

「地球変動のメカニズム」

平成11年度採択研究代表者

才野 敏郎

(名古屋大学地球水循環研究センター 教授)

## 「衛星利用のための実時間海洋基礎生産計測システム」

### 1. 研究実施の概要

地球規模の気候変化、環境変化において海洋における熱・エネルギー循環と物質循環が大きな役割を果たすと考えられている。その実態を解明するためには、今までの船舶観測に加えて、人工衛星観測と定点観測を組み合わせた時系列の観測が必要であることは、海洋における過去10年間の種々の国際協同観測計画の結果ますます強調されるようになってきた。特に、海洋の物質循環に関しては物質の鉛直輸送を担う生物ポンプの活動の地理的分布とその系時的变化を明らかにすることが中心的な課題となっているが、そのためには人工衛星海色リモートセンシングによる植物プランクトンの量と基礎生産の測定が唯一の現実的な観測手法として大きな期待が寄せられている。

本研究では、海洋現場に設置した自動昇降式ブイに搭載した光学的なセンサー類によって海洋の基礎生産を自動的に計測し、実時間的にデータ転送を行うことによって、人工衛星水色データから推定した基礎生産を実時間で検証するための計測システムを開発することと、各種光学的データから基礎生産を推定するためのアルゴリズムを開発することの双方を目的としている。

計測システムの開発に関しては、昨年度製作した水中ウインチ・計測ブイシステムの試作1号機の水槽試験、実海域試験を繰り返した。9月の実海域試験においては64回の自動昇降試験に成功した。水中における計測ブイの挙動を解析した結果、本プロジェクトで使用する光学的測器群を搭載するためのプラットフォームとして、姿勢の鉛直安定性、流れに対する追随性、昇降速度は理想的なものであった。実海域における中期（1ヶ月）の係留試験を繰り返した結果、本試作1号機は波高2メートル、流速2ノット程度でも昇降が可能であることが確認された。以上の成果に基づいて、試作機に水中音響、空中無線通信機能を付加した実機1号機を製作した。

基礎生産推定アルゴリズムの開発に関しては、昨年までに大枠の方針を決定したので、本年度は相模湾における現場観測を繰り返し、同アルゴリズムの各コンポーネントの高度化を進めるためのデータベースを作成し、検討を進めた。一方、本研究で開発している、単位海表面積・一日当たりの総基礎生産速度を推定するアルゴリズムをまったく独立の手法で検証するために、3種の酸素安定同位体比（ $^{16}\text{O}$ 、 $^{17}\text{O}$ 、 $^{18}\text{O}$ ）の自然存在比を用いる手

法の検討を進めた。この結果、海水中における鉛直的な<sup>17</sup>O同位体比異常を海洋表面における大気海洋間の酸素フラックスの実測値と組み合わせることによって海水中の単位海表面積・一日当たりの総基礎生産速度を推定することが可能になった。これは酸素明暗ビン現場実験の結果で確認された。

相模湾における現場観測を繰り返しているうちに、中心的な測器である高速フラッシュ励起蛍光光度計(FRRF)がブラックボックスであることの限界を痛感するに至り、本年度より自作FRRFを開発することとした。本年度末現在で基板、光学部品、筐体の開発が終わり回路試験を終了した。

## 2. 研究実施内容

### ・水中ウインチ・計測ブイシステムの開発

試作1号機を用いた短期実海域試験を、6月と9月に相模湾において実施した。6月の試験から係留系設置時に計測ブイを水中ウインチ部に音響切り離し装置を用いて固定すること、ウインチには流れ藻よけのネットを取り付ける必要があること、計測ブイのカバーをはずすことによって設置時の抵抗を軽減できることなどがわかった。これらの諸点を改良し、9月の試験においては、自動モード・音響指令モードを取り混ぜて連続64回の昇降動作に成功し、実海域における計測ブイの昇降動作に関するデータを取得した。

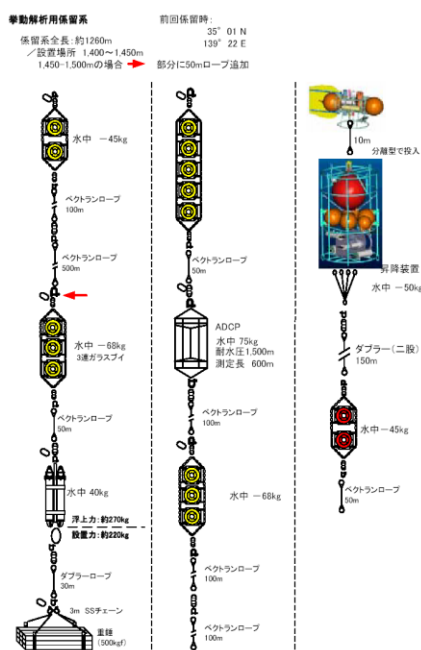


図1 採用した係留系の概略

Depth record of each component during the field trial in Sagami-Bay

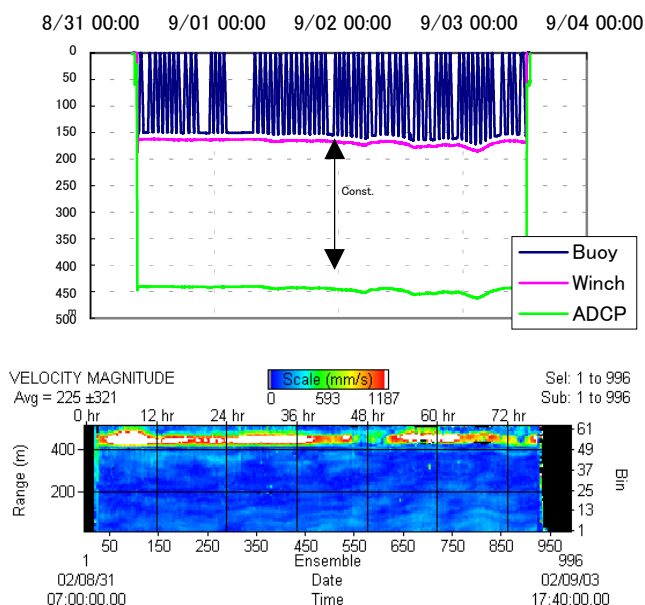


図2 昇降計測ブイ, 水中ウインチ, ADCPに取り付けた深度計の時系列データ(上)とADCPによって得られた450m以浅の流速の深度分布(下)

昇降動作時における計測ブイの挙動に関して、ブイの方位角とその深度での海流流向の関係を調べた結果、流速が5cm/秒以上ではブイの方位は流向に良く追従していることがわかった。また、鉛直・水平方向の姿勢に関しては表層に浮上したときを除いて、約2度以内に収まっており、光学測器のプラットフォームとして理想的な挙動を示すことが確認された。さらに、上昇下降速度は毎分10m程度であり、これもFRRFの実際の動作条件に最適であることがわかった。

2002年12月から相模湾で実施した中期係留試験では、1ヶ月間の係留の間毎日3-4回の昇降を19日間行った。このとき、最高の波高は2.2mで表面付近の流速は2ノット程度であった。このような波と流れが同時に起こることは相模湾においては1%以下の頻度であり、我々の開発したウインチシステムは平常時において十分運用可能であると考えられる。なお、本試験においては20日目にウインチが停止してしまったが、これはウインチに装着しているロープの「たるみ検出器」の劣化によるものと判断した。



図3 水中ウインチ実機

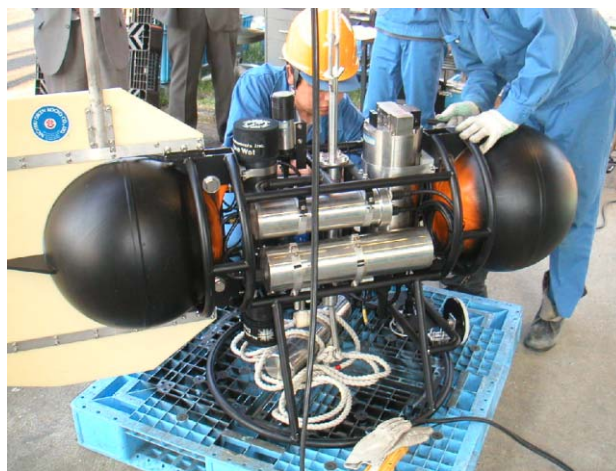


図4 昇降計測ブイ実機

本年9月末に納入された実機1号機について、無線および音響通信に関する水槽試験を2月24日から27日の間、独立行政法人港湾空港技術研究所の海底探査用実験水槽において実施した。4日間で56回の昇降動作を行い、メールによるデータ転送とウインチ動作の制御を実施した。

さらに、次年度における実海域試験に向けて、計測ブイの流失防止の目的で浮体内に位置を知らせるためのオーブコムブイを搭載することとして、そのための検討を開始した。

#### ・基礎生産力推定アルゴリズムの開発

昨年までに開発したアルゴリズムで推定された基礎生産力を $^{13}\text{C}$ 現場法と比較した。単位クロロフィル量当たりの基礎生産力は両者でほぼ1:1の関係が得られた。しかし、 $^{13}\text{C}$ 現場法では植物プランクトンの呼吸を差し引いた純基礎生産力が測られるのに対して、FRRF法からの推定はそれを差し引く前の総基礎生産力が得られるはずなので、今回の結果

はFRRF法の定量性に関して更なる検討が必要であることを意味している。

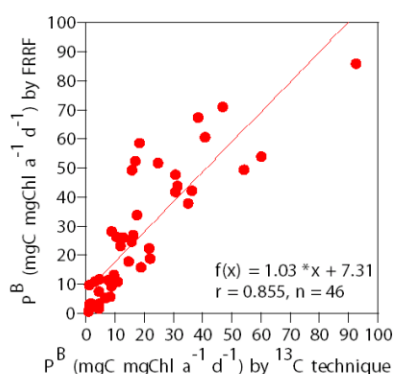


図5 FRRF法による基礎生産力と<sup>13</sup>C現場法による基礎生産力の比較。単位クロロフィル量当たり正規化している。

純基礎生産力と総基礎生産力の定量的な比較は<sup>13</sup>C現場法と酸素明暗ビン現場法によって実施した。相模湾における一年間の観測結果をまとめたものが図6で、有光層内を積算した総基礎生産に対する純基礎生産の割合は、混合期の平均値が48%であったのに対して成層期の平均値は37%と混合期よりも10%程度低い値であった。成層期における植物プランクトンの呼吸は混合期よりも10%程度高かったのかもしれない。混合期の値はLaws et al. (2000)によって報告された<sup>14</sup>C uptake/Gross primary productivityの理論値(0.48)と一致している。

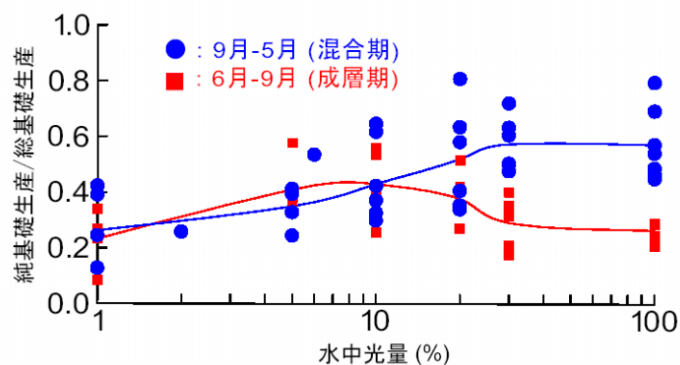


図6 各水深における純基礎生産力と総基礎生産力の比

相模湾においては、FRRF法や酸素明暗ビン法で求められる総基礎生産と<sup>13</sup>C法で求められる純基礎生産の比はおよそ2:1であることがわかった。このことを利用すれば、FRRF法による総基礎生産の推定から純基礎生産を推定することが可能になる。しかしながら、この方法では培養実験に伴う影響を独立に評価することができないので、我々は培養実験を必要としない検証手法を開発することとした。

海水中の溶存酸素の安定同位体比 (<sup>17</sup>O/<sup>16</sup>O, <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O) は呼吸によって消費されるときは質量依存の同位体分別が起こり、<sup>17</sup>Oの分別は<sup>18</sup>Oに比べておよそ0.521程度であることが知られている。したがって $\delta^{17}\text{O}$ 異常を $\delta^{17}\text{O} - 0.521 \delta^{18}\text{O}$ と定義すれば、海水中の溶存酸素

の  $\delta^{17}O$ 異常は大気から溶け込んだ酸素と海水から基礎生産によって生成した酸素によっ

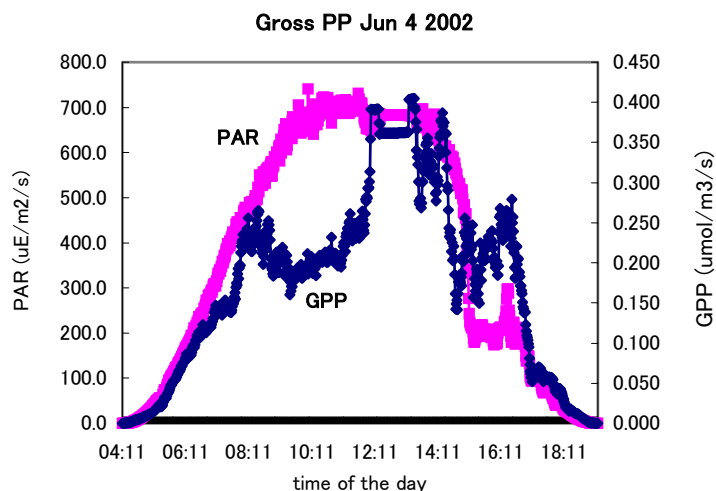


図7 相模湾定点表層における自然蛍光光度計から推定した総基礎生産の日変化

て生じる事となる．このため、別途大気から溶け込んだ酸素の量を見積もることによって基礎生産（厳密な意味での総基礎生産）を評価することが可能になる．この方法を相模湾において適用するために、2002年6月、9月の淡青丸航海において、CTDに組みこんだ酸素・窒素ガス分圧計と自然蛍光光度計を表層係留し、係留期間中の（総）基礎生産および酸素・窒素分圧の連続記録を得た．6月4日の例では、昼間極大をもつ基礎生産（図7）に対応して、酸素/窒素比は夕方に極大を示している（図8）。

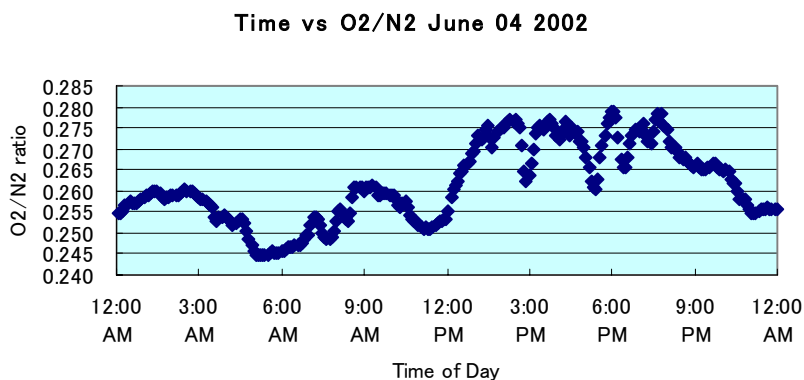


図8 相模湾定点表層における酸素/窒素比の日変化。窒素は生物学的に殆ど不活性であるため、この比の変動は生物による酸素の発生・消費を示す。

図9は青鷹丸で8月31日に観測した結果で、これからさらにCTD+酸素・窒素ガス分圧計のデータと淡青丸で測定された海上風速、湿度、気温に基づいて、Wanninkhofのガス交換係数を用いて大気・海洋間のガス交換を見積もると、総基礎生産はおよそ181 m mole

$O_2/m^2/day$ となった。この方法だと有光層の酸素の滞留時間 - およそ数日 - に相当する時間スケールでの平均値を与えているものと思われる。8月31日から9月1日の酸素法による総基礎生産の推定値はおよそ $163 \text{ m mole } O_2/m^2/day$ であった。現時点ではこれらの値を比較し、評価することは難しいが、データの蓄積を待つて解析を進めたい。

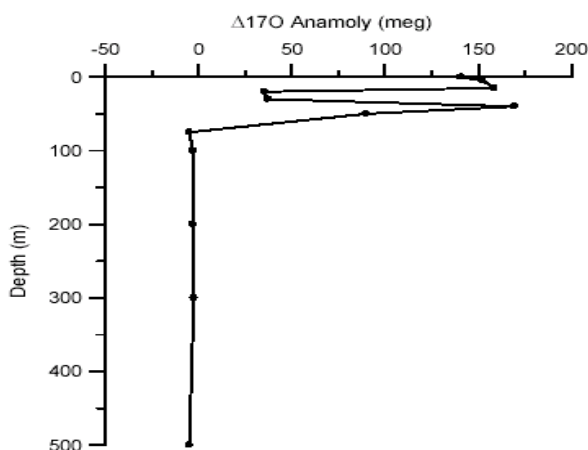


図9 2002年8月31日、相模湾定点における酸素 $^{17}O$ の同位体異常の鉛直分布

### 3. 研究実施体制

#### 高速フラッシュ励起蛍光法による基礎生産測定グループ

① 研究分担グループ長

才野敏郎 (名古屋大学地球水循環研究センター 教授)

② 研究項目

高速フラッシュ励起蛍光法による基礎生産測定法

#### 高速フラッシュ励起蛍光光度計の製作・改良グループ

① 研究分担グループ長

紀本岳志 (紀本電子工業 代表取締役社長)

② 研究項目

高速フラッシュ励起蛍光光度計の製作・改良

#### 現場培養法による基礎生産測定及び自動昇降ブイの開発グループ

① 研究分担グループ長

石丸隆 (東京水産大学水産学部 教授)

② 研究項目

現場培養法による基礎生産測定法及び自動昇降ブイ開発

#### 自然蛍光による基礎生産測定グループ

① 研究分担グループ長

古谷 研 (東京大学大学院農学生命科学研究科, 教授)

② 研究項目

自然蛍光法による基礎生産測定法  
光吸収による基礎生産測定グループ

- ① 研究分担グループ長  
石坂丞二（長崎大学水産学部，教授）
- ② 研究項目  
光吸収法による基礎生産測定法

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 原著論文

- Bricaud, A., C. S. Roesler, J. S. Parslow and J. Ishizaka (2002)  
Bio-optical studies during the JGOFS-equatorial Pacific program: a contribution to the knowledge of the equatorial system, *Deep-Sea Res. Part II*, 49 2583-2599.
- Chiba S, and T. Saino T (2002)  
Interdecadal change in upper water environment altered spring diatom community structure in the Japan Sea: an early summer hypothesis. *Marine Ecology Progress Series*, vol. 231, 23-35.
- Eko Siswanto and Joji Ishizaka (2002)  
Estimating chlorophyll vertical profiles around Kuroshio front of East China Sea during spring and autumn 2001. *Proceedings of PORSEC 2002*, 459-464.
- Furuya K. (2002)  
Evaluation of Biological Productivity of Lower Trophic Levels and Carrying Capacity of Aquaculture Areas. *Fisheries Sciences*, 68 suppl., 542-545.
- Iida, T., S. Saitoh, T. Miyamura, M. Toratani, H. Fukushima and N. Shiga (2002)  
Temporal and spatial variability of coccolithophore blooms in Eastern Bering Sea Shelf. *Progress in Oceanography*, 52(1-2), 165-175.
- Imai, K., Y. Nojiri, N. Tsurushima and T. Saino (2002)  
Seasonal variation of primary productivity at station KNOT (44N, 155E) in the subarctic western North Pacific. *Deep-Sea Research II*, 49, Nos.24-25, 5395-5408.
- Kishino, M., T. Ishimaru, N. Horimoto, and T. Saino (2002)  
Measurements of Absorption Coefficient of Colored Dissolved Organic Matter (CDOM)  
*Ocean Optics XVI*, CD-ROM
- Limsakul, A., T. Saino, J. I. Goes, T. Midorikawa (2002)  
Comparison of seasonal variability in lower trophic level biological

- environments between the subtropical and Oyashio Waters. *Deep-Sea Research II*, 49, Nos.24-25, 5487-5512.
- Liu, H., K. Imai, K. Suzuki, Y. Nojiri, N. Tsurushima and T. Saino (2002)  
Seasonal variability of picoplankton and bacteria in the western subarctic Pacific Ocean at Station KNOT. *Deep-Sea Research II*, 49, Nos.24-25, 5409-5420.
  - Liu, H., K. Suzuki, and T. Saino (2002)  
Phytoplankton growth and microzooplankton grazing in the subarctic North Pacific Ocean and Bering Strait during summer 1999. *Deep-Sea Research I*, 49 (2), 363-375.
  - Liu, H., K. Suzuki, and T. Saino (2002)  
Picoplankton Community structure in the subarctic Pacific Ocean and the Bering Sea during summer 1999. *Marine Ecology Progress Series*, 237, 1-14.
  - Mino, Y., T. Saino, K. Suzuki, and E. Maranon (2002)  
Isotopic composition of suspended particulate nitrogen  $\delta^{15}\text{N}_{\text{sus}}$  in surface waters of the Atlantic Ocean from 50N to 50S. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 4, 1059, doi:10.1029/2001GB001635, 2002.
  - Mizobata, K., S. Saitoh, T. Miyamura, N. Shiga, K. Imai, Y. Kajiwara and K. Sasaoka (2002)  
Bering Sea Cyclonic and Anticyclonic Eddies observed during summer 2000 and 2001, *Progress in Oceanography*, 52(1-2), 65-75.
  - Ono, T., K. Tadokoro, T. Midorikawa, J. Nishioka, and T. Saino (2002)  
Multi-decadal decrease of net community production in western subarctic North Pacific  
*Geophysical Research Letters*, 29 (8), 10.1029/2001GL014322.
  - Saino, T., A. Bychkov, C-T. A. Chen, and P. J. Harrison (2002)  
The Joint Global Ocean Flux Study in the North Pacific  
*Deep-Sea Research II*, 49, Nos.24-25, 5297-5301.
  - Saitoh, S., T. Iida and K. Sasaoka (2002)  
A description of temporal and spatial variability in the Bering Sea spring phytoplankton blooms (1997-1999) using satellite multi-sensor remote sensing, *Progress in Oceanography*, 52(1-2), 131-146.
  - Sarma, V. V. S.S., T. Ono, and T. Saino (2002)  
Increase of Total Alkalinity due to shoaling of aragonite saturation horizon in the Pacific and Indian Oceans: Influence of anthropogenic carbon inputs.  
*Geophysical Research Letters*, VOL. 29, NO. 20, 1971, doi:10.1029/2002GL015135, 2002.
  - Sasaoka, K., S. Saitoh, I. Asanuma, K. Imai, M. Honda, Y. Nojiri, and T.



Saino (2002)

Temporal and spatial variability of chlorophyll a in the subarctic northwestern Pacific determined from satellite and ship observations during 1997–1999

*Deep-Sea Research II*, 49, Nos.24–25, 5557–5576.

- Shiomoto, A., S. Saitoh, K. Imai, M. Toratani and Y. Ishida (2002)  
Interannual variation in phytoplankton biomass in the Bering Sea basin in the 1990s.  
*Progress in Oceanography*, 52(1-2), 147–163 (2002)
- Suzuki, K., A. Hinuma, J. Ohta, K. Matsumoto, S. Hashimoto, N. Horimoto, T. Ishimaru, and T. Saino (2002)  
Estimates of daily primary production in Sagami Bay (Japan) using fast repetition rate fluorometry and their data verification. *Ocean Optics XVI*, CD-ROM
- Suzuki, K., H. Liu, T. Saino, H. Obata, M. Takano, K. Okamura, Y. Sohrin, and Y. Fujishima (2002)  
East-west gradients in the photosynthetic potential of phytoplankton and iron concentration in the subarctic Pacific Ocean during early summer. *Limnology and Oceanography*, 47, 1581–1594.
- Suzuki, K., C. Minami, H. Liu and T. Saino (2002)  
Temporal and spatial patterns of chemotaxonomic algal pigments in the subarctic Pacific and the Bering Sea during summer 1999. *Deep-Sea Research II*, 49, Nos.24–25, 5685–5704.
- Suzuki, K., A. Tsuda, H. Kiyosawa, S. Takeda, J. Nishioka, T. Saino, M. Takahashi, and C. S. Wong (2002)  
Grazing impact of microzooplankton on a diatom bloom in a mesocosm as estimated by pigment-specific dilution technique. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 271 (1), 99–120.
- Takamaru, H., T. Yoshikawa, R. Neelam, S. Takeda & K. Furuya (2002)  
Rapid evaluation of photosynthetic activity of phytoplankton by pulse amplitude modulated (PAM) fluorescence in coastal waters. *Fisheries Sciences*, 68 suppl., 651–652.
- Tanaka, T. and T. Saino (2002)  
A modified method for the analysis of nitrogen isotopic composition of oceanic nitrate at low concentration in shallow water. *Journal of Oceanography*, 58 (4), 539–546.
- Yoshikawa, T., H. Otake & K. Furuya (2002)

Continuous monitoring of chlorophyll a and photosynthesis by natural fluorescence method in a coastal aquaculture ground. *Fisheries Sciences*, 68 suppl., 588-591.

○ 石坂丞二 (2002)

海洋リモートセンシング 第4回基礎生産,  
日本リモートセンシング学会誌別冊, 22, 457-461.

○ 鈴木光次・吉川尚・古谷研・才野敏郎 (2002)

クロロフィル蛍光による植物プランクトンの光合成活性の測定  
日本プランクトン学会報, 49(1), 27-36.

(2) 特許出願

H14年度特許出願件数：2件（研究期間累積件数：2件）