

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

二瓶泰雄*・灘岡和夫**・綱島康雄***・丸田直美****・青木康哲***・若木研水*****

1. はじめに

近年のサンゴ礁海域において大きな環境問題となっていた白化現象は、海水の高温化が主要因として挙げられることから（例えば、Glynn, 1993）、サンゴ礁海域における温熱環境特性を把握することは極めて重要である。サンゴ礁海域では、水深が浅く透明度が高いため大気影響や海底面での熱輸送が顕著であり、また隣接する陸域や外洋域からの影響を多大に受けるため、そこでの温熱環境特性を解明するには、多面的に現地観測を実施することが必要となる。

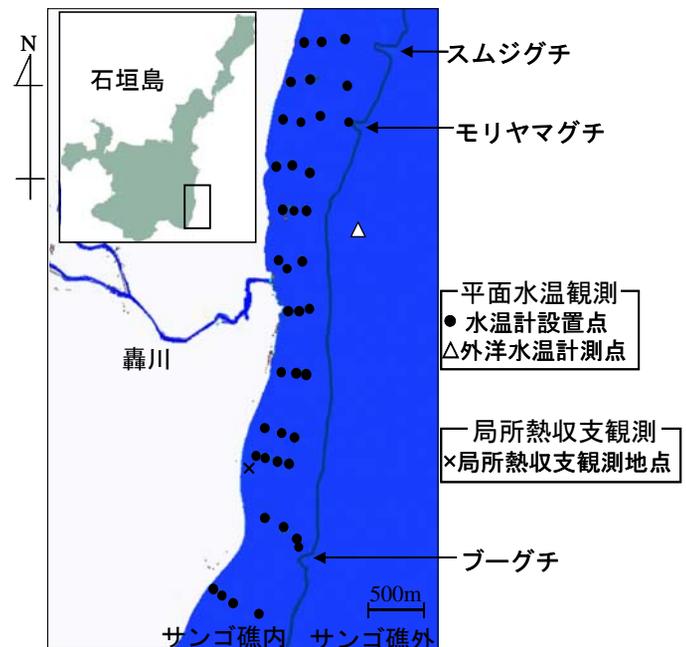
これに対して、灘岡ら（1999）は、沖縄県石垣島白保サンゴ礁海域を対象とした多点係留ブイ観測を実施し、サンゴ礁海域の水環境特性に及ぼす陸域・外洋影響についていくつか明らかにしている。しかしながら、そこでは、海底面での熱輸送に関しては、簡易的な算定式により評価しているのみであり、熱収支構造に及ぼす海底面効果については十分検討されていない。また、サンゴ礁内に係留ブイを多点で設置したものの、サンゴ礁内での平面水温パターンを詳細には把握しておらず、サンゴ礁内における温熱環境特性に関する平面分布等に関しては未だ不明な点が多い。

本研究では、サンゴ礁海域における温熱環境特性をより多面的に把握するために、石垣島白保サンゴ礁海域を対象として、①海底面効果に着目した局所熱収支・温熱環境観測と、②多くの小型水温計を用いた平面水温観測、という2種類の現地観測を実施した。以下には、上記の二つの観測結果について記述するが、ここでは特に、局所熱収支・温熱環境観測の結果に基づいて、海底面効果を考慮した熱収支解析結果を主として示す。

2. 現地観測概要

(1) 局所熱収支・温熱環境観測

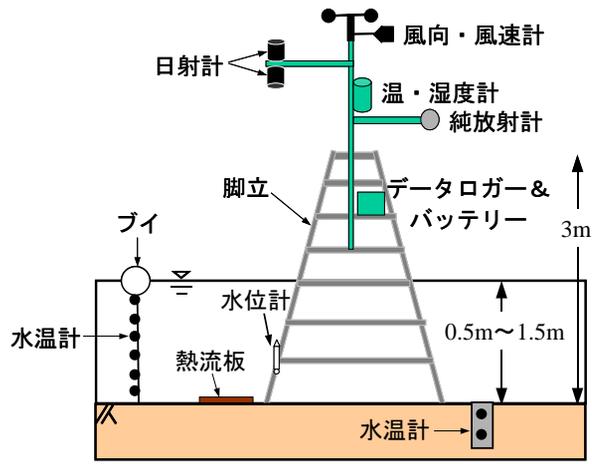
これまでのサンゴ礁における熱収支解析では、①短波放



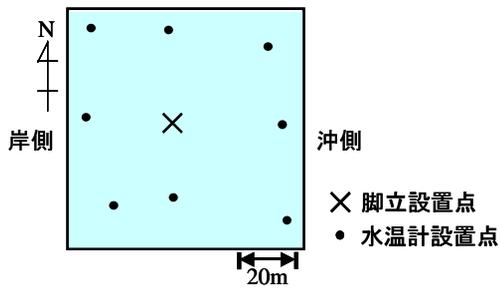
図—1 観測海域の概要

射伝達過程の海中・海底面における取り扱い方や、②海底面上における地中伝導熱を直接計測せず簡易式に基づいて算定する、といった問題点があったため、サンゴ礁海域での温熱環境に対する海底面影響は十分に把握されていない。これらの問題点を解決するために、石垣島白保サンゴ礁海域内における図—1中の×印で示されている、汀線より約100m、平均水深約1.0mの地点において、2000年9月3～5日にわたり局所的な熱収支・温熱環境観測を行うこととした。測定項目としては風向・風速、気温、湿度、上・下向き日射量、純放射量といった気象項目と、水温、水位といった海象項目に加えて、熱流板（英弘精機㈱、MF-81）を用いて海底面上での地中伝導熱を直接計測することとした。これらの測定項目のうち、上・下向き日射量を計測することにより上記の①の問題点を、熱流板による地中伝導熱の直接計測により②の問題点を、それぞれ解決した。また、海表面・海底面近傍での水温鉛直分布を詳細に把握するために、水温計を鉛直方向に密に配置した。これらの観測器をサンゴ礁海域内に設置するために、図—2(a)に示すような高さ3mの脚立を海域内に設置し、その脚立に各観測器を取り付けた。さらに、図—2(b)に示すように、熱収支観測を行う脚立設置点を中心として、周囲8地点に水温計を設置し、熱収支観測点近傍における局所的な岸沖・沿岸水温分布を計測した。

*	正会員	博（工）	東京理科大学講師	理工学部土木工学科
**	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
***		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）	㈱新日鉄ソリューションズ	
*****	学生会員	学（工）	東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻修士課程	



(a) 観測機器の設置状況



(b) 脚立周辺における水温観測点

図—2 局所熱収支・温熱環境観測の概要

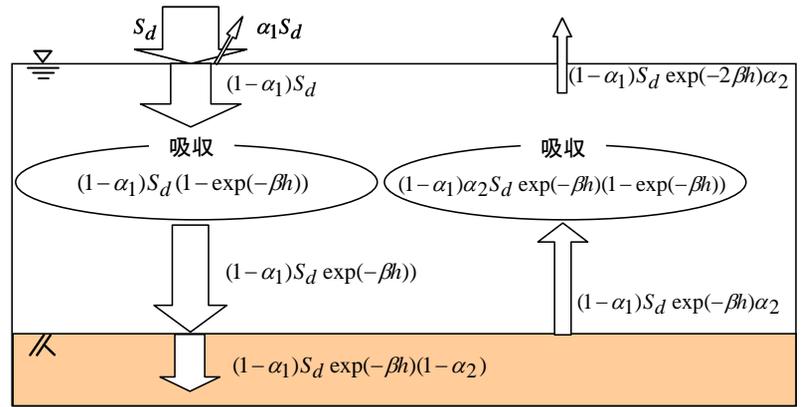
(2) 平面水温観測

平面水温観測では、サンゴ礁海域における水温平面分布を把握するために、ここでの水環境特性を特徴付ける3つの切れ込み口と轟川河口部を含むように、幅約1km、沿岸方向約5kmにわたる礁池内を観測対象とした。観測点は図—1中の黒丸で示される40地点であり、そこでの水深は1~3mである。観測期間は、2000年9月3日~28日とした。本観測では水温計の数の制約により、約半分の観測点では底面上20cmにのみ水温計を設置し、残りの点では底面上20cmと表層や底面上にも水温計を設置し、計52台の水温計を用いた。また、データ解析を行う際には、サンゴ礁外(水深25m、図—1中△印)での表層水温データも用いた。

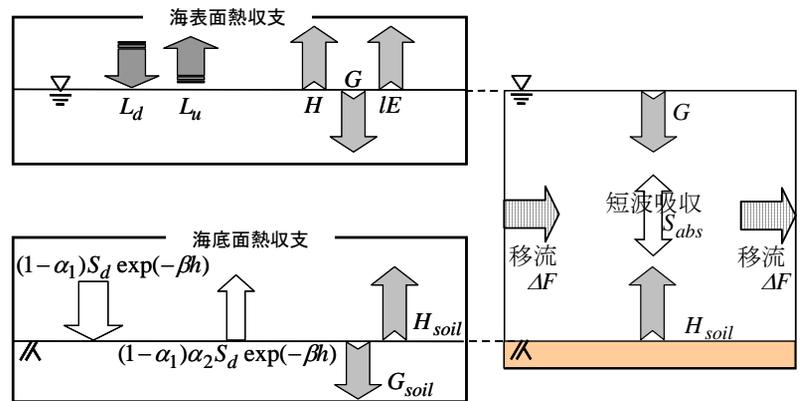
3. 海底面効果を考慮した熱収支解析手法

(1) 放射エネルギーの取り扱い

海底面効果を考慮した熱収支解析を行う際には、海表面と海底面、海中に対して、短波・長波放射量からなる放射エネルギーと、顕熱や潜熱、伝導熱等からなる非放射エネルギーのバランスを考えることとする。まず、放射エネルギーのうち短波放射量の収支については、短波放射量の水中での吸収や海底面での反射を考慮するために、図—3に示すように取り扱うこととする。その詳細は、小葉竹ら(1997)や松永ら(1998)を参照されたい。なお図中に使われている記号としては、 α_1 、 α_2 は海表面、海底面におけるアルベド、 β は光の水中消散係数、 h は水深、 S_d は下向き日射量である。また、長波放射量に関しては、水表面のごく薄い層内で吸収されるので、海表面のみでの長波放射量の上・下向き成分 L_u 、 L_d を考慮する。



図—3 短波放射量収支の概念図



(a) 海表面・海底面

(b) 海中

図—4 熱収支概念図

(2) 海表面・海底面・海中における熱収支式

上述した放射エネルギーの取り扱いに基づいて、海表面と海底面、海中における熱収支式を求める。まず、海表面では、図—4(a)に示されているとおり、非放射エネルギーとして顕熱 H と潜熱 IE 、水中伝導熱 G を考慮すると、以下のような熱収支式が与えられる。

$$L_d - L_u = H + IE + G \quad (1)$$

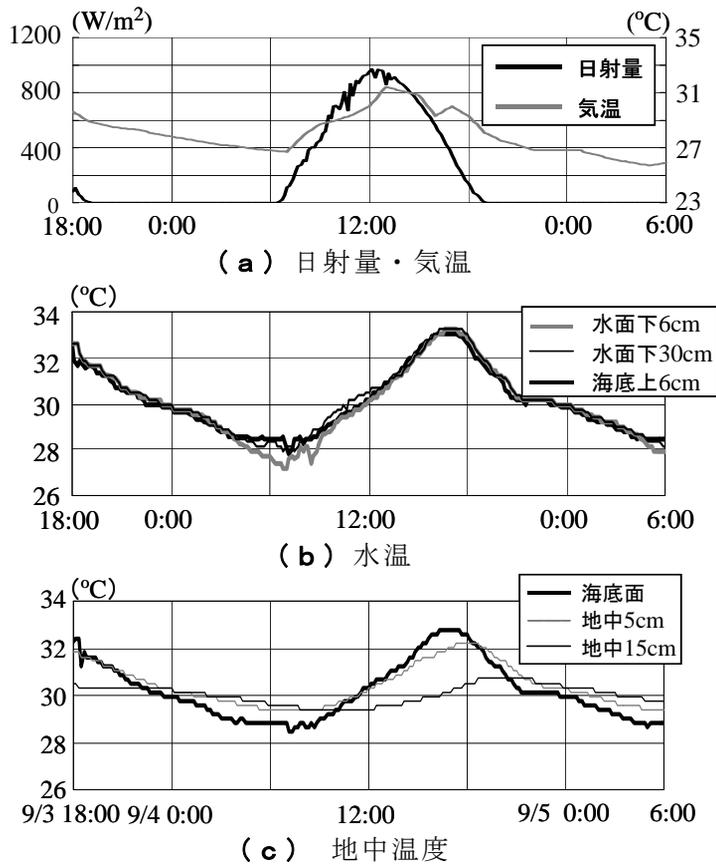
ここで、上式の左辺は海表面における正味の放射量であり、短波放射量は水表面では吸収されず、そのまま透過するものとしている(近藤, 1994)。式(1)中の各項を求めるに当たり、左辺の正味放射量は観測値より与え、顕熱 H や潜熱 IE はバルク式により求め、水中伝導熱 G は、式(1)を用いて残差として算出する。

次に、海底面に関しては、海底面における正味の短波放射量が顕熱 H_{soil} と地中伝導熱 G_{soil} の和と等しいとして、以下の式が得られる。

$$(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)S_d \exp(-\beta h) = H_{soil} + G_{soil} \quad (2)$$

上式中の S_d は観測値を、海表面でのアルベド α_1 は通常用いられる値(=0.06)を、海底面でのアルベド α_2 は現地底質砂を採取して別途計測した結果(=0.25)を各々用いた。地中伝導熱 G_{soil} に関しては熱流板による計測値を与え、海底面顕熱 H_{soil} は式(2)より算出した。また、水中消散係数 β は、大気中での上・下向き日射量より求めた。

また、海中に関する熱収支式としては、図—4(b)のように、単位面積あたりの水柱を対象として、水柱内の貯熱変化量 ΔQ が各検査面からの熱フラックスの総和と水柱



図—5 局所観測期間中の気象・水温データ

内の短波吸収量の和と等しいとする．ここでの熱フラックスとしては，海表面上での水中伝導熱 G ，海底面顕熱 H_{soil} ，水平移流・拡散（以下「水平移流」と呼ぶ）熱フラックス ΔF からなるので，以下の海中に関する熱収支式が得られる．

$$\Delta Q = G + H_{soil} + \Delta F + S_{abs} \quad (3)$$

ここで S_{abs} は水柱内の短波放射量の吸収量である．また， ΔQ は観測された水温・水位値より算出し， ΔF は式 (3) の残差として求める．なお，海中の熱収支解析の際には，水位変動の効果を除去するために，式 (3) の両辺を水深で除した形で各フラックスを算出している．また，式 (3) は式 (1)，(2) より以下のように書き換えられる．

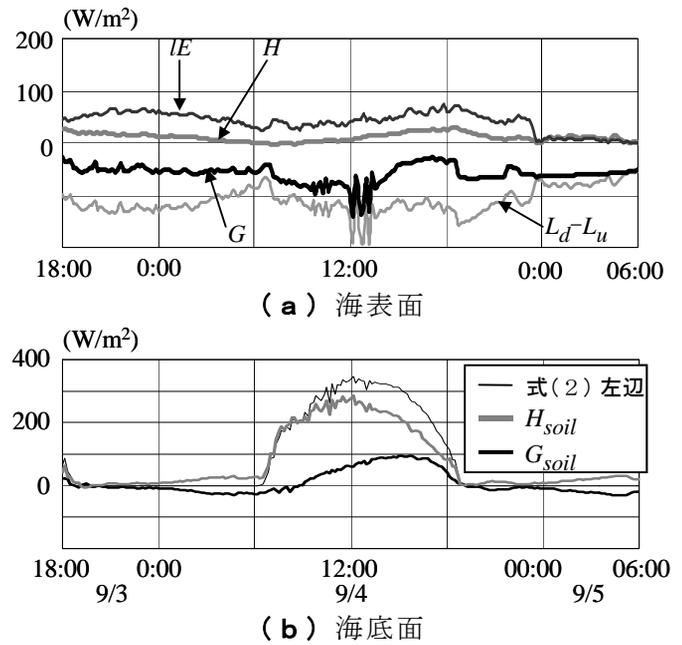
$$\Delta Q = G + \Delta F - G_{soil} + (1 - \alpha_1) S_d \times [(1 - \exp(-\beta h))(1 + \alpha_2 \exp(-\beta h)) + (1 - \alpha_2) \exp(-\beta h)] \quad (4)$$

最終的に導かれた上式には，海底面での熱輸送効果は右辺第三項に，短波の放射伝達過程は右辺第 4 項にそれぞれ反映されていることが分かる．

4. 観測結果と考察

(1) 気象概況及び水温変動特性

観測期間中における気象概況と水温・地中温度の時系列変化を図—5 に示す．まず，気象概況に関しては，概ね風速 5m/s 以下の典型的な穏やかな夏季晴天日であり，日射量は日中最大で 1000W/m^2 ，気温は最大 32 度弱で日較差が 5°C 程度であった．次に，同図 (b) に示されている水温変動に着目すると，どの鉛直位置においても早朝に最低値，夕方には最大値を取っており，日中には水温上昇，夜間には水



図—6 海表面及び海底面における熱収支特性

温低下している．また，水温の鉛直構造に着目すると，早朝付近を除いては明確な水温差は形成されていない．同図

(c) に示されている地中温度の変動パターンは，概ね水温変動と類似しているものの，深さとともに地中温度変動の位相が遅れ，振幅が小さくなっている．このような地中温度の変動特性は，熱伝導過程の基本的な特徴と概ね一致していることが分かる．

(2) 熱収支解析結果

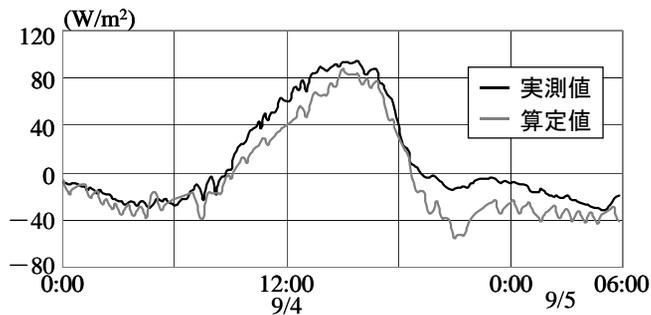
a. 海表面・海底面上での熱収支特性

図—6 (a) は，式 (1) を用いて得られる海表面上での熱収支解析結果を示している．これを見ると，水中伝導熱 G は， $50 \sim 100\text{W/m}^2$ と下向き日射量などと比べて小さい値であるが，対象期間中常に負となっており，海水は大気に海表面を通して熱が奪われていることが分かる．これは，正味の長波放射量 $L_d - L_u$ が負であること，また，その絶対値が顕熱 H や潜熱 IE よりも大きな値となっているためである．次に，海底面に関する熱収支解析結果を図—6 (b) に示す．これを見ると図—5 (b) に示されているとおり 9 月 4 日 7 時頃からの急激な日射量の増大に対応して，海底面における短波吸収量が増加し，それと連動する形で顕熱フラックス H_{soil} も急増していることが分かる．それに対して，地中伝導熱 G_{soil} も同様に増加するものの，その程度は H_{soil} と比べて相対的に小さくなっている．

上述された地中伝導熱 G_{soil} を評価する際には，これまででは，以下のように示される地中温度に関する鉛直一次元熱伝導方程式の理論解 $T(z, t)$ を用いていた（灘岡ら，1999）．

$$T(z, t) = T_b(0) + \int_0^t \frac{z}{2\sqrt{\pi a_G(t-\xi)^3}} \exp\left\{-\frac{z^2}{4a_G(t-\xi)}\right\} (T_b(\xi) - T_b(0)) d\xi \quad (5)$$

ここで， a_G は地中温度拡散係数， z は海底面からの高さ（下向きを正）， $T_b(t)$ は海底面温度であり実測値が与えられる．なお，上式は，初期条件として，鉛直方向に一様な水温分布を仮定している．式 (5) の地中温度分布を用いると，



図—7 地中伝導熱に関する実測値と算定結果の比較
($a=5.9 \times 10^{-7}$ [m^2/s])

海底面上での地中伝導熱 G_{soil} は以下のように与えられる。

$$G_{soil} = \int_0^{\infty} \rho_G c_G \frac{\partial T}{\partial t} dz \quad (6)$$

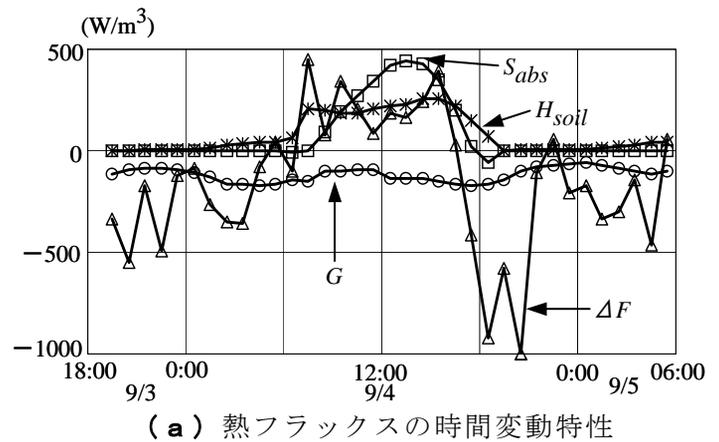
ここで、 c_G, ρ_G は地中の比熱と密度である。式(5)、(6)より得られる算定値と熱流板による実測結果を比較したものを図—7に示す。これを見ると、算定式により得られた温度変動の振幅や位相は実測値と良好に一致しており、算定式の推定精度が概ね良好であることが確認された。

b. 海中における熱収支特性

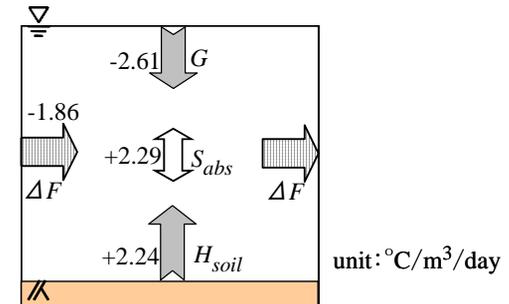
図—8(a)は、式(4)を用いて得られる海中に関する熱収支解析結果を示している。図中には省略されているが、貯熱変化量 ΔQ は、図—5(b)の水温変動パターンと対応して、日中に正、夕方から早朝にかけて負となっていた。これに対する各熱フラックスの寄与を見ると、日中における正の ΔQ に対しては、水中での短波吸収量 S_{abs} や水平移流分 ΔF に加えて、海底面上の顕熱 H_{soil} が同程度に寄与していることが分かる。一方、夜間における負の ΔQ に対しては、水平移流分 ΔF の影響が顕著となっている。

同図(b)は日平均された各熱フラックスの大きさを示している。ここでは、各熱フラックスを単位体積あたりの水柱の水温変化量に換算した値として表示している。これから、大気との熱交換や水平移流は冷却、短波放射量の吸収や海底面顕熱は加熱、の効果をそれぞれ有していることが分かる。また、海底面上の顕熱フラックスは、他のフラックスと比べて同程度の値を有していることが分かる。以上の結果より、サンゴ礁海域における温熱環境特性に対しては、海中での短波吸収 S_{abs} や海底面での顕熱輸送 H_{soil} が大きな影響を及ぼしているが明らかとなった。

また、水温変動過程に対して水平移流熱フラックス ΔF が最も大きな役割を果たしていることが確認されたので、この ΔF の変動要因について検討する。熱収支観測用の脚立周辺における局所的な水温の岸沖・沿岸方向分布を見たところ、脚立設置点が岸近くであったために水温の岸沖方向勾配が顕著であり、日中には $2^\circ\text{C}/100\text{m}$ まで達していた。そこで、水温の岸沖分布と水平移流熱フラックス ΔF の関係を調べたところ、潮汐に伴う岸沖方向の水塊の移動と、図—8に示される水平移流熱フラックス ΔF の正負の関係



(a) 熱フラックスの時間変動特性



(b) 日平均熱フラックス

図—8 海中に関する熱収支解析結果

が定性的に一致したことが確認された。このことより、ここでの水平移流熱フラックス ΔF の変動要因が、大きな水温勾配が形成されている岸沖方向の水塊の移動と密接に関連していることが示唆された。

c. 海底面効果が熱収支解析結果に及ぼす影響

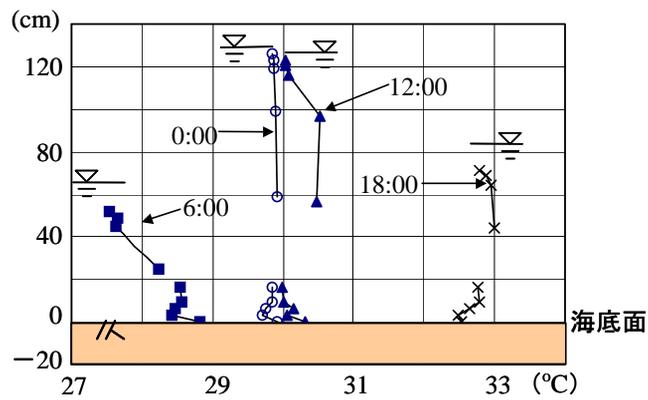
次に、①短波放射量の伝達過程の取り扱い方や、②海底面での熱輸送、といった海底面効果の取り扱い方が熱収支解析結果に及ぼす影響を検討するために、熱収支式において上記の①と②の効果の有無が解析結果に及ぼす影響を考える。そこで、まず、①と②の効果を考慮せずに、すなわち、短波放射量は全て水中で吸収され海底面での熱交換も無視する、という場合には、海中に関する熱収支式は以下のようになる。

$$\Delta Q = G + \Delta F + (1 - \alpha_1) S_d \quad (7)$$

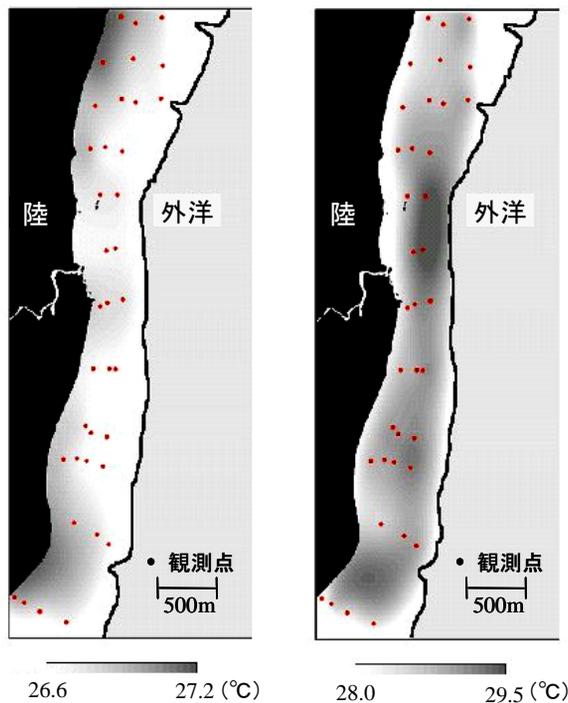
また、上記のうち②のみ考慮する、すなわち、短波放射量は全て水中・地中に吸収され、海底面での地中伝導熱は考慮する、という場合には、以下の熱収支式が与えられる。

$$\Delta Q = G + \Delta F - G_{soil} + (1 - \alpha_1) S_d \quad (8)$$

これらの熱収支式(3)、(7)、(8)を用いて、図—8(b)と同様に日平均貯熱変化量を水温変化量として換算することを試みた。ここでは、各式中の G は式(1)より、 ΔF は式(3)より得られた値をそのまま用いる。また、 S_d や G_{soil} は実測値を与えており、それらの結果得られる日平均貯熱変化量を比較する。まず、①、②の効果を考慮した式(3)を用いると、貯熱変化量は 0.07 [$^\circ\text{C}/\text{m}^3/\text{day}$] となる。一方、②の効果のみを考慮した式(8)を用いると貯熱変化量は 0.65 [$^\circ\text{C}/\text{m}^3/\text{day}$]、①、②を考慮しない式(7)を用いると 1.00 [$^\circ\text{C}/\text{m}^3/\text{day}$] という結果が得られた。以上の結果



図—9 水温鉛直分布



(a) $T_0 > T_l$ (b) $T_l > T_0$

図—10 サンゴ礁内の水温平面マップ

(T_0 :サンゴ礁外水温, T_l :サンゴ礁内全平均水温)

から、海底面での熱輸送や短波の放射伝達過程を考慮しないと、熱収支解析において大きな誤差が生じることが明らかとなった。このことより、サンゴ礁海域のような水深が浅く透明度が高い水域での熱収支解析を行う際には、短波放射量の海中・海底面での取り扱い方や海底面での熱輸送の評価精度が重要であることが示された。

(3) 水温の微細鉛直構造

図—9は、鉛直方向に密に配置された水温データより得られた水温及び地中温度の微細鉛直構造を示している。ここでは、日変動特性が分かるように、9月4日0時(満潮)、6時(干潮)、12時(満潮)、18時(干潮)の結果を図示している。これを見ると、海底面近傍では、明確な水温鉛直勾配が形成されていることが分かる。また、日中には海底面上温度が直上の水温より高くなっており、図—6(b)に示された海底面での正の顕熱輸送 H_{soil} と概ね対応している。なお、この海底面上における顕熱輸送と海底面近傍での水温鉛直分布や流動構造との関係は今後詳細に検討する必要がある。また、早朝には、表層水温が著しく低下し、その後一様化する、という興味深い現象も観測された。

(4) サンゴ礁内水温の平面分布

平面水温観測結果に基づいて、サンゴ礁内における水温の平面マップを作成したところ、サンゴ礁内外における水温の大小関係により、サンゴ礁内の水温平面パターンが大きく異なることが明らかとなった。そこでここでは、サンゴ礁内における日平均水温がサンゴ礁外の日平均水温よりも高かった日を抽出し、それらのデータを平均して得られた水温マップを図—10(a)に、逆のケースを同図(b)に示す。これを見ると、サンゴ礁内が相対的に高水温の場合には、サンゴ礁内に明確な水温の空間パターンが形成され、同一海域内で最大で 1.5°C も水温差が生じているのに対して、サンゴ礁外が高水温の場合には、明確な水温の空間分布が生じておらず、サンゴ礁内ではほぼ一様な分布となっている。このような観測結果は、温度の異なるサンゴ礁外からの影響の受け方が、サンゴ礁内において大きく異なることを実証しているものと考えられる。なお、このサンゴ礁内の水温マップを用いて、水温を流れのトレーサーとすることにより、外洋水のサンゴ礁内への侵入挙動など流動パターンを把握することが可能となるが、その詳細は灘岡ら(2001)を参照されたい。

5. おわりに

サンゴ礁海域における温熱環境特性を把握するために、沖縄県石垣島白保サンゴ礁海域を対象として、局所熱収支・温熱環境観測と平面水温観測を行うことを試みた。その結果、サンゴ礁海域における温熱環境特性に対して海底面が多大な影響を及ぼしていること、さらに、熱収支解析に際しては、海底面における熱輸送過程や短波の放射伝達過程の取り扱い方が重要であることが示された。また平面水温観測により、サンゴ礁内外の水温差と連動して、サンゴ礁内水温の空間変動特性が大きく変化す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)、基盤研究(B)(2)(課題番号：12555147, 代表者：灘岡和夫)、基盤研究(C)(1)(課題番号 12895008, 代表者：灘岡和夫)、平和中島財団国際学術共同研究助成(研究代表者：灘岡和夫)によるものである。

参考文献

- 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.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・横堀達也・熊野良子・大見謝辰夫(1999)：サンゴ礁海域の水環境に関する陸水・外洋水影響の検討, 海岸工学論文集, Vol.46, pp1181-1185.
- 灘岡和夫・若木研水・二瓶泰雄・今井陽介・青木康哲・丸田直美・大見謝辰夫(2001)：現地観測に基づく石垣島サンゴ礁海域の流動特性と微細土砂・熱輸送特性に関する解析, 海岸工学論文集, Vol.48(投稿中).
- 松永信博・児玉真史・福田和代・杉原裕司(1998)：干潟における熱収支観測, 海岸工学論文集, Vol.45, pp1056-1060.
- Glynn, P.W.(1993): Coral reef bleaching: ecological perspectives, Coral Reefs, Vol.12, pp.1-17.