

泥質干潟再生に向けた土砂環境動態評価手法の開発：自然泥干潟および干潟実験施設への適用

AN INTEGRATED METHODOLOGY TO EVALUATE THE TIDAL FLAT GEOENVIRONMENTS AND ITS APPLICATION TO NATURAL AND ARTIFICIAL MUDDY FLATS

佐々真志¹・渡部要一¹・川野泰広²・中島謙二郎³・吉田秀樹³

Shinji SASSA, Yoichi WATABE, Yasuhiro KAWANO, Kenjiro NAKASHIMA and Hideki YOSHIDA

¹正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²国土交通省九州地方整備局 有明・八代海海洋環境センター (〒861-5274 熊本市新港1-4-14)

³正会員 国土交通省九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 (〒750-0066 下関市東大和町2-29-1)

This paper describes an integrated methodology to evaluate the tidal flat geoenvironments and its application to natural and artificial muddy flats. The proposed methodology enables quantitative assessment of the dynamics of thermal and geophysical environments that were found to vary significantly under given tidal and meteorological conditions. The temporal and spatial variations of suction, void state and surface shear strength of the artificial flat soils were particularly noteworthy, occasionally yielding unfavorable geophysical environments to benthos habitats. The present method may thus provide a rational basis for adaptive geoenvironmental management so as to facilitate the favorable performance of diverse benthos activity.

Key Words : *Intertidal muddy flats, dynamics, geoenvironments, dredged soil, sand, natural flat, artificial flat*

1. はじめに

干潟は多様な生物層を育み、高い水質浄化能力があることから、豊かな沿岸環境のために不可欠な要素である。近年、九州沿岸の有明海及び八代海に代表される泥質干潟の保全・再生に向けた取り組み、とりわけ、浚渫土砂を活用した干潟造成技術の開発・確立に向けた検討が活発になってきている¹⁾。この際、重要なことは、造成する対象物は地盤であり、かつ地盤が底生生物を育む基盤を担うことである。このことは、生態系回復を真に実現するには、底生生物が住む地盤表層の土砂環境場の適切な理解が必要不可欠となることを意味している。しかるに、従来の干潟研究では、生態系や地盤上の水質・水理環境に研究主眼が置かれてきたために、干潟地盤内部の土砂環境場に関する研究が実質的に進んでおらず理解が乏しく留まっていた。

筆者らは、上述のような隘路を切り開くために、砂質干潟を対象として、干潟土砂環境場の体系的なモニタリング手法を開発し、観測・実験・解析の協

働によって、干潟土砂の保水場、土砂の安定性、ならびに巣穴生物の住環境において、干潟地盤表層のサクシオン(土中水分張力を表し、大気圧を基準とした負の間隙水圧により定義される)を核とした土砂環境動態が重要な役割を果たしていることを世界に先駆けて解明した²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。さらに、干潟土砂環境の様々な性能が生物活動条件と密接にリンクしていることを定量的に明らかにしてきた³⁾⁵⁾。そして、得られた知見に基づいた生態土砂環境場の評価・設計・管理指針を提示している⁵⁾。

本研究は、上述のような筆者らのこれまでの研究成果を礎として、泥質干潟土砂環境場の定量的評価手法を開発・提示するとともに、その適用性を自然泥干潟と浚渫土砂を含む干潟実験施設において詳しく検討することを目的としている。

2. 泥質干潟土砂環境動態評価手法

本研究において構築した泥質干潟土砂環境動態評価手法のセットアップ状況を記した模式図を図-1

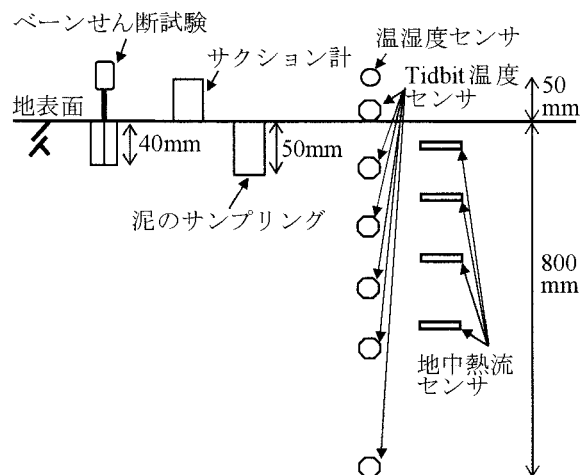


図-1 泥質干潟土砂環境動態評価手法のセットアップ状況の模式図

に示す。サクシオン計 (型名: USSG 型, サンケイ理化(株))は, 土中の水分張力を表し大気圧 u_a と間隙水圧 u_w の差 $u_a - u_w$ によって定義される物理量を計測するセンサである。サクシオンは, 土の保水力を表す指標であり, 土の飽和・不飽和状態と密接に関わっている。一般的に, 粘性土砂材料において蒸発が進行して不飽和になるほどサクシオンは大きく発達する。実質的な飽和状態では, 地表レベルでのサクシオンは, 水の単位体積重量を勾配として地下水位と 1 対 1 の線形関係にある²⁾⁵⁾。サクシオンの日々の変動は, 土の繰り返し収縮を引き起こし, サクシオン変動の厳しさに対応して, 土砂の間隙・強度状態に甚大な影響を及ぼす²⁾⁴⁾。一般に, サクシオンが発達すると土砂強度は大きくなる。

温湿度センサと Tidbit 温度センサ (型名 StowAway, Onset 社)は, 泥面直上の温度と湿度, 泥面温度, 泥地盤内部の温度分布を計測するセンサである。地中熱流センサ (型名: CPR-PHF 型, Climatec 社)は, 泥内の熱流, 具体的には地盤内の単位面積あたりの通過熱量を計測するセンサである。

泥のサンプリングは, 円筒アクリル容器 (内径 60mm, 厚さ 0.5mm)を用いて泥表層 50mm を対象に行う。サンプリングした土の重量を当日計測して, 当該土を研究室内に持ち帰り塩抜き後に炉乾燥させて自然含水比を測定し, 各種の室内試験により粒度分布, 土粒子密度, 間隙比, コンシステンシー (液性限界, 塑性限界)等の泥土の基礎物性を得る。この際, 土の飽和度 S_r を 1 として自然含水比 w と土粒子比重 G_s から間隙比 $e = G_s \cdot w / S_r$ を得る。

地盤表層の土砂強度の測定には, 小型ベーンせん断試験器 (型名: SH-63B, 丸東製作所(株))を用いる。当該試験を現地干潟の表層土砂 (深さ 40mm)に適用することにより, 不攪乱状態でせん断強さという干潟土の硬さに関する明確な物理量を得ることができる。これまでの筆者らの研究³⁾⁵⁾により, ベーンせん断強さは, 巣穴生物の住活動における最適・限界条件を支配していることが明らかとなっている。

3. 自然泥干潟への適用

前章で記述した手法を, 八代海奥に広がる自然泥干潟に適用した。同海奥の模式図を図-2 に示す。

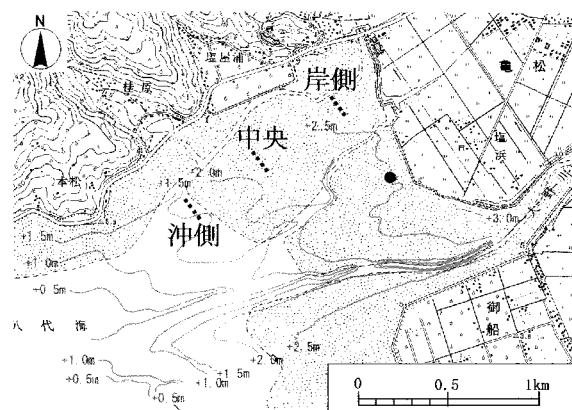


図-2 八代海自然泥干潟および干潟実験施設の位置模式図

同図中の黒丸印が動態観測地点である。軟弱な泥土のアクセスには干潟走行機と潟スキーを適宜使用した。当干潟で筆者らが事前に実施した調査結果⁶⁾によると, 全体的に軟弱で一様な堆積構造となっている。また, 岸側では粘土分が多く高間隙比 ($e \geq 5$) であり, 沖に向かって次第に砂の含有率が増加し, 低塑性になって間隙比は 2.5~3 程度まで減少する。これは, 岸側・沖側双方ともに含水比が液性限界の 2~3 倍であることに相当し, 極めて軟弱な状態であることを示唆している。実際, 岸側近くの泥表層のサクシオン計測結果 (図-3)をみると, 0~0.1kPa 程度と有意なサクシオンが発達していないことがわかる。当該圧力の水頭換算値は 10mm 程度であることから, ほぼ純粋な泥で構成される軟弱な自然泥干潟では, 干出時に地下水位は実質的に地表レベルに留まることがわかる。さらに, サクシオンが発達しない事実は, 土砂が飽和状態にあること, ならびにサクシオン変動による土砂の硬化が発生しないことを示しており, 上述の調査事実ともよく整合する。

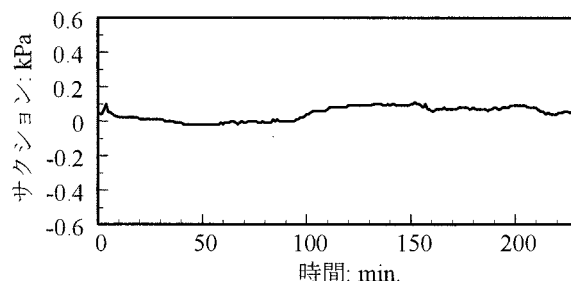


図-3 自然泥干潟のサクシオン計測結果

自然泥干潟における温熱動態観測を夏の大潮時に対応する平成 17 年 8 月 18 日, 19 日, 20 日の各日の干出直後から冠水直前までの干出時間中に行った。観測期間中は, 日各にそれぞれ晴れ, 曇り, 雨と典型的に異なる微気象条件であった。

晴れの微気象条件の下で, 観測した泥面直上の温

度・湿度と泥面・泥中温度ならびに泥内部の熱流の時間変化を図-4に示す。この際、熱流は、鉛直下

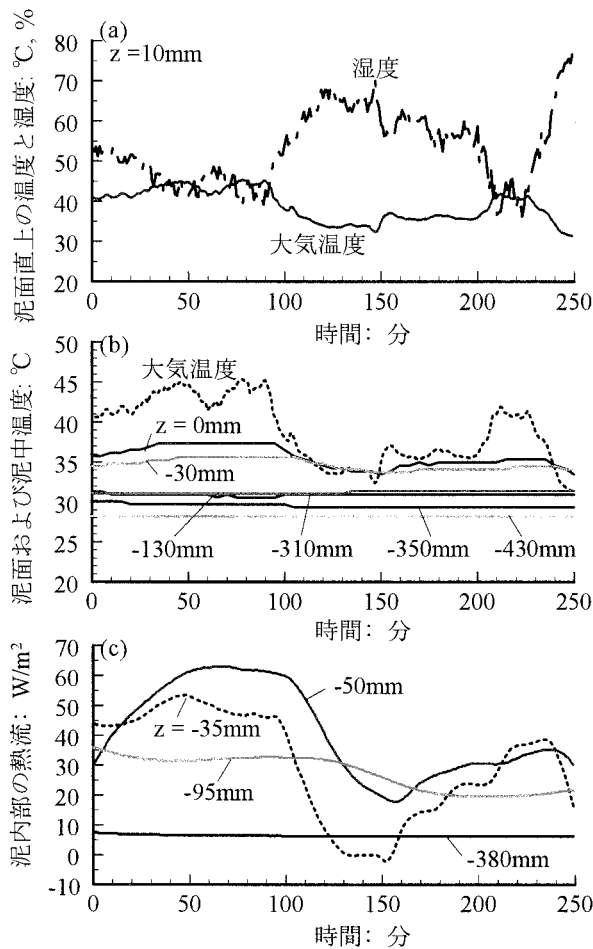


図-4 自然泥干潟の温熱動態観測結果: (a) 泥面直上の温度と湿度, (b) 泥面および泥中温度, (c) 泥内部の熱流, 平成17年8月18日 晴れ

向きを正としている。得られた結果から、まず、泥面直上の大気温度は泥面による照り返しによって最大 45°C に達していたことがわかる。そして、泥面直上の湿度と大気温度は逆相関の関係にあること、泥面近傍の温度変化が大きく、泥面-100mm 以深の温度変化は著しく小さいこと、及び晴天時の熱照射の下では、泥内部において鉛直下方への熱流が支配的である一方、地盤深部($z=-380\text{mm}$)では有意な熱流が生じていないことがわかる。

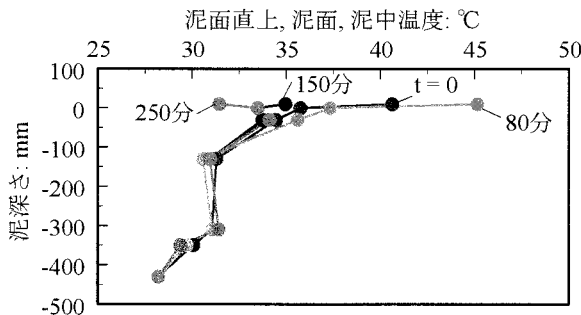


図-5 図-4に対応した泥温度の深さ分布

上述の連続観測結果は、図-5に示す泥内部の温度分布ともよく整合している。すなわち、泥面近傍の表層域($z \geq -50\text{mm}$)のみ温度変化が激しく、地盤深部の温度変化は極めて小さい。

曇りの微気象条件の下で観測した結果を図-6に示す。得られた結果から、晴れの微気象条件の結果と同様に、泥面直上の温度と湿度は逆相関の関係にあること、泥面近傍の温度変化が大きく、泥面-100mm以深の温度変化は小さいことがわかる。一方、泥内部の熱流については、晴天時と異なる曇時の微気象下では、泥面近傍において鉛直上向きの熱流が現れていることがわかる。また、上述の傾向は図-7に示す泥内部の温度深さ分布とも調和的である。

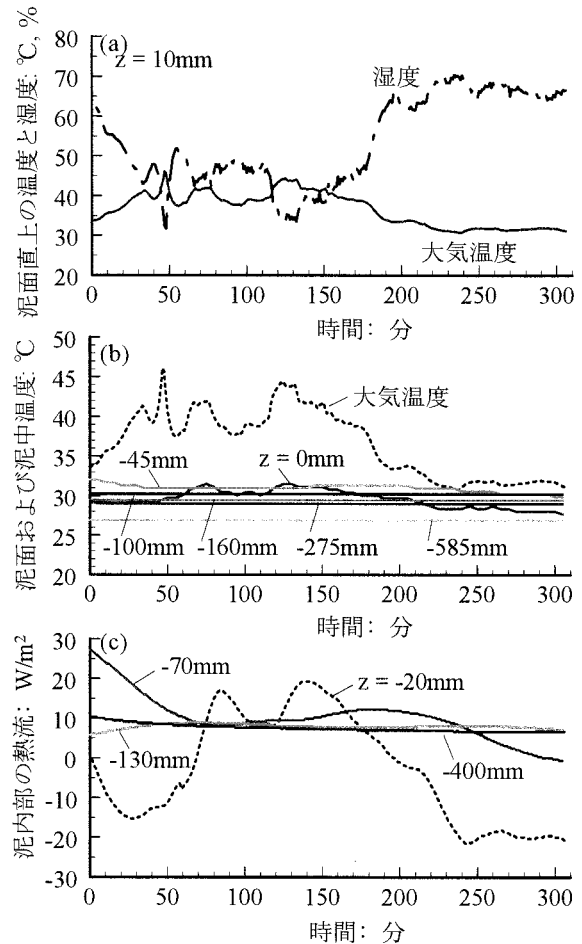


図-6 自然泥干潟の温熱動態観測結果: (a) 泥面直上の温度と湿度, (b) 泥面および泥中温度, (c) 泥内部の熱流, 平成17年8月19日 曇り

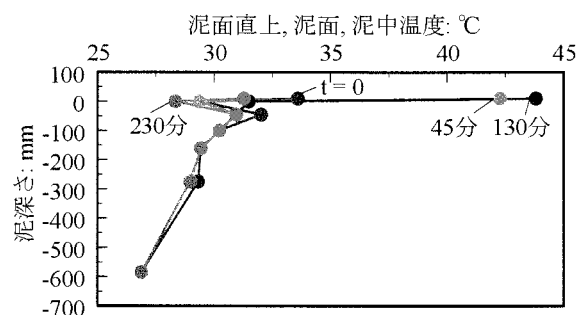


図-7 図-6に対応した泥温度の深さ分布

雨の微気象条件の下で観測した結果を図-8に示す。得られた結果から、降雨条件下において、90%を超える高湿度の下でも泥面直上温度と湿度の逆相関の関係は保持すること、泥表層温度は、晴天時・曇時と同様に、泥面直上温度の変化に追従し、泥面近傍の温度変化が大きく、泥面-100mm以深の温度変化は小さいことがわかる。そして、夏の降雨時の微気象下では、泥表層において鉛直上向きの熱流が支配的となることがわかる。本傾向は図-9に示す泥温度の深さ分布からみとれる。

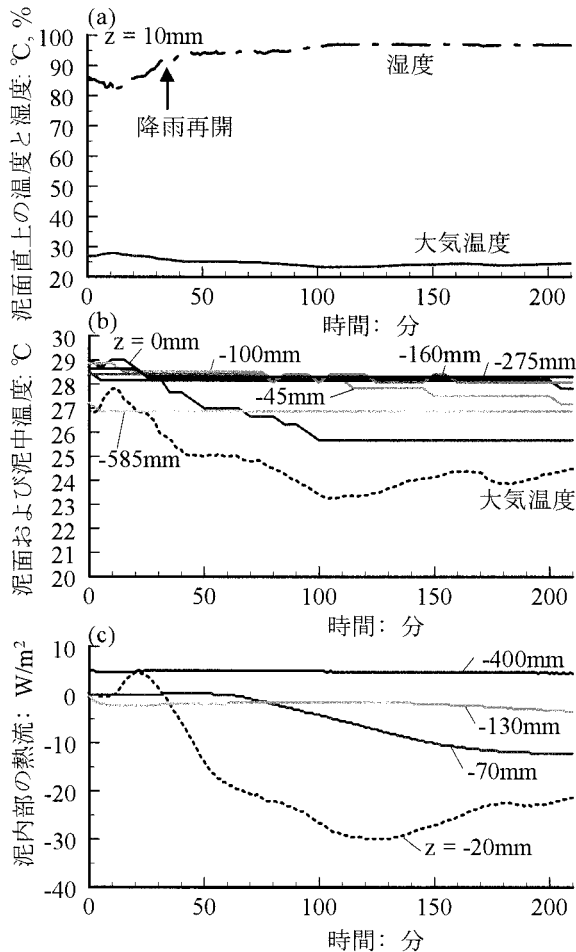


図-8 自然泥干潟の温熱動態観測結果: (a) 泥面直上の温度と湿度, (b) 泥面および泥中温度, (c) 泥内部の熱流, 平成17年8月20日 雨

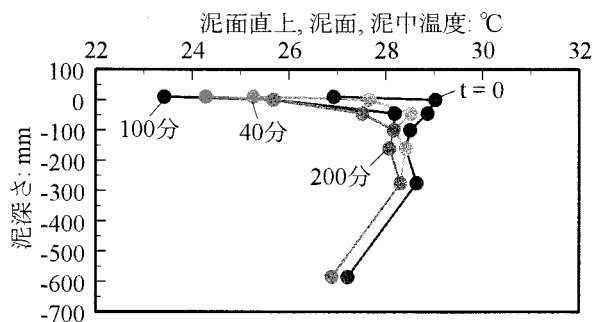


図-9 図-8に対応した泥温度の深さ分布

結局、上述の動態観測結果により、軟弱な飽和状態を保持する自然泥干潟では、温熱動態が重要であり、微気象 (晴れ, 曇り, 雨) の違いによって地盤表層内部の温度・熱流場が動的に大きく変化することが明らかとなった。

4. 干潟実験施設への適用

前章で記述した八代海奥の自然泥干潟で得られた知見を踏まえて、国土交通省九州地方整備局が平成17年9月に同海奥に造成設置した干潟実験施設において冬 (平成18年3月1日~3日) 及び夏の大潮時 (平成18年8月24日~26日) に、土砂環境動態観測を行った。干潟実験施設は、岸側・中央・沖側の各地点 (図-2 参照) に、浚渫土砂 70% : 砂 30%、浚渫土砂 100%、現地盤、浚渫土砂 30% : 砂 70% の4種類の地盤を設けたものである。当該実験施設の断面・平面イメージを図-10に示す。

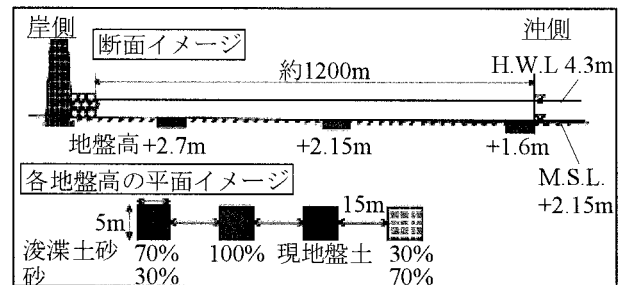


図-10 干潟実験施設の断面・平面イメージ

造成半年後および造成1年後の地盤の粒度を比較し、全ての地盤種類において多少のばらつきはあるものの一定の変化傾向は無いことを確認している。ここで重要なことは、岸側・中央・沖側の各地点において、波・流れ条件や地盤高が大きく異なるにも関わらず、平面的に粒度分布の有意な差がみられなかったことである。以下では、提案手法の適用を通じて、上述のように土砂の材料物性が同等でも、土砂の“環境”状態は、土砂内部に発現している物理場に対応して時空間的に顕著に異なってくることを示す。

岸側・中央・沖側地点における4種類の地盤のサクシオン計測結果を図-11に示す。現地盤では、常

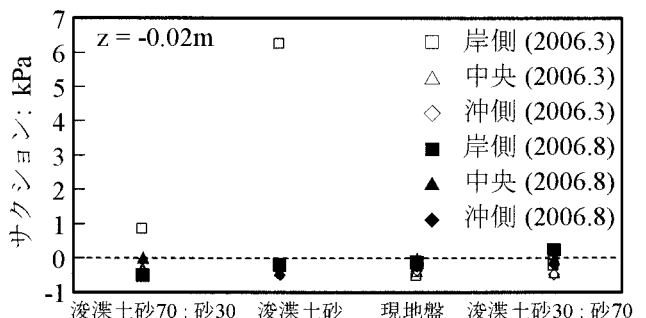


図-11 干潟実験施設のサクシオン計測結果: 造成半年後 (2006年3月) と造成1年後 (同年8月) の比較

時サクシオンは発達しておらず、それゆえ飽和した軟弱な泥状態を保持している。一方、浚渫土砂を含む地盤では、有意なサクシオンが発達していた。特に、岸側の浚渫土砂地盤においては、造成半年後の2006年3月において6kPaを超える砂質干潟でもあり得ないレベルのサクシオンが発達していたことがわかる。これは、本時点において当該土砂が不飽和状態にあったことを意味している。造成1年後には当該サクシオンは著しく低下し、全ての種類の地盤においてサクシオンは消失した。土砂造成の手順自体が岸側・中央・沖側地点で変わらないことを踏まえると、上述の観測事実、造成当初に不飽和状態にあった浚渫土砂ならびに浚渫土砂と砂の混合地盤において、地盤高が低く冠水時間の長い沖側地点から次第に飽和状態に遷移していき造成1年後の2006年8月には岸側地点を含む全地盤が実質飽和状態に移行したものと評価することができる。土砂の保水性は生物生息の重要条件であり、本手法の適用により、水分保持性能の観点からの土砂の健全度診断が可能である。

岸側・中央・沖側地点における4種類の地盤のベーンせん断強度の計測結果を図-12に示す。図中の点線は、用いた計測器の最大容量を表している。図-12の記号は図-11の記号と同一である。本結果から、現地盤では常に0.5kPa以下の軟弱な泥状態

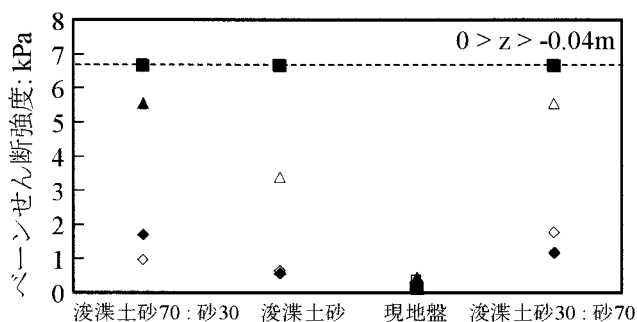


図-12 干潟実験施設のベーンせん断強度の計測結果：造成半年後（2006年3月）と造成1年後（同年8月）の比較

となっており、既述の知見と整合する。一方、浚渫土砂を含む地盤では、総じて現地盤より強度が大きくなっている。ここで特筆すべきことは、浚渫土砂を含む各地盤において、岸側地点の強度が沖側地点の強度に比べて著しく高いことである。土砂粒度の平面的な変化はないことを踏まえると、上述の観測事実、干潟土砂強度がサクシオンと間隙状態によって支配される⁴⁾⁵⁾ことと密接に関係していると考えてよい。このことを定量的に示すために、岸側・中央・沖側地点における4種類の地盤の間隙比を図-13に示す。本結果から、現地盤では、間隙比が4程度またはそれ以上の軟弱な構造を有している。一方、浚渫土砂を含む地盤では、間隙比が2以下と著しく小さくなっている。また、浚渫土砂を含む全ての地盤において、沖側地点よりも岸側・中央地点で間隙比がより低く密であり、かつ、造成半年後（2006年3月）よりも造成1年後（2006年8月）の方

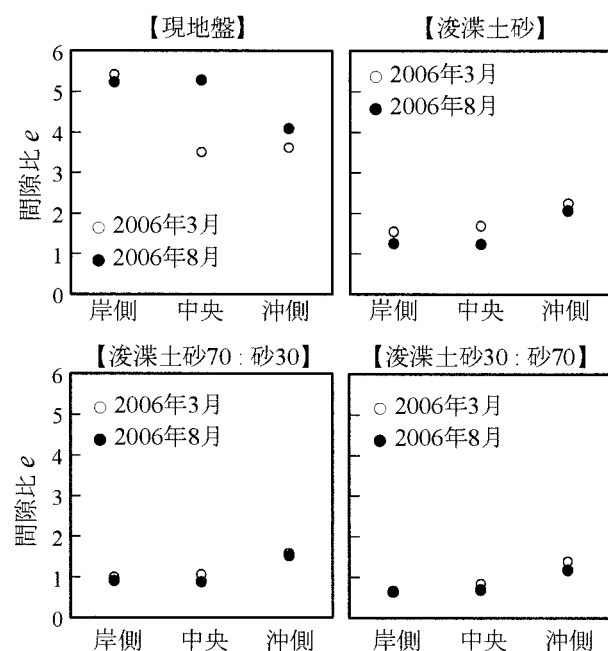


図-13 干潟実験施設の土砂間隙比の計測結果：造成半年後（2006年3月）と造成1年後（同年8月）の比較

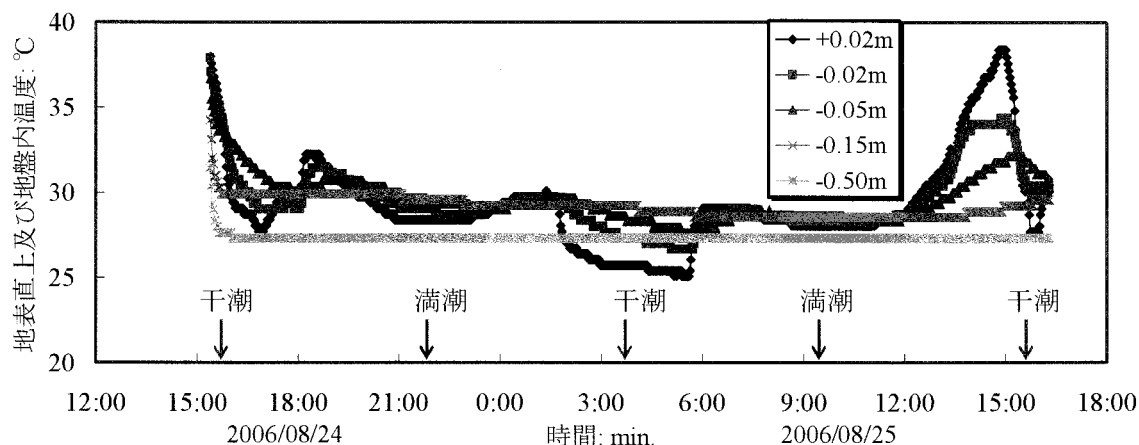


図-14 干潟実験施設の地表直上及び地盤内温度の時間変化：沖側、浚渫土砂70%：砂30%

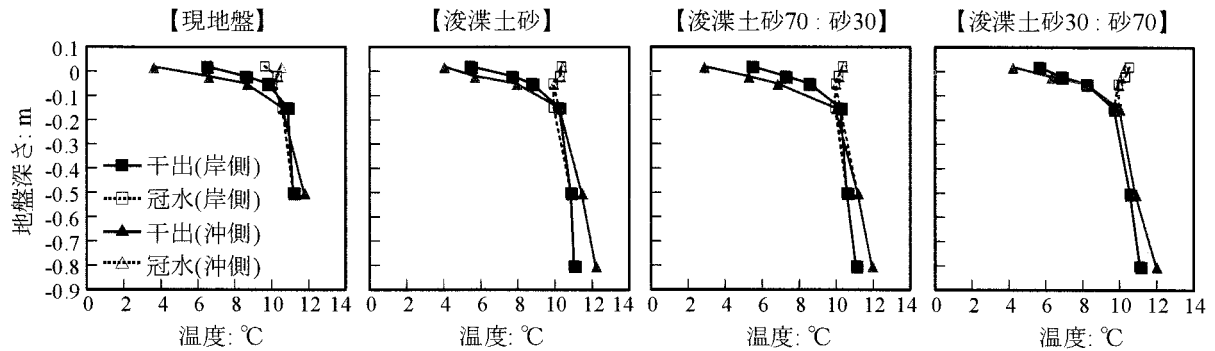


図-15 干潟実験施設における干出・冠水にともなう地盤の温度深さ分布: 2006年3月

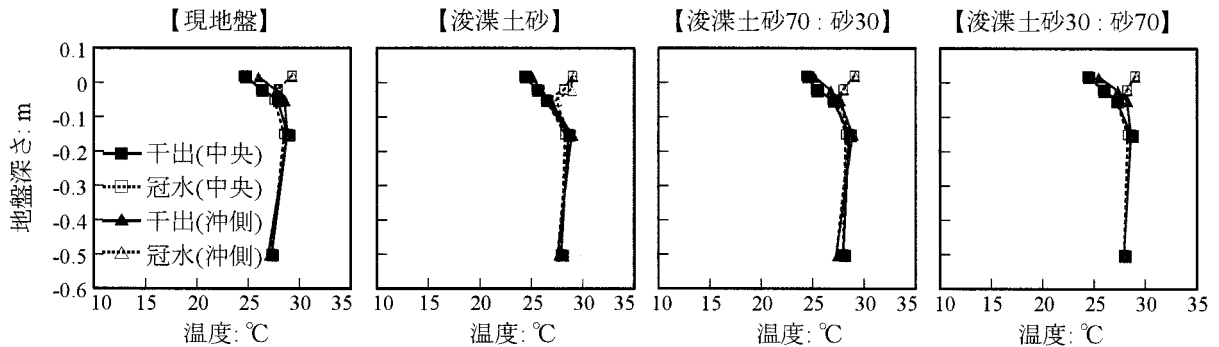


図-16 干潟実験施設における干出・冠水にともなう地盤の温度深さ分布: 2006年8月

がより締め固まっていたことがわかる。間隙比の低下レベルは半年で最大 0.3 程度であるが、これは土砂強度の顕著な差異を生じさせるのに十分な変化である。上述のサクシオン・強度の結果と統合すると、当該期間に有意なサクシオン変動を受けた岸側・中央地点のみがサクシオン動態による繰り返し収縮を経験して締め固まり土砂強度が増加していったと理解することができる。結局、土砂のサクシオン、間隙、強度状態は相互に密接にリンクしており、提案手法の適用によって、生物生息限界と深く関わる土砂強度とその発現メカニズムまでを定量的に評価することができる。

岸側・中央・沖側の4種類の各地盤において冠水・干出サイクルを含む1日間の温度連続観測を行った結果の例を図-14に示す。本結果は、夏の沖側の浚渫土砂70%：砂30%の場合に対応している。自然泥干潟と同様に、干出すると地盤表層温度の深さ変化が著しく大きくなり、冠水すると深さ変化が小さくなることがよくわかる。また、地表から -0.15m 以深では干出・冠水にともなう温度変化はほとんどないことがわかる。上述の温度特性は、地盤の種類に依らず、また夏・冬の季節に依らず、同様に観測された。実際、本特性は、図-15および図-16に示すような温度深さ分布において明瞭に確認することができる。

結局、温熱動態としては、土砂の種類に依らず、岸沖方向の平面的な変化よりも、繰り返し干出にともなう地盤表層の温度変化が卓越することが明らかとなった。

5. 結論

本研究で開発した手法は、自然泥土、浚渫土ならびに浚渫土と砂の混合土砂から成り時間的・空間的に大きく変動する干潟土砂環境場の定量的評価を実現する。したがって、本手法は、底生生物の活動形態との橋渡しを可能にするとともに、生物生息条件と密接に関わる土砂保水性と適切な土砂強度の双方を同時に満足することを目標とした造成干潟土砂の性能照査ならびに生態土砂環境場の順応的管理の指針確立に向けて大きく寄与することが期待できる。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：海の自然再生ハンドブック，第2巻，干潟編，138p.，2003.
- 2) 佐々真志，渡部要一：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，土木学会，pp. 981-985，2005.
- 3) 佐々真志，渡部要一：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，土木学会，pp. 1061-1065，2006.
- 4) Sassa, S. and Watabe, Y.: Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model, *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, F01003, doi:10.1029/2006JF000575, 2007.
- 5) 佐々真志，渡部要一：砂質干潟の生態土砂環境場に果たすサクシオンの役割—巣穴住活動／保水場の性能評価・設計指針，港湾空港技術研究所報告，第45巻，第4号，pp. 61-107，2006.
- 6) 渡部要一，佐々真志：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，土木学会，pp. 1236-1240，2006.