

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)	所属		役職
	いしだ てつや 石田 哲也	東京大学大学院 工学系研究科		教授
②研究 テーマ	名称	解析学的信号処理によるトンネル等のうき・剥離の 高精度・高速検出に関する研究開発		
	政策 テーマ	[主テーマ] 道路資産の保全 [副テーマ]	公募 タイプ	タイプIV
③研究経費 (単位:万円)	平成31 (R1) 年	令和2年度	令和3年度	総合計
	※端数切り捨て。実際の研究期間に応じて記入欄を合わせる こと 4,370万	4,598万	2,890万	11,858万
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。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 (※令和4年3月31日現在)			
みずたに つかさ 水谷 司	東京大学 生産技術研究所 准教授			
あんなか さとし 安中 智	首都高技術株式会社 インフラデジタル部 部長			
すずき きよし 鈴木 清	朝日航洋株式会社 モビリティ空間技術部 部長			
⑤研究の目的・目標	(提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
舗装の変状検出で実証された研究成果を計測技術と解析技術の両面で応用・発展させ、トンネル等におけるコンクリートのうき・剥離を点群情報から検出可能とすることを目的とする。 本研究成果は、高精度であるだけでなく、処理の自動化により高速にうき・剥離を検出することで、点検→診断→補修を準リアルタイムに連続的に行い、トンネル点検においてより効率的かつ生産性の向上につながる技術として社会実装を目指す。				

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況（研究の進捗や目的の達成状況、各研究者の役割・責任分担、本研究への貢献等（外注を実施している場合は、その役割等も含めて）について、必要に応じて組織図や図表等を用いながら、具体的かつ明確に記入下さい。）

これまでの研究経過と目的の達成状況

表1の研究達成目標に対する研究経過と達成状況について、技術分類ごとに示す。

表 1. 本研究目的に対する達成目標

技術分類	達成目標
計測技術（ハードウェア）	1) 一般的なうき・剥離を捉える高精度な計測技術の研究開発 …厚さ 1, 2mm 以上の損傷を捉えるレーザ測距装置を活用した計測技術の開発
解析技術（ソフトウェア）	2) 点群情報から表層変化を正確に検出する解析技術の研究開発 …検出率 8 割程度を有する解析技術の開発 3) 検出結果を準リアルタイムに出力する手法の研究開発 …計測から 2 日程度で解析が完了する技術の開発
技術実証	4) うき・剥離の表層変化の現場検証と技術の適応性検討 …地域・施工法の異なる条件下における適応性・適用範囲の検討

(1)計測技術（ハードウェア）の研究経過・目標達成状況

サブミリの厚さ検知能力を有する高精度なレーザ測距装置を選定し、本機器をベースとした車両搭載レーザ計測システムの構築を進めてきた。複数の実証フィールド計測に導入済みであり、1mm 以上のうき、2mm 以上の剥離を捉えることに成功した。

(2)解析技術（ソフトウェア）の研究経過・目標達成状況

既往の研究で本研究チームが開発してきた路面の凹凸性状評価アルゴリズムをベースに改良を進めてきた。複数の実証フィールドで改良した解析アルゴリズムを適用させ、いずれのフィールドにおいても約 8 割以上の検出率（検出した損傷数／打音検査により確認された損傷数）を確認した。また、高速な信号処理＋行列演算により、最速 10 秒／1m で損傷検出を可能とした。

(3)技術実証の研究経過・目標達成状況

複数の施工法・表面状態の実フィールドにて打音検査を実施し、解析結果との比較検証を進めてきた。当初予定をしていた表面状態の滑らかなフィールドと、研究着手後に要望のあった表面に非施工由来の激しい凹凸形状を有するフィールドにて適用性を検証し、様々な条件化でも大きな影響を受けず高精度な検出を可能とする技術であることを確認した。

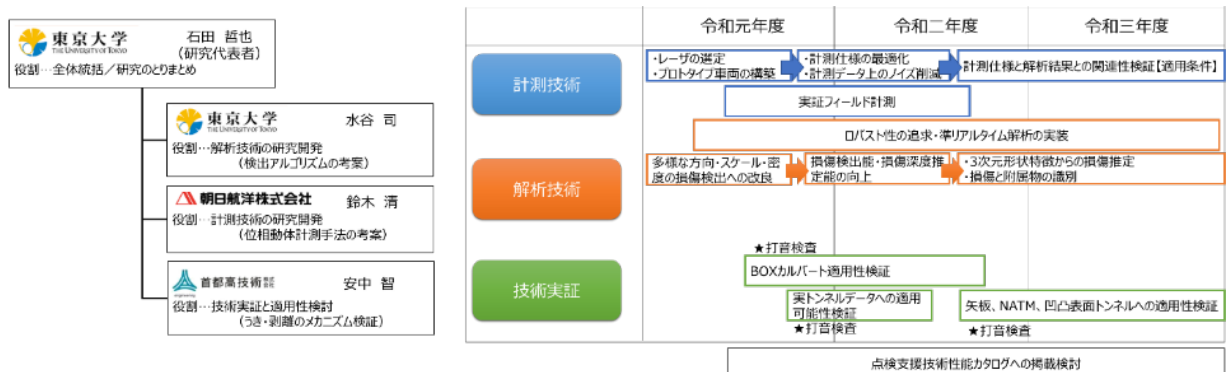


図 1. 研究体制と研究経過概要

⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

(中間・FS評価における指摘事項を記載するとともに、その対応状況を簡潔に記入下さい。)

FS評価 (令和元年度)

- 参考意見1-1: 今後の研究にあたっては、首都高速道路に限らず、国道の管理者である国との意見交換も実施して管理者ニーズをくみ取り技術開発に反映するなど、全国の道路トンネルの点検実務に本研究の成果が導入できるよう、技術研究開発が進められることを期待する。
- 対応状況1-1: 関東地方整備局管内トンネル管理事務所(長野国道事務所、相武国道事務所)様との意見交換を実施し、管理者からのニーズを取り入れた研究を進めてきた。具体的な事例としては以下の通りである。
 - 意見1: 現場で最も危惧しているのは、剥離からの車両被害である。日常点検で車両を走らせることで、うき剥離を早期に発見し、簡易対策などができれば嬉しい。
 - 対応1: 準リアルタイム性を追求し、計測が完了してから損傷を検出するまで、1mあたり約1分の解析処理を実現した。
 - 意見2: 橋沢隧道はコンクリート舗装のため舗装の凹凸が激しいが検出には影響するか。
 - 対応2: 下記計測機器の設置位置・姿勢等の情報から正確な補正值を算出し、車両の揺れなどに起因する計測データのノイズを低減した。

FS評価 (令和2年度)

- 参考意見1-1: うきの検出技術への発展を期待したい
- 対応状況1-1: 令和元年度より、計測データ凹凸の向きから、うきと剥離を区別して検出できるよう改良を行ってきている。また、トンネル内には損傷の他にも附属物等のデータとして見たときに同じような形状を有するものが存在しており、それらを3次元形状から区別する技術までも実現した。
- 参考意見1-2: 提案する検査技術の適用範囲(トンネル内環境など)を明確にした上で、本技術の有用性を評価することが望まれる。
- 対応状況1-2: 多様な施工法や表面状況を有するフィールドで検証を行い、また、当初予定をしていなかった非損傷由来の激しい凹凸を有するトンネルにおける検証までも実施した。結論として、施工法、表面状況に大きく影響しないことを定量的に評価している。
- 参考意見1-3: 実フィールドでの検証結果等を踏まえ、種々の課題を解決し、現場条件を整理して、実運用とし点検現場での活用が図れることが重要である。
- 対応状況1-3: 対応状況1-2と同様、複数の条件を持つ実フィールドにおいて検証を行い、適用条件と範囲を整理した。また、点検現場への活用を見越し、国土交通省「点検支援技術性能カタログ(案)」への掲載を念頭においたカタログ案を作成した。
- 参考意見1-4: 新アルゴリズム適用後も検出漏れ箇所が残っており、その扱いについて整理が必要である。
- 対応状況1-4: 解析パラメータを変更することで、検出漏れの少ない安全側での検出を行えるように実装済みである。

⑧研究成果 (本研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

1. 計測技術 (ハードウェア) の研究成果

(1) レーザ測距装置の選定と車両システムの構築

レーザ測距装置によるうき・剥離の検出は、レーザ測距精度 (照射方向精度) に大きく依存し、厚さ1, 2mmの損傷を移動体計測にて取得するためには、サブミリの測距精度を有するレーザ測距装置が必要である。図1は、測距精度0.4mm※1の位相距離方式レーザによる厚さ別供試体の移動体計測結果であり、厚さ1mmの検知能を確認した。また、本センサーを搭載した車両システムを構築し、各実証フィールドにてレーザ計測を実施した。

※1…25m先のターゲット計測精度

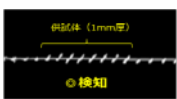
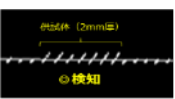


レーザ測距方式	1mm厚	2mm厚
位相距離方式 (PhaseShift)	 検知	 検知
タイムオブフライト (Time Of Flight) ※従来方式	 検知不可	 検知不可

図2. レーザ測距装置による供試体計測結果

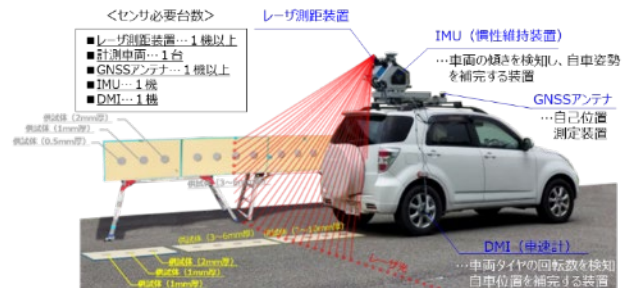


図3. 車両システムと構成

(2) 計測仕様と計測データの最適化

表2の通り最適な計測仕様を設定した。スキャン角は多様な方向に生じた損傷を検知しやすいよう45°に定めた。車両速度は理論値※2と実測値から得られた3次元点群データの計測ピッチ (点密度) と要求精度を照らし合わせ、最適な値を選定する必要がある。さらに、3次元点群データ上に生じた縞状ノイズの原因究明と対策を講じた。計測機器の相対位置・姿勢情報 (補正量) に原因があり、車両の傾きに応じてスキャン方向に2mm前後のズレとして生じていた。図4の通り、補正值を正確に定めることでノイズを削減することができた。

表2. 計測仕様 (車載搭載型レーザの場合)

設定項目	設定値	
スキャン角	45°	
スキャンレート	200Hz (最パフォーマンス値)	
パルスレート	100万発 (最パフォーマンス値)	
車両速度 ⇔ 計測ピッチ (点密度)	5km/h ⇔	約10mm
	10km/h ⇔	約20mm
	20km/h ⇔	約30mm
	30km/h ⇔	約40mm
	40km/h ⇔	約50mm

※2…理論値=車両速度/スキャンレート

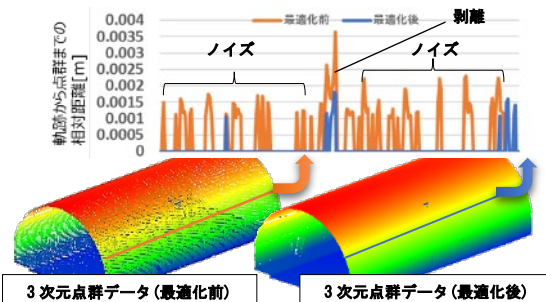


図4. 縞状ノイズの低減

(3) 解析学的信号処理までの処理過程の実装

トンネル覆工表面の形状から損傷を検出するため、車両軌跡データから見た3次元点群データの相対距離をトンネル横断面に連続的に算出し、2次元にプロットしたデータ (2.5次元メッシュデータ) を作成するロジックを構築した。なお、メッシュ間隔は表2の計測ピッチから最適な値を選定した。

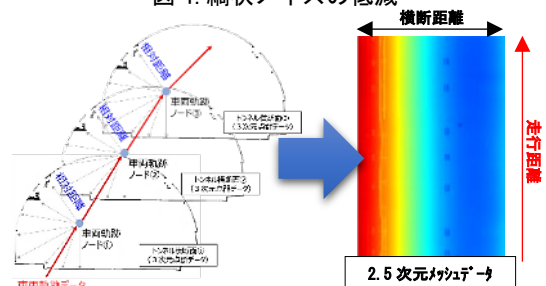


図5. 2.5次元メッシュデータの作成

2. 解析技術（ソフトウェア）の研究成果

(1) 解析学的信号処理によるうき・剥離検出アルゴリズムの開発

静的な変位データを動的な交流波形とみなすと、うき・剥離は正負の符号は異なるものの、「振幅」が大きいことが共通点として挙げられる。そこで、振幅が大きい波形の区間を検出するために、振幅変調特性を推定できる「ヒルベルト変換により得られる解析信号の絶対値（波形の包絡線）」を各側線で計測し、包絡線の値がある閾値以上の箇所は損傷、その閾値未満では非損傷とすることで、ロバスト・効率的に損傷候補区間を推定した。なお、トンネル施工由来の低周波信号による損傷の誤検出を削減するため、各側線信号に対してハイパスフィルタを事前に適用させている。これらの処理をトンネル縦横断方向に連続的に行い、局所極大推定により得た基準線を構成する損傷候補区間の端を通るような近似曲面を基準面として推定し、ハイパスフィルタ後のデータから基準面を除算することで、トンネル覆工面の三次元形状を抽出した。

さらに、三次元形状の高さ・外接四角形との面積比等を利用して特徴量解析を行い、トンネル内に散在する附属物や構造物等と損傷の判別を可能とした。また、三次元形状のZ軸最大・最小値を各損傷の最大厚み・深度として算定することで、損傷深度推定を可能とした。

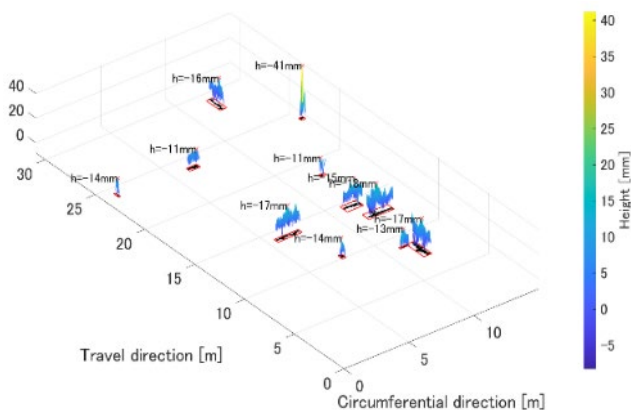


図 9-損傷の検出 (3D マッピング)

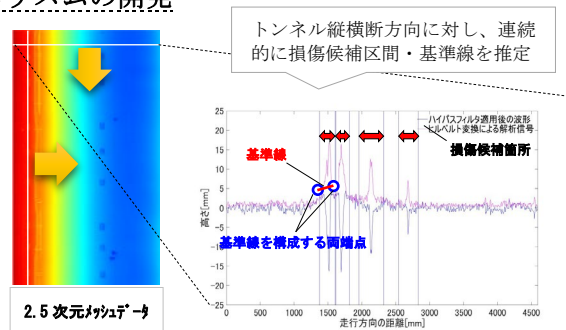


図 6-ヒルベルト変換による損傷候補区間・基準線推定

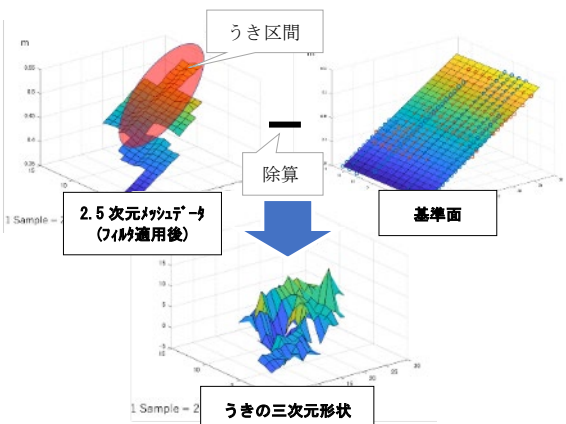


図 7-基準面の推定と三次元形状の抽出

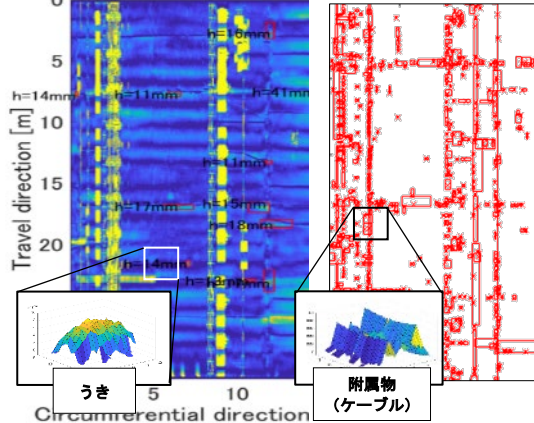
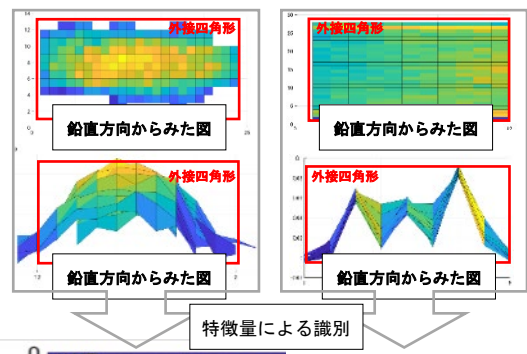


図 8-三次元特徴量による損傷と附属物の識

3. 技術実証

(1)本解析アルゴリズムの適用範囲の検証

異なる施工法・表面状態を持つトンネルにおいて、解析結果と打音検査の結果を比較し、本解析アルゴリズムの適用範囲の検証を実施した。下表の通り、施工法・表面状態に大きく影響することなく検出率約8割以上の結果が得られており、本来想定してなかった表面状態の悪いフィールドにおいても同様の検出結果を確認することができた。

表3-検証フィールドにおける損傷検出結果の1例（計測ピッチ10mm・20mm時）

検証フィールド	施工法・状態	損傷	損傷数	損傷検出数	検出率※1
首都高速道路 護国寺補修基地	施工法…BOXカバート 状態…十分平滑	うき	13	12	92%
		剥離	9	9	100%
関東地方整備局 生坂トンネル	施工法…NATM 状態…十分平滑	うき	-	-	-
		剥離	8	6	75% (主要損傷は全て検知)
関東地方整備局 池沢隧道	施工法…矢板 状態…平滑	うき	8	8	100%
		剥離	1	1	100%
関東地方整備局 橋沢隧道	施工法…矢板 状態…凹凸が激しい	うき	4	3	75% (主要損傷は全て検知)
		剥離	21※2	16	76% (主要損傷は全て検知)

※1 検出率[%]=損傷検出数/損傷数×100、※2 1箇所3次元点群データ上で損傷識別できず

点検員による打音検査にて確認されなかった損傷や施工由来の凸形状までも検出されている。また、損傷が存在しない箇所は該当損傷なしの結果が得られている。橋沢隧道は、他のトンネルに比べ施工由来の凹凸が顕著に見られるが、上手くトンネルの形状を除去し、損傷のみを検出していることがわかる。一部微弱かつ面積の小さい損傷の検出漏れが見られるが、誤検出と未検出のバランスを考え解析パラメータを変えた結果であり、主要な損傷については検出することができた。

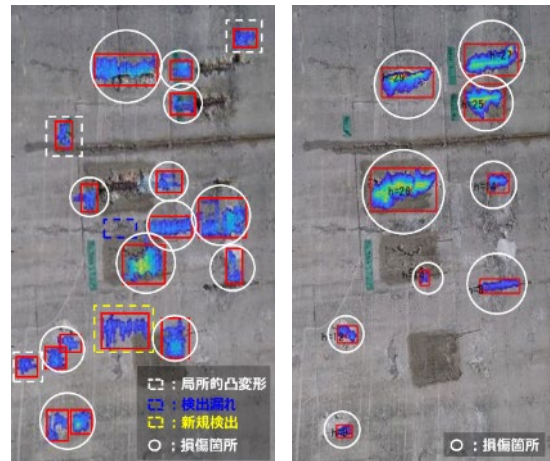


図10-護国寺補修基地 検証結果（計測ピッチ10mm）

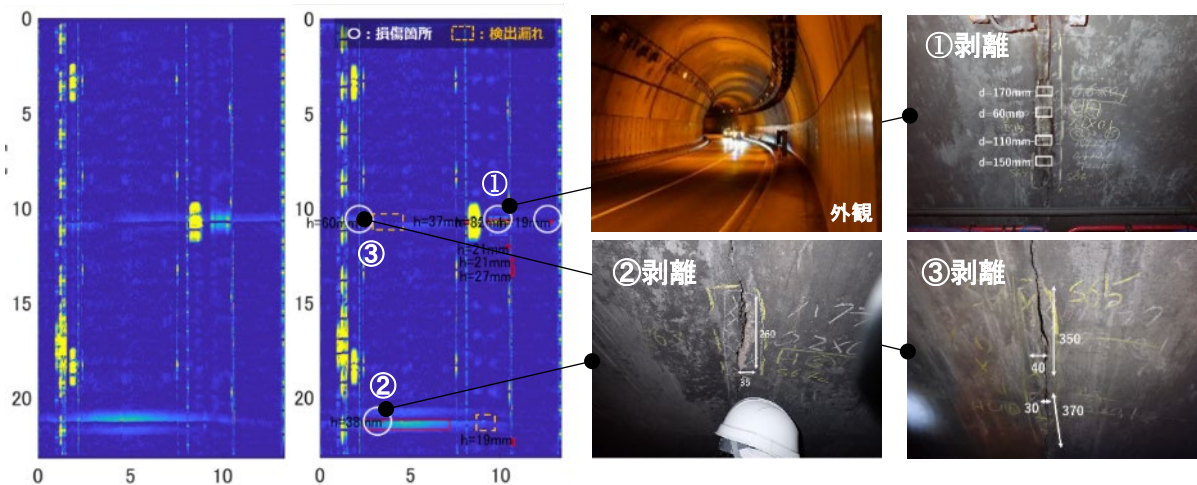


図11-生坂トンネル 検証結果1例（計測ピッチ20mm時）

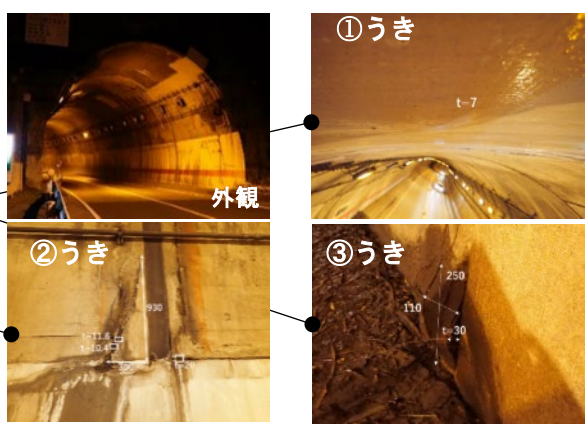
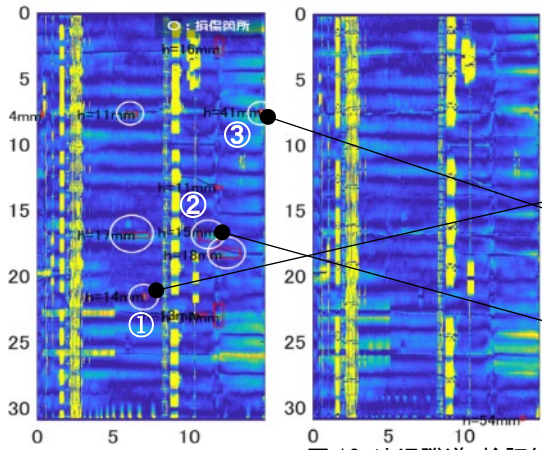


図12-池沢隧道 検証結果1例 (計測ピッチ20mm時)

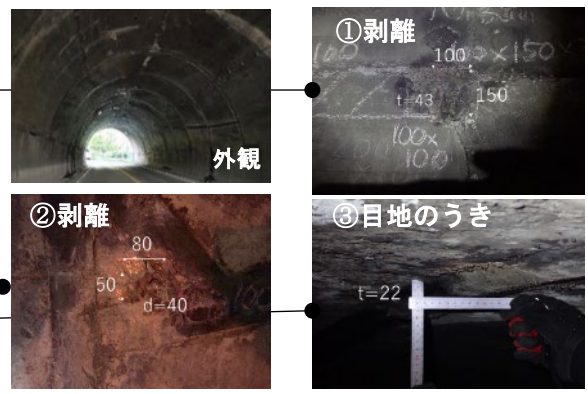
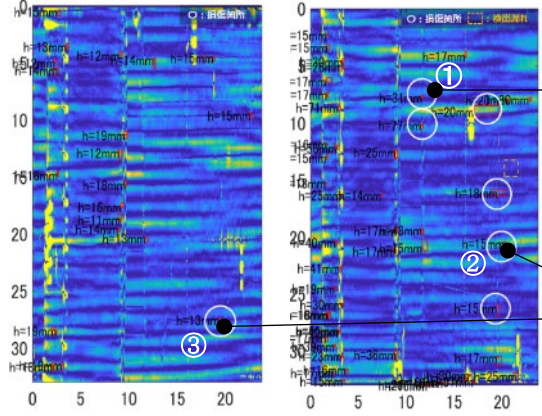


図13-橋沢隧道 検証結果1例 (計測ピッチ20mm時)

(2)本解析アルゴリズムの実運用性の考察

密な計測データは細かい損傷まで検出が可能である一方計測を高速化する必要があり、逆に疎な計測データは計測を低速化することができる一方で細かい損傷の検出が困難となると予想される。つまり計測速度と検出精度（検出率）は単調増加の関係にあると考えられる。ここでは、本予想の妥当性を検証し、ニーズに応じて計測ピッチを選定することで、精度コントロール可能な運用を実現できるのか考察を行った。

検証①-解析精度： 図14は、計測ピッチと検出率、損傷深度誤差平均、検出可能な損傷スケール（最小値）の関連性を示し、図15はそれを裏付ける池沢隧道のうきの検出結果である。
密度が上がるほど微小な損傷を捉えることができるため検出率は上がり、損傷深度誤差も小さくなる。ただし、密度1111点/m（計測ピッチ30mm時）では高さ40mmの損傷は捉えられていないことから、損傷スケールの2倍の点密度を有することが条件となる。

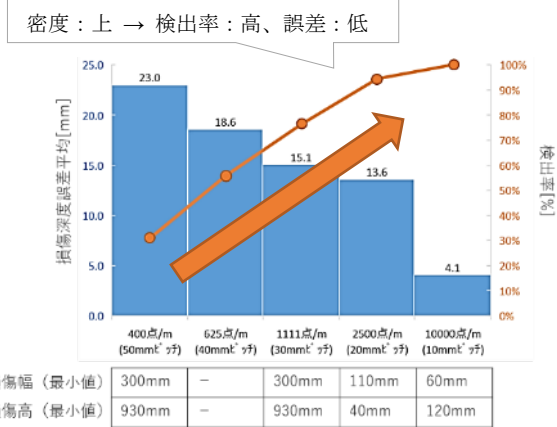


図14-計測ピッチ（点密度）毎の解析精度

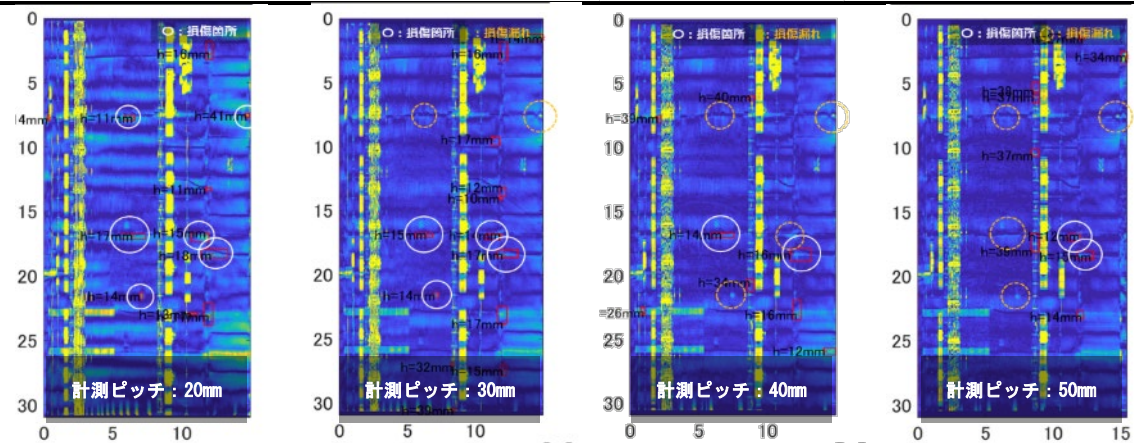
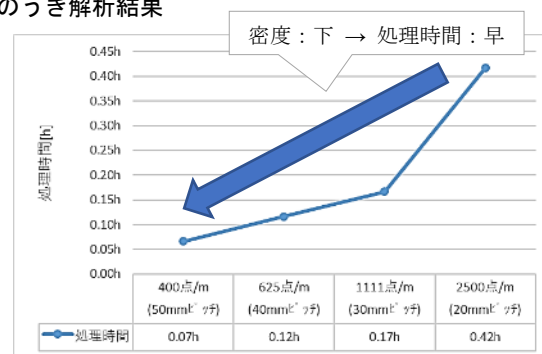


図 15-計測ピッチ毎のうき解析結果

検証②-処理時間： 図 16は計測ピッチ毎の処理時間（計測完了～損傷検出）を示したものである。なお、本データは図 15に示す延長約 25m の池沢隧道を対象とした結果である。密度を下げるに従って処理時間は早くなり、点密度 400点/m（計測ピッチ 50mm）では延長 1mあたり 10秒で処理を行うことが可能である。



以上 2 つの検証結果から、前述の仮定の通り、 図 16-計測ピッチ毎の処理時間（池沢隧道）要求性能に応じた精度コントロールが可能な実運用性の高い技術であると考察する。

(3)国土交通省「点検支援技術性能カタログ（案）」への掲載に向けた検討

前述までの検証結果から、本解析アルゴリズムの適用範囲や条件、優位性を整理し、社会実装に向けた 1 つの検討事項として「点検支援技術性能カタログ（案）」の記載項目の検討を実施した。

図 17は本技術の特筆すべき箇所を抜粋した本技術のカタログ案である。

計測装置	計測の適用条件 (計測原理に照らした適用条件)	計測手段は問わない（車両搭載型レーザ、地上レーザ等） ※推奨条件：計測手段…位相差距離方式レーザ搭載型MMS車両 測距精度…0.4mm（25m先のターゲット計測精度） スキャン角…45°、スキャンレート…200Hz、パルスレート…100万発
	アウトプット	2.5次元メッシュデータ（トンネル内の形状を二次元にプロットしたデータ）[* .mat]

4. 解析性能		性能		性能（精度・信頼性）を確保するための条件																																																
項目	検証の有無の記載	有	有																																																	
解析精度	検証の有無の記載	有	有	<ul style="list-style-type: none"> 検出率：損傷検出数/損傷総数×100[%] 左表に示す検出率（指標）を要望する場合は該当する計測ピッチを選定すること 即時性を重視する場合には、下表を参照の元該当する計測ピッチを選定すること 																																																
	・損傷の検出率（指標）	<table border="1"> <thead> <tr> <th>トンネル</th> <th>施工法</th> <th>トンネル表面状況</th> <th>損傷</th> <th>損傷数</th> <th>損傷検出数</th> <th>損傷検出率</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">①</td> <td rowspan="2">シフト</td> <td rowspan="2">M4ノット</td> <td>うき</td> <td>13</td> <td>12</td> <td>92%</td> </tr> <tr> <td>割離</td> <td>9</td> <td>9</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">②</td> <td rowspan="2">NATM</td> <td rowspan="2">工法</td> <td>うき</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>割離</td> <td>8</td> <td>6</td> <td>75%</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">③</td> <td rowspan="2">矢板工法</td> <td rowspan="2">平滑</td> <td>うき</td> <td>8</td> <td>8</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>割離</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">④</td> <td rowspan="2">矢板工法</td> <td rowspan="2">施工由来の凹凸</td> <td>うき</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>75%</td> </tr> <tr> <td>割離</td> <td>21</td> <td>16</td> <td>76%</td> </tr> </tbody> </table>	トンネル		施工法	トンネル表面状況	損傷	損傷数	損傷検出数	損傷検出率	①	シフト	M4ノット	うき	13	12	92%	割離	9	9	100%	②	NATM	工法	うき	-	-	-	割離	8	6	75%	③	矢板工法	平滑	うき	8	8	100%	割離	1	1	100%	④	矢板工法	施工由来の凹凸	うき	4	3	75%	割離	21
トンネル	施工法	トンネル表面状況	損傷	損傷数	損傷検出数	損傷検出率																																														
①	シフト	M4ノット	うき	13	12	92%																																														
			割離	9	9	100%																																														
②	NATM	工法	うき	-	-	-																																														
			割離	8	6	75%																																														
③	矢板工法	平滑	うき	8	8	100%																																														
			割離	1	1	100%																																														
④	矢板工法	施工由来の凹凸	うき	4	3	75%																																														
			割離	21	16	76%																																														
解析条件	検証の有無の記載	有	有	<ul style="list-style-type: none"> 3次元点群データが損傷によるコンクリート表面形状を捉えていることが大前提 トンネル覆工表面に損傷由来の形状が表れていない場合には検出対象外 漏水等によりトンネル覆工表面が濡れていること 附属物等の背面に位置する損傷は検出対象外 																																																
	・計測ピッチ（点密度）と解析条件（指標）																																																			

図 17-点検支援技術性能カタログ（案）検討項目（抜粋）

⑨研究成果の発表状況（本研究の成果について、これまでに発表した代表的な論文、著書（教科書、学会抄録、講演要旨は除く）、国際会議、学会等における発表状況を記入下さい。なお、学術誌へ投稿中の論文については、掲載が決定しているものに限ります。）

【フルペーパー査読付き国際ジャーナル】

- T. Mizutani, T. Yamaguchi, T. Kudo, K. Yamamoto, T. Ishida, Y. Nagata, H. H. Kawamura, T. Tokuno, K. Suzuki, and Y. Yamaguchi, “Quantitative Evaluation of Peeling and Delamination on Infrastructure Surfaces by Signal and Image Processing of 3D Point Cloud Data,” *Automation in Construction* (Elsevier), pp.1-10, 2021. (DOI: 10.1016/j.autcon.2021.104023) (Impact Factor: 7.700, Cite Score:12.0) (Construction分野で世界第2位のインパクトファクターのジャーナルに掲載)

【アブストラクト査読付き国際会議録】

- Tomoaki Tokuno, Yoshifumi Nagata, Hinari Kawamura, Tetsuya Ishida, Tsukasa Mizutani, Junko Yamashita, 2-Dimensional Innovative Pavement Evaluation via Mobile Mapping System, 第16回REAAA道路会議, 2021年6月15日～17日, マニラ.
- Hinari Kawamura, Yoshifumi Nagata, Satoshi Annaka, Tomoaki Tokuno, Tetsuya Ishida, Tsukasa Mizutani, Junko Yamashita, 2-Dimensional Innovative Pavement Evaluation via Mobile Mapping System, Porto · Portugal, SHMII-10, June30-July2, 2021.
- Hinari Kawamura, Yoshifumi Nagata, Tomoaki Tokuno, Tetsuya Ishida, Tsukasa Mizutani, and Junko Yamashita, Pavement evaluation method using MMS, RILEM International Symposium on Bituminous Materials (ISBM), Lyon, 2020.

【アブストラクト査読付き国内会議録】

- 水谷司, 工藤寅嗣, 山本和朋, 山口貴浩, 石田哲也, 永田佳文, 川村日成, 得能智昭, 山口裕哉, 鈴木清, MMS点群データの解析学的信号処理によるインフラ表面のうき・剥離の検出, 第34回道路会議, 点検セッション709, No.6035, 2021.

【その他】

- 工藤寅嗣, MMS三次元点群データの解析学的信号処理によるインフラ表面の浮き・剥離状損傷の定量評価, 東京大学工学部社会基盤学科2020年度卒業論文(主査:水谷司), 2021.

⑩研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

【東京大学生産技術研究所水谷研究室にて研究成果の公表】

- 水谷准教授, 山口研究員らの論文がElsevierのAutomation in Construction (IF=7.70)に受理 - A paper written by Associate Professor Mizutani, Project Researcher Yamaguchi et al. accepted in Elsevier's Automation in Construction (IF=7.70), <https://mizutanilab.iis.u-tokyo.ac.jp/archives/602>
- 第3回路面下空洞対策連絡会および空から地表からインフラを診る研究会において本研究成果を一部公表, https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/3860/?utm_source=facebook&utm_medium=social&utm_campaign=update&fbclid=IwAR1Y4BznFhJcgNNqnP3b5niLk8p_v9wnV9hVif-q1rEdEf2Eg-4yveSFF-A, https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/events/z0205_00077.html
- 公益財団法人 日本測量調査技術協会「先端測量技術」No.115 2022年5月, 近日WEB公開予定

⑪研究の今後の課題・展望等（研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。）

- ・本技術を他の国へも展開できるよう、様々な地域のデータを蓄積し、より汎用的でロバストなアルゴリズムへの発展を目指したい。例えば、発展途上国は日本よりもインフラ表面に形状変化があると考えられ、それらに対応するためには、データ計測・解析・検証を繰り返し改良することで、本技術が他国でも展開可能と考えられる。

⑫研究成果の道路行政への反映

（本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。）

- ・1次スクリーニング点検のような低コストで日常的に行う点検や、定期点検のように近接目視点検が義務化された詳細な点検等、要求される精度やコスト、迅速性に合わせて本技術を切り替えることで、多様な運用が可能であるとする。

⑬自己評価

（研究目的の達成度、研究成果、今度の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値についての自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。）

- ・当初想定していた以上の精度で損傷の「三次元的」形状を抽出するアルゴリズムを構築しそれを実証することに成功した。研究成果については世界トップクラスのジャーナルに掲載され、また実際の運用を想定した点検カタログ案を構築するまでの考察まで達成できたことから、開発面、学術面の両面において研究成果は高く、本研究開発は当初想定の100%以上を達成したといえる。