

## トンボロ干潟の形成・維持過程とその保全に関する基礎的研究

研究代表者 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 教授 加藤 茂

### 1. はじめに

干潟の優れた環境機能が認識され、その存在の重要性は益々高まってきている。しかし、これまでの干潟に関する研究は生物・水質関連のものが主であり、干潟地形の変化やその干潟の構成要素である土砂の特性に着目した調査・研究は少ない。したがって、豊かな環境を形成するための基盤である地形および土砂質の観点から、現存する貴重な干潟を管理・保全するための方法論は、まだ十分に検討されていない。

本研究で対象とする干潟は、三河湾内の北部に浮かぶ前島の背後に形成された干潟である（図1）。前島と陸側の砂浜を繋ぐ陸地（砂洲）が満潮時にはすべて水没してしまうため（写真1）、本来では「トンボロ」ではないが、地元では「前島トンボロ干潟」と呼ばれて

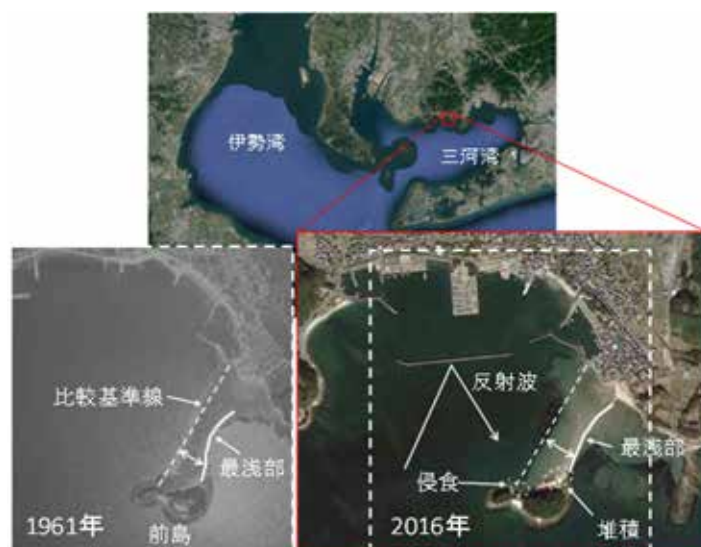


図1 前島トンボロ干潟の位置と航空写真による干潟地形変化の調査例



写真1 前島トンボロ干潟における水面変化の様子／(a) 干出時，(b) 水没時

おり、毎年、多くの人が潮干狩りを楽しむことのできる豊かな干潟環境を有した貴重な領域である。しかし、近年、貝毒の発生などに見られるような干潟の生物環境の変化が懸念されている。また、干出範囲の水深の低下（浅水化）により、干出時間の長い範囲が拡大しつつあり、あさり等の底生生物生育に適した範囲の減少も生じている。更には、干潟最浅部（干出時間が最も長い範囲）の東への移動や干潟上の土砂細粒化、それに起因すると思われる発現生物種の変化も、当該干潟を管理する東幡豆漁業協同組合によって確認されており（組合員からの聞き取り調査）、干潟環境の変化（悪化）が懸念されている。しかし、これらの生物的・物理的変化の把握・評価は行われておらず、貴重な自然干潟として維持・保全の手法は確立されていない。したがって、今後への対応は未着手の状況である。加えて、前島トンボロ干潟では、これまでに干潟の形成過程やその機構、維持・保全に向けた詳細な調査は行われておらず、貴重な干潟環境を後世に残すためにも、早急な現状調査・分析が必要である。

そこで本研究では、UAV および RTK-GNSS を用いた干潟の地形計測および地形変化の把握・分析、干潟表層土砂の粒度分析と表層約 1m の粒度分布構造調査による土砂環境の把握を行った。これらの結果を総合し、今後の干潟維持・保全のための管理方針について検討を行った。

## 2. 干潟の調査方法の概要

### 2. 1 地形調査方法

地形調査は、トンボロ干潟が出現する干潮の時間帯に実施した。調査では、UAV による空撮・平面地形計測と併せて、仮想基準点方式（VRS 方式）のネットワーク型 RTK-GNSS 測量による断面地形測量、DEM（Digital Elevation Model：数値標高モデル）の作成に必要な調査対象領域内に配置した GCP（Ground Control Point：地上基準点）の 3次元位置情報の取得を行った。ネットワーク型 RTK-GNSS 測量（VRS 方式）は、調査対象地の周辺に VRS（Virtual Reference Station：仮想基準点）を設置し、調査地域の周囲の電子基準点網から、観測者の近傍の仮想基準点での観測データを生成して RTK-GNSS 測位を行う測量である。これにより、基準点（基地局）の設置が不要で、RTK-GNSS 受信機 1 台での作業が可能になり、基準点の設置にかかる時間を大幅に削減することが可能である。一方で、基地局を設置する従来の RTK-GNSS 測量よりも精度が若干落ちるため、その点についての留意が必要である（以降、GNSS 測量と表記する）。

UAV による干潟の空撮には DJI 社 Phantom4 Pro を用いた。また、GNSS 測量による断面地形計測、GCP 位置情報取得には TOPCON 社製の HIPer SR（アンテナ）と FC-500（データレコーダ）を用いた。

## 2. 2 GNSS 測量による断面地形測量

2017年夏季(9月5日, 20日)の調査では, 図2のLine1~Line4(白破線)の横断面測量, 2017年冬季以降の調査では, 干潟中心付近に位置するLine3の横断面測量と干潟頂部(東西断面内での最高標高地点)を南北方向に連ねた位置に相当するLine5(黒破線)の縦断面測量を実施した. GNSS測量で取得したデータはいずれも世界測地系による平面直角座標系データであるため, 国土地理院のホームページ(測量計算サイト, <https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/main.html>)を利用して経度緯度データへの変換を行った. 前島トンボロ干潟は, 愛知県に存在しているため平面直角座標系では第7座標系に相当する. また, GNSS測量によって得られた断面地形データは, UAVによる平面地形計測の結果(DEM)と比較し, その計測精度を検証するための精度検証データとしても使用した.

## 2. 3 UAVによる平面地形計測

UAVに空中写真撮影の飛行高度は, 前島の植生(雑木林)を通過することができる高度50mとし, 干潟中心付近の頂部から高度を一定に保ちつつ飛行させた.

UAVによる調査は手動航空と自動航空に分けられる. それぞれ, 手動航空は現場に合わせた臨機応変な航行が可能であること, 自動航空は現場に合わせた設定をすれば何度も同じ航行が可能である特徴を有している. ここで, UAVによる空中写真撮影を行う場合, 臨機応変な航行が可能である手動航空が一般的である. しかし, 手動航空では空撮対象領域における写真重複に偏りが発生する可能性が高いことが指摘されており(EI Meoucheら, 2016), この問題解決には高い操縦技術が要求される. また, 撮影箇所が調査時の現場条件, 操縦者の判断に依存するため, 対象領域内の地形計測結果に精度のばらつきが生じてしまうことが懸念される. そこで本研究では, Phantom4 Proに付属するDJI社のDJI-GS-Proを用い, 自動航空による空中写真撮影を行うこととした.

非常に凹凸(鉛直方向の空間的変化)の小さい計測対象に関しては, 凹凸情報を取得(強調)するために斜め写真をDEM作成に加えることが考えられる. これに対して早坂ら(2015)は, DEM構築の際, 斜め写真を含めると, 斜めに撮影することによって撮影対象範囲が変わることや, 地上画素寸法が写真内(奥行方向)で大きく変化する影響が, 全体の計測精度に影響する, 条件によっては垂直写真のみを用いたDEM構築よりも高さ方向の誤差が大きくなる場合があることを報告している. したがって, 本研究ではUAVの真下を撮影して取得した垂直写真のみを用いることとした.

国土地理院の「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」では, 写真間毎の重複率であるオーバーラップ率(OL率)80%, 隣接する飛行コース間の重複率であるサイドラップ率(SL率)60%を標準とした航行計画を行うことが示されている. 本研究では, 写真測量に不向きであると考えられる干潟を対象としているため, 高精度の地形計測を目指して, OL率90%, SL率65%に設定した.

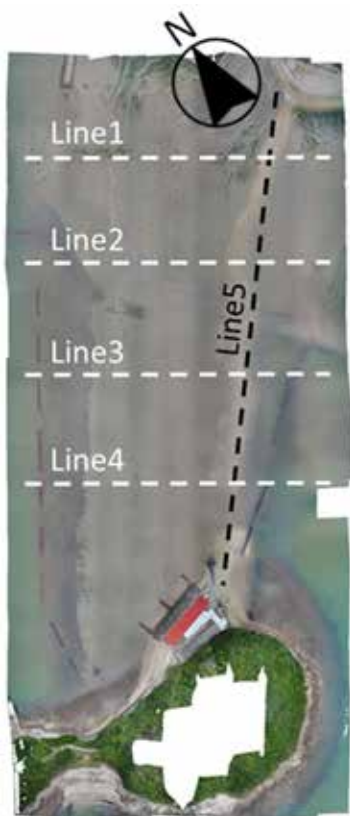


図2 前島トンボロ干潟の  
全景と地形計測の測線



図3 UAVの飛行ルート

(a) 春期～夏期 (9本) (b) 秋期～冬期 (4本)

日中の干潮時に広範囲が干出する春季～夏季の調査では、大潮の干潮時に干出する範囲(約 500m×約 350m)を全て撮影するために約 1300 枚を 9 本の飛行ルート(図 3(a))に分けて空撮を行った。秋季～冬季の調査では、春季～夏季に比べて日中の干潮位が高く、大潮期間においても干出部が狭くなるため(約 500m×約 150m)、飛行ルートを 4 本に減らして(図 3(b))約 500 枚の撮影を行った。空撮画像の解像度は 5472×3648pixel を使用し、UAV に搭載したカメラの視野角が 84°で撮影高度が 50m であることから、1 枚の垂直空撮写真は約 90×60m の範囲を約 1.7cm/pixel の解像度で撮影することが試算される。「UAV を用いた公共測量マニュアル(案)」(国土地理院, 2016 年 3 月)における最も高い精度の基準が誤差 5cm 以内であることから、本研究では精度検証点における UAV による空撮写真から作成した DEM と GNSS 測量成果との標高差±5cm 以内での地形計測を目標とした。

## 2. 4 干潟表層の土砂環境

干潟表層の土砂環境を調査するために、本研究では表層土砂の採取・粒度分析による空間的な土砂質調査と、ハンディ・ジオスライサを用いた表層約 1m の鉛直コアサンプルの取得による土砂の鉛直構造調査を行った。表層砂の採取地点は図 4 に示した 14 地点で

2018年2月～10月の間に4回実施した。採取地点間ごとの距離は東西方向間隔約50m、南北方向間隔約100mである。また、ハンディ・ジオスライサでのコアサンプル採取は図5に示した8地点で行った。本研究では写真2に示す1m打ち込みタイプのジオスライサを使用した。サンプルトレイ、シャッタープレート、打ち込み引き抜き用ハンドルから構成される。

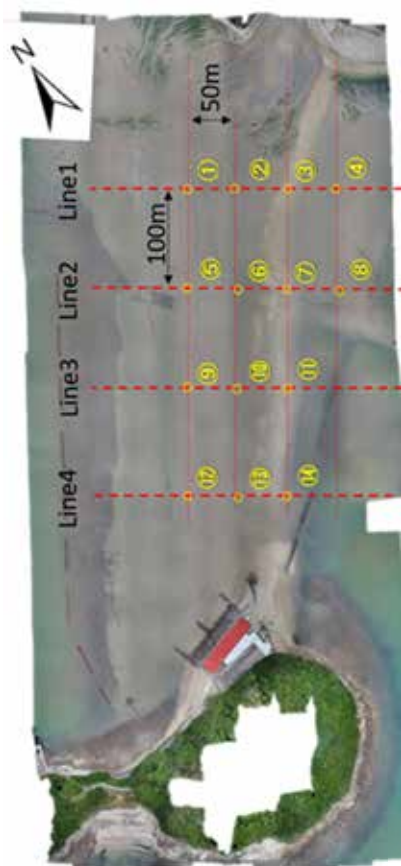


図4 表層砂採取地点



図5 鉛直コア採取地点



写真2 ハンディ・ジオスライサの構成部品

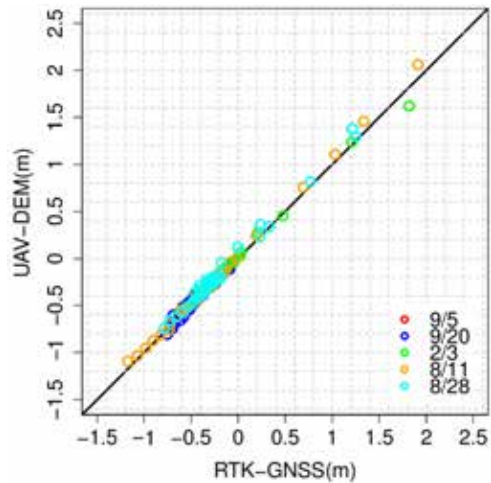
### 3. 干潟の地形変化特性の把握

UAVによって得られた干潟の空撮写真とGNSS測量によって得られたGCP(標定点)の位置情報を用いてSfM(Structure from Motion)処理を行い、DEM(数値標高モデル)を作成した。SfM処理には、Agisoft社のPhotoscan Professionalを用いた。

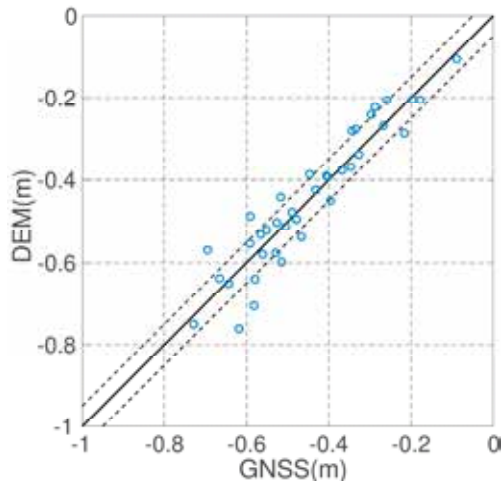
図6はUAVによる空撮写真からSfM処理によって作成した高密度点群データ(不等間隔データ)であり、このデータ群からメッシュデータ(等間隔データ)を構築し、DEMを作成・出力する。作成されたDEMの高さ情報(標高)の精度を確認するために、DEMからGNSS測量で取得した検証点(横断、縦断測量)に相当する地点の標高を抽出し、これらと比較することでDEMの精度検証を行った(図7)。9飛行ルートの場合(図3(a))では、DEMの標高データとGNSS測量による標高データの差の二乗平均平方根誤差



図6 SfM処理により作成された高密度点群データ



(a) 9飛行ルートの場合



(b) 4飛行ルートの場合

図7 DEM (標高データ) の精度検証  
／GNSS測量結果とDEMの比較

(RMSE) は約 3.0cm であり, 4 飛行ルートの場合 (図 3(b)) でも RMSE が約 4.5cm となり, 目標の 5cm 以内を満足する結果が得られた。

図8は, 2017年9月5日と20日のGNSS測量によるLine3上での測量結果を示している。この2回の調査の間 (9月17~18日) に台風18号が本州 (関西地方から北陸地方) を通過した。台風進路の東側となる三河湾でも台風による強風が作用し, 高波浪が発生した。この図より, 台風通過後に西側が堆積, 東側が侵食となる傾向が確認できた。この傾向は, 本研究で実施した2017~2019年の3年間の調査において度々確認され, 台風通過 (高波浪作用) による当該干潟の地形変化の主要な傾向であると考えられる。また, 断面地形の頂部 (最高地点) が僅かに低くなりながら西側に移動していたことも確認できる。

図9は図8と同日にDEMから求めた地形変化の分布を示している。この図より, Line3付

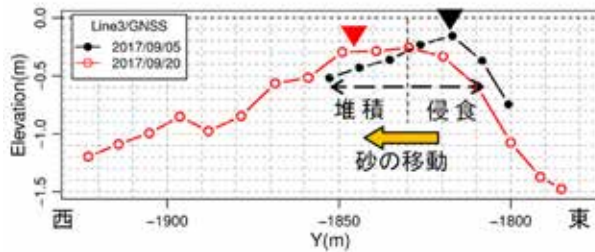


図8 Line3における台風前後（2017年9月5日～20日）の断面形状（GNSS測量結果）の比較／▽は干潟頂部の位置

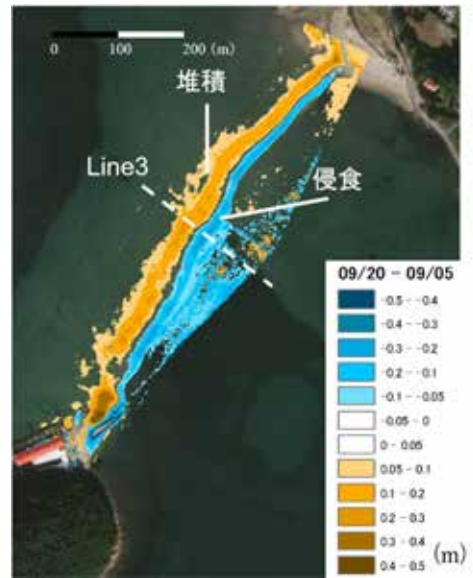


図9 9月5日～20日での地形変化分布

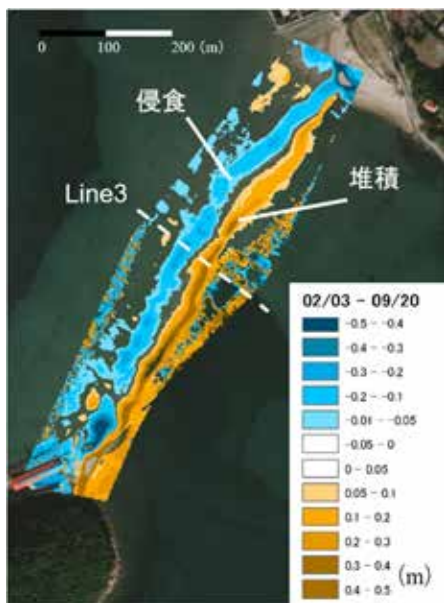


図10 9月20日～2月3日での地形変化分布

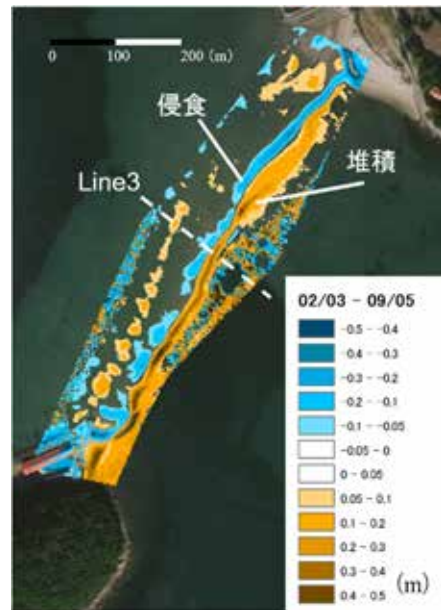


図11 半年間（9月5日～2月3日）での地形変化分布

近において、図8に示したGNSS測量による結果と同様な干潟西側で堆積，東側で侵食となる傾向が確認できる．また，干潟全域において西側で堆積，東側で侵食となる空間的な地形変化の特徴も確認することができ，UAVによる地形調査によって海象条件の変化に伴う干潟地形の変化を干潟全域で適切に把握可能であることが示された．

図10には，9月20日と2月3日のDEMから推定した地形変化の分布を示している．台風通過時には干潟頂部が西側に堆積，東側で侵食の傾向であったが，その後の比較的平穏な波浪条件作用後には西側で侵食，東側で堆積の傾向（台風通過直後とは逆の傾向）が確認で

き、台風で西側に移動した干潟頂部が台風通過後には西から東に移動し、台風前の状態に回復しつつあることが確認できた。

また、図11に示した約半年間（9月5日～2月3日）の地形変化では、台風通過に伴って東側に移動した砂は、約半年前（9月5日）よりも東側に移動していることが確認できた。今回の分析では、約半年という短期間での地形変化であり、この東側への変化が季節もしくは年スケールの変動の一部であるのかは不明である。2018、2019年に取得したDEMの分析では、干潟上の土砂量自体の大きな変化は確認されていないため、上記のような東西方向の土砂の移動を年スケールで繰り返していることが推察された。しかし、現時点では土砂移動経路や土砂移動量の把握ができていないため、今後も干潟の地形モニタリングを続けていくとともに、地形変化を引き起こす土砂移動量の調査が必要であると考えられる。

#### 4. 表層土砂環境の把握

図4に示した14地点で採取した表層砂は、恒温乾燥炉を用いて120度で10時間乾燥した後粒度分析を行った。粒度分析には、目開き75 $\mu$ mの金属製網ふるいに残留した土粒子に対して適用するふるい分析と、目開き75 $\mu$ mのふるいを通過した土粒子に対して適用する沈降分析の二種類がある。今回は分析試料となる表層砂の粒径が75 $\mu$ m以上のものが多いため、電磁式の自動ふるい装置を用いたふるい分析試験により粒度分析を行った。本分析では表層砂は最大粒径2mm以下の試料を対象としたため、1回の分析に200g程度の試料を準備し、JIS A 1204に準拠して、1.18mm, 1mm, 850 $\mu$ m, 710 $\mu$ m, 600 $\mu$ m, 500 $\mu$ m, 425 $\mu$ m, 355 $\mu$ m, 300 $\mu$ m, 250 $\mu$ m, 212 $\mu$ m, 150 $\mu$ m, 106 $\mu$ m, 75 $\mu$ mのふるいを使用した。この分析結果から中央粒径D<sub>50</sub>を求めた。

図12～15に各測線における調査日ごとの中央粒径と標高の関係を示す。各図から、2月3日の中央粒径は、Line4では西から東（図中：左→右）にかけて大きくなっているが、Line3では干潟頂部の中央粒径が最も大きくLine1、Line2では西側が大きくなり、海岸に近づくほど（Line4→Line1）西側の粒径が大きくなっている。しかし、台風の多い夏季（8～9月）ではトンボロ干潟の西側から東側に向かうにつれて、中央粒径が大きくなっている。特に、8月末に台風20号、直前の9月4日に台風21号が本州に上陸し縦断しており（図16）、その直後の調査である9月8日の調査では干潟の東西で中央粒径の変化が顕著であった。これは、台風により東から西にかけて強い沿岸流が干潟上で発生しており、干潟東部ではシルトのような微細な粒子は波によって輸送され堆積せず、粗い砂や礫が残留したものだと考えられる。また、各測線で見ると、干潟中央のLine2、Line3に比べ、干潟端部のLine1、Line4の中央粒径が大きくなっていることから、砕波帯周辺となる干潟両端での強い沿岸流が発生していると推測できる。



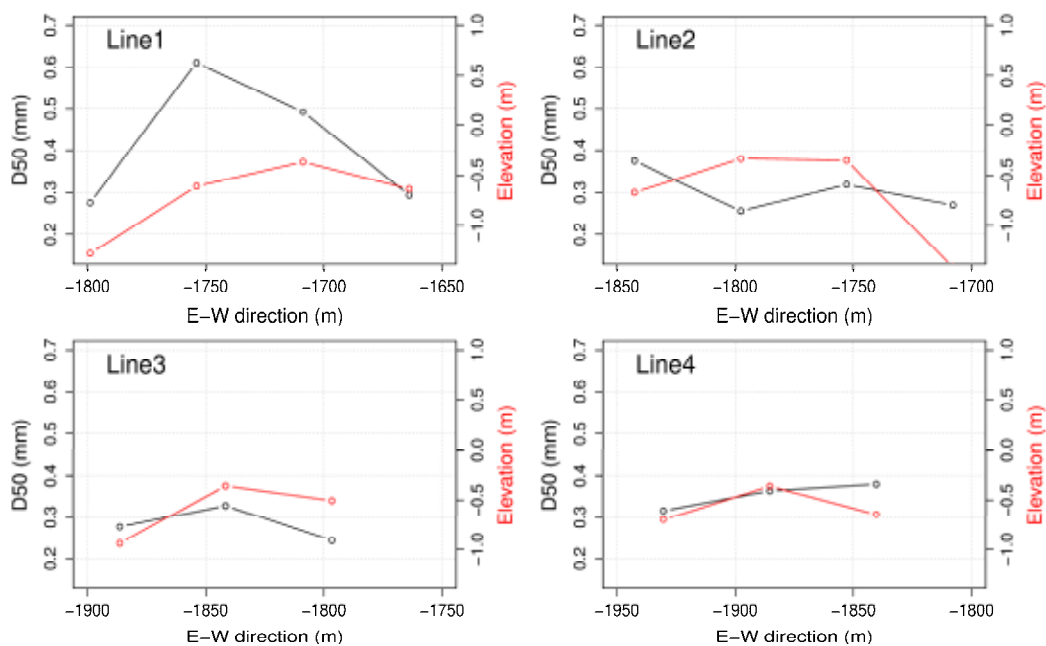


図 12 2018年2月3日の Line1~4 における中央粒径と標高の東西方向分布

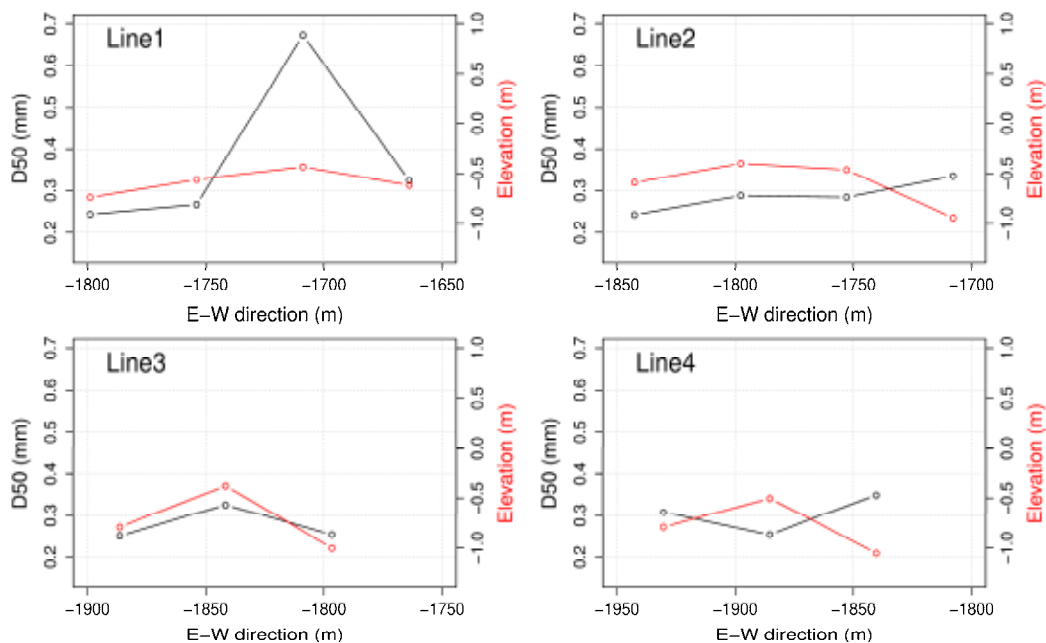


図 13 2018年8月11日の Line1~4 における中央粒径と標高の東西方向分布

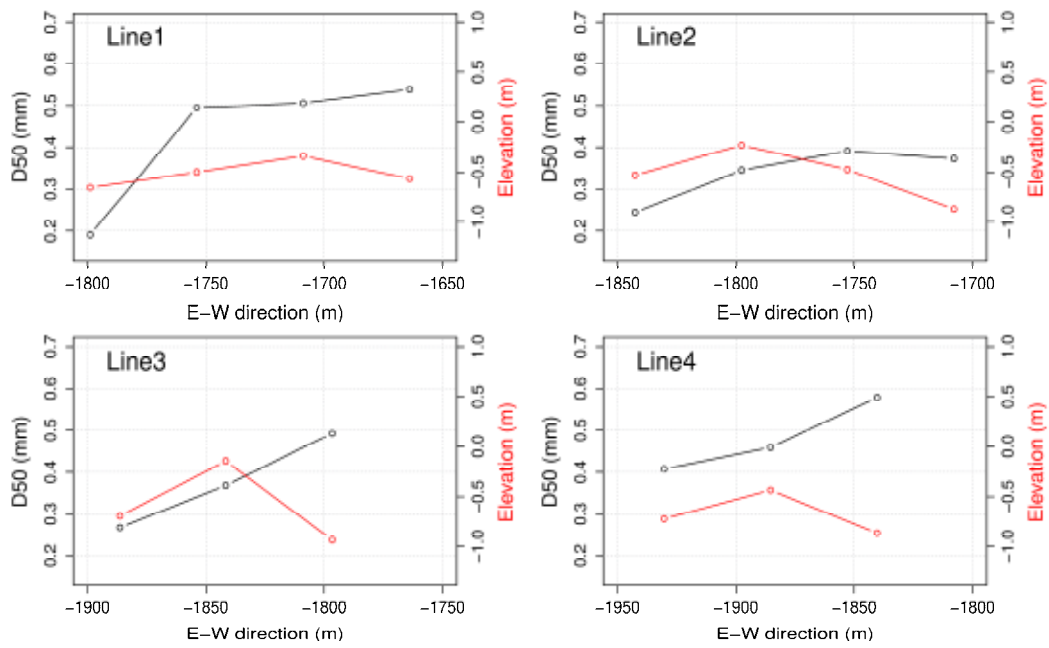


図 14 2018年9月8日の Line1~4 における中央粒径と標高の東西方向分布

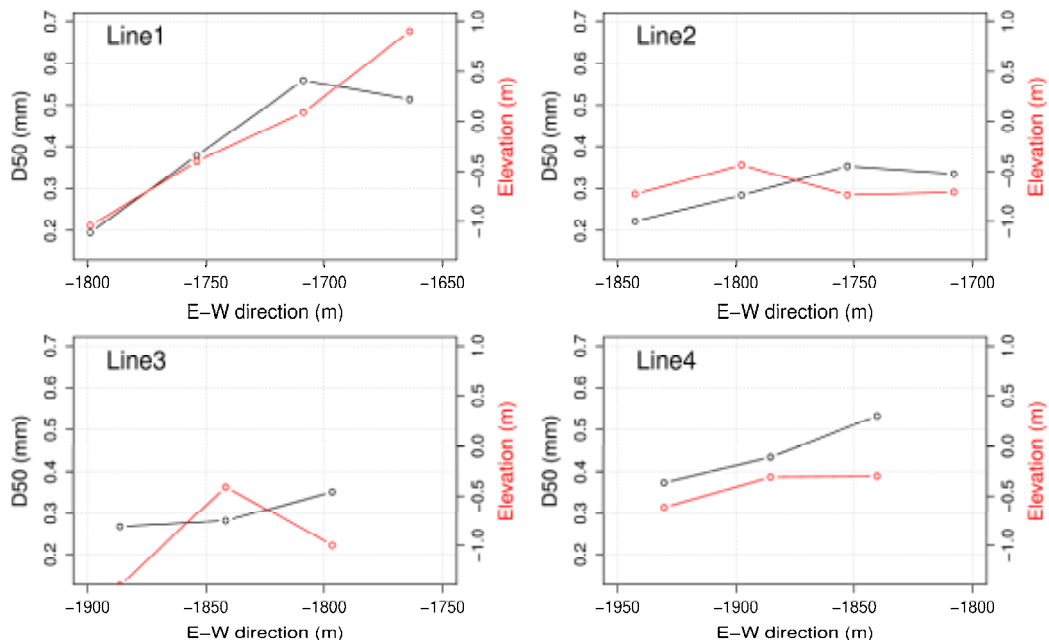


図 15 2018年10月25日の Line1~4 における中央粒径と標高の東西方向分布

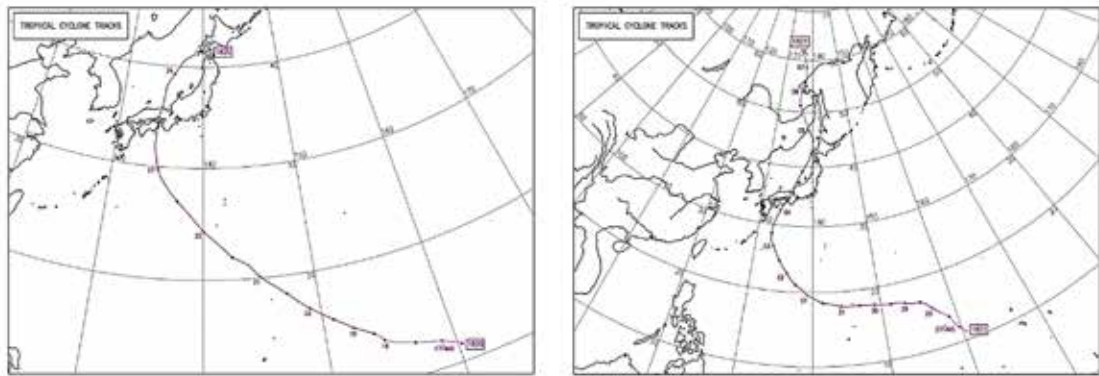


図 16 台風経路図 左：台風 20 号 右：台風 21 号 (引用：気象庁)

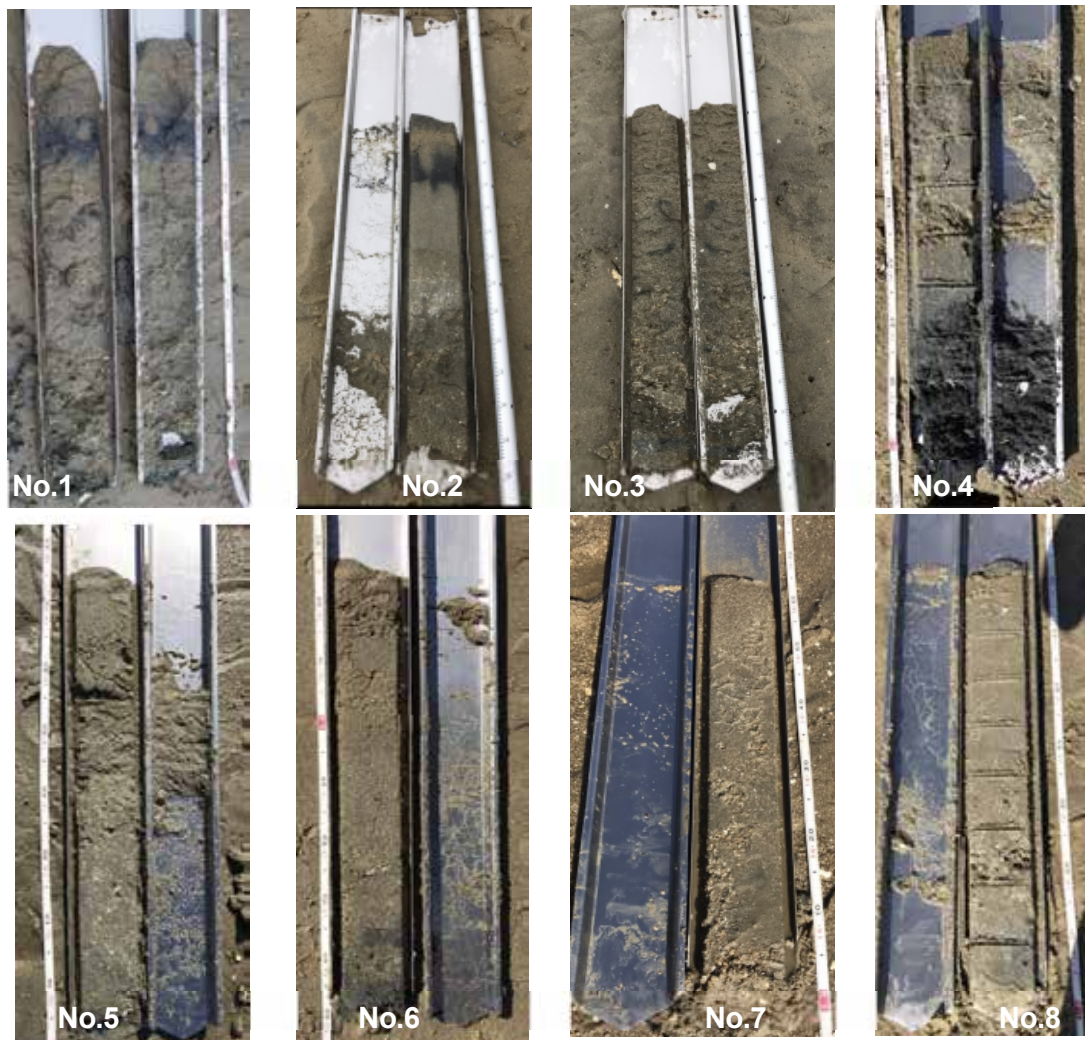


写真 3 各採取地点の鉛直コアの様子

採取した鉛直コアの様子を写真 3 に示す。No.1, No.2 の表層付近では砂色が黒色である層が確認され、No.4 では表層から鉛直方向 65cm 付近より下に黒色の層が確認された。しかし、黒色の層が明瞭に確認された鉛直コアはこの 3 本のみで、それ以外の鉛直コアは最下層まで茶色で色の変化がほとんどなかった。また、8 地点すべての下層付近で貝殻遺骸が確認できた。貝殻はもとの光沢や色彩が失われ、白色化していた。また、貝殻はかなり脆くなっており、2mm のふるい目を通して細粒化していることが確認できた。この貝殻遺骸は明らかに風化が進んでおり、長期間地中に存在していたことが推察できる。しかし、前島トンボロ干潟を管轄とする漁協組合では過去 50 年で広範囲に貝殻遺骸を埋めたような記録等はなく、深い層で貝殻が頻出する原因は不明であった。また、貝殻が白色化するほどかなり古いものであることから、貝殻が頻出する層より下層は少なくとも過去 50 年以上の間、地形変化の影響を受けていないものであると推測できる。

## 5. まとめ

UAV による干潟地形の調査により、干潟上での東西方向の土砂移動が確認された。また、土砂環境の調査では、干潟表層では地形変化を引き起こす土砂移動によって、粒度（中央粒径、 $D_{50}$ ）の東西方向分布が生じることが明らかとなった。しかし、鉛直方向コアの採取、分析から、表層からある程度の深さ以上では土砂移動が発生していなかった可能性も示された。

前島トンボロ干潟は、台風などの短期的な気象インパクト（荒天条件）によって短期間に生じる現象と、平常時の平穏な海象条件によって比較的長い時間をかけて生じる現象が混在している。本研究では、当該干潟において UAV を用いた干潟地形モニタリングを約 2 年間にわたって実施してきた。しかし、毎年、異なった地形変化を示し、干潟上での活発な土砂移動の存在を確認することになった。

当該干潟は、周辺に土砂供給源となる河川がなく、今後、陸域から（河川から）の土砂供給を期待することは困難である。したがって、引き続き地形モニタリングを継続する必要があることが明らかとなった。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人 JFE21 世紀財団の研究助成により行われたものである。関係各位に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

R.El Meouche, I.Hijazi, P.A. Poncet, M.Abunemeh, M.Reoug : UAV Photogrammetry Implementation to Enhance Land Surveying, Comparisons and Possibilities, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol.XLII-2/W2, 2016 11th 3D Geoinfo Conf., 20-21 October 2016,

Athens, Greece.

早坂寿人, 大野裕幸, 大塚力, 関谷洋史, 瀧繁幸 : UAVによる空撮写真を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証, 国土地理院技術資料, A5-No.127, pp.107-116, 2015.

国土地理院 : UAVを用いた公共測量マニュアル(案)平成29年3月31日改正.