

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	
	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・高速検出の研究開発				
	政策 領域	[主領域] 道路資産の保全 [副領域]	公募 タイプ	タイプⅣ		
③研究経費（単位：万円） ※R1は受託額、R2以降は計画 額を記入。端数切捨。	令和元年度	令和2年度	令和3年度	総合計		
	4,370万	4,740万	2,572万	11,683万		
④研究者氏名（研究代表者以外の主な研究者の氏名、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				
みずたに つかさ 水谷 司		東京大学 生産技術研究所 准教授				
ながた よしあみ 永田 佳文		首都高技術株式会社 インフラドクター部 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。）						
<p>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。</p> <p>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。</p>						

⑥これまでの研究経過

1. 概要

サブミリの分解能を有するレーザ測距装置を搭載したプロトタイプ車両の構築、および当機によるフィールド計測を実施した。また、レーザ測距装置により取得した3次元点群データから、周波数解析によるコンクリート面のうき・剥離を検出する基本解析ロジックの有効性を確認した。

2. 研究内容

2-1. 研究仮説

レーザ測距装置によるコンクリート上のうき・剥離検出において、その厚さ・深さの形状から損傷個所を検出することから、**検出精度はレーザ測距装置の照射方向精度（測距精度）に大きく依存することが予測される。**一般的なレーザ測距方式である「タイムオブフライト方式（以下、TOF方式）」「位相差距離方式（以下、PS方式）」レーザのスペックから、TOF方式はミリ単位、PS方式はサブミリ単位のうき・剥離を計測可能であることが予測されが、一般的なうき・剥離（1, 2mm程度）の検出にはPS方式レーザが必要であると考えられる。

表 1. レーザ測距装置スペック

測距方式	タイムオブフライト方式	位相差距離方式	備考
測距確度（水平方向精度）	5mm ※1	1mm ※2	※1…30m先のターゲット計測精度 ※2…50m先のターゲット計測精度
測距精度（レーザ照射方向精度）	3mm ※1	0.4mm ※3	※3…25m先のターゲット計測精度

また、短時間フーリエ変換に基づく空間周波数解析アルゴリズムでは、**損傷個所の基準面モデルと、着目している損傷が有する特定の面的なスケールを持つ変状を照らし合わせることで、高精度に異常値を捉えることができるため、補修すべき損傷のみをうまく検出できると考えられる。**

2-2. 計測技術の研究開発

レーザ測距装置の選定と精度検証: 「TOF方式」「PS方式」レーザにおいて、厚さ別供試体の計測テストを実施した結果、PS方式レーザ精度の方が良好であり、**その計測精度は厚さ1mmの供試体の検知を可能**とすることを確認した。これは一般的なうき・剥離の検出に十分な精度を有するものと考えられる。

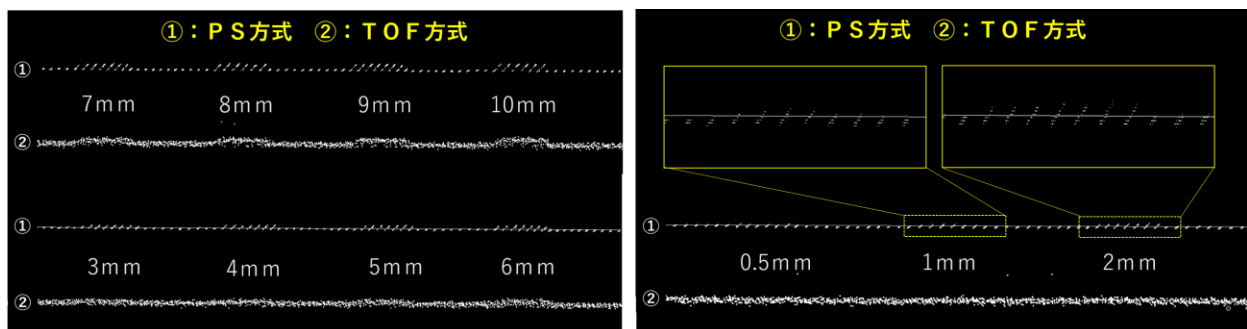


図 1. TOF方式、PS方式レーザ測距装置による対象物（厚さ0.5mm~10mm）計測精度検証

一般道における車両計測テスト: PS方式レーザを搭載したプロトタイプ車両による計測テスト検証を一般道にて実施し、**制限速度内で問題なくトンネル覆工表面を計測できることを確認した。**

表 2. プロトタイプ車両搭載機器

センサ名称	用途	台数
レーザ測距装置	距離データの取得	1[機]
GNSSアンテナ	自己位置の測定	1[機]
IMU装置	車両の傾きの検知	1[機]
DMI(車速計)	車両タイヤの回転数検知	1[機]

実証用フィールドの計測: プロトタイプ車両による実証用フィールド（首都高速道路：護国寺補修基地・首都高速道路トンネル、関東地方整備局管理トンネル）の計測を実施した。コンクリートのうき・剥離検出に最適なレーザ計測方法の設定検討を行うため、複数の仕様にて計測を実施した。

表 3. 実証用フィールド計測仕様

実証用フィールド	設定検証項目	設定範囲	備考
首都高速道路 (護国寺補修基地)	スキャン角	0,15,30,45[°]	スキャン角 …トンネル横断方向の計測方向 スキャンレート…車両進行方向におけるスキャン速度 パルスレート …点群の発射数 車両速度 …車両自体の計測速度
	スキャンレート	200[Hz]	
	パルスレート	100[万発]	
	車両速度	5,15,30[km/h]	
首都高速道路トンネル 関東地方整備局トンネル	スキャン角	0,15,30,45[°]	
	スキャンレート	200[Hz]	
	パルスレート	100[万発]	
	車両速度	50~60[km/h]	

2-3. 解析技術の研究開発

解析アルゴリズムの精緻化: 任意のデータ密度、スケール、凹凸の向きを認識し、区別して検出できるように、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の改良を行い、実データに適用することでその有効性を実証した。

2-4. 技術実証と適用性検討

空間周波数解析によるうき・剥離の検出: 実証用フィールド（護国寺補修基地）において、空間周波数解析によるコンクリートうき・剥離の検出を実施し、その基本解析アルゴリズムの適用性を実証した。打音検査の結果と比較し、P S方式レーザは、寸法120mm×60mmの損傷個所における厚さ2mm以上のうき、深さ6mm以上の剥離の検出が可能であることを確認した。また、本プログラムを使用することで、舗装の変状と同様に、コンクリートでも準リアルタイムでの変状解析が可能であることを確認した。

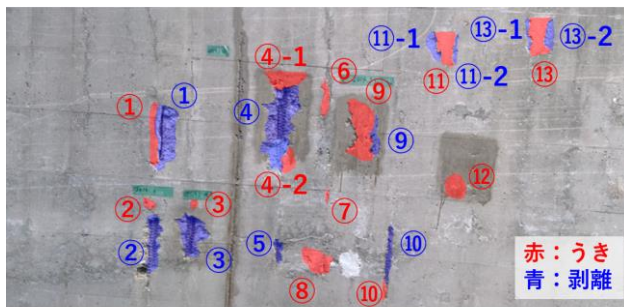


図 2. 打音検査（うき・剥離の位置）



図 3. 打音検査（うき・剥離の寸法）

表 4. 打音検査結果と周波数解析によるうき・剥離検出結果の比較

うき	番号	①	②	③	④-1	④-2	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	
	厚さ(最大値)	2mm	2mm	1mm	2mm	2mm	—	2mm	1mm	2mm	4mm	3mm	1mm	5mm	5mm	
	検出可否 <TOF方式>	×	×	×	×	×	—	×	×	×	○	×	×	×	×	
	検出可否 <P S方式>	○	○	×	×	×	—	○	×	×	○	×	×	×	○	
剥離	番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪-1	⑪-2	⑫	⑬-1	⑬-2
	深さ(最大値)	29mm	20mm	20mm	25mm	9mm	—	—	—	16mm	6mm	10mm	5mm	—	2mm	7mm
	検出可否 <TOF方式>	○	○	○	○	○	—	—	—	×	○	×	×	—	×	×
	検出可否 <P S方式>	○	○	○	○	○	—	—	—	○	○	○	×	—	×	×
	寸法(縦)	250mm	300mm	230mm	300mm	120mm	—	—	—	380mm	290mm	130mm	—	—	160mm	—
	寸法(横)	100mm	100mm	150mm	180mm	60mm	—	—	—	200mm	—	70mm	—	—	100mm	—

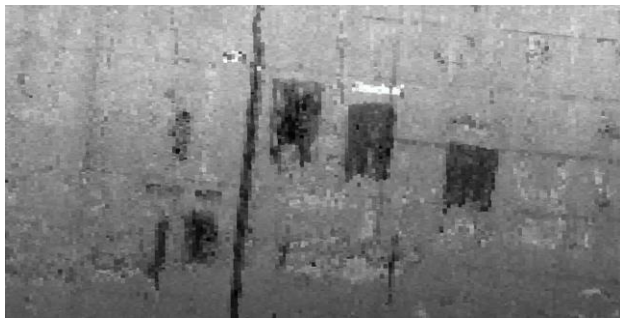


図 4.3次元点群データ（PS方式）

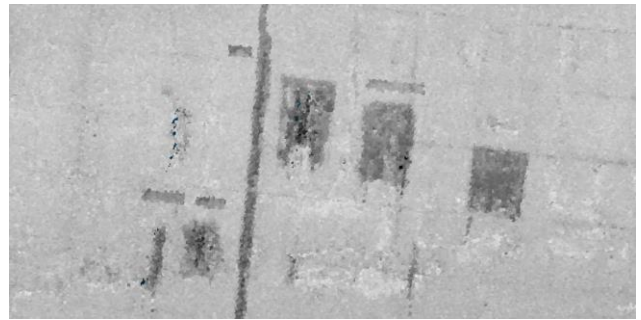


図 5.3次元点群データ（TOF方式）



図 6.周波数解析結果（PS方式）



図 7.周波数解析結果（TOF方式）

3. 研究の妥当性

3-1. 研究考察

図1の通り、PS方式レーザは **1mm厚の供試体計測精度を有し**、実証用フィールド検証においては、**寸法120mm×60mmにおける2mm厚までの損傷個所を検出可能**とした。ただし、その検出精度は全体として一貫しているものではなく、要因としては「①うき・剥離の検出基準面が不均一である」、「②うき・剥離が多様なスケールを持つ」、「③基準面モデルと実データとの相違がある」のようなことが考えられる。今後の対応としては、条件の異なる検証フィールド（首都高速道路フィールド、関東地方整備局管理フィールド）にて引き続き検証を行い、うき・剥離の検出基準面やスケールにおける最適なパラメータの追求、ならびに、検出精度の向上を目指す。

3-2. 研究計画の妥当性

令和元年度実証した基本ロジックを元に、来年度以降、施工法等の条件の異なるフィールドへの流用を検討・実証することで、トンネルの条件に依存しない点検が可能となることが考えられる。また、ロジックの最適化や自動化により効率的なトンネル点検手法として社会貢献が可能と考える。

3-3. 実施方法の妥当性

理想的なデータでは現実の構造物の複雑な表面の凹凸を再現することが困難であることから、うき・剥離などの実際の損傷を有する表面を計測しそのデータを使って妥当性評価を行い、その有効性を検討する必要があり、令和元年度実施した。

3-4. 体制の妥当性

本研究体制においては3つの研究区分を設けており、各区分に専門特化した機関を配備することで、効率的な開発を行っており、それぞれ「計測技術の研究開発」…朝日航洋株式会社、「解析技術の研究開発」…東京大学、「技術実証と適用性検討」…首都高技術株式会社の体制をとっている。なお、開発内容、進捗状況等は定例会により各機関で共有しており、各区分間の連携を能動的に行っている。

⑦特記事項

研究で得られた知見・成果

舗装解析用の空間周波数解析を応用し、首都高速道路フィールド（護国寺補修基地）コンクリート上の特定のうき・剥離検出を可能とした。また、本対象構造物のうき・剥離の検出に必要なパラメータ設定値を検証し、うき・剥離の厚さ・深さ・大きさに準じたパラメータを検証した。

研究の進捗・見通しの自己評価

1. 計測技術の研究開発

PS方式レーザを搭載したプロトタイプ車両を構築し、本機のテスト検証、および実証用フィールド（首都高速道路フィールド、関東地方整備局管理フィールド）の計測を完了した。以降は、コンクリート表面上のうき・剥離検出に最適な計測パラメータを検証するため、計測仕様を変更したデータの解析・検証を行う必要があると考えられる。

2. 解析技術の研究開発

首都高速道路フィールド（護国寺補修基地）において、空間周波数解析の基本的なロジックの有効性を実証した。ただし、一般的なコンクリート表面のうき・剥離を検出するためのロバストなアルゴリズムにするために、令和2年度以降検証と改良を繰り返す必要があると考えられる。

3. 計測実証と適用性検討

首都高速道路フィールド（護国寺補修基地）において、打音検査を実施し空間周波数解析の検出結果の妥当性を実証した。護国寺補修基地は擁壁部である。擁壁部（平面）に対しての空間周波数解析を行った。研究内容の記載の通り、特定のうき・剥離に対するパラメータを設定ができた。令和元年度の今後については首都高速道路フィールドおよび関東地方整備局管理フィールドのトンネルを対象に空間周波数解析の有効性を検証する。擁壁部（平面）とトンネル（曲面）とで、うき・剥離の検出にどのような違いが生じるかを確認する。この違いから発生する改善点等を抽出し、令和2年度以降に反映させる。