

多摩川感潮域における水質及び鉛直拡散係数について

Observation on the water quality and coefficient of
vertical diffusion 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

感潮河口部では、浮遊物質、溶存酸素量(DO)、生物化学的酸素要求量(BOD)、有機浮遊物質等の水質要因が、潮汐運動に乗って上下流に浮遊移送される。塩水侵入現象に伴う複雑な流水の運動下で、これら水質の挙動を把握する為には、塩水侵入現象による各潮汐位相での海向き、陸向きの輸送現象と鉛直混合現象とを関連つけて考える必要がある。又水質の季節変化、昼夜変化についても明らかにする必要がある。

本研究では、現地観測を中心としてこれらのことを把握することを目的として、1984年8月、1985年2月、8月の3回、多摩川河口域において観測を行った。夏期には4潮汐周期にわたって連続的に、流速、乱れ成分、塩分濃度、浮遊物質濃度、DO、BOD等の鉛直分布を測定し、冬期には水質項目を中心として測定を実施した。さらに浮遊物質、底泥中に含まれる有機物質量を焼熱減量の方法によって求めた。これらのデータの解析より、塩分侵入現象と水質、鉛直拡散との関連を明らかにすることが出来、水質要因の挙動、堆積の状況を明らかにした。このような検討により、水質環境の管理に対して基礎的な資料を提することが出来ると考えられる。

2. 観測地点及び測定方法(1985年の観測)

1984年夏期の観測¹⁾では1断面1測線であったが、1985年夏期の観測では、断面間の非保存物質の収支を検討する為、河口より5.2km、4.4kmの800離れた2断面内の各々3測線で測定を行った。流速、塩分分布の測定方法は前報¹⁾と同様な方法である。

a) 浮遊物質濃度、DO、BODの鉛直分布

採水方法は、検水流入パイプを瓶底近くまで差入れ、空気抜き用のビニール管を水面上でクリップではさみ、所定の水深に採水瓶が達した後に空気抜き用のクリップを外し、採水を行った。この方法により所定の深さで、大気と接触していない検水を採水することが出来る。1m間隔で1ℓ瓶2本の採水を行い、この内1本は浮遊物質濃度の測定用とし、他の1本よりサイフォンを利用してDO瓶、ふらん瓶にオーバーフローするまで分注した。DO瓶中の検水は直ちに現地で固定を行い、冷水の入ったクーラー内に保存し、速やかに実験室に運び分析を行った。夏期の現地観測では、計測器に対する高温対策が必要であった。

b) 有機物質濃度

浮遊物質濃度はろ過により測定し、この中に含まれる有機物質の量は、ガラス繊維ろ紙の燃えない最高温度450°Cでろ過物質を燃焼し、その減量分として算定した。有機物質の測定の為には重量差が有意なものであることが必要で、その為に別途に各深さで7ℓの採水を行った。

c) 底質中の有機物質濃度

潜水によって、各測点の河床表面及びそれよりも50cm深い堆積層内のヘドロを200cc瓶に乱さないように採取した。この資料を110°Cで24時間乾燥した後600°Cで4時間燃焼し、その減量の測定により、底泥中の有機物質量を測定した。

水質の季節的な変動特性を知る為に、冬期を代表する1985年2月に測定を行い、夏期との比較検討を行った。

3. 流況の概要

多摩川感潮部での流況の詳細については前報¹⁾で報告している。1985年夏の各測点での重力循環流を示したのが図-1であり、断面内の流速、密度の分布を示したのが図-2、図-3である。図-2の実線は海向きを、点線は陸向きの流速を示したものであり、上層は開水路に、下層は管水路に類似な分布型をしている。又矩形に近い上流側断面内では等密度面はほぼ水平であり、他方下流側断面では、干潮時に干潟がでる程度に浅い左岸側では密度は深さ方向に一様で、その密度は他の測点に比べて小さい。水深の浅い部分は複断面水路の洪水数に相当し、塩水の遡上時には高濃度の塩水が貯蓄されることが予測されるが、観測ではその様な現象は見られなかった。又下げ潮時に河床に高濃度塩水の残ることも観察されなかった。

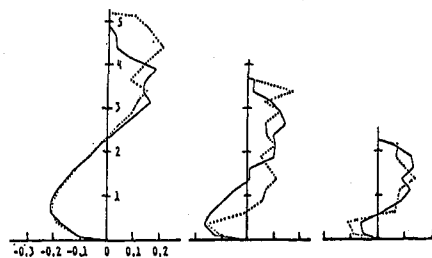


図-1 重力循環流 (4.4 km地点)

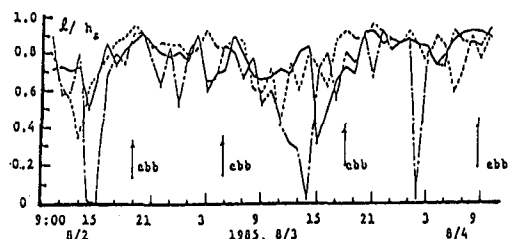
多摩川河口域は緩混合型であり、図-3の様な密度分布が潮汐の各位相で異なることは、各位相で成層の度合が変化することを示している。密度分布より定めた上層水深 h_s の内中間層厚さの占める割合を示したのが図-4である。成層度の違いは鉛直混合の強弱を概ね示すものであると考えられる。成層度パラメータ $1/h_s$ が上げ潮時に比較的大きく



図-2 流速分布 (下げ潮時) 上流断面 下流断面

なることが見られ、この位相では鉛直混合の結果中間層が厚くなるものと考えられる。又この位相では、鉛直速度成分が大きくなる結果も得られている。この鉛直混合について、乱れ速度成分の測定により検討を行った。乱れ成分の測定には2成分電磁流速計を用いた。

図-3 密度分布 (下げ潮時)



4. 電磁流速計と熱線流速計の応答性について 図-4 中間層の潮汐変化 (5.2 km地点)

電磁流速計の検出部は直径1cm弱あり、この検出部自体が乱れを発生させることが考えられるので、室内実験により熱線流速計との比較を行い、電磁流速計の出力の信頼出来る周波数域を決定した。感潮河川では潮汐によって流向、流速が複雑に変化すると共に乱れスケールも比較的大きいと考えられるので、減勢工下流部での大きな渦運動の存在する流れで電磁流速計の信号の有意性について検討を行った。熱線流速計のプロブはコニカルプロブを用い、2つのプロブが相互干渉を起こさない程度に離して設置し、信号の比較を行った。コニカルプロブは流向を感知できないので厳密な意味では出力の性質は異なっている。電磁流速計の検出部自身が誘起する乱れが、流れ自身にどのような影響を及ぼし、それが電磁流速計の出力信号にいかなる変化をもたらすのかを知ることは困難である。ここでは両者の出力信号を比較することにより電磁流速計の出力信号の信頼



図-5 (a) 電磁流速計の信号



図-5 (b) 熱線流速計の信号

出来る周波数域を決定すること及び出力信号をAD変換して統計的に処理した時の乱れの構造の類似性の検討より電磁流速計の出力の統計的処理の信頼性を検討することを目的とした。図-5はペンレコーダーに記録した出力の1例である。ペンレコーダーへの出力であるので、測定器の内部的な電気信号とは異なるが、低周波数の変動に対する応答性を20秒間の記録内に出現するピーク数で代表させると、電磁流速計は熱線流速計の約7割であり、応答性は3 Hz程度であった。計測器の電気的な応答性はこの数値より数倍大きいが、電磁流速計の応答性はせいぜい10 Hz程度と考えら

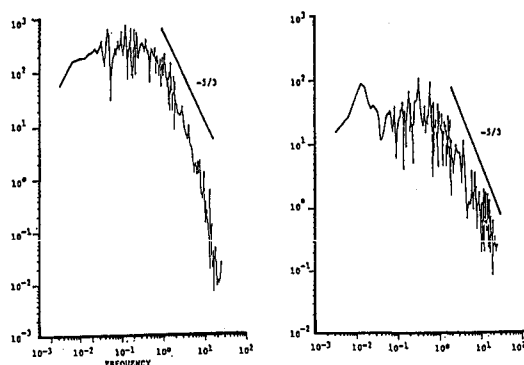


図-6 電磁流速計 熱線流速計

れ、これ以上の周波数の変動に対しては小さく測定することとなる。図-6はAD変換したデータを1/10 secのサンプリング間隔で処理し、エネルギースペクトルを示したものである。電磁流速計からの信号は5 Hzまでは $-5/3$ 乗則であるが、これ以上では急激にエネルギーが減少し、高周波域の変動を十分に計測していないことを示している。他方、熱線流速計の信号は50 Hz以上の周波数域でエネルギーが急激に減少している。これらの比較より、電磁流速計の信頼出来る周波数域は10 Hz以下と考えられる。又後述するTaylorの方法より求めた拡散係数は、熱線流速計の信号処理から $24.6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ であり、電磁流速計によるものは $71.56 \text{ cm}^2/\text{sec}$ であった。電磁流速計の信号は、流向の逆転を正負の信号で計測しているので平均値からの変動が大きく処理されるのでこの様な差が生じたと思われる。しかし両者の対応は概ね良好と考えることが出来る。従って、実際の河川での電磁流速計による乱れ計測では、信頼される周波数成分は10 Hz以下であることを考慮してデータのサンプリング間隔を設定すれば、乱れの特性の測定には問題の無いことが知られた。又電磁流速計のセンサー部分が検出部本体よりも僅かに突き出していること、及び感潮域では水深が深く流速が比較的に小さいことを考え合せると、検出部自体から発生する乱れは入力信号に有意な影響を与えないと結論つけることが出来る。

5. 鉛直拡散係数及び鉛直輸送量について

現地観測では、2成分電磁流速計を水平に固定し、鉛直、水平速度成分を同時に測定した。鉛直方向の乱れ成分のデータを用いて鉛直拡散係数を算定し、塩分の鉛直輸送量について検討を行った。又この鉛直輸送量を連行係数で換算し直し、従来の連行実験のデータとの比較をおこなった。

5-1 鉛直拡散係数 K_z

拡散係数はG. I. Taylorの定理を用いて次のように算定した。

$$K_z = \beta \overline{w'^2} \int_0^\infty R_E(\tau) d\tau \quad (1)$$

ここに $\overline{w'^2}$ はオイラー系変動速度の2乗平均であり、 R_E はオイラー系の自己相関係数である。G. I. Taylorの定理は拡散係数をラグランジュ系の変動速度、自己相関係数で算定する方法であるが、測定データはオイラー系であるので、ラグランジュ系からオイラー系への変換係数 β を用いて式(1)のように定義する。 β の値は0.4~6.0と幅広く変化することが報告されている。多摩川上流域での横方向の拡散実験、乱流計測の結果では、0.6~1.0の値が得られたので、本論文では β として1.0を採用し、 K_z を算定した。処理は、48時間連続データを1/100秒のサンプリング間隔でAD変換し、1/10秒間隔のデータを11分ごとのブロックに分割して統計処理を行った。図-7は、式(1)を用いて算定した鉛直拡散係数の位相による変化を示したものである。図中実線は上層、点線は下層での拡散係数 K_z を示す。鉛直拡散係数は上潮時、下げ潮時のそれぞれ中期の海向き、陸向きの流量が最大となる位相で大きくなる。

図-8 は中間層の厚さを用いた局所リチャードソン数の変化を示したものである。 $R_{i*} < 2$ で界面が不安定と考えると、 $R_{i*} < 2$ の位相は下げ潮時に相当しており、界面は不安定となることを示している。図-4 によると下げ潮時には比較的シャープな界面が出現するが、上下層の流向は逆向きでせん断応力が大きく、局所リチャードソン数は小さく、界面は不安定で鉛直拡散は大きい。他方上潮時には中間層の厚さは大きく、流向は同じで速度差も小さいので

R_{i*} は大きく、界面は安定となる。しかし全層にわたって同じ向きに流動して乱流となるので、鉛直拡散が活発となると考えられる。このように、下げ潮時には大規模乱流と共にせん断による界面の不安定に起因する鉛直拡散が生じ、上潮時には大規模乱流による鉛直拡散が生じると考えられる。

5-2 鉛直輸送について

図-9 は式(1)より求めた拡散係数を用いて次式によって鉛直輸送量を算定したものである。

$$Q = K_z \Delta \rho / \ell$$

図-7、図-9より拡散係数が大きくなる位相で輸送が活発に生じていることが知られる。この輸送量を連行係数Eで評価したのが図-10である。なお R_{i*} 、 R_i 、連行速度Wは次のように定義する。

$$\Delta \rho W_e = K_z \Delta \rho / \ell$$

$$W_e = E |U_1 - U_2|$$

$$R_i = \Delta \rho g h_s / (U_1 - U_2)^2 \rho$$

$$R_{i*} = \Delta \rho g \ell / (U_1 - U_2)^2 \rho$$

ここに h_s は上層厚さ、 U_1 、 U_2 は上下層の平均流速、 $\Delta \rho$ は密度差である。図中黒印は下げ潮時で、白抜きは上潮時のデータであり、一点破線は経験式 $E = 0.002 \times R_{i*}^{-3/2}$ を示したものである。非定常現象であるので他のデータとは性質を異にするが、下げ潮時には経験式で算定される値よりも大きく、上潮時には逆に小さくなることが知られる。図-11は K_z を R_{i*} に対して整理したものである。図中破線は経験式 $K_z = 80 e^{-3R_{i*}}$ を示したものである。 R_{i*} が2より小さい不安定域では、データは散らばっているが経験式が適用出来ることを示している。

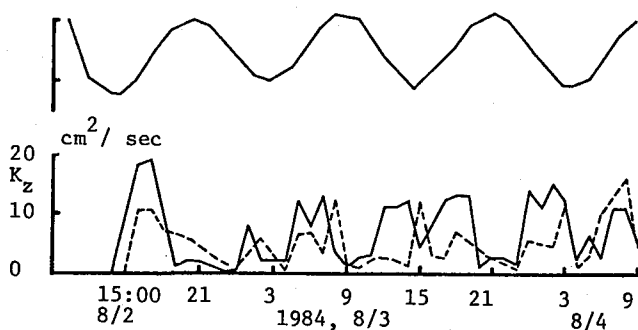


図-7 鉛直拡散係数

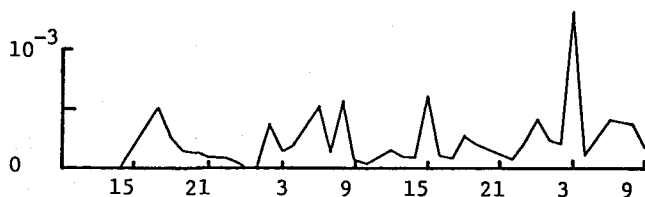


図-9 密度の鉛直輸送量

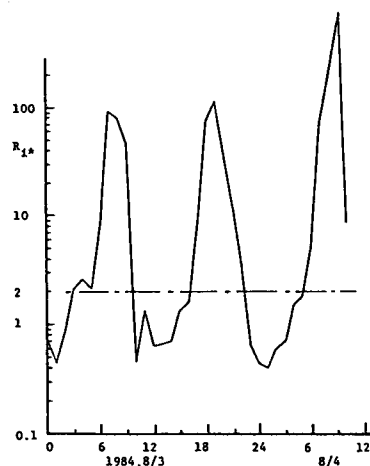


図-8 局所リチャードソン数

6. DO, BODの変化

夏期でのDO, BODの潮汐周期変化を示したのが図-12である。これは日中の位相に相当しており、水面近くのDOが増加するとBODも平行して増加する様子が見られる。このことは日射による光合成によりDOが水面近くで増加する時に、これと平行して光エネルギーによる有機物質の増加が生じ、微生物群への取込み、生物分解によるDOの消費が進行し、この両者がバランスしていることを示している。他方夜間には、水面のDOは減少するがそれよりもBODの減少の方が大きく、日中のバランスが崩れることが知られた。又河床ではDOの変化は無くほぼ一定であり、水面下1~2mの界面の深さまで日射の影響を受けることがわかる。

図-13は冬期(2月)のDO, BODの変化を示したものである。夏期と同様に日射と共に水面近くのDOが増加するのに合わせてBODが平行的に増加する。冬期ではDO, BODは夏期の約半分で、深さ方向の分布はほぼ一様であり、生活活動、生物活動、日射量の季節変化を反映している。

7. 有機物質量について

図-14は冬期での浮遊物質中の有機物質量の鉛直分布を示したものである。深さ方向には変化が無く、約50%が有機物質であることがわかる。表-1は冬期、夏期での水面近くでの

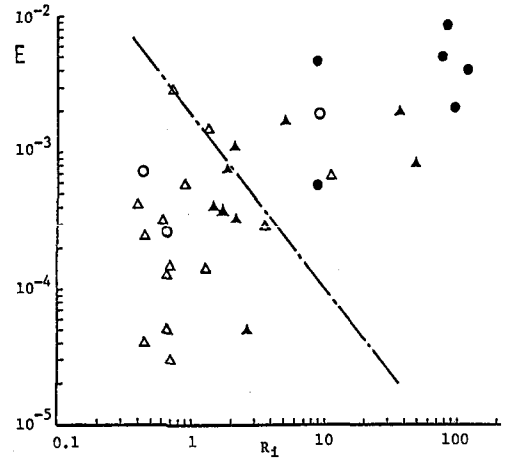


図-10 連行係数

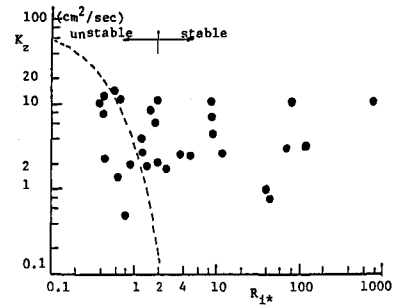


図-11 鉛直拡散係数

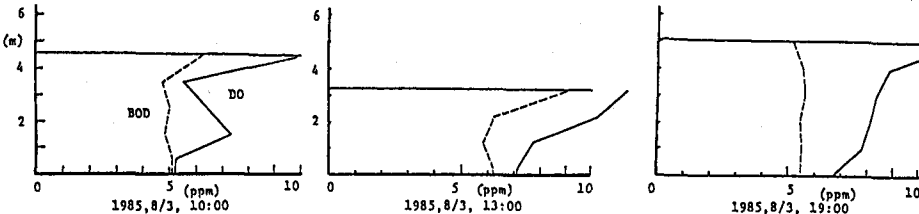


図-12 DO, BODの鉛直分布(5.2 km地点)

有機物質量を示したものである。夏期、冬期、上潮時、下げ潮時にかかわらず、約50%が有機物質であり、その量は夏期には冬期の2倍近い値であった。又表-2は底泥の組成及び有機物質の割合を示したものである。河床底面では、ヘドロ状の粒径の小さな堆積物であり、有機物質の含有の割合も大きい。他方、50 cm地中では粒径は1オーダー大きく、細砂で構成されており、有機物質の含有の割合は小さい。このように、底泥の深さ方向に有機物質量の割合が変化することは、長期の水質を考える上で、底泥物質の移動を考える必要のあることを示唆している。河床面では粒径の細かいヘドロ状の堆積物質が主で有機物質の割合も大きい。

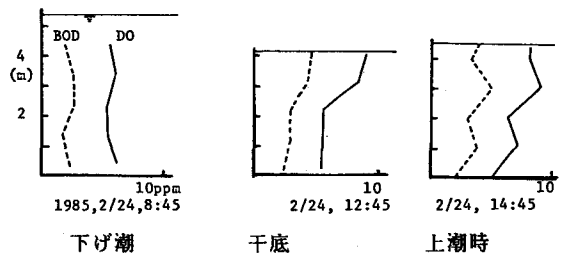
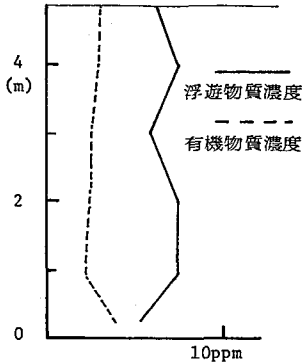


図-13 冬期のDO, BODの鉛直分布

8. まとめ

多摩川河口部での夏期、冬期の現地観測によって、塩水遡上現象の概要と、各位相での鉛直拡散係数、流質の鉛直輸送現象を明らかにすることが出来た。



感潮河川の乱流 図-1 4 有機物質 (冬期) 計測での電磁流

速計の信頼性について確かめ、このデータにより鉛直拡散係数の算定が可能であることを示した。下げ潮時には局所リチャードソン数が2より小さくなる界面不安定の領域が出現し、この位相では従来の鉛直拡散係数についての算定式が適用出来るが、上潮時の拡散については適用出来ないことを示した。又鉛直輸送を連行係数

で評価することにより、非定常な河口部での連行係数の上潮時、下げ潮時の定性的な傾向を明らかにし、算定式への基礎的な知見が得られた。さらに、DO、BOD、有機物質等の水質要因の日射変化、潮汐変化、季節変化の特徴を明らかにすることができた。

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京大学土木：浅枝、広沢 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芝工大水工研の学生諸君に感謝します。

参考文献

- 1) 菅和利、玉井信行：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、第29回水講演文集、1984.
- 2) Salt distribution in estuaries、Delft Hydraulics Lab. Report 169、1976
- 3) 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
- 4) Thatcher、M.L. and D.R.F.Harleman：A mathematical model for the prediction of unsteady salinity intrusion in estuaries、M.I.T.Report No.144、1972
- 5) 栗谷洋一：半閉鎖水域における物質の輸送及び収支に関する研究、科学研究費成果報告書、1984
- 6) 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.
- 7) 菅和利、玉井信行、井口昌之：感潮河川における流動特性について、第41回年講概要集、1986.

時 刻	位相	S. S	有機物質 (ppm)
1984,8/2, 11:00	下げ潮	11.3	5.7
1984,8/2, 17:00	上げ潮	12.5	5.6
1985,2/24, 10:00	下げ潮	6.0	3.0
1985,2/24, 16:00	上げ潮	6.4	3.4
1985,8/3, 22:00	下げ潮	20.1	10.1
1985,8/4, 4:00	上げ潮	14.5	7.0

表-1 浮遊物質中の有機物質量

位 置	粒 径 $\times 10^{-3}$ cm	沈降速度 (cm/sec)	有機物の割合 (%)
河 床 0 m	d_{65} 4.8	0.23	7.2
	d_{50} 2.4	0.06	
	d_{35} 0.56	0.003	
-5 0 c m	d_{65} 18.5	2.6	1.4
	d_{50} 15.8	2.08	
	d_{35} 12.8	1.5	

表-2 底泥の組成及び有機質の割合