

貯水池における酸素の消費・生産特性

Characteristics of Oxygen Production and Consumption in a Reservoir

岡 史浩*・真野 明**・後藤 光亀**

By Fumihiro OKA, Akira MANO and Koki GOTO

This paper deals with the production and consumption of dissolved oxygen caused by the behavior of algae and bottom mud in the reservoir. The amount of oxygen that produced by algae with photosynthesis and consumed with respiration, were obtained with field experiments. The relation between O_2 production and water temperature, sunlight intensity were analyzed. The behavior of algae are shown to be characterized by optimal O_2 production temperature, optimal sunlight intensity etc. Also O_2 consumption by respiration and bottom mud is evaluated quantitatively. The validity of results was examined using 1-D water quality simulation of DO.

Keywords: O_2 production, photosynthesis, respiration, algae, 1-D water quality simulation

1. はじめに

湖沼や貯水池の溶存酸素濃度は、複雑な生態系を通じて得られる水質項目であり、富栄養化とも非常に密接な関係を持つ指標である。特に、夏期水温躍層により下層で溶存酸素が枯渇してゆくと、底泥による内部負荷が進行し藻類の増殖が高まり、水質の悪化つまり湖沼そのものの価値が消失してゆく。さらにそれは、我々の生活に多大な影響を与えるのである。従って、湖沼や貯水池の溶存酸素濃度の動きを把握すること、とりわけ水中での酸素のほとんどが藻類の光合成によって生産され、また微生物の呼吸や底泥によって消費されることより、その湖沼での藻類や底泥の特性を知ることは、水質管理の上で重要である。藻類に関しては、実験室内で藻類単体として増殖・光合成に関する詳しい研究が成されている。それらを多くの種の藻類が共生する湖沼で適応して、実験室で得られた結果と同程度の構造とパラメーターを有する酸素生産と消費のモデルを構築することが出来れば、水質予測や制御を行なう上で重要な進展が得られることになる。

本研究は、夏期水温躍層安定期における藻類の消費・生産特性についてのモデルを提案し、さらにそれを数値シミュレーションに組み込んで妥当性を検証したものである。

2. 藻類による水中の酸素消費・生産速度

観測及び実測は、仙台市近郊の中原貯水池で行なった。この貯水池の平面図を図-1に示す。水深は約7.2 mで、ほぼ一定に保たれており、外からの流入はほとんどない。また貯水池に共生する藻類の種類の構成は、*Cyclotella*(珪藻類)が47%、*Scenedesmus*(緑藻類)が20%、*Navicula*, *Rhizosolenia*(珪藻類)がそれぞれ6%、*Chroococcus*(藍藻類)が5%である。

*学生会員 東北大学工学部土木工学科
(〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

**工博 東北大学助教授 工学部土木工学科

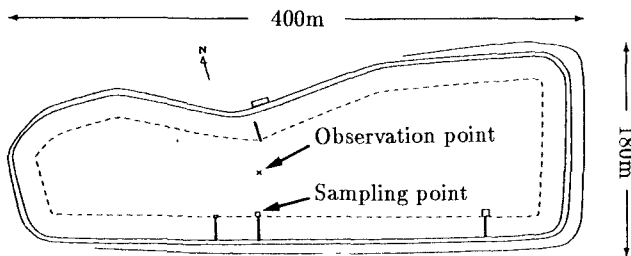


図-1: 中原貯水池平面図

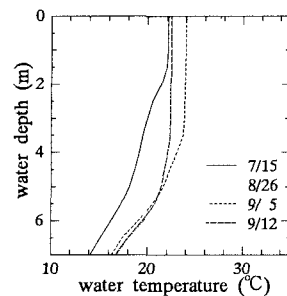


図-2: 平均水温鉛直分布図

2.1. 実験方法

夏期水温躍層安定期における湖水中の酸素消費・生産速度を求めるため、7/15、8/22、9/5、9/12の4回、現場実験を行なった。測定した深度は、0.1、1.0、2.0、3.5、5.0、6.0、6.5 mである。各深度の湖水を採水後直ちに気泡の入らないように4本つづ DO 瓶に満した。そのうちの2本はアルミホイルで包んで光を遮蔽し(暗瓶)、残りの2本はそのまま(明瓶)で採水深度の位置に沈めた。これらを約24時間後に引き上げ、DOの消費量及び生産量を測定した。また、各深度で採水した湖水を実験室に持ち帰り DO、Chl.a、SS、栄養塩類の測定を行なった。さらに連続自動観測により、水温、DO、流速、日射量、風速を40分おきに観測している。図-2に実験日の平均水温の分布を示す。

2.2. 酸素消費速度

本研究においては、暗瓶によって得られた DO の減少量を、硝化により消費される DO の減少量で補正したものを藻類による酸素消費速度とした。4回の実験の結果、単位 Chl.a あたり及び単位 SS あたりの酸素消費速度の鉛直分布は図-3、4に、水温との関係は図-5、6に示すとおりである。ここでの水温は、実験期間中に連続自動観測により観測された水温の平均値を用いた。また表層では水温の変化が大きく、水温の平均値では実際消費に影響を与えたと考えられる水温との誤差が生じてくるため、省いてある。単位 Chl.a、単位 SS あたりのそれぞれの酸素消費速度はかなりばらつきが生じており、1次関数として表現できない。そこで酸素消費速度は水温に対して指数関数的に変化すると仮定すると、図に示したように fitting することができ、また単位 Chl.a あたりの方が単位 SS あたりよりも相関が高いと言える。高崎¹⁾の研究によれば、単位 SS あたりの酸素消費速度の方が水温との相関が高い。4で述べるように Chl.a による酸素消費が NH₄の硝化による酸素消費の4~5倍に達しており、酸素消費の大部分は藻類の呼吸分解によって行なわれる。一方高崎の観測では、観測前に出水があり、これに伴い溶解性の N と SS が多量に流れ込んだと推測され、これによる酸素消費が大きかったためと考えられる。

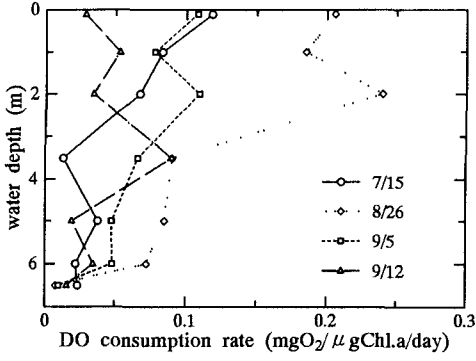
単位 Chl.a あたりの酸素消費速度を見ると、水温が20~24℃付近でばらつくが同じ水温でも深度により異なった挙動を示すことが分かる。深度によりそこに存在する藻類の活性に差が生じるためと考えられる。

2.3. 酸素生産速度

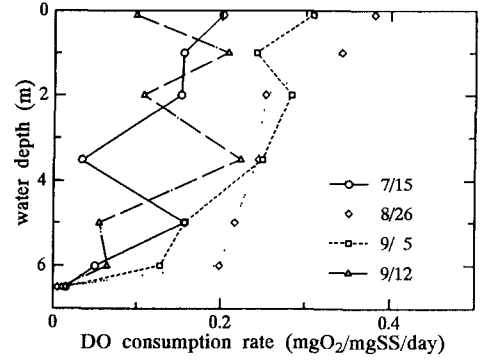
明瓶の DO 値から暗瓶の DO 値を差し引くことで、実験期間内での酸素生産量が得られる。ここでは、それをさらに単位 Chl.a あたり及び日照時間で割ったものを、藻類による酸素生産速度とした。またここでは、93年8月19~21日にこの貯水池で行なった実験の結果も利用した。

実験室内での藻類の培養実験では、藻類の種類ごとに水温や放射強度との関係について詳細な研究がなされている。実際に貯水池において、藻類を包括して考えた場合にどのような特性を持つかを調べるため、藻類の活動に必要な栄養塩類の条件を同じにした上で、藻類による酸素生産と水温及び日射との関係を明確にする。

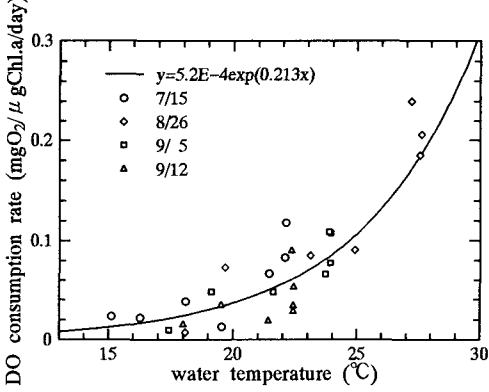
この貯水池における T-N、T-P の分析結果より N/P 比が約18~28であった。一般に N/P 比が10程度以上であれば P 制限である²⁾といえることより、この貯水池は P 制限である。そこで実験により得られた酸素生産速度を次式²⁾を使い最適栄養塩量での酸素生産速度を求めた。



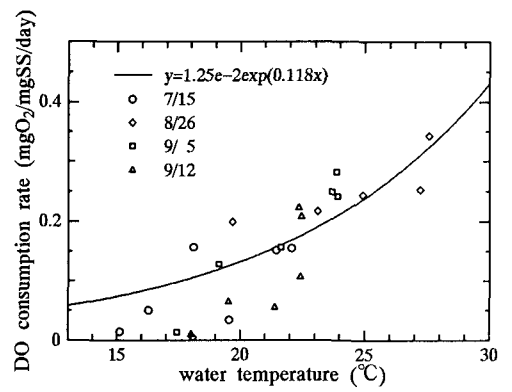
図－3: 単位 Chl.a あたりの酸素消費速度 (鉛直分布)



図－4: 単位 SS あたりの酸素消費速度 (鉛直分布)



図－5: 単位 Chl.a あたりの酸素消費速度



図－6: 単位 SS あたりの酸素消費速度

$$f_P = \frac{P}{K_m + P} \quad (1)$$

ここで、 P は P の濃度であるが、リン酸態リンは検出限界以下になることもあり、数値モデルには使いにくいのでここでは $T-P$ の濃度を用いた。 K_m は半飽和定数であり、ここでは $K_m = 0.01 \text{g/m}^3$ とした²⁾。この結果を用い酸素生産速度と日射量との関係を表したものを図-7に示す。ここでの日射量は、実験期間に連続観測から得られた日射量の総和を日照時間で平均したものである。また、水中の日射量は Lambert-Beer の法則に従うとし、水面からの距離 z の関数として次のように表せる。

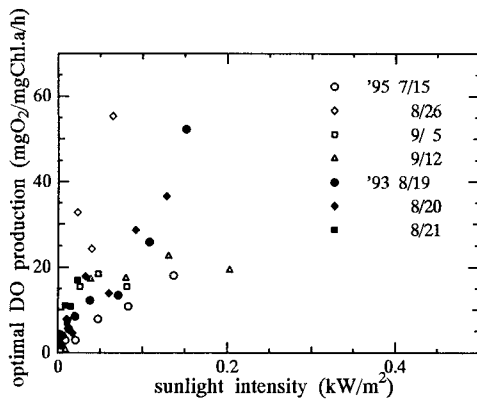
$$I = I_0(1 - \alpha_s)(1 - \beta_s)\exp(-\eta z) \quad (2)$$

ここで、 I_0 は日射量、 α_s は水面反射率、 β_s は水面吸収率、 η は減衰係数である。藻類の増殖と光合成による酸素生産とは比例関係にあるとすると、酸素生産速度は、Peeter & Eilers(1978)³⁾による式で表すことができる。

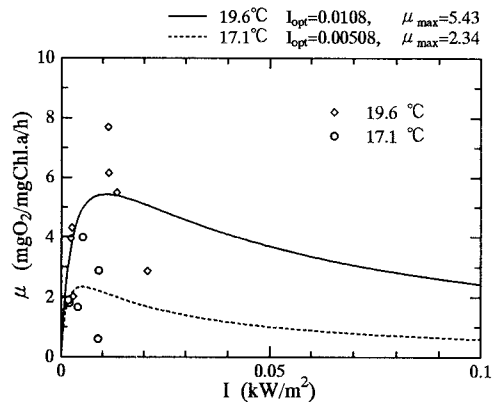
$$\mu = 2\mu_{max}T(1 + \beta) \frac{I_r}{(I_r^2 + 2\beta I_r + 1)} \quad (3)$$

ここで $\mu_{max}T$ 、 $I_{opt}T$ はある水温 $T^\circ\text{C}$ での最適酸素生産速度及び最適日射量、 $I_r = I/I_{opt}T$ 、 β は減衰係数である。ここでは $\beta = 2.0$ とした。この減衰係数は、光阻害による減衰を表している。この式を適用するため、まず各深度での水温により、平均水温が 17.1°C 、 19.6°C 、 21.5°C 、 22.6°C 、 23.7°C 、 26.2°C 、 27.7°C の7つに分類し、上式の係数を最小2乗法によりそれぞれの水温に関して求めた。それを図-8～10に示す。さらに、最小2乗法によって得られた $\mu_{max}T$ 及び $I_{opt}T$ と水温との関係を図-11に示す。Lehman ら (1975)³⁾による式より、

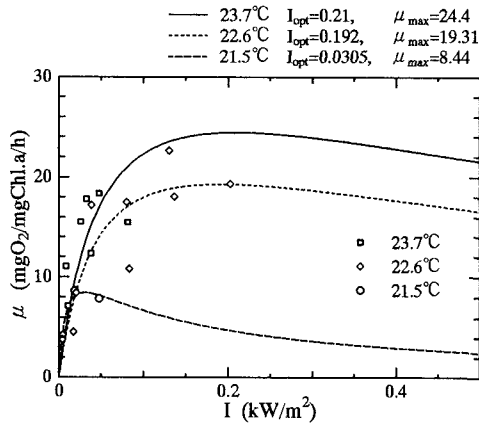
$$\mu_{max}T = \mu_{max} \exp \left\{ -2.3 \left[\frac{T - T_{opt}}{T_{inf} - T_{opt}} \right]^2 \right\} \quad (4)$$



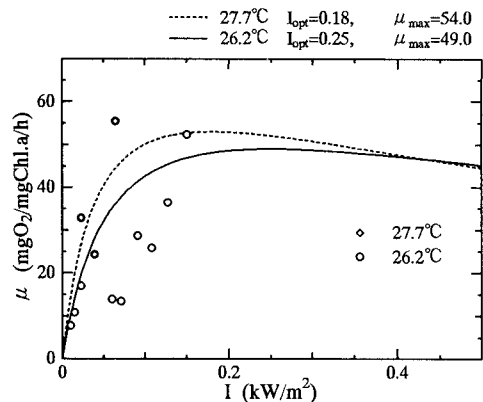
図－ 7: 最適栄養塩での酸素生産速度と日射量の関係



図－ 8: 水温 15～20℃での μ と I の関係



図－ 9: 水温 20～25℃での μ と I の関係



図－ 10: 水温 25℃以上での μ と I の関係

という関係があり、ここで T_{opt} は最適温度、 T_{inf} は $\mu_{max}T = 0.1\mu_{max}$ となる温度である。又この式は、 I_{opt} と水温 T の関係にも適用できる。図-11、12 の曲線はこの式によるもので、実験室レベルの結果とかなり一致した値が得られた。

これらの結果より、この貯水池内の藻類による酸素生産の最適温度は、28.6℃と算定できた。又、最適日射量の最大値が得られる温度は25.3℃となり、酸素生産速度が最適日射量が最大値のときに最大とはならないことが分かる。そして、日射量の増加により酸素生産速度が高まることと、日射量が多いときには酸素生産に対する光阻害が温度と共に大きくなることの2つの作用が、相互に影響しあっているといえる。さらに、このような定式化により、水温と日射量を測定することで容易に酸素生産速度を算定できる。

3. 底泥による酸素消費速度

3.1. 測定方法

測定は、サブマージドチャンバーを湖底に設置して行なった。このチャンバーは半透明のアクリル製で、底泥とそのすぐ上150 mmのところを隔離するもので、隔離された水の容積は0.024 m³、底泥の面積は0.16 m²である。光が完全に透過しないよう半透明部分をテープで覆った。チャンバー内の水を内径2 mmのチューブを通じて注射器により吸い上げ、チューブの容積分の水を捨てた後DOを測定した。測定は約24時間おきに行ない、測定期間中チャンバー内の水は静置された状態であった。

3.2. 測定結果

底泥による酸素消費の時間経過を図-13に示す。酸素消費は、

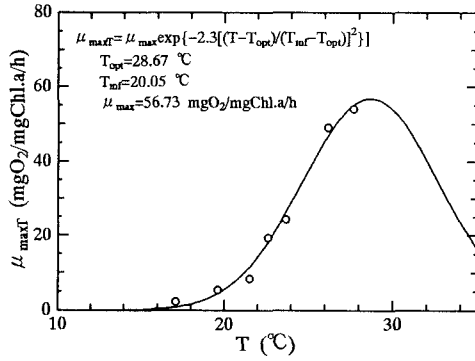


図- 11: $\mu_{max}T$ と水温 T の関係

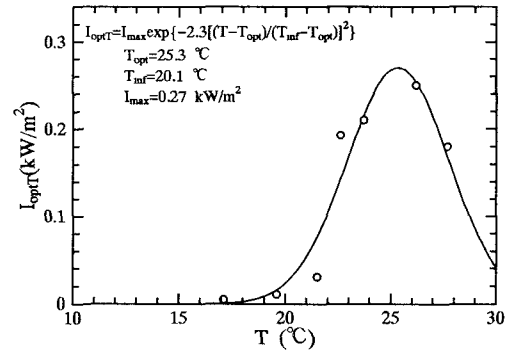


図- 12: $I_{opt}T$ と水温 T の関係

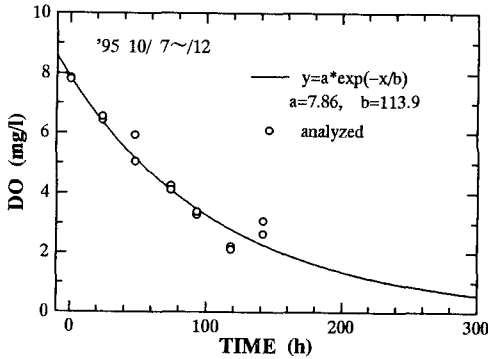


図- 13: 底泥による酸素消費

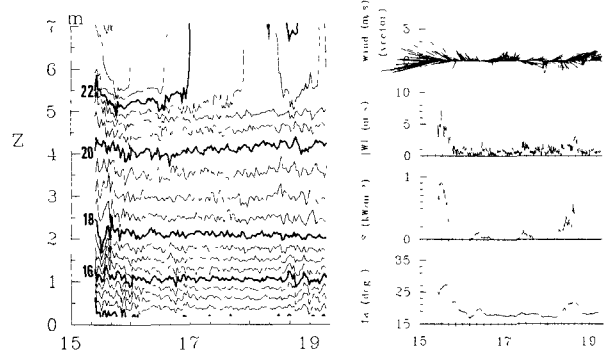


図- 14: 水温分布及び気象状況 (7/15~19)

$$\frac{d(CV)}{dt} = -\alpha AC \quad (5)$$

という式で表せ、ここで C はチャンパー内の DO、 V 、 A はチャンパーの容積及び底面積、 α は係数である。これよりチャンパー内の DO は経過時間 t の exp 関数となり、最小 2 乗法により求めた回帰式が、図に示した曲線である。DO の初期値が大きいのは、チャンパーを沈める際に上層の水が底まで運ばれたためである。

4. シミュレーションモデルによる検証

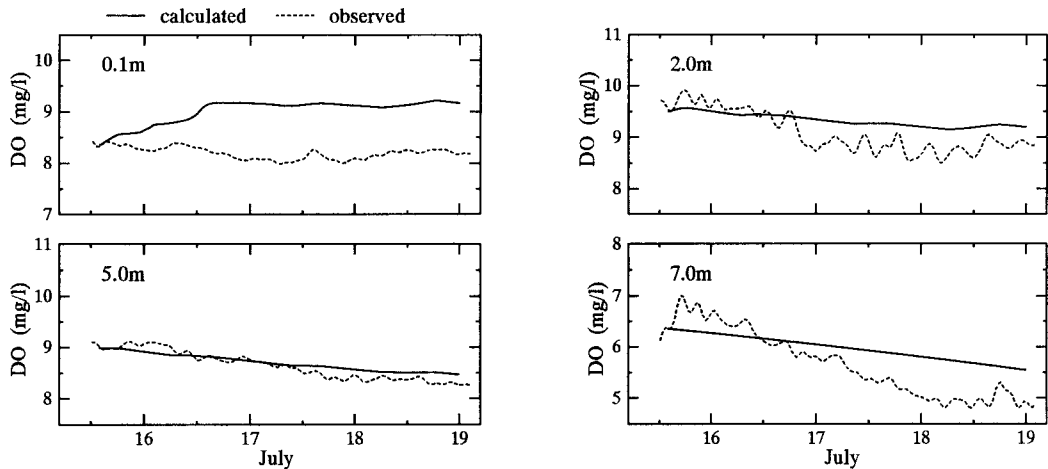
前述の DO の消費、生産の妥当性を検討するため、シミュレーションを行なった。この貯水池は底が水平な人造の池であり、周囲の盛土部分を除いて水深は一定であるため、以下の鉛直一次元のモデルを用いた。

$$X_{O_2} = \mu f_P \quad (6)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = E_z \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - V_{sed} \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{X_{O_2}}{\alpha_{O_2}} A - r_e A \quad (7)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + X_{O_2} A - r_e A \alpha_{O_2} - K_{NH_4} NH_4 \alpha_{NH_4} \quad (8)$$

ここで、 A : 藻類濃度、 C : DO 濃度、 E_z : 鉛直方向混合拡散係数、 V_{sed} : 沈降速度、 r_e 、 X_{O_2} : 藻類による酸素消費、生産速度、 α_{O_2} : 藻類の増殖、呼吸に伴う酸素の発生当量、 K_{NH_4} : 硝化速度定数、 NH_4 : アンモニア性窒素濃度、 α_{NH_4} : NH_4 の硝化における酸素消費当量である。 z は水面から鉛直下向きにとった座標である。DO 濃度の境界条件は、表層では Banks の式を用いて再曝気、又底層では混合拡散による上部からの移動量と底泥による酸素消費量との差により濃度に変化する条件を考慮した。又、鉛直混合拡散係数は、戸田⁶⁾による方法を用い、 r_e は、図-3 で示した回帰式を用いた。シミュレーションを行なった期間は、1995 年 7 月 15 日 10:30~19 日 0:00 である。この期間の水温分布及び気象状況を図-14 に示す。



図—15～18: 各水深での DO 時系列

水深 0.1, 2.0, 5.0, 7.0 m での DO 時系列の計算結果を, 連続観測によって得られた値と共に図-15～18 に示す. 全体的に見て, 連続観測値とのずれは最大で約 1mg/ℓ程度であり, 酸素消費・生産に関して適当な値として算定できたと考えられる. また, 呼吸による酸素消費量は硝化によるその約 4～5 倍であることがわかった. 水深 7 m では, それより上の層とは若干異なった挙動を示すが, 計算にはその挙動が現れず, 底泥と藻類による酸素の消費だけが効いている. 又表層においても計算で観測と挙動の違いが生じている. これは境界条件の効果がうまく効いていないためと考えられる.

5. 結論

本研究では, 中原貯水池での酸素消費と生産に関する実験により, その特性の検討を行なった. 現場実験によって得られたデータを用いて, いくつかの外的因子による関数として定式化することにより, 貯水池内に存在する藻類による酸素の消費・生産の特性, 及び底泥の酸素消費の特性を把握することができた. とりわけ藻類による酸素生産に関しては, 水温及び日射量との相互の関係を 2 つの式に定式化でき, 実験室レベルの相関を実際の現場へと適用することができた. それらの妥当性の検討を目的としてシミュレーションを行ない, 得られた値が適当であることが確認できた. しかし, シミュレーションの境界条件等は, 更なる検討が必要であり, 現場における DO の挙動の再現が今後の課題である.

謝辞: 本研究を行なうにあたり, 仙台市水道局より貴重な資料を提供していただいた. また本研究は文部省科学研究費一般研究 (B) (研究代表者: 真野 明, No.05452402), 及び小川記念基金の補助を受けたことを付記し, 感謝の意を表します.

参考文献

- (1) 高崎みつる: 湖の溶存酸素収支に関する研究, 東北大学博士論文, 1983.
- (2) 岩佐義朗: 湖沼工学, 山海堂, 1990.
- (3) Alain, D., Jean, D., Francoise, P. and Lhoussaine, B. : Growth rate of freshwater algae in relation to light and temperature, *Hydrobiol.*, pp.221-226, 1990.
- (4) Pahl-Wostl, C. and Imboden, D.M. : DYPHORA-adynamic model for the rate of photosynthesis of algae, *J. Plankton Res.*, pp.1207-1221, 1990.
- (5) 川島博之・川西琢也・鈴木基之: 小型酸化池における酸素供給, 水質汚濁研究, 第 13 巻, 第 2 号, pp.99-106, 1990.
- (6) 戸田賢治: 貯水池の熱的特性に関する基礎研究, 東北大学大学院修士論文, 1993.
- (7) 岡史浩・真野明・後藤光亀: 貯水池における出水後の水質シミュレーション, 土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.1336-1337, 1995.