UAVによる漂砂系スケールの 海岸底質粒径マッピング

五嶋 このみ¹・佐藤 慎司²

¹学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

E-mail: konomi@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

²フェロー 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

E-mail: sato@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

海岸の底質粒径は海岸地形と合わせて海岸保全の最も基本的な情報であり、海岸における漂砂系スケールの広域の粒径調査は土砂の移動方向や移動機構を解明する手段として活用されている。しかし粒径調査はサンプリングおよび分析の両面で多大なコストや労力を要し、漂砂系スケールの広域の情報を高い頻度で取得することは困難である。本研究ではUAVによる空撮画像から二次元ウェーブレット解析をベースとして高精度な粒径推定を行い、さらに撮影画像のGPS情報と推定粒径情報を結びつけることで、広域の底質情報を機動的に高解像度でマッピングする手法を開発した。また、同手法を砂礫混合海岸である富士海岸に適用し、現地適用性を確認するとともに礫養浜や各種構造物の海浜過程に及ぼす影響を議論した。

Key Words : wavelet analysis, UAV, grain size, monitoring, beach morphology

1. はじめに

海浜地形変化を議論する上で現地の地形形状や底質特性を把握することは極めて重要である。しかし一般に、大きく変動する海浜地形に対して高解像度で地形や底質情報を取得するには多大な労力とコストを要する。海底地形の監視については、音響探査技術の革新に加えて、漁船搭載ソナーを活用する手法(岡辺ら¹⁾)や、XバンドレーダーやUAV取得画像から波の伝播速度を介して水深を推定する手法(武若ら²⁾、松葉ら³⁾)などが開発されており、高頻度で機動的な地形測量が可能となりつつある。一方で底質特性の分析は、長期的・広域的な土砂動態の把握に有用であることが指摘されているが(例えば、佐藤⁴⁾)、土砂のサンプリングおよび分析のそれぞれにおいて多大な費用や労力を要するため技術革新が必要である。

海浜部の土砂サンプリングについては、遡上帯から後浜にかけて粒径が変化することが知られており、特に砂礫混合海浜では粒径が大きく変化する。そのため、採取位置の代表性が問題となる。線格子法・面積格子法による表面サンプリングやダンプトラックを用いた直接採取法(例えば、山本⁵⁾)などが提案されているが、代表性の検討や多大な労力の点に課題が残されている。

粒径の分析手法に関しては、標準的なふるい分け試験に加え、デジタルカメラ画像を分析する手法が提案され

ている。辻本ら⁶⁾は相関法、Buscombe⁷⁾はフーリエ変換法や一次元ウェーブレット解析法などを提案しているが、その対象の多くは理想的な条件で撮影した接写画像を対象としており、広域をカバーする現地調査への適用性は明らかではない。

以上の背景のもとで本研究では、漂砂系スケールの広域の連続的な底質粒径分布を、低コストかつ機動的に解明することを目的として、UAVからの取得画像を分析・マッピングする手法を開発する。現地適用性の高い手法確立に向けて現地におけるUAV取得画像を対象としたため、本論文ではまず富士海岸における現地調査について記述した。その後、二次元ウェーブレットを用いた手法開発と現地適用性について記述するとともに、適用における具体的な留意点にも触れることとする。

2. 現地調査

(1) 対象海岸

対象海岸は砂礫混合海岸である全長約16 kmの静岡県富士海岸とし、2016年10月に狩野川河口付近から昭和放水路にかけて、12月に田子の浦港から富士川河口付近にかけて、2017年4月に沼川第二放水路周辺において現地調査を行った。富士海岸の漂砂系は図-1のようになり、内陸の低湿地帯からの排水のために設けられた3つの放水路が西から東へ向かう沿岸漂砂を捕捉し、昭和

放水路と沼川第二放水路の東側で海岸侵食が発生している。侵食の激しい昭和放水路では、漂砂の下手側の東側で礫養浜が行われている。図-1上部の礫の写真は養浜位置での浜の礫（右）と養浜礫（左）を比較したものであり、養浜礫は現地材よりやや大きいことがわかる。

(2) 調査内容

2016年10、12月の調査ではUAVをバームからの高度10 mを一定に保ちつつバーム上を沿岸方向に飛行させた。鉛直下方向を連続的に撮影することで、富士海岸沿岸方向全域の汀線部の空撮画像を得た。撮影位置情報はUAV内蔵のGPSによって記録されている。本研究ではいずれの調査においてもUAVはDJI社のPhantom 4を用いた。撮影画像の例を図-2に示す。ただし、大型の消波ブロックが汀線付近に設置されている田子の浦港西側から昭和放水路西側までの区間等は、調査対象から除外した。また、10月の調査では図-1に示した地点において岸沖方向についても撮影を行った。岸沖方向では地形の高低差が比較的大きいことを踏まえ、後で標高の変化を確認できるようにするために、図-3に示したように沿岸方向には1 m間隔で2つずつ、岸沖方向には地形の変わり目を目安として10セットのマーカーを配置した。撮影高度は、バーム頂から高度10 mで一定とした。全ての撮影において画像サイズは3000×4000ピクセルである。

2017年4月の調査では沼川第二放水路を挟む沿岸約500 m、岸沖約50 mの区画を対象として調査を行った。まず対象区画内に、沿岸方向には50 m間隔、岸沖方向にはバーム上から14 m, 7 m, 6 m, 6 m, 6 m, 6 mの間隔で、マーカーを配置し、全てのマーカー位置をVRS方式のRTK-GPSで計測した。その上でUAVの高度10 m（粒径分析用）および30 m（地形分析用）で海浜表面を連続的に撮影した。ただし、UAVの高度は離陸地点の地盤高を基準として表示している。本調査では離陸地点はマーカーが設置してある地点付近とし、バッテリー交換で高度が変わる際には、その離陸位置を記録することとした。全ての撮影において画像サイズは3000×4000ピクセルである。

3. 粒径算出手法

(1) ウェーブレット変換

ウェーブレット変換は周波数解析手法の1つであり、マザーウェーブレット関数と呼ばれる基本となる関数を拡大縮小・平行移動させて信号に対して掛け合わせることで、その信号のある時点でのある周波数領域に対しての局所的な特徴量（ウェーブレット係数）を得るものである。周波数解析の代表例であるフーリエ変換に比べ、位置情報を残すことができ、広い周波数に対応可能であるという利点がある。

図-1 富士海岸漂砂系

図-2 UAVで高度10mから取得した画像の例

図-3 10月の岸沖方向の調査概要図

図-4 二次元ウェーブレット解析のマザー関数の概形

マザーウェーブレット関数は様々な種類のものが提案されているが、本研究ではFreeman et al.⁹⁾で紹介されている2次元メキシカンハットウェーブレットを用い、2次元ウェーブレット変換を行った。関数は式(1)に、その概形は図-4に示す。マザーウェーブレット関数 ψ を用いて式(2)からウェーブレット係数 W を算出することをウェーブレット変換という。ここで、 $f(x,y)$ は入力画像、 (x_0,y_0) は入力画像における着目点、 a は ψ の拡大縮小のパラメータで一般にスケールと呼ばれ、 a が入力画像中の粒径に対応するよう調整してある。

$$\psi(x,y) = \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{2}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2}\right) \quad (1)$$

$$W(x_0, y_0) = \frac{8}{a^2} \sum_x \sum_y f(x,y) \cdot \psi\left(\frac{2\sqrt{2}(x-x_0)}{a}, \frac{2\sqrt{2}(y-y_0)}{a}\right) \quad (2)$$

(2) 本研究における二次元ウェーブレット変換

撮影画像に対してBrown⁹⁾の歪みモデルを用いて歪み補正を行った後、グレースケール化を行った。そのグレースケール値に対して式(2)の二次元ウェーブレット変換を、スケール a の値を2の0乗、0.2乗、0.4乗…、7乗と徐々に変化させながら行った。各ピクセルで式(3)のようにウェーブレット係数の2乗で重み付けをしたスケールの平均 D を算出した。ただし、 a_n はあるスケールの値、 W_n はそのスケールに対応するウェーブレット係数の値である。サンプル画像に対しこの D を計算し図示したものとその元画像を図-5に示す。

$$D = \frac{\sum_n a_n \cdot W_n^2}{\sum_n W_n^2} \quad (3)$$

(3) 平均粒径の算出

図-6は上段のサンプル画像について D の値を算出し、中段にその赤線部分の結果を図示したものである。図から、 D は礫の中心をピークとして外側に向かうほど値が小さくなっており、ノイズも散見される。そこで8近傍メディアンフィルタによるノイズ処理を行ったのちピーク検出を行うと図-6下段のようになった。ノイズが除去され、礫の中心が検出できていることが確認できる。そこで本手法では検出されたピーク部分の D 平均[pixel]を算出し、それに撮影画像内の1ピクセル当たりの実際の長さを掛け合わせることで、実サイズ換算の平均粒径を決定した。最終的な粒径算出フローを図-7に示す。

(4) 精度検証

現地でUAVによって撮影した画像のうちサンプル9枚に対して以上の手法を適用して平均粒径を算出し、実粒径と比較したものを図-8に示す。一次元ウェーブレット変換を用いたBuscombe⁷⁾の手法による推定値を図-8に示

図-5 平均スケール D の分布

図-6 平均粒径の高精度推定

図-7 粒径分布の推定手法フロー

したが、これと比較しても精度が高いことが見て取れる。平均絶対誤差は既往手法では48%であったのに対し本手法では4.7%となり、高精度の粒径推定手法を確立できたと言える。また、図-5に示すように、画像中の位置に対応した形で粒径情報を得られることも特色の一つである。

図-8 粒径推定手法の精度検証

4. 富士海岸の粒径マッピング

(1) 沿岸方向の粒径マッピング

2016年10月と12月の調査で、バーム上を沿岸方向に撮影した画像の内およそ200mおきに一枚の割合で選別した各画像について、本手法により平均粒径を推定し、その撮影地点の経度情報を用いて描いた粒径の沿岸分布を図-9に示した。図-9には比較として1996年の実測粒径分布調査結果（富士海岸侵食対策基本計画(案)¹⁰）より示してある。図-9からまず狩野川河口付近と富士川河口付近では、1996年から2016年の20年間であまり粒径が変化していないことが読み取れる。一方で、昭和放水路東側から新中川放水路にかけての粒径は20年間で10~20mm程度大きくなっていることが確認できる。これは昭和放水路の東側で行われている養浜の養浜材料が10~150mmと元海浜の平均粒径に比べて大きめである（図-1参照）ことから、養浜の影響により下手海浜が粗粒化したものと考えられる。

また、図-10に沼川第二放水路付近の粒径分布の2016年10月の調査と2017年4月の調査の比較を示した。図から、放水路付近ではあまり粒径変化は見られないのに対し、放水路から100m程度離れた地点では2017年4月の方が2016年10月よりも平均粒径が大きくなっていることがうかがえる。より調査回数を重ねて定期的な調査を行うことで、波浪の季節変化と粒径分布の変化の関係を議論することができると考えられる。

(2) 岸沖方向の粒径マッピング

2016年10月の調査で岸沖方向に撮影した各画像から粒径を推定し、画像の緯度情報を用いて粒径の岸沖分布を描いた結果を図-11に示す。対象地点の位置は、図-1および図-9に示してある。ただし岸沖方向は沿岸方向とは異なり地形変化が大きいので、画像からの実サイズ換算

実測データ：沼津工事事務所資料(1998)より

図-9 富士海岸における汀線付近平均粒径の沿岸分布

図-10 沼川第二放水路付近の2017年4月と2016年10月の粒径比較

図-11 海浜岸沖断面における粒度分布

では、標定のために写し込んだ1m間隔のマーカース間のピクセル数を用いた。図-11に示したように、マーカース間のピクセル数から逆算した地形標高は、RTK-GPSによ

図-12 沼川第二放水路付近の SfM 法による三次元推定地形の標高 1~6m コンター図

図-13 沼川第二放水路付近の二次元粒径マッピング

る実測標高とおおよそ合致していることから、スケールを換算する標定点を適切に配置することで、UAVのみによる調査でも、地形変化を踏まえた粒径調査が可能であることが示唆されていると言える。また図-11によると、撮影を行った地点では岸沖方向およそ80mの間に10~50mmも粒径が変化していることがわかる。また、粒径はバーム上で40~50mm程度と最も大きくなり、内陸へ進むと30~40mmで安定するが、勾配が急になる点からは内陸へ進むにつれて粒径が比較的急激に小さくなっていることが読み取れる。このように富士海岸の底質粒径は岸沖方向に大きく変化しており、例えば汀線からの距離を定めて採取地点を決める従来のサンプリング方法では、粒径の値に変動が生じやすいことも確認された。

(3) 二次元粒径マッピング

2017年4月の調査において沼川第二放水路付近で高度10mで撮影した底質の連続画像に本手法を適用し、粒径の平面分布を算出した。実スケール換算は、UAVの地表からの高度との線形関係から求めた。ただし、UAVの地表からの高度は、離陸地点からの高度10m、離陸地

点の標高、撮影地点の標高から求めることとした。離陸地点の標高は、近傍マーカーの位置情報を用いた。撮影地点の標高は、多視点静止画像から3次元形状を復元するSfM (Structure from Motion)法により作成した三次元地形データと撮影地点を対応づけて求めた。SfM法には高度30mで撮影した画像群とマーカーのGPS情報を用いた。作成した三次元地形の標高1~6mのコンター図を図-12に示す。また、求めた粒径を撮影画像の緯度・経度情報を基に1mメッシュで二次元座標にマッピングしたものと二枚の原撮影画像を図-13に示す。原画像とマッピング画像を比較すると、砂礫の大小やその境界が正確にマッピングされていることがわかる。また、図-12から岸沖方向およそ50mに対し標高が6m上がっていることが読み取れる。このようにならかなり勾配の大きい砂礫浜であっても本手法は適用可能である。また、図-13からは、全長およそ16kmもある富士海岸全体と比して局所的と言える500m程度の対象範囲においても、沿岸方向・岸沖方向共に底質粒径が大きく変化していることが確認でき、放水路周辺の地形モニタリングにおいて、二次元マッピングが有用であることを示唆していると言える。

(4) 誤差の評価

本研究で構築した粒径マッピング手法は、広域の粒径情報を低コストで取得できる優れた手法であるが、精度を確保するためには留意すべき点も多い。まず、波によって打ち上げられた流木やごみの影響が挙げられる。これらが写り込んだ撮影画像は、粒径を過大評価する傾向にあることが見受けられた。

次に、画像内の明暗コントラストの影響が挙げられる。明度変化の影響を見るために7枚のサンプル画像に対して画像全体の明度を-100%, -50%, $\pm 0\%$, +50%, +100%の5段階に変化させて推定を行ったが、明度の違いによる誤差は2%にも満たないものであった。一方で人間の足跡や車の轍などによって画像内の一部に細かい影が入る場合は、影全体が大きな1つの礫として認識されてしまうことになる。また消波ブロック等による大きな影がある場合は、影部分と明るい部分の境界部でスケールの大きな関数との相関値が大きくなってしまう傾向があり、これも誤差を生む要因となる。

さらに、撮影画像の重複範囲にも注意が必要である。図-13からわかるように、今回の調査では底質粒径を推定できない隙間領域が生まれてしまった。これは、二次元ウェーブレット変換において、境界付近に推定精度の低い領域ができるためである。ウェーブレット変換で失われる分も考慮に入れて、隣接画像間の重複範囲を決定する必要があると言える。また本手法では、UAVの高度を一定とすることが重要であるが、強風時などは高度が不安定となるため、注意が必要である。本論文でも述べたように、実スケール換算を行うための標準スケールを適宜写し込むなどの配慮が重要となる。

5. おわりに

UAVで一定高度から撮影した連続画像に二次元ウェーブレット解析を適用することにより、海岸地形や底質粒径を高精度・高解像度で機動的にマッピングする技術を開発した。また、同手法を砂礫混合海岸である富士海岸に適用し、現地適用性を確認するとともに、礫養浜や各種構造物が海浜過程に及ぼす影響を議論した。構造物

などの影やごみの影響の除去などの課題は残るものの、本研究により高コストであった粒径調査を革新し、漂砂系スケールの広範囲現地調査が可能となった。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科研費挑戦的研究（萌芽）（17K18898）の研究成果の一部である。現地調査では、東京大学学生諸氏に加え、国土交通省沼津河川国道事務所および静岡県との協力を得た。地形推定では、東京大学大学院松葉義直氏およびKevin Bobiles氏の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 岡辺拓巳, 青木伸一, 宇多高明, 芹沢真澄, 加藤 茂: 漁船の操業データを用いた沖合海底地形の変動解析について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp. I_696-I_700, 2010.
- 2) 武若 聡, 後藤 勇, 西村仁嗣: Xバンドレーダを用いた前浜地形の観測, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.546-550, 2003.
- 3) 松葉義直, 佐藤慎司, 波多野景治: 静岡県福田浅羽海岸サンドバイパス吐出口周辺における UAV を用いた地形変化監視手法の適用, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.72, No.2, pp.I_851-I_858, 2016.
- 4) 佐藤慎司: 海岸堆積物の分析に基づく流砂系における土砂移動実態の推定, 2001 年度(第 37 回)水工学に関する夏期研修会, B-3, pp.1-22, 2001.
- 5) 山本晃一: 礫河床のサンプリングと統計的处理, 土木技術資料, 第 13 巻, 第 7 号, pp.40-44, 1971.
- 6) 辻本剛三, 山田文彦, 柿木哲哉: 砂粒子画像を用いた底質粒径の計測法の妥当性に関する研究, 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp.1207-1212, 2008.
- 7) Buscombe, D.: Transferable wavelet method for grain-size distribution from images of sediment surfaces and thin sections, and other natural granular patterns, *Sedimentology*, Vol.60, No.7, pp.1709-1732, 2013.
- 8) Freeman, P. E., Kashyap V., Rosner, R. and Lamb, D. Q.: A wavelet-based algorithm for the spatial analysis of Poisson data, *Astrophysical. J. Suppl. Series*, Vol. 138, pp. 185-218, 2002.
- 9) Brown, D. C.: Decentering distortion of lenses, *Photogrammetric Engineering*, Vol.32, No.3, pp.444-462, 1966.
- 10) 富士海岸侵食対策検討委員会: 富士海岸侵食対策基本計画(案), 建設省沼津工事事務所, 1998.

(2017.3.15 受付)

UAV-BASED SEDIMENT SIZE MAPPING IN SEDIMENT CELL SCALE

Konomi GOTO and Shinji SATO

A high resolution beach sediment mapping technique was developed on the basis of serial pictures taken from a UAV (Unmanned Aerial Vehicle) mobilized alongshore with a walking speed at an altitude of 10 m above ground. Two dimensional wavelet transform was introduced to determine the size of sediments in the range from 10^0 cm to 10^2 cm. The system was applied to the 20 km long Fuji Coast, composed of sand and gravel discharged from the Fuji River. Distributions of sediment size in the foreshore zone were successfully estimated both in the cross-shore and the alongshore directions.