

神聖とされている領域における地形把握手法の提案

Surveying the topography of an area of sacred site

原田紹臣¹・山中一幸²・中谷加奈³・里深好文⁴

Norio Harada, Ikko Yamanaka, Kana Nakatani and Yoshifumi Satofuka

¹三井共同建設コンサルタント株式会社 関西支社 (〒552-0007 大阪市港区弁天1丁目2番1-1000号)

Ph.D. in Engineering, Mitsui Consultants Corporation

²株式会社アミューズワンセルフ (〒542-0082 大阪市中央区島之内1-19-21)

Engineer, amuse oneself Incorporated

³京都大学大学院農学研究科 助教 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

Assistant Professor, Kyoto University, Graduate School of Agriculture

⁴立命館大学理工学部都市システム工学科 教授 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

Historic sites must be protected against landslides and debris flows to save them for posterity. However, it is difficult to survey the topography in an area of sacred site, such as an off-limits area behind a shrine, to devise countermeasures against such hazards. We propose a method of measuring the topography of an area of sacred site using an unmanned aerial vehicle (UAV). In this study, the photogrammetry data obtained with the UAV were compared to control survey data obtained on the ground to validate the proposed method. In addition, a new relationship between the watershed area and channel width was proposed by taking into consideration the riverbed gradient, for prediction of the river width accurately using the photogrammetry data.

Keywords : Unmanned aerial vehicle, shrine, holy area, topographical survey, river width

1. はじめに

近年、神社仏閣等の史跡に隣接した山地において、豪雨や地震に起因した斜面崩壊や土石流による土砂災害が発生しており、史跡保全の観点よりその対策等が課題となっている¹⁾。斜面崩壊や土石流流動に関する予測や災害時における初動の対応において、詳細な現況地形の把握が重要となる。しかしながら、神社本殿や拝殿の後背山地に存在する斜面や土石流危険渓流は神聖な領域(図1)とされており、一般的に調査時における立ち入りに関して制約を受ける。

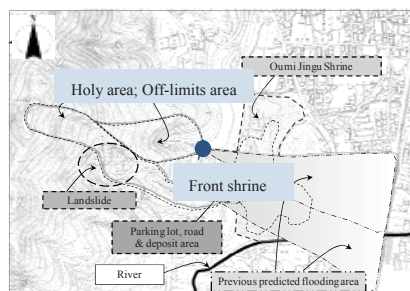


図1 谷出口付近に建立されている拝殿と立ち入り禁止となっている後背山地の事例²⁾

このような立ち入りが困難な区域を対象に調査する場合、従来から航空機による空中写真測量や航空レーザ測量が用いられている。ただし、航空機による測量は比較的費用が高く、航空法に基づく運用が必要となるため、災害直後の迅速な対応が困難な場合がある。そこで、迅速で簡易な現地把握手法として、近年開発されたUAV（小型無人自動自立航空機）を用いた空中写真撮影が有効であると考えられる³⁾。UAVはGPS機能と慣性センサを積載しており、比較的精度の高い自動飛行が可能である。なお、低空飛行による撮影が可能であり、詳細な画像を取得することが可能である⁴⁾。また、2011年3月11日に発生した東日本大震災により被災した東京電力福島第一原子力発電所の立ち入り禁止地区において、UAVを用いた情報収集手法の有効性が報告されている⁵⁾。さらに、UAVを用いた海岸調査⁴⁾や干潟堆積土砂調査⁶⁾の事例について報告されている。しかしながら、UAVを用いた空中写真測量による斜面地形解析に関する精度の検証や適用性についての報告は、筆者らが知る限り存在しない。一方、神聖とされている溪流における土石流の流動解析を目的に空中写真測量結果を用いて河道モデルを構築する際、河床高については推定が可能であるが、河道幅については植生により上空からの正確な河道幅の判別が困難となり調査結果をそのまま利用できない場合がある。

そこで、本研究では山間部における地すべり斜面を対象に、UAVを用いた空中写真測量結果と地表面における測量結果との比較により、UAVを用いた空中写真測量の精度及び適用性について考察する。また、UAVで得られた情報に対して補完的な検討により構築する河道モデルの精度を向上させるため、実測した河道幅等の調査結果により流域面積等を用いた山地河川における新たな河道幅の推定方法について提案する。

2. UAV（小型無人自動自立航空機）を用いた空中写真測量の試行と適用性に関する考察

山間部における地すべり斜面を対象にUAVを用いた空中写真測量を試行し、現地での測量結果との比較により、UAVを用いた空中写真測量の精度及び適用性について考察する。

(1) 調査方法

2014年3月19日、福井県内に位置する地すべり斜面（ただし、排土工による対策済み：写真1）を対象に、UAVを用いた空中写真測量を実施した。地表での風速は約0.5～1.0m、照度は約20,000～40,000 luxであった。今回使用したUAV（Unmanned Aerial Vehicle：写真2及び表1）は、飛行ルートに関して事前に電子地図を用いて設定及び機体に転送し、自動的に巡航させることが可能である。また、図2に示される上空の位置から撮影した空中写真（約10,000m²/枚；撮影位置の座標情報を保有）を用いて空間解析（空中三角測量）を実施し、点群データ、三次元地形図ならびにオルソフォト画像（写真3）等を作成することが可能である。ただし、別途実施する基準点測量結果（P1～P4:写真3）等を用いて、最終的に地形補正（制御）する必要がある。



写真1 今回対象とする山間部における斜面（地すべり斜面：ただし、排土対策後）

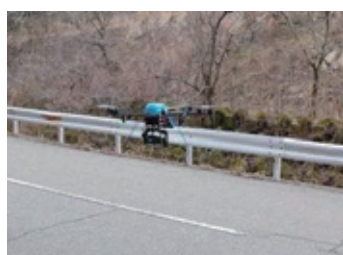


写真2 今回使用した UAV（小型無人自動自立航空機）の概要

表 1 今回使用した UAV の仕様

Length (Width)	~800 mm
Weight	1.3 kg
Payload	3.7 kg
Power	Electric power
Cruising speed	~5 m/s
Flight time	~5 min

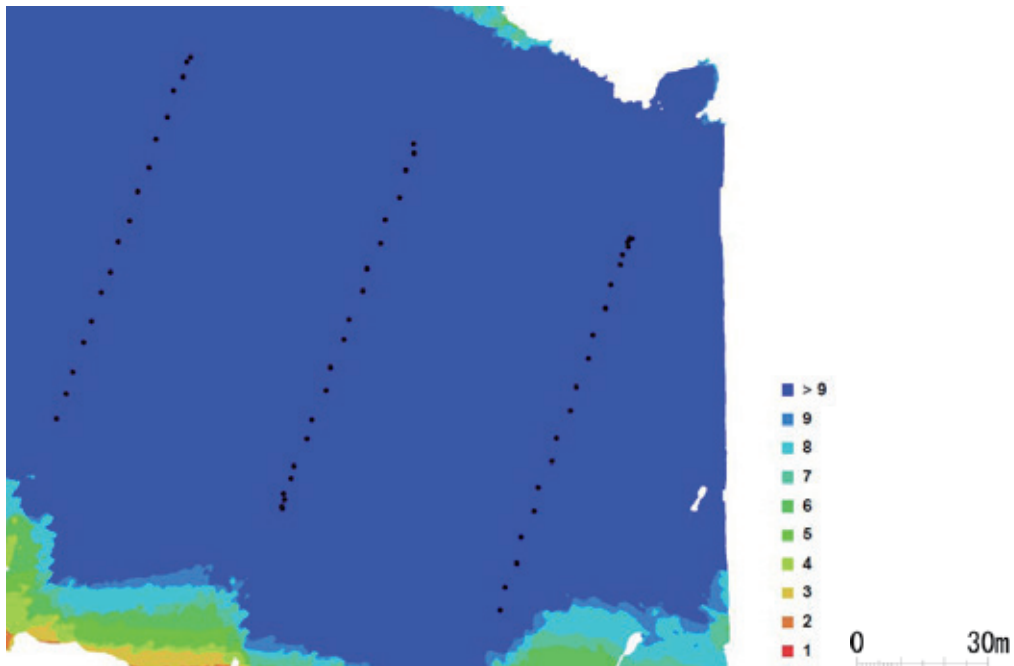


図 2 上空からの撮影位置（軌跡：黒点）及び空間解析時における画像の重複枚数（枚数：凡例着色）



写真3 今回作成したオルソフォト画像及び基準点測量の位置

(2) 調査結果及び考察

今回の撮影条件及び空間解析（空中三角測量）の条件を、表2に示す。また、UAVにより撮影した写真を用いて、空間解析（空中三角測量）により三次元地形モデルを作成した結果を図3に示す。なお、空間解析に際して、現地で実施した基準点測量（四級程度）結果を用いた制御において確認された制御誤差を、表3に示す。表3に示されるとおり、平面的な制御誤差は平均で1～3cmであった。また、補正（制御）に用いた各基準点測量地点の範囲内における現地との高さ（鉛直）方向における誤差は、最大で2cm未満であった。

図3に示される三次元地形モデルを用いて作成した地形平面図を、図4に示す。図4に示されるとおり、現地に存在している草本等の影響を受け等高線の一部が繁雑になっている。そこで、図4の地形図内に示した横断線を対象に、草本類の影響によるノイズに関して、空中写真等から明らかな草本を除去してスムージングした横断図を図5に示す。図5に示された横断図は、地すべり等の一般的な安定解析（例えば、円弧すべり解析）において利用可能な地形情報であると考えられる。

今回試行した結果を踏まえて、UAVを用いた空中写真測量の適用性に関して考察する。まず、小型UAVは軽量であり運搬に関しては有効である。しかしながら、軽量のため上空において風の影響を受けて機体が高不安定になった場合は、手動での操作が必要となる。このため、通常時には電子地図を用いたGPS自動操作が可能であるが緊急時には手動操作を行う必要があるため、飛行範囲は操作者の可視範囲に限定される。また、図3に示されるとおり、今回対象とした斜面の中央部（写真3）は地すべり対策（排土）後であるため高木が殆ど存在せず、空中写真測量の対象物としては比較的容易な条件であった。ただし、図4に示されるとおり地形図端部の高木は地形の一部として認識されてしまうため、斜面崩壊等により裸地となった斜面への適用が有効であると考えられる。

表 2 撮影条件及び空間解析条件

Number of camera station	57
Flying altitude	~175 m
Coverage area	~0.068 km ²
Precalibrated	No
Focal Length	16 mm
Camera Model	NEX-5N (16 mm)
Pixel Size	4.89 x 4.89 μ m

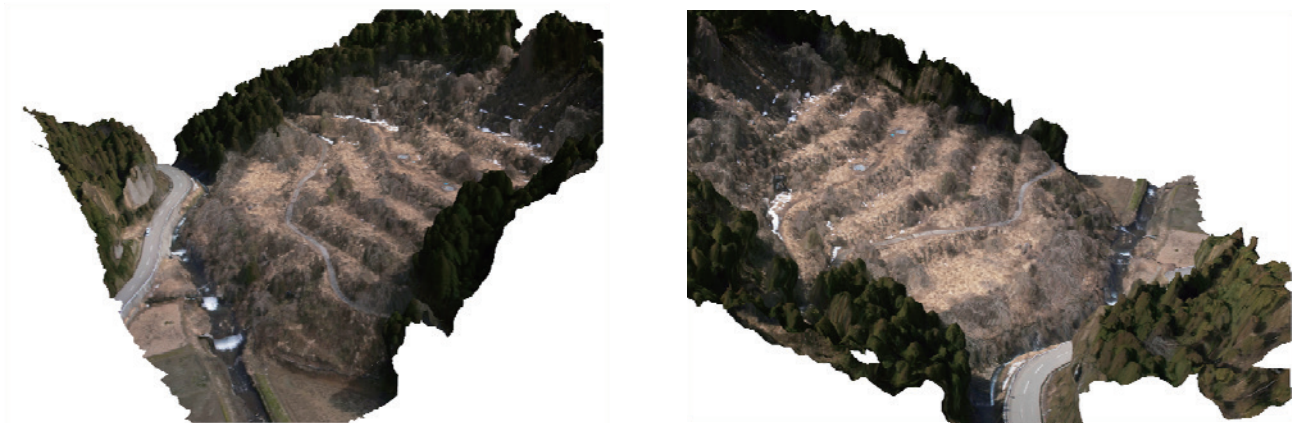


図 3 今回作成した三次元の地形モデル

表 3 空中写真測量の平面制御における精度

Label	X error (m)	Y error (m)	X error (m)	Error (pix.)
P1	-0.003	-0.002	-0.001	0.393
P2	-0.006	0.041	-0.015	0.383
P3	0.021	0.001	-0.001	0.367
P4	-0.011	-0.0381	0.012	0.364
Average	0.012	0.028	0.010	0.375

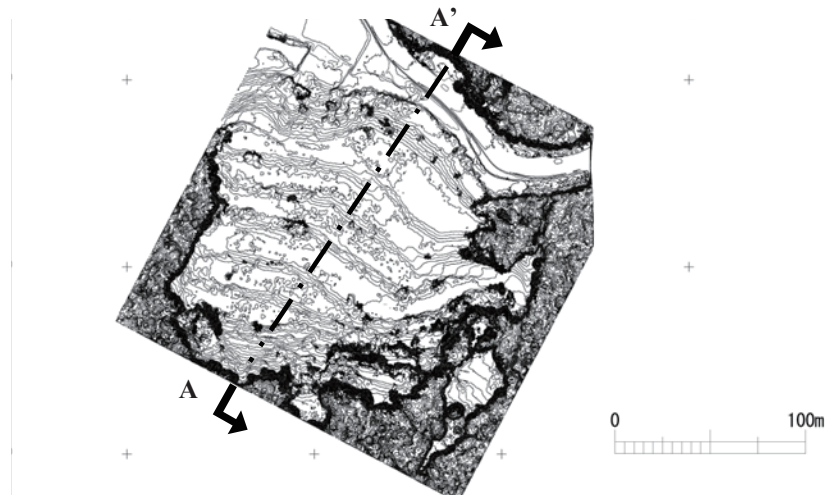


図 4 今回作成した地形図



図 5 草本等を除去してスムージングした A-A' 横断面図（排土後の地すべり斜面）

今後、簡易に操作が可能な小型のUAVを用いた上空からのレーザ測量手法の提案を目的に、機体とレーザースキャナーとの改良を加えて開発していく予定である。

3. 山地河川における河道幅の推定方法に関する提案

UAVにより撮影された空中写真を用いて溪流の河道幅について精度良く予測するため、現地にて実測した山地河道幅等の調査結果を用いて、新たな河道幅の推定方法について提案する。

(1) レジーム理論を用いた流域面積と河道幅との関係

河道幅に関して、一般的なレジーム理論を用いると、

$$B_0 \approx \alpha Q^{1/2} \quad (1)$$

$$B_0 \approx (\alpha k^{1/2} r_e^{1/2}) A^{1/2} = \beta A^{1/2} \quad (2)$$

と表される⁷⁾。ここに、 B_0 は河道幅、 Q は流量、 r_e は有効降雨強度、 A は対象地点より上流域の流域面積及び α 、 β 、 k は係数である。そこで、九頭竜川流域（福井県）の荒島谷を対象に調査した結果（河道幅等）を用いて、式(2)の適用性について検証する。調査結果を対象に式(2)を用いて整理された結果を、図6に示す。図6に示されるとおり、本予測式の相関係数 r は0.64（0.7以下）であった。これより、流域面積のみを用いた河道幅の予測式は、更なる改善が必要であることが分かった。

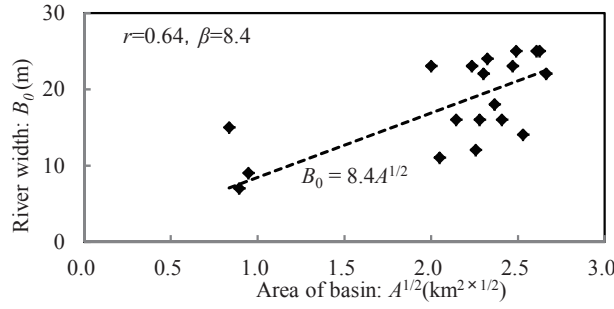


図6 流域面積と河道幅との関係

(2) 新たに提案する河道幅の推定方法

既往研究⁸⁾によると、河床材料が存在する中規模河道において、河床形態を支配する主な無次元量は τ_* 、 h/d 及び B_0/d である。ここに、 τ_* は無次元限界掃流力、 h は水深及び d は河床材料の代表粒径（ここでは、平均粒径）であり、

$$h/d = R(I) \cdot (B_0/d)^{2/3} \quad (3)$$

の関係が示されている。ここに、 $R(I)$ は勾配 I を考慮した係数である。ただし、河床勾配 I が $1/20$ 以下の緩勾配区間においては、

$$R(I) \doteq 0.45 \quad (I \leq 1/20) \quad (4)$$

であることが示されている⁸⁾。

また、流水の連続式は、

$$Q = v \cdot B_0 \cdot h \quad (5)$$

と表される。ここに、 v は流速であり、さらに、

$$v/v_* = \sqrt{8/f} \quad (6)$$

$$v = \sqrt{8/f} \cdot v_* = \sqrt{8/f} \cdot \sqrt{ghI} \quad (7)$$

と表される。ここに、 v_* は摩擦速度、 g は重力加速度及び f は摩擦損失係数である。

式 (2)、(3)、(4)、(5) 及び (7) を用いて整理すると、

$$B_0 = \frac{R(I)^{-3/4}}{(\sqrt{8/f})^{1/2}} \left(\frac{Q}{\sqrt{gdI}} \right)^{1/2} = \chi \left(\frac{Q}{\sqrt{I}} \right)^{1/2} = \delta \left(\frac{A}{\sqrt{I}} \right)^{1/2} \quad (8)$$

と表される。ここに、 χ 及び δ は係数である。ここで、式(8)を用いて、実河川で確認された河道幅を対象に整理された結果を図7に示す。図7に示されるとおり、河床勾配を考慮した流域面積を河道幅との関係性に関する相関係数 r は 0.84 であり、比較的に高い関係性があることがわかった。

参考に、河道幅 B_0 と河床勾配 $I^{-1/2}$ との関係に関して、実測結果を用いて整理する（図8）。図8に示されるとおり、河道幅と河床勾配（対象地点の前後10mにおける地表高を用いて算定）との相関係数 r は 0.79 であり、流域面積との関係（図6）に比べて相関が高いことがわかった。この要因について、以降に考察する。一般的に、河床変動が活発な谷形状を呈する河道において、河床堆積物の存在する幅（河道幅）は堆積物の厚さの違いに強く影響を受ける。また、堆積物の厚さは河床勾配の違いに影響を受ける。これより、河床勾配の違いが河道幅に影響を与えられと考える。

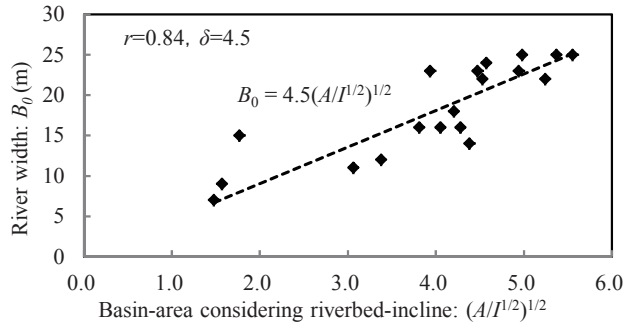


図7 提案する河床勾配を考慮した流域面積と河道幅との関係

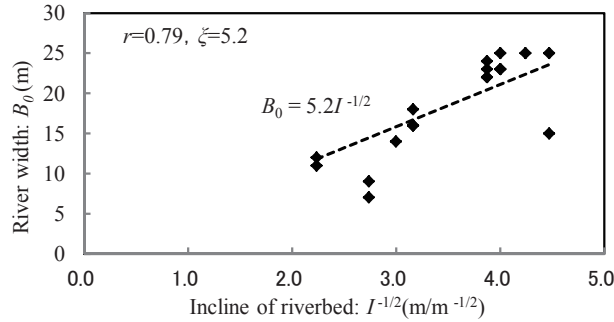


図8 河床勾配と河道幅との関係

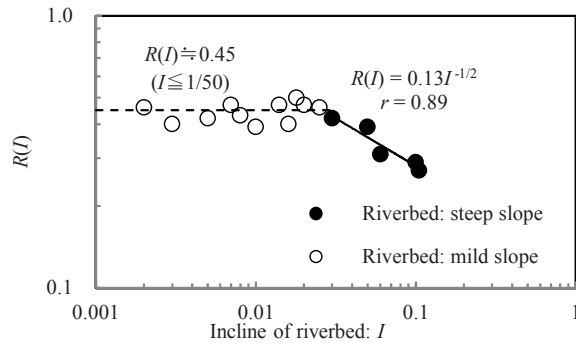


図9 河床勾配 I と係数 $R(I)$ との関係²⁾に一部加筆

一方、既往研究⁸⁾で提案されている式 (3) における河床勾配を考慮した係数 $R(I)$ は、式 (4) に示されるとおり、緩勾配区間においては河床勾配の影響を受けずに一定値とされている。ただし、河床勾配 I が急な山地河川においては、式 (4) を満足しない。そこで、既往研究⁸⁾で示されている河床勾配 I と係数 $R(I)$ との関係について、河床勾配 I が急な区間を対象に、新たに近似式を求める。河床勾配 I と係数 $R(I)$ との関係について、新たに再整理及び加筆した図を図9に示す。図9に示されるとおり、再整理した結果によると河床勾配 I が $1/50$ 以上より急な区間においては、

$$R(I) = \mu \cdot I^{-1/2} \quad (9)$$

の関係式が示される。ここに、 μ は係数である。

最終的に、式 (2)、(3)、(5)、(7) 及び (9) を用いて整理すると、

$$B_0 = \frac{R(I)^{-3/4}}{(\sqrt{8/f})^{1/2}} \left(\frac{Q}{\sqrt{gdI}} \right)^{1/2} = \mu \sqrt{\frac{fkr_e}{8gd}} \sqrt{\frac{A}{I}} = \eta \sqrt{\frac{A}{I}} \quad (10)$$

と表される。

これまでと同様に、調査結果を対象に式 (10) を用いて整理された結果を図10に示す。図10に示されるとおり、河床勾配を考慮した流域面積と河道幅との関係（相関係数 $r = 0.90$ ）が新たに示された。今後、他の山地河川を対象に本予測式の検証が望まれる。

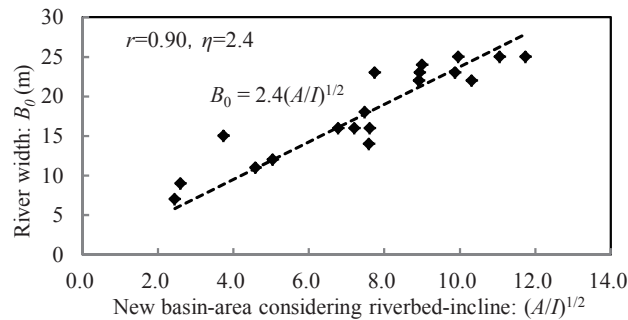


図10 提案する山地河川における河床勾配（ただし、河床勾配 I は1/50以上）を考慮した流域面積と河道幅との関係

4. おわりに

神聖な領域とされている神社本殿や拝殿の後背山地に存在する斜面や土石流危険渓流における簡易な地形把握手法の提案を目的に、山間部における地すべり斜面を対象にUAVを用いた空中写真測量結果と現地での水準測量結果との比較により、UAVを用いた空中写真測量の精度及び適用性について考察した。また、現地にて計測した河道幅等の調査結果を対象に、流域面積等を用いた山地河川における新たな河道幅の推定方法について提案した。

本研究により得られた成果を、以降に要約する。

- 1) GPS 機能と慣性センサを積載したUAV（小型無人自動自立航空機）により空中から撮影した写真を用いて画像解析（空中三角測量）を実施し、その適用性について考察した。
- 2) UAVを用いた空中写真測量結果と地表での測量結果と比較したところ、その高さ（鉛直）方向における誤差は最大で2cmであった。
- 3) 山地河川における流域面積と河道幅との関係等について、現地調査結果及び既往の経験式等を用いて検討した結果、新たに河床勾配を考慮した流域面積と河道幅との関係（相関係数 $r = 0.90$ ）が示された。今後、他の山地河川を対象にした本予測式の検証が望まれる。

参考文献

- 1) 赤澤史顕・藤本将光・里深好文・深川良一：熊野那智大社後背山地において発生した土石流に関する研究，歴史都市防災論文集，Vol. 7，pp.59-66，2013.
- 2) 原田紹臣・里深好文：史跡の保全に配慮した土砂災害対策，歴史都市防災論文集，Vol. 6，pp.133-140，2012.
- 3) 東俊孝・高田知典・鈴木弘人・窪野琢也：プログラミング飛行型ヘリを用いた空間情報収集システム，土木学会年次学術講演会，Vol.61，pp.539-540，2008.
- 4) 熊田貴之・宇多高明・鈴木真二・酒井和也・野志保仁・森田学・柄沢研治：無人飛行機（UAV）による新しい海岸モニタリング手法：海洋開発論文集，Vol.26，pp.1167-1171，2010.
- 5) YOMIURI ONLINE： <http://www.yomiuri.co.jp/national/news/20110330-OYT1T00276.html>，2011.
- 6) 渡部要一・佐々真志：UAVとMASWを活用した効率的な干潟堆積土砂調査，海岸工学論文集，Vol.65，pp.1441-1445，2009.
- 7) Norio HARADA: Predicting and Controlling Sediment Runoff caused by Heavy Rain in a Mountain Watershed, Doctoral Thesis, Ritsumeikan University, 2013.
- 8) 村本嘉雄・藤田裕一郎：中規模河床の分類と形成条件，水理講演会論文集，Vol.22，pp.275-282，1978.