

JAERI-Tech
2001-065



JP0150831



有用金属捕集材実海域試験における
海上設備の漂流防止対策
－海上設備位置監視装置と測位精度の向上－

2001年11月

玉田 正男・笠井 昇・瀬古 典明・長谷川 伸・川端 幸哉*
大沼 謙二*・武田 隼人・片貝 秋雄・須郷 高信

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、
お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division,
Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Nakagun,
Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

有用金属捕集材実海域試験における海上設備の漂流防止対策

- 海上設備位置監視装置と測位精度の向上 -

日本原子力研究所高崎研究所材料開発部

玉田 正男・笠井 昇・瀬古 典明・長谷川 伸・川端 幸哉*
大沼 謙二**・武田 隼人・片貝 秋雄・須郷 高信

(2001年9月10日受理)

有用金属捕集材の性能評価のために設置した実海域試験装置の海上設備の安全に配慮することを目的として、その位置を監視する装置を設計・製作した。位置監視装置は海上設備の浮体である鋼管フレームに取付け、その位置情報を GPS (Global Positioning System) 衛星より取得する。得られた測位情報は、衛星通信回線を経て、高崎研究所及びむつ事業所に設置した測位モニタへ送信することにより、位置をモニタした。実海域での 20 日間の性能試験で、2 時間毎に 262 データを取得し、9 回の信号欠損が発生した。2DRMS (twice of the distance root mean square) は、223.7 m であった。測位精度を向上させるため、位置監視装置本体のファームウェアの改良を行なった。測位桁数を 0.001° から 0.00001° とするとともに、GPS 衛星信号で海面からの反射の影響があるものを除き、定時刻に連続 5 回の測位を行い緯度・経度毎に 5 回の測位結果から最大値、最小値を除いた計 3 回の測位結果を平均化することとした。これらの改良により、測位の 2DRMS は 15.5 m まで向上し、事前に鋼管フレームの漂流などを阻止可能なレベルに達した。

高崎研究所：〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233

* 株式会社荏原総合研究所

** 三菱マテリアル株式会社総合研究所

Prevention Measures for Avoiding Unexpected Drifting of Marine Component
in Recovery Equipment of Significant Metals from Sea Water
- Positioning and Monitoring System for Marine Component
and Improvement of Its Positioning Accuracy -

Masao TAMADA, Noboru KASAI, Noriaki SEKO, Shin HASEGAWA, Yukiya KAWABATA*,
Kenji ONUMA**, Hayato TAKEDA, Akio KATAKAI and Takanobu SUGO

Department of Material Development
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received September 10, 2001)

Positioning and monitoring system for marine component in recovery equipment of significant metals from seawater with adsorbent was designed and assembled to avoid unexpected drifting accident. This system which was set on float part of the marine component obtains the positioning data from GPS satellites and sends them to Takasaki and Mutsu establishments through satellite communication. In both establishments, the position data were shown in computer displays. As characteristic test for 20 days in the real sea, 262 data were obtained every 2 hours. The twice of the distance root mean square (2DRMS) was 223.7 m. To improve this performance, three new functions were added to the present firmware. These are to raise positioning resolutions in longitude and latitude from 0.001 to 0.00001 degree, to remove the reflection of GPS signal from sea surface, and to average remaining three positioning data after maximum and minimum data were omitted from continuous five positioning data. The improved system shows the 2DRMS positioning of 15.5 m. This performance is enough to prevent marine component from its drifting accident.

Keywords: Positioning and Monitoring System, Marine Component in Recovery Equipment, Significant Metals, Seawater, Adsorbent, GPS, Positioning Accuracy, Improvement

* Ebara Research Co., Ltd

** Central Research Institute, Mitsubishi Materials Corporation

目 次

1. 緒言	1
1.1 経緯	1
1.2 実海域試験プロセス	1
1.3 海上設備	1
1.4 海上設備の安全性確保	1
2. 海上設備位置監視装置	3
2.1 基本諸元	3
2.2 機器の構成と各仕様	3
2.3 取付	4
2.3.1 取付個所の選定	4
2.3.2 取付方法	4
3. 性能試験	6
3.1 性能試験項目	6
3.2 データの欠損	6
3.3 誤作動と注意勧告／警報	6
3.4 仕様精度との比較	6
4. 位置監視装置の改良	8
4.1 改良点	8
4.2 位置監視性能の総合評価	10
5. まとめ	11
謝辞	11
参考文献	11
参考資料 GPS 部及び衛星通信部の原理	33

Contents

1. Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Marine Experimental Process	1
1.3 Marine Component	1
1.4 Safety of Marine Component	1
2. Positioning and Monitoring Apparatus	3
2.1 Basic Conditions	3
2.2 Equipment Assemblies and Specifications	3
2.3 Setting	4
2.3.1 Selection of Attaching Place	4
2.3.2 Setting Process	4
3. Characteristic Test	6
3.1 Check Points	6
3.2 Lost Data	6
3.3 Error, Caution, and Alarm	6
3.4 Comparison with Specification	6
4. Improvement of Positioning Apparatus	8
4.1 Improved Parts	8
4.2 Evaluation of Positioning and Monitoring Apparatus	10
5. Summary	11
Acknowledgements	11
References	11
Appendix Principle of GPS and Satellite Communication	33

1. 緒 言

1.1 経緯

放射線グラフト重合法は既存の材料にその特質を損なうことなく、接ぎ木のように新しい機能を付与することが可能である。原研高崎ではオイルフェンスにも使用される高分子不織布に重金属イオン吸着能を有する官能基を放射線グラフト重合法により導入する技術を検討し、高効率の捕集材を合成する方法を確立した。この方法を用いることで、厳しい海象条件や自然環境において長期間にわたり強度を維持でき、さらに、海水中の極低濃度のウラン捕集性能に優れた材料の開発が可能となった¹。この捕集材による海水からのウラン捕集について、実用化に向けた技術的課題の抽出を行うとともに実用化の可能性を検討するため、100 kg 規模の捕集材を一定期間実海域に浸漬し、性能を評価するため実海域試験装置を1999年9月に青森県むつ関根浜沖合に設置した。実海域試験装置は金属捕集のための海上設備と捕集した金属の分別溶離のための陸上の分別溶離設備で構成される。この海上設備は実海域試験における係留のための安全対策に万全を期しているが、より安全に配慮するため、高崎研究所及びむつ事業所でその位置をモニタ可能とするシステムを開発し、万一の漂流防止対策を講じた。

1.2 実海域試験プロセス

実海域試験は Fig. 1-1 に示すようなプロセスで実施する。放射線グラフト重合により合成した捕集材はスペーサと交互に積層して捕集材カセットに組み上げ、実海域に係留して海中に 20 日間程度浸漬し、有用金属の海洋捕集のち引き上げ、陸上の分別溶離設備に移送する。分別溶離工程では、最初に、前処理として海洋生物などの付着物を除去する。次に捕集材からの有用金属分別溶離工程において塩酸溶液に接触させ、有用金属を溶離する。溶離後の捕集材はアルカリ溶液で再生処理を行うことにより、再利用することが可能である。溶離したウランはキレート樹脂に吸着固定させ、分離精製工場へ輸送する。

1.3 海上設備

海上設備は、Fig. 1-2 に示すように、生け簃型の海上浮体（鋼管フレーム）の下方に捕集材を充填した吸着床を海水中につりさげることの出来る構造である。吸着床を深度 20m に係留するための浮体のサイズは、一辺が 8 m である。これを所定海域の設置位置 [北緯 41° 24.4' (41.407°)、東経 141° 18.0' (141.300°)] に固定するため、4 本の係留索 (50 mm φ ロープ) 及び緩衝波用のクッションブイを使用する。係留索は 40 トンアンカーブロック 4 ケにより所定の位置に固定されている。この鋼管フレームは、波高が 7.3 m 以上では海面下に埋没するようになっており、通常の台風等の高波でも充分耐えられる設計である²。

1.4 海上設備の安全性確保

海上設備は所定海域の設置位置に 4 本の係留索で固縛されている。そのロープの強度仕様は、設計波（有義波高:4.3 m、最大波高：7.3 m）に対して、安全率が 6.4 以上であり、また、波力、張力、風力のすべての最大外力が同時に作用した過酷な条件の計算の場合でさえ、安全率が 3.7 以上であることから、安全は十分に確保されている²。さらに、この仕様では風速 30 m、波高 10 m に耐えうるが、より安全に配慮するため以下の漂流防止対策を策定し

た。

漂流防止対策

鋼管フレームに位置監視装置を搭載して、位置監視装置からの位置情報は高崎研究所及びむつ事業所からモニタできるようにする。監視体制時に位置異常が生じた場合、下記の対策を講じることとした。

<監視体制> 試験実施時

位置確認 通常時： 2時間毎
異常時： 10分毎

<異常事の
判定基準> 位置監視装置からの位置情報が所定海域の設置位置を中心とした直径
220mの円内の範囲を超える漂流したと推定される場合、または特定方向への移動があり、係留ロープが切断されたと推定される場合。

<対 策> 高崎研むつ駐在は、海象条件を考慮し、可能な限り現場に急行し、状況を確認する。漂流の危険性がない場合は、修理に必要な措置の手配を行う。漂流時には、関係各所*に連絡するとともに、回収作業が可能な場合、作業を進める。

* : 八戸海上保安部警備救難課、青森海上保安部警備救難課、各漁協、むつ航路標識事務所、むつ土木事務所

2. 海上設備位置監視装置

2.1 基本諸元

位置監視装置は実海域に設置した鋼管フレームの位置情報を得て、高崎研究所及びむつ事業所でモニタするためには以下の課題を解決する必要がある。

- ・鋼管フレームの位置情報を取得し、2時間ごとに発信できること。
(異常時は送信間隔10分ごとに発信できること)
- ・発信された測位情報は高崎研究所及びむつ事業所で同時にモニタ可能のこと。
- ・鋼管フレームに取り付けるため、波浪によるダメージを受けないこと。

海上設備の位置情報を得るために、陸上に設置したレーダによりモニタする方法も考えられるが、鋼管フレームに反射板を取り付ける必要があること、また、漂流時の発見が困難になる場合を考え、独自に測位情報を発信する方法を採用した。

監視装置の測位情報取得には GPS (Global Positioning System) を採用し、捕集材の浸漬実験期間中は電池駆動により測位情報を取得する方式とした。本位置監視装置を使用した位置監視システムを Fig. 2-1 に示す。GPS 衛星から取得した測位情報は位置監視装置からオーブコム衛星を利用した通信回線により、ゲートウェイ地球局に送られ、その後、コントロールセンタからインターネット接続で高崎研究所及びむつ事業所に設置したコンピュータに到達する。測位情報を受け取ったコンピュータは位置情報をモニタに表示する。また、位置異常は測位情報をコンピュータにより演算処理して判断する。

2.2 機器の構成と各仕様

位置監視装置は位置監視装置本体と測位モニタから構成される。位置監視装置本体の外観を Fig. 2-2 に示す。形状は球形であり、主材料はアルミニウム合金である。高崎研究所、むつ事業所に設置した測位モニタの外観を Fig. 2-3 に示す。

[位置監視装置本体]

位置監視装置本体の構成を、Fig. 2-4 に示す。本体は、15 の部品から構成されている。

・ 標体部

内部に GPS 部、衛星通信部、電源部を収納する。

筐体

フード

パッキング

締付金具

機器取付板

SUS リング

・ GPS 部

GPS からの位置情報を設定された時間間隔で受信し、測位情報を衛星通信部へ送る。受信間隔は測位モニタから手動で送られるコマンドにより変更可能である。

GPS

GPS アンテナ

・衛星通信部

GPS 部から送られてきた測位情報を衛星通信を経由して、測位モニタへ送る。

オーブコム通信端末
送受信アンテナ
インターフェースユニット
バイロットランプ

・電源部

G P S 部、衛星通信部へ電力を供給する。

蓄電池
太陽電池
電池バンド
電源スイッチ

それぞれ機器の仕様を Table 2-1 から 2-4 に示す。GPS 部、衛星通信部の原理は巻末の参考資料に示す。

標体部	Table 2-1
GPS 部	Table 2-2
衛星通信部	Table 2-3
電源部	Table 2-4

[測位モニタ]

測位モニタは Windows の汎用コンピュータであり、インターネットに接続して、e-mail により、測位情報が受信可能である。ソフトウェアの処理の流れ (ver. 1) については、Fig. 2-5 にフローシートとして示す。地形、設置位置、移動距離許容範囲、位置データの画面上の表示位置などのパラメータが設定可能である。本ソフトウェアは Windows95/98/98SE/NT4.0 にて動作する。

測位モニタは、位置監視装置本体から設定された時間間隔で送信された測位情報を自動受信し、Fig. 2-6 に示すように画面上に最新の位置データ及び設置位置からの距離（移動距離）を図示するとともに、数字で表示する。受信したデータが、設置位置から、移動距離許容範囲を越えた場合、Fig. 2-7 の通り、警報を発する。通常は GPS 部での位置情報の受信間隔は 2 時間に設定されている。この受信間隔は手動で測位モニタから e-mail でコマンドを衛星通信部をへて GPS 部に送ることにより、10 分に設定変更が可能である。

2.3 取付

2.3.1 取付個所の選定

鋼管フレームの構造は、一辺が 8 m の生け簀型浮体である。捕集材の交換作業に支障のない位置で、フレームの影により測位に誤差が生じにくい位置として、Fig. 2-8 の矢印で示す鋼管フレームのコーナ上方に取り付けた。鋼管フレームへの取付状態を Fig. 2-9 に示す。

2.3.2 取付方法

有用金属捕集材実海域試験では捕集材を充填した吸着床を一定期間垂下後、引き上げる作

業を繰り返す。起重機船での吸着床の引上げ、浸漬作業で海上設備位置監視装置の損傷を避けるため、海上設備監視装置は鋼管フレームから取り外してクレーン船上に移動させ、引上・浸漬作業の終了後、鋼管フレームの所定の位置に取り付けた。

3. 性能試験

3.1 性能試験項目

位置監視装置を取り付けた鋼管フレームを所定海域の設置位置に設置し、以下の 3 項目を評価した。

- ・データの欠損
- ・誤作動と警報／注意勧告
- ・仕様精度との比較

GPS の精度を表すために用いられる「2DRMS」は、緯度方向の測位点の分散と経度方向の測位点の分散を求めて、両者を足して平方根をとり (drms)、さらにそれを 2 倍して求められる。また、測位点の位置を中心にして半径 2DRMS の円を描けば、その円の内側に全測位点の約 95% が含まれる。性能評価では測位データは正規分布と仮定し、標準偏差 (σ) を求めて、平均 + 2 σ を 2DRMS として、測位精度を評価した。

3.2 データの欠損

性能試験期間中、2 時間毎に 262 回のデータ取得を試みた。取得データは、Table 3-1 に示すように、測位時刻、緯度、経度、移動距離である。10 月 2 日と 18 日にそれぞれ、連続して 7ヶ及び 2ヶの測位データの受信が行われず、性能試験期間中のデータ欠損は 9 個となり、253 データが得られた。これは、測位時に最低必要な 3 個の GPS 衛星からの情報が得られなかつたため、測位データの取得ができなかつたためだと考えられる。

3.3 誤作動と注意勧告／警報

得られた測位データを Fig. 3-1 にプロットした。

海上設備の鋼管フレームに取り付けられた位置監視装置で GPS 衛星から受信する位置情報は、海面からの反射ノイズのため、測位の誤差が大きくなる。その結果、海上設備が設置位置にあったとしても、位置監視モニタ上では、設置位置から離れた場所として表示された。

鋼管フレームは、4 点係留されているが、海流により最大 10 m 程度の振れまわりが発生する²。そのため、受信ソフトウェアで位置異常を判断する場合の移動距離許容範囲は GPS の 2DRMS 100 m に振れまわりの 10 m を加えて、110 m とした。しかし、性能試験開始直後、移動距離許容範囲が 110 m では位置異常警報が頻出するため、移動距離許容範囲を 220 m に変更して試験を継続した。また、一回の測位誤差により直ちに誤った警報が出るのを防ぐため、220 m の移動距離許容範囲を越えた場合に注意勧告し、次の移動距離が続いて許容範囲を越えた場合に警報を発するようにソフトウェアを変更した。

移動距離許容範囲を 220 m とし、ソフトウェアの変更を行なった結果、性能試験中、注意勧告は 8 回、警報は、1 回となつた。

3.4 仕様精度との比較

性能試験中の測位データの 2DRMS は 223.7 m、移動距離平均値は 103.5 m であった。

位置監視装置の GPS 部の仕様 2DRMS は、100 m であり、移動距離は 95% の確率で 100 m 以下とならなければならない。また、鋼管フレームの振れまわりを考慮して、110 m 以下になることが望ましい。しかし、2DRMS は 223.7 m となって、仕様精度は達成できなかつた。その原因として下記の要因が考えられた。

- ・波動により、鋼管フレームが動搖し、衛星通信端末内の GPS アンテナが水平を保つていかない状態で測位がおこなわれた。
- ・GPS 衛星の配置が良好でない状態で測位が行われた。
- ・GPS 衛星からの電波信号が海面で乱反射を起こし、その反射信号が GPS アンテナに混入した。

その他、フードの送受信アンテナ取り付け部に亀裂が見つかり、送受信アンテナを波の衝撃から守る工夫が必要であった。

4. 位置監視装置の改良

4.1 改良点

平成 12 年 5 月、GPS の管理運用を行っている米国国防総省より、SA (Selective Availability) が解除された。SA の解除後の測位の精度は 10 倍に向上され、2DRMS 100 m の性能は 10 m となることが発表された⁴。

Fig. 4-1 に SA が解除後の測位データをプロットした。SA 解除後の 2DRMS は解除前の 1/10 となるはずであるが、実際は 166.4 m にとどまった。そのため、測位精度を改善し、当初の 110 m を達成するため、以下の改良を試みた。

[位置監視装置本体]

改良した位置監視装置本体の形状と構成を Fig. 4-2 に示す。また、鋼管フレームに取り付けた状態を Fig. 4-3 に示す。変更点を以下に示す。

- 標体部

蓄電池の容量増加に備えて、サイズを高さ 750 mm、230 mm ϕ とした。

- GPS 部・衛星通信部

改良前の位置監視装置では、GPS の 2DRMS が 100 m であるため、測位モニタまで伝送される測位情報は 0.001° の有効桁数であった。この測位分解能を距離に換算した場合、約 111 m となる。SA 解除に対応した精度向上を測位情報に反映させるため、GPS 部および衛星通信部のファームウェアを改良し、有効桁数を 2 桁上げ、0.00001° とした。このことにより、測位分解能を 1.1 m とした。また、衛星通信用のアンテナを波の直撃が無いよう内蔵型とし、水密性向上により機器信頼性を向上させた。

- 電源部

太陽電池の発電量は 0.28 Ah/d であるが、測位データの桁数を 2 桁増やすことにより、ファームウェア一関連の消費電力は 0.22 Ah/d から 0.30 Ah/d となり、太陽電池では安定な電力の供給が困難となった。そのため、内蔵電池容量を 5 Ah から、50 Ah に増やし、GPS 部・衛星通信部の機能付加へも対応をはかった。

[位置監視モニタ]

- 追加機能（ソフトウェア ver. 1 → ver. 2）を以下に示す。

- (1) 測位分解能の向上（測位桁数を 0.00001° に対応させ、距離換算で 1.1 m の測位分解能を表示可能とした位置表示を任意に拡大可能なようにズーム機能を付加した）
- (2) 位置送信間隔変更命令（測位モニタのソフトウェアからのコマンドを GPS 部に送信することで測位間隔を 5 分～6 時間に変更可能とした）
- (3) 受信データの自動ファイル化
(受信データを月毎のテキストファイルとして自動作成するようにした)
- (4) 地形図の高精度化
(海図の海岸線データである“統合海岸線デジタルデータ”を使用した)

(5) 地形図の画像ファイル出力機能（監視画面を画像ファイルに出力可能とした）

追加機能処理の流れについては、Fig. 4-4 にフローシートを示す。

・表示画面

統合海岸線デジタルデータを用いた高精度な地形図による位置監視装置モニタ表示画面を Fig. 4-5 に示す。

[測位分解能の向上]

測位分解能を 1.1 m として測位精度を陸上の予備実験で評価した結果、静置した位置監視装置では SA 解除後の 2DRMS は 223.7 m から 36.0 m まで向上することを確認した。しかし、位置監視装置を海上に移動にさせ測位データを取った場合、Fig. 4-6 に示すように、2DRMS は 36.0 m から 126.9 m に増大した。これは GPS 衛星よりの信号が海面にて乱反射を起こし、その反射信号を GPS アンテナが取得する事に起因するためと推測された。そのため、測位に利用する GPS 衛星を選択可能なように GPS 部のファームウェアをさらに改良した。

[PDOP の変更]

海面からの反射信号をノイズに含む GPS 衛星からの信号は、位置精度劣化指数（PDOP : Position Dilution of Precision）を変更する事により、測位用信号としては使用しないようにした。PDOP 値を従来の“10 以下”から“5 以下”に制限する事により、

- ・位置監視装置から見た存在位置が良好でない GPS 衛星からの情報
- ・海面から乱反射した GPS 衛星からの情報

を測位信号として使用しないようすることができる。しかし、PDOP 値は、数値を小さく制限すれば測位精度は向上する反面、測位に要する時間が増加する。消費電力を考慮した場合、50Ah の蓄電池容量での電池寿命は 70 日程度となるが、1 月の実験期間と安全率を 1.5 として、PDOP 値を 5 とした。PDOP の最適化を行った後、1 時間毎に 241 ケのデータを取得した。その結果を Fig. 4-7 に示す。ファームウェアで PDOP の最適化を行うことにより、測位モニタで受信する 2DRMS は海上の測位においても向上し、126.9m から 64.2m まで減少させることができた。PDOP の変更により、当初の目標である 2DRMS 110 m を達成することができた。さらに、精度の向上が可能であるかを確かめるため、平均化機能による効果を検討した。

[平均化機能の付加]

さらに、測定誤差を小さくするため、ファームウェアに平均化機能を付加した。位置監視装置で定時刻に測定した 1 回の測位結果を現在位置として伝送していたが、平均化機能では定時刻に連続 5 回の測位を行い、緯度/経度毎に 5 回の測位結果から最大値、最小値を除いた計 3 回の測位結果を平均化したデータを伝送することで測位誤差を小さくした。

得られた測位データを Fig. 4-8 にプロットした。平均化機能の付加により、2DRMS はさらに 64.2 m から 15.5 m と改善された。

4.2 位置監視性能の総合評価

改良に伴う 2DRMS、移動距離の平均値を Table 4-1 にまとめた。SA の解除後、分解能の向上、PDOP の最適化、平均化機能を付加した場合の設置位置からの測位の 2DRMS は 15.5 m、移動距離の平均は 6.7 m となった。その結果、データの欠損および位置監視装置からの測位誤差に起因する注意報／警報は解消し、海上設備位置監視装置は海上設備の安全確保に役立てる精度を有することが確認された。改良した位置監視装置により、信頼性のあるデータが得られるようになり、実海域試験装置の海上設備の漂流などを事前に察知し、未然に防ぐことが可能であり、安全性は充分に確保されると認められた。

5. まとめ

放射線グラフト重合法により合成した有用金属捕集材の性能を評価実験のために設置した実海域試験装置の海上設備の安全に配慮するため位置監視装置を設計・製作した。その浮体部分（鋼管フレーム）に位置監視装置を取り付けて、測位情報を GPS から取得し、衛星通信回線を利用して、高崎研究所及びむつ事業所へ送信することによってコンピュータにより位置情報を表示させる位置監視システムを構築した。

位置監視装置は鋼管フレームの上方に取り付けた。実海域での 20 日間の性能試験で、253 のデータを取得した結果、2DRMS は 223.7m であった。この位置情報の精度は鋼管フレームの位置監視には充分と言えないため、GPS 衛星の精度が SA の解除により 10 倍向上されたことにともない位置監視装置の改良を行い、測位精度を向上させた。位置監視装置本体では、測位桁数を 0.001° から 0.00001° とすること、PDOP の変更により海面からの反射の影響を取り除いたこと、定時刻に連続 5 回の測位を行い緯度/経度毎に 5 回の測位結果から最大値、最小値を除いた計 3 回の測位結果を平均化することとした。結果として、2 DRMS を 15.5mまで減少させることができ、捕集材の実海域試験海上設備の漂流などを事前に察知し、未然に防ぐことが可能となる測位レベルに達せさせることができた。

謝 辞

実海域装置の海上設備位置監視装置の開発につきまして、漂流ブイで培われた技術で協力いただきました株式会社ゼニライトブイおよび実海域の試験に支援いただきましたむつ事業所海務課に感謝いたします。

参考文献

1. 玉田正男、瀬古典明、Isotope News, 551, 2 (2000).
2. 長谷川 伸、瀬古典明、田畠幸吉、玉田正男、片貝秋雄、笠井 昇、渡辺 勉、川端幸哉、繩田孝高、須郷高信、有用金属捕集材実海域試験海上装置の製作と設置、JAERI-Tech 2001-020.
3. 日経パソコン、2000.6.26 号、pp26.

Table 2-1 位置監視装置標体部仕様

標体部	主要 材質	筐体 (塗色)	アルミニウム合金 (エマージェンシーオレンジ)
		フード (塗色)	耐衝撃性ポリカーボネート樹脂 (無色透明)
		パッキン	EPDM
		締付金具	ステンレス鋼
		機器取付板 (塗色)	アルミニウム合金 (A5052) (エマージェンシーオレンジ)
		SUSリング	ステンレス鋼
標体 諸元	形 状	球 形	
	寸 法	球直径 ϕ 340 × 高さ305mm (アンテナ突起部含まず)	
	質 量	約6kg	

Table 2-2 位置監視装置GPS部仕様

GPS部	機器 構成	GPSレシーバ	オーブコム通信端末に内蔵
		GPSアンテナ	オーブコム通信端末に付属
	GPS 諸元	方式・精度	単独GPS方式・精度100m (2 DRMS*)

*Twice of the distance root mean square

Table 2-3 位置監視装置通信部仕様

機器構成	オーブコム 通信端末	KX-G7101/N (消費電力: 0.22Ah/d、2時間毎測位)
	送受信 アンテナ	オーブコム専用入/4ホイップ送受信アンテナ
	インター フェース ユニット	—
	パイロット ランプ	赤色LED
通信部	通信方式	オーブコム衛星通信方式 (リアルタイム・双方向モード)
	通信範囲	茨城県(北浦)を中心とした半径2500km圏内
	送信データ	時刻 ... UTC(年月日時分) 位置 ... 緯度・経度(10進法表示、WGS84) 電圧 ... 蓄電池電圧
	送信先 アドレス数	最大7アドレス
通信諸元	通信フォーマット	YYMMDD HHMM AA.AAA OOO.OOO VV.V
	通信周波数・ 速度	Uplink 148~150MHz 2400bps Downlink 137~138MHz 4800bps
	送信間隔	2時間
	パイロット ランプ	正常時…電源ON後、約2~3分にて、ゆっくり点滅 →急点滅→消灯 異常時…電源ON後、12.5分間ゆっくり点滅→消灯

Table 2-4 位置監視装置電源部仕様

電源部	電池と容量	太陽電池式 (0.28Ah/d)
		鉛蓄電池 (5Ah)
	出力	12V
	電源スイッチ	トグルスイッチ

Table 3-1 性能試験データ

	測位時刻	緯度	経度	移動距離
1	1999.09.29 15:00	41.407°	141.300°	0.00m
2	1999.09.29 17:00	41.406°	141.300°	111.05m
3	1999.09.29 19:00	41.406°	141.300°	111.05m
4	1999.09.29 21:00	41.407°	141.300°	0.00m
5	1999.09.29 23:00	41.406°	141.301°	139.00m
6	1999.09.30 01:00	41.407°	141.300°	0.00m
7	1999.09.30 03:00	41.406°	141.300°	111.05m
8	1999.09.30 05:00	41.406°	141.301°	139.00m
9	1999.09.30 07:00	41.407°	141.300°	0.00m
10	1999.09.30 09:00	41.406°	141.301°	139.00m
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
236	1999.10.20 01:00	41.407°	141.301°	83.61m
237	1999.10.20 03:00	41.406°	141.300°	111.05m
238	1999.10.20 05:00	41.406°	141.301°	139.00m
239	1999.10.20 07:00	41.405°	141.300°	222.10m
240	1999.10.20 09:00	41.407°	141.300°	0.00m
241	1999.10.20 11:00	41.406°	141.300°	111.05m
242	1999.10.20 13:00	41.406°	141.300°	111.05m
243	1999.10.20 15:00	41.407°	141.299°	83.61m
244	1999.10.20 17:00	41.406°	141.301°	139.00m
245	1999.10.20 19:00	41.406°	141.301°	139.00m
246	1999.10.20 21:00	41.407°	141.300°	0.00m
247	1999.10.20 23:00	41.406°	141.300°	111.05m
248	1999.10.21 01:00	41.406°	141.300°	111.05m
249	1999.10.21 03:00	41.406°	141.301°	139.00m
250	1999.10.21 05:00	41.405°	141.303°	335.02m
251	1999.10.21 07:00	41.406°	141.301°	139.00m
252	1999.10.21 09:00	41.407°	141.300°	0.00m
253	1999.10.21 11:00	41.406°	141.301°	139.00m

Table 4-1 改良に伴う精度の向上

	2DRMS [m]	移動距離平均値 [m]
改良前	223.7	103.5
・SA解除後	166.4	110.8
分解能向上	126.9	30.9
PDOP の変更	64.2	25.9
平均化機能の付加	15.5	6.7

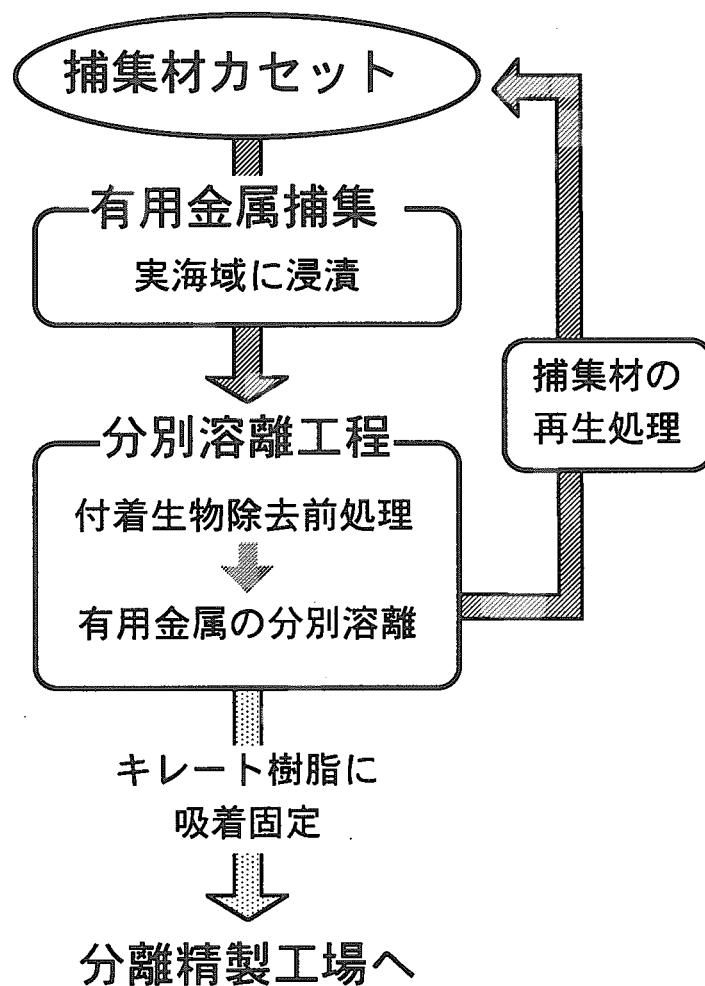


Fig. 1-1 実海域試験プロセス

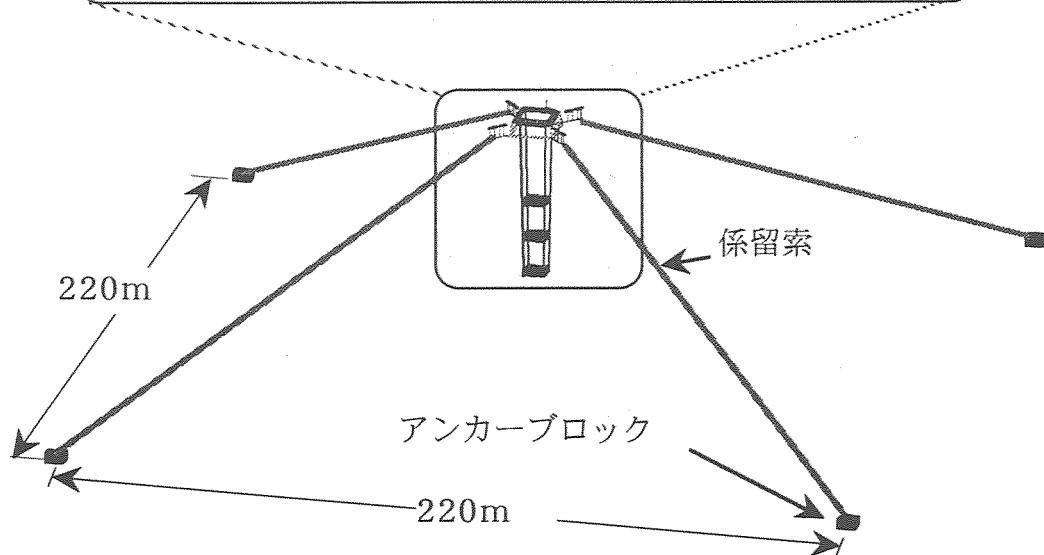
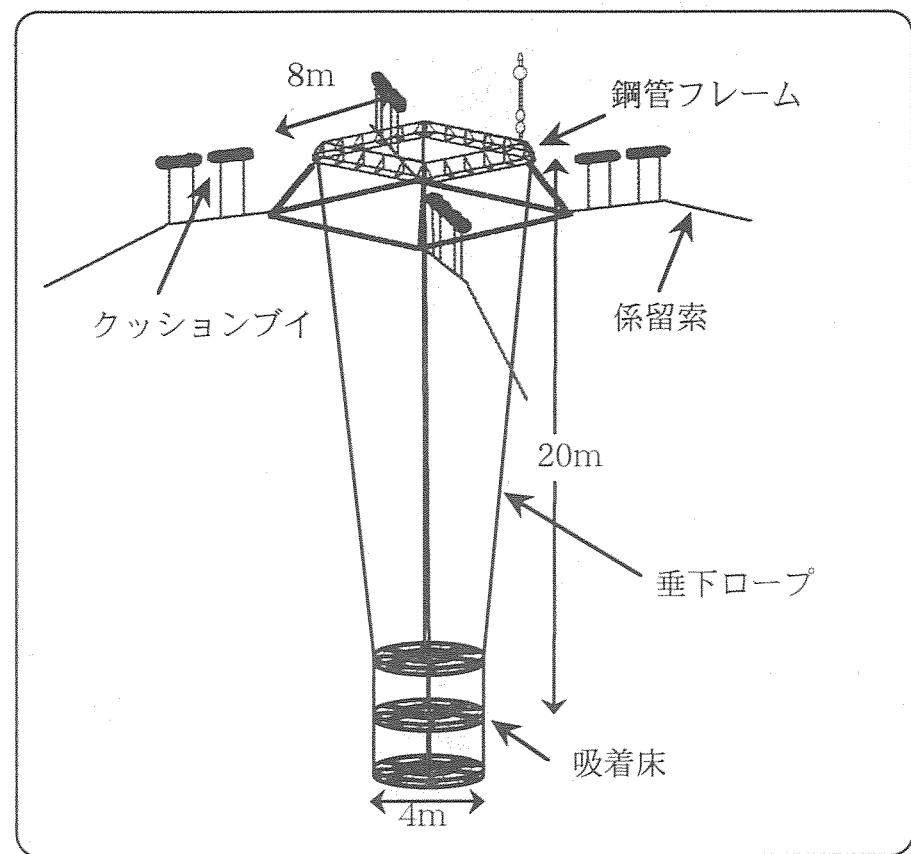


Fig. 1-2 実海域試験装置海上設備

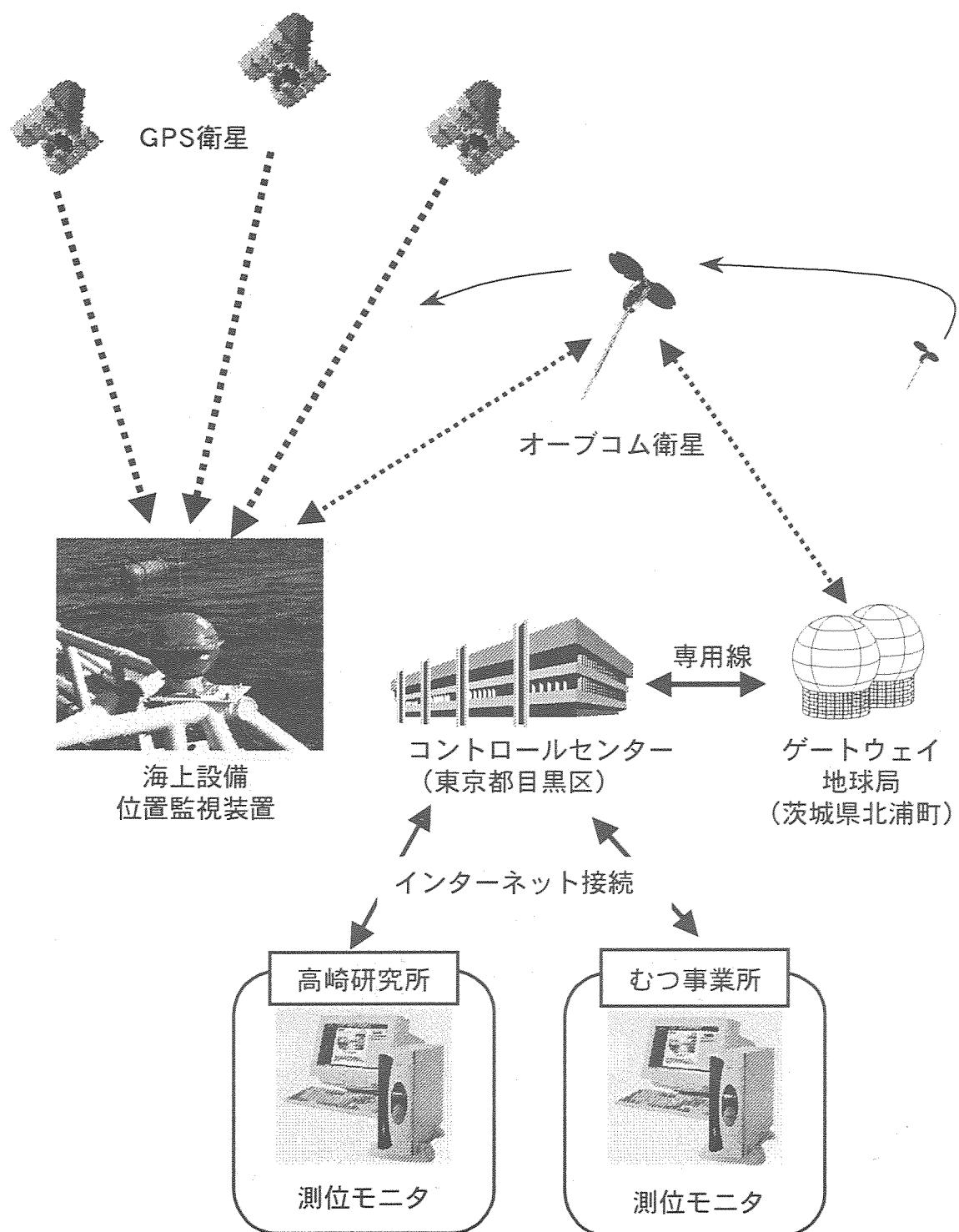


Fig. 2-1 位置監視システム概念図

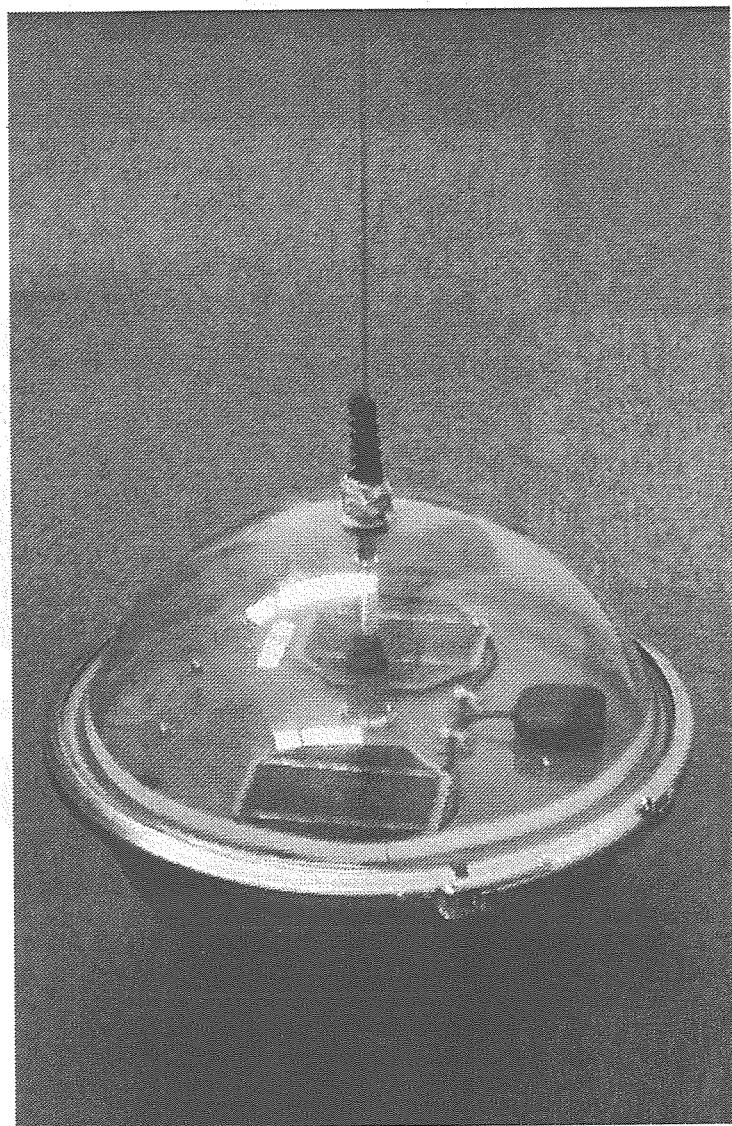


Fig. 2-2 位置監視装置本体の外観

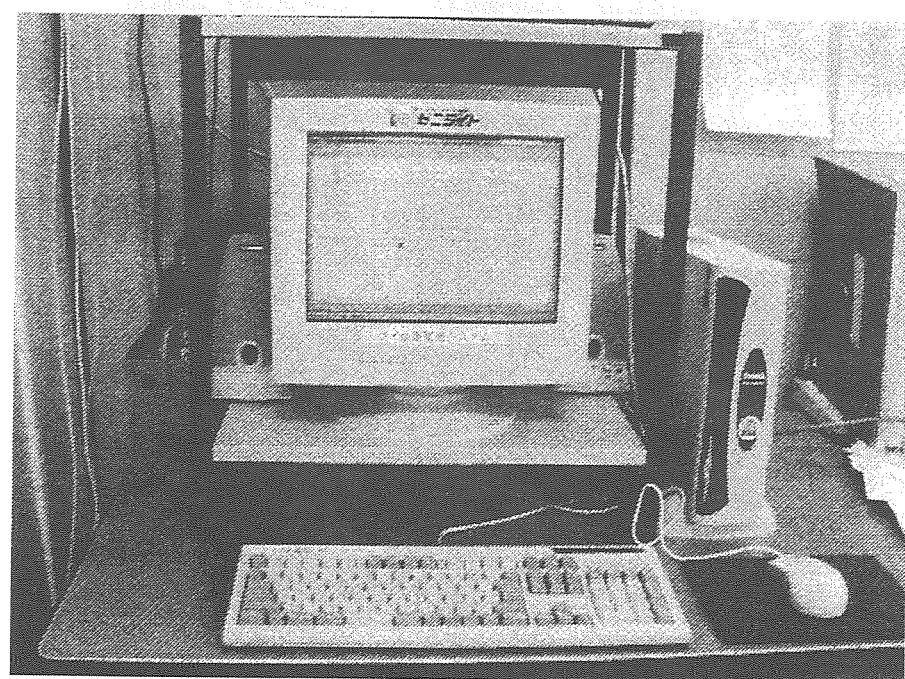


Fig. 2-3 高崎研究所およびむつ事業所に設置した
測位モニタ

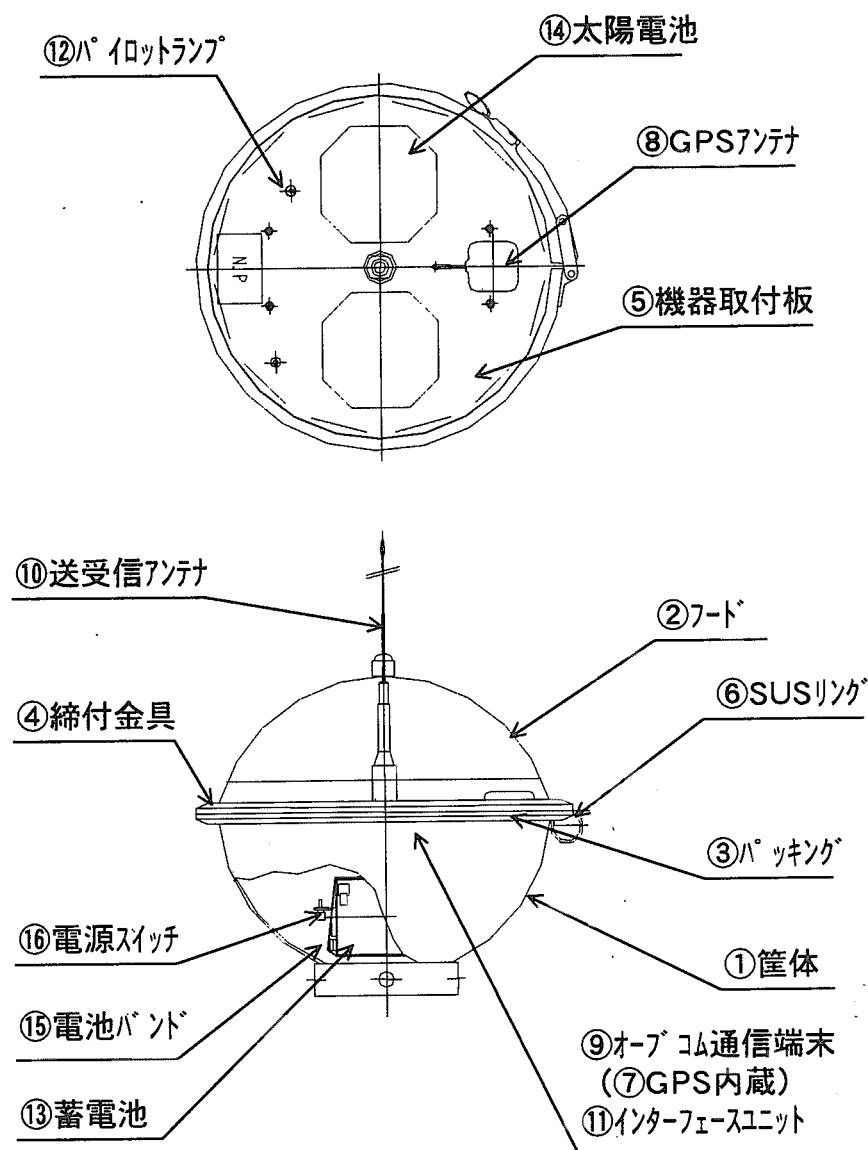


Fig.2-4 位置監視装置本体の構成

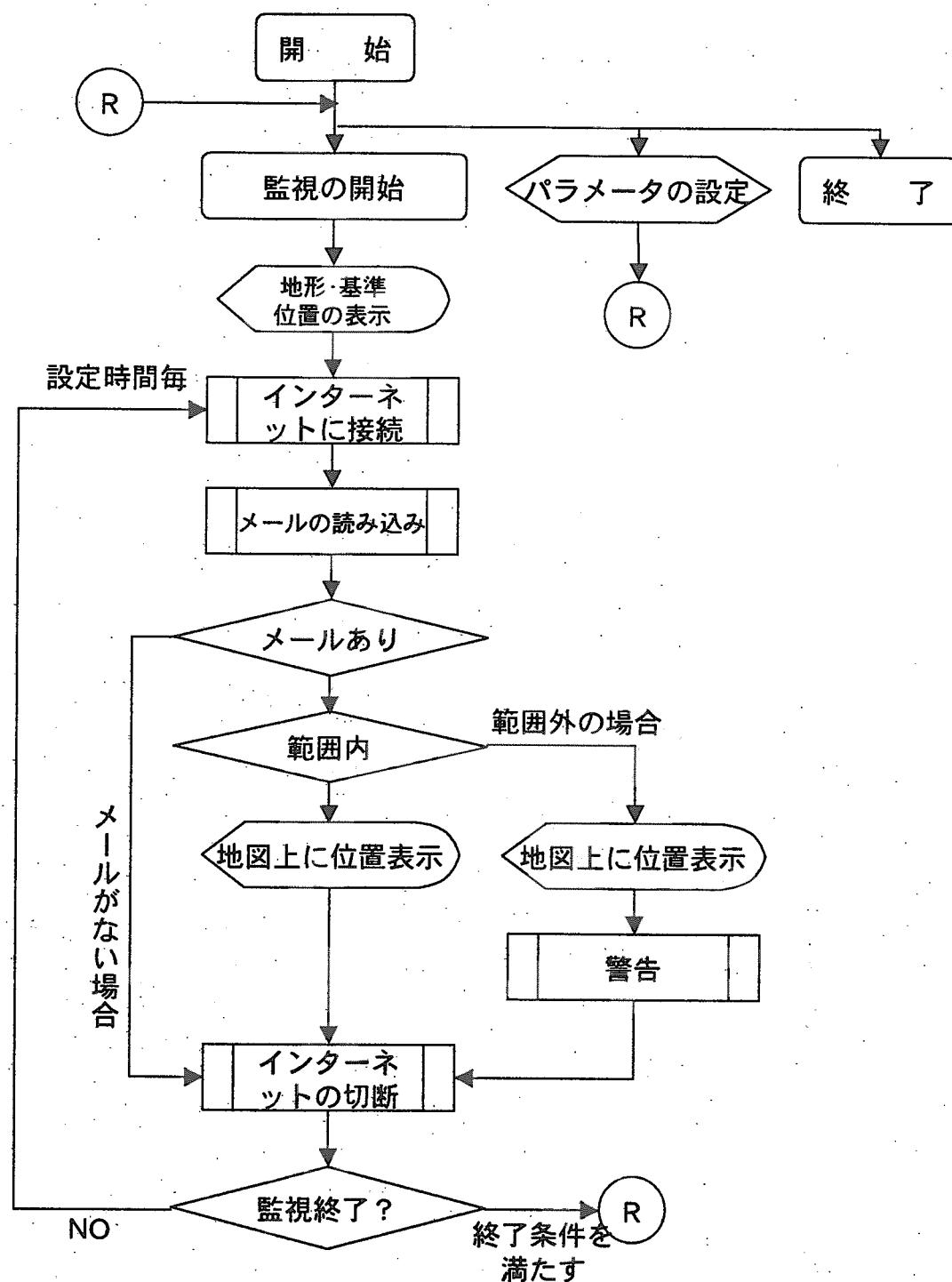


Fig. 2-5 ソフトウェアフローシート (ver.1)

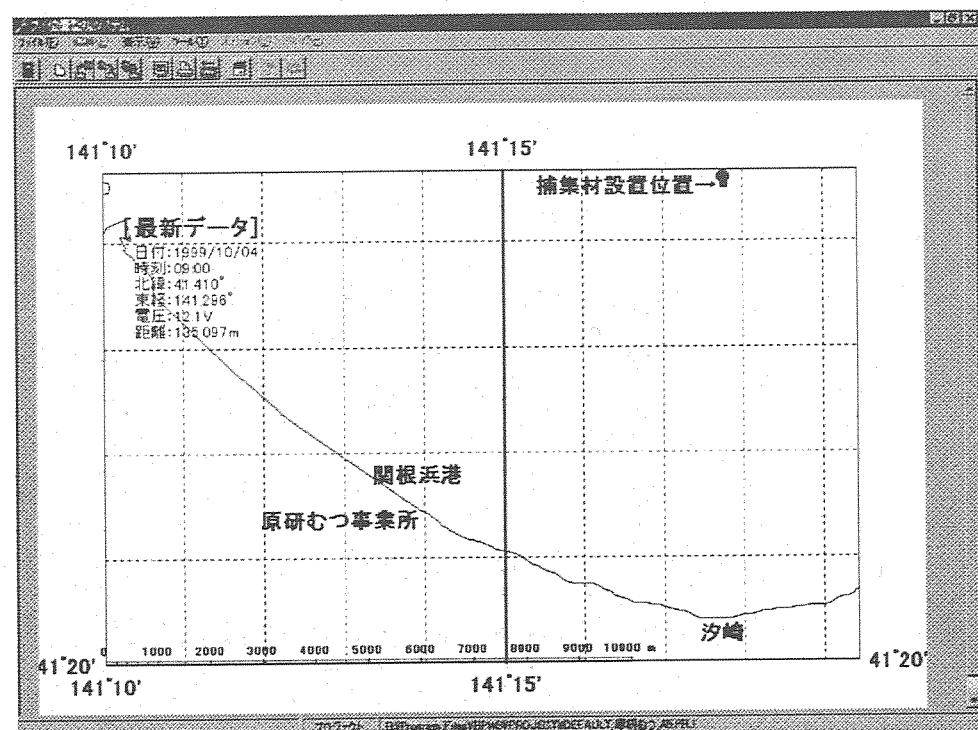


Fig. 2-6 データ表示画面

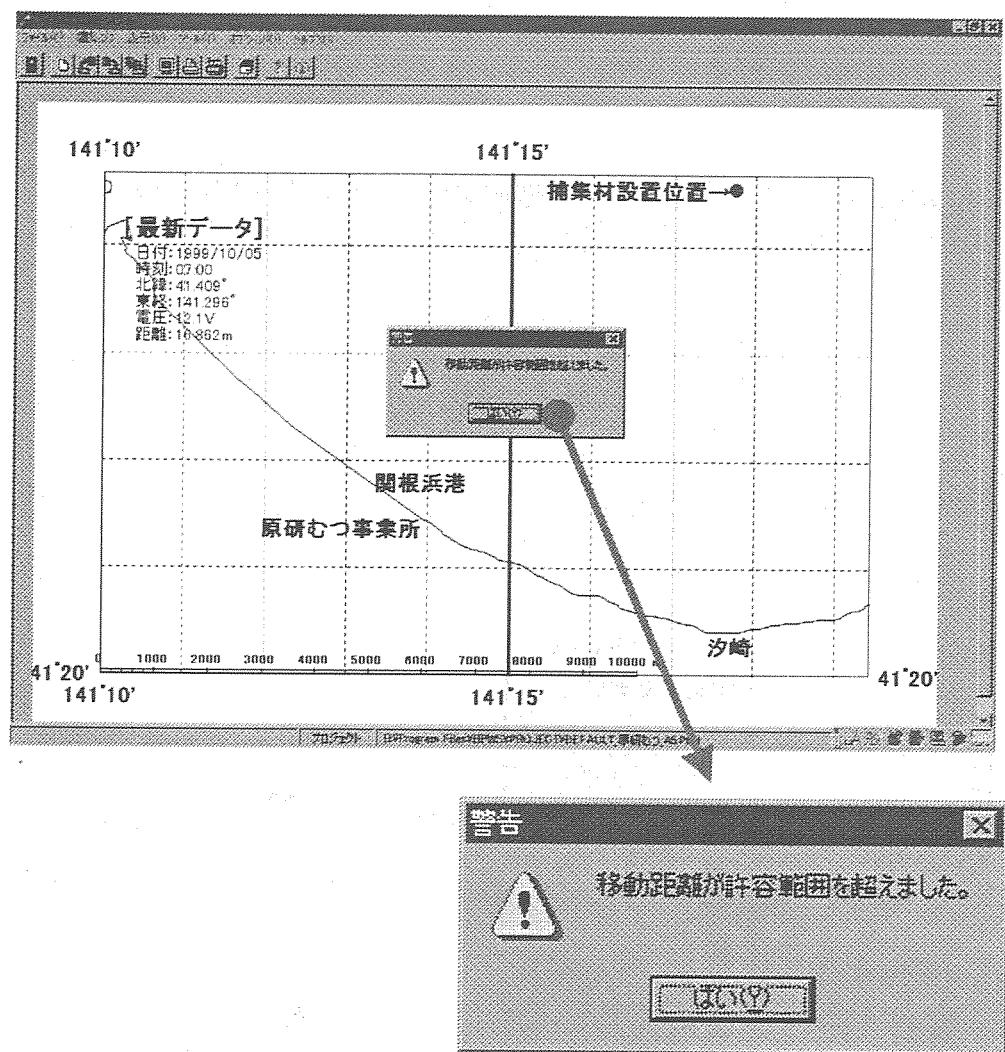


Fig. 2-7 警報画面

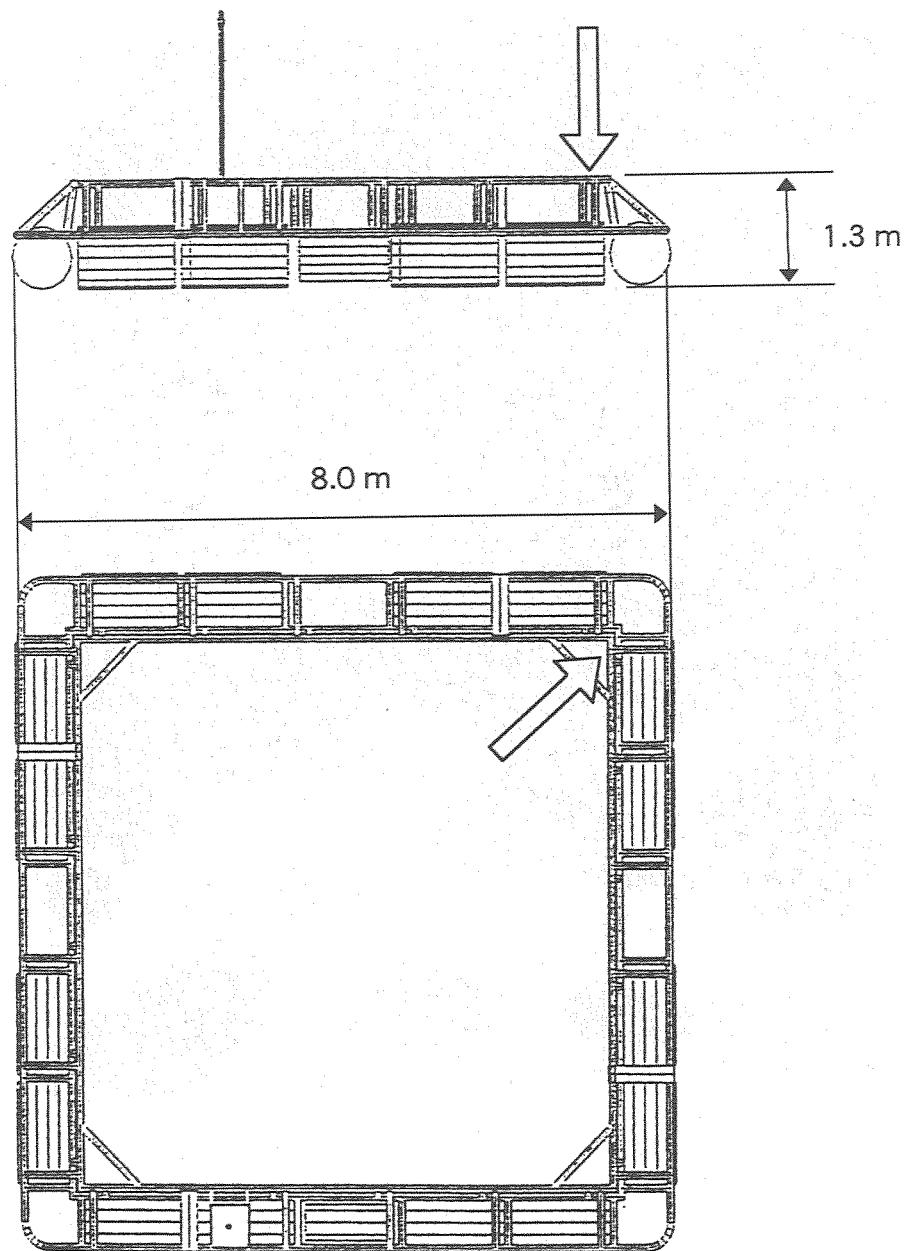


Fig. 2-8 鋼管フレームへの取付位置

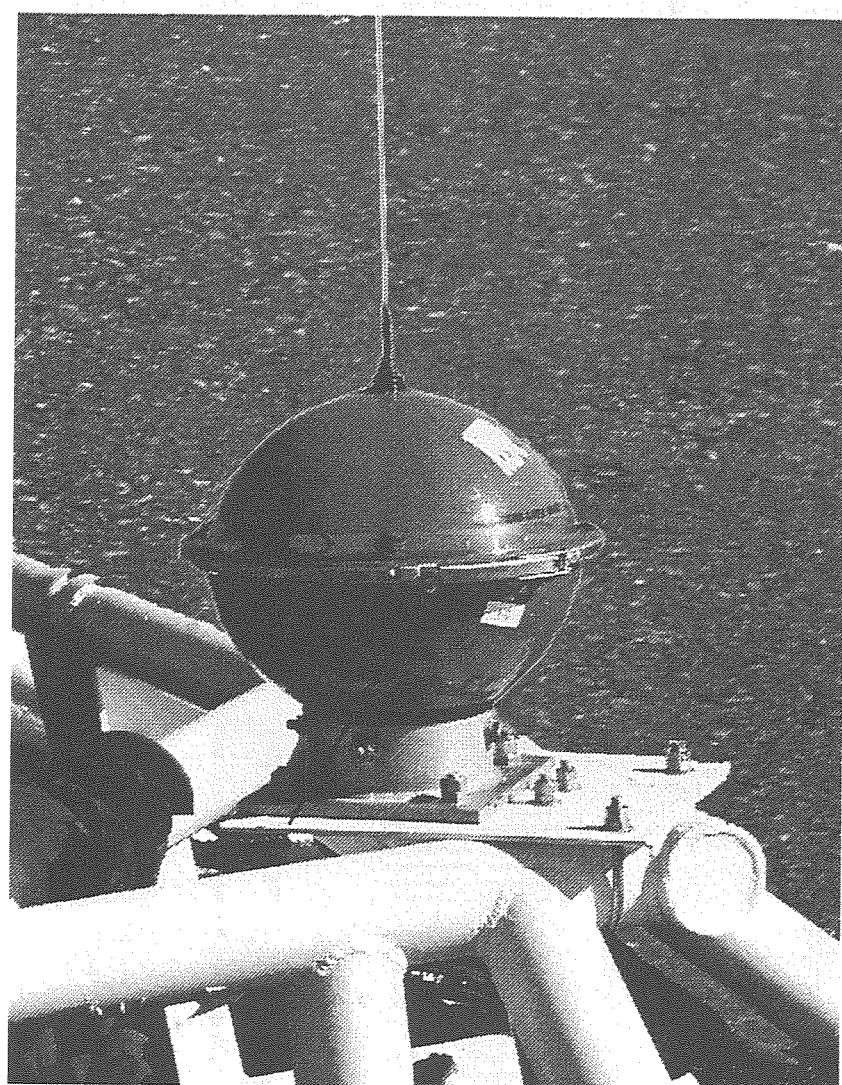


Fig. 2-9 鋼管フレームに取り付けた位置監視装置本体

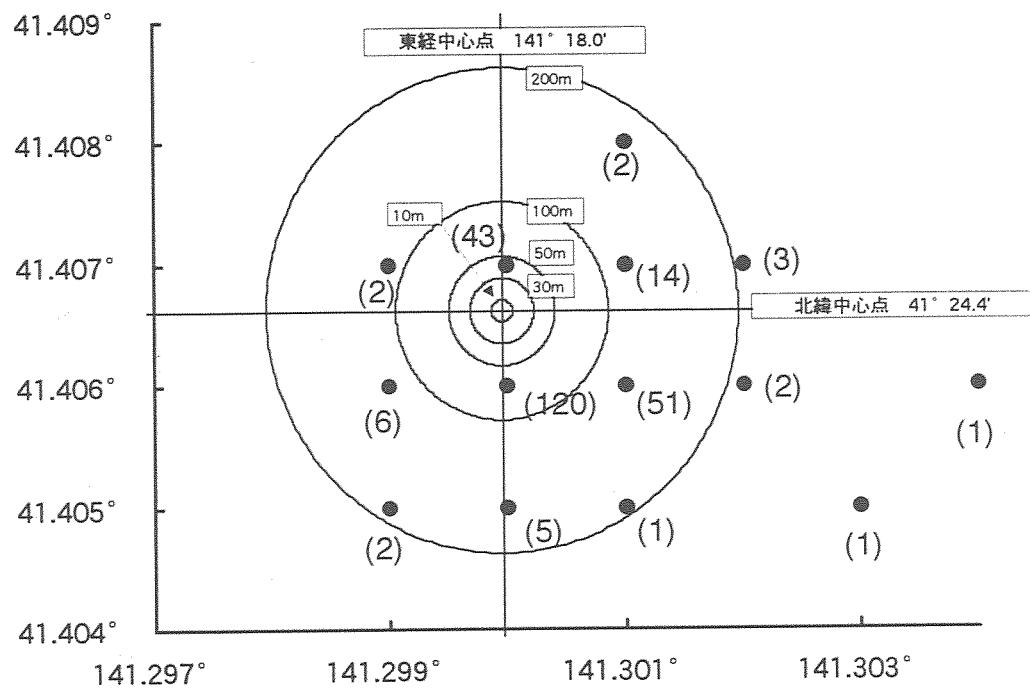


Fig. 3-1 性能試験での取得データ
(括弧内はデータ数)

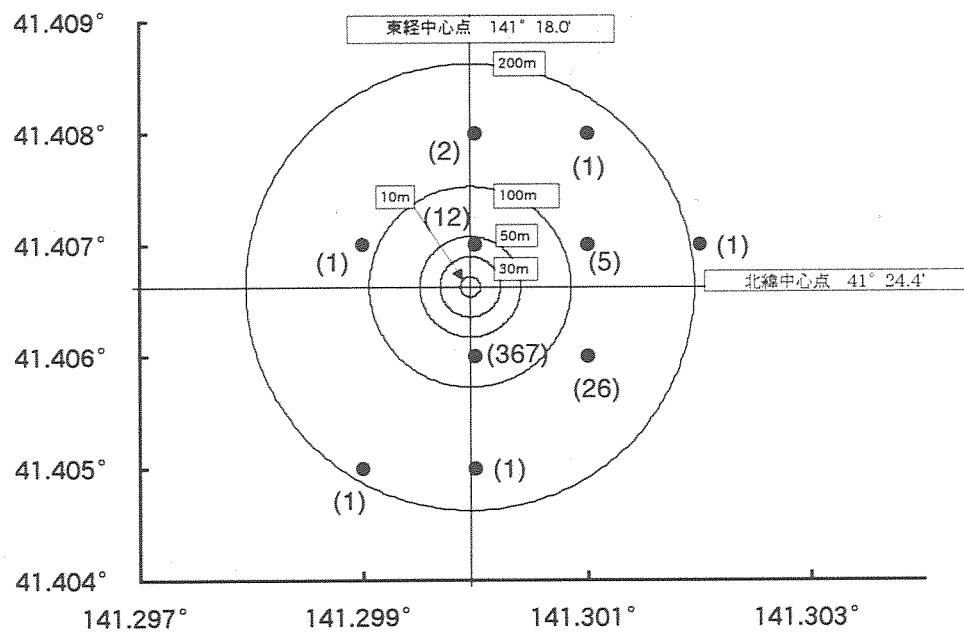


Fig. 4-1 SA解除後の測位データ
(括弧内はデータ数)

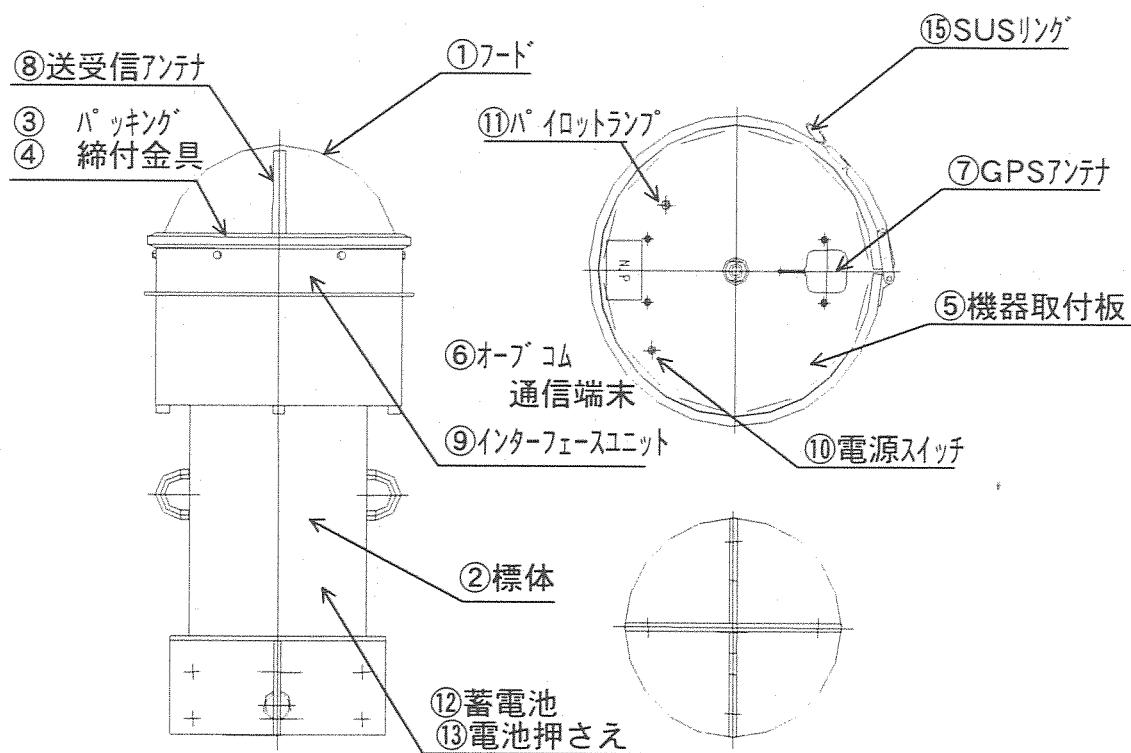


Fig. 4-2 改良した位置監視装置本体の形状と構成

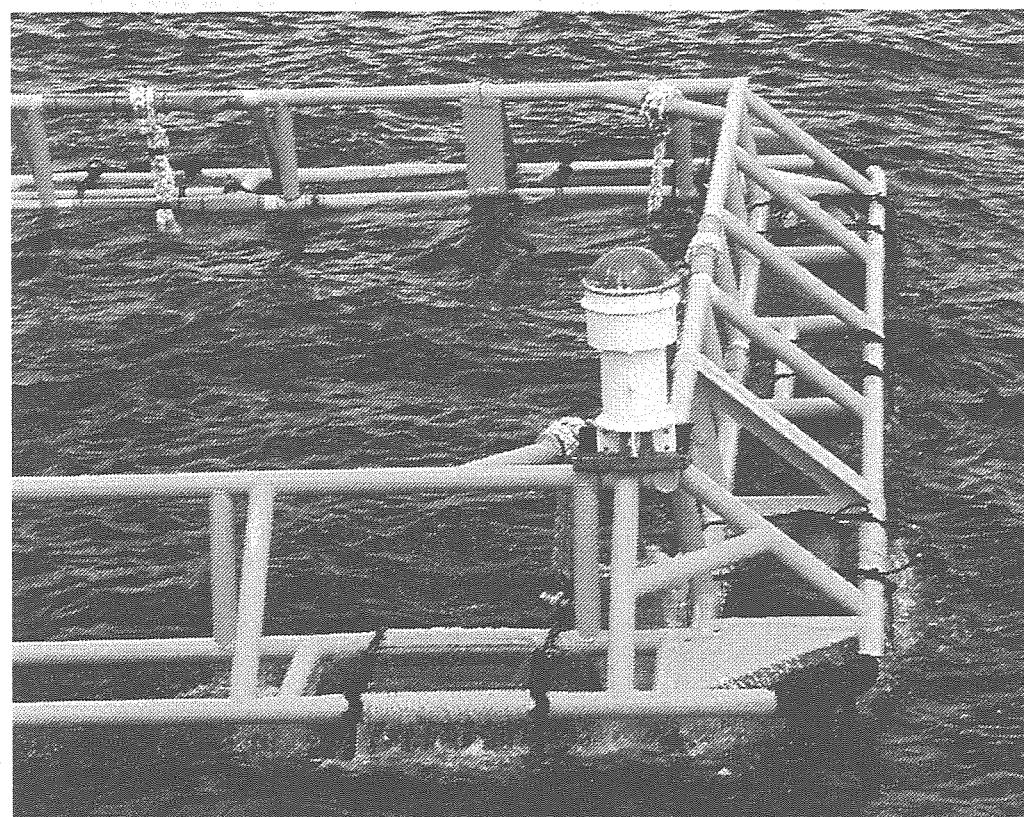


Fig. 4-3 鋼管フレームに取り付けた改良後の位置監視装置本体

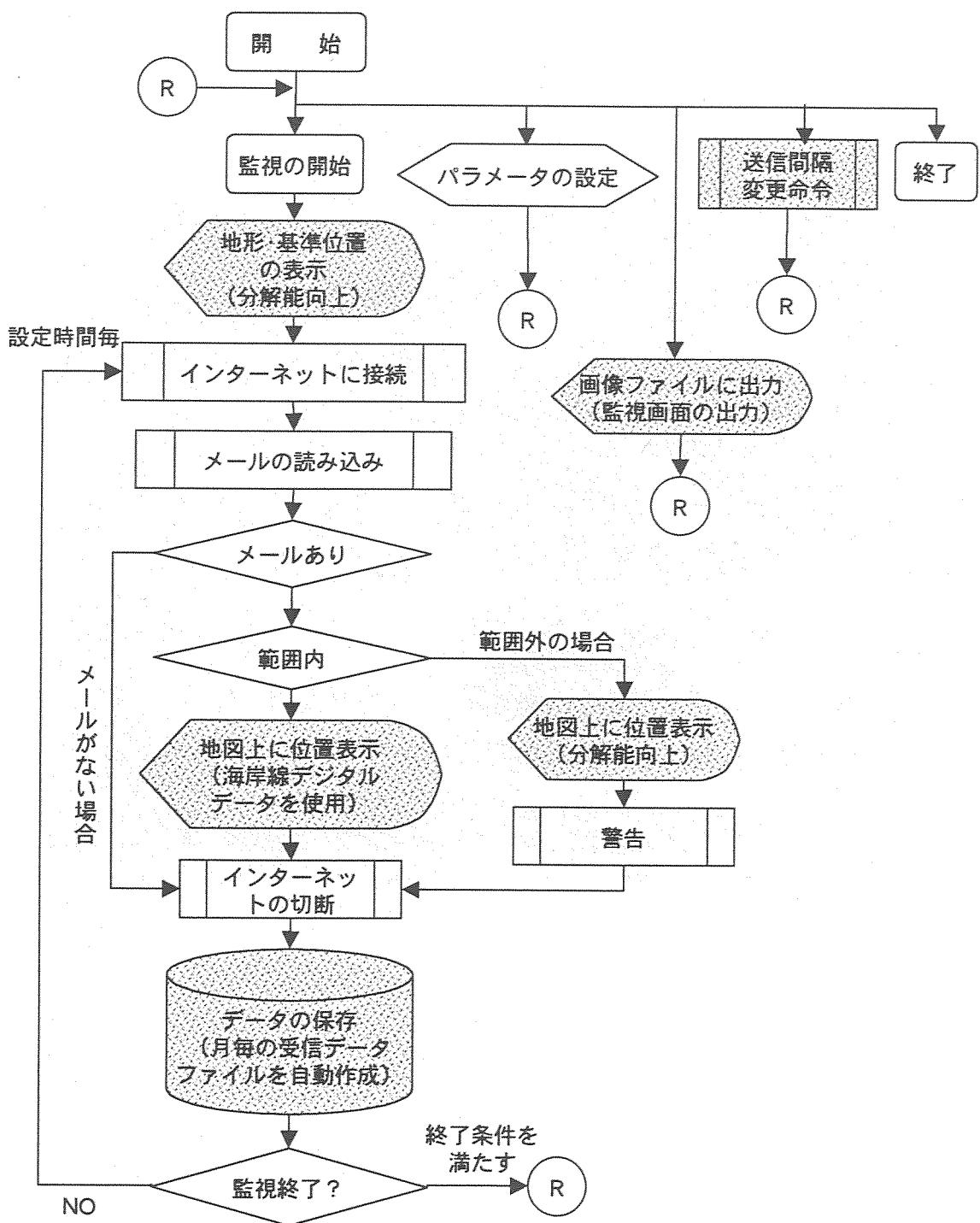


Fig. 4-4 機能を追加したフローシート (ver. 2)

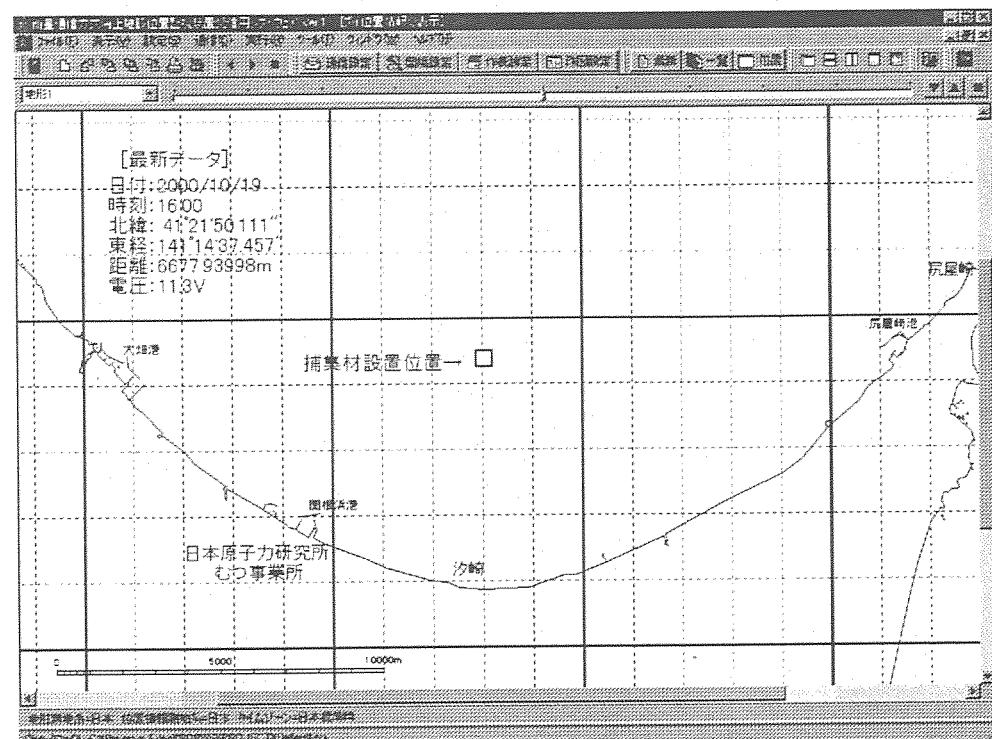


Fig. 4-5 デジタルデータを使用した測位
モニタ表示画面

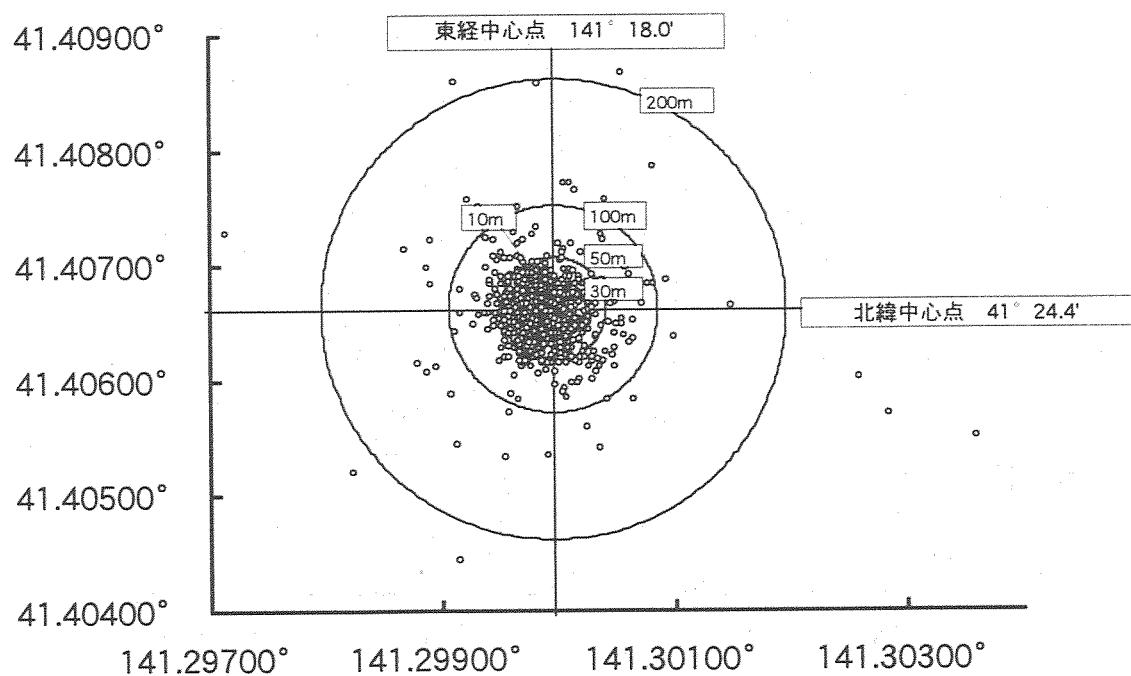


Fig. 4-6 分解能向上後の測位データ

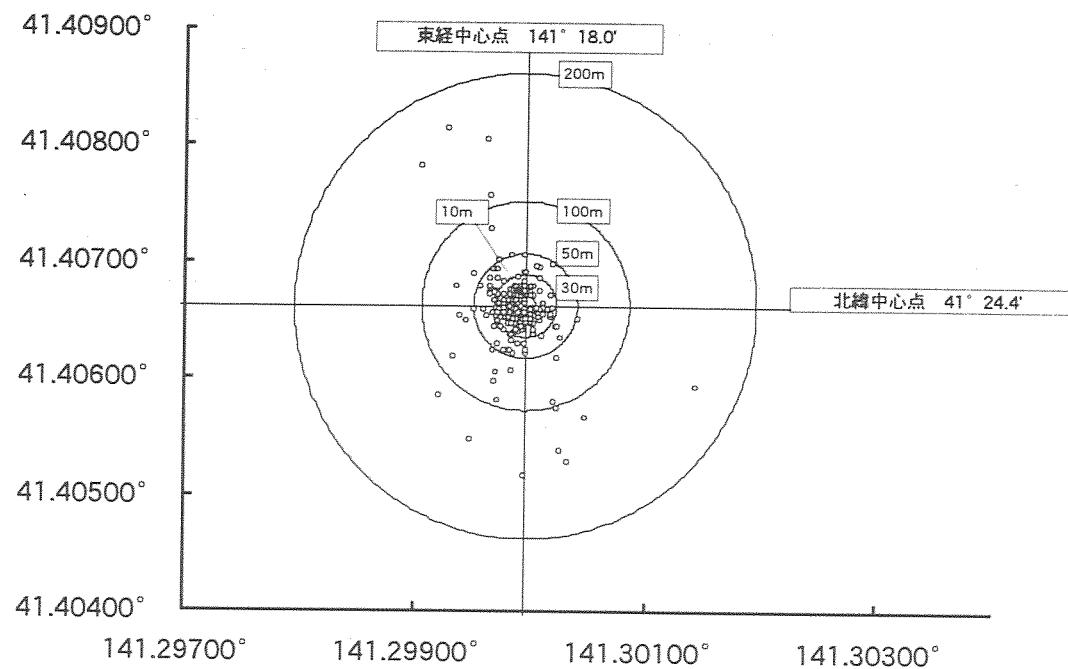


Fig. 4-7 PDOPの最適化を行なった測位データ

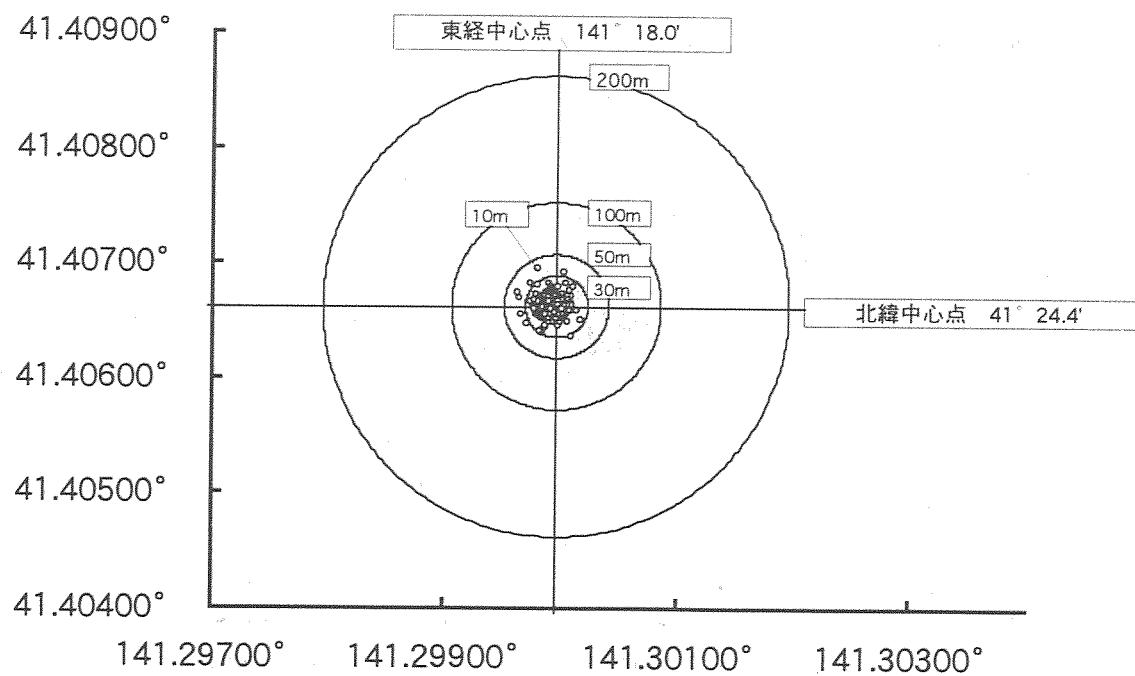


Fig. 4-8 平均化機能付加後の測位データ

<参考資料>

GPS部及び衛星通信部の原理

1. GPS部

GPSは、米軍により1973年に開発着手され、1993年、正式にGPS運用が開始された。これにより、地球上のいずれの場所、時刻でも、連続的に水平方向100m、垂直方向150mの精度でも測位が可能となった。米合衆国政府により、全世界のユーザに無償で開放されている。また、GPSの管理運営は、米国国防総省(DOD: Department of Defense)により行われている。

1) GPS衛星¹

Table 1に示すように、24機のGPS衛星が昇降点傾斜角約55度で昇降点経度が60度ずつ異なる6つの軌道面に4機ずつ配置され、全地球をカバーしている。Fig. 1にGPS衛星の軌道模式図を示す。したがって、地球上のどの位置でも任意の時刻に高精度の三次元位置の測定を可能である。衛星の周回周期は、1/2恒星日である約11時間58分2秒であり、約23時間56分4秒ごとに同じ配置の衛星が上空に現れる。位置の測定に使用される電波は、UHF(Ultra High Frequency)で周波数はL1=1575 MHz、L2=1227 MHzの2種類である。C/AコードとP(Y)コードと呼ばれる衛星ごとに互いに異なる擬似ランダム雑音(PRN: Pseudo Random Noise)で変調されている。一般に開放されているのはL1が乗せられたC/Aコードによる測位で、SPS(Stand Positioning Service)と呼ばれている。P(Y)コードによる測位(PPS: Precise Positioning Service)は、米軍関係者にのみ使用が許されている。GPS衛星から送信される航法データの伝送レート、構成、主な内容をTable 2にまとめた。

2) GPSを用いた測位法

GPS測位では、衛星から発射される電波が、ユーザの受信器に到達するまでの時間を最初に計測する。この時間と電波の速度c($=30\text{万 km/s}$)との積により衛星までの距離が求められる。ここで、GPS衛星は高精度な原子時計を搭載しているので 10^{-11} 以下の安定度であるが、ユーザ側では原子時計のような精度の装置を用意することが困難である。そのため、GPS衛星の時計と受信機の時計との間に常に誤差があり、距離誤差sが生じ、ユーザ受信器の演算によるGPS衛星-ユーザ受信器間距離を擬似距離と呼ぶ。この擬似距離を用いと位置計測の誤差が大きくなるため、以下に示す双曲線法を用いる。

便宜的に平面上にGPS衛星(送信源)を配置した場合、Fig. 2に示す。2つのGPS衛星からの距離の差が等しい点を求める。この等距離差の点の集合は2機のGPS衛星を焦点とする双曲線となる。さらに、もう一組のGPS衛星対からなる双曲線を求め、2つの双曲線の交点から位置を決めることができる。この双曲線は、位置の線と呼ばれる。距離の差の測定には必ず誤差が含まれるので、位置の線は測定誤差に対応する幅を持ち、同一地点で連続的に測位を行うと位置の線近傍に測位点が分布することとなる。送信源が一方に偏った場合、橢円の長軸は衛星方向に伸び、誤差は大きくなる。

3) 測位計算方法

Fig. 3に実際のGPS測位を示す。GPSでは、地球中心と橢円中心の一致した橢円体を基準にしたWGS-84(World Geodetic System 1984)により緯度、経度、高さが計算される

ようになっている。地球の中心を原点、地球の自転方向を Z 軸、グリニッジ基準子午面と赤道が交わる方向を X 軸、これら二軸と右手系をなすように Y 軸とする。ユーザの位置を $U(X, Y, Z)$ とし、また、必要な初期データはユーザ受信器で軌道情報から計算された i 番目の衛星の位置 $S_i(X_{Si}, Y_{Si}, Z_{Si})$ および疑似距離 ri は電波の飛行時間から測定され、(式 1) の関係が成立する。

$$ri = \sqrt{(X - X_{Si})^2 + (Y - Y_{Si})^2 + (Z - Z_{Si})^2 + S} \quad (\text{式1})$$

ここで S は受信器の時計誤差による距離への影響を表す。衛星の位置 (X_{Si}, Y_{Si}, Z_{Si}) は、衛星から送られてくる起動情報から求められるため、未知数 4 の方程式を解くために、4 衛星必要となる。そこで、未知数をその近似値と補正值との和で表して、式をその補正值について展開し、補正值は微小であると仮定することにより、二次以上の高次項を無視して線形化する。この近似計算法を用いて、必要な精度まで計算を繰り返し、衛星の位置を求める。測距誤差は 1σ (平均値からの標準偏差) 程度である。

4) 測位誤差

利用者等価測距誤差 (UERE:User equivalent Range Error) は誤差の値を 2 乗し、全ての和の平方根を取ったもので、受信器から衛星までの距離測定誤差に相当する。これに HDOP の 2 倍を掛けたものが 2DRMS である。測位点の位置を中心にして半径 2DRMS の円を描けば、その円の内側に全測位点の約 95% が含まれる。測位の誤差² の要因について以下に記載した。

a. 衛星時計のドリフト

GPS 衛星を使用した測位では、GPS 衛星からの電波がユーザ受信器に届くまでの時間を測定するため、衛星時計自身が正確でなければならない。GPS 衛星には極めて安定度の高い原子時計が用いているが、わずかながらドリフトする。これを世界 5 ヶ所に配置された地上の監視局でモニタし、時計の補正量を航法データとして衛星からコード信号に載せて送信している。ユーザはこれをもとに測定した擬似距離の補正を行っている。しかし、GPS 衛星には精度劣化操作として選択利用性 (SA : Selective Availability) が施されており、この SA の影響を受けずに GPS を利用できるのは、米軍関係者に限られている。SA は意図的に衛星の時計をドリフトさせることにより測位誤差を大きくしている。

b. 衛星の位置誤差

GPS 衛星の位置は測位点での位置決めの基準であるため、可能な限り正確に決定する必要がある。刻々の衛星位置は、衛星から送信される 16 個の軌道係数を用いて演算により求められる。これらの値は時計の修正量と同様に、地上の監視局でモニタし、修正を行っているが、更新までの間に、太陽や月の引力、太陽光の輻射圧などの外乱によりドリフトし、誤差が生じる。

c. 電離層および対流圏伝播誤差

GPS 衛星が発射する電波が地上に到達するまでに、地上約 50~200 km の電離層と大気の層を通過する。その際、電離層と大気の層の電子密度に比例し、電波の周波数の 2 乗に反比例して、電波の速度が変化する³。そのため、この値を補正する必要がある。P(Y) コードは 2

周波で送信されているので、電離層遅延量を補正可能であるが、C/A コードは 1 周波であるため、電離層の状況に応じて補正式を航法データに含めて送信される。補正是、モデル化により比較的容易であるが、湿度により変動するため誤差が大きくなる。

d. マルチパス誤差と受信機雑音について

GPS 衛星から発射された電波は GPS 衛星本体・近隣の構造物、地表で反射した電波とともに受信器のアンテナに到達する。これにより、直接到達する電波の波形が乱れ、到達時間の測定に誤差が生じる。これをマルチパス誤差と呼ぶ。受信器ではコード同期により復調されたコードの立ち上がりで、到達時間を測定するため、含まれる雑音が精度に影響を与える。

2. 衛星通信部

本監視設備は、衛星通信回線を利用して測位情報を送信する。利用可能な通信衛星は、高度が約 800 km であり、地球 1 周を約 100 分で周回している。現在、35 機の通信衛星が打ちあがっており、日本上空で利用可能な衛星は、27 機である。これらの衛星は低軌道周回衛星であるため、電波の送信パワーが抑えられ、機器が小型・軽量となり、海上での用途に適している。

衛星通信回線は、オーブコムジャパン社から提供されている通信サービスであり、低軌道周回衛星オーブコムを利用した第 1 種通信事業（第 1 種通信事業は、電話や、携帯電話と同じ通信事業のこと）である。

なお、送信される測位データは E メールで配信するため、高崎及びむつ事業所に設置したコンピュータにより測位情報を受信することができ、位置情報をモニタすることができる。また、緊急時には高崎研究所、むつ事業所に設置した以外のコンピュータでも受信可能である。

参考文献

1. 土屋 淳、辻 宏道：やさしい GPS 測量、(社) 日本測量協会 (1991) .
2. 宮本佳則：広域 DGPS の測位精度に関する基礎的研究、水産工学, 36, 229 (2000) .
3. 奥田邦晴：DGPS の補正データ伝送遅延における測位精度の劣化、水産工学, 36, 49 (1999) .

Table 1 GPS衛星の概要

衛星機数	4機×6軌道面
衛星設計寿命	7.5年
軌道半径	26,561km
周回周期	12恒星時間（約11時間58分2秒）
軌道傾斜角	55°
搬送波周波数	L1=1,575.42MHz (10.23MHz×154) L2=1,227.6MHz (10.23MHz×120)
測距信号	C/A code : L1波で送信、民生用に解放 P(Y) code : L1、L2で送信、非公開
地上受信電力 (仰角5°以上)	L1 : C/A code > -160dBW, P code > -163dBW L2 : P code > -166dBW
搭載原子時計	セシウム原子周波数標準器2台 ルビジウム原子周波数標準器2台
単独測位精度	C/A code : 約100m (2DRMS:SA on) P code : 約16m (2drms)

Table 2 GPS衛星からの航法データ

伝送レート	50bps
構成	1500bit／フレーム 1周期（12.5分）25フレーム
主な内容	衛星位置情報 搭載時計の情報（GPS時間との差） 電離層補正データ 他の衛星の位置情報

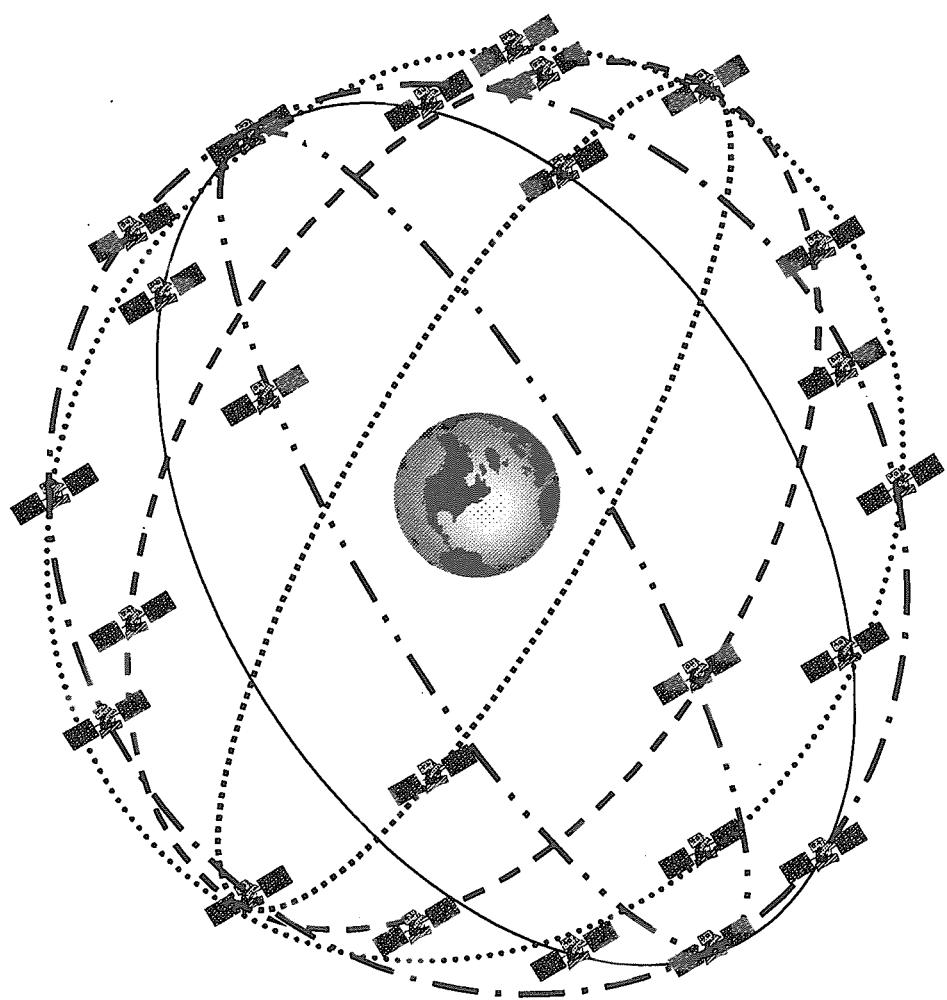


Fig. 1 GPS衛星の軌道模式図

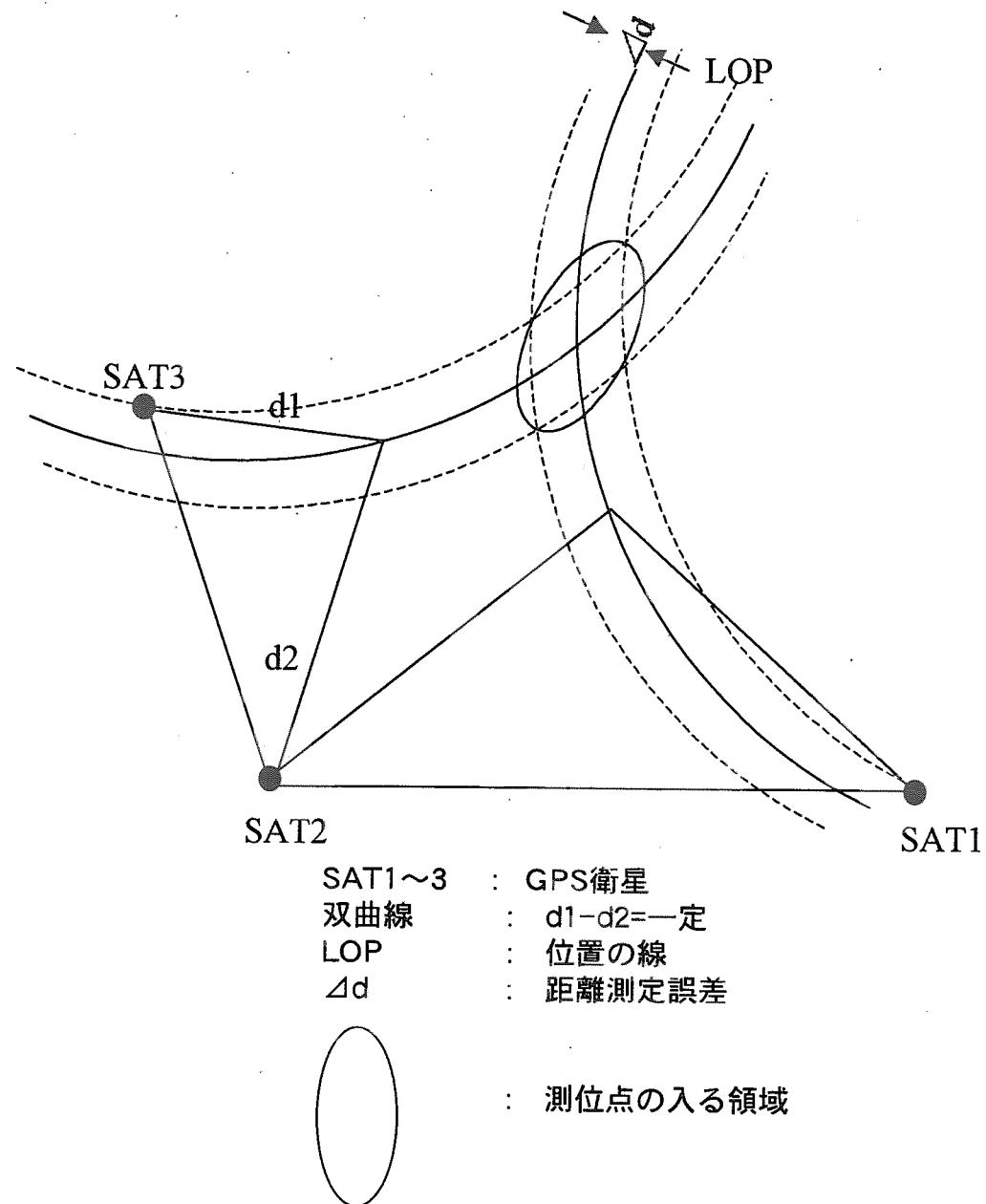
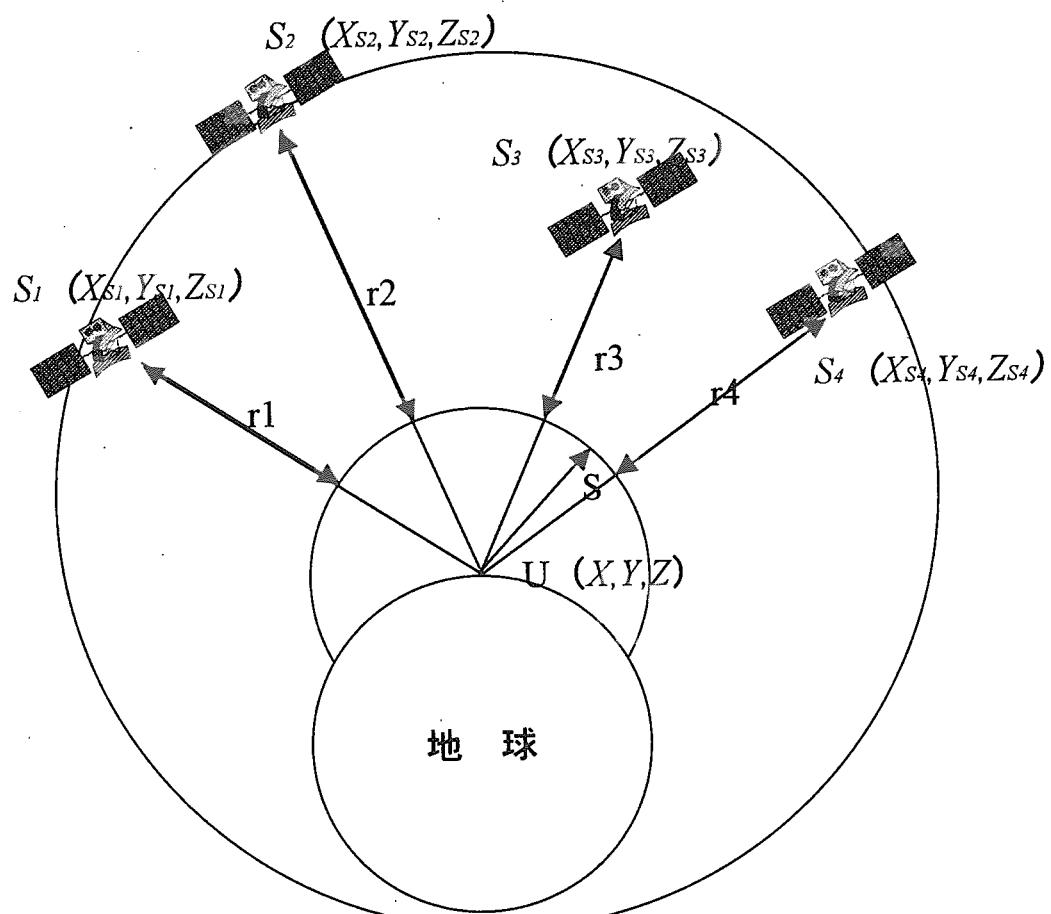


Fig. 2 GPS測位における双曲線法



$r_1 \sim r_4$: 疑似距離
 $S_1 \sim S_4$: GPS衛星の位置
 U : ユーザの位置

Fig. 3 GPS測位

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

1. 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
1	10.1972	0.224809			
9.80665	1	2.20462			
4.44822	0.453592	1			
粘度 1 Pa·s(N·s/m ²)	= 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))				
動粘度 1 m ² /s	= 10 ⁴ St(ストークス)(cm ² /s)				
力					
1	0.0980665	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
9.80665	0.101325	1	0.967841	735.559	14.2233
4.44822	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.03323	1	760	14.6959
	6.89476 × 10 ⁻³	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
		7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸		= 4.184 J(熱化学)
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		= 4.1855 J(15 °C)
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		= 4.1868 J(国際蒸気表)
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹		仕事率 1 PS(仏馬力)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹		= 75 kgf·m/s
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸		= 735.499 W
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100		1	3876		1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1		2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

海上設備位置監視装置と測位精度の向上
漂流防止対策—海上設備の漂流試験における海域推進材の実用化

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。