# 干潟における底泥温度特性に関する研究

Field Study on Characteristic of Thermal in Bottom Mud at Tidal Flat

森本剣太郎<sup>1</sup>•矢北孝一<sup>2</sup>•清田政幸<sup>3</sup>•滝川 清<sup>4</sup>

## Kentaro MORIMOTO, Kouichi YAKITA, Masayuki KIYOTA and Kiyoshi TAKIKAWA

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 to grasp the characteristic thermal from field observation and calculate the numerical thermal model simulation in the bottom mud at tidal flat. The thermal water or bottom was observed at four sites that were different in the ground level and the meteorological variables in the inter-tidal zone near Kumamoto Port. As a result, the thermal in bottom was depended on tide change and the numerical thermal model improved the accuracy with a scheme thermal diffusion.

## 1. はじめに

干潟は潮汐によって独自の環境を形成し,気圏,水圏, 地圏と生物圏の4圏が相互に作用し合う複雑系である. 干満のサイクルが、底泥や海水に新鮮な酸素を提供し内 陸付加などの栄養塩を一次生産者によって分解・浄化、 太陽の光や熱エネルギーが珪藻類や植物プランクトンの 繁殖や生育を促進させ、ベントス、魚、野鳥に至る種々 の生物生息場の提供,潮干狩りなどの親水機能など多岐 に渡る. 干潟の水質, 底質, 生物は早くから注目され数 多くの既往研究があるのに対し、干潟の気圏や温度に関 する研究事例(朴ら, 1997;松永ら, 1998;二瓶ら, 2002)はあるものの前者と比べると少なく、干潟固有の 複雑系を紐解くには更なる研究成果が期待される.また, 昨今の生態系モデルは、湾内の海域を対象としたモデル について十分に検討されているが干潟を含めたモデルと なると実に少なく、複雑系の簡略化や干潟占有面積の過 少などの理由により無視されることが多い. しかし, 有 明海の干潟面積は湾内面積の約11%を占め(大阪湾0.1 %、東京湾1.8%)、干潟が及ぼす影響を無視することは 出来ない. また, 二瓶ら(2002) はマングローブ域の調 査により水中に入射する日射量は水表面と底面に吸収さ れること、田中ら(2004)は熊本港周辺干潟において干 出時に潟土が熱源であることを論じており、干潟の熱収 支の重要性を説いている.

そこで本研究は、植物プランクトンや生物活動の活性

1 正 会 員	博(工)	熊本大学沿岸域環境科学教育研究セン ター特定事業研究員
2 正 会 員 3 学生会員 4 フェロー	工博	熊本大学工学部技術部 熊本大学大学院自然科学研究科 熊本大学沿岸域環境科学教育研究セン ター教授

に及ぼす,また数値解析の境界条件などに必要な干潟の 熱環境特性を把握することを目的として,熊本港周辺干 潟において気象観測や水温・泥温について現地観測し, 特に,干潟の泥温や潟土の熱拡散係数について考察を行っ た.さらに数値シミュレーションにより泥温分布の再現 を試み,観測結果と比較した.

### 2. 熊本港周辺における現地観測の概要

本研究は、図-1に示す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 の池と略す)」およびその周辺の自然干潟において現地 観測を実施した.図より,野鳥の池は護岸により外海と 隔てられているが,直径1mの通水管を通して潮汐によ り海水が自由に出入りできる.野鳥の池から北へ約160 mの干潟上に設置された気象観測塔(以下,観測塔と



図-1 野鳥の池と気象観測塔の位置

略す)において表-1に示す観測項目を収集した. さらに, 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、観測塔傍の自然干潟 St.1,野鳥 の池外の自然干潟 St.2,野鳥の池内の潮溜まり St.3,野 鳥の池内の高潮帯 St.4の計4地点において T 型熱伝対な どにより、地中の5~10深度(泥深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 イル観測を行った。また、各地点における底質の中央粒 径を表-2, St.1, 2における土粒子密度と直径8cmの供 試体長 Lを底泥表層から10cm と30cm 採泥し、それぞれ に対し h/L=1, 2, 3の条件(h は水位差)で行った定水 位法の透水試験の平均値を表-3に示す.図-2は温度鉛直 プロファイル観測の模式図であり、地盤高(D.L.表記) もあわせて記す.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い る. 観測期間は2007年11月20日~12月11日であり、St.1 では5秒毎のサンプリングデータを5分平均で、St.2~St.4 は1分毎の瞬間値を汎用型データロガーに収録した.

## 3. 熱伝対の観測結果と考察

#### (1) 泥温の経時変動

図-3は St.1, St.2, St.4の12月2~7日までの泥温と観 測地点での水位の経時変動図であり、水温・気温熱伝対 センサー(底泥表層から5cm)の観測値と気象観測塔の 気温も併せて示す。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、海水と潟土間で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は潮汐の変動に追随し 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.この期間はちょうど小潮期であり,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,

表-1 観測項目の一覧

場所	内容	観測項目		
気象観測塔	気象 風向・風速,気温,相対湿度,降 気圧,4成分放射			
(St.1)	海象			
	温度	泥温と水温・気温(20ch)		
St.2	温度	泥温と水温・気温(12ch)		
St.3	温度	泥温と水温・気温(12ch)		
St.4	温度	泥温と水温・気温(7ch)		
その他	水質	塩分 水温 pH 濁度 DO ORPなど		

**表-2** 底質の中央粒径(μm)

泥深(cm)	St.1	St.2	St.3	St.4
0	234.9	29.0	60.0	54.8
10	131.8	29.8	79.3	51.3
20	133.1	42.5	23.8	64.4
30	53.3	45.6	25.4	55.9

**表-3** St.1,2の土粒子密度(g/cm3)と透水係数(cm/sec)

	泥深	St.1	St.2
土粒子	0~10cm	2.81	2.56
密度	10~20cm	2.83	2.60
(g/cm³)	20~30cm	2.77	2.59
透水係数(cm/sec)		4.55E-04	5.21E-05



図-2 温度観測地点の模式図 (泥温は潟土表面からの深さ,水温・気温は潟土表面からの高さ)

白川河口であるが故に澪筋や地下水などの影響により安 定した温度を保っていると推察する.

St.4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.4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.なお、St.3の潮溜まりは、 測定誤差もしくは生物活動の影響なのか定かでないが、 観測結果に疑問が残る点が数多く見られた.

### 4. 熱拡散係数と泥温数値シミュレーション

#### (1) 一次元熱伝導方程式

地中温度の鉛直方向の熱伝導方程式は、以下のとおり である(近藤, 1994).

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \tag{1}$$

$$K = \frac{\lambda}{c\,\rho} \tag{2}$$

ここで、Kは潟土の熱拡散係数、 $\lambda$ は熱伝導率、cは比 熱、 $\rho$ は密度である。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輸送に重要な パラメータである(朴ら、1997).

(2) 熱拡散係数

朴ら(1997)と林ら(2000)は,式(1)の解法に昼夜 や潮汐による温度変動の振幅と位相差に注目して熱拡散 係数Kを求めている.また,松永ら(1998)は,冠水時 の観測値を式(1)に入力し熱拡散係数を求めている.本 研究では,式(1)の一次元非定常方程式を差分化し陰解 法の SOR 法(Successive Over Relaxation:逐次過小緩和 法)を用いて熱拡散係数を算出した.図-4は算出した熱 拡散係数を,横軸を冠水および干出しはじめた時間を基 準とした時系列変化の一例であり,冠水時と干出時に区



図-3 St.1, St.2, St.4における観測値の泥温鉛直プロファイルの経時変化(2007/12/02~2007/12/07)



 図-4 St.1における冠水・干出し始めからの経過時間と熱拡散係数 (左:泥深5cm, 左:泥深30cm, 左:泥深150cm)

別して表現した. なお, 凡例下の拡散係数は, 算出した 値のうち上位・下位それぞれ10%の値を取り除いた平均 値である. St.1の泥深5cm, 30cm, 150cm である. 図よ り, いずれの条件においても熱拡散係数に大きなバラツ キが生じている. これは, 調査地点 St.1はハマグリ, ア サリ, シオフキガイ, アナジャコ, ゴカイなどの底生生 物が数多く生息しており, センサー付近での巣穴や生態 活動に伴う海水や底泥の移動・攪拌による温度変動も考 えられるが, 朴ら (1997) と林ら (2000)の観測結果に おいても同様にバラツキが生じており, 観測誤差の範囲 内と考える. また, どの泥深においも熱拡散係数は, 冠 水時よりも干出時の方が小さい傾向にあり, 水分量が増 大すると熱拡散係数は小さくなるという理論 (八幡, 1975; William ら, 2004) と反する結果となっており, 潮汐を考慮する必要がある.

## (3)泥温の数値シミュレーション

数値シミュレーションは、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11/26の0時 の観測値をスプライン関数で補間した.また、境界条件 として、5分平均の観測値の泥深1cm と最深部の温度を 与えた.計算結果を図-5に示す.上段から下段にかけて は観測値、および以下に記す計算手法の算出値である.

#### a) 一次元熱伝導方程式を用いた計算結果(Step1)

Step1は式(1)を用い,底泥は均一粒子であると仮定し, 干潮時の熱拡散係数0.01 cm<sup>2</sup>/sec,満潮時0.03 cm<sup>2</sup>/sec と して計算を行なった.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15~50cmを中心に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.特に,泥深30cm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 温を考えるとき,干潟の最大の特徴である潮汐による影 響を十分に考える必要がある.



(上段:観測値,中段:Step1,下段:Step2)

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 でなく,潟土の土粒子の間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 (八幡, 1975).

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} - v \frac{\partial T_s}{\partial z}$$
(3)

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.

$$v = q_z = -k_z \frac{\partial \phi}{\partial x} \tag{4}$$

ここで、 $k_{z}$  は透水係数、 $\phi$  は水頭ポテンシャルである. なお、透水係数 kz は30cm 以浅では**表**-3に示す4.55×10<sup>4</sup>、 それ以深では朴ら(1997)の1.0×10<sup>6</sup> 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.

$$v \cong -k_z \frac{dH}{dL} \tag{5}$$

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-5の下 段に示す. なお, 熱拡散係数は干潮・満潮時ともに図-4 を参考とし0.024cm<sup>2</sup>/sec とした.

Step1と Step2を比較すると, Step2は上層と下層の温 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顕著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.

#### 5. 結語

本研究では気象観測および泥温・水温の鉛直プロファ イル観測を行い,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) 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及ぼすことが確認された.

(2) 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,大気,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.

(3) 底泥の熱拡散係数は場所(底質性状)や泥深によっ て異なり,また,バラツキも確認できた.しかも,間隙 水が少ない深い地点ほど熱拡散係数が大きくなる結果を 得た.このことから潮汐による潟土間隙への影響を考慮 する必要がある.

(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.

ただし、本計算では冠水時には海水が潟土に浸入する および干出時に潟土から排水する海水量を無視しており、 海水(間隙水)の質量保存則を満足しておらず、時系列 の含水率の変動追跡調査などを行う必要がある.しかし、 提案した計算式は鉛直一次元の簡素な式であり、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 える.最後に、本研究の対象地点は、底生生物が数多く 生息し(倉原ら、2007)生態活動の影響を強く受けるた め、これ以上の観測精度の向上は困難だと思われる.ま た、高精度の精緻化やシミュレーションの再現性も必要 であるが、データを蓄積し、松永ら(1998)や永尾ら (2007)のように気温や日照など AMeDAS などで観測 されている一般的な気象情報から泥温数値シミュレーショ ンができるように汎用性を持たせることも必要であり、 今後の検討課題である.

## 参考文献

- 倉原義之介・森本剣太郎・増田龍哉・鐘ヶ江潤也・古川恵太・ 滝川 清 (2007):干潟環境再生に向けた生物生息環境評価 モデルの活用に関する検討,海岸工学論文集,第54巻, pp.1401-1405.
- 児玉真史・松永信博(1999):冬季干潟における熱環境特性と底 生藻類の分布,海岸工学論文集,第46巻, pp.1126-1130.
- 近藤純正(1994):水環境の気象学-地表面の水収支・熱収支-, 朝倉書店, pp.128-159.
- 近藤純正(2000):地表面に近い大気の科学-理解と応用-,東京大学出版会, pp.137-144.
- 永尾謙太郎・滝川 清・森本剣太郎・田渕幹修・芳川 忍 (2007):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.
- 成松 明・田中健路・森本剣太郎・滝川 清(2005):乱流渦相 関法を用いた有明海干潟上の地表面フラックス直接観測, 海岸工学論文集,第52巻, pp.1081-1085.
- 二瓶泰雄・綱島康雄・佐藤正也・青木康哲・佐藤慶太・灘岡和 夫(2002)::現地観測に基づくマングローブ域の水温・放 射環境に関する研究,海岸工学論文集,第49巻,pp.1206-1210.
- 朴 鐘和・中山哲嚴・瀬口昌洋(1997):沿岸干潟域における底 泥の環境特性,水工研研報, pp.1-19.
- 松永信博・児玉真史・福田和代・杉原裕司(1998):干潟におけ る熱収支の観測,海岸工学論文集,第45巻,pp.1056-1060.
- 八幡敏雄(1975):土壌の物理,東京大学出版会, pp.131-133.
- 林文慶・田中昌宏(2000):沿岸域干潟底質の熱環境の観測, 鹿 島技術研究所年報, 第48号, pp.111-114.
- William, A. J. and Robert H. (2004) : 土壌物理学-土中 の水・熱・ガス・化学物質移動の基礎と応用-, 築地書館, pp.180-183.