

河口堰貯水区間の酸素収支

建設省	九州地方建設局	堀川 光治
〃	土木研究所	柏谷 衛
〃	〃	村上 健
〃	〃	○長谷川 清

1. はじめに

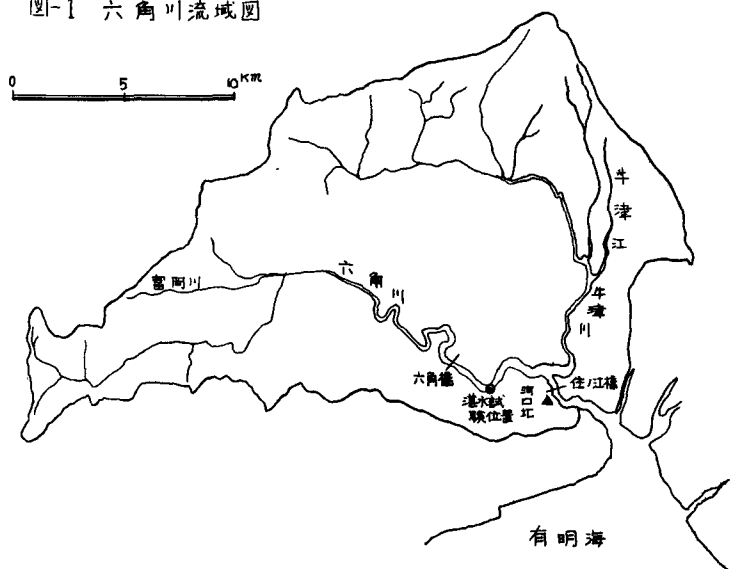
近年水需要の逼迫にともなって、いくつかの河口堰の計画が調査・検討されているが、水質的な問題が未解決のため実現に至らないケースが多い。河口堰の貯水区間における水質的な問題としては塩分、底泥の影響を含む溶存酸素収支、富栄養化などの問題があるが、塩分の問題を除けば、定量的な評価が難しく、河口湖と設けた場合の水質を適確に予測することは困難である。

筆者らは六角川河口堰の計画に關する調査において貯水した場合の溶存酸素収支を現地実験によってかなり定量的に把握することが出来たので、この問題を中心に報告する。

2 計画の概要 (図-1 参照)

図-1 六角川流域図

六角川は佐賀県の中央部から有明海の湾奥に注ぐ流域面積 341 km^2 、流路総延長 75 km の河川である。六角川は有明海の湾奥に位置していること、及び流域の大半が干拓造成であり、平地率が5割強にも達する緩勾配の平地河川であることから、古くから毎年の如く高潮による被害を受けている。さらに下流域には約 $8,000 \text{ ha}$ のいわゆる白石平野の穀倉地帯を擁しているが、



その用水源は溜池、深井戸、クリーフ、アカ取水によるものが大部分を占めているために水不足は深刻である。この地、高潮による被害(想定面積 49 km^2)を防除すると共に、淡水化による不特定灌漑区域 ($4,427 \text{ ha}$) 用水の確保を目的として、河口から 4.6 km の地奥に可動堰を設け、灌漑期には締切って貯水池とすることが計画されている。河口堰の貯水容量は、高潮時の洪水を対象とする治水容量が $12,500,000 \text{ m}^3$ 、利水容量が $3,500,000 \text{ m}^3$ で有効貯水量は $16,000,000 \text{ m}^3$ である。利水容量の $3,500,000 \text{ m}^3$ によって、既往の最渇水(昭和35年)について $0.6 \text{ m}^3/\text{sec}$ の取水が可能となり、これによって不特定灌漑面約 $4,400 \text{ ha}$ の不足量の約7割が充足される。しかし現在六角川にはかなりの量の都市下水、製紙

工場廃水、洗炭廃水などが流入しており、河口堰を締切って貯水を開始すると、締切り前は海へ少しづつ搬出されていた汚濁負荷が貯水池内に蓄積し始め、また流れがなくなって再曝気量が減少するので、貯水池内の水質は現在よりも悪化すると考えられ、事前調査を十分に行なうことになった。

3 溶存酸素収支

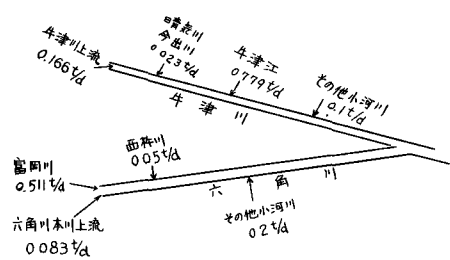
(1) BODおよび河床堆積物による酸素消費と空気中からの酸素供給

1) 貯水区間に流入するBOD負荷量およびBODによる酸素消費量

流入状況を模式的に表わすと図-2のようになるが、図からわかるように主な汚濁源は牛津江および富岡川(武雄市の都市下水)のみであって、牛津江のBOD負荷量は総負荷の35%、富岡川の負荷量は23%を占めており、両者を合計すると総負荷量の約60%にもなる。

この内訳をみると工場・炭鉱廃水によるBOD負荷が約0.82 ton/d、家庭下水による負荷が1.38 ton/dで、家庭下水による負荷の方が多少大きい。以上のBODは全て5日間BODで表わした値であるが、これを最終BOD(UOD)に換算すると、脱酸素係数を0.1とすると5日間BODの約1.5倍になり、一日当り貯水池に流入する最終BOD負荷量は3.3 tonになる。貯水池に流入したBODは水中の溶存酸素を消費して安定化されていくのであるが、このBOD負荷が完全に安定化されるためには最終BODに等しいだけの酸素が必要なので、1日当りの酸素消費量は約3.3 ton(六角川のBOD負荷に対して約1.3 ton、牛津川の負荷に対して約2.0 ton)である。

図-2 BOD負荷流入状況



2) 河床堆積物による酸素消費

河床堆積物中の有機物が酸化される過程において水中の溶存酸素は河床内にとり込まれて消費されるので、河川水の溶存酸素の収支についても時には河床堆積物の影響を考える必要があるが、特に貯水池のように水が停滞している場合には接触時間が非常に長くなるので大きい影響を及ぼす。したがって、六角川の河口堰貯水区間においても河床物質による酸素消費量がかなり大きな要素になると考えられるので、六角川、牛津川の数ヶ所で河床の泥を採取し、実験を行なった。実験装置は参考文献¹⁾の実験装置と同じ装置である。実験は2回行ない、最初の実験は43年6月に、2回目の実験は43年10月に行なった。最初の実験に用いた試料は住ノ江橋下流、杵島炭鉱吐口下流、西村川(西村炭鉱排水路)、牛津江合流点下流でそれぞれ採取した試料で、いずれも水際で採取したものである。最初の実験では水温を20℃とし、泥の厚さは10cmおよび20cmで行なった。2回目の実験は、温度の影響をみるために行なったもので、実験に用いた泥は住ノ江橋下流、牛津江合流点下流で採取し、同一の試料について水温20℃と30℃で実験した。第1回目の実験結果によれば、住ノ江橋下流、牛津江合流点下流、杵島炭鉱吐口下流の3個所の試料はいずれも1日、1㎡当り2.5~3grの酸素を消費することがわかった。才2回目の実験では、同じ20℃の実験でも住ノ江橋下流、牛津江合流点下流の試料共に酸素消費は約4.2gr/㎡/d程度になり、また水温30℃の時の実験結果によると、水温30℃のときの酸素消費量

は水温20℃の時の値の約15%増になっている。したがって、実験室内での実験によれば河床堆積物による酸素消費速度は夏季の貯水期間には、 $25 \sim 5 \text{ gr O}_2/\text{m}^2/\text{day}$ 程度と考えられ、滞水面積を 1.9 Km^2 とすれば1日当り $4.8 \sim 9.5 \text{ ton}$ の酸素を消費することになり、非常に大きな影響を持つことになる。しかしながら、この実験を行なった実験装置は、泥の表面と接触している水には溶存酸素がかなりあり、かつ水は流動しているという構造になっているが、実際の貯水池では水の流動は殆んどなく、泥と水との境界面への溶存酸素の供給も限られていると考えられるので、この値は実際の貯水池で起り得る最大限の値と考えるべきであろう。

3) 空気中からの酸素供給量

空気中から供給される酸素の溶解速度(再曝気速度)は貯水池の場合には流速が殆んどないので普通の河川に較べて非常に小さな値になる。流速がほとんどない場合、空気中からの酸素供給量(再曝気量)の計算は一般に河川で用いられているような方法では行なえないので、以下のような試算を行ってみる

試算1 ラグーンにおける酸素供給量の値を用いての計算

アメリカ下水道協会のマニュアルによれば、ラグーンにおける空気中からの酸素供給量は、経験的に1 acre 当り $12 \sim 16 \text{ lb/d}$ とされている。ラグーン内の溶存酸素不足量 8 ppm とすると、不足量 1 ppm 当り、 1 Km^2 当り、 $0.16 \sim 0.225 \text{ ton/d}$ の酸素供給量になる。したがって貯水池の表面を 1.9 Km^2 とすると酸素供給量は不足量 1 ppm 当り、 $0.31 \sim 0.43 \text{ ton/d}$ となる。

試算2 テームズ川の酸素交換係数の実測値を用いての計算

テームズ川の調査報告によると 流速が殆んどない所で²⁾の酸素交換係数の値として 約 1 cm/hr の値が報告されている。この値を貯水池にも適用すれば水面積を 1.9 Km^2 として、不足量 1 ppm 当り、 0.46 ton/d となる。

以上の試算1, 2により、風があまりない静穏時の酸素供給量は溶存酸素不足量 1 ppm 当り、約 0.4 ton/d と考えられる。この値は再曝気係数に換算すると約 0.14 (eを底とした値)に相当する。

(2) 現地湛水試験

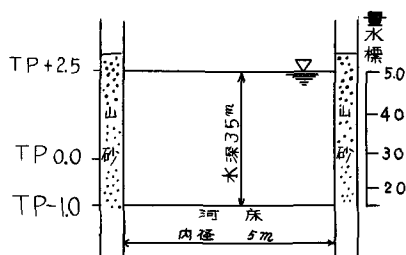
河口区貯水区画における酸素収支に関する要因として、上記のBODによる脱酸素、河床堆積物による酸素消費および空気中からの酸素供給のみを考えた場合には、酸素供給量はDO不足量を 8 ppm とした場合でも一日当り、 3.2 ton であるから高々BODによる脱酸素にみあう量しかなく、貯水区画の溶存酸素は急激に減少して湛水開始後間もなく溶存酸素は0となることになる。しかし、貯水期間を夏季に限っているため、藻類の光合成による酸素供給がある程度期待でき、また河床堆積物による酸素消費も実際の貯水区画では室内実験で求めた酸素消費よりも小さくなる可能性があるため、藻類による酸素供給量如何によっては貯水区画の溶存酸素は0にはならない。六角川の河川水は有明海に流入する河川特有のガタ土の浮遊および洗炭废水の流入によってSSが非常に高く、最も高い場合には、数千 ppm にも達することがあり、通常の場合でも数百 ppm なので太陽光線の透過は著しく小さく現状では藻類の光合成は殆んど行なわれていない。しかし、貯水開始後ある程度日数が経過し、SSが沈殿して光の透過率も大きくなれば、藻類の発生に必要な栄養塩類は家庭下水の流入によって十分供給されているので、発生の条件は十分に有るといえる。このような観点から現在の河道の一部に

湛水試験池を設置して、藻類の光合成による酸素生産量および河床堆積物の影響を観測することとした。

1) 湛水試験池の概要および観測方法

湛水試験池は、池の中の状態がなるべく河口堰の貯水区間の状態に近くなるようにするため、現在の河道内に設けることとし、図-3に概略図を示すように内径5mの円形にシートパイルを打って河道を締切って作った。設置場所は六角川本川の河口から約9kmの地奥である。試験池内の水深は、河口堰の貯水区間の平均水深にほぼ等しくなるよう3.5mとした。また試験池に湛水する水には河口堰の操作を考慮して、試験池周辺の最干時におけるなるべく塩分濃度の低い水を用いた。実験は8月5日から9月24日まで行ない、実験期間中、毎日定時(午前10時)の観測と24時間連続(2時間ごと)の観測を3回行なった。観測位置は、全水深に対して、2割、4割、6割、8割及び表面の5個所で行なった。分析項目としては、溶存酸素(DO)、BOD、SS、Cl、水温、照度(Lux)等を行なった。

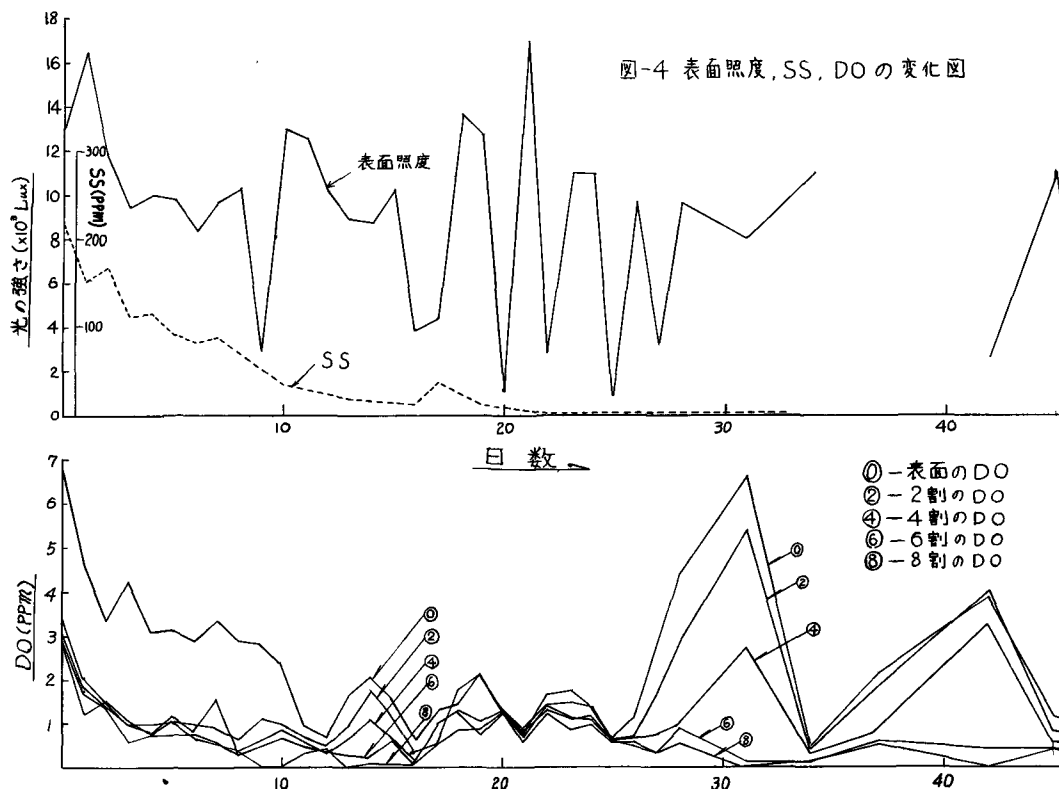
図-3 湛水試験池の概略図



けるなるべく塩分濃度の低い水を用いた。実験は8月5日から9月24日まで行ない、実験期間中、毎日定時(午前10時)の観測と24時間連続(2時間ごと)の観測を3回行なった。観測位置は、全水深に対して、2割、4割、6割、8割及び表面の5個所で行なった。分析項目としては、溶存酸素(DO)、BOD、SS、Cl、水温、照度(Lux)等を行なった。

2) 観測結果および解析

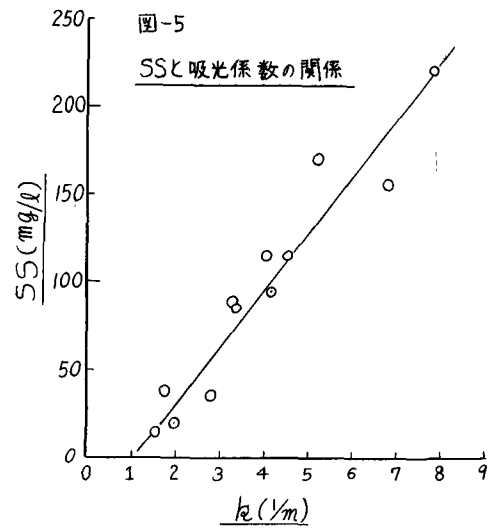
昭和44年8月5日から始めた実験のDO、表面照度、SSの変化を図-4に示す。



測定時間が午前10時で、溶存酸素の変化率が最も大きい時刻であるため多少のバラツキはあるが、全体的に見ると、観測開始後2～3日間はD.O.が急激に減少するが、その後は減少の割合が緩やかになり、観測開始後10日程度経過するとほぼ一定の値になる。さらに、25日程度経過すると底層を除くとD.O.は増加し始めるとみなしてよいであろう。このようなD.O.の変化になるのは、観測開始当初は水中のSSが非常に高いので太陽光線が透過せず、したがって藻類の光合成が行なわれないので池内のD.O.は河床およびB.O.D.によって消費されて減少して行くが、水中のSSが次第に減少して藻類が増殖し光合成が活発になるためと思われる。光の透過量については、Lambert-Beerの法則の吸光係数(k)とSSとはほぼ比例関係にあり、図-5のような関係があった。したがって、藻類の光合成は貯水した場合の酸素の供給源として非常に大きな役割を持っていると思われるので、24時間の連続観測から光合成による酸素供給速度を求め、あわせて河床堆積物による酸素消費量を求めてみる。藻類による呼吸および光合成を考慮した場合、溶存酸素収支式は次のように表わされる。

$$\frac{dC}{dt} = P + R - K_1 L + K_2 (C_s - C) \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 C ：溶存酸素濃度、 C_s ：飽和溶存酸素濃度
 P ：藻類の光合成によるgrossの酸素生産速度、 R ：藻類の呼吸による酸素消費速度(≤ 0)、 K_1 ：脱酸素係数、 K_2 ：再曝気係数、 t ：時間



(1)式中の各項は時間の関数であるのは勿論であるが、貯水池の場合のように水深方向の混合・拡散が限られている場合には水深の関数でもある。したがって(1)式を用いて試験池の溶存酸素収支を解析するには試験池を水深方向に何層かに区分し、各層ごとに(1)式と同様な収支式を立てて解析しなければならない。いまし層目の層を考えた場合収支式は次のようになる。

$$g_i = P_i + R_i + b_i + d_i + r_i \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 g_i ：溶存酸素の変化率(dc/dt)、 b_i ：B.O.D.による酸素消費速度($= -K_1 L$)、 d_i ：($i-1$)層目の層からの酸素の移動速度、 r_i ：($i+1$)層目の層への酸素の移動速度(≤ 0)

(2)式において、 $d_i = -r_{i-1}$ であり、また最上層を考えた場合には(2)式中の d_i は再曝気速度($= K_2 D$)となり、最下層を考えた場合には、 r_i は河床堆積物による酸素消費速度になる。

試験池における溶存酸素の観測は表面、2割、4割、6割、8割の5点で行なったので、(2)式を用いて解析するために表面～3割、3割～5割、5割～7割、7割～河床と四層に分けて考えた。なお、表面以外の採水点での採水は実験開始時に設定した水位を基準としてそれぞれの位置に固定した採水管によって行なったのであるが、実験開始直後の漏水や蒸発によって実験終了時には水面が約50cm低下していた。したがって上記の2割、4割、等の位置は厳密に実際的水深に対する位置でない。24時間の連続観測(2時間間隔)は、8月16日～17日、8月28日～29日、9月20日～21日の3回

行なった。各国の調査の観測結果を
図-6, 7, 8に示す。図に示した
各層のDOは 表面, 2割, 4割,
6割, 8割の各測定の間ではDOが
直線分布をしているとして求めた平
均濃度である。図に示した温度分布
およびDOの時間的な変化から判断す
ると、昼間は完全に温度成層してい
るようであり、夕刻気温が下るにつ
れて表面から徐々に混合が広がり始
め、午前2時~4時になると全層が
混合する形になっている。したがっ
て、昼間水面近くで藻類の光合成に
よって生産された酸素が夜間下層に
補給されて溶存酸素のバランスが保
たれているといえる。

8月16日~17日の観測結果の解析

調査日は実験開始から約2週間経
過した時々に相当するが、まだ浮遊
物が十分に沈殿しておらず、水中照
度が表面照度の1%レベルになる水
深は約0.75mであった。光合成が行
なれる層は水中照度が表面照度の
1%レベル以上の層と考えて良いの
で藻類の光合成は第1層だけにつき
考えた。しかし、一日一回は殆んど
全層にわたる混合があるので、下層
にも藻類は存在すると考えられ、下
層での藻類による呼吸量は無視する
ことは出来ない。

さて、各層について(2)式の如き
収支式を立てた場合、まず第1層に
ついては g_1 は第1層の溶存酸素の時
間変化から、 d_1 は前節で述べた空気
中からの酸素供給量から、 b_1 は実測
のBODからそれぞれ求めることが

図-6 水温, DO観測結果 (期間 8/16~8/17)

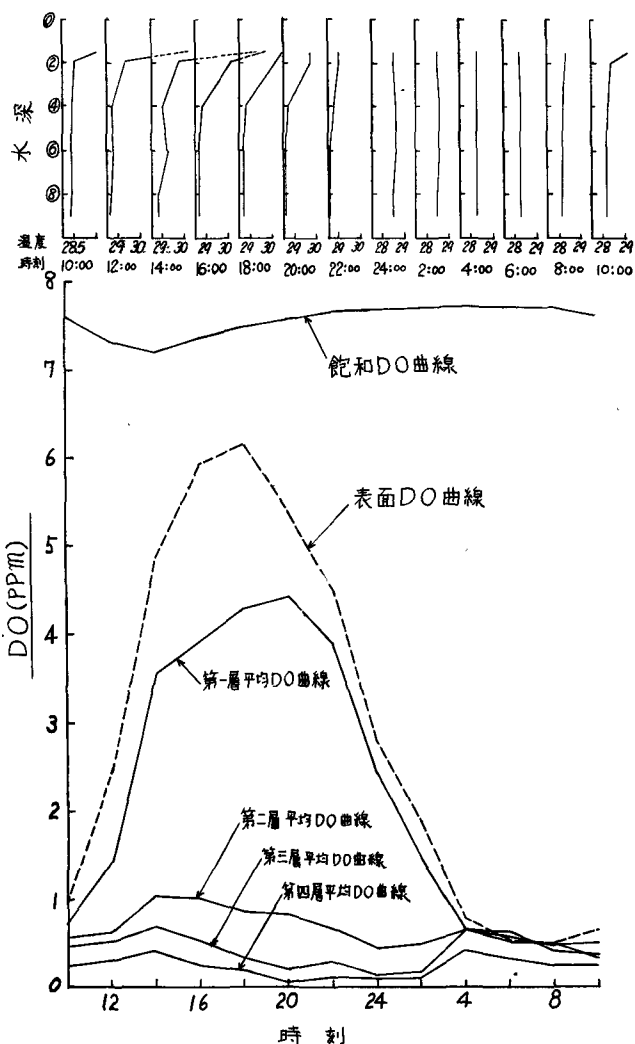


表-1: 各層ごとの酸素収支 (単位: $O_2 g/m^2/d$) (期間 8/16~8/17)

項目 層区分	Σg	Σr	Σd	Σb	ΣR	ΣP
第1層	0.400	-4.290	0.896	-0.406	-0.497	4.697
第2層	-0.158	-3.515	4.290	-0.412	-0.521	0.000
第3層	-0.620	-3.202	3.515	-0.412	-0.521	0.000
第4層	-0.081	-1.192	3.202	-0.617	-1.474	0.000
合計	-0.459	-1.192	0.896	-1.847	-3.013	4.697

できるので既知量である。したがって、未知量は P , R_1 , r_1 であるが、夜間について考える場合には、光合成は行なわれないので $P=0$ としてよく、呼吸速度 R_1 でええられればオ2層への酸素の移動速度 r_1 が求まる。藻類の呼吸速度はクロロフィル量によって定まると考えられるが、クロロフィルの分析精度が呼吸速度の算定ができる程には高くなかったので次のような方法で決めた。

まず最下層の第4層については、昼間はかなり強い成層状態になっているので、第4層における昼間のDOの減少率は藻類の呼吸速度+ BOD による脱酸素と考えると、第4層の呼吸量を求めた。その他の層については、夜間の池内全体の溶存酸素の減少率が近似的に藻類の呼吸速度+ BOD による脱酸素速度と等しいとを考えて求めた。このようにして藻類の呼吸速度が求まれば夜間について、オ1層からオ2層への酸素の移動速度 r_1 を求めることができる。昼間については、光合成による酸素生産速度 P を考えなければならぬので、呼吸量を既知量としても P と r_1 とが未知量になる。しかし、昼間は池内が成層状態になっているので酸素の移動は殆んど分子拡散のオーダーで行なわれているとみてよいと思われる。水中での酸素の分子拡散係数は、 20°C で $2.12 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$ であるが、安全を考慮して拡散係数を 10^{-9} オーダーにしても拡散による酸素の移動速度は他の項に比べると2桁程度小さい値で

図-7 水温、DO観測結果 (期間 8/28~8/29)

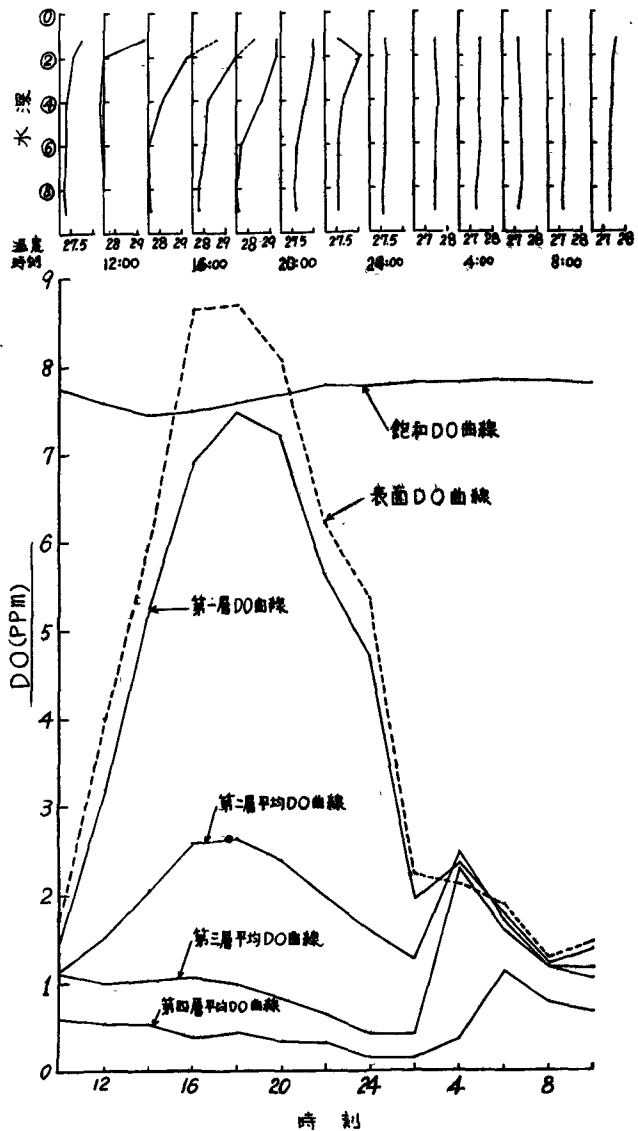


表-2: 各層ごとの酸素収支 (単位: $\text{O}_2 \text{ g/m}^2/\text{d}$) (期間 8/28~8/29)

項目 層区分	ΣG	Σr	Σd	Σb	ΣR	ΣP
第1層	-0.055	-3.192	0.607	-0.359	-1.413	4.302
第2層	0.317	-3.581	3.192	-0.412	-0.428	1.546
第3層	-0.040	-2.981	3.581	-0.412	-0.428	0.200
第4層	0.023	-2.290	2.981	-0.643	-0.023	0.000
合計	0.245	-2.290	0.607	-1.826	-2.294	6.048

ある。したがって、層間では $Y_1 = 0$ として良いと考えられるので収支式より光合成による酸素生産速度 P が求まる。第2層については $d_2 = -Y_1$ において同様な解析を行ない、以下順次各層の溶存酸素収支を計算すれば表-1のようになる。

表-1によれば、藻類の光合成による酸素総生産量 P は水面積 1m^2 、1日当り 4.697gr であり、呼吸量 R は 3.013gr であった。従って P/R は 1.56 であった。また河床堆積物による酸素消費速度は、 1m^2 、1日当り 1.192gr であった。

8月28日~29日の観測結果の解析

この期間の実験の特長は ①実験開始後23日目で、浮遊物がほとんど沈殿し、SSは 4ppm (98%沈殿) である。②その為、光の透過率が高く表面照度の1%レベルが水深の 230m にまで達した。この為、かなりの藻類が活発な同化作用を起し、表面でのDOは日中で過飽和になった。前回の場合と同様に計算すると溶存酸素収支は表-2のようになる。

表-2によれば藻類による光合成での酸素総生産量は水面積 1m^2 、1日当り 6.048gr であり、呼吸量 R は 2.294gr であった。従って P/R の比は 2.64 であった。また河床堆積物による酸素消費速度は 1m^2 当り、1日当り 2.29gr であった。

9月20日~21日の観測結果の解析

この期間の実験では、前回の実験の時よりも温度と照度が下がっており、生産側に勿く藻類の一部が呼吸側に勿くため、表面DOだけでなく全水深でのDOが減少していると言える。1回の計算方法と同じに行なうと表-3のようになる。表-3によれば、藻類の光合成による酸素総生産量 P は水面

図-8 水温、DO観測結果

(期間 9/20~9/21)

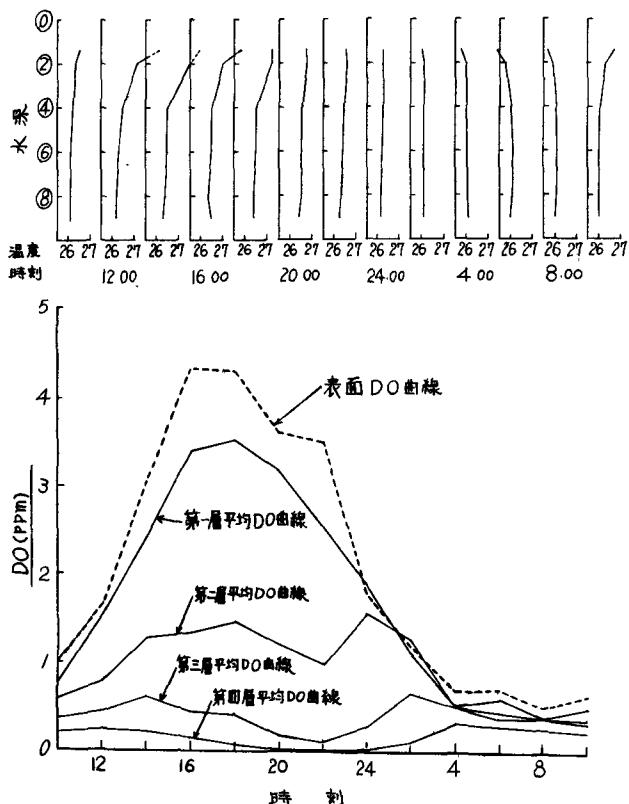


表 3: 各層ごとの酸素収支

(期間 9/20~9/21)

(単位: $\text{O}_2\text{gr}/\text{m}^2/\text{d}$)

項目 層区分	Σg	Σr	Σd	Σb	ΣR	ΣP
第1層	0.363	-2.020	1.508	-0.347	-0.609	1.832
第2層	-0.636	-2.380	2.020	-0.442	-1.107	1.273
第3層	-0.264	-1.605	2.380	-0.442	-1.107	0.509
第4層	0.135	-0.642	1.605	-0.663	-0.675	0.510
合計	-0.402	-0.642	1.508	-1.894	-3.498	4.124

積 1m^2 当り 1 日当り 4.124 gr であり呼吸量は $R=3.498\text{ gr}$ であった。従って P/R 比は 1.18 であった。
また河床堆積物による酸素消費速度は 1m^2 当り, 1 日当り 0.642 gr であった。

3) 現地湛水試験のまとめ

観測結果の解析に当って (イ). 各層ごの代表値 (DO 値) の求め方 (ロ) 藻類の呼吸量 (R) の求め方 (ハ) 温度, 風等によって引起される混合の影響 などの問題点はあったが一応の結果をまとめると次のようになる。

- i) 河川水中の浮遊物質濃度は非常に高いが、約 2 週間で約 90% 以上の沈降除去が期待でき、それにともなって太陽光線の透過率も大きくなり、藻類の光合成が活発に起きるようになる。
- ii) 光合成による生産は表層が主であるが、24 時間観測結果によれば 水面 1m^2 , 1 日当り $4.5 \sim 6\text{ gr}$ の酸素が生産される。対応する呼吸量は同じく 1m^2 , 1 日当り $2.3 \sim 3.5\text{ gr}$ で差引き $0.62 \sim 3.75\text{ gr}$ の酸素供給がある。
- iii) P と R の比は栄養レベル, 藻類の種類によって決めることが可能であると言われるが、今回の実験によれば それぞれ 1.56 , 2.64 , 1.18 であった。
- iv) 泥への酸素吸収量は室内実験では $2.5 \sim 5\text{ gr/m}^2/\text{d}$ の値が得られたが、現地試験の場合には、河床の表面に十分酸素が供給されないのが河床堆積物の酸素消費は小さくなり、 $0.64 \sim 2.29\text{ gr/m}^2/\text{d}$ の範囲であった。

4 結論

貯水池内の溶存酸素収支をまとめると次のようになる。

消費側	BOD による酸素消費	3.3 ton/d
	河床堆積物による酸素消費	$0.64 \sim 2.29\text{ ton/d}$
供給側	光合成による酸素生産	河床堆積物による酸素消費量と同等またはそれ以上
	再曝気による酸素供給	DO 不足量 1 ppm 当り 0.45 ton/d

上記収支表によれば、河床堆積物による酸素消費速度はかなり大きい。現地湛水試験によれば藻類の光合成による酸素生産量はほぼ等しいとみなしてよいので、酸素収支の問題は結局、BOD による酸素消費と再曝気による酸素供給との収支バランスになる。したがって、貯水開始直後の DO が高い間は消費速度の方が大きいので、日数が経過するに従って貯水池内の DO は下がって行くが、ある程度日数が経過して DO 濃度が下がれば、再曝気量と BOD による酸素消費速度とが平衡するようになるので、貯水池全体としては DO ゼロになることはないと考えられる。しかし、BOD 負荷源が集中している牛津江附近、富岡川附近や、かなり水深の深い部分の底層では、DO が 0 になるなど、局所的な問題は残ると思われる。

参考文献

- 1) 村上他 才 23 回土木学会年次学術講演会概要
- 2) "Effects of Polluting Discharges on Thames Estuary.", HMSO, 1964