

有明海の干潟における底泥の熱環境特性と モデル化に関する研究

ANALYSIS OF CHARACTERISTIC GRASP TO THERMAL AND MODELING
THERMAL TRANSFER IN THE BOTTOM MUD AT ARIAKE TIDAL FLAT

清田政幸¹・森本剣太郎²・矢北孝一³・滝川清⁴

Masayuki KIYOTA, Kentaro MORIMOTO, Kouichi YAKITA and Kiyoshi TAKIKAWA

¹学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

²正会員 博(工) 熊本大学 沿岸域環境科学教育研究センター (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

³正会員 熊本大学 工学部技術部 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

⁴フェロー 工博 熊本大学 沿岸域環境科学教育研究センター (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

It is difficult to clarify the environmental condition in tidal flat because of the complicated interaction of atmosphere, sea water, land and creature. The thermal environment is an important factor in water quality closed relationship phytoplankton growth and activated biological. The objective of this study is the characteristic grasp of thermal and the attempted to calculate the numerical thermal model simulation in the bottom mud at tidal flat. The thermal water or bottom was observed at three sites that were different in the ground level and the meteorological variables was observed using a weather station deployed in the inter-tidal zone near Kumamoto Port. As a result, the thermal water and air temperature influenced not only just bottom surface but also the interior bottom at tidal flat and the use of seepage flow in the numerical thermal model improved the accuracy of the model.

Key Words : ARIAKE sea, thermal transfer, thermal environment, thermal diffusion, tidal flat

1. 緒 言

日本を代表する大型閉鎖性内湾である有明海は、約5mにも達する大きな干潟の条件の下、わが国の干潟総面積の約40% (約190km²) に及ぶ広大な干潟が発達した海域である。近年、この有明海ではノリの色落ち被害、赤潮の大規模化などに代表される環境悪化が慢性化しており、悪循環に陥っていると懸念されている。このような環境悪化を受け、水質および底質改善対策として干潟・浅場の造成に期待が寄せられているが、これらの環境改善対策を行うにあたっては、事前に改善効果を定量化する必要がある。

干潟は、河川から流れ込む栄養塩を蓄積し、微生物により分解する。また、有機物を干潟の生物に供給し、生物の繁殖、生息を促す機能を持つ。更に、干潟では植物プランクトンや底生藻類の活動が水質変動に大きく関与している。これらの植物プランクトンや生物の活動は熱にも依存していると考えられており、干潟の熱環境は生態系の機能に重要な影響を与えると指摘されている¹⁾。そのため干潟の持つ機能を理解するためには、干潟の熱環境特性の把握

が必要不可欠であるが、干潟環境は気圏、水圏、地圏、生物圏の4圏にまたがる複雑系であることから十分に解明できていないのが現状である。

そこで本研究では、干潟を取り巻く様々な環境因子の中で、生物生産機能や水質浄化機能に影響を及ぼす熱環境の特性を把握することを目的として、熊本港北東の干潟において気象観測や水温、泥温の鉛直プロファイル連続観測を実施した。また、干潟地表面におけるエネルギーフラックスの算出を行い、干潟における熱環境特性について考察を行った。また、数値シミュレーションにより泥温分布の再現を行い、干潟における泥温分布の予測モデルの構築を試みた。

2. 観測・調査概要

本研究は図-1に示すように熊本港北東角に造成された人工潟湖干潟「熊本港親水緑地公園、野鳥の池 (以下、野鳥の池とする)」およびその周辺の自然干潟において調査を実施した。野鳥の池は石積護

岸により外海と隔てられており、4ヶ所設置されている通水管(直径1m)によって、潮汐の干満に応じて海水が自由に出入りしている。野鳥の池から北へ約160mの干潟上に設置された干潟気象観測塔(以下、観測塔とする)において気象情報の観測を行っており、観測項目は風向、風速、気温、湿度、降水量、気圧、潮位および4成分放射を観測している。なお、4成分放射とは、上向き下向きの短波、長波放射の4つの成分であり、短波放射は太陽からの日射、長波放射は大気や地表からの放射と同義である。また、水中、潟土中の熱輸送の把握および地盤高の差異による泥温変化を捉えるため、観測塔付近の自然干潟のST.1、野鳥の池外の自然干潟のST.2、野鳥の池内の高潮帯のST.3の計3地点において熱伝対と塩分・温度計(CT計)を用いて、地中の5~10深度(地下1cm~150cm)の泥温、地表から2~10高度(1cm~300cm)の水温の鉛直プロファイル観測を行っている。図-2に鉛直プロファイル観測の詳細図を示す。なお、水温を観測する各センサーは、潮位変動により水温および気温のいずれかを観測しており、また、センサーに直射日光が当たらないように工夫している。観測塔における観測機器は、汎用型データロガーに接続しデータを収録しており、観測項目は5秒毎にサンプリングされ5分間の平均値として収録される。その他の観測機器は1分毎の瞬間値を収録している。

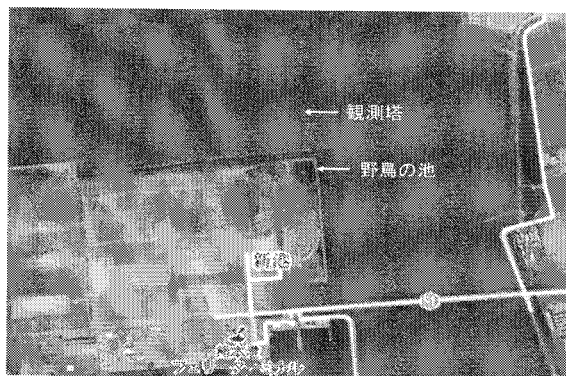


図-1 観測塔および野鳥の池の位置図

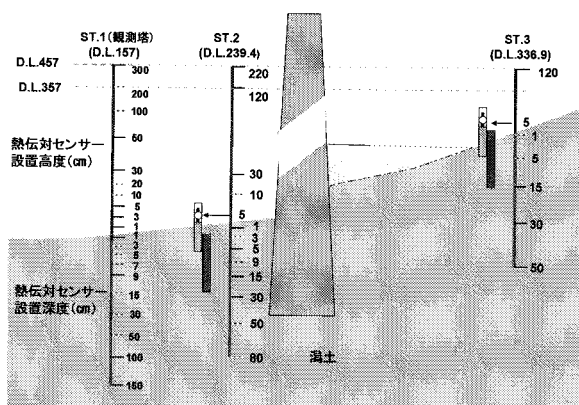


図-2 鉛直プロファイル観測の詳細図

3. 熱収支過程のモデル化

一般的に地表面の熱収支は式(1)により表される。この式はいかなる場合にも成立する関係で、地表面の熱収支式、概して熱収支式と呼ばれる²⁾。

$$Rn = H + IE + G_{soil} \quad (1)$$

ここで、 Rn は正味放射量、 H は顕熱輸送量、 IE は潜熱輸送量、 G_{soil} は干出時および冠水時に地中への貯熱量である。正味放射量 Rn は短波放射(日射)と長波放射(大気放射と地面からの放射)を合計したものであり、次式で表される。ただし、いずれも干潟表面に入射する向きを正とする。

$$Rn = S_d + S_u + L_d + L_u \quad (2)$$

ここで、 S_d は全天日射量、 S_u は干潟表面からの反射日射量、 L_d は大気からの長波放射量、 L_u は干潟表面からの長波放射量を表す。また、海水面温度および地表面温度は上下方向の長波成分より、次式で求めることができる。

$$L_d = \varepsilon \sigma T_s^4 + (1 - \varepsilon) - L_u \quad (3)$$

ここで、 ε は射出率、 σ はステファンボルツマン定数($=5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)、 T_s は潟土表面温度を表す。

(1) バルク法による顕熱・潜熱輸送量の算出

顕熱輸送量 H とは空気の乱流によって運ばれる熱エネルギーのことである。潜熱輸送量 IE とは空気の乱流によって運ばれる水蒸気輸送量と同義であるが、他の熱輸送量と単位を合わせるために蒸発量 E に気化の潜熱 l を掛け算したものを潜熱輸送量と呼んでいる。本研究では顕熱輸送量 H と潜熱輸送量 IE は以下のバルク式を用いて算出した。

$$H = c_p \rho_a C_H U (T - T_a) \quad (4)$$

$$IE = l \rho_a C_E U (q - q_a) \quad (5)$$

ここで、 c_p は空気の比熱、 ρ_a は空気の密度、 U 、 T_a は基準高度の風速および気温、 l は水の気化熱、 q_a は空気の比湿、 q は潟土(海水)表面温度 T に対する飽和比湿のことである。 $C_H U$ 、 $C_E U$ は顕熱・潜熱輸送の交換速度と呼ばれるパラメータである。 U の係数となる C_H 、 C_E を顕熱・潜熱に対するバルク係数と呼ぶ。

(2) バルク式の大気の安定度の考慮

顕熱・潜熱輸送の交換速度は、地表面の種類、大気の安定度によって随時変動するパラメータである。干潟では潮汐に伴い地表面の状態は潟土面、海水面と周期的に変化しているため、本研究では比較的単純な式によって、潮汐と風速の変動を考慮した式に変更した。以下に算出式を示す。

a) 干出時における大気の安定度

干出時、裸地面の交換速度 $C_H U$ (ms^{-1})は以下のよう
に表される²⁾.

$$C_H U \approx C_E U (\text{ms}^{-1}) = 0.0027 + 0.0031 \cdot U_{1m} \quad (6)$$

また、微風 ($U < 2 \text{ms}^{-1}$), 不安定 ($T_s > T_a$) 時には顕熱・潜
熱輸送交換速度は以下のように表される.

$$C_H U \approx C_E U (\text{ms}^{-1}) = 0.0012 \times (T_s - T_a)^{1/3} \quad (7)$$

b) 冠水時における大気の安定度

冠水時の海面での交換速度は、以下のように設定
した¹⁾.

$U_{10m} < 5.0 \text{ms}^{-1}$ のとき

$$C_H U \approx C_E U (\text{ms}^{-1}) = 0.0017 \cdot U_{10m} \quad (8)$$

$5.0 \text{ms}^{-1} < U_{10m} < 30.0 \text{ms}^{-1}$ のとき

$$C_H U \approx C_E U (\text{ms}^{-1}) = 0.0018 \cdot U_{10m} \quad (9)$$

微風 ($U < 2 \text{ms}^{-1}$), 不安定 ($T_w > T_a$) のとき

$$C_H U \approx C_E U (\text{ms}^{-1}) = 0.0017 (T_w - T_a)^{1/3} U_{10m} \quad (10)$$

(3) 地中貯熱量および海水の持つ熱量の算出

本研究では干出、冠水時における地中への貯熱量
は、底面付近の地中温度の水平勾配が鉛直勾配に比
べて十分に小さいと仮定し、熱伝対から得られた観
測値により、以下の式で求めることとした²⁾.

$$G \equiv G_{(z=0)} = \int_0^D \frac{d(c_G \rho_G T_G)}{dt} dz \quad (11)$$

ここで D は熱伝導がほぼゼロとなる値であり、本研
究では D は最深部に位置するセンサーの深さとした。
また、 c_G , ρ_G は潟土の比熱と密度、 T_G は地中温度を
表す。 z は鉛直下向きを正とした。また、海水の持
つ熱量を算出するに当たっては、水平方向への熱の
移流・拡散や潮汐の変動に伴う海水の質量変動によ
る影響が大きいと考えられる。本研究ではその値を
的確に捉えるための十分な観測が行われていないた

め、以下に示す簡単な収支式により海水の持つ熱量
 H_w を推算した。

$$H_w = -(Ln + H + LE) \quad (12)$$

$$Ln = \varepsilon (\sigma T_s^4 - L_d) \quad (13)$$

(4) 地表面（海水面）における熱収支の算出

以上の方法を用い、ST. 1における12月2日から12
月7日までの熱収支の算出を行なった。図-3にその
結果を示す。なお、潜熱、顕熱輸送量は鉛直上向き
方向への熱輸送が正の値を示すこと、正味放射量、
地中への貯熱量、海水への貯熱量は鉛直下向きへの
熱輸送が正の値を示している。図より干潟では、海
水の蒸発による潜熱輸送量の占める割合が大きいこ
とがわかる。潜熱輸送量は最大で 300W/m^2 にもなり、
正味放射量の半分以上のエネルギーである。顕熱輸
送量は最大でも 100W/m^2 程度である。また、潜熱輸
送量は顕熱輸送量に比べて、2~10倍程大きい値で
変動している。潜熱輸送量の日変化は日射による影
響に加え、干出のタイミングにも大きく影響される。
12月3日や4日のように昼間に干潮を迎え、十分に湿
潤した潟土表面に日射による加熱を受ける事により、
日射量に匹敵するほどの潜熱が輸送されている。そ
の後、日射の減少とともに潜熱輸送量も減少するが、
大気の乱流により夜間でも顕熱・潜熱輸送量は正の
値を示している。12月2日と6日の夜間の干潮時では
地中への貯熱量は -100W/m^2 の値を示しているが、海
水が浸入する事で 400W/m^2 の熱量が地中へと貯熱さ
れている様子が見える。このことから、夜間におい
ては大気と潟土の熱交換よりも、海水と潟土との熱
交換の方が約4倍近く大きいことがわかった。また、
地中貯熱量の上昇期は満潮前の上げ潮時であること
がわかる。これは上げ潮時の海水の流入や、流入に
よる底泥の巻き上げの効果により、盛んに地中へ熱
が輸送されているためと考えられる。また、今回の
観測では海水の持つ熱量は常に負の値となっており、
冬季での干潟において、海水は常に熱源として作用
していることがわかった。

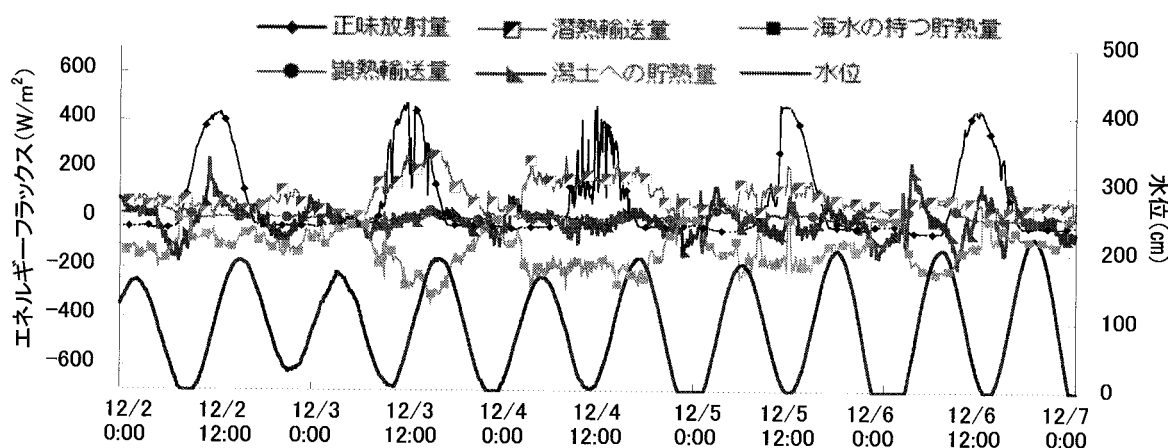


図-3 ST. 1における熱収支の経時変化

4. 熱伝対の観測結果

(1) 泥温の経時変動

図-4, 5, 6はST. 1, ST. 2, ST. 3の12月2日から12月7日までの泥温と観測地点での水位の経時変動図である。なお、見易さのため、ST. 1の経時変動図にのみ熱伝対の水温センサーの表層から5cmの温度値と気温を示す。全地点で泥深が大きくなるに伴い泥温は高くなり、泥温変化も小さくなる様子がわかる。ST. 2に注目すると、干潟の泥温は干出・冠水の時刻により非常に複雑な温度変化を示している。まず冠水時は、昼夜関係なく泥深15cm付近まで水温とほぼ同じ値を示し、深度毎の温度差は小さくなっている。しかし、12月2日の昼間の満潮時においては、水温が他の日に比べ2～3℃高いため、温度差が生じている。夜間の干出時は、日射も無く、気温も低いため、深さ毎に緩やかな温度勾配を描き、時間経過と共に徐々に泥温が下降している様子がわかる。その後、海水が流入すると同時に泥温は水温の影響を受け急激に上昇し、ほぼ時間差なく泥深15cm付近まで海水温に近い値となった。このことから大気と潟土間よりも、海水と潟土間の方がより著しい熱交換が行われていること、夜間の一潮汐の間に一日で最も大きな熱交換が行われていることが確認できた。また、昼間の干潮時は日射による加熱を受けるため、夜間の干潮時ほど泥温は下降しないことがわかる。また、ST. 2において、12月6日の午前0時頃に干潮となり、表層付近の泥温は約2℃まで低下する。その後朝方にかけて相対的に温かい海水が浸入し、泥温は約13℃まで上昇する。その後昼間に干潮を迎えるが、潮が引くとともに日射量が増加し、気温も上がることで、干出したと同時に海水により温められた潟土は日射によりさらに加熱され、表層付近の泥温は約23℃となった。そして潮が満ちてくると、半日加熱され続けた潟土は海水温よりも温度が高くなり、海水により逆に冷却される様子がわかる。このように干出のタイミングによっては一日で約20℃も泥温の変動があることがわかった。

(2) 各地点との比較

ST. 1はST. 2に比べて泥温の変動が小さく、深度毎の温度差も小さいことがわかる。ST. 1は潮汐の変動に追従して泥温変動を示しているものの、変動は最大でも5℃程度しかない。この原因として、この期間はちょうど小潮期にあたるため、図中の水位が示すように、ST. 1は12月5日と6日の夜間のわずかな時間帯にしか潮が引かないためだと考えられる。しかし、夜間に潮が引くにもかかわらず、他の地点に比べて泥温変動が小さい。これには潟土の含水率などの物理特性、白川河口であるが故に近くに大きな滞筋が通っていることや地下水などの影響により熱の

輸送が減少したと考えられる。

ST. 3はST. 1とは逆に海水と潟土が接する時間が短いため、泥温の変動は気温や昼間の日射に強く影響されていることが明らかとなった。また、ST. 3は、海水が流入してきても冠水時間が短いため、海水による熱交換は比較的小さいものとなった。また、泥深5cmにおける泥温は、泥深1cmよりも平均して5℃程高くなるという傾向が見られた。これは他の地点では見られない兆候であり、潟土の含水率や生物による攪拌などの局所的な何らかの因子が寄与しているものと考えられる。以上より、大気、海水、潟土が相互に接することが、複雑な熱交換に作用していることが明らかとなった。

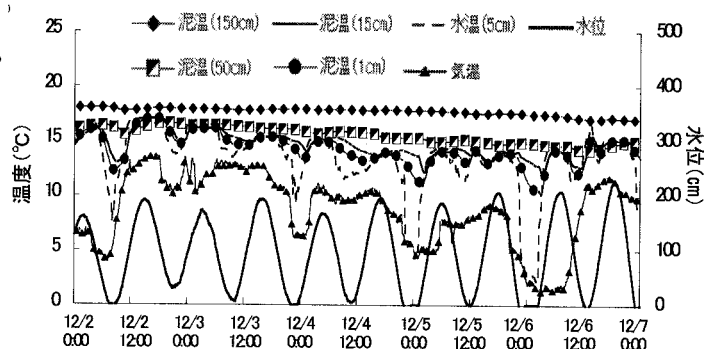


図-4 ST. 1における泥温の経時変化

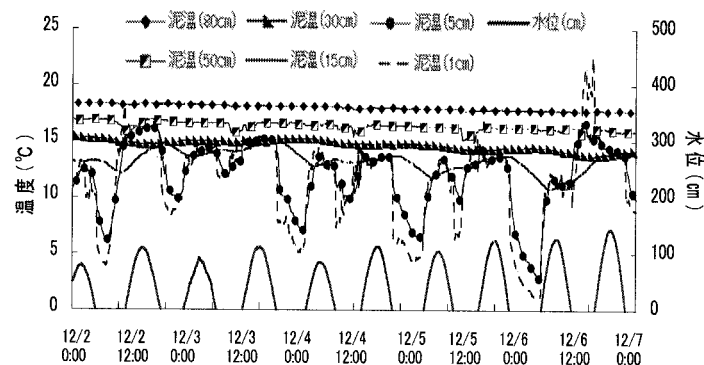


図-5 ST. 2における泥温の経時変化

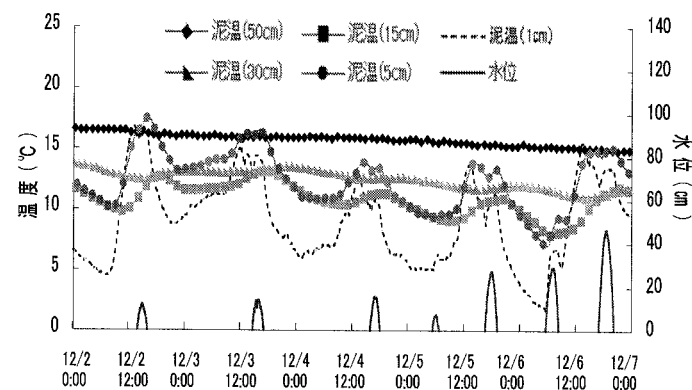


図-6 ST. 3における泥温の経時変化

5. 泥温分布の数値シミュレーション

(1) 一次元熱伝導方程式の概要

本章では、鉛直一次元モデルを用いて泥温分布の数値シミュレーションを行う。時系列の泥温分布は、干潟がフラットな地形であるならば、鉛直勾配に比べて水平勾配が無視できると仮定し、一次元熱伝導方程式により求められる。

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \quad (14)$$

$$K = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (15)$$

ここで、 K は潟土内の熱拡散係数、 λ は熱伝導率、 c は潟土の比熱、 ρ は潟土の密度である。一般的に K は潟土の土粒子密度、粒度分布、含水率などの物理特性によって変化するパラメータであり、潟土中の温度分布または熱の輸送にはこの拡散係数 K が重要なパラメータとなる³⁾。本研究では K の値は、熱伝対の観測値を式(14)に代入し求めた。

(2) 計算結果

数値シミュレーションでは鉛直方向のメッシュ間隔は1cmとし、このメッシュに与える初期泥温は観測値の線形補値を与えた。計算ステップにおいては、地表面の泥温を得るための十分な観測を行っていないため、観測値の泥深1cmと各地点の最深部の温度を境界条件として与えた。計算結果を図-7に示す。図中の左段から右段にかけては地点毎にST.1, ST.2, ST.3, 上段から下段にかけては観測値、以下に計算手法を示す計算値step1, step2の結果である。

a) 一次元熱伝導方程式を用いた計算結果 (step1)

step1は、式(14)を用い、泥層を上層、中層、下層の三層に分け、それぞれの層で熱拡散係数を一定値で与えて計算を行なった。その結果、全層での周期的な泥温変動はある程度精度良く再現することができ、また上層と下層での温度差も良く再現することができた。しかし、泥深30cm以深は、温度差が観測値と比べて小さくなる、泥温上昇のピーク時の表層付近の泥温分布を過大評価してしまうなどの問題点も見られた。また、ST.1における泥深30cmや、ST.3における泥深5cmでの計算結果は実測値と大きく異なる結果となった。干潟の泥温を考えると、干潟の最大の特徴である潮汐による影響を十分に考

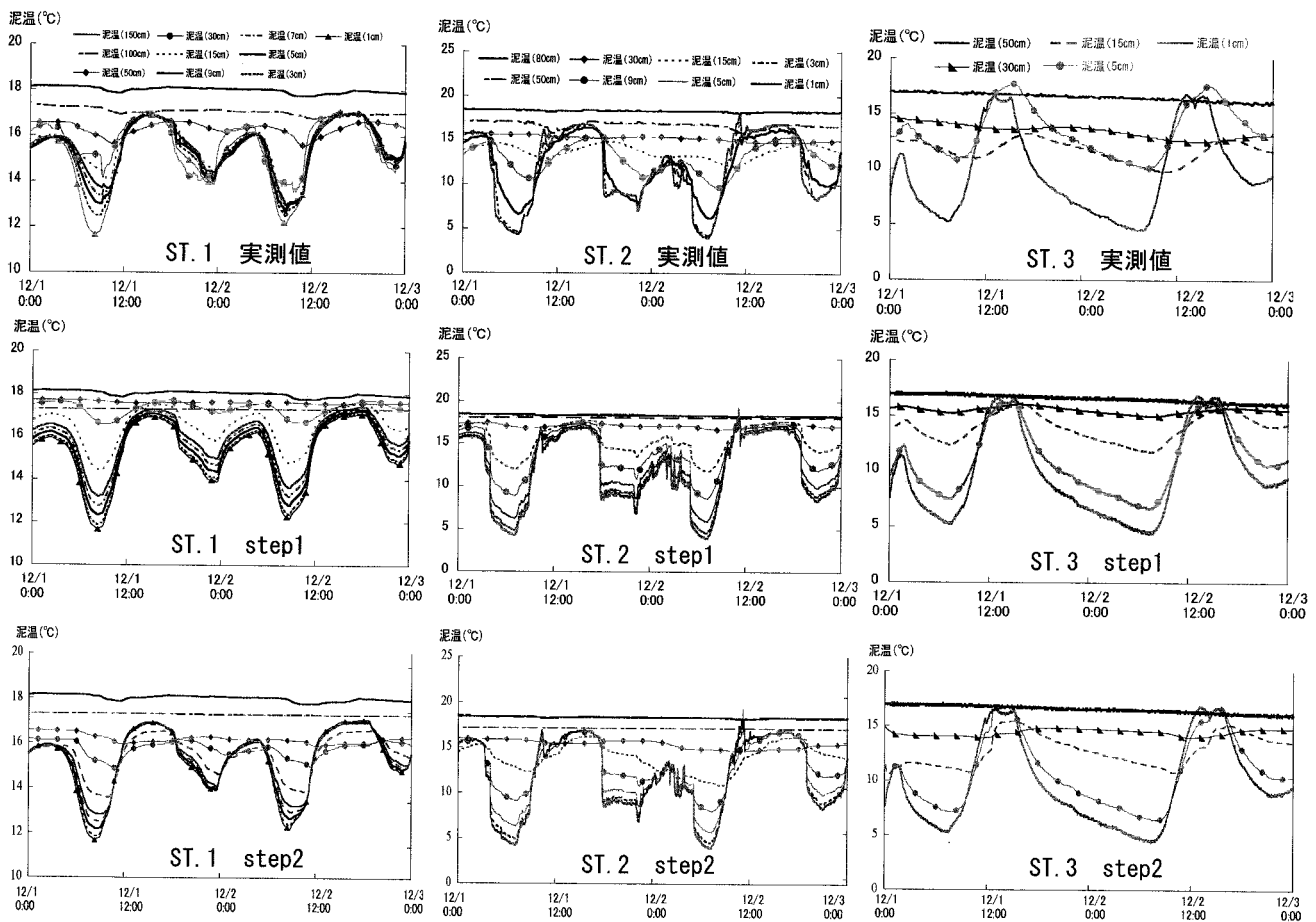


図-7 泥温の経時変化の比較

(左段よりST.1, ST.2, ST.3, 上段より実測値, 計算値step1, 計算値step2)

える必要がある。

b) 浸透水流動を考慮した一次元熱伝導方程式 (step2)

前節でも述べたように、潮汐の変動が泥温変動に与える影響は重大であると考えられる。海水が流入したと同時に表層付近の泥温が急激に上昇している様子を見ると、浸入してきた海水が地表面から潟土内を瞬時に温めるのではなく、潟土の土粒子の空隙に相対的に温かい海水が浸透したと考えられる。そこでstep2として、泥温上昇期、すなわち潮汐により干潟に海水が流入したときの数値計算の再現性の向上を図るため、以下に示す、浸透水流動に伴う熱の流れを考慮した一次元熱伝導方程式を用いることとする⁵⁾。

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} - v \frac{\partial T_s}{\partial z} \quad (16)$$

ここで、 v は単位面積を通じて1秒間に浸透移動する水量であり、以下の式で表される。

$$v = q_z = -k_z \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (17)$$

ここで、 k_z は透水係数、 ϕ は水頭ポテンシャルである。なお、透水係数 k_z は朴ら³⁾を参考にした。本研究では水頭ポテンシャルを算出するための十分な観測が行われていないため、 v は以下の式により推算した。

$$v \cong -k_z \frac{dH}{dL} \quad (18)$$

ここで、 dH は水深、 dL は各地点の熱伝対センサーの最大の深さを表す。以上の式を用いた計算結果を図-7の下段に示す。

step1とstep2を比較すると、step2は全地点において上層と下層の温度差をより精度良く再現することができた。また泥温上昇期や泥温ピーク時の再現性は格段に良くなったと考えられる。今後、熱拡散係数の与え方や初期値、境界条件の与え方次第でさらに精度良く再現することが可能であると考えられる。また、この計算式は一次元の簡単な式であり、水質モデルなどの境界条件としても容易に導入できるものと考えられる。

6. 結言

本研究では気象観測および泥温・水温の鉛直プロフィール観測を行い、干潟における熱環境特性を明らかにした。また実測値と数値モデルを用い、泥温の再現計算を行った。以下にその主要な結果を示す。

- (1) 地表面における熱収支の変動は、潮汐と日射のタイミングに強く影響されることを得た。
- (2) 干潟において、正味放射量の約50%の値を持つ潜熱輸送量が大气へ放出される場合があることがわかった。また潟土への貯熱量の結果から、夜間においては大气と潟土の熱交換よりも、海水と潟土との熱交換の方が約4倍近く大きいこともわかった。
- (3) 海水による熱環境の影響は地表面だけでなく、潟土内の温度分布にも重大な影響をもたらすことが確認された。また、地盤高の違いによる干出冠水時間の違いにより異なる泥温分布、泥温変動を示すことが明らかとなった。つまり、大气、海水、潟土の三者による熱の交換が干潟の熱環境に大きく影響を及ぼすものと考えられる。
- (4) 泥温の数値計算において、一次元熱伝導方程式に浸透流の影響を考慮した第二項を追加することにより、再現性は良くなった。このモデルは干潟における泥温の再現に有効だと考えられる。

今後自然干潟を対象としてより詳細な検討を行うためには、泥温再現の数値モデルの汎用性を上げる必要があるが、そのためには潟土の様々な物理性状について調査を行い、それらが熱拡散係数に与える効果を定量化することが必要になると考えられる。

参考文献

- 1) 永尾謙太郎, 滝川 清, 森本剣太郎, 田渕幹修, 芳川 忍: 干潟域における熱収支過程のモデル化と現地適用性の検討, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 1141-1145, 2007.
- 2) 近藤純正: 地表面に近い大気の科学 理解と応用, 東京大学出版会, 2000.
- 3) 朴 鐘和, 中山哲蔵, 瀬口昌洋: 沿岸干潟域における底泥の環境特性, 水工研研報, pp. 19, 1997.
- 4) 八幡敏雄: 土壌の物理, 東京大学出版会, 1975.