

## 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（2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	公募	タイプIV		
		[副領域]	タイプ			
③研究経費（単位：万円）	令和元年度	令和2年度	令和3年度	総合計		
※R1は精算額、R2は受託額、 R3は計画額を記入。端数切捨。	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 よしふみ 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	<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。</p>					

## ⑥これまでの研究経過

### 1. 令和元年度の研究成果

#### 1-1. 研究成果の概要

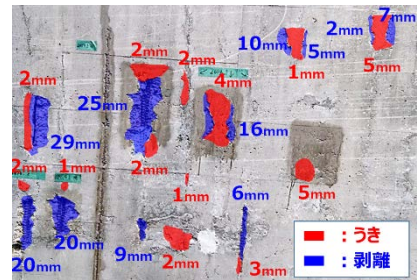
サブミリの分解能を有するレーザ測距装置を搭載したプロトタイプ車両、および、多様な密度・凹凸方向を持つ損傷を効率的・高精度に演算する解析プログラムを開発し、首都高速道路護国寺補修基地（現場①）、関東地方整備局管理生坂トンネル・池沢隧道（現場②）にて適用性の検証を行った。現場①では1mmのうき・剥離の検出性能を確認し、現場②では本解析ロジックのトンネルへの適用性を確認した。



図：うき検出結果（護国寺）



図：剥離検出結果（護国寺）



図：剥離打音検査結果（護国寺）

#### 1-2. 令和元年度の課題と対策

**課題と対策①:**実運用上、損傷エリアの過剰検出は安全側の評価となるため問題はないものの、実際の損傷エリアと検出したエリアがより整合的になることは望ましい。

**課題と対策②:**剥離の深さとうきの厚さの推定能が十分ではないため、点検員の感覚と整合的な基準面を定義・実装し、より正確な推定を目指す。

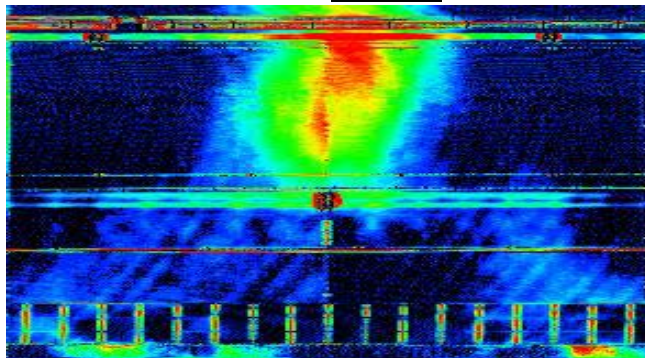
### 2. 令和2年度の研究経過

#### 2-1. 研究経過概要

令和元年度の課題に対し、次の通り研究を行った。

**課題①:**損傷エリアの検出能については、**対策①:**既往アルゴリズムのパラメータ最適化と、新しい解析ロジックの構築の2つのアプローチによって比較検討を行った。また、**課題②:**損傷の深さ・厚み推定能については、**対策②:**新しくアルゴリズムを開発した。

ただし、**課題③:**本年度月上旬に新たに確認された計測データ上の非損傷由来の縞状凹凸ノイズの低減についても、**対策③:**プロトタイプ車両の最適化による比較検討を行った。



図：縞状の凹凸ノイズ（生坂トンネル）

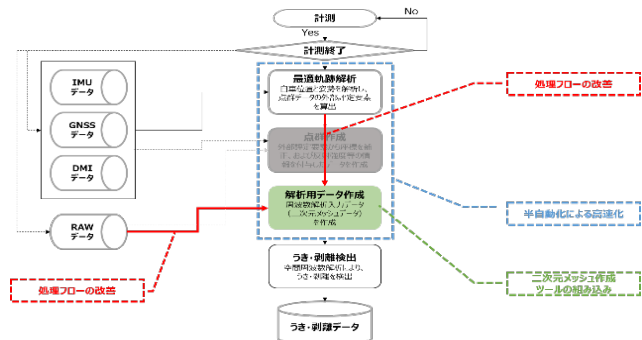


図：生坂トンネル表面の状況

## 2-2. 計測技術の高度化

### 準リアルタイム変換を見据えた解析学的信号処理までの高速化:①準リアルタイムフローの考案:

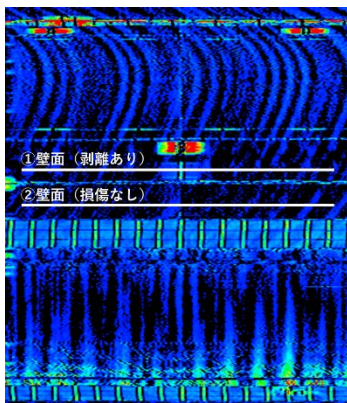
計測完了から解析入力データ作成までの解析時間を削減するフローを考案した。計測データから、レーザ照射距離を高さ方向に持つ二次元データへ直接変換するツールを本解析ロジックへ組み込むことで、三次元点群データ作成工程の省略化と半自動処理化が可能となり、計測～点検までのリードタイムの削減が見込まれる。



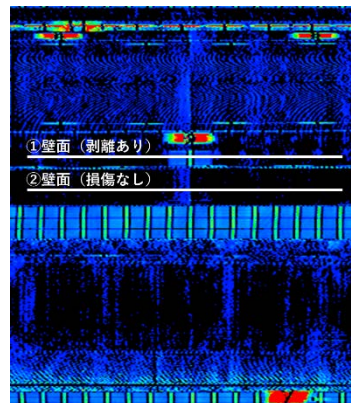
図：令和2年度考案フロー

### 準リアルタイム変換を見据えた解析学的信号処理までの高速化:②プロトタイプ車両の最適化:

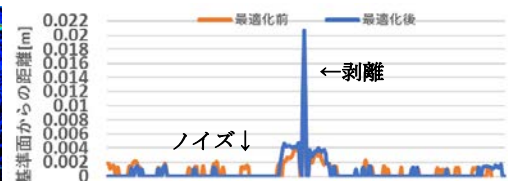
対策③:解析時間を削減し、かつ、損傷検出精度を担保するため、縞状の凹凸ノイズの原因究明と対策を講じた。ノイズはトンネルのようなGNSS衛星の非受信区間において顕著に見られ、車両の位置・姿勢とレーザの計測タイミングのズレにより生じたスキャン方向のノイズであると推測される。これに対し、レーザ・IMU・GNSSアンテナ・DMIの設置位置・角度を正確に定め、補正値を算出し解析を行うことで、2mm前後の凹凸を持つ縞状のノイズ削減を確認した。



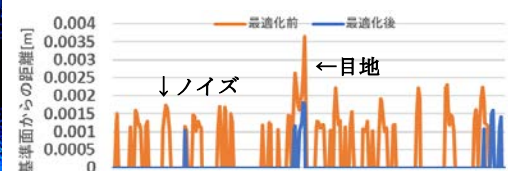
図：最適化前の凹凸情報



図：最適化後の凹凸情報

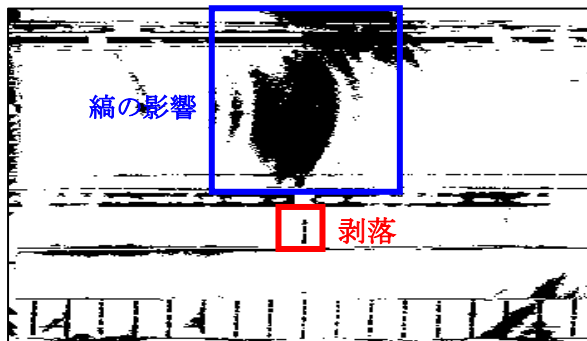


図：①壁面 (剥離あり) プロット図

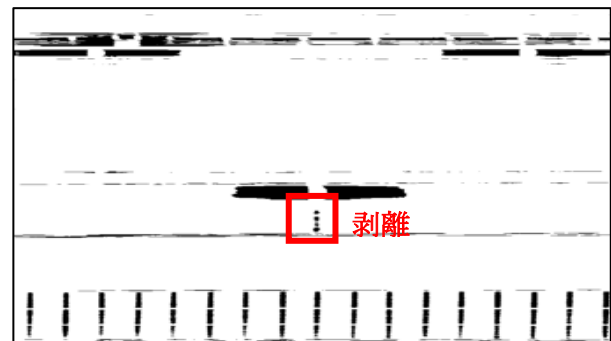


図：②壁面 (損傷なし) プロット図

現場実証データの取得と検証:縞状の凹凸ノイズの削減による損傷検出精度への影響について検証を行った。下図の通り、縞状に凹凸ノイズに起因する過剰検出エリアが低減しており、より正確に損傷を検出できていることがわかる。



図：令和元年度剥離抽出結果 (二値化)



図：令和2年度剥離抽出結果 (二値化)



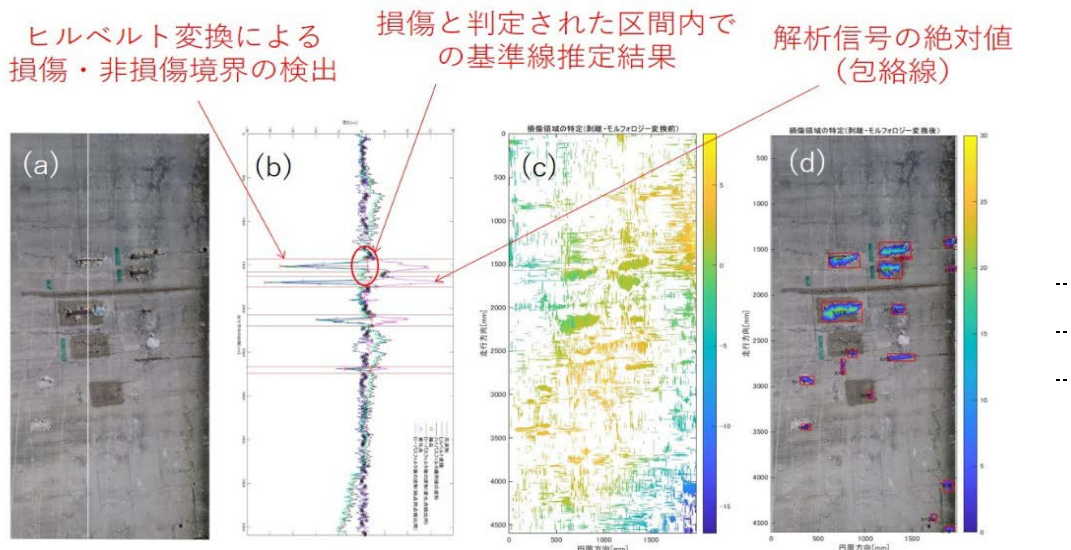
### 2-3. 解析ロジックの精緻化

**対策①:** 以下①-1、①-2、2つのアプローチで解析ロジックの精緻化を進めた。

①-1：時間周波数解析により変位の空間的なスケール特性を分析できる既往アルゴリズムのパラメータの最適化を行い、損傷エリアの検出能を高めることを試みた。(a)壁面形状由来と考えられるより小さいトレンドの除去を行うことで非損傷エリアの検出度合いを低減した。(b)周波数領域で損傷と定義する変位(振幅スペクトル)の閾値のパラメータをより大きくし、過剰検出の度合いを低減した。

①-2：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)」を各側線で計算し、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・効率的に損傷箇所を推定することにした(下図(a)、(b))。これらの処理を走行方向、円周方向のすべての側線に対して適用することで、「疑似的に」二次元的な処理を行い損傷エリアの推定を行った。ただし、この疑似的な二次元分析では、面的な広がりをもつうき・剥離損傷とは異なり、一側線上だけで大きく変化する変位であっても捉えることになり、側線に沿ってノイズが生じる(図(c))。そのため側線方向ノイズを除去できる画像処理手法である「モルフォロジー演算」を適用することにより、損傷として尤もらしい箇所のみを残すこととした(図(d))。

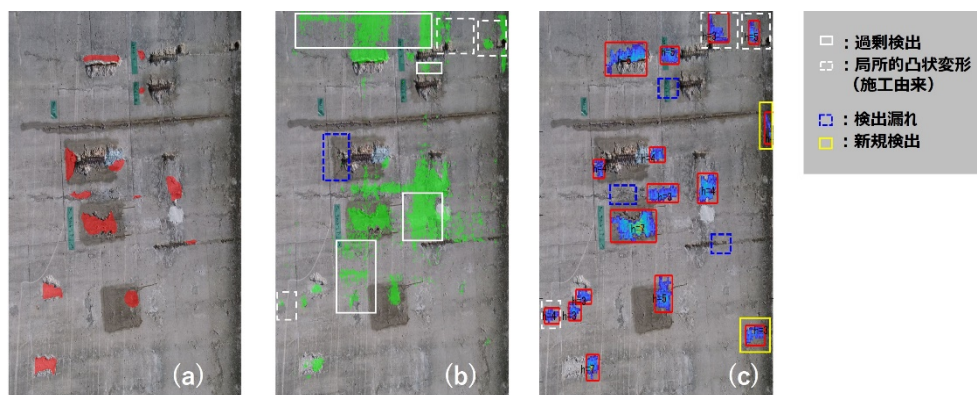
**対策②:** 前述①-2で検出した損傷区間について、隣接する非損傷区間のトレンドを推定しノイズを除去した上で、損傷区間内を直線補間することで基準面を生成した。基準面上側はうき、下側は剥離とし、また各損傷エリア内において基準面からの最大変位を推定することで、うきの厚さ、剥離の深度を推定することとした(図(b))。



図：(a)計測対象壁面(護国寺)、(b)1側線上の基準線推定例(対象側線は図(a)の白線)、(c)走行・円周方向の全側線での基準線推定および損傷候補箇所の出力結果、(d)図(c)のモルフォロジー演算によるノイズ除去・平滑化等による最終的な損傷エリアの推定結果

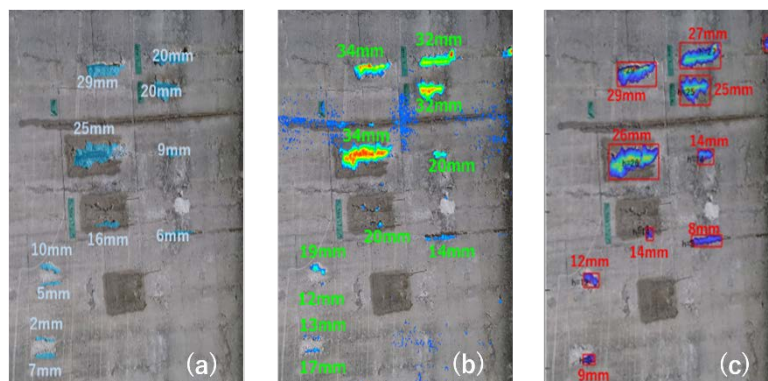
## 2-4. 検証フィールドによる検証・確認

**対策①の検証（うきのエリア検出能の検証）**：点検員の判定結果である下図(a)に対して、既往のアルゴリズムでは、図(b)に示すようにパラメータを最適化しても非損傷エリアを広範囲に損傷エリアとして判定しており、**過剰検出の度合いが大きい**ことが分かる。新たに現場検証を行ったものの、これら広範囲の過剰検出エリアにおいては、明確に局所的な凸状の変形があることは認められなかった。これは、波形の空間周波数特性を分析する既往のアルゴリズムでは、各空間周波数の振幅特性を見ることになり、**周波数間の干渉効果を直接的には知ることができない**ため、今回のケースでは**実波形の形状を過大評価し検出したこと**によるものと考えられる。一方で、図(c)に示すように新アルゴリズムでは、小さいうきで検出できていないものや施工時の型枠の局所的な凸状の形状が検出されているものの、**既往アルゴリズムの過剰検出エリアがほとんど消えており、また実際のうきのエリアの形状をより正確に捉えている**ことがわかる。



図：(a) 点検員による判定結果(うき)、(b)既往アルゴリズム(最適化)、(c)新アルゴリズム

**対策②の検証（剥離の深度推定能検証）**：既往アルゴリズムにおいて、深度推定はロバスト性を優先して波形のRMSの解析信号の絶対値で得られる包絡線を近似的に基準線とする方法を取っている。包絡線は損傷の変位と逆方向に膨らむ性質があるため、**深度を過大評価する傾向**にある。下図(b)から分かるようにその過大評価の度合いは図(a)に示す実際の倍以上になることもあるため、**精度としては不十分**である。一方で、新アルゴリズムの基準線は、損傷区間に隣接する非損傷区間両端を線形補間することで生成するため、**既往アルゴリズムのように過大評価に傾く**ことはない。しかも図(c)からわかるように、**精度は既往アルゴリズムより実際のものと整合的で、1mm精度で一致しているものもある**ことが分かる。

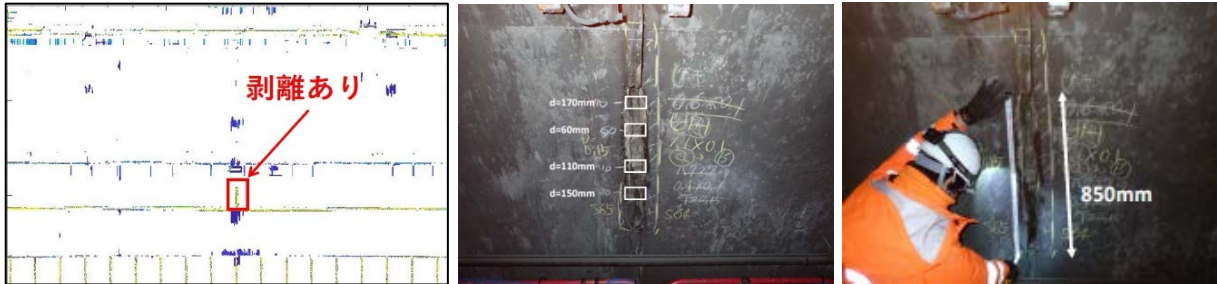


図：(a) 点検員による判定結果(剥離)、(b)既往アルゴリズム、(c)新アルゴリズム

### 3. 令和2年度の今後の予定

#### 3-1. 十分平滑な表面のトンネルにおける検証

例として下図に示すように、生坂トンネル・池沢隧道において本解析ロジックを適用し、損傷の検出能と深度・厚み推定能の検証を行う。また、点検員の判定結果と整合性が十分でない場合には、現場検証などを通してその原因の分析と改良点の考察を行う。



図：生坂トンネルへの適用例

図：生坂トンネル剥離

図：現場検証例

#### 3-2. 非損傷由来の凹凸を有するトンネルにおける検証

採択後に追加要望のあった施工等による非損傷由来の無視できない大きさの凹凸を有するトンネルにおいても、本解析ロジックの有効性を検証する。検証フィールドは、関東地方整備局管理の橋沢隧道などを予定している。



図：橋沢隧道 事前踏査写真

表：検証フィールドの実績と計画

No	検証フィールド	施工法	表面の状態	実績と計画
①	護国寺補修基地	擁壁	十分平滑	【R1】計測・解析・現場検証完了 【R2】再解析による損傷検出性能の検証完了
②	生坂トンネル	NATM工法	十分平滑	【R1】計測・解析・現場検証完了
③	池沢隧道	矢板工法	十分平滑	【R2】再計測完了 再解析・検証による損傷検出性能の検証（実施中）
④	橋沢隧道	矢板工法	非損傷由来の凹凸	【R2】計測・解析・現場検証予定（2月以降実施予定）

#### 3-3. その他

- ・準リアルタイム処理のための解析ロジックの最適化：開発中の本解析アルゴリズムによる点検時間の低減効果について、令和元年度との比較検証を実施する。
- ・カタログ掲載に向けた検討：国土交通省道路局「点検支援性能カタログ(案)」への技術掲載を念頭においた検討を実施する。
- ・道路管理者等との意見交換：トンネル管理者のニーズを技術開発に反映させるため、関係者らと意見交換を行う。



## ⑦研究成果の発表状況

本年より随時発表予定

## ⑧研究成果の活用方策

- ・点検・補修の効率化：トンネル点検の短時間スクリーニング技術を確立することで点検員による近接目視点検エリアを大幅に圧縮でき、迅速な補修が可能となり維持管理コストの削減に寄与できる。
- ・道路資産の安心・安全への貢献：うき・剥離の損傷箇所を迅速にあぶり出すことで道路資産の予防保全のための対策を実施できると期待される。
- ・渋滞等の緩和：道路規制時間が大幅に削減され、道路規制に起因する渋滞等の社会的損失を低減できると期待される。

## ⑨特記事項

### 研究で得られた知見・成果

空間領域データを時間周波数領域に変換し間接的に処理する既往アルゴリズムは、コンセプトは比較的シンプルな一方で特にエリア検出能と深度・厚み推定能に限界があった。一方、新アルゴリズムは多段階の処理ステップを必要とするものの、空間領域データの波形形状を直接的に厳密に分析することが可能であるため、既往アルゴリズムに比べて損傷のエリア検出能と深度・厚み推定能が向上することが特定の検証フィールドで確認された。

### 研究の進捗・見通しの自己評価

#### 1. 計測技術の高度化

プロトタイプ車両の最適化を行い、トンネル内計測データ上の縞状ノイズの削減と損傷検出の精度向上を図り、その効果を確認することができた。今後は、考案した準リアルタイム解析を見据えた処理フローを構築し解析時間の検証を行うことで、実運用性の高い技術の開発を目指す。

#### 2. 解析技術の精緻化

本年度、時間周波数解析に基づく既往アルゴリズムの改良と、空間領域で直接データを処理する新アルゴリズムの開発の二つのアプローチで解析技術の向上を図った。今後それぞれの利点を活用し、ロバスト性、検出精度、計算コストなどが最良になるように、二つのアルゴリズムの組み合わせも想定しつつさらなる改良を目指す。

#### 3. 現場フィールドによる検証・確認

検証用のフィールドである十分平滑な表面をもつ護国寺補修基地の壁面データに開発したアルゴリズムを適用した結果、損傷のエリア検出能と深度・厚み推定能の向上が実証された。今後さらに十分平滑な表面のトンネルでの実証実験を繰り返し、有効性を確認することに加え、非損傷由来の無視できない大きさの凹凸を有する表面をもつトンネルへの適用可能性についても検証する。