

# AIを用いたトンネル覆工の 打音調査技術



**木下 果穂**  
Kaho Kinoshita  
構造物技術研究部  
トンネル研究室  
主任研究員



**嶋本 敬介**  
Keisuke Shimamoto  
構造物技術研究部  
トンネル研究室  
主任研究員



**仲山 貴司**  
Takashi Nakayama  
構造物技術研究部  
トンネル研究室長



**蒲池 秀矢**  
Hideya Kamachi  
株式会社ジェアール総研情報システム  
計測システムプロジェクト研究室  
プロジェクトリーダー

## はじめに

鉄道トンネルでは、1999年に相次いで発生したコンクリート塊のはく落事故(図1)を契機に、検査体系が大きく見直されました。現在では、2年ごとの目視調査に加え、新幹線では10年、新幹線以外で20年を超えない期間ごとに、トンネル覆工表面の近接目視と打音調査が実施されており(図2)、トンネルの安全性が確保されています。

この検査体系の中で重要な役割を担っているのが、検査員による打音調査です。検査員はハンマーでトンネル覆工表面を叩き、その際に生じる音の違いから内部の状況を判断し、はく落に対する安全性を判定します。健全部では高音の澄んだ音(清音)が響き、内部に浮きや空洞がある場合には清音以外の音(濁音)となります。これは、内部の状態によって振動の伝わり方や響き方が変わるためであり、検査員はその

図1 トンネルからの大規模なはく落<sup>1)</sup>

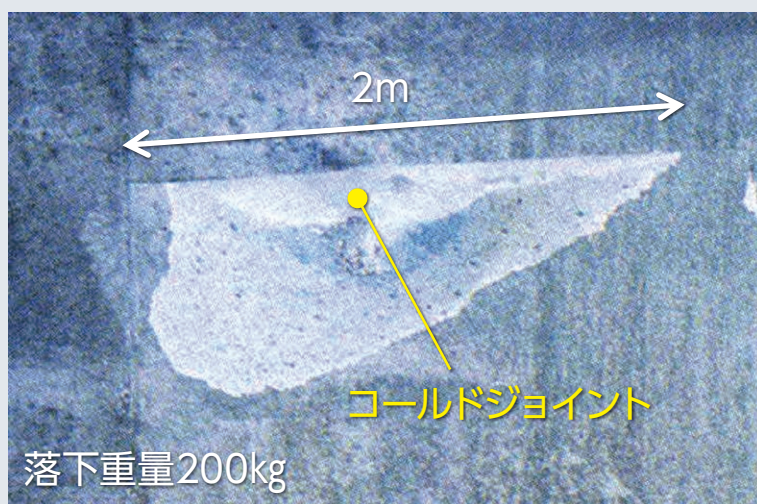
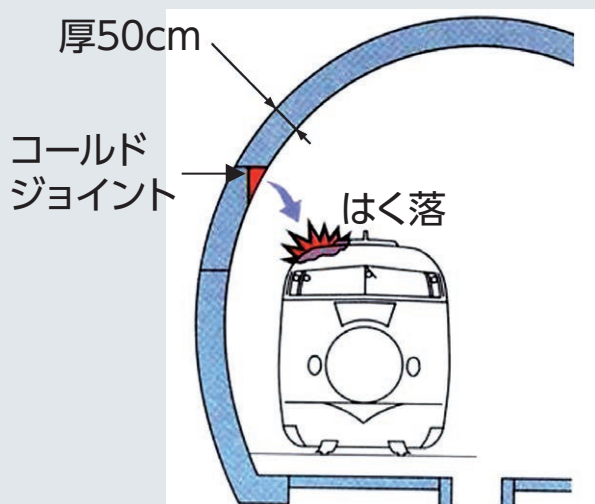




図2 トンネル覆工表面の近接目視と打音調査

違いを経験にもとづいて聞き分けています。

このように打音調査は検査員の経験に大きく依存する検査手法であり、現在は熟練した検査員の技能によりはく落に対する健全度の評価が行われています。しかし、将来にわたって同じ

体制を維持できるとは限りません。そのため、安全性を低下させることなく、検査を省人化することが重要な課題となっています。

このような背景を踏まえ、ハンマー打撃時に生じる音をAIで解析し、清音・濁音を自動判定するとともに、打音位置の可視化および自動記録を行う打音調査技術を開発しました。

## AIを用いたトンネル覆工の打音調査技術

### ■ 全体の概要

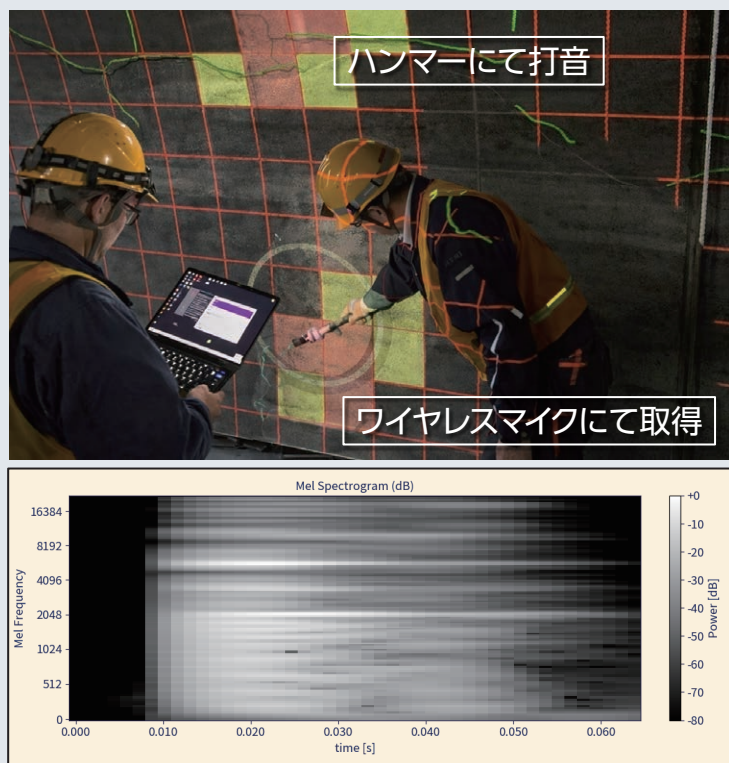
開発した打音調査技術の全体イメージ図を図3に示します。本技術は、打音の自動判定、打音位置の取得、結果の投影および記録を一体化した検査支援技術です。打音の判定から記録までを連続的に処理することで、効率的な検査とデータの一元管理を可能にしています。

### ■ 打音の自動判定

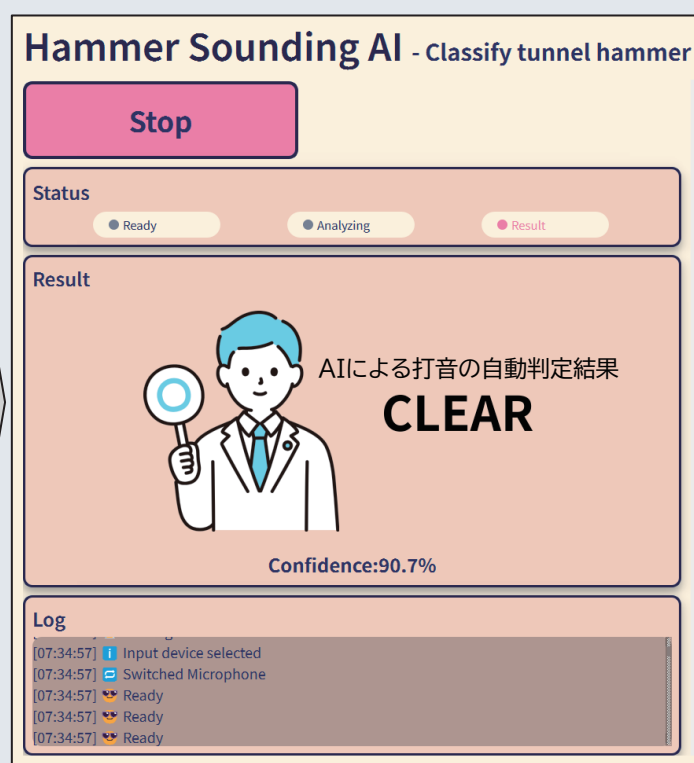
打音調査では、ハンマーでトンネル覆工を叩いたときの音の違いから内部の状態を判断しますが、その違いは「音の高さ」だけでなく、「響き方」や「減衰の仕方」などの時間変化を含む特

図3 AIを用いたトンネル覆工の打音調査技術の全体イメージ





メルスペクトログラム (打音を画像化)



打音自動判定アプリ

図4 打音の自動判定の例

徴として現れます。そこで、本技術では、こうした時間変化を含む音の特徴を捉えるため、打撃音をそのまま扱うのではなく、音の特徴を視覚的に表現した画像に変換し、これをAIで解析することで清音・濁音を自動判定(図4)できるようにしました。

具体的には、実際のトンネルで収録したハンマーの打撃音を「メルスペクトログラム」という画像に変換しました。メルスペクトログラムは、横軸が時間、縦軸が周波数とし、音の強さを濃淡で表しています。メル尺度は人の聴覚特性に近い周波数尺度であり、低い周波数を細かく、高い周波数を粗く表現することで、人が感じる音の違いに近い形で周波数成分を示します。そのため、清音と濁音の違いが視覚的な「模様」として現れます(図5)。

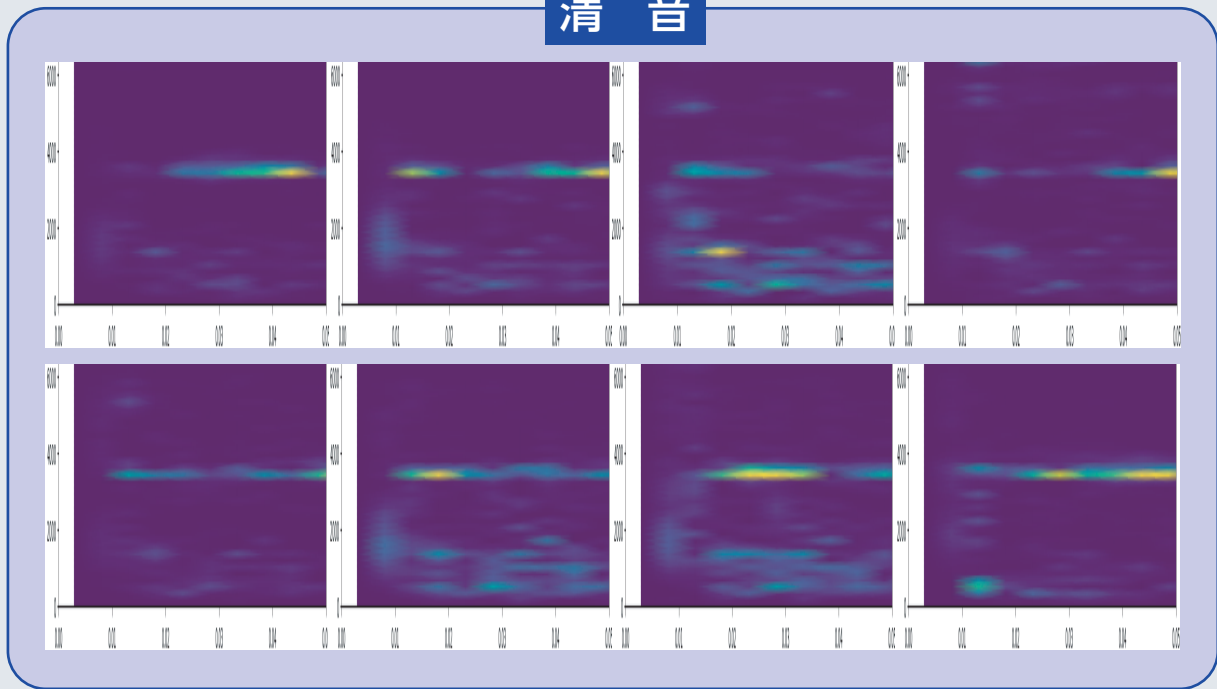
このメルスペクトログラム画像を教師データ

として学習させることで、清音・濁音を自動判定できるようにしました。本研究では、Vision Transformer (ViT) と呼ばれる画像認識手法を用いています。ViTは、画像を小さな領域に分割し、それらの関係性から全体の特徴を捉えるモデルであり、打撃音特有の複雑な模様の違いを効率的に学習することができます。なお、打音は叩く位置や叩き方、覆工の状態などによって多様に変化するため、現場データの蓄積に合わせて学習データを追加し、微妙な打音の違いにも対応できるよう改良を重ねています。

### 打音位置の取得

打音判定アプリで判定した打音結果は、打音した位置とひもづけて自動記録することで、記録の省力化やはく落に対する健全度の自動判定につながると考えられます。そこで、本技術では、打音位置を自動的に取得する仕組みを導入

## 清音



## 濁音

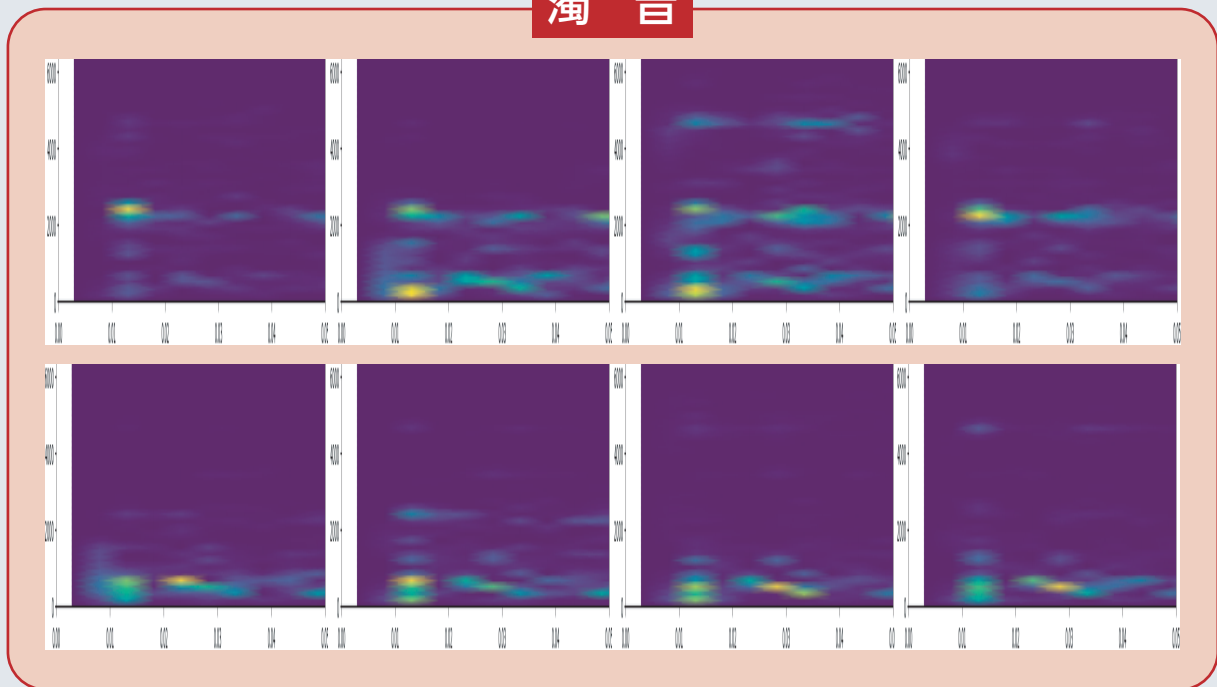


図5 メルスペクトログラム

しています。検査員がトンネル覆工表面をハンマーで打撃すると、同時に無線測位技術により打音位置を算出します。本技術ではBluetoothを用いた測位方式を採用しており、電波の到来方向（角度）などの情報を活用して、トンネル

内におけるハンマーの位置をほぼリアルタイムに算出します（図6）。これにより、打音結果と位置情報とがその場で自動的に対応付けられ、従来のように検査員が図面上で位置を確認しながら記録する必要がなくなります。



図6 Bluetoothによる位置測位

### 結果の投影および記録

打音判定アプリで得られた打音結果および取得された打音位置は、その場でプロジェクターによりトンネル壁面に投影されます(図7)。例えば、清音であれば青色、濁音であれば赤色で表示され、打音した位置に直接示されます。これにより、検査員は打音の実施状況とその判定結果をその場で確認することができます。

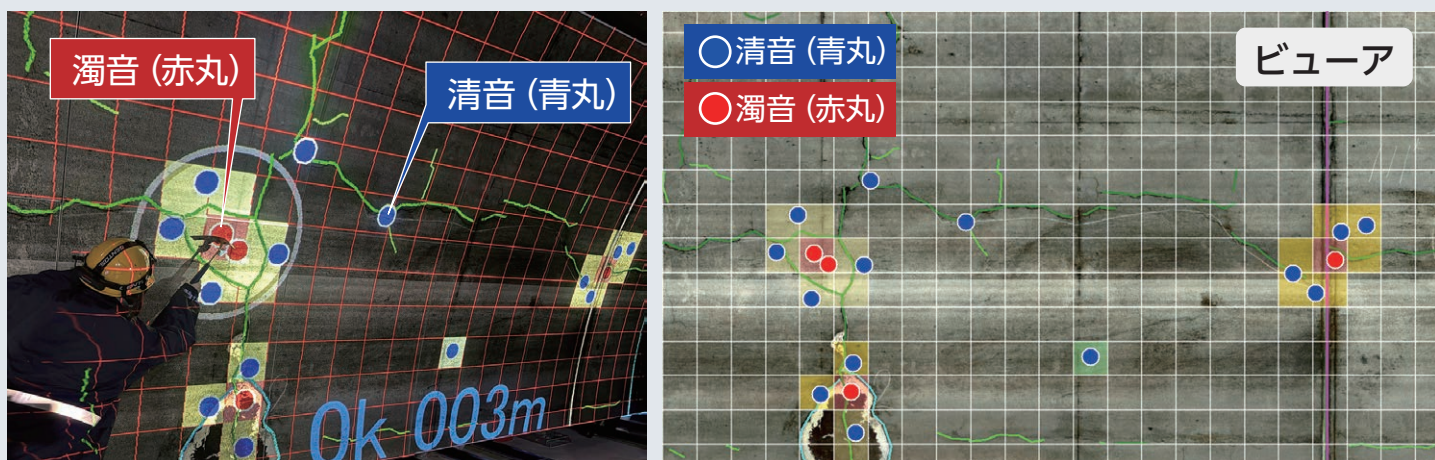
この投影により、暗所かつ広範囲に及ぶトンネル検査においても、検査の進行状況を視覚的に把握できるため、叩き漏れや重複打音の抑制に寄与します。従来は、トンネル壁面にチョークなどで印を付けながら検査を行っていますが、

本技術では投影表示そのものが検査の履歴として機能します。

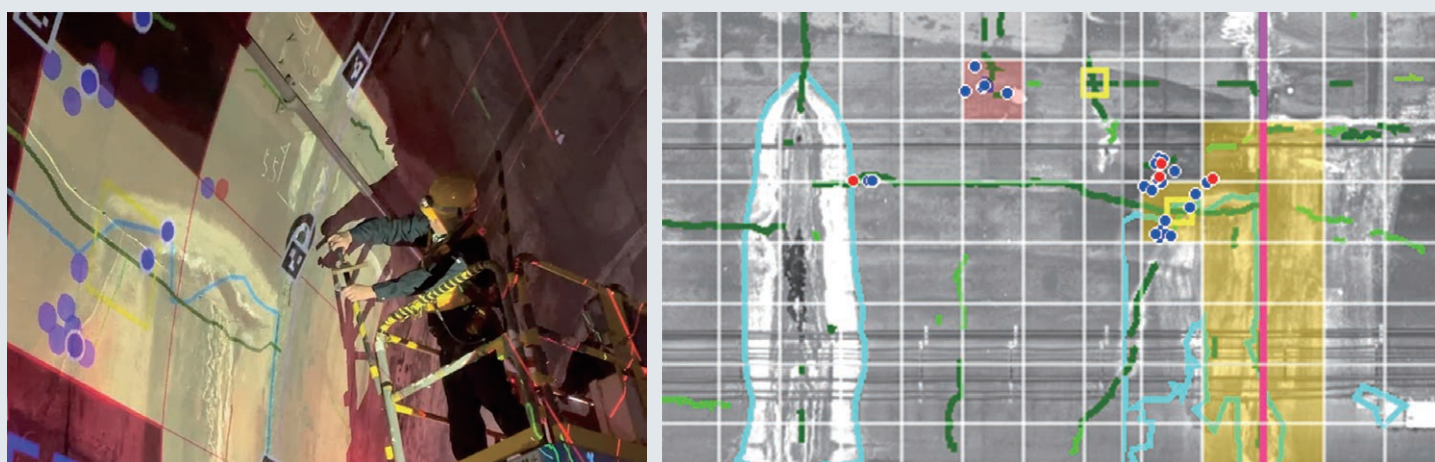
さらに、検査員が最終的に確定した打音結果は、自動的にデータとして保存されます。これにより、現場での手書き記録や後日の再入力作業が削減できるだけでなく、蓄積されたデータを活用することで、過去の検査結果との比較や経時変化の把握といった継続的な維持管理への活用も可能となります。

### おわりに

本稿では、AIを用いたトンネル覆工の打音調査技術について紹介しました。ハンマーの打



(a) モックアップにおける試行の様子



(b) 現場適用の様子

図7 打音結果の投影の例

撃音の自動判定，打音位置の取得，打音結果の投影および自動記録を一体化することで，検査員の経験に依存してきた判断やその記録作業をデジタル技術により支援する仕組みを構築しています。今後，検査員の確保が難しくなることが見込まれる中，トンネル検査の省人化への期待は高まっており，近年多くの技術開発が行われています。本技術は検査の効率化や記録作業の省力化に寄与するとともに，判定結果をデータとして蓄積できる点に特長があります。蓄積されたデータを活用することで，経時変化の把握や維持管理計画への反映など，将来的な維持管理の高度化にもつながると考えられます。今

後は，現場適用を通じてさらなる精度向上と運用性の改善を図り，持続可能なトンネル検査体制の構築に貢献していきます。

本研究の一部は，国土交通省の交通運輸技術開発推進制度JPJ002223の助成を受けたものです。RRR

## 文献

- 1) 国土交通省鉄道局：コンクリート片等の剥落対策に係る手引き，2017