

鹿島灘海岸域における日スケールの水温変動と物質輸送特性

八木 宏¹・日向博文²・足立久美子³・日向野純也⁴・灘岡和夫⁵

¹正会員 博士(工) 東京工業大学助教授 工学部土木工学科(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²正会員 工修 東京工業大学工学部土木工学科助手

³水修 水産庁水産工学研究所環境分析研究室 主任研究官

⁴国際農林産業研究センター水産部 主任研究官

⁵フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 情報理工学研究所情報環境学専攻

さまざまな外力条件の影響を受けることから、これまであまりその水環境特性の解明が進んでいない開放性の高い沿岸域に関して、生態系も含めた環境変動が顕著となる夏季を対象として、その日スケールの変動特性を把握するための現地観測を典型的な開放性沿岸域である鹿島灘波崎海岸周辺海域において行った。その結果、日スケールの水温変動・流速変動に関しては日周期の内部波の影響が大きいこと、またそれに伴って植物プランクトン、濁質、浮遊幼生なども活発な移動をしていることが明らかとなり、夏季の開放性沿岸域の水環境に対する日周期内部波の重要性が示された。

Key Words : open coast, diurnal variation, water temperature, internal waves, cross-shore transport

1. はじめに

開放性海岸域の生態環境に関する最近の研究(足立ら¹⁾)によれば、従来「海の砂漠」と呼ばれるほど貧栄養で生産力が低いと考えられてきた開放性海岸が、予想以上に高い基礎生産力を有し、それが海岸生態系を支える上で重要な役割を果たしていることが明らかにされつつある。したがって、今後、自然環境と調和した形で海岸保全を進めていくためには、このような高い基礎生産力を保持している開放性海岸の仕組みや海岸生態系との関係など、海岸防災以外の視点からの海浜メカニズムの解明が必要になる。

開放性海岸域の大きな特徴の一つは、場が開放的であるがゆえに沖合海域の影響を受けやすいことであり、したがって開放性海岸の環境特性を考える上では、沖合海域からの影響、特に海洋と海岸の中間領域ともいえる大陸棚海域の役割を明らかにすることが重要である。大陸棚海域自体の物理構造、環境特性については、近年欧米域を中心として現地観測に基づく実態解明が精力的にすすめられている。例えば、Simpson²⁾は、これまでのアイリッシュ海の研究結果を総括する形で、潮流の影響が大きい大陸棚海域の基本構造が、①内部潮汐の発生とその混合作用に

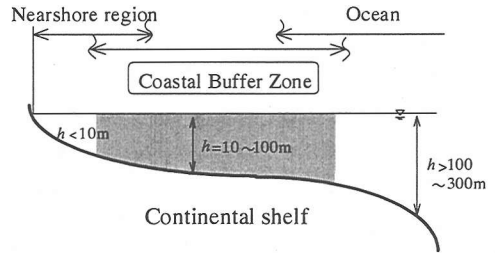


図-1 開放性沿岸域におけるCBZの概念図

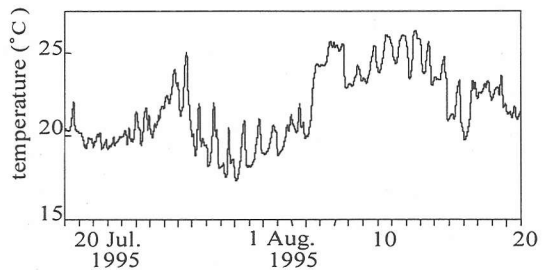


図-2 日周変動する海岸域水温の観測例(鹿島灘波崎海岸)⁷⁾

よって特徴づけられる大陸棚縁, ②潮汐フロントをはさんで成層域と混合域からなる大陸棚中央海域, ③陸域からの間欠的な淡水供給が支配的な浅海部, に分類されることを示した上で, それぞれの物理機構と生態環境との関連の重要性を指摘している. 一方, 潮流の影響が相対的に小さく開放性の高い海域については, 北カルフォルニア大陸棚海域における大規模な現地観測 (CODE- I II, STESS- I II) によって, 大陸棚上の沿岸湧昇の構造や海底境界層の性質などが詳細に検討されている³⁾⁻⁵⁾. しかしながら, 具体的にどのような形で大陸棚海域を介して沖合海域と海岸域が海水交換を行っているか, またそれが海岸環境や生態系にどのような影響を与えているかについては, これまでにも定性的な指摘はあるものの (例えば, 草野⁶⁾), 物理メカニズムに基づいてその影響を評価したものは非常に少ないのが現状である.

著者らは, このような現状をふまえ, 大陸棚沿岸海域を海岸域と海洋域を結ぶ Coastal Buffer Zone (以後, CBZと呼ぶ, 図-1参照)と位置づけた上で, 現地観測をベースとしたCBZの実態解明を試みている. そして, それらの観測結果から, CBZにおける海上風の影響の大きさや様々な時間スケールを有する内部波の重要性などを指摘している^{7), 8)}. 本研究のねらいは, こういったCBZの挙動と海岸域との関係を明らかにすることにあるが, ここでは特に, これまでの現地調査においてその存在を確認している日スケールの水温変動現象 (図-2参照) に着目し, それを通して海岸域とその沖合海域との物質移動特性を把握することを目的としている.

2. 現地観測の概要

現地観測の対象海域は, 広く外洋に面し開放性の高い鹿島灘波崎海岸周辺海域である (図-3参照). 今回の観測は, 大きく分けて①観測調査船と観測棧橋を用いた多目的短期集中観測, ②係留計測ブイを用いた水温・塩分・流速の長期連続観測から構成されている. このうち短期集中観測は, 1996年7/31 9:00~8/1 12:30の約28時間にわたって, 波崎海岸にある港湾技術研究所波崎海洋研究施設 (HORS) の観測棧橋上及び, その沖合い海域に観測調査船たか丸 (水産工学研究所所属) を係留して実施した (図-4参照). 観測内容の詳細は表-1に示すとおりで, i)観測棧橋上の数地点における連続採水と水温・塩分・クロロフィルa・濁度の計測 (アレック電子(株), ACL208-DK), ii)たか丸によるHORS沖合い海域 (距岸3km, 水深約24m地点で係留)における連続採水及び水温・塩分・クロロフィルa・濁度の鉛直分布計測, ADCP(RD社

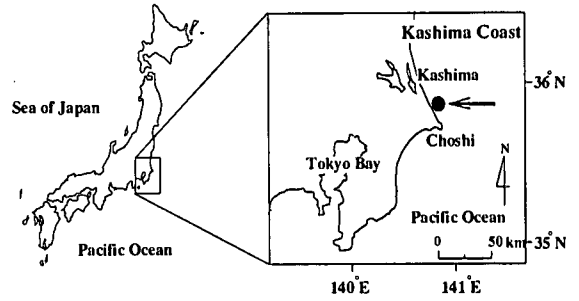


図-3 観測海域

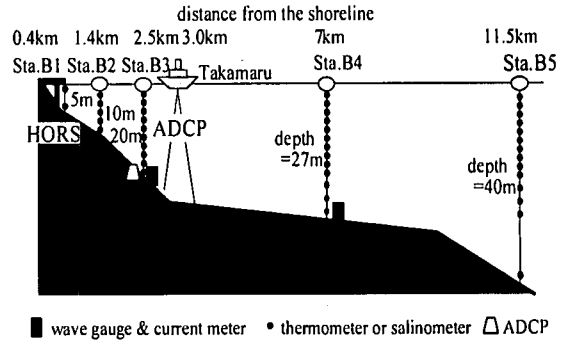


図-4 係留観測ブイと観測計器の設置状況及び観測調査船たか丸, 観測棧橋 HORS の位置関係

表-1 観測項目

	採水計測	各種センサーによる直接計測
A. 短期集中観測	栄登塩 クロロフィルa 二枚貝の浮遊幼生	水温 塩分 濁度 クロロフィルa
(1) 観測棧橋HORS		
(2) 観測船たか丸	栄登塩 クロロフィルa 二枚貝の浮遊幼生	水温 塩分 濁度 クロロフィルa 流速分布(ADCP)
B. 係留観測ブイによる長期観測	なし	水温 塩分 水位・波高 底層流速(EMC) 流速分布(ADCP, Sta.B3)

表-2 各係留観測ブイにおける計測器の設置位置

Station	Distance from shore (km)	Depth (m)	Instrument Settings
Sta. B1	0.4	5	水温計 (1, 4 m)**
Sta. B2	1.4	10	水温計 (1, 3, 5, 7, 9 m)
Sta. B3	2.5	20	水温計 (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19m) 塩分計 (3, 7, 11, 15, 19m) 波高計 & 電磁流速計(海底上1.5 m) ADCP
Sta. B4	7	28	水温計 (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 24, 27m) 波高計 & 電磁流速計(海底上1.5 m)
Sta. B5	11.5	40	水温計 (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 24, 27, 39m)

(距岸、水深)* (水面からの距離)**

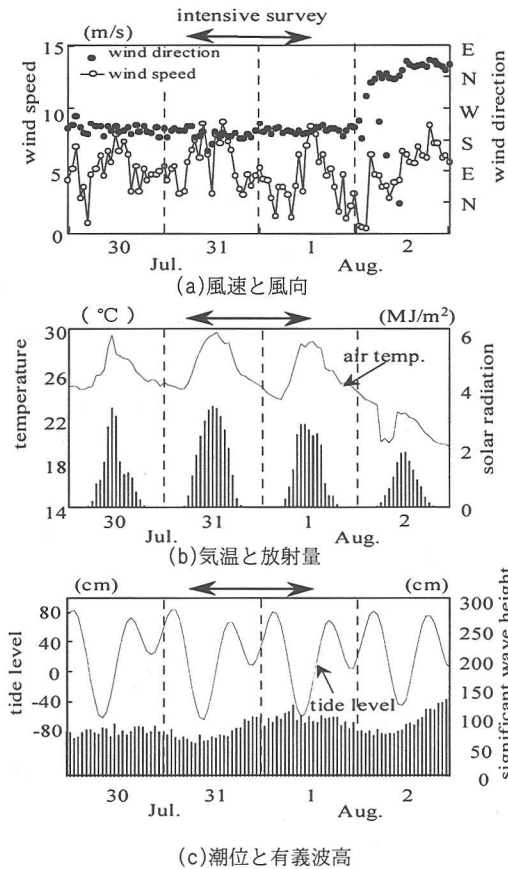


図-5 集中観測期間前後の気象・海象条件

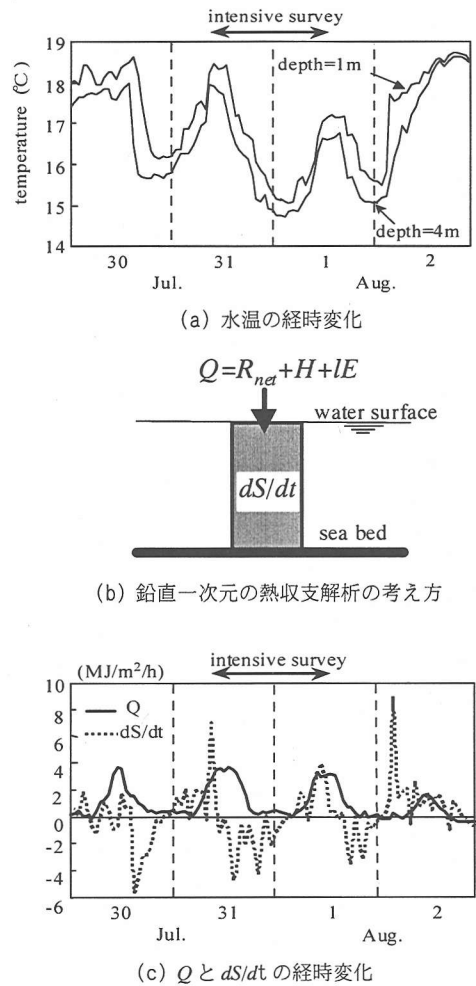


図-6 海岸域(Sta.B1)における水温変動と熱フラックス・貯熱変化量の経時変化

製, 300kHz)を用いた流速計測である。なお, クロロフィルa量の計測方法としては, 採水による方法と蛍光光度計 (ALC-208DK) による現地直接計測の2つ方法を採用している。ここでは, 異なる計測法から得られた結果を対応させるために, 2つの計測法を同時に行った場合の計測結果から蛍光光度とクロロフィルa量の関係を求め, それに基づき蛍光光度からクロロフィルa量への換算を行っている。

一方, 長期連続観測については, 集中観測期間を含む1996年7/23~8/13の間に, 本海域に複数の係留計測ブイを設置し, 水温・塩分・底層流速の長期連続計測を実施した。係留計測ブイの設置位置や各測定器の設置状況の詳細は, 図-4, 表-2に示す (Sta.B3ではADCPによる流速計測も行っているが, 欠測期間が長いために以下の解析では使用していない)。本研究では, 海岸域における日スケールの水温変動現象と物質移動との関係に主眼を置いていることから, ここでは主として短期集中観測期間に焦点をあて, その期間の係留計測ブイの測定結果と観測船及び観測棧橋における多目的短期集中観測の結果を組み合わ

せることによって, 水温・流速・クロロフィルa・濁度・浮遊幼生量の日スケールの変動特性の把握を試みた。なお, 長期連続観測についての詳しい検討については, 別途報告予定(八木ら⁹⁾)である。

3. 現地観測結果と考察

(1) 短期集中観測期間中の気象・海象条件

図-5に観測期間中及びその前後の海上風向風速 (HORS 観測棧橋先端部, 海上10mの計測値), 気温・日射量 (銚子地方気象台の観測値), 潮位・有義波高 (HORSの観測値)の経時変化を示す。これを見ると, 海上風については短期集中観測期間前から南西~南南西風が連吹しており, 集中観測終了後の8/2に大きく変化するまで風向は安定している。また, 気温・日射量については, 7/30~8/1の期間は安定した晴天が

続いたため比較的安定した日周変動を繰り返している。さらに、潮位については集中観測が行われた7/31～8/1は、大潮期にあたり最大潮位差が140cm程度であった。なお、波高は7/31の午後からやや大きくなっているもののその大きさは有義波高で1m程度であった。

(2) 海岸域の水温変動と放射フラックスとの関係

図-6(a)に、海岸域の水温としてSta.B1における水温経時変化を示す(HORS先端部、表層から1m及び4m)。これを見ると、これまでの観測結果においてもたびたび認められている水温の日周変動が集中観測が行われた7/31 9:00～8/1 12:30(図中横矢印)にかけても明瞭に現れている。このような水温日周変動の原因としてまず考えられるのは上空からの放射効果である。海岸域は水深が浅いために、夏季の強い日射の影響をうけて、浅い湖沼や閉鎖性の強い浅海域(例えば、内山ら¹⁰⁾)のように水温が日周変動することが考えられる。そこでここでは、観測期間中の気象条件などから放射量の見積もりを行い、日射による局所的な加熱効果の影響の大きさを鉛直一次元の熱収支解析によって評価することを試みた。具体的には、まず海岸域に海底から海表面までの単位断面面積の水柱を考え(図-6(b)参照)、観測期間中の気象条件等から海表面を通して水柱に入る熱輸送量(Q)を式(1)から算定した。また、水柱に単位時間あたりに蓄えられる貯熱変化量(dS/dt)を水温の観測値を用いて式(2)によって求めた。

$$Q = R_{net} + H + IE, \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \rho c_p D \frac{\Delta T_s + \Delta T_b}{2\Delta t}, \quad (2)$$

ここで、 R_{net} :短波放射と長波放射の和、 IE :潜熱、 H :顕熱、 $\Delta T_s, \Delta T_b$:Sta.B1の上層水温(水深1m)、下層水温(海底上1m)の測定時間間隔 Δt の間の変化量、 ρ :海水の密度、 c_p :海水の比熱、 D :水深をそれぞれ表している。なお、対象地点(Sta.B1)は水深が5mと浅く、図-6(a)が示すように上層と下層の水温差が最大で0.5°C程度と小さいため、式(2)では上層水温と下層水温の単純平均を水深平均水温と考えて定式化している。

ここで、海水から地中への熱輸送量を微小と仮定し(海底地盤中の温度拡散係数が小さいため、今回の場合、地中への熱輸送量は $Q, dS/dt$ にくらべ十分小さいことは試算によって確認している)、海岸域の水温が日射による局所的な加熱効果のみに支

配されているとすれば、 Q と dS/dt がほぼ一致するはずである。しかしながら、図-6(c)を見ると、例えば集中観測期間中の7/31の午後は、放射の効果 Q としては海表面を通して海水に熱を供給しているものの、海水の貯熱変化量は逆に低下しており、 Q と dS/dt に大きな違いが生じていることがわかる。このように Q と dS/dt との間に明らかな相違が見られるという事実は、海岸近くの水温の日周変動が海面を通じた放射のみに支配されたものではないことを示している。

(3) 沿岸水温の時空間変動特性

日射による局所的な加熱冷却効果以外の海岸水温への影響因子としては、熱の水平方向の移流・拡散効果が考えられる。ここでは、海岸域の水温(Sta.B1)を沖側の観測点(Sta.B2～B5)の水温データと比較し、沿岸域全体の水温の時空間変動特性と海岸域の水温変動の関係を調べた。図-7は、Sta.B1～B5のすべての観測点の表層から底層までのすべての水温計測結果の時系列を示したものである。図には、(a)水温生データとともに、主要な周波数成分をバンドパスフィルターによって抽出した結果、すなわち、(b)日周変動より長い成分(33時間以上、以後、長周期成分と呼ぶ)、(c)日周成分(16～33時間)、(d)半日周成分(9～16時間)も併せて表示している。なおここでは、それぞれの周波数帯の幅を、水温のスペクトル解析結果に基づいて定義している。また、(c)日周成分、(d)半日周成分については変動特性をわかりやすくするために、それぞれの変動成分に各計測位置の長期観測全期間(7/23～8/13)の平均値を加えた形で表示してある。以下に、各周波数帯ごとの特徴をまとめる。

a)長周期成分

長周期の水温変動成分図-7(b)を見ると、短期集中観測期間の7/30～8/1にかけて、Sta.B1～B5のすべての観測点で水温低下が生じていることがわかる。図-8(a)はこの水温長周期変動成分を岸沖断面内水温空間分布の経時変化として表示したものであるが、これを見ると観測海域の全般的な水温低下に対応して下層の低温水が沿岸部で湧昇している様子がわかる。そこで、長周期の水温変動成分と海上風の関係を調べた。図-9には、係留ブイ観測全期間の風向と長周期水温変動成分(全期間平均水温を含む)の関係が示されており、このうち集中観測期間を含む7/30～8/2のデータを Δ で表示している(風向は岸に直角な陸向き風を 0° として時計回りに風向角を再定義している)。これを見ると、観測値にはばらつきがあるものの、観測期間全体の傾向として、風向が $-90^\circ \sim 0^\circ$ (図中II)の時に長周期水温変動が高く、 $90^\circ \sim 180^\circ$ (図中IV)では水温が低くなっている。ここでIIは、陸向きで岸

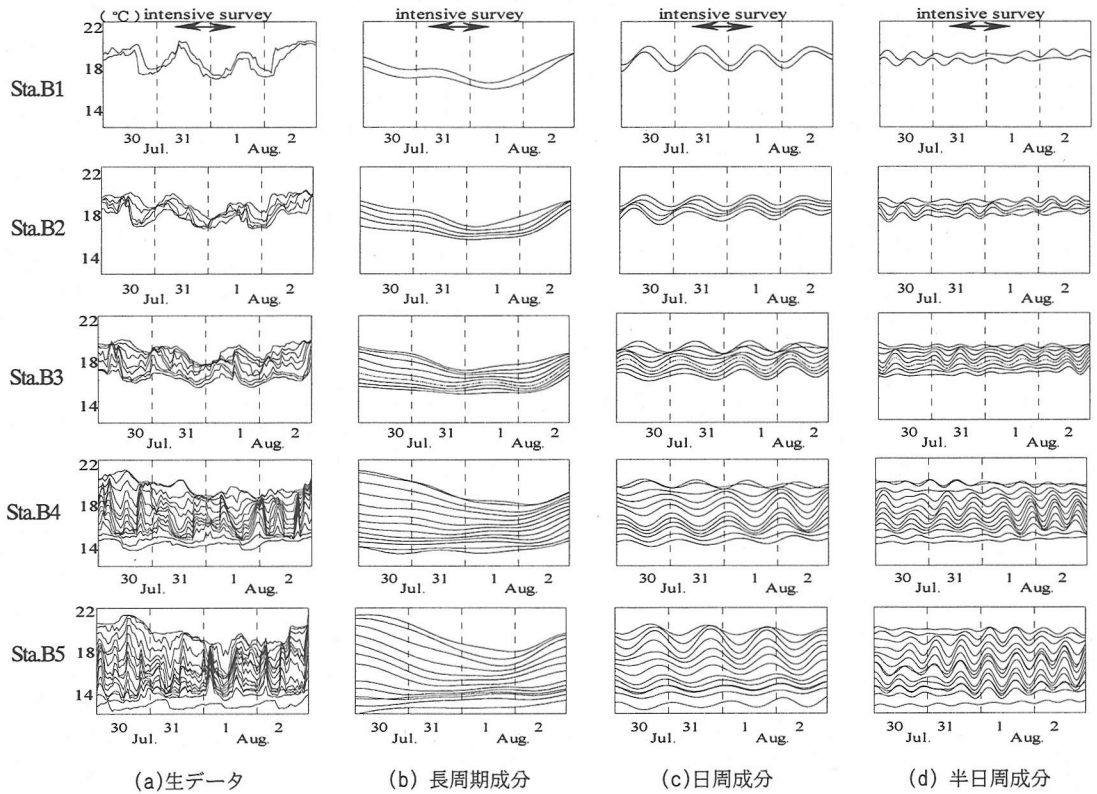


図-7 Sta.B1-B5における水温の経時変化

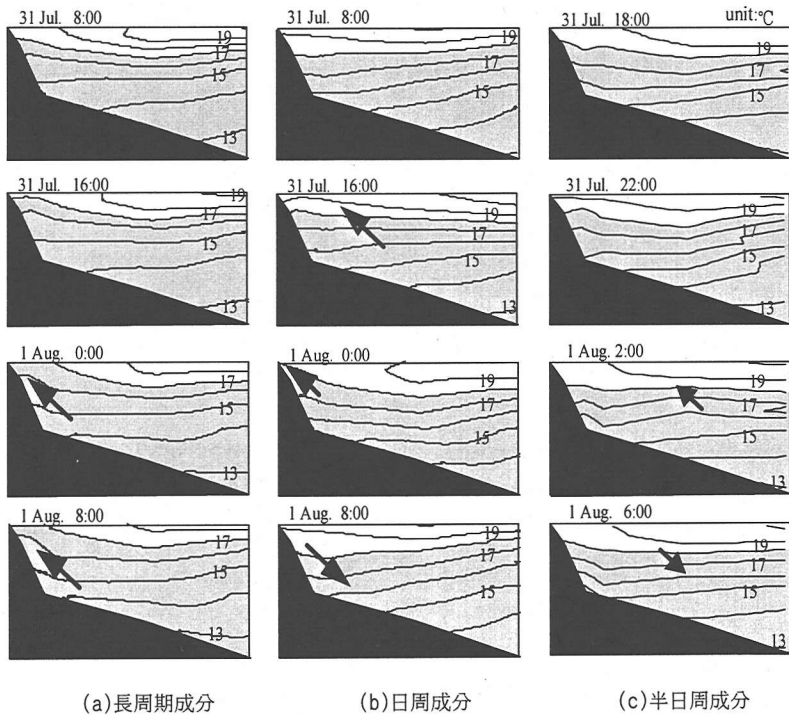


図-8 水温変動の空間分布の経時変化

を右手に見る方向（沿岸沈降を引き起こす風向）、IVは沖向きで岸を左手に見る方向（沿岸湧昇を引き起こす風向）にそれぞれ相当しており、風向と海岸水温

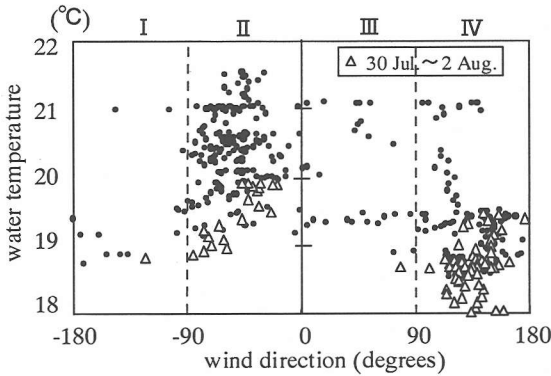


図-9 海岸水温の長周期変動成分（全期間平均水温を含む）と風向との関係

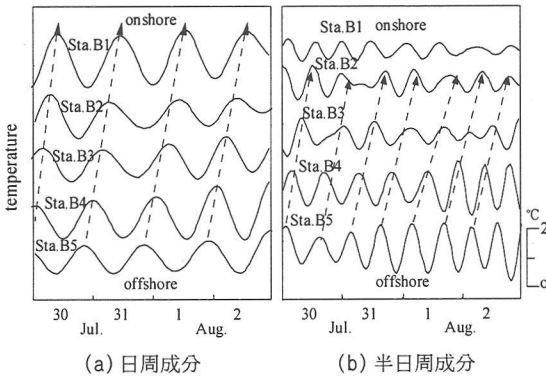


図-10 Sta. B1-B5 の中層水温の経時変化の比較

の対応関係から日スケール以上の水温変動は海上風による沿岸湧昇及び沿岸沈降の結果と考えられる。

b) 日周期成分

図-7(c)を見ると海岸域において顕著な水温日周変動は、海岸域のみではなくその沖側のすべての観測点 (Sta. B2-5) に明瞭にしかも全水深にわたって現れており、水温の日周変動現象が浅海域や表層に限った現象ではないことがわかる。図-10は、日周水温変動成分の岸沖方向変化をわかりやすく表示するために、Sta. B1~B5のすべての観測点における中層部の水温変動を並べて表示したものである。これを見ると、水温変動の位相が沖から岸に向かって連続的にシフトしており、水温日周変動が沖側から先に変化する形となっていることがわかる。さらに、図-8(b)に示す水温日周成分の岸沖断面内空間分布の経時変化を見ると、集中観測開始時に近い7/

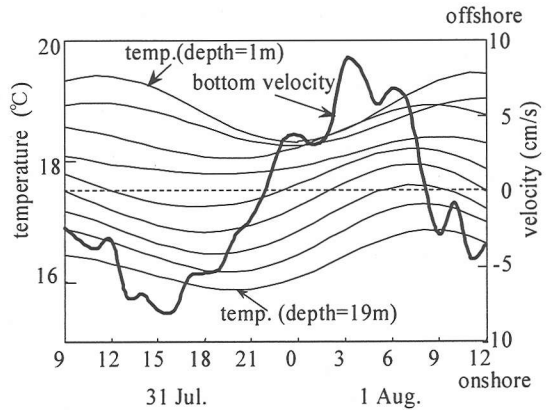
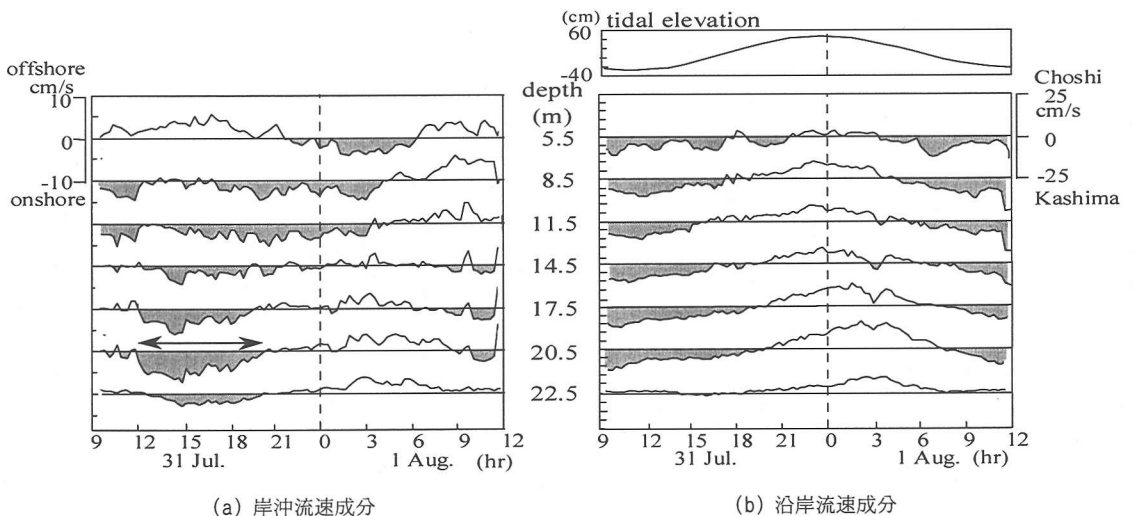


図-11 Sta. B3 における岸沖底層流速成分と水温の日周成分の比較



(a) 岸沖流速成分

(b) 沿岸流速成分

図-12 たか丸係留位置における ADCP による流速鉛直構造の計測結果

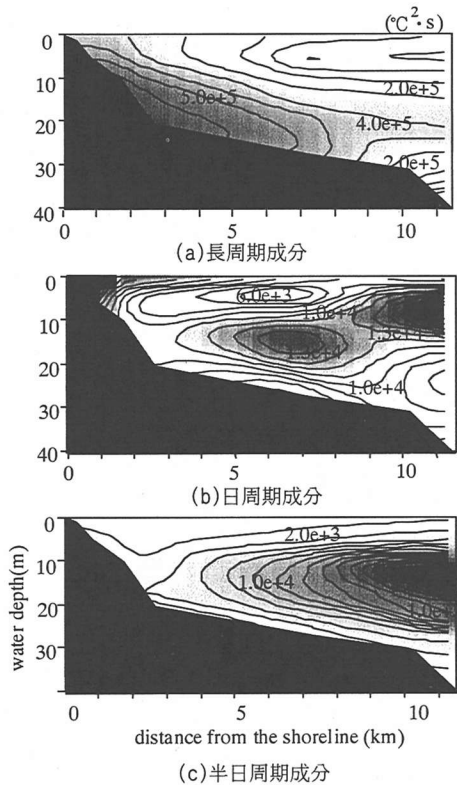


図-13 長周期帯及び日周期帯の水温変動スペクトルピーク値の空間分布 (八木ら⁸⁾)

31の8:00に沖合いにあった低水温部が岸に近づき、8/1の0:00頃に岸に遡上した後に引いている様子が見てとれる。先に示した海岸水温の日周変動との関連を調べると、底層低温水が海岸域に到達する8/1の0:00にかけて海岸の水温が下がっていることから(図-6(a)参照)、海面を通した放射効果だけでは説明できなかった海岸域の水温日周変動の原因として、このような底層低温水の海岸付近での遡上が考えられる。次に、このような水温変動パターンと流速との関係を調べた。図-11は、Sta.B3における底層の岸沖流速成分と水温日周成分を比較したものである。これを見ると、水温低下時に岸向き流速、水温上昇時に沖向き流速になっており、水温の空間変動パターン(図-8(b))から推測された底層水の動きに整合したものとなっている。さらに図-12は、Sta.B3に近い観測船たか丸においてADCPを用いて計測した流速鉛直分布の経時変化を示したものである。これを見ると、①岸沖、沿岸両流速成分とも下層(特に水深20.5m付近)で流速振幅が大きくなる、②日周変動流速が最大となる時刻が鉛直方向にずれている、など表面水位に対応した単純な日周潮流では説明できない流速鉛直構造を示しており、これは現象の傾圧

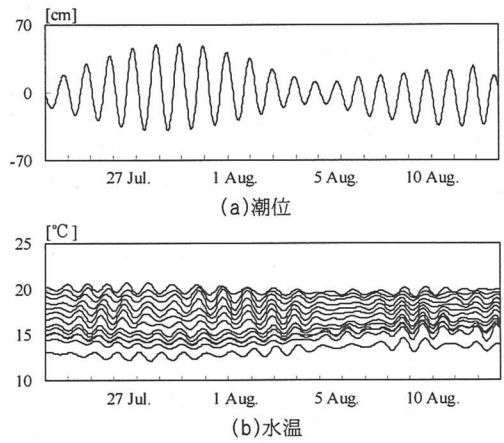


図-14 水温(Sta.B5)と潮位の日周期変動成分の比較

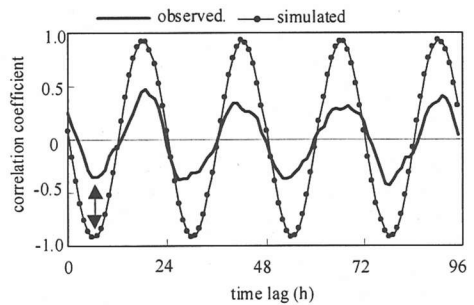


図-15 風速と水温変動(Sta.B2底層)の相互相関係数

的な特徴を示しているものと考えられる。以上のような、水温の時空間変動特性、水温と流速の対応関係、傾圧性を有した流速分布の特徴から、対象海域に水温日周変動を引き起こしているのは日周期の内部波であると考えられる。

次に、日周期の内部波の特徴を把握するために、長期連続観測全期間(7/23~8/13)にわたる係留観測ブイの計測結果からその性質を検討した。図-13は、各周波数帯(長周期、日周期、半日周期)それぞれの水温変動の空間構造特性の基本的な特徴を示すために、すべて水温データのパワースペクトルから、各周波数帯(長周期、日周期、半日周期)ごとのピーク値を求め、それを空間分布として表示したものである。これを見ると、海上風による沿岸湧昇・沈降の影響が主である長周期変動成分については、底層域での変動強度が大きくなっているのに対し、日周変動・半日周変動は中層域それも沖側で比較的大きな値を示していることがわかる。このことは日周期及び半日周期の水温変動が観測海域より沖合からの影響を受けたものである可能性を示唆している。そこで、水温変動が顕著な最沖合の観測点(Sta.B5)について、その

水温日周変動成分を日周潮位変動成分と比較してみた(図-14)。これを見ると、変動の詳細については多少差異はあるものの、潮位変動振幅と水温変動振幅の大小の変化パターンに関連があり、水温の日周成分が多少のタイムラグを伴いながら潮位変動に連動するように変化していることがわかる。以上のような、水温の空間構造特性や水温変動と潮汐との関係から、ここでとらえた日周期内部波は、大陸棚縁で励起された日周内部潮汐波が沿岸域に波及したものである可能性が考えられる。

さらに図-5に示した、短期集観測期間中及びその前後の気象データを調べると、風速自体にも日周変動する傾向が認められるため、ここでは日周期海上風変動が内部波を引き起こす可能性についても検討を行った。図-15は、集中観測期間を含む8日間(7/25~8/1)の海上風と水温(日射による影響が少ないSta.B2の底層)の相互相関係数を示したものである。これを見ると、相関係数の絶対値は0.4程度と低いもののタイムラグ8時間程度にピークが現れている(図中矢印)。これは、海上風の日周変動に対応して水温が約8時間遅れで変化していた可能性を示している。さらに、このような海上風に対する水温変動の応答時間が妥当なものであるかどうかを検証するために、Princeton Ocean Model¹³⁾を用いた数値実験を行った。ここでは、日周変動する海上風に対する水温変動の応答特性を調べるのが目的であることから、実際の状況に基づいてそれを単純化し、①海上風は風速振幅2.5m/s、周期24時間の正弦振動風、②海域の成層状態は、最沖合の係留ブイSta.B5近傍において、集中観測開始直前に計測した結果(水温については図-19参照)をそれぞれ海域に一樣に与えた。詳細な計算条件等を表-3に示す。なお、数値計算は、流速変動、水温変動がほぼ平衡に達するまで行い、その時点の海上風と水温変動から相互相関係数を求めた(図-15)。これを見ると、数値計算による海上風と水温変動(Sta.B2に対応する位置)のタイムラグも8時間程度であり、現地観測結果の傾向と一致する。このことは、日周変動する海上風も日周期内部波の生成に影響を及ぼしていた可能性を示唆している。この様に本海域では、日周期の内部波を引き起こす要素として、①日周内部潮汐波、②日周変動する海上風の効果が共存しており、この両者の作用によって海岸水温の日周変動成分が励起されたものと考えられる。

このうち、日周変動現象の主たる原因と考えられる日周期内部潮汐波については、その周期が慣性周期(本海域では20.4時間)よりも長いために、それを単純に大陸棚縁で励起された慣性内部重力波が岸に向かって入射したものと考えることができない。

表-3 数値実験の諸条件

計算領域	鹿島沖岸沖2次元断面 距岸0.5~40km 水深 5~240m
計算格子サイズ	水平:0.5km 鉛直:シグマ座標30層
風速	$V_{wind} \text{ (m/s)} = 2.5 \cdot \sin(2\pi t/T)$ t:時間、T:周期24h
風向	南西(北から-150°) 7/25~8/1の観測値に対応
海面摩擦係数	2.5×10^{-3}
計算モデル	POM (Princeton Ocean Model)
初期条件	流速は0m/s。水温、塩分は、最沖合の係留ブイSta.B5近傍において、集中観測開始直前に計測した結果(水温は図-19参照)を海域に一樣に与えた。

これについては、①川崎¹²⁾が指摘する、鹿島灘大陸棚縁辺部付近に存在する南下流(黒潮に引き込まれる流れ)のシア効果によって内部慣性重力波の存在周波数帯が広がり、慣性周期よりも長い周期を持つ日周期内部波が大陸棚縁で励起され内部慣性重力波として岸に向かって伝播したものの、②内部ケルビン波(慣性周期以上の周期帯においても存在可能)として沿岸に沿って北側海域から伝播してきたもの、などが考えられるされる。本論文では、沿岸方向の伝播特性を議論できるデータを対象としていないので、これについては今後詳細な検討が必要と考えられるが、著者らがこれまでに行った鹿島灘海域における観測結果の検討⁸⁾によれば、日周期内部波が沿岸方向に伝播する特性を持っていることが示されており、このことから日周期の内部潮汐としては内部ケルビン波の可能性が高いと考えられる。この場合、沿岸方向に伝播する日周期内部波によって、なぜ岸沖方向流速が生じ得るのかということが問題となるが、本研究で対象としているような海岸に近い海域の場合、沿岸斜面上を岸に沿って伝わる内部波は、内部界面変動が図-8(b)に示されているように斜面に沿う形になり、それによって、図-11や図-12からも明らかかな有意な大きさの日周期岸沖流速変動が発生するものと考えられる。

c) 半日周期成分

半日周期成分については、その周期や沖合からの伝播特性(図-10(b))から内部慣性重力波としての半日周内部潮汐が原因であると考えられる。ただし、図-8(c)や図-10(b)からもわかるように、半日周期水温変動は、沖側海域でその変動が顕著であり海岸に近い海域においては大きく減衰している。このことは、鹿島灘沿岸域においては成層期に日周期及び半日周期の内部波が発生しているが、海岸環境への直接的な影響という点では日周期内部波の方がより大きな影響を与えていること示している。

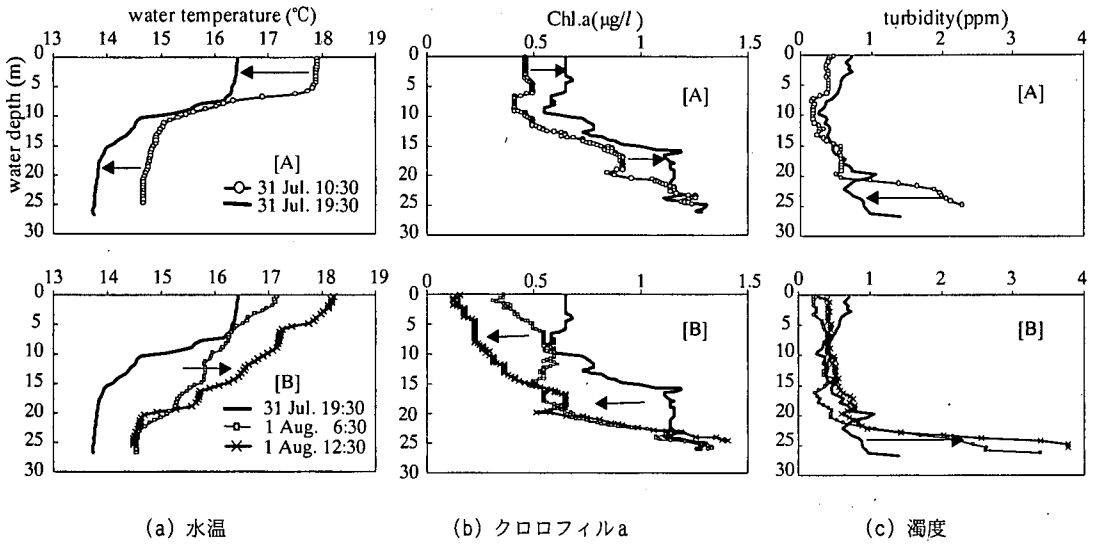


図-16 観測船たか丸で計測された水温, クロロフィル a (蛍光光度計), 濁度の鉛直分布

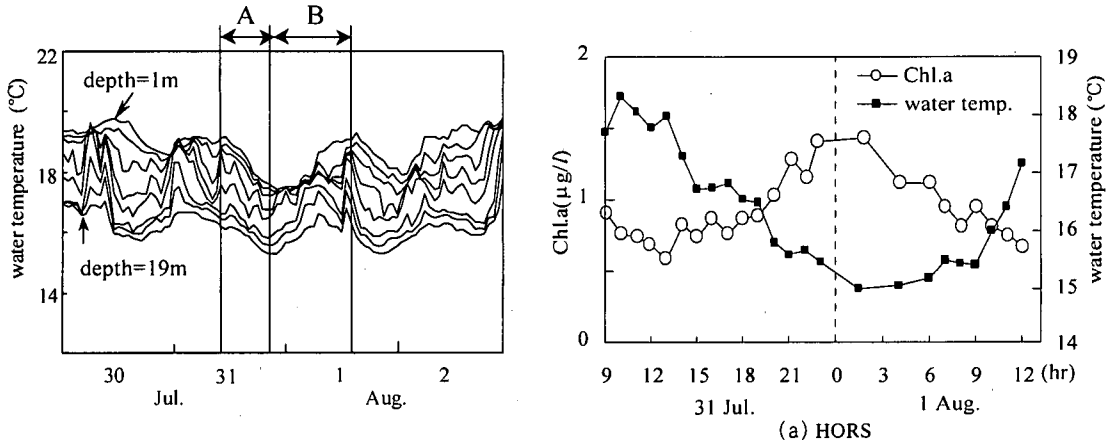


図-17 Sta. B3 の水温と集中観測期間中の期間 A, B の関係

(4) 水温・クロロフィル a・濁度の岸沖方向移動特性

前節までの検討によって, 開放性の高い鹿島灘波崎海岸周辺海域においては日周期内部波が海岸域に直接作用することで海岸域の水温環境に大きな影響を与えていることが示された. 本節では, 短期集中観測期間中に観測船たか丸で計測した水温・クロロフィル a・濁度の詳細な鉛直分布構造とその時間変動を観測栈橋 HORS での計測結果と比較することで, 海岸域とその沖合い海域との間の物質移動特性を把握することを試みる.

図-16 は, 観測船たか丸で計測された HORS 沖合い海域 (距岸 3km, 水深約 27m 地点) における水温, クロロフィル a, 濁度の鉛直分布の経時変化を示したものである. 計測は短期集中観測期間に 1~1.5 時間間

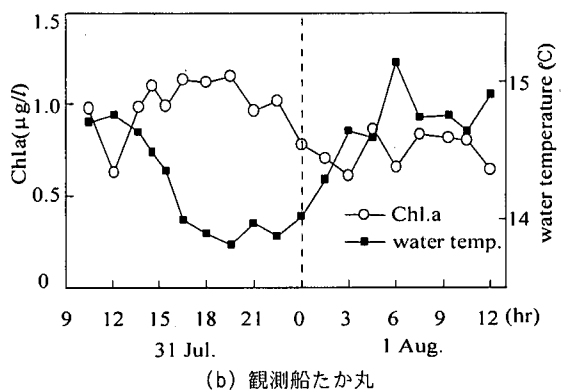


図-18 クロロフィル a 濃度 (採水) と水温の経時変化

隔で計 22 回行われたが, ここではこの間の鉛直分布構造変化の特徴によって短期集中観測期間を 2 つの期間 A, B に分けて表示している.

水温鉛直分布変化の特徴をまとめると, 短期集中

観測前半にあたる期間Aでは、明確な水温躍層が水深下5~10m付近に形成され、それが水温躍層を維持しながら全層的に水温低下している。一方、期間Bでは、全層で低下した水温が主に上層の高温層厚が増加する形で水温上昇し、同時に水温躍層が不明確になっている。これをたか丸に最も近いSta.B3の係留計測ブイの水温計測結果(図-17)及び各水温変動成分の空間分布(図-8)と比較すると、A、B両期間は海上風による沿岸湧昇に加え、①期間Aは、日周期内部波による下層低温水が遡上した時期、②期間Bは、海岸域に遡上していた下層低温水が沖に戻り、逆に表層暖水が岸に向かって押し寄せた時期にそれぞれ対応している。

次に、これを図-16(b)に示すクロロフィルa濃度の鉛直分布と比較すると、クロロフィルa濃度と水温が密接に連動して変化していることがわかる。すなわち、水温躍層が顕著な期間Aには、クロロフィルaの鉛直分布にも明確な躍層が表れており、その鉛直分布の基本形を維持しながら全層的にクロロフィルaのレベルが上昇している。さらに、水温上昇期の期間Bでは、躍層より上の低クロロフィルa層の層厚が増加する形で、クロロフィルaの減少が全水深的に進んでいる。さらに濁度(図-16(c))についても、期間Aに底層を中心に濁度低下、期間Bに濁度上昇と各期間A、Bに濁度変化の傾向を対応させることができ、クロロフィルaや濁度等の浮遊物質の移動が内部波と密接に関連していることがわかる。

次に、上記のような海岸の沖側海域の水温・クロロフィルaの変動パターンと海岸域におけるそれらの経時変化の関係を調べた。図-18(a)は、海岸に近い海域(HORS先端部)におけるクロロフィルaと水温の経時変化を示したものである。これを見ると、海岸域のクロロフィルaも水温と同様に明確な日周変動を示しており、高温時に低クロロフィルa、低温時に高クロロフィルaとなっている。今回の観測では水温が最低になる8/1の0:00頃にクロロフィルa濃度が最大となっており、これは日射等の影響による植物プランクトンの増殖や移動によるものとは考えられない。一方、図-18(b)は、図-15に示した沖合水深約27m地点でのたか丸による計測値から、海表面下20mのクロロフィルaと水温の経時変化を示したものである。これを見ると、水温とクロロフィルaの日周変動の位相が海岸域よりも明らかに進んでおり、水温が最低、クロロフィルa濃度が最大となる時刻が7/31 20:00頃となっていることがわかる。先述の水温変動解析から、海岸域の水温日周変動に日周期内部波が大きく影響していること、また内部波の性質により水温日周変動が沖側から岸側へと伝わるのがす

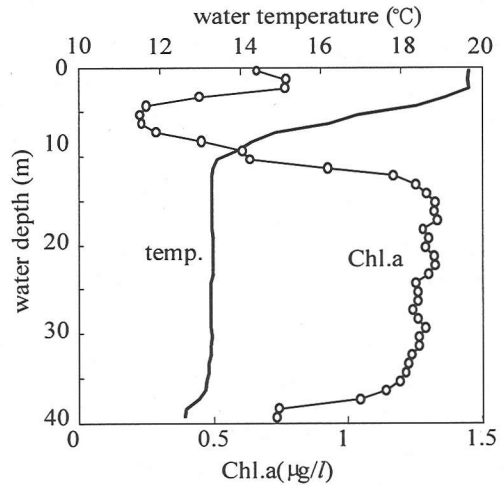


図-19 観測係留ブイ Sta.B5 付近の水温とクロロフィルa

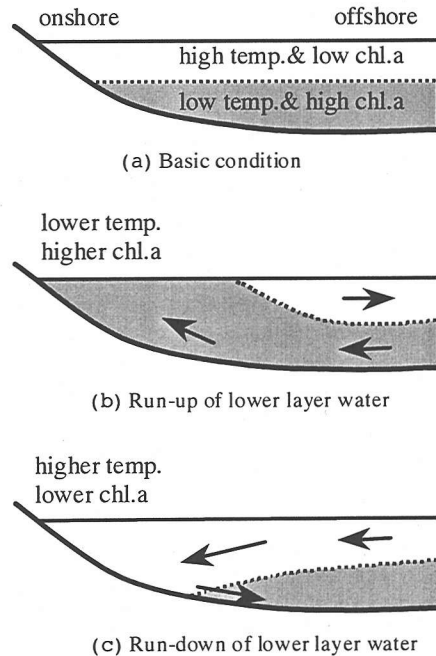


図-20 日周期内部波による岸沖物質移動の概念図

で示されている。これらのことから、水温変動に連動したクロロフィルaの日周変動は、日周期内部波によるクロロフィルaの岸沖方向輸送が原因であるものと考えられる。

次に、本海域の大局的な水温及びクロロフィルaの空間構造を把握するために、最沖合の係留ブイSta.B5近傍(距岸11.5km、水深40m)において、集中観測開始の直前(7/31の9:00)に計測した水温とクロロフィ

ルaの鉛直分布を図-19に示す。これを見ると、図-16に示した計測結果にも見られた水温・クロロフィルaの躍層構造がより明確な形で現れており、このような水温・クロロフィルaの鉛直構造が海岸域沖側の広い海域に広がっていたことが推測される。このように、水温躍層より上層で低クロロフィルa濃度、下層で高クロロフィルa濃度となるのは、成層期外洋海域の特徴的な傾向と考えられ（成層期には安定した密度躍層が発達し、それが底層から表層への栄養塩の供給を妨げるため、太陽光が到達可能で栄養塩が相対的に豊富な躍層で深において植物プランクトンの活性が大きくなる）、開放性の高い本海域の成層状態が海洋としての典型的な特徴を明確に有していたことをこの観測結果は示している。

以上の水温及びクロロフィルaの時空間変動特性から、開放性沿岸域における日周期内部波による岸沖方向の物質移動特性は以下のようにまとめられる。まず、開放性沿岸域において夏季に安定した晴天が継続すると、河川からの淡水供給が減り、沿岸域は外洋の影響を強く受けた海洋性の成層構造、すなわち上層は高温・低クロロフィルa濃度、下層は低温・高クロロフィルa濃度となる（図-20(a)）。こういった状態に日周期内部波が作用すると、内部波の運動による底層水の遡上が沖合下層の低温・高クロロフィルa濃度の水塊を海岸近くまで輸送するために、海岸の水温は低下しクロロフィルa濃度が上昇する（図-20(b)）。一方、海岸近くまで遡上していた下層水が沖に戻るとそれと入れ替わるように、高温・低クロロフィルa濃度の上層水が海岸近くまで押し寄せ、海岸域では水温が上昇し、クロロフィルa濃度は減少する（図-20(c)）。さらに、図-16(c)に示した海底近傍のけん濁物質についても、このような日周期内部波の作用によって輸送されていると考えられ、相対的に海底けん濁物濃度が低い沖側底層水の遡上による底層濁度の低下（図-16(c)[A]、図-20(b)）、また遡上していた底層水が沖に戻るときに波浪などの影響によって相対的に濁度レベルが高い岸側底層水が沖側に輸送されることによる底層濁度の上昇（図-16(c)[B]、図-20(c)）などが生じていると考えられる。

図-21は、海岸域（HORS基部から300m沖：A地点、及び380m沖：B地点でのそれぞれ上層、下層）における、二枚貝の浮遊幼生個体数密度の経時変化を示したものである。これを見ると、観測開始当初（7/31、12:00）に約2000個/m³であった浮遊幼生数密度は、水温低下とクロロフィルa濃度の増大と連動するようにクロロフィルa濃度が最大となる8/1の0:00にほぼ0へと急激な変化を示している。これも、日周期内部

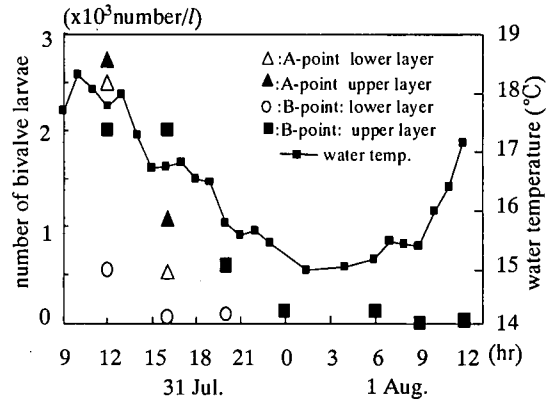


図-21 海岸域における二枚貝浮遊幼生数の経時変化

波の運動と関連させて考えれば、内部波によって下層水塊が海岸に押し寄せたことに伴い、それまで海岸近くに存在していた浮遊幼生が沖合いに移動させられたためと考えることができ、日周期内部波がクロロフィルa（植物プランクトン）、濁度、浮遊幼生といった浮遊物質移動全般の移動に重要な影響を及ぼしている可能性をこの結果は示している。

ここでの議論は、基本的には図-4に示した一つの岸沖観測断面内の観測結果に基づいたものであるため、今後は、図-20に示した岸沖輸送現象の沿岸方向変化など、さらに詳細な検討が必要と考えられるが、日周期内部波による輸送現象が従来よく指摘されている長時間スケールの沿岸湧昇と同様に、成層期の海岸域とその沖合海域間の物質輸送現象に重要な役割を果たしていることは、今回の観測結果からも明らかであり、こういった物質輸送が海岸域の生態系に大きな影響を与えていることが考えられる。

4. おわりに

開放性海岸域の水環境特性に与える沖合海域の影響を把握するために、鹿島灘波崎海岸周辺海域において日スケールの水温変動現象と物質輸送過程に着目した現地観測を行った。主要な結論は以下のとおりである。

①開放性の高い鹿島灘波崎海岸において成層期に現れる海岸水温の日周変動には、日射による局所的な加熱効果に加え、日周期内部波の影響が大きく、それによって、海岸付近のような陸岸に近い浅海域であっても、内部波による下層冷水の遡上と上層暖水の接岸が交互に繰り返されることで水温の日周変動が励起される。

②内部波の運動に伴い、クロロフィルa、濁度、浮遊幼生など浮遊物質・生物も岸沖方向に移動してお

り, CBZ と海岸域間の物質移動に対して日周期内部波が重要な役割を果たしている。

鹿島灘沿岸域に限らず日本近海は一般に大陸棚海域が狭いため, 大陸棚縁で励起された内部潮汐波が直接的に海岸域まで影響を及ぼすことが十分に考えられる。日周変動する海上風の効果もあわせ, 内部波や内部潮汐が開放性沿岸域における日スケールの物質移動や水環境変動に重要な役割を果たしていることが考えられる。

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, 西海区水産研究所木元克則企画連絡科長(前水産工学研究所環境分析研究室長)の協力によるところが大きい。また, 現地調査に協力して頂いた水産庁水産工学研究所所属観測船『たか丸』の乗務員の方々, また東京工業大学水工学研究室の職員及び学生諸氏, 論文中の図面作成に協力してくれた(株)日本工営(元東京工業大学大学院生)内山雄介君に謝意を表します。なお, 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付記する。

参考文献

- 1) 足立久美子, 日向野純也, 木元克則: 鹿島灘砂浜海岸における一次生産 I. 植物プランクトン量の変動(1992年), 水産工学研究所技報(水産土木), 13-24, 1994.
- 2) Simpson, J.H.: Tidal process in shelf seas, *The Sea*, Vol.10, John Wiley & Sons, Inc., 113-150, 1998.
- 3) Lentz, S. J.: Current dynamics over the North California

inner shelf, *J. of Physical Oceanography*, Vol.24, 2461-2478, 1994.

- 4) Trowbridge, J. H. and Nowell, A. R. M.: An introduction to the Sediment Transport Events on Shelves and Slopes (STRESS) program, *Continental Shelf Res.*, Vol.14, 1057-1061, 1994.
- 5) Trowbridge, J. H. and Lentz, S. J.: Dynamics of the bottom boundary layer on the Northern California shelf, *J. of Physical Oceanography*, Vol.28, 2075-2093, 1998.
- 6) 草野和之: 沿岸と沖合, *水産科学*, 26(2), 21-35, 1983.
- 7) 八木 宏, 緒方健太郎, 坂本太郎, 灘岡和夫: 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, 1201-1205, 1996.
- 8) 八木 宏, 坂本太郎, 灘岡和夫: 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, *海岸工学論文集*, 第44巻, 416-420, 1997.
- 9) 八木 宏, 日向博文, 灘岡和夫: 鹿島灘沿岸域における成層期の水温構造と流動特性, *土木学会論文集(投稿予定)*
- 10) 内山雄介, 灘岡和夫, 瀬崎智之, 八木宏: 東京湾奥極浅海域の砂浜海岸周辺における成層期の水環境特性, *土木学会論文集*, No.593/ II -43, 125-144, 1998.
- 11) 川崎 清: 水産海洋研究会25周年記念誌, 320-327, 1988.
- 12) 川崎 清: Shear Effect(鹿島灘の内部潮汐), *月刊海洋*, 21, 534-538, 1989.
- 13) Blunberg, A.F. and Mellor, G.L.: Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight, *J. Geophys. Res.*, Vol.88, 4579-4592, 1983.

(1999.5.13受付)

DIURNAL VARIATION OF NEARSHORE WATER TEMPERATURE AND CROSS-SHORE TRANSPORT PROCESS AT THE KASHIMA COAST

Hiroshi YAGI, Hirobumi HINATA, Kumiko ADACHI, Junya HIGANO
and Kazuo NADAOKA

To find the characteristics of short-period variations in the nearshore water environments, and the related crossshore transport process of materials at an open coast in stratified condition, a long-period mooring observation and an intensive survey by means of a research vessel and an observatory pier were performed at the Kajima coast in Japan. The results of the data analysis show that the diurnal variation of water temperature, which is one of the most characteristic features in the nearshore water environment, is induced by the run-up and -down motion of diurnal internal waves at the nearshore region. The internal waves play significant role in the crossshore transport of chlorophyll.a, turbidity and planktonic larvae. The internal waves transport may reach a very shallow water region close to the shore.