

# 博士論文概要

赤外線熱計測による地下鉄覆工  
コンクリートの浮き検出方法の  
検討とその応用

Infrared Thermometry Application to The Detection  
of Void in The Subway Tunnel Lining Surface

申請者

川上	幸一
Koichi	KAWAKAMI

2018年12月

我が国の鉄道は、輸送人員として毎年度 230 億人以上の輸送を支えており、路線延長として 25,000km を超える施設を有している。このうち、橋梁が約 100,000 橋、トンネルは約 5,000 本が整備されている。2012 年 12 月の中央自動車道笹子トンネル事故以来、鉄道においても設備の落下事象は問題となっており、2012 年度、2013 年度の鉄道トンネルや高架橋からのコンクリート片のはく落件数は、落下物総質量が 1kg 以上となるものは、それぞれ 66 件、47 件となっており、いずれの事象においても、直近の定期検査において、その発生の予兆を捉えることができていなかったという問題がある。

地下鉄トンネルの維持管理においてもコンクリートのはく落は、列車の安全を確保するうえで大きな問題である。はく落の主な原因は、躯体内部の鉄筋等の鋼材が中性化や漏水等により腐食膨張し、かぶり部分のコンクリートが押し出されること、つまり浮き・はく離（以下、浮き）が進展して発生すると考えられる。現在、浮きの検出はコンクリート表面の目視のみでは困難であることから、検査員による打音検査を主体に行われている。しかし、検査員が直接打音するため、検査速度の限界、高所作業車や足場の必要性等から、終電から始発までの限られた時間（以下、線閉時間）内に実施するには、検査員の判断により必要と思われる箇所のみを打音するため、検査員の能力や経験の違いで見落とし等が生じるという課題がある。

上記のことから、本論文では、地下鉄トンネル覆工コンクリートの赤外線熱計測と綿密な打音検査結果をもとに、浮きを非破壊・非接触で効率的に検出できる検査方法（以下、赤外線法）について研究を行うとともに、地下鉄トンネルの維持管理に確実に適用できる手法を考案した。本論文は、序論から結論までの 9 章で構成されているが、以下に各章の概要を述べる。

第 1 章は序論であり、我が国における鉄道構造物において、近年多くの鉄道施設が老朽化している現状から維持管理の重要性が増してきていること、また鉄道施設におけるコンクリート片のはく落事象が問題となっていること、さらには将来の生産年齢人口の減少が予測されていることから、維持管理の効率化が課題となっていることを概説した。結びとして、本研究の目的である地下鉄トンネルにおける赤外線法の必要性、および本論文の構成と各章の概要を要約した。

第 2 章では、過去に生じた鉄道トンネルにおける重大なコンクリートはく落事故の例について述べ、事故例を踏まえて鉄道構造物を対象として議論され基準化された国土交通省の「維持管理標準」の考え方について説明した。また、それに基づいて研究開発が進められている検査の機械化事例、および赤外線法に関する既往の研究について述べ、本研究の位置づけを明らかにした。

第 3 章では、東京地下鉄株式会社（以下、東京メトロ）の維持管理の概要について説明した。まず、通常全般検査、特別全般検査、はく落防止のみを目的とした打音点検について、その内容および検査体制と所要期間について説明し、銀座線トンネルにおける通常全般検査と特別全般検査の結果比較から、浮きの検出においては特別全般検査が有効であることを示した。また、コンクリートのはく落に至る過程について、中性化と漏水の関係について説明した。さらに、今後の地下鉄トンネル点検において赤外線法との組み合わせが可能な考えられるシステムとして、維持管理の ICT 化とタブレットによる検査アプリケーションの概要、検査データを統計分析することにより、浮きの観測される確率を算出する方法や、画像認識技術を利用し、可視画像からはく落要注意箇所を抽出する試みについて概説した。

第4章では、地下鉄トンネルにおいて赤外線法が適用できることを確認するため、土被り3.3mで換気口から20m、土被り6.5mで換気口から300m、土被り7.6mで換気口から250mの3地点で実施した予備検討の結果を述べた。この予備検討では、上記の3地点で打音検査により確認された21箇所の浮き部について赤外線法による計測を2013年9月、11月、2014年1月の3回実施し、それぞれの健全部と浮き部の温度差を調査した。その結果、列車の運行がない線閉時間帯には、トンネル坑内の気温(以下、トンネル内気温)が低下し、赤外線法により浮き部を温度差として検出できること、またトンネル内気温と健全部の温度差(以下、環境温度)が大きい程、健全部と浮き部の温度差が大きく浮き部の検出率が高く、その環境が冬期に顕著に観測されることを確認した。

第5章では、第4章の観測結果をもとに、赤外線法の実用化に向けて適用可能な条件について詳細に検討した。まず、開削トンネル区間での、ある停車場から地上部までの約2kmにおいて、10箇所のトンネル内の気温測定を予備検討とほぼ並行して、2013年10月から2014年2月まで連続して実施した。また、選定した13箇所において予め打音検査で確認された306箇所の浮きを対象として、赤外線法計測を2013年10月、11月と2014年2月の3回にわたって実施した。

第4章の結果をもとに、その結果を分析し、以下の2項目の重要な知見を得た。

①赤外線画像から浮きを検出する健全部と浮き部の温度差の閾値を $0.03^{\circ}\text{C}$ とした場合、トンネル内気温が健全部コンクリート表面温度より低い状態(放熱環境)で、かつ環境温度が $0.35^{\circ}\text{C}$ 以上の場合に赤外線法による浮きの検出が可能であるということが明らかになった。

②トンネル内気温が健全部コンクリート表面温度より高い状態(吸熱環境)では、浮きの検出率が40%と低く、環境温度の絶対値が大きくなっても検出率は改善しなかった。

第6章では、シールドトンネル区間においても、赤外線法の適用が可能であることを確認するために、ある停車場の端から100mのシールドトンネル区間において、2014年7月から翌年2月までトンネル内気温を連続測定し、トンネル坑内の温度環境の分析を実施した。この結果、開削トンネルの研究結果から、浮きの検出が可能とされる、放熱環境かつ環境温度が $0.35^{\circ}\text{C}$ 以上になる赤外線法による計測可能日数は、10月では計測可能日の割合は約65%であるが、外気温が低下する11月から1月までは80%以上の割合で計測が可能であることが明らかになった。

また、同一区間において打音検査を実施し、その結果確認された246箇所の浮きに対して、A(はく落の恐れがある)、B(将来、Aに進展の恐れがある)、C(はく落の恐れなし)の3段階のランク付けを実施した。その上で、2014年8月、11月、2015年1月の3回にわたり赤外線法による計測を実施し、浮きの検出率について分析を行った結果、下記のような成果を得ることができた。

①Aランクの浮きについては、3回の計測とも赤外線法ですべて検出できた。

②Bランクの浮きの検出率については、外気温が高い8月は38%であったが、外気温の低下する11月、1月では95%であった。

③Cランクの浮きの検出率についても、8月が36%、11月が61%、1月が64%を得ることができた。

このことから、はく落につながる恐れのある浮きについては、ほぼ検出が可能であることが明らかになった。しかし一方で、赤外線法では浮きと判断したが、実際には浮いていない箇所(以下、過検出)が全体の6割程度存在し、赤外線法の実用化に向けた課題であることが明らかになった。

第7章では、赤外線法の実用化に向けての課題の解決に取り組んだ。

まずは、赤外線法による熱画像を撮影する作業日程の決定方法の効率化を検討した。線閉時間における地下鉄トンネル内では、トンネル保守の他、線路や電気設備等の各種の保守作業が日々行われている。そのため、撮影日程を予め決定し、事前に作業登録をすること、また当日のトンネル内温度環境が赤外線法に適しているかを把握することが必要である。このことから、直近で特別全般検査が終了した路線の、比較的変状の多いと思われる開削トンネルの駅間約1000mにおいて2015年8月から翌年2月まで連続して温度計測を実施し、外気温との関係を整理することで、外気温の平均気温が15℃を下回れば、トンネル内温度環境が赤外線法に適していることを確認した。

次に、同区間のうち500mの区間において、別途綿密な全面打音検査を実施し、区間内の全ての浮きを検出し、その結果と特別全般検査結果、および赤外線法による計測結果と比較した。その結果、全面打音検査で検出された浮き174箇所に対し、特別全般検査のみで検出された箇所7箇所、赤外線法のみで検出された箇所73箇所、双方で検出された箇所27箇所、双方で未検出の箇所67箇所であったことから、赤外線法による浮き検出率は約60%であることを確認した。

さらに6章で明らかになった課題である、過検出についての処理方法を検討した。上記の調査で判明した赤外線法による239箇所の過検出数を低減する方法として、赤外線法における浮きと判断された部分の面積が小さいほど過検出が多いことに着目し、面積0.03 m<sup>2</sup>以下の浮き判定箇所についてはノイズとして棄却する方法を考案した。その結果、ノイズとして棄却された88箇所のうち、実際の浮きが11箇所、B判定9箇所、浮きの補修跡が2箇所であり、この方法で37%の過検出を除去できることを確認した。

第8章では、本研究で得られた成果をもとに地下鉄トンネルの維持管理の実務に、赤外線法を導入する具体的な方法を考案した。手順は次の6段階で構成されている。①外気温の観測結果から計測実施日程の決定、②赤外線法計測の実施、③変温部抽出、④面積によるノイズ処理、⑤赤外線法によるデータと既存の検査データ（通常全般検査、特別全般検査）を総合して、打音点検箇所を設定、⑥打音検査及び結果の記録。なお、東京地下鉄株式会社では、はく落予防を目的として4年周期で鉄道構造物等維持管理標準に基づく検査とは別に、打音点検を実施することとしていることから、この仕組みを打音点検に導入することとしている。

第9章は結論であり、各章で述べた結果および知見を取りまとめ、今後ますます重要となると思われる、地下鉄トンネル覆工コンクリートのはく落対策に関する今後の課題と対策を整理した。

課題としては、①検出率の更なる向上、②赤外線画像から浮きを検出する際の労力低減、③維持管理業務全体の中での赤外線法の位置づけの明確化が挙げられる。対策としては、①トンネル内の強制換気の実施、②統計分析手法や画像技術を利用したはく落要注意箇所との比較・検証による浮きの可能性評価、③画像認識技術を利用した赤外線法による浮きの自動抽出が挙げられる。あわせて、保守土木技術者の人財育成を継続的に行っていく仕組みづくりが大切であることが指摘できる。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 川上 幸一 印

(2018年 12月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 論文	
○論文	川上幸一, 小西真治, 篠原秀明, 久保昌史, 黒須秀明, 赤木寛一, 赤外線熱計測による地下鉄覆工コンクリートの浮き検出方法の検討とその応用, 土木学会論文集 F1, 74 巻 1 号 p.25-39, 2018 年 8 月
○論文	川上幸一, 小西真治, 村上哲哉, 日下義政, 赤外線サーモグラフィカメラによる地下鉄トンネルの浮き・はく離検出に関する有効性の検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 21 巻, p.9-16, 土木学会, 2016.
○論文	川上幸一, 小西真治, 村上哲哉, 久保昌史, 中山聡子, 赤外線熱計測による地下鉄シールドトンネル内中子型セグメント表層コンクリートの浮き検出, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.71, No.3 (特集号), I_112-I_121, 2015.
○論文	川上幸一, 小西真治, 久保昌史, 中山聡子, 現場での赤外線熱計測による地下鉄覆工コンクリートの浮き検出の可能性, 地下空間シンポジウム論文・報告集. 第20巻. Pp.73-84, 土木学会, 2015.
○論文	Kouichi KAWAKAMI, Shinji KONISHI, Shigeo Hozumi, Tetsuya MURAKAMI, Masafumi KUBO, Yoshimasa KUSAKA, Development of Voids Detection Method in Subway Tunnel Lining with Infrared Thermometry, The 11 <sup>th</sup> World Congress on Railway Research, May 29-June 2, 2016, Milan, Italy,
論文	Masumi SHINOZAKI, Shinji KONISHI, Koichi KAWAKAMI, Masafumi KUBO, Satoko NAKAYAMA, Effective method of inspection for voids near surface in subway tunnel with infrared thermometry, The International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems, November 10-12 2015, Chiba, JAPAN
○論文	Kouichi Kawakami, Yoshihiko Mutou, Shinji Konishi, Takanori Miura, Shunsuke Matsukawa, Yuuji Morohashi, Utilization of IT and the Current Condition of the Repair Measures in the Maintenance of Subway Tunnels, ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly May 22-28, 2015, Lacrova Valamar Congress Center, Dubrovnik, Croatia
報告	篠原秀明, 小西真治, 川上幸一, 三浦孝智, 田口真澄, 村田利文, 石川雄章, 画像認識技術を利用したはく落要注意箇所自動抽出システムの開発, トンネル工学報告集. 第 26 巻, III-2, 土木学会, 2016.11
○報告	川上幸一, 小西真治, 篠崎真澄, 福中公輔, ベイジアンネットワークによる地下鉄トンネルの変状観測確率の検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第21巻, B2-4, p123-128, 土木学会, 2016. (講演奨励賞)

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
報告	小西真治, <u>川上幸一</u> , 三浦孝智, 篠崎真澄, 篠原秀明, 村田利文, 石川雄章, 画像データによるはく落要注意箇所抽出方法の研究, トンネル工学報告集, 第25巻, III-2, 土木学会, 2015.11.
○報告	<u>川上幸一</u> , 小西真治, 三浦孝智, 篠崎真澄, 福中公輔, 地下鉄トンネルの全般検査データによる維持管理指標の研究, トンネル工学報告集, 第25巻, IV-1, 土木学会, 2015.11.
○報告	<u>川上幸一</u> , 小西真治, 岩本佑太, 日下義政, 黒須秀明, 赤外線計測による地下鉄トンネルの覆工コンクリートの浮き・はく離検出方法の研究, トンネル工学報告集, 第24巻, III-5, 土木学会, 2014.12. (優秀講演賞)
2. 講演	
講演	久保昌史, <u>川上幸一</u> , 瀬筒新弥, 佐々木考太, 小西真治, 中山聡子, 赤外線熱計測によるトンネルコンクリートの浮き・剥離の検出割合向上に関する検討, 土木学会第72回年次学術講演会VI-939, 平成29年9月
講演	川島千明, 黒須秀明, 小西真治, <u>川上幸一</u> , 村上哲哉, 地下鉄トンネル内の赤外線熱計測における変状部の判定確度と浮き・はく離検出精度の関係性の研究, 土木学会第71回年次学術講演会VI-758, 平成28年9月
講演	篠原秀明, 小西真治, <u>川上幸一</u> , 三浦孝智, 村田利文, 石川雄章, 可視画像データによる地下鉄トンネル異状箇所抽出システムの開発, 土木学会第71回年次学術講演会VI-747, 平成28年9月
講演	中山聡子, <u>川上幸一</u> , 小西真治, 村上哲哉, 久保昌史, 開削トンネルにおける赤外線熱計測によるコンクリートの浮き・剥離手法の検討, 土木学会第71回年次学術講演会VI-745, 平成28年9月
講演	五十嵐 翔太・三浦 考智・ <u>川上 幸一</u> , 榎谷祐輝, 野口正則, 小松正典, ICTを活用した地下鉄のトンネル検査, 土木学会第71回年次学術講演会VI-744, 平成28年9月
講演	田口真澄・榎谷祐輝・ <u>川上幸一</u> , 三浦孝智, 村上哲哉, 福中公輔, 地下鉄トンネル検査結果を用いた維持管理指標の妥当性の検証, 土木学会第71回年次学術講演会VI-682, 平成28年9月
講演	日下義政, 黒須秀明, 土屋善靖, 小西真治, <u>川上幸一</u> , 移動赤外線熱計測による地下鉄トンネル内コンクリートの浮き・はく離検出, 土木学会第70回年次学術講演会VI-219, 平成27年9月
講演	村上哲哉, 福中公輔, 小西真治, <u>川上幸一</u> , 篠崎真澄, 全般検査結果を用いた地下鉄トンネルリスク評価のための総合指標の検討, 土木学会第70回年次学術講演会VI-344, 平成27年9月

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	篠崎真澄, 村上哲哉, <u>川上幸一</u> , 小西真治, 福中公輔, 全般検査結果を用いたベイジアンネットワークによる変状発生の原因関係の分析, 土木学会第 70 回年次学術講演会VI-343, 平成 27 年 9 月
○講演	<u>川上幸一</u> , 小西真治, 岩本佑太, 小西真治, 石川雄章, 安達慎一, 可視画像データを利用した地下鉄トンネルの状態分析, 土木学会第 70 回年次学術講演会VI-155, 平成 27 年 9 月
講演	久保 昌史・小西 真治・ <u>川上 幸一</u> , 小松正典, 沢田秀樹, 中山聡子, 赤外線熱計測によるトンネルコンクリートの浮き・はく離調査手法の検討, 土木学会第70回年次学術講演会VI-490, 平成26年9月
○講演	<u>川上幸一</u> , 武藤義彦, 大泉政彦, 保栖重夫, 諸橋由治, 地下鉄箱型トンネルにおける中性化進行予測, 土木学会第 69 回年次学術講演会VI-165, 平成 26 年 9 月
3. その他	
○特許	<u>川上幸一</u> ,三浦孝智, 変状管理システム, 特許6006761 (2016/09/16)
特許	福中公輔, <u>川上幸一</u> ,小西真治,三浦孝智,村上哲哉,諸橋由治,榎谷祐輝,篠崎真澄, 維持管理指標算出装置及び維持管理指標算出方法, 特許5904651 (2016/03/25)
特許	福中公輔, <u>川上幸一</u> ,小西真治,野本一美,石川知幸,瀬筒新弥,野口正則,岩本佑太, 管理指標算出装置及び管理指標算出方法, 特許5904650 (2016/03/25)
著書	丸山久一, 岸利治, <u>川上幸一</u> , 他, コンクリート構造物の補修・補強 ～実例で見る思想と実践～ 8-2 導水から止水へ p 412-416, (株)産業技術サービスセンター, 2016.4
講演	福中公輔, 澤田基之, 小西真治, <u>川上幸一</u> , 三浦孝智, 今泉直也, データサイエンスと働き方改革～安全で効率的なメンテナンスを目指して～, データサイエンス協会 4rd シンポジウム, 2017 年 10 月, (データサイエンスアワード 2017 最優秀賞)
○報文	<u>川上幸一</u> ・若山哲雄・諸橋由治, 実物大の訓練用トンネルを用いた土木技術者の育成, トンネルと地下 Vol49 8月号 p.45-51, 2018
報文	三浦孝智, <u>川上幸一</u> , 小西真治, 篠原秀, 地下鉄トンネル覆工の浮き・剥離の可視化による検出システムの検討, トンネルと地下 Vol47 11月号 p.41-46, 2016.
○報文	<u>川上幸一</u> , 鉄道構造物の歴史を辿る 51 わが社の誇る鉄道施設 19 銀座線「新橋駅」「万世橋駅」「山岳工法トンネル」, 鉄道施設協会誌 Vol.53 7月号, p6-8, 2015. (論文賞)
○報文	<u>川上幸一</u> , 東京メトロの土木構造物検査における ICT 活用, 鉄道施設協会誌 Vol.53 2月号, p40-43, 2015. (論文賞)
報文	その他, 報文 6 件