

ARGOフロートの投入シミュレーション

岡 英太郎*¹

長期予報の精度向上や気候変動予測の実現のために、今後数年間で全世界の海洋に約3000個のプロファイリングフロートを展開し、海洋表層・中層のリアルタイム監視システムを構築する国際プロジェクト、ARGO計画が2000年に始まった。日本では、地球観測フロンティア研究システム 気候変動観測研究領域 亜表層・中層グループと海洋科学技術センター 海洋観測研究部の共同チーム(FORSGC/JAMSTEC)がARGO計画実施の主体となり、約400個のフロートを西部熱帯・北太平洋及び熱帯インド洋の一部に展開する。限られた航路を利用し、担当海域に多数のフロートを効率よくかつできるだけ均等に展開するために、FORSGC/JAMSTECでは海洋大循環モデルの出力流速データを用いたフロートの投入シミュレーションを行い、その結果を基にフロートの投入位置を決めている。このシミュレーションの方法とフロート投入計画作成への応用について簡単に説明する。

キーワード：ARGO計画, フロート展開, シミュレーション

A Simulation for Deployment of ARGO Floats

Eitarou OKA*²

The ARGO project started in 2000. In this international project, approximately 3000 profiling floats will be deployed in the world ocean in several years to build a real-time monitoring system of the upper and middle layers of the ocean for long-term weather forecasts and climate predictions. In Japan, Frontier Observational Research System for Global Change and Japan Marine Science and Technology Center (FORSGC/JAMSTEC), the main organizations for implementation of the ARGO project, will deploy approximately 400 floats in the western tropical and North Pacific and a part of the tropical Indian Ocean. In order to deploy many floats efficiently using limited cruises available and let them distribute as uniformly as possible, FORSGC/JAMSTEC is performing a simulation of float deployment using output data of velocity of an ocean general circulation model (OGCM), and decides the locations of deployment based on its result. Method and application of this simulation are briefly explained in this report.

Keywords : ARGO project, float deployment, simulation

*1 地球観測フロンティア研究システム 気候変動観測研究領域

*2 Climate Variations Observational Research Program, Frontier Observational Research System for Global Change

1. はじめに

長期予報の精度向上や気候変動予測の実現のために、プロファイリングフロートを用いて海洋表層・中層のリアルタイム監視システムを構築する国際プロジェクト、ARGO計画が2000年に始まった(水野, 2000; Roemmich and Owens, 2000; 佐伯, 2000)。このプロジェクトでは、今後数年間で全世界の海洋に、平均で300km四方あたり1個の密度で分布するように、約3000個のプロファイリングフロート(ARGOフロート)を展開する予定である。フロートは所定の滞在深度(通常2000m深)を漂流し、所定の期間(通常10日)ごとに、自身の体積を変化させることにより浮力を変化させ、海面まで浮上する。浮上中CTDセンサーにより水温・塩分・圧力データを測定し、海面浮上後ARGOS衛星システムを通じて地上に送信する。フロートは海面に約半日滞在した後、再び滞在深度に戻る。

日本では、国際的なARGO計画に対応して、政府のミレニアム・プロジェクト「高度海洋監視システムの構築」(以下、日本のARGO計画と呼ぶ)が2000年度に始まった。日本のARGOフロート展開の主な担当海域は、西部熱帯・北太平洋(10°S以北、170°W以西)及び熱帯インド洋の一部(18°S-5°N, 75°-95°E)である(図1)。これらの海域を300km四方あたり1個の密度で満たすためには、合計で約430個のフロートが必要である。日本のARGO計画実施の主体である地球観測フロンティア研究システム 気候変動観測研究領域 亜表層・中層グループと海洋科学技術センター 海洋観測研究部の共同チーム(以下、FORSGC/JAMSTEC)では、2000年度末までに17個のフロートを黒潮続流の南側と北側及び続流内に投入した。今後、2001年度は約80個、2002-2004年度

は毎年100個を投入する予定である。

投入したフロートは空間的に常に均等に分布するのが理想であるが、2000m深および海面における流れはフロートの位置を時々刻々と変化させる。特に海面での流れは、浮上・沈降サイクルに占める時間的割合は低いものの2000m深の流れに比べて強く、収束・発散を伴うためにフロートの分布に偏りを生じさせる。また、フロートの投入には海洋科学技術センターの観測船「みらい」、他の実施機関や関係機関(気象庁、海上保安庁、水産庁)の観測船や調査船、大学の観測船、その他篤志商船や篤志漁船などが用いられるが、これらの航路や航海時期は通常、ARGOフロートの展開とは無関係に決められる。

そこで、限られた航路を利用し、担当海域に多数のフロートを効率よくかつできるだけ均等に展開できるように、投入位置を決定する必要がある。FORSGC/JAMSTECでは現在、海洋大循環モデルの出力流速データを用いたARGOフロートの投入シミュレーションを行い、その結果を基にフロートの投入位置を決定している。本稿では、このシミュレーションの方法(2節)とフロート投入計画作成への応用(3、4節)について簡単に説明する。

2. シミュレーション方法

海洋科学技術センター海洋観測研究部の高解像度海洋大循環モデルで出力された流速データと粒子追跡プログラムを用いてARGOフロートの動きをシミュレートした。詳細を以下に述べる。

モデルはNOAA/GFDLで開発されたMOM2(Modular Ocean

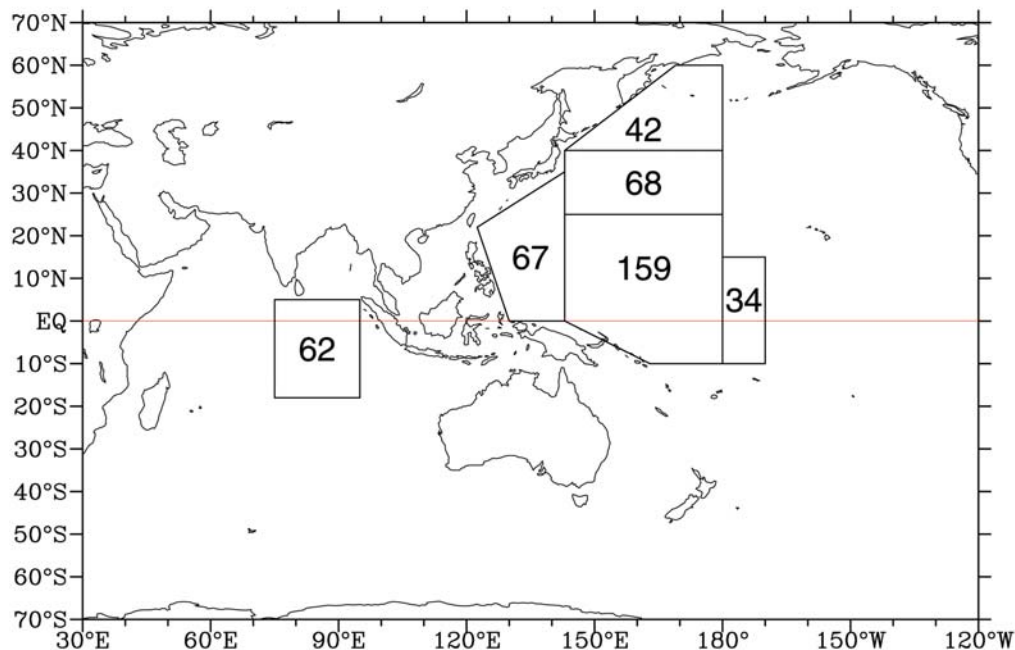


図1 ARGO計画で日本がプロファイリングフロートの展開を担当する主な海域(黒い線で囲まれた部分)。各海域を平均で300km四方あたり1個の密度で満たすために必要なフロートの数を示す。

Fig. 1 Main areas (areas surrounded by black lines) of deployment of profiling floats by Japan in the ARGO project. Number of floats needed to fill each area with average spacing of 300km is shown.

Model 2)に基づいて構築された(詳細は Ishida et al.(1997)を参照のこと)。75°Sから75°Nまでの全球を対象とし、分解能は水平方向に0.25度、鉛直方向に55レベルである。境界条件は、熱・塩分はモデルの最上層の水温・塩分を Levitus(1982)による水温・塩分気候値データに復元させ、運動量には Hellerman and Rosenstein(1983)の風応力データを用いている。水平粘性・拡散には、Bi-harmonic の式を用い、係数の値は粘性・拡散係数共に $-1 \times 10^{10} \text{cm}^4/\text{sec}$ としている。鉛直粘性・拡散には Pacanowski and Philander(1981)の式を用いている。最初の2年間は初期スピニングアップとして、境界条件に年平均データを用いて積分計算が行なわれた。その後、季節変動を与えるために月平均データを用いて18年間の計算が行なわれた。

本シミュレーションでは、月平均データによる計算の最後の1年、すなわち積分20年目の1年間分の5日毎スナップショット水平流速を、粒子追跡計算の流速データとして用いた。海面およびフロート滞在深度の2000mにそれぞれ最も近い層として、レベル1(最上層;5m)およびレベル43(2045m)のデータを使用した。一部のフロートは、海面付近の密度が季節的に著しく低下する海域に投入されるため、海面浮上の可能性を考慮して滞在深度を1500mに設定する予定である。これらのフロートについての計算では、レベル43の代わりにレベル39(1523m)の流速データを使用した。

粒子追跡プログラムはMOM2のオプションである粒子追跡ルーチンを利用して作成した。粒子追跡計算では、2時間ごとの各水平格子点における水平流速を、その直前および直後の5日毎流速データから線形補間で求める。次に各粒子(ARGOフロートに相当)の位置での水平流速を、その粒子の存在する格子の格子点における流速から線形補間で求め、これを用いて次のステップ、すなわち2時間後の粒子位置を計算する。粒子の運動は水平方向のみ計算する。

現在実海域に投入されているFORSGC/JAMSTECのフロートの設定では、フロートは10日ごとに海面に浮上し、海面には約11時間滞在する。そこで本シミュレーションでは、粒子がレベル43に114ステップ(9日12時間)とレベル1に6ステップ(12時間)、交互に滞在すると仮定して粒子追跡計算を行なった。フロートの浮上・沈降には共に約6時間を要するが、これらのプロセスは計算上無視した。フロートが海面に在る間に2000mより浅い海域に流れこみ、沈降時に着底した場合は、約9日後に浮上を開始するまで海底の同じ位置にとどまると考えられる。これに対応して、粒子がレベル1からレベル43に移る時に2000mより浅い海域に存在した場合は、続く114ステップの間同じ位置にとどめ、再びレベル1に戻った時に動き始めるとした。

本シミュレーションでは、投入場所によるフロートの動きの違いを統計的に調べるために、一つの投入予定点に対して多数のフロートを配置して計算を行った。具体的には、各投入予定点を中心とする1度四方のボックス内にフロートを均等に25個ないしは100個ずつ配置した。

3. 日本の担当海域におけるARGOフロートの移動の特徴

西部熱帯・北太平洋及び熱帯インド洋の担当海域に

ARGOフロートを展開するにあたり、まずこれらの海域においてフロートが投入後どのように移動するのを知る必要がある。シミュレーションで西部熱帯・北太平洋にフロートを仮想的に様に投入し、3年間の動きを計算した(図2)。

フロートの移動の様子は大きく3つの海域で異なる。20°S-0°と0°-25°Nの熱帯域ではフロートはそれぞれ主に西南西-南西、西北西-北西方向へと動き、日本の東、30°-50°Nの亜熱帯・亜寒帯域では東南東-南南東方向へと動く。熱帯域の動きは主に西向きの南赤道海流及び北赤道海流と、貿易風による極向きのエクマン流のためであり、亜熱帯・亜寒帯域の動きは東向きの黒潮続流、亜寒帯前線、及び北太平洋海流と、偏西風による南向きのエクマン流のためである。この結果、15°-35°Nではフロートが南や北の海域から集まり、増加する(図3)。特に20°-30°Nではフロートの数は3年間で50%以上増加する。これに対し、赤道付近の5°S-10°Nではフロートは極向きに散り、その数は大きく減少する。35°N以北でもフロートは東向きの流れによって投入域から離れていくため、減少する。なお、図2では計算を1月1日から開始しているが、他の季節から開始した場合でもフロートの移動の大まかな特徴は変わらない。

シミュレーション結果によれば、2000m深の流れは海面での流れに比べてずっと弱い、フロートが滞在する時間の割合は2000m深の方がずっと大きい、フロートが2000m深と海面において動く距離はコンパラとなる。もっとも2000m深には海面のような卓越した流れの体系はなく、また2000m深の流れはほぼ非発散であるため、図2、3に示されるフロートの動きは海面での流れを強く反映したものとなる。

フロートの展開という点から考えると、日本の東の亜熱帯・亜寒帯域では、日本の近くでフロートを投入しても東向きに流されて海域全体に広がるため、展開が比較的容易である。これに対し熱帯域ではフロートは西向きに動くため、日本から遠い東側の海域で投入を行なう必要がある。特に、気象庁が定期観測を行っている165°E線より東側では利用できる航海が少なく、投入手段の確保が重要となる。また、赤道付近ではフロートが大きく発散するため、フロートを定期的に補充しつづける必要がある。

図2と同様の計算をインド洋において行った(図4)。南赤道海流の存在する25°-5°Sの熱帯域では太平洋と同様、フロートは西南西-南西方向へと動くが、5°S以北の様子は太平洋と大きく異なる。赤道付近の5°S-3°Nでは、フロートは東向きに動く。これはモンスーンの遷移期に生じる東向きの赤道ジェットと、そのすぐ南に位置する東向きの南赤道反流のためである。5°N以北のアラビア海とベンガル湾における流れは季節的に大きく変化するが、平均ではフロートは東-南東方向へと動く。日本の担当海域にフロートを効率よく分布させるためには、5°S以北では西側の海域で、5°S以南では北東側の海域で投入を行なえばよいことが分かる。

ここで、本シミュレーションで用いているモデル流速データの主な問題点について述べておきたい。まず、複数年にわたるシミュレーションにおいて積分20年目の1年間分の

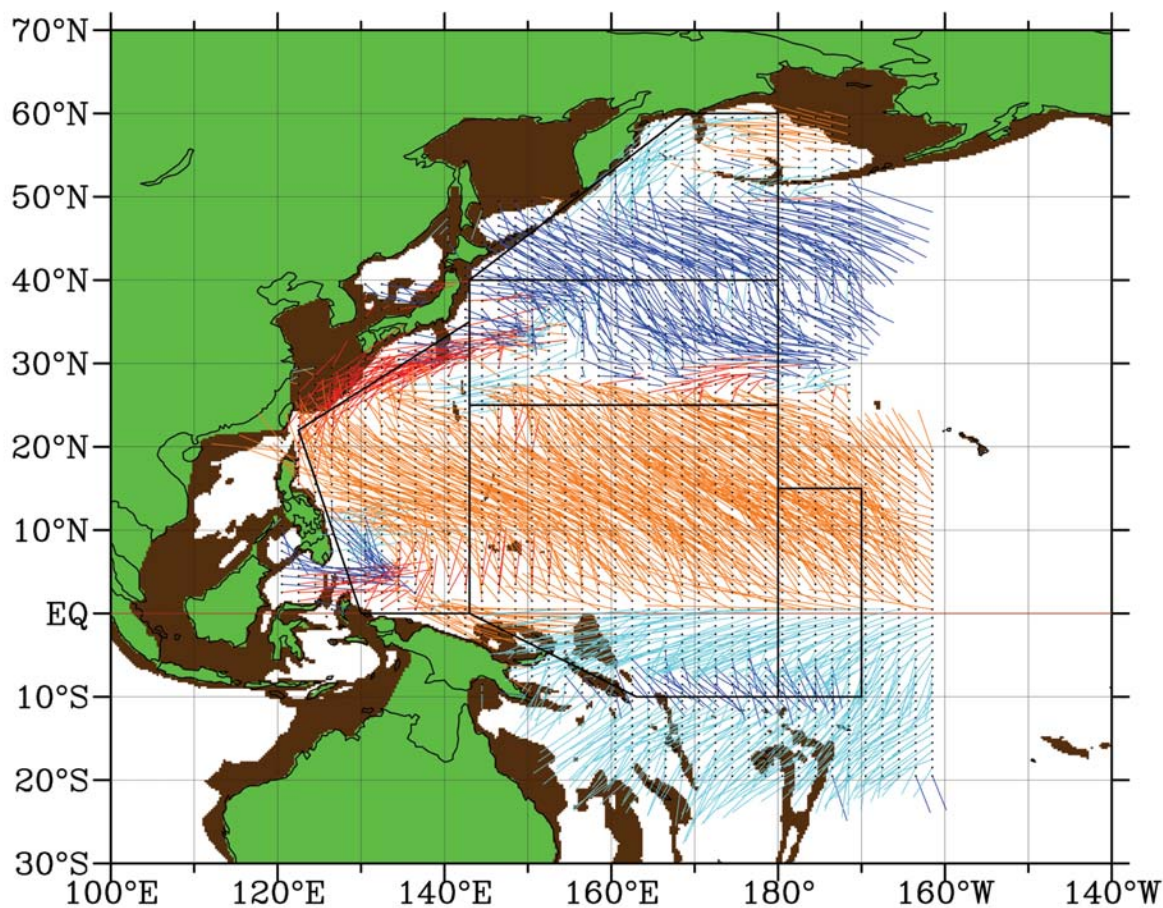


図2 シミュレーションにより得られた、西部熱帯・北太平洋に一樣に投入したARGOフロートの3年間の位置の変化(色のついた線)。投入位置をドットで示す。線の色は移動方向を表し、赤は北と東の間、青は東と南、水色は南と西、オレンジは西と北の間の方向を表す。シミュレーションでは、各ドットを中心とする1度四方のボックス内にフロートを均等に25個ずつ配置し、1月1日から3年間の動きを計算した。その上で、フロートの3年後の位置をボックスごとに平均した。緑と茶色の領域はそれぞれモデルにおける陸地と2000m以浅の海域を示す。黒の太線は日本のARGOフロート展開の主な担当海域を表す。

Fig. 2 Changes in position (colored lines) for three years of ARGO floats deployed uniformly in the western tropical and North Pacific, obtained by the simulation. Locations of deployment are shown by dots. Color of lines indicates the direction of shift; red is for between north and east, blue east and south, light blue south and west, and orange is for between west and north. In the simulation, 25 floats were initially distributed uniformly in each $1^\circ \times 1^\circ$ box centered by dot, and their movement for three years from 1 January was computed. Their locations at three years were averaged for each box. Green and brown regions indicate lands and areas shallower than 2000m in the OGCM, respectively. Black, thick lines show the main areas of Japanese deployment of ARGO floats.

データを繰り返し用いているため、その年に特徴的な流速データの構造、特に中規模渦等の分布がシミュレーション結果に強く反映されやすい。この点については、今後積分21年目以降の流速データを加え、フロートの稼動期間(約4年間)に相当する長さのデータを使用できるよう、現在準備中である。もう一点、モデルでは黒潮や親潮等の西岸境界流の再現性に多少の問題がある。その影響は、各航海でのフロート投入について局所的なシミュレーションを行う場合に顕著となる。この点については、次節で具体的に述べる。

4. 2001年度の日本のARGOフロート投入

日本のARGOフロートの投入は、2000年度までは日本の南東の海域で試験的に行われていたが、2001年度からは担当海域全域で本格的に行われる。2001年度は68個のフロートが西部熱帯・北太平洋に(図5)、10個がインド洋に投入される予定である。投入には海洋科学技術センターの観測船「みらい」、気象庁の啓風丸及び凌風丸、海上保安庁の拓洋、東京大学海洋研究所の白鳳丸の計8航海が用いられる。各航海でのフロート投入位置は、航路、航海時期、利用可能なシップタイム、シミュレーションから予想されるフロートの動き等を基に決められた。

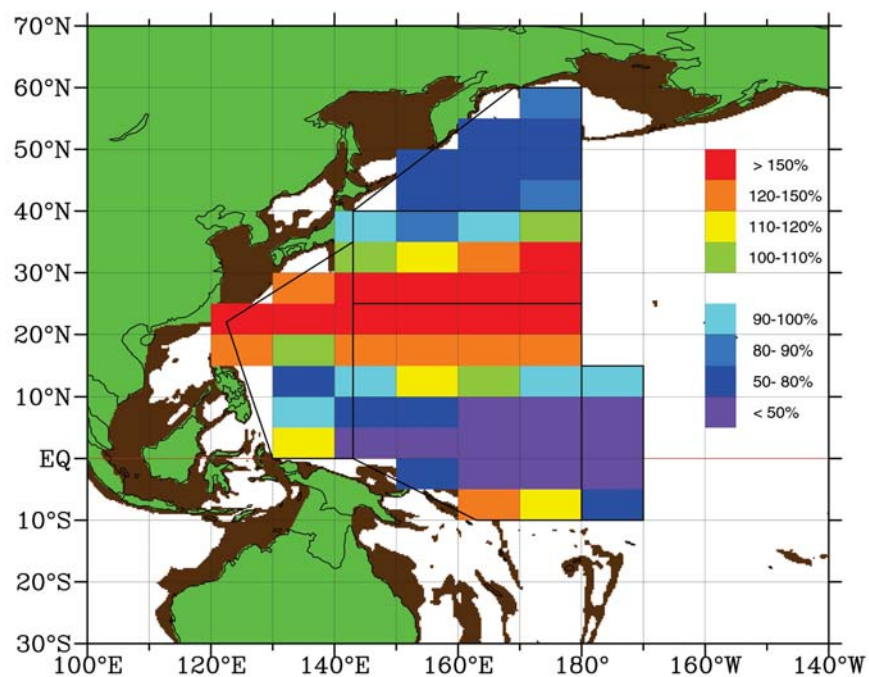


図3 図2の計算で、南北5度・東西10度の各領域に投入3年後の時点で存在するARGOフロートの数を投入時に存在する数で割った比(%)。緑と茶色の領域はそれぞれモデルにおける陸地と2000m以浅の海域を示す。黒の太線は日本のARGOフロート展開の主な担当海域を表す。

Fig. 3 Ratio (%) of number of ARGO floats existing in each $5^{\circ} \times 10^{\circ}$ area at three years after deployment to that at the time of deployment, based on the computation shown in Fig.2. Green and brown regions indicate lands and areas shallower than 2000m in the OGCM, respectively. Black, thick lines show the main areas of Japanese deployment of ARGO floats.

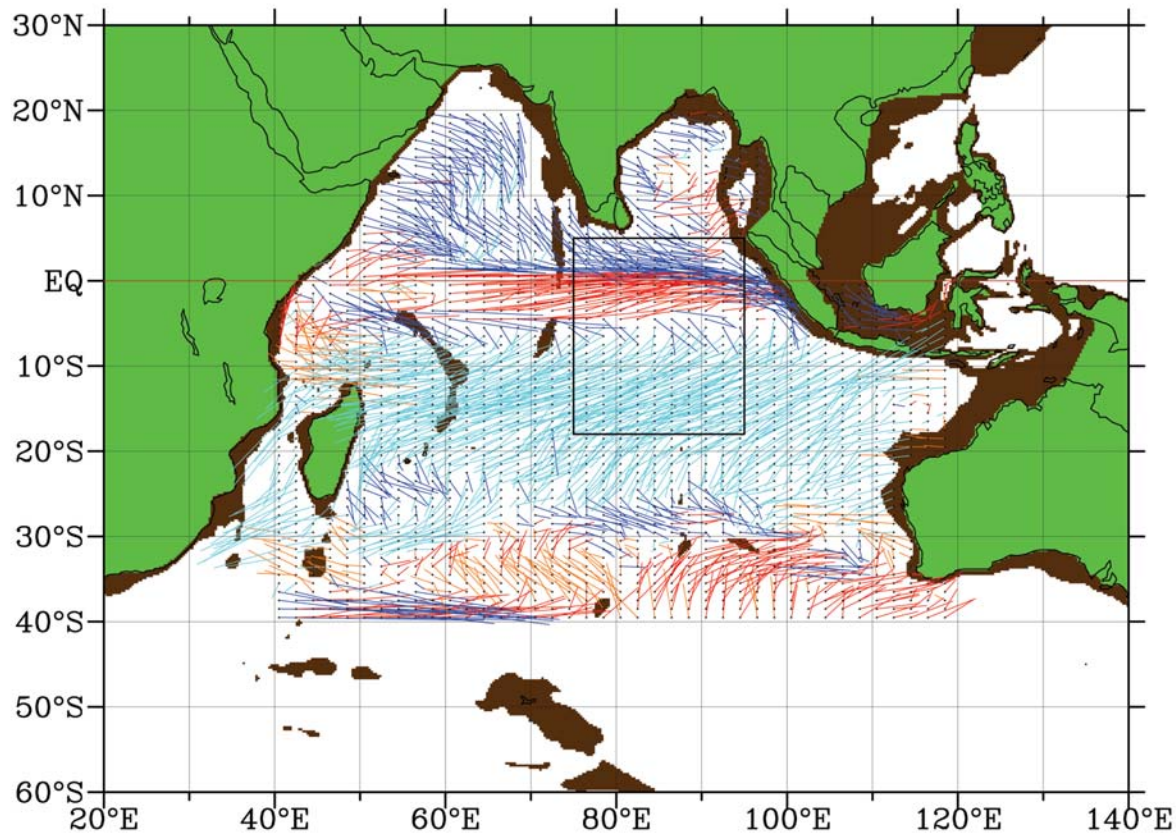


図4 図2と同様。但し、インド洋での計算。

Fig. 4 Same as Fig.2 but for the Indian Ocean.

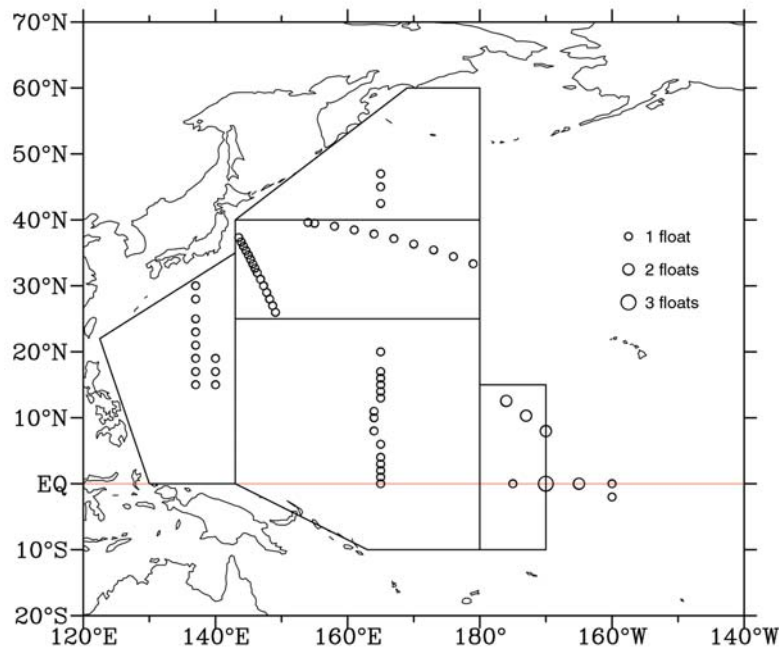


図5 2001年度の西部熱帯・北太平洋における日本のARGOフロートの投入予定位置(丸)。丸の大きさは各点での投入個数を示す。黒い線は日本のARGOフロート展開の主な担当海域を表す。

Fig. 5 Scheduled locations (circles) of Japanese deployment of ARGOS floats in the western tropical and North Pacific in the fiscal year 2001 starting in April 2001. Size of circles shows number of floats deployed at each location. Black lines show the main areas of Japanese deployment of ARGOS floats.

各航海についてのシミュレーション結果の一例として、2002年2月21日出航の「みらい」MR02-K02航海で投入されるフロートの投入3年後の分布を図6に示す。この航海では、八戸から8°N・156°Eのトライトンブイ設置点に向かう航路上、緯度が37°20'Nから26°Nまでの15点でフロートが1個ずつ投入される予定である。投入の3年後、29°-37°Nではフロートが東西方向に分散し、特に投入ラインの東側に大きく広がっている。これは日本の東、34°N付近を東向きに流れる黒潮続流のためである(図7)。その南の24°-29°Nでは西向きの弱い黒潮逆流のために、フロートは投入ラインの西側に分布する。フロートの一部は140°E付近の伊豆・小笠原海嶺を越えて四国海盆へと入る。シミュレーションの結果は、南北方向に投入したフロートが東西方向の流れによって効率よく分散することを示している。なお、モデルにおける黒潮続流は現実の続流よりも2度ほど南に位置している。

モデルにおける西岸境界流の再現性の問題について前節で述べたが、その一例として、北海道南東の41°N・145°Eを中心とする高気圧性渦の存在が挙げられる(図7)。この渦に伴い、本州東岸に沿って北上し北海道南東から東向きに抜ける流れが存在しており、モデルの北海道南東海域における流速分布は、親潮が北海道南東岸に沿って南下する現実の流速分布と大きく異なっている。この本州東岸から北海道東方に至る流れは、シミュレーションにおいて本州東方

の混乱水域に存在する粒子を次々と高緯度側の海域へと運び、非現実的なフロート分布を作り出す。図6ではこの流れの効果を除くため、高気圧性渦の北側半分をカバーする41°-43°N、142°-150°Eの領域に投入後4年の間に入ったフロートを除いてある。

各航海についてのシミュレーション結果をまとめ、2001年度に西部熱帯・北太平洋に投入されるフロートの2003年度末時点での密度分布を求めた(図8)。日本の東の25°-40°Nやフィリピン海盆の15°N以北の海域にはフロートが比較的高密度で分布しているのに対し、40°N以北や25°N以南の海域の大部分にはフロートがほとんど分布していない。2002年度以降、これらの空白域を埋めるようにフロートを展開していく予定である。

5. まとめ

FORSGC/JAMSTECで行なっているARGOフロートの投入シミュレーションについて簡単に説明した。シミュレーションの結果は、実際のフロートの動きとの比較を行い、その妥当性を検討する必要がある。現在、R. E. Davis氏より提供して頂いたフロートの位置データ(Davis, 1998)を基に、本シミュレーションの評価を行なっている。

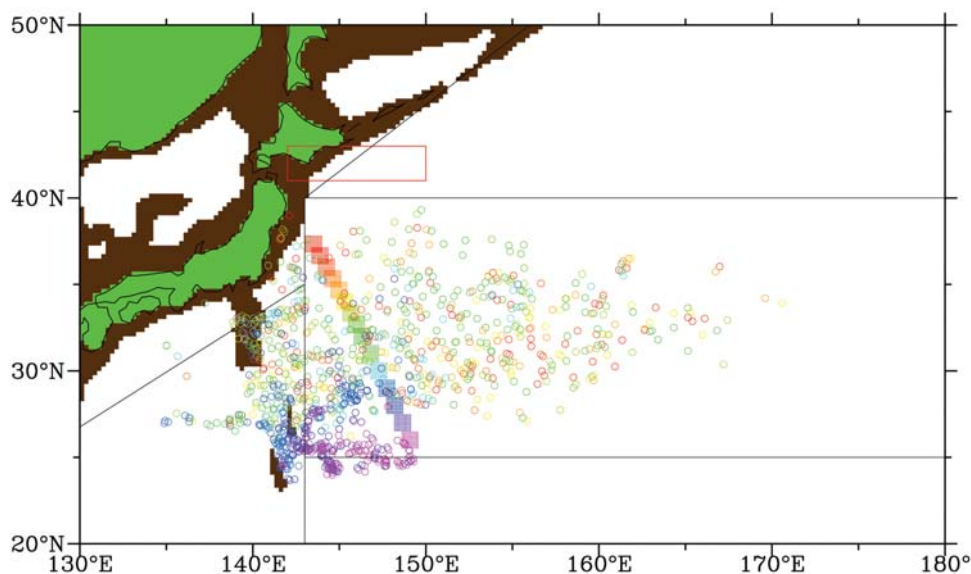


図6 シミュレーションにより得られた、2002年2月に観測船「みらい」MR02-K02航海で投入されるARGOフロートの投入3年後の分布(丸)。シミュレーションでは、各投入予定点を中心とする1度四方のボックス内にフロート(ドット)を均等に100個ずつ配置し、2月25日から4年間の動きを計算した。4年間に赤い線で囲まれた41°-43°N, 142°-150°Eの領域に入ったフロートは除いた(詳細については本文を参照のこと)。丸およびドットはボックスごとに異なる色で表す。緑と茶色の領域はそれぞれモデルにおける陸地と2000m以浅の海域を示す。黒い線は日本のARGOフロート展開の主な担当海域を表す。

Fig. 6 Simulated distribution at three years after deployment of the ARGO floats (circles) which are scheduled to be deployed in MR02-K02 cruise of R/V Mirai in February 2002. In the simulation, 100 floats (dots) were initially distributed uniformly in each $1^\circ \times 1^\circ$ box centered by the location of deployment, and their movement for four years from 25 February was computed. The floats which entered the region at $41^\circ - 43^\circ \text{N}$, $142^\circ - 150^\circ \text{E}$ surrounded by red lines during the four years were removed (See the text for details). The circles and dots are colored differently among boxes. Green and brown regions indicate lands and areas shallower than 2000m in the OGCM, respectively. Black lines show the main areas of Japanese deployment of ARGO floats.

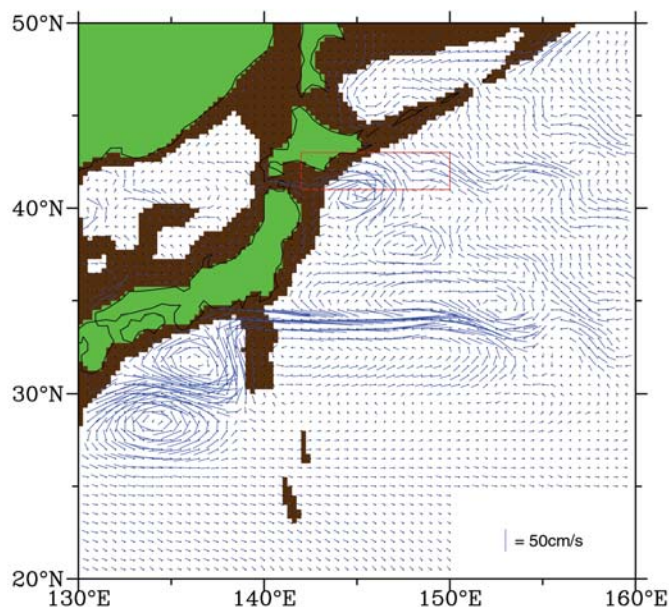


図7 シミュレーションで用いているレベル1(最上層;5m深)のモデル流速の日本近海での年平均分布(青線)。流速ベクトルの始点をドットで示す。緑と茶色の領域はそれぞれモデルにおける陸地と2000m以浅の海域を示す。赤線で囲まれた41°-43°N, 142°-150°Eの領域については本文を参照のこと。

Fig. 7 Distribution around Japan of annual mean of the OGCM velocity (blue lines) at Level 1 (top layer at 5-m depth) used in the simulation. Starting points of the velocity vectors are shown by dots. Green and brown regions indicate lands and areas shallower than 2000m in the OGCM, respectively. See the text for the region at $41^\circ - 43^\circ \text{N}$, $142^\circ - 150^\circ \text{E}$ surrounded by red lines.

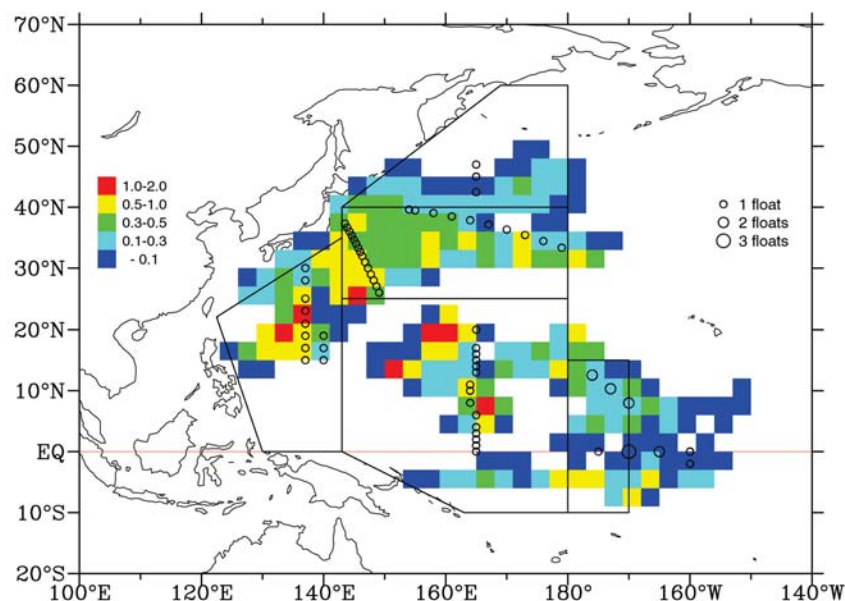


図8 シミュレーションにより得られた、2003年度末時点で3度四方の各格子内に存在するARGOフロートの数の期待値。2001年度に西部熱帯・北太平洋に日本が投入する予定のフロート(丸)に対して計算を行った。シミュレーションでは、各投入予定点を中心とする1度四方のボックス内にフロートを均等に100個ずつ配置し、各投入予定日からの動きを計算した。フロートの滞在深度は2000mだが、165°E線上の8°N以南と2°S-0°、175°-160°Wで投入されるフロートについては1500mとした。2003年度末時点で3度四方の各格子内に存在するフロートの数を100で割って期待値とした。黒い線は日本のARGOフロート展開の主な担当海域を表す。

Fig. 8 Expected value of number of ARGO floats existing in each $3^\circ \times 3^\circ$ grid at the end of fiscal year 2003 (end of March 2004), obtained by the simulation. This is computed for the floats (circles) which are scheduled to be deployed by Japan in the western tropical and North Pacific during the fiscal year 2001. In the simulation, 100 floats were initially distributed uniformly in each $1^\circ \times 1^\circ$ box centered by the location of deployment, and their movement from the scheduled dates of deployment was computed. The parking depth of floats was 2000m, but it was 1500m for those deployed south of 8° N along 165° E and at 2° S- 0° , 175° - 160° W. The expected value was obtained by dividing number of the floats existing in each $3^\circ \times 3^\circ$ grid at the end of fiscal year 2003 by 100. Black lines show the main areas of Japanese deployment of ARGO floats.

謝辞

海洋科学技術センター海洋観測研究部の石田明生さんには高解像度海洋大循環モデルの流速データを快く提供して頂きました。また、粒子追跡計算について度々御教授頂きました。深謝いたします。本シミュレーションの計算には海洋科学技術センター横浜研究所のスーパーコンピューター NEC SX-5 を使用し、横浜研究所情報業務部情報業務課の方々にはお世話になりました。御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Davis, R. E., "Preliminary results from directly measuring middepth circulation in the tropical and South Pacific", J. Geophys. Res., 103, 24619-24639 (1998).
- 2) Hellerman S. and M. Rosenstein, "Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates", J. Phys. Oceanogr., 13, 1093-1104 (1983).
- 3) Ishida, A., Y. Kashino, H. Mitsudera, N. Yoshioka, and T. Kadokura, "Preliminary results of a global high-resolution

GCM experiment", J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII(Geophysics), 11, 441-460 (1997).

- 4) Levitus, S., "Climatological atlas of the world ocean", NOAA Prof. Pap. No. 13, U.S. Govt. Print. Office, Washington, D.C., 173pp (1982).
- 5) 水野恵介, "高度海洋監視システム(ARGO計画)構想について", 日本造船学会誌, 854, 485-490 (2000).
- 6) Pacanowski, R. and S.G.H. Philander, "Parametrization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans", J. Phys. Oceanogr., 11, 1443-1451 (1981).
- 7) Roemmich, D. and W. B. Owens, "The Argo project: global ocean observations for understanding and prediction of climate variability", Oceanography, 13, 45-50 (2000).
- 8) 佐伯理郎, "ARGO(アルゴ)計画", 気象, 44(7), 4-8 (2000).

(原稿受理: 2001年7月31日)