ 、 $1,000 \text{ mm}$ 、 $1,500 \text{ mm}$  の計測結果において、算術平均粗さが増加するにつれて、最大振れ幅が減少することが確認できた。また、その最大振れ幅と算術平均粗さの関係は、線形近似で決定係数 0.8 以上の高い相関を持つことが確認できた。この近似直線の傾きは計測距離が遠くなるにつれて小さくなった。

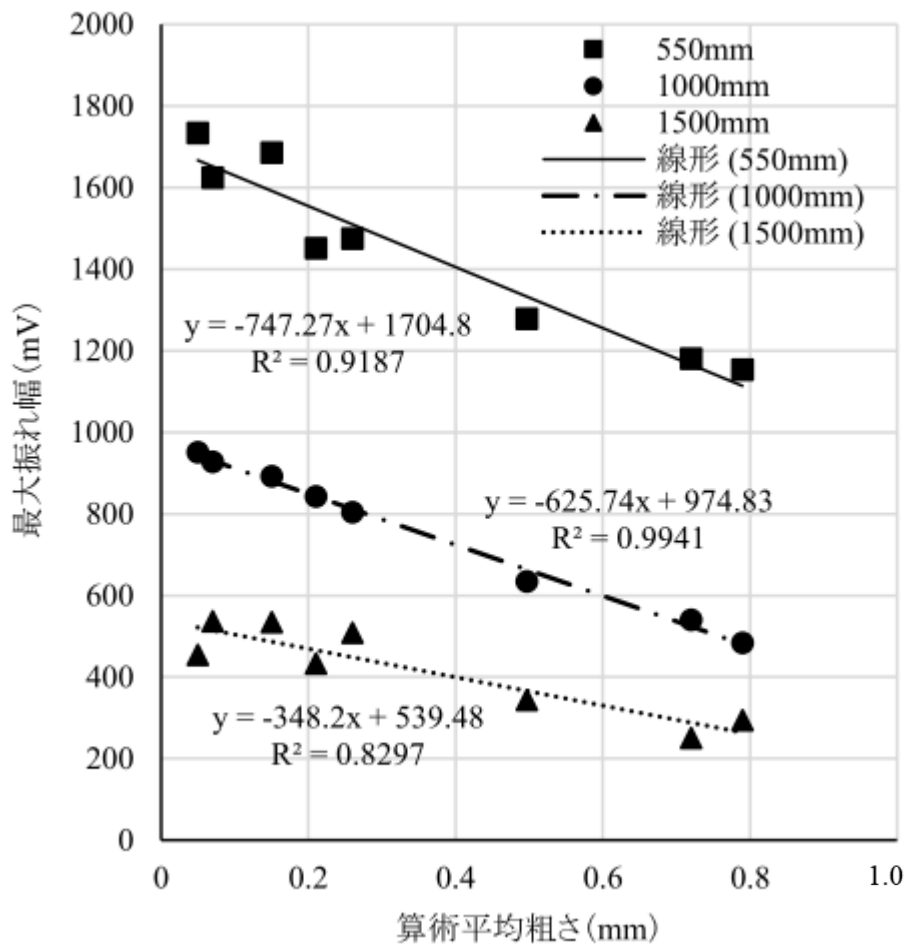


Fig. 2- 9 最大振幅と算術平均粗さの関係

#### 2.2.4 計測範囲

本節で使用した空中超音波センサの6dB減衰指向角は50度である。6dB減衰指向角は中心音圧が半減する角度であり、対象面から1,000mm離れた超音波センサの場合、対象面においてセンサ直下から直径約933mmの領域となる。しかし、指向角はコンクリート粗さ計測における計測領域を表しているものではない。

そこで、計測範囲を明らかにするため、空中超音波センサ直下のコンクリート面上に砂利を同心円状に設置し、その領域を拡大していくことで実測的に検討した（Fig. 2-10）。使用した砂利は、粒径9.5～19mm、粒径2～4.75mm、粒径850 $\mu$ m～2mmの3種類とし（Fig. 2-11）、計測した算術平均粗さは、 $R_a=2.35$ mm、 $R_a=0.89$ mm、 $R_a=0.33$ mmであった。砂利を設置する際は砂利面の高さを一定とするために、砂利の粒子が重ならないように設置した。

砂利の同心円の大きさは、直径200、400、600、800、1,000mmとした。計測はコンクリート面からの距離1,000mmの位置に超音波センサを配置した。

Fig. 2-12に検討領域の直径と最大振れ幅の関係を示す。検討領域が広がるにつれて、どの砂利においても最大振れ幅が減少する傾向を確認した。そして、その傾向は検討領域の直径が600mm以上でほぼ一定の値に収束した。この結果、本節に用いた空中超音

波センサの計測領域は、1,000mm の距離からの計測で直径  
600mm の領域を計測していると考えられる。

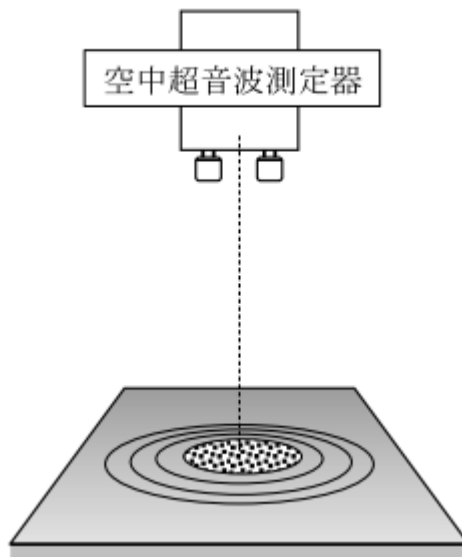


Fig. 2- 10 計測範囲の検討のための実験概要図

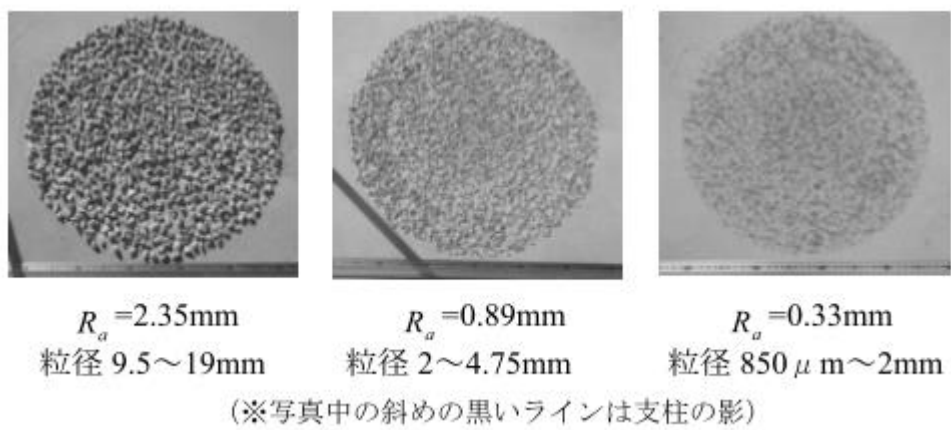


Fig. 2- 11 領域の検討に使用した砂利

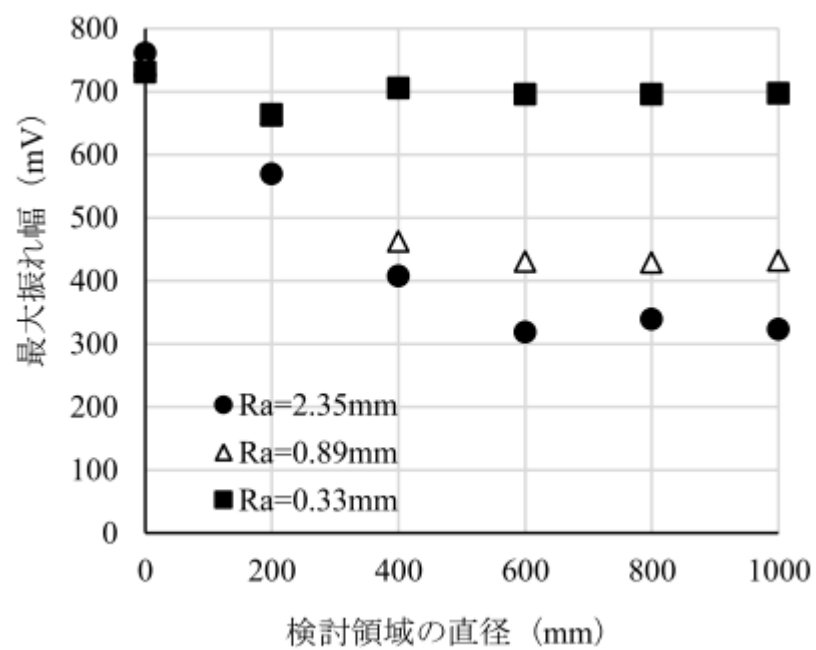


Fig. 2- 12 計測領域の直径と最大振れ幅の関係

### 2.2.5 Kirchhoff モデルとの比較

粗面からの超音波散乱強度を評価するモデルとして最もよく使用されるモデルに Kirchhoff モデルがある。このモデルは、単純な理論をもとに構成されており、極微小な粗さを対象とした面からの反射強度の計算においてある程度の有効性も確認されている（井原，スクマナ，2008）。Kirchhoff モデルでは、反射強度  $I$  はコヒーレント成分  $I_{coherent}$  とインコヒーレント成分  $I_{incoherent}$  の和として次式で表される。

$$I = I_{coherent} + I_{incoherent} \quad (2-5)$$

一方、インコヒーレント成分は、散乱点と観測点との距離  $r$  と超音波照射面積  $S$ ，対象面の相関長  $\lambda$  を用いて次式で表される。

$$\frac{I_{incoherent}}{I_0} = \frac{k^2 \lambda^2 e^{-k^2 R_q^2} S}{4 \pi r^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(k^2 R_q^2)^n}{n! n} \quad (2-6)$$

本論では、反射強度を最大振れ幅とし、平滑な表面からの反射波の強度  $I_0$  は 2.2.3 項の計測結果の近似直線の切片の値とし、超音波照射面積  $S$  は 2.2.4 項より 600 mm とした。

また、相関長  $\lambda$  は定義より対象面の自己相関係数を  $C_R$  としたとき、 $f(x)$  の標準偏差が  $\sigma$  のときに、次式のような長さとした。



$$C_R(\lambda) = \frac{\langle f(x) \cdot f(x+\lambda) \rangle}{\sigma^2} = \frac{1}{e} \quad (2-7)$$

ここで、 $\langle \rangle$  はアンサンブル平均。

Kirchhoff モデルでは、コヒーレント成分は平均値平面による鏡面反射成分のみを持ち、インコヒーレント成分はあらゆる方向への散乱波を含む。ただし、Kirchhoff モデルは、対象面について、凹凸の変化がゆるやかで、凹凸の曲率半径は入射波の波長に比べて充分大きく ( $2k^2 R_q^2 \ll 1$ )、Gaussian 分布を持っているという仮定を置いている。

Fig. 2- 13 に実験結果と計算された Kirchhoff モデルのコヒーレント成分の反射強度 ( $I_{co}$  計測距離)、反射強度 ( $I$  計測距離) を示した。横軸は二乗平方根粗さとした。Fig. 2- 11 より、実験結果と Kirchhoff モデルのコヒーレント成分の反射強度を比較すると計測距離が近く、二乗平方根粗さが小さいとき実験結果と良く一致していることが分かる。計測距離が近く、粗さが小さい場合は反射強度におけるコヒーレント成分が支配的であると考えられる。計測距離が遠く二乗平方根粗さが大きい領域では、実験結果が Kirchhoff モデルのコヒーレント成分の反射強度よりも大きくなる。この要因としては、反射波におけるコヒーレント成分の割合が減少しインコヒーレント成分が相対的に増加し始めたことによると

考えられる。また、実験で用いた対象面が必ずしも Gaussian 分布を満たしていないことも原因と考えられる。

次に、実験結果、Kirchhoff モデルのコヒーレント成分の反射強度 ( $I_{co}$  計測距離) と反射強度 ( $I$  計測距離) を比較すると、二乗平方根粗さが大きい領域で、反射強度がコヒーレント成分の結果より大きくなり実験値に近づいていることがわかる。しかし、Kirchhoff モデルの反射強度は、実験結果をよく表しているとは言いがたい。この要因としては、超音波照射面積  $S$  の影響が考えられる。超音波照射面積は 2.2.4 項の結果をもとに 600 mm と決定したが、Fig. 2- 12 をみると粗さにも依存しているようにみえる。実際の照射範囲についてさらに検討を重ねる必要がある。

さらに、計測距離に着目すると Kirchhoff モデルによる反射強度  $I$  は、550 mm の計測距離からの実験結果をよく表現できており、計測距離が大きくなるにつれて実験結果との差異が大きくなっている。このため、Kirchhoff モデルは、550 mm 程度の近い距離からの計測結果から対象面の粗さを推定することができると考えられる。さらに検証を重ねることで、二乗平方根粗さだけでなく、相関長も定量的に評価できる可能性がある。

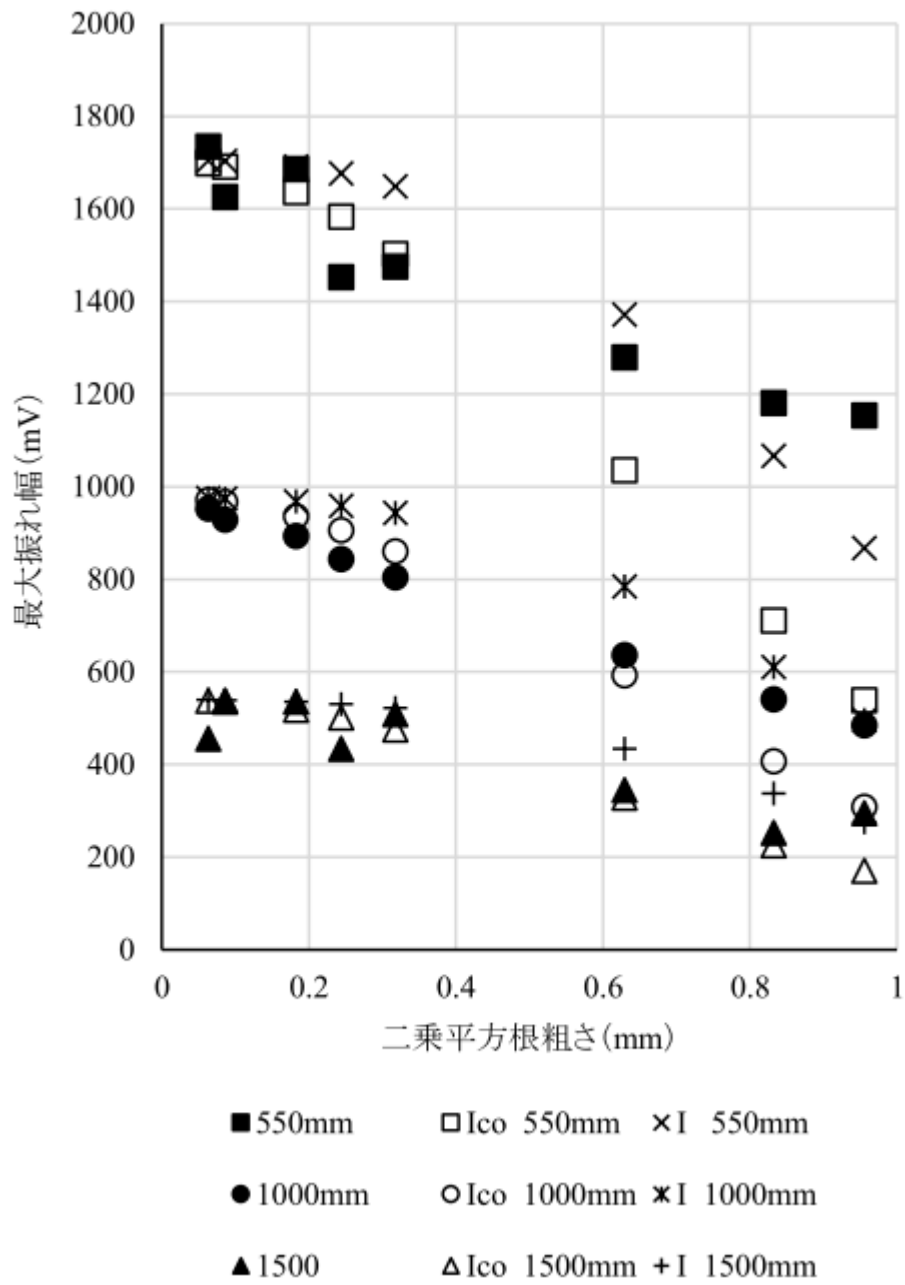


Fig. 2- 13 Kirchhoff モデルと最大振幅の比較

## 2.2.6 まとめ

(1) 2.2 節では、初めに空中超音波センサの反復計測した場合のばらつきについて検討した。計測値のばらつきは、10 回程度の計測結果の平均をとれば、100 回の移動平均値の平均値の 1% 程度の標準偏差に抑えることができることを明らかとした。

(2) 2.1 節で仮定した計測原理の検証をした。計測距離 550 mm, 1000 mm, 1500 mm から異なる粗さを持つコンクリートに対して空中超音波計測を行った結果、その最大振れ幅と算術平均粗さの関係は、線形近似で決定係数 0.8 以上の高い相関を持つことが確認できた。x 軸と y 軸を入れ替え、算術平均粗さの推定式を作製することで、未知の粗さを最大振れ幅と計測距離を計測することで推定することができることを明らかとした。

(3) 計測領域について検証をした。超音波センサの計測領域は、1,000 mm の距離からの計測で直径 600 mm の領域を計測していることを明らかとした。また、計測面に対して、空中超音波センサは面的な計測が出来ることを明らかとした。

(4) Kirchhoff モデルとの比較をした。計測距離が近い場合 Kirchhoff モデルは実験結果を良く表現しており、Kirchhoff モデルを用いることで二乗平方根粗さだけでなく相関長も定量的に評価できる可能性を示した。

これらの結果から、摩耗した水路壁の粗さの定量的な機能診断手法として、空中超音波が有効となる可能性を示唆することができた。

## 2.3 単眼センサ

### 2.3.1 実験装置

#### ① 単眼型空中超音波センサ

単眼型の超音波センサは，1つの素子で送信と受信を交互に切り替えることで計測がする．計測機器の小型化だけでなく，素子の取り付け精度への計測精度の依存が無くなる．例えば，複眼型センサは，送信・受信素子の取り付け角度が $1^\circ$ ずれるだけで計測値が変化することが懸念される．

本論で使用した単眼型センサは，LV-EZ1 (MaxBotix.inc) である (Fig. 2-14)．電源電圧は，2.5～5.5V である．安定化電源で直流 5.0V に固定して計測をした．周波数は，42kHz で複眼型センサと同程度である．温度域は， $-40\sim 65^\circ\text{C}$  (推奨温度  $0\sim 60^\circ\text{C}$ ) である．センサの寸法を Fig. 2-15 に示す．小型で軽量であることが確認できる．

#### ② 型どりゲージ

2.2.1 項参照．

#### ③ 計測面の選定

計測面は，コンクリート舗装面を対象に選定を行った．本節では，A 反復計測によるばらつき，B 粗さ計測への適用検証，C 乾湿の影響，の検討項目について，算術平均粗さを  $0.05\sim 0.79\text{mm}$  の範囲

で 5 つの対象面を選定した。A, B, C の検討項目と対象面の関係を **Table 2- 2** に示す。



Fig. 2- 14 単眼センサの写真

Frequency		42	kHz
Dimensions	A	16.4	mm
	B	15.5	mm
	C	19.9	mm
	D	22.1	mm
Mass		4.3	grams

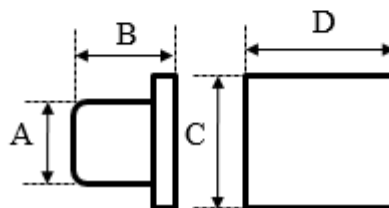


Fig. 2- 15 センサの寸法

Table 2-2 検討項目と対称面の算術平均粗さ

$R_a$ (mm)	ばらつき 2.3.2	適用検証 2.3.3	乾湿 2.3.4
0.00		○	
0.30	○	○	○
0.37		○	
0.45	○	○	○
0.67		○	



### 2.3.2 反復計測によるばらつき

実験は、晴れまたは曇りの屋外で、計測面は、 $R_a = 0.30$ 、 $0.45\text{ mm}$  を使用した。センサから計測面までの距離は  $1,000$ 、 $550\text{ mm}$  の距離から行った。同一点で反復計測を行い、 $119$  個の計測データを得た。1 回から  $20$  回までの移動平均を取り、 $100$  サンプルの平均値 (mV) と、標準偏差 (mV) を得た。標準偏差のみで評価すると計測値が大きくなるにつれ、ばらつきが大きくなる傾向があり、相対的な評価ができない。そこで、平均値に対する標準偏差の割合から、ばらつきの評価を行った。Fig. 2- 16 に平均した回数と標準偏差/平均値の関係を示した。

距離  $550\text{ mm}$  からの計測に比べ、距離  $1,000\text{ mm}$  からの計測の方が、ばらつきが大きくなる傾向であった。計測距離が長くなることで、空気乱れによって超音波に影響が表れていると考えられる。5 回の平均で、ほぼ  $4\%$  以内のばらつきに抑えることができ、15 回の平均で、 $2\%$  程度のばらつきに抑えることができた。15 回の計測にかかる所要時間は  $0.6$  秒であり、短時間での計測が可能である。本節では、以下の検討項目において  $15$  回以上の平均値を用いた。

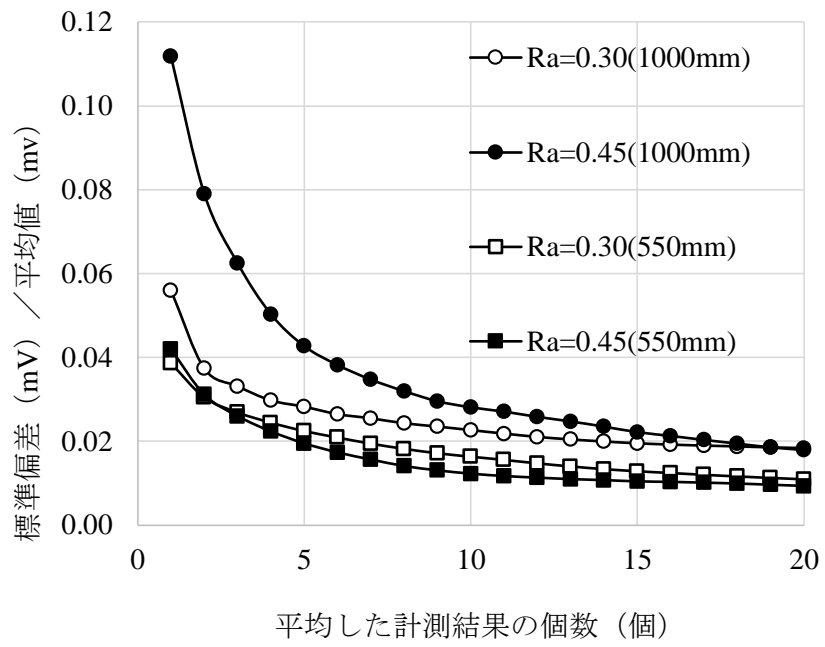


Fig. 2- 16 計測値の移動平均のばらつき

### 2.3.3 粗さ計測への適用検証

粗さ計測への適用検証は、 $R_a = 0.00 \sim 0.67 \text{ mm}$  までの 5 つの計測面で、晴れた屋外で計測した。空中超音波センサから計測面までの距離は  $1,000 \text{ mm}$  とした。

算術平均粗さと最大振れ幅の関係を **Fig. 2- 17** に示す。

**Fig. 2- 17** より、算術平均粗さが増加するにつれて、最大振れ幅が減少することが確認できた。また、その最大振れ幅と算術平均粗さの関係は、線形近似で決定係数  $0.9$  以上であり高い相関を持つことが確認できた。

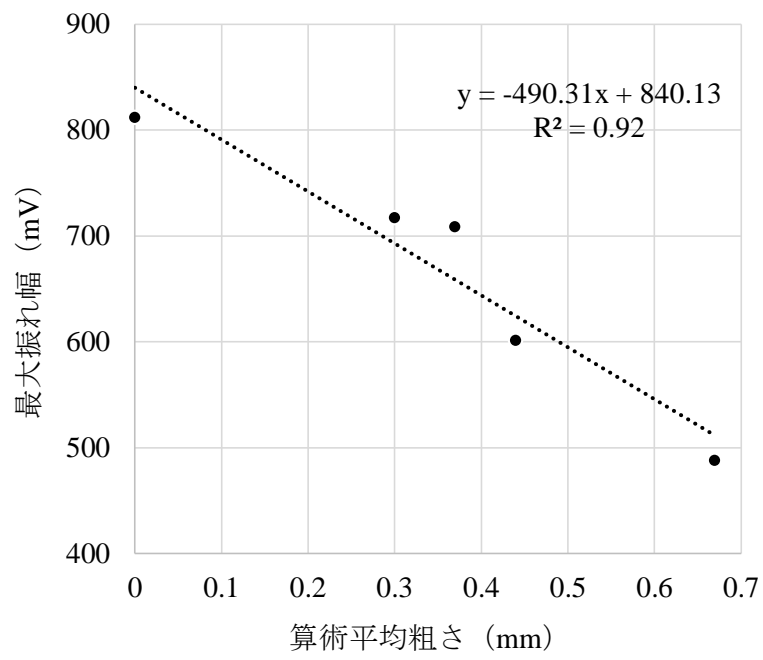


Fig. 2- 17 最大振れ幅と算術平均粗さの関係

#### 2.3.4 乾湿の影響

農業用水路の機能診断は、非灌漑期に行うことが一般的であるが、機能診断の為に一時的に水位を下げる場合や、前日の雨で水路壁面が濡れている場合を想定して実験を行った。

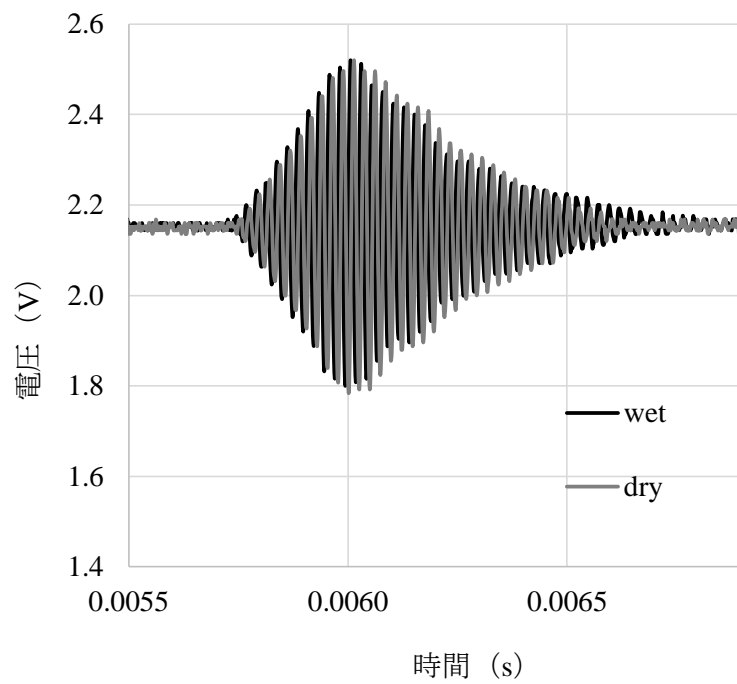
そこで、 $R_a = 0.30$ 、 $0.45 \text{ mm}$ の乾いた面と湿った面で計測を行った。湿った面とは、 $1 \text{ m}$ 四方の全面を濡らした後、タオルで軽く拭き取り、表面が湿った程度である。

**Table 2-3**に乾いた面と湿った面の最大振れ幅を示す。 $R_a = 0.30 \text{ mm}$ のとき、乾いた面の最大振れ幅が $704.4 \text{ mV}$ で、湿った面の最大振れ幅が $717.6 \text{ mV}$ であった。 $R_a = 0.45 \text{ mm}$ のとき、乾いた面の最大振れ幅が $590.1 \text{ mV}$ で、湿った面の最大振れ幅が $601.5 \text{ mV}$ であった。乾いた面に比べ、湿った面の計測結果が、大きくなる傾向がみられた。

須田ら(2009)は、土の含水量が多くなるほど、超音波の最大振れ幅が大きくなると報告している。このことから、計測面の凹凸に水が入り込み、結果として凹凸が小さくなったと考えられる。しかし、乾いた面と湿った面の計測結果の差は、非常に小さく、2.3.2項での20回移動平均の100サンプルの標準偏差は、 $R_a = 0.30 \text{ mm}$ のとき $\pm 9.1 \text{ mV}$ 、 $R_a = 0.45 \text{ mm}$ のとき $\pm 6.3 \text{ mV}$ である。乾湿の実験結果は、標準偏差の範囲内であり、計測に影響は少ないと考えられる。また、**Fig. 2-18**より2つの反射波形は、ほぼ一致していることが確認できた。

**Table 2-3** 乾湿の最大振れ幅結果

$R_a$ (mm)	湿 (mV)	乾 (mV)
0.3	717.6	704.4
0.45	601.5	590.1



**Fig. 2-18** 乾湿の反射波形比較

### 2.3.5 計測範囲

センサ直下に砂利を同心円上に設置し、その領域を拡大しながら計測を行った。計測の概要図を **Fig. 2- 19** に示す。使用した砂利の粒径は 2mm で、隙間がなく、重ならないよう設置した。

センサから計測面までの距離は 1,000, 550mm とした。計測距離が 1,000mm のときは、砂利の直径が 0~900mm の 100mm 間隔で計測を行った。計測距離が 550mm のときは砂利の直径が 0~500mm の 100mm 間隔で計測を行った。

**Fig. 2- 20, Fig. 2- 21** に最大振れ幅と計測領域の直径の関係を示す。計測距離 1,000mm のときは、直径 600mm まで最大振れ幅が減少を示した。直径 600mm 以降の計測結果は、標準偏差内に収まっていることから、計測値は一定である。したがって、計測距離 1,000mm のとき、計測範囲は、直径約 600mm である。

距離 550mm のときは、直径 300mm まで最大振れ幅が減少を示した。直径 300mm 以降の計測結果は、標準偏差内に収まっていることから、計測値は一定である。したがって、計測距離 550mm からの、計測範囲は、直径約 300mm である。また、距離 1,000mm, 550mm の 2つ共に、直径 200mm 以内での減衰量が大きくなることが確認できた。ここで、**Table 2- 4** に距離 1,000mm のときの 200mm 間隔の減衰量を計算した。直径 200mm のときの減衰量が全体の減衰量の 70% 程度の寄与率があることが分かった。つま

り，センサ直下に近い領域の計測面の凹凸状況が最大振れ幅に大きな影響を与えると考えられる．



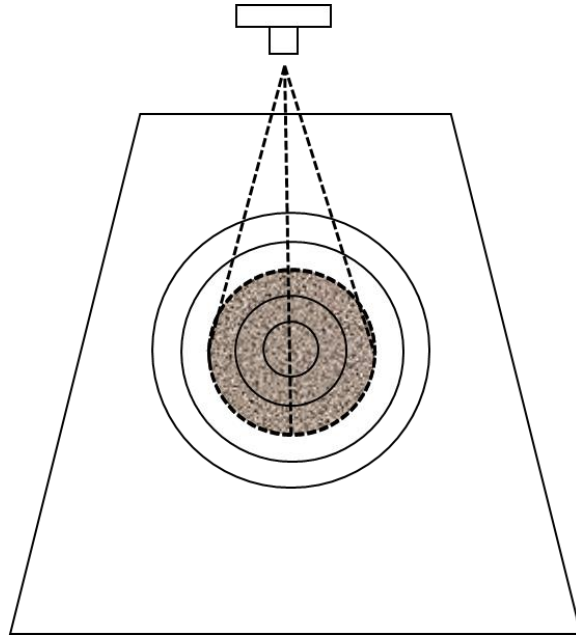


Fig. 2- 19 計測範囲の実験概要図

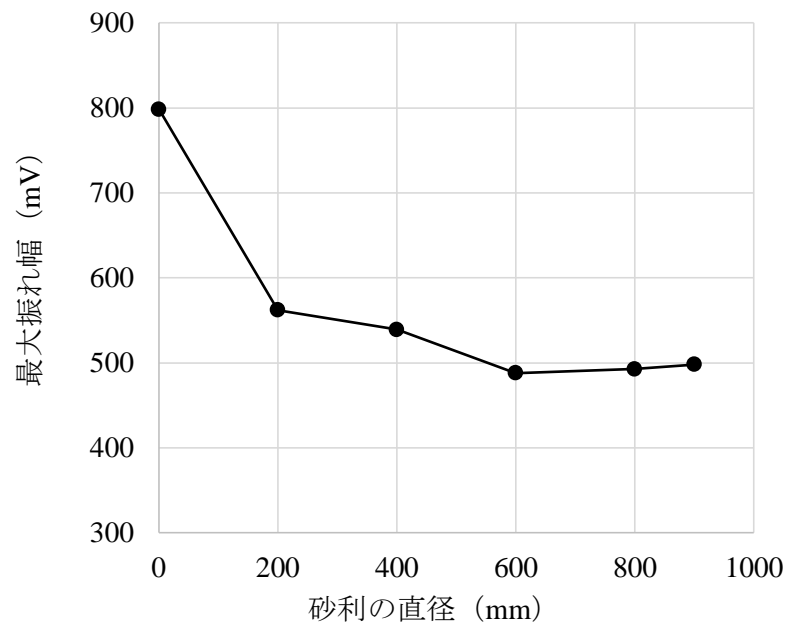


Fig. 2- 20 計測領域の直径と最大振幅の関係 (計測距離  
550 mm)

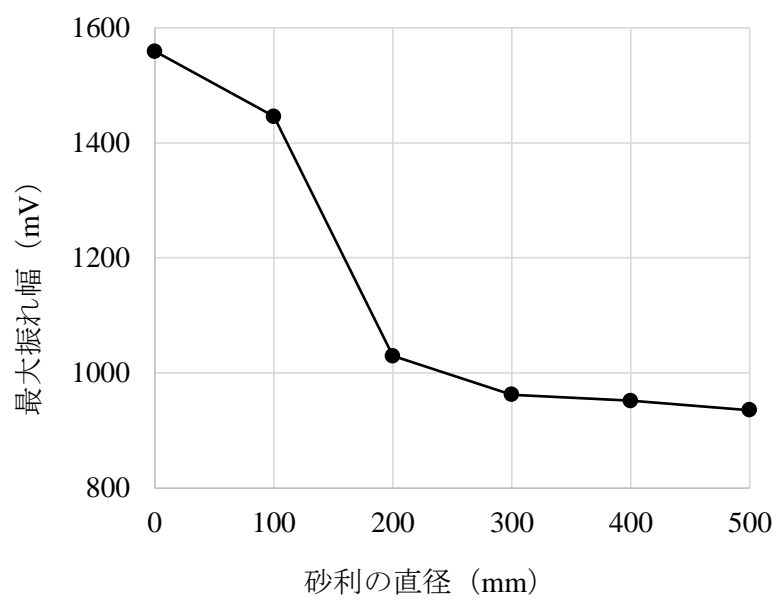


Fig. 2- 21 計測領域の直径と最大振幅の関係 (計測距離  
1,000mm)

**Table 2-4** 直径毎の減衰量（計測距離 1,000mm）

砂利直径（mm）	0～200	200～400	400～600
減衰量（mV）	232.3	22.9	51.3

### 2.3.6 まとめ

2.3 節では，単眼型の空中超音波センサを使用した粗さ計測への適用性を検証した．

まず空中超音波センサの反復計測した場合のばらつきについて検討をした．計測値のばらつきは，15 回程度の計測結果の平均をとれば，100 回の移動平均値の平均値の 2% 程度の標準偏差に抑えられることを明らかとした．

次に 2.1 節で仮定した計測原理の検証をした．計測距離 1,000 mm から異なる粗さを持つコンクリートに対して空中超音波計測を行った結果，その最大振れ幅と算術平均粗さの関係は，線形近似で決定係数 0.9 以上の高い相関を持つことが確認できた．x 軸と y 軸を入れ替えることで，算術平均粗さの推定式となり，最大振れ幅と計測距離を計測することで推定することができることを明らかとした．

次に計測範囲について検証をした．超音波センサの計測範囲は，計測距離 1,000 mm から直径 600 mm の範囲を計測していることを明らかとした．計測距離 550 mm から直径 300 mm の範囲を計測していることを明らかとした．また，センサ直下に近い領域が計測値への寄与率が高いことを明らかとした．

これらの結果から，摩耗した水路壁の粗さの定量的な機能診断手法として，空中超音波が有効となる可能性を示唆することができた．

## 2.4 センサ法線と計測面のなす角が及ぼす影響による複眼センサと単眼センサの比較

2.2 節で複眼センサ，2.3 節で単眼センサについての研究を行い粗さ計測への有効性が示された．ここで，この2種類のセンサから粗さ計測に最適な種類の選択をした．

これまでの研究では，大きな違いはないが，最大振れ幅と算術平均粗さの関係式の傾きにおいて複眼センサが $-625.74\text{ mV}$ で，単眼センサが $-490.31\text{ mV}$ に着目することができる．複眼センサの方が単位算術平均粗さあたりの最大振れ幅が大きくなり，より高精度の計測が期待できると考えられる．しかし，計測精度を傾きだけで判断することは難しい．単眼センサの方が素子の多さから単純に小型化，軽量化が期待できる．そこで，センサ素子数の違いから生じる優位性について検討していく．

計測時はセンサが水路壁面と垂直であることが望ましいが，屋外で計測する場合厳密に水路壁面との垂直を保つことは難しい．そのため，センサ法線と計測面との間になす角が生じ，最大触れ幅が減衰すると想定される．そこで，センサ法線と計測面のなす角と最大触れ幅の関係を明らかにする実験を行った．

複眼センサでは **Fig. 2- 22** より  $x$  軸を素子に平行とし，原点を素子外枠の midpoint とした．回転は  $x$ ， $y$ ， $z$  の3つを軸とした正・負の回転が考えられる． $z$  軸が計測面に垂直であるとき， $z$  軸回転では計測面とのなす角は発生しない． $x$  軸回転では回転によりそれぞ

れの素子から計測面までの距離は変わらないため、正の回転、負の回転を同等のものとみなすことができる。y 軸回転では正・負の回転で送信素子と受信素子の上下が入れ替わり、それぞれの素子と計測面との計測距離に違いが生じ、計測結果への影響が想定される。以上より、①x 軸回り、②y 軸回り(送信下)、③y 軸回り(送信上)と設定した。

単眼センサでは Fig. 2- 23 より回転軸の違いによる計測への影響はなく、常にセンサ法線と計測面との最小のなす角がセンサ法線と計測面のなす角となる。

Fig. 2- 24, Fig. 2- 25 に実験結果を示す。複眼センサでは、③の送信上パターンでなす角を大きくしていくと、大きく最大振幅が低下することが確認できた。反対に、送信下パターンではほとんど最大振幅に変化はなかった。実験結果の近似式により角度補正が可能である。複眼センサでは決定係数が 0.86~0.97 と高い値となった。しかし、上記のように回転による最大振幅の減衰が異なり、線形近似式の傾きが異なってくる。つまり、x 軸および y 軸の 2 軸に合わせた角度補正が必要となることがわかった。

単眼センサでは、0~3° の範囲において最大振幅の減衰は少なく、計測結果の標準偏差の範囲内である。したがって、なす角 1, 2, 3° は角度補正の必要はないと考えられる。3~5° の範囲では決定係数 0.998 と高い相関での角度補正が可能である。

以上の結果より，複眼センサを使用した場合は，計測面に対してセンサが傾いた場合の処理が複雑になることがわかった．単眼センサを使用した場合は，回転軸が決まっているため，簡単な処理で補正することが出来ることがわかった．従って，今後の研究では計測時に生じるセンサの傾きや小型化，軽量化を期待して，単眼センサを使用することにした．

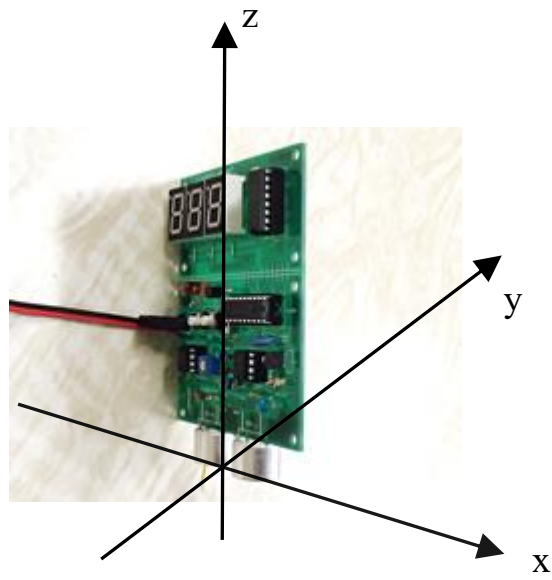


Fig. 2- 22 回転軸の設定（複眼センサ）

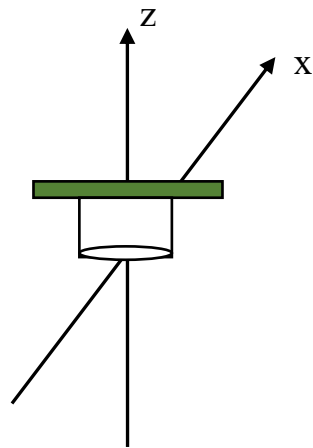


Fig. 2- 23 回転軸の設定（単眼センサ）



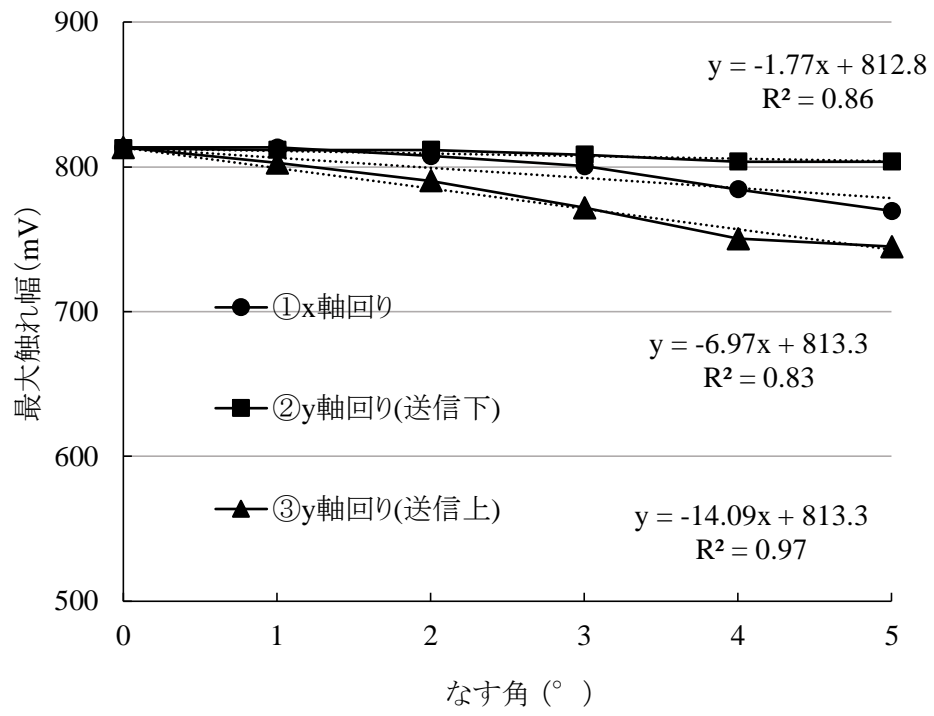


Fig. 2- 24 最大振れ幅となす角の関係 (複眼センサ)

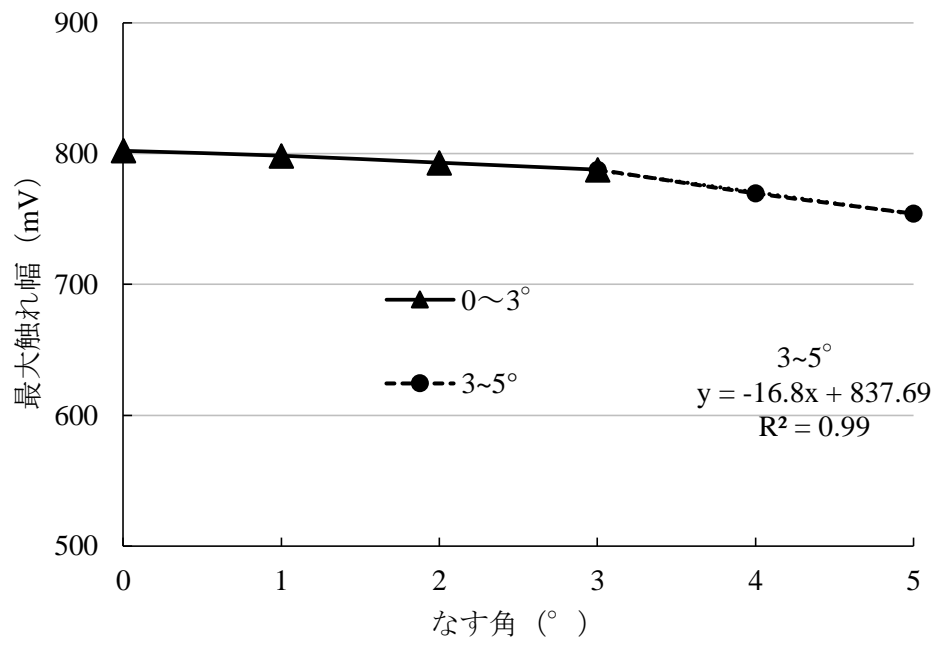


Fig. 2- 25 最大振れ幅となす角の関係 (単眼センサ)

### 3 章 空中超音波センサの環境条件への適用性

#### 3.1 温度・湿度・大気圧の影響

##### 3.1.1 空気吸収減衰について

##### 3.1.2 空気吸収減衰式

##### 3.1.3 実験概要

##### 3.1.4 温度・湿度・大気圧による 最大振れ幅への影響

##### 3.1.5 理論式による補正

##### 3.1.6 増減率と温度の関係式による減衰補正案

##### 3.1.7 まとめ

#### 3.2 風速の影響

##### 3.2.1 超音波による風速について

##### 3.2.2 実験概要

##### 3.2.3 風洞装置稼働時に発生した ノイズの処理方法

##### 3.2.4 風速による最大振れ幅への影響

##### 3.2.5 理論式の提案

##### 3.2.6 理論値と計測値の比較

### 3.2.7 まとめ

本論では，温度・湿度・大気圧・風速を総称して環境条件と表現する場合がある．

## 3 章 空中超音波センサの環境条件への適用性

### 3.1 温度・湿度・大気圧の影響

#### 3.1.1 空気吸収減衰について

超音波が空気中で吸収減衰することは古くから知られており、1845年に Stokes が空気の粘性による吸収減衰を発見した。実測値と理論値が一致したのは、1969年に窒素分子の回転緩和現象のメカニズムが明らかにされてからである。吸収減衰の物理的なメカニズムは3つにカテゴライズされ、空気の粘性や熱伝導による起因、分子の回転緩和現象による起因、酸素と窒素の振動緩和現象による起因だとされている。1993年 ISO 9613-1 に規格化された（山田，1990，吉久，1997）。

茂木ら（2014）は、空気吸収減衰係数と温湿度の関係を調べ、超音波温湿度計の開発を試みている。しかし、空気吸収減衰に関する研究は、都市環境騒音や航空機騒音など音圧レベルによる騒音問題によるものが多く目立つ。既往の研究は、騒音問題の対象となる周波数である低い周波数を研究が多く、実際 ISO 9613-1 に示されている空気吸収減衰式は、周波数帯が 50Hz～10kHz と規定されている。そのため、本論で使用するセンサの周波数 42kHz は範囲外となり、実験的に空気吸収減衰について検討し把握する必要がある。そこで、温度・湿度・大気圧の異なる環境条件下で空中超音波計測を行った。まず、空気吸収減衰の現象を温湿度を変化させながら最大振れ幅を計測することで確認した。

次に，ISO9613-1 に基づいた補正式を適用して補正を行った。  
並びに増幅率と温度の関係式による補正案の提案を行った。

### 3.1.2 空気吸収減衰式

超音波の音圧は距離に対して指数関数的に減衰をする。減衰は減衰係数 $\alpha$  (dB/m) で決定される。減衰係数 $\alpha$ は、古典減衰係数 $\alpha_{cl}$ 、回転緩和減衰係数 $\alpha_{rot}$ 、振動緩和減衰係数 $\alpha_{vib}$ の和である。以下の式は ISO 9613-1 に準ずる。

#### (1) 適用範囲

音の周波数：50 Hz ~ 10 kHz

気温：-20 °C ~ 50 °C

相対湿度：10 % ~ 100 %

気圧：101.325 kPa (1 気圧)

#### (2) 記号

$p_r$ ：基準の気圧：101.325 kPa

$T_0$ ：基準の気温：293.15 K

$X_N$ ：空気中におけるモル濃度比率：0.78084

$X_O$ ：空気中におけるモル濃度比率：0.209476

$\theta_N$ ：特性振動温度：3352.0 K

$\theta_O$ ：特性振動温度：2239.1 K

$h$ ：水蒸気モル濃度 (%)

$f_{rN}$  : 窒素の緩和周波数

$f_{rO}$  : 酸素の緩和周波数

$p_{sat}$  : 飽和水蒸気圧

減衰係数  $\alpha$  は，古典減衰係数  $\alpha_{cl}$ ，回転緩和減衰係数  $\alpha_{rot}$ ，振動緩和減衰係数  $\alpha_{vib}$  の和である．

$$\alpha = \alpha_{cl} + \alpha_{rot} + \alpha_{vib} \quad (3-1)$$

古典減衰係数と回転緩和減衰係数の和は，次式で表される．

$$\alpha_{cl} + \alpha_{rot} = 1.60 \times 10^{-10} \left( \frac{p_a}{p_r} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{0.5} \quad (3-2)$$

振動緩和減衰は，空気組成成分の分子毎に定義されている．空気の組成は，窒素と酸素でほぼ支配されているため，二酸化炭素を含む微小成分を無視することができる．窒素の分子振動緩和減衰係数を  $\alpha_{vib,N}$ ，酸素の分子振動緩和減衰係数を  $\alpha_{vib,O}$  とすると，次式で表される．

$$\alpha_{vib} = \alpha_{vib,N} + \alpha_{vib,O} \quad (3-3)$$



$$\alpha_{vib,N} = [(\alpha_{vib}\lambda) max, N] \times \left(\frac{f}{C_{th}}\right) \left\{ 2 \left(\frac{f}{f_{rN}}\right) \left[ 1 + \left(\frac{f}{f_{rN}}\right)^2 \right]^{-1} \right\} \quad (3-4)$$

$$\alpha_{vib,O} = [(\alpha_{vib}\lambda) max, O] \times \left(\frac{f}{C_{th}}\right) \left\{ 2 \left(\frac{f}{f_{rO}}\right) \left[ 1 + \left(\frac{f}{f_{rO}}\right)^2 \right]^{-1} \right\} \quad (3-5)$$

振動緩和周波数は，次式で表される．

$$f_{rN} = \left(\frac{p_a}{p_r}\right) \left(\frac{T}{T_0}\right) - \frac{1}{2} \left[ 9 + 280 h \exp \left\{ -4.170 \left[ \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{1}{3}} - 1 \right] \right\} \right] \quad (3-6)$$

$$f_{rO} = \left(\frac{p_a}{p_r}\right) \left( 24 + 4.04 \times 10^4 h \frac{0.02 + h}{0.391 + h} \right) \quad (3-7)$$

$(\alpha_{vib}\lambda)max$ は，振動緩和に起因する 1 波長分の距離  $\lambda$  での減衰最大値で，特性振動温度  $\theta$  に依存する．

$$(\alpha_{vib}\lambda) max, N = \left(\frac{2\pi}{35}\right) (10 \log_{10} e^2) X_N \left(\frac{\theta_N}{T}\right) \exp\left(-\frac{\theta_N}{T}\right) \quad (3-8)$$

$$(\alpha_{vib}\lambda) max, O = \left(\frac{2\pi}{35}\right) (10 \log_{10} e^2) X_O \left(\frac{\theta_O}{T}\right) \exp\left(-\frac{\theta_O}{T}\right) \quad (3-9)$$

水蒸気モル濃度、飽和水蒸気圧は以下の式で表せる。

$$h = h_r \left( \frac{p_{sat}}{p_r} \right) / \left( \frac{p_a}{p_r} \right) \quad (3-10)$$

$$\frac{p_{sat}}{p_r} = 10^c \quad (3-11)$$

$$c = -6.8346 \left( \frac{T_{01}}{T} \right)^{1.261} + 4.6151 \quad (3-12)$$

以上の式により，超音波の空気中での減衰係数 $\alpha$ が計算できる．

**Fig. 3- 1**，**Fig. 3- 2**，**Fig. 3- 3**に減衰係数と環境条件の関係を示す．古典減衰係数，回転緩和減衰係数の和は温度に関わらずほぼ一定の減衰を示す．窒素の振動緩和減衰係数は，温度，湿度の増加に伴い増加する（グラフの縦軸 1/20 倍）．酸素の振動緩和減衰係数は，他の減衰係数に比べて大きい．そのため，空気吸収減衰は，酸素の振動緩和減衰係数に大きく依存する．

本論では，単位長さ  $m$  当たりの減衰係数  $m$  ( $1/m$ ) を使用する． $m$ は $\alpha$ の関数となっており式(3-14)で求められる．減衰係数 $m$ は，温度・湿度・大気圧・周波数・伝搬距離による関数となっている．本論において周波数 42 kHz，伝搬距離 2.015 m は固定値として設けているため，空気中の温度・湿度・大気圧を計測することによって吸収減衰を評価できる．

$$I = I_0 \exp(-ms) \quad (3-13)$$

$$m = \frac{\alpha}{20 \log_{10} e} \quad (3-14)$$

ここで， $I$ ：減衰音，実測値(mV)， $I_0$ ：純音，補正值(mV)， $m$ ：減衰係数(1/m)， $s$ ：伝搬距離(m)

**Fig. 3- 4** に  $\exp(-ms)$  と環境条件の関係を示す．湿度 0% のときは古典減衰係数，回転緩和減衰係数による減衰のみとなる．温度の増加に伴い一時は減衰が大きくなるが，ある温度でピークを迎え減衰が小さくなっていく傾向が見られる．その傾向は湿度によって変化をする特徴を持つ．

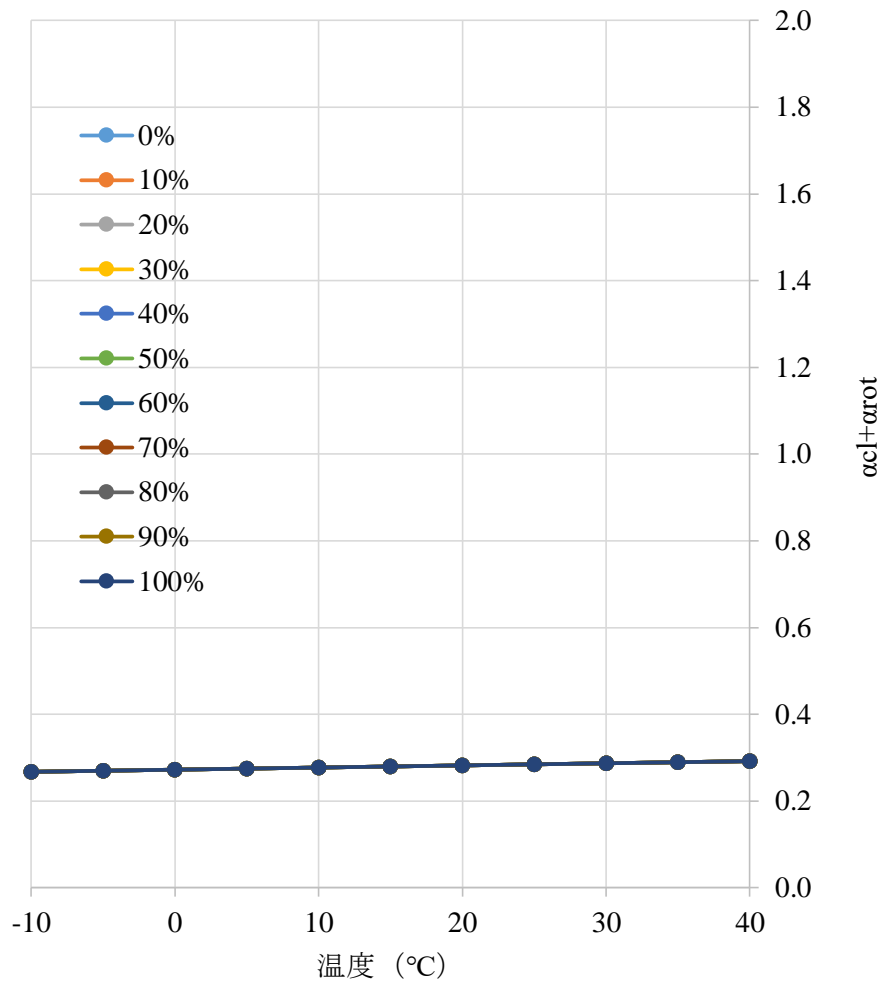


Fig. 3- 1 古典減衰係数と回転緩和減衰係数の和

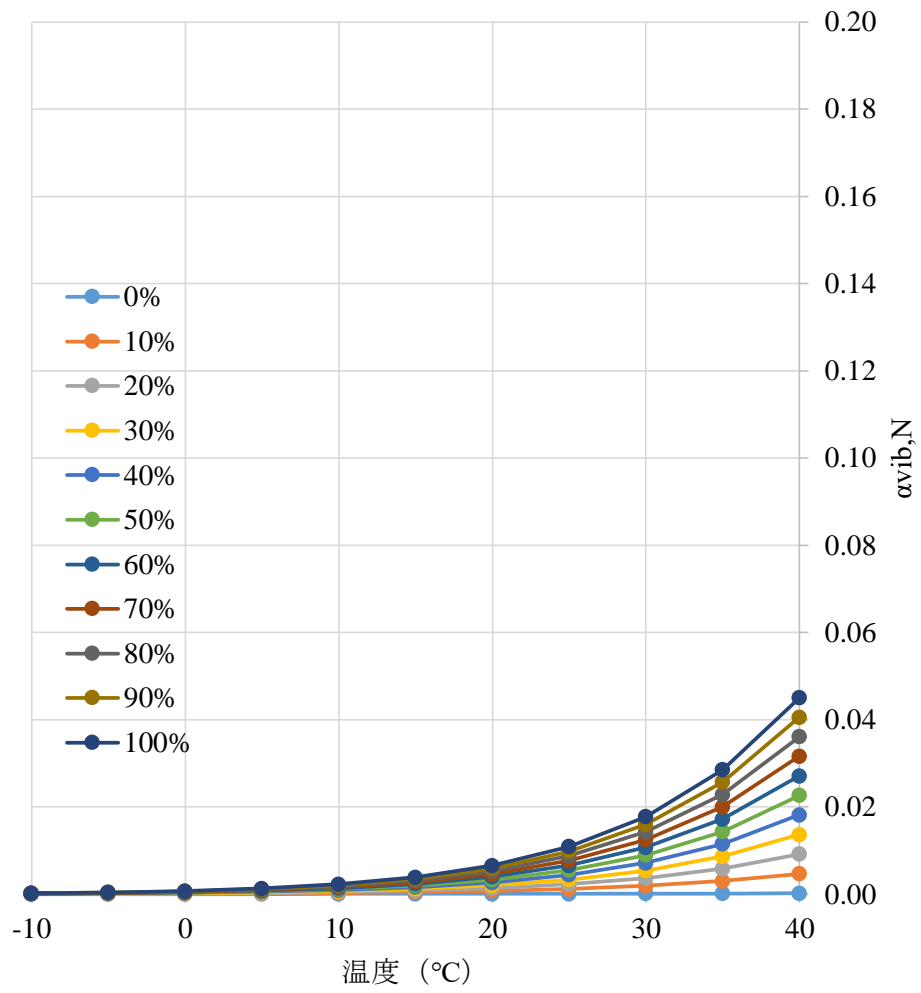


Fig. 3- 2 窒素の振動緩和減衰係数

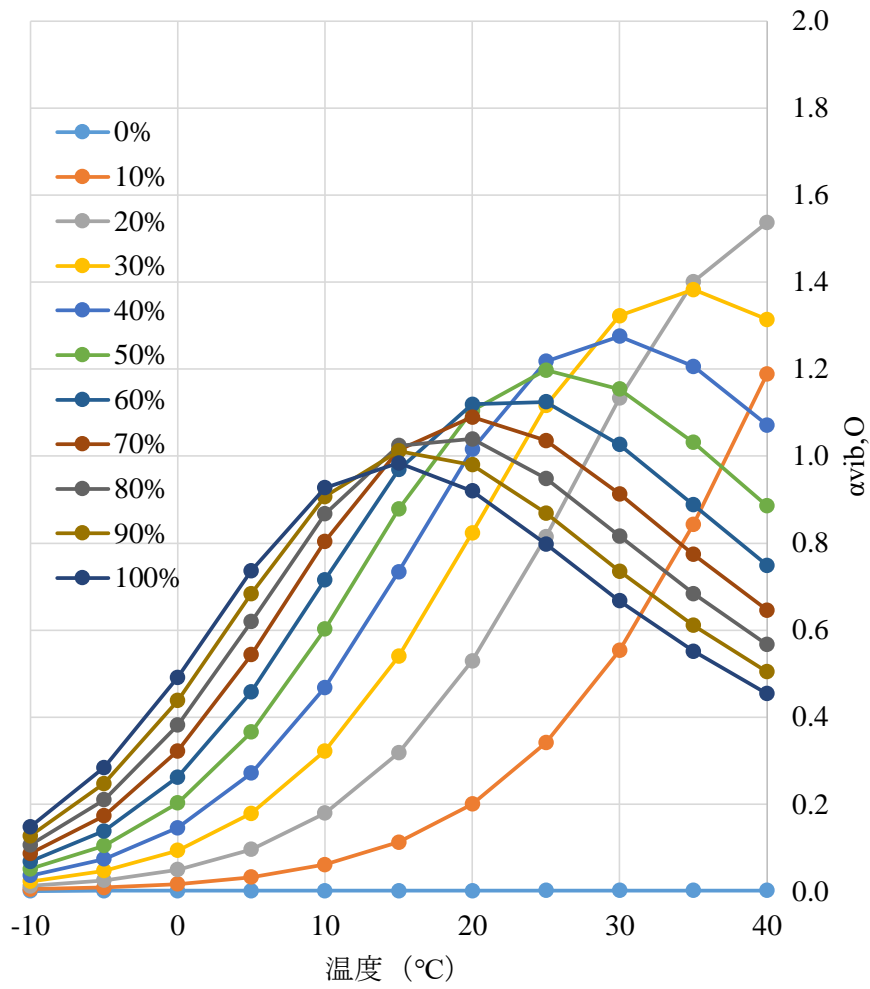


Fig. 3- 3 酸素の振動緩和減衰係数

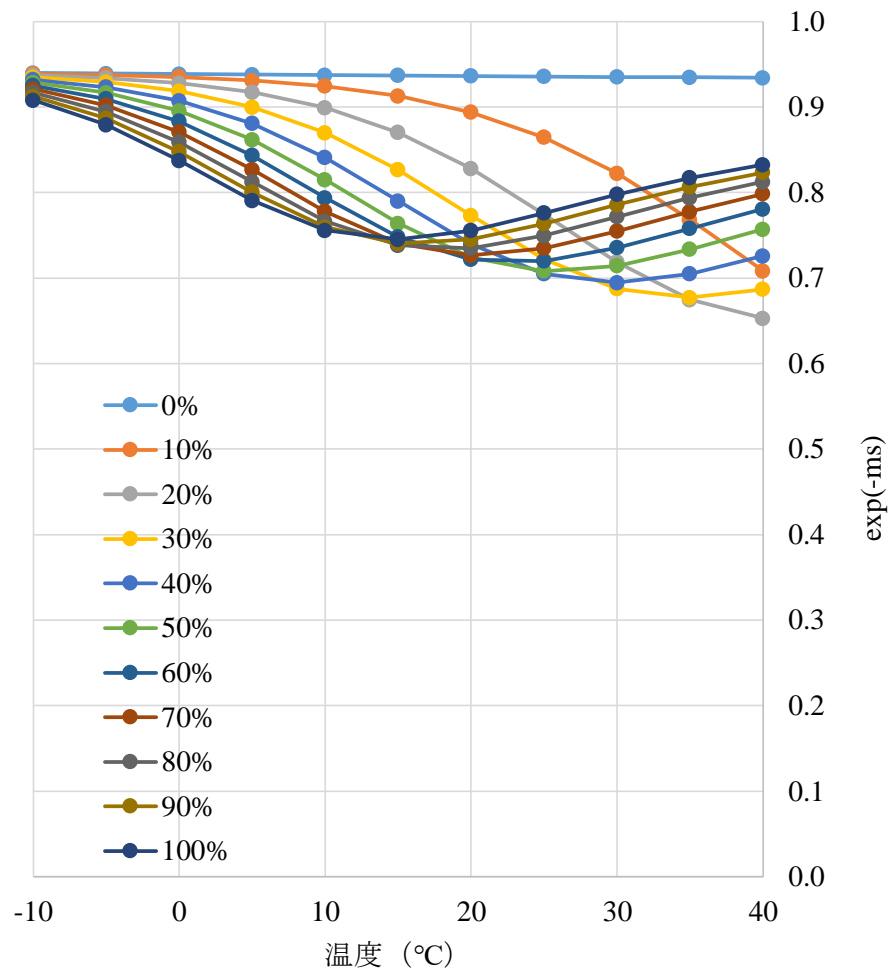


Fig. 3-4 減衰係数の推移

### 3.1.3 実験概要

#### ① 空中超音波センサ：LV-EZ1 (MaxBotix.inc)

本節からセンサの送受信機にホーンを装着した。ホーンは超音波の指向性を高め音波を集音させることができる装置である。2章で示すように、計測範囲は直径約600mmであり、直径約200mmの間に80%の寄与率があることが既知となっている。

加藤ら(2008)によると流速分布や通常水位の高さの関係から、縦断方向で摩耗の進行が異なることが報告されている。すなわち、直径約600mmという計測範囲で計測することは、計測結果がどの粗さを計測しているのか不明確となると考えることが出来る。従って、本論では計測範囲を制限する必要があると考えた。

そこで、Raihanulら(2016)は、様々な種類のホーンを用いて、計測範囲や集音効果を検討し、最適形状のホーンを選定した。9種類の中心角やホーン長の異なるホーンを、作製し、計測範囲の検証と、超音波の集音効果を検討している。その結果、Fig. 3-5に示すホーンを用いることによって、計測範囲を直径300mm程度まで制限することができ、高い集音効果が得られたと報告している。中心角： $32.9^{\circ}$ ，扇形上辺半径：89.7mm，扇形下辺半径：139.7mmである。本論では、超音波の透過や吸収を避けるため、十分な硬さである2mm厚の樹脂を用いて3Dプリンターにより作製した。



## ② 計測面

屋外だけでなく屋内の安定した環境条件で計測する必要があるため、持ち運びができる摩耗模型コンクリートパネルを作製した。滑面のパネルと、洗い出し処理によりコンクリート表面に粗さを設けたパネルを使用した。

洗い出し処理とは、コンクリート打設後に、コンクリート表面に遅延剤を用いることで表面部の固結を遅延させ、固結していない表面に高圧洗浄機などを用いてセメントペーストや骨材を洗い出す技術である。使用する遅延剤によって、洗いだし深さを変えることが出来る。遅延剤は、ヒーバウ L-10, L-130 を採用した。最大粒径は実用水路に多く用いられている 20 (mm) , 使用した骨材は砕石で、寸法は計測距離 1,000mm からの計測領域が直径 600mm であることから 700×700×50 (mm) である。3 つの計測面の算術平均粗さを型どりゲージを用いて計測した。滑面が  $R_a=0.04\text{mm}$  , L-10 が  $R_a=0.32\text{mm}$  , L-130 が  $R_a=1.04\text{mm}$  である。L-10 は細骨材の剥離程度を再現しており、L-130 は粗骨材の剥離程度を再現している。

以降 L-10 を粗面 1, L-130 を粗面 2 と呼ぶ。粗面 1, 粗面 2 の写真を Fig. 3- 6, Fig. 3- 7 に示す。空気吸収減衰に関する実験では、滑面と粗面 2 を使用した。

③ 温湿度・大気圧計 TR-73U（（株）ティアンドデイ）

空中超音波計測時の環境条件の記録として用いた。画面を見て記録をしたが、データとして記録保存も並行して行った。

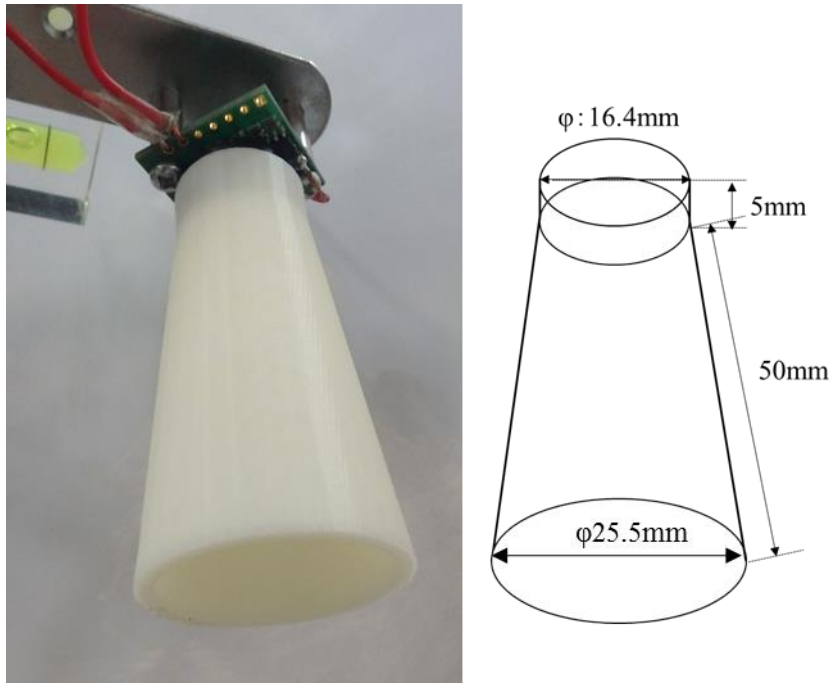


Fig. 3- 5 ホーン装着時の写真と寸法



Fig. 3- 6 粗面 1



Fig. 3- 7 粗面 2



Fig. 3- 8 TR-73U

### 3.1.4 温度・湿度・大気圧による最大振れ幅への影響

本実験は、温度・湿度・大気圧以外の環境条件を排除するため、屋内で計測を行った。実験概要図を **Fig. 3- 9** に示す。屋内の床に粗面 2 を置き、センサカバー面と計測面の距離を 1,000 mm とし、計測面に対して垂直方向に設置した。薄いアクリル板（滑面）を粗面 2 の上に置くことで滑面と粗面 2 を交互に計測ができるようにした。TR-73U を計測距離 500 mm の位置と、計測面の高さに設置し、温度・湿度・大気圧を取得した。2 つのセンサで空間中に環境条件に差が生じていないかを確認し、計測データは 500 mm の位置にあるセンサを使用した。異なる環境条件のもと、空中超音波計測によって最大振れ幅を取得した。取得したデータは 71 個である (**Fig. 3- 10**) 。

温度、湿度、大気圧それぞれを横軸にとり最大振れ幅との関係を検討した。**Fig. 3- 11**, **Fig. 3- 12**, **Fig. 3- 13** に滑面の時の最大振れ幅と温度、湿度、大気圧の関係を示す。温度を横軸にした場合、広域的に温度の増加に伴い最大振れ幅が減少している傾向であった。しかし、20℃より低い温度域では最大振れ幅はほぼ一定の値を示している。湿度を横軸にした場合、最大振れ幅はばらつきがあり、計測時の温度もしくは大気圧の影響に引っ張られていると考えられる。大気圧を横軸にした場合、短時間で屋内の温度、湿度変わっても大気圧は大きく変わることはなく、同一大気圧下で最大振れ幅が変動していることが確認できた。つまり、**Fig. 3-11** ~ **13** に示したように、空気吸収減衰は温度や湿度が複合的に関係するため、1 つの指標を軸とすることが難しいが、最も傾向が表れた

温度を横軸にして今後の検討を行っていく。

**Fig. 3- 14** に粗面 2 の時の最大振れ幅と温度の関係を示す。滑面の時と同様に、 $20^{\circ}\text{C}$  以下では最大振れ幅はほぼ一定の値を示し、 $20^{\circ}$  以上では温度の増加に伴い最大振れ幅の減少が確認できた。

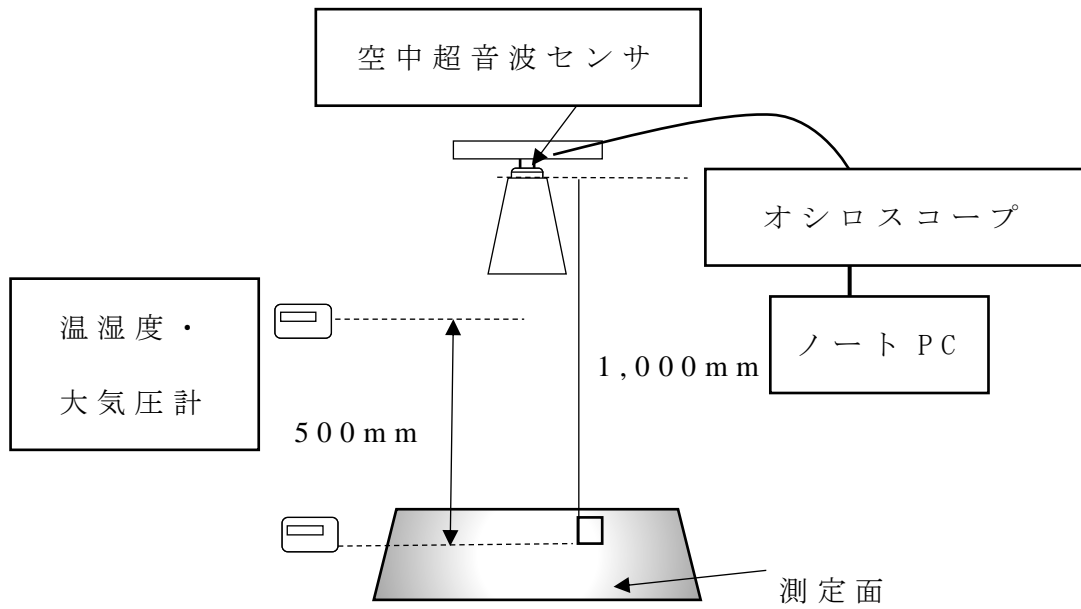


Fig. 3- 9 実験概要図

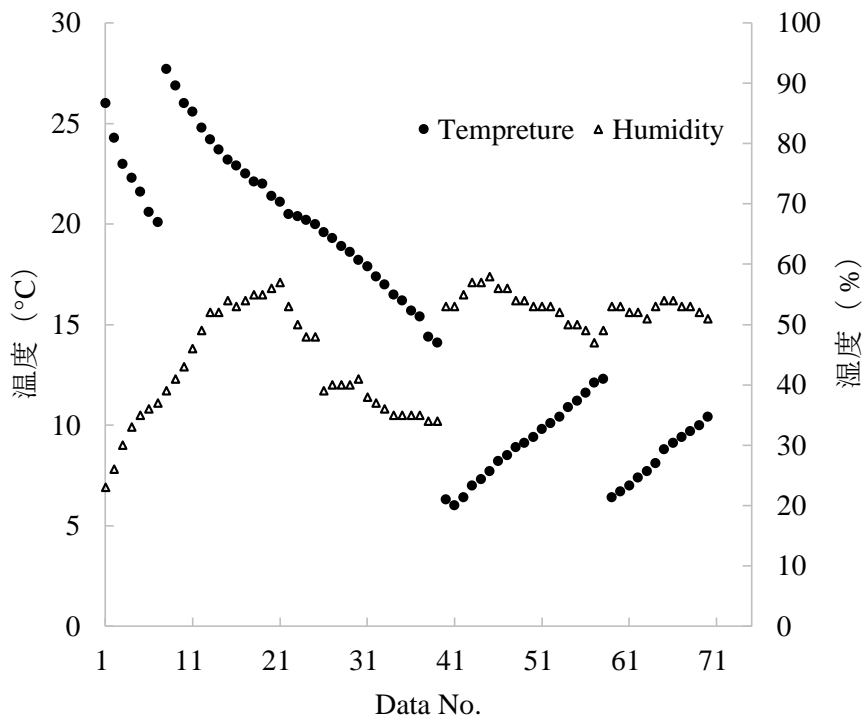


Fig. 3- 10 最大振幅を取得した環境条件



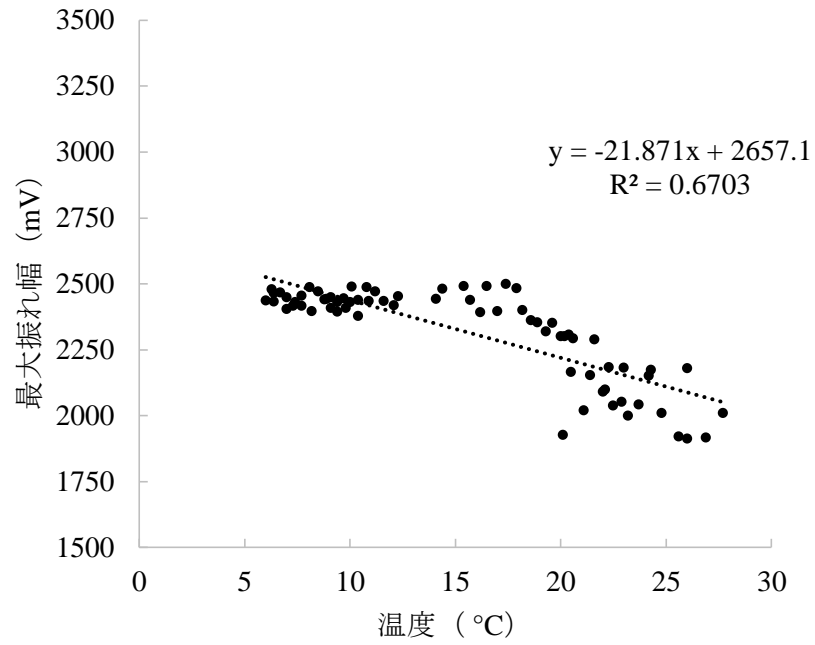


Fig. 3- 11 最大振幅と温度の関係（滑面）

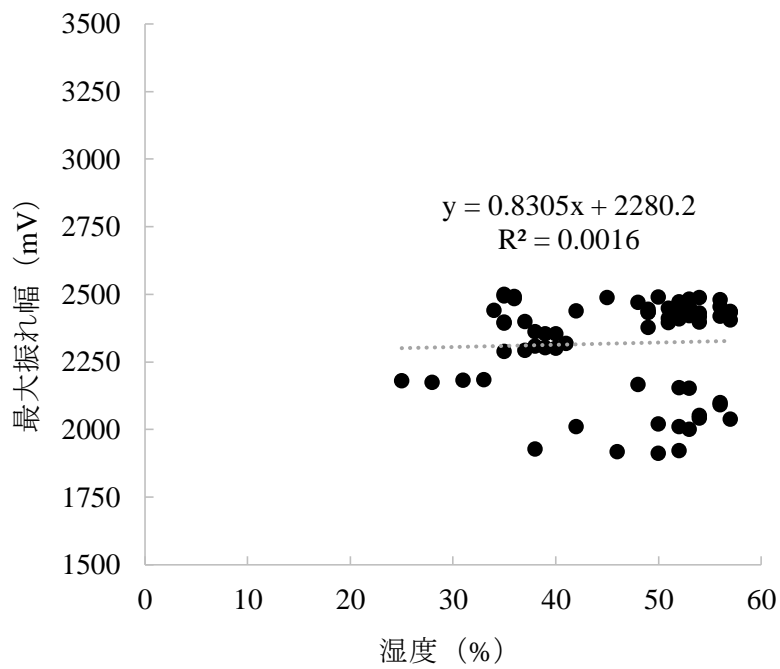


Fig. 3- 12 最大振幅と湿度の関係（滑面）

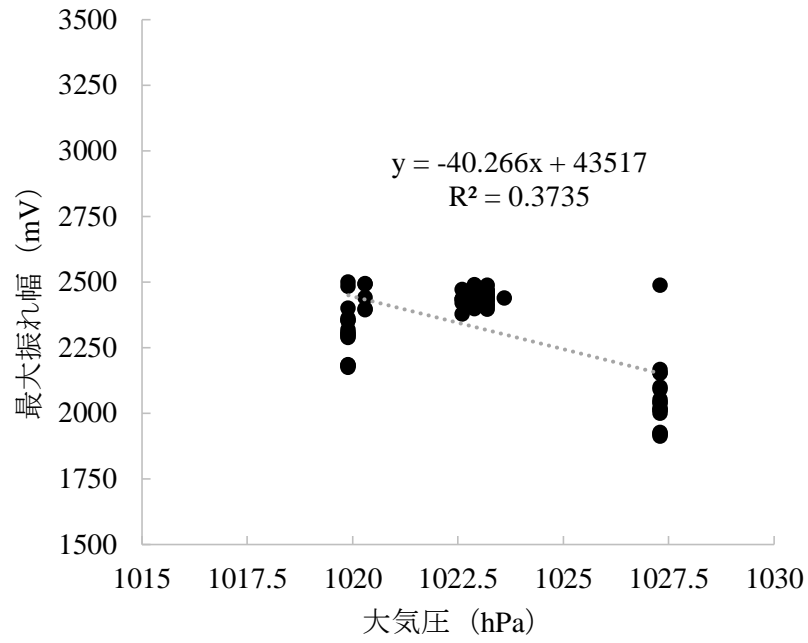


Fig. 3- 13 最大振幅と大気圧の関係（滑面）

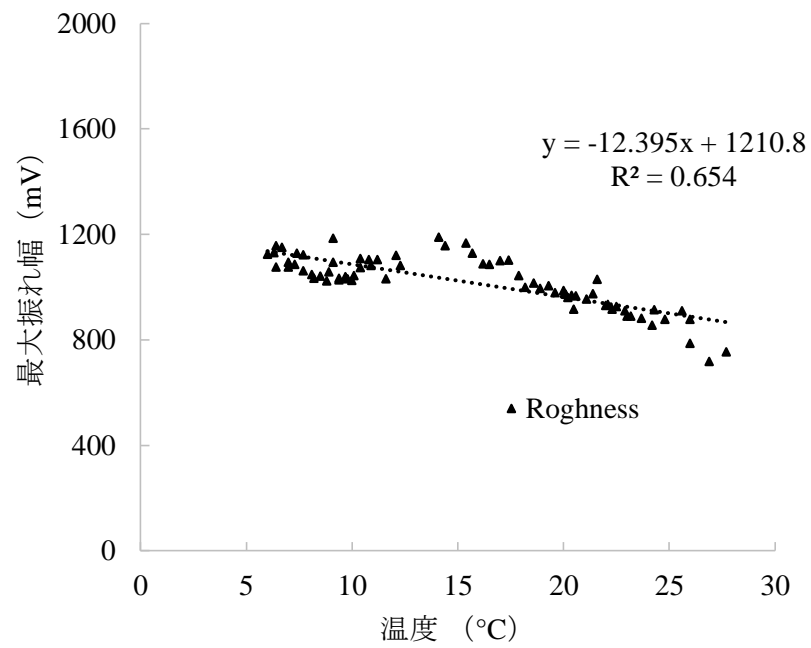


Fig. 3- 14 最大振幅と温度の関係（粗面 2）

### 3.1.5 理論式による補正

取得した 71 データから，式(3-13)より純音  $I_0$  を計算した．この  $I$  を補正值として検討を行った．**Fig. 3- 15** に補正值と温度の関係を示す．**Fig. 3- 11** に示す計測値と比較すると，値が一定に近づいた．特に，計測値で確認された温度  $20^\circ$  以上の減衰が，補正によって  $20^\circ$  以下の値に近づいていることが確認できた．粗面 2 の補正結果を **Fig. 3- 16** に示す．滑面同様に計測値と比較すると，値が一定に近づいた．ここで，計測値と補正值がどの程度値が変動しているのかを，平均値を真値として相対誤差%を計算した．計算結果を **Table 3- 1** に示す．補正值は計測値に比べ半分以下に抑えられていることが分かった．

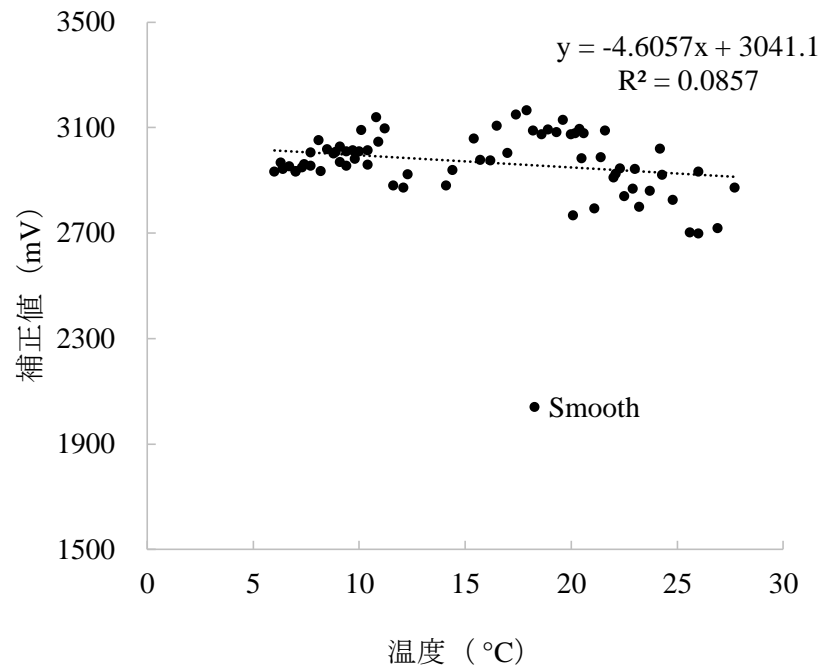


Fig. 3- 15 補正值と温度の関係 (滑面)

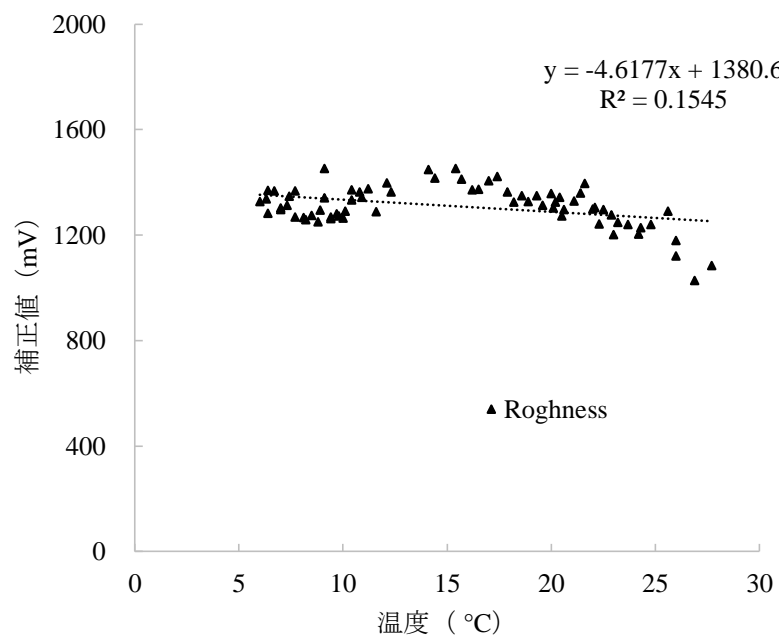


Fig. 3- 16 補正值と温度の関係（粗面 2）

Table 3- 1 補正值と計測値の相対誤差

	補正值	計測値
平均値 mV	2970	2319
相対誤差 %	2.7	6.4

### 3.1.6 増減率と温度の関係式による減衰補正案

本項では 20℃を基準温度として、 $20 \pm 0.5$ ℃の時の最大振れ幅 3 つの平均値を、基準温度の最大振れ幅とした。増減率とは実測値に対する基準温度の最大振れ幅の割合である。

$$[\text{増減率}] = \frac{[\text{実測値}]}{[\text{基準温度の最大振れ幅}]}$$

滑面と粗面の各温度での増減率を求め、減衰傾向を比較検討した。滑面と粗面の増減率を **Fig. 3-17** に示す。温度による滑面と粗面の増減率はほぼ一致していることが確認できた。このことから、粗さに依存せず、増減率と温度の関係式を求めることができると考えた。そこで、15℃を境界として増減率の傾向が大きく変化することから、温度条件を 2 つに分けて式を求めた。増減率  $r$  と温度  $t$  の関係式を以下に示す。式(3-15)において、傾きが非常に小さいため、傾きを 0 とみなした。

$$r = 0.0013t + 1.1393 \cong 1.1393 \quad (6 \leq t < 15) \quad (3-15)$$

$$r = -0.027t + 1.591 \quad (15 \leq t \leq 25) \quad (3-16)$$

ここで、 $r$  : 増減率,  $t$  : 温度(℃)

式(3-15)および式(3-16)を用いることで、温度  $t$  から増減率  $r$  を求めることができる。現場で得られた実測値を増減率で割ることで、基準温度の最大振れ幅へ補正することができる。

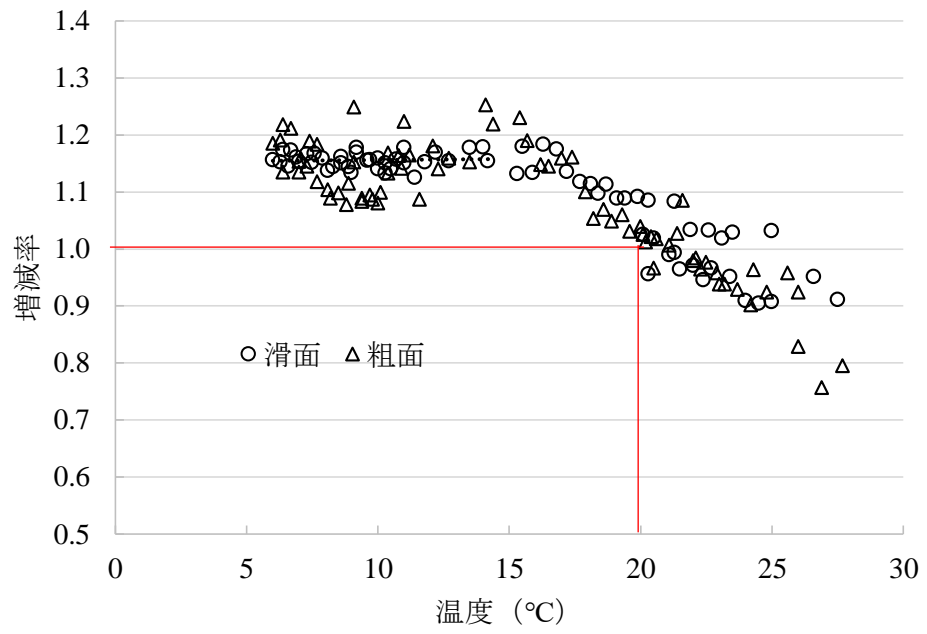


Fig. 3- 17 滑面と粗面 2 の増減率と温度の関係



### 3.1.7 まとめ

計測の環境条件を変えることで、超音波の空気吸収減衰について検討を行った。71個の異なる環境で空中超音波計測を行った結果、温度への最大振れ幅の依存が確認できた。20℃以内のとき、最大振れ幅はほぼ一定の値となることが確認できた。20℃以上のとき、温度の増加に伴い最大振れ幅は減少をすることが確認できた。

次にISO9613-1に基づき、純音を計算することで、温度補正を行った。その結果、計測値に比べ補正值は温度に関わらず一定の値になった。71個の最大振れ幅の平均値を真値として相対誤差を計算したところ、半分程度に抑えられることを明らかとした。

最後に、20℃を基準温度とした、増減率による減衰補正を提案した。20℃の時の最大振れ幅を基準とした増減率を71データ計算した結果、15℃を境界として増減率を求める2つの関係式が得られた。現場で得られた温度から増減率を計算し、空中超音波計測で得られた最大振れ幅に割ることで基準温度20℃の最大振れ幅に補正する手法である。

## 3.2 風速の影響

### 3.2.1 超音波による風速について

超音波センサは風向風速計として用いられることがあり，超音波センサと計測面との空間に，風が吹くことによって計測に影響が生じることが懸念される．しかし，風速による最大振れ幅への影響に着目をした研究例は少ない．梅田ら（1973）は，風によって乱された超音波の音圧を計測し，風速と音圧の関係から風速を計測する試みを行っている．

本論では，送信器と受信器を風向に対して直角に対向に設置し，風速と送受信器取り付け角を変化させて受信波の音圧を計測している．風による空中超音波の偏向による音圧の減衰について説明がされ，理論的な減衰値と実測値の比較が報告されている．しかし，本論で使用した空中超音波センサは，送信器と受信器が一体型であり，伝搬過程に粗さの異なるコンクリート面での反射や乱反射が経由する．そのため，空中超音波の伝搬過程にコンクリート面での反射を經由する反射波の風速による影響を検討すること，また，粗さの異なるコンクリート面での反射波の風速による影響を検討する必要がある．

本論では，風洞装置を用いて安定した風を発生させ，送受信器と計測面を風向に対して直角に対向させ，反射波の最大振れ幅を計測した．実験結果から空中超音波の粗さ計測への風速の影響を検討し

た．また，反射波における理論式を提案し理論値と実測値の比較を行った．

### 3.2.2 実験概要

① 空中超音波センサ：LV-EZ1 (MaxBotix. inc)

2.3 節参照.

② 計測面：摩耗模型コンクリートパネル ( $R_a=0.04$ ,  $0.32$ ,  $1.04\text{ mm}$ )

3.1 節参照.

③ 温湿度大気圧計：TR-73U

3.1 節参照.

④ 風洞装置

直径  $1,600\text{ mm}$  の吐出し口径をもつ開放型風洞実験装置を使用した。風速計測はピトー管により行い  $100$  回の計測値の平均値を風速とした。超音波センサとコンクリートパネルは、風に飛ばされないように、地面に固定された単管パイプで固定した。また、コンクリートパネルの厚さが  $50\text{ mm}$  あるため、前面に風が当たることでコンクリートパネル上の風の流れが乱れないように、整流板を装着した (Fig. 3-18)。前方 (風洞側) の整流板の形状は、コンクリートパネルの厚さ  $50\text{ mm}$  に合わせて、長辺：短辺 =  $10:1$  の楕円形とした。後方の整流板形状は、高さ  $50\text{ mm}$ 、底辺  $500\text{ mm}$  の直角三角形を 2 つ合わせた 2 等辺三角形とした。整流板の素材は、発泡スチロール製である。

#### ④ 実験装置の設置

各装置を **Fig. 3- 19** に示すよう設置した。風洞装置の吐出し口径は直径 1,600 mm の円形である。空中超音波の伝搬方向に対して直角に風が当たるように設計した。その理由は、現場水路で最も強い風が発生する風向きは、水路延長方向になることが想定されること、伝搬方向に対して追い風や向かい風での実験は、センサ本体や計測面が障害となり風の流れを乱すことが想定されるためである。超音波センサからコンクリートパネルまでの距離は、超音波センサのカバー面を基準面として垂直に 1,000 mm とした。中間 500 mm の点が風洞吐出し口の中心点になるように設置した。受信波を取得するために用いた USB オシロスコープ (PicoScope4424 (Pico Technology Limited. inc) ) とノートパソコンは、延長ケーブルによって風の流れを乱さない位置まで風洞装置から離れた。

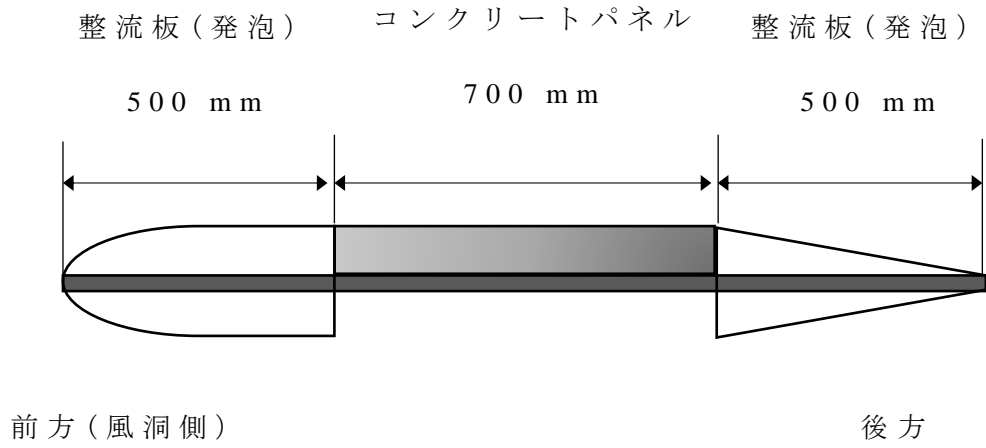


Fig. 3- 18 整流装置とコンクリートパネル側面図

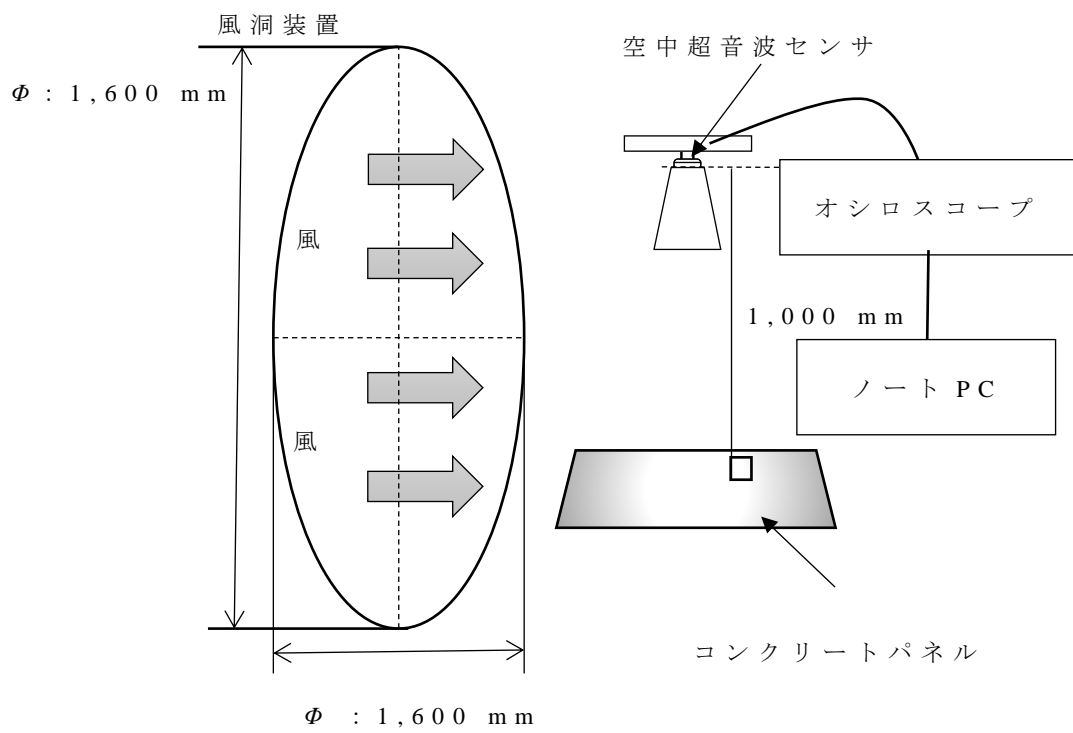


Fig. 3- 19 風洞実験概要

### 3.2.3 風洞装置稼働時に発生したノイズの処理方法

風洞装置により風を発生させるときに、機械的なノイズが発生した。超音波の反射波を取得したときに、超音波の反射波形にノイズが加わり、最大振れ幅を増加させる影響が生じた。ノイズが生じている反射波形の一例として滑面で風速 10 m/s のときの反射波形を **Fig. 3- 20** に示す。このノイズは不規則な細かな波形と規則的な大きな波形からなる。

そこで、反射波をフーリエ変換してフーリエ・スペクトルを求めたのち、卓越周波数は 40 kHz となった。そこで、この前後の 32 ~ 48 kHz の波形を得るために、スペクトルを逆フーリエ変換するデジタルフィルタによって、空中超音波センサの周波数スペックである 42 kHz 前後の波形のみを得ることにした。

除去後の波形を **Fig. 3- 21** に示す。本論で用いた空中超音波センサの周波数 42 kHz 前後の周波数で構成された波形である。**Fig. 3- 20** に生じているノイズを除去できていることがわかる。本論では、全ての実験結果に対して、デジタルフィルタを掛けた。

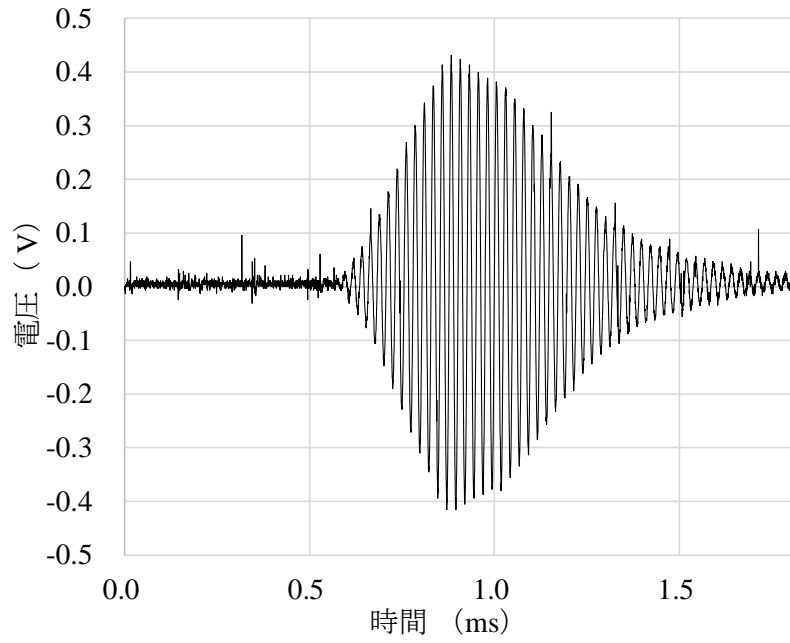


Fig. 3- 20 反射波形ノイズ除去前

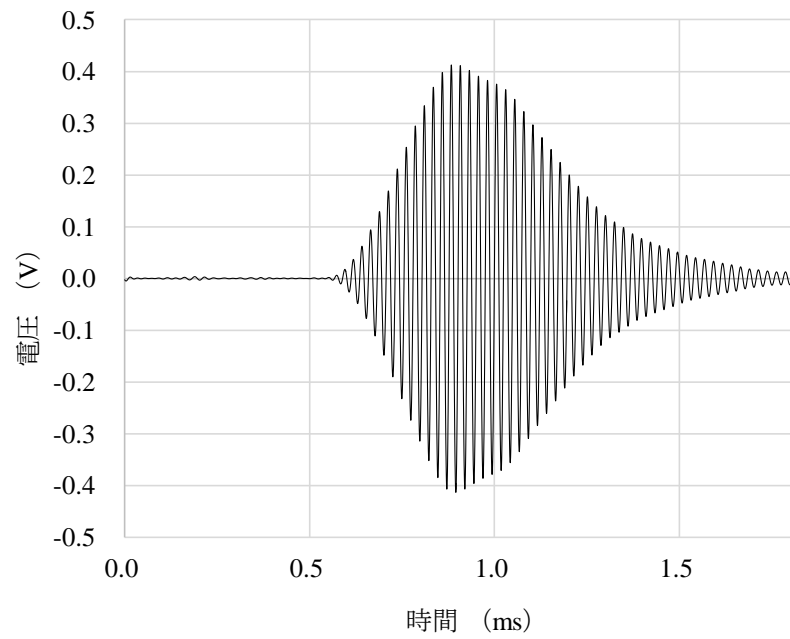


Fig. 3- 21 反射波形ノイズ除去後



#### 3.2.4 風速による最大振れ幅への影響

実験装置の設定が完了したら，風洞装置を稼働させる前に風速 0 m/s（無風時）のデータを計測した．無風時の空中超音波計測が完了したら，風洞装置を稼働させた．風の強弱の設定は，専用のインバータによって行った．風は風速 2 m/s 間隔で増加させ，最高風速は 10 m/s とした．最高風速 10 m/s の設定は，気象庁によると「風速 10 m/s 以上の風は，風に向かって歩きにくくなる．」とされているため，現場水路を想定した場合，計測上の限界風速であると判断したためである．風速 0，2，4，6，8，10 m/s の 6 段階の空中超音波計測（1 サイクル）が完了したら，粗さの異なるコンクリートパネルに変更して実験を行った．

風速毎に取得した最大振れ幅を **Fig. 3- 22** に示した．グラフに示すエラーバーは 20 データの標準偏差である．**Fig. 3- 22** の全ての計測面において，風速 0 m/s の最大振れ幅を基準として考えると，風速 4 m/s までは風速の増加による最大振れ幅の変動は小さく見える．

ここで，各計測面の風速 0 m/s の最大振れ幅を基準として，風速 4 m/s の最大振れ幅の減衰率を計算した．その結果，滑面は 0.1%，粗面 0.32 は 0.3%，粗面 1.04 は 2.3% となった．粗面 1.04 の減衰率が最も大きく，滑面と粗面 0.32 はほとんど減衰をしていないことが確認できた．

風速 6 m/s を超えると、風速が増加するにつれて最大振幅が減衰する傾向が確認できた。各計測面の風速 0 m/s の最大振幅を基準として、風速 10 m/s の最大振幅の減衰率を計算した。その結果、滑面は 4.4%、粗面 0.32 は 7.2%、粗面 1.04 は 11.1% となった。風速 10 m/s のときも、粗面 1.04 の減衰率が最も大きいことが確認できた。

また、全ての計測面において風速が増加するにつれて標準偏差が大きくなる傾向が確認できた。

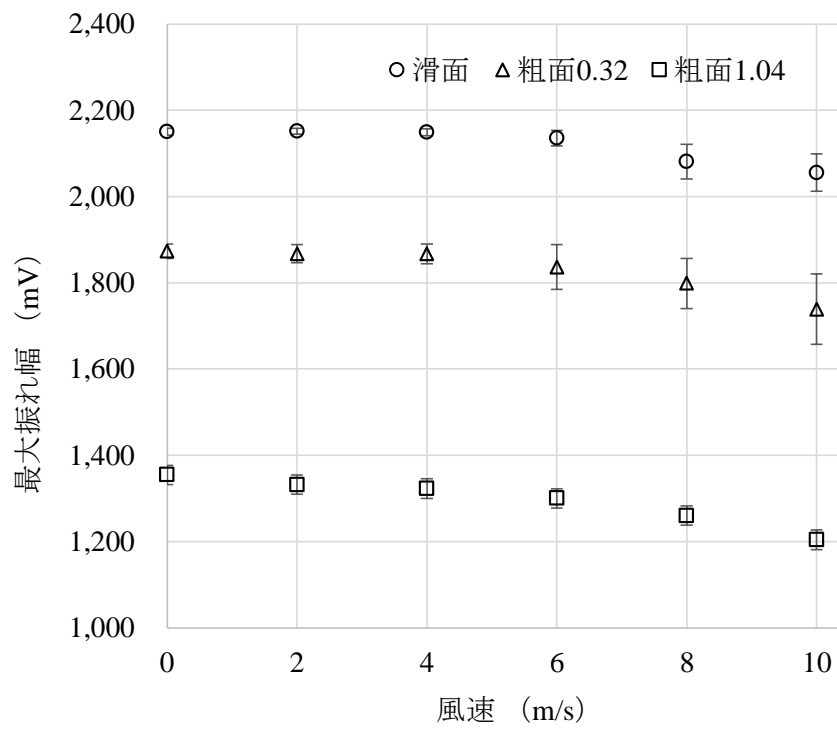


Fig. 3- 22 最大振れ幅と風速の関係

### 3.2.5 理論式の提案

梅田・前田（1973）は，風によって乱された超音波の音圧を計測し，風速と音圧の関係から風速を計測する試みを行っている．この研究では，

**Fig. 3- 23** のように対向した送信器と受信器を風向に対して直角に設置し，風速と送受信器取り付け角を変化させて受信波の音圧を計測している．送信器は  $\alpha$ ，受信器は  $\beta$  の取り付け角で設置されている．周波数は 50 kHz，送信器と受信器の距離は 1,000 mm である．

超音波の送信器，受信器は指向性を有しており，放射される方向や距離によって音の強弱が異なる．センサの形状および寸法が指向性を変化させる．風の影響が無い場合，このような指向性を有する空中超音波の計測される音圧  $p$  は，指向性関数  $R_{(\alpha)}$ ， $R_{(\beta)}$  によって式 (3-17) のように音圧  $p_0$  から減衰する．

$$p = p_0 \times R_{(\alpha)} \times R_{(\beta)} \quad (3-17)$$

ここで指向性関数  $R_{(\theta)}$  は，円形ピストンの場合，次式で表される．

$$R_{(\theta)} = \left| \frac{2J_1(z)}{z} \right| \quad (3-18)$$

$$z = \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta \quad (3-19)$$

ここで、 $J_{1(z)}$ ：第一種ベッセル関数、 $a$ ：振動子の半径 mm、 $\lambda$ ：波長 mm、 $\theta$ ：振動子の中心軸からの角度、 $\pi$ ：円周率である。

振動子の半径  $a$  を超音波センサの振動子半径とすると、ホーンの有無によらず同じ超音波センサを用いているため減衰量は一定となる。しかし、予備実験として行ったホーン無しでの実験結果は減衰が少なく、ホーン有りと異なる傾向を示した。鳥越・石井（1990）は放射インピーダンスの実数部は、開口から放射される音響パワーに比例するとし、星（2015）は円形ピストン開口部の径を  $a$  とし、指向性関数を計算している。

そこで、本論では、振動子半径はホーン開口部半径 12.75 mm を使用した。

風の影響が有る場合、風による偏向によって  $\alpha$  から  $\alpha'$ 、 $\beta$  から  $\beta'$  に変化し、式(3-20)で表される。

$$p' = p_0' \times R(\alpha') \times R(\beta') \quad (3-20)$$

$\alpha'$ 、 $\beta'$  は、超音波の音速  $c$  [m/s] と風速  $V_w$  [m/s] を使って、式(3-21)、(3-22)によって計算される。

$$\alpha' = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \alpha - V_w/c}{\cos \alpha} \right) \quad (3-21)$$

$$\beta' = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \beta + V_w/c}{\cos \beta} \right) \quad (3-22)$$

しかし，上記のような理論式は，送信器と受信器を風向に対して直角に対向に設置した場合の式であり，本論での実験における，伝搬過程にコンクリート面での反射を経由する反射波の風速による音圧減衰を表す式ではない．そこで，反射波の音圧の減衰関数(7)式を指向性関数  $R_{(\gamma)}$ ， $R_{(\omega)}$  を用いて以下のように作成した．しかし，粗面の場合は，超音波の散乱現象により反射角度がランダムになるため提案した理論式とは異なる結果となる可能性がある．

$$p'' = p_0'' \times R_{(\gamma)} \times R_{(\omega)} \quad (3-23)$$

ここで，偏向角  $\gamma$  は **Fig. 3- 24** のように伝搬過程にコンクリート面での反射を経由する．送受信器の中心軸からの傾きは  $0^\circ$  のため，

**Fig. 3- 23** でいう送信器側の偏角  $\alpha$  は  $0^\circ$  となり，式(3-24)で求められる．偏向角  $\omega$  は計測面からの反射波が反射角  $\gamma$  で反射するため，

**Fig. 3- 23** である受信器側の偏角  $\beta$  は  $\gamma$  とすることができる。超音波は計測面から受信器まで伝搬する過程で再び風速によって偏向し、偏向角  $\omega$  は式(3-25)で求められる。

$$\gamma = \tan^{-1} (V_w/c) \quad (3-24)$$

$$\omega = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \gamma + V_w/c}{\cos \gamma} \right) \quad (3-25)$$

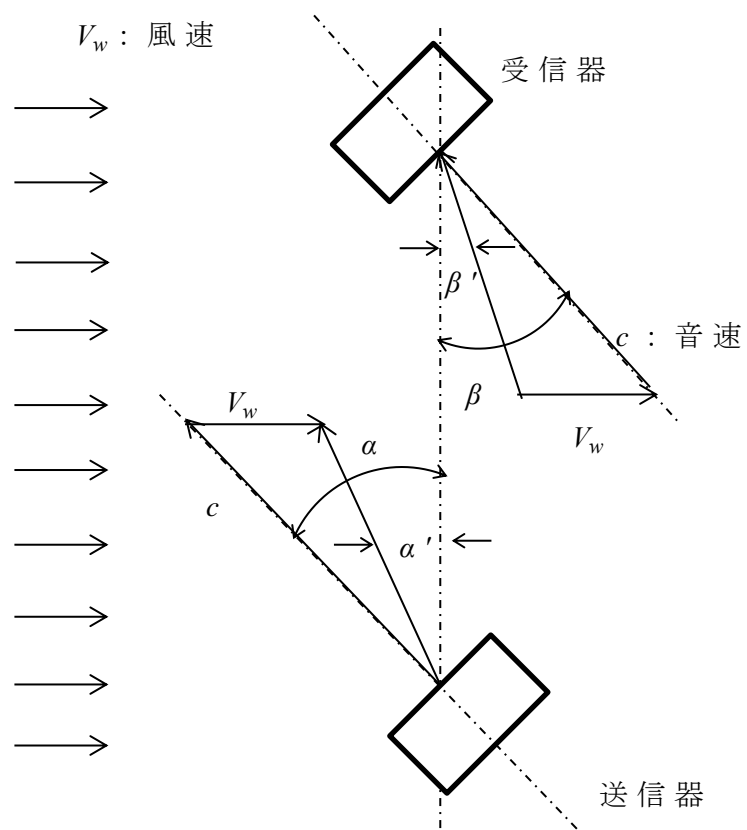


Fig. 3- 23 超音波の風による偏向の概念図



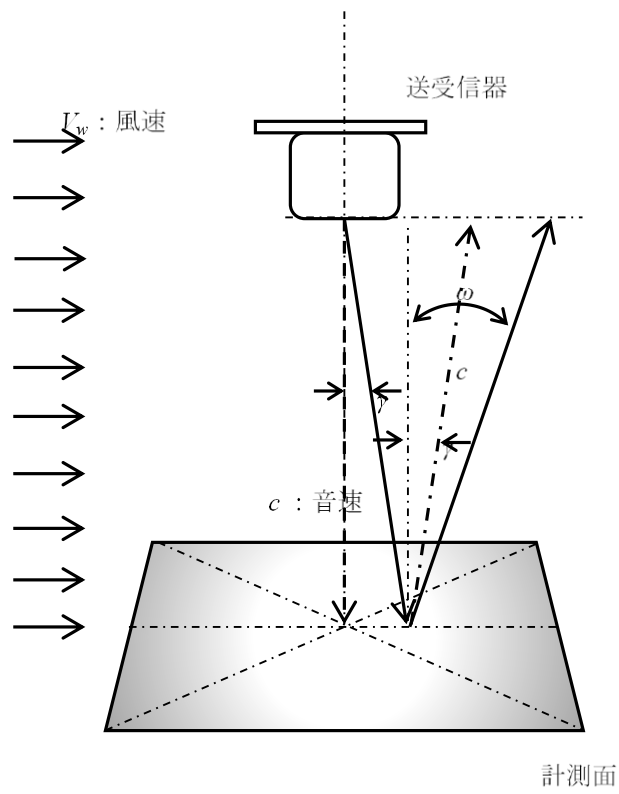


Fig. 3- 24 空中超音波における風による偏向の概念図

### 3.2.6 理論値と計測値の比較

最大振れ幅を音圧とみなし，3.2.5 節で提案した理論式で計算した理論値と計算値の比較を行った．ここで，滑面，粗面 0.32，粗面 1.04 を比較するため，風速 0 m/s の最大振れ幅に対する，各風速の最大振れ幅の割合，すなわち減衰割合を計算し比較を行った．減衰割合と風速の関係を **Fig. 3- 25** に示した．また，粗面の場合には，超音波の散乱現象により反射角度がランダムになるため，考察を滑面と粗面で分けて行った．

滑面の場合：計測値と理論値の減衰割合は同様にして，風速の増加と共に小さくなった．本論の実験結果が，理論式の値を比較的近く再現できていることが確認できた．

粗面の場合：計測値は，滑面や理論値よりも小さくなる傾向があり，その差は風速や粗さが増加するほど広がる傾向がわかった．理論値と異なる結果となったのは，粗面の場合の粗さ計測の精度に寄与するものではなく，散乱波の偏向による影響が寄与していると考えられる．Kirchhoff モデルによると超音波の反射波は，コヒーレント成分として鏡面反射成分のみを持つものと，インコヒーレント成分としてあらゆる方向への散乱波成分を含むものとに分けられる．岡島ら（2016）は，計測面の粗さが大きくなると，インコヒーレント成分が大きくなることを報告しており，つまり，散乱波成分が大きくなる．粗さのある計測面で散乱し，散乱による角度の付いた反射波は，反射強度である最大振れ幅を減衰させ，ある風速

$V_w$  の場合では，散乱による角度から更に， $\tan^{-1}(V_w/c)$  偏向される．その結果，反射波の増幅に寄与する場合と減衰に寄与する場合が考えられるが，本実験では減衰への寄与が大きかったと考えられる．つまり，インコヒーレント成分が大きくなり，散乱波によって散乱による角度が付くことが，滑面と粗面の減衰割合の差が広がった要因であると考えられる．

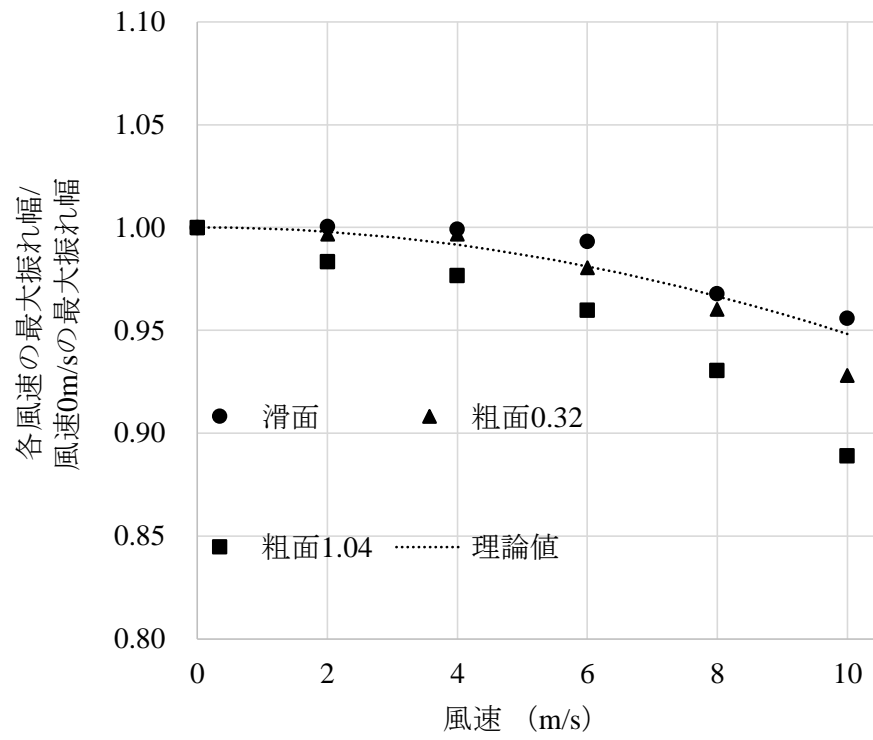


Fig. 3- 25 理論値と計測値の比較

### 3.2.7 まとめ

本論では，空中超音波の粗さ計測における風速の影響を評価するため，風洞実験により人工的に安定した風を発生させ反射波の最大振れ幅を風速毎に計測し検討を行った．検討項目は，風速による最大振れ幅への影響，風速による算術平均粗さへの影響，理論値と計測値の比較，3項目である．以下に明らかとなったことを示す．

風速による最大振れ幅への影響では，風速の増加にともない最大振れ幅が減衰を示し，なお且つ，標準偏差が大きくなることが確認できた．風速 0 m/s の最大振れ幅を基準として，風速 4 m/s の最大振れ幅の減衰率を計算した結果，滑面は 0.1%，粗面 0.32 は 0.3%，粗面 1.04 は 2.3%となった．同様にして風速 10 m/s の減衰率を計算すると，滑面は 4.4%，粗面 0.32 は 7.2%，粗面 1.04 は 11.1%となった．

理論値と実測値の比較において，滑面では，提案した理論値と計測値の減衰割合は，ほぼ一致をする結果となった．本論の実験結果が，理論式の値を比較的近く再現できていると考えられる．粗面では，計測値は滑面や理論値よりも小さくなる傾向があり，その差は風速や粗さが増加するほど広がる傾向が確認できた．その要因として，インコヒーレント成分が大きくなり，散乱波によって散乱による角度が付くことによって，滑面と粗面の減少割合の差が広がったと考えられる．粗面の場合は，提案した理論値とは異なる結果となった．

## 4 章 水中超音波の粗さ計測への有効性

### 4.1 実験装置

### 4.2 反復計測によるばらつき

### 4.3 粗さ計測への適用検証

### 4.4 計測範囲

### 4.5 計測距離による伝達損失

#### 4.5.1 理論式について

#### 4.5.2 理論値と計測値の比較

### 4.6 まとめ

## 4 章 水中超音波の粗さ計測への有効性

これまでの研究は，非灌漑期の水路内の水位が低い時を前提とした計測手法である．そのため現在の技術では，灌漑期や通年通水をしている水路での水面下にあるコンクリート壁の粗さ計測はできない点で課題がある．

本章では，この課題を解決する手法として，水中超音波を用いた計測手法を検討した．本手法は，農業用水路のみならず，通年取水が必要とされる工業用水路や水道用水路への活用が期待できる．計測原理は空中超音波と同様に超音波の散乱現象が利用できると仮定して行う．水中超音波と空中超音波は，超音波の伝達媒質が水と空気で異なるため，媒質の密度や超音波の伝達速度や波長が大きく異なる．

標準大気圧  $1,013 \text{ hPa}$  における温度  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  の水の密度は  $998.22 \text{ kg/m}^3$  で，同様にして空気の密度は  $1.205 \text{ kg/m}^3$  である．水中超音波は空中超音波に比べて伝達効率が高い性質を有する．しかし，空中超音波センサを水中超音波センサとして流用することは技術上不可能である．従って，新たに水中超音波における粗さ計測への有効性を検討する必要がある．

また，本章ではセンサの特性や種類による違いに対して，普遍性を確保するため振幅比を評価指標に用いた．振幅比とは，計測距離  $500 \text{ mm}$  から計測面の滑面を計測したときの最大振れ幅を基準とした値である．計測距離  $500 \text{ mm}$  での計測は，4.3 節で行ってい

る．式(4-1)より振幅比  $L$  は，距離 500 mm での最大振れ幅  $V_0$  と，任意の計測距離での最大振れ幅  $V$  の比で表される．

$$L = \frac{V}{V_0} \quad (4-1)$$



## 4.1 実験装置

① 水中超音波センサ：NAKI610 (Yachting Electronic.inc)

Fig. 4- 1 に本章で使用した水中超音波センサである NAKI610 を示す．超音波の周波数は 200 kHz と 83 kHz の可変式で，指向角は 20 度 (200 kHz) ， 60 度 (83 kHz) である．入力電圧は 12 V である．一般的に市販されている水中超音波の周波数は，近距離を計測する 200 kHz 程度と，遠距離を計測する 80 kHz 程度である．波長を計算すると水温 20 度のとき 200 kHz は，約 7.5 mm で，80 kHz は約 17.9 mm である．空中超音波の周波数は 40 kHz であるが，水中と空気中では音速が異なるため，波長は約 8.5 mm となる．つまり，本論で使用する周波数の 200 kHz は空中超音波と近い波長の超音波であると言える．本論では 200 kHz を使用して実験を行った．入力電源は，電池や自動車用 12 V バッテリーでは電圧が安定しないため，安定化電源を用いて家庭用 AC100 V から DC12 V に変換した．

② 計測面：摩耗模型コンクリートパネル ( $R_a=0.04$  ,  $0.32$  ,  $1.04$  mm)

3.1 節参照．



Fig. 4- 1 水中超音波センサ NAKI610

## 4.2 反復計測によるばらつき

空中超音波センサは反復計測のばらつきがあり，10回の平均値を用いることで抑制している．水中超音波でも同様にばらつきが想定されるため，反復計測によるばらつきの検討を行った．計測距離と計測面の粗さでばらつきの傾向が変わることが想定されるため，計測距離は500 mmと1,000 mmを使用して，計測面は3つのコンクリートパネルを使用した．水中超音波センサはコンクリートパネルの中心点からの垂直線上に設置した．最大振れ幅は119個取得した．計測は連続して行うことで，計測距離や水温などの環境要因は同一条件である．計測にかかる時間は1分程度である．1～20個の移動平均を100サンプル計算した．100サンプルの移動平均の平均値 mV と標準偏差 mV を計算した．この平均値 mV に対する標準偏差 mV の割合%をばらつきの指標として，計測値のばらつきを検討した．

**Fig. 4- 2** に各条件の結果を示した．全ての条件において，1個の最大振れ幅でも100サンプルの計測結果の平均値の1%以内の標準偏差に収まることがわかった．また，ばらつきは平均個数を多くするにつれて低下し，10個以上の平均でおおむね値が安定し，0.5%以内の標準偏差に収まることがわかった．空中超音波の場合，計測距離550 mmと1,000 mmにおいて3つの粗さの異なる計測面から合計6パターンで計測値のばらつきを検討したところ，平均値の1%程度以内に標準偏差を抑えるには10個の平均が必要であった．このことから，本章で用いた水中超音波のばらつきは，2章

の空中超音波に比べて小さいことが明らかとなった。従って、より短時間に少ない回数での粗さ計測が期待できる。計測面の粗さや計測距離による計測値のばらつきの違いは見られたが、傾向は見られなかった。例えば、計測距離 1,000 mm のときは、滑面が 10 個の平均個数のときのばらつきが最も大きくなるが、計測距離 500 mm のときは、粗面 0.32 が 10 個の平均個数のときのばらつきが最も大きくなる。以上の結果より本章では、全ての検討項目において 10 個の計測値の平均値を用いる。

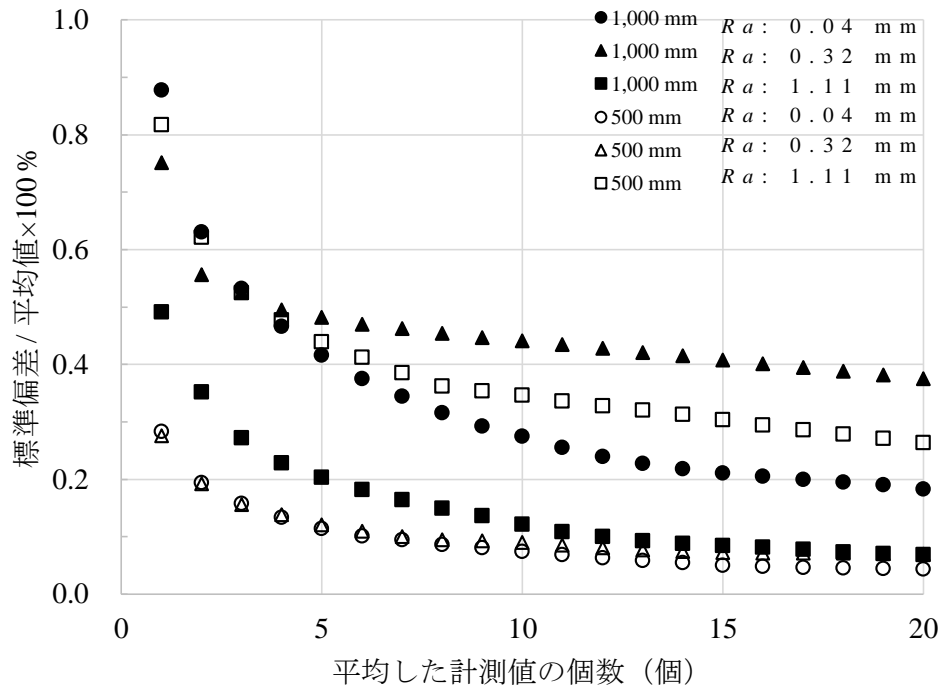


Fig. 4- 2 各条件による平均値に対する標準偏差の割合

### 4.3 粗さ計測への適用検証

計測距離は 500 mm と 1,000 mm で，計測面は 3 つのコンクリートパネルを使用した。

**Fig. 4- 3** に振幅比と最大振れ幅の結果を示した。計測距離 500 mm，1,000 mm において，振幅比は，算術平均粗さの増加にともない，低下することが確認できた。この現象は，粗さの増加にともなって，水中超音波の反射波の散乱成分が大きくなっているからであると考えられる。

計測距離 1,000 mm に比べて，計測距離 500 mm の方が，単位最大振れ幅あたりの粗さの変化量が小さい。すなわち，計測距離 500 mm の方が，小さな粗さ変化を捉えられることができ高い精度で計測ができる可能性を示す。

本論の算術平均粗さの範囲内では線形に計測値が減少しているため，切片に滑面の振幅比の平均値を用いた近似直線を描いた。近似直線と計測値の決定係数は，計測距離 500 mm のとき 0.95，計測距離 1,000 mm のとき 0.79 と高い値となり，振幅比，すなわち最大振れ幅と算術平均粗さの高い相関が確認できた。

3 つの計測面の結果について着目する。滑面と粗面 0.32 は，**Fig. 4- 4** に示すように計測箇所 5 点の粗さのばらつきが少ないにも関わらず，5 つの計測値にばらつきが発生した。3.2 節で反復計測による 10 回の標準偏差は計測値に対して 0.5 % 以下と小さいことが明らかになっているため，計測点の粗さ形状，もしくはセンサ

の特性が影響していると考えられる。特に粗面 0.32 は、細骨材の細かい粗さを持ったコンクリート表面からの反射になるため、周波数 200 kHz の超音波の分解能では処理できずに、滑面と近い計測値を検出した可能性が考えられる。粗面 1.11 は、計測点毎の粗さの違いに対して、最大振幅が比較的対応しているように見える。特に、計測距離が 500 mm のときに高い精度で粗さと最大振幅が対応した結果が、近似直線との決定係数を高くしていると考えられる。比較的計測面の粗さが小さいとき、算術平均粗さが一様なパネルにおいても、最大振幅にばらつきがあることが確認できた。

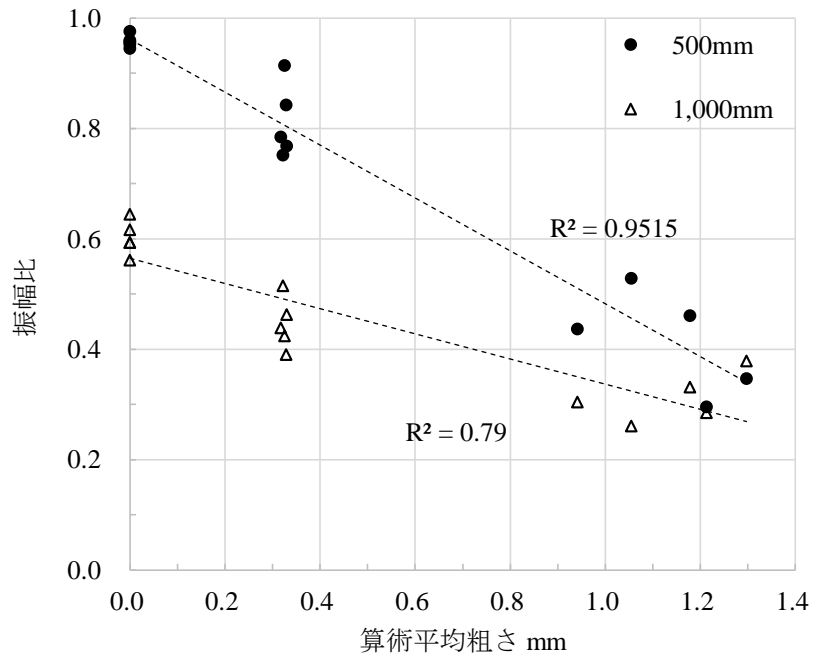


Fig. 4-3 振幅比と算術平均粗さの関係

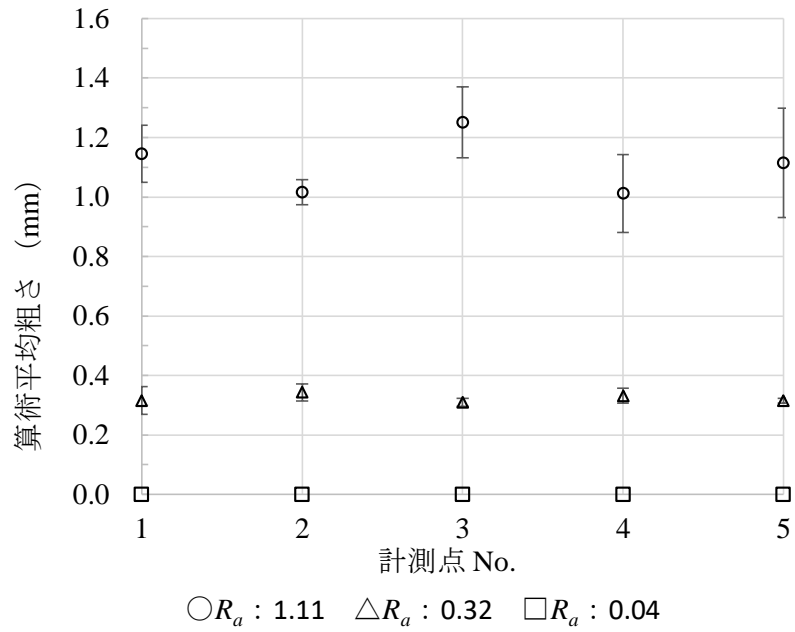


Fig. 4-4 計測面の各計測点の算術平均粗さ



#### 4.4 計測範囲

水中超音波を魚群探知機に使用する場合，探知する範囲を示す指標として指向角（半値角）を用いる．指向角とは振動子の中心，つまり音響レベルが最大の角度より，角度をずらしていき音響レベルが最大値の 1/2 に減衰する角度である．

しかし，指向角によって計算された範囲は，粗さ計測における実際の計測範囲を示しておらず，目安として使うことしかできない．そこで，粗さ計測に影響のある計測範囲を把握するため，滑面の計測面に砂利を広げていき，水中超音波の計測値の変化が無くなる直径を計測範囲として，計測範囲の検証を行った．

**Fig. 4- 5** に実験概要を示した．滑面には塩ビ板を使用し，計測距離は 500 mm とした．粗さを表現するための砂利は，形やサイズが比較的均一である園芸用の天然玉砂利 3 分（直径 9 mm 前後）を使用した．砂利の敷詰め範囲の直径は 100 mm 間隔で広げ，水中超音波で最大触れ幅の計測を行った．砂利は，隙間無く砂利同士が重ならないように敷詰めた．砂利を広げた状態の算術平均粗さは，1.85 mm である．

**Fig. 4- 6** に砂利の敷詰め範囲の直径の違いにおける振幅比の結果を示した．砂利の敷詰め範囲の直径 0 mm のときは，基準の最大振れ幅  $V_0$  に近い計測値になる．砂利の敷詰め範囲の直径を 100 mm にしたとき，計測値は基準の最大振れ幅の半分以下となった．砂利の敷詰め範囲の直径を広げていくにつれて振幅比は低下した．

そして、300 mm になったときから振幅比の低下は止まり、その後一定に近い値が計測された。ここで、計測範囲が直径約 300 mm であると仮説を立て、t 検定により検討した。Fig. 4-6 に p 値を示している。有意水準 5% で有意差が見られたのは直径 0, 100, 200 mm のときだった。直径 400, 500, 600 mm は有意差が見られなかった。従って、本論で使用した水中超音波の計測範囲は直径約 300 mm であると判定した。計測距離を長くすることで計測範囲の拡大が期待できる。

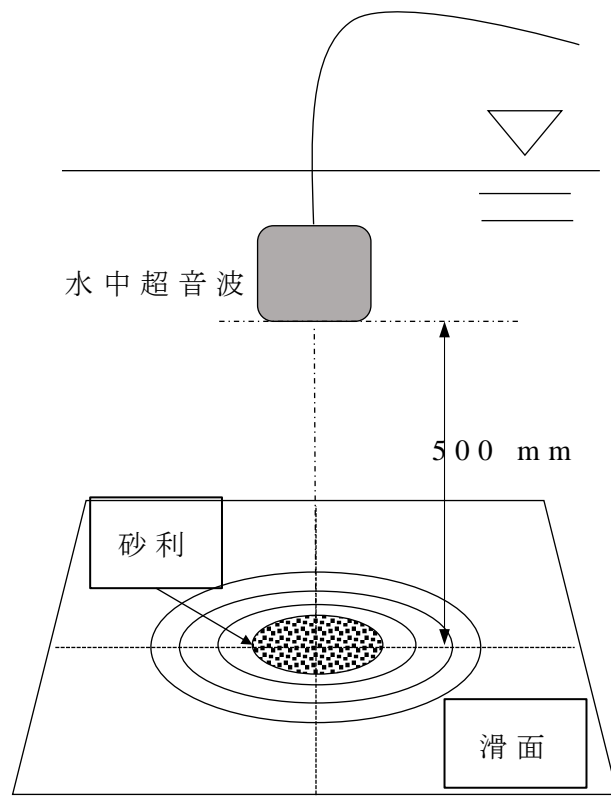


Fig. 4-5 計測範囲の実験概要

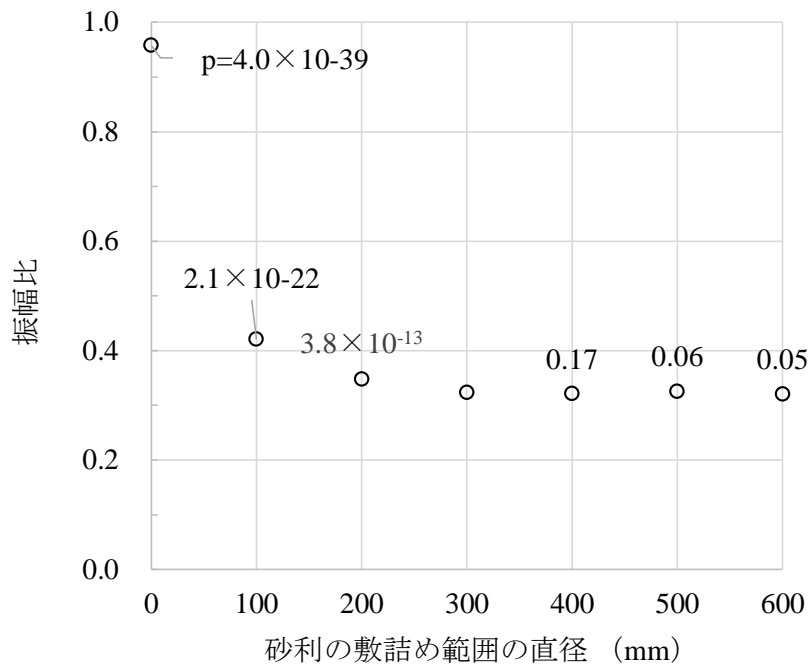


Fig. 4- 6 振幅比と砂利の直径の関係

## 4.5 計測距離による伝達損失

### 4.5.1 理論式について

超音波は，波が伝達する距離が遠くなるにつれて音圧レベルが低下する伝達損失が知られている（海洋音響学会，2014，c）．本論で使用した，水中超音波の伝達損失の傾向について検討した．検討には，実験により取得した計測値と理論値を用いた．

水中超音波計測は，反射波が受信できる限界距離である200 mmから，計測距離1,000 mmまでセンサを計測面から遠ざけて，計測距離の異なる計測値を31個取得した．

間庭（1985）は，送信器と受信器が対向した水中超音波における水中超音波の伝達損失について計算式を報告している．

本論では，送信器と受信器が一体型であり，送信された超音波は，計測面で反射をして同一センサで受信している．間庭（1985）らの研究とは，伝達過程に異なりが生じているが，コンクリートと空気の音響インピーダンスの差が大きいため，コンクリート表面でほぼ100%の反射をすると仮定をして計算を行った．伝達損失  $PL$  は，式(4-2)より常用対数を用いた音圧比で定義される．

$$PL = 20 \log_{10} \left| \frac{p}{p_0} \right| \text{ [dB]} \quad (4-2)$$

ここで、 $p_0$  [Pa]は基準の伝達距離  $x_0$  [m]での音圧であり、 $p$  [Pa]は任意の伝達距離  $r$  [m]での音圧である。

本論では、音圧を最大振れ幅として計算する。基準の伝達距離  $x_0$  は、水中超音波計測した31データの中から1,000 mmとし、そのときの最大振れ幅を基準の最大振れ幅とした。伝達距離とは、超音波が送信されてから受信されるまでの距離であるため、計測距離の2倍となる。伝達損失は、発散損失と吸収損失の2つの要素の和で表される。Fig.4-7に伝達損失の概要を示した。発散損失は、センサから発射された超音波のすべての反射境界が音源から十分離れている場合、すなわち等方性かつ均質媒質中では球面発散をする。発散損失は伝達距離の比を用いて式(4-3)で表される。

$$20 \log_{10} \frac{x_0}{r} \text{ [dB]} \quad (4-3)$$

吸収損失は、超音波が水中を伝達するときに水の圧縮と膨張が繰り返され、水分子の粘性摩擦などによって熱に変化する。それに加えて、海水中では、海水に含まれる成分の硫酸マグネシウムやほう酸などによって分子共鳴による緩和吸収が発生する。本論では、海水中の影響を無視することができる。従って、真水での粘性吸収のみを考えると、吸収損失は、定数  $a$  と伝達距離を用いて式(4-4)で表される。定数  $a$  は経験に基づく経験値であるが、Thorpe (1967)の式が最も有名である。Thorpeの式では  $a = 3.01 \times 10^{-7}$  である。

$$a(x_0 - r) \quad (4-4)$$

発散損失と吸収損失の和が  $PL$  となる。式(4-5)から  $PL$  は、伝達距離  $r$  の関数となることがわかる。つまり、基準の伝達距離  $x_0$  (m) の最大振れ幅を計測することで、任意の伝達距離の最大振れ幅を計算することができる。計算した最大振れ幅を理論値にした。

$$PL = 20 \log_{10} \frac{x_0}{r} + a(x_0 - r) \quad (4-5)$$

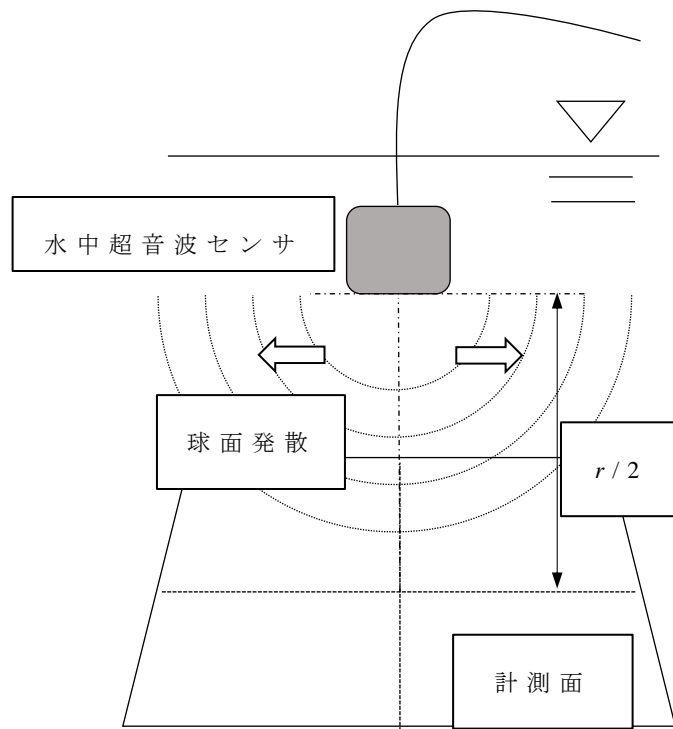


Fig. 4- 7 伝達損失の概要



#### 4.5.2 理論値と計測値の比較

実験から得られた計測値と理論値の結果を Fig. 4- 8 に示した。まず、計測値について見ていく。計測値の振幅比は、計測距離が遠くなるにつれて、伝達損失により小さくなることが確認できた。

計測距離 200 mm のときの計測値は、基準の最大振れ幅に比べて 2 倍以上の値を検出した。計測距離 1,000 mm の時の計測値は、基準の最大振れ幅に比べて 1/2 倍程度の値を検出した。すなわち、計測距離が近いほど、単位計測距離あたりの最大振れ幅の損失量は大きく、伝達損失の影響を敏感に受けることがわかった。

次に、計測値と理論値の相違について見ていく。計測距離 500 mm、すなわち伝達距離 1,000 mm のときは、式(4-5)より  $PL$  が 0 となるため、式(4-3)より  $p/p_0 = 1$  となり理論値は計測値と一致する。計測値と理論値は高い一致を示し、決定係数は、0.98 となった。理論値も計測距離が近いほど、単位計測距離あたりの最大振れ幅の損失量が大きいことが確認できた。

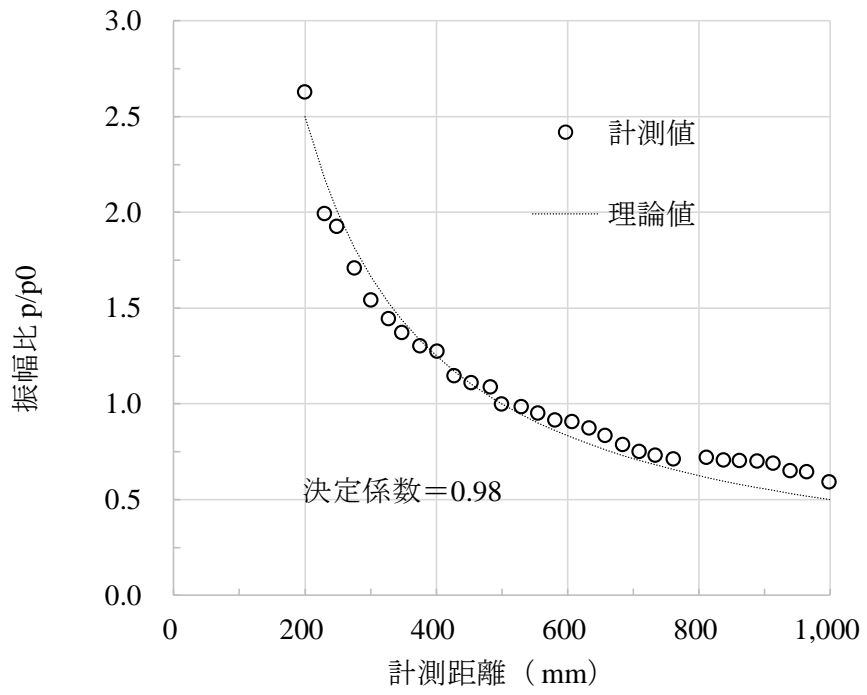


Fig. 4-8 計測値と理論値の比較

## 4.6 まとめ

本章では，水中のコンクリート表面の粗さを計測する手法として，水中超音波を用いた計測手法の検討を行った．項目は，計測値のばらつき，粗さ計測への適用検証，計測範囲，伝達損失，の4項目である．

計測値のばらつきでは，1個の計測値でも100サンプルの計測結果の平均値の1%以内の標準偏差に収まることがわかった．また，ばらつきは平均個数を多くするにつれて低下し，10個以上の平均でおおむね値が安定し，0.5%以内の標準偏差に収まることがわかった．

粗さ計測への適用検証では，計測距離 500 mm，1,000 mm において，振幅比は，算術平均粗さの増加にともない低下することが確認できた．線形近似した決定係数は，計測距離 500 mm のとき決定係数 0.95 で，計測距離 1,000 mm のとき決定係数 0.79 と高い相関を持つことが確認できた．

計測範囲では，本論で使用した水中超音波は，計測距離 500 mm の場合，直径約 300 mm の範囲であることがわかった．

計測距離による伝達損失では，計測距離が近いほど，単位計測距離あたりの最大振れ幅の損失量が大きいことが確認できた．水中超音波による計測値と理論値は，高い一致を示し，決定係数は 0.98 を示した．

以上の結果より，水中超音波は水中のコンクリート表面の粗さ計測手法として有効となる可能性が明らかとなった．

## 5 章 水中超音波の環境条件への適用

### 5.1 流速の影響

#### 5.1.1 実験装置と対象水路

#### 5.1.2 流速計測結果（対象水路 A）

#### 5.1.3 計測値と流速 0 m/s の理論値との比較 （対象水路 A）

#### 5.1.4 流速計測結果（対象水路 B）

#### 5.1.5 計測値と流速 0 m/s の理論値との比較 （対象水路 B）

#### 5.1.6 まとめ

### 5.2 濁りの影響

#### 5.2.1 実験装置

#### 5.2.2 濁度による影響評価

#### 5.2.3 透視度による影響評価

#### 5.2.4 まとめ

## 5 章 水中超音波の環境条件への適用

4 章では，水中超音波を用いて水中にあるコンクリート表面粗さを計測する手法の有効性について検討し，基礎的な研究を行った．しかし，現場を想定した場合における，水路内に発生する流れや濁りについての検討が行われていない．本節では現場計測に向け，水路内に発生する水の流れと濁りについて検討を行った．

### 5.1 流速の影響

超音波はパイプ内の流量計に利用させる．これらに用いられる周波数は 1MHz と高周波である．計測原理はドップラー効果による反射波の周波数変化と時間差式がある．ドップラー効果は水中の懸濁物との反射を計測する技術であるため，本論には関係がない．時間差式は流れによって伝搬時間に差が生じることを計測原理にしておき，4 章で水中の伝搬距離による減衰から確認できたように，最大振幅への影響が考えられる．そこで，実用水路で表面粗さの少ない水路と，粗さの有る水路を対象にして，流速と超音波計測を並行して行った．

### 5.1.1 実験概要と対象水路

#### ① 水中超音波センサ：NAKI610 (Yachting Electronic.inc)

4.2 節参照. **Fig. 5- 1** に示すように, 単管とクランプを使用して水路底板に垂直に設置した.

#### ② 流速計

流速計には電磁流速計の LP-30 (株式会社ケネック) を使用した. 1 軸 1 方向の計測で, 流速範囲は 0~3 m/s, 計測精度は±2% (フルスケール測定時) である. 10 秒平均を計測値とし, 12 個の計測値の平均値を採用した. **Fig. 5- 2** に計測の様子を示す. 単管に固定することで安定した計測を可能にした.

#### ③ 対象水路 A

共用 40 年以上経過する水路であるが, 補修工事により表面被覆がされている. **Fig. 5- 3** に示す, 赤丸の AG モルタル補修区間で実験を行った. 調査点は表面に凹凸が無く直線区間で流れが安定しているため選択をした. 水路壁面と底板の摩耗状況が同じであったため, 型どりゲージで算術平均粗さを計測したところ 0.08 mm と滑面と同等の粗さであることが確認できた. **Fig. 5- 4** に示すように, 台形水路で下底は 1,060 mm, 上底は 2,100 mm, 水路高は 1,550 mm である. 当日の水深は 1,010 mm であった.

#### ④ 対象水路 B

水路 B は水路 A と比べ摩耗が進行している，かつ流速が早い  
ため選択した．**Fig. 5- 5** の写真は非灌漑期に撮影したものである．  
水路底板には **Fig. 5- 6** に示すように苔が繁殖していることが確  
認できる．苔の下は，モルタルが削られ一様に細骨材が剥き出しに  
なっており，粗骨材による大きい凹凸は見られなかった．**Fig. 5-  
7** の写真は計測当日に撮影した写真である．水路高は 1,500 mm，  
水深は約 1,400 mm であるため，計測当日は水路底の状況が確認で  
きない．調査点は直線区間が 100 m 以上確保できており，安定した  
流れになっている．



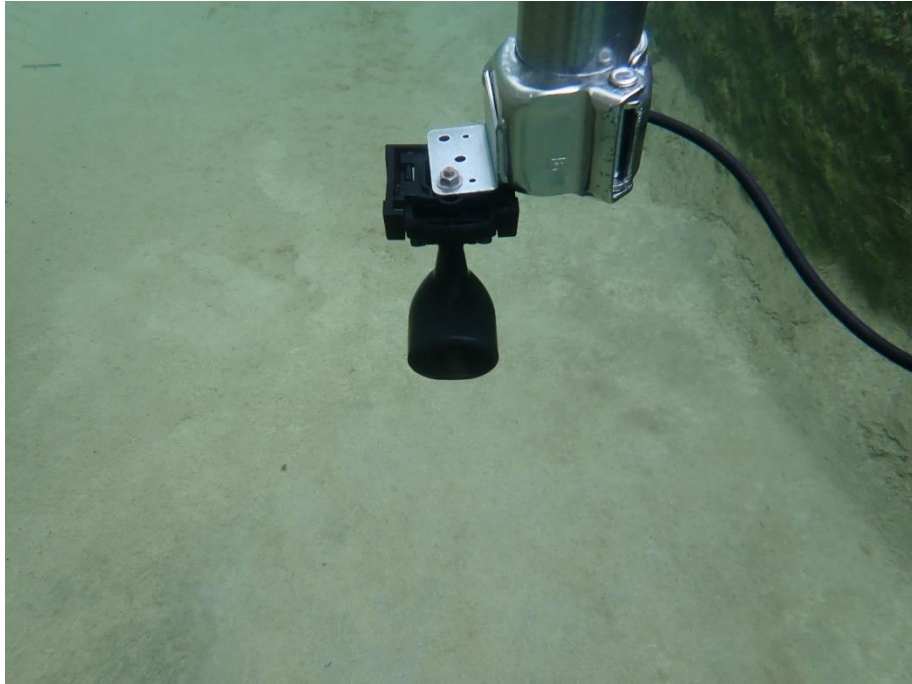


Fig. 5- 1 水中超音波設置の様子



Fig. 5- 2 流速計測の様子

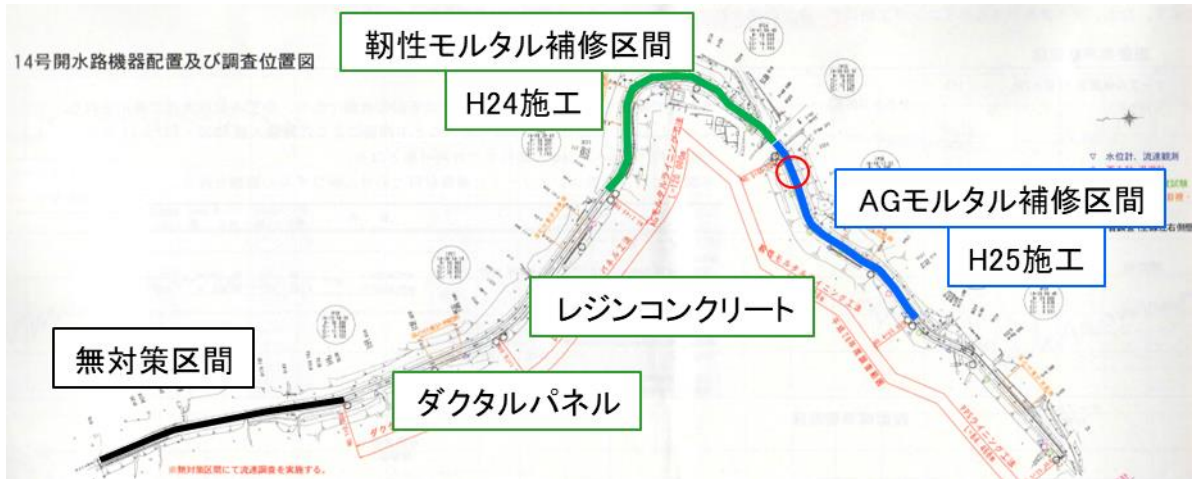


Fig. 5-3 対象水路 A 調査区域

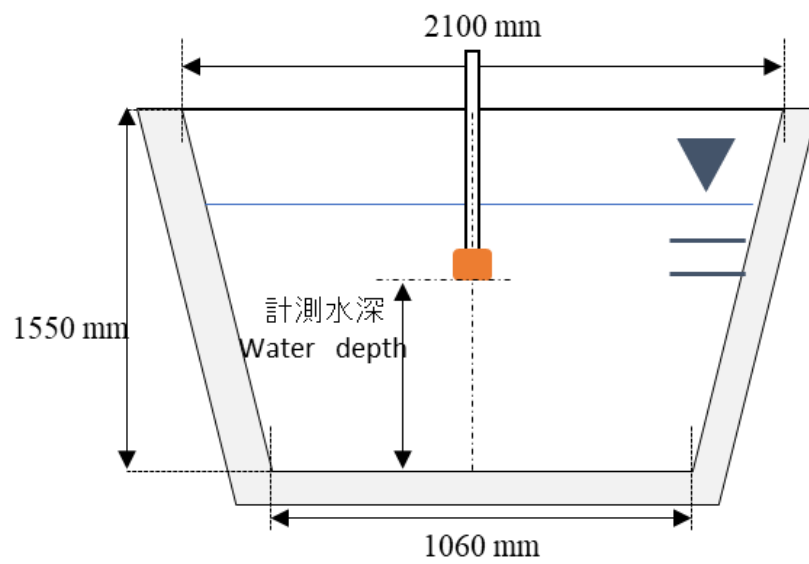


Fig. 5-4 水路正面図



Fig. 5- 5 非灌漑期の様子



Fig. 5- 6 水路底の様子



Fig. 5- 7 灌漑期の様子

### 5.1.2 流速計測結果（対象水路 A）

当日の水深は 1,010mm であった。流速は水路底から 900mm まで、100mm 間隔で計測をした。水路底の流速は 0m/s として、水路底+10cm の水深を水路底に流速計を押し当てた時の計測結果とした。水深 1,010mm の流速は水深 900mm の時の流速を採用した。1点につき 12回連続で計測し、最大と最小をカットした 10回の平均値を採用した。

**Fig. 5- 8** に計測した流速分布図を示す。最大流速は水深 200mm のとき 0.67m/s であった。台形断面のため、流速が下底と上底であまり差が見られなかった。平均流速は、計測点と計測点の間の面積を求めてその合計を水深の 1.01m で割ることで求めた結果、0.62 m/s となった。

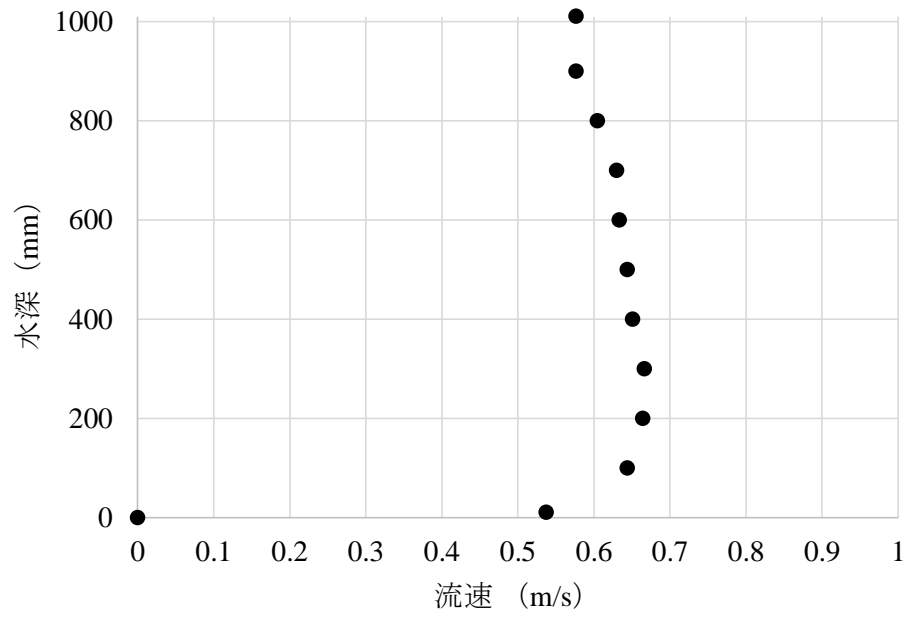


Fig. 5- 8 流速分布 (对象水路 A)

### 5.1.3 計測値と理論値（静水）との比較（対象水路 A）

水中超音波計測は，水深 300mm から 1,000mm までの 100mm 間隔で計測をした．

計測結果を **Fig. 5- 9** に示す．流水条件下であるが，4.5 節で述べた静水条件下の距離による伝達損失と似た傾向を示すことが確認できた．ここで，水深 500mm の時の最大振れ幅 5068mV を基準の伝達距離の音圧として，伝達損失による静水時の理論値を式 (4-2) から計算した．

比較結果を **Fig. 5- 10** に示す．2 つのグラフは高い相関で近似している．決定係数は 0.98 と非常に高い値となった．静水時の理論値と高い相関が確認できたことから，水中超音波は流速 0.62m/s の滑面水路の条件下では計測値に影響がないことが確認できた．しかし，計測距離の長い 900, 1,000mm の時の計測値が理論値より低い値となった．静水状態では，4 章に示したように，理論値に比べ計測値が大きくなっていることから，より流速の早い水路や計測距離を長くすることで影響を受ける可能性が考えられる．

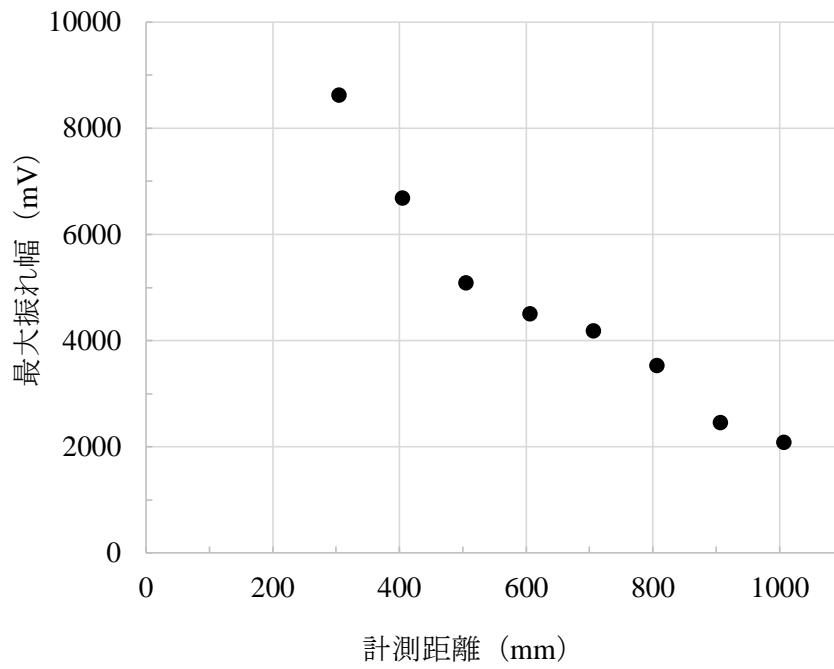


Fig. 5- 9 流水条件下での最大振れ幅と計測距離の関係

(対象水路 A)

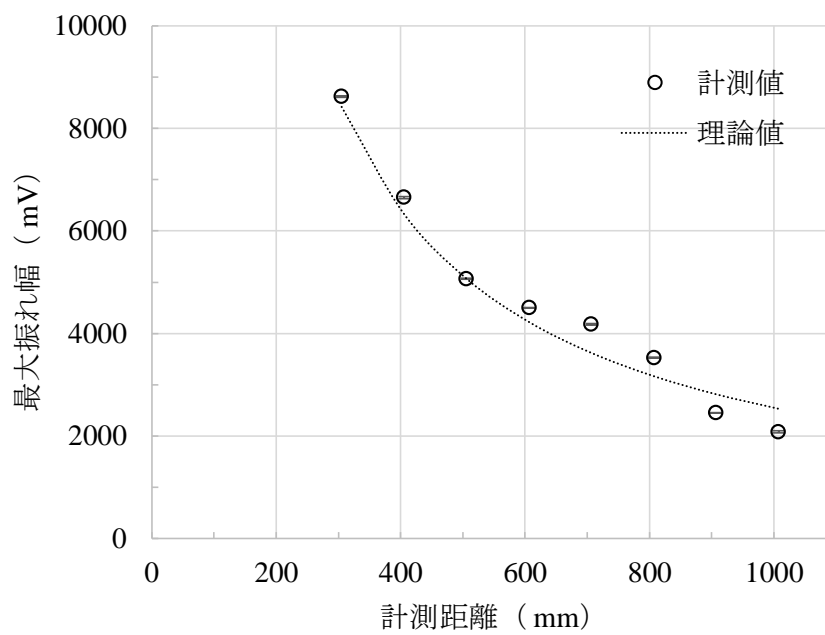


Fig. 5- 10 計測値と理論値の最大振れ幅と計測距離の関係 (対

象水路 A)



#### 5.1.4 流速計測結果（対象水路 B）

当日の水深は 1,400 mm であった。流速は水路底から 1,300 mm まで、200 mm 間隔で計測をした。水路底の流速は 0 m/s として、水路底+10 cm の水深を水路底に流速計を押し当てた時の計測結果とした。水深 1,400 の流速は水深 1,300 mm の時の流速を採用した。1 点につき 12 回連続で計測し、最大と最小をカットした 10 回の平均値を採用した。

**Fig. 5- 11** に計測した流速分布図を示す。最大流速は水深 900 mm のとき 1.18 m/s であった。一般的に矩形断面水路は 8 割水深が最大流速になるが、本水路では 6.5 割の地点で最大流速になっている。これは、**Fig. 5- 5** に見られる水路下部の傾斜によって流速が下部で早くなっていることが原因であると考えられる。平均流速は、計測点と計測点の間の面積を求めてその合計を水深の 1.4 m で割ることで求めた結果、0.99 m/s となった。

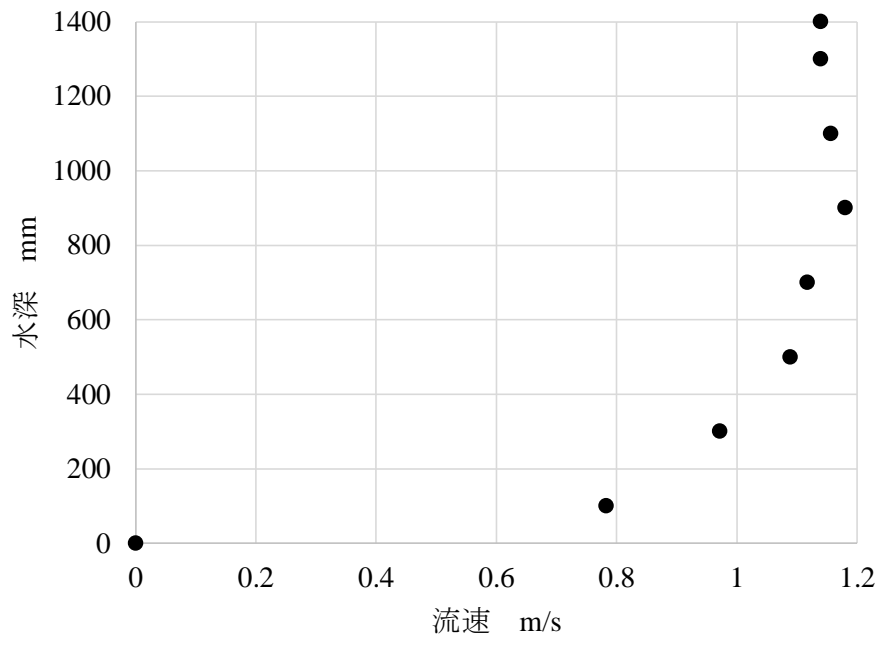


Fig. 5- 11 流速分布 (对象水路 B)

### 5.1.5 計測値と理論値（静水）との比較（対象水路 B）

水中超音波計測は，水深 300 mm から 1,400 mm までの 100 mm 間隔で計測をした．

計測結果を **Fig. 5- 12** に示す．流水条件下であるが，4.5 節で述べた静水条件下の距離による伝達損失と似た傾向を示すことが確認できた．しかし，**Fig. 5- 6** のように水路底板に粗さや苔の繁茂が有るため，散乱現象により最大振れ幅が付知川と比較すると小さい結果になっている．

ここで，水深 500 mm の時の最大振れ幅 3,986 mV を基準の伝達距離の音圧として，伝達損失による静水時の理論値を式（4-2）から計算した．比較結果を **Fig. 5- 13** に示す．2 つのグラフは高い相関で近似している．決定係数は 0.98 と非常に高い値となった．静水時の理論値と高い相関が確認できたことから，水中超音波は流速 0.99 m/s の粗面水路の条件下では計測値に影響がないことが確認できた．

**Fig. 5- 10** の結果と同様に，計測距離の長い 800，900，1,000，1,400 mm の時の計測値が理論値より低い値となったが，理論値との乖離は計測距離に関わらずほぼ一定である．この現象が流速の影響である場合，計測距離に比例して理論値との乖離が大きくなることが考えられる．また，計測距離 1,200 mm は，計測値と理論値が一致をした．従って，**Fig. 5- 10** と **Fig. 5- 13** に見ら

れた計測距離が長い時に計測値が理論値より小さくなる現象は、流れの影響以外のところが原因であると考えられる。

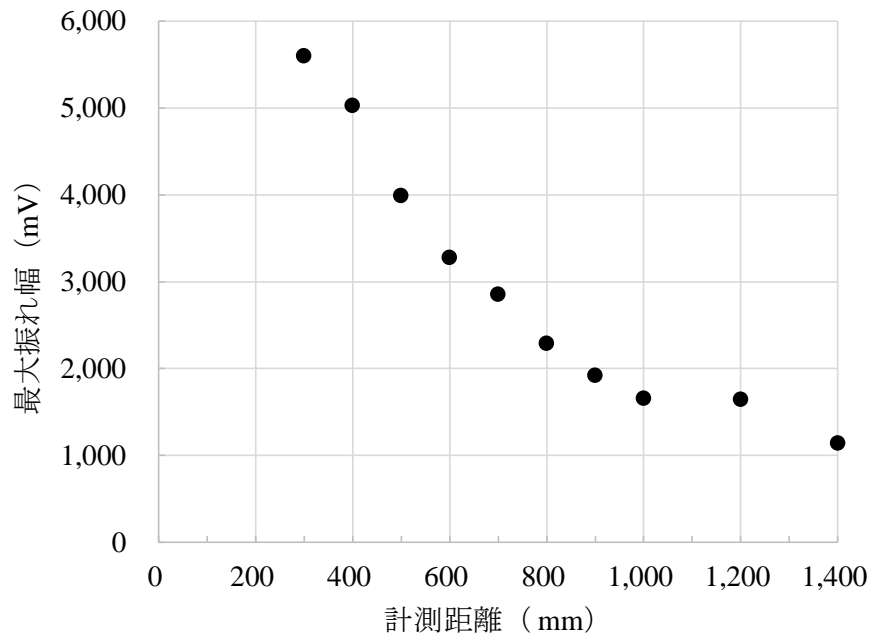


Fig. 5- 12 流水条件下での最大振幅と計測距離の関係（対象水路 B）

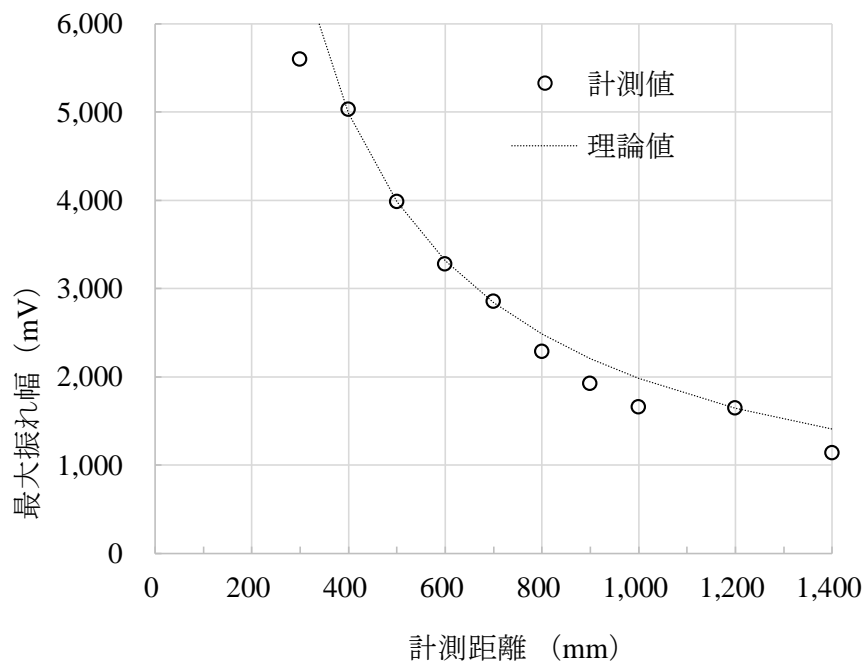


Fig. 5- 13 計測値と理論値の最大振幅と伝搬距離の関係（対象水路 B）

#### 5.1.6 まとめ

流速の異なる2つの現場水路で水中超音波計測をすることで、流速の影響を検討した。

流速計を用いて流速分布を作製して平均流速を計算した結果、対象水路 A は  $0.62\text{ m/s}$  で、対象水路 B は  $0.99\text{ m/s}$  であった。

水中超音波計測は  $300\text{ mm}$  から  $100\text{ mm}$  間隔で計測し、対象水路 A は  $1,000\text{ mm}$  まで、対象水路 B は  $1,400\text{ mm}$  まで計測をした。取得した最大振幅（流水条件）と、伝達損失の理論式から得られた理論値（静水条件）との比較を行った結果、どちらの水路も決定係数が  $0.98$  と高い相関を示した。従って、流水条件下においても、静水条件と同じ値の最大振幅が計測できることを明らかとした。

## 5.2 濁りの影響

農業用水路の水は，山間部などの上流域を除き，一般的には濁り水を用い水として使用している．酷い濁り水の場合，水路壁面の状況を目視で診断することが出来ないこともあり，水中超音波計測手法が活躍する場面であるとも考えられる．そこで，濁りが水中超音波計測に与える影響について検討する必要がある．橘田ら（2011）は，ドップラー式の超音波流速計を応用した超音波濁度のアプリケーション開発を行っている．このように超音波を使用した濁度計測は広く行われている現状である．これらのセンサは流量計と同じく高周波数であるが，実験から検討していく必要がある．

濁りの指標には，濁度，透視度，SS（浮遊物質）が主に挙げられる．

濁度とは，JIS K 0101「工業用水試験方法」に定められており，精製水 1L に対し、標準物質であるカオリンまたは，ホルマジン 1mg を含ませ、均一に分散させた懸濁液の濁りが濁度 1 度（カオリンまたは，ホルマジン）となっている．定義はシンプルであるが，この濁度を計測するためには，高価なセンサが必要である．

SS とは，水中に浮遊する粒径 2 mm 以下の不溶解性物質の総称であり，質量濃度（mg/L）で表される．収集した懸濁水をガラスセンサろ紙法や遠心分離法を用いて計測する．

透視度とは，水の透明度を表現するための指標である．透明

な管の中にある標識板を認識できる水の高さが計測値となる。簡単で安価な手法であるため、広く一般に使用されている。しかし、計測環境、特に明るさに結果が左右される。また、人によって見え方が違う欠点がある。

上記3つの指標から、本論では濁度と透視度を用いた。濁度は、懸濁物質にカオリンを使用するため、正確に濁りを評価することが出来るため採用した。透視度は、広く一般に使用されているため、参考値として扱いやすいため採用した。



### 5.2.1 実験装置

① 水中超音波センサ：NAKI610 (Yachting Electronic.inc)

4.2 節参照.

② 水槽

本節ではドラム缶を使用した。直径 60cm, 高さ 80cm である。水中超音波計測は計測距離 500mm で実験をするため, 計測範囲は十分に満たしている。

③ 懸濁物質

カオリン (林純薬工業株式会社)

④ 透視度計

高さ 40cm と, 100cm の 2 つを使用した。Fig. 5- 16 は, 40cm の透視度計と標識板である。

⑤ 攪拌用具

容器内のカオリンを攪拌するためにデッキブラシを使用した。



Fig. 5- 14 ドラム缶

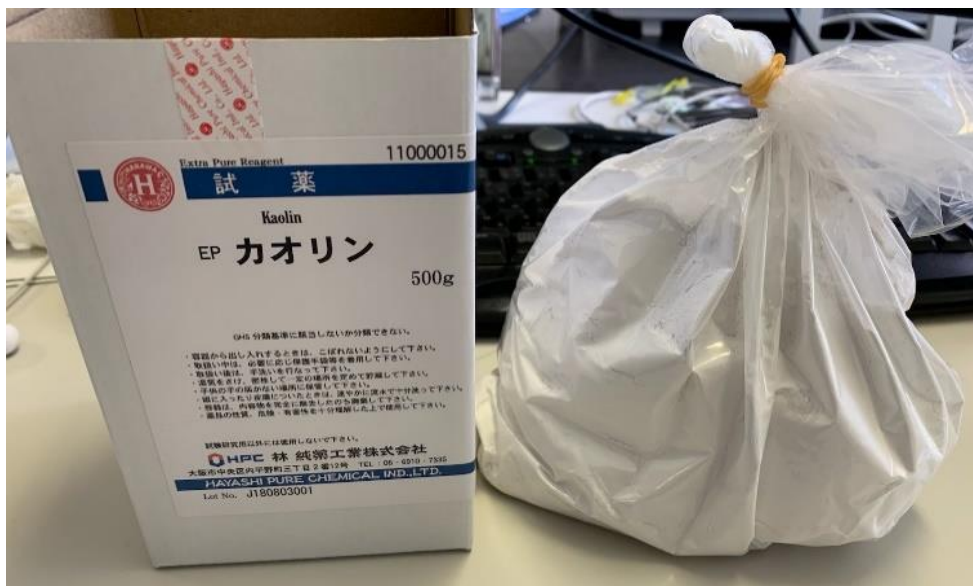


Fig. 5- 15 カオリン

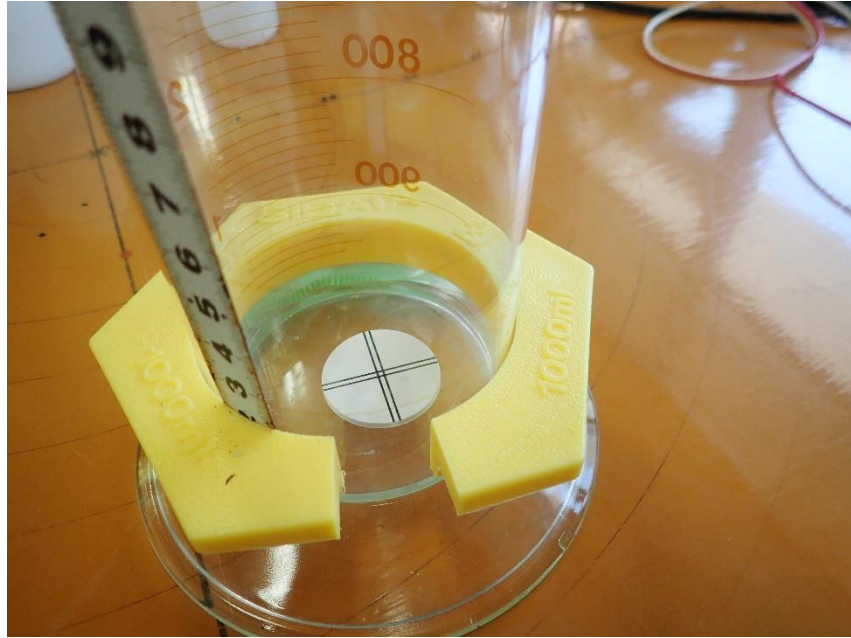


Fig. 5- 16 透視度計と標識板

### 5.2.2 濁度による影響評価

水中超音波センサの計測距離は 500mm とし，ドラム缶に水を 163.91L 入れた．**Fig. 5- 17** に水中超音波センサを設置しドラム缶に水を入れた直後の写真を示す．この状態からカオリンを入れ懸濁液を作り，最大振れ幅を計測していく．

本節では，濁度 0 の最大振れ幅を基準とした振幅比を用いた．カオリンを入れた量と，その時の濁度を **Table 5- 1** に示す．0～2,000mg までは 500mg 間隔で追加をした．2,000～10,000mg までは 1,000mg 間隔で追加した．10,000～35,000mg までは 5,000mg 間隔で追加した．**Fig. 5- 18** に懸濁液の様子を示す．No.1～10 まではほとんど変化は見られなかった．No.10 以降，徐々に白濁が強くなり，No.16 以降は見た目に変化が見られなかったため，実験は No.18 の濁度 200mg/l を超えたところで終えた．

**Fig. 5- 19** に振幅比と濁度の関係を示す．濁度 100 mg/L 未満は振幅比 1～0.98 の間を推移しており，水中超音波計測に影響がないように見られる．濁度 100 mg/L 以上になると，明らかに 100 mg/L 未満と比べ振幅比が小さくなった．しかし，減衰率は 0.5 割未満にとどまっており，計測への影響は非常に少ないことが確認できた．



Fig. 5- 17 実験の様子（濁りなし）

Table 5- 1 カオリンの総量と濁度

No.	1	2	3	4	5	6
カオリン総量 mg	0	500	1000	1500	2000	3000
濁度 mg/L	0	2.9	5.9	8.8	11.8	17.7
No.	7	8	9	10	11	12
カオリン総量 mg	4000	5000	6000	7000	8000	9000
濁度 mg/L	23.6	29.5	35.4	41.3	47.2	53.1
No.	13	14	15	16	17	18
カオリン総量 mg	10000	15000	20000	25000	30000	35000
濁度 mg/L	59	88.5	118	147.4	176.9	206.4

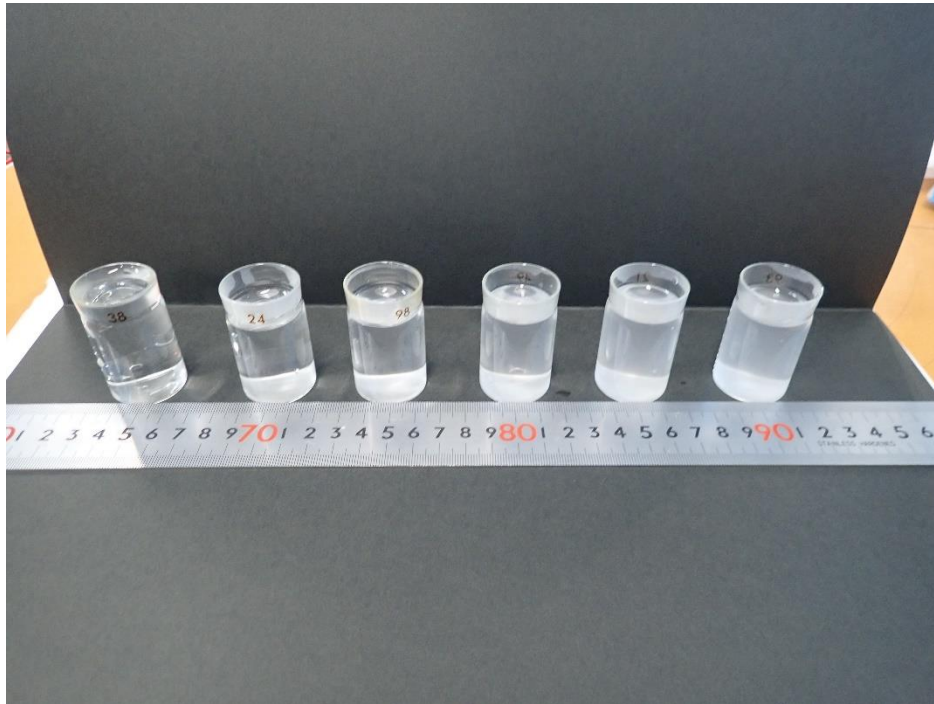


Fig. 5- 18 懸濁液の様子 (No. 1, 5, 10, 14, 16, 18)

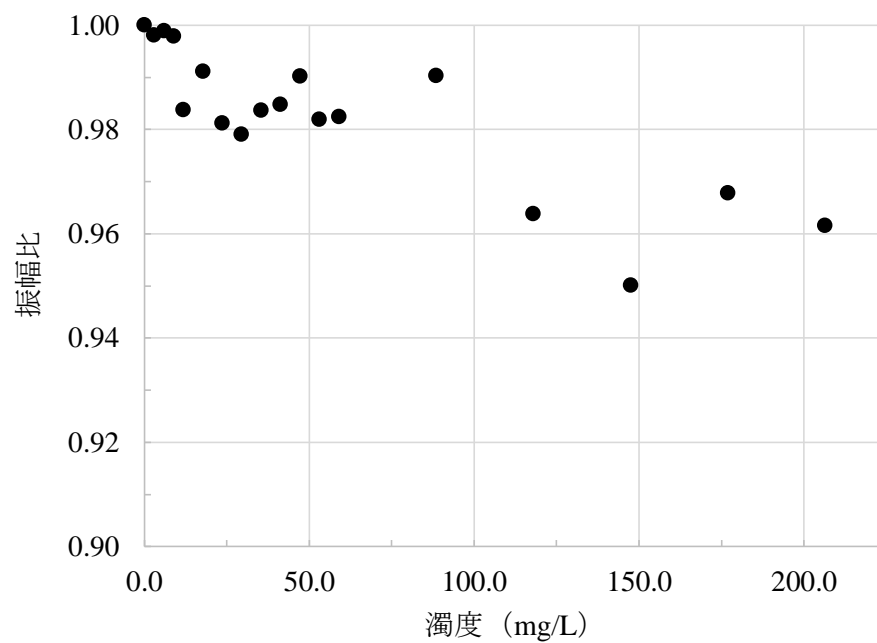


Fig. 5- 19 振幅比と濁度の関係

### 5.2.3 透視度による影響評価

一般的に透視度は，50cm 以上は「澄んでいる」，20cm は「やや濁っている」，10cm は「濁っている」，5cm は「とても濁っている」と判断される。

計測は自然の光の入らない環境で行った。透視度 100cm 以上の結果は，100cm とした。計測は 5.2 節と同じタイミングで行っているため，カオリンは **Table 5- 1** に示す量を入れた。

**Fig. 5- 20** に振幅比と透視度の関係を示す。No.1, 2 は透視度が 100cm を超えたため，100cm としている。5.2.2 項で，計測値の低下が見られた濁度 100mg/L 以上のときは，透視度が約 10cm 以下のときであることが確認できた。

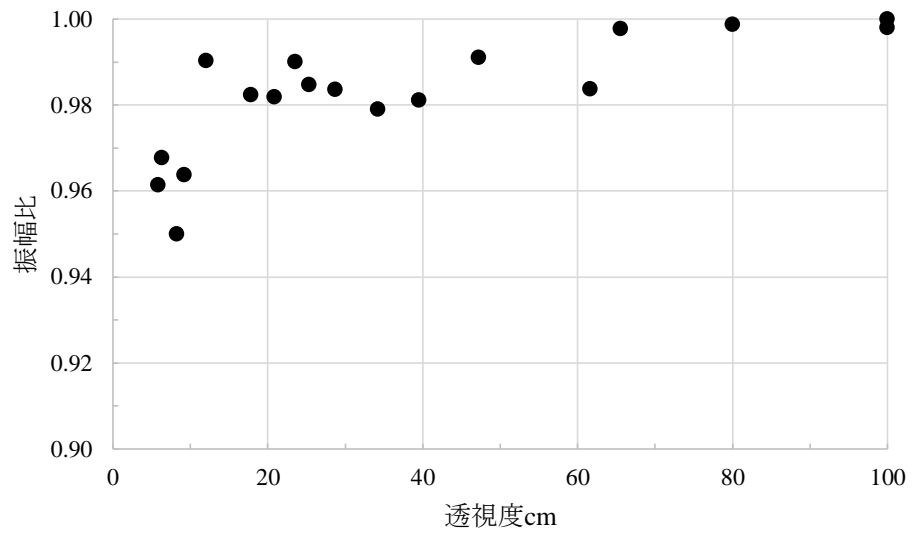


Fig. 5- 20 振幅比と透視度の関係



#### 5.2.4 まとめ

カオリンを用いて懸濁液を作製し，水中超音波の濁りの影響について検討した．濁りの指標には濁度と透視度を用いた．カオリンの総量を増やししながら最大振れ幅を計測した．

振幅比と濁度の関係は，濁度  $100\text{ mg/L}$  未満は影響がほとんど現れなかった． $100\text{ mg/L}$  以上のとき，明らかな減衰が確認できた．しかし，その減衰量を初期条件の最大振れ幅から計算すると  $0.5$  割未満であり，計測への影響は極めて小さいことを明らかとした．

次に，透視度による評価をした．濁度  $100\text{ mg/L}$  以上のときは，透視度計で計測した場合は約  $10\text{ cm}$  以下であることが確認できた．従って，透視度計を使用する場合，透視度約  $10\text{ cm}$  以下のときは，最大振れ幅が低下する可能性があるため水中超音波計測を避ける必要があることを明らかとした．

## 6 章 摩耗模型水理実験による粗度係数推定式の開発

### 6.1 実験概要

#### 6.1.1 実験水路

#### 6.1.2 水深計測

#### 6.1.3 超音波センサ

#### 6.1.4 粗度係数計測手順

### 6.2 粗度係数計測結果

#### 6.2.1 滑面

#### 6.2.2 粗面 1

#### 6.2.3 粗面 2

#### 6.2.4 発泡 1

#### 6.2.5 発泡 2

#### 6.2.6 発泡 3

### 6.3 粗度係数推定式の作製

## 6 章 摩耗模型水理実験による粗度係数推定式の開発

農業用水路の通水性能を示す指標には，マンニングの平均流速公式中の粗度係数  $n$  が一般的に用いられており，水路補修の判断にも用いられている．

粗度係数  $n$  は材質や表面の状態に起因し，その一覧は Chow (1959) によってまとめられている．しかし，1.5 節に示すように，現場水路で粗度係数を正確に計測することは困難である．

中矢ら (2008) は，コンクリート水路摩耗模型実験水路で測定した粗度係数から，レーザ変位計で測定した算術平均粗さ  $R_a$ ，最大高さ  $R_y$  と相当粗度  $k_s$  の関係式を提案した．しかし，検討に用いた摩耗模型パネルは算術平均粗さが  $0.5 \text{ mm}$  ( $\sigma = 0.12 \text{ mm}$ ) の 1 パターンであるため，追加での実験が必要である．

また，中矢ら (2008) は足立 (1964) による栈粗度の研究では，栈の高さが同じであっても栈高さと栈間隔の比が  $10 \sim 20$  程度のときに粗度が最大になることが示されている．このように同じ栈の高さであっても，粗度係数は変化するため，摩耗したコンクリート表層において同じ  $R_a$  や  $R_y$  であっても粗度係数が異なることが予想される，と報告している．

本章では，複数の摩耗模型パネルを用いて水理実験から粗度係数の計測を行う．そして，得られた粗度係数と超音波計測による最大振れ幅との関係を明らかにすることで， $R_a$  や  $R_y$  から計算した相当

粗度を經由することなく，直接的に粗度係数を計測するための関係式の構築を行った。

## 6.1 実験概要

### 6.1.1 実験水路

実験で用いた水路は三重大学内生物資源学部，水理実験施設内に設置されたものである．

本論のために設計を行った．実験水路は2015年2月に完成した．全長約19mで，調整水槽を備え，勾配無しの14m矩形断面水路，排水槽で構成されている（Fig. 6-1）．

#### ① 調整水槽

調整水槽は計測区間である水路に水を滑らかに送るための整流作用を備えた装置である．大きさは長さ2.4m，幅1.2m，高さ1.2mである．整流作用とは水の持つエネルギーを減衰させることで水面の波うちを抑制することである．計測区間で水面の波たちが荒れていると，計測の誤差につながるため，重要な区間である．Fig. 6-2にもぐり堰通過前後の水面の荒れ具合を示す．

設計において，金子ら（2008）の流水水槽の製作を参考にし，パンチングメタルを4枚調整水槽に設置した．パンチングメタルは流化方向に向かって穴の直径が $\phi 2\text{mm}$ ， $\phi 4\text{mm}$ ， $\phi 6\text{mm}$ ， $\phi 8\text{mm}$ のパンチングメタルをそれぞれ使用した．透過率の違いが制限要因とならないように，すべてのパンチングメタルの透過率を51%に揃えた．さらに整流作用を増すため設置したパンチングメタルの間に，ヘチマロンを挿入した．ヘチマロンとは乾燥させたヘチマのように空隙を多く持った構造をしている．主に土木用の排水

材料などに用いられる。ヘチマロンを通過することでさらに流下した水はエネルギーを失い、波たちが抑えられる。

水槽に流れこんだ水はもぐり堰を越え、パンチングメタル、ヘチマロンを通り整流される。最後に調整水槽から水路への導流部にはカーブをつけることで、導流部で波が立つことを抑えた。また、調整水槽に溜まった水を排水させるために水槽後部の下部にφ80mmのホースをつなぐことが出来るニップルを備え付けた。

## ② 水路計測部

水路本体は、幅600mm、高さ450mmである。厚さ50mmの摩耗模擬コンクリートパネルを設置するため、実際に流れる断面は、幅500mmとなる。これは想定される実験パターンのうち最も水深が高くなる流量60l/s、フルード数0.2程度の水理条件でも水があふれない断面である。

## ③ 摩耗模擬コンクリートパネル

摩耗模擬パネルの製作方法は3.1節と同様である。しかし、粗さとパネルサイズが異なる。1つ目は、滑面のものである。2つ目は、細骨材の剥離程度を再現したものである（粗面1と呼ぶ）。3つ目は、粗骨材の剥離程度を再現したものである（粗面2と呼ぶ）。粗骨材の最大寸法は20mmで、配合設計をTable 6-1に示す。コンクリートパネルの寸法は側壁パネルで幅450mm、長さ1000mm、厚さ50mmである（Fig. 6-4）。底板で幅490mm、長さ1000mm、厚さ50mmである（Fig. 6-5）。質量は約56kg

であった． 14m の水路に隙間なく敷設するため， 1 種類につき側壁  
コンクリートパネルを左右併せて 28 枚， 底板コンクリートパネル  
は 14 枚作製した．

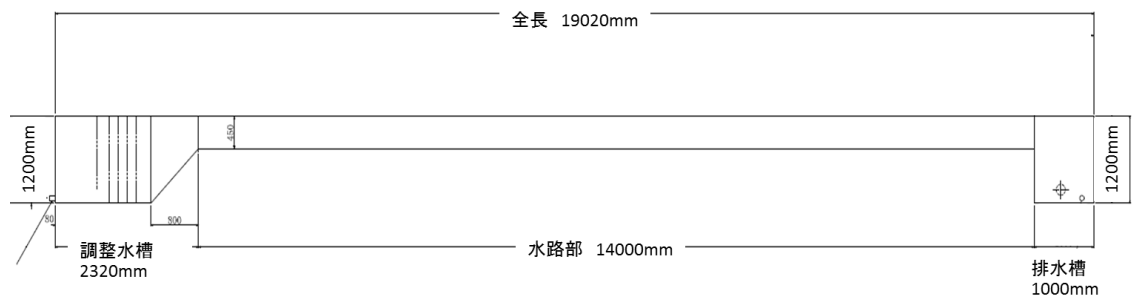


Fig. 6- 1 実験水路概要図

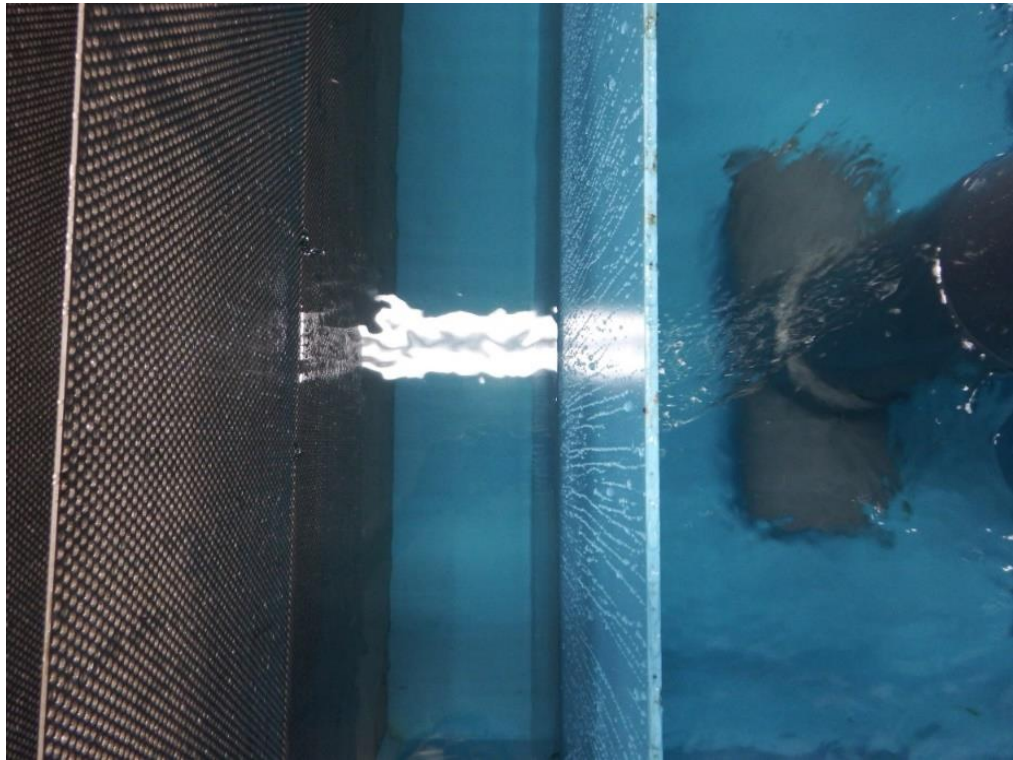


Fig. 6- 2 調整槽の整流作用



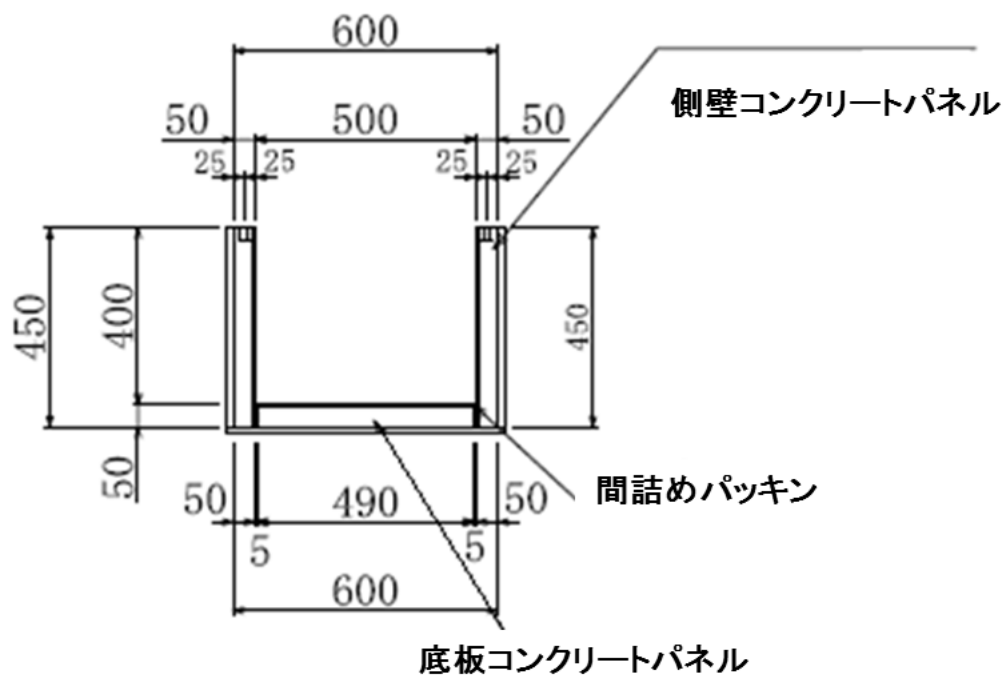


Fig. 6-3 水路断面正面図 (単位 mm)

Table 6-1 コンクリートパネルの配合設計

配合記号	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量 (%)	単位水量 W (kg)	単位セメント量 C (kg)	水セメント比 W/C (%)	絶対細骨材材料 S/a (%)	単位細骨材量 S (kg)	単位粗骨材量 G (kg)	単位混和剤量  (CC または g)
								砂	碎石 20~5 mm	
30-18-20N	20	18.0 ±2.5	—	173	372	46.5	46.3	829	1014	2.900



Fig. 6- 4 使用したコンクリートパネル例（粗面1側壁）



Fig. 6- 5 使用したコンクリートパネル例（粗面1底板）

### 6.1.2 水深計測

ポイントゲージや容量式波高計といった接触型センサでは波の影響や、センサ自体が流れに影響を与える可能性があるため、非接触型であるレーザ変位計を用いた。記録はメモリハイロガー（日置電機株式会社）を使用した。

#### ① レーザ変位計

IL-600（株式会社キーエンス）は、基準距離が 600 mm、計測距離が 200 mm~600 mm となっている（Fig. 6- 6）。フルスケール誤差は±0.25%である。繰り返し精度 0.05 mm であった。水はレーザーを透過する性質がある。そのため、レーザー式変位計による水面形の計測の際に、レーザー光を反射するため、厚さが 0.02 mm の農業用マルチを流した。マルチを流すときは流れに影響を与えないように気を付けた。水面とマルチの摩擦、背面堰上げ、マルチの気泡を考慮し、可能な限り水面への影響を排除した。アンプユニットには IL-1000（株式会社キーエンス）を使用した（Fig. 6- 7）。



Fig. 6- 6 IL-600 センサヘッド



Fig. 6- 7 IL-1000 アンプユニット

### 6.1.3 超音波センサ

① 空中超音波センサ : LV-EZ1 (MaxBotix. inc)

2.3 節参照.

#### 6.1.4 粗度係数計測手順

マニングの平均流速公式から粗度係数を算出する場合は，上下流の水深を計測し，水面勾配を計算することで求めた．実験手順は以下の通りである．

1. コンクリートパネルを実験水路に設置した．
2. レーザ式変位計およびポイントゲージを実験水路に設置した．設置位置は調整水槽から 2.5 m 位置 ( $h_1$ )，10.5 m 位置 ( $h_2$ ) である．これは上流の乱れ，および下流の堰上げ背水の影響を小さくするため，中央部を計測区間としたためである．
3. コンクリートパネルが粗面の場合，計測機器の 0 セットをするためにコンパネを計測機器の直下にぐらつかないように置き，そのコンパネの高さをゼロ位置とした．この時，使用したコンパネの厚さをノギスにより計測した．
4. 実験水路に水を流し，水が安定するまで 30 分ほど待った．特に流量が 50 l/s を越えるときはポンプを 2 台稼働した．
5. 流量と水面が安定したら，電磁流量計から流量を，ポイントゲージを用いて水深を計測した．
6. データロガーの記録は，サンプリング間隔 0.01 s，電圧レンジ -5 v から +5 v の 10 v である．
7. 上流部からマルチを流し，水面位置の計測を行った．マルチがセンサを通過した時の記録開始からの経過時間を記録した．これを 3 回繰り返した．
8. 流量を 60 (1/s) から 10 (1/s) まで 5 (1/s) ずつ変えて 7. の計測を行った．

9. 全ての計測箇所を計測後に、データロガーの計測を終了した。  
以下はデータ整理の方法である。
10. 生データは波形データとして保存されているので HIOKI ロガーユーティリティーをとおして、CSV 形式で再度保存した。  
この際、経過時間は相対時間表示、データの分割はなしにして保存した。
11. Excel を用いて、実験の際に記録した経過時間から電圧データを読み取った、各計測それぞれに 100 個程度の水面変動値の平均を計算し、3 回の計測の平均を各流量で計算した。
12. ポイントゲージで計測した水深  $h_i$  とその時の流量におけるレーザ式変位計の電圧データを初期値とした。流量変化後の計測における電圧データと初期値の電圧データの差  $\Delta v$  に校正係数  $\alpha$  を乗じることにより初期値の水深からの差を計算し、水深  $h_{i+1}$  を計算した。また、粗面パネルの場合はコンパネの厚さ  $\beta$  を加えた。式に表すと以下の式(6-1)の通りである。

$$h_{i+1} = \Delta v \times \alpha + h_i + \beta \quad (6-1)$$

13. 以下の式(6-2)からエネルギー勾配を算出した。

$$I_e = \frac{\left\{ \left( \frac{v_1^2}{2g} \right) + h_1 \right\} - \left\{ \left( \frac{v_2^2}{2g} \right) + h_2 \right\}}{L} \quad (6-2)$$

14. マニングの平均流速公式から粗度係数を算出した。

次に不等流水面形計算による粗度係数の算出方法について説明する。水面形の計測は，下流端から 1 m の範囲内では 0.1 m ごとに，1 m~2 m までの範囲では 0.2 m ごとに，それ以降は 1 m ごとに行った。これは下流端から 2 m までの範囲においては，水面の変化が大きいため，計測箇所を増やしたためである。実験手順は以下の通りである。

1. レーザ式変位計およびポイントゲージを移動式の台座に据え，実験水路に設置した。上記の計測位置に設置した。
2. コンクリートパネルが粗面の場合，計測機器のゼロセットをするためにコンパネを計測機器の直下にぐらつかないように置き，そのコンパネの高さをゼロ位置とした。この時，使用したコンパネの厚さをノギスにより計測した。
3. 実験水路に水を流した。特に流量が 50 l/s を越えるときはポンプを 2 台稼働した。
4. データロガーの記録をスタートした。
5. 流量と水面が安定したら，ポイントゲージを用いて水深を計測した。
6. 上流部からマルチを流し，水面位置の計測を行った。マルチがセンサを通過した時の，記録開始からの経過時間を記録した。これを 3 回行った。
7. ある計測箇所の計測を終えたら，次の計測箇所に台座を移動させ，同様にマルチを流し計測を行った。
8. 全ての計測箇所を計測後に，データロガーの計測を終了させた。



以下はデータ整理の方法である。

9. 生データは波形データとして保存されているので HIOKI ロガーユーティリティソフトをとおして、CSV 形式で再度保存した。この際、経過時間は相対時間表示、データの分割はなしにして保存した。
10. Excel を用いて、実験の際に記録した経過時間から電圧データを読み取った、各計測それぞれに 100 個程度の水面変動値の平均を計算し、3 回の計測の平均を各流量で計算した。
11. 式(6-1)を用いて、計測水深  $h_0$  を算定した。
12. Excel の散布図グラフ作成機能を用いて水面形を描いた。横軸に距離、縦軸に水深とした。
13. ルンゲ・クッタ法を用いて、不等流水面形の計算を行った。水面形の計算式は以下の式(6-3)である。この時、Excel の演算機能を用いたため小数点以下の処理を円滑にするため長さの単位を(mm)で計算した。

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i_b - \frac{n^2 Q^2}{R^3 b_2 h_2}}{1 - \frac{Q^2}{g b^2 h_2}} \quad (6-3)$$

ここで、 $n$ : マニングの粗度係数、 $Q$ : 流量 ( $\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$ )、 $R$ : 径深 (mm)、 $i_b$ : 水路床勾配、 $b$ : 水路幅 (mm)、 $h$ : 水深 (mm)、 $g$ : 重力加速度 ( $\text{mm s}^{-2}$ )

14. 粗度係数を 0.00001 刻みで変更しつつ  $\chi^2$  誤差 E を以下の式 (6-4) にしたがって計算した.

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^n \frac{(h_{0,i} - h_{c,i})^2}{h_{0,i}} \quad (6-4)$$

ここで,  $N$ : データ数,  $h_{0,i}$ : 計測水深 (mm),  $h_{c,i}$ : 計算水深 (mm)

15.  $\chi^2$  誤差が最小となったときの粗度係数を実測した水面形の粗度係数とした.

## 6.2 粗度係数計測結果

### 6.2.1 滑面

粗度係数の計測は上下流の水面勾配から計算するマンニングの平均流速公式と、不等流水面形の計算の2通りで行った。平均流速公式から算出した粗度係数および、フルード数の関係を **Fig. 6-8** に示す。

**Fig. 6-8** より、フルード数が大きくなるにつれて、一定値に漸近していくことがわかった。土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」によると「一般に同一の材質で作られた水路で比較すれば、流速が極めて小さい場合や径深が小さくなる場合は、粗度係数が大きくなる傾向にある」と明記されている。また長谷川ら（2015）は「模型実験により粗度係数を推定する際には、事前に使用する実験水路において、粗度係数とフルード数との関係を明確にしておくことが重要であるといえる。」と報告している。本論で使用する水路においても適切な水理条件を考慮して実験を行う必要がある。

低流速帯では下流の堰上げの影響を強く受けることが一因と考えられる。マンニングの平均流速公式は等流の時に成り立つ式であるが、下流の堰上げにより水深が等流水深よりも大きくなった。その結果、水路の流れは等流と近似できず、粗度係数が過大になってしまった可能性が考えられる。また、流速が速い時は、等流に近い状態を再現できるため、その水路における粗度係数を表していると考えられる。

従って、本論でもちいた三重大大学の実験水路ではフルード数 0.4 以上で等流に近い流れとなり正確な粗度係数が計測できることがわかった。この時の粗度係数を滑面パネル設置時の粗度係数とした結果、平均で 0.0108、その偏差は 0.000556 であった。これはコンクリート水路の標準値である 0.012～0.016 の下限に近く、供用直後のコンクリート水路の通水性能を表せた。

また、通常の農業用開水路のフルード数は 0.2～0.7 であるので、三重大大学の実験水路はこの範囲内で粗度係数を正確に測りうることがわかった。

水面形を Fig. 6- 9, Fig. 6- 10 に示す。水面形の形はどちらも一般的な低下背水曲線を表していた。各水面形の計測結果から、不等流水面形の計算をルンゲクッタ法により行い、 $x^2$  誤差  $E$  が最も小さくなる粗度係数を求めた。計測条件は刻み幅 0.1 m、下流端水深はフルード数が 1 以下となった地点の水深  $m$  である。

$x^2$  誤差  $E$  が最小となる粗度係数を算出した。その結果、滑面水面形 1 で粗度係数が 0.0104、滑面水面形 2 で粗度係数が 0.0109 の時  $x^2$  誤差  $E$  が最小となった。よって水面形により得られた粗度係数とマンニングの平均流速公式から得られた粗度係数はほぼ等しいことがわかった。

以上のことから本論で用いた実験水路においては、フルード数が 0.4 以上の時、マンニングの平均流速公式で算出した粗度係数がその実験水路の通水性能を表していることがわかった。

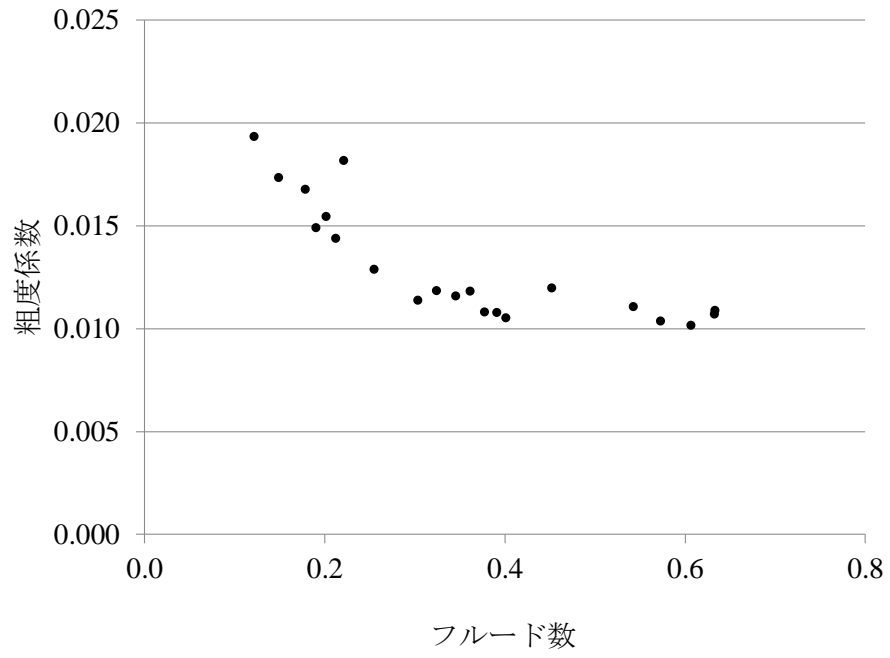


Fig. 6-8 粗度係数とフルード数の関係（滑面）

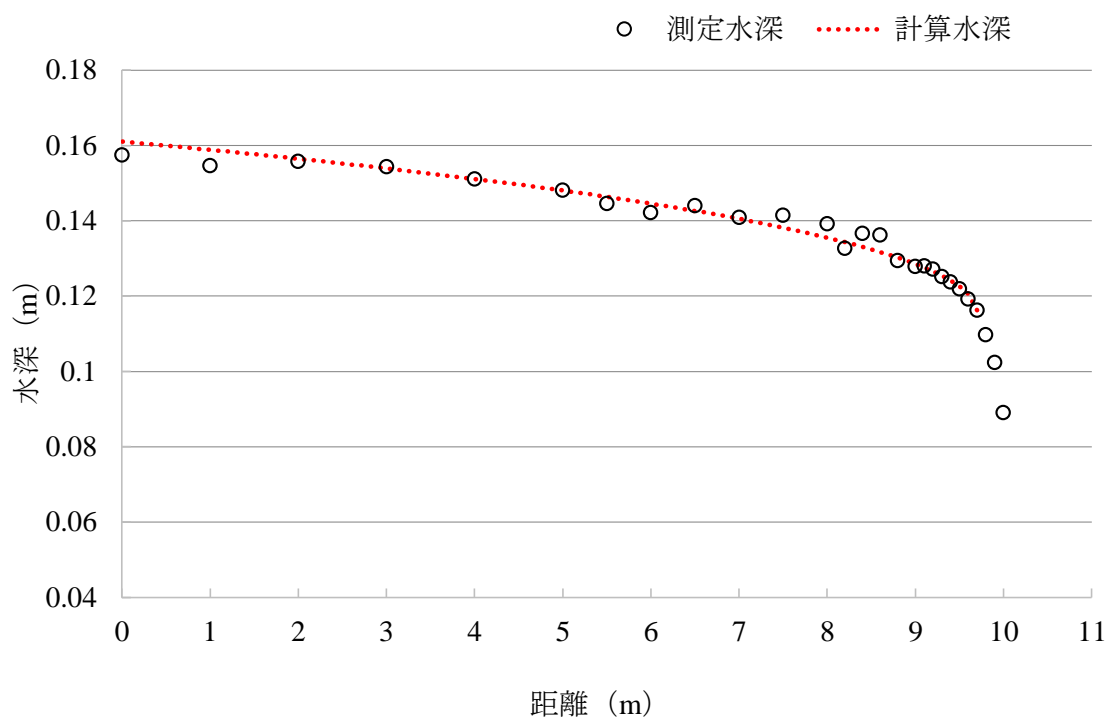


Fig. 6- 9 滑面の水面形①

Table 6- 2 水面形①の  $\chi^2$  誤差

粗度係数	$\chi^2$ 誤差 E
0.0101	0.0000315
0.0102	0.0000299
0.0103	0.0000290
0.0104	0.0000287
0.0105	0.0000292
0.0106	0.0000303
0.0107	0.0000321
0.0108	0.0000346
0.0109	0.0000377

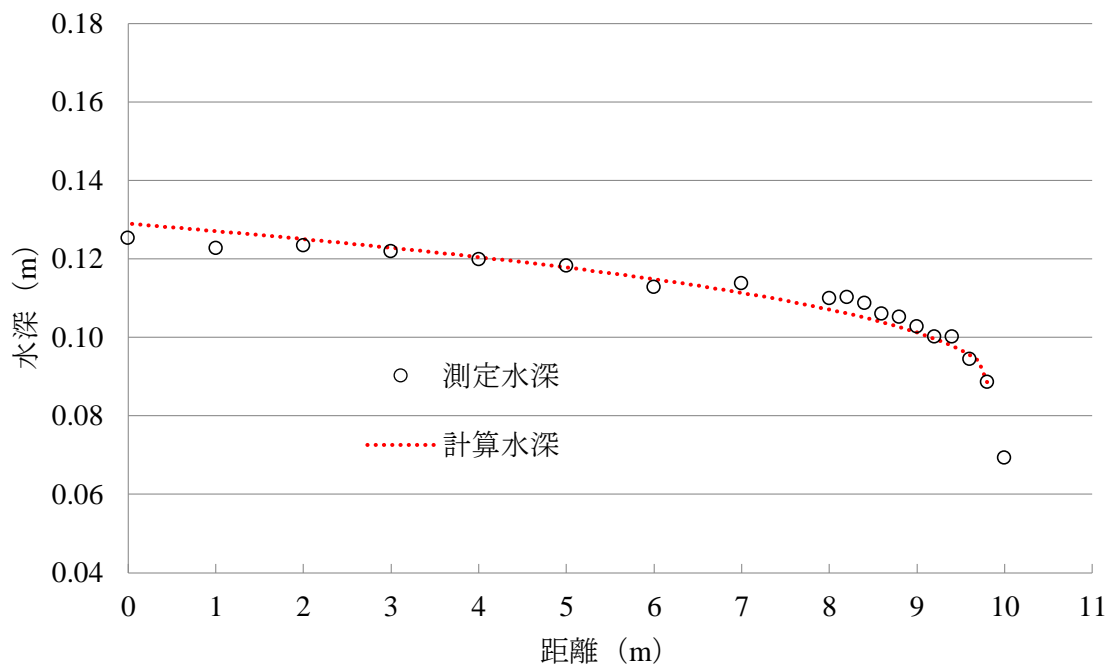


Fig. 6- 10 滑面の水面形②

Table 6- 3 水面形②の  $\chi^2$  誤差

粗度係数	$\chi^2$ 誤差 E
0.0105	0.05521
0.0106	0.05288
0.0107	0.05133
0.0108	0.05055
0.0109	0.05054
0.0110	0.05129
0.0111	0.05282
0.0112	0.05511
0.0113	0.05817

### 6.2.2 粗面 1

平均流速公式から算出した粗度係数とフルード数の関係を **Fig. 6- 8** に示す.

粗面 1 パネルを設置した場合, フルード数にかかわらずほぼ一定の値となった. これは背面堰上げによる流れへの影響よりも, 水路壁面の摩擦損失項が過大であることが原因の一つであると考えられる. 滑面パネルの時と同様にフルード数が 0.4 以上になった時の粗度係数を粗面 1 パネル設置時の実験水路の粗度係数とすると, 平均 0.0148, 標準偏差 0.000175 となった. これはコンクリート水路の標準値の範囲内の値である.

粗面 1 の水面形を **Fig. 6- 12**, **Fig. 6- 13** に示す. 2 つの水面計は一般的な低下背水曲線を表していた. 各水面形の計測結果から, 不等流水面形の計算をルンゲクッタ法により行い,  $x^2$  誤差  $E$  が最も小さくなる粗度係数を求めた. 計測条件は刻み幅 0.1 (m), 下流端水深はフルード数が 1 以下となった地点の水深(m)である.  $x^2$  誤差  $E$  が最小となる粗度係数を算出した. その結果, 粗面 1 水面形 1 で粗度係数が 0.0136, 粗面 1 水面形 2 でも粗度係数が 0.0136 の時  $x^2$  誤差  $E$  が最小となった. したがって, 粗面 1 パネルを設置した時の水面形から得た粗度係数は 0.0136 である.

マニング式より得た粗度係数の平均が 0.0148 であるため, 水面形から算定した粗度係数と一致しなかった. この原因に考えられたのが, 流量計測の誤差である. 調整水槽に送られた水に多数の気泡



が含まれていた。地下水槽から揚水する際に、十分に水が地下水槽に貯まっていなかったため気泡が揚水した水に気泡が含まれてしまった。電磁流量計はファラデーの電磁誘導に基づき流量を計測している。電磁流量計の管内を流れる水の流速に比例して起電力が生じ、この起電力を計測することで流速を計算し、流速と電磁流量計の管径から流量を計測している。そのため電磁流量計を通る液体に空気が混じると起電力が小さくなり、確かな流量を計測できなかった可能性がある。

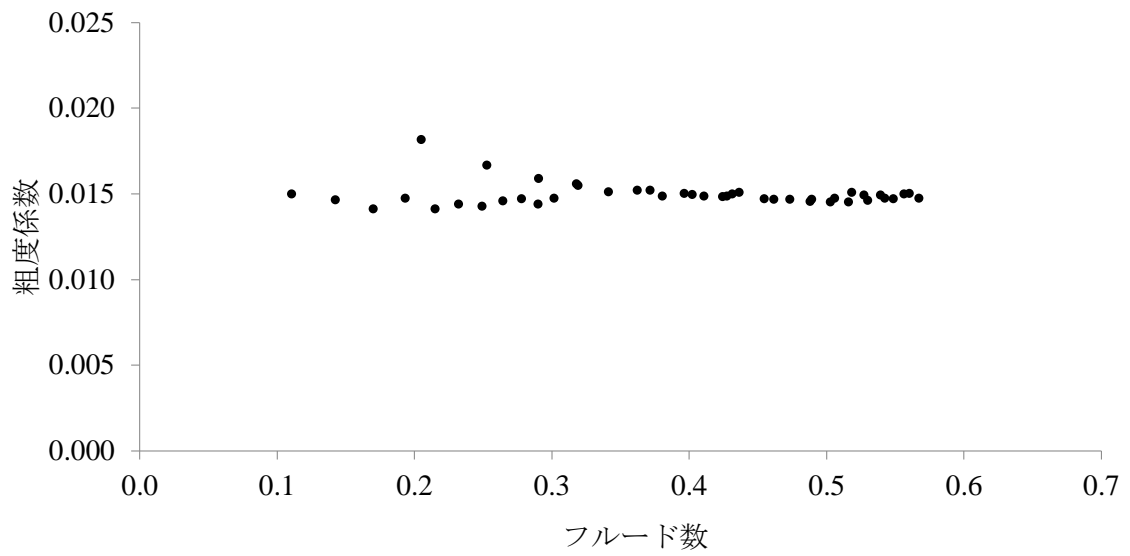


Fig. 6- 11 粗度係数とフルード数の関係（粗面 1）

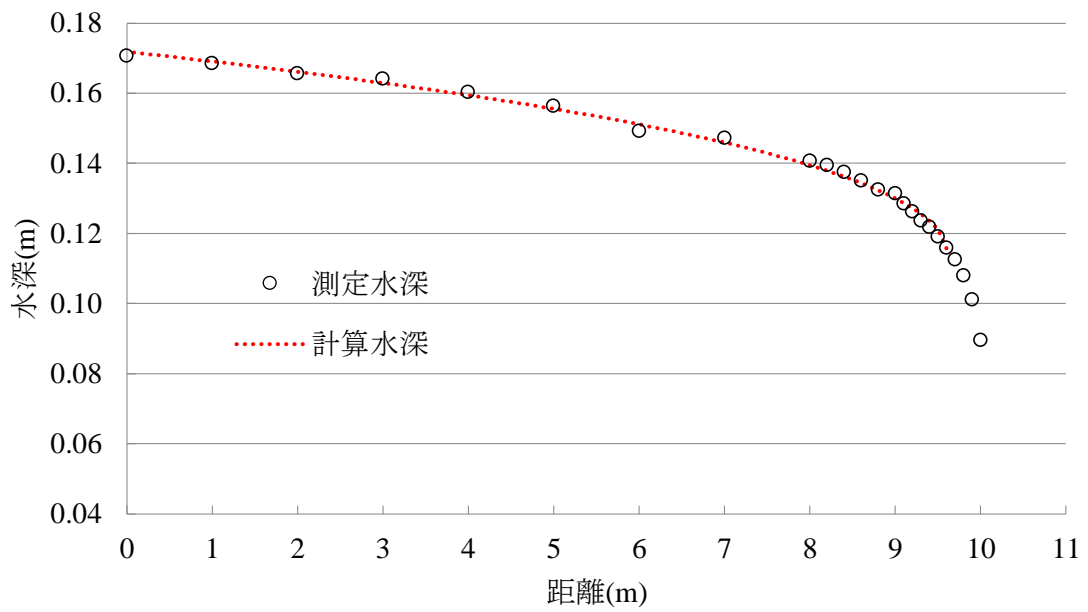


Fig. 6- 12 粗面 1 の水面形 ①

Table 6- 4 粗面 1 の水面形 ① の  $\chi^2$  誤差

粗度係数	$\chi^2$ 誤差 E
0.0132	0.01663
0.0133	0.01442
0.0134	0.01282
0.0135	0.01185
0.0136	0.01150
0.0137	0.01177
0.0138	0.01265
0.0139	0.01415
0.0140	0.01627

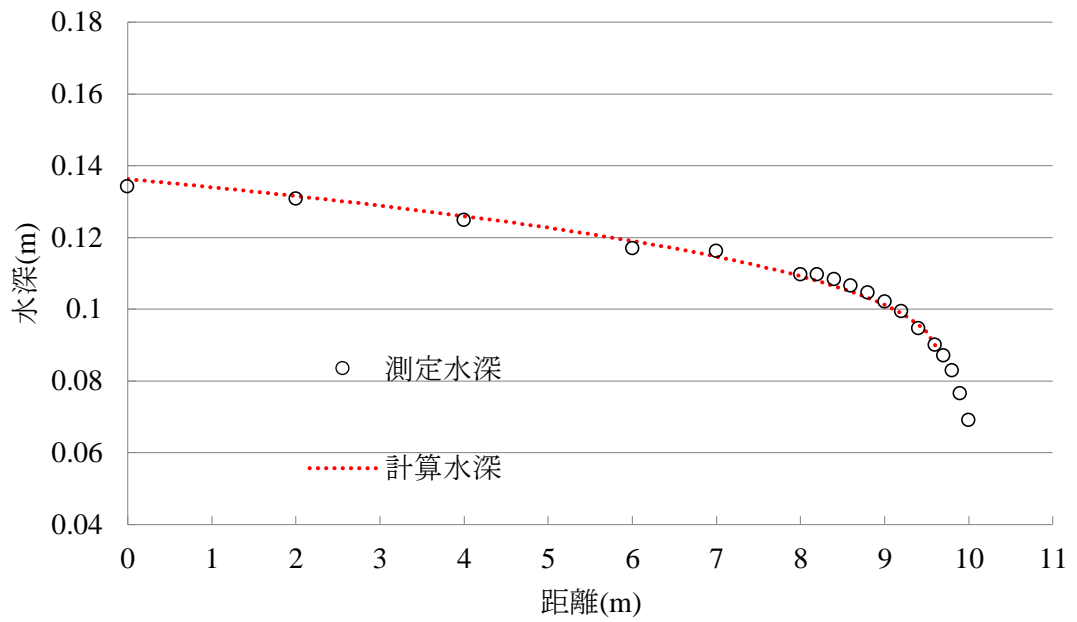


Fig. 6- 13 粗面 1 の水面形 ②

Table 6- 5 粗面 1 の水面形 ② の  $\chi^2$  誤差

粗度係数	$\chi^2$ 誤差 E
0.00132	0.019664
0.00133	0.018121
0.00134	0.017085
0.00135	0.016555
0.00136	0.016529
0.00137	0.017005
0.00138	0.017982
0.00139	0.019457
0.00140	0.021430

### 6.2.3 粗面 2

平均流速公式から算出した粗度係数とフルード数の関係を **Fig. 6- 14** に示す.

粗面 2 パネルを設置した場合, 粗面 1 パネル同様にフルード数にかかわらずほぼ一定の値となった. フルード数が 0.4 以上となった時の粗度係数を粗面 2 パネル設置時の模型水路の粗度係数とすると, 平均で 0.0162, 標準偏差 0.000148 となった. コンクリートの設計標準値の上限を超えており, 粗面 2 パネルを設置した実験水路は通水性能が阻害された不健全な水路を再現できた.

粗面 2 の水面形を **Fig. 6- 15**, **Fig. 6- 16**, **Fig. 6- 17** に示す. 各水面形の計測結果から, 不等流水面形の計算をルンゲクッタ法により行い,  $x^2$  誤差  $E$  が最も小さくなる粗度係数を求めた. 計算によって得られた水面形と  $x^2$  誤差  $E$  の計算結果を以下に示す. 計測条件は刻み幅 0.1 m, 下流端水深はフルード数が 1 以下となった地点の水深  $m$  である.

計測したすべての水面形は一般的な低下背水曲線を表していた.  $x^2$  誤差  $E$  が最小となる粗度係数をそれぞれ算出した. その結果, 粗面 2 水面形 1 で粗度係数が 0.0149, 粗面 2 水面形 2 で粗度係数が 0.0159. 粗面 2 水面形 3 で粗度係数が 0.0159 となった. 3 つの結果を平均すると 0.0155 となり, 平均流速公式から得られた粗度係数と近い値になった.

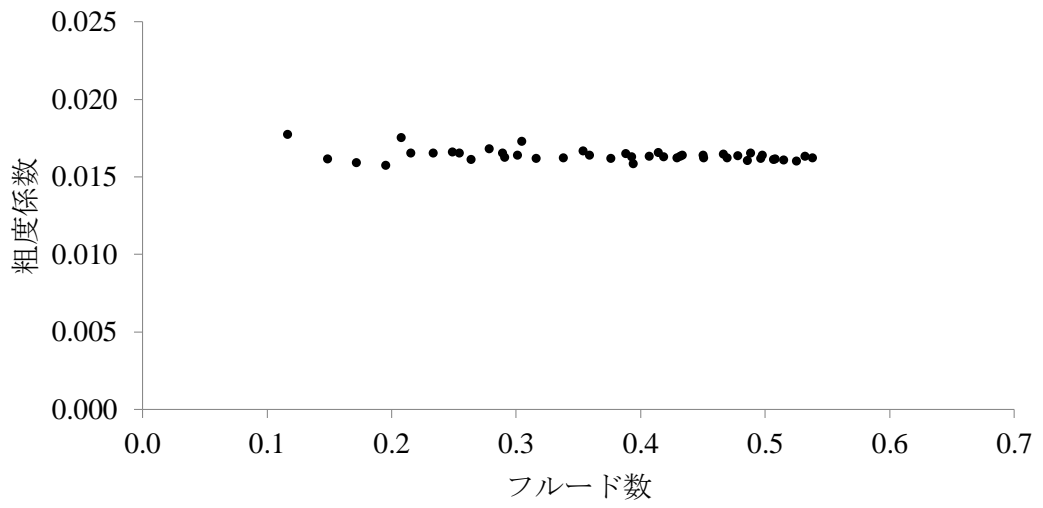


Fig. 6- 14 粗度係数とフルード数の関係（粗面2）

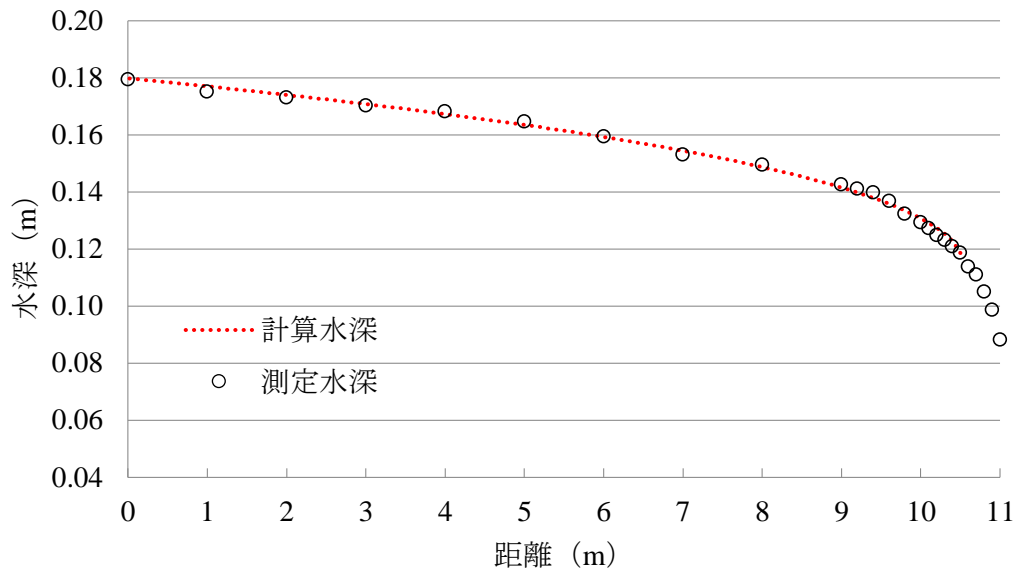


Fig. 6- 15 粗面 2 の水面形 ①

Table 6- 6 粗面 2 の水面形 ① の  $\chi^2$  誤差

粗度係数	$\chi^2$ 誤差 E
0.0145	0.01920
0.0146	0.01681
0.0147	0.01504
0.0148	0.01391
0.0149	0.01339
0.0150	0.01351
0.0151	0.01424
0.0152	0.01559
0.0153	0.01756

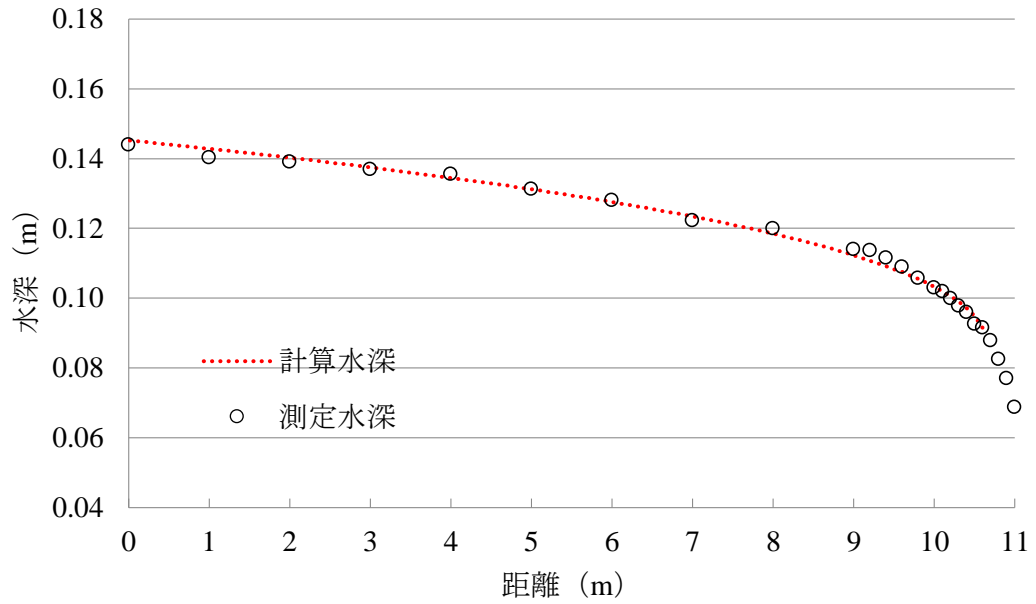


Fig. 6- 16 粗面 2 の水面形 ②

Table 6- 7 粗面 2 の水面形 ② の  $\chi^2$  誤差

粗度係数	$\chi^2$ 誤差 E
0.0155	0.02174
0.0156	0.01999
0.0157	0.01875
0.0158	0.01802
0.0159	0.01782
0.0160	0.01813
0.0161	0.01895
0.0162	0.02028



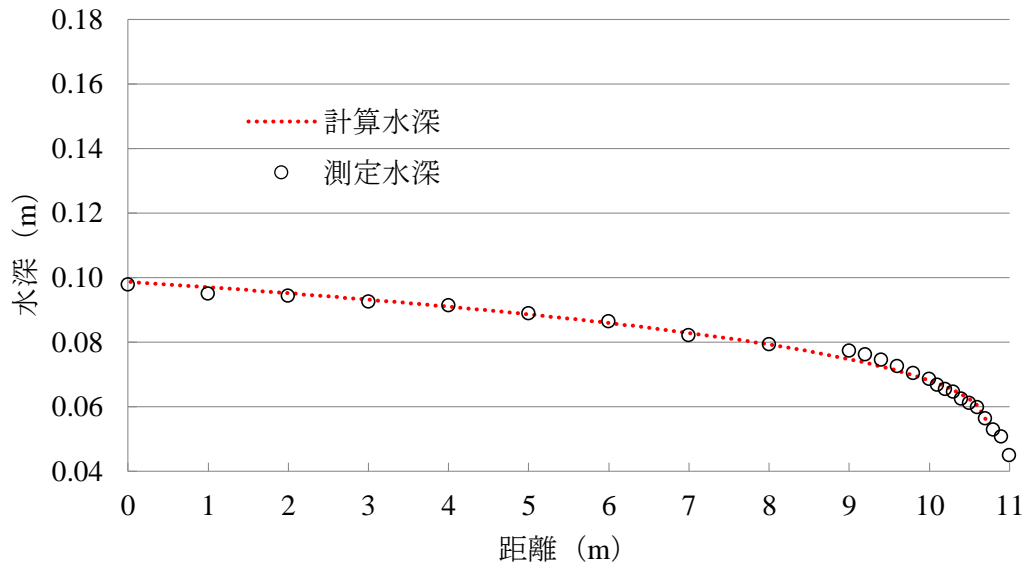


Fig. 6- 17 粗面 2 の水面形 ③

Table 6- 8 粗面 2 の水面形 ③ の  $\chi^2$  誤差

粗度係数	$\chi^2$ 誤差 E
0.0155	0.02312
0.0156	0.02170
0.0157	0.02068
0.0158	0.02007
0.0159	0.01985
0.0160	0.02004
0.0161	0.02063
0.0162	0.02162
0.0163	0.02300

#### 6.2.4 発泡 1

これまでの研究では，コンクリートパネルを粗度係数推定式に採用していたが，コンクリートパネルでは，パネル 42 枚で表面粗さが異なるため，算術平均粗さの標準偏差大きく，最大で 24% のばらつきがあった．つまり，パネル毎で 42 通りの粗度係数が発生していると考えられた．さらに，最も粗いパネルの粗度係数が 0.0162 と，これ以上の粗度係数を計測できていない．

そこで，発泡スチロールパネルに着目をして実験を行った．着目したパネルは，化粧型枠の表面形状は規格化されていてパネル毎で全く表面形状が同じである．さらに，最も粗い TSS-8 パネルは粗さ面の最大凹凸高さは 16mm と，遅延剤を用いたコンクリートパネルの作成方法では再現できない粗さを作ることができ，大きい粗度係数が期待できる．発泡スチロール製パネルには，住理工商事株式会社製のモールドスター TSS シリーズを使用した．パネルは 3 種類の粗さで，TSS-8，TSS-51，TSS-70 を使用した．**Table 6-9** に，各発泡スチロールパネルの最大凹凸高さ，打増体積を示す．

**Table 6-9** 発泡パネルの最大凹凸高さ と 打増体積

発泡パネル	最大凹凸高さ (mm)	打増体積 ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ )
TSS-8	16.0	0.0096
TSS-51	6.0	0.0017
TSS-70	8.8	0.0047



Fig. 6- 18 TSS-8 写真

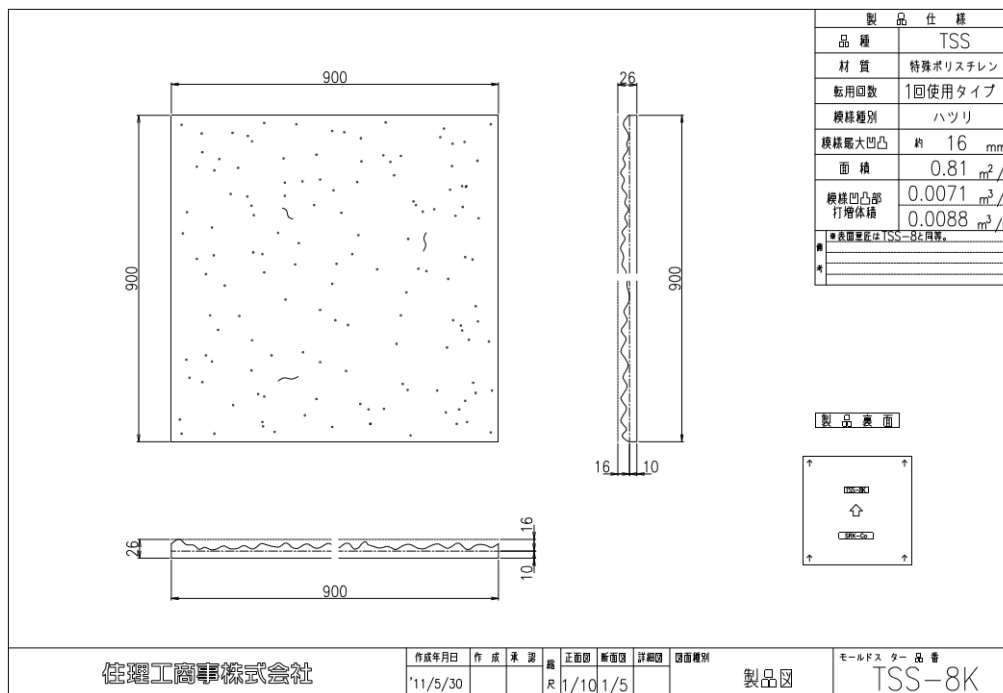


Fig. 6- 19 TSS-8 仕様



Fig. 6- 20 TSS-51 写真

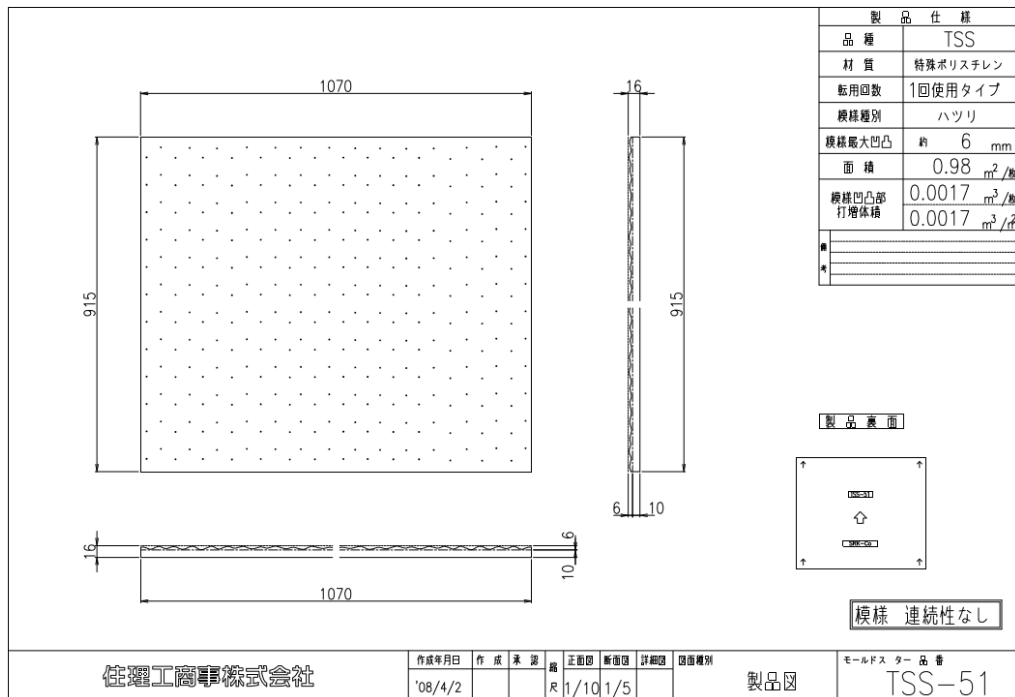


Fig. 6- 21 TSS-51 仕様



Fig. 6- 22 TSS-70 写真

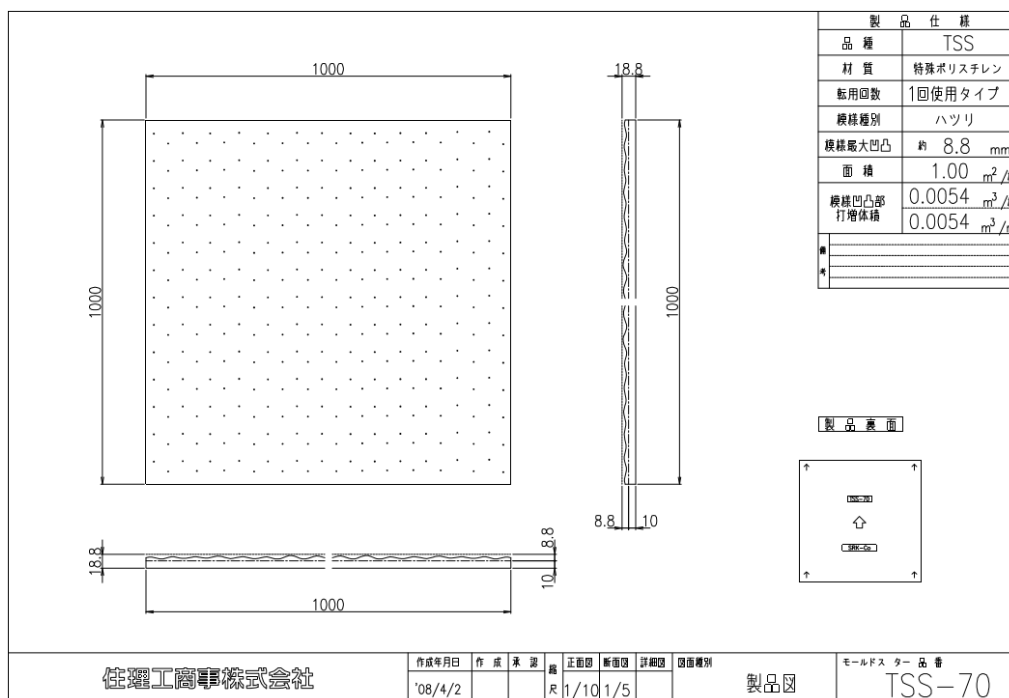


Fig. 6- 23 TSS-70 仕様

発泡パネルを使用した実験では，マニングスの平均流速公式による粗度係数の計測を行った．発泡 TSS-8 を設置した際の水理模型実験における粗度係数とフルード数の関係を **Fig. 6- 24** に示す．

発泡 TSS-8 パネルを設置した水理模型実験ではフルード数にかかわらずほぼ一定の値を得られた．これは背面堰上げによる流れへの影響よりも，水路壁面の摩擦損失項が過大であることが原因の一つであると思われる．滑面パネルの時と同様にフルード数が 0.4 以上になった時の粗度係数を粗面 1 パネル設置時の実験水路の粗度係数とすると，平均 0.0206，標準偏差 0.000199 となった．

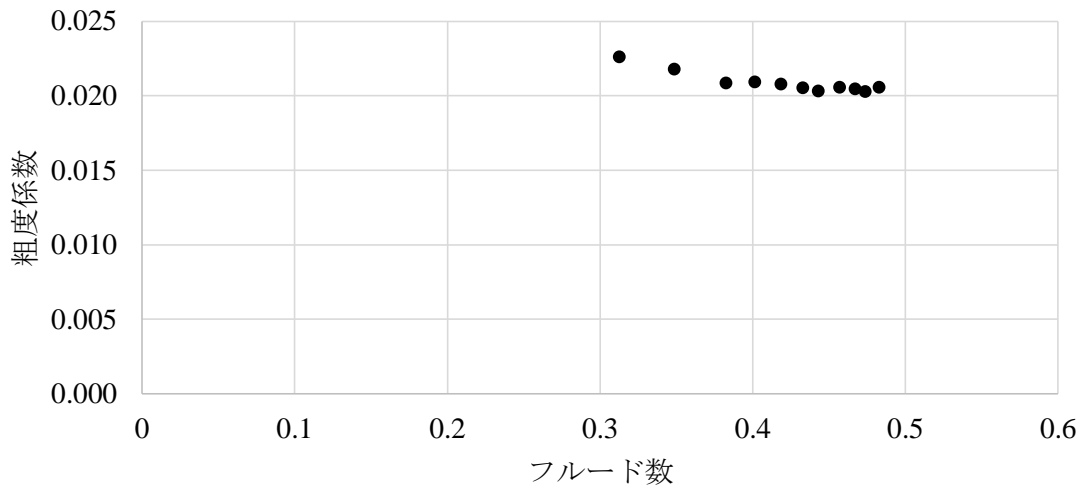


Fig. 6- 24 粗度係数とフルード数の関係 (TSS-8)



### 6.2.5 発泡 2

発泡 TSS-51 を設置した際の水理模型実験における粗度係数とフルード数の関係を Fig. 6-25 に示す。

発泡 TSS-51 パネルを設置した水理模型実験ではフルード数にかかわらずほぼ一定の値を得られた。これは背面堰上げによる流れへの影響よりも、水路壁面の摩擦損失項が過大であることが原因の一つであると思われる。滑面パネルの時と同様にフルード数が 0.4 以上になった時の粗度係数を発泡 TSS-51 パネル設置時の実験水路の粗度係数とすると、平均 0.0141、標準偏差 0.00035 となった。

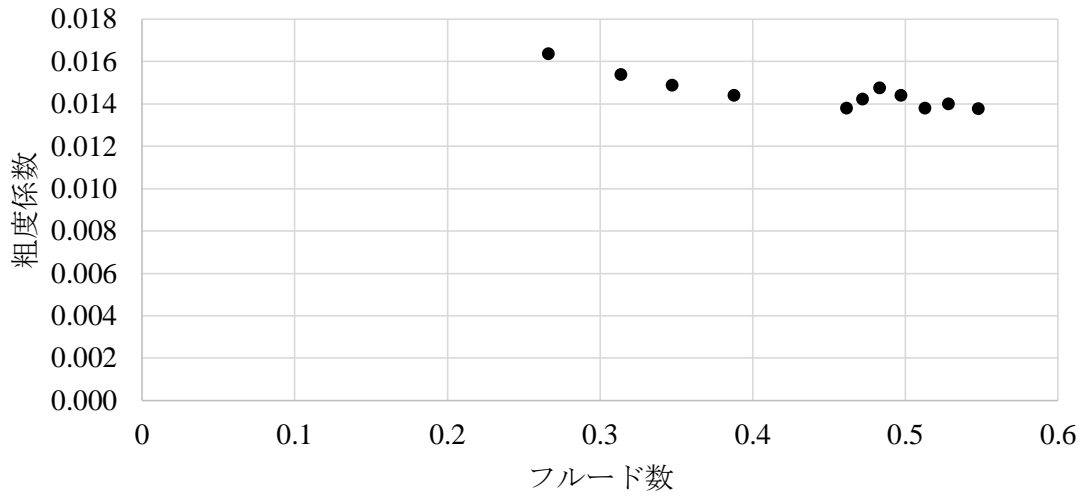


Fig. 6- 25 粗度係数とフルード数の関係 (TSS-51)

### 6.2.6 発泡 3

発泡 TSS-70 を設置した際の水理模型実験における粗度係数とフルード数の関係を **Fig. 6- 26** に示す.

発泡 TSS-70 パネルを設置した水理模型実験ではフルード数にかかわらずほぼ一定の値を得られた. これは背面堰上げによる流れへの影響よりも, 水路壁面の摩擦損失項が過大であることが原因の一つであると思われる. 滑面パネルの時と同様にフルード数が 0.4 以上になった時の粗度係数を発泡 TSS-70 パネル設置時の実験水路の粗度係数とすると, 平均 0.0166, 標準偏差 0.000311 となった.

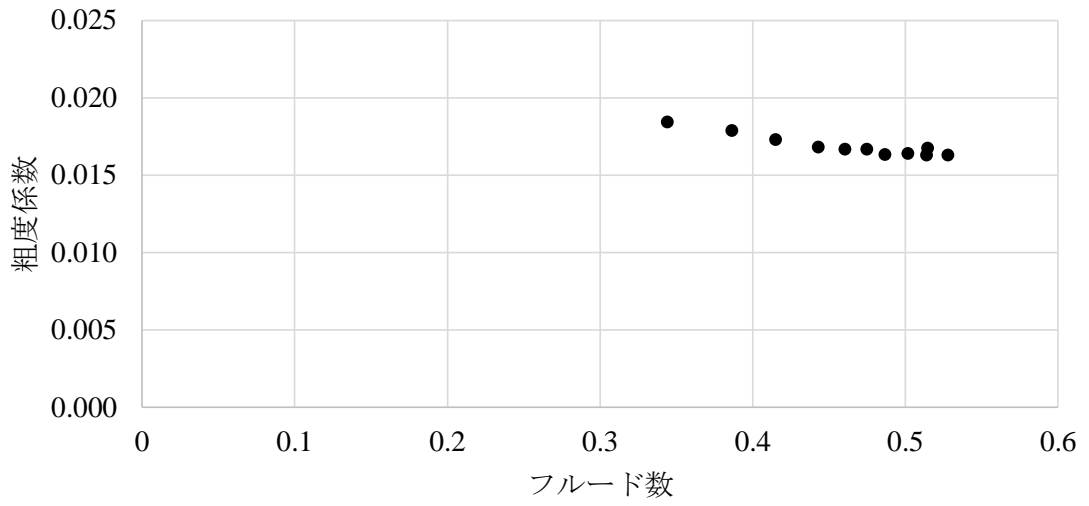


Fig. 6- 26 粗度係数とフルード数の関係 (TSS-70)

### 6.3 粗度係数推定式の作製

6.2 節で得られた粗度係数を **Table 6- 10** にまとめた。ここで、最大振れ幅との関係を検討するため、空中超音波計測を行った。コンクリートパネルは底板 14 枚を計測し平均値を代表値とした。発泡パネルは 5 点異なる箇所を計測し平均値を代表値とした。

コンクリートおよび発泡パネルの最大振れ幅の結果を

**Table 6- 11, Table 6- 12** に示す． 最大値となる滑面の最大振れ幅から， 粗面 2 の最大振れ幅は約半分まで減衰をし， TSS-8 のときは約 30%まで減衰をした．

粗度係数と最大振れ幅の関係を **Fig. 6- 27** に示す． 計測範囲内では対数近似することで， 最も決定係数が高く， 結果を上手く表すことができた． 超音波センサの性質上， 滑面の最大振れ幅を超えることは無いため， 粗さの小さい計測サンプルは， 滑面の粗度係数である 0.0108 に漸近する． また粗さの大きい領域では最大振れ幅の値に， より敏感に粗度係数が効いてくることになる． また， 線形近似した場合でも決定係数は， 0.86 と高い値を示し， 粗度係数推定式を簡略化することも可能である． マニング-ストリクラー (Manning-Strickler) の式では， 粗度係数は相当粗度の  $1/6$  乗に比例すると知られている． そこで， 最大振れ幅の逆数を取り， 粗度係数との関係を見てみた． **Fig. 6- 28** に粗度係数と最大振れ幅の逆数の関係を示す． 粗度係数は最大振れ幅の逆数の約  $1/2$  乗に比例することが確認できた．

**Table 6- 10** 粗度係数と算術平均粗さ一覧

パネル	滑面	粗面 1	粗面 2
粗度係数	0.0108	0.0148	0.0162
Ra (mm)	0.037	0.51	1.32
パネル	TSS-51	TSS-70	TSS-8
粗度係数	0.0141	0.0166	0.0206
Ra (mm)	0.85	2.35	4.8

Table 6- 11 コンクリートパネルの最大振れ幅

滑面		粗面 I		粗面 2	
No	最大振れ幅 (mV)	No	最大振れ幅 (mV)	No	最大振れ幅 (mV)
1	1830	1	1727	1	814.8
2	1802	2	1616	2	1145
3	1858	3	1299	3	844.4
4	1842	4	1651	4	973.8
5	1847	5	1373	5	856.4
6	1859	6	1629	6	1052
7	1842	7	1325	7	1358
8	1867	8	1352	8	752.7
9	1805	9	1355	9	903.4
10	1857	10	1177	10	660.5
11	1852	11	901	11	685.9
12	1880	12	1623	12	963.3
13	1868	13	1076	13	920.7
14	1877	14	1298	14	1112
平均	1849.0	平均	1385.9	平均	931.6
標準偏差	22.82	標準偏差	231.6	標準偏差	183.4



Table 6-12 発泡パネルの最大振れ幅

No	TSS-8	TSS-51	TSS-70
1	382.8	994.5	631.2
2	591	1469.6	886.3
3	839.3	773.8	755.2
4	509.9	1032.2	778.6
5	426	982.8	939.3
平均値	549.8	1050.6	798.1
標準偏差	161.43	228.134	107.515

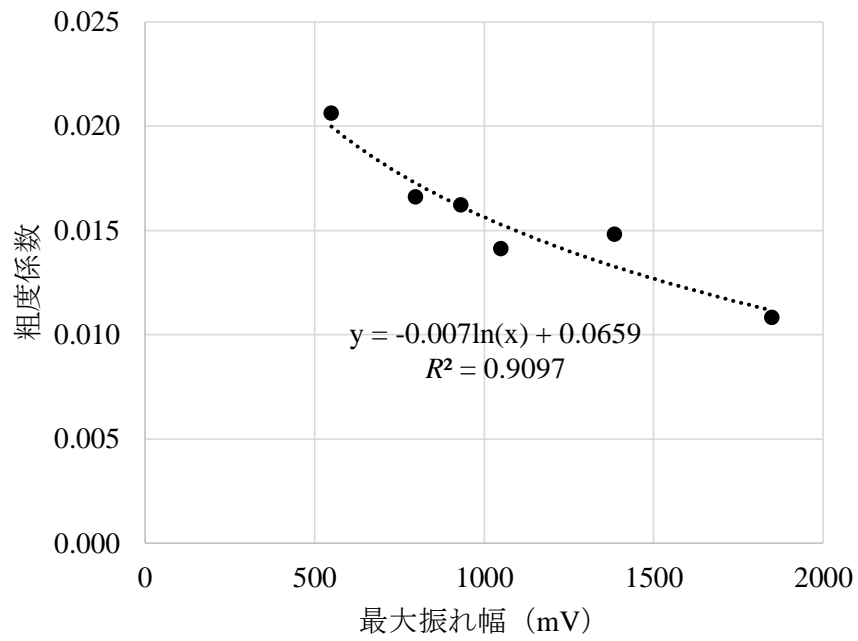


Fig. 6- 27 粗度係数と最大振幅の関係

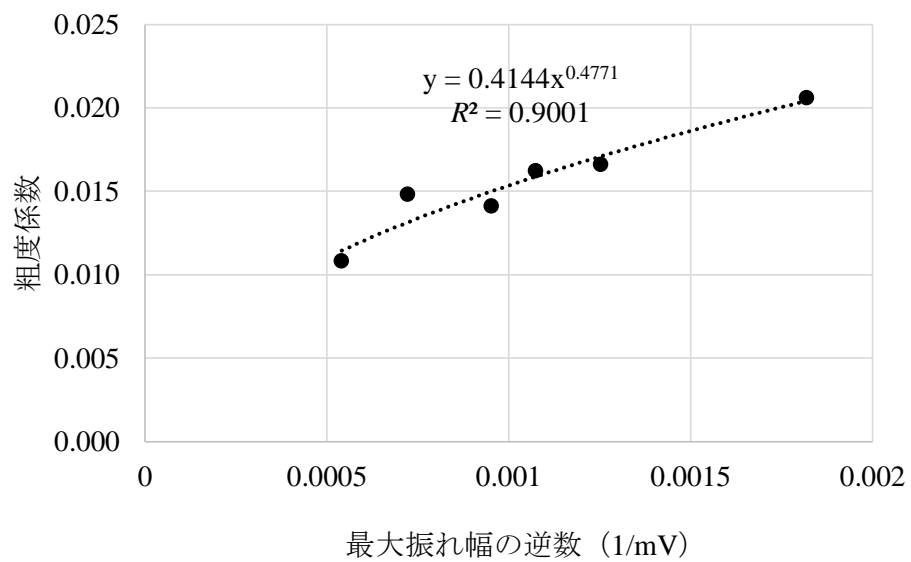


Fig. 6- 28 粗度係数と最大振幅の逆数の関係

## 7 章 現場計測へ向けた接触型集音機の検討

### 7.1 計測設置における課題と目的

### 7.2 実験装置

### 7.3 実験手順

### 7.4 接触型集音機を用いた粗さ計測への適用検証

#### 7.4.1 円柱型 D20 の結果

#### 7.4.2 円柱型 D30 の結果

#### 7.4.3 円錐型 16° の結果

#### 7.4.4 円錐型 20° の結果

### 7.5 最適な接触型集音機の選定

#### 7.5.1 円柱型の結果

#### 7.5.2 円錐型の結果

### 7.6 まとめ

## 7 章 現場計測へ向けた接触型集音機の検討

### 7.1 計測設置における課題

従来の空中超音波粗さ計測においては、いくつかの計測条件が存在する。

まず、1 つ目は計測距離が 1 m であることである。計測面から計測機までに 1 m の距離を確保しなければならず、計測距離が遠いため水路幅が大きい開水路においては計測が困難なことが課題として挙げられる。

また、2 つ目はセンサの計測方向と計測面の垂直の確保を、レーザーポインタを頼りに行わなければならないことである。計測者は、**Fig. 7- 1** のように計測機に取り付けられた 4 つのレーザーポインタの照射点を、あらかじめ計測面に設けた 4 つの視準点に合わせることで垂直と距離の確保を行わなければならない。この手順には、計測面にあらかじめレーザーポインタの視準点を設けるといったことが必要になり、時間がかかる。

以上のことから、従来の空中超音波粗さ計測法では、計測機と計測面の距離が遠いことや垂直の確保が簡便でないことが課題であり、計測機の操作性の向上が必要であるといえる。

従来の空中超音波粗さ計測法の課題を解決するために、センサに接触型集音器を取り付け、計測面に直接押し当てて計測を行うことを考えた。接触型集音機とは、超音波センサに装着するカバーのことであり、計測面とセンサの間に挟み込み、測系距離と垂直を確保

するものである。Fig. 7- 2 に接触型集音機のイメージを示す。

Fig. 7- 2 にあるような接触型集音機を用いることで、計測面との垂直の確保を即座に行うことが可能であると考えられる。また、計測面とセンサの間を覆うことにより、風などの影響を防ぐことができると考えられる。

本章では、センサに接触型集音器を装着し、計測面に押し当てて計測を行うことで、従来の空中超音波粗さ計測法の課題の解決を図ることとした。また、形状の異なる複数の接触型集音機を比較することで、最適な接触型集音機形状を求めることを目的とした。



Fig. 7- 1 レーザーポインタによる計測位置決め



Fig. 7- 2 接触型集音機のイメージ

## 7.2 実験装置

### ① 接触型集音機

検討する接触型集音機形状を **Fig. 7- 3** に示す．まず、円柱型接触型集音機には塩化ビニール管を用いた．円柱型には内径（D）20cm と 30cm の 2 種類を準備し、それぞれ高さ（H）20cm から 100cm まで 10cm 間隔のものを準備した．また、円錐型接触型集音機には樹脂製のロードコーンを用いた．円錐型には、開き角が  $16^\circ$  および  $20^\circ$  の 2 種類を準備した．開き角  $16^\circ$  では高さが 20,30,40,50,55cm のものを準備し、開き角  $20^\circ$  では高さが 20,30,40,50cm のものを準備した．

また、空中超音波センサに接触型集音機を装着するため、**Fig. 7- 4** にあるように円錐型接触型集音機には 10cm 四方程度のアクリル板を接着し、アクリル板の中心にセンサを固定するための穴を設けた．円柱型接触型集音機においてもセンサを装着するために、塩化ビニール管上部に穴の開いた 40cm 四方程度のアクリル板を取り付けた．

### ② 空中超音波センサ LV-EZ1 (MaxBotix.inc)

2.3 節参照．

### ③ 計測面：摩耗模型コンクリートパネル ( $R_a=0.04, 0.32, 1.04\text{mm}$ )

3.1 節参照．

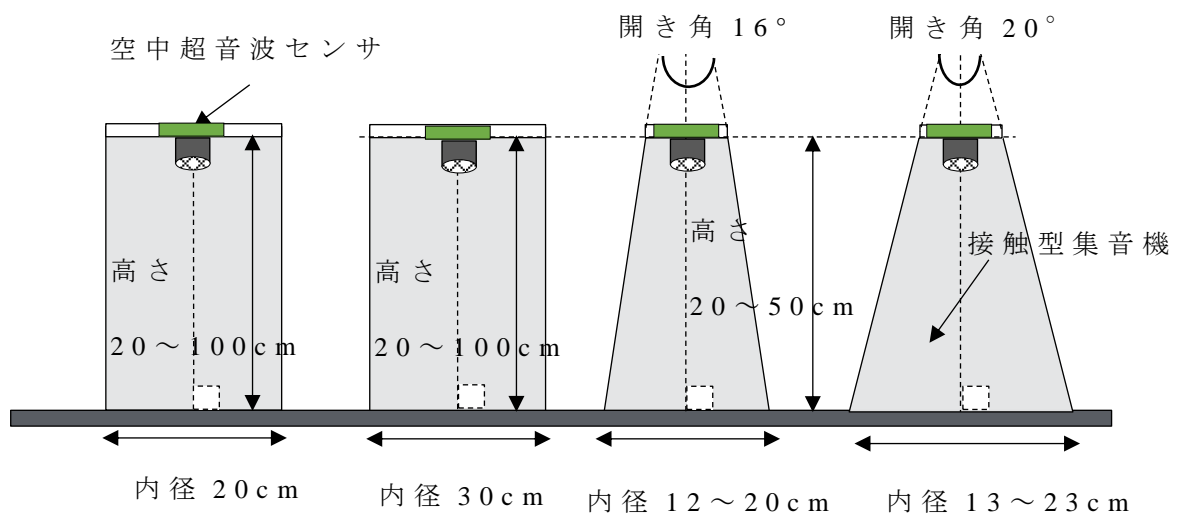


Fig. 7- 3 接触型集音機の概要図

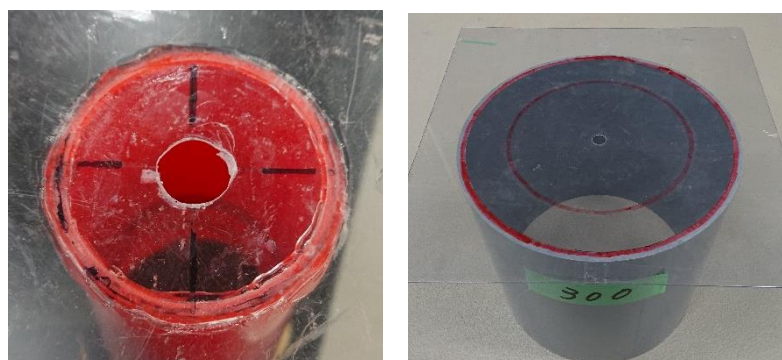


Fig. 7- 4 接触型集音機上部 (センサ差込口)



### 7.3 実験手順

- 1) 計測面の水平を、水準器を用いて確保した。
- 2) 接触型集音機にセンサを取り付け、計測点に接触型集音機の中  
心が来るように設置した。
- 3) 接触型集音機上部の水平を確保した。
- 4) オシロスコープにより、反射波の最大振れ幅について波形デー  
タを取得した。
- 5) 3種類の計測面でそれぞれあらかじめ設定した9地点の計27地  
点に対し、1回ずつ計測を行い、データを取得した。2)～4)の  
作業を、接触型集音機形状を変え、すべての条件で行った。

## 7.4 接触型集音機を用いた粗さ計測への適用検証

接触型集音機毎で取得した最大振れ幅と計測点の算術平均粗さの関係から、粗さ計測への有効性を検証した。

### 7.4.1 円柱型 D20 の結果

円柱型の D（直径）20cm の結果を Fig. 7- 5, Fig. 7- 6 に示す。データは、H（高さ）20～60cm と 70～100cm に分けてまとめた。Fig. 7- 5, Fig. 7- 6 から、円柱 D20 の接触型集音機では計測原理通りに、計測面の粗さが増すと、反射波の最大振れ幅が小さくなることが確認できた。したがって、円柱型 D20 の接触型集音機は、粗さ計測への有効性が示された。

また、円柱型 D20 について、接触型集音機の高さごとに結果を見ていくと、Fig. 7- 5 において、D20-H20 が最も低い近似直線となり、D20-H30 で最も高い直線になった。その後、D20-H40, D20-H50, D20-H60 と高さが大きくなると、直線は低くなっていくことが確認できた。Fig. 7- 6 の D20-H70 から H100 については、D20-H70 が最も高くなった D20-H30 と同程度に位置する。その後、D20-H80, D20-H90, D20-H100 と高さが大きくなると、位置は低くなっていくことが確認できた。接触型集音機の高さが変わると集音効果が変わり、円柱型 D20 の場合は、H30 と H70 を頂点とした波のような形になることが確認できた。

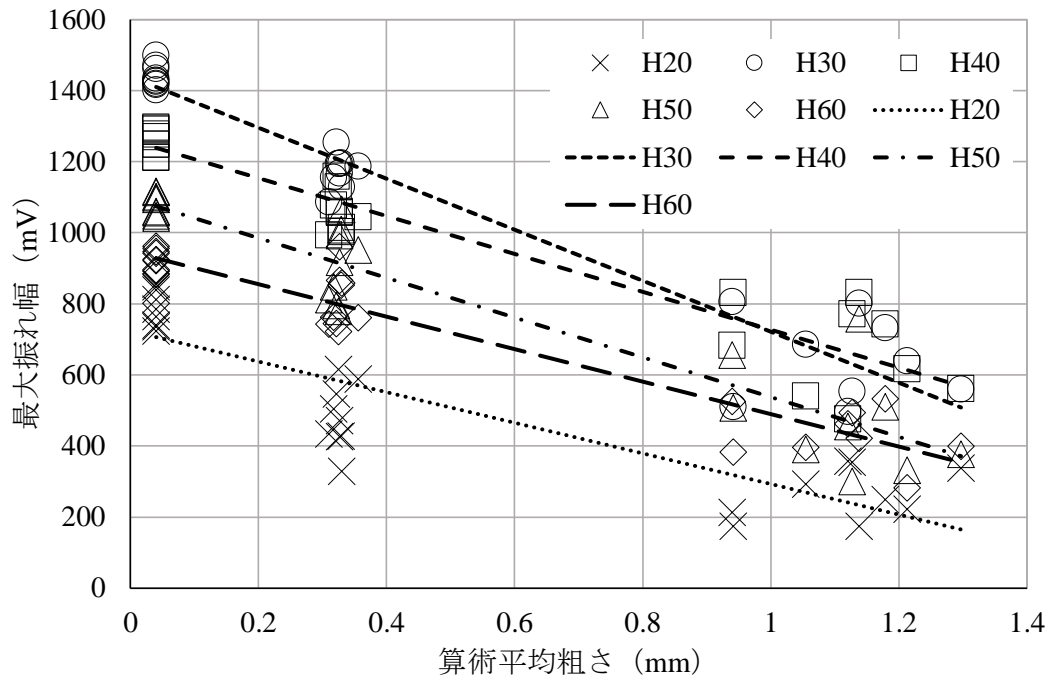


Fig. 7- 5 円柱型 D20-H20~60

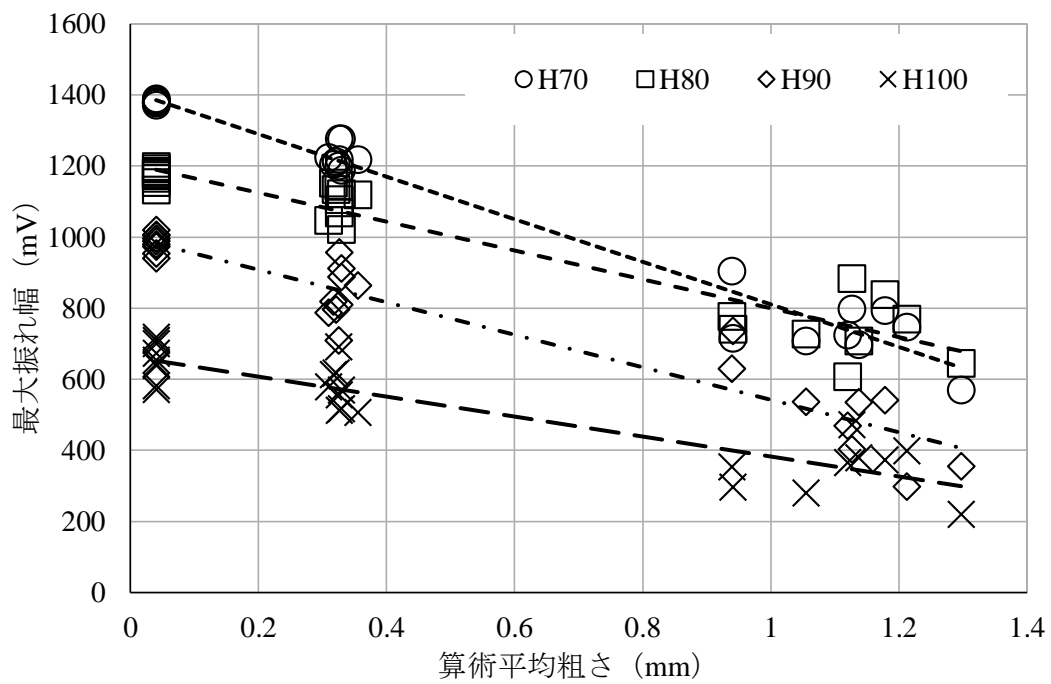


Fig. 7- 6 円柱型 D20-H70~100

#### 7.4.2 円柱型 D30 の結果

円柱型の D30cm の結果を Fig.7- 7, Fig.7- 8 に示す.

Fig.7- 7, Fig.7- 8 から、円柱 D30 の接触型集音機では計測原理通りに、計測面の粗さが増すと、反射波の最大振れ幅が小さくなることが確認できた。よって、円柱 D30 の接触型集音機を装着した超音波センサは、粗さ計測への適応があるといえる。

また、円柱 D30 ついて、接触型集音機の高さごとに結果を見ていくと、Fig.7- 7 において、D30-H20 が最も低い近似直線になり、その後、D30-H30, D30-H40, D30-H50 と高さが大きくなると、直線は徐々に高くなっていくことが確認できた。D30-H50 をピークに高さが大きくなると、徐々に位置が下がっていき、D30-H80, D30-H90, D30-H100 の分布はほとんど同程度となった。

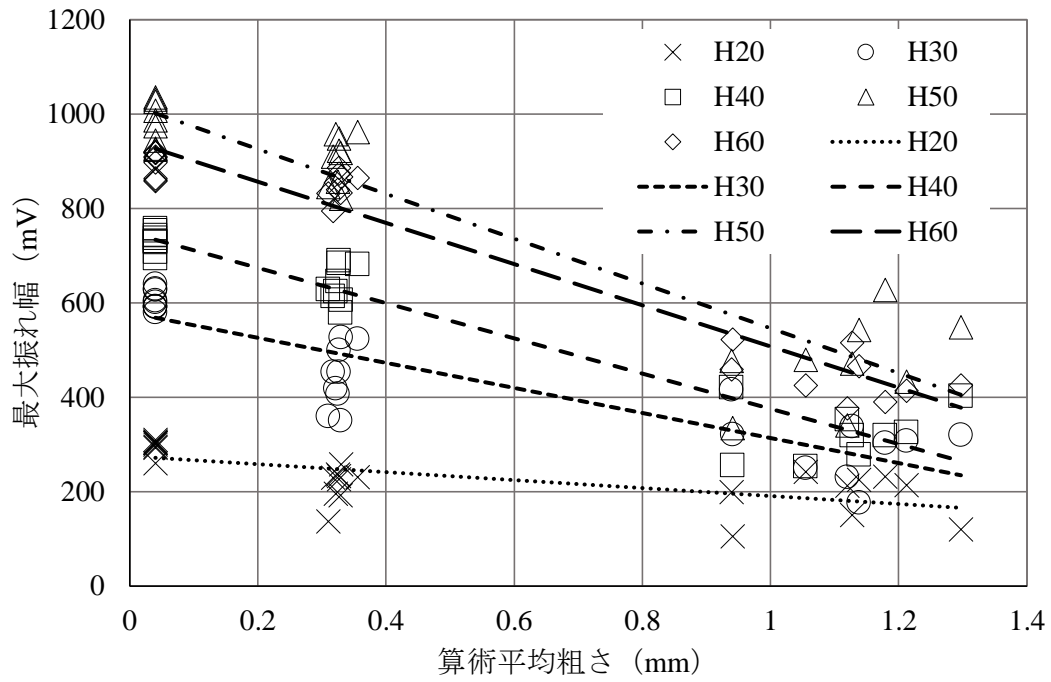


Fig. 7- 7 円柱型 D30-H20~60

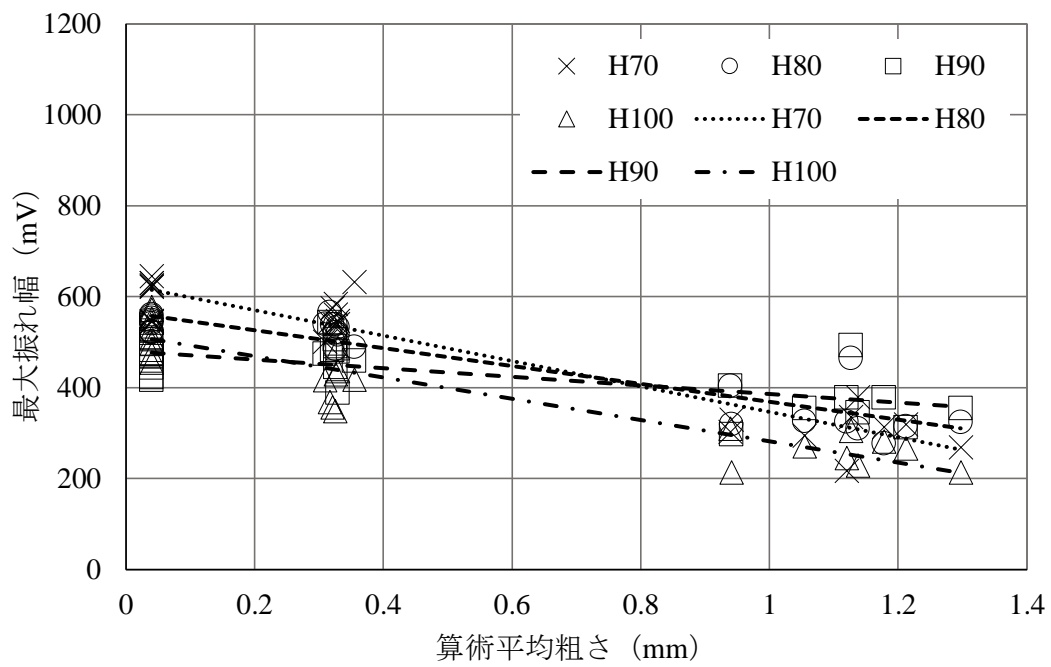


Fig. 7- 8 円柱型 D30-H70~100

#### 7.4.3 円錐型 16°の結果

円錐型 16°の結果を Fig. 7- 9 に示す. 円錐 16° の接触型集音機では計測原理通りに、計測面の粗さが増すと、反射波の最大振幅が小さくなることが確認できた. よって、円錐 16° は、粗さ計測への有効性が示された.

また、円錐型 16° の結果について、高さごとに近似直線の位置をみていくと、16° -H20, H30 で同程度の位置となり、それ以外の条件では、位置は低くなることが確認できた.

以上のことから、円錐型 16° の接触型集音機でも、円柱型接触型集音機と同様に高さが増えると計測結果は変化し、求められる近似直線も異なるものであることが明らかとなった.

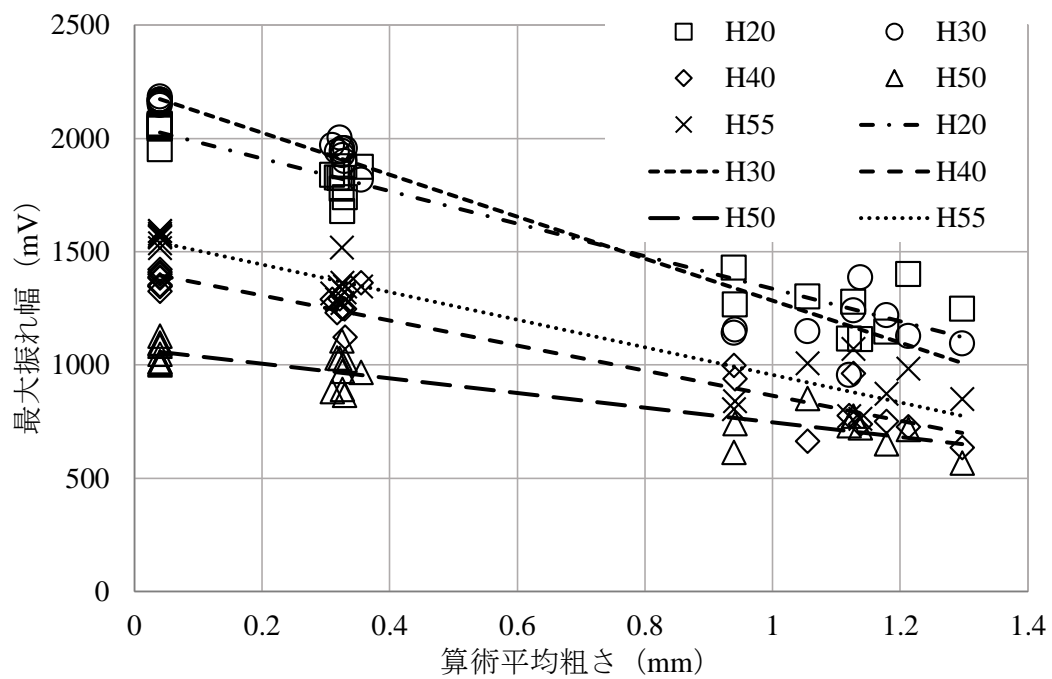


Fig. 7- 9 円錐型 16° の結果

#### 7.4.4 円錐型 20°の結果

円錐型 20°の結果を Fig. 7- 10 に示す. 円錐型 20° の接触型集音機では計測原理通りに、計測面の粗さが増すと、反射波の最大振幅が小さくなることが確認できた. よって、円錐型 20° は、粗さ計測への有効性が示された.

また、円錐型 20° の結果について、高さごとに近似直線の位置をみていくと、16° - H20~40 までは計測距離が大きくなると、分布は大きくなっていくことが確認できた. また、その後の 16° - H50 では分布は低くなった.

以上のことから、円錐型 20° の接触型集音機でも、円筒型接触型集音機および円錐型 16° と同様に高さが増えると計測結果は変化し、求められる近似直線も異なるものであることが明らかとなった.



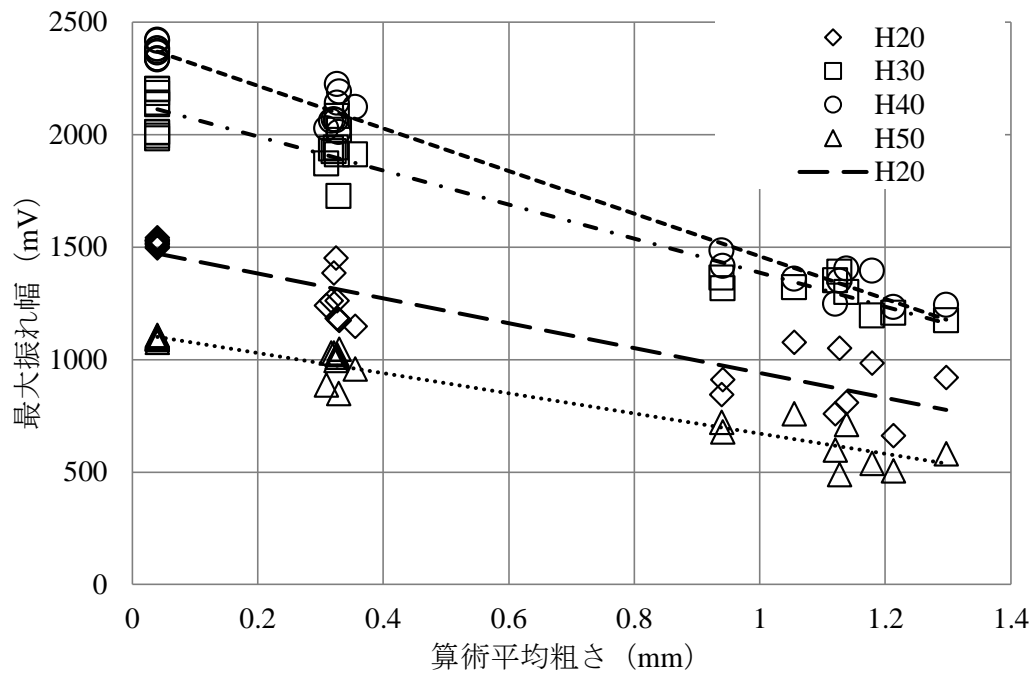


Fig. 7- 10 円錐型 20° の結果

## 7.5 最適な接触型集音機の選定

7.4節で接触型集音機を用いた場合における空中超音波の粗さ計測への有効性を明らかにした。しかし、計測に最適な形状については言及していない。そこで、得られた関係式の傾きと切片に着目をして最適な形状を検討していく。Fig. 7-11 に円柱 D20-H20, 30 を例に示す。2つの関係式の傾きを見ると、H30の方が傾きは大きくなっている。ここで、任意で粗さ0.4から0.8の間を考えると、その間の最大振れ幅の差分は、傾きの絶対値が大きくなっているほど大きくなっている。つまり、傾きの絶対値が大きくなると、単位粗さ当たりの最大振れ幅の差分が大きくなり、計測精度が高くなると考えられる。傾きの絶対値は空中超音波の粗さ計測における計測精度に左右し、傾きの絶対値が大きいほど、計測精度は高くなることが期待できる。よって、近似直線の傾きの絶対値は、粗さ計測への適応度を判断する基準となり、最適な接触型集音機を求めるために最も重要な指標であるといえる。

次に計測精度の高い接触型集音機の特徴として、集音効果の高さが見られたため、集音効果と計測精度の関係を検討した。Fig. 7-12 に円柱 D20-H20, 30 を例に示す。集音効果は関係式の切片の値を用いた。

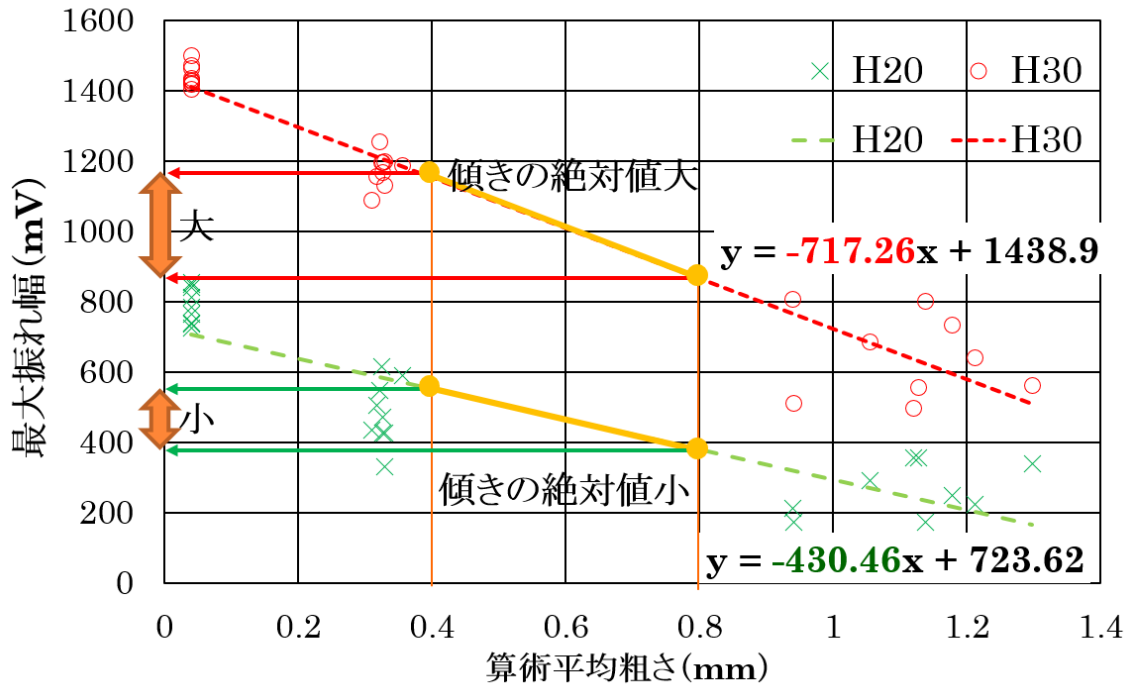


Fig. 7- 11 関係式による計測精度について

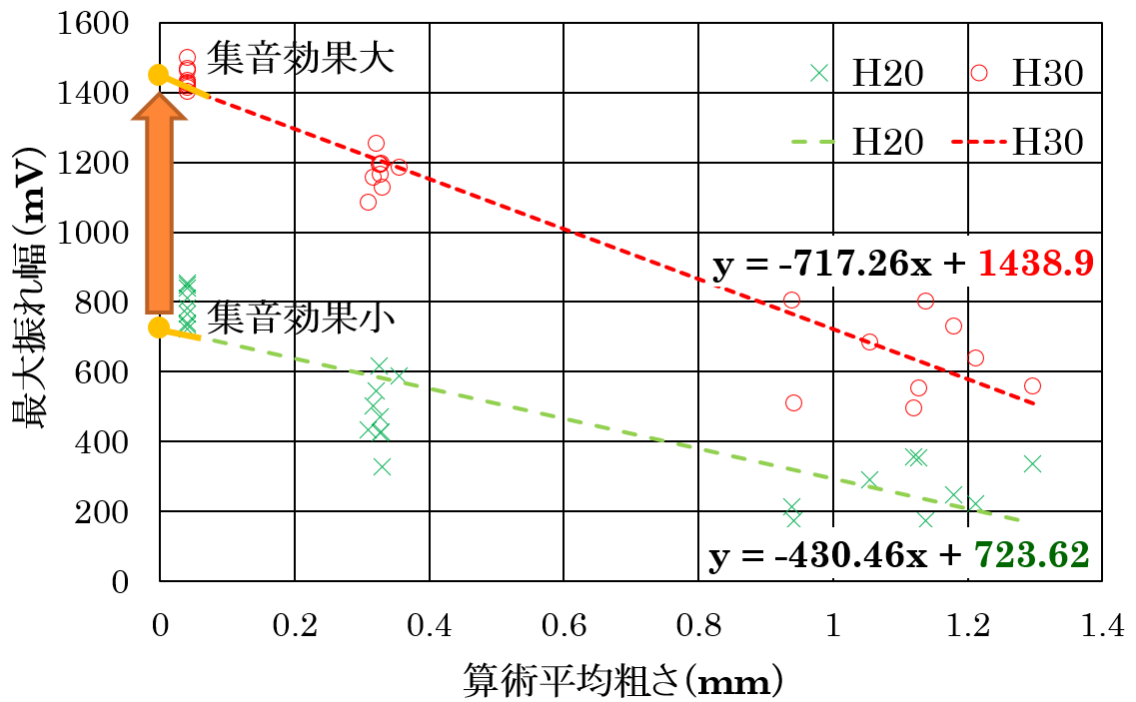


Fig. 7- 12 関係式による集音効果について

### 7.5.1 円柱型の結果

**Fig. 7- 13** に円柱型 D20 の傾きの絶対値と切片を示した。最も大きい傾きは、H30 のときで H60 まで高くなるにつれて減少傾向を示し、H70 で再び大きくなり H100 まで高くなるにつれて減少傾向を示した。切片は傾きと類似の傾向を示し、最も大きい切片は H30 であった。

**Fig. 7- 14** に円柱型 D30 の傾きの絶対値と切片を示した。最も大きい傾きは、H50 のときで H50 を頂点とした山形の結果となった。切片は傾きと類似の傾向を示し、最も大きい切片は H30 であった。

**Fig. 7- 13**, **Fig. 7- 14** より傾きと切片の大きさは波のように増減を繰り返すことが確認できた。これは、接触型集音機の形状によって、超音波の位相が変わることが一因していることが考えられる。その他にも多様な現象が起因して本結果に反映されていると考えられる。D20 の方が D30 に比べて傾きが全体的に大きく高い計測精度が期待できる。この現象は、直径が小さい方が音波を拡散させずに集音した結果であると考えられる。また、傾きと切片に高い相関が見られたため、切片すなわち集音効果の高い接触型集音機を採用することで計測精度の高い形状を簡易的に推定できる可能性がある。

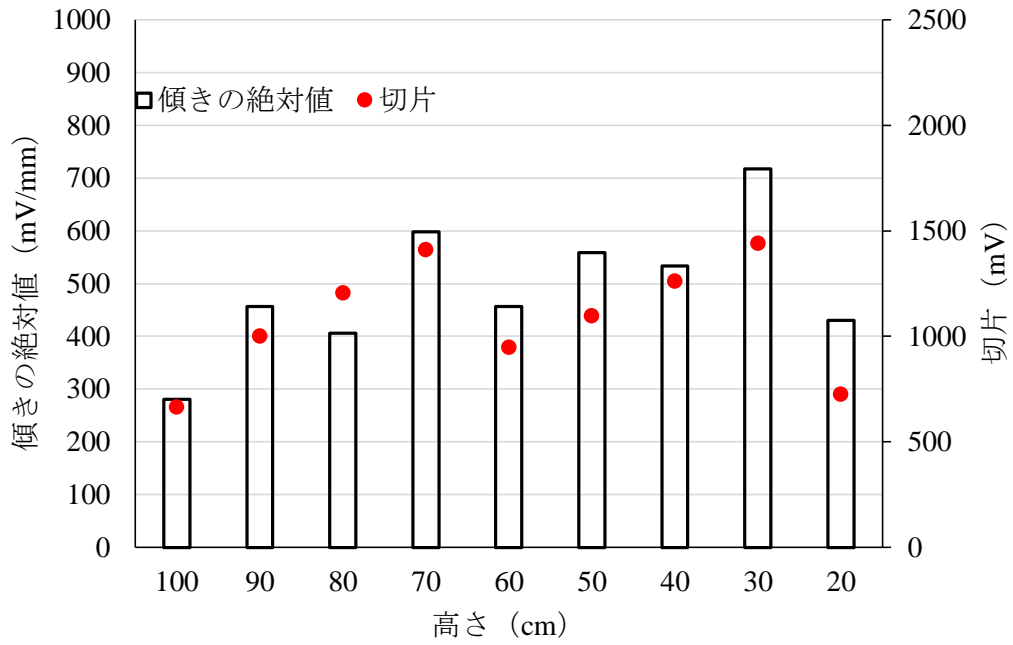


Fig. 7- 13 円柱型 D20

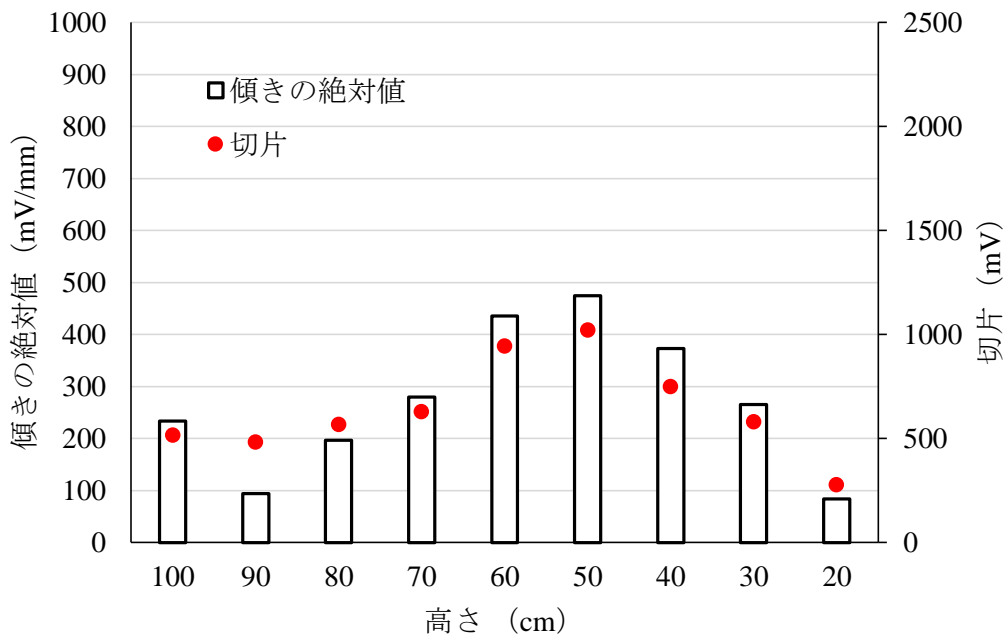


Fig. 7- 14 円柱型 D30

### 7.5.1 円錐型の結果

**Fig. 7- 15** に円錐型  $16^\circ$  の傾きの絶対値と切片を示した。最も大きい傾きは、H40 のときで H40 を頂点とした山形の結果となった。切片は傾きと類似の傾向を示し、最も大きい切片は H40 であった。

**Fig. 7- 16** に円錐型  $20^\circ$  の傾きの絶対値と切片を示した。最も大きい傾きは、H30 のときで H30 を頂点とした山形の結果となった。切片は傾きと類似の傾向を示し、最も大きい切片は H30 であった。

**Fig. 7- 15**, **Fig. 7- 16** より傾きと切片の大きさは最大値を頂点とした山形の形になった。円柱型と同様に、傾きと切片に高い相関が見られたため、切片すなわち集音効果の高い接触型集音機を採用することで計測精度の高い形状を簡易的に推定できる可能性がある。

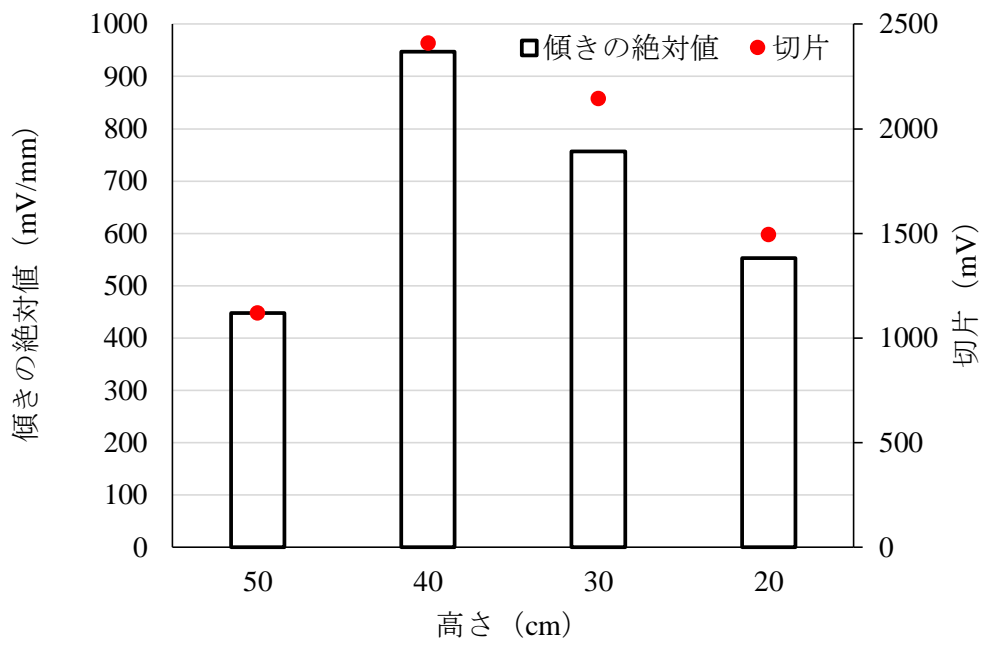


Fig. 7- 15 円錐型 16°

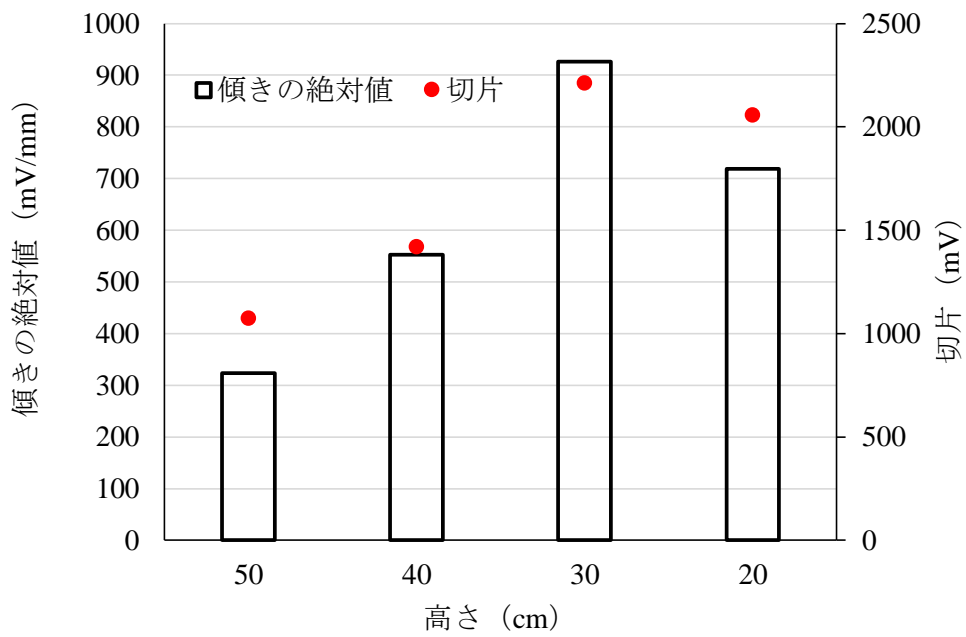


Fig. 7- 16 円錐型 20°

## 7.6 まとめ

空中超音波センサに接触型集音機を取り付けることで、計測の簡易化を図った。計測の簡易化だけでなく、風防の役目を果たし風による影響を無視することが出来る。接触型集音機は円柱型と円錐型を用いた。円柱型は直径 20cm と 30cm の 2 種類、円錐型は 16° と 20° の 2 種類を用いた。まず、全ての接触型集音機で粗さ計測への適用検証を行い、次に最適な接触型集音機の選定を行った。

粗さ計測への適用検証では、全ての接触型集音機で計測原理である、粗さの増加に伴う最大振れ幅の減少が確認できた。同じタイプであっても、高さが変わることで、集音効果やグラフの傾きが異なることが確認できた。

最適な接触型集音機の選定では、得られた関係式の傾きと切片に着目をして最適な形状を検討した。傾きは計測精度を評価することができ、切片は集音効果を評価することが出来る。円柱型 D20 の時、最も切片が大きかった形状は H30 であった。円柱型 D30 の時、最も傾きが大きかった形状は H50 であった。円錐型 16° の時、最も傾きが大きかった形状は H40 であった。円錐型 20° の時、最も傾きが大きかった形状は H30 であった。全ての接触型集音機の中で、最も傾きが大きかった形状は、円錐型 16° H40 であった。

また、傾きと切片に高い相関が見られたため、切片すなわち集音効果の高い接触型集音機を採用することで計測精度の高い形状を簡易的に推定できる可能性がある。



## 8 章 結論

本論は，コンクリート製農業用開水路の摩耗によって生じる粗さ（凹凸，粗度）を定量的に安価，簡便，面的な計測を可能にするため，超音波に着目をした．

計測原理として，ある開口角を有する超音波の粗さ面に対する散乱現象を利用した．粗さ成分が大きくなるとインコヒーレント性が支配的になり，超音波の反射強度が小さくなると考えた．

反射強度には最大振れ幅を指標として用いた．最大振れ幅から粗さを計測できることで，Manning-Strickler 式から粗度係数を推定することが出来た．まず，空中超音波センサを用いて粗さ計測への有効性を検討した．

### 空中超音波について

空中超音波センサを用いて，複数の算術平均粗さに対する計測を行った．その結果，最大振れ幅と算術平均粗さの關係に高い相関を得ることが出来た．このことにより，計測距離と最大振れ幅を計測することで算術平均粗さの推定が出来ることを明らかとした．

計測は 10 回程度の平均を取ることでばらつきを抑えられることがわかった．超音波は高速で計測が可能であるため，短時間での計測が出来る．

計測範囲は、計測距離 1,000 mm から直径約 600 mm の面的な計測が可能であることを明らかとした。しかし、計測範囲が広いと、水路のどの位置の粗さを計測しているか不明瞭になる可能性があるため、ホーンを装着することで計測範囲の制御と集音効果を高めることが出来た。

単眼センサと複眼センサでは、基礎研究から大きな差異が見られなかったが、計測時に計測器が傾くことを考えると、簡易的な角度補正が可能な単眼センサが最適であると判断した。以上の結果より、空中超音波センサは安価で簡便で面的な計測手法になることを明らかとした。

実験室内の安定した環境ではなく、現場の様々な環境を想定した場合、温度・湿度・大気圧・風速の影響を検討する必要がある。そこで、計測環境を制御して最大振れ幅への影響を検討した。

その結果、温度・湿度・大気圧の3つの中では、温度に最も依存していることが確認できた。特に 20℃以上の高温の場合、空気吸収減衰によって最大振れ幅の低下が顕著に表れることを確認した。空気吸収減衰式を用いることで減衰を補正することが出来た。

また、基準温度 20℃からの減衰率を温度から計算することで経験的に補正する手法を提案した。

風速による影響は、風洞実験により検討を行った。風速 6 m/s 以上の時最大振れ幅の減少を確認した。

理論式を提案して、計測値と比較したところ、滑面の時は高い相関が得られたが、粗さが大きくなるにつれて計測値が理論値に比べて小さくなる現象になった。

空中超音波計測は、温度・湿度・大気圧は補正によって影響を小さくでき、風速は 6m/s 以下での計測を推奨し、強風下での計測の時は理論式で補正することが出来ることを明らかとした。

## 今後の課題

- (1) 温度・湿度・大気圧による計測データの蓄積が必要である。
- (2) センサ本体の発熱に関する検討が更に必要である。特に、センサの追加の性能を持たせる場合、基盤の持つ熱量が大きくなる。基盤を含めたセンサを密閉した場合は、センサ内部温度の上昇による影響が危惧される。

## 水中超音波について

水中超音波センサでの計測手法の確立は、灌漑期の農業用水路だけでなく、通年取水が必要とされる工業用水路や水道用水路への活用が期待できる。水中超音波センサは、伝搬媒質が空気よりも密度の大きい水であるため、外的要因による損失に作用されにくい性質を持つ。まず、粗さ計測への有効性を検討した。

その結果、最大振れ幅と算術平均粗さの関係に高い相関を得ることが出来た。このことにより、計測距離と最大振れ幅を計測することで算術平均粗さの推定が出来ることを明らかとした。

計測は、10回程度の平均を取ることでばらつきを抑えられることを明らかにした。空中超音波に比べてばらつきは、小さいことが確認できた。水中超音波は、空中超音波に比べて高速で計測が可能であるため、より短時間での計測を期待出来る。

計測範囲は、計測距離 500 mm から直径約 300 mm と面的な計測が可能であることを明らかにした。以上の結果より、水中超音波センサは、安価で簡便で面的な計測手法になることを明らかとした。

水中超音波を現場で使用する場合、流速と濁りの影響を検討する必要がある。流速の異なる2つの現場水路で水中超音波計測をすることで、流速の影響を検討した。

流速計を用いて流速分布を作製して平均流速を計算した結果、対象水路 A は 0.62 m/s で、対象水路 B は 0.99 m/s であった。水中

超音波計測は 300mm から 100mm 間隔で計測し，対象水路 A は 1,000mm まで，対象水路 B は 1,400mm まで計測をした．

取得した計測値（流水条件）と，伝達損失の理論式から得られた理論値（静水条件）との比較を行った結果，どちらの水路も決定係数が 0.98 と高い相関を示した．従って，流水条件下においても，静水条件と同じ値の最大振れ幅が計測できることを明らかにした．従って，平均流速 0.99m/s 以下の水路では，水中超音波計測の流速の影響が極めて小さい．

濁りの影響は，カオリンを水に懸濁させることで人工的に懸濁液を作製し検討を行った．

100mg/L 以上のとき，明らかな減衰を確認できた．しかし，その減衰量を初期条件の最大振れ幅から計算すると 0.5 割未満であり，計測への影響は極めて小さいことを確認した．

次に，透視度による評価をした．濁度 100mg/L 以上は，透視度計で計測した場合は約 10cm に相当することが確認できた．従って，透視度計を使用する場合，透視度約 10cm 以下のときは，最大振れ幅が低下する可能性があるため水中超音波計測を避ける必要があることを明らかにした．

## 今後の課題

(1) 水中のコンクリート表面を計測するため、対称面の状況を目視できない場合に、コンクリート表面の計測をしているはずが、苔や堆砂を計測してしまっている場合がある。事前の清掃や計測地点の画像取得などの技術進歩が必要であると考えられる。

(2) 水の流れや、計測時間の高速性能を利用して、水中超音波をフロートのような物と一緒に水に流すことで連続計測ができる可能性がある。しかし、計測結果と計測地点のすり合わせ方法や回収、紛失等の課題がある。

(3) 流速の影響は、更にデータの蓄積が必要である。現場で計測できる機会がある場合は、流速と滑面の計測を行うだけでデータの蓄積になり、より一層結果の信頼性を確保することが出来る。

## 摩耗模型水理実験について

6 種類の摩耗模型パネルを用いて、水理実験から施工直後から不健全な水路に相当する粗度係数を得た。

次に、6 種類の摩耗模型パネルを用いて超音波計測から最大振れ幅を得た。この粗度係数と最大振れ幅の関係は対数近似することで、最も決定係数が高く、結果を上手く表すことができた。得られた関係式を用いることで、粗度係数を直接推定することが出来ることを明らかとした。センサの個体や種類が変わった場合は、6 種類のパネルの最大振れ幅を計測し直すことで粗度係数の推定式を作製することが出来る。従来方法である、Manning-Strickler 式からの粗度係数の推定では、算術平均粗さと粗度係数の 2 重推定をしている。従って、6 章で得られた式を使用することで精度の向上が期待できる。

## 接触型集音機について

空中超音波センサの設置における簡易化を図るため、計測治具として、計測面とセンサの間に接触型集音機を装着した。その結果、計測の簡易化と風防の役割を果たすことが出来た。

最適な形状を円柱型と円錐型から検討した結果、円錐型の開き角  $16^\circ$  の高さ  $40\text{cm}$  であることを明らかとした。接触型集音機は集音効果の高い形状を使用することで、計測精度の高いセンサとなることが分かった。

## 参考文献 (英文: アルファベット順, 和文: 50 音順)

- (1) Abu-Tair, A.I., Lavery, D., Nadjai, A., Rigden, S.R. and Ahmed, T.M.A. (2000) : A new method for evaluating the surface roughness of concrete cut for repair or strengthening, *Construction and Building Materials*, 14(3), 171-176.
- (2) ASTM (1996) : Standard test method for measuring pavement macrotexture depth using a volumetric technique, E965
- (3) ASTM (2005) : Standard test method for measuring pavement texture drainage using an outflow meter, E2380
- (4) Courard, L., Garbacz, A and Bissonnette, B. (2012) : Topography evaluation methods for concrete substrates: parametric study, *International Congress on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, 379-384.
- (5) Chow, V. T.(1959): *Open channel Hydraulics*, McGraw-Hill Co, 680.
- (6) ISO 9613-1 (1993) : *Acoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors-Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.*



- (7) M. E. Delany (1977) : SOUND PROPAGATION  
IN THE ATMOSPHERE : Historical Review,  
ACUSTICA 38, 201- 223.
- (8) Nagaoka.S, Raihanul.I.M, Okajima.K, Ishiguro.  
S, Ito.R, Watanabe.K, and Ito.T, (2017):  
MEASUREMENT OF ARITHMETICAL MEAN  
ROUGHNESS OF CONCRETE BY TRANSCEIVER  
TYPE AERIAL ULTRASONIC SENSOR, *International  
Journal of GEOMATE*, 13(39), 61-66.
- (9) Nagaoka.S, Raihanul.I.M, Okajima.K, Ishiguro.  
S, Ito.R, Watanabe.K, and Ito.T,(2018):  
EVALUATION OF ATTENUATION OF ULTRASONIC  
WAVE IN AIR TO MEASURE CONCRETE  
ROUGHNESS USING AERIAL ULTRASONIC SENSOR,  
*International Journal of GEOMATE*, 14(22), 197-  
204.
- (10) Nagaoka.S, Okajima.K, Ito.R, Watanabe.K, and  
Raihanul.I.M, (2019):Development of a measurement  
method for abrasion irrigation channel using  
underwater ultrasonic wave , *Paddy and Water  
Environment*, 17(3) 549-554.

- (11) Pedro, MD, Santos and Eduardo, NBS. (2013) :  
A state-of-the-art review on roughness  
quantification methods for concrete surfaces,  
*Construction and Building Materials*, 38, 912-923.
- (12) Perez, N. and Negreira, C. (2008) : Evaluation  
of Air Coupling Ultrasonic Transducers for Surface  
Roughness Measurement, *Proceedings of the 6th  
Ibero-American Congress on Sensors*, 263-268.
- (13) Raihanul, I.M., Nagaoka, S., Okajima, K.,  
Ishiguro, S., Ito, R., Watanabe, K. and Ito, T.  
(2016): Effects of Hand Made Plastic Horn to  
measure the Arithmetic Mean Roughness of Concrete  
surface by Transceiver Type Aerial Ultrasonic  
Sensor, *The 15th PAWEES Conference*, Korea, 49.
- (14) Sukmana, D. D. and Ihara, I. (2005) :  
Application of Air-Coupled Ultrasound to  
Noncontact Surface Roughness Evaluation, *Jpn. J.  
Appl. Phys.*, 44(6), 4417-4420.
- (15) Thorp, W.H. (1967) : Analytic description  
of the low-frequency attenuation coefficient,  
*The Journal of the Acoustical Society of  
America*, 42(1), p.270.

- (16) VEN TE CHOW 著, 石原藤次郎 訳 (1962) : 開水路の水理学 1, 丸善, 92-191.
- (17) 浅野 勇, 渡嘉敷 勝, 森 充広, 西原正彦 (2014) : レーザ距離計による摩耗測定手法の開発, 農業農村工学会論文集, 293, 1-12.
- (18) 足立昭平 (1964) : 人工粗度の実験的研究, 土木学会論文報告集, 104, 33-44.
- (19) 井原郁夫, デデン ディアン スクマナ (2008) : エアカップル超音波による材料表面の非接触トポグラフィー, 精密工学会誌, 74 (7), 691-695.
- (20) 一般財団法人 日本水土総合研究所 (2012) : 平成24年度水路保全技術検討業務委託事業報告書.
- (21) 宇田川義夫 (2016) : 超音波技術入門, 日刊工業新聞社, a1, b7.
- (22) 梅田吉邦, 前田 弘 (1973) : 超音波による風速の一測定法, 日本航空宇宙学会誌, 21(234), 401-406.
- (23) 内田晃一, 石田征男, 小川彰一 (2008) : コンクリート開水路の表面形状測定による粗度係数の評価, 農業農村工学会全国大会講演要旨集, 432-433.
- (24) 岡島賢治, 長岡誠也, 石黒 覚, 伊藤良栄, 渡部 健, 伊藤 哲 (2016) : 空中超音波の最大振れ幅によるコンクリート面の粗さ計測, 農業農村工学会論文集, 303, 233-240.

- (25) 太田垣晃一郎，長谷川雄基，鈴木哲也，松本伸介，佐藤周之(2012)：三次元画像解析によるコンクリート水路表面粗度の測定手法に関する研究，農業農村工学会論文集，280，7-13.
- (26) 金子昌晴(2008)：流水水槽の作製，岩手大学技術報告部，1，51-54.
- (27) 加藤 敬，本間新哉，北村浩二，今泉眞之(2008)：開水路における壁面の凹凸から水路の粗度係数を求める試み，農村工学研究所技報，207，183-193.
- (28) 川上昭彦，浅野 勇，森 充広，川邊翔平，渡嘉敷 勝(2017)：型どりゲージを用いた摩耗測定手法，農業農村工学会論文集，304，77-84.
- (29) 海洋音響学会(2014)：海洋音響の基礎と応用，a22-23，b99，c32-33.
- (30) 橘田隆史，横山 洋，橋場雅弘，新井 励(2011)：ADCPの超音波反射強度を利用した濁度計測技術について，河川流量観測の新時代，第2巻，1-8.
- (31) 須田剛文，平井一弘，田中克彦，酒匂一成，深川良一(2009)：斜面崩壊予知のための超音波による土中水分状態モニタリングの検討，電子情報通信学会技術研究報告，US2008-92，117-122.

- (32) 竹村武士，丹治 肇，蘭 嘉宜（2001）：開水路の現場粗度係数の推定方法の検討，農土誌，69（5），25-28.
- (33) 鳥越一平，石井 泰（1990）：音響インピーダンス式流速計，計測自動制御学会論文集，26，145-150.
- (34) 中矢哲郎，渡嘉敷 勝，森 充広，森 丈久（2008）：摩耗したコンクリート水路表層形状からの粗度係数推定手法，農業農村工学会論文集，258，23-28.
- (35) 長岡誠也，岡島賢治，伊藤良栄，RAIHANUL Islam Mohammad，渡部健，伊藤哲（2018）：空中超音波粗さ計測法における風速の影響に関する研究，農業農村工学会論文集，86(2)，197-204.
- (36) 長岡誠也，岡島賢治，伊藤良栄，RAIHANUL Islam Mohammad，渡部 健（2019）：水中超音波を用いたコンクリート表面粗さ計測手法の開発，農業農村工学会論文集，87(1)，91-97.
- (37) 農林水産省（2016）（参照 2019.12.16）：農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」，1-68，（オンライン），入手先  
<<http://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/attach/pdf/index-4.pdf>>

- (38) 農林水産省 (2017) (参照 2019.12.16) : 農業水利施設におけるストックマネジメントの取り組みについて, 1-10 (オンライン), 入手先  
<<https://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/attach/pdf/index-42.pdf>>
- (39) 農林水産省農村振興局 (2001) : 土地改良事業計画設計基準設計「水路工」基準書技術書, 155-156.
- (40) 長谷川雄基, 齋 幸治, 佐藤周之 (2015) : 水理模型実験による開水路の粗度係数推定方法に関する提案, 農業農村工学会誌, 83 (2), 125-128.
- (41) 平岡伸隆, 三品 健, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一, 島村誠, 外狩麻子 (2011) : 超音波土中水分・水位計測における周波数特性の検討, 土木学会第 66 回年次学術講演会要旨集, 629-630.
- (42) 吉久光一 (1997) : 屋外の伝搬における空気吸収の計算 (ISO9613-1 について), 騒音制御, 21 (3), 130-135.
- (43) 藤山 宗, 伊藤夕樹, 長野浩一, 樽屋啓之, 中田 達, 伊藤裕二, 靱井和朗 (2017) : 評価板を用いたコンクリート開水路の粗度係数の推定, 農業農村工学会論文集, 305, 97-102.
- (44) 星 貴之 (2015) : DIY 音響浮揚装置を作ってみた (第 2 報), エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2015 論文集, 2015, 100-106.

- (45) 間庭愛信 (1985) : 水中音の特性, 騒音制御, 9(2),  
61-64.
- (46) 森 充広, 渡嘉敷 勝, 森 丈久, 中矢哲郎 (2011) : カ  
ルシウム溶脱したモルタルと補修材料との付着強度に関する  
考察, コンクリート工学会年次論文集, 33 (1) , 701-706.
- (47) 茂木貴弘 (2014) : 超音波の音速と減衰に基づく温湿  
度計測法に関する研究, つくばリポジトリ, 12102 甲第  
6886 号.
- (48) 山田一郎 (1990) : 空気による音の吸収, 騒音制御  
14 (1) , 23-27.

## 謝辞

本論文の成果は多くの方々の支えのもとになりたっています。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

三重大学大学院生物資源学研究科 石黒覚教授には、7年間物心両面においてご指導して頂きました。石黒先生のひたむきにコンクリートに向き合う姿勢は、いつも私の励み、そして日々の研究活動の活力になりました。

三重大学大学院生物資源学研究科 岡島賢治准教授には、常日頃から熱く心のこもったご指導をして頂きました。7年間の歳月の中で、何でもこなしていらっしゃる岡島先生の姿を間近に見ることが出来たのは、私にとってかけがえのない経験になります。岡島先生の意味は、受け継ぎ私の今後の人生に活かせるように精進していきたいと思います。

三重大学大学院生物資源学研究科 成岡市教授には、研究分野の垣根を超えて、いつも手厚いご指導を頂きました。成岡先生には修士課程の時にも、学位審査をして頂きました。成岡先生の部屋で数時間の指導・意見交換をさせていただいたことは生涯忘れることはありません。成岡先生の昔話や実験への熱い思いを聞くと、私はまだまだ未熟者であることを再認識できるいい機会となりました。研究の厳しさ、そして楽しみについてご教授いただいたことは、深く感謝しております。



三重大学大学院生物資源学研究所 陳山鵬教授には，副査として学位請求論文の審査をして頂きました．農業機械を専門とする陳山先生から，本論の意見を頂き反映することが出来たことは，深く感謝しております．

丸栄コンクリート工業株式会社 環境課 渡部健氏には，本課題に対する共同研究企業としてお世話になりました．渡部氏の常に研究の成功への道筋を立て，積極的に行動される姿は，私にとって目標となる姿でした．沢山の経験をさせて頂いた，渡部氏，そして丸栄コンクリート工業株式会社様には，深く感謝しています．

環境施設工学研究室 本論に関連する研究を共に行った，多湖さん，小古くん，渡邊くん，松井くんには，この成果をともに喜び分かち合いたいと思います．また，修士課程で共に勉学に励んだ，西脇さん，古田さんには，今誠に感謝しております．

最後になりましたが，9年間の大学生活を支えてくれた両親に深く感謝いたします．