

利根川河口堰下流部における 濁質の浮上とそれに伴う酸素消費

RESUSPENSION OF BOTTOM SEDIMENT AND ITS OXYGEN CONSUMPTION IN THE TONE RIVER ESTUARY

鈴木伴征¹・大作和弘²・横山勝英³・石川忠晴⁴

Tomoyuki SUZUKI, Kazuhiro OSAKU, Katsuhide YOKOYAMA and Tadaharu ISHIKAWA

¹正会員 博(工) 独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²学生会員 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 環境理工学創造専攻
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259 東京工業大学)

³正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭一番地)

⁴フェロー 工博 東京工業大学教授 東京工業大学大学院総合理工学研究科 環境理工学創造専攻

Field measurements and laboratory tests were conducted in order to investigate resuspension of the bottom sediment and its oxygen consumption (OC) in the Tone River estuary.

Vertical profiles of salinity and turbidity were measured along the deepest line of the channel. And turbidity and flow velocity near the river bed of the salt wedge front were also measured continuously during about one year. The measurements showed that turbidity concentration near the bed increased when adverse flow was a maximum during a flood tide, and that a turbidity maximum occurred rapidly in the front part of the saline wedge during a flood tide.

The laboratory tests of OC were conducted by using the bottom sediments which was mixed with the river water and suspended by stirrer. As a result, it was estimated that SS of 70 mg/l was nearly equal to the sediment for OC.

Key Words : resuspension of bottom sediments, salt wedge, turbidity maximum, oxygen consumption

1. はじめに

河川感潮域に堆積した濁質は塩水層の流動に伴って再浮上・流動・沈降を繰り返している。また、この濁質は有機物などの被酸化物質を多く含んでいる。そのため、濁質は水中に浮上している間に溶存酸素を消費し、水域全体における酸素収支に大なり小なり影響を及ぼしていることが考えられる。

一般に自然水域での酸素消費を考える場合、水中での酸素消費(BOD)と底質による酸素消費(SOD)の2つを主な酸素消費要因として取り扱うことが多く、濁質の運動に伴う酸素消費を取り扱っている研究は少ない。一例として、中野ら¹⁾は感潮河川の水質解析モデルの中でBODを溶存態と粒子態の2つに分けてモデル化を行っており、観測結果と比較してその有効性を確認している。しかし、溶存態と粒子態BODの定量的な比較まではおこなっていない。

ところで利根川河口堰下流部では水産資源としてヤマシジミが有名であるが、数年に一度大量に斃死することがあり、その原因の一つとして貧酸素水塊の発生が考えられている。鈴木らは²⁾同水域において貧酸素水塊

の形成機構を明らかにするために現地観測と数値シミュレーションを行っており、主な酸素消費要因としてSODとBODの2つを取り扱っている。しかし前述のように、被酸化物を含んだ濁質が潮汐によって浮上・沈降を繰り返すと、BOD・SODに加えて濁質の浮上に伴う“動的な酸素消費”も明らかに生じるため、それが塩水層の貧酸素化に対して重要な意味をもつ可能性がある。

そこで本研究では利根川河口堰下流部を対象として、現地観測によって塩水流動に伴う濁質の浮上現象を細かく把握し、次に現地底泥を用いた酸素消費実験を実施し、それらを総合して現地の濁質浮上が貧酸素化に及ぼす影響について定量的に検討した。

2. 対象水域の概要

図-1に観測サイトの平面図を示す。河道は概ね直線的で大きな蛇行部はない。また、低水路幅は600 - 1000m、水深は5-6m、河床はほぼ水平(1万分の1以下)である。

河口から18.5kmの位置に利根川河口堰が建設されている。河口堰は塩害防止と新規利水開発を可能とす

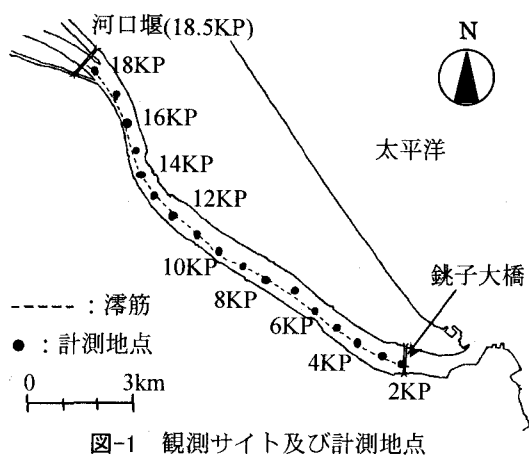


図-1 観測サイト及び計測地点

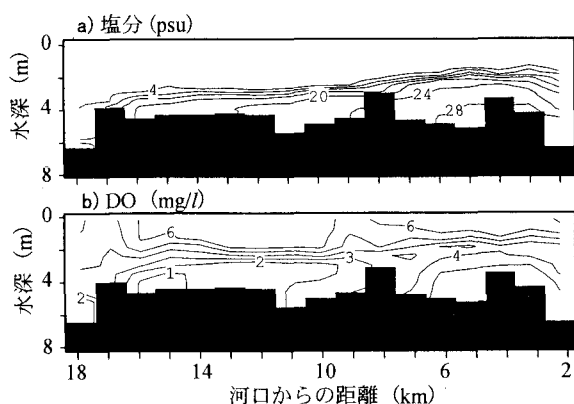


図-2 現地の塩水遡上特性と貧酸素水塊の発生状況 (1996年9月13日の観測結果)

る一方、堰下流部の流動性を低下させるため、塩水と淡水の二層状態が強められるようになる。特に利根川河口堰の場合、夏季における堰からの放流量は最低流量 ($30\text{m}^3/\text{s}$) を目標にゲート操作が行われる日が少なくなく、堰直下流まで塩水が遡上して長期間停滞することもある。

現地の塩水遡上特性と貧酸素水塊の状況を大まかに説明する。図-2 は 1996 年 9 月 13 日の塩分と溶存酸素(以下、DO とよぶ)の観測結果²⁾で、縦軸が水深、横軸が河口からの距離を示し、塩分・DO はコンターで表されている。水深 3 - 4m あたりに強い塩分躍層が存在しており、塩水楔が堰付近まで遡上している様子がわかる。また、塩分と DO を比較すると、塩水楔先端部に DO 濃度 1 - 2 mg/l の貧酸素水塊が形成されている様子がわかる。平常時における現地の塩水の混合形態は図-3 に示したように弱～緩混合であり、塩水楔は大抵、堰付近まで遡上している。したがって堰付近は流れがよどみやすく、濁質が沈降・堆積しやすい環境になっている。

平常時の底質の状態を大まかに把握するために堰下流部の3地点(18, 16.5, 15KP)の最深部において底質調査を実施した。その結果を表-1 に示す。調査期間は 2001 年 7～8月で、この期間中に大きな出水はなかった。なお分析には採取した底質の表層 3cm を用いている。調査の結果、3地点とも平均粒径は $8\mu\text{m}$ 前後で安定していた。このことから平常時における堰付近の表層底質

表-1 平常時の底質の状況(2001年実施結果)

日付	18.0KP		16.5KP		15.0KP	
	平均粒径 (μm)	強熱減量 (%)	平均粒径 (μm)	強熱減量 (%)	平均粒径 (μm)	強熱減量 (%)
7月3日	-	-	9.8	7.8	8.9	6.1
7月16日	7.2	13.0	8.3	9.6	8.9	9.4
7月19日	-	-	8.3	10.4	-	-
7月25日	-	-	7.7	9.7	-	-
7月30日	8.2	10.2	7.7	5.9	7.9	9.8
8月6日	-	-	7.8	8.8	-	-
8月13日	-	-	7.3	12.0	-	-

は概ねシルト質であり、それらが潮汐に伴って浮上・沈降を繰り返していると考えられる。なお、強熱減量は多少ばらつきはあるが平均 9.4%であった。

最後に河口堰からの放流量操作だが、堰上下流の水位状態に応じて行われる。すなわち下流側水位が高い場合はゲートは全閉され、低い場合には部分的に開放される。

3. 観測方法

(1) モニタリング観測

濁質の時間変動特性を調べるために、濁度と流速の定点計測を 2000 年 8 月から実施している。観測地点は、過去に実施された縦断観測結果から濁質の浮上・沈降が活発と思われる場所を選び、16.5KPとした。濁度計測にはメモリー式ワイパー付き濁度計(アレック電子製: ATU5-8M)を使用し、最深部河床から 1.5m 上方(YP-3.5m)にロープとアンカーで設置した。計測は 10 分間隔である。流速計測には超音波式ドップラー流速計(RD-Instruments 社製: WH-ADCP1200kHz)を用い、これを最深部河床に設置した。測定水深は河床上方 1m～水面で、鉛直方向に 30cm 間隔で5分おきに計測した。

(2) 縦断観測

縦断観測は塩分・水温・DO 及び濁度の空間分布特性を把握するために、堰～河口部の広域を対象区間として、1996～1998 年の夏季から秋季にかけて定期的実施された。計測には多項目水質計(アレック電子製: ACL-1183PDK)を用い、図-1 に示す銚子大橋(2KP)～河口堰(18KP)までの 16km を対象区間とし、破線で示す滞筋上において 1km おきに上記水質の鉛直分布を計測した。1回の計測には 2-3 時間を要した。

(3) Turbidity Maximum の発生に関する集中観測

縦断観測の結果、塩水楔先端部で濁度の高い領域(Turbidity Maximum³⁾)が見られた。この現象の時間・空間スケールが濁質の浮上に伴う酸素消費と強く関連していると考えられる。そこで Turbidity Maximum の発生過程を調べるために、モニタリング観測と縦断観測の結果から濁度が高くなる領域と時間帯を選定し、水質と流速

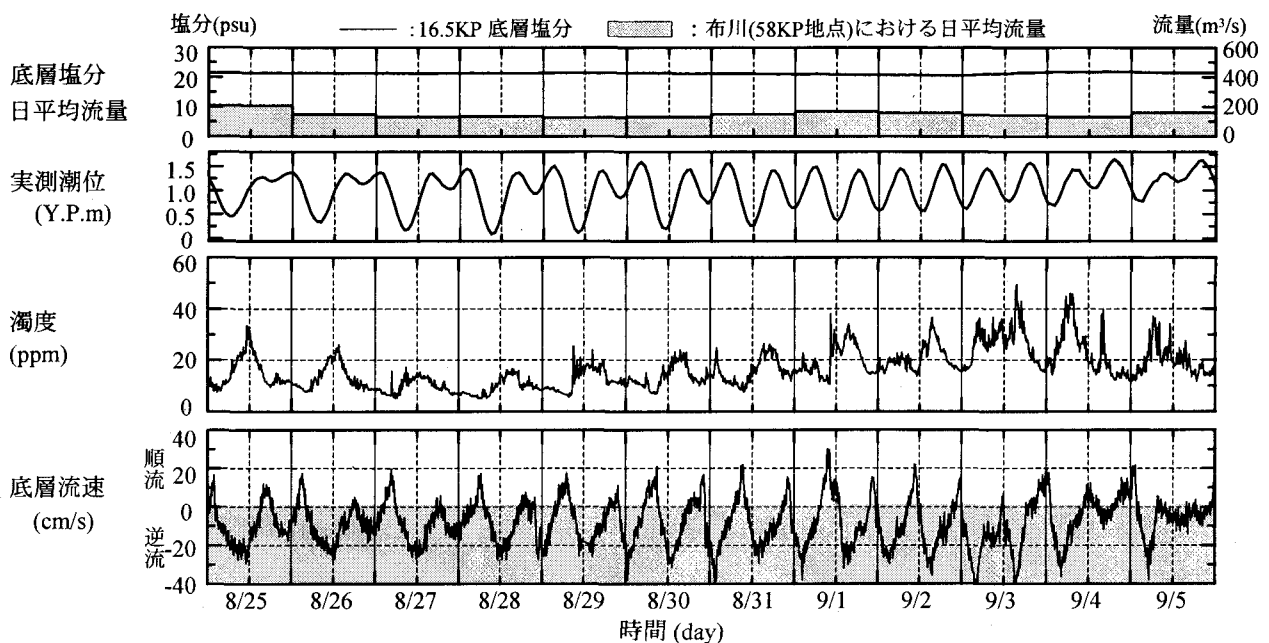


図-3 濁質の時間変動特性 (モニタリング地点:16.5KP最深部, 観測期間:8月25日～9月6日)

の移動観測を実施した。観測日は2001年8月4日(大潮)である。計測区間は12-18KPの6kmとし、濁筋上に0.5km または 1km おきに予め設定した測点に船を移動させ、多項目水質計によって塩分・水温・濁度の鉛直分布を計測した。なお、測点の位置決めには DGPS(フルノ電機製:GP-1650D)を使用した。移動観測は1回 40～50 分で干潮から満潮にわたって計8回実施した。

4. 観測結果

(1) 濁度の時間変動特性

モニタリング観測結果を用いて濁度の時間的な変動特性について説明する。図-3 は2000年8月25日～9月5日の観測結果である。図は上から順に、布川(河口堰から40km 上流)の日平均流量、16.5KPの底層塩分、実測潮位(銚子漁港)、濁度、底層流速(河床から1mの流速)である。なお底層流速は南北成分と東西成分から河道方向成分を合成し、順流を正、逆流を負で表している。また、この期間、流量は200m³/s 前後で安定しており大きな出水はなく、底層塩分もほぼ20psu で一定していることから、塩水はモニタリング地点を越えて堰付近で停滞し続けていたことがわかる。

まず濁度と潮位の時系列を比べてみると、干潮から満潮にかけての比較的短い時間、10～50ppm くらいの範囲で濁度の上昇・下降する様子が見られる。いっぽう底層流速をみると、濁度ピークと逆流のピークは概ね対応している。また底層流速は平均的には逆流であるが、これは河道縦断-鉛直面内における残差流、いわゆるエスチュアリー循環と考えられる。したがって塩水層内で浮上した濁質は平均的には上流側へ輸送されていく。

また、濁度ピーク値と底層流速の最大値には相関関

係があると予想していたが、観測結果(特に、8月29日～9月2日)を見る限り必ずしもそうでないことがわかる。この理由の一つとして、観測地点の塩水層の厚さ変動していることが考えられる。つまり、観測地点の塩水層の厚さは潮汐と堰放流の影響でかなり変化するため、同程度の濁質が浮上した場合、塩水層が厚ければ濁度は低くなるし、逆に塩水層が薄ければ濁度は高くなる。実際に塩水層内部で濁質が一様に混合するとは限らないが、濁質の浮上量と塩水層の厚さによってピーク濁度に変化していることが考えられる。

(2) 濁度の縦断分布特性

塩分と濁度の縦断観測結果を用いて濁度の空間分布特性について説明する。図-4 は1997年8、9月に実施された塩分と濁度の縦断観測結果、図-5 は各観測日の潮位と計測時間の関係を表している。観測結果は8月11日から1週間おきに4回実施したもので、8月11日が小潮、18日が大潮、25日が小潮、9月1日が大潮である。なお、この期間中に大きな出水はなく、堰も通常操作がほとんどであったが、9月1日のみ小出水(400m³/s)のために全開放流を行っていた。

図-4 の塩分のコンターを見ると観測日によって分布傾向が多少異なるが、いずれの場合も塩水楔が堰付近まで遡上していることがわかる。次に塩分と濁度を比較すると、いずれの観測結果においても塩水楔先端部において濁度の高い領域が存在している。

また、観測された Turbidity Maximum の濁度は、小潮時(8月11日、25日)で20 - 30 ppm、大潮時(8月18日、9月1日)で60 - 90 ppm となっており、潮によって異なるようにも見える。しかし、図-5 から観測時の間帯は大潮が干潮～上げ潮、小潮が下げ潮である。濁度ピー

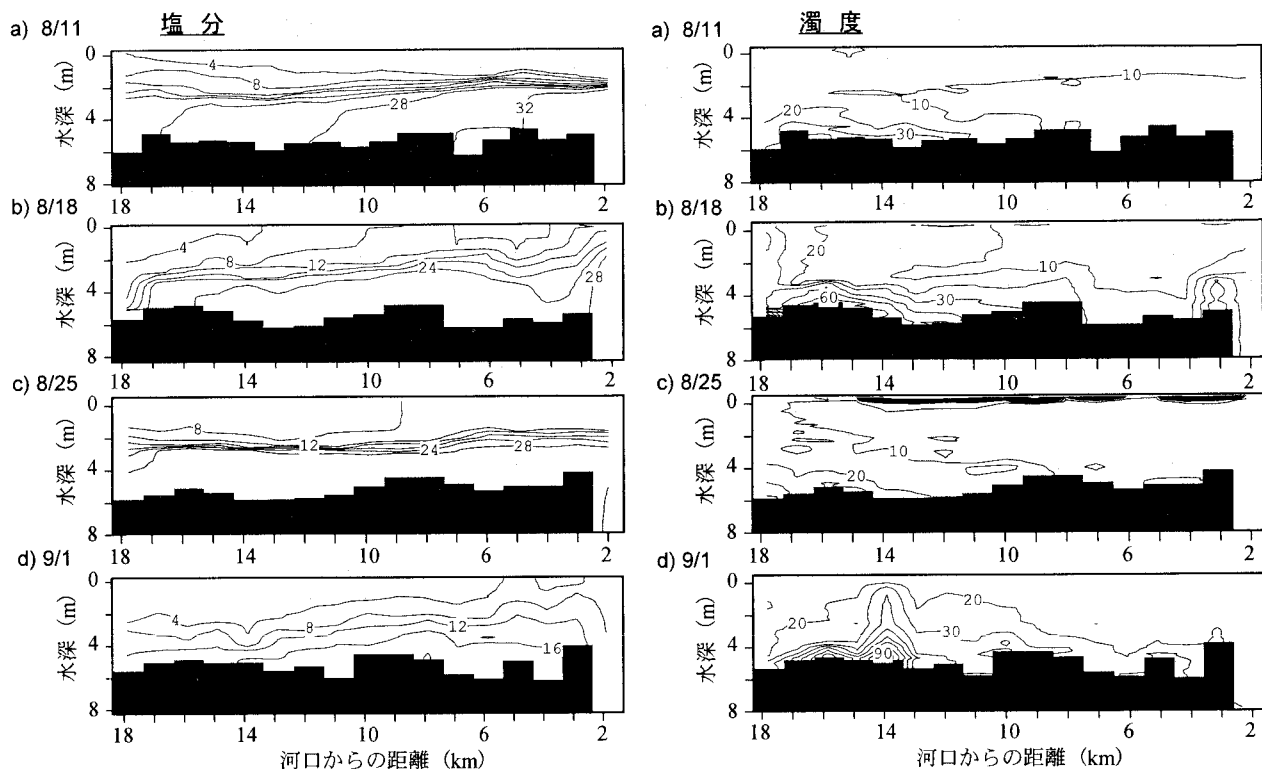


図-4 塩分と濁度の縦断観測結果(観測実施年:1997年, 塩分コンター:4psu, 濁度コンター:10ppm間隔)

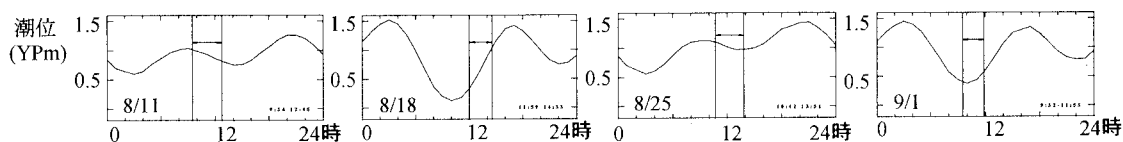


図-5 観測日の潮位変動と計測時間帯(1997年)

クは上げ潮時に生じていることを考えると、これらの観測結果の相違は大潮・小潮によるものというよりも、大潮時は濁度ピーク時付近を捉えていて小潮時はピーク後を捉えているという違いの方が強いと考えられる。

(3) Turbidity Maximum の発生

モニタリング観測と縦断観測の結果から、Turbidity Maximum はおよそ 12KP～18KP の範囲の塩水楔先端部において、上げ潮時に発生すると考えられた。そこで、Turbidity Maximum の発生過程を細かく捉えるために観測区間を塩水楔先端部に絞って観測時間の短縮を図り、時空間的に密な計測を行った。

図-6 に 8 月 4 日の潮位と観測時間帯の関係、図-7 に塩分と濁度の観測結果を示す。なお、実際には8回の縦断観測を行っているが、紙面の都合上、ここでは1回目と8回目を除く6回分のみを示している。下げ潮時の観測(2回目)では濁度 30ppm 前後の濁水塊が河床付近に確認できるが、干潮時(3回目)になって、およそ 14KP - 17KP の範囲において濁度 50ppm 前後の薄い層が河床付近に発生し、4, 5回目と進むにつれてその範囲は拡大し、浮上した濁質はさらに上方に広がっていく様子が伺える。そして満潮に近づくにつれて(6回目・7

回目)全体的に濁度が減少していく様子が見られた。以上から、利根川における Turbidity Maximum は大体同じ時間に塩水楔先端部 14～17KP の河床から上方に広がっていき、干潮から満潮までの7時間くらいの間に急激に変化していく現象と考えられる。

次に、塩水楔先端部における濁質の鉛直1次元的な変動特性について検討を行ってみた。図-8 は、14KP～17.5KP の範囲における塩水層内部の濁度の鉛直積分値(TTB)と塩水層の厚さの関係をプロットしたものである。なお、計算にあたって塩分躍層は塩分 20psu の水位とし、また TTB・塩水層厚は対象区間における全計測点の平均値とした。TTB は3～4回目にかけて顕著な増加を示しており、上げ潮始めの短時間において急激に底質の巻き上げが生じた様子が伺える。しかしその後、塩水層は増加傾向を示しているが、TTB は大きな変化もなく大体一定している。したがって、Turbidity Maximum は図-7 において5回目以降、徐々に衰退していくように見えるが、これは濁質が沈降したというよりも、急激に巻き上がった濁質が乱流拡散によって塩水層内部全体に広がったためそのように見えたと考えられる。

図-9 に集中観測前後のモニタリング観測結果を示す。この観測結果の濁度時系列を手掛かりにして集中観測

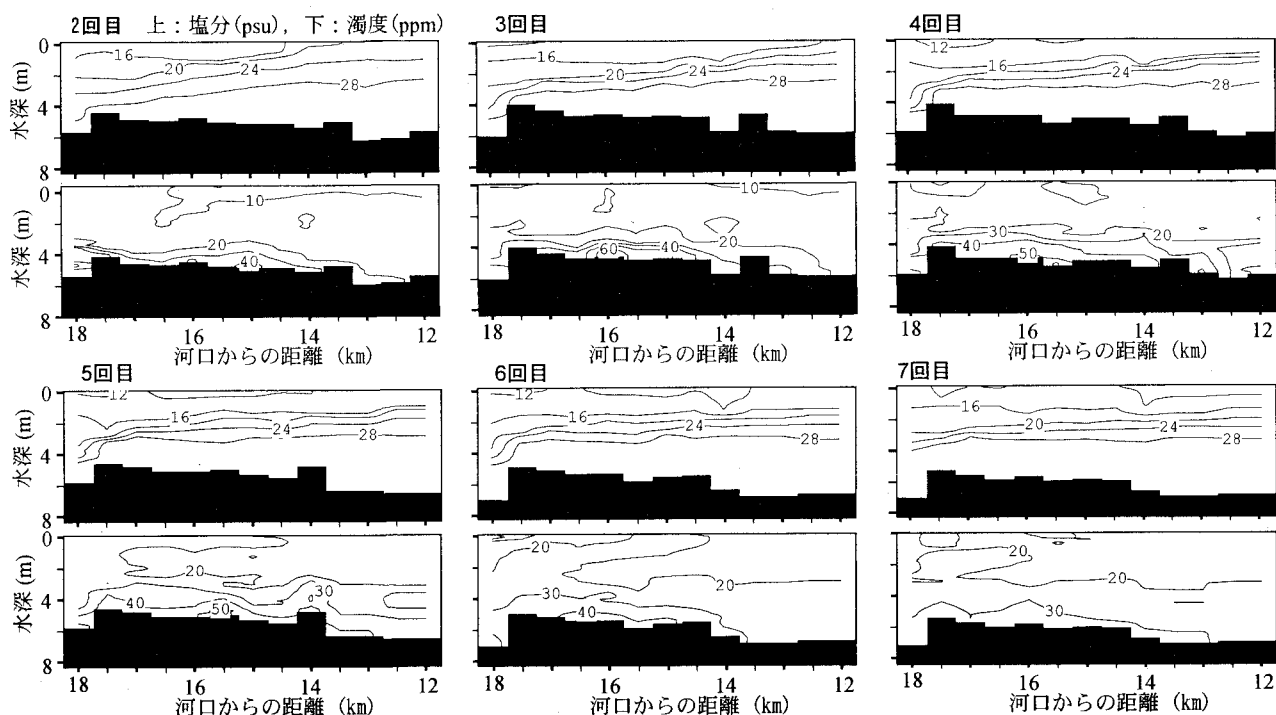


図-7 Turbidity Maximum の発生過程 (2001年8月4日観測, 塩分コンター:4psu間隔, 濁度コンター:10ppm間隔)
(観測は全8回実施されたが, 紙面の都合上, 1回目と8回目の観測結果を省略した。)

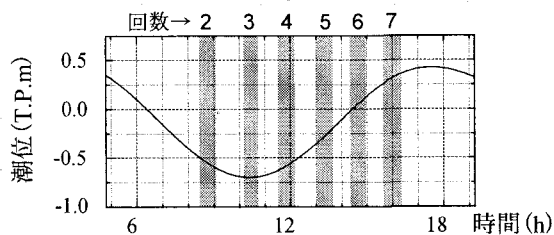


図-6 2001年8月4日の潮位と観測時間帯

後の濁水塊の挙動を推測すると, おそらく5日の深夜0時頃の小さな上げ潮で一度濁度は上昇するものの, そのあと5日昼の干潮の少し前まで塩水楔内の濁質は徐々に沈降してゆき, 図-7の2回目観測の濁度分布くらいの状態に戻ると思われる。

5. 酸素消費に関する室内実験

最後に, 濁質の再浮上が塩水楔内の酸素消費に及ぼす影響を把握するために, 現地の底質と河川水を用いた酸素消費実験を実施した。

(1) 実験方法

まず, 現地で採取した塩水を1 μ mのメンブランフィルターでろ過した後にはばっ気し, 18KP 濁筋付近で採取してきた底泥を適量溶かし, SS濃度を調整した水を作成する。次にその水を複数のフラン瓶に詰めてアルミ箔で遮光し, 20℃の恒温水槽で保温した。その際, フラン瓶内の水をスターラーで攪拌して濁質の浮遊状態を保ちながら一定時間おきにサンプル瓶を取り出し, ウインクラー・アジ化ナトリウム変法によってDOを滴定して酸素

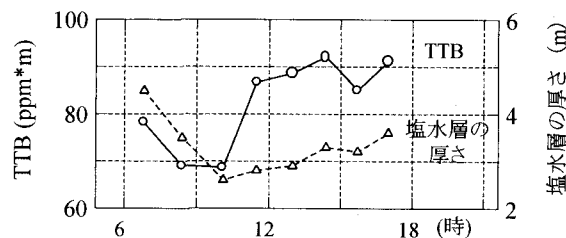


図-8 塩水楔先端部における濁度の鉛直積分値(TTB)と塩水層厚の時間変化 (プロットは左から順に第1回から第8回目に対応している)

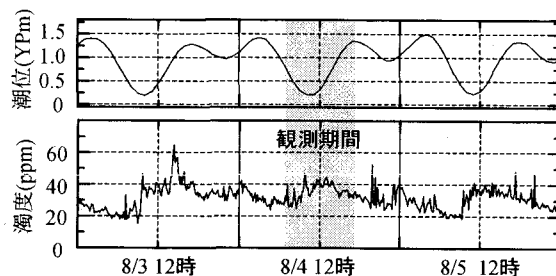


図-9 集中観測前後のモニタリング観測結果

消費量を求めた。設定したSS濃度は0, 40, 70, 180, 260mg/lである。また, 底泥による酸素消費の影響についても調べるため, 濁質実験に用いた底質をフラン瓶の底に数mm厚で敷き詰めてろ過水を入れ, 濁質と同様に酸素消費量を調べた。

(2) 濁質の浮上に伴う酸素消費量の概算

濁質とろ過水(SS=0mg/l)の実験結果を図-10に示す。SS濃度が大きくなるほど酸素消費量が大きくなるのが分かる。そこで, 図-10の各SS濃度における実験開始1日後の酸素消費量から同日のろ過水の酸素消費量を

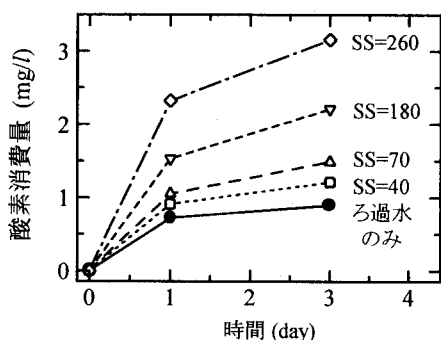


図-10 濁質の酸素消費実験(水温20℃)
(底質は2000年1月11日 18KPで採取)

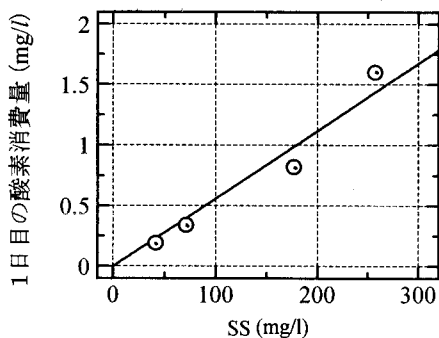


図-11 SSと酸素消費量の相関

引くことによって濁質による1日後の酸素消費量を求め、SS との関係調べてみた。その結果を図-11 に示す。SS 濃度と酸素消費量は概ね比例関係であることがわかる。次に、「濁質が塩水楔全体に様に分布している」と仮定して、現地スケールにおける濁質、底泥及びろ過水の酸素消費量を比較してみた。なお、底泥による酸素消費量は濁質の場合と同じように求めており、塩水楔の平均的な厚さは1997年観測結果に基づいて2.5mとした。その結果を図-12 に示す。SS が40mg/l で全体の酸素消費量の2割弱、SS が70 mg/l に達すると底泥の酸素消費量と同程度になることがわかる。最後に、Turbidity Maximum の観測結果を基にして、8月4日の第1回～第8回の観測時間帯における塩水楔内部の濁質、底質、ろ過水の酸素消費量の割合を計算してみた。なお、計算にあたって濁度分布は横断方向に水平に様と仮定し、塩水界面を20psu、河道方向の積分区間は14 - 17.5KPとした。その結果、塩水楔先端部における濁質、底質、ろ過水の酸素消費の割合は、それぞれ1割、3割、6割程度となった。モニタリング観測結果(図-9)によれば、この時の濁度ピークは40ppm 程度であり、図-3 と比べると比較的大きいピークと言える。したがって、利根川感潮域の場合、塩水楔内部の酸素消費は主にBOD とSOD によって支配されていると言ってもよく、濁質浮上の影響は大抵の場合、考慮しなくてもよいと考えられる。しかし、観測結果にも見られるように、河床付近では高濁度が生じることもあるので、河床付近のDO 変動を取り扱う場合には濁質浮上の影響を無視できない場合もあり得ると思われる。

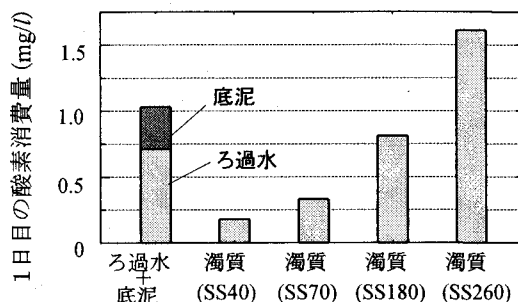


図-12 現地スケールにおける酸素消費量の比較

6. おわりに

本研究では、利根川河口堰下流部における濁質の浮上とそれに伴う酸素消費の影響を把握するために現地観測および室内実験を実施した。その結果、以下のようない知見を得た。

- 1) 利根川河口堰下流部では、上げ潮の逆流時に、塩水楔先端部において濁度の増加・減少が繰り返し生じている。
- 2) 塩水楔先端部において Turbidity Maximum の発生過程が観測された。この現象は干潮から満潮にかけて濁質が河床付近から上層に向かって急激に広がってゆく過程で顕著になり、その後さらに塩水層内部で広がりながら衰退していく。
- 3) 室内実験結果を基に、観測された Turbidity Maximum による酸素消費の影響を調べた結果、濁質の浮上に伴う酸素消費は、濁質・底質・水による全酸素消費量の1割程度と見積もられた。

濁質による酸素消費量は本来、濁質中の酸素消費物質質量によって変わるのだが、今回は1地点で採取した底泥についてのみ実験が行われたため、酸素消費物質による影響に関しては検討できなかった。今後は底泥の採取地点数を増やし、強熱減量と酸素消費量の関係などについても調べていく予定である。

謝辞: 本研究を行うにあたり、国土交通省関東地方整備局利根川下流工事事務所、水資源開発公団利根川河口堰管理所に多大の便宜をはかっていたいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 中野晋・渡辺章弘・中川紀雄・細川由彦・三井宏: 塩水中での浮遊物質の挙動を考慮した都市感潮河川網の水質解析, 環境工学研究論文集, Vol.32, pp.447-456, 1995.
- 2) 鈴木伴征, 石川忠晴, 銭新, 工藤健太郎, 大作和弘: 利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発生と流動, 水環境学会誌, Vol.23, No.10, pp.624-637, 2000.
- 3) 西條八束, 奥田節夫 編: 河川感潮域—その自然と変貌—, 名古屋大学出版会, 1996.

(2001. 10. 1受付)