

黒潮続流域におけるプロファイリング フロートの軌跡

TRAJECTORIES OF PROFILING FLOATS IN THE KUROSHIO EXTENSION REGION

楊燦守¹・須賀利雄²・四竈信行³

Chan-Su YANG, Toshio SUGA and Nobie SHIKAMA

- ¹正会員 工博 地球観測フロンティア研究システム (〒237-0061 横須賀市夏島町2-15)
² 理博 地球観測フロンティア研究システム (〒237-0061 横須賀市夏島町2-15)
³ 理修 地球観測フロンティア研究システム (〒237-0061 横須賀市夏島町2-15)

As part of the Japan Argo project, 20 autonomous profiling floats have been deployed in the western North Pacific to measure vertical profiles of temperature, salinity and pressure during the trips between the surface and parking depth, generally 2000m. In this paper, the trajectories of the 8 floats deployed in the Kuroshio Extension region in February 2001 are used to depict the circulation pattern at the surface and 2000m depth. The corresponding sea surface topography maps created from satellite altimeter and dynamic height climatology were compared with the tracks of nearly coincident floats and were found to agree well in most cases except for the period June 5 to 16 2001. It is shown that the conspicuous breakaway of the floats from an expected path is possibly associated with the abnormal path of the Kuroshio Extension such as an outbreak event, as revealed by AVHRR infrared image and cross sections by cruise data.

Key Words : Argo, Kuroshio Extension, Oyashio, Altimeter, TOPEX/POSEIDON, ERS Coastal SST

1. はじめに

黒潮・親潮境界域(図-1)は海洋物理および生物, 化学の各方面から重要な海域であるため, 多くの研究が行われてきた^{1), 2)}. また, 沿岸の水温環境と沖合海況との関連性に対しても考察されてきた. しかし, 従来の観測手法で得られる海洋内部のデータの時間および空間分布はこの海域の海洋現象を把握するためには不十分である.

この海域の海況把握に資するため, 2000年度から始まった日本Argoプロジェクトの一環として, 自動プロファイリングフロート³⁾(図-2)による海洋表層・中層観測が行われている. 本研究では, TOPEX/POSEIDON・ERS-2衛星データを用いて, 2001年2月15日から16日にかけて黒潮続流域に投入された8台のフロートの表面と深度2000mにおける軌跡について解析を行った.

2. Argo Project

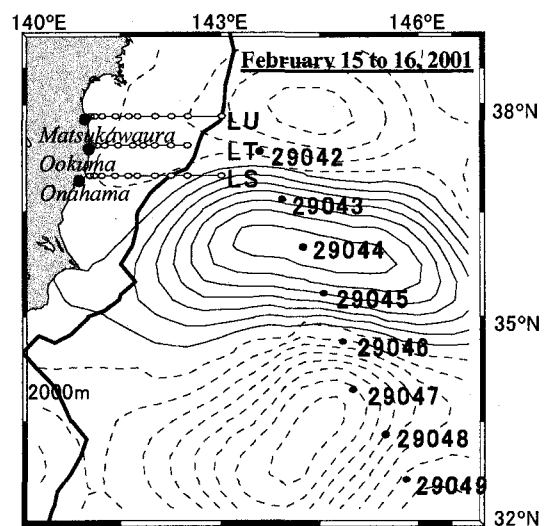


図-1 研究海域での海洋観測定線の位置(LU, LT, LS), 沿岸定地水温観測地点(小名浜, 大熊, 松川浦)およびフロート投入点(29024から29049). 2000mの等深線(太い実線)とsea surface height anomalyデータによる等値線(正は実線, 負は点線, 間隔は0.12m).

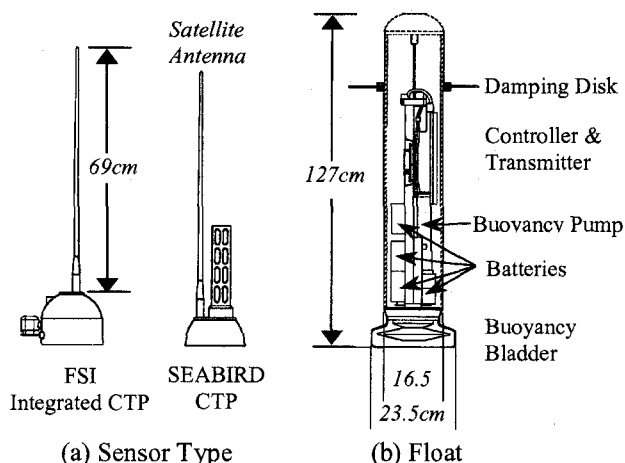


図-2 アルゴフロート(APEXタイプ)の断面図 ((a)を(b)の upper end に接合).

Argoは、全球海洋に3000台(緯度・経度にして約3度毎に1台)のプロファイリングフロートを投入し、海面から2000mまでの海洋をリアルタイムで監視しようという国際プロジェクトである。

現在 12か国が参加しており、その内9か国が世界

の海洋にこれまでに224台のフロート(Argoに寄与するフロートをアルゴフロートと呼んでいる)を展開している。2002年までに700台以上のアルゴフロートが投入される計画である。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Argoに参加しており、これまでに20台のフロートを西太平洋に投入した。また、2001年度中に約80台を入れる予定である。

アルゴフロートは、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日間毎に海面に浮上する。その間に水温・塩分・圧力を観測し、浮上後はARGOSシステムによって観測データやフロートの位置を伝送し、再び漂流深度まで沈む。このようなサイクルを4~5年間持続する。

3. 海面高度データとフロートの軌跡の比較

解析に用いた海面高度偏差(sea surface height anomaly, 以後SSHA)データはTOPEX/POSEIDONとERS-2海面高度計によって観測されたものである。本研究ではColorado 大学(www-ccar.colorado.edu/~leben/research.html)が編集・公開しているデータセットを

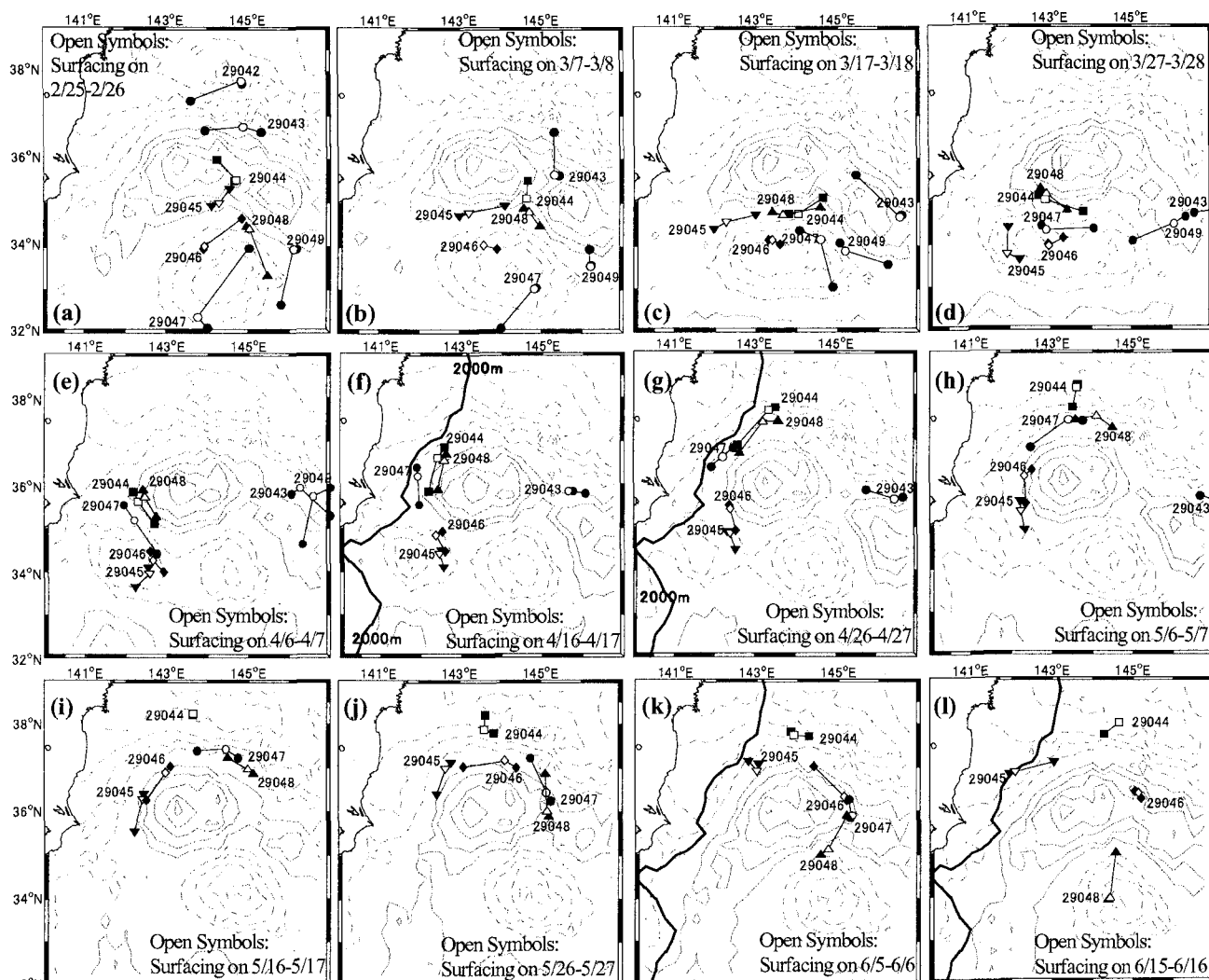


図-3 海面高度(0.2m間隔)とフロートの軌跡の比較 (フロート番号がついているところが最後の位置)。

用いた。図-1のようなSSHAのcontour mapはKuragano and Kamachi⁴⁾の方法に従ってSSHAデータを10日間隔で最適内挿したものである(2001年2月15日から6月15日まで)。

図-3は絶対海面高度(sea surface height, 以後SSH)データであり, SSHAに力学高度場の年平均気候値を加えて作成したものである。力学高度気候値は, HydroBase⁵⁾収録のデータセットをもとに1000dbを基準面とする力学計算により求めた。SSH図を作成することによってSSHA図で見られる低気圧・高気圧性の渦が確認できた。図-3ではその渦を見やすくするために1.9m以上は実線(高気圧), それ以下は点線(低気圧)で表した。また, 白色のシンボル・マークはARGOSによって浮上後最初に得られたフロートの位置を示し, 黒色は沈降前最後に得られた位置である。各フロートの番号がついているところは各図面での最後の位置を示す。海面での漂流(浮上から沈降まで)は約9時間である。

海面高度データとフロートの軌跡の比較を行うために, フロート29042が浮上する日(29042から29049までの浮上時間差は約23時間)のSSH図に重ねてフロートの軌跡をプロットした(図-3)。図-1に見られるSSHAの状況で8台のフロートが投入された後, 2月25-26日に浮上し沈降するまでの軌跡(図-3の左上)を見ると, 29042から29044までのフロートは高気圧の北部に位置し, 東向きに移動した。29045から29048のフロートは高気圧の南部と低気圧の北部に位置し, 西向きに移動した。特に, 表面での漂流はSSHの等値線とよく一致してる。一方, 深度2000mでの軌跡も, SSHに見られる低気圧・高気圧の渦に概ね

対応していることから, これらの渦が少なくとも2000mまで及んでいることが分かる。このような傾向は6月15-16日の図まで共通して見られる。全体的に黒潮続流の南に接して高気圧性の渦が, その南側には低気圧性の渦が分布しており, フロートの動きはこれらの中規模渦の流れに従っていたことが分かる。

海面高度データによく対応していないフロートの軌跡は(1)フロート29047(2月26日), (2)フロート29049(3月8日と28日), (3)フロート29043(4月6日と16日), (4)フロート29044(5月6日と6月16日), フロート29048(6月17日)などである。これらの軌跡とSSH場のずれの原因として, SSH場が捉えきれなかった黒潮続流の短期変動の影響が考えられるが, 他に, 表面の軌跡については風の影響, 2000mでの軌跡については約10日間の軌跡を直線で近似したことの影響なども考えられる。このうち, 明らかに黒潮続流の短期変動に伴うずれの例について本節の最後と次節で議論する。

深度2000mにおける, 直線で近似したフロートの軌跡を用いて, 約9.1日(約219時間)平均の漂流海域の平均流速を計算できる。ただし, この軌跡は沈降前最後に得られたフロートの位置と浮上後最初に得られた位置を結んだものなので, 深度2000mの流れだけを反映しているわけではない。しかし, 以下のようにその誤差は大きくないと考えられる。浮上および沈降に要する時間は5-6時間, ARGOSによる位置の確定時刻と浮上沈降時刻の差は合わせて2時間程度である。表面から2000mまでの平均流速を30cm/sec, 2000mでの流速を6cm/secと仮定すると, その誤差は10%程度である

図-3に見られる特徴の一つは, 本州沿岸の2000m等深線付近での動きである(4月6日から27日までの図)。フロートは2000m等深線付近まで近づきながら右側に曲っていく。したがって, 2000mより深いところの水はそれより浅いところに入りやすく, この海域の流れは海底地形に制御されていると推測される。

しかし, 6月16-17日の図を見ると, フロート29045は2000mより浅いところに入っていることが分かる。これはSSH場から期待される動きとは逆向きである。さらに, この時期にはほかのフロートの軌跡もSSH場と一致してない。

図-4に2月16日から6月16日までフロート29045の軌跡を示した。フロートは南下しながら伊豆小笠原海溝付近で低気圧渦によって反時計回りに動いて5月末まで北上した。その後6月6日に, その距離は短い南東方向に移動してから6月16日には水深2000m以下の領域に入った。結局, このフロートは最後まで2000mより浅いところを漂流した。

次にこのようなフロートの大きな経路離脱の原因を究明するため, NOAA/AVHRRのCh. 4データおよび海洋定線観測データ(位置は図-1)を用いて解析を行った。

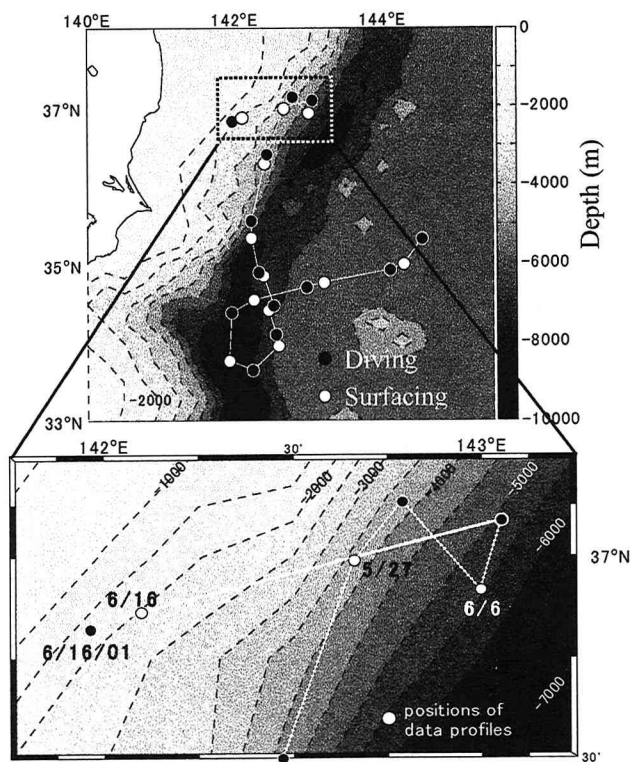


図-4 フロート29045の軌跡と海底水深図。

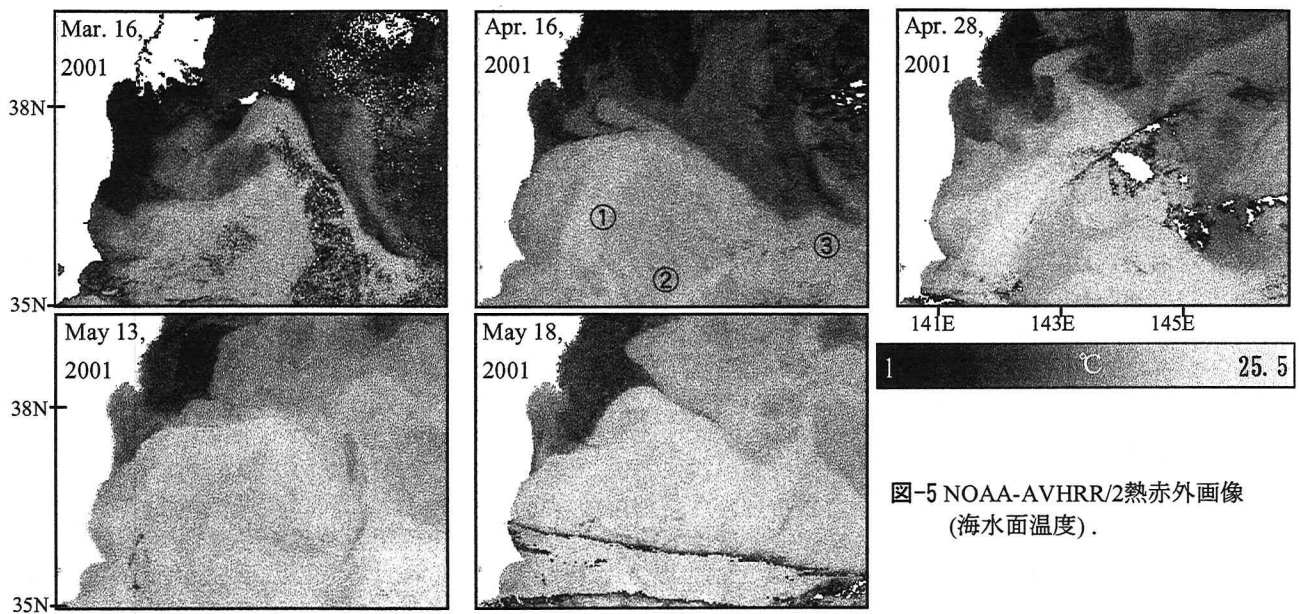


図-5 NOAA-AVHRR/2熱赤外画像
(海水面温度)。

4. 衛星データと船舶観測データによる2001年春の海況

研究海域には主に親潮系水、黒潮系水、津軽暖流水が存在する。親潮系水は3月頃より南下の勢力を強め、4月に最も強まり、牡鹿半島沿岸近くまで達する。5月になると親潮系水の勢力は次第に弱まり、夏になると東北海域にはその姿は見られなくなる^{6), 7), 8)}。一方、黒潮系水は3月末から5月にかけて北上するが、沿岸部には見られず、沖側で発達していることが多い。そこで春期に黒潮系水の勢力が沿岸近くで強まることによって、海底エクマン層による沿岸湧昇の影響で異常漁獲現象がおこったこともある⁶⁾。

冬から春にかけて、津軽暖流の勢力は弱く、三陸沿岸におけるその流路の幅は狭いが、津軽暖流水の影響の判別は難しい。また、黒潮・親潮境界域はもっと複雑であり、その前線域に生ずる流れの形も変わる。

(1) NOAA/AVHRR海面水温データによる黒潮・親潮境界域の短期変動の考察

図-5と6は2001年3月から5月までの代表的な海面水温画像である。これらは東北大学によるNOAA衛星画像のデータベースJAIDAS⁹⁾からのデータであり、その中でAVHRR/2のCh. 4のみを温度変換したものである。図の中の白色は雲を示す。可能な限り合成することにより、雲域を減らした。たとえば、5月18日画像の南部分(黒い色の細いバンドの内部)は17日または18日のデータである。

水温画像によると、今年3月まで親潮の南下は強かった。3月16日画像で親潮は東北沿岸を沿って約36.5Nまで南下しているように見えるが、他の画像では35N付近沿岸にも親潮が見られる。これは93年以来的ことである。この時期のフロートの軌跡を見ると、黒潮続流の蛇行の峰の右側に位置したフロート29043は南に移動していた。また、図の南中央にあっ

たフロートも図で見られるように西に動いた。このようなフロートの動きは表面と深度2000mでよく似ていた。

4月16日画像での黒潮続流の流れのパターンは4月によく現れる形であり、黒潮続流は二つの軸(図の①と②のところ)を持つ経路で流れている。このような流れはフロートの軌跡(図-3)からも確認できる。しかし、東向きに移動していた③付近のフロート29043は4月はじめから西向きに動いた。すなわち、4月16日まで約半月間表面、2000mとともに西向きに移動し、その後また東向きに動いた。

4月28日と5月13日の図では、黒潮続流が沿岸により接近しながら北上していることが見られる。その後、黒潮続流は沿岸から離れ、東向きに移動した。

図-6は2001年6月4日の海面水温画像である。また、画像の上に海洋定線(LS, LP, LU)でADCPによって観測された深度100mの流速ベクトルをプロットした。ここで、LSとLUは6月4-5日間に観測したがLTは11-13日の流速である。LT以外は流速ベクトルと水温分布がよく対応していることが分かる。

図-6で見られる黒潮続流は今までの流れパターンとは非常に異なる様子を示している。非常に広い

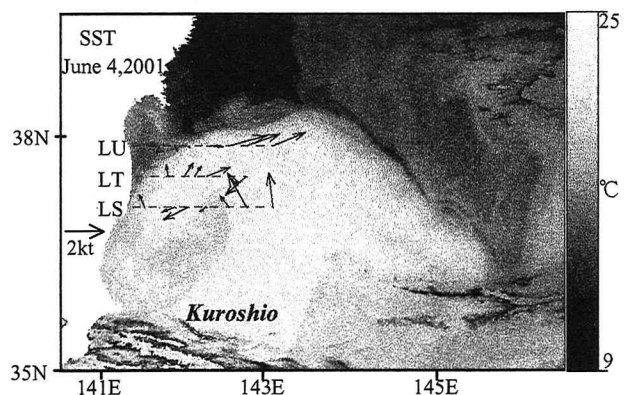


図-6 2001年6月4日の海面水温画像と深度100mで観測された流速ベクトル。LSとLUは6月4-5日観測、LTは11-13日の流速。

幅を持つ流れが急激に北東に進んでいたが、その流れが西側と東側に回って図のようなパターンになったと考えられる。図-3の6月の二つの図(k)と(l)でフロートが予想される経路から離脱したことこの現象との関連を調べる。

日本南岸付近を流れた黒潮は本州東方海域で一部が北向きに分岐し、二次黒潮前線がしばしば形成される¹⁰⁾。また、黒潮続流の蛇行の変動によって二次黒潮前線の分岐パターンは大きく変動する。すなわち、図-6のようなパターンは分岐の急成長に関連したものであると考えられる。たとえば、流軸流速は海面付近2.0から2.9ノット(LSのNo. 9と10)であり、二次黒潮前線の上端部分でも2.7ノット(LUのNo. 8)に達する。6月4日から7-8日後、LTでの海面付近流速は最大1ノット程度で二次黒潮前線の勢力は弱くなっている。

したがって、図-3の6月5-6日(k)の状況では、すでに黒潮続流から分岐した流れから、岸に向かって流

れるイベントが発生していたと考えられる。すなわち、6月15日(図-3の(l))ごろは、そのイベントが終わった段階である。そのイベントに従ってフロートが動いたといえる。6月25日から7月15日までのSSH場(図省略)とフロートの軌跡を比較してみるとフロート29048以外はよく対応していた。

Tobaら¹¹⁾は今回東北沿岸付近で観測された現象のような流れを紀伊半島沖で観測し、それを暖水のアウトブレイク(outbreak)として記述した。今度のイベントはその位置や形などでTobaらのアウトブレイクとは異なるが、黒潮本体とは逆向きに暖水を放出した点は共通している。

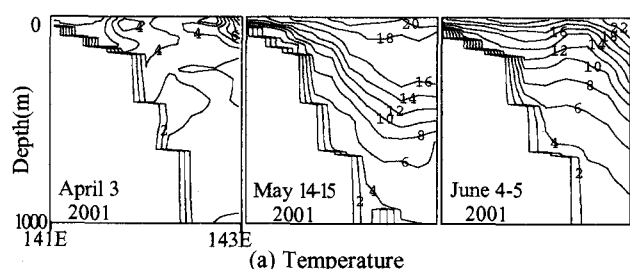
(2) 船舶観測データによる海況

衛星データは表面の状態を主に反映しているの、海域の断面構造を把握するため図-7と8に海洋観測定線(LS, LP, LU)における水温、塩分、ポテンシャル密度の断面図を示す。

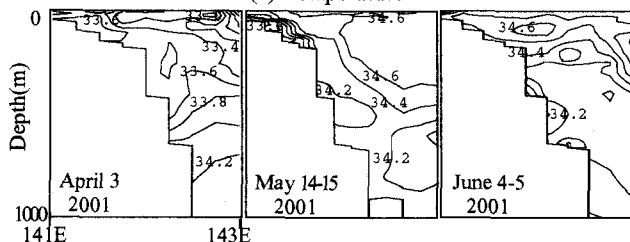
黒潮続流の指標を200mで15℃にすると、5月中旬に黒潮続流が沿岸近くまで接近していることがわかる。深度500mでも10℃以上を示し、図-5の5月13日の画像に見られる海面水温のパターンともよく対応する。しかし、黒潮系水が見られる深さは定線LUでは約100m程度である。すなわち、LU付近の暖水は黒潮続流そのものではないと考えられる。

その後、図-5の5月18日画像のように黒潮系水が沿岸から離れはじめたと推測される。6月はじめになっても塩分値はあまり変わらないが、水温は5月と比べ低くなった。しかし、表面付近では高くなっているところがある。水温断面図と同様に、ポテンシャル密度もLSの142.4Eで両側より小さくなった。142.4E付近に高温の水が入ってきたと判断される。

図-9は6月4-5日(LSとLU)と11-13日(LT)の観測データから深度500mに対して求めた地衡流である。定線LSで、No. 8-9とNo. 9-10では北向きであり、No. 6-7では南向きであって、図-8の100m流速ベクトルと方向は一致する。LUでは、すべて比較的弱い北向きの流れである。一方、LUで流速が小さいのは、LUでの観測が他の観測より約一週間遅く行われたのがその原因であると思われる。衛星画像と現場観測データによると、6月はじめごろにおきたフロートの異常な移動が研究海域の変動と関連していたことが

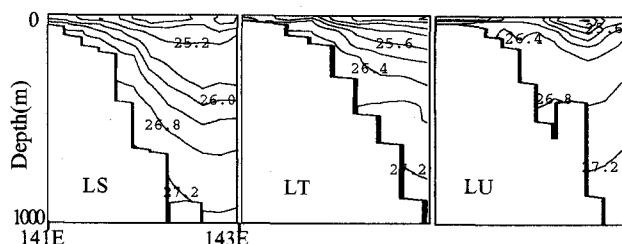


(a) Temperature

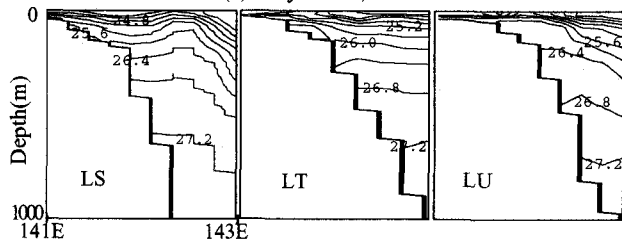


(b) Salinity

図-7 定線LSにおける水温と塩分の断面図(2001年4月-6月)。



(a) May 14-16, 2001



(b) June 4-5 and 11-13(LT), 2001

図-8 定線LS,LP,LUにおける σ_θ の断面図(2001年5月と6月)。

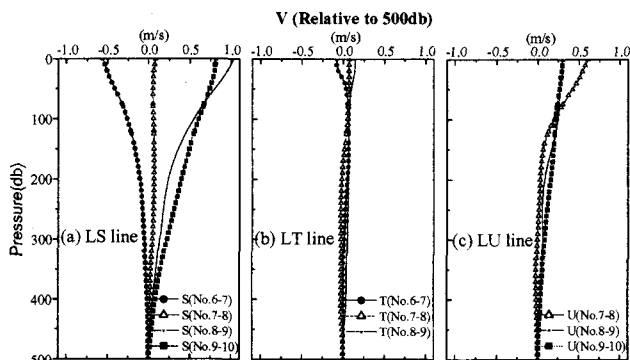


図-9 定線LS,LP,LUにおける深度500mを基準にした地衡流の速度(図-8の(b)と同じ日)。

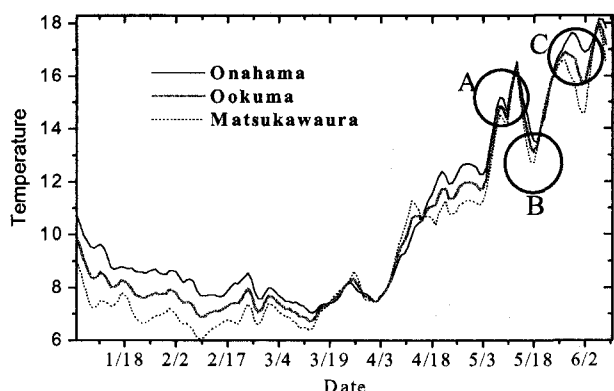


図-10 沿岸定地水温観測地点(小名浜, 大熊, 松川浦)における水温の時系列.

分かる.

図-10は2001年1月から7月10日までに沿岸定地水温観測地点(小名浜, 大熊, 松川浦)で観測された水温データに移動平均(3日)と施したものである. 3月10日ごろまでは場所による水温の違いがはっきり出ているが, その後4月はじめまで三つの場所での温度差が非常に小さくなる. この時期は親潮の南下が強かった時期(図-5の3月16日画像)である. 5月はじめまでは黒潮続流が北上することによって, 再び場所による水温の差が出る.

しかし, 5月中旬には黒潮続流からの暖水舌による熱供給(たとえば, 図-5の5月18日画像で沿岸部分)や日射などによって小名浜, 大熊, 松川浦での水温は一緒に変動する(図-10のA部分). また, 黒潮続流の離岸に伴って水温が急に下がるが(図-10のB部分), C部分で見られるように黒潮続流の2回目の接岸によって水温が上がる. しかし, 図-6での岸向きの暖水の流れの影響が場所によって異なるので, 水温の差が出ると考えられる.

6. 結論

2001年2月に本州東方の黒潮続流に投入した8台の自動プロファイリングフロートの表面と深度2000mにおける軌跡について解析を行った. その際, 海面高度衛星データ, 海面水温画像および船舶観測データを用いて次のような結果が得られた.

1. 緯度・経度にして約3度毎に1台のフロートを配置するのがArgoプロジェクトの目的である. しかし, 黒潮続流海域で, ほとんどのフロートが同じ軌跡に従ったということは, 今後の投入計画立案に重要な情報となる.

2. 海面高度データとフロートの軌跡の比較を行った結果, フロートの動きは中規模スケールの流れに従うことが分かった. また, 2000m等深線付近でのフロートの動きによると, この海域の流れは海底地形に制御されていると推測される.

3. 一方, 6月はじめにフロート29045がSSH場から期待される動きとは逆向きに移動し, 水深が2000mより浅いところに入った. このイベントが黒潮続流の短期変動によるものであることを確認した. この

ような変動は沿岸の水温環境にも影響を及ぼしていることが分かった.

フロートの軌跡, 海況の変動, 沿岸水温環境という要素はお互いに密接に関連していることから, ほぼリアルタイムで公開されているフロートの情報は海岸工学分野にも貢献が期待される.

今後, 表面および深度2000mでの流速場をより正確計算する必要がある.

謝辞: フロートの準備, 投入作業などには, 海洋科学技術センター, 地球観測フロンティア研究システム, 観測船「みらい」(MR01-K01航海), マリンワークジャパンの多くの方々が関わった. また, 福島県水産試験場から貴重な資料を御提供頂いた. ここに謝意を表する.

参考文献

- 1) Hanawa, K.: Southward penetration of the Oyashio water system and the wintertime condition of midlatitude westerlies over the North Pacific, *Bull. Hokkaido Natl. Fish. Res. Ins.*, 59, pp. 103-120, 1995.
- 2) Okuda, K., Yasuda, I., Hiroe, Y. and Shimizu, Y.: Structure of subsurface intrusion of the Oyashio water into the Kuroshio Extension and formation process of the North Pacific Intermediate Water, *J. Oceanogr.*, Vol.57, 2001.
- 3) Davis, R.E., Webb, D.C., Regier, L.A. and Dufour, J.: The Autonomous Lagrangean Circulation Explorer (ALACE), *J. Atmos. Ocean Technol.*, Vol.9, pp.264-285, 1992.
- 4) Kuragano, T. and Kamachi, M.: Global statistical space-time scales of oceanic variability estimated from the TOPEX/POSEIDON altimeter data, *J. Geophys. Res.*, Vol.105, pp.955-974, 2000.
- 5) Macdonald, A. M., Suga, T. and Curry, R. G.: An isopycnally averaged North Pacific climatology, *J. Atmos. Ocean Technol.*, Vol.18, pp.394-420, 2001.
- 6) Yang, C. S., Tanaka, H., Sawamoto, M. and Hanawa, K.: Topographically induced upwelling of the Kuroshio and its effect, northeast Japan, *29th IAHR Congress Proc.: Hydraulics for Maritime Engineering*, Tsinghua University Press, pp. 439-444, 2001.
- 7) 楊燦守: 昇温期間における東北沿岸海面温度の変動特性, *水工学論文集*, 第44巻, pp. 927-932, 2000.
- 8) Yang, C. S.: Atmospheric and oceanic forcings on the spring coastal thermal environment in the Kuroshio/Oyashio Frontal Region, *Coastal Eng. J.*, 42(4), pp.407-425, 2000.
- 9) 江藤純一, 牧野正三, 川村宏: 日本画像データベース(JAIDAS)について, *SENAC*, Vol. 30, 97-102, 1997.
- 10) Toba, Y., H. Kawamura, Hanawa, K., Otobe, H. and Taira, K.: Outbreak of warm water from the Kuroshio South of Japan -A combined analysis of aatellite and OMLET oceanographic data, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 47, 297-303, 1991.
- 11) Kawai, H.: Hydrography of the Kuroshio Extension. *Kuroshio, It's Physical Aspects*, Stommel, H. and Yoshida, K. eds., University of Tokyo Press, pp.235-352, 1972.

(2001. 10. 1受付)