

東京湾口フェリーによる 流況・水質・気象の自動計測手法の開発

DEVELOPMENT OF THE CURRENT – WATER QUALITY –
METEOROLOGICAL MONITORING SYSTEM
USING THE FERRY ACROSSING THE TOKYO BAY ENTRANCE

鈴木高二朗¹・加藤英夫²・下司弘之³・亀山 豊⁴
Kojiro SUZUKI, Hideo KATOH, Hiroyuki GESHI and Yutaka KAMEYAMA

¹正会員 工修 (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部主任研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海洋開発研究室長

³正会員 工修 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所長

⁴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

Long term environmental monitoring at Tokyo bay entrance is important in order to control the current and water quality in Tokyo bay. We installed the environment observation system in a ferry boat which crosses the Tokyo bay mouth. The system is composed of ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), water quality and meteorological observation system.

In this paper, the property of this observation system and the obtained data are shown.

Key Words : Tokyo bay entrance, Ferry, ADCP, water quality, Kuroshio

1. はじめに

(1) 研究目的

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、海底面等多くの境界があるが、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、物質の流出入や水質の変動メカニズムを明らかにする必要がある。

湾口の環境計測は、これまでも松本ら¹⁾をはじめとして数多く行われており、最近では日向ら²⁾に示されるような黒潮系暖水の東京湾への波及効果や外海水の中層貫入といった湾口の特徴的な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。フェリー等の商船を用いた観測としては、瀬戸内海の“さんふらわああいぼりー”³⁾や対馬海峡の“かめりあ”があり、フェリーを用いた長期連続的な環境計測が有効であることが示されている⁴⁾。

そこで本研究では、東京湾口を往復しているフェ

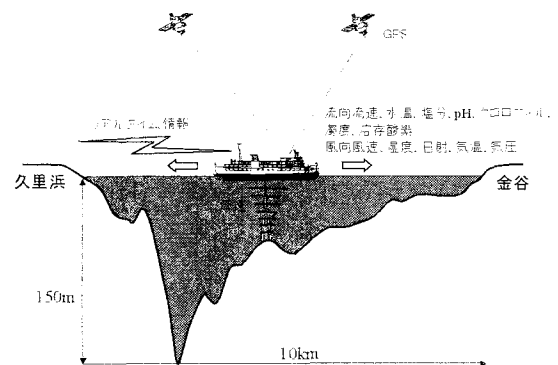


図-1 観測システムの概念図

リーに環境測定装置を設置し、東京湾の連続的なモニタリングを行うこととした。

(2) 計測システムの概要

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間約10kmを片道約30分（船速約6m/s）で結んでおり、毎日AM6:20~PM7:20にかけて

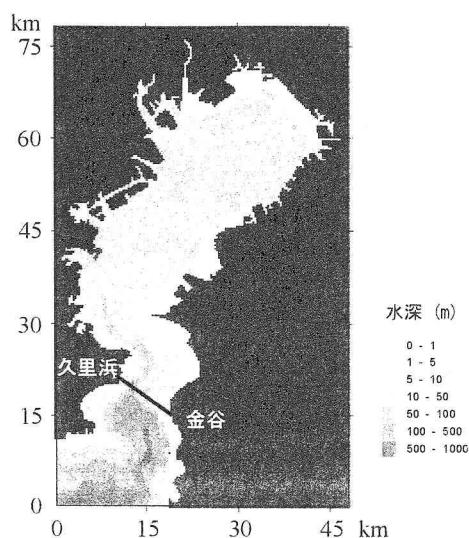


図-2 東京湾の水深とフェリー航路

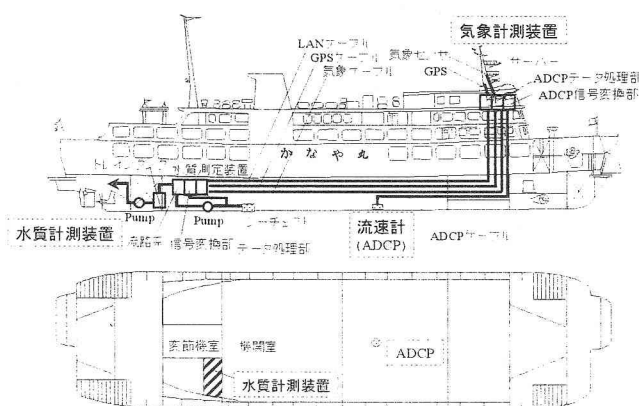


図-3 ADCP, 水質, 気象観測装置の設置図

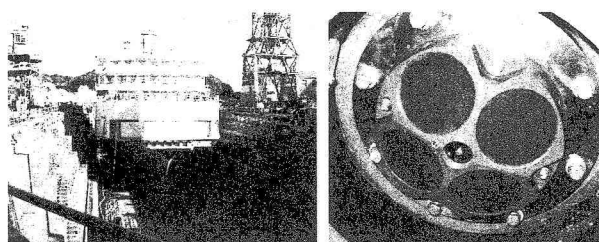


写真-1 かなや丸

写真-2 ADCP



写真-3 海水分析装置

写真-4 気象計測装置

約7往復している。

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渓谷の上を横切っており、約10km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水深は約170m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り、写真-1, 2, 3, 4はそれぞれドック入港時の“かなや丸”、ADCP、海水分析装置、気象計測装置である。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ダーマスト上に設置されている。取得されたデータはブリッジ内のサーバーへ転送され、久里浜港に着岸中に携帯電話で陸上のサーバーへ転送されるしくみになっている。

2. 流況計測

(1) 計測装置 (ADCP)

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300kHzのものであり、船上のブリッジ内に設置されたPC、ADCPデッキボックス、GPS受信機 (Leica製MX421) および船底に設置された4個の音響発振器からなっている。船底型ADCPは、独自のコンパスを持たないため、フェリーに既存のジャイロコンパス (トキメック社製TG-5000) からの方位信号を受けて流速成分を求めている。海水の対地流速は、ADCPで得られる各層の流れの対船流速から、海底からの反射波から得られる船速を差し引くことで得ている (ボトムトラックリフェレンス)。なお、フェリー航路の最大水深は約170mであるため、ボトムトラックリフェレンスが可能となっている。

なお、発振周波数300kHzの今回のADCPによる計測可能最大水深は175m、ボトムトラックが可能な最大水深は260m、音響発信器のビーム角 θ は 20° である。

フェリーの喫水は3.4mであり、流速の鉛直プロファイルは、水深10.59mの位置から層厚4mで約40層計測している。最初の1層目の中心は12.59mである。流速は0.5s間隔で計測されているが、解析ではそれらの流速値を20s平均し、20s間隔で出力した値を用いている。船速は約6m/sであるので、約120mピッチで、1航海あたり80点ほどのデータが得られる。

通常ADCPでは、サイドローブの影響で海底面と表層で測定不能域ができる。測定可能水深 D は船底直下の水深を D_b とすると、

$$D = D_b \cdot \cos(\theta) \quad (1)$$

で表される。本研究の場合、海底面から水深の約6%の部分が測定不能域となっている。

(2) 東京湾口での流況計測の特質

a) 湾口部での水深の急変

湾口部では水深が急に深くなっており、フェリー航路付近での水深は最大170m近くにまで達している。図-4は、2003年4月25日の航跡図である。普段は久里浜-金谷を結ぶ直線的な一定の場所を通っている

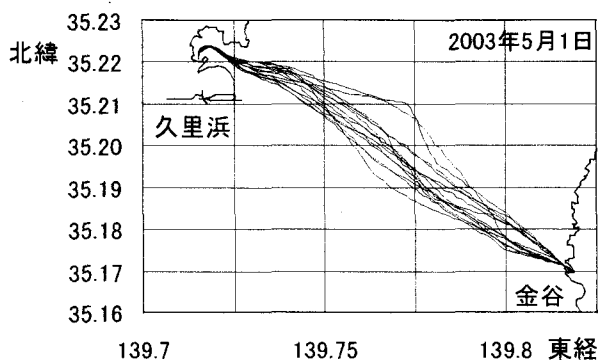


図-4 2003年4月25日の航跡図

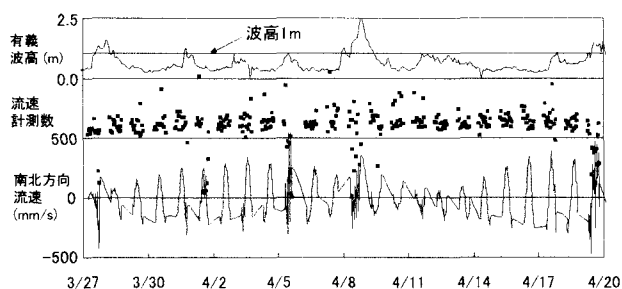


図-5 “あしか島”で計測された有義波高とADCPで計測された流速計測数と南北方向断面平均流速

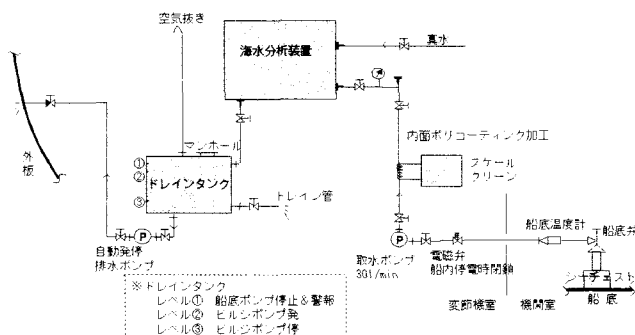


図-6 船底配管図

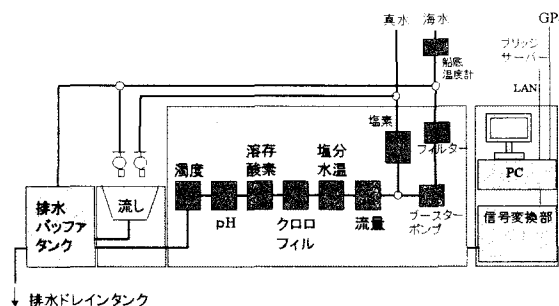


図-7 海水分析装置概略図

が、東京湾口を出入りする船舶を避けるため、航路がずれることがある。なお、フェリーは金谷港に向かう時は南側（外海側）、久里浜港に向かう時は北側（湾奥側）を航行するため、金谷港に向かう時の方が全般に深く、最も深いときの水深は約170mとなっている。

b) 荒天時の計測

荒天時には、風や波の影響で船が揺れやすく、得られた流速値には誤差が大きく乗っており、流況計測自体ができない場合があった。図-5は、久里浜港の入り口にある“あしか島”で取得された有義波高とADCPで計測された流速計測数と南北方向の断面平均流速である。流速は最も深い場所で1箇所あたり40層分のデータが得られるが、流速計測数はADCPのPercent Goodが50以上だった場合の一航海あたりの計測数の総数である。有義波高が1mを越えると、流速の計測数が小さくなって流速も乱れており、誤差が大きくなっているのが分かる。

3. 水質気象計測

(1) 水質計測装置の配管

図-6は、船底シーチェストから表層の海水を採取し、排出する装置の配管図である。変節機室（軸室）の取水ポンプによって機関室下部のシーチェストから海水を取水する。取り込まれた海水は、分析装置へ送られた後、ドレインタンクに一旦排水され、ドレインタンク内の水位がある高さまで上昇すると、自動発停の排水ポンプが作動し、船外へ排水される。海水分析装置には、海水の他、船から真水を供給している。なお、安全面から“かなや丸”機関長に、朝、船底バルブを開けて取水排水ポンプの電源を入れ、夜、電源をポンプの電源を落として船底バルブを閉めるという操作を行っていただいている。

図-7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・クロロフィル蛍光光度・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6m/sであるため、約360m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つは流し、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いる。分析装置流路に流れ込んだ海水は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ブースターポンプを経由して約1.5l/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。

(2) 時定数を高めるための配管の設計

東京湾口における熱塩フロントなどの空間的に複雑な現象を捉えるためには、空間的に高密度にデータをサンプリングする必要がある。しかし、“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。そのためには、1) 太い配管で分析装置までの流量を多くする。2) 細い配管でシーチェストからの分析装置までの流速を上げる。3) シーチェストから分析装置までの距離を短くする等の方法が考えられる。

1) は、ポンプが大きくなり配管径も太くなるために管内で古い水と新しい水のコンタミが発生して良いデータが取得できない。2) は、多少流量が減るがコンタミが少なくなる。そのため、本分析装置では、2), 3) のように分析装置設置場所に近いシーチェストから分岐して30l/minの流量で25A（やや細めの内径）の配管を用いて高流量、高流速で分析装置まで海水を導くものとした。

分析装置流路内のセンサーの取り付け方法も時定数を高めるためには重要な要素である。センサー装着方法として、a) 大きなタンクを用意して総てのセンサーを内部に挿入、b) 各センサーを細い配管材料を用いて流路に配する等がある。a) は、タンク内に大量の水が入るために古い水と新しい水が入れ替わり難く、良いデータが得られない。b) はセンサーマウントにコストがかかるが、各センサーのフローセル容量を小さくし、かつセンサー間の距離を短くすることによって時定数が高められコンタミも少ない。そこで、方法b) を採用することとした。

(3) 配管内部およびセンサーの汚れ防止機能

a) 配管のポリライニング加工

配管内部は時間経過とともに内部にスケールが溜まり、内部抵抗が増加して本来の吐出流量が得られなくなる。このことは高価なチタン管を使用しても安価な鋼管を使用しても同じである。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た。

b) スケール付着防止装置

スケール付着を極力防ぐ、さらに付着しても剥離しやすくなる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。なお、これによって植物プランクトンが死滅していないことを、蛇口から採水した海水のサンプルで確認している。

c) 生物付着防止液の注入（久里浜金谷入港時）

センサー自体の汚れを防ぐ意味で、GPS信号を検知して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た。

(4) 水質・気象センサー類の仕様

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。フィルター（メッシュ5mmφ、最大流量1.6l/min、材質PPおよびアクリル、大きさ316H×128mmφ）、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0.03~75μg/l、感度0.03μg/l、

Excitation波長450nm、Emission波長685nm、サンプリングレート6Hz、温度補償0~30℃、出力0~5VDC、大きさ16.2×6.0cmφ）、CTセンサー（FSI製、Excell Thermosalinograph：水温測定範囲-3~+45℃、水温精度0.010℃、電気伝導度測定範囲0~90mS/cm、電気伝導度精度0.025mS/cm、塩分2~42PSU、塩分精度0.030PSU、大きさ190.5φ×20.3L×260.4Hmm）、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0.07~200%飽和、精度：±0.15%FS、大きさ：24φ×235H mm）、pHセンサー（AMT製：測定範囲2~11pH、精度±0.05pH、大きさ30φ×240Hmm）、光後方散乱濁度計（Wetlabs製、LSS-60：ダイナミックレンジ1x unit~7.5NTU on high gain；~25NTU on low gain；3x unit~2.25NTU on high gain；~7.5NTU on low gain、分解能<0.03%FS、大きさ：32φ×127mm）、流量センサー（測定範囲0.5~3l/min、精度±3%FS、大きさ80W×400D×62Hmm）、船底温度センサー（Sea-Bird Electronics製、SBE38：測定範囲-5~35℃、精度±0.001℃、安定性：±0.001℃/6ヶ月、大きさ139.121φ×220H mm）。

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0.5~60m/s、精度±0.3m/s）、風向計（測定範囲0~360°、精度±3°）、相対湿度温度計（温度測定範囲-40~+60℃、精度±0.3℃；湿度測定範囲0~100%、精度±2%）、気圧計（測定範囲600~1100hPa、精度±0.3hPa）、日射計（計測レンジ2000W/m²）である。

4. 観測結果

(1) 観測の一例（黒潮系暖水の流入）

図-8は、2004年1月21日AM11:15~11:45の流向流速データ、塩分、水温、クロロフィルaであり、冬季の東京湾口における特徴的な黒潮系暖水の流入を示すものである。塩分、水温、クロロフィルaのいずれもが、久里浜港から約3.5km地点で大きく変化しており、久里浜と金谷で水温は約4℃も異なっている。高温高塩分な黒潮系暖水が金谷側から流入していることを示すものである。クロロフィルa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。水質・気象データは

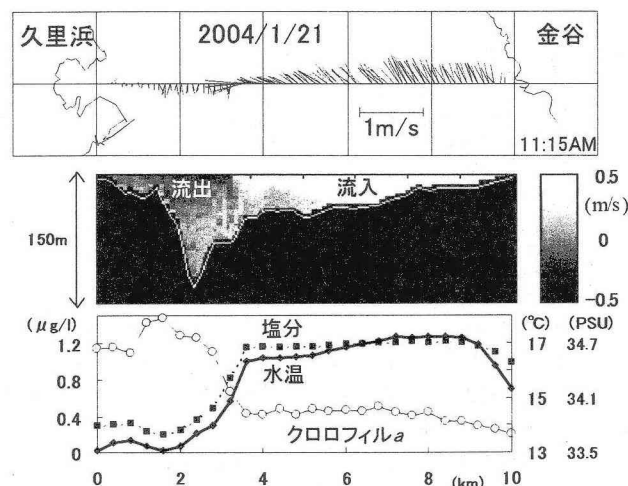


図-8 観測の一例（黒潮系暖水の流入）

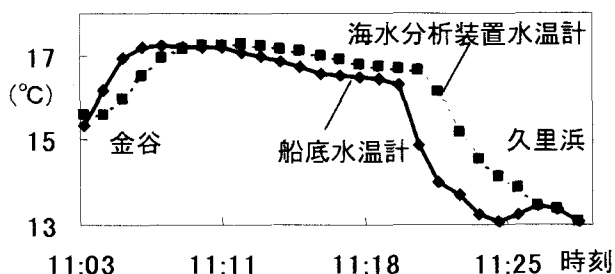


図-9 船底水温計と海水分析装置の水温計との比較

1分間隔(約360m間隔)で計測しているため、このような複雑な現象を捉えることが可能である。

図-9は、このときシーチェスト付近で計測された船底水温と分析装置で計測された水温の比較である。図-7中の分析装置に海水が送られるまでに2分間ほどタイムラグがあるのが分かる。また、全体に分析装置で計測された水温は機関室や船底取水ポンプを通る間に高くなっている。したがって、水温は船底水温での計測結果を用いるのが良いことが分かる。また、分析装置で計測された塩分水温、クロロフィルa、pH、D0は、2分間(約720m)前の位置の水質データとして取り扱うのが良い。図-8では、このことを考慮して水質データは1分間ほどずらして表示している。

一方、光後方散乱濁度計は光路長を必要とするため、直径15cm、長さ50cmほどの容器に海水を溜めて計測しているため、必ずしも1分間隔のデータにはなっていない。そのため、濁度の精度は一航海の平均程度であると考えられる。

(2) 平均流速の潮位データとの比較

図-10は、ADCPで計測された南北および東西の断面平均流速と久里浜港内で計測された潮位の微分値との比較である。ともに相関が高く、ADCPによって精度良く流向流速が得られているものと推察される。

(3) 水質の長期観測結果

図-11は、12月22日～3月13日の塩分、水温、

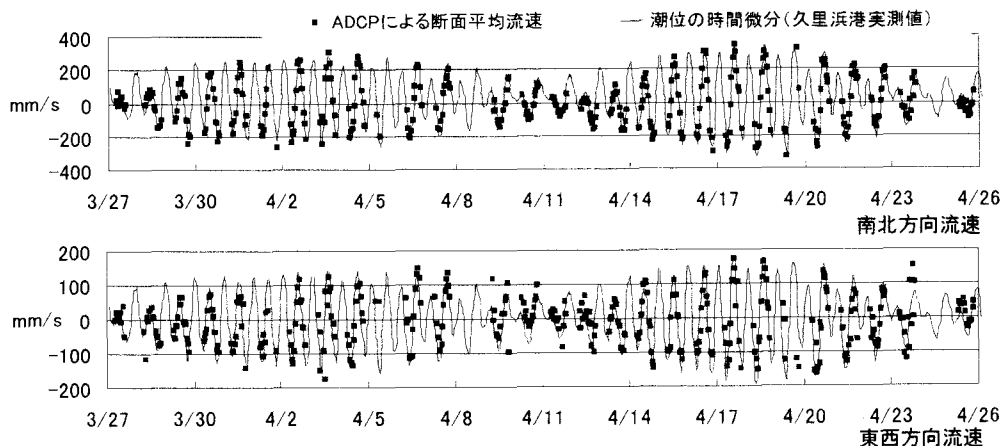


図-10 潮位(久里浜港内の観測値)の微分値に比例定数をかけたものとADCPで計測された南北方向、東西方向の断面平均流速との比較

クロロフィルa、濁度、pH、D0の1日平均値の変動である。黒潮系暖水の流入は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、クロロフィルa、pH、D0、濁度は塩分水温とほぼ逆相関にあることが分かる。

ただし、pH、D0に関しては、センサーがドリフトしやすく、頻繁に蛇口から採水を行い、クロスチェックをする必要があるものと考えられる。

5. まとめ

1) 東京湾口を往復する東京湾フェリー株式会社所有“かなや丸”に流況・水質・気象を計測する観測装置を設置し、平成15年より観測を開始した。

2) ADCPによる流況計測では、20s間隔(水平方向約120m間隔)、鉛直方向4m間隔で水深160mまでデータを測得することにより、詳細な東京湾口の流況計測が可能となった。ただし、ADCPによる流況計測では、湾口の急な水深の変化や航路の変動の他、荒天時の船の揺れ等による欠測等、観測が難しくなる場合がある。特に荒天時には“あしか島”の有義波高が1mを越えると、データの信頼性が悪くなる。

3) ADCPによる断面平均流速値と久里浜港で計測された実測潮位の微分値との比較を行ったところ、荒天時を除いて相関が高いことが分かった。

4) 水質計測装置では、表層の塩分、水温、クロロフィルa、濁度、pH、D0を、気象計測装置では風向風速、気温、湿度、日射を、1分間隔(水平方向約360m)で計測することが可能である。これにより、冬季黒潮系暖水の流入など、空間的に変動の激しい現象も計測することが可能である。

5) 冬季のクロロフィルa、pH、D0、濁度は塩分水温とほぼ逆相関にあることが分かった。

謝辞：本研究の遂行にあたって、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。また、水質分析装置の設計に関しては株式会社CT&Cの柏俊行氏、柏光利氏、太田長樹氏

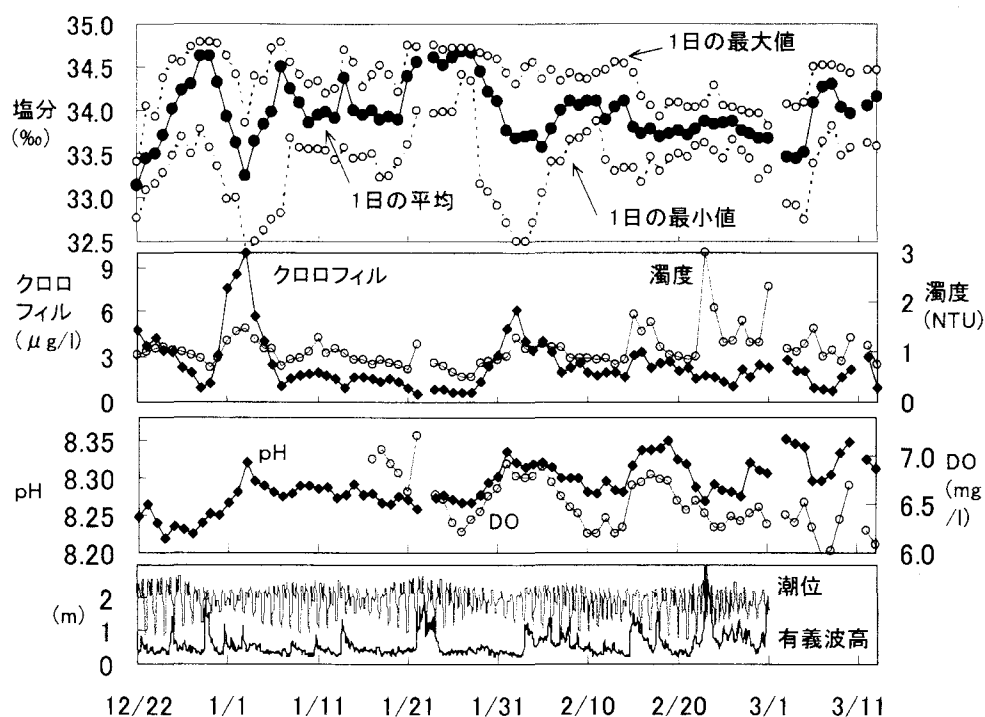


図-11 2003年12月22日～2004年3月13日の塩分、水温、クロロフィル a 、濁度、pH、DOの1日平均値の変動

の発案によるところが大きい。ここに深甚なる感謝頂いている。また、水質分析装置の設計に関しては株式会社CT&Cの柏俊行氏、柏光利氏、太田長樹氏の発案によるところが大きい。ここに深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松本輝寿, 金子安雄, 寺尾 健, 川島 毅: 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, 1974.
- 2) 日向博文, 吉岡 健, 八木 宏, 灘岡和夫: 冬季東京湾における黒潮暖水波及の実態解析, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1001-1005, 1999.
- 3) 原島 省: 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, 1997.
- 4) 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.