

現地連続観測による有明海干潟域の 熱環境特性に関する研究

RESEARCH ON HEAT ENVIRONMENTAL CHARACTERISTIC OF ARIAKE SEA
TIDAL FLAT REGION BY LOCAL CONTINUOUS OBSERVATION

清田政幸¹・矢北孝一²・森本剣太郎³・滝川清⁴

Masayuki KIYOTA, Kouich YAKITA, Kentarou MORIMOTO 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 熊本大学 工学部技術部 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

³正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3丁目1-1)

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)

The tidal flat region has a maintenance function of the ecosystem that various living things live, a clarification function of seawater, and a hydrophilicity service function. Various ecosystems of a peculiar seafood and the wild bird are formed under a peculiar, natural condition by the influence of the inflow load from continental areas and actions of the tide. Recently, various problems of the environmental deterioration such as making of the bottom sediment, mud oxygen-deficient water, and the red tide occurrence's increasing and making to a large scale have been actualized in the littoral region in various places including Ariake Sea. In the present study, the continuous observation of the weather and an underground temperature in which year was passed to construct the water quality change model by whom the heat budget was considered, to assume the adjustment to the whole area of Ariake Sea to be the final purpose, and to obtain a basic finding of the interchange of heat in the tidal flat region was executed, and a heat environmental characteristic of the tidal flat was considered. In addition, the numerical simulation of the distribution of the temperature of mud of the perpendicular one dimension was executed in winter and summer and it made comparative study with the observational result.

Key Words : Ariake sea, Thermal transfer, Thermal environment, Thermal diffusion, tidal flat

1. はじめに

干潟は潮汐によって独自の環境を形成しており、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。干潟は、内陸負荷などの栄養塩を一次生産者によって分解・浄化するという水質浄化機能、太陽光に起因する熱エネルギーによる珪藻類、植物プランクトン、底生生物の繁殖や生育を促進させる生物生産・生息場機能、潮干狩り、バードウォッチングなどの親水機能など、多様な機能を有している。近年、干潟の保全・再生に対して社会の関心が高まっており、干潟の機能を理解するために水質、底質、生物の研究が活発に行われており、多くの知見が得られている。それに対して、干潟の気圏や温度に関する研究事例^{1), 2), 3)}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、気圏、温度を含めた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。そこで本研究では、植物プランクトンや生物活動の活性に及ぼし、また数値解析の境界条件などにも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底質や気象観測や水温・泥温について現地観測を実施し、特に、干潟における泥温・熱収支の季節変動特性や、泥温と気象との関連性について考察を行った。さらに鉛直一次元の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. 調査地点・観測概要

(1) 調査地点概要

本研究は図-1に示すように、熊本港北東角から

北に約160m離れた砂泥質干潟上に設置された干潟気象観測塔（以下、観測塔とする）；およびその周辺の自然干潟において調査を行った。観測塔の全景写真を写真-1に示す。また観測期間中に光波測量を実施し地盤高（D.L.表記）を求めるとともに、底質を柱状採取し、底質の深度別の粒度分布、50%粒径、含泥率、密度を調査した。密度は試験方法JIS A 1202で分析し、その他の項目は分析機器（HORIBA LA-920）を用いて分析した。さらに直径8cmの供試体長 L を底質表層から10cmと30cm採取し、それぞれに対し $h/L = 1, 2, 3$ の条件（ h は水位差）のもと、現地において定水位法を用い透水係数を求め、その平均値を算出した。調査地点の底質特性を表-1に、深度別の粒度分布を図-2に示す。観測塔付近は泥深25cmまでは砂分が60%以上を占め、表層付近では粗砂を含んでいる。また泥深が大きくなるにつれて含泥率が高い値を示すようになり、泥深30cm付近では含泥率が50%以上となっている。

(2) 観測概要

本研究では観測塔において2007年10月より気象・海象情報の連続観測を行っており、観測項目は風向、風速、気温、湿度、降雨量、気圧、潮位、泥温、水温および4成分放射を観測している。泥温と水温はT型熱伝対を用いて鉛直方向に観測しており、泥深1～150cmで不等間隔に10ch、地表面から1～300cmの高さに不等間隔に4ch、センサーを設置して観測している。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。また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。観測塔のデータは5秒間隔で取得したサンプリングデータをロガー内部のプログラムで物理量に変換し、5分間の平均値を汎用型データロガーに収録している。

なお、水温および泥温の基準位置は、干潟表面としている。観測期間中に、台風・出水等の干潟域を改変するイベントは発生しておらず、約2週間毎のデータ回収の際に、水位センサーと熱電対の基準位置を確認した。

3. 泥温の季節変動特性

本章では、観測塔において2008年1月から2009年1月の期間で連続観測したデータから、2月、4月、7月、10月の大潮期間中の4日分を各季節の代表として設定し、それぞれの期間における泥温の変動特性について考察する。また、降雨量の多い6月における泥温変動特性についても考察した。



図-1 調査地点位置図

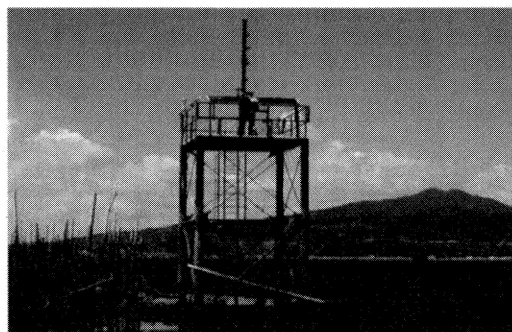


写真-1 観測塔の様子

表-1 調査地点の底質特性

底質 色彩	地盤高 (D.L.)	透水係数 (cm/sec)	密度 (g/cm ³)	深度 (cm)	50%粒径 (mm)	含泥率 (%)
黒灰色	157 (cm)	4.55E-04	2.815	0～5	0.235	5.5
				5～10	0.179	6.0
			2.831	10～15	0.132	34.7
				15～20	0.174	14.7
			2.768	20～25	0.133	29.2
				25～30	0.052	57.8

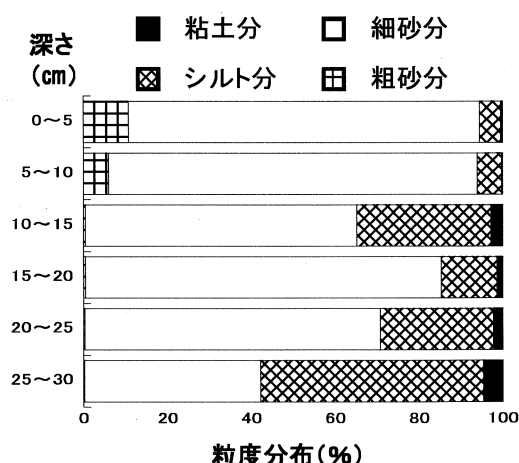


図-2 深度別の粒度分布

(1) 泥温の季節変動特性

各季節における泥温の時系列を図-3に示す。2月（冬季）においては表層付近の泥温は下層より常に低い値を示している。また2月6日に注目すると、この日は昼間に干潮を迎え、地表面は日射により温め

られるが泥温変動は小さく、その後の上げ潮により海水が流入しても大きな泥温変動は見られず、泥深30cmまではほぼ同じ泥温分布を示しているが、夜間に干出すると表層付近の潟土は急激に冷却され、表層から下層まで温度差が生じている。その後、相対的に温かい海水が流入すると同時に潟土が急激に温められ、再び安定した温度分布を示すようになる。この一昼夜のサイクルから、冬季では海水が熱源として作用していることがわかった。

4月（春季）においては、昼間干出すると同時に日射の影響により深度毎に緩やかな温度勾配を描きながら泥温は上昇し、海水が流入した後は泥温が下降しており、夜間は干潮後の海水流入により泥温が上昇していることから、海水は、昼間は冷却源として作用しており、夜間は熱源として作用していると考えられる。しかし、4月4、6、7日は、昼間の干潮後、海水が流入すると同時に泥温が一時的に急上昇し、1日で最大の泥温を記録していることがわかる。これは海水が遡上してくる際に、日射と、日射により温められた潟土の熱を吸収することにより高い温度の水塊を形成し、それが干潟に流入することにより一時的に高い温度を示していると考えられる。その後水位が高くなるとともに泥温は下降し、泥深30cmまで安定した値を示している。4月5日の昼間においては海水の流入による泥温上昇はない。これはこの日の天候が曇りで、日射量が他の3日の3割程度であり、他の3日に比べて日射の影響を受けていないことから、前述を支持する結果となった。

7月（夏季）においては、他の季節に比べて表層と下層での温度差が大きく、最高で約4℃の差がある。春季に見られた、昼間の干潮後の海水の流入による泥温の上昇は若干見られるが、基本的には昼夜問わず、海水の流入とともに泥温は下降しており、夏季において海水は概ね冷却源となっていることが確認できた。秋季においては春季とほぼ同様の変動傾向を示しており、海水は昼間においては冷却源に、夜間では熱源として作用している。

以上のように泥温の季節変動特性について考察した。いずれの季節においても表層から30cmまでは明確な泥温の日変化が確認できたが、それより深くでは日変化は見られなかった。また、年間を通して表層付近の泥温は30℃近く変動しているのに対して、下層では約15℃の変動があり、表層と下層では約二倍の泥温変動の違いが見られた。また、概ね海水は冬季においては熱源、夏季においては冷却源、春季と秋季において昼間は冷却源、夜間は熱源として作用しているようだが、日射量の多い春季や夏季においては、昼間に遡上してくる海水は温度が高く、流入する際に瞬時に潟土を加熱するなど、特異な現象も確認できた。

この干潟に多く生息するヤマトオサガニ等の甲殻生物は、春から夏にかけては温かい干潟表面で活動

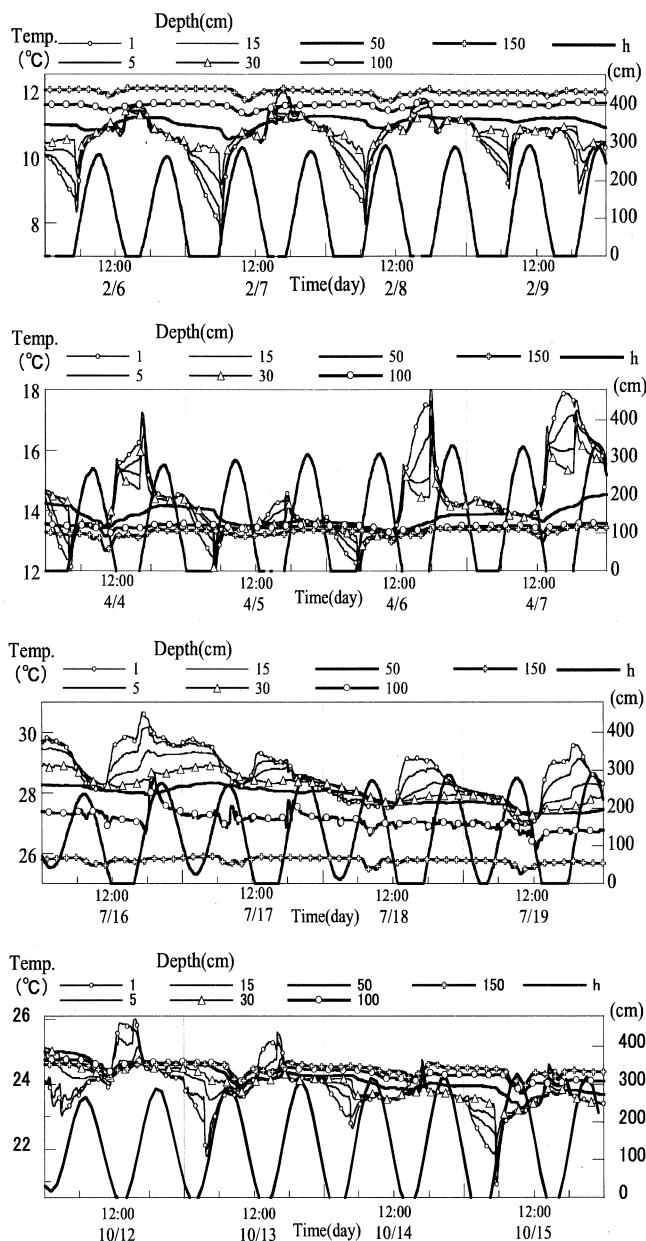


図-3 各季節の泥温変動

し、冬は潟土表面より温かい地中で過ごし、春を待つ。また泥温の日変動とともに巣穴内を移動しており、その活動が底質を攪拌し、好気的な環境に保つ働き（バイオターベーション）があり⁴⁾、潟土内の複雑な泥温変化が生物の活動を促し、底質環境にも影響を与えていることが示唆された。

(2) 降雨時の泥温特性

本節では一年間で最も降水量の多い6月における、晴天時、降雨時における泥温の変動特性について調べた。図-4は2008年6月14日から17日までの観測塔における降雨量、日最高気温、日最低気温、正味の放射量および泥温の時系列である。観測期間中の降雨は、少ないものも含めて3日観測され、最大は6月15日の71mm/day、観測期間中の平均降雨量は

31mm/dayであった。またこの期間中、日最高気温、日最低気温ともに大きな変動はみられず、正味の放射量は最大降雨が観測された6月15日では100W/m²未満であり、それ以外では800~900W/m²であった。

降雨のない14、17日においては昼間に干潮を迎え、日射によって加熱されて温度が4℃近く上昇し、海水の流入によって泥温が下降しており、夏季と同様の泥温変動を示している。しかし最大降雨を記録した15日では昼間に干潮を迎えても泥温は上昇しておらず、むしろ表層付近の泥温は2℃近く下降し、観測期間中で最も低い値を示した。また16日は晴天日に近い日射量があるにもかかわらず、泥温の上昇が晴天日に比べて半分程度に抑えられている。以上のことから、夏季においては降雨が泥温上昇を抑える働きがあることがわかった。また、冬季においては泥温の下降を抑える傾向があり、降雨が干潟における熱循環に影響を与えている可能性が示唆された。

4. 地表面における熱収支の季節変動特性

(1) 熱収支式の概要および正味の放射量の算出

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⁵⁾。

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

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。

(2) 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。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 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

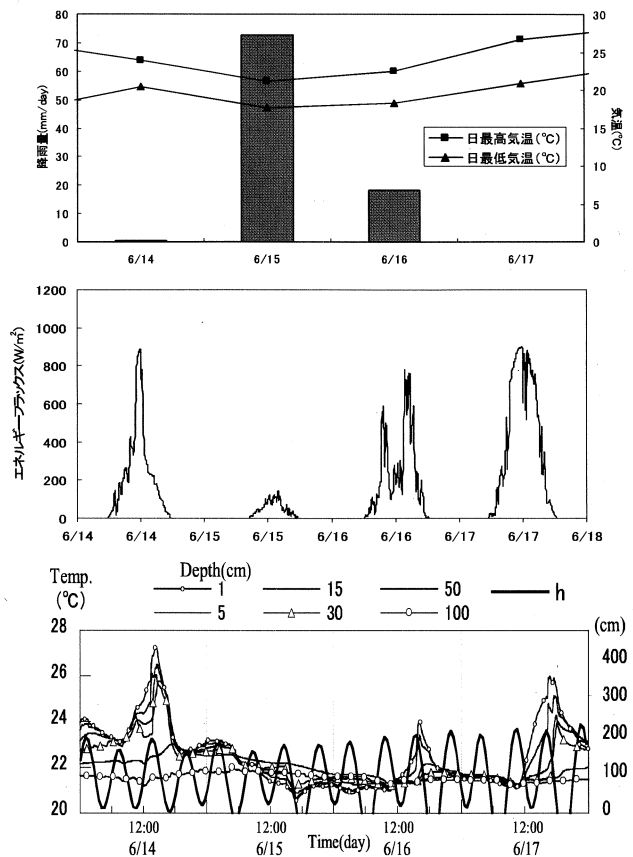


図-4 観測期間中の降雨量、最高・最低気温、正味の放射量、泥温の時系列

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。この顕熱・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)は以下のよう表される⁵⁾。

$$C_H U \approx C_E U (ms^{-1}) = 0.0027 + 0.0031 \cdot U_{10m} \quad (6)$$

また、微風($U < 2ms^{-1}$)、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。

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

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⁶⁾。

$$U_{10m} < 5.0 ms^{-1} \quad \text{の} \quad \text{とき}$$

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

5.0 ms⁻¹ < U_{10m} < 30.0 ms⁻¹ のとき

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

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) 地中への貯熱量の算出

地中への貯熱量 G_{soil} 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、(11) の式で求めることとした⁵⁾。

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

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。以上の方法を用いて算出した熱収支の時系列を図-5に示し、各パラメータの季節変動特性について考察する。なお、潜熱、顕熱輸送量は鉛直上向き方向への熱輸送が生じる値を示すこと、正味放射量、地中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、干潟においては、季節に関係なく水分の蒸発による潜熱輸送量が高い割合を占めていることがわかる。潜熱輸送量は日射と干出のタイミングに強く依存しており、正味放射量の多い昼間でも、冠水時には潜熱輸送量の増加は見られず、海水への貯熱などの効果が相応にあると考えられる。その後干潮を迎え、十分に湿潤した干潟上に日射が降り注ぐことにより、昼夜を通して最大の潜熱が輸送されており、冬季においては正味放射量の半分近い 250 W/m^2 、夏季においては正味放射量の半分以上である 700 W/m^2 もの潜熱が輸送されていることがわかった。また日射のない夜間においても大気の影響や、海水温が気温よりも高いことにより正の値を示している。一方、顕熱輸送量はどの季節においても低い値を示しており、最大でも 30 W/m^2 程度である。この結果は、2005年に乱流渦相関法により直接観測した結果と整合しており、干潟域において、バルク法を用いた潜熱・顕熱輸送量の算出が妥当であると言える。

5. 泥温の数値計算

泥温の数値計算はかねてから行われており、一次元の熱伝導方程式で概ね再現可能であることがわかっている。しかし既往の研究では境界条件に実測値を用いている場合が多く、海域全体の泥温を計算する場合、汎用性が低いと考えられる。そこで本研究では、晴天日の昼間・夜間の干潮時において、熱収支式の差分から求めた地中への貯熱量 G_{soil} を境界値として与え計算し、実測値との整合性について検討する。

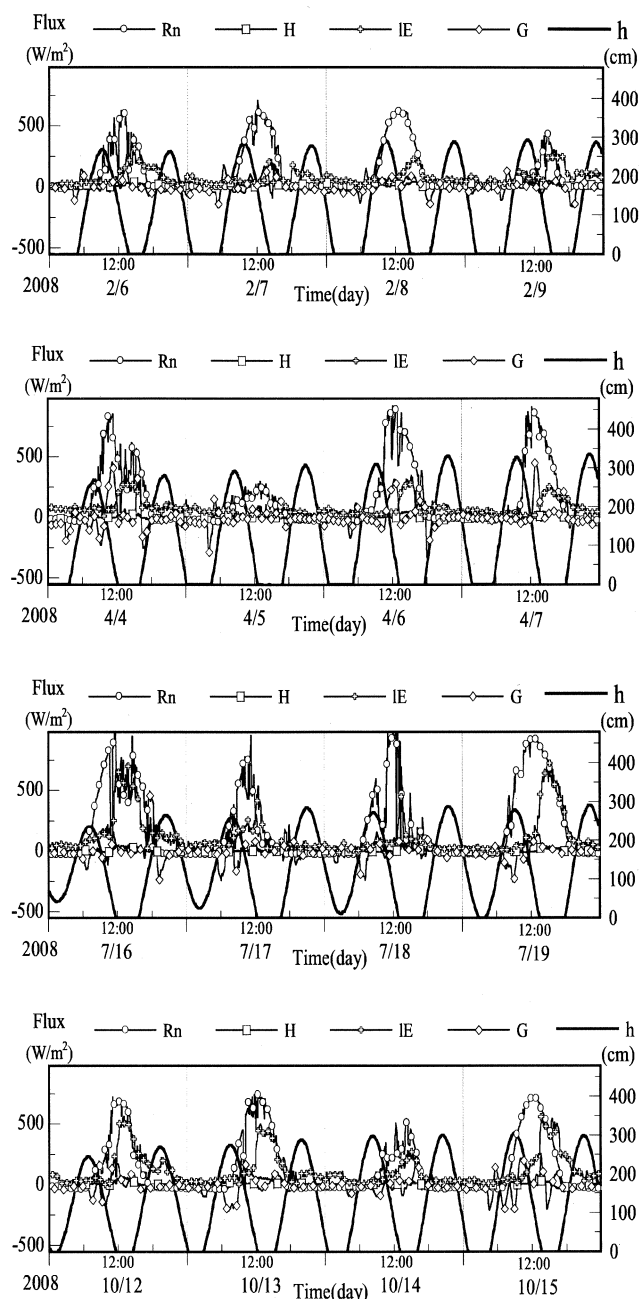


図-5 各季節における熱収支の時系列

(1) 一次元熱伝導方程式の概要

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。

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \quad (13)$$

$$K = \frac{\lambda}{c \rho}$$

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¹⁾。本研究では K の値は、熱伝対の観測値を式(13)に代入し算出した。

(2) 計算結果

数値シミュレーションでの境界条件は、式(1)の熱収支式から求めた地中への貯熱量を既知量として、式(11)を用いて地表面温度の時間勾配として求め、境界条件となる泥温として与えた。また初期条件は、観測値の線形補値を与え、鉛直方向のメッシュ間隔は1cmとした。

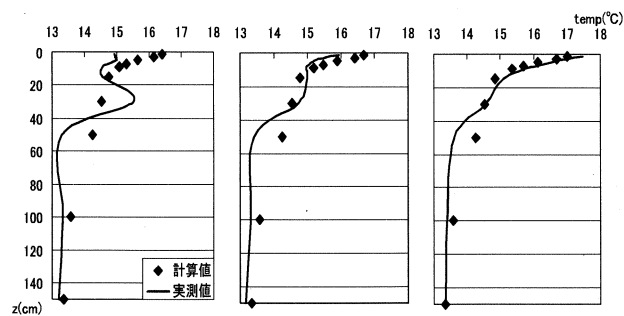
計算結果と実測値の比較を図-6、図-7に示す。図中の左段から右段にかけては、干出直後、干出2時間後、冠水直前における鉛直プロファイルで示した。

まず昼間の計算結果については実測値とよく一致しているが、干出直後は表層から泥深50cmまで再現性が比較的悪く、 $\pm 1^\circ\text{C}$ 程誤差が生じている。しかし時間が経過するにつれて再現性が良くなり、冠水直前では表層から最深部まで非常に良く一致している。これは、干出直後は潟土が十分に湿潤しており、時間の経過とともに潟土中の水分の移動や日射によって水分量が減少し、一般的な一次元熱伝導方程式での計算精度が向上したものと考えられる。また夜間については干出中は表層付近の再現性が比較的悪く、実測値よりも約 3°C 高くなっている。これは干潟表層が海水温に近い泥温で干出しても、日射による加熱が起こらず、また相対的に温度の低い大気に触れることにより、泥温上昇が抑えられているためと考えられる。

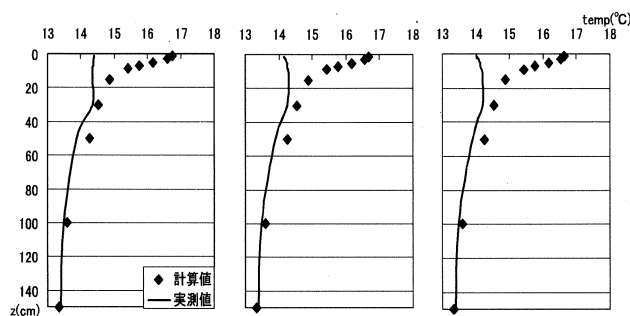
6. 結言

本研究では有明海の自然干潟において気象や泥温の連続観測を行い、泥温・熱収支の季節変動特性について考察した。また泥温の数値計算を行い、実測値との整合性について検討した。以下に主要な結論を述べる。

- (1) 干潟において、概ね海水は冬季では熱源、夏季では冷却源、春季と秋季では昼間は冷却源、夜間は熱源として作用しているが、夏季や春季では、昼間に遡上してくる海水は系内で最も高い温度を有していることがわかった。
- (2) 干潟での熱収支において、季節の変動に関係なく、潜熱輸送量が高い割合を占めており、また変動量も大きい。一方、顕熱輸送量は非常に小さい値で推移していることがわかった。



(a) 干出直後 (b) 干出2時間後 (c) 冠水直前
図-6 春季昼間の干出時における鉛直プロファイルの計算値と実測値との比較



(a) 干出直後 (b) 干出2時間後 (c) 冠水直前
図-7 春季夜間の干出時における鉛直プロファイルの計算値と実測値との比較

- (3) 干出時における泥温の数値計算は観測値と良く一致しているが、より正確に再現するためには干出後の時間変動に伴う潟土内の水分の動態を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 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, 水工研報, pp. 19, 1997.
- 2) 松永信博, 児玉真史, 福田和代, 杉原裕司: 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, 1998.
- 3) 成松 明, 田中健路, 森本剣太郎, 滝川 清: 乱流渦相関法を用いた有明海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, 2005.
- 4) 小野勇一: 干潟のカニの自然誌, 平凡社, 自然叢書 29, pp. 247-253, 1995.
- 5) 近藤純正: 地表面に近い大気科学 理解と応用, 東京大学出版会, 2000.
- 6) 永尾謙太郎, 滝川 清, 森本剣太郎, 田淵幹修, 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.