

氷海用自動観測ステーション (IOEB) の開発

畠山 清^{*1} 滝沢 隆俊^{*1} 中村 亘^{*1}
本庄 丕^{*2} R. クリシュフィールド^{*2}
小山 登^{*3}

氷海用自動観測ステーション (IOEB: Ice-Ocean Environmental Buoy) は、北極海の海洋～海水～大気間の水、熱の輸送及び物質循環過程を精密に観測することを目的に、米国のウッズホール海洋研究所と当センターとの共同により開発・建造されたものである。

IOEBには、気象観測センサーが3種、海水観測センサーが3種、海洋観測センサーが8種及びブイの姿勢監視センサーが3種の合計17種類のセンサーが搭載されている。これらのセンサーが取得した観測データは、IOEB専用開発されたMUSSIC (Multi Sensor Signal and Control) システムによりまとめられて、人工衛星による通信システムであるARGOSシステムを経由して送信されている。

IOEB 1号機は、1992年4月にアラスカ沖ボーフォート海 (73°1.26' N, 148°49.68' W) に設置して、IOEB 2号機は、1994年4月に北極海中央部の極横断流水野内 (85°49.8' N, 12°03.0' W) に設置して、観測を実施している。

キーワード: 北極海, 海水, 漂海ブイ, 自動観測, ARGOSシステム

Development of Ice-Ocean Environmental Buoy (IOEB)

Kiyosi HATAKEYAMA^{*4} Takatoshi TAKIZAWA^{*4}
Toru NAKAMURA^{*4} Susumu HONJO^{*5}
Richard KRISHFIELD^{*5} Noboru KOYAMA^{*6}

The Ice-Ocean Environmental Buoy (IOEB) was developed jointly by the Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) and Japan Marine Science & Technology Center (JAMSTEC) for studies in atmospheric, oceanographic and ice physics in Arctic Ocean during all seasons. The data, are transmitted via ARGOS Satellite System, which displays Arctic

* 1 海洋観測研究部

* 2 ウッズホール海洋研究所

* 3 国際気象海洋株式会社

* 4 Ocean Research Department

* 5 Woods Hole Oceanographic Institution

* 6 International Meteorological & Oceanographic Consultants Co, Ltd.

environment on the WHOI and JAMSTEC computer system.

Technology developed for second generation IOEB is discussed in this paper. IOEB consists of a very durable surface flotation component and underwater mooring line instruments and sensors. The apex contains data loggers for air, ice and engineering measurements, microcontroller modules for accumulating data from all the instruments/and ARGOS platform transmit terminals for broadcasting the data. Ice thermistor strings, vibrating wire stress sensors/and thickness gauge are installed in the ice surrounding the buoy, and from which data are obtained from ice modules inside the apex. In the ocean, a 110m conducting strength cable conveys data from conductivity/temperature recorders, an Acoustic Doppler Current Profiler and data compression module, dissolved oxygen sensor, transmissometer and fluorometer to the microcontrollers. A sediment trap and water transfer system transmit status information through the network cable.

Key Words : Arctic Ocean, Drifting Buoy, Sea Ice, Automated Observation, ARGOS System

1 はじめに

北極における極域研究は、南極における極域研究と大きく異なる。その理由は言うまでもなく南極は大陸であるのに対して、北極は海洋であることにある。北極海の表面には、周りを取り巻く陸地から流れ込む大量の河川水により、低塩分の北極表層水が形成される。このため寒冷な気候もあって、海水が成長しやすい状況である。生まれた海水は、徐々に厚くなりながら北極海にしばらく留まった後、グリーンランドとスピッツベルゲンの間のフラム海峡を通過してグリーンランド海に流れ出て行く。そして逆にグリーンランド海からは、この流れ出た海水と等量の暖かくかつ高塩分の北大西洋水が、北極海に送り込まれることになる。つまり、地球にとって北極海は、ネガティブな熱を輸送する非常に大きな熱ポンプと言えるのである。この熱ポンプは、冬季にシベリヤやカナダの上空の高気圧が作り上げる $-50\sim-60^{\circ}\text{C}$ と言う非常に冷たい大気と、最低でも -2°C にしかない海水と、両者に比べれば非常に薄いものでしかない数mの厚さの海水の3者から構成されている。もし、この海水が、地球の温暖化あるいは河川水の供給量の低下により、その範囲を狭めしかも厚さを薄くするとしたら、ポジティブなフィードバックで地球温暖化が進むことは、誰にでも想像できることであろう。ゆえに地球温暖化がもし進む傾向にあるならば、北極にその変化がより明確に現れてくるはずであり、この変化量の把握が北極海を観測する主要な目的の一つである。

一方、塩と物質の輸送から見ると、ユーラシア大陸と北アメリカ大陸から流入した大量の河川水が海水に生ま

れ変わり、北極海中央部からフラム海峡へ向かう巨大な水の流れ（極横断流）となってグリーンランド海を経て大西洋へ流出することは、例えばアジア・モンゴル高原に源を発し大西洋に至る世界最大の淡水の川が存在していると言えるであろう（図1）¹⁾。このことから北極海の役割は、大陸からの豊富な栄養塩を海水とともにグリーンランド海や北大西洋に運び出すことにより、これらの海に淡水と栄養塩を供給することにある。したがって海洋大循環や物質循環の立場からも、シベリアの5大河川から流れ出た栄養塩を含んだ水が北極の海水となり、どのように運ばれ、どのように海中の植物プランクトンの増殖に係わっているのかなど、我々が知らなければならないことは数多くある²⁾。

北極海で我々が測定しなければならないのは、熱や塩の移動などの物理的因子と栄養塩などの生物・地球化学的因子であることを上に述べた。しかし、何を用いてこれを測ればよいのであろうか？ただ測ると言っても、夏期に砕氷船で数日間測定したデータでは、この指標と成り得ない。通年で大気～海水～海洋の各データを取り、しかもこれを数年間は続けなくては本当の指標となるデータを得ることができない。10～20人の研究者を、海水上に設営した基地に年間を通して住まわせたの観測は、その後方支援体制を含め巨大な組織とならざるを得ず、莫大な資金が必要となる。ましてやこれを北極海上に数点設けるようなことは、今のところ夢物語に過ぎない。

我々の最終目標は、観測データから北極の大気～海水～海洋の温度変化などの気候を知り、北極のシミュレーションモデルを作り上げることである。そのためには、

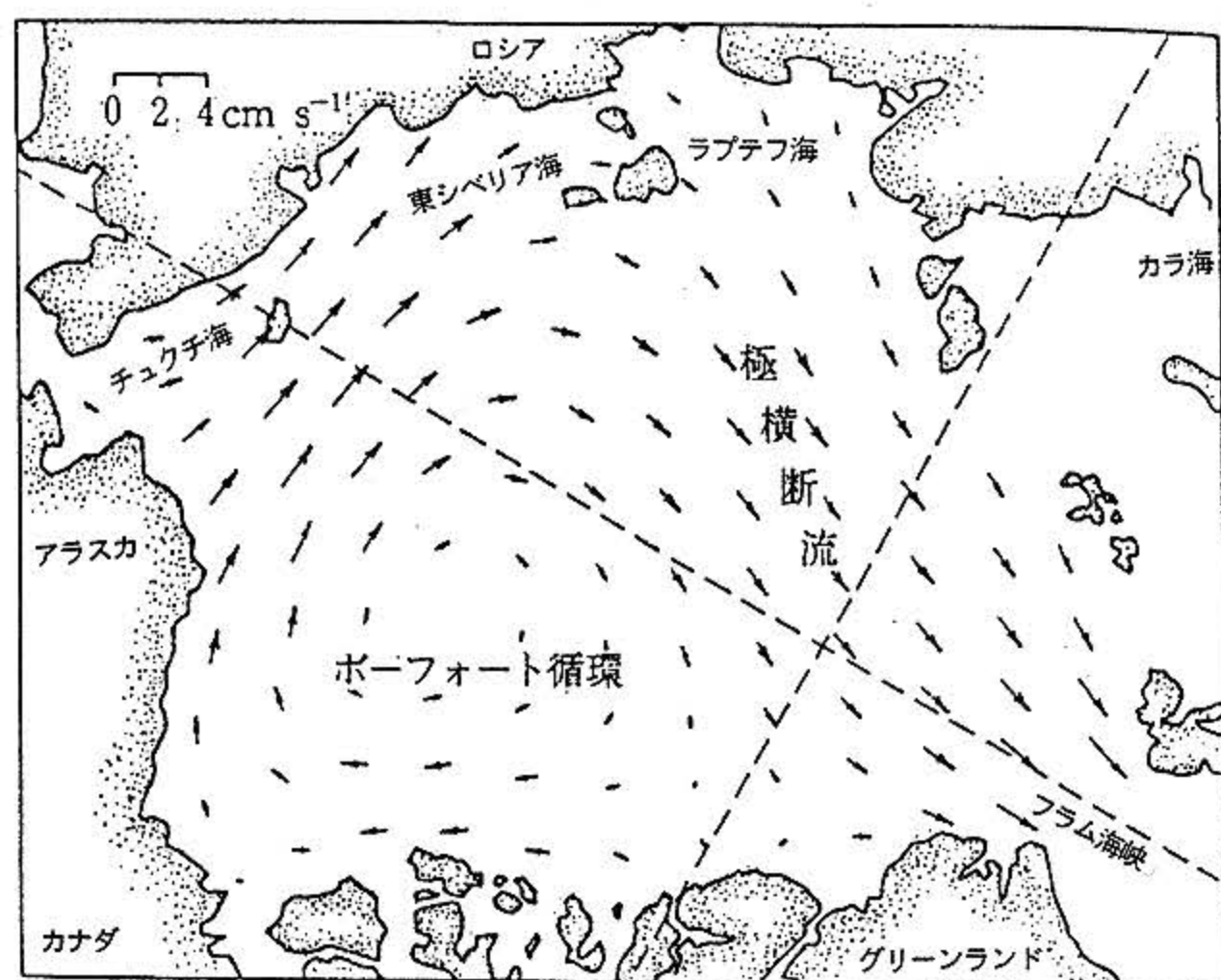


図1 北極海の流水の長い期間での平均的動き
Fig.1 General circulation of the arctic ice pack.

北極海上の数点で、自動的に観測することができる観測ブイによる観測網を作り上げることが必要である。そのブイに課せられる目的は、北極の厳しい環境に耐えられること、大気～海水～海洋の各種データを測定できること、観測したデータをリアルタイムで研究者のもとへ送信することなのである。この度、海洋科学技術センターとウッズホール海洋研究所の共同により建造した氷海用自動観測ステーション（以下、IOEB [Ice-Ocean Environmental Buoy] と呼ぶ）は、この目的をクリアした自動観測ブイである^{3)~5)}。以下にその技術開発について述べる。

なお、現在までIOEBは2機が製造され、両者の仕様に多少の相違がある。本文中の技術的仕様は、主に平成5年度に製造された2号機のものである。

2 IOEBの概要

IOEBの構成を図2に示す。頂上浮体の底部から海中に垂下した長さ約110mの海中索に数種の海洋測器が取り付けられている。また、浮体上部には気象測器が取り付けられており、その脇の海水中には、海水測器が埋設されている。頂上浮体の内部には、IOEBの中核としての役割を持つ中央演算処理装置とリチウム電池（測器の電源用として約2年分、データの送信機用に約3年分）が格納されている。取得した観測データは、2台の送信機によって人工衛星を経由するデータ通信システム（ARGOSシステム）⁶⁾により、日本に伝送される。伝送されないデータについては、IOEBを回収したときに各々のセンサーが有する内蔵メモリーから取り出すことができる。

IOEBには、大きく分けて4群のセンサーが搭載されている（表1）。第1群は気象観測センサー群で、気温計、気圧計、風向風速計の3種のセンサーからなり、第2群は海水観測センサー群で、水温計、氷厚計、氷応力計の3種のセンサーからなる。第3群は海洋観測センサー群であるが、センサーの性質から物理センサーと生物・化学センサーの2種類に分けることができる。物理センサーとしては、音響式流向流速計、電磁式流向流速計、電気伝導度・水温計があり、生物・化学センサーとしては、セディメントトラップ、現場海水濾過システム、透過率計、蛍光光度計、溶存酸素計がある。第4群は頂上浮体の姿勢を監視するセンサー群で、浮体の基準線の磁方位を計測するコンパス、動揺を計測する傾斜計、及び海洋観測センサーを垂下する海中索の張力を計測する張力計の3種のセンサーがある。

IOEBの技術的特徴としては、次の4項目が上げられる。

- ① 多種多様な測定装置からの情報を、2台の中央処理装置で管理・整理し、2台の送信機により決められた手順で人工衛星に送信するための通信管理シス

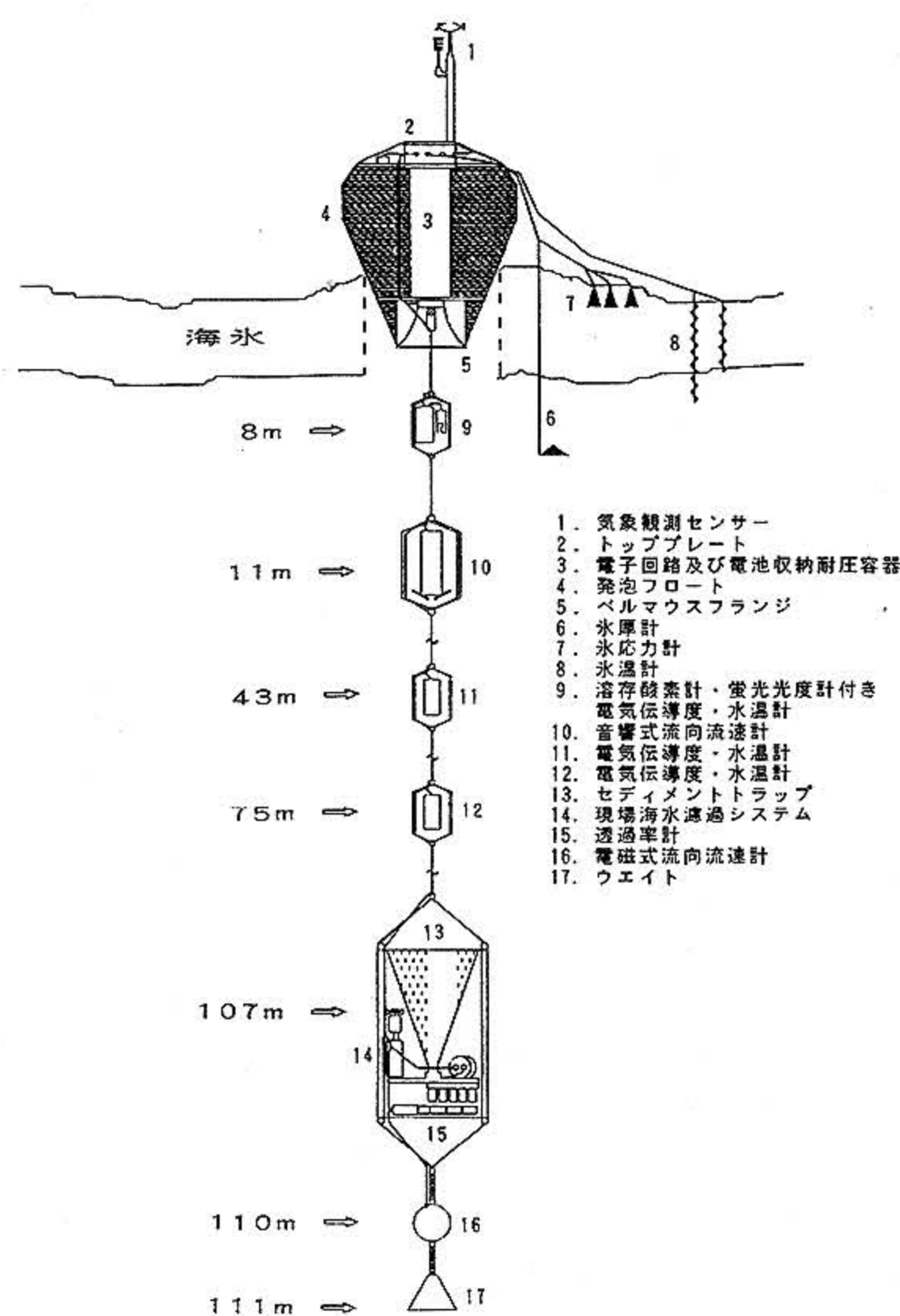


図2 氷海用自動観測ステーション2号機の構成
Fig.2 Ice-Ocean Environmental Buoy (Second version).

表1 IOEB 2号機観測センサー一覧表
Table 1 Lording sensor on IOEB-2nd.

装置名		製造会社名及び形式		測定レンジ	分解能	計測器位置	データ取得タイミング
(1)気象観測 センサー	①風向風速計	R. M. Young	05103+05603M	風向 0~360 度 風速 0~50m/sec	1.412度 0.196m/sec	図4 参照	1時間/回 (10分間平均)
	②気温計 (放射シールド付)	R. M. Young	41342+41002	-40~+20℃	0.059℃	図4 参照	1時間/回
	③気圧計	Paroscientific	216B	920~1,050hPa	0.127hPa	中央処理装置内	1時間/回
(2)海水観測 センサー	①水温計	CRREL	YSI44033	-56.1~+5.22℃	0.02℃	図4 参照	6時間/回
	②氷応力計	Geokon	4350BX	-270 ~+492kPa	6kPa	図4 参照	1時間/回
	③氷厚計	Mezotech	807B	0~10m	0.002m	図4 参照	3時間/回
(3)海洋観測 センサー	①電気伝導度・水温計	Sea-Bird	SBE16-03	電導度 0~66mmho/cm 水温 -5~+35℃	0.008mmho/cm 0.01℃	水深 8 m, 43m 75m	1時間/回
	②溶存酸素計	Sea-Bird	SBE23	0~5 V	0.0012V	水深 8 m	1時間/回
	③蛍光光度計	Sea-Tech	Fluoro.	0~5 V	0.0012V	水深 8 m	1時間/回
	④音響式流向流速計	RD Instrment	BB-ADCP-75kHz	流速 -127~+127cm/s 水温 -5~+20℃	0.5cm/s 0.098℃	水深11m	2時間/回 (15分/回×8回)
	⑤セディメントトラップ	McLane	Mk7G-21	—	—	水深 107m	15日/回
	⑥現場海水濾過システム	McLane	Mk5-18	—	—	水深 107m	15日/回
	⑦透過率計	Sea-Tech	25cm Trans.	0~ 100%	0.024%	水深 107m	1時間/回
	⑧電磁式流向流速計	Inter-Ocean	S4	流速 -256~+256cm/s 電導度 20~71mS/cm 水温 -5~20.5℃	0.5cm/s 0.05mS/cm 0.1℃	水深 110m	3時間/回 (2分間平均)
(4)姿勢監視 センサー	①コンパス	Aanderaa	1248	0~ 360度	1.412度	中央処理装置内	1時間/回
	②傾斜計	Spectron	L-211U/556A	-60~+60度	0.945度	中央処理装置内	1時間/回
	③張力計	WHOI	BLH SR-4	0~5518lbs	21.6lbs	ペラマストラジ内	1時間/回

注) 測定レンジ、分解能及びデータ取得タイミングはアルゴシステムを介して得られるデータのものである。

テムMUSSIC(Multi Sensor Signal and Control)を開発した。

- ② 浮体の材質に従来の金属に代わって、Surlynフォーム (高分子発泡材) を採用し、低温環境下での高い弾性と十分な強度を持ち、かつ軽量化された浮体を開発した。
- ③ 音響式流向流速計の大量のデータを処理し、送信可能な程度に圧縮する DPM (Data Processing Module)を開発した。
- ④ 砕氷船に頼らず小型飛行機 (ツインオッター程度) で北極海に設置できるように、各装置のパッケージ化と作業用クレーン等の設置作業機材の小型・軽量化に成功した。

3 IOEBの仕様

3.1 漂流ブイとしての構成

IOEBは、北極海の海水とともに移動する漂流ブイである。漂流ブイとしての主な構成は、頂上浮体、トップ・プレート、圧力容器及びE/Mケーブル (海中索) からなる。

(1) 頂上浮体

IOEB の浮体に用いられた Surlyn Form Float は、

Softliteという名称により米国のGilman社によって商品化されている。このフロートに用いられている樹脂の代表的な製品としては、ゴルフボールの外皮があげられる。ゴルフボールの外皮は非常に堅固に作られているが、IOEBに使用されているフロートの場合は、泡密度を粗くすることによって、重量体積比を96.1kg/m³とし、柔軟さと大きな浮力を有するように工夫されている。また、鉄のフロートとは異なり弾力性があるので、北極海における海水の圧力を柔軟に受け止めることができる。形状は、直円錐台 (上底直径106cm, 下底直径62.5cm, 高さ132cm) をしており、重量60kg, 浮力約700kgである。(写真1 参照)

(2) トップ・プレート

頂上浮体の上部をカバーするトップ・プレートは、厚さ1cmのアルミニウム板で作られており、カップ部と蓋部の2個に分けられる。蓋部にはARGOS衛星用の直径30cmの平盤アンテナを2カ所埋め込む窪みが設けられており、また、カップ部には海水観測センサーと気象観測センサー用の伝送ケーブルを通すために、直径約3.5cmの8個の穴が設けられている。主な寸法及び重量は、直径98cm, 高さ37cm, 重量75kgである。(写真2 参照)

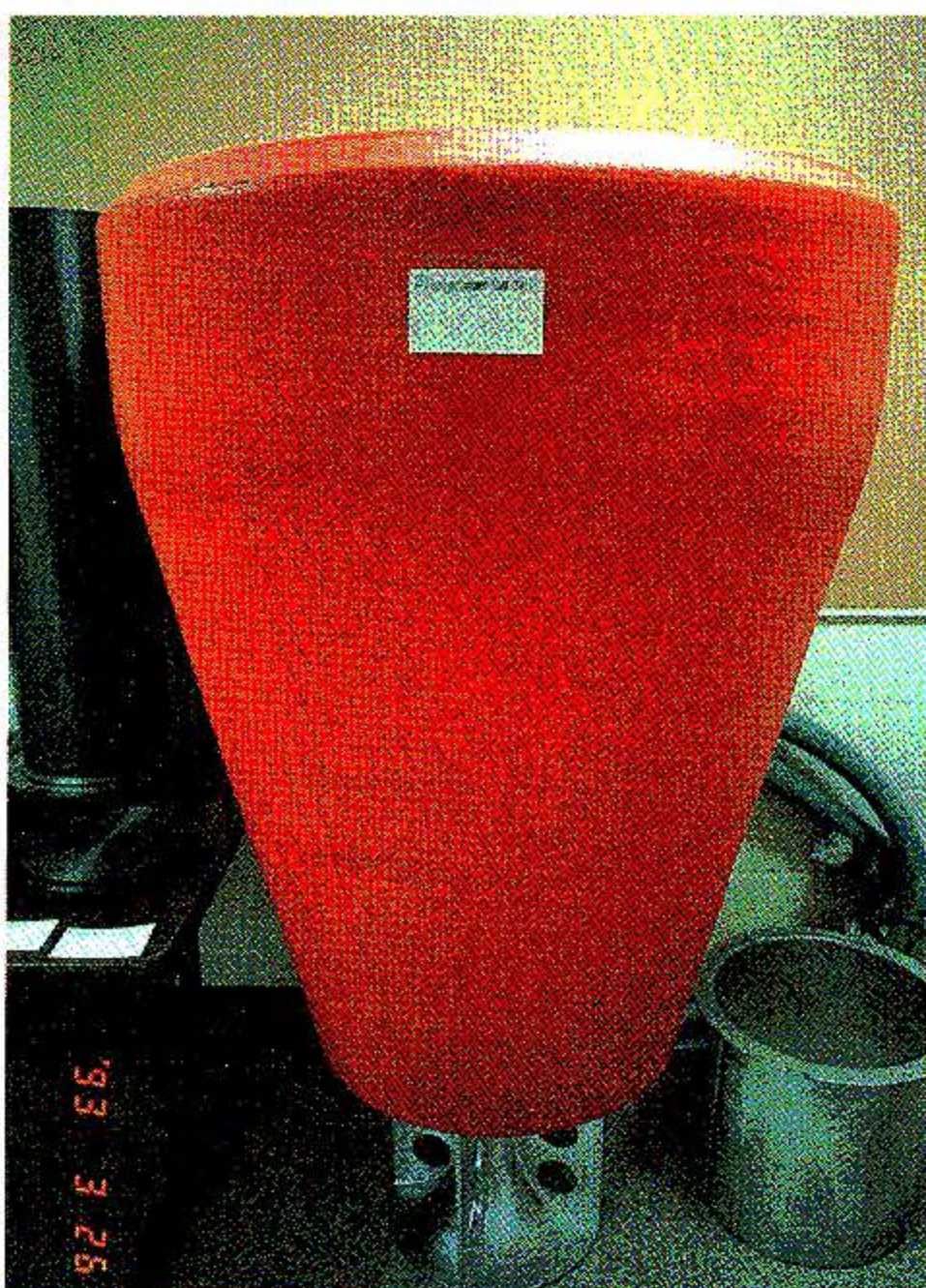


写真1 頂上浮体（発泡樹脂フロート）

頂上浮体の下の銀色の金具がベルマウスフランジで、E/Mケーブルの曲げを保護するためにラッパ形状をしている。左の台上にある円筒が圧力容器である。

Photo 1 Top-float form.

A bell-mouthed flange which is silver colored hardware, is located under top-float. It is support for electro mechanical cable. A decompression chest is on the left side table.

(3) 圧力容器

IOEBの頂上浮体は竹輪形状をしており、中央の穴に圧力容器が組み込まれる。容器の材質はアルミニウム（6061-T6）で、表面には防蝕剤が塗布されている（写真1）。容器の目的は、中央演算処理装置及び主電池を内蔵・保護するため、よって上部の蓋には11個のデータ伝送用貫通部が配置されている。

(4) E/Mケーブル

E/MケーブルはElectro-Mechanicalケーブルの略で、電氣的にデータの転送を行うための3本の伝送線と、機械的に海中索の張力を支えるチェーンまたはワイヤケーブルで構成されたものである。IOEBには次の2種類のE/Mケーブルが用いられている。頂上浮体の直下約7mの間のE/Mケーブルには、IOEBが海水中に没した際に、氷塊で揉まれても切断されないように、3/8インチのトロールチェーンをウレタンコーティングしたも

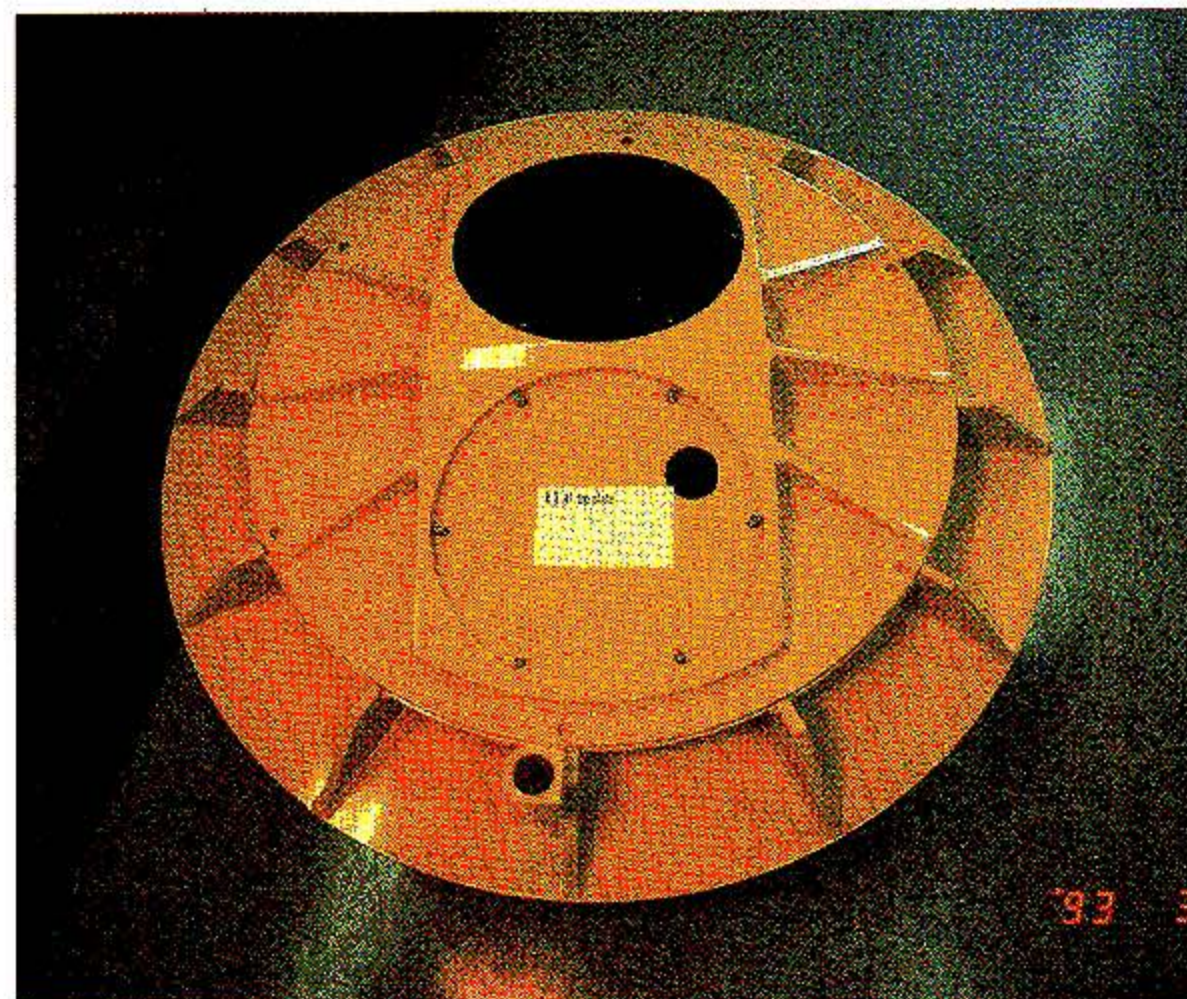


写真2 トッププレート

カップ部の上に蓋部が乗っているものである。黒い円形が平盤アンテナで、片方が取り付けられた状態である。

Photo 2 Top-plate.

The top-plate is composed a cup and cap. Only one side plate antenna is set on the cap which color is black.

のが用いられている。また、水深10m以深のE/Mケーブルには、19本の素線でトルクバランスされた3本のストランドからなる直径5/16インチのワイヤケーブルの縊りの谷間に、3本の伝送線を沿わせ、全体を厚さ1ミルの透明のフィルムで巻き、さらにその上に厚さ60ミルのポリウレタン被覆が施されたものが用いられている。なお、この水深10m以深のE/Mケーブルの破断強度は約4,700kgである。

3.2 データの処理と伝送

IOEBの観測データの大部分は、衛星を経由したデータ通信システム（ARGOSシステム）により日本へ伝送される。このデータ通信システムの制約に合わせるために、IOEBの処理系には、各センサーからのデータを集約し配列する作業を行わせる必要がある。そこで、各センサーが取得したデータをIOEB内部の伝送ラインに乗せるための変換装置、それを伝送するライン、伝送され

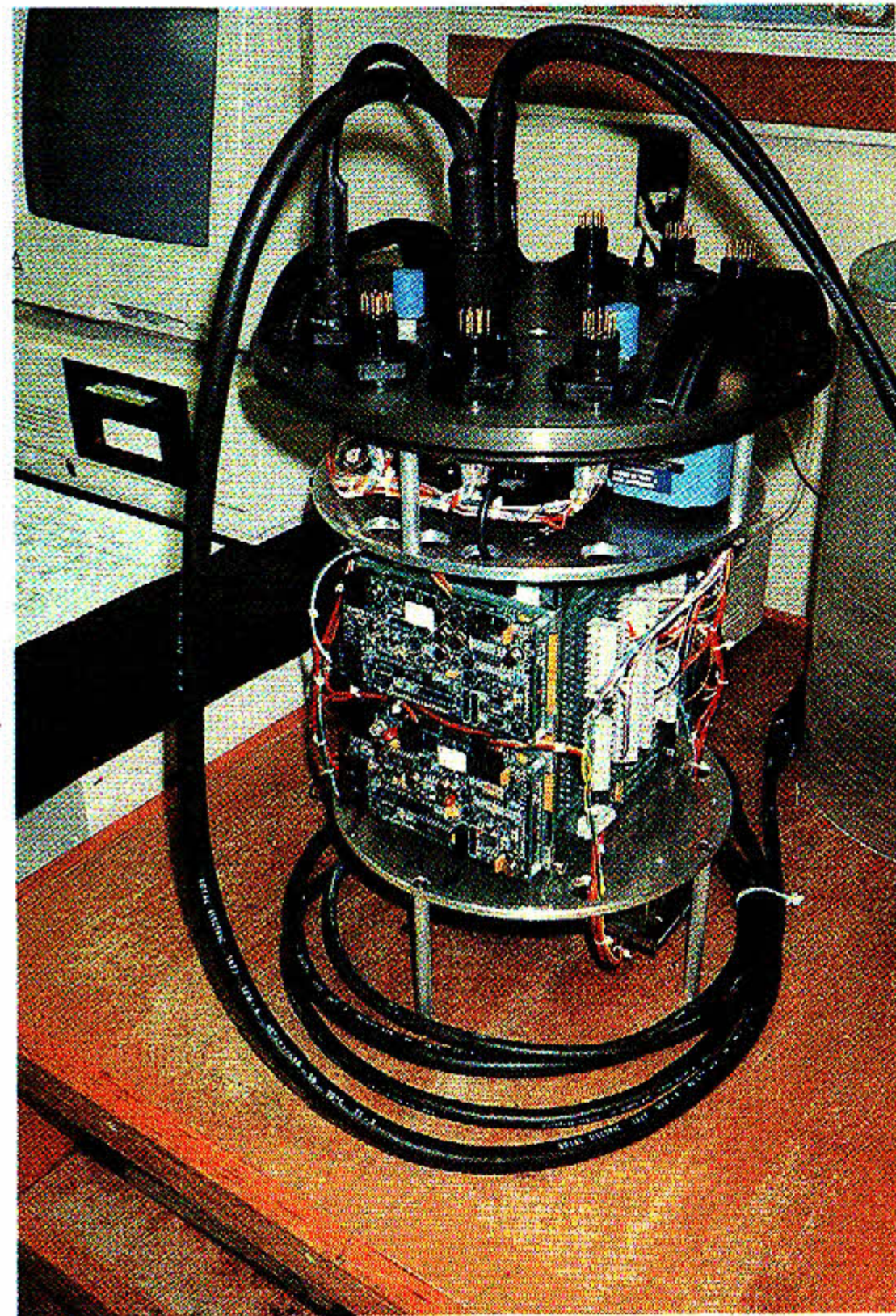
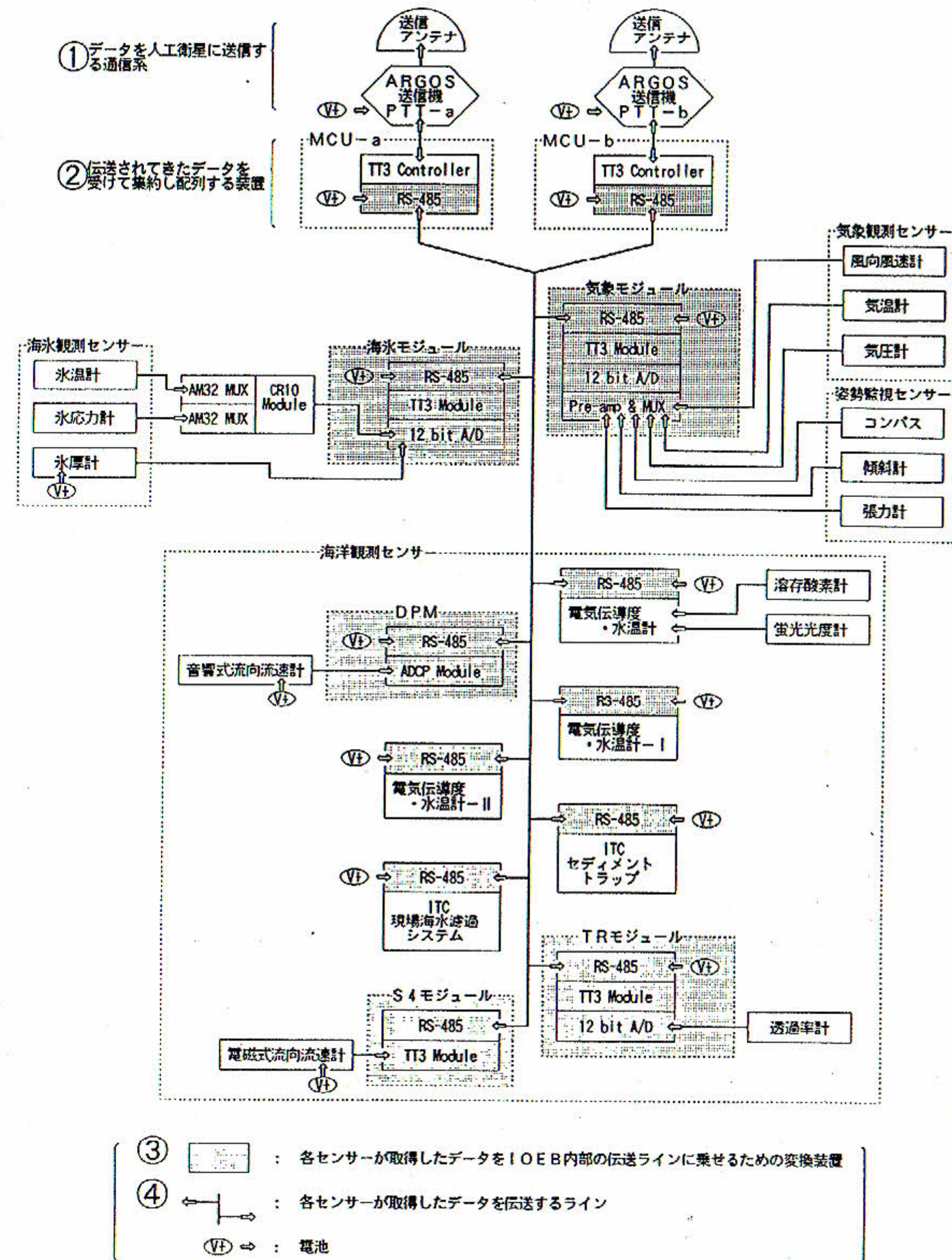


写真3 中央演算処理装置
Photo 3 Main controle unit.



てきたデータを受けて集約し配列する装置、及びデータを人工衛星に送信する通信系の四つの部分からなるMUSSICシステムが開発された(図3)。

MUSSICシステムを開発するにあたり、そのコンセプトとして、ハードウェアの面からは、2本のワイヤで通信ネットワークを組むことが可能なEIA485基準を利用し、ソフトウェアの面からは、SAIL(Serial ASCII Instrumentation Loop) 会話プロトコルを部分的に修正して利用することにした^{7,8)}。そこで『各センサーから伝送されてきたデータを受けて集約し配列する装置(写真3)』として、米国Onset社製のTT3データロガーを基本として、2系統のMCU(Micro Controle Unit)を用いることにした。このMCUのTT3データロガーには、MUSSICシステムの伝送ラインの基準に適應させるために、TT485回路ボードが特別に設計開発されて組み込まれている。また、MCUには、アルゴス送信器へ渡すデータセットを蓄えておくための補助的な記憶回路も配置されている。

『データを人工衛星に送信する通信系』としてIOEBには、2個のSeimac社製のPTT(Platform Transmit Terminal)が備えられている。PTTの機種選択には、電源の消費量、運用可能な温度範囲、外部の処理ユニットからシリアルデータを受け入れられること、受けたデータを独立して送信できることを条件として決定された。特に、PTTの環境温度は、夏と冬で50℃以上変化するので、送信周波数の基準となる水晶振動子の温度特性が重要となる。IOEBの送信データは、90秒毎に頂上浮体のトップ・プレートに取り付けられた円形の平板アンテナから送信される。ARGOSシステムで用いられる人工衛星は極軌道を周回するため、北極海域に設置されるIOEBの送信データを、1日に最大28回、受信可能である。受信されたデータは、フランスとアメリカにあるARGOS受信施設に送られ、IOEBの位置も含めて計算処理されて、フランスARGOS社の大型コンピュータ内で管理される。

ARGOSシステムで転送できるデータのビット数が256ビットに制限されていることから、IOEBの大量のデータを送信するためには、表2に示したように六つの異なるデータ送信電文(シーケンス)の配列が必要となる。各シーケンスは、1時間に1回の周期で各々のPTTから送信される。つまり、6時間で六つのシーケンスが一巡し、送信されるべき観測データはすべて送られることになる。6時間に1回以上の周期でデータが必要なものについては、毎時、あるいは2時間に1回の割合でデータ

が更新されて送信されるようにシーケンスが組まれている。ただし、IOEBには前記したようにMCUとPTTを2系統(表2のa及びb)搭載することにしたので、この2系統のシーケンスに3配列分のズレをもたせて送信する方法を用いている。よって2系統の送信機が正常に作動すれば、1回の送信で512ビットのデータが送信でき、3時間で六つのシーケンスのすべてが送信されるようになっている。

例えば、奇数番目にあたる5番目のシーケンスでは、気象と海水の観測センサーのデータが主に組み込まれている。海水観測センサーの内、海水温度を測定する水温計のデータを送信するには330ビットが必要となるため、6時間に1回、取得されるデータを三つに分割し、110ビットずつを三つの奇数シーケンスに分配して送信している。

また、偶数番目にあたるシーケンスでは、音響式流向流速計及び一番浅い水深の電気伝導度・水温計からのデータの送信回数が最大限になるように配置されている。残りの電気伝導度・水温計、電磁式流向流速計、セディメントトラップ、そして現場海水濾過システムからのデータは、各々のMCUとPTTの電源のデータとともに、6時間に1回、各々のデータが更新されて送信されるようになっている。

表2 IOEB 2号機のデータ伝送スキーム
Table2 Transmission scheme of IOEB-2nd.

	001	010	011	100	101	110
PTTa	MET & MECH SENSORS (87)	ST (4) SEACAT I (32)	MET & MECH SENSORS (89)	WTS (5) SEACAT II (32)	MET & MECH SENSORS (95)	S4 (38)
	ITIME (14)	ADCP1 (100)	ECHO (12)	ADCP1 (100)	PTTa (6)	ADCP1 (100)
	ICE STRESS (42)		ICE STRESS (42)		ICE STRESS (42)	
	ICE THERMS I (110)	ADCP2 (47)	ICE THERMS II (110)	ADCP2 (47)	ICE THERMS III (110)	ADCP2 (47)
		TRANS (12)		TRANS (12)		TRANS (12)
		SEACAT & DO, FL (56)		SEACAT & DO, FL (56)		SEACAT & DO, FL (56)
	100	101	110	001	010	011
PTTb	WTS (5) SEACAT II (32)	MET & MECH SENSORS (95)	S4 (38)	MET & MECH SENSORS (87)	ST (4) SEACAT I (32)	MET & MECH SENSORS (89)
	ADCP1 (83)	PTTb (6)	ADCP1 (83)	ITIME (14)	ADCP1 (83)	ECHO (12)
		ICE STRESS (42)		ICE STRESS (42)		ICE STRESS (42)
	ADCP2 (64)	ICE THERMS III (110)	ADCP2 (64)	ICE THERMS I (110)	ADCP2 (64)	ICE THERMS II (110)
	TRANS (12)		TRANS (12)		TRANS (12)	
	SEACAT & DO, FL (56)		SEACAT & DO, FL (56)	SEACAT & DO, FL (56)		SEACAT & DO, FL (110)
Schedule	Hour 1	Hour 2	Hour 3	Hour 4	Hour 5	Hour 6

3.3 IOEBの観測センサー

(1) 気象観測センサー

頂上浮体上部に立てられたマスト中段に放射シールド付きの気温計が、マスト先端には風向風速計が取り付けられている（図4）。北極の環境下で用いることから、計測精度や信頼性を低下させる原因となる着氷や霜で覆われるという問題が発生する可能性を持っているが、これを防止する手段を施すことは電源の確保という点から難しく、対策は取られなかった。

気圧計は、頂上浮体の中央に位置する圧力容器の内部に取り付けられている。圧力検知のための管が、圧力容器の上蓋に開けられた小さな穴を通して浮体上部のウォータートラップに接続されている。このウォータートラップによって、頂上浮体が海中に水没しても気圧計まで海水が浸水しないような構造になっている。（表1参照）

(2) 海水観測センサー

厚さが4mを超える多年氷の鉛直温度分布を計測するために、米国の極域研究所のひとつであるCRREL（Cold Regions Research & Engineering Laboratory）によって、氷温計が開発製作された。使用している温度センサーは、超小型の金属サーミスタで、これを塩化ビニール製のチューブの中に流し込んだシリコンゴムに、図4に示す間隔で埋め込んだものである。このチューブは、長さ2.9mのもの1本、0.9mのもの1本及び0.8m（長さ0.5mのケーブルの先端にサーミスタ1個が付いたものを含む）のもの1本の三つに分解することができ、これを現場でつなぎ合わせて設置する。

海水の内部応力変化を計測するために、氷応力計が、海水表面から50cm、100cm、200cmの深さに埋め込み設置された。氷応力計の測定原理は、ステンレス製の円筒内に3軸方向に金属線が張られ、その線が外力によって生じる円筒の変形を受けて伸縮し変化する量を、線に通じる電圧を計測して得るものである。この氷応力計も氷温計同様にCRRELによって開発されたセンサーである。

氷厚の変化を観測する方法として、海水の底面の変化を音響によって測定する方法を用いている。そこで、小型の音響式距離測定器を、海水底面下約2mの所に送受波面を上に向けて設置してある。（表1参照）

(3) 海洋観測センサー

① 音響式流向流速計(ADCP)とADCP専用データ管理モジュール(DPM)

頂上浮体の下の水深11mの所には、75kHzのADCP

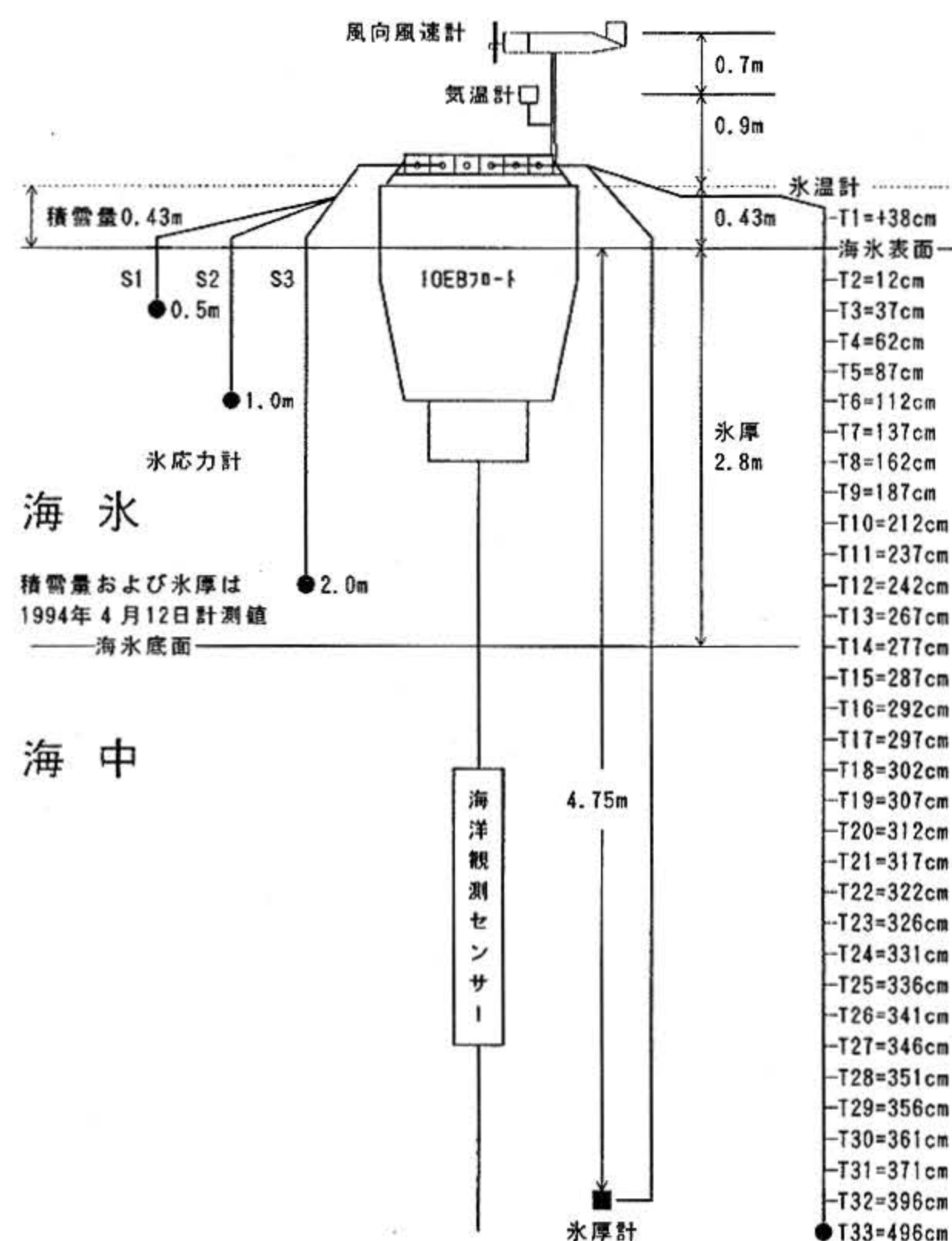


図4 IOEB 2号機設置状況（側面図）

Fig. 4 Deployment state of IOEB-2nd (Side view).

(Acoustic Doppler Current Profilers) とウッズホール海洋研究所が開発したDPM（Data Processing Module）がひとつの吊り籠内に納められている。

ADCPは下向きに据え置かれており、水深19m～403mの間の海流プロファイルを計測するように設定されている。水平速度の鉛直プロファイルは、ビンと呼ぶ1層の層厚が16mで24層の範囲で測定された四つの放射状の速度から計算される。ADCPは、15分間のインターバル毎に719byteのデータを、自らが有する20Mbyteのメモリーに保存している。このADCPが作り出す非常に大きな情報を、IOEBの内部通信システムであるMUSSICシステムで送信するためにDPMが開発された⁸⁾。DPMは、ADCPのデータを2時間平均するなどの操作により4分の1に圧縮している。また、MCUへの送信のためのデータのバッファの役目もしている。

② 電磁式流向流速計(S4)

ADCPが測定する数層のデータの内のひとつと照合するため、セディメントトラップの近くの水平流を測定するために、海中索の最下端（水深110m）

の位置に、S4型電磁式流向流速計が備えられている。S4は、電気伝導度と水温のセンサーも付属しており、流向流速と同時に計測を行う。S4のデータをMUSSICシステムに適應させるインターフェイスとして、S4モジュールがTT3データロガーとTT485変換回路及び専用ソフトウェアによって開発された。

③ 電気伝導度・水温計(CT)

海水の水温・塩分測定用として合計3個の電気伝導度・水温計(CT)が取り付けられている。このCTには、MUSSICシステム内で通信しデータを送るために、内部にEIA485回路を含むように部分改造をし、また、ファームウェアもそれに応じた改造をしている。二つのCTが、水深45mと76mに位置して1時間に1回の電気伝導度と水温のデータのみを供給するのに対して、一番浅い位置にあるCTには、溶存酸素計(DO)と蛍光光度計(FL)がさらに付け加えられて、表面浮体の下の水深8mに置かれ観測している。

④ セディメントトラップ(ST)

セディメントトラップは、外洋における沈降粒子を測定するもので、大きなロート形状をしている。ロートの下に22個のサンプル容器が取り付けられており、沈降粒子を一定期間ごとに分けて集めることにより、その時間変化がわかる。後述する現場海水濾過システムと同様に、採集されたサンプルを研究室まで持ち込んで分析しなければデータが得られないので、装置の作動状況のみが送信されてくる。22個のサンプル容器の採集間隔は、最短が2分、最長が18カ月で設定することができるが、IOEBでは15日間隔で動作するように設定されている。

セディメントトラップのすべての部品を収容するフレームは、6本の鉛直チューブと一対のリングを溶接して作られたチタニウム製のもので、外部との衝突によるダメージから装置を守るように作られている。なお、このセディメントトラップは、フレームの上下につながれた3本の1mの長さのワイヤロープにより、水深107mに配置されている。

⑤ 現場海水濾過システム(WTS)

現場海水濾過システム(WTS:Water Transfer System)は、18個に分割されたニュクレオポア・フィルタ及びポンプ機構で構成されている。ポンプのモーターの稼働時間に対する回転数から流量が計算され、選択されたフィルターを通過する海水の流れが正確にコントロールされている。IOEBで用い

るために、一つのフィルタが150分間を超えることなく、60ml/分で吸引するように初期設定を行っている。なお、この吸引が、何らかの原因で流量が20ml/分を下回るようであるか、あるいは合計で10ℓの吸引を行ったとした場合には、そのイベントを中止し、次のイベントのために待機するように設定されている。(表1参照)

4 低温試験

IOEBは -50°C にも達する環境下で、数年間にわたって正常な動作をすることが要求される。特に頂上浮体の圧力容器に収納される電子機器の低温特性が重要となる。そこで温度負荷試験装置を用いて各種の要素試験を実施した。

4.1 CPUの温度負荷試験

IOEBのCPUには、米国Onset Computer社製のTattle-taleⅢ型(TT3)データロガーが採用された。その理由としては、14個のデジタルI/Oライン、8チャンネルのA/D変換器、EPROM及び96kバイトのRAMを有しており、大きさが 3×5 インチと小型であること、また、BASIC言語によるプログラミングが可能であり、サンプリング周期の間は冬眠モードという電源消費の少ないモードでの運用が可能なので、限られたスペース及び電源しか許されない海洋観測ブイには非常に適していることなどによる。しかし、このTT3の運用仕様は $0^{\circ}\text{C}\sim +65^{\circ}\text{C}$ までであり、北極海に設置されるIOEBのCPUとして、低温環境下において確実な作動が得られるか否かを事前に確かめておく必要がある。なお、以下に述べる試験は2号機用に行われたものである。

温度負荷試験に用いた装置はEnvirotronics社製の卓上型温度負荷試験装置で、 $-68^{\circ}\text{C}\sim +177^{\circ}\text{C}$ までの温度環境を作りだせる能力がある。この試験でTT3に負荷された温度は、 $-55^{\circ}\text{C}\sim +100^{\circ}\text{C}$ までである。温度の基本的な負荷パターンは、図5に示した。

試験項目は、大きく分けて作動中の各モードでの電流変化、入力電圧のデジタル変換状況及び冬眠モードの作動状況とし、観察及び測定値の記録は、 100°C 、 25°C 、 0°C 、 -40°C 、 -55°C の各温度にて実施した。

14個のTT3を試験した結果、3個のTT3が冬眠モードから、再起動しなかった。さらに得られた数値結果から、最大、最小、平均、及び標準偏差を計算し、レーダーグラフに図示し(図6)、この図が小さくまとまりのあるもの(図6a)をCPUとして使用可能なものとして抽出

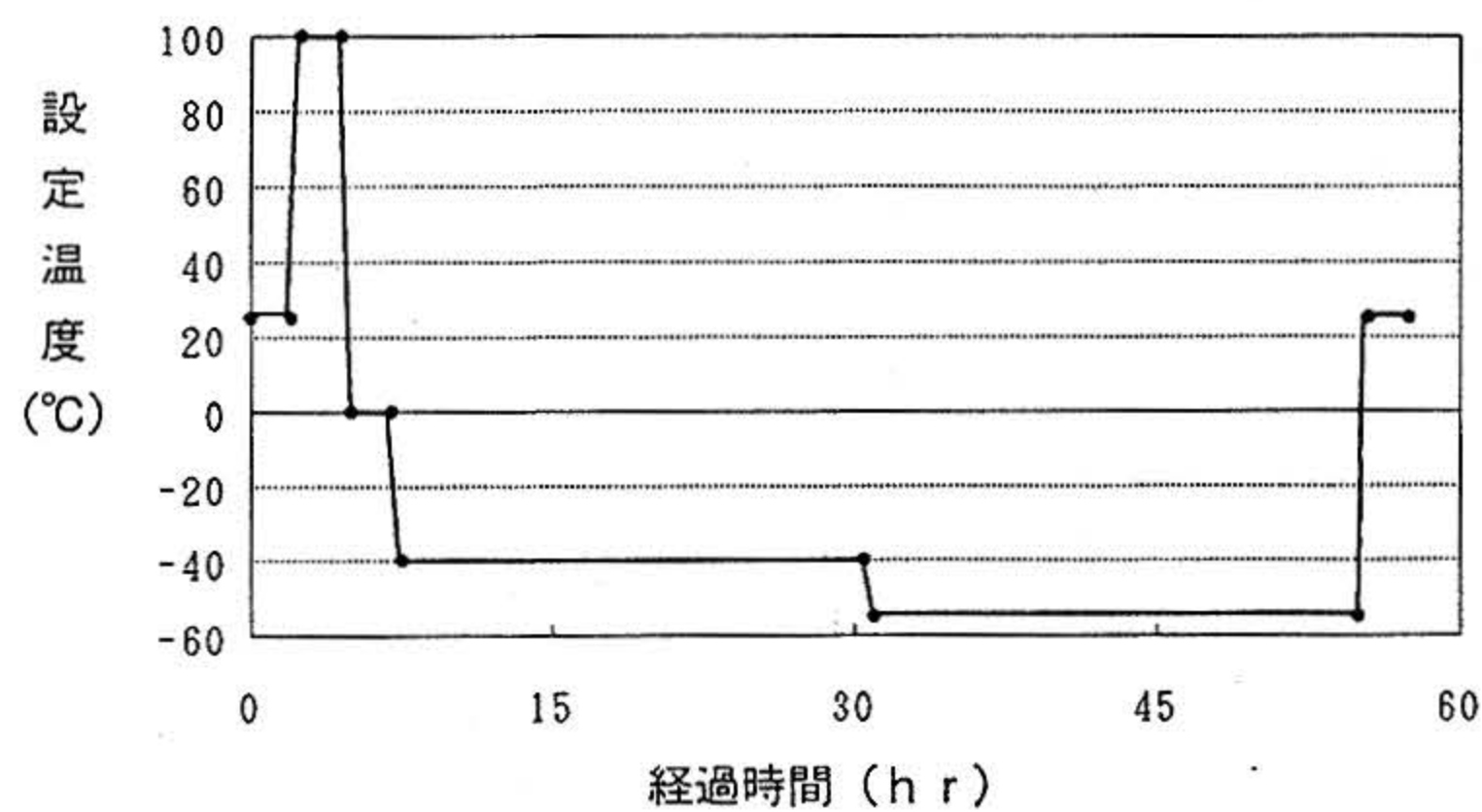


図5 基本的な温度負荷パターン
Fig.5 Basic pattern of thermometric load.

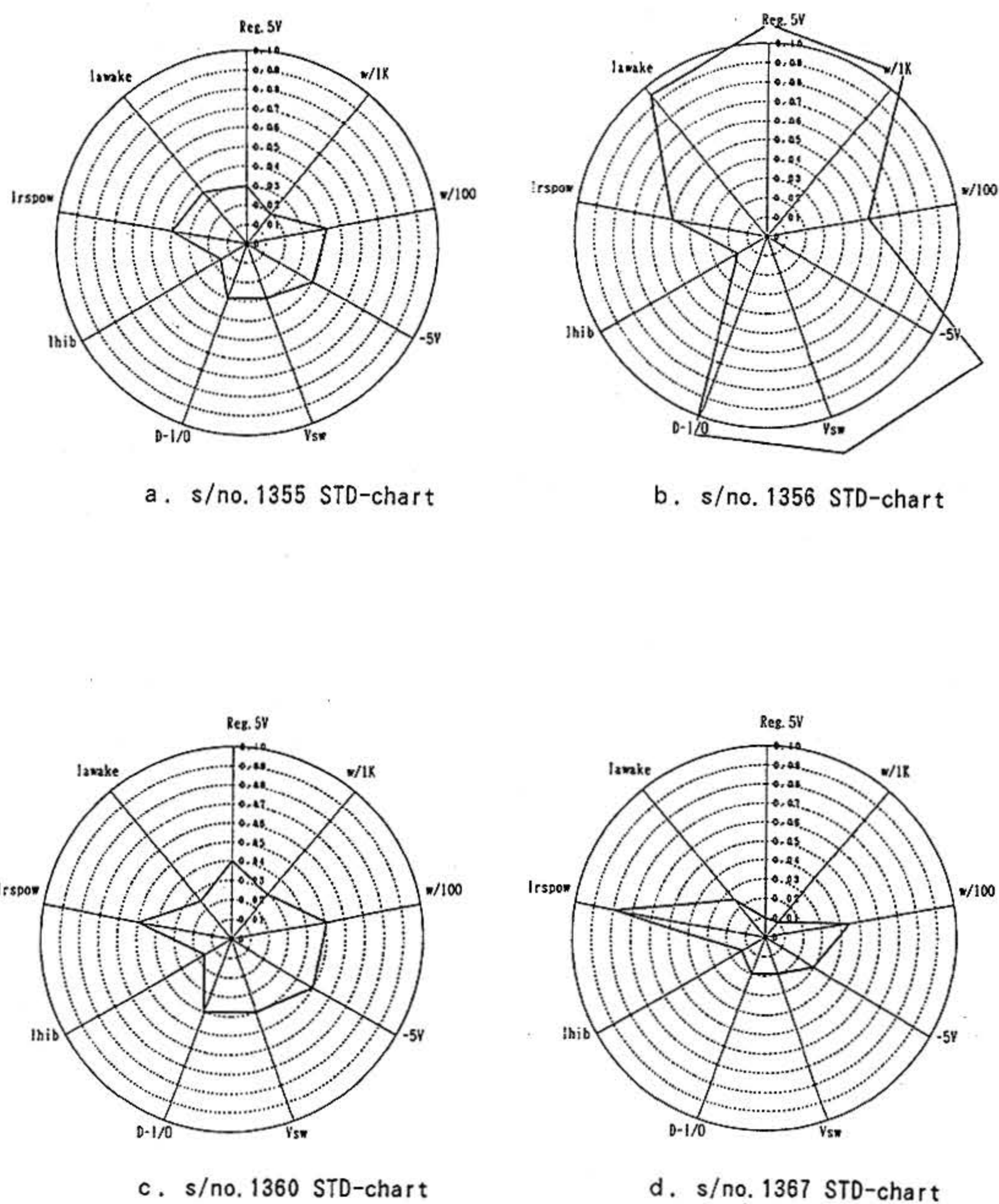


図6 温度負荷試験結果 (標準偏差レーダーチャート)
Fig.6 Examination result of thermometric load (STD radar chart).

した。その結果、残りの11個の内、試験の結果として良好であると思われるのは10個であった。10個の中から中央演算処理装置用として2個、海水モジュール用として1個及び気象モジュール用として1個の合計4個が用いられた。これらのTT3は頂上浮体の内部に搭載されるので、多少の断熱効果が期待できる。しかしながら北極海の冬季においては容器内の温度も-50℃に近い温度まで低下することが予想できる。今回の環境温度負荷試験の最低負荷温度は、-55℃を負荷しており、この環境で1ないし2昼夜放置後の作動状況を観察している。1昼夜で北極の冬季を2年から3年越せるものを確実に選びだすには無理があろうが、一旦、温度を+100℃まで上昇させてから、-55℃まで下げるという過酷な試験をしていることから、もしもTT3上に不具合があれば、何らかの反応を捕らえることができると予想できる。なお、この試験で選ばれた4個のTT3は2号機に取り付けられ、1994年4月～11月の約半年間、正常な動作を行っている。

4.2 送信試験

IOEBには、2組のARGOSシステム用のデータ送信器 (PTT: Platform Transmit Terminal)が組み込まれており、256 ビット×2の量のデータを90秒の周期で、1時間に1回データを更新する形式により送信している。2号機に採用されたPTTはカナダのSeimac社のSmart Catという製品で、-50℃の低温下でも作動する。

TT3と同様に、卓上型温度負荷試験装置にPTTを入れ、作動中の各モードでの電流と送信出力の測定を行った(写真4)。また、アンテナと接続し、ARGOS衛星の受

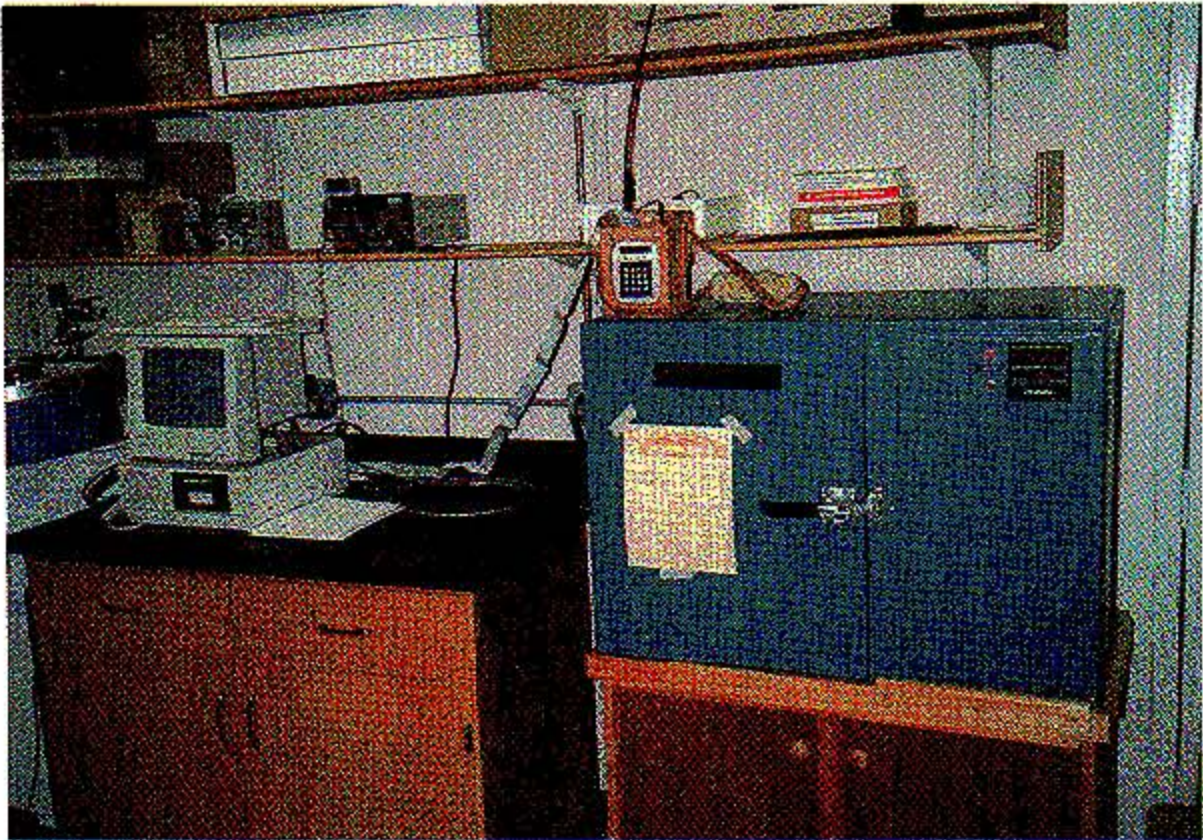


写真4 PTT-アンテナ発信試験状況
 右の青く四角い箱が低温負荷試験装置。その装置の左上に乗っているのが電波受信機。
 Photo 4 PTT-antenna transmission test.
 The blue square box is a incubator for thermometric load test. A receiver for ARGOS radio wave is left side on the incubator.

信頻度の確認を行った。試験では、負荷温度を50, 25, 0, -40, -50, 25℃のように変化させ、また電源電圧も7, 9, 11Vの4種で行った。

ARGOS衛星に電波が届くか否かの目安は、PTT出力端子の信号電力によって与えられる。PTT出力端に専用測定器を接続し、表示される数値 (Power Number) が67以上であれば、出力は0.5ワット以上であり十分な信号電力が得られていることになる。

試験した2個のPTTの送信出力結果を表3に示す。この結果から、No.17987のPTTに供給させる電圧が、7Vまで低下した場合には、ARGOS衛星に電波が届かない事態が生じる可能性があることがわかる。しかし、

表3 PTT環境温度負荷試験結果
 Table 3 Examination result of thermometric load on PTT.

PTT no. - 供給電圧	25℃	50℃	0℃	-40℃	-50℃	25℃
17987 - 7V	63	63	65	65	64	63
17987 - 9V	74	74	75	75	74	74
17987 - 11V	83	82	83	82	81	83
17988 - 7V	82	78	86	88	91	91
17988 - 9V	92	91	97	100	105	92
17988 - 11V	102	98	104	105	112	98

表のPower Numberと出力ワット数の関係は以下の通り
 Power Number 出力ワット数
 53～66 → 0.25(WATTS)
 67～80 → 0.50
 81～96 → 0.75
 97～111 → 1.00
 112～119 → 1.25
 120～136 → 1.50

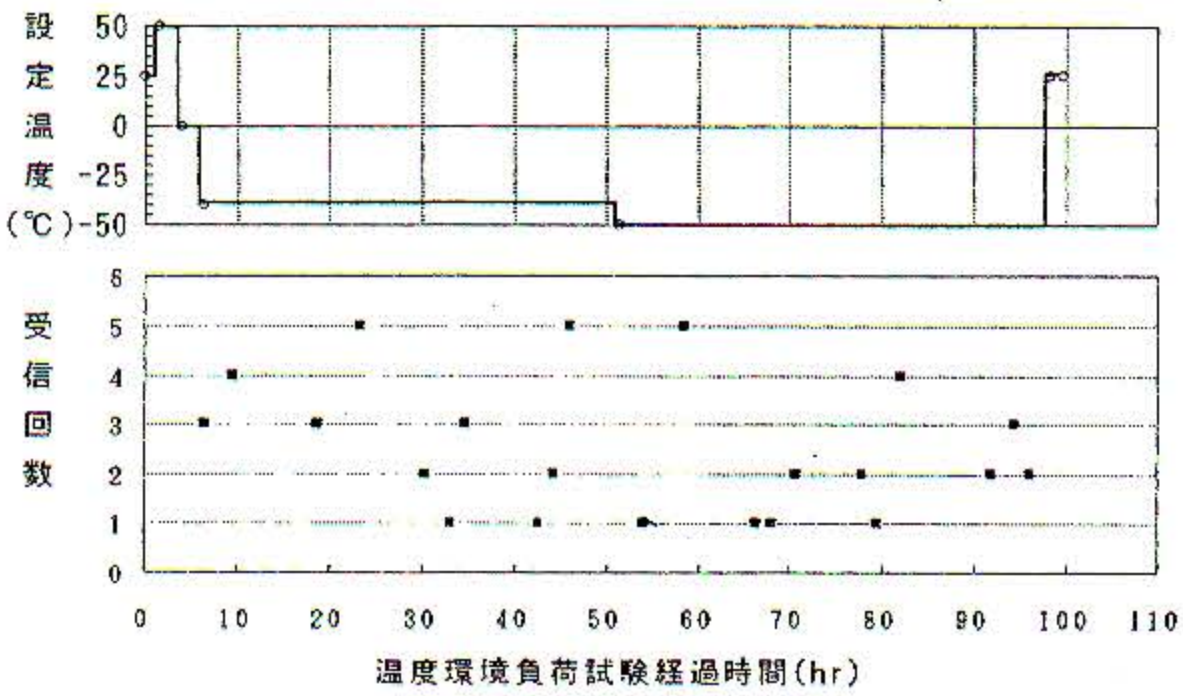


図7 PTT (No.17987)の温度負荷試験とARGOS衛星のデータ受信回数
 Fig. 7 Thermometric load examination (PTT-No. 17987) and data received number at ARGOS satelight.

IOEBで用いられる電源はリチウム電池が用いられるため、電圧低下の恐れがあるのは電池の寿命期の3年と同時期と見てよく、電源についての問題は特にはないと考えられる。図7は、No.17987のPTTに7Vの電源を送り、温度負荷状態からARGOS衛星に試験データを送信した際に、衛星がデータを受信した回数を時系列で示したものである。この図から電圧が7Vに低下して送信出力が落ちても、衛星は少なくとも受信だけはしてくれたことを意味する。したがって、もし電源電圧が7V程度まで低下した場合に、送信データの信頼性には疑問が起り得るが、IOEBの位置を捕捉するには十分であることがわかった。

5 設置作業

IOEBによる北極海研究において、ブイの開発・製造に加えて、それを北極海の厚い氷海上に如何に設置するかが重要な技術的問題である。方法としては、砕氷船によるものと航空機によるものと二つ考えられる。それらの長短については、表4に示した。

砕氷船利用の場合は、IOEBの設置作業のためだけに傭船するのには費用対効果を考えると現実的ではない。国際共同の観測計画の一環として運用計画に作業を組み込むしかない。このような、大型の観測計画と言えども、毎年のように砕氷観測船の運航を行うことはなく、最近では1991年と1994年に行われた。1991年は米独スウェーデンの3隻、1994年は米加の2隻の砕氷船による北極海中央部の観測が行われた。我々としては、IOEB1号機の設置と回収をこれら航海で計画した。しかし、両航海ともに途中で大きな運航計画の変更が生じて作業を行うことができなかった。多くの研究課題を抱えた総合観測航海の難しさを示す結果となっている。

そこで現在、我々としては氷海内でのIOEBの設置・回収作業は、航空機による方法を第一に採用している。以下に、2号機の設置作業について簡単に述べる⁹⁾。

IOEB2号機は、北極点からグリーンランド海へと流れる流水の動き（極横断流）に従って、各種の観測を行うことを目的とした。そのため、グリーンランドの北端にあるデンマークの観測基地ノルドを拠点として、設置作業を行った（図8）。米国からノルドまでの人員・機材の輸送、ノルドでの後方支援などは、米国の北極研究計画AREA(Arctic Research and Environment Activities)の一環として行われた。北極海の氷海上の活動も、AREAの枠内ではあったが、多くの部分は設置作業パーティーの独自作業であった。航空機としてツインオッター

機を使用し（写真5、表5）、氷上キャンプへの機材搬入に5便、撤収に3便を要した。加えて、設置点の決定のための偵察飛行が2便行われた。

表4 設置方法の比較

Table 4 Comparison of deployment method.

	砕 氷 船	航 空 機
長所	• 大量の機材輸送が可能 • 設置場所選定が自由（但し、独自傭船の場合） • 船の装置・施設・補給などが利用できる。	• 短期間で作業を行うことができる。 • 費用が安い。*
短所	• 長期間（1カ月以上）にわたる複数の砕氷船の行動となるので運航費が莫大である。 • 傭船可能な砕氷船が非常に少ない。 • 氷状により、大きく運航計画が変わる。	• 陸上の飛行場の位置により設置点が制約を受ける。 • 長距離の作業が困難。 • 輸送機材の量が限られる。 • 氷上キャンプを設ける必要があるため危険性がある。また、生活と作業環境が悪い。 • 作業可能な季節が限られる。

* 飛行場や観測基地等の利用について、当該諸国の協力と支援を受けられる前提が必要。

表5 ツインオッターの要目

Table 5 Basic specification of Twin-otter.

(1) 機体重量	3,184kg
(2) 最大総重量	5,252kg
(3) 燃料	381ガロン（ジェット燃料）
(4) 巡航速度	160MPH（マイル／時間）≒296km／時間
(5) 貨物室容積	10.9m ³ （但し、客室を貨物室として使用した場合）
(6) 貨物搬入扉	1.52m×1.52m

表6 設置作業の日程

Table 6 Schedule of deployment work.

	事 項
4月8日	偵察飛行、設置点の決定
9日	キャンプ設営（写真6）、一部の人員・機材輸送
10日	人員・機材の輸送、作業クレーン等の組み立て
11日	IOEB投入穴の掘削作業
12日	投入作業（写真7、8）
13日	ノルドへの帰投

* IOEBが設置された氷盤は、厚さ2.8mの多年氷であった。掘削は温水ドリルにより、直径1mの氷の円柱を切り出すのに約2時間要した。

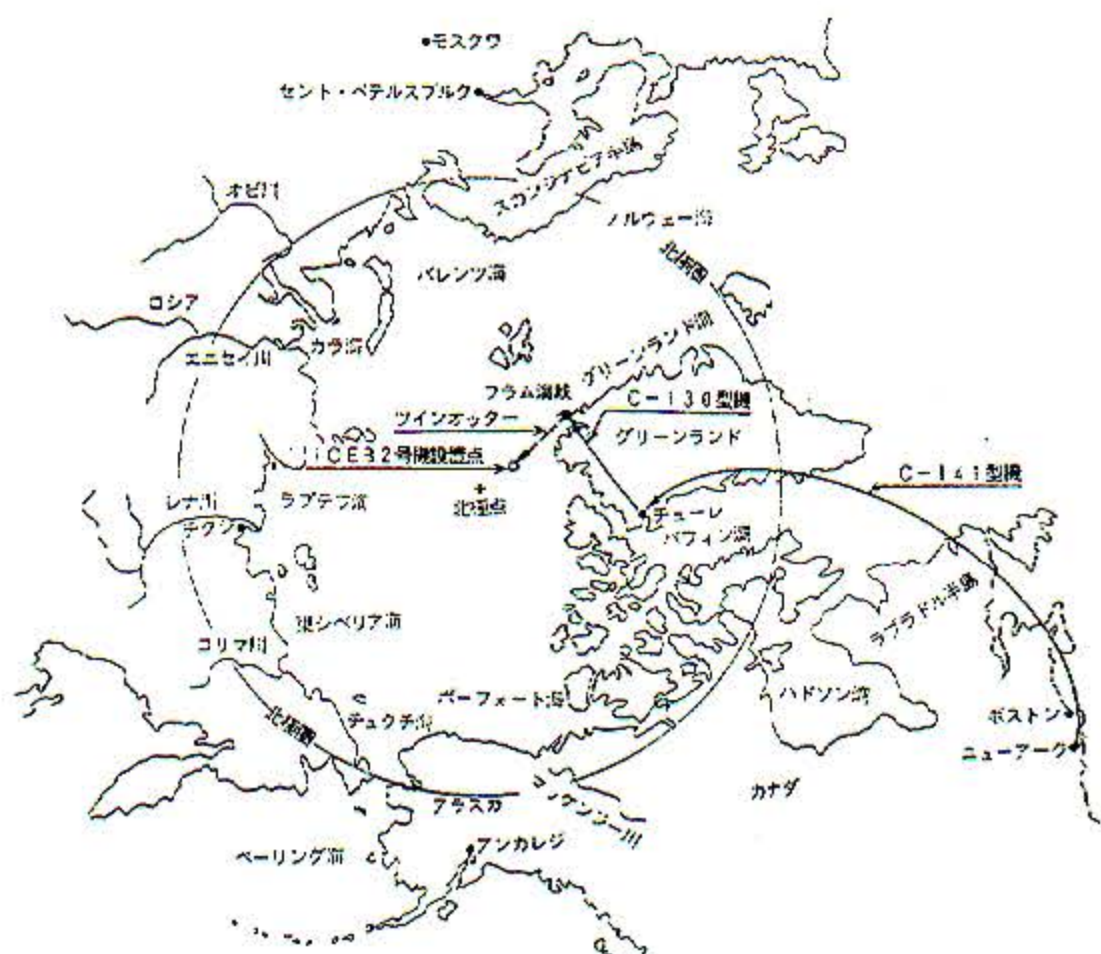


図8 IOEB 2号機の設置に関わる研究者の移動及び機材の輸送経路

Fig. 8 Access routes for IOEB 2nd deployment operation.

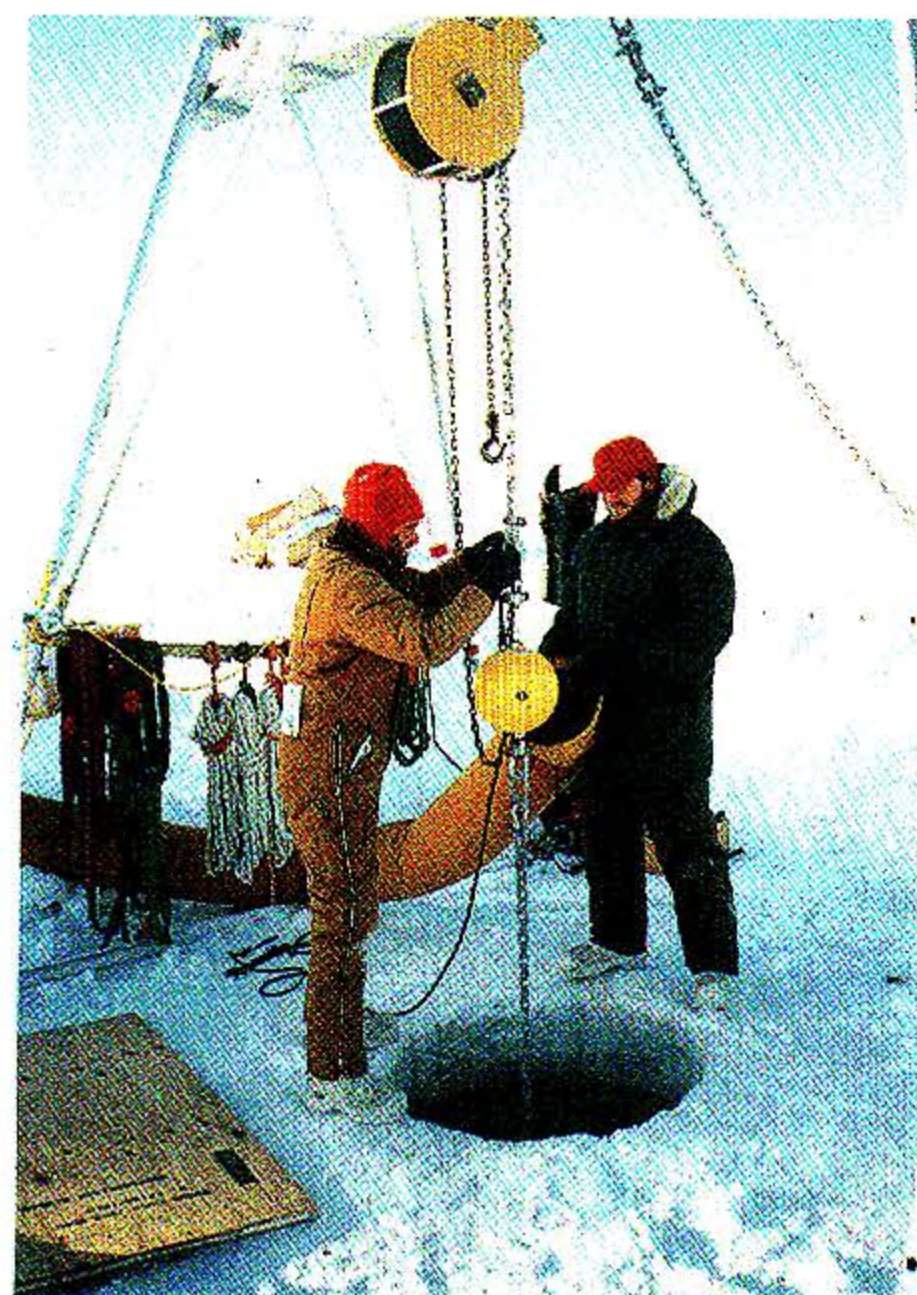


写真7 電磁式流向流速計の投入

Photo 7 Deployment of S4 current meter.



写真5 ツインオッター

Photo 5 Twin-otter.

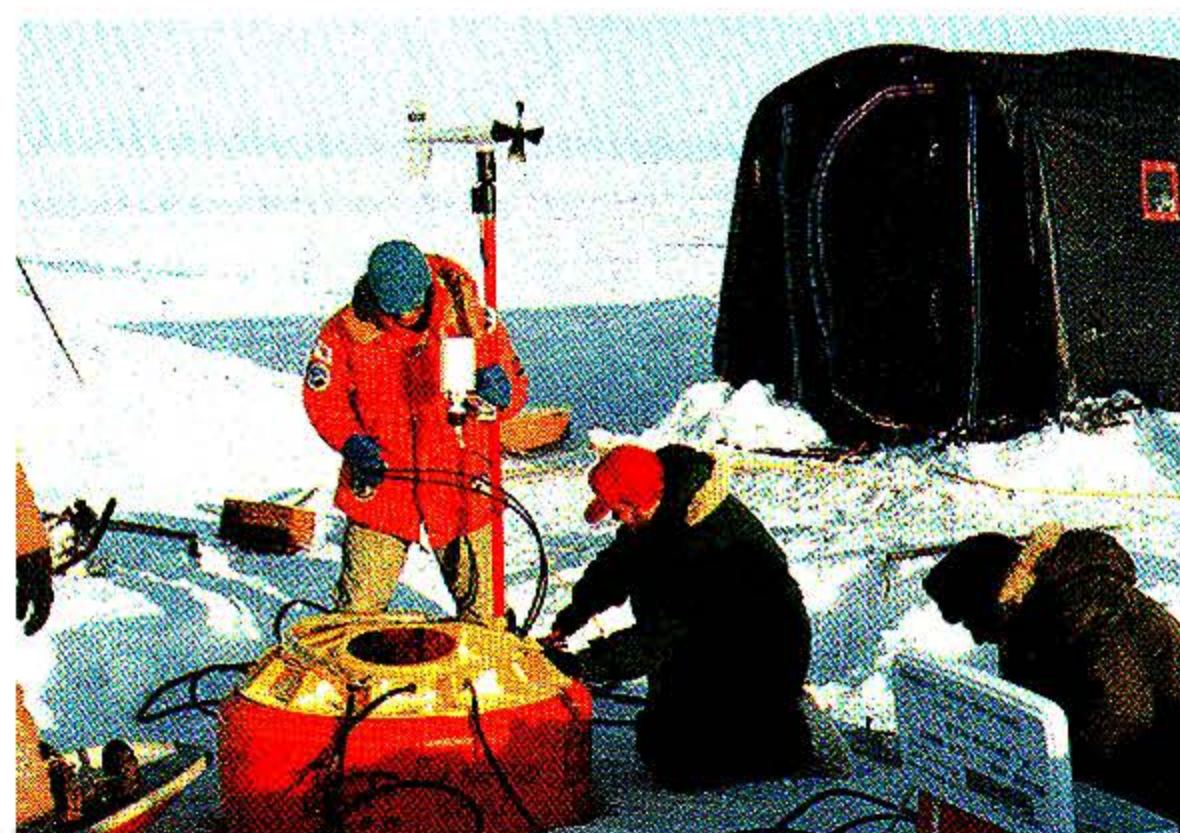


写真8 気象マストの取り付け

Photo 8 Setting for meteorological mast.



写真6 氷上キャンプ全景

Photo 6 Ice-camp.

キャンプまでの機材輸送、キャンプの設営と運営などのロジステックスは、すべて米国のPAI (Polar Associates Inc., 極地でのロジスティックスを請け負う民間会社) に委託した。パーティーは日本側2人、米国側はPAIの1人を含め4人、計6人である。実作業は、1994年4月8日～4月13日 (ノルド→氷上キャンプ→ノルド) の6日間で終了した (表6, 写真6, 7, 8)。米国ウッズホール海洋研究所を出発してから戻るまでは、ノルドで一週間の天候待機を含めて16日間であった。

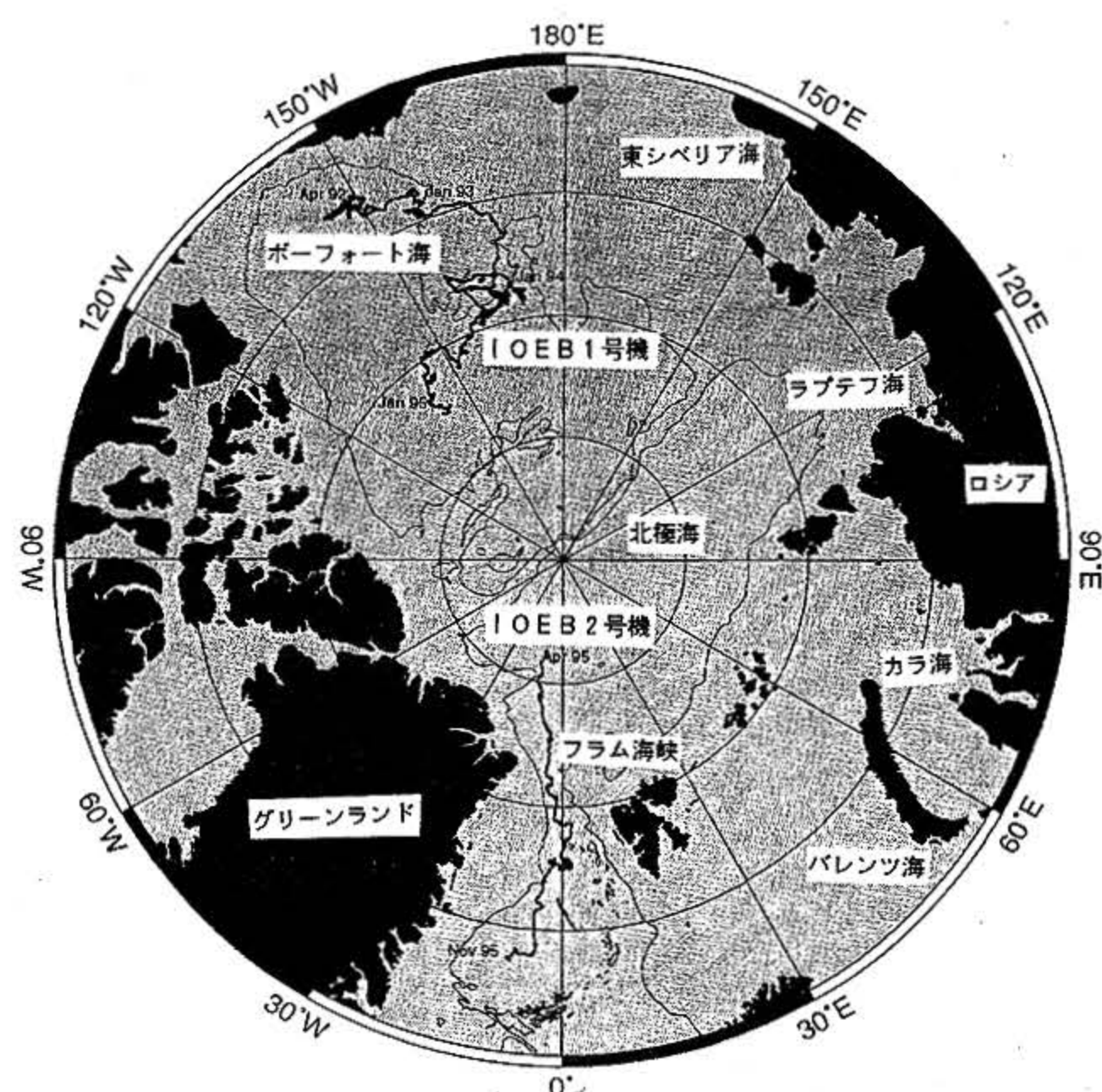


図9 IOEBの漂流軌跡
Fig.9 Drift trajectory of IOEBs.

T94 Met Data

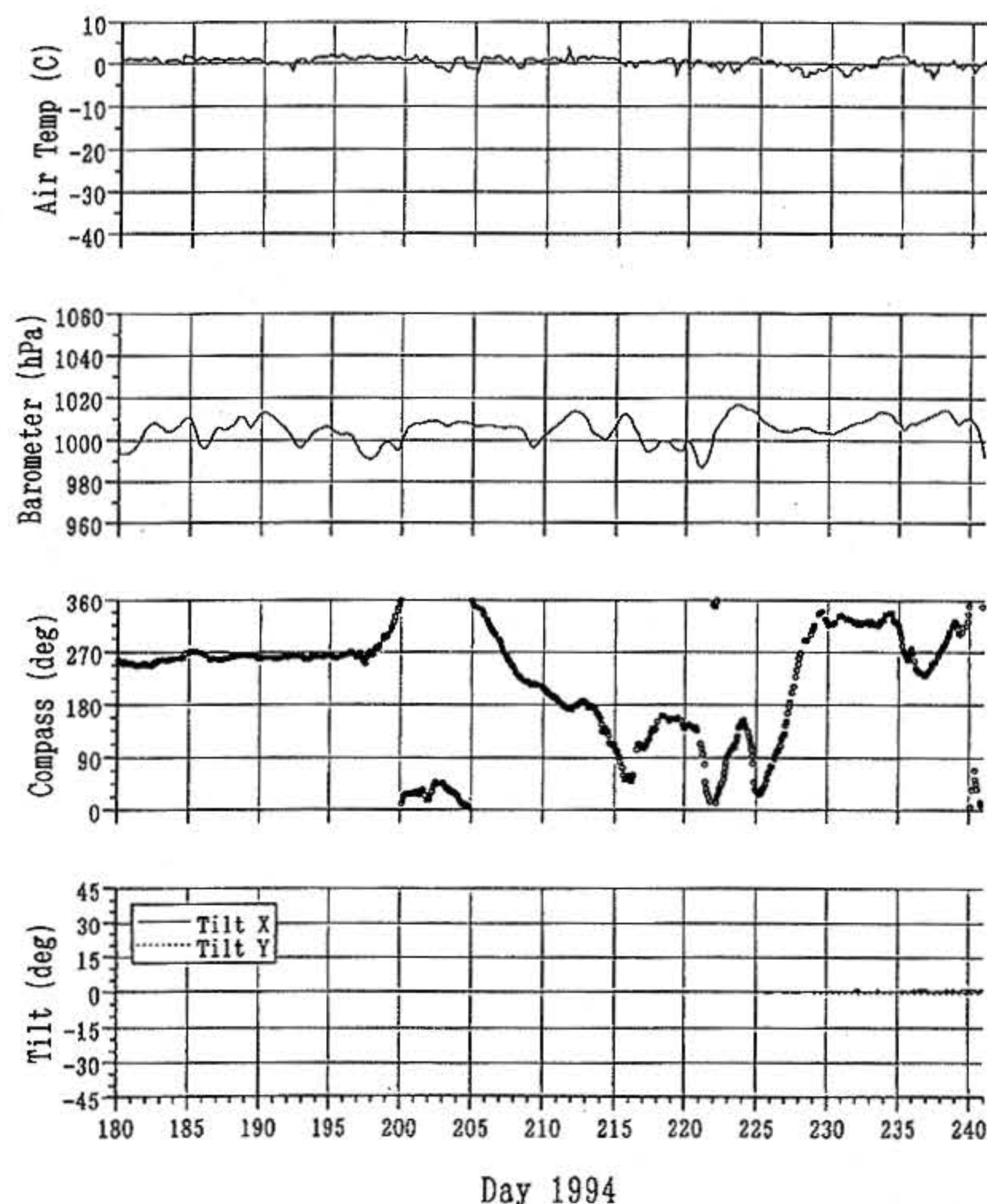


図10 気象観測データ
Fig.10 Meteorological data.

T94 Wind,Drift,S4 Vectors

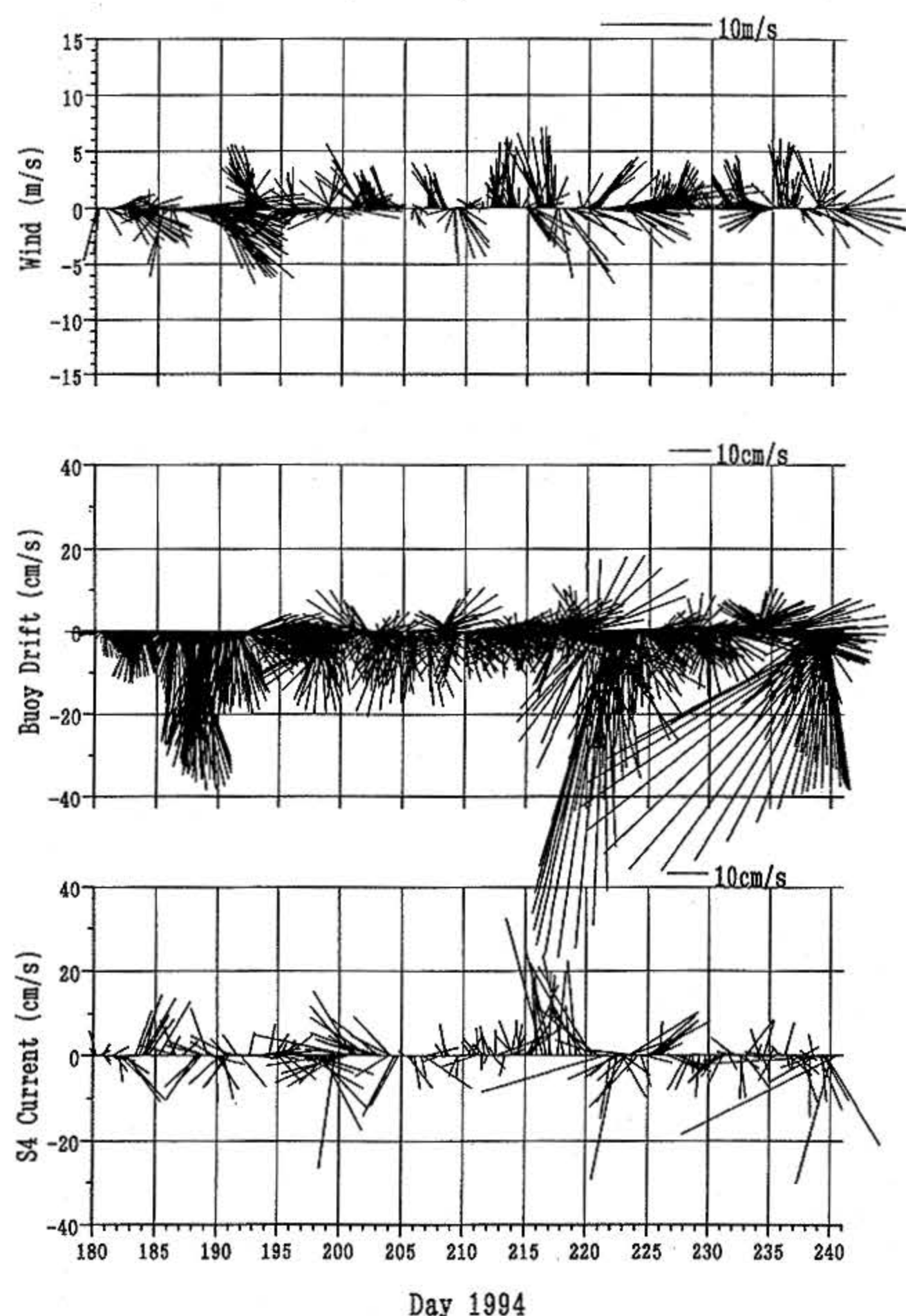


図11 風速,漂流及び流速ベクトル
Fig11 Wind,drift and S4 current vectors.

6 観測結果の例

IOEB 1号機は時計回りに循環するボーフォート渦に従って移動している。IOEB 2号機は極横断流によって南方に漂流しており、その漂流速度は、設置後の90日間で平均速度約7.8km/日で約700km移動した(図9)。

図10及び図11にIOEB 2号機で得られた観測データを示した。図10は、縦軸が上から気温、気圧、コンパス、傾斜の各データの値で、横軸は時間軸で1994年1月1日を起算日とした通算日数である。コンパスのデータは、IOEBが設置されている氷盤の回転を表しており、第203日目から第216日目の13日間で1回転したことが分かる。傾斜のデータからは第226日ごろから頂上浮体が傾くようになったことを示している。

図11には、風向風速ベクトル、漂流ベクトル及び水深110mの電磁式流向流速計が観測した海流ベクトルを示した。第220日目以降、漂流速度と海流に非常に大きな値が現れている。前半は、北極海内部で大きな密接度を

持った氷野で安定した動きを示している。第220日目以降フラム海峡に近づき氷縁に近くなったことにより、傾斜計データにも現れているように流水の動きが激しくなったことを示している。

7 おわりに

IOEBの開発と建造は、電子工学に始まり、機械工学、気象学、海水学、海洋物理学、生物学、化学などの多岐の分野にわたって専門的な知識を必要とするものである。作業はウッズホール海洋研究所において、日本側が参加する形で行われ、同研究所の各分野の研究者及び技術者の協力を得て進められた。IOEBの技術は、完成されたものではなく、細かい点において幾つかの問題点が残されており、開発途上の技術であるといえる。

IOEB 2号機は、1994年11月にグリーンランド海の開水域において、ノルウェーの観測船を傭船し回収した。現在はウッズホール海洋研究所において再設置へ向けての整備と改良作業を行っている。1号機は依然として北極海にあり、一部の観測データを送ってきている。1996年春に、航空機により回収作業を予定している。

謝 辞

IOEBによる北極海観測研究は、科学技術庁、海洋科学技術センター、ウッズホール海洋研究所の支援と協力のもとに行われてきている。また、IOEBの設置作業は、J. Kemp (WHOI)氏およびJ. Lord (PAI)氏の協力なしには不可能であった。米国の北極研究計画であるAREA及びLEADDEXからは、設置作業に関して数々の便宜を計っていただいた。これらの多くの方々及び機関に改めて厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Colony, R. and A. S. Thorndike: An estimate of the mean field of Arctic sea ice motion. *J. Geophys. Res.*, **89**, 10623-10629, (1984)

- 2) Aagaard, K.: A synthesis of the Arctic Ocean circulation, *Rapp. P.-V. Reun., Cons. Int. Explor. Mer*, **188**, 11-22, (1989)
- 3) Krishfield, R., K. Doherty, and S. Honjo: Technical Report of the 1991-1992 Ice-Ocean Environmental Buoys (IOEB). Woods Hole Oceanographic Institution, 125pp. (1992)
- 4) Honjo, S., T. Takizawa, R. Krishfield, J. Kemp and K. Hatakeyama: Drifting Buoys Make Discoveries about Interactive Processes in the Arctic Ocean. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, Vol. **76**, No.21, pp 209, 215, 219., (1995)
- 5) Honjo, S., R. Krishfield, and K. Hatakeyama: Automated Ice-Ocean Environmental Station. *Sea Technology*, Vol. **35**, No.5, 16-23, (1994)
- 6) Electronic Industries Association, EIA 485 Standard for Electrical Characteristics of Generator and Receivers for use in Balanced Digital Multipoint Systems, Electronic Industries Association, Washington D. C., 22 pp., (1983)
- 7) IEEE Computer Society, IEEE Standard Serial ASCII Instrumentation Loop (SAIL) Shipboard Data Communication, ANSI/IEEE, Std 997-1985, pp. 5-12, (1985)
- 8) Plueddemann, A. J., A. L. Oien, R. C. Singer, and S. P. Smith: A Data Processing Module for Acoustic Doppler Current Meters. Technical Report WHOI-92-05, 71pp., Woods Hole Oceanographic Institution., (1992)
- 9) 畠山 清: 氷海用自動観測ステーション2号機の設置回収方法. *JAMSTEC*, **7** (2), (通巻26), 22-31, (1995)

(原稿受理: 1996年7月11日)