

富栄養化した閉鎖性海域の短期的 DO 変動モデル

Joseph Hun-wei Lee*, 平山 彰彦**, Lee Hok-shing***

1. はじめに

富栄養化した内湾部などの閉鎖性水域では、内部生産が活発な時期に溶存酸素濃度 (DO) が短期的に変動し、場合によっては急激な低下により生物に大きな被害が出る場合があるため、水質管理の一環として DO 変動の予測を行なうことが重要である。光合成による酸素生産と底質による消費の影響が大きい場合の DO の予測は依然難しい問題であるが (Thomann, 1987a), Lee ら (1991a, b) はモデル化を前提とした集中的な連続観測を行ない DO モデルへの適用を試みている。本論文ではこの研究に基づき、気象変動と光合成に関する生態パラメーターを動的に評価した短期的 DO 変動モデルを提案する。毎時日射量などの気象データを与えて、1—2 箇月の水質の推算を行い、動的評価の重要性を示すとともに、基本的なパラメータの感度解析を行なう。

2. DO 収支モデル

流れの影響と水深方向の水質の変化が小さい、閉鎖性水域を対象として、生物・物理的要因に起因する酸素生産と消費を単純化し、定量化することにより、富栄養化した水域の 1 日の DO 変動をモデル化する。植物プランクトンによる生産と呼吸、溶存・懸濁態有機物の酸化による消費 (CBOD), 硝化に伴う消費 (NBOD), 底質による消費と生物呼吸、および再ばっきにより鉛直水柱内の DO の時間変動を次式により表す。

$$\dot{c} = a_{op}(\mu - r)P - k_1 L_0 - 4.57 k_{N1} N_1 - (SOD + F)/h + k_2(c_s - c) \quad (1)$$

ここに、 c : 鉛直方向に平均化された DO [mg O₂/l] で $\dot{c}$ はその時間微分、 P : 植物プランクトン濃度で一般に行なわれているようにクロロフィル a [= $Chl-a$; μg $Chl-a$ /l] を指標に用いる、 a_{op} : 単位 $Chl-a$ 当たりの酸素生産量 [mg O₂/μg $Chl-a$], μ : 植物 $pl.$ 増殖率 [d⁻¹], 植物 $pl.$ 呼吸速度: r [d⁻¹] = 0.05 (1.08), L_0 : 最終生物化学的酸素要求量 [mg O₂/l], 生物化学的酸化速度: k_1

[d⁻¹] = 0.23 (1.047)¹³, N_1 : アンモニア態チッソ [mg N/l], 硝化速度: k_{N1} [d⁻¹] = 0.1 (1.08)¹³, SOD : 底質酸素消費速度 [g O₂/m²/d], F : 養殖魚等の生物呼吸速度 [g O₂/m²/d], h : 水深 [m], c_s : 飽和溶存酸素濃度 [mg O₂/l] (式-19), k_2 : 再ばっき係数 [d⁻¹] (式-18), $pl.$ ≡ プランクトン, $d^1 \equiv day^1$, () 内の値は 20°C を基準とする温度 (T) 補正係数で、例えば $k_1 = 0.23 \times (1.047)^{T-20}$ であり、上付き 1) は (Ambrose ら, 1988) に対応する。変動係数および温度補正係数の内可能なものについてはこれまでに確立された値を用い、場所に依存する SOD などは現地観測データおよびモデルを用いてこれらの値を推定する。

植物 $pl.$ の増殖は、一般によく用いられるように日射量、栄養塩、温度の制限要素関数を重ね合わせて表す。

$$\mu = \mu_{max} g(I)g(N)g(T) \quad (2)$$

ここに、 μ_{max} : 最大増殖率 [d⁻¹], $g(I)$: 日射量依存関数、 $g(N)$: 栄養塩依存関数 (式-3), $g(T)$: 水温依存関数 (式-4) である。 $g(I)$ は Steele の強光阻害型 $g(I) = I/I_s \exp(1 - I/I_s)$ と光透過に Beer's Law $I(z) = I_0 e^{-\gamma z}$ を用いて水深 h で平均したものをを用いる (式-5)。飽和照度 I_s は植物 $pl.$ の光強度順応性を仮定して (Kremer ら, 1978), 前 3 日間の日平均水面直下可視照度 (PAR) を重み付けして求めている (式-6)。

$$g(N) = N/(N + K_N), \quad g(T) = (1.066)^{T-20} \quad (3), (4)$$

$$\bar{g}(I) = 2.718 [\exp(-a e^{-\gamma h}) - \exp(-a)] / (\gamma h); \quad a = I_0 / I_s \quad (5)$$

$$I_s = 0.7 I_1 + 0.2 I_2 + 0.1 I_3 \quad (6)$$

ここに、 K_N : 栄養塩摂取の半飽和定数, γ : 光の消散係数, I_0 : 1 日当たりに換算した毎時 PAR [MJ/m²/d], I_i [MJ/m²/d] = 0.5 × (i 日前の 10-15 時の平均 PAR) である。 PAR (0.3-0.7 μ) は晴天時の日射照度 (0.3-4 μ) の約 43% で (Bannister, 1974), さらに実測から表面での減衰を 15% 見込んでいる。 γ は水中の濁りと植物 $pl.$ 自身による減衰に依存し、現地観測から次式のように求めた。

$$\gamma = 0.24 - 0.005 P + 0.145 P^{0.5} \quad (7)$$

光合成による酸素生産は、酸素/炭素の化学当量比 2.67

* Ph. D. Hong Kong 大学 Reader 土木工学科
** 正会員 M.S. 清水建設(株)技術研究所 海洋環境グループ
*** Hong Kong 大学 土木工学科

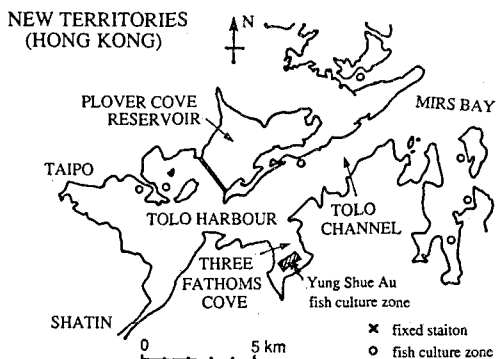
と植物 *pl.* の有機炭素/*Chl-a* 比 *CCHL* により次式で計算できる。

$$a_{op}\mu P = 0.00267 (CCHL) \mu_{max} \bar{g}(I) \bar{g}(N) \bar{g}(T) P$$

..... (8)

3. 現地観測

Hong Kong 沿岸部では魚の養殖が盛んに行なわれている。養殖に伴う底質の汚濁化と陸部からの末処理排水流入により内湾部では富栄養化が進行している。これにより主にケイ藻を優先種とする赤潮が頻繁に発生しており、'87年、'88年には各々 33回、89回の赤潮が観測されている。毒性の赤潮はほとんど見られないものの、プランクトンの死滅・分解に伴う酸素欠乏により養殖魚に被害が出ているため、水質の管理・改善は重要な課題となっている。

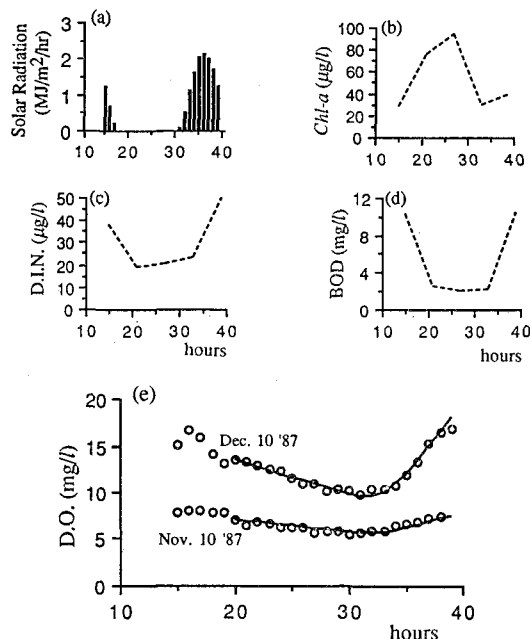


図—1 Tolo Harbour と定点観測所

Tolo Harbour 内 Three Fathoms Cove (図—1) において、DO モデルへの適用を前提として、様々な気象・海象条件のもとで、'87年7月から'89年3月の間に17回の26時間連続水質観測を行なった。現地は岸から200m以内に養殖筏が20—30緊留されており、その内の1つの筏(180m²)を定点観測所とした。現地の水深は6m、流速は1—2cm/s、海水交換率は0.1d⁻¹のオーダーである (Lee ら, 1985)。毎時水深1m毎にDO、水温、塩分を測定し、6時間毎に表層、中層、底層から採水し水質分析に用いた。観測結果の一部を図—2に示す。*Chl-a* の増加と共に、無機溶存態窒素 (D.I.N.) が減少し、日射照度の増加と共に、DOが増大していることがわかる。DOの鉛直勾配は1日を通じてほとんど無い場合と、表層と底層で最大で4mg/l変化する場合があり、特に午後には差が大きく夜間にはDOの減少と共に濃度勾配は小さくなった。全観測の平均水質を表—1に示す。観測を通じて窒素・リンの重量比は1.3—3.3と小さく、窒素が最も重要な制限栄養塩であることを示している。

表—1 Three Fathoms Cove の平均水質

BOD (mg/l)	Chl-a (μg/l)	植物 pl 細胞数 (ml ⁻¹)	亜硝酸+硝酸態窒素 (μg/l)	
2.2	11.2	1630	27.3	
アンモニア態窒素 (μg/l)	リン酸態リン (μg/l)	ケイ酸 (μg/l)	水温 (°C)	飽和酸素濃度 (mg/l)
49.7	28.3	369.6	20.4	7.6



図—2 日射照度、水質の観測値('87年12月10日)(a)–(d)と深さ平均DOの観測値(○)と計算値(実線)との比較(e)

4. 観測データによるモデルの最適化

図—2 (e) に示されるように、鉛直平均 DO の観測値はほとんどの場合、8pm から 6am の夜間にほぼ直線的に減少する。この観測値の回帰直線により総消費速度が求められる。植物 *pl.* の呼吸、CBOD、NBOD および再ばき分を水質・物理データより計算し差し引くことにより *SOD* と魚類呼吸量 (*F*) の和を決定できる。次に昼間の酸素消費量の推定を同様の方法で行ない、光合成による DO の増加を水温、*Chl-a*、栄養塩、日射照度の計測値を用いて式(8)により計算し、DOの観測値に最も適合するように *CCHL* を決定した。なお *CCHL* は1日の間で一定とした。

計算による *SOD* + *F* は平均 13g O₂/m²/d で、*SOD* の現地測定値と養殖魚量からの *F* 推定値との比較では 2—3g O₂/m²/d の誤差の範囲内である。*CCHL* の推定値は100—850範囲で、平均値は460、実験室でのケイ藻と渦鞭毛藻の純粋培養における *CCHL* は85—680の範

囲, 平均値は 350 である。これらは Mann(1982)が示した入江での値 454 や North Sea での値 250 (Steele 1962) に近い値であるものの他の報告値に比べると高めである (例えば, Thomann, 1987b)。これは従来のモデルが主により長い時間スケールを対象にしているためである。また CCHL 推定値にはモデルで考慮されていない植物 *pl.* の種構成変化, *Chl-a*/フェオ色素比の変化, 養殖筏に生える藻類による酸素生産, 曇天時の日射照度の空間的分布の影響が含まれている。

図-2(c) は, 典型的な通常時の DO 変動 ('87年11月10日) と冬季晴天時のケイ藻による赤潮時の DO 変動 ('88年12月10日) を, 実測値と計算値により示している。全観測を通じた DO 変動の計算値と実測値との平均誤差は 0.36 mg/l と小さく, 本 DO 収支モデルにより 1 日の DO 変動を良くシミュレートできる。

5. 動的パラメータの定式化と水質モデル

従来モデルでは, 飽和日射照度 (I_s), CCHL を一定とし, 平均日射量を与えて, 1 日あるいは月単位の平均的な DO 変動を予測することに重点をおいてきた。これに対して本モデルでは, I_s , CCHL, SOD を 1 日毎に変化するパラメータとして動的に評価し, 短期的 DO 予測の精度を上げることを試みた。

(1) 生態系パラメータの動的評価

光合成生産を式-2 を用いて p [mg C/m³/d] = μ (CCHL) P で表し, Smith (1980) のアナロジーを用いると照度 = 0 における一定光合成速度すなわち光子収量の最大値 $\phi_{\max}$ が求まる。

$$\phi_{\max} [\text{mg C/MJ}] = \left. \frac{dp}{dI} \right|_{I=0} = \frac{\mu_{\max} (CCHL) g(T) e}{I_s \gamma^*} \dots (9)$$

太陽光の可視エネルギーは, 1 einstein $\approx$ 52 kcal (= 217.36 kJ) であるので (Bannister, 1974), 単位の換算を行ない $\phi_{\max}$ [moles C/einstein] とすると, 次式のように比較的值が一定のパラメータにより CCHL を記述できる。

$$CCHL [\text{mg C/mg Chl-a}] = \frac{20310 \gamma^* \phi_{\max} I_s}{\mu_{\max} g(T)} \dots (10)$$

ここに γ^* [m²/mg Chl-a] = $\gamma(P)/P$ は単位 Chl-a 当たりの消散係数で, $\gamma(P) = -0.0057 P + 0.145 P^{0.5}$ である。晴天でかつ大きい DO 変動という条件に該当した 9 個の 26 時間観測データと対応する CCHL の推定値から求めた $\phi_{\max}$ の平均値は 0.12 [moles C/einstein] である。この値は $\phi_{\max}$ の理論最大値と等しく従来の観測値に比較して高めであるが, すでに述べた CCHL に含まれる誤差, 特に 40–60% という高いフェオ色素の割合が寄与しているものと考えられる。以下では $\phi_{\max} =$

0.12 として CCHL を計算している。

26 時間観測データに基づいた SOD の推定値は Chl-a 濃度と強い相関があり, また沈殿した植物 *pl.* は, 数日間で分解していることが認められた。植物 *pl.* の沈殿速度を 1 m/d とし, 平均 CCHL = 350 を用いて Chl-a 濃度の観測値より計算した沈殿 *pl.* 量 M_c と SOD との関係は, ばらつきがあるものの次式により表わすことができる。

$$SOD [gO_2/m^2/d] = SOD_{FF} + 2.67 k_c M_c \dots (11)$$

ここに, M_c : 植物 *pl.* 由来の底質有機物濃度 [g C/m²], M_c の酸化速度: k_c [d⁻¹] = 0.58 (1.047), 残餌他の有機物分解に伴う消費 SOD_{FF} は給餌の量, 温度に依存するため, 季節に応じて {1.5–4.5} (1.047) [g O₂/m²/d] の値を与えた。

(2) 水質モデル

上記の動的パラメータを組み込んで, DO, Chl-a, 有機溶存態窒素, 無機溶存態窒素, 動物 *pl.*, M_c の 6 変数からなる水質モデルを以下のように組み立てた。植物 *pl.* および栄養塩の変動はこれまでに一般に受け入れられている考え方に基いている (例えば, Thomann, 1987b)。NBOD は本来アンモニア態窒素濃度を用いて計算すべきであるが, 26 時間観測データと DO 収支モデルから求めた, 全 DO 消費に寄与する NBOD の割合は最大でも 3% あるので, 若干の誤差を許容し簡単化のため硝酸態窒素を加えた無機溶存態窒素濃度を用いている。

$$\dot{P} = [\mu_{\max} \bar{g}(I) g(N) g(T) - r - d_p - v_s/h - k_f - C_g Z] P \dots (12)$$

$$\dot{c} = a_{op} [\mu_{\max} \bar{g}(I) g(N) g(T) - r] P - k_1 L_0 - 4.57 \times 10^{-3} k_{N_2} N_2 - (SOD + F)/h - a_{cz} k_z Z + k_2 (c_s - c) \dots (13)$$

$$\dot{N}_1 = -(k_{N1} + k_f) N_1 - f_{ON} a_{np} (r + d_p) P + a_{nz} k_z Z + B_{N1} \dots (14)$$

$$\dot{N}_2 = k_{N1} N_1 - k_f N_2 + (1 - f_{ON}) a_{np} (r + d_p) P - a_{np} \mu_{\max} \bar{g}(I) g(N) g(T) P + B_{N2} \dots (15)$$

$$\dot{Z} = a_1 [C_g a_{zp} PK_z / (K_z + P) - k_z - d_z - k_f] Z \dots (16)$$

$$\dot{M}_c = a_{cp} v_s P - k_c M_c \dots (17)$$

$$k_2 = [3.9 V^{0.5} / h^{1.5} + (0.728 W^{0.5} - 0.317 W + 0.0372 W^2) / h] (1.024)^{T-20} \dots (18)^{10}$$

$$c_s = 1.43 [10.291 - 0.2809 T + 0.006009 T^2 - 0.0000632 T^3] - 0.607 (0.1161 - 0.003922 T + 0.0000631 T^2) S] \dots (19)^{20}$$

ここに, N_1 : 溶存有機態窒素濃度 (D.O.N.) [μg N/l], N_2 : D.I.N. 濃度 [μg N/l], Z : 動物 *pl.* 濃度 [mg C/l], S : 塩分濃度 [‰], V : 流速 [m/sec], W : 風速 [m/sec], 植物 *pl.* 最大増殖速度: $\mu_{\max}$ [d⁻¹] = 2.1,

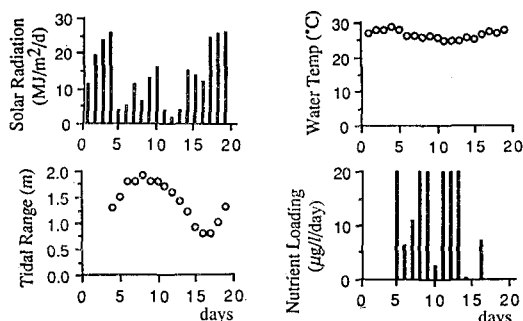


図-3 Three Fathoms Cove における水質計算のための環境条件

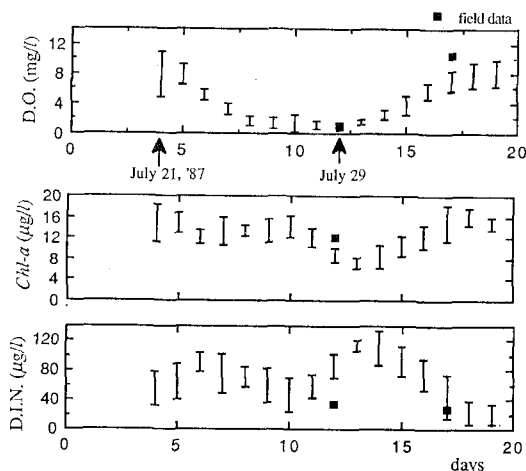


図-4 Three Fathoms Cove における '87年7-8月の主要水質項目の日変化(縦幅)

植物 *pl.* 非捕食死滅速度: $d_p [d^{-1}] = 0.02$, 植物 *pl.* 沈降速度: $v_s [m/d] = 1-1.3$, 海水交換率: $k_f [d^{-1}] = 0.1$, 単位動物 *pl.* 当たりの酸素消費量: $a_{oz} [mg O_2/mg C] = 2.67$, 動物 *pl.* 死滅速度: $k_z [d^{-1}] = \{0.2-0.25\}$ (1.047), D.O.N. 無機化速度: $k_{N1} [d^{-1}] = 0.05$ (1.08), 動物 *pl.* 同化率: $a_1 = 0.6$, 単位 *Chl-a* 当たりの窒素分: $a_{np} [\mu g N/\mu g Chl-a] = 10$, 単位動物 *pl.* 当たりの有機窒素分: $a_{nz} [\mu g N/mg C] = 10^{-3} a_{np}/CCHL$, 植物 *pl.* 死骸の D.O.N. への回帰分: $f_{ON} = 0.5$, D.O.N. の流入負荷: $B_{N1} [\mu g N/l/d]$, D.I.N. の流入負荷: $B_{N2} [\mu g N/l/d]$, 窒素摂取の半飽和定数: $K_N [\mu g N/l] = 15$, 動物 *pl.* 捕食速度: $C_0 [l/mg C/d] = 0.35$ (1.066), 動物 *pl.* 捕食の半飽和定数: $K_z [\mu g Chl-a/l] = 10-15$, 単位植物 *pl.* 摂取当たりの同化量: $a_{zp} [mg C/\mu g Chl-a] = 0.35$, 動物 *pl.* 非捕食死滅速度: $d_s [d^{-1}] = 0.1$, 底質中の単位 *Chl-a* 当たり有機炭素量: $a_{cp} [mg C/\mu g Chl-a] = 0.35$, 養殖魚の呼吸量: $F [g O_2/m^2/d] = \{1.5-4.5\}$ (1.047), 上付き 1) = Thomann ら (1987b), 2) = Maskell ら (1977) である。

6. 計算結果

(1) 1987年7月の養殖魚大量死

Three Fathoms Cove における '87年7-8月の環境条件(図-3)を与えて、式12-17を次の Rung-Kutta 法により0.5時間刻みで解いた(図-4)。ただし I_0 は毎時間観測値を与えている。初期値は26時間観測により得られた '87年7月21日00時のもので、この日は晴天の暑い日で *Chl-a* 濃度は $12 \mu g/l$ であった。この観測日の後、曇り日と雷雨や多雨の日が続いた。DO の計算値は最初の2-3日は高く、縦幅で示される1日のDO変動量は、晴天日ほど大きい傾向にある。その後DOは減少を続け、7月29日には危険濃度である $2 mg/l$ を1日中下回っている。この日午前1時頃現地では小潮と重なって、大量の魚が酸素欠乏で死に養殖魚のほとんどが被害を受けた。*Chl-a* 濃度の計算値と観測値はそれほど高くないものの、細胞数のデータは7月中旬から始まり28日をピークとする渦鞭毛藻のブルームの発生を示しており、最大細胞数は $0.5 \times 10^6/ml$ であった。この後細胞数は急減し、それに伴い酸素欠乏が起こった。14日目以後は日射量の増加に伴い DO, *Chl-a* が増加し、D.I.N. が減少している。現地では8月3日に高密度なケイ藻の繁殖が観測された。計算結果は、酸素欠乏の時期とその後の日射量の増大に伴う DO の増加を良く説明していると共に *Chl-a* の増減に伴う栄養塩の変動についても比較的良く再現している。この期間の全酸素消費における $SOD + F$, 植物 *pl.* 呼吸量, CBOD+NBOD の割合は、52:17:31である。以上の計算結果より、現地の DO 収支にとり日射量、降雨による流入負荷などの環境要因および底質酸素消費が重要な役割を果たしていることが判断できる。

(2) 動的パラメータの効果

モデルで動的に評価しているパラメータ I_s と $CCHL$ の効果を調べるために、 I_s をこの期間の平均値 $5 MJ/m^2/d$, $CCHL$ を室内実験での平均値 350 に固定した場合の日平均 DO 変動を、両者共に動的に評価した場合と比較した(図-5)。 $CCHL$ 一定の場合には酸素欠乏を再現できず、 I_s 一定の場合には DO の減少が大きすぎると共に、酸素欠乏後の DO の増加を説明できないなど、 $CCHL$, I_s を動的に決定することの重要性が示された。

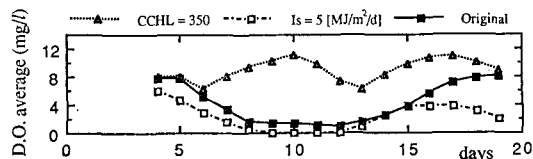


図-5 日平均 DO におよぼす動的パラメータの影響

(3) 感度解析

本モデルでは基本的なパラメータを観測値に基づいて決定していると共に、26時間観測データに基づいた DO 収支の最適化を行なっているため、網羅的に感度解析をすることは意味がない。ここでは植物 *pl.* の増殖に関するパラメータのうち非線形に作用する栄養塩の半飽和定数 K_n と *Chl-a* 以外の濁りによる消散係数 γ_0 (式-7 の第1項) に関して DO に及ぼす影響を調べる。図-6 は K_n を 1/2 と 2 倍にした時の DO への影響を調べたものである。DO は K_n の変化に対して鋭敏でなく、 $K_n=15$ 前後の値を用いれば、妥当な結果が得られる。

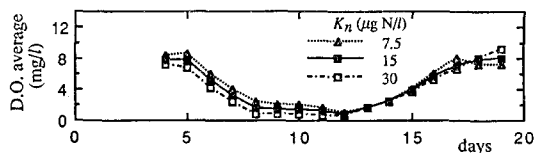


図-6 日平均 DO におよぼす半飽和定数の影響

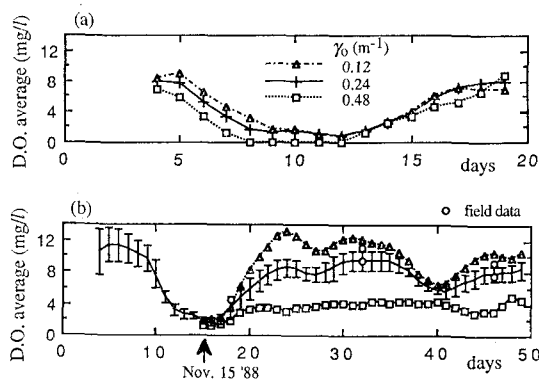


図-7 DO 変動におよぼす消散係数 γ_0 の影響: '87年 7-8 月 (a), '88年 11-12 月 ($\gamma_0=0.24$ に関しては日変動を示している) (b)

光合成を制御する要因の一つである光の消散係数は、*Chl-a* 濃度が低い場合には相対的に γ_0 の影響が大きくなる。この影響を調べるために、*Chl-a* 濃度が 8-18 $\mu\text{g/l}$ に変化する '87年 7-8 月と *Chl-a* 濃度が 5-10 $\mu\text{g/l}$ と低い値で推移した '88年 11月 15日以降の 35日間に 関して γ_0 を変化させて DO 変動におよぼす影響を調べた (図-7)。*Chl-a* 濃度が低い場合 (図-7b) には DO 変動は γ_0 に対して敏感であり、その決定は慎重に行なう必要があることが分かる。多数回実測に基づく $\gamma_0=0.24$ を用いることをより計算値は実測値と良い一致を示している。

7. おわりに

26時間連続観測データを用いて DO 収支モデルの生態的パラメータを最適化することにより、富栄養化した閉鎖性水域 Three Fathoms Cove における 1 日の DO 変動を説明できることを示した。次に、飽和日射強度、カーボン/クロロフィル比、底質酸素消費を日毎に変化する動的パラメータとして組み込んだ水質モデルにより、水質の悪化した夏期の水質計算を行なった。計算値は養殖魚の大量死の原因となった酸素欠乏を比較的良く再現しており、短期的 DO 変動推算に取って、動的パラメータを用いることが重要であることを示した。また低 *Chl-a* 濃度時には濁りに起因する光の消散係数の決定が DO 変動を左右することが分かった。

今後は、本モデルを他の水域へ適用すると共に、流れの影響が強い水域や成層化した水域へ応用するための理論拡張を行なっていくたい。

参考文献

- Ambrose, R. B., et al (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, *Limnology and Oceanography*, Vol. 19, pp. 1-12.
- Kremer, J. N. and S. W. Nixon (1978): A Coastal Marine Ecosystem, Springer-Verlag, 217 p.
- Lee, J. H. W., C. W. Li, and K. W. Choi (1985): Simulation of tidal circulation in a coastal bay: a comparative case study, *Proc. 21 st IAHR Congress*, Vol. 4, pp. 74-80.
- Lee, J. H. W. et al (1991a): Dissolved oxygen variation in a fish culture zone, ASCE, *J. of Environmental Engineering* (in press).
- Lee, J. H. W. et al (1991b): Forecasting of dissolved oxygen in a marine fish culture zone, ASCE, *J. of Environmental Engineering* (in press).
- Mann, K. H. (1982): Ecology of coastal waters- a systems approach, *Studies in Ecology* Vol. 8, Blackwell.
- Maskell, J. M. and N. V. M. O'dd (1977): A mathematical model of the oxygen balance in a well-mixed estuary, *Wallingford Hydraulics Research Station Rep.* IT171.
- 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, *Limnology and Oceanography*, 7, pp. 137-150.
- Thomann, R. V. (1987a): Systems analysis in water quality management, *Proc. WATERMATEX 87; 1 st IAWPRC Conf. on Systems Analysis in Water Quality Management*.
- Thomann, R. V. and J. A. Mueller (1987b): PRINCIPLES of Surface Water Quality Modelling and Control, Harper and Row, 644 p.