

深海曳航データ表示装置

門馬大和*¹ 堀田 宏*¹

海洋科学技術センター試験研究報告第7号で、ジンバルシーブの開発とその使用結果について述べた。その後、幾つかの改良を加えた2号機を製作し、潜水調査船母船「なつしま」による深海曳航調査において重要な役割を果たしている。

深海曳航中のケーブルに関するデータは全て本シーブで計測され、線長、張力のほか、ケーブル角等から、先端の曳航体位置を求めることが可能である。そこで、これらのデータをオンライン処理し、カラーCRTへの表示、データのプリントおよび収録を可能とした。これによって、従来は帰港後に手作業で行っていた解析が大幅に省力化された。曳航体位置は、音響測位結果によって補正されているので、音響航法によらない水中位置の測定が可能である。また、本装置はドレッジやコアサンプリングにも応用されたが、これらにも偉力を発揮することがわかった。

Deep Tow Cable Data Display by the Gimbaled Sheave

Hiroyasu Momma*² Hiroshi Hotta*²

A prototype and an improved Gimbaled Sheave was developed in 1979 and 1981, and has been used during twenty cruises of the Deep Tow sea floor survey. The sheave has six sensors to monitor cable length, tension, angle and direction. The cable data are processed using a microcomputer and displayed on a color CRT display, printed on a printer and stored in a 5 1/4" soft disc. There are three display modes on a CRT. The first is a plan view of the relative position of the ship and the towed body, the second shows a vertical section of them, and the third is raw data from each sensor.

This cable data display system makes possible online processing and display, and saves great man-hours for offline data analysis. The positions of the towed body calculated from the cable data are corrected using the reference positions of the acoustic positioning system.

This system is also very useful in dredging and coring, where careful cable handling and ship maneuvering are required, as the cable direction and tension are visually monitored.

*¹ 深海研究部

*² Deep Sea Research Department

1. ま え が き

海洋科学技術センター試験研究報告第7号で、「深海曳航用ジンバルシーブ」の開発について述べた。本シーブは、深海曳航中のケーブルの損傷を防止することおよび、ケーブルの挙動を定量的に把握することを目的として1979年に開発され、これまでに、20次（1985年6月末現在）にわたる試験および調査に使用された。この間、1981年度には、さらに改良を加えた2号機を製作した。これは、1号機に比べて機構を小型化し、さらにシーブ自重等の完全なキャンセル、高精度の線長計の装備を行ったものである。これによって、曳航中のケーブルがとりうるあらゆる変化に対して、シーブを完全に追従させることが可能となった。また、潜水調査船「しんかい2000」の母船「なつしま」のAフレームにも搭載可能とし、深海曳航式探査システムの使用範囲を拡大した。

ジンバルシーブの機構は、すでに報告した通^{1,2}りであるが、シーブがジンバル機構で支持されており、各旋回軸には角度センサが設置されている。したがって、これらの角度を検出し、曳航中のケーブルの方向を知ることができる。さらに、線長を計測すれば、ケーブル先端すなわち、曳航体位置の推定が可能である。

当初は、各センサの出力をペンレコーダに記録し、調査終了後5～10分ごとに読み取って解析を行っていた。この方法は、労力が極めて大きく、現場で真値を直読できないという欠点があった。システム運用上の安全性の面からも曳航中のケーブルデータを実時間で知る必要が生じた。

以上の理由から、1983年度にケーブルデータをマイクロコンピュータによりオンライン処理し、カラーCRTへの表示、データの収録等を可能とした。曳航体と船の位置関係は、平面図および鉛直断面図として表示できるので、曳航状態が視覚的にモニターできる。これは、ウインチ操作および操船上極めて有効であることがわかった。

船位は常に電波航法で求められているので、上の方法で求めた曳航体の相対位置をプロットすると、音響航法と同様に曳航体の水中位置が求められる。これは、ケーブルを直線と仮定した近似的方法であるが、音響航法と比較した補正係数が得られているので、船が一定コースを航走している

場合の位置はかなり精度が高い。

ソナーやカメラを用いた深海曳航式探査システムによる調査は、原則として海底にトランスポンダを設置して、高精度の測位を行っているが、海域が広範囲の場合や、時間的余裕のない場合は、トランスポンダを使用しないことがある。このような場合、上の方法は極めて有効であり、これまでもたびたび実行している。

2. ジンバルシーブの主要性能

ここでは、改善したジンバルシーブ2号機の主要性能について簡単に説明する。1号機と2号機との違いは以下のとおりである。

- (1) 1号機によって、曳航中のケーブルがとりうる角度の範囲が明らかになったので、これを考慮して小型化をはかった。
- (2) 1号機は、シーブの自重がキャンセルされていなかったもので、ガイドアームによって強制的にシーブをケーブルに追従させていた。このため、低張力下でシーブの追従性が若干低下する傾向が見られた。そこで、2号機ではシーブの自重をバランスウエイトでキャンセルし、いかなる条件下でも完全に追従させることが可能となった。
- (3) ロードセルと角度センサのほか、高精度（6,000 mに対して±1.5 m）の線長計を設置した。これによって、ジンバルシーブにおいて曳航中のすべてのケーブルデータが計測可能となった。
- (4) 1号機と一緒に専用のAフレームを製作したが、2号機もこれと適合可能とした。また、潜水調査船「しんかい2000」の母船「なつしま」船尾Aフレームにも取り付け可能とした。従来、「なつしま」ではAフレームの左船側張出しにシーブを吊ってソナーを曳航する計画であった。しかし、この位置と方法では曳航上の制約が大きく、ケーブルや曳航体を傷める危険があった。ジンバルシーブの採用によって、本格的な深海曳航調査が可能になった。

図1に、専用のAフレームおよび「なつしま」Aフレームに設置したジンバルシーブとその曳航状態を示す。



図1(a) 専用のAフレームに設置し、深海曳航中の
ジンバルシーブ2号機

An improved gimbale sheave under deep towing.

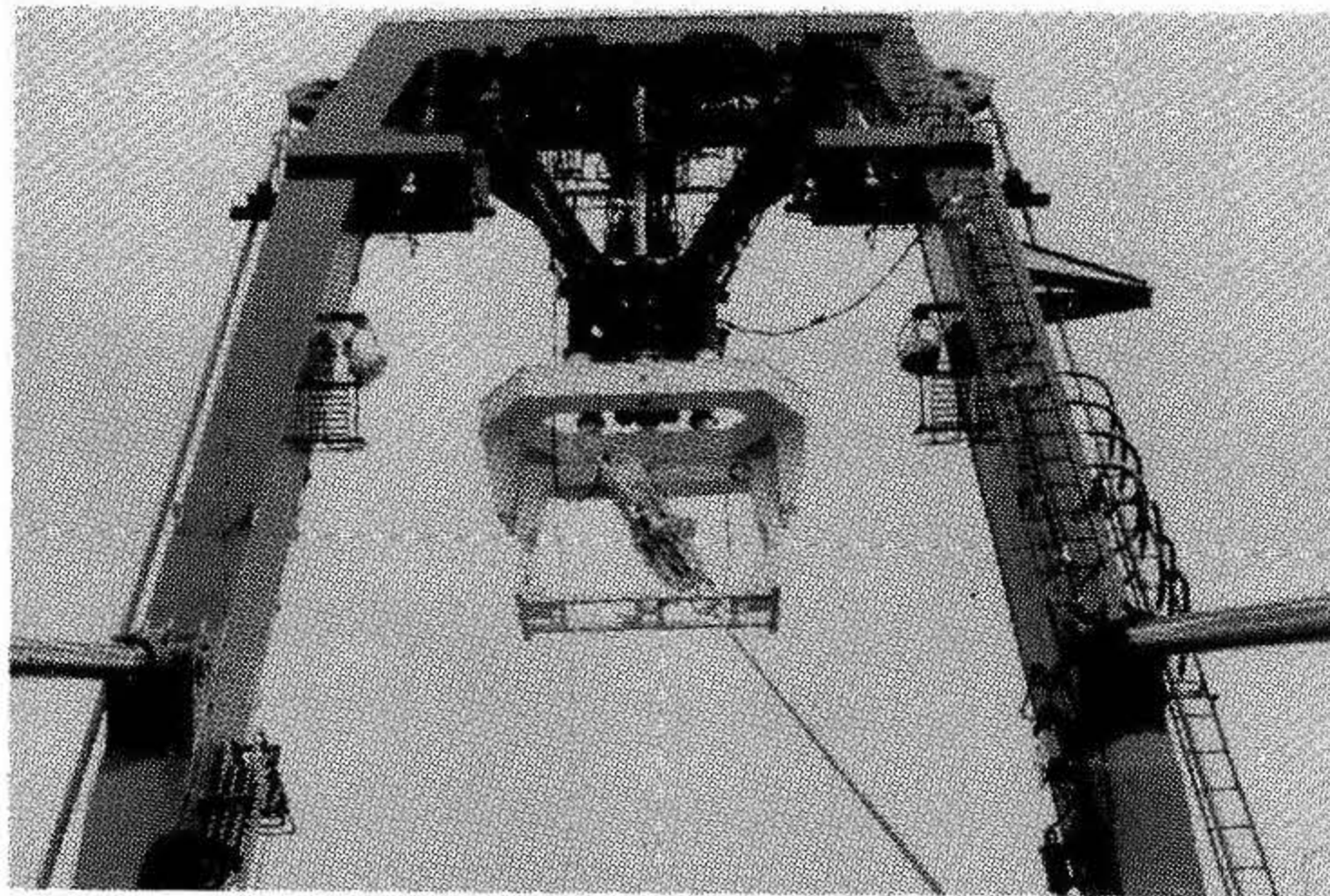


図1(b) 取付ワクを介して、「なつしま」船尾Aフレームのペンダントフレームに設置された2号機、この写真はシーブの前後のケーブルが重なる角度から撮られたものであるが、シーブの面もこれと一致していることがわかる。

The gimbale sheave is put on the pendant frame (A-frame) with special attachment. The A-frame in this picture is installed on the R/V "NATSUSHIMA" a mother ship of the deep submersible "SHINKAI 2000". The cable which comes into and goes out the sheave coincides with the sheave.

3. ケーブル角等による曳航体位置 の推定方法

ジンバルシーブの各旋回軸は一点で交わっており、これはAフレームすなわち船に対する固定点である。したがって、この固定点に対するケーブルの方向を求めることによって先端、すなわち曳航体の位置がわかる。

図2のように、Aフレームに固定した仮想の直交座標系を設定する。すなわち、X軸は船首船尾方向と直交し、右舷方向を正、Y軸は船首船尾方向で、船尾方向を正、Z軸は鉛直下向きを正とする。また、X軸の回転(θ_x)により、Y軸及びZ軸はそれぞれY'軸、Z'軸に移行する。さらに、Z軸の回転(θ_z)により、Y'軸およびX軸はY''軸、

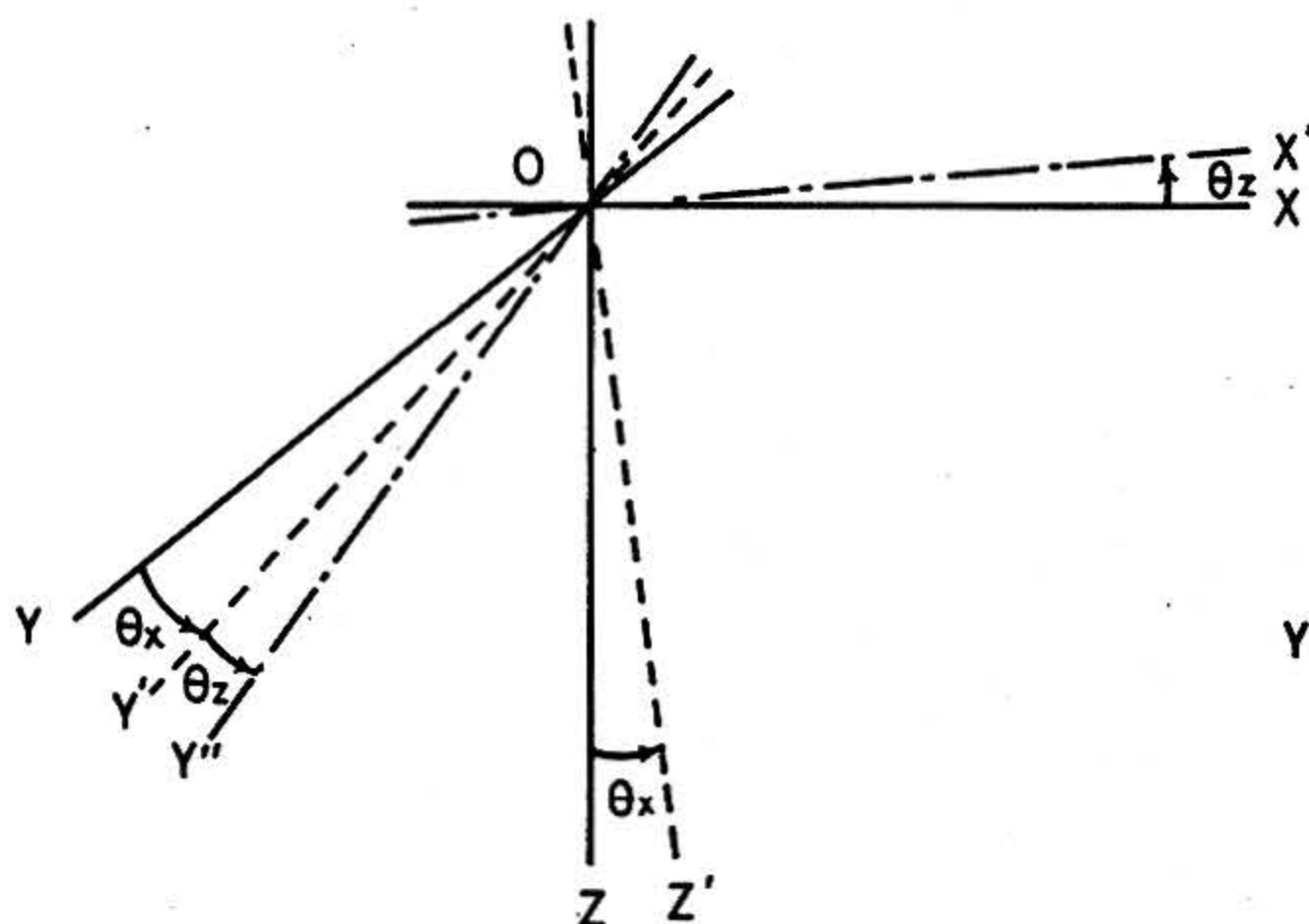


図 2(a) A フレーム (船) に固定した仮想の座標系、X 軸の回転 (θ_x) により、Y 軸は Y' 軸、Z 軸は Z' 軸に移行する、Z 軸の回転 (θ_z) により、X 軸は X' 軸、Y' 軸は Y'' 軸に移行する。

Rotations of the original XYZ coordinate system. Y and Z axes move to Y' and Z' with rotating X axis by θ_x , and also X and Y' axes move to X' and Y'' with rotating Z axis by θ_z .

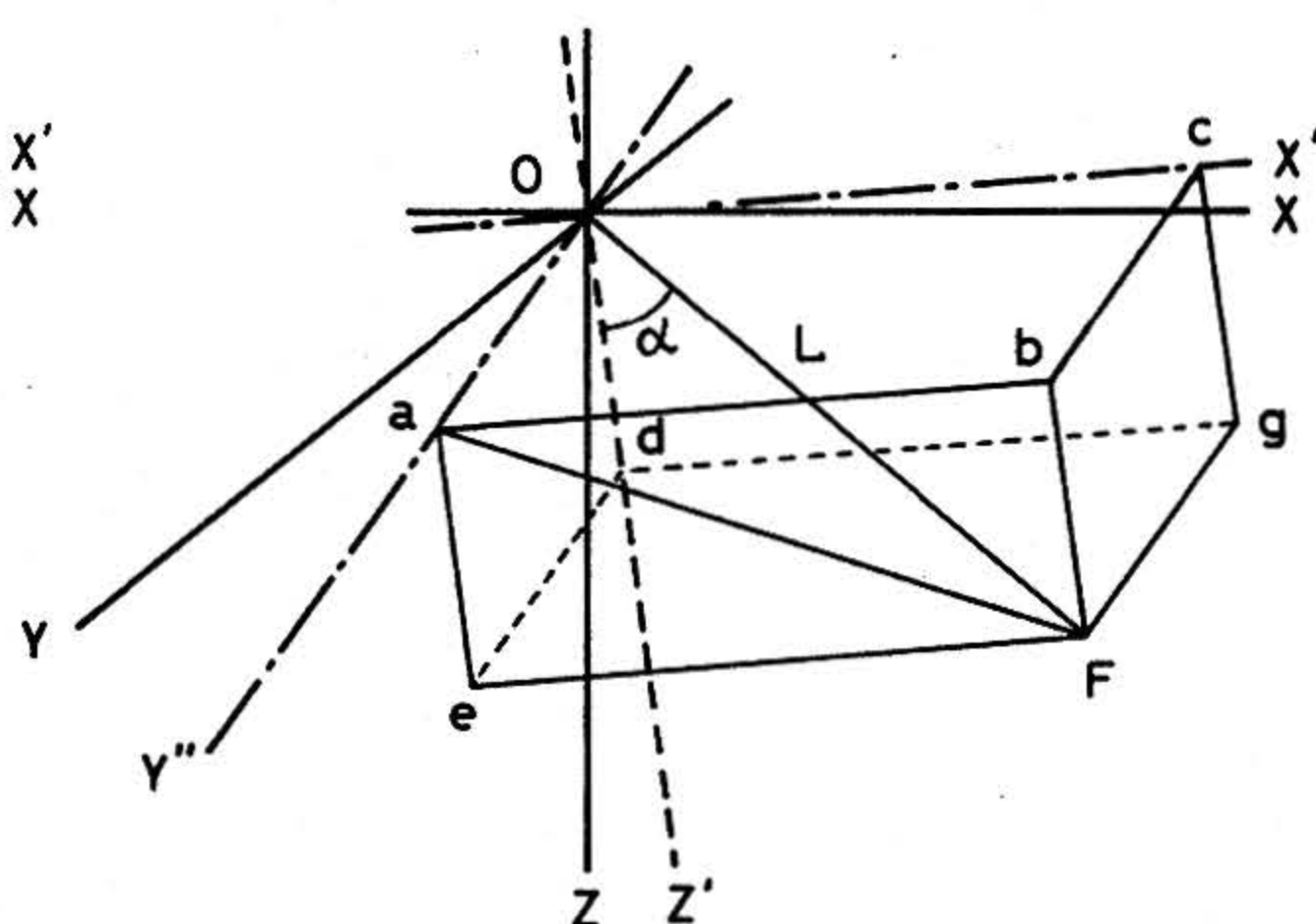


図 2(b) (a)の座標系と曳航体位置 F の関係図、点 F を回転後の座標軸に投影すると、直方体 OabcdFg ができる。これを元の座標軸に戻すと、点 F の船に対する位置がわかる。

The fish position could be obtained by transforming hexahedron OabcdeFg, which was projected a point F to X' Y'' Z' coordinates to the original XYZ coordinate system.

X' 軸となる。曳航体位置 F は、X' Y'' Z' 座標系の各軸を底辺とする直方体の、原点に対する対角線上にある。これらを X Y Z 座標系に変換すれば、船に対するケーブルの方向がわかる。

曳航中のケーブルの形状を直線と仮定すると、線長が OF となるのでケーブル先端、すなわち曳航体の位置が次式のように与えられる。

$$X_F = L (\sin \alpha \sin \theta_Y \cos \theta_Z + \cos \alpha \sin \theta_Z) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$Y_F = L (\cos \alpha \cos \theta_Z \cos \theta_X - \sin \alpha \sin \theta_Y \sin \theta_Z \cos \theta_X - \sin \alpha \cos \theta_Y \sin \theta_X) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$Z_F = L (\cos \alpha \cos \theta_Z \sin \theta_X - \sin \alpha \sin \theta_Y \sin \theta_Z \sin \theta_X + \sin \alpha \cos \theta_Y \cos \theta_X) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし、

L : 線長 (m)

α : ケーブル接触角 ($^\circ$) (図 2(b)参照)

$\theta_X, \theta_Y, \theta_Z$: X, Y, Z 各軸旋回角度 ($^\circ$)

4. 深海曳航データ表示装置

ジンバルシーブに設置されたセンサは、ロードセル、X, Y, Z 軸角度計、ケーブル角度計、および線長計の六つである。従来、これらセンサの出力は、ペンレコーダに記録されていた。したがって、船上では角度、張力等の変化の傾向を知るのみで、データの解析は、帰港後ペンレコーダの記録を読み取って行っていた。この方法は時間と

労力を要するので、マイクロコンピュータを用いてオンライン処理を行うこととした。

図 3 にシステムハードウェアの構成を示す。すなわち、処理装置本体に NEC PC-8801Mk II Model 30, 表示にカラー CRT およびドットプリンタを用いた。ソフトウェアおよび処理データの収録は、本体内蔵の 5 1/4 インチソフトディスクに行う。

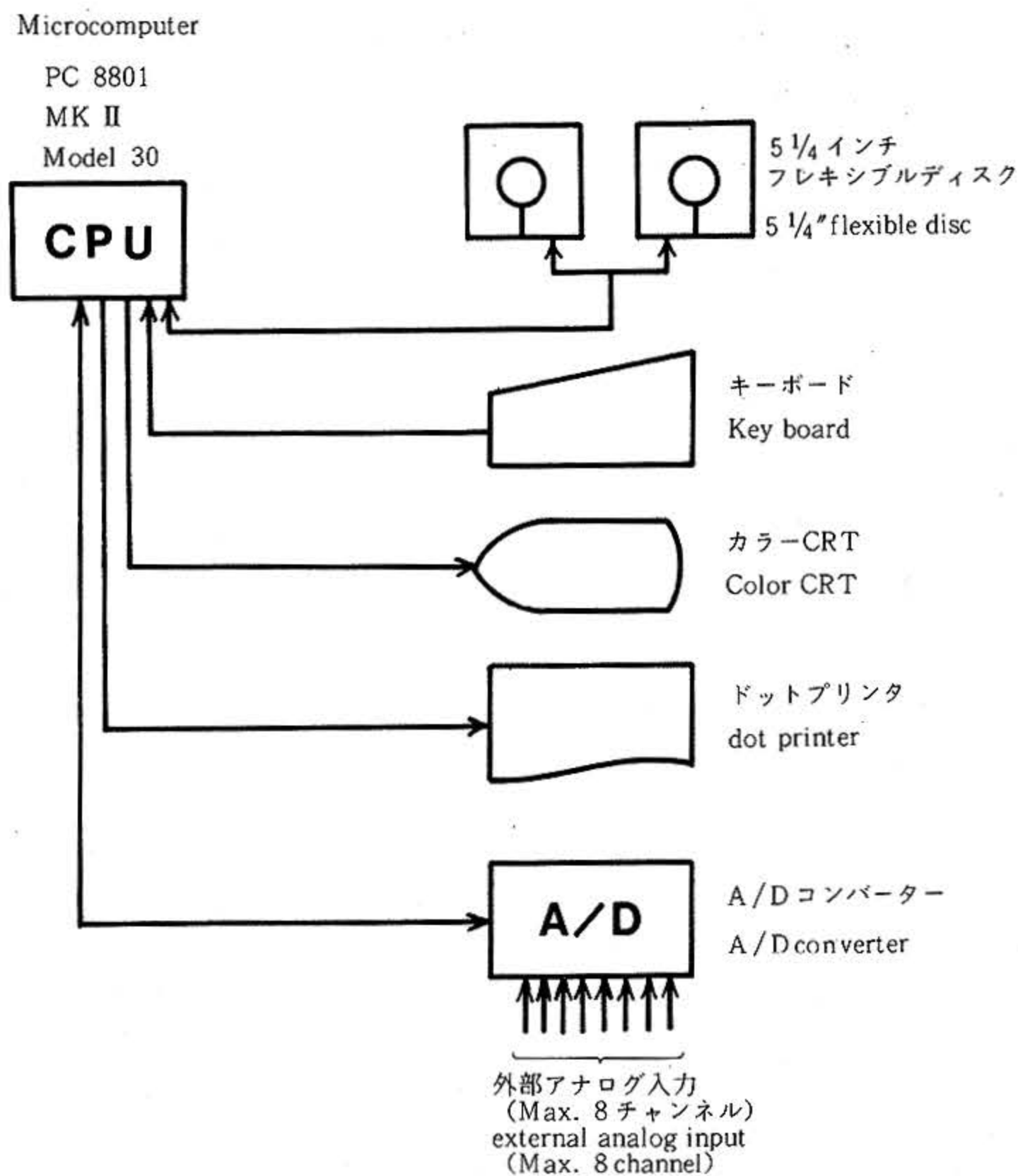


図3 深海曳航データ表示装置
Block diagram of the deep
tow cable data display

4.1 ソフトウェアの概要

ソフトウェアは、データのオンライン処理と収録、およびデータの再生に大別される。

オンライン処理は、各センサの電圧出力を張力、線長、角度等に変換し、曳航体の位置計算を行う。結果はカラーCRTにデジタル表示すると共にプリンタに時刻と共に印字される。また、船と曳航体の位置関係は、平面図または鉛直断面図としてカラーCRTに表示される。これらの表示モードおよび表示スケールの指定はキーボード操作で行う。

各センサの出力、特にロードセル出力は船の動揺周期にはほぼ同期した変動出力であるため、移動平均の周期を可変にしている。また、カラーCRTの表示モードには、各センサの電圧出力をアナログ表示でモニターするモードがある。これによりシステムのチェックや移動平均周期の選択が可

能である。

ケーブルデータのみでは曳航体の絶対方位が不明であるため、ジャイロの出力を取り込むことが可能であるが、現在はおよそ5分ごとにキーボードから手入力している。

オンライン処理ではこのほか、5 1/4インチソフトディスクに生データおよび処理結果を収録する。図4にカラーCRTディスプレイの表示例を、表1にオンライン処理結果の印字例を示す。

データのオフライン処理すなわち再生は、収録データを再生し、生データおよび処理結果をプリントするもので、カラーCRT表示は行わない。再生の開始は、時刻またはデータIDの指定により任意の位置から可能である。表2に再生データのプリント例を示す。線長以外の各データは変動幅があるので、生データは移動平均値と平均区間の最大および最小値を表示する。

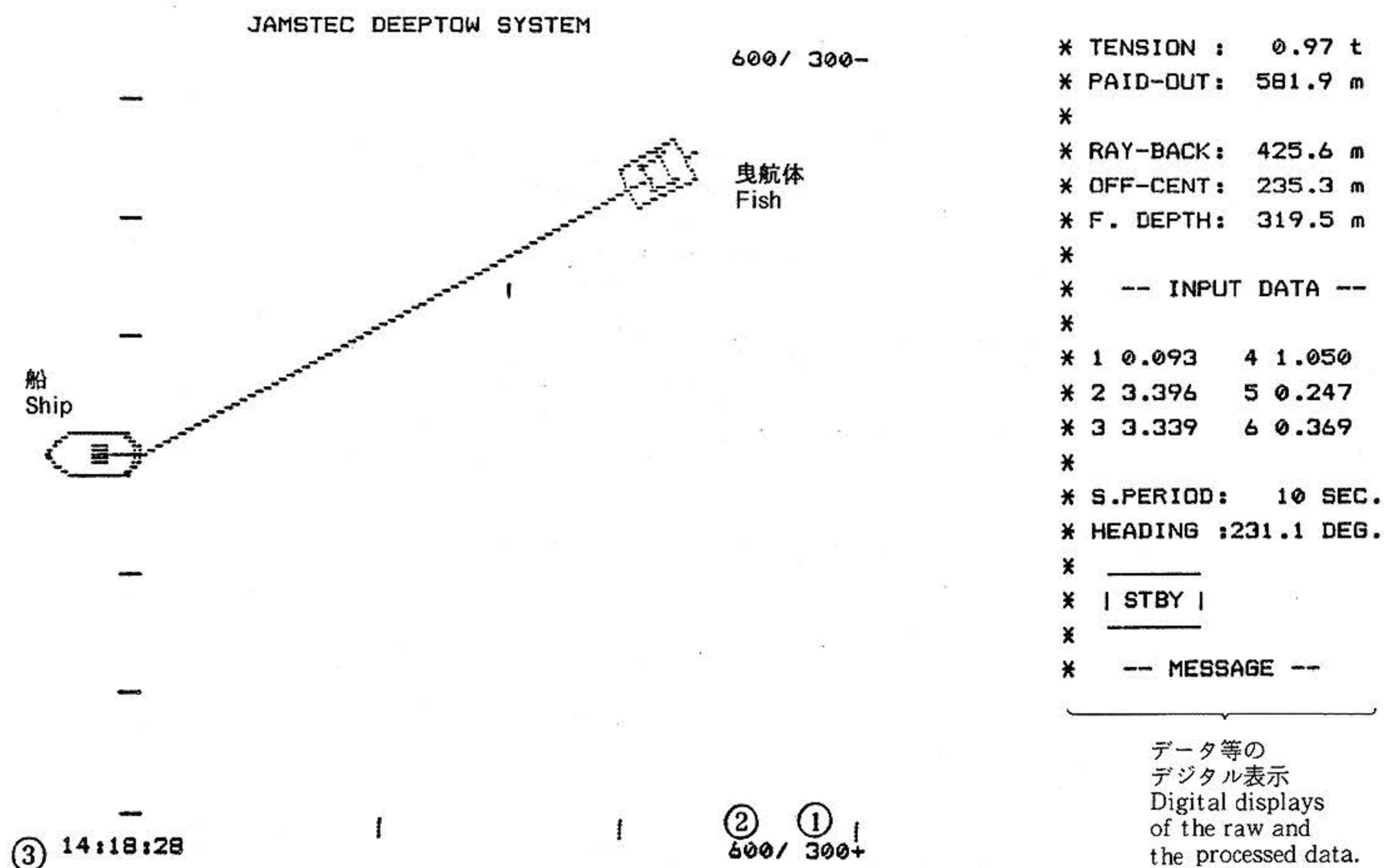


図 4(a) 平面図ディスプレイモード

①縦軸レンジ ②横軸レンジ ③表示データの時刻

An example of plan view display. ① Vertical range

② Horizontal range ③ Time of day of the displayed data

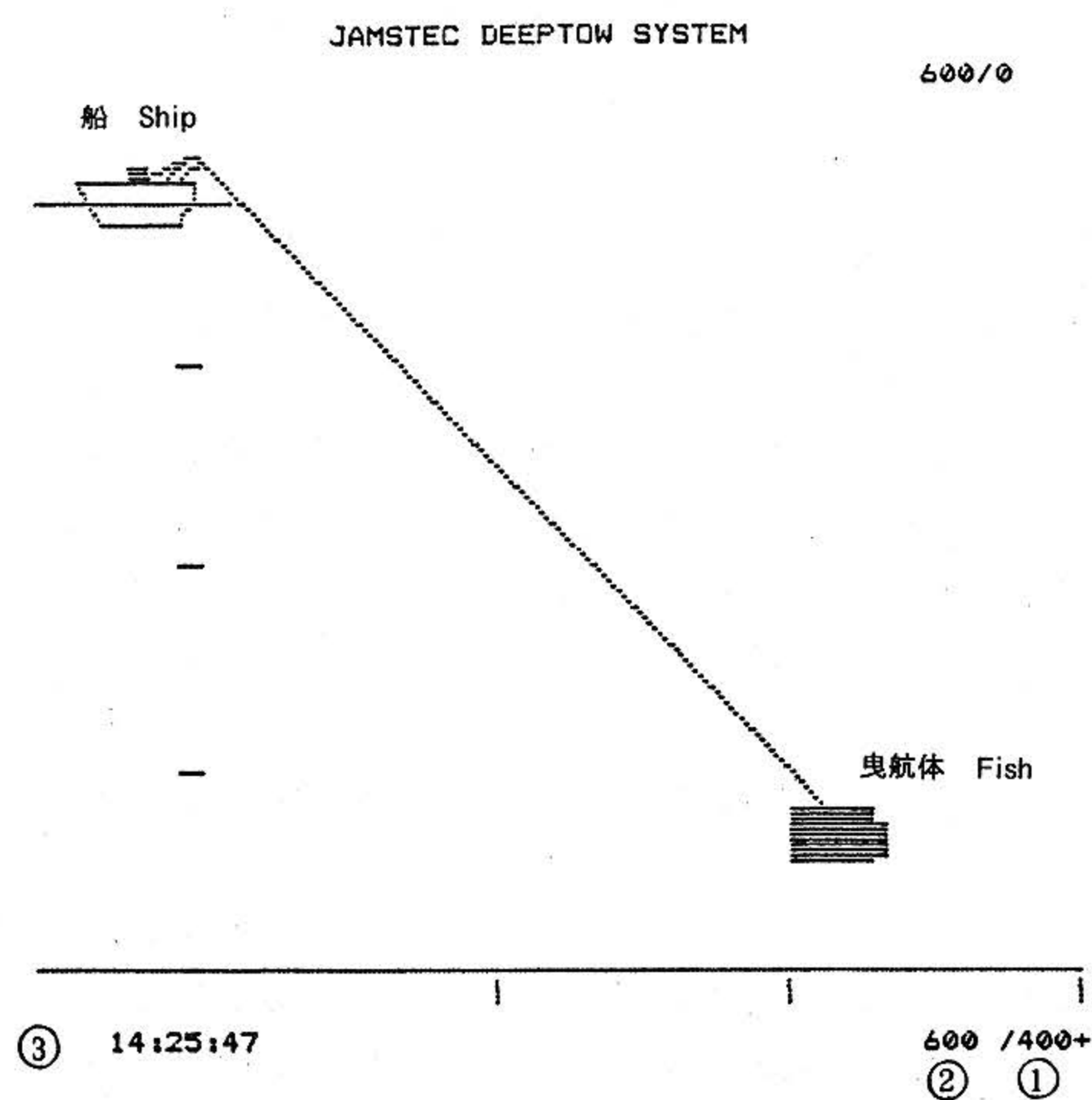


図 4(b) 鉛直断面ディスプレイモードの例

An example of vertical section display. Captions from ① to ③ and the digital data display are the same with Fig 4(a).

An example of online print out of the processed data

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
X                                     X
X      JAMSTEC DEEPTOW SYSTEM      X
X                                     X
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

1984/06/19

TEST
VER.02

***** STANBY --> GO *****

TIME = 13:32:33
DISK NO. 2

TEST VER.02 TOW

S. PERIOD = 2 SEC. REC. EXEC. = 1

TIME	S.HDG	F.DIR	S-F(m)	F-D(m)	C-L(m)	CANG	CT(t)
13:32:39	0.0	157.3	509.1	289.6	585.7	29.63	1.11
13:33:03	0.0	157.3	507.5	288.6	583.8	29.63	1.11
13:33:26	0.0	157.3	507.6	288.4	583.8	29.60	1.11
13:33:51	231.2	28.5	507.5	288.6	583.8	29.63	1.10
13:34:22	231.2	28.6	507.5	288.6	583.8	29.62	1.10
13:34:46	231.2	28.6	507.4	288.7	583.8	29.63	1.10
13:35:24	231.2	28.6	507.5	288.6	583.8	29.62	1.10

An example of off line data processing

TIME	S.HDG D.TYPE	F.DIR CHN(1)	X (m) CHN(2)	Y (m) CHN(3)	Z (m) CHN(4)	CT(t) CHN(5)	C.L(m) CHN(6)
13:32:39	0.0	157.3	196.7	469.6	289.6	1.11	585.7
	MAX.	0.0586	3.2430	3.2064	0.7729	0.2589	
	AVR.	0.0578	3.2393	3.2056	0.7723	0.2573	0.3712
	MIN.	0.0574	3.2381	3.2039	0.7705	0.2527	
13:33:03	0.0	157.3	196.0	468.1	288.6	1.11	583.8
	MAX.	0.0586	3.2430	3.2064	0.7729	0.2589	
	AVR.	0.0578	3.2393	3.2048	0.7718	0.2569	0.3700
	MIN.	0.0574	3.2357	3.2039	0.7692	0.2527	
13:33:26	0.0	157.3	196.0	468.2	288.4	1.11	583.8
	MAX.	0.0586	3.2430	3.2064	0.7729	0.2601	
	AVR.	0.0575	3.2390	3.2051	0.7723	0.2569	0.3700
	MIN.	0.0574	3.2381	3.2039	0.7705	0.2527	
13:33:51	231.2	28.5	196.0	468.1	288.6	1.10	583.8
	MAX.	0.0598	3.2418	3.2064	0.7729	0.2601	
	AVR.	0.0578	3.2384	3.2048	0.7720	0.2558	0.3700
	MIN.	0.0574	3.2357	3.2039	0.7692	0.2491	

4.2 深海曳航データ表示装置の使用結果

本装置は1984年3月に製作され、プロジェクト研究「深海調査研究」および受託研究「インド洋・太平洋」における深海曳航調査に使用された。

ケーブル張力はCRTにデジタル表示されるとともに、プリンタに印字される。これを横軸を線長、縦軸を張力として表示したのが図5である。これは、曳航式カメラを海底まで降下し、観察終了後ケーブルを巻き上げた際の張力変化を示している。ただし、図示した張力は10秒ごとの移動平均である。図のように、ケーブルの繰り出しと巻き上げ時の張力はヒステリシス曲線を描き、破線で示した静的張力がその中間に位置することはこれまでの結果と同様である³。従来は、ペンレコーダからロードセルの出力と、ケーブル接触角を読み取り、電卓で張力に換算していたが、本装置によって大幅に省力化された。

次に、ケーブル角等から求めた曳航体の船に対する相対位置について述べる。現在の方法は、曳航中のケーブルの形状を直線で近似しているため、

実際よりも曳航体の水平距離が大きく、深度が小さく出るはずである。そこで、この方法で求めた曳航体の水平距離と、SSBL（スーパーショートベースライン）式音響航法装置による測位結果を比較した。図6に両者の航跡図を示す。この図の場合の水深は約800mであるが、船がほぼ直進している際の誤差は100m以内である。

このような比較を複数の海域で行い、曳航体位置（水平距離）の換算式を求めると、次式のようにになる。

$$H \div 0.95 H' \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし、

H : 真の(音響測位に換算した)水平距離

H' : ケーブル角等から求めた水平距離

このように単に補正係数0.95を乗ずるのみで換算できるのは、曳航速度がほぼ一定(約1.5kt)であるためと思われる。したがって、この補正係数を用いればケーブルのカテナリを考慮しなくても水中位置精度を上げることができる。

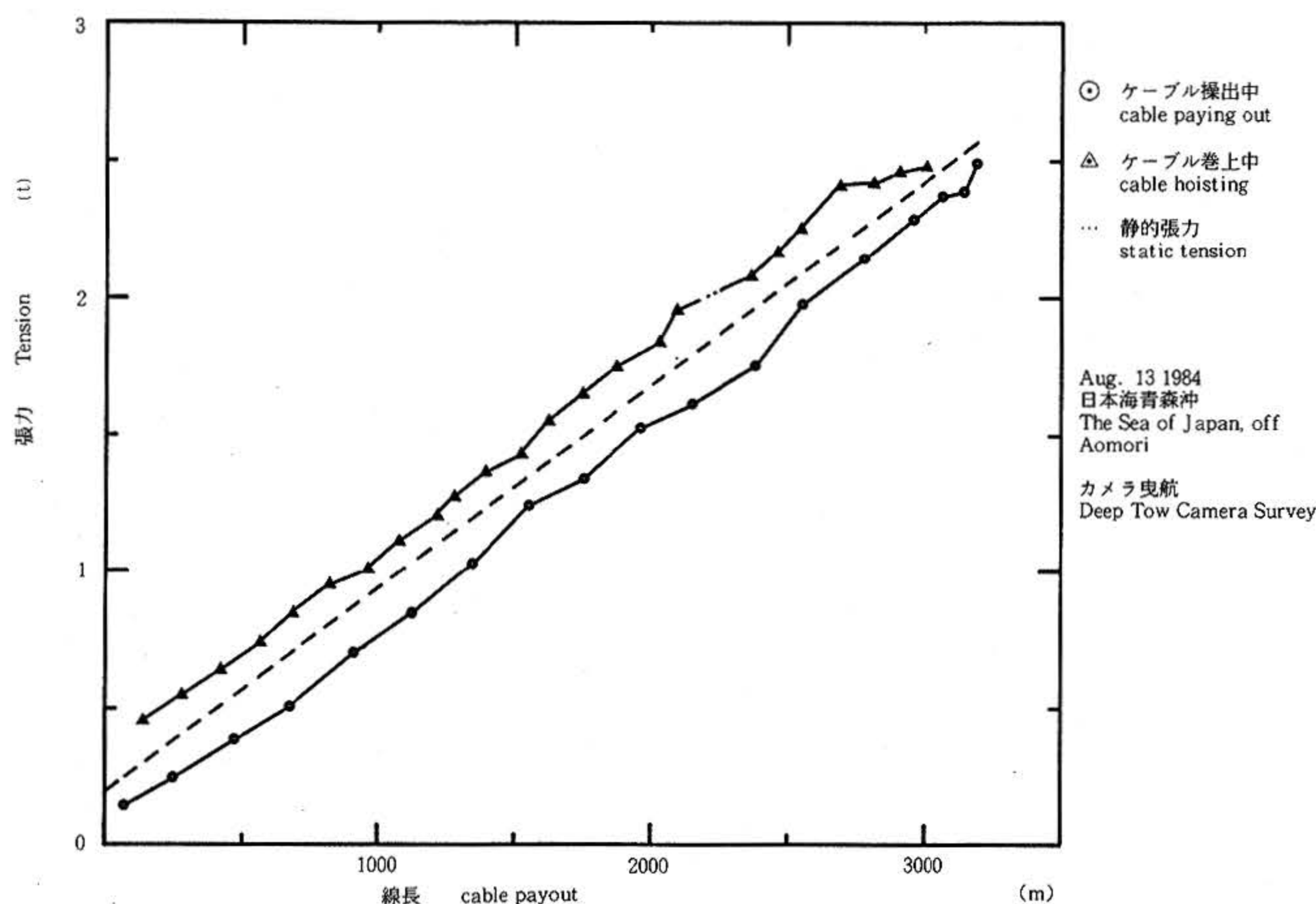


図5 ケーブル繰出及び巻上中の線長と張力の関係。張力は10秒間の移動平均値を示す。破線は、ケーブルと曳航体の自重から求めた静的張力。

Cable length vs cable tension. The lower and the upper curves correspond to cable paying out and hoisting. Each tension shows moving average in ten seconds.

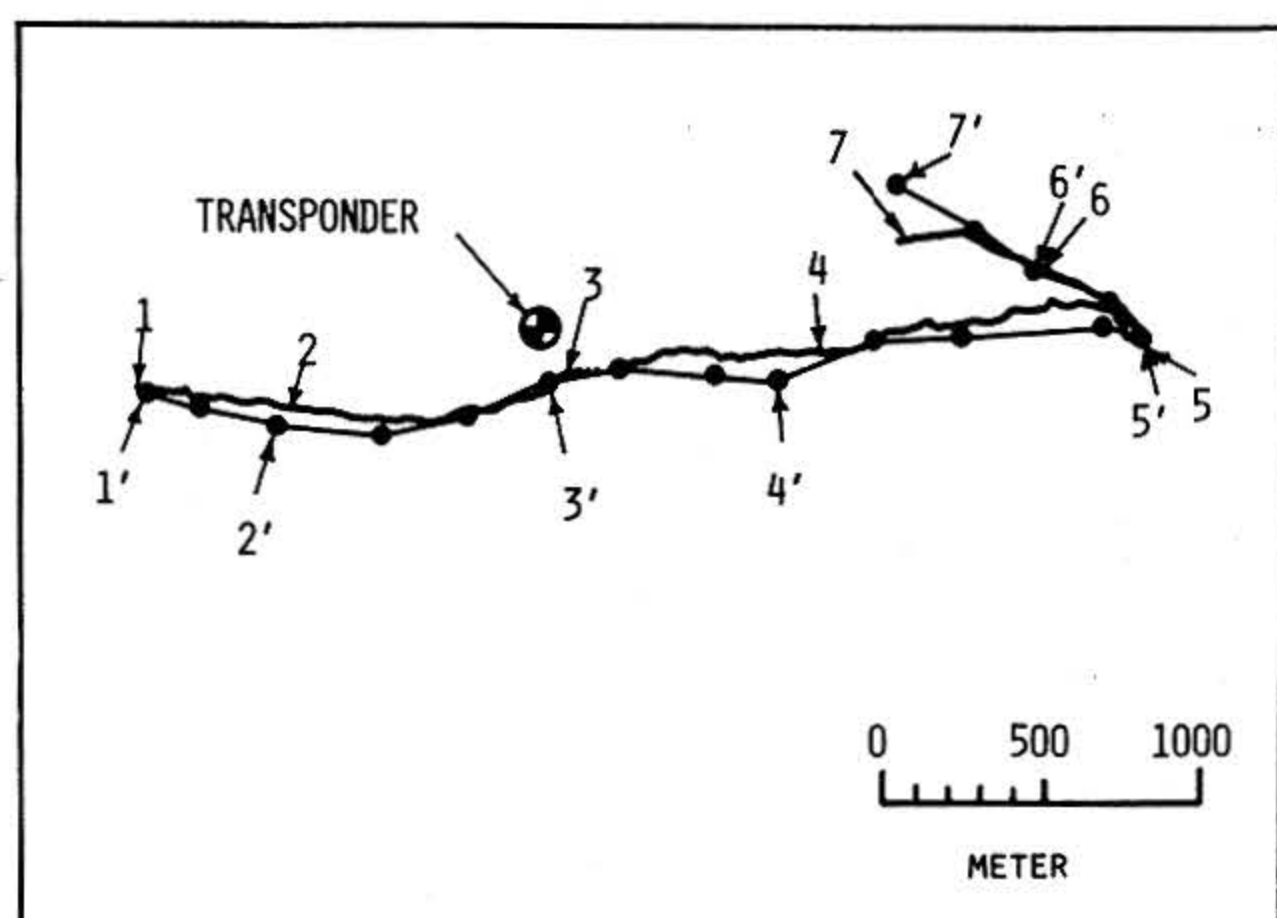


図6 音響航法装置及びケーブル角度から求めた曳航体水中位置の比較。数字はそれぞれの対応する位置を示し、プライム付の数字はケーブル角度から求めた位置を示す。水深約800m。

Comparison of fish tracks between acoustic positioning system (non-primed number) and calculated from cable data (primed number). Water depth about 800 m.

4.3 ドレッジおよびコアリングへの応用

1984年11月14日から12月13日にかけて、トンガ海溝域の国際共同調査が行われた。その際、地質調査所によりドレッジおよびコアリングが行われた。海洋科学技術センターも深海曳航調査を行うべく「なつしま」と共に参加した。したがって、Aフレームにジンバルシーブが取り付けられていたため、これを利用してドレッジおよびコアリングを行った。これらの運用上の要点は、着底の正確な検出と、ケーブル角度の把握である。着底による張力の微小な変化は、ペンレコード記録と併せて検出することができた(図7)。コアリングでは、ケーブルを出来るだけ鉛直に保つことが必要であるが、CRTディスプレイの鉛直断面表示により、操船が極めて容易に行われた。また、ドレッジは過度の張力が加わらないように、ケーブル張力の監視が極めて重要であるが、ペンレコード記録と張力のデジタル表示により、正確な監視を行うことができた。ドレッジおよびコアリングは、期間中合計20回行われ、成績は良好であった。

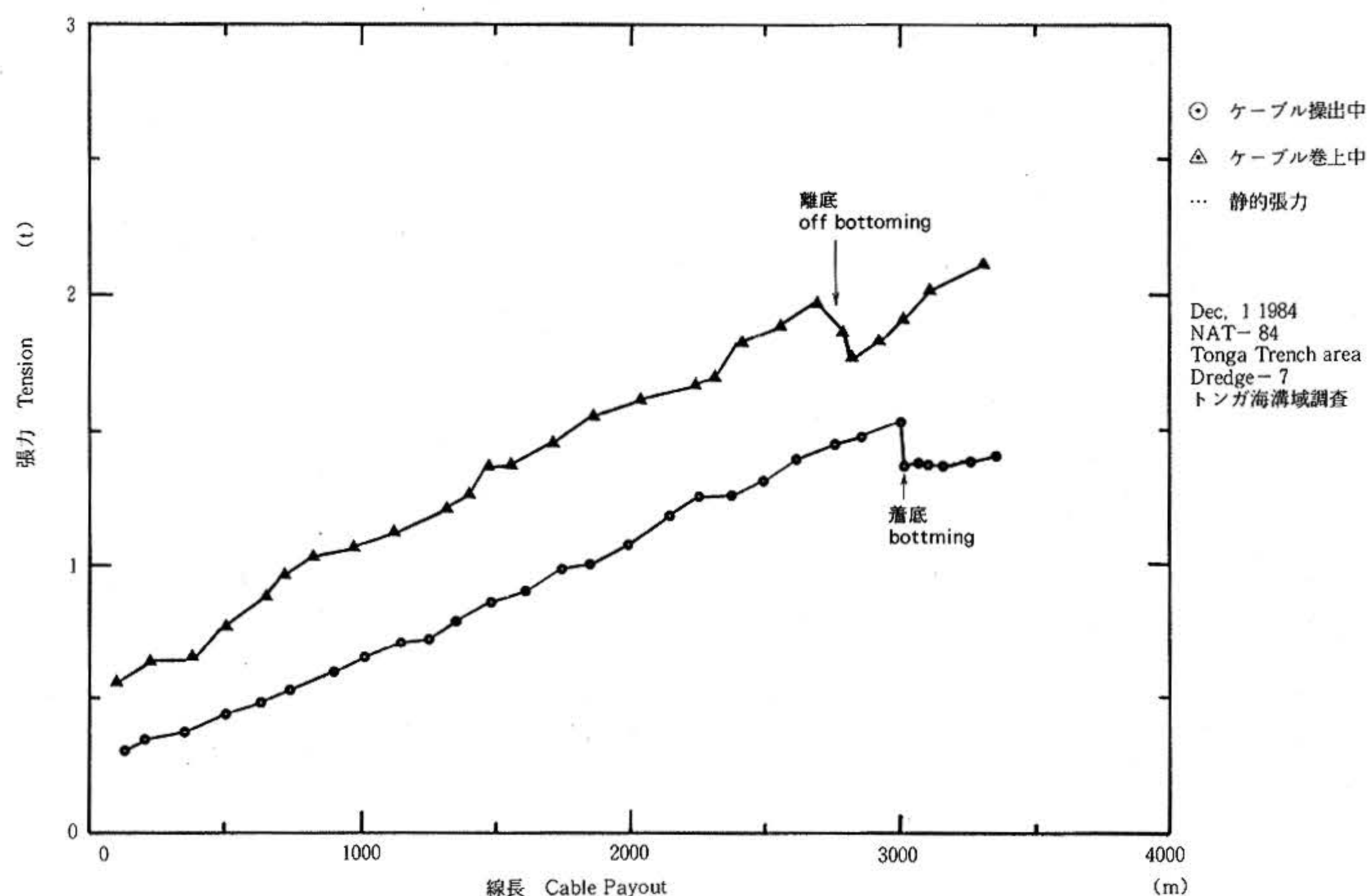


図7 ドレッジを行なった際の線長と張力の関係。着底および離底による張力の変化が分かる。

Cable length vs cable tension. The lower and the upper curves correspond to cable paying out and hoisting. Drastic changes of cable tension are shown at the bottoming and the off bottoming of dredge bucket.

これは、本表示装置に負うところ極めて大で、内外の研究者の高い評価を受けた。

5. ま と め

ジンバルシーブは、1号機の製作以来合計20次にわたる深海調査および実験に使用され、鎧装ケーブルの損傷防止と曳航中のケーブルデータの計測に大きな役割を果たして来た。今日では海洋科学技術センターの深海曳航調査に欠くことの出来ない装置となっている。

今回報告した「深海曳航データ表示装置」は、深海曳航の安全性の向上、データ処理の省力化、音響航法のバックアップとして大きな成果を上げつつある。

曳航中のケーブルの形状は、実際には直線ではなく曲線であり、特に変針中は曲面となるので、直線近似の誤差は大きくなる。しかし、深海曳航調査の測線は、通常直線的であり、大きな変針は他の測線に移行する場合に行われる。このため、本装置では直線的に航走している場合の位置測定に主眼を置き、さらに音響航法による補正を行った。したがって、比較的単純な方法にもかかわらず、その精度は悪くない。

ケーブルの形状について補足すると、これまでに水深6,000m海域において約1ktで曳航を行った場合、ケーブルはほぼ直線と見なしうるとい

う結果が出ている。³

6. 謝 辞

本装置の開発にあたって、基本的ソフトウェアの開発にあたった、元東海大学大学院修士課程実習生の中村泰之氏、装置の最終的なまとめに当たった(株)ジェイ・イー・エスの照屋貴司氏に深く感謝の意を表する。また、海洋調査に際して協力を頂いている「なつしま」船長以下乗組員のかたがたにも併せて謝意を表する。

文 献

- 1) 門馬大和, 堀田 宏, 1981 “深海曳航のための船上曳航装置—ガイドアーム付ジンバルシーブ及びAフレーム—”, JAMSTECTR (7)1-23
- 2) Momma, H., Hotta, H., “Development of a Gimbal Type Sheave for Deep Towing”, Proc. OCEANS'83, San Francisco, 1983-9, IEEE/MTS, 1983, vol.1, 270-273
- 3) 海洋科学技術センター, “「追跡調査のための深海底探索調査システムに関する対策研究」昭和55年度成果報告書”, (1982)

(原稿受理: 1985年3月30日)