

306 : 501 : 13 : 601 (モニタリング; プロファイリングフロート;
ミレニアム・プロジェクト; 水温; 塩分)

1. Argo の成果と可能性

須賀利雄*

1. はじめに

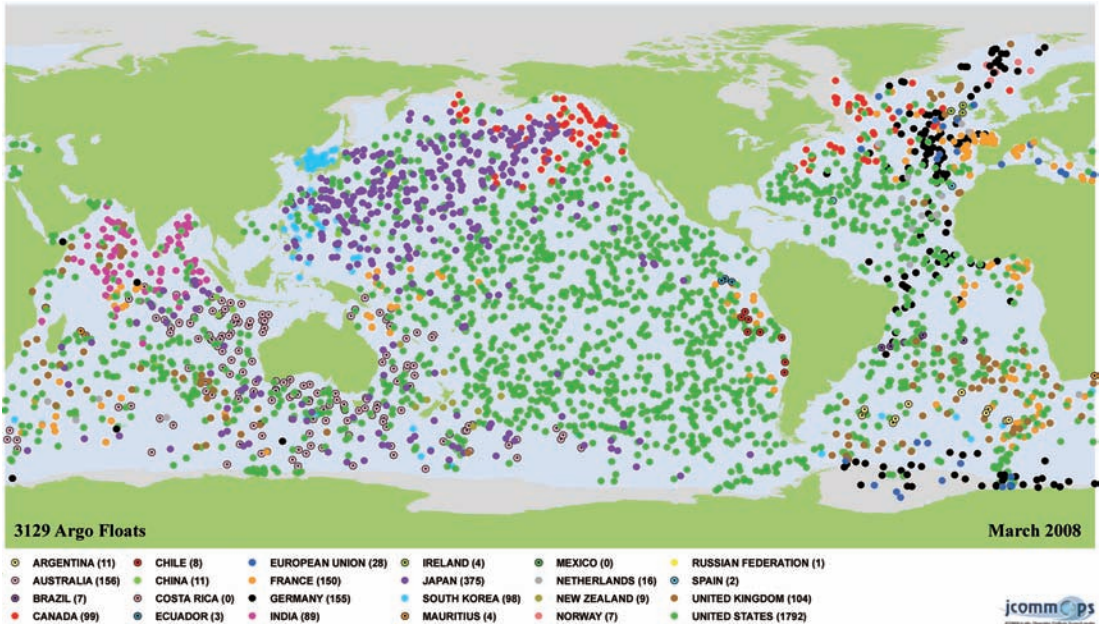
2007年11月, 世界の海の水温・塩分をプロファイリ

ングフロートという観測ロボットによりリアルタイムでモニタリングする観測網 Argo (アルゴ) の稼動フロート数が, 当初の目標であった3000台に達した (第1図). 3000台というのは, 海水域を除く, 水深2000m以上の海域を300km四方に1台の割合でカバーする数である. 海の上半分 (2000m以浅) では

* 東北大学大学院理学研究科/海洋研究開発機構.

suga@pol.gp.tohoku.ac.jp

© 2010 日本気象学会



第1図 Argoフロートの分布図(2008年3月現在). Argo Information Centerのウェブサイト (<http://wo.jcommops.org/cgi-bin/WebObjects/Argo>) より.

あるが、世界の海洋の内部をむらなく、継続的に観測する手段を人類がはじめて手にした時として、海洋学の歴史、あるいは、地球観測の歴史に、刻まれるべき出来事とっていいだろう。Argoのプロポーザルが世に出た1998年からちょうど10年目、Argoフロートの展開が本格的に始まった2000年から8年目のことだった。

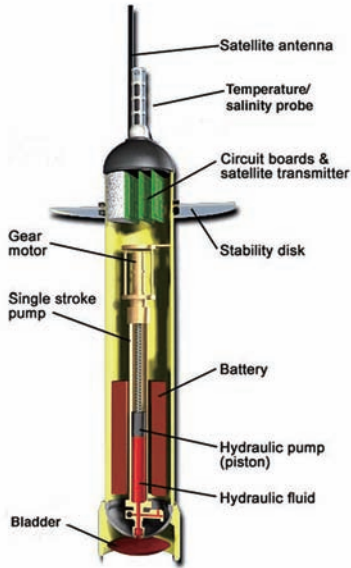
フロートの寿命は4年ほどなので、3000台のフロート観測網を維持するためには、年に800台程度のフロートを投入し続ける必要があり、観測網の完成は、プロジェクトの完了というより、むしろ、観測網の維持という、ある意味で観測網の構築より困難な挑戦のはじまりと捉えたほうがいい。したがって、お祝い気分浸っているわけにはいかないのだが、Argoを、より広いコミュニティーに知ってもらうには、いいタイミングであると思われる。この機会に、Argoの概要と、これまでの成果、そして今後の可能性について、述べさせていただきたい。

2. Argoの概要

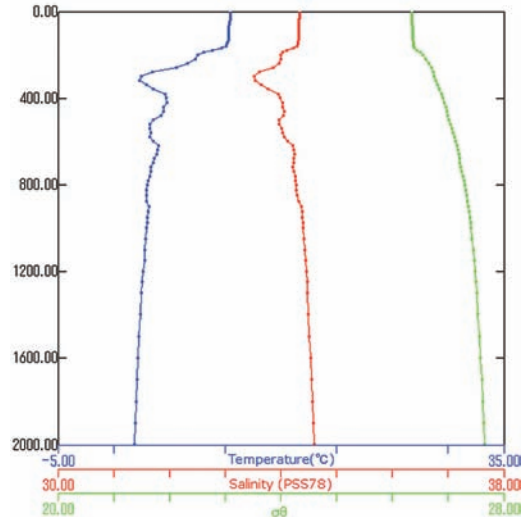
Argoについては、その起こりや当初の構想を含む一般的な解説(竹内 2002)から、比較的最近の

Argoに関する国内・国際事情(四竈 2007)やデータ流通システム(吉田 2007)、データ品質管理体制(中村 2007)まで、これまでにいくつもの紹介記事が著されている。また、日本におけるアルゴ計画(Japan Argo)の公式サイト(http://www.jamstec.go.jp/J-ARGO/index_j.html)などを通じて、Argoに関する最新の情報を入手することができる。詳しくはそれらを参照していただくこととして、ここでは簡単に概要を紹介する。

Argoを可能にしたプロファイリングフロートの構造を第2図に示す。浮袋(bladder)のオイルを出し入れすることで浮力を調節し、普段は所定の深度(パーキング深度と呼ぶ)を漂流して、定期的に、水温と塩分の鉛直プロファイル(第3図)を計測しながら海面まで浮上する。海面でデータを衛星に送信し、再びパーキング深度まで沈降する。プロファイリングフロートのうち、後述するArgoデータセンターにデータを供給している、すなわちArgo観測網を構成しているものをArgoフロートと呼んでいる。Argoフロートの標準的動作サイクルを第4図に示す。観測周期は10日、パーキング深度は1000mで、いったん2000mまで沈降し、そこからおよそ 10cms^{-1} の速さ



第2図 プロファイリングフロートの断面図。Argo フロートとして、最も広く用いられている APEX フロートの例。Argo Project Office のウェブサイト (<http://www-argo.ucsd.edu/>) より。

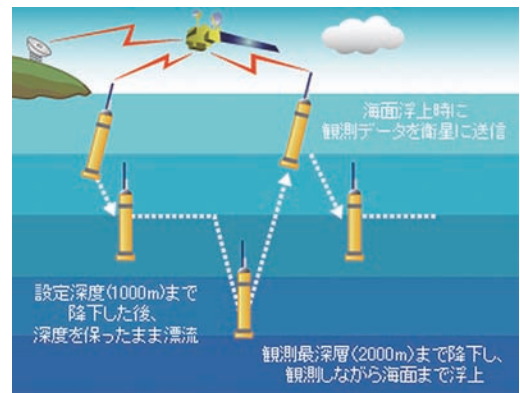


第3図 プロファイルデータの例。2008年4月9日に北太平洋西部 (39.64°N, 151.73°E) で得られたもの。JAMSTEC のウェブサイト (http://www.jamstec.go.jp/ARGO/J_ARGOj.html) より。

で、5～6時間かけて海面まで浮上する。データを衛星に確実に送信するため、6時間以上、海面を漂流する。

衛星が受信したデータは数時間以内にフロート運用者に届けられ、通常、それと同時に、国別データセンター (DAC) に送られる。DAC は、原則として観測後24時間以内に、即時品質管理を施したデータを世界データセンター (GDAC) に送付する。DAC は、同時に、全球気象通信システム (GTS) にもデータを投入し、これにより、現業気象・海況予報業務での即時の利用が可能になっている。GDAC はインターネットを通じて、データを無償で一般に公開している。つまり、インターネットにアクセスできる人なら誰でも、世界中の Argo データを、ほぼリアルタイムで利用することができる。

なお、日本の DAC は気象庁が務め、GDAC は、米国海軍数値気象海洋センター (FNMO) とフランス海洋開発研究所 (IFREMER) に置かれている。さらに、研究用の高度な品質管理 (遅延品質管理) が、原則として観測から6ヶ月以内に施され、このデータも GDAC から公開されている。日本の Argo フロートの遅延品質管理は海洋研究開発機構 (JAMSTEC)



第4図 Argo フロートの動作サイクル。Japan Argo のウェブサイトより。

が担っている。

2008年3月現在、23カ国の協力により、3129台の Argo フロートが稼動している (第1図)。このような国際的な協力体制は、Argo の、全球観測網構築という目標とデータ公開方針とに賛同する国々の自主的な参加によって成り立っている。国ごとに、予算の裏づけは異なり、それぞれ独自の目的をもったプロジェクトとして実施されている。そのような有志連合とし

での国際 Argo プロジェクトの推進役を担っているのは、参加国の研究者・データ管理者の代表によって構成される国際 Argo 運営チーム (International Argo Steering Team : IAST) である。国際プロジェクトとしての Argo の特異性とそのメリットについて、竹内 (2002) が以下のように表現している。「最初からキチッとした国際的な枠組みを作ってから始めるのではなく、まず最初は有志が集まって始められるところから始め、徐々に参加者 (国) を増やししながら体制を整えて行っていることである…… (IAST にしても) 強制力を持つわけではなく、情報を交換しながら調整を進める場になっている。フロートの展開にしても各国に海域を割り当てるのではなく、それぞれの計画を持ち寄り、重複を避け、足りないところを補い合うような調整を行うだけである。言わばいいかげんな組織である。しかし、そのお陰でこれだけ早く計画を立ち上げることが出来た……Argo は歩きながら考えるプロジェクトである。」

2008年4月現在、稼働中の日本の Argo フロートは375台であり、米国の1792台につぐ貢献をしている。日本の Argo は、2000年度からミレニアム・プロジェクトの一環として、文部科学省と国土交通省を中心に、季節予報の精度向上を目標に実施され、2004年度からは JAMSTEC の中期計画 (5 年) に盛り込まれて、主に太平洋における季節から十年スケールの海洋気候変動の実態把握とメカニズム解明を目標に進められてきた。

概要の紹介の締めくくりに、Argo の語源に簡単に触れる。Argo は、ギリシア神話の英雄イアソン (Jason) が冒険航海で乗った船の名前である。一方、1992年から周年周期約10日での全球海面高度マッピングのミッションを担ってきた TOPEX/Poseidon 衛星の後継として、Jason 衛星が2001年に打ち上げられた。Argo という名前は、Jason 衛星との相補的な連携を強く意識して選ばれたものである。

3. Argo の成果

Argo は、それまでの観測システムでは不可能だった時空間的に均質なサンプリングによる、外洋域の大規模海洋変動のモニタリングを担う観測システムであり、黒潮などの強い海流を横切る船舶による断面観測、固定点での高時間分解能時系列を得る TAO/TRITON のような係留観測、各種の衛星観測などととも、地球上層海洋観測ネットワークを構成してい

る。国際 Argo は、その目的として、(1)熱・淡水の貯蔵や輸送など、上層海洋の状態の変化を定量的に記述する、(2)海面下の水温・塩分・流速データを得て、Jason 衛星が捉える海面高度変動の解釈を可能にする、(3)海洋予報モデル・大気海洋結合モデルの初期値作成、および、データ同化、モデルの評価に資する、(4)季節から十年スケールの気候変動性を記述し、その予測可能性の理解に資する、というものを掲げている (<http://www-argo.ucsd.edu/index.html>)。

Argo データは、観測網の完成を待たずに、既に広く活用され、これらの目的は順調に達成されつつある。たとえば、海洋の貯熱量の長期変動の記述は、これまで、時空間的に限られた船舶観測データを客観解析によりマッピングすることで行われてきた (Levitus *et al.* 2005など)。従来のデータの分布の一例として、1970年から1974年に得られた水温プロファイルデータのうち700m以深に及ぶものの分布図を示す (第5図)。データの分布は極めて不均質であり、北大西洋と、中央部を除く北太平洋以外には、データの空白域が広がっている。とくに、南半球には一部の沿岸域を除いて、絶望的なほどデータがないことがわかる。このような船舶データに基づく海洋の貯熱量変動の記述には、大きな不確実性が伴うことは容易に想像がつくと思う。この図を、第1図と比較してほしい。第1図は Argo フロートの分布図なので、10日ごとに得られる2000mまでの水温・塩分プロファイルデータの分布に相当する。Argo によって、海洋の熱・淡水の貯蔵量のモニタリング体制が飛躍的に改善されたことは明白であろう。また、これらのプロファイルデータによって、衛星高度計によってモニタリングされる海水位変動を、深度ごとの水温・塩分変動からの寄与に分解できるようになったことも理解されるだろう。

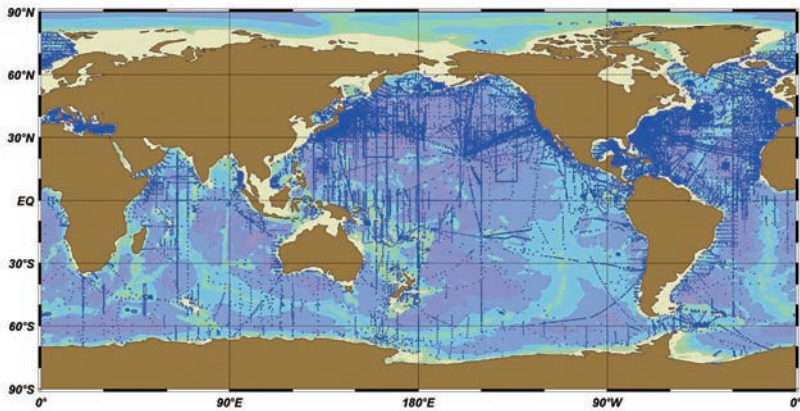
Argo データは、気象庁、アメリカ環境予測センター (NCEP)、ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) をはじめとする世界の現業気象予報機関で季節予報や ENSO 予報に既に用いられているほか、日本では、水産総合研究センターや JAMSTEC の海況予報モデルにも用いられている。Argo データは、従来、現場データの主役だった XBT (投下式水温水深計) に比べ、データの量を増やしただけでなく、時空間分布の均一性、精度、深度レンジ、塩分データの取得など、多くの点で優っており、予報モデ

ルのパフォーマンスの向上に貢献していると考えられる。しかし、その貢献の統計的な評価や、Argo データの利点を十分に生かせるようなデータ同化手法の改良など、Argo の効果が客観的に示されるまでには、まだ、しばらく時間が必要である。

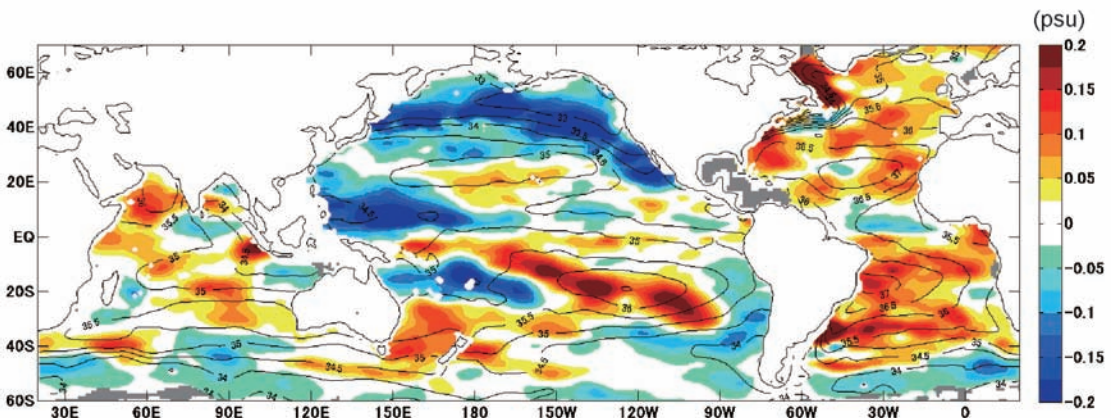
成果として、とくに強調したいのは、塩分の全球的モニタリングは、Argo によってはじめて可能になったということである。そのインパクトを示す研究結果を、具体的な成果の一例として挙げる。第6図は、表層100m 平均塩分の2006年の年平均偏差である (Hosoda *et al.* 2009)。年ごとの塩分のマップを作成

することは、Argo 以前には考えられないことだった。第6図は、年間を通じて、時空間的に均質に分布するデータによる、文字通りの年平均マップである。全球塩分の緯度分布には、蒸発の卓越する亜熱帯域で高塩分、降水の卓越する亜寒帯域と熱帯域で低塩分という特徴があり、また、海盆間の違いとしては、太平洋は大西洋よりも低塩分であるという特徴があることがよく知られている。興味深いのは、気候値塩分が高い海域には正偏差が、低い海域には負偏差が現れていることである。この特徴は2003年から2007年までの各年の偏差分布に共通している (図は省略) ことから、

近年、蒸発 (降水) が卓越する海域ではますます蒸発 (降水) が増えたこと、すなわち、全球的に水循環が強化していることが示唆される。この塩分の変化が海面における蒸発・降水の差の変化のみに起因すると仮定して、蒸発・降水の差の変化量を見積もる試みもなされている。海洋の塩分の観測が、大気・海洋系の水収支の理解に大きく貢献する可能性を示す研究例といえるだろう。



第5図 World Ocean Database (<http://www.nodc.noaa.gov/OC5/SELECT/dbsearch/dbsearch.html>) に収録されている1970年から1974年までの水温プロファイルデータの分布。最深層が700m以上のプロファイルについて示した。Ocean Data View (Schlitzer 2007) により作図。



第6図 2006年の表層塩分偏差の年平均値 (カラー) と表層塩分気候値 (等値線)。表層塩分は海面から100mまでの平均値。等値線間隔は0.5psu。気候値は WOA01 (Conkright *et al.* 2002) による。

4. Argoの可能性

前節に示した例のように、Argoによる海洋の水温・塩分の時空間的に均質なモニタリングは、気候変動の理解に不可欠な大気海洋系の熱・淡水収支とその変動の理解に極めて有用な情報をもたらす。さらに、それらの収支の変動が生む水温・塩分偏差の海洋内部への伝播や、その熱・淡水収支へのフィードバックを追うことも可能になる。Argoデータそのものの解析だけでなく、Argoデータを取り込んだデータ同化システムのプロダクト（海洋再解析データ）の解析が、この分野の研究の大きな進展を促すだろう。

全球海洋の水温・塩分観測網としてのArgoの一つの発展の方向は、深度レンジを、海の残り半分、すなわち2000mから海底までもカバーするように広げる、というものである。そのためには、プロファイリングフロートの耐圧性の向上と、より高い精度のセンサーの開発が必要になる。そのような取り組みは既に進められている。

もう一つの発展の方向は、Argoを、水温・塩分以外の様々なセンサーによる海洋モニタリングのためのプラットフォームとして活用する、というものである。溶存酸素センサー、クロロフィルセンサーなどは、既に実用化され、それらのセンサーを搭載したプロファイリングフロートが市販されている。酸素センサー付きのプロファイリングフロートはこれまでに世界で100台以上投入されている。ヨーロッパの研究者を中心に、全球の海洋・大気・陸域の酸素変動を一体的にモニタリングしようという構想が打ち出され、そのためのパイロットプロジェクトが提案されている。近い将来、酸素がArgoの観測項目に正式に加わることになるかもしれない。また、人工衛星の海面センサーによる海面付近の一次生産のモニタリングを補完するものとして、フロートによって亜表層のクロロフィルをモニタリングしようという動きもある。このほか、栄養塩（硝酸塩）や二酸化炭素分圧、pHのセンサーの開発も進んでいる。

5. おわりに

Argoによって、海洋学は革命的な変化を迎えつつある。しかし、Argoの価値を十分に引き出すためには、これを10年、20年と継続する必要がある。第2節に述べたように、Argoには、永続的な観測網としての予算的な裏づけは、ほとんどの国で、まだない。幸い、2008年3月に策定された海洋基本計画には、国際協力の分野で我が国が主導的な役割を果たす項目の一つとして、Argoが明記された。今後、海洋学のみならず、気象、気候、生態系など、幅広い研究・応用コミュニティにとって有用な海洋モニタリングの基盤として、Argoを維持しようという機運が、ますます高まることを祈る次第である。

参考文献

- Conkright, M. E., R. A. Locarnini, H. E. Garcia, T. D. O'Brien, T. P. Boyer, C. Stephens and J. I. Antonov, 2002: World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics, and Figures, CD-ROM Documentation. National Oceanographic Data Center, Silver Spring, MD, 17pp.
- Hosoda, S., T. Suga, N. Shikama and K. Mizuno, 2009: Global surface layer salinity change detected by Argo and its implication for hydrological cycle intensification. *J. Oceanogr.*, **65**, 579-586.
- Levitus, S., J. Antonov and T. Boyer, 2005: Warming of the world ocean, 1955-2003. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L02604, doi: 10.1029/2004GL021592.
- 中村知朗, 2007: Argo 高品質データ. 月刊海洋, **39**, 434-439.
- Schlitzer, R., 2007: Ocean Data View. <http://odv.awi.de>.
- 四電信行, 2007: 国内・国際 Argo の現状. 月刊海洋, **39**, 418-421.
- 竹内謙介, 2002: Argo 計画の概要と現状, その限界. 月刊海洋, **34**, 614-623.
- 吉田 隆, 2007: Argo データ管理システム. 月刊海洋, **39**, 429-433.