

(3) 酸化池における炭素・酸素の物質収支

京都大学工学部 宗 宮 功

" 藤 井 滋 穂

" ○吉 長 幸 視

1. はじめに

筆者らは、栄養塩類の除去・水質の安定化を目的として一連の3次処理酸化池の実験を行なってきたが、その結果の一部はすでにリンの挙動に関する研究として昨年度報告した。その考察でも確認されたように、酸化池内の栄養塩類の挙動に関して生物反応はとくに重要な役割を担っている。本研究では、この生物反応の定量的な把握を目的として、種々の実験結果より炭素および酸素に関する物質収支を求め、池内主要反応量を求めた。求められた反応量を滞留時間や季節と関連づけて量的評価することから、酸化池内での生物反応の特徴について考察した。

2. 実験概要

本研究に用いたデータは、1979年1月10日から同年11月12日までの酸化池実験に基づいている。この実験は、京都大学工学部衛生工学教室水質汚濁制御シミュレーション施設(大津)の野外水路を改良した池で行なわれた。実験は、Fig.1に示すような水深75 cm, 全滞留時間16日の池である。滞留時間の違いによる水質挙動の変化が把握できるように、池内を流下方向に4等分した。流入水には、同施設内の活性汚泥法パイロットプラントの2次処理水を用いた。注意する点として、7月26日から9月1日までの間、2次処理プラントの故障により流入水が停止したことがあげられる。

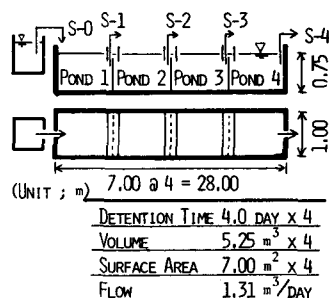


Fig.1 Layout of test pond

Table.1 には、プラント

運転中に行なった主要な実験の方法とその分析項目を示す。水質分析は、全期間にわたり原則として4日ごとに行なった。また、4月1日からは沈降物を採取し定量、さらに実験終了時には底泥全量を採取しその組成を調べた。ところで、酸化池では炭素濃度が低く、

Table 1 Method of various tests

TEST	DATE	INTERVALS (TIMES)	METHODS	MEASURED INDEXES
Water Analysis	1979 1/10 ~11/12	4 days (75)	Sample from each sampling tap.	pH, DO, Alkalinity Chl.a, Kj-N, CODcr T-P, NH ₄ -N, NO ₃ -N Respiration Rate
Settling material analysis	4/1 ~11/12	8 days (26) 1 month (7)	Set the bottle on the bottom of pond, and collect them after certain interval.	(Both samples) Chl.a, CODcr (1 month sample) SS
Sediment Analysis	11/12	(1)	Collect the sediments at the end of experiment, and analyse its mass and composition	SS, Chl.a, CODcr VSS, T-P

* ; Filtered and unfiltered samples were analysed

正確な値を直接TOC計で得ることが困難であった。そこで、炭素の各形態の濃度をTable.2に示す式から算出した。このうち、無機態炭素(In-C)の濃度を求める式は、水中でアルカリ度に主として寄与する物質が、OH⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻であることにに基づいている。一方、有機態炭

Table 2 Calculation methods of Carbon concentration

	CONDITION	EQUATION(mgC/l)	REF.	TERMINOLOGY
Inorganic	P > 0 (pH>8.3)	0.2475*(M-P-δ)	1)	M ; M-Alkalinity(mgCaCO ₃ /l) P ; P-Alkalinity(mgCaCO ₃ /l) δ, δ' ; revised terms on other ions (≈ 0)
Carbon	P = 0 (pH≤8.3)	0.2403*(M-δ') (2α ₁ +α ₂ -0.00274)	2)	α ₁ ; CO ₃ ²⁻ mole fraction α ₂ ; HCO ₃ ⁻ mole fraction CODcr ; CODcr (mgO ₂ /l)
Organic	—	CODcr 3	—	

素(OC)の濃度を算出する式は、藻類などに含まれる炭素量とそのCOD_{cr}値との比が、Table.3に示されるようにほぼ1:3であることに基づいている。

3. 水質変化の概要

まず、Fig.2にDO濃度の経時変化を示す。DO濃度は、流入水では5mg/l前後の低い値を示したが、池内ではほとんどの値が10mg/lを越えていた。とくに3月

から9月にかけては、20mg/lを越えることがしばしばあり、同期間における藻類の光合成活動の活発さが示される。同期間にはその変動も大きい、これはDOが過飽和の不安定な状態にあったためと思われる。

炭素濃度の経時変化をFig.3に示す。全炭素(T-C)濃度は、流入水の変動の影響を受けながらも、3月から9月にかけて高い値を示している。浮遊性有機態炭素(POC)濃度は、流入水ではほとんど0mg/lに近いが、4池流出水では最大22mg/l(4月29日)となるなど、3月から9月にかけて池内での増加が大きい。溶解性有機態炭素(SOC)濃度もPOC濃度同様、この期間における増加が著しく、4池流出水ではしばしば10mg/lを越えていた。一方、I_n-Cは逆に3月から9月にかけて低濃度となっており、光合成にともない摂取利用されたことがわかる。

つぎに、濃度と滞留時間との関係を見るため、流入水および各池の水質平均値をTable.4に示す。池内はpHが9以上、DOが10mg/l以上となっており、かつ後方の池ほど高くなっている。Chl.a濃度も78μg/lから136μg/lと滞留時間の増加とともに増大している。T-C濃度も流入水の22.7mg/lから4池の25.5mg/lと微量ながら増大しており、池内で付加されたことがわかる。なお、炭素の中ではPOCの増大が著しく、4池では流入水の4.6倍の濃度となった。

以上まとめると、池内では藻類の光合成によるDOの生産、I_n-CからPOC、SOCへの炭素の形態変化が顕著に観察された。

4. 物質収支モデルの設定

酸化池内での炭素および酸素の挙動を把握するには、それらの物質収支を求めることがもっとも適切である。しかし、これらの物質は、池内で様々な反応に影響されるため、野外データのみを用いて完全な物質の流れを求めることは困難である。そこで、とくに物質収支に大き

Table 3 COD/C ratio in organic materials

Matrial	C(%gSS)	CODcr/C	Ref
Plant (C ₁₀₆ H ₁₈₀ O ₄₆ N ₁₆ P)	40.3	3.0	3)
Gloyna's formula(algae) (C ₁₀₆ H ₁₈₀ O ₄₅ N ₁₆ P)	52.4	3.0	4)
Oswald's formula(algae) (C ₇ H _{8.1} O _{2.5} N)	57.4	2.7	4)
<i>Euglena gracilis</i>	44.8	3.0	5)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	49.1	3.2	5)
Primary treatment wastewater		2.9-3.1	6)
secondary treatment wastewater		2.8-3.2	6)

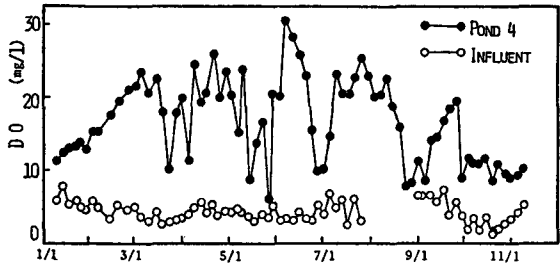


Fig.2 Variation of DO concentration

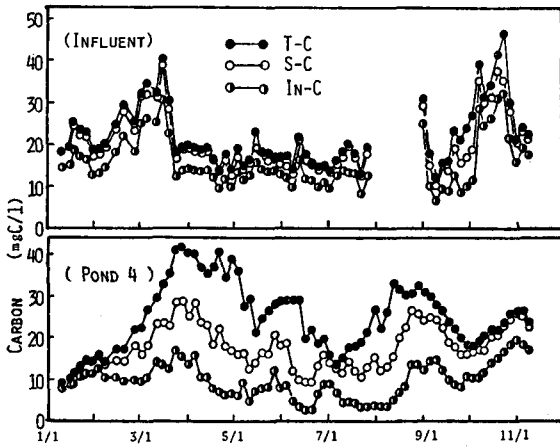


Fig.3 Variation of Carbon concentration

Table 4 Mean qualities of influent and pond water

Unit	Influ.	Pond 1	Pond 2	Pond 3	Pond 4
pH	7.43	8.99	9.43	9.67	9.88
DO mg/l	4.4	11.7	14.3	15.5	16.6
Chl.a μg/l	0	78	100	118	136
T-C mgC/l	22.5	23.6	23.6	24.7	25.4
I _n -C mgC/l	16.3	13.0	11.6	10.7	9.8
SOC mgC/l	4.6	6.4	7.0	7.6	8.2
POC mgC/l	1.6	4.2	5.0	6.4	7.5

な影響を与える、池内の流動条件および反応量の算出に関して若干の仮定を導入し、以下に示す物質収支のモデルを得た。

流動条件 池内の水収支を求めるうえで考慮すべき要因としては、流入および降水、蒸散の4つがあげられる。このうち、蒸散は、日々速度を算出することが困難であるうえ、その速度が流入水負荷量に比べきわめて小さい（蒸散量を彦根気象台の報告した1000mm/yearと仮定すると流入水量の6%に相当）ので、あえて無視した。しかし、降水量は日々実測されているうえ、その水負荷が降水のあった日にはきわめて大きな影響を与える（たとえば、6月27日に94mm/dayの降水があったが、これは流入水量の約2倍に相当する）ので、水収支の上で考慮した。したがって、流出水量は流入水量と降水量の和として与えた。

一方、各池は水深が浅く、滞留時間が長いので、完全混合槽とみなすことができよう。連続する池間は、塩基板で仕切られ、数cmの水深間を水が越えて流れる形となっているため、拡散や風による一時的逆流が生じにくいようになっている。しかし、主流（流入水による流れ）がきわめてゆっくりしたものであるため、前後の池間の混合・拡散を無視することができない。そこで、この一時的な逆流を混合率（主流に対する逆流の割合）*a*で代表させ、各池

間の流動条件をFig.4に示すような形に簡略化して考えた。なお、混合率*a*は、保存性物質であるリンを指標に用い、この流動条件で予想される池内での*P*の除去量と実測された*P*の除去量との差の2乗和を最小とすることより求め、0.69の値を得た。

このようにして得た池内の流動条件が、実際の池の水の流れを再現しているかどうかを確認するため、比較的池内で増減が少ない総アルカリ度をトレーサーとして用い、流動シミュレーションを行なっ

た。その微分方程式をTable.5に示す。総アルカリ度に関する反応項として、窒素の形態変化（硝化・脱窒）を考慮し、実測された窒素の形態変化よりアルカリ度への寄与分を算出して与えた。シミュレーションの結果を、Fig.5に示す。図は、比較のため、混合率0でかつ降雨0mmの場合を点線で併記した。なお、計算は流入水質を境界条件とし、RKG法により予測値を得ている。両者を比較すると、1池では点・実線ともにほぼ実測値を再現しているが、4池では明らかに降雨・混合率を考慮した方が実測値に近い。この違いは、4池のような後方の池では降雨の影響が積算

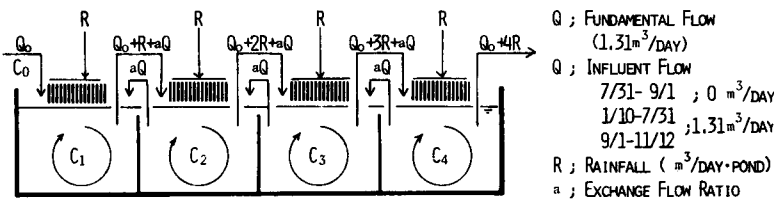


Fig.4 Flow pattern of test pond

Table 5 Fundamental equations of simulation

$V \frac{dC_1}{dt} = Q_0 C_0 - (Q_0 + R + aQ) C_1 + aQC_2 - VF_1$	①	<i>V</i> ; VOLUME
$V \frac{dC_2}{dt} = (Q_0 + R + aQ) C_1 - (Q_0 + 2R + 2aQ) C_2 + aQC_3 - VF_2$	②	<i>C_i</i> ; ALKALINITY
$V \frac{dC_3}{dt} = (Q_0 + 2R + aQ) C_2 - (Q_0 + 3R + 2aQ) C_3 + aQC_4 - VF_3$	③	<i>F_i</i> ; REACTION RATE
$V \frac{dC_4}{dt} = (Q_0 + 3R + aQ) C_3 - (Q_0 + 4R + aQ) C_4 - VF_4$	④	

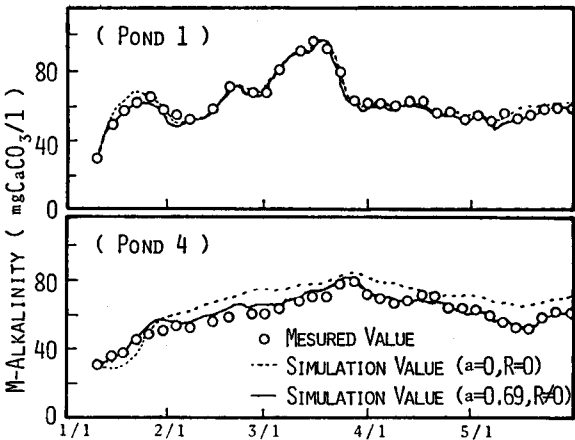


Fig.5 Results of simulation

され、無視できなくなったためであり、図には示さなかったが、降雨のみを考慮した場合には4池でも降雨、混合率を考えた場合と同じくらいの値が得られている。一方、混合率の影響では、 $a=0.69$ の場合、 $a=0$ に比べ流入初期での値の適合性が良い等の改善をみたが、その違いは明確ではなかった。いずれにせよ、本実験池ではFig. 4に示す流動条件で実際の水の流れをかなり精度よく再現できることがわかった。

反応機構 池内での反応については、Table 6に示す物質の流れを設定した。図は、炭素を例として、その計算方法を併記した。まず、池水中の炭素は水質分析の結果より I_n-C (無機態炭素)、POC (浮遊性有機態炭素)、SOC (溶解性有機態炭素) の3つの形態に分けた。ここで I_n-C は CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} の総和である。POCは藻類を主体とするが、その他流入水中のデトリタス、細菌、動物プランクトンなどを含む。SOCは流入水によって持込まれたものと、藻類の死滅などで池内で生成されたものを含む。池内では、これらとは別に、底面に堆積した底泥、壁面で繁茂した付着性藻類を独立した有機態炭素の存在部分として取扱った。また、9月以降1池底層で繁茂した綿状の藻類ヒザオリ (*Mougeotia*, 緑藻類) も独立したものとして扱った。池内の炭素を、このように6つの存在部分に分けて、これらの部分間の反応経路を以下のように決め、主要な反応に限定した。

- ① 光合成による I_n-C の摂取としては、水中の藻類 (POC), 付着性藻類, ヒザオリによるものを考える。このうち、水中の藻類によるものは、呼吸速度が実測されているので総生産量として与えるが、他は純生産量として与える。 I_n-C の供給源としては、流入水以外に大気とのガス交換、底泥からの溶出および呼吸による POC からの回帰を考え、SOC の分解による回帰は無視した。
- ② POC では、呼吸・分解による I_n-C 、SOC への変化と底層への沈降を考えた。
- ③ 底泥は、POC の沈降によってできるものとし、その水中への回帰はすべて I_n-C として溶出するものとした。すなわち、SOC としての溶出はないものとする。

なお、実際のフラックス算出にあたって、浮遊物の呼吸量は暗ビン試験の DO 変化より得られる酸素消費速度を炭素に換算 (酸素 3 g の消費で POC 1 g が CO_2 になると仮定) したものである。また、沈降総量は、4月以降の実測値に、その間に得られた沈降率から計算される1~3月の推定値を加えることにより得ている。一方、各形態炭素の流入出総負荷量、現存量変化量、付着性藻類量、ヒザオリ量、底泥量は実測値であり、他のフラックスは、これらの値より計算することによって得ている。

一方、溶存酸素に関する池内での反応には、光合成、呼吸、底泥での消費などがあるが、これらはすべて有機態炭素の分解あるいは生成 (光合成) に対応するものであり、炭素の反応量から算出できる。したがって溶存酸素の収支は、炭素の収支をもとに、流入出、現存量変化の量を与えて求める。なお、ほとんどの場合池内の DO レベルが過飽和であったことより、大気中への酸素の放散を収支の上で考えた。

Table 6 Calculation method of each flux (Carbon)

Table 6 Calculation method of each flux (Carbon)	
(Suffix) i ; Pond No. or Sample No. (1 ~ 4) j ; Water Quality j=1 : I_n-C j=2 : POC j=3 : SOC o ; Initial Value f ; Final Value	
EQUATION	TERMINOLOGY
Influent Load $I_j = (1/A \cdot T) \int_0^T \{C_{j,i} \cdot R_{in} + aQ(C_{j,i} - rC_{j,i})\} dt$ (j=1-3, and a=0 at i=0)	T; Experiment time(306days) A; Surface Area (7 m ²) W; Area of Wall (16 m ²) V; Volume (5.25m ³)
Effluent Load $O_j = (1/A \cdot T) \int_0^T \{C_{j,i} \cdot R_{out} + aQ(C_{j,i} - C_{j,i} \cdot p)\} dt$ (j=1-4, and a=0 at i=4)	Q; Fundamental flow (1.31m ³ /day) Q _{in} ; Influent Flow of Pond i (m ³) Q _{out} ; Effluent Flow of Pond i (m ³)
Storage of pond water $St = (1/A \cdot T) (C_{j,i} \cdot S - C_{j,i} \cdot p) V$ (j=1-3)	C; Concentration of Water Quality (mg/l)
Net-production of Sessile Algae $S_2 = (1/A \cdot T) \cdot \alpha \cdot Ch \cdot W$	S _{di} ; Sedimentation Rate(g/m ² day) Ch; Chl.a density of Sessile Algae (gChl.a/m ²)
Net-production of <i>Mougeotia</i> $S_d = (1/T) \int_0^T S_{di} dt$	Se; Dry Weight of Sediments (gSS/pond)
Sedimentation of POC $S_3 = (1/A \cdot T) B \cdot Se$	Mo; Dry Weight of <i>Mougeotia</i> (gSS)
Revolutions $R_1 = S_d - S_3$	a; C/chl.a Ratio in <i>Mougeotia</i>
Decomposition of POC $R_2 = O_2 + S_{t2} - I_2$	B; C Content of Sediments(gC/gSS)
Respiration $R_3 = (1/A \cdot T) \int_0^T R \cdot V dt$	a; Exchange Ratio (0.69)
Gross-production in water $R_4 = O_2 + S_{t2} + R_2 + S_d - I_2 - I_1 - R_2$	r; Respiration rate(mgO ₂ /l·day)
Absorption of CO ₂ $R_5 = O_1 + R_4 + S_1 + S_2 + S_{t1} - I_1 - R_1$	O; Oxygen /Carbon ratio in respiration(=3.0)

5. 炭素・酸素の物質収支

前述のように設定して求めた炭素の物質収支図を、Fig. 6に示す。図中、各フラックスの数値は単位面積あたりの変化速度で示した。図によると、POCの総生産量は、1池から4池で1680～3490 $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ であった。晴天の日の富栄養湖での総生産量は200～2000 $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ であり⁷⁾、池内の藻類の生産量がかなり高レベルであったことがわ

かる。一方、POCの純生産量は、この総生産量から呼吸量を差し引いた1120～2610 $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ となった。単位Chl. aあたりの純生産量は、1池から4池でそれぞれ19.4、14.3、19.0、25.7 $\text{mg C/mg Chl. a} \cdot \text{day}$ となり、生産性は2池でやや低く、4池で最も高かった。POCの一部は、呼吸、排泄等種々の反応により溶存化、無機化され、 $\text{I}_n\text{-C}$ やSOCとなるが、これらの作用は各々560～880 $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ および140～190 $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ であり、生成されたPOCの30～50%にあたる量が呼吸等により分解されたことがわかる。池内では、 $\text{I}_n\text{-C}$ の同化がすすみPOCが生産されたが、その流出量はPOC総生産量の半分以下であり、POCの多くは沈降する。それぞれの池の沈降量は660～2060 $\text{mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ であり、後方の池ほど大きかった。各池のPOCの沈降性を調べるため、沈降量とPOC平均存在量との比を求めると、0.21、0.22、0.37、0.38となり、後方の池で沈降しやすい傾向がみられた。底泥の生成は沈降物の蓄積によるが、沈降量が後方の池で多いにもかかわらず、底泥量は池による差が少なかった。底泥からの水中への回帰率は、70～90%と高く、微生物による分解活動が活発であったことがわかる。

次に滞留時間の影響を調べるため、各池の反応量の積算値と滞留時間との関係を求めた。それをFig. 7に示す。それによると、滞留時間の増加にともない、POC純生産量、沈降量は累進的に増大するが、溶出回帰量も同様に増大し、その結果底泥量は一定割合の増加にとどまった。このことから、滞留時間の増加にともない、炭素の反応量が增大することがわかった。

Fig. 8には、POCの純生産量および呼吸量の経時変化を1池と4池について示した。純生産量は、沈降量採取期間ごとの収支をとって求めたもので、一方呼吸量は実測値である。この両者はよく対応しており、

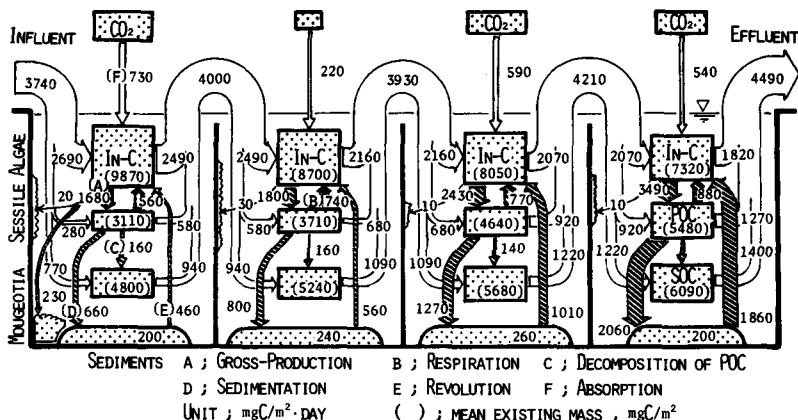


Fig. 6 Carbon balance -

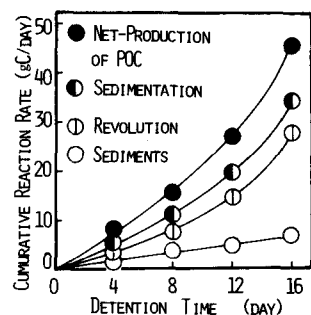


Fig. 7 Each reaction and detention time

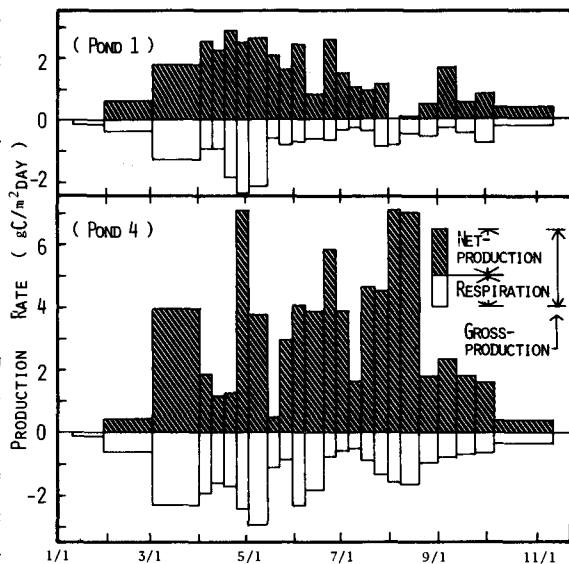


Fig. 8 Variation of production rate

呼吸作用に藻類が大きく関与していたことがわかる。純生産量の最高値は、4池の $7000 \text{ mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ であり、一時的にきわめて高率の生産が行なわれていた。

つぎに、Fig. 9 に酸素の物質収支図を示す。ここでは、硝化・脱窒による影響も考慮したが、この量は窒素の収支から求めた。図より酸素の純生産量を求めて

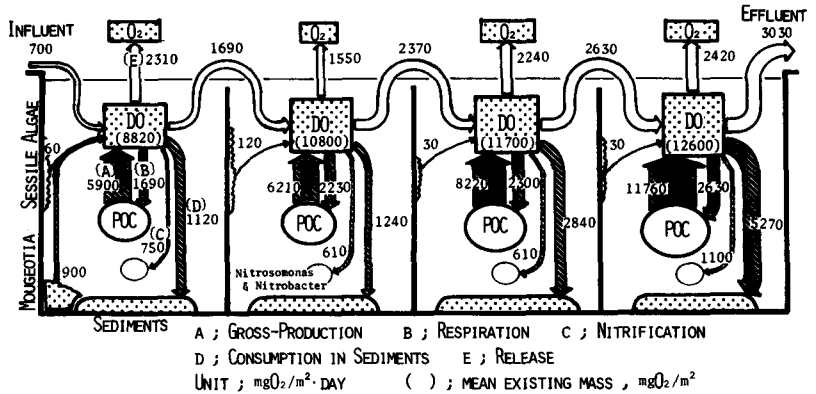


Fig. 9 Oxygen balance

みると、1池から4池それぞれ 5170 、 4100 、 5950 、 $9180 \text{ mg O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ となった。この純生産量は、酸化池で汚水进行处理するとした場合の許容 BOD 負荷率と考えることができる。そこで、この値を Oswald の提示した酸化池設計基準⁴⁾と比較すると、BOD 負荷率 $11000 \sim 22000 \text{ mg BOD/m}^2 \cdot \text{day}$ の好気性池にくらべやや低めの値であるが、通性嫌気性池の値よりは高い値であった。実際には、生産された酸素はおもに流出、呼吸、大気中への放散、底泥の分解によって失われていた。大気中への放散は平均 $2200 \text{ mg O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 程度であり、各池で生産される酸素量の $20 \sim 40\%$ にあたっていた。底泥の分解による消費量は、各池で $1120 \sim 5270 \text{ mg O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ であり、後方の池ほど大きく、4池では生産されている酸素量の 50% にあたっていた。

6. まとめ

以上、酸化池における炭素・酸素の物質収支を求め、その反応量を検討した。以上に結果を列記する。

①池内の流動条件を検討した結果、混合率 $a = 0.69$ から降水量を水量負荷とした流動モデルを得た。

これをもとに、池内での反応経路を主要な反応に限定して、炭素・酸素の物質収支図を得た。

②炭素の収支図によると、池内での量的に大きな反応は、藻類の光合成による浮遊性有機物 (POC) の生産、POC の沈降、底泥の微生物分解による $\text{I}_n\text{-C}$ の水中回帰であった。これらの反応量は滞留時間とともに増大した。

③池内では、総生産量 $1700 \sim 3500 \text{ mg C/m}^2 \cdot \text{day}$ にみられるように、藻類によるかなり高レベルの生産が行なわれていた。

④酸素は池内で、 $6000 \sim 12000 \text{ mg O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 生産された。しかし、この量の $20 \sim 40\%$ にあたる酸素が大気中への放散によって失われていた。

⑤底泥では、微生物による有機物分解がさかんで、酸素 $1100 \sim 5300 \text{ mg O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ が用いられていた。

最後に、本研究の遂行にあたり、河村正純氏、久保裕志氏、武田薫氏の各氏に多大なる尽力を頂いたことを付記し、その感謝の意を表する。

[参考文献]

- 1) Standard methods for the examination of water and waste water, 14 th edition, 1975.
- 2) Park, P.K., Oceanic CO_2 system, Limnol. Oceanogra. 14, 179-186, 1969.
- 3) Odum, E. P. 著 三島次郎訳, 「生態学の基礎(上)」, 培風館, 1974.
- 4) 宗宮功「酸化池法」新しい生物学的処理技術総覧, 科学技術開発センター, 221-223, 1978.
- 5) 津田松苗著「汚水生物学」北隆館, 1964.
- 6) 秋山高「水質汚濁の示標とその応用」水処理技術, Vol. 14, 361-378, 1973.
- 7) 有賀祐勝著「水界植物群落の物質生産Ⅱ—植物プランクトン—」生態学講座 8 共立出版, 1973.