

東京湾口を横断するフェリーによる冬季海水流動と 水質の長期連続観測

鈴木高二郎* ・加藤 英夫**・桑江朝比呂***
下司 弘之****・亀山 豊*****

湾口を横断するフェリーに水質の連続観測装置を設置し、2003 年 12 月 22 日～2004 年 3 月 11 日にかけて観測を実施し、冬季における東京湾口の水質の長期連続変動を調べた。その結果、(1) 黒潮系暖水の東京湾口への流入が 1～2 週間周期で見られ、塩分の最大値は 34.6 PSU を越えていた。(2) 表層の黒潮系暖水は金谷側から流入するが、流出するときには金谷側によって流出する場合と航路中央部に残りながら流出する場合とがある。(3) クロロフィル *a* 濃度は毎日増減を繰り返しており、日射量と同じ時間間隔で変化していた。日射量が最大となる時刻にクロロフィル *a* 濃度は最小値をとっており、これは優占していた *Ceratium fusus* の日周運動の特徴と推定される。

1. はじめに

東京湾の長期的な自然環境の変化や埋立等の工事による環境変化を予測していく上で、東京湾の定常的なモニタリングが必要である。東京湾の流動・水質を予測するために必要な境界条件としては、河川、海表面、海底面等があるが、その中で東京湾口は最も重要な境界条件の一つであり、湾口境界を通した海水、物質の流入や水質の変動メカニズムを明らかにする必要がある。湾口での環境計測は松本ら (1974) をはじめ多くの観測例があり、最近では日向ら (2000) によって黒潮系暖水の波及効果等、湾口の特徴的現象も明らかになりつつある。こうした観測は主にブイ係留による水質の連続計測や観測船による短期集中観測で行われてきたが、東京湾口には頻繁にそこを横断するフェリーがあり、これを利用することでこれまでにない高密度で連続的なモニタリングが可能となる。そこで本研究では、フェリーに連続観測装置を設置し、冬季の黒潮系暖水波及のような時間的・空間的に変動の激しい海水流動と、そこでの水質の長期連続変動を調べることとした。

2. 流況・水質・気象測定装置の概要

図-1 は観測システムの概念図である。東京湾フェリー株式会社の協力を得て、同社所有の“かなや丸”の船体に観測装置（またはセンサー）を取り付け、平成 15 年 2 月より ADCP による流況の計測を、平成 15 年 12 月より水質・気象の計測を開始した。

“かなや丸”は図-2 のように神奈川県久里浜港と千葉県金谷港の約 10 km を片道約 30 分（船速約 6 m/s）で結んでおり、毎日 AM 6:20～PM 7:20 にかけて約 7 往復している。

* 正会員	工修	(独法) 港空研海洋・水工部主任研究官
** 正会員		(独法) 港空研海洋・水工部海洋開発研究室長
*** 正会員	農博	(独法) 港空研海洋・水工部主任研究官
**** 正会員		国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所長
***** 正会員		国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所環境課長

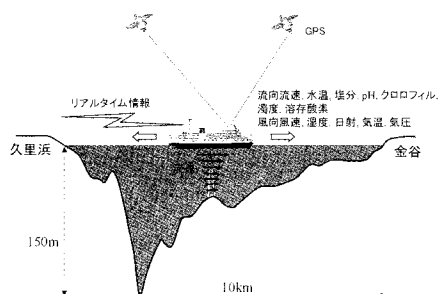


図-1 フェリー観測システムの概念図

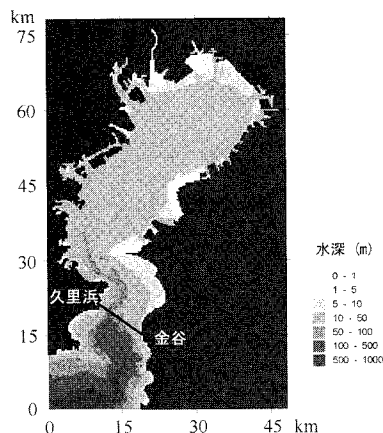


図-2 東京湾の水深とフェリー航路

観測項目は流向流速の断面分布と表層の水質（塩分、水温、クロロフィル *a*、濁度、溶存酸素、pH）、気象データ（風向風速、湿度、日射、気温、気圧）であり、フェリーの位置は DGPS で計測している。

フェリーは東京湾海底溪谷の上を横切っており、約 10 km のフェリー航路を航行する間に水深は急に深くなり、フェリー航路付近での最大水深は約 170 m である。

図-3 は、フェリーへの流向流速計と水質、気象測定装置の設置図である。流向流速計は船底の中央部に、水質測定装置は船底後部の軸室内に、気象計測装置はレー

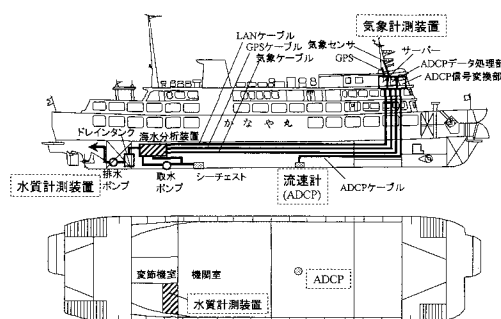


図-3 東京湾フェリー“かなや丸”と観測システム

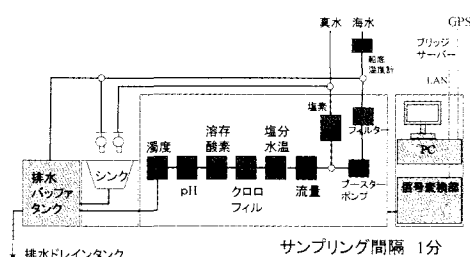


図-4 海水分析装置概要図

ダーマスト上に設置されている。

今回フェリー船底に設置した流向流速計は、RD Instruments社製の船底装備型 Broad-Band ADCP (Workhorse Mariner ADCP) で、発振周波数 300 kHz のものである。フェリーの喫水は 3.4 m であり、流速の鉛直プロファイルは、水深 10.59 m の位置から層厚 4 m で約 40 層計測している。流速は 20 s 間隔で出力した値を用いており、船速が約 6 m/s であるので、約 120 m ピッチで、1 航海あたり 80 点ほどのデータが得られる。

水質の測定は、船底のシーチェストから取水ポンプによって自動で表層の海水を採取し、その海水を海水分析装置に送って分析している。図-4 は、海水分析装置の概略図であり、多項目の水質センサー（水温および電気伝導度・DO・pH・クロロフィル *a* 濃度・光後方散乱濁度・流量）が配されている。海水はこれらを順番に通過していき、各センサーからの信号を 1 分間隔で PC に収録するようになっている。船速は約 6 m/s であるため、約 360 m 間隔でサンプリングしている。

なお、データは GPS からの情報（年月日、時刻、船位等）とシーチェスト付近に取付けられた船底水温のデータ、さらにレーダーマストに取付けられている気象計測装置のデータ（風向風速、気温、日射、湿度、気圧）と共に収録されている。

分析装置まで流入した水は 3 つの系統に分かれて、1 つは分析装置、1 つはシンク、またバイパスを通過したものは直接、排水バフファタンクに流れ落ちるようになって

ている。分析装置流路に流れ込んだ海水は大型ゴミを除去させる 5 mm のフィルターを通過後、クロロフィルを感度良く感知させるためにプルスターポンプを経由して約 1.5 l/min に規定させて各センサーを通過させ、排水バフファタンクに落とす仕組みとなっている。

“かなや丸”は、久里浜—金谷間を僅か 30 分で航行するため、船底から取り込まれた表層水をタイムラグを小さくして測定する必要がある。そのため、本分析装置では、分析装置に近いシーチェストから分岐して 30 l/min の流量で 25 A の配管を用いて高流量、高流速で分析装置まで海水を導いており、実際のタイムラグは約 2 分（距離約 700 m）である。

配管内部は時間経過とともにスケール（付着物）が溜まり、内部抵抗が増加して本来の吐出流量が得られなくなる。そこで、造船所での加工がしやすく安価である鋼管を選び内部にスケールが付着し難いポリライニング加工を施している。また、スケール付着を極力防ぐため、スケール付着防止装置“スケールクリーン”を採用した。これは配管にケーブルを巻いて電磁でスケール成分を細分化しスケール付着を防止するものである。さらにセンサー自体の汚れを防ぐ意味で、久里浜港および金谷港入港時には、分析装置内部に懸濁海水を流入させない処置を行い、入港している間、海水に生物付着防止液（塩素）を混ぜたものを分析装置内部に流す方法をとっている。

水質測定装置に用いた各種センサー類の名称と仕様は以下のとおりである。船底温度センサー（Sea-Bird Electronics 製、SBE 38：測定範囲 $-5 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 、精度 $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ ）、クロロフィル蛍光光度計（Wetlabs 製 ws-3-mf：ダイナミックレンジ $0.03 \sim 75 \mu\text{g/l}$ 、感度 $0.03 \mu\text{g/l}$ 、Excitation 波長 450 nm、Emission 波長 685 nm、サンプリングレート 6 Hz）、CT センサー（FSI 製、Excell Thermosalinograph：水温測定範囲 $-3 \sim +45^{\circ}\text{C}$ 、水温精度 0.010°C 、電気伝導度測定範囲 $0 \sim 90 \text{ mS/cm}$ 、電気伝導度精度 0.025 mS/cm 、塩分 $2 \sim 42 \text{ PSU}$ 、塩分精度 0.030 PSU ）、DO センサー（AMT 製：ガルバニ方式、ガラスチップセンサー、測定範囲 $0.07 \sim 200\%$ 飽和、精度： $\pm 0.15\%$ FS）、pH センサー（AMT 製：測定範囲 $2 \sim 11 \text{ pH}$ 、精度 $\pm 0.05 \text{ pH}$ ）、光後方散乱濁度計（Wetlabs 製、LSS-60：ダイナミックレンジ $1 \times \text{unit} \sim 7.5 \text{ NTU on high gain}$ ； $\sim 25 \text{ NTU on low gain}$ ； $3 \times \text{unit} \sim 2.25 \text{ NTU on high gain}$ ； $\sim 7.5 \text{ NTU on low gain}$ ）。

気象測定装置に用いたセンサーは、VAISALA 製自動気象ステーション MAWS であり、風速計（測定範囲 $0.5 \sim 60 \text{ m/s}$ 、精度 $\pm 0.3 \text{ m/s}$ ）、風向計（測定範囲 $0 \sim 360^{\circ}$ 、精度 $\pm 3^{\circ}$ ）、相対湿度温度計（温度測定範囲 $-40 \sim +60^{\circ}\text{C}$ 、精度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ；湿度測定範囲 $0 \sim 100\%$ 、精度 $\pm 2\%$ ）、気圧計（測定範囲 $600 \sim 1100 \text{ hPa}$ 、精度 ± 0.3

hPa), 日射計 (計測レンジ 2000 W/m²) である。

3. 観測結果

(1) 黒潮系暖水の流入

図-5 は 2004 年 1 月 21 日に見られた黒潮系暖水の流入状況であり, 表層流速, 断面流速, 表層海水の塩分, 水温, クロロフィル *a* 濃度である。久里浜港から約 3.6 km の位置にフロントがあり, この地点を境に表層流速は久里浜側では東京湾から流出する向き, 金谷側では東京湾に流入する流れの向きになっており, 断面流速もこの地点で, 流入流出が反転している。

また, 塩分水温もこの地点を境に大きく異なっており, 久里浜と金谷で塩分は約 0.9 PSU, 水温は約 4°C も異なっている。金谷側の水温は冬季にもかかわらず 17°C にもなっており, 黒潮系暖水が流入していることが分かる。

一方, クロロフィル *a* 濃度は久里浜側で高く, 黒潮系暖水と比較して高濃度の内湾水が流出しているのが分かる。このときの久里浜側の海水には写真-1 のような内湾性の渦鞭毛藻類である *Ceratium fusus* が優占しており, 外洋性植物プランクトンの種組成と全く異なっていた。なお, 写真-1 は海水分析装置の“シンク”から採取した海水に含まれていたものを撮影したものである。

図-6 は, 12 月 22 日~1 月 1 日にかけて, 黒潮系暖水が東京湾口に流入し, その後, 流出した際の塩分, 水温, クロロフィル *a* 濃度の変化を示す図であり, それぞれの

日に対して 1 日間の全データをプロットしている。

12 月 22 日は塩分約 33 PSU, 水温約 15°C, クロロフィル *a* 濃度約 6 µg/l の内湾水がフェリー航路を覆っていたが, 12 月 26 日には黒潮系暖水が東京湾口に流入し始め, 金谷側の塩分水温が上昇し, クロロフィル *a* 濃度も小さくなっている。さらに, 12 月 30 日には, 黒潮系暖水が流入してフェリー航路のうち金谷側の約 60% 以上の範囲を覆うようになり, 水温は約 19°C, 塩分も約 34.7 PSU と高く, クロロフィル *a* 濃度は逆に 0.5 µg/l 以下になっている。

1 月 1 日になり, 黒潮系暖水の流入が小さくなって久里浜側の塩分水温が小さくなると, クロロフィル *a* 濃度は高くなり, 黒潮系暖水流入前の 3 倍程度になっている。

図-7 はこの間の塩分とクロロフィル *a* 濃度の散布図であり, 塩分が高いほどクロロフィル *a* 濃度は低い傾向

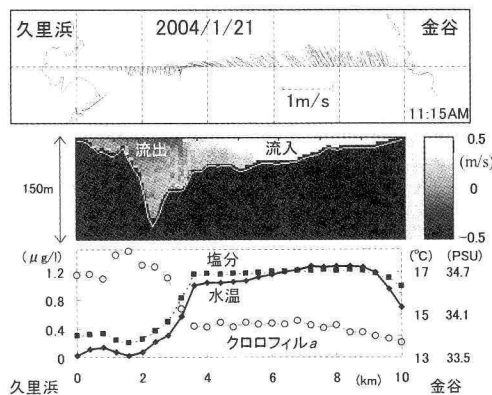


図-5 黒潮系暖水の流入状況

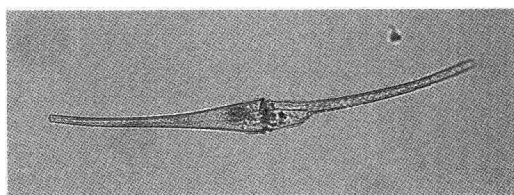


写真-1 サンプル水に含まれていた渦鞭毛藻類の *Ceratium fusus*

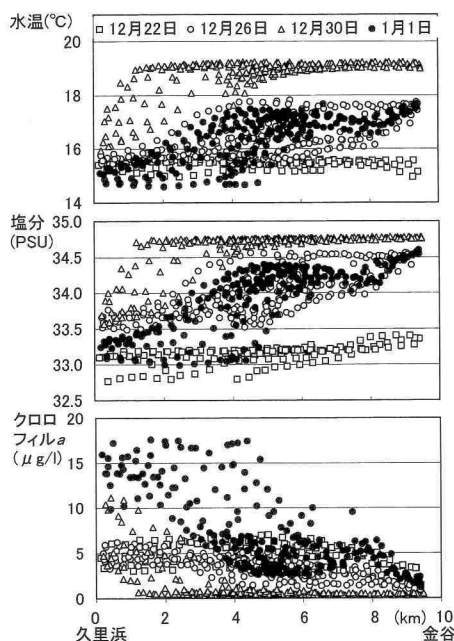


図-6 黒潮系暖水, 流入流出時の塩分, 水温とクロロフィル *a*

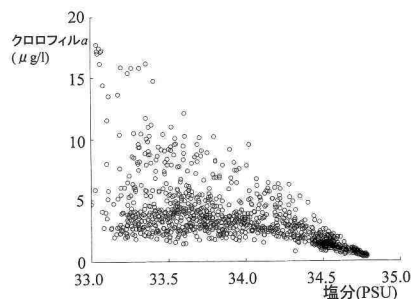


図-7 塩分とクロロフィル *a* 濃度との関係

にある。塩分が低い部分でばらつきがあるがこれは後述するクロロフィル a 濃度の日変化によるものと考えられる。

(2) 塩分、水温、クロロフィル a の長期変動

図-8は、塩分、水温、クロロフィル a の2004年12月22日～2004年3月11日までの1日の平均値、最大最小

値である。

黒潮系暖水の流入は2月までの間に1～2週間周期で見られ、流入の大きいときの塩分の最大値は34.6 PSUを越えており、特に12月28日～31日、1月21日～28日にかけて顕著だった。また、2月15日～3月1日にかけては、塩分水温の最大最小値の差が小さく、平均値で塩分

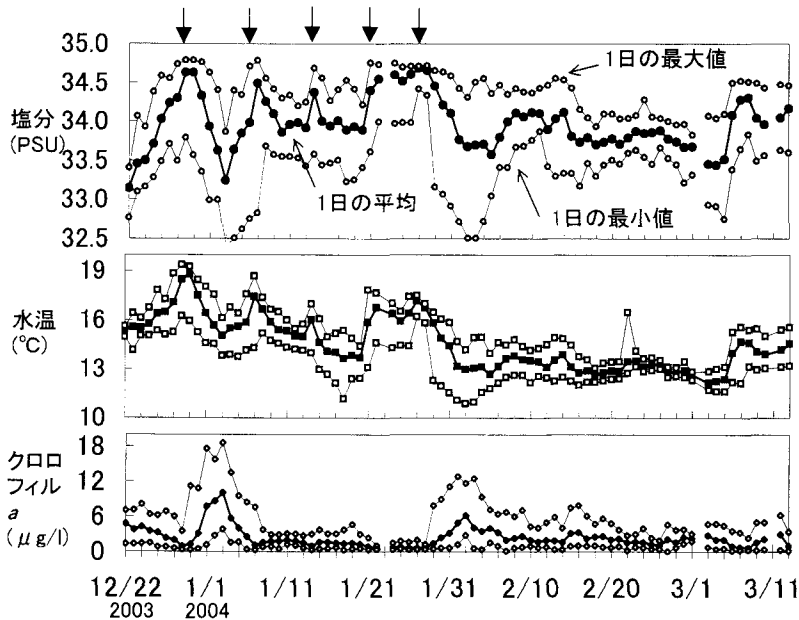


図-8 塩分、水温、クロロフィル a の長期変動

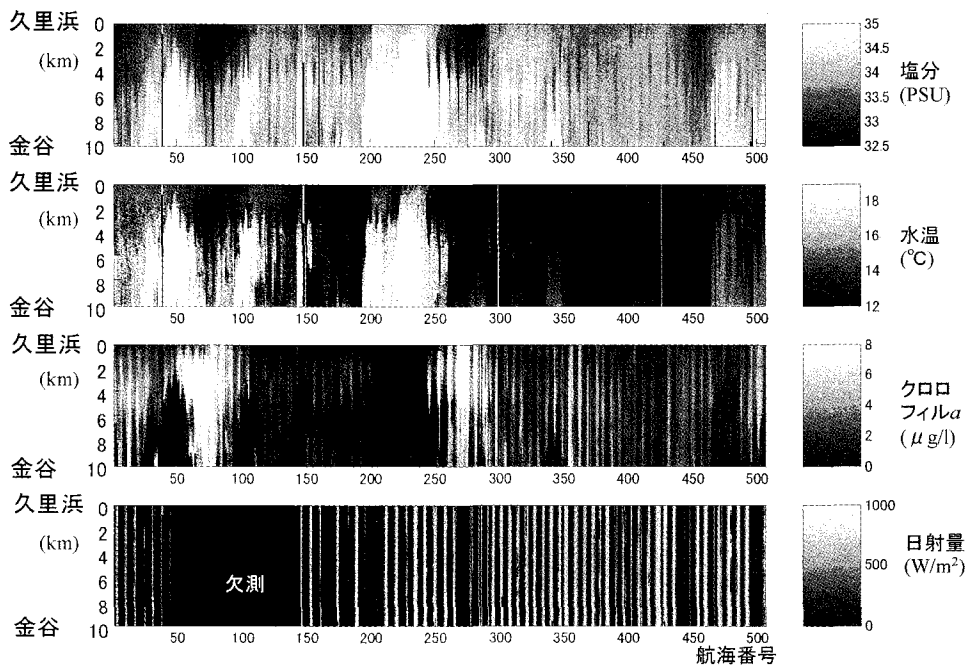


図-9 塩分、水温、クロロフィル a の長期変動

は 33.9 PSU、水温は 13°C で安定していた。

クロロフィル *a* は塩分、水温が高く（低く）になると高く（低く）なる傾向にあり、強い暖水流入直後に上昇する傾向にあった。

図-9 は、塩分、水温、クロロフィル *a*、日射量の観測期間中全データの長期変動であり、横軸は航海番号、縦軸は久里浜と金谷間の位置を示しており、久里浜から金谷に向かうときだけを抽出して表示している。塩分、水温を見ると黒潮系暖水は金谷側から流入するが、流出するときには金谷側にそって流出する場合（航海番号 70 付近）と航路中央部に残りながら流出する場合（航海番号 110, 150, 260 付近）とがある。

(3) クロロフィル *a* の日変化

図-9 中、クロロフィル *a* 濃度を見ると縦縞が多数見られ、ほぼ毎日増減を繰り返しており、その増減は日射量と同じ時間間隔で繰り返されているのが分かる。図-10 は観測された全データの日射量とクロロフィル *a* 濃度の散布図である。クロロフィル *a* 濃度のピークは日射量の低いときに見られる。

図-11 は、黒潮系暖水の流入が無い日のクロロフィル *a* と日射量の変化である。日射量が最大となる 12 時頃にクロロフィル *a* 濃度は最小値をとっている。

このような日射量とクロロフィル *a* 濃度の関係は夜間に表層、昼間に底層へ鉛直移動する特性を有する渦鞭毛藻類の *Ceratium fusus* の特徴によるものと推定される（東海大学出版会編（1975））。

4. おわりに

本研究では湾口を横断するフェリーに海水の連続観測装置を設置し、2003 年 12 月 22 日～2004 年 3 月 11 日にかけて観測を実施し、冬季における東京湾口の水質の長期連続変動を調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 黒潮系暖水の東京湾口への流入が 1～2 週間周期で見られ、流入の大きいときの塩分の最大値は 34.6 PSU を越えていた。黒潮系暖水流入時には、久里浜側と金谷側で塩分、水温、クロロフィル *a* 濃度が大きく異なっていた。

(2) 黒潮系暖水は、流入する場合金谷側から流入するが、流出するときには金谷側にそって流出する場合と航路中央部に残りながら衰退する場合とがある。

(3) クロロフィル *a* 濃度は毎日増減を繰り返しており、その増減は日射量と同じ時間間隔で変化していた。日射量が最大となる 12 時頃にクロロフィル *a* 濃度は最

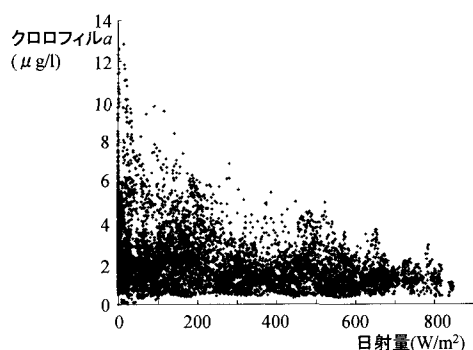


図-10 観測された全データの日射量とクロロフィル *a*、日射量の観測期間全データの長期変動

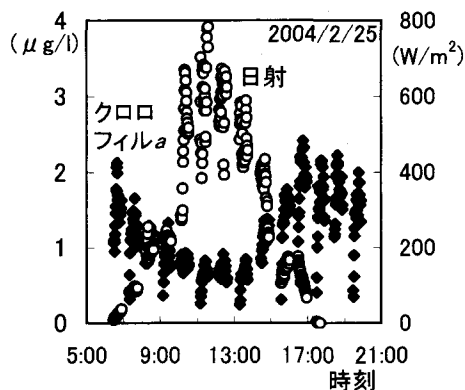


図-11 クロロフィル *a* 濃度と日射量の日変化

小値をとっており、夜間に表層、昼間に底層へ鉛直移動する *Ceratium fusus* の特徴によるものと推定される。

謝辞：本研究を実施するにあたり、東京湾フェリー株式会社赤木常務、樋口海務部長、黒川課長、“かなや丸”船長、機関長をはじめ多くの方々のご協力を頂いている。ここに深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 金子 新・荒井正純・江田憲彰・杉本隆成・中嶋秀夫・袁 宙・鄭 紅・朱 小華・山根将司：商船を利用した西太平洋の ADCP 観測，海の研究，Vol. 7, No. 6, pp. 357-368, 1998.
- 原島 省（1997）：フェリープラットフォームの特性と展開，月刊海洋 29, 101-108.
- 日向博文・八木 宏・吉岡 健・灘岡和夫（2000）：黒潮暖水波及時における冬季東京湾湾口部の流動構造と熱・物質フラックス，土木学会論文集，No. 656/II-52, pp. 221-238.
- 松本輝寿・金子安雄・寺尾 健・川島 毅（1974）：海水交流に関する現地観測，第 21 回海岸工学講演会論文集，pp. 291-296.
- 東海大学出版会編（1975）：海洋科学基礎講座 6，海洋プランクトン，p 240.