

北方の閉鎖性海域に適した低次生態系モデル構築に向けた現地実験

Field Observations for Development of the Ecosystem Model in Cold Region Enclosed Sea

山本 潤¹・林田健志²・峰 寛明³・牧田佳巳⁴・山下彰司⁵・田中 仁⁶

Jun YAMAMOTO, Kenji HAYASHIDA, Hiroaki MINE,
Yoshimi MAKITA, Syoji YAMASHITA and Hitoshi TANAKA

The purpose of this study was to estimate biological parameters for the ecosystem model especially in cold region estuary. Because the phytoplankton is primary producer in the ecosystem, it is necessary to measure the growth to the accuracy of the ecosystem calculation. Field investigations including Phytoplankton's incubation experiment were conducted at Lake Furen in Hokkaido. From the experiment, we had an equation showing the relation between light - photosynthesis of cold region phytoplankton. The maximum photosynthetic rate and optimum light intensity were 3.3(1/day) and 34.0(W/m²) respectively at 17.8°C. They indicate that the phytoplankton grows up in conditions of low temperature and a little quantity of light, compared with the general parameters used in Japan.

1. はじめに

閉鎖性海域の水質変動を高度に再現・予測するため、低次生態系をモデル化した計算が広く用いられている。この中で使用される生物パラメータはその海域に応じた値を用いることが望ましいが、パラメータ数が多い上にその検証は困難であり、海域の特性が同様であると仮定して一般に使用されている値をそのまま用いるか、水質の計算結果が観測結果と合うように調整する例が多い。著者らは本州で実施されている低次生態系計算を北海道のような寒冷沿岸域に適用する際に、実際に現地に生息している低温域を好む生物に合わせてパラメータを適切に設定し直す必要があると考え、生態系の中で基礎生産を担っている植物プランクトンの培養実験を現地において行い、その成長式を算定した。

水質変動の再現計算および検証は、北海道東部の根室湾に面する汽水湖である風蓮湖を対象に行った。ここでは、上流に位置する酪農地帯の水質負荷流出抑制対策の効果を予測・評価することを目的として、著者らが2006年より農業・河川等の研究チームと連携して調査を実施している。前報(山本ら, 2007)では、風蓮湖の湖口付近は清浄な外海水との海水交換によって湖内の水質が良好に保たれるが、奥部では外海水の影響が届かず、風蓮

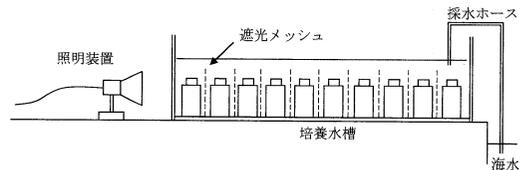


図-1 現地培養実験の模式図 (走古丹漁港岸壁)



写真-1 現地での培養容器の設置状況

川等から流入する陸域由来の水質負荷によって水質悪化を引き起こしているとの観測結果を示した。このような風蓮湖の水質の状況は窒素・リン負荷の高い陸水と清浄な外海水との割合として塩分を用いて概ね説明できた。しかし、リン酸態リン・硝酸態窒素等の栄養塩類は、塩分のように保存物質として扱うことに疑問が残り、風蓮湖内部での低次生態系の活動による消費を考慮する必要性が示唆された。

本稿では、これらの現地培養実験の概要を紹介するとともに、ここで得られた現地観測結果や、現地培養実験から取得したパラメータを用いた計算結果、および従来のパラメータによる計算結果の比較を行い、現地で取得した生物パラメータを使用する有効性を示した。また、低次生態系モデルを北方海域に適用する際の問題について

- | | | |
|--------|------|--------------------|
| 1 正会員 | 博(工) | (独法)土木研究所, 寒地土木研究所 |
| 2 | 環境修 | (株)エコニクス |
| 3 | | (株)エコニクス |
| 4 正会員 | | 北海道開発局, 網走港湾事務所 |
| 5 正会員 | | (独法)土木研究所, 寒地土木研究所 |
| 6 フェロー | 工博 | 東北大学教授 工学研究科土木工学専攻 |

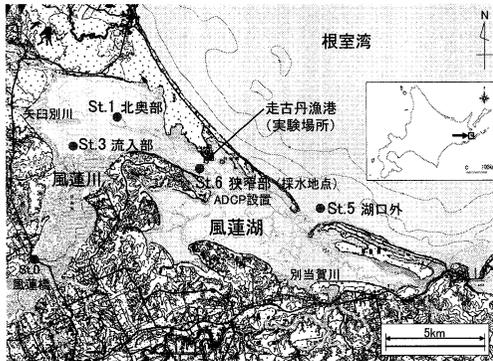


図-2 調査位置図 (風蓮湖及び風蓮川下流)

でも考察したので、それらの結果を報告する。

2. 現地観測の方法

(1) 植物プランクトンの現地培養実験

植物プランクトンの光合成は光条件に大きく依存するため、特に光に関するパラメーターが必要である。そこで、風蓮湖の植物プランクトンによる光-光合成曲線を作成するため、風蓮湖で採取した植物プランクトンの培養を数段階の光条件の下で行い、培養前後の試水及び植物プランクトン中の安定同位体比の変化から光合成量を推定した。実験の模式図を図-1、培養水槽の設置状況を写真-1に示した。試料となる植物プランクトンは、図-2に示す風蓮川流入部 (St.3) から湖口を経て外海 (St.5) に至る経路上のほぼ中間点である狭窄部 (st.6) において2007年9月20日に採取した。植物プランクトンの活性は光、水温、栄養塩など環境条件が大きく影響するため、培養実験は採取後の活性の低下を最小限にするように採取地点近傍の走古丹漁港岸壁において行った。採取した試料を250ml ずつポリカーボネイト製の容器に分注し、 $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ を添加して、現地に設置した水槽内にて植物プランクトンの培養を4時間行った。培養中は、天然光を遮断するために水槽の周囲5面を板などで囲い、残りの1面から照明装置 (メタルハライドランプ) により光を当てた。培養容器の位置は、直読式の光量子計で照度を測定しながら、遮光メッシュで照度の調節を行って決定した。培養時の栄養塩濃度は、光合成の栄養塩制限にならない濃度とするため硝酸態窒素及びリン酸態リンを添加し、それぞれ1.1mg/l、0.19mg/lとした。また、現地水温を維持するため、ポンプにより汲み上げた現地海水を連続的に水槽内に循環させた。培養後、試料中の安定同位体 ^{13}C をGF/Fフィルターを用いて濾過捕集し凍結保存して持ち帰った。

(2) 光合成量の推定方法

元素分析計 (EA1112)、質量分析計 (DELTA V Plus) を用いて ^{13}C およびPOCの分析を行い、分析結果より光合成量の推定を行った。光合成により、添加した安定同位体 (^{13}C) は植物プランクトン体内に取り込まれることから、培養実験前後で植物プランクトン体内の安定同位体比は変化する。この安定同位体比と培養後のPOC (植物プランクトン炭素量) を分析することにより、光合成量を推定することができる。光合成量推定の計算式を以下に示す。

培養前後での植物プランクトン中の ^{13}C 量の収支は、Hama (1983) より(1)式で与えられる。

$$a_{is} \times C = a_{ns} \times (C - \Delta C) + a_{ic} \times \Delta C \quad (1)$$

ここで、 a_{is} は培養後、 a_{ns} は培養前のPOC (植物プランクトン) 中の ^{13}C 存在比 (%), a_{is} は $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ 添加後の全無機炭素 (培養海水) 中の ^{13}C 存在比 (%) である。 C は培養後のPOC濃度 ($\mu\text{gC/L}$), ΔC は培養によって増加したPOC濃度 ($\mu\text{gC/L}$) である。(1)式を光合成速度 P について整理すると、(2)式が得られる。

$$P = \frac{\Delta C}{t} = \frac{C \times (a_{is} - a_{ns})}{t \times (a_{ic} - a_{ns})} \times \frac{1000}{x} \quad (2)$$

なお、 P は光合成速度 ($\text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$), t は培養時間4(h), x は試料の体積250 (mL) である。また、添加した $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ 中の ^{13}C 存在比は99.0%, a_{ns} は1.1%であることを考慮して、 a_{ic} はそれぞれの濃度比にそれぞれの ^{13}C 存在比を乗じて算出した。クロロフィルa濃度当たりの光合成速度である比光合成速度 P' ($\text{mgC}/(\text{mgChl.a}) \cdot \text{h}$) は(2)式を培養前のクロロフィルa濃度 ($\text{mgChl.a}/\text{m}^3$) で割ることで得られる。ここで、 $C/\text{Chl.a}$ 比として通常50 (Kawamiya, 1995) を用い、 P' を1日あたりに換算して、低次生態系モデル内のパラメーターとして使用する。ただし、換算された P' (1/day) は、自然環境下における1日の成長速度の計算式ではない。

(3) 風蓮湖の水質調査

水質調査は前報とほぼ同様に行った。図-2中の風蓮川からの陸水が風蓮湖を経由して根室湾に出る経路上に観測点を設置し、2007年8月19日、9月20日、10月31日に水質観測を行うとともに、この期間にクロロフィルa等の連続観測を行った。主な水質分析項目は、DO、COD、pH、塩分、クロロフィルa、栄養塩類、大腸菌群数、動植物プランクトンの種類別出現集数等である。

3. 観測結果と考察

(1) 光合成量の推定

推定された比光合成速度は、光量子密度20~93 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の範囲では最大値まで増加し、93~2,000 $\mu\text{mol}/$

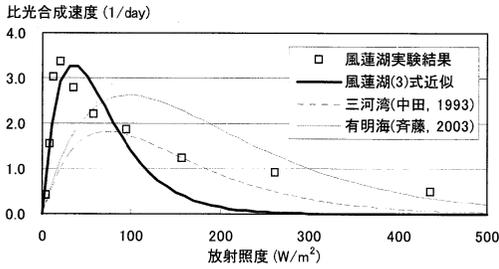


図-3 各海域の光-光合成曲線の比較

($m^2 \cdot s$)の範囲では減少した。この結果を低次生態系モデルで使用する生物パラメータとして利用するため、光-光合成曲線の作成を行った。まず、光子密度 ($\mu mol/(m^2 \cdot s)$) をメタルハライドランプ用換算値である4.59 (Thimijan, 1983) で割ることで、太陽光の放射照度 (W/m^2) に換算した。曲線の推定は、比光合成速度 P' を算出した現地実験結果に、低次生態系モデルで一般的に用いられている光-光合成曲線関数である(3)式 (Steele, 1962) を最小二乗法で当てはめることで行った。誤差判定は下二桁とした。推定された光-光合成曲線を図-3に示す。(3)式の P' は一日あたりに換算された比光合成速度、 $I(t)$ は照度 (W/m^2)、 $\alpha(T)$ は水温 $T^\circ C$ における最大可能成長速度 (1/day)、 I_{opt} は最適光強度 (W/m^2) である。

$$P' = \alpha(T) \times \frac{I(t)}{I_{opt}} \exp \left(I - \frac{I(t)}{I_{opt}} \right) \quad (3)$$

$$\alpha(T) = \alpha_0 \times \exp(0.0633 \times T) \quad (4)$$

なお、観測で得られた最大可能成長速度3.3 (1/day) は、水温 $17.8^\circ C$ での値であるため、(4)式の光合成速度の温度依存の関数 (中田, 1993) を用いて $0^\circ C$ での値に換算すると、 α_0 は1.07(1/day)となる。図で近似された曲線は照度 $100 W/m^2$ 以上で過小評価になるが、観測期間中の St.5の水深5m 及び St.6の水深3m における水中照度が概ね $20 \mu mol/(m^2 \cdot s)$ 以下の低い範囲で日変動しており、その影響は少ないと考えられた。

(2) 他の海域との比較

図-3には、比較のために他の海域の低次生態系計算で使用されている光-光合成曲線も示した。表-1にはそれらの曲線のパラメータを示した。本州以南で使用されている値と比較し、低温における植物プランクトンの成長速度が高く、少ない光量で最大の成長が行われることを示している。これは、植物プランクトンが北方域及び風蓮湖の光条件に適応していることが理由だと考えられる。表-2には採水地点での植物プランクトンの種構成を示す。

表-1 計算で使用される主な生物パラメータの比較

低次生態系計算の対象水域	$0^\circ C$ での最大可能成長速度	最適光強度
風蓮湖 (本研究)	1.07(1/day)	34 (W/m^2)
三河湾 (中田, 1993)	0.59(1/day)	73 (W/m^2)
有明海 (斉藤, 2003)	0.851(1/day)	97 (W/m^2)

表-2 植物プランクトンの主な出現種 (2007年9月20日採水分)

地点	分類	種類名	細胞数 (細胞/L)	組成比 (%)
St.1	珪藻綱	<i>Skeletonema costatum</i>	66,000	40.0
	クリプト藻綱	<i>Cryptomonas acuta</i>	39,000	23.6
St.3	クリプト藻綱	<i>Cryptomonas acuta</i>	1,838,400	81.0
	緑藻綱	<i>Pyramimonas sp.</i>	398,400	17.5
St.5	珪藻綱	<i>Rhizosolenia stolterfothii</i>	87,600	16.7
	珪藻綱	<i>Skeletonema costatum</i>	76,200	14.5
	珪藻綱	<i>Chaetoceros affine</i>	62,200	11.8
St.6	珪藻綱	<i>Skeletonema costatum</i>	28,200	17.6
	珪藻綱	<i>Rhizosolenia stolterfothii</i>	23,400	14.6
	クリプト藻綱	<i>Cryptomonas acuta</i>	23,000	14.4
	珪藻綱	<i>Chaetoceros affine</i>	21,000	13.1

表-3 最適光強度の文献値との比較

種類名	最適光強度 (W/m^2)	文献
<i>Skeletonema costatum</i> (珪藻)	54~65	Ryther(1956) 三河湾
<i>Thalassiosira nordenskioldii</i> (珪藻)	22 培養水温($0 \sim 10^\circ C$)	Suzuki(1995) サロマ湖
	44 培養水温($15^\circ C$)	Suzuki(1995) サロマ湖

図-4 最大可能成長速度の文献値との比較 (Carol, 1996)

最大可能成長速度 ($mgC/(mgChl.a) \cdot h$)	備考
2~14	全体的な範囲
2~3.5	低温($2 \sim 4^\circ C$)
6~10	高温($8 \sim 18^\circ C$)
0.2~1.0	低栄養塩海域
9~17	高栄養塩・高温海域
6.9	本実験(培養水温 $17.8^\circ C$)

培養試験の試料採取地点である St.6では、珪藻類である *Skeletonema costatum* をはじめ数種が拮抗している。最適光強度や成長速度は、種や生息域、水温等によって異なると考えられており、本実験のように自然下の海水を試料とした場合には、試料中に複数の種が混在し、最適光強度が採取箇所が生息する種全体の特性を示す値として得られている。このため、既往文献値と単純に比較することはできないが、その特性を判断する目安として、

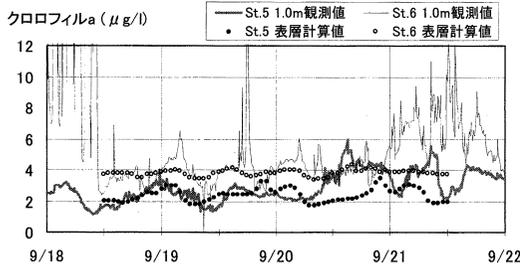


図-4 クロロフィル a の観測値と計算値の比較

最適光強度や最大可能成長速度に関して他の文献値との比較を行った。室内試験の実験条件などから最適光強度を確認することができた文献とその値を表-3に示す。比較のため、単位は全て放射照度 (W/m²) に換算した。表-4では最大可能成長速度をモデル用単位でなく、光合成速度の一般的な単位である mgC/((mgChl.a)・h) で示す。得られた最大可能成長速度3.3 (1/day) は、2. (2)の方法により単位換算し、比較を行った。本実験では培養水温17.8°Cで6.9mgC/ ((mgChl.a)・h) が得られたことから、表-4の値と比較しても、妥当であると考えられる。

4. 培養実験結果を用いた風蓮湖の低次生態系計算

(1) 風蓮湖の低次生態系の再現方法

風蓮湖の物理場の計算は、水平50m×50m 格子、層厚1m のマルチレベル密度流モデルで行った。計算方法は前報の通りである。低次生態系の計算には山口ら (1998)、中田 (1993) による生態系モデルを用いた。各生物変数は、(5)式の移流拡散方程式によって計算される。

$$\frac{dB}{dt} + u \frac{dB}{dx} + v \frac{dB}{dy} + w \frac{dB}{dz} = Ac \cdot \left(\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(Kc \cdot \frac{\partial B}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right) \quad (5)$$

式中のBは生物変数、u、v、wはそれぞれx、y、z方向の流速、Ac、Kcは水平・鉛直方向の拡散係数、右辺最終項は本生態系モデルによって計算される生物化学変化項である。あらかじめ計算した物理量のu、v、w、Kc、水温、塩分の1時間毎のデータや気象データ特別値を30秒毎に補間して生態系モデルの計算に用いた。河川流入や沖側の境界には9月20日8:00~12:00や10月31日10:00~11:00に採取した観測結果を一定値として用い、観測日時を挟む数日間の低次生態系の再現を試みた。

植物プランクトン量は、クロロフィル a の観測値を2. (2)に示した Kawamiya ら (1995) によるC/Chl.a 比50により炭素量に変換して用いた。栄養塩類は、河川流入部と沖側の観測値を塩分濃度に比例した配分として設定し、

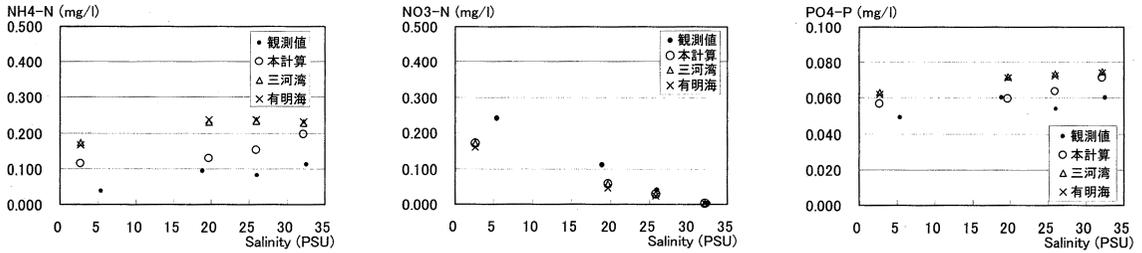
数日間の予備計算により安定した時点で本計算の初期値とした。クロロフィル a の観測値と計算値を図-4に示す。観測値はセンサーへの付着生物や浮遊ゴミ等の影響により、特に湖内側でのデータの乱れが大きく、センサーの設置やメンテナンス直後等、信用できるデータの使用が限られた。データが安定している9月18日正午から3昼夜の観測値を計算結果と比較すると、当計算により概ね植物プランクトンの動態が再現できていることがわかる。

(2) 計算結果の考察

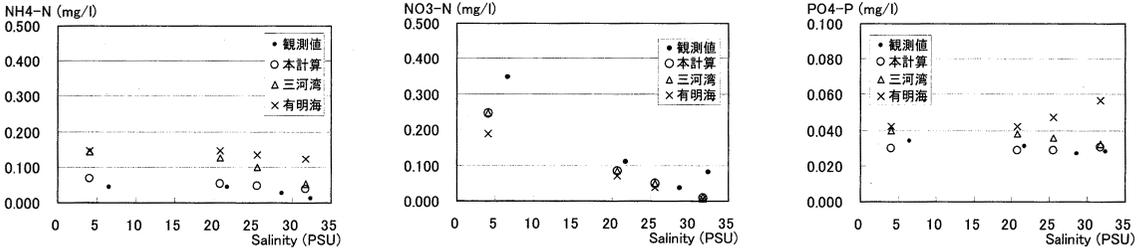
風蓮湖のように陸水と外海水の水質に明確な差がある場合には、湖内の生物活動による窒素・リンの消費を無視し、それぞれの水質を塩分で比例配分する簡易な方法でも湖内の水質分布をある程度は把握することが可能である。本計算では、陸水と外海水の混合の他に、湖内での植物プランクトンによる消費等を考慮している。上流側の塩分の低い地点から外海に至る各観測地点において観測値と計算値を比較した結果を図-5に示す。本計算結果は概ね観測結果を再現しており、特に図-5(2)のケースでは流入部を除く各地点において良好な結果を示しており、生物活動の影響を考慮することが重要であることがわかる。なお、流入部の水質は淡水域での水質変動の影響を強く受けるため、これを考慮していない場合には時間帯によっては計算精度が大きく劣ることになる。図中には、表-1の生物パラメータのみを変えて計算を行った結果と比較しているが、三河湾や有明海のパラメータを用いた計算結果は本計算結果よりも観測値から外れていくことがわかる。また、植物プランクトンがアンモニウム塩を選択摂取するため、硝酸態窒素よりアンモニア態窒素にその傾向が見られている。本州以南のパラメータを風蓮湖で用いた場合、光合成量を過小に見積もることになり、栄養塩の消費が過小となった結果、各地点での栄養塩濃度は過大に算出されたものと思われる。これは、図-3で示した光-光合成曲線の特性を反映しているためであり、風蓮湖で得たパラメータを用いた方が風蓮湖の水質を良く再現できると思われる。

5. おわりに

現地培養実験によって、風蓮湖の植物プランクトンの最大可能成長速度および最適光強度の生物パラメータを取得した。本州以南で一般的に使用される値と比較して北方海域の特徴が見られており、これを考慮して計算したところ、比較的良好な結果が得られた。北方の閉鎖性海域において生態系モデルを適用する際には、現地において植物プランクトンの光合成に関わるパラメータを取得し、それをを用いて計算を行うことが精度向上のため有効であることが示された。なお、本現地実験は水質問題が生じやすい水温の高い時期に行ったが、周年の傾向を



(1) 2007年9月20日 8:00~12:00 の観測値と計算値との比較



(2) 2007年10月31日 10:00~11:00 の観測値と計算値との比較

図-5 塩分による地点別の水質分析値と計算値の比較

把握するため、特に低水温・低照度となる冬季~春季においても同様の培養試験を行い、北方海域での(4)式の適用性も含めて検証することが望ましい。春のブルミング等を対象として各地のパラメーターによる計算結果を比較した場合には、本研究の意図する効果がさらに顕著に見られるものと予想される。

ただし、これらのパラメーター等の設定以外にも、河川流入部の扱いや初期値、境界条件の設定の仕方等による計算結果の違いが大きいと考えられ、生物パラメーター以外は同条件で行っているものの、その感度に影響が生じることに注意しなければならない。生態系計算を精度良く行うには、より多くのデータを取得して、さらに検討をすすめる必要がある。

本研究は北海道開発局による「北海道における港湾・漁港等沿岸構造物整備の機能向上に関する研究」、及び寒地土木研究所による「寒冷地港内水域の水産生物生息場機能向上と水環境保全技術の開発」、「大規模農地から河川への環境負荷流出抑制技術の開発」の一環として実施された。現地培養実験を進めるにあたり、北海道大学大学院環境科学院の工藤勲准教授はじめ研究室の皆様にご指導を頂いた。関係諸氏に厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

齊藤周・北沢大輔・佐藤徹 (2003) : MEC モデルを用いた有明海生態系シミュレーション, 第17回流体力学シンポジウ

△, E9-1.
 中田喜三郎 (1993) : 生態系モデル-定式化と未知のパラメータの推定法-, Journal of Advanced Marine Technology Conference, Vol.8, pp.99-138.
 山口創一・経塚雄策 (1998) : 有明海の物理環境のシミュレーション, MEC モデルワークショップ (第3回), MEC Ocean Model ユーザー会, pp.159-164.
 山本潤・牧田佳巳・山下彰司・田中仁 (2007) : 風蓮湖に陸域からの汚濁負荷が及ぼす影響に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1006-1010.
 Carol M. LALLI and Timothy R. PARSONS (1996) : 生物海洋学入門, 第2版, 講談社サイエンティフィック, pp.1-242.
 Hama, T., Miyazaki, T., Ogawa, Y., Iwakuma, T., Takahashi, M., Otsuki, A. and Ichimura, S. (1983) : Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using stable ¹³C, Marine Biology, Vol.73, pp.3136.
 Kawamiya, M., Kishi, M. and Suginoara, N. (1995) : An ecological-physical coupled model applied to Station papa, Journal of Oceanography, Vol.51, pp.635-664.
 Ryther, J. H. (1956) : Photosynthesis in the ocean as a function of light intensity, Limnology and Oceanography, Vol.1, pp.61-70.
 Suzuki, Y. and Takahashi, M. (1995) : Growth responses of several diatom species isolated from various environments to temperature, Journal of Phycology, Vol.31, pp.880-888.
 Steele, J. H. (1962) : Environmental control of photosynthesis in the sea, Limnology and Oceanography, Vol.7, pp.137-150.
 Thimijan, R. W. and Heins, R. D. (1983) : A review of conversion constants and procedures for photometric, radiometric, and quantum light units of measure, Hort. Science, Vol. 18(6), pp.818-822.