

交通運輸技術開発推進制度
研究成果報告書
(ダイジェスト版)

シールドトンネルの平常時のモニタリングおよび
掘削時の安全管理へ向けたセグメント組込型有機
導波路の提案

平成 30 年 3 月

国立大学法人 電気通信大学

目次

和文要約	1
英文要約	2
研究開発の目的と実施体制	3
研究開発成果	
1. 序論	4
2. シールドトンネルへの敷設へ向けた実現性の調査	4
3. 他の構造物の点検への応用可能性の調査	6
3-1. NATM工法のトンネル	6
3-2. 擁壁	7
3-3. 斜面・積雪の崩落	7
3-4. 山留め・支保工	7
4. フィールドにおける初期検討	8
4-1. 積雪下への敷設	8
4-2. コンクリートへの埋め込み	13
6. 結論	14
7. 知的財産権取得状況	15
8. 研究成果発表実績	15
9. 参考文献	16

和文要約

研究成果報告要約

作成年月	平成 30 年 3 月
研究テーマ名	交通インフラにおける老朽化対策, 事前防災・減災対策及び的確な維持管理・更新-災害に強い公共交通に向けた技術開発-
研究課題名 (課題番号)	シールドトンネルの平常時のモニタリングおよび掘削時の安全管理へ向けたセグメント組込型有機導波路の提案 (2015-2)
研究代表者名	国立大学法人 電気通信大学 古川 怜
研究期間	平成 29 年 7 月 14 日～平成 30 年 3 月 30 日
研究の目的	シールドトンネルはシールド機による掘削と、その後方で組み上げられるセグメントによって構築される。工法の特性上柔らかい地盤に作られている場合が多いため、地盤周辺の影響を受けやすく、また、比較的小さな欠損からでもトンネル内部に周囲の土砂や海水が流入しやすいというリスクがある。このようなリスクに対抗する導波路型監視技術という位置付けで、本研究では、シールドトンネルのセグメントにあらかじめ導波路が組み込まれた新規のヘルスマニタリング技術の創出を目的とする。この方式により、センサー部の簡便な敷設と交換が可能となる。また、セグメントの歪みを色変化によって、セグメント同士のズレや破壊を光の減衰によって肉眼検知することができる。従って、トンネル掘削者自らによる異常検知が可能となり、結果として土砂流入などの有事に早期の避難や対策を促すことにつながると期待される。また、トンネル完成後も点検者や通行人によって歪み変形の日常点検が行える。
研究成果の要旨	目標とする歪センサーは、高粘度な前駆体から成形可能なエラストマーを母材とし、コアおよびクラッドに異なる色素を含有する導波路である。歪によりコアの発光光がクラッドに漏れることによりクラッドで発光し、導波路出射端の見え方を変化させ、シンプルかつリアルタイムの検知を促す。本年度は、開発する導波路型歪センサーのセグメントへ導波路センサーが埋め込まれた形のプロトタイプの前製および実用性の具体的な検討を実施した。また、シールドトンネル以外の構造物モニタリングへの適用性についても調査を行った。結果として、シールドトンネルに関してはセグメント端以外に開口端を儲けるのが望ましいことがわかった。シールドトンネル以外への適用可能性については、土砂崩れおよび雪崩の未然検知へ向けた斜面への敷設、および仮設工事現場の山留めの変位の検知へ向けたコンクリートへの埋め込み実験を行った。
知的財産権取得状況	特許出願 0 件
研究成果発表実績	論文発表：国内 0 件、海外 1 件 口頭発表：国内 3 件、海外 3 件 その他：技術紹介に関する寄稿 2 件

英文要約

Summary of Research Report
Program for Promoting Technological Development of Transportation

Date of preparation	March, 2018
Title of subject	Accurate maintenance for secure transportation infrastructure against aging and natural hazards -Development of robust transportation system against natural hazards-
Title of project (Project number)	Development of organic-waveguide strain-sensor for health monitoring of shield tunneling process (2015-2)
Name of research coordinator	Rei Furukawa (The University of Electro-Communications)
Duration of project	July 14, 2017-March 30, 2018
Purpose of project	In shield tunneling method, wall of the tunnel is constructed behind the excavator using precast concrete segments. Misalignments of the segments need to be detected immediately, because it will be a high risk for the workers if the fluid flew inside the tunnel from the cavity. The goal of this project is to develop a novel waveguide-structured sensor that can detect misalignment of the segments during the excavation and still can be used for detecting strain after the tunnel is built. Detection is a simple visual check, in which strain and misalignment will appear as color change and darkening of the waveguide end, respectively.
Summary of results	Previously, a novel fiber-optic strain sensor was developed using elastomer as its base material. Elastomer has advantage in molding due to its viscous precursor state. The sensor contains different organic fluorophores in core and cladding, respectively. Light leakage from the core to cladding excites secondary material, and the color change alerts user the deformation. This year, we had made contacts to universities and industries mainly in architectural field. The purpose of this work was to find a clearer picture whether our sensor has possibilities to be used in tunnels or any other building structures. As a result, we had found that the output end of the fiber sensor should be placed somewhere in the inner surface of the tunnel, instead of the cross section of it. Field tests were done assuming prediction of landslide and deformation of retaining wall.
Patents, etc	Patents: 0
Publication, etc	Paper Publications: Domestic 0, Overseas 1 Oral Presentations: Domestic 3, Overseas 3 Others (Articles): Domestic 2, Overseas 0

研究開発の目的と実施体制

研究開発の目的

シールドトンネルは軟弱地盤に適した工法ゆえ、国内で鉄道分野等適用事例の多いインフラである。しかし、周囲の土砂や海水が流入し人身事故に繋がった例がある。従来技術である光ファイバーヘルスマニタリングは、インフラ災害の予兆検知に極めて有効とされるが、敷設と交換の困難さ、信号解析の複雑さ、コストの高さなどが普及へのネックとなっている。そこで、本研究では、シールドトンネルのセグメントにあらかじめ導波路が組み込まれた新規のヘルスマニタリング技術の創出を目的とする。この方式は極めて簡便に敷設と交換が行えるに加え、電力消費ゼロで肉眼により現場の人間が危険の未然検知を行うことができる。本案では、セグメントの歪みによって引き起こされる出射光の色変化によって、歪みを肉眼検出できる導波路構造と、セグメント同士のズレや破壊により出射光強度が減衰する構造を併せて作製する。それぞれの仕組みにおいて、シールドトンネルにおける平常時の歪みモニタリングと、トンネル掘削時の作業員の安全管理を目的対象とした研究開発およびその有効性検証を行う。有効性の検証において、シールドトンネルへの適用の実現性について更に具体的に調査を行うとともに、他の構造物へのセンサーの適用性についても、デモ実験などを通じて探索する。

研究実施体制

本研究は、電気通信大学を総括研究機関として実施した。担当機関の研究実施の流れを示すチャートは以下の通りである。

全体課題名

「シールドトンネルの平常時のモニタリングおよび掘削時の安全管理へ向けたセグメント組込型有機導波路の提案」

機関名及び研究代表者氏名

電気通信大学 古川 怜



個別課題名

「プロトタイプ作製と有効性検証」

機関研究代表者

電気通信大学 古川 怜

(ミニチュアプロトタイプへの導波路作り込み、各機関からのデモを通じた意見収集)

研究支援者氏名及び支援内容

溝呂木大地、上村創、廣瀬智絵、鶴田碩信 (化学実験、光学測定)

研究開発成果

1. 序論

本年度は、平成 27-28 年度にかけて開発した光ファイバー導波路型歪センサーの適用対象との技術的な相性を中心に調査検討を行った。意見照会先としては、九州大学大学院工学研究院附属アジア防災研究センター地圏環境研究室の三谷泰浩教授に照会を行った。また、イノベーションジャパン 2018 および新技術説明会などの技術紹介を通じて有識者とのマッチングおよび情報収集を行った。これらの調査結果として、1) シールドトンネルへの敷設へ向けた実現性、2) 他の構造物の点検への応用可能性、として分類する。また、これらの調査結果を反映した 3) フィールドにおける初期検討、を行った。それぞれの項目における成果を以下にまとめた。

2. シールドトンネルへの敷設へ向けた実現性の調査

本課題は、シールドトンネルのセグメント内部に透明体の導波路を埋め込むという構想をもとに、材料開発、センサー開発、プロトタイプ作製を行ってきた。図 1 に最終的な成果物の利用法の構想を示す。今年度は、この構想通りに、敷設、ひずみの検知、導波路端の視認、などが可能かどうかの実現性の調査を行った。

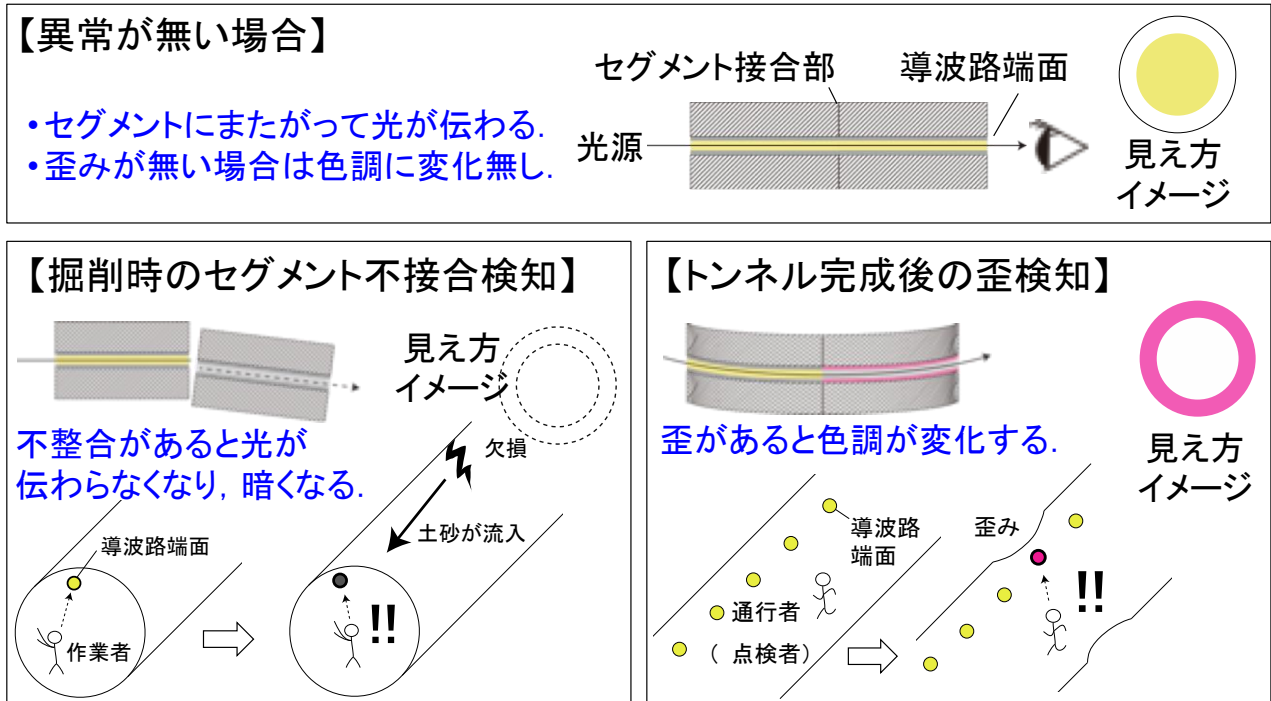


図 1：導波路埋蔵によるセグメントずれの検知（上段左）、および掘削端における導波路開口端のイメージ（上段右）。

本案の当初の目標は、シールドトンネルの掘削時と完成後の両方のシチュエーションにおいて、有効に利用できる構造点検法を提供することであった。昨年度の事業者へのヒアリングにおいては、許容されるセグメントのアライメント誤差は、セグメントの寸法などケースごとの状況に左右されるが、一般的に数ミリのオーダーであるということであった。また、シールドトンネルは、完成後は比較的安定な構造物であり、事故リスクがあるとすれば掘削中が主であるということであった。

図2（右）に本研究課題における導波路のセグメントへの組み込みイメージを示す。図2（左）はその開口端と検知者の位置関係を示す。図2においてはトンネル延長方向へのセグメントの接合ずれを検知する目的で、アラインされた導波路が描かれている。このような構造を取らせることにより、掘削端よりはるか地上部に近い位置において接合ずれが起きた際も、消光を確認することで迅速にそれを知ることができる。この構成についての意見収集の結果、掘削中はこのような断面方向から掘削端を観察する状況が極めて稀であるということであったため、図2のような構成は少なくとも実現性が低いことがわかった。ただ、セグメントのアライメント作業は作業者の目視が中心であるため、アライメントの補助としては当センサーが有効であると考えられる。

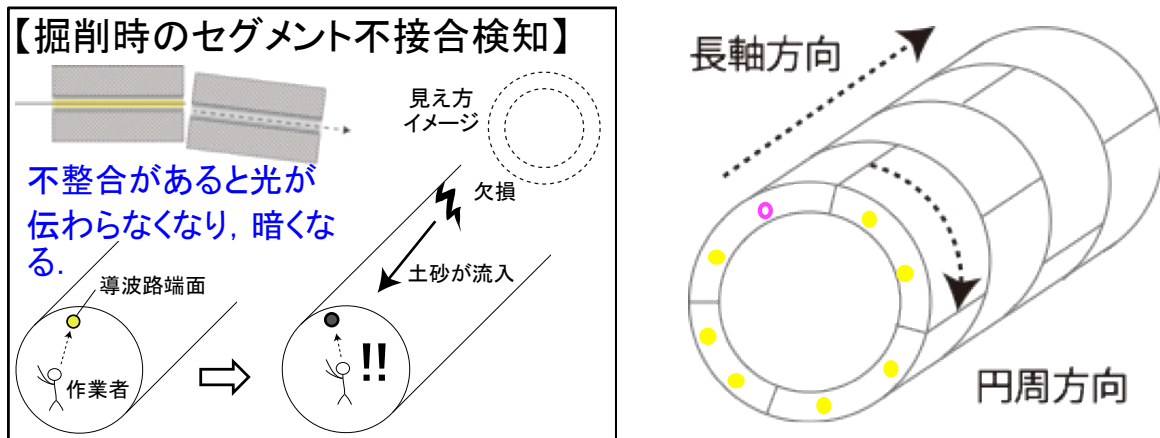


図2：導波路埋蔵によるセグメントずれの検知（左）、および掘削端における導波路開口端のイメージ（右）。

3. 他の構造物の点検への応用可能性の調査

3-1. NATM 工法のトンネル

NATM 工法のトンネルは、シールドトンネルと異なり、掘削中に加え、掘削後も形状が安定しないケースが多い。詳細については、平成28年度に実施した現場見学をもとに前年度の報告書に記した。このように、形状が安定しない場合は、工期に間に合わせるという事情もありながら、同時に安全性を確保しなければならない。このことから、トンネル形状のモニタリングは極めて重要であり、当センサーが有効となる可能性がある。一方、前述したシールドトンネルの例と同様に、トンネル壁を断面方向から観察することは作業工程上ほぼ無いという点から、トンネル延長方向に沿った導波路の敷設は実現性が低い。一方、ロックボルトなどに添わせて埋め込むという構成は、センサーの開口端がトンネル内部から視認できるため、有効である可能性があるという意見を得た。図3にロックボルトの打設風景と断面図を示す。この打設する深さは場合によって異なるが、少なくとも穴が直線状に伸びており、全長で10メートル程度もしくはそれ以下であることが想定される。この構成は、光ファイバー導波路センサーを直線状に設置することができるため、初期の応力についての懸念がなく、また、長さにおいても高損失な有機母材であっても条件によっては十分に終端まで光を伝搬させることができる。ただ、光源の取り方などについては検討課題が残る。



図3：ロックボルトの打設風景（左）、同断面図（右）[平成28年度報告書より]。

3-2. 擁壁

トンネル以外への適用性として、擁壁への導入が有効である可能性があるという意見があった。擁壁には多岐にわたる種類が存在し、それぞれ強度、工法、コストなどに長所短所を持つ。斜面の特性に合わせて最適なものが選択される。特に、斜面奥に異なる地質の層断面が存在する場合などは、それを境界として地滑りなどが起きやすい。このような層を横断する形で、数メートルの規模で導波路センサーを埋め込むことで、地質を縫い付けるアンカーとしての役割と斜面奥の地層の動きの監視が同時にできる。敷設の構想としては、前項のロックボルトに近い。よって、同様に光源の確保については検討が必要である。また、擁壁についてはトンネルと異なり野外での利用が想定されるため、太陽光環境と照明光環境という相違があり、光源の取り方や視認性という点で検討の方向が異なってくる。

また、擁壁と関連して橋台への適用可能性についても意見があった。橋台は、トンネルや擁壁と異なり、地上に露出している部分が多いため、位置によっては光ファイバー導波路を貫通させた構造を取ることができる可能性がある。これは、太陽光を光源として利用するためには適した構造であると言える。一方、橋梁のような大型インフラの場合、保守点検に極端なコストカットをするケースは想定されにくく、本技術のように光源と光ディテクターを省くような究極的なコストカットをした検知技術よりも、BOTDRなどの既存技術の方が適すると言える。また、インフラの寿命が長いことから、センサーの定期交換が必要になる。あるいは海外などで十分な保守点検が行えない事情があり、かつ橋梁が大量に必要な地域などがあれば、導入も検討される。

3-3. 斜面・積雪の崩落

舗装されていない斜面の土砂崩れや雪崩の検知への適用可能性も示唆された。河川の水位や斜面などを包括的に管理するモニタリング用カメラを使った監視網の一環として、導波路センサーで斜面を監視するという構想の提案が企業1社からあった。このような応用への初期検討として、地滑りが起きる前後の斜面のひずみ状態を疑似的に再現するため、ワンシーズンで積載量が増減する積雪を利用したフィールドテストを行った。フィールドテストの詳細については、後の項目に記した。

3-4. 山留め・支保工

導波路センサーの山留め・支保工への有効性についても専門家から言及があった。また、この応用構想については、研究期間中に建設会社一社と共同研究が開始し、後の項目で述べる敷設に関する初期検討を行った。山留めは、下水管に関する作業など、一時的な地中作業を行う際に、周囲の土砂が空乏へ流れ込むのを防止するものである。山留め・支保工のデザインは、構造計算によって決定されるが、工期中に想定よりも雨量が多かったなどの不測要素の影響も大きく、想定以上の力がかかり、防壁が変形することも想定される。この変形は地道な測定によりモニタリングされているが、今後この工程の簡略化が望まれる。あくまで仮設であるため、導波路母材の寿命や耐久性について、そこまで高いレベルを問われないという点、安価でディスポーザブルが望ましい点、などからポリマー光ファイバーの適用に好適といえる。

山留め工法において、山留め壁の変形挙動にも多岐にわたるパターンがあるということであった。このような理論モデルが存在するため、これを利用して、あらかじめ倒壊が起きないとされる土留め壁の

深さなどの寸法の算出がなされる。一方で、過剰な補強は非効率であるため、安全とされるボーダーラインは技術者によって決定される。山留めはこのようなプロセスで設置されるため、一部、不確定要素を含んでおり、現地でのモニタリングが不可欠である。現行のモニタリング法の一例として、現場ではピアノ線を張って、山留め壁との距離を一定間隔で計測する手段などが取られている。この工程を視認検知で簡略化できないかという要望が企業1社よりあった。

この要望の一環として、H形鋼あるいは矢板に沿って導波路センサーを敷設することを想定した初期の検討を実施した。また、類似の適用可能性として、薬液注入時の周囲の形状計測、道路の舗装に関する沈下・たわみ計測、コンクリートひび割れに関するひずみ計測などが挙げられ、実現性について初期検討が開始した。

4. フィールドにおける初期検討

4-1. 積雪下への敷設

未舗装の斜面への適用の初期検討として、積雪を利用した敷設実験を行った。ロケーションとしては、土砂などの荷重の増減の検知のモデルとして、ワンシーズンで積載量の増減が見込める積雪環境を選択した。ある程度の積雪量が見込め、かつ光学/電気設備へのアクセスが可能という点から、北海道千歳市のフォトリックサイエンステクノロジー株式会社の敷地を利用した。図4に敷地の全景を示す。



図4：ファイバー敷設現場の全景。
敷設前（上段左）、敷設後（上段右）、および降雪後（下段）。

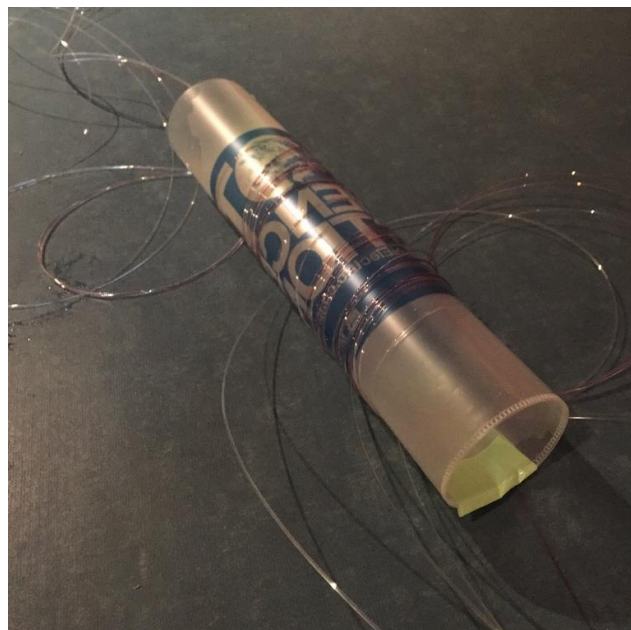
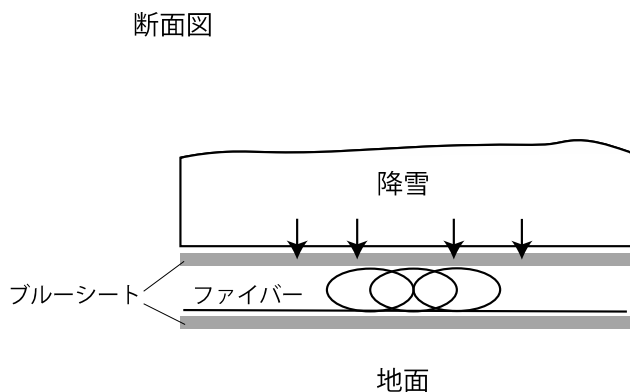


図6：応力印加部のレイアウト。弾性のある円筒形プラスチックフィルム（直径6センチ）にファイバーを5周巻きつけ、ブルーシート間に設置した。降雪により、円筒がつぶれ、ファイバーループに長軸方向の力が加わる。

今回の初期検討において、主な検討項目は、以下の三点とした。

- ① 野外環境および低温環境に対する有機物（アクリル樹脂およびエラストマー）の耐久性の確認
- ② 敷設および測定時の取り扱いのしやすさなどの確認
- ③ センサー性能の確認

最終的な考察は融雪後にファイバーの形態を確認してからとなるが、現段階では以下のことがわかっている。

まず、①については、敷設した複数本のうち、数本ほどのファイバーが入出力端付近で破断していることが確認された。強度の問題として、ファイバー径やポリマー鎖の配向条件などの検討が必要であることが示唆された。

②については、色素が添加されたPMMA母材のファイバーの場合、端面からの色素の視認性は良好であった。ただ、今回のように装置で測定するとなると、光学機器の扱いは寒冷地や雨天環境では非常に厳しいことがわかった。逆に、本課題で目標とした視認検知の需要は高いということが示唆された。

③に関連することとして、ファイバー出射光の色調の変化に関して、以下のことがわかった。図7にフィールドで取得したスペクトルの実験室データとの比較を示す。光強度は各ピークが比較しやすいように規格化されている。実験期間中、天候の影響で降雪量が段階的に変調する条件が得られなかったため、ここでは降雪量20センチほどの状態で取得したデータのみを示した。図中、黒線と青線はこのような条件下において、フィールドで取得した値である。黒線と青線は、それぞれ白色光源および青光源

を入射光に使用した場合の出射光スペクトルを示す。青光源は、ドナーの吸収ピークに合致するもので、[1]で使用した物と同一の光源をフィールドに持ち込んだ。まず、これらの波形においては、ドナーとアクセプターの両ピークにおいて、トップが削れた波形となってしまった。これは、光強度が受光器の検出限界を超えるほど強かったためである。青光源、白色光源ともに光源側で出力強度を増減することができる仕様であるが、その範囲で入力の光強度を増減させても、図7のスペクトルに差はほぼ見られなかった。なお、図7のフィールドデータは、光源の強度を最大にした場合のものである。また、光源別に波形に大きな差が見られなかった。このことから、光ファイバーの破断が起きている、あるいは、太陽光をクラッド外から取り込んでいるなどの懸念が示唆された。

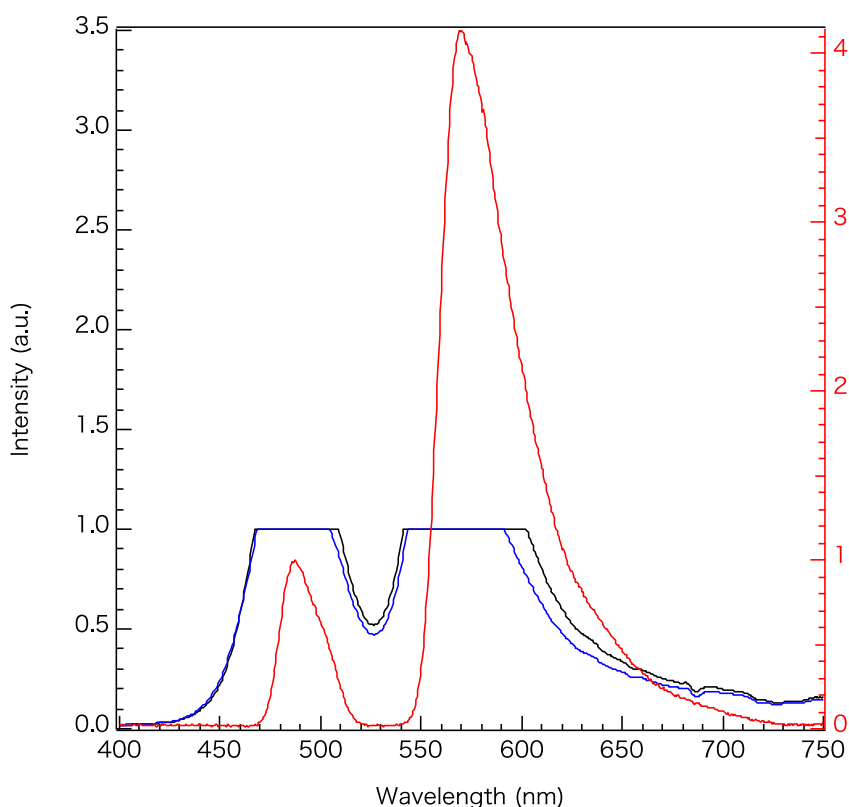


図7：フィールドおよび実験室で得られた波形の比較。それぞれ、測定場所と光源別に、フィールド・白色光源（—）、フィールド・青色光源（—）、実験室・青色光源（—）を示す。

また、図7の赤線は、実験室で青光源を入射光として使って得られた波形を示す。実験室では、ファイバー長1メートル、3センチ直径のループへ巻きつけた条件で波形を取得した。フィールドの波形と比較すると、480 nm付近にあるドナー蛍光体の発光ピークは、ほぼ同じ箇所に見られた。一方、実験室での測定において520 nm付近に得られたアクセプター蛍光体の発光ピークが、フィールドのデータではやや短波長側に現れる傾向が見られた。この原因は現段階で十分に考察できていないが、実験室は暗室環境であるのに対し、フィールドでは十分な遮光がされていないため、太陽光をクラッド壁外側から取り込んでいる影響が考えられる。あるいは、両測定でファイバー長が異なること、および温度や応力などの環境の相違によりコア-クラッド間で光授受の挙動が異なった、などが原因として考えられる。低温の野外環境に晒されたことで、色素や母材ポリマーが変性した可能性も残されている。

これらを総合すると、光ファイバーの破断、太陽光の取り込みなどが、波形に影響を及ぼしている可能性が高い。これは、雪が無くなった状態で改めてループ部の状態などを確認してから考察する必要がある。仮にこれらの要因が影響しているとする、積雪を利用したフィールド実験においては、今回の測定はセンサーの有効性を議論するには情報として不十分である。その場合、今回の教訓を反映させ、さらに実験系を工夫し、再検証する必要がある。

4-2. コンクリートへの埋め込み

山留め支保工のたわみ計測や硬化後のコンクリートのクラックやひずみ計測などへの適用性を判断するため、コンクリートへの光ファイバーの埋没テストを行った。まずは、最も一般的な全断面掘削工法を想定し、土留め壁に光ファイバーセンサーを設置できるかについて検討を行った。

モデル実験を計画するに当たり、どのような破壊を想定するかを決める必要があるが、このように、破壊挙動についてもバリエーションがあり、モデル実験として一本化することは困難であった。したがって、目下、共同研究先の企業より提示された、5～6メートル区間で1～2センチほどのたわみを検出することを第一目標として採用した。この目標を踏まえて、今回は、実験室で実現可能なスケールとして、全長3メートルのポリマー光ファイバーセンサーのうち、中央1.5メートルをコンクリートへ埋没させた。図8にその写真を示す。

今回の検討では、硬化前後での伝搬光の変化を中心に評価を行った。結果として、今回の寸法においては、プライマーなどの試薬をポリマーとコンクリート間に介せずとも、強い密着性が得られた。また、コンクリート硬化による光ファイバーへのダメージは、現段階ではそれほど大きな兆候は見られていない。一般的な支保工工事期間は十分に耐久性を持つものと思われる。今後は、実際のたわみを想定して、5～6メートル区間で1～2センチほどのたわみを検出するための検討を進める。



図8：ポリマー光ファイバーを埋没させたコンクリート平板。

6. 結論

最終年度となる本年度は、開発した視認式光ファイバーひずみセンサーの適用可能性を調査することを目的とし、専門家からの意見収集および実装についての初期検討を行った。シールドトンネルへの導入に関しては、開口端の位置をセグメント側面に設けるべきではないことなどが参考意見として得られた。それ以外の適用可能性としては、斜面、山留め支保工などが挙げられた。これらの実現性を探るために、光ファイバーセンサーを使い、積雪を利用した敷設実験およびコンクリートへ埋没させた板の作製評価などを実施した。事業者との共同研究が1件スタートし、次年度以降に更に具体化した検討に進む予定となっている。また、他に1件、事業者とコミュニケーションという形態で実装実験についての情報を一部共有している。

7. 知的財産権取得状況

特許出願 0 件

8. 研究成果発表実績

1) 論文発表

国内 0 件、海外 1 件

[1] Strain sensing based on radiative emission-absorption mechanism using dye-doped polymer optical fiber 共著 So Kamimura and Furukawa Rei APPLIED PHYSICS LETTERS 111, 063301-1-063301-4 2017/08/09 0003-6951 10.1063/1.4998738

2) 口頭発表

国内 3 件、海外 2 件

[2] ドナー/アクセプタ蛍光体添加ポリマー光ファイバーの出射 光スペクトル解析 第 66 回高分子討論会 上村創、古川怜 2017/09/20

[3] [招待講演] ひずみ「見える化」へ向けたポリマー光ファイバーセンサー 古川 怜・上村 創（電通大）・福田伸子（産総研）・佐々高史（理研）電子情報通信学会 OME 研究会 2018/2/22

[4] エラストマー光ファイバーの実現へ向けた材料探索及び試作 廣瀬智絵・古川 怜（電通大）・福田伸子（産総研）・佐々高史（理研）第 65 回応用物理学会春季学術講演会 2018/3/20

[5] Stress Detection Using Polymer Optical Fiber with FRET Pair Dyes 232nd ECS Meeting 有 R. Furukawa and S. Kamimura 2017/10/04

[6] Stress sensor based on radiative emission-absorption mechanism using dye-doped polymer optical fiber, The 17th International Symposium on Advanced Organic Photonics (ISAOP-17) R. Furukawa and S. Kamimura 2017/10/11

3) その他（研究内容報告書、機関誌発表、プレス発表等）

・イノベーション・ジャパン 2017 国立研究開発法人科学技術振興機構、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 2017/08/31 東京ビッグサイト

・スマート QOL (Quality Of Life) 新技術説明会 科学技術振興機構、首都圏産業活性化協会、首都大学東京、電気通信大学、埼玉大学、青山学院大学、芝浦工業大学、東洋大学 2017/09/07 JST 東京本部別館 1F ホール（東京・市ヶ谷）

・「ポリマー光ファイバーで挑戦する民間の防災 -有機材料の利点を生かして-」オプトロニクス 2018 年 01 月 16 日

・「ポリマー光ファイバー業界・若手の苦悩と挑戦」新川電機株式会社 SHINKAWA TIMES 2018 年 2 月 6 日、3 月 6 日

9. 参考文献

- [7] 「道路土工仮設構造物工指針」 社団法人 日本道路協会（平成11年3月）
- [8] 「土木の要点③ 基礎構造物/地中構造物」 鹿島建設 土木設計本部編 鹿島出版会