

# サンプリングモアレカメラによる 山岳トンネル掘削環境下における変位計測

赤木 俊文\*<sup>1</sup>・坂井 一雄\*<sup>1</sup>

Keywords : Sampling moire camera, mountain tunnel, wall displacement measurement, continuous measurement

サンプリングモアレカメラ, 山岳トンネル, 壁面変位計測, 連続計測

## 1. はじめに

サンプリングモアレ法は、2次元の格子画像に対する位相解析手法のひとつであり理想的な環境下であれば格子ピッチの1/100～1/1000の計測精度（格子ピッチ10mmの時0.1mm～0.01mmの精度）が得られる。また、本手法を用いたサンプリングモアレカメラ（Sampling Moire Camera, 以下SMCと称す）は複数ターゲットを同時に1回/秒以上の高頻度で計測できることが特徴であり、土木分野では橋梁の異常診断への適用が見られる<sup>2)</sup>。山岳トンネルでは施工管理の一環として、2回/日の頻度で10m～20m毎に計測断面を設けてトータルステーション（TS）による変位計測が実施される。TSによる計測は持ち運びが容易で汎用性が高い一方で、毎回の機器の据え付けや基準点設置といった作業を要する。また、毎回の据え付けは計測誤差の原因となることに加え、作業負担や計測可能なサイクルが限られる等の理由から計測頻度を上げることが難しい。よって、高精度かつ高頻度の計測が要求される場合や、長期の変位モニタリングが要求される場合にSMCをTSによる計測と相補的に活用することにより、変位計測の品質向上が期待できる。しかしながら、SMCを山岳トンネル内で用いた事例はごく限られており<sup>3)</sup>、その適用性は十分に検証されていない。筆者らは、SMCを用いた山岳トンネルでの壁面変位計測への応用を目標として、山岳トンネル掘削環境下での適用性検証を目的とした現場試験を実施した。本報告ではその取組みを紹介する。

## 2. 計測手法の概要

### 2.1 サンプリングモアレ法の原理

サンプリングモアレカメラはサンプリングモアレ法による画像計測により対象の変位を取得する。ここでは、サンプリングモアレ法の原理を1次元の問題で説明する。まず変位を計測する対象に貼り付けられた黒白の格子模様（図-1(a)）のピクセル画像を撮影する（図-1(b)）。取得したピクセル画像から格子模様の周期よりも少し小さい整数 $N$ に対して、 $N$ ピッチでピクセルを取り出す（図-1(c)）。ここでは $N=4$ の場合で図示されている。得られたピクセルセットを内挿すると一定間隔で周期のずれた $N$ 本の模様が得られる（図-1(d)）。この $N$ 本の模様は式(1)のように表され、内挿された輝度分布は共通の位相 $\theta(i)$ を有する（ $i$ はピクセル番号）。

$$I_k(i) = a(i) \cos \left[ \theta(i) + k \frac{2\pi}{N} \right] + b(i) \quad (1)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, N-1)$$

$\theta(i)$ は $N$ 本の輝度分布より離散フーリエ変換法等を用いて求めることができる（図-1(e)）。初期と変位後の位相差 $\Delta\theta$ と格子幅 $p$ を用いて変位 $\delta x$ を次式で求めることができる。

$$\delta x = \frac{p\Delta\theta}{2\pi} \quad (2)$$

以上がサンプリングモアレ法の原理の概要である。

\*1 技術センター 社会技術技術研究部 地盤研究室

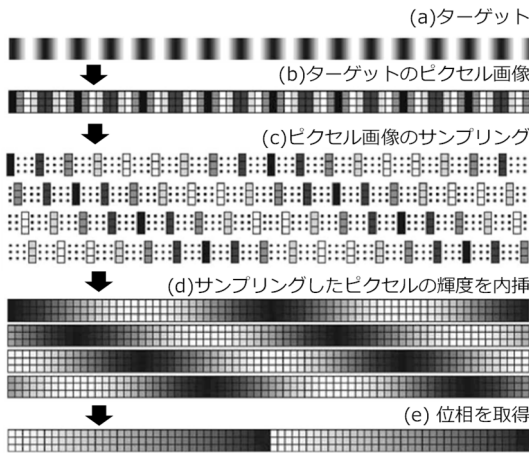


図-1 サンプルングモアレ法の原理<sup>1)</sup>  
Fig.1 Principle of sampling moire method<sup>1)</sup>

## 2.2 トンネル壁面変位の計測方法

サンプルングモアレカメラを用いてトンネル壁面変位を計測するために、図-2 に示す 10cm×10cm の正方形の金属板に 5mm 幅の格子シールを貼り付けた計測用ターゲットを作成した。撮影時はターゲット全体でなく、ターゲット内に収まるように設定した長方形のフレーム内を撮影する。撮影フレーム内の格子模様は格子幅（ここでは 5mm 以上）スライドすると区別がつかなくなる。そのため、変位の計測上限は原則 5mm で、5mm 以上の変位は初期値を再設定しつつ累積で求める。図-3 は複数カメラを使用した場合のトンネル坑内での計測イメージである。壁面変位を計測する位置にターゲットを取り付け、ターゲットの変位を計測する。トンネル壁面とターゲットが一体となって変位すると仮定している。サンプルングモアレカメラによる変位計測では、変位計測箇所に設置するターゲットに加えて、基準ターゲットと呼ばれるカメラの回転に伴う見かけの変位を補正するためのターゲットが必要となる。見かけの変位の発生メカニズムを図-4 に示す。図中の青色がターゲット上のカメラの初期視認位置である。ターゲットが変位して右に動いた場合、ターゲット上の視認位置が赤色の範囲に変わり、撮影フレーム内の格子模様から得られる位相変化から変位を取得できる。一方、ターゲットは動かずに、カメラが左向きに回転することでターゲット上の視認位置が緑色の位置にずれたとする。この場合も撮影フレーム内の格子模様は変化するため、ターゲットは動いていないにも関わらず、変位として計測されることになる。これが見かけの変位であり、カメラの回転方向と逆向きに発生し、カメラとターゲットの間の距離に比例して大きくなる。見かけの変位は原理上、同じカメラで計測しているす

べてのターゲットで同じ向きに発生するため、変位のない箇所にターゲットを設置すると、その計測変位はすべて見かけの変位となる。これが基準ターゲットであり、その計測変位をカメラとターゲットとの距離を考慮して他の計測変位から差し引くことで、次式のように見かけの変位を取り除くことができる。

$$u^* = u - u_{app} = u - \frac{L}{L_b} u_{app,b} \quad (3)$$

ここに、 $u$ が計測変位、 $u^*$ が実変位、 $u_{app}$ が見かけの変位、 $u_{app,b}$ が基準ターゲットの計測変位、 $L$ がカメラとターゲットの距離、 $L_b$ がカメラと基準ターゲットの距離である。カメラの並進による見かけの変位は距離によらず一定であり、カメラが固定されていればごく小さいと考えられるため考慮しない。現状はカメラの回転を極力抑えるために発破のない機械掘削時か、切羽から離れた後方での使用を前提としている。

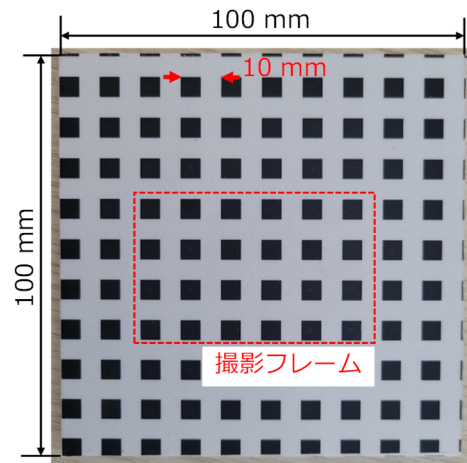


図-2 計測用ターゲット  
Fig.2 Target for displacement measurement

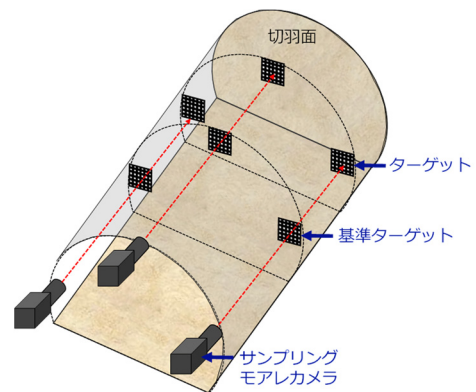


図-3 複数カメラでの計測イメージ  
Fig.3 Measurement layout with multiple cameras

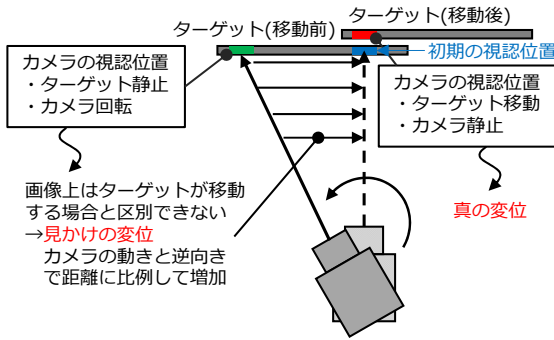


図-4 カメラの回転による見かけの変位  
Fig.4 Apparent displacements due to rotation of camera

### 3. 現場試験

本章では、当社施工の山岳トンネルで実施した2回の現場試験<sup>4),5)</sup>について述べる。最初の試験は、安定した変位の小さい地山で実施し、トンネル切羽（掘削中のトンネル先端）から距離を空けて、トンネル掘削環境下での重機の振動や粉じん等がある中での適用性を確認することを目的とした。2回目は国道7号鼠ヶ関トンネル工事において実施した試験であり、切羽後方3mで計測を開始することで1回目の試験に比べて大きな変位への適用を図った。

#### 3.1 安定した地山での計測

##### 3.1.1 試験条件

図-5 にターゲットおよび計測機器の設置位置の概要を示す。ターゲットは5箇所、側壁下部に設置した。後方にカメラを設置し、照明でターゲットを照らしながら計測した。照明には直進性の高いホロライト（HL05CW1）を使用した。壁面にボルト固定した鋼製架台にアクリルケースを設置し、その中に高さ・角度調節可能な台の上にカメラを設置した（図-6）。架台下に落下防止用の単管を設置し、地面からの振動伝達防止のために緩衝材を挟んでいる。計測用PCに接続され随時計測データが保存される。ターゲットはカメラに近い方から測点1~4と呼称する。カメラとターゲットの距離は測点1~4それぞれ48m, 57m, 66m, 72mで、計測開始時点の切羽と測点4の離れは19mである。計測頻度は1回/秒である。また、カメラ設置位置での気温を合わせて計測した。

##### 3.1.2 計測結果

図-7に測点1~4の水平変位および鉛直変位を示す。計測値には振幅1~2mm程度の高周波ノイズが含まれていたため、期間600秒で移動平均をとっている。水平変位は地山側が正、鉛直変位は鉛直上向きが正である。水平変位と鉛直変位はともに測点1~4まで同一の変位モードを示すとともに、カメラから遠い測点ほど

振幅が大きくなる。これはカメラの回転による見かけの変位の特性と一致する。つまり、本計測結果はカメラの動きに伴う見かけの変位が主だと考えられる。加えて、灰色で示したカメラ設置位置の気温変化と比べると、気温と変位が逆トレンドを有することが分かる。カメラの動きの要因を完全に特定することは難しいが、本試験ではカメラを設置した鋼製架台等の温度ひずみに起因する動きが要因であったと推測される。切羽から最も遠い測点1を基準ターゲットとして見かけの変位を除去した結果が図-8である。水平・鉛直変位ともに±1mm以内の変動に収まっている。よって計測期間中にターゲット設置断面に地山の動きが無く、地山が動いていないことを精度よくかつ連続的に捉えることができたと考えられる。本試験により、簡単な平均処理によるノイズ除去と基準ターゲットを用いた見かけの変位の除去により、ほぼ静止した地山に対して、トンネル掘削環境下での重機の振動や粉じんがあっても精度良く計測できることが確認できた。

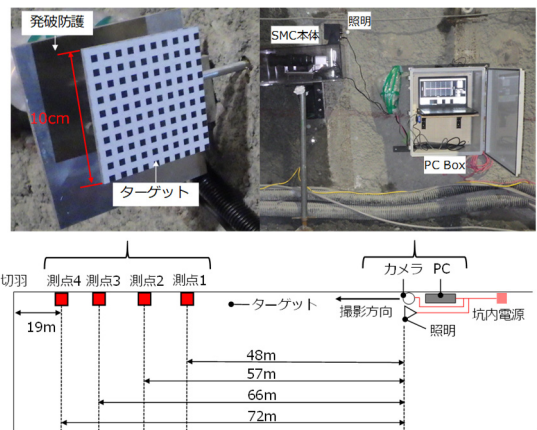


図-5 ターゲットおよび計測機器の設置位置  
Fig.5 Installation positions of targets and measurement equipments

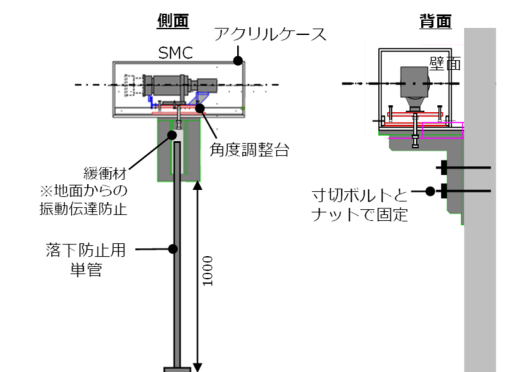


図-6 カメラの設置方法  
Fig.6 Installation and fixation of camera

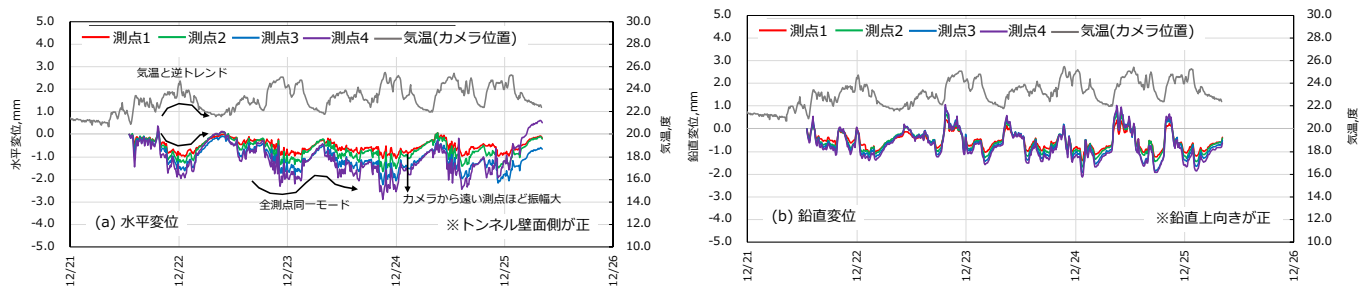


図-7 水平変位および鉛直変位  
Fig.7 Horizontal and vertical displacements

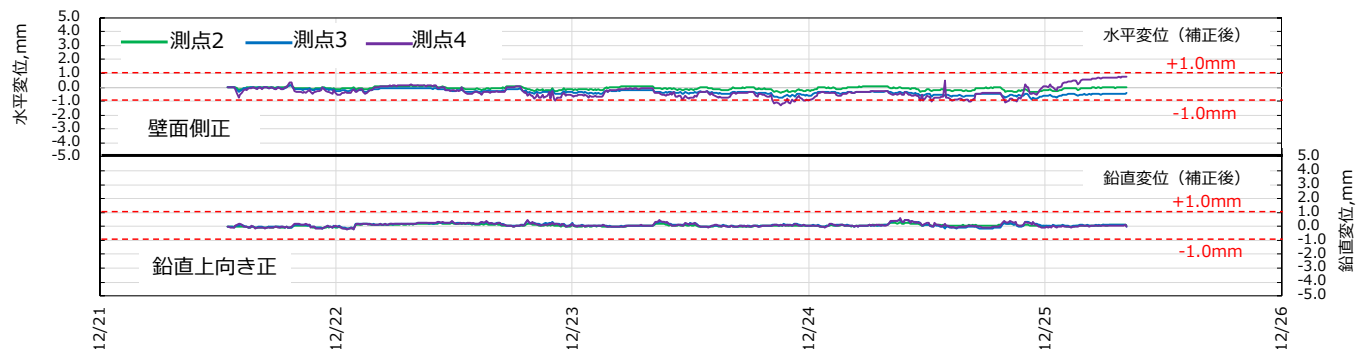


図-8 見かけの変位補正後の水平および鉛直変位  
Fig.8 Horizontal and vertical displacements after correction of apparent displacements

### 3.2 大きな鉛直変位が発生した計測例

#### 3.2.1 目的と試験条件

図-9 に計測機器の設置位置概要を、写真-1 に計測機器の設置状況を示す。SMC, 照明, 計測用 PC を断面 A-A' (TD55m) の右側壁に設置し, 断面 B-B' (TD95m) に基準ターゲット, 断面 C-C' (TD119m) に計測用ターゲット 2 枚を設置した。TDはトンネル坑口 (入口) からの距離である。基準ターゲットは計測用ターゲットを撮影した際の面角に収まるように切羽に向かって右側の側壁上方に設置し, 発破防護プレートを背面に取り付けた (写真-1(c))。はじめに述べたように, 基準ターゲットは不動点であることが原則である。しかし, トンネル坑内では, ターゲット設置位置

の変位が収束しているとは限らない。そこで, 基準ターゲット設置位置の変位も TS により別途計測した。計測用ターゲットは 1m の間隔を空けて右肩壁面に設置し, 発破防護プレートを各ターゲット背面に設置した (写真 1(d))。初期設置時との切羽との離れは約 3m である。また, 同一断面のターゲット近傍にひずみ計を設置して吹付けコンクリートのひずみを合わせて計測した (図-10)。カメラの設置方法は先に述べた設置方法と同様である (図-6)。トンネル坑内の 3 相 200V 電源を変圧器で 100V に変換して使用した。本試験では格子幅 5mm を超える 50mm 程度の沈下が発生したため, 複数回初期値を再設定しつつ, 累積の変位を取得した。

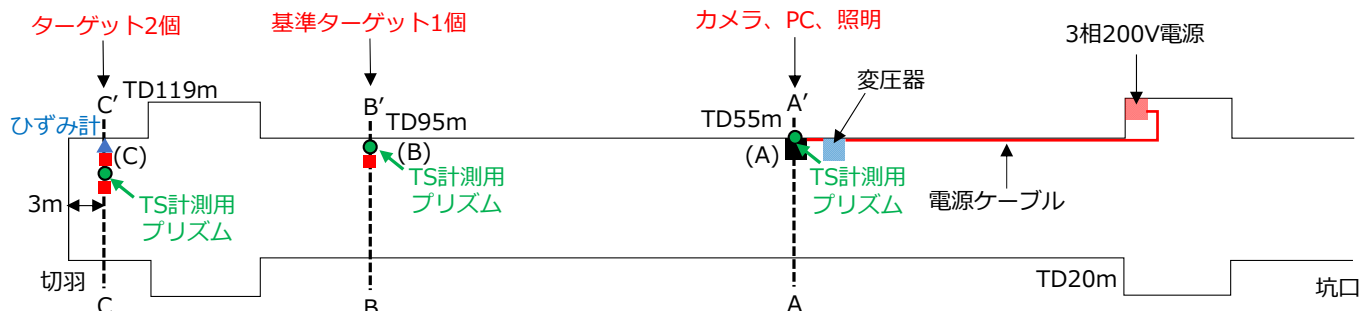


図-9 機器設置位置  
Fig.9 Positions of equipments

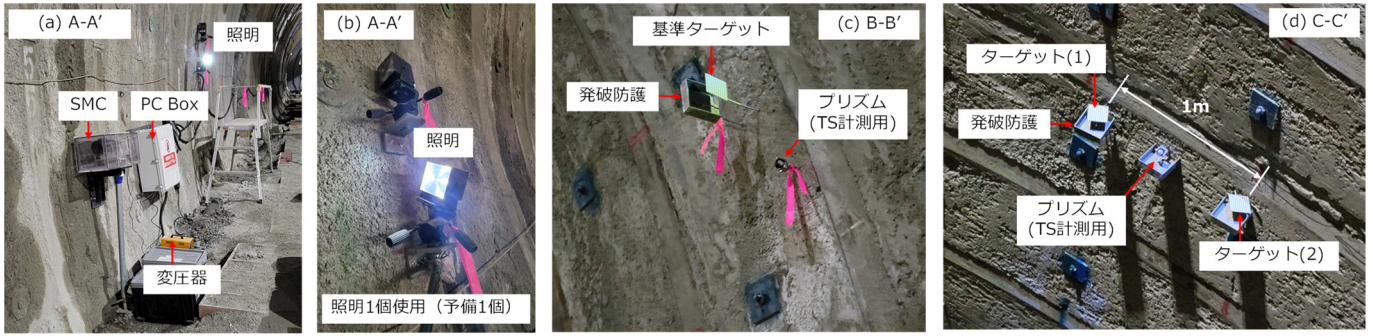


写真-1 機器設置状況

Photo.1 Installation of equipments

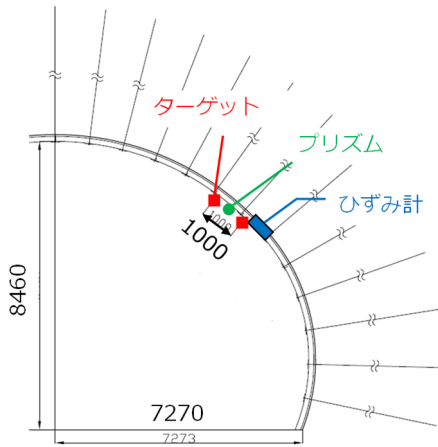


図-10 ひずみ計設置位置 (C-C'断面)  
Fig.10 Installation position of strain gauge

### 3.2.2 計測結果

図-11 に測定した鉛直変位を示す。この変位は基準ターゲット変位の補正前の値である。図中の赤線・赤点線が基準ターゲットの鉛直変位と同位置で TS により計測した鉛直変位である。また、図中のシンボル付きの黒線と灰色線がターゲット 1, 2 の鉛直変位と同位置でトータルステーション (TS) により計測した鉛直変位である。TS による計測は 1 時間に 1 回であるが、シンボルが無い期間は重機等の障害物による計測不良である。SMC により沈下傾向を捉えられている一方で、基準ターゲットで 10mm, ターゲット 1, 2 で 15mm 程度 TS による計測結果と差が生じた。SMC の計測精度不足ではなく、カメラが鉛直下向きに回転したことが要因であると考えた。カメラの自重のため、長期間の計測では鉛直方向の見かけの変位が発生する場合がある。カメラに鉛直下向きの回転があると、基準ターゲットの変位とターゲットの変位それぞれに距離に比例した見かけの変位が含まれる。カメラの回転角を  $\theta$ , カメラと基準ターゲットの距離を  $L_b$ , カメラとターゲットの距離を  $L$ , 基準ターゲットおよびターゲットの

真の計測変位を  $u^*, u_b^*$ , 計測変位を  $u, u_b$  とすると次式の関係が成り立つ。

$$u_b^* = u_b - L_b \theta \quad (4)$$

$$u^* = u - L \theta = u - \frac{L}{L_b} L_b \theta \quad (5)$$

基準ターゲットの TS による計測変位と SMC による計測変位の差が見かけの変位  $L_b \theta$  であると仮定する。つまり、カメラの回転が無ければ図-11 中の青線が SMC による基準ターゲットの計測変位であったと仮定する。こうして得られた  $L_b \theta$  を用いて式(5)により補正した SMC によるターゲットの計測変位が図-11 中の緑線である。ターゲット 1, 2 の補正後の鉛直変位は TS の測定変位とよく一致しており、計測結果の差は見かけの変位で説明できることが分かる。

さらに、SMC の高い精度を生かして変位より吹付コンクリートひずみや応力評価ができる可能性があると考え、計測した変位の差分をとることにより、ターゲット 1 と 2 の間に生じた吹付けコンクリートひずみの推定を試みた。図-12 に検証用に設置したひずみ計による計測値および変位から推定したひずみを示す。水平変位成分に計測不良があったため、ひずみは鉛直変位成分のみから算出した。よって、ひずみの推定値は小さめの見積りになると考えられるが、鉛直変位より推定した吹付けコンクリートひずみはひずみ計で計測したひずみ (0.02%程度) を大きく超え、最大 0.2%を示した。生じたひずみが 0.02%と小さかったこと、1mのごく短い区間で差分をとったことを原因として、真の変位差が計測誤差に紛れてしまったものと考えられる。今回は実験の都合上局所的に 1 点でひずみを推定したが、同一断面内で 3~4 点以上計測し、全体の変位分布から各所のひずみを算出の方がより適当ではないかと考えている。

以上のように、SMCによる計測では、沈下傾向を概ね追跡できたがそれぞれ15mm、10mm程度、TSと比較して沈下量が小さくなった。ただし、カメラの動きによる見かけの変位が継続的に生じていたと仮定すると、上記の計測値の差は合理的に説明できるため、計測精度自体は十分に発揮されていたと考える。一方、ピントを合わせるためにはターゲットおよび基準ターゲットの設置区間は30m程度の範囲に限られるため、

今回のようにトンネル坑内で基準ターゲットに変位が発生する事態は十分考えられる。本試験のように基準ターゲット設置個所の変位を別途計測すれば補正できるが、SMCとは別の計測を必要とし、かつその計測精度に影響を受ける。基準ターゲットを坑内変位が十分に収束した地点に確実に設置する方法が望まれるが、今後の課題である。

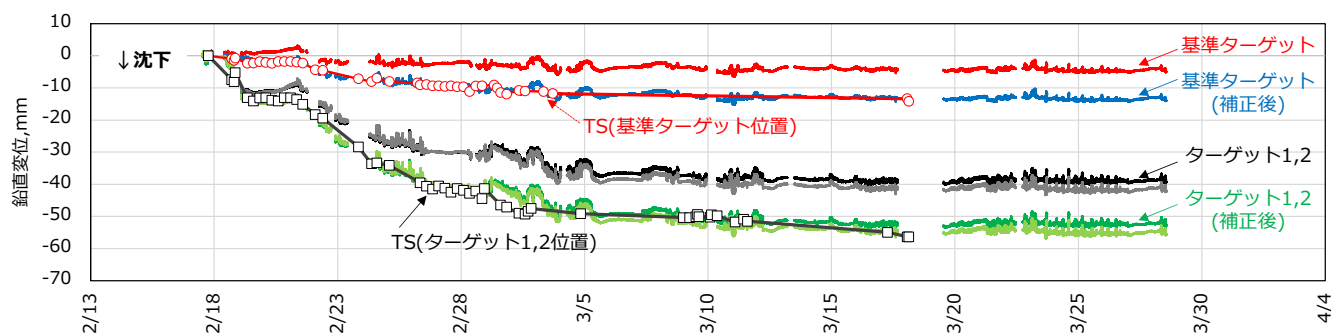


図-11 ターゲット1,2および基準ターゲットの鉛直変位  
Fig.11 Vertical displacements for target 1, 2 and reference target

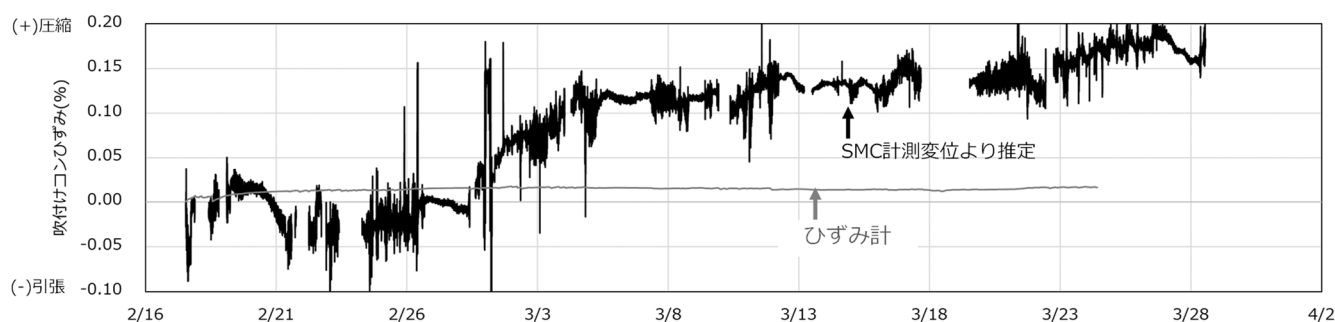


図-12 吹付けコンクリートひずみの推定結果  
Fig.12 Estimation results for shotcrete strain

## 4. まとめ

本報では、トンネル坑内変位計測の品質向上と省力化を目的としたSMCによる変位計測の山岳トンネル壁面変位計測への応用の取組みを紹介した。山岳トンネル掘削環境下での適用性検証を目的とした2回の現場試験について述べた。今回示した現場試験の結果より、SMCによる変位計測はトンネル掘削環境下において1mm程度の計測精度が期待できるのではないかと考えている。今後は同一断面内複数点での計測を試みるとともに、設置方法など運用上の課題抽出と改善を図っていく予定である。

## 参考文献

- 1) 森本吉春, 藤垣元治, 柘谷明大: サンプルングモアレ法による変位・ひずみ分布計測. *Journal of the Vacuum Society of Japan*, 54(1), pp.32-38, 2011.
- 2) 原卓也, 藤垣元治, 不破佑哉, 杉山隼紀, 宮島拓也, 河尻留奈, 鈴木啓悟.: サンプルングモアレカメラによる変位および回転角の時系列計測システムの構築と道路橋への適用. *実験力学*, 21(1), pp.41-48, 2021.
- 3) 谷卓也, 前田芳巳, 津田仁, 林正浩: サンプルングモアレ法によるトンネル掘削中の坑内変位の監視. *トンネル工学研究発表会講演集*, 26, pp.1-6, 2016.
- 4) 赤木俊文, 坂井一雄: サンプルングモアレカメラによる山岳トンネル掘削環境下における壁面変位計測. 令和4年度土木学会全国大会 第78回年次学術講演会, III-152, 2022.
- 5) 赤木俊文, 坂井一雄, 渡辺 貴之: サンプルングモアレカメラによる山岳トンネル壁面変位計測の現場実験. 第58回地盤工学研究発表会, 2023.