

デジタルカメラ画像を用いたフィルダム堤体の長期変位計測

丸 屋 孝 広
亥 野 垂 衣 子
小 野 徹

概要 デジタルカメラ画像を用いた変位計測システムの開発を行い、実証実験としてロックフィルダム堤頂部の長期変位計測を行ってきた。本計測システムは撮影間隔や撮影画像の伝送等を遠隔制御し、遠隔地でのモニタリングおよび高精度画像マッチング処理を用いた自動変位計測が低コスト・短時間でできるものである。本稿では、標高約1,000 mに位置する大型のロックフィルダムにおいて、高精度で安定的な計測が行えること、変位計測結果がダム貯水位と高い相関があることを確認し、また GPS 計測結果との比較による検証を行ったので報告する。

キーワード：変位計測，斜面モニタリング，画像計測，デジタルカメラ

I. はじめに

ダム堤体などの斜面においては、設備保全や安全管理を目的とした様々な変位計測監視システムが採用されている。広範囲の多点同時計測においては、多額の設備投資や維持管理費を要するのが一般的である。また、計測監視を必要とする斜面では、台風や地震等による災害の発生によって現地確認が困難な状況となることがあるうえに、そもそも日常的な巡回監視や設備等の定期的な保守点検のために立ち入ること自体が危険を伴う箇所も少なくない。

そこで、高精度で低価格かつ高い耐候性を持ち、遠隔監視が可能な変位モニタリング技術を確立するため、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計測システムの開発を行い、そのための実証実験を行ってきた。開発したシステムは、自然環境下においてデジタルカメラを用いた自動撮影および遠隔監視を行い、任意に指定した基準となる画像と後続撮影した画像について高精度マッチング処理を行った後に画像変位解析を行うものである。計測ターゲットは人工的な構造物に加え、一定の条件を満たせば自然物もターゲットとすることができる。変位計測システムは大まかに、①変位計測対象範囲を指定、②画像マッチング、③変位解析の3ステップで構成される。

これまでに、システムの概要や計測・解析手法ならびに盛土斜面での検証実験¹⁾²⁾について報告をしているが、本

稿では、H28年10月から約2年に渡り、関西電力(株)奥吉野発電所上部調整池の瀬戸ダム(中央土質遮水壁型ロックフィルダム)で行った実証実験について報告する。実証実験では、確認された事象や得られたデータを変位計測システムや機材にフィードバックし、それらについての改良を適宜実施した。その結果、高精度で安定的な計測が行えること、変位計測結果がダム貯水位と高い相関関係にあることが確認できた。

II. 瀬戸ダムでの実証実験の概要

1. 概要

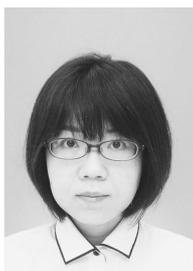
実証実験期間は、H28(2016).10.14～H30(2018).12.18までの2年2ヶ月間である。実証実験の対象となった瀬戸ダムの特徴として、堤体延長約343 m、堤体高さ約110 mに及ぶ大型のロックフィルダムであること、揚水と発電を繰り返すため日々水位が変動すること、標高が高く山深い場所にあることが挙げられる。年間の最高気温は33℃であるが、最低気温は-10℃という厳しい自然環境下にあり、冬季は降雪もある。そのため、屋外に設置する機器類には夏季の日射に対する対策だけではなく、寒冷地用の対策も必要となった。

実証実験は、ダム堤頂部の変位を計測することを目的とし、ダム左岸側の擁壁天端にカメラ等撮影機器を、ダム堤頂部の4箇所に計測点(人工ターゲット)を、ダム右岸側の建屋と擁壁の2箇所に不動点(人工ターゲット)を設置した。不動点については、変位計測精度向上の目的で既設構造物ターゲット(手摺りや擁壁の模様等)も補助不動点として利用することとした。これらの配置および設置状況を図-1と図-2に示す。また、同図には本稿に関わる堤体変位測量(以下、変位測量と表記)に用いる既存の測量点とGPS計測の測点の設置状況を併せて示した。

今回の実証試験では、カメラ位置から不動点までの撮影距離が最大400 mに及ぶことから、焦点距離200 mmの望



丸屋 孝広



丸野 亜衣子



小野 徹

*関西電力(株) 技術研究所 土木技術研究室 会員 maruya.takahiro@c2.kepcoc.co.jp

** (株)地域地盤環境研究所 地盤調査部 ino@geor.co.jp

*** (株)ズームスケープ 代表取締役 ono@zoomscape.net

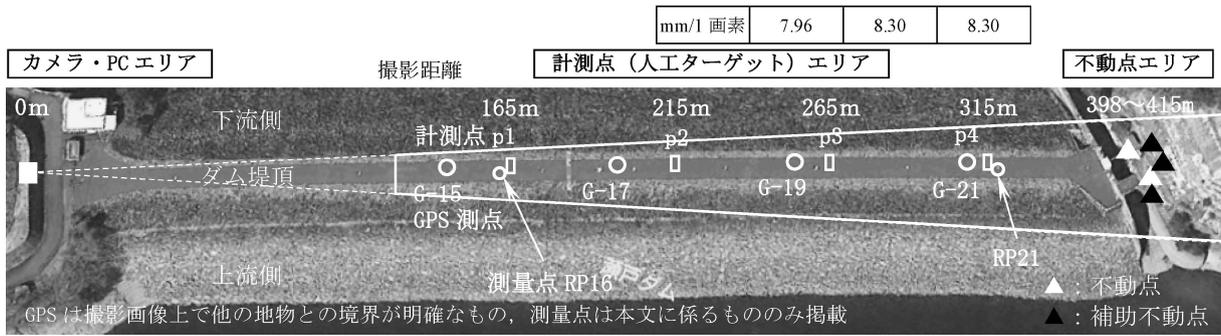


図-1 計測点, 撮影機材, GPS, 測量点の配置平面図(撮影範囲内)

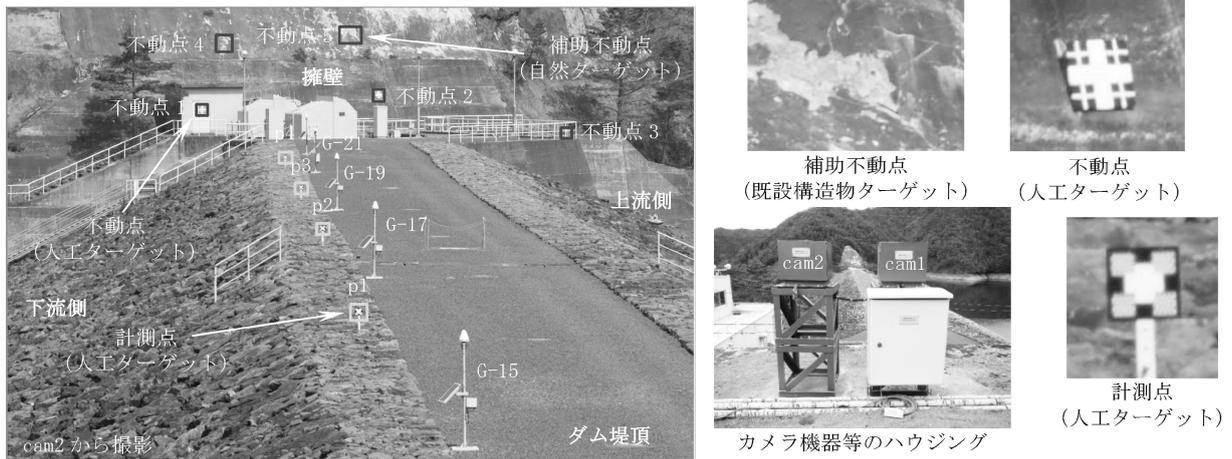


図-2 計測点, 撮影機材, GPS, 計測点, 不動点の状況

遠レンズを付けたカメラ2台と制御用PC1台を用い、昼夜を通して2時間毎に撮影を行い、撮影した画像やシステム稼動状況の確認、画像マッチングによる変位計測の結果(以下、変位計測データと表記)の取りまとめと評価(変位計測結果およびGPS計測結果との比較)を実施した。

今回、対象とした瀬戸ダムは、標高が高く山深い場所に立地することから計測システムおよび機器類のメンテナンスが容易にできない。そのため、機器メンテナンスは年2回の撮影画像ファイル回収時に行い、計測システムのメンテナンスは、必要に応じて遠隔で実施した。

2. 撮影方法およびシステム構成について

実証実験の計画段階では、2台のカメラでパノラマ合成を行う予定であったが、現地を確認した結果、カメラ1台で撮影範囲を網羅できることが確認できたため、cam2のカメラ(撮影距離400mで焦点固定)で撮影した画像を変位計測用として採用し、cam1のカメラを予備カメラ(バックアップ用)とした。変位計測の分解能である各ターゲットの1画素当たりの実寸サイズを表-1に示す。

表-1 各計測点における1画素当たりの実寸サイズ

区分	計測点				不動点	
	p1	p2	p3	p4	不動点1	不動点2
計測点	p1	p2	p3	p4	不動点1	不動点2
撮影距離	165m	215m	265m	315m	400m	410m
mm/1画素	3.30	4.30	5.30	6.30	8.00	8.20

区分	補助不動点		
計測点	不動点3	不動点4	不動点5
撮影距離	398m	415m	415m

撮影時間は、ダム設備以外の人工灯が堤頂部の周辺に存在しないことから、夜間の画像撮影時に必要な光量(照度)を得ることが難しいため、日中(8時, 10時, 12時, 14時, 16時)の撮影画像を変位計測の対象とした。また、撮影枚数は、大気ゆらぎの影響を無くすため²⁾に、1秒間隔で連続20枚の撮影を行った。

計測システムの構成を図-3に示す。計測画像の撮影に使用するカメラのレンズは、防塵・防滴型とし、図-2のハウジングに収納したうえで防水加工を施した。さらには、夏季の高温対策として、ハウジングに遮熱壁と通気口を設けた。また、冬季の低温と結露への対策として、サーモスタット付きベルトヒーターをカメラに取り付けた。

制御用PCは、ハウジングのサイズを考慮して小型の業務用PCを採用した。制御用PCならびにカメラ(2台)は、通信回線(機器)を用いて遠隔で操作できるように設定し

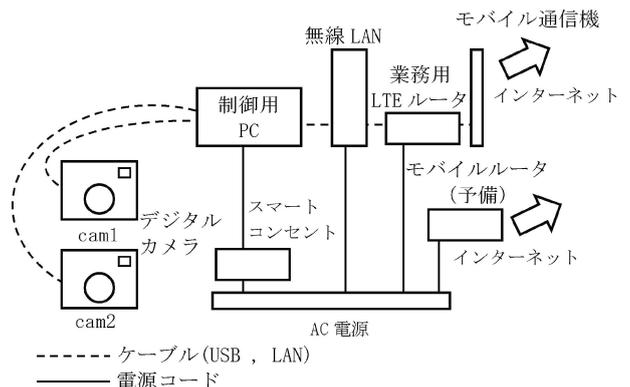


図-3 システム構成図

た。制御用 PC 内には、自動で撮影できるプログラムを組み込んだ。画像変位解析は、撮影した画像を遠隔地の解析用 PC へ伝送して実施する方式とした。制御用 PC の OS は、Windows10 Pro を採用し、OS のアップデート動作を制御できるように設定した。また、計測システムの堅牢性を高めるため、制御ソフトウェアを監視し、動作不良(エラー)が発生した場合にソフトウェアを自動復帰させる機能、メールによるシステム異常通知機能を搭載させた。さらには、定期的な OS の自動再起動や制御用 PC が動作不能に陥った場合を考え、スマートコンセントを用いた遠隔で再起動できる機能も搭載し、計測システムがダウンすることなく稼働し続ける仕組みを導入した。

通信機器は、機器の信頼性と微弱で不安定な電波状況から業務用の LTE ルータを採用し、電波増強のため外部アンテナを使用した。さらには、通信環境の信頼性を上げるため、予備回線を用いて通信回線を二重化した。

3. 画像変位解析システムについて

開発した計測システムでは、基準となる撮影画像(以下、基準画像と表記)と後続の撮影画像(以下、後続画像と表記)をマッチングさせて撮影画像の解析と変位計測を行っている。基準画像と計測対象を選定した後、

- ① 各計測点の計測領域を基準画像上で指定
- ② 画像ずれ補正と計測領域単位での画像マッチング
- ③ 画素単位で変位量を解析し傾き等を補正し実寸換算
- ④ 統計処理により異常値除去を行いグラフ化

といった流れで自動解析処理を行う。

①で取得した基準画像上での写真座標を後続画像に適用して画像マッチングを行うため、長期計測の影響による画像ずれ(シャッター動作等の微振動によるカメラ雲台のゆるみ等によるもの)があると計測領域内から対象が外れてしまい、マッチングエラーや変位量の増大といった現象が発生する。そのため、H30年度は画像マッチング処理の前工程として特徴量マッチングによる画像ずれ補正を行った。

Ⅲ. GPS 計測結果と画像変位計測結果の比較

実証実験を開始してから約1年後のH29.11.27より、GPS モニタリングシステムでの計測が開始された。そこで、ダム堤頂部に設置された GPS モニタリングシステムの計測センサー(以下、GPS と表記)のうち撮影画像内に確認できた GPS の4 測点(G-15, G-17, G-19, G-21)を、計測システムでの計測ターゲットに設定し、H30年度の計測期間内(H30.4.1~H30.12.18)における計測システムによる変位計測データと GPS モニタリングシステムの計測データとの比較を行った。計測システムで設定した GPS の計測ターゲットを図-4 に示す。なお、GPS 計測は、1 時間毎に1 個、1 日24個のデータとなっており、データ総数を揃えるため、計測システムの時刻と同時刻のデータを比較対象とした。

GPS 計測は、その特性から各時刻の計測データを時系列で統計処理を行い、ノイズを抑制した値(トレンド値)を計測データとして採用している。このため、GPS の計測データには、時間的な幅が含まれている。これに対して、変位計測データは、時間的な幅が含まれないデータであるため、両者を直接比較することはできない。そこで、変位

計測データに対し、メディアンフィルタと移動平均フィルタをかけて GPS のグラフと同程度に平滑化したものとの比較を行った。その結果を図-5 に示す。

図中、破線で示した GPS 計測データと実線で示した変位計測データの変位傾向を見てみると、水平方向変位でよく似た傾向を示していることがわかる。GPS 計測の G-15 測点では4月から10月にかけて時間の経過と共に下流側へ変位した後、10月のほぼ1ヶ月間で上流側へと戻り、双方の差もあまり大きくない。G-17測点については、H30.9.4に通過した台風の影響でGPSの位置が移動した可能

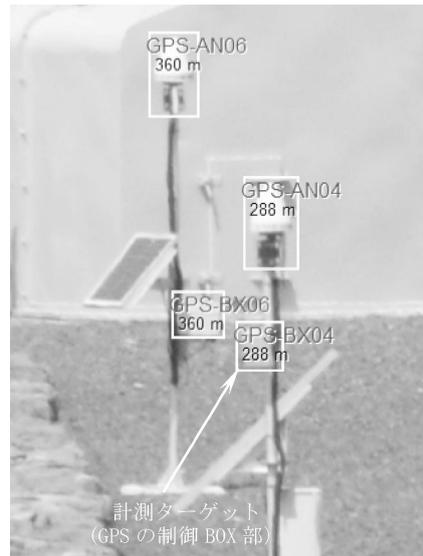


図-4 GPS 計測センサー部に設定した計測ターゲット

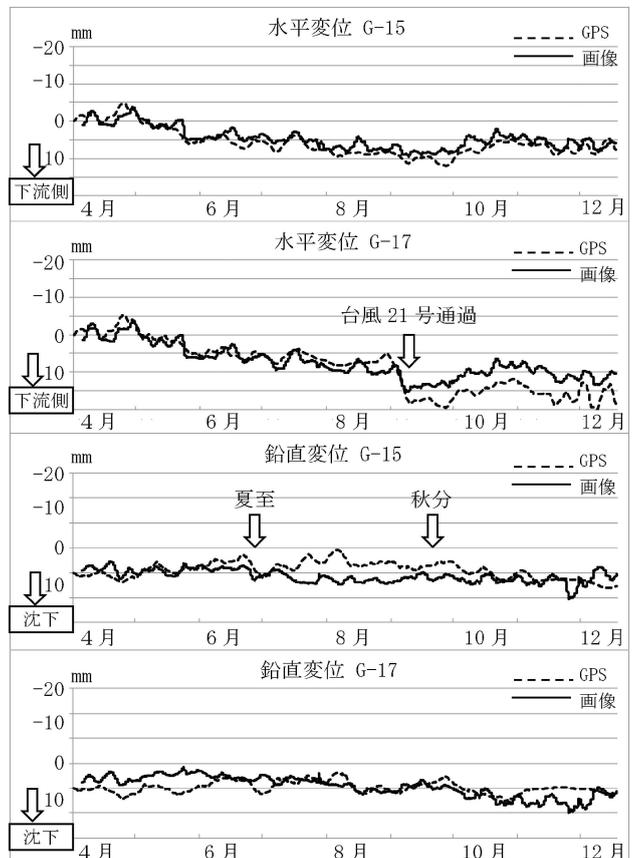


図-5 GPS と画像計測の比較

H30.4.1 8:00 の計測データを 0 として変位を算出

性があり、その前後で不自然に大きな変位がみられる。それ以外の地点においては、GPS 計測と変位計測データのグラフはよく一致している。

鉛直方向変位では、一部期間に数mm程度の差がみられるが、全体としてはよく一致している。

Ⅳ. ダム貯水位・測量結果と画像変位計測結果の比較

瀬戸ダムでは毎月1回、トータルステーションを用いた変位測量が実施されている。ダム堤頂部には、複数箇所の測量点が設置されているが、そのうち計測点p1およびp4に近い測量点であるRP16およびRP21(図-1)の変位測量結果と変位計測データとの比較を行った。図-6にH29.4~H30.12月までの変位計測データの経時変化と変位測量結果およびダム貯水位を示す。瀬戸ダムのダム貯水位は、揚水と発電を繰り返すことから日単位で変動がある。ま

た、天候等の影響により、月単位でも変動がある。そのため、月1回の変位測量結果と変位計測データとの関連性については、鉛直方向変位および水平方向変位ともにこの図から読み取ることができない。また、比較する変位測量データの総数が少ないこと、サンプリング周期が極めて異なること、ダム水位に影響を受けることから、何らかの相関関係があったとしても証明することは難しい。

日単位ならびに月単位で変動があるダム貯水位と変位計測データを比較するため、図-7にH30.10月の変位計測データの経時変化とダム貯水位の比較を示した。この図からダム貯水位は、最大4日間をかけて上昇してピークに達した後、上昇に要した日数とはほぼ同じ日数をかけて下降する、という変動パターンを読み取ることができる。p1の水平方向変位の経時変化に着目すると、ダム貯水位の上昇に伴って下流側(図の下端側)へ変位が増大し、ダム貯水位の下降に伴って上流側(図の上端側)へ戻る傾向にあり、

※H29年度：H29.4.18 14:00の画像計測・4.20 12:00の測量値、H30年度：H30.4.1 8:00の画像計測・4.10 10:00の測量値を0として変位を算出

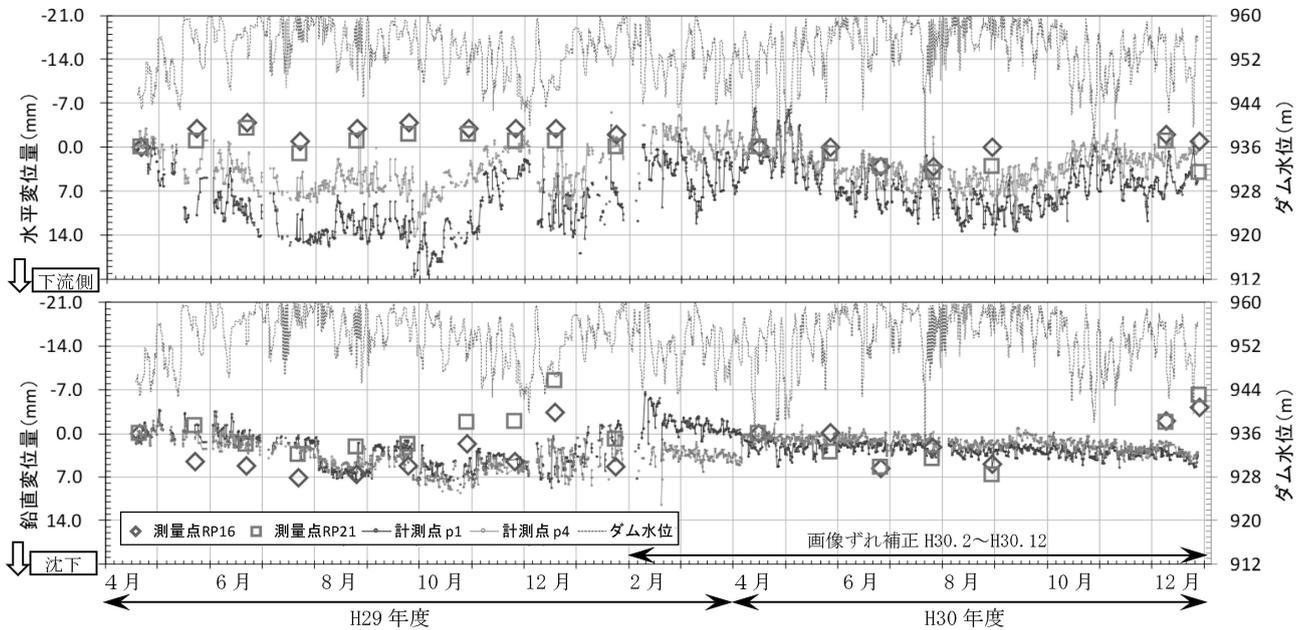


図-6 ダム貯水位・変位測量と画像計測の比較

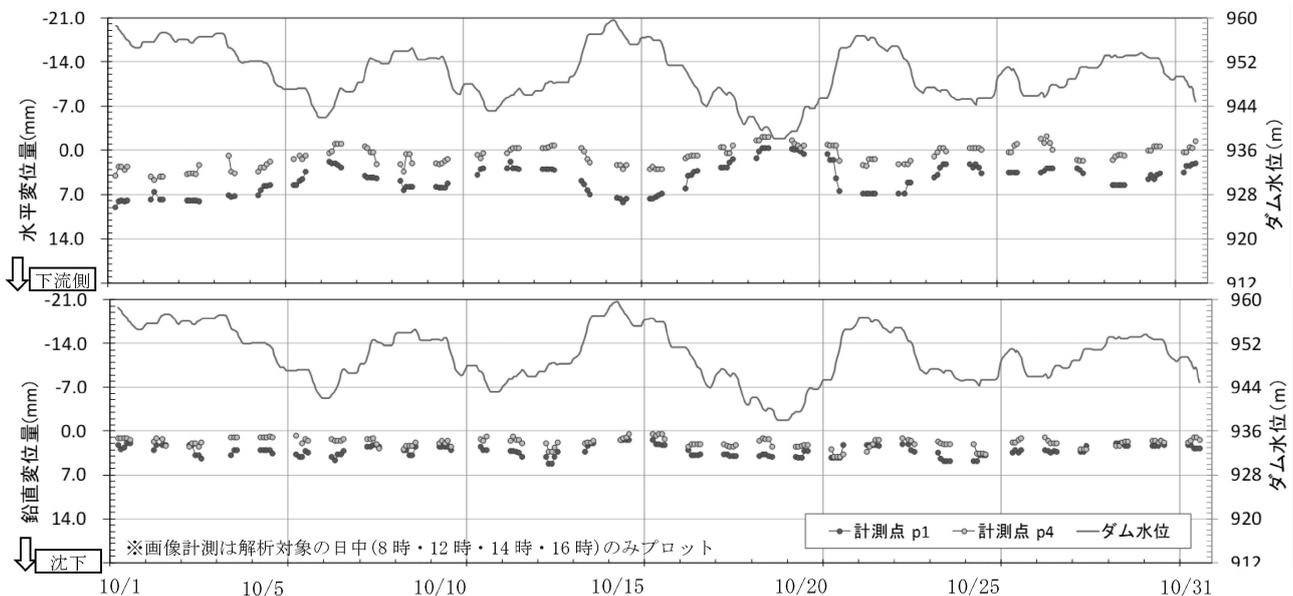


図-7 H30.10月のダム貯水位と画像計測の比較

p4の変位パターンもほぼ同じであることが分かる。ダム貯水位の変化、すなわち堤体への作用水圧の変化によって堤体の変位していると考えれば、ダム中央付近にあるp1の方がダム端部に位置するp4より水平変位量は大きくなると考えられる。実際に、表-2に示したH30.10月の変位計測データから、p1の方がp4よりも変動量が大きいことが認められる。

表-2 H30.10月の変位計測データ

H30.10.7	水平変位(mm)		ダム水位	H30.10	水平変位(mm)	
	上流(-), 下流(+)				p1	p4
撮影時刻	p1	p4		平均	4.56	0.89
2018/10/7 8:02	1.99	1.86	942.68	標準偏差	2.38	1.59
2018/10/7 10:02	3.43	0.18	943.42	Min	-0.31	-2.13
2018/10/7 12:02	4.17	-0.98	944.59	Max	11.64	4.78
2018/10/7 14:02	6.93	-2.21	946.46	Max-Min	11.95	6.91
2018/10/7 16:02	3.36	-1.61	947.29			

水平変位量とダム貯水位の関連をさらに深く見るために、図-8にダム貯水位と変位計測データの毎12時の値における相関を示す。H29年度とH30年度の寄与率は、それぞれ、 $R^2=0.79$ (H29)²⁾、 $R^2=0.85$ (H30)と高い相関を示している。これらから、ダム貯水位の変動によるダム堤体の水平変位量の連動性は高いと考えられる。その一方で、鉛直変位量とダム貯水位との関連性については、図-6および図-7から読み取ることができない。

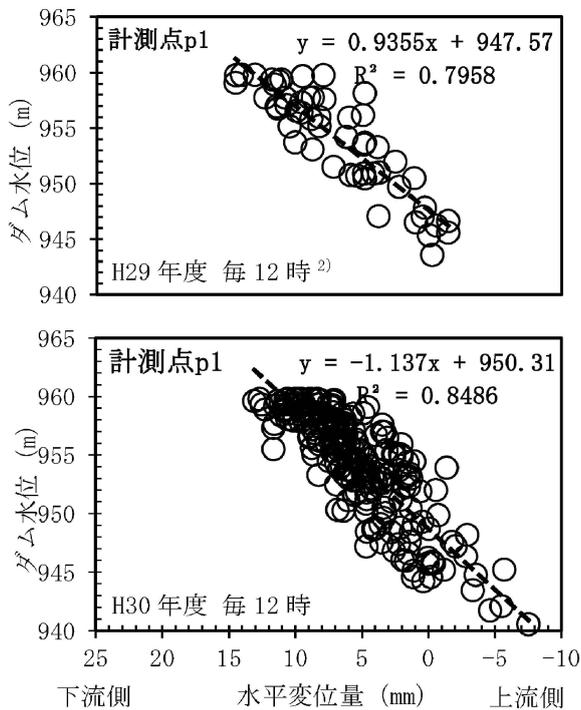


図-8 ダム貯水位と画像変位の水平変位量の相関

V. おわりに

デジタルカメラ画像を用いた変位計測システムの実証実験として2年2か月間の長期計測を行った。その成果として、一年を通して安定的で高精度の計測が可能な定点固定式計測システムの根幹を固めることができた。ダム貯水位と画像計測の水平方向変位量との間に明確な相関関係があることが確認できたことから、分単位などの短い間隔での計測についても可能であると考えている。さらに、台風通過後も機器メンテナンスを施すことなく継続して計測ができたことから、システムの堅牢性にも一定の評価ができると考えられ、通信環境等の条件を整えば、緊急時にも適用可能であると考えている。また、GPS計測結果(トレンド値)と画像計測の平滑化データがよく一致していたことから、GPS計測が難しい地点における計測システムの適用も可能であろうと考えている。

以上のことから、計測対象やその期間・設置条件等によって最適な通信システムおよび機器の構成、計測インターバルを選定ならびに設定する必要はあるが、計測条件として過酷な瀬戸ダムを対象とした実証実験における構成をモデルとし、開発した変位解析ソフトウェアを他のダムサイトに応用することは十分可能であると考えられる。

その一方で、現時点では日中の監視に留まっているが、夜間計測についても基礎的な実験を行っており、成果がまとも次第報告したい。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.