

有明海干潟上における大気—海面—陸面間の エネルギーフラックスに関する観測

田中 健路*・滝川 清**・成松 明***

干潟域における大気—陸面—海面間の物質・熱エネルギー相互作用を解明することを目的として、熊本港北東側干潟域において観測塔を設置し、自動気象観測を実施してきている。本研究では、自動気象観測で得られた気象データを基に、バルク法を用いて地表面熱収支の特性について解析を行った。陸域や沖合の海域においては、大気側への顕熱・潜熱輸送は日射などの放射加熱に伴う日周期変化が卓越しているが、干潟域では日射に加えて、干出・冠水のサイクルに伴う地表面状態の周期的変動が重大な寄与をもたらす。特に、冬季においては、夜間に浸入する海水が干潟上の大気への熱源として重大な寄与をもたらすことが確かめられた。

1. 序 論

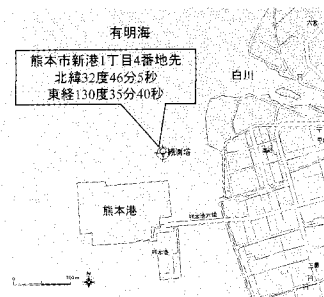
干潟域における大気と海水・土壌との物質交換・熱交換は、上空の大気循環に少なからず影響を与え、干潟に棲む生物への活動に影響を与えたと考えられてきている。干潟域は、大気と海水面、大気と土壌表面が接し、潮汐に応じてその様相が周期的に変化するという特徴を有する。陸地や海洋においては、日射加熱を伴う日変化が支配的とされる一方、干潟域は潮汐を伴うことにより、大気との熱交換・物質交換がより複雑であり、十分に明確な知見が得られていない。

有明海・八代海をはじめとして、干潟を含む閉鎖性水域における環境変動に関する諸問題が顕在化し、現地調査資料に基づく要因分析や、数値シミュレーションに基づく流動場・物質循環の解明など、さまざまな観点から研究が進められてきている。密度成層の形成など、海水中の熱の移流・対流を伴う現象を数値計算で検証するに当たって、水域・非水域の境界領域にあたる干潟域が、熱源として作用するのか、冷却源として作用するのか、それぞれが海域全体の熱プロセスに対して有意なものかを検証していく必要があると考えられるが、干潟域における熱エネルギー過程を避けては解明できない。

干潟上の大気—海面および干潟土壌面（陸面）との熱エネルギー相互作用を把握することを目的として、熊本港北側（白川河口）干潟域に、観測塔を設置し、自動気象観測を実施してきている。本研究では、自動気象観測で得られた気象要素を基に、地表面エネルギーフラックスを算出した。

2. 干潟環境観測塔

干潟上の大気・海水・土壌の熱・物質循環のメカニズム解明を目的として、2003年3月に熊本港北東端から北へ170mの干潟域に干潟環境観測塔（以下観測塔と略



図一 干潟環境観測塔の位置

す）を設置した。観測塔の位置を図一に示す。観測塔は、鉄骨・ブレース構造で、地表面から頂上までの高さが10m、地上から5.6mの高さに3m四方の足場を設け、電源やデータ回収・転送装置などを収納している（写真一）。観測塔の基礎は、長さ6mのH型鋼を井形上に組み、スパイラル杭（直径150mm×長さ2,000mm；GTスパイラル製）を52本埋め込み、H型鋼に固定している（写真二）。部材には耐摩耗性・耐候性に非常に優れているCOR-TENO（新日本製鐵）を用いている。尚、観測塔本体の設置工事は、昼間時の干潟域干出時間帯に実施し、3日間かけて完成した。

表一に、観測塔で使用している測器の一覧を示す。観測塔頂上部にプロペラ式風速計を設置しているほか、気温湿度・降水量・気圧の各気象要素、上下方向の紫外線～可視光線（短波）と赤外線（放射）の放射4成分観測、超音波水位計を用いた水位観測を実施してきている。2004年4月からは熱電対を用いた地中温度プロファイル観測を開始しており、観測項目の多様化を徐々に進めてきている。

観測機器は、汎用型データロガー（CR-10 X, Campbell）およびチャンネル切り替え器（AM 416・AM 25 T, Campbell）に接続し、データロガー内蔵のプログラムによってセンサー側からの電圧・パルス出力を物理値に変換し、測定データとして収録している。サンプリング間隔は5秒で毎10分値の平均値などを収録しているCR-

* 正 会 員 理修 熊本大学助手 工学部環境システム工学科
** 正 会 員 工博 熊本大学教授 沿岸域環境科学教育研究センター
*** 学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科

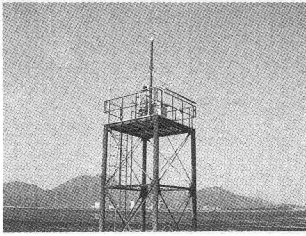


写真-1 干潟環境観測塔

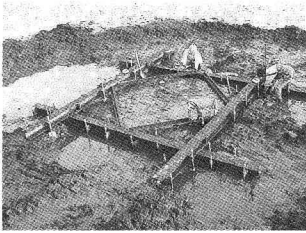


写真-2 観測塔基礎部分 (H型鋼トラスパイラル杭)

表-1 気象測器

観測項目	測器種類	機種・メーカー
風向風速	プロベラ式風向風速計	W655-EIS2 小松製作所
気温湿度	通風式温度湿度計	HMP45A Vaisala
気圧	気圧計	PTB 210 Vaisala
降水量	転倒ます式雨量計	TK-1 竹田計器工業
放射成分	4成分放射計	MR-40 英弘精機
水位	超音波式水位計	SR-50 Campbell

10 X には、携帯電話通信モジュールを接続しており、データ回収やプログラム更新作業を遠隔操作で行うことができる。

3. エネルギーフラックス測定・計算方法

大気と海面・土壌表面における熱収支について、下記の式が成立すると仮定する。

$$Rn = H + lE + Q \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Rn は正味放射フラックス、 H は大気側への顕熱フラックス、 lE は潜熱フラックス、 Q は海水ならびに地中側への熱伝導などによる蓄熱量である。

正味放射フラックスは、紫外線～可視光線域を中心とする短波放射フラックス (SW) と波長約 $10\mu m$ を熱赤外線領域中心とする長波放射 (LW) それぞれの上下方向成分より、以下の形で定義される。

$$Rn = SW^{\downarrow} - SW^{\uparrow} + LW^{\downarrow} - LW^{\uparrow} \quad \dots\dots\dots (2)$$

上下方向の長波放射フラックスより、射出率 ε を与える

ことにより、以下の関係式を用いて地表面温度 $T_s(K)$ を求めることができる。

$$LW^{\uparrow} = \varepsilon \sigma T_s^4 + (1 - \varepsilon) - LW^{\downarrow} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) である。

バルク法によれば、大気側への顕熱フラックスおよび潜熱フラックスおよび運動量フラックスはそれぞれ以下の式で定義される。

$$\tau = \rho_a C_M U_a^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$H = \rho_a C_p C_H U_a (T_s - T_a) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$lE = \rho_a l C_E U_a (q_s - q_a) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ρ_a は空気密度、 C_p は定圧比熱 ($1005 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)、 U_a は平均風速、 $T_a(K)$ は気温、 $q_s, q_a(\text{kg/kg})$ は地表面および地上空気中の比湿 (空気 1 kg 中に含まれる水蒸気の質量の割合)、 l は水の蒸発潜熱 ($2.508 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$) を表す。式 (5)、(6) における係数、 C_H, C_E がそれぞれ顕熱輸送・潜熱輸送に関するバルク輸送係数である。海面・地表面における比湿 q_s は、飽和状態の比湿 $q_{sat}(T)$ の 0.98 倍で与え (日本気象学会, 2001)、塩分の影響を考慮した。

4. バルク輸送係数

干潟域においては、干潟土壌表面の冠水・干出に応じて、大気-陸地面および大気-海面間の輸送係数を使い分ける必要があるとされる。本研究では、平均水深 η に応じてバルク輸送係数を以下の通りに与えた。

(1) 干出時 ($\eta < 0.03 \text{ m}$)

干出時においては、干潟土壌と大気間の熱的な相互作用として捉えることができる。このとき、バルク係数 C_H, C_E は大気の安定度に依存する形で以下の式で表される。(例えば、Li ら, 2002)

$$C_M = \frac{\kappa^2}{[\ln(z/z_{0M}) - \Psi_M]^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$C_H = \frac{\kappa^2}{Pr_0 [\ln(z/z_{0M}) - \Psi_M] [\ln(z/z_{0H}) - \Psi_H]} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$C_E = \frac{\kappa^2}{Pr_0 [\ln(z/z_{0M}) - \Psi_M] [\ln(z/z_{0E}) - \Psi_E]} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $\kappa(=0.40)$ はカルマン定数、 $Pr_0(=0.94)$ は乱流 Prandtl 数、 z は地上高度、 z_{0M}, z_{0H}, z_{0E} は運動量輸送、顕熱輸送、水蒸気輸送に関する粗度長を表す。 Ψ_M, Ψ_H, Ψ_E は、それぞれ風速、温度、比湿に関する積分普遍関数であり、次式の形をとる。

$$\Psi_i = \int_{z_{0i/L}}^{z/L} \phi_i(\xi) d\xi \quad \dots\dots\dots (10)$$

添え字 i には、運動量輸送 M 、顕熱輸送 H 、水蒸気輸送 E が適用される。また、 ϕ は風速、温度、比湿に関する鉛直プロファイルの普遍関数として以下で定義される。

$$\phi_M\left(\frac{z}{L}\right) = \frac{\kappa z}{u_*} \frac{\partial U}{\partial z} \dots\dots\dots (11)$$

$$\phi_H\left(\frac{z}{L}\right) = \frac{\kappa z}{T_*} \frac{\partial T}{\partial z} \dots\dots\dots (12)$$

$$\phi_E\left(\frac{z}{L}\right) = \frac{\kappa z}{q_*} \frac{\partial q}{\partial z} \dots\dots\dots (13)$$

ここで z/L は Monin-Obukhov の安定度パラメータであり、以下の式で定義される。

$$\frac{z}{L} = \frac{g}{T} \frac{\kappa z T_*}{u_*^2} \dots\dots\dots (14)$$

また、 u_* 、 T_* 、 q_* はそれぞれ摩擦速度、摩擦温度、摩擦湿度を表す。

本研究で実施している観測では、 u_* 、 T_* 、 q_* を直接算定するのに十分応答性の高い測器を使用していない。そのため、バルク・リチャードソン数

$$Ri_b = \frac{g}{T} \frac{(T_a - T_s)/z_T}{(U/z_U)^2} \dots\dots\dots (15)$$

を安定度パラメータとして用いる。ここで、 $T = (T_s + T_a)/2$ 、 $z_T (= 7.12 \text{ m})$ 、 $z_U (= 10.0 \text{ m})$ は測器の地上からの高さである。バルク・リチャードソン数は、普遍関数 ϕ および積分普遍関数 Ψ より z/L の関数として与えることができる。

普遍関数および積分普遍関数 ϕ 、 Ψ の代表的な関数形はいくつか存在するが、 Ri_b から z/L を算出する際に、反復法で解かなければ求められないものが多い。その中で、Byun (1990) は Businger ら (1971) の積分普遍関数より、バルク・リチャードソン数から z/L を求める解析解を導出している。今回は Byun (1990) の方法を用いた。

中立に近い状態 ($z/L = Ri_b \approx 0$) においては、積分普遍関数 Ψ は 0 とみなされ、バルク係数は粗度長 z_{0M} 、 z_{0H} 、 z_{0E} で決定される。粗度長は、中立に近い状態で風の対数分布則を用いて算定されるが、最低でも 2 高度の風などの観測が必要である。今回の観測では 1 高度のみであるため、粗度長を逐次算定不可能である。したがって、植生のない滑らかな裸地面における典型値 ($z_{0M} = 1.0 \text{ mm}$ 、 $\ln(z_{0M}/z_{0H}) = 2.0$ 、 $z_{0E} = z_{0H}$) として与えた。

風速計の起動風速 (2.0 ms^{-1}) を下回る、弱風時の不安定条件 ($T_s > T_a$) においては、バルク輸送係数に風速を乗じた交換速度として考える。近藤 (1994) によれば、上記条件下における顕熱・潜熱に関する交換速度は

$$C_E \approx C_H = 1.2 \times 10^{-3} (T_{sv} - T_{av})^{1/3} \dots\dots\dots (16)$$

と表される。温度の添え字 v は仮温度 (K) を表し、比湿 q を用いて $T_v = (1 + 0.61q)T$ で表される。

(2) 冠水時 ($\eta > 0.03 \text{ m}$)

近藤 (1994) によれば、海洋上の数々の観測結果より、水面上 10 m におけるバルク係数は風速に応じて、次に示す値を用いるのが実用的であるとされている。

$$C_M(10) \times 10^3 = \begin{cases} 0.771 + 0.0858 U_{10} & 2.2 \leq U_{10} < 5 \text{ ms}^{-1} \\ 0.867 - 0.0667 U_{10} & 5 \leq U_{10} < 8 \text{ ms}^{-1} \\ 1.2 + 0.025 U_{10} & 8 \leq U_{10} < 25 \text{ ms}^{-1} \\ 0.073 U_{10} & 25 \leq U_{10} < 50 \text{ ms}^{-1} \end{cases} \dots\dots\dots (17)$$

$$C_E(10) \approx C_H(10) = \begin{cases} 1.15 \times 10^{-3} & U_{10} \leq 5.0 \text{ ms}^{-1} \\ 1.25 \times 10^{-3} & 5.0 < U_{10} \leq 30 \text{ ms}^{-1} \end{cases} \dots\dots (18)$$

対数分布則を用いて、平均水位 η 及びセンサー設置高度 z_T 、 z_U で補正を行い、以下の値を用いる。

$$C_M = \frac{\kappa^2}{[\kappa(C_M(10))^{-1/2} - \ln(10/(z_U - \eta))]^2} \dots\dots\dots (19)$$

$$C_E = C_H = \frac{\kappa C_M}{\left\{ \frac{\kappa [C_M(10)]^{-1/2}}{C_H(10)} + \ln \left[\frac{(z_T - \eta)}{10} \right] \right\}} \dots\dots (20)$$

また、微風 ($U < 2 \text{ ms}^{-1}$) で不安定有的时候には、干出時と同様に式 (16) を用いる。

上記以外の条件においては、風速より中立条件を仮定して係数を求め、(7)～(9) 式で中立条件の一つである $\Psi = 0$ を代入することで、輸送係数より粗度長 z_{0M} 、 z_{0H} 、 z_{0E} が求められる。次に、水位を考慮したバルク・リチャードソン数

$$Ri_b = \frac{g}{T} \frac{(T_a - T_s)/(z_T - \eta)}{T [U_a/(z_U - \eta)]^2} \dots\dots\dots (21)$$

より z/L を計算し、干出条件で示したバルク係数の式 (7)～(9) において、積分普遍関数 Ψ の積分区間に適用させることで係数を決定する。

5. 結 果

(1) 放射収支

冬季と春季における放射フラックスの日変化例を、それぞれ図-2、図-3 に示す。下向き短波放射 ($SW \downarrow$) は、冬季晴天日の昼間で 600 Wm^{-2} 、5 月上旬の晴天日昼間で 950 Wm^{-2} に達する。その一方、上向き短波放射は、晴天日においても 100 Wm^{-2} を超えることはなく、反射率 (アルベド) は、 $0.05 \sim 0.10$ 程度である。上向き長波放射は、晴天条件においては、下向き長波放射と比べ 100 Wm^{-2} 以上となり、上空の雲からの放射に応じてその差は小さくなる。

(2) 表面温度と水位

干潟の干出・冠水に伴う表面温度の時間変化について、冬季の例を図-4 に、春季の例を図-5 にそれぞれ示

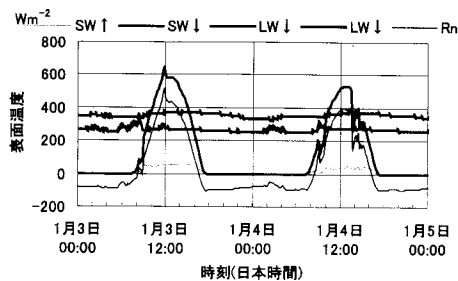


図-2 放射4成分と正味放射フラックス (2004/1/3~2004/1/4)

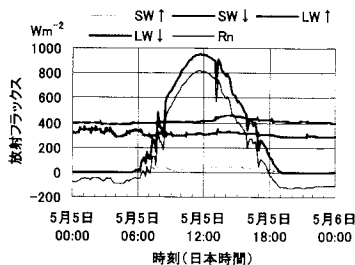


図-3 放射4成分と正味放射フラックス (2004/5/5)

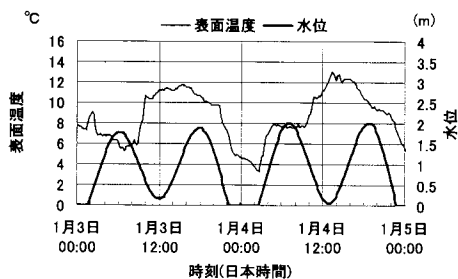


図-4 表面温度と水位の時間変化 (2004/1/3~2004/1/4)

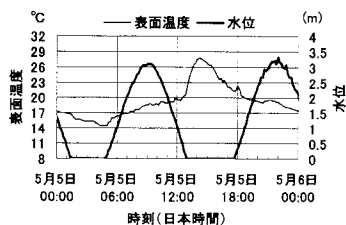


図-5 表面温度と水位の時間変化 (2004/5/5)

す。冬季・春季ともに晴天日では、昼間において水位が干潮時において急激な表面温度の増大が見られる。特に、5月5日では、干出直後の午後1時からの1時間に8°Cを超える地表面温度の上昇が起こった。このとき、800 Wm^{-2} を超える正味放射フラックスを観測しており、露出した土壌表面が、放射加熱を直接受けて急激に地表面

温度が上昇したものと考えられる。その一方で、冬季においては1月4日午前1時~午前2時のように、干潟土壌表面が放射冷却や蒸発などで冷却されたところに、相対的に暖かい海水が流入することで1時間に4°Cの温度上昇が観測されている。

(3) 地表面・海面エネルギー収支

図-6、図-7に地表面エネルギーフラックスの日変化例を示す。昼間においては、顕熱フラックスと潜熱フラックスとの和は正味放射フラックスの半分に満たない結果が得られた。その一方で、夜間の正味放射フラックスが負となる時間帯においても、正の顕熱・潜熱輸送が発生している。

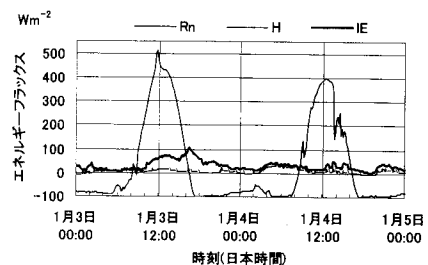


図-6 エネルギーフラックスの時間変化 (2004/1/3~2004/1/4)

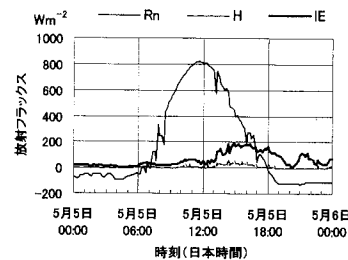


図-7 エネルギーフラックスの時間変化 (2004/5/5)

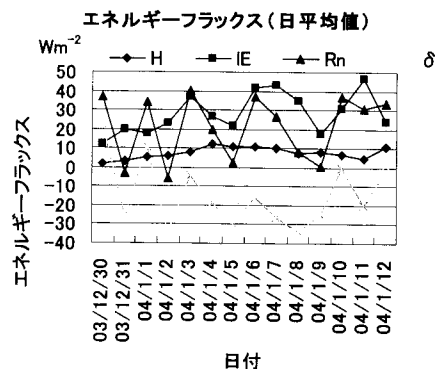


図-8 エネルギーフラックスの時間変化 (2004/1/3~2004/1/4)

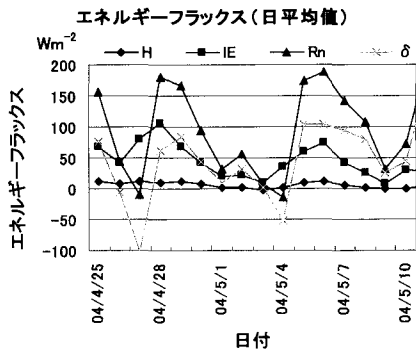


図-9 エネルギーフラックスの時間変化(2004/4/25~2004/5/10)

冬季・春季についてそれぞれ日平均値を算出したところ、図-8、図-9が得られた。それぞれの図において、 δ は正味放射から顕熱と潜熱を引いたエネルギー残差である。冬季においては、正味放射フラックスに対して潜熱フラックスが上回っており、夜間における相対的な暖かい海水による大気への熱輸送が日平均の収支に重大な寄与をもたらしている。また、5月においては、エネルギー残差は正味放射フラックスの半分程度で潜熱輸送と同程度の値となっている。

6. 結 語

本研究では、大気—陸面および大気—海面間で利用されている既存のバルク輸送係数を用いて、干潟上の気象観測データを用いて顕熱・潜熱輸送を評価した。陸面や海洋上では、日射などによる日変化が非常に支配的である一方、干潟域においては、潮位変動に伴う冠水・干出のサイクルによる海水の移動が顕熱・潜熱輸送に重大な

寄与をもたらす。春季晴天日においては、干出とともに 800 Wm^{-2} を超える強い放射加熱により1時間に 8°C もの地表面温度上昇が観測され、その一方で、冬季の夜間では暖かい海水流入により、夜間においても正の顕熱・潜熱輸送が発生する。その結果日平均でみると、海水の流入が干潟域の大気への熱源となることが分かった。

その一方で、地表面エネルギー収支が閉じているとは必ずしも言い切れない。一つは、本稿での観測段階では海水や土壌の蓄熱・熱輸送を算定するための十分な観測が行われておらず、今回は不確定なものとして扱っていることにある。その一方、今回使用したバルク係数の過小評価の可能性も無視できない。バルク法においては、接地境界層において Monin-Obukhov 相似則が成立することを前提としているが、本来は表面が水平—様かつ定常 (stationary) であるという仮定が置かれている。干潟域のような水平非—様かつ非定常 (non-stationary) な条件では、渦相関法に基づくフラックス直接観測を行い、相似則の成立の可否など、接地境界層の特性を詳細に解明していく必要がある。

参 考 文 献

- 近藤純正 (1994): 水環境の気象学, 朝倉書店, 350 p.
- 日本気象学会編(2001): 地表面フラックス測定法, 気象研究ノート第199号, 242 p.
- Businger J. A. et al. (1971): Flux-profile relationship in the atmospheric surface layer, J. Atmos. Sci., Vol. 28, pp. 181-189.
- Byun, D. W. (1990): On the analytical solutions of flux-profile relationships for the atmospheric surface layer, J. Appl. Meteor., Vol. 29, pp. 652-657.
- Li, G., T. Duan, S. Haginoya, and L. Chen (2002): Estimates of the bulk transfer coefficients and surface fluxes over the Tibetan Plateau using AWS data, J. Meteor. Soc. of Japan, Vol. 79, pp. 625-635.