

衛星リモートセンシングによる宍道湖の 一次生産量モニタリングの試み

作野裕司¹・松永恒雄²・高安克己³・國井秀伸³
中村幹雄⁴・六川修一⁵

Monitoring primary production in Lake Shinji using satellite remote sensing

Yuji Sakuno¹, Tsuneo Matsunaga², Katsumi Takayasu³, Hidenobu Kunii³,
Mikio Nakamura⁴ and Shuichi Rokugawa⁵

Abstract: To monitor the gross primary production (P_g) in Lake Shinji, a simple algorithm of the P_g estimation using chlorophyll-a (Chl.a) derived from satellite remote sensing data and the maximum primary production per Chl.a (P^Bm) derived from the in-situ water temperature (T_w) was proposed. Some assumptions for developing the algorithm were verified using field survey data obtained in the lake, 1995-1998. And the algorithm was applied to images and T_w data of different dates in the Lake. The following results were obtained. 1) The area average SPOT/HRV band ratio after offset removal showed high correlation ($R=0.98$) for the area average in-situ Chl.a. 2) The primary production per Chl-a (P^B) almost reached saturation ($\doteq P^Bm$) under the irradiance below $400\mu\text{Ein}/\text{m}^2/\text{s}$ condition. 3) The P^Bm showed relative high correlation ($R=0.71-0.73$) for T_w . 4) The estimated P_g using the algorithm changed within the range of about $50-700\text{mgC}/\text{m}^3/\text{hr}$ in the lake.

Key words: Lake Shinji, monitoring, primary production, remote sensing

1. はじめに

近年、宍道湖に生息するシジミによる水質浄化能力を評価する目的で、複数の物質循環モデル (Nakamura *et al.*, 1988; 山室, 1997) が提案されている。しかしその物質循環モデルの中で最も重要な

パラメータの一つである一次生産量は時空間的な変動が大きく、その広域分布の推定は難しかった。

そこで筆者らは宍道湖全域における一次生産量を推定するために、1995年から1999年まで高分解能衛星センサを用いた一次生産量モニタリングの技術開発に関わる現地調査を継続して行ってきた (例えば

¹ 広島大学工学部 Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima, 739-8527, Japan
E-mail: ysakuno@naoe.hiroshima-u.ac.jp

² 東京工業大学大学院総合理工学研究所 Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, 226-8502, Japan

³ 島根大学汽水域研究センター Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, Matsue, 690-8504, Japan

⁴ 島根県内水面水産試験場 Shimane Prefectural Fisheries Experimental Station, Hirata, 691-0076, Japan

⁵ 東京大学大学院工学系研究科 Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku 113-8656, Japan

作野ほか, 1996). 一般に衛星データを用いて一次生産量推定を行う場合, 通常衛星データからクロロフィル a 濃度 (以下 Chl.a と略す) を推定する過程 (第 1 段階) と Chl.a から一次生産量を推定する過程 (第 2 段階) に分けられる. 筆者らはまず第 1 段階についてまとめ, ある一時期の衛星データから宍道湖の表層 Chl.a 分布を推定する比演算回帰モデルを提案した (作野ほか, 1999). この結果を受け, 本報では多時期の衛星データでも同様の Chl.a 推定モデルが適用可能であるか, そしてまだ研究に着手していない Chl.a から一次生産量を推定する方法についてそれぞれ検討したのでここに報告する.

2. 衛星データを用いた宍道湖用簡易一次生産量推定アルゴリズムの提案

筆者らは 1997 年 10 月 9 日の衛星データと現場データを使って宍道湖の表層 Chl.a 分布推定を行い, SPOT/HRV センサのバンド 1 (XS1:0.50–0.59 μm) とバンド 2 (XS2:0.61–0.68 μm) の比演算モデルが Chl.a 推定に有効であると報告した (作野ほか, 1999). 多時期の衛星データについても同様のモデルが有効であるとする, 宍道湖の表層 Chl.a と衛星データとの関係は次式で表せる.

$$C = a (XS1/XS2) + b \quad (\text{式 2-1})$$

ここで, C は Chl.a, XS1 及び XS2 はオフセット除去後 (暗画素法と呼ばれる簡便大気補正後) の SPOT/HRV データの DN, a 及び b は定数である. ただし宍道湖の Chl.a は上下層間で差が数 $\mu\text{g/l}$ と小さく (橋谷他, 1991), 上下間の濃度差は均一とする.

一方, 一次生産量を衛星データから導く場合, 一般に以下のような式が用いられる.

$$P_g = P^B C \quad (\text{式 2-2})$$

ここで, P_g は総一次生産量, P^B は「Chl.a あたりの総一次生産量」である. また P^B は通常, 照度や水温等の関数として表され, 一般にその設定は観測値が使用される. しかし, 宍道湖において P^B の観測例は少なく, その設定方法の議論もなされていない. そこで, ここでは衛星が飛来する午前 10~12 時前後の時刻には宍道湖の P^B が最大 (P^Bm) となり (森本ほか, 1977), かつ良好な衛星画像が取得できるのは晴天の日に限られ照度は P^B の律速条件になら

ないと仮定して式 2-3 を以下の式で表す.

$$P_g = P^Bm C \quad (\text{式 2-3})$$

また P^Bm は温度の関数であることが知られており (Epply, 1972; Balch and Byrne, 1992), 霞ヶ浦でも P^Bm と水温は高い相関があることが報告されている (岩熊・安野, 1981). 宍道湖でも霞ヶ浦と同様, 水温の関数で表せると仮定し, P^Bm と水温の関係を以下の式で表す.

$$P^Bm = cT + d \quad (\text{式 2-4})$$

$$\text{または } P^Bm = c' \text{EXP}(d'T) \quad (\text{式 2-5})$$

ここで, T は水温, c , d , c' , d' はそれぞれ定数である. ただし宍道湖は水平・鉛直の水温差が平均 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 程度以下と小さいことから (橋谷ほか, 1991), P^Bm の値も鉛直的に均一とする.

以上の仮定が妥当であれば, P_g は Chl.a と水温の関数で求めることができ, 衛星データと水温データを使って宍道湖の総一次生産量を比較的簡便に推定することが可能となる.

3. 宍道湖用簡易一次生産量推定アルゴリズムにおける仮定の検証

3.1 多時期衛星データによる比演算モデルの妥当性

3.1.1 使用データ

式 2-1 のモデルの検証に使用したデータは, 1995 年 11 月 7 日, 1996 年 10 月 11 日, 1997 年 8 月 8 日, 10 月 9 日, 1998 年 3 月 3 日, 3 月 4 日に筆者らが収集した衛星 (SPOT/HRV) / 現場 (Chl.a) データセットである. Chl.a の値は現場で採水した試料を実験室に持ちかえり, アセトン・抽出吸光度法により求めた. 天候や調査機器等の関係上, 調査日によってデータの取得数は異なるが, 基本的な測点は図 1 に示す通りである. また取得した水質データ (Chl.a) データを取得した同地点で取得した透明度, SS の各データも含む) の概要を表 1 に示す.

衛星データは, 地上基準点 (GCP) による精密幾何補正処理により現場調査測点と対応づけた画素の DN を使った. また各測点の DN は, センサノイズ及び測点位置決定誤差の影響を軽減する目的で, 現地調査測点を中心とした 3×3 画素 ($60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$) の平均値を用いた. さらに大気補正には暗画素法 (作野他, 1999) を採用し, 清浄な日本海域の DN を各

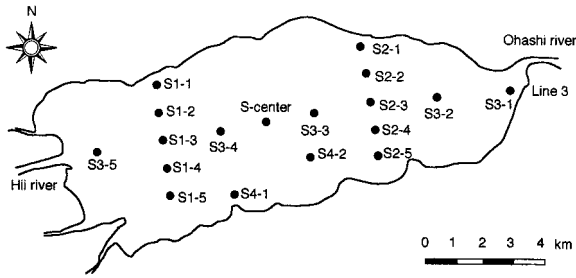


図1 宍道湖における基本調査測点.

Fig.1 The standard stations of water quality survey in Lake Shinji.

測点の DN から差し引いた.

3.1.2 結果及び考察

図2 (a), (b) はそれぞれ, オフセット除去前の SPOT/HRV の比演算値と現場表層 Chl.a の関係を示している. (a) と比べて (b) は全データが直線的に並び, 両者の相関は非常に高い (相関係数 0.81). これは宍道湖の HRV データにおけるオフセット除去が時期間の大気補正処理手法として, 十分な効果があったことを示している. しかし図2 (b) で各測定日ごとの値を見ると, 両者の相関は悪く, ここに示した回帰式では各測定日ごとの Chl.a 分布を推定する式としては不適當である. このような問題は多時期の Landsat/TM データを使った東京湾の表層

表1 1995~1998年に宍道湖衛星同期調査で得られた水質データのレンジ.

Table 1 Ranges of simultaneous water quality survey data with satellite observation in Lake Shinji, 1995-1998.

| No. | Date | Chl-a ($\mu\text{g/l}$) | SS (mg/l) | Transparency (m) | Temperature ($^{\circ}\text{C}$) |
|-----|--------------|---------------------------|----------------------|------------------|------------------------------------|
| | | Min-Max | Min-Max | Min-Max | Min-Max |
| 1 | 7 Nov. 1995 | 19.2-29.3 | 3.7-5.7 | 1.3-1.7 | 13.8-14.6 |
| 2 | 11 Oct. 1996 | 14.1-34.1 | 3.4-7.2 | 1.0-1.5 | 19.9-20.4 |
| 3 | 8 Aug. 1997 | 26.7-36.9 | 3.2-8.0 | 0.9-1.1 | 26.9-27.7 |
| 4 | 9 Oct. 1997 | 36.7-68.8 | 6.8-10.5 | 0.7-1.0 | 19.8-20.9 |
| 5 | 3 Mar. 1998 | 1.4-11.7 | 3.6-7.2 | 1.0-1.6 | 8.3-8.9 |
| 6 | 4 Mar. 1998 | 4.2-8.2 | 2.4-8.4 | 1.3-1.5 | 8.4-9.1 |

Chl.a 推定例 (水尾, 1998) でも報告されている. このことは現状の衛星センサデータから1つの Chl.a 推定式で全測定日の Chl.a 分布を推定することの難しさを示しているといえる. これは, 湖内や湾内の表層 Chl.a の濃度差に比べて時期的な表層 Chl.a の濃度変化の方が大きいことに起因すると考えられる.

一方, 図3は図2 (b) を各測定日の SPOT HRV の比演算値と現場表層 Chl.a のそれぞれ面平均値をとった時の関係を示した図である. この図において両者の相関は高い (相関係数 0.89) ことがわかる. このことは, 衛星データからただ1つの回帰式で多時期における宍道湖の面平均表層 Chl.a を比較的精度よく推定することができる可能性を示している. そこで, 式 2-1 を次式に修正した場合, 多時期衛星

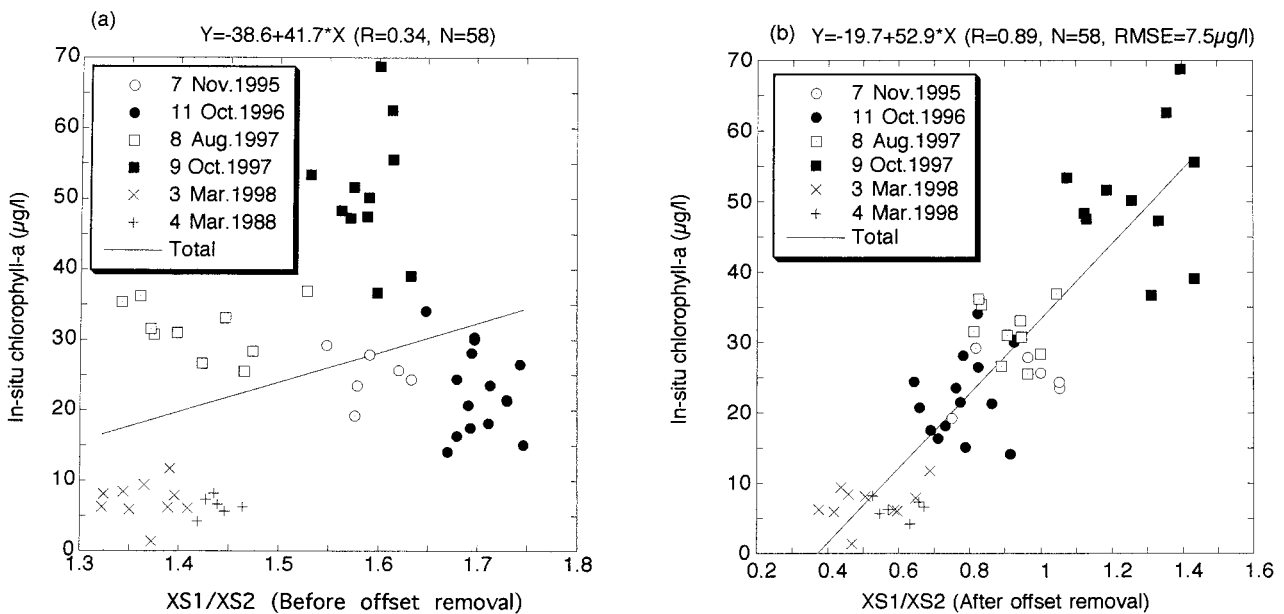


図2 宍道湖における SPOT/HRV の比演算値と現場表層クロロフィル a 濃度との相関. (a) オフセット除去前, (b) オフセット除去後.

Fig.2 Correlation between SPOT/HRV band ratio and the in-situ surface chlorophyll-a concentration in Lake Shinji. (a) before offset removal, (b) after offset removal.

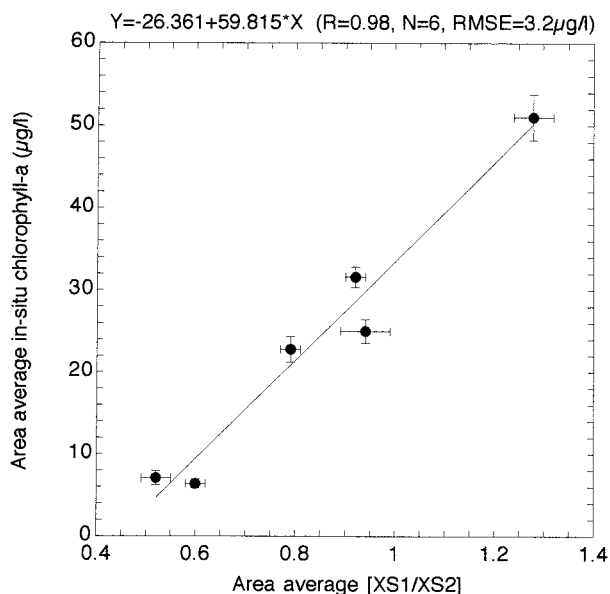


図3 宍道湖における SPOT/HRV の面平均比演算値と現場の面平均表層クロロフィル a 濃度との相関。

Fig.3 Correlation between the area average of SPOT/HRV band ratio and the average in-situ surface chlorophyll-a concentration in Lake Shinji.

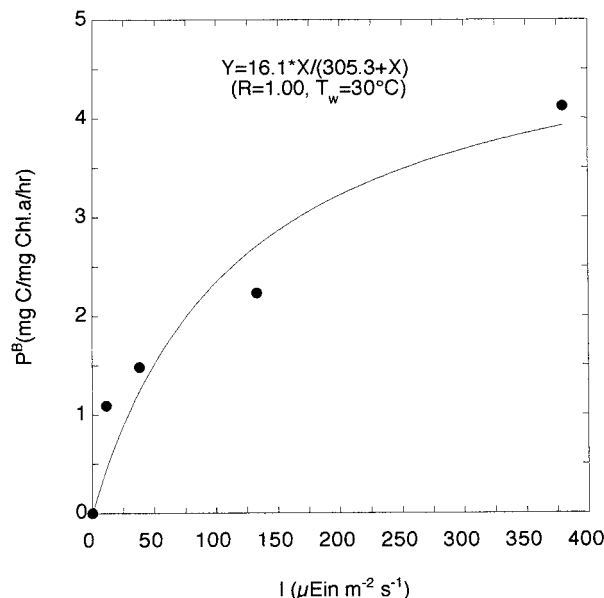


図4 宍道湖湖心における光 (I) - 一次生産量 (P) 曲線の例 (1994年8月1日). P と I は國井 (未発表) のデータを使用。

Fig.4 Example of P - I curve at the center of Lake Shinji. P and I data from Kunii (unpublished).

データによる比演算モデルは宍道湖の表層 Chl.a 推定に妥当だといえる。

$$C_{ave} = a (XS1/XS2)_{ave} + b \quad (\text{式 3-1})$$

ここで、 C_{ave} は表層 Chl.a の面平均値、 $(XS1/XS2)_{ave}$ は SPOT/HRV の比演算値の面平均値、 a 、 b はそれぞれ定数である。

3.2. 「Chl.a あたりの一次生産量」の光依存性及び温度依存性について

3.2.1 使用データ

宍道湖における光 (照度) と一次生産量のデータは、國井 (未発表) のデータを用いた。このデータは、1994年8月から1995年11月まで毎月宍道湖湖心表層で採取した14試料を用いて、実験室において種々の照度 (I) 下で明暗瓶法により一次生産量を測定したものである。本報では國井が測定した各光量下の純一次生産量と呼吸量を足すことによって、総一次生産量を求めた。また一次生産量と同じ湖水試料で測定された水深0mと1mにおけるChl.aの平均値を表層Chl.aとした。そしてこの表層Chl.aで総一次生産量を割って、「Chl.aあたりの一次生産量」(P^B)を求めた。ただし、この測定値は酸素単位 (mg O_2) であるため、先に求めた P^B の

値を0.47倍 (気象庁, 1977) して炭素単位 (mg C) に変換した。このようにして求めたデータの一覧を表2に示す。

一方、 P^B の最大値 ($P^B m$) は先に示した國井の I と P^B のデータを使って両者の関係を次式のような双曲線 (関, 1996) で近似することによって求めた。

$$P^B = \alpha I / (\beta + I) \quad (\text{式 3-1})$$

このうち、 α と β は定数で、それぞれ $P^B m$ と半飽和定数 ($P^B m$ の1/2のときの光強度、 K_i) に相当する。本報ではこの定数 α を $P^B m$ のデータとした。またこの時の水温 (T) は I と P^B を測定した水槽内の水温とした。

3.2.2 結果及び考察

図4は宍道湖湖心表層における I と P^B の関係を式3-1で双曲線近似した結果を表した例である。図中の近似式のうち、分子側の定数16.1、分母側の定数305.3がそれぞれ $P^B m$ 、 K_i の値に相当する。また表3には同様にして求めた全データの $P^B m$ 、 K_i 、相関係数 (R)、RMS 誤差 ($RMSE$) を、図5には全データから求めた近似曲線をそれぞれ示す。

表3より1995年1月、2月の相関が他の日にちと比べ若干悪い ($R = 0.88, 0.73$) がその他の相関は

表2 疑似現場法によって得られた宍道湖湖心のクロロフィル a 濃度あたりの一次生産量, 呼吸量とクロロフィル a 濃度及び水温のデータ (國井, 未発表). クロロフィル a 濃度データは水深 0 m と 1 m の平均値

Table 2 Original data primary production per chlorophyll-a (P^B), using the simulated in-situ method, chlorophyll-a concentration (Chl.a), and water temperature at the center of Lake Shinji (Kunii, unpublished). Chl.a data are the averages of values at 0 m and 1 m depths.

| Light intensity ($\mu\text{Ein/m}^2/\text{s}$) | Gross primary production per Chl.a (mg C/mg Chl.a/hr) | | | | | | Respiration (mg C/mg Chl.a/hr) | T_w ($^{\circ}\text{C}$) | Chl.a ($\mu\text{g/l}$) |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------|-------|------|------|------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| | 0 | 3.8 | 11.4 | 38 | 133 | 380 | | | |
| 1.Aug.94 | 0.00 | -0.26 | 1.09 | 1.48 | 2.23 | 4.12 | 3.0 | 25.0 | 15.1 |
| 9.Sep.94 | 0.00 | 0.50 | 0.64 | 1.50 | 3.12 | 7.29 | 2.3 | 25.0 | 22.0 |
| 13.Oct.94 | 0.00 | 0.34 | 0.45 | 1.56 | 3.86 | 4.14 | 0.6 | 20.0 | 63.3 |
| 24.Nov.94 | 0.00 | 0.35 | 0.89 | 0.95 | 4.30 | 5.76 | 1.0 | 15.0 | 14.8 |
| 20.Dec.94 | 0.00 | 0.16 | 0.74 | 2.60 | 3.80 | 3.48 | 0.5 | 10.0 | 30.2 |
| 27.Jan.95 | 0.00 | 0.55 | 0.82 | 2.11 | 2.56 | 2.21 | 1.2 | 6.5 | 49.1 |
| 28.Feb.95 | 0.00 | 0.15 | -0.09 | 2.00 | 1.88 | 0.81 | 2.5 | 6.5 | 12.6 |
| 29.Mar.95 | 0.00 | -0.04 | 0.38 | 1.04 | 1.85 | 1.00 | 0.7 | 12.0 | 24.4 |
| 20.Apr.95 | 0.00 | 2.28 | 3.79 | 3.84 | 6.65 | 6.51 | 4.7 | 15.0 | 8.3 |
| 1.Jun.95 | 0.00 | 0.30 | 0.71 | 2.09 | 3.57 | 4.24 | 1.4 | 20.0 | 15.5 |
| 30.Jun.95 | 0.00 | 0.34 | 1.05 | 1.84 | 4.32 | 6.72 | 2.4 | 25.0 | 8.3 |
| 27.Jul.95 | 0.00 | 0.30 | 0.52 | 1.68 | 4.46 | 6.22 | 0.8 | 27.5 | 15.6 |
| 29.Aug.95 | 0.00 | 0.07 | 0.22 | 1.49 | 5.18 | 8.86 | 0.7 | 30.0 | 25.9 |
| 27.Sep.95 | 0.00 | 0.11 | 0.47 | 1.45 | 3.85 | 4.69 | 0.4 | 25.0 | 49.4 |
| 5.Nov.95 | 0.00 | 0.06 | 0.63 | 1.59 | 3.55 | 3.76 | 0.3 | 15.0 | 34.3 |

$R=0.96$ 以上と極めて高い. このことは, 宍道湖湖心表層における I と P^B の関係は式 3-1 の双曲線で近似することが妥当であることを示している. また, P^Bm の値は $1.5\sim 18.4$ mg C/mg Chl.a/hr 範囲にあり, 一般の富栄養湖で観測された P^Bm の値 $2\sim 6$ mg C/mg Chl.a/hr (有賀, 1973) と比べても同等かそれ以上の高い値を示している. 同様な指摘は山室(1991)でもなされている. 一方, 図 5 からほとんどのデータが $400\mu\text{Ein/m}^2/\text{s}$ 以下の照度下で P^B は飽和しており, 衛星データ取得条件である晴天時・午前 10~12 時前後にはほぼ飽和状態つまり P^Bm の状態に達している場合が多いと推測される. 以上から衛星データ観測日時における宍道湖湖心表層では $P^B=P^Bm$ の仮定は妥当であると考えられる.

図 6 は, 異なる水温下における典型的な光—一次生産量曲線を示す. また図 7 には P^Bm と水温の関係を表す. 両者には $R=0.71\sim 0.73$ 程度の相関があり, 値はほぼ岩熊・安野 (1981) が示した回帰曲線上に近いところへプロットされた. このことから, 宍道湖の P^Bm と水温の間にも深い関係があることが示唆された. しかし, 推定誤差 (RMSE で表す) は 3 mg C/mg Chl.a/hr 程度あり, 水温の関数で P^Bm を推定する場合にはこの程度の誤差を考慮しなけれ

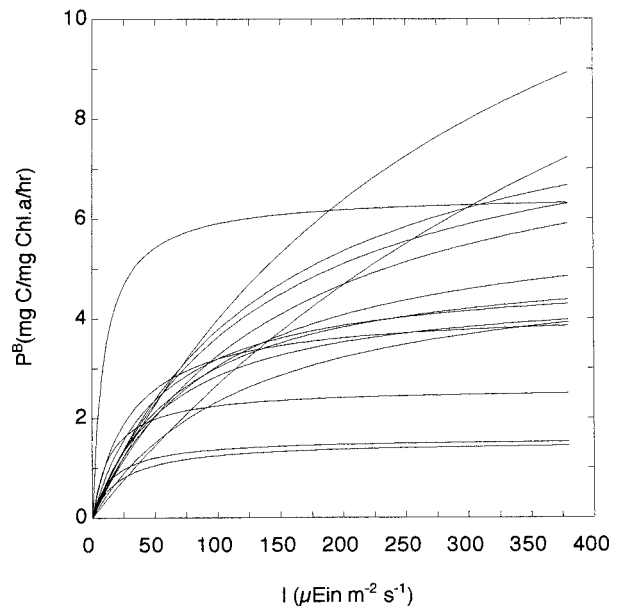


図 5 1994 年 8 月から 1995 年 11 月まで毎月の光 (I)—一次生産量 (P) データを使って推定した宍道湖の全 $P-I$ 曲線. P と I は國井 (未発表) のデータを使用.

Fig.5 $P-I$ curves estimated from P and I data for each month between Aug.1994 and Nov.1995 in Lake Shinji. P and I data from Kunii (unpublished).

表3 式3-1によって導き出された宍道湖のChl.aあたりの最大一次生産量 (P^B_m) 及び半飽和定数 (K_I), 相関係数 (R), RMS 誤差 ($RMSE$). 単位: P^B_m (mg C/mg Chl.a/hr), K_I (μ Ein/m²/s), $RMSE$ (mg C/mg Chl.a/hr).

Table 3 Maximum primary production per chlorophyll-a (P^B_m), $P-I$ saturation parameter (K_I) in Lake Shinji derived from equation 3-1, and correlation coefficient (R) and RMS error ($RMSE$). Unit: P^B_m (mg C/mg Chl.a/hr), K_I (μ Ein/m²/s), $RMSE$ (mg C/mg Chl.a/hr).

| No. | Date | P^B_m | K_I | R | $RMSE$ |
|------|-------------|---------|-------|------|--------|
| 1 | 1 Aug.1994 | 5.2 | 121.2 | 0.99 | 0.5 |
| 2 | 9 Sep.1994 | 18.4 | 585.4 | 0.99 | 0.3 |
| 3 | 13 Oct.1994 | 5.2 | 73.0 | 0.96 | 0.4 |
| 4 | 24 Nov.1994 | 8.3 | 155.3 | 0.99 | 0.4 |
| 5 | 20 Dec.1994 | 4.2 | 30.6 | 0.98 | 0.3 |
| 6 | 27 Jan.1995 | 2.6 | 15.4 | 0.97 | 0.2 |
| 7 | 28 Feb.1995 | 1.6 | 16.1 | 0.88 | 0.6 |
| 8 | 29 Mar.1995 | 1.5 | 22.7 | 0.73 | 0.3 |
| 9 | 20 Apr.1995 | 6.5 | 9.8 | 0.96 | 0.7 |
| 10 | 1 Jun.1995 | 4.9 | 53.7 | 1.00 | 0.1 |
| 11 | 30 Jun.1995 | 9.2 | 144.1 | 1.00 | 0.2 |
| 12 | 27 Jul.1995 | 8.6 | 136.5 | 1.00 | 0.2 |
| 13 | 29 Aug.1995 | 16.1 | 305.3 | 1.00 | 0.2 |
| 14 | 27 Sep.1995 | 6.1 | 101.4 | 0.99 | 0.2 |
| 15 | 5 Nov.1995 | 4.6 | 62.6 | 0.99 | 0.2 |
| Ave. | | 6.9 | 122.2 | | 0.3 |
| SD | | 4.8 | 149.9 | | 0.2 |

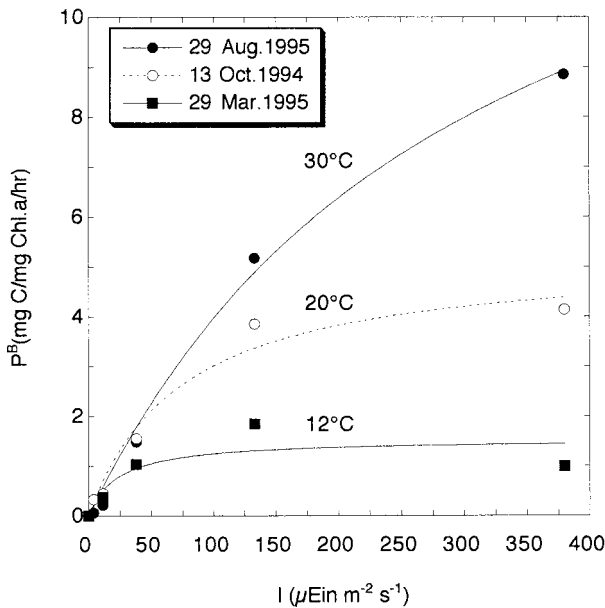


図6 3時期の異なる水温下における宍道湖の典型的な $P-I$ 曲線. P と I は國井(未発表)のデータを使用.
Fig.6 Typical $P-I$ curves in Lake Shinji under three different water temperature condition in Lake Shinji. P and I data from Kunii (unpublished).

ばならない. このような比較的大きなばらつきが生じる原因としては, 主に栄養塩の影響が考えられるが(秋山ほか, 1986), 本報では栄養塩のデータを入手することができなかったためその原因については十分な検討ができなかった. しかし, 現状では宍道湖の P^B_m を設定する他のよい方法がないため, 水温を関数とした図7中の回帰式を使用するのが妥当だと考えられる.

4. 提案した宍道湖用簡易総一次生産量推定アルゴリズムの適用と問題点

図8は2で提案した式2-3を使って推定された平均的な宍道湖全体における総一次生産量の季節変化である. 使用したデータは, HRV から推定された面平均 Chl.a (図3参照) と実測した面平均水温のデータである. P^B_m の設定には図7に示す回帰曲線式(宍道湖のデータで計算した回帰式)を用いた. これによると推定された宍道湖の総一次生産量は約 50~700 mgC/m³/hr の範囲内で変化している. 一方, 秋山(1991)が1974~1985年に宍道湖で実測した総一次生産量の最小, 最大はそれぞれ 20~80, 130~420 mgC/m³/hr であった. 本アルゴリズムを使って

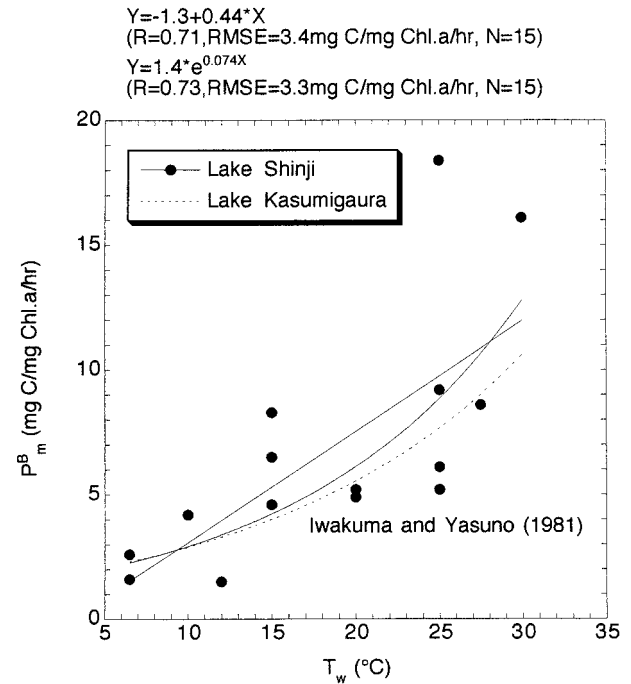


図7 宍道湖における水温 (T) と Chl.a あたりの最大一次生産量 (P^B_m) の相関.
Fig.7 Correlation between the water temperature (T) and the maximum primary production per chlorophyll-a (P^B_m).

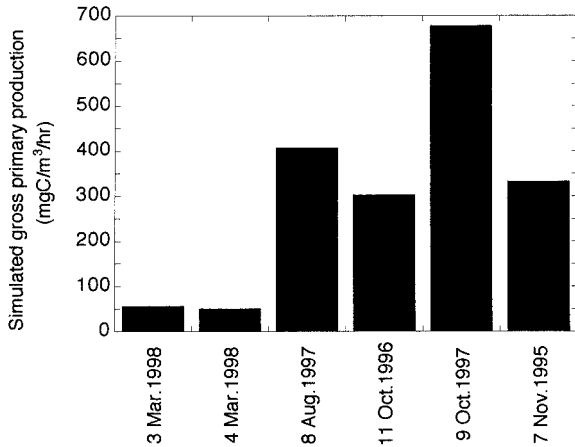


図8 本報で提案した方法を用いて推定した宍道湖の面平均総一次生産量の季節変化。

Fig. 8 Seasonal change of the area average of the estimated gross primary production using the proposed method in Lake Shinji, 1995–1998.

得られた総一次生産量はアオコ発生時の10月のデータを除くと妥当な推定値であると考えられる。図8のグラフから推定される宍道湖全体の一次生産量は3月(冬～春)は低く、8月～10月(夏～秋)は高い。このような季節的な変動は國井(1995)も指摘しており、宍道湖の一次生産量の季節変化が大きいことを示唆している。

一方、本報で提案したアルゴリズムの精度を求めるには、衛星データと同期して得られた現場の総一次生産量測定値が必要である。またこのアルゴリズムでは前述したように $P^b m$ の推定誤差が大きいため、時期によって推定値が大きく異なる場合が考えられる。さらに、現時点ではSPOTデータが得られない場合、面平均Chl.a推定は不可能であり、SPOTデータも高価でありかつ衛星と同期した現場の水温データも得ることが難しいことから現実的な方法とはいえないという問題点がある。従って、今後はTerra/ASTER(岸野, 1995)等比較的安価で購入でき広域のChl.aや水温を推定可能な衛星センサデータや建設省等が観測している水温、塩分、栄養塩データ等を活用するアルゴリズムに改良することが重要だと考えられる。

5. まとめ

多時期の衛星データを用いて一次生産量を推定するアルゴリズムの提案をし、そのアルゴリズムにおけるいくつかの仮定の検証を行った。また提案したアルゴリズムを現場データに適用し、宍道湖におけ

る一次生産量の季節変化について若干の考察を行った。

そして以下のような事項が明らかになった。

1. オフセット除去をした多時期のSPOT/HRVデータの比演算値と現場Chl.aの相関は全体としては高いが、各調査日における両者の相関は低い。一方HRVの比演算値と現場表層Chl.aのそれぞれ面平均値をとった場合の相関は高い。これらの結果は、湖内の表層Chl.aの濃度差に比べて時的な表層Chl.aの濃度変化の方が大きいことに起因する。
2. 季節に関わらず $400 \mu \text{Ein}/\text{m}^2/\text{s}$ 以下の照度下で宍道湖の P^b はほぼ飽和状態に達していることから、衛星データ取得条件である晴天時・午前10～12時前後には $P^b = P^b m$ とする仮定は妥当である。
3. $P^b m$ と水温には $R = 0.71 \sim 0.73$ 程度の相関があり、現状では宍道湖の $P^b m$ を水温から推定するのが妥当である。
4. 推定された宍道湖の総一次生産量は約 $50 \sim 700 \text{ mgC}/\text{m}^3/\text{hr}$ の範囲内で変化し、従来の研究値から判断して妥当な推定値といえる。

今後は本報で提案したアルゴリズムの検証のための一次生産量測定を行いたい。また、本アルゴリズムを改良して比較的安価で入手できる可視センサ及び熱赤外センサを搭載したTerra/ASTERセンサに適用できる新しい一次生産量推定アルゴリズムの開発を行いたい。

謝 辞

島根大学大学院理学研究科地質学専攻修士課程(当時)の中山大介氏には、現場調査の準備、実施、データ処理等、終始手伝って頂きました。その他にも船舶による現地調査ではたくさんの方々にお世話になりました。お世話になった皆様に感謝致します。

引用文献

- 秋山優(1991) 中海・宍道湖の水質保全に関する調査報告(第12報)。島根県環境保全課, 1-10。
- 秋山優・有賀祐勝・坂本充・横浜康継(1986) 藻類の生態。内田老鶴圃, 東京, 163-169。
- 有賀祐勝(1973) 水界植物群落の物質生産II—植物プランクトン。共立出版, 東京, 91 p。
- Balch, W.M. and Byrne, C.E. (1994) Factors affectig the estimate of primary production from space. Journal of

- Geophysical Research, **99 C**: 7555-7570.
- Eppley, R.W. (1972) Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fishery Bulletin*, **70**: 1063-1085.
- 橋谷博・清家泰・近藤邦男・奥村稔・藤永薫・伊達善夫 (1991) 月 1 回の定期調査からみた中海・宍道湖の水質—地点間変動—. *山陰地域研究 (自然環境)*, **7**: 93-104.
- 岩熊敏夫・安野正之 (1981) 霞ヶ浦の一次生産特性. *国立公害研究所報告*, **22**, 99-122.
- 岸野元彰 (1995) ASTER の海洋・陸水への応用. *日本リモートセンシング学会誌*, **15 (2)**: 72-77.
- 気象庁 (1977) 海洋観測指針, 9.5 基礎生産量の測定. 244-256.
- 國井秀伸 (1995) 宍道湖湖心における水深別クロロフィル量と光合成速度の季節変化 (予報). *LAGUNA (汽水域研究)*, **3**: 97-101.
- 水尾寛己・岡敬一・小倉久子・二宮勝幸・大道章一・飯村晃・安藤晴夫・三島義人・安岡善文 (1998) 人工衛星データによる水質モニタリング—関連自治体による環東京湾プロジェクト紹介—. *日本リモートセンシング学会*, **18 (3)**: 62-66.
- 森本直知・川上誠一・石原純子・葛原美紀雄 (1977) 宍道湖の水質汚濁と植物プランクトン. *用水と排水*, **19**: 407-419.
- Nakamura, M., Yamamuro, M., Ishikawa, M. and Nishimura, M. (1988) Role of the bivalve *Corbicula japonica* in the nitrogen cycle in a mesohaline lagoon. *Marine Biology*, **99**: 369-374.
- 作野裕司・高安克己・松永恒雄・中村幹雄・國井秀伸 (1996) 宍道湖における衛星同期水質調査 (その 1). *LAGUNA (汽水域研究)*, **3**: 57-22.
- 作野裕司・松永恒雄・中山大介・六川修一・高安克己・國井秀伸・中村幹雄・山室真澄 (1999) SPOT /HRV データによるアオコ発生時の宍道湖表層クロロフィル a 濃度分布の推定. *日本リモートセンシング学会誌*, **19**: 132-148.
- 関文威監訳 (1996) 生物海洋学入門. 講談社, 東京, 220 p.
- 山室真澄 (1991) 富栄養化した汽水湖での窒素循環における懸濁物食性二枚貝の役割. 東京大学大学院理学研究科地理学専門課程博士論文, 1990.
- 山室真澄 (1997) 汽水域での高次生産者を通じた窒素・リンの収支. *沿岸海洋研究*, **35**: 69-73.