

# 東京湾口のフェリー観測データからの潮汐成分と残差流成分の推定

鈴木高二朗\* ・ 竹田 晃\*\* ・ 下司弘之\*\*\*  
亀山 豊\*\*\*\* ・ 清水勝義\*

東京湾フェリー“かなや丸”に設置された ADCP によって、東京湾口の流向流速を高密度でかつ連続的に得られている。しかし、フェリーが東京湾を出入りする船舶を避けて航行するため観測位置が固定しないため、通常の調和解析を用いて潮汐成分と残差流成分を分離するのが困難だった。そこで、3 次の空間的な多項式関数として取り扱う解析手法（3 次元調和解析）と標準航路に流速ベクトルを射影することでフェリーの蛇行を無視した解析手法（射影断面での調和解析）を用いて調和定数を算出した。観測データからこれらの手法で得られた潮汐成分を取り除くことで、黒潮系暖水の流入等の残差流成分の推定が可能となった。

## 1. はじめに

定期船舶に ADCP を設置して海域の流況を観測する方法を用いると、観測船や傭船を用いて観測を行うよりも連続的、かつ安価に観測を行うことができる。このような方法を用いて東京湾口では2003年12月より定期フェリー（東京湾フェリー株式会社所有“かなや丸”）を用いた流況・水質の観測が連続的に行われている。このうち流況は船底設置型の ADCP を用いて観測されており、湾口を出入りする海水の動きが観測できるようになっている。しかし、東京湾フェリーによる観測では、①東京湾を出入りする船舶をよけてフェリーが通るため、航跡が大きく蛇行する場合があります航路が一定でない、また、②フェリーの運行時間が AM 6:20~PM 7:20 までであるため夜間のデータが欠測となるといった問題があり、通常固定点で連続的に観測されたデータに対して行われる調和解析では、潮汐成分と残差流成分を分離するのが困難だった。

Candela ら(1992)は調和定数を面的な 2 次の多項式で表現し、移動する船舶に搭載した ADCP データから観測海域での調和定数を算出している。この手法は観測地点や観測時刻が異なるデータからも調和定数を算出できるため汎用性が高い。そこで本研究では、本手法を拡張して 3 次の空間的な多項式関数で調和定数を近似する調和解析手法について検討することとした。またこの他に、標準航路に流速ベクトルを射影することでフェリーの蛇行を無視した解析手法についても検討することとした。

得られた調和定数をもとに東京湾口における潮汐成分の特徴を調べ、さらに、観測データから残差流成分を分

離し、冬季と秋季での残差流の特徴を捉えることとした。

## 2. 観測データの概要と一次処理

### (1) 東京湾フェリーと湾口の海底地形

本研究で使用したデータは、東京湾フェリー株式会社所有“かなや丸”の船体に設置された ADCP, DGPS, 表層海水分析装置から得られたデータであり（鈴木ら, 2004）、2003年12月23日~2005年2月28日までのデータを対象としている。かなや丸は図-1 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。フェリー航路付近は水深の変化が大きく、最大水深は約170 m である。

通常、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い。さらに、東京湾口を出入りする船舶を避けるため図-2 のように航路が大きく蛇行する場合がある。前述したように東京湾口では水深が急激に変化するためフェリーが蛇行して移動すると水深が毎回異なってしまうため、流速の評価が難しい。

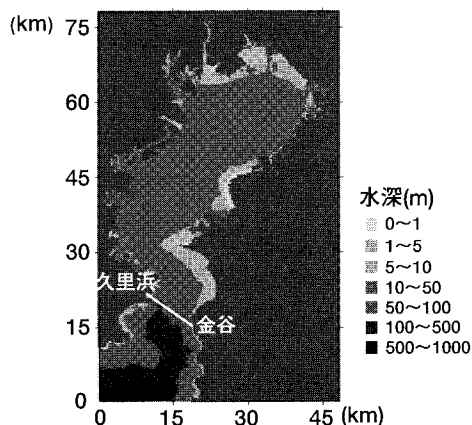


図-1 東京湾フェリーの航路と水深図

\* 学生員 修(工) (独法)港空研 沿岸環境領域 主席研究官  
\*\* 正会員 博(工) (独法)港空研 沿岸環境領域 特任研究員  
\*\*\* 学生員 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  
\*\*\*\* フェロー 工博 国土交通省 港湾局 環境・技術課 環境整備計画室 課長補佐

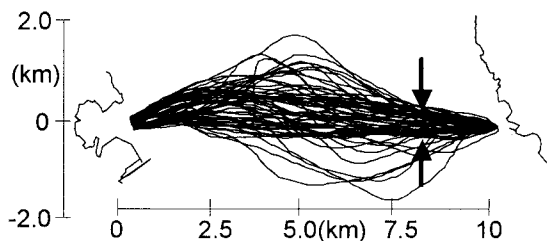


図-2 観測期間中の東京湾フェリーの航跡

## (2) ADCP

ADCP は, RD Instruments 社製の船底装備型 Broad-Band ADCP で, 発振周波数は300 kHz, 音響発信器のビーム角  $\theta$  は20°である.

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等からの方位信号を受けて流速成分を求める必要がある. 今回の計測ではジャイロ信号がドリフトして精度の良い流速値が得られなかったため, GPS から方位を得て流速値を求めている. また, 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).

流速データは, 水深10.59 m の位置から層厚4 m で約40層, 0.5 s 間隔で計測されている. 解析ではそれらの流速値を20 s 平均した値を用いている. 船速が約6 m/s であるので, 約120 m おきに1航海(10 km)あたり80地点のデータが得られる.

## (3) データの一次処理

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  $D_B$  とすると式(1)で表され, 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.

$$D = D_B \cos \theta \quad (1)$$

また, パーセントグッドが80%未満, 流速値が0.8 m/s 以上のデータを除いている.

一方, 荒天時には風や波の影響で船が揺れやすく, 風が非常に強い日にはフェリーが欠航する. 欠航していない場合も風や波が大きい場合には, 流速値の誤差が無視

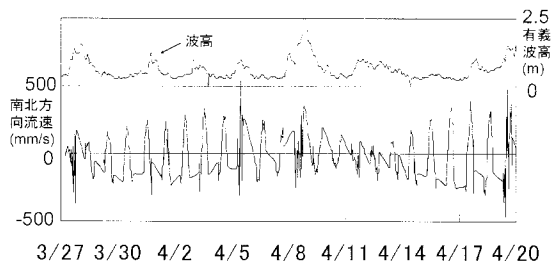


図-3 あししか島の波高と南北方向断面平均流速

できない. 図-3 は, 久里浜港の入り口にある“あししか島”で取得された有義波高と南北方向の断面平均流速である. 有義波高が1 m を越えると, 流速が乱れ, 誤差が大きくなっている. そのため本解析ではこのように流速が乱れている時間帯のデータをあらかじめ除いている.

## 3. 調和解析

### (1) 射影断面での調和解析

今回のフェリー観測では, 測定位置が常に変化するため, 様々な位置で計測されたデータがある位置のデータとして補完し, 1つの時系列データとした後に調和解析を行う必要がある.

そこでまず, ①蛇行してフェリーが走っていても, 同じ流線にあるならば, 流速は大きく変わらないものとし, 流軸に垂直なライン上をフェリーが走っているものと考えて, そのラインに流速ベクトルを射影することとした. フェリーの航路は海底溪谷をほぼ垂直に横切っていることから, 流軸もフェリー航路にほぼ垂直であるものと考え, 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)に流速ベクトルを射影した. 以降, この基準線を標準航路とよぶ. 図-4(a)は, 航跡と表層流速ベクトル図である. 航跡が曲がっており, 流れの様子が分かりにくい. そこで, 標準航路に流速ベクトルを射影させて表示したのが図-4(b)である. 射影することで表層の流速ベクトルの変化がより分かりやすくなっているのが分かる. 次に, ②データが約120 m おきに計測されていることから, 航路を80等分し, さらに水深方向に40層に分けて, それらの区間の中に入っているデータをまとめて, 各位置での時系列データとした.

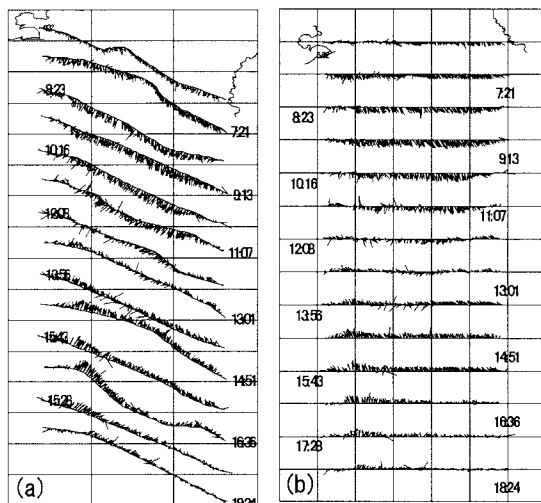


図-4 流速ベクトルを標準航路へ斜影する前後の比較

## (2) 3次元調和解析

フェリーが蛇行して航行する場合、観測データは3次元的に散らばっている。節(1)では標準航路をフェリーが航行していると仮定して、こうした3次元的なデータの散らばりを無視したが、ここでは調和定数を式(2)に示すような3次元の空間的な多項式関数におきかえて調和解析を行うことで、3次元的なデータの散らばりを考慮することとした。以降、3次元調和解析とよぶ。この方法は調和定数を2次元の多項式関数として考えて調和解析を行った Candela ら (1992) の方法を3次元に拡張したものである。

$$u(x, y, z, t) = u_0(x, y, z) + \left\{ \sum_{i=1}^8 \{a_{2i-1}(x, y, z) \cos w_i t + a_{2i}(x, y, z) \sin w_i t\} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2)中、 $u_0$ 、 $a_{2i-1}$ 、 $a_{2i}$ は、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ の多項式で表される関数である。

$a_1 \sim a_8$ までの関数の形を決めるため以下の4つのケースを比較した。関数が①次多項式で、 $x^3$ 、 $y^3$ 、 $z^3$ 、 $x^2y$ 、 $x^2z$ 、 $y^2x$ 、 $y^2z$ 、 $z^2x$ 、 $z^2y$ 、 $xyz$ 、 $x^2$ 、 $y^2$ 、 $z^2$ 、 $xy$ 、 $yz$ 、 $xz$ 、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、1の多項式からなるケース、②2次多項式で、 $x^2$ 、 $y^2$ 、 $z^2$ 、 $xy$ 、 $yz$ 、 $xz$ 、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、1の多項式からなるケース、③2次多項式で、 $x^2$ 、 $xz$ 、 $x$ 、 $z$ 、1の多項式からなるケース、④2次多項式で、 $xz$ 、 $x$ 、 $z$ 、1の多項式からなるケースである。③、④のケースは、フェリーの蛇行があまり調和定数に影響がなく、航路に垂直な方向( $y$ 方向)には調和定数があまり変化しないと考えたケースである。

①～④の各計算ケースの優劣は坂本ら (1983) に従って、AIC (赤池情報量基準) を用いて比較した。

表-1 AICの計算結果

| ケース | AIC(赤池情報基準)   | 誤差分散 $\sigma^2$ |
|-----|---------------|-----------------|
| ①   | 9.4679e + 005 | 142.7843        |
| ②   | 9.4837e + 005 | 144.4617        |
| ③   | 9.6566e + 005 | 163.8213        |
| ④   | 9.6878e + 005 | 167.5773        |

表-1はそれぞれのケースで得られたAICである。AICが小さい方がモデルとして最適であることから、ケース①の3次多項式を用いた場合が最も良いことが分かる。

## (3) 調和解析結果の比較

図-5、6は、それぞれ、2004年1月1日から2004年1月31日までのデータを対象とした節(1)および節(2)の方法で求めた標準航路における潮流楕円であり、M2、S2、K1、O1の結果を示している。なお、図-5、図-6共に調和解析はS2、M2、K1、O1、Q1、N2、M4、MS4の8分潮で行っている。また、100m以深については、計測データ数が少ないため、推定精度が落ちる傾向にある。80m付近の楕円に対して大きくなっていることから考えられる。

楕円はいずれも時計回りであり、流速は溪谷がある部分で最も速くなっている。それぞれの楕円の中には溪谷部での流速がピークとなる時刻の位相を示す線を引いている。全体に岸に近く、深い部分ほど位相が早くなっており、摩擦のある振動流の特性を示している。

図-5の射影断面での調和解析結果では、ある点のデータの上に依存しているため、それぞれの点での調和定数に関連が無いのに対し、図-6の3次元調和解析の結果では航路全てのデータが関連しているため、空間的に

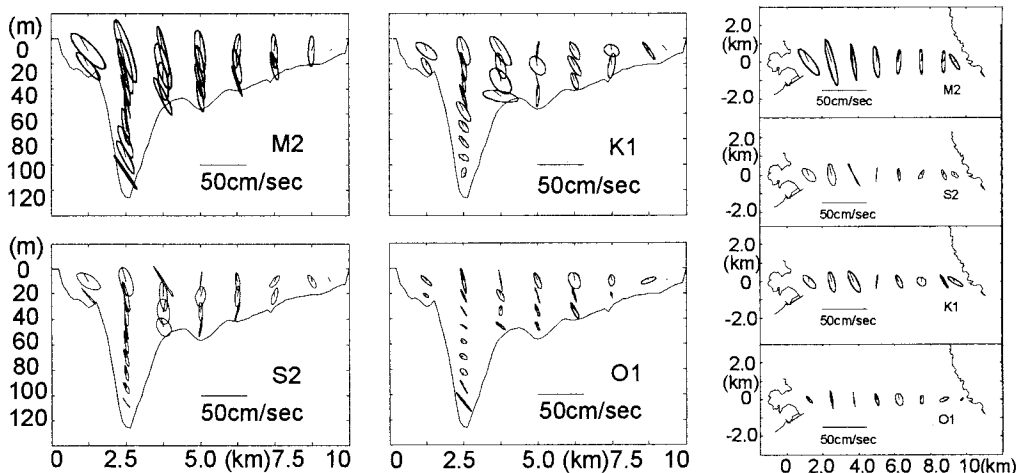


図-5 射影断面での調和解析における潮流楕円 (M2,S2,K1,O1)  
(解析期間2004年1月1日から2004年1月31日)

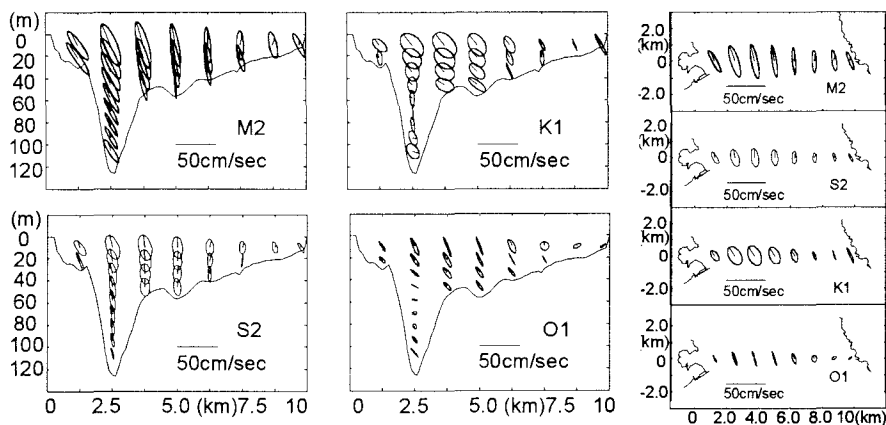


図-6 3次元調和解析における潮流楕円 (M2,S2,K1,O1)  
(解析期間2004年1月1日から2004年1月31日)

均されており楕円にはばらつきが見られない。

また、振幅が最も大きいM2分潮の場合、図-5では $x = 2,500(\text{m})$ での楕円振幅が最大になっているのに対し、図-6では $x = 3,750(\text{m})$ での振幅が最大となっている。

以上のことから、射影断面での調和解析では、航路の蛇行を無視して考えていることと対象とするデータ数が少ないことなどから、調和定数の値が空間的にバラツキやすい傾向があることが分かる。一方、3次元調和解析ではそうしたバラツキの少ない調和定数を推定することが可能である。ただし、3次元調和解析では空間的に変化の大きい調和定数の分布を3次関数で表現しきれない可能性や、その関数の性質上、データの少ない境界部ほど誤差が大きくなりやすいという傾向がある。

#### 4. 残 差 流

図-7は、2004年1月7日PM 1:30の潮流の実測値(a)と、その実測値から3次元調和解析による潮汐成分の推定値、および射影断面での調和解析による潮汐成分の推定値を差し引くことで得た残差流(b), (c)である。

この日は黒潮系暖水が湾口に流入していたが、PM 1:30の時点は上げ潮であり、潮流と残差流が重なった実測値(a)からは、黒潮系暖水の流入状況がよく分からない。

実測値から3次元調和解析による潮汐成分の推定値を差し引いた後の残差流成分(b)を見ると、黒潮系暖水の流入状況が明瞭に抽出されているのが分かる。一方、射影断面での調和解析によって求めた残差流成分(c)では、(b)よりも明瞭では無いものの、黒潮系暖水の流入状況が抽出されている。

図-8は、3次元調和解析(a)と射影断面での調和解析(b)によって求めた2004年10月10日PM 3:56の残差流成分であり、台風が頻繁に来襲した8~11月にかけて見られた外洋水の中層貫入現象(日向ら, 2004)である。

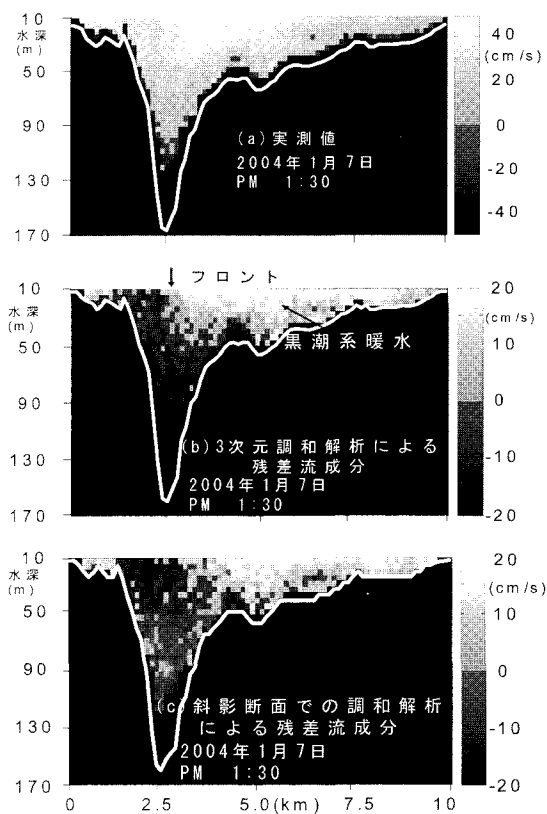


図-7 冬季の黒潮系暖水の流入

図-9は水深16 mにおける流速ベクトルとフェリーで計測された塩分、水温、クロロフィル $a$ 量を示している。久里浜港から約7,000 m付近で流速が反転しており、塩分・水温もその点を境に大きく変化している。久里浜側では塩分・水温が低く、クロロフィル $a$ 量が大きくなっており、金谷側との差は塩分で5.5PSU、水温で2℃、クロロフィル $a$ 量が $6 \mu\text{g/l}$ となっている。東京湾

に注がれた大量の降雨が表層から外海へ流出し、密度の比較的大きい外洋水が中層から流入し、中層より下層側では内湾の密度の大きい海水が外海へ流出していることを示している。

図-8に戻ってみると(a), (b)ともに中層貫入を表現しているが、3次元調和解析の方がコントラストが大きい。

以上のような調和解析を用いて残差流を求めたところ、2004年1～3月には図-7に示されるよう表層からの外洋水の流入が7回、2004年8～11月には図-8に示されるような外洋水の中層貫入が、8, 9, 10, 11月に、それぞれ18, 11, 25, 17日間発生していた。

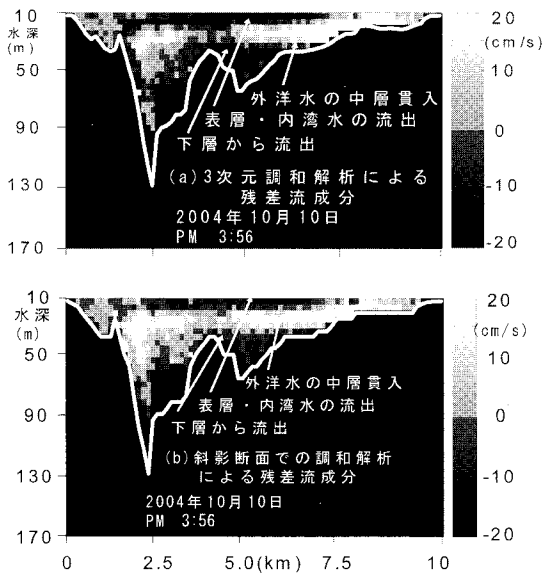


図-8 台風来襲後の中層貫入

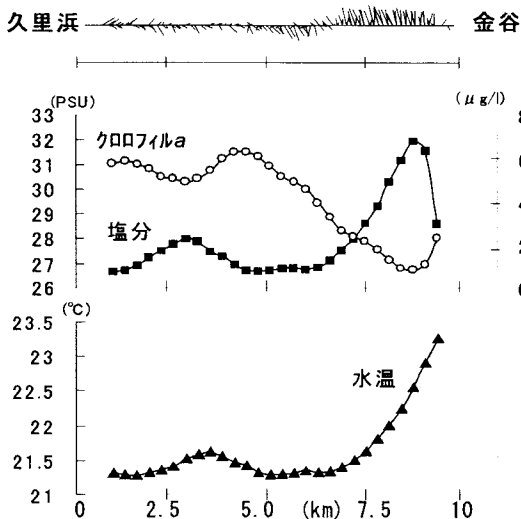


図-9 台風来襲後の流速ベクトルと水質データ  
(2004年10月10日PM3:56)

## 5. おわりに

東京湾フェリーで計測された流速データから潮汐成分と残差流成分を分離することを目的として検討を行ったところ、以下のような結果を得た。

- 1) フェリーが東京湾を出入りする船舶を避けて航行するため観測位置が固定せず、通常の調和解析を用いて潮汐成分と残差流成分を分離するのが困難だった。そこで、空間的な多項式関数として取り扱う解析手法(3次元調和解析)と標準航路に流速ベクトルを射影することでフェリーの蛇行を無視した解析手法(射影断面での調和解析)を用いて調和定数を算出した。
- 2) これらの手法で求めた潮流楕円は全て時計回りであった。また、全体に岸に近く、深い部分ほど位相が早くなっており、摩擦のある振動流の特性を示していた。
- 3) 2つの解析手法を比較すると、射影断面での調和解析では、航路の蛇行を無視して考えていることと対象とするデータ数が少ないことなどから、調和定数の値が空間的にバラツキやすい傾向があることが分かった。一方、3次元調和解析ではそうしたバラツキの少ない調和定数を推定することが可能である。ただし、3次元調和解析では空間的に変化の大きい調和定数の分布を3次関数で表現しきれない可能性や、その関数の性質上、データの少ない境界部ほど誤差が大きくなりやすいという傾向がある。
- 4) 2つの手法により観測データから推定されたそれぞれの潮汐成分を取り除いて残差流成分を求めたところ、いずれも黒潮系暖水の流入状況などを抽出できることが分かった。ただし、3次元調和解析による方が外洋水の流入状況をより明瞭にとらえているようである。

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、黒川部長代理、“かなや丸”船長、機関長、(独法)港空研・加藤新技術研究官はじめ多くの方々からご協力を頂いています。また、“あしか島”波高データは海象情報研究室から頂いています。ここに深甚なる感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 鈴木高二朗・加藤英夫・桑江朝比呂・下司弘之・亀山 豊 (2004)：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，海岸工学論文集第51巻，pp. 891-895。  
日向博文(2004)：東京湾の流動への外洋影響－特に黒潮変動影響について，土木学会水工学シリーズ，04-B-3，pp. 1-21。  
Candela, J., R.C.Beadsley and R.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.