

研究成果報告書

研究開発課題名	空中超音波による開水路の粗度係数計測法の開発
研究総括者	丸栄コンクリート工業（株）渡部 健
研究開発組合	丸栄コンクリート工業（株） （株）クロスアビリティ
試験研究機関	三重大学大学院生物資源学研究科

1 事業の実施内容

1. 1 事業の背景及び目的

わが国の主要な農業用水路は、総延長約 4 0 0, 0 0 0 k mあり、膨大なストックを有している。これらの水路は、高度経済成長期以降に集中して整備されたものが多く、築造から数十年経過しているため、今後順次補修・更新を行う必要がある。このような主要な農業用水路の多くはコンクリートにより作られている。コンクリート製の農業用水路では、機能診断において水理機能の低下を補修・更新の要因とすることが多い。水理機能の低下は、流水によって水路コンクリート表面の凹凸である“粗さ”が増大し、粗度係数を上昇させることに起因する。しかし、機能診断における粗さの判定は目視に依存していることが多い。このため、機能診断におけるコンクリート表面の粗さによる粗度係数を定量的に評価する方法が望まれている。また、ストックマネジメントにおいて最も望まれる劣化予測についても、定量的な評価によるデータの蓄積が不可欠である。

本研究開発は、コンクリート製農業用水路の流水による摩耗によって生じたコンクリート表面の粗度係数を、空中超音波を用いて「安価」で「簡便」に「面的な情報」を「短時間」に取得できる機器の開発を目的とする。

1. 2 事業の内容及び実施方法

研究開発は、大きく 2 つのパートに分かれて相互に情報交換しながら行われる。1 つのパートは検証・実証研究のパートであり、丸栄コンクリート工業（株）が中心となって試験研究機関である三重大学と取り組んだ。もう 1 つが機器作製のパートであり、株式会社 クロスアビリティが中心となって試験研究機関である三重大学と取り組んだ。

(1) 実証・検証データに関する研究開発

- ①測定範囲の検証
- ②空中超音波送受信センサとコンクリート面のなす角と反射強度の関係
- ③空中超音波送受信センサとコンクリート面のなす角の検出機構の開発
- ④防滴タイプ・開放タイプの計測センサの違いによる計測結果の差
- ⑤理論的な解析
- ⑥様々な環境条件下での計測
- ⑦骨材の大きさによる影響評価
- ⑧測定結果（反射強度）と粗度係数との関係

(2) 機器作製に関する研究開発

- ①試作機の作製
- ②回路設計
- ③粗度係数との関連関数組み込み
- (3) 実証試験
 - ①水路壁面の付着物の影響評価
 - ②壁面以外からの反射波の影響評価
 - ③センサの周辺環境（気温、湿度、天候など）への影響評価
 - ④操作方法の不備による計測結果への影響

1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

技術的問題点	対応
①測定範囲の検証	三重大学（岡島・石黒）が予備実験により検討した砂利を使用した測定範囲の検証を進展させ、砂利の位置を変えた実験を重ねることで測定範囲の検証を行った。（平成 26 年度 検証）
②空中超音波送受信センサとコンクリート面のなす角と反射強度の関係	三重大学（岡島・石黒）が基礎研究に使用した機器により検証。（平成 26 年度 検証）
③空中超音波送受信センサとコンクリート面のなす角の検出機構の開発	三重大学（伊藤）が画像解析による対象面とのなす角を解析するプログラムを作成する。（平成 27 年度 なす角解析機構の変更により解消）
④防滴タイプ・開放タイプの計測センサの違いによる計測結果の差	三重大学（岡島・石黒）が数種のセンサを持つ基礎研究用の機器を作製し基礎的な性能を比較検証 指向性を制御するホーンなどを設置し、ホーンの有効性などについても検証した。（平成 27 年度 検証）
⑤理論的な解析	三重大学（岡島・石黒）が反射波に関する周波数特性解析、位相解析などの理論的な解析を検討した。（平成 26 年度 検証）
⑥様々な環境条件下での計測	丸栄コンクリートがコンクリートパネルを作製し、三重大学に検証委託。 三重大学（岡島・石黒）が三重大学実験棟に恒温恒湿室を持っているため、極限条件を除く温度・湿度管理下での基礎的な検証する。また風速は人工的に風を作りその条件下で検証した。 平成 27 年度 低温域の温度影響、風速影響について検証 平成 28 年度 高温域の温度影響、湿度の影響について検証
⑦骨材の大きさによる影響評価	丸栄コンクリートが骨材の大きさの異なるコンクリートパネルを作製し、三重大学（岡島・石黒）が骨材および表面の凹凸を段階的に変化させたコンクリートパネルにより検証した。 平成 27 年度 パネル製作 平成 27 年度 パネルを使用した風速影響検証 平成 28 年度 パネルを使用した温度影響検証
⑧測定結果（反射強度）と粗度係数との関係	丸栄コンクリートが骨材を洗い出したコンクリート水路を作製し、三重大学（伊藤・岡島・石黒）がコンクリートパネルを実験水路に設置して粗度係数の実測とともに検証した。（平成 27 年度 検証）

①水路壁面の付着物の影響評価	丸栄コンクリート（渡部）および三重大学（岡島・石黒）が試作機を用いて評価。高圧洗浄機を使用してコケの除去の程度、および洗浄後から計測までの待ち時間などを検証した。（平成 28 年度 検証）
②壁面以外からの反射波の影響評価	丸栄コンクリート（渡部）および三重大学（岡島・石黒）が試作機を用いて評価。水路床からの高さを変えて計測を行い、反射波の影響を検討した。 平成 27 年度 ホーンにより計測領域を限定したことにより解消
③センサの周辺環境（気温、湿度、天候など）への影響評価	丸栄コンクリート（渡部）および三重大学（岡島・石黒）が試作機を用いて検証。夏期、冬期、雨天、強風時などの計測を行った。 平成 27 年度 低温域の温度検証、風速の影響検証 平成 28 年度 高温域の温度検証、現地環境での検証
④操作方法の不備による計測結果への影響	丸栄コンクリート（渡部）および三重大学（岡島・石黒）が操作マニュアルを検証。操作不備が生じないかの確認を行った。 平成 28 年度 マニュアルを作成

1. 4 事業の実施体制

（1）研究開発組合内の役割分担

◎丸栄コンクリート工業（株）

丸栄コンクリート工業（株）担当研究員 渡部は、検証に必要なコンクリートパネルの作製、実験水路の作製、自社水路設置箇所における現場検証を担当した。試験研究機関との連携が不可欠で、コンクリート水路の製造販売の視点から、検証が必要な骨材粒径のコンクリートパネルの選定及び摩耗したコンクリートを再現したコンクリートパネルの作製を行った。また、コンクリートパネルの作製にあたっては、摩耗を再現したパターンの異なるコンクリートパネルを、三重大学構内に設置した実験水路（幅 0.5 m、高さ 0.4 m、延長 14 m）に三面水路を再現した状態に設置した。さらに、施工年次が判明している自社水路設置箇所を精査し、現場検証の対象水路として試作機による現場検証を実施した。

平成 26 年度

コンクリートパネル張替え型の実験水路の製作設置を行った。

粗さの異なる 3 種の洗い出しコンクリートパネル計 126 枚を製作し、試験研究機関に検証を依頼した。現地調査用の候補地の選定を行った。

平成 27 年度

粗さの異なる 3 種の洗い出しコンクリートパネルを用いて、試験研究機関と共に空中超音波センサを用いた粗度係数推定式を開発した。

検証用コンクリートパネルを製作した。検証用コンクリートパネルを用いて試験研究機関と共に風速の影響を風洞実験により検証した。

現地調査の候補地に赴き、現地調査の可能性を検討した。

平成 28 年度

実験水路を用い、底面が砂礫または砂礫が堆積した水路を想定し、壁面と底面の粗さの異なる水路について検証した。

現地調査の候補地で空中超音波による粗度係数測定の検証を行った。

試験研究機関と協力し、開発した機器のマニュアルを策定した。

◎株式会社 クロスアビリティ

株式会社クロスアビリティ担当研究員 伊藤は、試作機の作製およびデータ利用技術開発を担当した。試作機の作製のためには、試験研究機関における画像解析プログラムの開発が必要となる。必要性能を満たす試作機の作製に当たり、必要センサ類の決定、回路設計、金型設計作製委託等、研究開発による機器作製の全般を行った。また、研究開発中に得られるデータから、その利用方法、ネットワークシステムとのリンクなど、本研究開発によって作られる粗さ測定器の ICT における可能性を検討した。

平成 26 年度

試作機 1 作製し、試験研究機関に検証を依頼した。

その結果、試作機の超音波センサは送受信一体型にする必要が生じた。

平成 27 年度

試作機 2 を作製し、試験研究機関に検証を依頼した。

試作機 2 より、空中超音波センサによる粗度係数の推定に一定の目処が立った。

試験研究機関より試作機 2.0 プロトタイプの製作がなされた。

平成 28 年度

試作機 2.5 を作製し、試験研究機関に使用性の聞き取り等を行った。

(2) 試験研究機関と研究開発組合の役割分担

試験研究機関となる三重大学は、基礎的な検証研究、画像解析プログラム作成および試作機の検証を担当した。

基礎的な検証研究は岡島・石黒が担当し、粗さの異なるコンクリート面について、高さ、角度、温湿度、風速の条件を変化させたデータの蓄積を行った。また、コンクリート 3 面水路による実験水路で実験を行うことで、粗度係数と空中超音波の反射強度との関係を得た。

画像解析プログラムは伊藤が担当した。画像解析はコンクリート面と空中超音波センサのなす角を画像から解析するプログラムを開発したが、小型 PC を搭載する必要性が生じたため、なす角と計測距離の設定については別の手法を検討した。その結果、レーザーポインタを 4 つ用いることで、1m の計測距離と対象面に対して垂直な設置が可能となった。

試作機の検証は岡島・石黒が担当し、使用されている水路における付着物の影響と高圧洗浄の必要性について検証した。

平成 26 年度

粗さの異なるコンクリート面について、高さ、角度、乾湿の影響を検証。

平成 27 年度

温度（低温域）、風速の影響を検証

平成 26 年度、27 年度の検証結果より、空中超音波による粗さ測定法は屋外での使用に比較的適した手法であることが確認された。

平成 28 年度

超音波センサの環境影響評価検証を行うとともに、現地試験による現地計測での課題を精査し解決した。

1. 5 事業の年度計画と実績

実施パート	研究内容	平成 26 年	平成 27 年		平成 28 年	
		下	上	下	上	下
検証・実証研究	超音波センサと対象面との角度の検証					
	画像解析プログラム開発			方針転換		
	数種の超音波センサでの基礎検証					
	水理実験用水路の作製・設置					
	試験用コンクリートパネル作製					
	骨材の影響評価					
	様々な環境条件での影響評価					
	水理実験用水路による粗度係数との関連性					
	試作機 1 の基礎検証・実験水路での性能評価					
	試作機 1 の使用されている水路での検証				方針転換	
	試作機 2 の基礎検証・実験水路での性能評価					
	試作機 2 の使用されている水路での検証					
機器作製	金型作製会社の検討					
	試作機 1 のサイズ・性能打合わせ					
	回路設計					
	試作機 1 外装の設計・作製委託					
	試作機 1 の組み立て					
	試作機 1 使用性の聞き取り					
	耐候性の要求性能の打ち合わせ					
	粗度係数との関連関数組み込み					
	試作機 2 のサイズ・性能打合わせ					
	試作機 2 の設計・作製					
	試作機 2 使用性の聞き取り					
	試作機 2 の微修正（試作機 2 改）					
	試作機 2 改を現場管理者への貸し出しにおけるヒアリング項目の設定					
全体	試作機 2 改の現場管理者への貸し出しおよびアンケート調査					
	研究開発事業のとりまとめ					

注) は計画, は実績。

1. 6 研究開発の概要、結果、課題等

研究開発は、基本的に計画時の事業の年度計画に基づいて行った。研究項目は検証・実証研究と機器製作の 2 つの実施パートに分け事業進捗を管理した。以下、年次毎の研究開発の概要及び結果、課題を整理する。

【平成 26 年度】

26. I 検証・実証研究パート

平成 26 年度の検証・実証研究パートは、試作機 1 を作製するための空中超音波センサの決定とその基礎的な性能検証を目的とした。

空中超音波センサの決定に当たっては、①周波数、②センサカバー、③送受信素子数の 3 つの観点から選定を行った。結果として、

①周波数：1m 程度離れた距離からの計測では、空中で減衰率の低い低周波の超音波センサが適しており、本事業では 40kHz の超音波センサを選択した。

②センサカバー：開放型と防滴型を検討した結果、雨天時の水路点検を想定しないことで、受信感度が高く計測精度を上げられる開放型のセンサを選択した。

③送受信素子数：送受信分離型と送受信一体型を検討した。超音波センサでの計測時の計測角度の影響を小さくするために、送受信一体型を選択した。

以上の結果、本事業で選択した超音波センサは、40kHz、開放型、送受信一体型の超音波センサとした。次に、選択した超音波センサの基礎的な性能検証を行った。平成 26 年度に行った検証項目は 1) 空中超音波センサの計測範囲、2) 計測角度の検証、3) 対象面の乾湿の影響である。

26. 1) 空中超音波センサの計測範囲

空中超音波センサは、面的な粗さ計測が可能であるが、計測範囲が不明であったため、実験により検証を行った。実験では、対象面を滑面とし、超音波センサを計測距離 1m に設置し、図 26. 1 に示すように、対象面上の空中超音波の垂直点を中心として直径 20cm ずつ砂利（平均粒径 15 mm）を広げることで計測範囲を確認した。計測範囲よりも広く砂利が広がった場合には砂利を広げても計測結果は変化しないと考えられる。計測は、超音波の反射波を受信した最大の出力電圧差を最大振幅として記録した。

（結果）図 26. 2 に計測範囲の検証結果を示す。直径 60cm を超えると計測結果が変化しなくなったため、計測範囲は直径 60cm の範囲と確認できた。

（課題）計測範囲が確認できたものの、直径 20cm の範囲で大きな減衰が見られるため、主な計測範囲は直径 20cm の範囲と言える。そこで、平成 27 年度に計測範囲を直径 20cm の範囲に絞り、集音効果と計測範囲の明確化を図ることとした。

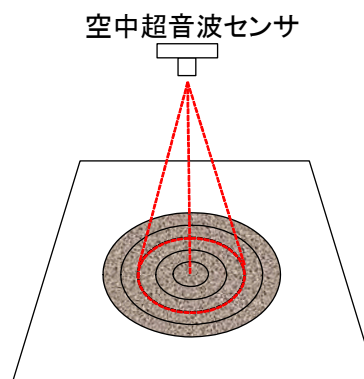


図 26. 1 計測範囲検証実験概念図

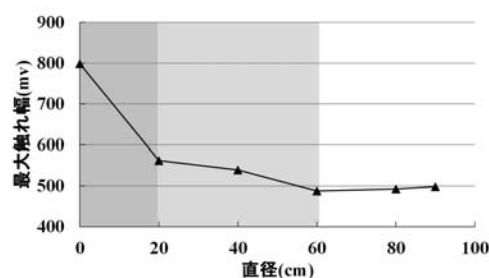


図 26. 2 計測範囲検証結果

26. 2) 計測角度の検証

本事業の成果品は、現場水路にて手で固定するため、測定面に対して厳密に垂直にセンサを設置することは難しいと考えられた。そこで、どの程度まで計測角度が大きくなると計測結果に大きな影響を与えるかを確認するために、実験を行った。実験では、対象面を滑面として、図 26. 3 のように滑面に対して垂直となる位置に空中超音波センサを設置し、その計測角度を 1° ずつ 5° まで変化させることで、反射波を受信した最大の出力電圧差である最大振れ幅がどのように変化するかを記録した。

(結果) 図 26. 4 の結果に示すように、計測角度 3° 以内ではほとんど最大振れ幅は減少せず、 3° を超えると最大振れ幅の減少率が大きくなることが確認された。このことから、**計測角度 3° 以内であれば計測角度の影響は小さい**と考えられる。

(課題) 粗面における乱反射の影響も考慮すると、より多くの対象面での検証が今後必要と考えられる。

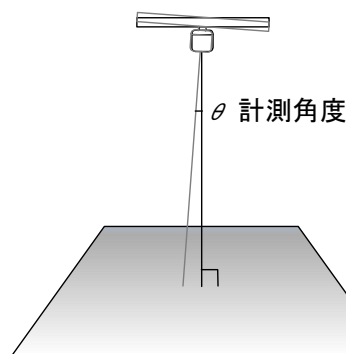


図 26. 3 計測角度検証実験概念図

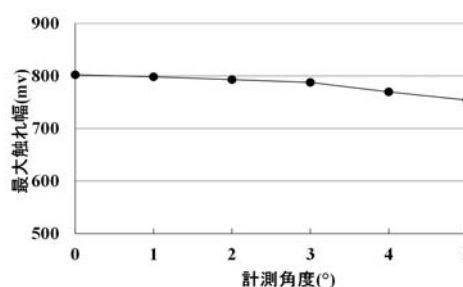


図 26. 4 計測角度検証結果

26. 3) 対象面の乾湿の影響

本事業の成果品は、現場水路を高圧洗浄後に計測することを念頭に開発を進めたが、洗浄後、水路壁面が濡れている状態での計測が計測結果にどのような影響を与えるかを確認するために実験を行った。実験は、コンクリート面（算術平均粗さ $Ra=0.26\text{mm}$ ）を対象面とし、乾いた面と散水後水溜りができない程度にふき取った湿った面において、同位置での空中超音波の計測を行った。

(結果) 図 26. 5 に反射波の出力信号の波形を示す。乾燥した面、湿った面の両波形ともほぼ一致し、最大振れ幅もほぼ同じ値となることが確認された。この結果、**空中超音波による粗さ計測では、水路壁面が濡れている状態での計測も可能**であるといえる。

(課題) 実験における湿った面は、散水後水たまりができない程度にふき取った湿った面としたが、数値化できないため、定量的な議論が難しく、どの程度までの水分で結果に影響するのかまで言及できなかった。

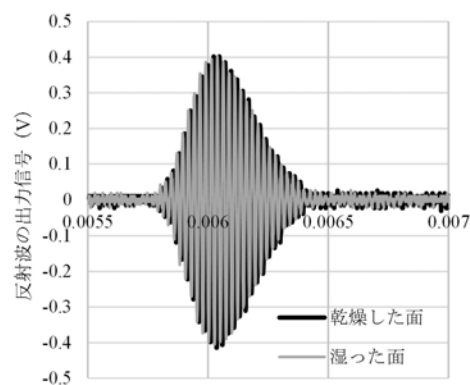


図 26. 5 対象面の乾湿による反射波の波形の比較

26. 3) 骨材径の影響

本事業の成果品が、現場水路にて計測を行う際には多くの骨材粒径の現場が想定される。そこで、骨材粒径の変化を砂利粒径の変化とし 3 種類の砂利（粒径 8-12mm、粒径 3-5mm、粒径 2mm）を用いた空中超音波法の有効性の検証を行った。検証方法は 26.

1) 空中超音波センサの計測範囲に準じ、空中超音波センサから 1m の距離に同心円状に直径 20cm ごとに砂利を広げていき粒径の変化と最大振幅の変化を検証した。

（結果）図 26. 6 に反射波の最大振幅と砂利の直径の関係を示す。砂利が大きくなるごとに最大振幅が変化し、最大振幅は安定していることが確認できた。この結果、空中超音波による粗さ計測では、骨材径の変化も粗さの変化として計測可能であるといえる。

（課題）検証に用いた粒径は最大 8-12mm であった。コンクリートの摩耗面に生じる凹凸としては、比較的大きな凹凸まで模擬したものであるが、粒径 40mm を超えるような骨材において本検証の結果が適用できるかどうかの検証が必要といえる。

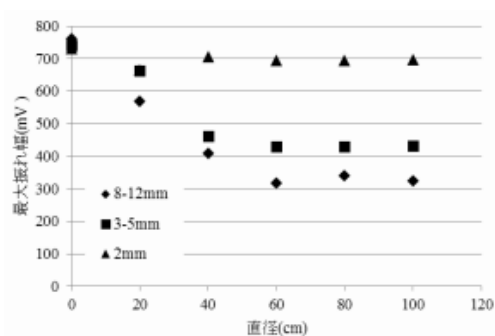


図 26. 6 粒径による最大振幅の減少

26. II 機器製作パート

26. I の結果を受け、送受信分離型で試作した試作機 1 を改良し、40kHz、開放型、送受信一体型の超音波センサで試作機 1.5（図 26. 7）を作製した。

（課題）計画段階で予定した画像取得による位置検出機構について、小型 PC の搭載が必要との見通しになり、軽量化・可搬型の機器の開発のため別機構による位置検出機構を考える必要が生じた。

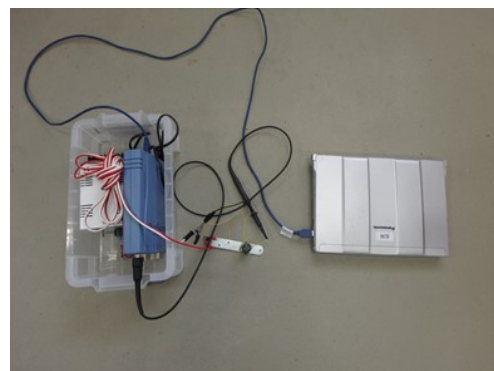


図 26. 7 試作機 1

【平成 27 年度】

27. I 検証・実証研究パート

平成 27 年度の検証・実証研究パートは、平成 26 年度に方針変更した集音装置（ホーン）を装着した空中超音波センサを用いて、風速による計測結果の影響を明らかにすることを目標とした。（写真 27. 1）

そして、水路模型実験をもとに、空中超音波の反射波の出力の最大差である最大振幅と粗度係数の関係式を作成することを目指した。以上のことから平成 27 年度の検証・研究項目は、27. 1) ホーンの集音効果・

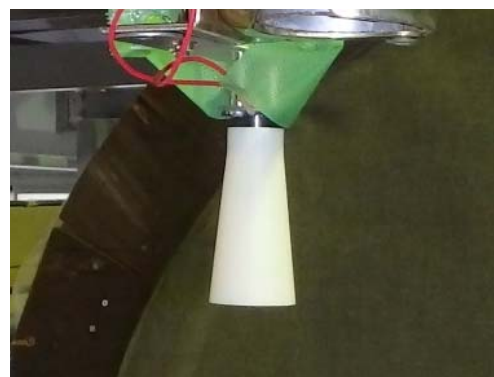


写真 27. 1 集音装置（ホーン）を付けた空中超音波センサ

計測範囲，27. 2) 風速の影響，27. 3) 水路模型実験とした。

27. 1) ホーンの集音効果・計測範囲

平成 26 年度に行った計測範囲の検証で選択したセンサは，1m の計測距離からおよそ 60cm の計測範囲を持つことが確認されたが，直径 20cm の範囲が主な計測範囲であることも分かった。そこで，1m の計測距離から計測範囲が 20cm となるような集音装置（ホーン）を作製し，1m の計測距離に設置した空中超音波センサに装着（写真 27. 1）することで，集音効果と計測範囲の検証を行った。

（結果）表 27. 1 に 1m の計測距離から粗さの異なる 3 種類のコンクリートパネルを対象面として空中超音波の反射波の最大振幅を計測した結果を示す。集音効果はいずれのパネルでも 2.7 倍程度となり高い集音効果が確認できた。また，ホーンを装着して，平成 26 年度の 26. 1) と同様の実験を行った結果を図 27. 1 に示す。20cm の計測範囲を意図して作製したホーンであるが，1m の計測距離に対して計測範囲は約 30cm となることが確認できた。

（課題）検討領域の実験において，測定範囲境界部に砂利の境界が来た場合最大振幅の結果が小さくなる傾向が見られた。境界部からの反射波が超音波センサに向かわず発散したためと考えられるが，検証まではできなかった。

27. 2) 風速の影響

空中超音波は，超音波風速計などにも用いられるように，風速の影響を受ける可能性がある。このため，風速環境の整った施設において，風速の影響を検討する実験を行った。

図 27. 2 に風速の影響を検討する実験の概念図を示す。直径 1600mm の風洞の正面に計測面を設置し，計測面から 1m の計測距離となる位置に空中超音波センサを設置した。計測面には，滑面，川砂利粗さ小，碎石粗さ小，川砂利粗さ大，碎石粗さ大の 5 種類の計測面をコンクリートパネルで作成した。計測は，気温は 11 度±1℃の環境で風速を，0，2，4，6，8，10m/s と変化させて空中超音波の反射波の受信出力の最大振幅を計測した。

（結果）図 27. 3 に風速の影響の実験結果を示す。どの計測面においても，風速 6m/s ま

表 27. 1 集音装置（ホーン）の効果

Ra (mm)	最大振幅 (mV)		集音効果 有／無
	ホーン無	ホーン有	
0.04	862.3	2368.7	2.7
0.317	787.3	1991.4	2.5
1.015	455.1	1405.0	3.1

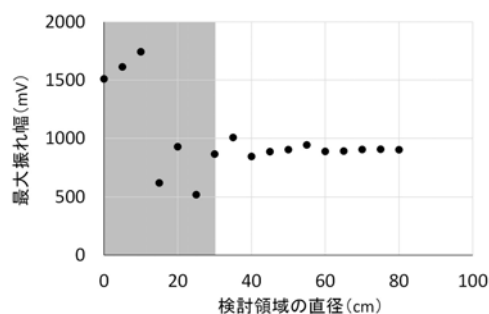


図 27. 1 計測範囲検証結果

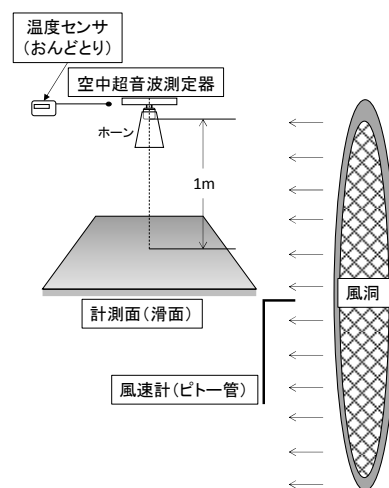


図 27. 2 風速の影響検討概念図

では、風速 0m/s とほぼ同じ最大振幅を計測した。また、風速 6m/s からは減少率が大きくなることが確認された。このことから、空中超音波による粗さ計測では、風速 6m/s 以下での計測を推奨する必要があることが分かった。

(課題) 風速 6m/s は砂埃が立ち、白波が多くなる風であるため、無理をすれば水路点検が可能となるが、本事業の成果品では推奨環境からはずす結果となった。

3) 水路模型実験

水路模型実験では、側面と底面に粗さの異なる最大骨材粒径 20mm のコンクリート製パネルと、発泡パネルを張り替えることのできる水路模型を製作した。水路部は、全長 14m、流水部の幅 0.50m、高さ 0.45m の矩形水路とし、勾配は水平勾配とした。コンクリート製パネル 3 種と発泡パネル 3 種を張り替えることで計 6 種類の粗さの異なる断面での実験を行った。

水路模型実験では、境界部の影響が少なくなる水路部の上流から 3m、下流から 3m の位置にレーザー距離計を設置することで、非接触で水位が計測可能となっている。上下流の水位計測点での水位と流量から、マンニングの粗度係数を求めた。流量は、10L/s～55L/s まで 5L/s 毎に増加させた。フルード数が 0.4 よりも小さい領域では、マンニングの粗度係数が増加する傾向がみられるため、水路模型の粗度係数としては、フルード数 0.4 以上の安定したマンニングの粗度係数を代表値とした。

(結果) 図 27. 4 に水路模型で得られたマンニングの粗度係数を示す。マンニングの粗度係数で健全な 0.011 程度～不健全な 0.020 程度の粗度係数までの水路を再現することができた。

(課題) 粗さを適度にばらつかせる水路パネルの選定が非常に困難であり、0.015～0.017 に集中するパネルとなった。

27. II 機器製作パート

27. I の結果を受け、試作機 1.5 を改良し、GPS 及び記録装置のついた超音波センサ試作

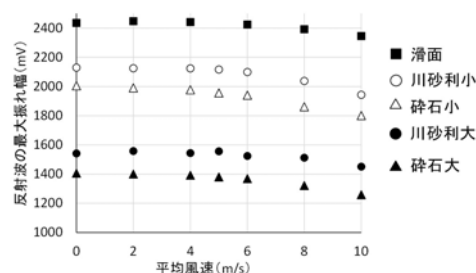


図 27. 3 風速の影響検証結果



写真 27. 2 実験水路の全景

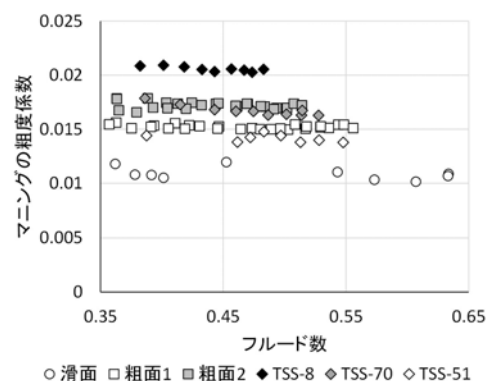


図 27. 4 水路模型で得られたマンニングの粗度係数

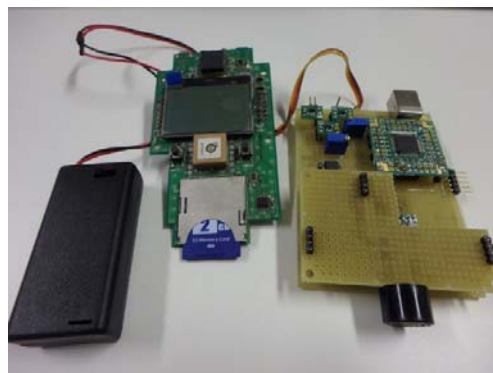


写真 27. 3 試作機 2.0

機 2.0 を作製した（写真 27. 3）。

（課題）試作機更新のたびに基礎的なデータの収集が必要となり、事業期間を圧迫することとなった。

【平成 28 年度】

28. I 検証・実証研究パート

平成 28 年度の検証・実証研究パートは、平成 27 年度に十分検討できなかった 28. 1)温度による計測への影響を評価するとともに、28. 2)現場適用を見据えた計測距離の誤差の影響を評価することを目的とした。

28. 1)温度による影響の検証

音波は、温度・湿度・大気圧の影響を受けるが、最も影響の大きい温度に関する実験を行った。実験では、対象面として滑面を用い、計測距離 1m の位置に空中超音波を設置した（図 28. 1）。計測気温が 11℃～40℃まで、センサ付近と対象面付近の 2 か所の温度が 0.5℃以内となるように攪拌したのち空中超音波による計測を行った。温度センサは、同時に温度・大気圧・相対湿度を計測できるおんどりを使用した。

（結果）図 28. 2 に気温と反射波の出力電圧の最大振幅の関係を示す。気温が 22℃までは、反射波の最大振幅はほとんど変化しなかったが、気温 22℃を超えると急激に反射波の最大振幅が小さくなることが分かった。このことから、**空中超音波による粗さ計測では、気温 22℃以下での計測を推奨する必要がある**といえる。ただし、減少率が線形であることから 22℃以上でも単純な式による補正が可能と考えられる。

（課題）空気中の音波減衰は理論的には、距離減衰に加えて、水蒸気、酸素分子、窒素分子による減衰が考えられるが、本実験の 25℃以上の減衰量が理論では説明できないほど大きな減衰となり、理論的な補正ができず、実験からの補正式の導出となったことが課題と言える。

28. 2)計測距離の誤差の影響の検証

成果品は、コンクリート面に対して、垂直に 1m の距離からの計測が必要となる。このとき、厳密に 1m に設置することは難しいため、

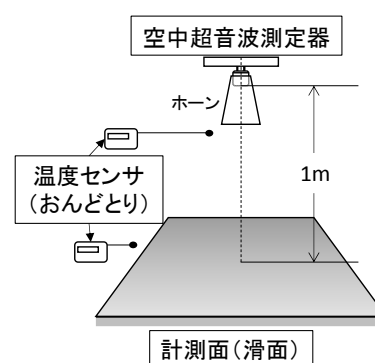


図 28. 1 温度の影響検証概要

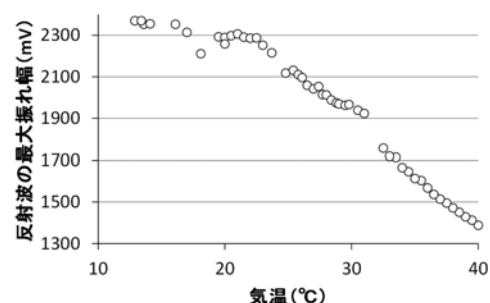


図 28. 2 温度の影響検証結果

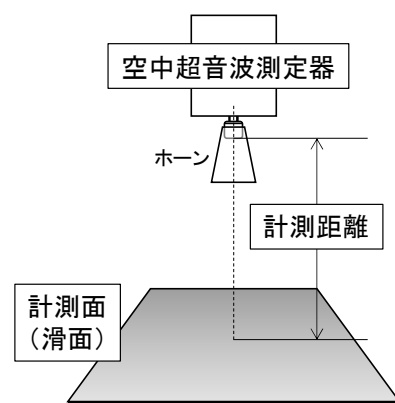


図 28. 3 計測距離の影響検証概要

1m からどの程度のずれまで計測値に影響を与えないかを確認する必要があった。そこで、計測距離の誤差の影響を検討する実験を行った。

実験は、対象面として滑面を用い、計測距離を 0.900m、0.950m から 1.050m まで 0.010m ずつ変化させたものと 1.100m の位置に空中超音波センサを設置して計測を行った（図 28. 3）。

（結果）図 28. 4 に計測距離の影響の結果を示す。計測距離が離れるに従い、空中超音波の反射波の出力電圧の最大振幅は減少する傾向が確認できた。

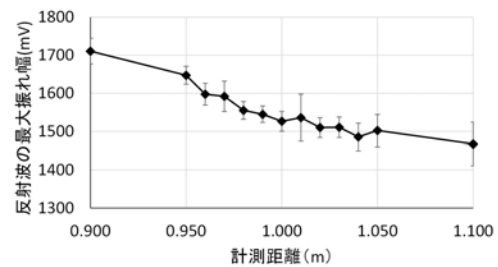


図 28. 4 計測距離の影響の結果

しかし、1.000m±0.010m では、計測結果がばらつきの標準偏差の内に入ることが多いことが分かった。このことから、空中超音波による粗さ計測では、計測距離は 1.000m ±0.010m での計測を推奨する必要があることが分かった。

（課題）対象面を粗面にて行う追加実験も検討する必要があった。

28. II 機器製作パート

28. I の結果を受け、送受信分離型で試作した試作機 2.0 を改良し、可搬型の超音波センサ試作機 2.5 を作製し、成果品とした（写真 28. 1）。

（課題）環境の影響評価が事業期間中に延長したため、成果品の完成が遅くなり供用水路での使用性のアンケート結果が少なくなったことが課題と言える。



写真 28. 1 可搬型超音波センサ（試作器 2.5）

1. 7 実証試験（現場適用）の概要、結果、課題等

実証試験は、①水路模型実験による精度検証、②Manning-Strickler 式との比較、③供用水路での実証試験の 3 つの観点から行い、成果品の精度を検証した。

① 水路模型実験による精度検証

水路模型実験による精度検証は、反射波の出力電圧の最大振幅と水路模型実験の粗度係数との関係式を決定する（STEP1）と、STEP1 で決定した関係式を用いて 2 種類のコンクリートパネルの粗度係数の予測を行い、そのコンクリートパネルの水路模型実験の結果得られる粗度係数と比較し精度を検証する（STEP2）の手順で行った。

STEP1（関係式の決定）

関係式の決定において水路模型実験に使用するパネルは、凹凸が規格化されている発泡スチロール製のコンクリート型枠（発泡パネル）を使用することとした。発泡パネルは、工場製品として凹凸がすべて同じであり、摩耗水路を模擬するとき生じるパネル間の摩耗のばらつきをなくすることができる。また、凹凸が規格化されている発泡パネルは、空中超音波センサの検定用のパネルとしても適用しやすいことがある。今回用いた発泡パネルの粗さが最も大きいパネルは、骨材の粒径が 40mm 程度の粗さを模擬して

いる。

水路模型実験によって得られた発泡パネルを使用したマンニングの粗度係数と、計測距離 1m から計測した空中超音波の反射波の出力電圧の最大振幅の関係を図 1. 7. 1 に示す。決定係数である R^2 値が 0.9331 と非常に高い相関を確認できた。この関係式を成果品の回路に組み込み、画面表示できるようにした。

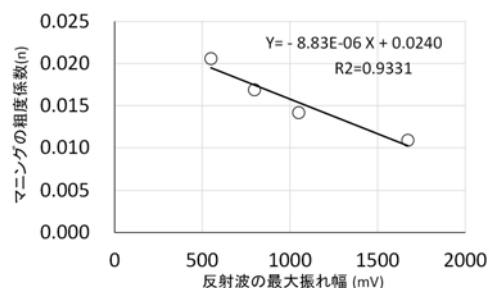


図 1. 7. 1 マンニングの粗度係数と最大振幅の関係

STEP2（精度の検証）

次に、粗さの異なる 2 種類の摩耗を模擬した最大骨材粒径 20mm のコンクリート製粗面パネル（粗面 1：算術平均粗さ 0.51mm，粗面 2：算術平均粗さ 1.32mm）に対し、STEP1 で得られた関係式をもちいて、あらかじめ空中超音波によるマンニングの粗度係数の予測値を得たのち、それぞれのコンクリート製粗面パネルを用いた水路模型実験により得られたマンニングの粗度係数の実験値と比較した。ただし、粗面 1 パネル、粗面 2 パネルも摩耗のばらつきがあったため、空中超音波による計測はすべてのパネル（それぞれ 48 枚）の平均値を用いた。

表 1. 7. 1 精度の検証結果

パネル名称 (算術平均粗さ(mm))	空中超音波による 予測値	実験水路による 実測値	相対誤差 (%)
粗面1パネル (算術平均粗さ0.51mm)	0.0152	0.0152	0.0
粗面2パネル (算術平均粗さ1.32mm)	0.0174	0.0172	1.1

（結果）表 1. 7. 1 に精度の検証結果を示す。粗面 1 パネルも粗面 2 パネルも空中超音波による粗度係数の予測値は実験水路による実験値とほぼ同じ値となり、空中超音波による粗度係数の計測は、高い精度で実験水路の粗度係数を予測できることが分かった。また、骨材粒径についても、40mm 程度までは空中超音波による計測が可能であることがわかった。

（課題）模型水路実験の実験パターンが少ないため、より多くの実験を行い精度の検証を高める必要がある。

②Manning-Strickler 式との比較

河川や水路等で河床材料や凹凸からマンニングの粗度係数を計算する Manning-Strickler 式がある。

Manning-Strickler 式は以下のような式となり、相当粗度高さ（ k_s (m)）に依存する式となっている。ここで、 g は重力加速度。

$$n_m = \frac{k_s^{1/6}}{7.66\sqrt{g}}$$

模型水路実験で用いた発泡パネルは、凹凸が規格化されているため、相当粗度高さを設定しやすいことから、発泡パネルを対象に空中超音波

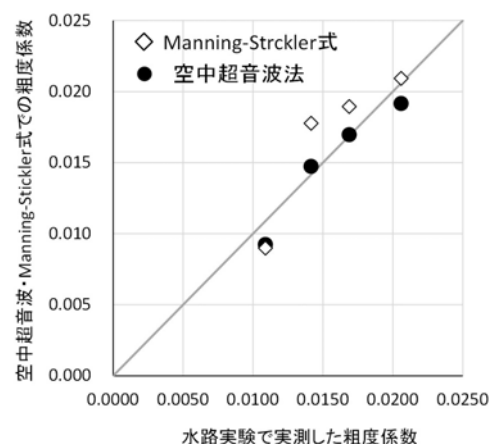


図 1. 7. 2 粗度係数の実測値と空中超音波, Manning-Strickler 式による粗度係数の比較

で計測したマンニングの粗度係数と、Manning-Strickler式で計算されるマンニングの粗度係数を模型水路実験で得られた粗度係数と比較した。ここでは、模型水路実験に使用した発泡パネルのカタログに習い、相当粗度高さ k_s を凹凸の最大高さとして計算した。

(結果)図 1.7.2 に模型水路実験で得られた粗度係数と空中超音波, Manning-Strickler 式で得られた粗度係数を比較した。1:1 となる灰色の線上ほど模型水路実験の結果に近いことを意味している。図 1.7.2 より空中超音波による粗度係数の計測は, Manning-Strickler 式と同程度以上の精度で粗度係数を得ることができていることが分かった。

(課題) Manning-Strickler 式の相当粗度高さの与え方には様々なものがあるため、最大高さを適用した本検証は 1 事例ととらえる必要がある。

③供用水路での実証試験

供用水路での実証試験のために、適切な供用水路を選定し、水位および流量を精度よく計測することは大変難しい。そこで、ここでは近傍で流量、水位観測を行っている、水資源機構管轄の愛知用水幹線用水路廻間フルームを対象水路とした。廻間フルームの概要は図 1. 7. 3、図 1. 7. 4 に示す。計測されている流量、水位観測データから計算した廻間フルームの粗度係数は 0.015 となった。

対象水路での実証試験は平成 28 年 11 月 24 日に行った。実証試験当日対象水路の水は抜いてあったが、水路底部には約 10cm 程度の湛水があった。対象面は、点検のため高压洗浄されている面として、水路床から高さ 1m の位置を中心に 9 か所を空中超音波により計測した。(図 1. 7. 5)

(結果) 空中超音波による計測結果の平均の粗度係数は **0.0175** となった。計測では、側壁面のみの計測であったが、水路床は底面よりも摩耗が進んでおらず、側壁面と底面の合成粗度はもっと小さくなると予想された。仮に、底面の粗度係数を **0.014** とすると、合成粗度は、**0.0157** となり、廻間フルームの計測結果と近い値になる。

(課題) 供用水路での実証試験は、現場の粗度係数を求める方法が困難であった。また、水路全体の粗度係数を求める場合には水路床の粗度係数を計測する方法の検討が必要である。

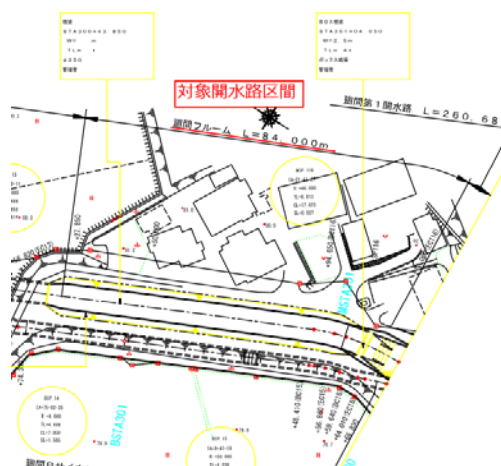


图 1. 7. 3 供用水路平面图

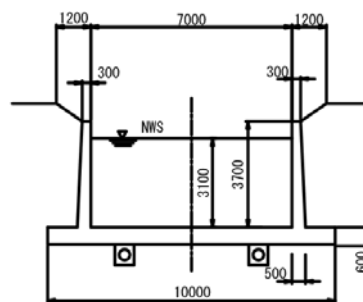


图 1. 7. 4 对象水路断面图

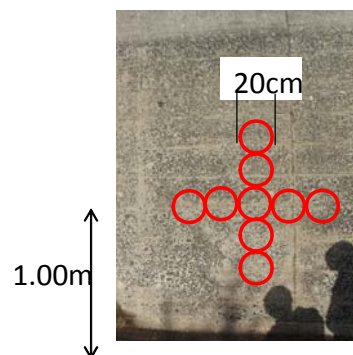


図 1. 7. 5 計測位置

2 事業の成果

2. 1 成果の内容

本事業の研究開発をもとに試作した成果品の概要を図 2. 1. 1 に示す。

成果品は空中超音波粗度係数計測機で、

1.00m 離れた距離からの計測により

- ・ 計測番号
- ・ 計測面のマニングの粗度係数
- ・ 計測位置の緯度経度
- ・ 計測時間

を画面表示し、記録用 SD カードに保存できる。

空中超音波粗度係数計測機の性能は、

計測領域 : 計測面と空中超音波直交点から直径 300mm の領域の粗度係数を計測

計測時間 : 1 回当たり約 30 秒 (30 秒間で 20 回の粗度係数計測を行い、平均値を計算)

計測機設置時間 : 計測機を計測面と垂直に 1.00m の距離の位置に設置するのに約 2 分

計画時の目標としていた、軽量・簡便・短時間・面的な粗度係数計測を達成した。

計測に必要な機材

- ・ 空中超音波粗度係数計測機、・ 一脚、・ 付属アクリル板、・ 1m 鋼尺

補正用 (適用範囲内の環境条件では不要)

- ・ 温湿度大気圧計、・ 風速計

供用水路の利用手順

①利用目的

水路機能診断調査の現地調査(近接目視と計測)における水理機能通水性の評価において、コンクリート製水路側壁の摩耗進展を定量計測するために使用する。使用に当たっては、コンクリート製水路の側壁面の健全度評価の管理指標として、比較的理解しやすい粗度係数により管理する目的のために使用する。

②計測ポイントの設定

水路機能診断調査の現地調査(近接目視と計測)において、リバウンドハンマーを使用するための定点で定量計測する計測点を併用する。(50m おきに左右岸 1 か所ずつ程度)

③計測ポイントにおける計測点

水路側壁に付着しているコケなどを除去したリバウンドハンマー計測点での 25 か所の打点のうち、中央、左右上下の境界中央の 5 点を中心とした領域(図 2. 1. 2)を、空中超音波による粗度係数の計測領域とする。

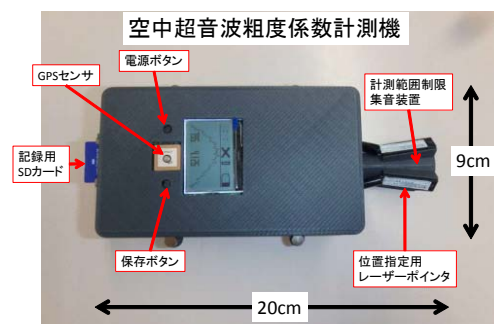


図 2. 1. 1 成果品の計測機概要

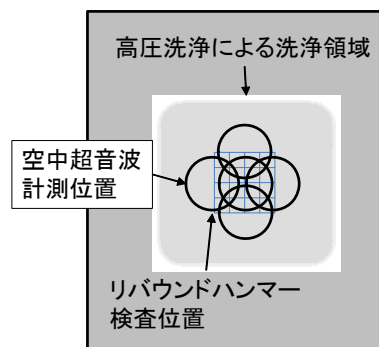


図 2. 1. 2 付属アクリル板の概要

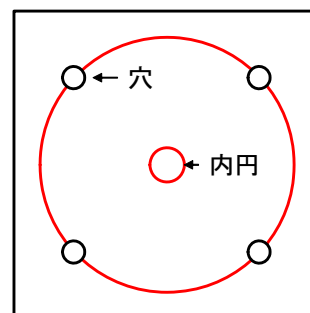


図 2. 1. 3 付属アクリル板の概要

④ 空中超音波粗度係数計測機の設置

計測機の電源ボタンを押して電源を入れる。

中心合わせ：付属の亚克力板（図 2. 1. 3）を計測位置に押さえつけ、穴からマーカでコンクリート面に印を 4 つ付ける。次に、亚克力板の内円に計測機器のレーザーポインタが照射されるように計測機器を近づけて一脚の高さを調整する（図 2. 1. 4）。

計測機の設置：水路底に水路に直交するよ

うに 1m 鋼尺をおき、鋼尺を目安に 1m 離れた位置に一脚を設置する。一脚の高さを変えずに、レーザーポインタの 4 つの光が中心合わせで付けた 4 つの印に重なるように計測機を調整する（図 2. 1. 5）。

⑤ 空中超音波粗度係数計測機による計測

計測機の保存ボタンを長押しして計測を開始する。約 20 秒で計測は終了する。計測が終了したら画面に表示された粗度係数等を記録する。

このとき、計測中にできるだけレーザーポインタの位置が印からずれないように気を付ける。

⑥ 計測ポイント 5 点の計測

③で決めた 5 点を中心とした計測領域で、④と⑤を繰り返す。

⑦ 調査後のデータ整理

調査後、SD カードに保存されているデータを管理し、必要であれば補正要エクセルシートを用いてデータを補正する。



図 2. 1. 4 中心合わせ



図 2. 1. 5 計測機の設置

2. 2 目標の達成度

（1）成果から得られる効果

本事業の成果から得られる効果としては、現在目視に頼っている水理機能の通水性能の評価を定量的に計測できることが挙げられる。通水性能の評価が定量的に計測できれば、将来的には健全度評価の指標として活用することもできる。さらに、定点での計測を続けることで、劣化曲線を作ることができるようになり、補修の計画を立てることができるように考えている。

また、本事業の成果品は、携帯性に優れ、操作も簡便で比較的安価な価格を設定できると考えているため、機能診断を請け負う建設コンサルタンツだけでなく、土地改良区などの日常管理団体などにも普及の可能性が考えられる。

(2) 従来技術との比較

1) 比較する従来技術

① コンクリートパネルによる比較

実務に耐えうる従来技術は、農村工学研究所が開発した「レーザー距離計を用いた摩耗測定手法（2015）」がある。（図2.2.1）

従来技術は、粗さのあるコンクリート面にレーザー距離計を照射することで約 15cm 区間の直線上の算術平均粗さを計測できる技術である。

従来技術と比較する方法として、同じコンクリートパネル 33 枚に対して、空中超音波での計測（反射波の最大振幅 mV ），と空中超音波での計測箇所を従来技術で計測した算術平均粗さ（ mm ）を比較して相関を調べた。

(結果) 図 2. 2. 2 に従来技術との比較結果を示す。本事業の成果品は、従来技術で計測した算術平均粗さと決定係数 $R^2=0.8084$ と高い相関を持つことが確認できた。一部計測結果が従来技術の計測値に対して大きく外れているが、面的に計測する本事業の成果品と線上の算術平均粗さを計測する従来技術との違いと考えられる。



図 2. 2. 1 比較する従来技術機器

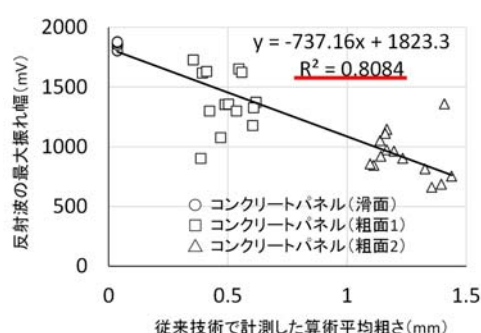


図 2. 2. 2 従来技術との比較結果

② 供用水路における比較

供用中の水路において、本事業の成果品と従来技術との検証を行うために、東海農政局付知川右岸第 14 号開水路の無対策区間、靱性モルタル補修区間、AGモルタル補修区間を対象として粗度係数の計測を行った。(図 2. 2. 3) 実施日は平成 29 年 2 月 23 日、比較する従来技術は、東海農政局により平成 28 年に水位をもとに計算された粗度係数(水位観測)で民間建設コンサルタンツによる水位計測と、不等流水面計算による粗度係数推定している。もう一つの従来技術は、平成 25 年から農研機構農村工学部門によってレーザー距離計を用いた摩耗測定手法(2015)を用いて計測されている定点での平成 28 年度の粗さ計



図 2. 2. 3 付知川右岸第 14 号開水路における対象区間の位置

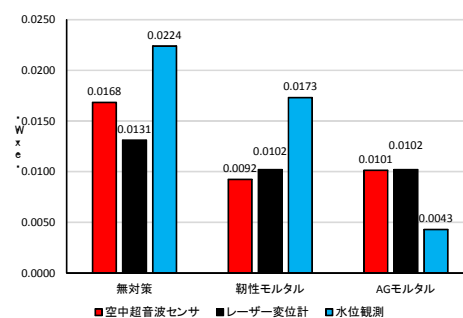


図 2. 2. 4 従来技術との比較結果

測をもとに中矢らの式により推定された粗度係数（レーザー変位計）である。

（結果）図 2. 2. 4 に従来技術との比較結果を示す。空中超音波は、レーザー変位計と比較的近い粗度係数を推定している。特に、無対策区間ではレーザー変位計の粗度係数は比較的健全な 0.0131 を予測しているが、実際の水路の健全度はそれほど良くなく空中超音波による計測結果がより現実の水路の粗度係数を示していた。また、水位観測による粗度係数の推定が困難であることもわかる。この結果より、**本事業の成果品はレーザー変位計による粗度係数推定と同程度以上の粗度係数を推定できると考えられる。**

（課題）従来技術との比較については、付知川右岸用水路の結果のみであるため、さらに対象地区を増やし検討する必要がある。

農研機構農村工学部門が継続調査している地点は、

北海道 3 地区（旭川市、共和町、羽幌町）

関東 4 地区（栃木県真岡市、茨城県城里町、埼玉県本庄市、静岡県藤枝市）

東海 2 地区（岐阜県中津川市、愛知県犬山市）

近畿 2 地区（和歌山県紀ノ川市、兵庫県三木市）

中四国 2 地区（岡山県岡山市、徳島県三好市）

あるため、今後検討可能な地区を選定し、従来技術との比較を行う。

2) 従来技術に対する優位性

①経済性

本事業の成果品は、安価なセンサと比較的単純な電子回路で製作されており、従来技術は高価なレーザー変位計がセンサ部として必要であり専用ソフトがインストールされたノート PC が必要であるため、従来技術より安価な価格で販売可能と考えられる。

②工程

本事業の成果品は、リバウンドハンマー計測点での計測を考えており、計測ポイントを新たに設けずともよいため機能診断の工程の一つとして組み込みやすい点が優れている。また、従来技術においては、車用のバッテリーに加え本体とノート PC を合わせて 10kg 程度あり、PC の起動、設置、1 か所の計測の一連の工程で 10 分程度の設置・計測時間となる。一方で本事業の成果品は 300g 程度と軽量で設置・計測時間が 1 か所当り 2.5 分と短く、1 計測ポイントでの 5 か所の計測でも 15 分程度で計測できる点が優れている。

③品質

本事業の成果品は、1m の計測距離から直径約 30cm の領域の面的な粗度係数を計測が計測可能である。一方で、従来技術は約 15cm の区間の線上での凹凸の計測技術であり、面的な情報を得ることはできない。

④安全性

従来技術は電源機器に車用バッテリーを使用しているため、水路での計測時に濡れることで感電の恐れがある。一方本事業の成果品は、小型で軽量であり電源も電池となっているため、安全性を脅かす大きな危険性は考えられない。

⑤施工性

本事業の成果品は、電源ボタンと記録ボタンの 2 つしかないため、計測時の操作は非常に簡便であるのに対し、従来技術はノート PC での起動、レーザー変位計の操作が必要となり、作業工程は大幅に節減できる。

⑥周辺環境への影響

従来技術、本事業の成果品ともに計測時に落水した環境を必要とするため、周辺環境への影響は従来技術と同等と考えられる。

2. 3 成果の利用に当たっての適用範囲・留意点

①計測時の環境条件

- ・計測時の気温は、22℃以下での計測を推奨する。
※22℃を超える場合は専用エクセルファイルで補正する。
- ・計測時の風速は 6m/s 以下での計測を推奨する。

②計測対象面の条件

- ・計測対象面は、50cm×50cm 以上の平らなコンクリート水路壁
※計測領域は中央の直径 30cm の領域
- ・計測対象面の状態は、コンクリート水路壁の付着物を除去した状態。
※ただし、高圧洗浄後の湿潤状態でも計測可能

③計測機器の設置条件

- ・計測距離は計測面から $1.00 \pm 0.01\text{m}$ となるよう空中超音波センサを設置
- ・計測面と超音波センサは垂直（±3 度）となるように空中超音波センサを設置
※これらの条件は、レーザーポインタを指定の印に照射することで確保できる。

④留意点

- ・空中超音波粗度係数計測機で水路壁面を計測した値は、水路壁面の粗度係数で水路全体の粗度係数ではないことに留意する。

3 普及活動計画

3. 1 想定される利用者

本事業の成果品は、水路機能診断調査の現地調査（近接目視と計測）における水理機能通水性の評価への利用を想定しているため、機能診断業務を受ける①建設コンサルタンツ、日常管理を行う②管理事務所職員、土地改良区職員などを想定している。

3. 2 利用者への普及啓発等の方法

普及啓発は、ARIC の民間技術情報データベースへの登録、研修会等の開催などでの啓発活動を考えている。現場データが充実したのち、健全度評価指標としての調査マニュアルの整備に向けた働きかけを行う。

3. 3 利用者に対するサポート体制、参考資料等

研究成果を学会発表・論文発表で公開し、参考資料とする。

製品化に当たっては、事業期間内に「操作マニュアル（案）」の整備を行った。

3. 4 特許・実用新案等の申請予定

基本機構については特許出願済

【発行国】日本国特許庁(JP)

【公報種別】公開特許公報(A)

【公開番号】特開 2015-215217(P2015-215217A)

【公開日】2015 年 12 月 3 日

【発明の名称】コンクリートの表面粗さ及び劣化評価装置

【国際特許分類】

G01B 17/08 20060101AFI20151106BHJP

G01N 29/00 20060101ALI20151106BHJP

【出願人】

【識別番号】304026696

【氏名又は名称】国立大学法人三重大学

【住所又は居所】三重県津市栗真町屋町 1 5 7 7

3. 5 成果品の導入モデル

成果品の普及に向けて、製品の生産、販売、サポート体制についての計画を立案した。特許については、出願されている【公開番号】特開 2015-215217(P2015-215217A)の審査請求を行った。

■案件■

届出受付番号 : MU25-0048

代表発明者 : 生資) 岡島賢治

発明の名称 : 「コンクリートの表面粗さ及び劣化評価装置」

出願番号 : 特願 2014-097707

出願日 : 2014/05/09

出願人 : 三重大学・丸栄コンクリート工業株式会社（共同出願）

今後の導入に向けての計画を以下の表に示す。およそ 2 年後の販売開始を目指し

て今後も組合内で協議を続ける予定である。

内容	実施時期
申請特許の審査請求	平成 29 年 5 月 9 日
組合検討会議・方針決定	平成 29 年 5 月末
デモ器貸出によるヒアリング実施 ※【使用性の調査】	平成 29 年 11 月～2 月
生産拠点の選定	平成 29 年 9 月末
調査指針（案）策定	平成 30 年 3 月末
販売計画検討	平成 30 年 4 月～6 月
コスト試算・販売価格	平成 30 年 6 月～9 月
販売ルート確立	平成 30 年 9 月～12 月
生産開始	平成 31 年 1 月～
販売開始	平成 31 年 4 月

※【使用性の調査案】

平成 27 年 2 月 26 日にも研修会を開催しているが、東海農業土木事業協会水利施設保全管理補修部会への働きかけを行い、本計測方法の説明並びに、所属するコンサルタント会社に働きかけを行い、実際の調査における計測を実施する。

4 研究総括者による自己評価

項 目	自己評価	自己評価の理由
研究計画の効率性・妥当性	B	概ね研究計画通りに事業を進めることができた。また成果品は、研究計画時に予定していた性能を有するものを開発できた。 しかし、計画時に以下の点で予測が甘く計画通りに遂行できなかった。 ・「画像解析による傾き検出機構」が小型PC搭載の必要性を予測できず、機構の変更を余儀なくされた。 ・「供用中の水路での実証」は水路の不同沈下、風の影響による波などで、当初想定していたよりも供用中の水路の粗度係数の計測が困難であったため、成果品の精度の検証を模型実験水路の結果によるものを中心に行う必要が生じた。 ・「環境による影響検討」において温度の影響が25℃以上で理論式より減衰率が大きくなる現象の理論的説明ができなかった。データからの補正式に留まっており理論的解明が求められる。
目標の達成度	A	本事業の成果品は研究計画時に予定していた性能を有するものを開発できた。
研究成果の普及可能性	A	本研究開発の成果として得られる機器は、①測定するコンクリート面の粗度係数（または粗さ）、②画像情報、③GPS（GNSS、QZSS）による位置情報を取得できるものを予定している。現在のGPS（GNSS、QZSS）の精度であれば、農業用水路の1バレル単位での管理が可能である。このため、コンクリート製農業用水路の粗度係数を得るという目的以外にも、各バレル定点での計測により、バレル毎の粗度係数の経年変化のデータを蓄積することもできる。粗度係数という定量的な値を蓄積できるため、

		既存のLCC算定ソフトなどを活用し、粗度係数の劣化進行予測が可能となると考えられる。長大な農業用水路のストックマネジメントを行う上で、本研究開発による「安価」で「簡便」に「面的な情報」を「短時間」に取得できる機器の普及可能性は高いと考えられる。
総合コメント 本事業は概ね研究計画通りに遂行でき、成果品においても当初予定していた性能を有する機器を開発できた。今後製品化に当たっては本事業で開発した主機能以外の、カメラ機能といった追加機能などを搭載することや、機器のデザイン、画面表示などをよりブラッシュアップすることで、一層使いやすい機器の形で販売できると考えられる。		

注) 評価結果欄は、A、B、Cのうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段階で記入する。

5 今後の課題及び改善方針

- ・ 本事業の成果品は、計測距離 $1.00\text{m} \pm 0.01\text{m}$ であるため、水路幅 1m 以上の比較的大きな水路での利用に限定される。計測距離 0.5m でも算術平均粗さの計測が可能であることは確認できているため、水路幅の狭い水路に対応できるように計測距離を 0.5m にもできるような改善が考えられる。

- ・ 供用中の水路の粗度係数の計測が想定以上に困難であったため、供用中の水路での実証結果が少なくなった。供用中の水路での精度の高い粗度係数の計測手法を考えて、今後供用中の水路での実証試験のデータを蓄積する必要がある。

- ・ 空中超音波による粗度係数計測は、わずかでも水が溜まっている水路底面の粗度係数の計測が困難であることから、水路全断面の粗度係数を得ることが困難である。可能であれば灌漑期間中に水路底面の粗度係数も計測可能な技術開発が求められる。