

利根川河口堰下流部における 嫌気水塊の運動について

ON THE MOVEMENT OF ANAEROBIC WATER IN THE
TONE RIVER BELOW THE ESTUARY BARRAGE

鈴木伴征¹・若岡圭子²・石川忠晴³

Tomoyuki SUZUKI, Keiko WAKAOKA and Tadaharu ISHIKAWA

¹学生会員 東京工業大学大学院総合理工学研究科 環境物理工学専攻 (〒226 横浜市緑区長津田町 4259)

²工修 東京建設コンサルタント (〒171 東京都豊島区池袋 2-43-1 池袋青柳ビル)

³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 環境物理工学専攻

Field observations were carried out in order to investigate the generation and the movement of anaerobic water in the Tone River below the Tone estuary barrage. The obtained data shows that anaerobic water frequently appeared in the front part of salt wedge, and part of the anaerobic water sometimes flows down along the interface between the salt and the fresh water. The sediment oxygen demand (SOD) coefficient estimated from the variation of DO concentration contained in the salt wedge agreed fairly well with the SOD coefficient obtained by a laboratory experiment.

Key Words : anaerobic water, DO, estuary barrage, salt wedge, SOD

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。利根川では随所で取水が行われているため、河口堰からの放流量は下流部の河積に対して著しく小さい。特に近年は渇水が慢性化しており、非降雨時の放流量は日平均で $30\text{ m}^3/\text{sec}$ (最低放流量) に抑えられることが多い。この放流条件下における下流河道の単純平均流速は 1 cm/sec 以下であり、下流水域の流動は主に潮汐作用に支配されている。したがって利根川河口堰下流部は、河川というより“細長い入江”と考えた方がよい。

最低放流量時には、干潮時でも塩水楔が堰地点まで到達していることが多い。このため河口堰直下流部の水域における底層水の停滞性は特に強く、底泥の酸素消費によって嫌気水塊が発生しやすい。嫌気水塊は、通常は底層に滞留しているが、潮汐の具合によって中層ないし表層に浮上した場合には、生態系に大きな影響を及ぼす恐れもある。

そこで本研究では、河口堰から銚子大橋までの16km区間において、塩分、DO及び流速を計測し、嫌気水塊の分布及び移動状況を調べた。また複数の観測結果より、塩水界面以下におけるDO総量の時間変化を求め河道平均的な酸素消費速度を推算した。

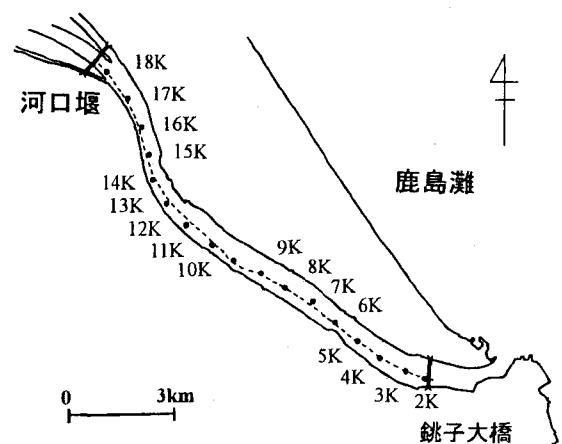


図-1 利根川河口堰下流部の形状と観測地点

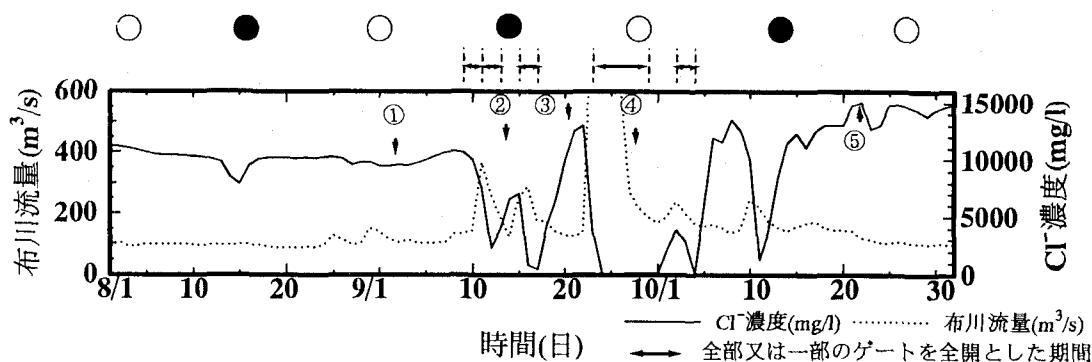


図-2 観測期間の日平均放流量と底層の塩分濃度(16.5K) (●：新月，○：満月)

2. 現地観測

(1) 溶存酸素量と塩分の観測

観測は平成8年9月から10月にかけて5回行った。観測地点は、銚子大橋(2K地点)から利根川河口堰までの区間の滞筋に沿って1kmおきに設定した。(図-1参照)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、魚群探知機で水深をモニターしながら横断方向にゆっくり走り測定地点を定めた。このため観測日ごとに計測位置が若干異なっている。

使用した計測装置は直読式DOメーター(セントラル科学製:UC-12-SOL型)及び多項目水質計(アレック電子製:ACL-1180-DK)である。後者では深度(水圧)、水温、塩分、濁度及びクロフィル-aが計測できる。一方DOメーターには深度の測定機能が付いていないため、水質計の深度測定部の横に取り付けて計測した。

まず、水質計をゆっくりと下降させ各水質項目を測定し、その後50cmずつ引き上げて停止しDOを計測した。水質計による計測項目の計測時定数は非常に短い。そこでセンサーを約50cm/secの速度で下降させながら、出力をRS-232Cで連続的にパソコンに取り込んだ。深度(水圧)と水質項目の相関図から鉛直分布が得られる。一方DOメータの時定数は大きいので、各深度に30sec静止させた後の値を野帳に記録した。

(2) 流速観測

平成8年9月13日(第2回観測)には、ADCP(RD-Instrument社製:1200kHz)を用いて、図-1に点線で示す滞筋上で流速観測を行った。鉛直分解能を30cmとし、15ピン平均値を1観測値とするように設定した。その結果、1プロファイルの出力には約18秒を要した。また、滞筋の水深は5m前後であるため、鉛直方向に15層程度の観測値が得られた。

3. 観測期間の状況

観測期間における布川地点(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-2に示す。図中には朔望日(○と●)と観測日(①～⑤)も記入してある。

利根川河口堰からの放流は、水位条件を考慮して干潮時にまとめて行われる。日平均放流量は布川流量から約60m³/secを減じた量である。常時は二段ゲートを用いた部分開度放流(上層放流または下層放流)が行われているが、流入量が多い場合には必要放流量に応じた門数だけ一段ゲートを全開する。後者の操作が行われた時間帯を図-2の上段に示している。これからわかるように、全開操作が行われると塩水楔が後退するので16.5K地点の底層Cl⁻濃度は減少する。

平成8年の夏期は少雨であり、第1回観測以前の放流量は継続的に少なく、塩水楔の先端は河口堰近傍に滞留していた。第2回と第3回観測の前には小出水があり、塩水楔は若干後退している。ただし16.5KのCl⁻濃度がゼロまで下がっていないことから、後退量はさほど大きくないものと考えられる。9月23日には台風17号出水(ピーク流量は2038m³/sec)があり、16.5K地点における底層Cl⁻濃度は1週間にわたってゼロレベルに低下している。後に述べるように、この期間には塩水楔が河口までフラッシュされていた。しかし9月末には塩水楔が河口堰近傍に再び達しており、小出水による変動はあるものの、底層Cl⁻濃度は徐々に増加している。第4回観測は台風出水により塩水楔がフラッシュされた期間に行われ、第5回観測は塩水楔が回復した後に行われている。

第1回から第5回の観測日における潮位変動(銚子)及び16.5K地点の底層Cl⁻濃度を図-3に示す。

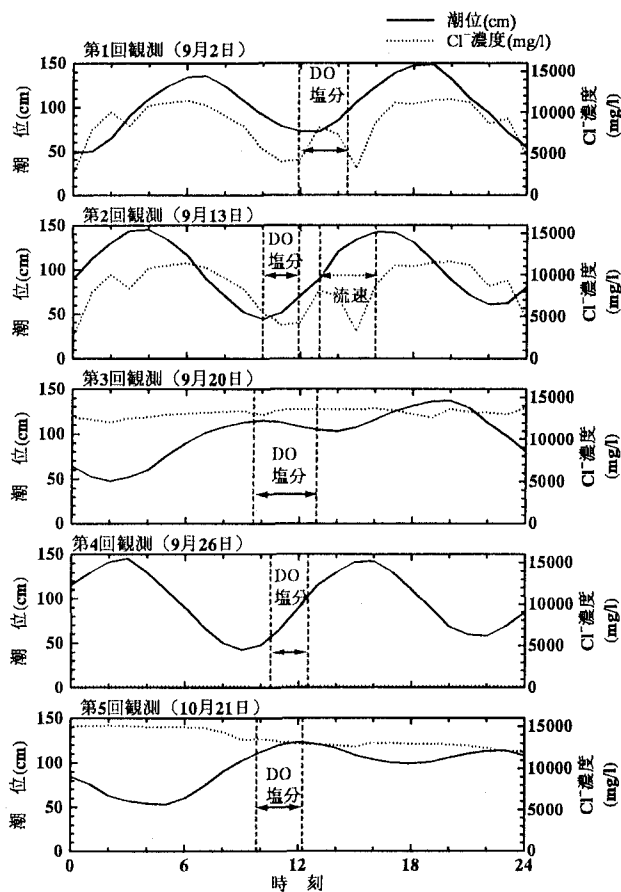


図-3 観測日の潮位変動と 16.5 K 底層の塩分濃度

図中には観測時間帯も記入してある。第1回観測及び第2回観測の塩分・DO計測は低潮時に行われた。特に第2回観測での潮位は低かった。(ただし第2回観測の流速計測は上げ潮時に行われた。)第3回及び第5回観測での潮位条件は比較的類似しており、いずれも高潮時に行われた。

4. 観測結果

(1) 塩分の縦断分布

図-4に各観測日の塩分濃度の縦断分布を示す。縦軸は水深で、横軸は縦断方向距離である。濃淡が各項目の濃度に対応しており、両者の関係を下段に示している。また矩形状の実線が計測地点の水深を表している。前述したように観測点が毎回少しずつ異なるために河底の形状は多少異なっている。

第1回観測では塩水楔が河口堰に達しているが、表層の塩分濃度もかなり高く、内部界面は不明瞭である。この原因として以下の可能性が考えられる。前述のように8月から9月初旬にかけて小雨の時期が続いたため、最低放流量(日平均 $30\text{m}^3/\text{sec}$)が継続していた。この場合、放流量から単純に計算される断面平均流速は 1 cm/sec 以下であり、二層流状

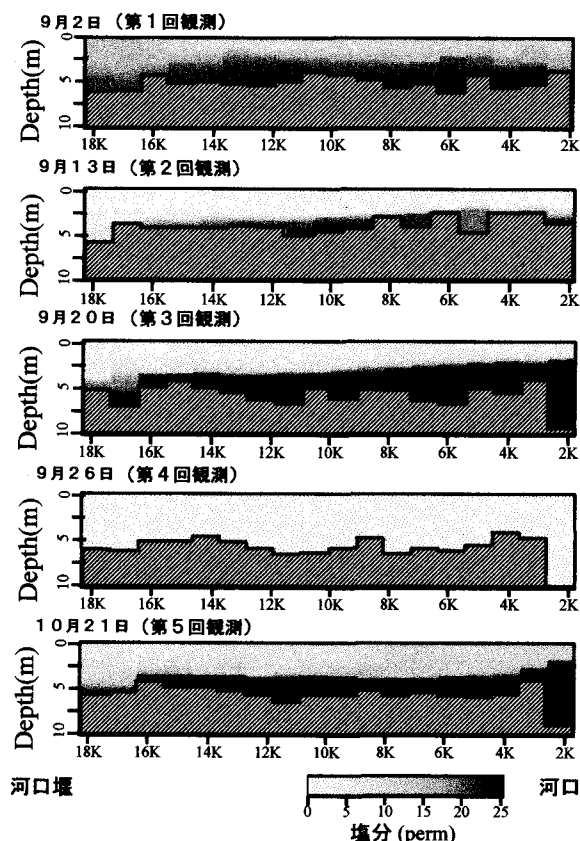


図-4 塩分の縦断分布

態を考慮しても高々数 cm/sec である。したがって放流水が河道に滞留する時間は1週間以上となり、風などによる鉛直混合の影響を受けている可能性がある。

第2回観測の数日前に日平均流量(布川) $350\text{m}^3/\text{sec}$ 程度の出水があった。したがって布川から河口堰までの取水量を差し引いても日平均で $300\text{m}^3/\text{sec}$ 近い放流があったと考えられる。この放流量は下流部の塩水楔をフラッシュするほどではないが、躍層上部の水を2日間で置き換えることができる。したがって、それ以前に表層に滞留していた中間密度の水は河口に排出されたと考えられる。このため第2回観測では表層塩分濃度が低下し、塩分躍層が明瞭になっている。ただし潮位が極めて低い時間帯に観測が行われているために、塩水楔の体積は小さい。

第3回観測は高い潮位条件のもとで行われたため、塩水楔がかなり深く侵入している。また表層と底層の塩分濃度差が大きく、内部界面が明瞭である。この観測の5日前に日平均で $300\text{m}^3/\text{sec}$ 弱(布川)の出水があったので、前回の観測時と同様に表層の塩分濃度は低下したと考えられる。

第4回観測は台風17号通過(9月23日)直後であ

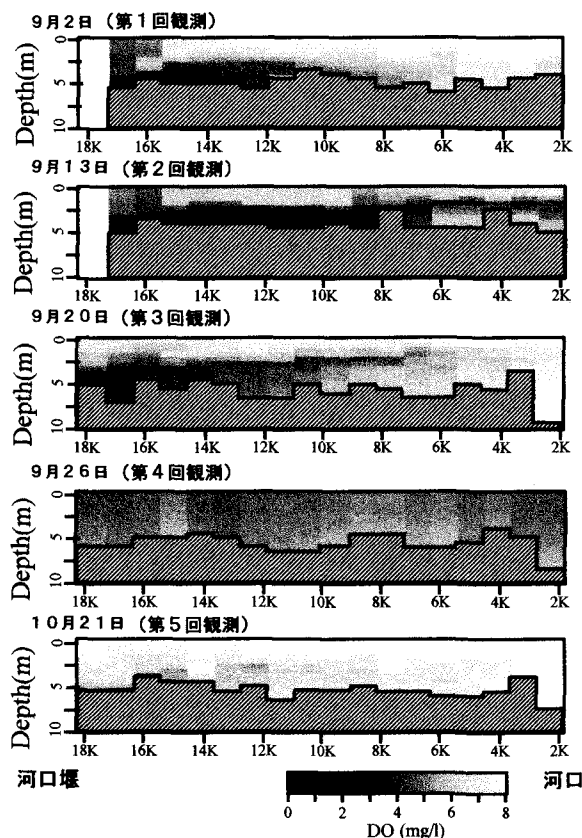


図-5 DOの縦断分布

ったため、塩水楔は河口までフラッシュされている。また第5回観測は出水後約一ヶ月が経過した10月21日の満潮時に実施された。この時の塩水楔の状態は第3回観測とほぼ同じになっている。

(2) DOの縦断分布

図-5にDOの縦断分布を示す。表示方法は図-4と同様である。第1回から第3回までの観測では嫌気水塊の存在が明瞭に認められる。その範囲にはかなりの開きがある。時間的に連続したデータではないので必ずしも断言はできないが、しかしこの3回の観測結果の相对比较から次のような傾向が見られる。すなわち塩水楔が深く侵入するほど嫌気水塊の範囲が上流側に偏り、塩水楔が後退すると広範囲に広がる。このことから、嫌気水塊の主たる部分は、外洋水と入れ替わることの少ない湾奥部の水塊に対応し、その移動に合わせて伸縮しているものと考えられる。

また第2回と第3回の観測結果では、塩淡水境界面に沿ってDOの少ない領域が下流部まで存在する。したがって、塩水楔の先端に近い部分で形成された嫌気水塊の一部は、塩分躍層に沿って上昇しながら

流下しているものと考えられる。このことは、次節で述べる流速・流向観測の結果からも示されている。

第4回観測は台風17号通過(9月23日)直後であったため、塩水楔はフラッシュされており、DO濃度も一様化している。しかし値は5 ppm程度であり必ずしも高くない。この理由として考えられることは、洪水流自体のDOが低かったか、洪水が輸送する懸濁物質等によって洪水後に嫌気化したかの2通りだが、この観測結果だけからは判定できない。

第5回観測は出水後約一ヶ月が経過した10月21日の満潮時に実施された。この間に2回の小降雨があり塩水楔先端は多少後退したが(図-2参照)、河道内にはとどまっていたと考えられる。第4回観測時に比べるとDO濃度は全体に上昇しており、特に表層のDOは飽和値に近くなっている。ただし底層のDO濃度の回復は表層からのDO輸送によるものではなく、図-4に示したように新鮮な塩水が侵入したためである。したがって第5回観測における底層でのDOの若干の不足は、台風17号出水以降に侵入した塩水が嫌気化した結果であると考えられる。

(3) 流速・流向の縦断分布

流速観測を行った9月13日には、まずDOの観測を先に終了し、その後に流速と塩分の観測を実施した。前者が干潮時であるのに対し後者は上げ潮時である。(図-3参照)

図-6に縦断流速分布を示す。ただし矢印の面積が流速値に対応する。また図-7に流向の縦断分布を比較する。白が順流、黒が逆流を表している。流速観測が行われた時間帯が上げ潮時であるため、下流部は逆流となっている。一方、上流部では河口堰からの放流により順流となっている。

同日のDOデータ(図-5の2段目)と対比すると、嫌気水塊の中心が存在する中流部の流れはかなり微弱である。しかし、図-7の流向分布からわかるように、嫌気水塊は順流であるのに対し、その上部の淡水は逆流となっている。また嫌気水塊の下部にはDO濃度の比較的高い塩水が下流側から侵入している。すなわち、嫌気水塊は2つの逆流層に挟まれる形で下流部に移動する。その結果、DOの少ない中間層が形成されるものと推測される。

5. 利根川河口堰下流部の酸素消費速度

河口堰下流部の嫌気水塊の発生現象を予測するための基礎資料を得ることを目的として、現地で採取した底泥の酸素消費速度について室内実験を行った。

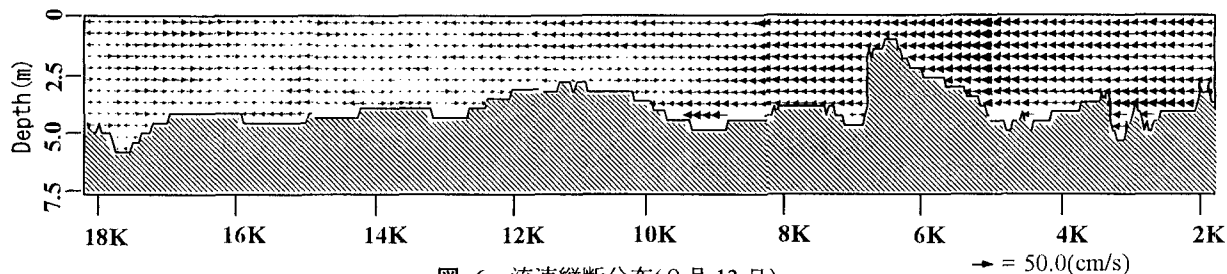


図-6 流速縦断分布(9月13日)

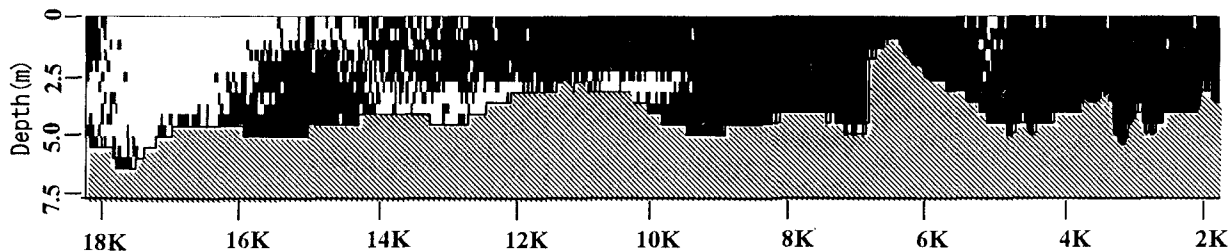


図-7 流向縦断分布(9月13日)

また、4.(2)に示した溶存酸素の縦断分布データを用いて、塩水界面以下に存在する溶存酸素総量の減少量を計算し、室内実験結果と比較した。

(1) 底泥の酸素消費速度に関する室内実験

a) 実験方法

実験用底泥は、平成9年9月1日に、18K地点の滞筋においてエックマンバージ採泥器で採取した。この底泥を、底面が65mm x 65mm、高さ145mmの角柱容器の底に35mm厚で敷き、十分曝気した純水で上部を満たして密栓した。検体は複数個作成し、恒温水槽において24℃(底泥採取時の現場水温)で保存し、各測定時間に一つずつ開栓して計測した。計測には直読式DOメータ(セントラル科学製:UC-12-SOL)を使用した。

b) 実験結果

細井ら¹⁾の研究と同様に、底泥による酸素消費が一次反応式で表されると仮定し、その係数について調べた。

$$V \frac{dC}{dt} = -KAC \quad (1)$$

ここに、Cは溶存酸素濃度、Vは容器体積、Aは底泥の平面積、Kは単位面積当たりの脱酸素係数である。式(1)の解は次式となる。

$$C = C_0 \exp\left(-K \frac{t}{H}\right) \quad (2)$$

ここに、C₀は実験開始時の溶存酸素濃度、H=V/Aである。

実験結果を図-8に○印で示す。片対数紙上で概ね直線となっており、式(2)で近似できることがわ

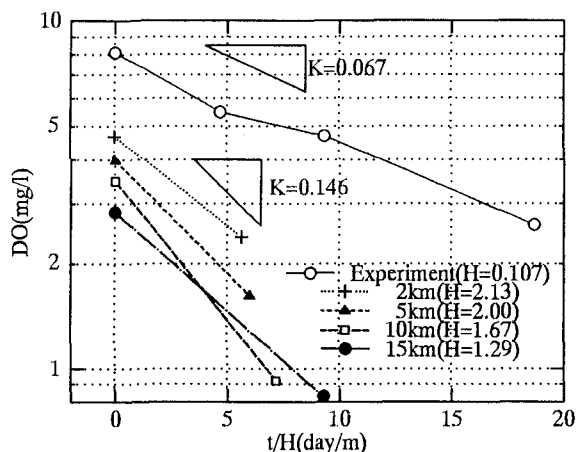


図-8 平成8年観測結果と実験結果の比較

かる。脱酸素係数Kは約0.067 m/dayとなった。

(2) 現地観測データに基づく酸素消費速度

図-2に示したように、各観測の間には出水があり、16.5Kにおける低層塩分濃度は減少している。しかし第1回観測と第2回観測の間では減少量が比較的小さいことから、塩水楔は下流に若干後退しているもののフラッシュされるには至らなかったものと考えられる。そこで、この2回の観測結果から、溶存酸素消費量を見積もることとした。

図-4に示した1kmおきのDO鉛直分布を、横断方向には水平に成層しているものと仮定して、内部界面以下で断面積分する。さらにその結果を、河口堰から下流に向けて縦断的に積分することにより、一定河道区間での溶存酸素現存量を推定する。そして第1回と第2回観測における現存量の差から酸素消費量の積分値(M)を推定した。もちろん厳密には下流端でのフラックスを考慮しなければならないの

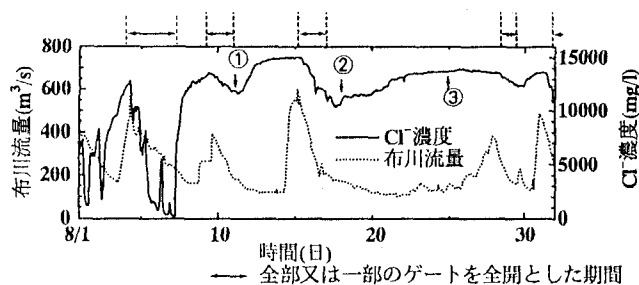


図-9 平成9年観測期間の日平均放流量と底層の塩分濃度

だが、それを見積もるための資料がないことから、オーダーを検討するための概算として行ったものである。なお、断面積分にあたっては平成8年に建設省が実施した測量結果を用いた。

縦断的な積分区間は、河口堰(18K)を上流端とし、15K,10K,5K,2Kの4ケースとした。それぞれのケースについて、2回の観測における塩水楔の平均体積(V)と塩水楔の平面積(A)を計算し、代表深さ($H=V/A$)と代表濃度($C=M/V$)を求めた。その結果を図-8に示している。

現地のDO濃度から推定された脱酸素係数Kは、積分区間によらずほぼ一定で、約0.146m/dayとなった。室内実験結果の約2倍であるが、オーダーは一致している。現地の値が室内実験に比べて大きくなる原因の一つとして水中での酸素消費が考えられる。すなわち現地では、底泥による酸素消費に加えて、懸濁及び溶存物質による酸素消費もあるからである。今一つの原因としては、乱れの影響が考えられる。すなわち室内実験は静水条件で行われているが、現地では乱れによる攪拌があり、このために酸素消費速度が3～4倍になり得ると考えられている¹⁾。以上のことを考慮すると、上記の一致度は比較的良好であると言える。

(3) 平成9年8月観測

前項で述べたように、平成8年観測において酸素消費速度を検討できるデータはわずかであり、その普遍性に問題が残された。また、酸素消費速度の室内実験は平成9年採取の底泥に対して行っている。そこで平成9年8月に実施した現地観測結果についても同様の検討を行った。

観測期間における布川地点の流量と16.5Kの底層Cl⁻濃度の時系列を図-9に示す。観測は3回実施したが、第1回観測と第2回観測の間に出水があった。しかし図からわかるように、16.5KのCl⁻濃度がほとんど低下していないことから、塩水楔はフラッシ

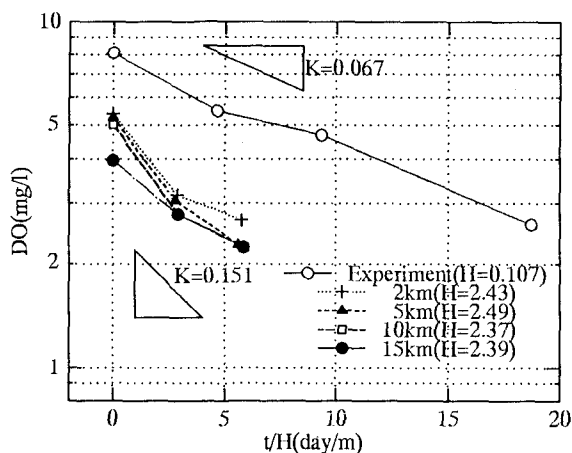


図-10 平成9年観測結果と実験結果の比較

ュされていないと考えられる。

そこで3回の観測結果について前項と同じデータ整理を行ったところ図-10が得られた。図-9との比較からわかるように、脱酸素係数は平成8年観測とほぼ同じ結果となっている。

6. おわりに

本研究では、利根川河口堰下流部の水域において現地観測を行い、塩水楔の滞留による嫌気水塊の発生現象を捉えた。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 河口堰下流部に塩水楔が滞留すると、楔先端に近い部分で嫌気水塊が発生しやすい。
- 2) 潮の干満によって、嫌気水塊の一部が上昇し、塩分躍層に沿って下流に移動することがある。
- 3) 現地でのDO分布の変化から脱酸素係数の推算を行ったところ、単位面積当たりの脱酸素係数は現地で採取した底泥について酸素消費実験を行って求めた脱酸素係数の約2倍であった。

謝辞：現地観測を実施するにあたり、建設省関東地方建設局利根川下流工事事務所及び霞ヶ浦工事事務所、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だいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 細井由彦, 村上仁士, 上月康則：底泥による酸素消費に関する研究, 土木学会論文集, No.456/II-21, pp83-92, 1992
- 2) 西條八束, 奥田節夫編：河川感潮域, 名古屋大学出版会, pp173-194, 1996

(1997.9.30 受付)