

開放性海岸における夏季の水温変動特性

八 木 宏*・緒方健太郎**・坂 本 太 郎***・灘 岡 和 夫****

1. はじめに

開放性の高い海岸域は、水深が浅く場が開放的であるがゆえに、海上の気象条件（風、日射、気温）や外海の影響（海流、波浪、潮汐）、陸水の影響（河川水、地下水）など様々な要素の影響を受けやすい構造となっている。したがって、このような水域の水理特性や水質環境を明らかにしていくためには、様々な効果が複雑に重合した実際の水域の特徴を現地観測ベースで解き明かしていくアプローチが必要である。しかしながら、これまで開放性海岸域については、1)閉鎖性海域のような深刻な水質問題がなかったこと、2)気象・海象条件が厳しいために一般的に現地観測が困難であること、3)海岸侵食などの防災問題に対する必要性から現地調査の主眼が surf zone 内に向けられていたこと、などが主な原因となって surf zone の沖合いまで広く含む海岸域全体の水環境の実態については未だに十分な理解が得られていないのが現状である。今後、大規模構造物建設に対する環境保全という観点や沿岸漁業の育成といった水産学的な見地からも、その実態解明が必要になると考えられる。

そこで著者らは、surf zone の沖合いまで広く含む海岸域を広義の coastal zone と位置づけ、特に surf zone と外海を結びつける領域ながらその実態が十分に把握されていない水深 30 m 以浅、距岸 5 km 以内程度の中間領域を“coastal buffer zone”と名づけ、そこでの基本特性を明らかにすることを目指して、一昨年から現地観測を開始した。1994 年 11 月には、非成層期の流動特性に主眼を置いた観測（八木ら、1996）を行ったが、今回はそれに引き続いて成層期の海域の特徴を把握するために、夏季の水温変動に着目した現地観測を行ったのでその結果について報告する。

2. 観測概要

現地調査の対象海域としては、外洋に面し開放性の高い典型的な海岸域として鹿島灘波崎海岸周辺海域を選ん

だ（図-1 参照）。当海域は、房総半島北端の銚子の北側にあたる比較的単調な地形の沿岸域であり、陸岸から 20~30 km 程度の幅の大陸棚を介して外洋と結びついている。沖合いには黒潮と親潮が複雑に混合する海域が存在しており、既往の観測結果などから沿岸域への黒潮・親潮両者の影響が指摘されている（例えば、日本海洋学会沿岸海洋研究部会編、1985）。

今回の観測では、開放性海岸域における岸沖断面内の水温構造を把握することを第一の目的として、波崎海岸にある運輸省港湾技術研究所波崎海洋研究施設の観測棧橋延長線上に水深の異なる 4 つの観測点（St.1=距岸 200 m：水深 3.5 m, St.2=距岸 600 m：水深 6 m, St.3=距岸 1500 m：水深 13 m, St.4=距岸 2400 m：水深 19 m）を設け、各測点において係留系を用いた水温の連

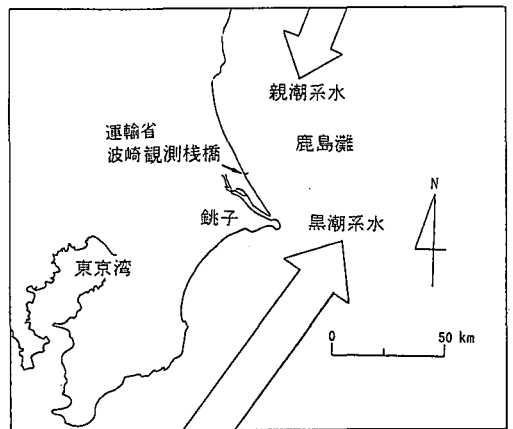


図-1 鹿島灘波崎海岸周辺海域

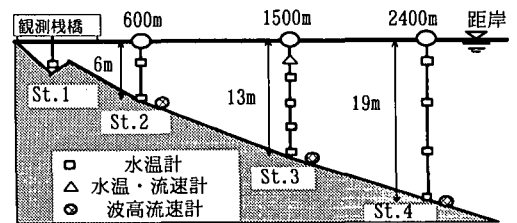


図-2 観測機器の設置状況

* 正 会 員 博(工) 東京工業大学土木工学科 講師
 ** 学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科
 *** 学生会員 東京工業大学大学院情報理工学研究科
 **** 正 会 員 工 博 東京工業大学大学院情報理工学研究科 教授

統計測を行った(図-2参照)。また、同時に各測点の海底には波高流速計、濁度計を、St. 3の表層(海面下2.5 m)、中層(海底上8 m)には電磁流速計を設置し、水位、流速、濁度の観測も併せて実施した。なお、観測期間は1995年7月19日～8月20日までの約1ヶ月間である。

3. 観測結果

3.1 海岸に近い浅い水域の水温変動特性

図-3は、今回の観測で得られたSt. 1(水深3.5 m)及びSt. 3(水深13 m)における水温の経時変化を示したものである。図には、観測期間中に銚子気象台で観測された日射、気温のデータも併せて表示してある。これを見ると、日射と気温に関しては、梅雨明け前後(7月24日頃)を除いて比較的安定した日変動を繰り返しているのに対して、水温変動は各測点ともに様々な時間スケールの変動を含んだかなり複雑な変動パターンを示している。このことは、比較的水深が浅い海岸域においてもその場の水温が日射や気温といった局所的な加熱・冷却効果に単純に支配されているわけではないことを示している。そこでここでは、まずはじめに、比較の変動パターンが単調で海岸に近い観測点St. 1の水温変動特性を通して、海岸域における複雑な水温変動の基本的な特徴を把握することを試みた。

図-4は、St. 1における水温変動のパワースペクトルを示したものである。これを見ると水温変動には、周期が2日以上の大周期の変動成分と10～30時間の日スケールの変動成分が卓越していることがわかる。ここでは、浅い海岸域の水温変動を支配するこれら2つの周期帯の変動に着目し、その性質を以下に詳しく検討した。

(a) 大周期の水温変動特性

図-5はSt. 1における水温の生データに移動平均を

かけて2日以上の大周期の変動成分を抽出したものである。これを見ると観測期間中に2回程度の顕著な水温低下が現れている。図-5には観測期間中に、銚子気象台で計測された風速ベクトルも併せて表示しているが、大きな水温低下(図中矢印)には南西風もしくは南風と相関があることがわかる。図-1の地形図からもわかるように南西及び南からの風は当海域において岸から沖に向かう方向となる。つまりこの沖向きの風による表層水の沖出しに伴い、底層水の湧昇が起こり大きな水温低下が引き起こされたことが考えられる。当海域において、夏季に海上風の影響により水温変動が生じることは柳島ら(1988)も指摘している。

これとは別の特徴として、観測期間中の8月上旬に平均水温レベルが低い状態から高い状態に大幅にそして急激に遷移している現象が挙げられる。これは、移動平均をしない生データ(図-3 St. 1のハッチ部)にその特徴がよく現れており、8月5日の8時から16時までの約8

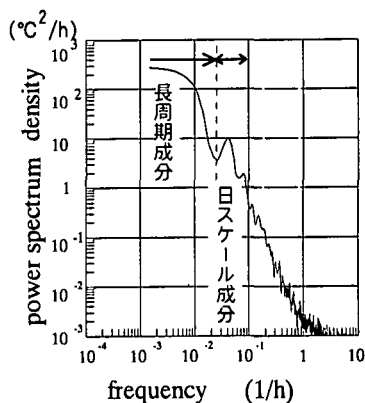


図-4 St. 1における水温のパワースペクトル

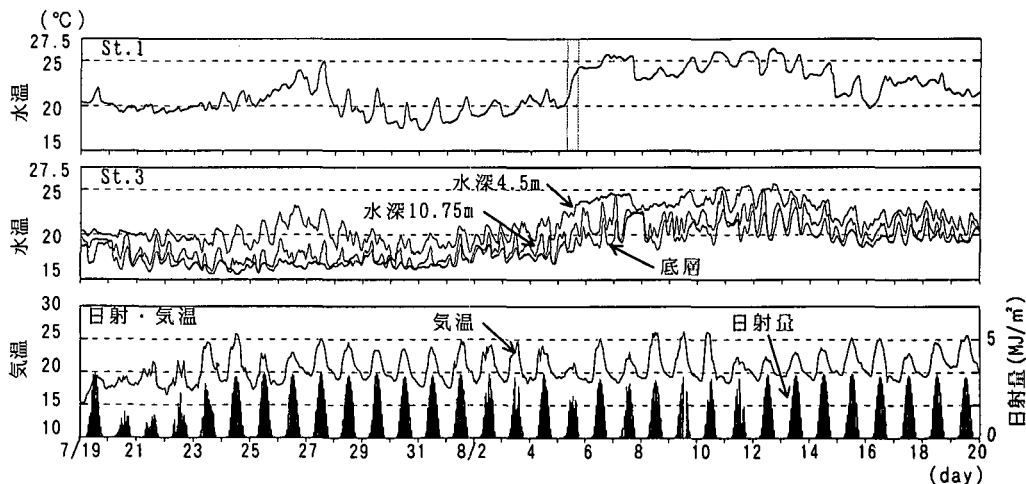


図-3 St. 1及びSt. 3における水温と日射・気温の経時変化

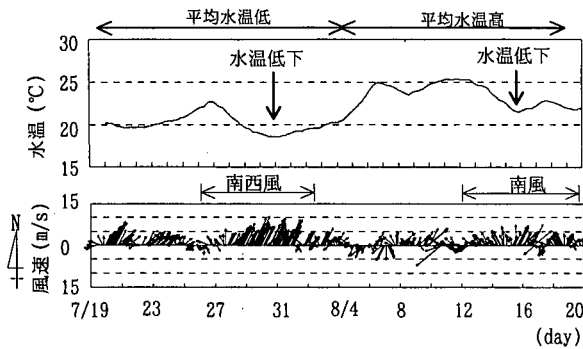


図-5 長周期の水温度変動成分 (St. 1) と風速ベクトルの関係

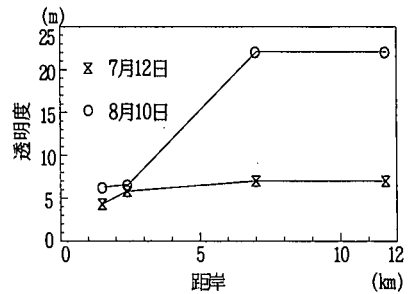
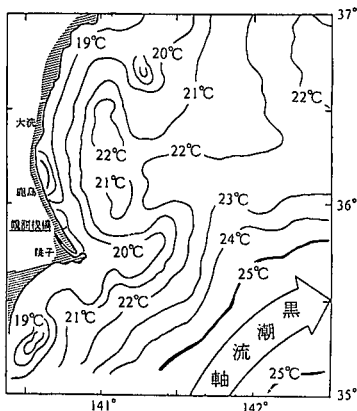
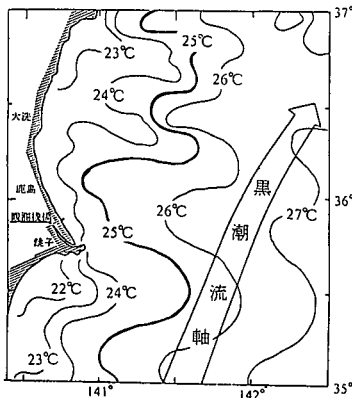


図-7 透明度の岸冲分布



95年7月14日～20日



95年8月4日～10日

図-6 表面水温分布 (茨城県漁業無線局発行漁海報速報)

時間に4°Cもの水温上昇が生じている。このような大幅なそして急激な水温レベルの移行は、その前後において日射や気温といった気象条件に大きな変化がないことから何らかの沖合水の影響と考えられる。そこで本観測期間中の沖合水の状況を茨城県漁業無線局発行の「漁海況速報」によって調べた。図-6はそれを示したもので、常

磐南部海域～鹿島灘一帯の表層水温及びそれから推定される黒潮流軸位置が示してある。これを見ると7月中には銚子沖を東流していた黒潮の流軸が、8月上旬にはその流向を北東向きに大きく変化させており、それに伴って表層水温の高温域が岸に近づいている様子がわかる。また、図-7は、同時期に水産庁水産工学研究所の観測調査船によって計測された波崎観測桟橋延長線上の透明度の岸冲分布である。これを見ると7月には岸から12kmの地点まで透明度7m程度と全体的に低い状態であったものが8月には距岸約7kmの地点まで透明度が20m以上の外洋系の水塊となっていることがわかる。

以上の観測事実から考えると、8月上旬に発生した水温レベルの大幅な変化は、沖合いの黒潮流軸が北方に変化するのに伴って陸棚域に黒潮系水の侵入が起こり、その影響が7月下旬から徐々に海岸近くにまで近づいていたものが、何らかの理由で8月5日に急激に海岸域に接岸したことが原因と考えられる。以上のことは、海岸にごく近い浅い海域であっても、その水温環境が外洋水の挙動に強く影響を受けることを示すものである。

(b) 日スケール水温変動

次に日スケールの水温変動に注目する。図-8は、St. 1において水温が顕著に変動する時の典型的な観測断面内水温分布を示したものである。これを見ると、St. 1の水温が上昇する時には、表層の暖水部が岸に向かって移動しており、また水温が下降する時には底層冷水が遡上していることがわかる。この様子から、海岸付近の日スケールの水温変動は、上下層で運動方向が異なるバロクリニク的な波動によるものと推定され、波の時間スケールから内部潮汐が海岸に押し寄せた結果と考えられる。外洋に面した大陸棚域では、陸棚外縁部で海洋潮汐によって内部潮汐が励起され、それが大陸棚上を伝播する現象がこれまでも観測されており、鹿島灘においても川崎 (1988) が報告している。今回の観測結果は、開放性の沿岸域においては、このような内部潮汐が直接海岸近くまで押し寄せることで海岸付近の水温環境を強く

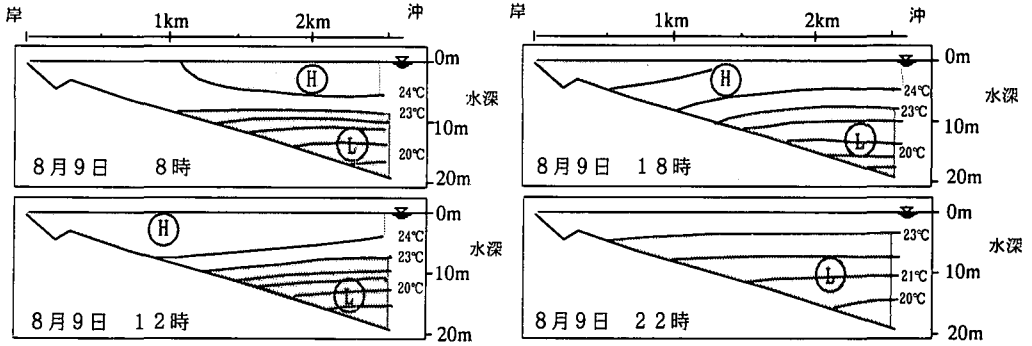


図-8 日変動する水温の岸沖断面内空間分布

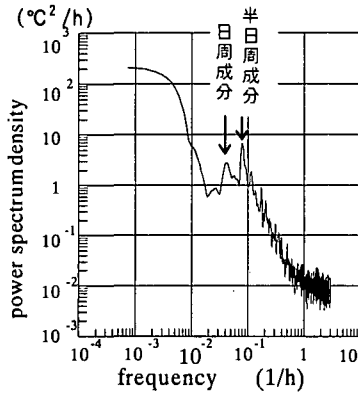


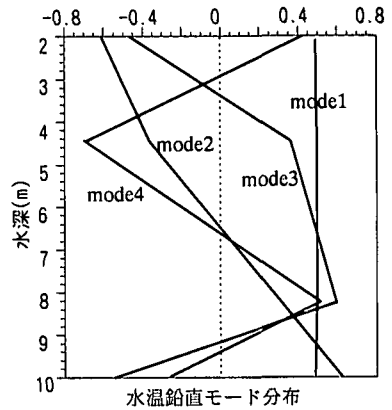
図-9 St. 3 の水表面から 10.75 m における水温変動のパワースペクトル

支配していることを示すものである。ここでは、紙面の都合上詳しく示せないが、このような内部潮汐によって水温のみならず栄養塩や植物プランクトンも移動していることが、同時に行った調査によって明らかとなっており、沖合いと海岸付近とを結ぶ内部潮汐の海岸環境及び生態系への重要性がうかがえる。

3.2 水温変動特性の岸沖方向変化

次に、このような海岸近くにおける水温変動の特徴が岸沖方向にどのように変化しているかを調べた。図-9は、沖側の測点である St. 3 (距岸 1500 m : 水深 13 m) の水表面から 7 m の位置での水温変動の周波数スペクトルを示したものである。海岸に近い St. 1 のスペクトル特性(図-4)と比較すると、沖側の St. 3 の方が全体的に高周波の成分が卓越しており、特に St. 1 において不明瞭な半日周成分が St. 3 に顕著に現れていることが特徴的である。このことは、沖合いから海岸域に入射する内部潮汐には日周成分及び半日周成分が存在するものの、半日周成分は海岸近くにまで到達できず日周変動成分のみが海岸近くの水温変動として現れることを示している。

そこでここでは、さらに詳しくその性質を探るために



水温鉛直モード分布

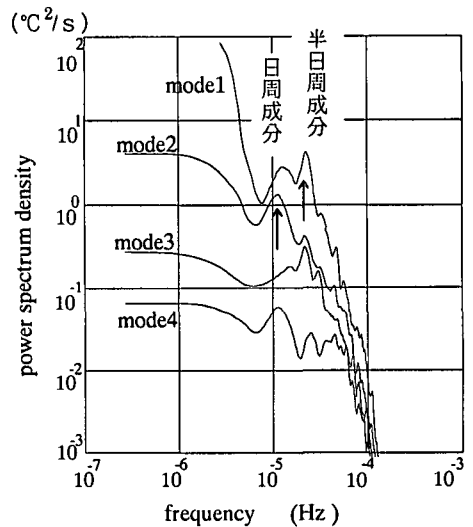


図-10 EOF 解析による水温の鉛直モード分布とその時間変動のパワースペクトル

水温の鉛直構造の時間変動に着目し、それを EOF 解析(経験的直交関数法)によって調べた。図-10は、St. 3 における上下 4ヶ所の水温データから EOF 解析によって求めた 4つの水温鉛直モードの分布形とその時間変動特

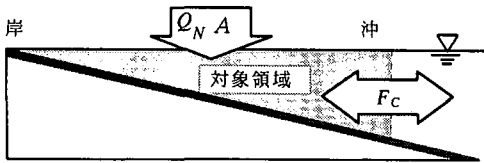


図-11 熱収支解析に用いた box モデルの概要

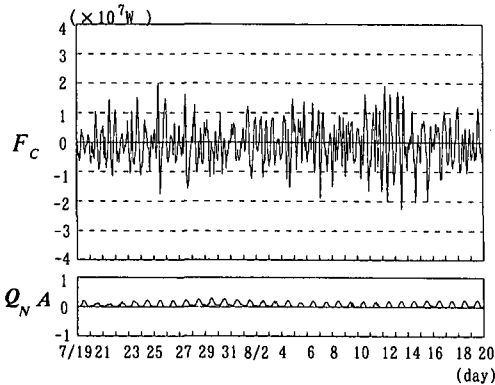


図-12 熱収支解析結果

性をパワースペクトルによって示したものである。この結果を見ると鉛直方向に一樣な分布を表すモード 1 には、日周変動及び半日周変動の成分が存在するものの、上下の水溫差を作り出すモード 2 には日周変動が卓越していることがわかる。このことは、沖から入射する内部潮汐には半日周成分も存在するものの、上下に強い水溫差を作り出すような大きな波動成分は日周的に発生し、その時に水溫変化の影響が海岸近くにまで伝わることを示唆している。

3.3 熱収支解析

以上の解析では、開放性海岸における水溫変動の特徴を把握するために、その変動の性質を比較的詳細に検討してきたが、ここでは海岸に近い海域の熱環境の基本特性、特に日射の寄与の程度を明らかにするために、観測領域全体を対象としたグロスな熱収支解析を行った。具体的には、対象海域全体を図-11 に示すような三角形の box としてとらえ、この三角形部分の境界を通過する熱フラックスの大きさを調べた。熱収支理論によれば、海面を通過する正味の熱輸送量 Q_N は以下の式で表現される。

$$Q_N = Q_S + Q_L + Q_E + Q_H \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Q_S , Q_L , Q_E , Q_H はそれぞれ、正味の短波放射量、有効長波放射量、潜熱輸送量、顕熱輸送量であり、これらは、気象データと表層水溫からバルク法によって算出できる。さらに、今回観測した全水溫データから三角形領域の平均水溫を算出すれば、それを用いて次式から水平方向の熱輸送量 F_C が算出できる。

$$F_C = \rho C V \Delta T / \Delta t - Q_N A \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ρ は海水密度、 C は海水の比熱、 V , A は三角形領域の体積と海表面積、 ΔT は Δt 時間内の平均水溫変化量を示している。なお、ここでは海底面における熱フラックスの寄与は小さいと仮定して無視している。図-12 には、以上によって算出された F_C , $Q_N A$ の経時変化を示しているが、これを見ると明らかに水平方向の熱輸送量 (F_C) の寄与の方が日射等 ($Q_N A$) の寄与より大きいことがわかる。このことは、開放性海岸域では、前述のような海流や内部潮汐などによる沖合いからの移流効果に伴う水溫変化が主体的であり、局所的な日射の効果が小さいことを示している。そして、このように沖合いの影響を非常に受けやすいことが coastal zone の水溫環境の特徴と言える。

4. おわりに

開放性海岸における夏季の水溫変動特性を調べるために、鹿島灘波崎海岸において現地観測を行った。その結果、開放性の沿岸域は、場が開放的であるが故に、沖合の海流や陸棚端で励起されたと考えられる内部潮汐の影響が直接海岸近くに到達し、それによって海岸の水溫変動特性が強く支配されていたことがわかった。

このように開放性海岸における coastal buffer zone は、成層期には内部潮汐や沿岸湧昇、非成層期には海上風による吹送流や陸棚波など激しい環境変化が顕著に現れる領域であり、それらが生態環境に与える影響の大きさから考えて、今後さらにその性質を解き明かしていく必要があると考えている。

謝辞：本研究の観測を行うにあたっては、港湾技術研究所海洋環境部柳島慎一主任研究官、水産工学研究所水産土木工学部環境分析研究室木元克則室長、日向野純也主任研究官、足立久美子研究官の協力によるところが大きい。ここに記して謝意を表します。また、本研究は文部省科学研究費一般研究 (C) (課題番号：07650589、代表者：八木 宏) の補助を受けて行われたものであることをここに付記する。

参 考 文 献

- 川崎 清 (1988)：水産海洋研究会 25 周年記念誌，pp. 320-327.
- 日本海洋学会沿岸海洋研究部会 (1985)：日本全国沿岸海洋誌，東海大学出版会，pp. 287-333.
- 八木 宏・日向博文・荒井尚樹・灘岡和夫 (1996)：非成層期における開放性沿岸域の流動特性，日本海洋学会春季大会要集，pp. 165-166.
- 柳島慎一・磯上知良・末次広児 (1988)：波崎海洋観測施設 (鹿島灘) で観測された水溫変化，第 7 回水産工学研究推進全国会議報告書，pp. 5-8.