

# 鏡を用いた低コストの 傾斜モニタリング手法の開発

芥川 真一<sup>1\*</sup>・中田 勝行<sup>2</sup>・佐々木 弘<sup>3</sup>・岩崎 健二<sup>1</sup>・田井 克昌<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>オフィスひもろぎ 代表 (〒603-8347 京都市北区等持院中町39)

<sup>3</sup>牛方商会 営業部 (〒224-0053 神奈川県横浜市都筑区池辺町4666)

\*E-mail: cadax@kobe-u.ac.jp

計測装置の高度化、データ管理の進化・IT化が進む一方で、工事中の事故、豪雨時の土砂崩れなどによる人的被害は少ないながらも存在し続けている。高価な計測システムを潜在的危険箇所のすべてに常時設置することは不可能であり、新しい方法論が必要とされている。ここでは、簡易な装置で変状を把握し、それを原位置で分かりやすく表示し、危険を可視化するための新しい考え方"On Site Visualization"を紹介し、またその中でも低コストで広範囲のモニタリングが可能な"Single Observation Point 法"について詳しく説明する。

**Key Words :** safety, disaster prevention, OSV, SOP-method

## 1. はじめに

社会インフラの建設・整備に関係するあらゆる工事において施工中、供用時の安全管理、維持管理問題が重要視されるようになってきた。通常の変状監視体制においては、計測器が察知した情報をパソコンに転送し、それをスクリーン上などで図化して、専門技術者が現状を評価する。すべてが順調に進んでいる場合はこれで問題はないが、データ通信に問題があった場合、専門技術者が監視業務を怠った場合、あるいは予期せぬ問題が生じた場合などにおいては、変状に関する情報が正しく分析されない、あるいはその情報が作業員や周辺住民に正確に、あるいは迅速に伝わらないなどの可能性が出てくる。また、コストなどが主要因で、変状監視体制が取られていない現場は数多く存在するわけであり、変状が起きていても何も分からない、なにも知らされない場合のほうが圧倒的に多いのが現実である。

このような現状を改善するため、著者らは関連企業グループとともに工学モニタリングに視覚的要素を盛り込んだ方法を提案している。この新しい方法論では、監視対象域内で用いる変状(変位や傾き)計測装置に「光を用いた視覚的な結果表示機能」を付加することを特徴としている。これらの装置は、任意の場所に設置でき、その場所に何らかの変化があれば、発光ダイオード

(LED) による光の色によってその程度が表示されるために、図-1に示すように作業員や周辺住民はその変化をリアルタイムで視覚的に確認できることになり、これを On Site Visualization (OSV)<sup>1)</sup>と名付けている。これは従来の方法(センサが感知した情報をパソコンなどのメディアで確認するもの)とは多くの点で異なる新しい防災・安全監視システムの構築が可能になることを意味している。本稿では、これまでに開発されてきたOSVのためのセンサの中でも、SOP法という低コストかつ広範囲のモニタリングが可能な方法論について焦点をあてて紹介し、今後の展望について言及する。

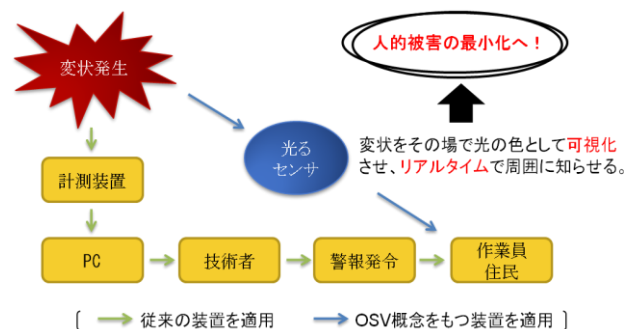


図-1 OSV概念を用いた場合の、現場での変状発生から作業員に伝達されるまでのフロー

## 2. 光るセンサ

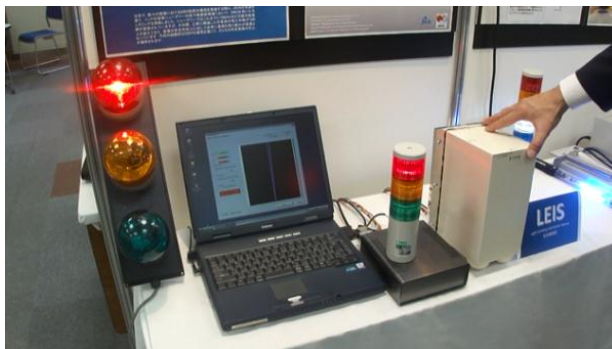
On Site Visualization (OSV) に基づくモニタリングでは、観測結果をその場で光の色として表示することによって、安全・危険情報を視覚的に把握することを原則としている。従来の方法ではパソコンなどにデータを集約してからスクリーン上で可視化を行うことが多いが、OSVでは危険が迫っている場合にその場所にいる関係者に一早くそれを知らせることを重要視し、現場での可視化を基本としている。これを可能にするためには様々な計測データを光の色に変換できる装置が必要となる。



(a) 光る変位計 (LEDS)



(b) 光るコンバーター (LEC)



(c) 光る傾斜計 (LEIS)

写真-1 光るセンサ

OSVの概念に基づくモニタリングを実施するためのツールとしては写真-1のようなものが挙げられる。変位を色で表す光る変位計 (Light Emitting Deformation Sensor, 省略してLEDS) に加え、既存の計測装置 (高精度で動作信頼性がすでに確立されているもの) に視覚的アウトプット機能を付加した光るコンバーター (Light Emitting Converter, 省略してLEC), 傾斜を高精度で計測し、その結果を表示する光る傾斜計 (Light Emitting Inclusion Sensor, 省略してLEIS) そしてその直進性, 反射特性を合

理的に利用した直接的変状表示方法であるレーザー光線の利用等がある。

光る変位計は任意2点間の相対変位を2mmごとに5色の光で表示できるものである。標準ストロークは10mmで、特殊アタッチメントをつけることで疑似ストロークを2mmから50mmまで変化させることができる。設置や移動が簡単であるため、作業員が最も気になる場所に気軽に設置することができる。また、新規に開発したLECと既存の計測装置をペアで用いる方法では信頼度の高いデータ処理を行うことができ、それに基づいて、これまではない視覚的アウトプットが得られるため、重要度の高い監視箇所のモニタリングに適している。LECを用いたモニタリングは変位だけでなく傾斜, 圧力, 温度, 水圧等多種のデータ計測に対応している。これらの視覚的アウトプット機能を有するツールを用いて実施するOSVによるモニタリングの大きな特徴として、「そこにいる人々」、すなわち現場作業員や周辺住民が、「安全度」を、「その場で確認」できるということが挙げられる。従来計測では、計測終了から安全か危険かを人々に知らせるまでに、いくつかのステップがあり、どうしても時間的な遅れが発生してしまう。その点、On Site Visualizationでは、リアルタイムな表示が現場において行われるので、発生する光の色に対するアクションプランを定めておけば、危険を避ける迅速な行動が可能となる。

## 3. SOP法のご概念

新しい低コストモニタリング手法として、Single Observation Point法(SOP法)を紹介する<sup>2)4)</sup>。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場所(Single Observation Point)でのみ観測できる方法論である。

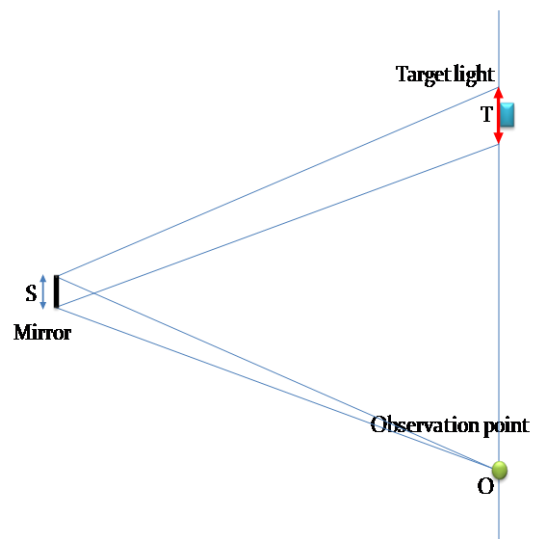


図-2 初期状態での位置関係

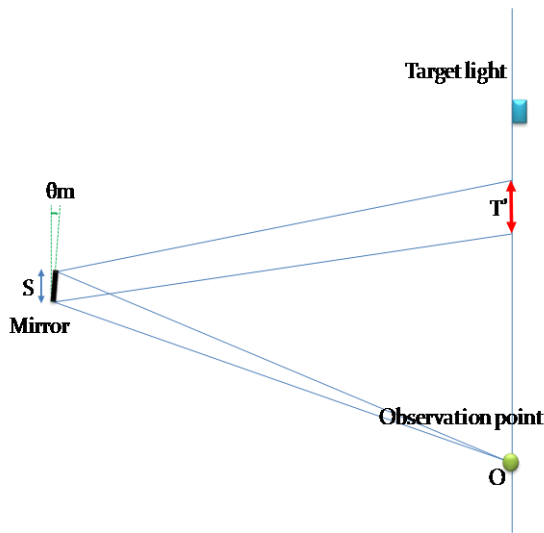


図-3 変化後の位置関係

基本概念としては、まず図-2のように任意の不動点 (Target lightの場所) に光源を設置し、変状を計測したい箇所 (Mirrorの場所) に鏡を取り付ける。そして定めておいた観測点 (Observation point) 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が生じ、鏡が $\theta$ 傾いた場合 (図-3の状態) を考える。この時傾き $\theta$ の影響により、観測点から鏡越しに見えていた光源が見えなくなっている。このように鏡越しに見える光源の変化により、鏡を取り付けた箇所に任意の変状があったことを検知するのが基本的な方法である。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モニタリングが行える手法であるといえる。

また、図-4にはSOP法の基本的な設置例を示す。この時、計測点を複数にしても光源と観測点は1箇所、増えるものは鏡のみであるため、計測点を多く取っても増える費用は鏡の分だけであり広範囲のモニタリングを非常に低コストで行えることがわかる。

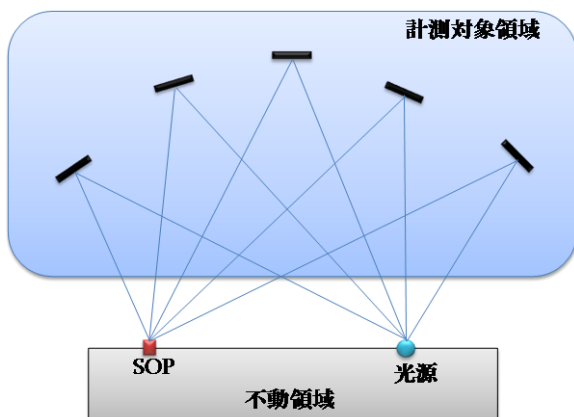


図-4 SOP法の基本的な設置の例

#### 4. SOP法の精度

SOP法では、鏡のサイズ、設置距離の組み合わせにより、計測箇所に応じた精度を設定することが可能である。次式(1)は観測点から計測対象ポイント (鏡の中心位置) までの距離と、鏡から光源までの距離を把握したうえで要求される精度を達成するための鏡の大きさ $S$ を求めるための式である。

$$S = 2 \frac{d1d2}{(d1 + d2)} \tan(2\alpha) \quad (1)$$

$S$ : 鏡の直径  $\alpha$ : 鏡の回転角度

$d1$ : 観測点から鏡の中心までの距離

$d2$ : 鏡の中心から光源までの距離

この式を用いて0.01度の鏡の回転で光が反射しなくなるための鏡の大きさ (円形の鏡を使用する場合の直径、図-5の縦軸にMirror sizeと表示) を求めるグラフを $d1$ 、 $d2$ との関係で図-5に示す。 $d1$ のバリエーションとして、10mから400mの結果を示している。グラフより観測点から鏡までの距離( $d1$ )を200m、鏡から光源までの距離( $d2$ )を150mと考えた場合、直径が約60mmの鏡を用いれば回転角0.01度といった微小変化を視覚的に判定できる高精度センサを作ることが可能であることがわかる。

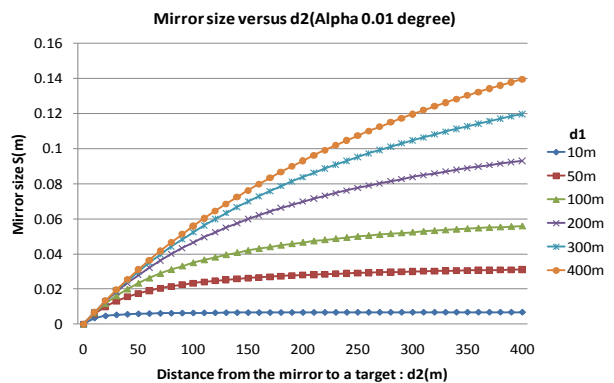


図-5 微小回転 (0.01度) で光が反射しなくなるための鏡の大きさ (直径)

#### 5. SOP法の応用例

##### (1) 変状の段階的表示

光源を工夫し、鏡の回転に応じて鏡に映る光の色を変えることで計測対象物に生じる変状の度合いを段階的に捉えることが可能となる。図-6には、いくつかの目的ごとに有効な光源の例を示している。SOP法ではこのように光源や鏡の形を変えることで適用現場の状況に応じ



た柔軟なモニタリングが可能となる。



変位量絶対値      上下の変位      4象限の変位  
 図-6 目的に応じた光源の形

## (2) 複数の計測対象領域を観測

図-7に複数の計測対象領域を複数の観測ポイントで監視する例を示す。観測ポイントは原則的には1点あれば十分であるが、観測作業の実態、その場所に関する諸事情により、複数の観測点を設けたほうが良い場合が考えられる。どちらにしても、鏡の設置角度を変えるだけで様々な観測体制に対応できる柔軟なシステムを構築できることがわかる。

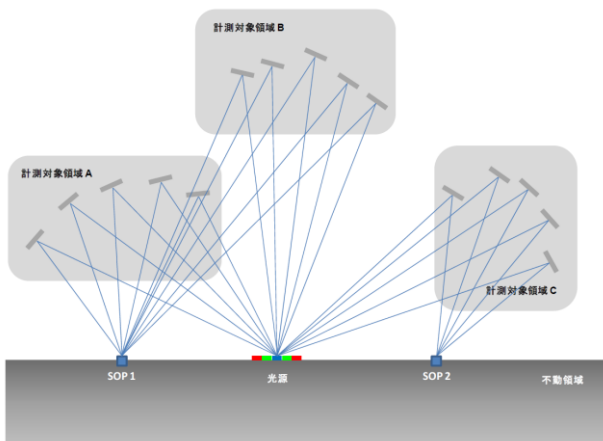


図-7 複数の計測対象領域を複数の観測ポイントで監視する例

## 6. SOP法の設置実験

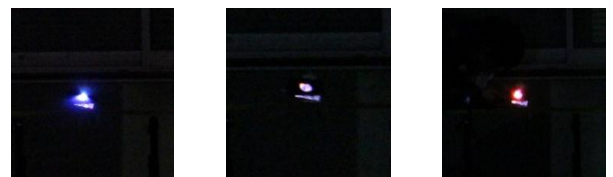
写真-2 は、実際に SOP 法を行っている様子である。光っているのは電球ではなくすべて光源を反射している鏡で、使用している光源は1つのみである。この写真から、ただ1つの光源で広範囲のモニタリングが可能となることがわかる。また、鏡に微小な変化を与えただけで光が見えなくなり、高精度に変状を捉えることが可能であることが確認できた。さらに、観測点位置を微小距離ずらした場合にはすべての光を観測することができなくなり、実際に観測点を限定したモニタリングが可能であった。また、光源までの距離については、基本的に夜間の実施を想定しているため、1km以上離れていても問題

がないことが確かめられている。



写真-2 SOP法の設置実験の様子

次に変状の段階的表示を想定した実験を行った。光源に直径 1.5cm の青色の光源と赤色の光源を用い、5cm 離して設置を行い、観測点と光源を 1m、直径 2.5cm の鏡をそこから 50m 離れた位置関係で、鏡に意図的に微小変化を与え、変位を観測した。その時の鏡に映る像の変化を写真-3 に示す。この写真より、変状が大きくなるにつれ、初期の青色から、青色と赤色の2色、赤色のみへと段階的表示していく様子が見える。50m 程度の距離では肉眼でも色の変化を捉えることが可能であった。また距離と鏡の大きさの関係から青の時は0度から約 0.01 度、青と赤の時は約 0.01 度から約 0.02 度、赤の時は約 0.02 度以上という微小な回転変位を捉えていることになる。



青のみ(0-0.01)      青と赤(0.01-0.02)      赤のみ(0.02-)  
 写真-3 各段階(deg)の鏡に映る光源の様子

## 7. 結論と今後の課題

低コストで広範囲な新しいモニタリング手法である SOP法を提案し、設置実験によりこの手法が実際に有効であることを確認した。3次元空間のある1点だけで観測ができる体制は、低コストで多点の情報を読み取るが、その結果を不特定多数の観測者にそのまま伝えるオープン型の情報開示ではなく、たとえば管理者だけがその情報にアクセスできる限定型情報開示が適切である場面などに好都合である。今後の課題として、設置の簡略化、現場での適用を行い、実用化に向けたシステムの構築を早急に進めていく必要がある。

謝辞：本稿で紹介したセンサにおいては、北斗電子工業、

東亜エルメス（株），曙ブレーキ工業，環境総合テクノ  
ス，オフィスひもろぎ，（有）牛方商会の協力を得た。

関係各位に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) S. Akutagawa; S. Mori; Development of new deformation sensors for monitoring of infrastructures, *Proceedings of the EIT-JSCE Joint Seminar on Rock Engineering*, September 16-17, Bangkok, pp.192-195., 2008.
- 2) 特願 2011-029228 自然および人工構造物変状検知装置, 2011.

- 3) 田井克昌：鏡を用いた変状検知及び特異観測ポイントにおける表示手法の基礎的実験，卒業研究，神戸大学工学部市民工学科，2011.
- 4) 金秀娟：簡易メカニズムを利用した傾斜のセンサリング及び表示技術の開発，卒業研究，神戸大学工学部建設学科，2010.

## DEVELOPMENT OF LOW COST MONITORING METHOD FOR MONITORING INCLINATION BY USING MIRRORS

Shinichi AKUTAGAWA, Katuyuki NAKATA, Hiroshi SASAKI, Kenji IWASAKI  
and Katumasa TAI

Low-cost method for measuring inclination at many points is proposed. In this method, a mirror is used at a measurement point of inclination which is initially set in such a way that an observer can see reflected light of a lamp installed at a fixed point. It is assumed that the observer makes visual observation from the fixed point in 3D space, called "Single Observation Point". If the mirror inclines due to ground movement, the observer loses the sight of the light. Quite high accuracy can be achieved by selecting distance between the SOP, the mirror and the lamp.