

(4) 湖の溶存酸素収支に関する研究

東北大学工学部 佐藤 敦久

同 〇高崎 みつる

国立公害研究所 須藤 隆一

同 岡田 光正

同 細見 正明

1 はじめに

湖における溶存酸素は、魚類の生息のみならずリン、鉄等の溶出に大きな影響を与えるため、湖内水質の管理上重要な指標である。湖の溶存酸素消費に関し、Gorden, J. A.¹⁾らのように水中の溶存酸素消費量を評価したもの、また Thomas, V. B.²⁾、Peater, A. N.³⁾らにみられるように底泥の溶存酸素消費に検討を加えたもの等、多くの報告がなされている。これらの研究は溶存酸素の消費に関して基礎的知見を与え、すでにいくつかの溶存酸素収支モデルも提案されている。しかし実際の湖において水中と底泥両者の溶存酸素消費速度を同時に測定した例は少なく、とくに富栄養湖の温度躍層形成期にみられる溶存酸素鉛直分布の急激な変化現象を湖内の溶存酸素収支の実測に基づいて定量的に検討した例はみあたらない。

本研究は春期循環期から夏期成層初期における溶存酸素鉛直分布の変化過程に着目し、その間の溶存酸素収支を明らかにしたものである。ここでは湯の湖を対象として、溶存酸素鉛直分布の変化、底泥の溶存酸素消費ならびに水中藻類の光合成による溶存酸素発生および消費を実測し、これらのデータより溶存酸素収支におよぼす各因子の寄与を明らかにした。

2 溶存酸素収支

図-1に溶存酸素収支を表わす鉛直一次元多層(7層)ボックスモデルを示す。ここでは水平方向の流動および拡散は無視しており、鉛直方向の乱流拡散のみを評価した。

溶存酸素の供給項としては、植物プランクトンの一次生産に伴う溶存酸素補給と表層における大気中の酸素との交換を与えた。消費項としては、水中のSS(植物プランクトン、動物プランクトン、バクテリア)による呼吸分解ならびに底泥による溶存酸素消費を考慮した。溶存酸素収支式は次のようになる。

$DO_{i=0}$ 層

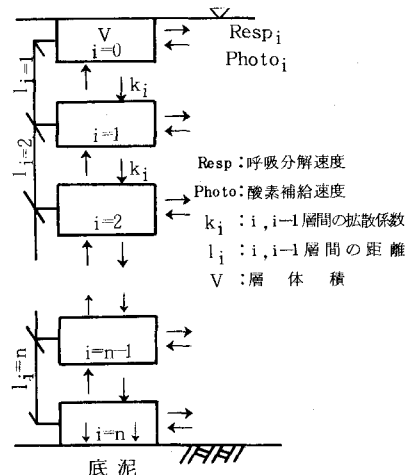
$$V_0 \frac{dDO_0}{dt} = -\text{Resp}_0 + \text{Photo}_0 + K(DO_0^* - DO_1)A$$

$DO_{i=1 \sim (n-1)}$ 層

$$V_i \frac{dDO_i}{dt} = -\text{Resp}_i + \text{Photo}_i + \frac{k_i}{l_i}(DO_{i-1} - DO_i)A + \frac{k_{i+1}}{l_{i+1}}(DO_{i+1} - DO_i)A$$

$DO_{i=n}$ 層

$$V_n \frac{dDO_n}{dt} = -\text{Resp}_n + \text{Photo}_n + \frac{k_n}{l_n}(DO_{n-1} - DO_n)A - \text{SOD} \cdot A \quad \dots (1)$$



DO_i : i 層における溶存酸素濃度 (mg/m^3)、 V_i : i 層の容積 (m^3)、 Resp_i : i 層内の呼吸分解による溶存酸素消費速度 (

図-1 鉛直一次元多層ボックスモデル

O_2 $mg/m^2/h$), $Photo_i$: i 層内の光合成による溶存酸素発生速度 (O_2 $mg/m^2/h$), K : 再ばっき係数 (m/h), k_i : i 層と $i-1$ 層間の乱流拡散係数 (m^2/h), l_i : i 層と $i-1$ 層間の中心距離 (m), DO_0^* : 表層の飽和溶存酸素、 DO_i : i 層の溶存酸素、 SOD : 底泥の溶存酸素消費速度 (O_2 $mg/m^2/h$), A : 層の断面積 (m^2)

3 実験方法

3-1 調査期間

調査対象とした湯の湖は、日光国立公園内に位置する面積 $0.35km^2$ 、最大水深 $12m$ 、平均水深 $7.4m$ の小さな湖である。1981年4月から観測をはじめ、とくに躍層形成初期の6月2日から6月10日にかけては1日1回の連続観測を行った。

3-2 測定方法および測定項目

測定項目は、水温、溶存酸素、クロロフィル a 、SS、透明度、日射量、水中照度などである。水質項目については湖心（水深 $12m$ ）で測定を行った。水温はサーミスタ温度計を用いた。クロロフィル a はアセトン抽出法による。クロロフィル a および SS の測定にはワットマン GF/C ろ紙を用いた。溶存酸素はウィンクラーアジ化ナトリウム変法によって求めた。採水深度は、0, 2, 4, 6, 8, 11, $11.5m$ とした。採水には 6ℓ バンドーン採水器を用いた。

3-3 溶存酸素発生速度の測定

溶存酸素発生速度の測定は明暗ビン法によって行った。明暗ビン各2本ずつを水深0, 1, 2 mに設置し、一定時間放置後引き上げ、溶存酸素の時間変化を測定した。また、同時に試水のSSを測定した。設置期間中の空中照度の時間変化は光量子センサーを用いて連続測定した。水中照度の減衰は水中光量子センサーを用いて測定した。

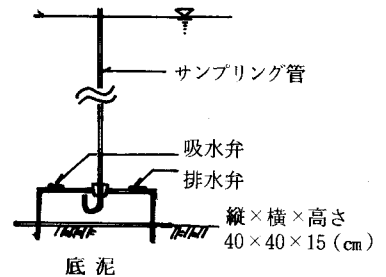


図-2 サブマージドチャンバー

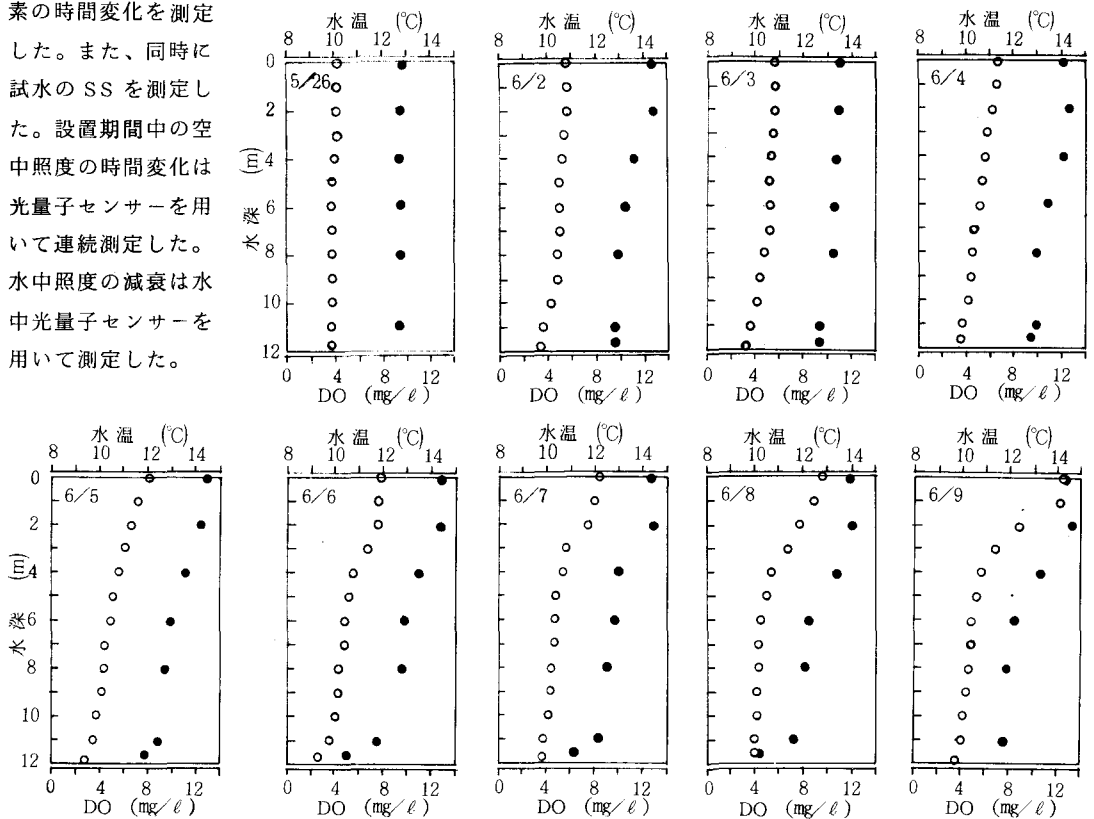


図-3 水温および溶存酸素の鉛直分布 (○: 水温・●: 溶存酸素)

3-4 呼吸・分解速度の測定

水深 0, 1, 2, 8, 10, 11 m に設置した暗ビンによって呼吸、分解速度を測定した。各水深の暗ビンは 1 日ごとに引き上げ、溶存酸素の変化から呼吸および分解速度を求めた。

3-5 底泥による溶存酸素消費速度の測定

図-2 に示すサブマージドチャンバー（以下チャンバーという）を用いて、底泥の溶存酸素消費速度を求めた。チャンバーは湖心に 2 基設置した。設置の際、チャンバー内の空気を完全に追い出した後静かに降ろしていき、着底前から着底時にかけてはとくに底泥の巻き上げが最小になるよう注意した。着底後、ただちに初期の溶存酸素を測定した。採水は注射器を用い、採水前にチャンバー内の水をピストンフローにて数回攪拌した。採水した試水は注射器の先端にチューブを付け、気泡の入りぬように DO ビンに採水し、溶存酸素の時間変化を測定した。

4 実験結果および解析

実験期間中の水温および溶存酸素の鉛直分布を図-3 に示す。5 月 26 日は完全な春期循環を示し、水温、溶存酸素ともに鉛直分布に変化はみられない。6 月 2 日の表層と底層直上での水温差は 1℃であり、水温上下差は大きくない。しかし、6 月 2 日以降の水温躍層の発達から、すでに水温躍層形成初期の段階と見ることが出来る。一方、6 月 2 日にはすでに表層と底層の溶存酸素の差が約 3 mg/l 程あり、鉛直分布に変化が生じ始めている。しかし、5 月 26 日のデータと比較すると水深 0～6 m 付近までの溶存酸素が増加しているだけであり、8 m 以深においては溶存酸素に変化はない。6 月 3 日には表層と底層の溶存酸素の差異は小さくなり、8 m 層のみ溶存酸素に増加がみられる。また、6 月 3 日を境として溶存酸素鉛直分布は大きく変化し始め、6 月 4 日以降底層において急激な溶存酸素の減少が認められる。以上の結果から、モデルに与える初期値として 6 月 3 日のデータを選んだ。

4-1 生産速度

4-1-a 生産量推定に用いる吸光係数 α_z の決定

水中に透入した光は水深とともにほぼ指数関数的に減衰することが Beer によって示されている。一般に減衰は式(2)の吸光係数によって決められる。SS、セストン量などが鉛直方向にわたり一様に分布している場合 α は一定値をとることになるが、水深方向に変化している場合には α は水の層ごとに变化するはずである。 α_z を水深方向の関数であると仮定すると、照度は式(3)で表わされる。

$$I_z = I_0 \exp(-\alpha \cdot z) \quad \dots (2)$$

$$I_z = I_0 \exp\left(-\int_0^z \alpha_z dz\right) \quad \dots (3)$$

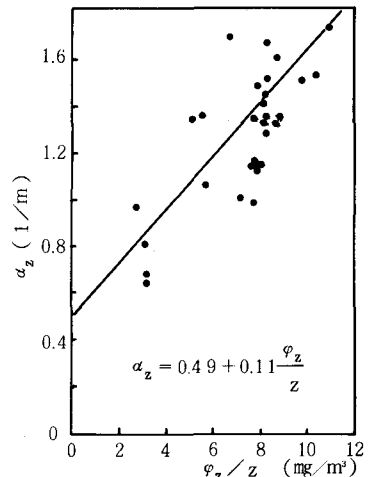


図-4 α_z と ϕ_z/z の関係

α : 吸光係数 (1/m)、 I_0 : 表面照度 ($\mu\text{Ein/cm}^2/\text{h}$)、 I_z : 水深 z における照度 ($\mu\text{Ein/cm}^2/\text{h}$)、 z : 水深 (m)、 α_z : 水深 z における吸光係数 (1/m)

ここで、水深 z における吸光係数 α_z を式(4)で与えると、式(3)、(4)とから式(5)が得られ、式(6)のように整理できる。

$$\alpha_z = \lambda + \epsilon C_z \quad \dots (4)$$

$$I_z = I_0 \exp\left[-\int_0^z (\lambda + \epsilon C_z) dz\right] \quad \dots (5)$$

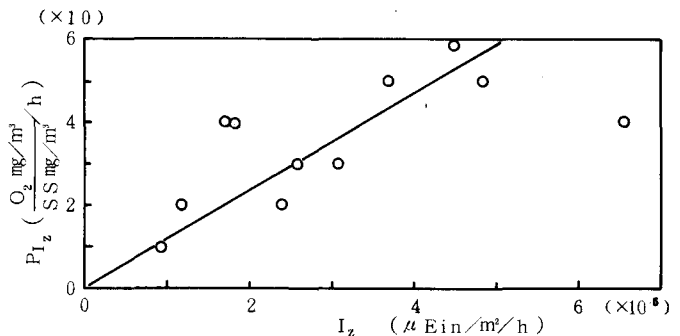


図-5 P_{I_z} と I_z の関係

$$-\frac{1}{z} \ln \frac{I_z}{I_0} = \lambda + \frac{\epsilon}{z} \int_0^z C_z dz \quad \dots (6)$$

λ : 水の吸光係数 (1/m)、 C_z : 水深 z における SS (mg/m^3)、 ϵ : 定数 (m^2/mg)

ここで、 φ_z を式(7)で定義すれば、式(6)の左辺は α_z に等しいから式(8)を得る。したがって α_z と φ_z/z の関係をプロットすれば λ 、 ϵ が求まる。結果を図-4に示す。

$$\varphi_z = \int_0^z C_z dz \quad \dots (7) \quad \alpha_z = \lambda + \frac{\epsilon}{z} \varphi_z \quad \dots (8)$$

φ_z : 水深 z の層より上の SS (mg/m^2)

4-1-b 生産量の推定

実験期間中の空中照度と表面照度には次の関係があった。

$$I_0 = I_{\text{air}} \times \frac{1}{1.42} \quad \dots (9)$$

純生産速度と照度の関係を図-5に示す。この結果より、照度に対する溶存酸素発生速度 P_{I_z} は次式となる。

$$P_{I_z} = 1.18 \times 10^{-1} \cdot I_z \quad \dots (10)$$

P_{I_z} : 照度 I_z に対する単位 SS あたりの溶存酸素発生速度 ($\frac{\text{O}_2 \text{ mg}/\text{m}^3}{\text{SS mg}/\text{m}^3} / \text{h}$)

これから、式(1)中の Photo の項を求めると式(11)のようになる。

$$\text{Photo} = \text{SS} \times P_{I_z} \quad \dots (11)$$

4-2 呼吸・分解速度の推定

Ditoro、Canaleらは、植物プランクトンの呼吸速度がある温度範囲内で、水温の一次関数として表現出来ることを示している。図-6に、実験期間中の水温と呼吸分解速度との関係を示す。この図より、溶存酸素消費速度を求めると、 $9.8^\circ\text{C} \leq \theta \leq 14.5^\circ\text{C}$ の水温範囲で次の実験式が得られた。

$$R_\theta = 3.01 \cdot \theta - 28.3 \quad \dots (12)$$

ここで、 R_θ : 水温 $\theta^\circ\text{C}$ における単位 SS あたりの溶存酸素消費速度 ($\frac{\text{O}_2 \text{ mg}/\text{m}^3}{\text{SS mg}/\text{m}^3} / \text{h}$)

この結果から、式(1)の Resp の項は水温と照度の関数として次のようになる。

$$\text{Resp} = \text{SS} \times R_\theta \quad \dots (13)$$

4-3 チャンバーによる底泥の溶存酸素消費速度の推定

チャンバーの体積 V_c は、 $40 \times 40 \times 15 (\text{cm}^3)$ で、断面積 A_c は、 $40 \times 40 (\text{cm}^2)$ である。チャンバー内の溶存酸素消費速度は、溶存酸素に対して一次関数であると仮定すると式(14)となり、式(15)が得られる。

$$\frac{d(C V_c)}{dt} = -A_c k' C \quad \dots (14)$$

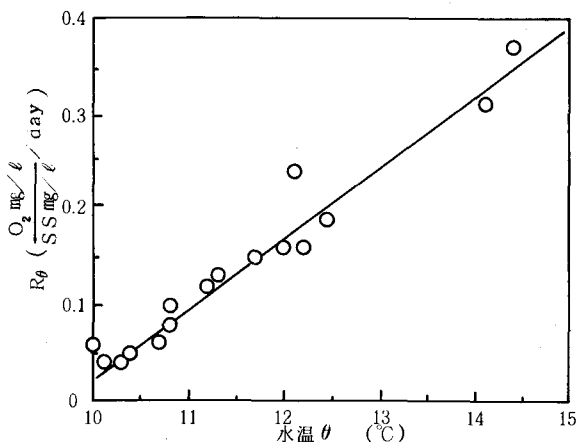


図-6 R_θ と水温 θ の関係

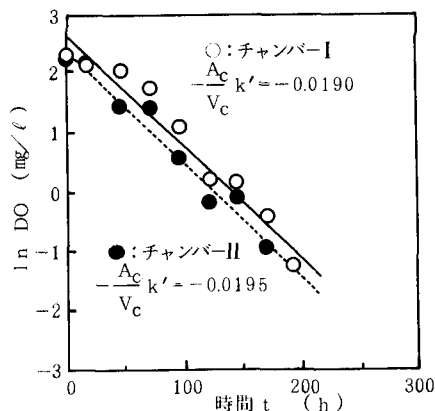


図-7 底泥による見掛けの溶存酸素消費速度

$$\ln C = -\frac{A_c}{V_c} k' t + \ln C_0 \quad \dots (15)$$

C: チャンバー内の溶存酸素 (mg/ℓ)、V_c: チャンバー体積 (cm³)、A_c: チャンバー断面積 (cm²)、k': 見掛けの溶存酸素消費速度係数 (cm/h)、C₀: チャンバー内の初期溶存酸素 (mg/ℓ)

式(15)中、 $-A_c/V_c \cdot k'$ を 2 基のチャンバーの実験結果より求める。図-7 に、 $-A_c/V_c \cdot k' t$ と $\ln C$ の関係を示す。図-7 より、チャンバー I、II の k' はそれぞれ $k'_1 = -0.285$ 、 $k'_2 = -0.293$ (cm/h) となる。

k'₁、k'₂ の平均から溶存酸素消費速度係数 K および底泥の溶存酸素消費速度 SOD は式(16)で与えられる。

$$K = -2.89 \times 10^{-3}, \quad SOD = 2.89 \quad \dots (16)$$

K: 底泥の溶存酸素消費速度係数 (m/h)、SOD: 底泥による溶存酸素消費速度 (O₂ mg/m²/h)

4-4 乱流拡散係数の推定

乱流拡散による物質移動速度は熱収支から導いた拡散係数を用いて推定した。水深 z_i 層の熱収支式を考える。底泥は断熱され、横方向から移流がないという条件のもとでは、z 層以深での熱量の時間変化は次式によって与えられる。

$$c \rho \int_{z_i}^{z_B} \frac{\partial \theta}{\partial t} dz \quad \dots (17)$$

c: 水の比熱、ρ: 水の密度、z_i: i 層の水深 (m)、z_B: 底層までの水深 (m)、t: 時間 (h)、θ: 水温 (°C)

上述の条件から熱量変化は、水深 z_i の面における乱流拡散によってのみ与えられる。乱流拡散係数を k_i とすると上式は、

$$c \rho \int_{z_i}^{z_B} \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = -c \rho k_i \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} z_i \quad \dots (18)$$

k_i: 水深 z_i における乱流拡散係数 (m²/h)

実際には上式を差分に書きなおした式(19)に基づいて乱流拡散係数を推定した。

$$k_i = -c \rho \sum_{i=1}^{i=B} \left(\frac{\Delta \theta_i}{\Delta t} \right) \Delta z_i / c \rho \left(\frac{\Delta \theta_i}{\Delta z_i} \right) \quad \dots (19)$$

5 解析結果・考察

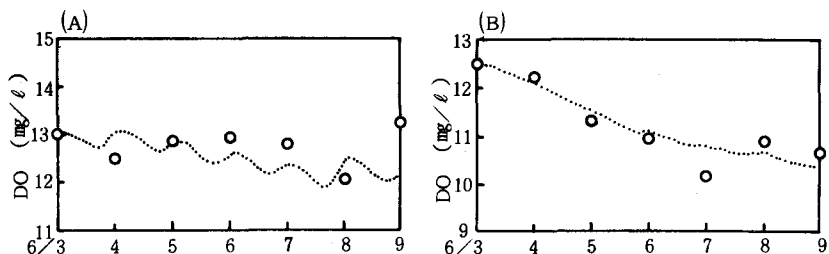
式(1)を用いて計算した結果を図-8 に示す。初期条件は 6 月 3 日の各層における溶存酸素の値を用いた。この計算結果から、とくに図-7-(E)、(F)において計算値が実測値に近い値を示していることがわかる。また、6 月 9 日 12 時(E)層における各項目の占める割合を見ると、SOD、Resp、乱流拡散に伴う溶存酸素移動の寄与率はそれぞれ、-10.6%、-1.8%、2.4% である。この結果から、水温成層初期の溶存酸素の急減は、底泥による溶存酸素消費速度に大きく影響されることを示唆している。図-7-(G)には、10、11、11.5m に対する計算値と、11、11.5m に対する実測値を示した。計算値は底層に近づく程実測値と近い値を示していることがわかる。これらの結果から、式(1)のモデルは底層近傍では成層初期に対する溶存酸素変化をとくによく表現していることがわかる。図-7-(A)、(B)、(C)、(D)層に対しての計算結果もおおむねこれらの層の溶存酸素を表わしているとみなせる。ただし、(C)、(D)層において実測値は溶存酸素消費速度の時間変化が一定もしくは増加の傾向を示しているのに対して、計算値の溶存酸素消費速度の時間変化は減少の傾向を示している。これは、(C)、(D)層では時間の経過とともに式(1)に表わした項以外の影響がきいてくる可能性があることを示唆していると考えられる。

6 おわりに

夏期成層初期における溶存酸素鉛直分布変化について以上の結果から次のような結論を得る。

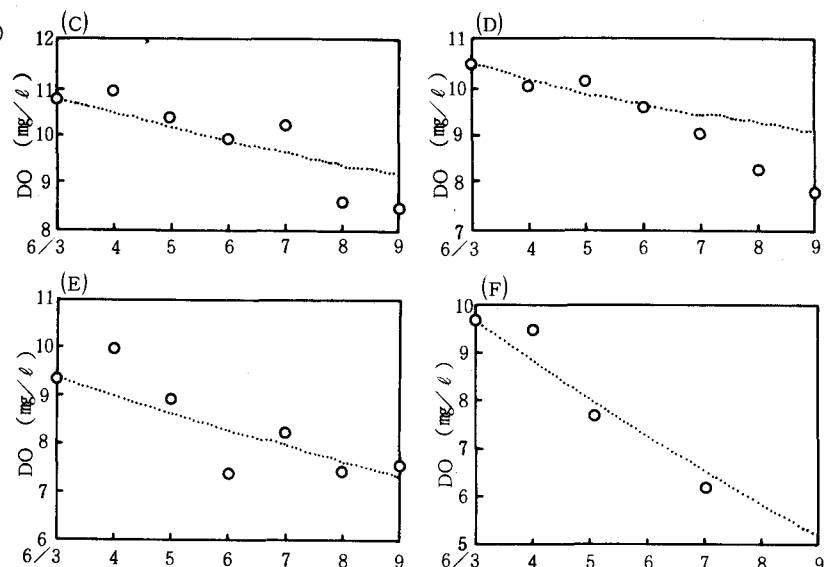
1) 式(1)で示したモデルは多くの仮定の上に成立しているものであるが、夏期成層形成初期における溶存酸

- (A) 2m 1~3m層
 (B) 4m 3~5m層
 (C) 6m 5~7m層
 (D) 8m 7~9m層
 (E) 11m 9~12m層
 (F) 11.5m 10~12m層



実測値 (○) 計算値 (·····)

- (A) 2m 1~3m層
 (B) 4m 3~5m層
 (C) 6m 5~7m層
 (D) 8m 7~9m層
 (E) 11m 9~12m層
 (F) 11.5m 10~12m層



- (G) ○ 11m → 10m層
 ● 11.5m ... 11m層
 ← 11.5m層

実測値：測定時刻 (12:00)

素鉛直分布をおおむね表わすことができる。

- 2) 夏期成層形成初期においては底泥の溶存酸素消費の寄与は著しく、この間の底層近傍にみられる急激な溶存酸素消費の中心的な役割をになうことが知れた。

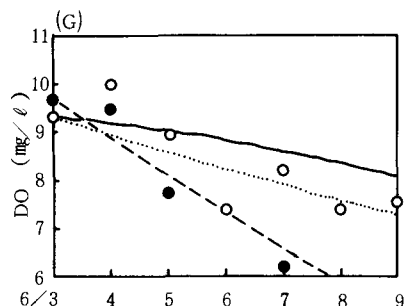


図-8 各層における溶存酸素変化

参考文献

- 1) Gorden J.A. ; "Reservoir Metarimnion Oxygen Demands" ASCE, EE6, pp. 1001~1009(1977)
- 2) Thomas V.B. ; "Benethic Oxygen Demand in Lake Apoka Florida" Water Research, Vol. 15 pp. 267~274
- 3) Peater A.N. ; "Oxygen uptake of sediment in Castle California" Verh Internat Verein. Limnol, Vol. 19 pp. 792~799 (1975)
- 4) Ditoro, Canale ; Modeling Biochemical Processes in Aquatic Ecosystem 2-(respiration)