

海水交流に関する現地観測

松本輝寿*・金子安雄**・寺尾健***・川島毅****

1. まえがき

東京湾は湾口部が狭く閉じた内湾域を形成しているため、湾内水と外洋水の交流が少ない。しかも、沿岸地域の人口の集中、産業の発展により、湾内に流入する汚染物質量は増加の一途をたどっている。

このため汚染の進行が著しく、東京湾をわが国首都圏のかけがえのない資源として今後も利用していくために、水域環境保全施策の必要性が強く認識されるにいたった。

これらの施策については、模型実験、数値計算を用いての評価が行われる。そのとき、湾口での湾内水と外洋水の交流による汚染物質の流出入の取扱いが問題となる。海水交流は、恒流および潮汐ごとに行われる湾内水と外洋水の交換によるが、これらについて、東京湾での実態はいまだ明らかにされたとは言い難い。

東京湾口での恒流については、山田¹⁾が30日間の潮流観測記録から、恒流の変化について述べている。

潮汐による海水交換については、明石海峡、サンフランシスコ湾などで、現地観測が行われている。速水²⁾は、明石海峡での播磨灘と大阪湾との海水交換について、塩素量と密度の測定結果を混合距離の概念を用いて解析している。Parker³⁾は、金門海峡でのサンフランシスコ湾と外洋との海水交換について、異なった潮汐条件下で塩素量を測定し、海水交換の大きさと潮差の関係を求めている。

本報告は、山田¹⁾およびParker³⁾の方法にならって、恒流と潮汐による海水交換について、富津と観音崎を結ぶ線上での、15日間の潮流観測と、のべ2昼夜の塩分測定を実施した結果をまとめたものである。

2. 海水交流による物質収支

湾口での流れは恒流と潮流にわけられる。恒流は濃度分布と無関係に、流れの方向に物質を輸送する。潮流は下げ潮時に湾内水を湾外へ流出し、上げ潮時には、下げ潮時に流出した湾内水の一部と新しい外洋水を湾内へ流

入させる。この潮汐による海水交換は、濃度の高い所から低い方向へ物質を輸送する。

このため、海水交流による湾口での物質の収支を考える場合、恒流および潮汐による海水交換を取り扱わなければならない。

以下に、物質の収支、恒流の強さ、潮汐による海水交換率を定義し、それらの関係を求める。

一潮汐間の海水の流出量と流入量の比 α は、 Q_e を流出時の流量、 Q_F を流入時の流量として、

$$\alpha = \int Q_F dt / \int Q_e dt \dots\dots\dots (1)$$

一潮汐間の海水中の物質の流出量と流入量の比 β は、 C_e を流出時の濃度、 C_F を流入時の濃度として、

$$\beta = \int Q_F C_F dt / \int Q_e C_e dt \dots\dots\dots (2)$$

Parker³⁾にならい、上げ潮時に湾内に流入する海水のうち、初めて湾内に入ってくる外洋水の比 r を潮汐による海水交換率 (tidal exchange ratio) と定義して

$$r = Q_0 / Q_F \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 Q_0 は上げ潮時に初めて湾内に入ってくる外洋水の流量であり、下げ潮時に流出した海水のうち、上げ潮時に湾内に戻る海水の流量を Q_B とすれば、 $Q_F = Q_0 + Q_B$ である。

r の値は上げ潮の各時刻において変化すると考えられるが、この変化を無視し、さらに、上げ潮時には、その前の下げ潮時に流出した海水は流出時の平均的な濃度 $\bar{C}_B$ で戻ってくると仮定すれば、 α 、 β 、 R の間に次の関係が成り立つ。

$$\beta = \alpha [1 + R(C_0/\bar{C}_B - 1)] \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 R は一定値と仮定したときの r 、 C_0 は外洋水の濃度である。 $\bar{C}_B$ は流出時の平均濃度であり、

$$\bar{C}_B = \int Q_e C_e dt / \int Q_e dt \dots\dots\dots (5)$$

式(4)は海水交流による物質収支 β と恒流による海水収支 α 、潮汐による海水交換率 R の関係を表わしている。

塩分のように湾内水よりも外洋水の濃度が高い場合、 $(C_0/\bar{C}_B - 1) > 0$ であり、 α 、 R が大きいほど β も大きくなる。つまり、恒流による流入量、潮汐による海水交換

* 正会員	運輸省第二港湾建設局次長
** 正会員	運輸省港湾技術研究所海洋水理部海洋汚染水理研究室長
*** 正会員	運輸省第二港湾建設局京浜港工事事務所所長
**** 正会員 工修	運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所

率が大きいほど、物質の流入量も大きくなる。汚染物質のように湾内水が外洋水よりも濃度が高い場合、 $(C_0/\bar{C}_B - 1) < 0$ であり、 α が小さいほど、 R が大きいほど β は小さくなる。つまり、恒流による流出量が大きいほど、潮汐による海水交換率が大きいほど、物質の流出量も大きくなる。

ある指標物質を選び、潮流と水質を同時に測定し、 β , α , $C_0/\bar{C}_B$ を求めて式(4)により R を求めれば、他の物質についても、流出時の平均濃度と外洋濃度がわかれば、その物質の収支を推定することが可能となる。

3. 観測方法

図-1, 2 に示す地点で、15日間の潮流観測、1昼夜の塩分、水温観測を冬期に2回実施した。

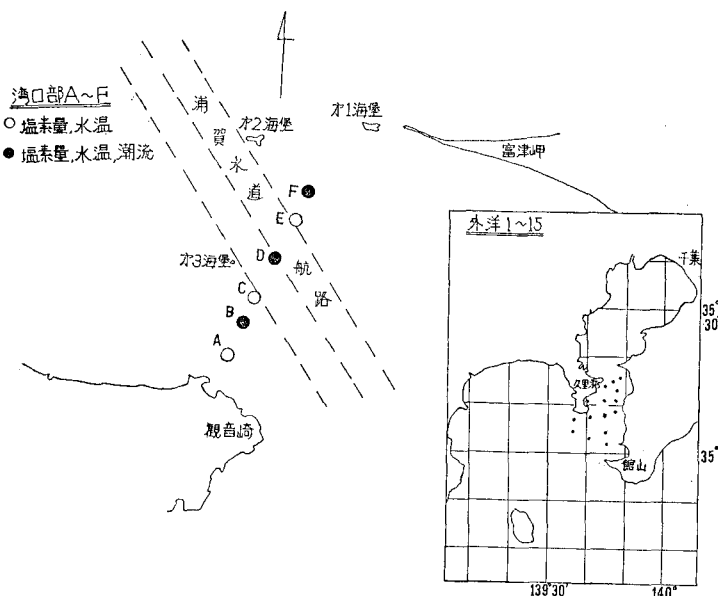


図-1 調査位置図

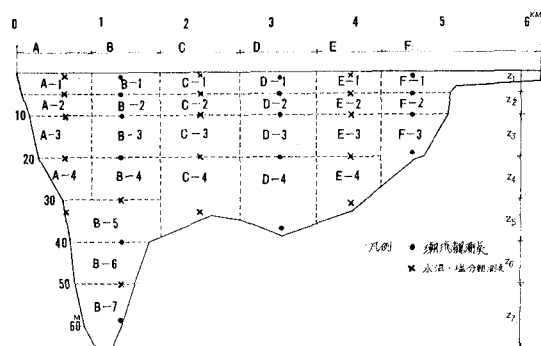


図-2 測定断面図

図-1 St. B, D, F に小野式流向流速計を設置し、2月1日から2月16日まで、15日間連続観測を行った。

St. A~F, 1~15において、2月10日から11日、3月9日から10日にかけて、1昼夜の採水、測温を行った。St. A~F は、観測船3隻によって各船2測点ずつ分担し、1時間ごとの採水とサーミスター温度計を用いての測温を行った。外洋の測点 St. 1~15 は、観測船1隻により、1昼夜に1回、St. A~F と同様の方法で採水、測温を行った。採取した海水は、陸上の分析室においてサリノメーターによる塩分測定を行った。

4. 整理方法

(1) 潮流

小野式流向流速計の記録から流向、流速を読み取り、観測断面方向、断面直角方向の成分に分け、時間変化曲線を作成した。さらに、断面直角方向の成分については、25時間の移動平均を行い、恒流の変化曲線を作成した。

また、採水時の記録から毎正時における断面直角方向の流速を求め、断面をいくつかに分けた各ブロックの断面積をかけて、流量を求めた。これより、上げ潮時、下げ潮時に断面を通過する水量とその比 α を求めた。

(2) 塩分

各点、各層の塩分の経時変化曲線を作成し、毎正時の平均塩分を求めて、流量をかけた。これより、上げ潮時、下げ潮時に断面を通過する塩分量とその比 β を求めた。さらに、塩分と流量より流出時の平均塩分 $\bar{C}_B$ を求めるとともに、外洋での測定結果から、外洋濃度 C_0 を求めた。

(3) 海水交換率

(1), (2) の結果を用いて、式(4)により各ブロックごとの海水交換率を求めた。また、全体の海水交換率 R_T を、 R_{ij} を各ブロックごとの海水交換率、 V_{Fij} を各ブロックを上げ潮時に通過した水量として、式(6)で求めた。

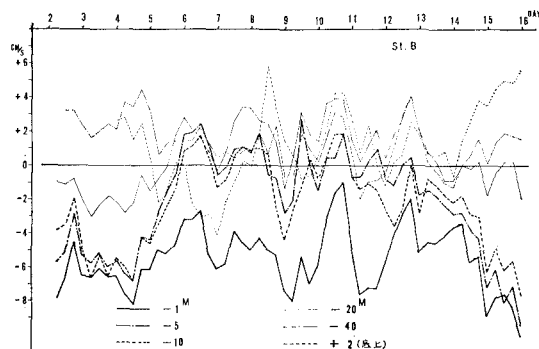
$$R_T = \sum_{ij} V_{Fij} R_{ij} / \sum_{ij} V_{Fij} \dots \dots \dots (6)$$

5. 観測結果

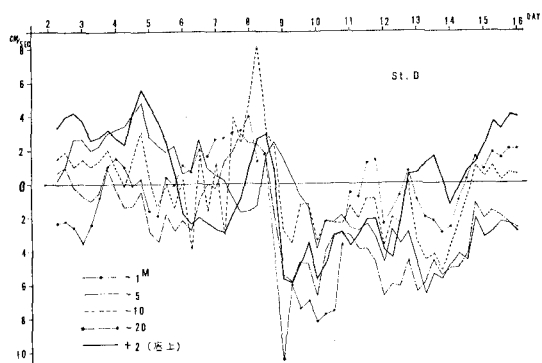
(1) 恒流

図-3~5 に恒流の変化曲線を示す。いずれの測点においても恒流の変化が激しいが、その変化には以下の傾向がみられる。

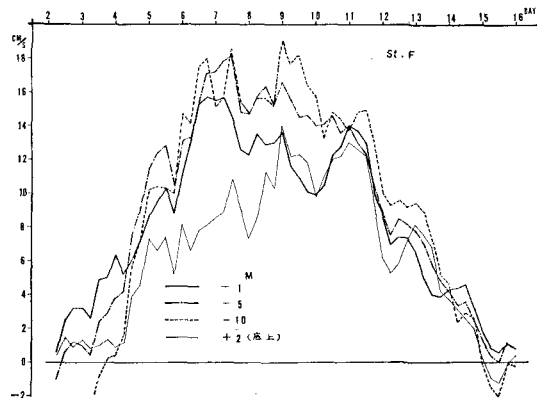
- 1) B点では上層と下層でやや相反した流れを示している。
- 2) D点では観測期間前半の2月8日まではやや流入



図—3 恒流の変化 St. B



図—4 St. D



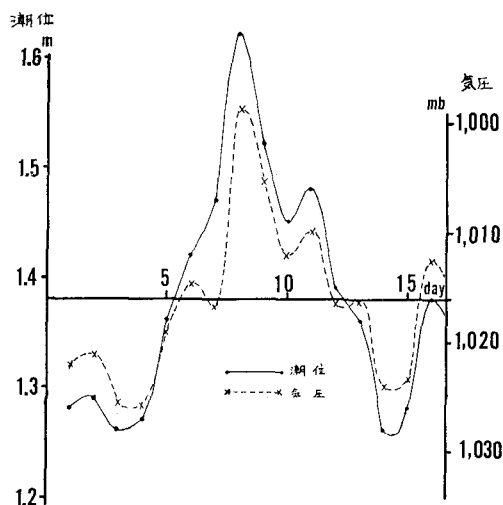
図—5 St. F

の傾向を示し、9日以降の後半は流出の傾向を示している。

3) F点では観測期間を通じて流入していたが、観測期間中頃の8日から9日にかけて、流入速度が非常に大きく、その前後は対称的な変化を示している。

これらの恒流の変化と気象海象条件の関係を検討するために、観測期間中の横浜での気圧、第2海堡での潮位の25時間移動平均値を図—6に示す。

平均潮位の変動は気圧変動とよく対応しており、観測期間前半は平均潮位が上昇し、後半は下降している。平

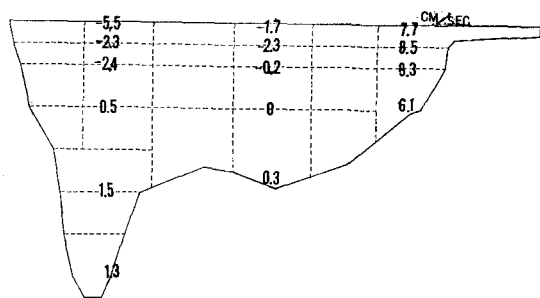


図—6 潮位 (25時間移動平均値)

均潮位の上昇、下降は湾口を通じての海水の流入、流出を伴うはずであるが、これはD点での前半の流入、後半の流出と対応している。

観測期間中の潮汐は、小潮～大潮～小潮の変化を示し、観測期間中頃の潮差が最大であり、F点での流入速度の変化と対応している。山田ら⁴⁾は、恒流の原因の一つとして、潮汐による地形性の恒流をあげ、その大きさは主流の流速に比例しているが、F点での恒流の大きさが潮差と対応していることから、F点での恒流は富津岬による地形性の恒流と推定される。

図—7は、恒流の15日間平均値を示したものである。B、D点では-20m以浅で流出、以深で流入し、F点ではいずれの層でも流入している。



図—7 恒流 (15日間平均値)

(2) 海水交換率

a) 観測記録

2月10日から11日にかけての採水期間中の、第2海堡での潮位、St. Bの表、底層、St. Fの底層での潮流、塩分の変化を図—8から図—14に示した。

日潮不等が少なく潮差は約1.3mであった。水深方向にはほぼ同時刻に転流しているが、St. Fでは流出から流入への転流時が他の測点より3時間ほど早く、流入時

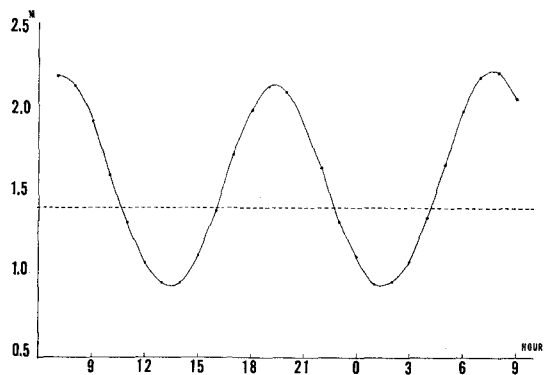


図-8 潮位 (49年2月10~11日)

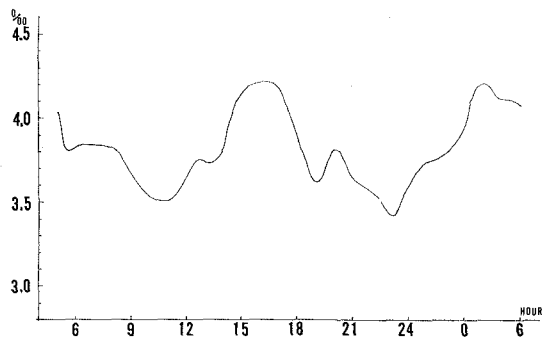


図-12 塩分曲線 (St. B, 底上 2m)

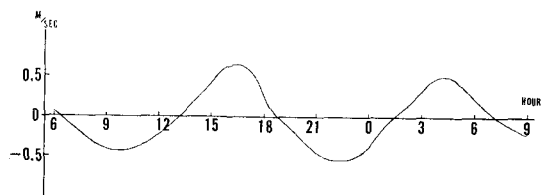


図-9 流速曲線 (St. B, -1m)

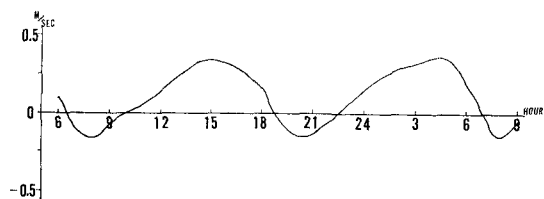


図-13 流速曲線 (St. F, -1m)

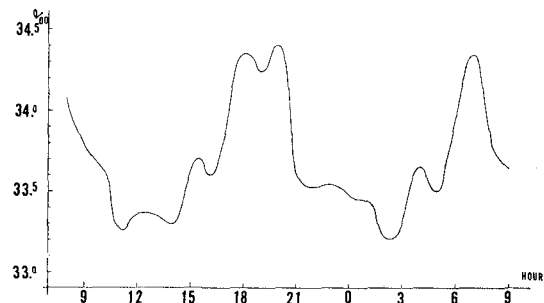


図-10 塩分曲線 (St. B, -1m)

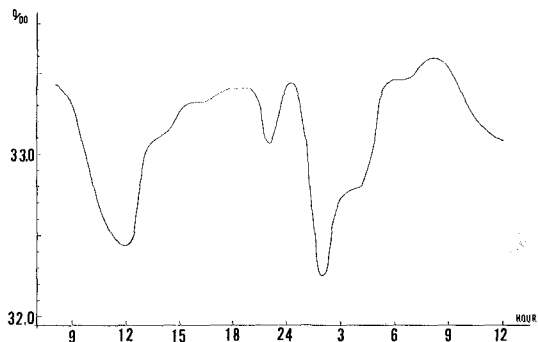


図-14 塩分曲線 (St. F, -1m)

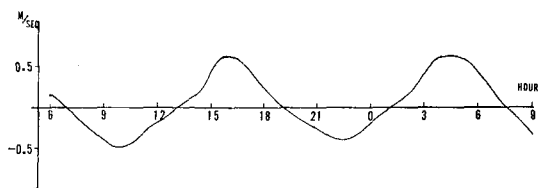
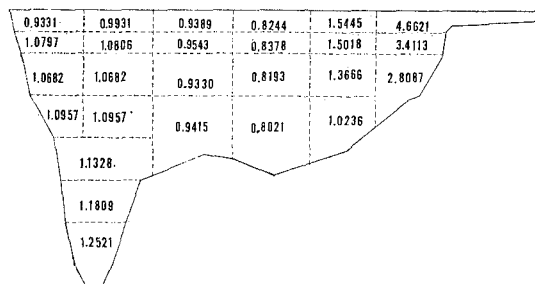
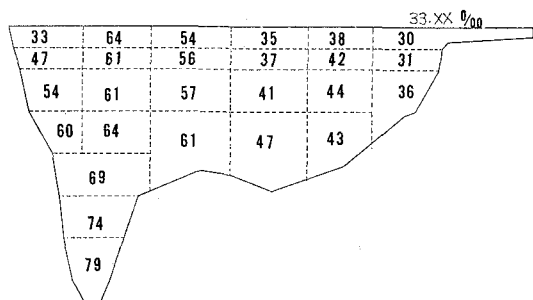
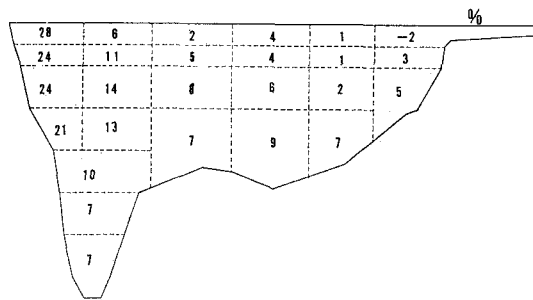
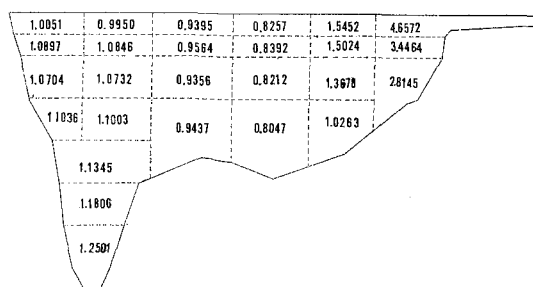
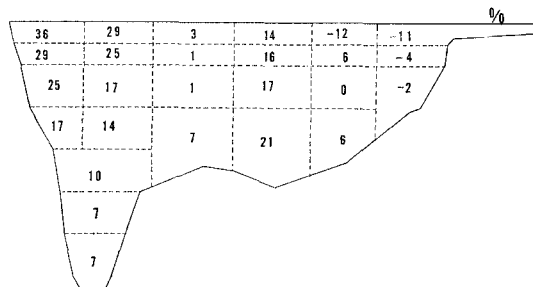


図-11 流速曲線 (St. B, 底上 2m)

図-15 α (2.10~11)

図-16 $\bar{C}_e$ (2.10~11)図-18 R (2.10~11)図-17 β (2.10~11)図-19 R (3.9~10)

間が流出時間よりも長い。また流速の最大値も流入時のほうが大きい。

塩分は、湾内水の影響が最も強い流出から流入への転流時に低くなり、外洋水の影響が最も強い流入から流出への転流時に高くなっている。

b) 海水の収支

2月10日から11日にかけての2潮汐間の α の分布を図-15に示す。a)で指摘した15日間の平均的傾向と比較して、富津側で流入の著しい点は一致するが、中央部では上層のみでなく、下層からも流出していた点が異なる。

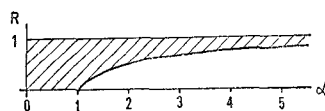
c) 塩分の収支

断面を通過する塩分分布の大略を知るために、2月10日から11日における $\bar{C}_E$ を図-16に示す。高塩分水は測点Bにあり、東西に遠ざかるにしたがって、その値は小さくなる。また、上層よりも下層のほうが一般的に高塩分である。

2月10日から11日にかけて、2潮汐間の β の分布を図-17に示す。図-10, 12, 14に示したように、塩分の潮時変化は塩分値そのもののわずかなパーセントである。そのため、流量と塩分の積である塩分量の流出入量の比 β は、海水の流出入量の比 α とほとんど同じ分布となっている。

d) 海水交換率

海水交換率を求めるのに必要な外洋水の濃度 C_0 は、2月10日から11日にかけての外洋での平均値として、34.754‰であった。

図-20 R の範囲

R の値は、図-18, 19にみられるように、 $-0.03 \sim 0.28$ (2月10日~11日)、および $-0.11 \sim 0.36$ (3月9日~10日)の範囲で変動する。 R が負の値をとることは考えられないが、 R を求めるまでの流速、塩分の観測の粗さ、測定誤差などによって生じたものと考えざるをえない。

一般的に、観音崎側で R の値が大きく、富津側で小さい。また、観音崎側では上層で R が大きいが、逆に富津側では下層のほうが大きい。

また、全体の海水交換率 R_T の値は、2月10日~11日にかけては8%、3月9日~11日にかけては10%であった。

e) α と R の関係

下げ潮時に流出した海水のうち、上げ潮時に湾内に戻る海水の比を R' とすると、

$$R' = \frac{\int Q_E dt}{\int Q_E dt} = \alpha(1-R) \dots \dots \dots (7)$$

R' は0と1の間の値をとるので、

$$1 - \frac{1}{\alpha} < R < 1 \dots \dots \dots (8)$$

すなわち、 α が大きくなるにつれて、 R のとりうる

値の下限は、図—20に示したように大きくなる。

しかるに、富津側では α がきわめて大きいにもかかわらず R はほとんど0である。

この原因として、a)で示したように、富津側の流出から流入への転流時が中央部より3時間ほど早く、観音崎から中央部にかけて、湾内水がまだ流出しているにもかかわらず、すでに富津側から海水が流入しているためと考えられる。すなわち、流出から流入への転流時に湾口外富津南側に反時計回りのうずが形成され、富津側から流入する海水の主体が中央部から流出した塩分の低い海水であったためと推定される。

f) $C_0/\bar{C}_B$ と β の関係

今回の観測結果には、ある程度の誤差が含まれており、海水交流の機構も不明であるが、2回の観測結果から、 α , R の大略の値を推定し、式(4)をもとに、 $C_0/\bar{C}_B$ と β の関係を検討する。 α は観音崎側表層での0.8程度から、富津側での4程度まで、 R は観音崎側表層での0.3程度から富津側での0程度まで変化すると、大まかな検討を行う。

塩分のように湾内外の濃度差が少なく、 C_0 が $\bar{C}_B$ よりも数%しか大きくない場合、 R が高々0.3程度であるので、 $R(C_0/\bar{C}_B - 1)$ が1に比べて無視でき、一方、 α は0.8から4まで変化するので、 β は α にほぼ比例すると考えてよい。つまり、物質の収支は主として恒流に支配され、観音崎から中央部にかけての表層から流出し、その底層および富津側から流入する。

また、湾内外の濃度差が大きく、たとえば $C_0/\bar{C}_B = 0.5$ である物質を考えると、富津側では $R \approx 0$ であるため、 $\beta \approx \alpha$ つまり物質の収支は主として恒流に支配されるが、観音崎側では $\beta = 0.7$ となり、恒流のみによる場合よりも1割程度流出量がふえ、海水交換の影響も無視できなくなる。

6. あとがき

東京湾口で一昼夜の塩分、水温の測定と15日間の潮流観測を行った。

湾口での物質の流出入は恒流と潮汐による海水交換によって行われる。恒流については、その変化は激しい

が、平均的傾向として、観音崎から中央部にかけての表層から流出し、観音崎から中央部にかけての底層および富津側から流入していた。特に、富津側からの流入が著しかった。また、恒流の変化の原因として、気圧変動による海面の昇降、地形性の恒流の潮差による消長などが考えられた。

海水交換率については、観音崎側で大きく、富津側で小さかった。富津側で海水の流入する傾向が著しいにもかかわらず海水交換率が小さな値を示す原因として、富津南側にできる反時計まわりのうずの影響が考えられた。

恒流と海水交換率の断面分布から、湾内外の濃度差の小さい物質は恒流によって輸送される量がほとんどであり、湾口での物質の流出入は、上に述べた恒流による海水の収支と似た傾向を示す。

湾外の濃度が湾内の濃度に比べて非常に低い物質は、富津側から恒流によって流入する傾向は上と同じであるが、観音崎側表層からの恒流による流出以外に、海水交換による流出も大きくなる。

ただし、以上の結果は成層の弱い冬期の観測結果によるものであり、成層の発達した夏期には、海水交流の機構そのものが変わる可能性がある。また、観測方法、解析方法にも大きな仮定を含んでおり、今後改良すべき点も多いと考えられる。

最後に、この観測は、第二港湾建設局横浜調査設計事務所が財団法人日本水路協会に委託して行ったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 山田紀男：東京港の潮流，水路要報第91号，pp. 85~90，1971.
- 2) 速水頌一郎・福尾義昭・依田大介：明石海峡による播磨灘と大阪湾との海水交流について，第3回海岸工学講演会講演集，pp. 49~53，1956.
- 3) Parker, D. S., Norris, D. P. and A. W. Nelson: Tidal exchange at Golden Gate, Proc. of ASCE, Vol. 98, No. SA2, pp. 305~323, 1972.
- 4) 山田紀男・矢野幸雄：地形の影響による恒流と1/4日周潮流の発生について，水路部研究報告第6号，pp. 63~77，1971.