

開放性沿岸域における成層期の水温構造と 流動特性に関する現地観測

八木 宏*・坂本 太郎**・灘岡 和夫***

1. はじめに

広く外海に面した開放的な沿岸域は、場が開放的であるがゆえに外海の影響を受けやすい構造となっている。したがって、海岸近く水環境（流動構造、水質特性、生態環境など）を考える上では、沖合いの影響がどのように海岸近くの環境形成に影響を及ぼしているかを明らかにしていくことが必要となる。しかしながら、これまで開放性沿岸域については、海岸工学分野では主に岸近くの波浪・海浜流・漂砂を中心として、また海洋学分野では陸棚の外側まで含む広い海域の物理現象の解明に主眼がおかれ、海岸近くの海域と沖合いとの関係については十分な理解が得られているとは言えない。

そこで著者らは、海岸近くと沖合いとを結ぶ重要な海域でありながら、その実態が十分に把握されていない中間領域を“coastal buffer zone”と位置づけ、その基本的な流れの性質を明らかにするために非成層期及び成層期それぞれについて現地観測に基づく実態解明を試みている（八木ら 1996 a, b, c）。このうち、成層期については、典型的な開放性の沿岸域である鹿島灘一帯の水温変動が、①海上風、②海流の挙動、③内部潮汐によって主に支配されていることを示したが、今回の研究では、このような現象の時空間構造をさらに詳細に把握するための現地観測を行ったのでその結果について報告する。

2. 現地観測の概要

現地観測は、八木ら（1996b, 以下前報とする）と同じく開放的な沿岸域である茨城県の鹿島灘須田浜周辺海域で行った（図-1(a)）。観測期間は、水温成層が顕著となる夏季の1996年7月23日～8月13日の約20日間である。今回の観測では、広範囲にわたる開放性沿岸域の水温と流速の時空間構造を把握することが主な目的であるため、距岸12 km以内、水深40 m以浅の海域に合計7箇所（St. 1, St. 2a～e, St. 3）の観測ステーションを岸沖・沿岸方向に十字に配置した。図-1(b)に、岸に直角な直

線上に配置した St. 2a～e における計測器設置状況を示す。各観測ステーションでは、ブイに係留したワイヤーロープに水温計及び塩分水温計を表層（水深1 m）から海底までおよそ2 mの間隔（但し、St. 2eの底層のみ設置間隔大）で設置した。なお、St. 1, St. 3においても、これらとほぼ同様に水温計を設置している。また、St. 2c, d及びSt. 3の海底には波高流速計を、St. 2cの海底にはADCPを設置し、それぞれ波高・底層流速、そして流速の鉛直分布の測定を試みた。

3. 観測結果と考察

3.1 水温観測データの周波数特性

観測データに含まれる現象の基本的な特徴を把握するために、水温のスペクトル解析を行った。図-2に、St. 2cにおける鉛直位置の異なる9箇所の水温データから求めたパワースペクトルを示す。これを見ると、水深方向にその特性に差が見られるものの、基本的には i) 長周期帯（約33時間以上）、ii) 日周期帯（約16～33時間）、iii) 半日周期帯（約9～16時間）にそれぞれパワースペクトルのピークを持つ構造となっている。このような現象の

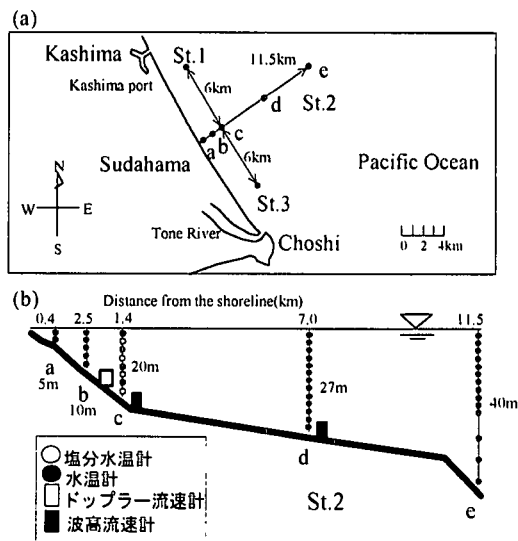


図-1 観測ステーションと計測器の設置状況

* 正会員 博(工) 東京工業大学土木工学科 助教授

** 修(工) NTT データ通信(株)

*** 正会員 工 博 東京工業大学大学院情報理工学研究所 教授

周波数特性は、前報の傾向と一致したものであり、開放的な沿岸域である本海域の特徴といえる。さらに図-3は、St. 2a~eのすべての水温データのスペクトル解析結果から、i)~iii)の周波数帯のパワースペクトルのピーク値をそれぞれ求め、それを岸沖断面内の空間分布として表示したものである。各周波数帯ごとに空間分布の特

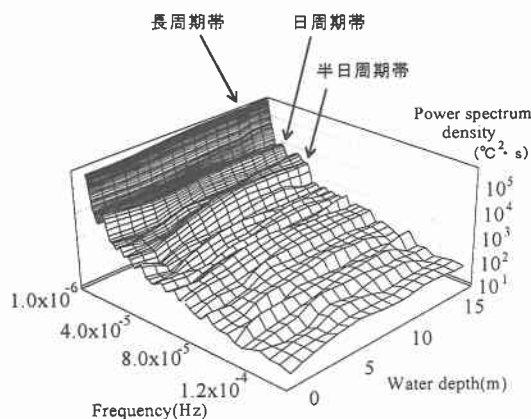


図-2 水温のパワースペクトル (St. 2-c)

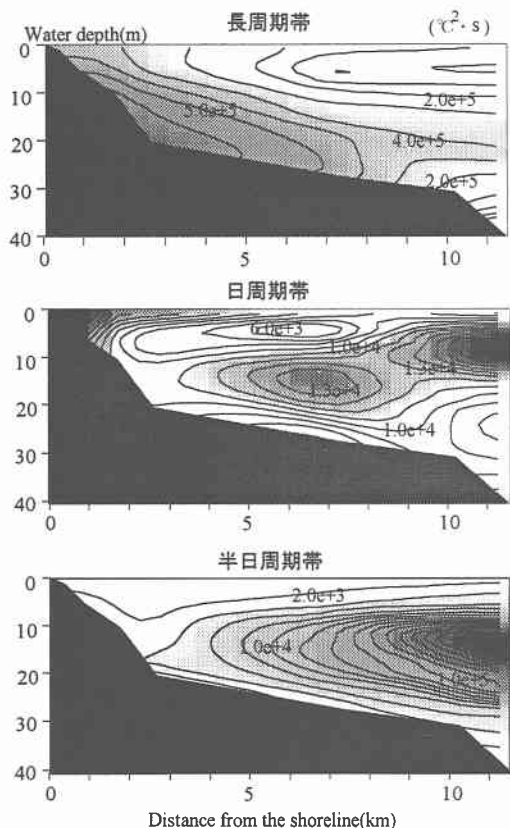


図-3 周波数帯別の水温変動スペクトルピーク値の空間分布

徴が異なっており、運動特性の相違が明瞭に現れている。そこで本研究では、沿岸域の水温・流速の変動特性を支配するこれら3つの周期帯に属する現象について、個別にその時空間的な変動構造の解析を行った。

3.2 長周期の変動現象

図-4(b)は、St. 2cにおける水温データから Low-pass filter によって長周期の水温変動成分(周期33時間以上)のみを抽出し、それを時空間コンターとして表示したものである。長周期の水温変動パターンの特徴は、観測期間前半の緩やかな低温化(図中矢印※)と、後半における比較的急激な水温の上下(図中矢印A~D)である。このような日スケールよりも長い長周期の水温変動を引き起こす原因としては、前報の結果からも海上風の影響がまず第一に考えられる。そこで、これを風速ベクトル(図-4(a), St. 2aにおける海面上10mの風速)と比較すると、水温が緩やかに低下する観測期間前半には、比較的安定した南からの風が吹いており、8月2日に風向きが大きく変化していることがわかる。当海域においては、南からの風は岸を左手に見る方向の沿岸風速成分(鹿島向き)を持つことから、観測期間前半の低温化は海上風によるエクマン輸送によって表層水が沖へ向い、それ

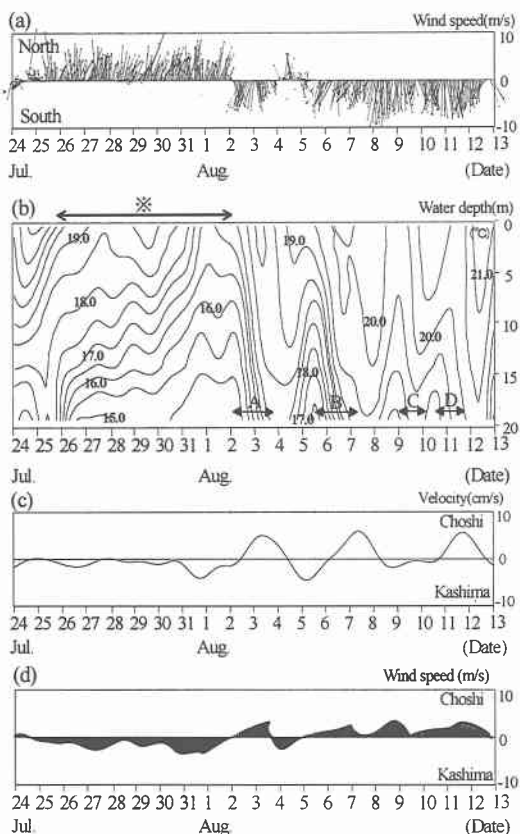


図-4 水温・流速・風速の長周期成分 (St. 2c)

に伴って沿岸湧昇が発生した結果と考えられる。一方、観測期間後半については、図中矢印A～Dに示すように急激な水温変動が特徴である。このような特徴は、底層沿岸流速(図-4(c))にも現れており、観測期間後半では前半には見られない比較的大きな流速変動が発生している。そこで、これらの現象についても海上風との関係を調べてみた。図-4(d)は、風速の長周期成分を沿岸・岸沖成分表示(x 軸正方向:沖向き、 y 軸正方向:銚子向き)として示したものである。これを水温と比較すると、まず図中矢印AとBの現象については急激な水温上昇の開始時に沿岸風速成分が鹿島向きから銚子向きに転じていることがわかる。前述のように、鹿島向きの沿岸風は沿岸湧昇、銚子向きの沿岸風は沿岸沈降を引き起こすことを考えると、A, B示した水温の上下動は海上風の変動に対応した沿岸沈降・沿岸湧昇であると考えられる。これに対して、C, Dについては海上風の変化と明確な対応関係が見られず、風に直接引き起こされた現象とは考えられない。そこで水温の空間構造を、風に関連した現象A, Bと関連性が見られない現象C, Dについて比較した。

図-5は、A～Dそれぞれの変動現象において水温が最も低下した時刻での岸沖断面内水温空間分布を比較したものである。これを見ると、A, Bでは等値線が岸側で上向きとなっており沿岸湧昇時に見られる典型的な分布の傾向を示している。これに対し、C, Dでは水温等値線が全体的に切り立った形で岸に向かって下向きであり、水温の空間構造がA, Bとは大きく異なっていることがわかる。そこで、C, Dについて水温変動の沿岸方向の伝

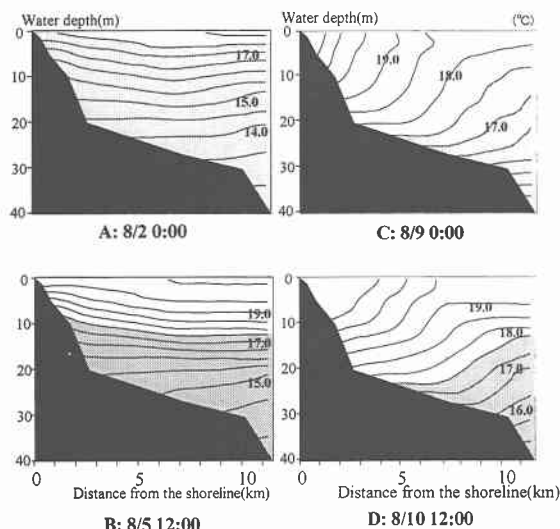


図-5 水温の岸沖断面内空間分布
(17.5°C以下にハッチ)

播特性を検討した。

図-6は、沿岸方向位置の異なる St. 1, St. 2c, St. 3 における水面から 11 m の位置の水温長周期成分の時系列を、C, D の水温変動が発生する期間についてのみ拡大して表示したものである。図中の矢印で示した水温低下部分に着目すると、C, D 両者とも鹿島側 (St. 1) から銚子側 (St. 3) に位相が伝播していることがわかる。3 地点の水温データの相互相関から平均的な伝播速度を求めると 0.16 m/s 程度となり、比較的低速で伝播していることがわかった。このように岸を右手に見て比較的低速で沿岸方向に伝播する現象としては、陸棚沿岸域にトラップされた長周期内部波動 (内部ケルビン波等) があり、本現象はそれをとらえたものと考えられる。

3.3 半日周期の変動現象

図-7に Band-pass filter によって抽出された St. 2d における半日周期成分の潮位と水温の時系列を示す。半日周期の水温変動はその強弱はあるものの観測期間全体にわたって現れている。図-8は半日周期の水温変動の空間構造を示したものである。沖合いから入射した内部波 (図-8(a)) が岸に向かって進行し (b), 沿岸部で底層部が遡上し (c), その後沖に引いていく様子がわかる (d)。

次に、岸沖・沿岸方向に配置した各観測ステーションの観測値から、水温の相互相関を求め観測ステーション相互の水温変動の位相差を求めた (図-9)。このうち岸沖方向については、一番沖合いの観測ステーション St. 2e を基準とし、それと St. 2d～a との相互相関係数から遅れ時間を求めると、St. 2d (4.5 時間), St. 2c (9.3 時間), St. 2b (12.2 時間), St. 2a (13.6 時間) であり、岸に向かって平均位相速度 0.23 m/s で進行していることがわかる (但し、岸近くの浅海域では位相速度が遅くなっている)。一方、沿岸方向については、St. 1 に対する St. 2-c, St. 3 の遅れ時間がそれぞれ -1.0 時間, -0.7 時間と

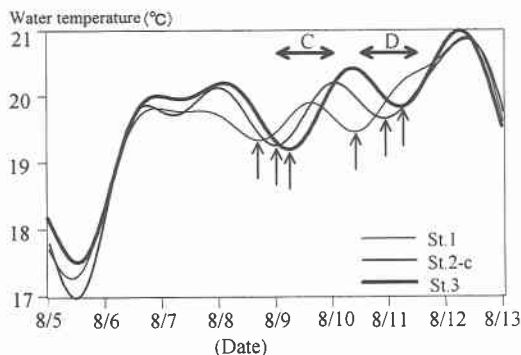


図-6 沿岸方向に配置した観測点 St. 1～St. 3 の水温長周期成分の比較

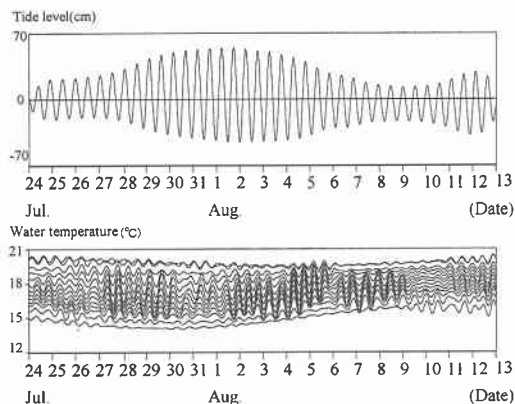


図-7 半日周期成分の潮位・水温の時系列 (St. 2d)

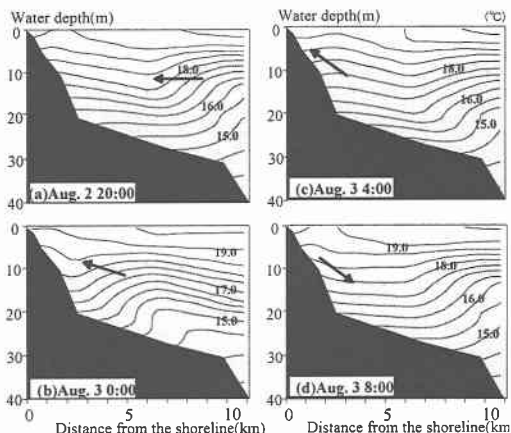
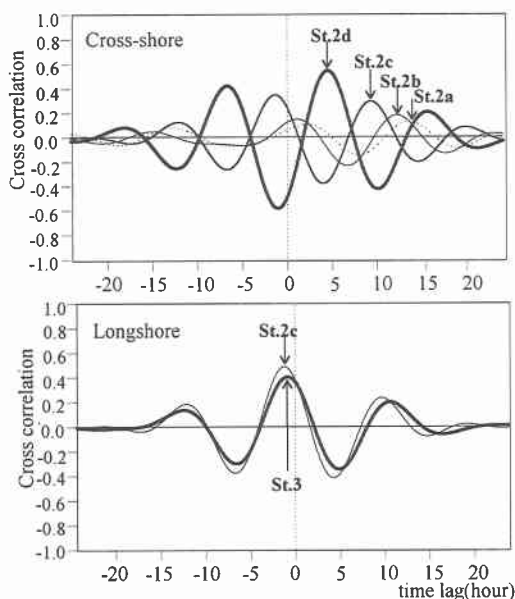
図-8 半日周期水温変動成分の空間分布
(18℃以下にハッチ)

図-9 水温変動半日周成分の岸沖・沿岸方向の相互相関係数

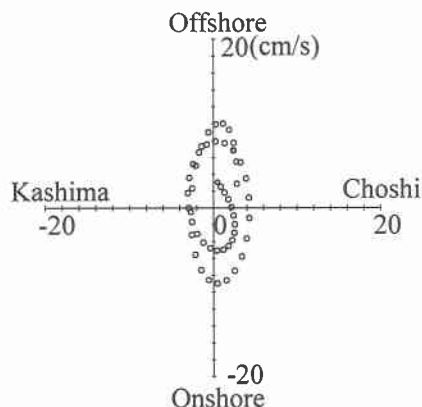


図-10 半日周期底層流速成分のホドグラフ (8/4)

っており、St. 1 からの距離が大きい St. 3 の方が遅れ時間が小さくなっているなど、沿岸方向への伝播は明らかではない。

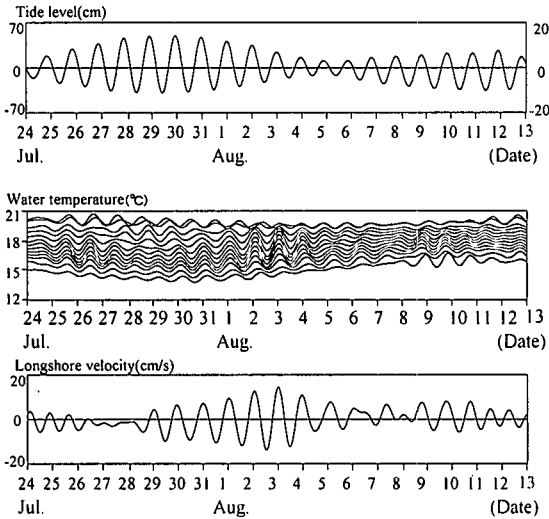
図-10 は、半日周期水温変動が比較的大きい 8 月 4 日における底層流速半日周期成分とのホドグラフとして示したものである。沿岸方向よりも岸沖方向の流速成分が卓越していることがわかる。以上の水温・流速の変動特性から考えると、半日周期の水温変動は半日周内部潮汐波によるものであり、この半日周内部潮汐波は海岸にほぼ直角に入射する内部慣性重力波であると考えられる。

3.4 日周期の変動現象

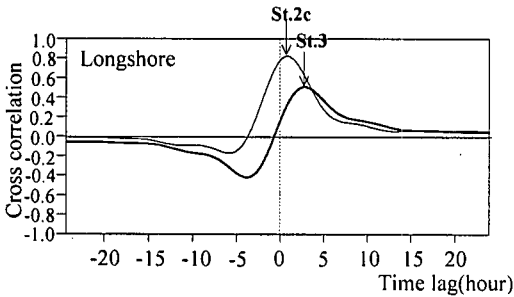
図-3 からわかるように、日周期の水温変動が顕著となるのは水深が浅い海岸部や表層、及び水深 20 m 以深の沖側領域中層部である。熱収支解析を行った結果、浅海部や表層については日射の影響が大きいことがわかった。一方、日射の影響が直接及ぶとは考えられない中層については日周期の内部潮汐が原因と考えられる。

図-11 は、潮位、水温、沿岸底層流速の日周期成分の時系列を示したものである。日周期の潮位振幅が最大となる(日周外部潮汐波のピーク)のは 7 月 29 日ごろであるのに対し、日周期の水温・流速変動振幅が大きくなるのは 8 月 3 日ごろであり、外部潮汐と内部潮汐に位相差があることがわかる。さらに流速・水温の日周変動が顕著となる 8/1~8/4 の期間を選び、沿岸方向の伝播特性を調べた(図-12)。その結果、沿岸方向には St. 1~St. 2c で 1.2 時間、St. 1~St. 3 で 2.9 時間の時間差があり、鹿島側から銚子側に伝播する性質があることがわかった。

図-13 は、水平流速のホドグラフを示している。これを見ると、半日周潮成分とは異なり岸沖流速成分より沿岸流速成分のほうが卓越する傾向があり、岸に直角に入射する慣性重力波とは異なった挙動を示している。川崎



図一11 日周成分の潮位・水温・沿岸底層流速の時系列 (St. 2d)



図一12 水温変動日周期成分の沿岸方向の相互相関係数

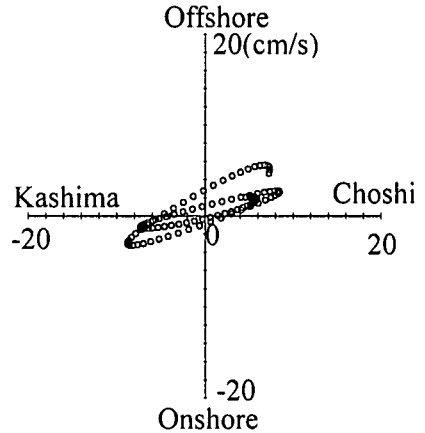
(1988)によれば、鹿島灘海域においては海流の Shear 効果によって通常は存在できないと考えられる日周期 (慣性周期よりも大) の慣性内部重力波が存在する可能性が指摘されているが、今回の観測でとらえられた日周期変動現象は慣性重力波としての性質より、沿岸域にトラップされ沿岸方向に伝播する長周期内部波動としての性質を有している。

4. おわりに

開放性の高い沿岸域である鹿島灘における成層期の現地観測結果から以下のことを示した。

(1) 長周期の水温・流速の変動現象として、海上風の影響による沿岸湧昇・沿岸沈降の他に、局所的な風に依存しない変動現象が観測され、それが沿岸域にトラップされた長周期内部波動である可能性を指摘した。

(2) 半日周期の水温変動は、半日周内部潮汐波が原



図一13 日周期底層流速成分のホドグラフ (8/2~8/3)

因であり、これは沖から岸にほぼ直角に入射する内部慣性重力波である。

(3) 日周期の水温変動を引き起こす日周内部潮汐波は、沿岸域にトラップされて沿岸方向に伝播する長周期内部波である可能性がある。

なお、紙面の制約上ここでは詳しく示さなかったが、長周期の水温変動現象は、半日周及び日周の内部潮汐波の伝播特性に大きな影響を与えることが観測結果からわかっている。このことは、長周期の水温変動と日スケールの変動現象が互いに密接に関連しながら海岸付近の水温環境を支配していることを示唆している。

謝辞：本研究の解析を行うにあたっては、運輸省港湾技術研究所より波崎海洋研究施設の観測データを提供して頂いた。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基盤研究 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.
- 八木 宏・日向博文・澁岡和夫 (1996 a): 非成層期における開放性沿岸域の底層流動特性, 海岸工学論文集, 第 43 巻 (2), pp. 406-410.
- 八木 宏・緒方健太郎・坂本太郎・澁岡和夫 (1996 b): 開放性海岸における夏季の水温変動特性, 海岸工学論文集第 43 巻 (2), pp. 1201-1205.
- 八木 宏・坂本太郎・緒方健太郎・澁岡和夫 (1996 c): 開放性沿岸域における成層期の海水流動特性, 環境流体シンポジウム講演論文集, pp. 441-442.