

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

河野幸彦¹・出野尚¹・○小野徹²・有本弘孝³・藤原正明²¹関西電力・²ズームスケープ・³地域地盤環境研究所

1. 研究の目的と概要

ダム堤体などの斜面において、安全性の確保と設備保全のため変位計測管理が行われているが、現行手法の多くは、広範囲に及ぶ多点計測が技術的・費用的に難しく、地震など災害時における即時的な詳細把握には適していない。また、急峻な地形に構築されたダムも多く、災害時には土砂崩れなどにより現地へ赴くことさえ困難な状況が予想されるため、画像等による遠隔操作での状況把握と施設の安全性の確認が望まれる。このような背景から著者らは、ダム堤体など斜面を対象とした安全かつ低費用な遠隔変位モニタリング技術の確立を目的として、デジタルカメラ画像を用いた自動変位計測手法の構築とシステム開発及び実証実験を長年に渡り行ってきた^{1),2),3)}。

デジタル画像を用いた変位計測手法には多くのものがあり、反射ターゲットを用いるもの⁴⁾や格子状のターゲットを用いたサンプリングモアレ法⁵⁾などが有名であるが、いずれも専用の人工ターゲットを予め配置することが前提であるため斜面全体の状況把握には適していない。当手法は専用のターゲットを用いる必要がなく、ターゲットなしでの変位計測も可能であるため、緊急時の計測に適している。一方、自然物を利用すると気象変化や日照変化などの影響を受けやすく安定的な計測ができないという課題があった。本研究では、ダム堤体における既設の設備などをターゲット代わりに用いることを前提として、気候、気象、植生の変化など様々な周辺環境の変化への対策やカメラの傾きのずれの補正などの処理を施すことで、年単位の長期的な計測においても安定的に計測できる計測システムを開発し、その実証実験を行った。

計測対象は堤体長約 300m を超えるロックフィルダムで、その周辺環境は標高約 1000m の厳しい気候、気象条件下であるが、耐環境性の高い撮影解析システムの開発により安定的な動作が確認された。計測精度についても、鉛直方向については数 mm の変化に収まっていること、水平方向については水位データと高い相関があることから、高精度な計測が実現できていることが確認された。

2. 計測方法とその原理

2.1. 撮影方法

撮影方法の典型例を図-1 に示す。変位モニタリングの対象となる斜面に向けて、斜面から十分離れた位置にカメラを強固に固定して設置し、計測範囲に合わせて焦点距離を設定しピントを合わせ固定する。対象範囲の広さや計測精度によりカメラの台数が複数台となる場合は、図-1 のように隣接写真の一部が重複して写るように撮影範囲を調整する。

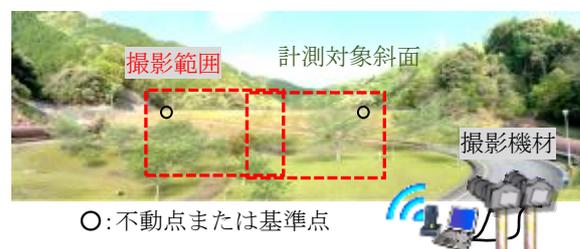


図-1 撮影方法の例

2.2. 撮影機材

撮影機材の例を図-2 に示す。カメラとレンズは防塵防滴のものを使用し、ハウジングに入れたうえで防水加工を施す。夏場の高温対策のため、ハウジングには遮熱壁と通気口を設ける。冬場の低温対策と結露対策として、サーモスタット付きのヒーターをカメラに巻く。さらに、防塵防水加工を施した制御用 PC とカメラを接続し、制御用 PC と通信機器とを接続し、遠隔操作を可能とする。さらに、これらの機器を監視しハングアップが確認された場合に再起動する電源管理装置やバックアップ電源、バックアップ通信装置、データバックアップ用外部ストレージを備え、何らかの異常事態に備える。



図-2 撮影機材の例

2.3. 自動撮影処理

自動撮影システムの概要を図-3 に示す。定期的な撮影を確実にするため、定期撮影の制御は解析プログラムとは別プロ

Remote Displacement Monitoring of Dam Wall Bodies by Long-term Fixed Point Observation with Digital Camera Images

Yukihiko Kohno¹, Takashi Deno¹, Tetsu Ono², Hrotaka Arimoto³, Masaaki Fujiwara²

(¹KANSAI Electric Power Co., Inc., ²Zoomscape Inc., ³Geo-Research Institute)

KEY WORDS: Displace monitoring, Dam body, Environmental resistance, Photogrammetry, Image matching

セスで行う。①定期的に撮影信号を送る装置により、カメラが定期撮影を行う。その際、撮影された画像はカメラ内部に保存される。②解析用PCがカメラ内に新しい画像があるかどうかを確認し、ある場合は転送する。この2つのプロセスは非同期でもよい。処理を分離することで解析処理の負荷が高い場合や解析PCが異常を起こした場合でも安定して定期的な撮影がなされる。

計測精度を上げるため、画像撮影は一度に1枚だけでなく、10枚以上の複数枚の連続撮影を行う。

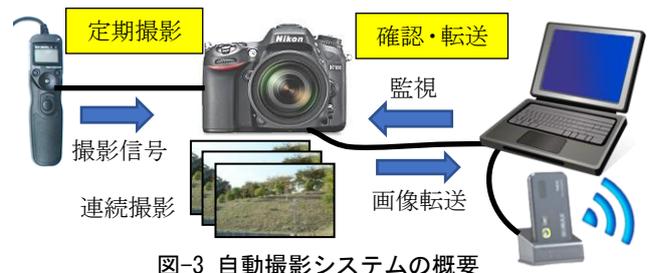


図-3 自動撮影システムの概要

2.4. 計測点・不動点の設定

ノンターゲット式の画像計測では、計測対象を明示的に指定する必要がある。計測対象範囲は画像上の領域として指定する。便宜的に計測対象領域を計測点と呼ぶが実際には面である。不動点も同様に画像上の領域として明示的に指定する。また、実寸変位に変換する必要があるため、各計測点や不動点までの撮影距離をレーザー距離計などにより別途測って与える。なお、領域設定は最初の画像(基準画像)上で一度行えば、後続して撮影される画像については、自動的に領域設定される。

2.5. 変位解析の流れ

解析用PCに画像が転送されてから、変位量が算出されるまでの主な処理過程を以下に示す。

- ① 基準画像の指定領域に相当する範囲を後続画像上で切り出す
- ② 領域ごとに画像マッチングにより画素単位の変位量を得る
- ③ 不動点をもとにカメラの傾きなどを補正する
- ④ 画素単位の変位を実寸単位の変位に変換する
- ⑤ 統計処理により異常値除去を行ないグラフ化する

2.6. 画像マッチング

本変位計測システムにおいては、最小二乗マッチング⁶⁾と呼ばれる手法をベースとして独自開発した画像処理手法を用いて画像上での変化を捉え、そのうち平行移動量を画素単位の変位量として出力する。その概念図を図-4に示す。詳細については、文献1), 2)を参照されたい。

2.7. 実寸単位の変位への変換（幾何変換）

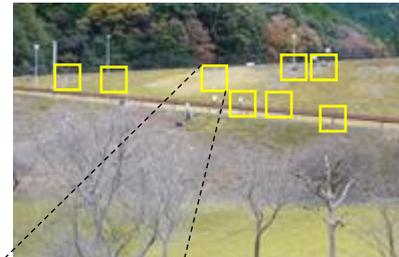
画像処理により得られた画素単位の変位ベクトル(dx, dy)を実寸単位の二次元変位ベクトル(dX, dY)に変換する。撮影距離を D 、傾斜角を ϕ 、水平角を θ 、光軸まわりの回転角を κ とする(図-5参照)。また、焦点距離を f 、センサーサイズを s としたときの変換式を以下に示す。なお、奥行き方法の変位は得られない。

$$\begin{pmatrix} dX \\ dY \end{pmatrix} = Ds/f \begin{pmatrix} 1/\cos\theta & 0 \\ \tan\phi \tan\theta & 1/\cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa \\ \sin\kappa & \cos\kappa \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} \quad (1)$$

2.8. 不動点によるカメラの傾き補正

長期間のモニタリングでは、カメラを強固に固定していたとしても撮影角が微小に変動する。その変動量を不動点で補正する。本来動かないはずの不動点の移動量や傾きから、カメラの傾きを逆推定するのである。撮影角の微小変化と不動点位置の変化の関係を図-6に示す。移動前の不動点を○で、移動後の不動

- ① 画像上の各計測点領域を設定基準画像



- ② 異なる時間に撮影された画像を比較

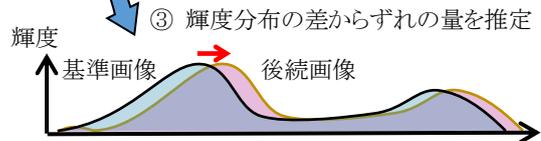
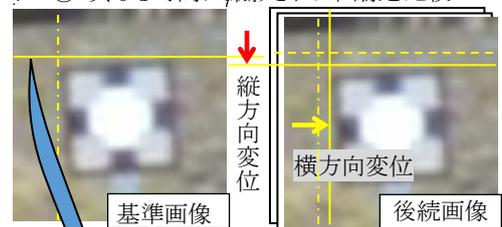
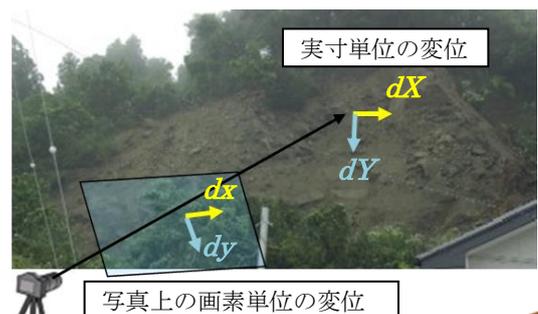


図-4 画像処理による画素単位の変位計測



写真上の画素単位の変位

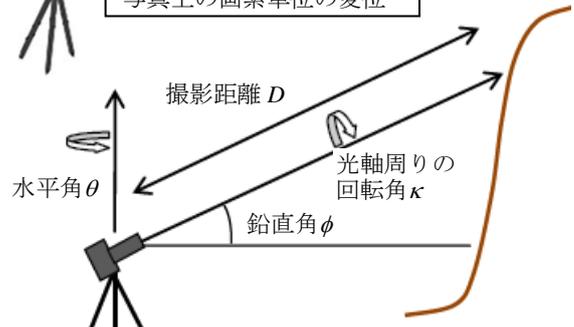


図-5 カメラの撮影角と変位の関係

点を●で表し、不動点 1, 2 の中間点を小さい丸で表している。不動点 1, 2 の中間点の変位ベクトルの X 成分が水平角の微小変動 $\delta\theta$ による影響であり、Y 成分が鉛直角の微小変動 $\delta\phi$ による影響である。撮像面上での中間点の変位ベクトルを $(\delta X, \delta Y)$ とすると、

$$\delta\theta = \sin(\delta X / f)^{-1}, \quad \delta\phi = \sin(\delta Y / f)^{-1} \quad (2)$$

として計算できる。また、変動前後の不動点 1, 2 の線分の傾きの変化を光軸まわりの微小変動 $\delta\kappa$ として算出できる。このようにして算出した撮影角の変化を加えたうえで、式(1)を用いて実寸単位の変換を行い、カメラに生じた微小な傾きのずれの影響を補正することができる。なお、不動点を多数設定し相互の位置関係をもとに変位発生や大誤差がある不動点を省いて補正する。

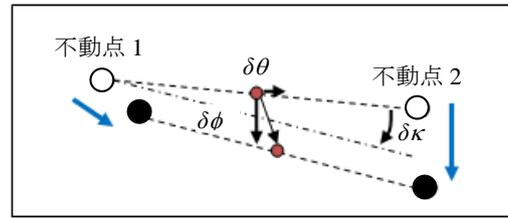


図-6 撮影角の変化と不動点位置の変化の関係

2.9. 異常値除去と統計処理

斜面の変位計測の目的は、地盤の変動を捉えることであって、風などによる計測点付近の草木の揺れや大気ゆらぎなどは、排除しなければならない。これらの動きは短時間に变化するという特性があるため、複数枚の連続撮影を行って、その中で大きな動きがあるものを異常値として除去し、残った画像の変位データを平均することで統計的に計測変位の安定化をはかる(図-7)。また、たまたま虫や人などの映り込みや反射や影の影響で、画像マッチングの一致度が低い(最小二乗残差が大きい)場合も異常値とみなして除去する。これらの処理を行っても取り除けない異常値については、集約後の変位データに対しフィルタ幅 5 個分の中間値をとるメディアンフィルタをかけて除去する。

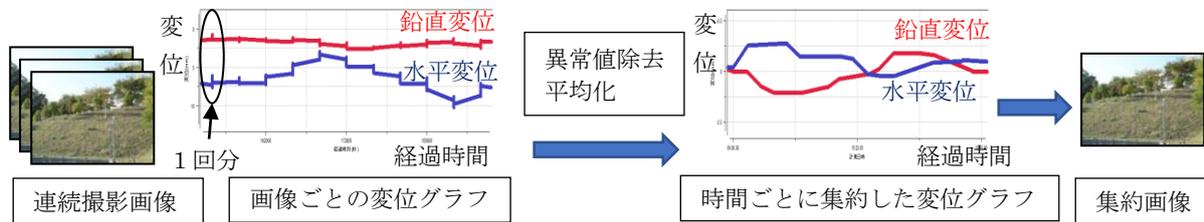


図-7 統計処理による連続撮影画像の集約化

3. 周辺環境の影響に対応するための工夫

3.1. 大気揺らぎへの対応

撮影距離が大きいと気象条件や周辺の環境条件によっては、大気揺らぎの影響が非常に大きくなる。大気揺らぎは、振幅が小さく動きが速いものから振幅が大きく動きがゆっくりしたものまで様々な周波数成分の揺らぎが含まれるが、これまでの実験結果により 0.1Hz 以下の周波数の揺らぎは、ほぼ存在しないことがわかっており、1 秒以上の間隔で 10 枚以上の画像を撮影してそれらの変位を平均化することで、大気揺らぎの影響を統計的にほぼ除去できることが現場実証実験により確認されている。ただし、露光時間が長いと被写体ボケするため、露光時間を極力短くすることが望ましい。

また、不動点が大気揺らぎにより大きく揺らぐと計測点全体の変位に大きな誤差が発生する。撮影距離が小さければ大気揺らぎの影響も小さくなるため、可能なら不動点はカメラに近接した位置に設置することが望ましい。それが難しい場合は、逆に非常に遠方に不動点を取るとよい。非常に遠方にある点では、多数の大気揺らぎの影響が重なるため、空間的に揺らぎの影響が平滑化されるため、揺らぎはむしろ小さくなる。それも難しいなら、多数の不動点を設けて平均化することで大気揺らぎの影響を小さくする必要がある。

3.2. 日照変化・天候変化への対応

日照変化の影響の例として、図-8 に同一の欄干の日照変化を示す。これからわかるように、日照変化は影の現れ方に大きな影響を与えるだけでなく、背景にも大きな違いが現れるため、影の影響を取り除けばよいというほど単純なものではない。天候によっても写り方は大きく変わる、晴天と曇天では影の出方や明るさが異なるが、雨天の際には明るい色のコンクリートが暗い色に変化するなど非常に大きな違いが現れる。

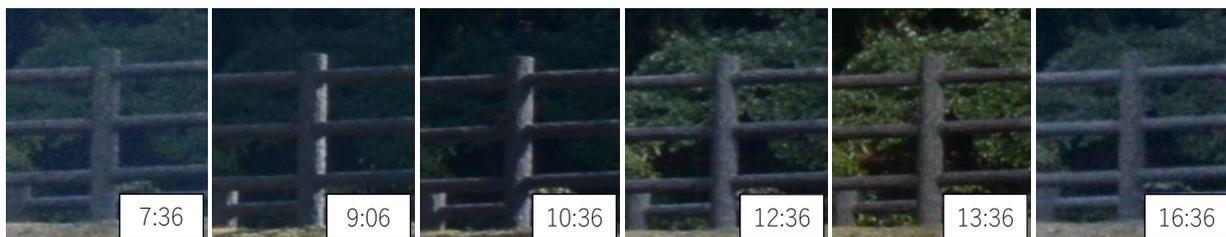


図-8 ダム欄干における日照変化による写り方の違い

これらの影響に対応するため、以下の対策を施した。

- パターンの異なる基準画像を複数用意し、画像マッチング時の類似度が最も高い基準画像をもとに変位を算出する
- どの基準画像とも適合しない場合は、異常とみなして計測データから除外する
- 長期の計測を行う場合は、撮影する時間帯を揃える

3.3. 季節変動、植生変化などへの対応（基準画像のもし替え）

季節変動による植生変化やがけ崩れなどによる斜面の大きな変化に対応するには、基準画像のもし替えが必要である。基準画像と後続画像との画像マッチング残差が増大してきたら、自動的にもし替え用の基準画像が選定される。もし替え用の基準画像は、①その前後の期間において画像マッチング残差が十分小さいこと、②もし替え前後の変位グラフのパターンが大きく変わらないこと、を条件として最適なものが選定される。

また、もし替え前後で重複した計測期間を設けて、期間内での変位の平均値が一致するようにすることで、変位グラフの連続的な連結が行われる。

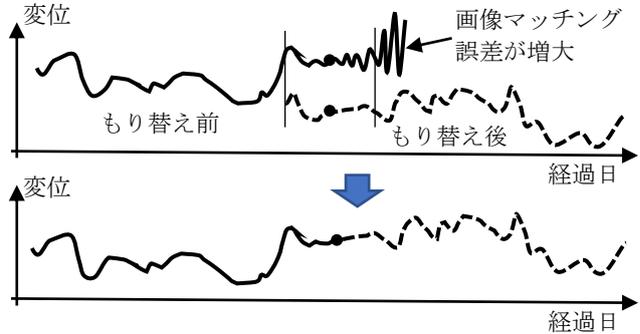


図-9 基準画像のもし替え方法

3.4. カメラの大きな傾きへの対応

長期間に及ぶ計測では、振動などの影響によるカメラ台座の緩みなどからカメラの傾きが増大することがある。このような場合、画像間での位置ずれが大きくなりすぎて、基準画像において設定した計測領域が、後続画像での探索範囲から外れてしまい画像マッチングエラーとなる。この問題に対処するため、画像全体での位置ずれの大きな補正を行う必要がある。この処理には、特徴量マッチングのひとつである AKAZE 法⁷⁾を用いた。

4. 検証実験

4.1. 計測対象とカメラ配置

実証実験の計測対象と計測点および不動点の状況を図-10 と図-11 に示す。

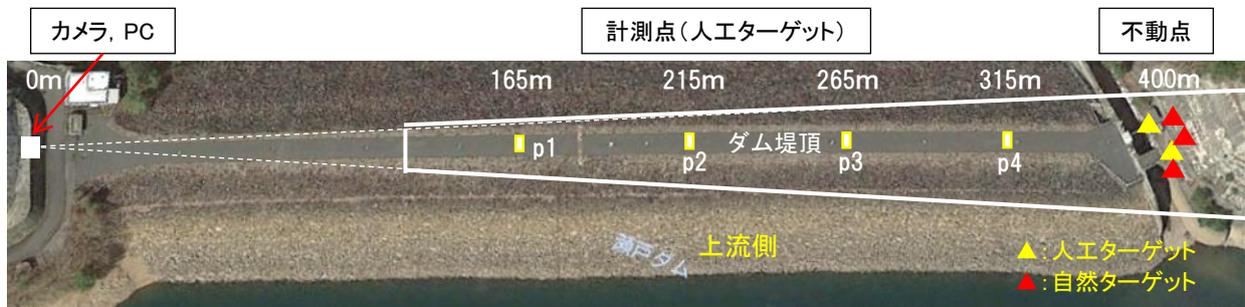


図-10 計測点と撮影機材の配置平面図

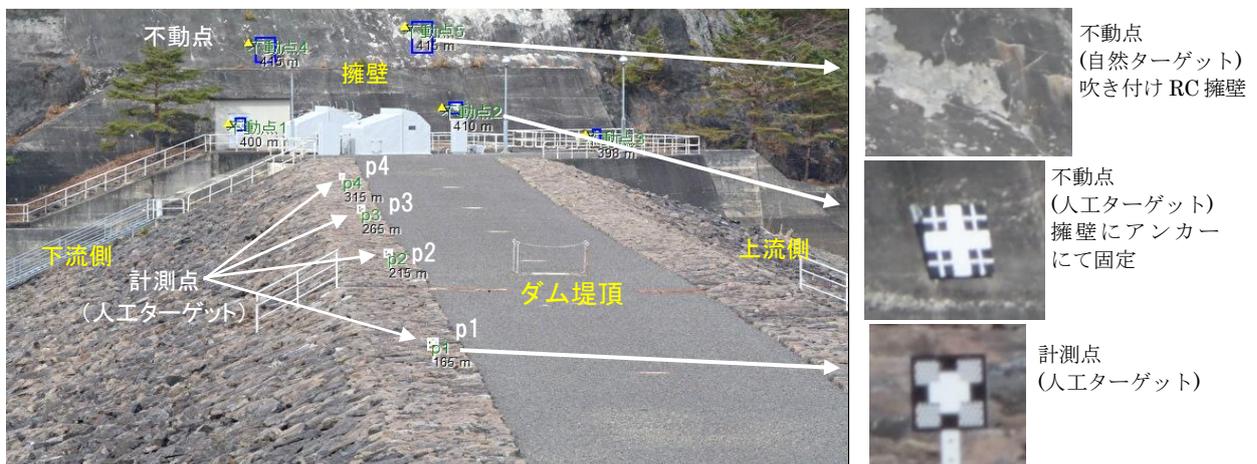


図-11 計測点および不動点の状況

計測対象としたのは、奈良県吉野郡十津川村に位置する瀬戸ダムである。瀬戸ダムの特徴として、堤体延長約 343m、堤体高さ約 110m にも及ぶ大型のロックフィルダムであること、揚水式の水力発電を行うためダム水位の日変化が大きいこと、標高約 1000m の山深い場所に位置することが挙げられる。撮影距離は遠いところで約 400m にも及ぶ。

4.2. 撮影装置

実験に用いた主な撮影装置を表-1 に示す。ハウジングを含めた外観は図-2 に示した通りであり、頑強な擁壁上に固定して設置されている。2 台のカメラを用いて定期撮影しているが、本稿ではそのうち 1 台の計測成果について報告する。

空間分解能は、最遠端の不動点(400m)において約 8.0mm であり、最も近い計測点 p1(165m)でも約 3.3mm である。

撮影インターバルは日中の 2 時間 (8 時, 10 時, 12 時, 14 時, 16 時) である。一度に 1 秒間の間を空けて 20 枚の連続撮影を行った。撮影された画像は解析用 PC に転送され、変位解析が行われる。解析により得られた変位データは、通信装置により遠隔地にあるサーバに転送される。

表-1 実験に用いた機材

種類	機種	主な特徴
デジタルカメラ	ニコン D7100 	6000×4000 画素 APS-C CMOS センサ 素子サイズ 3.9μm
ズームレンズ	AF-S DX ニッコー ル 55-200mm	f/4-5.6. テレ端 200mm で固定
解析用 PC	Intel NUC 7i3BNH	OS Windows10 Intel Core i3-7100U

4.3. 実験期間と長期動作確認

実験期間は、平成 29 年 4 月 18 日～平成 30 年 1 月 31 日である。2 月以降も撮影は続けているが、雪の影響があるため、本研究の実験期間を 1 月末までとした。気象条件としては、最高気温 30℃、最低気温-10℃となっており、日降水量が 100mm を超える豪雨が 2 回、台風などの接近が数回ある。

その間に、停電やハードウェアトラブルなどにより全期間 289 日中 39 日の停止期間があり、システム保守後の稼働率は 92%となっている。6 月に不良機器の入れ替え作業を行った以外は、全て自動復旧あるいは遠隔操作で復旧している。

4.4. 鉛直方向の計測精度

図-12 に鉛直方向の変位グラフと停止期間を示す。

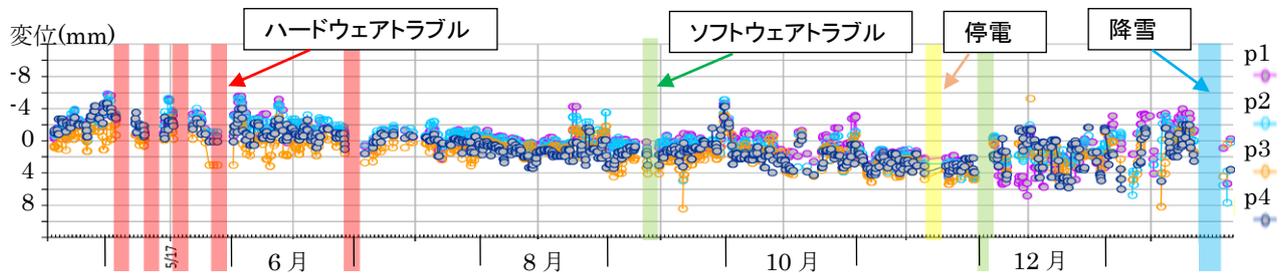


図-12 鉛直方向の変位グラフと停止期間

瀬戸ダムの堤頂の高さは非常に安定していると考えられるため、グラフ上に現れている変位はほぼ計測誤差であると考えられる。12 月以降は降雪などのためばらつきが大きいが、それ以外は全点概ね±5.0mm 以内に収まっていることが確認できる。鉛直方向の平均誤差として、全期間の平均二乗誤差(RMSE)を表-2 に示す。最大 300m 以上の撮影距離がありながら、1.5mm を下回る高い精度で計測できていることがわかる。

表-2 鉛直方向変位の平均二乗誤差

計測点	p1	p2	p3	p4
鉛直変位 RMSE(mm)	1.35	1.28	1.32	1.28

4.5. 水位データとの相関

水平方向の変位量は貯水量(水位)に応じた水圧によって変化する。計測位置によっても水平方向の変位量は異なり、ダム堤体の中央付近に位置する p1, p2 については大きな水平変位が発生し、次いで p3 が大きく、p4 は端部に位置するためあまり動かないと考えられる。図-13 に各計測点の水平変位グラフとダム貯水池の水位データを重ねて示す。

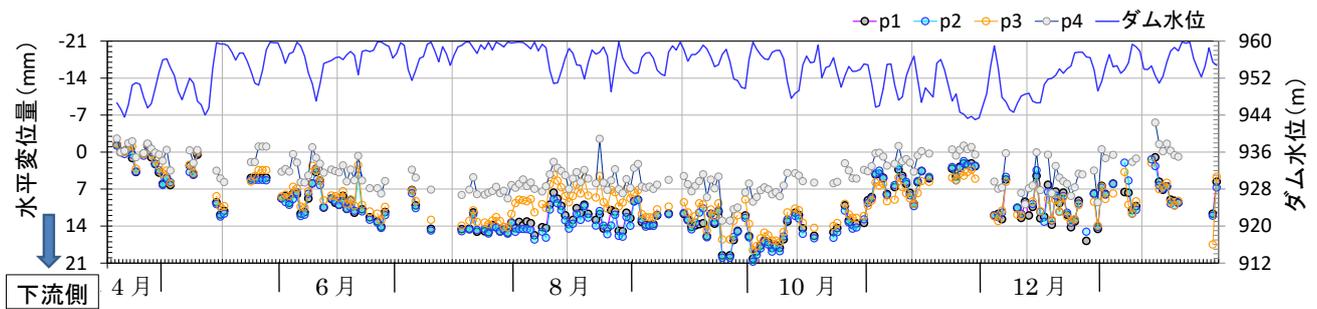


図-13 水平方向の変位グラフとダム水位

この結果を見るとダム中央付近の対称位置にある p1, p2 の水平変位量はほぼ重なっており、ダム中央からの距離に従い p3, p4 の順で水平変位量が小さくなり、変位パターンもほぼ同じであること、ダム水位が高いほど下流側への水平変位が大きくなっていることから、良好な結果が得られていると推察される。さらに詳しくダム水位と水平変位との関係进行调查するため、p1 の水平変位とダム水位との相関をとったグラフを図-14 に示す。この結果を見るとダム水位との高い相関があることがわかる。図-14 に示したダム水位は、毎 12:00 のデータであるが、瀬戸ダムは揚水式発電所の貯水ダムであることから、水位の日変動も大きく、それが相関を乱している可能性がある。そこで、さらに 11 月の 2 時間ごとの水平変位とダム水位との相関をとった。その結果を図-15 に示す。その結果、寄与率がおよそ 0.9 という非常に高い相関があることがわかった。

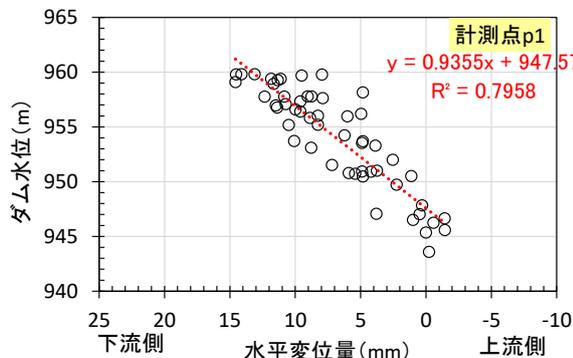


図-14 ダム水位と水平変位の関係(毎 12 時のデータ)

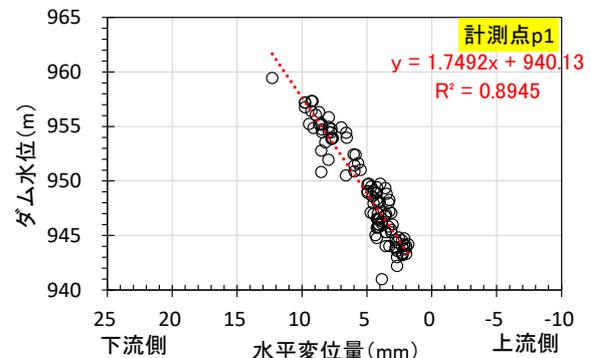


図-15 ダム水位と水平変位の関係(2 時間ごとのデータ)

5. 結論

堤体延長約 300m 以上に及ぶ瀬戸ダムを対象として、画像計測により約 1 年間にわたる長期の変位モニタリングを行い、鉛直方向の平均精度 1.0mm 超という高い精度の変位計測成果を安定的に得ることができた。また、ダム水位変化に伴う水平変位についても適切にとらえられており、2 時間ごとの水位変化とも正確に連動していることから、準リアルタイムでの計測に利用できることが確認できた。

参考文献

- 1) 小野徹・若木伸也：写真計測による雨天時のノンターゲット土砂災害モニタリング，日本写真測量学会学術講演会発表論文集，2013-10 号，pp.89-92，2013.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 西山哲・大西有三・大津宏康・矢野隆夫・龍明治・李徳河：デジタル画像計測法の斜面防災モニタリングシステムへの応用に関する研究，応用地質，Vol.44，No.6，pp.331-340，2004.
- 5) 藤垣元治：土砂災害の前兆現象における変位検出のための遠隔からのサブミリメートル変位計測装置の試作，実験力学，Vol. 12，No. 3，pp.159-164，2012.
- 6) 織田和夫・近藤剛・尾幡昌芳・土居原健：LM 法による画像の自動モザイク，写真測量とリモートセンシング，Vol.37，no.3，pp.42-51，1998.
- 7) Pablo F. Alcantarilla, J. Nuevo and Adrien Bartoli : Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces, In British Machine Vision Conference (BMVC), Bristol, UK, September 2013.