

# 熱変動特性から見た夏季鹿島灘沿岸域における 海水流動特性の解明

八木 宏\*・日向博文\*\*・内山雄介\*\*\*・灘岡和夫\*\*\*\*

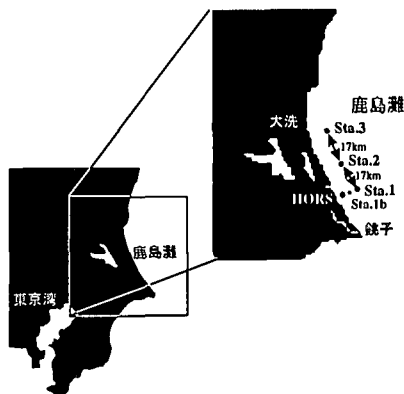
## 1. はじめに

広く外洋に面した開放性沿岸域は、沿岸域において一般に支配的と考えられている①海上風、②河川水による浮力加入、③潮汐といった流れの駆動力に加え、沖合いを流れる海流や大陸棚縁で励起される内部潮汐波など、外海からのリモートな影響を直接受けやすい構造となっている。したがって、熱収支や物質収支といった沿岸域を支える基本的な水環境特性を把握するためには、陸域からのフラックス、海面フラックスとあわせて、これまでその定量的な評価がほとんどなされていない外海の役割について、その素過程や物質フラックスの実態を明らかにしていくことが不可欠である。

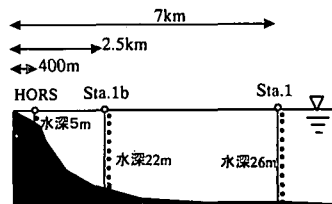
著者らは、このような点をふまえて、海岸域と外洋域とを結ぶ重要な海域でありながら、その実態把握が進んでいない中間領域を“Coastal Buffer Zone (CBZ)”と位置づけた上で、その基本的な性質を現地観測ベースで明らかにすることを試みて来ている(八木ら, 1995, 1996)。今回の研究では、複雑な CBZ の流れの構造をさらに詳しく解き明かすことを目的として、これらの影響がダイレクトに現れやすい熱環境に着目し、①水温の時空間変動特性から CBZ 支配する日スケール以上の長周期の流動メカニズムを把握する、②それぞれの物理過程が有する熱フラックスの大きさを定量的に把握することを試みた。

## 2. 現地観測の概要

観測対象海域は、典型的な開放性沿岸域である鹿島灘であり、観測期間は季節水温成層が顕著となる夏季の 1996 年 7 月 16 日～1996 年 8 月 27 日の約 43 日間である。今回の観測では、鹿島灘全体にわたる水温の時空間構造の特徴をつかむことを目的として、同海域の汲上沖から須田浜沖の距岸約 7 km、水深約 30 m の海域に、沿岸方向に約 17 km の間隔をおいて 3 か所にサーミスターチェーンを設置した (Sta. 1～3, 図-1 参照, 水温計



(a) 観測ステーション配置図



(b) 鉛直断面の測器位置 (●印は水温計)

図-1 現地観測概要

鉛直設置間隔は約 2 m)。さらに、これに対応した沿岸近くの水温度変動を把握するために、須田浜沖距岸 2.7 km 水深 22 m の位置 (Sta. 1b, 水温計鉛直設置間隔は約 5 m) とそのさらに岸側に位置する運輸省波崎海洋観測機橋 (HORS) 先端部 (Sta. 1c, 水深 4～5 m の海底上 1 m と 3 m) においても水温計を設置し計測を行った。

## 3. 水温変動の基本的な特徴と物理過程

### (1) 観測水温データの基本的な特徴

図-2 に、本観測によって取得された Sta. 1 (表層, 中層および底層) と, HORS (Sta. 1c, 表層および底層) の水温変動 (1 時間平均値) を示す。観測水温データに関して、気象などの外的条件や流況等と比較検討を行った結果、特徴的な数日スケールの変動現象として、①海上風系の変動に対応した急激な水温低下現象 (7/28, 8/1, 8/5, 8/10, 8/13), ②海上風系の変動に対応しない中層

\* 正会員 博(工) 東京工業大学助教授 工学部土木工学科  
\*\* 正会員 工 修 東京工業大学助手 工学部土木工学科  
\*\*\* 正会員 修(工) 日本工営(株)国内コンサルタント事業本部  
\*\*\*\* 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

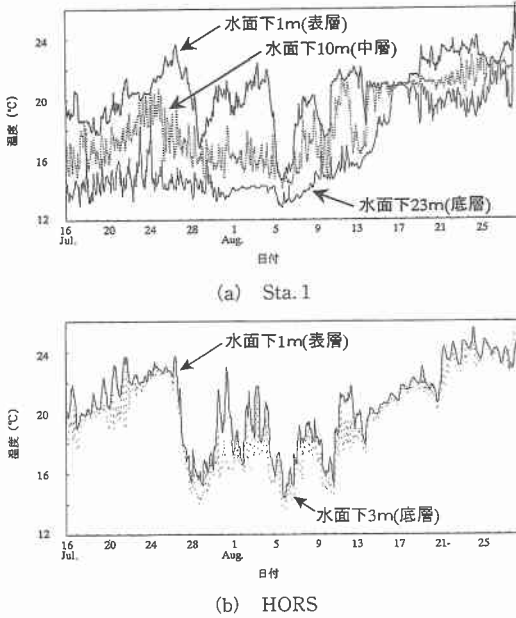


図-2 観測水温データの経時変化（1時間平均値）

以深の水温低下現象(7/24, 8/10), ③底層水温の長期的な上昇現象(8/5~)があることがわかった。また、さらにそれよりも短周期の現象として、日周期及び半日周期の水温変動現象も顕著であることが確認された。ここでは、日スケールよりも長い長周期の変動現象の着目していることから、①から③の水温変動を中心に物理過程との関連を検討したのでその結果についてまとめる。

### (2) 沿岸域における湧昇及び沈降現象

日スケール以上の長周期水温変動特性を調べるために、周期27時間以上の変動成分をローパスフィルターによって抽出した結果を図-3に示す。これを見ると、観測期間中、急激な水温低下現象が4回程度発生しており(図中矢印)、i) いずれも風速5m/s以上の南風(本海域においては沖向きで岸を左に見る方向)が連吹していること(図-4)、ii) 水温低下が表層から生じていること、などからこれら急激な水温低下は海上風に励起された沿岸湧昇が原因と考えられる。次に、この4回の沿岸湧昇のさらに詳細な性質の違いを把握するために、湧昇に伴う海水貯熱量の変化と大気からの熱輸送量(短波放射, 長波放射, 潜熱輸送量, 耐熱輸送量の和, 図-5中棒グラフ)の関係を調べた。その結果、沿岸湧昇後の水温上昇過程について、前半2回の湧昇(矢印A)と後半2回の湧昇(矢印B)に大きな性質の違いがあることがわかった。すなわち、矢印Aの湧昇後の水温上昇過程においては、大気からの熱輸送量と水域の貯熱変化量がほぼ等しくなっていることから、大気からの熱輸送が海水を加熱したことが水温上昇の主な原因と考えられる。一方、矢印Bの

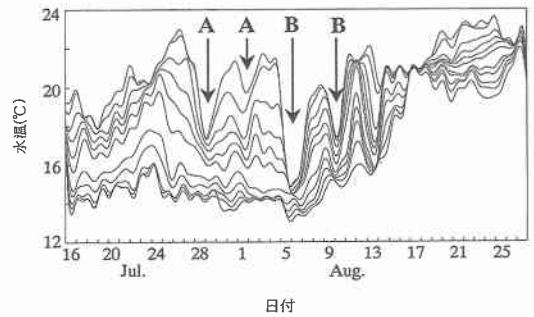


図-3 日スケール以上の長周期水温変動の経時変化 (Sta. 1, 27時間平均値)

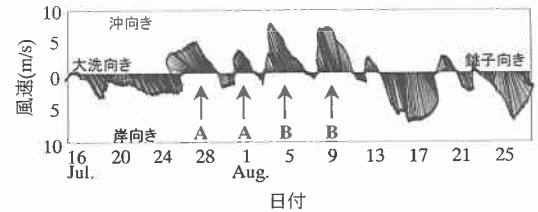


図-4 観測期間中の海上風の経時変化 (HORSにおける観測値, 27時間移動平均値)

期間については、大気からの熱輸送と比べて、水域の貯熱変化量が明らかに大きく正の値をもっており、これはこの期間の水温上昇が何らかの水平移流によって生じた可能性を示している。図-6に、Sta. 1における水温イソプレスを示すが、これを見ると、矢印Aの湧昇時には、底層水(ここでは15°C以下の水塊と定義している)が表層まで及ぶことはない。一方、矢印Bの湧昇時には、底層冷水は表層にまで達しており、A, Bに湧昇の規模の違いがあることが示唆される。さらに海上風の風速レベルについても(図-4)、矢印Aの期間では風速(1時間平均値)の最大が6.75m/sであるのに対し、矢印Bの期間では最大7.58m/sであり、風速レベルが大きいことがわかった。以上のことから考えると、期間Bの湧昇とその後の水温上昇過程の違いは次のように説明できる(図-7)。すなわち、湧昇規模が大きい期間Bでは、沿岸湧昇発生後の風系の変化に対応して、表層の暖水が沿岸域に押し寄せることによって水温上昇がすすむ。これに対して、風速レベルの小さい期間Aでは、期間Bのようなダイナミックな暖水の押し寄せは発生せず、主に大気側からの熱輸送によって水温が上昇している。

### (3) 沿岸に拘束された長周期内部波

さらに詳しく長周期水温変動を検討すると、7/24~7/26および8/12~8/13にかけて、表層水温の変動とは関係なく中層以深において急激な水温低下, 上昇が発生していることがわかる。この変動は、Sta. 1~3に共通の現

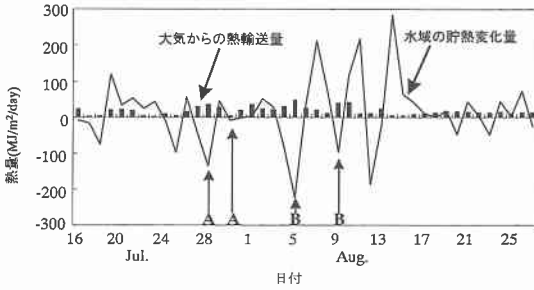


図-5 大気からの熱輸送量と水域の貯熱変化量の比較 (Sta. 1)

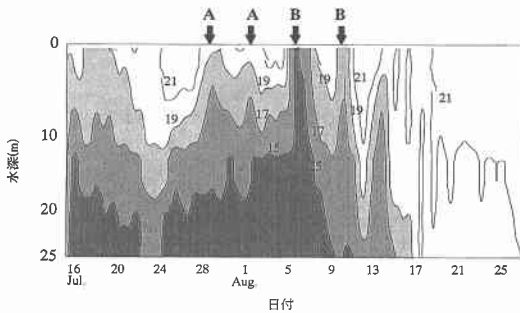


図-6 Sta. 1 における長周期水温変動のイソプレス

象であるが、前述の期間 A, B のような海上風との対応関係は見られない。そこで Sta. 1~3 の水温データを用いて、沿岸方向鉛直断面における水温分布を調べてみた。

図-8 は、7/24~7/26 の水温低下現象発生時における 12 時間間隔の水温沿岸断面コンターである。これを見ると、中層以深の水温変動に対応して、水温躍層面がまず北側(大洗)で上昇し、それが南側(銚子)に向けて伝播している様子がわかる。この水温変動現象について周期及び位相速度を算出すると、それぞれ約 55 時間、0.17 m/s となる。①周期が慣性周期(当海域では約 20.4 時間)より長いこと、②現象が傾圧的な性質有すること、③岸を右手に見て沿岸に沿った伝播をすることを考えると内部ケルビン波の可能性がある。そこで、実際の成層構造を単純な 2 層モデルに置き換え、内部ケルビン波の波速を次式により計算した。

$$c = \sqrt{eg \frac{h_1 h_2}{h}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで  $h$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  は全水深、上層水深および下層水深、 $\epsilon$  は有効重力 ( $=(\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$ )、なお  $\rho_1$  は上層密度、 $\rho_2$  は下層密度) を、それぞれ表している。観測点における水深  $h$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  については、茨城県水産試験場の実測データに基づき、30 m, 10 m, 20 m とすると、波速  $c$  は約 0.23 m/s となり、現地観測結果 (0.17 m/s) と近い値が得られた。このことから、日スケール以上の長周期水温変動現象として、

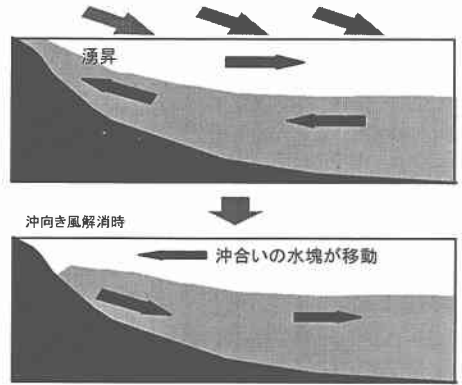


図-7 期間 B に対応する沿岸湧昇の模式図

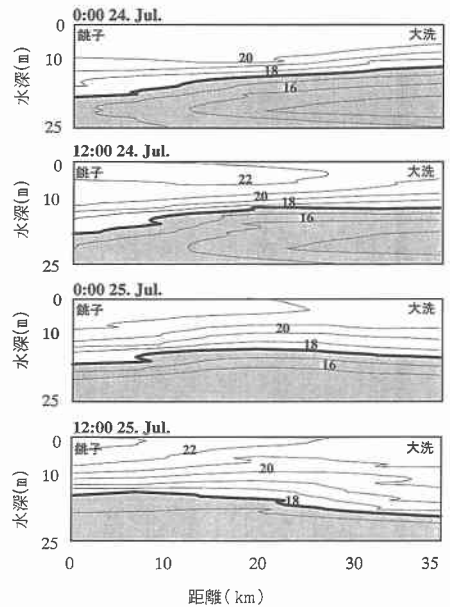


図-8 Sta. 1~Sta. 3 の沿岸方向鉛直断面の水温分布 (7/24~25)

自由波としての内部ケルビン波も CBZ の水環境特性に有意な影響を与えることを本観測結果は示している。

(4) 海流の影響

図-3 の長周期水温変動を見ると、観測期間前半において、一定のレベルを保っていた底層水温が、8/5 ごろから上昇し始め、観測期間後半では比較的高いレベルで水温が安定していることがわかる。このような観測期間途中からの底層水温レベルの上昇は Sta. 1~3 に共通した現象であった。そこで、このような長周期の水温変動と流速変動との関連を調べるために、鹿島港の港外に設置されている運輸省の港外波高計 (図-1×印) の底層流速値と水温変動の関係について調べてみた。図-9 は沿岸方向流速の長周期変動成分 (周期 27 時間以上) の経時変

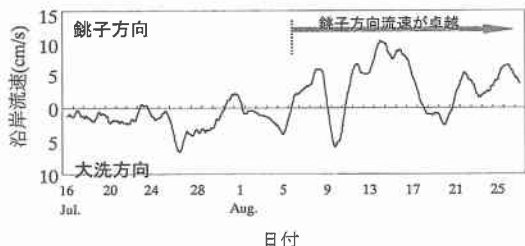


図-9 底層沿岸流速の経時変化 (鹿島港港外)

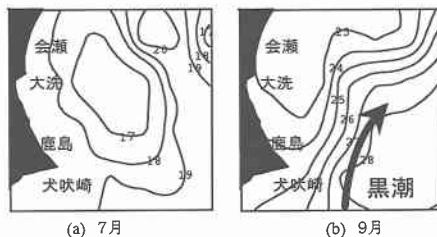


図-11 外洋の表層水温分布

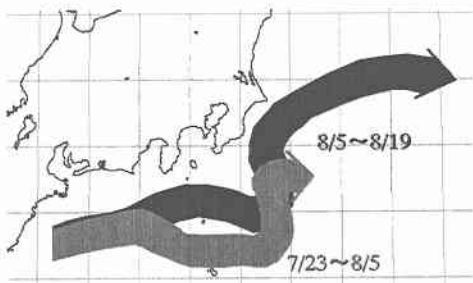


図-10 黒潮流軸の変動状況 (海洋速報)

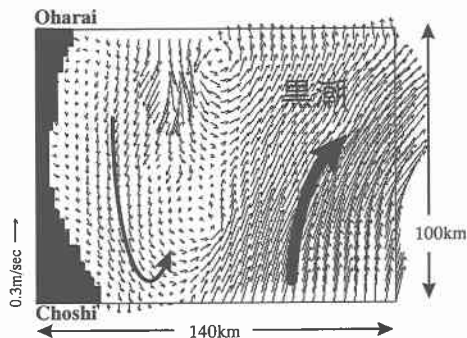


図-12 診断モデルによる密度流計算結果 (9月)

化を示しているが、それを水温変動と比較すると、底層水温の上昇時期に対応して、有意な南向きの流れ(鉾子向き、以下南下流呼ぶ)が発生していることがわかる。この流速変動、水温変動については、海上風や河川からの出水に対応した現象では無いことから、外洋の影響を受けた結果と考えられる。図-10に、この時期の外洋の状態を示す「海洋速報」の結果を示すが、これを見ると7/23~8/5には比較的沖合いを流れていた黒潮が、南流の発生する8/5~8/19にかけて房総半島に近づくように大きく流向を変化させており、こういった黒潮の流軸変動が鹿島灘沿岸域の発生した南下流に密接に関係している可能性が示唆される。そこでこの外洋と沿岸域の流れの関係を明らかにするために、茨城県水産試験場が毎月観測している広域の水温・塩分データを用いて診断モデルによる流況シミュレーションを行った。図-11は、黒潮が房総沖に接岸する前の7月と、接岸後の9月の表層水温分布を示している。これを見ると黒潮流軸の変化に伴い、鹿島灘の沖合いの水温構造が大きく異なっている様子がわかる。図-12は、診断モデルによる計算結果であり、黒潮の房総沖接岸後の9月の流況(水面下5m)を示したものである。これを見ると、房総沖を流れる黒潮に引き込まれる形で、鹿島灘沿岸域に南流が発生していることがわかる。これは、久保(1985)が指摘している鹿島灘沖合海域に存在する南下流に相当するものと考えられ、今回の本観測結果は海流に励起された沖合の流れが、海岸にかなり近い沿岸域の流速場にも大きな影響を

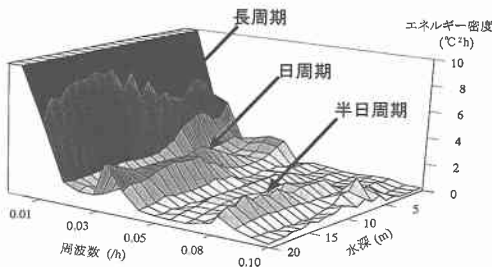
示すことを示している。

#### (5) 日周期・半日周期の内部波

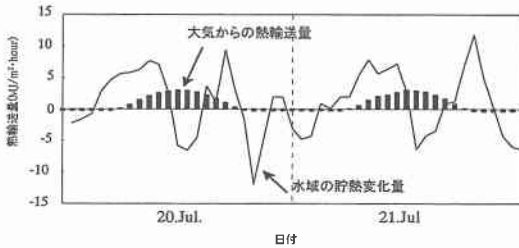
図-13は、Sta.1における表層から底層までのすべての観測水温から求めた水温変動のパワースペクトルである。これを見ると、水深5m以深の領域において日周期および半日周期の水温変動が顕著である。この日スケールの水温変動については、変動の中心が中層以深であり日射の直接的な影響は受けにくいこと、本海域においてはこれまでも日スケールの内部波が観測されていること(川崎, 1989, 八木ら, 1995, 1996)などから考えて、半日周期及び日周期の内部潮汐であると考えられる。次に、内部潮汐が海岸域に与える熱的な影響を検討した。図-14はHORSにおける大気からの熱輸送量と単位面積当たりの水柱の貯熱変化量を示している。これを見ると、水域の貯熱変化量は、大気からの熱輸送量の3~4倍の変動振幅をもつことがわかる。この大気からの熱輸送では説明できない日スケール水温変動は、水平移流フラックスによるものと考えられ、その変動周期が1日および半日の周期であることから内部潮汐の影響と考えられる。内部潮汐が海岸の熱環境に影響することは、すでに著者ら(八木ら, 投稿中 a, b)によって示されているが、本観測結果はそれを支持する結果となっている。

#### 4. 各物理過程に対する熱フラックスの評価

ここでは前節で検討した様々な物理過程の熱的な寄与の大きさを定量的に評価する事を試みた。表-1は、先述



図一13 水温変動のパワースペクトル (Sta.1)



図一14 沿岸域の数時間スケールの変動 (HORS)

の熱収支解析から求められた各物理過程の移流による熱輸送量を、単位体積の水の水温変化量として算出したものである。これをみると、日スケールより長い現象の中では、沿岸湧昇による冷却効果が最も卓越しており、最大で  $2.14^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\cdot\text{day}$  という有意な大きさであることがわかる。黒潮接岸に伴う南下流が沿岸域に与える加熱効果は、最大  $0.62^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\cdot\text{day}$  であり、水温変化が他の物理現象と比較して小さいために熱輸送量としては小さい値を示すが、期間が長期間にわたるために長期的にみた沿岸域の熱環境にとっては重要な役割を果たしていると言える。一方半日周期・日周期の内部潮汐は、 $\pm 1.72^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\cdot\text{hour}$  と短時間に大きな水温変化を示すことが特徴であるが、周期性が強いため1周期平均での寄与は小さくなる。

## 5. 結 論

開放性の高い沿岸域である鹿島灘のCBZの広域流動特性を理解するために、物理過程の影響がダイレクトに現れやすい熱環境に着目し、その特徴から主要な物理過程の性質と、それぞれの要因の沿岸域熱環境形成への寄与を定量的に把握することを試みた。その結果得られた結論は以下の通りである。

① 沿岸湧昇後の水温上昇過程は、湧昇の規模によってその性質が大きく異なり、湧昇の規模が小さい場合には沿岸湧昇後の水温上昇は大気からの熱輸送が支配的であるのに対し、湧昇規模が大きいと、沖合表層水の岸向き輸送(移流)支配的となる。沿岸湧昇による熱輸送は

表一1 各物理過程に対する熱フラックスの評価

物理過程	熱フラックス
沿岸湧昇	$-2.14^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\cdot\text{day}$
内部ケルビン波	$-1.65^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\cdot\text{day}$
海流	$0.62^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\cdot\text{day}$
内部潮汐波	$\pm 1.72^{\circ}\text{C}/\text{m}^3\cdot\text{hour}$

風速レベルと関係しているが、本観測期間の場合最大約  $2.21^{\circ}\text{C}/\text{day}/\text{m}^3$  の熱輸送量を示した。

② 沿岸に拘束された長周期内部波(内部ケルビン波)の発生がとらえられ、それは熱的には最大で  $1.62^{\circ}\text{C}/\text{day}/\text{m}^3$  の移流効果をもっていることがわかった。

③ 黒潮の房総沖への接岸により、鹿島灘沿岸域に南下流が発生し、これに対応する形で底層水温が上昇することが示唆された。これによる移流加熱効果は、約  $0.62^{\circ}\text{C}/\text{day}/\text{m}^3$  程度であった。

④ 本海域において、成層期に発達する日周および半日周期の内部潮汐波は大気からの熱輸送量の3~4倍の大きさを示す。

謝辞：本研究を行うにあたり、HORSの風データを運輸省港湾技術研究所から、鹿島港の港外波高計のデータを運輸省鹿島港工事事務所から、また鹿島灘広域水温塩分観測データを茨城県水産試験場から提供して頂いた。ここに関係各位のご協力に対して謝意を表します。また、本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究C(代表者：八木宏、課題番号：07650589)によることを付記する。

## 参 考 文 献

- 内山雄介・八木 宏・日向博文・灘岡和夫：夏季鹿島灘における長周期水温変動に関する研究，日本海洋学会秋季大会要旨集，p. 213, 1998.
- 宇野木早苗：沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，pp. 340-344.
- 久保：鹿島灘，日本全国沿岸海洋誌，pp. 300-303, 1985.
- 川崎 清：Shear Effect—鹿島灘の内部潮汐—，月刊海洋 Vol. 21, No. 9, pp. 534-538, 1989.
- 近藤純正：水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—，朝倉書店，pp. 333-335.
- 八木 宏・緒方健太郎・坂本太郎・灘岡和夫：開放性沿岸域における水温変動特性，海岸工学論文集，第43巻，pp. 1201-1205, 1995.
- 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，pp. 416-420, 1996.
- 八木 宏・灘岡和夫・内山雄介・日向博文：長期連続観測に基づく東京湾・鹿島灘・霞ヶ浦の年間表層水温変動特性の比較解析，土木学会論文集(投稿中a).
- 八木 宏・日向博文・足立久美子・日向野純也・灘岡和夫：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，土木学会論文集(投稿中b).