

氷海用自動観測ステーションのデータ通信状況

畠山 清^{*1} 中村 亘^{*1} 滝沢隆俊^{*1}
小山 登^{*2} 本庄 丕^{*3} Richard Krishfield^{*3}

氷海用自動観測ステーション2号機 (IOEB: Ice-Ocean Environmental Bouy, 図1) は, 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, 1994年4月12日に北極海中央部の極横断流水野内に設置 (北緯85° 49.8', 西経12° 03.0') され, 種々のデータを取得することに成功した。

観測データは, 人工衛星を経由して送信され, 当センターのコンピューター画面上に写し出された。これを可能にした送信機とアンテナおよび通信方法には, 極域という特殊な環境においても能力を発揮できるように様々な工夫が施されていた。

IOEBのデータ通信状況について, 送信された電波の受信状態などをグラフ化することにより, 受信回数に季節的な変化が見られることや, IOEBが設置された海水の状態の変化などが受信回数に与える影響をとらえることができたので報告する。

キーワード: 北極海, 漂流ブイ, アルゴス, データ通信

Data Transmission Conditions from the Arctic Ocean using IOEB

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

The Ice-Ocean Environmental Buoy (IOEB), which was developed jointly with Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) and Japan Marine Science & Technology Center (JAMSTEC), was deployed on an ice-flow (85° 49.8' N, 12° 03.0' W) at The Trance Polar Drift in the Arctic Ocean in April 12, 1994. It could successfully obtain various kinds of data from the Arctic Ocean.

The data, which was received by IOEB, was transmitted via the ARGOS Satellite System, which showed the Arctic environment on the JAMSTEC computer system. IOEB has a ability to transmit a large amount of data from a particular environment in a polar field. This real-time observation was possible by dual sets of transmitters and antennas. These were

* 1 海洋観測研究部

* 2 国際気象海洋株式会社

* 3 ウッズホール海洋研究所

* 4 Ocean Research Department

* 5 International Meteorological & Oceanographic Consultants Co, Ltd

* 6 Woods Hole Oceanographic Institution

manufactured especially for IOEB.

In this report, some of the figures show the data transmission conditions from IOEB. Those in Fig. 8 show the seasonal change through the years the data was collected. However, Figs. 10 and 11 show almost the same profile from the data via the ARGOS System and the memories in the SeaCats, which is one of the sensor on IOEB.

Key Words : Arctic Ocean, Drifting bouy, ARGOS, Data Transmission

1 はじめに

氷海用自動観測ステーション 2 号機 (IOEB: Ice-Ocean Environmental Buoy, 図 1) は, 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, 1994 年 4 月 12 日に北極海中央部の極横断流水野内に設置 (写真 1, 北緯 $85^{\circ} 49.8'$, 西経 $12^{\circ} 03.0'$) され, 種々のデータを取得することに成功した¹⁾²⁾。IOEB によって取得された北極海域の観測データは, リアルタイムに近い時間間隔で人工衛星を経由して送信され, 海洋科学技術センターのコンピュータ画面上にその日々の変化を表した³⁾⁴⁾。これを可能にした送信機とアンテナおよび通信方法には, IOEB が設置される極域という特殊な環境においても能力を発揮できるように, 様々な工夫が施されていた。IOEB は, 海水とともに移動する漂流ブイであることから, 観測データを発信し位置を知らせる送信機とアンテナは, IOEB の中でも最も重要な装置 (ライフライン) といえ, このデータ送信装置はデュアルで装備されている。

IOEB のデータ通信状況について, 送信された電波の受信状態などをグラフ化することによりまとめてみたので紹介する。また, IOEB のデータ通信システムとして利用した ARGOS システムを経由して得られたデータと, IOEB 搭載装置の内部メモリーに蓄えられたデータについて比較したので併せて述べる。

2 ARGOS システムと IOEB の通信装置

ARGOS (アルゴス) は, ギリシア神話に出てくる百個の目を持つ怪物の名前であるが, 本稿の中で述べるアルゴスシステムは, NOAA (米国海洋大気局), NASA (米国航空宇宙局) および CNES (フランス国立宇宙センター) の 3 者によって共同開発された人工衛星を利用したデータ通信システムである⁵⁾。アルゴスシステムのデータ通信方法は, 専用の送信機であるアルゴス送信機から発射された電波 (データ) を, 極軌道を周回する人工衛星により受信し, 地上受信局に転送することで, データを送るものである (図 2 参照)。IOEB のデータ通信には, このアルゴスシステムが利用されている。

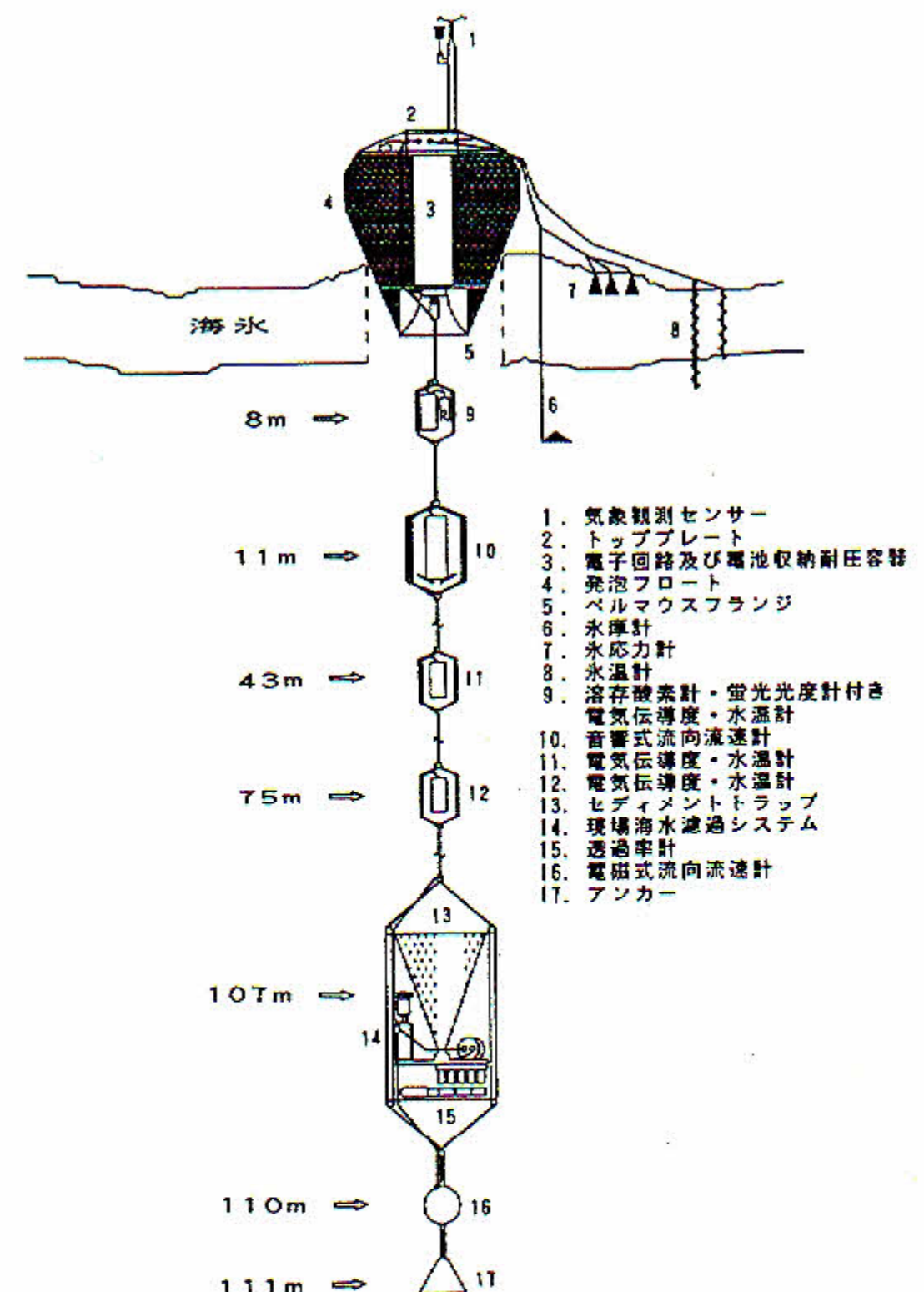


図 1 氷海用自動観測ステーション 2 号機

Fig. 1 Ice-Ocean Environmental Buoy (Second version)



写真 1 IOEB 2 号機の設置を完了したところ
〔ブイ上部の 2 つの黒い丸が送信アンテナ〕

Photo 1 IOEB-2 deployment site

(1) アルゴス送信機

IOEB 2号機に搭載された2台のアルゴス送信機は、カナダ Seimac 社の SmartCAT である (IOEB 1号機は Synergetics 社の 2101A)。2台の送信機は90秒に1回、タイミングを少しずらして電波 (送信周波数401.65MHz) を発射する。電波が運ぶメッセージには、送信機の識別番号と送信機に接続されたセンサーからのデータが含まれる。センサーのデータとして利用できるメッセージの長さは、送信機1台で最大256ビットであるが、IOEBには2台の送信機が搭載されているので、512ビットのデータを送信できるようになっている。IOEB 2号機で用いた SmartCAT は既成品であるが、設置海域が北極海ということから、極地用のオプション仕様として運用温度が $-40^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ の仕様となるような処置を施している。

(2) アルゴス人工衛星

アルゴス送信機から送信されたメッセージを受信する装置は、NOAA衛星に搭載されている。NOAA衛星の軌道は、地球を周回するたびに両極が視野範囲に入る極軌道である。そこで衛星は常に、その真下の直径5,000 kmの円内にあるすべての送信機を視野に収めている。IOEB 2号機が設置された場所が北緯 $85^{\circ} 49.8'$ であることから、表1よりIOEBに搭載された送信機は、1日に28回、2基のNOAA衛星の視野に入ることがわかる。また、日本付近では、1日の平均通過回数が10回程度であることを考えると、IOEBがいかに条件の良い海域に投入されているかがわかる。人工衛星によって受信されたメッセージは、アルゴスの地上受信局 (米国のフェアバンクス、ワロップス島およびフランスのランオンの3か所) が衛星の視野に入ったときに、衛星から地上に転送される。このアルゴスシステムを利用することにより、IOEBのセンサーが取得したデータを、IOEBに搭載されたアルゴス送信機から発信された後、約3時間後には海洋科学技術センターのコンピュータ上で見ることを可能にしている。

(3) IOEB用に開発された平板アンテナ

図3に示された直径30cmの平板アンテナは、IOEB用のデータ送信アンテナとして開発されたものである。ポリウレタンで被覆された平板アンテナから延びる接続線には、防水性のある水中コネクタが取り付けられており、頂上浮体が水没した場合でも水圧に耐えられる構造になっている。アンテナを平板形状にした理由としては、氷縁

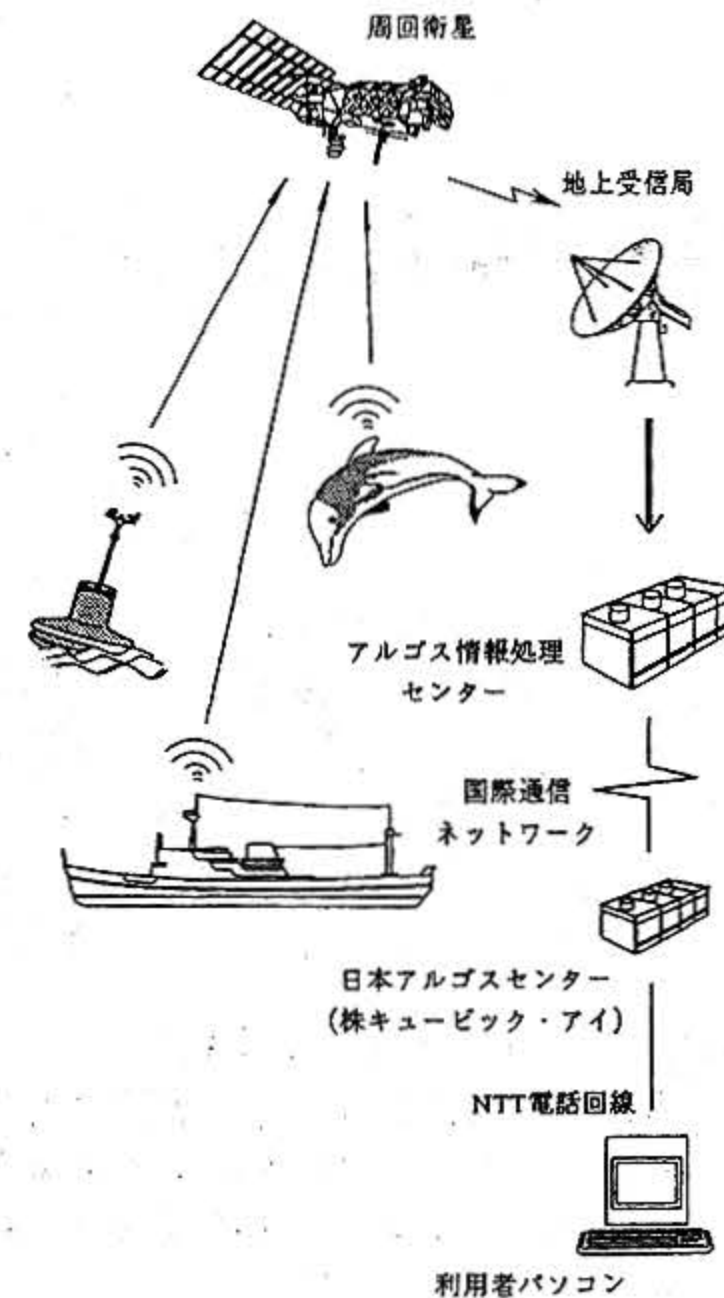


図2 アルゴスデータ収集システム概念図⁵⁾
〔アルゴスシステムガイドより〕
Fig. 2 ARGOS Data Collection System⁵⁾
〔Guide to The ARGOS System〕

表1 人工衛星の1日当たりの通過回数⁵⁾
Table 1 Number of satellite passes per 24 hours⁵⁾

送信機の緯度	1日当たりの最小通過回数	1日当たりの平均通過回数	1日当たりの最大通過回数
	(人工衛星が2基の場合)		
0°	6	7	8
$\pm 15^{\circ}$	8	8	9
$\pm 30^{\circ}$	8	9	12
$\pm 45^{\circ}$	10	11	12
$\pm 55^{\circ}$	16	16	18
$\pm 65^{\circ}$	21	22	23
$\pm 75^{\circ}$	28	28	28
$\pm 90^{\circ}$	28	28	28

EXTREMELY LOW PROFILE PATCH ANTENNA WITH CIRCULAR POLARIZATION

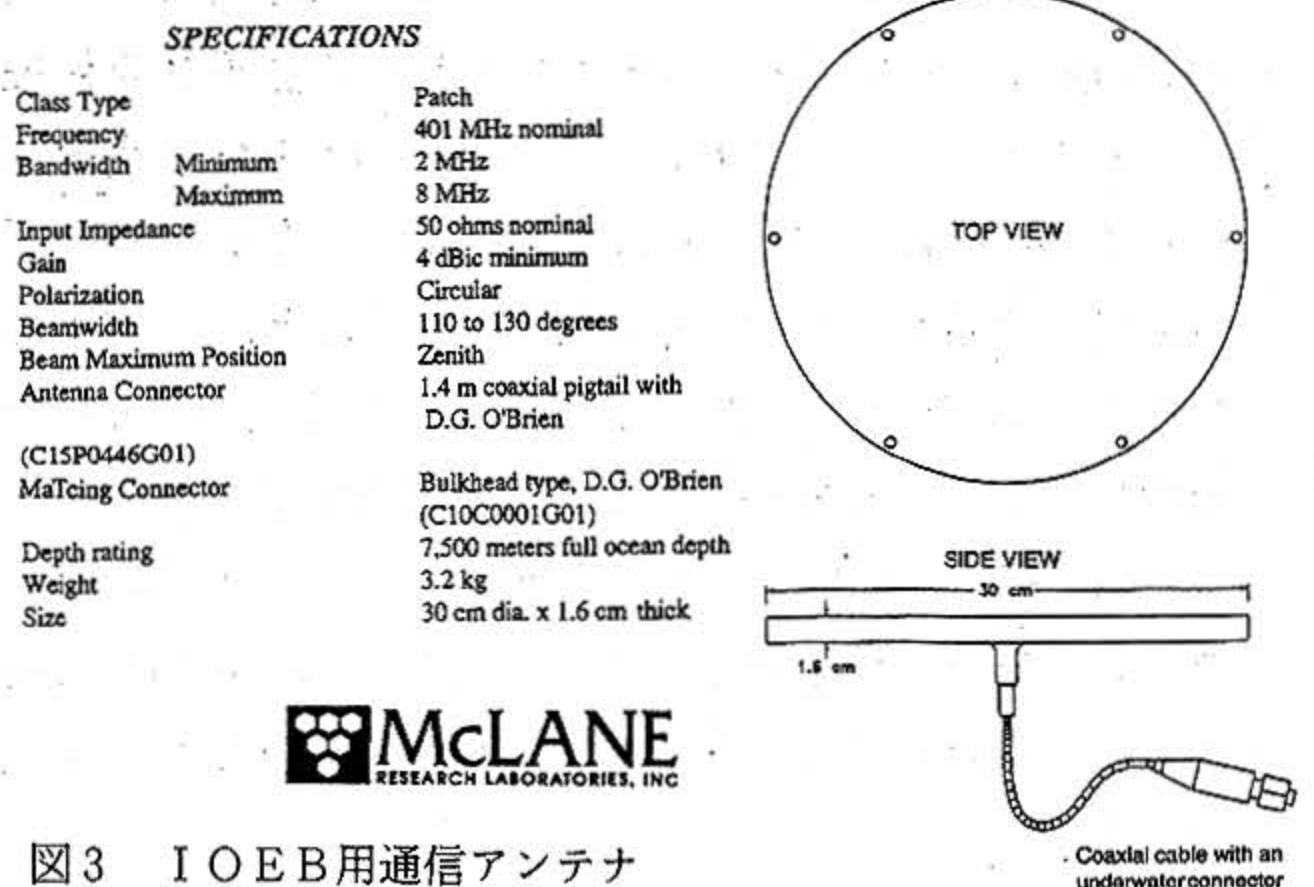


図3 IOEB用通信アンテナ
Fig. 3 Transmission Antenna

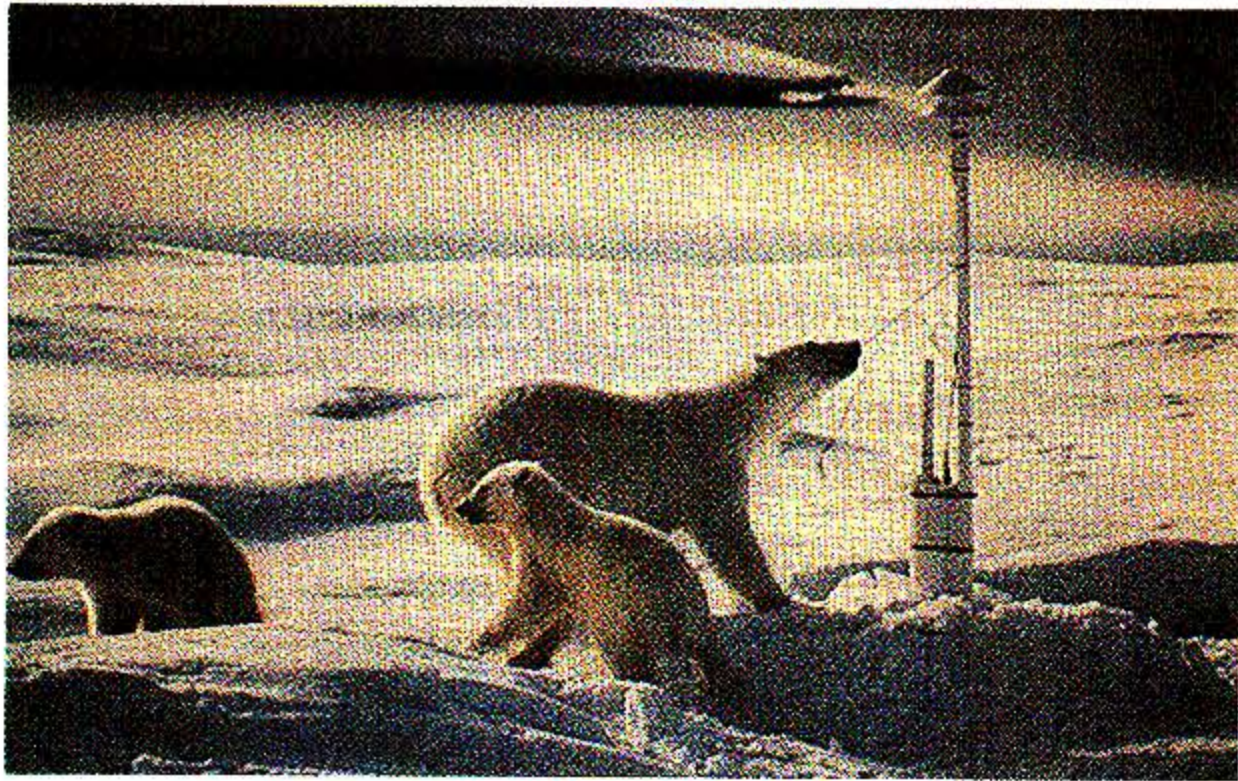


写真2 北極観測用ブイを攻撃する北極熊⁶⁾
 [この写真は、1992年の9月に米国の沿岸警備隊のポーラ・スター号で、北極海にブイを設置したときにD.G.Barton氏によって撮影されたものである。]
 Photo 2 Bear versus Buoy⁶⁾
 [This photo, courtesy of and copyright by D.G.Barton, was taken from the U.S. Coast Guard Icebreaker Polar Star just after the Bouy was deployed, September 1992.]

域で海水に揉まれた場合に傷つけられ難い形状であること、北極熊などの生物による攻撃も受け難い形状であることなどからである。

IOEBのように自然環境内に投入される観測装置からの送信データが突然途切れたりすると、その原因は、システム上に発生した機械的な不具合によるものであると考えることが多い。しかし、写真2に見られるように、北極海域では北極熊による破壊が原因になることもあり得る。

3 IOEBの位置精度について

IOEBは、北極海の海水とともに移動する漂流ブイである。そこでIOEBの位置データは、観測データを解析するために非常に重要なパラメータの一つとなる。IOEBの位置は、アルゴスシステムで行われる位置計算処理により求められる。これは人工衛星がIOEBの上空を通過する際に、IOEBのアルゴス送信機から発信された電波を受信するが、その発信源となるIOEBと、受信者となる人工衛星の相対速度によって変化する受信電波の周波数のドップラー偏移を測定して計算をするものである。ゆえにIOEBの位置データの精度も、このアルゴスシステムの位置計算精度に依存することになる。得られた位置データを用いて、IOEBの漂流軌跡を描いたものが図4である。

(1) アルゴスシステムの位置計算精度

アルゴスシステムの位置計算精度は、発信周波数の安定性、衛星の仰角、1パス中の受信回数、1パス中の最初と最後のメッセージ間の時間などのパラメータによって左右される。これらのパラメータに基づいて、アルゴスシステムの位置計算アルゴリズムが計算した移動物体の位置データには、計算した位置の精度を表す『クラス』が各位置データ毎に付加される。クラス別の位置精度は表2に示す通りである。表2の精度は、データの位置計算誤差が正規分布になっていると仮定した場合の標準偏差を表す。従って、例えばクラス3の場合、得られた位置データの約68%が、150mの誤差範囲内に収まっていることを意味する。アルゴスシステムの算出する位置は、ユーザから与えられる高度データ、プラットフォームの移動速度、発信周波数の安定性に大きく依存する。例えば、高度が100m異なれば、位置計算の誤差は300m程度となる。このような原因による誤差は、アルゴスシステム内で検知することが出来ないで、データの利用時にユーザ側で考慮に入れなければならない。

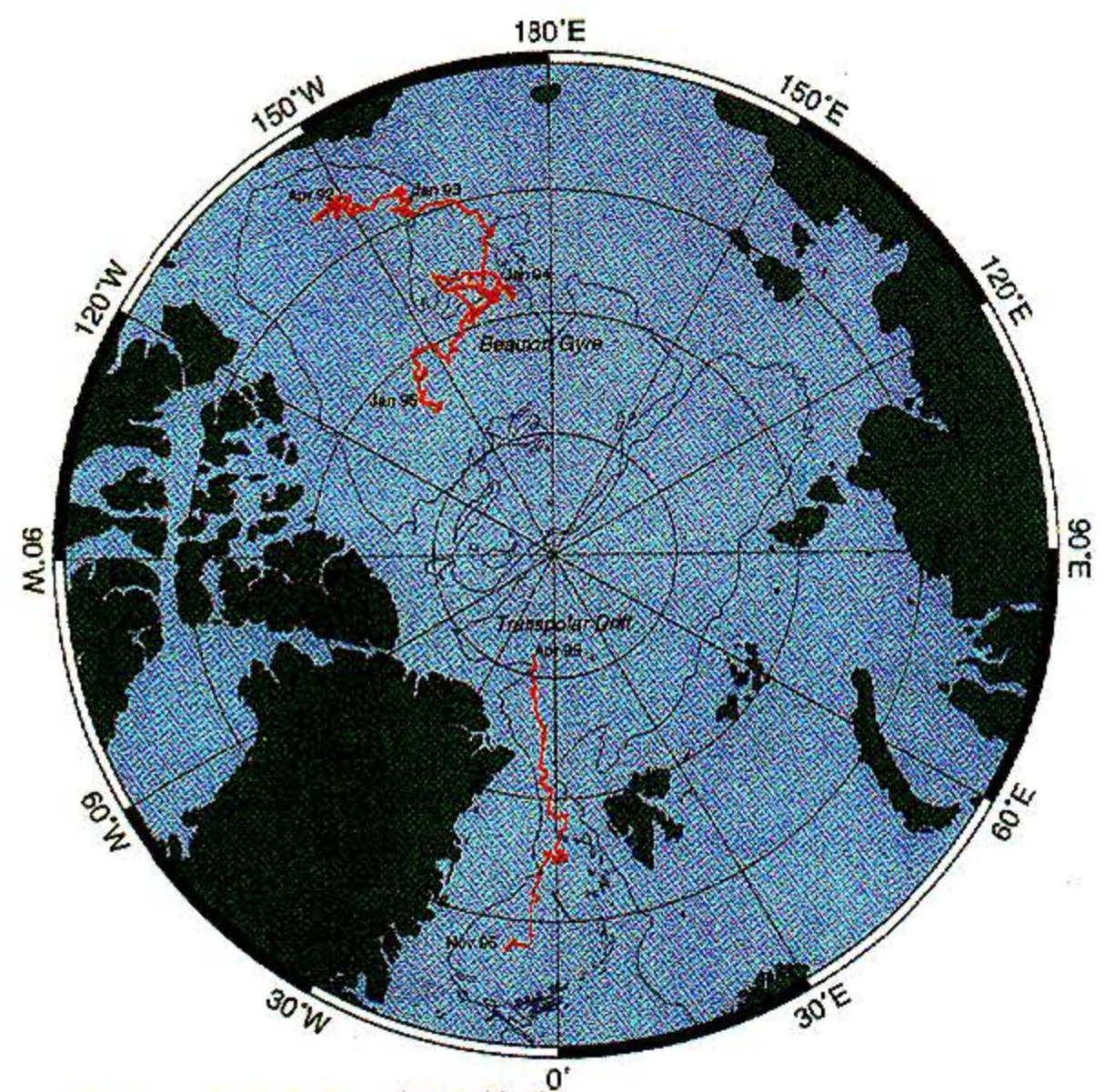


図4 IOEBの漂流軌跡
 Fig.4 Drift tracks of IOEB

表2 アルゴスシステムの計算位置の精度⁵⁾
 Table 2 ARGOS System Location Performance⁵⁾

クラス	精度
クラス3	精度150m
クラス2	精度350m
クラス1	精度1,000m
クラス0	位置特定出来ず

(2) IOEBから発信されたメッセージの受信回数と位置計算精度のクラス別比率

月毎のIOEB 2号機からのメッセージ受信回数と位置計算の精度のクラス別比率を図5に示す。ただし、ここで述べる受信回数は、位置計算を含んだデータの受信回数に限るものとした。IOEBは漂流ブイであることから、1日に何回その位置を知ることかできたか、また、その位置の精度がどの程度のものであるのかが重要となるからである。図5からは、9月からの受信回数が8月までの受信回数と比較して、激減していることがわかる。この原因は、図6に示すIOEB 2号機の7～10月のブイ姿勢監視センサーおよび気象観測センサーのデータなどから推定することができる。図6のコンパスや傾斜計のデータが、8月末からそれまでとは異なる大きな変化を示している。よって、IOEBが設置されていた氷盤が割れて、頂上浮体部分が海面に浮いた状態になったと推定できる。つまり受信回数が激減した理由は、頂上浮体が波によって洗われるために、海氷上に垂直に固定されていた状態と比較して、送信機から安定した電波が送信されなくなったことによるものと考えられる。

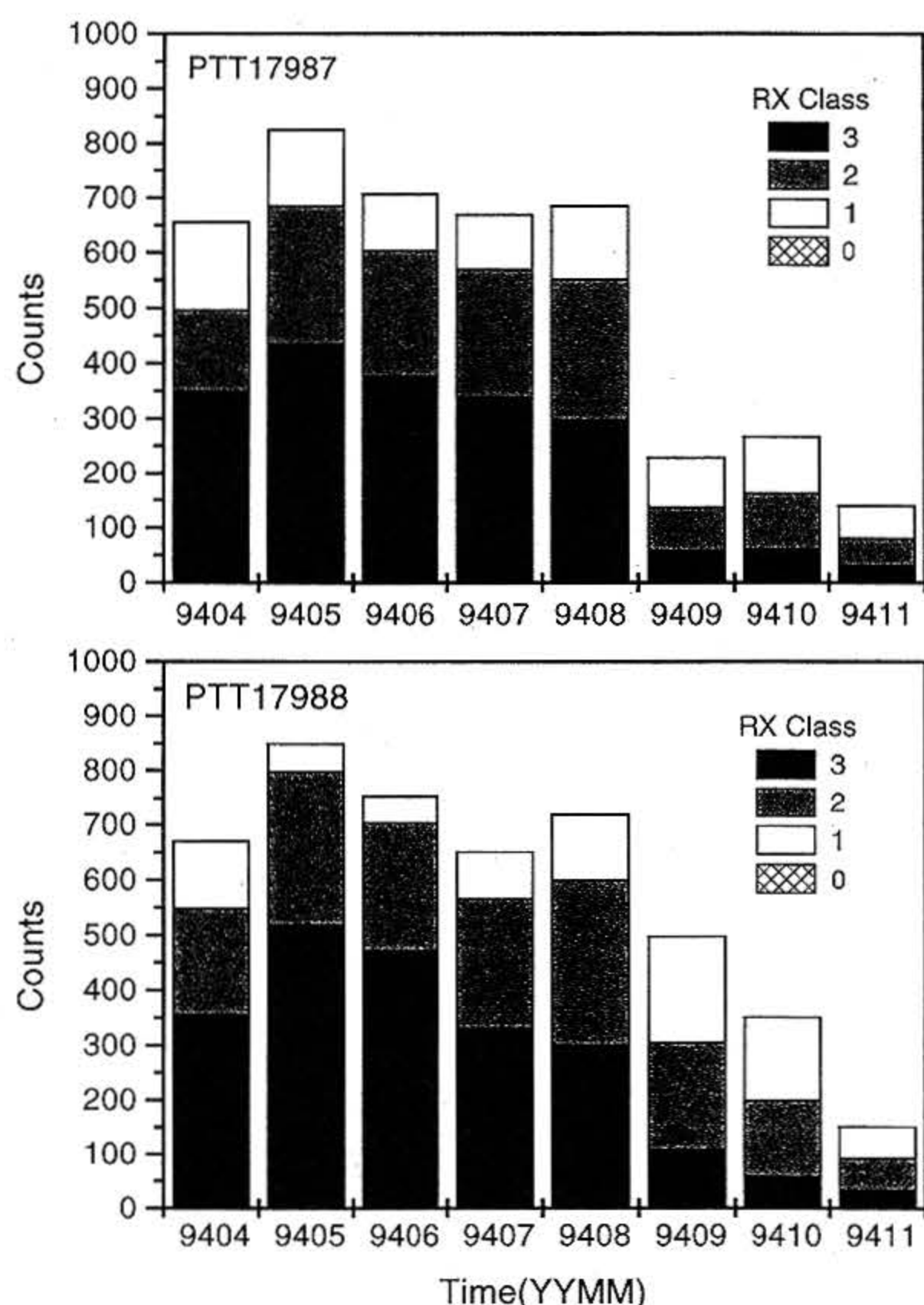


図5 IOEB 2号機の月別データ受信回数

Fig.5 Received Number of a monthly transmitted data (IOEB-2)

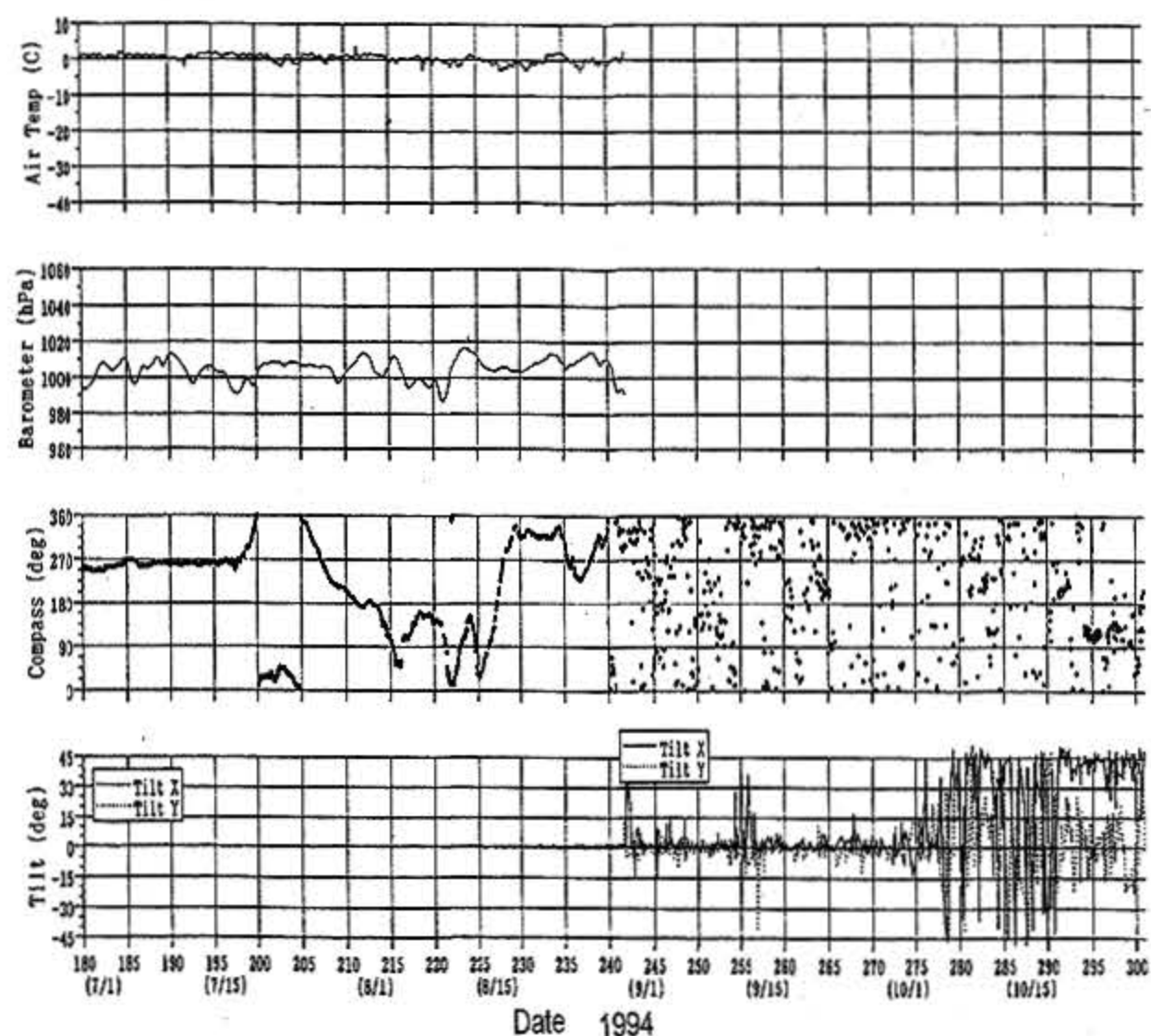


図6 IOEB 2号機の気象観測および姿勢監視センサーのデータ

Fig.6 IOEB-2 Meteorological & Mechanical sensors data

図7に、図5のIOEB 2号機の位置計算の精度から8月と9月の2ヵ月を抜き出して日毎の受信回数として示した。この図7からは、8月下旬からの受信回数の増減に周期的な変化が見られる。この周期的な変化は、図6の気圧データの変化と非常に良く合致している。例えば9月2日～3日、11日～12日、21日～22日の低気圧の通過による気圧の低下と受信回数の低下とは非常に良く合致している。これは、低気圧の通過により海上が荒れて、頂上浮体が波間に浮き沈みしたために、送信機から安定した電波が送信されなくなったことを示していると考えられる。

参考までに、月毎のIOEB 1号機からのメッセージ受信回数と位置計算の精度のクラス別比率を図8に示す。この図8からは、受信回数およびクラスに季節的な変化があることが見て取れる。1992年の春～1994年の春の間、夏の時期は受信回数が多く、また、クラスも精度の良いクラス3の数が増加している。これに対して冬の時期(12月～2月)は、受信回数が減少し、また、クラスも精度が良いクラス3の数が増加している。これは、極域の気温の季節的な変化と良く一致することから、気温の低下によりIOEB内部の電子回路に多少の機能低下が起きたものと推定される。また、冬の時期に雪が降り積もり、氷に変化するなどして、平板アンテナを覆う膜となったために、送信出力が弱められたことによるものであろうと考えられる。

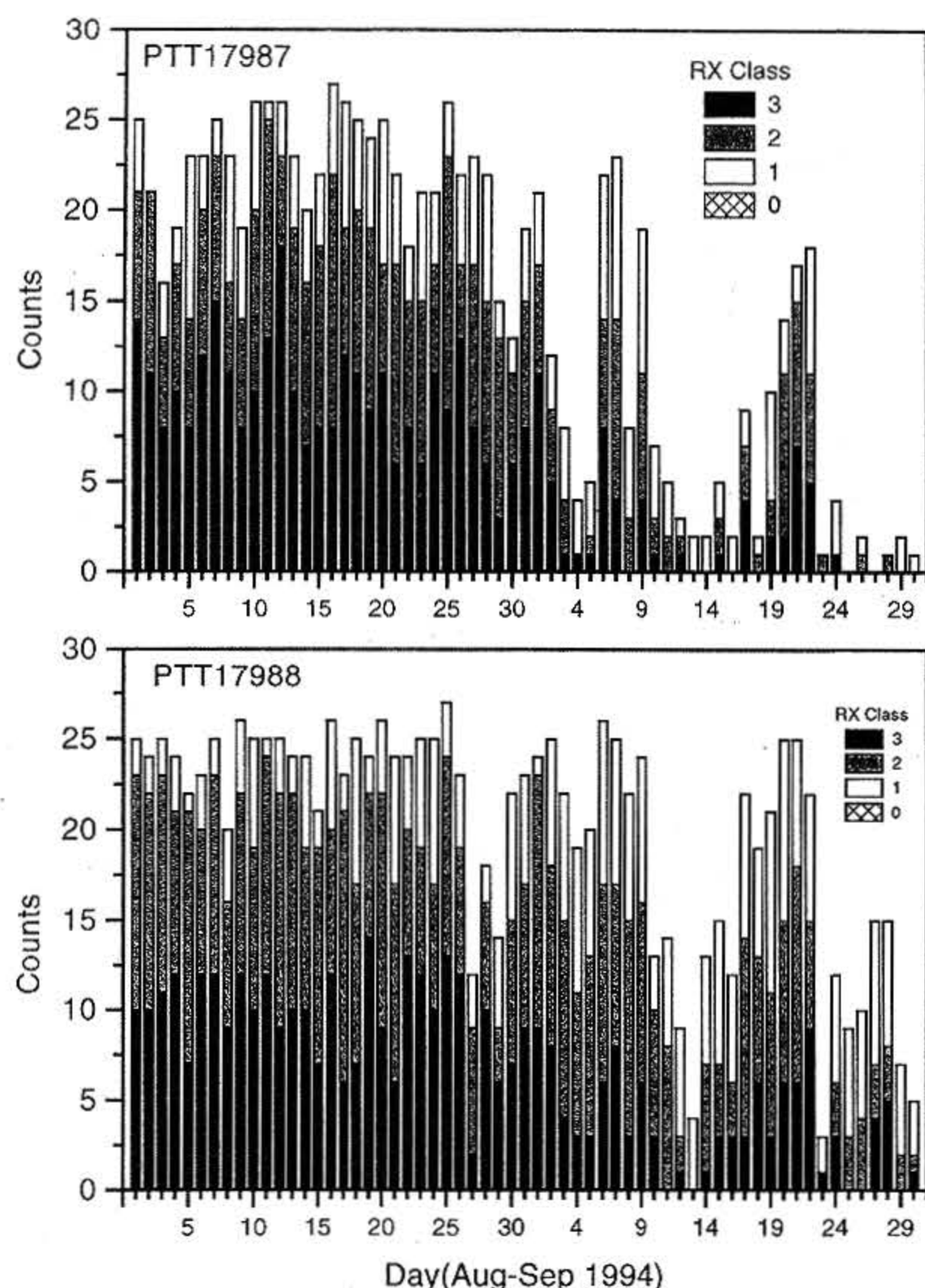


図7 IOEB 2号機の日毎のデータ受信回数
Fig.7 Received Number of a daily transmitted data (IOEB-2)

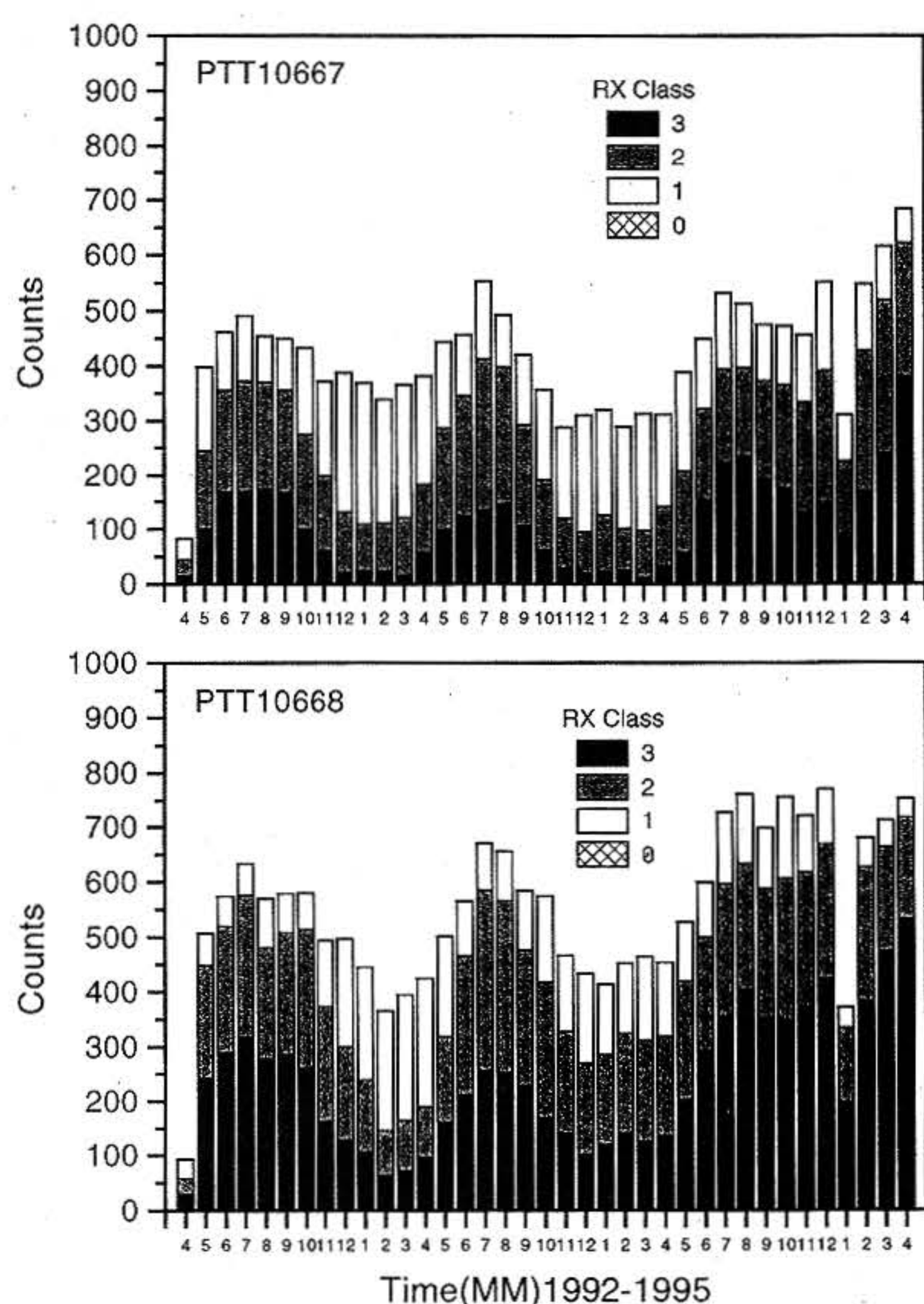


図8 IOEB 1号機の月別データ受信回数
Fig.8 Received Number of a monthly transmitted data (IOEB-1)

4 流向流速計データの問題点

IOEBには、RD-Instruments社製の音響式流向流速計(ADCP)と、Inter-Ocean社製の電磁式流向流速計(S4)の2種類の流向流速計が搭載されている。この2つの流向流速計で得られたデータには、IOEBが海水と共に移動する漂流ブイであることから、IOEBの移動速度が含まれている。そこで、真の流向流速を得るには、観測データからIOEBの移動速度の成分を取り除く必要がある。

(1) 流向流速計におけるデータ処理方法

IOEB 2号機に搭載されたADCPの流向流速データの処理過程は、以下の通りである。まず、ADCP本体では自分が有する時計に従って、15分に1回データを取得し内蔵メモリーに蓄積している。次に、ADCPを係留する枠内には、このADCPのデータをIOEBのデータ処理システムに適合させるために、ADCP専用のDPM(Data Processing Module)も搭載されており、このDPMも15分に1回、ADCPからデータを得ている。DPMは、ADCPからのデータを8回分(2時間)蓄積して平均し、それを2時間の中間の時刻に得られた値として、IOEBのデータ処理システムに伝送している。

一方、S4の流向流速データの処理過程は、S4自身は、1時間に1回、2分間(0.5秒間隔で120回サンプルし平均する)データを取得して、内蔵メモリーに蓄積している。この後、取得データはS4専用のS4-DPMによってIOEBのデータ処理システムに適合するように書き直されて伝送されている。

(2) IOEBの移動速度の算出方法

図4に示したIOEBの漂流軌跡図は、このアルゴスシステムにより計算されたIOEBの位置のデータを用いて作図されたもので、この図よりIOEBの移動速度を得ることができる。図9に、図4の一部を拡大して示した。×印がIOEBの位置のデータをプロットしたものである。これに対して実線は、IOEBの位置のデータ間を線型補間し、その間を直線でつないだものである。この直線1本分が1時間に相当する。IOEBの移動速度を算出するひとつの方法として、この直線を移動速度のベクトル表示として見立てて計算する方法が考えられる。

(3) 計算例

例えば、ADCPのデータであれば、2時間分の直線のベクトル表示を合計することで、その間のIOEBの移動速度として代表させることができる。しかし、精度クラ

ス3の位置データのみを用いて移動速度を決定しても、1時間に1個の位置データは±150mのズレを含む（表2参照）ことから、海中の真の流れがゆるやかなもの（約9cm/sec以下）であった場合には誤差範囲の中に値が埋もれてしまうことになる。従って、この方法を用いても代表値としての範囲の精度でしかなく、おおよその流れの傾向としてデータが得られるにすぎない。この問題点についての今後の対策としては、IOEB自身に位置を把握するための装置を搭載させて、適切な時間間隔でその位置データをメモリーに蓄積することが必要であると考え。近年、小型のGPSが開発され、容易に位置データを取得することが可能となった。そこで、このGPSを搭載することは、IOEBの瞬時の移動速度が得られるため、この問題の解決のために必要不可欠と思われる。

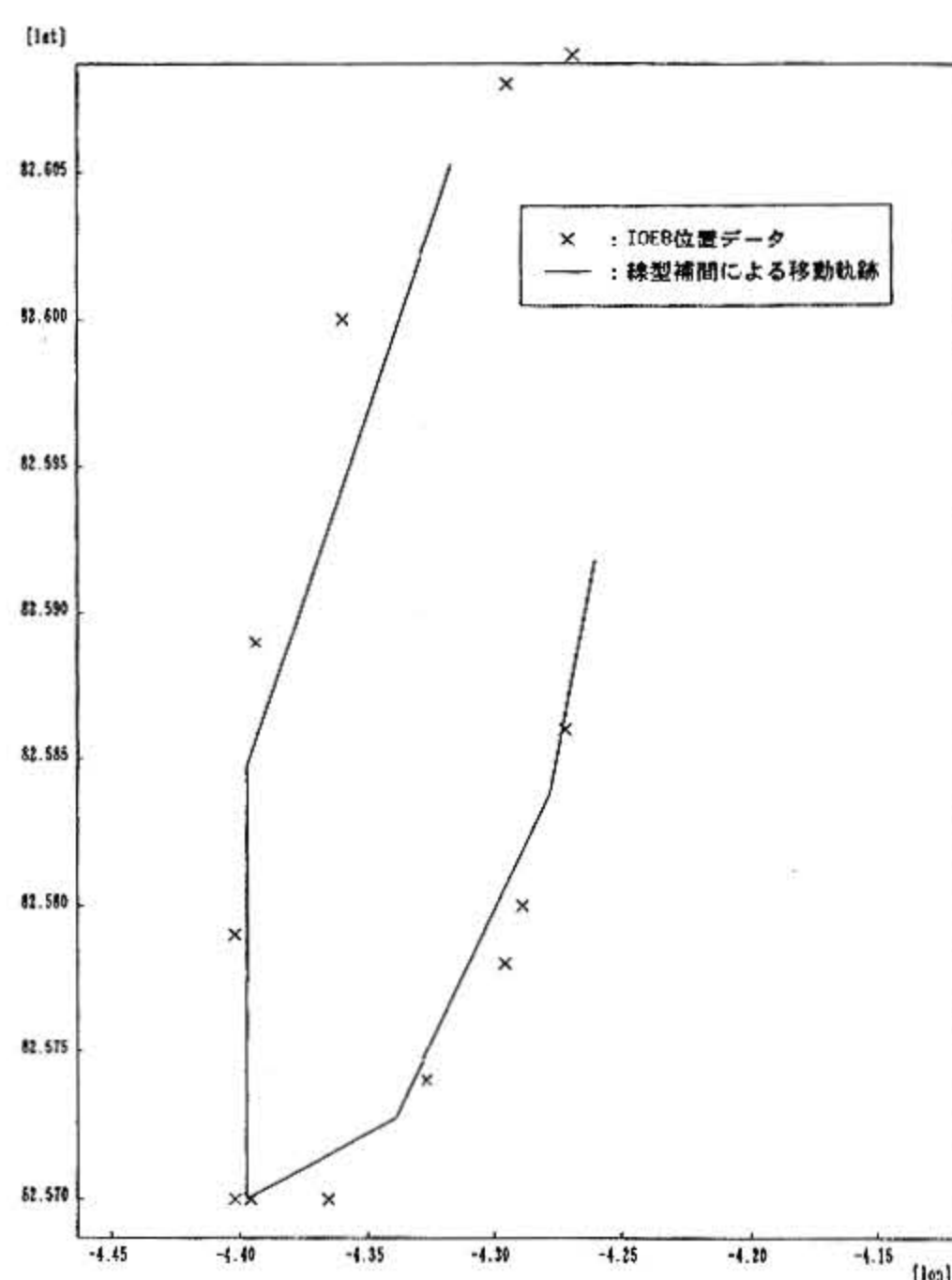


図9 IOEBの位置と線型補間による移動軌跡
Fig.9 IOEB location and drift tracks of linear interpolate

5 アルゴスシステムを経由して得られたデータとIOEB搭載装置の内部メモリーに蓄えられたデータ

IOEB 2号機は、1994年11月9日にグリーンランド海で回収された。この際にIOEBに搭載した電気伝導度・水温計の内部メモリーに蓄えられたデータを回収することに成功したので、このデータとアルゴスシステムを経由してえられた同装置のデータを比較した。

(1) アルゴスシステムを経由した電気伝導度・水温計のデータ伝送について

電気伝導度・水温計からIOEBの中央制御装置へ送られるデータは、表3に示すように8個のASCIIキャラクタ文字からなる。これを受けた中央制御装置は、バイナリーデータに直してPTTにデータを渡す。PTTは人工衛星に向けてバイナリーデータを発信する。以降は、前述したようにアルゴスシステムにより（図2参照）データが転送される。アルゴス社の大型コンピュータ内では、このデータを先頭から4ビットずつに区切り、ヘキサデータに変換し並べ、受信時刻、発信位置を加えて、IOEBのデータファイルとして管理されている。このアルゴス社のコンピュータにアクセスしてデータを閲覧することで、IOEBが取得した観測データを得ることができる。最終的にアルゴスシステムを経由して得られる電気伝導度・水温計のデータは、IOEBの伝送系内で電気伝導度・水温計から中央制御装置へ送られたデータの8個のASCIIキャラクタ文字と全く同じになる。つまり、電気伝導度・水温計のデータについてはアルゴスシステムを経由しても、内蔵メモリーに収納されているデータと全く同じものが得られることになり、物理量に変換して得られた数字は、電気伝導度・水温計が有する精度で得られることを意味している。

表3 電気伝導度・水温計のデータの流れ

Table 3 Data flow of SeaCat-16 in the IOEB

・電気伝導度・水温計の場合		
アドレスNo.	温度データ	電気伝導度データ
IOEB内部.....	3 1 R	8 B E 0 0 3 D C
↓		
人工衛星間...	10001011111100000	0000001111011100
↓		
アルゴスシステム・コンピュータ上.....	8 B E 0	0 3 D C
↓		
物理量への変換	温度データ	電気伝導度データ

(2) 電気伝導度・水温計の内部メモリーに蓄えられたデータとアルゴスシステムを経由して得られたデータとの比較

図10に示したのが水温データで図11に示したのが塩分に換算した電気伝導度のデータである。電気伝導度・水温計のサンプリング間隔は1時間に1回で設定されてお

り、1日に24個のデータ数となる。これに対してアルゴスシステムを経由して得られるデータ数は、前述したように1日に最大28回であるので、タイミングが良ければ、1日に電気伝導度・水温計が取得する24個のデータのすべてを人工衛星を経由して取得できることになる。

図7からIOEB2号機の1日平均の受信回数は、20回を超えていることからわかるように、アルゴスシステムを経由して得られたデータ数は、解析に必要な図を作成するのに十分なデータ数が衛星を経由して得られている。

確かに8月末 (DATE=930) 以降のIOEBが設置されていた氷盤が割れて頂上浮体部分が海面に浮いた状態になってからは、電気伝導度・水温計の内部メモリーに蓄えられたデータが、非常に細かな変動を含むようになったことを表しているのに対して、アルゴスシステムを経由して得られた同装置のデータでは、これを再現することはできなかった。この理由は、図5からわかるように、8月末以降に受信回数が減ったためであることは明らかである。

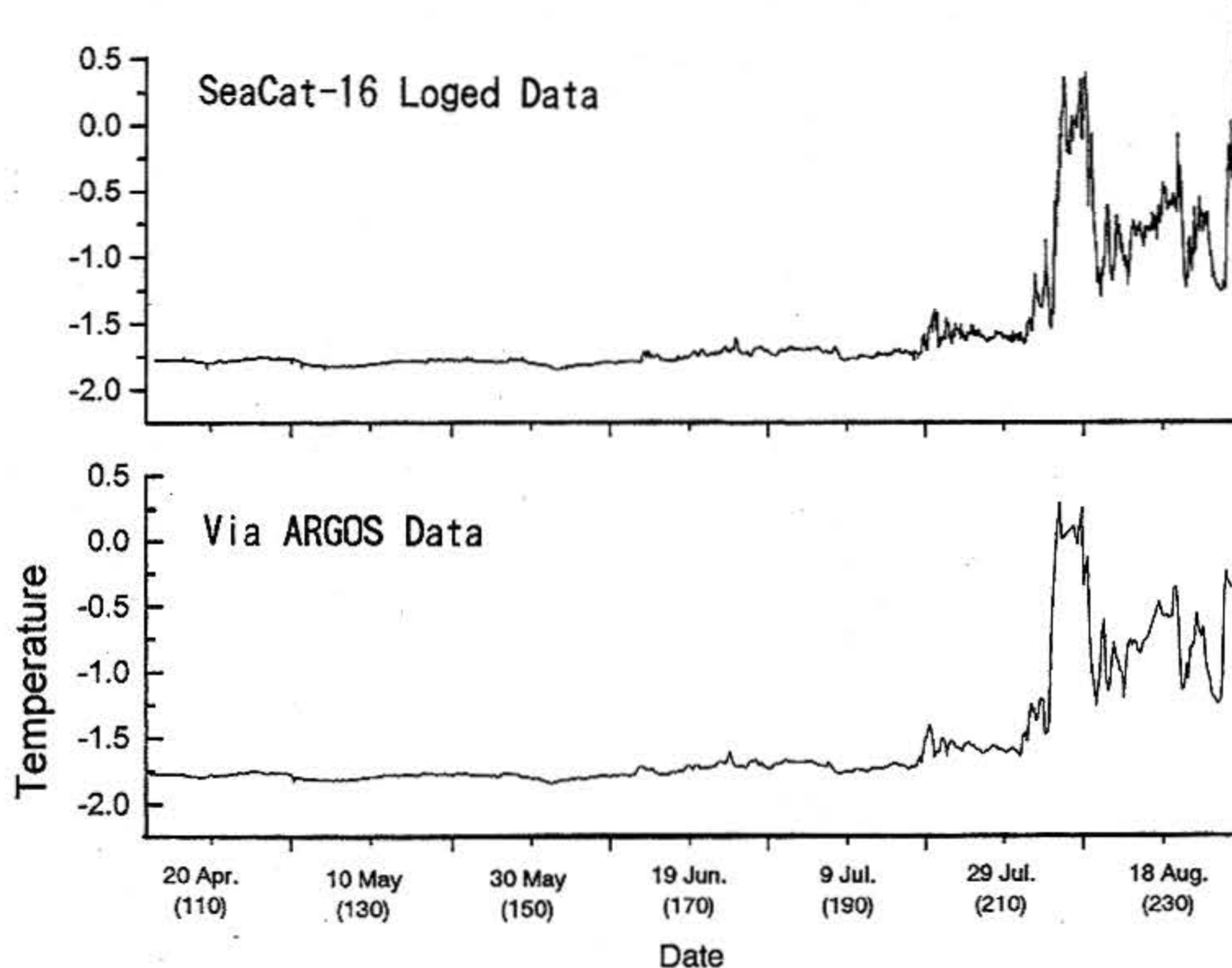


図10 電気伝導度・水温計が取得した水温データ
Fig.10 Temperature Data by SeaCat-16

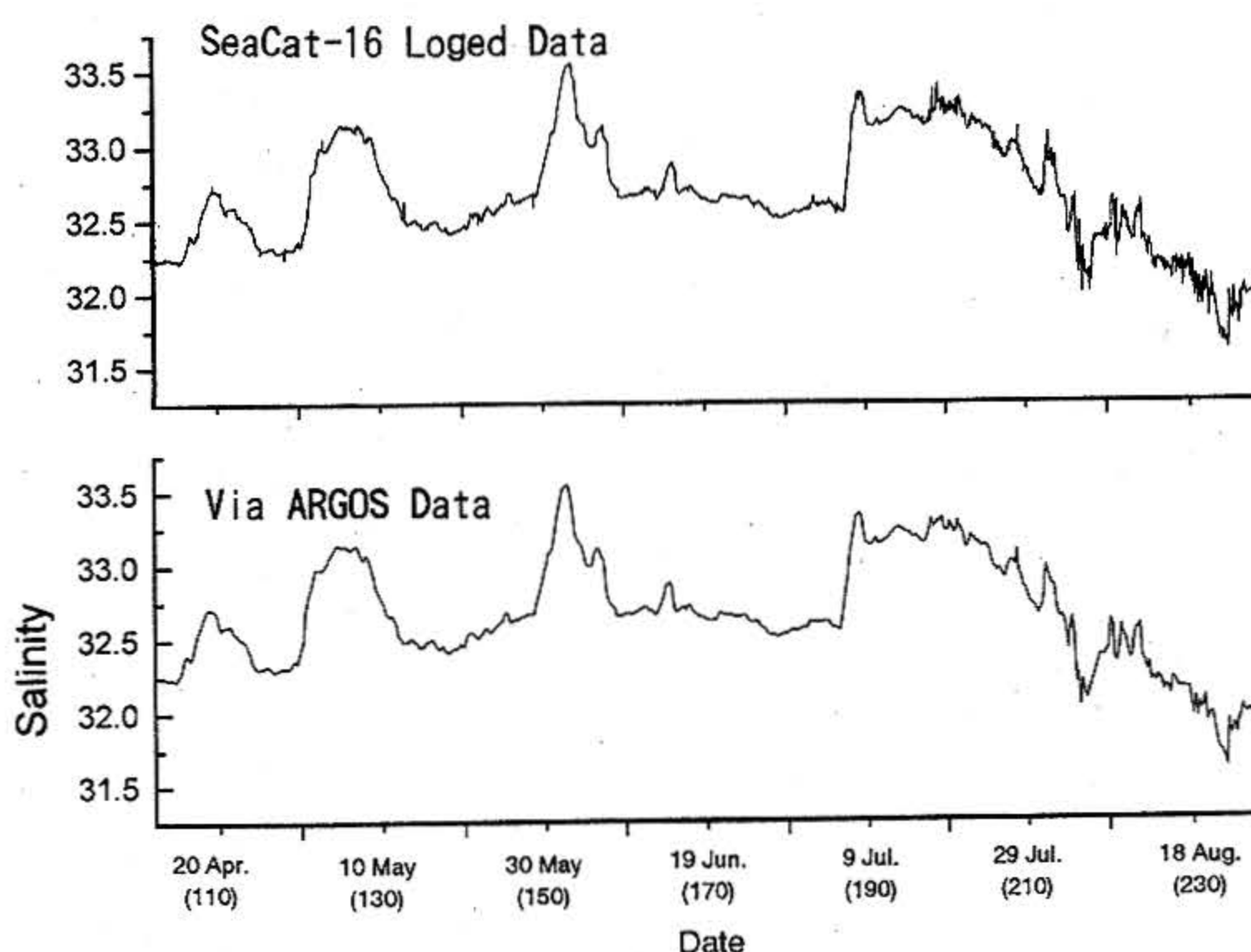


図11 電気伝導度・水温計が取得した塩分データ
Fig.11 Salinity Data by SeaCat-16

6 おわりに

氷海用自動観測ステーション(IOEB)の観測海域である北極海域は、データ通信システムとして利用したアルゴスシステムの人工衛星が極軌道を通ることから、1日のデータの受信回数が最大28回得られる。これは、係留系で海域を観測する場合に、通常設定するデータ取得周期の1時間に1回のデータを、そのまま人工衛星を経由して送信できることを意味している。IOEBを含め漂流ブイや係留系は、厳しい自然環境の中でデータを取得する。この観測データが、それが回収されなければ得られないとするならば、観測に要する時間的なロスや亡失という事態のような問題点を拭い去ることはできない。しかし、IOEBは人工衛星によるデータ通信システムを利用して、極寒冷の北極海域からリアルタイムに近い時間間隔で観測データを取得することに成功した。

IOEBは、まだ幾つかの改良を要する箇所を持つものの北極海域を観測する漂流ブイとして、世界的にも代表的な存在になったものと考えている。今後の観測計画としては、1996年からの3年間で、ロシアのラプテフ海からグリーンランド海までの極横断流の観測を予定している。

参考文献

- 1) 畠山 清：氷海用自動観測ステーション2号機の建造. JAMSTEC, 6 (1), (通巻第21号), 25-33. (1994)
- 2) 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), (通巻第26号), 22-31. (1994)
- 3) 滝沢 隆俊：氷海用自動観測ステーション2号機による北極観測. 海洋科学技術センター, 第20回研究発表会要旨集, 43-47. (1995)
- 4) Honjo Susumu, Takatoshi Takizawa, Richard Krishfield, John Kemp and Kiyoshi Hatakeyama (1995): Drifting Buoys Make Discoveries about Interactive Processes in the Arctic Ocean. Eos, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 76, No. 21, pp 209, 215, 219.
- 5) アルゴスシステムガイド(1992). 株式会社キュービック・アイ, Pages 1-9.
- 6) International Arctic Buoy Program パンフレット裏表紙 (1991).

(原稿受理：1995年10月20日)