

フェリー ADCP データからの連続的な残差流成分の推定

鈴木高二朗¹・竹田 晃²・橋本典明³

下司弘之⁴・佐藤義博⁵

フェリーに設置された ADCP による流向流速観測は、広範囲かつ定期的に実施できるため優れている。しかし、夜間や荒天時には観測できないため、データが不連続となり、通常の調和解析では不連続な残差流しか推定できない。本研究では東京湾口のフェリーで観測されている ADCP データに対し赤池ベイズ型情報量基準 (ABIC) を適用し、連続的な残差流を推定した。その結果、ABIC を用いることで毎日 12 時間欠測のあるデータからも、欠測の無いデータからと大差ない残差流が推定できることが分かった。また、東京湾口での 1ヶ月平均の残差流は冬にエスチュアリ循環型、秋に中層貫入型であり、海水交換量は秋に最も大きいことが分かった。

1. はじめに

フェリーに設置された ADCP による流向流速の観測は広範囲で定期的な観測ができるという点で優れている。しかし、フェリーが一定の海域を通過する頻度は限られており、荒天時には欠航するため、観測データから潮汐成分と残差流成分を分離するのが困難な場合もある。また、東京湾口のような閉鎖性内湾の湾口において海水交換量を求めようとする場合は、連続的な残差流の推定が必要となるが、現状では観測値から調和解析で推定された潮汐成分を差し引いた残差流しか推定できない。

そこで本研究では、夜間や荒天時に観測ができないフェリー ADCP データから、連続的な残差流の推定を可能とすることを目的とした。

2. 東京湾フェリーによる東京湾口の ADCP 観測

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), 観測は 2003 年 12 月 23 日から連続的に実施されている (<http://www.tokyobayferry.pari.go.jp>)。

“かなや丸”は図-1 のように神奈川県の大磯港と千葉県の大網浦港の約 10 km を片道約 30 分 (船速 6 m/s) で結んでおり、毎日 AM6:20~PM7:20 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。ADCP は、RD Instruments 社製の船底装備型 Broad-Band ADCP で、

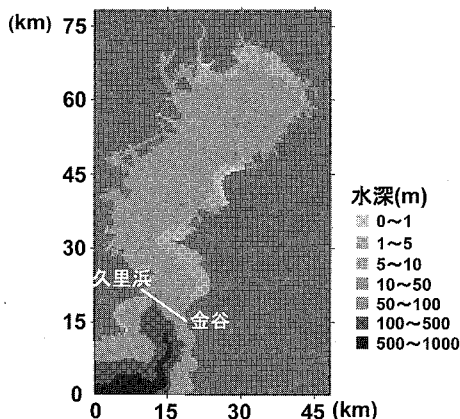


図-1 東京湾フェリーの航路と水深図

発振周波数は 300 kHz, 音響発信器のビーム角は 20° である。

東京湾フェリーで観測された ADCP データを解析する場合、以下の理由により、通常の調和解析では連続的な残差流成分の推定が難しい。①フェリーの運行時間が AM6:20~PM7:20 までであるため、夜間のデータが欠測となる。②東京湾口では外洋からの波浪等により船舶が動揺しやすく、観測データにノイズが多くの場合がある。また、風や波浪が大きい場合にはフェリーが欠航し、日中でも欠測となる場合がある。③東京湾を出入りする船舶をよけて通るためフェリーが大きく蛇行して航行する。このため計測地点が毎回異なるとともに、湾口では図-1 のように海底地形が複雑であるため、計測している場所の水深も大きく変化する。

このような不連続的に観測されたデータから連続的な残差流成分を推定するため、ここでは Akaike (1980) の赤池ベイズ型情報量基準 (Akaike Bayesian Information Criterion, 以下, ABIC とよぶ) を用いることとした。

1 正 会 員 工 修 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部
2 国土交通省四国地方整備局松山港湾空港整備事務所三島川之江港事務所
3 フェロー 工 博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門
4 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
5 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

3. ABIC による残差流成分の推定法

(1) 潮汐成分と残差流成分、および評価関数の定義

ここでは、観測された流速値 u_n を式 (1) の右辺のように、第 1 項の潮汐成分と第 2 項の残差流成分 d_n 、および第 3 項の誤差 ε_n で表現している。ここで、 n は時刻、 M は分潮数、 a_{2m-1} 、 a_{2m} 、 ω_m は潮汐成分 m の振幅と角周波数である。残差流成分は連続的であるとして考え、 d_n を時刻 n の残差流成分とし、観測期間中全ての時刻の d_n が未知数であるとした。通常の調和解析では、 d_n という項がない。

$$u_n = \sum_{m=1}^M (a_{2m-1} \cos \omega_m t_n + a_{2m} \sin \omega_m t_n) + d_n + \varepsilon_n \quad \dots\dots\dots (1)$$

調和定数 a_{2m-1} 、 a_{2m} と残差流成分 d_n は、次式 (2) で表される評価関数 $J(\mathbf{a}, \mathbf{d})$ を最小化する値として最小自乗計算によって求められる。式 (2) 中、 $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_{2M})^T$ 、 $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_K)^T$ であり、 K は残差流 d_n の未知数の数である。

$$J(\mathbf{a}, \mathbf{d}) = \sum_{n=1}^N \left\{ u_n - \sum_{m=1}^M (a_{2m-1} \cos \omega_m t_n + a_{2m} \sin \omega_m t_n) - d_n \right\}^2 + v^2 \sum_{k=1}^K (d_k - 2d_{k-1} + d_{k-2})^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

通常の調和解析では、式 (2) の第 1 項 (d_n の無い形) を評価関数として最小自乗計算が行われるが、ここでは第 2 項を新たに設けて評価関数 $J(\mathbf{a}, \mathbf{d})$ が定義されている。第 2 項は残差流成分 d_n の階差であり、残差流成分 d_n は潮汐成分と比較してなめらかに変化するため階差は小さい、という仮定のもとに評価関数が定義されている。

(2) ABIC 最小化による超パラメータ v の決定

ここで、 v は超パラメータと呼ばれ、残差流成分のなめらかさを規定する係数である。 $J(\mathbf{a}, \mathbf{d})$ の最小化によって調和定数 a_{2m} を求めるには、あらかじめ v を決めておく必要がある。 v の値が大きくなれば、残差流成分の自由度が小さくなってなめらかな直線に近い形となり、逆に v を小さく取れば残差流の形の自由度が大きくなる。

超パラメータ v の値は、式 (3) で定義される ABIC という値を最小化することによって求められる。式 (3) 中の L は、式 (4) で与えられる確率密度分布であり、 a_n 、 d_n が与えられた条件で、式 (1) の不規則成分 ε_n 、あるいは式 (2) の第 1 項の $\{ \}$ 内部が平均値 0、分散が σ^2 の正規分布となると仮定して得た観測値 u_n の条件付確率密度分布である。一方、式 (3) 中の P は、残差流成分 d_n の階差である式 (2) の第 2 項の $()$ 部が、平均値 0、分散が $(\sigma/v)^2$ の正規分布であると仮定して得た残差流 d_n の事前分布である。

計算法は橋本 (1987) が ABIC を波浪の方向スペクト

ル推定に適用した例に準じており、詳細は鈴木ら (2005) に記されている。

$$ABIC = -2 \ln \{ \int LP dd \} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$L(u_1, u_2, \dots, u_N | d_1, d_2, \dots, d_N, a_1, a_2, \dots, a_M; \sigma^2) \\ = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2} \right)^{N/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N (u_n - \sum_{m=1}^M (a_{2m-1} \cos \omega_m t_n + a_{2m} \sin \omega_m t_n) - d_n)^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$P(d_1, d_2, \dots, d_K | v^2, \sigma^2) = \left(\frac{v^2}{2\pi\sigma^2} \right)^{K/2} \exp \left\{ -\frac{v^2}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^K (d_k - 2d_{k-1} + d_{k-2})^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

4. ABIC による残差流成分推定例

(1) ABIC を実施する前のデータ処理

フェリーは図-2(a)のように蛇行して航行している。しかし、ここでは流れが久里浜港と金谷港を結ぶ線 (標準航路とよぶ) にほぼ垂直に流れており、実際は蛇行していても、解析では標準航路を航行しているものとみなすこととした。図-2(b)では $y=0$ に相当する。

ABIC を実施する前のデータ処理として、以下のような操作を行った。①まず、ADCP の測定精度を示すパーセントグッドが 70 % 未満のデータを除くとともに、フェリー航路では 1 m/s 以上の流速は発生しにくいいため、1 m/s 以上の流速データもエラーとして除いている。②次に、南北方向、東西方向の流速値として計測された値を標準航路に垂直方向と平行方向の流速に座標変換した。③さらに、計算機のメモリ容量に限界があったため、計測された時間、場所を四捨五入し、時刻は 1 時間間隔、場所は 125 m 間隔のデータとした。

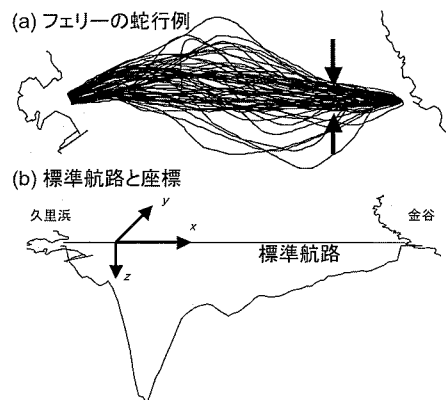


図-2 フェリーの蛇行例と標準航路

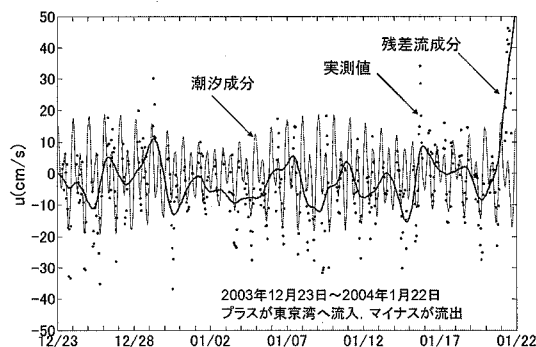


図-3 ABICによって推定された潮汐成分と残差流成分

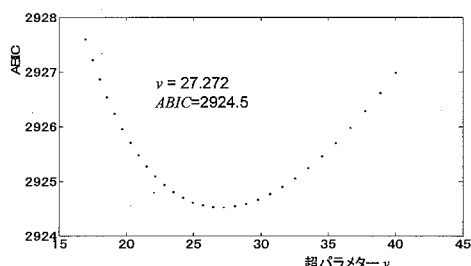


図-4 図-3を求めた際の超パラメータとABIC

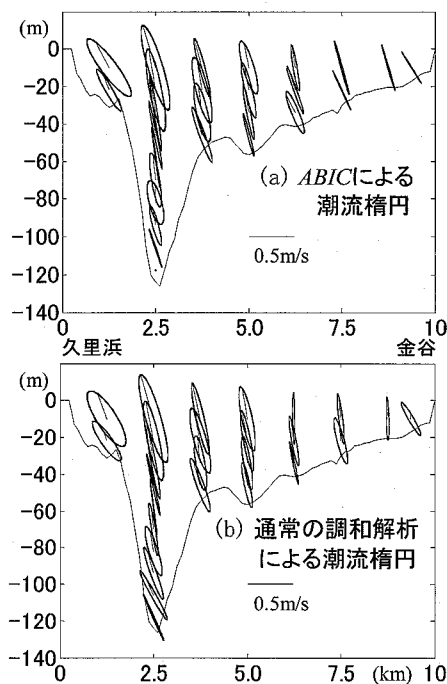


図-5 ABICと通常の調和解析によるM2潮流楕円の比較

(2) ABICによる残差流と潮流楕円の推定例

図-3は、2003年12月23日～2004年1月22日のデータのうち、金谷側の海表面に近い位置 ($x=7500$ m, $y=0$ m, $z=10.6$ m) の観測値を取り出し、ABIC最小化によって潮汐成分と残差流成分を分離したものである。

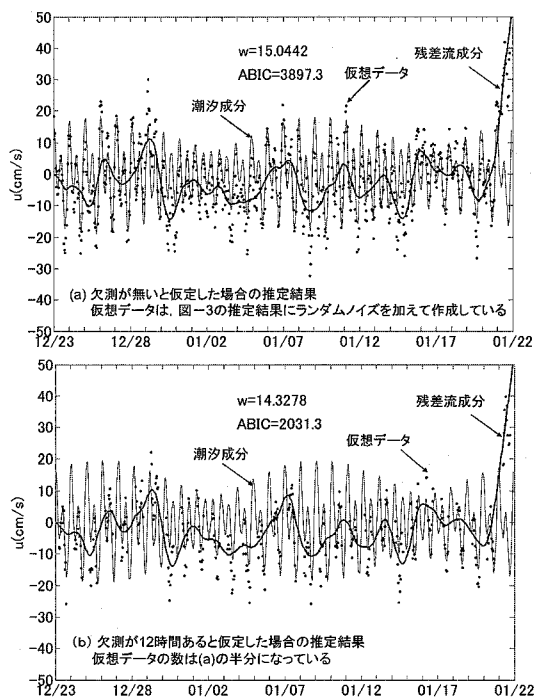


図-6 欠測が無い場合と12時間欠測がある場合の比較

ここで、流速は標準航路に垂直方向の流速であり、東京湾への流入方向を正、流出方向を負としている。

推定された残差流成分は潮汐成分と比較するとゆったりとした波形となっており、特に1月21日に大きな正の流速が発生している。

なお、(1)の方法で作成された時系列データ u_n の個数は408個であり、観測期間全体(720個に相当)の56.7%である。また、推定した変数は、残差流成分 d_n の個数が720個、調和定数 a_m は13分潮を用いており26個である。

図-4はこのときの超パラメータ ν とABICの関係でありABICが最小となる $\nu=27.272$ で残差流を推定している。

図-5は、断面の全ての点に対して調和解析を行って求めたM2分潮の潮流楕円ある。それぞれ、2004年1月の(a)ABICによる潮流楕円と(b)通常の調和解析による潮流楕円であり、ともに大きな差異が無いことが分かる。

(3) ABICを用いた残差流推定における欠測時間の影響

残差流推定における欠測時間の影響を調べるため、仮想データを作成して欠測時間の影響を調べた。仮想データは、図-3で得られた潮汐成分と残差流成分、およびランダムノイズを足しあわせて作成し、欠測時間が無い場合と欠測時間が1日あたり12時間ある場合を試している。図-6はその結果であり、欠測時間が無い場合(a)は図-3とほとんど結果が変わらない。12時間の欠測がある場合(b)では、若干差が出ているものの、図-3の残

差流をうまく推定できている。夜間のデータが無くとも、*ABIC* によって残差流成分が推定できること示している。

5. 残差流と表層塩分水温の比較、および海水流量

(1) 残差流と表層塩分水温の比較

図-7は久里浜金谷間のフェリーによる表層の水質(塩分水温)と ADCP による実測値(水深 10, 20, 40, 60 m), および *ABIC* による推定残差流であり, それぞれ, 久里浜から金谷にかけての全データを表示している。流速は標準航路に垂直方向の流れであり, プラスが湾内へ流入する方向である。塩分水温は 1 月 8~12, 15~16 日を除いて, 全般に金谷側の方が久里浜側よりも大きくなっている。実測流速は潮汐によって流向が変化しており, その状況は表層から水深 60 m まで同じ位相となっている。

実測値は夜間のデータが無く, 1 月 22, 23 日は荒天のためフェリーが欠航している。一方, *ABIC* による推定残差流はデータの無い時刻を補っており, 実測値とは異なりなだらかに流速が変化していることが分かる。

推定残差流には 1 月 7, 14, 21, 26 日に, 強い流入が水深 10 m と 20 m で見られる。この時期に塩分水温が上昇しており, 外洋水が流入していたことを示している。

図-8は, 1 月 26 日の推定残差流の分布であり, 強い外洋水の流入が久里浜から 2~10 km の広い範囲にわたって見られる。逆に, 久里浜から海底溪谷部にかけては東京湾からの海水が流出している。なお, 海底面付近は ADCP のサイドロープの関係で, もともとデータが少なく残差流が推定できていない。

(2) 1ヶ月平均の断面流速分布

図-9は, 2004 年 1, 2, 8, 10 月の *ABIC* によって推定された残差流の 1ヶ月平均の断面流速分布である。1 月は

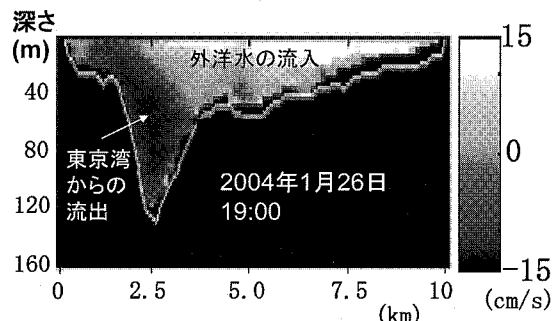


図-8 2004 年 1 月 26 日の推定残差流 (外洋水の流入)

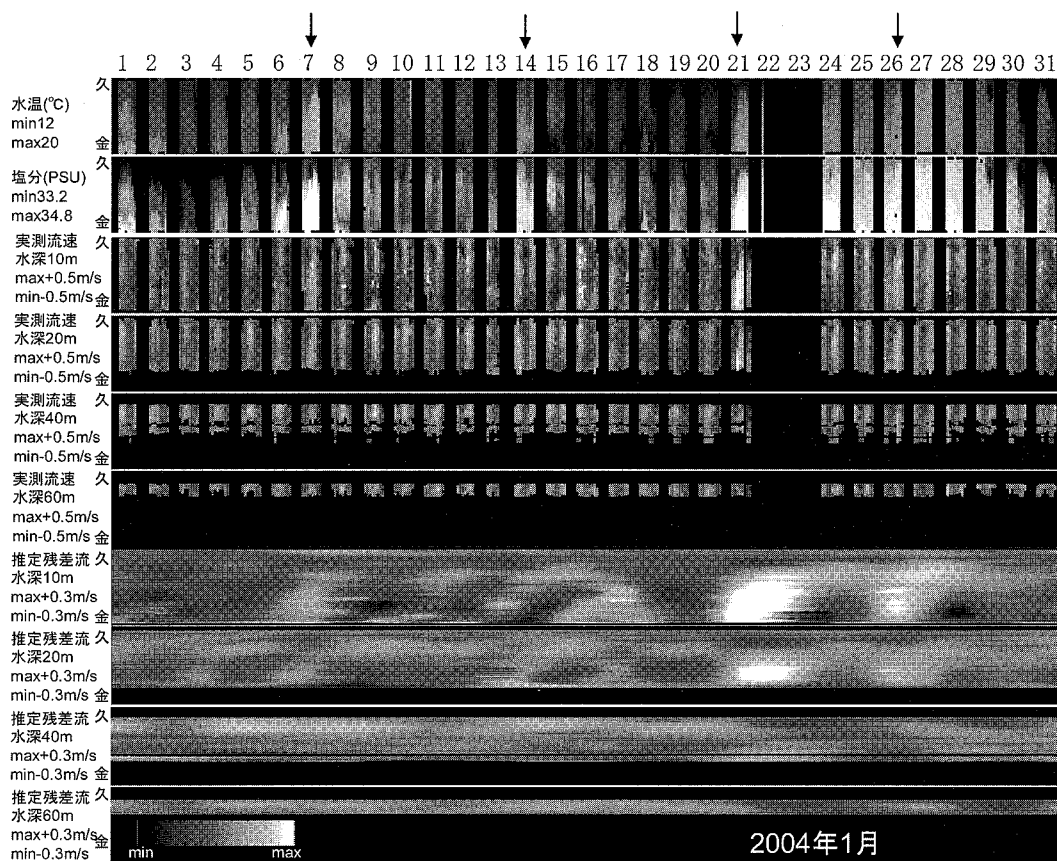


図-7 久里浜金谷間のフェリーによる塩分水温と ADCP による実測値, および *ABIC* による推定残差量

金谷側から外洋水の流入などが見られていたが、平均すると表層流出、中層(中央)流入、下層流出となっていた。

2004年2月にも同様な外洋水の流入が見られているものの、さらに金谷側での流出傾向が強く、久里浜から2~3km、海底溪谷に相当する位置の水深20~40m層での流入流速が全般に大きい。この他2005年のデータも調べたところ、冬は全般にエスチュアリ循環的になっていた。

一方、夏から秋にかけては、流入部分が久里浜から2~7kmの範囲に均される一方、水深10~20mの表層部分と、下層部分に流出が見られ、いわゆる中層貫入的な流れになっている。

八木ら(2003)は、外洋の塩分水温と東京湾への淡水流入をもとに数値実験を行い、富津-金沢八景沖を結ぶ断面における月ごとの平均的な流速分布を示している。その結果では、冬季はエスチュアリ循環、その他は中層貫入気味で、特に秋に中層貫入が卓越するという結果を得ている。今回の観測位置とは異なっているものの、図-8は八木らの数値計算結果と似た傾向を示している。

(3) 海水交流量

図-10は、2004年1月~2005年8月にかけての海水交

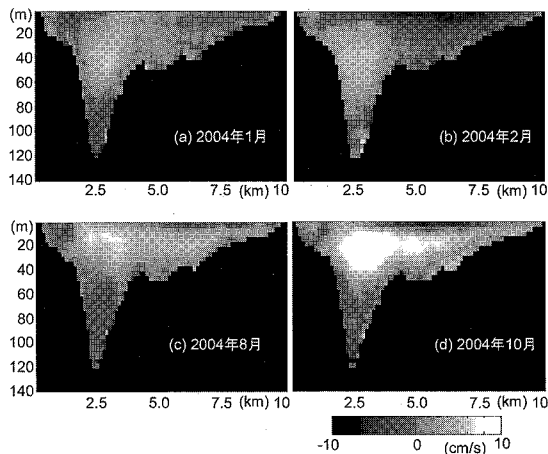


図-9 1ヶ月平均の断面流速分布

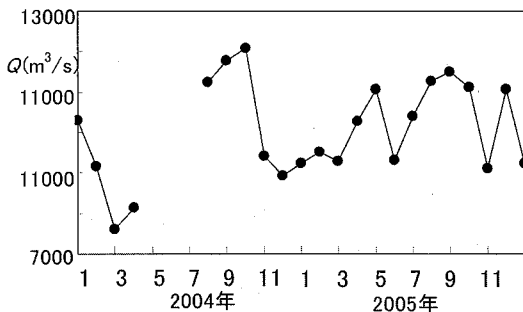


図-10 海水交流量の1ヶ月平均

流量の1ヶ月平均値である。海水交流量 Q は、外洋から湾内へ流入する(あるいは湾内から外洋へ流出する)単位時間あたりの海水量として、以下の式で求めている。

$$Q = (Q_+ - Q_-) / 2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_+ = \int u_+ dA_+ \quad Q_- = \int u_- dA_- \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 u_+ 、 u_- はそれぞれ、 $ABIC$ で求めた残差流のうち湾内へ流入する流速と湾内から流出する流速であり、 dA_+ 、 dA_- はそれぞれ流入、流出している位置の断面積である。 Q_+ 、 Q_- は、それぞれ $ABIC$ によって得られた残差流の流入流量、流出流量である。

海水交流量は冬に小さく、秋に大きい傾向にあり、2004年10月の1ヶ月平均値は約 $12,100 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。

6. ま と め

フェリーに設置された ADCP による流向流速の観測では、夜間や荒天時に観測ができないため、観測データが不連続となり、通常の調和解析では不連続な残差流しか推定できない。そこで、本研究では東京湾口のフェリーで観測されている ADCP データに対して、赤池ベイズ型情報量基準 ($ABIC$) を適用し連続的な残差流を推定した。

その結果、以下のことが分かった。① $ABIC$ と通常の調和解析で推定された潮汐成分には大きな差異がない。② 仮想データを作成して $ABIC$ を試したところ、12時間欠測があっても、欠測が無い場合の推定結果と大きな違いがない。③ 2004年1月には塩分水温の高い外洋水の流入にともない、残差流には強い流入が見られた。④ 1ヶ月平均の残差流の断面分布は、冬は全般にエスチュアリ循環で、秋は中層貫入であった。⑤ 海水交流量は秋に大きく、2004年10月の1ヶ月平均値は約 $12,100 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。

謝辞：観測の実施にあたり東京湾フェリー株式会社の方々から多大なご協力を頂いています。ここに深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 赤池弘次・北川源四郎(1995)：時系列解析の実際Ⅱ，朝倉書店，218p.
- 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.
- 鈴木高二朗・竹田晃・橋本典明(2005)：非固定航路で不連続的に観測された流況データからの潮汐成分と残差流成分の分離手法について，港空研報告，第44巻，第2号，pp. 39-56.
- 橋本典明(1987)：ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定，港研報告，第26巻，第2号，pp. 97-125.
- 八木宏，片岡理英子，山口肇，藤原建紀(2003)：東京湾の外海水進入特性に関する数値実験，海岸工学論文集，第50巻，pp. 931-935.
- Akaike, H. (1980)：Likelihood and Bayes procedure, Bayesian Statistics, University press, Valencia, Spain, pp. 143-166.