

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22510004

研究課題名（和文） 大気海洋境界過程の直接観測による海洋生態系モデルの高精度化

研究課題名（英文） PRECISION IMPROVEMENT OF THE OCEAN ECOSYSTEM MODEL THROUGH DIRECT MEASUREMENTS OF DYNAMICAL PROCESSES AT THE AIR-SEA INTERFACE

研究代表者

小松 幸生（KOMATSU KOSEI）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：30371834

研究成果の概要（和文）：外洋域において波浪、水温、塩分、溶存酸素濃度、クロロフィル濃度、濁度等を漂流しながら連続的に計測可能な多機能観測ブイを新たに開発して、海上風の変動が風波の変動を介して海洋表層の栄養塩類及び植物プランクトンの鉛直分布に与える影響の実態を観測し、従来の海洋生態系モデルで利用されていた大気・海洋間の運動量・熱フラックスおよび表層混合層の変動過程を推定する手法の改良を行い、モデルの精度を向上させた。

研究成果の概要（英文）：A multi-sensor buoy, a drifter attached with a GPS wave-sensor and water-quality sondes, was developed to observe directly the impacts of wind variation on the vertical distributions of nutrients and phytoplankton in the epipelagic ocean through the air-sea interfacial processes mainly caused by wind waves. In-situ data of the epipelagic ecosystem at the surface and subsurface layers obtained continuously by the multi-sensor buoy promoted effectively validations of the lower-trophic-level ecosystem model and modifications of schemes of the interfacial fluxes and mixed layer models, consequently contributed to the accuracy improvement of the ecosystem model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：海洋生態系モデル・多機能観測ブイ・大気海洋境界過程

1. 研究開始当初の背景

| 現在、国際的なレベルで最重要の環境問題

は地球温暖化問題である。海洋による二酸化炭素の吸収量は陸上生物圏による正味の吸収量よりも2倍以上多いと推定されており、その正確な推定は、二酸化炭素排出量の削減策を決める上で必須である。しかしながら、推定の基礎となっている生物地球化学循環論に基づく全球の生態系モデルは不確定な要素が多く、モデル精度の向上は喫緊の課題となっている (IPCC, 2007)。特に、海洋生態系モデルの場合、生物過程および化学過程のパラメータが不十分であること (Fasham, 2003) に加えて、生態系モデルの基盤となる物理モデル (海洋大循環モデル) においてさえもいくつかの問題を抱えている (Hecht and Hasumi, 2008)。海洋表層生態系の生産性と分布構造を精度良く推定するためには、(1) 大気海洋境界過程と (2) 海洋表層の鉛直拡散・混合過程、の正確な再現が不可欠であるが、現状では、これらの過程を正確組み込んだ海洋生態系モデルは無い (Kantha and Clayson, 2000a)。

(1) は大気と海洋の運動量・熱・エネルギー・気体の交換を決定し、(2) は水温・塩分といった物理場をはじめ、栄養塩や動・植物プランクトンなど生態系の鉛直構造を決定する重要な過程である。しかしながら、(1) については外洋域の海上風と風波、(2) については乱流を現場で正確に計測することが困難であったために、その実態については不明な点が多く、海洋大循環モデルでは、パラメータライズしてこれらの過程を導入しているのが実状である (Kantha and Clayson, 2000b)。

こうした中、近年の観測技術の進歩により、外洋域において (1) 海上風と風波、および (2) 乱流を直接かつ正確に計測することができるようになってきた。まず、(1) については Harigae et al. (2004) により GPS を利用した波高計センサが開発され、これを搭載した漂流ブイが商品化されている。この漂流ブイは、太陽電池を電源として、海面を漂いながら GPS 位置と波高・波周期・波向を所定の時間間隔で計測し、データを通信衛星経由で e-mail 配信するもので、その最大の特徴は、従来の気象観測ブイに比べて、比較的安価で小型であるため、現場での利用と展開が容易な点にある。また、GPS 波浪ブイのもう一つの特徴は、波高センサの他に、超音波風速計、水・気温計、光量子計、クロロフィルセンサ、硝酸塩センサなど、他のセンサをブイ本体に追加付設することが可能である点である。波浪ブイに各種センサを付設することにより、大気海洋間の熱・運動量フラックスの計算に必要な物理量に加えて、海面の生物・化学データを連続的に計測することができる。その結果、これまで不明だった大気海洋の境界過程における海洋生態系変動の実態が世界で

初めて数時間の時間スケールで把握できることが期待できる。

次に、(2) については、海洋表層から深層までの海洋乱流を連続的に直接観測する手法が最近開発され、従来不明だった海洋乱流の微細な鉛直構造の実態が明らかになりつつあり、同時に、海洋生態系の鉛直分布構造に与える影響も解明されつつある。以上のように、海洋生態系モデルを高精度化する上で課題となっていた物理過程の実態把握が徐々に進んでいる。

## 2. 研究の目的

本研究では、日本周辺の魚類生産に重要とされる黒潮～黒潮続流域の海面から混合層を含む海洋表層を対象として、3年間で下記の3項目を達成することを目標とする。

- ① 物理・生物・化学の同時直接観測による、大気海洋境界物理過程が表層生態系変動に及ぼす影響の実態解明
- ② 得られた現場観測データとの比較による、既往の海洋生態系モデルの検証と問題点の抽出
- ③ モデル海面フラックス・混合層スキームのパラメータの改良・調整

以上の目標が達成されることにより、以下の点が明らかになることが想定される。

- A) 外洋の海上風の変動による風波の発達に伴う海面粗度と運動量・熱フラックスの変化の実態
- B) 海上風、風波、吹送流間の関係、またこれらが表層生物・物質の水平輸送に与える影響
- C) 海上風、風波、表層乱流間の関係、またこれらが表層生物の生産・鉛直分布に与える影響

## 3. 研究の方法

(1) 多機能ブイの開発 (2010～2012年)

- ① 現有の GPS 波高計センサ付設の漂流ブイ (GPS 波浪ブイ) からケーブルを介して多項目水質計 (水温、塩分、クロロフィル濃度、溶存酸素濃度、濁度、pH の各センサで構成される) を付設する。
- ② 多機能化したブイが正常に作動することを確認するために、神奈川県平塚市の 2km 沖合に設置された東京大学平塚観測塔に多機能ブイを係留・設置して動作試験を行う。
- ③ 学術研究船白鳳丸および淡青丸の研究航海 (次項) で黒潮海域に多機能ブイを漂流させ、実用試験を実施する。

(2) 黒潮域表層生態系観測 (2011～2012年)

- ① 2011年2月～3月に学術研究船白鳳丸 KH11-3 航海 (代表者: 安田一郎・東京大学大気海洋研究所)、2011年4月に学術研究

船淡青丸KT11-5 航海（代表者：小松幸生）、2012年4月に同KT12-5 航海（代表者：小松幸生）を実施し、黒潮～黒潮続流域において、CTD、硝酸計、栄養塩採水、乱流計（VMP500、VMP2000）、FRRFによる光合成活性鉛直プロファイリング、植物プランクトン・動物プランクトンネット採集、イワシ類仔魚ネット採集、を実施し、表層生態系の分布構造および変動過程の実態を把握する。

- ② 上記航海において多機能ブイを漂流させて、風波、水温、塩分、クロロフィル濃度、溶存酸素濃度の連続観測を実施する。
  - ③ 多機能ブイと乱流計による直接観測から、海上風の変動→風波の発達→海面下の乱流の発生→表層生態系の鉛直分布構造の変化、の一連の過程を追跡する。
- (3) 海洋生態系モデルの検証と改良（2011～2012年）
- ① 上記航海で得られたデータを、物理場をデータ同化した低次栄養段階の海洋生態系モデル（Komatsu et al., 2007）と比較して、既往モデルの精度を検証する。
  - ② 海面フラックスのうち、運動量フラックス（風応力）については、多くの大循環モデルで使用されている Large and Pond (1982) のバルクスキームの抵抗係数について、Donelan et al. (1993)、Janssen et al. (2002) 他で提案されている風波パラメータ（波齢他）に依存した抵抗係数を適用して、ブイ観測値と比較し、妥当なスキームとパラメータ値を探索して提示する。熱フラックスについては、バルクスキームによる顕熱・潜熱フラックスの計算に上記の改良した抵抗係数を導入する。
  - ③ 海洋混合層モデルのスキームについては、Mellor and Yamada (1982)、Noh and Kim (1999) 等の代表的なスキームや、風波（波齢）に依存させた Qiao et al. (2004) のスキームについて、まず、上記の改良した海面フラックスのスキームを適用して感度実験を行う。続いて、乱流計の直接観測から得られた海洋表層のエネルギー消散率と拡散係数の鉛直分布およびブイから得られた風波パラメータを比較の対象として、適切なスキームとパラメータ値を探索する。
  - ④ 改良した海面フラックス・混合層スキームを海洋生態系モデル（Komatsu et al., 2007）に組み込み、現場観測で得られたクロロフィル、硝酸塩データと比較してモデルの精度を検証する。
  - ⑤ 大気海洋境界過程が海洋表層の生態系に与える影響、特に、海上風のイベント的な変動に伴う表層生態系の応答を調べる。従来の海洋生態系モデルで再現されなかった人工衛星（SeaWiFS）の海色データにお

いてときどき見られる数 10km 規模のパッチ状の高濃度域（Komatsu et al., 2007）に着目して解析する。台風や前線域などの風が急変する海域での海上風に対する栄養塩と植物プランクトンの応答特性を明らかにする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 多機能ブイの開発とその利用による黒潮域の連続観測

沖合を漂流しながら波浪および表層の水質を連続的に自動観測する多機能ブイを新たに開発した。大気海洋の境界過程と所定の深度の水質を連続的に計測可能な漂流ブイはこれまで存在しなかった。開発した多機能ブイは、GPS 波浪ブイ（（株）ゼニライトブイ、太陽電池式/時系列データメモリ式）に浮力 120kg のフロートを介してケーブルをつり下げ、2 台の多項目水質計（YSI/Nanotech Inc., 6600V2-4）を任意の深度（本課題では投入点の季節密度躍層底部と主密度躍層上部の深度）にそれぞれ付設・固定し、ケーブル末端に水中重量約 30kg の錘を取り付けたものである（図 1）。波浪センサは、1 時間ごとに 20 分間の連続変位を計測・保存し、波高、波周期、波向の統計量を算出・送信する。一方、多項目水質計は、深度、水温、塩分、溶存酸素、濁度、クロロフィル、pH/ORP を 4 分間隔で計測する（測定間隔は変更可能）。

多機能ブイによる連続観測から、従来の船舶観測や昇降式フロート（例、アルゴフロート）では得られなかった数時間スケールの海洋環境変動を捉えることができた。例として 2012 年 4 月の淡青丸航海の概要を述べる。多機能ブイを黒潮内側域の点（138°E, 34°N）で 4 月 10 日 17 時 15 分に投入し、4 月 12 日 16 時 50 分に回収した。ブイは期間中左周りに漂流し、漂流速度の最大値は 0.7m/s に達した（図 2a）。途中強い低気圧の直撃を受け、最大波高が 9.6m に達したが（図 2b）、ブイは全ての項目を欠測なく計測した。また、漂流中の水質計の深度はそれぞれ平均値（標準偏差）が 49.5m (0.8m) と 144.3m (1.5m) で、ほぼ一定の深度を維持し、所定層の水質を安定的に計測できていた。上層では 2 日間で水温が 3°C 程度変動し、下層では上層に比べて変動幅は小さいものの、いずれでも半日程度の周期の変動が見られた（図 2c）。また、水温の変動に伴って密度が大きく変動しており、密度が低下（増加）すると溶存酸素濃度、クロロフィル濃度、pH が上昇（下降）し、その変化は互いに強い相関関係にあった。上層（50m）の水質計による密度変化は 25.3～25.8 $\sigma_\theta$  の範囲であり、これは周辺海域の CTD プロファイルから推定すると、鉛直方向に 40m 分の変動に相当する。ブイの漂流海域が 3000m から 500m 以浅へと急激に

浅くなる海域であることから、漂流ブイは内部波に伴う密度面の変動を捉えたものであると推察された。このような内部波に伴う水塊の上下動が表層への栄養塩供給、さらには基礎生産に及ぼす機構の詳細解明とその定量的評価は今後の課題である。

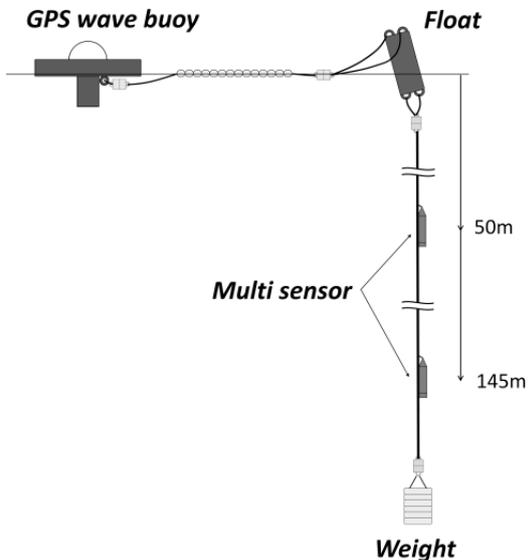


図1. 多機能ブイのデザイン

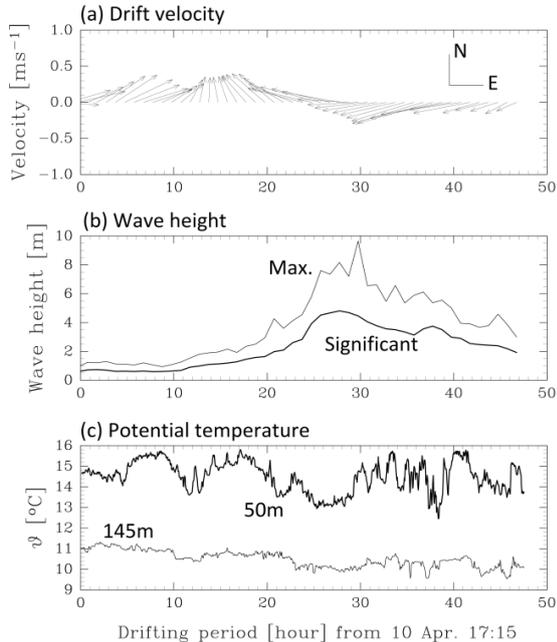


図2. 多機能ブイにより得られた時系列

## (2) 海洋生態系モデルの高精度化

物理場をデータ同化した既往の生態系モデル (Komatsu et al., 2007) について、多機能ブイおよび詳細観測で得られた海洋表

層生態系の現場データと比較することにより、運動量・熱フラックスの推定スキームと混合層モデルを改良してモデルの高精度化を図った。以下では概要のみ記述する。

### ①運動量・熱フラックス推定スキームの検証・改良

既存のスキームでは Janssen et al. (2002) のスキームが最も妥当であり、波齢への依存パラメータを強化することで強風時の再現性が向上することが分かった。

### ②混合層モデルの検証・改良

多機能ブイの観測で見出されたような内部波の影響が強い海域においては、従来のモデルでは混合層内部の水塊構造および変動の再現性が低いことが分かった。この点の改良は今後の課題である。ただし、風波の直接的影響が大きい表層においては、Qiao et al. (2004) のモデルが再現性に比較的優れており、波齢に加えて波高をパラメータとして導入することでその再現性が向上することが明らかになった。

### ③海洋生態系モデルの高精度化

物理場をデータ同化した低次栄養段階の海洋生態系モデル (Komatsu et al., 2007) に以上の改良を組み込んで強風時の植物プランクトンの応答特性を数値実験で調べたところ、改良したモデルでは強風時に数 10km 程度のパッチ構造が再現できることを確認した。例として、2012 年 4 月に実施した黒潮域の現場観測 (図3) との比較を図4に示す。

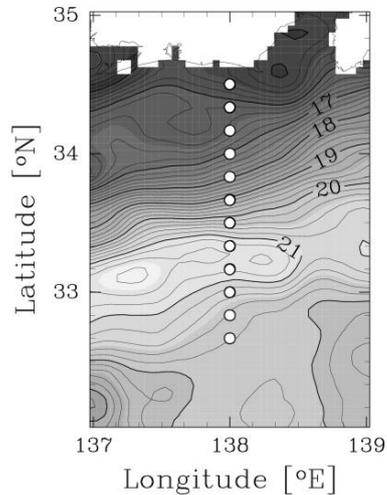


図3. 2012 年 4 月中旬に実施した淡青丸による黒潮横断航海の測点図。背景は海面水温 (°C)。

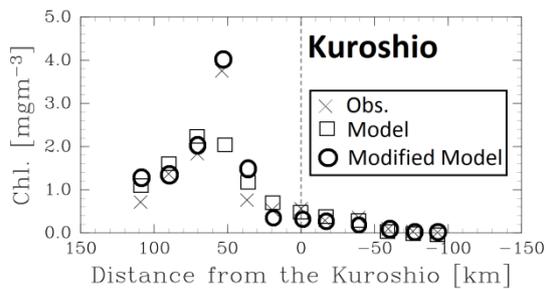


図4. 2012年4月の138°E線に沿った黒潮横断面における10m層のクロロフィル濃度。観測値と改良前後のモデル推定値の比較。横軸は黒潮強流位置を0として、北側（沿岸側）を正、南側（沖合側）を負とした。

本課題で対象としたモデルのように物理場を同化することにより黒潮のような西岸境界流を適切に再現した上で数10km程度のプランクトンのパッチ構造を再現可能な生態系モデルはこれまで例がない。今後、内部波の影響を再現できるように混合層モデルを改良し、また、波浪を介した海面のフラックス変動の機構の解明が進んでその成果をモデルに反映させることにより、海洋生態系モデルのさらなる高精度化が期待される。将来的には、イワシ類、サンマ、マアジ、サバ類等の黒潮域を主産卵場とする重要浮魚類の資源変動要因の解明に適用する計画である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Kaneko, H., I. Yasuda, K. Komatsu and S. Itoh, Observations of the structure of turbulent mixing across the Kuroshio, *Geophysical Research Letters*, 査読有、Vol. 39, 2012, L15602, DOI:10.1029/2012GL052419
- ② Okunishi, T., S. Ito, D. Ambe, A. Takasuka, T. Kameda, K. Tadokoro, T. Setou, K. Komatsu, A. Kawabata, H. Kubota, T. Ichikawa, H. Sugisaki, T. Hashioka, Y. Yamanaka, N. Yoshie and T. Watanabe, A modeling approach to evaluate growth and movement for recruitment success of Japanese sardine, *Fisheries Oceanography*, 査読有、Vol. 21, 2012, 44-57, DOI:10.1111/j.1365-2419.2011.00608.x
- ③ Itoh, S, T. Saruwatari, H. Nishikawa, I. Yasuda, K. Komatsu, A. Tsuda, T. Setou

and M. Shimizu, Environmental variability and growth histories of larval Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) and Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) near the frontal area of the Kuroshio, *Fisheries Oceanography*, 査読有、Vol. 20, 2011, 114-124, DOI:10.1111/j.1365-2419.2011.00572.x

[学会発表] (計24件)

- ① Komatsu, K. et al., Impacts of epipycnal and diapycnal nutrient-transport by the Kuroshio on the productivity in the adjacent epipelagic waters, PICES 2012 Annual Meeting, 2012年10月16日、広島県広島市国際会議場
- ② 小松幸生, 他、多項目観測漂流ブイによる黒潮内側域の連続観測～黒潮域生態系の3次元輸送・拡散過程 (V)～、2012年度日本海洋学会秋季大会、2012年9月14日、静岡県静岡市東海大学清水校舎
- ③ Komatsu, K., Impacts of the 3D nutrient-transport by the Kuroshio on the land-sea biogeochemical interaction in the western North Pacific, 日本地球惑星科学連合 (JPGU) 2012年大会、2012年5月22日、千葉県千葉市幕張メッセ

[図書] (計3件)

- ① 小松幸生, 他、講談社サイエンティフィク、最新水産ハンドブック、2012、25-27
- ② 小松幸生, 他、朝倉書店、自然環境学の創る世界、2011、1-18

[その他]

ホームページ等

<http://lmr.aori.u-tokyo.ac.jp/feog/kosei/index.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小松 幸生 (KOMATSU KOSEI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：30371834