

東京湾口での海水交換の季節変化について

Seasonal variation of water exchange rate at the mouth of Tokyo bay

鈴木高二朗¹・磯部雅彦²・下迫健一郎³

Kojiro SUZUKI, Masahiko ISOBE and Kenichiro SHIMOSAKO

Yearly averaged subtidal current obtained by ferry observation at the mouth of Tokyo bay indicates the estuarine circulation in the Tokyo bay. Water exchange rate estimated by the observation data is the same as that estimated by Box model. The ratio of water exchange rate to river discharge Q/R is compared with the vertical density difference observed at the head of Tokyo bay (Chiba monitoring post). The result shows that Q/R is smaller in summer because of stratification inside Tokyo bay. During January to February, Q/R is smaller than that of spring and fall. Change of wind direction and the deepening of oceanic water intrusion are thought to be the cause of Q/R decrease.

1. はじめに

東京湾口では、東京湾へ流入する淡水と外洋の海水との交換が起きており、東京湾の富栄養化した海水が外洋へ流出し、栄養塩の少ない湾外水が東京湾内に流入している。そのため、東京湾口での海水交換量の推定は重要であり、これまでにも塩分水温の観測データからボックスモデルを用いて宇野木（1998）、高尾ら（2004）などによって求められている。

一方、2003年12月より東京湾口では神奈川県久里浜港と千葉県金谷港を結ぶフェリーに設置した流向流速計（ADCP）により日々の流況観測が実施されており、約6年のデータが得られている（鈴木ら、2006）。そこで、本研究では湾口の流況観測データから海水交換量を直接求め、特にその季節変化を調べることを目的とした。

2. フェリーによる連続観測と海水交換量について

流況観測は東京湾フェリー株式会社所有の“かなや丸”に設置されたADCPによって行われており、図-1に示す神奈川県久里浜港と千葉県金谷港間の水平距離約10km、水深約150mまでの断面流速が、日中、約1時間に1回の間隔で6:20から20:00まで計測されている。ただし、船舶設置型ADCPではサイドロープの影響で表層～深さ10mの流速が計測できないため、本研究では表層～深さ10mまでは推定を加えて考察する。なお、ADCPはRD Instruments社製のADCP（300kHz）であり、4m厚層の20s平均データを用いて解析しており、精度は±5mm/sである。詳細は鈴木ら（2006）に述べられている。

解析は2004年～2008年の5カ年のデータに対して実施

した。まず、フェリーの航路に垂直な流速成分を抽出し、年毎に1年間の調和解析（主要8分潮）を実施してその潮汐成分を求めた。次に観測値から潮汐成分を差し引いて残差流を求めた。この残差流には潮汐による残差流のほか、エスチュアリー循環流と吹送流、黒潮系暖水の流入などが含まれているほか、ノイズ成分が含まれている。

3. 残差流の特徴

図-2は潮汐残差流の年平均断面図である。水深の最も深い久里浜港から2.5km、深さ30mを中心にした場所での流入量が多く、それより千葉側（2.5～9km）では表層から深さ20mまでが流出となっている。全般的なフェリー航路の残差流の流向流速は、上層流出、中層流入、下層流出であり、富津―観音崎以北の水深30mより浅い部分と対応させるならば、上層流出、下層流入であり、東

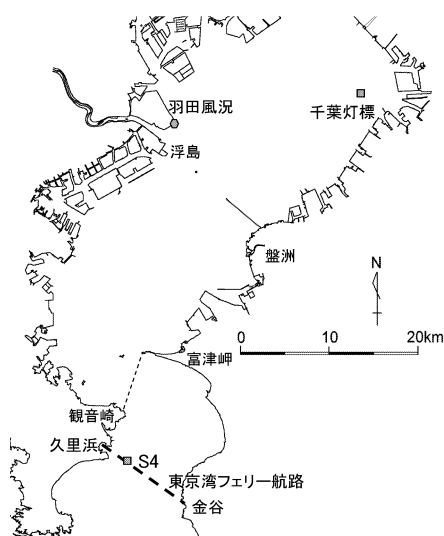


図-1 調査地点図

1 正会員	工修	(独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部
2 フェロー	工博	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
3 正会員	博(工)	(独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部 前 国交省横浜港湾空港技術調査事務所長

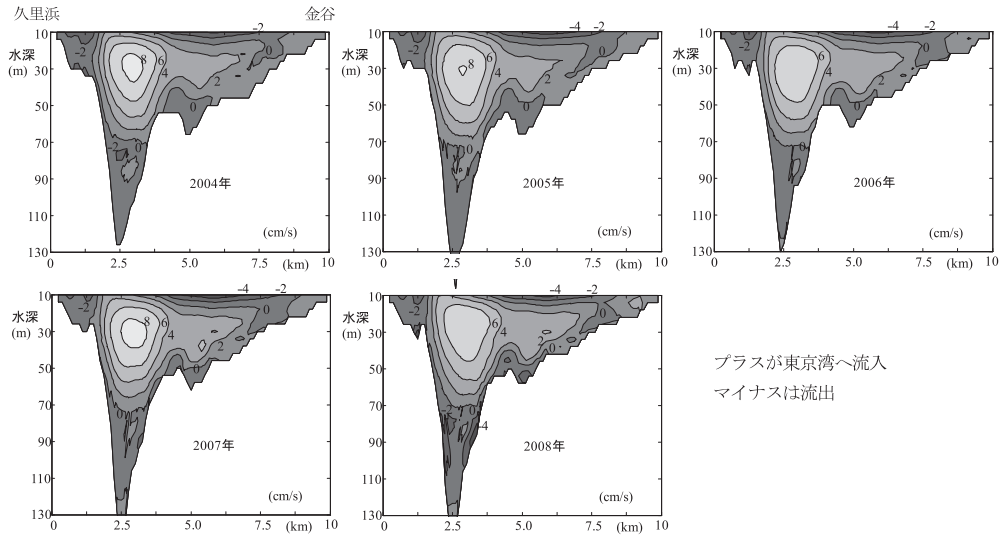


図-2 年平均残差流（フェリー航路に垂直な流速成分）

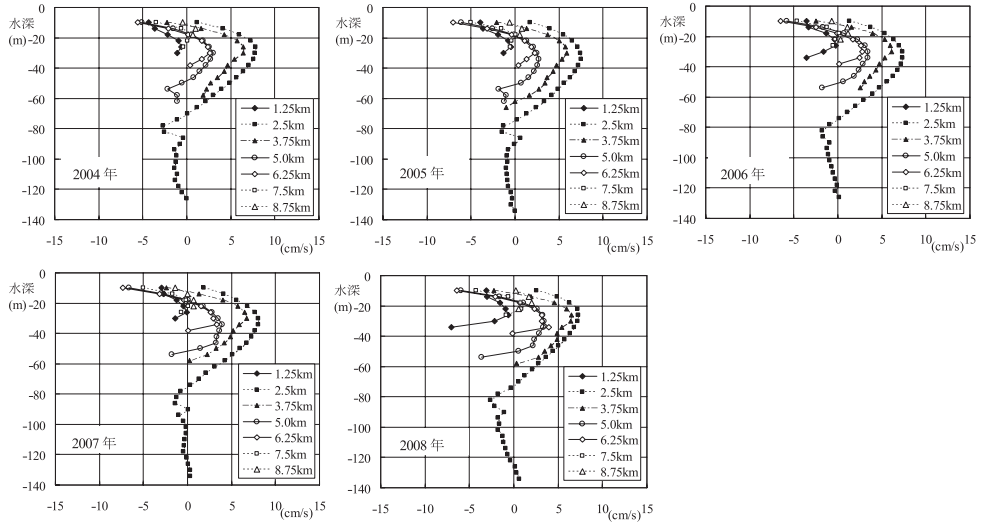


図-3 年平均残差流の鉛直プロファイル

京湾のエスチュアリー循環と対応している。

図-3は、図-2の断面図の鉛直プロファイルである。最も深い久里浜から2.5km地点では、水深30m付近で流入流速が7～8cm/sで最大値をとり、水深70mで流速が反転し、水深80m付近で流出流速が2～3cm/sで極大値をとる。

一方、水深10～20mのプロファイルの傾きからすると、表層では流出となり、5～10cm/sの流出流速となっているのではないかと推定される。また、2.5km地点以外の点では表層流速はさらに大きく、5kmや6.25km地点では、流出流速が15cm/sよりも大きいものと推定される。このように、ADCPで計測される流向流速は、表層～深さ10mまでの流向流速が計測されないため、断面平均値はプラ

ス（流入）となり、実際にはその流入量に匹敵する量の水塊が表層～深さ10mで流出しているものと考えられる。

4. 断面平均流速と海水交換量

(1) 海水交換量と海水交換日数

図-4は、各年の残差流の東京湾への流入流速と流出流速の断面平均であり、5年間の平均値をともに示している。なお、流速の断面平均は式（1）、（2）で表される。

$$\overline{u_{in}} = \int u_{in} dA_{in} / \int dA_{in} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\overline{u_{out}} = \int u_{out} dA_{out} / \int dA_{out} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで, u_{in} , u_{out} はそれぞれ流入と流出の残差流の月平均流速であり, A_{in} , A_{out} は流入, 流出位置の断面積である。

この図からすると, 淡水流入の多い9~10月が最も平均流速および海水交換量が大きく, ついで4~6月が大きい。一方, 1~3月と6~8月の平均流速が小さい。

ここでは宇野木(1998)と同様に湾口断面の下層で湾外から湾内に単位時間に流入する量を Q , 上層で湾外へ流出する流量を Q' , 淡水流入量を R とすると

$$Q' = Q + R \cdots \cdots (3)$$

が成り立つ。 Q はエスチュアリー循環の海水交換量(または鉛直循環流量)と呼ばれるもので, 今回の場合, 次式(4)で表される。図-3に示されるように観測不能域である水深10m以浅では月平均残差流の流入がないことから, 海水交換量を式(4)で表すことは妥当と考えられる。

$$Q = \int u_{in} dA_{in} \cdots \cdots (4)$$

図-5は, 式(4)で表される各月の海水交換量 Q である。海水交換量 Q は, 10月が最大で5年平均で約11,500 (m³/s), 1月が最小で約6,000 (m³/s)である。

次に, 図-6は東京湾フェリーより北側の東京湾内の水容量 V_{Bay} , 1.82×10^{10} (m³)を図-5の海水交換量と淡水流入量の和($Q+R$)で除した淡水の滞留日数 τ である。1月が40日と最も遅く, 最も早い9~10月には約20日で交換していることになる。

高尾ら(2004)は2002年に計測された東京湾の塩分・水温のデータを用いてボックスモデルによる東京湾の海水交換日数を算出し, 夏季に約20日, 冬季に約40日と算出した。高尾らの海水交換日数は, 富津-観音崎より北側の東京湾に対して実施した解析であり, 今回の久里浜-金谷より北に対する海水交換量とは厳密には異なるが, フェリーの流向流速データから求めた海水交換日数とは

Monthly averaged velocity of residual current (cm/s)

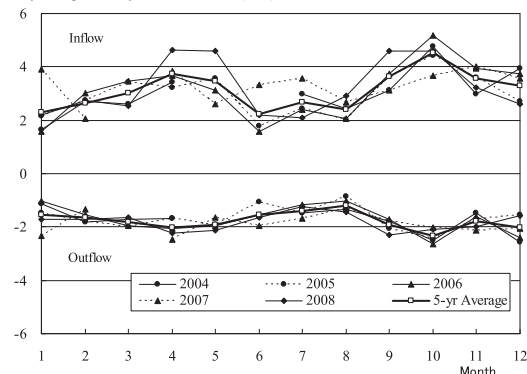


図-4 月平均残差流の断面平均流速 流入と流出の流速

ば一致しており, ボックスモデルとフェリー観測によって得た海水交換量の妥当性を示すものである。

表-1は各種解析結果の比較であり, 1947~74年の塩分・水温の観測データから求めた宇野木・岸野(1977)の結果と比較すると, 今回のフェリー観測から得られた海水交換日数は小さく, 高尾ら(2004)の海水交換日数を5年間のデータにより支持している。

(2) 海水交換効率 Q/R と密度成層の関係

図-7は, 月平均の海水交換量 Q と淡水流入量 R である。エスチュアリー循環のため, 淡水流入量 R が多ければ海水交換量 Q が大きくなるという傾向が見られるものの, ばらつきがかなり大きい。

図-8は, 海水交換量と淡水流入量の関係の5年間平均で

Monthly averaged water exchange rate ($\times 10^3$ m³/s)

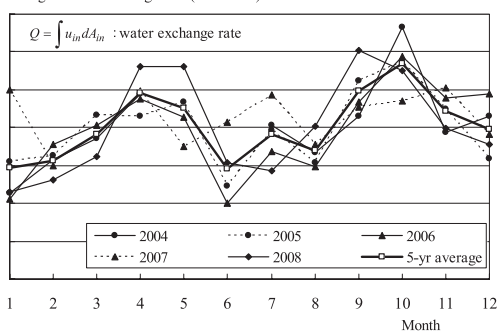


図-5 東京湾口における月平均海水交換量

Residence time of river water τ (day)

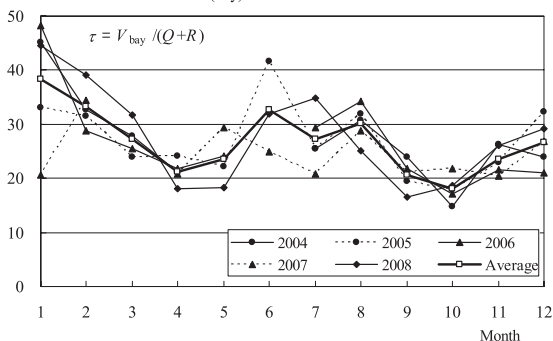


図-6 東京湾の淡水の滞留日数

表-1 既往の研究による海水交換日数

	対象年	夏季	冬季	分割線
松本ら (1974)	1974		1.7~ 2.3ヶ月	現地観測 観音崎-第一海堡
宇野木ら (1977)	1947 -1974	1.1ヶ月	2.65 ヶ月	ボックスモデル 浮島-盤洲, 観音崎-富津
宇野木 (1998)	1961 -1970	1.0ヶ月	2.7ヶ月	ボックスモデル 観音崎-富津
高尾ら (2004)	2002 -2003	20日	40日	ボックスモデル 観音崎-富津

あり、それぞれの月を表示した。これをみると、6～9月の関係と3～5月、11～12月の関係が大きく違っている。

そこで図-9に各月の淡水流入量に対する海水交換量の比 Q/R を示した。 Q/R 比は淡水流入量に対するエスチュアリー循環の効率であると考えられ、ここでは Q/R 比を海水交換効率とよぶことにする。6～9月の Q/R 比は20～25であるのに対し、3～5と11～12月の Q/R 比は40～45と大きく、1～2月は若干小さく約32～38である。

宇野木（1998）はボックスモデルにより、 Q/R 比が冬季に大きく約13、夏季に小さく約6であることを示した。

宇野木の海水交換量は観音崎－富津での量であり、本研究の海水交換量は久里浜－金谷での量であるため、大きさは異なるものの、夏に Q/R 比が小さく、冬に Q/R 比が大きい傾向は一致している。宇野木は Q/R 比が夏季に小さくなる原因として密度成層の発達により鉛直混合が小さくなり、エスチュアリー循環が小さくなることをあげている。そこで、ここでは千葉灯標で2003年から連続的に計測されている水質データと比較し、海水交換効率 Q/R と東京湾奥の密度成層の関係を調べることとした。

図-10は、海水交換効率 Q/R と密度成層の発達を示す表層（水深1m）と下層（水深10m）の密度差 $\Delta\sigma_t$ とを比較

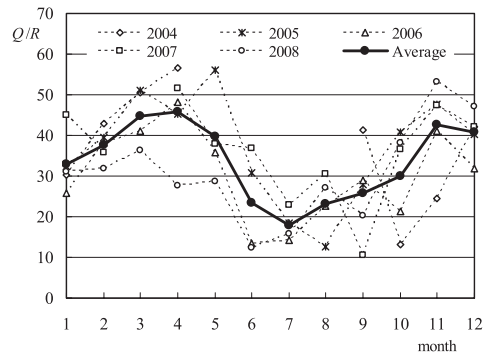


図-9 各月の海水交換効率 Q/R

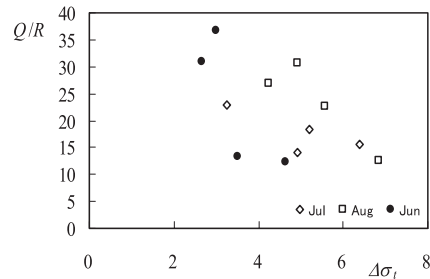


図-10 東京湾奥（千葉灯標）の密度差と海水交換効率 Q/R

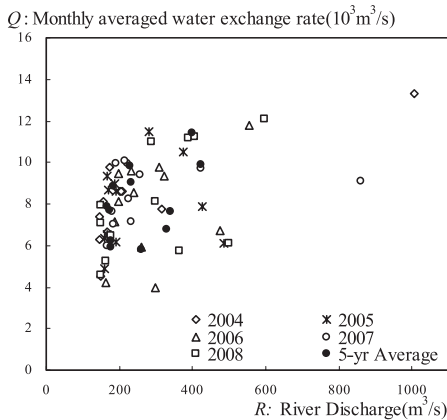


図-7 淡水流入量と月平均の海水交換量

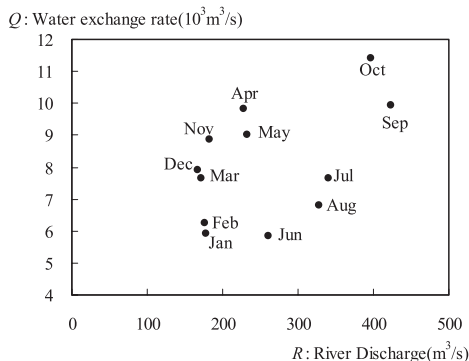


図-8 5年平均の月平均淡水流入量と月平均海水交換量

したものである。 Q は東京湾フェリーによる観測値、密度差 $\Delta\sigma_t$ は千葉灯標での観測値であり、それぞれ6～8月のデータを比較している。 Q/R と $\Delta\sigma_t$ は負の相関関係にあり、6, 7, 8月の相関係数はそれぞれ0.80, 0.77, 0.90だった。密度成層が発達することにより、エスチュアリー循環による海水交換効率が低下していることが、これらのデータから実証的に明らかとなった。

(3) 海水交換効率に及ぼす風向と外洋水の進入

前掲図-9で1～2月の海水交換効率が極小値をとった原因として、風向きと外洋水の進入について考える。

図-11は羽田の各月の風向きの割合である。6～8月にかけては南よりの風が多く8月は約50%が南よりの風であり、9月になると北～北東の風のしめる割合が多くなる（図-11 (a)）。一方、10～2月は北よりの風が多く、約80%を占めている。ただし、秋から冬の図をよく見ると、9～11月は北東の風が卓越するのに対し、12～2月は北北西の風が卓越している（図-11 (b)）。東京湾の長軸は北東－南西の軸にそっており、北東の風はエスチュアリー循環を強化するものと考えられる。したがって、このように秋から冬にかけて北東風から北北西風に風向きが変わることが海水交換効率 Q/R を小さくしている可能性がある。

一方、冬季になると東京湾内の海水が冷却されて密度が大きくなるため、秋季には中層に進入していた外洋水の進入深度が徐々に深くなる傾向にある。図-12はフェリー航路（S4）と湾央（C12）で観測された水温のイソ

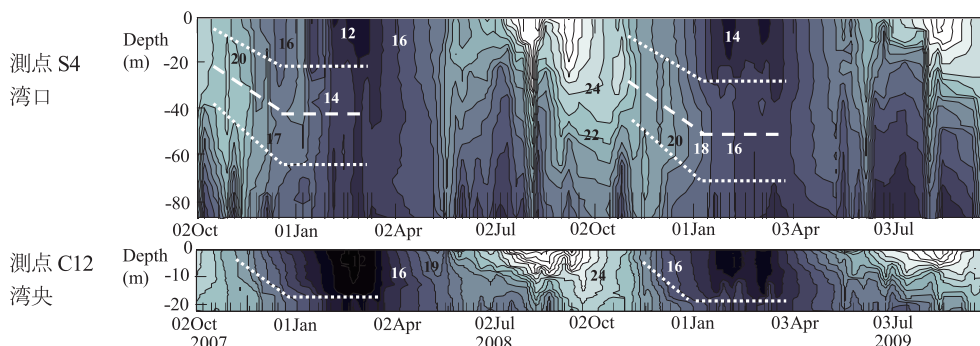


図-12 水温のイソプレス 秋から冬にかけて外洋水の進入深度が深くなる 湾央では中層から底層進入へ変化する

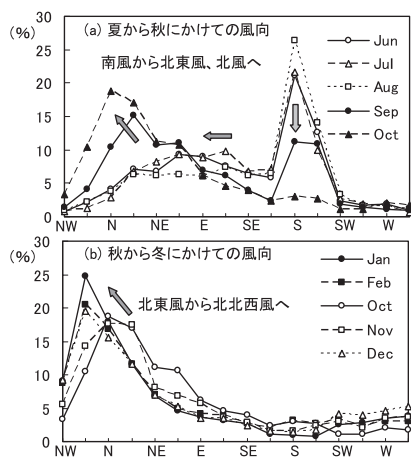


図-11 夏から冬にかけての風向きの変化 (羽田アメダス)

プレスである。冬季には外洋水の水温の方が湾内水の水温よりも高いため、外洋水の進入深度が推定できる。1～2月にかけて進入深度が徐々に深くなり、湾央では15m以深となり、外洋水の進入量が小さくなっているものと考えられる。外洋水の進入深度が深くなる現象については藤原 (2009) にも示されている。前掲図-9で1～2月の海水交換効率 Q/R が低かった原因として、このように冬季に外洋水の進入深度が深くなることも、1～2月にかけての海水交換効率を下げる要因の一つとなっている可能性がある。

5. まとめ

- (1) フェリーによる東京湾口の過去5年間の潮汐残差流の年平均流向流速は、上層流出、中層流入、下層流出であり、富津一観音崎以北の水深30mより浅い部分と対応させるならば、上層流出、下層流入であり、東京湾のエスチュアリー循環と対応していた。
- (2) この流向流速データから求めた東京湾の淡水の滞留日数は1月が40日と最も長く、最も短い9～10月には約20日で交換していた。この結果は高尾ら (2004) が

ボックスモデルで求めた値と一致しており、ボックスモデル解析とフェリー観測による淡水の滞留日数の算定それぞれの妥当性を示すものであり、今回初めて示されたものである。

- (3) 6～9月の海水交換効率 Q/R (湾口海水交換量 Q の淡水流入量 R に対する比) は20～25であるのに対し、3～5月と11～12月の Q/R 比は40～45と大きく、1～2月は若干小さく32～38だった。海水交換効率 Q/R と密度成層の発達を示す湾奥 (千葉灯標) の表層と下層の密度差 $\Delta\sigma_t$ を比較した結果、 Q/R と $\Delta\sigma_t$ は負の相関関係にあり、密度成層が発達することにより、エスチュアリー循環による海水交換効率が低下していることが、今回の観測データから実証的に明らかとなった。なお、冬季の海水交換効率 Q/R に風向や外洋水の進入深度が影響する可能性が示されたがその定量的評価は課題として残された。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、千葉灯標のデータを海上保安庁海洋情報部から頂いている。フェリー観測では東京湾フェリー株式会社の皆様から多大なご協力を頂いている。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 宇野木早苗・岸野元彰 (1977): 大局的に見た内湾の海水交流, 第24回海岸工学論文集, pp.486-490.
- 宇野木早苗 (1998): 内湾の海水交換量と河川流量の関係, 海の研究, Vol.7, No.5, pp.283-292.
- 鈴木高二朗・竹田 晃 (2006): 東京湾口フェリーによる海洋環境の2003～2005年の観測結果とその特徴, 港空研資料, No.1134, 37p.
- 高尾敏幸・岡田知也・中山恵介・古川恵太 (2004): 2002年東京湾広域環境調査に基づく東京湾の滞留時間の季節変化, 国総研資料, 第169号, 78p.
- 藤原建紀 (2010): 閉鎖性内湾の循環構造, 第10回東京湾シンポジウム報告, pp.17-26.
- 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.