

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1075 March 2004

フェリーによる東京湾口の流況計測

鈴木 高二朗
加藤 英夫

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	2
1. はじめに	4
2. 東京湾フェリー航路の特徴と流況測定装置	4
2.1 東京湾フェリー航路の特徴	4
2.2 流況測定装置	4
2.3 フェリー観測の問題点	5
3. 観測結果	7
3.1 流況計測	7
3.2 恒流成分と潮汐成分の分離	9
4. まとめ	11
謝 辞	11
参考文献	11

Currents measurement at Tokyo bay entrance using ferry

Kojiro SUZUKI*

Hideo KATO**

Synopsis

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. Observation data will be used as the bay mouth boundary condition in numerical simulations of Tokyo bay. In order to predict and control the Tokyo bay environment, this observation data will be also used.

In this report, the observation system in the ferry and the data obtained from February to June 2003 are introduced.

Key Words: Tokyo bay mouth, ferry, current measurement, ADCP, harmonic analysis, tidal current, subtidal current

* Senior Research Engineer of Marine Environment and Engineering Department
** Head, Ocean Development Division, Marine Environment and Engineering Department
Independent Administrative Institution, Port and Airport Research Institute, 3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5082 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:suzuki_k@pari.go.jp

フェリーによる東京湾口の流況計測

鈴木高二郎*・加藤英夫**

要 旨

東京湾口での長期的な環境計測は、東京湾の流況や水質を管理していく上で重要であり、平成 15 年 2 月より湾口を横切るフェリーに環境測定装置（流況、水質、気象測定装置）を設置し、長期連続的な環境計測を開始した。今回のフェリーでの環境計測結果は東京湾の数値シミュレーションを行う上で、湾口での境界条件となり、長期的な東京湾内の環境変化を予測・管理に資するものと考えられる。

本資料では、平成 15 年 2 月に設置した流況測定装置（ADCP）とこれによって得られた平成 15 年 2 月～6 月までの観測結果について述べる。

キーワード：東京湾口，フェリー，流況計測，ADCP，調和分解，潮流，恒流

* 海洋・水工部主任研究官

** 海洋・水工部耐波研究室

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5082 Fax：046-844-1274 e-mail:suzuki_k@pari.go.jp

1. はじめに

長期的な東京湾内の環境変化や護岸・埋立等の工事による環境変化を予測・管理していく上で、東京湾の長期的かつ定常的なモニタリングが必要である。特に、湾口での水質の出入りをモニタリングすることは、東京湾の物質収支に関する情報を得る上で重要であるとともに、東京湾全域の数値シミュレーションを行ううえでその高度な境界条件となる。

湾口の環境計測は、これまでも松本ら(1974)をはじめとして数多く行われており、最近では日向ら(2000)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。しかし、これらの観測は長くても1ヶ月程度であり、長期連続的に湾口の環境計測を行い、その環境変動を調べた例は見あたらない。

一方、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”(原島, 1997)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非常に有効であることが示されている(金子ら, 1998)。東京湾においてもフェリー等の定期的な商船を用いれば、長期連続的な環境計測を行うことが可能である。

そこで本研究では、東京湾口を1日約7往復で運行する東京湾フェリーに環境測定装置を設置し、東京湾の長期連続的なモニタリングを行うこととした。本資料では、2003年2月より先行的に実施した ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) による流況観測について述べる。

なお、通常、流況データは調和分解によって潮汐成分と恒流成分に分離されることが多いが、東京湾口の流況解析は湾口の複雑な地形により解析が難しくなっている。例えば、湾口では相模湾から湾奥にむけて、水深が400mから一気に20m程度まで浅くなっている。また、観音崎と富津岬との間の距離が短いため、渦ができ、湾口での流れを複雑にしている。本研究でのフェリーの航路もこれらの複雑な影響を受けており、ここではその問題点と解析方法について述べることにする。

2. 東京湾フェリー航路の特徴と流況測定装置

2.1 東京湾フェリー航路の特徴

本研究のフェリーは3隻ある東京湾フェリーのうちの1隻、“かなや丸”(図1)と呼ばれるフェリーである(表1)。

図2は東京湾の水深とフェリーの航路である。フェリーは神奈川県の大磯港と千葉県の大網浦港を船速約6m/s、片道約30分で結んでおり、毎日AM6:20~PM7:20

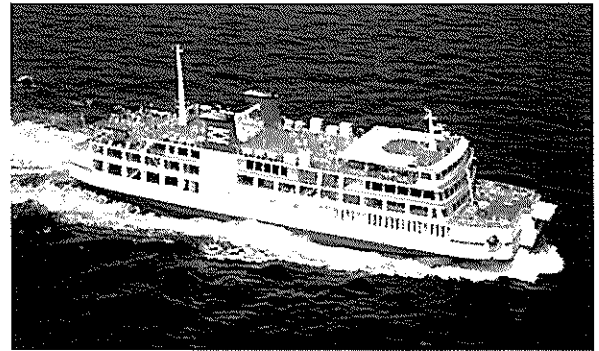


図1 東京湾フェリー“かなや丸”

表1 東京湾フェリー諸元

船名	総トン数	全長(m)	速力(km/h)	定員(人)	車両数(台)	就航日
かなや丸	3,580	79.0	24	580	100	1992年4月
しらはま丸	3,260	79.1	24	580	100	1989年12月
くりはま丸	2,759	78.8	24	570	100	1986年7月

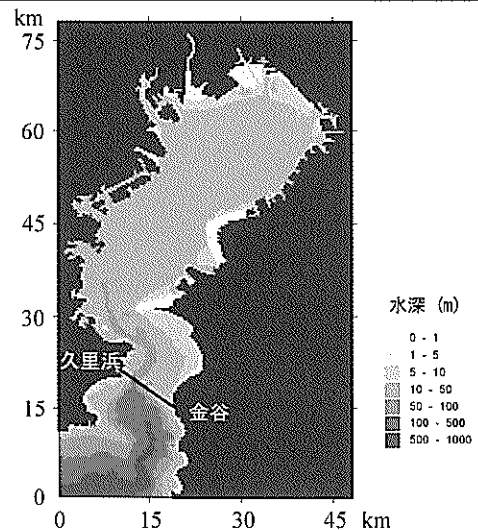


図2 東京湾の水深とフェリー航路

にかけて約7往復している。

2.2 流況測定装置

今回フェリー船底に設置した ADCP 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。

図 3 は、フェリーへの ADCP と水質、気象測定装置の設置図である。ADCP は船底の中央部に設置されており、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研究所のサーバーへ転送されるしくみになっている。

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 8.6m 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 10.6m 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(約 10km)あたり 80 点ほどのデータが得られる。

2.3 フェリー観測の問題点

(1) 航路の変動と複雑な海底地形

湾口部では水深が急に深くなっており、航路付近での水深は最大 200m 近くにまで達している。水深の急変は、フェリー航路が常に一定でないため、データの取り扱いを難しくしている。図 4(a), (b) は、それぞれ 2003 年 4 月 25 日と 5 月 4 日の航跡図である。普段は図 4(b) のように比較的一定の場所を通っているが、東京湾口を出入りする船舶を避けるため、図 4(a) のように大きく航路がずれることがある。大きく航路をずれた場合には、データを棄却する必要がある。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 160m となっている。

(2) 海底面と表層での流速測定不能域

通常 ADCP では、サイドロープの影響で海底面と表層で測定不能域 D ができ、船底直下の水深を D_B とすると、

$$D = D_B \cdot \cos(90^\circ - \theta) \quad (1)$$

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。

(3) 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

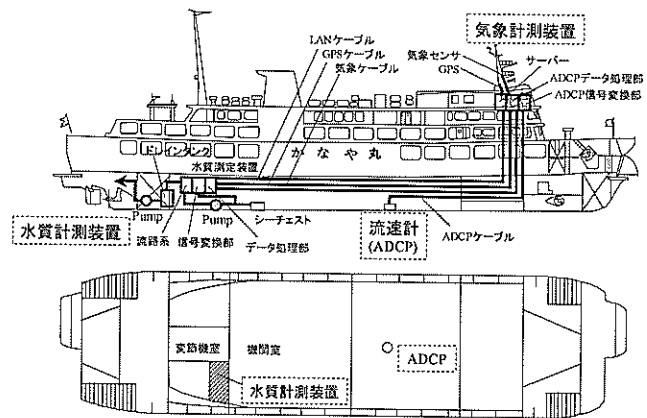


図 3 ADCP, 水質, 気象観測装置の設置図

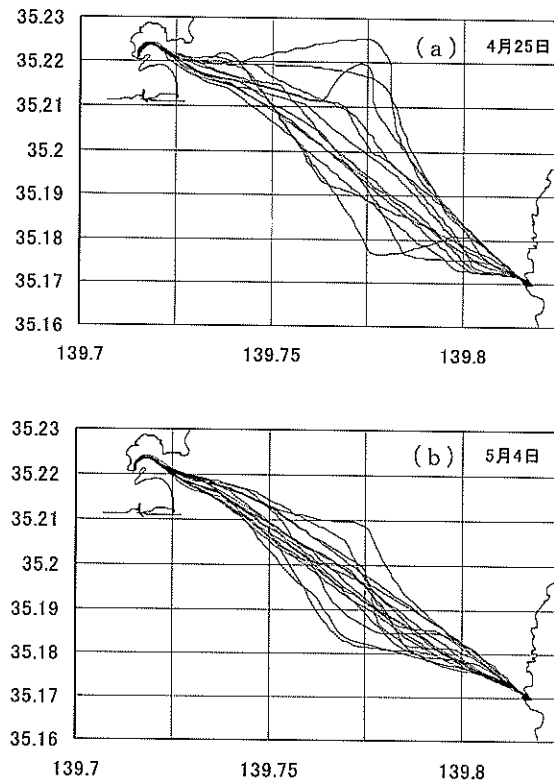


図 4 フェリー航跡図

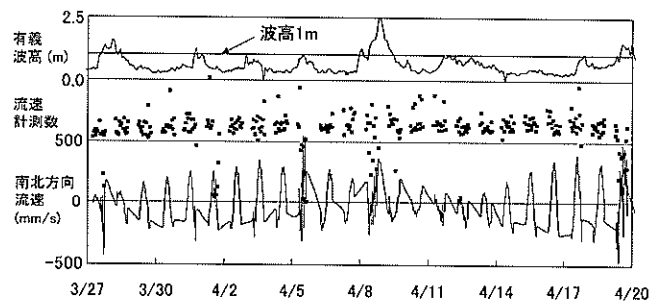


図 5 波高と南北方向断面平均流速

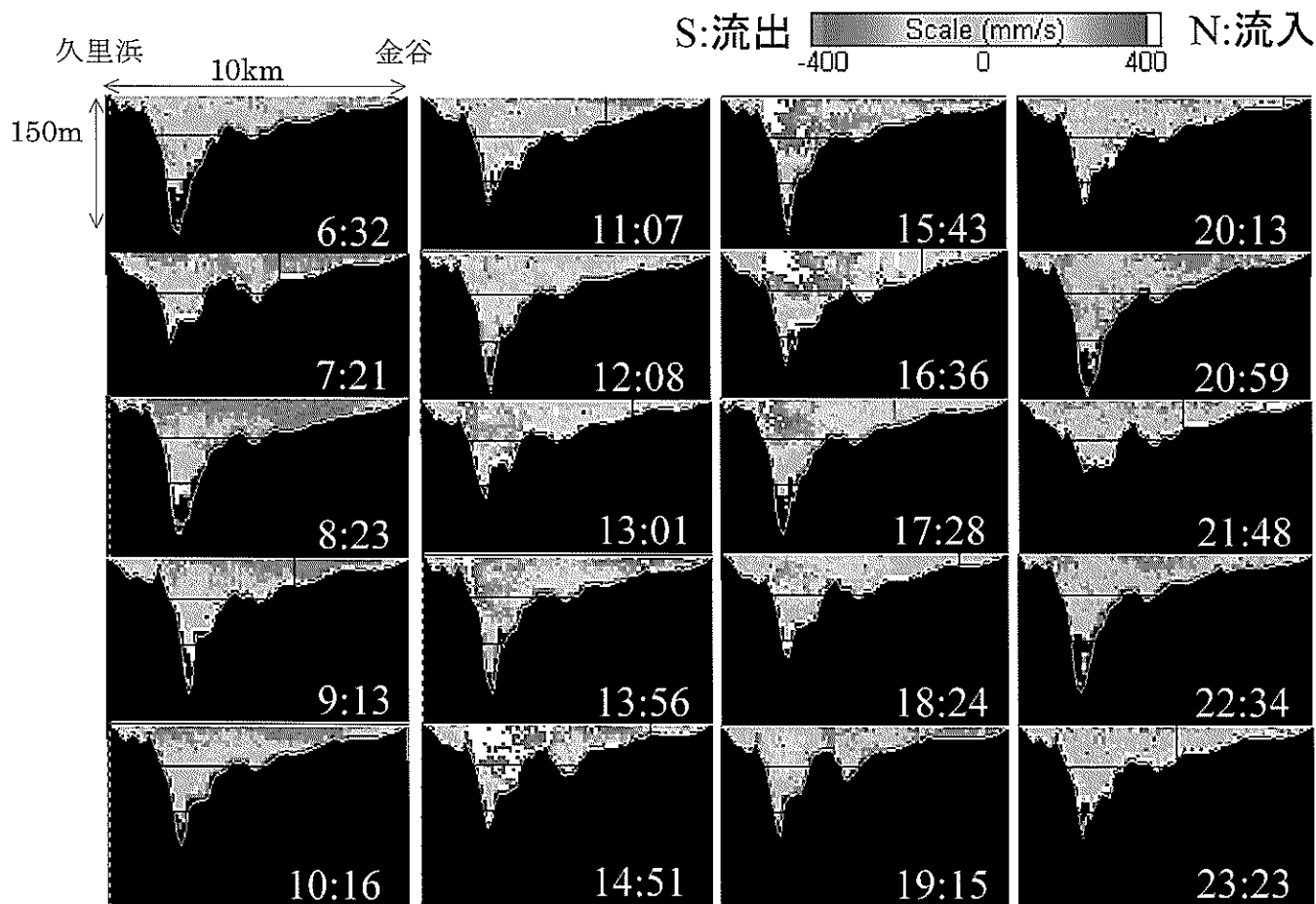


図6 南北方向流速の断面分布 (2003年5月4日)

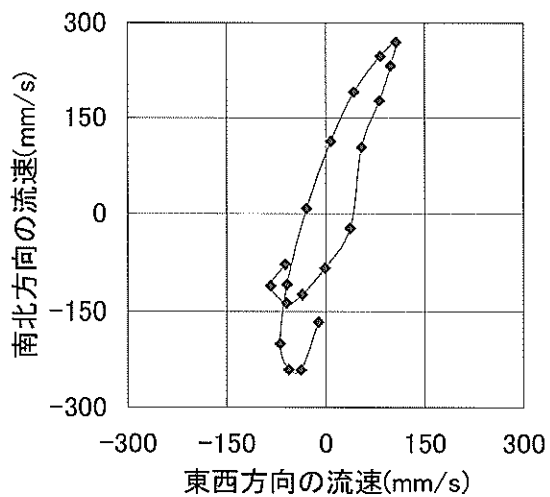


図7 断面平均流速の時間変化 (2003年5月4日)

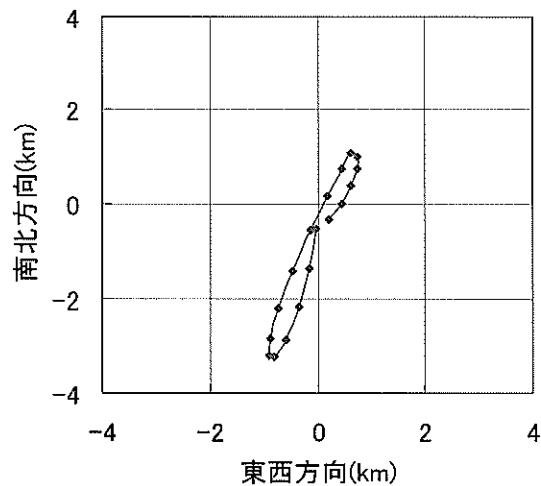


図8 断面平均流速を積分して求めた水塊の軌跡 (2003年5月4日)

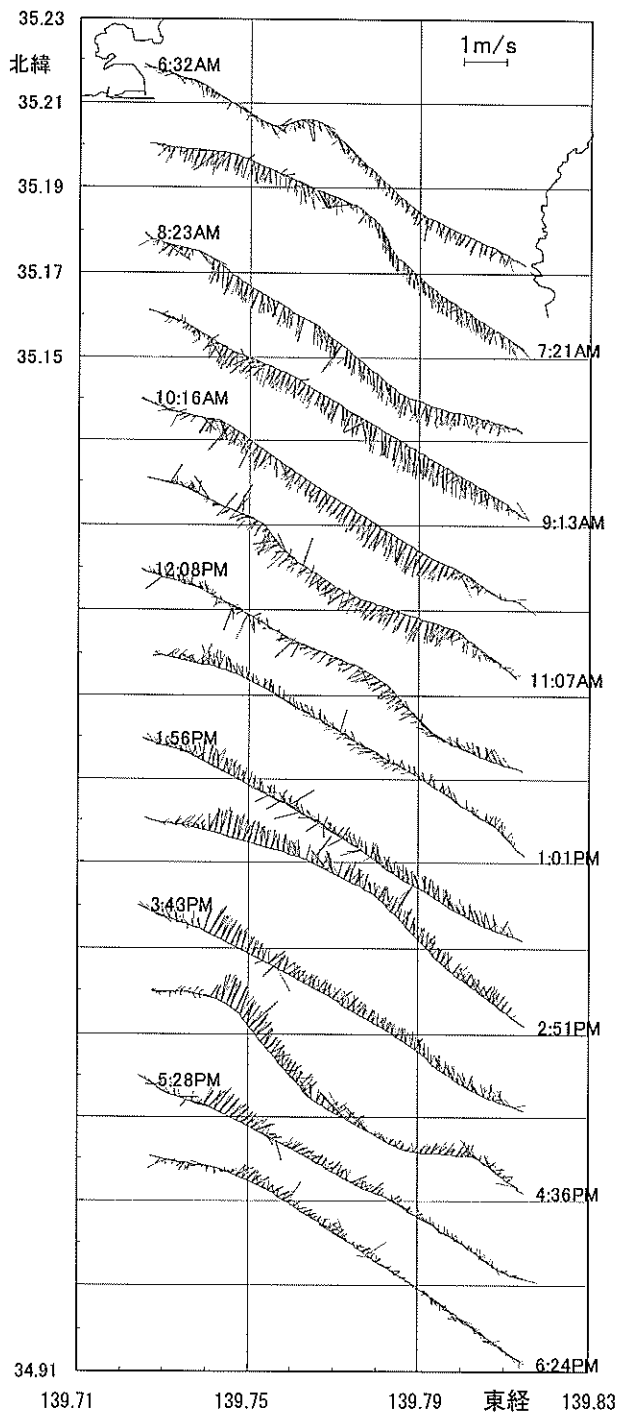


図9 航跡図と表面流速ベクトル図(2003年5月4日)
(赤:-10.6m, 青:-14.6m, 緑:-18.6m)

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もあった。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 で得られた断面の NS 方向平均流速を比較したものである。有義波高が 1m を越えると、流速の誤差が大きくなっており、今後の解析では、有義波高 1 m 以上の条件で計測された

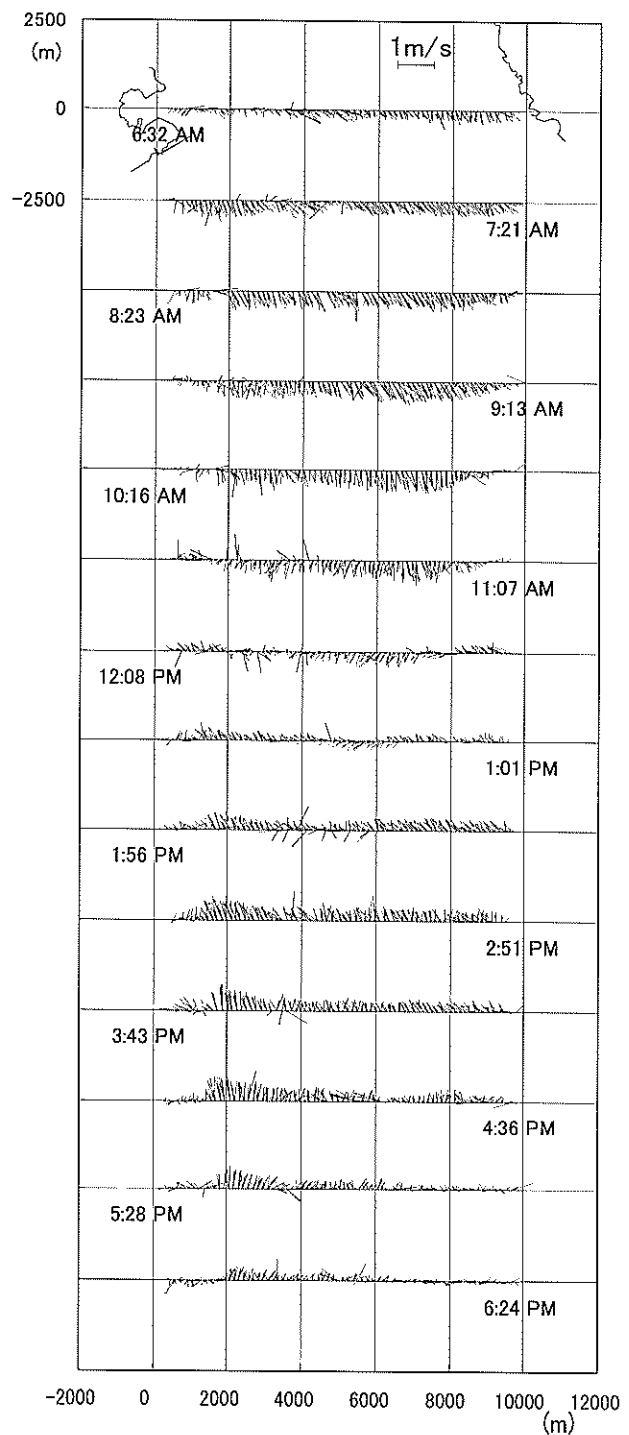


図10 表面流速ベクトル図(久里浜と金谷を結んだ直線上に図9の流速ベクトルを射影した図)

データを棄却することにした。

3. 観測結果

3.1 流況計測

(1) 大潮時の流況計測の一例(2003年5月4日)

図6は、2003年5月4日に得られた断面流速分布であ

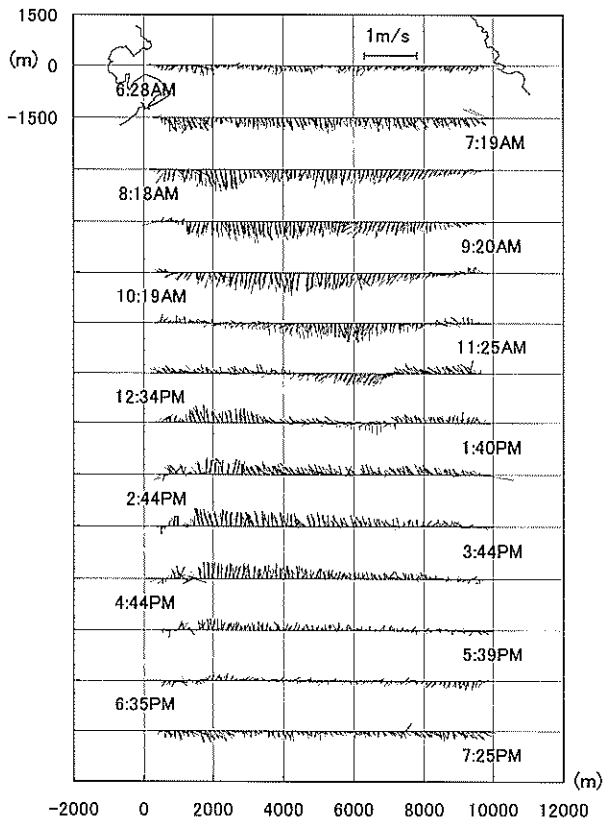


図11 航跡図と表面流速ベクトル図(2003年4月4日)

り、流速の南北成分の分布である。青は東京湾から外海へ向かう南向きの流れ、赤は外海から東京湾内に流入する北向きの流れである。この日は連休中であり、6:32~23:23の間、10往復のデータが得られている。

流出時の最大流速は金谷よりで最大0.5m/s、流入時は久里浜よりで最大0.5m/sの流速となっている。この日の流れは流出時に金谷側から流出し、流入時には久里浜側から流入する傾向にあった。

図7、図8は南北方向、東西方向の流速値の断面平均をとって得た流速の時間変化とこれを時間軸に積分して求めた水塊の軌跡である。平均流速は最大約0.3m/sであり、1潮汐あたり約5km、水塊が往復運動しているのが分かる。流れは流入時に北北東向きに、流出時に南南西向きに流れており、東京湾口の地形に沿って流れている。また、流れは時計回りで、流速、水塊の軌道、ともに楕円を描いているのが分かる。

図9は航跡と表層流速ベクトル図であるが、航跡が曲がっていて分かりにくい。そこで、フェリーが一定の基準線(東経139.7234°、北緯35.221°の久里浜港と東経139.8159°、北緯35.1712°の金谷港を結ぶ直線)上に航行すると考えて、この基準線に流速ベクトルを射影さ

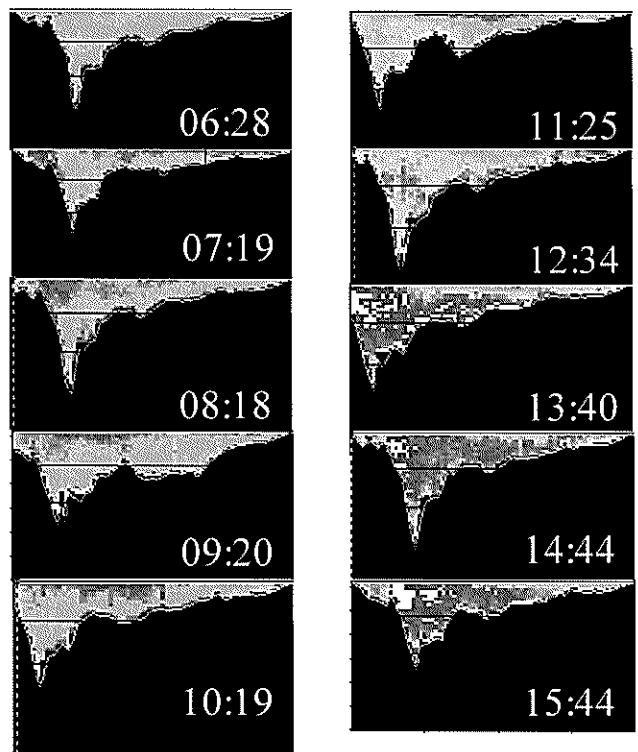


図12 断面流速分布(2003年4月4日)

せて、図10のようにグラフ化した。実際にはこの基準線から1km以上離れて航行している場合もあり、数値計算の境界条件として用いる場合には、注意が必要である。

図10を見ると表層の流速ベクトルの変化がよく分かる。12:08頃、中央部での流れの向きは外海に流出する向きであるが、徐々に久里浜側に向き、13:56頃には逆転して湾奥に向かっており、湾口部で時計回りの渦ができていたのではないかと考えられる。また、12:08頃のデータを見ると、中央部での流れはまだ外海に流出する向きであるのに対し、久里浜側と金谷側の陸付近の流速は既に反転しており位相が速い。

中央部の流れの動きが、その周りに対して位相が遅れているのは、図6の断面流速分布からも分かる。例えば、AM12:08では、久里浜、金谷側の陸付近の流速だけでなく、海底面近くの流速も湾口中央の流速より全体に位相が速くなっている。

図11、図12は2003年4月4日の大潮の日に見られた表層の流速ベクトルと流速の鉛直プロファイルである。この日も5月4日と同様に、流れは時計回りに動いているとともに、中央部の流速はその周りの流速より位相が遅くなっている。

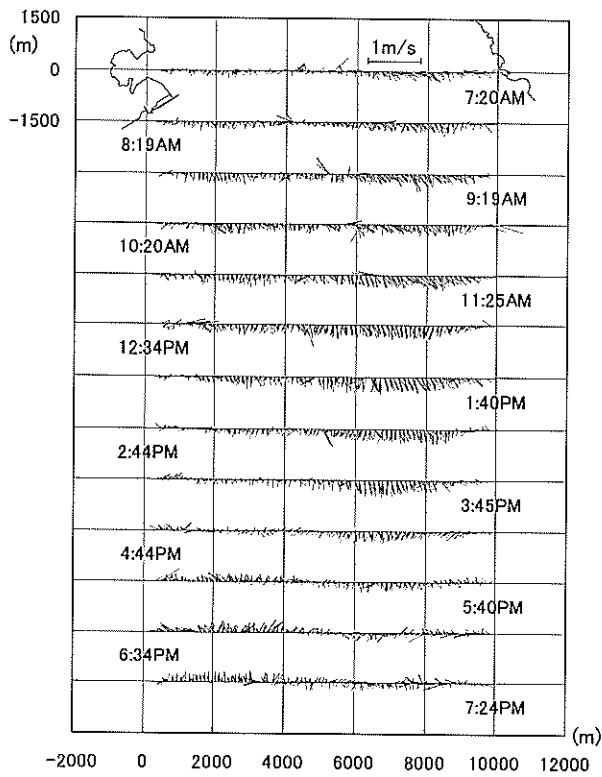


図13 航跡図と表面流速ベクトル図(2003年4月10日)

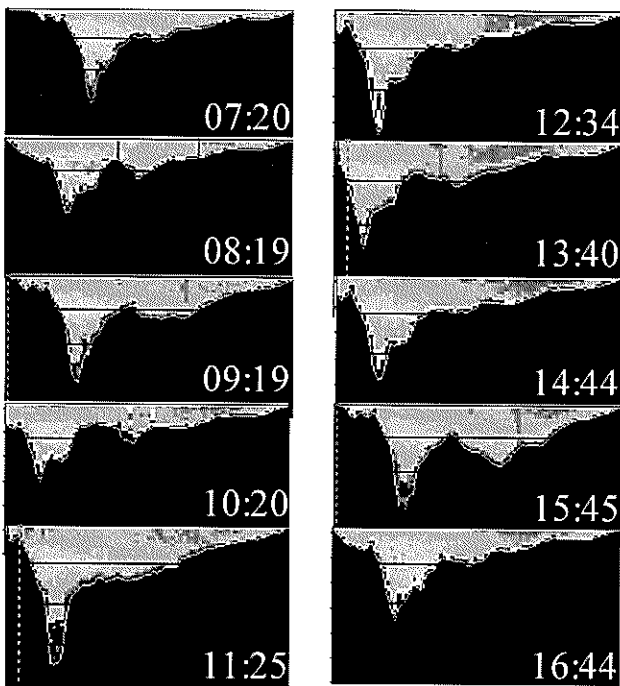


図14 断面流速分布(2003年4月10日)

(2) 小潮時の流況計測の一例(2003年4月10日)

図13, 図14は, 2003年4月10日の小潮の日に見られた表層の流速ベクトルと流速の鉛直プロファイルである。流れの構造は上述, 4月4日, 5月4日の大潮の日と同様であるが, 表層金谷側で流出, 中層久里浜側で流入という傾向にある。

3.2 恒流成分と潮汐成分の分離

3.1 で述べたように, フェリーが航行している東京湾口では, 湾口の地形の影響が強く, 潮汐による流れは時計回りの楕円軌道を描き, 流出時は金谷側, 流入時は久里浜側での流速が速くなっているように見られた。

しかし, 実際の流れは潮汐成分だけではなく, 密度流, 吹送流, 潮汐残差流といった恒流成分が重なりあっているものと考えられる。宇野木ら(1980)によると湾口での潮汐成分と恒流成分の比は3:1であり, 恒流成分が大きいことが分かる。したがって, 湾口の流況をその原因も含めて把握するには, これら潮汐成分と恒流成分を分離する必要がある。

1測点で長期間連続データを得ることができる係留型 ADCP では問題とならないが, フェリーを利用する ADCP 計測では, 計測場所が時々刻々変化するので恒流と潮汐の分離が難しくなる。ただし, 今回のフェリー観測では, ほぼ同一な測線を半日のうちに多数回往復して計測するため, ある程度, 恒流成分と潮汐成分の分離が可能であるものと考えられる。

図15は, 3月27日~5月26日までの南北方向の断面平均流速と, その平均流速を調和分解し, 得られた調和定数から新たに得た流速波形である。かなり良くあっているが, 若干ずれている。ずれの原因としては, 計測が昼間にしか行われていないことが考えられる。

図16は, 昼のみの流速で得た調和定数と昼夜の流速で得た調和定数から再生した流速波形と実測値との比較である。昼のみのデータだけ用いた場合, 昼夜のデータを用いた場合と比較すると若干ずれが見られる。

図17は, 杉山ら(1995)にならい, 潮位の微分をもとに潮汐成分を推定したものである。潮位は久里浜港内の港湾空港技術研究所にある潮位計の値である。潮位の微分に適切な係数かけることにより, 潮汐成分がうまく実測値を表現できているのが分かる。

図18は, 5月4日の断面流速分布から, 図17のようにして得た断面平均流速の推定値を差し引いたものであり, 恒流成分を示している。この日の恒流成分は, 金谷側表層部で流出, 久里浜側中層部から流入, さらに久里浜側下層部から流出していたものと考えられる。

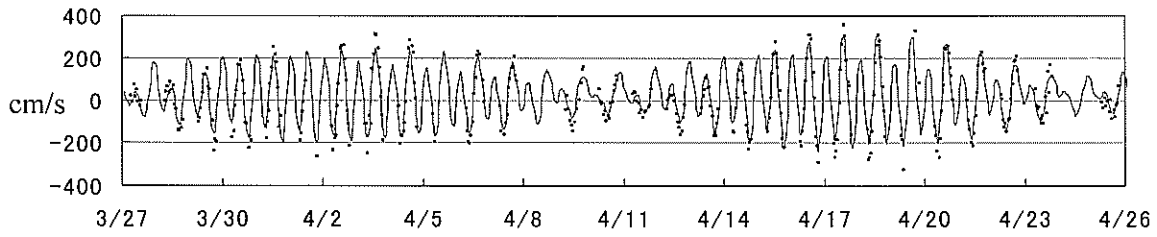


図 15 南北方向の断面平均流速と 3 月 27 日～5 月 26 日間の南北方向流速の調和定数から再生した流速波形

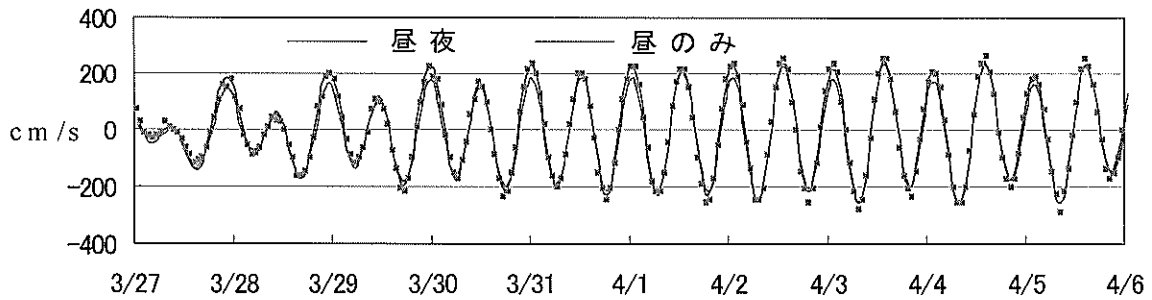


図 16 昼のみの観測値から求めた調和定数と昼夜の観測値から求めた調和定数から再生した流速波形の違い (観測値としては潮位の微分値の 1 時間おきのデータを用いた)

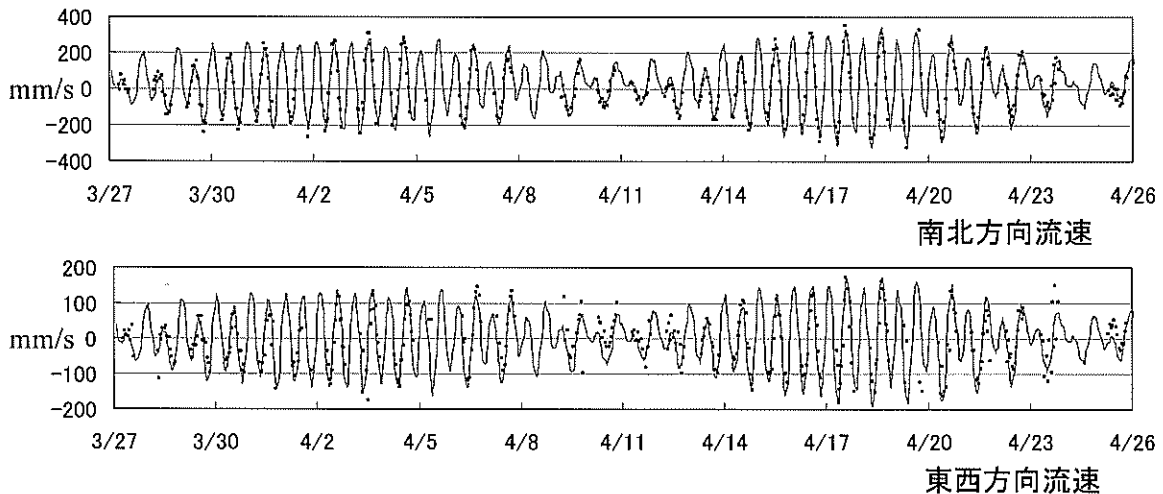


図 17 潮位 (久里浜港内の観測値) の微分値に比例定数をかけたものと、南北方向、東西方向の断面平均流速との比較、調和分解よりも一致度が高い。

4. まとめ

本研究は、フェリーを用いた東京湾口の環境計測 (流況・水質の計測) に関する第 1 報であり、フェリーに設置した船底型 ADCP による東京湾口の流況計測について述べている。

本研究の 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、観測を難しくする要素がある。

ここでは、流速の実測値と、流速の調和分解や実測潮位の微分値との比較を行い、潮汐成分は潮位の微分値からある程度推定できることが分かった。さらに、実測流速分布から潮汐成分の推定値を差し引くことで、恒流成分を求めた。

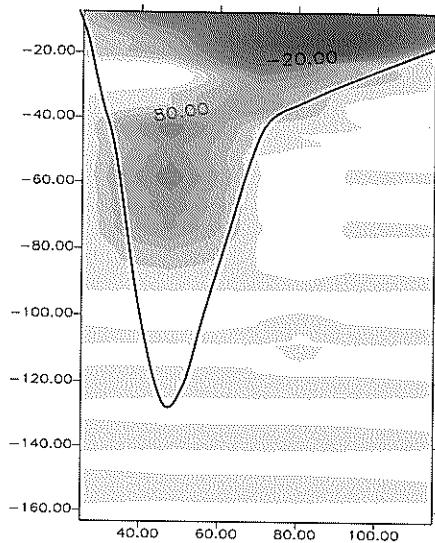


図 18 恒流成分 (2003 年 5 月 4 日, 観測値から潮位の微分値より得られる潮汐成分を差し引いたもの)

謝 辞

本研究は国土交通省関東地方整備局からの受託研究の一部として行ったものであり, 実施にあたっては池上正春所長, 亀山豊課長をはじめの横浜港湾空港技術調査事務所の方々から多大な協力を頂いています。また, (株)東京湾フェリーの樋口和孝海務部長, 黒川清和課長, 運行管理者西澤俊生様, かなや丸の船長をはじめ乗組員の方々から多大な協力を頂いています。また, 国土技術政策総合研究所の日向博文主任研究官より, 貴重なご意見をいただいています。ここに深甚なる感謝の意を表します。

(2003 年 11 月 17 日受付)

参 考 文 献

- 宇野木・岡崎・長島(1980): 東京湾の循環流と海況, Tech. Rep. No.4, 理研海洋物理研究室, 262p.
- 金子 新・伊集院通(1994): ADCP の普及と海洋学の発展, 海の研究, Vol.3, pp.359-372.
- 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 (1998): 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.
- 杉山陽一・藤原建紀・中辻啓示・福井真吾 (1995): ADCP による伊勢湾の流動構造調査, 海岸工学論文集, 第

42 巻, pp.1096-1100.

日向博文・吉岡 健・八木 宏・灘岡和夫(1999): 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.

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.

万田敦昌・磯辺篤彦・松野健・柳哲雄・韓仁盛・神尾光一郎・西田英明・久野俊行・森井康宏・山脇信博・吉村浩・兼原壽生・青島隆(2000): 東シナ海黒潮前線における ADCP 観測結果とこれに適用した潮流分離手法について, 九州大学総合理工学研究科報告, 21 p.343-348, 2000

Arata Kaneko and Toshimichi Ito (1994): 海の研究, Vol.3, No.5, pp.359-372

Julio Candela, Robert C. Beardsley, and Richard Limeburner (1992): Separation of Tidal and Subtidal Currents in Ship-Mounted Acoustic Doppler Current Profiler Observations, Journal of Geophysical Research, Vol.97, No.C1, pp.769-788.

港湾空港技術研究所資料 No.1075

2004. 3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 有限会社 黎明社

Copyright © (2004) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。