

# 非線形写像法による航空レーザ測量データの幾何補正と それに基づく2014年広島豪雨災害での崩壊土砂量の推定

## Nonlinear Mapping-based Geometric Correction of LiDAR Data and Its Application to Soil Volume Estimation in the 2014 Hiroshima, Japan Rainstorm

三浦弘之<sup>1</sup>, 弓真由子<sup>2</sup>

Hiroyuki MIURA<sup>1</sup> and Mayuko YUMI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 広島大学 大学院工学研究院

Institute of Engineering, Hiroshima University

<sup>2</sup> 朝日航洋株式会社 空間情報事業本部

Spatial Information Division, Aero Asahi Corporation

In order to accurately estimate soil volume in debris flow areas, nonlinear mapping technique is applied to multi-temporal Digital Elevation Models (DEMs) derived from LiDAR data observed before and after the 2014 Hiroshima rainstorm. Geometric distortions between the pre- and post-event DEMs are remarkably reduced by the nonlinear mapping. The erosion and deposition volumes in the debris flow areas are estimated by the elevation change between the DEMs. The result shows that the soils of approximately 700,000 cubic meters are mobilized in the rainstorm. The multi-temporal results of the soil volume estimation quantitatively reveal the volumes removed after the disaster.

**Keywords:** LiDAR, Nonlinear Mapping, Debris Flow, The 2014 Hiroshima Rainstorm

### 1. はじめに

2014年8月19日夜から20日未明にかけて中国地方や九州北部地方で発生した豪雨により、各地で多くの被害が生じた。特に、広島市内では安佐北区三入において観測史上最高となる1時間降雨量の日最大101.0ミリ、3時間降雨量の日最大値217.5ミリ、24時間降雨量の日最大値257.0ミリを観測した<sup>1)</sup>。この局地的に発生した猛烈な豪雨により、広島市安佐南区や安佐北区において多数の土石流が発生し、死者74名、重軽傷者44名、全半壊255棟の甚大な被害が生じた<sup>2)</sup>。広島県では風化花崗岩（まさ土）が広く分布していることから、豪雨等により崩壊しやすい地域が多く、1999年6月の豪雨災害をはじめ数多くの土石流や斜面崩壊等の土砂災害が発生している<sup>3~5)</sup>。

大規模災害が発生した場合、被害状況の迅速な把握のために、航空機からの空中写真撮影が実施され、被災家屋の判読や被害地域の抽出等が行われる<sup>6, 7)</sup>。土石流や地すべりといった大規模な土砂災害の場合、被害の規模や影響範囲の把握、復旧作業の立案のために、災害後できるだけ早期に崩壊土砂量を把握することが必要である。また、実際の災害における崩壊土砂量を詳細に把握しておくことは、将来の土砂災害における崩壊土砂量の予測技術を高度化する上でも重要となる。最近では航空レーザ測量（Light Detection and Ranging: LiDARあるいはLaser Profiler: LP）技術の向上により、比較的簡便に高解像度な数値標高モデル（Digital Elevation Model: DEM）を取

得することが可能となり、迅速な地形変化の把握や崩壊土砂量の推定に利用されるようになった<sup>8~10)</sup>。

土砂災害による崩壊土砂量は、災害前後のDEMによる標高差分値から推定される場合が多く、2014年広島豪雨災害においても崩壊土砂量の推定が行われている<sup>11)</sup>。ただし、LPデータによるDEMに対して、単純に2時期の標高値の差分分布を求めると、使用するデータによっては、位置ずれの影響により地形変化がほとんどない地域においても、大きな標高差が生じる場合があることが指摘されている<sup>12)</sup>。一般に、LPデータによるDEMの位置ずれは、現地での測量を基にして補正されることが多いが<sup>13)</sup>、緊急時に実施することは容易ではない。災害後の迅速かつ実用的な被害把握を考えた場合、高精度な崩壊土砂量の推定のためには、簡便にDEMの位置ずれを補正する方法を検討しておく必要がある。

LPデータによるDEMの位置ずれを解消するために、データ全域における二時期の標高差が最小となるよう、最適手法によりDEMを幾何補正する手法が提案されている<sup>12)</sup>。ただし、この方法は、データ全域に一定の移動量を与えるものあり、地形変化が発生した箇所の標高差も含めて補正を行うため、範囲内に地形変化が多く含まれている場合や移動量が局所的に異なる場合には精度の良い位置合わせができない可能性がある。

一方で、画像処理分野では、2時期のリモートセンシング画像間に含まれる局所的な位置ずれやひずみを解消するための非線形写像法が提案されている<sup>14)</sup>。この方法は、

それぞれの画像を小領域に分割し、小領域毎に画像間の誤差が最小となる移動ベクトルを求め、それに基づき画像を幾何補正するものであり、変化が大きく正しい移動ベクトルが求めにくい箇所に対しては、周囲のベクトルに合わせて移動ベクトルを修正することで、精度の高い位置合わせを行おうとするものである。このような手法は、地形変化が顕著な地域や局所的な位置ずれを有するデータの補正に有効であると考えられるが、地形データに対する適用性を検討した例はみあたらない。

そこで本研究では、高精度な崩壊土砂量の把握技術を構築するために、2014年広島豪雨災害での土石流氾濫域を対象として、災害前後のLPデータによるDEMに対して非線形写像法による幾何補正を行い、その適用性を評価する。さらに、得られたDEMを用いて各土石流氾濫域における崩壊土砂量を推定し、それらの特徴を考察する。

## 2. 対象地域と使用したデータ

本研究では、2014年広島豪雨災害で甚大な被害が発生した広島市安佐南区および安佐北区の一部を対象とした。対象地域における災害前DEMを図1に示す。このDEMは、国土地理院により基盤地図情報<sup>15)</sup>(数値標高モデル)として公開されているデータであり、LPデータから作成された5mメッシュデータである。データ作成年は2013年であり、高さ方向の分解能は0.1mである。対象地域は土石流による被害が甚大であった安佐南区八木地区や緑井地区、安佐北区可部地区を含む南北約12km、東西約12kmの範囲である。

同地域における災害後DEMを図2に示す。このDEMは朝日航洋株式会社により災害から約1週間後の8月27、28日に計測されたLPデータから作成されたものである。本LPデータ計測における使用機体はヘリコプターAerospatiale AS350B3で、飛行高度は約700m、計測にはカナダOptech社のALTM ORION M300を用い、計測時のレーザ照射密度は約4点以上/m<sup>2</sup>である。得られたDEMは1mメッシュのデータであり、高さ方向の分解能は0.01mである。また、同時に撮影された航空写真も図2に示す。図1や2には、国土地理院による写真判読結果<sup>16)</sup>を参考にして、航空写真から判読した土砂流出範囲を示している。判読した範囲は斜面崩壊によるものが一部含まれているが、ほとんどが土石流によるものとなっている。対象地域では計174箇所、計約1km<sup>2</sup>の範囲で土砂の流出がみられた。また、基盤地図情報<sup>15)</sup>による建物ポリゴンと重ね合わせたところ、土砂流出範囲には計約900棟の建物が含まれていた。

本研究で使用する災害前後のDEMは、解像度がそれぞれ異なる。本研究では、DEMの詳細な位置合わせを行うために、災害前DEMを空間補間により1mメッシュデータに変換した。空間補間では、災害後DEMにおけるメッシュの中心点が同じとなるメッシュを作成し、中心点での標高値を周囲のメッシュの標高値から共一次内挿法によりリサンプリングすることで、1mメッシュデータを作成した。なお、本研究では主に水平方向の位置ずれ対象として解析を行うため、高さ方向の分解能を災害前後のデータともに0.1mに統一して行った。

ここで、土砂流出がみられず災害による影響がほとんどない地域を対象として、災害前後のDEMの標高差分値の特徴を調べた。対象地域は、平地に比べて起伏が大きく、位置ずれの影響が顕著に現れる山地とした。本研究

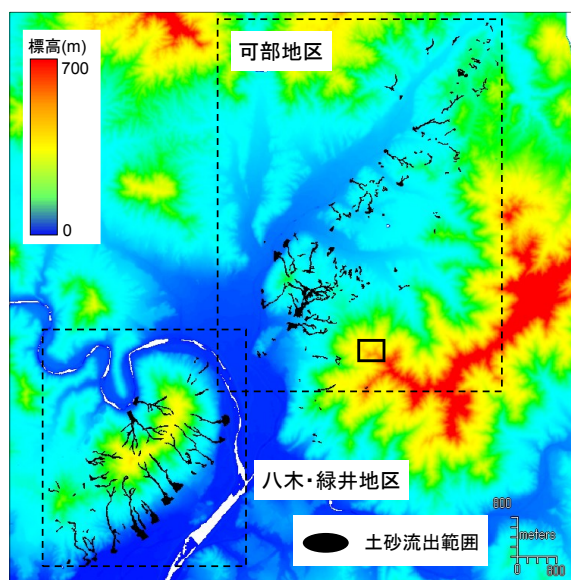


図1 対象地域における災害前DEM (5mメッシュ)

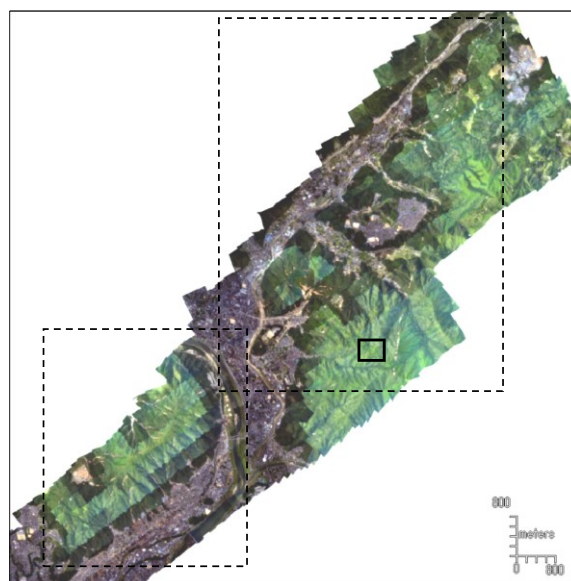
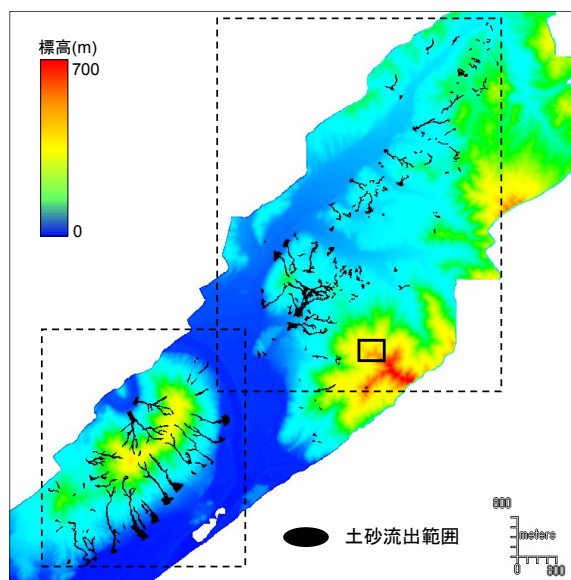


図2 災害後DEM (1mメッシュ) と航空写真

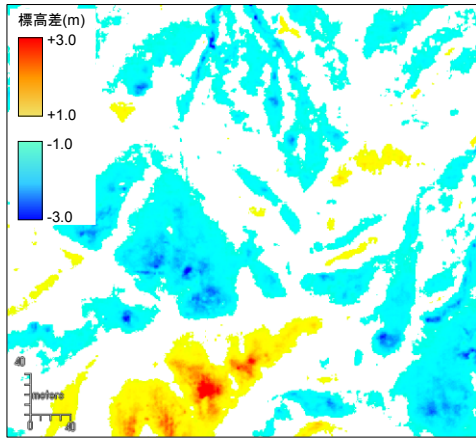


図3 未補正 DEM による標高差分布

では、図 1, 2 中の実線枠で示す範囲を対象とした。災害前後の DEM から単純な標高差分値を求めた結果を図 3 に示す。なお、図では標高差分が±1m 以内のメッシュは着色していない。一見、2 時期の標高分布には大きな違いはみられないにも関わらず、図 3 には 1m 以上の標高差分がみられる範囲が広く分布していることがわかる。航空写真等をみる限り、大きな地盤変動が起きたとは考えにくいことから、これらの標高差のほとんどは DEM 間の位置ずれによって生じたものと考えられる。

図 3 のような位置ずれが生じる原因として、既往の研究<sup>12)</sup>では、①主に GPS に起因する航空レーザ測量における計測誤差、②データの測地系変換時に生じる誤差、が挙げられている。また、LP データから DEM を作成する際には、地物を除去するためにフィルタリング処理が施されるが、その処理方法はデータの計測・作成機関によって異なる上、手作業による処理も行われる<sup>13)</sup>。このため、本研究で用いたデータにおいて、上記のようなずれが生じた原因として、③LP データから DEM へのフィルタリング処理の違い、また、④災害前 DEM の解像度が粗いことによる精度の違い、の影響も含まれているものと考えられる。

### 3. 2 時期の DEM に対する非線形写像法の適用

本研究では、2 時期のリモートセンシング画像からの変化域抽出に利用されている非線形写像法<sup>14)</sup>を、災害前後の DEM に対して適用することを試みた。この方法は、それぞれのデータを  $N \times N$  個のメッシュからなる正方小領域に分割し、小領域毎にデータ間の標高差分が最小となる移動ベクトルを求める探索操作と、各移動ベクトルを近傍の移動ベクトルと比較して修正する協調操作からなる。本手法の概念図を図 4 に示す。特に文献<sup>14)</sup>では、小領域の大きさを段階的に変化させて複数回探索操作を行うこと（多段的探索）と、修正する移動ベクトルを統計的な判別分析法によって決定すること（選択的協調）で、詳細な位置合わせを試みている。

この手法では、航空写真等の複雑な画素分布を有する高解像度なリモートセンシング画像へ適用するために多段的探索が行われているが、本研究で用いる DEM の標高分布は、リモートセンシング画像の画素分布ほど複雑でないことを考慮して、多段的探索は行わず、探索操作は一度のみ行うこととした。なお、本 DEM に対して多段的探索を実施しても結果に大きな違いは表れないことを確

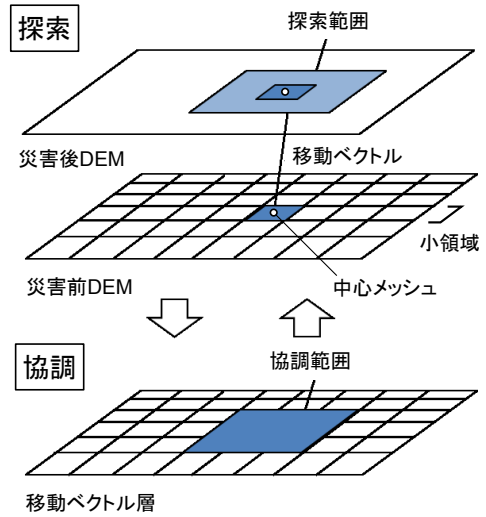


図4 非線形写像法の概念図

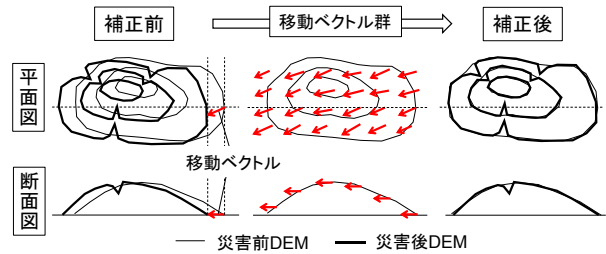


図5 補正前後の地形と移動ベクトルの模式図

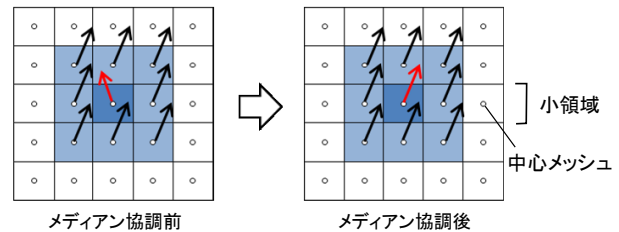


図6 移動ベクトルの協調処理

認している。災害前後の DEM による誤差は[1]式に示すように小領域内における各メッシュでの標高差分の二乗平均平方根として求めた。

$$d = \frac{1}{N^2} \sqrt{\sum_{j=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \sum_{i=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \{e_1(i_c+i, j_c+j) - e_2(i_c+i+dx, j_c+j+dy)\}^2} \quad [1]$$

ここで、 $N$  は正方小領域の一辺のメッシュ数、 $(i_c, j_c)$  は小領域の中心となるメッシュの座標、 $e_1$  は災害後の標高値、 $e_2$  は災害前の標高値を表し、 $dx$  は X 方向の移動量、 $dy$  は Y 方向の移動量を表す。探索処理では、探索範囲内で標高差分  $d$  が最小となる  $dx, dy$  を求める。このとき、移動量  $(dx, dy)$  が移動ベクトルを表す。図 5 に補正による災害前後の地形と得られた移動ベクトルの模式図を示す。図に示すように、災害前後の地形の誤差が最小となるように各小領域で移動ベクトルを求める。

協調操作は、文献<sup>14)</sup>による方法と同様に、探索操作によって求めた全移動ベクトルを線形判別法により 2 グ



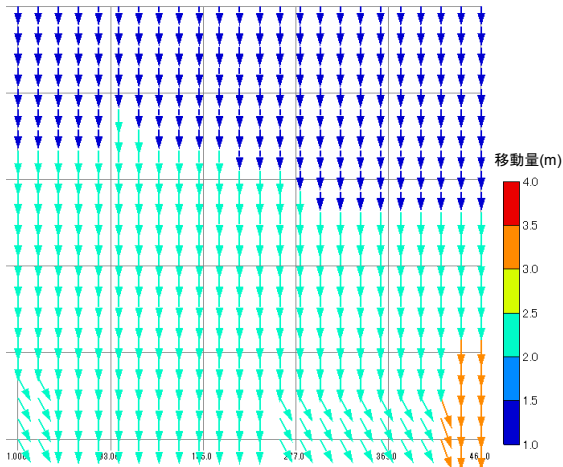


図7 非線形写像による移動ベクトルの分布図

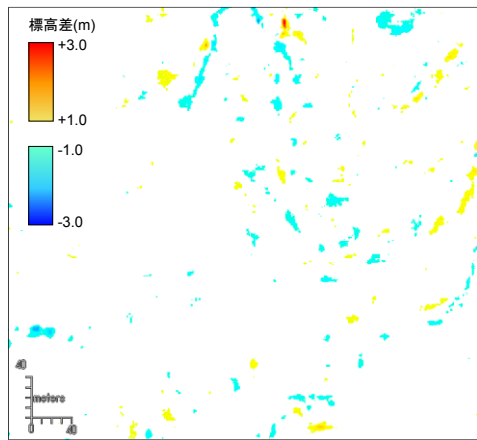


図8 非線形写像による幾何補正後の標高差分分布

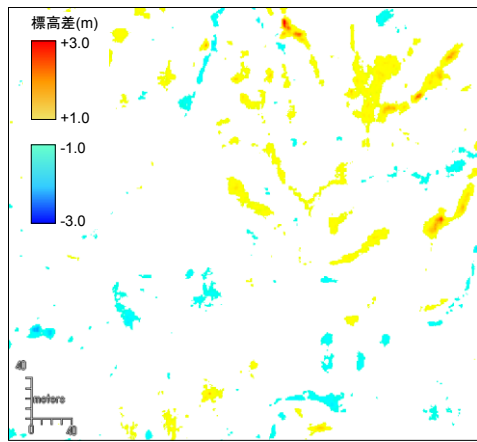


図9 線形写像による幾何補正後の標高差分分布

ループに分割し、ベクトルの大きさが大きいグループに対してのみ協調操作を行うこととした。協調操作では、近傍のベクトルを参照して X、Y 方向の移動量の中央値を、対象となるメッシュの移動ベクトルとして置き換える処理（メディアン協調）を行った。協調処理の概念図を図 6 に示す。各小領域で得られた移動量を共一次内挿法によって補間することで、全メッシュに対する移動量を算出し、それに基づいて DEM の幾何補正を行った。本研究では、元々の解像度が粗い災害前 DEM を災害後 DEM に一致するように移動させた。

解析に用いるパラメータは、小領域の大きさ、探索範

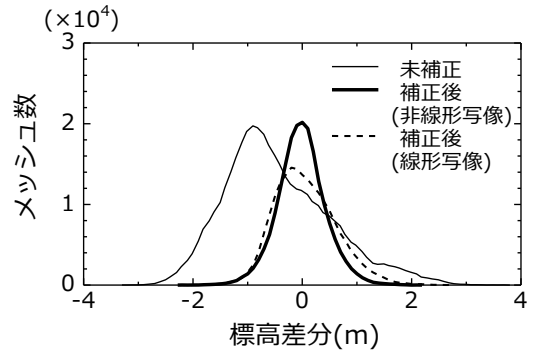


図10 標高差分のヒストグラムの比較

表1 補正前後の標高差分の比較

幾何補正の有無	標高差分(m)	
	平均値	標準偏差
未補正	-0.437	0.976
非線形写像による補正後	0.016	0.447
線形写像による補正後	0.056	0.572

囲の大きさ、協調処理を行う範囲の大きさである。小領域の大きさを小さくするときめ細かく移動量を求めることが可能であるが、大きな範囲で地形変化があった場合、正しい移動先を見つけにくくなる。また、探索範囲を小さくすると計算時間は短くなるが、必要な移動量に比べて小さいと正しい移動先を見つけられない可能性がある。ここで、図 1,2 に示す土砂流出範囲をみると、土石流が発生した溪流の幅は最大で 30m 程度であった。そこで、小領域の大きさは、これらの溪流幅をカバーするように 31×31 メッシュ (31m) と設定した。また、使用した災害前 DEM の元の解像度は 5m であることから、ほとんどのメッシュの移動量は 5m 以内に収まるものと予想される。ただし、広域のデータに対する試行の結果、移動量が 5m を越えるメッシュがわずかにみられたことから、探索範囲は 10×10 メッシュ (10m) とした。また、協調操作を行う範囲は、文献<sup>14)</sup>で使用された値を参考にして 7×7 とした。なお、いずれのパラメータも上記以上の大きさにした場合、結果に顕著な違いが表れないことを確認している。

さらに、本研究では比較のために、文献<sup>12)</sup>と同じく、全域に一定の移動量を与えて水平方向に平行移動させる方法も検討した。文献<sup>12)</sup>による方法では、データの移動量を直接探索法による最適化手法を用いて探索しているが、本研究では上記の非線形写像法で得られた全移動ベクトルの平均値を、移動量として災害前 DEM に与えた。以降、この手法による幾何補正を線形写像による補正と呼ぶ。

図 3 に示す範囲の DEM に対して、非線形写像法を適用して得られた移動ベクトルの分布を図 7 に示す。対象範囲における移動方向と移動量は、全体ではほぼ南方向へ 1m ないし 2m となっており、移動量は場所によってやや変化していることがわかる。また、非線形写像による補正後の DEM を用いた標高差分分布と線形写像による補正後の DEM を用いた標高差分分布を図 8, 9 にそれぞれ示す。図 3 に示す未補正の標高差分分布と比べて、いずれの結果も 1m 以上の標高差がみられる範囲が大幅に低減されてい

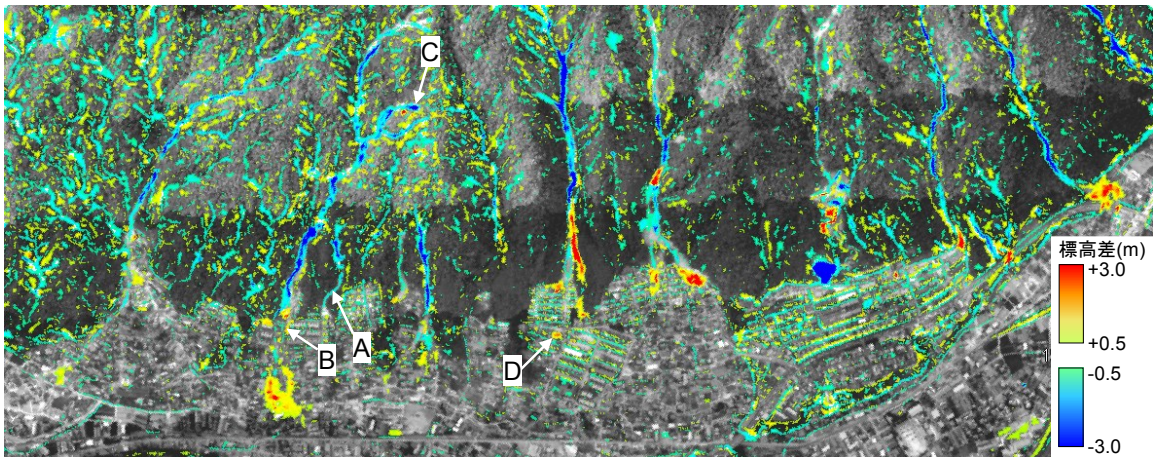
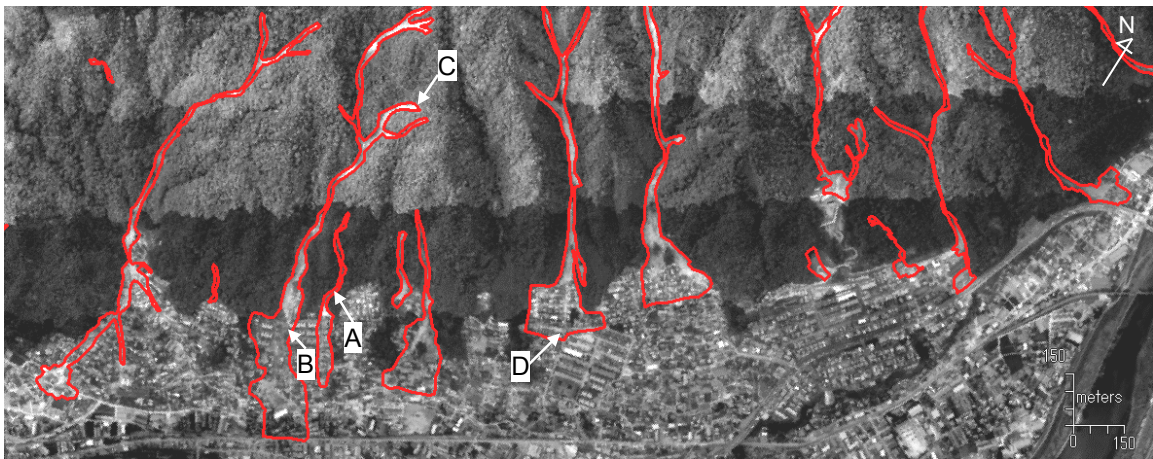


図 11 八木・緑井地区における土砂流出範囲（赤線枠）と標高差分分布



図 12 現地写真（2014年9月3日撮影）

ることがわかる。補正後の標高差分分布図を比較すると、非線形写像による補正の方が、標高差が大きい範囲は少なくなっている。

それぞれの標高差分のヒストグラムを図 10 に示し、それらの平均値と標準偏差を表 1 に示す。未補正のデータでは、標高差分の平均値はゼロから大きく外れ、標準偏差も大きいものに対して、補正後のデータでは平均値はほぼゼロとなり、標準偏差も小さくなっていることが確認できる。また、線形写像による補正に比べて、非線形写像による補正の方が、標高差分がゼロとなるメッシュが多く、標準偏差が小さい。このことは、非線形写像法により局所的に異なる移動量を与える補正の方が、精度良く位置合わせできていることを示している。

#### 4. 災害前後の標高差分による崩壊土砂量の推定

図 1 に示す対象地域全体の DEM に対して、非線形写像法による幾何補正を行い、標高差分を求めた。土石流に

よる被害が最も甚大であった安佐南区八木・緑井地区における解析結果を図 11 に示す。図では青色ほど災害後に標高が低くなり、土砂が浸食されていることを表し、赤色ほど災害後に標高が高くなり、土砂が堆積していることを表している。また、標高差が±0.5m 以内は着色していない。図 11 上には土砂流出範囲も併せて示している。なお、災害前の DEM には基本的に樹木は含まれていないのに対して、災害後の DEM では倒れて流出した樹木が地形の高さに含まれている可能性があるが、災害後の LP データから土砂と倒木を分離することは困難であることから、両者をあわせて土砂として取り扱うこととした。

図をみると、土砂流出範囲外においても標高差分がやや大きいメッシュがみられるものの、標高差分が大きなメッシュのほとんどは土砂流出範囲内にあり、土石流による土砂の移動により地形が変動している様子が確認できる。図 11 中の A, B で示す地点における現地写真を図 12 に示す。図 12 は災害後約 2 週間後に撮影したもので、地点 A は土石流が発生した溪流の上流に位置し、2m 程度の土砂の浸食がみられた。地点 B は下流の住宅地に位置し、約 4m の土砂の堆積が確認された。また、図 10 中の C で示す地点は土石流が発生した溪流の源頭部に位置し、D で示す地点は下流の住宅地に位置する。現地調査<sup>17)</sup>によると、地点 C, D でそれぞれ高さ 4~5m の土砂の浸食、高さ約 3m の堆積がみられた。一方、図 11 の本研究により推定された標高差分分布をみると、地点 A で-2.2m、地点 B で+3.4m、地点 C で-4.4m、地点 D で+3.0m となり、現地での様子とほぼ対応していることが確認された。ま



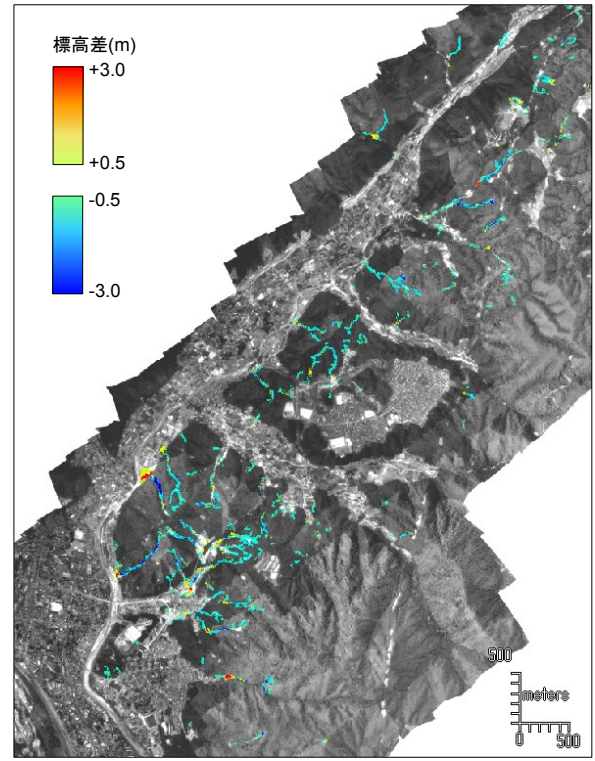
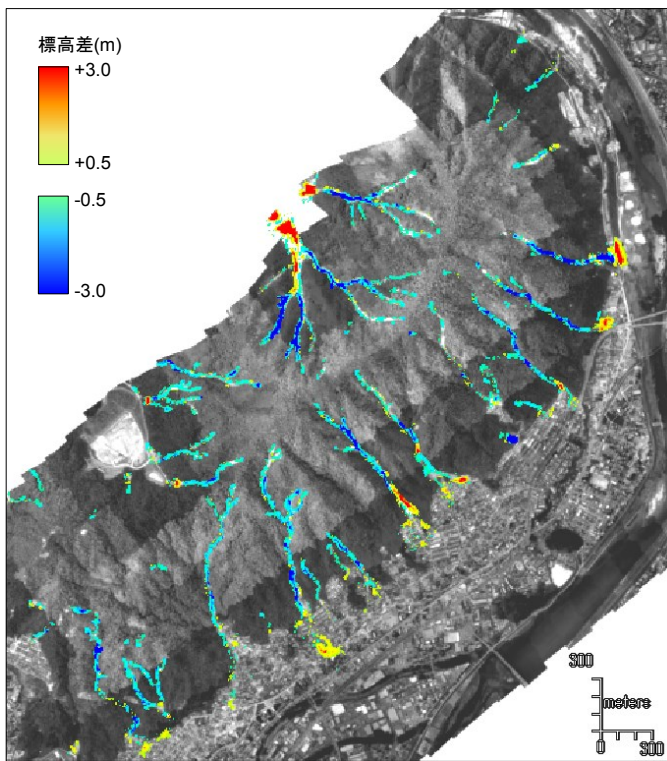


図13 土砂流出範囲内における標高差分布 (左：八木・緑井地区，右：可部地区)

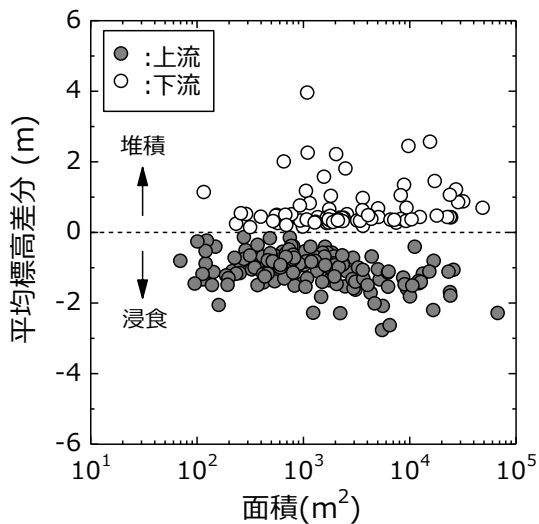


図14 上流側・下流側における平均標高差分

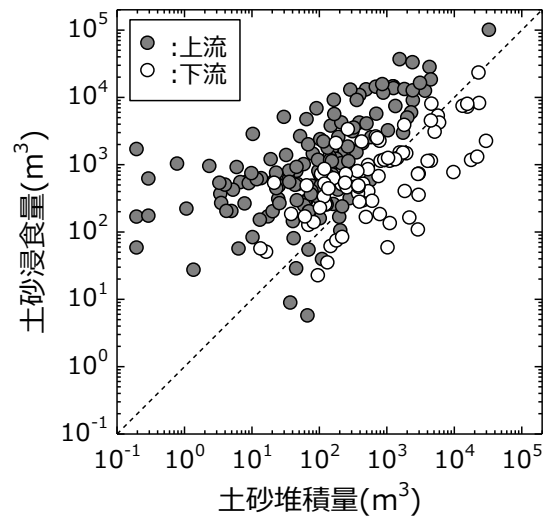


図15 上流側・下流側における土砂移動量

た、図11の範囲における標高差分の最大値は、浸食側で-7.6m、堆積側で+5.8mであった。

空写真から判読した土砂流出範囲内における標高差分分布を求めた結果を図13に示す。図1, 2中の破線枠のうち、図13の左側が南側の八木・緑井地区の拡大図を表し、右側が北側の可部地区の拡大図を表している。両地区の標高差分分布を比較すると、可部地区よりも南側の八木・緑井地区の方が標高差分が大きなメッシュが多く、高さ3m以上の土砂の浸食・堆積が広く現れていることがわかる。

図13の結果に対して、文献<sup>11)</sup>を参考に標高差分の正負が逆転する地域を境界として、各土砂流出範囲を上流側と下流側に分類した。各溪流での上流側・下流側の領域面積と標高差分の平均値の関係をプロットしたものを図

表2 補正後データによる土砂量の収支

	浸食量(m <sup>3</sup> )	堆積量(m <sup>3</sup> )	収支(m <sup>3</sup> )
上流側	-562,487	91,750	-470,736
下流側	-133,818	256,746	122,928
合計	-696,305	348,496	-347,809

表3 未補正データによる土砂量の収支

	浸食量(m <sup>3</sup> )	堆積量(m <sup>3</sup> )	収支(m <sup>3</sup> )
上流側	-749,474	88,028	-661,446
下流側	-145,197	285,086	139,889
合計	-894,671	373,115	-521,556

14 に示す。上流側では平均的に約-1m の標高差が、下流側では約 0.5m の標高差がみられた。下流側では、地形が比較的平坦で土砂が広範囲に分散すること、土砂が河川や家屋等へ流入すること、捜索活動や復旧活動のために災害直後から土砂の撤去が行われること、などの理由から、上流側に比べて標高差分が小さくなったものと考えられる。上流側のプロットをみると、面積が大きくなるほど平均標高差分はやや大きくなる傾向がみられるが、ほぼ一定とみなせる。このことは、土砂の崩壊土層の厚さは、崩壊規模によらず、同程度であることを示唆している。

次に、得られた標高差分分布を用いて土砂移動量の推定を行った。まず、メッシュ面積 (1m<sup>2</sup>) に標高差分を掛け合わせた値を 1 メッシュあたりの土砂移動量 (m<sup>3</sup>) とし、負のとき浸食量、正のとき堆積量と定義する。次に、各溪流の上流側および下流側の範囲内の全メッシュに対して浸食量と堆積量の和を算出することで、土砂収支を計算した。各土砂流出範囲の上流側および下流側での土砂浸食量と土砂堆積量の関係をプロットしたものを図 15 に示す。全体として、上流側では土砂浸食量の値が顕著であり、下流側では土砂堆積量が顕著であることが確認できる。各溪流における土砂浸食量は最大で約 10 万 m<sup>3</sup>、堆積量は最大で約 3 万 m<sup>3</sup> であった。上流側、下流側で浸食量および堆積量の総和を求めた結果を表 2 に示す。また、それぞれの収支すなわち浸食量と堆積量の差も併せて示している。土砂浸食量は計 70 万 m<sup>3</sup> であるのに対して、堆積量は計 35 万 m<sup>3</sup> と約半分となっている。これは、前述の通り、下流側では土砂の撤去や家屋等への流入が大きいためと考えられる。これを踏まえると、表 2 に示す土砂浸食量の総和である約 70 万 m<sup>3</sup> が、土石流による崩壊土砂量を表しているものと考えられる。

データの位置ずれを補正をしていない DEM を用いた場合における土砂量の推定を行った結果を表 3 に示す。表 2 に示す補正後の結果と比べると、土砂浸食量、堆積量ともに過大に評価されていることがわかる。堆積量を比較すると、補正後データでは約 35 万 m<sup>3</sup>、未補正データでは約 37 万 m<sup>3</sup> と 5% 程度の違いしかないのに対して、浸食量を比べると、補正後データでは約 70 万 m<sup>3</sup>、未補正データでは約 90 万 m<sup>3</sup> と約 30% も大きくなっている。これは、土砂の堆積が現れる下流側は低地であり比較的起伏が小さいために、位置ずれの影響がそれほど大きく現れないのに対して、浸食が現れる上流側は起伏が大きく位置ずれの影響が土砂量に顕著に現れるためだと考えられる。以上から、精度のよい崩壊土砂量の把握のためには、特に起伏の大きな地域での位置合わせが重要であり、本研究による補正が有効であることがわかった。

## 5. 異なる時期に計測されたデータによる崩壊土砂量との比較

本研究で推定した崩壊土砂量について、異なる LP データによる DEM を用いて土砂量を推定した結果<sup>11)</sup>と比較する。この解析では、2009~2010 年に計測された災害前 LP データと、2014 年 8 月 25 日に計測された災害後 LP データ (一部に 23 日、28 日に計測されたデータも含む) から作成された DEM の差分により土砂量を推定している。データの空間分解能は災害前後とも 1m であり、災害後のデータの取得日は本研究のデータに比べて 2~3 日早い。

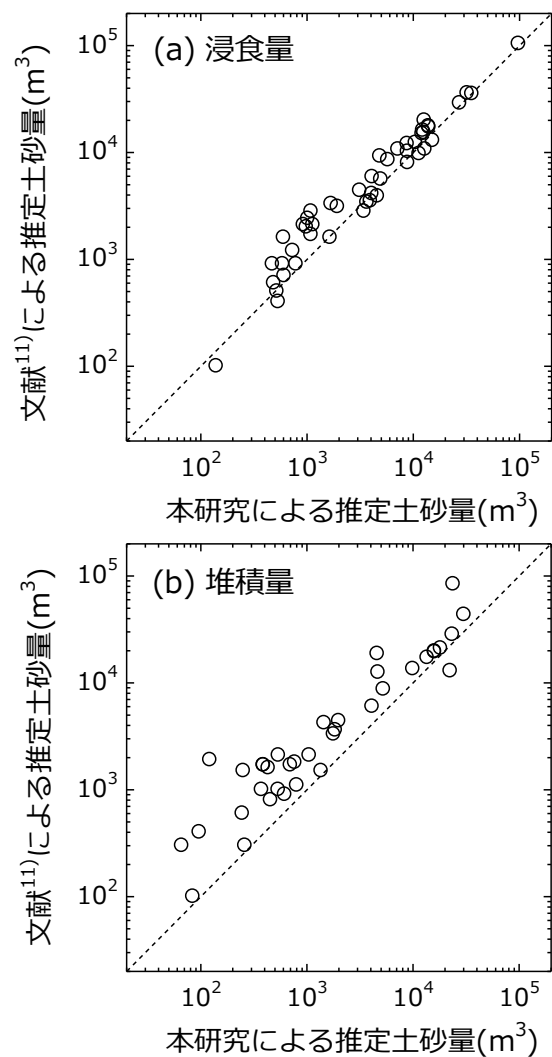


図 16 推定土砂量の比較

表 4 文献<sup>11)</sup>による土砂量の収支

	浸食量(m <sup>3</sup> )	堆積量(m <sup>3</sup> )	収支(m <sup>3</sup> )
上流側	-579,800	150,100	-429,700
下流側	-120,100	361,400	241,300
合計	-699,900	511,500	-188,400

これらのデータに、本研究で使用したデータにみられたような位置ずれの有無や、位置ずれの補正処理を施しているかは確認できなかった。ただし、本研究では災害前データとして分解能 5m の DEM を利用しているのに対して、文献<sup>11)</sup>では災害前後ともに分解能 1m の高解像度な DEM を利用していることを考慮すると、データの位置精度は本研究による補正後のデータと同程度ないしそれ以上に高いものと予想される。

文献<sup>11)</sup>では土砂流出範囲が明記されていないため、本研究による結果と単純に比較することは困難であった。そこで、本研究による土砂流出範囲が、文献<sup>11)</sup>の土砂流出範囲とほぼ同じであると判断した約 40 の溪流について、両者の浸食量と堆積量を比較した結果を図 16 に示す。浸食量は溪流の上流側の値を、堆積量は下流側の値をそれぞれ比較した。文献<sup>11)</sup>のデータに位置ずれの影響がないものとする、両者の土砂量の差は、文献<sup>11)</sup>と本研究で使用した災害後データの計測日の間における土砂の移動

量を表しているものと考えられる。図 16(a)をみると、両者の土砂浸食量に大きな差はみられない。これは、一般に土石流により浸食された溪流の上流側では、災害直後に土砂の移動が行われることはほとんどないためと考えられる。一方で、図 16(b)をみると、堆積量については、ほぼ全ての溪流において本研究による値の方が小さい傾向がみられた。本研究で用いたデータの計測日の方が 2～3 日遅いことから、両者の差は計測日の間に撤去された土砂量を表しているものと考えられる。

本研究と同じ対象地域における文献<sup>11)</sup>での土砂収支の結果をまとめたものを表 4 に示す。表 2 に示した本研究による結果と比較すると、浸食量は上流側、下流側とも同程度の値で、合計値も約 70 万 m<sup>3</sup>で同程度となっていることが確認できる。一方で、堆積量を比較すると、本研究による結果の方が上流側で約 6 万 m<sup>3</sup>、下流側で約 10 万 m<sup>3</sup>少なく、合計で約 16 万 m<sup>3</sup>少なかった。上記と同様に、両者の差を撤去された土砂量と仮定すると、この結果は、対象地域全体で 8 月 25 日から 2～3 日間におよそ計 16 万 m<sup>3</sup>の土砂が流出範囲外へ撤去されたことを示唆している。

この土砂撤去量について、対象地域全域における土砂撤去の進捗に関する資料は見当たらなかったため、被害が最も大きかった八木・緑井地区における土砂撤去に関する資料<sup>18)</sup>を基に考察する。この資料<sup>18)</sup>によると、八木・緑井地区では 8 月 23 日から本格的な土砂撤去が開始され、8 月 27 日までの 5 日間における進捗率は 35%であると記載されている。この値は、対象となる道路等の総延長に対する土砂撤去された累計距離の割合を表したものであり、厳密には撤去された土砂量の割合を表したものではないが、ここでは土砂量にも適用できるものと考えた。この進捗率に基づくと、1 日あたりの土砂撤去の進捗率はおおよそ 7%と概算できる。表 2 や表 4 の浸食量の合計に示したように、対象地域全域における崩壊土砂量は約 70 万 m<sup>3</sup>であり、全域における土砂撤去の進捗率は、八木・緑井地区での進捗率と同等であると仮定すると、対象地域全域では 1 日あたり 4.9 万 m<sup>3</sup>の土砂が撤去されているものと推定できる。この値を用いると、8 月 25 日から 2～3 日間における全域での土砂撤去量は約 10～15 万 m<sup>3</sup>と求まる。前述の通り、本研究による推定値は約 16 万 m<sup>3</sup>であり、上記の概算値と概ね対応する。以上に示す考察から、本研究と文献<sup>11)</sup>との土砂堆積量の差は、計測日の間に流出範囲外へ撤去された土砂量を概ね表していると判断できる。

以上より、文献<sup>11)</sup>による結果と本研究による結果を比較したところ、土砂浸食量については大きな差はみられなかったことから、文献<sup>11)</sup>によるデータの位置精度は本研究により補正したデータの位置精度とほぼ同程度ないしそれ以上であることが示唆された。また、土砂堆積量の変化から、データ計測日の間における土砂の撤去量を推定することができた。

## 6. 結論

本研究では、2014 年広島豪雨災害で甚大な被害が生じた広島市安佐南区八木・緑井地区と安佐北区可部地区を対象として、災害前後に計測された LP データによる DEM に対して、非線形写像法による位置合わせを行った上で、2 時期の標高差分を用いて崩壊土砂量の推定を行

った。

用いたデータには顕著な位置ずれがみられ、これを補正するには、既存の手法に比べて、局所的な位置ずれを補正できる非線形写像法が有効であることを示した。位置ずれを補正した DEM の標高差分を求めた結果、土石流による被害が甚大であった地域では、最大で高さ約 7.5m の土砂の浸食が、高さ約 6m の土砂の堆積がみられた。さらに、標高差分値から土石流が発生した各溪流で崩壊土砂量を推定した。その結果、ひとつの土石流発生箇所ですべて最大約 10 万 m<sup>3</sup>の土砂の浸食が、約 3 万 m<sup>3</sup>の土砂の堆積がみられることを示した。また、対象範囲全域では、土砂の浸食量は約 70 万 m<sup>3</sup>、堆積量は約 35 万 m<sup>3</sup>となることを示した。

本研究のデータより 2～3 日早く取得された LP データによる崩壊土砂量の推定結果と比較したところ、土砂浸食量には大きな違いはみられなかったこと、堆積量は本研究による値の方が全体で約 16 万 m<sup>3</sup>小さく、土砂撤去の進捗に関する資料を参考にして、2～3 日間でその量の土砂が流出範囲外へ撤去されたことと判断できることを示した。

## 謝辞

文献<sup>11)</sup>の資料は国土交通省中国地方整備局より提供いただいた。匿名の査読者には論文を改善する上で有益なコメントをいただいた。関係各位に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 気象庁：平成 26 年 8 月 19 日から 20 日にかけての広島県の大雨 広島市関連の気象情報 <http://www.jma.go.jp/jma/menu/h26hiroshima-menu.html>, 2014.
- 2) 広島県災害対策本部：8 月 19 日からの大雨による被害などについて (第 68 報), 9 月 19 日更新, [http://www.bousai.pref.hiroshima.jp/hdis/info/1649/notice\\_1649\\_1.pdf](http://www.bousai.pref.hiroshima.jp/hdis/info/1649/notice_1649_1.pdf), 2014.
- 3) 海堀正博, 石川芳治, 牛山素行, 久保田哲也, 平松晋也, 藤田正治, 三好岩生, 山下祐一：1999 年 6 月 29 日広島土砂災害に関する緊急調査報告 (速報), 砂防学会誌, Vol.52, No.3, pp.34-43, 1999.
- 4) 海堀正博, 浦真, 吉村正徳, 藤本英治：2005 年 9 月 6 日広島県宮島で発生した土石流災害, 砂防学会誌, Vol.58, No.5, pp.18-21, 2006.
- 5) 加納誠二, 土田孝, 中川翔太, 海堀正博, 中井真司, 来山尚義：2009 年に東広島市志和町内地区で発生した土砂災害の調査について, 地盤工学ジャーナル, Vo.6, No.2, pp.243-259, 2009.
- 6) 田代啓, 丸山喜久, 山崎文雄：デジタル空中写真測量に基づく新潟県中越沖地震における建物倒壊の把握, 地域安全学会論文集, No.13, pp.379-386, 2010.
- 7) 望月貫一郎, 甲斐納, 小井戸今朝己, 清水雅行, 今井靖晃, 中村三友, 小田三千夫, 阿部直樹, 近藤弘崇, 沼田洋一, 服部聡子, 金田真一：広島豪雨災害の緊急撮影活動, 写真測量とリモートセンシング, Vol.53, No.5, pp.198-204, 2014.
- 8) 向山栄, 江川真史：2 時期の細密 DEM から作成した地形画像解析により推定した平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震における荒砥沢ダム周辺の地表変動, 応用地質学会研究発表会講演論文集 pp.3-4, 2009.
- 9) 島重章, 橋口翔：航空レーザ計測による堆積土砂量の推測, 広島工業大学紀要研究編, 第 45 巻, pp.57-64, 2011.



- 10) 日本測量調査技術協会：航空レーザ測量による災害対策事例集, 195p, 2013.
- 11) 国土交通省中国地方整備局：平成 26 年 8 月豪雨災害（広島豪雨災害）主要被災エリア崩壊土砂量等算出, 18p., 2014.
- 12) 平川泰之：航空レーザ測量による地形変化把握のための標高差分値の最適化, 砂防学会誌, Vol.58, No.6, pp.18-22, 2006.
- 13) 日本測量調査技術協会：図解航空レーザ計測 基礎から応用まで（監修：齋藤和也）, 208p, 2008.
- 14) 中村公紀, 坂元光輝, 小杉幸夫：多段的探索・選択的協調による地理画像変化抽出機能の安定化, 電子情報通信学会技術研究報告, IE, 画像工学, Vol.102, No.469, pp.1-6, 2002.
- 15) 国土地理院：基盤情報地図ダウンロードサービス, <http://fgd.gsi.go.jp/download/>, 2014.
- 16) 国土地理院：平成 26 年(2014 年)8 月豪雨による被害状況に関する情報, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h26-0816heavyrain-index.html>, 2014.
- 17) 土木学会・地盤工学会：平成 26 年広島豪雨災害合同緊急調査団調査報告書, 2014.
- 18) 国土交通省中国地方整備局：平成 26 年 8 月豪雨災害（広島豪雨災害）における緑井地区および八木地区の土砂撤去の進捗について（8 月 27 日現在）<http://www.cgr.mlit.go.jp/kisha/2014aug/140828top3.pdf>, 2014.

(原稿受付 2015.6.6)

(登載決定 2015.7.25)

