

利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の 発達・流動に関する現地観測と数値計算

FIELD MEASUREMENT AND NUMERICAL SIMULATION
ON DEVELOPMENT AND MOVEMENT OF THE LOW OXYGEN WATER
IN THE TONE RIVER BELOW THE ESTUARY BARRAGE

鈴木伴征¹・石川忠晴²

Tomoyuki SUZUKI, Tadaharu ISHIKAWA

¹学生会員 工修 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
(〒226-0065 神奈川県横浜市緑区長津田町4259 東京工業大学G5-209)

²正会員 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 measurement and numerical simulation were carried out in order to investigate development and movement of the low oxygen water mass in the Tone River below the estuary barrage. The measurement data shows that low oxygen water frequently generated in the front part of salt wedge, and then developed downstream in the salt wedge gradually.

Next, in order to simulate the characteristic behavior of the low oxygen water, the standard $k-\varepsilon$ turbulence model is adopted in the numerical model of salt intrusion. Furthermore in addition to the $k-\varepsilon$ model, DO-transport equation and BOD-transport equation are introduced for the purpose of simulating the characteristic behavior.

Comparing the calculation results with the measurement data, the characteristic behavior are reappeared well.

Key Words : low oxygen water mass, estuary barrage, salt wedge, dissolved oxygen, $k-\varepsilon$ turbulence model, numerical simulation

1. はじめに

利根川河口堰は、図-1に示すように河口から18km入った地点に建設されている。その下流部では、河積に比べて流量が小さく、塩水楔が安定して停滞する傾向にある。このため、塩水楔先端部の乱流混合が弱く、貧酸素化しやすいと考えられる。

筆者ら⁽¹⁾は、1996年9月～10月にかけて、同水域の塩分と溶存酸素(以下DOと言う)の縦断分布を数度にわたって観測し、塩水楔先端部から貧酸素水塊が形成されている様子、及びその一部が上昇して塩分躍層に沿って流下する様子を捉えた。しかし、観測間隔が比較的大きく、また流速計測を1度しか行っていなかったため、時間的推移の把握が十分ではなかった。

そこで本研究では、貧酸素水塊が形成されていく過程を捉えるために、定期的に現地観測を実施した。また、塩水楔の流動を $k-\varepsilon$ 乱流モデルによって計算し、DO、BODの輸送方程式を組み合わせることにより、貧酸素水塊の挙動を数値的に再現を試みた。

2. 現地観測

(1) 観測概要

観測区間は、銚子大橋(河口から2km地点)から利根川河口堰までの16km区間とした。また観測期間は1997年6月10日～10月27日である。なお、本論文では、塩水楔が安定して停滞した8月の観測データを取り扱う。

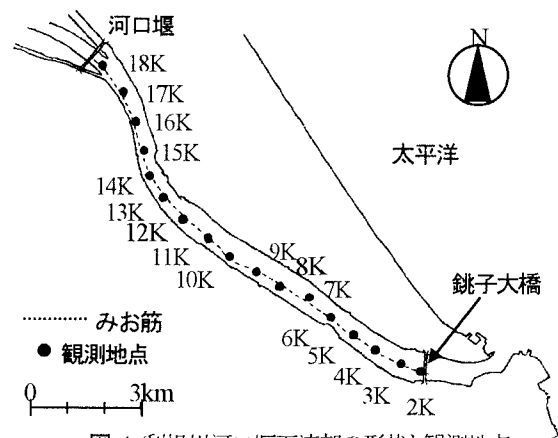


図-1 利根川河口堰下流部の形状と観測地点

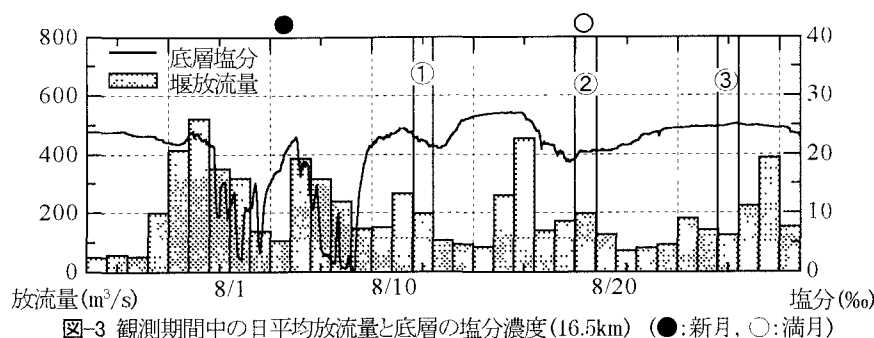


図-3 観測期間中の日平均放流量と底層の塩分濃度(16.5km) (●:新月, ○:満月)

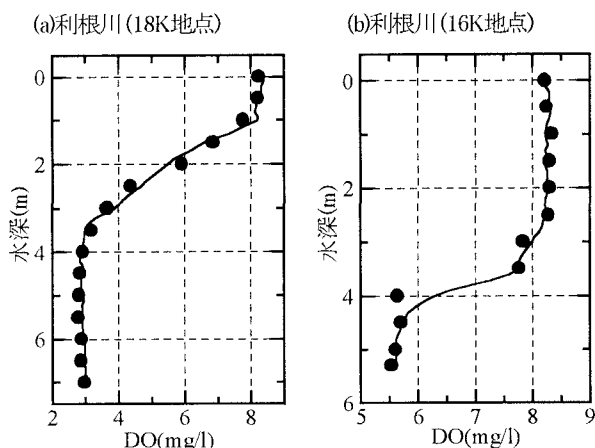


図-2 DO計測法の比較(●:通常計測, —:鈴木らの方法)

(2) 観測方法

観測は1997年6月10日～10月27日の期間において2週間おきに計13回実施した。ただし、8月は1週間おきに観測を実施した。観測内容は多項目水質計(アレック電子製:ACL-1183PDK.)によるDO、塩分、水温および濁度の水質計測と、ADCP(RD-Instrument社製:1200kHz)による流速観測とに分かれる。

水質計測では、図-1の滞筋上に1kmおきに設定した計17地点の測点(●印)において、各水質の鉛直分布を計測した。ただし、目標ブイを設置できなかったため、GPSによって観測地点付近まで船を移動した後、音響測深器で水深をモニターしながら横断方向に走り、測点を定めた。このため、観測日ごとに計測位置が若干異なっている。流速観測は1997年8月18日に、図-1の破線で示す滞筋上を船で一定速度で移動しながら合計5回実施した。

なお、DO測定はセンサーの時定数が大きいので、その他の水質計測に比べて多くの時間を要する。しかし、感潮河川でDO濃度が時空間的に変化するため、できるだけ短時間で計測することが望ましい。そこで鈴木ら²⁾の検討した「計測器の時間応答性を考慮して、DO濃度の鉛直プロファイルを推定する方法」を用いることにより、観測時間の短縮を図った。通常の計測方法と鈴木らの方法による測定結果の比較を図-2に示す。両者はよく一致しており、貧酸素水塊の分布状況を把握するために十分な精度を有しているといえる。

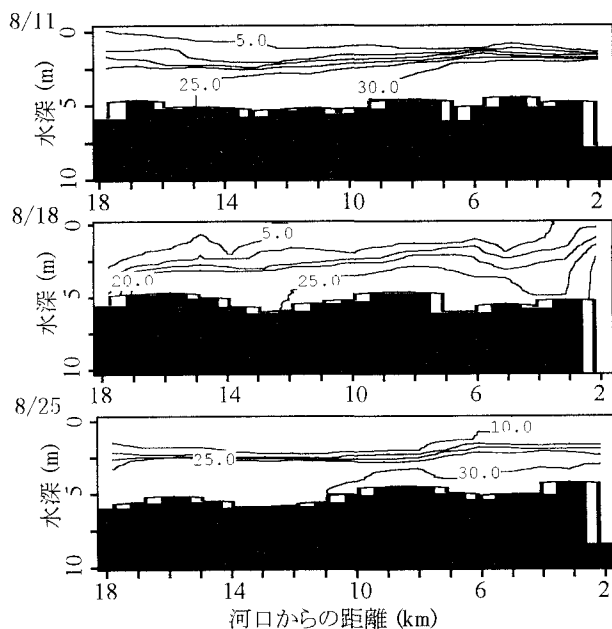


図-4 塩分縦断分布の観測結果(単位:‰)

(3) 観測結果および考察

1997年8月の布川地点(河口堰から58km上流)の日平均流量と16.5K(河口堰より2km下流)における底層Cl濃度の日平均値を図-3に示す。図中には朔望日(●と○)と観測日(①～③)も記入してある。①と②の観測の間に出水があったが、16.5KのCl濃度がほとんど低下していない。これより、①～③の観測期間中に塩水楔はフラッシュされずに停滞しつづけたと考えられる。

図-4、図-5に1997年8月11日、18日、25日の塩分とDOの縦断分布を示す。いずれも縦軸は水深で、横軸は縦断方向距離である。また、各図の黒で塗りつぶされた矩形部分は河床形状を示している。前述の通り、観測点が毎回少しずつ異なるために河床形状は多少異なっている。

図-4から、いずれの観測日においても塩水と淡水の二層状態がかなり明確に形成されている様子や、高濃度の塩水が堰直下流付近まで侵入していることがわかる。

8月11日には塩水楔先端付近にDO濃度4mg/l程度の貧酸素水塊が生じている。また、11K～16K地点において、微弱ではあるが、貧酸素水塊の一部が塩分躍層に沿って流下する様子がみられる。8月18日には、塩水楔先端のDO濃度は3mg/lに低下している。8月25日には、塩水楔先端のDO濃度は2mg/lまで低下し、貧酸素化している領域も

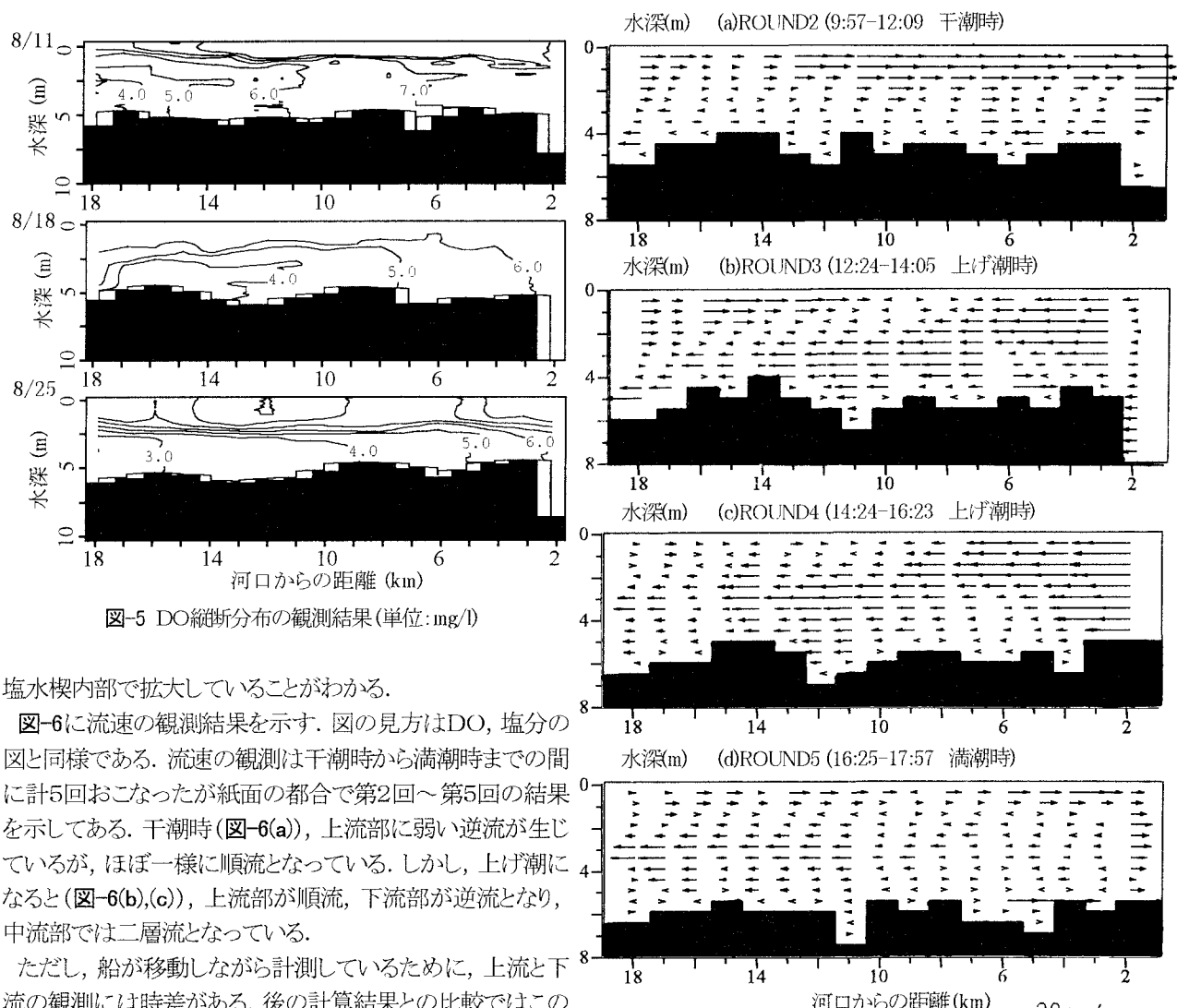


図-5 DO縦断分布の観測結果(単位:mg/l)

塩水楔内部で拡大していることがわかる。

図-6に流速の観測結果を示す。図の見方はDO、塩分の図と同様である。流速の観測は干潮時から満潮時までの間に計5回おこなったが紙面の都合で第2回～第5回の結果を示してある。干潮時(図-6(a)), 上流部に弱い逆流が生じているが、ほぼ一様に順流となっている。しかし、上げ潮になると(図-6(b),(c)), 上流部が順流、下流部が逆流となり、中流部では二層流となっている。

ただし、船が移動しながら計測しているために、上流と下流の観測には時差がある。後の計算結果との比較ではこの点について考慮する。

3. 貧酸素水塊の発達・流動に関する数値計算

(1) 現象の簡略化及び基礎方程式

貧酸素水塊の発生・発達及び移動は、塩水の流動と混合に強く依存している。そこで、 $k-\epsilon$ 乱流モデル式とDO及びBODの輸送方程式を組み合わせることで現象の再現を試みる。ただし、図-4～6に示した観測データは全て鉛直縦断面内のものであることから、以下に述べる対象河道の特性を考慮して、横断方向に積分化された方程式を取り扱うことにする。

① 図-1に示すように対象河道は緩やかに蛇行している。蛇行の影響は遠心加速度 u^2/r (u :最大流速, r :代表曲率半径)と実質重力加速度 δg (δ :相対密度差, g :重力加速度)の比で概略評価できる。図-1の平面図より $r=4\text{km}$ とし、計測データから $u=0.8\text{m/sec}$, $\delta=0.02$ とすると、後者は前者の1000倍以上となる。したがって、蛇行の影響は無視できるものと考えられるので、当該河道を直線河道とみなす。

② 利根川下流部は元来が広い入り江であったので、図-7に示すように、当該河道の河床勾配は極めて小さい。そこで、本数値計算では河床勾配をゼロとおく。ただし横断面

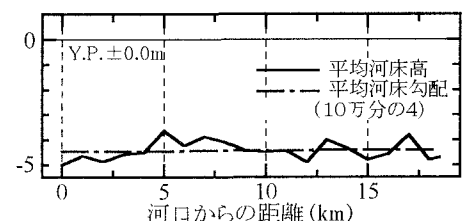


図-7 利根川下流部の平均河床高と平均河床勾配

形は矩形とせず、実際の断面形に近似して川幅と水深の関係を設定する。((3)a)参照)

③ 潮位変化に伴う当該河道の水位変化を図-8に示す。わずかの水面勾配は生じるものの、上流から下流まで概ね一様に上下する。これは、この河道が自流量に比較して河積が非常に大きいために、実質的には「細長い入江」に近くなっていることによる。そこで本研究では、水面を、潮汐に合わせて上下する Rigid Wall とみなす。なお、水面勾配の効果については別途考慮する。

④ 現地観測の結果では、観測期間での水温変動は3～4℃であったので、密度変化要因は塩分のみとした。また、水面に作用する風応力の効果は考慮しない。

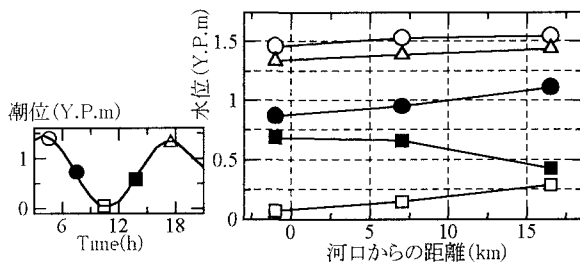


図-8 利根川下流部の水面変動特性

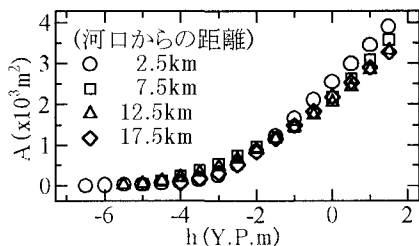


図-9 利根川下流部各地点の水位(h)と断面積(A)の対応関係

以上の条件のもとで、連続式、ブシネスク近似をした運動量輸送方程式、 $k-\varepsilon$ モデルの k -輸送方程式、 ε -輸送方程式及び塩分、DO、BODの輸送方程式を横断方向に積分すると次の式形を得る。

$$\frac{\partial}{\partial x}(uB) + \frac{\partial}{\partial z}(wB) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} B + \frac{\partial}{\partial x}(uBC) + \frac{\partial}{\partial z}(wBC) - \frac{\partial}{\partial x}\left((v_{eff})B \frac{\partial C}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left((v_{eff})B \frac{\partial C}{\partial z}\right) \\ = -BS + \frac{F}{(n_s \cdot n_y)} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 C は輸送される物理量であり、 x は河道に沿った座標、 z は鉛直上向き座標、 u と w は x 及び z 方向の横断平均流速、 $B=B(x,z)$ は河道幅、 v_{eff} は実効動拡散係数である。 S は単位体積あたりの C の生産率(または消滅率)であり、 u と w の輸送方程式では圧力勾配、 k と ε の輸送方程式では $k-\varepsilon$ 方程式で定義される量、塩分の輸送方程式ではゼロ、DOとBODの輸送方程式ではBOD分解速度となる。また、 F は河床面におけるフラックスであり、 u の輸送方程式では底面せん断力、 w 、 k 、 ε 及び塩分とBODの輸送方程式ではゼロ、DOの輸送方程式では底泥による単位面積当たりの酸素消費量としている。 $(n_s \cdot n_y)$ は河床に垂直な単位ベクトル n_s と横断方向の単位ベクトル n_y の内積を表す。

底泥による単位面積あたりの酸素消費速度は、鈴木らの実験結果⁽⁴⁾に基づき以下のように与えた。

$$F_{DO} = K_S C_{DO} \quad , \quad K_S = 0.067 \text{ m/day} \quad (3)$$

また、BOD分解速度は一次反応式に従うものとし、次式を仮定する。

$$S_{DO} = S_{BOD} = K_w C_{BOD} \quad (4)$$

K_w の値については後述する。

(2) 計算方法

上記の式を有限体積法で離散化し、SIMPLE法によって解いた⁽³⁾。計算格子には、振動解を防ぐためスタガード格

子を用いている。

計算領域のメッシュ幅は全域一様に $\Delta x=500\text{m}$ 、 Δz を 0.1m 、時間ステップ Δt は 60s とした。ただし、水面に接するメッシュの Δz については以下のようにした。

(1)の③で述べたように、本数値計算では、潮汐に合わせて上下する Rigid Wall として水面を取り扱う。そこで、水面に接する計算メッシュ幅 Δz を $0.05\sim 0.15\text{m}$ の範囲で変化させ、その範囲を越えた場合、水面に接するメッシュを分割あるいは直下のメッシュと結合させるスキームを導入した。さらに、銭ら⁽⁴⁾が霞ヶ浦の三次元計算で用いた「水面での鉛直流速成分の時間積分値を静水圧増分として考慮した」スキームも導入し、潮位変動により生じる水面勾配の効果を組み込んだ。すなわち、計算グリッドが水平であっても、水面勾配の効果は静水圧増分として計算に反映される。

(3) 計算条件

a) 川幅の取り扱い

式(1)、(2)の中の川幅 $B(z)$ については以下のように与えた。まず建設省が平成8年に実施した利根川断面形状の測量結果を基に、各横断面における水位 h と、その水位以下の断面積 A の関係を調べた。その結果、河口から2km地点以外では図-9に示すようにほぼ同形ベキ乗関数近似できると考えられた。そこで、傾向の異なる2kmを除き、 h と A の関係を表す代表曲線を次式のように設定し、最小二乗法で A_m を定めた。

$$A(h) = A(h_1) \left(\frac{h - h_0}{h_1 - h_0} \right)^{A_m} \quad (5)$$

ここで、 h は水位(Y.P.m)、 h_0 は各地点最深部の平均水位で $h_0=-5.7\text{m}$ 、 $A(h_1)$ は $h_1=+1.0\text{m}$ における各地点の実際の断面積である。なお、 A_m は 1.81 となった。式(5)を微分することにより川幅 B と h の関係を求めた。なお、後述するように、本研究では下流端境界を河口外においているが、河口より下流域は断面資料がないため、河口からの距離を半径とした円周の $1/2$ の長さを便宜的に川幅とした。

b) 対象期間

塩水楔がフラッシュされるほどの大きな出水がなく、貧酸素水塊の発達過程が観測された1997年8月11日～8月25日の2週間を計算対象期間とした。

c) 境界条件および初期条件

計算領域は利根川河口堰(河口から18.5km上流)から河口より下流3km地点までの21.5kmとした。上流端での流速の境界条件は、河口堰からの放流量を上流端断面積で除し、平均流速として与えた。

計算下流端を河口より下流に設定している理由は次のとおりである。河口断面では潮汐の位相ごとに塩分状態や流速分布の状態が変動するが、それに関する計測データはない。そこで計算下流端を変動の少ない海部において境界条件を与えることにより、境界条件の設定が河道の中の計算結果に及ぼす影響を少なくしている。

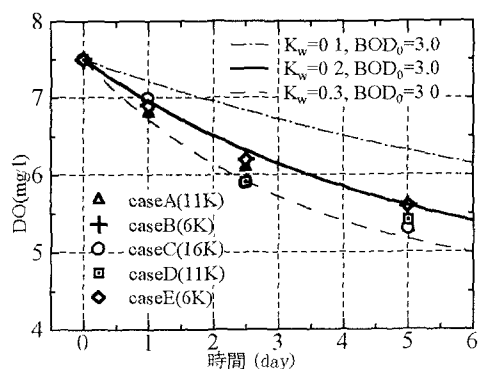


図-10 河川水による酸素消費実験

下流端水位は、河口端での潮位を与えた。また、下流端流速は次のように与えた。利根川下流部4地点の水位記録によれば18km区間での水位変動の時差は小さい。そこで、河道内水位が潮位と等しく変動するとした場合の河道内貯留量の時間変化から下流端排水量を近似的に求め、これを下流端断面積で除した平均流速を、下流端流速として与えた。なお、この方法は、図-7～図-9に示した利根川下流部の地形・水理特性を前提としたものであり、他の河川に適用できるとは限らない。

河床・河岸ではスリップ流速を認め、境界面に垂直な流速をゼロとした。なお、スリップ流速と応力の関係は次式で与える。

$$\nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} = f_b u |u| \quad (6)$$

ここに、 f_b は摩擦係数であり、ここでは0.004とおいている。

塩分の境界条件は、上流端において淡水(0‰)、下流端で海水(34‰)を水深方向に一樣に与えた。

DOに関する境界条件は以下のように与えた。まず、上流端・下流端の流入条件は計算期間中のそれぞれの平均水温における飽和値とした。

水面におけるばう気は飽和DO濃度 C_s からの不足分に比例したフラックスが存在するとして、次式で表す。

$$S_1 = K_A B(C_s - C_{DO}) \quad (7)$$

ここに、 K_A は再ばう気係数で、ここでは 0.5 day^{-1} とした。

BOD分解速度の係数 K_w と代表BOD濃度は、採水分析から以下のように求めた。図-10は、現地で採水した河川水の酸素消費実験の結果である。ここで、分解可能な全有機物量 BOD_0 と反応係数 K_w を種々仮定し、次式をデータに重ね合わせるにより K_w と BOD_0 を定めた。

$$C_{DO} = DO_0 - BOD_0(1 - \exp(-K_w t)) \quad (8)$$

その結果、 $K_w=0.2 \text{ day}^{-1}$ 、 $BOD_0=3 \text{ mg/l}$ となった。なお、 BOD_0 は分解可能な全有機物量であり、上記の K_w のもとでは BOD_0 が 2 mg/l の場合に相当する。利根川の BOD_0 はもちろん時間的に変動するが、平均的には河口堰上流で 3 mg/l 程度、河口付近で 2 mg/l 程度である⁽⁵⁾。したがって、上記の設定は現実とそれほど変わらないものと考えられる。塩分・DOの初期値は8月11日の観測結果とし、流速は静止流速とした。BODの初期値及び上流端、下流端境界でのBOD値

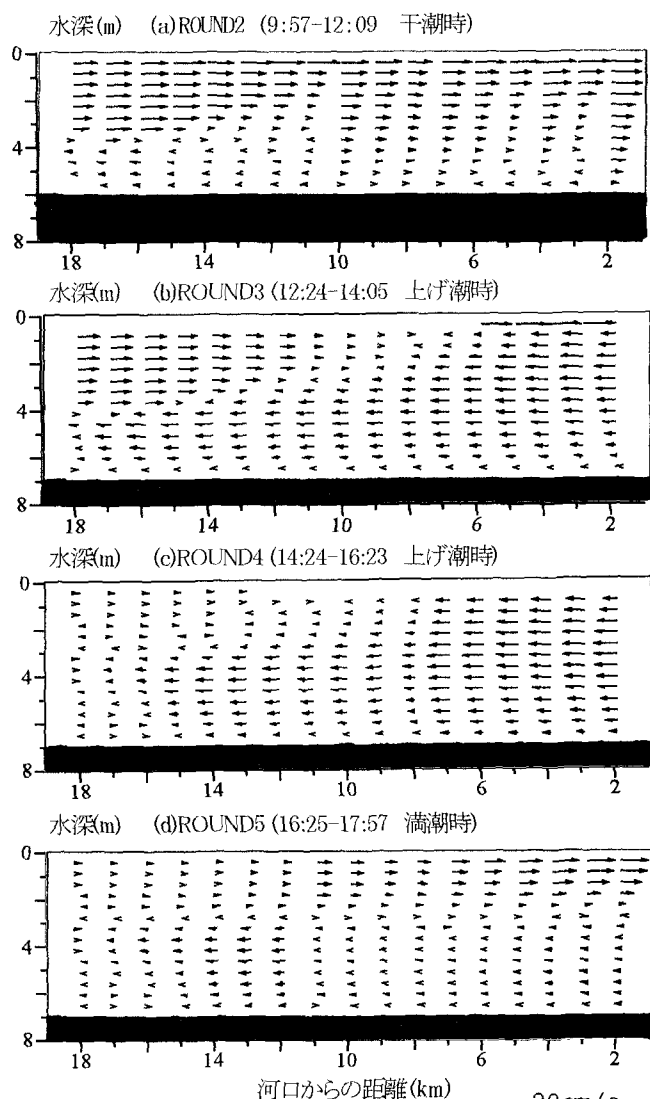


図-11 流速の計算結果

は上で求めた BOD_0 (3 mg/l)とした。

(4) 計算結果と観測結果の比較及び考察

a) 流速分布

主流方向 u の計算結果を図-11に示す。図-6に示した観測値が船で移動しながら計測された結果であることを考慮し、船による観測と同じ位置・時間の鉛直分布の計算結果を縦断的に並べて図-11を作成している。図の見方は図-6と同様である。計算で求められた流速分布のパターンは観測結果とよく一致している。しかし、計算結果では流速の絶対値が全体的に小さくなっている。この要因には、もちろん計算手法自体が完全でないこともあるが、観測では流心部に沿って計測しているのに対し、計算では横断面平均値を求めていることにもよっていると思われる。

b) 塩分分布

塩分の計算結果を図-12に示す。図-4の観測結果と比較すると、全体的によく一致していることがわかる。また、図-12はそれぞれ大潮時、小潮時に観測したものであるが、潮による塩分濃度の違いもよく再現できている。

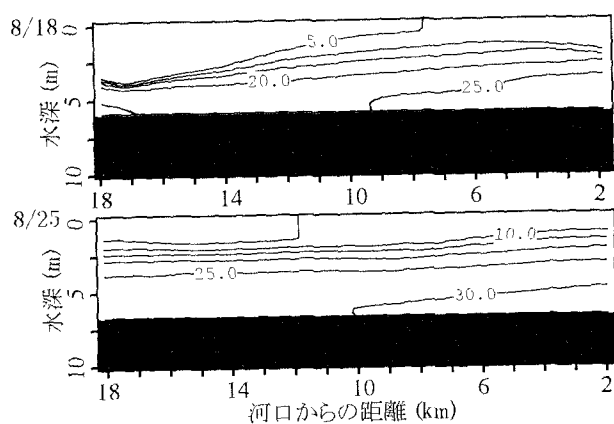


図-12 塩分縦断分布の計算結果(単位:‰)

c) 貧酸素水塊の発生・発達

DOの計算結果を図-13に示す。同図には、観測日の計算結果のほかに、各観測の中間日の計算結果を示している。計算と観測を比較すると、貧酸素水塊の主要部分が塩水楔先端付近で発達する傾向は比較的良好一致している。また、塩水楔先端付近のDO濃度も3～4mg/lと概ね一致した。しかし、貧酸素水塊が塩水楔内部において下流方向へ発達していく現象については、8月18日まではよく一致しているものの、8月25日の計算結果では、かえって減少している。図-13(c)～(e)を見ると、計算結果がこうになる過程は次のようになっている。すなわち、大潮から小潮に移行するにつれて、フレッシュで高密度の塩水が河川奥まで侵入するようになり、楔先端部の中間密度の流体(貧酸素水塊)が持ち上げられ、塩水楔界面に沿って下流に放出される。その結果として貧酸素水塊は減少する。しかしながら現地では貧酸素水塊は拡大しているわけだが、その機構については8月18日と25日の間の情報が無いためわからない。この不一致の原因を調べるためには、より短い間隔での観測を行う必要があると考えられるが、今後の課題としたい。

4. おわりに

本研究では利根川河口堰下流部の貧酸素水塊の発生・発達を現地観測するとともに、その現象を再現できる数値モデルの開発を試みた。その結果以下のような知見を得た。(1)河道横断方向に方程式を積分した鉛直二次元 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いて、利根川下流部における塩水遡上の数値計算をおこなった。観測結果と比較したところ、流れのパターンおよびその時間変化は比較的良好一致した。しかし、流速の絶対値については計算結果は過小であった。(2)BOD、DOの輸送方程式を $k-\epsilon$ 乱流モデルに組み込み貧酸素水塊の発達・流動の再現を試みた。観測と比較した結果、貧酸素水塊の主要部が塩水楔の先端付近で発達する様子が再現できた。また、塩水楔先端付近のDO濃度も概ね一致した。ただし、貧酸素水塊の発達については8月18日以降において再現性が不十分であった。

謝辞：現地観測を実施するにあたり、建設省関東地方建設

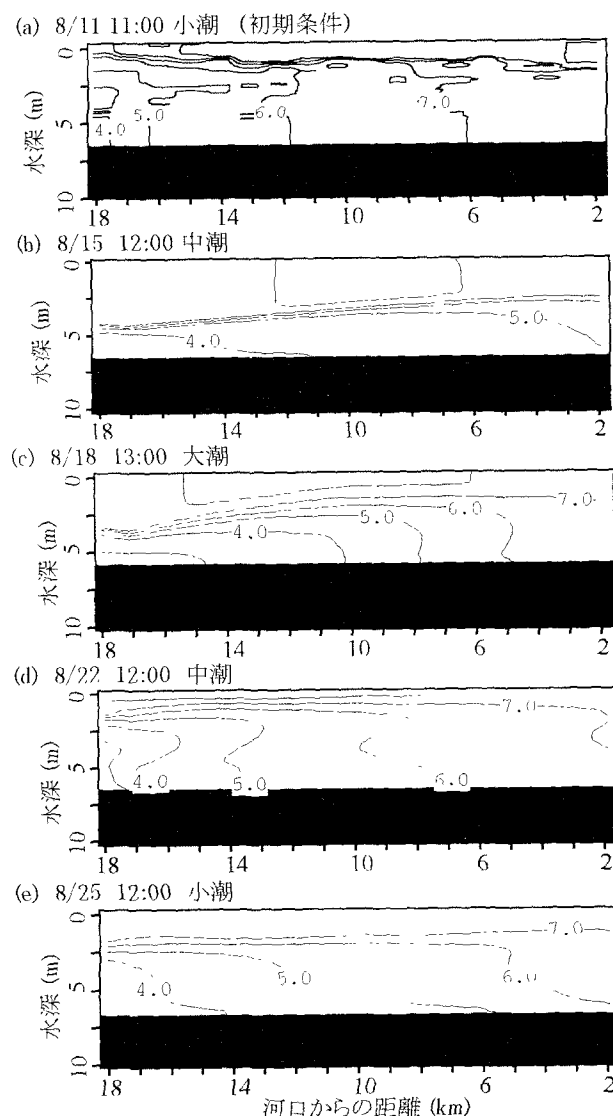


図-13 DO縦断分布の計算結果(単位:mg/l)

局利根川下流工事および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頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 鈴木伴征, 若岡圭子, 石川忠晴: 利根川河口堰下流部における嫌気水塊の運動について, 水工学論文集, 第42巻, pp.769-774, 1998
- 2) 鈴木伴征, 鶴田泰士, 石川忠晴: 河川・湖沼等におけるDO空間分布の高速計測, 水環境学会誌, 第21巻 第7号, pp.455-459, 1998
- 3) 荒川忠一: 数値流体工学, 東京大学出版会, 1994
- 4) 銭新, 石川忠晴, 西部隆宏: 霞ヶ浦高浜入りにおける日成層形成時の湾水交換の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.1051-1055, 1997.
- 5) 小倉久子, 利根川下流部の水質の変化～公共用水域水質測定結果をもとにして～, 利根川河口堰の流域水環境に与えた影響調査報告書, pp.47, 1998.

(1998.9.30受付)