

アルゴフロートのターミネーション後の陸上漂着率に関する考察

楊 燦守*¹ 石田 明生*² 岩坂 直人*¹

2000年から始まったARGO(アルゴ)国際プロジェクトは、水温・塩分・流速を観測するため2005年まで全球海洋に3000台のフロートを投入し、中上層海洋をリアルタイムで監視しようというプロジェクトである。2002年7月までに14か国が世界の海洋に476台のフロートを展開している。本研究では、数多く投入されたフロートがターミネーションした後どのように漂流するかを大循環モデルの流速場によるシミュレーションで調べた。

まずシミュレーションの妥当性を調べるために、モデルで得られた海面流速データを用いてフロート漂流シミュレーションを行い、WOCEの海面漂流ブイのデータベースとの比較により結果を評価した。モデル結果は全体としては海面漂流ブイの動きをよくシミュレートし、北太平洋全体での沿岸漂着率も再現していることから、モデルはフロートのターミネーション計画や回収方法の検討の際、有効な方法であることが分かった。次いで、フロート投入後4年間は海面と深度2000mとの間を10日間周期でサイクルし、4年後に海面でターミネーションするという仮定で、北太平洋における653個(緯度経度3度毎に1個)の粒子に対して、100年間シミュレーションを行った。その結果、約29%のフロートが海岸へ漂着する予測結果が得られた。

キーワード：アルゴフロート、フロートターミネーション、シミュレーション評価

On Prediction of the Argo Floats Drifted Ashore after Termination

Chan-Su YANG*³ Akio ISHIDA*⁴ Naoto IWASAKA*³

An international project, known as Argo, for collecting data on temperature, salinity and velocity of currents in the world's oceans, has been started in the year 2000 and the full Argo array of approximately 3000 floats will be deployed by 2005. 14 countries deployed 476 floats, which are operating in the ocean of the world as of July 2002. In the present study, we tried to predict float distribution and a rate of drifting ashore of the floats after their termination based upon a product of the ocean general circulation model of JAMSTEC. We first evaluated reliability of the model product quantitatively by comparing trajectories of surface buoys of WOCE Surface Velocity Program (SVP) and those predicted by the model surface current field. It is found that the model is acceptable for practical application to deploy floats and to estimate those trajectories. 653 particles at 3-degree spacing are used to investigate the ratio of floats drifted ashore, given that during the first 4 years floats cycle between the surface and 2000m for 10 days and then floats are on just the surface for 100 years. The simulation indicates that about 29% of deployed floats will be drifted ashore within 100-year.

Keywords : Argo float, float termination, simulation evaluation

*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 海洋観測研究部

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

*4 Ocean Observation and Research Department

1. はじめに

ARGO(アルゴ)プロジェクトは、海面から2000mまでの海洋をリアルタイムで監視するため、全球海洋に3000台(緯度・経度にして約3度毎に1台)の自動プロファイリングフロートを投入しようという国際プロジェクトである^{1), 2), 3), 4)}。現在22国以上が参加しており、その内14か国が世界の海洋に2002年7月までに476台のフロートを展開している。図1は投入国およびフロート台数の分布を示す。ARGOプロジェクトに寄与するプロファイリングフロートをARGOフロートと呼んでいる。2002年までに700本以上のARGOフロートが投入される計画である。詳しい情報は、ARGO Information Center (<http://ARGO.jcommops.org/index.html>)とARGOホームページ(<http://www.ARGO.ucsd.edu/>)で得ることができる。

日本ではミレニアム・プロジェクト『高度海洋監視システム(ARGO計画)の構築』の一環として2000年度からARGOに参加している^{2), 3)}。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 重表層・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、これまでに62台のARGOフロートを西太平洋およびインド洋に投入した(2002年7月現在)。その内22台はAPEXタイプフロート(図2)であり、残りはPROVOR型である。今後、2002-2004年に毎年100個を投入する予定である。(ARGO計画のホームページ: http://www.jamstec.go.jp/ARGO/J_ARGOj.html)

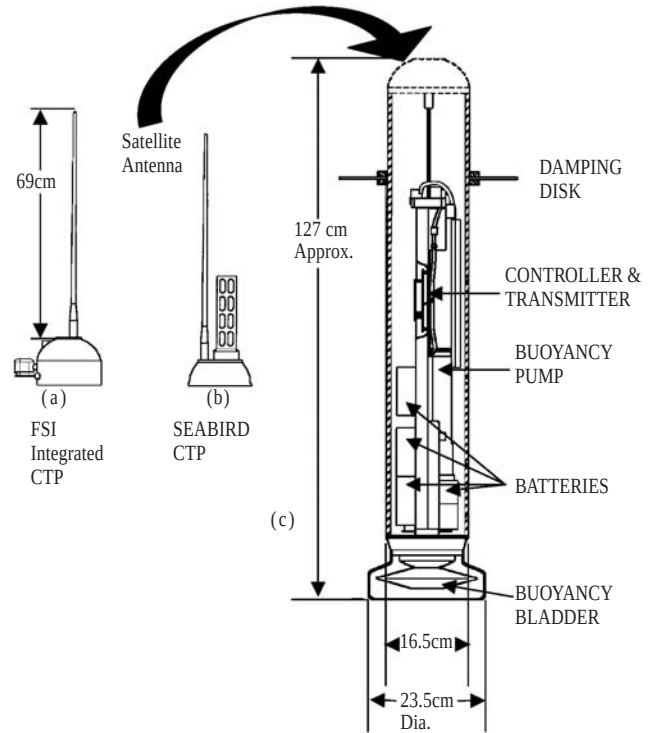


図2 アルゴフロート(APEXタイプ)の断面図((a)を(b)の上端に接合)
Fig. 2 Schematic diagram of APEX float.

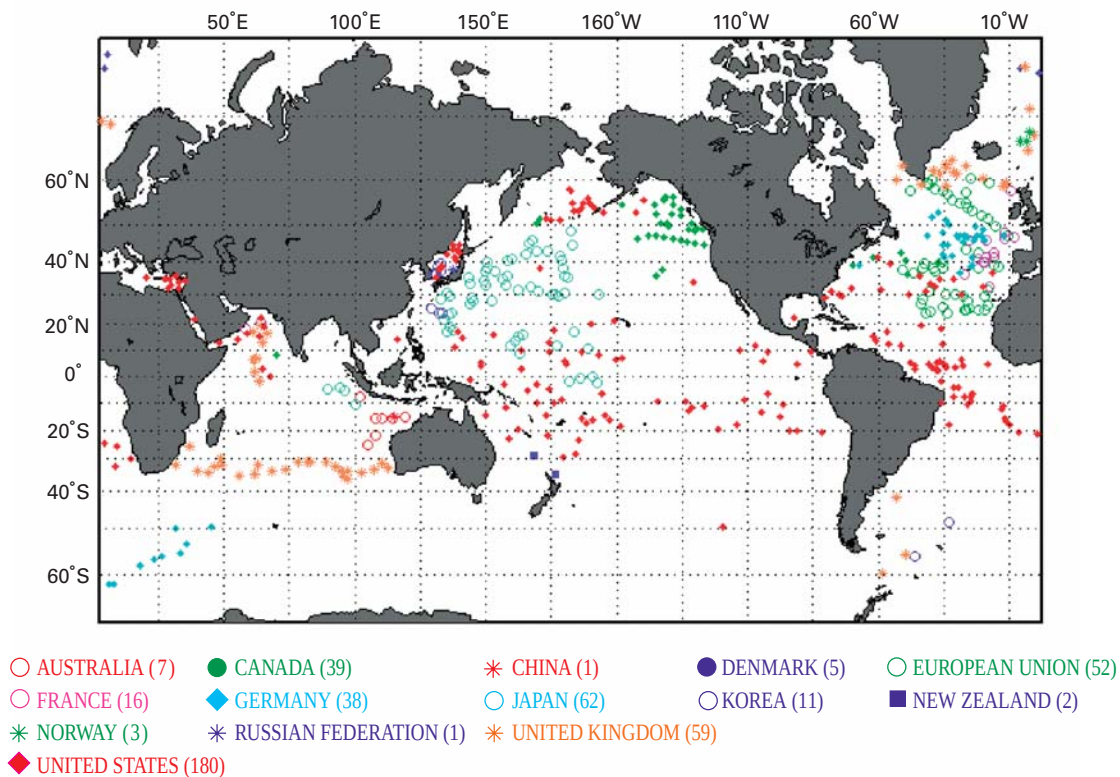


図1 Argo Projectとして日本を含む14ヶ国が投入したプロファイリングフロートの分布(2002年7月1日現在の位置)。インデックスは、シンボル / 国名 / フロートの数を表す。現在476台が投入された。

Fig. 1 Argo status as of July 1, 2002 (476 floats contributed by 14 countries). Parenthesis of index indicates the number of deployed float.

ARGOフロートは、海に投入されると滞在深度(通常2000m)まで沈み、一定期間その深さで漂った後、約10日後に海面に浮上する。その間に海洋表層・中層の水温・塩分・圧力を観測し、浮上後はARGOSシステム(衛星によるデータリレーサービス)によって観測データやフロートの位置を伝送し、再び滞在深度まで沈む。このようなサイクルを4~5年間持続する。この期間は、フロートバッテリーの寿命に相当する。

ARGOプロジェクトの目標が達成されると(2005年以降)、原因不明の故障以外にも毎年700-800台はバッテリーの寿命により動作しなくなる(これをターミネーションという)と予想されるため、同数程度のARGOフロートが新しく投入されることになる。ターミネーションしたフロートの処理は海洋環境にとって重要な問題になる可能性がある。そのため日本のARGO計画では、ターミネーションしたフロートを回収することを計画している。そこで、フロートの回収方法を検討する際、ターミネーション後のフロートの陸上への漂着予測が必要となる。本研究では、北太平洋海域に対して約300km四方あたり1個の密度でフロートを投入したと仮定し、フロートの長期間にわたる漂流分布や海岸への漂着に関するシミュレーションを行った。まず、実測データ(WOCEの表層フロートのデータベース)とシミュレーションの比較によってシミュレーションの有効性を検証した。次いで、フロートがターミネーションするまでの4年間とその後の100年間に對してフロートの漂流分布を調べた。2節ではシミュレーションの方法を簡単に説明し、シミュレーションの評価(3節)とフロートターミネーションに関するシミュレーション結果(4節)について述べる。

2. シミュレーション方法

ARGOフロートの漂流シミュレーションのため、海洋科学技術センターの高解像度海洋大循環モデル^{5), 6)}で計算された流速場に、仮想的な粒子を追跡することによって実施した。同様の方法はARGOフロートの展開計画⁷⁾にも使用されている。

海洋大循環モデルはNOAA/GFDLのMOM2 (Modular Ocean Model 2)を基にしたもので、75°Sから75°Nまでの全球を対象としており、分解能は緯度経度方向共0.25度、鉛直方向は55レベルで、海面から水深100mまでの鉛直解像度は10mである。海面熱・塩分フラックスは、モデルの最上層の水温・塩分を Levitus⁸⁾ 水温・塩分気候値データに復元させることで与え、Hellerman and Rosenstein⁹⁾の風応力データが運動量フラックスとして与えられた。最初の2年間は年平均海面データを用いた計算の後、月平均データを用いて18年間の積分を行った。

モデル地形は、NOAA/NGDCの東西、南北共に5分の分解能を持つデータ(ETOPO5)を約50km~100kmの影響半径をもつガウシアン・フィルターで平滑化し、モデルの格子点に割り当てた後、モデルの格子間隔では解像できない海峡を埋める等によって求められた。海洋大循環モデル地形のうち、本報告書で考察する海域のみを図3に示す。海峡を埋めるなどによって台湾はユーラシア大陸(中国)と1つになっていることや、ハワイ諸島やポリネシア諸島などの小さな島は海とみなされているなど、十分現実の地形を解像できていない箇所がある。モデル、数値実験の詳細は石田ほか⁵⁾, Ishida et al.⁶⁾を参照。

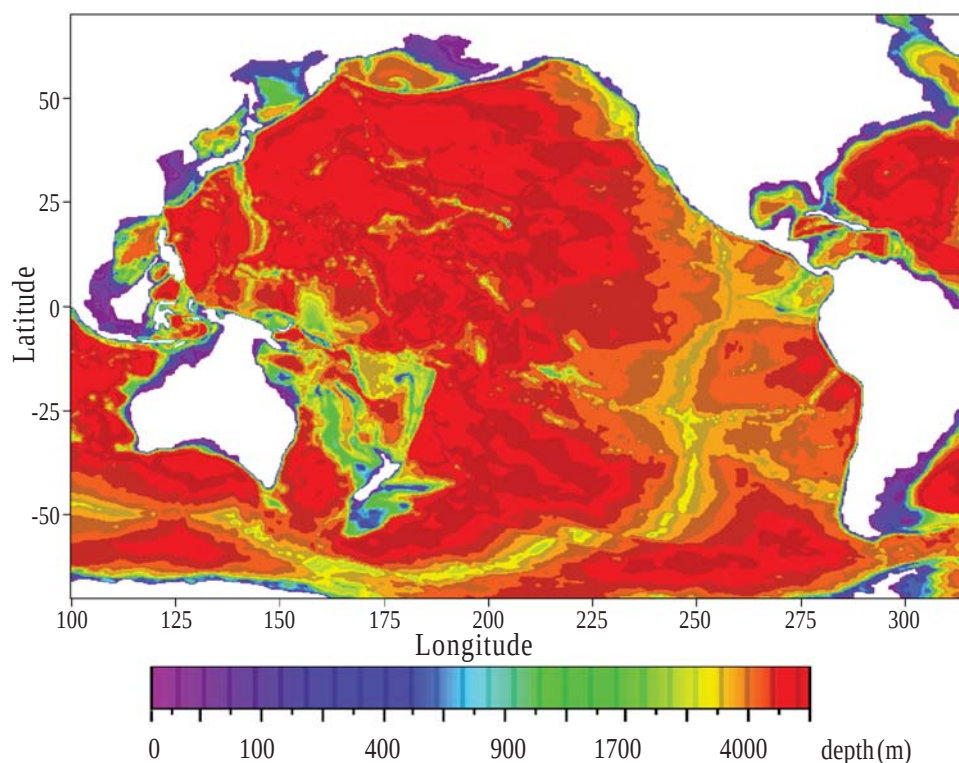


図3 研究海域に対するモデルの地形(白色は鉛直レベル0すなわち、陸地)

Fig. 3 Bottom topography of model. Land corresponds to the white-colored area.

漂流シミュレーションの方法は、岡⁷⁾と同様である。海洋大循環モデル計算の最後の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。粒子追跡プログラムはMOM2の粒子追跡ルーチンをもとに作成されたもの¹⁰⁾を、投入シミュレーションに応用したもの⁷⁾であり、5日毎の流速データから線形補間で求めた流速により移動する粒子を2時間の時間ステップで追跡する。岡⁷⁾と同様、ARGOフロートの浮上、沈降サイクルにあわせて、仮想粒子は、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、浮上・沈降に要する時間は無視して粒子追跡計算を行なった。フロートが海面にいる間に2000mより浅い海域に流れ込み、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。

粒子が岸に漂着したかどうかは、以下のような判断基準に基づいて見積った。海洋大循環モデルの解像度は1/4度と粗いため、十分現実の地形を表現していないが、モデルより高い解像度で粒子追跡結果は得られないため、モデル地形(1/4度×1/4度の格子)で海陸を判断し、陸の格子に入った粒子は沿岸に漂着したと判断した。岸に近いところでは流れが弱く、粒子がその格子に留まることがある。そこで、陸のすぐ隣の海の格子にいて60日以上留まっている粒子は岸に乗り上げたものとした。

現実のフロートは、海面の波の打ち寄せなどによって沿岸に漂着すると考えられるが、本研究で用いた海洋大循環モデルはrigid lid近似を用いたプリミティブ方程式系を解くものであり、そうしたプロセスは含まれていない。即ち、モデルの流れ場から求めた粒子追跡によって、その粒子がモデルの陸に乗り上げるということは原理的にあり得ず、もしあるとすると、それは粒子追跡計算の数値誤差というべきものである。しかし、ここではラージスケールの循環によってどのようにフロートが漂流し、どの海域にどれくらいの数のフロートが沿岸に漂着するかを近似的に求めることを主眼としているため、上記のように漂着を判断することとした。

3. 表面ブイデータを用いたARGOフロート漂流シミュレーションの評価

3.1. 表層ブイデータ

ARGOフロートの漂流シミュレーションの妥当性を検討するために、表層ブイの漂流をシミュレーションし、実際の漂流の様子と比較した。ここで用いる表層ブイデータは、World Ocean Circulation Experiment(WOCE)のSurface Velocity Program(SVP)で収集されたもので、NOAAのAtlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory(AOML)が世界の表層フロートのデータベースとして公表している(http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/meds/Prog_Int/

WOCE/WOCE_SVP/SVP_e.html)。表層フロートは6時間毎の位置データ(通信衛星経由)を送信するので、個々のフロートの動きについて詳しい情報を得ることが出来る。その情報から個々のフロートID、投入日、位置、漂着日、位置、ターミネーションコード(原因)などを含むデータベースが作成されている。すなわち、表層フロートの漂着がほぼ明らかになるので、沿岸に漂着した位置の分布と漂着率を簡単に計算できる。ここでは、1979年2月から2001年8月31日までに投入された表層フロート(以下、表面漂流ブイ)の記録を用いて、シミュレーションによる結果との統計的な比較を行った。

図4(a)は表面漂流ブイデータベースのうち、北太平洋に投入された879台のブイの投入位置をプロットしたものである。投入後、沿岸に漂着したブイは白抜きのマークで、漂流中のブイは赤丸で示してある。漂流ブイは投入後1年以上経ても漂流しているものだけを示している。漂着したブイはデータベースで沿岸漂着と記載されているもののうち、いくつかは明らかに沿岸から離れた外洋にあるため、地形データと照らし合わせて、実際に漂着と判断されるものを選んだ。図4(b)には、図4(a)に示したブイの月別投入台数を示した。これを参考にして、3ヶ月毎に投入時期を分けて漂流シミュレーションを行った。

3.2. 海面漂流ブイデータとシミュレーション結果との比較

図5(a)は2001年8月31日における879台(図4(a))のブイデータの最終位置分布を、図5(b)は沿岸に漂着した184台のブイに対して投入および漂着位置を表す。ここで、水色実線は投入後1年以内に漂着したブイを、青点線は漂着まで1年以上かかったことを示している。

北太平洋で漂流中のブイの多くは、北緯20度から30度までの海域に集まっている。これは、偏西風と貿易風による海洋のエクマン流の収束による効果が大いと考えられる。漂着場所は西太平洋沿岸およびアメリカの沿岸やアラスカ湾に集中している。南太平洋に投入されたブイのほとんどはオセアニアに移動し、島に漂着する。

879台中約184台(約21%)のブイが沿岸に漂着した。沿岸に漂着した184台のうち、投入後1年以内に約75%、2年以内には93%、3年以内までに約100%が漂着している。すなわち、沿岸漂着は比較的短い時間でおこることが分かる。

一方、図4(a)に示されたブイ投入位置を初期位置としてシミュレーションした結果を図6に示す。流れの季節変動を考慮して、投入時期は3ヶ月ごとに4期間に分け、各期間の中間を投入時間として、観測データと同じ漂流期間に対してシミュレーションを行った。漂流を続けるブイに関しては、実際よりも北緯30度付近、特にハワイ諸島の北東海域に集中しているが、これ以外に大きな分布の差はない。また、漂着したブイに関しては、日本や台湾など西部太平洋沿岸で漂着するなど観測結果と類似している。しかし、粒子の漂着位置(図6(b))を見ると、実際の分布といくつか異なる傾向が見られる。それらをまとめると、1. モデルの地形では小さな島はないので、ハワイ諸島、フィジーなど太平洋の小さな島に漂着する粒子はない。2. 赤道付近の東海域では、多くの粒子がコロンビアの海岸まで移動し、漂着する。実際のブイもそのような移動は

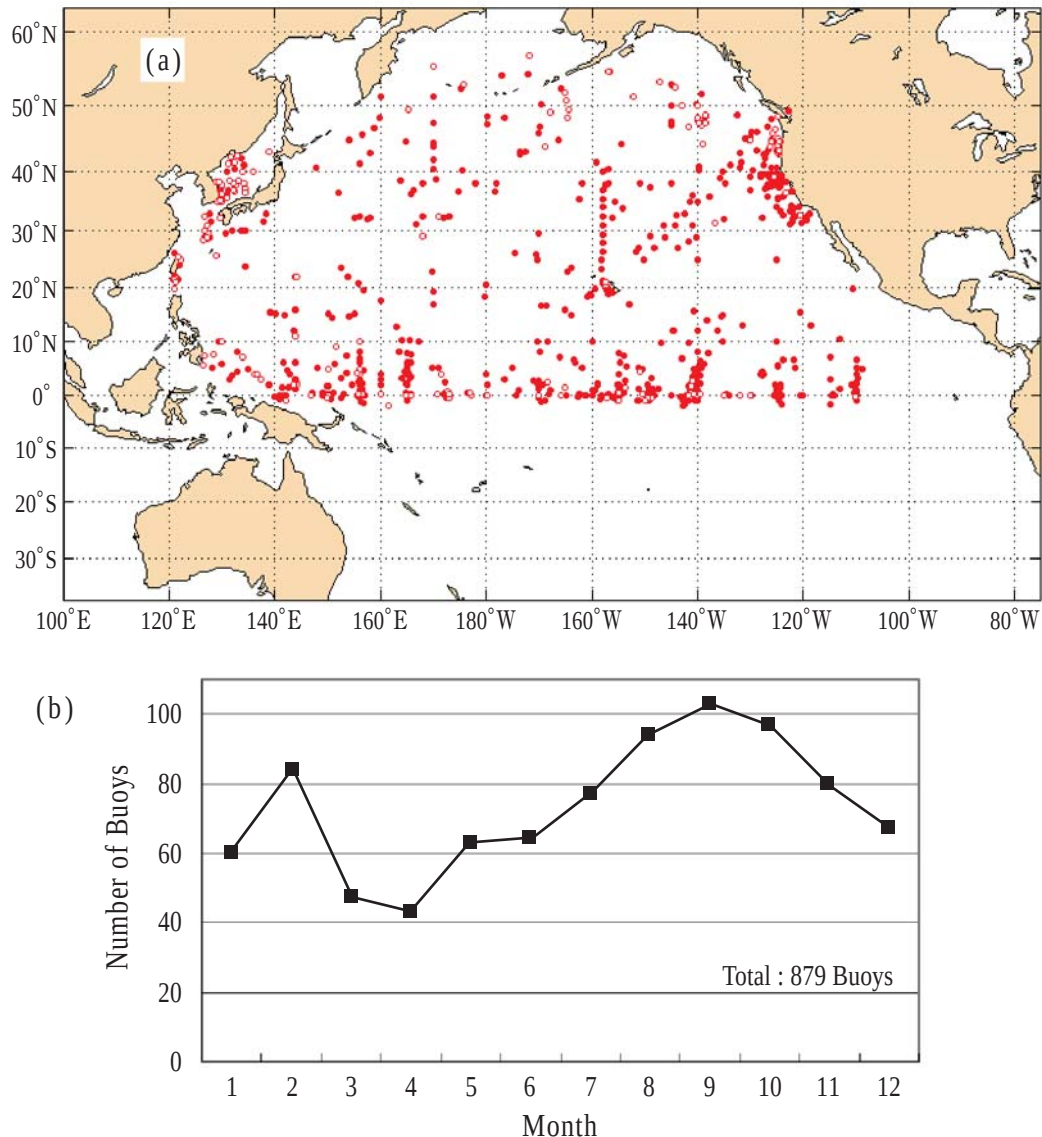


図4 879台のブイデータの投入分布図(a)と月別ブイ数(b)。(a)図で白抜きマークは最終的に沿岸漂着となったブイを示す。

Fig. 4 Distribution of 879-buoy data (a) and their monthly number (b). Open symbols (a) represent the buoys ran aground.

見られるが、東部熱帯太平洋沿岸に漂着するものはない。3. 東太平洋の赤道海域の粒子がオセアニア等西部太平洋で漂着しない。これは、赤道域でモデルの表層流の南北発散が大きく、南赤道海流で西に運ばれる前に粒子が南北に発散してしまうことが原因と考えられる。4. アラスカ湾に向かって移動しない。5. 漂着した粒子の数は106個であり、1年以内は29個である。すなわち、実際と比べるとその数も少なく、一年以内に漂着する割合も低い。この原因として、シミュレーションでは各ブイの期間にあわせてシミュレーションしている(例えばデータで1年後にブイが漂着した場合、シミュレーションでは漂着しておらず、1年と数日で漂着する可能性があるとしても、1年で計算を止めている)ことが考えられる。この

点に着目して、各ブイの計算を観測期間にあわせるのではなく、投入後4年間シミュレーションを行った。

図7(a)と(b)はすべての粒子を1年間と4年間シミュレーションした結果である。1年後(図7(a))と4年後の図を比較すると、4年後には沿岸に漂着した粒子以外は、ほぼすべて北緯30度付近に集まっているが、それ以外に大きな分布の差はない。島の影響も含めてシミュレーション結果を調べるため、モデル地形では平滑化のため海となっているハワイ諸島海域について水深が20mより浅いところに入った粒子は漂着したものとして実験した。その結果を図7(c)に示す。ブイデータからの図4(b)と比較すると、データでは東部太平洋低・中緯度の海域およびハワイ諸島近海から4個のブイがハ

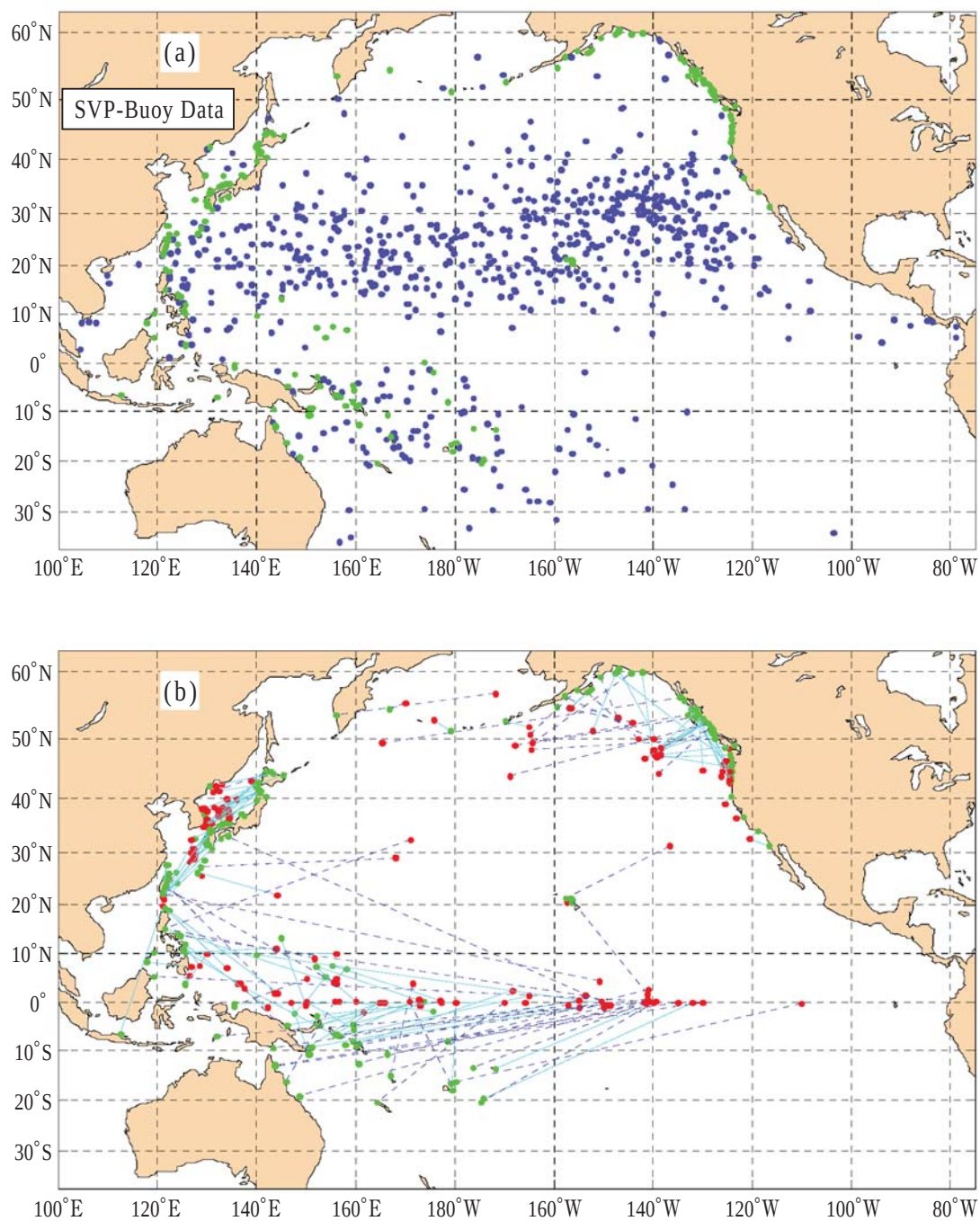


図5 2001年8月31日における879個のブイデータの最新位置分布 (a)と沿岸漂着したブイに対する投入および漂着位置 (b)。緑円は、漂着位置を、赤い円は投入位置を、青い円は漂流ブイの位置を示す。(b)図で漂着にかかった時間の1年以下は水色実線で、1年以上は青点線である。

Fig. 5 Distribution of 879-buoy data as of August 31, 2001 (a) and buoys ran aground (b). Red circle : the release point ; blue circle : still drifting ; green circles : ran aground less than 1 year (cyan solid line) and over 1 year (blue dotted line).

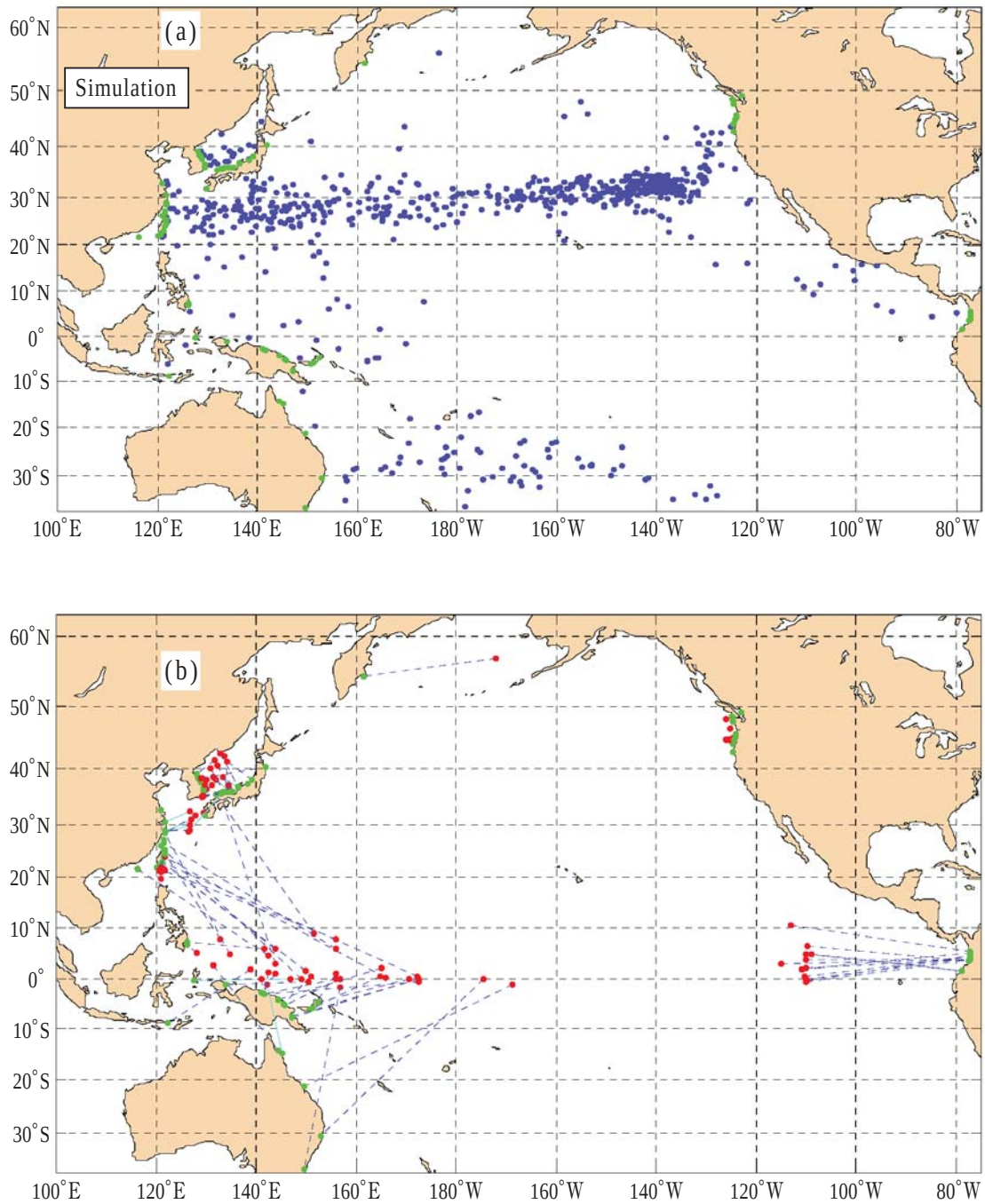


図6 プイデータ(4(a))と同期間に対して行ったシミュレーション結果。各シンボルや線の意味は図5を参考。

Fig. 6 Simulation results over the same period as in the buoy data shown in Fig.4(a). Refer to Fig.5 for explanations of symbols and line types.

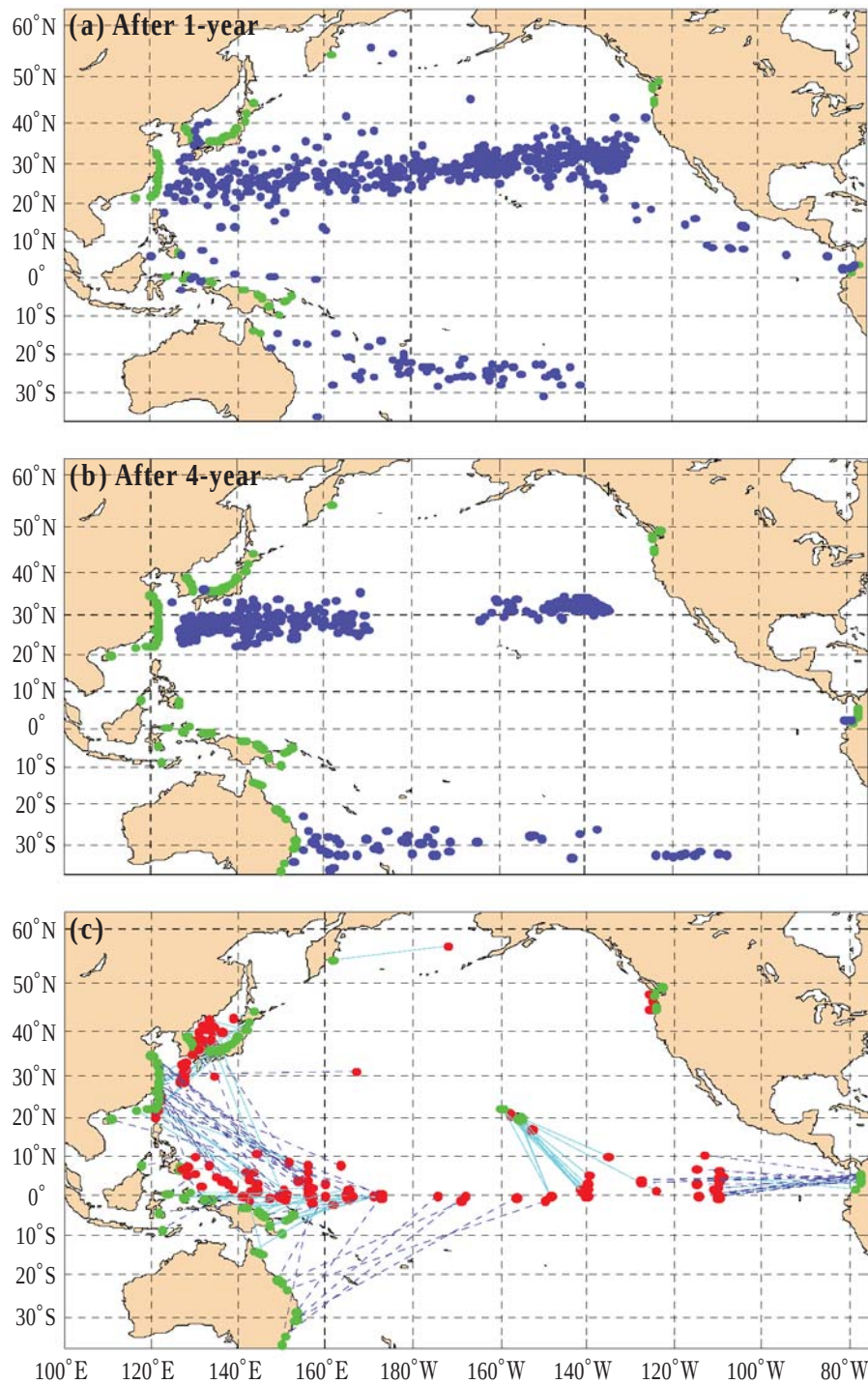


図7 図4(a)のデータによるシミュレーション計算結果(1年後(a), 4年後(b))とハワイ諸島を考慮した場合の沿岸漂着粒子の投入および漂着位置(c)。各シンボルや線の意味は図5を参考。

Fig. 7 Simulation results for the data shown in Fig.4(a) (1-year after (a), 4-year after (b)), Particles ran aground in the case where the Hawaiian Islands are considered as a model topograhly (c). Refer to Fig.5 for explanations of symbols and line types.

ワイ諸島に漂着しているのに対して、シミュレーションでは、東部太平洋低緯度の海域とハワイ諸島近海から19個の粒子が漂着している。これは、漂着の判断基準が甘く、ハワイ諸島を迂回する粒子を漂着したものとみなしてしまっていることが考えられる。4年間のシミュレーションに対する沿岸漂着数は、193個(全投入粒子の約22%, ハワイ諸島に漂着したものを含む)であり、そのうち1年以内に漂着したものは約70%, 2年以内90%, 3年以内96%, 4年以内に100%である。全体的な割合は、シミュレーションの方が実際のブイデータよりやや高めであるが岸への乗り上げ場所を比較してみると良く似ていることが分かる。しかし、モデルの地形は北太平洋の小さな島がないので、図4(b)のように北太平洋の島に漂着することはない。また、ブイデータでは、東部赤道域に投入したブイがフィリピンなど西部熱帯域で漂着しているが、シミュレーションでは東部熱帯域に投入した粒子のうちハワイ諸島に漂着するものはあるが、西部熱帯域で漂着するものはない。こうしたブイデータとの不一致はみられるものの、全体としては西部太平洋に投入した粒子の漂着位置や、東部

沿岸域からアメリカ西海岸への漂着など、漂着位置の分布は似ており、漂流シミュレーションの漂着率を見積る上で、よい情報を与えてくれることを示している。

3.3. モデルの評価

モデルの結果は、全体としては実際の表層ブイの動きを良くシミュレートしていると評価できるが、実際より狭い海域に集まる傾向があることや沿岸漂着場所が異なるなど、違いも見られる。その理由を調べるため流速場を比較した。図8には、モデルの表層流速場を、図9と10には、ここで用いたWOCE-SVPの表層ブイデータの数分布とそれから推定した流速場を示してある。ここでは6810台の表層ブイデータを用いた。位置データから推定した表層流速データは約600万個に達する。0.5°グリッドでの表層ブイデータの数を図9に示す。モデルの流速場のパターンは観測値と良く一致しているが、南北流速はやや高めの傾向が見られ、このことが実際のブイの動きより早く収束領域にブイを移動させる事になっているのではないかと推測される。

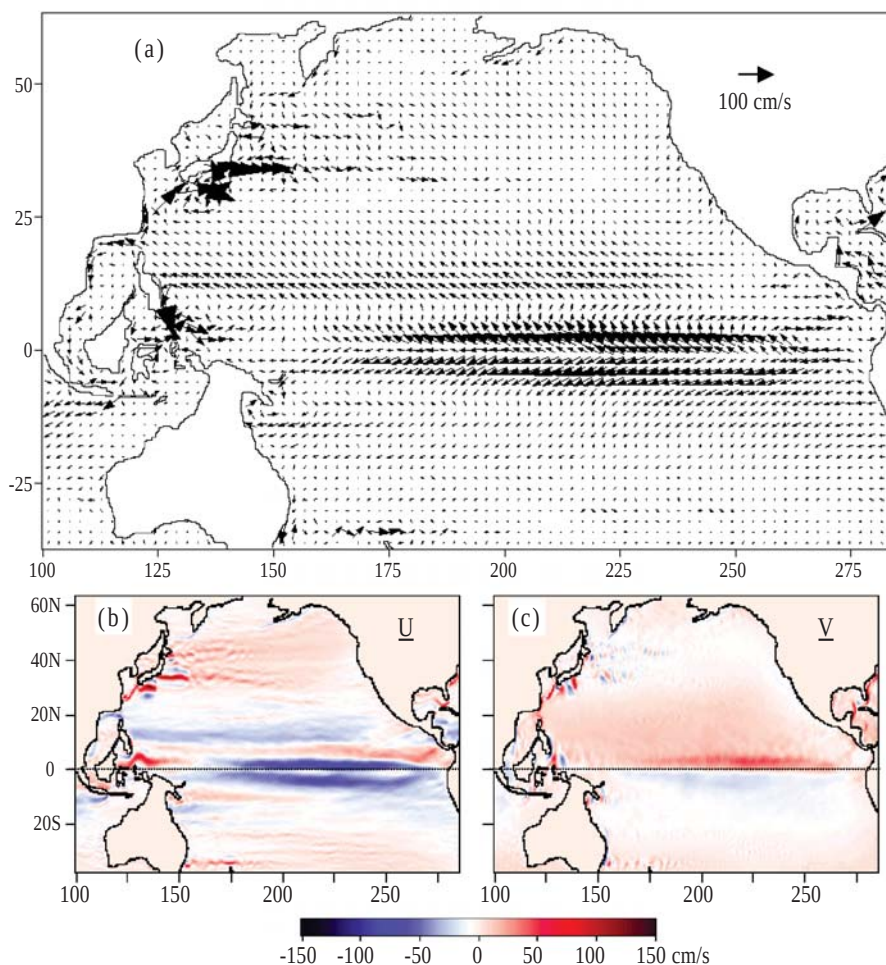


図8 シミュレーションで用いているレベル1(最上層;5m深)のモデル流速の年平均分布。(a)は流速ベクトルを、(b)と(c)は流速の東西成分と南北成分を示す。

Fig. 8 Distribution of annual mean of the OGCM velocity at Level 1 (top layer at 5-m depth) used in the simulation. (a) : the velocity vectors, (b) : zonal velocity, (c) : meridional velocity.

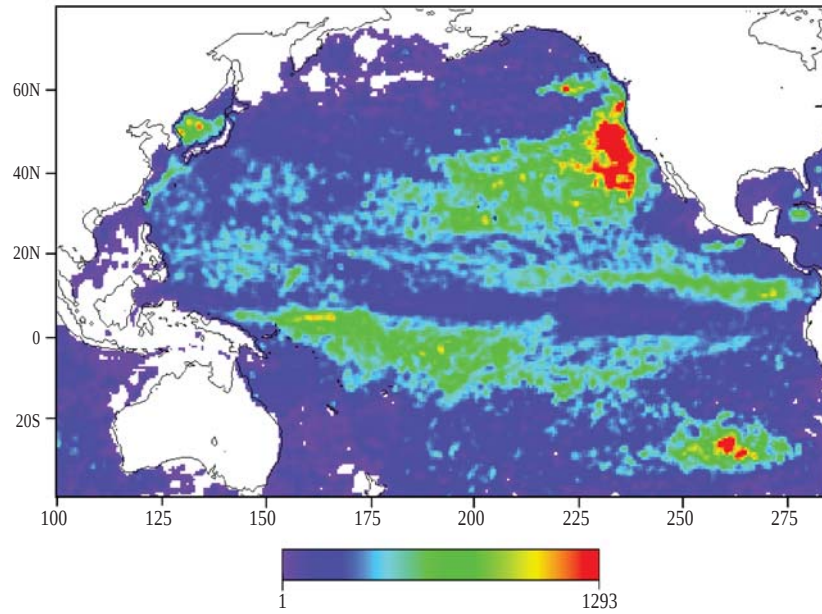


図9 WOCE-SVPの表層ブイデータにおける0.5°グリッドでの数。

Fig. 9 Number of WOCE-SVP data in $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ bins.

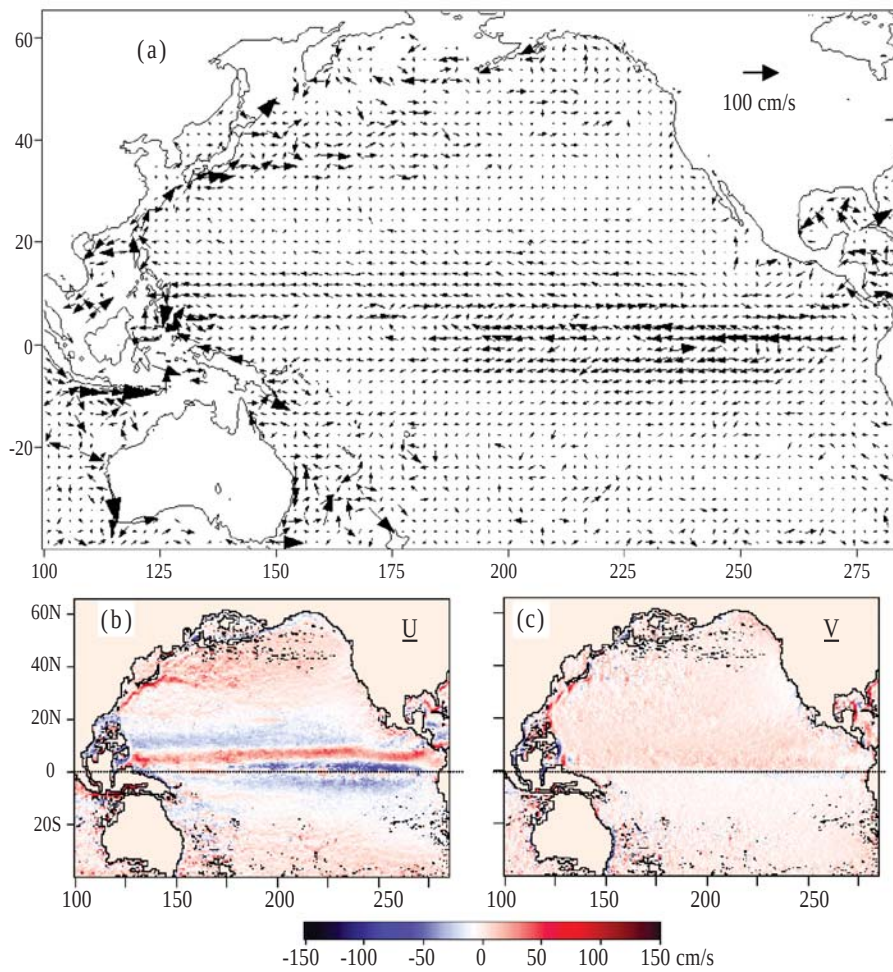


図10 WOCE-SVPの表層ブイデータから推定した平均流速場。(a)は流速ベクトルを、(b)と(c)は流速の東西成分と南北成分を示す。

Fig.10 Annual mean of the surface layer's velocity calculated from WOCE-SVP buoys. (a) : the velocity vectors, (b) : zonal velocity, (c) : meridional velocity.

このシミュレーションでは、季節変動までは考慮しているものの風の場の経年変動などは考慮していない。例えば、図11に見られるように、特定の海域にモデルを適用して比較を行うと実際のブイとシミュレーションによる軌跡は大きな差が出ることもある。しかし、モデルは元来海洋大循環の研究のために作られているので表層での漂流を精密に再現できるほどの鉛直・水平・時間分解能を備えているわけではない。従って、これらシミュレーションの方法およびモデルの限界を考慮すれば両者は良く一致していると言えるだろう。

4. フロートのターミネーションによる陸上漂着率

日本のアルゴフロートは電池切れになると海面を漂流するよう設計することになっている。作動中は水深2000mにいる時間が長いので作動中の漂着はないものと仮定する。ここ

では、ターミネーションフロートの漂流シミュレーションを行って、フロートの陸上漂着率を調べる。シミュレーションは以下の条件で行った。

- ・ 初期分布は深度2000m以上の海域に対して緯度経度3度毎に一個の割合。
- ・ 最初4年間は10日サイクルで沈降・漂流(9.5日間)／浮上・漂流(0.5日間)する。
- ・ 投入して4年後に表面でターミネーションすると仮定し、海面のみで漂流する。
- ・ 電池切れの後腐食して分解するまでのフロートの寿命は最大100年位なので、計算は100年間行う。

図12(a)はシミュレーションに用いた653個の粒子(水深2000m以上の約 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ の範囲に一つ)の投入位置分布であり、仮想粒子投入後4年経過した粒子の分布を図12(b)に

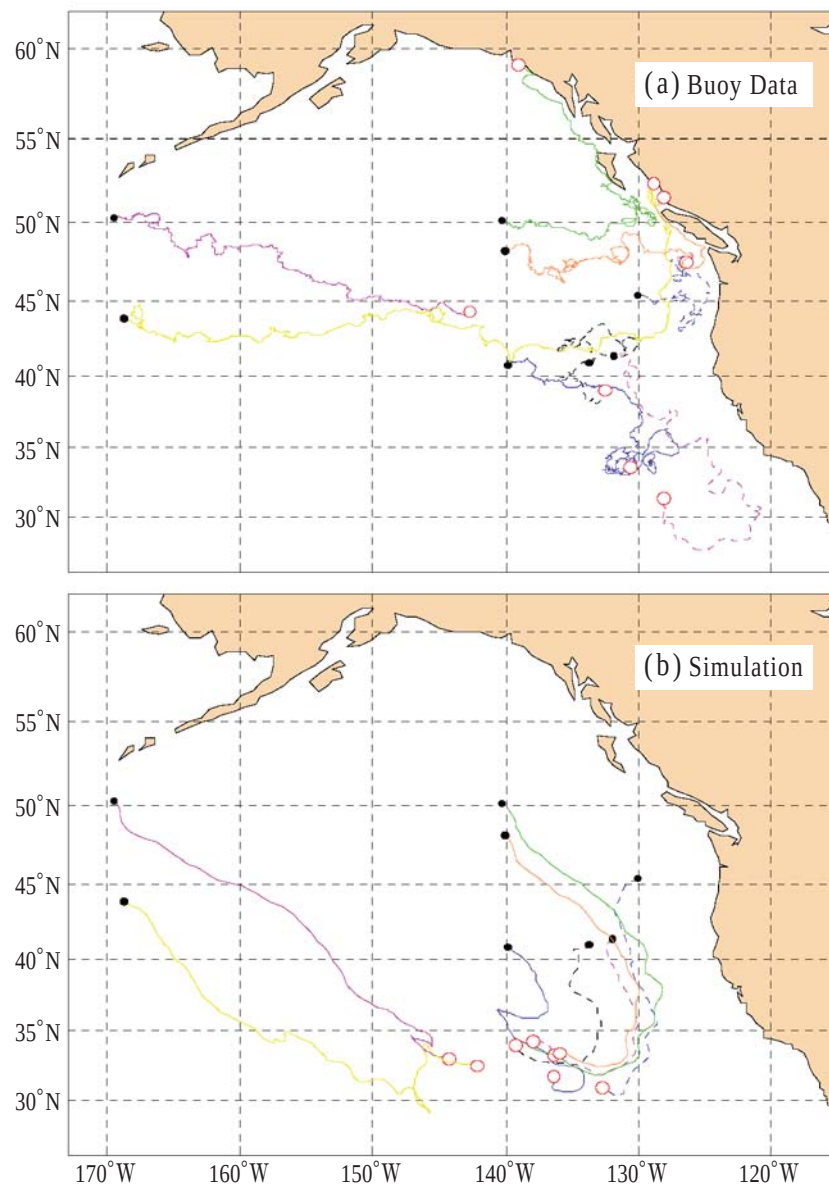


図11 実際のブイとシミュレーションによる軌跡の比較。投入位置は黒色丸。

Fig.11 Trajectories of buoys and simulated particles. Launch sites are indicated by the black circles.

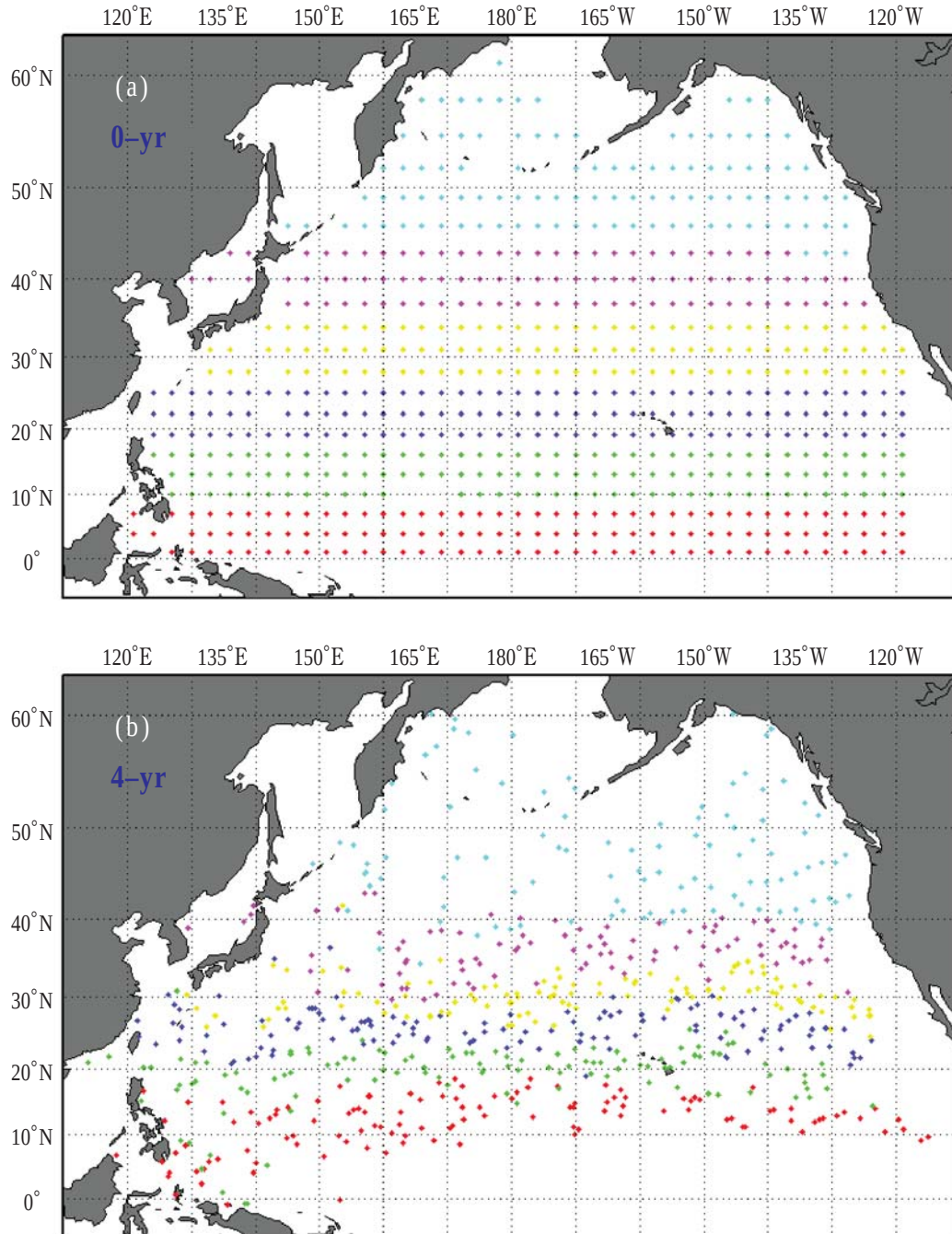


図12 シミュレーションに用いた653個の粒子(水深2000m以上の約3°×3°の範囲に一つ) (a), 2000mと海面に対するシミュレーション結果(4年後) (b)。

Fig.12 653 particles used for simulation (a) and simulated distribution four years after for the surface and 2000m (b).

示す。最初の4年間は、粒子は10日のサイクルのうち0.5日間しか流れの速い海面を漂流しないため、この段階では粒子の投入位置からの移動は小さい。また、投入後4年間で2000mより浅いところに入った粒子は71個で、そのうち12個のみが岸に漂着した。2000mよりも浅い海域に入ったプイは、海面から滞在深度(2000m)に沈降する際に海底に着底してしまうため、そのまま浮上しない可能性がある。本研究で注

目している沿岸への漂着とは異なるが、観測データの取得率に影響する問題である。沿岸への漂着は台湾周辺やフィリピンに集中している。台湾は黒潮の源流がぶつかり、黒潮本流と南シナ海への海流に分岐する海域であり、フィリピンは北赤道海流が黒潮とミンダナオ海流に分岐する海域である。表層プイデータにもこれらの海域での漂着は多く、妥当な結果といえる。

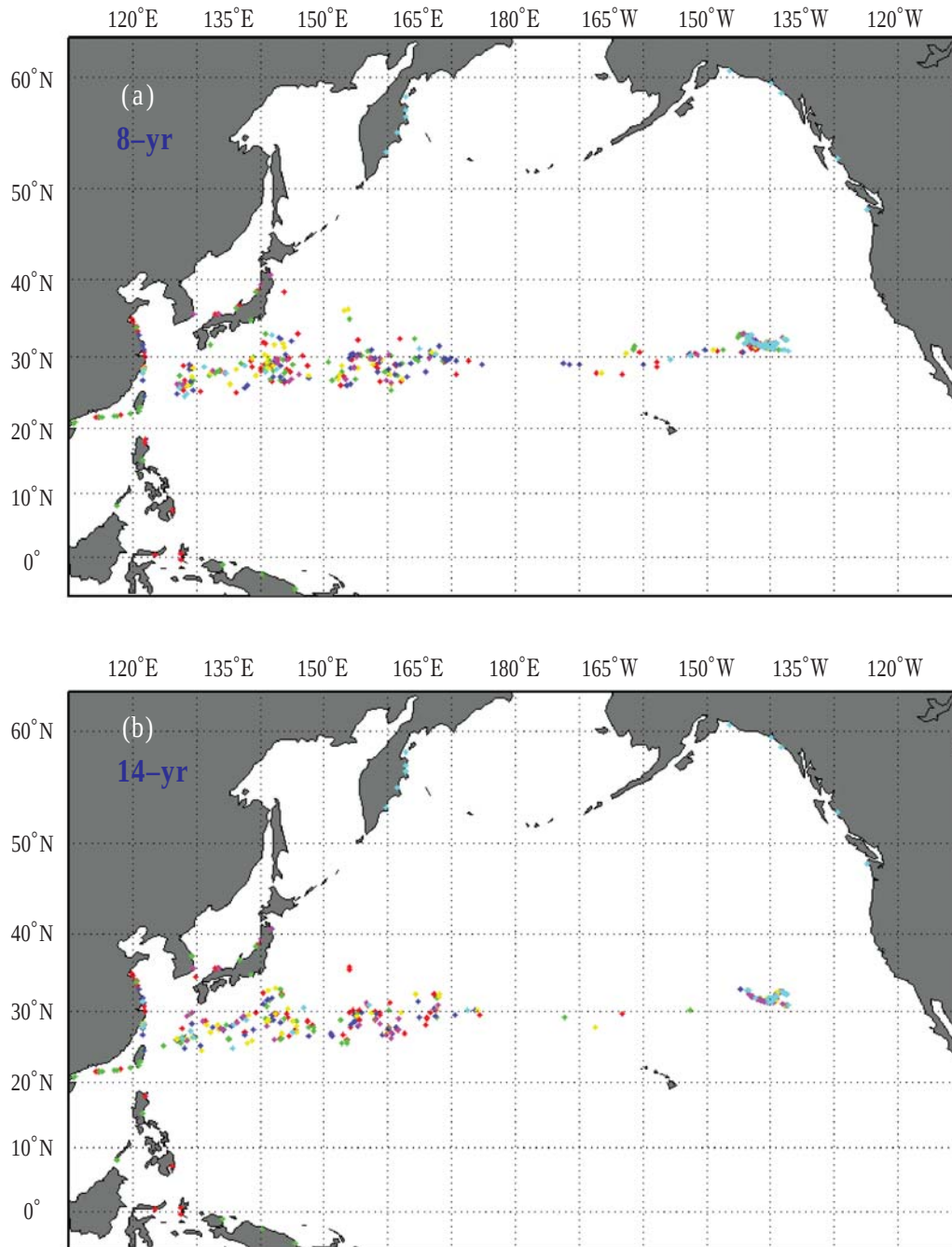


図13 投入4年後100年間海面に対するシミュレーション結果：8年後の分布 (a), 14年後の分布 (b)
Fig.13 Simulated distribution at 8-year (a) and 14-year (b) after the deployment of floats.

図13は、ターミネーションした後、4年、10年経過した時の、フロートシミュレーションの結果である。図13で大きな特徴は、粒子が北緯30度付近に集まりながら台湾と中国の沿岸に漂着する粒子が増えていることである。さらに、図14に投入後40年および100年経過した粒子の分布を示す。両者の分布はほぼ同じであり、100年後には大きく動く粒子が少なくなる。岸に漂着するものは台湾と中国の周辺に集中するが、まだ漂流している粒子の大部分はハワイ北東海域（北緯32度、西経140度付近）に集まる。これは沿岸漂着しないフロートの約

61%（100年後基準）である。この海域は、海面流速が収束しているところなので、ここに粒子が集まってくると考えられる。水産庁では、1980年代後半に北太平洋上のごみの観察調査を行い、ごみ分布や密度を調べた¹¹⁾。その結果、海洋ごみがハワイ北方海域に集中していることが分かった。モデルの結果はこの研究の観測結果ともよく整合している。

Kubota¹²⁾は、浮遊物がハワイ北海域に蓄積されるメカニズムを明らかにするため、Stokes drift、地衡流、エクマン流による海面流速場を求めて説明した。そのメカニズム及び、それ

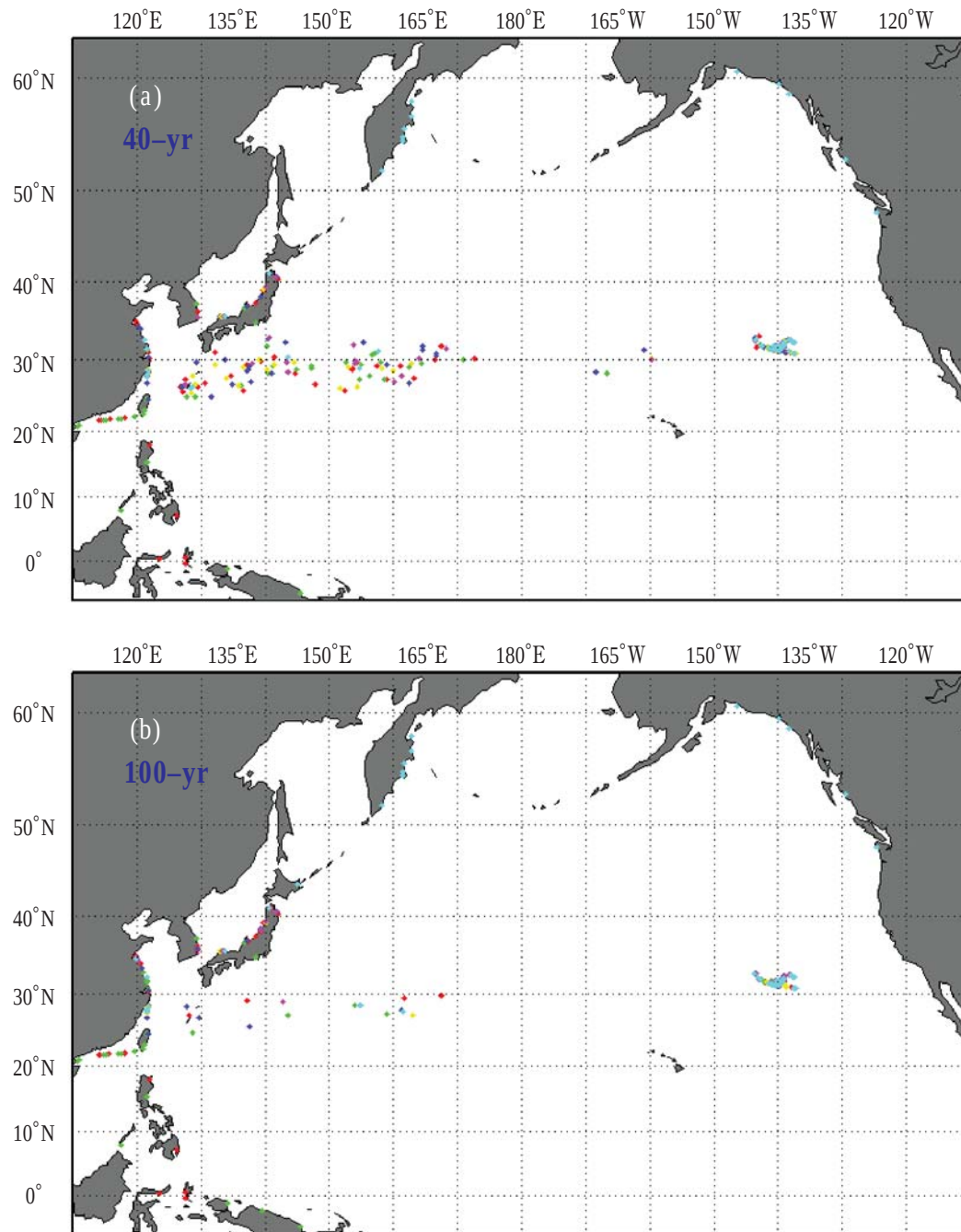


図14 投入4年後100年間海面に対するシミュレーション結果：40年後の分布 (a), 100年後の分布 (b)。

Fig.14 Simulated distribution at 40-year (a) and 100-year (b) after the deployment of floats.

による働き(括弧内に記入)は、以下のようなものである。

- 1) 貿易風と偏西風によるエクマン収束(浮遊物を中緯度に収束させる)
- 2) 北太平洋海流 または亜寒帯海流(浮遊物を中緯度で西太平洋から東太平洋に移動)
- 3) 亜熱帯高気圧に起因するエクマン収束(ハワイ北方海域への収束)

本シミュレーションの結果も、Kubota¹²⁾の結果と定性的に良く似た結果を示しており、大循環による移動とエクマン収

束が主なメカニズムと考えられる。しかし、3節で海面ブイデータとの比較で示されたように実際のブイの漂流位置はより分散しており、海面を漂うごみの移動と異なり、海面下の流速、エクマン流の鉛直構造などの寄与も無視できないと考えられる。また、今回用いた流れ場は、月平均風応力場で駆動されたモデルの流れ場であるが、より低気圧の通過など短い周期の変動が、ブイの分散に大きく働くと考えられるが、それらの変動を取り込んだ漂流シミュレーションは今後の課題である。

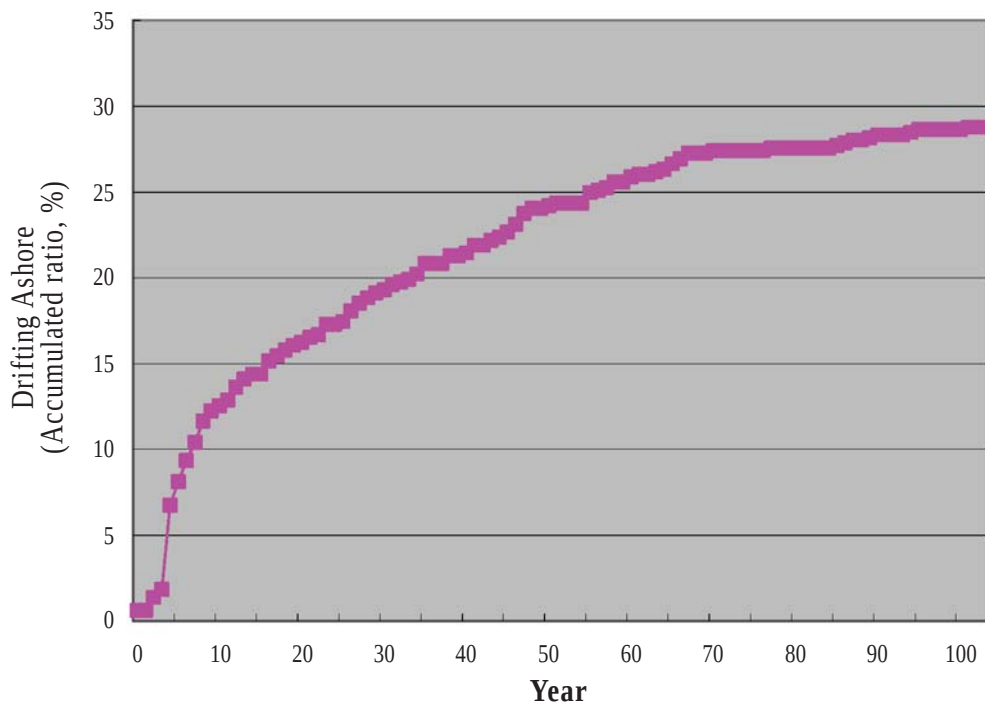


図15 時間の経過による陸上漂着率(104年には約28.8%)。

Fig.15 Accumulated ratio (%) of floats washed ashore due to the float termination. 188 floats (appr. 29% of those deployed) drifted ashore within 100-year after float termination.

図15には、ターミネーション前4年間とターミネーション後100年間の合計104年間のフロートの陸上漂着率を示す。この結果によると、ターミネーション直後の1年間に漂着する粒子が最も多く(漂着率は最も大きく増率する)、最初の数年で沿岸漂着率は急増する。10年目以降、ほぼ一定割合で漂着率は増えつづけ、およそ60年目以降、30%程度に漸近する。最終的に28.8%が沿岸漂着しており、このことは約100年を要するフロートの自然分解の前に、全フロートの約30%が沿岸に漂着することを示している。

5. まとめ

本研究では、ターミネーション後のフロートの沿岸漂着への対策を検討するための情報として、フロートの長期間にわたる漂流分布や海岸への漂着に関するシミュレーションを行った。

フロートシミュレーション結果を評価するため、WOCEの海面ブイデータによる沿岸漂着率およびブイの漂着分布とモデルのシミュレーション結果を比較した。モデルによる沿岸漂着率は約22%で、実際の表面ブイの場合の21%とほとんど変わらず、全体的な軌跡パターンはお互いに似ていることが分かった。また、沿岸漂着は比較的短い時間(1年以内に漂着するブイが全体の70%以上)に起こることもモデルで再現された。

北太平洋海域に対して約300km四方あたり1個の密度でフロートを投入したと仮定し、フロートが通常の観測サイクル

を繰り返しターミネーションするまでの4年間と、その後の100年間(常に海面を漂流)に対してフロートの漂流・漂着分布を調べた。シミュレーションで得られたいくつかの興味深い点を以下に要約する。

- (1) ターミネーション以前に漂着するフロートは少ないが、ターミネーション直後の1年間に沿岸漂着するフロートが最も多い。
- (2) 投入後100年以内に沿岸に漂着するブイの割合は約29%であり、ターミネーション後1年以内に急増するがその後30%程度に漸近する。
- (3) フィリピン、台湾、中国など太平洋西岸域と日本海の日本沿岸に多く漂着する。
- (4) 沿岸漂着しないフロートの約61%はハワイ北東域(北緯32度、西経140度付近)に収束する。

この研究の漂流シミュレーションで得られた結果は、全体として表層ブイの動きをよくシミュレートしており、北太平洋全体としての漂着率の見積りは信頼性があると考えられる。しかし、漂着位置など表層ブイの観測結果との違いも見られるので、より精度の高いシミュレーションのためには漂着判断の基準の取り方や粒子追跡計算における時間ステップ、流速場の空間内挿スキーム、与える風の場合等を、今後検討する必要がある。

謝辞

地球観測フロンティア研究システムの竹内謙介博士、岡英太郎博士、海洋科学技術センターの水野恵介博士には多くの貴重な御意見を賜りました。記して感謝いたします。また、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。

引用文献

- 1) Roemmich, D. and W. B. Owens, "The ARGO project: global ocean observations for understanding and prediction of climate variability", *Oceanography*, 13, 45-50 (2000).
- 2) 佐伯理郎, "ARGO (アルゴ) 計画", *気象*, 44 (7), 4-8 (2000)。
- 3) 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)。
- 4) Guinehut, S., G. Larnicol, and P. Y. L. Traon, "Design of an array of profiling floats in the North Atlantic from model simulations", *J. Marine Systems*, 35, 1-9 (2002).
- 5) 石田明生・柏野祐二・三寺史夫・吉岡典哉・門倉輝明, "高解像度海洋大循環モデルによる海洋変動の研究一序報", *海洋科学技術センター試験研究報告*, 36, 157-170 (1997)。
- 6) 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 (1998).
- 7) 岡英太郎, "ARGOフロートの投入シミュレーション", *海洋科学技術センター試験研究報告*, 44, 9-16 (2001)。
- 8) Levitus, S., "Climatological atlas of the world ocean", NOAA Prof. Pap. No. 13, U.S. Govt. Print. Office, Washington, D.C., 173pp (1982).
- 9) Hellerman S. and M. Rosenstein, "Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates", *J. Phys. Oceanogr.*, 13, 1093-1104 (1983).
- 10) 石田明生・柏野祐二・三寺史夫・門倉輝明, "高解像度 OGCMに見られる赤道太平洋垂表層反流の平均構造と変動", *海洋科学技術センター試験研究報告*, 39, 117-137 (1999)。
- 11) Mio, S. and S. Takehama, "Distribution and density of marine debris in the North Pacific based on sighting survey in 1987", *Proc. 35rd INPEC, Fisheries Agency of Japan* (1988).
- 12) Kubota, M., "A mechanism for the accumulation of floating marine debris north of Hawaii", *J. Phys. Oceanogr.*, 24, 1059-1064 (1994).

(原稿受理: 2002年7月29日)