プラスチックファイバーセンサーを利用した地下鉄トンネルの漏水検知事例

伊藤　聡[1]・小西　真治[2]・今泉　直也[3]・榎谷　祐輝[4]・田中　大介[5]・
水原　勝由[6]・町島　祐一[7]・芥川　真一[8]・増本　智紀[9]

[1]正会員　東京地下鉄株式会社　工務部（〒111-8614 東京都台東区東上野三丁目 19 番 6 号）
E-mail: sato.itou@tokyometro.jp

[2]正会員　東京地下鉄株式会社　工務部（〒111-8614 東京都台東区東上野三丁目 19 番 6 号）
E-mail: s.konishi.r4r@tokyometro.jp

[3]非会員　東京地下鉄株式会社　工務部（〒111-8614 東京都台東区東上野三丁目 19 番 6 号）
E-mail: n.imaizumi@tokyometro.jp

[4]非会員　東京地下鉄株式会社　工務部（〒111-8614 東京都台東区東上野三丁目 19 番 6 号）
E-mail: y.enokidani@tokyometro.jp

[5]非会員　東京地下鉄株式会社　工務部（〒111-8614 東京都台東区東上野三丁目 19 番 6 号）
E-mail: d.tanaka@tokyometro.jp

[6]正会員　地域地盤環境研究所（〒113-0034 東京都文京区湯島 1 丁目 8 番 4 号）
E-mail: mizuhara@geor.co.jp

[7]正会員　株式会社　レーザック（〒124-0002 東京都葛飾区西亀有 1 丁目 5 番 3 号）
E-mail: machijima@lazoc.jp

[8]正会員　神戸大学教授　大学院工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail: cadax@kobe-u.ac.jp

[9]学生会員　神戸大学　大学院工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail: 193T132t@stu.kobe-u.ac.jp

地下鉄トンネル内において漏水検知の為に独自に設計されたプラスチック製光ファイバーセンサーの実用性を評価するための試験的な調査を行った．数十年前に建設された地下のインフラに対して効果的な保守作業を行うためには，劣化を進めると考えられているコンクリート構造物の亀裂からの漏水状態を効果的に把握することが不可欠である．今回実施した調査の結果は，提案するセンサーが実験室と現場の両方で漏水を検知することができることを示しており，老朽化したコンクリート構造物の保守作業に必要な漏水状況の把握目的に効果的に適用できることを示している．

Key Words: *Metro tunnel, concrete wal, crack, water leakage, plastic optic fiber sensor*

１．はじめに

東京メトロは計 195km の都市の鉄道網を運営しており，そのうち 167km は地下に存在している．地下において，トンネル内のひび割れから発生する漏水は適切な処置が行われない場合，コンクリートの損傷や鉄筋コンクリート内の鉄筋の発錆につながる可能性があるため，メンテナンスの必要が発生する．したがって，定期的な調査とメンテナンス作業を適切に計画し実行するために，漏水挙動の経時変化を適切に把握することが重要であると考えられる．

プラスチック製の光ファイバーで製作された水検知センサーが芥川ら [1), 2)]によって提案されており，それによって水の存在を明確に識別し記録することができることが分かっている．この方法は，例えば Hill ら [3)]，Meltz ら [4)]，Funnel ら [5)]が行ったようなガラス製光ファイバーによる分布型センシング法とは異なり，プラスチック製光ファイバー（Plastic Optic Fiber, 略称 POF）の先端で光情報を記録するもので，恰も POF を画素数 1 のデジカメのように使用する方法である．このセンサーは，光情報取得部位が接着された 2 本の POF からなり，その先端を 45° に切断することで作られる．芥川ら [1), 2)]はこのセンサーが非常に敏感に水の存在を検知できることを確認しており，**図-1** に示されるようなコンクリート表面の湿潤状態のわずかな違いを経時的に記録することができる．本報告では，実験室と現場で実施した一連の水分検知事例について紹介し，このセンサーがどの

図-1　一般的なトンネル内コンクリート壁の湿潤表面の外観

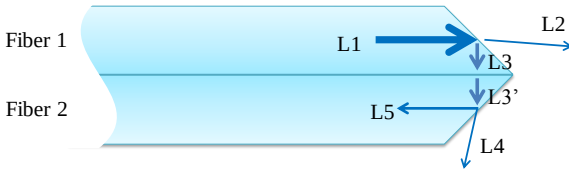


図-2　水を検知するための RR センサー

ように機能し重要なメンテナンスの問題に対して効率的かつ確実に漏水検知ができるかを示す.

２．POF センサーによる水分検知の方法

ここで用いる水分検知センサーは，2 本の POF（それぞれ，直径は 1mm）を使用した新しいセンサーであり，その形状は図-2 に示されている．このセンサーは物理学における光の反射（Reflection）と屈折（Refraction）の原理に基づいて作動するため，それらの頭文字をとって RR センサーと呼ぶこととする．このセンサーでは，光はまず L1 として示されるようにファイバー1 に送られ，その一部は L2 として屈折してファイバー1 を出て，残りは L3 としてファイバー1 内部で反射する.

その後，L3 の光はファイバー1 の側面に到達し，一部は反射され残りはファイバー1 から放出される．ファイバー1 を出たばかりの光はすぐにファイバー2 の側面に到達し，そこで一部が反射され残りは L3’ としてファイバー2 に入射する．L3’ もファイバー2 の側面に到達しファイバー1 と同様の現象が発生し，最終的には L5 が光専用データロガーに記録される．この時，L5 は POF（屈折率 1.49）と周辺物質の光の屈折率の差Δｎに依存する量になるため，周辺物質が空気（屈折率 1.000）か水（屈折率 1.33）であるかの違いが分かることになる.

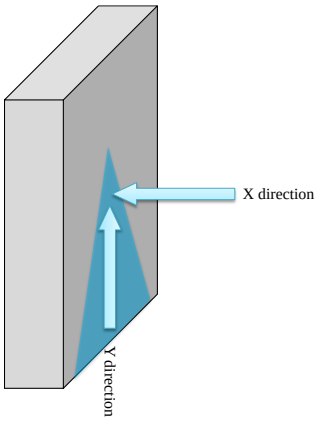


図-3　基本的な漏水検知の方針

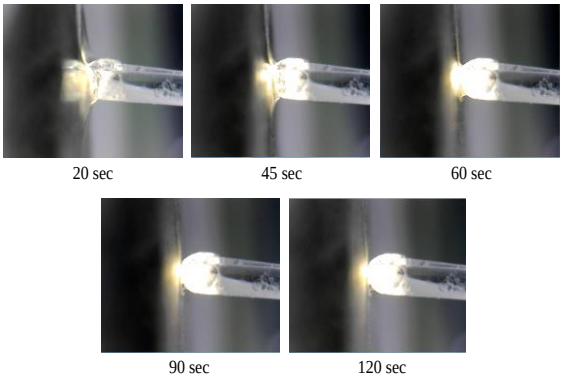


図-4　計測面に対して垂直に設置した RR センサー周辺の水の挙動

３．室内実験

(1) RR センサーを計測面に垂直に配置した例

図-3 に示すように，漏水が発生している面を対象に RR センサーを配置する際，面に垂直な方向（X 方向）と平行な方向（Y 方向）での設置を考えることが出来る.

最初の室内実験では，図-3 の X 方向に設置された RR センサーの先端が水平を保ちながらコンクリート板の表面と一点で接するように設定した．その後，数滴の水を接点に与え，水が壁に沿って落ち，時間の経過とともに蒸発し消える現象における光強度の測定を行った．この過程で撮影された写真が図-4 である．水を与えて 20 秒後，水の表面張力によって RR センサー先端の表面積のほとんどが水中にあり，そのことによって光強度（Light intensity）が下がる現象が確認された．時間が経過するにつれて，水によって覆われる表面積が減少し続け，図-5 に示されるように RR センサーによる光強度も継続的な増加傾向が見られた．また，水と触れる前の光強度に戻るまで約 1 分かかった.

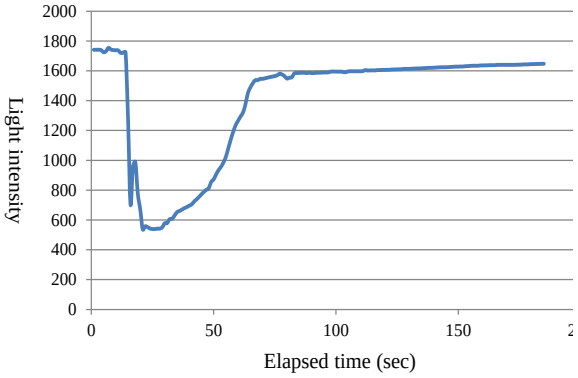


図-5　水平に設置された RR センサーによる光強度の変化

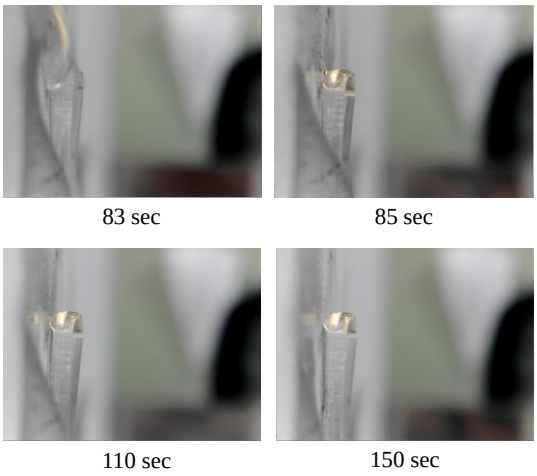


図-6　垂直に設置された RR センサー周辺の水の挙動

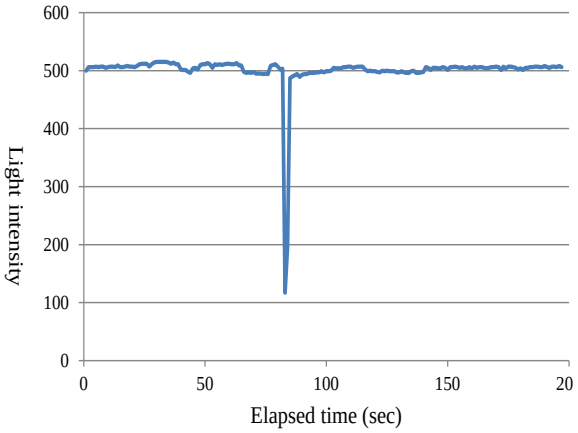


図-7　垂直に設置された RR センサーによる光強度の変化

(2) 垂直に設置された RR センサー周辺の水の挙動

次の実験は，**図-3** の Y 方向に設置された RR センサーがコンクリート板の表面と平行になるように設定する．計測開始から 80 秒ごろに数滴の水をセンサーに与えた．**図-6** は水がセンサー先端部分付近に長くとどまらず，急速に落ちたことを示している．計測された光強度もこれを裏付けおり，グラフ中の急激な変動がこれを示している．

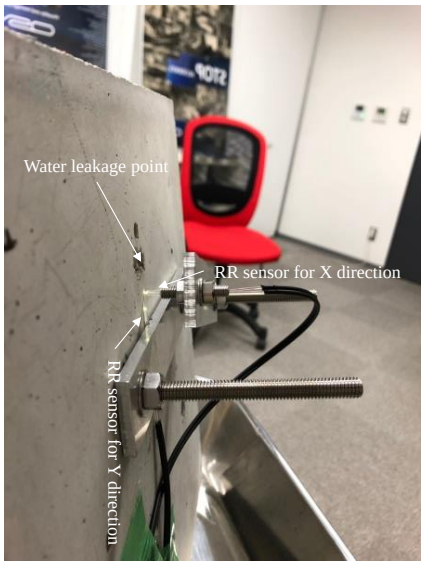
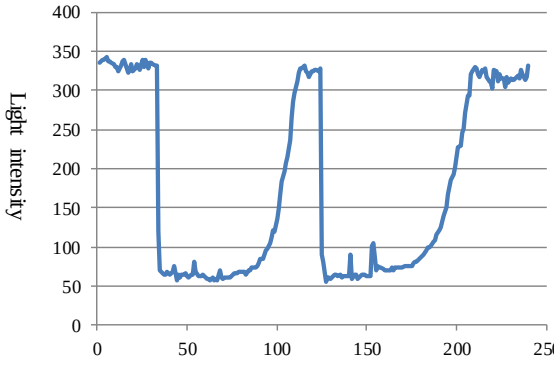
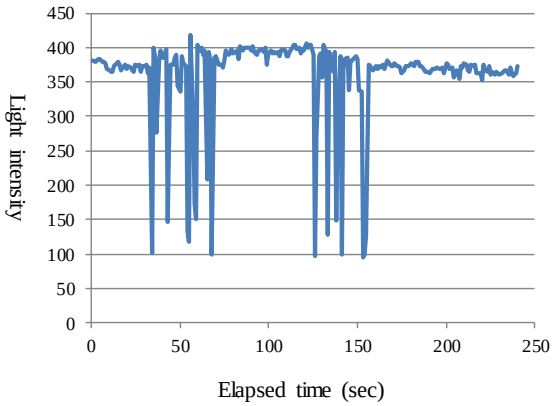


図-8　実験の外観



(a) X 方向に設置した RR センサーの記録



(b) Y 方向に設置した RR センサーの記録

図-9　RR センサーによって記録された繰り返し発生する水漏れに関する光強度の変化

(3) 固定治具を使用した漏水のモニタリング

2 種類の方向に設置されたセンサーの感度は確認できたため，新たに開発した固定治具を使用して追加の実験を実施した．**図-8** に示すように，2 つの RR センサーがそれぞれ X，Y 方向に設置されたコンクリート板を用意した．漏水点として板に小さな穴を

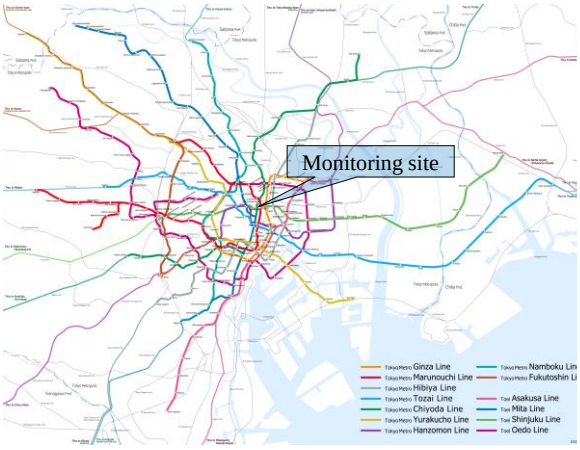
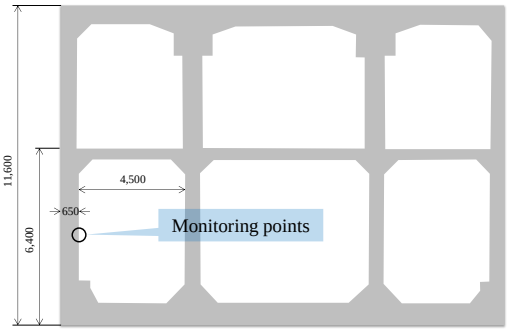
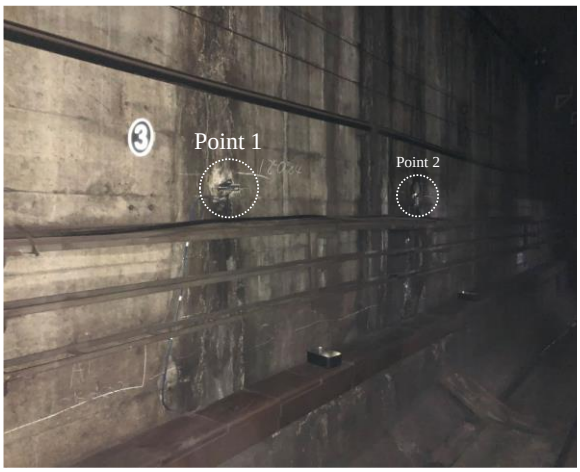


図-10　モニタリング現場の位置



(a) 断面図（単位：mm）



(b) 2つのモニタリングポイント

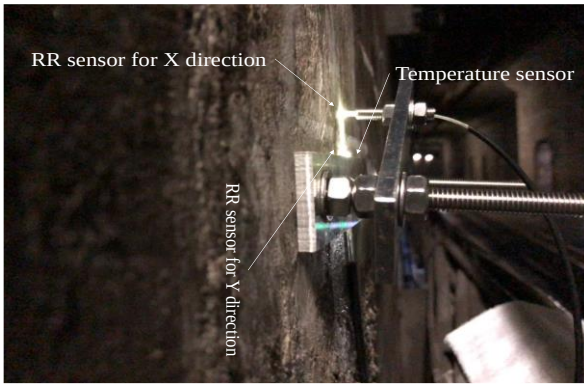
図-11　計測現場の断面図と2つのモニタリングポイント

開け，そのすぐ下に RR センサーを 2 方向に配置した．コンクリート板の裏側の穴から水を供給し，それが表側から漏れるようにして，RR センサーで計測を実施した．水は2段階で供給し，RRセンサーはそれぞれ X 方向（図 9-a），Y 方向（図 9-b）の光強度を的確に記録できることを確認した．

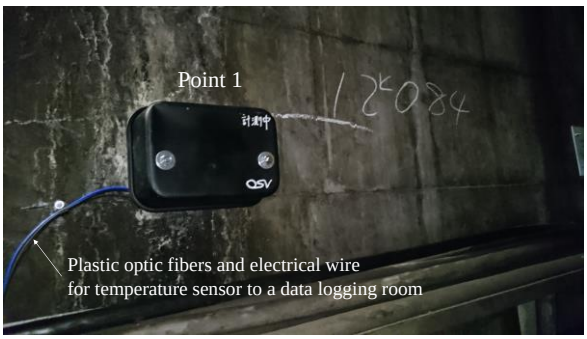
4．現場計測

(1) モニタリング現場の概要

漏水のモニタリングを行うために，図-10 に示す



(a) X, Y 方向に RR センサーを設置



(b) 電車からの光を遮断するためのカバー

図-12　RR センサー設置の外観

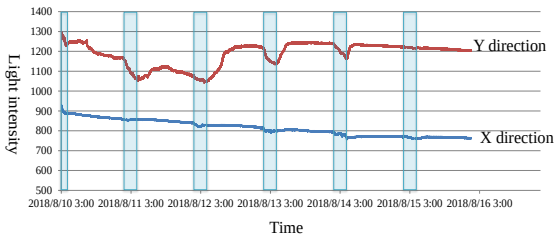


図-13　1週目に観測された測点1の光強度

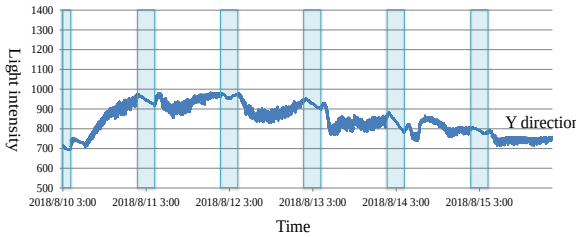


図- 14　1週目に観測された測点2の光強度

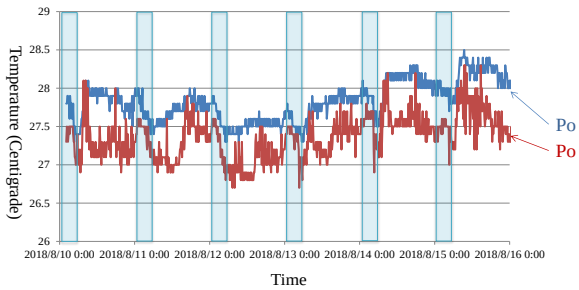


図 -15　計測間隔が 10 分の 1 週目の気温データ

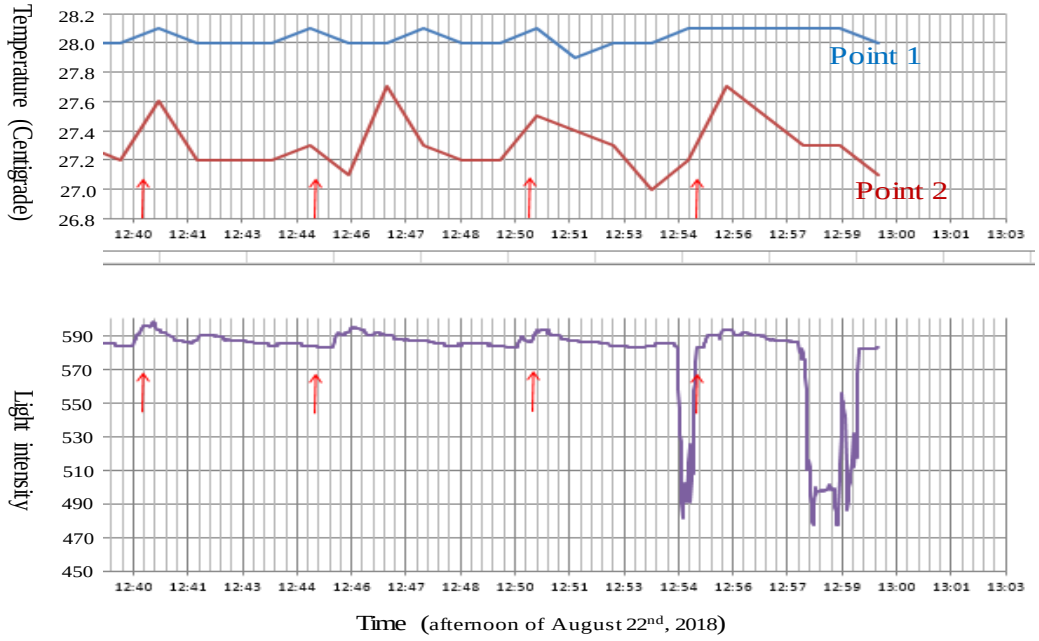


図-16 通過する列車とデータの変動の詳細

ように東京メトロの開削トンネル内の現場を選定した．

図-11 (a) のような二層コンクリート構造は1969年に建設され，以後50年近くにわたって使用されている．構造物の上の土層の厚さはおよそ 7m で，地下水面はコンクリート構造体上端よりも上部にあると考えられる．**図-11 (b)** に示すように，2 つの測点を設置し，測点 1，2 とした．

各測点について，コンクリート表面に蓄積した残留物を始めに除去し，室内実験で使用したものと同じ取り付け治具を使用し，**図-12**（a）のように X，Y 方向の二つのセンサーおよび温度センサーを設置した．すべてのセンサーを装置に取り付けた後，電車からの光が測定プロセスを妨げないように，**図-12**（b）の黒い箱でセンサーを覆った．データの記録は，測点から約 25m 離れた部屋で行った．

(2) 計測結果

計測開始（2018 年 8 月）から 1 週間の計測結果が**図-13，14，15** である．図中の青い領域は電車が走っていなかった時間帯を表している．**図-13** のように X，Y 方向の光強度は測点 1 において首尾よく記録された．X 方向の光強度は 1 週間でなだらかに減少する傾向が見られた一方で，Y 方向の光強度は温度変化に関連すると考えられる多くの変化が見て取れた．また，1 週目の測点 1 では漏水の兆候が見られなかった．

測点 2 における X 方向の光強度は，POF の損傷による問題で記録ができなかった．測点 2 での Y 方向の光強度は，測点 1 の Y 方向で観察された光強度と同様の変動が見られた．さらに，データは 1 日の計測の中で細かい変動を示した．したがって，測点 2 の光強度のデータを詳細に考察するために，2018 年 8 月 22 日の約 30 分について 1 分ごとに採取された光強度のデータを温度データと共に示したものが**図-16** である．赤い矢印は，測点の前を電車が通過する予告時間である．

この区間を通過した最初の 3 つの列車では，温度と光の強度は少し上昇する傾向にあり列車の通過後に通過前の記録とほぼ同等になる．4 つ目の列車も同様に気温は上昇したものの光強度は急激に低下した後，元の水準に戻った．また，12 時 57 分から 12 時59分の間にも同様の急激な光強度の低下が見られた．この光強度の低下は，次のような点から漏水の指標であると考えられる．

1) 光強度の低下のタイミングは電車の通過とは無関係である．
2) 光強度は上昇するのではなく低下し，その変動量は通過する列車の影響と思われる変動よりはるかに大きいものだった．
3) 光強度のグラフ形状は，**図-7**，**図-9**（b）に示されるように室内実験での漏水について記録された形状と類似していた．

次に，8 月 20 日から 23 日までに記録された光強度が**図-17** である．測点 1 の場合，記録された光強度は X 方向にはほとんど漏水が無いことを示唆している．一方，測点 2 で Y 方向に記録された光強度は多数の下向きの変動を示し，漏水が列車の走っていない期間を含み複数のタイミングで発生したことを示している．これらのデータを温度環境，地下水位の変動，亀裂幅の変動などと時間的に相関させることで，将来の保守作業を改善するための有用なデータとなると考えられる．

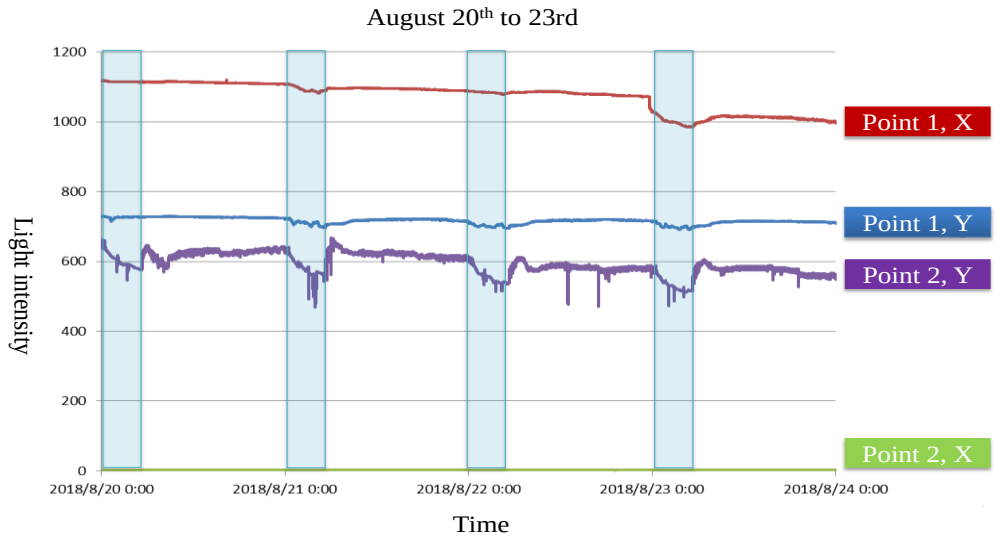


図-17　8 月 20 日から 8 月 23 日の光強度の記録

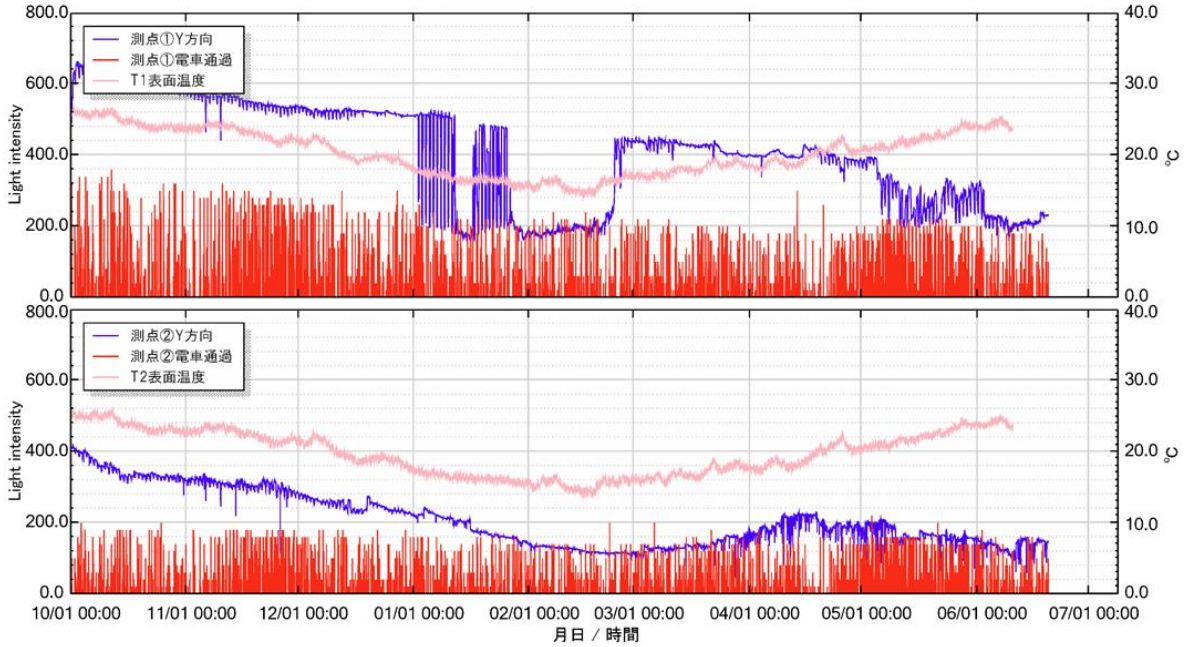


図-18　2018 年 10 月 1 日から 2019 年 6 月 19 日までの計測データ

また，図-18 は 2018 年 10 月 1 日から 2019 年 6 月 19 日までの計測データである．この段階では，漏水の確認には Y 方向の RR センサーだけで十分に目的が達成されることが確認済みであったため，それぞれの測点において，壁に垂直な方向（X 方向）に設置した RR センサーを取り外し，その POF の 1 本を通過する電車の方向に向け，電車通過のタイミングを光で確認するように計測を実施していた．従って，図-18 には，それぞれの測点での Y 方向に設置した RR センサーによる漏水に関する情報（青い線），温度（ピンク色の線），電車通過の記録（赤い棒グラフ）が表示されている．

この期間（約 9 ヶ月）において，測点 1 では 12 月までは漏水の程度は小さく，2019 年 1 月になると漏水の頻度が急激に高くなっていることが分かる．また，2 月には青い線がずっと下がったままになっており，RR センサーの先端が濡れっぱなし，すなわち漏水現象が連続的に生じていた可能性が示唆されている．3, 4, 5 月には漏水現象は一旦落ち着き，6 月以降には再び，漏水が多くなっていることが伺える．このように，もっとも気温が低くなった時期と，降雨が多い時期に漏水が多く発生している現象はこれまでの現場経験とほぼ一致しており，RR センサーが捉えた情報が概ね漏水現象を正しく捕らえていることが推察される．

また，測点 2 については全体を通じて漏水現象があまり発生していなかったことが分かる．なお，両方のグラフにおいて RR センサー捕らえた光強度の

ベースラインと，その場所で記録された温度のラインの全体的な形状が類似しているため，これらの間に相関があることが推察される．この点と，降雨データと漏水データの関係解明などが今後の課題として位置づけられる．

5. おわりに

本報告では，独自に開発したPOFセンサーであるRRセンサーを用いて，漏水検知への適用性を検証した．室内実験では，RRセンサーがコンクリート表面で模擬的に再現した漏水現象に対して，的確に水の存在を検知できることを確認した．また，現場での適用例として築50年の地下鉄トンネル内に設けた2ヶ所の測点において漏水検知を実施し，測定場所の違いによる漏水現象の違い，あるいは地下鉄構内の温度の季節変動，また，周辺地盤の地下水の状況などによって漏水現象が変化している様子が確認でき，これが経験的に蓄積されているこれまでの知見と整合することが分かった．今後は，このようなデータが地下鉄インフラの効果的な維持管理業務の遂行に有効に使用されるよう見当を重ねると共に，異なる形式で建設されている箇所，特にシールド区間においても基礎的な漏水現象の計測を企画してゆく予定である．

参考文献

1) Akutagawa, S. , Machijima, Y. , Sato, T. & Takahashi, A. 2017. Experimental characterization of move-ment of water and air in granular material by using optic fiber sensor with an emphasis on refractive index of light. Proceedings of the 51st US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium . ARMA 17-313. San Francisco.
2) Akutagawa, S. & Y. Tanaka. 2018. Experimental observation of hardening process of engineering materials by optic fiber sensor. Proceedings of the 52st US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium. ARMA 18-1127. Seattle.
3) Funnell, A. , Xu, X. , Yan, J. , & Soga, K. 2015. Simulation of BOTDA and Rayleigh COTDR systems to study the impact of noise on dynamic sensing. Int. J. Smart Sens. Intell. Sys. 8 (3).
4) Hill, K. O. , Y. Fujii, D. C. Johnson & B. S. Kawasaki. 1978. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection fiber fabrication. Appl. Phys. Lett. 32 (10): 647.
5) Meltz, G. et al. 1989. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. Opt. Lett. 14 (15): 823.

（2019.8.9 受付）

MONITORING OF WATER LEAKAGE BEHAVIOR FOR AGED CONCRETE LININGS BY USING PLASTIC OPTIC FIBER SENSOR

Satoshi ITO, Shinji KONISHI, Naoya IMAIZUMI, Yuki ENOKIDANI,
Daisuke TANAKA, Katsuyoshi MIZUHARA, Yuichi MACHIJMA,
Shinichi AKUTAGAWA and Tomoki MASUMOTO

Tokyo Metro operates a total of 195km of urban rail networks of which 167km is underground. There have been an increasing number of locations where a maintenance care has to be taken with respect to water leakage through cracks in aged tunnel linings, which might occasionally lead to damaged concrete or rusting of re-bars within the lining if proper treatment is not conducted. It is therefore regarded important that water leakage behavior be appropriately grasped over time such that periodical manual investigation and the following maintenance works can be properly planned and executed. An innovative optic fiber sensor is proposed with which presence of water can be clearly identified and recorded. This sensor is made of two plastic optic fibers glued together at their tips that have inclined cut surfaces. These surfaces become sensing planes that can identify presence of water with high accuracy. A series of laboratory tests and field monitoring conducted in Tokyo over the last 12 months are described in this paper to show how this sensor can be applied for an importance maintenance problem with efficiency and confidence.