有明海奥部泥質干潟の温熱環境とその生物活動への影響

Heat and Temperature Environments at the Muddy Tidal Flat in the Interior Parts of the Ariake Sea and Its Effects on Bioturbation

瀬口昌洋¹・郡山益実²・吉野克己³・田中文也⁴

Masahiro SEGUCHI, Masumi KORIYAMA, Katumi YOSHINO and Fumiya TANAKA

The major objectives of present study are to clarify the properties of heat and temperature environments at the muddy tidal flat in the interior parts of the Ariake Sea, and the relationships between these environmental properties and bioturbations such as the burrow constructing or feeding by macrofaunas, in order to obtain the fundamental knowledge for preserving the environment of muddy tidal flat and the rare macrofaunas there. In the present studies, it was shown that there were large differences in the properties of heat balance and soil temperature profiles at the muddy tidal flat in summer and winter. It was also clarified that the air and soil temperature there made affects the bioturbations of macroepifauna strongly, and its active bioturbations reduced the number of the small burrows of macroinfauna.

1. はじめに

有明海奥部には、わが国において他に類を見ない広大な泥質干潟が発達している。ここには、ムツゴロウ、ワラスボといった貴重な大陸系特産種や準特産種の底生生物が多く生息している(佐藤, 2001)。これらの底生生物は、干潟が露出する干潮時には活発な生物活動を通して底質や水質の環境さらには環境の浄化や親水などの多面的機能に大きな影響を及ぼす(瀬口ら, 2002)。一方、階層構造すなわち干潟表面から下層に向かって酸化層、RPD (Redox Potential Discontinuity) 層、還元層より成る底泥中(栗原, 1991)には、好気性や嫌気性のバクテリアが多く生息し、それらの活発な代謝活動を介して泥質干潟におけるN, P, Cなどの物質循環に深く関与している(瀬口ら, 2007)。このような泥質干潟における底生生物の採餌や巣穴形成などの生物活動及びバクテリアの代謝活動は、気温や底泥中の温度(泥温)によって大きく左右される(古賀ら, 2009)。したがって、近年悪化している泥質干潟の環境を修復し、さらには減少している底生生物(農林水産省, 2003)を保全するためには、これらの基本的かつ重要な環境因子である気温、泥温、日射量などの温熱環境の特性を明らかにすると同時に、その生物活動への影響を究明することが不可欠である。しかし、近年、この方面の研究は必ずしも多くはなく、博多湾和白干潟での熱収支(松永ら, 1998)や有明海熊本港地先干潟での熱収支過程モデル化(永尾ら, 2007)の検討に関する研究が見られる程度である。

本研究は、有明海奥部に発達した広大な泥質干潟の修復とそこに生息する貴重な表在性底生生物の保全を前提に、表在性底生生物の活動を左右する温熱環境の時空間的変動性さらにはその底生生物の巣穴形成や採餌などの生物活動への影響を現地観測データに基づいて明らかにすることを目的とした。特にここでは、干潟の冠水時には巣穴に這入って活動を休止し、また干出時には巣穴から干潟面に出て活動を活性化させる表在性底生生物の習性を考慮し、対象地点が数日間～約1週間干出する小潮期干潮時の温熱環境を対象に検討した。

2. 現地観測の概要

図-1に示されるように、有明海奥部の最も典型的な泥質干潟($Md\phi \approx 7$)が広がり、ムツゴロウ、トビハゼ、ヤマトオサガニなどの表在性底生生物やゴカイなどの埋在性底生生物が多数生息する佐賀市東与賀干潟で、2008年7月～2009年1月にかけて現地観測を行った。

現地観測では、図-2に示されるように干潟面上方2mの高さに風向風速計(HOBA, S-WCA-M003)、温湿度セン

図-1 観測地点Aの位置

1 正会員	農博	佐賀大学教授農学部生物環境科学科
2 正会員	農博	佐賀大学助教農学部生物環境科学科
3	農学士	九州大学大学院生物資源環境科学府
4	農学士	宮崎大学大学院農学研究科

図-2 観測装置の概観

サー (HOBA, S-THA-M002), 放射収支計 (Climatec, CPR-NR-LITE), アドベドメータ (Climatec, CPR-PCR-01) を, また底泥中には白金測温抵抗温度計 (Climatec, C-PT) を深さ0, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30cmに埋設し, 1時間間隔で連続測定し, データロガーに収録した。

一方, 現地観測中に広大な干潟が露出する10月, 12月の小潮期に干潟面に1m×1mのコドラート (方形枠) を置き, その上方2mにインターバルカメラ (Climatec, CH-CMR3) を設置し, 干潟面の底生生物の種類, 個体数, 活動状況, 巣穴の数と位置を1時間毎に約1週間に渡って連続撮影した。さらに, それに合わせて干潟表層1cmのクロロフィル-a (Chl.a) 濃度, 底泥中の土壌含水比, 酸化還元電位 (Eh) 及び間隙水の $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の濃度を測定した。なお, Chl.a濃度はLorenzen法 (西條ら, 1991) により, また栄養塩類濃度はオートアナライザー (SWAAT, BLTEC) で測定した。

3. 結果及び考察

(1) 干出時の温熱環境

図-3は, 観測地点における夏季と冬季の観測時及びその前後の水位の経時変化を示した。観測地点は, 大潮期

図-3 観測地点における観測時及びその前後の水位の経時変化

図-4 夏季, 冬季における R_n , H , ℓE 及び G の経時変化

において潮汐の干満に伴い冠水と干出を周期的に繰返すが, 小潮期では満潮時でも冠水しない。

図-4は, 干潟面が数日間～約1週間干出し, 表在性底生生物の活動が活発化する小潮期干潮時に放射収支計で測定された純放射量 (R_n) と (1), (2) 式より, それぞれ算出された顕熱輸送量 (H) 及び潜熱輸送量 (ℓE), さらに (3) 式より算出された地中伝導熱 (G) の夏季 (8月), 冬季 (12月) における経時変化を示した。

$$H = C_p \rho_a C_H U (T_s - T_a) \quad \text{..... (1)}$$

$$\ell E = \ell \rho_a \beta C_E U (q_{sat} - q) \quad \text{..... (2)}$$

$$G = R_n - H - \ell E \quad \text{..... (3)}$$

ここで, C_p は大気比熱, ρ_a は大気密度, C_H 及び C_E はそれぞれ顕熱及び潜熱のバルク輸送係数, T_s 及び T_a はそれぞれ干潟面温度及び気温, ℓ は気化の潜熱 ($= 2.5 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$), U は基準高さの風速, β は蒸発効率 (≈ 1.0), q_{sat} 及び q はそれぞれ T_s に対する飽和比湿及び大気比湿であり, (4), (5) 式で与えられる。

$$q_{sat} = 0.622 e_{sat} / (p - 0.378 e_{sat}) \quad (\text{g kg}^{-1}) \quad \text{..... (4)}$$

$$q = 0.622 e / (p - 0.378 e) \quad (\text{g kg}^{-1}) \quad \text{..... (5)}$$

ここで, e_{sat} , e はそれぞれ飽和水蒸気圧及び水蒸気圧, p は大気圧である。また, (1), (2) 式を適用する際, $C_H U$ (顕熱交換速度) 及び $C_E U$ (潜熱交換速度) として, それぞれ近藤 (2000) の提示した (6) 式及び (7) 式を用いた。

(a) 微風 ($U_{10} < 2 \text{ ms}^{-1}$), 不安定 ($T_s > T_a$) の時

$$C_H U \approx C_E U = 0.0012 (T_s - T_a)^{1/3} \quad (\text{ms}^{-1}) \quad \text{..... (6)}$$

(b) 上記以外の時

$$C_H U \approx C_E U = 0.0027 + 0.0031 U_1 \quad (\text{ms}^{-1}) \quad \text{..... (7)}$$

ここで, U_1 は地上1mの高さにおける風速である。図示

されるように、夏季（8月）の晴天日正午頃、 R_n は 800W/m^2 前後の高い値になる。そして、日中の R_n の大部分は、 ℓE によって占められる。すなわち日中、 R_n の多くは、干潟面での蒸発に利用され、気化熱として大気中に輸送される。しかし、日中において H 、 G は、 ℓE に比べて相対的にかなり低い。一方、冬季（12月）の晴天日正午頃、 R_n は夏季の約半分の 400W/m^2 前後の低い値となる。また、夏季とは逆に、冬季の日中では、 H 、 G がそれぞれ R_n の約半分を占めているが、 ℓE はほぼ0である。すなわち、日中、 R_n の約半分は干潟面付近の空気の流れにより大気中に輸送され、また残りの約半分は底泥中に伝導される。

図-5は、(8)式より算出される夏季と冬季の入放射量($R\downarrow$)に対する H 、 ℓE 、 G の比率 $H/R\downarrow$ 、 $\ell E/R\downarrow$ 、 $G/R\downarrow$ の経時変化を示した。

$$R\downarrow = (1-\alpha)S\downarrow + L\downarrow \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 $S\downarrow$ は日射量、 α はアルベド、 $L\downarrow$ は大気放射量である。図示されるように、図-4の各輸送量の経時変化をほぼ反映し、夏季晴天日では、 $\ell E/R\downarrow$ は正午過ぎにピークとなり、0.55前後の値となる。すなわち、干潟面への入射エネルギーの約55%は干潟面からの蒸発に消費される。また、 $G/R\downarrow$ は正午前に0.25前後のピークを示すが、正午頃には急減してほぼ0となる。これは、正午前に干潟面での温度上昇率が最大となると同時に、正午頃には激しい干潟面での蒸発により温度上昇が大きく抑制されるためと考えられる。このような干潟面での蒸発による昇温の抑制効果は、表在性底生生物、特にムツゴロウやトビハゼなどの魚類の夏季炎天下での生息や生物活動を可能にしていると推察される。さらに、 $H/R\downarrow$ は正午前後に0.1前後のピークを示した後、比較的急速に減少し、夕刻(18時頃)には-0.1前後の最小値となった後、再び0となる。一方、冬季晴天日の日中では、夏季晴天日に $H/R\downarrow$ 、

図-6 夏季と冬季のボーエン比

$G/R\downarrow$ に比べて高い値を示した $\ell E/R\downarrow$ は大きく低下し、0前後の低い値である。しかし、 $\ell E/R\downarrow$ に代わり、 $H/R\downarrow$ と $G/R\downarrow$ が共に0.25～0.3となり、両者が $R\downarrow$ の50～60%を占める。すなわち、日中の干潟面への入射エネルギーの大半は干潟面近辺とその上方の空気との交換により大気中に輸送されると同時に、ほぼ同等のエネルギーが泥中に伝導される。しかし、 $G/R\downarrow$ は夕方(17時頃)から翌朝(8時頃)にかけて負の値となり、日中とは逆に泥中から大気にエネルギーが伝導される。

図-6は、 ℓE に対する H の比であるボーエン比 $H/\ell E$ と T_a の関係を示した。図示されるように、 $H/\ell E$ は T_a の上昇に伴って指数関数的に減少する。これは、日中の気温の高い夏季と気温の低い冬季の潜熱及び顕熱輸送量の経時変化の差異を大きく反映している。

図-7、8は、それぞれ夏季と冬季における気温と各深さの泥温の経時変化及び泥温の時空間分布を示した。図示されるように、夏季の干潟面から深さ15cm付近までの泥温の経時変化は大きい。特に夏季の干潟面の泥温の変動は大きく、晴天日正午頃では気温より数℃高くなる。また、夏季の干潟面から深さ15cm付近までの泥温分布は、冬季のそれに比べて短い時間間隔で昇温と降温を繰り返す

図-5 夏季、冬季における $H/R\downarrow$ 、 $\ell E/R\downarrow$ 及び $G/R\downarrow$ の経時変化

図-7 夏季、冬季における各深さの泥温の経時変化

図-8 夏季、冬季における泥温の時空間分布

ている。これは、上述したように夏季と冬季におけるGの経時変化、すなわち夏季では干潟面から泥中あるいは干潟面から大気へのエネルギーの伝導が、それぞれ正午前及び夕方の数時間と短時間間隔であるが、冬季では、それぞれ日中及び夕方から翌朝にかけての長時間間隔であることを強く反映していると考えられる。しかし、夏季、冬季のいずれにおいても、泥温の変化は深さと共に急減し、深さ30cm以下では1℃以下となる。すなわち、夏季と冬季の深さ30cm以下の泥温は、それぞれ約21℃及び11℃とかなり安定した状態である。

(2) 温熱環境の生物活動への影響

図-9は、干潟面が数日間干出した10月、12月の小潮期干潮時における天気、水位、気温、干潟面温度、干潟面の底生生物数及び巣穴数の経時変化を示した。図示されるように、日中の気温や干潟面温度が20℃を超える10月においては、泥質干潟の代表的な表在性底生生物であるムツゴロウ、トビハゼ及びヤマトオサガニが15～30匹

図-10 干潟面のChl-a濃度の経時変化と潟華

/0.25m²程出現している。しかし、それらの出現数は時間帯によってかなり大きく変動する。特にムツゴロウ、トビハゼの出現数は、ヤマトオサガニのそれに比べて大きく変化し、気温や干潟面温度が上昇する正午頃最多となる。これは、ヤマトオサガニに比べてムツゴロウ、トビハゼの採餌行動が気温や干潟面温度に大きく左右されるためと考えられる。また、気温や干潟面温度が低い12月においては、表在性底生生物はほとんど出現しない。ただ、日中の気温や干潟面温度が15℃付近に達した12月21日には、数匹/0.25m²のトビハゼと本来干潟面に出現しない埋在性底生生物のゴカイが確認される。これは、図-10に示されるように当日の干潟面のクロロフィル-a濃度が高いことより、この日に多量に繁茂し、スラリー状となった干潟面の潟華（ガタバナ）（図-10）と呼ばれる底生性珪藻類をゴカイが摂食するために出現したためと考えられる。一方、干潟面における底生生物の巣穴数の経時変化は、10月ではムツゴロウ、トビハゼの出現数の経時変化とは逆の傾向を示す。すなわち、底生生物の巣穴数は、ムツゴロウ、トビハゼの出現数の少ない朝方や夕方に多くなり、逆にその出現数の多い正午頃に減少する。しかし、12月の底生生物の巣穴数の経時変化は、全般的に10月の経時変化とは逆の傾向を示す。すなわち、底生生物の巣穴数は、概ね朝方と夕方に少なく、正午頃に最大となる。また、数匹のトビハゼが出現した12月21日の巣穴数は、

図-9 小潮期干潮（干出）時における水位、気温、干潟面温度、底生生物数及び巣穴数の経時変化

表在性底生生物の全く出現していない他の日の巣穴数より全般的に少ない。このような両月における底生生物の巣穴数の経時変化は、特に表在性底生生物の中で干潟面を這い回りながら活発に生物活動するムツゴロウ、トビハゼの出現数によって大きく左右されるためと考えられる。すなわち、10月では、干潟面の巣穴数の約90%以上を占める埋在性底生生物のゴカイによる数mm以下の巣穴の多くが、日中の気温や干潟面温度の上昇する正午頃に多数出現するムツゴロウ、トビハゼの活発な生物活動によって破壊、封鎖されるために消失する。しかし、日没による気温の降下に伴ってムツゴロウ、トビハゼの出現数が減少し、その生物活動も低下する夕方から翌朝にかけては、埋在性底生生物であるゴカイの巣穴形成などの生物活動が活発となり、破壊、封鎖された多くの巣穴が修復されて巣穴数も再び増加すると推察される。このような気温や干潟面温度といった干潟の温熱環境は、日中の干潟干出時に出現するムツゴロウ、トビハゼなどの表在性底生生物の生物活動やそれに伴う干潟面の巣穴数の増減を大きく左右し、さらにはそれらを介して底泥中の生息環境、特に酸化層と還元層の鉛直分布にも影響を及ぼすと推察される。今後、干潟の温熱環境と底泥中の生化学的作用やN, P, Cなどの物質循環との相互関連性についても、詳細な検討が必要である。

4. まとめ

本研究で得られた知見は、次のように要約される。

- (1) 有明海奥部に広がる底生生物の生息場としての泥質干潟において、夏季(8月)と冬季(12月)の晴天日日中における干潟面干出時の熱収支構造に差異が確認される。すなわち、入射量の大きい夏季の日中正午頃では、干潟面への入射エネルギーの55%は潜熱輸送量により占められ、干潟面からの蒸発によって大気中に輸送される。一方、入射量の小さい冬季の日中正午頃では、干潟面への入射エネルギーの50~60%は顕熱輸送量と地中伝導熱により占められ、干潟面近辺とその上方の空気の交換によって大気中に輸送されると同時に、泥中に伝導される。
- (2) 夏季(8月)と冬季(12月)における日中の地中伝導熱の経時変化に差異が見られる。その差異は、両季節の深さ15cm付近までの昇温と降温の分布性の違いとなつて反映される。しかし、夏季、冬季のいずれにおいても、泥温の変化は深さと共に急減し、深さ20cm以下では1℃以下となる。したがって、夏季と冬季の泥中においては、深さ20cm以下ではかなり安定した泥温状態が保持される。また、特に夏季の晴天日正午頃の泥温については、干潟面での高い潜熱輸送量によって上昇が大きく抑制される。このような干潟面での昇温の抑

制効果がムツゴロウ、トビハゼなどの魚類の夏季炎天下での生息と生物活動を可能にすると考えられる。

- (3) 10月及び12月の干潟干出時における泥質干潟の代表的な表在性底生生物であるムツゴロウ、トビハゼ及びヤマトオサガニの日中の出現数は、気温や干潟面温度によって左右される。特に10月のムツゴロウ、トビハゼの出現数は、ヤマトオサガニのそれに比べて大きく変化し、気温の上昇する正午頃最多となる。また、12月においても気温が15℃付近に達する日中にはトビハゼが見られる。冬季日中におけるムツゴロウ、トビハゼ及びヤマトオサガニの出現の有無を左右する気温や干潟面温度の閾値は、15℃付近と推察される。
- (4) 10月及び12月の干潟干出時における底生生物の干潟面の巣穴数の経時変化は、干潟面を這い回りながら活発に生物活動するムツゴロウ、トビハゼの出現数によって大きく左右される。これは、干潟面の巣穴数の約90%以上を占める埋在性底生生物であるゴカイの数mm以下の巣穴の多くが、正午頃に多数出現するムツゴロウ、トビハゼの活発な生物活動によって破壊、封鎖されるためと推察される。

謝辞：本研究を実施するに際し、佐賀大学有明海総合研究プロジェクトより、多大な支援を受けた。また、分析に際しては、鹿児島大学大学院連合農学研究科の古賀あかねさんのご助力を頂いた。このことを、ここに付記し、深謝致します。

参 考 文 献

- 栗原 康(1997)：河口・沿岸域の生態系エコテクノロジー、東海大学出版会、pp.32-42。
古賀あかね、瀬口昌洋、郡山益実(2009)：有明海奥部干潟域における脱窒菌群の生息分布と脱窒活性、農業農村工学会論文集、第260巻、pp.15-22。
近藤純正(2000)：地表面に近い大気科学 理解と応用、東京大学出版会、pp.137-165。
西條八束、三田村緒佐武(1999)：新編潮沼調査法、講談社サイエンティフィク、pp.191-192。
佐藤正典(2001)：有明海の生きものたち 干潟・河口域の生物多様性、海遊社、pp.10-16。
瀬口昌洋、郡山益実、加藤 治(2002)：泥質干潟におけるマクロベントスの巣穴形成とその硝化・脱窒過程への影響、水工学論文集、第46号、pp.1169-1174。
瀬口昌洋、郡山益実、古賀あかね、野田美幸(2007)：有明海奥部干潟域における脱窒菌群の生息分布と底質環境について、海岸工学論文集、第54巻、pp.1126-1130。
永尾謙太郎、滝川 清、森本剣太郎、田淵幹修、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。
松永信博、児玉真志、福田和代、杉原裕司(1998)：干潟における熱収支の観測、海岸工学会論文集、第45巻、pp.1056-1060。
農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会(2003)：最終報告書-有明海の漁業と環境の再生を願って-、pp.1-15。