水工学シリーズ 21-B-2

# UAVを用いた海岸情報マッピング技術

高知工科大学 教授 佐藤 愼司

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2021年8月

# UAVを用いた海岸情報マッピング技術

# Coastal Zone Mapping by using UAV

佐藤慎司 Shinji SATO

# 1. はじめに

わが国では河川からの流出土砂が多く,海岸を構成する材料が砂と礫の混合物であることが多い.また特 に河口周辺の砂礫海岸では,河川からの流出土砂の減少や沿岸構造物の建設などの影響を受けて,深刻な海 岸侵食が問題となっているところが多い.砂礫海岸では,地形変化とともに海岸表層の底質が複雑に変動す るため,海浜過程の理解は十分でない.

砂礫海岸の複雑な挙動を把握することは、さまざまな手法で試みられているが(例えば、佐藤ら、2007; 宇多ら、2014; 袰川ら、2012),砂礫が分布する広い範囲の底質構成や波浪・潮汐の履歴に影響されるなど、 底質粒径が均質な海岸の海浜過程に比べて極めて複雑であり、これを理解するためには、一定程度の広い領 域を対象として、高頻度の観測を継続することが必要である.このような広範囲・高頻度の海岸調査は、近 年普及が進んだUAVを用いて比較的容易に実現できるようになってきた(例えば、Matsuba・Sato, 2018; 五 嶋・佐藤、2017; 柴田ら、2019).

ここでは、高知海岸の砂礫海岸を対象としてUAVを用いて著者らが実施した最近の研究に基づいて、海浜 過程を解明するうえで、UAVによる調査が有用であることを示す.高知海岸は図-1に示すように、西側に仁 淀川流砂系、東側に物部川流砂系の砂礫浜で構成される長さ約20kmの海岸である.2019年度には、仁淀川河 口砂州付近で砂礫海浜の変動調査(佐藤ら、2020a)と岸沖方向のトレンチ調査(佐藤ら、2020b)を実施し た.2020年度には物部川河口と種崎海岸のほぼ中間の離岸堤背後の砂礫浜で、カスプのダイナミクスに関す る高頻度調査(佐藤ら、2021a)と沿岸方向のトレンチ調査(佐藤ら、2021b)を実施した.本稿では、海岸 調査におけるUAVの活用に焦点を当てて、それぞれの調査事例を紹介する.



#### 図-1 高知海岸における各種調査地点

# 2. 河口付近海浜の漂砂機構

佐藤ら(2020a)は、仁淀川河口付近の砂礫海岸において、RTK-GNSSを装備したUAV (DJI社Phantom 4 RTK, 以下RTK-UAV) により海浜地形と表面砂礫の変動を記録した.河口導流堤を中心として沿岸方向約300m, 岸沖方向約80mの海浜領域上を二種類の高度(25mと38m)で飛行させたRTK-UAVにより、地形や砂礫粒径の 変動を記録した.これに加えて,汀線に沿って約1kmの区間を海抜高度約30mで飛行させ,海岸線部の地形変 動を推定した.地形DEMの構築は,前後・側方の重複度をそれぞれ80%として二次元写真測量の飛行コース を設定し,自動飛行モードで撮影した数百枚の写真画像から,Agisoft 社の metashape-proを用いてSfM/MVS 法により行った.観測期間は,2019年12月31日から2020年2月5日までで,計20日分の観測データを取得した. 地形推定に加えて,写真をさらに詳細に分析することにより,表面砂礫の粒径分布を分析した.これらから, 海浜地形と波浪・潮汐の関係,侵食・堆積と表面砂礫粒径の関係,カスプの発達・消失過程などを分析した.

#### (a) 撮影高度と解像粒径

まず,RTK-UAVの高度と画像から解像可能な砂礫粒径の関係を明らかにするため、砂(粒径0.3mm程度)から大礫(粒径10cm程度)までさまざまな粒径の砂礫が混在する領域において,UAVの高度を0.7m~100mの範囲で変化させて画像を撮影した.UAVに装備されているカメラでは、地上画素寸法GSD(Ground Sampling Distance, cm)とUAVの高度H(m)には、

#### GSD=*H*/36

(1)

の関係があるため、地上画素寸法を0.2mm~3cmの範囲で変化させて画像を取得したことになる.図-2左上は、高度11.6mから撮影した画像である.直径約10cmの大礫の近くに長さ1mの標尺を置き、この領域が撮影画像の中心になるように各高度の画像を撮影した.

図-2には、撮影高度を変化させた場合の標尺付近の画像領域も示してある. 同図で確認は困難であるが、 標尺の目盛り(1mmごと)は、高度10mでは確認できなくなり、高度100mになると、標尺そのものも確認し づらい. それぞれの画像を拡大しながら確認したところ、解像できる砂礫の粒径は、それぞれ図中に示した 通りであり、地上画素寸法の3倍程度となることが確認された. 砂礫の多くは凸多角形であり、その形状を表 現するには、最低でも3×3ピクセル程度の領域が必要なことからも、適切な目安であると考えられる.



H=11.6m, GSD=3.2mm 解像限界~1cm





H=100m, GSD=2.8cm 解像限界~8cm





図-2 撮影高度と砂礫の解像限界粒径

#### (b) 砂礫海岸の変動特性



図-3 波・潮位・風速・降雨量とカスプのスパン(仁淀川河口付近の観測)

図-3は、観測期間における戸原観測所の波浪特性と高知港における推算天文潮位を示したものである.波浪 特性としては、10分ごとの有義波高、有義波周期、平均波向を示してある.海象特性に加えて、高知気象台 における観測風速と降雨量を合わせて示してある.冬季昼間の観測なので、潮位はやや高めの時間帯での観 測が多くなった.波浪は穏やかな日が多く、海浜地形変化は汀線近傍に限定されることが多かったが、3回の 高波が作用し、地形が大きく変化した.特に、2020年1月28日には、有義波高6.4m、有義波周期12.5sの高波浪 が作用した.当日の高波浪の波向きは南東方向である.河口付近の海岸のため、風は強いことが多く、現地 に赴いても強風のため観測できないことが2、3回あった.図-3の下段に示したカスプの特性については後 述する.

表面砂礫の分布特性は、高度38mで飛行させたRTK-UAVにより取得された画像群を用いて推定した. Metashape proにより、水平面に対する解像度約1cmの高精細オルソ画像(沿岸方向3万×岸沖方向8千画素) を作成した.画像内の明暗の差や粒子の色合いの違いなどの影響を緩和しつつ、粒子として認識できる礫を 抽出するために、ピクセル座標における画像の明度*f*(*x*,*y*)に対して、次式で表される勾配の大きさ*g*(*x*,*y*)を 計算して粒子の輪郭を抽出した.

 $g(x,y) = |\nabla f(x,y)|$  (2)

 勾配の具体的な値は、次式で表されるように原画像に線形フィルタを畳み込ませて計算できる.

  $g(i,j) = \sum_{n=-w}^{w} \sum_{m=-w}^{w} f(i+m,j+n)h(m,n)$ 

B-2-3

ここで, f(i,j)は原画像, g(i,j)は微分値の画像, h(m,n)はフィルタの係数行列であり, ここでは, 次式で表 される3次のSobelフィルタを用いてx, y二方向の勾配を計算し, 勾配ベクトルの大きさから各点の勾配の大き さg(x,y)を算出した.



図-4 撮影画像の例と明度勾配値の画像

図-4は、高度38mのUAVで撮影された原画像(左)と明度の勾配画像(右)を示したものである.この画像の領域では、砂と礫が混在しているうえ、砂面の湿潤度の違いや車の轍が明度の分布に顕れているが、勾配値ではこれらの違いが軽減されるとともに、礫で覆われた部分は勾配値が大きいため白くなり、砂で覆われた部分は勾配値が小さいため黒い領域として表現されている.このように、適切な解像度を持つ画像の勾配値を計算することにより表面の砂礫分布を容易に判定できることがわかった.

# (c) 高波浪のインパクト

2020年1月28日の高波浪では、海岸が広い範囲で侵食され、表面砂礫の粒度分布が変化した.高波浪来襲前の観測は1月26日に実施し、来襲後の観測は1月30日に実施している.図-5は、高波浪来襲前後の地形と地形変化を示したものである.地形変化の差分図では、侵食域を青色、堆積域を赤色で示している.汀線近傍では、波浪による水面変動が撮影されている影響により、標高0m付近の地形は精度が悪い.導流堤を挟んで、西側と東側の岸沖断面図を見ると、全体的に高波による広い範囲での侵食がみられ、特に西側断面が侵食されていることが確認できる.



図-5 高波浪前後の地形変化



図-6 高波浪前後の礫分布

図-7 高波浪前後の明度勾配の分布

これらの地形変化とともに,海浜表面の砂礫粒径も大きく変化した.図-6は,高解像度オルソ画像を拡大し, 表面に礫が分布する範囲を抽出したものである.画像の画素寸法は約1cmであるため,粒径3cm以上の礫の分 布範囲が抽出されていることになる.さらに図-7は,画像の明度勾配を計算し,勾配値の大きさを色合いで 示したものである.暖色系の領域は,粒径3cm以上の礫が多いことを示している.緑色から寒色系の領域は, 礫が検出されなかった領域であり、表面が砂成分で覆われていることが多い.1月26日の分布と1月30日の分 布を比較すると、高波浪の作用により、 表面砂礫の粒径が大きく変化したことが確認できる.

地形変化は標高7m付近まで生じたが、標高約4m以下の領域は概ね侵食され、それより高い領域はわず かに堆積している.標高が比較的高いこれらの領域は高波浪後の調査では砂で覆われていることが多くなっ た.高波浪の来襲中は、砂も礫も移動し海浜地形は侵食されるが、高波浪来襲後の波浪の減衰過程では、巻 き上げられた砂礫が沈降し、表面に堆積層を形成すると考えられる.堆積層の形成過程では、礫より砂の方 がゆっくりと沈降するため、堆積層表面は砂で覆われることになる.このような地形変化と表面砂礫の変化 は、波浪の直接的作用による岸沖漂砂により引き起こされると考えられるため、海浜全体で生起するが、汀 線近傍の地形・底質変化には、沿岸漂砂の影響も明確に確認できる.

1月28日に発生した高波浪は南東方向から入射したので、海岸線が南に面している河口付近では西向きの 沿岸漂砂が卓越したものと推察される.西向き漂砂が卓越したことは、図-5に示した地形変化において、導 流堤東側の汀線が前進し、西側の汀線が後退したことからも確認できる.このような地形変化に加えて、礫 の分布する領域の変化を見ると、沿岸漂砂の上手にあたる東側の汀線付近では、高波浪後には標高約2mまで の堆積域はほぼ礫で覆いつくされている.これに対し下手の西側海浜の汀線付近には、礫が少なく、砂で覆 われた部分が目立っている.このことは、汀線近傍の沿岸漂砂の主成分が礫であることを示しており、天端 の標高が3mである導流堤の捕捉効果により、左右岸で対照的な粒度分布が形成されたものと考えられる.高 波をはさむ数日間に数回の高頻度観測を実施することにより、同時に生起した岸沖漂砂と沿岸漂砂が砂礫の 移動に果たした役割をデータに基づいて分析することができた.

#### (d) 海浜トレンチ調査(岸沖方向)

海浜の形成機構を実証的に解明するためには、過去の高波浪の影響が残されている海浜内部の構造を分析 する必要がある.トレンチ調査については、砂礫海岸の形成過程を理解するうえで極めて有効であることが 認識され、静岡・清水海岸、富士海岸、浜松海岸、宮崎海岸などで実施されてきた(野口、2018; Nomura et al.,2019). 佐藤ら(2020b)は仁淀川河口海岸でトレンチ調査を実施した.海岸線にほぼ垂直な測線に沿って長 さ35m,幅と深さが約2mのトレンチを掘削し、トレンチ面の堆積層を分析した.トレンチ面はほぼ鉛直な掘 削面であるが、その記録にはUAVが活用された.RTK GNSSを搭載したUAVを低空飛行させながらトレンチ 面を撮影し、さらにGNSS通信を維持した状態のUAVをハンディカメラとして用いて掘削面を接写すること で掘削面を面的に記録した.これにより、RTK測位精度の位置情報が付与された画像群が得られ、Agisoft Metashape Proを用いて掘削面の3Dモデルを構築した.構築した3Dモデル上における前述の対空標識地点に三 次元座標を付与し、そのいくつかを検証点として構築した3Dモデルの推定精度を検証したのちに、掘削面の 正射影オルソ画像を出力して掘削面を構成する砂礫の粒径分布とともにそれらの絶対座標を推定した.

トレンチ面はほぼ鉛直な面であるので、UAVにより上空から撮影した画像のみでは高精細な3Dモデルは構築できない. 佐藤ら(2020b)の調査では、空撮写真に加えてUAVを手持ちにして撮影した接写写真も用いることにより、位置誤差1cm程度で高精度かつ高解像度の3Dモデル(解像度は1mm/pixel以下)が構築されている. 図-8の上部は構築された3Dモデルから作成したトレンチ面の高精細オルソ画像の一部を示したものである. 海側に向けて傾斜する砂礫互層の下に陸側に向けて傾斜する逆勾配の地層が確認できる. これらにより、構造物など三次元的な対象物についても、撮影方法を工夫することにより、RTK GNSSを搭載したUAVを用いる優位性が示された.

トレンチ調査地点では、トレンチに沿う岸沖測線で地形が毎年測量されている.測量データを年代を考慮



図-8 仁淀川河口付近における岸沖トレンチ面の部分拡大図

して重ね合わせることにより、トレンチ面の層序線を推定することができる.推定層序線をオルソ画像に重 ね合わせたものを図-8の下部に示した.オルソ画像の縞模様は推定層序線と概ね合致しているが、逆勾配の 層である1996年、1997年、1998年の3本の層序線は、図-8の推定層序線では2018年12月の層によって切断され ているが、実際にはそれより1m以上も下方に位置する赤点線で示された礫層で切断されている.この大規模 な侵食面に相当する推定層序線は深浅測量記録には存在しないことから、その形成時期を詳しく分析するこ ととした.

来襲波浪との関係を検討するため、高知海岸戸原海象観測所の波浪記録を分析した.毎正時の有義波高 H と有義波周期 T の観測値から、来襲する波浪のエネルギーフラックスを示す値としてH<sup>2</sup>T を求め、定期横 断測量の間毎にリセットされる時間積分値の時系列を示したのが図-9である.2017年12月~2018年12月の積 算値は、諏訪ら<sup>8)</sup>が沖合い土砂の大規模な沖向き移動が発生したことを指摘した2004年1月~2005年2月の積 算値に次ぐ大きさとなっている.

2015年以降の年間のH<sup>2</sup>Tの積算値を図-10に示した.勾配が急勾配となっている部分が,暴浪イベントの発生を示している.2018年は年末の積算値も最大であるだけでなく,イベントが数回連続して生じていたこと





図-10 H<sup>2</sup>Tの積算値の年内変化

が分かる.8月21日付近の台風19号によるイベントが最大であり、次に大きいものが、10月1日付近の台風24 号である.9月4日は台風21号によるもので、7月初旬のものは梅雨前線によるものである.トレンチ面に複数 の礫層が存在することと合わせ考えると、2018年8月21日付近の台風19号により大規模な侵食面(図-8の赤点 線)が形成され、それ以後測量時期の2018年12月までに1mを超える急激な堆積が生じたと考えられる.この 期間には、台風21号と台風24号の2回のイベントがあり、これらが堆積層中の礫層の形成に寄与したものと考 えられる.

## 3. 離岸堤背後海浜の漂砂機構

海浜トレンチ調査は、海浜構造の分析を通じて海浜過程の理解に有効であるが、既往の研究は自然海浜 を対象とした岸沖方向トレンチによるものが多く、構造物で防護された海岸の沿岸構造を対象とした調査は 実施されていない. 佐藤ら(2021b)は、海岸防護構造物の建設により安定化した砂礫浜海岸における三次元 的な構造を解明するため、離岸堤背後の沿岸・岸沖両方向のトレンチ調査を実施し、これにより、海浜過程 を分析した. トレンチ調査地は図-11に示すように、高知新港と高知龍馬空港の間に位置する高知海岸南国 工区の離岸堤背後の海浜である. 2020年12月1日、12月2日に38号離岸堤背後の海浜のトレンチ調査を実施し た. 12月1日には離岸堤中央部より東側、12月2日には西側を掘削した. いずれも西端から沿岸方向(E11 度N方向)に掘り始め、進捗時間を見ながら途中で岸沖方向の掘削と結合し、L字形状のトレンチとした. トレンチの深さと幅は約2mであり、沿岸方向長さは、東トレンチが60m、西トレンチが67mである. 岸沖方 向部分の長さは、東トレンチ10m、西トレンチ20mである.



図-11 離岸堤背後海浜における沿岸方向トレンチ調査地点



図-12 離岸堤建設前後の空中写真



# 図-13 UAVによる地形観測(2020年11月30日)

トレンチ調査地が位置する高知海岸南国工区では、1973年に物部川河口付近から西向きに離岸堤群の建設が 始まり、1985年までに工区のほぼ半分の領域に25基の離岸堤が建設された.その後、1986年からは、工区の 西端からも東向きに離岸堤が建設され、1998年に計52基の離岸堤建設が完了している.トレンチ調査地付近 では、1991年に39号、1992年に38号、1995年に37、36号と西から順に離岸堤が建設されており、南国工区の 中では離岸堤の建設年次が遅い領域に位置している.したがって、トレンチ調査では、離岸堤建設後約25年 間の比較的新しい堆積層を観察できることになる.

離岸堤の建設前後1992年4月20日,1997年4月24日の空中写真を用い,離岸堤建設による地形変化の比較を 行った.離岸堤建設前後の様子(図-12)を比較すると,38号離岸堤建設前の1992年4月20日では、トレンチ 調査での掘削地が汀線付近に位置していることがわかる.現地海岸の汀線付近では、T.P.+1m~2mには礫が 集積し、カスプが形成されていることが多いことから、トレンチ調査地点においても、底部には離岸堤建設 当時の礫層やカスプの痕跡が確認できるのではないかと考えられる.次に38号,37号離岸堤建設後の1997年 4月24日に撮影された空中写真では、舌状砂州の発達が確認でき、離岸堤建設後から数年で海浜が回復し始め ていることがわかる.また、2020年11月30日のRTK-UAVによる観測データ(図-13)によると、砂浜の回復 はさらに進むとともに、標高1m~2mの領域に礫が集積し、カスプが形成されていることが確認できる.



図-15 観測期間の海象とカスプの発達の関係







東トレンチ

2018-2005

西卜

地形変化(m)

-0.2

-0.1

0

-1 -0.5

図-14 離岸堤背後の地形変化(2005年~2019年)

#### (a) 海浜地形変化

陸域航空機レーザー測量と海域NMB (Narrow Multi Beam)測量による,2005年から2019年までの計11年分の1mメッシュ地形測量データを用い,地形変化を分析した.2005年のデータを基準として各年のデータの地形差分図を作成し,分析を進めた.図-14は,2006年,2018年,2019年の差分図であり,暖色域が堆積,寒色域が侵食を示している.2006年では1m以上の侵食域がみられるのに対して,2018年では0.5m以上の堆

積域が大部分を占めている.これらより,離岸堤 の建設から約20年経過しても堆積が継続している といえる.しかし,2018年,19年の高波浪により 2019年には侵食域が増加している.ただし,トレ ンチ掘削地まで完全に侵食されているわけではな く,離岸堤背後の海浜防護効果は高いことが確認 できる.

これらに加えて最近の地形変化特性を把握する ため、トレンチ調査実施前の約3か月間に、RTK-UAVによる現地調査を実施した.図-15下段に調査 期間中の戸原観測所による波浪を天文潮位ととも に示す.期間中に来襲した台風は、台風10号と台風 14号の二つであり、主たる波向きは、台風10号は南 南東、台風14号は南東からである.図-16に示した、 それぞれの台風を挟む調査日の地形を比較すると、 離岸堤開口部からの波の進入方向に対応する形で、 侵食域の位置が異なることがわかる.すなわち、離 岸堤の影響により、波向きの違いで地形変化の様子 が異なることが確認できた.





図-162つの台風による地形変化(上図,台風 10号;下図,台風14号)

## (b) 海浜トレンチ調査(沿岸方向)

トレンチ面は堆積層面を清掃したうえで,RTK-UAVにより撮影記録した.画像の重複率が70%程度となる ような密度で撮影し,東トレンチは約2,000枚,西トレンチは約600枚の接写画像を取得した.上空から撮影 した画像を加え,SfM/MVS解析によりトレンチ面のDEM/オルソ画像(解像度約1mm)を作成した.解析に はAgisoft社のmetashape proを用いた.さらに,沿岸方向トレンチの両側面で,試料採取地点を1か所選定し, 鉛直方向の数か所で試料を採取した.

地形変化の大きかった観測データから海浜過程に影響した2020年9月10日,10月4日,10月15日,11月30日 を抜粋し、1mメッシュ地形測量データと合わせ、トレンチ断面の海浜地形経年変化を分析した(図-17). また、最も新しい地形である11/30から順に、古い地形と標高を比較することにより、層序図を作成した.層 序図を詳細にみると、2005年、2006年以後の堆積・侵食状況が確認できるが、西トレンチと東トレンチで層 序が大きく異なることがわかる.先述の波向きによる地形変化に対する影響の違いが、層序にも反映されて いるものと推定される.



図-17 沿岸方向トレンチに沿う断面の海浜地形変化と層序図



図-18 トレンチ面オルソ画像と層序図の重ね合わせ(西トレンチ北面)

図-18は、西トレンチ北面のオルソ画像と、高解像度オルソ画像から読み取った層序線を示したものであ る.両図と合わせ見ると、2005年の地形と標高がほぼ同じ高さに明瞭な砂礫層境界がみられることや、下部 の礫層には複数の褶曲構造がみられることがわかる.2005年・2006年に形成された境界面は、諏訪ら(2010)や 佐藤ら(2020)が指摘したように、2005年、2006年は波浪エネルギーが大きく、大規模な海岸侵食があったこと と対応していると考えられる.また、掘削断面の試料採取を行い、粒径を算出したところ、上部には砂層が 多く、下部には褶曲した礫層が確認できた.両面ともに先述の境界面付近で粒径が急激に変化していること から、下部の礫層を侵食する形で境界面が形成されたものと推定できる.離岸堤建設当時にはトレンチ位置 は汀線付近に位置していたことから、下部にみられた褶曲構造はカスプ地形が離岸堤建設による急激な堆砂 により埋没したものであると推定された.

# 4. カスプのダイナミクス

#### (a) 仁淀川河口付近のカスプ形状

ビーチカスプ(以下,カスプ)は汀線付近にできるリズミカルな砂浜形状であり,その特徴や成因を明ら かにするためこれまで多くの研究が行われてきた.玉井による一連の研究(1974~1977)では,本稿で対象と している高知海岸におけるカスプの形成機構を検討している.本稿で紹介している調査においても,汀線付 近にカスプの発達がみられた.しかし,多くのカスプは観測日ごとにその位置や形状が絶えず変化し,従来 から議論されているような波浪条件に応じた固定化された形状が維持された状態は観察されなかった.カス プのダイナミクスは,UAVによる高頻度・高解像度の観測により初めて解明されたものと思われるため,本 節で詳細に紹介する.

仁淀川河口付近の観測(佐藤ら,2020a)では観測期間中,汀線付近の一部の領域にはカスプ地形の発達が 観察された.先述の図-3の下段には,期間中に観測されたカスプのスパンを示した.1月後半以後の観測で は,導流堤付近に加えて,汀線に沿った観測も実施しているので,カスプの存在は,これらの領域を含めて 判定している.カスプ地形は,導流堤の両側で発達するが,片側のみにしか見られないことも多い.

波向が南西で比較的波高が高かった2020年1月6日から1月9日の期間では導流堤西側の汀線付近に砂礫が 堆積していたのに対し,東側の汀線付近は侵食されていた.この影響のためか9日以降,西側ではカスプが観 測されたのに対し,東側ではしばらく観測されなかった.これに対して,波向が南東の高波浪を観測した1月 26日から1月30日の期間では導流堤西側の汀線付近は侵食され,東側海浜は堆積していた.こちらも30日以 降,侵食された西側海浜ではしばらくカスプは観測されなかった.このことから高波浪時の波向が礫の集 積に関係し,その後の数日間のカスプの発達に影響すると考えられる.カスプのスパンは,約10~20mであり 比較的短期間で発達と消失を繰り返している.カスプが消失する前には,高波浪の来襲や潮位の高い時期が 見られることが多い.

図-19は、1月28日の高波浪作用後に見られたカスプの発達を示したものである.高波浪の作用により、 汀線近傍の地形は平坦化され、カスプも消失したと考えられるが.高波浪作用の二日後の1月30日にはスパ ン約5mの小規模なカスプが発生している.その翌日1月31日の観測ではカスプ地形はスパン約10mにまで成 長している.カスプの成長は、高波浪後の数日間でカスプ頂部への礫の堆積とともに進行することが捉えら れた.





# (b) 離岸堤背後海浜のカスプ

1952年から2019年までの期間に撮影された高知海岸の空中写真を物部川河口砂州,種崎海岸,仁淀川河口 砂州に焦点を当て分析した.1952年~2006年までは国土地理院の空中写真閲覧サービス,2006年以降は高知 河川国道事務所撮影の空中写真を分析対象とした.種崎海岸は岬の裏側に位置し,現在は高知新港の防波堤 の遮蔽域に位置している.汀線部を拡大して詳細に観察した結果,3地点において形成時期に差があるものの カスプの存在を確認できた.すなわち,カスプは人工構造物の有無や海岸特性に関わらず頻繁に形成される ことが確認できた.空中写真の撮影間隔が年単位と大きく,カスプの形成要因を検討することまではできな かったため,観察領域を特定の範囲に絞り,高頻度の調査を実施することとした.

高頻度調査の対象地点を,高知空港と高知港のほぼ中央の南国工区の砂礫海岸(図-1参照)とし,RTK-UAVを用いて,海浜地形の変動を記録した.観測期間は,2020年9月5日から2021年1月27日までで,干潮時 を狙って計27日分の観測を実施した. 同地点では、2020年12月1日と2日に海浜トレンチ調査<sup>90</sup>を実施した ため,本研究ではトレンチ調査実施までの自然状態の海浜を主たる分析対象とした. 沿岸方向約300m,岸 沖方向約100mの海浜領域上を高度約44mでUAVを自動飛行させ,地形DEMを推定した. 画像の重複率は進 行方向,側方ともに80%とし,高度補正のための斜め俯瞰画像を含めて,一回の調査で約330枚の写真を撮 影した. 画像群は,Agisoft社のmetashape proでSfM/MVS分析し,解像度約1cmの高精細DEMやオルソ画像を 作成した.UAVの位置情報はRTK-GNSSで記録され,SfM/MVS分析でも利用されるため,海浜上には標定 点を設置していないが,海岸堤防上の測量基準点と比較したところ,DEMの精度は1cm程度であることを確 認している.図-20は代表的な調査における海浜部のDEMを示したものである.カスプが形成されたのは礫 が集積する汀線近傍の標高1m~2m(図中の白色に近い帯状領域)であり,標高2m以上の領域に有意な地形 変化が生じたのは2回の台風による高波浪時のみであった.



図-20 離岸堤背後の海浜地形とカスプの形成

カスプの層序構造を確認するため、12月2日に重機を 用いてカスプを掘削し、カスプ断面の砂礫を採取した. 図-21はふるい分け試験により測定した試料の中央粒 径d<sub>50</sub>を、断面の様子とともに示したものである.カス プの断面は深層部が比較的細かい粒径の砂礫層になっ ており、表層に近づくにつれ粒径が大きくなる傾向に あった.しかし、粒径の鉛直構造は単調ではなく、砂礫 の粒径が大きい<u>cの層</u>の上部に粒径が小さい<u>dの層</u>が見 られる.これらは、カスプが発達・減衰・再形成を繰り 返していることを示唆していると考えられる.

戸原観測所の10分ごとの波浪観測データから,波の 遡上標高を推定した.先述の図-15は,海象特性とカス プの特性を示したものである.中段の図は,有義波高 (青,左軸),有義波周期(赤,右軸)を示しており,



**図-21** カスプの層序構造

矢印は観測の実施時を表している. 台風10号と台風14号に より、4mを超える高波浪が来襲している. 下段は波向きを 示し、上段の図には、天文潮位 $\bar{\zeta}$ (細線)と波の遡上標高  $\zeta_{max}$ (太線)をカスプ特性とともに示してある. 波の遡上 標高 $\zeta_{max}$ は波浪諸元から、砕波帯内の平均水位上昇と波の 打ち上げを考慮して算定されている. 離岸堤による波の低 減は考慮していないため、推算値は開口部付近の遡上標高 を示すものであり、離岸堤背後領域では、さらに低くなる ものと考えられる. また後述するように、波の遡上標高が 2mを超えるとカスプが減衰し、2m以下の期間が続くとカ



図-22 カスプの発達と地形の最大傾斜位置

スプが発達するため、遡上標高が2mを超える部分を赤線で表示している.

図-15上段の図中の記号は、観測領域内のカスプの個数(青三角)と海浜地形の最大傾斜角(赤丸,いずれ も右軸)を示している.カスプの個数は地形DEMから目視で確認して数えたものである.地形の最大傾斜位 置を地形DEMを用いて表示したところ、図-22に矢印で示したように、カスプ頂部海側面となることが多か った.そこで、観測日毎に地形の最大傾斜角を評価し、カスプ地形の発達を表す指標とした.最大傾斜角は 40度を超える場合も観測されており、これらは、自然に堆積したゆる詰め砂礫の限界勾配に近い状態と考え られる.微地形の中の局所勾配まで推定できる点は、UAVにより解像度1cm以下の高解像度DEMが得られた ことによる.

図-15からカスプは発達と減衰を繰り返したことが確認できるが、9月5日と10月4日にはほぼ完全に消失した。9月5日は台風10号の影響を受けて高波浪初期の観測であり、遡上標高は約6mに達していたと推定されるため、観測時にはカスプが消失していたと考えられる。10月4日のカスプ消失は、9月30日の高波浪の遡上標高が約3mに達していたためと考えられる。また、波の遡上標高が約2mを超えた場合には、消失までは至らないもののカスプが減衰していることが多く観察された。10月4日の直後の10月9日には台風14号の影響で、5mを超える遡上標高が推定されたが、次の観測日である10月15日には多くのカスプが確認されている。台風直後の観測ができなかったので、詳細は確認できないが、台風通過後から10月15日までの波浪は比較的穏やかであったため、この数日間にカスプが再形成されたものと推察される。

#### (c) カスプの分裂と複列化

図-15を見ると、11月中旬から12月にかけて著しいカスプの発達が確認できる.この間には顕著な高波が 無く、波の遡上標高がカスプの形成範囲である1m~2mの範囲となる日が長く続いたためと考えられる.この 期間にカスプの個数が増加した一因は、カスプの分裂と複列化にある.

図-23は、「複列化」が進みつつあるカスプ周辺の遡上波による流れを模式的に描いたものである.標高1m ~2mの領域において、点線で示したカスプ列が形成されている状態で、海に向けて突出したapex部に収束し つつ入射した波は、遡上しながらbay部へ向かう循環流を形成する.その後遡上波が引く際には、bay部で強 い離岸流が形成される.図中に青色の矢印で示した循環流によって砂礫が輸送され、カスプを含む海浜地形 を変形させるものと考えられる.

11月22日から11月28日にかけて、図-24に示したように、スパンが半分に分裂した分裂カスプが観測された.また、12月13日から27日にかけては、図-25に示したように、カスプ列の海側に新たなカスプ列が形成された.新たに形成されるカスプ列のapexとbay位置の位相は、元のカスプ列と逆転している.このように、カスプの発達が数日以上にわたって継続すると、分裂や複列化が生じることが明らかとなった.

カスプの分裂(図-24)と複列化(図-25)は、いず れも図-23に示したカスプ周辺の流れによって生じる と考えられる.すなわち、bay部前面の離岸流によって 砂礫が輸送され、bay部が突出する形で分裂が発生した り、bay部海側に輸送された砂礫が堆積することにより 複列化が生じるものと考えられる.図-15を詳細にみる と、分裂カスプの形成期間(11/22-28)では、最大遡上 標高がほぼ一定であるのに対し、複列カスプの形成期 間(12/13-27)では、最大遡上標高が徐々に低くなって いることが確認できる.すなわち、既存カスプ列とほぼ 同じレベルに循環流が形成される期間が長い場合に は、bay部に新たなツノ状突起が形成されて分裂が進 み、既存カスプ列より低い位置で循環流が形成される 場合には、低いレベルに新たなカスプ列が形成され複 列化が生じることになるものと考えられる.

複列カスプの2列目の海側カスプ列は、潮位が大き く下がった時でないと観察しづらいため、詳細な観測 例は少ない.本研究の調査においても、その存在を確 認できたのは、数回の観測のみであった.図-25の12月 27日に見られた複列カスプ列は、12月31日の観測では 海側の2列目のカスプ列は消滅しており、陸側の1列め のカスプ列も減衰していた.これは12月30日に観測さ れた有義波高1m程度の波浪の影響と考えられる.この ように複列カスプは波が穏やかな期間が長く続き、既 存カスプの前浜に十分な砂礫が堆積したときのみ形 成されるが、わずかな高波で消滅する脆弱で観測困難 な地形形態であると推察される.



図-23 カスプ周辺の遡上波運動



図-24 カスプの分裂



図-25 カスプの複列化

#### 5. おわりに

UAVにより取得された画像を分析することにより、さまざまな海浜過程を解明できることを示した.海浜 過程の理解には現地調査が重要であるが、海岸での調査は一般に高コスト・高リスクであるため、高頻度な 調査を実施することは難しい. 監視カメラやUAVの利用は、調査の労力を大幅に軽減しつつ、従来捉えるこ とができなかった諸現象の定量的な解明を飛躍的に進めつつあり、今後もさまざまな調査研究に適用される ことが期待される.

# 参考文献

- Matsuba, Y. and S. Sato (2018) Nearshore bathymetry estimation using UAV, Coastal Engineering Journal, Vol. 60, No.1, 51-59, DOI: 10.1080/21664250.2018.1436239.
- Nomura, R., Sato, S. and Noguchi, K. (2019): Mechanism of beach deformation elucidated by bathymetry survey and beach trench survey on Miyazaki Coast, Proc. 10th Intl. Conf. on Asian and Pacific Coasts, 353-360, Springer.
- 袰川龍一,高川智博,佐藤愼司,長坂陽介,山中悠資 (2012), RFID を用いた砂礫混合海浜における礫の移動機構の解明, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 68-2, I\_491-I\_495, 2012.
- 宇多高明,石川仁憲,三波俊郎,青葉佳宏,大井戸志朗 (2014):静岡県浜松篠原海岸における粗粒材養浜後の地形変化実態,土木学会論文集 B2 (海岸工学),第70巻, pp.691-695.
- 五嶋このみ・佐藤愼司 (2017): UAV による漂砂系スケールの海岸底質粒径マッピング,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 73, No. 2, I\_1639-I\_1644.
- 佐藤慎司・長崎由伽子・小塚海奈里 (2020a): RTK-UAV による砂礫海岸変動特性の解明, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 76, No. 2.
- 佐藤愼司・野口賢二・山中悠資・与那嶺瑞樹 (2020b):海浜トレンチ調査による砂礫海岸形成機構の解明,土木学会論文 集 B2(海岸工学), Vol. 76, No. 2.
- 佐藤愼司・長崎由伽子 (2021a): 高頻度高精細観測に基づくカスプ地形の動的変形過程の解明, 土木学会論文集 B2(海岸 工学), Vol. 77, No. 2.
- 佐藤愼司・小塚海奈里 (2021b):トレンチ調査による離岸堤背後海浜の三次元構造の解明,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 77, No. 2.
- 佐藤愼司,大畑俊和,田島芳満 (2007): 礫の挙動に着目した天竜川河口付近の土砂移動機構の解明,海岸工学論文集,第 54 巻, pp.606-610.
- 柴田 涼太郎, 佐藤 愼司, 山中 悠資 (2019), UAV を用いた海岸情報マッピングに関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 2019, 75 巻, 2 号, p. I\_1261-I\_1266.
- 諏訪義雄・山田浩次・宇多高明・宮原志帆・芹沢真澄・石川仁憲 (2010):高波浪に伴う沖の細砂堆積域での地形変化と 掘削による汀線後退の機構,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 66, No.1, 2010, 606-610.
- 玉井佐一 (1974): カスプの形成に関する研究, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 115-120.
- 玉井佐一 (1975): 海浜カスプの形成機構に関する研究, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 135-139.
- 玉井佐一 (1976): 現地海岸におけるカスプの特性, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 254-259.
- 玉井佐一 (1977): カスプ形成による海浜変形特性, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 157-161.
- 野口賢二, 諏訪義雄 (2014):静岡・清水海岸でトレンチ掘削調査により得られた砂と礫の堆積構造,土木学会論文集 B2 (海岸工学),第70巻, pp. 681-685. (2014)
- 野口賢二 (2018):トレンチ調査と推理実験に基づく砂礫混合海浜の形成過程の解明と効率的な養浜手法に関する研究, 東京大学博士論文.