

環境条件が空中超音波  
粗さ測定に与える影響に関する研究

平成 28 年度  
修士論文

三重大学大学院生物資源学研究科  
共生環境学専攻 農業農村工学講座  
環境施設工学教育研究分野

学籍番号 515M228

氏名 長岡 誠也

指導教員 岡島 賢治

## 目次

第 1 章 序論 .....	4
1.1 はじめに .....	4
1.2 農業用水路ストックマネジメントに基づく保全管理 .....	4
1.3 農業用水路摩耗劣化について .....	9
1.4 コンクリート表面粗さ測定に関する既往の研究 .....	11
1.5 空中超音波粗さ測定について .....	12
1.5.1 空中超音波算術平均粗さ測定 .....	13
1.5.1.1 算術平均粗さと最大振幅の関係による粗さ測定 .....	14
1.5.1.2 測定範囲の検証 .....	15
1.5.2 空中超音波粗度係数測定 .....	16
1.5.3 現場環境を想定した研究 .....	22
1.5.3.1 センサ法線と測定面のなす角が及ぼす影響 .....	22
1.5.3.2 乾湿による影響 .....	26
1.6 研究目的 .....	28
第 2 章 空中超音波測定方法 .....	30
2.1 実験で用いた測定機器 .....	30
2.2 ホーン .....	34
2.3 増幅回路 .....	36
2.5 測定回数について .....	38
2.4 測定面について .....	39
第 3 章 環境条件が与える影響 .....	41
3.1 空気吸収減衰について .....	41
3.1.2 空気吸収減衰 ISO 9613-1 .....	41
3.1.3 実験概要 .....	47
3.1.4 実験結果と理論的減衰との比較 .....	49
3.1.5 減衰補正 .....	51
3.1.6 粗面での吸収減衰 .....	52
3.1.7 増減率と温度の関係式による減衰補正案 .....	54
3.2 風速について .....	55
3.2.2 風洞実験装置の諸元 .....	56
3.2.3 実験概要 .....	56
3.2.4 実験結果 .....	59
3.2.5 風速による粗さ測定への影響 .....	61
第 4 章 まとめ .....	63
4.1 空気吸収減衰について .....	63

4.2 風速について .....	63
第 5 章 引用参考文献 .....	64
謝辞.....	67

# 第 1 章 序論

## 1.1 はじめに

我が国の農業用排水路は、幹線水路で約 5 万 km、支線水路を含めると約 40 万 km に及ぶ延長を有している。再建設費ベースで考えると 18 兆円ともなる巨大資本である（農林水産省 2014）。これら水路網は、高度経済成長期に施工され、長い年月が経過し、近年では、老朽化が進んでいる状況にある。一般的にコンクリート建造物の耐用年数は、40 年だとされており、刻一刻と更新が必要な水路が増加している。

ここで、耐用年数を迎える水利施設の推移を図 1 に示す。2000 年以降に急速に増加している。しかし、一度に更新することは、財政面で不可能とされており、戦略的な保全管理が必要とされている。農業用水利施設を効率的に保全するために、農林水産省は、平成 19 年から「農業水利施設の機能保全の手引き」を策定し、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図るストックマネジメントの取り組みを掲げている。

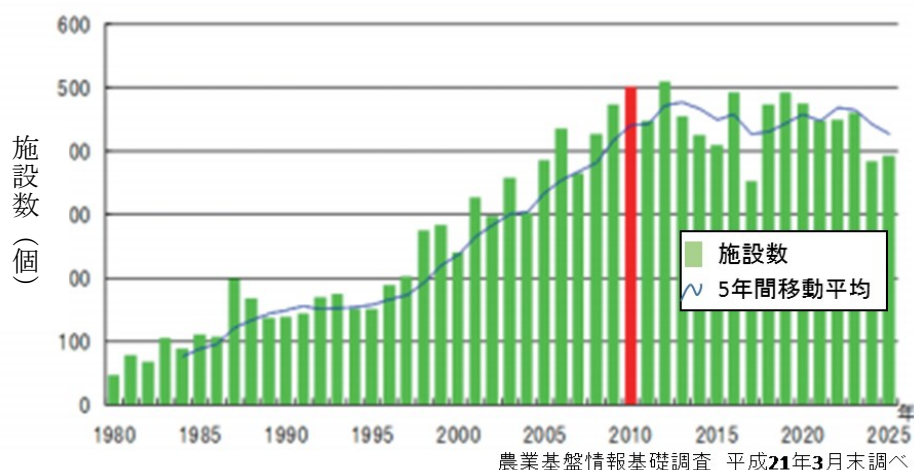


図 1 耐用年数を迎える基幹的水利施設（農林水産省，2014）

## 1.2 農業用水路ストックマネジメントに基づく保全管理

ストックマネジメントとは、従来、劣化の進行により施設性能に改良の必要が生じた場合に、全面的な更新設備を施すことが一般的であったが、適切な機能診断を行い、管理水準を下回る前に補修・補強・更新の対策をとることで施設の長寿命化を図り、施設のライフサイクルコストを低減させる取り組みのこ

とをいう。

農林水産省は、よりの確かつ効率的にストックマネジメントを実施するために以下の 6 つのことを策定している。ストックマネジメントの実施サイクルを図 2 に示す。「①施設管理者による日常管理における点検，補修，②施設造成者等による定期的な機能診断，③ 診断結果に基づく劣化予測，効率的な対策工法の比較検討，機能保全計画の策定，④施設監視計画に基づく施設監視，⑤機能保全計画及び監視結果を踏まえた関係機関等における情報共有と役割分担による対策工事の実施，⑥調査・検討の結果や対策工事に係るデータの蓄積等を段階的・継続的に実施する」（農業水利施設の機能保全の手引き，2015）

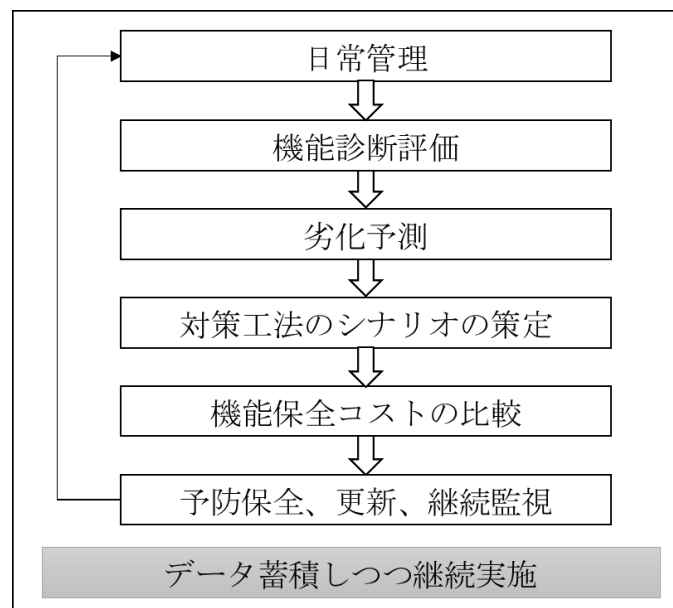


図 2 スtockマネジメントの実施サイクル（農林水産省，2015）

ストックマネジメントの実施サイクルは，機能診断結果に基づき，対策等の検討が行われる。そのため，多岐にわたる劣化に対して適切な機能診断が必要とされている。農業用水路の性能低下とその因子について図 3 に示す。いくつもの劣化要因が相互的に作用し，性能低下を及ぼしていることがわかる。

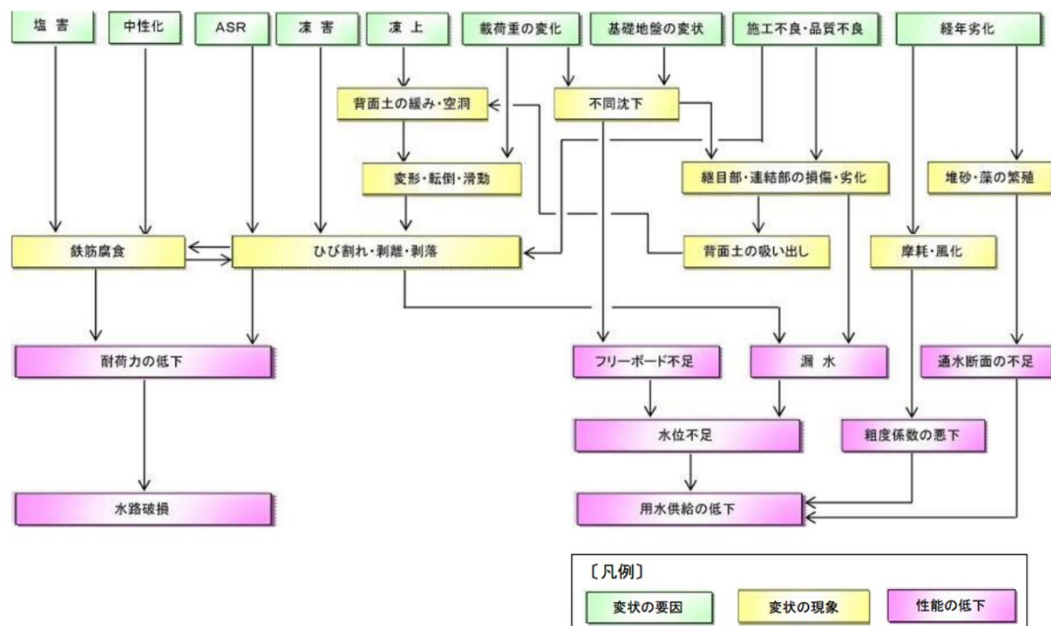


図 3 性能劣化とその要因（農林水産省，2015）

このように、様々な劣化に対する適切な機能診断技術が重要であり、水路形状や環境条件を含めた診断が必要になる。

現在行われている現地調査について表 1，表 2 に示す。力学的安定性に関する劣化因子の、ひび割れ，変形・歪み，圧縮強度や，通水性に関する劣化因子の，流量，水位などは，定量的な機能診断技術が整備されている。しかし，その他の劣化因子に対しては，目視による診断が目立つ現状である。

実際，表 3 に示すように東海農政局管内で平成 13 年から 22 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。

このようなことから，通水性能の低下を補修要因とする事例は多く，定量的な機能診断技術が求められている。特に，ストックマネジメントの観点に着目すると，通水性能は農業用水路の最も大きな役割を果たすため，今後定量的な機能診断が重要課題として考えられる。通水性能を引き起こす摩耗劣化について以下の 1.3 節で記述する。

表 1 機能診断手法－1（農林水産省，2015）

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、ポール、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	目視による有無	写真記録、図化
			（析出物）エフロレッセンス	〃	〃
			（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	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

表 2 機能診断手法－2（農林水産省，2015）

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 ・性理	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	〃
	水位制御性・ 分水制御性	分水流量	定量計測結果より算定	定量記録、写真記録	灌漑期
		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



表 3 東海農政局 機能診断事例 (2015)

事前評価 (機能診断) 結果一覧表 【1/2】 青字: 性能を定量的に把握している、赤字: 性能を定量的に把握できていない、緑字: 中略

整理番号	(1)	(12)~(13)	(22)~(24)	(25)~(28)	(29)	(3)	(38)~(42)	(49)	備考
事業名、事業内容、水路タイプ、築修・補修工法	新設件 緑川幹線 瀬川暗渠工事 開水路 PCM	新設件 岡崎幹線 渡瀬水路他その1~2工事 開水路 PCM応力機能目地	新設件 左岸幹線 左岸幹線水路その1~2工事 開水路 PCM応力機能目地	新設件 宮田導水路 大土工区その1~その2、扶農工区その1~2工事 開水路 PCM応力機能目地	新設件 宮田導水路 草井工区 開水路 PCM目地補修	新設件 大江排水路 稲沢工区その9工事 開水路 (緑石植) 底版: 強コンクリート → 施工段階でパネルに変更	新設件 大江排水路 一宮上流工区その1~4工事 開水路 (緑石植) 底版: パネル	宮川 導水路 その6-2工事 開水路 PCM、パネル	
年度	H12調査、H18設計	H19,20調査、H20設計	H13調査、H15設計	H16調査、H19設計	H16調査、H20設計	H15調査、設計	H15調査、H16設計	H15調査、H18設計	
主な対策理由	コンクリートの劣化、通水性能不足 (常時通水であり、非灌漋期に片側通水で補修等の対策を行う。)	コンクリートの劣化 S評価 (S-3)	各変状が発生しており、これらに対策することで耐久性を向上させる。	排水流入による通水性能不足、各変状が発生しており、これらに対策することで耐久性を向上させる。	排水流入による通水性能不足、各変状が発生しており、これらに対策することで耐久性を向上させる。	通水性能不足、主石護岸の劣化対策 (護岸はブロック護岸)	通水性能不足、主石護岸の劣化対策 (護岸はブロック護岸)	通水性能不足、既設水路の老朽化	
水理性能	通水性能: 定量的評価なし (目視調査のみ)、現況通水性能 $n=0.015$ で水理計算実施 → NG能力不足 (改良能力 $n=0.015$ )	止水性能: 目地の割れ、止水板の割れ等を定量的評価 通水性能: 評価なし	通水性能: 骨材の洗い出し (目視: 定量的評価なし) 止水性能: 止水材の劣化 (目視: 定量的評価なし)	通水性能: 定量的評価なし (目視調査のみ)、現況通水性能 $n=0.015$ で水理計算実施 → NG能力不足 (改良能力 $n=0.015$ ) 止水性能: 止水材の劣化 (目視: 定量的評価なし)	通水性能: 定量的評価なし (目視調査のみ)、現況通水性能 $n=0.015$ で水理計算実施 → NG能力不足 (改良能力 $n=0.015$ ) 止水性能: 止水材の劣化 (目視: 定量的評価なし)	通水性能: 定量的評価なし (目視調査のみ)、現況通水性能 $n=0.025$ で水理計算実施 → NG能力不足 (改良能力 $n=0.025$ )	定量的評価なし (目視調査のみ)、現況通水性能 $n=0.025$ で水理計算実施 → NG能力不足 (改良能力 $n=0.025$ )	通水性能: 定量的評価なし (目視調査のみ)、現況通水性能 $n=0.015$ で水理計算実施 → NG能力不足 (改良能力 $n=0.015$ )	
構造性能	耐荷性能: コア採取による圧縮強度試験 → OK 21N/mm2 以上	耐荷性能: コア採取による圧縮強度試験 → OK 21N/mm2 以上 鉄筋腐食: 耐久性能低下の要因になるとしてすべて補修	耐荷性能: コア採取による圧縮強度試験 → OK 21N/mm2 以上	耐荷性能: コア採取による圧縮強度試験 → OK 21N/mm2 以上	耐荷性能: コア採取による圧縮強度試験 → OK 21N/mm2 以上	耐荷性能: 定量的評価なし (目視調査のみ) → NG 目視調査結果より定性的に評価	耐荷性能: 定量的評価なし (目視調査のみ) → NG 目視調査結果より定性的に評価	耐荷性能: コア採取による圧縮強度試験 → OK 21N/mm2 以上	
耐久性能	中性化: コア採取による中性化試験 → OK 中性化残り 10mm 以上 摩耗: 定量的評価なし (目視調査のみ) → 評価なし ひび割れ: ひび割れ幅等測定 $\geq 0.2mm$ 以上を要対策	中性化: コア採取による中性化試験 → OK 中性化残り 10mm 以上 摩耗: 定量的評価なし (目視調査のみ) → 評価なし ひび割れ: ひび割れ幅等測定 $\geq 0.2mm$ 以上を要対策	中性化: コア採取による中性化試験 → OK 中性化残り 10mm 以上 摩耗: 定量的評価なし (目視調査のみ) → 評価なし ひび割れ: ひび割れ幅等測定 $\geq 0.2mm$ 以上を要対策	中性化: コア採取による中性化試験 → OK 中性化残り 10mm 以上 摩耗: 定量的評価なし (目視調査のみ) → 評価なし ひび割れ: ひび割れ幅等測定 $\geq 0.2mm$ 以上を要対策	中性化: コア採取による中性化試験 → OK 中性化残り 10mm 以上 摩耗: 定量的評価なし (目視調査のみ) → 評価なし ひび割れ: ひび割れ幅等測定 $\geq 0.2mm$ 以上を要対策	該当無し	該当無し	中性化: コア採取による中性化試験 → OK 中性化残り 10mm 以上 摩耗: 定量的評価なし (目視調査のみ) → 評価なし ひび割れ: ひび割れ幅等測定 $\geq 0.2mm$ 以上を要対策	
事前評価 (機能診断)	○	△	△	△	△	△	△	△	

### 1.3 農業用水路摩耗劣化について

摩耗の進行は、大きく 2 種類に分類することができる。すなわち、①森ら(2011)より、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。および、②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。

図 4 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。

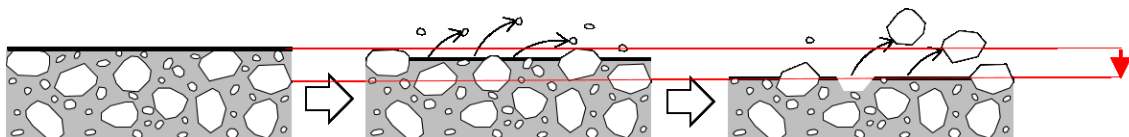


図 4 摩耗劣化の進行

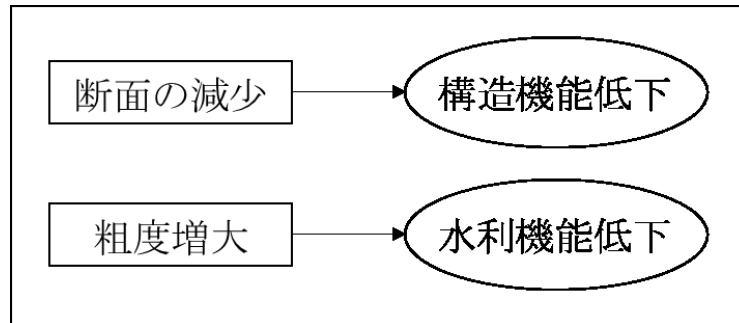


図 5 摩耗による水路機能への影響

ところで、摩耗劣化は、一般的にマンニングの粗度係数で評価される。しかし、竹村ら(2008)によると、現場水路で粗度係数を正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は困難であると報告している。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、コンクリート表面の摩耗量を、粗さ指標である算術平均粗さ  $Ra(mm)$  を用いて評価する試みが進められ、算術平均粗さが、JIS B 0601 に規定されている。図 6 に概略図を示す。算術平均粗さ  $Ra(mm)$  とは、粗さ曲線  $f(x)$  から、基準長さ  $l(mm)$  を抜き取り、平均線  $Y(x)$  から粗さ曲線までの偏差の絶対値を合計して、平均した値である。摩耗劣化に関する既往の研究については、以下の 1.4 節で記述する。

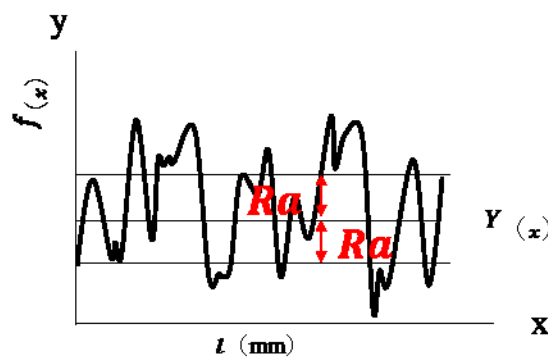


図 6 算術平均粗さ概略図

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

ここで、 $R_a$ : 算術平均粗さ (mm),  $l$ : 基準長さ (mm),  $f(x)$ : 粗さ曲線,  $Y(x)$ : 平

## 1.4 コンクリート表面粗さ測定に関する既往の研究

農業用水路粗さ測定に関する研究として、中矢ら（2008）が提案した手順が基礎となる。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と、レーザ変位計で測定した算術平均粗さ  $R_a$ 、最大高さ  $R_y$  との関係式を提案した。粗さを測定することで、粗度係数を推定することができることを示したが、粗さ測定に有効な測定手法は確立していない現状である。

そこで、以下に既往の粗さ測定手法のいくつかについて紹介する。

1)型取りゲージ：型取りゲージは、0.8mm 程度の針金が 100 本以上、上下に可動できるよう設置されており、測定面に針金を押し当て、粗さの型を取り、解析を行う手法である(Abu-Tair A.I. et al., 2000)。加藤らは(2008)は、供用中の水路で型取り測定を行い、算術平均粗さ  $R_a$ 、最大高さ  $R_y$  と水路健全度の相互関係を評価した。加藤ら(2008)によると、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 程度になることが報告されている。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。

2)Concrete Surface Profiles：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. et al., 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。

3)レーザ変位計：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、レーザ変位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。

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る。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(Courard L. et al., 2012 & ASTM E 965, 2001) (Mokarem D., 2006)。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(Pedro M.D. et al., 2013 & ASTM E 2380)。

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（長谷川ら 2013）。しかし、これは取得画像を解析するときに、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。

そこで、長岡ら（2014）は、空中超音波の持つ、反射強度・面的であることに着目をして、粗さ測定手法開発を行った。空中超音波粗さ測定については下記の 1.5 節で記述する。

## 1.5 空中超音波粗さ測定について

長岡らは 2013 年から空中超音波粗さ測定に関する研究を行っている。長岡ら（2014）が農業農村工学会全国大会で報告をした「空中超音波を用いたコンクリート面の粗さ測定」が研究の基礎となるもので、空中超音波センサを用いて算術平均粗さの推定式を提案し、測定範囲も明らかにしている（1.5.1 節）。

次に、粗度係数の推定式を求める手順を、小古ら（2015）が提案をし、渡邊ら（2016）によって関係式を報告している（1.5.2 節）。

岡島らは、これらの結果を基に、一連の現象に対して理論的考察を加え、農業農村工学論文集（2016）に投稿した。また、これらの研究と並行をして、現場水路を想定した、検討も行っている（1.5.3 節）。

### ➤ 1.5 章で用いた空中超音波センサ

- ・ T/R40-16（日本セラミック（株））
- ・ LV-EZ1（Maxbotic 社）

図 7、図 8 にセンサの写真を、表 4 に 2 つのセンサ仕様と実験に用いたセンサを示す。スペックは両者似ているが、T/R40-16 は送信と受信専用の素子があり、LV-EZ1 は、送信と受信を一つの素子が交互に行う特徴を持つ。

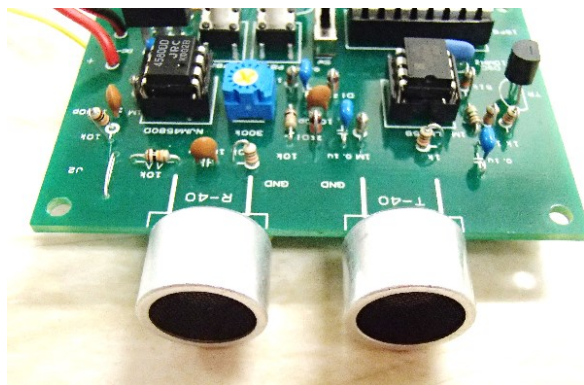


図 7 T/R40-16（日本セラミック（株））



図 8 LV-EZ1 (Maxbotic 社)

表 4 空中超音波センサ仕様と 1 章の各実験に用いたセンサ

	T/R40-16	LV-EZ1
中心周波数(kHz)	40	42
センサタイプ	開放型	開放型
測定周期(s)	0.025	0.05
センサ直径(mm)	16.2	15.5
高さ(mm)	12.2	16.4
1.5.1.1	○	
1.5.1.2	○	
1.5.2		○
1.5.3.1	○	○
1.5.3.2		○

### 1.5.1 空中超音波算術平均粗さ測定

長岡ら(2014)は、空中超音波粗さ測定の基礎研究を行い、空中超音波センサが「安価・簡易的・面的」に算術平均粗さを測定する技術を報告した。センサには“安価”な超音波距離計を用いた。算術平均粗さと最大振れ幅の関係による粗さ測定から、簡易的な測定であることを明らかにした。測定範囲の検証から、面的な測定であることを明らかにした。

空中超音波の反射波の最大振れ幅（以後最大振れ幅とする）mV を評価指標として用いている。最大振れ幅の例を図 9 に示す。最大振れ幅とは反射波の振幅

が最大となった時の変位量の絶対値である。測定原理を図 10 に示す。空中を伝播する超音波はコンクリートと空気の音響インピーダンスの差で反射率、透過率が決定する。この、2 媒体の音響インピーダンスの差は非常に大きいため、音波は完全反射し、透過率はほぼ 0 に近くなる。しかし、コンクリート面に粗さがある場合では、粗さによって乱反射をし、最大振れ幅が小さくなる特徴を持つ。

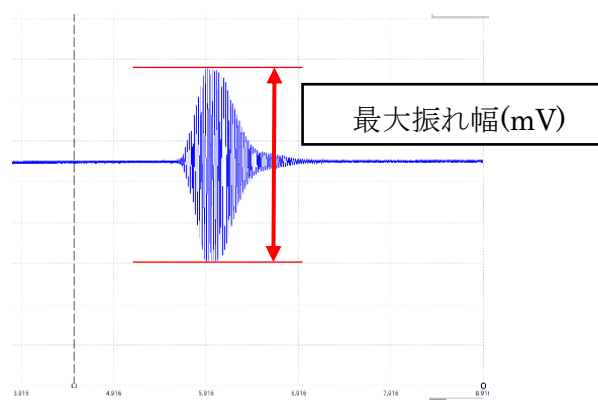


図 9 最大振れ幅の例

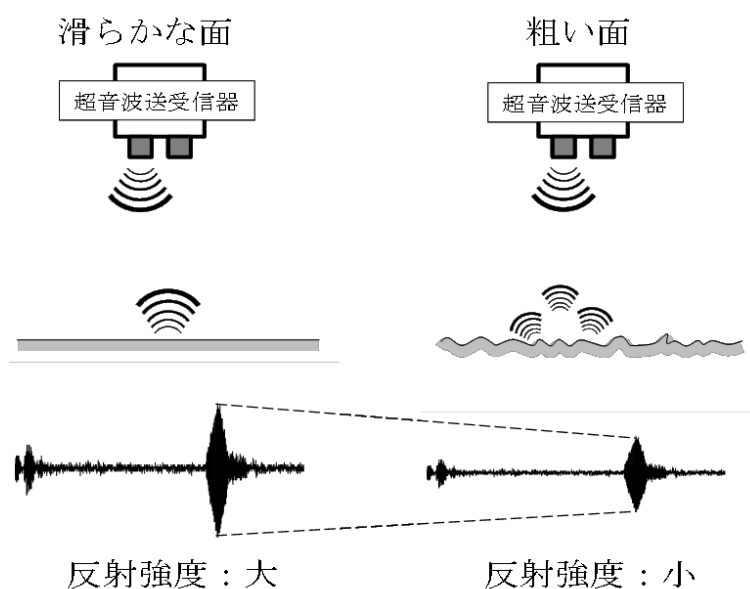


図 10 測定原理

#### 1.5.1.1 算術平均粗さと最大振れ幅の関係による粗さ測定

測定面に対して空中超音波センサを垂直方向に設置し、センサカバー面と測



定面の距離を 550, 1000, 1500mm と変化させた．算術平均粗さの異なる測定面で空中超音波粗さ測定を行った．その結果を，図 11 に示す．算術平均粗さが大きくなる(粗さが大きくなる)につれて，最大振れ幅が小さくなることが確認できた．各測定距離において  $R^2$  値は高く，精度の高い粗さ測定ができる可能性が示された．また，空中超音波の測定手法は“距離”と“最大振れ幅”という 2 つのシンプルな指標から，“簡易的”に算術平均粗さを推定することができることが明らかとなった．

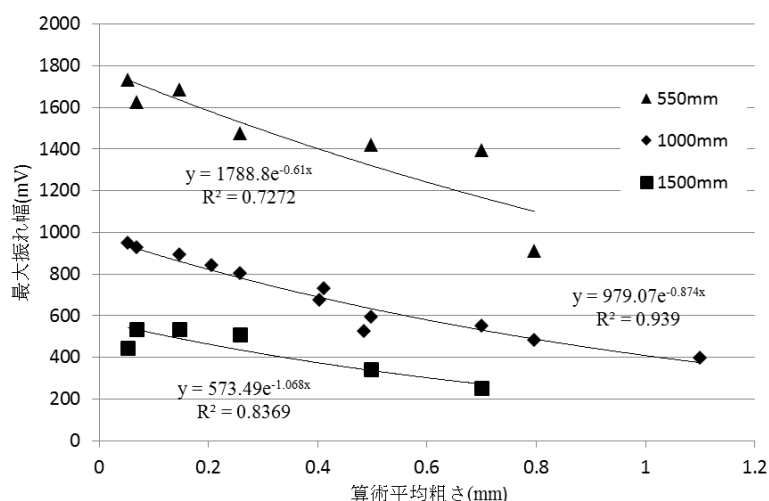


図 11 最大振れ幅と算術平均粗さの関係（長岡ら，2014）

### 1.5.1.2 測定範囲の検証

3 種類の粒径の異なる砂利を用いて，粗さ領域を拡大していくことで，測定範囲を検証した．その結果を，図 12 に示す．それぞれ直径 60cm 以内は砂利の領域が広くなるに伴い，最大振れ幅が小さくなった．これは，粗さ領域が広がり，超音波の乱反射が大きくなったと考えている．しかし，直径 60cm 以上は最大振れ幅が一定となったことから，砂利の直径が測定範囲を超えたと考えた．したがって，測定範囲は直径 60cm であると判断した．既往の研究が線情報であったのに対して，本研究では，面情報を取得することから，“面的”であることが明らかとなった．

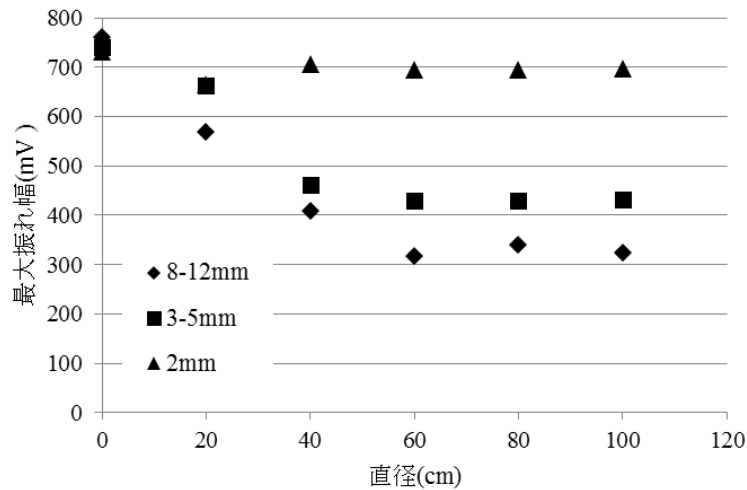


図 12 測定範囲（長岡ら，2014）

### 1.5.2 空中超音波粗度係数測定

小古ら（2015）は，空中超音波センサを用いた粗さ測定技術を用いて，最大振れ幅から粗度係数を推定する技術を提案した．実験に用いた摩耗模型コンクリートは，粗さの異なるコンクリート 3 種類を作製した．作製方法については下記の 2.4 節で記述した．

水理実験は，三重大学生物資源学部水理実験施設を利用し，本研究のため水路の設計・施工を行った（水路設計方法については 1.5.2 節の最後に記述する）．

図 13 に実験水路側面図を示す．全長約 19m で，調整水槽を備え，14m の矩形断面水路，排水槽で構成されている．粗度係数の実測は，式(2)マンニングの平均流速公式を用いて，上下流のエネルギー勾配を求めることで求めた．また，水面計を追跡し，式(3)ルンゲクッタ法を用いて不等流水面形を計算し，階二乗誤差の最も小さくなる粗度係数を求めた．空中超音波測定は，測定距離 1000mm から行い，最大振れ幅を取得した．図 14 に粗度係数と最大振れ幅の関係を示す．粗度係数と最大振れ幅の関係式を用いて，最大振れ幅から粗度係数を推定することができることが報告された．



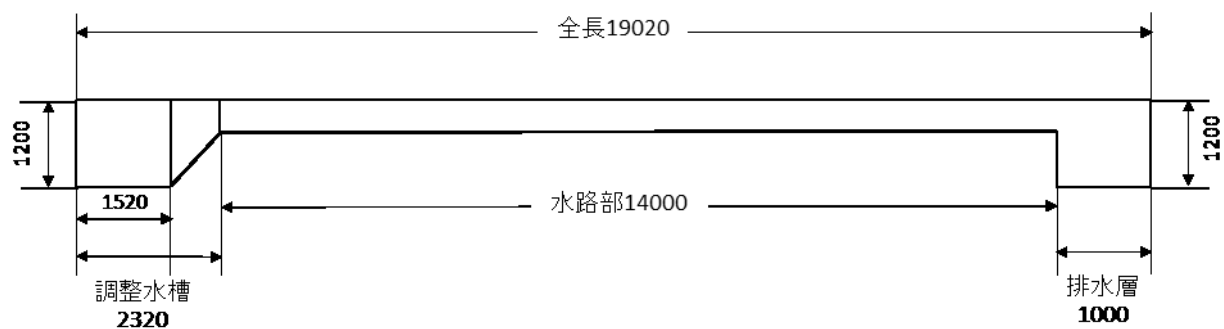


図 13 実験水路側面図 (単位:mm)

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

$n$ :マンニングの粗度係数( $\text{m}^{\frac{1}{3}}/\text{s}$ ),  $v$ :流速( $\text{m}/\text{s}$ ),  $R$ :径深( $\text{m}$ ),  $I_e$ :エネルギー勾配

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i_b - \frac{n^2 Q^2}{R^{\frac{4}{3}} b^2 h^2}}{1 - \frac{Q^2}{g b^2 h^2}} \quad (3)$$

$n$ :マンニングの粗度係数( $\text{mm}^{(1/3)} \text{s}^{-1}$ ),  $Q$ :流量( $\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$ ),  $R$ :径深( $\text{mm}$ ),  $i_b$ :水路床

勾配,  $b$ :水路幅( $\text{mm}$ ),  $h$ :水深( $\text{mm}$ ),  $g$ :重力加速度( $\text{mms}^{-2}$ )

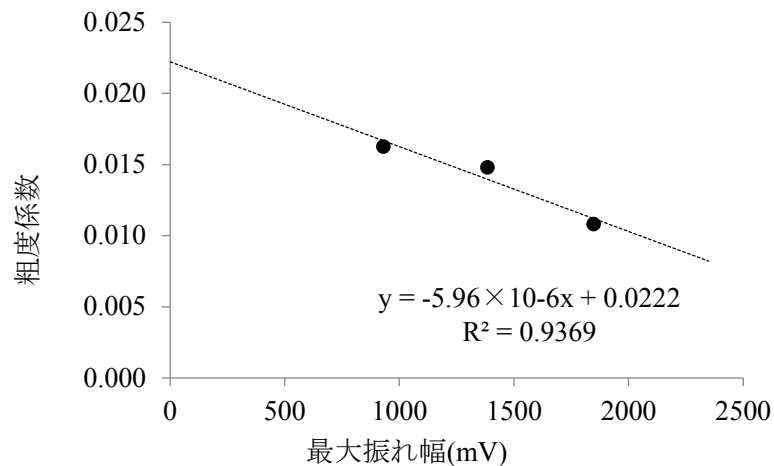


図 14 粗度係数と最大振幅の関係（渡邊ら，2016）

➤ 水路の設計について

本研究で要求される性能を満たすように水路の設計を行った．設計において，明治大学の小島信彦准教授に助言をいただいた．設計の方針としては以下の点に特に注意した．

◆ 可能な限り水路部を長くすること

これは上流と下流で水頭差を出しやすくするためである．

◆ 水路部に水を流すための調整水槽において整流作用を十分に機能させること

これは水路に流れる水の表面が荒れていると測定の誤差が大きくなるため

◆ 流入した水を溢れさせることなく流下，排水できること

➤ 調整水槽

調整水槽は測定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（図 15）．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．測定区間で水面が波たち荒れていると，測定の誤差につながるため，重要な区間である．図 16 にもぐり堰通過前後の水面の荒れ具合を示す．



圖 15 調整水槽

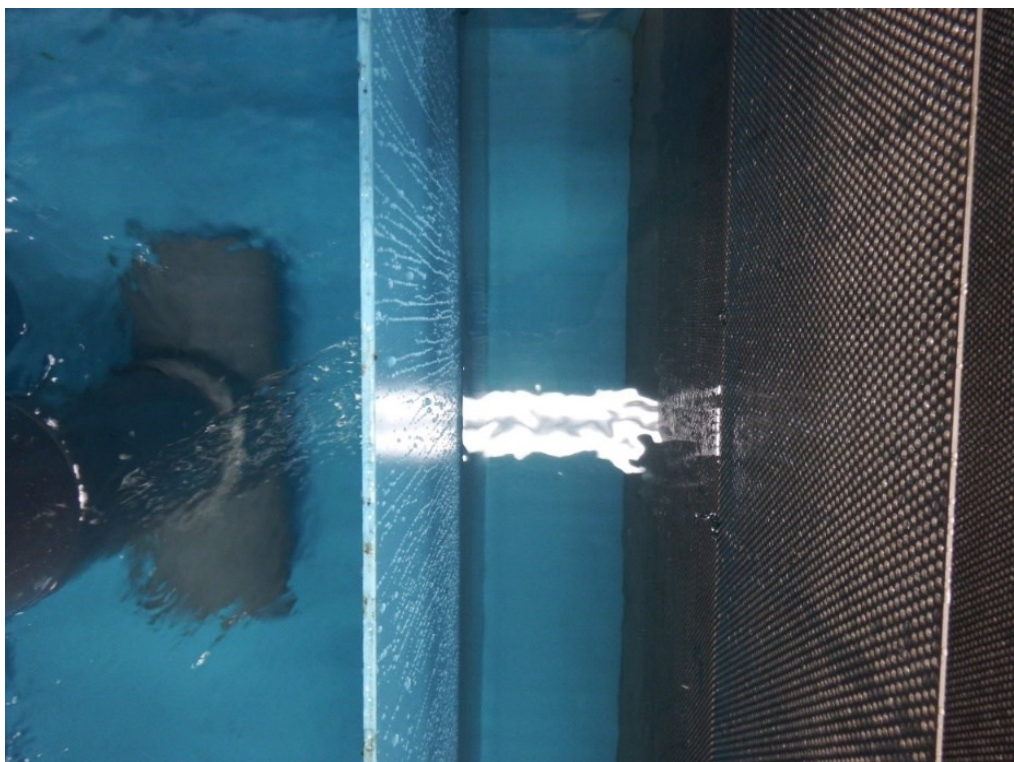


圖 16 整流作用

調整水槽の設計において、岩手大学、金子らの流水水槽の製作を参考にした。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下方向に向かって穴の直径がφ2mm, φ4mm, φ6mm, φ8mm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おり、新光ナイロン株式会社の製品である。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。

#### ➤ 水路

本研究の水理模型実験を行うために、水路部にはコンクリートパネル(丸栄コンクリート製)を3面に敷設し、コンクリート三面張り水路模型とした(図17)。そのため、水路は重さ60kgにもおよぶパネルを3枚支えるだけの強度が必要であった。設計当初は木製の予定であったが、支保工の数が膨大になってしまい、水路の変形等の可能性が考えられた。そのため、鋼製水路にすることでこれらの問題を解決した。

水路部の延長は14mあり、これは水理実験施設が許す限り長くした結果である。水路幅は中矢ら(2008)の研究を参考にして、コンクリートパネルを設置していない状態で0.60mとした。水路高さは0.45mであった。コンクリートパネル設置状態で幅0.50m、高さ0.4mであった。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高さであった。また、測定等の作業のしやすさを考慮した結果である。





図 18 排水層から地下水槽への導管

### 1.5.3 現場環境を想定した研究

#### 1.5.3.1 センサ法線と測定面のなす角が及ぼす影響

これまでの研究では、三脚と水準器を用いて、センサと測定面の垂直を確保していた。しかし、現場水路では三脚を据え付ける時間が手間となること。また、非灌漑期においても、管理用水として水が残っている場合、三脚が据え付けられないことが想定される。したがって、確実に垂直を確保することが困難となる可能性が懸念される。

そこで垂直でない場合を想定し、センサと測定面の角度を  $0, 1, 2, 3, 4, 5^\circ$  と変化をさせた。この時の角度は図 19 に示すように、センサ表面に接する接線に対する法線と、測定面との垂直線がなす角度をいう。測定距離は法線が  $1000\text{mm}$  となるように設定をした。

図 20, および図 23 に回転軸を示す。まず、T/R40-16 では、 $z$  軸については回転による影響は無いと判断し検討は行っていない。 $x$  軸については図 21 が示すように、回転による影響が有ると判断をし、① $x$  軸回りとして検討を行った。 $y$  軸については図 22 が示すように、回転による影響が有ると判断をし、② $y$  軸回り（送信下）、③ $y$  軸回り（送信上）として検討を行った。

次に、LV-EZ1 では、 $z$  軸については回転による影響は無いと判断し検討は行っていない。 $x$  軸については図 24 が示すように、回転による影響が有ると判断をし、検討を行った。

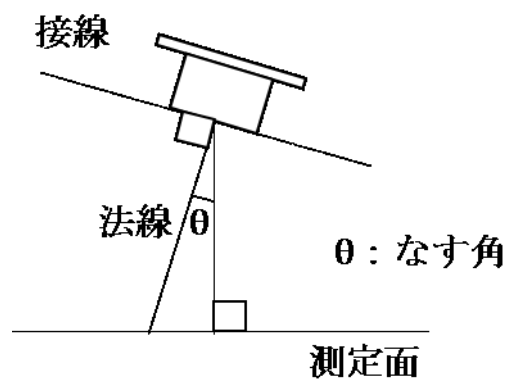


図 19 なす角と法線について

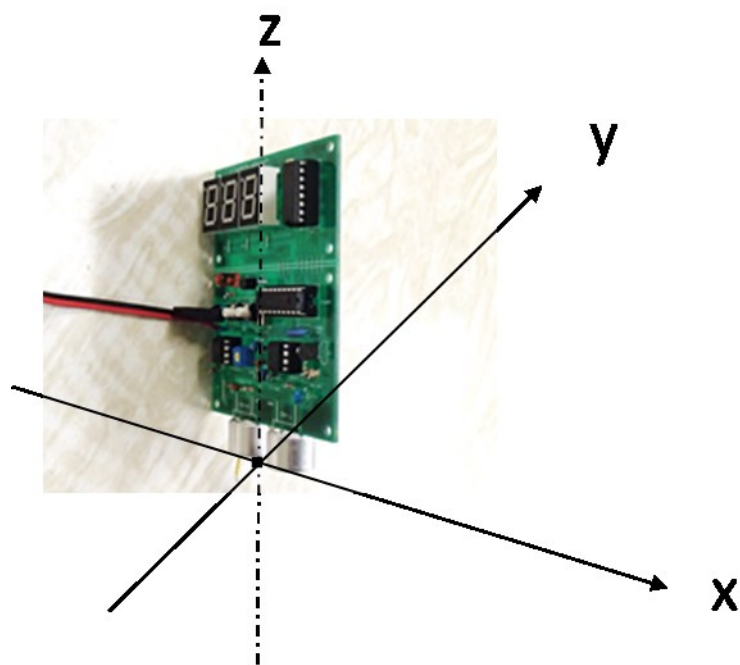


図 20 T/R40-16 の回転軸

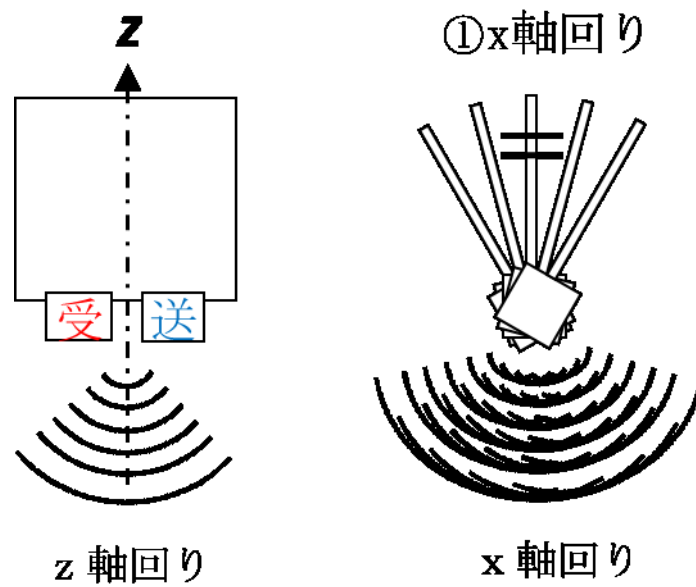


図 21 T/R40-16 の Z 軸回り, x 軸回り

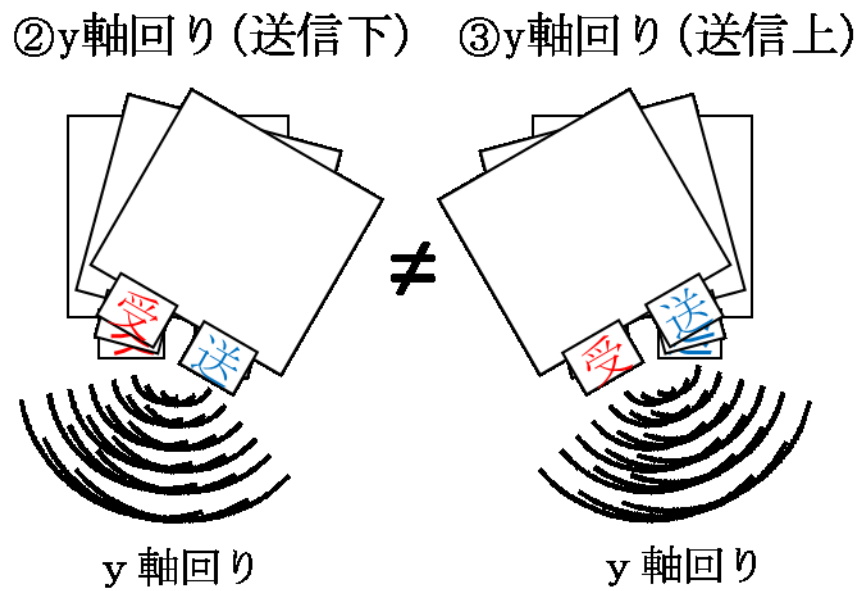


図 22 T/R40-16 の y 軸回り



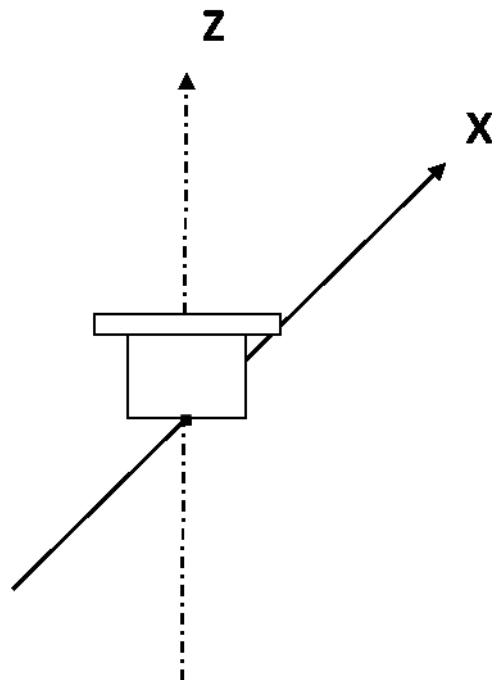


図 23 LZ-EZ1 の回転軸

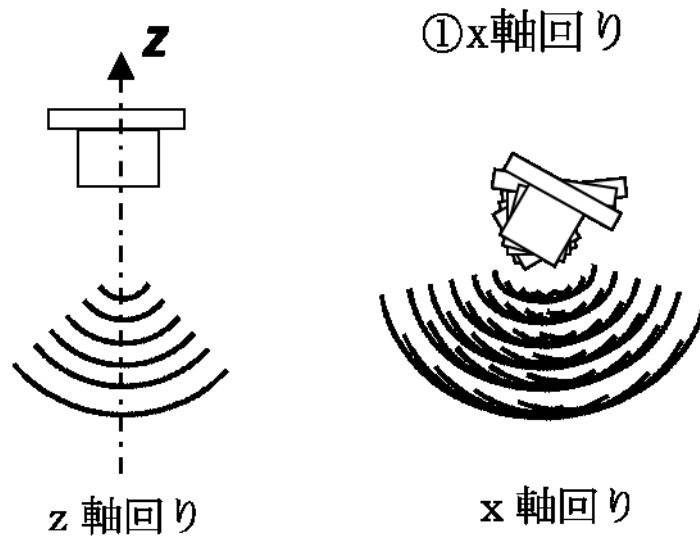


図 24 LV-EZ1 の z 軸回り, x 軸回り

図 25 に T/R40-16 の実験結果を示す. 回転パターンによって最大振れ幅の減少傾向が異なることがわかった. 特に, ③y 軸回り (送信上) で回転させた時が, 最も減少が大きくなった. 角度の補正を行う場合は, 回転軸によって減少傾向が異なるため困難である.

図 26 に LZ-EZ1 の実験結果を示す．0～3° の範囲において最大触れ幅の減衰は少なく，測定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  $R^2$  乗値 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，現場での空中超音波測定は，LZ-EZ1 のような送信・受信素子が一体となっているタイプが望ましいことがわかった．

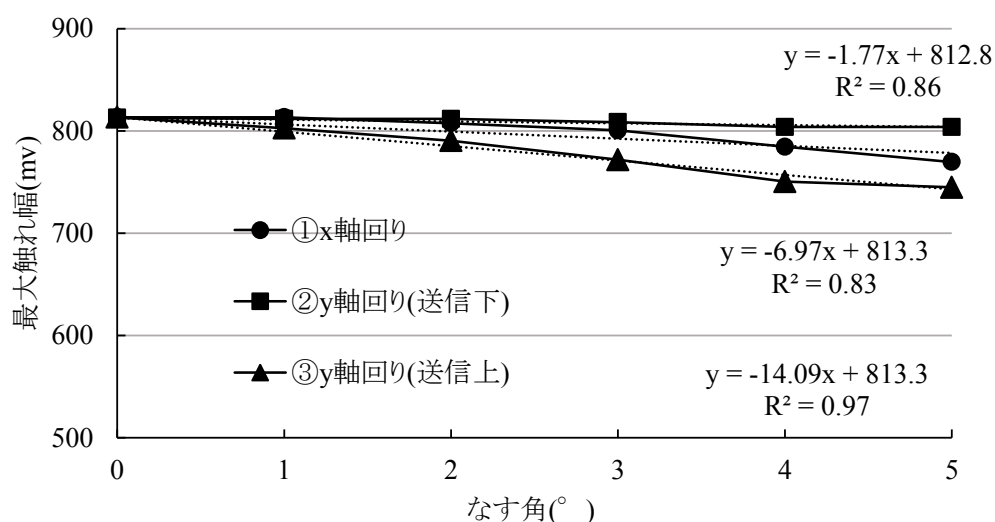


図 25 T/R40-16 最大振れ幅となす角の関係（長岡ら 2015）

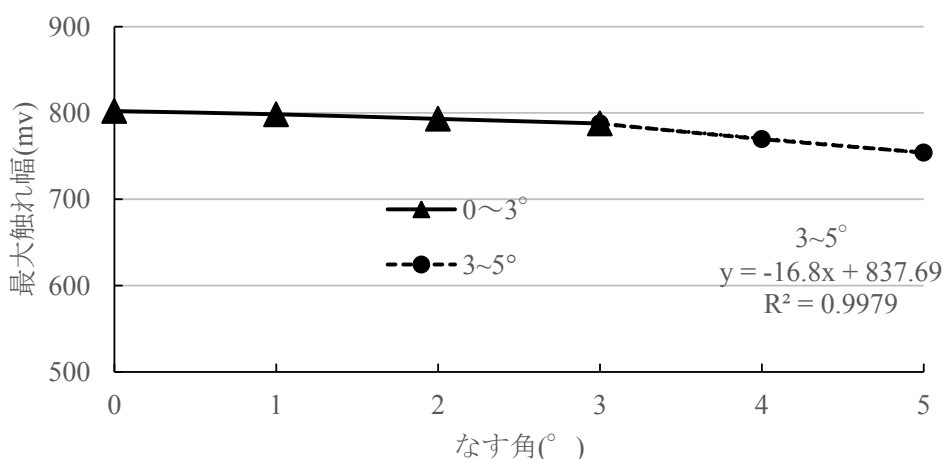


図 26 LZ-EZ1 最大振れ幅となす角の関係（長岡ら 2015）

### 1.5.3.2 乾湿による影響

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、前日の雨で水路が濡れている場合が想定される。そこで、 $Ra=0.30$ ,  $0.45\text{mm}$  の乾いた面と湿った面で測定を行った。なお、湿った面とは、 $1\text{m}$  四方を濡らした後、タオルで軽く拭き取り、表面が湿った程度である。図 27 に湿った面の状況を示す。表 5 に乾いた面と湿った面の最大振れ幅を示す。

乾いた面に比べ、湿った面の測定結果が、大きくなる傾向がみられた。須田（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、測定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測定結果の差は、非常に小さく、4.1 節での 20 回移動平均の 100 サンプルの標準偏差は、 $Ra=0.30$  のとき  $\pm 9.1\text{mV}$ 、 $Ra=0.45$  のとき  $\pm 6.3\text{mV}$  であった。乾湿の実験結果は、標準偏差の範囲内であり、測定に影響は少ないと考えられる。また、図 28 より反射波形も、ほぼ一致していることが確認できた。



図 27 湿った測定面

表 5 乾湿の最大振れ幅

	乾 (mV)	湿 (mV)
$Ra=0.30$ (mm)	704.4	717.6
$Ra=0.45$ (mm)	590.1	601.5

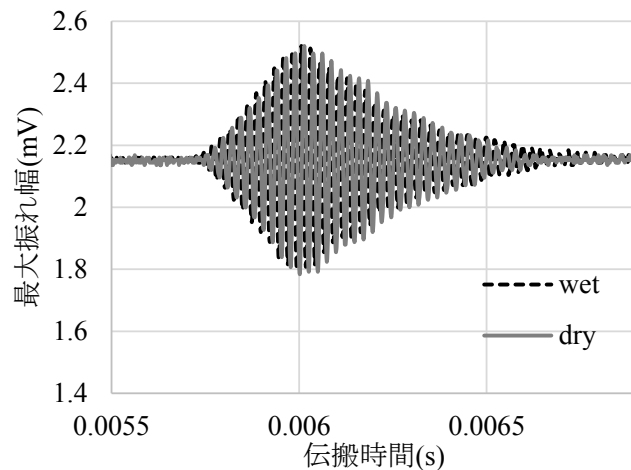


図 28 乾湿の反射波形（長岡ら，2015）

## 1.6 研究目的

1.5 節より，空中超音波粗さ測定技術の農業用水路への有効性が示された．しかし，これまでの空中超音波測定は，屋内で行われることが多く，現場を想定した検討は，1.5.3 項で記述した，センサ法線と測定面のなす角が及ぼす影響と，乾湿による影響であった．従って，現場の環境条件が測定結果に与える影響について検討していなかった．特に，温度・湿度・大気圧は，空気中での音圧の減衰に対して影響を与えることが古くから知られている．また，風速は，空気中での伝搬速度に影響を与えることが古くから知られている．茂木ら(2014)は，減衰と温湿度の関係から，温湿度計の開発を試みた．超音波風速計の技術は，1960 年頃に日本に伝わり，光田ら(1964)は超音波風速計の開発を試みた．しかし，これらの研究事例とは周波数や評価指標が異なるため，環境条件に対する検討を新たに行う必要がある．環境条件に対する課題を解決しなければ，農業用水路粗さ測定を正確に行うことができず，効率的なストックマネジメントを施すことができない．そこで，現場水路内を想定とした温度・湿度・大気圧や風速が空中超音波粗さ測定結果に与える影響に対して，適切な補正や測定条件を設定することを本研究の目的とした．

第 2 章では，空中超音波測定方法で用いた測定機器や測定技術について記述する．

第 3 章では環境条件が与える影響を検討した．

3.1 節では，空気吸収減衰の影響について検討した．

3.2 節では，風速による影響について検討した．

第 4 章では，第 3 章で得られた結果を元に，環境条件が空中超音波粗さ測定に与える影響をまとめた．

第 5 章では，参考文献をまとめた．

## 第 2 章 空中超音波測定方法

### 2.1 実験で用いた測定機器

➤ 空中超音波センサ：LV-EZ1（Maxbotic 社）

表 6 にセンサの仕様を示す．図 29 にセンサの写真と寸法を示す．

表 6 センサの仕様

周波数		42	kHz
寸法	A	16.4	mm
	B	15.5	mm
	C	19.9	mm
	D	22.1	mm
質量		4.3	g

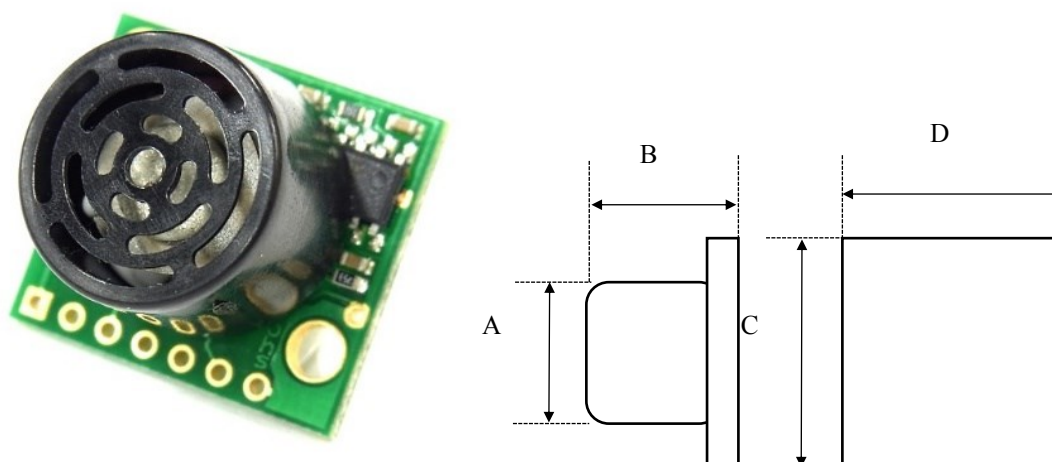


図 29 センサの写真と寸法

本センサの選定には，①周波数，②センサカバー，③送信・受信モジュールの数，3つの検討課題を設けた．選定内容を下記に記述する．

#### ① 周波数

周波数の選定では，超音波の分解能と減衰率に着目する．幹線的な農業用水路での測定を想定すると，測定距離に 1～2m の確保が必要となる．

図 30 に，距離に対する音圧の減衰量を示した．減衰は距離と周波数によって決まる．最大でも 2m での測定が必要であるため，80kHz では減衰が大きい．また，20kHz では可聴域に近く聞こえ，騒音となる可能性があるため，不適切

である。したがって、40kHz 程度を選定した。

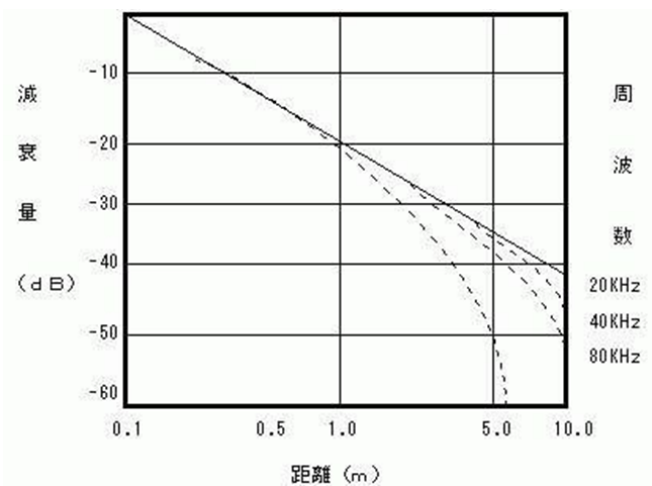


図 30 周波数減衰特性（沼津高専 電子制御工学科）

② センサカバー

センサカバーの選定では、防滴性と感度について着目した。農業用水路での測定は、屋外で比較的水に近いところで測定となるため、防滴型の方が望ましい。しかし、防滴型は開放型に比べて感度が悪くなる。参考として N 社の開放型と防滴型の感度を表 7 に示した。感度に大きな差が表れることから、本研究では開放型と選択し、雨などのセンサが濡れる状況を制限することとした。

表 7 開放型と防滴型の感度比較

	感度(dB)
開放型	-58
防滴型	-80

③ 送信・受信モジュールの数

検討項目，実験概要，実験結果については 1.5.3 節に示す。

➤ オシロスコープ：PicoScope4424（Pico Technology Limited 社）

空中超音波の反射波の電気信号を表示し，最大振れ幅を取得するために用いた。



図 31 PicoScope4424

ー使用手順ー

オシロスコープ表示画面を図 32, 図 33 に示す

1. 最も電圧の振幅が大きくなるのが図 32 に示す, 直接波であるため, 直接波にトリガーを合わせ, 波形を表示させる.
2. 測定結果の横にある+ボタンを押し, ピーク間を選択する.
3. 測定セクションをルーラー間にして, 反射波にルーラーを入れる.
4. 保存方法…ファイル→全波形を名前を付けて保存.

上記の手順で反射波を測定・保存した.

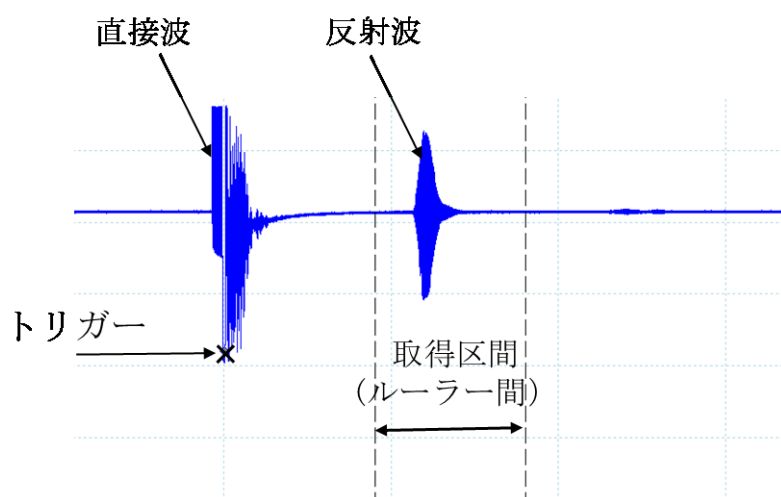


図 32 画面表示-1



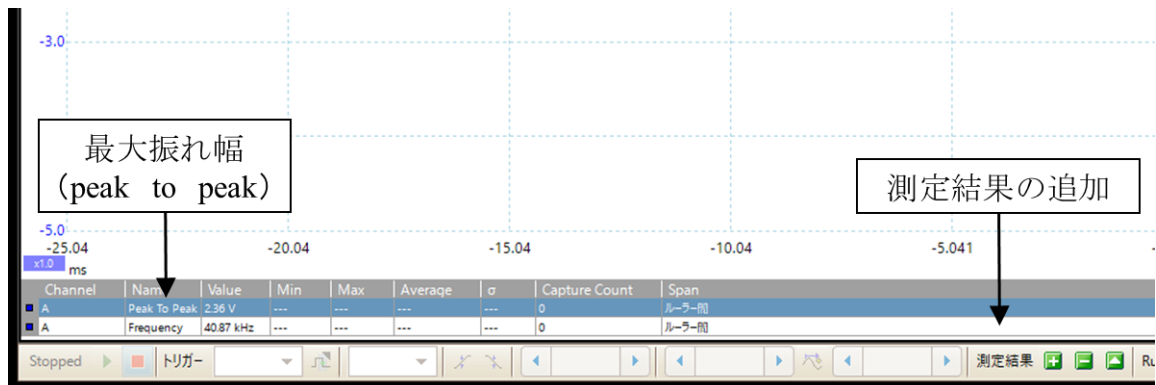


図 33 画面表示－2

### ➤ 型取りゲージ

算術平均粗さを安価に精度よく測定するため、型取りゲージを使用した。用いた、型取りゲージは長さ 147mm、測定スパン約 0.8mm である。

#### －測定手順－

1. コンクリート表面に型取りゲージを図 34 に示すように押し当てる。
2. 1mm 間隔の方眼紙に型取りゲージを図 35 に示すように合わせて、デジカメ等により画像を取得する。
3. 画像をパソコンで拡大をして、0.1mm 精度で凹凸を目視で読み取る。
4. y 軸に凹凸高さ、x 軸に型取りゲージ長さをとり、式(4)を用いて算術平均粗さを計算する。図 36 に算術平均粗さの概略図を示す。



図 34 型取りゲージ測定手順－1

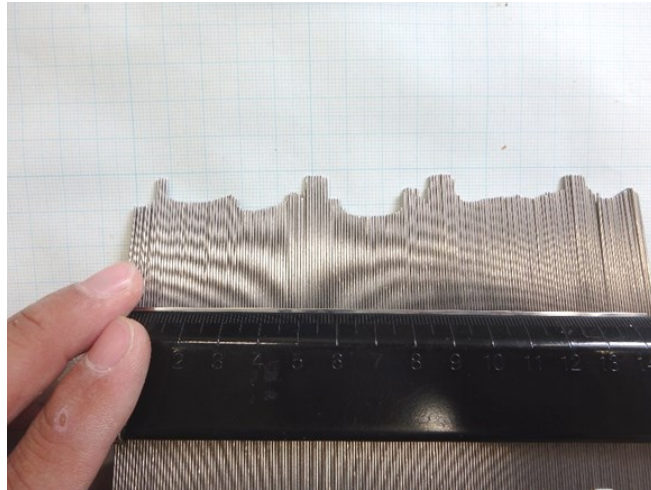


図 35 型取りゲージデータ測定手順－2

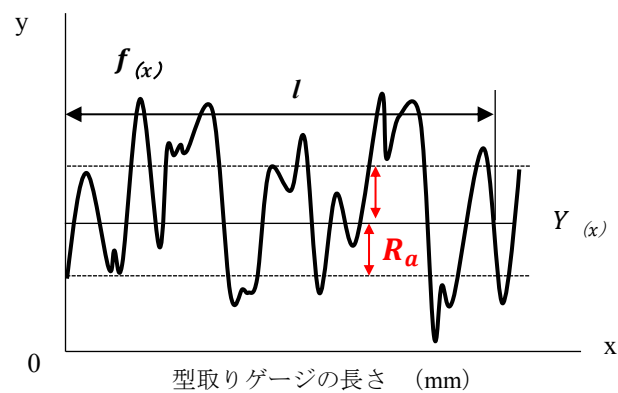


図 36 算術平均粗さ概略図

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

ここで、 $R_a$ ：算術平均粗さ (mm)， $l$ ：型取りゲージの長さ (mm)， $f(x)$ ：  
表面粗さ曲線， $Y(x)$ ：近似直線

## 2.2 ホーン

ホーンと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。

1.5 章で示すように，測定範囲は直径約 600mm である．また，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，縦断方向で摩耗状況が異なることが報告されている．従って，直径約 600mm という測定範囲で測定することは，測定結果がどこの粗さを測定しているのか不明確となる．したがって，測定範囲を制限する必要があると考えた．そこで，M.Raihanul(2016)は，様々な種類のホーンを用いて，測定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，測定範囲の検証と，超音波の集音効果を検討した．その結果，図 37 に示すホーンを用いることによって，測定範囲を直径 300mm 程度まで制限することができた．図 37 はホーンの写真と寸法である．図 38 にホーンを展開したときの諸元を示す．すなわち，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．

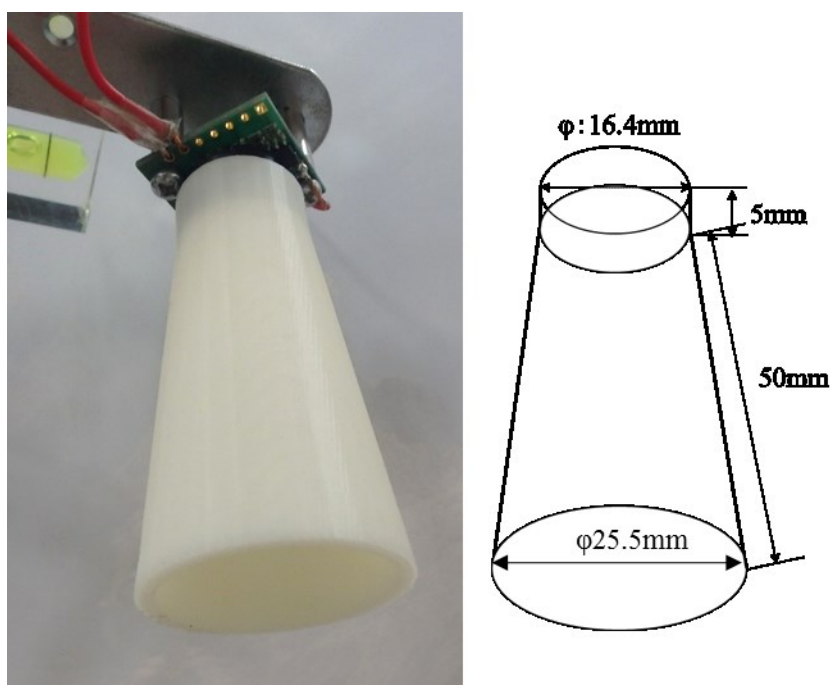


図 37 ホーンの写真と寸法

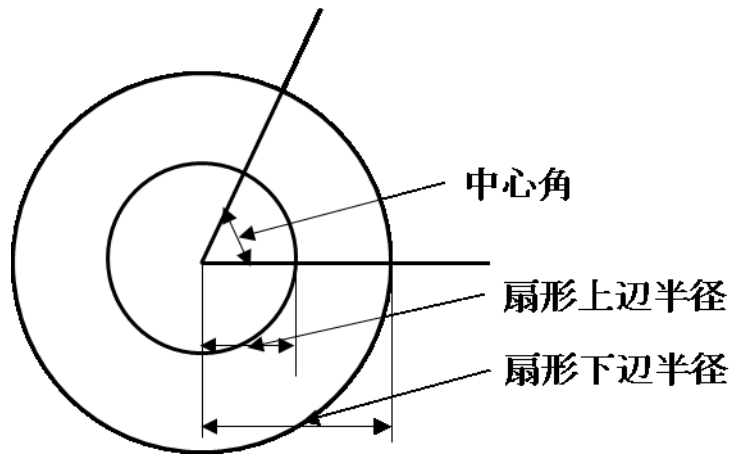


図 38 ホーン展開図

## 2.3 増幅回路

増幅回路とは、空中超音波センサで得られる反射波  $mV$  を、増幅して大きな値として出力する回路である。反転増幅回路と非反転増幅回路の 2 種類があるが、本研究で用いた空中超音波センサ LV-EZ1 は非反転増幅回路を使用している。

### A) 反転増幅回路

図 39 に反転増幅回路図を示す。

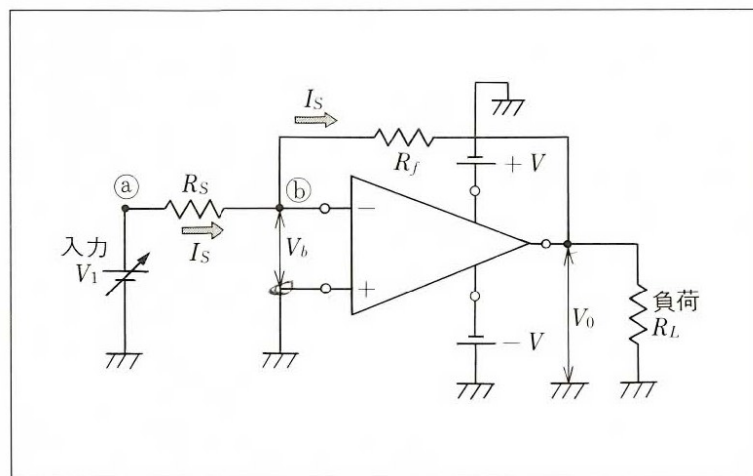


図 39 反転増幅回路

端子 a に入力電圧  $V_1$  を加えたとき、抵抗  $R_s$  に流れる電流  $I_s$  は入力インピー

ダンスが非常に大きいため一端子には流れ込まず，すべて  $R_f$  に流れる．

$$I_s = \frac{V_1 - V_b}{R_s} = \frac{V_b - V_0}{R_f} \quad (5)$$

このとき， $V_b = 0$  ならば

$$I_s = \frac{V_1}{R_s} \quad (6)$$

$$V_0 = -I_s R_f = -\frac{R_f}{R_s} V_1 \quad (7)$$

となる．したがって，電圧増幅度は式(8)で求められる．

$$\frac{V_0}{V_1} = -\frac{R_f}{R_s} \quad (8)$$

## B) 非反転増幅回路

図 40 に非反転増幅回路を示す．電圧増幅度は式(11)で求められる．

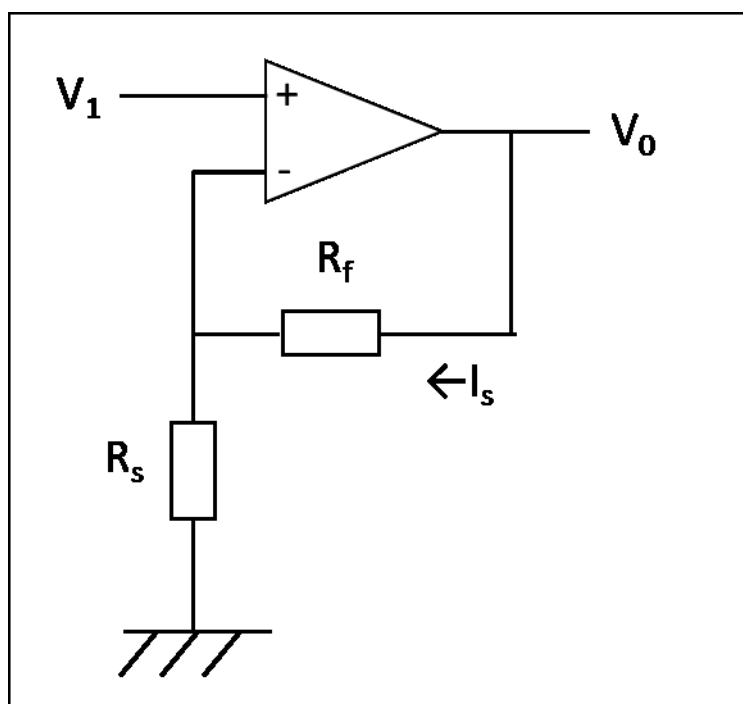


図 40 非反転増幅の回路図

$$V_1 = I_s R_s \quad (9)$$

$$V_0 = I_s R_f + I_s R_s \quad (10)$$

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{R_f + R_s}{R_s} \quad (11)$$

## 2.5 測定回数について

長岡ら(2015)は, 空中超音波測定が持つ最大振れ幅のばらつきに対する検討を行った.

算術平均粗さ 0.30, 0.45mm, 測定距離 550, 1000mm, ホーン無しの測定条件から, 120 個の測定データを取得した. そして, 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 を計算した. 平均値が大きくなるにつれて, 標準偏差が大きくなる傾向が表れた. そこで, 相対的ばらつきを評価するため, 平均値に対する標準偏差の割合を用いた. その結果を図 41 に示す.

距離 550mm からの測定に比べ, 距離 1000mm からの測定の方が, ばらつきが大きくなる傾向があるものの, 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た. また, 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 回の測定にかかる所要時間は 0.6 秒であり, 短時間での測定が可能であると報告した.

本研究においては, ホーンを装着していることから, 測定条件が多少異なる. 従来以上のばらつきが生じる可能性が有るため, 本研究では 20 回の平均値を測定結果に用いることにした.

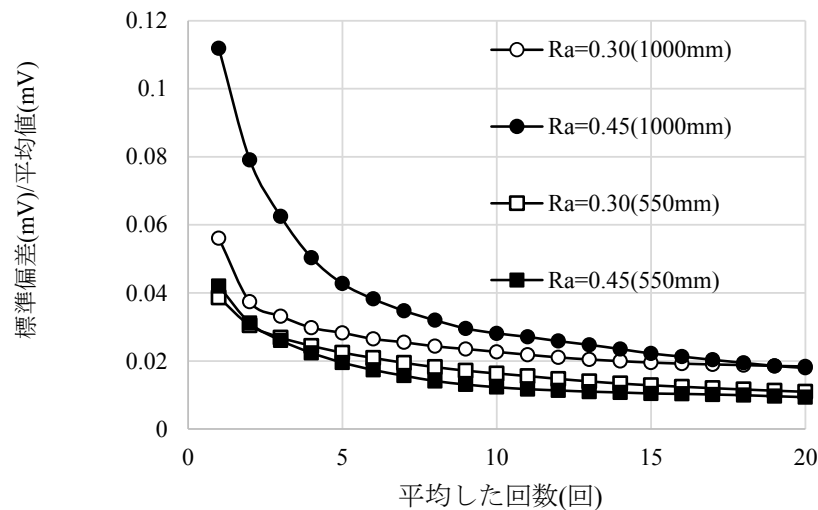


図 41 ばらつきの検討(長岡ら, 2016)

## 2.4 測定面について

本研究で用いた測定面は，丸栄コンクリート株式会社に製作依頼し，粗さの異なる 3 種類の摩耗模型コンクリートを作製した．洗い出し処理によりコンクリート表面に粗さを設けた．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．各実験に用いたコンクリートパネルを表 8 に示す．図 42, および図 43 は実際に測定に用いたコンクリートパネルである．L-10 はセメントペースト，細骨材が剥離し，粗骨材が露出し始めている状態を再現している．L-130 は粗骨材の露出が大きく，粗骨材の剥離を起こす直前の状態を再現している．加藤ら(2008)によると，供用年数 40 年を迎える水路の  $R_a$  は  $0.7(\text{mm})$ 以上とされていることから，摩耗劣化を段階的に表現できていると考えている．

表 8 実験項目と用いた測定面

	$R_a(\text{mm})$	吸収減衰	風速
滑面	0.04	○	○
L-10	0.32		○
L-130	1.04	○	○



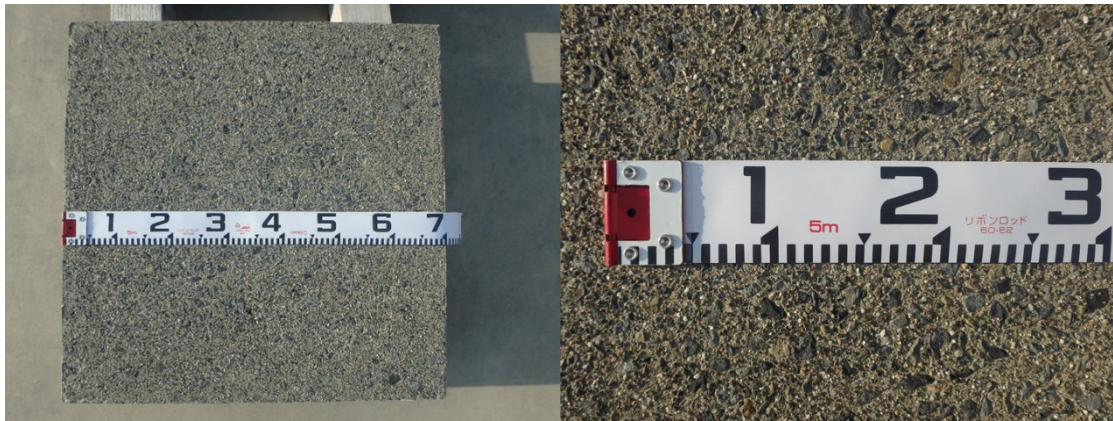


図 42 L-10 全体写真（右） 近距離写真（左）

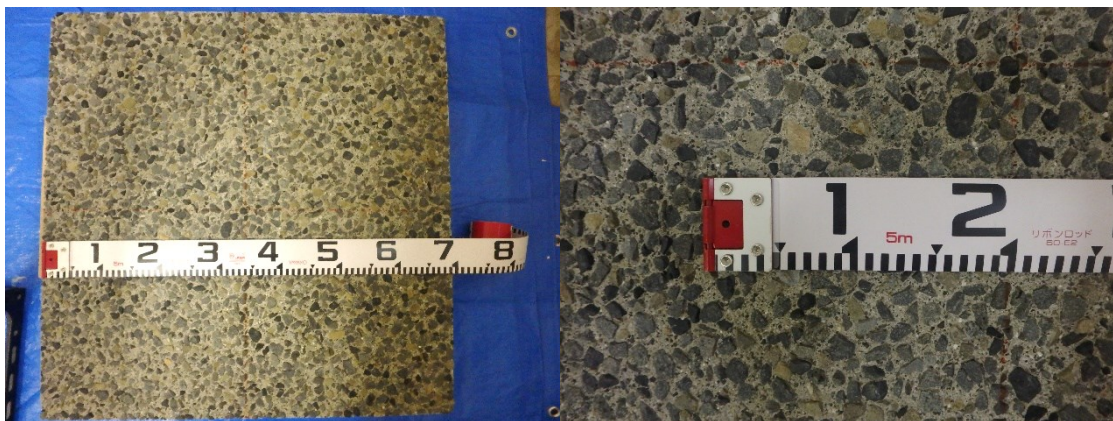


図 43 L-130 全体写真（右） 近距離写真（左）



## 第 3 章 環境条件が与える影響

### 3.1 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 により空気の粘性による吸収減衰が発見された．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，とされている．1993 年に ISO9613-1 に規格化された．

茂木ら(2013)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い．したがって，騒音問題の対象となる周波数は，本研究で用いている空中超音波に比べ低い周波数を扱うため，ISO 9613-1 に示されている周波数帯は 50Hz～10kHz とされている．そのため，本センサの周波数 42kHz は範囲外となってしまう，実験的に空気吸収減衰について検討をする必要がある．そこで，温度・湿度・大気圧の異なる環境条件下で測定をした実測値を用いて，本センサでの減衰を確認し，ISO9613-1 に基づいた補正式を適用して補正を行った．また，増幅率と温度の関係式による補正案について検討を行った．

#### 3.1.2 空気吸収減衰 ISO 9613-1

超音波の音圧は式(24)より，距離に対して指数関数に超音波の音圧は減衰をする．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．

—適用範囲—

音の周波数：50Hz～10kHz

気温：－20℃～50℃

相対湿度：10%～100%

気圧：101.325kPa（1 気圧）

—記号—

$p_r$  : 基準の気圧 : 101.325kPa  
 $T_0$  : 基準の気温 : 293.15K  
 $X_N$  : 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 : 3352.0K  
 $\theta_O$  : 特性振動温度 : 2239.1K  
 $h$  : 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。

$$\alpha = \alpha_{cl} + \alpha_{rot} + \alpha_{vib} \quad (12)$$

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。

$$\alpha_{cl} + \alpha_{rot} = 1.60 \times 10^{-10} \left( \frac{p_a}{p_r} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{0.5} \quad (13)$$

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。

$$\alpha_{vib} = \alpha_{vib,N} + \alpha_{vib,O} \quad (14)$$

$$\alpha_{vib,N} = [(\alpha_{vib}\lambda)_{max,N}] \times \left( \frac{f}{C_{th}} \right) \left\{ 2 \left( \frac{f}{f_{rN}} \right) \left[ 1 + \left( \frac{f}{f_{rN}} \right)^2 \right]^{-1} \right\} \quad (15)$$

$$\alpha_{vib,O} = [(\alpha_{vib}\lambda)_{max,O}] \times \left( \frac{f}{C_{th}} \right) \left\{ 2 \left( \frac{f}{f_{rO}} \right) \left[ 1 + \left( \frac{f}{f_{rO}} \right)^2 \right]^{-1} \right\} \quad (16)$$

振動緩和周波数は、次式で表される．

$$f_{rN} = \left(\frac{p_a}{p_r}\right) \left(\frac{T}{T_0}\right) - \frac{1}{2} \left[ 9 + 280h \exp \left\{ -4.170 \left[ \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \right\} \right] \quad (17)$$

$$f_{rO} = \left(\frac{p_a}{p_r}\right) \left( 24 + 4.04 \times 10^4 h \frac{0.02 + h}{0.391 + h} \right) \quad (18)$$

$(\alpha_{vib}\lambda)_{max}$ 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．

$$(\alpha_{vib}\lambda)_{max,N} = \left(\frac{2\pi}{35}\right) (10 \log_{10} e^2) X_N \left(\frac{\theta_N}{T}\right) \exp\left(-\frac{\theta_N}{T}\right) \quad (19)$$

$$(\alpha_{vib}\lambda)_{max,O} = \left(\frac{2\pi}{35}\right) (10 \log_{10} e^2) X_O \left(\frac{\theta_O}{T}\right) \exp\left(-\frac{\theta_O}{T}\right) \quad (20)$$

水蒸気モル濃度、飽和水蒸気圧は以下の式で表せる。

$$h = h_r \left(\frac{p_{sat}}{p_r}\right) / \left(\frac{p_a}{p_r}\right) \quad (21)$$

$$\frac{p_{sat}}{p_r} = 10^C \quad (22)$$

$$C = -6.8346 \left(\frac{T_{01}}{T}\right)^{1.261} + 4.6151 \quad (23)$$

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．

図 44, 図 45, 図 46 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．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．

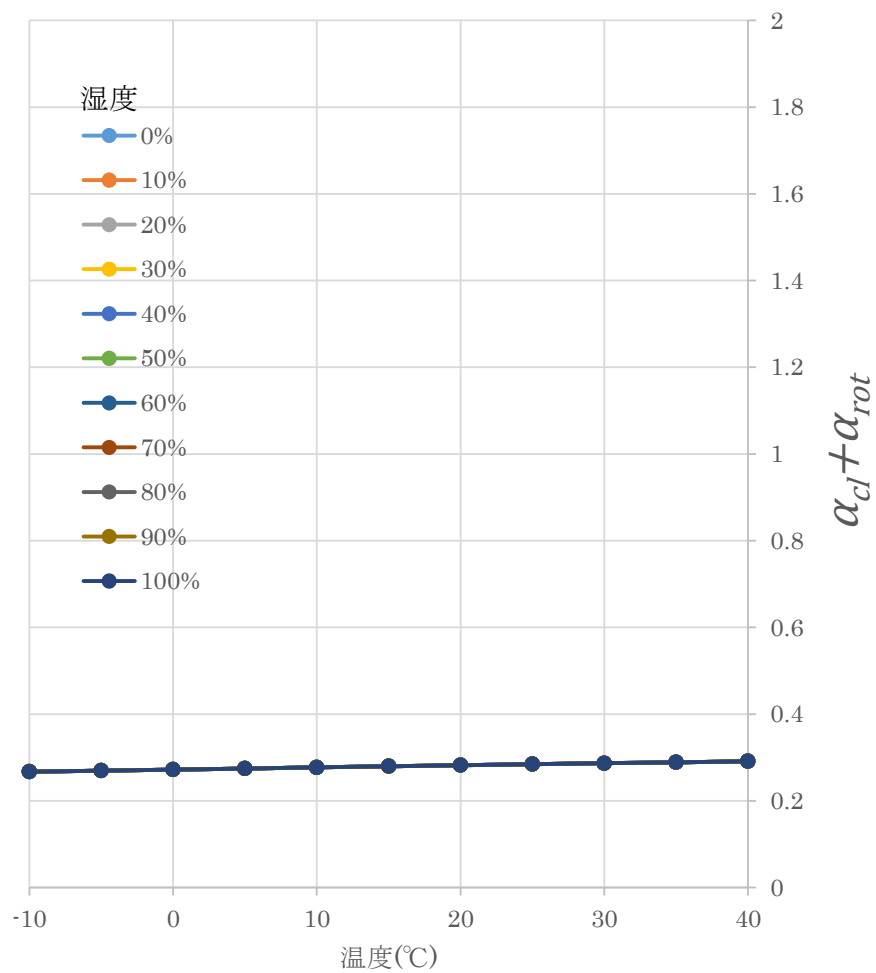


図 44 古典減衰係数，回転緩和減衰係数の和と環境条件の関係

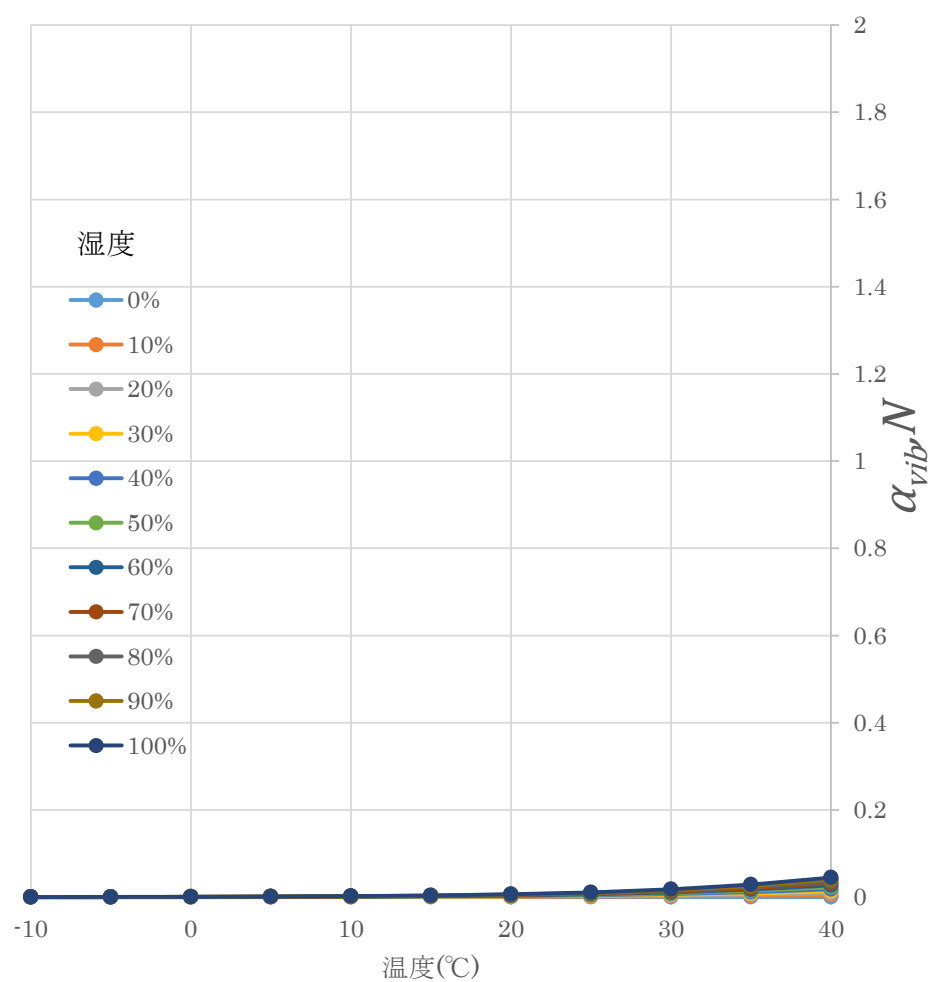


図 45 窒素の分子振動減衰係数と環境条件の関係

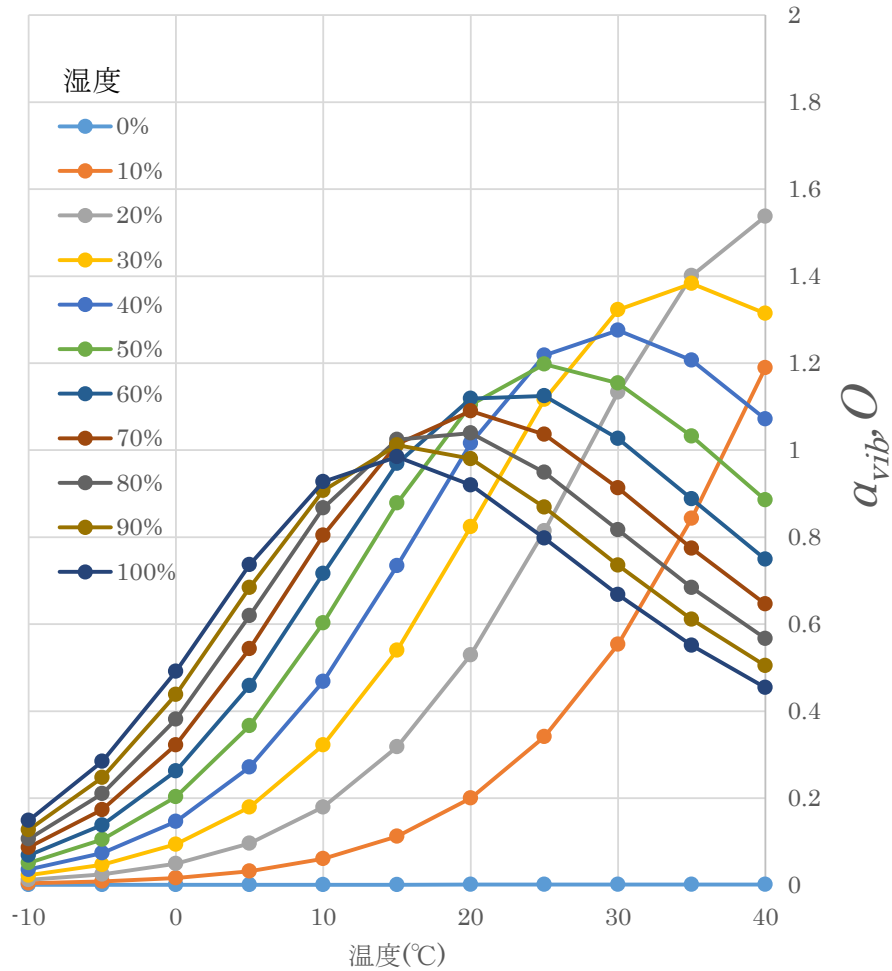


図 46 酸素の振動緩和減衰係数

本研究では、単位長さ当たりの減衰係数 $m$  (1/m)を使用する． $m$ は $\alpha$ の関数となっており式(22)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．本研究において周波数 42kHz，伝搬距離 2.015m は固定値として設けているため、空気中の温度・湿度・大気圧を測定することによって吸収減衰を評価できる．

$$I = I_0 \exp(-ms) \quad (24)$$

$$m = \frac{\alpha}{20 \log_{10} e} \quad (25)$$

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)

図 47 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．

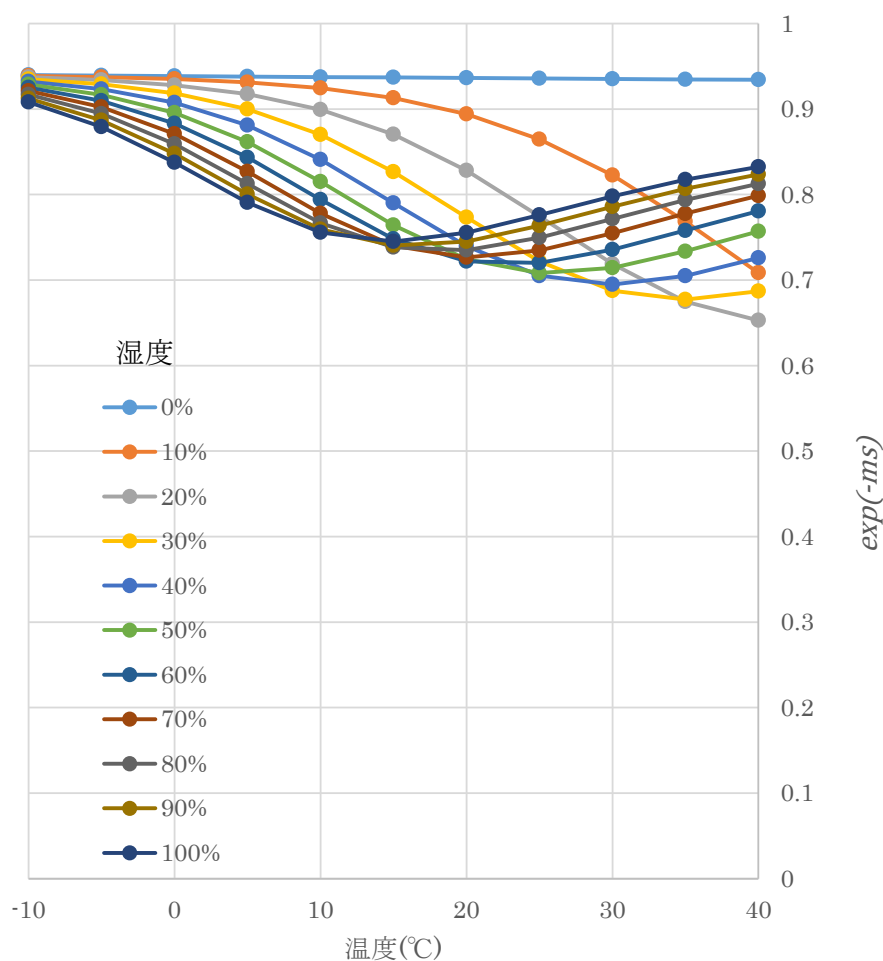


図 47  $\exp(-ms)$  と環境条件の関係

### 3.1.3 実験概要

—実験器具—

- 空中超音波センサ：LV-EZ1 (Maxbotic 社)
- 測定面：表 8 参照 (3.1 章では L-130 を粗面とする.)
- 温度・湿度・大気圧計：TR-73U, TR-72wf-H ((株) ティアンドデイ)



図 48 温湿度・大気圧計 TR-73U ((株) ティアンドデイ)



図 49 温湿度計 TR-72wf-H ((株) ティアンドデイ)

以下に実験の手順を示す．図 50 に実験概要を示す．

1. センサカバー面と測定面の距離を 1000mm とし，測定面に対して垂直方向に設置した
2. TR-73U を測定距離 500mm に設置し，温度・湿度・大気圧を取得した．測定区間中に温度の層ができるため，TR-72wf-H を測定面付近に設置し，



TR-73U と温度や湿度の環境条件が大きく異なることを確認した。

3. 温度・湿度・大気圧の異なる条件下で、空中超音波測定によって最大振幅を取得した。

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、屋内で測定を行った。

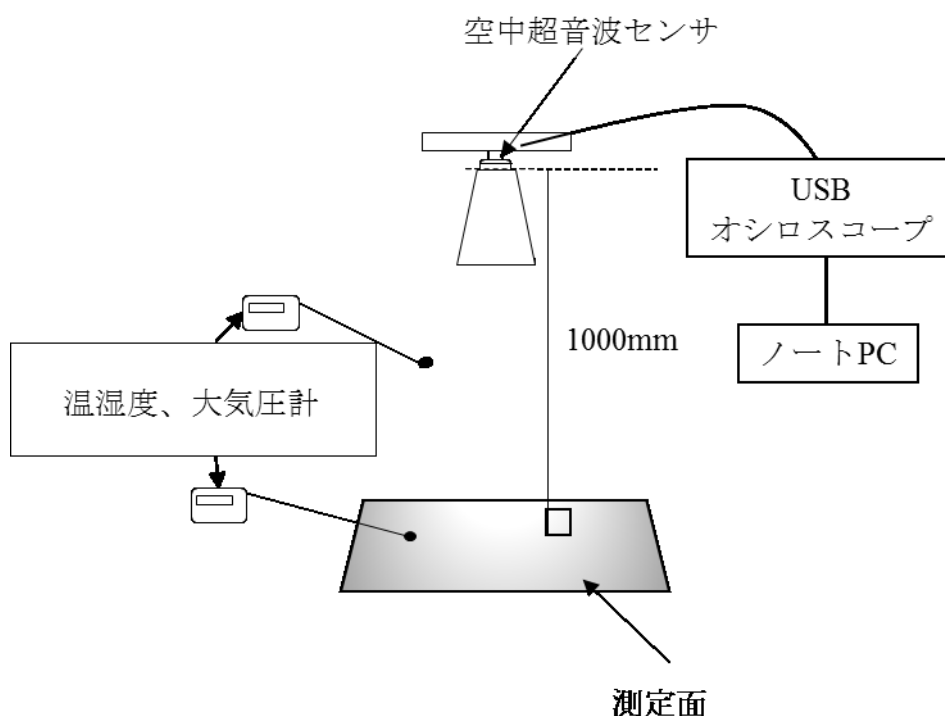


図 50 空気吸収減衰の実験概要

### 3.1.4 実験結果と理論的減衰との比較

空中超音波測定によって得られた最大振幅を実測値とする。3.1 章では測定データが多いため、エラーバーを表示しない。湿度と大気圧は測定をして補正式に使用しているが、影響が少なかったため議論をしない。したがって、温度に着目をして、議論を行っている。

実測値と温度の関係を図 51 に示す。湿度は 10%毎に色分けをしている。実測値は、約 15℃以上になると温度の増加に伴い減少する傾向が見られた。したがって、空気吸収減衰によって測定結果に影響が表れることが確認できた。

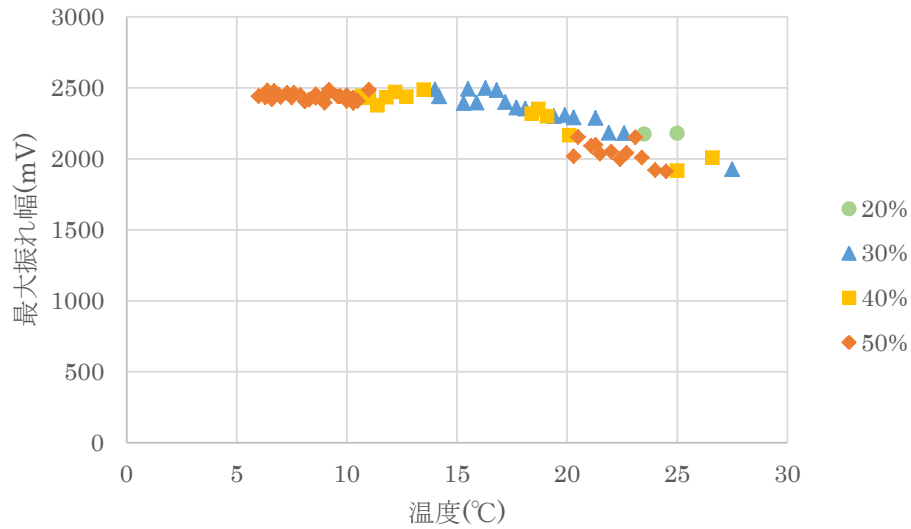


図 51 実測値と温度の関係

ここで、本研究で用いたセンサの最大振幅の減衰が、理論的減衰と一致するのかを検討した。ISO9613-1 より温度、湿度、大気圧のデータを用いて、純音 $I_0$ を計算した。そして、純音の平均値を純音代表値 $I'_0$ とした。純音代表値から、各データの理論減衰値 $I'$ を計算し、同一グラフで比較を行った。

$$I'_0 = \frac{\sum_{k=1}^n I_{0k}}{n} = \frac{I_1 \exp(-m_1 s) + I_2 \exp(-m_2 s) \cdots I_n \exp(-m_n s)}{n} \quad (26)$$

$$I' = I'_0 \exp(-ms) \quad (27)$$

実測値、理論減衰値と温度の関係を図 52 に示す。実測値は 15°C以内の減衰が見られないが、理論的には減衰が起きているため、2 つに相違が見られた。しかし、全体的にみると、実測値と理論減衰値はほぼ一致しているように見られる。

ここで、理論減衰値を真値として、真値と実測値の相対誤差の平均値を求めた。その結果を表 9 に示す。なお、10.0°Cは 6~10°Cに属することとした。相対誤差の平均値は 2.7%という値が得られた。このことから、比較的精度の高い補正が期待できる。

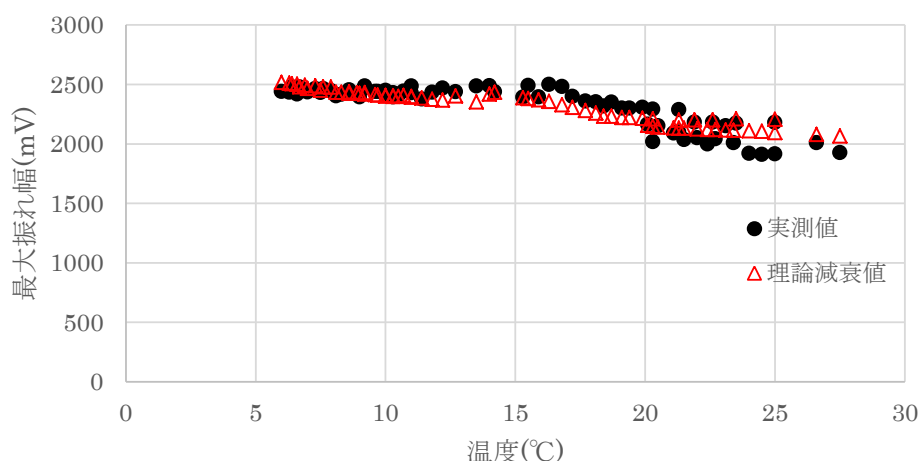


図 52 実測値と理論減衰値の比較

表 9 温度域ごとの相対誤差

温度域(°C)	6～10	10～15	15～20	20～25	25～30	全体
相対誤差(%)	1.72	4.00	4.45	1.38	5.23	2.70

### 3.1.5 減衰補正

実測値と理論減衰値の相対誤差は 2.70%と、本研究で用いたセンサが理論的に吸収減衰をしている傾向が確認された。ここで、ISO9613-1 に示される補正式を適用し補正值を計算した。

補正值と温度の関係、実測値と温度の関係を図 53 に示す。実測値と比べて補正值は、近似直線の傾きが 0 に近づいたため、環境条件による影響が少なくなっていることが確認できた。ここで、平均値を真値として、補正值と実測値の相対誤差の平均を計算した。補正值と実測値の相対誤差を表 10 に示す。表に示す標準偏差は、実測値および補正值 71 データの最大振れ幅から求めた値である。補正值の相対誤差が 2.7%、実測値の相対誤差が 6.4%と、減衰補正によってばらつきを半分以下に抑えられることができた。

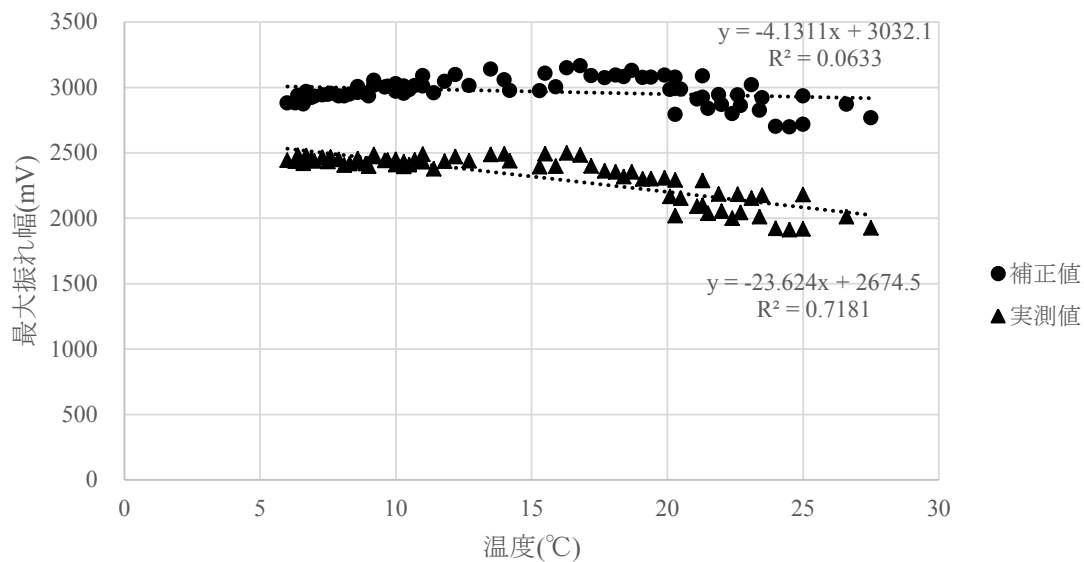


図 53 補正值，実測値と温度の関係

表 10 補正值と実測値の相対誤差

	補正值	実測値
平均値(mV)	2970	2319
標準偏差(mV)	103.5	175.7
相対誤差(%)	2.7	6.4

### 3.1.6 粗面での吸収減衰

滑面での吸収減衰を確認したが，粗さのある測定面での減衰傾向を確認する必要がある．粗さの大きい L-130 を測定面に用いて，滑面の時と同様の実験を行った．3.1 章では L-130 を粗面とする．

実測値と環境条件の関係を図 54 に示す．滑面と同様に実測値は約 15℃以上の温度で，温度の増加に伴い減衰が確認できた．

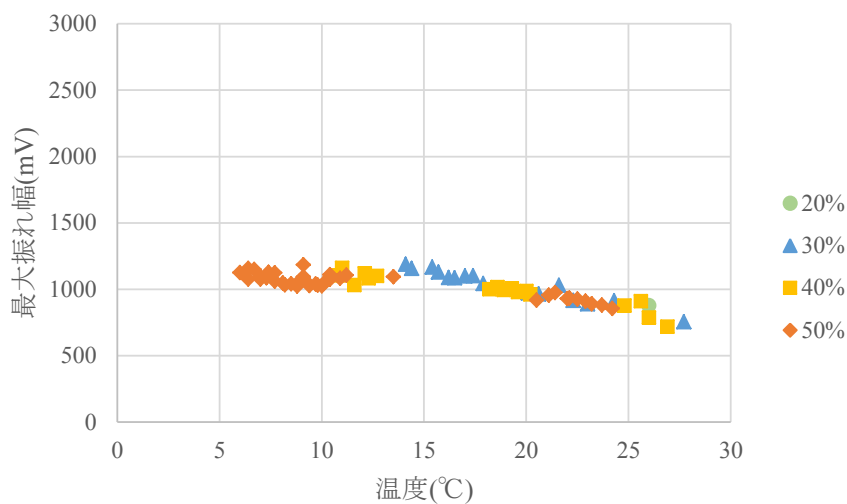


図 54 実測値と温度の関係（粗面）

ここで滑面と同様の手順で理論減衰値との比較を行う．実測値，理論減衰値と温度の関係を図 55 に示す．理論減衰値を真値として，真値と実測値の相対誤差の平均値を求めた．その結果を表 11 に示す．粗面の相対誤差は 4.48%と滑面に比べ 2.4%程度大きくなる傾向が見られた．2.5 章で記述したばらつきが，滑面の時 0.024，粗さ面の時 0.068，と倍以上の差がある．したがって，実測値のばらつきが大きくなり，その結果粗面の相対誤差が大きくなったと考えている．

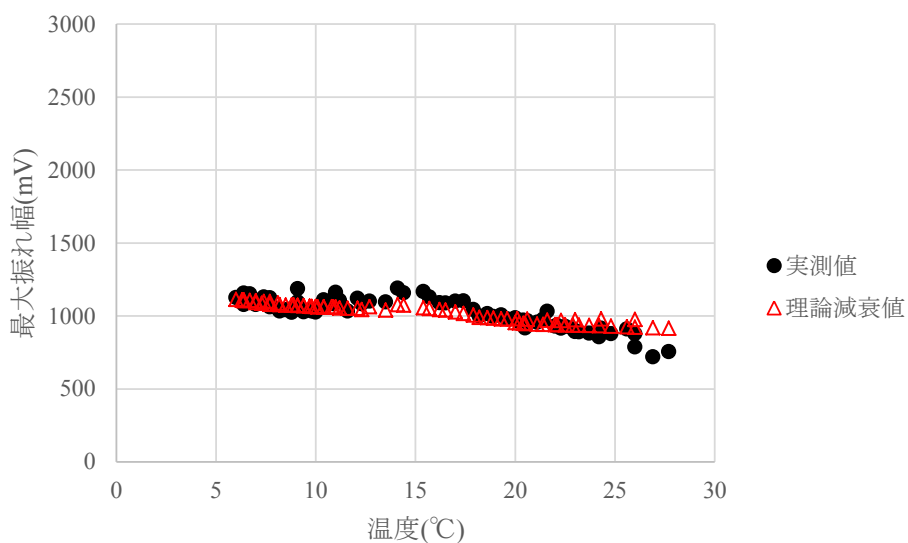


図 55 実測値と理論減衰値の比較（粗面）

表 11 温度域ごとの相対誤差 (粗面)

温度域(℃)	6～10	10～15	15～20	20～25	25～30	全体
相対誤差 (%)	4.12	4.13	4.86	4.64	4.90	4.48

### 3.1.7 増減率と温度の関係式による減衰補正案

本研究では 20℃を基準温度として、 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 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。

$$[\text{増減率}] = \frac{[\text{実測値}]}{[\text{基準温度の最大振れ幅}]} \quad (28)$$

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図 56 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(29)において、傾きが非常に小さいため、傾きを 0 とみなした。

$$r = 0.0013t + 1.1393 \approx 1.1393 \quad (6 \leq t < 15) \quad (29)$$

$$r = -0.027t + 1.591 \quad (15 \leq t \leq 25) \quad (30)$$

ここで、 $r$ : 増減率,  $t$ : 温度(℃)

式(26)および式(27)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。

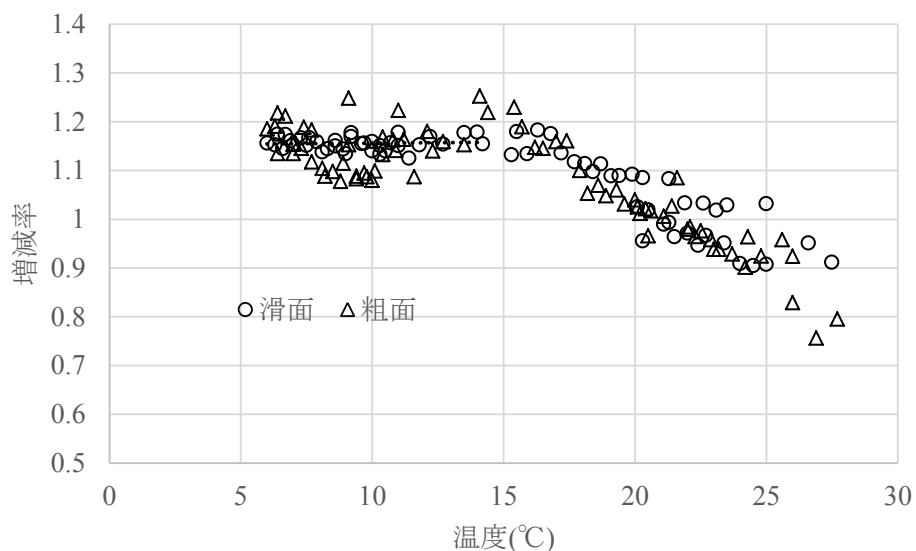


図 56 増減率と温度の関係

## 3.2 風速について

空中超音波は，風速計に用いられている．超音波風速計は，第二次世界大戦中に急速に発展した超音波技術を応用したもので，1940年代頃に研究が始められた．我が国では光田ら(1964)が先駆け，超音波風速計の開発を試みた．超音波モジュールの送信受信を向かい合わせ，送信モジュールから照射された超音波が受信モジュールに到達する時間から算出する原理である．超音波の伝搬速度は，ラプラス式を用いて  $0^{\circ}\text{C}$ ，1気圧のとき式(31)により  $331.4\text{m/s}$  となる．

風速により，超音波の音圧が減少する研究事例は少ないが，測定結果への影響が懸念される．そこで，風速の異なる環境条件下で測定をした最大振れ幅を用いて，最大振れ幅への影響を検討し，測定条件を設定した．

$$V = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (31)$$

ここで， $V$ : 縦波の伝搬速度( $\text{m/s}$ )， $\gamma$ : 定圧・定容両比熱比， $P$ : 圧力( $\text{dyn/m}^2$ )， $\rho$ : 媒質の密度( $\text{g/m}^3$ )

### 3.2.2 風洞実験装置の諸元

風洞実験装置：三重大学工学部エネルギー環境工学研究室所有

風洞形式：開放型

吹き出し口径：1600mm

風速：2~20m/s

風速計：ピトー管により 100 回の平均値を使用

測定面の設置や超音波センサの位置などは，三重大学工学部前田太佳夫教授にご教授頂き実験の準備を行った．

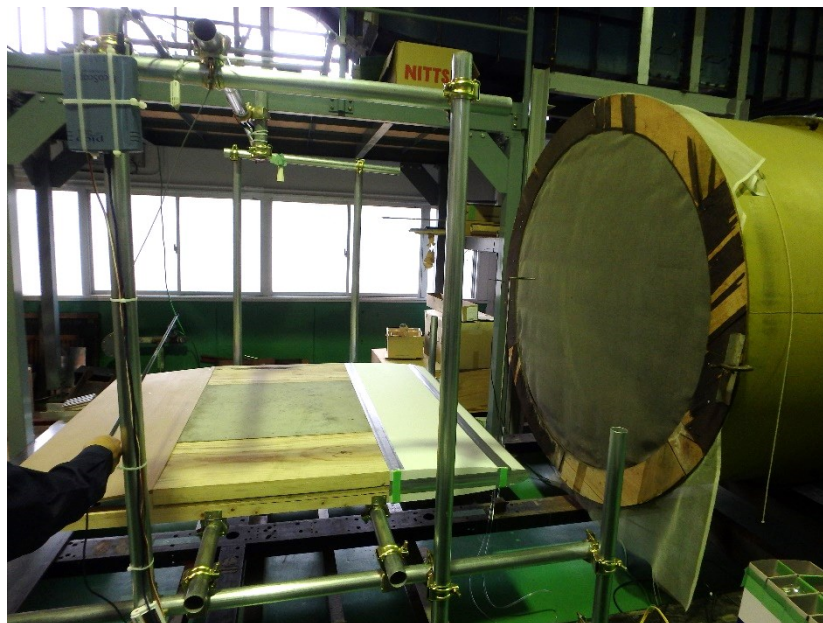


図 57 実験で用いた風洞装置

### 3.2.3 実験概要

ー実験器具ー

- 空中超音波センサ：LV-EZ1（Maxbotic 社）
- 測定面：表 8 参照（3.1 章では L-130 を粗面とする．）
- 温度・湿度・大気圧計：TR-73U，TR-72wf-H（（株）ティアンドデイ）
- 風速測定器：ピトー管



以下に実験の手順を示す．図 58 に実験概略図を示す．

1. センサと測定面が対向し，超音波往復する中心軸が測定面に垂直となるよう，センサと測定面の両者に水準器を取り付けて設置した．測定距離は 1000mm とした．
2. 空中超音波測定は 0m/s から行い，2m/s 間隔で行った．風速は 10m/s まで行った．
3. 10m/s まで測定が終了したら，測定面を変更し同様の手順で実験を行った．

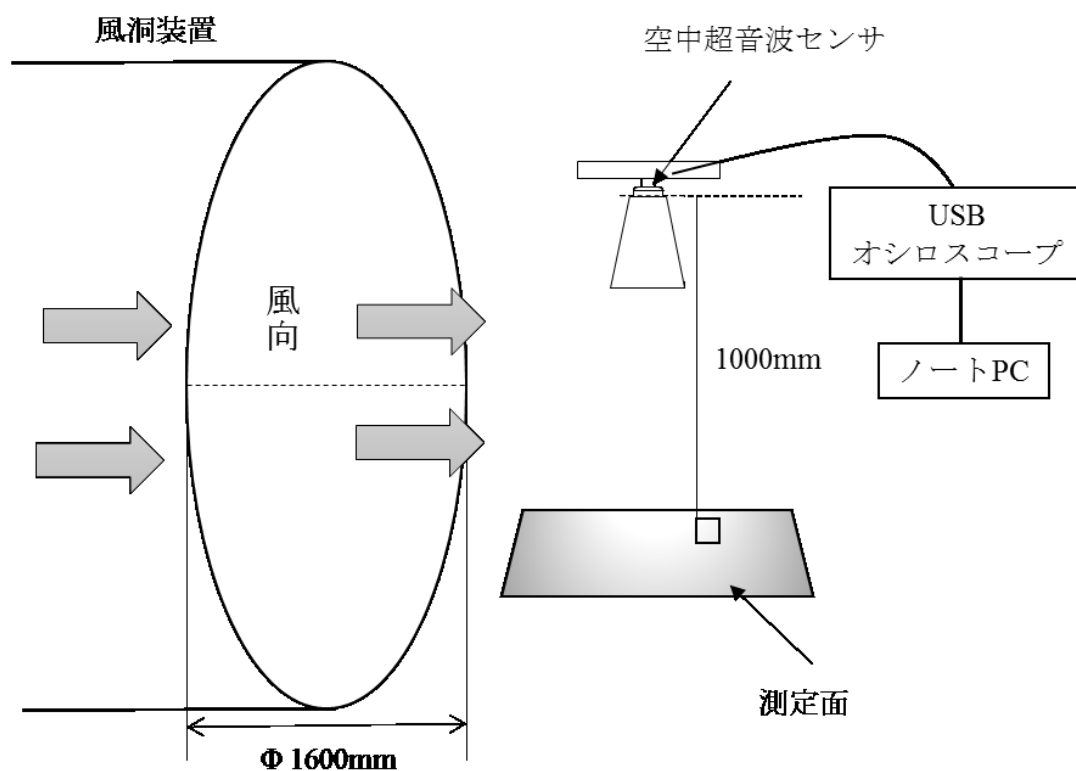


図 58 風洞実験の概略図



図 59 風洞実験の風景

農業用水路内は図 60 に示すように、水路壁面に左右覆われていることから、水路延長方向に強い風が吹くことが想定される。したがって、超音波伝搬方向に対して、横方向からの風を想定する必要があるため、図 58 のように設置した。また、気象庁によると、風速 10m/s 以上では、風に向かって歩きにくくなると示されている。したがって、風速 10m/s を現場での測定限界とし、10m/s 以内での測定を行った。また、図 61 に風洞実験時の温度・湿度変化を示す。測定面毎に環境条件は異なるが、3.1.4, 3.1.7 で示すように 15℃以内はほぼ一定の値を示す。また、各測定面の風洞実験中に環境条件の変化はほぼ見られないため、風速による測定結果への影響を評価する上で、減衰補正による対応は行わない。



図 60 現場水路

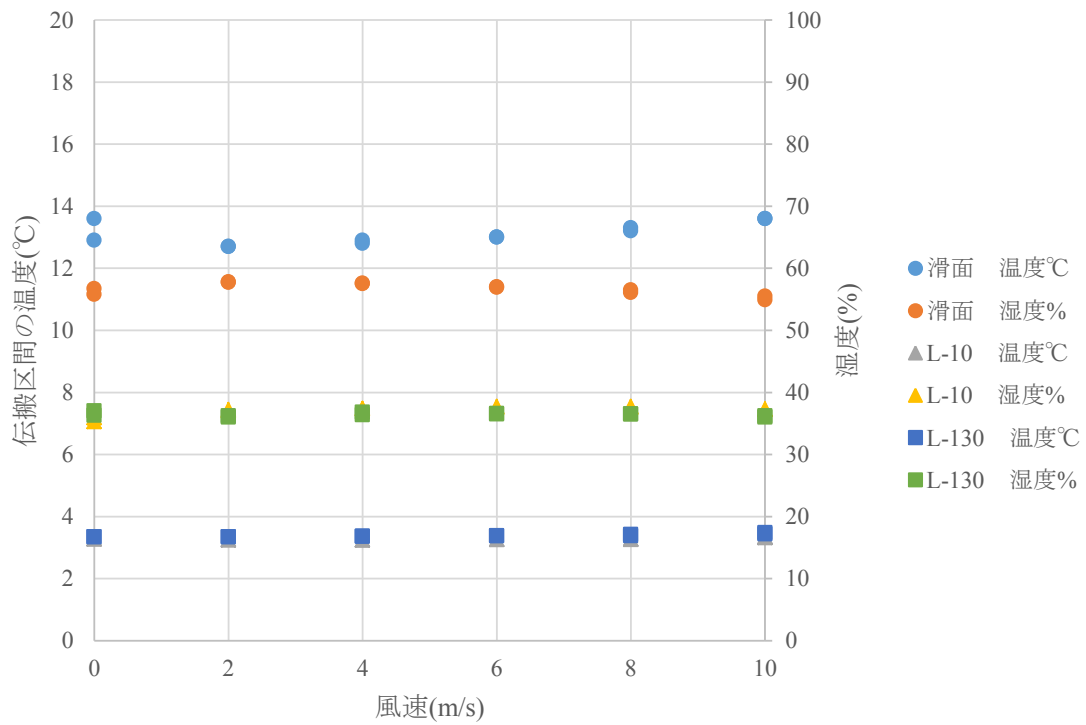


図 61 風洞実験時の温度・湿度変化

### 3.2.4 実験結果

滑面での実験結果を図 62 に示す．図に示すエラーバーは測定結果 20 回の標準偏差である．風速 2, 4m/s のときの最大振れ幅±標準偏差は，風速 0m/s のときの最大振れ幅に含まれるため，影響はほとんど見られなかった．風速 4m/s 以上

のとき最大振れ幅は減少傾向になった．風速が大きくなるにつれ標準偏差が大きくなる傾向があった．風速 0m/s の時に比べ風速 2m/s の最大振れ幅大きいのは，標準偏差の範囲内であり，測定誤差と言えるが，風洞装置を起動させると，超音波にノイズが加わり，ノイズ分が増加していると考えている．ノイズは L-10 と L-130 でも同様である．

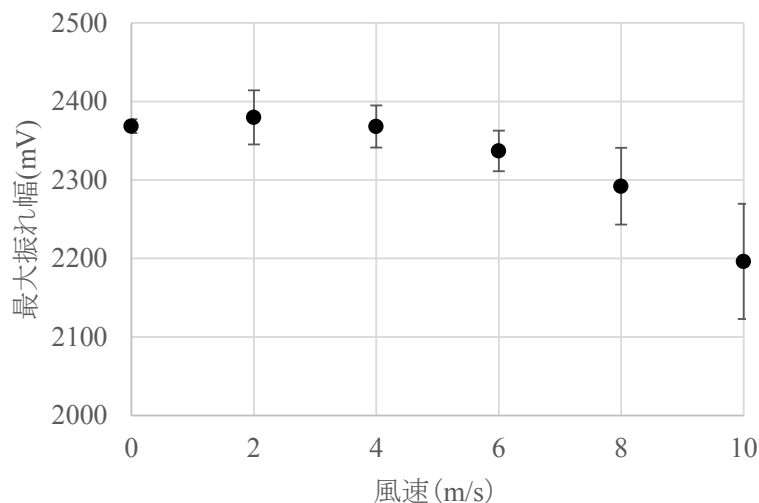


図 62 滑面 風速と最大振れ幅の関係

L-10 での実験結果を図 63 に示す．図に示すエラーバーは測定結果 20 回の標準偏差である．風速 2, 4, 6m/s のときの最大振れ幅±標準偏差は，風速 0m/s の時の最大振れ幅に含まれるため，影響はほとんど見られなかった．風速 6m/s 以上のとき最大振れ幅は減少傾向になった．風速が大きくなるにつれ標準偏差が大きくなる傾向があった．

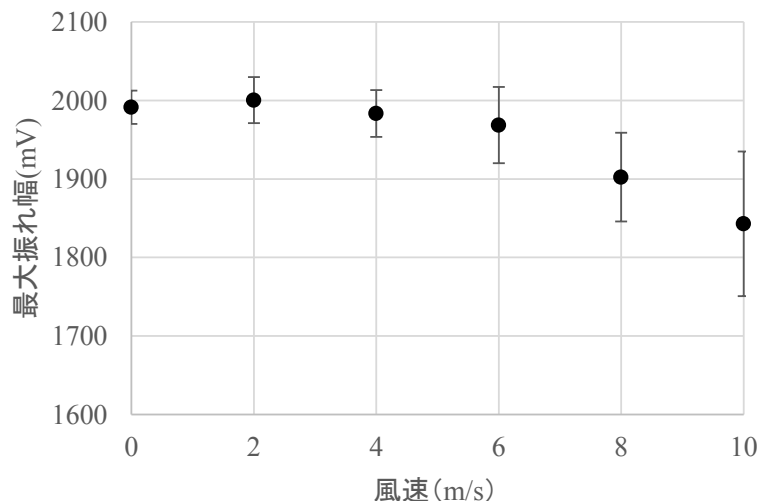


図 63 L-10 風速と最大振れ幅の関係

L-130 での実験結果を図 64 に示す．図に示すエラーバーは測定結果 20 回の標準偏差である．風速 2, 4, 6m/s のときの最大振れ幅±標準偏差は，風速 0m/s の時の最大振れ幅に含まれるため，影響はほとんど見られなかった．風速 6m/s 以上のとき最大振れ幅は減少傾向になった．風速が大きくなるにつれ標準偏差が大きくなる傾向があった．

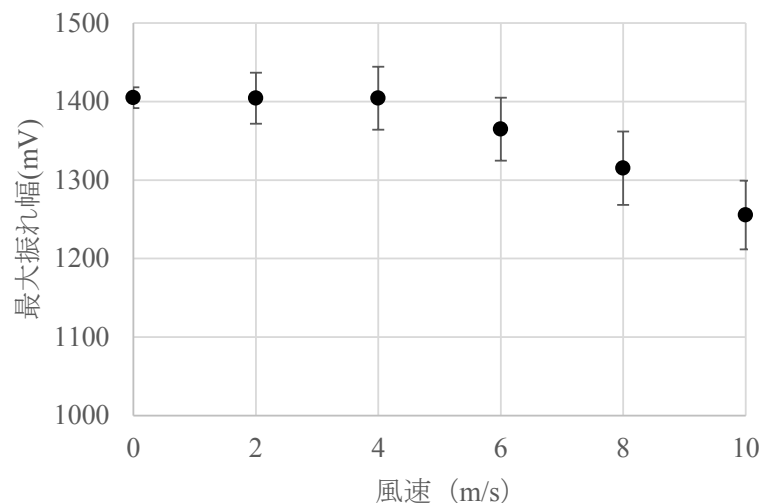


図 64 L-130 風速と最大振れ幅の関係

### 3.2.5 風速による粗さ測定への影響

ここで，風速によって最大振れ幅が減少したときに，粗さ測定にどの程度の影響を及ぼすのかを，風速毎に算術平均粗さを推定することで評価をした．図 65 に算術平均粗さと最大振れ幅の関係を示す．算術平均粗さと最大振れ幅の関係から得られる式(32)を用いて，最大振れ幅から算術平均粗さに換算した値を表 12 に示す．風速 0m/s の時の算術平均粗さを基準に考えると，風速 2, 4m/s の時はほとんど測定に影響は無い．風速 6m/s の時は 0.04 程度の差が生じる．風速 8m/s の時は 0.1 程度の差が生じる．風速 0m/s と風速 10m/s の時の算術平均粗さの差が最も大きかったのは，滑面の時で，+1.9mm であった．加藤ら(2008)によると，不健全とされる水路の算術平均粗さは 0.7mm 以上とされており，空中超音波測定には，0.1mm 程度の測定誤差は，影響が大きいと考えられる．したがって，現場での測定条件を風速 6m/s 以内とした．

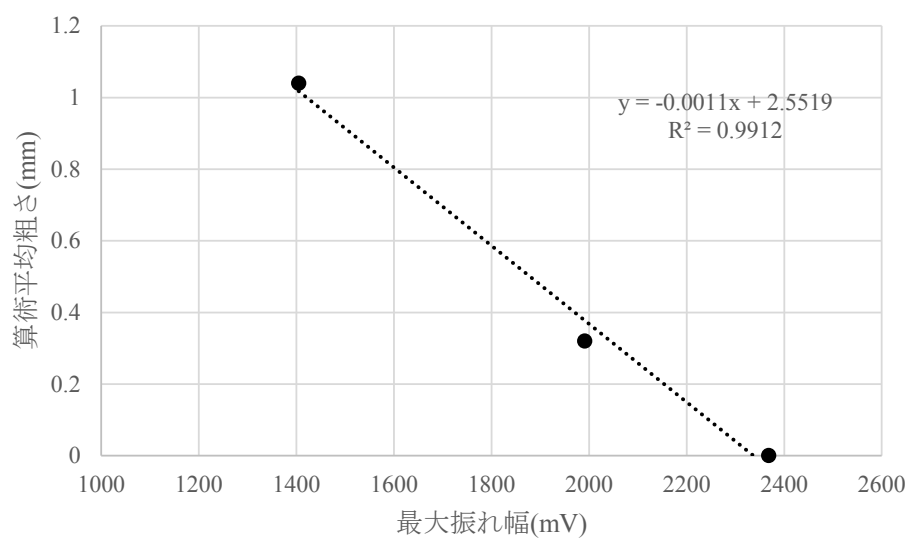


図 65 算術平均粗さと最大振幅の関係

$$Ra = -0.0011x + 2.5519 \quad (32)$$

ここで,  $Ra$ : 算術平均粗さ(mm),  $x$ : 最大振幅(mV)

表 12 風速による算術平均粗さへの影響

風速(m/s)		0	2	4	6	8	10
滑面	Ra 推定値(mm)	-0.05	-0.07	-0.05	-0.02	0.03	0.14
L-10	Ra 推定値(mm)	0.36	0.35	0.37	0.39	0.46	0.52
L-130	Ra 推定値(mm)	1.01	1.01	1.01	1.05	1.11	1.17

## 第4章 まとめ

### 4.1 空気吸収減衰について

- 本研究で用いた周波数 42kHz の空中超音波センサは，空気吸収減衰の影響を受けることが明らかとなった．
- 理論的減衰値と実測値の相対誤差は滑面の時に 2.70%で，粗さ面の時に 4.48%であった．
- 実測値に対して ISO9613-1 に基づいた補正式を適用した結果，補正值の相対誤差を，実測値の相対誤差の半分程度に抑えることができた．
- 増減率と温度の関係は粗さに依存しないことから，増減率と温度の関係式による減衰補正を提案した．以下に本研究で用いたセンサで求めた，増減率と温度の関係式を示す．
- $r = 0.0013t + 1.1393 \div 1.1393 \quad (6 \leq t < 15)$   
 $r = -0.027t + 1.591 \quad (15 \leq t \leq 25)$

### 4.2 風速について

- 本研究で用いた周波数 42kHz の空中超音波センサは，風速が大きくなると測定結果に影響を受けることが明らかとなった．
- 風速が大きくなるにつれて，標準偏差が大きくなる傾向が確認された．
- 風速 6m/s 以内は測定に与える影響は少ないことが確認することができた．
- 風速 6m/s 以上は粗さを大きく推定する可能性が確認することができた．
- 現場での風速の測定条件を 6m/s 以内とした．

## 第5章 引用参考文献

1. Abu-Tair AI, Lavery D, Nadjai A, Rigden SR, Ahmed TMA (2000) : A new method for evaluating the surface roughness of concrete cut for repair or strengthening. Construct Build Mater 14(3):171–6.
2. ASTM E 965 (2001) : Standard test method for measuring pavement macrotexture depth using a volumetric technique. West Conshohocken (PA): ASTM International.
3. ASTM E 2380 (2005) : Standard test method for measuring pavement texture drainage using an outflow meter. West Conshohocken (PA): ASTM International.
4. Courard L, Garbacz A, Bissonnette B (2012) : Topography evaluation methods for concrete substrates: parametric study. International Congress on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting.
5. Pedro M.D. Santos a, Eduardo N.B.S. Júlio (2013) : A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces Construction and Building Materials 38 (912–923).
6. Mokarem D (2006) : Use of the digital surface roughness meter in Virginia. Research Report VTRC 07-R4, Virginia Transportation Research Council.
7. Mokarem D (2006) : Use of the digital surface roughness meter in Virginia. Research Report VTRC 07-R4, Virginia Transportation Research Council.
8. 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, pp.432-433
9. 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
10. 加藤敬(2008), 開水路における壁面の凸凹から水路の粗度係数を求める試み, 農工研技報, 183-193
11. 加藤智丈, 石神暁朗, 渡嘉敷勝, 森充広 (2009) : 農業用水路コンクリートに生じる摩耗に関する調査手法, コンクリート工学年次論文集, Vol31, No.1
12. 北村浩二, 本間新哉, 加藤敬(2008) : 農業用水路における壁面粗化による劣化予測の定量的評価, 農業農村工学会誌, 76, 823-828
13. 渡嘉敷勝(2013) : 農業用コンクリート水路における摩耗機構および促進摩耗試験に関する研究, 農工研報, 52, 1-57
14. 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

15. 堀口敬(1993): コンクリートの摩耗に関する研究の現状, コンクリート工学, 31, No.10
16. 光田寧, 水間満郎(1964): 超音波風速計とその試作, 天気, Vol.11, No.2, 1964
17. 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
18. 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(2011), Vol.33, No.1
19. 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, 農業農村工学論文集, 258, 23-28
20. 吉久光一(1997): 屋外の音の伝搬における空気吸収の計算, 騒音制御, Vol.21, No.3, pp.130-135
21. 一般財団法人 日本水土総合研究所: 平成 24 年度水路保全技術検討業務委託事業報告書
22. 沼津高専 電子制御工学科: 超音波センサ調査報告書  
<http://www2.denshi.numazu-ct.ac.jp/mirsdoc2/mirs0103/tech/num0003a/tyouonpa.html> (2017 年 1 月 26 日)
23. 農林水産省 (2014): 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  
<http://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/attach/pdf/index-16.pdf> (2017 年 1 月 26 日)
24. 農林水産省 (2015): 農業水利施設の機能保全の手引き  
<http://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/attach/pdf/index-16.pdf> (2017 年 1 月 26 日)
25. JIS Z 8378: 屋外の音の伝搬における空気吸収の計算  
<http://kikakurui.com/z8/Z8738-1999-01.html> (2017 年 1 月 26 日)

学術論文：A)

学術雑誌：B)

国際会議：C), D)

国内学会：E), F), G), H), I)

- A) 岡島賢治, 長岡誠也, 石黒 寛, 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, Vol.84, pp.233-240
- B) 長岡誠也(2016)：空中超音波センサを用いたコンクリート面の粗さ測定, 日本工業出版超音波 techno28(5), pp.67-70
- C) Seiya NAGAOKA, Kenji OKAJIMA, Satoru ISHIGURO, Ryouei ITO, Ken WATANABE and Tetsu ITO (2015)：Measurement of Arithmetical Mean Roughness of Concrete Surface by Transceiver Type Aerial Ultrasonic Sensor, Fifth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, pp.325-330
- D) Mohammad Raihanul Islam, Seiya NAGAOKA, Kenji OKAJIMA, Satoru ISHIGURO, Ryouei ITO, Ken WATANABE and Tetsu ITO (2016)：Effects of Hand Made Plastic Horn to measure the Arithmetic Mean Roughness of Concrete surface by Transceiver Type Aerial Ultrasonic Sensor, PAWEES Conference Korea
- E) 長岡誠也, 多湖優汰, 岡島賢治, 石黒 寛(2014)：空中超音波を用いたコンクリート面の粗さ測定, 農業農村工学会全国大会講演要旨集, pp.678-679
- F) 長岡誠也, 岡島賢治, 石黒寛, 小古貴晃(2015)：空中超音波によるコンクリート表面粗さ測定の送信・受信素子数による比較検討, 農業農村工学会全国大会講演要旨集, pp.676-677
- G) 小古貴晃, 岡島賢治, 石黒 寛, 伊藤良栄, 長岡誠也(2015)：空中超音波による開水路の粗度係数測定方法に関する基礎式の提案について, 農業農村工学会全国大会講演要旨集, pp.678-679
- H) 渡邊真人, 長岡誠也, 岡島賢治, 石黒寛, 伊藤良栄, 渡部健(2016)：水理模型実験による空中超音波センサを用いた粗度係数の推定, 農業農村工学会全国大会講演要旨集
- I) 長岡誠也, 岡島賢治, 石黒寛, 伊藤良栄, 渡部健, 伊藤哲(2016)：空中超音波センサによる農業用水路コンクリート表面粗さ測定における風速による測定結果への影響, 農業農村工学会全国大会講演要旨集

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導を頂いた三重大学大学院生物資源学研究科の石黒寛教授や指導教員の岡島賢治准教授に感謝致します。

丸栄コンクリート工業株式会社 渡部健氏には，水路の施工や測定面の製作に大きく関わって頂き感謝致します。

株式会社クロスアビリティ 伊藤哲氏には，センサの製作や技術的課題に対して相談に乗って頂いたことを感謝致します。

最後に，研究室の皆様には日頃から，貴重な意見，質問を頂き感謝致します。  
度