

# 水温・地中温度の長期連続観測に基づく 干潟・マングローブ水域の温熱環境特性の把握

## STUDY ON THERMAL ENVIRONMENT IN TIDAL FLAT AND MANGROVE AREA BASED ON LONG-TERM MEASUREMENT OF WATER AND SOIL TEMPERATURE

遠藤亮之輔<sup>1</sup>・大槻順朗<sup>2</sup>・二瓶泰雄<sup>3</sup>・原田渉<sup>4</sup>・島谷幸宏<sup>5</sup>

Ryonosuke ENDO, Kazuaki OHTSUKI, Yasuo NIHEI, Wataru HARADA  
and Yukihiko SHIMATANI

<sup>1</sup>学生員 学 (工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程  
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

<sup>2</sup>正会員 博 (工) 東京理科大学助教 理工学部土木工学科 (同上)

<sup>3</sup>正会員 博 (工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (同上)

<sup>4</sup>非会員 修 (工) 東海旅客鉄道㈱

<sup>5</sup>フェロー 博 (工) 九州大学大学院教授 工学研究院環境社会部門  
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

The present study aims to clarify thermal function of tidal flat and mangrove area in summer and winter. We conducted long-term field measurements for water and soil temperature in Sumiyo Bay, Amami Oshima Is., which are known as a habitat of Ryukyu-ayu. The results showed that the water temperature of tidal flat and mangrove area was close to that of outer sea in summer and river in winter, showing the heat fluxes from water surface and bottom were dominant in tidal flat and mangrove area. The heat budget analysis indicated that the sensible heat flux from bottom of the tidal flat and mangrove cooled significantly water column in winter.

**Key Words :** thermal environment, heat budget, tidal flat, mangrove, Ryukyu-ayu

### 1. 序論

熱帯・亜熱帯域の河口域や沿岸域では、陸域と外洋域に挟まれる形で、マングローブ水域や干潟、藻場、サンゴ礁など非常にバラエティに富んだ環境場が形成され、これらは生息生物へ多様な基盤環境を創出している<sup>1),2)</sup>。一方、河口域や沿岸域では、人為的利用や埋立等の開発行為が行われ易く、上記の多様な環境場が消失・劣化している<sup>3),4)</sup>。そのため、マングローブ水域や干潟等の様々な環境機能を把握すると共に、河口・沿岸開発による環境影響を精緻に評価し得る知見の集積が不可欠となる。

本研究対象である鹿児島県奄美大島住用湾には、絶滅危惧種であるリュウキュウアユ<sup>5)</sup>が生息しており、そこには広大な干潟やマングローブ水域が存在している。干潟やマングローブを含む河口域はリュウキュウアユの仔稚魚期の育成場となっており、リュウキュウアユの生存には水温条件が重要であることが指摘されている<sup>6)~8)</sup>。そのため、干潟やマングローブ水域における温熱環境機能や熱収支特性を把握することは極めて重要となる。

干潟やマングローブ水域は、冠出を繰り返す潮間帯に位置し、かつ、水深が浅い。そのため、深い水域では無視されることが多い底面との熱交換が大きな役割を果たすことが予想される。しかしながら、干潟やマングローブ

水域に限らず、浅い水域における熱収支特性や底面との熱交換に関する検討は限定され<sup>9)~11)</sup>、長期間・広域にわたる温熱環境調査は皆無である。

本研究では、干潟やマングローブ水域がある奄美大島住用湾における長期連続水温・地中温度観測を実施し、干潟やマングローブ水域における水温環境や熱収支特性、その季節変化を明らかにする。そのため、マングローブ水域や干潟に加え、河川や外海での水温や地中温度の連続計測を約一年間実施した。得られた観測結果から、二瓶<sup>10)</sup>に基づいて浅い水域用の熱収支解析を行い、干潟やマングローブ水域における底面での熱交換量を求める。

### 2. 現地観測の概要

#### (1) 観測サイト

鹿児島県奄美大島の南部に位置する住用湾には、約71haのマングローブ域とその下流に約100haの干潟がある(図-1)。この住用湾には奄美大島最長の住用川(全長16km, 流域面積47km<sup>2</sup>)と役勝川(全長15km, 流域面積45.1km<sup>2</sup>)が流入している。両河川共に、リュウキュウアユが生息しているが、生息する個体数では役勝川の方が多<sup>12)</sup>。また、住用湾はリュウキュウアユの仔稚魚の生息域となっている。干潟域の高さは-1.0~0.4T.P.mであり、潮汐に

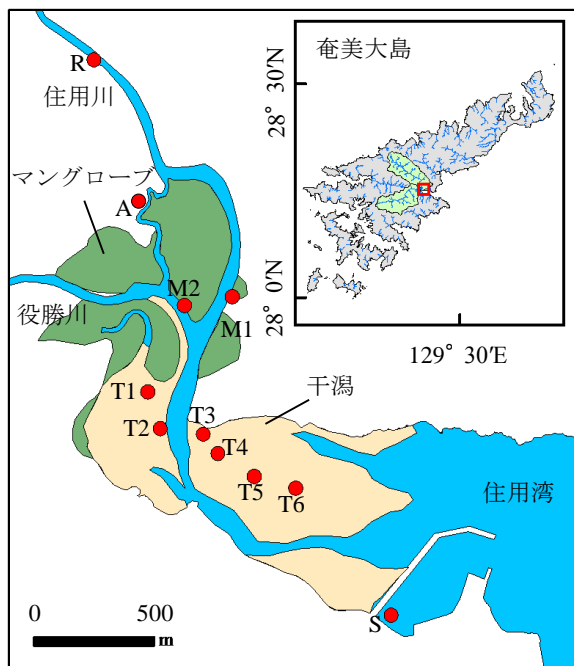


図-1 観測サイトと観測点マップ

より冠水・干出を繰り返す。また、マングローブ水域は、国内2番目の規模であり、オヒルギ (*Bruguiera gymnorhiza*) やメヒルギ (*Kandelia obovata*) が優占している。

## (2) 現地観測方法

住用湾の干潟やマングローブ水域における温熱環境や熱収支特性を把握するために、図-1のように干潟、マングローブに加えて、これらを囲む河川 (Stn.R) と外海 (Stn.S) にて水温・地中温度を計測した。干潟では、滞筋を挟む形で6地点 (Stns.T1~6) を設け、これらの地盤高さは-0.79~0.37T.P.mである (表-1)。マングローブ域では住用川・役勝川に隣接する氾濫原 (swamp) の2地点 (Stns.M1, 2) を選定した。マングローブでは河道 (creek) から離れた地点が望ましいが、干潟観測点と地盤高さを合わせるために、川岸から10m程度奥に入った所とした (表-1)。これらの8地点では、図-2に示すように、表層 (水面直下)・中層 (水面下0.5m)・底層 (底面上0.1m) に小型水温計 (Water Temp Pro v2, Onset社製) を設置して水温 (干出時は気温) を計測した (Stns.M1, 2では、表層・底層のみ)。また、ボタン型小型水温計 (TidbiT v2, Onset社製) が埋め込まれた木杭を地中に設置し、地中温度を計測した (計測深: 底面から0.02m, 0.05m, 0.10m)。河川 (Stn.R) や外海 (Stn.S) では、水位と水温の同時計測が可能な自記式水位計 (U20 Water Level Logger, Onset社製) を設置した。また、住用湾周辺の気象情報を得るため、陸上1地点 (Stn.A) に温湿度計 (U23 Pro v2, Onset社製) を設置した。計測時間間隔は10分もしくは20分とした。

観測期間は、2012年8月4日から2013年6月11日の約10カ月間であり、途中メンテナンスを1回行った (2012年11月

表-1 各観測地点の地盤高さ (単位: T.P.m)

Stn.	マングローブ					
	M1	M2				
地盤高さ	-0.02	0.06				
Stn.	干潟					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
地盤高さ	0.12	-0.28	0.37	0.20	-0.44	-0.79

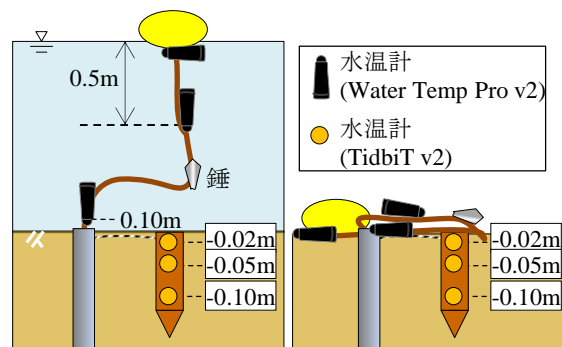


図-2 水中・地中の水温計配置例

9~12日)。これらのデータを用いて、干潟・マングローブ水域の水温環境を把握すると共に、地中温度データを生かして底面への熱輸送や水柱全体の熱収支解析を行う。

## 3. 水温環境

### (1) 水温変動の特徴

干潟とマングローブ水域における基本的な水温変動特性を抽出するために、全観測期間における干潟 (Stn.T4) とマングローブ (Stn.M1) の日平均水温の時間変化を図-3に示す。ここでは、底層の水温データを例示する。また、外海・河川水温と気温も表示する。なお、水温計データは冠水中の値のみを表示している (以下、同様)。まず、この期間内では、外海水温は18.7~31.0°C、河川水温は13.1~25.8°C、気温は9.2~28.8°Cの範囲で変化し、夏季は河川水温<気温<外海水温、冬季は気温<河川水温<外海水温の順となる。干潟やマングローブ水域の水温は、基本的には、外海水温と河川水温の間を変化しており、また、干潟水温の方が概ねマングローブ水温よりも高い。しかしながら、夏季には干潟水温が外海水温を上回ることや (図中矢印①)、冬季にはマングローブ水温が河川水温を下回る時期 (同矢印②) が見られる。また、干潟・マングローブ水温は、夏季には外海水温に相対的に近く、冬季には河川水温に近づいている。このような干潟・マングローブ水域における観測結果は、河川水や外海水の移流・混合のみでは説明できず、水表面や底面の熱輸送が大きく寄与していることが示唆される。

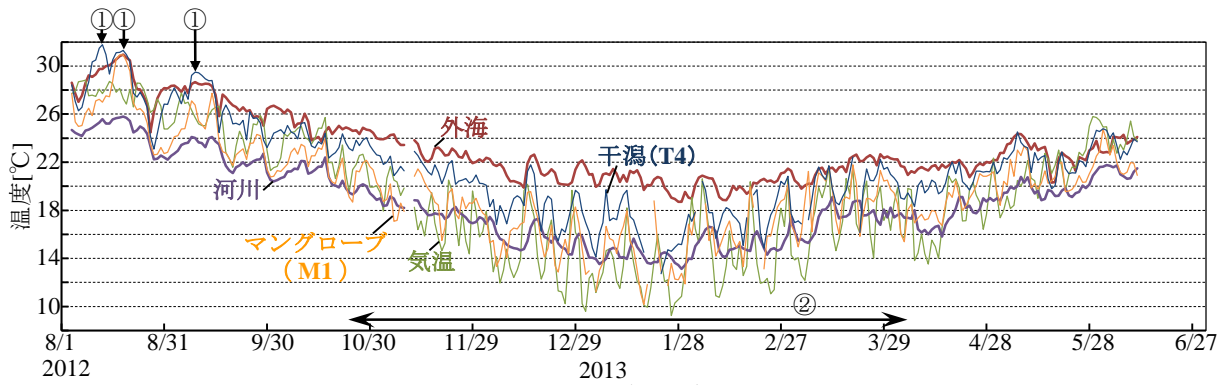


図-3 観測期間中の外海と干潟 (Stn. T4) ・マングローブ (Stn. M1) ・河川水温と気温の長期変化

### (2) 月平均水温の季節変化

このような水温の季節変動特性を調べるために、月平均水温の季節変化を図-4に示す。ここでは、外海、河川、気温、干潟、マングローブ域の全地点における水温データを表示している。ここでも底層水温を対象とするが、Stn.T3は途中で欠測したため、ここでは除外している。また、底層水温と表層水温の差は月平均値では $0.6^{\circ}\text{C}$ 以下と極めて小さいため、底層水温データのみとする。これより、干潟水温は8月に最大 ( $28.0\sim 28.6^{\circ}\text{C}$ )、1月に最低 ( $16.3\sim 19.5^{\circ}\text{C}$ ) となり、マングローブ水温も8月に最大 ( $26.7\sim 27.1^{\circ}\text{C}$ )、1月に最低 ( $14.0\sim 15.2^{\circ}\text{C}$ ) となり、干潟水温はマングローブ水温を上回る。また気温と外海水温が近い夏季は、河川を除く地点の水温差は非常に小さいが ( $< 2^{\circ}\text{C}$ )、気温が外海水温よりも $5^{\circ}\text{C}$ 以上低くなる冬季は地点間の差も大きく (最大 $5.5^{\circ}\text{C}$ )、同じ河口域でも水温の縦断勾配が夏と冬で大きく異なっていることが分かる。

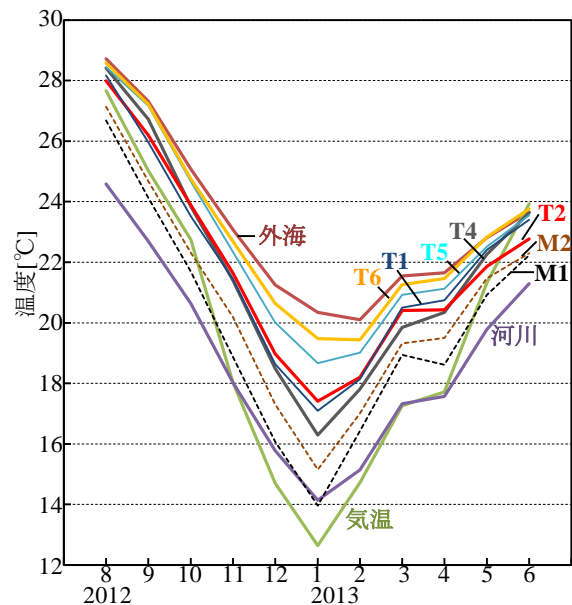


図-4 月平均水温の季節変化 (底層水温)

### (3) 大潮時における水温・地中温度の時間変動特性

相対的に暖かい海水の干潟・マングローブ水域遡上時における水温変動特性を調べるために、大潮時における水温・地中温度の時間変化を図-5に示す。ここでは、夏季 (2012/8/18) と冬季 (2013/2/10) を例とし、上図には外海・河川・干潟 (Stns.T3~T6) ・マングローブ (Stn.M1) の水温 (底層) と気温を図示する。また、下二つの図には、干潟 (Stn.T4) とマングローブ (Stn.M1) の水温・地中温度を表示する。まず夏季では、日中に干潟・マングローブが干出し、その間、外海水温は $32\sim 33^{\circ}\text{C}$ に達した。その後、外海水が干潟に冠水すると、干潟水温は冠水直後にピークとなり、かつ、そのピーク水温 $33.8\sim 35.4^{\circ}\text{C}$ は外海水温よりも高い。この時、干潟・Stn.T4における地中温度は、干出する日中に大幅に上昇して気温を上回り、底面下 $0.02\text{m}$ では最大 $38.3^{\circ}\text{C}$ まで達した。冠水後にはこれらの地中温度は大きく低下し、底層水温と同じ挙動をした。これより、日中に干出した干潟は大気から温められ、その後、その上を遡上する海水は干潟底面から温められるため、干潟水温は外海水温より高くなる。

一方、マングローブ水域 (Stn.M1) でも日中の冠水直後に水温ピーク ( $=33.2^{\circ}\text{C}$ ) となるが、これは外海水温ピーク値とほぼ同じである。同地点の地中温度は、日中の干出時に温度上昇するが、その様子はほぼ気温と一致する。その後、冠水するとマングローブの地中温度は上昇し、干潟とは逆の結果となる。木々により日射が遮られているマングローブ水域の地中温度は、日中には干潟ほど昇温せず、相対的に暖かい外海水が冠水するとマングローブ底面より外海水を冷却しているものと考えられる。なお、上記の結果ではマングローブ水温が外海水温とほぼ同程度あったのは、マングローブ水域の観測点が河道部と非常に近いためである。また、地中温度は、日射や冠水・干出などの影響を受けて日変動しているが、その変動幅は干潟の方が非常に大きい。

次に冬季 (図-5 (b)) に関しては、干潟・マングローブ水域の水温は、上げ潮時には冠水後から上昇し、下げ潮時には減少している、ということが全地点で共通して見られる。また、地中温度は、干潟・マングローブ水域

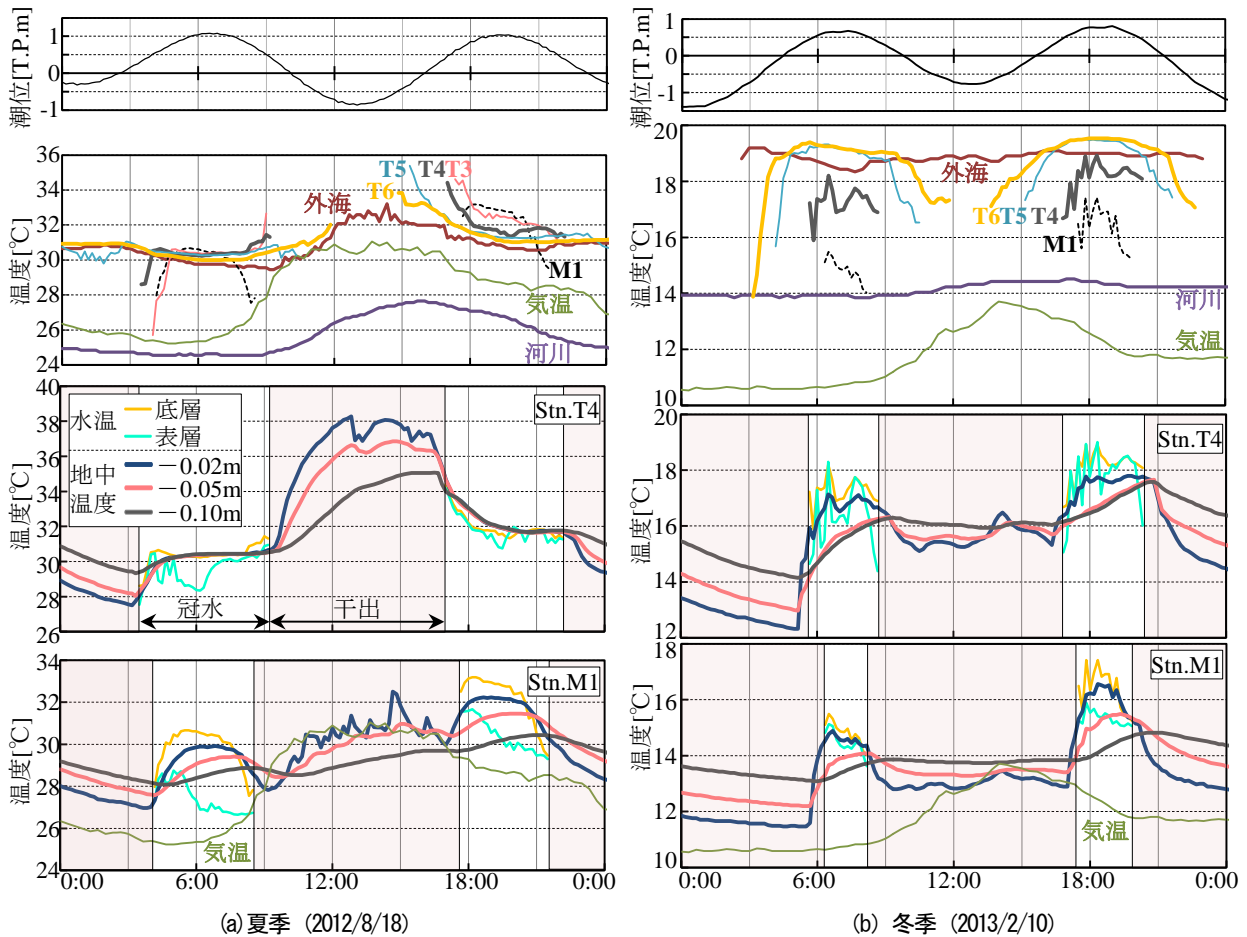


図-5 大潮時における水温（上：全地点底層）・地中温度（中：Stn. T4, 下：Stn. M1）の時間変化

共に、ある程度の時間遅れを伴いながら底層水温と同じように上昇・低下を繰り返している。このように、温かい外海水は、干出時に大気から冷やされた干潟・マングローブ面上を水温低下しながら遡上しており、冬季にはマングローブ水域や干潟が“冷源”の役割を果たしているものと推察される。

#### (4) 水温と地盤高の関係

干潟・マングローブ水域の水温と地盤高さの関係を検証するために、干潟・マングローブ水域の全8地点における夏季（2012年8月）と冬季（2013年2月）の月平均水温と地盤高さの相関図を図-6に示す。ここでは、外海・河川水温や気温を比較しやすい形で表示している。なお、ここでも底層水温を選定し、2月のStn.T3のデータは欠測のため掲載していない。これより、夏季では、干潟水温の月平均値は地盤高さによらずほぼ一様であり、外海水温よりやや低く、気温より高い。一方、マングローブ水温は干潟水温よりも低い。両者において完全に同一の地盤高さの地点はないが、干潟データから内挿して考えると、同一の地盤高さにおいてもマングローブ水温は干潟水温より低い。

冬季に関しては、干潟水温は地盤高さが高くなると低

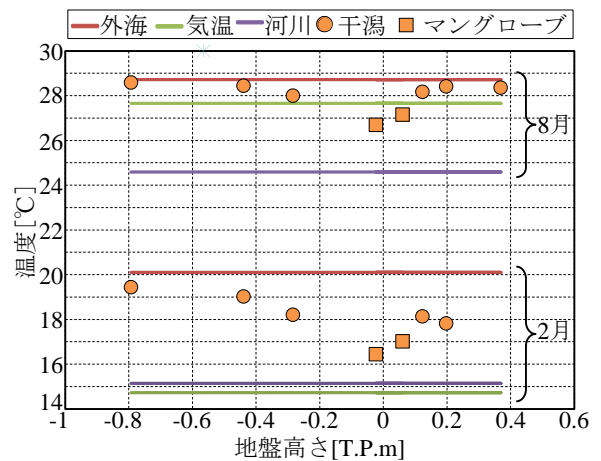
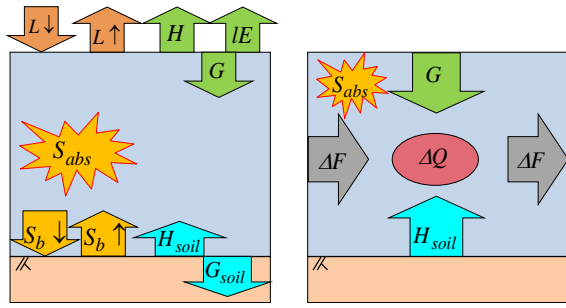


図-6 月平均水温（底層）と地盤高さの関係

下していることが分かる。これは、前述したように、干出時に大気から熱を奪われて、干潟の地中温度が低下しているためであり、その影響は干出時間が相対的に長い高い地盤地点の方が顕著である。また、同一地盤高さにおいてマングローブ水温は干潟水温を下回り、夏季と同じ結果となった。これより、マングローブ水域のほうが干潟よりも冷源効果は卓越するものと考えられる。



(a) 水面・水中・底面 (b) 水柱  
図-7 熱収支解析の概念図<sup>10)</sup>

#### 4. 熱収支特性

##### (1) 熱収支解析の概要

干潟・マングローブ水域の水温変動要因を調べるために、熱収支解析を行う。ここでは、底面における熱輸送を考慮した浅い水域用の熱収支解析として、サンゴ礁海域で行われた、図-7に示す熱収支解析法<sup>10)</sup>を用いる。放射エネルギーとして、水面に入射する短波放射は反射・透過し、透過した短波放射は水中で減衰しながら底面に到達し ( $S_b \downarrow$ )、一部吸収され残りが上向きに反射される ( $S_b \uparrow$ )。一方、水面に到達する下向きの長波放射  $L \downarrow$  は一部反射し ( $L \uparrow$ )、残りは水表面にて吸収される<sup>13)</sup>。この時、水表面での熱収支は、顕熱を  $H$ 、潜熱を  $IE$ 、水中伝導熱を  $G$  とすると、次の式 (1) のようになる。

$$L \downarrow - L \uparrow = H + IE + G \quad (1)$$

一方、底面での熱収支式は、底面の顕熱を  $H_{soil}$ 、地中伝導熱を  $G_{soil}$  とすると、次式 (2) のようになる。

$$S_b \downarrow - S_b \uparrow = H_{soil} + G_{soil} \quad (2)$$

これらの算出方法は二瓶ら<sup>10)</sup> と同じ一般的なやり方であるが、地中伝導熱  $G_{soil}$  については以下の式 (3) のように与える。

$$G_{soil} = \int_0^{\infty} \rho_G c_G T_G \frac{\partial T_G}{\partial t} dz \quad (3)$$

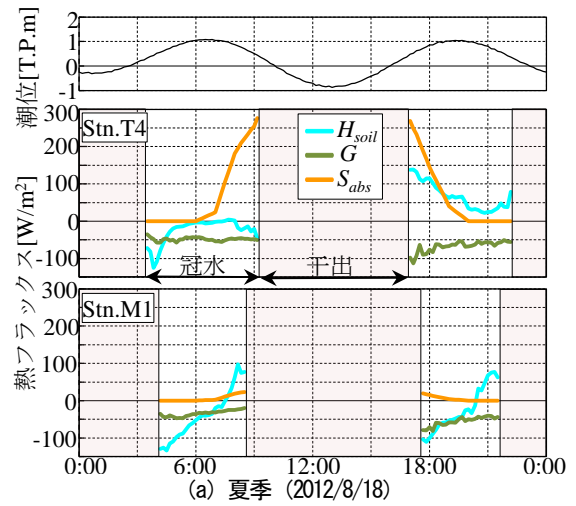
ここで  $\rho_G, c_G, T_G$  は地中の密度と比熱、温度である。地中温度には底層水温データを境界条件とした鉛直一次元熱伝導方程式の数値解を与える。その際、地中温度データと一致するように地中温度拡散係数をチューニングする。

水柱の熱収支には、図-7(b)と式 (4) のように、水面・底面からの熱輸送  $G$ 、 $H_{soil}$ 、水中短波吸収量  $S_{abs}$ 、水平移流  $\Delta F$  の和が水柱の貯熱変化量  $\Delta Q$  と等しいとする。

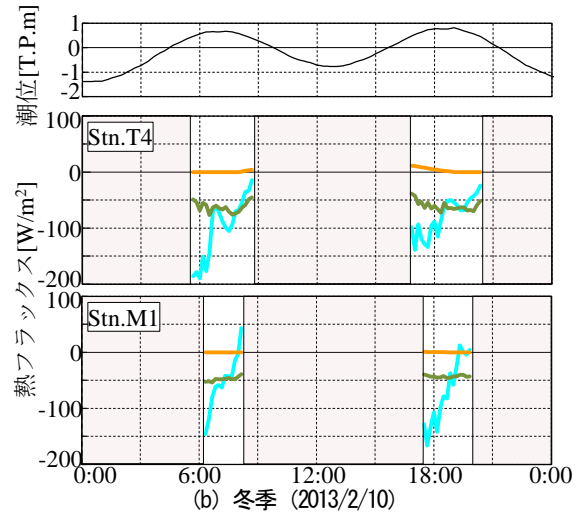
$$\Delta Q = G + H_{soil} + \Delta F + S_{abs} \quad (4)$$

ここでの熱収支解析では流動モデルは含まれておらず、上式の水平移流以外は観測値より算出し、水平移流  $\Delta F$  は上式の残差により求めている。

##### (2) 熱収支解析結果



(a) 夏季 (2012/8/18)

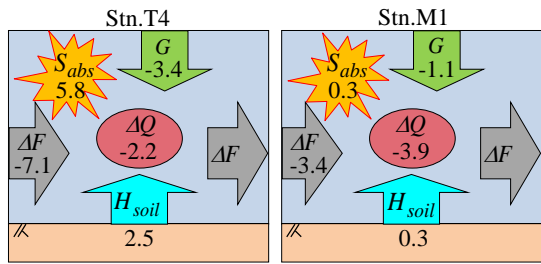


(b) 冬季 (2013/2/10)

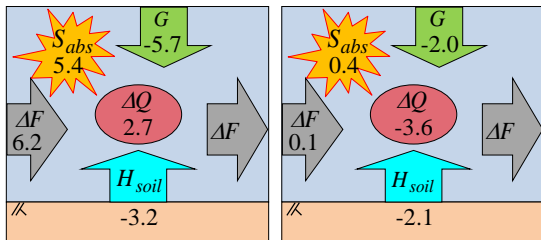
図-8 水中伝導熱  $G$ 、底面顕熱  $H_{soil}$ 、水中短波吸収量  $S_{abs}$  の時間変化 (干潟 Stn. T4、マングローブ水域 Stn. M1)

図-5と同じ大潮時の水面・底面・水中における熱フラックスの時間変化を図-8に示す。ここでは、水中伝導熱  $G$  と底面顕熱  $H_{soil}$ 、短波水中吸収量  $S_{abs}$  を示す。夏季の干潟では、日中の冠水直後に  $H_{soil}$  と  $S_{abs}$  が正に大きく、これらが冠水後の温度上昇 (図-5(a)) を引き起こす。マングローブでは、日中の  $H_{soil}$  は上げ潮時に負、下げ潮時に正となり、底面の加熱・冷却効果が混在している。また、水中伝導熱  $G$  は両地点共に負であり、これは水表面の正味放射収支が影響する。一方、冬季では干潟・マングローブ共に  $H_{soil}$  や  $G$  が概ね負となり、これらが海水冠水時の温度低下の要因となる。なお冬季の2013/2/10は曇りであったため、短波水中吸収量  $S_{abs}$  がほぼ0となった。

これらの熱フラックスを含む水柱全体の熱収支解析結果を図-9に示す。ここでは、夏季 (2012年8月) と冬季 (2013年2月) の月平均値を示す。これより、夏季干潟では  $S_{abs}$  や  $H_{soil}$  が正に大きく、水面・底面での熱交換により大きな加熱効果が生じる。マングローブでは  $S_{abs}$  や  $H_{soil}$  は正であるが、その大きさは干潟よりも小さい。一方、冬季では  $G$  と  $H_{soil}$  は、干潟・マングローブ共に負となり、



(a) 夏季 (2012年8月)



(b) 冬季 (2013年2月)

図-9 水柱の熱収支 (月平均値, 単位:  $^{\circ}\text{C}/\text{m}^2/\text{day}$ )

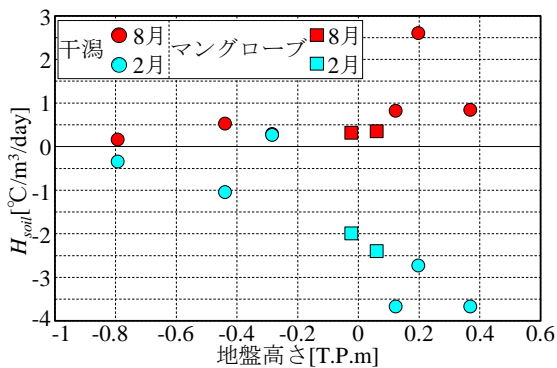


図-10 月平均底面顕熱  $H_{soil}$  と地盤高さの関係

冷却効果が顕著になる。このように、干潟やマングローブにおける水柱の熱収支には底面顕熱  $H_{soil}$  が夏季・冬季共に大きな影響を及ぼしていることが明らかとなった。

$H_{soil}$  の月平均値と地盤高さの関係を見ると (図-10)、干潟とマングローブ共に夏季には正、冬季には負となり、干潟・マングローブ底面は夏季には熱源、冬季には冷源となる。大きさを比べると絶対値では冬季の  $H_{soil}$  が夏季よりも大きく、干潟やマングローブ水域では冬季に顕著な海水冷却機能を有していることが分かる。対象水域に生息するリュウキュウアユの仔稚魚の生育には冬季水温が  $20^{\circ}\text{C}$  以下となる必要があり、外海水温では  $20^{\circ}\text{C}$  以下となる期間は非常に短い (図-3)。そのため、冬季における干潟やマングローブ水域の冷却機能が湾内を遡上する海水を冷やし、水温を  $20^{\circ}\text{C}$  以下に維持している。このことから、干潟やマングローブ水域の保全は、温熱環境特性からも必須であることが実証された。

## 5. 結論

本研究により得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 干潟・マングローブ水温は、夏季には外海水温に近く、冬季には河川水温に近く、これらの現象は河川水や外海水の移流・混合のみでは説明できず、水表面や底面の熱輸送が大きく寄与していることが示唆された。
- 2) 水温データより、同一地盤高さにおいても、マングローブ水温は干潟水温を下回り、マングローブ水域のほうが干潟よりも冷却効果が大きいことが示された。
- 3) 底面顕熱  $H_{soil}$  により、干潟・マングローブ底面は夏季には熱源、冬季には冷源となり、この効果は冬季のほうが顕著であることが明らかとなった。

**謝辞:** 鹿児島県大島支庁総務企画課及び建設部建設課には、現地観測に対して様々な便宜を図って頂いた。現地観測の実施に際して、(株)マングローブ公社・寿浩義氏及び東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏に大変お世話になった。本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号: 22310050, 研究代表者: 島谷幸宏) によるものである。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 茅根創, 宮城豊彦: サングとマングローブ, 岩波書店, pp.13-78, 2002.
- 2) 中村武久, 中須賀常雄: マングローブ入門, めこん, pp.77-89, 1998.
- 3) 島谷幸宏, 横川翔, 宗塚万, 河口洋一, 水垣滋, 馬場崎正博: 今津干潟の変遷と堆積環境に関する研究, 水工学論文集, Vol.52, No.2, pp.1087-1092, 2008.
- 4) 松田義弘: マングローブ環境物理学, 東海大学出版会, pp.1-21, 2011.
- 5) 環境省: レッドデータブック, pp.30-31, 2008.
- 6) 四宮明彦: 日本の希少淡水魚の現状と系統保存リュウキュウアユ (長田芳和・細谷和海編), 緑書房, pp.36-47, 1997.
- 7) 岸野底, 四宮明彦, 寿浩義: リュウキュウアユ仔魚の水温・塩分耐性に関する生存実験, 魚類学雑誌, Vol.55, pp.1-8, 2008.
- 8) 大槻順朗, 島谷幸宏: 河口域の人為改変に伴うリュウキュウアユ仔魚の生理的生息条件に対する影響評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.1709-1714, 2012.
- 9) 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観測, 海岸工学論文集, Vol.45, pp.1056-1060, 1998.
- 10) 二瓶泰雄, 灘岡和夫, 綱島康雄, 丸田直美, 青木康哲, 若木研水: サング礁海域の温熱環境特性に関する多面的観測と解析, 海岸工学論文集, Vol.48, No.2, pp.1146-1150, 2001.
- 11) 二瓶泰雄, 綱島康雄, 佐藤正也, 青木康哲, 佐藤慶大, 灘岡和夫: 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, Vol.49, No.2, pp.1206-1210, 2002.
- 12) 岸野底, 四宮明彦: 奄美大島の河川におけるリュウキュウアユ遡上個体の出現状況, 日本水産学会誌, Vol.70, pp.179-186, 2004.
- 13) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, pp.150-159, 1994. (2013.9.30 受付)