

干潟における小規模地形の形成過程と干潟全域での地形変化・砂移動の関係の把握

Investigation of relationship between formation process of small-scale topography and large-scale morphological changes and sand movement on a tidal flat

豊橋技術科学大学大学院 教授 加藤 茂

（研究計画ないし研究手法の概略）

干潟の防災・環境機能の重要性は広く認識されているものの、干潟などの浅場面積の縮小は世界的な問題となっている。今後は地球温暖化による海面上昇の影響で、益々減少することが危惧されている。これまでに、適切な干潟管理の実現を目標として干潟地形のモニタリングや、その結果による地形変化の実態把握が数多く試みられている^{1)~4)}。しかし、地形変化の元となる砂移動は、直接的な砂追跡等の調査が困難であることから実態把握には至っていない。より正確に地形変化を把握し、適切な干潟管理を実現するためには、干潟上での砂移動の把握は必要不可欠である。一方、干潟上では時々刻々と水理条件が変化することによって、砂漣などの小規模地形（cm スケール）の形成・消失が発生し活発な砂移動の存在が確認できる。干潟全体の地形変化には、これら小規模地形の変化も大きく影響している。したがって、干潟上での砂移動と小規模地形の形成過程を把握することは、干潟全体の地形変化を把握・管理するためにも重要である。そこで本研究では、現地で発生している現象を適切に把握・理解することを第一の目的とする。そのために水中において砂移動、地形変化の画像計測を実施し、目視による現象把握とその物理過程の理解を行う。その理解に基づいて、水理条件の現地計測データを用いた砂移動と地形変化の発生条件の把握、更には小規模地形変化と干潟全体の地形変化の関係の把握を試みた。具体的には、三河湾内の愛知県西尾市東幡豆町地先の東幡豆干潟（図-1）を研究対象フィールドとして、砂漣（小規模地形）と干潟全域での地形の特徴とその変化について、調査・分析を行った。

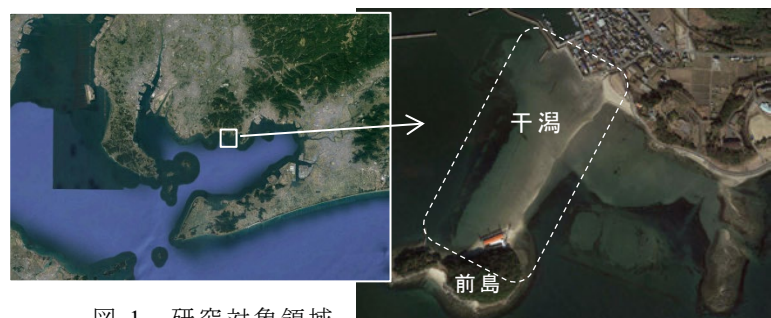


図-1 研究対象領域
(左：三河湾，右：東幡豆干潟) (Google Earth より引用)

（実験調査によって得られた新しい知見）

1. 干潟上での砂漣，水位，波，流れの現地観測

東幡豆干潟において、大潮期間中の2021年8月23日～24日（期間1）および9月20日～21日（期間2）に、干潟上で約2潮汐分（1昼夜）の現地観測を実施した。現地観測では、水面下での砂漣の撮影、水位、波浪および流速の計測を行った。砂漣の撮影は小型の水中カメラを使用し、1分間隔のタイムラプス方式で行った（図-2）。この際、撮影画像から砂漣の移動量を定量的に計測するために、竹串を1.5 cm 間隔に配置した全長30 cm のスケールを

カメラから 40 cm 離れた位置に設置した．カメラの向きは北北東方向で，東西方向の砂漣の移動を確認できるようにした．また，砂漣の移動状況と海象条件の関係を調べるために，水圧計と電磁流速計を撮影地点近傍（カメラから約 2 m 地点）に設置し，0.1 秒間隔で水位と水平 2 方向流速の連続計測を行った．

撮影した画像から定量的に砂漣の移動過程を計測するために，画像に写る各竹串から砂漣表面位置を検出し，砂漣の形状を表す画像内での座標（位置情報）を画像ごとに取得した．得られた砂漣形状の位置情報を図化し，時間毎の形状変化・移動過程を把握した．この時，図-3 の砂漣撮影画像の竹串に記されている目盛りは 1 cm 間隔であるため，1 cm 当たりのピクセル数（pixel/cm）を算出し，砂漣形状とその変化量の実スケール化を行った．

水圧計と電磁流速計で取得した 0.1 秒間隔の連続データは，10 分間ごとに分割し，10 分間での平均水深，有義波（波高，周期），平均流速・流向を求めた．本稿では，紙面の都合上，主に期間 1 での結果を示す．

図-4 に期間 1 の平均水深，有義波高・周期，流速および流向の観測結果を時系列で示している．流向は北を 0°として，時計回りに 90°：東，180°：南，270°：西を表している．潮位変化により，水深は 0.0（干出）～1.5 m の範囲で大きく変化する．期間 1 では有義波高が 10 cm 未満と非常に小さい条件が継続した．また，有義波周期は 4～8 秒であった．期間 2 では，波高が最大で 20cm，周期も 8 秒を超えた場合もあり，期間 2 の方が波浪は大きかったことを確認している．平均流速は観測期間の殆どが 5 cm/s 以下の非常に弱い流れであった（図-3(c)）．東幡豆干潟

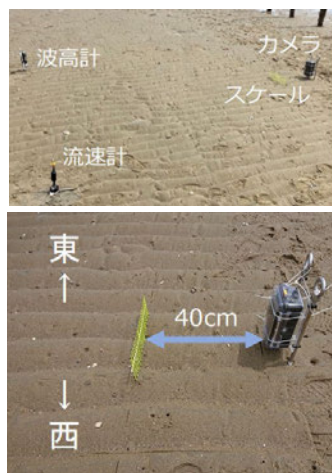


図-2 観測の様子

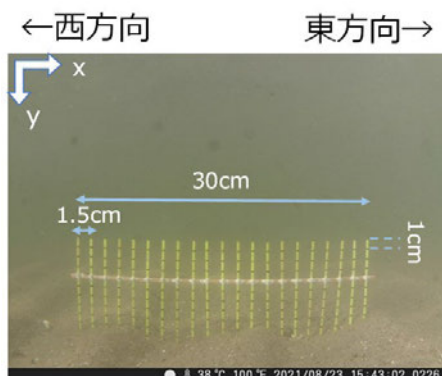


図-3 砂漣撮影画像例

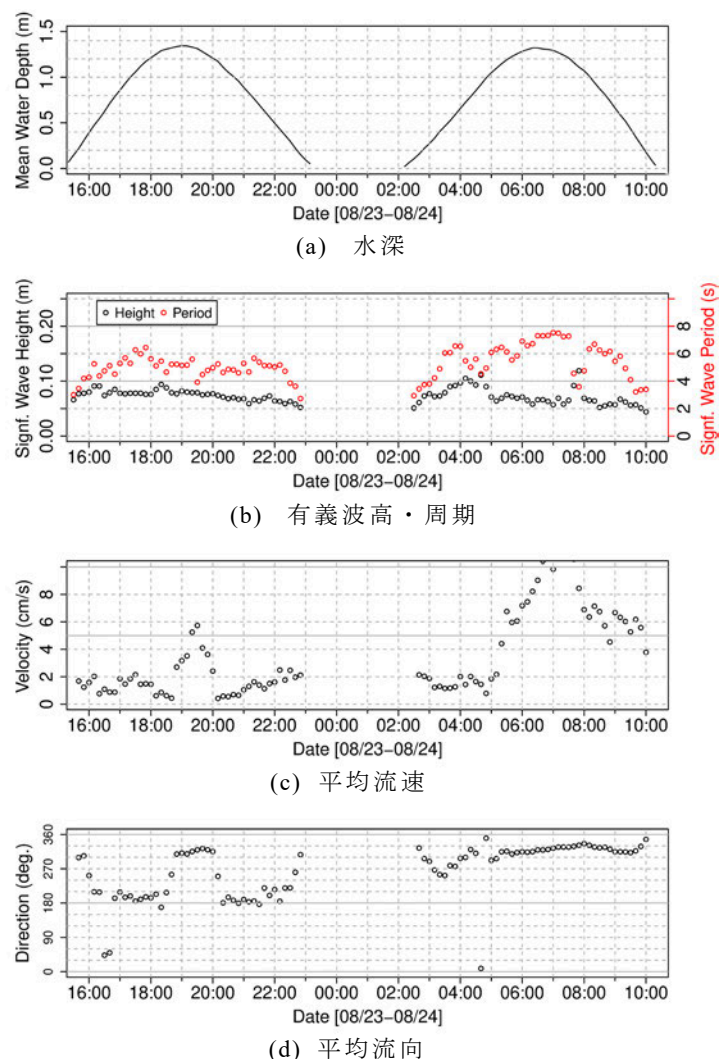
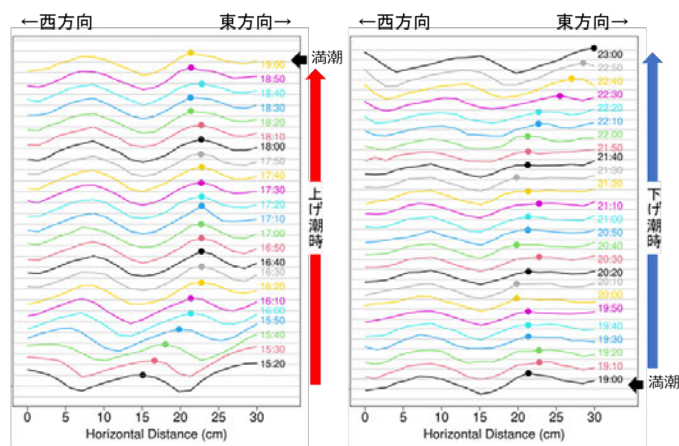


図-4 期間 1 の波浪・流況観測結果

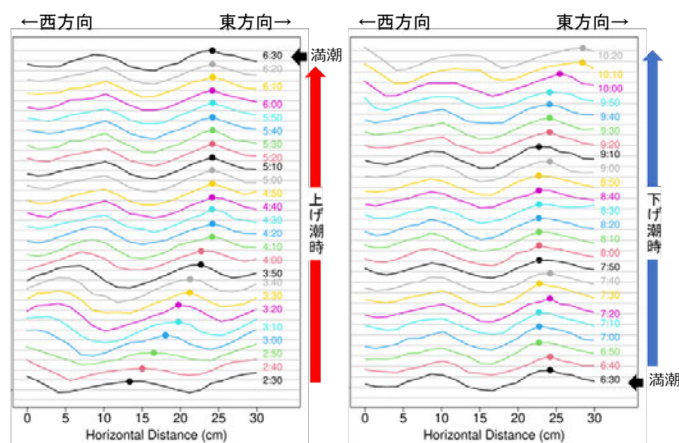
は、干潮時に干潟最浅部が干出することで、干潟周辺の海域が東西に分断される。そのため、最浅部が干出している時間は波が干潟部に向かって左右（東西方向）から波が打ち寄せる。一方、干潟全域が水没している時には一方向（東向き）へ波が伝搬する特性があり、干潟上の波向・流向は大きく変化する。しかし、図-4(d)に示したように、本研究の観測地点では、平均流向は東向き（90°前後）はほとんどなく、西向き（180°～360°）の流れが卓越している。また、周期的な水深変化に伴う特徴的な平均流速・流向の変化は確認できず、前述した陸域と海域の位置関係や波向の変化の影響は確認できなかった。

2. 水位変化に伴う小規模地形（砂漣）の形成・移動過程の把握

図-5 に、期間 1 を 1 潮汐ずつに分けた 10 分毎の砂漣形状（海底面の断面形状）の変化を示す。各図、上に向かうにつれて、10 分毎の時間経過を示し、左側が上げ潮（水位上昇、干潮→満潮）、右側が下げ潮（水位下降、満潮→干潮）の時間帯を示している。移動過程を確認できるように、各時間の主要な砂漣頂部に●印を付け、砂漣頂部の移動を表示している。砂漣の画像計測結果から、砂漣は移動する時間帯と移動しない時間帯が明確に分かれた。この時、砂漣移動発生時間は上げ潮開始後と下げ潮終了前のそれぞれ約 1 時間である。また、砂漣移動が発生している水深は、50 cm 以下であった。期間 2 においても同様の移動状況が確認され、期間 2 では期間 1 と比較して移動時間が長く、上げ潮開始後、下げ潮終了前のそれぞれ約 2 時間の間で移動が生じていた。また、砂漣移動が発生して

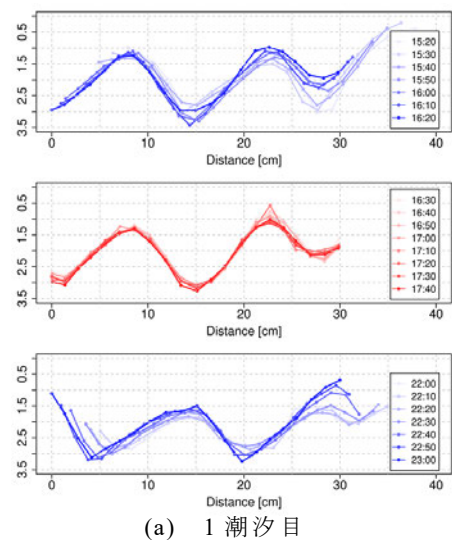


(a) 1 潮汐目

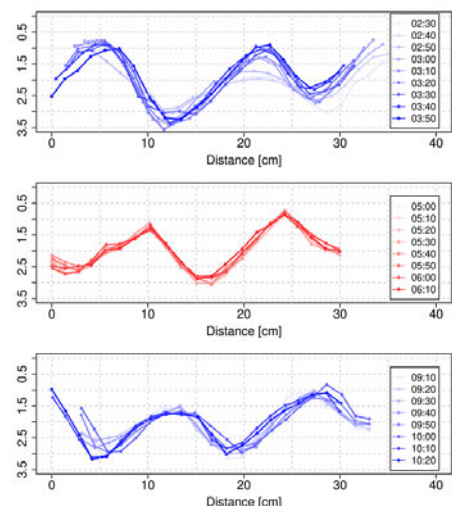


(b) 2 潮汐目

図-5 期間 1 の砂漣移動状況



(a) 1 潮汐目



(b) 2 潮汐目

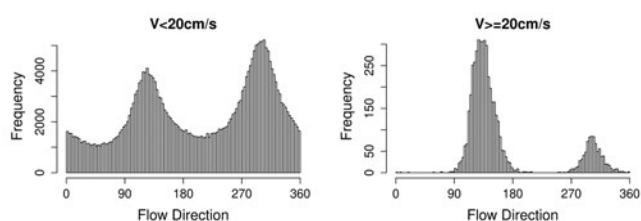
図-6 砂漣形状の比較（期間 1）

いる水深は、80 cm 以下であり、期間 1 よりも移動距離が長かったことが特徴的であった。これは、期間 1 と 2 での海象条件（主に波浪条件）の違いに起因すると考えられる。

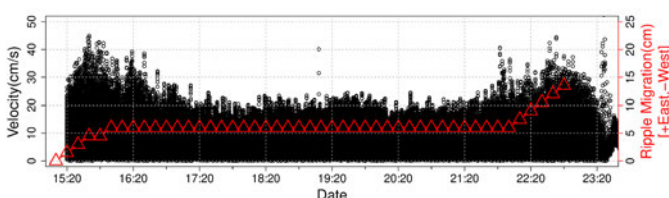
図-6 は、期間 1 における砂漣形状の変化の様子を示している。移動している時間帯では、主要な砂漣頂部が重なるようにデータをずらし、色の濃淡（薄→濃）で時間の経過を示している。この図より、砂漣の移動が発生している時間帯（青）では、砂漣形状が徐々に先鋭化し砂漣高さが高くなる傾向があるのに対して、移動していない時間帯（橙）では土砂移動は発生しているものの、形状はほとんど変化しないことが確認できた。

3. 砂漣の移動条件の分析

水中での砂漣の移動状況の把握から、移動方向は東向きであったことが明らかとなった。しかし、観測結果の平均流向では西向きを示しており（図-4(d)）、砂漣の移動方向とは逆の結果を示していた。そのため、平均流速・流向では、砂漣の移動現象を予測または把握することが困難であると考えられる。そこで、流速計で取得した 0.1 秒毎の流速・流向瞬間値データの確認を行った。図-7 の(a), (c)は期間 1 における 0.1 秒間隔の瞬間流速の流向頻度分布を、20 cm/s 未満と 20 cm/s 以上に分けて示している。また、(b), (d)は瞬間流速値と 10 分毎の砂漣移動の経時変化を示している。流向分布では、20 cm/s 未満の流速はやや西向きの頻度の方が高いが、20 cm/s 以上の強い流れは東向きが顕著に優勢であることが確認できた。この東向きの強い流れが、砂漣の移動の主な外力であると考えられる。しかし、全体では西向きの弱い流れ（20 cm/s 未満）の発生頻度が圧倒的に多いため、平均流速を用いた現象の分析では、砂漣の移動を適切に判断できなかったと推測できる。さらに図-7 の(b), (d)では、砂漣移動が発生している時間帯は強い流れが発生している時間帯と概ね一致していることが確認できた。



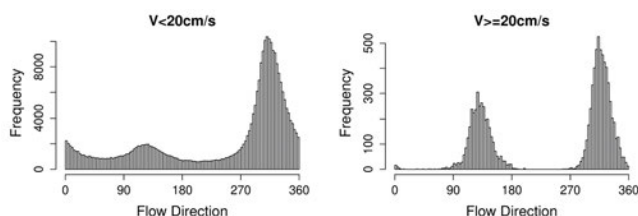
(a) 1 潮汐目の流向分布
(左：20 cm/s 未満，右：20 cm/s 以上)



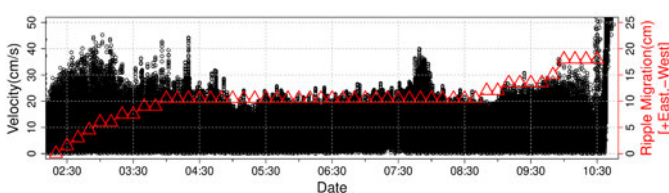
(b) 1 潮汐目の瞬間流速と砂漣移動距離

4. 砂漣形成範囲と干潟地形変化の関係の把握

干潟全域の地形計測を目的として実施した UAV による空撮画像を用いて、干潟全域での砂漣形成範囲やその変化を把握し、干潟の地形変化との対応を把握した。地形計測は、これまでの調査実績^{5) 6)}と同様の条件で実施し、空撮画像と VRS-GNSS 測量結果を用いた SfM 処理によって、数値地形モデル (DEM) を作成した（図-7）。砂漣の形成範囲（空間分布）の検出は、DEM 作成時に出力した干潟全域



(c) 2 潮汐目の流向分布
(左：20 cm/s 未満，右：20 cm/s 以上)



(d) 2 潮汐目の瞬間流速と砂漣移動距離

図-6 瞬間流速、流向と砂漣移動距離の対応（期間 1）

のオルソ画像を約 5m 四方の大きさに再分割し（約 7000 枚），その画像内での砂漣の有無を目視で確認した．砂漣が確認できた画像については，画像解析（エッジフィルターと周波数解析）により砂漣の主方向を推定し，砂漣の範囲とその方向のカラーマップを作成した（図-8）．図-7 の標高分布図の比較では，干潟中央部（南北方向に延びる最浅部）でやや浅くなっている（黄色の範囲が拡大している）ことがわかる．特に北側の陸に近い部分でその傾向が顕著である．また，浅くなった領域では，砂漣の方向も東西方向（黄色）からやや南向き（緑色）に変化している（図-8）．浅くなった陸側の領域では，2020 年度から 2021 年にかけて砂漣の形成が確認できた範囲が広がっており，地形変化と砂漣の形成やその方向が関係していることが確認できた．

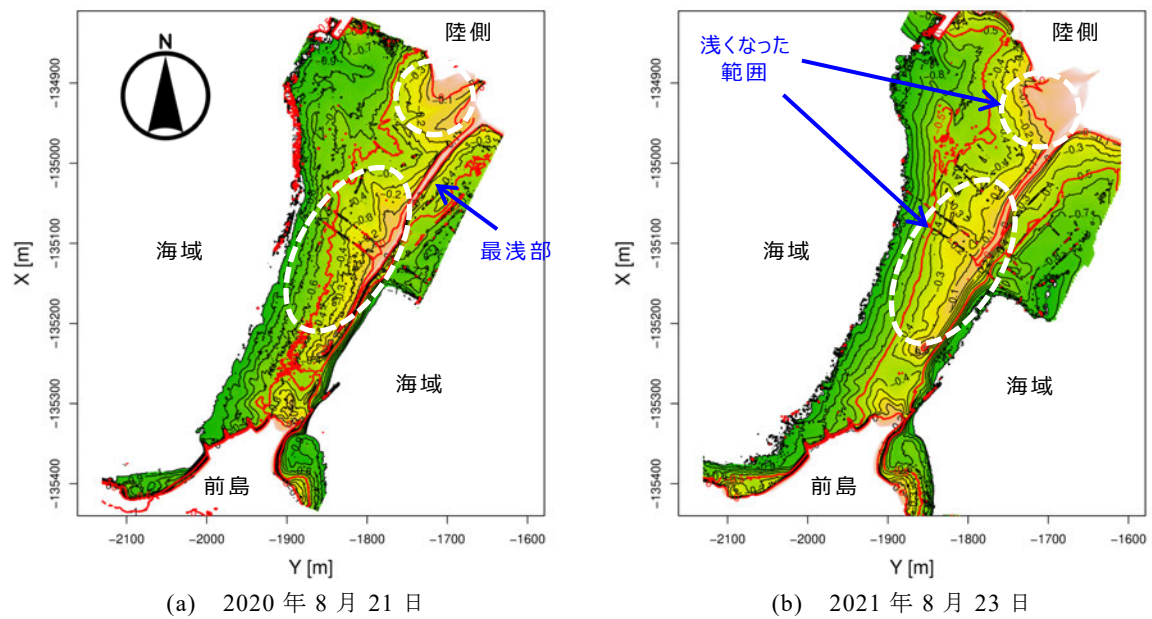


図-7 干潟の標高分布

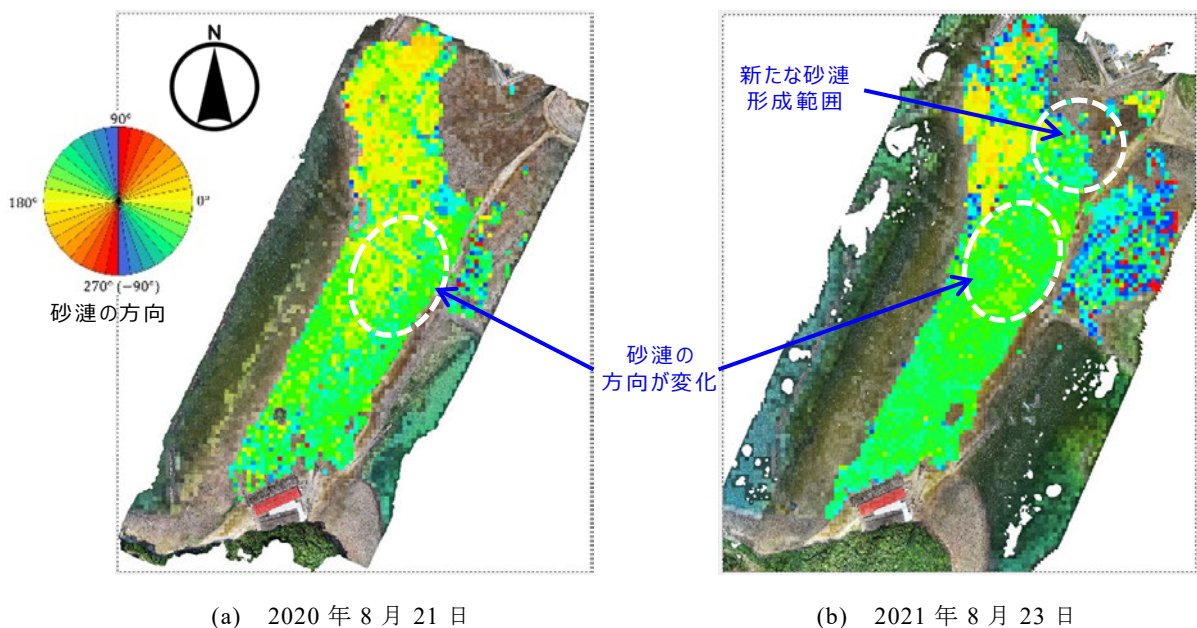


図-8 砂漣形成範囲と砂漣の方向分布

5. まとめ

小型カメラによる水中でのタイムラプス撮影（1分ごとの連続観察）により、干潟上の形成されている砂漣（小規模地形）は、水深が浅い条件下で移動が発生し、水位変化（潮汐）や波浪条件によっては、移動量が変化することが確認された。また、撮影された画像の解析から、移動時に砂漣形状変化も生じることが確認された。これらは、干潟上で常に活発な砂移動が発生していることを示しており、砂移動の正確な把握の必要性が改めて確認された。

砂漣の形成範囲・方向と干潟全体での地形との対応関係では、標高が浅くなることで砂漣の形成範囲が広がり、また砂漣の方向も変化していることが示された。砂漣の新たな形成や方向の変化は、その発生外力である波や流れが変化したことを意味しており、砂漣の観察により、海象条件の変化に関する情報が得られると考えられる。

本研究では、砂漣（小規模地形）の変形・移動過程と干潟全体での地形変化との定性的な関係は確認できたものの、干潟地形の管理や保全に資する定量的な砂移動量の把握には至らなかった。今後は、砂移動の定量評価に向けて、現地調査だけでなく数値計算の活用も検討する必要がある。

（参考文献）

- 1) Kato, S., Kuritani, I., Tabata, T., Nakamura, R., Okabe, T., 2020, Topographic change and sediment transport on Maeshima Tombolo tidal flat, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 933, 012015, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/933/1/012015>
- 2) Wang, Y., Wang, Y. P., Yu, Q., Du, Z., Wang, Z. B., & Gao, S., 2019, Sand - mud tidal flat morphodynamics influenced by alongshore tidal currents. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124(6), 3818-3836.
- 3) 内山雄介：干潟のながれと地形変化，日本流体力学会誌「ながれ」，24(1)，57-66，2005.
- 4) 山田文彦，小林信久，柿木哲哉：地形パラメータを用いた干潟断面の季節変動の要因分析，海岸工学論文集，50，551-555，2003.
- 5) 栗谷 樹，加藤 茂，岡辺拓巳，仁木将人：干潟における流動場と地形変化の数値解析，土木学会論文集 B3（海洋開発），76(2)，I_336-I_341，2020.
- 6) 田畑貴大，加藤 茂，中村亮太，小田敏弘，西園大貴，岡辺拓巳：UAVによる干潟地形計測精度の検証と継続的なモニタリングへの適用性の検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），74(2)，I_961-I_966，2018.

（発表論文）

Azmi, S. A. B., Mohamed, H. B., Kato, S., Toyoda, M.: Study on the Relationship between

Topography and Sand Ripple Formation Area on Tidal Flat, 令和3年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，II-33，2022.3.4（オンライン）

Mohamed, H. B., Kato, S., Toyoda, M.: Study on Topographic Monitoring and Analysis of Topographic Changes on Maeshima Tombolo Tidal Flat in 5 Years, 令和3年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，II-34，2022.3.4（オンライン）

和田京果，加藤 茂，豊田将也，朝倉稜翔：干潟における砂漣の移動・変形過程に関する現地観測，土木学会論文集 B3（海洋開発），2022，投稿中