

# デジタルカメラ画像による斜面変位計測

丸 有 小  
屋 本 野  
孝 弘  
広 考 徹<sup>\*</sup>  
孝 徹<sup>\*\*</sup>  
徹<sup>\*\*\*</sup>

**概 要** 本研究では、デジタルカメラ画像の高精度画像マッチング処理を用いた安価で簡便な二次元画像変位計測技術について、携帯式カメラによるカメラ位置や撮影角度の違いが画像変位の誤差に及ぼす影響を検証した。また、二次元画像変位計測技術を応用し、パノラマ画像撮影(手動)・パノラマ合成(自動)・画像変位解析(自動)が可能な三次元変位計測システムの開発を行い、実際の長大斜面(比高20 m 以上)を対象にその適用性を検証した。本稿では、これらの検証結果について報告する。

**キーワード** : 変位計測, 斜面モニタリング, 三次元変位, デジタルカメラ, パノラマ画像

## I. はじめに

自然斜面や切土・盛土法面において、安全性の確保と設備管理のために変位計測が行われている。これまで、著者らは、従来の計器類を用いた変位計測やトータルステーション(TS)測量に代わる技術として、カメラ画像を用いた変位計測技術の開発を行ってきた<sup>1)~4)</sup>。しかし、これまでのシステムには、カメラを固定して撮影する必要があるため、広範囲の計測が困難という問題があった。そこで、本研究では、携帯式カメラで広範囲を計測する移動式変位計測の研究開発を行った。なお、撮影位置が全く任意では変位計測が困難であるため、TS 測量と同様に、測量用マーカや測量杭などにより地面上に器械点を設け、器械点位置にカメラを設置する方式とした。

器械点を設けたカメラ撮影には、携帯式と半固定式の二種類の撮影方式がある。携帯式とは、カメラと三脚を持ち運び、器械点上に三脚とカメラをその都度据えて撮影する方式である。また、半固定式とは、カメラのみを持ち運び、器械点上に予め設置されたカメラ設置架台にその都度カメラを取り付ける方式である。前者は、器械点設置作業が容易かつ安価であるが、カメラ位置が固定されないため、カメラ位置を含めて画像解析する必要がある。一方、後者は、カメラ位置が固定されるため、高精度で安定した変位計測が可能である。なお、両者とも広い計測範囲をカバーするために、パノラマ状の撮影を行うが、これが本技

術のもうひとつの特徴である。

パノラマ状の撮影画像を用いる本システムは、撮影時に明確に画像中心位置を定めなくてもよい上、任意に画像切り出し範囲を定められることから、撮影操作時の簡易性が向上し、撮影者が異なる場合においても撮影の再現性を高められる可能性がある。さらには、焦点距離を維持したまま撮影範囲を拡大することができるため、実現場の要求精度を維持した上で対象範囲を広げることや遠く離れた不動点を映しこむことも可能となる。

## II. カメラ位置・撮影角度の違いによる影響の検証

携帯式カメラ撮影は、安価で簡便な撮影方式であるが、カメラ位置が計測の都度、計測初期位置に対して cm 単位で変化する。また、撮影角度、すなわち水平方向・鉛直方向・光軸回りの回転を同じにすることも困難である。そこで、カメラ位置・撮影角度のズレによる計測誤差が、定量的に許容範囲内であるかを確認すべく、単体画像での基礎的な検証実験を行った。

### 1. 実験概要

実験方法の概要を図-1に、実験状況の概要を図-2にそれぞれ示す。

#### ①カメラ位置のズレに関する実験

地表面の撮影位置上に、地表面から高さを一定にした三脚・カメラを据付け、画像中央に測量ポール(基準位置の目印)が正確に写り込むように5枚の撮影を行い、これを基準画像とした。これに対して、計測点に向かってカメラ位置を左方向、前方向、上方向に各々5 cm, 10 cm, 15 cm 移動させ、同様に各々5枚撮影した。なお、カメラ位置の移動は、加工雲台を用いて機械的に1 mm 精度で行った。

#### ②撮影角度のズレに関する実験

基準画像に対して、加工雲台によりカメラに水平方向、鉛直方向、光軸回りの回転を各々2°, 4°, 8° 与え、画像を各々5枚撮影した。



丸屋 孝広



有本 弘孝



小野 徹

\* 関西電力㈱ 技術研究所 土木技術研究室 会員 maruya.takahiro@c2.kepco.co.jp

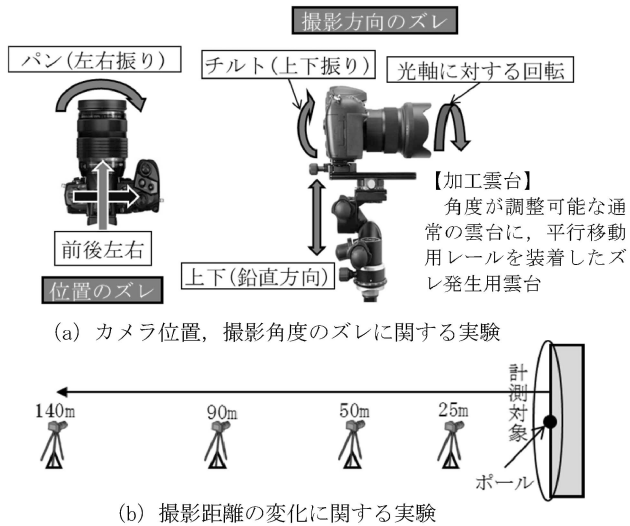
\*\* ㈱地域地盤環境研究所 地盤調査部 次長 arimoto@geor.co.jp

\*\*\* ㈱ズームスケープ 代表取締役 ono@zoomscape.net

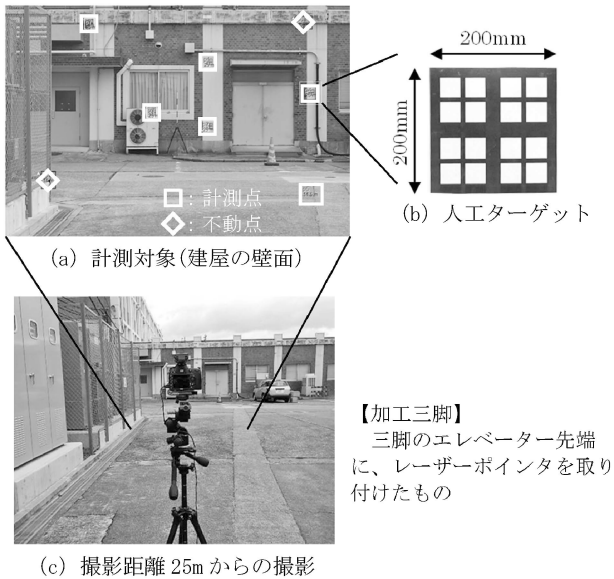
③撮影距離の変化に関する実験

上記①, ②の実験で撮影距離を25 m, 50 m, 90 m, 140 mに変化させて撮影を行った。

以上のパターンで得られた画像を基準画像と画像マッチング<sup>1)</sup>させて、撮影条件と画像マッチングや計測精度の関係について検証した。



図一1 実験方法の概要



図一2 実験状況の概要

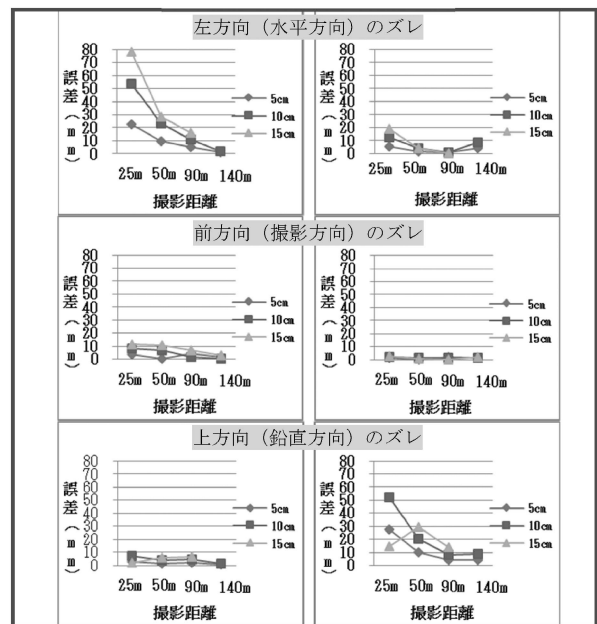
2. 実験より得られた知見

本実験では、計測点を変位が発生しない箇所に設置したため、カメラ位置・撮影角度が基準画像撮影時の条件と異なっても、画像変位はゼロとなるはずである。そうならない量、すなわち「計測された画像変位」を計測誤差と見なした。カメラ位置・撮影角度のズレと計測誤差の関係を図一3と図一4に示す。各々の図では、カメラ位置・撮影角度をパラメータとして、撮影距離と水平方向の計測誤差および鉛直方向の計測誤差の関係を表している。

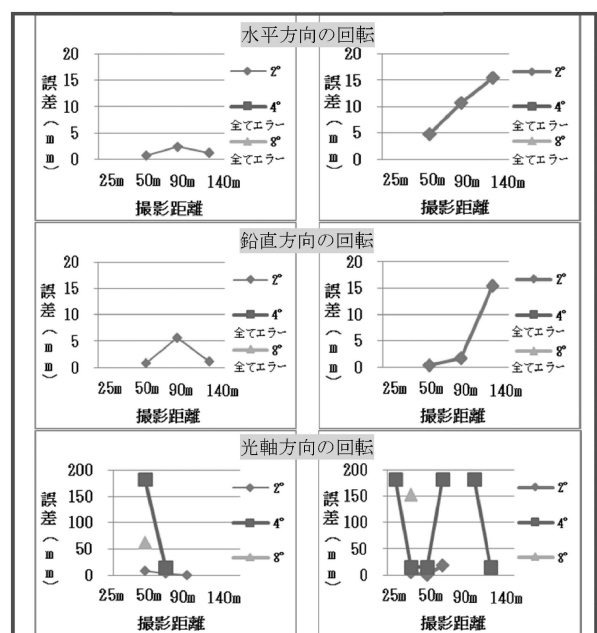
図一3より、左方向(水平方向)のズレの場合は水平方向の計測誤差に、上方向(鉛直方向)のズレの場合は鉛直方向の計測誤差に、大きな影響を及ぼしている。前方向(撮影

方向)のズレによる影響は前二者よりもかなり小さい。また、撮影距離90 m以上の遠方から撮影した場合には、全ての方向で10 cm程度のカメラ位置にズレを与えても10 mm以内の誤差に収まる。それに対して、撮影距離25 mでは、全ての方向で5 cm程度のカメラ位置のズレでも20 mm以上の誤差があることから、許容範囲を数 mm程度とするには、カメラ位置のズレは数 mm以下に抑える必要があることも分かった。

図一4の撮影角度のズレと計測誤差の関係については、角度回転が4°以上、すなわち画像幅の1割を超える回転がカメラに発生した場合、多くの場合は画像マッチングに失敗(図中では“エラー”と表記)した。画像マッチングに成功した場合でも、大きな計測誤差が発生した。



図一3 カメラ位置のズレと計測誤差の関係



図一4 撮影角度のズレと計測誤差の関係

以上のようなカメラ位置のズレ対策としては、カメラ位置の補正を含めて補正処理(調整計算)を取り入れる必要がある。現行システムにおいて、100 mm 以上の大きな誤差が発生したケースでカメラ位置の補正を行った場合、誤差が10 mm 以下となることが確認できた。

計測精度の更なる向上を目指すには、カメラ位置が固定されやすいカメラ設置架台を用いる方式(半固定式)を採用することが望ましい。また、撮影角度のズレを解決する方法として、パノラマ雲台を用いたパノラマ状の画像を合成したうえで、同一撮影範囲を切り出す方法が考えられる。図-5は、通常の雲台とパノラマ雲台を使用した場合のカメラの動きを示す。パノラマ雲台では、カメラ回転軸とノーダルポイント(投影中心位置)を一致させることが可能で、これによりカメラの向きを変えても撮影位置がずれることはない。



図-5 パノラマ撮影時のカメラの動き

### III. 三次元変位計測システムの開発

#### 1. 開発システムの特徴

##### (1) 複数視点からのパノラマ画像撮影

三次元画像変位を求めるためには、図-6に示すような複数視点からの画像撮影、いわゆるステレオ撮影を行うことが必要である。

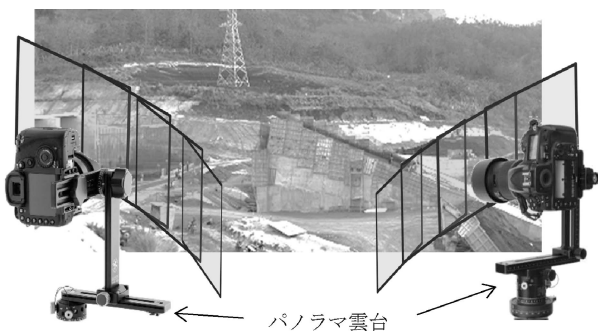


図-6 三次元画像変位の画像撮影

図-7は、異なる複数のカメラ設置での画像変位と、三次元変位との関係を示したものである。計測点Pにおける三次元変位( $dX, dY, dZ$ )を求めるためには、各々の撮影位置iにおいて、①位置座標、②撮影角、③撮影距離および焦点距離が必要であり、三次元画像変位は各々カメラ位置での二次元画像変位の合成により算出する。

- ①撮影位置iの座標  $O_i(X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i})$
- ②撮影位置iでの撮影角( $\phi_i, \theta_i, \kappa_i$ )、 $\phi_i, \theta_i, \kappa_i$ は順に、鉛直角、水平角、光軸回りの回転角
- ③撮影距離、カメラレンズの焦点距離

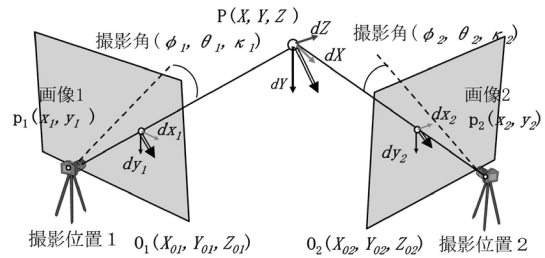


図-7 複数視点の画像変位と三次元変位の関係

##### (2) 要求精度等を考慮した撮影条件の設定

実斜面での計測の設計においては、計測の要求精度と図-8から算出される1画素当たりの実寸サイズとの関係を考慮して、「使用するカメラレンズの焦点距離」、「撮影範囲(パノラマ撮影枚数)」、「カメラ台数とその位置」を総合的に決定する必要がある。本システムでは、計測対象斜面の状況を勘案し、焦点距離や撮影画角を維持したまま、広い計測対象範囲(100 m 程度)への拡大や遠く離れた自然ターゲット(不動点等)を写し込むことも可能となるパノラマ雲台付きカメラを計測毎にカメラ設置架台へ設置し、図-6で示したようなパノラマ状に手動撮影する半固定式を採用した。

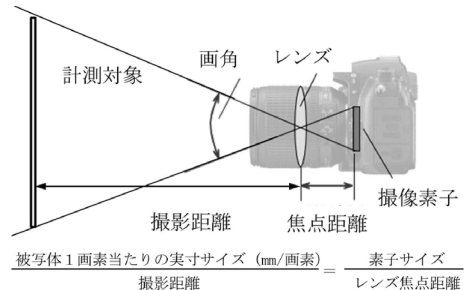


図-8 1画素当たりの実寸サイズの算出方法

##### (3) システムの構成

本システムは、表-1に示す項目で構成されており、基本的には現行システム「固定式カメラ・自動撮影・自動画像変位解析」と同じである。変更点としては、自動撮影が「④手動撮影(各々カメラ位置でのパノラマ撮影)」に変わり、「⑤SDメモリカード挿入、以降自動、画像取り込み、パノラマ合成」、「⑥画像サイズ切り取り、画像ズレ修正」、「⑧二次元変位合成による三次元変位算出」が新規開発である。開発した技術は、64ビット処理対応による大容量画像変位解析を可能とした。

パノラマ撮影の方法を図-9に示す。下段の画像群から撮影方向に対して左側から右側へ、隣接画像が30%以上オーバーラップするよう、パノラマ雲台を機械的に水平回転(12度毎)させながら撮影する。下段の撮影が終われば、カメラ位置を撮影開始時(左側)へ戻し、上段画像と下段画像が50%以上オーバーラップさせるようにして上段のパノラマ撮影を行う。この一連の撮影を5サイクル実施して1回の画像計測とする。なお、画像のオーバーラップや複数サイクルは計測精度を上げることを目的としている。

本システムの二次元画像変位解析は、現行システムと同じ“高精度画像マッチング処理を用いた変位計測手法<sup>1),2)</sup>”を使用している。精度的には、模擬供試体を用いた精度検証実験から、1画素の解像度より細かい精度(サブピクセル精度)での変位計測が可能であることを実証している<sup>1)</sup>。

表一 システム構成

事前作業	① カメラ・レンズ校正作業
現場作業	② 撮影機材の設置と調整・設定
	③ 計測対象までの撮影距離、傾斜角の計測
	④ 手動撮影(各々カメラ位置でパノラマ撮影)
解析用PC 自動処理	⑤ SDメモリカード挿入、以降自動、画像取り込み パノラマ合成
	⑥ 画像サイズ切り取り、画像ズレ修正
	⑦ 二次元画像変位解析(高精度画像マッチング)
	⑧ 二次元変位合成による三次元変位算出
	⑨ 変位量の数値表・グラフ化・指定管理者へ送信

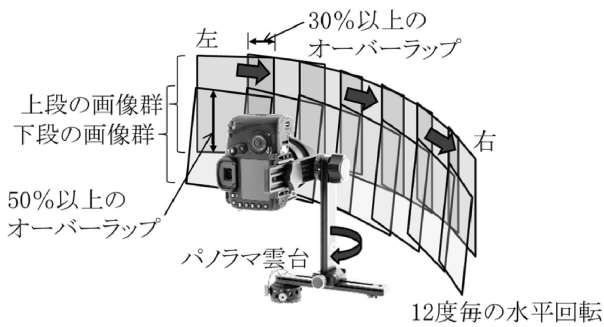


図-9 パノラマ撮影の方法

## 2. 実斜面への適用

今回開発したシステムを実斜面の変位計測へ適用し、その適用性の評価を行う検証実験を実施した。

### (1) 計測概要

実斜面における画像変位計測の位置図を図-10に示す。計測対象斜面は、幅約60 m、延長約150 m、比高約30 mの切土法面である。計測結果をTS測量と比較することも考慮し、斜面内に計測点6箇所(人工ターゲット)、斜面外に不動点4箇所(人工ターゲット2箇所、自然ターゲット2箇所)、斜面が見渡せる離れた位置にカメラ設置架台2箇所を設置した。撮影距離は49 m~205 m、撮影焦点200 mとなり、焦点距離50 mmの単焦点レンズを採用した。1

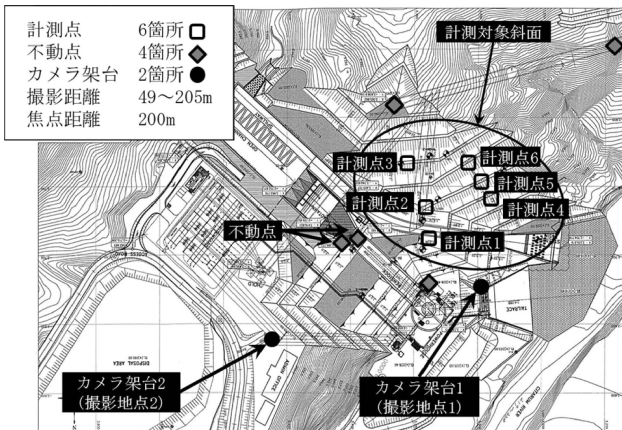


図-10 画像変位計測の位置図

画素当たりの実寸サイズは、パノラマ画像合成時に行う画像圧縮も加味して5 mm(撮影距離49 m)~21 mm(撮影距離205 m)である。最も遠い不動点(鉄塔)で約500 m離れている。

設置した人工ターゲットとカメラ設置架台を図-11に示す。現場条件から、撮影地点1では斜面を見上げる撮影となるため縦長の人工ターゲットとした。また、パノラマ雲台における撮影開始位置のばらつきを抑えため、カメラ設置架台にクイックシューベースを、パノラマ雲台にクイックシューを取付けた。



(a) 計測点(人工ターゲット) (b) 不動点(人工ターゲット)  
(ターゲットパネルの寸法: 300×400mm, t7mm)



(c) カメラ設置架台 (d) 撮影状況

図-11 人工ターゲットとカメラ設置架台

### (2) 計測結果

実証実験は、2019年8月から開始し、2020年2月まで月1回の頻度で計7回、TS測量の計測日付近で実施した。計測結果の一例を図-12にまとめて示す。同図(a), (b)は撮影画像とパノラマ合成した計測画像であり、計測1回の1サイクル当たりの撮影枚数は、撮影地点1で26枚、撮影地点2で8枚である。同図(c)は画像計測およびTS測量による南北(斜面横断)方向の水平変位の経時変化を、同図(d)は3方向の計測値の平均値と標準偏差を、画像計測とTS測量で比較したものである。なお、画像計測点とTS測量点の離隔距離は1.5~1.8 mである。

これらの計測結果の比較により、画像計測における水平変位は、東西(斜面縦断)方向・南北(斜面横断)方向ともにTS測量と同程度の精度であることが分かった。一方、画像計測における鉛直変位は、TS測量との比較で数mmの差異があることも分かった。想定される要因としては、大気ゆらぎやパノラマ合成などに影響される変位のバラツキが考えられる。なお、現時点では、サンプルデータ数が7サンプルと少ないため、変位の発生や変化の傾向について分析するには、より長期間で多くのサンプルデータが必要である。

### (3) 機能の維持

現地自然環境下に設置している装置は、現在、乾季・雨季を一通り経過し、大きな不具合もなく計測できていることから、良好な機能を維持しているものと考えられる。

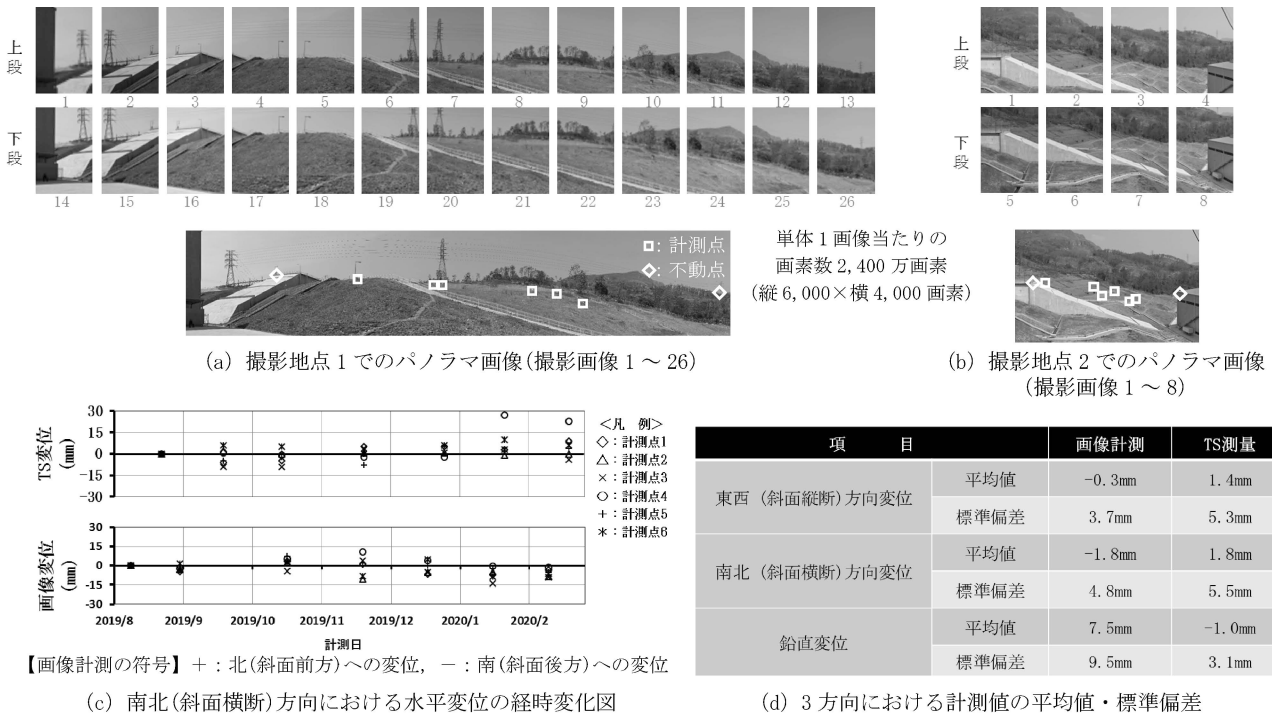


図-12 計測結果の一例

#### IV. おわりに

本研究では、まず基礎実験を行うことで、撮影位置のズレと撮影方向のズレに伴う撮影距離ごとの計測誤差の関係を明らかにした。その誤差対策として、パノラマ雲台を用いてパノラマ撮影を行いパノラマ画像合成したうえで変位計測を行う半固定式の撮影方法を考案し、そのシステム開発を行った。また、広範囲に及ぶ実斜面において実験を行いその有効性の検証を行った。

今回開発した半固定式カメラを用いた斜面変位計測システムは、実斜面(自然環境下)における画像変位計測に適用可能性があり、特に水平変位に対しては精度が高く、TS測量と同程度の精度であると考えられる。一方、鉛直変位においては、TS測量との比較で数mmの差異が認められた。

今後は、長期にわたり計測を継続するとともに、設置した人工ターゲット以外の自然ターゲット(斜面に設置している構造物)等への適用性についても確認を行う予定である。また、今回開発した本システムを他の斜面にも適用することは十分可能であると考えられ、国内外を問わず、より多くの実斜面への活用を目指していきたい。

#### 参考文献

- 1) 吉田次男・柴田卓詞・藤原正明・小野徹・早川清・若木伸也：デジタルカメラによるノンターゲット式斜面自動変位計測システムの開発, Kansai Geo-Symposium 2015 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集, 地盤工学会関西支部, pp. 19-24, 2015.
- 2) 河野幸彦・有本弘孝・小野徹：デジタルカメラによる斜面変位計測システムの開発, 電力土木, 387, pp. 122-126, 2017.
- 3) 河野幸彦・出野尚・小野徹・有本弘孝・藤原正明：デジタルカメラ画像を用いた長期定点観測によるダム堤体の遠隔変位モニタリング, Kansai Geo-Symposium 2018 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集, 地盤工学会関西支部, 2018.
- 4) 丸屋孝広・玄野亜衣子・小野徹：デジタルカメラ画像を用いたダム堤体の長期変位計測, 電力土木, 402, pp. 42-46, 2019.