

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（1年目の研究対象）】

①研究代表者		氏名（ふりがな）		所属		役職	
		横田 有為 （よこた ゆうい）		東北大学 金属材料研究所		准教授	
②研究 テ マ	名称	自律型打音検査装置についての技術研究開発					
	道路行政 技術開発 ニーズ	No.	HM71		政策 テーマ	持続可能なインフラメ ンテナンス	
		項目名	トンネルの健全性の診断 に必要な情報を定量的に 把握・推定する技術				
③研究経費（単位：千円）		令和7年度	令和8年度	令和9年度	総合計		
※R7は受託額、R8以降は計画額 を記入。端数切捨。		26,910	27,180	27,380	81,470		
④研究者氏名		（研究代表者以外の共同研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）					
氏名			所属・役職				
大橋 雄二			秋田県立大学 教授				
沓澤 京			埼玉大学 助教				
小野寺 晃			Flagship A 株式会社 代表取締役				
藤岡 宏之			D-smart 株式会社 代表取締役				
⑤研究の目的							
本業務は、持続可能なインフラメンテナンス実現のため、高精度・高効率で安全にトンネル内壁の状態を把握する「自動打音検査」と「ロボット」が融合した自律型打音検査装置を開発する。大学の要素技術と企業の事業実績を基に、産学連携において量産装置の開発・自律型検査の実証試験を行う。							

⑥これまでの研究経過、目標の達成状況

1) 自立型打音装置の設計・開発

① 自律型打音装置の設計

目的：自動打音検査装置とロボット制御の融合を実現するためのシステムを設計する。
自動打音装置およびロボット制御技術の融合を実現するべく、両者の性能を加味した動作状況（設置方法・稼働方法・動作範囲・走査速度等）を検討する。

研究結果：

自動打音検査装置とロボット制御の融合を実現するため、両者の性能をまずは明確にした。具体的な両者の性能を下記のようにまとめた。

- ・重量 : ロボットアーム可搬重量 12.5 kg
ロボットアーム重量 33.5 kg+土台等
- ・稼働方法：自動打音装置（ソレノイドコイル・セルフアライメント機構）
ロボットによる力制御
自動打音装置・ロボットアームはそれぞれ独自ソフトウェアで動作
- ・動作範囲：ロボットアーム長 1300 mm（最大値） + 打音検査装置の接続棒の長さ
- ・走査速度：ロボットアーム 4 m/s（最大値）
自動打音装置 10 cm/s（目標値）

上記両者の性能を踏まえた融合システムとしての想定される動作状況は以下となる。

- ・重量 : 自動打音装置はロボットアーム可搬重量と接続棒にかかる重要を念頭に 3.3 kg 以内に設計する
- ・稼働方法：1 台の PC で融合システムの動作制御を行う。
融合システムは、高所作業車に設置して使用する。
- ・動作範囲：実証試験の結果等を踏まえて、打音検査装置の接続棒の長さを設定し、ロボットアームの動作範囲を合わせて決定する。
- ・走査速度：打音検査装置の走査速度に律速される。
実証試験の結果を踏まえて、信号が取得可能な最大の走査速度を決定する。
- ・接続方法：ロボット部に打音検査装置を接続棒によって固定
(安定性を確保するためアームによる保持は行わない)
接続棒の長さは実証試験等の結果を踏まえて今後決定する。

今回の装置の目標として、覆工コンクリート壁厚を確認しながら、トンネル上部に発生することが多い空洞の確認を確認することを目指す(図1)。そのためには、これまで人が行っていた打音検査における音での空洞検査に加えて、コンクリート内の超音波振動を圧電センサーで取得することで壁厚の評価が行えるシステムを検討する。

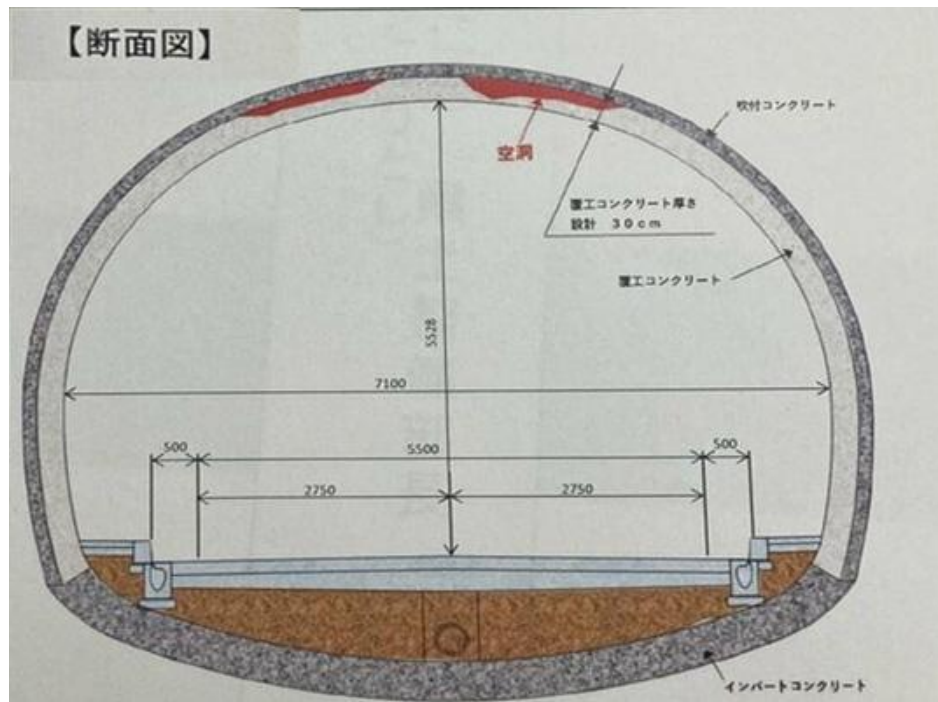


図1 上部に空洞を有するトンネルの模式図。

2) ロボット制御技術の開発

① ロボットの力制御基盤構築と接触状態制御の研究

目的：打音検査自動化の実現に欠かせない基礎技術として、マニピュレータを用いた力制御の基盤構築をおこなう。検査装置を用いず、装置を模した簡易的なエンドエフェクタによって壁面との接触を維持するような制御システムを構築する。実際の打音検査の際には、長さのある持ち手を介してロボットの手先から離れた箇所に打音検査装置が搭載されるため、そのような状況でも接触が維持可能な制御系を実装する。

研究結果：本研究計画に用いるマニピュレータとして、Universal Robots社のUR12eを選定、発注した。UR12eの主な仕様は次のとおり。

- 最大到達距離：1300 mm
- 最大動作速度：4 m/s
- 可搬重量：12.5 kg（ただし重心が手先から300 mm 離れると約10 kgまで低下）
- 手先に6軸力覚センサーを内蔵し、エンドエフェクタ部での接触力を検知可能。

上記マニピュレータを模した環境を動力学シミュレーション上で実装し、制御系の基礎の構築を試みた（図2）。マニピュレータ先端には長さ500 mmのエンドエフェクタが固定されている。エンドエフェクタの位置とマニピュレータ手先で測定した接触力とをインピーダンス制御（ロボットの見かけの剛性などの機械的特性を制御する手法）によって制御し、壁面との接触の維持を試みた。シミュレーション結果の一例を図3に示す。エンドエフェクタ先端は加減速しつつ段階的に壁面に接近し、8.5 s付近で壁面に接触した。衝突時に最大で11 N程度の撃力が生じた後、約15 sまで7.5 N程度のおおむね一定の接触力で壁面との接触を維持することができた（図3）。このことから、簡易的ではあるものの、接触を維持する制御の基礎の実装が進められた。ただし、実機においては制御パラメータの調整や安全策のための例外処理が必要である。今後は実機での制御の実装を進めていく。

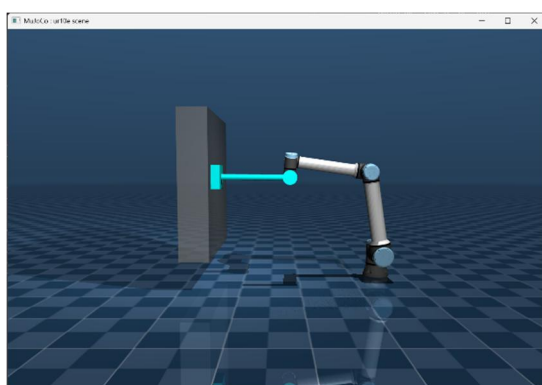


図2 動力学シミュレータでの接触の様子

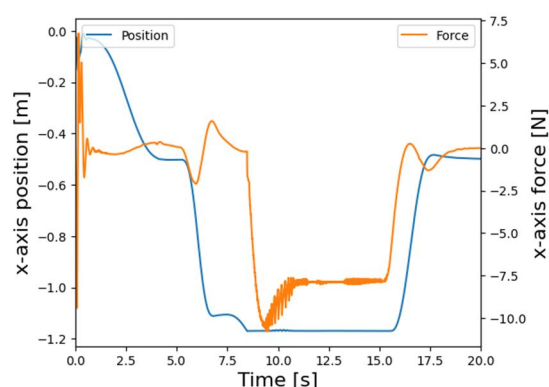


図3 接触動作時の先端位置と接触力

3) 打音検査センシング部の最適化

① 打撃強度、ローラーサイズ、センサー配置の最適化

目的：初年度は、FS 研究で開発した打音検査と衝撃波検査を同時計測できる超音波センサー内蔵ローラー型自動打音検査装置をより実用的な形態にするための最適化を行う。実際のトンネル用コンクリートの材質や厚さの範囲に対して、十分な打撃強度での打音および衝撃波の応答受信ができるよう打撃強度の最適化を行う。また、広範囲な面積を効率よく検査するためのローラーサイズを最適化の検討も行う。さらに、ローラーに内蔵している超音波センサーの取付位置やフレーム部への取付けによる簡便化も含めてセンサー配置の最適化の検討も行う。

研究結果：

上記の目的を達成するため、(A) ローラー系の最適化、(B) 内部分割構造および電極接触機構の改良、(C) 打撃強度の最適化（コンクリート厚および材質対応）、(D) ローラーサイズおよび真円度の確保、(E) 超音波センサー取付位置の最適化、を実施した。各項目の研究結果を以下に記す。

(A) ローラー径の最適化（トンネル表面凹凸への対応）

一般的なトンネルコンクリート面における表面凹凸への追従性を確保するため『ローラー径を3パターン（ $\phi 30$ mm、 $\phi 46$ mm、 $\phi 55$ mm）』を検討した（図4）。この寸法は、実際のトンネル（フィージビリティスタディ「以下FS」の現場）での走行性およびデータ取得安全性を総合的に評価した結果である。ローラー径に関しては、 $\phi 55$ mmとした場合、ベアリング外径が $\phi 47$ mmとなることから重量が80 gとなり、目標とする全体重量をオーバーすることが判明した。一方で、ローラー径が大きいほどより広い範囲の計測が可能となる。したがって、測定範囲と総重量のバランスを考慮した $\phi 46$ mmを採用することとした。

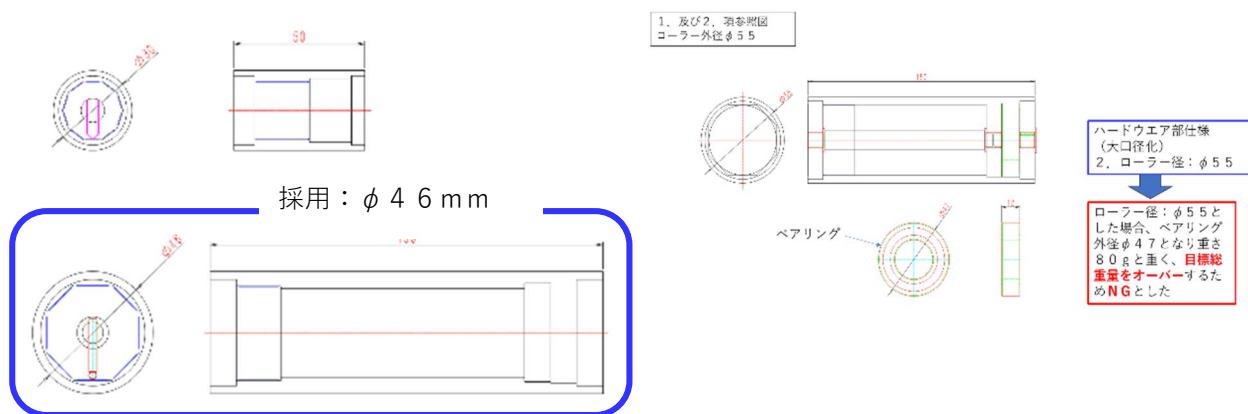


図4 ローラー径3パターン（ $\phi 30$ mm、 $\phi 46$ mm、 $\phi 55$ mm）の設計図。

(B) 内部分割構造および電極接触機構の改良

圧電素子およびデータ取得用スプリングプロブ (FA 社独自のブラックボックス機構) の接触を安定化させるため、ローラーの内部分割数を FS ステージ時の 10 分割から 8 分割に変更した (図 5)。さらに、FS 時の電極接触長さ 5 mm を 15 mm の約 3 倍に延長することで、圧電素子との接触時間を長くし、信号安定性を向上させた。これにより、従来よりも安定した打音データが取得できると考えており、現在はその実証試験中である。

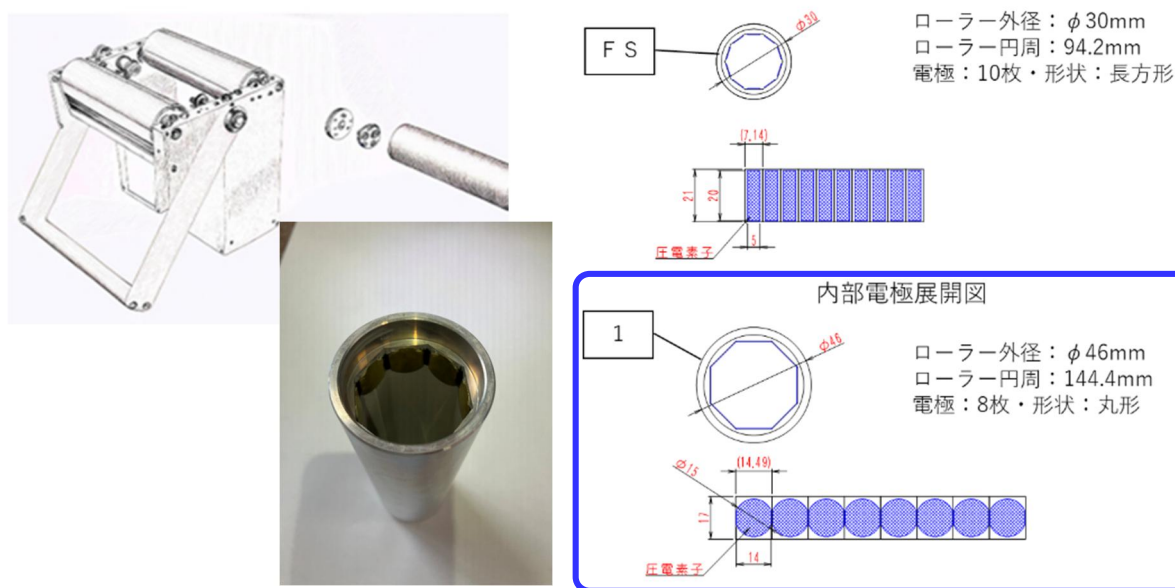


図 5 データ取得用ローラー部とローラー内部圧電素子の模式図。

(C) 打撃強度の最適化 (コンクリート厚および材質対応)

日本道路協会基準により、トンネル覆工コンクリート厚は 30 cm 以上を確保することが求められている。工法 (NATM 法、矢板工法等) によりコンクリートの材質や内部構造が異なることを踏まえ、十分な打撃エネルギーを確保する打撃部の設計を行った (図 6)。FS ステージ時におけるソレノイドの打撃強度 0.23 N を基準とし、その打撃強度を 8.0 N (FS ステージの約 35 倍) とすることで、十分な打撃音および反射波の応答取得が可能であることを確認した。

さらに、真円度の高精度加工により偏心を抑制し、走行時の信号のバラツキを防止した。2本のローラーがトンネル表面に均等に接触する構造とすることで、片当たりを防ぎ、安定した検査走行を実現した。

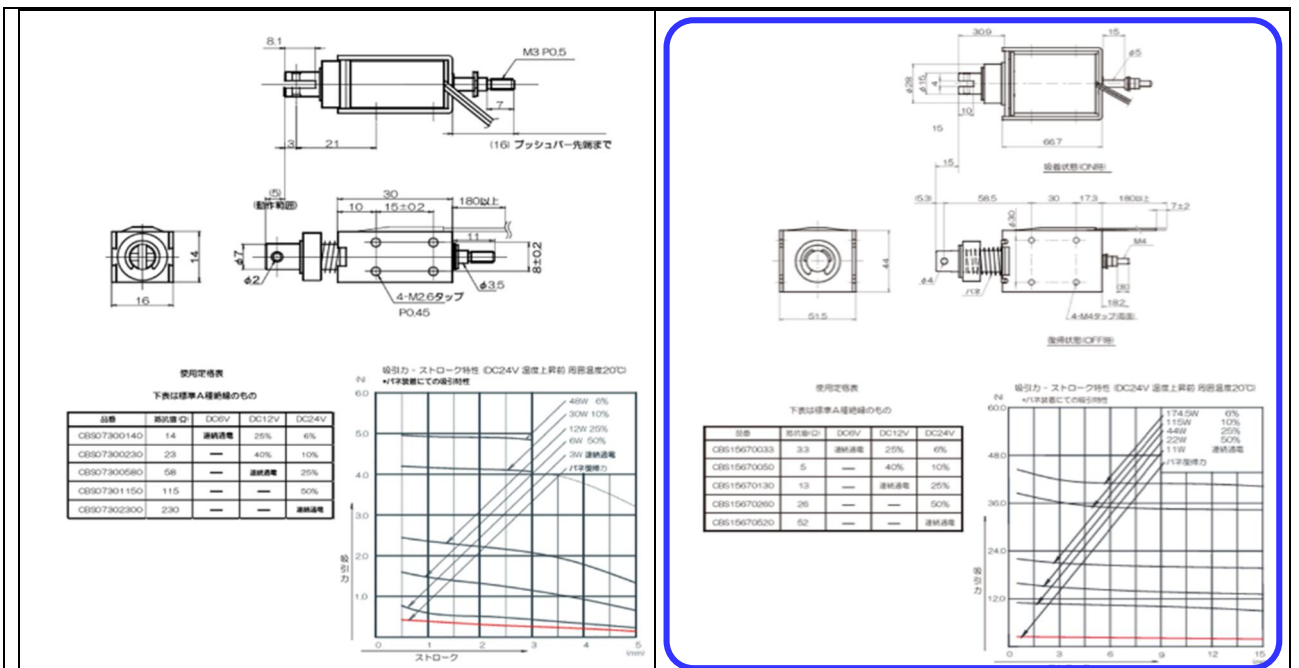


図6 打撃部の設計図 (左) FS ステージ、(右)本ステージ構成。

(D) ローラーサイズおよび真円度の確保

自動打音装置として広範囲な面積を効率的に検査することを目的に、内部に圧電素子を配置したローラーの長さをFS ステージ時の3倍となる150 mmとした(図7)。さらに、ローラーがトンネル表面に均等に接触する構造にするため、ローラーユニット部との接続箇所にゴニオ機構を取り付けた。その結果、トンネル表面に対して片当たりを 방지、ローラー部に均一に押し付け圧力を維持した状態での安定した検査走行を実現した。

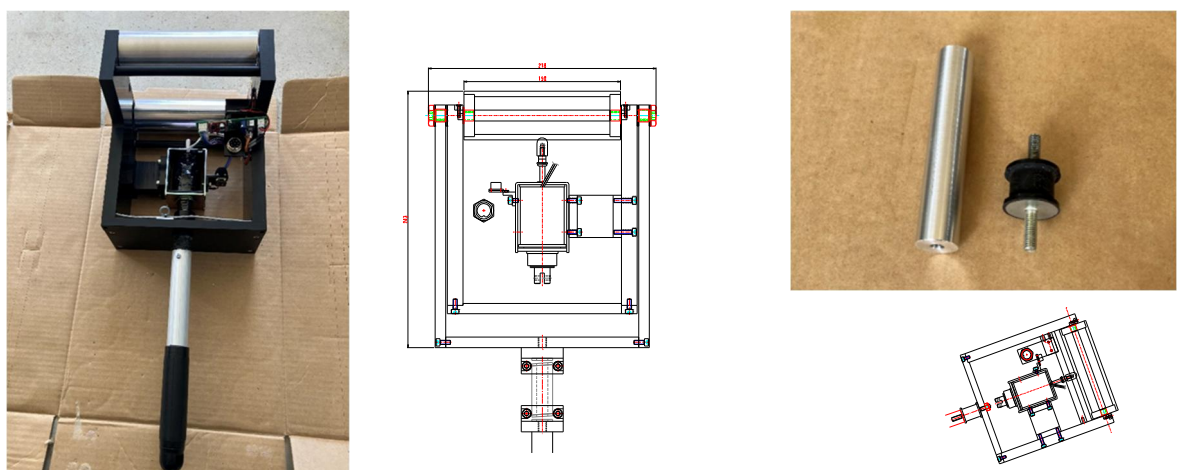


図7 ローラーユニット部およびゴニオ機構。

(E) 超音波センサー取付位置の最適化

超音波センサーの設置位置（フレーム幅方向）を3パターン（70 mm、90 mm、110 mm）で検討し、それぞれの設計・試作を行った（図8）。今後は、実証実験より最適位置を評価・選定する予定である。構造全体は、ハンドリング性および保守性を考慮し、シンプルかつ軽量（総重量約 3.3 kg）な形態を目指している。

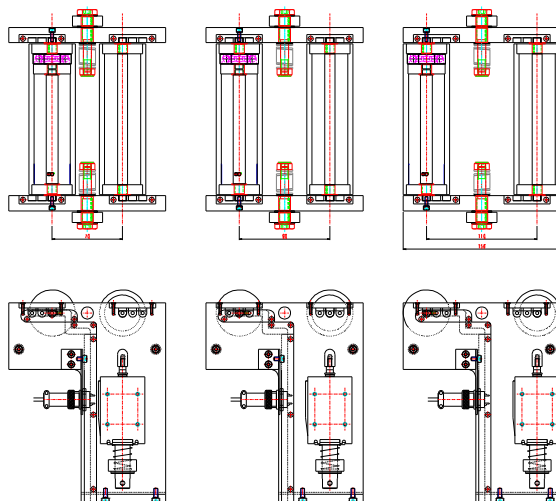


図8 センサー取付位置を変化させた際のローラーユニット部図面。

表1 自動打音装置の途中経過のまとめ

	FS ステージ時	改良後	効果
ローラー径	φ 30 mm	φ 46 mm	凹凸追従性と走行安定性の両立
圧電分割数	10 分割	8 分割	データ取得の安定化
電極接触長さ	5 mm	15 mm	信号の安定化向上
打撃強度	0.23 N	8.0 N	反射波強度の向上
ローラー長さ	50 mm	150 mm	検査面積効率向上
センサー取付幅	—	70, 90, 110 mm	実証実験で最適化予定
重量	0.35 kg	3.3 kg 以内	ロボット可搬重量内で設定、作業効率を向上

今後は、φ 46 mm ローラー構成における各種試験、データ取りを実施し、耐久性および温度影響などの評価を行う。さらに、実証試験を踏まえ、超音波センサー取付位置の最適化およびフレーム構造の軽量化を検討する。実際のトンネル環境における打音検査を行い、課題抽出と対応策の検討を行う。次期展望として、ロボットとの融合の最適化につなげるべく、超音波センサー内蔵型自動打音検査装置の改善・改良の検討を重ねる。

② 受信信号の解析法の最適化

目的：打撃によって収音マイクおよび内蔵超音波センサーで受信するそれぞれの信号を解析して、検査対象の良・不良の判定を行う必要があるが、今回は対象となるトンネル用コンクリートの材質や厚さ範囲に対応した信号に最適化していく必要がある。初年度は、コンクリート内部の砂利サイズ、密度等に応じた音波伝搬速度と音響インピーダンスの最適範囲の設定や、信号強度閾値設定、ピーク検出機能設定等が可能な解析ソフトの構築を進める。

研究結果：

(A) コンクリート内部音波伝搬速度測定の見直し

最初にコンクリート内部を伝搬する音波の伝搬速度の教師データを取得するため下記のような実験系にて測定を行なった（図9）。サンプルとしてU字溝（1002 mm）と蓋板（600 mm）を準備し、片端面（打撃面）に圧電センサー1を取り付け、反対面（受信面）に圧電センサー2とAEセンサーを取り付け、打撃面をハンマーで打撃した際の各センサーの応答をオシロスコープで観察し、打撃パルスの伝搬時間を計測した。

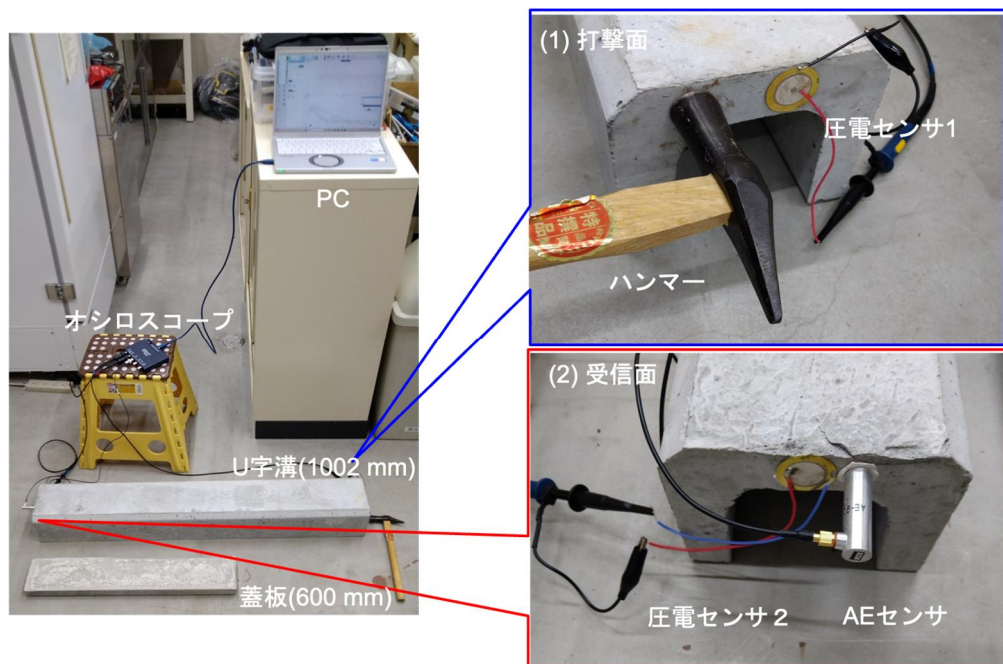


図9 コンクリート内部の音波伝搬速度測定の実験構成。

U字溝試料、蓋板試料、それぞれに対する各センサーの時間応答信号とそれらの高速フーリエ変換(FFT)スペクトルの結果を図10に示す。時間波形を見るといずれも周期的な変化を示しており、各ブロックの長手方向を音波が往復している様子が観測される。また、そのFFTスペクトルにもその周期性を反映して基本周波数のピークとその高調波成分のピークが検出されている。コンクリート内部の音波伝搬速度は、打撃面のセンサーの受信パルスの発生時間を基準にして、受信面のセンサーの受信パルスの到達時間の時間差を求めることで決定することができる。

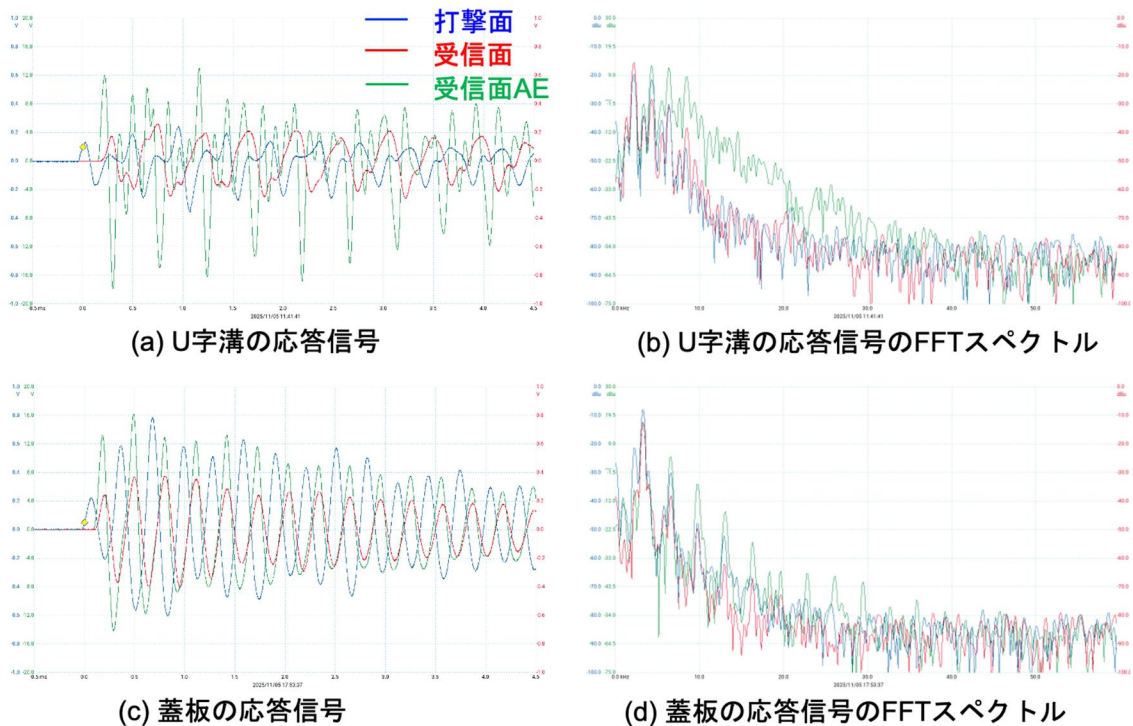


図10 コンクリート試料に対する打撃応答信号とFFT解析スペクトルの結果例。

この結果をもとに、伝搬時間を読み取った。図11では、応答信号の立ち上がり開始時刻の時間差を求めたものと、応答信号パルスのピーク時刻の時間差を求めたものを示している。この結果では、立ち上がり時間差の方がピーク時間差よりも短い時間になっていることがわかる。また、図12はFFTスペクトルの基本周波数に相当する最も大きいピークの周波数を求めた結果を示している。これらの時間差（あるいは周波数）と試料長から音波の伝搬速度を求めてみた結果が表2である。この結果を見ると、算出手法に依存してU字溝で3798~4527 m/s、蓋板で3883~4956 m/sと大きなばらつきがある。これは用いた圧電センサの応答速度が十分でない（厚み振動ではなく円板全体のたわみ振動に成長する時間がかかっているものと推測される）ことが原因の一つと考えられる。これに対し、図10に示したAEセンサ（緑）での応答を見ると、同じ受信面の圧電センサ

(赤)よりも早くパルスが立ち上がっており、応答性が良いことがわかる。また、FFT スペクトルのピークからの算出では、同一試料であれば受信面のセンサも打撃面のセンサもどちらもほぼ同じ結果が得られている。サンプル間の速度値の違いは、有限の幅を持ったサンプルのため純粋に長手方向の伝搬のみでなく、斜め、横方向などの複雑な共振が発生しているためと考えられる。いずれにしても今後はこれらの知見を元により精度のよい計測法で伝搬速度算出を進める。

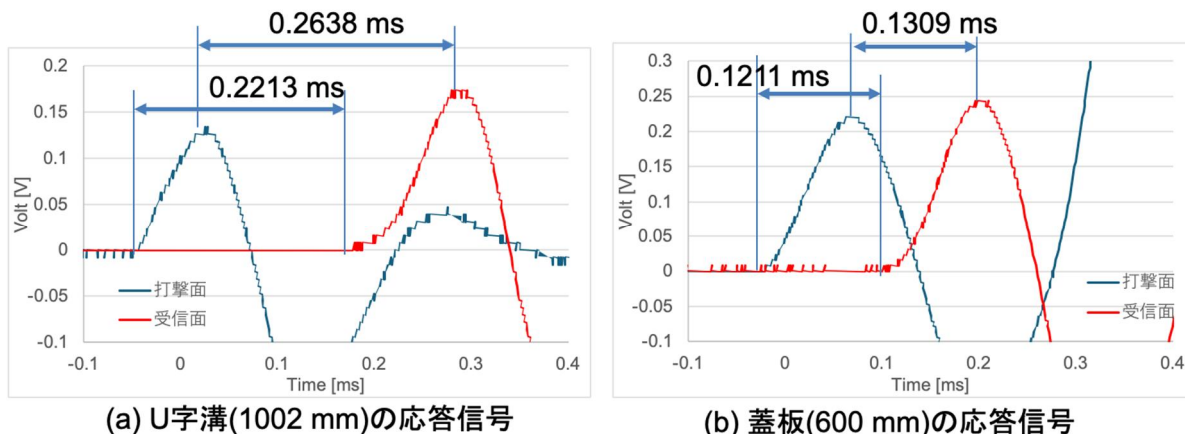


図 11 応答信号の立ち上がり時間差、ピーク時間差の測定結果。

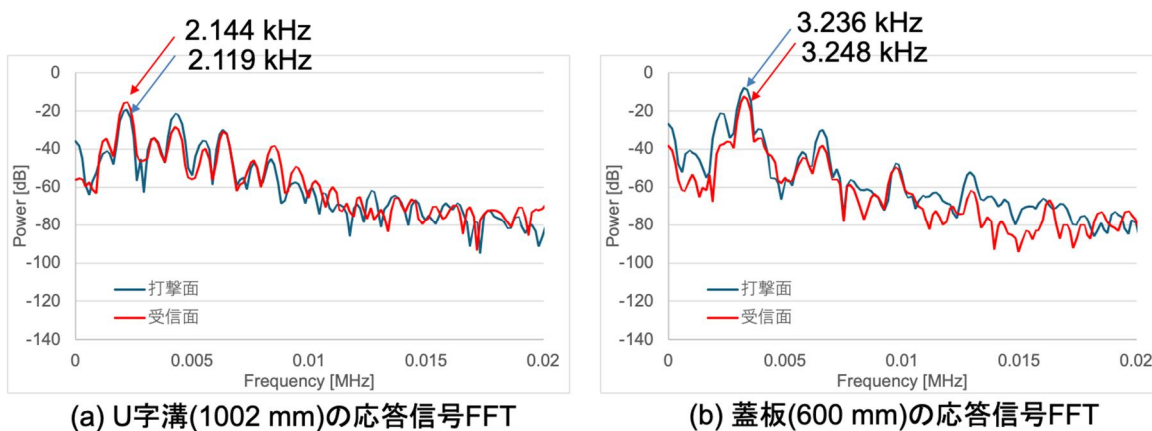


図 12 応答信号の FFT スペクトルのピーク周波数測定結果。

表 2 各手法で求めた音波伝搬速度。

	U字溝(1002 mm)	蓋板(600 mm)
立ち上がり時間	4527 m/s	4956 m/s
パルスピーク時間	3798 m/s	4584 m/s
FFTピーク周波数 (打撃面)	4247 m/s	3883 m/s
FFTピーク周波数 (受信面)	4297 m/s	3897 m/s

(B) 打音検査装置の制御 BOX および解析ソフトの試作

打音検査装置の機能として大きく分けて、センシング部、制御 BOX 部、解析ソフト部の3つの部分から構成され、それぞれの機能は図 13 のようなブロック図で表される。前項 3)-①で開発したセンシング部を駆動制御するための制御 BOX および受信信号を表示・解析するためのソフトウェアの開発を行なった。開発した制御 BOX と解析ソフト画面の例を図 14 に示す。前述のセンシング部と接続し、打撃の制御、信号取り込み、波形表示ができることが確認できた。現在は受信波形の FFT スペクトル出力を表示する機能の追加作業を行なっている。今後は、さらに受信信号から評価に必要な信号を抽出し判定を行うための解析手法の検討を進め実装していく予定である。

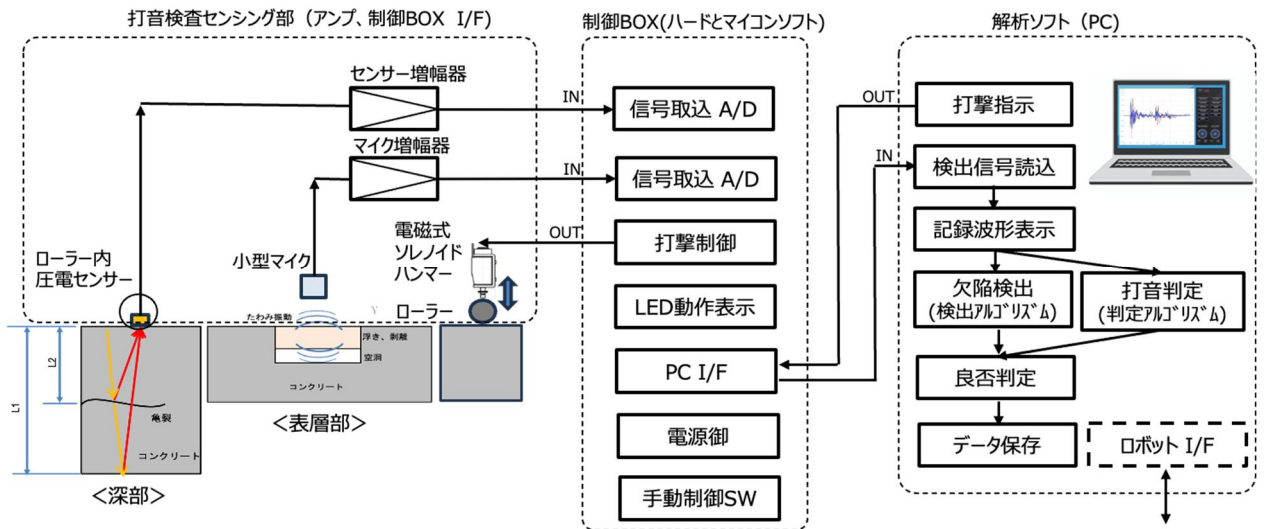


図 13 打音検査装置の制御 BOX 部および解析ソフトの概要ブロック図。

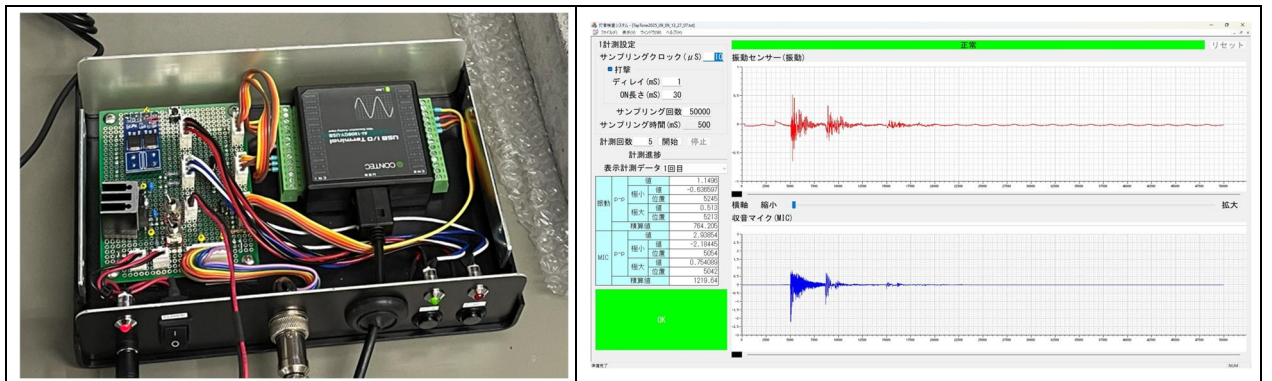


図 14 開発した制御 BOX 試作品と解析ソフトの測定画面例。

4) 自立型打音検査装置の実証

目的：実証試験では、実際のトンネル内で開発した装置を用いた内壁検査を行う。場所は、D-smart 社が事業を展開している宮崎県を予定している。初年度は、3) で作製する改良型の自動打音検査装置の実証試験を実施する。改良前後の実証試験結果を装置開発にフィードバックすることで、更なる装置の最適化を進める。

研究結果：

まずは初年度の実証試験として改良型の自動打音検査装置を行う場所の選定を実施した。当初は、D-smart 社が事業を展開している宮崎県を予定していたが、既に開通後のトンネル等の場合は試験を行うための手続きや当日の警備員配置などの費用が多く必要となる。さらに、今回の装置開発は東北・関東において実施していることから、実証試験場所への移動に対して、時間と移動費が多く必要になる上、装置の長距離移動におけるリスクも生じてしまう。そこで、国土交通省 東北地方整備局と相談の上、開通前のトンネルでの実証試験の実施を検討した。東北地方整備局の支援により、現時点で実証試験が可能な東北地域のトンネルをリストアップ頂いた (図 15)。これらは、全て覆工まで施工完了のトンネルであり、開通前であるため実証試験当日の警備員配置などの費用を削減することができた。

	トンネル名 (仮称)	住所	担当事務所
①	猪ノ鼻トンネル	山形県最上郡戸沢村大字古口	山形河川国道事務所
②	金山第一トンネル	山形県最上郡金山町大字金山	山形河川国道事務所
③	小岩川第二トンネル	山形県鶴岡市小岩川字出口～北沢	酒田河川国道事務所
④	大岩川トンネル	山形県鶴岡市小岩川～大岩川	酒田河川国道事務所
⑤	湯野上 3 号トンネル	福島県南会津郡下郷村	郡山国道事務所

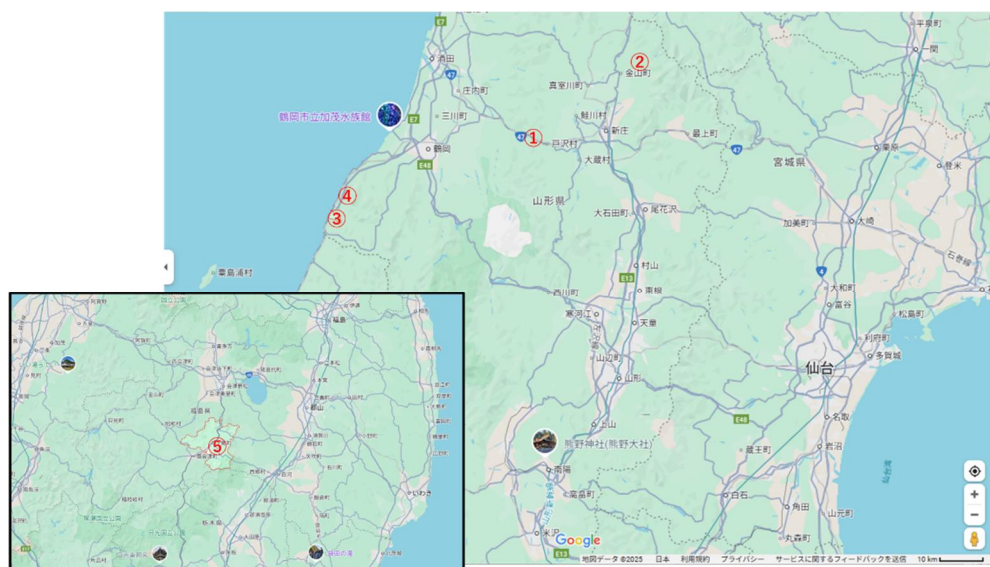


図 15 実証試験候補地リストとその場所

⑦特記事項

進捗に関してはおおむね予定通り進んでいる。2026年2月頃に開発した打音検査装置の実証試験を予定しており、その結果を踏まえて、改良等が必要になった場合は迅速に対応を検討する。