

On Site Visualization による 安全・危険情報の原位置可視化手法

芥川 真一

モニタリングにおいて取得した情報を、その場で、リアルタイムに表示する On Site Visualization のコンセプトを紹介する。この手法は、通常のモニタリング技術に様々な形態の可視化技術を組み込んだもので、情報が作業員、現場監督、技術者、周辺住民などにリアルタイムに開示されるため、安全・危険情報の共有が可能になり、現場の安全管理システムの合理化に寄与するものである。それと同時に、可視化された情報の取り扱いに関する新しい仕組みを構築することも要求される。

キーワード：モニタリング、リアルタイム、可視化、安全管理

1. はじめに

建設工事や防災に関連するモニタリング技術は進化の一途をたどっている。これらの技術がカバーする問題の範囲は広いと、取り扱うセンサの種類、得られるデータの種類の多岐にわたる。情報化施工という言葉は既に常識語となり、特に大規模な建設工事においては必須となっている。一方で、モニタリングを実施した現場で事故が起こっていることも現実であり、安全管理技術の更なる向上が望まれている。ここでは、モニタリング技術に可視化の技術を組み込んで情報をリアルタイムに共有する On Site Visualization (略称 OSV) のコンセプト¹⁾を紹介するとともに、その装置や適用例について述べ、新しい時代のモニタリングの方向性を探る。

2. 変位を可視化する

OSV に関する技術開発を始めた 2006 年当時は、LED を使った様々な商品が市場に登場しつつある時期であった。そのため、我々は変位の大きさを何とかして、LED の光の色の変化として表現しようと試みた。ペーパークリップやばねなどを利用して、初めて手作りの「光る変位計」を作製し、室内実験を行った。ベニヤ板 4 枚を用意してそれぞれの中心にピンを刺し、それらの間に光る変位計（白を初期状態として伸びる側に 3 色、縮む側に 3 色の合計 7 色を出せるもの）を 3 本セットした。最初の色を白に設定した後に、ベニヤ板 1 枚だけを故意に動かして、3 本の変位計の内、

2 本に伸びが生じるようにした。変位計は伸びの大きさによってリアルタイムに色を変え、初めての可視化実験は成功した（写真一 1）。その後、光る変位計には Light Emitting Deformation Sensor (LEDS) というニックネームをつけた。企業との共同開発が 2007 年度からスタートし、LEDS は数回のモデルチェンジを行いながら様々な現場で適用されている（写真一 2）。



写真一 1 地滑りを模擬した実験



写真一 2 ニューデリーの開削現場で使用された光る変位計

3. ひずみや応力を可視化する

「変位」の次は、ひずみ、傾斜、圧力、温度などの工学で扱う一般的な量を光の色に変換するツールを開発することとした。この目的を達成するために創られたのが写真—3に示す光るデータコンバーター（Light Emitting Converter, 略称 LEC）である。LECを既存のセンサと連結することによって、そこから得られるデータをデジタル処理し、予め指示された閾値と光の色との関係に基づいて、モニタリングの現状を光の色でリアルタイムに表示することができる。また、複数の「センサと LEC のペア」を1台のパソコンにつないで制御し、データを記録することもできるようになっている。写真—4に、ニューデリー市内の地下鉄駅出入り口の開削現場で切梁の軸力や土留め壁の傾斜を監視するために LEC を適用した例を示す。これは、JICA の支援により 2010 年 3 月から 6 月にかけて実施した海外で初めての OSV モニタリング例^{2,3)}である。この写真では、一番奥側に見える LEC が緑になっており、開削現場と近接構造物の間にあるレンガ壁にわずかの傾斜が発生したことが分かる。LEC と既存のセンサ（応力、ひずみ、傾斜、温度、湿度、pH、圧力など）の組み合わせによるモニタリング例は多岐にわたり、その汎用性が各地の現場で受け入れられている⁴⁾。

4. 傾斜を可視化する

ニューデリーでは、橋梁架設工事においても OSV



写真—3 光るデータコンバーター (LEC)



写真—4 ニューデリーの開削現場で使用された光るデータコンバーター



写真—5 加速度センサを使った光る傾斜計

による傾斜データのモニタリングを実施した。実施時期が夏季で、日中の気温が 45℃ を超えることも報告されていたため、加速度センサをベースとした光る傾斜計（Light Emitting Inclination Sensor, 略称 LEIS）を特別に製作し（写真—5）、センサボックス内の温度を常に 50℃ に保つようにして外気温の影響を最小限に抑えるようにした。

LEIS は 3 セット用意し、写真—6 に示す手前側の橋梁桁部に 2 セット、その橋脚に 1 セットを取り付け、コンクリート打設に反応して発生する橋桁の微小な傾斜を監視した。光の表示方法としては工事ヤードの広さ、作業員の動線などを考慮して炎天下でもある程度の距離から光の色を判別しやすい回転式のものを採用した。また、この現場では橋梁の直下に鉄道があり、その信号機と OSV に関する回転灯の光が列車の運転士に混同されないように細心の注意を払った。



写真—6 橋梁仮設工事で LEIS を使用した例

重要構造物の固定点における傾斜の計測と可視化を推進する一方で、ポータブルでモビリティの高い戦略も必要である。測定の頻度や測定期間などが画一的に決められないケース（例えばトンネル内でトラブルが起こりそうな場所が日々変化するケース、資材が搬入され数日間だけその保管状態の安全確認が必要な場合など）においては、ポータブルな装置が必要となる。写真—7はこのように目的に適合する形で開発された、ポケットに入るサイズの傾斜計である。電池式で稼働するため、計りたい場所に置く、固定するなどすればすぐに作動し、傾斜の状態を光の色（3色）で可



写真一七 ポケットに入るサイズの光る傾斜計

視化できる。複雑な工程が日々展開する工事現場などの隠れた危険箇所を気軽に監視したい場合などに適している。

5. 光のパス (= Path) を巧みに使う

OSVによるモニタリングでは、電気を使用する様式の装置とは別に、主に光のパス (= Path) を利用した方法も開発している。レーザーポインターを固定した点に何らかの動き (特に傾斜) があれば、ビームが当たっている場所を監視することによって、その動きの量から傾斜角を特定できる。写真一8、9では、ニューデリーで実施したモニタリングの際に、掘削部に近接する4階建てのビルの傾斜を監視した例を示す。この例では、近接構造物の傾斜を0.9/1000以内に抑えるという管理基準値でモニタリングを実施し



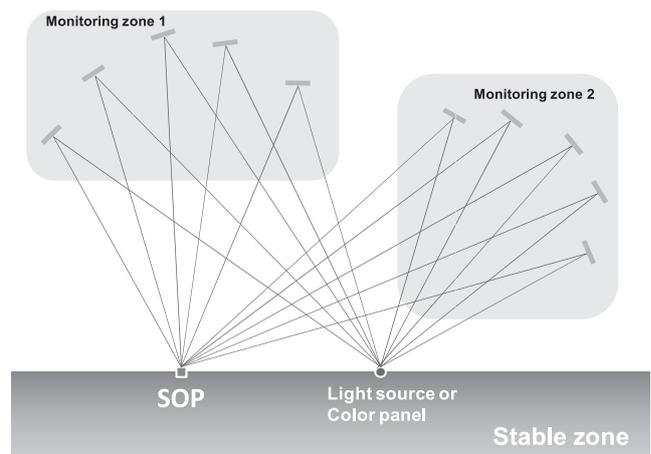
写真一八 ビルの屋上に設置したレーザーポインター



写真一九 約40m離れた場所に設置したスクリーン

た。これは約40m離れたスクリーンに投影された赤いレーザービームの光 (直径8cm程度になっているもの) が、4cm程度 (ビーム直径の半分) ずれるかどうかを監視するというものである。夜間においてはこの作業が十分に行えることが確認された。

OSVによるモニタリングでは現地の状況に関係者に視覚的に公開するのが原則であるが、場合によっては施主側の要望により、可視化された情報を限定的に確認したい場合がある。そのような場合に適したモニタリング手法として、Single Observation Point法 (SOP法) を開発した⁵⁾。SOP法は鏡と光源だけで、計測対象物に生じる変状 (特に傾斜) を可視化し、その情報を限られた観測点 (Single Observation Point) でのみ観測できる方法論である。図一1のように、任意の不動点 (Stable zone 内部) に光源を設置し、変状を計測したい箇所に鏡を取り付ける。そして定めておいた観測点 (SOP) から鏡越しに光源が見えるように鏡の角度を調整する。この形がSOP法の初期状態であるが、この状態から鏡の設置箇所に変状 (特に傾斜) が生じると、光源が見えなくなる。この時、例えば鏡 (円形) の直径を10cm、光源の直径を5cm、観測点から鏡までの距離 (光源から鏡までの距離も同じと仮定) を100mとした場合、光が見えなくなる時の鏡の回転角度は0.0358度になる。鏡や光源のサイズを調整すればより高い精度を実現することも可能だ。用いるのは基本的に鏡と光源のみであるため非常に低コストで広範囲の傾斜モニタリングが行える手法として位置づけられるものである。



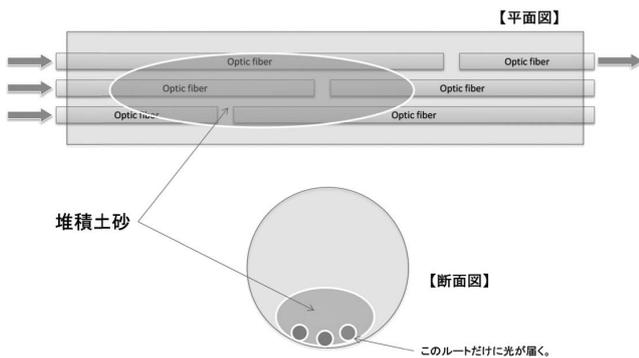
図一1 SOPを適用するときの観測点、光源、鏡の配置関係

6. 光ファイバーを巧みに使う

レーザー光や鏡を使った例では、基本的には光が直線的に飛ぶことを利用している。一方で、可視化され

た情報を直線ではないルートで運ぶ有力なメディアとして光ファイバーがある。どのような現象を、どのような原理で光の情報として捉え、それをどのようにして可視化・分析・記録するかについては様々な方法論が構築可能だ。

「パイプが詰まる」という現象をモニタリングする例を図一2で示そう。この例ではパイプの中に光を通るファイバーのルートを3本設置している。それぞれのルートは、途中にファイバーが途切れているギャップがあるため、ファイバーに光を通した場合にギャップに土砂などの物質がなければ、その光は途中で少し外部に漏れるが、最終的にファイバーの他端まで届く。しかし、ギャップのところに土砂があれば、それが光を遮断するため、光が届かなくなる。この方式で、ファイバールートのギャップの場所に任意物質が存在する、しないの判定ができることになり、結果的にパイプが詰まってゆく過程をモニタリングすることが可能になる。

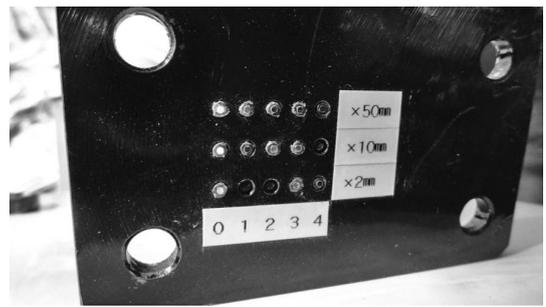


図一2 パイプ内の土砂堆積を監視する方法

太陽光をうまく取り込んだエコな方法も可能だ。写真一10、11は地滑りを監視するための変位計を太陽光取り入れ方式で組み上げた例である。この装置では、特殊なパターンで光を取り入れる窓を設けたガラス板が変位によってスライドし、その下に埋め込んでいる15本の光ファイバーに選択的に太陽光を送り込む方式になっている。窓の位置とファイバー設置位置を巧みに組み合わせることによって、変位量を読み取



写真一10 太陽光を取り入れる窓を施したガラスプレートと装置外観



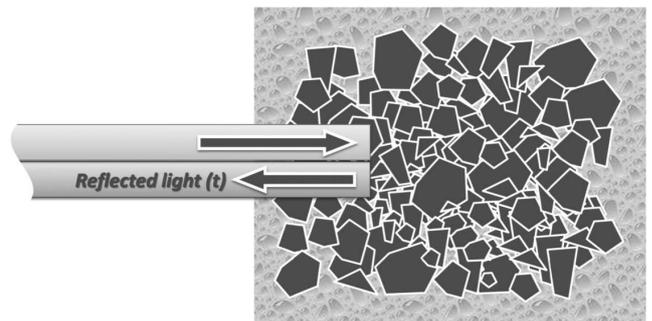
写真一11 光ファイバーの他端を並べたボード



写真一12 ウェブカメラで転送された画像の例

れる方式だ。ファイバーの他端をボードに差し込んで表示板を作ることができるので、太陽光によってそこに表示される情報を視認できる。昼間だけの使用が前提となるが、ランニングコストはゼロであるため、そのメリットを活かせる現場には事欠かない。また、ウェブカメラなどを使えば遠隔監視も可能になる(写真一12)。

ファイバーを2本並べて使用する方法も有用だ。図一3に示すように、1本目のファイバーに光を送り込み、その先端を例えば地盤内部に配置する。先端で放射された光は周辺状況に応じて反射し、その一部が2本目のファイバーに入るため、それを光センサーで記録するシステムを構築することが可能だ⁶⁾。これまでに、地盤材料の動き、注入材料の確認、水の浸透挙動、気泡の存在や移動、液状化挙動などを定性的に捉えられることが分かっており、その適用可能現場は多岐に

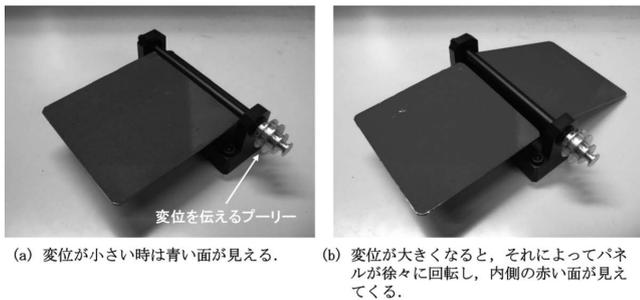


図一3 ファイバー先端での光の反射をデジタル方式で読み取る方法

わたると予想している。なお、この方式は、パイプの詰まりで説明したギャップ方式でも同様に適用できるものである。

7. 無電源装置を使う

低コストで製作でき、無電源で作動する機械式装置も現場では大いに役に立つ。写真—13の装置は任意2点間に生じる相対変位を回転に変えて表示するものである。最初は青い面が見えていて、変位の増大によってそれが回転し、最終的には当初の2倍の面積に赤い面が現れる。特殊な再帰反射塗料を塗布しているため夜間には一際視認がしやすくなる。このような装置は簡単に装着でき、故障も少ない為、現場では使いやすい。このようなコンセプトは変位だけでなく、傾斜のモニタリングにも適用できるものであり、様々な装置をデザインすることが可能であろう。



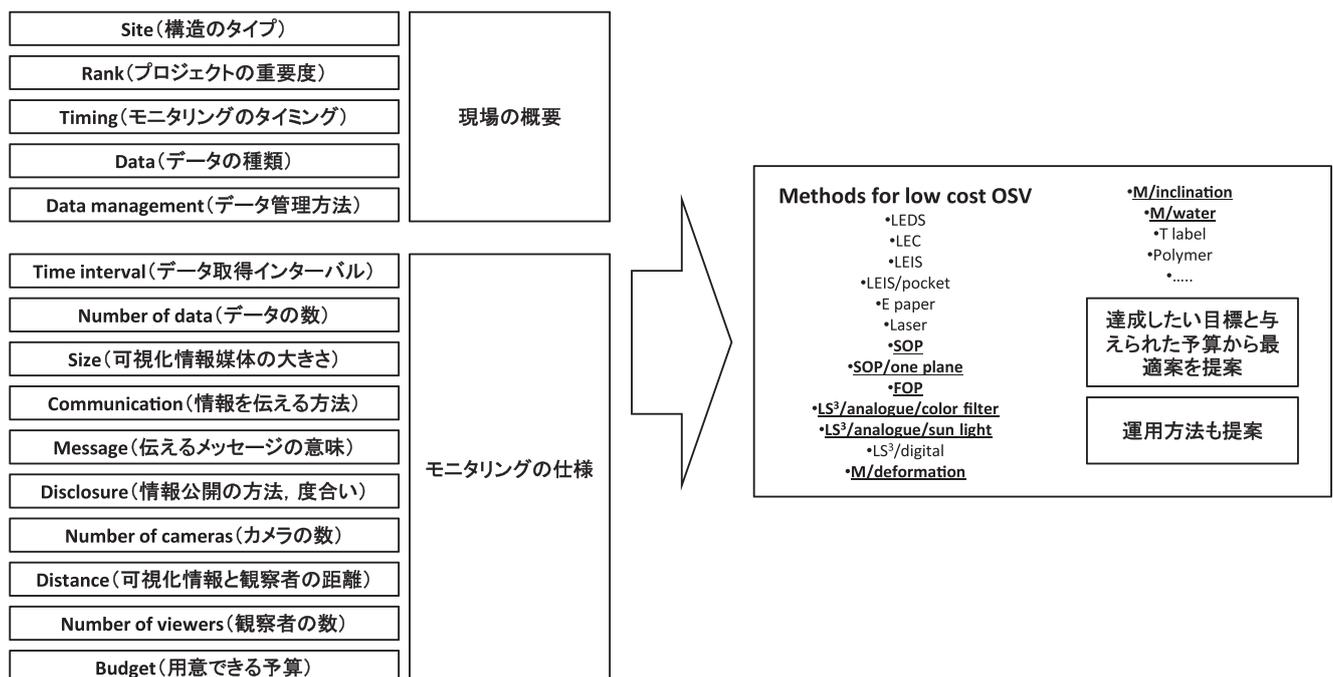
写真—13 変位を回転に変えて表示する機械的装置

8. 技術を組み合わせる・技術を組み込む

ここで紹介するセンシングと可視化の技術は単独で使用できるだけでなく、組み合わせることで新しい価値を生むことも可能だ。傾斜を高精度で可視化できるSOP法と相対変位を回転で表示する技術を組み合わせれば、非常に高精度で変位を可視化することが可能となる。レーザーポインターと光ファイバーの技術を組み合わせることで様々な新しいモニタリングの方法論を構築できる。また、実際に用いる装置を建設時にインフラ本体に組み込むことができれば、完成後の維持管理目的でのモニタリングが大幅に効率化できる可能性がある。

9. おわりに

建設現場の安全向上や防災対策を考える際には、モニタリングが不可欠だ。実施にあたっては、プロジェクトの概要を踏まえた上で、様々な要因(図—4参照)を合理的に決定し、すべてを予算内に収めるようにモニタリングを実施することが必要となる。主に、データを集中管理する形での情報化施工がこれまでの流れであったとすれば、これからはその良さを保持しつつ、データを現場で可視化する技術を織り交ぜて、さらにきめ細かい安全管理体制を整備してゆく必要がある。その際にはここで紹介したようなシンプルで低コスト・低消費電力型の視覚に訴える方法論も的確に組



図—4 新時代の情報化施工

み込み, さらには聴覚に訴える方法論などを巧みに使うことで, 新しい時代の情報化施工やインフラの維持管理手法を築くことが必要になるであろう。

謝辞

ニューデリーで実施した OSV によるモニタリングは JICA の支援を得たものであり, “SPECIAL ASSISTANCE FOR PROJECT IMPLEMENTATION (SAPI) APPLYING THE MONITORING METHOD BY ON SITE VISUALIZATION AT DELHI METRO CONSTRUCTION SITES, FINAL REPORT, SEPTEMBER 2010, JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY” にその全容が報告されている。また, 低コスト型のセンサについては国土交通省平成 24 ~ 26 年建設技術研究開発助成制度採択課題「On Site Visualization のコンセプトに基づく低コスト・低消費電力型モニタリングシステムの開発」の支援で開発を進めているものである。

J|C|M|A

《参考文献》

- 1) 芥川真一, On Site Visualization - 新しいモニタリングの形を探る -, 土木技術, 66 巻, 10 号, pp.53-58, 2011.
- 2) S. Nakamura, R. Abe, S. Akutagawa, et al. 2010d. Final Report, Special Assistance for Project Implementation (SAPI) applying the monitoring method by On Site Visualization at Delhi Metro construction sites, SAPI for Delhi Metro Phase II, Japan International Cooperation Agency (JICA).
- 3) S. Akutagawa, 2010b. On Site Visualization as a New Paradigm for Field Measurement in Rock Engineering, Proceedings of the 6th Asian Rock Mechanics Symposium, New Delhi, pp.KN34-KN45.
- 4) LEC (光デバイス) による計測・警報システム, NETIS 登録番号, KK-130017-A
- 5) S. Akutagawa, K. Nakata, A. Nishio and H. Yamada : Single Observation Point method for measurement and real-time visualization of inclination using a mirror for rock engineering projects, Proceedings of the 8th Asian Rock Mechanics Symposium, October 14-16, Sapporo, 2014. (in press)
- 6) Akutagawa, S., Nishio, A. and Matsumoto, Y. and Machijima, Y. : A new method for reading local deformation of granular material by using light, Proceedings of the 48 US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, June 1-4, Minneapolis, 2014.

【筆者紹介】

芥川 真一 (あくたがわ しんいち)
神戸大学大学院
工学研究科市民工学専攻
教授

