

国産フロート (NINJA) の陸上および実海域試験結果

安藤健太郎*¹ 伊澤 堅志*² 水野 恵介*³ 細田 滋毅*¹
井上亜沙子*⁴ 小林 大洋*⁵ 四竈 信行*⁵

3000台の中層プロファイリング・フロート(以降, フロート)による海洋観測システムの構築を目指す国際アルゴ計画が開始された時点では, 使用できるフロートを供給できるメーカーが2社のみに限られていた。これは, 将来, 競争がなくなった場合, プロジェクトのコストを上昇させることにつながるため, フロートを供給できるメーカーを増やすことが一つの課題とされていた。また, 将来にわたりより安価で高品質のフロートを投入し続けるために, 新しいフロートの技術開発も重要な要素として挙げられてきた。日本では, 鶴見精機がフロート開発に着手し, 2001年9月には鶴見精機による1500mでの実海域実験の成功した。それを受けて, アルゴグループでは, ニーズに合うフロートに仕様を変更し, 2002年4月以降陸上試験および実海域試験を行ってきた。その結果, フロートのハード的な機能として, アルゴ計画で使用できる十分な能力を持っているフロートであると評価できた。

キーワード: 国産中層フロート, アルゴ計画, 実海域実験

Results of field experiments and laboratory tests of domestic profiling float (NINJA)

Kentaro ANDO*⁶ Kenji IZAWA*⁷ Keisuke MIZUNO*⁸ Shigeki HOSODA*⁶
Asako INOUE*⁹ Taiyo KOBAYASHI*¹⁰ Nobuyuki SHIKAMA*¹⁰

In the beginning of the Argo project, the most serious issue is that only two companies could manufacture the profiling float in commercial base. Such condition was thought to be undesirable not only for supplying low-cost high quality floats in future but also for promoting to develop new technology of profiling float. Tsurumi Seiki Co. in Japan had started the development of profiling float for the Argo project in 2000, and succeeded their first field test in the coastal region of Japan in September 2001. We, JAMSTEC, purchased several floats, which met to our Argo specification, and tested on land and in the real ocean. The results indicate that the float has enough ability and functions for using the Argo project.

Keywords : domestic profiling float, Argo project, field experiments

-
- *1 海洋科学技術センター・海洋観測研究部
 - *2 海洋科学技術センター・海洋観測研究部(現所属:(株)鶴見精機)
 - *3 海洋科学技術センター・海洋観測研究部(現所属:独立行政法人水産総合研究センター遠洋水産研究所)
 - *4 マリン・ワークス・ジャパン・海洋観測課
 - *5 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
 - *6 Ocean Research and Observation Department, JAMSTEC
 - *7 Ocean Research and Observation Department, JAMSTEC (Present affiliation: Tsurumi Seiki Co.)
 - *8 Ocean Research and Observation Department, JAMSTEC (Present affiliation: National Research Institute of Far Seas Fisheries)
 - *9 Marine Works Japan, Co.
 - *10 Frontier Observation Research System for Global Change, JAMSTEC

1. はじめに

2000年度より海洋科学技術センター(以後、センター)で開始された「ミレニアム・プロジェクトの一つである「地球規模の高度海洋監視システムの構築に関する研究(アルゴ計画)」では、国際協力により、全球海洋で3000台の中層プロファイリング・フロート(以降フロート、詳細は後述)を投入し、継続的に年間100,000点の水温と塩分のプロファイルデータをリアルタイムで取得することを目標としている(水野, 2000)。取得されたデータは、気象予報や気候予測の初期値として利用され、その精度向上に大きく貢献するものと考えられている。また、アルゴによる観測データはこれまで何十年もかかって蓄積された歴史的な観測データを一年で蓄積できるほどの多量なデータである。これは、海洋研究にとっても革命的なことであり、海洋学を大きく進展させる原動力となることも期待されている。

この計画で利用される中層フロートは、任意の深さ(通常は2000mや1000mなど)の海水の現場密度と同じ密度(すなわち、浮力がゼロ)となるように重量調整されて投入され、10日程度その深度で滞在したのち、体積を増加させ浮上するように、プログラムされている。浮上時に水温と塩分の鉛直プロファイルを計測し、海面に浮上した後人工衛星でそれらのデータを送信する。その後、再度、決められた深度まで沈降し、同じ観測を繰り返すものである。市販のフロートは、4年程度の期間、150回以上のプロファイル観測を行えるように設計されている。

国際的なアルゴ計画が始まる前は、市販されているフロートは米国Webb社のAPEXおよびフランスのMartec社のPROVORのみであり、それ以外には米国スクリプス海洋研究所で独自に開発が行われていたにすぎなかった。この状況は、フロートの価格や機能向上において、正常な競争状態にない状況であった。これを受け一つの動きとして、Martec社はカナダのMetocean社にエンジン部分の提供を行うこととし、カナダでMetocean-Provorという製品で市販化を実現した。また、スクリプス海洋研究所は独自のフロート(SOLO)の設計図を公開(有料)し、世界の海洋研究所での新規開発を促した。この設計図は、米国ウッズホール海洋研究所にて、WHOI-SOLOとして開発が続けられている。

日本では、鶴見精機がスクリプス海洋研究所より設計図を購入し、フロートの基本について習得した。その後、鶴見精機が独自の技術により国産フロートの開発を行ってきた。2001年度には、鶴見精機による1500mの海域実験に成功し、それを受けてセンターでは、アルゴで要求される仕様で利用できることを検証するため、試験用にフロートを購入し、陸上および実海域でのテストを繰り返し行って来た。センターのアルゴ仕様としてはCTD(水温・電気伝導度・深度)センサーとして、当時より安定した観測が可能であり、アルゴの仕様を十分満たすと評価されている米国シーバード社製のSBE41もしくはSBE41CPの搭載を要求してきた。鶴見精機もそれに対応し、センターの発注する試験機の段階からSBEセンサーの搭載を可能にした。なお、塩分の計測方法は、水温・海水の電気伝導度・水圧の関数として間接的に行うことが国際的に定められている。

現在、鶴見精機製の中層フロートは、NINJA(New Profiling Float of Japan)と命名され、製品化された状況にある。本研究では、2001年度および2002年度に試験機として購入したNINJAに関して2002年度に陸上試験と実海域投入を行ったので、それについて報告する。

2. 国産フロート(NINJA)

国産フロート(NINJA)の仕様を表1に、また、概略図を図1に示す。大きさとしては、直径16cm、高さが215cm、空中重量は32Kgであり、米国Webb社のAPEXより7kg重く、高さも若干高い。しかし、カナダMetocean社のPROVORより3Kg程度軽く高さも低い作りとなっており、NINJAのサイズと重さは両者の中間である。バッテリーは、リチウム電池を

表1 NINJAの仕様

Table 1 Specification of domestic float (NINJA).

Model name	NINJA-T (TSK CTD sensor) NINJA-S (SBE CTD sensor)
Dimensions	16.5 cm dia. x 215 cm long
Buoyancy Engine	Plunger type: 350 cc
Mass	32 kg
Operating depth	2000 meters at maximum

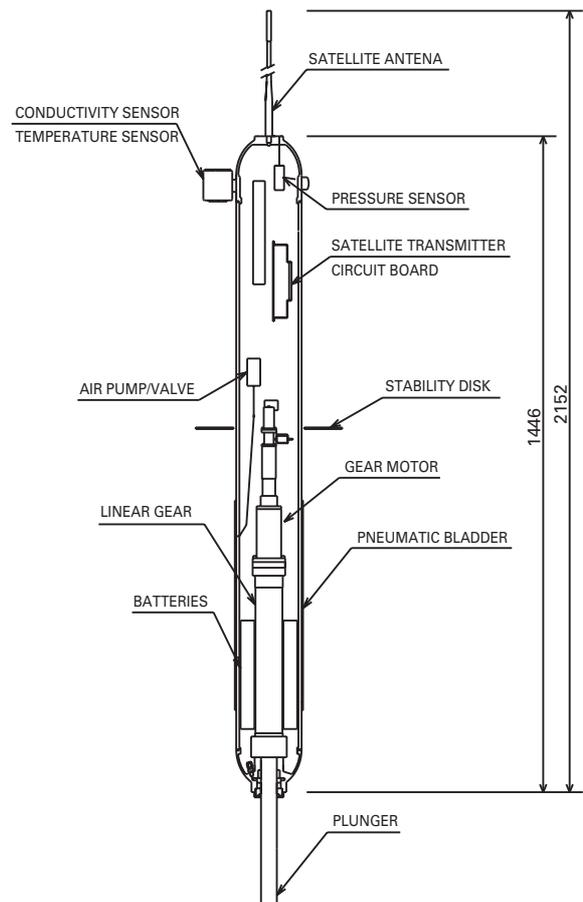


図1 試験用フロートの概略図。

Fig. 1 Conceptual diagram of NINJA float.

利用し、実際に販売されるフロートは、シーバード社製 SBE41センサー付きで2000m深から150回以上のプロファイルと一度のプロファイルで18メッセージを送信し、深度で70層以上のデータの送信が可能となる。我々が使用した試験機では、オペレーションにおいてスリープ時間を少なくしているため、シーバードCTDセンサー付きで90回程度のプロファイルが可能となっている。NINJAの特徴の一つが、センサーが選択出来る点が挙げられ、電磁誘導式の鶴見精機オリジナルCTDセンサーもしくは米国シーバード社のSBE41センサー(CTDセンサー)が選択できる。これら2種類のセンサーによるプロファイルデータの評価は後述する。

もう一つの特徴は、浮力コントロールの方法である。図1にフロートの概念図を示す。APEXやPROVORなどの場合、浮力コントロールは筐体外に油たまり用の袋を持ち、浮力をえる場合(浮上の場合)には、筐体外の油たまりに筐体内から油たまりに油を送液し体積を変化させ浮力を得ている。NINJAの場合には、図1に示すように、筐体内のプランジャーと呼ばれるチタン製の棒を直接ギアモーターで押し出し体積を変化させる。浮力の変化は350cc可能であり全体積が約32,000ccであるため、約1.1% (=350/32,000)の体積変化率となる。APEXでは、約1.04% (=260/25,000)であるため、体積変化率において若干有利であるといえる。ただし、この体積変化率については、PROVORが最も有利で、NINJAとAPEXの10倍程度の体積変化率を持っている。

フロートを実際に2,000mより浮上・沈降させることを考えた場合、NINJAとAPEXの体積変化率は、実際の海洋の海面と2,000mの現場密度の変化と同じオーダーとなり、フロートは変化できる体積のほとんどを利用して浮上・沈降を行っている。このため、投入前のフロートの浮力調整(バラストニング)は必要不可欠である。NINJAのバラストニングに関しては、Swift and Riser (1998)を元に行ったAPEXのバラストニング実験(伊澤ら, 2000)を参考に行われている。

3. センターにおける陸上テストとその結果

実際の海洋に投入する前に、陸上で可能な限りのテストを実施し、不具合を潰しておくことは、実海域テストを成功させるために重要なことである。そのための実験の一つとして、高圧下もしくは低温下でフロートがプログラム通りに作動しデータを送信するかを確認する必要がある。これらの陸上試験は、2002年4月にセンター・むつ研究所に共用施設として完成した高圧タンク(写真1)を利用して行われた。

(a) 高圧下作動テスト

このテストの目的は、高圧タンクを利用して実際の浮上・沈降の動作を確認することである。従って、フロートを各プロセスでの時間間隔は短くするものの、実際に投入するモードを用いて、フロートの動作にあわせて、理想的な圧力環境をタンクにて再現する必要がある。なお、図2に高圧下作動テスト時におけるタンク内のフロートの位置関係を示す。フロートは、水中カメラに映るように設置され、プランジャーの押し出し・引き込みがフロートの高さから計測で



写真1 むつ研究所に新たに整備された高圧タンク。
Photo 1 High pressure tank used for the laboratory test of domestic float.

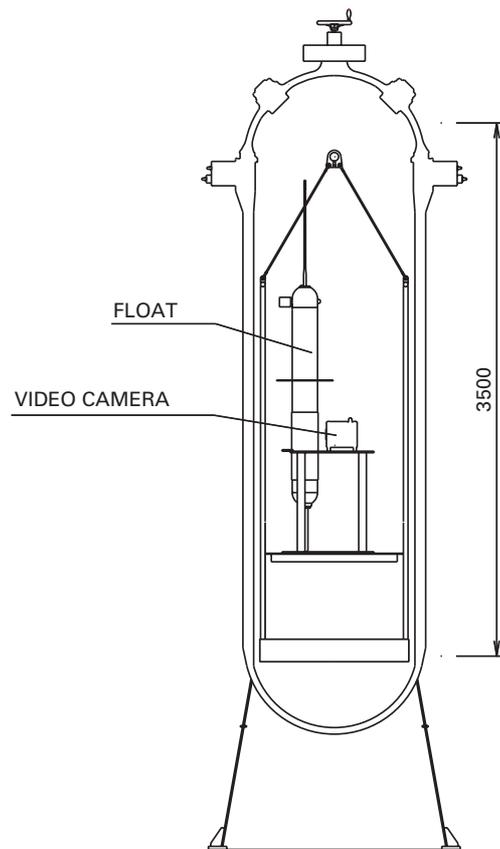


図2 高圧タンク内における高圧下作動試験時のフロートおよび水中カメラの設置位置。
Fig. 2 Position of installations of NINJA float and underwater camera in the high pressure tank.

きるようにフロートの側面に目盛りが付けられている。図3にこの実験でおこなった圧力制御を示す。高压タンクの圧力制御は、フロートの動作に合わせてマニュアルで行った。以下に、実際の高压下作動試験の詳細な方法を示す。

- 1) フロートを実海域に投入するモードにし起動をかけ、プランジャーが引き出され、エアブラダーが膨らんでいることを確認する。
- 2) フロートを高压タンクに設置する(図2, 写真2)
- 3) 高压タンクを閉じ、水を満たす。
- 4) フロートが沈降を開始する(プランジャーを引き込み、エアブラダーを縮ませる)時刻になったら、高压タンクの加圧を開始する。
- 5) フロートの沈降が停止したこと(プランジャーの引き込みが停止したこと)が水中カメラで確認されたら、そのプランジャーの位置に相当する水圧まで加圧し、高压タンクを停止させる。
- 6) 滞在時間(この実験の場合、10分程度に短縮)の後、フロートは自動的にプランジャーさらに引き込み、下降時に2000dbar 深度で深になったことを確認した後、浮上を開始するため、プランジャーを押し出す。これを水中

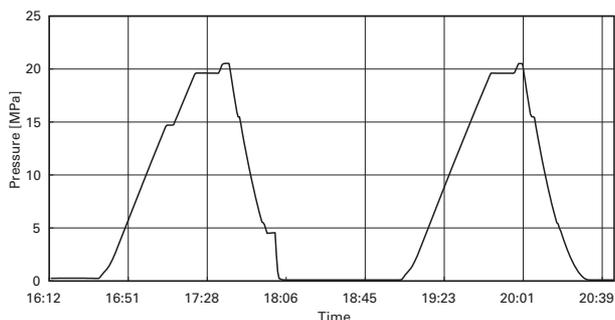


図3 高压下作動試験時の高压タンクの圧力制御スケジュール。横軸は、実際にかかった時間を記入。

Fig. 3 Schedule of controlling pressure in the high pressure tank during the operation test of the NINJA float.



写真2 高压タンクに水を満たし、水中カメラおよびフロートを設置したところ。

Photo 2 The NINJA float installed inside the high pressure tank with the underwater camera before experiment.

- カメラで確認し、それに合わせて、加減圧操作を行う。
- 7) 減圧が終了し0dbar になった後、高压タンクの蓋を解放し、アルゴスによるフロートデータの送信を簡易受信機で受信する。
- 8) この操作を再度繰り返し、動作が正常であることを確認する。

上述のように、フロートの動作に従い、圧力を制御する必要があるが、より詳細な点としてNINJAの浮力制御には2つの特徴がある。一つは、最初の沈降の際に2000dbarでのプランジャーの位置を決定するために、あらかじめ1500dbarとなるように計算されたプランジャー位置で実際にどの深さになるかを計測し、2000dbarで滞在するためのプランジャー位置を計算するというものである。このため、高压タンクテストでは、最初の沈降時に1500dbarまで加圧して、フロートのプランジャーが再度動き出したのちに2000dbar付近に加圧した。二つ目の特徴は上昇時にある。試験機であるため上昇時の浮力制御は簡略化されており、3段階に分かれている。すなわち、プランジャーの押し出しを3分の1ずつ行うという点である。具体的には、2000dbarで3分の1、1500dbarで3分の1、500dbarで3分の1押し出す。このため、押し出しを確認する必要があるため、減圧時にそれぞれ適当な深度でフロートの制御が終了するのを待つために、減圧を停止させた。

これらの実験により、フロートの制御ソフトに若干のバグが発見され修正を行うことができた。また、投入前には最終確認のため、ここで報告する全ての試験フロートで高压下作動テストを行った。最終確認時のテストでは、全てのフロートで期待される制御を行った。なお、このテストは、バラスティングの装置(水中カメラ等)を利用はするが、全く別のものである。バラスティングに関する報告は、伊澤ら(2001)を参照願う。

なお、2003年度製造分からのNINJAからは、1500dbarでの事前制御の方式をやめ、直接滞在深度へ向け沈降するようにソフトの仕様変更されている。

(b) 低温・高压下作動テスト

鶴見精機の社内での部品テストの段階で、低温の環境下で高压時の負荷がかかった状態で起動する際、モーターに大電流が流れるため、保護回路が働きモーターを駆動させないトラブルが発生したため、我々も高压下作動テストをパスしたフロートのうち一台について、高压下作動テストと同じ圧力制御の元で、水温をできるだけ下げてフロートの全ての機能が正常かどうかの試験を実施した。水温を下げるために、むつ研究所の近くの大畑漁港より漁船用の氷を800Kg購入(写真3)し、それをタンク内に入れて(写真4および5)、4℃程度まで下げた。これは、通常の海洋では水深1500~2000dbarの水温に相当する。この実験の結果、正常な作動を確認できた。表2は、実験時にアルゴス送信されたデータの一例の一部である。減圧時(上昇時)の水温が4度程度と非常に低い状況で実験されたことが送信された水温データわかる。



写真3 低温・高圧下作動テスト時にタンク内の水を冷却するために使用された氷。大畑漁協で購入した。

Photo 3 Purchasing 1,000Kg ice from the Ohata fisherman's union near the Mutsu Institute of Oceanography of JAMSTEC. The ice was used to cool water below 3-degree C inside the tank.



写真4 タンク内にいれた氷。ビニールシートは、タンク周りの溝に氷が入らないように覆っているため、加圧時には外す。

Photo 4 Ice inside the tank. The blue vinyl sheet was used to protect dropping ice inside the groove of the tank.



写真5 氷を入れた後に、試験用の国産フロートを設置。その後、蓋をして加圧実験を行った。

Photo 5 After inserting ice in the tank, the NINJA float was installed. Then, the high-pressure tank test with low temperature water was performed.

表2 例として、アルゴスID20486のフロートの低温高圧試験においてフロートが送信してきたメッセージをデコードしたもののうち、上昇時のプロフィールデータを抜粋で示す。

Table 2 A part of profile data during ascending (decreasing pressure) as an example, which was measured during the high-pressure tank test of NINJA float with ARGOS ID 20486.

Pressure (dbar)	Temp. (°C)	Sal. (psu)
1990.9	2.328	0.0360
1889.3	2.330	0.0360
1492.4	3.605	0.0380
992.7	3.583	0.0380
792.9	3.589	0.0380
694.1	3.596	0.0380
595.5	3.616	0.0380
495.7	3.647	0.0380
396.3	3.653	0.0380
297.0	3.699	0.0380
197.9	3.743	0.0380
99.7	3.768	0.0390
49.7	3.757	0.0400
9.1	3.738	0.0420
5.3	3.875	0.0420

4. 実海域テスト

上述の陸上試験を行った後、2002年6月より3回に分けて実海域試験を実施した。ここでは、これまでに投入した9台のフロートの状況を記述し、送信されてきたデータ(特に塩分値)を評価する。実海域テストでのフロートは、浮上観測周期以外は、2000dbar付近に滞在し、浮上時に2000dbarから海面まで72層の観測を行い、海面に浮上後10時間にわたり40秒毎のアルゴス送信を行い、その後2000dbarに沈降する動作に全て設定した。浮上観測周期については、加速試験用の設定として3日、通常試験用の設定として10日を設定している。

(a) 観測履歴

表3にこれまで投入したNINJAの履歴を示す。6月の投入(アルゴスID、2020および20231の2台)は、海洋地球研究船「みらい」で行われた。2台投入した内、1台(20231)は設定通りのオペレーションで観測データを送信したが、残りの1台(2020)からの送信はなかった。原因としては、投入時の海面での衝撃によるコネクタの接触不良であると推測した。6月の投入前の陸上実験でもしばしばコネクタの接触不良が発見されたためである。これは、当該機が最初の試験機であったため幾度もメーカーおよびセンターで検査が繰り返されており、コネクタ部が緩む傾向にあったものと考えている。

10月の投入(アルゴスID10864, 11087, 10867, 20480, 20486の4台)は、海洋調査船「かいよう」で行われた。これらは、6月での失敗の原因と考えられたコネクタに関してコネクタ着脱が起こりにくいハード上の修正を行っている。投入した5台の内、1台(10867)からデータの送信はなかった。これは、これらのフロートはバラストイングにおいて必要重量より重く設定されたフロートが多く見つかった(アルゴスID10864および11087のフロート)ことから、そのフロートも重く設定されそのため、沈降スピードが速く緊急浮上に入る前に圧壊したものと考えている。実際、データの送信があった4機のうち3機の浮上・沈降・滞在の動作にお

いてバラストイングのミスが示された。それら3機のうち2機は、必要とされる重量より40グラムもしくはそれ以上重く設定されており、内1機は常時2100dbarより深く沈降するため、緊急浮上のモードとなり3日の観測周期の設定が、実質1日毎の浮上となった。この緊急浮上を繰り返したフロート(11087)の送信されてきている技術情報によると、海面から2000dbarまでの沈降時間として通常5時間30分から6時間20分程度であるところ、4時間で沈降をしていた。重めに設定された残りの1機(10864)は、設定通りの観測周期(3日)で浮上・沈降を繰り返したが、浮力が相対的に足りないため浮上に時間がかかった。この2台は、浮上時にはCTDセンサーで計測を常時行うため電源が入った状態が長く続いたとの理由により電池の消耗を早めた。軽めに設定されたフロート(20480)も、1900dbarより浅い1840dbar深までしか沈降できず、制御ソフトによりフロートの状態が計画より浅すぎ(すなわち、着底)であると判断され、緊急浮上を繰り返した。このフロートも観測周期を3日と設定したが、緊急浮上を繰り返したため、観測データを1日ごとに送信した。残りの1機(20486)は、NINJAフロートで想定された浮力制御範囲内に入り、設定通りの観測を行った。

2月の投入では、10月の失敗であるバラストイングに関して、その手順および重量管理を徹底させて重量を決定したフロートを利用した。投入後の送信データからは、バラストイング(重量調整)は成功しており、かつ、投入した2台とも設定通りの観測を行っていることがわかった。

これまでの観測を行ったフロートについて、バラストイング以外の問題としては観測回数が短いことが上げられる。これは、試験機であったため、浮上時の塩分水温計測時に各層毎にスリーブを入れずにセンサーを常時通電させていたことが最も大きい。さらに、観測回数が少ないフロートは全てTSKセンサー付きである。これは、TSKセンサーがSBEセンサーに比べ、消費電流が3倍以上になることによる。メーカー側の見積もりによれば、SBEセンサーを搭載するモデルでは、浮上時である程度観測層に距離がある場合に電源を切ることにすれば、2000dbarからの160回の

表3 実海域試験で投入した国産フロートの観測状況。2003年6月時点において、灰色が観測無し、水色が観測終了、黄色が観測中を示す。

Table 3 The current status of field tests of launched NINJA floats as of the end of June 2003. Grey colored IDs indicate no report after launched, blue colored IDs indicate no transmitting after certain numbers of profile, and yellow colored IDs indicate in observation as of the end of June 2003.

アルゴスID	センサー	投入日	全観測回数	観測周期	観測期間	備考
20200	TSK	2002年6月	0	3日	観測なし	コネクタ接触不良?
20231	TSK	2002年6月	55	3日	5ヶ月	電池切れ
10864	TSK	2002年10月	39	3日	4ヶ月	電池切れ、重量調整ミス
11087	TSK	2002年10月	38	1日	2ヶ月	電池切れ、重量調整ミス
10867	TSK	2002年10月	0	3日	観測なし	重量調整ミス?
20480	SBE	2002年10月	89	1日	3ヶ月	電池切れ、重量調整ミス
20486	SBE	2002年10月	観測中	10日	9ヶ月で観測中	(2003年6月現在)
11064	TSK	2003年2月	観測中	3日	4ヶ月で観測中	(2003年6月現在)
12194	SBE	2003年2月	観測中	3日	4ヶ月で観測中	(2003年6月現在)

観測が可能となることがわかっている。2003年度に製造される最新型のNINJAには、この省電力化が行われたモデルとなる。なお、電力の多くは浮上時の水温・塩分計測時に消費されるので、より浅い深度からの浮上にすれば、観測回数はさらに増やすことができる。

アルゴスによるデータ送信では、全てのフロートについてエラーをほとんど起こさずに送信していることがわかった。2000dbarからのプロファイルは、72層の水温・塩分・水圧が256ビット(32バイト)×18メッセージ(技術情報を含む)として送信されており、1メッセージが受信できないとプロファイルに欠測がでることになり好ましくない。実際、9機のフロートの送信データにはプロファイルの抜けはない。

(b) データ評価 (SBE41センサー付き)

図4に、アルゴスID20486の水温および塩分の時間-深さ断面図およびフロートの位置を示す。横軸はプロファイル回数である。水温・塩分とも当該海域での妥当な観測値を示

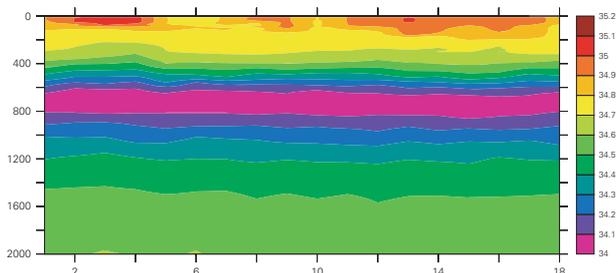
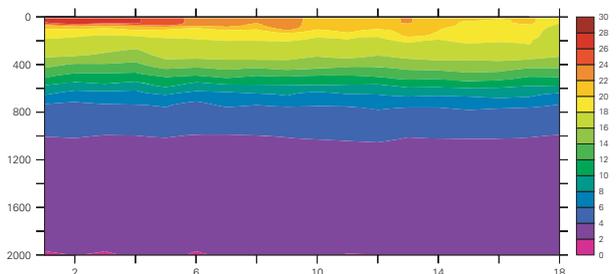
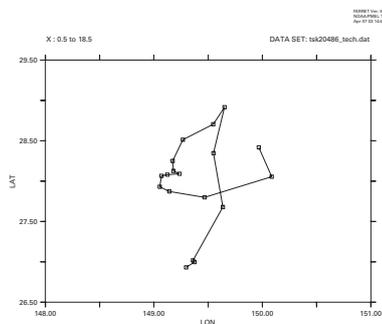


図4 アルゴスID20486 (SBEセンサー付き)のフロートの水温・塩分の深さ-時間断面図(2003年3月までのデータによる)上段は、フロートの位置を緯度経度で示す。中段と下段は、それぞれ水温と塩分の時間(プロファイル番号)-深さ断面図を示す。

Fig. 4 Location of floats (Upper panel), and time(number of profile)-depth sections of temperature (Middle panel) and salinity (Lower panel) of the ARGOS ID 20486 NINJA float with the Sea-Bird CTD sensor (model:SBE41).

し、かつ、深層(1500dbar以深)での水温および塩分値が安定していることがわかる。図5に、フロートを投入した直後に行われた観測船からのCTDによる水温・塩分値との比較を示す。CTDが観測した場所および時刻は、フロートが観測した場所および時刻とは一致していないため、厳密な意味での比較は出来ないが、この海域では1500dbarより深いところでは水塊が時空間的に安定していると考えられるので、そこでの比較は意味がある。1500dbar以浅(3℃以上)では、等圧における水温・塩分の比較および等温における塩分の比較では、差が大きくなっているが、1500dbar以深(3℃以下)でのCTDとの比較では、水温で0.01℃、塩分でも0.01psu以内に収まっており、アルゴの要求精度を満たしている。

図6に3℃以下のTS図上での詳細な比較を示す。フロートの水温が正しいと仮定すれば、フロートの塩分の方がCTDより若干低めに出ていることがわかるが、ほぼ0.01psu以内に収まっている。なお、フロートによる最初の観測だけが、CTDより塩分が低い。正確な原因は不明であるが、過去に投入当初に、生物付着防止剤が溶け出し、それにより塩分を低くさせる現象があったことから、このフロートのセンサーに投入直後に同様のことが起こった可能性がある。また、アルゴスID20480のフロートもCTDと比較し同様の結果を得ている。

これらの解析は、SBEセンサー付きのNINJAフロートは、データの質という意味においてSBEセンサーを搭載したAPEXと同等であり、アルゴで要求されている精度を満たす観測データを取得できることを示している。

(c) データ評価 (鶴見精機製センサー付き)

鶴見精機製のセンサーは、製作毎に改良が重ねられているので、現段階でセンサーとして最新であり、かつ、データが最も蓄積された10月に投入したフロートのデータを示すこととする。図7にアルゴスID10864のフロートの水温および塩分の時間-深さ断面を示す。このコンター(水温2℃、塩分0.2psu)で描画する限りでは時間的に安定した水温と塩分データを観測していると思われる。図からは深層の水温と塩分にも大きなドリフトもなく、表層の水温および塩分値も許容される範囲である。図8に、アルゴスID10864のフロート投入時に現場でおこなったCTDとの比較を示す。等圧における水温の比較では非常に良い一致を示し、深層で0.005℃程度には入っていることが推測される。しかし、等圧における塩分の比較で、深層で1500dbarでは0.02-0.03psu程度高く、2000dbarでは0.03-0.04psu程度高くなっており、また、水温センサーが正しいと仮定して行う等水温における塩分の比較でも、水温-塩分関係が安定する水温3℃以下において、0.02-0.03psu程度塩分が高くなっている。これは、水温が高くなる、もしくは圧力が低くなると現場CTDと一致する傾向であることを示すが、原因は明確になっていない。推測としては、センサーのハード的な部分で圧力の影響が出ている可能性がある。

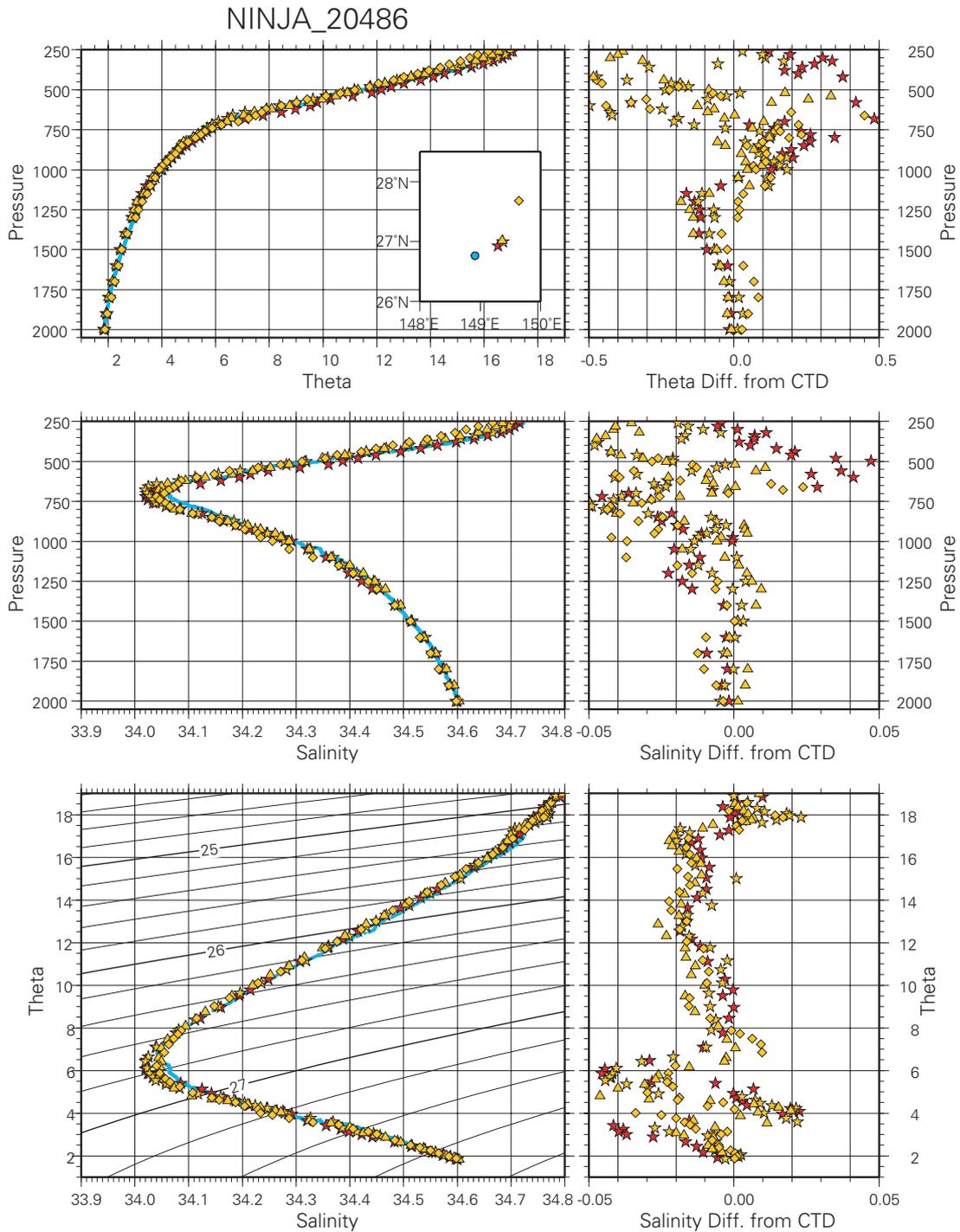


図5 図4のフロートの水温・塩分データと投入時に船から行ったCTD観測データとの比較。上段左は、縦軸を圧力にして、投入時に行った船からのCTD観測と最初3回までのフロートによる水温を比較したもので、上段右は水温の等圧上での船からのCTDとの差を示す。中段は、上段の図と同じであるが、CTDの塩分との比較を示す。下段は、縦軸を水温として、CTDと比較したものであり、左が水温-塩分関係図上に船からのCTD観測とフロート観測をプロットしたものであり、右が塩分の等水温上での現場CTDとの差を示す。

Fig. 5 Comparisons of the temperature and salinity data from the first three profiles of ARGOS ID 20486 NINJA float with the shipboard CTD data. Top left panel indicates the comparison of temperature data on the pressure surface, and top right panel indicates the difference of temperature on the pressure surface. Middle left panel indicates the same as the top left panel except for salinity, and middle right panel indicates the same as the top right panel except for salinity. Bottom left panel indicates the comparison of temperature and salinity on the T-S diagram, and bottom right panel indicate the comparison of salinity on the temperature surface.

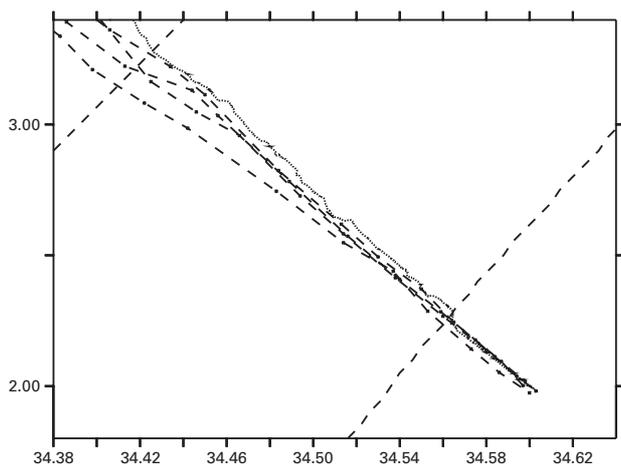


図6 図5と同じデータについて、3°C以下の部分をT-S上で拡大したものを。点線が現場CTDによる水温・塩分値、波線が初回から4回目までのフロートによる水温・塩分値を示す。一点破線は、等密度線を示す。

Fig. 6 Same as the bottom right panel in Figure 5 (T-S comparison) except for enlarging below 3 degree-C.

(d) 技術メッセージの解析

表4に試験用フロートでの技術メッセージの内容を示す。技術メッセージとしては、フロートの観測時に得られた電圧情報やプランジャー位置、浮上・沈降情報などが送信されてきており、今後のフロートの改良に役立てることができる。特に、浮上回数などでは陸上の試験を元にした計算からは得られているが、実際には実海域での実績が必要であり、また、浮上速度や沈降速度も陸上での計算では得られているが、表4の様な情報から実測値として計算しておくことは、将来の高効率化につながるものである。

図9(a)は、アルゴスID10864の主電源の電圧変動を示す。このフロートは、38回で観測を終了しているが、初回から26回にかけて電圧が上昇し、34回から降下を開始し、38回目に11Vとなり、その後観測を終了している。これは、搭載しているバッテリーがリチウムであるため、使用開始時には電圧が上昇し、消耗直前に段階的に落下し、その後消耗しきってしまうというリチウム電池の特性を現している。

図9(b)は、2000dbar付近に滞在しているときのフロートのCTDで計測した水圧値の時間変化を示す。これからは、フロートは予定していた滞在深度2000dbar付近で滞在していることがわかる。初回から14回目までは2000dbarに非常に近い深度で滞在しているが、その後はばらつきが大きい。原因は不明であるが、生物等が付着した可能性がある。23回目、31回目、37回目にはプランジャーにより深くなりすぎないための制御が行われ、成功している様子がわかる。

図9(c)に、浮上時の浮上速度を示す。このフロートはバラストに失敗し50g程度予定より重くなったと考えられており、浮上速度が通常フロートより遅くなっている。特に、1800-1900dbar間(実線)の浮上速度は、通常10-12cm/sが期待されるが6-8cm/sと半分程度の浮上速度しか出ていない。他の深度での浮上速度も同様に遅くなっている。さ

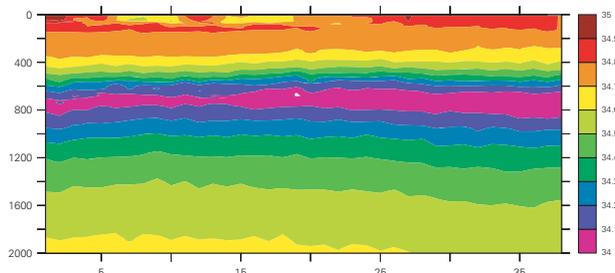
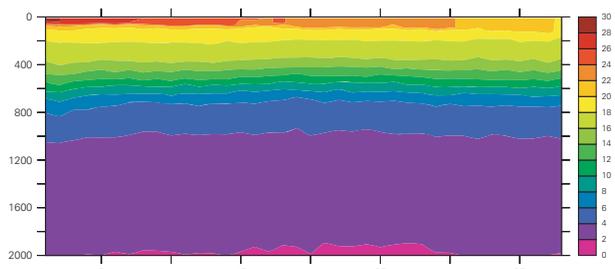
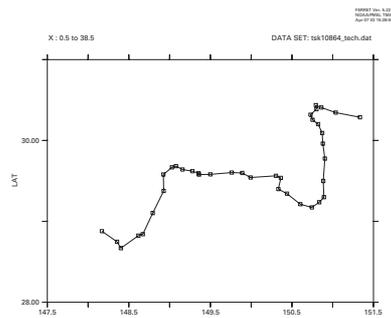


図7 アルゴスID10864(鶴見精機製センサー付き)のフロートの水温・塩分の深さ-時間断面図(2003年3月までのデータ)。上段は、フロートの位置を緯度経度で示す。中段と下段は、それぞれ水温と塩分の時間(プロファイル番号)-深さ断面図を示す。

Fig. 7 Location of floats (Upper panel), and time(number of profile)-depth sections of temperature (Middle panel) and salinity (Lower panel) of the ARGOS ID 10864 NINJA float with the TSK(Tsurumi Seiki) CTD sensor. The data received before the end of March 2003 were used to plot.

らに、海面からの沈降速度も、沈降開始から2000dbar滞りまで通常5時間30分から6時間20分程度かかるところが、4時間で沈降を終了している。沈降速度が速いとフロートにとっては圧壊の危険性が高いことを示していると同時に、フロートが重いため海面の密度によっては浮上出来なくなる危険性が高くなり、また、浮上速度が遅いためプロファイルの計測期間が長くなり電池の消耗に影響がでることが考えられる。事実、重めに設定されたフロートのプロファイル回数はバッテリーのエネルギー量から計算された分より短くなっている。この結果は、フロートの重量を最適にするバラストを行うことが、フロートによる観測の確実性を増すことになると同時に、プロファイルの計測スケジュールの最適化を行うことができ、省電力化につながることを意味している。さらに、一般論として重量を最適に調整することが、現行のNINJAだけでなく現行のAPEXや将来のフロートの小型化にとっても重要であることを示している。

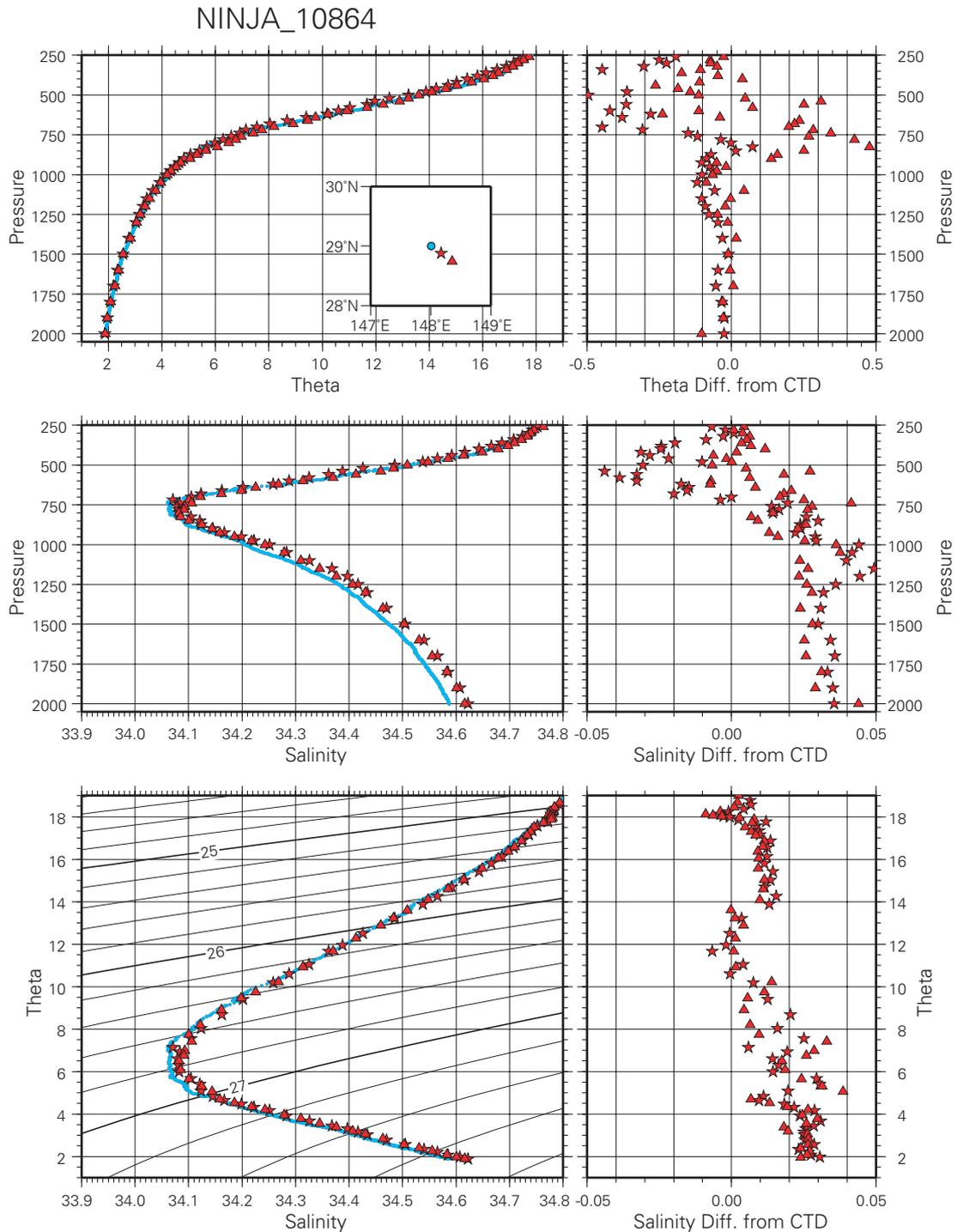


図8 図7のフロートの水温・塩分データと投入時に船から行ったCTD観測データとの比較。上段左は、縦軸を圧力にして、投入時に行った船からのCTD観測と最初2回までのフロートによる水温を比較したもので、上段右は水温の等圧上での船からのCTDとの差を示す。中段は、上段の図と同じであるが、CTDの塩分との比較を示す。下段は、縦軸を水温として、CTDと比較したものであり、左が水温-塩分関係図上に船からのCTD観測とフロート観測をプロットしたものであり、右が塩分の等水温上での現場CTDとの差を示す。

Fig. 8 Comparisons of the temperature and salinity data from the first two profiles of the ARGOS ID 10864 NINJA float with the shipboard CTD data. Top left panel indicates the comparison of temperature data on the pressure surface, and top right panel indicates the difference of temperature on the pressure surface. Middle left panel indicates the same as the top left panel except for salinity, and middle right panel indicates the same as the top right panel except for salinity. Bottom left panel indicates the comparison of temperature and salinity on the T-S diagram, and bottom right panel indicate the comparison of salinity on the temperature surface.

表4 試験用フロートの技術メッセージ。18組のメッセージのうち、メッセージ番号1, 16, 17および18に技術的な情報が書き込まれている。それ以外は、水温と塩分のプロファイル時のデータである。

Table 4 Contents of technical messages from NINJA float. In the 18 pieces set of messages, the message numbers of 1, 16, 17 and 18 includes the technical information listed in this table.

技術メッセージの種類	内容
時刻情報	アルゴス送信日時, 降下開始日時, 滞在深度に入った日時, 上昇開始日時, アルゴス送信開始日時
プロファイル情報	プロファイル番号, プロファイルポイント数, プロファイル状況のフラグ, 2000dbar から海面までの100dbar 毎の通過時刻
滞在情報	滞在深度に入った日時, 滞在を開始した深度, 開始時のモーター回転数, 滞在深度での補正情報(モータを動かした場合), 滞在深度での1日ごとの深度
制御情報	上昇時のプランジヤーの押し出し時間, 12V 主電源電圧, 6V 電源電圧

5. まとめと議論

鶴見精機が開発してきた国産フロート(NINJA)を購入し、陸上の高圧タンクおよび実海域にて試験を実施した。バッテリー消費の問題はあったが、浮上・沈降というフロートの基本的な繰り返し動作について、投入し送信されているフロートの技術情報からは特段の問題も見つからず、バッテリーが消耗しきるまで観測した。シーバード社製のセンサー(SBE41)を搭載したモデルについては、現場でのCTDなどとの比較から、水温・塩分の精度について国際的に決められたアルゴの要求精度を満たしていることもわかった。鶴見精機製のセンサーは、水温については明らかな問題は見られなかったが、塩分について現場のCTDにくらべて0.03psu程度高くなっていることがわかった。鶴見精機製センサーについては今後も改良が必要である。全体的には、6月および10月の実験で発見された問題点が2003年2月の投入フロートでは修正されており、フロート自体はほぼ完成していると考えられる。

今後出ている問題としては、例えば、2001年度に購入したMetOcean製のPROVORの様に長期間の運用において緊急浮上が4割程度発生し、そのほとんどが短命であるという結果が2002年度にわかってきた。これは、一つのフロートを長期間安定して観測させ、3000機のプロートによるアレーを作り上げようとするアルゴ計画において、大きな問題となる。米国Webb社製のAPEXに関しては、長期間にわかり安定した動作を行う実績があるが、NINJAに関しては、本報告でのテスト結果だけからは長期間のプロートの運動および安定性について評価を出すことができていないため、これらについて実績評価が必要と考える。

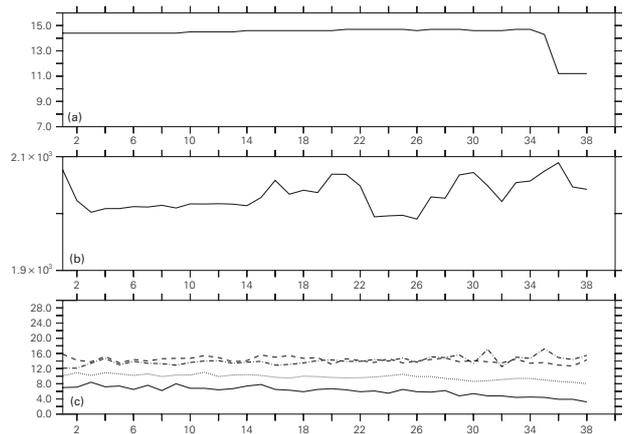


図9 アルゴスID10864の技術情報の解析結果。(a)は主電源の電圧の時間変化を、(b)は2000dbar付近の滞在開始時の滞在深度の時間変化を、(c)浮上時の浮上速度をプロファイル番号毎に示す。

Fig. 9 Examples of technical messages. (a) Time series of main battery voltage, (b) time series of parking depth changes in each profile and (c) ascending speed measured as the average speed in the 1900 and 1800 d-bars (solid), the 1400 and 1300 d-bars (dashed), the 400-300 d-bars (dashed with dots) and the 200-100 d-bars (dotted).

謝辞

NINJAフロートの投入は、海上保安庁「昭洋」、海洋地球観測船「みらい」、海洋調査船「かいよう」により行われた。NINJAフロートからのデータ受信および処理は、マリンワークジャパンにより行われている。低温・高圧化作動試験の際には、青森県大畑町大畑漁協の成田部長他関係者にお世話頂き氷を購入することが出来た。高圧タンクの使用に際しては、むつ研究所の皆様にお世話頂いた。

最後に、NINJAフロートの開発を自社のみの努力で行ってきている鶴見精機社長ほか社員の皆様方に敬意を表します。

参考文献

- 水野, 2000: 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.
- 伊澤ら, 2001: プロファイリングフロートの重量調整について, 海洋科学技術センター試験研究報告, 44, 181-196
- Swift, D. and S. Riser, 1994: RAFOS floats: Defining and Targeting surfaces of neutral buoyancy, J. Atmos. Oceanic Technol., 11, 1079-1092.

(原稿受理: 2003年8月12日)