

都市河川の感潮域における 水質と汚濁堆積物の挙動

Water Quality and Sedimentation
in Urban Tidal River

土屋十園^{*}、和泉 清^{**}

By Mitsukuni TSUCHIYA and Kiyoshi IZUMI

Behavior of Water Quality and Sediment in Estuary region is influenced by Floods and Tide, There is a complicated phenomenon. Estuary region is catchment area for run-off of rain fall, living waste water, and Basic flow of urban small rivers is extremely small quantity.

Therefore, precipitation and sedimentation is easily in estuary region. Pollution load is on the increase in flooding.

This paper is result of investigation to use numerical analysis of a dimensional unsteady flow equation and diffusion equation and data of observation about behaviors of water pollution and bottom deposits at tidal reach in urban small river.

The following was clarified by this research about area of sediment in quantitative with relation to tractive force

Keywords: tidal area, water quality, behavior of sediment,

tractive force, pollution load

1. はじめに

河川感潮部の水質・底質の挙動は洪水や潮汐の影響を受け複雑な現象を呈している。感潮部は流域からの雨水流出や生活排水等が集中するエリアであり、特に、河川固有流量の少ない都市河川では、汚濁物の堆積し易い領域である。

感潮部の水質変動現象を扱った研究には二渡、楠田らの塩分濃度と流速の関係を移流分散式から明らかにした研究がある。¹⁾ また、川西、余越の太田川感潮部の浮遊砂泥濃度と流速、塩分濃度の関係から潮汐に伴う砂泥の浮上と堆積について解明している研究などがある。²⁾ 感潮部、河口部の水質、底質の挙動に関して洪水時、晴天時を比較して取り扱っている調査・研究は少ない。著者らはすでに、目黒川感潮部を対象として水質変動と底泥の堆積、洗掘現象並びに底質の変化について実証的に明らかにしてきた。³⁾

本報は上記の調査を検証する意味から低水時、洪水時の水質・流量変動について一次元不定流モデルによって変動特性の解析を行い、実測値との比較検討を行った。また、洪水の規模による水質、流量、負荷量の変動についても実測データをもとに計算を行い、SS、BODの堆積及び巻き上げの卓越している区間について定量的に明らかにした。更に、洪水スケールの違いによる掃流力の縦断変化とSS、BODの変化についても検討し、感潮部での変動特性について考察を加えたものである。

本研究で対象とした河川は図-1に示す都内の目黒川である。河川の概要は河川延長8km、川幅25m、河床勾配は上流から田楽橋までは順流部であり $i=1/400$ 、ここより河口までは $i=1/1400$ の緩勾配となっている。

^{*} 正会員 工修 東京都土木技術研究所技術部 主任研究員

(〒108 港区港南1-1-18)

^{**} 正会員 東京都土木技術研究所技術部 総括主任研究員

(〒108 港区港南1-1-18)

流域の概要については既報³⁾で述べているので割愛する。

2. 洪水スケールの違いによる地点別汚濁物堆積量

2.1 計算モデル

感潮域における流況と水質の挙動は時間的、空間的に変動する非定常流れであることから、一次元の不定流の式と拡散方程式によって解析を行った。

流れの連続式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \dots \dots \dots (1)$$

運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g \left(1 - \frac{h^2 u |u|}{R^{3/2}} \right) \dots \dots (2)$$

ここで、A：流積 (m²)、Q：流量 (m³/s)、q：流下方向の単位長さ当たり流出入量 (m³/s)、t：時間 (sec)、x：流下距離 (m)、u：流速 (m)、h：水深 (m)、I：水面勾配、R：径深 (m)、g：重力加速度 (m/s²) である。
次に、水質変動については下記の拡散方程式を適用する。

拡散方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} - f(t) \cdot C_s + k_1 C + k_2 C + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_s \frac{\partial C}{\partial x} \right) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、C_s：底泥の巻き上げによる汚濁物濃度 (mg/l)、C：水質濃度 (mg/l)、U：縦断方向の流速 (m)、f(t)：せん断力により巻き上げられる割合、k₁：自己減少割合 (BODでは自浄係数) (1/sec)、k₂：沈降により減少する割合 (1/sec)、D_s：拡散係数 (m²/sec)、t：時間 (sec)、x：流下距離 (m) である。

2.2 計算条件

計算条件は目黒川の水質・流量の実測値が同時に観測されている1985年12月20日~21日 (低水量)、1985年8月11日と8月30日の2つの洪水流量並びにこの両洪水の中間的規模の洪水として作成した中間的パターンの洪水の4ケースを対象とした。上流端は田楽橋の流量を用い、下流端は河口部の昭和橋地点として上流端の田楽橋の流量データと対応した実測水位データを用いて計算を行った。上流端における最大流量を表-1に示す。また、中間的パターンの想定洪水の水位を設定するために大潮、小潮時の振幅と実測日の潮位の振幅との比、すなわち、振幅比αを考慮して水位パターンを以下のように設定した。

$$Ht' = (Ht - H) \cdot \alpha + H \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、Ht：t時の実測水位、H：実測の平均水位、Ht'：変化水位、α：振幅比 A'/A、A'：大潮又は小潮時の振幅、A：実測日の潮位振幅である。

以上の結果、8月11日の洪水時の例として不定流計算に設定した上流側 (田楽橋)、下流側 (昭和橋) の境界水位、水質を表-2に示す。

2.3 流況に関するパラメータの設定

次に、流況に関するパラメータの設定については、粗度係数 n=0.035、計算時間差分:0.25秒、計算距離差分間隔50mとした。水質に係わるパラメータとしては拡散係数、自浄係数、沈降による除去係数、巻き上げによる負荷係数などがあるが、対象が洪水時であることから拡散係数、自浄係数の寄

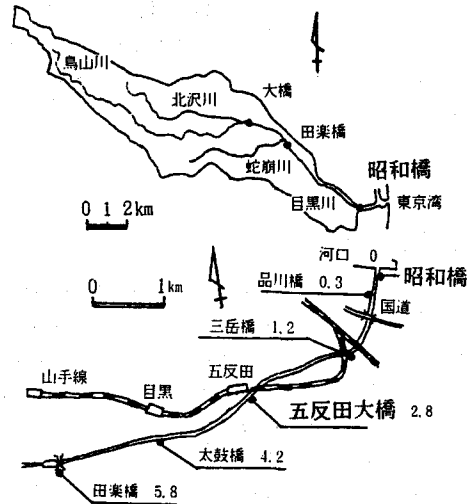


図-1 目黒川流域と観測地点

表-1 上流端における最大流出量 (田楽橋)

ケース	最大流出量
12月20日	0.75 m ³ /s
8月11日	258.0 m ³ /s
8月30日	91.0 m ³ /s
中間パターン	170.0 m ³ /s

表-2 境界水位と水質 (1985年8月11日)

河川名		目 黒 川					
地点名		田 楽 橋			昭 和 橋		
項 目	水 位	BOD	SS	水 位	BOD	SS	
単 位	m	mg/ℓ	mg/ℓ	m	mg/ℓ	mg/ℓ	
11日	11:00	1.65	13.5	69.0	1.09	-	-
	11:30	2.15	16.2	88.0	1.12	-	-
	12:00	2.80	28.6	149.0	1.15	-	-
	12:30	3.60	21.0	137.0	1.23	-	-
	13:00	4.30	19.6	130.0	1.30	-	-
	13:30	3.95	15.3	108.0	1.33	-	-
	14:00	3.50	13.6	104.0	1.36	-	-
	14:30	2.10	16.4	72.0	1.41	-	-
	15:00	1.85	15.3	55.0	1.46	-	-

与率は小さいと考えてこれらについては既存資料の平均値を採用した。⁴⁾ 沈降による除去係数と巻き上げによる負荷係数は実測値との比較により修正した値を用いた。⁵⁾

すなわち、拡散係数： $D_x=1\times10^{-1}$ (m²/s)、自浄係数：BOD； $k_1=0.2$ (1/day)、SS； 0.0 (1/day)、沈降による除去係数： $k_2=E_v/h$ ；(E_v =沈降速度、 h =水深)、BOD； $k_3=1.5$ (m/day)、SS； $k_3=10^{-2}$ (cm/s)として設定した。

次に、巻き上げによる負荷係数は沈降除去割合 $k_4= E/h$ 、 E ：巻き上げ速度、 h ：水深、巻き上げ速度 E は楠田らの六角川感潮部での経験式(5)を用いた。

$$E = C (\tau/\tau_c - 1)^2 \quad \tau > \tau_c \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $C=0.036$ kg/m²・min、限界掃流力 $\tau_c = a \cdot (1 - \epsilon)^b = 0.925$ N/m²、 a ：係数 N/m²、 $1 - \epsilon$ ：固体含有率を表す。また、底質初期濃度 C_o は目黒川の既往の底質、溶出試験データからBOD、SSともに2000mg/lとして計算を行った。沈降速度 E_v 、限界掃流力 τ_c 、巻き上げによる負荷水質 C_o についてパラメータを変えながら昭和橋における水質濃度が実測値に近づくように試算を繰り返すとともに、洪水時には巻き上げによる負荷水質 C_o について次のような仮定を設け関数式化して計算を行った。

巻き上げによる負荷水質 C_o は流出初期には高く流出後半には低下するものと考え、その減少する割合は上流部の境界濃度に依存するものとして次式によった。 m^3/s

$$C_{o,t} = C_o \cdot S_t / S_o \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 C_o ：初期の負荷水質 (mg/l)、 S_o ：上流の境界水質 (mg/l)、 S_t ： t 時の上流境界水質 (mg/l)、 $C_{o,t}$ ： t 時の巻き上げ水質 (mg/l)である。

上記のような方法によつてパラメータの繰り返し検証計算の結果、水質に係わるパラメータとしてはBODの場合、巻き上げ初期水質 $C_o=550$ (mg/l)、限界掃流力 $\tau_c=1.5$ (N/m²)、沈降速度 $E_v=600$ (m/day)とした。また、SSの場合 $C_o=500$ (mg/l)、 $\tau_c=1.8$ (N/m²)、 $E_v=1500$ (m/day)として設定して計算を行った。

3. 計算結果の事例

3.1 流量変動

田楽橋の実測データをもとに不定流計算による感潮部の各地点における水量変動を8月11日の洪水ハイドログラフで、図-2に示す。各地点のピーク流量が下流に移動するに伴い時間差をもち減少していく様子が分かる。ピーク流量の発生時刻が上流側の田楽橋と下流側の昭和橋において20分の遅れがあり、昭和橋地点におけるピーク流量は田楽橋地点のほぼ半分になっている。

3.2 水質変動

上記の8月11日の洪水に対応するBOD、SSの変動を図-3に示す。BODについてみると、上流の田楽橋から下流の昭和橋にかけて水質ピークは2.5倍以上に増加し、五反田大橋、三岳橋、昭和橋の3地点については大きな差はみられない。

これに対して、SSはBODとは逆な現象を示し、上流の田楽橋地点から下流の昭和橋地点にかけてSSのピーク水質は半分ほどに減少していることが分かる。また、水質のピーク時刻については流量の場合の時間差とは異なり、上流から下流まで40分の

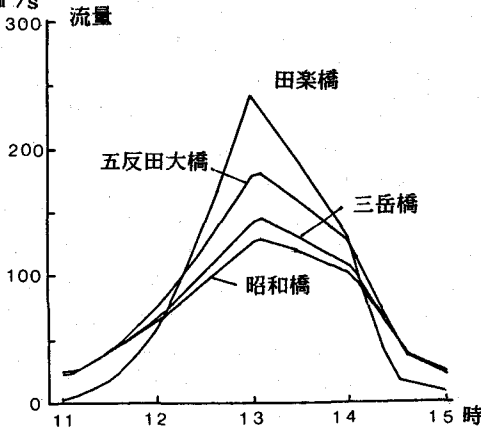


図-2 目黒川洪水時の計算結果(1985年8月11日)

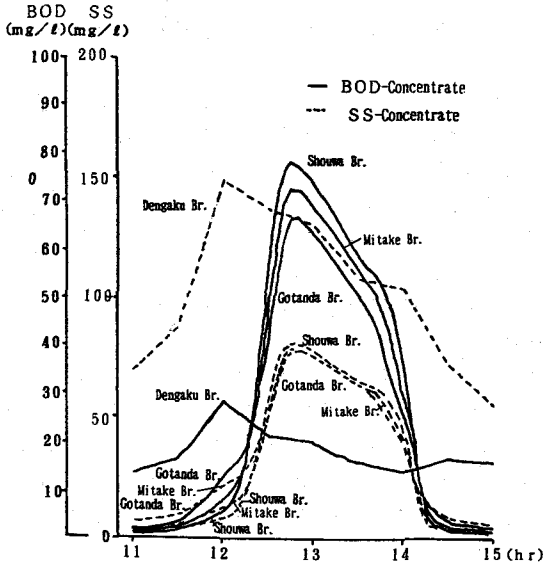


図-3 洪水時のBOD、SSの変動(1985年8月11日)

時間遅れをもつことが分かる。

3.3 地点別累積汚濁負荷量

感潮区間での水質変動は場所的な違いによる比較をする場合、水質変動だけではなく累積負荷量で検討するほうが都合がよい。そこで、流量と同様に、上流側から田楽橋、五反田大橋、三岳橋、昭和橋（河口）の各地点における時間と累積負荷量の関係を求めた。

図-4には低水時の場合で12月20日のケースを示す。田楽橋から昭和橋にかけて1日に約3t近いBOD負荷量がこの区間に蓄積することになる。五反田大橋と三岳橋が逆転しているのは潮位の影響によるものと考えられる。

一方、図-5-図-6に示すように、洪水時は流出初期には上流部の方が負荷量が多いが流出の増加に伴い上下流の負荷量が逆転している。8月11日の場合と8月30日の場合を比較すると前者のパターンは五反田大橋が最終的に一番高いのに対して、後者は昭和橋で一番高くなっている。流出パターンとしては前者が1つの山の洪水で、洪水継続時間は4時間であるのに対して、後者は2つ山の洪水パターンで、8時間以上の長い洪水継続時間をもっている。

また、累積BOD負荷量を見ると、8月11日の場合は田楽橋で約25tであるのに対して、その下流の五反田大橋では約50tである。すなわち、約2kmの区間で約25tのBOD負荷量が河床などからの巻き上げによって流出し、増加したと思われる。しかし、つぎの下流地点の五反田大橋から昭和橋の約3kmの区間は上流区間とは逆に堆積・沈降が行なわれ約5-8tの堆積となっている。

図-6に示すように、8月30日の小規模洪水の場合は上流の田楽橋から下流の五反田大橋までの間に約8tの増加となり、更に、下流の昭和橋までの5.8kmの間に約10tの増加となっている。

次に、SS負荷量について地点別の変化をみる。SS負荷量はBOD負荷量と異なり、洪水流量、低水流量にかかわらず各地点別累積負荷量は上流から下流に向かって順次減少している。

図-7、図-8に8月11日と8月30日のケースを示す。前者は4時間の出水時に田楽橋から五反田大橋の区間で約100tのSS負荷量が堆積・沈降している。五反田大橋から三岳橋までが約15t、三岳橋から昭和橋までが約3tの堆積となり、流下に伴って堆積量は減少している。

したがって、田楽橋から五反田大橋までの3kmの区間にSS換算で流出負荷量の85%が堆積・沈降していることが分かった。

また、8月30日の小規模洪水の場合でも田楽橋から五反田大橋までの区間に約100tのSS負荷量が堆積・沈降し、全区間の90%となっている。中間的なパターンの場合でもほぼ同様な傾向を示した。

4. 掃流力と水質の縦断変化

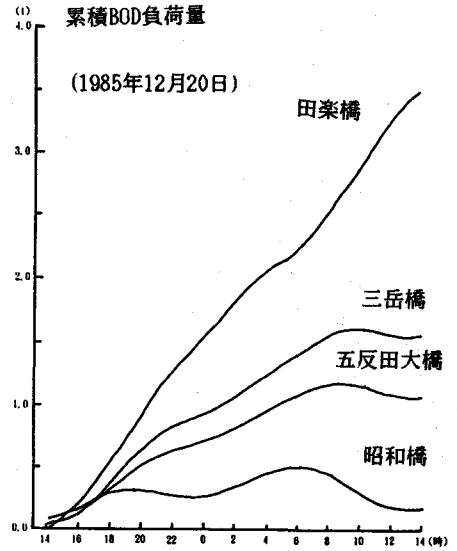


図-4 低水時の累積BOD負荷量

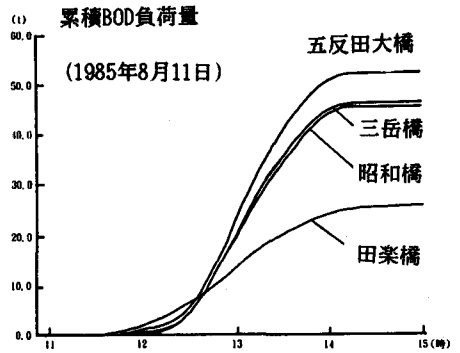


図-5 洪水時の累積BOD負荷量

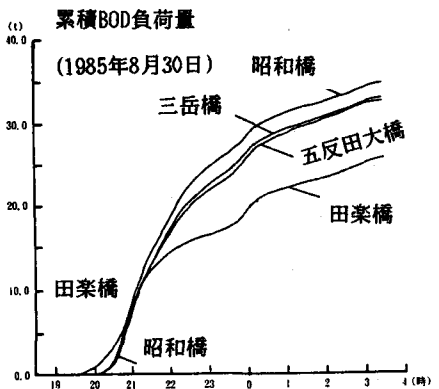


図-6 洪水時の累積BOD負荷量

4・1 掃流力の縦断分布

洪水時の掃流力は河床に働くせん断力の大きさであり、堆積物の巻き上げ量を規定する。

そこで、次式によって縦断変化を検討する。

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot I_e, \quad u_* = \sqrt{\tau / \rho} \quad \dots (7)$$

$$I_e = i - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2g} \right) - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{n^2 \cdot v^2}{R^{4/3}} \quad \dots (8)$$

ここで、 i :河床勾配、 τ :掃流力、 ρ :水の密度、 g :重力加速度、 R :径深、 I_e :エネルギー勾配、 v :平均流速、 n :Manningの粗度係数、 u_* :摩擦速度、 R :径深である。

前章で計算した各ケースの流量が最大となる時刻の掃流力の縦断変化を図-9に示す。低水時の掃流力をみると田楽橋から500m程度までは平行状態が続き、区間内で最大である。その後、太鼓橋近傍まで掃流力は低下し、五反田大橋付近までは掃流力Zeroになっている。しかし、下流に向かって再び掃流力は増加し、上流の田楽橋地点の1/4程度になっている。この増加は河口部の干満潮の流れに起因するものである。

洪水時、流量の増大と共に感潮区間全域で掃流力は高くなっている。田楽橋直下から2kmまでの区間で掃流力は急激に低下し、洪水の場合でも五反田大橋の手前で掃流力は $\tau=5 \text{ N/m}^2$ 程度となっている。五反田大橋付近から河口に向かって、再び微増の傾向にある。洪水の規模によって減衰から微増の変化が平行していることが分かる。すなわち、掃流力のこのような縦断的变化は、前章でのSS負荷量の堆積・沈降の区間ともよく一致している。

4・2 水質の縦断分布

次に、掃流力の縦断変化に対応した同時刻のBOD、SSの縦断変化について図-10に示す。低水時の12月20日のケースはBOD、SSとも上流500mまでは増加している。しかし、その後は掃流力の低下とともに流下方向に水質は低減している。これに対して、洪水時のケースをみるとBODは流下とともに河口部に向かって増加しており、SSは減少している。従って、BODでは河床からの巻き上げに伴う負荷量の供給が沈降や自浄作用より卓越していること、また、区間内においてBOD負荷量の途中流出を示すものと考えられる。

SSについては沈降量が河床等からの巻き上げに伴う負荷量を上回っていることを示している。すなわち、洪水時に流下とともにSSが減少するのは比重の大きな沈降性のSSの存在が卓越しているものと考えられる。この結果は堆積変動量調査の測定結果³⁾ともほぼ整合し、堆積し

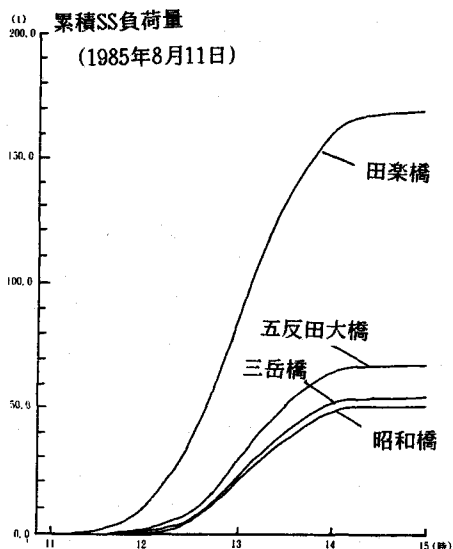


図-7 洪水時の累積SS負荷量

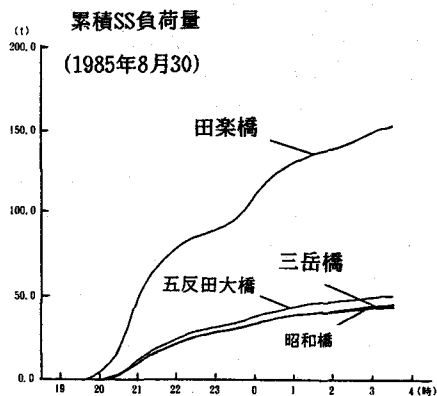


図-8 洪水時の累積SS負荷量

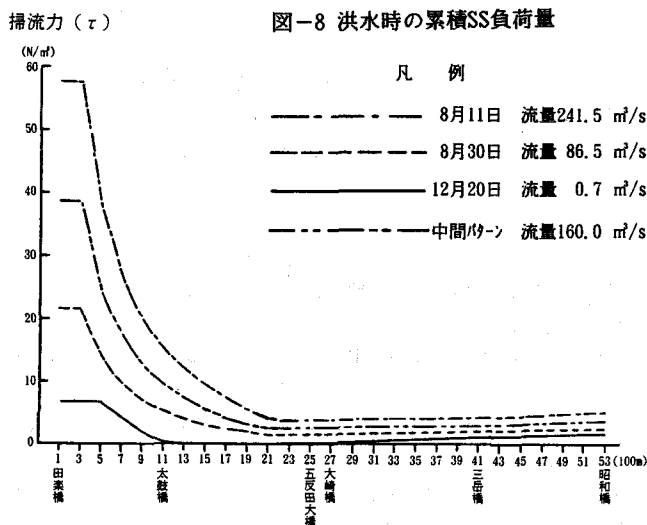


図-9 流量が最大となる掃流力の縦断変化

易い区間が一致していることが分かった。

5. 結論

本報は目黒川を対象として、感潮部における水質・流量・負荷量の変動解析を試みた。その結果、自己流量に乏しい都市河川の感潮域は平常時、流域に蓄積されている汚濁物質が洪水時に大きなエネルギーで流出し堆積する区間であることが実証された。この結果を要約すると以下の通りである。

(1) BOD、SSについて一次元拡散モデルにより各地点の水質変動の再現と洪水規模による水質変動予測を行うことができた。

(2) 洪水時のSS、BODの変動をみるとBOD

は下流に向かって増加の現象を示し、

反対にSSは減少している。特に、SSは洪水によって底泥から巻き上げられたSS成分などが洪水規模の違いによる堆積区間と堆積量を明らかにすることができた。

(3) 上流の田楽橋から下流の昭和橋までの感潮部に堆積するSS負荷量は各ピーク流量のケース毎に、低水時(0.75m³/s)のケースは約1.1t、洪水時は91m³/s(8月30日)のケースは約100t、170.0m³/s(中間の流出パターン)のケースが約80t、258.0 m³/s(8月11日)のケースが約120tとなっている。堆積量は洪水規模にほぼ比例していることが分かる。

(4) また、感潮区間別にSSの堆積負荷量をみると洪水時、上流の田楽橋から五反田大橋までの約3kmの区間に流出負荷量の約90%が堆積・沈降していることが分かった。前報の汚濁物堆積変動調査ともほぼ一致していることが分かった。

(5) 洪水スケールの違いによる掃流力の縦断変化はいずれのケースの場合も河床の変化する田楽橋の直下2kmから急激に低下し、低水時はZEROとなるり、洪水時は5N/m²程度に減少している。また、河口に向かってわずかであるが掃流力は微増していることがわかった。

参考文献

- 1) 二渡 了、楠田哲也：六角川感潮部における水質変動、土木学会第14回環境問題シンポジウム講演論文集、pp.40-45,1986
- 2) 川西 登、余越正一郎：太田川感潮部における浮遊砂泥と組織乱流、第32回水理講演会論文集、pp215-219,1988
- 3) 土屋十朗、和泉 清：目黒川感潮部における水質変動と底泥堆積物の挙動、第33回水理講演会論文集、pp637-642,1989
- 4) 土木学会：水理公式集、pp461-464,1977
- 5) 佐藤敦久：水環境工学—浮遊物質からみた環境保全—、技報堂、pp208-219,1987

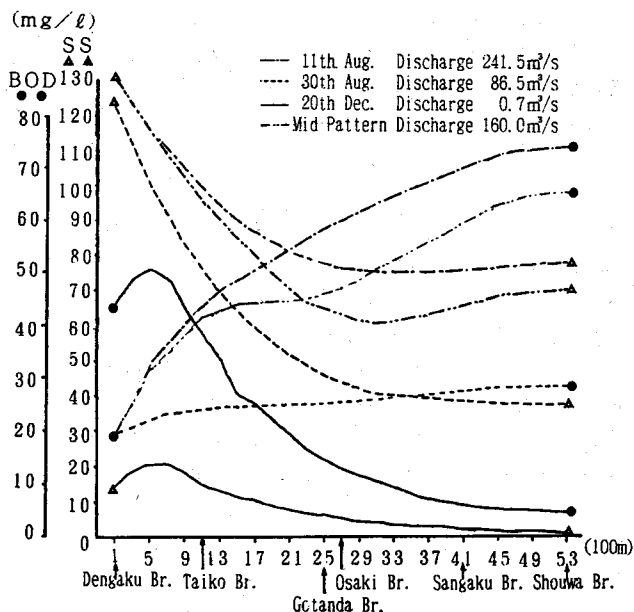


図-10 BOD、SSの縦断変化