

短期的水質モデルパラメータのキャリブレーション

平山彰彦*・中西正己**・宮島利宏***
中野伸一***・熊谷道夫****

1. はじめに

水質管理の一手段として、溶存酸素 (DO) などの短期的水質シミュレーションが試みられているが、富栄養水域では内部生産が活発な時期に水質が大きく変動するため、植物プランクトンの光合成特性を時間・空間的に把握し、モデルパラメータに反映させることが重要である。閉鎖性の強い水域では DO の日変化を連続で測定することによりパラメータキャリブレーションを行なうことができ、その有効性が実証されている (例えば Lee 他, 1991a)。一方、流れのある水域では従来から明暗ビン法により光合成速度、呼吸速度が求められてきたが、それを短期的水質モデルパラメータに適用するための手法についてはあまり検討されていない。富栄養水域では、光合成が光強度により制限される場合が多いため、本研究では、まず最初に太陽光の水面および水中での消散を計測により求め、水域の光環境を把握した。次に、明暗ビン法により求めた DO と全炭酸の収支を数値モデルを用いて解析することにより、流れのある場所における短期的水質モデルの光合成パラメータのキャリブレーションを行なうことを試みた。

2. 太陽光の消散と光合成への影響

(1) 観測および分析法

1991年4月に琵琶湖南湖全域 (図-1)、同8月に赤野井湾において、光量子計 (LI-COR, LI-192 SB) を用いて水面直上と水面直下、および水深 0.5 m 毎に水底付近まで PAR (0.4–0.7 μm) の計測を行なった。同時に水深 0.5 m と 3.0 m で取水したサンプル水を、Whatmann GF/C フィルターを用いてろ過後、植物プランクトンのクロロフィル a 濃度を SCOR-Unesco 法と Lorenzen 法により決定した。全日射量 (I_T) は Eppley 180°-pyranometer (Ishikawa, s-110) による現地での計測値である。

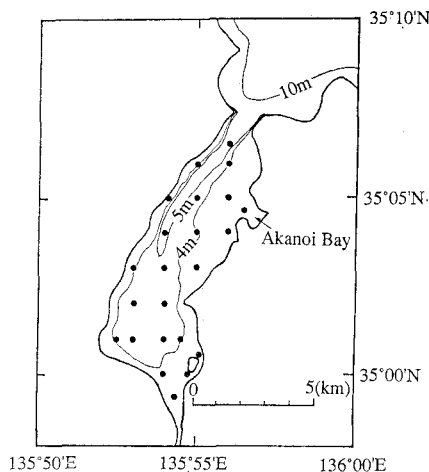


図-1 琵琶湖南湖の観測点 (●)

(2) 結果と考察

I_T と水面直上での PAR の同時時間積分値を $1 \text{ MJ} = 4.60 \text{ einstein}$ として比較した結果、 I_T の約 47% が PAR であることがわかった。観測期間中の雲量は 8~10% で、晴天時の値 43% (Bannister, 1974) よりも I_T における PAR の占める割合が増加する。次に、水面直上の PAR を水面直下の PAR (I_0) と比較した結果、水面における太陽放射エネルギーの反射と減衰は約 13% あることが分かった (図-2)。

水面下での光強度は吸収と散乱により水深 z と共に減衰し、Beer's Law $I(z) = I_0 e^{-K_e z}$ により表わされる。ここに $K_e (\text{m}^{-1})$ は消散係数で、水深に対する $\ln(I/I_0)$ の回帰直線の傾きから K_e を求めた。いずれの地点でも回帰直線の相関係数は 0.98 以上である。こうして求めた K_e と水深方向にほぼ均一に分布した Chl.a 濃度 (クロロフィル a + フェオ色素) の平均値とをプロットした結果、図-3 に示すように高い相関が見られ、琵琶湖南湖での K_e は Chl.a 濃度に応じて 0.5~2.5 と大きく変化する。したがって K_e を一定とした場合には光合成速度の計算に大きな誤差を含む可能性があることが分かる。以上の結果より、琵琶湖南湖における任意の水深での水中光強度は、全日射量と Chl.a 濃度をもとに、次

* 正会員 M.S. 清水建設(株) 技術研究所

** 理博 京大大学生態学研究センター助教授

*** 京大大学生態学研究センター

**** 理博 滋賀県琵琶湖研究所

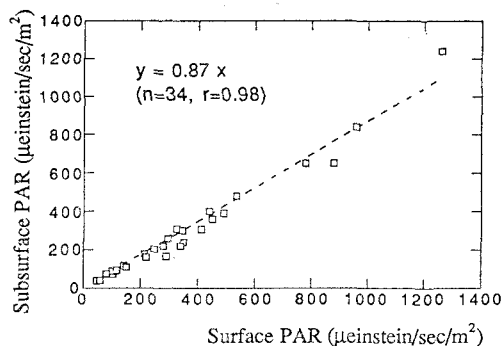


図-2 光合成有効輻射 (PAR) の水面での減衰

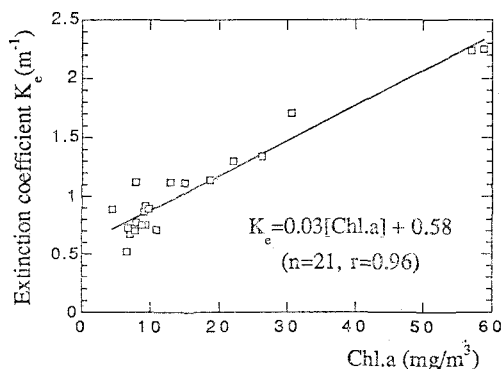


図-3 Chl.a 濃度と消散係数

式で計算することができる。

$$I(z) = I_T \alpha (1 - \beta) e^{-K_e z} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$K_e = 0.03[\text{Chl.a}] + 0.58 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 I_T : 全天日射量 ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hr}$)、 α : PAR の割合 ($=0.43-0.47$)、 β : 水面での減衰係数 ($=0.13$)、 $[\text{Chl.a}]$: Chl.a 濃度 (mg/m^3) である。単位 Chl.a 当りの消散係数 ($\gamma^*=0.03$) およびバックグラウンド値 ($K_e'=0.58$) は、これまでに北湖で得られている、 $\gamma^*=0.015-0.022$ 、 $K_e'=0.16-0.18$ に比較して大きい値であり (Tsuda & Nakanishi, 1988)、南湖では光の消散が Chl.a 濃度により大きく依存すると共に、Chl.a 以外の懸濁・溶存物質などによる影響も大きく受けていること

を示している。

3. 酸素ビン内の DO, TIC 収支

(1) 明暗ビン法による生産・消費速度測定

琵琶湖南湖でも特に富栄養化した赤野井湾の水深 1.8 m の地点で、1991年8月に水質観測を2回行った。現地の観測期間中の流速は 3—5 cm/sec、水質は鉛直方向にはほぼ一様で、水温差もほとんどの時間帯で 0.1°C 以下である。Van-Dorn 採水器により 0.5 m で取水したサンプル水を、100 cc の酸素ビンに封入し、深さ方向に 0.5 m 毎に2個ずつの明ビンと、表層に暗ビン2個を約7—12時間放置した。1日の変動を調べるために一連の作業を3回連続して行なった。酸素ビン内の DO、全炭酸 (TIC) 濃度の収支を測定することにより、純生産速度、消費速度が求められると共に、水深方向には光強度の影響を測定できる。サンプル水は、Whatmann GF/C フィルターによりろ過し、Chl.a (Lorenzen 法)、および DIN ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$)、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の初期濃度を決定し (Nakanishi *et al.*, 1986)、未ろ過液から JIS 法により COD_{Mn} を測定した。DO はウィンクラー法、TIC は TOC メータ (Shimazu TOC 500) により初期濃度と酸素ビン内の最終濃度を測定した。表-1 に水質をまとめて示す。また8月5—6日、19—20日の毎時の全天日射量を 図-4 に示す。

(2) DO・TIC 収支モデル

酸素ビン内の DO と TIC 濃度の時間変動を、次式のように植物プランクトンによる生産と消費 (第一項)、溶存・懸濁態有機物の酸化による消費 (CBOD) と生産 (第二項)、および DO に関しては硝化による消費 (NBOD; 第三項) を加えて表した。

$$\dot{c}_1 = 0.00267 CCHL(\mu - r)P - k_1 L_0 - 0.00457 k_{N_1} N_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\dot{c}_2 = 0.001 CCHL(r - \mu)P + \frac{1}{2.67} k_1 L_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\mu = \mu_{\text{max}} g(I)g(N)g(T) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$g(N) = \min\left(\frac{DIP}{DIP + K_P}, \frac{DIN}{DIN + K_N}\right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

表-1 赤野井湾の水質

Time	Chl.a (mg/m^3)	$\text{PO}_4\text{-P}$ (mg/m^3)	DIN (mg/m^3)	$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/m^3)	$\text{NO}_2\text{-N}$ (mg/m^3)	$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/m^3)	COD_{Mn} (g/m^3)
8/5 11:40	58.8	3.7	44.4	10.2	2.0	32.2	5.2
8/5 19:00	54.0	2.5	16.7	0.0	1.3	15.4	4.6
8/6 5:20	45.9	1.9	32.2	4.5	1.1	26.6	4.5
8/19 12:20	8.8	5.3	16.1	4.6	0.3	11.2	2.7
8/19 18:20	10.6	-	-	-	-	-	4.7
8/20 6:40	13.1	-	-	-	-	-	4.3

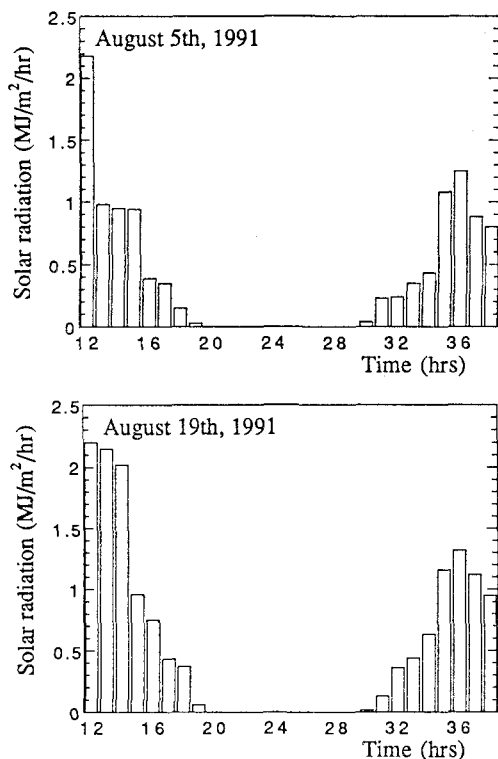


図-4 毎時日射量

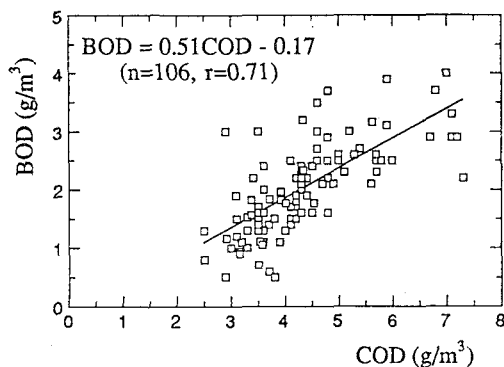


図-5 琵琶湖南湖での COD と BOD との関係

4. 光合成パラメータのキャリブレーション

光合成による内部生産が活発な水域を対象にした水質計算では、飽和日射強度、カーボン・クロロフィル比 ($CCHL$) を日変化する動的パラメータとして評価することが重要である (Lee 他, 1991c)。ここでは、それらのパラメータを流れ場において決定し、その妥当性を観測値との比較により評価する。2回の観測データは、平均 $Chl.a$ 濃度が 53 と 11 mg/m^3 と約 5 倍、飽和日射強度が 6 と 9–11 $MJ/m^2/d$ と約 2 倍の違いがありこの目的に最適である。

(1) $CCHL$ の決定

式 (3), (4) に水温、表-1の水質の初期値を与えて、 $\mu=0$ とし、暗ビン内の DO, TIC 収支に一致するように $CCHL$ を決定する。その結果表-2に示すように、 $CCHL$ は同じ観測時間帯でも DO, TIC 収支のどちらを用いるかにより違う値を取る。これは植物プランクトンの炭素同化率が増殖段階により違うために、酸素消費と炭酸生産の比が必ずしも一定でないこと、また測定誤差が含まれることなどによる。したがって両者の平均した $CCHL$ を用いることによりこれらの影響を軽減する。

$CCHL$ はほぼ日単位で変動し、深さ方向の変化は小さいと仮定すると (Smith, 1980), 24時間内 3 セットの観測で得られた各 $CCHL$ を平均することにより、1日の平均 $CCHL$ が得られる。2回の観測日の日平均 $CCHL$ は 40 と 57 で (表-2)、北湖で計測された $CCHL$ と同じ範囲にあり妥当な値が得られている (Nakanishi, 1976; Nakanishi 他, 1992)。次に $CCHL$ から量子収量 (quantum yield) の最大値 ϕ_{max} を式 (7) により求めると (Lee 他, 1991c), 各々 0.037, 0.036 (moles C/einstein) とほぼ一定値を示した (表-2)。この値は、Bannister (1974) により示された 0.06 ± 0.02 とほぼ同じ範囲に属する。

$$\phi_{max} [\text{moles C/einstein}] = \frac{\mu_{max}(CCHL)g(T)}{20310I_{0T}^*} \dots (7)$$

ここに、 c_1 : DO 濃度 (gO/m^3), c_2 : TIC 濃度 (gC/m^3), $\cdot$ はその時間微分, P : $Chl.a$ 濃度 (mg/m^3), $CCHL$: カーボン・クロロフィル比, L_0 : 最終生物化学的酸素消費量 (g/m^3), DIP : 無機リン濃度 (mg/m^3), DIN : 無機チッソ濃度 (mg/m^3), K_P , K_N はリン, チッソ摂取の半飽和定数である。それ以外の記号の説明は Lee 他 (1991c) と同様で、 $k_{N1}[d^{-1}] = 0.1(1.08)^{T-20}$, $K_P=1$, $K_V=15$ (mg/m^3) とした (Ambrose 他, 1988)。CBOD は従来 BOD から計算されてきたが、BOD は計測時間がかかること、また植種により値がばらつくことから (小野他, 1990), COD から CBOD が計算できればより簡便である。しかしながら COD と CBOD とを関係付けるデータは現在のところ少ないので、これまでに南湖で夏場に得た同一サンプル水の BOD と COD_{Mn} (共に JIS 法) を比較すると、 $BOD/COD_{Mn} \cong 0.5$ の関係にあることがわかった (図-5)。したがって COD_{Mn} から L_0 を計算し、酸化速度を $k_1[d^{-1}] = 0.23(1.047)^{T-20}$ とした (Ambrose 他, 1988)。一般に植物プランクトンの呼吸量は、最大総生産の 10% であるとされるので (Parsons *et al.*, 1984), これを $CCHL$ が既知の実測値に適用し (Nakanishi 他, 1992), かつ $0.05-0.15d^{-1}$ の範囲を考慮し (Bowie 他, 1988), $r=0.15(1.08)^{T-20}(d^{-1})$ とした。

表-2 時ビン内 DO, TIC 収支と推定 CCHL

Case No.	Time	平均水温 (°C)	飽和日射強度 (MJ/m ² /day)	DO収支 (gO/m ³)	推定 CCHL	TIC収支 (gC/m ³)	推定 CCHL	平均 CCHL	日平均 CCHL	$\phi_{\max}$ (moles C /einstein)
I	8/5 11:40- 19:00	27.3	6.3	-0.59	31	0.24	35	33		
II	8/5 19:00- 8/6 5:20	26.6		-1.07	50	-	-	50	40	0.037
III	8/6 5:20- 12:50	26.3	5.8	-0.35	18	0.28	55	37		
IV	8/19 12:20- 18:20	29.5	11	-0.27	95	0.14	115	105		
V	8/19 18:20- 8/20 6:40	28.3		-0.59	55	0.20	45	50	57	0.036
VI	8/20 6:40- 12:20	28.1	9.2	-0.23	26	0.14	10	18		

ここに、飽和日射強度 I_s [MJ/m²/d] = $0.7 I_1 + 0.2 I_2 + 0.1 I_3$, I_i [MJ/m²/d] = 0.5 (i 日前の 10—15 時の平均 PAR), γ^* : 単位 Chl. a 当りの消散係数 (=0.03; 式 (2) である。信頼性を高めるために、さらにデータが必要なものの、CCHL は既知のパラメータにより計算することができ、Ambrose 他 (1988), Lee 他 (1991 b, c) によっても示されたように CCHL を未知数として取り扱うことができることを示している。

(2) 光制限関数の決定

平均 CCHL, 水質の初期値 (表-1), 毎時の全日射量 I_T (図-4) を入力して、式 (3)~式 (6) により水深を変化させて DO, TIC 収支を計算し観測値と比較することにより、すでに決定したパラメータと、以下に記す光制限関数 $g(I)$ の設定が妥当であるかどうかを調べる。2 回の観測共に、Melosira granulata などのケイ藻が優先種で、 $g(T) = (1.08)^{T-20}$, 室内実験値をもとに $\mu_{\max} = 1.0 [d^{-1}]$ とした (Ambrose 他, 1988; Ishida & Mitamura, 1988). 日中の培養中に酸素ビン内の Chl. a の増加および栄養塩の減少が見込まれるが、ここではそれらが相殺されるものと仮定して計算を行なった。

酸素ビン内の DO 収支は水面で最大値を示し、光合成が強光阻害を受けないことを示している。このような場合の水質計算には、一般に Baly 式: $g(I) = I/(I + I_k)$, Smith 式: $g(I) = I/\sqrt{I^2 + I_k^2}$ などの飽和型光制限関数がいられ、式中の半飽和定数 I_k は一定値として取り扱われる。しかしながら、植物プランクトン光合成の最適光強度は、過去の光強度に応じ変化するので (Kremer & Nixon, 1988), I_k も日射強度に応じて変化すると考えるべきである。Baly 式, Smith 式を用いて観測時間帯 I, III, IV (表-2) の表層での DO 収支に一致するように I_k (MJ/m²/d) を決定すると各々 $I_k = 1.3$ と 3.5 (I), 1.2 と 3.2 (III), 2.0 と 6.0 (IV) である。この最適 I_k を飽和日射強度 I_s と関連づけて調べると、Baly 式: $I_k = 0.20 I_s$, Smith 式: $I_k = 0.55 I_s$ の関係でほぼ表すことができる。従来法のように I_k を一定とした場合、例えば $I_k = 2.0$ と 6.0 を用いて 8 月 5—6 日 25 時間の DO 収支計算を行なうと、水面での観測値に比べて Baly 式で 0.6 gO/m^3 , Smith 式では 1 gO/m^3

もの誤差を生じる。したがって、短期的水質計算では I_k を日射強度に応じて変化させる必要があることが分かる。

上記の方法により、水面での光合成速度はほぼ推定することができるものの、鉛直方向の適合性も調べる必要がある。Baly 式, Smith 式に加えて、Steele 式 (1962), $g(I) = (I/I_s) \exp(1 - I/I_s)$ を $I/I_s > 1.0$ で $g(I) = 1.0$ と飽和型に変えた 3 式により、平均 CCHL, 最適 I_k , I_s を用いて鉛直方向の DO, TIC 収支を計算して観測値と比較した。その結果、光合成速度の大きい観測 I では、Baly 式の相関が特に悪い (図-6 a)。全観測を通じて飽和型に応用した Steele 式が最も誤差が小さく、鉛直方向の光合成速度を適正に評価できる (図-6 b, c)。以上の結果から、設定したパラメータにより、Chl. a 濃度、飽和日射強度が大きく変化する環境下での光合成速度を、時間・空間的に適正に評価できることが示された。

5. おわりに

流れのある富栄養化した水域において、以下の手順により、短期的水質モデルの光合成に関するパラメータのキャリブレーションが可能であることを示した。

1) 光合成有効輻射の割合、水面、水中での減衰率を現地観測により求め、水中での消散係数を Chl. a 濃度の関数として表した。これにより全日射量を入力条件として、水中の光強度を計算することができる。

2) Chl. a 濃度が 5 倍、飽和日射強度が 2 倍と大きく違う条件のもとで、現場明暗ビン法により、1 日 3 回 DO, TIC 収支を求め、暗ビン内の DO, TIC 収支から、カーボン・クロロフィル比 (CCHL) を決定した。CCHL から求めた最大光子収量 $\phi_{\max}$ は約 0.04 とほぼ一定値を示し、CCHL を未知数として取り扱えることを示した。

3) 毎時の全日射量を入力して、酸素ビン内の DO, TIC 収支を計算し観測値と比較した。Baly 式, Smith 式などの飽和型光制限関数を用いる場合、半飽和定数を飽和日射強度 I_s の関数として表すことが必要であると共に、深さ方向の特性を調べることににより最適な光制限

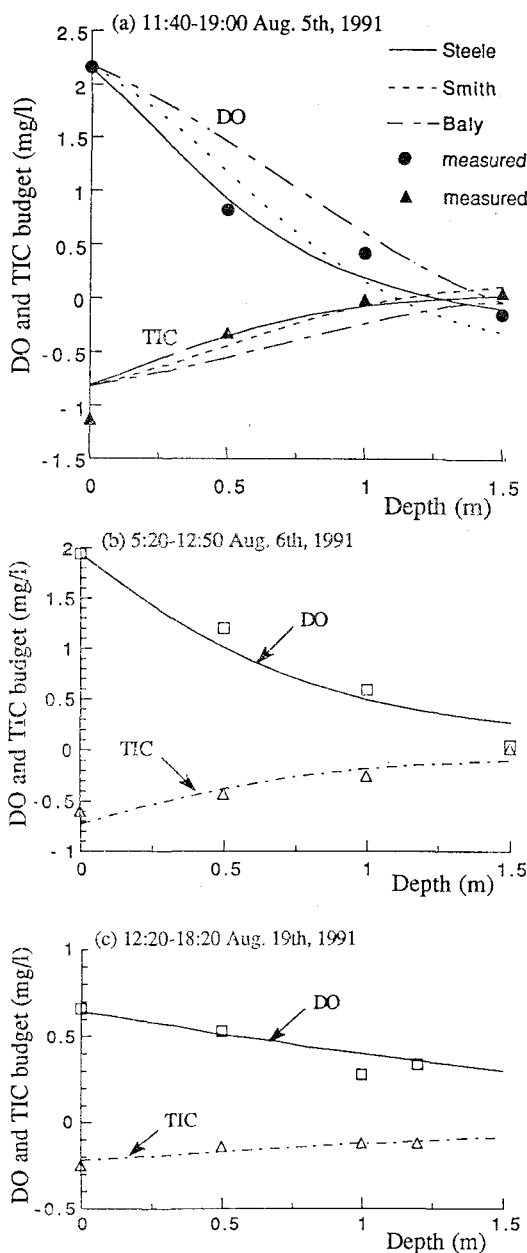


図-8 酸素瓶内の DO・TIC 収支 (線分: 計算値, 記号: 測定値)

関数を選択することが重要であることを示した。

今後は、異なる季節のデータを加えて、パラメータの信頼性を高めると共に、流れを考慮した水質計算を行ない、本法の有効性を実証したい。

謝辞: この研究成果を発表するに際し、これまでに香

港大学 J. H. W. Lee 助教授より受けた指導に感謝します。また、*Chl.a* 濃度データの一部を提供して頂いた琵琶湖研究所高橋幹夫主任研究員に感謝します。

参考文献

- 小野勝一・熊本重次・蛭田清司・小泉晃一 (1990): BOD 測定における種液検討の一例, 環境と測定技術, Vol. 17, No. 5, pp. 51-53.
- Ambrose, R.B., T.A. Wool, J.P. Connolly and R.W. Schanz (1988): WASP4, A Hydrodynamic and Water Quality Model, U.S. Rep. EPA 600/3-87/039.
- Bannister, T. T. (1974): Production equations in terms of chlorophyll concentration, quantum yield, and upper limit to production, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 19, pp. 1-12.
- Bowie, G.L. et al. (1985): Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling, Rep. EPA 600/3-85/040.
- Kremer, J. N. and S. W. Nixon (1978): A Coastal Marine Ecosystem, Springer-Verlag, 217 p.
- Lee, J. H. W., R. S. S. Wu, Y. K. Cheung and P. P. S. Wong (1991a): Dissolved oxygen variation in marine fish culture zone, *ASCE J. of Env. Eng.*, Vol. 117, pp. 799-815.
- Lee, J. H. W., S. S. Wu and Y. K. Cheung (1991b): Forecasting of dissolved oxygen in a marine fish culture zone, *ASCE J. of Env. Eng.*, Vol. 117, pp. 816-833.
- Lee, J. H. W., 平山彰彦, L. Hek-shing (1991c): 富栄養化した閉鎖性水域の短期的 DO モデル, 海岸工学論文集第38巻, pp. 861-865.
- Nakanishi, M. (1976): Seasonal variations of chlorophyll a amounts, photosynthesis and production rates of macro- and microphytoplankton in Shiozu Bay, Lake Biwa, *Physiol. Ecol. Jpn.*, 17, pp. 535-549.
- Nakanishi, M., T. Narita, T. Suzuki and O. Mitamura (1986): Horizontal distribution and seasonal change of chlorophyll a concentration in the south basin of Lake Biwa, *Jpn. J. Limnol.* Vol. 47, pp. 155-164.
- Nakanishi, M., Y. Tezuka, T. Narita, O. Mitamura, K. Kawabata, S. Nakano (1992): Phytoplankton primary production and its fate in a pelagic area of Lake Biwa, *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.*, 35, pp. 47-67.
- Parsons, T. R., M. Takahashi and B. Hargrave (1984): *BIOLOGICAL Oceanographic Processes* (3rd ed.), Pergamon Press, 330 p.
- Smith, R. A. (1980): The theoretical basis for estimating phytoplankton production and specific growth rate from chlorophyll, light and temperature data, *Ecological Modelling*, 10, pp. 243-264.
- Steele, J. H. (1962): Environmental control of photosynthesis in the sea, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 7, pp. 137-150.
- Tsuda, R. and M. Nakanishi (1988): The relative importance of chlorophyll a, non-living suspended and dissolved matter and water to the vertical light attenuation in the north basin of Lake Biwa, *Mem. Fac. Sci. Kyoto Univ. (Ser. Biol.)*, 13, pp. 101-109.