

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360193

研究課題名(和文) 高速自動分割撮影技術による広範囲の変位・ひずみ場計測装置の開発と検証

研究課題名(英文) Development and verification of large field displacement and strain measurement system based on high speed automatic image dividing technique

研究代表者

亀田 敏弘 (Kameda, Toshihiro)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：40302393

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：構造物の非線形大規模数値計算によって得られる莫大な量の計算データの検証のために必要となる大量のデータを計測可能な、ひずみゲージを用いた従来の方法とは異なる、広範囲を高速かつ高精度に分割撮影する新しい歪分布計測装置の開発・検証を行った。本研究期間では、1)分割画像取得による広範囲の変位・ひずみ計測用のプロトタイプ開発、2)E-Defenseにおける、準静的応答の変位・歪分布計測の検証、を実施した。市販のレンズを組み合わせた光学系において、目標としていた、0.1%のひずみを検出できる精度を確認したとともに、ミラーのさらなる高速駆動とレンズの大口径化による性能向上についての知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：Since 3-D Finite Element Method is developing with computer progress, we are able to acquire a huge amount of computational result. On the other hand, it is not satisfactory to measure strain distribution in the high spatial resolution and accuracy. Therefore verification method between computational results and experiment should be improved for efficient validation. In this study, 1) the prototype development of displacement and strain field measurement system for wide region based on divided image acquisition, 2) the field verification by real size building experiment at E-defense, are performed. We achieved the planned detection accuracy of strain smaller than 0.1%, and gained perspective to improve the system by faster mirror movement and larger aperture lens utilization.

研究分野：応用力学

キーワード：非接触計測

## 1. 研究開始当初の背景

シェル要素・ソリッド要素を使う3次元非線形有限要素法の高性能化は目覚ましい。この非線形大規模数値解析手法の妥当性を検証するためには、これに見合った量のデータが必要である。例えば、10[m]程度の寸法の構造物に対し、材料非線形性に起因する非線形応答を検証する場合、空間分解能 0.1[m]、精度 0.1 [%]を目安とした歪分布のデータが必要である。

歪ゲージのような点での計測では、表面に限っても、10000の計測点が必要であり、貼付と設備のいずれにおいても実現不可能である。面での計測には、レーザスペckル法やドップラースキャナー法等が従来から用いられているが、計測範囲、空間分解能、精度に限界がある。これらに対して、1,000万超のCCD素子で撮影されたデジタル画像は空間分解能の点で有望視されており。これまでも、広範囲を撮影するために、多数のカメラを使ったり、カメラを精密に移動させたりする等の工夫が検討されてきたが、成功例は報告されていない。

一方、レーザ工学の分野では、固定したレーザ受信・発信装置に、精密に制御したガルバノミラーを使ってレーザを受信・送信する技術が培われている。CCDカメラの位置制御に比べ、ガルバノミラーの制御は遥かに容易であり、固定したCCDカメラに広範囲の詳細な画像を自在に入力することが原理的に可能である。こうして、従来ネックとなっていた精密な分割撮影が実現される。

我が国にはE-Defenseに代表される大規模かつ先進的な振動実験施設が存在し、実物大の構造物に対して加振を行うことが可能である。得られた実験結果を用いて、大規模数値計算結果の検証を行うには、広範囲かつ高精度の歪測定は必須のものであり、利用価値は極めて高い。また、大規模な振動実験は一回のみのことも多く、多くの計測データを取得することは将来の多角的な研究応用のための情報蓄積・再利用の面でも重要である。他にも、供用された構造物の維持管理を考える場合、亀裂等が発生する箇所を事前にピンポイント予測することは不可能であり、健全性評価においては、構造物全体を検査する必要がある。一般的な構造物に対し全体をモニタリングするためのひずみゲージやセンサを設置することは困難であったが、本計測システムにより、表面変位の経年推移を精度よく計測することも可能と考えられる。

申請者は、応力逆解析理論[1]に基づいて、レーザスペckル法による表面変位場測定による材料内部の応力場の取得[2]に関する研究を行った経験があり、歪分布の高精度な面計測の経験を有している。実物大構造物を考慮した、歪分布の計測領域の拡大と精度の維持という、両立が困難な問題の解決手法として、(1)分割撮影による解像度の向上(2)レーザ工学分野で実績のある精密制御可能なガ

ルバノミラー利用による高速な視野移動、を利用して必要となる計測を実現する手法の着想に至った。

## 2. 研究の目的

近年発達目覚ましい非線形大規模3次元有限要素法を用いた構造物の応答解析の妥当性を検証するには、多くの実測データが必要である。我が国では、E-Defenseを利用した実物大構造物の振動実験が可能になっているにもかかわらず、歪分布を要求される空間分解能と精度で計測できる手法が存在せず、大規模計算結果の検証には困難がある。この状況を打開するために、精密制御可能なガルバノミラーを駆使することで、広範囲を高速かつ高精度に分割撮影する新しい歪分布計測装置を開発・検証することを目標とする。本研究期間では、1)高精度・高速のガルバノミラーの制御技術、2)ガルバノミラーとCCDカメラを組み合わせたプロトタイプの開発、3)E-Defenseにおける、準静的応答と動的応答の変位・歪分布計測の検証、を行う。

上記の目標を見据え、実用化に向けた基礎研究となる本研究は、1)高精度・高速のガルバノミラーによる撮影視野制御技術の開発、2)ガルバノミラーとCCDカメラを組み合わせたプロトタイプの開発、ならびに、3)広範囲を対象として、準静的応答と動的応答の変位・歪分布計測の検証、を行う。各目標の具体的な課題は以下の通りである。

1)高精度・高速のガルバノミラーによる撮影視野制御技術の開発

ガルバノミラーの制御の精度と、得られる画像の分解能・精度の関係を明確にし、目標達成のためのミラー駆動速度の決定、ミラー設置個所の最適化を行う。

2)ガルバノミラーとCCDカメラを組み合わせたプロトタイプの開発

上記の結果を踏まえ、歪分布を計測可能なプロトタイプを開発する。ガルバノミラーと望遠レンズの堅牢な組み合わせ、ガルバノミラー自動制御ソフトウェアの開発、といった、システムの構築が課題である。

3)準静的応答と動的応答の変位・歪分布計測の検証

プロトタイプの性能の実証を行う。E-Defenseにて各種実験を遂行し、準静的応答と動的応答での、変位・歪分布計測を行い、空間分解能と精度等の検証を行う。検証には格子配列した歪ゲージを使う。計測された歪分布データを用いて、3次元非線形大規模数値解析手法の検証も併せて行う。

## 3. 研究の方法

### 3-1. プロトタイプ的设计と開発

図1に開発を目指す計測システムの原理を示す。接写光学系に補助レンズを組み合わせることにより、焦点距離を延長して撮影倍率を向上させたカメラと、コンピュータ制御による方向制御が可能なガルバノミラーと

呼ばれる鏡が主要な構成部品である。ガルバノミラーによって広範囲の撮影領域を 5mm 四方程度で分割撮影することで実物大構造物の全表面計測を可能にする。表 1 に目標とする性能を示す。

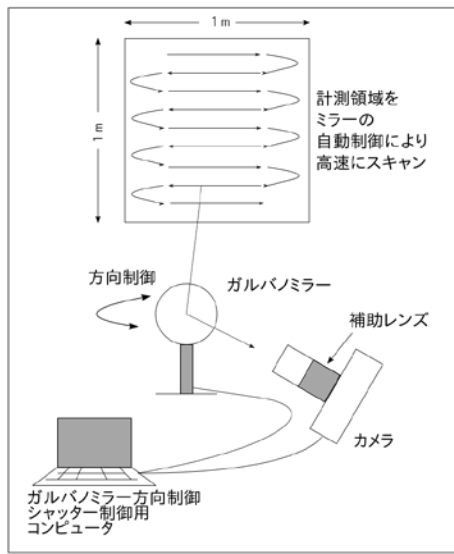


表 1 開発する計測装置のスペック

計測領域	1 m × 1 m
計測可能変位	50 μm
計測可能ひずみ	5cm 四方の領域に対して 0.1%
計測距離	5 m

大規模数値解析計算結果の検証のためのデータの計測を想定して、全表面において幅 1cm 程度の変形が局所化した領域が十分検出できるよう、5cm グリッドにおいて 0.1% のひずみ (0.05mm の変形に相当) を検出できる精度を目標とする。また、E-Defense における使用を考慮し、振動台の外部に計測装置を設置できるように、測定対象から 5m 離れた状態で計測を行えるものとする。

#### 4. 研究成果

##### 4-1. プロトタイプ的设计と製作

まず、光学系の設計の妥当性の検証のためにミラーを除去した状態のものを製作した。試作した装置の外観を図 2 に示す。

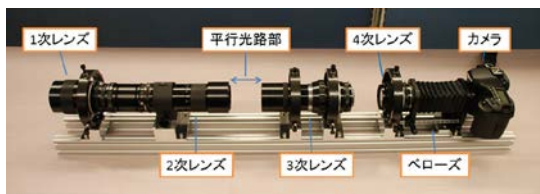


図 2 光学系検証実験装置

1 次レンズの焦点距離は 135mm, 2 次レンズ

と 3 次レンズは 200mm, 4 次レンズは 35mm である。4 次レンズは拡大率を大きくするためにカメラとの間にベローズを挿入している。各レンズの詳細を表 1 に示す。各レンズの絞りはずべて開放で使用した。それぞれのレンズは治具を用いてアルミフレームの上に固定し、1 次レンズと 2 次レンズの間はアダプターリングを用いて接続している。アダプターリングは適切な光路長となるように組み合わせさせた。このシステムにおいては 1 つ目のレンズを焦点距離の異なるものに変更することで全体の撮像範囲を変更させることもできる。

撮像センサは市販の一眼レフデジタルカメラである Canon EOS40D を使用した。センサは 22.2mm×14.8mm サイズの CMOS センサで有効画素数は約 1010 万画素 (3,888×2,592) である。

表 2 光学系検証実験装置レンズ詳細

	レンズ	焦点距離	開放 F 値
1 次レンズ	Nikon nikkor135mm F2.8	135mm	2.8
2 次レンズ	Nikon Ai Micro Nikkor 200mm F4S (IF)	200mm	4
3 次レンズ	Nikon Auto Nikkor 20cm (200mm) F4	200mm	4
4 次レンズ	Nikon nikkor 35mm F1.8	35mm	1.8

##### 4-2. 検証と改良

###### 4-2-1. E-Defense での実証

2013 年 10 月 7 日から 15 日にかけて兵庫県三木市にある防災科学技術研究所兵庫耐震工学実験センターの実大三次元震動破壊実験施設 (以下 E-defense) において鉄骨構造物の加振試験が行われた。今回、この加振実験において製作した計測装置のプロトタイプの実証実験を行った。加振試験では 3 階建ての実物大鉄骨構造物を振動台に設置し、1 軸方向の振動を複数回に分けて加えた。計測においてはあらかじめ梁に描いた点群の画像を加振の合間の損傷観察の際に取得した。この加振の前後での画像を比較することで静的なひずみ場を算出する。加振中、計測装置は供試体から取り外しておき、加振の合間の損傷観察の際に毎回供試体内に持ち込んで計測を行った。今回実験で使用した加振台と供試体を図 3 に示す。

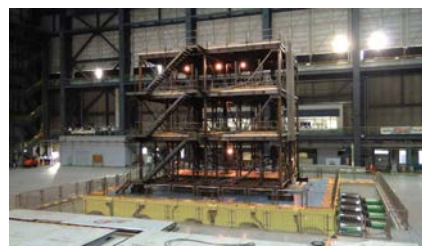


図 3 加振台と供試体

今回の実験では天井の梁のマーカを撮影するため、レンズを強固に固定する必要があった。そのため2次レンズと3次レンズのレンズを入れ替えて3次レンズは三脚座で固定、1次レンズと2次レンズはアダプター部分を鏡筒バンドを用いて固定した。また、3次レンズと4次レンズの間に新たにアダプターを追加し、4次レンズを三脚座によって固定された3次レンズに接続することにより固定を行った。3次レンズと4次レンズの間のアダプターは適切な光路長を維持できるようにヘリコイドを用いて可変できるようにした。また、撮像距離が近く合焦しなかったため、1次レンズと2次レンズの間に光路長6mmの延長筒を追加し、合焦するようにした。カメラはより高感度で高解像度の Nikon D5200 を使用した。撮像センサは 23.5×15.6mm サイズの CMOS センサで有効画素数は約 2410 万画素 (6,000×4,000) である。今回構成した実験装置を図 4 に、そのレンズ構成を表 3 に示す。

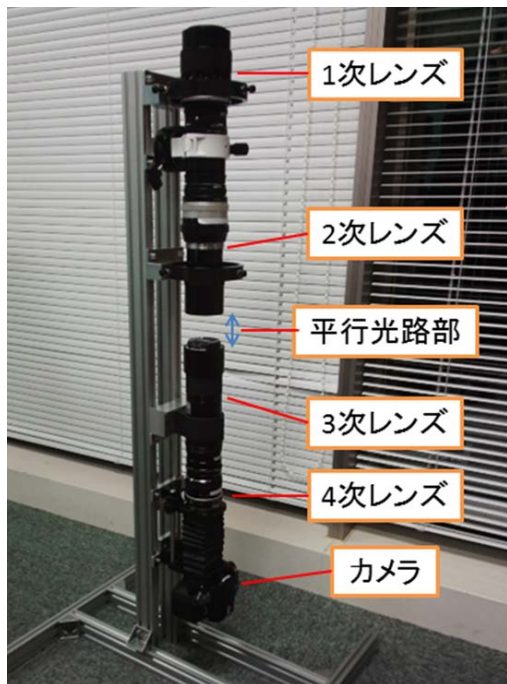


図 4 E-defense 実験装置

表 3 E-defense 実験装置レンズ詳細

	レンズ	焦点距離	開放 F 値
1 次レンズ	Nikon nikkor135mm F2.8	135mm	2.8
2 次レンズ	Nikon Auto Nikkor 20cm (200mm) F4	200mm	4
3 次レンズ	Nikon Ai Micro Nikkor 200mm F4S(IF)	200mm	4
4 次レンズ	Nikon nikkor 35mm F1.8	35mm	1.8

計測対象箇所を図 5 に示す。本実験では 3 階中央の梁の下フランジ溶接個所周辺のひずみ分布を計測した。梁の下部に計測用の点群を描き、加振の前後においてその移動量を比較することでひずみ分布の計測を行う。点群は梁の左右に 1 種類ずつ計 2 種類用意した。1 つは伸縮性の高いカッティングシートにレーザー加工機によって定期的に 0.3mm 程度の小さい穴をあけ、それを直接貼り付けたもの、もう一つはそのカッティングシートをマスクパターンとして利用し、直接塗料で点を塗装したものである。各点の間隔はすべて 5mm である。どちらも事前にグラインダーを用いて塗装を剥がした後に貼付、あるいは塗装を行い、計測の間隔が 1 日を超える際には防錆用のオイルを塗布した。また、点群を観測する梁フランジの裏側には検証のためにひずみゲージを貼付した。ひずみゲージはフランジの裏側にあたる部分に貼付した。今回は毎回装置を設置しなおしていることから計測点との位置関係のずれによる歪の補正が必要と考えられたため、マグネットを用いて基準となる正方形の頂点を計測前に対象部に貼り付け、補正用の基準データを取得した。この基準の正方形の 1 辺は 20mm である。

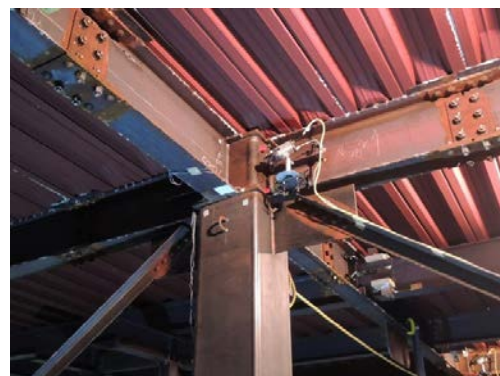


図 5 計測対象箇所の様子

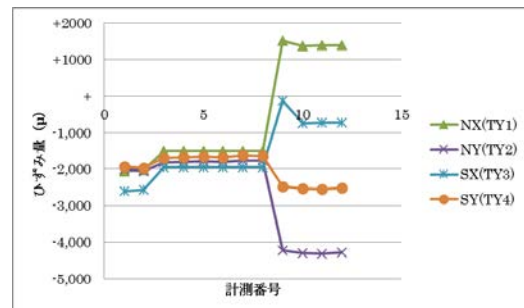


図 6 ひずみゲージによる計測データ

表 4 計測点間のひずみ

NX(TY1)	NY(TY2)	SX(TY3)	SY(TY4)
+3029	-2,460	+1821	-838

基準点に対する移動方向と移動量をベクトル図で示したものを図 7 に示す. 単位は画像上のピクセル数である. また, X 方向および Y 方向それぞれに対して求めたひずみ場を図 8, 図 9 に, せん断ひずみを図 10 に示す. これは隣接する 4 点に関して形状関数を用いてひずみを求め, その中点に対してひずみ量を色で示したものである.

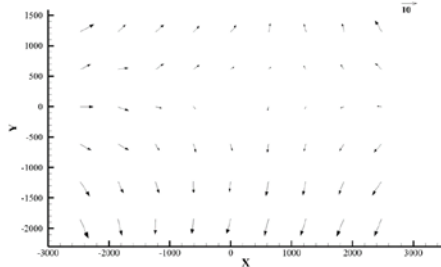


図 7 基準点に対する移動量

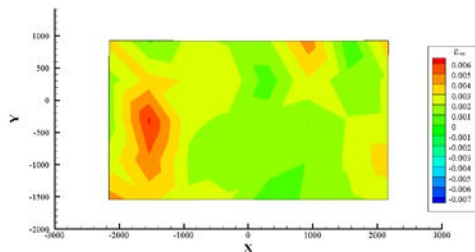


図 8 X 方向ひずみ場

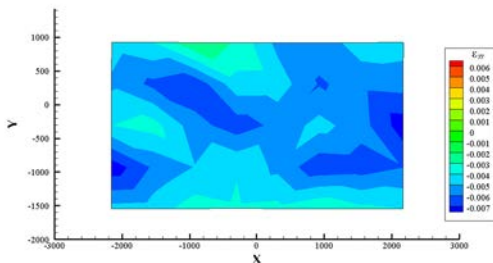


図 9 Y 方向ひずみ場

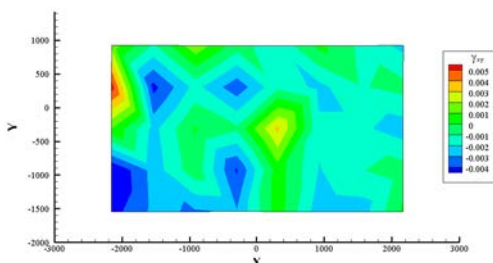


図 10 せん断ひずみ場

局所的な変位が観察されるものの, ひずみの方向が一致し (X 方向で引張, Y 方向で圧縮), ひずみの大きさ  $3000\mu$  程度となっており, ひずみゲージの計測結果と概ね一致する. 今回

の解析では画像の収差や歪の影響は補正していない. また, 今回の比較対象は 1 か所のひずみゲージのみであったため, 測定精度の評価のためにはより詳細なひずみ場のデータとの比較が必要である.

#### 4-2-2. 分割撮影への改良

本実験では撮影範囲を可変できるように可動式のミラーを平行光路部に設置した. ミラーはギヤードステッピングモータの出力軸に取り付けられており, 精密な角度制御が行えるようになっている. ギヤードステッピングモータにはオリエンタルモーター社のハーモニックギヤ付 5 相ステッピングモータ「CRK513PA-H100S」を用いた. これは基本ステップ角  $0.0072^\circ$  であり, マイクロステップ駆動を組み合わせることで非常に高精度な位置決めを行うことが可能である. ミラーは大きさ  $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ , 平面度  $3\lambda/25\text{mm}$  の平面鏡を用いた. また, システムの光学系に関しては拡大率を上げるため, 3 次レンズ後方に 2 倍のテレコンバータ (Kenko テレプラス PRO300 2X DGX) を接続した. 分割撮影実験装置の外観を図 11 に示す.



図 11 分割撮影実験装置

微動ステージにドットを描いたマーカを貼り, ドットの間隔を  $50\mu\text{m}$  ずつずらして撮影し, ドットの移動量を画像から計測した. 試作した光学系は対象から  $5\text{m}$  の距離に設置して実験を行った. ドットの間隔は約  $7\text{mm}$  と約  $16\text{mm}$  であるが, 今回は外側の約  $16\text{mm}$  間隔のマーカに関して計測を行った. ミラーを順次回転させていくことにより, システム撮影可能範囲の端から順に撮影範囲を移動させていく. 各測定点においては視野の中心に計測対象となる微動ステージを置き, 移動量  $0\text{mm}$  から  $1\text{mm}$  まで微動ステージを  $50\mu\text{m}$  ずつずらして撮影を行った. カメラの設定はすべての撮影で同じとし, 感度は  $\text{ISO}3200$ , シャッタースピードは  $1/10$  で撮影を行った. 高感度による撮影のため, 各撮影では加算平均処理のために 10 枚ずつ撮影しノイズの低減を図った. 1 回の撮影範囲は  $5\text{m}$  離れた点において約  $75\text{mm} \times 110\text{mm}$  であり, ミラーを回転させることで計測可能な範囲は約  $72\text{cm}$  である. 計測可能範囲が目標である幅  $1\text{m}$  に対して狭くなっているが, これは平行光路光学系にリレーレンズ方式を用いたため視野中央

部のみが2次レンズによって平行光に変換されているためである。これは第一焦点面にフィールドレンズを挿入することで解決することができる。今回は隣り合う計測画像に重複範囲ができるようにこの範囲を9か所に分けて計測を行った。

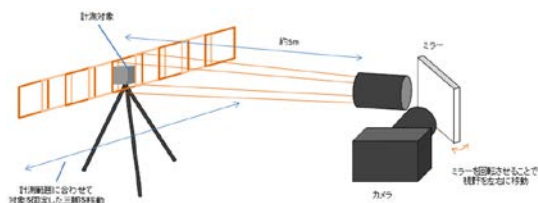


図 12 分割撮影実験概要図

解析用の画像から各ドットの輝度重心を求めグラフ化したものを一例を図 13 に示す。

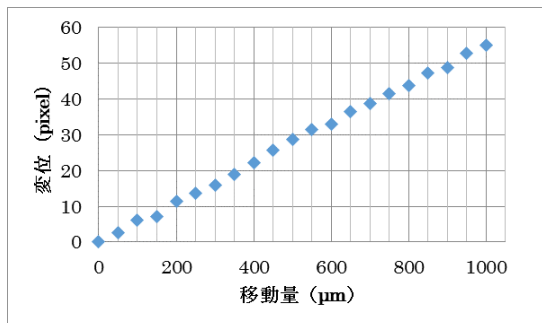


図 13 計測結果[a]

各点において計測結果はほぼ線形となり、50  $\mu\text{m}$  の差異は十分検出できているといえる。しかしながら一部の測定点においては線形関係からの誤差が生じている。これは元画像のコントラストが非常に低く、強力な画像処理を加えたためドットの輝度ムラが大きくなってしまい、輝度重心が十分な精度で検出できなくなってしまうことが原因と考えられる。これに関しては、光学系を収差が小さくなるように最適化することや、大きなコントラストが得られるように反射材のようなものをマーカーとして用いることによって誤差を小さくすることが可能であると考えられる。

#### 4-2-3. 防災科学技術研究所大型耐震実験施設(つくば市)での実証

2015年2月23日から26日にかけて茨城県つくば市にある防災科学技術研究所大型耐震実験施設において図14に示す縮小鉄骨構造物の加振試験が行われた。

改良を加えた画像解析手法の検証を目的としていたが、加振中に相似則のための錘を結合しているブレースが外れるトラブルがあり、加振による鉄骨の塑性化が発生せず、十分な計測が実施できなかった。

27年度以降、同供試体を用いて再度実験を行う予定である。



図 14 1/3 縮小供試体

#### 5. 主な発表論文等

〔図書〕(計1件)

①兵庫県, 防災科学技術研究所, 神戸大学との共同研究「地震によって損傷を受けた鉄骨建築物の耐震安全対策に関する実験研究」報告書: 多賀 謙蔵, 谷 明勲, 藤谷 秀雄, 難波 尚, 向井 洋一, 山邊 友一郎, 高見 隆, 澤田 光司, 古林 智宏, 梶原 浩一, 谷 和夫, 山下 拓三, 亀田 敏弘, 2014年3月, 総ページ数 160 ページ, pp. 129-149 (山下), pp. 150-160 (亀田)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

亀田 敏弘 (KAMEDA, Toshihiro)  
筑波大学システム情報系・准教授  
研究者番号: 40302393

(2) 研究分担者

山下 拓三 (YAMASHITA, Takuzo)  
防災科学技術研究所・研究員  
研究者番号: 40597605

堀 宗朗 (HORI, Muneo)  
東京大学地震研究所・教授  
研究者番号: 00219205