

(別紙2)

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 研究課題名

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

2. 研究期間 平成24年度～平成26年度

3. 代表者及び研究代表者、共同研究者

代表者	芥川真一	神戸大学大学院工学研究科・教授
研究代表者	芥川真一	神戸大学大学院工学研究科・教授
共同研究者	野村貢 片山辰雄 高橋厚志 中田勝行 小林弘典 辻村幸治	建設技術研究所東北支社・次長 環境総合テクノス・土木部長 環境総合テクノス・土木部マネージャー オフィスひもろぎ・代表取締役社長 大日本印刷事業開発センター印刷エレクトロニクス 開発第1部開発第2課・課長 SKラボ・代表取締役社長

4. 補助金交付総額 33,930,000 円

5. 研究・技術開発の目的

本研究開発では、限られた予算で、できるだけ多くの、あるいは広い場所を効率的に監視し、インフラに発生する異常をできるだけ早く捉えることで維持管理の作業を合理化すると共に、事故や自然災害の発生を防止するための新しい提案を行う。それは申請者が推進している新しいモニタリングの考え方"On Site Visualization"に基づくものであり、計測で得た情報をその場で可視化することによって周辺の作業員、一般市民、通行人などが「異常に気付く」確率が上がることを利用するものである。また、可視化された情報はカメラなどの映像デバイスでも管理できるため、不特定多数の「人間の目」、および様々な形態での「機械の目」が安全監視のシステムに組み入れられることになる。これは通常のIT技術に依存した方法と異なる側面を持った新しい方法であり、低コスト、低消費電力、あるいは無電力型のセンサを開発することで、これまでの方法に比べて、「より多くの場所で監視し、より多くの目がリアルタイムでそれを見ている」という新しいインフラの監視システムを構築できることを意味する。

本研究では、状況が異なる場面での適用を想定して3種類の異なる方法論を並行して開発する。それらの骨子(図5.1参照)は以下の通りである。

(1) Single Observation Point (SOP)法の開発

この方法では傾斜を生じる複数の場所に鏡を置き、1個だけ用意した光源が、複数の鏡のすべてに映るようにする。これを観測できる場所は固定した一点(Single Observation Point)に限られ、そこに集約された可視化情報を効率的に監視することが可能になる。計測点が多くても、増えるのは鏡だけであるため、総コストを低く抑えながら広範囲で高い精度のモニタリングを実現することが可能になる。

(2) Light State Sensor System (LS³)法の開発

この方法では、傾斜や変位の発生で自然に発生する現象を利用して、その大きさなどを光の色

や状態で簡易に表示する装置を配置し、主に夜間の安全監視が有効な場所で適用することを目的とする。太陽光などを取り入れた、ランニングコストがゼロの装置も合わせて開発する。

(3) Mechanical tools (M)法の開発

この方法では、傾斜や変位の発生で自然に発生する現象を利用して、その大きさを機械的な動きを利用した表示に結び付けることで、周辺から視認できるようにするものである。完全に無電源で作動するため、センサの価格は低く抑えられる予定である。

これらの方法論を工事関係者や周辺住民などの協力を得た上で現場実証すると共に、可視化された情報の総合的マネジメントに関するガイドライン作成の方向性を示唆するとともに、今後の課題を抽出することも合わせて本研究開発の目的とする。

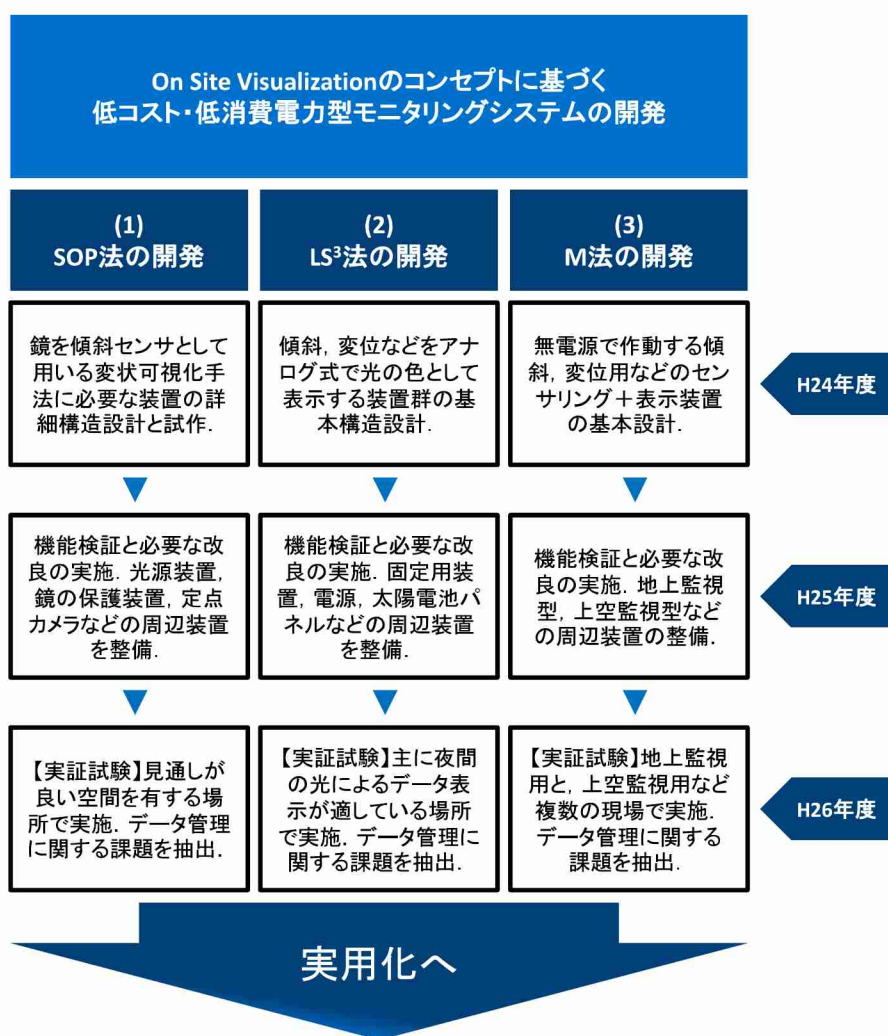


図 5.1 3種類の方法論を同時に開発する本プロジェクトの概要

6. 研究・技術開発の内容と成果

前章で述べた3種類の方法論を並行して開発し、その段階に合わせて適宜現場での試行実験を進める形で研究プロジェクトを実施した。以下では、平成24年度 (Part A)、平成25年度 (Part B)、平成26年度 (Part C) に実施した研究・技術開発の内容と成果を時系列に合わせて報告す

る。なお、使用する図番号などは時系列に合わせて図 A* (1年目の成果)、図 B* (2年目の成果)、図 C* (3年目の成果) のようにしている。

【平成 24 年度までの研究・技術開発の内容と成果】

センサ開発について

(1) Single Observation Point (SOP)法

鏡を利用した傾斜計測を可能とする SOP 法においては機能性の高い鏡設置装置が必要である。そこで、鏡の方向制御方法が異なる 2 種類の設置装置を試作し、その一部で現地テストを行った。試作した装置や現地テストの概要を図 A1 に示す。試作が先行していた方向制御ねじ 2 本の鏡を北海道虻田郡の地滑りゾーンで試験設置し、その動作性を確認したところ、日中の温度影響により光源の光が見えなくなるなど、温度に対する影響が確認された。しかし、約 150m 離れた場所における設置作業については、現状の方法論では 1 箇所あたり 30 分から 1 時間程度かかるため、その作業効率を上げるために望遠鏡システムを導入する必要が改めて確認された。



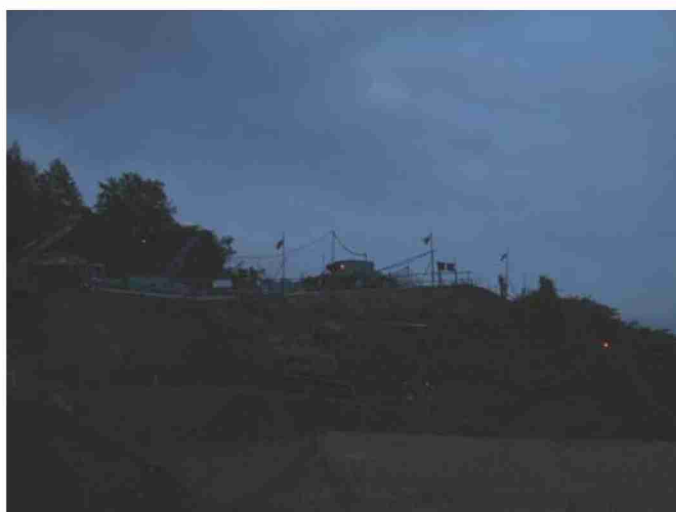
2本ねじ方式の鏡。対角線の位置にある2本のねじと、別の1点で鏡を支持し、鏡の方向を制御するシステム。



3本ねじ方式の鏡。測量器具の鉛直軸出し用3本ねじと同様の方法で鏡を支持し、鏡の方向を制御するシステム。中央部に穴を設けて、レーザーポインターなどを挿入する設計変更も可能。



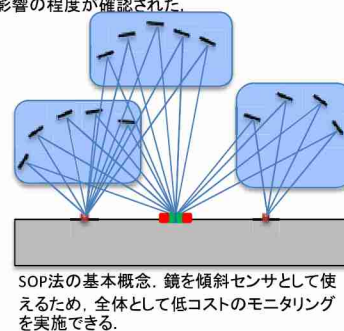
鏡の方向を初期設定する作業(従来は30分程度かかっていた)をスピードアップするための望遠鏡システム。数百m離れた場所にある鏡に何が映っているかを見ながらねじによる鏡の方向制御が必要であるため、望遠鏡の補助が必要。



約150m離れたモニタリングポイント(3箇所)においた鏡(2本ねじ方式)に光源の赤い光が映っている初期状態。この現場(北海道、虻田)では約1年間試験的にSOPによるモニタリングを実施。光の見やすさと温度による影響の程度が確認された。



SOP(ここだけに見えるという特異ポイント)に設置した光源と簡易望遠鏡。



SOP法の基本概念。鏡を傾斜センサとして使えるため、全体として低コストのモニタリングを実施できる。

図 A1 SOP 法に関する成果と課題

(2) Light State Sensor System (LS³)法

変位や傾斜を簡単な方法で光の色の変化、あるいは光の明るさの変化として可視化する手法である LS³ 法については複数の方式がある。ここでは、H24 年度に試作を行った方式の例について図 A2 に基づいて説明する。

Color filter 方式では白い光を LED などを用意し、変位や傾斜によっておこる現象(物体の一次的な動きや傾斜によって滑る、落ちるなどの現象)によってカラーフィルターを動かすことに

よって異なる色の光を作る。ロックボルト、グラウンドアンカーのどちらのケースも従来の電気式の装置に比べて圧倒的に低コストにできる可能性があり、構造もシンプルとなっている。ただし、グラウンドアンカー用の装置については予算不足のため、設計図を準備した段階でとどまっている。傾斜可視化装置の例では、直径約10cm、高さ2.5cm程度のメインチェンバーを金属製枠と亚克力で作り、その中に一定の圧力で透明グリス（粘性の高い油）と滑動式カラーフィルターを入れる構造となっている。初期設定ではフィルターの中心を装置の中心に合わせ、装置が傾くとフィルターが滑って移動し、装置中心下部にある白い光とフィルターによって異なる光の色を創るものである。この試作品では、油圧を変動できるようにすることで傾斜に対する感度を操作できるようにしているが、H25年度以降にはこの機能を簡素化することも考えられる。



図 A2 LS³法に関する成果と課題

Hide and See方式では日光などの自然周辺光を直接複数の光ファイバーに取り込み、光を取り込んでいるファイバーの数が変位、傾斜などによって変化する構造の設計を採用しており、いったん設置した後のメンテナンスがほとんど不要となる特徴を持っている。写真の装置は本プロジェクト以前に試作した物であるが、実施現場との協議に応じて必要な設計変更を行った上でH25年度以降に採用する可能性がある装置である。

Gap方式によって土の詰まりなどを検出するためのセンサユニットでは、2本の光ファイバー間のギャップ（写真の例では約2mm幅）に土などの物体があるか、無いかによってそこを通過する光の量が変化するため、目詰まりを肉眼で判定できるというものである。これは盛土などの排水機能チェックを始めとして、土が詰まる現象（特定の場所に土が無い初期状態が次第に崩れてい

くプロセス)や、土の浸食・流出(特定の場所において、土が無くなっていくプロセス)などの程度を知る低コストの手法としての適用が期待できるものである。光ファイバーの長さは数百 m になってもこの原理は問題なく作動することが確認されている。

(3) Mechanical tools (M)法

電気を要しない方法論として推進しているのが M 法である。この中には可逆式、非可逆式の大きな分類があり、それぞれにおいて変位、傾斜などを捉えて表示する装置が考えられる。ここでは、学生実験レベルだけの試作品も含めてその成果を概観する。

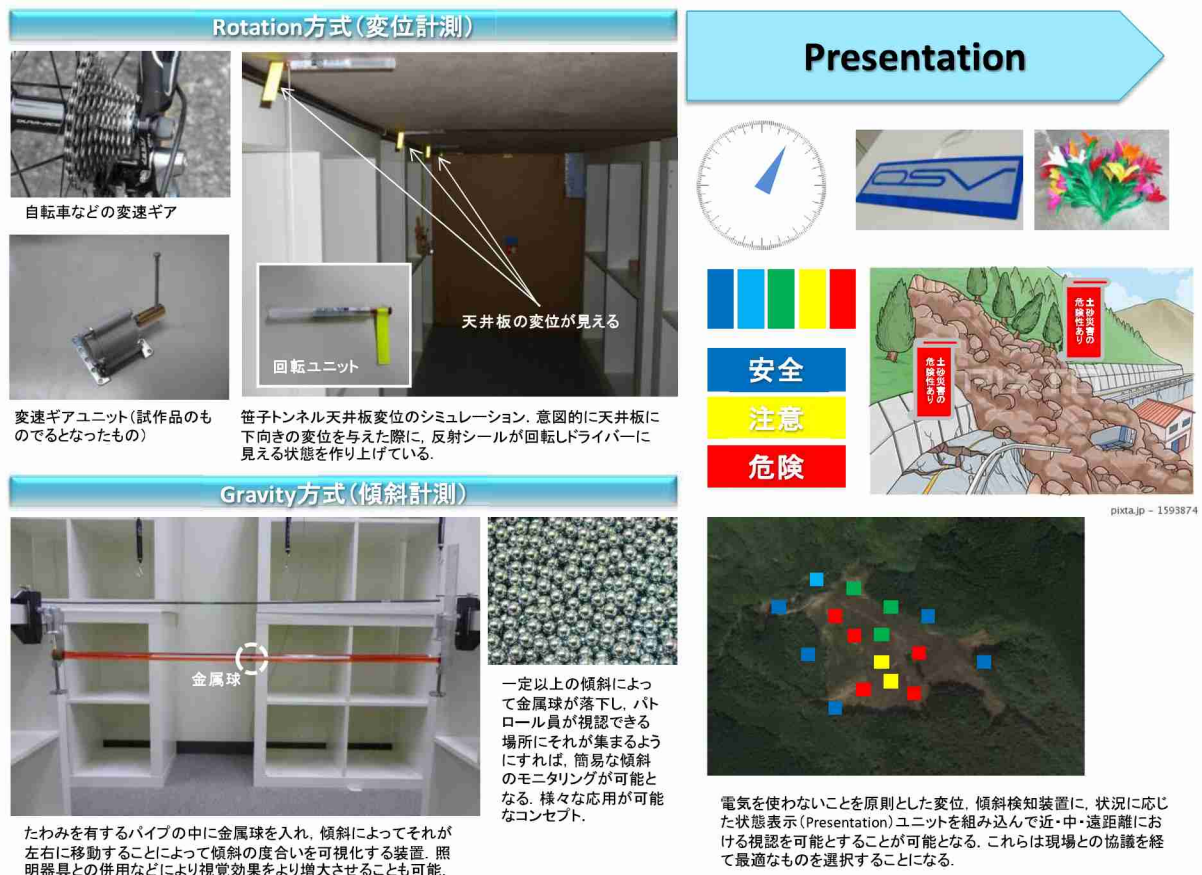


図 A3 M 法に関する成果と課題

Rotation 方式では可逆式の変位表示装置で回転軸を利用する形態のものを示す。任意 2 点間の相対変位を捉えてそれを回転軸に伝え、回転軸に取り付けた表示板(色で示すもの、動きだけで示すもの、文字を書いたもの、など)の動きによって変位量を可視化するものである。回転軸の直径を適切に選ぶことで、変位と回転の感度を自由に調整・選択ができるよう変速ギアのような機能を持つものを設計している。この基本機能を持つごく簡単な装置で、管子トンネルの天井板崩落のシミュレーション実験を行った例も示している。このような簡単な表示であっても、ドライバーに天井板の異常を知らせるには十分であり、低コスト装置としてのポテンシャルが大いに期待されている。

Gravity 方式は可逆式の傾斜表示装置で、気泡式水準器を応用したものである。この例では、アクリルパイプをオイル(ここではたまたま赤色の自動車用エンジンオイルを使用)で満たし、その中に金属球を入れたものである。パイプとオイルの自重で装置全体は撓んでおり、それで装置の初期状態が完成する。この状態で金属球が中央に来るように端部の高さを調整した後に、装置が傾斜すれば、その大きさと装置の曲率によって球が移動し、その量が傾斜の程度を表すことになる。また、単純に一定以上の傾斜で金属球が落下するシンプルなユニットを使用して、それが

監視員に都合のよいモニタリングポイントに集まるようにしておけば、様々な応用が可能な簡易傾斜検知システムを構築することも可能である。これらの装置は適用現場との今後の交渉過程を見て、H25年度に作成することも可能である。

Presentation（見せ方）は、目盛り板、メッセージボード、電子ペーパー（超省エネタイプの表示デバイス）、任意補助パーツの動き、樹木頂上よりも高い位置で開き、遠くからも視認できるユニットなど多様なものが考えられる。これらのアレンジは現場の状況、担当部署、地域住民との協議の上で決定する。また、視覚情報だけではなく、音を出すことが望まれるケースにおいては、その機能を付加する可能性もある。

H25年度以降の実施候補現場について

H24年度の活動におけるもう一つの重要事項は、H25年度以降の実施候補地を選定することであった。この作業においては、国土交通省近畿地方整備局、奈良県、神戸市などの協力を得て協議を進めてきた結果、図A4に示す3地域を候補地とすることでほぼ合意を得た。

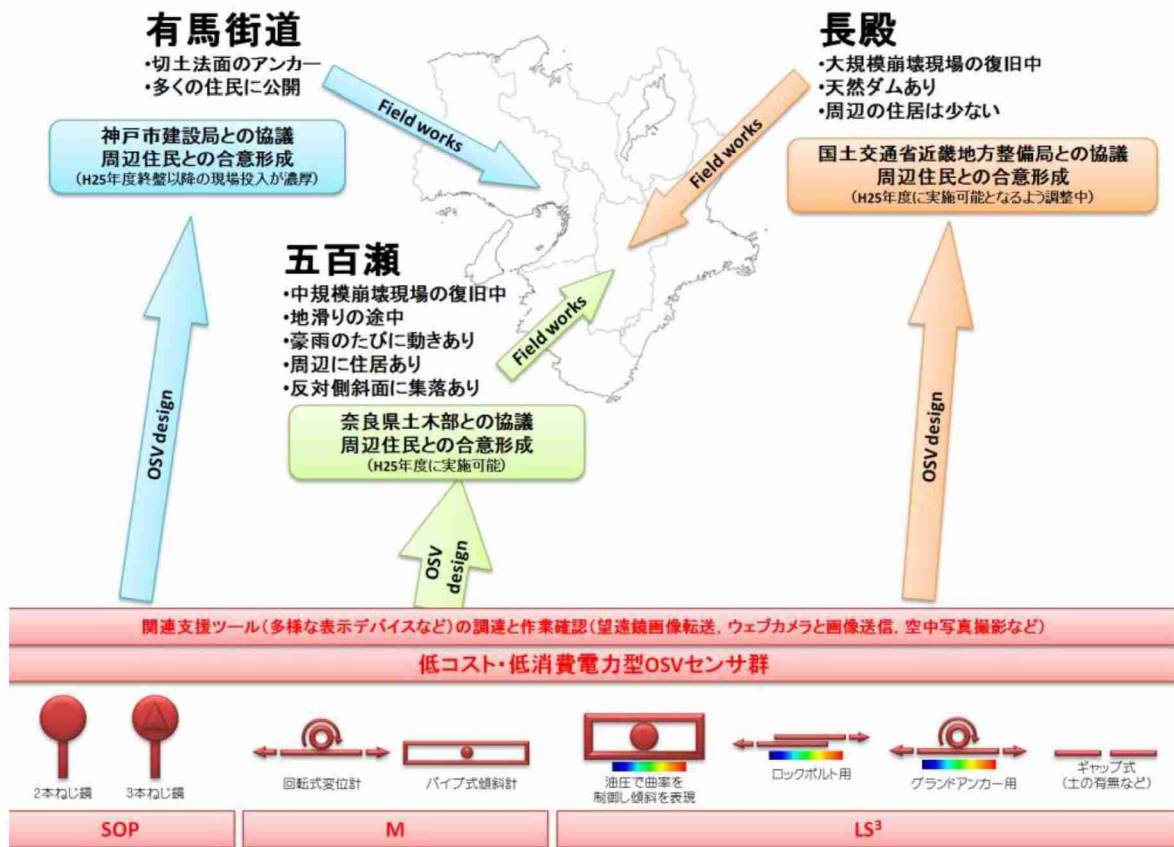


図 A4 実施候補地の概要

【平成 25 年度までの研究・技術開発の内容と成果】

平成 25 年度（2 年目）の研究目的概要は以下の通りとした。

- 1) 3 候補現場の管理責任者、周辺住民との十分な協議を実施し、現地での受け入れが決まった場合には、実際に設置・運用可能なセンサの仕様を決定の上、それらを試作すること。
- 2) OSV によるモニタリングのためのセンサを製造し、現地に設置する。その際、データ収集の方法が効率化されるよう、現地の維持管理担当者、周辺住民の協力を最大限に得られるよう

協議をすると共に、ウェブカメラなどの画像処理・転送 IT 機器を効果的に配置することとする。

- 3) 3 候補現場（工事の開始時期によっては神戸市の現場を除く 2 現場になる可能性あり）でのモニタリングの進捗を適宜確認し、センサの状態などを確認するとともに、データ収集体制、運用方法（警告の発進、報告行動&避難行動の実動性チェック、関係者との協力体制など）も含めた改善点をリストアップする。

現場の状況(1) 奈良県十津川村五百瀬地区（対応相手先：奈良県土木部）

五百瀬地区（図 B1 参照）では平成 23 年の台風 12 号による集中豪雨の際に、過去に地滑りがあり、補修工事をしていた部分（神納川左岸で、高さは約 150m）の周辺で再度地滑りが生じた。その上端部周辺には滑落崖（段差 1m 程度）や複数のクラックがあり、1 年前から設置されているモニタリングにより降雨に伴う変位が累積で 100mm 程度発生している。ここでは、奈良県土木部が、「降雨による 1 時間当たりの変位量が 2mm を超える状態が 2 時間連続する」状態になると警報が発せられるように安全対策が既に運用されている。そのため、OSV によるモニタリングを設計する際は、現在運用されている計測システムから得られるデータとの整合を確認すると共に、現在は計測器が設置されていない箇所（滑りゾーン上部周辺を除くすべての場所）を含めた範囲に低コストのセンサを配置し、2 次災害の前兆が生じた場合にそれを確実に捉えて可視化し、早めの対策が迅速に計画できるようにできるかどうか重要なポイントとなる。



図 B1 五百瀬地区の概要



図 B2 長殿地区の概観

現場の状況(2) 奈良県十津川村長殿地区 (対応相手先：国土交通省近畿地方整備局)

長殿地区においては平成 23 年の台風 12 号による集中豪雨で十津川支流の南側が高さ 400m に渡って表層崩壊し、天然ダムが形成された。復旧工事完成は平成 30 年ごろを予定しており、それまでの期間に作業員の安全を確保するための対策の補助として OSV によるモニタリングを企画する予定で、国土交通省近畿地方整備局の担当者に協力を依頼し協議中である。この現場では、砂防堰堤工事の担当ゼネコンが技術提案の際に電気を使用するタイプの OSV センサの設置(地中変位や傾斜を対象としたもの)を予定しているため、本研究では、それとのバランスを考慮して低コストの OSV センサを配置することが望ましい。地滑り跡地のため現在は植生がほとんどなく見通しがよいため、SOP などの様なオプションが重点的に採用される可能性が高い。

現場の状況(3) 神戸市北区有馬街道唐櫃地区 (対応相手先：神戸市建設局)

神戸市北区の県道 15 号線(通称：有馬街道)沿いに位置する唐櫃地区(図 B3 参照)では、交通量の増大による渋滞が多発する状態が続いており、その拡幅工事が行われることが決まっている。この際に東側 500m に渡る切り取り斜面が高さ約 19m、傾斜は 1 : 0.5 となるためアンカー工によってその安定を図ることとなっている。この際、施工中および供用後のアンカー軸力のモニタリングに LS³ のカラーフィルター方式による可視化装置を取り付けるなどの安全対策が望まれている。施工開始は発注業務の進捗などにも依存するが、早ければ H25 年度の終盤からとなる可能性もあるため、早めの協議と準備が必要となっている。この際、完成後にも OSV センサを長期にわたって維持管理のために運用するプランについて対応相手先(神戸市建設局)と十分に協議し、場合によっては現場に近い唐櫃地区住民との合意形成を図る必要性などについて検討する予定である。



図 B3 神戸市北区唐櫃地区の概観

3 候補地のそれぞれについて、対応相手先（管理責任者）及び周辺住民との十分な協議に基づくセンサの準備を経て、H25 年度以降の設置と運用を実施する。その際に、研究担当者が現場に常駐できる状態ではないので、可視化された情報の確認や収集は、対応相手先及び住民の協力を依頼すると共に、ウェブカメラの効果的利用や、降雨後の航空写真の撮影などを効果的に織り交ぜて実施する予定である。

センサ開発について

(1) Single Observation Point (SOP)法

鏡を利用した傾斜計測を可能とする SOP 法においては機能性の高い鏡設置装置が必要である。そこで、鏡の方向制御方法が異なる 2 種類の設置装置を試作し、その一部で現地テストを行った。試作した装置や現地テストの概要を図 B4 に示す。独自に開発した装置は、これまでの実績で設置位置から観測点までの視認距離が 150m 程度で十分に短い時間で設置でき（1 点当たり 15～30 分程度）、傾斜角度の計測も高い精度で実施可能であることが確かめられている。また、一般的な土木工事などでこの方法を用いる場合は、視認距離が数 m から数十 m と短い場合が多いため、そのような近距離での SOP 適用においては、より低コストのミラーユニット（カメラ業界などで使用されている小型のもの）が効果的に利用できる可能性があるため、その基本性能を確認したところ、コスト面、動作性の面からも十分に適用可能であることが確認された。



2本ねじ方式の鏡。対角線の位置にある2本のねじと、別の1点で鏡を支持し、鏡の方向を制御するシステム。



3本ねじ方式の鏡。測量器具の鉛直軸出し用3本ねじと同様の方法で鏡を支持し、鏡の方向を制御するシステム。中央部に穴を設けて、レーザーポインターなどを挿入する設計変更も可能。



2本ねじ方式の鏡ホルダー。光学精密機器メーカー（駿河精機製）の製品であるが、近～中距離程度（数十m程度）においては、十分な操作性を有すると期待される。低コストが魅力。この中に、円形のミラーを装着することでSOPに適用できる。



3本ねじ方式の鏡ホルダーを斜面に設置した様子。この斜面に傾斜が発生すると、約150m離れた観測点でそれを確認することができる。

図 B4 独自に開発したミラーユニット（左側上2段）、カメラ業界で使用されている近距離用の角度調整ミラーユニット（左側下）、および SOP の適用例（右）

(2) Light State Sensor System (LS³)法

変位や傾斜を簡単な方法で光の色の変化、あるいは光の明るさの変化として可視化する手法である LS³ 法については複数の方式がある。H24 年度までには、基本的な例題として、カラーフィルター方式（グラウンドアンカーやロックボルトの変位を可視化するもの、傾斜を可視化するもの）、太陽光直接取り込み式（グラウンドアンカーの軸力を可視化するもの）などの基本形を製作した。H25 年度には、この中で特に、太陽光直接取り込み式（LS³/analogue/sun light）の変位計を製作し、奈良県十津川村五百瀬地区の地滑りゾーンに設置した。



図 B4 LS³/analogue/sun light の構造

この装置は、太陽光が、変位と連動して動く穴空きフィルターボードの裏側に待ち受けている光ファイバーに入る仕組みになっている。光ファイバーは2mmごとの動きを読み取るための5本、10mmごとの動きを読み取るための5本、50mmごとの動きを読み取るための5本の合計15本が装置の裏側に設置されており、それらの他端を離れた場所に設置する変位確認ボードまで引き込む形式となっている。図B5の例では、2mmごとの変位を確認するファイバーの4本目に太陽光が届いており、他の2本については初期状態のまま（光が一番左側のファイバーに届いていること）であることから、変位はおおよそ6mm程度になっていることが分かる。（この写真は、実際の映像を現地で確認することが困難であるため、ウェブカメラで遠隔地に画像転送したもの。）変位に関する情報は隣接する既存の地滑り変位計のデータと検証を続けており、これまでのところ、両者は整合していることを確認している。



図 B5 LS³/analogue/sun light による変位の表示例

(3) Mechanical tools (M)法

電気を要しない方法論として推進しているのが M 法である。この中には可逆式、非可逆式の大きな分類があり、それぞれにおいて変位、傾斜などを捉えて表示する装置が考えられる。H25 年度には任意 2 点間の相対変位をプーリーで回転に変え、それを時計の針のような「回転による表示」により可視化する装置を重点的に開発した。図 B6 にその例を示す。様々な工業用目的で量販されているプーリー（ベアリングにより滑らかに回転するもので、白いプラスチック部分に溝がある）を利用する。このタイプは、表面の溝の中に糸を通すことができるため都合がよく、溝の底（直径が 21mm になっている）に剛性の高いケブラー糸を通すことによって、相対変位を回転に変えることができる。感度はプーリーの直径により決まるので、現場ごとに都合のよい程度の感度を出せる直径のプーリーを使うことによって、非常に簡単に無電源変位表示装置を創ることができる。

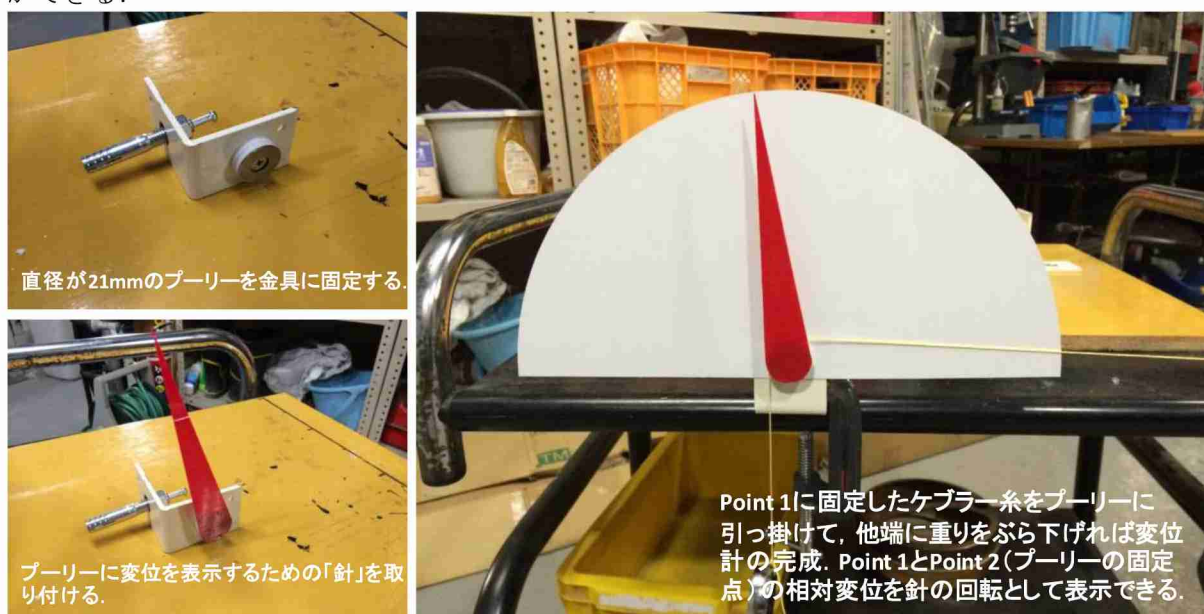


図 B6 プーリーを利用した変位表示装置 (M/deformation)

この装置の適用性を確認するために、実際のトンネル（山梨県で1箇所、和歌山県で2箇所）工事中の安全管理の目的で現地適用試験を実施した。図 B7 には山梨県内の道路トンネル建設現場で実施した例を示す。ここでは、正月休みを挟んだ1週間程度の中に、トンネル掘削の最前面（切羽と呼ばれる場所）から 1m 手前でトンネルの左右の壁の間の水平距離を監視していたところ、15mm を超える変位が生じていたことが確認された。休み明けの安全確認においては、実際に動きがあったのかどうかを確認することが非常に重要であることが知られており、簡易な装置でこの作業を実施できることが確認されたため、M/deformation の利用で現場における安全管理体制の向上を計れることが確認された。

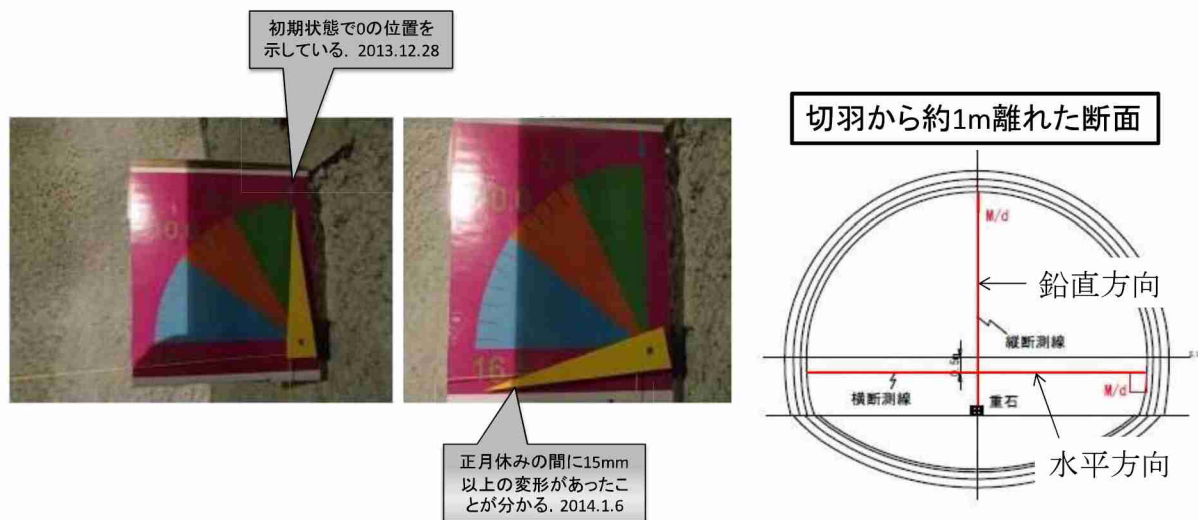


図 B7 M/deformation をトンネルに適用した例

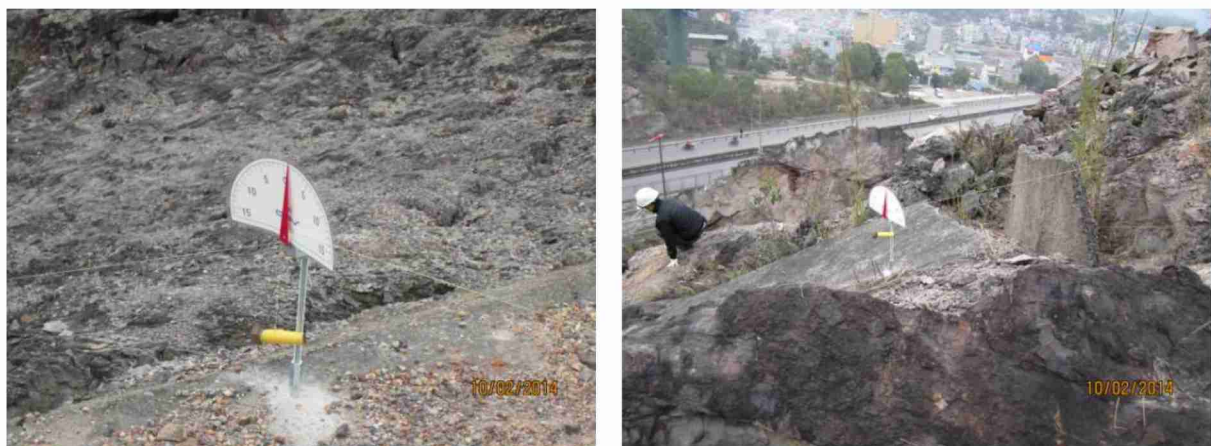
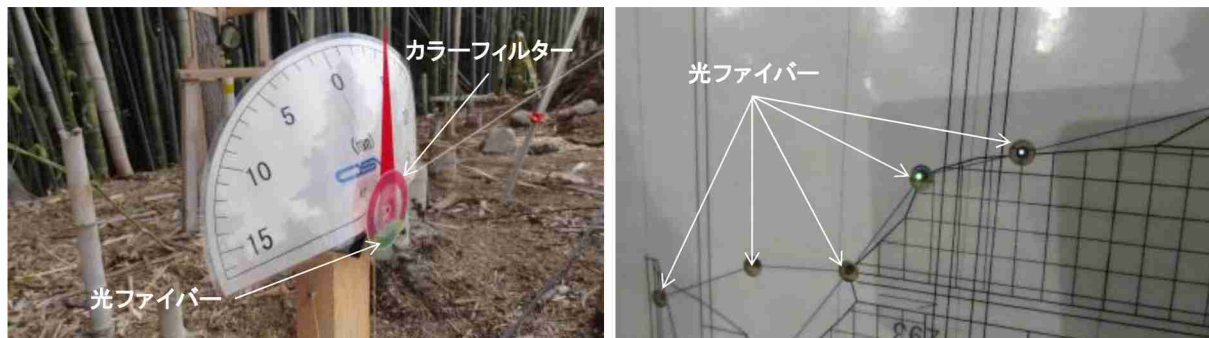


図 B8 M/deformation を不安定岩盤斜面に適用した例

図 B8 に M/deformation を不安定な岩盤斜面に設置した例を示す。これはベトナムのハノイから東へ 250km 程のところにあるバイチャイで以前から特定されていた不安定岩盤斜面に対して、補強工事の必要性を最認識するために実施した特別モニタリングである。これまでに、数回の降雨による大きな変形が起こっている現場で、装置を設置後数ヶ月間モニタリングを実施したところ、有意な動きがあることを確認できた。これは本助成プロジェクトで生まれたノウハウ (M/deformation) が、海外の現場で実用化に向けて使用された第 1 例である。

また、図 B9 には LS³ の太陽光を取り入れる方法論と M/deformation の抱き合わせ形式の装置を

示す。この装置では、相対変位を針の動きで視認できるようにしているが、周辺に草木が茂ったり、障害物によってそれが視認できなくなることを想定して、同装置に光ファイバーを設置し、変位の大きさを周辺の太陽光によって視認しようとするものである。装置設置の位置、方向の関係で必ずしも十分な光量を取り入れることができない場合もあるが、一つの装置に fail safe を意識して、二つの機能（どちらも電気なしで作動する）を盛り込む例として試作したものである。



M/deformationによって機械式に変位を捉えて表示するとともに、回転部にカラーフィルターを接着して、変位の大きさを光の色で判別できるようにしたもの。

カラーフィルターで色付けされた太陽光を離れた場所(50m～100m程度)で確認できる。

図 B9 M/deformation と LS³/analogue/color filter/sun light を抱き合わせて適用した例

【平成26年度までの研究・技術開発の内容と成果】

平成26年度（最終年度）には、低コストセンサについては3つのカテゴリーにおいてこれまでに進めてきている開発、改良、整備を推進する。低コストで製作可能なものについても、現場での使用期間が長い場合には耐候性に優れていることが要求されるため、その観点からの整備を計る。

現場適用については、すでに装置を設置している場所については、装置の機能維持状態、耐候性の確認などを継続して実施する。また、新規に設置が予定されている場所（神戸市北区の斜面など）については、関係者と協議の上で、最適化したプランで計測を実施する。

最終年度の重要事項として、モニタリングの計画、実施の詳細プラン立案、運用方法に関するガイドラインの起案がある。低コストでシンプルな構造で機能するOSVセンサを広く社会で展開するためにはガイドラインが親しみのある読みやすいものでなければならない。併せて、今後の国内、及び国際的な展開に滑らかに繋がっていくように、国際シンポジウムを開催する。ここでは、実際のプロジェクトに関与していただいた国、自治体などの関係者、ゼネコン、コンサルなどのエンジニアを招き、3年間のプロジェクトの成果を公表し、今後、国内外の各地で安全安心のためのモニタリングを低コストで実施できるようにするための基礎づくりを計る。

以下に、3年目に実施したセンサ開発、および関連する現場での作業について3手法のそれぞれについて述べる。

(1) Single Observation Point (SOP)法の開発

2年目当初よりSOPシステムを八幡トンネル坑口法面に設置した際の概要を図C1に示す。鏡の大きさS（直径10cm）、光源の大きさL（5cm）、視認距離D（150m）を考慮すると、この設定で光源が見えなくなる際の鏡の回転角 θ_c は

$$\theta_c = (S+L/2)/(2D) = 0.024 \text{ 度}$$

となる。従って、トンネルの施工によって θ_c 以上の傾斜が出たかどうかは、SOPの位置に目をおいた時に、「光源が見えるかどうか」によって判定できることになる。しかし、この実際の現場では掘削という具体的な行為を行うため、鏡設置位置における傾斜が θ_c を上回ったため、反射光視認位置を確認するための装置を準備した。つまり、本来、SOP（常にここから光源を確認するという特殊なポイント）にて視認するが、その時に光源が見えない場合、光源が見える点をSOPの周辺で探し、その時の視準望遠鏡の位置（SOPからの横ズレ、縦ズレ量）を記録するという作業を行った。その記録を図C2に示す。

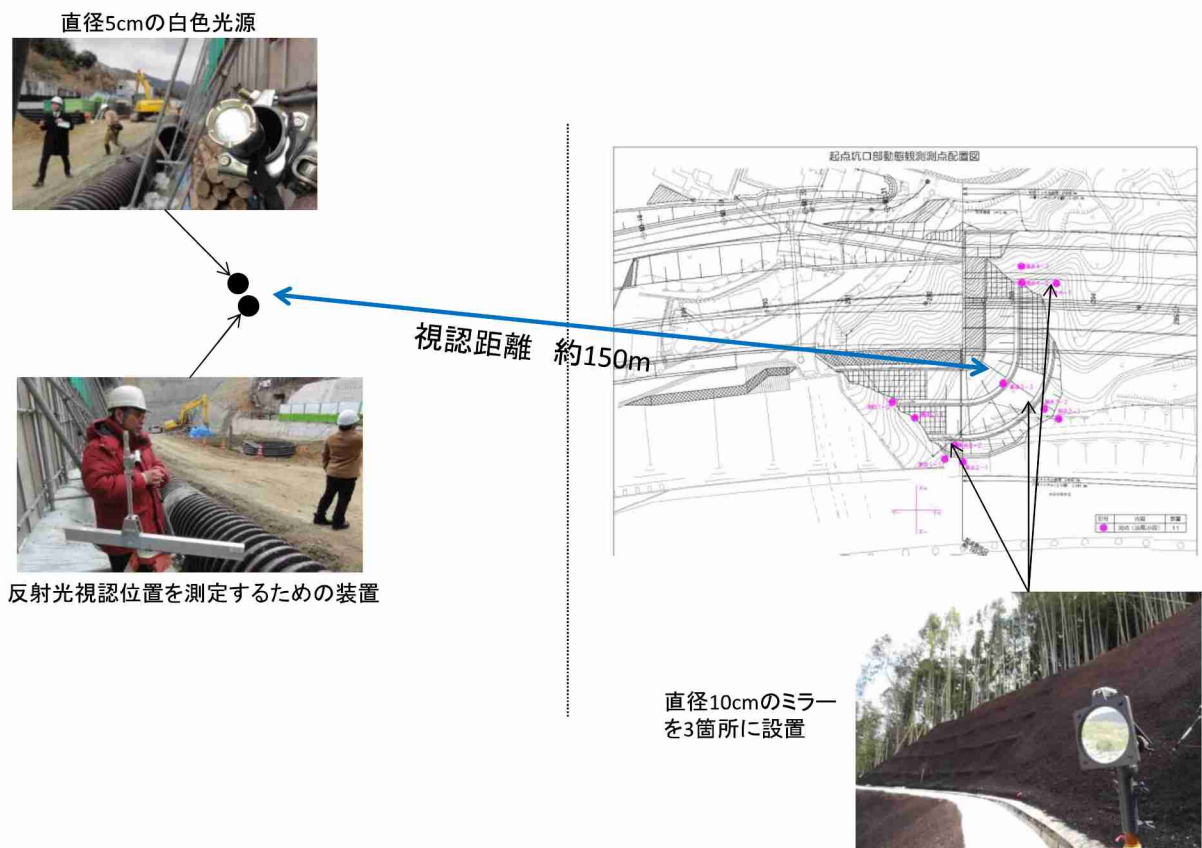


図 C1 SOP による八幡トンネル坑口法面の監視体制

計測結果(グラフ)

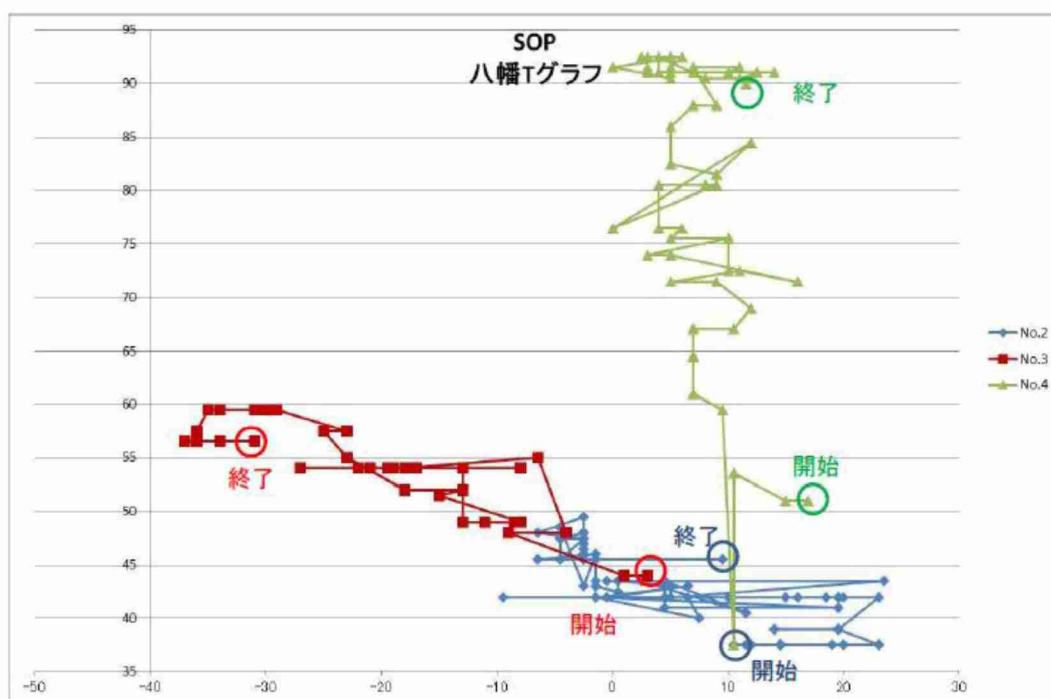
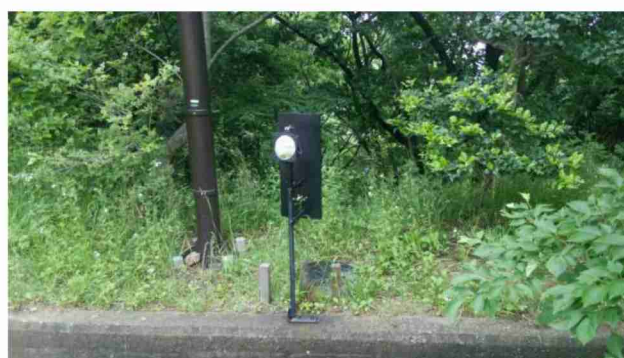


図 C2 光源視認位置の SOP からのズレ量 (単位: mm) の経緯
(データ提供: 鴻池組, SK ラボ)

このケースでは、トンネル建設工事に伴い最大で反射光の視認位置が 10cm 程度ずれていることがわかる。このズレが純粹にミラー設置位置に生じた傾斜角であるとする、視認距離 (約 150m) などの数値から、設置位置に 0.019 度程度の傾斜が生じたことがわかる。このデータは既存の測量データとの比較を待つが、鏡を設置するだけで非常に小さな傾斜を把握できることがわかる。



(a) 工学部キャンパス内の位置



(b) 設置した鏡の様子。(季節による植生の違いあり)



(c) SOP を設置した建物

図 C3 神戸大学工学部キャンパス内に設置した長期観測用の SOP システム

トンネル工事現場とは異なり、通常はほとんど動きがないと想定される現場例として図 C3 に示す神戸大学工学部キャンパス内の盛土区域を選定した。盛土法肩にミラー（直径

10cm) を設置し、約 50m 離れた校舎 3 階のベランダ内に SOP を設定した。この設定では θ は 0.071 度になっている。ミラー近傍には植生があるため季節によって視認環境がわずかに変化するが年間を通して視認に問題はなく、また、当初に設置した鏡には全く傾斜が生じていないこと（即ち設置期間内には盛土の変形がないこと）が確認されている。

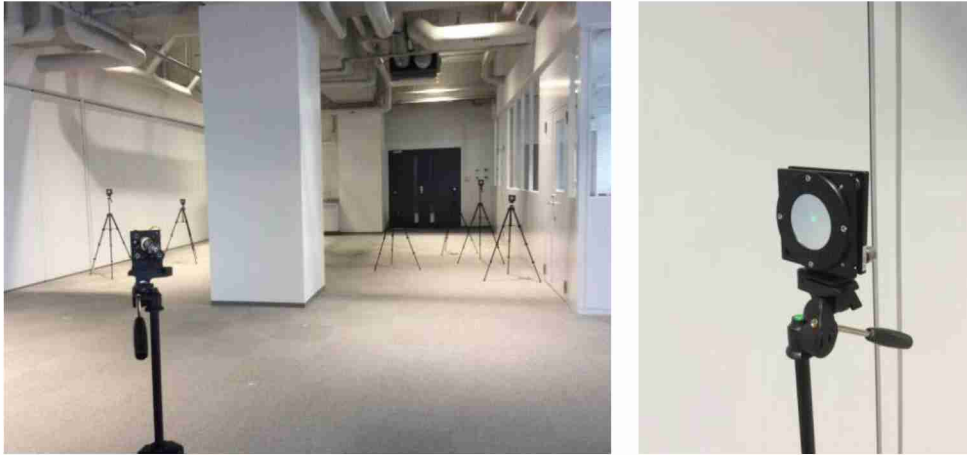
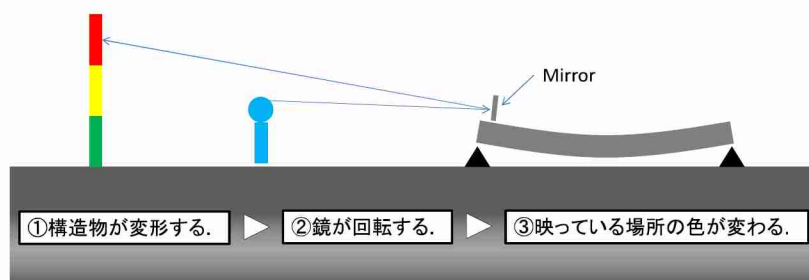


図 C4 市販のミラーを使用した SOP システムの運用

本研究で、試作&開発したミラー（標準サイズは直径 10cm）においては、視準距離が 200m 程度の範囲まで、初期設置の作業が問題なく実施できることを確かめている。なお、視準距離が 10m から数十 m の範囲においては価格などの問題から市販のミラー（2 軸の角度調整機能有り、図 C4 参照）を使用する方が合理的である場合もあるため、実際のモニタリングを計画する際には距離、総予算などを勘案して最適なアレンジをすることが望ましい。

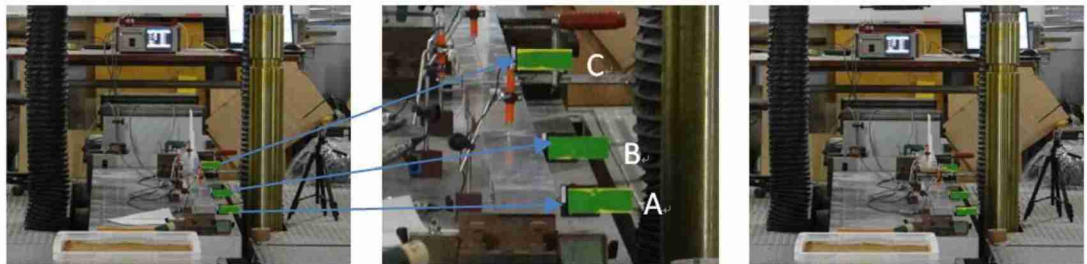
また、視覚情報を 3D 空間の 1 点に集中する標準型 SOP システムを簡略化した方法論として、視認箇所を「点」から「線」にする方法も開発可能であることを確かめている。この手法は、SOP の簡略版方法論として展開できるもので、鏡の形状、モニタリングしようとする量、光源の形状などを、通常 SOP とは異なる設定にできるものである。図 C5 に単純梁の変形試験において、梁に生じるたわみ角を長方形の鏡で可視化した例を示す。



(a) 梁の曲げ変形（たわみ角）を鏡で可視化する実験概要



(b) 梁に取り付けた鏡（左、青い部分が鏡）と横縞模様として用意したカラーボード（右）



a) Origin

b) Partial enlargement of the mirrored green stripe

c) 9.8N



d) 98N

e) 196N

f) 294N

(c) 段階的に梁を変形させた時の鏡に映る色の变化

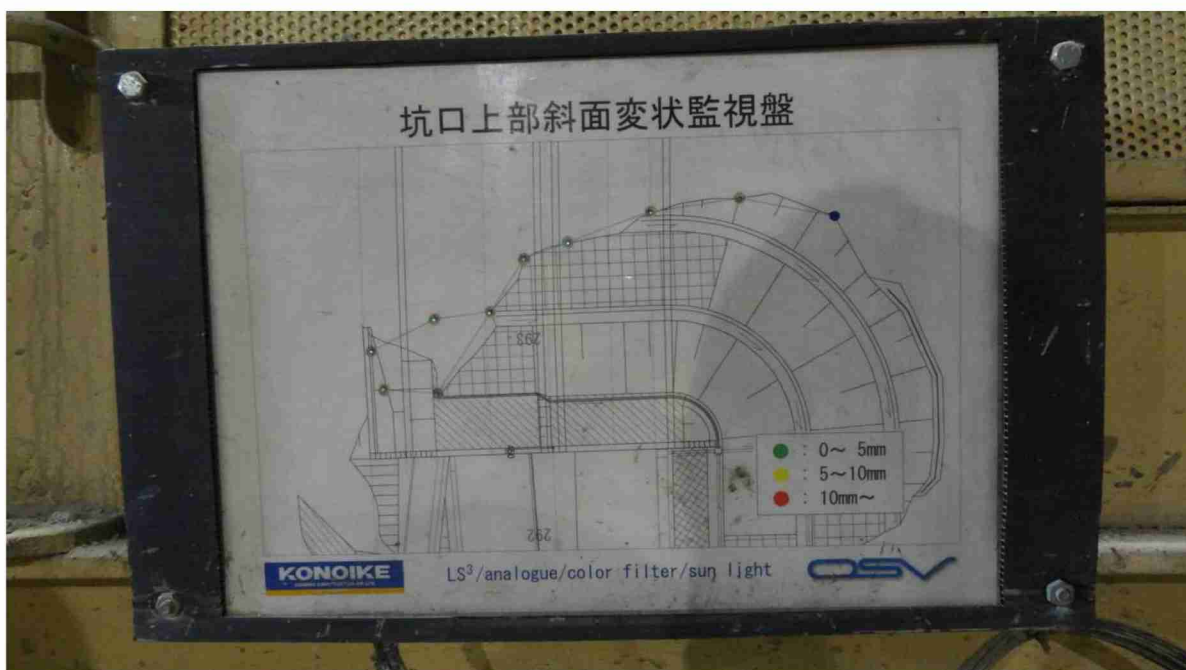
図 C5 長方形ミラーを使用した SOP の簡略版システム例

この例では、光源の代わりに異なる色をプリントした紙を使っている。従って、電力の供給が不要となる。また、視認が可能な場所が「点ではなく、線でもよい」という設定としているため、紙に描いているカラーバンドは横長に描いている。ミラーは長方形（高さ 3cm、幅 8cm）とし、角度変化の計算においては、高さ 3cm が重要なインデックスになるようにしている。即ち、梁に荷重を与えて曲げ変形を起こさせると、たわみ（鉛直変位）と、たわみ角（回転）が生じるが、たわみによる影響よりもたわみ角による影響が大きいため、長方形ミラーに映る映像は、基本的にはたわみ角を表現していると見なして良い。この例では、任意構造物のたわみ角を可視化した例となっているが、変位をプーリーなどで回転に変えれば、同様の方法論で変位を鏡で可視化することも容易にできる。この簡略化した方法では視認箇所が線になるため、Single Observation Line としての運用が可能となることがわかる。

(2) Light State Sensor System (LS³)法の開発：

2年目当初から八幡トンネルに設置した変位確認装置は、太陽光を光ファイバーに入れて、

暗い場所で変位量を視認する仕組みであるためランニングコストがゼロである。そのため、試行設置期間において、正常にその機能を果たし、見学者の注目度も高かった。小動物などによる光ファイバーの切断のような突発事故は避けられないものの、電子デバイスの故障によるモニタリングシステムの稼働停止のような状況は起こらないため、この方法論は今後の多様な拡大展開が可能である。

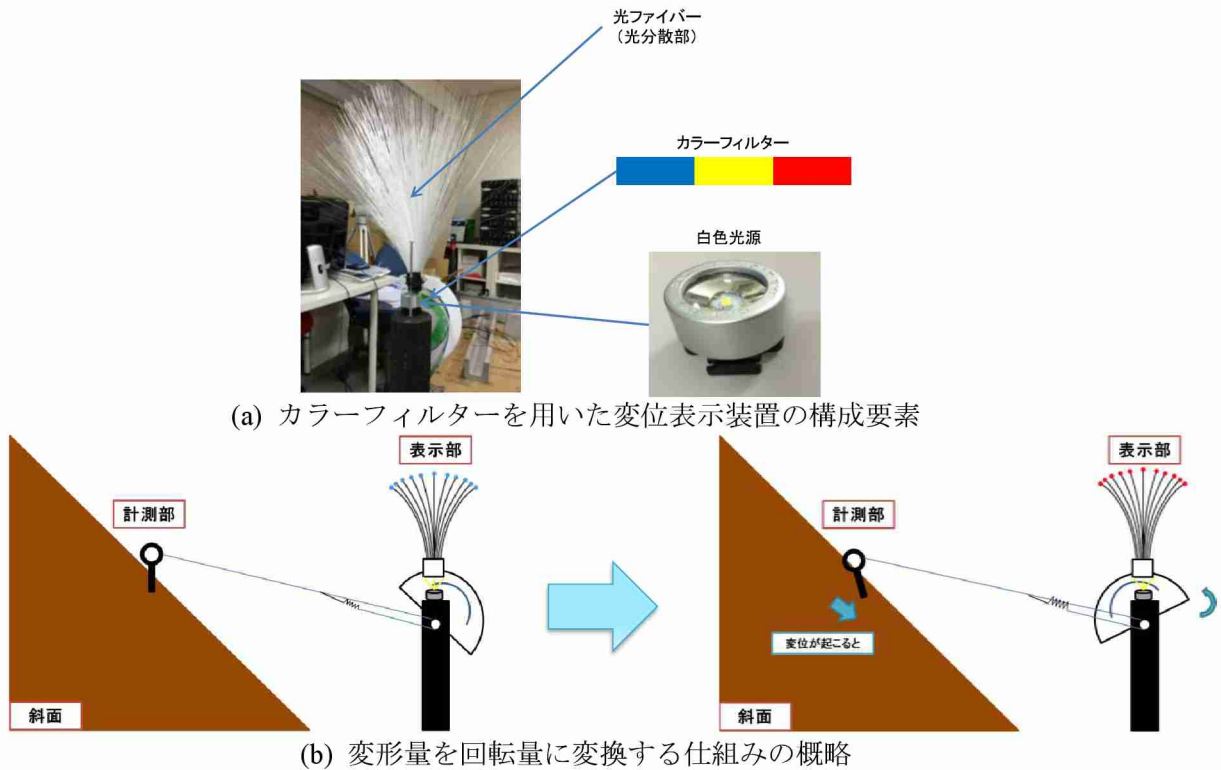


(a) 50m 程度離れた場所の変形状況を伝えるボード



(b) ファイバーボードを視察する技術者

図 C6 法面の変形を光ファイバーで視認する方法



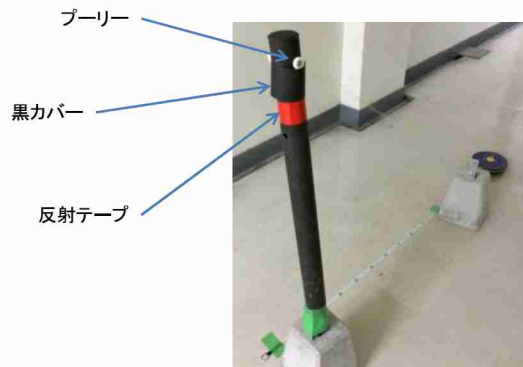
計測部の 変位置		12mm	0mm	36mm
装置全体				
表示部				

(c) 光の色として可視化される変位置

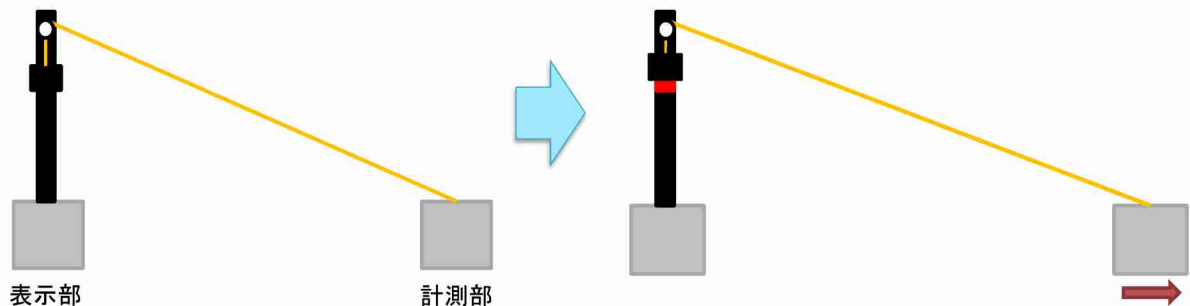
図 C7 カラーフィルターを利用した変位表示機の例

図 C7 にカラーフィルターを用いた変位表示装置の例を示す。この例では、変形によりプーリーを回転させ、それと連動するカラーフィルターの動きで白色光が色付けされて光ファイバーの束に可視化される仕組みとなっている。この例では、光源を用意する必要があるが、それ自体に特に問題がない場合においては、トータルコスト、美観（特に夜間）などを総合的に判断すると適用可能な現場が多く存在することが考えられる。即ち、この方法論は、防災のための情報開示&共有にデザインの感覚を融合させることができる素因を含んでいるため、技術者、行政関係者、建築家、造園デザイナーなどが防災情報の新しいマネジメントシステムを構築するスキームにつながる可能性がある。

次に、光を反射するテープを利用した装置を図 C8 に示す。この例では、変形量をそのまま移動物体の動き（この場合は、黒いカバー）に伝えて、「変形が大きくなる+カバーが動く+隠れていた反射テープが見えてくる」という極めてシンプルな機構を実現している。



(a) 光反射テープを用いた変位表示装置の構成要素



(b) 変形量で反射テープが見えるようになる仕組みの概略

計測部の変位量	0	10mm	30mm	50mm
テープの見える幅	0	8mm	20mm	37mm
理論値	0	7.07mm	21.21mm	35.35mm
表示部				

図 C8 反射テープを利用した変位表示装置の例

変形量で黒カバーを移動させる際に、必要であればギアなどを使って変形を増大させる（1mm の変形量をギア比 10 で 10mm に拡大するなど）ことも可能である。カバーの移動でその下にあった反射テープが次第に見えるようになるため、中間、夜間を問わずそれを視認

することが可能になる。このような例では、例えば図 C9 に示すように、斜面の任意箇所に生じている変位をガードレールに可視化することも容易にできるため、既存インフラを有効利用した低コスト変状可視化システム構築が、非常に小さなコストで実現できることがわかる。

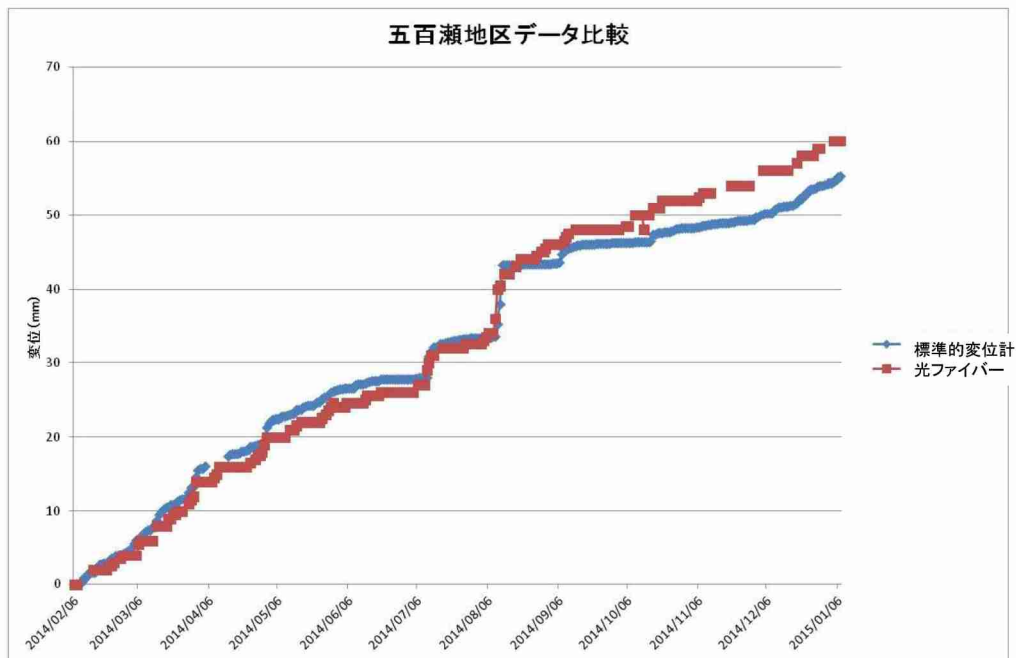


図 C9 反射テープを利用した変位表示装置の適用箇所例
(*This image is from the Internet.)

2年目の末期に奈良県五百瀬地区に装着した地すべり変位を捉える装置は、1年以上トラブルなく作動し続けた。図 C10 に示すように、通常の変位計が捉えた変位と比較しても、この装置が高い信頼性で使用できることがわかる。今回作成したモデルは変位計測のレンジを 250mm 程度にしているが、レンジを例えば 5mm 程度にすることが適切なケースにおいては、装置の製作コストを非常に小さく抑えることが可能になる。



(a) 地すべり変位を光ファイバーで捉える装置

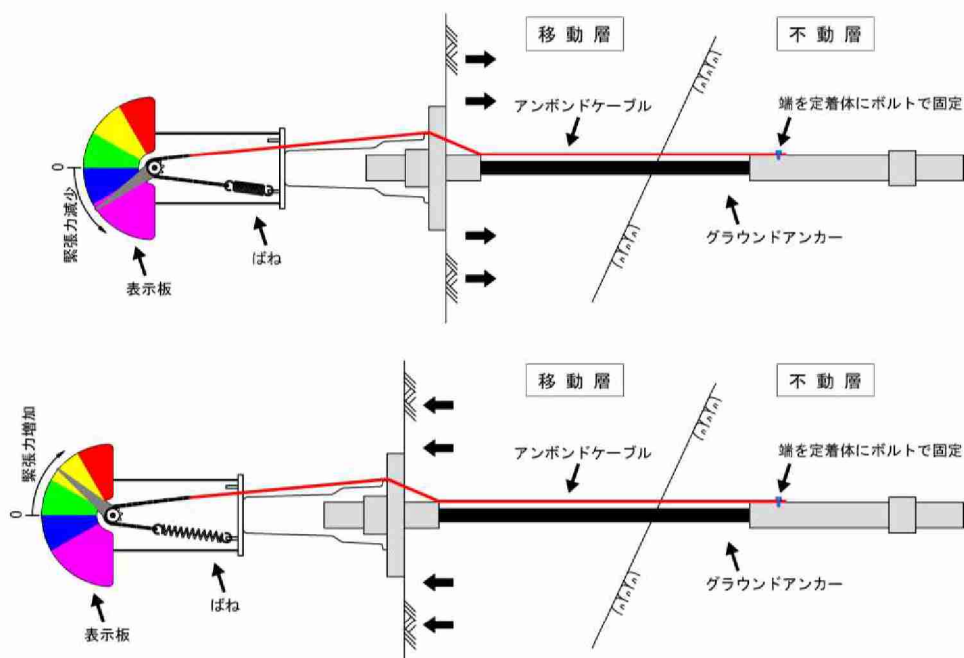


(b) 標準的な変位計との比較

図 C10 光ファイバーと太陽光を利用した変位表示装置の適用例
(データ提供：日本工営)

(3) Mechanical tools (M)法の開発：

図 C11 にプーリーを利用した変位表示装置をアンカーに適用した例ここを示す。この例では、新規に設置するアンカー軸力を、変位表示の目的で挿入されているケーブルの動きを利用して針の回転として表示する機構を採用している。ランニングコストがゼロであるため、維持管理が容易であり、装置の大きさを工夫すればかなりの遠距離からも視認が可能となる。斜面補強工として重要な位置を占めるグラウンドアンカーの状態把握に常套的に使用されることが期待できる。



(a) 無電源でアンカー軸力を可視化する機械的装置
(エスイー：「見えるアンカー」のパンプレットより抜粋)



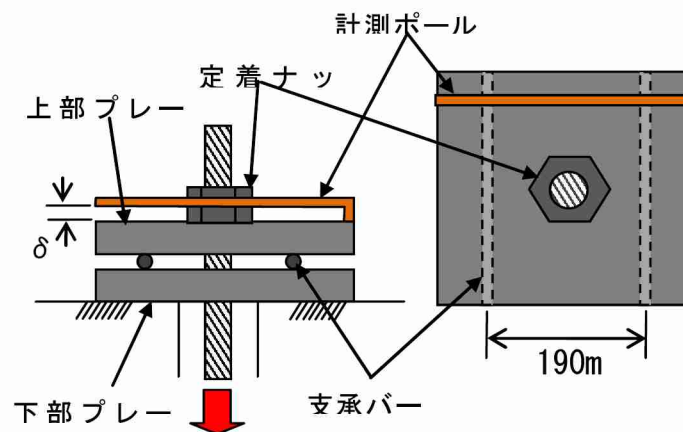
(b) 機械的装置の外観



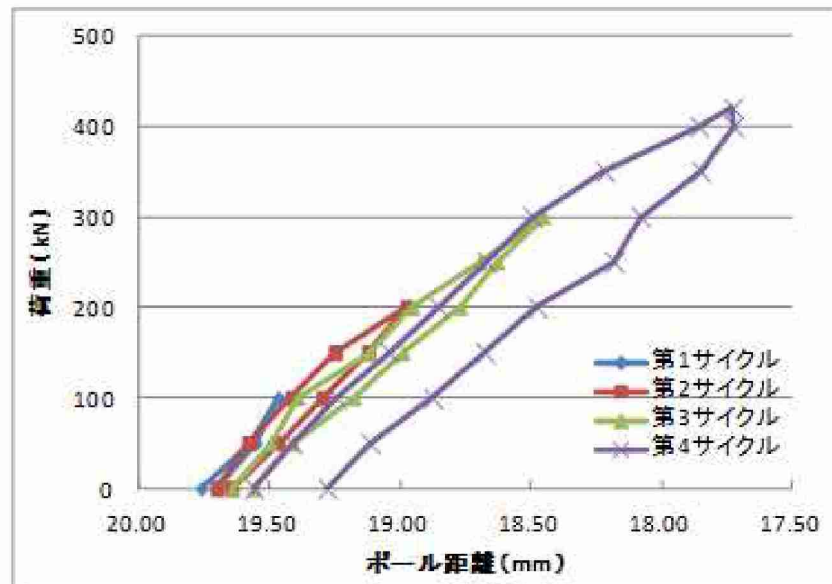
(c) 崩壊した斜面の補強工事例

図 C11 無電源で作動するアンカー軸力表示装置の適用例

図 C12 にアンカープレート周辺に新しい工夫を施す例を示す。通常、アンカー軸力は楔式、ナット式などによらず固定部のプレートは1枚である。ここで提案する方法では第2のプレートを挿入し、その曲げ変形をノギスで計測するようになるものである。第2のプレートの曲げ変形は直接計測も可能であるが、図に示すようなオレンジの部分新たに設置し、その先端とプレートの間（□で表示されている部分）に生じる変位を測れば構造上、プレート中央部のたわみが数倍に増幅されるので変位計測の信頼度を上げることができる。軸力と変位量 δ の相関が示すように、この方法論は十分に実用に耐えるものであり、ノギス計測だけでなく、ここにプーリーを用いた可視化装置を装着することも将来的には可能である。



(a) 第2のプレートの構造と配置方法



(b) アンカー軸力とノギス計測結果の関係

図 C12 第2のアンカープレートを利用した軸力の可視化スキーム

電子ペーパーの有効利用

3種類のカテゴリーで開発を推進したが、電力をわずかでも使用するケースにおいて、その可視化情報をより広い面積で表示したいケースがある場合には、ランニングコストが非常に小さくて済む電子ペーパーを使用することが望ましい。図 C13 にはその例を示すが、3段階、あるいは5段階で情報を表示したい場合、あるいは色ではなく表示したいメッセージを形状（例えば○, □, △, →などを表示したい場合）によって行いたい場合には、電子ペーパーが効果的なデバイスとして利用できることが分かっている。



図 C13 様々な装置に連結できる電子ペーパー

上空、および遠距離からの視認性

技術的な確認事項の最後として、OSVの低コスト装置を上空、および遠距離から視認する際の作業性を確認した。図C14に神戸大学の周辺を西向きに見て、上空(50m~100m程度、Verticalと表示されている方向)、および遠距離(1,000m程度、Horizontalと表示されている方向)からの視認性を確認した。

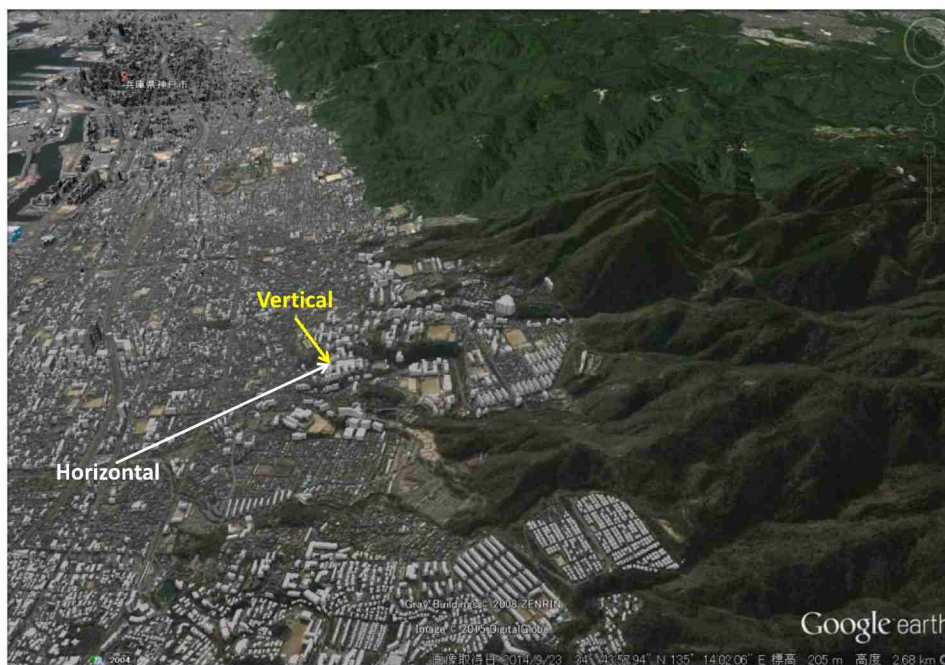


図 C14 上空、遠距離からの視認性確認作業の位置



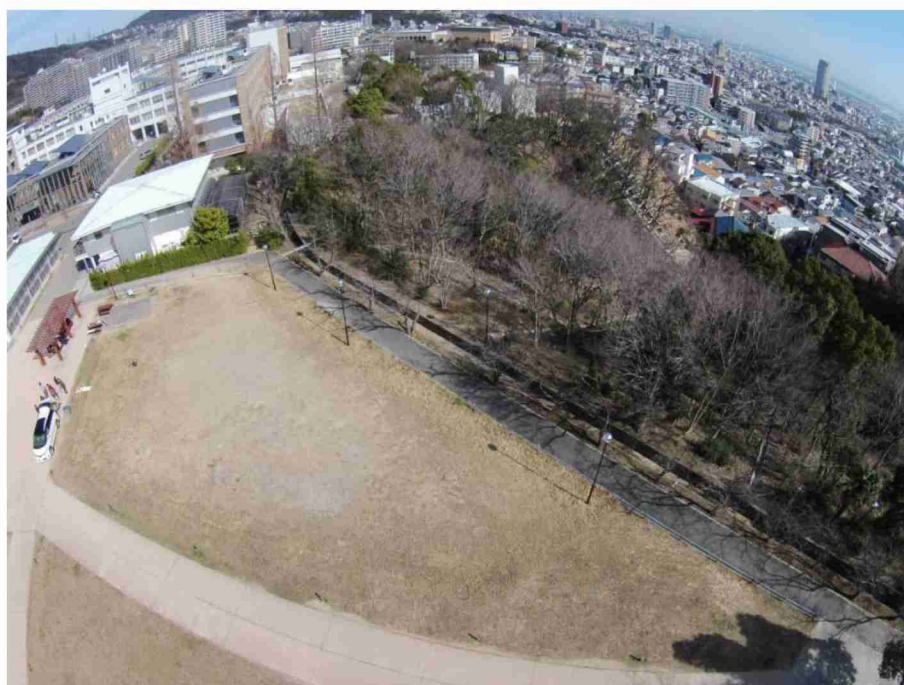
(a) 上空からの視認作業に用いたドローン



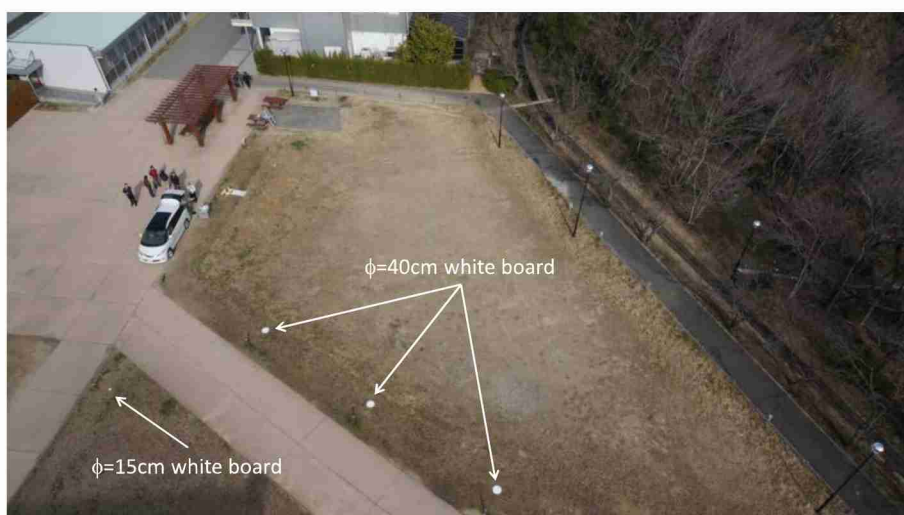
(b) 白いプラスチックボード (直径 40cm)

図 C15 上空からの視認作業に用いたドローンと白いプラスチックボード

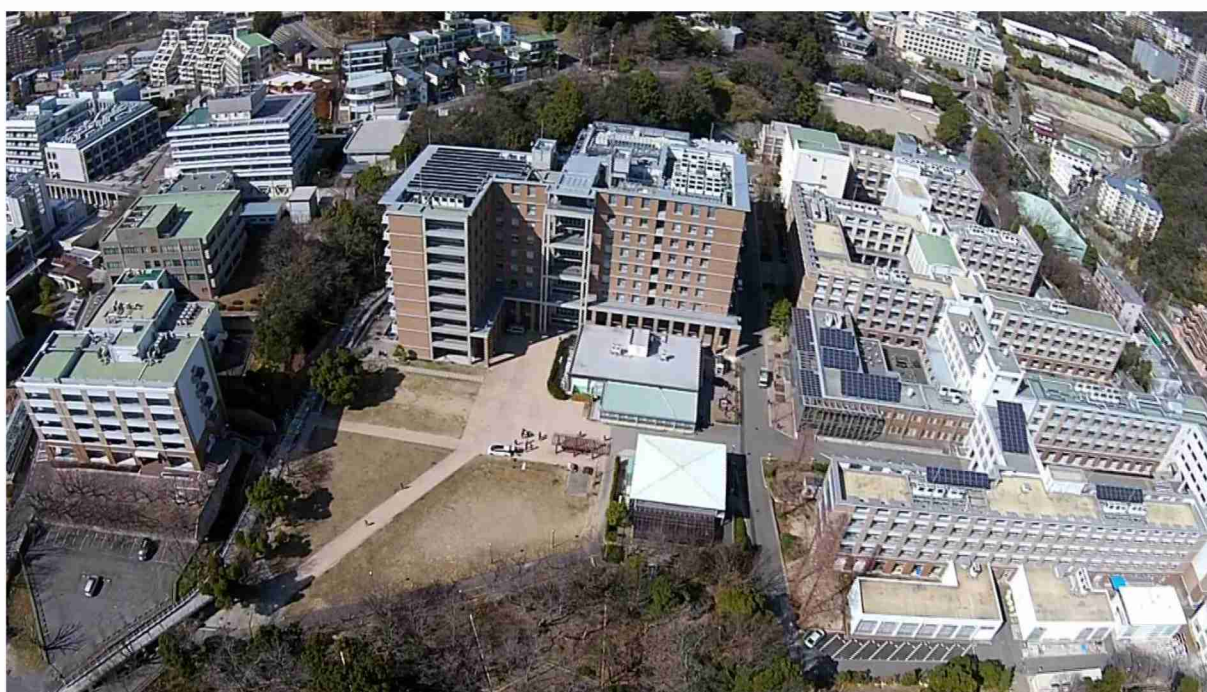
上空からの視認には図C15に示すような小型カメラ付きドローンヘリコプターを用いた。地上に置く OSV の装置は視認性の確認だけが目的であったため、周辺との区別がしやすい円形の白いプラスチックボード (直径 40cm と 15cm の 2 種類) を用いた。上空からの撮影は、プラスチックボードを置く前、置いた後のそれぞれで、高度 15m 程度から 50m 程度の範囲内で実施した。代表的な映像を図 C16 に示す。



(a) 上空 15m 程度からの映像 (OSV 装置を置く前)



(b) 上空 15m 程度からの映像 (OSV 装置を置いた後)



(c) 上空 50m 程度からの映像 (OSV 装置を置く前)



(d) 上空 50m 程度からの映像 (OSV 装置を置いた後)

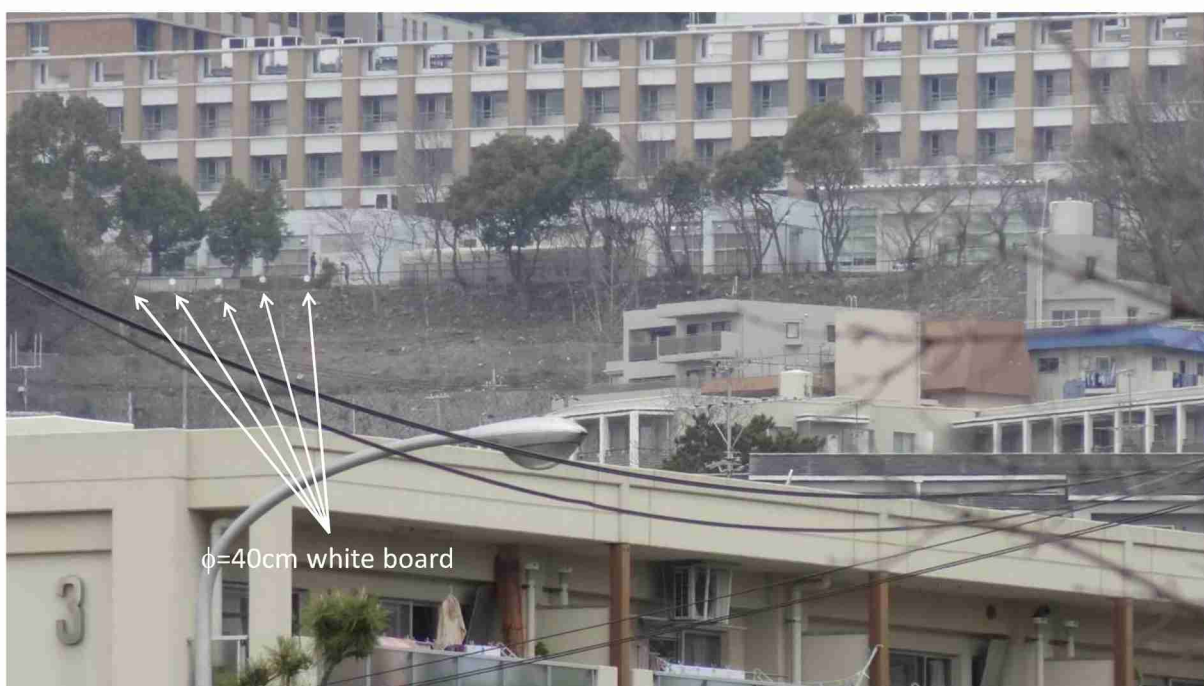
図 C16 上空からの視認性確認実験の映像

これらの結果から、周辺環境と区別がしやすいことが知られている「白」のプラスチックボードがはっきりと視認できていることがわかる。

一方、水平方向の視線で約 1,000m 離れた場所から同様の白いプラスチックボードの視認性を確認した。その結果を図 C17 に示す。ここでは、デジタルカメラのズームなし、ありの 2 種類の写真を示しているが、肉眼（視力 1.5）でもはっきりと視認することが可能であった。この視認性実験では簡単のために白のプラスチックボードを置くだけの設定としたが、これを実際の OSV 装置として使用する際には、初期条件としてボードの表面を周辺環境と区別がつかないような板でカバーしておき（例えば迷彩柄など）、所定の変状が生じると、そのカバーがはずれるような仕組みを作ることは容易である。



(a) 約 1,000m からの映像 (OSV 装置を置いた後, ズームなし)



(b) 約 1,000m からの映像 (OSV 装置を置いた後, ズームあり)

図 C17 水平距離約 1,000m からの視認性確認実験の映像

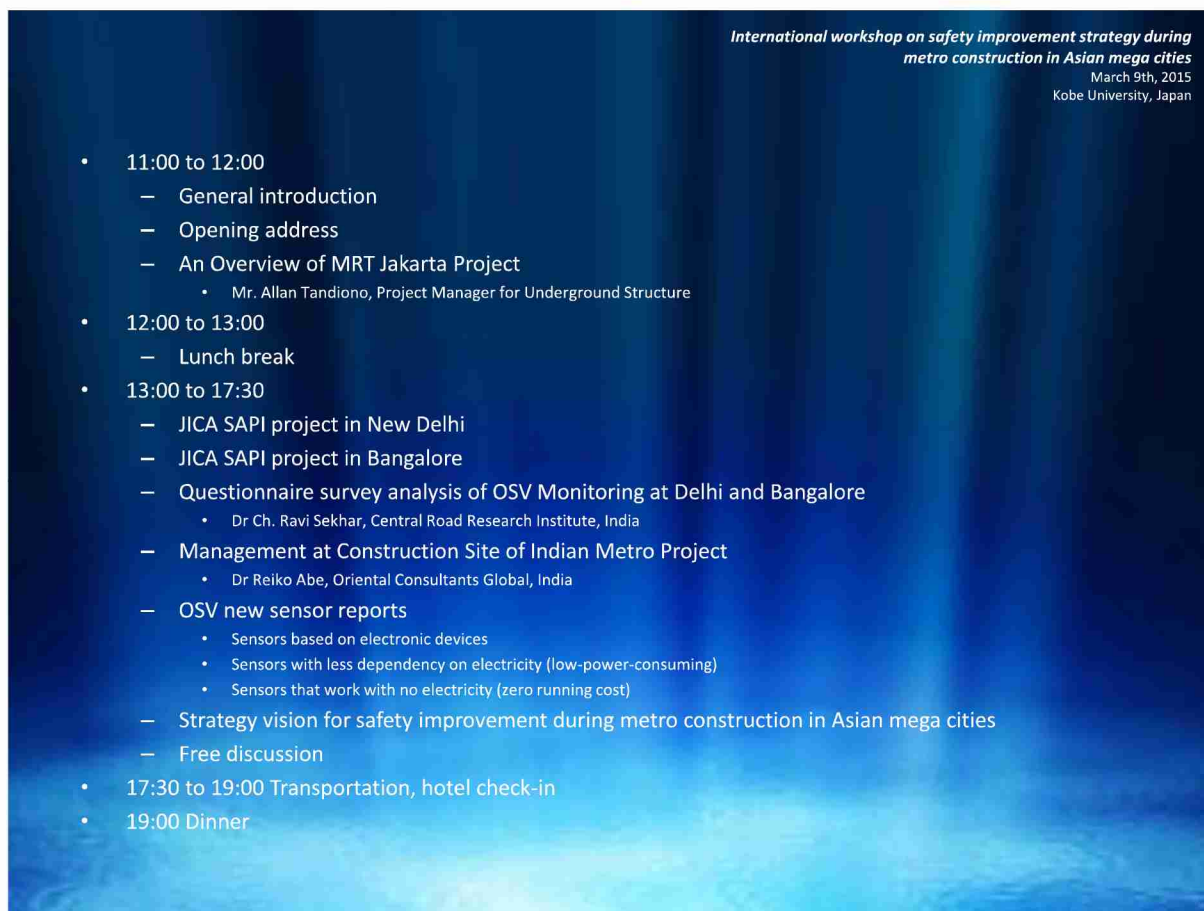
国際ワークショップ

効果的なインフラのモニタリングは世界共通のテーマである。ここでは、3年間の研究成果を国内だけでなく、海外でも展開できるようにすることが重要である。その足がかりとして、インド、インドネシア、フィリピンから政府関係、メトロ建設関係の技術者3名を招聘

し、International workshop on safety improvement strategy during metro construction in Asian mega cities, と題した国際ワークショップを開催した。この企画は、アジアの大都市における大規模プロジェクトに直接関係する技術者間で密な情報交換を行うことを目的として実施し、大変に有意義な情報発信、情報交換を実施することができた。



(a) ワークショップの案内パンフレット



(b) ワークショップのプログラム
図 C18 国際ワークショップの実施概要

現場試行実験を実施できた現場について

図 C19 に研究機関内においてフィールド実験を実施した現場を示す。トンネル、斜面など複数の現場の協力を得ることができ、それぞれのセンサの動作性を確認することができた。なお、白抜きの現場は、本研究プロジェクトの枠を超えて独自に実施されたものであるが、それらの現場においても低コストの OSV 装置を用いるコンセプトが適用されている。

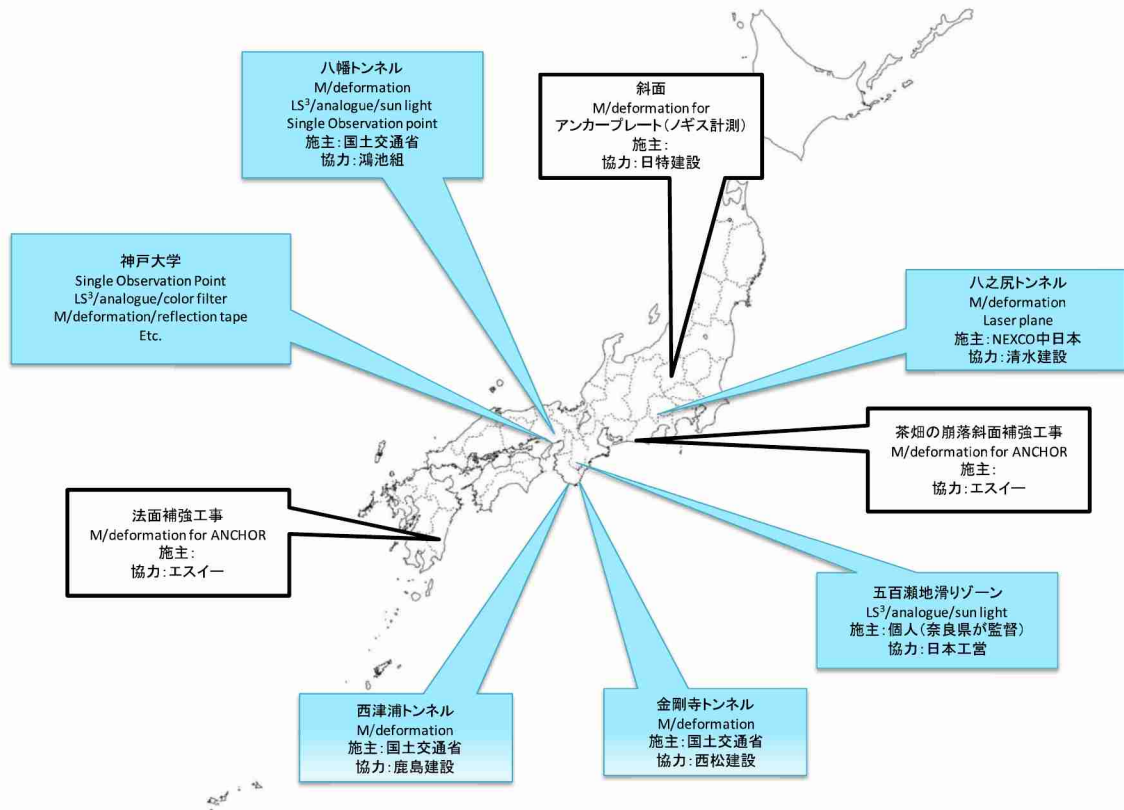


図 C19 フィールド実験を実施した現場

現場試行実験を実施できなかった現場について

奈良県の長殿、兵庫県の神戸市において情報収集、交渉を進めていた現場についてはそれぞれ自然災害の復旧対策などに関連する現地の事情により、低コストのOSVシステムの試行を期間内に実施することはできなかった。これらの現場については、今後に必要な情報交換を適宜進めてゆく必要がある。

7. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名）	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
1) Experiment for monitoring of ground movement ahead of mountain tunneling face using optical fiber	2012年11月	地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム, 地盤工学会関西支部	Haihua Zhang, M. Terashima, K. Tsujimura, S. Akutagawa
2) A new method for visualizing force in ground anchor by using plastic optical fiber and sun light	2012年10月	Proceedings of the 7th Asian Rock Mechanics Symposium, Seoul	S. Akutagawa, A. Nishio, K. Takeya, Y. Ishizuka and T. Katayama
3) Onsite visualisation of measured information in mining engineering for advanced risk management	2013年5月	Proceedings of the 7th International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, 2013, Perth, Australia, pp. 645-656, 2013.	S. Akutagawa, S. Komiyama, T. Kunimi, A. Takahashi, C. Izumi and R. Abe
4) Visualisation of deformation or force in rock supporting structures	2013年5月	Proceedings of the 7th International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, Perth, Australia, pp.657-667, 2013.	A. Nishio, H. Zhang, S. Akutagawa, K. Takeya, Y. Ishizuka, T. Katayama
5) Measurement and real-time visual presentation of ground deformation ahead of mountain tunneling face using optical fibers	2013年6月	Proceedings of the 3rd SINOROCK Symposium "Rock Characterization, Modelling and Engineering Design Method", pp.759-762, 18 to 20 June, Shanghai, China, 2013.	S. Akutagawa, H. Zhang, M. Terashima and K. Tsujimura
6) RISK MANAGEMENT AND NEW TECHNOLOGIES IN HANOI METRO LINE 2	2013年10月	Proceedings of the International Workshop on the Risk Management in Urban Underground Construction, pp.667-674, Hanoi, Vietnam, 16th October, 2013.	C. Izumi, S. Akutagawa and Ho Thanh Son

7) SIMPLE MECHANICAL METHODS FOR MONITORING AND DATA-VISUALIZATION DURING NATM TUNNEL CONSTRUCTION	2014年1月	第42回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, pp.38-43, 2014.	H. ZHANG, M. TERASHIMA, K. TSUJIMURA and S. AKUTAGAWA
8) 計る技術と伝える技術で未来を創る	2014年2月	月刊土木技術, pp.8-14, Vol.69, No.2, 2014.	芥川真一
9) A new method for reading local deformation of granular material by using light	1-4 June, 2014.	Proceedings for the 48th US Rock / Geomechanics Symposium, Minneapolis, Paper 7723	Akutagawa, S., Nishio, A. and Matsumoto, Y., Machijima, Y.
10) Single Observation Point method for measurement and real-time visualization of inclination using a mirror for rock engineering projects	14-16 October, 2014	Proceedings of the 8th Asian Rock Mechanics Symposium, PDF file RHM-4, Sapporo, Japan	Shinichi Akutagawa, Katsuyuki Nakata, Akinobu Nishio and Hiroyuki Yamada
11) A mechanical method for monitoring and visualization of deformations of tunnel structures	14-16 October, 2014	Proceedings of the 8th Asian Rock Mechanics Symposium, PDF file FMT2-5, Sapporo, Japan	S. Akutagawa, H. Zhang, T. Terashima, K. Tsujimura
12) Monitoring and Data-visualization of Displacement for NATM Tunnel Constructions	16-19 November, 2014.	Proceedings of the International Conference on Life-Cycle of Structural Systems – Furuta, Frangopol & Akiyama (Eds), pp.216-220, Waseda University	S. Akutagawa, H. Zhang, M. Terashima and K. Tsujimura
13) The development of low cost Mechanical OSV (On Site Visualization) and its application on Bai Chay Bridge approach road in Vietnam,	16-19 November, 2014.	Proceedings of the International Conference on Life-Cycle of Structural Systems – Furuta, Frangopol & Akiyama (Eds), pp.649-656, Waseda University	C. Izumi, S. Akutagawa, H. Zhang, K. Tsujimura
14) グラウンドアンカーの緊張力変動を容易に把握する技術の開発と現場実証実験	October 9, 2014.	第17回「斜面防災対策技術フォーラム'14」 in 札幌	齋藤 春佳, 小林亮太, 竹家宏治, 川崎洋右, 芥川 真一

15) 大変形を生じる地山への M/d 機器の適用性	2015.1.	土木学会第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 210-215	青野泰久, 塚本晃平, 真下義章, 熊坂博夫, 張海華, 芥川真一
16) 無電源で作動する岩盤構造物の モニタリング装置の開発と適用事例	2015.1.	土木学会第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 284-287	芥川真一, 張海華, 西尾彰宣, 辻村幸治, 小林弘典, 高橋厚志
17) 計測データの可視化による安全監視	2014-09-01	地盤工学会誌 62(9), 32-33	芥川真一
18) A mechanical method for measurement and visualization of the deformation and its application	2014.7.	第 49 回地盤工学研究発表会, 北九州, No.978	S. Akutagawa, H. Zhang, K. Tsujimura
19) On Site Visualization -新しいモニタリングの形を探る-	2014.9.	建設機械施工, Vol.66, No.9, pp.42-47,	芥川真一
20) 鉱山の安全管理を目的とした On Site Visualization の適用可能性について	2015.2	資源素材学会誌, Journal of MMLJ, Vol.131(2015), No.2,3, pp.39-46	芥川真一
21) グラウンドアンカーの緊張力変動を容易に把握する技術の開発	2014.8.19	第 53 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.114-115	斎藤春佳, 小林亮太, 竹家宏治, 芥川真一
22) グラウンドアンカーのたわみ式荷重判定装置の載荷試験	2014.8.19	第 53 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.116-117	中野亮, 芥川真一, 宇次原雅之, 竹家宏治
23) 安全の見える化技術の現場適用と検証に関する一考察	2014.9	第 69 回土木学会年次学術講演会, VI-020	山田浩幸, 大槻文彦, 木村圭吾, 芥川真一
24) 土砂災害の予兆を捉える	2015.1.26	日経コンストラクション	(*)取材に基づく記事

8. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

必ずしも本プロジェクトの研究期間内に申請したものではないものも含まれているが、内容が強く関連しているためそれらを含めた知財関連情報を表に示す。

知的財産権の内容	知的財産権の種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
「自然および人工構造物変状検知装置」 (注) 本プロジェクト開始以前にすでに特許申請していたもの。カラーフィルター、光ファイバーなどを利用して低価格で可視化を実施する複数の技術を盛り込んだパッケージ特許。本研究では LS ³ の部分がこれに相当する。	特許 第 5607185 号	2011/2/14	2014.9.5	環境総合テクノス 神戸大学
「ミラー調整治具、構造物変状検知システムおよび構造物変状検知方法」 (注) 本プロジェクト開始以前にすでに特許申請していたもの。鏡を利用して角度変化を可視化する SOP に関するもの。	特願 2011-035265	2011/2/21	審査中	神戸大学 オフィスひもろぎ
「地盤アンカーの緊張力変動表示装置」 (注) 本プロジェクトで推進している機械的装置 (Mechanical) のコンセプトをグラウンドアンカーに適用した特許申請。	特願 2014-151504	2014.7.25	審査中	神戸大学 エスイー
「見えるアンカー」 (注) 上の欄の特許に関して、これを NETIS 申請したもの。	NETIS KT-140109-A		2015.1.30	神戸大学 エスイー
「緊張力計測装置及び計測方法」 (注) 本プロジェクトで推進している機械的装置 (Mechanical) のコンセプトを拡大展開してグラウンドアンカー軸力評価に取り組んだ特許。ノギスだけで軸力評価ができることをアピールしており、可視化装置の装着も可能な設計になっている。	特願 2012-179178	2012/8/13	審査中	神戸大学 日特建設

9. 成果の実用化の見通し

OSV センサの実用化への現状と今後の取り組みについて

3種類の方法論，即ち，(1) Single Observation Point (SOP)法，(2) Light State Sensor System (LS³)法，(3) Mechanical tools (M)法を同時並行で開発し，基礎実験，フィールド実験を実施してきた．その結果，基礎実験だけに留めたもの，フィールド実験で将来性を確認できたもの，実用化の目前まで開発が進んだものなど，複数のセンサ開発を実施することができた．その概要を表9.1, 9.2, 9.3に示す．多くのセンサが無電源で運用できることが分かる．また，特殊な表示デバイスとして適用性を検討した電子ペーパーを表9.4に示す．

表 9.1 Single Observation Point 法，及び光の path を使うセンサ (SOP)

センサ	機能・特徴	試作品のレベル	実験レベル	実用化に近いレベル
	SOP を実施するために作成した角度調整機能を具備した鏡．光の反射を利用して角度変化を高精度で可視化することができる．視認距離は 250m 程度まで取ることができることを確認済み．鏡の大きさなどを選択すれば 0.01 度のオーダーで角度計測を行うことも可能（ただし，環境影響が小さい場合）． 【無電源で運用すること=>可能】			○
	SOP を実施するために用いる市販の鏡．角度調整機能を具備しており，視認距離 100m 程度までの距離で使用できる． 【無電源で運用すること=>可能】			○
	鏡に映る映像を「点」ではなく「線」にする場合に用いる長方形鏡を装着した装置．視認場所がライン上のどこでも良いことになるので，それが許されるケースにおいては非常に採用しやすい方法論である． 【無電源で運用すること=>可能】		○	
	平面の鏡を使った方法を拡張して，局面の鏡（ここでは円柱の表面）を同時に複数個利用することでメリットが得られる方法論．角度変化を可視化でき，それを確認する場所は「点」，「線」よりもさらに広がる方法． 【無電源で運用すること=>可能】	○		
	光の反射ではなく，レーザー光（ここではレーザービームではなく，レーザー面）を利用し，それが投影されるターゲットの形状，数，配置などを工夫することで柔軟な角度変化や変形を可視化できる方法論．		○	

表 9.2 カラーフィルターや光ファイバーを使う方法 (LS³)

センサ	機能・特徴	試	実	実
-----	-------	---	---	---

		作品のレベル	験レベル	用化に近いレベル
	白色光とカラーフィルターを用いて変形量を色の変化として可視化する装置。左の写真は任意構造物に装着することが可能。	○		
	白色光とカラーフィルターを用いて変形量を色の変化として可視化する装置。左の写真はトンネル掘削時の、地盤内変形量を可視化した実験の様子を撮影したもの。変形が起きている場所（地盤内）から離れた場所でカラーフィルターを用いた可視化が可能であることを示した例。なお、この例題では、可視化に用いている光ファイバーをトンネル掘削により切断しても、可視化の状態は変化しないというアレンジ可能である。	○		
	白色光とカラーフィルターを用いて変形量を色の変化として可視化する装置。左の写真では、光の色を見せる媒体として光ファイバーの束を使用している。このような見せ方は防災情報の可視化と都市の美観向上のジョイントプロジェクトにつながる可能性がある。	○		
	白色光とカラーフィルターを用いて傾斜量を色の変化として可視化する装置。装置のおおきさは実際の適用例に応じて最適化できるため、例えば直径数 mm のオーダーで同様の傾斜計を製作することも可能。	○		
	グラウンドアンカーの軸力を光ファイバーで可視化する装置。この例では、太陽光を利用するため全体が無電源で作動する。 【無電源で運用すること=>可能】		○	
	光ファイバーのギャップに土などの任意材料があるか、ないかを判定する簡易装置。このコンセプトはギャップの状態を多様な目的で計測対象とすることができるため、土砂の存在、グラウト材料の到達確認、泥水の濁度確認など、様々な目的で適用できる方法論である。 【無電源で運用すること=>可能】		○	
	地滑りなどで観測される変位を光ファイバーで可視化する装置。この例では、太陽光を利用するため全体が無電源で作動する。2 つ上の欄に示す装置との違いは、変位の測定レンジの大きさと、光ファイバーの配列方法になっている。 【無電源で運用すること=>可能】			○
	変形によって動く黒いカバーの奥に光反射テープを貼っている装置。任意の原因でカバーが動くと、そこに光を当てるだけで変状を容易に可視化できる。特に、夜間の道路脇などにおいてガードレールを利用して設置すれば、通行する車両から法面などの異常をはっきりと視認できるシステムを構築できる。 【無電源で運用すること=>可能】		○	

表 9.3 電力を使用しない機械的な装置 (Mechanical)

センサ	機能・特徴	試作品	実験レ	実用化






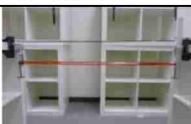

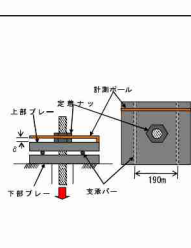

		の レ ベ ル	ベ ル	に 近 い レ ベ ル
	変形量を回転に変えて表示する装置。左の写真は最初の実験で用いた物。 【無電源で運用すること=>可能】	○		
	変形量を回転に変えて表示する装置。左の写真はインプットの変形量をギアで増幅させるための装置の骨格部分を示している。 【無電源で運用すること=>可能】	○		
	変形量を回転に変えて表示する装置。左の写真はトンネル内で実施した内空変位計測の様子。低価格で製作できるため多点で計測を実施することができる。 【無電源で運用すること=>可能】		○	
	変形量を回転に変えて表示する装置。左の写真はグラウンドアンカーの軸力を、アンカーヘッドに取り付けた回転する針に表示させる装置。離れた場所からグラウンドアンカーの軸力を確認でき、無電源で使用することができる。 【無電源で運用すること=>可能】			○
	変形量を回転に変えて表示する装置。左の装置は変形量が0の時に閉じている状態で初期設置し、変形に伴って表の板が開き、内側に塗布している赤の反射塗料が見えてくる設定。夜間の使用に適している。 【無電源で運用すること=>可能】		○	
	傾斜によってパイプ内に入れていた球体がたわんでいるパイプの内部を移動する装置。 【無電源で運用すること=>可能】	○		
	遠距離からの視認性確認に用いた白いプラスチックボード。通常時には周辺環境に紛れて視認しづらい状態にしておき、変状があれば、そのカバーが外れる仕組みを作れば、低価格で遠距離からの視認も可能な装置を量産できることにつながる。 【無電源で運用すること=>可能】	○		
	グラウンドアンカーの軸力を把握するために第2のアンカープレートを利用する例。軸力に比例する大きさの変形がプレートの特定の場所に現れる為、その場所で変位を可視化すれば、非常に低価格で軸力を可視化できる。この装置は、新たに求められている「維持管理が容易になる構造」として位置づけられるものであり、同時にデータの可視化にもつながるコンセプトで製作されたものである。 【無電源で運用すること=>可能】			○

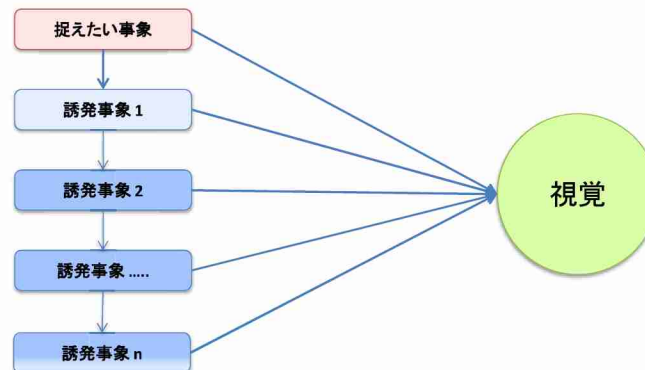
表 9.4 低消費電力で使用できる表示デバイス (Display)

センサ	機能・特徴	試 作 品	実 験 レ	実 用 化

		の レ ベ ル	ベ ル	に 近 い レ ベ ル
	非常に少ない消費電力でさまざまな映像を表示できる電子ペーパー。この表示デバイスは電気を使用するセンサに接続できるため、情報の可視化において、単純に光の色を出すことが適切ではない場合に効力を発揮する。また、大きさや表示映像を任意に設計できるため、柔軟な適用が可能となる。また、シンプルなスイッチに連結することも将来的には可能である。			○

多様な装置設計・製造概念の包括的な統合に向けて

本研究では、(1) SOP, (2) LS³, (3) Mechanical という3つのベクトルを意識したセンサ開発を実施した。しかしながら、表9.1, 9.2, 9.3, 9.4に示したように、センサの仕様は3種類の方法論に留まることなく、自由な設計が可能であることがわかる。このコンセプトを整理するために、図9.1を示す。インフラ業界におけるモニタリングは、捉えたい事象をどのような方法論で計測し、どのようなステップを経てその情報を関係者に伝えるか、ということである。その事象そのものが肉眼で視認できる場合は、計測をする必要はない。そうでない場合には、何らかの方法でその事象を捉え、何ステップかの誘発事象を故意に作る（センサを使うという意味）ことで、できるだけ効率的に関係者に伝達する必要がある。



(a) 捉えたい情報を関係者に伝える段階の模式図



(b) 誘発事象を起こす際の選択肢

図9.1 一般化したセンシングシステム設計の概念

この際、誘発事象を起こさせる、即ちセンシングをする、という段階で、どのような事象を採用するかについては図9.1(b)に示す選択肢があると考えられる。例えば、SOPを採用する場合には、「捉えたい事象が発生する」=>「鏡が傾く（誘発事象=Mechanical）」=>「鏡に

映る場所が変わる（誘発事象=Optical）」という連鎖事象を作ることになる。このように、捉えた事象を関係者に伝達する連鎖誘発事象の設計には多くの選択肢があるため、プロジェクトの性質を十分に吟味した上で、予算を考慮し、最も適切なモニタリングシステムを設計することが懸命であることがわかる。

また、OSVに基づくモニタリングを企画する際のデザインファクター（考慮事項）の例を図9.2に示す。この図に記入されているファクターの内、白のボックスは通常のモニタリングでも考慮する必要があるものである。赤のボックスはOSVのコンセプトに基づいて視覚情報を発信するために考慮する必要が出てくる新規のファクターであり、これらを合理的に組み上げるためのガイドラインの作成が必要となっている。

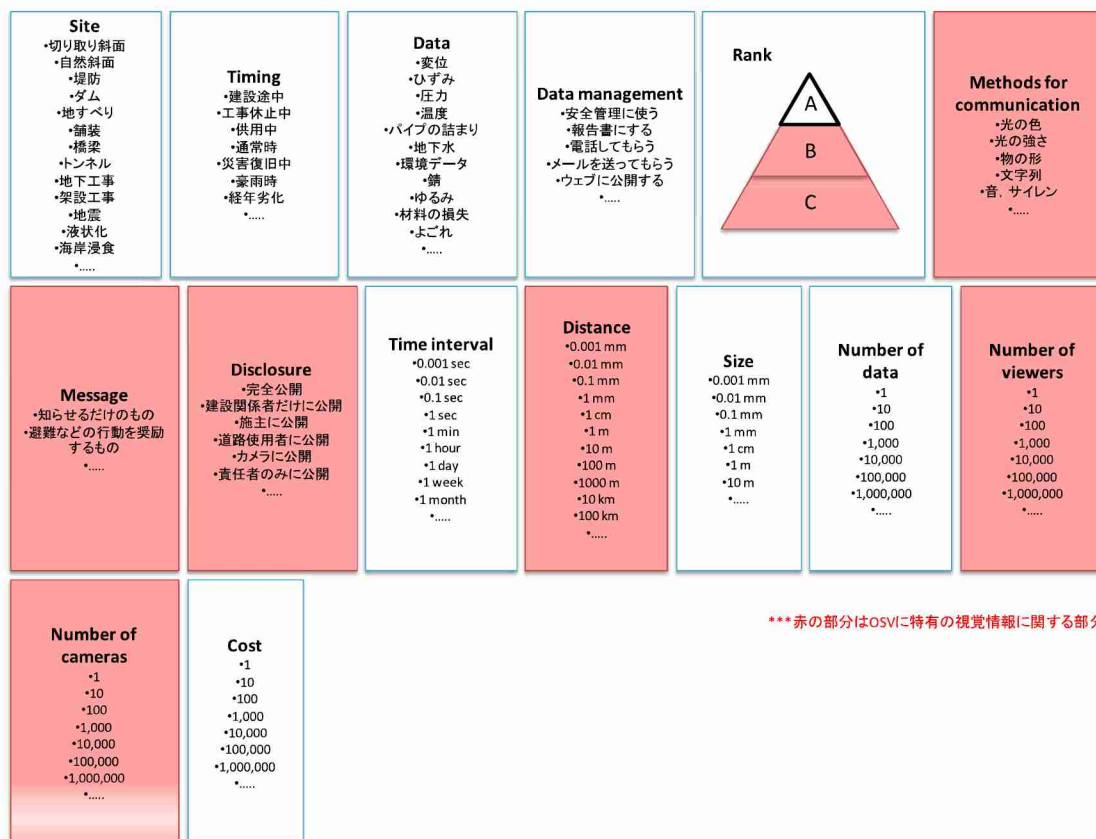


図9.2 OSVに基づくモニタリングを企画する際のデザインファクター

効果的な運用方法（ガイドライン）の構築に向けて

これらの方法論を周辺住民などの協力を得た上で現場実証すると共に、可視化された情報の総合的マネジメントに関するガイドラインの骨子を作成するとともに、今後の課題を抽出することも合わせて本研究開発の目的とする。

(1) 効果的な運用方法（ガイドライン）の必要性について

未だ自然斜面では、危険斜面の多くが未認識、あるいは認識されているがハード的対策が未了の状況で、順次、ハード、ソフト対策を実施中であるが、降雨強度の高まりにより、たびたび災害が発生している。

一方、工事斜面では、安全確保の観点から必要な計測や対策は実施されるが、工事予算制約により、必要最小限度が強く意識されている。そのため、まれに事故が発生している。

これらの状況を踏まえると、ハード対策の重要性は変わるところではないが、避難を実効的にし確実性を挙げて実施することに資するソフト対策の進展が重要である。

避難に資するソフト対策進展には、以下のポイントが重要である。

- ① 危険情報（災害ポテンシャル、逐次情報）の提供
- ② 共助の仕組みづくり
- ③ 避難ルートの整備，避難所の整備

本研究のアプローチは、新しい概念の計測ツールにより①をこれまで以上に幅広く、確実に提供するものであり、実用化を進めるには、各システムが高い性能を発揮できるようにガイドラインを作成する必要がある。

(2) 計測の性能規定化

実際に作業場や公共空間に計測を配置する段階の課題として、どのような計測をすれば、あるいは計測システムを適用すれば十分か、言い換えると「良い性能の計測」であるのかについては、明確な指標がない。もとより、労働安全衛生法第25条により「事業者は、労働災害発生の急迫した危険があるときは直ちに作業を中止し、労働者を作業場から退避させる等必要な措置を講じなければならない」と規定されており、有効な現場計測工法の導入は事業者の責務である。

あらゆる工事が限られた予算のなかで施工され、多くが公的資金を適用していることを踏まえれば、計測システムは必要であるが、その程度は査定できない状況というのはアカウンタビリティの観点からも望ましい状況ではなく、工事の安全を高めるとともに、計測システムの妥当性を的確に評価する仕組みが必要である。

また、工事や防災上の計測はある程度センサー、管理システムについてマニュアル化されており、仕様が固定している。このような環境下で新しい概念のセンサーやツールを普及するには、従来手法と性能面でどのような差があるのかを明確にする必要がある。

工事、公共空間における計測システムの性能は、次の要求事項で説明できる。

- ① 適切な対象が抽出されているか
- ② 適切な計器を用いているか
- ③ 適切な測定間隔で計っているか
- ④ 適切な判断ルールを用いているか
- ⑤ 適切な表示方法を用いているか
- ⑥ 表示に対する周知・教育が適切に実施されているか

これを定量的に表現するために、計測システムの性能値 Pf を定義する。

$$Pf = \alpha Pf_{tool} \times \beta Pf_{logic} \times \gamma Pf_{output} \quad (1)$$

ここで、 Pf_{tool} ：計測ツールあるいは計測の性能値

Pf_{logic} ：計測値判断の性能値

Pf_{output} ：結果表示の性能値

α, β, γ ：各性能値の重要度により定まる係数

この Pf 値を用いて、計測システムの評価を行う。具体的には、計測システムの性能レンジ Sp を定義し、 Pf 値の範囲と関連付ければよい。

ここで、①から⑥において示した計測システムに対する要求事項は以下の対応となる。

Pf_{tool} : 計測システムに対する要求事項の ①②③

Pf_{logic} : 計測システムに対する要求事項の ④

Pf_{output} : 計測システムに対する要求事項の ⑤

Pf_{tool} を評価するためにユニットという概念を導入する。ここでは、工事現場や対象斜面を安全監視の観点から「独立ユニット」の集合体と仮定する。これは工事現場において不測の事態が起きる可能性のある最小ユニットとなる。簡単に図化すると、以下のような区分をユニットと定義することになる。

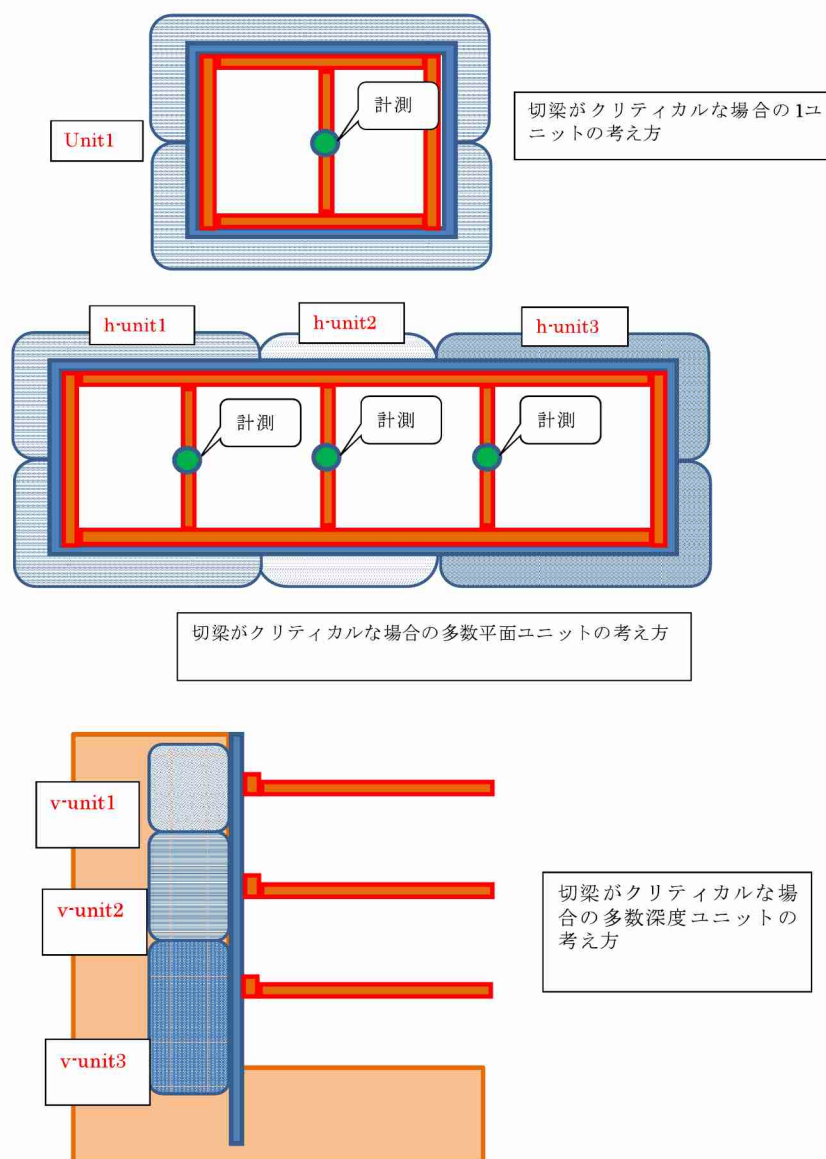


図 9.3 計測ユニットの考え方

図9.3は、切梁がクリティカルな場合として仮定したユニット分割であるが、この他にも不測の事態が起きる対象としては、近接構造物、土留め壁安全性、土留め壁遮水性などがあり、この監視項目ごとにユニットを設定する。

即ち、切梁応力 P、近接構造物 N、山留め壁安全性 S、山留め壁遮水性 W の 4 項目が監視項目となる構造である場合で、m 段切梁の場合、

$$\sum_{i=1}^n (P, N, S, W) \times \sum_{j=1}^m (P, N, S, W) \quad (2)$$

のユニット数が存在することになる。

Pf_{logic} は、計測が妥当な状況で実施されたとして、言い換えると Pf_{tool} が高いレベルにあるとして、危険と安全の判断を行う閾値を定めること、その閾値の性能として定義する。計測結果が良くとも、その判断が稚拙であると正しい外部表示ができず、安全性能を損ねることになる。開削トンネル工事、切梁工事には、さまざまな技術基準が既に存在し、運用され実績があるので、これに拠ればよい場合とそうではない場合、即ち新しい計測方法を導入した場合や極めて複雑な構造、複雑な地盤条件や周辺環境条件の場合で技術基準に拠らない場合に分けて考えることができる。

これに対して、表 9.5 のような評定点を与えることにより性能を数値化することができる。

表 9.5 Pf_{logic} のインデックス

状 況	Index
技術基準または確かな経験則により閾値が決定されている	10
解析的検討または経験則により信頼できる閾値が提案されている	5
何らかの閾値が定められている	1
状態表示のみで判断ロジックがない	0

Pf_{output} は、必要な対策・対応（避難、補強、交通規制など）を行うために必要な情報（計測対象の危険度）が作業員、管理者、第三者など規定するに対象者に正しく伝達される性能と定義する。

この過程は、情報が伝達対象者に対して、必要な時間内に正しく伝えられ、認知されることで実現されるので、正しくは 3 つの性能を規定することになる。

- ① 情報が必要な時間内に伝達されるか
- ② 情報が正しく伝達されるか
- ③ 情報が正しく認知されるか

認知されるかは「気付くか」と言い換えても良い。最終的には認知し、行動しなければならないが、これには「表示に対する周知・教育が適切に実施されているか」の計測システムに対する要求事項が深く関係している。

(3) ガイドライン

ここで指向するガイドラインは、機器取扱い説明や、しきい値の指標ではなく、他の計測システムと比較検討することを含め、現場や公共空間における計測システムの要求事項を満たすように低コスト・低消費電力型モニタリングシステムを企画・実施できるようにする

ためのものである。従って、本ガイドラインに沿って企画されるモニタリングにおいては、以下の3項目が自動的に保証されている状態になることを目指す。

- ① Pf_{tool} Pf_{logic} Pf_{output} の各要求事項
- ② 適切な経済性
- ③ 他のソフト対策との連携性

ここで Pf_{tool} Pf_{logic} Pf_{output} の各要求事項を保証するのは、以下の資料である。

Pf_{tool} $UnitIndex$ ⇒ ユニットの網羅性 ⇒ エリアカバー率
 $SensorIndex$ ⇒ センサーカタログ
 $TimespanIndex$ ⇒ システム設計書
 Pf_{logic} ⇒ 科学的妥当性
 Pf_{output} $InformationTimeIndex$ ⇒ 情報カバー率
 $InformationRightnessIndex$ ⇒ 情報カバー率
 $InformationRecognitionIndex$ ⇒ 教育・訓練実施計画

これらをサイトカルテとして作成することをマニュアル化する。特に本システムは、 $output$ の主要ツールに光デバイスを使用するので、この距離特性を把握することが必要である。



図 9.4 ツールの距離特性の概念

カルテは、 Pf_{tool} および Pf_{output} について作成し、図 9.5 のようにユニットの重なりやアウトプットツールの距離特性を色調表現することにより可視化する。

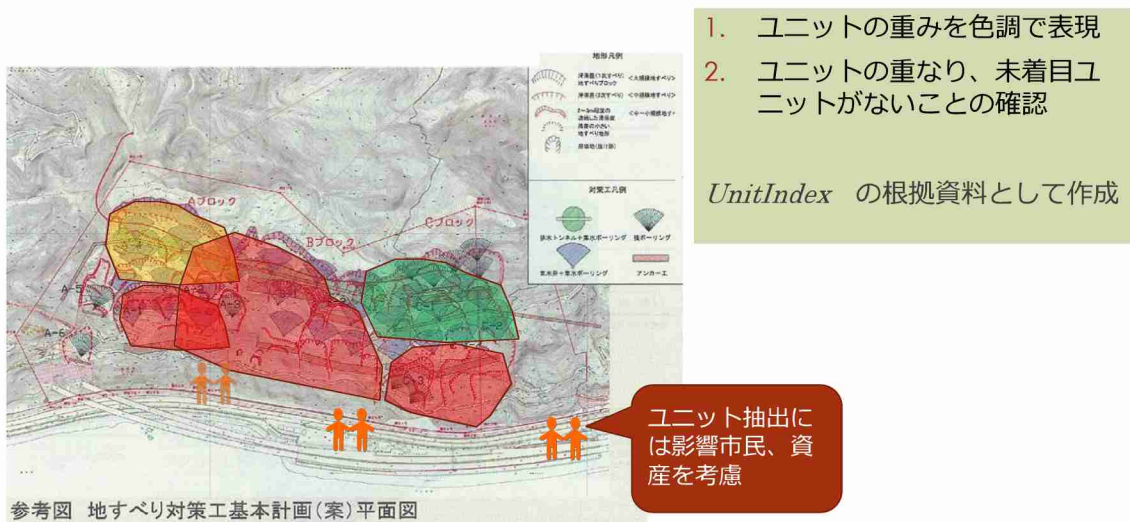


図 9.5 Pf_{tool} カルテのイメージ

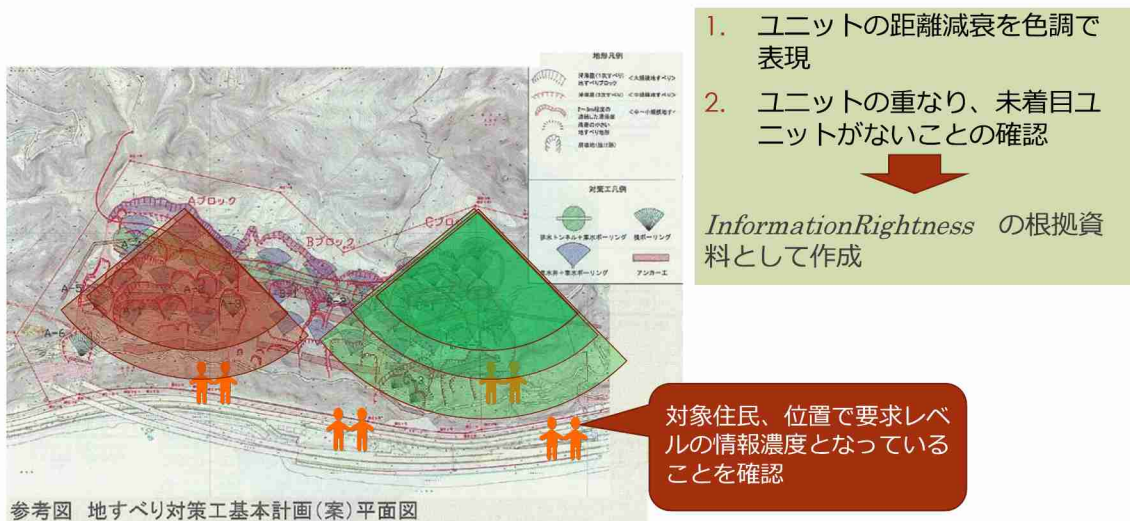


図 9.6 Pf_{output} カルテのイメージ

(4) ガイドライン構築の課題

今後、ガイドラインを具体化していくためには、以下の点が必要である。

- ① ガイドラインの要求事項でもある「適切な経済性を保証する」方法について研究を進め、ケーススタディおよび実施事例による検証を進めること
- ② ハード対策や他のソフト対策（他の方法による情報提供、例えば雨量情報に基づく交通遮断など）との連携方法について包含すること
- ③ ガイドラインに引用するツール（デバイス）の距離特性を把握する実験を実施、特性表にまとめること

10. その他

(注)

1. 用紙の大きさは、日本工業規格で定めるA列4とし、縦位置左綴とすること。
各項目の記入にあたっては、数字、図表等を用いて詳細に説明すること。記入量に応じて、適宜、欄を引き伸ばして差し支えない。
2. 「研究課題名」について
平成26年度建設技術研究開発費補助金交付申請書に記載した研究課題名を記入すること。
3. 「研究期間」について
当該研究課題について補助金が交付された期間（年度）を記入すること。
4. 「代表者及び研究代表者、共同研究者」について
 - (1) 「代表者は1人又は1法人を記入すること。研究代表者は1人を記入すること。共同研究者は、研究に参加している者全てを記入すること。
 - (2) 研究組織の変更により代表者又は研究代表者を交替している場合は、交替後の研究者名を記入すること。
5. 「6. 研究・技術開発の内容と成果」について
 - (1) 当該研究期間に行った研究によって得られた成果を、各年度の交付申請書の「研究・技術開発の目的及び目標」「本年度の実施計画」と対比させてわかりやすく記入すること。
 - (2) 主要な研究方法、手段等の経過を詳細に記入すること。
6. 「7. 研究成果の刊行に関する一覧表」について
 - (1) 記入した書籍又は雑誌については、その刊行物又は別刷り一部を添付すること。
7. 「8. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況」
 - (1) 説明上必要な書類を、適宜、添付すること。
8. 「9. 成果の実用化の見通し」について
 - (1) 研究・技術開発の成果による実用化について、具体的な計画がある場合にはその内容を記載すること。