

三次元サブミリメートル変位計測による 遠隔観測型崖崩れ前兆検出システムの開発

藤垣 元治¹・此松 昌彦²・上保 徹志³・石川 礼³・大手山 達治³・
森田 慎⁴・森本 吉春⁵

¹和歌山大学 システム工学部 光メカトロニクス学科 (〒640-8510和歌山市栄谷930)

²和歌山大学 教育学部地学教室 (〒640-8510和歌山市栄谷930)

³財団法人雑賀技術研究所 センシング技術研究室 (〒640-8341和歌山市黒田75-2)

⁴アイレス工業株式会社 環境防災推進部 (〒642-0015海南市且来840)

⁵一般社団法人モアレ研究所 代表理事・所長 (〒598-0046泉佐野市羽倉崎2-1-4-804)

崖崩れの前兆現象である数ミリメートルの変位を遠隔観測によりリアルタイムに検出し、早期に警報を出す遠隔観測型崖崩れ前兆検出システムの開発を行った。本研究開発のシーズとなるコア技術は、サンプリングモアレ法による画像を用いた微小変位計測技術と新型定在波レーダーによる変位計測技術である。上記のシーズを利用して、一体化した小型の遠隔観測型三次元変位センサーの試作を行った。屋外での掘削現場の変位計測実験により、数ミリの変位がサブミリメートルの分解能で計測できることを確認した。

キーワード 三次元変位計測, 崖崩れ前兆変位, サンプリングモアレ法, 新型定在波レーダー

1. はじめに

地震や豪雨, 台風, 雪崩など自然災害への対策は緊急に対応すべき課題である。とくに崖崩れに関しては, 人的・物的損害に直結し, また道路等のライフラインの緊急時の確保のためにも, その前兆を早期に検知して避難することや, 保全を行うことが必要とされる。地滑りや崖崩れなどの土砂災害の危険箇所は, 全国には30万カ所以上ある。リアルタイムできめ細かい観測によって早期警戒ができるようになり, 防災・減災, さらに斜面沿いの道路の維持管理が効率的に行えるようになる。

従来の地滑り検出手法では, 斜面にワイヤーやセンサー, 光ファイバ等を設置する必要がある。さらにその配線も行うため, 大規模な工事が必要となる。そのため, 設置コストが高く, 限られた危険箇所に設置されているだけである。その全ての崖崩れ前兆をリアルタイムにとらえることができれば, 早期警戒体制の整備ができ, 災害時への備えが万全な防災先進社会が実現できる。

崖崩れ危険箇所の近くにある一般家屋すべてにおいて, 自宅の裏山の危険前兆をリアルタイムできめ細かく検出して早急に警報を出すシステムがあれば, 早めに避難をすることができる。そのためには, 安価で設置しやすい検出システムの開発が必要となる。

そこで, 本研究では斜面側には簡単な施工だけで設置できるターゲットを設置し, 麓側でそのターゲットの三次元変位を計測する技術の開発を行った。本研究開発のシーズとなるコア技術は, 和歌山大学で開発した「サンプリングモアレ法」による画像を用いた微小変位計測技術¹⁾²⁾と, 財団法人雑賀技術研究所で開発した「新型定在波レーダー」による変位計測技術³⁾⁴⁾である。

前者は, 格子画像の変位解析をきわめて精度よく行う手法であり, 格子ピッチの1/1000の分解能で観測方向に垂直な方向の変位が得られる。後者は, 電波の定在波の信号周波数を解析することにより, 200メートル先にあるターゲットの0.01ミリメートルの観測方向変位が検出できる。

本研究では, 上記のシーズを利用して, 一体化した小型の遠隔観測型三次元変位センサーの試作を行った。一般家屋の軒先や電柱等の既存の構造物に容易に取り付けられるように, 重量を片手で持てる3kg以内とした。試作した装置は, 屋外で評価実験を行い, サブミリメートルの変位が検出できることを確認した。以下, その詳細を述べる。

2. 遠隔観測型崖崩れ前兆検出システムの目標

本研究では, 斜面土砂の三次元変位をサブミリメートル

ルの分解能でリアルタイムに検出できる小型の遠隔観測型崖崩れ前兆検知システムの開発を行う。サンプリングモアレ法と新型定在波レーダーの技術を組み込んで、一体化した小型の遠隔観測型三次元変位センサーの試作を行い、それを用いた崖崩れ前兆検知システムを開発する。

目標とする三次元変位の計測分解能は、数百メートル先でサブミリメートルである。例えば、200メートル先で0.5ミリメートルの変位が検出できれば、前兆の検知能力としては十分なものとなる。この装置を一般家屋の軒先や電柱等の既存の構造物に容易に取り付けられるように、重量を片手で持てる3kg以内とする。

図-1に遠隔観測型崖崩れ前兆検出システムの構想図を示す。図-1(a)に示すように、斜面側はターゲットを設置するだけで配線等は不要にする。また図-1(b)に示すように、ネットワーク化することで、複数の検出システムが連携することで検知精度を高め、情報を伝達することにより、県内全体の災害情報の把握と警戒・救助体制を充実させることができるようになる。

本研究で開発をめざしている崖崩れ前兆現象検知システムの特徴は次の通りである。

- ・画像とレーダーを利用することで小型の装置で三次元変位が高精度で定量的に計測できる。
- ・斜面側には簡単なターゲットを設置するだけにし、配線やメンテナンスが不要となる。
- ・設置費用と装置の費用が安い。

従来の斜面の変位計測手法としては、ワイヤー式伸縮計、光ファイバーによる斜面変状検出システム、光ファイバー式ボアホールセンサ、GPSによる地表変位計測、トルク計測によるすべり面検知装置、感圧ケーブルによるすべり面検知装置などがあるが、以上の様な地滑り検知方式は、電気配線工事を行う必要があるものも多い。さらに、検知装置の設置等にはかなりの工事（工事費共

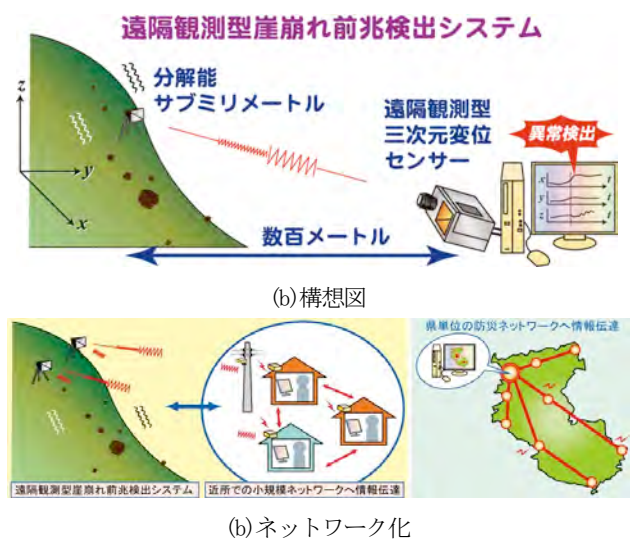


図-1 遠隔観測型崖崩れ前兆検出システムの構想

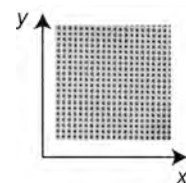
に)が伴う。また、ひとたび地滑りが起こると、装置自身が破壊される可能性も高い。それと比較すると、本計測手法は、斜面にターゲットを設置するだけであるため、有利である。

3. 計測原理

(1) サンプリングモアレ法^{1,2)}

本計測手法においては、画像によって撮影方向に対する横方向(x方向)と縦方向(y方向)の微小な変位を検出することができるサンプリングモアレ法を用いる。サンプリングモアレ法は、撮影した2次元の格子パターン画像から、サンプリングによって得られるモアレパターンを利用して、その位相を求める画像計測の手法である。図-2に示すように、1枚の2次元格子画像から、y方向とx方向に平滑化した画像それぞれに対して、等間隔のサンプリングと補間処理を行うことで位相シフトされたモアレ画像を生成し、それに対して位相シフト法を適用することでx方向とy方向の位相分布をそれぞれ求める。変位前後の位相差からx方向とy方向の変位量をそれぞれ求めることができる。

この手法は、位相を利用するため、一般的な画像内での対応点の移動を求める手法と比較して格段に精度がよく、格子ピッチの1/100から1/1000の分解能で変位計測が可能である。例えば、10mmピッチの格子パターンを用いた場合は、0.1mmから0.01mmの変位の計測が可能である。画像に格子パターンが撮影されればいので、遠隔であっても望遠レンズを用いることで微小な変位計測を行うことができる。



(a) 撮影した2次元格子画像



(b) x方向の位相解析

(左から、y方向平滑化画像、モアレ格子、モアレ位相分布)



(c) y方向の位相解析

(左から、x方向平滑化画像、モアレ格子、モアレ位相分布)

図-2 サンプリングモアレ法による2次元格子の位相解析原理

(2) 新型定在波レーダー^{3),4)}

撮影方向(z方向)の変位に対しては、新型定在波レーダーを利用する。これは、送信波と反射波の干渉により生じる定在波を利用して0.1mm程度の微小な変位を計測することができるレーダーである。

送信波と反射波を分離する必要がなく、回路が簡素化できるという点も特徴である。微小変位検知が可能で相対変位分解能は0.01mmである。至近距離から200mの遠距離まで広範囲の測距が可能である。非常にシンプルな構成で、小型・低コスト化により応用分野が広い。詳細は参考文献に示す。

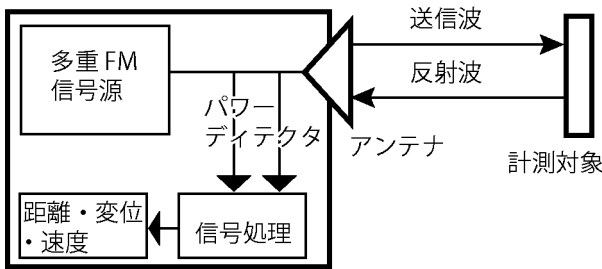


図3 新型定在波レーダーの構造

4. 屋外設置型地盤変位計測実験装置の試作

(1) 試作装置の概要

雨天時でも現場で1週間程度の計測実験が行える装置の開発を行った。図-4にその写真を示す。風雨に耐えられるように筐体は金属製とし、内部にカメラ、新型定在波レーダー、パソコンを固定している。各電源は別途に用意した箱内の燃料電池から供給する。燃料電池は1週間程度は動作する程度の容量としている。

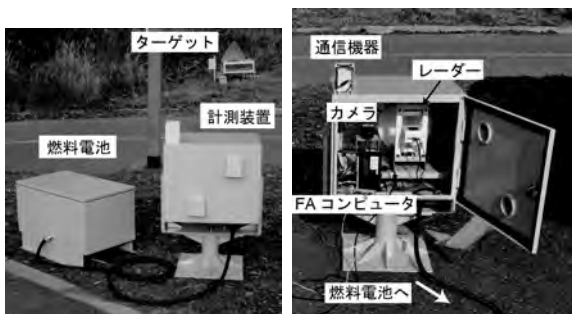


図4 遠隔観測型崖崩れ前兆検出システム

(2) 土砂災害危険箇所の現場での実験

遠隔観測型崖崩れ前兆検出システムを用いて、ワイヤ式変位計との比較実験を行った。実験場所は、有田川町上湯川にある地すべり対策地区である。図-5に位置を示す。本実験場所に、計測システムを設置して2010年9月9日～10月17日の期間、連続して計測実験を行った。図-6は軒先に計測装置を設置している様子であり、図-7に計

測地点付近の写真を示す。計測距離は28mで格子ピッチは15mmピッチとした。図-7に示すように、地すべり箇所の上に格子を設置した。図-8にターゲットを撮影した画像を示し、図-9に計測中の画面を示す。本実験では、新型定在波レーダーの電波が周囲の樹木の影響で使用できなかったため、画像のみを用いて計測実験を行った。夜間については、午後6時から朝6時までの間、露光時間中だけLEDによる照明を行うようにした。ターゲットに再帰反射材を用いているために、夜間でも十分に計測を行うことができた。

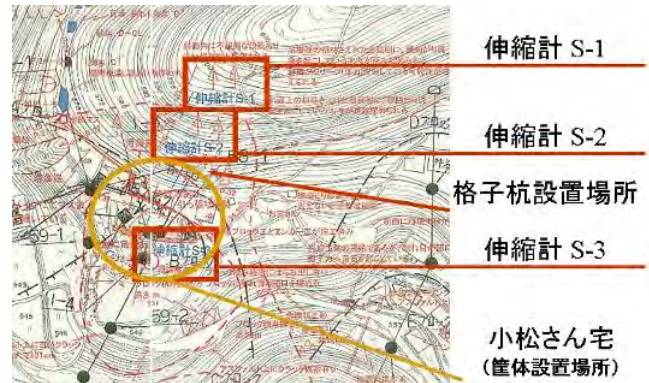


図5 ワイヤ式変位計との比較実験場所



図6 計測装置の設置



図7 定点観測実験のターゲット設置



図8 ターゲットを撮影した画像



図9 計測画面

図-10に変位計測実験結果の例を示す。夜間は比較的安定しているが、実際には変位していないにもかかわらず、日中は数ミリの変化をすることがわかった。他の日にも、同様の変化パターンが見られるため、これは温度変化によって計測装置の筐体が微小に変形したと考えることができる。

ワイヤー変位計の計測では、107.9 mmから108 mmの伸縮であったが、サンプリングモアレカメラの計測結果は誤差が大きかった。これは筐体の構造が大きいことに対し、地面と固定する足の部分が細く、計測結果に影響を与えていると考えられる。

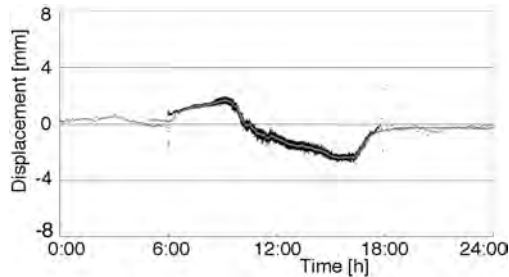
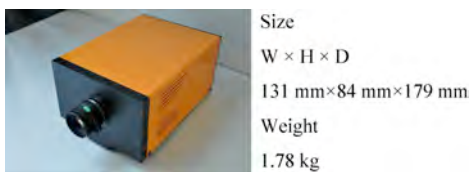


図-10 変位計測実験結果の例 (x方向の1日の変化)

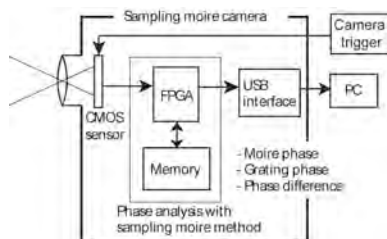
5. サンプリングモアレカメラの開発

(1) 試作装置の概要

サンプリングモアレカメラは図-11(a)に示すようなカメラである。内部は(b)のようになっておりC-MOSのセンサ、FPGA、メモリ、USB接続部分、電源ユニットで構成されている。このカメラは画像を撮影するだけでなく、撮影した二次元格子画像にサンプリングモアレ法を適用してカメラ内のFPGAで位相解析を行いリアルタイムに二次元の位相差分布画像(変位分布画像)を出力することができる。撮影速度は撮影領域によって変わり、1024×1024 pixelsの標準サイズるとき3.5fpsで、128×128



(a) 外観



(b) ブロック図

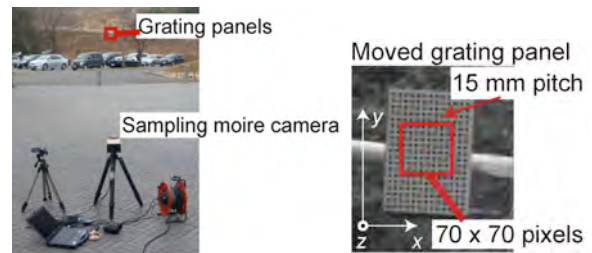
図-11 開発したサンプリングモアレカメラ

pixelsの最小サイズるとき71fpsの速度で撮影できる。

(2) 評価実験

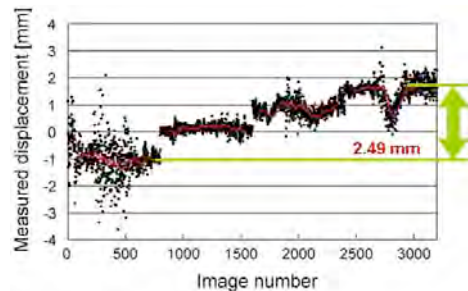
評価実験では、サンプリングモアレカメラから130m離れた場所に設置した二次元格子パネルの変位を計測した。15mmピッチの二次元格子を貼り付けたパネルをx軸移動ステージに取り付けた。計測領域は、撮影画像の格子パネル部分の中央付近70×70 pixelを用いた。図-12に実験の様子と格子パネルを示す。

図-13に示す実験結果では、x方向の変位は2.49mm、誤差は-0.51mmであった。y方向の変位は2.80mm、誤差は0.20mmであった。この実験から、サンプリングモアレカメラを用いた130mの距離における変位計測の分解能はサブミリメートルであることが確認できた。

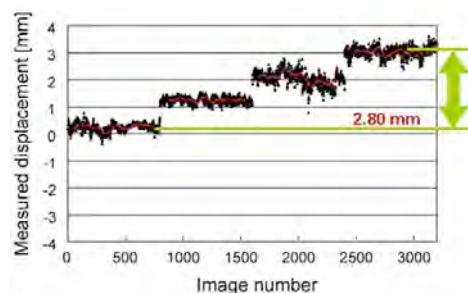


(a) 実験の様子 (b) 格子パネル

図-12 実験の様子と格子パネル



(a) x方向計測結果



(b) y方向計測結果

図-13 x方向とy方向の変位計測結果 (距離130 m)

6. 小型三次元変位計測システムの試作

(1) 試作装置の概要

次に、x方向とy方向の変位を検出するサンプリングモアレカメラとz方向の変位を検出する新型定在波レーダーを改良し、一体型ケースに取り付け、改良型遠隔観測型崖崩れ前兆検出システムを試作した。片手で持てる重

量3kg以内にすることを目標にして、**図-14**に示す3方向の変位計測が可能な装置を試作した。その内部には、最大83fpsで変位計測ができるサンプリングモアレカメラと新型定在波レーダが組み込まれている。ケースのサイズは、295 mm×115mm×235 mmであり、重量は2.86 kgとなった。



(a) ケース内部 (b) ケース概観写真

図-14 改良型遠隔観測型崖崩れ前兆検出システム

(2) 性能評価実験

上記の改良型遠隔観測型崖崩れ前兆検出システムを用いて、**図-15**に示すように、重機により斜面を人為的に掘削した際の変位の計測実験を行った。**図-15(a)**に計測装置とターゲットの位置関係を示す。斜面として、資材置き場の高さ5mの土山を利用した。ターゲットを土山の頂上付近に設置した。ターゲットと計測システムの距離は約30mであった。

ターゲットの下方に**図-16(a)**に示すように、約0.5m間隔で目印のマークP1からP8をつけ、その位置をショ

ベルカーで垂直に掘削していった。**図-16(b)**に掘削の様子を示す。

掘削時に計測された変位の変化を**図-17**に示す。x, y, z方向ともに、60回の移動平均を求めている。**表-1**に各マークごとの変位の変化をまとめる。P1からP8と掘削を進めるにつれて、x方向はマイナス方向(左向き)に約2.4mm変位した。y方向はプラス方向(上向き)に約2.9mm変位した。z方向はマイナス方向(計測装置から離れる方向)に徐々に変位して-4.1mm変位した。

このように、3次元の変位をリアルタイムで計測することができた。このときの計測速度は7.5 fpsであった。また、x, y, zそれぞれの変位計測結果から、ばらつきはサブミリメートルであることが読み取れる。

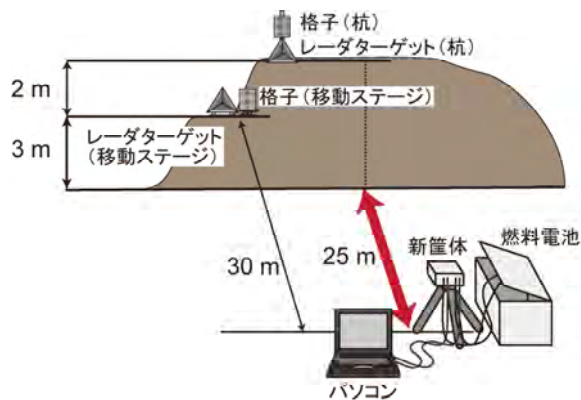


(a) ターゲット付近の地面に取り付けたマーク



(b) P8を掘削する様子

図-16 ターゲット近くを掘削する様子

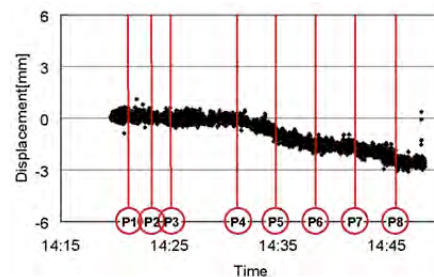


(a) 配置図

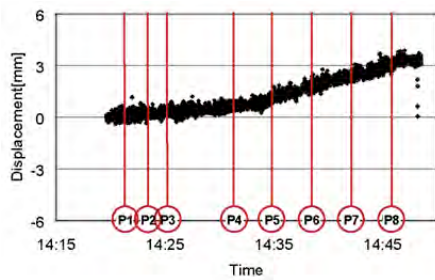


(b) 写真

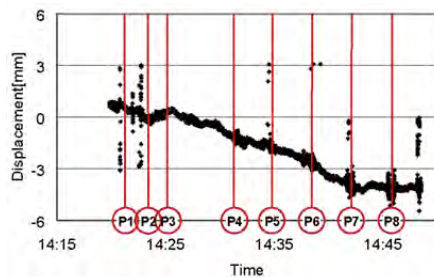
図-15 重機により斜面を人為的に掘削した際の変位計測実験



(a)x方向変位



(b) y方向変位



(c) z方向変位

図-17 変位計測結果

表-1 掘削箇所と掘削後の変位 (単位: mm)

マーク	時刻	x 変位	y 変位	z 変位
P1	14:21:09	0.19	0.11	0.67
P2	14:23:17	0.10	0.21	-0.08
P3	14:25:04	-0.02	0.37	0.18
P4	14:31:14	-0.07	0.62	-1.12
P5	14:34:49	-0.82	1.04	-1.74
P6	14:38:27	-1.53	1.77	-2.58
P7	14:42:09	-1.66	2.37	2.25
P8	14:45:53	-2.36	2.94	2.07

7 その他の研究項目と今後の課題

以上に述べたこと以外に、次の研究項目を実施した。

- ・指向性を高めた新型定在波レーダの開発：指向性を高めるための電波用レンズを試作し、実験により半値角が水平方向7度、垂直方向4度となるようなアンテナを開発した。
- ・遠距離定点観測装置を試作：雨量や風に対する影響を調べた。140m離れたターゲットに対して、28mm/h程度の雨量の場合でも、変位が計測できることを確認した。
- ・屋外用画像計測ソフトウェアの開発：風や振動による望遠画像のゆらぎの影響を減らすために連続的に自動で撮影と解析を安定して繰り返すことができるソフトウェアを開発した。
- ・サンプリングモアレカメラの開発：サンプリングモアレ法による変位計測を電子ボード化して、高速に出力するカメラを新たに開発した。また、その改良を行った。

また、本研究を通して、今後の改良点もか見えてきた。その代表的なものとしては、レーダーの指向性の問題で

ある。電波を用いる新型定在波レーダ方式は、その分解能や小型装置の完成度についてはよいのであるが、屋外の実験で樹木等による電波の反射が大きい。また、遠方においては、コーナーキューブ型の反射板をターゲットとして用いる必要がある。改良案としては、指向性の高い光を用いる方式が有力であろうと考えている。光を用いると、再帰反射材によるターゲットがそのまま利用できる。

もうひとつは、温度変化による取り付け部の変位である。これについては、日中によく変化する傾向が観察された。変化しにくい設置方法を検討することと、変化があったとしても、決まったパターンの緩やかな変化であるために、崖崩れ前兆現象との違いを検出することができないかどうかを検討する必要がある。

8 おわりに

本研究では、一般家屋の軒先や電柱等の既存の構造物に容易に取り付けられるように、重量を片手で持てる3kg以内として、一体化した小型の遠隔観測型三次元変位センサーの試作を行った。試作した装置は、屋外で評価実験を行い、リアルタイムにサブミリメートルの変位が検出できることを確認した。

今後の必要な改良点として、z方向の検出方法を見直す必要があることが挙げられる。その研究については、現在引き続いて取り組んでいるところである。今後、本研究を進め、実用的なものとして実際に役立つものに上げていきたい。

謝辞：本研究を進めるにあたりご協力いただいた和歌山県工業技術センター、和歌山県県土整備部河川・下水道局砂防課、和歌山県有田振興局建設部二川ダム管理事務所、有田川町小松為成様、有限会社恒久建設、和歌山県商工観光労働部企業政策局産業技術政策課の皆様へ感謝する。

参考文献

- 1) Ri, S., Fujigaki, M. and Morimoto, Y., Sampling Moire Method for Accurate Small Deformation Distribution Measurement, Experimental Mechanics, Vol. 50, No. 4, 501-508 (2010).
- 2) Fujigaki, M., Shimo, K., Masaya, A. and Morimoto, Y., Dynamic Shape and Strain Measurements of Rotating Tire Using a Sampling Moire Method, Optical Engineering, Vol. 50, No. 10, 101506 (2011).
- 3) 上保徹志, 定在波レーダの原理とその応用, RF ワールド (CQ出版), No. 8, pp.106-116, Dec. (2009).
- 4) 上保徹志, 距離測定装置、及び距離測定方法, 特願 2006-54485, (2006. 3. 1).