

## 200Hz海洋音響トモグラフィシステムの時間計測手法

前島 芳充\*<sup>1</sup> 中埜 岩男\*<sup>1</sup> 中村 敏明\*<sup>1</sup>  
茨田 和生\*<sup>1</sup> 海法 宇治\*<sup>2</sup> 長内 正憲\*<sup>2</sup>  
相田 雅史\*<sup>2</sup> 塩野入六成\*<sup>2</sup>

海洋科学技術センターでは、1,000km四方の海洋構造を音波を用いて観測することができる海洋音響トモグラフィ観測手法の開発を行ってきた。このトモグラフィでは、内部クロックによる動作スケジュールの正確な時刻管理が最も重要である。我々は音波伝搬の計測に必要な時刻精度を $3.2 \times 10^{-10}$ /yearに設定した。この目標を達成するためには、トランシーバー内に高精度クロックを持つことが不可欠である。しかしながら、水晶発振器のみではこの時刻精度を保つことが不可能である。我々は、開発した200Hzトランシーバーに、二重時刻校正システムを導入した。このシステムは、GPS衛星から送信される時刻パルス信号を用いて内部の水晶発振器の時刻パルス信号を校正し、さらに緊急時にはトランシーバーに内蔵したルビジウム発振器で校正するものである。このシステムを用いることによってトモグラフィ観測に必要な時刻精度を達成することが可能となった。

キーワード：海洋音響トモグラフィ、高精度クロック、GPS、ルビジウム発振器

## Method of time measurement in the 200Hz ocean acoustic tomography systems

Yoshimitsu MAEJIMA\*<sup>3</sup> Iwao NAKANO\*<sup>3</sup>  
Toshiaki NAKAMURA\*<sup>3</sup> Kazuo BARADA\*<sup>3</sup>  
Ieharu KAIHOU\*<sup>4</sup> Masanori OSANAI\*<sup>4</sup>  
Masashi AIDA\*<sup>4</sup> Mutsunari SHIONOIRI\*<sup>4</sup>

Japan Marine Science and Technology Center has been developing an ocean acoustic tomography system which can observe 1,000km $\times$ 1,000km ocean structures by using an under water sound technique. Most important factor for the tomography is the accurate time control of the event schedule by transceiver's clock. Our goal for time accuracy is set at  $3.2 \times 10^{-10}$ /year for the schedule management. A highly accuracy clock is required for the tomography system to reach the goal. However, we cannot keep accurate time using only

\* 1 海洋観測研究部

\* 2 沖電気工業株式会社

\* 3 Ocean Research Department

\* 4 Oki Electric Industry Co.,Ltd.

a crystal oscillator. So, we introduced a double-corrected time system to our 200Hz transceivers. This system corrects the crystal oscillator using the GPS pulse signal as well as an inside Rubidium oscillator for emergency case. We find that the double-corrected time system enables us to reach the goal.

**Key Words :** Ocean acoustic tomography, Highly accuracy clock, GPS, Rubidium oscillator

## 1 はじめに

海洋科学技術センターは、1,000km四方の海洋の水温と流向流速の三次元分布を音波を用いて観測することができる海洋音響トモグラフィ（以下、トモグラフィ）の開発を行っている。トモグラフィは、観測海域を囲むようにトランシーバー（送受信機）を海中に設置し、トランシーバー間の音波信号の伝搬（到達）時間を正確に計測する。この伝搬時間は、海域内の水温、塩分、流向流速の影響を受けることから、複数のトランシーバー対の間の伝搬時間から逆問題手法を用いて海洋構造を推定するものである<sup>1)3)</sup>。この観測手法では長期間にわたり、音波伝搬時間の計測を正確に行うことが最も重要である。

200Hzトランシーバーの開発において<sup>4)6)</sup>、我々はトランシーバーに内蔵される高精度クロックの時刻ドリフト量（精度）目標を、2年間自動運転観測で $3.2 \times 10^{-10}$ /year以下と設定した。しかし、高精度クロックに内蔵される水晶発振器単独では、目標時刻精度を実現することが不可能である。この目標を達成するために、GPS衛星から送信される時刻パルス（セシウム原子時計： $10^{-12}$ /year）信号を用いて、高精度クロックに内蔵された水晶発振器の時刻校正を行う方式を導入した。さらに、GPS信号を受信できない緊急時には、トランシーバーに内蔵したビジウム発振器（ $10^{-11}$ /year）を用いて、水晶発振器の時刻校正を行う二重時刻校正システムを採用した。この方式を用いることにより、トモグラフィ観測に必要な $10^{-10}$ /yearのオーダーの精度を2年間保持することが可能となった。

本報告では、最初にトモグラフィシステム、及び高精度クロックを基幹とした電子回路部の概要について述べる。第3節ではトモグラフィ時間計測手法として、トモグラフィに必要な時刻精度について触れた上で、時刻精度を達成するために導入された二重時刻校正システムについて述べる。そして、この校正システムを構成する高精度クロックとその周辺ハードウェアを記した。

第4節では、高精度クロックが管理するシステム動作について詳細に述べる。第5節では、実海域実験で起きた緊急時において、二重時刻校正システムが、常に一定誤差範囲内に時刻精度を保持した結果を示す。

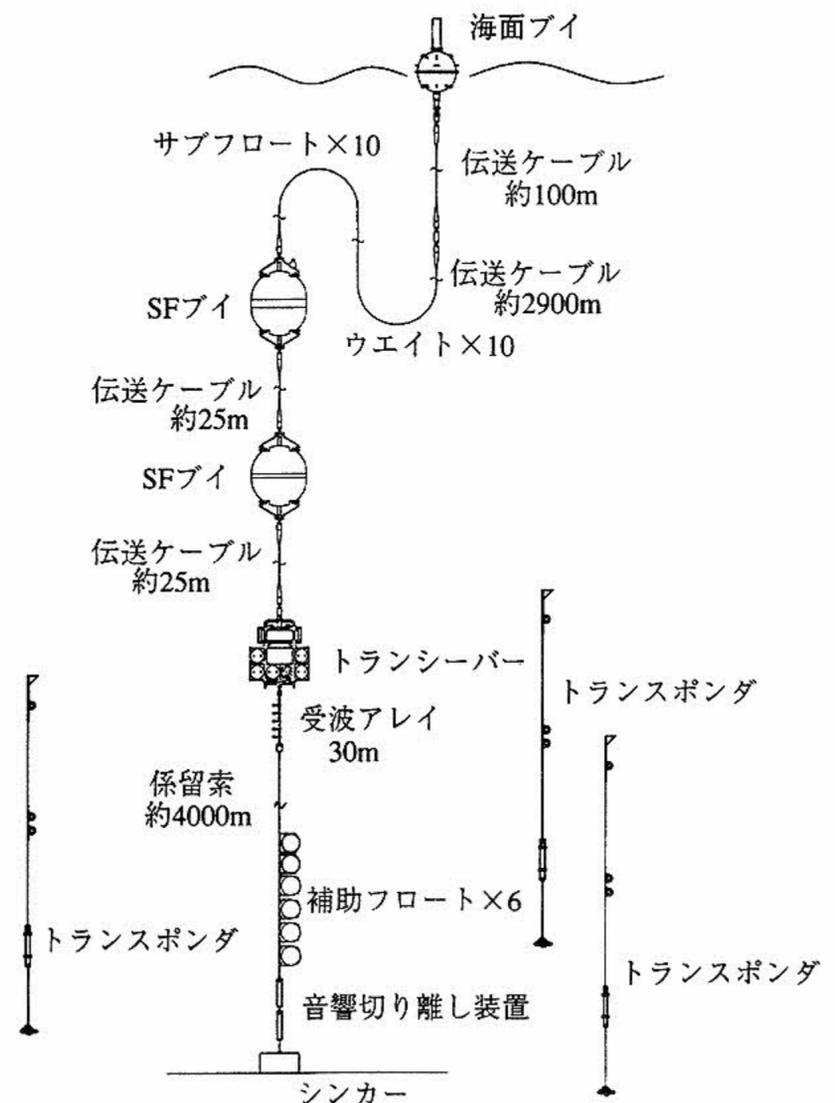


図1 200Hzトモグラフィ係留系の構造  
Fig.1 Construction for the 200Hz tomography mooring system

## 2 システムの構成

### 2.1 200Hz送受信システム

200Hz送受信システムの係留系の全体構成を図1に示す。200Hz送受信システムは、本体のトランシーバー係留系と3式の音響測位用トランスポンダ係留系で構成されている。トランシーバー係留系は、最上部から海面ブイ、伝送ケーブル、シntaxック、フォームブイ、トランシーバー、係留索、音響切り離し装置、そしてシンカーからなっている。

海面ブイには、インマルサット送受信機、GPS受信機、そして両通信機のアンテナが内蔵されている。インマルサット送受信機は、衛星を介してトランシーバーと陸上端末装置のデータ通信ができる。GPS受信機は、トランシーバー内の高精度クロックの校正や海面ブイ自身の流失の監視に利用する。海表面における海面ブイの運動をトランシーバー本体に直接伝えないために、伝送ケーブルの途中にウエイトとサブフロートを付け、海中でケーブルに緩みをもたせている。2個のシntaxック・フォームブイは、トランシーバーを緊張係留するために十分な浮力を持っている。トランシーバーは、低周波音源<sup>7)-10)</sup>、受波アレイ、電池、そしてトランシーバーシステム全体を制御する電子回路部で構成される。この音源は中心周波数200Hz、最大音圧193dBの性能を有し、音波を1,000 km伝搬させる性能を有している。受波アレイは5つの素子で構成され、±10度のビームを作ることができる。電子回路部の構成の詳細については次項に示す。音響切り離し装置は、2台直列に接続されている。3式のトランスポンダ係留系は、トランシーバー係留系の周囲に設置され、トランシーバーの海中での動揺を計測する。

## 2.2 電子回路部

トランシーバー内の電子回路部の構成を図2に示す。トランシーバー電子回路部は、制御部、高精度クロック、M系列変調器、受信処理部、受信制御部、センサーインターフェイス、音響測位部、そして海面ブイインターフェイスの8ユニットで構成されている。写真1にトランシーバーの電子回路部を示す。写真の左側にある白い箱が高精度クロックである。

制御部は電子回路部全体の動作を管理する機能を持っている。高精度クロックはスケジュールによる起動や基本設定を管理し、M系列変調器は送信用M系列信号の発生/出力を行う。受信処理部は受信された音響信号の処理を行い、受信制御部は受信処理部とハードディスク(以下、「HDD」)入出力制御を行う。圧力や温度等のセンサー情報(圧力、水温、方位、傾斜)の計測はセンサーインターフェイス、そしてトランスポンダによる音響測

位計測は音響測位部で行われる。最後に、海面ブイインターフェイスは海面ブイとトランシーバーのデータ通信を行う。

高精度クロックは、あらかじめ入力される動作スケジュールに従い、動作(以下「イベント」)を実行する。スケジュールは7種類のイベントにより組立られる。これらのイベント種類を図3に示す。

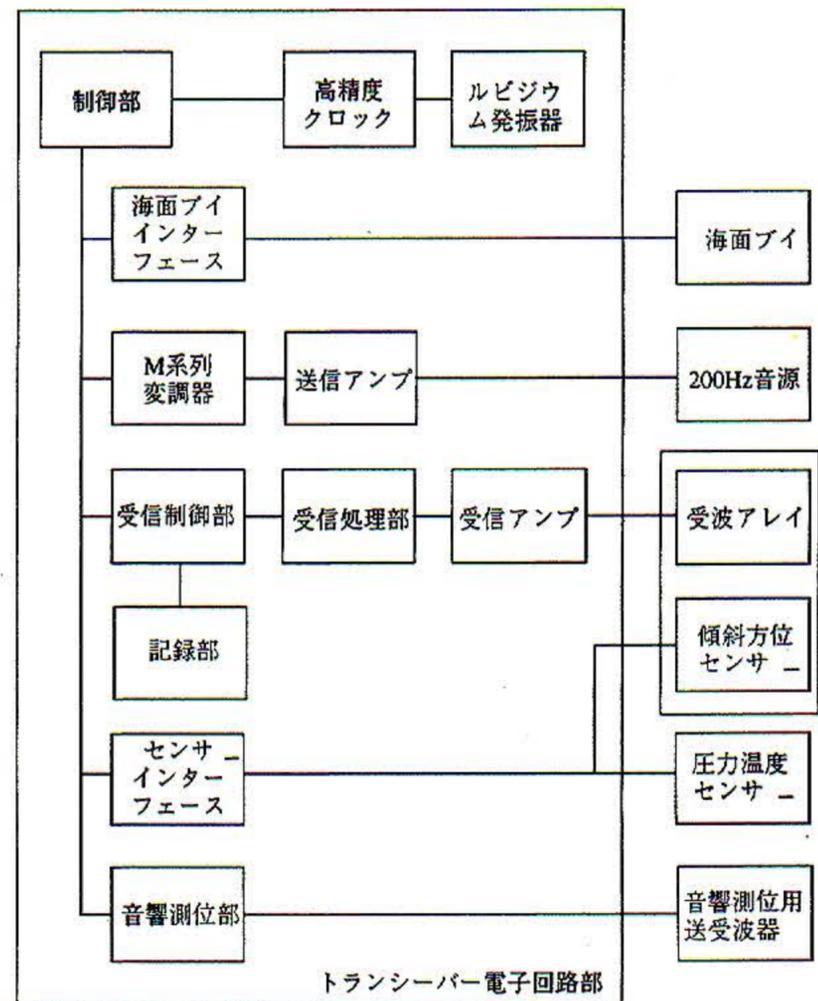


図2 トランシーバー電子回路部のブロック図  
Fig. 2 Block diagram for electronics in the transceiver

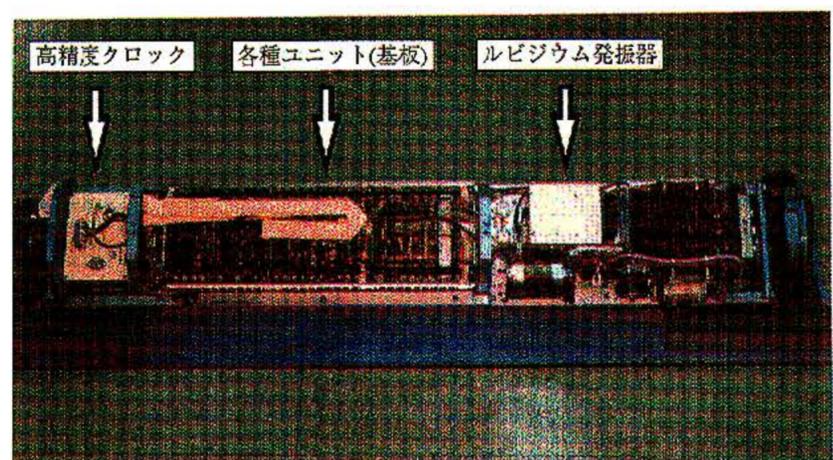


写真1 トランシーバー電子回路部  
Photo 1 Electronics in the transceiver

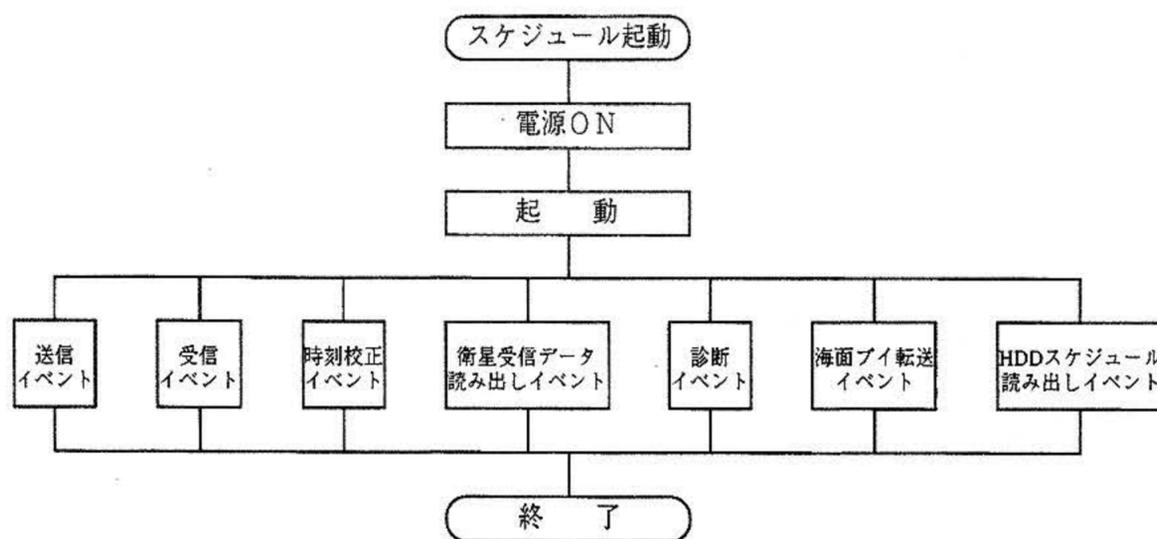


図3 トランシーバー作動フロー  
Fig. 3 Operational flow diagram for transceiver

### 3 トモグラフィー時間計測手法

#### 3.1 時間精度

トモグラフィーは海洋の音速（温度）と流速の分布を知るためのものである。音波信号の、設置した機器間それぞれの双方向伝搬時間の和によって音速分布を計測し、双方向伝搬時間の差によって流速を計測する。そのため伝搬時間の計測、音線の分離等には高い精度が要求され、トランシーバー内部における時間は計測すべての基準となるため、さらに高い精度と管理が求められる。そのため、トランシーバー内の動作時間、システムの動作スケジュール等を管理する高精度クロックには以下のような時刻精度、周波数精度を設定した。高精度クロックにおける時刻のドリフト $\Delta d$ を10msec/year以下に保持させるために必要な時刻精度 $T$ ,

$$\begin{aligned}
 T &= \Delta d / C \\
 &= 10 \times 10^{-3} / 3600 \times 24 \times 365 \\
 &= 3.2 \times 10^{-10}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

となる。ここで、 $C$ は1年間に経過する秒数である。(1)式より内蔵発振器の時刻精度 $T$ は $10^{-10}$ /yearのオーダーが必要であることがわかる。さらに、周波数ドリフト量の誤差 $\Delta k$ は(2)式から求められる。送波時間 $T_f=150$ 秒間に対し、位相誤差 $\theta_R=30^\circ$ まで許容できるとすると、

$$\begin{aligned}
 \Delta k &= |f_T - f_R| \leq \theta_R / (360 \times T_f \times f_0) \\
 &= 30 / (360 \times 150 \times 200) \\
 &= 2.77 \times 10^{-6} \text{ Hz}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

となる。ここで、 $f_T$ は真の周波数、そして $f_R$ は最大ドリフト周波数、 $f_0$ は音波信号の周波数である。(2)式から、周波数のドリフト量誤差 $\Delta k$ は $2.77 \times 10^{-6}$  Hz以下である

ことが必要となる。30度までの位相ずれは平均すると15度となり、音波信号の相関処理後の入力信号のレベルは $\cos 15^\circ$ 分( $\cos 15=0.96$ )となる。したがって、ピーク検出データの劣化は4%にとどまり、計測精度に影響を与えない。

(1)式で求めた時刻精度は原子周波数基準（ルビジウム(Rb)： $10^{-11}$ 、セシウム(Ce)： $10^{-12}$ )に匹敵し、この要求精度を達成するには、既存の水晶発振器単独では不可能である。また、トランシーバー内にRbやCe原子時計を搭載し、常時使用するには、非常に大きな消費電力が必要である。電池駆動の観点から、これらの原子時計を長期間起動させておく電力を搭載させておくことは非実用的である。そこで、トモグラフィー観測に必要な時刻精度を満足し、かつ低消費電力化するために、水晶発振器の二重校正方式を導入することにした。次項にその方式を詳細に述べる。

#### 3.2 二重校正方式

高精度クロックのメインの発振器には温度補償型水晶発振器を採用した。温度補償型水晶発振器は、時刻精度： $1 \times 10^{-6}$ 、消費電力は5 mW以下であり、低消費電力のため長期運用に適している。この水晶発振器に長期変動分をある程度補償できるように長期エージングを行い、さらにソフト補正を行うことによって、水晶発振器自身で精度 $5 \times 10^{-8}$ を実現した。しかしながら、この水晶発振器単独の時刻精度では4.3msec/day (1.6s/year)程度ドリフトする。この問題を解決するため、以下に示す方式を導入した。

GPSが送信するCe原子時計は100nsec/dayの精度が保証されており、また周波数のドリフト量を校正する精度も保証されている。さらに全球に信号を送信しているため、自動運転のトモグラフィシステムの時刻管理及び周波数校正には最適である。トランシーバーは、1日1回の割合でGPSが送信するCe原子時計のパルス信号を受信し、水晶発振器のパルス信号と比較し、同期させることによって校正を行う。同時に周波数ドリフト校正も行う。

次に二重目の校正システムについて述べる。このシステムは、GPSからの信号を受信できない等の状態、つまり荒天時に海面ブイが水没したり、海面ブイが流出した緊急時に稼働する。海面ブイインターフェイスがGPS信号の受信を認識しないとき、トランシーバー内部に搭載されたもう1台のクロックであるルビジウム発振器が起動される。ルビジウム発振器は、約20分間のプリヒートで自体の動作を安定させた後、その基準周波数を高精度クロックとの周波数校正に提供する。校正終了後、ルビジウム発振器は速やかに電源が切られる。

### 3.3 高精度クロックとその周辺機器の構成

二重校正方式を構成する高精度クロックとその周辺機器の詳細について示す。

#### (1) 高精度クロック

高精度クロックのブロック図を図4に示す。高精度クロックは水晶振動子を基幹として構成されるモジュールである。高精度クロックの電子回路部は樹脂製の容器に納められ、回路部と水晶振動子より構成されている。回路部は基板2枚が容器下部に取り付けられたマザーボードと固定板により固定されている。水晶振動子はアルミ、石綿、エアーキャップによって保護されている。この保護構造は、機械的衝撃、温度などによる影響を緩和するためである。高精度クロックの仕様を表1に示す。

#### (2) ルビジウム発振器

ルビジウム発振器は、ルビジウム原子(Rb)のもつ安定度の高い固有周波数と、ルビジウム発振器内部にある水晶発振器の発信周波数を同期させることによって、基準周波数を発信するものである。表2にルビジウム発振器の仕様を示す(外形は写真1を参照)。前述したように、このルビジウム発振器は消費電力が大きいため常時運用することができない。電源が入るのは海面ブイのGPS信号受信を認識できず、本ルビジウム発振器による周波数補正の実施を必要としたときのみである。

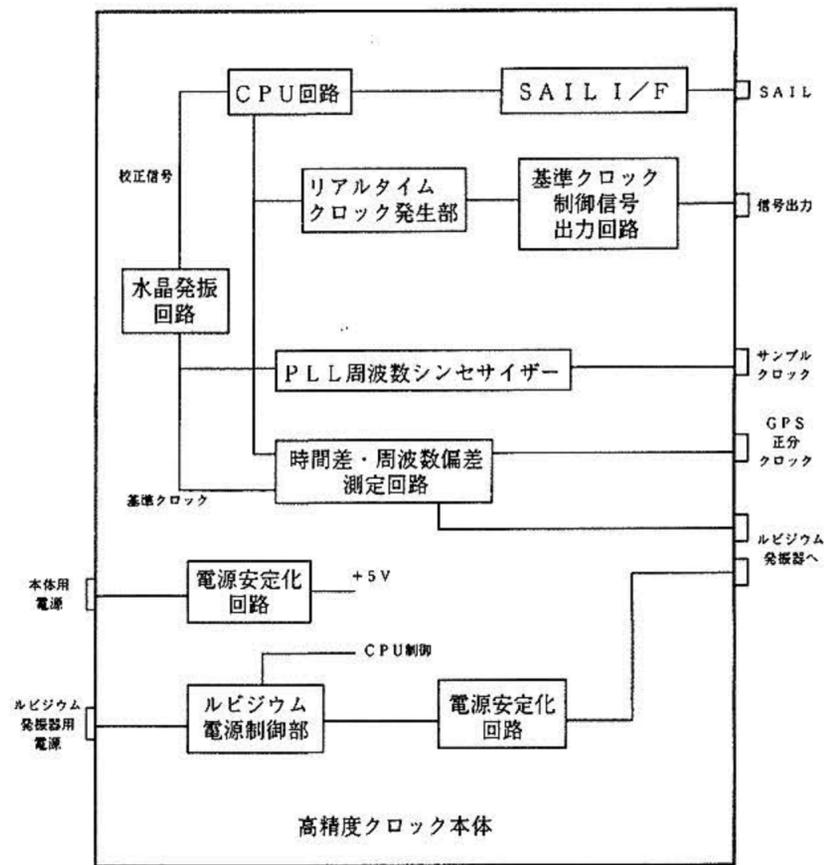


図4 高精度クロックのブロック図

Fig. 4 Block diagram for highly accuracy clock

表1 高精度クロックの性能

Table 1 Specification of highly accuracy clock

1. 一般性能			
(1)	電源	DC 5.5 ~ 12 V	
(2)	消費電流	作動時	平均 30 mA 以下
		スタンバイ時	10 mA 以下
(3)	外部インターフェイス	SAIL	
(4)	周波数安定度	10 <sup>-9</sup> /年	GPS校正あり
		10 <sup>-7</sup> /年	外部校正なし
(5)	温度特性	2×10 <sup>-8</sup> /℃	
(6)	サンプルクロック精度	409.6 kHz ±0.1 Hz	
(7)	外形寸法	160W×120D×166H	
(8)	重量	2 kg 以下	
2. 環境性能			
(1)	作動温度	-5 ~ 50 ℃	
(2)	精度保証範囲	0 ~ 35 ℃	
(3)	振動	2 G (10 ~ 20 Hz)	
(4)	衝撃	20 G	

表2 ルビジウム発振器の性能

Table2 Specification of Rubidium oscillator

項目	性能	備考		
周波数安定度	長期安定度	$<2 \times 10^{-11}$ / 月		
	短期安定度	$<1 \times 10^{-11}$ /sec rms $3 \times 10^{-12}$ /10sec rms $1 \times 10^{-12}$ /100sec rms		
	周囲温度変化	$<\pm 1.5 \times 10^{-10}$	+25 °C ± 25 °C	
	電源電圧変化	$<\pm 1 \times 10^{-11}$ / V		
	立ち上がり特性	$<2 \times 10^{-10}$	電源投入後 20 分 Ta=+25 °C	
周波数調整範囲		$>2 \times 10^9$		
		$\pm 1.5 \times 10^9$ / 0 ± 1V		
出力	周波数	10 MHz		
	レベル	$>0.5$ V rms / 50 Ω		
入力供給電圧		DC+24 V ± 2 V		
消費電力		$<17$ W	Ta=+25 °C (安定時)	
外形寸法		110W × 123D × 89H		
重量		約 2.5 kg		
振動・衝撃	電源 ON 時	振動	10 ~ 30 Hz	加速度 2G 以下
		衝撃	20 G 以下	
	電源 OFF 時	振動	10 ~ 45 Hz	加速度 3G 以下
		衝撃	30 G 以下	

表3 GPS受信機の性能

Table3 Specification of GPS receiver

項目	性能
チャンネル数	6チャンネル
衛星取得数	8個
距離精度	100 m 以下
受信周波数	1,575 MHz
ボーレート	4,800 bps
立ち上がり時間	90 秒以下 (バックアップ電池あり)
電源電圧	DC 9 ~ 32 V
消費電力	1.85 W

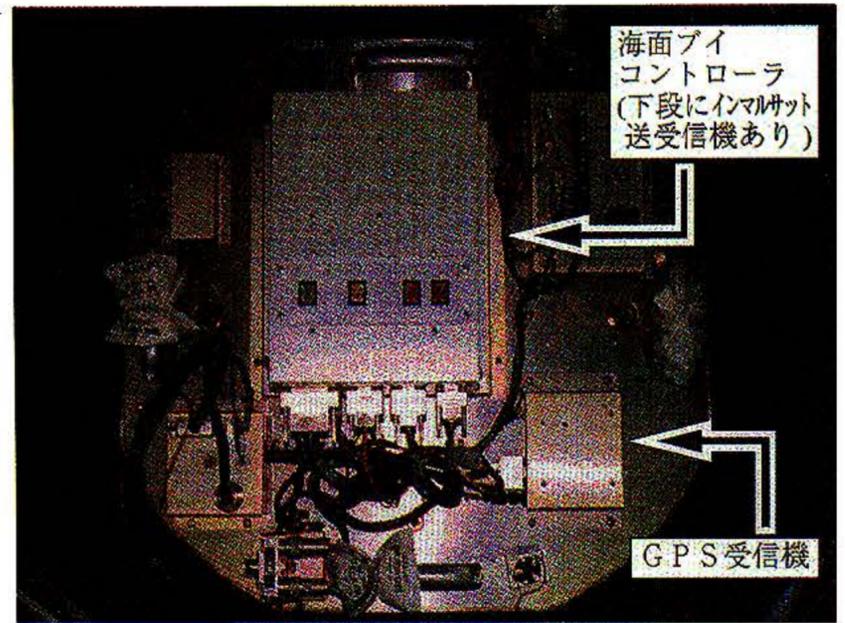


写真2 海面ブイ電子回路部

Photo 2 Electronics in the surface buoy

(3) GPS受信機

海面ブイの電子回路部を写真2に示す。写真の右下にあるケースがGPS受信機の本体である。アンテナは、衛星による観測データを伝送するインマルサット送受信機のものと同じである。表3にGPS受信機の仕様を示す。

4 高精度クロックの動作について

高精度クロックの動作全体のフローチャートを図5に示す。高精度クロックは、トランシーバー電子回路部内で常に電力供給されている唯一の装置であり、コマンドやデータの受け渡しにはSAIL (Serial ASCII Interface Loop) による全ユニット共通のバスラインを使用している。イベントの起動については、前節に示した二重校正方式によって精度を保持している高精度クロックが管理している。本節では高精度クロックの動作について述べる。

4.1 通常時の動作

電源が投入された直後、高精度クロックは初期化と外部リセットの判定を行う。判定終了後、高精度クロックのCPUはスリープモードに切り替わる。これは消費電力を抑えるためである。ここでは、高精度クロックのCPUが全般的に行っている割り込み処理、コマンド処理、スケジュール展開、イベント管理、温度補正、そしてドリフト補正の詳細について示す。

4.1.1 割り込み処理

CPUのスリープモードは、以下に説明する1秒信号とSAILデータ受信の割り込み処理により解除され各処理を行う。割り込みの処理フローを図6(a), (b)に示す。

(1) 1秒信号による割り込み (割り込み処理1)

高精度クロックは、内部の水晶発振器出力 (32.768 kHz) をリアルタイムクロック回路 (以下RTC) により分周した1秒信号による割り込みが発生するごとに、内

部時刻を1秒進める。割り込み処理終了後、イベント起動時刻・ドリフト補正実施時刻・温度補正実施時刻と比較され、時刻が一致した場合、前述した対象となる各処理を開始する（各処理の内容は後述）。該当時刻でなければ、高精度クロックはCPUを再度スリープモードに設定する。

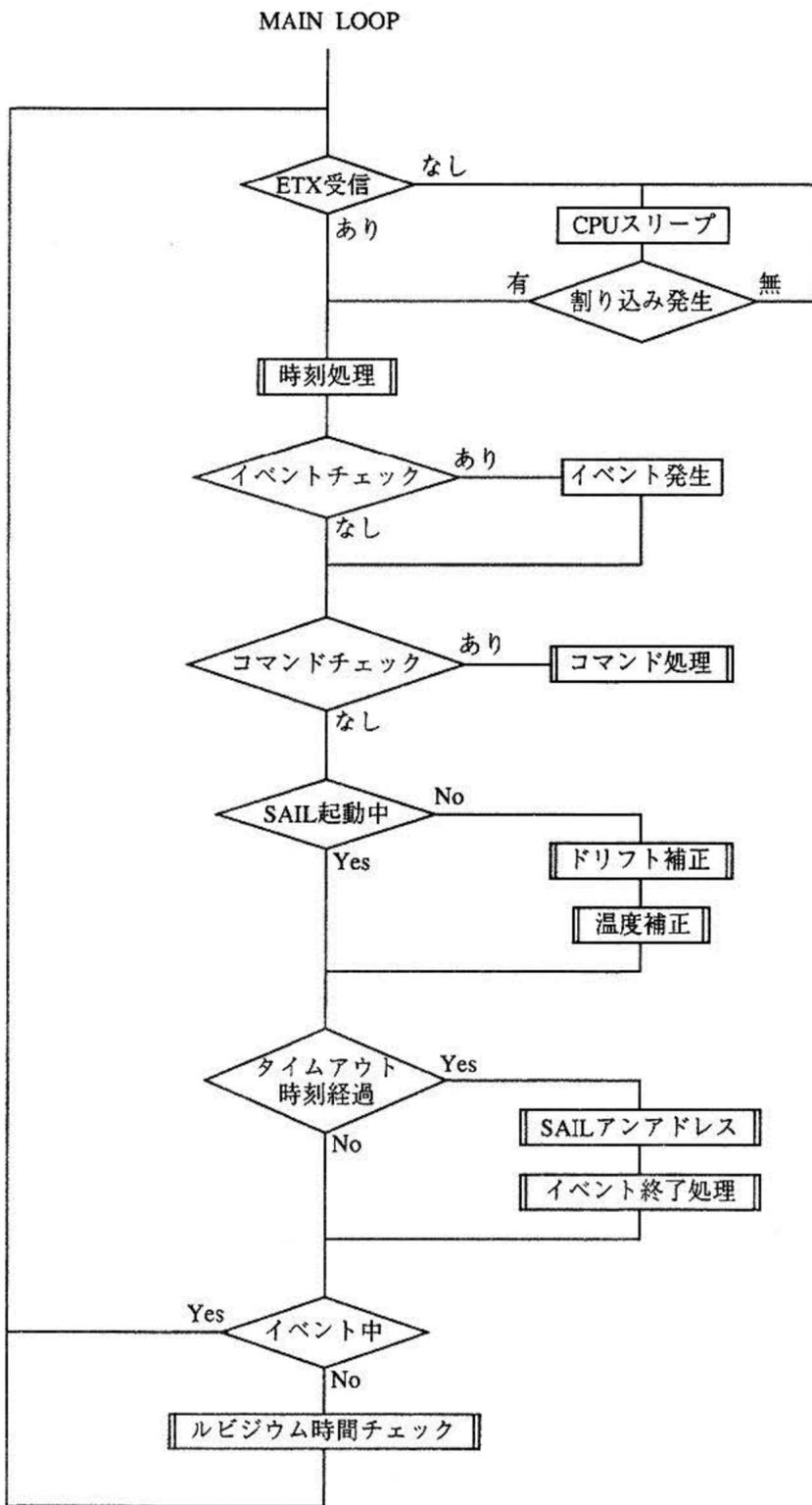


図5 高精度クロックのメイン動作フロー  
Fig. 5 Main operation flow diagram for highly accuracy clock

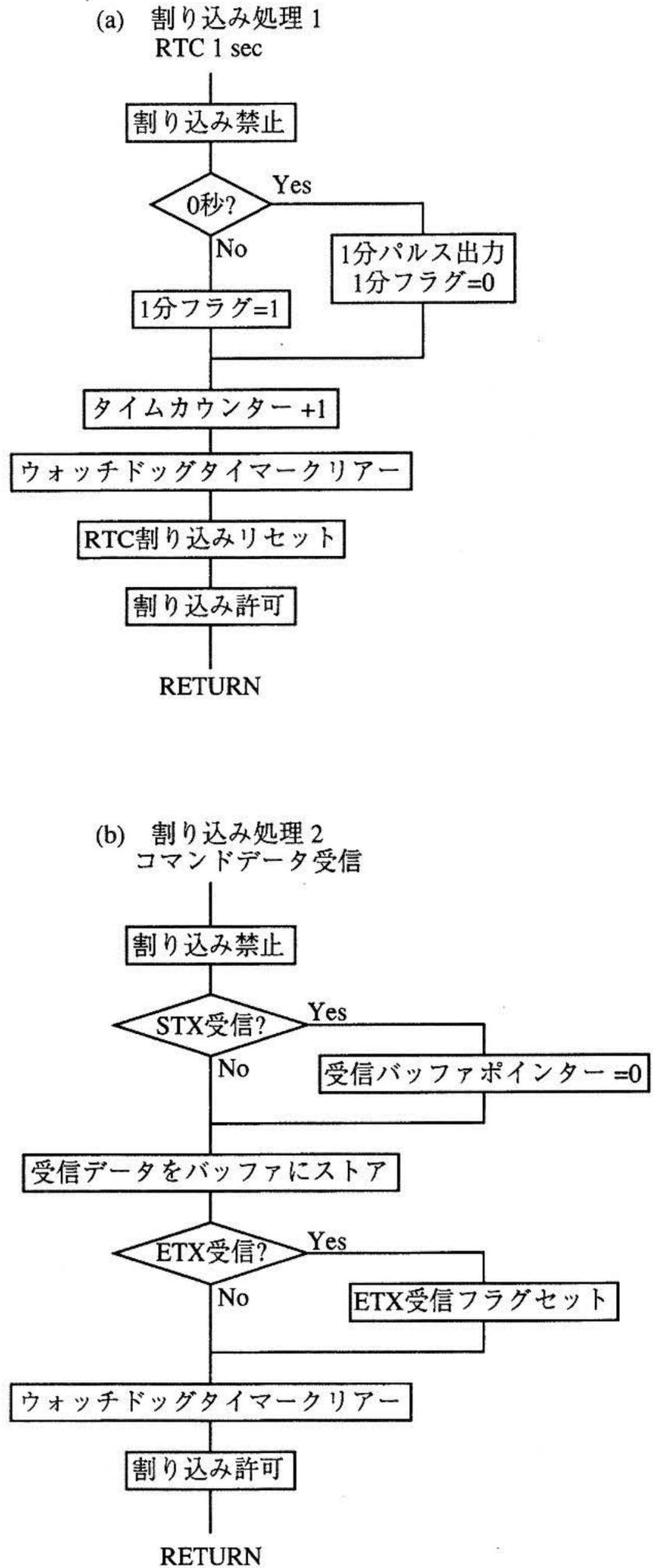


図6 高精度クロックの割り込み処理フロー  
(a)RTCによる割り込み, (b)コマンドデータ受信による割り込み  
Fig. 6 Interrupt processing flow diagram for highly accuracy clock. Interrupt by RTC (a) and by command data reception (b)

(2) コマンドデータ受信により割り込み（割り込み処理2）

制御部からコマンドデータを受信すると、受信データをバッファへ保存する。受信データの最後にコマンドエンドデータ（ETX）を受信した場合、割り込み処理終了後コマンド処理が行われる（次項参照）。EXTを受信していない場合、CPUはコマンド処理を行わない。割り込み終了後、CPUは受信コマンドの判定を行う。コマンドによる起動がされていない場合は、CPUは起動コマンドのみを対象としてコマンドチェックを行う。すでにコマンドによりCPUが起動している場合は、CPUは起動元アドレスとコマンド送信元アドレスの比較を行い、一致したときのみデータ（コマンド種別・コマンド長）チェックを行い、コマンド処理の実行に移る。アドレスが一致しない場合、CPUはコマンド処理を行わない。

4.1.2 コマンド処理

コマンドエンドデータの受信後、制御部からのコマンドは、CPUにおいて以下の手順で処理される。CPUにおけるコマンド処理フローを図7(a), (b)に、コマンド表を表4に示す。

(1) コマンドによる起動がされていない場合（コマンド処理1）

- ① 入力されたコマンドが起動コマンドであるかをチェックする。
- ② 起動コマンドの場合、起動元アドレスを記録する。

(2) 制御部からのコマンドによって起動されている場合（コマンド処理2）

- ① 制御部のアドレスと、今回のコマンド送信元アドレスを比較する。
- ② アドレスが一致する場合、コマンドの文字とテーブルデータの比較を行う。テーブルデータにはすべてのコマンド文字列が登録されている。
- ③ コマンドコードに登録されているコマンドの場合、コマンドの全バイト長を比較する。

以上に示した判定処理を経て、コマンドが正常である場合、各処理を実行する。コマンドに異常がある（コードがない、バイト数が合わない等）場合は、処理を行わない。受信可能なコマンドの種類は、イベントの発生中または待機中にかかわらず、常にすべてのコマンドが実行可能で、発生したイベントの種類等によって変わるこ

とはない。本文中の起動というものは、SAILによる通信が可能な状態をさしている。

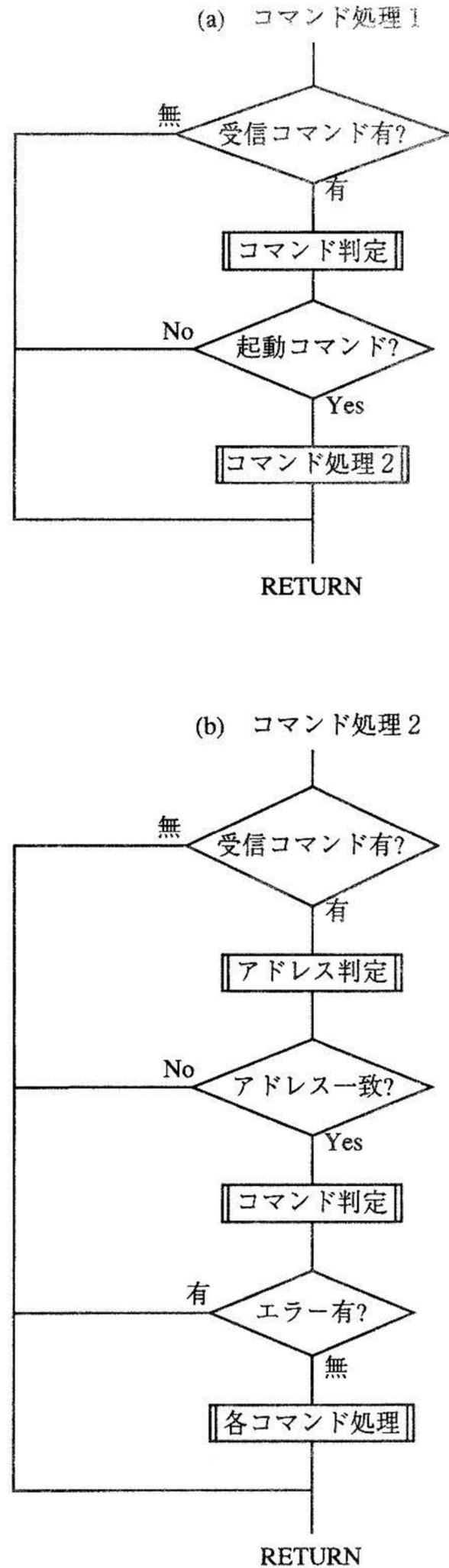


図7 高精度クロックのコマンド処理フロー  
 (a) コマンド処理1, (b) コマンド処理2  
 Fig. 7 Command processing flow diagram for highly accuracy clock.  
 Command processing 1(a) and 2(b)

表4 高精度クロックコマンド表

Table 4 Command sets of highly accuracy clock

コマンド内容	入力コマンド	バイト数	出力コマンド	バイト数	備考
通信可能指示	STX,#60:61,ETX	10	STX,%60:61,ETX	10	
通信終了指示	STX,#60,ETX	7			出力コマンドなし
イベント情報読み出し	STX,%61:IEV,ETX	11	STX,&61:IEV,イベントタイプ, イベント時刻(データ),ETX		
メモリーデータ読み出し	STX,%61:RDD,アドレス,データ数,ETX	19	STX,&61:RDD,D1,D2,...,Dn,ETX	11+3*n	nはデータ数
時刻校正結果読み出し	STX,%61:KRD,ETX	11	STX,&61:KRD,G/R/N時刻,データ,ETX	135	
メモリーデータセット	STX,%61:WRT,アドレス,データ数, D1,D2,...,Dn,ETX	19+3*n	STX,%61:WRT,ETX	11	nはデータ数
イベント終了通知	STX,%61:END,ETX	11			出力コマンドなし
GPS 時刻セット	STX,%61:GPS,D,H,M,ETX	22	STX,%61:GPS,ETX	11	
スケジュールデータセット	STX,%61:SCG,スケジュールデータ,ETX	13,500	STX,%61:SCG,ETX	11	
現在時刻読み出し	STX,%61:TMR,ETX	11	STX,&61:TMR,D,H,M,S,ETX	25	
診断指示	STX,%61:TST,ETX	11	STX,%61:TST,D1,D2,D3,D4,ETX	22	D1,D2,D3,D4は診断結果
409.6kHz出力制御	STX,%61:CLK,0/1,ETX	13	STX,%61:CLK,ETX	11	0:OFF 1:ON
GPS NG 通知	STX,%61:GNG,0/1,ETX	13	STX,%61:GNG,ETX	11	0:GPS NG 1:GPSオフライン
時刻セット	STX,%61:STM,D,H,M,S,ETX	25	STX,%61:STM,ETX	11	
作動積算時間読み出し	STX,%61:CTT,ETX	11	STX,&61:CTT,積算時間,ETX	20	
作動積算時間リセット	STX,%61:CTR,ETX	11	STX,%61:CTR,OK,ETX	14	
診断イベント起動指示	STX,%61:CHK,ETX	11	STX,%61:CHK,ETX	11	

#### 4.1.3 スケジュール展開

高精度クロックは、内部のメモリに書き込まれているスケジュールデータからイベントの起動を読みとるために、スケジュールデータを並べ替える作業を行う。この処理をスケジュールの展開という。スケジュールの展開は以下のタイミングで行う。

##### (1) スケジュールデータ受信直後

SAILコマンドにより制御部からスケジュールデータ受信後、CPUはスケジュールデータの総バイト数が規定値であることを確認し、そしてデータを展開する。CPUはスケジュールの展開が終了するとスケジュールデータ受信コードを制御部に返送する。

##### (2) イベント終了処理後

イベント終了処理において制御部の電源制御信号をOFFにした後、CPUはスケジュールデータを展開し、現在時刻に最も近いスケジュールのイベントと、その発生時刻を決定する。もしイベント発生中に、他のイベントの発生時間を経過してしまった場合は、そのイベントは無視される。

#### 4.1.4 イベント管理

図3に示した各種イベントの発生は、前項で説明した、高精度クロックが管理する展開したスケジュールデータから判断し、その発生時間になると、高精度クロックが制御部の電源ON/OFF信号をONにすることによって行う<sup>11)</sup>。イベント発生後、制御部からのイベント情報読

み出しコマンドにより、現在のイベントの種類を制御部へ返送する。1つのイベントがイベント終了コマンドの受信によって終了するまで、高精度クロックは制御部からのコマンドを待つ状態になり、自らなんらかのアクションを起こすことはない。例えば、時刻校正イベントにおいても、イベント要因の質問コマンドに答えるだけであり、その後のGPSの起動等の操作は制御部側の判断で行う。ただし、所定の時間を過ぎてもイベントが終了しない場合のみ、イベントの強制終了を行う。

イベントの終了時には、制御部の電源ON/OFF信号をOFFにする。

#### 4.1.5 ドリフト補正

周波数の補正は図8(a)に示すように、本項で説明するドリフト補正と、次項で説明する温度補正により行われる。ドリフト補正の動作フローを図8(b)に示す。ドリフト補正は、以下に示す(3)・(4)式により算出されたドリフト量と逆の変化を制御電圧に与える。ドリフト補正では、時刻校正間隔中のドリフト量は一定で、ドリフトにより周波数は時間の1次関数として表せると考えて、補正を行う。実際には、ドリフト量は対数的に変化し、一定環境においては時間とともに落ちつく傾向がある。したがって長期ドリフトの補正を行うにあたって校正間隔の基準を1日とすると、この間を直線で近似して考えても大きな誤差は生じない。

いま周波数誤差 $\Delta f$ は

$$\Delta f = at + b \quad (3)$$

という式で表すものとする。

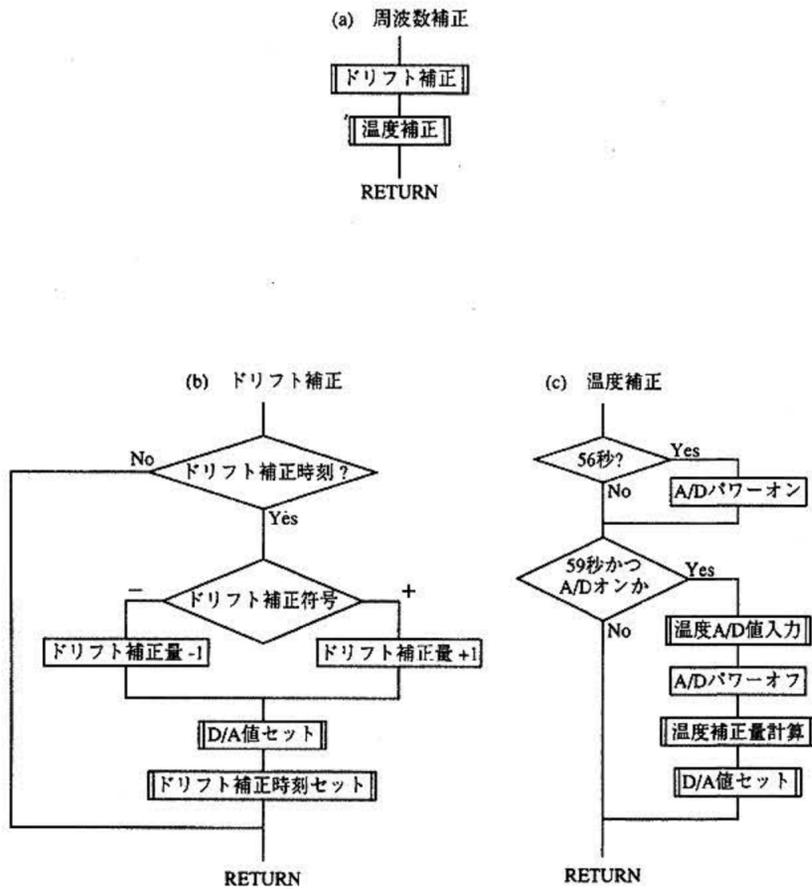


図8 高精度クロックの周波数補正処理フロー  
 (a)周波数補正, (b)ドリフト補正, (c)温度補正  
 Fig. 8 Frequency correction processing flow diagram for highly accuracy clock.  
 Frequency correction(a), drift correction(b) and temperature correction(c)

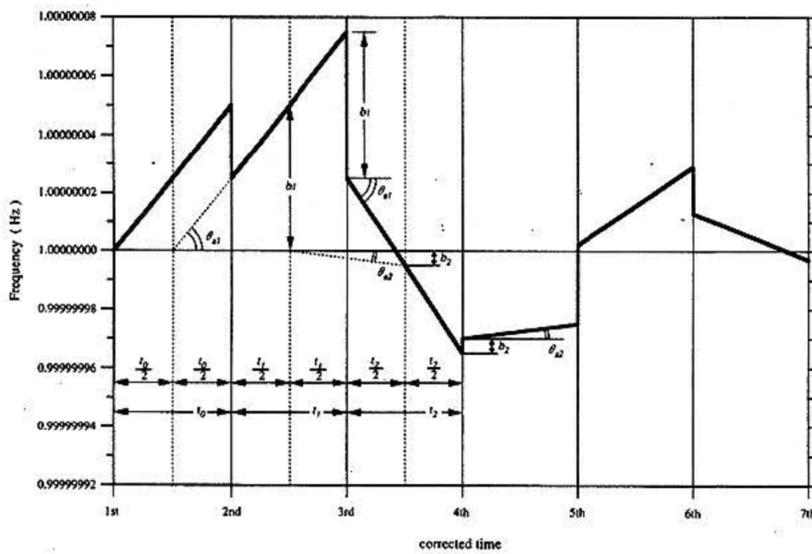


図9 ドリフト補正の模式図  
 Fig. 9 Convergence of the clock error by a drift compensation

1回目の時刻校正では時刻ずれ $\Delta t$ を計測する。2回目の時刻校正では $\Delta t$ を計測し、1回目からの経過時間 $t_0$ により平均誤差周波数 $\Delta f = \Delta t / t_0$ を得る。これにより $a=0$ ,  $b = \Delta f$ とし、周波数補正量を $b$ だけ補正する。3回目の時刻校正では前々回から前回までの経過時間を $t_0$ とし、前回から今回までの経過時間を $t_1$ とすると、

$$\begin{aligned} \Delta f &= \Delta t / t_1 \\ a &= 2 \times \Delta f / (t_0 + t_1) \\ b &= \Delta f \end{aligned} \quad (4)$$

を得、ドリフト補正量を $a$ だけ補正し、周波数補正量の現在値を $b$ だけ補正する。以下、同様にして1回前の計測値と今回の計測値の2つから、 $a$ と $b$ の2変数を求める。ドリフト補正についての模式図を図9に示す。図中において、角度 $\theta_a$ は、 $\theta_a = b / t$ である。実際には図中に示すように、 $a$ と $b$ の補正量は、 $t/2$ のタイミングにおける値により比較・決定され、補正される。

#### 4.1.6 温度補正

温度補正の動作フローを図8(c)に示す。温度に対する周波数の補正は、水晶振動子へ印加する電圧を修正することによって補正している。温度補正に用いられるA/Dコンバーター及びD/Aコンバーターは図4の水晶発振回路に取り付けられている。温度センサーの電圧出力は約1V~3.5Vである。これが水温0度~35度の範囲に対応している。A/Dコンバーターの入力レンジは0~5Vで分解能は16ビットである。このことから温度に換算した分解能は約0.001度/1LSBとなる。

温度による発振周波数の変化は、厳密には時定数を持ち、外部温度が変化した後の周波数変化は時間の関数になる。このため、もし外部温度が一定の割合で変化することを考えると、実際の周波数の動きは複雑になる。

高精度クロックでは温度の時間変化による補正は行わず、ある温度点で一義的に求められる補正項のみの計算を行っている。高精度クロックの使用状況を考慮すると、温度変化が最も激しいのは、船上から海中にトランシーバーを投入した直後で、係留後、観測点での温度変化は緩やかになっている。このため投入直後だけのために、温度による補正テーブルを時間の関数まで考慮して複雑にする必要はなく、観測点で最初のGPSによる時刻校正が行われるまでのあいだに一定精度を保てればよい。一度時刻校正が行われれば、投入期間中の温度変化による周波数変動から生じる時刻誤差は、後の精度に影響を与えることはない。

温度の補正值は、A/D変換した値から、対応するD

／Aの補正値を、内部演算の32ビット浮動小数点を用いて求める。温度による補正係数は最終的に発振回路のD／Aコンバーターの値を修正し、電圧を変化させることで補正している。温度校正は1分に1回行うが、消費電力を低減させるために以下のように制御を行っている。

- ① 秒の単位の値が56秒のとき、A／Dコンバーターのパワーダウンモードを解除、発振器の温度計回路電源を投入
- ② 秒の単位の値が59秒のとき、A／Dコンバーターを起動して温度を計測
- ③ 計測終了後、A／Dコンバーターをパワーダウンモードに設定  
発振器の温度計回路電源を切断
- ④ 補正項を計算し、D／Aコンバーターに制御電圧を設定  
D／Aコンバーターは、水晶振動子への印加電圧を設定された電圧値に修正し、温度に対する変化を補正する

#### 4.2 時刻校正時の動作

時刻校正は、高精度クロック作動開始から72時間までは12時間、以降24時間ごとに実行する。前回校正時刻より午前・午後もしくは日付が更新されると、現在設定されている次のイベント起動時刻まで15分間以上時間がある場合には、現在時刻の10秒後に時刻校正イベント起動を設定する。

15分以内に次のイベントが設定されている場合には、次のイベントが終了後再び同じチェックを行う。

##### (1) 正常にGPSが受信できる場合

GPSによる時刻校正の動作手順を以下に示す。

- ① 電源ON／OFF信号をONにし、イベントを起動する。
- ② イベント起動後、制御部からのイベント情報要求コマンドに対し、時刻校正イベントであることを返送する。
- ③ 制御部からGPS時刻セットコマンドにより、GPS1秒信号入力開始時刻を入力する。前回時刻校正成功からの、時刻誤差エラーによる時刻校正NGが4回以上のときには、強制時刻整合を行う。強制時刻整合では、GPS1秒信号の入力により高精度クロックの時刻をGPS1秒信号入力開始時刻に設定する。時刻誤差エラーによる時刻校正NGが3回以内で、入力された時刻が現在時刻以前も

しくは現在時刻から3分以上間隔がある場合には、時刻誤差エラーとなり時刻校正終了を返送する。GPS1秒信号が規定時間内に入力されないときには、GPSエラーとなり時刻校正終了を返送する。

- ④ 1分パルスとGPSからの1秒信号の入力を監視する。
- ⑤ GPSと高精度クロックの時間誤差を、高精度クロックのCPU内蔵の32ビットカウンターにより計測する。
- ⑥ GPS1秒間を、高精度クロックのCPU内蔵のカウンターにより計測し、内蔵カウンターのキャリブレーションを行う。GPS1秒間カウント値が規定範囲外のときには、時刻誤差エラーとなり時刻校正終了を返送する。時刻誤差カウント値とGPS1秒間カウント値から、時刻誤差値を秒単位で計算する。
- ⑦ スケジュールデータで設定された時刻校正しきい値を時刻誤差値が越えたときには、時刻誤差エラーとなり時刻校正終了を返送する。正常に時刻誤差を計測したときには、時刻補正を行う。時刻誤差値と、前回の時刻校正から今回までの時間により平均周波数誤差・ドリフト補正値を計算し、時刻校正終了を返送する。

##### (2) ルビジウム発振器で時刻校正を行う場合

GPSによる時刻校正が正常に行えない状態が規定日数(30日間)続いた場合、内蔵するルビジウム発振器の10MHz信号から、高精度クロックの周波数誤差を計測し校正する。周波数誤差計測値と校正間隔により、ドリフト補正値を算出する。しかし、この校正方法では絶対時刻がわからないため、時刻の修正は行わない。ルビジウム発振器による校正では、校正が終了し10秒後にイベントが発生する。ルビジウム発振器による時刻校正の動作手順を以下に示す。

- ① ルビジウム発振器の電源ON／OFF信号をONにする。
- ② 20分間ウォームアップする。
- ③ ウォームアップ後、温度補正を行う。
- ④ 高精度クロックの100秒間に、高精度クロックのRTCに内蔵されている16ビットカウンターでルビジウム発振器の10MHz信号をカウントし、ルビジウム発振器の電源ON／OFF信号をOFFにする。
- ⑤ 計測したカウント値から現在の周波数誤差を計算し、補正する。

- ⑥ 前回のルビジウム発振器による校正から今回の校正までの時間より、ドリフト補正値を計算する。
- ⑦ 校正終了後、現在時刻の10秒後にルビジウム校正終了イベント起動をセットする。

カウントは、RTCの16ビットカウンターを用いて100秒間ルビジウム発振器の出力の10MHzをカウントする。100秒間の時間基準は、クロック内部の発振であるから、このカウンター値によって、クロック内部の発振周波数の精度を $10^{-9}$ のオーダーで計測できる。10MHzの周波数を100秒間カウントするためには、実際は10桁のカウンターが必要になる。しかし周波数誤差を最大 $1 \times 10^{-6}$ としても実際に使用するはこのうちの下4桁で、上桁は一定である。このため16ビットカウンターを用いて、上の桁がオーバーフローしても問題はない。現実には16ビットカウンターは65,535を越えると0に戻るので、もし内部周波数とルビジウム発振器の周波数が一致していたとすると、16ビットカウンターの値は100秒間で $10 \times 10^6 \times 100 - \text{int}(10 \times 10^6 \times 100 / 65,536) = 51,712$ になる。ここでintとは、 $10 \times 10^6 \times 100$ 以下で65,536の倍数の最大値をあらわす。この値を中心にして $\pm 32,768$ の範囲で内部周波数の進みまたは遅れが計算される。つまり16ビットカウンターの計算値から $51,712 - 32,768 = 18,944$ 以内の場合は、内部周波数は遅れており、それ以外の場合は進んでいると判断される。

### 4.3 リセット時の動作

リセットは陸上の解析装置でデータを見ていて、動作がおかしい、スケジュールの変更がかからない、高精度クロックの暴走が認められる等の状況に陥ったときに行う処置である。

リセット信号は、ハードウェアのリセット端子により直接CPUへ入力されるので、すべての動作に優先して行われる。リセット信号受け付け後、プログラムはリセット要因レジスタの値をチェックする。海面ブイから10 msec以上のパルス幅をもつリセット信号を入力すると強制リセット処理を実行する。以下にその動作手順を示し、動作の概要フローを図10に示す。

- ① 高精度クロック内の時刻データのクリア
- ② 校正データのクリア
- ③ スケジュールデータのクリア
- ④ 制御部用メモリのクリア
- ⑤ 衛星受信データ読み出しイベント起動によりスケジュールデータの取得
- ⑥ 衛星受信データ読み出しイベントでスケジュー

ルデータが入力されなかった場合は、HDDスケジュール読み出しイベントを起動してスケジュールを取得する。

- ⑦ 診断イベント起動
- ⑧ GPS校正イベント起動による時刻の整合を行う。

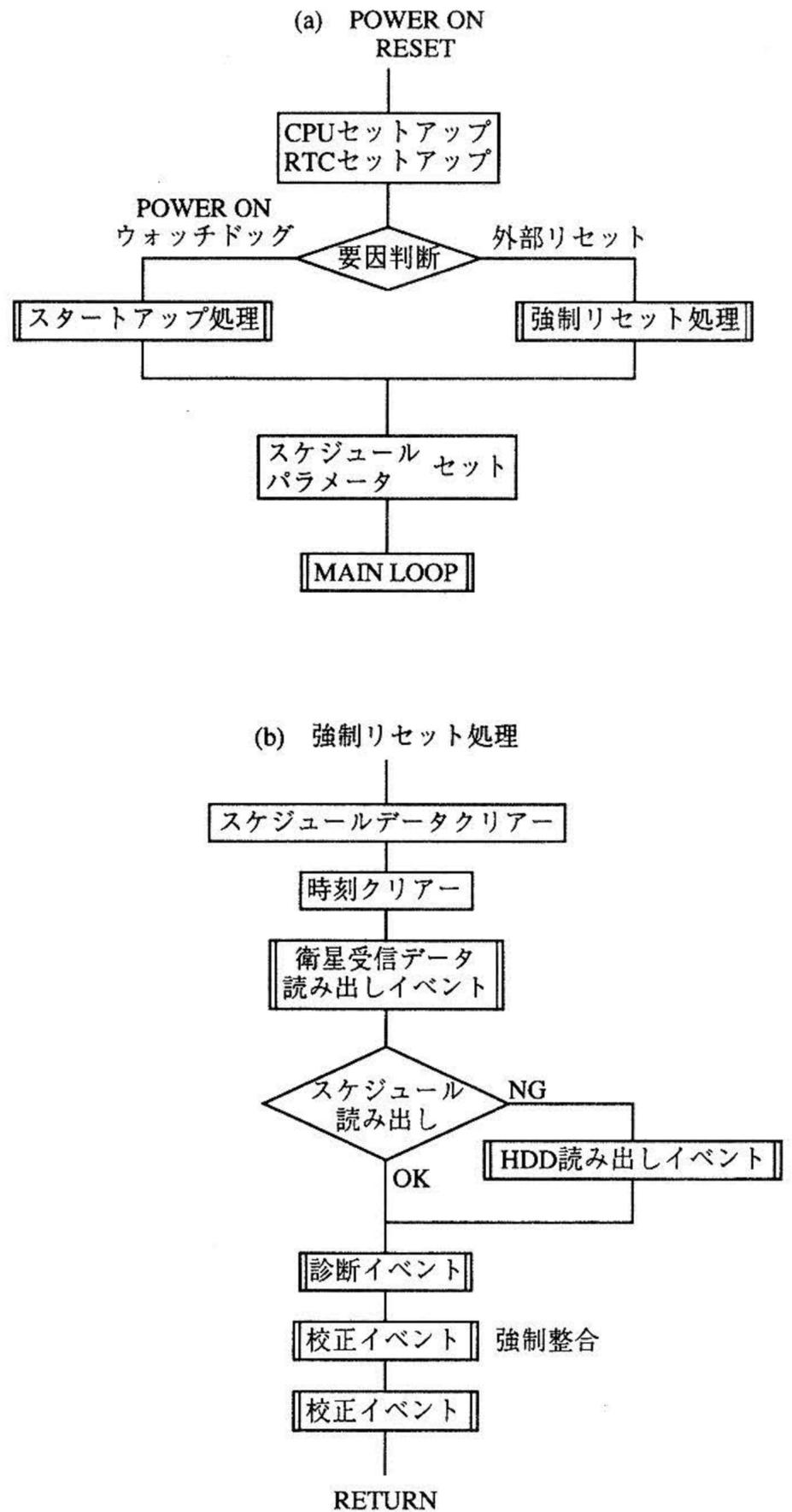


図10 高精度クロックの強制リセット処理フロー  
(a)パワーオンリセット, (b)強制リセット

Fig.10 Reset processing flow diagram highly accuracy clock.

Power on reset (a) and forcet reset (b)

## 5 海域実験例

海洋科学技術センターは、1997年7月から1997年9月にかけて伊豆小笠原海溝東方の黒潮続流域でトモグラフィー観測を行った(図11)。この観測は、トランシーバーを5基用いて黒潮続流域の水温変動をモニタリングするものである。この実験期間中、観測地点S1(北緯36°12′東経145°09′)に設置したトランシーバー5号機の海面ブイが、GPSパルス信号を受信できない状態になった。この状態は3.2節で述べた緊急時である。本節では、この緊急時以降も、二重時刻校正システムにより、時刻精度を保持できたことについて報告をする。

トランシーバー5号機は、1997年7月9日に観測点に設置された。時刻校正を行ったときの周波数誤差を図12に示す。設置時は周囲温度の変化により、周波数誤差は大きく揺らいでいた。その後、誤差変動は徐々に収束している。設置時から7月25日0時(UT)まで、二重時刻校正システムは、GPSパルス信号を用いて時刻校正を行っていた。しかし、7月26日0時(UT)から、GPSを用いた時刻校正が行えない状況が発生し始めた(時刻校正不能時は誤差が0を示す)。その後、GPSを用いた時刻校正は8月7日のみである。このことから、8月7日までは衛星通信用アンテナは無事であったと推測できる。海面ブイが水没後(もしくはアンテナ破損後)、高精度クロックは時刻校正イベントを1日平均16回ずつ発生させている。このイベント発生動作は、回収されたHDDに書き込まれているイベント発生記録から確認することができた。この時刻校正イベントは、送信・受信イベントの間で行われている。しかし、高精度クロックが、イベントスケジュールの管理を行っているため、頻繁に行われている時刻校正イベントが他のイベントに影響することはない。

1997年8月8日から、GPSによる時刻校正が不能になった。このため、二重時刻校正システムは、内蔵するスケジュールに従い、1997年9月6日にルビジウム発振器を用いて高精度クロックを時刻校正(周波数誤差校正)を行っている。

回収直後、高精度クロックの時刻誤差と周波数のドリフト量誤差を確認した。時刻誤差 $\Delta d$ は $4.492 \times 10^{-3}$ secで、この時刻誤差は、GPSによる校正ができなくなって以降53日間( $C=3,600 \times 24 \times 53$ 秒)の積算値となる。そのため(1)式に当てはめ、精度 $T$ を検証すると、

$$\begin{aligned} T &= \Delta d / C \\ &= 4.492 \times 10^{-3} / (3,600 \times 24 \times 53) \\ &= 9.81 \times 10^{-10} \end{aligned}$$

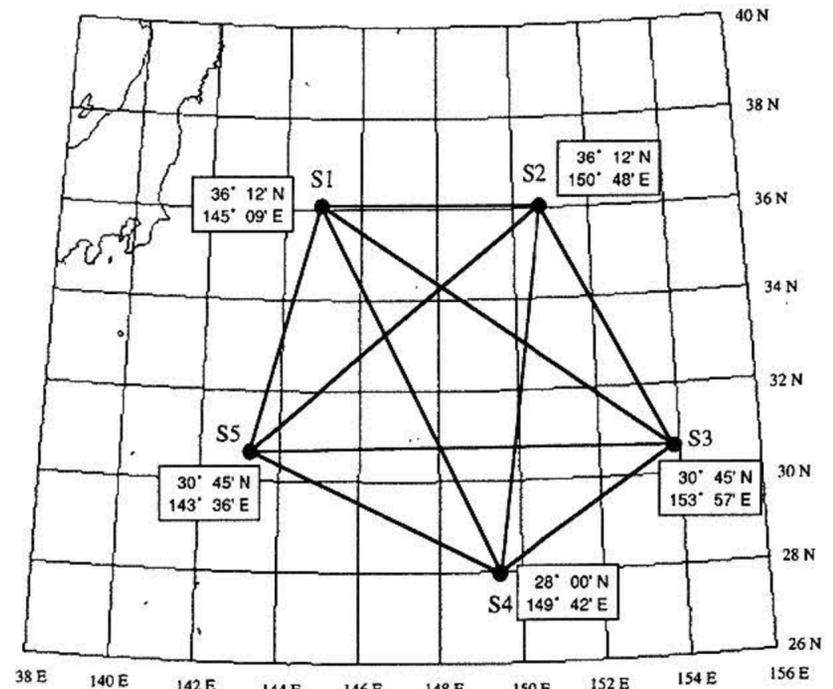


図11 実験海域図

Fig.11 Deployment positions for transceiver mooring systems

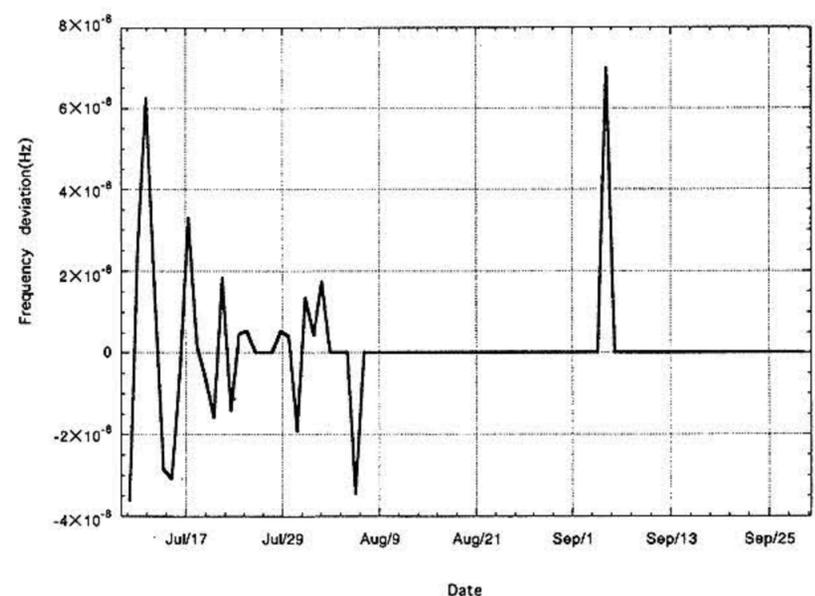


図12 時刻校正結果(周波数誤差)

Fig.12 Result of time correction (Frequency error)

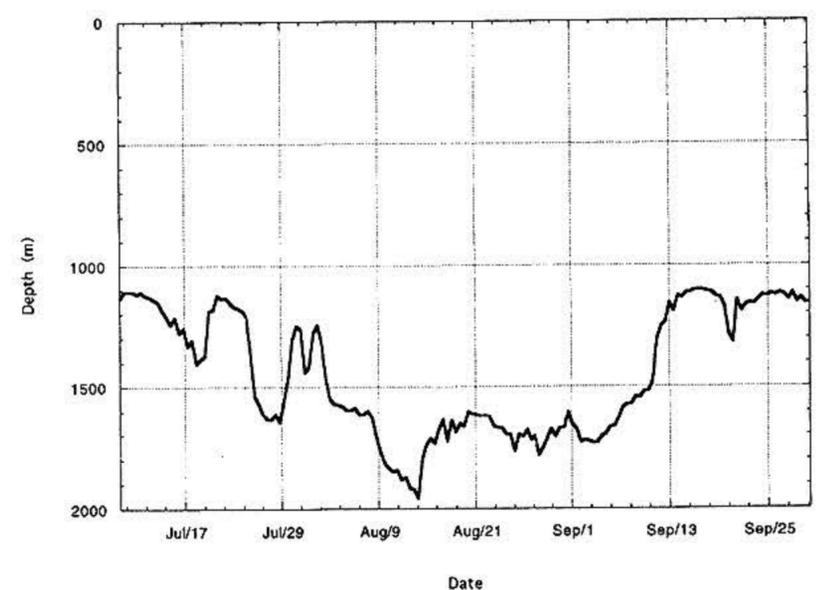


図13 トランシーバーの挙動(深度)

Fig.13 Variation of the depth for the transceiver in mooring

となる。絶対的な精度はGPSによる校正を1日1回行うという条件が加味されたものであることを考慮すると、この誤差でも十分に評価できる。

周波数のドリフト量誤差 $\Delta k$ は $1.18 \times 10^{-7}$  (Hz)であった。この周波数のドリフト量誤差は(2)式で示したトモグラフィーの周波数要求精度 $2.77 \times 10^{-6}$  (Hz)の許容誤差範囲内であり、位相誤差角度 $\theta_R$ は(2)式より

$$\begin{aligned}\theta_R &= \Delta k \times (360 \times T_f \times f_0) \\ &= 1.274^\circ\end{aligned}$$

となり、ピーク検出データの劣化は $\cos 1.274 \approx 0.9997$ より0.03%以下に収まることがわかる。

9月6日に行われた時刻校正の結果を、回収されたHDDから読み出してみると、周波数のドリフト量誤差は、ルビジウム発振器による校正を用いた結果、図12に示すように、 $6.98 \times 10^{-8}$  (Hz)となっている。この結果も(2)式で示したトモグラフィーの周波数要求精度 $2.77 \times 10^{-6}$  (Hz)の範囲内であることが確認できた。

さらに、トランシーバー回収後、GPSによる校正ができなくなったのは、アンテナドームが破損したためであることが確認された。アンテナを保護しているアンテナドームは電波の透過性を考慮して樹脂材(超高分子ポリエチレン)を用いている。このアンテナドームが、回収されたHDDに書き込まれているトランシーバーの深度データ(図13)から推定すると、水深600~700mまで水没し圧壊したと推測される。その時の水圧によりアンテナドームが押しつぶされ、中にあるアンテナまでもが破壊された。この時点より、トランシーバーは時刻校正とデータ伝送も不可能となってしまったが、トモグラフィー観測は上述のように精度よく継続することができた。

## 6 まとめ

今回の実験結果より、各トランシーバーに内蔵された高精度クロックは、スケジュールに従いイベントを正確に管理・発生させることができていた。また、GPSによる時刻校正不能に陥った場合においても、高精度クロックがスケジュール動作を遂行する合間に、プログラムどおりの動作を行っていることも確認できた。時刻精度についても、設定した要求精度を実現していることがわかった。このことから、取得された観測データの信頼性は高い。我々は、この観測データを用いて黒潮続流域の水温変動をモニタリングすることに成功した<sup>12),13)</sup>。

来年度は、米国との共同観測を予定している。この計画は、トモグラフィーを用いて熱帯赤道域で2年間観測を行うものである。これにより不安定波動など赤道域の

中規模変動や、エルニーニョのメカニズム解明に寄与できると考えられる。

文末にあたり、システム製作を担当し、海上実験における設置回収及び、衛星伝送されてくるデータの解析に協力いただいた沖電気関係者各位、実海域でシステムの設置回収作業を支援していただいた「かいよう」乗組員各位に対し、ここに深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) W. H. Munk and C. Wunsch : Ocean acoustic tomography : a scheme for large scale monitoring. Deep Sea Res., 26, 123-161. (1979)
- 2) W. H. Munk, P. F. Worcester and C. Wunsch : Ocean Acoustic Tomography. Cambridge University Press, New York, 433pp. (1995)
- 3) P. F. Worcester, D. A. Peackham, K. R. Hardy and F. O. Dormer : AVATAR : second-generation transceiver electronics for ocean acoustic tomography. In Oceans'85 : Ocean Engineering and the Environment (12-14 Nov. 1985, San Diego, CA), IEEE, 654-662. (1985)
- 4) 中村敏明・中埜岩男・土屋利雄・網谷泰孝・越智寛・藤森英俊・新家富雄・榊田尚志・海法宇治・中西俊之 : 200Hz送受信システムの開発. 海洋科学技術センター試験研究報告, JAMSTECR, 34, 103-113. (1996)
- 5) 中埜岩男・中村敏明・榊田尚志・藤森英俊 : 四国沖における1000km双方向音波伝搬試験, 海洋音響学会研究発表会講演論文集, 75-78. (1996)
- 6) 藤森英俊・中埜岩男・中村敏明・袁剛・茨田和生・木邑純一 : 西太平洋熱帯赤道域における音響トモグラフィー観測実験, 日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 97-98. (1997)
- 7) I. Nakano, T. Tsuchiya, Y. Amitani, T. Nakanisi, N. Yamagami and H. Kamata : Giant magnetostrictive acoustic transducer of oceans, Proc. of Intern. Symp. on Giant magnetostrictive Materials and their Applications, 77-82. (1992)
- 8) 新家富雄・土屋利雄・網谷泰孝・中埜岩男・中西俊之・吉川隆・鎌田弘志 : 200Hz低周波音源の開発. 海洋科学技術センター試験研究報告, JAMSTECR, 29, 53-61. (1993)
- 9) 中村敏明・土屋利雄・中埜岩男・中西俊之・海法宇治・吉川隆・鎌田弘志 : 海洋音響トモグラフィー

用200Hz低周波音源. 海洋音響学会誌, vol. 21, (3), 26-35. (1994)

- 10) 中村敏明・中埜岩男・土屋利雄・中西俊之・吉川隆・海法宇治・鎌田弘志: 200Hz海洋音響トモグラフィ用音源について. 海洋科学技術センター試験研究報告, JAMSTECR, 31, 1-11. (1995)
- 11) 前島芳充・中埜岩男・中村敏明・茨田和生・海法宇治: 200Hz海洋音響トモグラフィシステムの動作について. 海洋音響学会研究発表会講演論文集, 39-42. (1996)
- 12) 袁 剛・藤森英俊・中村敏明・木邑純一・茨田

和生・前島芳充・中埜岩男・海法宇治・賀谷彰夫・鴨志田隆: 小笠原海溝東方海域における3次元海洋音響トモグラフィ観測(速報), 日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 54. (1997)

- 13) 藤森英俊・中埜岩男・中村敏明・袁 剛・茨田和生・木邑純一・前島芳充・鴨志田隆・賀谷彰夫・海法宇治・中西俊之: 音響トモグラフィシステムによる黒潮続流域のリアルタイム立体観測. 平成9年度海洋科学技術センター研究報告会要旨集. (1998)

(原稿受理: 1997年12月22日)