

多摩川河口域における塩分・流速及び浮遊物質の現地観測

Observation on the temporal variations of salinity, velocity and
suspended substances in Tama River estuary

芝浦工業大学 正員 菅 和 利

東京大学工学部 正員 玉井 信 行

1. はじめに

都市河川の多くは排水樋管、支川を有し、本川上流域からの浮遊物質の輸送と併せて多数の汚濁負荷源を有している。河口部では塩分の河道への侵入が存在しており、上流から輸送された粘土鉱物を含む浮遊物質は塩素イオンによる電気化学的な作用により凝集体を形成し、大きな沈降速度を有するようになり河床近くへの沈降が加速される。河床近くに沈降した凝集体の一部は河床に堆積し、他の部分は密度の大きい下層塩水層に浮遊し、この塩水の流動に乗って上下流に浮遊移送される。そして、時として再浮上し水質を大きく悪化させる。又これら浮遊物質は洪水時には大部分が海へ移送される。近年、都市河川河口域は余暇空間の一部としての高度利用が考えられており、このような河口域及びそれに連なる湾等での水質環境の保全、改良の為には、河口部での浮遊物質の挙動及び輸送の収支を明らかにする必要がある。感潮河口部での浮遊物質輸送量の定量評価を行う為には、凝集体の形成過程、堆積、再浮上、浮遊物質の掃流力等に及ぼす流速、塩分濃度、浮遊物質濃度の効果について定量化する必要があるが未だ充分とは言えない。

我が国においては、現地観測の例は少なく、潮汐運動の下での複雑な様相を呈する塩分侵入現象と浮遊物質の挙動について不明な点が多い。本研究では、多摩川河口域を対象として、現地観測により潮汐周期の間の塩分、浮遊物質濃度、流速分布、乱れ成分等の時間変化を数周期にわたって測定することにより、浮遊物質の純輸送量等河口域での流動特性を把握しようとしたものである。

2. 観測地点及び測定方法

本研究での現地観測の目的は、塩分遡上の実態の把握、浮遊物質輸送現象の把握、流速分布、乱れ成分の測定にあり、多摩川河口域を網羅する多地点での測定が望ましい。しかし今回の観測では、流れを把握する事及び精度良いデータを数潮汐周期にわたって連続測定することを主目的とし、河口域内の代表地点での定点観測を行った。多摩川の感潮区間は調布堰(13.2km地点)から下流域で、この区間での平均河床勾配は図-1に示すように2つの領域に大分される。河口から約7kmの区間では河床勾配はほぼ平坦であり、7~13.2kmの区間では約1/2000である。従って感潮区間内の7kmの地点までは幅広い水理条件に対して確実に塩水くさびが遡上していることが予測されるので観測地点としては、この区間内で横断面形状の比較的矩形に近い5.2km地点を選定した。浮遊物質濃度は冬期、夏期では潮汐リズム等の差異により異なることが報告されているが本研究では夏期を対象として8月2日午前9時より8月4日午前10時迄の49時間4潮汐周期を測定期間とした。

2-1 測定方法

対象地点での水深は5~6.5mであり、流速も30~40cm/secが予測されたので、測定期間中の安全確保、計測器の固定の為に河道内に作業台を設置し、観測ステーションとした。測定項目としては4潮汐周期の間連続的に記録する流速の2成分、塩分分布と1時間間隔で測定する主流速の鉛直分布、浮遊物質濃度である。図-2は作業台及び計測器の固定位置、測定位置を示したものである。

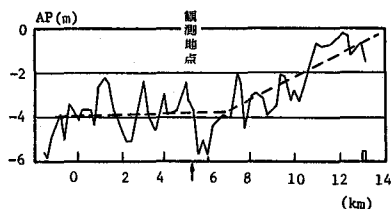


図-1 河床高の縦断面図

a) 流速成分の測定

流速成分としては、流れ方向の流速成分 u 、鉛直方向の成分 w を 2 成分電磁流速計 (E.M) を用いて測定した。 u 、 w は海向き、上向きを正とする。潮汐により水位が時間的に変化する流れ場では、鉛直断面内での測点の相対的な位置が時間と共に連続的に変化するので、流速成分の断面内分布の連続測定は困難である。そこで本観測では、鉛直断面内での流速分布としては 1 時間間隔で主流を測定することとした。乱れ成分及び鉛直速度成分等の流速成分の構造の測定としては上層、下層を代表する固定点に 2 成分電磁流速計をそれぞれ設置した。水深が 5 ~ 6.5 m の間で変化する所以、上、下層の代表地点として河床から 1.2 m 及び 4.2 m の所を選び、流速変動成分を精度良く測定する為に振動しないように配慮し、1.5 m のアームで作業台に固定した。出力はデータレコーダに連続的に記録した。又 1 時間間隔での主流流速成分 u の鉛直分布は可搬式電磁流速計を用い、正反の向きで 2 度トラバースすることにより流向と流速を測定した。

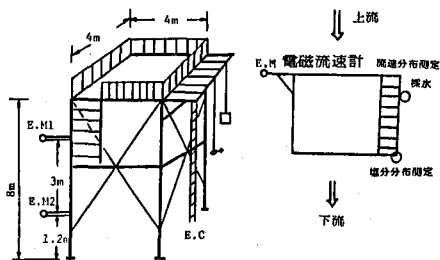


図-2 作業台

b) 塩分分布

塩分分布の測定は電導度より求めた。電導度の測定にはくし型の 4 電極プローブを作成し、鉛直方向に 30 cm の間隔で 24 個設置し、導電率計により測定した。導電率計プローブ及び 2 成分電磁流速計センサーは作業台に固定しており、作業台のヘドロ内への降下により実際は約 20 cm 河床に近い地点である。

c) 浮遊物質濃度

固形物として浮遊している物質を対象として、採水資料の分析より S S 濃度を測定した。又代表的な時刻には水面で 20 l の採水を行い、この資料を 450 °C で燃焼し、減量の測定より有機物質量を測定した。

3. 流況の分類

観測地点での水位及び代表時刻での密度分布、流速分布を示したのが図-3 である。密度分布より明らか

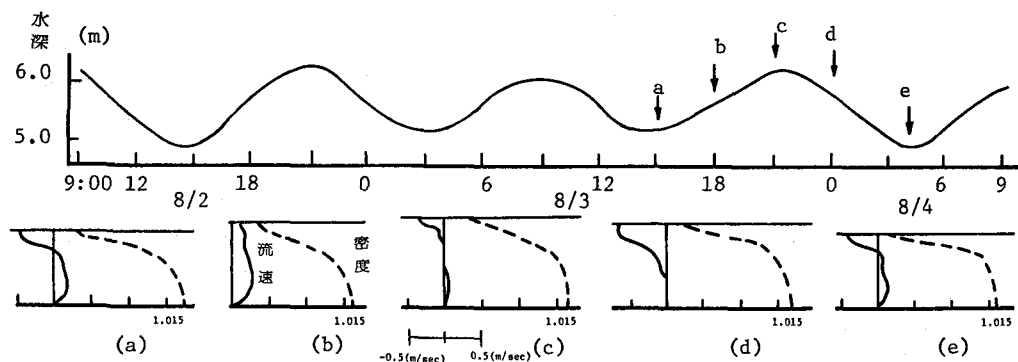


図-3 水位及び密度・流速分布

のように、下層塩水はくさびを形成して侵入していることがわかる。又分布形より緩混合型に属している。河口部流況の分類図としては Hansen・Rattray¹⁾ のものがある。彼らの分類法を観測地点に適用すると 2 型で連続成層の領域に属する。2 型の流況は“残差流の向きが水深方向に変化し、陸向きの塩分の輸送は拡散と残差流による”と定義されている。須賀²⁾ は日本の河川下流部でのデータを基にして水面と底面での塩素イオン濃度 C_S 、 C_B との比によって

$C_S/C_B < 0.1$ 弱混合, $0.1 < C_S/C_B < 0.5$ 緩混合, $C_S/C_B > 0.5$ 強混合

と定義し、大潮時潮位変動量と感潮区間長とによって整理した(図-4)。図中黒丸が今回対象とした多摩川でのデータであり、緩混合の領域に属している。又 C_S/C_B は約 0.2 である。観測時の潮位差は約 1~1.5 m で大潮~中潮の期間であった。又 Harleman・Abraham³⁾ はタイダルプリズム P_T 、淡水流量 Q_f 、潮汐周期 T 、河口部での最大フルード数 F_0 により $E = P_T F_0^2 / Q_f T$ で定義されるエスチュアリー数によって成層の度合を決定している。8月3日3時から8月4日4時までの2潮汐周期平均の P_T は 15540 m^2 であり $Q_f = 234 \text{ m}^3/\text{hr}$ 、 $T = 12 \text{ hr}$ 、 $F_0 = 0.04$ であり $E = 0.0088$ であった。Harleman・Abraham の論文より類推するとこの E の値ではシャープな界面を有する成層流を示し、観測結果とは一致しなかった。図-5 は観測期間中の2潮汐周期の深さごとの単位幅流量の潮汐周期平均を示したものである。河床から 3.7 m の間では陸向きの残差を示し、それより上層では海向きの残差を示し、重力循環流の存在を示している。又この差は海向きの量となり、河川淡水流量と大略一致しており、流速分布の測定精度が良好なことを示している。境界は密度分布より定義される中間層のほぼ中間的な位置に対応している。以上のことより、多摩川河口部では塩水くさびが潮汐周期のいずれの位相においても河道内に存在し、重力循環流の向きが水深方向に変化する緩混合型と分類することができる。

4. 流速成分及び流れの特徴について

密度分布より水面と底面での密度差の 0.9 だけ水面の密度より大きい密度の位置を界面と定義し、この界面により上層、下層と分けて呼ぶこととする。図-6 は上層、下層での平均流速の時間変化を示したものである。図中実線は上層を、点線は下層での流速を示す。又海向きの流速を正とする。図-3、図-6 を合せて見ると、上層の流れは退潮時の中間時刻に最大流速が出現している。下層流速の大きさは塩水の遡上速度を表わしており、塩水は上層流れが最大となる水位下降の時間変化の最大の時刻より遡上を開始し、水位の最も低い位相より約 1 時間進んだ時刻で最も活発に遡上する。このように上層流れは水位変化より $1/4$ 周期位相が進んでおり、下層塩水の運動はさらに $1/4$ 周期位相が進んでいる。図-7 は海向き、陸向きの流量を流速分布より算定したものである。この流量については上下層の流速とは異なり、海向き、陸向きの位相は一致している。このように水位の低下開始と共に海向きの流量は増加し始め、最大流量の時刻より陸向きの流量(塩水)の増加が始まり位相の一致が見られるが、水位最低時刻にはすでに陸向きの塩水の流量は大きく、位相は $1/4$ 周期ずれている。又深さごとの流向、流速はさらに複雑であり、このような流れによる浮遊物質の輸送量を評価する場合には注意が必要である。

図-8、9 は固定点での連続測定データより 1 時間間

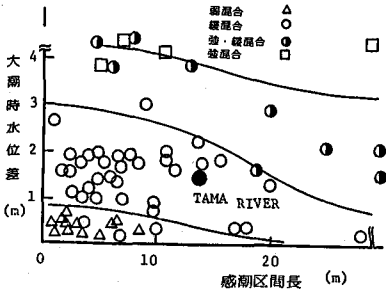


図-4 流況分類図(須賀)

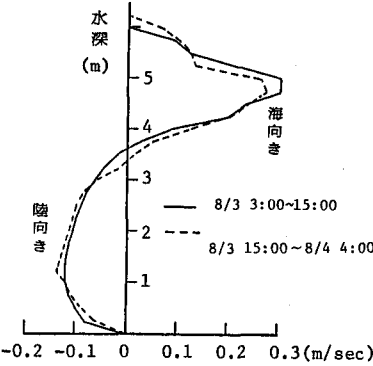


図-5 重力循環流

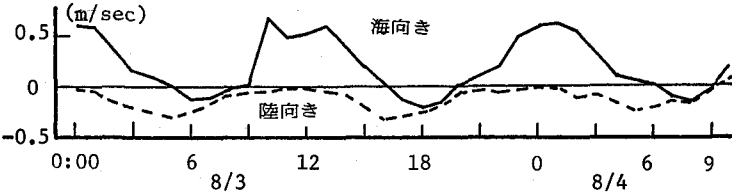


図-6 上・下層の平均流速

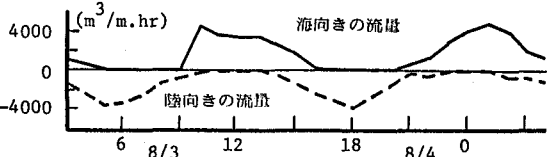


図-7 海向き、陸向き流量

隔の変動の大きさを示したものである。図-8は主流速成分 u の変動の2乗平均を、図-9は鉛直速度成分 w の変動2乗平均を示したものであり、実線は上層、点線は下層での値である。 $\sqrt{u'^2}$ 、 $\sqrt{w'^2}$ 共にほぼ同じ時刻で大きな値を示している。この位相は図-7の海向きの流量の最大となる下げ潮時に当り、下げ潮時に乱れ速度が大となる他の観測者の結果とも一致している。又陸向きの流量が大きな位相(図-7)及び下層流速の大きな位相(図-6)では $\sqrt{u'^2}$ 、 $\sqrt{w'^2}$ は共に比較的小である。鉛直方向の平均流速の大きさは+5cmから-3cmの大きさであり、予想以上に大きく、又変動流速も同等なオーダーであり、鉛直方向の物質の輸送が活発に生じていることを示唆している。又海向き流量の大きな位相で上層流の乱れ成分が大きくなることより、この位相では上層に浮遊している物質の海に向っての輸送量は沈降量に比べて卓越していると思われる。他方陸向き流量の大きな位相(塩水の侵入が活発)では上、下層の変動成分は共に小さく、沈降が促進され、堆積が進行すると考えられる。

5. 密度分布及び中間層厚さ

前述したように多摩川河口域は緩混合型であり、塩水はebbの終期においても河道内に存在していることが図-3より知られる。又図-3は、成層の度合が潮汐周期の各位相で異なることをも示している。図-10は密度分布より定めた中間層の厚さを上層水深で無次元化し示したものである。混合層の厚さ h は、水面と底面との密度差の0.1、0.9だけ水面の密度より大きな密度の存在する水深位置の距離として定義され、 h/h_1 の値が大きい程成層の度合の低いことを示している。水位の下降する位相では上層での海向きの流速が大きく、水面近くの間層をフラッシュすると共に上流から淡水が流下してくるので、上層の密度が小さくなり、一時的に界面が形成され、成層度が高くなる。このような比較的成層度の高い状態が水位上昇中期まで持続する。水位上昇に伴って海部の水面上に広がっていた希釈塩水が下層塩水を覆うようにして河道内に侵入してくるので水面の塩分が上昇し、中間層厚さは増加すると共に成層度は低下する。又中間層の厚さは潮汐周期平均では上層厚さの約80%に達しており、多摩川河口部が緩混合の状態であることを良く示している。今回の観測ではEuler的な方法によっているが、中間層の厚さは上述したような特性を有しながら場所的にも時間的にも複雑な様相を呈することが容易に予測しうる。河床に非常に近い層では、高濃度の泥流に近い状態が存在することが電導度の測定結果及び潜水による目視により観察された。

6. 浮遊物質濃度について

図-11は河床から1.2m、4.2mの位置での浮遊物質の重量濃度の時間的な変化を示したものである。実線が上層での濃度で点線が下層での濃度である。全体的には下部の方が濃度が高く、時として高濃度が出現している。図-11より次の4つの特徴を見出すことができる。

- i) 8月2日14時に下部の濃度が上昇し、この高濃度は5時間後の19時に再び出現し、11時間後の8月3日1時に再度出現している。同様な現象が8月3日19時から8月4日の7時の間にも生じておりいずれも4~6時間の周期を有しており、潮汐の半周期に近い値である。このことは、同一の高濃度の流塊が潮汐によって上、下流に輸送されていることを示唆している。($A_i, B_i; i=1\sim3$)
- ii) 下部に高濃度が出現しない周期では満潮時に上部では濃度が低くなる(C_1, C_2)
- iii) 上部に高濃度が出現するのは水位上昇期で、この時刻では下部濃度も大きい。
- iv) 水位上昇期(塩水侵入期)を起点とする高濃度Bの方が水位下降期末期を起点とするAよりも濃度が高い。

水位の上昇期に何らかの原因で河床から巻き上げられたヘドロは下層に浮遊するが、水位下降末期では上層の $\sqrt{u'^2}$ 、 $\sqrt{w'^2}$ は大きいので上層にまで混入しながら海に向って輸送され、水位上昇期に再びこの流塊が遡上するので C_1, C_2 のような上層での高濃度が出現すると考えられる。又高濃度の起点 A_1, B_1 も河床から巻き上がった高濃度流塊のこの地点への出現と見做すことができ、上層の $\sqrt{w'^2}$ の大きくなる水位の下降

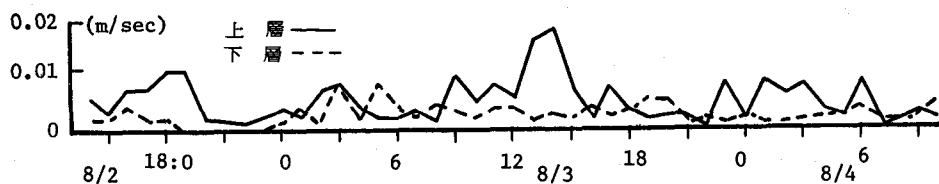


図-8 主流速成分の変動 $\sqrt{u'^2}$

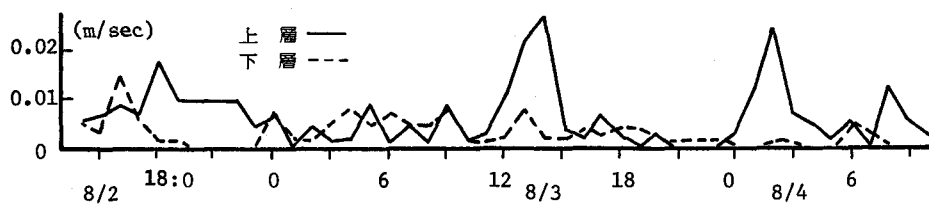


図-9 鉛直速度成分の変動 $\sqrt{w'^2}$

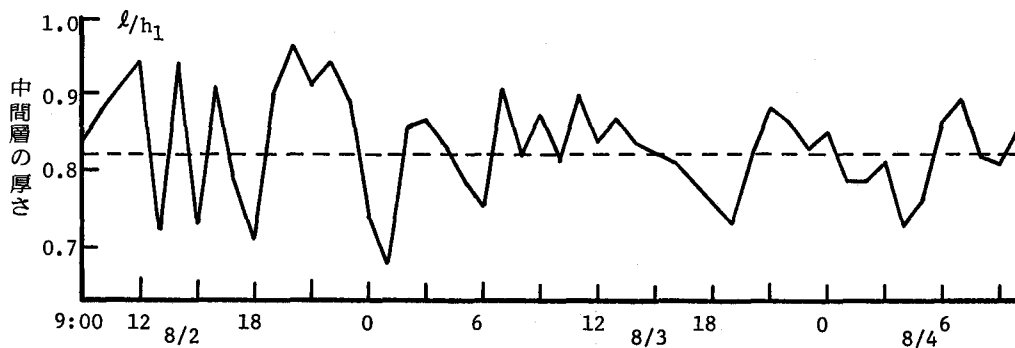


図-10 中間層の厚さ

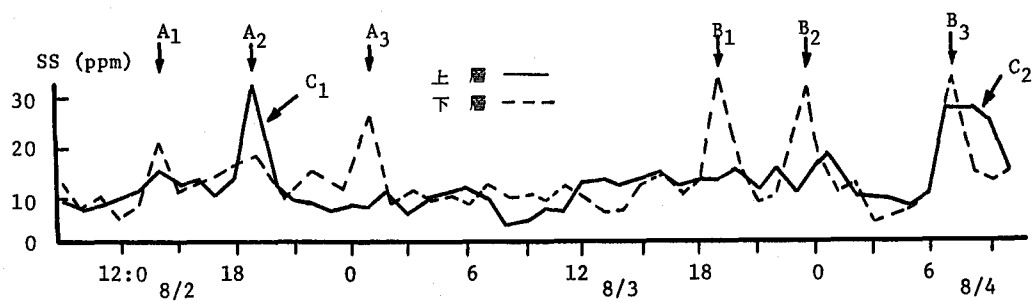


図-11 浮遊物質の濃度 (ppm)

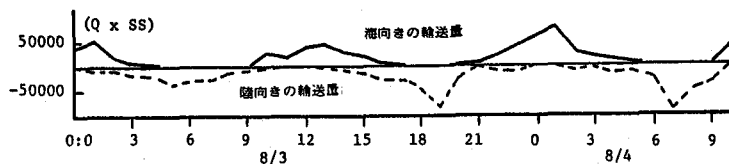


図-12 浮遊物質の輸送量

末期から上昇初期は塩水遡上の初期に当ており、遡上時に底泥を巻き上げている。

7. 浮遊物質の輸送量

図-12は流速分布より各時刻の海向き、陸向きの単位幅当りの流量を計算し、この流量による浮遊物質の輸送量を計算したものである。実線は海向きの輸送量を示し、点線は陸向きの輸送を示す。上層で海向きに輸送されている時にも下層では陸向きの浮遊物質の輸送が同時に生じていることを示しているが、周期平均で見ると浮遊物質はこの地点を行ったり来たり遊泳していると判断しうる。単位幅当りの2周期の海向き、陸向きの総輸送量はそれぞれ419.7kg、444.9kgでありこの差の分が陸向きに輸送されることになる。しかしこの値は総輸送量に比べると微少であり、差は有意なものでは無い。又浮遊物質中の有機物質の量を知る為に焼熱減量の方法により測定を行った。焼熱減量を精度良く行う為に一般の採水とは別に水面近くで下げ潮時、上げ潮時に20ℓづつ採水し、7ℓごとに分析を行った。結果は次のようになった。

8月2日11時(下げ潮)	浮遊物質濃度	11.3 ppm	有機成分	5.7 ppm
--------------	--------	----------	------	---------

8月2日17時(上げ潮)	"	12.5 ppm	"	5.6 ppm
--------------	---	----------	---	---------

このように浮遊物質中約半分が有機物であることを示している。

8. まとめ

多摩川河口部での現地観測により、緩混合状態の流況の概要、流速2成分の潮汐周期内での挙動、浮遊物質の輸送と塩分遡上、乱れ成分等の相関について明らかにすることができ、塩分遡上現象と浮遊物質の輸送をリンクした現象把握が可能となり、定量化への基礎的な知見が得られた。塩分分布形より定義した中間層厚を成層度の指標として各位相での成層度を明らかにした。又底泥の巻き上げが水位下降末期から水位上昇初期に大きくなる原因として、この位相で大きくなる上層の乱れ成分 $\sqrt{w'^2}$ 及び塩分遡上が大きな役割をしていることが明らかとなった。浮遊物質中に半分近く含まれる有機物の存在は、河床への堆積後底泥中での物質の移動を考える必要のあることを示唆している。

謝 辞

本調査の為に多大のご協力を賜った建設省関東地建京浜工事事務所及び大成建設東京湾作業所の方々ならびに東大土木：浅枝・廣沢 両氏に深く謝意を表します。又現地観測を担当してもらった東大応水研・芝工大水工研の学生諸君に感謝します。

参考文献

- 1) Hansen, D.V. and M. Rattray, Jr : New dimensions in estuarine classification, Limnol. Oceanog, Vol 11, 1966.
- 2) 須賀堯三：感潮河川における塩水くさびの水理に関する基礎的研究，土木研究所資料第1537号，1979.
- 3) Harleman, D.R.F. and Abraham, G., : One-dimensional analysis of salinity intrusion on the Rotterdam Waterway, Delft Hydraulic Laboratory Publ.No. 44, 1966.
- 4) 栗谷陽一：半閉鎖水域における物質の輸送及び収支に関する研究，科学研究費研究成果報告書，1984.
- 5) 馬場洋二・岩井国臣：感潮河道における浮遊物質の移動特性について，第24回水講演文集，1980.
- 6) 菅和利・玉井信行：バイパス型分・合流部を含む水路内での塩水くさびの挙動について，第28回水講演文集，1984.