

# UAVとMASWを活用した効率的な干潟堆積土砂調査

## An Effective Investigation of Tidal Flat Sedimentation by Means of UAV and MASW

渡部要一<sup>1</sup>・佐々真志<sup>2</sup>

Yoichi WATABE and Shinji SASSA

This study aims to develop a new technology in order to evaluate temporospatial geomorphology and outline of the sedimentation stratigraphy in a small intertidal flat. A small unmanned aerial vehicle (UAV) with a compact digital camera was applied to take aerial photographs in the intertidal flat. Because the water surface of the intertidal flat is tranquil, the waterline (water's edge) evaluated by aerial photograph taken from the UAV corresponds to a very precise contour of the intertidal flat. In addition, a geophysical exploration named as the multi-channel analysis of surface waves (MASW) was applied to investigate the sedimentation stratigraphy of the flat. The shear wave velocity structure obtained by MASW, corresponding to the stiffness distribution of the sediments, was consistent with the soil slices sampled by handy geo-slicer.

### 1. はじめに

干潟堆積土砂の地盤高と微地形の分布、土砂の厚さや硬軟の分布（堆積状況）、底生生物の分布は密接に関連していると考えられる。しかし、測量で地盤高を評価しても微地形まで捉えることは難しく、加えて堆積状況の把握には高価なサウンディングやボーリングなどの本格的な地盤調査が必要であり、調査対象領域が広いために膨大な費用と時間を必要とする。また、表層の底生生物分布の調査においても、信頼性の高い結果を得るためには、時間と費用が掛かってしまう。

本研究では、最新技術である小型の無人飛行機（UAV：Unmanned Aerial Vehicle）による高精度デジタル写真と、地球物理的探査手法の一つでParkら（1999）やHayashi・Suzuki（2004）により開発された多チャンネル型表面波探査（MASW：Multi-channel Analysis of Surface Waves）とにより、干潟堆積土砂の概略を効率的に、かつ、精度良く捉えることを目的とする。

ここでは、岸沖方向に200 m程度の小規模でポケットビーチ的な干潟を主な研究対象として想定している。これは近年各地で試みられている人工干潟の規模に相当するが、人工干潟では造成直後に干潟地盤の変化（圧密沈下や波・流れによる土砂移動）が著しく、モニタリングが必要とされている。このため、堆積土砂の地層構成や干潟表面の微地形に関して、それらの時空間分布を把握することは、施工管理や維持管理の上で極めて重要となる。さらには、堆積土砂の物理環境の変化（佐々・渡部、2005；Sassa・Watabe, 2007）のみならず、底生生物の活

動（佐々・渡部、2006）も、土砂の保水性と干出時の地下水位に対応した土中水分張力（サクション）と関連づけた説明がなされており、その意義はますます高まってきている。

### 2. 調査対象干潟

小型UAVにより全体像を把握できる程度の小規模な干潟として、神奈川県三浦市にある江奈湾干潟を調査対象として選定した。同干潟は、元々は砂質干潟であったが、近年は上流部から畑の土砂が流入して堆積し、表面の泥土化が進んでいる。

### 3. 小型UAVによる干潟微地形の調査

#### (1) 調査概要

小型UAVによる調査は2006年11月1日に実施した。周辺の天文潮位によれば、若潮で、干潮が7:01で潮位CDL+0.51m、満潮が14:01で潮位CDL+1.37mであった。

使用した小型UAVは全長1.2m、全幅1.7m、重量約2kg、巡航速度60km/sであり、電動推進のため騒音・排ガスがない。GPS受信機、姿勢を把握するためのセンサー（加速度計とジャイロ）、圧力計、飛行制御用電子回路と小

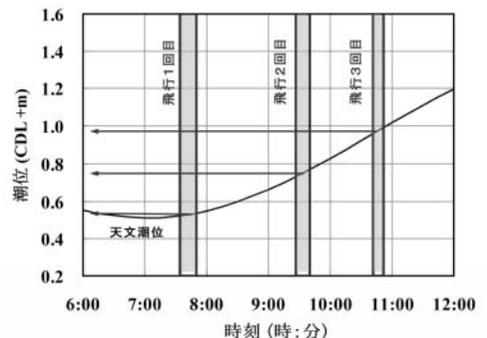


図-1 潮位変動と小型UAVの飛行時刻との関係

1 正会員 博(工) (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部土質研究チーム リーダー  
2 正会員 博(工) (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部土質研究チーム 主任研究官

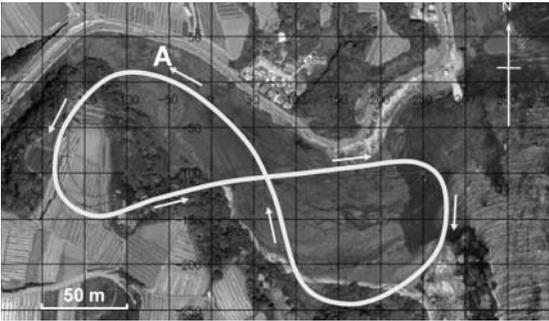


図-2 小型UAVの代表的飛行経路



図-3 小型UAVの離陸作業

型デジタルカメラが搭載されている。同機は、設定した複数の目標点を設定高度で周回する自律飛行が可能である(鈴木ら, 2007; 辰巳ら, 2005)。

満ち潮に伴って、潮位がCDL+約0.55m, 約0.75m, 約0.95mと約0.2mずつ上昇した3時点(それぞれ時刻7:34~7:50, 9:27~9:40, 10:42~10:52)において小型UAVを飛行させた。1回あたりの飛行時間は10~16分である。潮位と飛行時間の関係を図-1に示す。飛行中は、搭載した小型デジタルカメラによって2~4秒ごとにカラー写真を撮影・記録した。使用したカメラは解像度600万画素程度の市販品である。

代表的な飛行経路を図-2に示す。また、図-3はA地点での離陸作業の状況である。滑走路は必要とせず、動力装置を作動させた状態で風上に向かって投げ上げて離陸させた後、直ちに自律飛行に移行する。飛行高度は80mに設定した。なお、目標点変更や高度変更等の信号を地上基地から小型UAVに向けて送信することにより、飛行経路の変更ができる。飛行1回目においては、高度約80mで飛行した後、途中から高度約120mまで上昇させた。

## (2) 調査結果

撮影時の位置・高度情報をもとに画像を回転したり台形補正を施したりして複数の写真を合成すると干潟の平面画像が得られる。飛行1回目の高度120mでの撮影画像群と、飛行2回目・3回目の高度80mでの撮影画像群を用いて、干潟域の合成画像を作成した。飛行1回目で高度

120mの画像を優先したのは、高度80mでの撮影画像群よりも高度120mでの撮影画像群の方が広範囲を撮影して干潟全体の状況を捉えており、飛行2回目・3回目の撮影画像群と比較しやすいことに基づいた判断である。なお、高度80mと120mでは、撮影範囲こそ異なるものの、前者では1画素が約50mmに相当し、後者でも1画素が約70mmに相当することから、撮影画像の分解能に著しい差はない。

飛行1回目で高度120mで撮影した画像6枚を合成して得られた平面画像を図-4に示す。簡便な合成を施しただけであり、オルソ補正などの高度な処理は施していない。同図には、次に述べるMASWの測線や小型ジオスライサーによるサンプリング地点も示してある。

一般に干潟域の水際近傍の水面は波浪の影響がきわめて小さく穏やかであることが特徴である。本研究で対象としているような内湾の小規模干潟の場合、沖と干潟域との潮位に時間差はほとんどない。特に、地下水のしみ出しがほとんどない満ち潮過程においては、水際線の標高は潮位とほぼ一致する。このことに着目すると、平面画像から読み取った水際線は等高線に相当すると理解できる。

調査時の実際の干潟状況でも、満ち潮にともなって時間とともに水際線は沖側から岸側に徐々に移動していたが、湾外は波が荒かったものの、湾奥に位置する干潟域の水面は穏やかで波はなく、水際線が等高線となることを現地の状況として確認した。図中の午前7:41(飛行1回目)の水際線の場合、潮位CDL+約0.55mの標高に相当する。

図中には午前9:33(飛行2回目)と午前10:44(飛行3回目)の水際線も示してある。各時点での水際線はそれぞれ潮位CDL+約0.75mとCDL+約0.95mに相当し、満ち潮により0.2mずつ標高が高くなる。午前7:41と午前9:33の水際線間隔(約30m)の方が、午前9:33と午前10:44の水際線間隔(約70m)より狭いことがわかる。一見、平坦に見える干潟も緩やかな傾斜を有しており、その勾配は、沖の方がやや急であることが読み取れる。

上述のように、干潟は波浪の影響が極めて小さく、特に水際近傍では穏やかな水面を有することから、小型UAVを使った航空写真撮影で水際線の変化を捉えることにより、きわめて平坦な干潟地盤の地形情報を効率的かつ精密に把握できることがわかった。自然干潟のみならず、人工干潟の場合には、地盤高の管理にも有用な手法であると思われる。特に、自律飛行が可能であることから、予め設定した経路を何度も飛行することができるため、干潟微地形の経時変化を捉えることにも活用できるといえる。

小型UAVで撮影された高画質画像は、干潟表面微地形

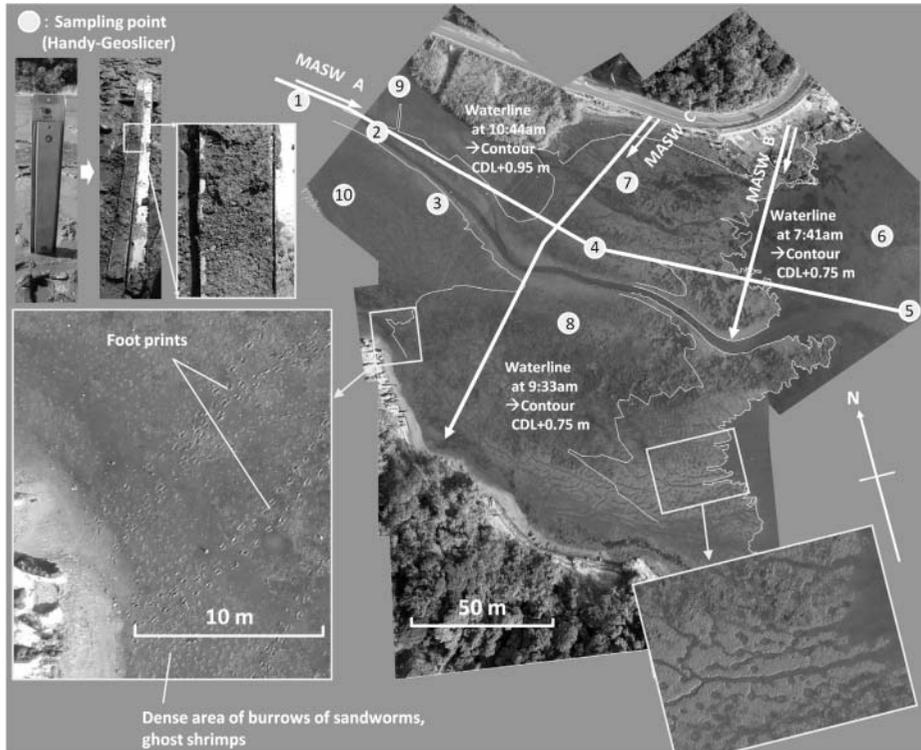


図-4 小型UAVから撮影した干潟表面画像（合成）とMASWの測線および小型ジオスライサー調査位置

もの確に捉えており、右下の拡大画像に示したように、底生生物の巣穴をきっかけとしていくつもの水みちができてきている様子を読み取れる。

左下の拡大図（拡大写真は高度80mで撮影したもの）を見ると、海岸線付近のやや乾燥した砂浜の領域や干潟面に表面水が存在する領域に比べ、水分保持した状態で干出している領域にはゴカイやスナモグリなどの底生生物の巣穴が高密度に見られる。画像に写っている人の足跡は長さ270mmほどのものであり、それよりもかなり小さい底生生物の巣穴まで識別できるような高分解能で撮影できていることがわかる。また、近年の目覚ましいデジタル技術の発展からすると、市販のコンパクトデジタルカメラの解像度は急速に向上しており、本手法により得られる画像の分解能は今後も向上していくものと期待できる。

巣穴底生生物の住活動と土砂物理環境とは密接に関連していることが解明されており（佐々・渡部，2006），小型UAVを利用して撮影された高画質画像は、地盤の保水状況と底生生物の棲息密度といった視点から、干潟微地形と巣穴底生生物とを関連づけることにもきわめて有用であると思われる。さらに、小型UAVで撮影された個々の画像を精度良く効率的に合成する手法の開発も進められており（原口ら，2006），近い将来、小型UAVにより撮影されるデジタル航空写真が、更に身近なツール

になるものと期待される。

#### 4. MASWによる干潟土砂堆積状況の調査

##### (1) 調査概要

MASWによる探査は、図-4に示したように、中央を流れる滞筋に沿った岸沖方向の測線Aと、これを横断する沿岸方向の測線BとCを設定して実施した。なお、沖側の測線Bは、滞筋の北側だけの測線である。

ジオフォンと呼ばれる高感度の速度型地震計（上下動）24個を1m間隔に取り付けたランドストリーマー（稲崎，1998）を測線に沿って牽引し、2m移動する毎に端部のジオフォンから約0.5m前方の地盤表面をカケヤで鉛直に叩いてレーリー波と呼ばれる表面波を発生させ、長さ23mの区間を通過する波形をジオフォンで計測し、コンピュータに記録した。なお、前方を叩くか後方を叩くかは作業上の都合であり、調査結果には影響しない。図-5はMASWを実施した際の調査状況である。

計測された波形のパターンからフーリエ解析により周波数と位相速度の関係（分散曲線）を求め、逆解析によりせん断波速度分布を推定する方法は、多様な干潟地盤に対して同手法を適用した渡部・佐々（2006）やWatabe・Sassa（2008）に詳しく述べられている。

せん断波速度構造は、MASWによる計測結果を逆解析して推定した硬軟分布である。これが、実際の土層構成



図-5 MASWによる探査の実施状況

どのように対比されるかを調べるために、図-4に示した10地点において、小型ジオスライサー（高田ら、2002）による層序の確認調査を実施した。同装置は中田・島崎（1997）によって考案された地層スライス採取装置の小型改良版で、地盤中に矢板状の2枚のステンレス製プレートを順に嵌合して挿入し、地盤のスライスを切り出すサンプラーである（図-4左上写真を参照）。

(2) 調査結果

各測線で得られたせん断波速度構造の断面図を図-6に示す。硬さや軟らかさの指標であるせん断剛性 $G_0$ は、単位体積重量 $\rho_t$ とせん断波速度 $v_s$ を用いて $G_0 = \rho_t \times v_s^2$ と表されるので、ここで示すせん断波速度構造は本質的に地盤の硬軟の分布を表している。

測線Aのせん断波速度構造を見ると、上流側では表層のせん断波速度として50~80m/sが得られ非常に軟らか

いが、下流側では表層で80~100m/sが得られやや硬い。畑からの流入土砂が堆積することによって、表層は上流側ほど泥質土となっていることと整合した結果が得られている。表層の軟弱層が厚い場合、減衰が著しいために深部まで振動が伝播せず、深部の情報が得られないことが懸念されたが、江奈湾の干潟では、表層の軟弱層は1m程度と薄く、下部は砂層が厚く堆積していることから、計測結果を外挿することなく深度16m程度までのせん断波速度分布を得ることができた。

横断方向の測線B, Cによると、干潟中央部の測線Aの南側で、現在の滞筋よりもやや南側のエリアで深部まで軟らかいことがわかる。このことは、堆積土砂形成史の中で主たる滞筋は常にこの付近に位置し、緩詰め状態で土砂が堆積したことが推察される。滞筋周辺の地盤は、常に水没しているか、あるいは干出時間がきわめて短いことが特徴である。このため、凸地形（砂州など）が干出を繰り返すことによって、サクシオンに起因する圧縮が蓄積していく現象（渡部・佐々, 2006; Watabe・Sassa, 2008）がなかったために軟らかい状態が保たれているとして説明できる。また、滞筋沿いには、流入する泥質土が堆積しやすいことなども軟らかさの原因の一つである。

南北の海岸線近傍では密な砂質土が堆積し、北側端部では岩盤が落ち込んでいる様子も捉えられている。しかしながら、端部を除くと、小さな干潟全域にわたって、せん断波速度が300m/s以上となるような基盤層は確認されなかった。当該干潟の土砂は、深い谷地形の中に堆積していることがわかる。

小型ジオスライサーで採取した試料写真一覧を図-7に示す。上流側に位置するNo.1, 2, 3, 9, 10の地点では、表層から厚さ0.1m強の範囲は畑からの流入土砂が泥土状に

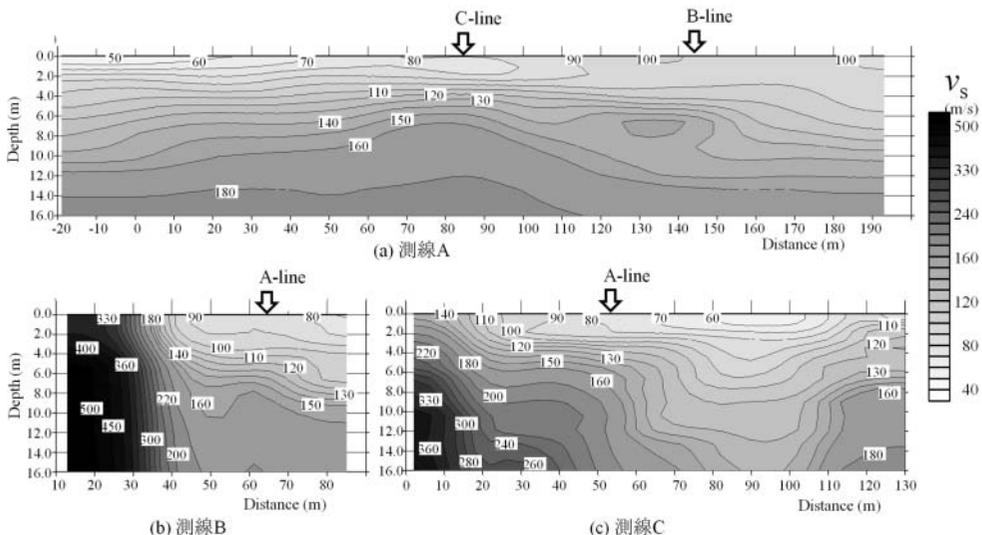


図-6 各測線に沿ってMASWで評価したせん断波速度構造

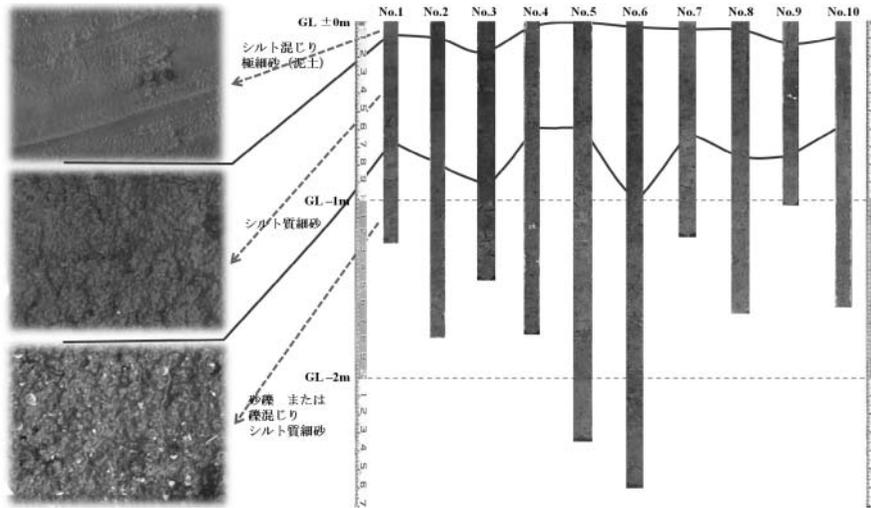


図-7 小型ジオスライサーによる層序確認

堆積している。また、その下には0.6～1.0mの深度までシルト質な軟弱層があり、さらには下には礫分や貝殻を多く含む層が厚く堆積している。上流側で泥土やシルトなどの軟弱層が厚くなっていることは、MASWにより推定された測線Aのせん断波速度構造において表層が著しく軟弱であったことと整合する結果である。

## 5. まとめ

干潟表面の情報を得るために小型UAVを使った航空写真撮影を行った。潮が満ちる過程において時刻ごとの水際線の変化を捉えることにより、きわめて平坦な干潟地盤の微地形を効率的かつ精密に把握できた。また、高解像度画像を得ることにより底生生物の巣穴の分布等を捉えることができた。干潟土砂の地層構成など堆積状況を効率的かつ高精度に得るために地球物理的手法であるMASWによる表面波探査を行い、せん断波速度構造として地盤の硬軟分布の断面図を得た。その結果は小型ジオスライサーで試料採取し、目視により確認した地層層序と整合するものであった。

**謝辞**：本研究は科学研究費補助金（基盤研究(B)課題番号18360232）を受けた。また、調査実施に当たっては、小型UAVは三菱電機（株）、MASWは応用地質（株）、小型ジオスライサーは復建調査設計（株）より御協力いただいた。ここに記し、関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 稲崎富士（1998）：「ランドストリーマー」を用いた都市域での高分解能S波反射法探査，物理探査学会第98回学術講演会論文集，pp. 114-117.
- 佐々真志・渡部要一（2005）：砂質干潟の土砂環境場におけるサクシオン動態とその果たす役割，海岸工学論文集，第52巻，pp. 981-985.
- 佐々真志・渡部要一（2006）：干潟底生生物の住活動における臨界現象と適合土砂環境場の解明，海岸工学論文集，第53巻，pp. 1061-1065.
- 鈴木太郎・目黒淳一・瀧口純一・佐藤幸一・畑山満則・天野嘉春・橋詰 匠（2007）：小型自律飛行機を用いた高精度三次元計測，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2007, 2A2-B05.
- 高田圭太・中田 高・宮城豊彦・原口 強・西谷義数（2002）：沖積層調査のための小型ジオスライサー(Handy Geoslicer)の開発，地質ニュース，579号，pp. 12-18.
- 辰巳 薫・廣川 類・寛松洋平・鈴木真二・土屋武司・久保大輔（2005）：小型自律飛行ロボットシステムの開発と飛行試験，日本航空宇宙学会誌，Vol.54-625，pp. 41-45.
- 中田 高・島崎郁彦（1997）：活断層研究のための地層抜き取り装置（Geo-slicer），地学雑誌，106号，pp.59-69.
- 原口一希・目黒淳一・瀧口純一・佐藤幸一・畑山満則・天野嘉春・橋詰 匠（2006）：小型自律飛行機と時空間GISを用いた高解像度モザイク画像，計測自動制御学会第7回システムインテグレーション部門講演会（SI2006）講演論文集，pp. 896-897.
- 渡部要一・佐々真志（2006）：干潟堆積構造の地球物理学的評価と形成要因－砂質・泥質・砂泥二層干潟－，海岸工学論文集，第53巻，pp. 1236-1240.
- Hayashi, K. and Suzuki, H. (2004) : CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data, *Explor. Geophys.* Vol. 35, pp. 7-13.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J. (1999) : Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, Vol. 64, No. 3, pp. 800-808.
- Sassa, S. and Watabe, Y. (2007) : Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model, *Journal of Geophysical Research*, 112, F01003, doi:10.1029/2006JF000575, 2007.
- Watabe, Y. and Sassa, S. (2008) : Application of MASW technology to identification of tidal flat stratigraphy and its geo-environmental interpretation, *Marine Geology*, Vol. 252, pp. 79-88.