

UAVに搭載した赤外線カメラとAIを用いた モルタル吹付のり面の劣化箇所の検出に関する 基礎的研究

石村 直人¹・藤生 慎²・石塚 久幸³・田中 尚人⁴・
福岡 知隆⁵・高山 純一⁶・塩崎 由人⁷

¹学生会員 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail:ishi315@stu.kanazawa-u.ac.jp

²正会員 金沢大学准教授 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail:fujju@se.kanazawa-u.ac.jp

³非会員 株式会社東洋設計 (〒920-0016 金沢市諸江町212番地1)
E-mail:hisayuki.ishizuka@toyosk.co.jp

⁴非会員 協同組合全国企業振興センター (〒920-8205 石川県金沢市大友1丁目386番地)
E-mail:n-tanaka@jointmaker.com

⁵正会員 金沢大学研究員 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail:tfukuoka@se.kanazawa-u.ac.jp

⁶フェロー 金沢大学教授 理工研究域 地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail:takayama@se.kanazawa-u.ac.jp

⁷正会員 金沢大学大学院特任教授 自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail:yuto@se.kanazawa-u.ac.jp

モルタル吹付のり面は高度経済成長期に多く施工され、団塊的な老朽化が進んでいる。熟練技術者の不足、国や地方自治体の財政難などの状況下において、今後は限られた予算や人員の中でより適切な維持管理を行うことが重要になっている。既存のり面の浮きの検査手法としては打音検査が挙げられるが、のり面上方など路上からでは点検の行いづらいつら箇所はのり面小段に登るなどして行うため時間がかかってしまう。本研究では、UAVに搭載した赤外線カメラを用いて浮きがある異常箇所と正常箇所の温度変化を把握し、機械学習させた画像解析システム（以下AI）により浮きの自動検出を行う。今回は、赤外線カメラを用いて浮きを診断した箇所のコアサンプリングを行うことで診断の精度を検証し、のり面表面温度に影響を与える要因について明らかにした。

Key Words : Maintenance, UAV, AI, Infrared camera, Slope

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

我が国では、高度経済成長期に多くの土木構造物が建設された。その中でもモルタル吹付のり面は、高度経済成長期とともに昭和 40 年代に多くの施工実績があり、昭和 40 年代後半には 800 万 m²/年もの施工量があったといわれている。また、図-1 に土木関係職員数の推移、図-2 に土木構造物の維持管理費・更新費の推移を示す。現在、モルタル吹付のり面の維持管理は国土交通省・道

路局の総点検実施要領（案）⁴⁾に準じて行われているが、土木関係職員数の減少や土木構造物の維持費・更新費の増加といった状況において、今後は限られた予算や人員の中でより適切な維持管理を行うことが重要である。

既存のモルタル吹付のり面（以下のり面）の浮きの検査手法としては打音検査や赤外線カメラを使用した熱赤外線映像法が挙げられる。しかし、路上からでは点検の行いづらいつらのり面上方ではのり面小段に登るか、または、高所作業車を用いて点検を行う必要がある。また、打音検査ではのり面 1m²毎程度にハンマーでたたくことによ

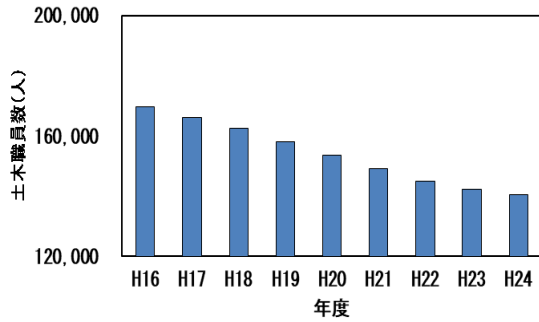


図-1 土木関係職員数の推移

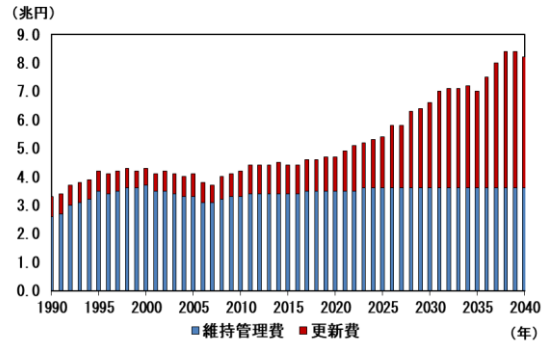


図-2 土木構造物の維持管理費・更新費の推移

って不安定箇所を抽出を行っている。これは時間や打音の判定に熟練性が必要になってしまい、あまり効率的ではない。

本研究では、UAV に搭載した赤外線カメラを用いて浮きがある異常箇所と正常箇所の温度変化を把握し、機械学習させた画像解析システム（以下 AI）により浮きの自動検出を目指す。また、浮きの有無だけでなく浮きの広がり程度の把握や、のり面背後の土質の推定を最終的な目的とする。本稿では、のり面背後の浮きの自動検出 AI の精度向上に向けて、AI 判定箇所のコアサンプリングを行い、のり面表面の温度に影響を与えている要因を明らかにすることを目的とする。

図-3に研究における分析の手法を示した。AIの自動判定の前段階として、赤外線画像を人間の目視により判定し、浮きがあると思われる箇所のコアサンプリングを行うことで、赤外線カメラによるのり面の浮き点検の精度の検証と、のり面背後の地山の状態を確認する。

(2) のり面点検の現状

本研究で対象としているモルタル吹付のり面は、切土のり面の一つである。

国土交通省・道路局の策定した総点検実施要領（案）⁹⁾によれば、切土のり面の点検方法は一次点検と二次点検の二段階で行っている。一次点検では、路上からの目視観察により、切土のり面に生じている老朽化、劣化、変状等の位置、範囲、性状を確認し、第三者被害につながる恐れがある顕著な老朽化、劣化、変状等を抽出する。以下、のり面点検における着眼点を示す。

- ・のり面崩壊の恐れのある箇所
- ・吹付工等の構造物の一部が破損・劣化し、落下する恐れのある箇所

二次点検では、変状等の見られるのり面で、路上からの調査のみでは判断が難しいものや、のり面上方の確認が必要な箇所の点検を行う。点検方法は、近接目視や打音、触診等である。

本研究では、UAV に搭載した赤外カメラを用いての

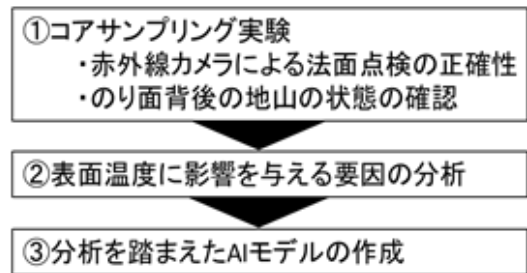


図-3 研究の流れ

り面の温度差を把握することで、のり面の上方部も含め、のり面背後の浮きを非接触で検出することを試みる。

2. 既往研究の整理

のり面の浮き点検において、赤外線カメラを用いて診断を行う熱赤外線映像法に関する研究は、これまで数多く行われているため、既往研究をまとめるとともに本研究の位置づけを行う。

吹き付けのり面は、のり面背後の状態によって吹き付け表面の温度の状態が異なる。一般に空気の体積熱容量は、土に比べて非常に小さい。そのため、のり面背後に浮きが存在している表面箇所は温まりやすく冷めやすいという性質を持っている。赤外線カメラを用いることで、のり面の温度分布状態を把握することができ、現状の浮きがある箇所の判定を行うことが可能となる。

小島ら⁹⁾は熱赤外線映像法によるのり面診断を実際に行うとともに、赤外線カメラの精度の検証を行っている。検証の結果として、モルタル吹付厚さが15cm程度以下であること、また、のり面の撮影対象面に対して撮影角度が45度以内であれば有効性の高いデータが得られることを明らかにしている。

原ら⁹⁾は、ドローンに搭載した赤外線カメラを用いてのり面の熱赤外線調査を行い、その適用性や有効性につ

いて検証を行っている。

浅利ら⁷⁾はFEM数値実験と現場実験の両面から、夜間においても健全部と異常部分には温度差が生じていて、空洞部は健全部に比べて1~2度の温度低下があることを明らかにした。

松岡ら⁸⁾の研究では、ドローンに搭載した赤外線カメラを用いて、のり面を撮影し浮きの把握を行っている。撮影した画像ではのり面背後に浮きがある箇所は温度が高いことを示す白または黄色で表示され、浮きの無い箇所は温度が低い赤色で示される。これにより、赤外線画像からののり面の浮きを目視で確認することが可能となった。また、今までの既往研究とは異なり、松岡は赤外線画像から自動的にのり面の浮きを判定するAIモデルを作成している。

のり面の浮きの調査において熱赤外線映像法の活用可能性に関する研究は数多くあるが、赤外線画像を用いた自動検出に関する研究は少なく、その精度検証・精度向上に向けた要因把握については不十分である。本研究では、吹付のり面といった不確定要素の多いのり面を対象として、AIを用いた浮きの自動検出における課題を把握することを新規性とする。

3. 実験の概要

本研究では、赤外線カメラによるのり面の浮き点検の正確性の把握とのり面背後の地山の状態の把握を目的として、コアサンプリング実験を行った。以下に、対象としたのり面、調査日時、実験の概要を示す。

(1) 対象としたのり面と調査日時

今回の実験で対象としたのり面は、石川県の県道207号線沿いののり面、県道10号線沿いののり面、県道209号線沿いののり面の3箇所である。表-1に調査日時、天候条件を示す。

(2) 実験に用いたドローンと赤外線カメラの仕様

今回の実験で用いたドローンはDJIのInspire1、赤外線カメラはDJIとFLIR共同開発のZenmuse XTという赤外線カメラを用いた。赤外線イメージャーは非冷却VOxマイクロボロメーター、ピクセル・ピッチは17 μ m、フルフレーム率は30Hz、もしくは25Hz、感度は<50mK at f/1.0である。使用したドローンと赤外線カメラの画像、赤外線カメラの仕様を表-1、図-4に示す。

表-1 コアサンプリング実験の調査日時

路線名	のり面形態	撮影日時	天候
県道207号	モルタル吹付のり面	2019年8月29日 午前8時半ごろ	曇り
県道10号		2019年8月29日 午前11時ごろ	曇り
県道209号		2019年8月29日 午後3時ごろ	曇り、時々、小雨

表-2 赤外線カメラの仕様

赤外線イメージャー	非冷却 VOx マイクロボロメーター	
FPA/デジタルビデオ ディスプレイフォーマット	336 × 512	336 × 256
ピクセル・ピッチ	17 μ m	
フルフレーム率	30Hz(NTSC) 25Hz(PAL)	
感度(NE Δ T)	<50mK at f/1.0	



図-4 実験に使用したドローンと赤外線カメラ

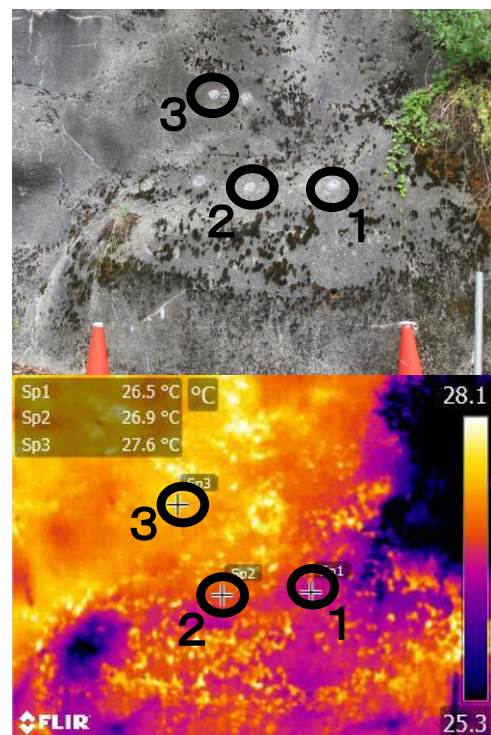


図-5 県道 207 号線沿いののり面の可視光画像と赤外線画像

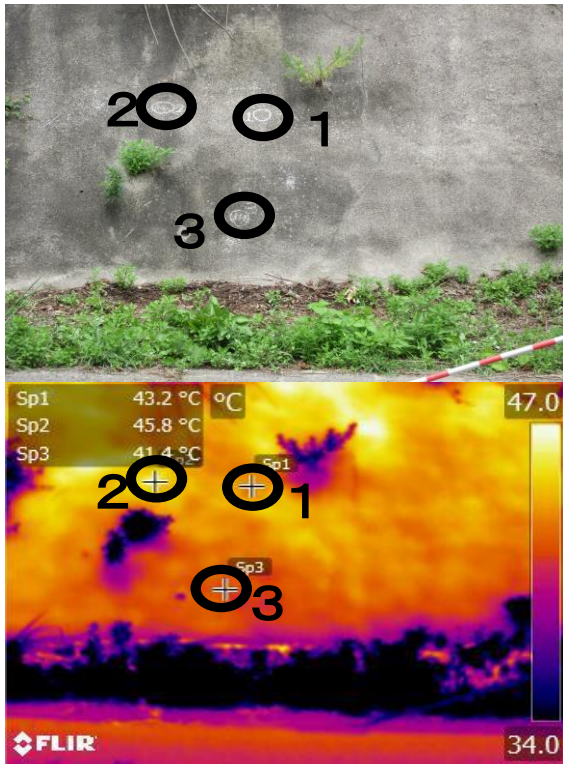


図-6 県道10号線沿いののり面の可視光画像と赤外線画像

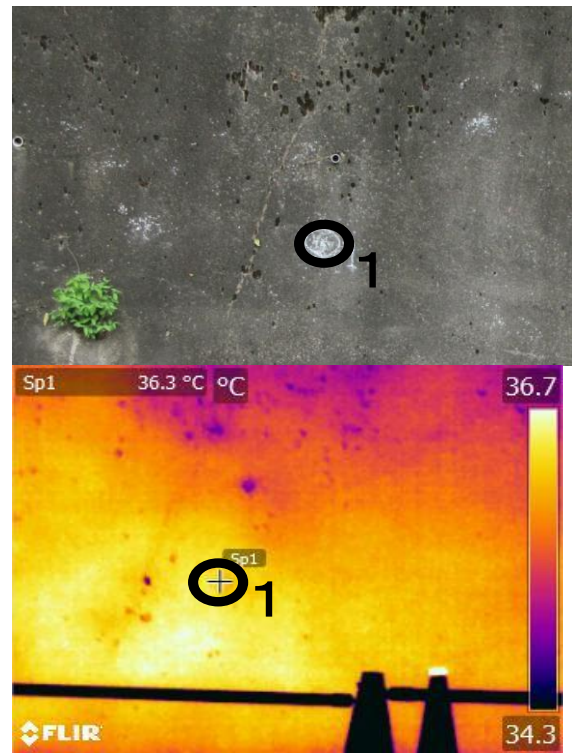


図-7-1 県道209号線沿いののり面の可視光画像と赤外線画像

(3) コアサンプリング実験の概要

本実験で用いた赤外線カメラでは、温度が高い箇所は白または黄色で示され、温度の低い箇所は青に近い色で示される。AIによる判定の前段階として、赤外線の画像を目視により診断し、コアを採取する箇所を選定した。

温度の高い色を示す箇所が浮きがある可能性が高いとし、各のり面において浮きがあると考えられる箇所、浮きがあるかどうかははっきりしない箇所、浮きがないと考えられる箇所の3箇所を選定した。浮きのある可能性が極めて高い箇所のみを3箇所選定しなかった理由としては、浮きの有無にかかわらず、のり面表面の温度に影響を与える要因を明らかにするためである。

各のり面において選定した3か所についてコアサンプリングを行った。各のり面における可視光画像と赤外線画像を図-5、図-6、図-7-1、図-7-2に示す。

県道207号線沿いののり面では、1番は浮きが無いと考えられる箇所、2番は浮きがあるかどうかははっきりしない箇所、そして、3番は浮きがあると考えられる箇所である。

県道10号線沿いののり面では、1番は浮きがあるかどうかははっきりしない箇所、2番は浮きがあると考えられる箇所、そして、3番は浮きが無いと考えられる箇所である。

県道209号線沿いののり面では、1番は浮きがあると考えられる箇所、2番は浮きがないと考えられる箇所、3番

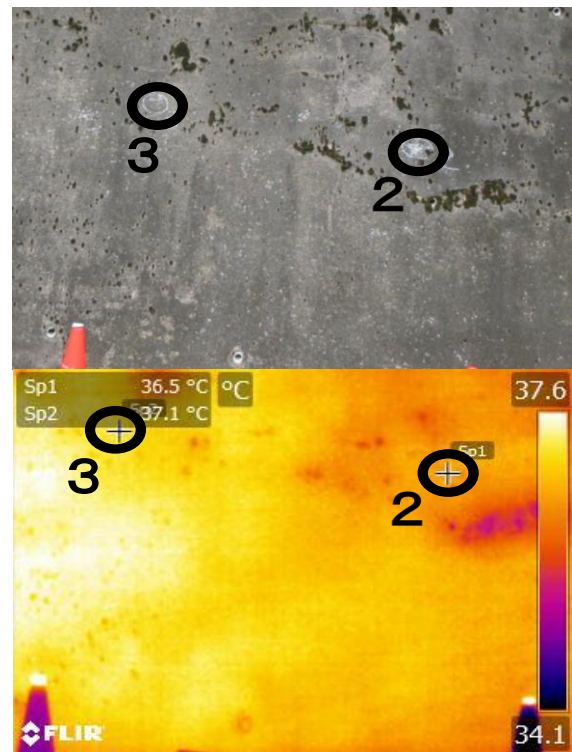


図-7-2 県道209号線沿いののり面の可視光画像と赤外線画像

は浮きがあるかどうかははっきりしない箇所として選定した。

表-2 コアサンプリング実験の結果

路線名	箇所	モルタル吹付法面の状況	削孔長 (mm)	モルタル厚さ (mm)	背面の浮き (mm)	背面の地質	備考
県道207号 倉谷土清水線	1		135	90~95	10	流紋岩質凝灰岩	吹付モルタルの厚さは90~95mm。モルタルの背後に10mmの浮きが確認された。のり面背後の地質は弱風化した流紋岩質凝灰岩。湧水は無し。
	2		150	70	無し	礫混じり砂質シルト (粘性土)	吹付モルタルの厚さは70mm。モルタルの背後の浮きは無し。のり面背後の地質は、黄褐色の礫混じり砂質シルト (粘性土)、軟らかく指圧でへこむ。湧水は無し。
	3		150	110	無し	流紋岩質凝灰岩	吹付モルタルの厚さは110mm。モルタルの背後の浮きは無し。のり面背後の地質は、やや酸化して褐色を帯びる流紋岩質凝灰岩で硬質である。湧水は無し。
県道10号 金沢溝蒲橋光線	1		250	90	無し	砂質シルト (粘性土)	吹付モルタルの厚さは90mm (50~60mm間は固結度が低い)。モルタルの背後の浮きは無し。のり面背後の地質は、暗緑褐色の砂質シルト (粘性土)、軟らかく指圧でへこむ。湧水は無し。
	2		190	40~90	無し	砂質シルト (粘性土)	吹付モルタルの厚さは左が40mm、右が90mm (40mmのほうは固結と度の低い土砂混じりモルタルとなっている)。モルタルの背後の浮きは無し。のり面背後の地質は、暗緑褐色の砂質シルト (粘性土)、軟らかく指圧でへこむ。湧水は無し。
	3		190	120	無し	砂質シルト (粘性土)	吹付モルタルの厚さは120mm。モルタルの背後の浮きは無し。のり面背後の地質は、暗緑褐色の砂質シルト (粘性土)。湧水は無し。
県道209号 芝原石引線	1		150	55~60	無し	軽石凝灰岩	吹付モルタルの厚さは55~60mm。モルタルの背後に厚さ10mmの緩いシルト質砂が分布。その背後の地質は灰色の軽石凝灰岩。湧水は無し。
	2		150	70	無し	軽石凝灰岩	吹付モルタルの厚さは70mm。モルタルの背後の浮きは無し。のり面背後の地質は、軽石凝灰岩。湧水は無し。
	3		150	85	無し	軽石凝灰岩	吹付モルタルの厚さは85mm。モルタルの背後の浮きは無し。のり面背後の地質は、新鮮な灰色の軽石凝灰岩。湧水は無し。

4. コアサンプリング実験の結果

コアサンプリング実験の結果を表-2に示す。

県道207号線沿いののり面での結果を示す。浮きがないと考えた1番の箇所では10mmの浮きが存在し、浮きがあると考えた3番の箇所では浮きが存在しなかった。浮きがあるかわからない箇所として選んだ2番では、のり面背後に土砂 (シルト質砂) が存在した。予想したものと逆の結果が出てしまった原因として、朝早くに撮影を行ったことで吹付背後の性状により浮きや土砂の部分が低温になっていた可能性が考えられる。表-3に吹付のり面の地山性状と表面温度の一般的パターン⁹⁾を示す。

のり面背後の土質が3箇所とも同じであった県道10号線沿いののり面では、吹付厚さにばらつきがあり、表面温度に差があるにもかかわらず浮きが検出されない結果となった。その原因としては、のり面厚さにばらつきがあり、のり面背後の状態による温度差がのり面表面に反映されていなかった可能性がある。

県道209号線沿いののり面での結果を示す。浮きがあると考えた1番の箇所では、のり面背後が岩盤ではなく土砂が存在していた。浮きのある可能性が低いと考えた2番の箇所では浮きもなく、のり面背後は岩盤であり正確な判定を行えたと言える。浮きがあるかわからない箇所として選んだ3番では、のり面背後に浮きも土砂部も存在しなかった。赤外線カメラによる診断の際に途中で

表-3 吹付のり面の地山の性状と表面温度の一般的パターン

吹付背後の性状	深夜・早朝	日中
空洞部	低温	特に高温
土砂部	低温	高温
湿潤部	低温	特に低温
健全部	高温	やや低温

小雨が降り始めてしまい、のり面表面の温度に影響を与えてしまった可能性が考えられる。

のり面背後の地質は県道207号線沿いののり面では流紋岩質凝灰岩、県道10号線沿いののり面では砂質シルト、県道209号線沿いののり面では軽石凝灰岩であった。

5. まとめと今後の課題

土木構造物の維持管理費・更新費の増加や土木関係職員数の減少といった状況において、今後は限られた予算や人員の中で維持管理を行うことが重要である。そこで、本研究ではUAVと赤外線カメラを用いてのり面を診断し、AIにより浮きの自動判定を行う。AIによる自動判定の前段階として、赤外線画像を人間の目視により判定し、浮きがあると思われる箇所のコアサンプリングの実験を行った。

今回のコアサンプリング実験では、赤外線カメラを用いてのり面の劣化状態を診断し、浮きのある可能性の異なる三か所のコアの採取を行った。コアサンプリング実験の結果として、同一のり面であっても固結度や吹付厚さにばらつきがあることが確認された。また、のり面背後に浮きが存在しなかった場合でも、のり面表面には温度差が存在することが確認された。

今後の課題としては、同一のり面であっても吹付厚さにはばらつきがあることが確認されたが、吹付の厚薄の差によってのり面表面に温度差が生じている場合、AIが浮きに起因する温度差と誤認識してしまう可能性が考えられる。そこで、モルタルの吹付厚さが分かっている箇所の温度を継続的に計測することで、吹付厚さと表面温度の関係性を明らかにする。また、同一のり面上で赤外線カメラによる診断結果と打音検査による診断結果が同じである箇所の温度変化を計測することで、温度差につながる原因を把握する。

参考文献

- 1) 補強土工法研究会 老朽化吹付のり面補修工
<http://www.japan-hokuyoudo.jp/roukyuuka-morutaru.html>
(最終閲覧日：2019年9月22日)
- 2) 国土交通省 社会資本の適確な維持管理・更新
<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h23/hakusho/h24/html/n1216000.html>
- 3) 国土交通省 社会インフラの維持管理の動向
<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h25/hakusho/h26/html/n1133000.html>
- 4) 国土交通省 道路局：総点検実施要領（案）【道路のり面工・土木構造物編】2013年2月
<https://www.mlit.go.jp/road/ir/ircouncil/pdf/roadstock11.pdf>
- 5) 小島伸樹：「熱赤外線映像法による法面診断事例」建設コンサルタント業務技術発表 2004年
- 6) 株式会社ベーシック：ドローンを活用した赤外線調査法による吹付のり面の老朽化診断，中部地質調査業協会ミニフォーラム 2017
- 7) 浅利公博，横谷直道，石橋清美，吉岡良平：簡便化した熱赤外線映像法による吹付けのり面老朽化調査-その2，日本応用地質学会，研究発表会講演論文集，pp243-246，2005
- 8) 松岡佑樹「土木分野における小型無人航空機（ドローン）の利活用に関する研究」修士学位論文 2018年
- 9) 建設省土木研究所：熱赤外線映像法による吹付けのり面老朽化診断マニュアル，1997

USING AN INFRARED CAMERA ON UAV AND AI REGARDING THE DETECTION OF DETERIORATION OF MORTAR SPRAY SURFACE BASIC RESEARCH

Naoto ISHIMURA, Makoto FUJII, Hisayuki ISHIZUKA, Naohito TANAKA,
Tomotaka FUKUOKA, Junichi TAKAYAMA, Yuto SIOZAKI

Many mortar spray slopes were constructed during the period of high economic growth, and the aging of the baby boom is progressing. Under the circumstances such as shortage of skilled engineers and financial difficulties of national and local governments, it will be important to perform more appropriate maintenance management with limited budget and personnel. The existing method of checking the lift of the slope is a hammering inspection, but it takes time because it is done by climbing the steps on the slope, etc., where it is difficult to inspect the road from above the road. In this study, we use an infrared camera mounted on the UAV to grasp the temperature change between abnormal and normal areas where there is a float, and automatically detect the float using a machine-learned image analysis system (AI). This time, the accuracy of the diagnosis was verified by performing core sampling of the location where floating was diagnosed using an infrared camera, and the factors affecting the slope surface temperature were clarified.