

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

二瓶泰雄*・綱島康雄**・佐藤正也***・青木康哲****・佐藤慶太*****・灘岡和夫*****

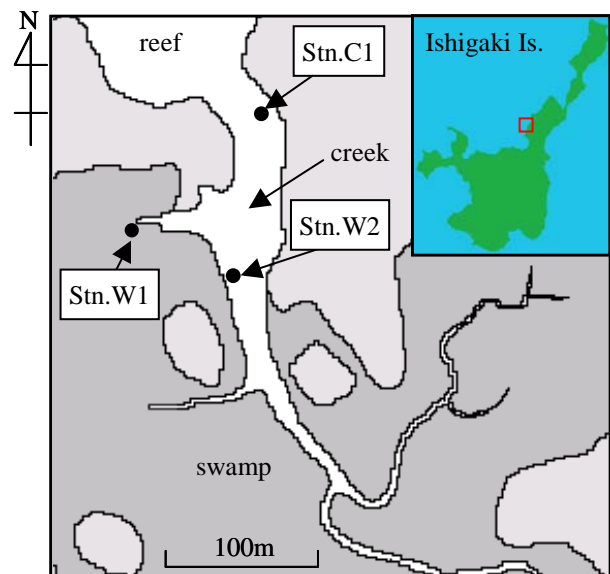
マングローブ域における水温度・放射環境を明らかにするために、沖縄県石垣島吹通川マングローブ域を対象として局所熱収支・温熱環境観測などを実施することを試みた。その結果、creekやswampにおける水温度は潮汐や日射により大きく変化し、swamp奥部ほど水温度が低下していることが確認された。また、マングローブ林内や水中における放射伝達過程について検討したところ、そこでの日射減衰過程を把握するとともに、水中へ入射する日射量の大部分は水表面や底面において吸収されることが示された。さらに、swamp上の海水に対して熱収支解析を行った結果、swampを出入りする海水は、主として、底面からの熱輸送により冷却されていることが明らかとなった。

1. はじめに

熱帯・亜熱帯の潮間帯に群落をなしている塩生植物であるマングローブ林では、ヒルギ類などのマングローブ植物による流体力学的な抵抗効果や太陽光の遮蔽効果などにより、サンゴ礁、藻場、干潟等の周辺海域とは大きく異なる特徴的な環境場が形成されている。このマングローブ域では、潮汐の作用を通して周辺海域と様々な物質交換が行われていることから、マングローブ域における大気・水・底質環境特性を把握することは、マングローブ林そのものや周辺海域における生態環境特性を把握する上で極めて重要である。

このうち、マングローブ域における温熱環境特性に関しては、マングローブ林の日射遮蔽効果がそこでの水温度環境の安定化を促進しているものと推察されるが(小滝, 1997), 温熱環境や熱収支構造そのものに着目した研究は極めて限定されている(Clough, 1992; 松田, 1997; 二瓶ら, 2001a)。このようなことから、河道部(creek)やマングローブ林が繁茂する氾濫源(swamp)における水温度環境や、マングローブ林内や水中における放射伝達過程、潮汐に伴う周辺海域との熱交換特性など未解明な点が数多く残されている。

そこで本研究では、沖縄県石垣島吹通川マングローブ域においていくつかの温熱環境観測を実施し、マングローブ水域における水温度・放射環境特性を多角的に検討することを試みる。具体的には、creekやswampにおける局所的な熱収支・温熱環境観測や、多くの小型水温度計を平面展開した多点連続観測等を行ったので、以下にその結果を示す。



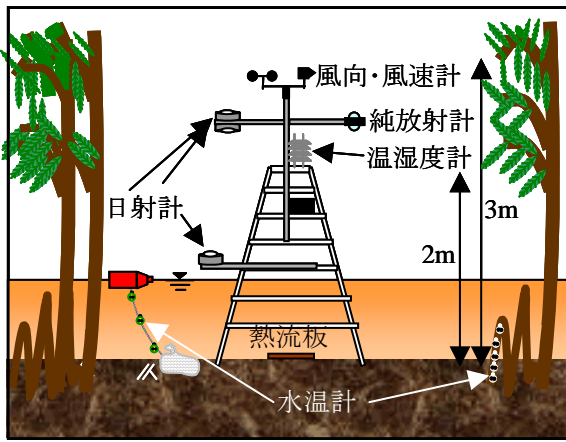
図—1 吹通川マングローブ水域と観測地点

2. 現地観測の概要

マングローブ域における基本的な水温度環境や放射収支特性を把握するために、石垣島北西部に位置する吹通川マングローブ域を現地観測サイトとして選定した(図—1)。このマングローブ域では、ヤエヤマヒルギ(*Rhizophora stylosa*)とオヒルギ(*Buruguiera gymnorhiza*)が卓越種であり、それらの樹高は5~10m程度である。上述した局所熱収支・温熱環境観測における観測地点としては、図—1に示しているように、swamp(Stn.W1)とcreek(Stn.W2)においてそれぞれ一地点選定し、観測期間としては各々2001/7/29~8/17, 2001/8/17~20とした。この観測を行う際には、図—2に示すように、様々な観測機器やデータロガーを取り付けた梯子をswampもしくはcreekに設置するとともに、係留ブイを用いて水温度鉛直分布を計測した。

気象に関する測定項目としては、気温、湿度、風向・風速、上向き・下向き日射量、純放射量とした。水環境に関しては、流速(creekのみ)、水位、水温度、水中日射量を、底面上及びその内部では、地温度や地中伝導熱フラ

*	正会員	博(工)	東京理科大学講師	理工学部土木工学科
**		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
***		学(工)	都市基盤整備公団	
****		修(工)	五洋建設	
*****	学生会員	修(工)	東京理科大学大学院	理工学研究科土木工学専攻博士後期課程
*****	フェロー	工博	東京工業大学教授	大学院情報理工学研究科情報環境学専攻



図—2 測定器配置例 (swamp, Stn.W1)

ックスをそれぞれ計測項目とした。ここで、水中における日射量に関しては、通常大気中において使用される日射計 (MS-601, 英弘精機株) を防水加工して用いた。これにより、大気中における上向き・下向き日射量データに加えて、水中の下向き日射量データを取得することができるため、より詳細な水中における日射伝達過程を把握することが可能となる。また、底面上における地中伝導熱フラックスの計測には、二瓶ら (2001b) と同様に、熱流板 (MF-81, 英弘精機株) を用いた。

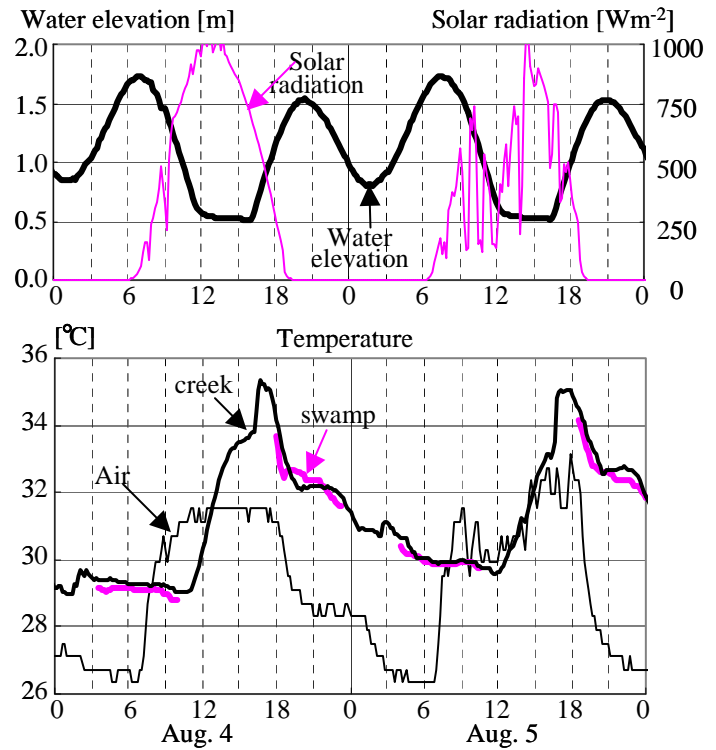
swamp (Stn.W1) における観測は、マングローブ植物の樹高 5~6m の地点で行われ、各気象項目をマングローブ林内(底面より 2.5~3.0m)と林外(底面より 6.0~6.5m)において計測した。また、林内における日射減衰過程を詳細に把握するため、swamp における局所観測時のうち、8/14~17 において、5 台の日射計を用いて、林内外における下向き日射量の鉛直分布を計測した。さらに、マングローブ植物の葉温を表面温度計 (安立計器株, HFT-40) を用いて別途計測した。

この局所観測に加えて、マングローブ域内における平面水温環境や周辺海域との熱交換量を検討するために、同時期に行われた吹通川マングローブ水域全域を対象とした平面水理環境観測 (二瓶ら, 2002) の結果を解析する。この観測では、creek や swamp における多点において水位、流速、水温等に関して計測した。本研究では、swamp において平面的に配置された水温計データや、河口部 (図—1 中 Stn.C1) における上述した項目の観測値を用いた。なお、この平面水理観測の詳細に関しては二瓶ら (2002) を参照されたい。

3. creek と swamp における水温変動特性

(1) 水温の時間変動特性

マングローブ域における基本的な水温変動特性を見るために、大潮時における creek (Stn.C1) と swamp (Stn.W1) の水温変動を、気温 (swamp 林内)、下向き日射量 (swamp

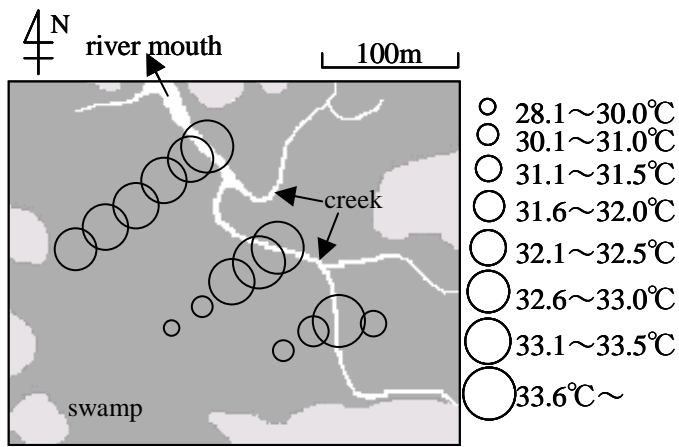


図—3 creek と swamp における水温の時系列変化 (上図: 水位 (Stn.C1)・下向き日射量 (林外), 下図: 気温 (林内)・水温 (swamp (Stn.W1), creek (Stn.C1)))

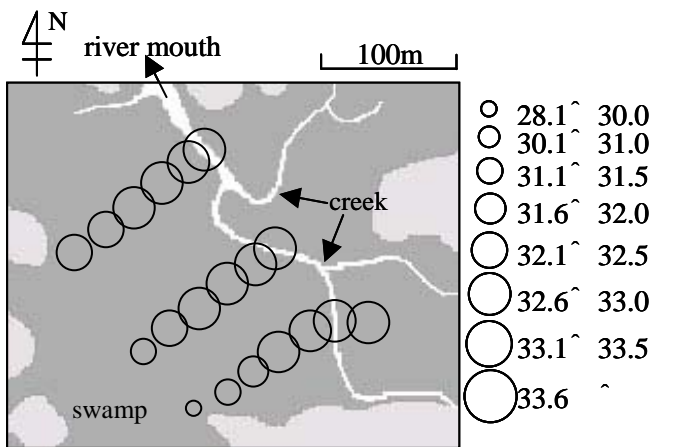
林外)、水位変動 (creek, Stn.C1) とともに図—3 に示す。なお、swamp (Stn.W1) では低潮時には干出するため、swamp における水温データは冠水中のみ図示されている。まず、水位変動に着目すると、干潮時に大きく歪んだ波形となっていることが分かる。これは、吹通川マングローブ水域と隣接するサンゴ礁海域の間に位置する干潟域が干潮時に干出することにより、干潮時においてマングローブ水域と海域が分断されるためである (松田, 1997; 二瓶ら, 2001a)。この影響を受けて、干潮時の creek では、浅くほとんど流れのない状況となっている。

creek における水温変動に関しては、日中では、干潮時に水温が上昇し、その後の上げ潮時初期に水温ピークが見られる。この要因としては、水深が極浅い干潟や藻場における相対的に高温の海水が、マングローブ域へ侵入してくるためであると考えられる。また夜間においては、潮位とともに水温変動は見られるものの、その変動幅は日中よりは小さく、水温最低値は午前中の干潮時に現れている。このように、creek における水温変動は潮汐や日射とともに大きく変動していることが分かる。一方、swamp では、creek と類似した水温変動パターンが見られるものの、水温レベルは creek よりわずかに小さい。なお、ここでは示していないが、小潮時には creek や swamp における水温のピーク値が日中満潮時に現れるなど、大潮時と小潮時とは異なる水温変動パターンが生じることが確認されている。

(2) swamp 内における水温平面マップ



(a) 上げ潮時 (8/16, 16:40)



(b) 満潮時 (8/16, 18:30)

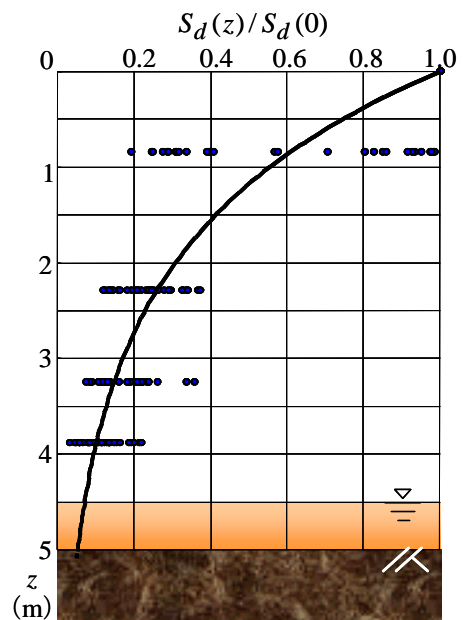
図—4 swamp における水温の空間分布

次に、マングローブ水域における水温の空間変動特性を明らかにするために、swamp 内における平面水温分布を図—4 に示す。ここでは、平面水理環境観測により得られた結果の典型例として、全 19 地点 (creek3 地点、swamp16 地点) における上げ潮時 (8 月 16 日 16:40) と満潮時 (同日 18:30) での水温値を円の大ききで示している。なお、冠水していない地点における結果は示されていない。これらを見ると、上げ潮時には、全体的には swamp 奥部へ行くと水温値は低下し、その程度は swamp 奥部へ進行する潮汐フロント近傍において顕著である。さらに満潮時においても、水温値は swamp 奥部ほど低くなっている。これらの結果より、潮汐に伴って swamp に侵入する海水がマングローブ域において冷却されている様子が分かる。

4. マングローブ林内及び水中の放射環境

(1) マングローブ林内における日射減衰過程

マングローブ林による日射遮蔽効果を明らかにするために、マングローブ林内の様々な高さにおいて計測された日射量の鉛直分布特性について検討する。まず、マングローブ林内における日射量の時系列変化を見たところ、日射量が高さごとに大きく異なっており、低い位置での日射量が相対的に高い位置での値よりも大きくなること



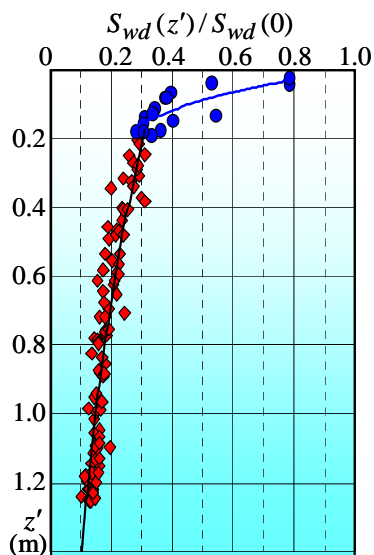
図—5 マングローブ林内における日射減衰過程 ($S_d(0)$: 林上端に入射する日射量, $S_d(z)$: マングローブ林上端からの距離 z における日射量)

も時折確認された。そこで、マングローブ林上端から入射する日射量の減衰過程を調べるために、マングローブ林上端からの高さ z における下向き日射量 $S_d(z)$ と林上端における値 $S_d(0)$ との比に関する鉛直分布を図—5 に示す。これを見ると、各高さにおいて日射量比 $S_d(z)/S_d(0)$ は大きく変動しており、マングローブ林上端部直下では 0.2~1.0 と変動幅が極めて大きく、高さ z とともにその変動幅は減少している。各高さにおける日射量比の平均値は、高さ z とともに概ね指数関数的に減少しており、水表面まで到達する日射量は林上端に入射する短波放射量の 10% 弱であることが分かる。また、林内における日射減衰の程度を表す日射消散係数 β_f に関しては、指数関数の近似曲線より $\beta_f = 0.4 \sim 0.7 \text{ m}^{-1}$ となり、Clough(1992)の結果と概ね一致していることが分かる。

(2) 水中における日射環境

a) 水中の日射減衰特性

次に、水中における日射伝達過程について検討するために、水中の各高さ z' における下向き日射量 $S_{wd}(z')$ に対する水表面での値 $S_{wd}(0)$ の比に関する鉛直分布を図—6 に示す。これは、creek (Stn.W2) における局所観測時の結果である。また、日射計は水中において固定されていたため、水中日射量比の鉛直分布を求める際には、水中の日射計から水面までの高さが潮位とともに変化することを利用している。この図を見ると、水表面近傍において 70% 程度の日射量が吸収・反射され、その後日射量は水深とともに緩やかに減少している。この 0.20m 以深における日射量比に対して、指数関数を近似曲線として当てはめた結果、水中における日射消散係数 β_w は 0.73 m^{-1} となり、きれいな水に対する値 (近藤, 1994) よ



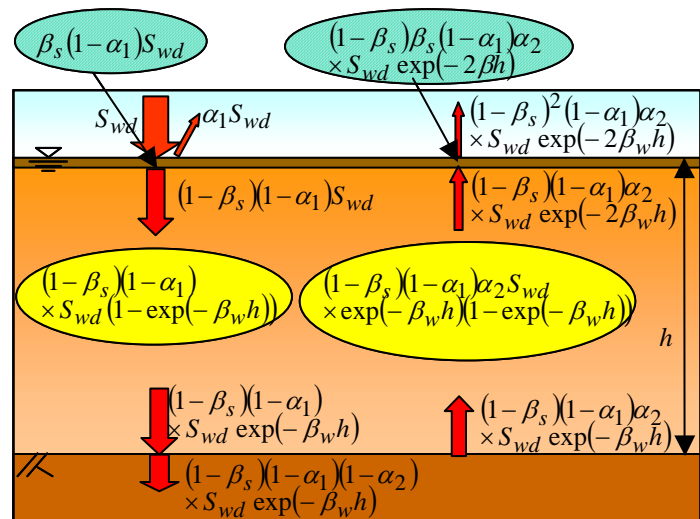
図—6 水中における日射減衰過程 (creek, Stn.W2)
 $(S_{wd}(0)$: 水表面に入射する日射量, $S_{wd}(z')$: 水深 z' における日射量)

りも大きくなっている。

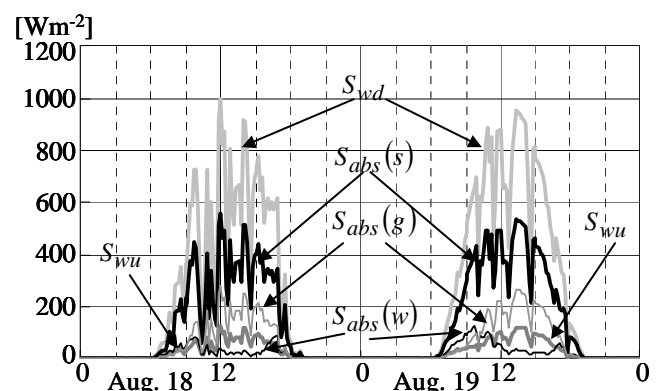
b) 水中における日射量収支

この日射量データを用いて, creek の水中における日射量収支について検討する. ここで, 水中の日射伝達過程としては, 水中での吸収や底面での反射を考慮した小葉竹ら (1997) の取り扱いに加えて, 水表面を透過する日射量が β_s ($=0\sim 1$) の割合で水表面に吸収される, という水表面での吸収過程を加味した日射伝達モデルを用いる. 図—7 (a) はこのモデルの概念図を示しており, 図中の記号としては, S_{wd} は水表面に入射する下向き日射量, α_1 と α_2 は水表面・底面におけるアルベド, h は水深である. なお, 同図中では水表面は有限の層厚を有しているように描かれているが, この日射伝達モデルでは, 水表面は無限小の厚さを持つものとしている. また, 水中における日射消散係数 β_w は, 観測により得られた値 ($=0.73\text{m}^{-1}$) を深さ方向に一定値として与えている.

このような日射伝達モデルにより得られた水中での日射量収支を図—7 (b) に示す. 図中には水表面への入射日射量 S_{wd} と水表面・水中・底面での日射吸収量 $S_{abs}(s)$, $S_{abs}(w)$, $S_{abs}(g)$, さらに, 水表面からの上向き日射量 S_{wu} の時系列変化が示されている. これらの値を求める際には, 底面でのアルベド α_2 に関しては現地底質を用いて日射量の反射率を計測した結果 ($\alpha_2=0.18$) を与えた. また, 水表面でのアルベド α_1 や日射吸収率 β_s は, 大気中及び水中における日射量を用いて求めた. これを見ると, 水中に入射する日射量 S_{wd} の多くは水表面や底面に吸収されており, 水中ではほとんど吸収されていない様子が分かる. また, 水表面からの上向き日射量 S_{wu} は, 早朝や夕方を除いて, 水中へ入射する下向き日射量 S_{wd} の 8~13%程度となっている. このように, creek のような浅



(a) 日射伝達モデルの模式図



(b) 日射量収支 (creek, Stn.W2)

図—7 水中における日射伝達過程

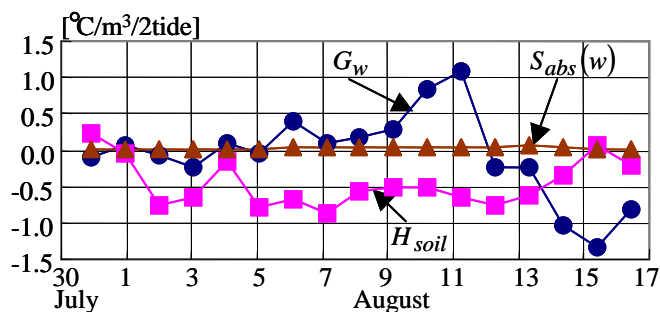
水域においても, 水中へ入射する日射量の多くが水表面や底面において吸収されてしまうため, 水表面での上向き・下向き日射量の比 S_{wu}/S_{wd} は, 深海域での値 0.06~0.08 (Payne, 1972) と比べて顕著には増加していない.

なお, ここでは図示していないが, 水表面での日射吸収率 β_s は 0.40~0.70 と高く, これらの変動と水中での濁度との負の相関関係が確認された. また, 水表面でのアルベド α_1 は 0.05~0.25 と大きく変化しており, 近藤 (2000) と同様に, 天頂角との関連性が見られた.

5. swamp 上の海水に対する熱収支解析

(1) 解析方法の概要

3. で示したマングローブ域を出入りする海水が冷却される要因を定量的に明らかにするために, 局所観測結果に基づいて swamp 上の海水に対する熱収支解析を行う. この局所的熱収支解析を実施する際に必要となる日射及び長波放射量の取り扱いに関して記述する. まず, 水中に関しては, 日射伝達過程としては, 4. 2 で示した日射伝達モデル (図—7 (a)) を用いて評価し, また, 長波放射は水表面において全て吸収されるものとする. 次に, 大気から水表面へ入射する日射量に関しては, マングローブ林外における下向き日射量と 4. 1 で示され



図—8 局所熱収支解析結果

たマングローブ林内における日射消散係数 β_f を用いて水面高さまで到達する日射量を算定し、それを熱収支解析に用いた。長波放射量に関しては、マングローブ林上端からの林内への入射成分、水表面からの上向き成分、マングローブ植物の葉面からの寄与を考慮して、日射量と同じ光の消散係数 β_f を用いて 2-stream model (近藤, 1994) により水表面へ入射する長波放射量を評価した。このような放射過程に基づいて、単位体積あたりの水柱の貯熱変化量 ΔQ が、大気と底面からの熱輸送 (G_w , H_{soil})、水平移流に伴う熱輸送 ΔF 及び水中短波吸収量 $S_{abs}(w)$ の和と等しい、という熱収支解析を実施する。上述した熱フラックスの算出方法としては、二瓶ら (2001b) で用いている手法に加えて、前述した水表面における日射吸収に伴う昇温効果は、水中ではなく水表面上での熱収支式に取り入れられ、ここでは大気からの熱輸送 G_w に反映されている。

(2) 解析結果と考察

熱収支解析結果のうち、大気・底面からの熱輸送 G_w , H_{soil} と水中短波吸収量 $S_{abs}(w)$ を各々温度換算した値の時系列変化を図—8 に示す。ここでは、潮汐や日潮不等の影響を取り除いた平均的な値として見るため、2 潮汐間にわたる平均値を示している。これを見ると、まず、水中日射吸収量による昇温効果 $S_{abs}(w)$ はほぼゼロであり、図—7 に示した水中における日射吸収量が相対的に少ない結果と整合している。大気からの熱輸送 G_w は、正負に大きく変動し、水柱に対して有意な加熱・冷却効果を作用していることが分かる。このような G_w の正負の変化は、潮汐や日射量と密接に関連しているものと推察される。さらに、底面からの熱輸送 (顕熱輸送) H_{soil} は、全期間中概ね負となっていることが分かる。これらの結果より、swamp を出入りする海水は主として底面からの熱輸送により冷却されていることが明らかである。

6. 結論

マングローブ域における温熱環境特性を多角的に把握するために、沖縄県石垣島吹通川マングローブ域を対象

とした局所熱収支・温熱環境観測等を行った。その結果、creek や swamp における水温は、潮汐や日射に伴って大きく変動し、swamp 奥部ほど水温が低下していることが示された。マングローブ林内や水中における放射伝達過程について検討したところ、そこでの日射減衰過程について把握するとともに、水中へ入射する日射量の大部分が水表面・底面において吸収されることが分かった。さらに、この放射伝達過程を反映した局所的熱収支解析を swamp 上の海水に対して行ったところ、swamp 上を出入りする海水に対する冷却効果としては、主として底面からの熱輸送が顕著に作用していることが明らかとなった。

謝辞: 本研究の一部は、文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(1) (課題番号: 12450198, 代表者: 灘岡和夫) によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 小滝一夫 (1997): マングローブの生態, 信山社, pp.1-138.
- 小葉竹重機・塩田挙久・河内信二郎 (1997): 河川水温の形成過程における光の吸収率の影響, 水工学論文集, Vol.41, pp.599-604.
- 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.
- 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.31-81.
- 二瓶泰雄・灘岡和夫・青木康哲・若木研水・矢井秀明・大見謝辰男・古川恵太・佐藤慶太 (2001a): マングローブ水域における流動・熱・水質環境特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, Vol.48, No.2, pp.1211-1215.
- 二瓶泰雄・灘岡和夫・綱島康雄・丸田直美・青木康哲・若木研水 (2001b): サンゴ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.
- 二瓶泰雄・青木康哲・綱島康雄・佐藤慶太・西村司・灘岡和夫 (2002): 多点連続観測に基づくマングローブ・エスチュアリーにおける流れと物質輸送特性, 海岸工学論文集, Vol.49 (投稿中).
- 松田義弘 (1997): マングローブ水域の物理過程と環境形成 — 自然の保護と利用の基盤 —, 黒船出版, pp.1-103.
- Clough, B.F. (1992): Primary productivity and growth of mangrove forests (eds. Robertson, A. I. and D. M. Alongi), *American Geophysical Union*, pp.225-249.
- Payne, R. E. (1972): Albedo of the sea surface, *J. Atmos. Sci.*, Vol.29, pp.959-970.