

小型超音波ドップラー式流況精査装置の開発

松澤誠二*¹ 甲斐源太郎*² 神崎 正*³

近年、海洋における流速計測の手法として各国で超音波を利用した測器の開発が盛んである。超音波ドップラー式の流況計は、船舶に装備し、航行しながら測定が可能なため、注目されている。

本研究で開発した、小型超音波ドップラー式流況精査装置は、周波数 125KHz のパルスを 4 方向に発射する“Janus”方式を採用し、水深 400m 以浅の海域において、深度 100m までの流況 (流向流速) を最大 16 層に分割して測定し、各層の平面ベクトル、鉛直プロファイル等を、リアルタイムで船上表示する。

本装置は、船舶に装備し、航走しながら同時に多層の測定が可能であるため、短時間で広範囲の流況が立体的に把握できるようになった。

本報告では、超音波ドップラー式流況精査装置の概要と、機械式流速計との比較、および実海域での試験結果について述べる。

Development of Doppler Current Profiler

Seiji Matsuzawa *⁴ Gentaro Kai*⁵ Tadashi Kanzaki *⁶

This paper describes the system-design of the Doppler Current Profiler, and some experimental results.

Doppler current measurement systems are becoming a useful technique for remote investigation in shallow coastal areas.

The Doppler Current Profiler is pulsed 115 KHz by a four-beam “Janus configuration” transducer array. Reliable measurement of the bottom in excess of 400 meters and horizontal currents have been profiled to depths of 100 meters separated into 16 layers simultaneously.

The system can be used on a moving ship and a CRT terminal provides a real-time display.

*¹ 深海研究部

*² 海洋開発研究部

*³ 大成建設(株)技術本部海洋開発室

*⁴ Deep Sea Research Department

*⁵ Marine Research and Technology Department

*⁶ Taisei Corporation, Technical Development Department

1. はじめに

最近、海洋土木工事をはじめとする、沿岸海域の利用、開発が活発になるにつれて、これらが海洋環境にあたえる影響をできるだけ詳しく予測したり、把握したりすることが重要になってきた。

このような環境アセスメント、あるいは、環境の把握には、先ず、流れの状況をできるだけ精度よく知る必要がある。

従来、流速測定では、主に、ブイなどに取り付けられた機械式の流速計が、必要な深さのところに一定期間設置され、その回収後に、計測データを読み出すという方法が普通であった。

この方式による測定では、1台の流速計について、一点（一層）のデータしか得られない。したがって、水平方向および鉛直方向に密度高く、流向・流速の分布を知りたい場合には、多数の流速計を設置、回収する必要があるので、多大な労力と経費と運用技術が必要になってくる。そのうえ、特に沿岸部では、流れ藻やビニールなどの浮遊物が流速計の回転部などに巻き付いて、測定器の正常な動作が維持できなくなることがしばしば発生している。

一方、近年、海洋における流速の測定手法として、各国で、水中超音波を利用する流速計の開発が始まっている¹⁾²⁾

この超音波ドップラー・プロファイラー式の流速計の特徴は、船に一度装備してしまうと、航走するだけで、何日でも、広い海域でも測定できることであるので、その運用法上の長所のみならず、深さ方向に関する多層の流向、流速および音響散乱強度が測定できるという点で注目されている。

すでに、この原理を利用する潮流計は、わが国においても市販され、主として、漁業関係者の間で利用され始めている。しかし、これらの製品は水中における測定層数が3～5層と少ないばかりでなく、一層あたりの層厚が大きく設定されているので、深さ方向に、かなり平均化処理された値が用いられているので、海中での流れの様子をより詳しく知る上では、十分とはいえない。

この報告では、浅海域用の小型の超音波ドップラー式流況精査装置の開発を目的として、測定船上にて、実時間で多層の流況が把握できる装置の開発および浅海域試験の結果を述べる。

なお、この流況精査技術の開発は、海洋科学技術センターと大成建設(株)との共同研究として実施されたものである。

2. 原 理

送受波器から海底に向けて発射された超音波パルスの強度は深さとともに減衰するが、その一部は、海底または、海中の散乱物体（プランクトン、浮遊懸濁物あるいは、密度差など）によって反射され、送受波器に戻ってくる。このとき、発射体（走航中の船に取り付けられた送波器など）と反射体（浮遊物や海底）との間に相対的に速度差がある場合、発射波の周波数と反射波の周波数との間に、相対速度に比例した周波数のずれが生じる。図1に示すように、海面下にある送受波器から超音波パルスを発射する場合、俯角を θ 、発射周波数を f_0 、船の対地速度を V_1 、船の対水速度を V_2 、海底からの反射波に対するドップラーシフト周波数を f_{dB} 、海中の散乱物体からの反射波に対するドップラーシフト周波数を f_{dc} 、水中の音速を C とすると、

$$f_{dB} = 2 \cdot V_1 \cdot f_0 \cdot \cos \theta / C$$

$$f_{dc} = 2 \cdot V_2 \cdot f_0 \cdot \cos \theta / C$$

で表される。

海水の流速 V_c は、船の対水速度と対地速度との差として次式で求められる。

$$V_c = C (f_{dc} - f_{dB}) / 2 \cdot f_0 \cdot \cos \theta$$

次に、測定層の深度 D は、送受波器の設置深度

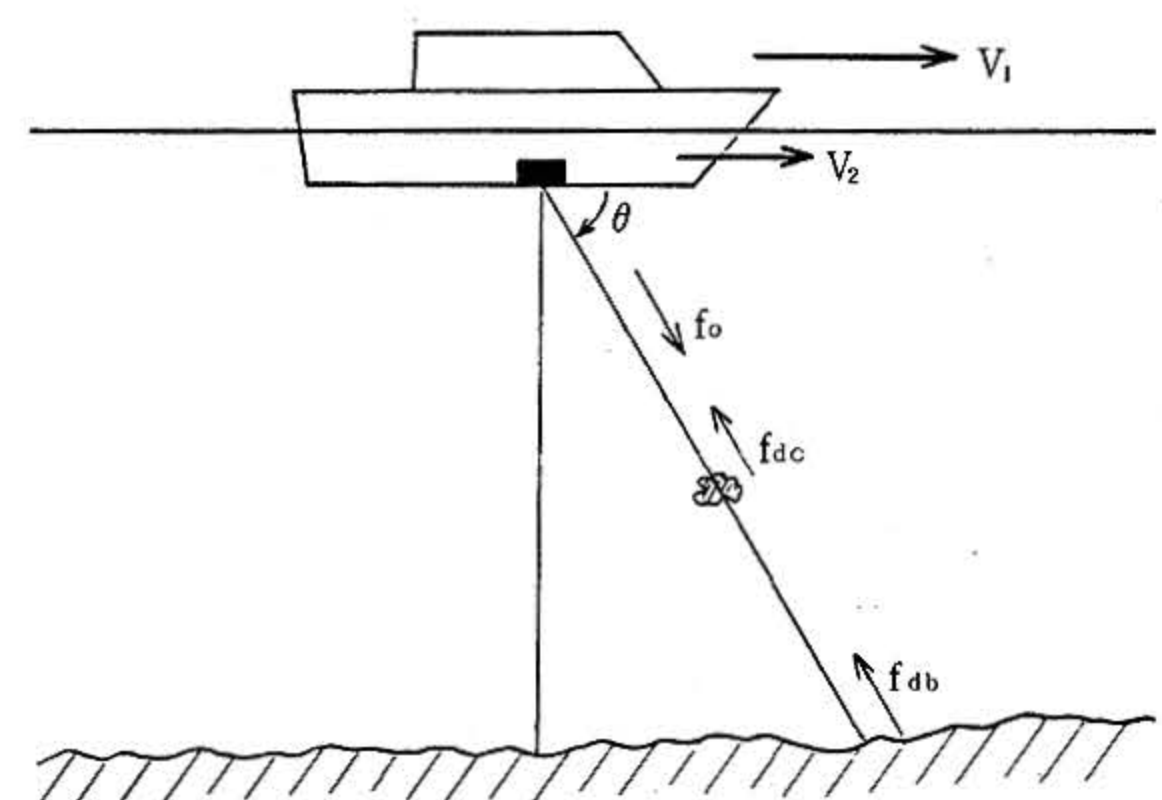


図1 ドップラー測定の原理

Principle of Doppler measurement

D_0 ，超音波パルスを発射してから反射波を受けるまでの時間差を t とすると，次式で表わされる。

$$D = \frac{C \cdot t}{2} \cdot \sin \theta + D_0$$

ドップラーシフト周波数は，送受波器から発射され散乱物体によって反射され受信される信号に，タイムゲートをかけて抽出される。この値を用いて，任意の深度の流速値が算出される。

3. 装置の開発

3.1 設計の基本

本研究では，沿岸海域を対象として，より詳細に多くの流況情報を得るためのシステムの研究お

よび装置開発を行った。

開発にあたっての基本概念は，

(1)小型船舶に容易に装備できるように，小型軽量で，しかも分割可搬型であること

(2)最大水深 400 m までの海底反射波が検知でき，また，深度 100 m までの海流の流向流速および音響散乱強度が最大16層に分けて測定可能であること

(3)計測データは，船上の CRT ならびに XY プロッタ上にリアルタイムで表示できること

(4)すべてのデータは高密度 CMT に記録でき，オフラインコンピュータ処理ができることと定められ，これに基づき開発基礎実験を実施し，表 1 に示す基本仕様が決定された。

表 1 基 本 仕 様
Characteristics

流 向 ・ 流 速 測 定 可 能 深 度 測 定 層 の 厚 さ 測 定 層 の 数 測 定 範 囲	2 m ～ 100 m (水深 5 m 以深、水深の 80 % の範囲) 2 m、6 m 選択 16 層 流向：0～360 度 (0.1 度、真方位) 流速：0～5 m /sec (1 cm/sec)
音 響 散 乱 強 度 測 定 可 能 深 度 測 定 層 の 厚 さ 測 定 層 の 数 測 定 範 囲	流向、流速と同じ -60 dB～-110 dB (1 dB)
表 層 水 温 測 定 深 度 測 定 範 囲	送受波器の設置深度 0°C～40°C (0.1°C)
そ の 他 船 速 範 囲 海 底 検 知 作 図 項 目 記 録 時 間	0～20 ノット 3 m～400 m 平面ベクトル図、鉛直プロフィール図経時変化図、 水深数値図、航路図 最大 40 時間 (記録間隔 3 秒の場合)

3.2 ドップラーシフト周波数の抽出

超音波ドップラー式の流速計においては、ドップラーシフト周波数をいかに正確に抽出できるかが重要な問題となる。海中および海底からの反射信号は、周波数スペクトラムの拡がりをもっている。このため、本装置では、局所的な平均周波数を短時間に検出すること、および多層同時測定を効率よく行う目的で、ドップラーシフト周波数の検出のためにゼロクロス法が採用された。

海域基礎実験において、超音波パルスの最適発射周期を求めた。この結果、水中の散乱物体からの反射波強度は、海底からの反射波強度に比較すると変動が大きいので、流速値の算出にあたっては、海底反射波から算出される対地速度の場合よりも、平均化処理により長い時間が必要であることが判明した。したがって、本装置においては、検討の結果、パルスの発射間隔を1.5秒とし、また、平均化処理時間を、30秒、60秒、120秒、300秒と設定した。

3.3 装置の構成

本システムの構成を図2に示す。送受波器は、船舶の舷側から船底位置付近に固定され、周波数125KHzの超音波パルスは、前後左右の4方向に俯角60度で互いに直交するように発射される。周

波数にドップラーシフトを受けた反射信号は、データ処理部において、船首方位のデータを基に地球座標に変換される。船首方位の検出には、本装置の目的が沿岸の小型船舶での使用を前提としているため、マグネティックコンパスが使用されている。しかし、コンパスの設置場所による方位誤差や偏位を考慮する必要があるため、ジャイロコンパスの装備されている大型船舶での使用に際しては、ジャイロ信号も利用できるような設計されている。

船の位置測定には、ロランCが使用されているので、測位データはリアルタイムで制御表示部に送られる。制御表示には、HP-85 デスクトップコンピュータが使用され、各種の測定条件の設定が行われるとともに、流況情報がリアルタイムでモニターできる。

なお、船位測定には電波測位装置も利用できるので、測位に精度が要求される場合は電波測位データも入力できるように、データフォーマットが設定されており、このことはすでに実証済みである。

表1に本装置の基本仕様を、写真1および写真2に送受波器および船上装置をそれぞれ示す。

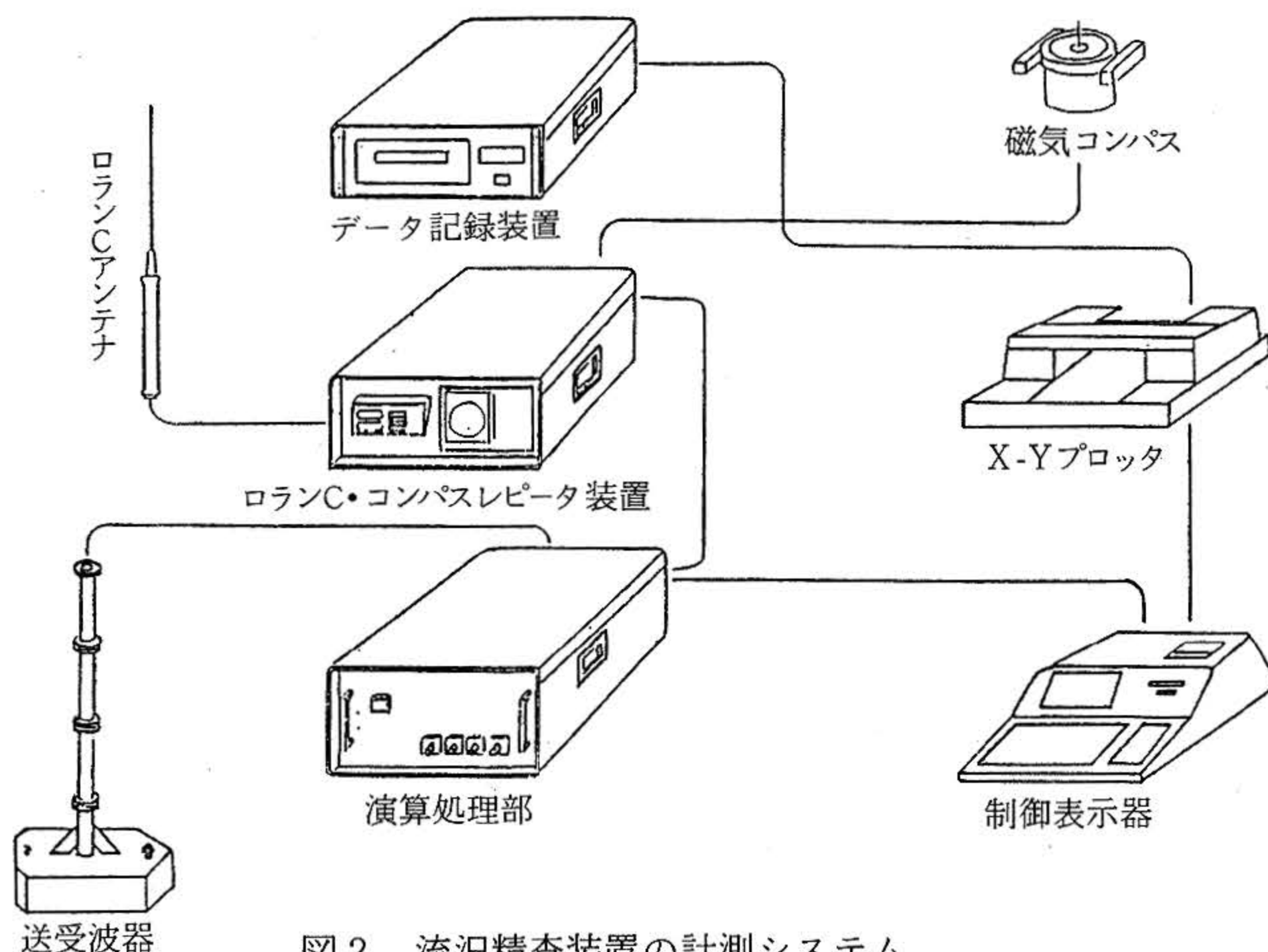


図2 流況精査装置の計測システム

Measurement system of Doppler Current Profiler



写真2 船上装置部
Ship-mounted installations

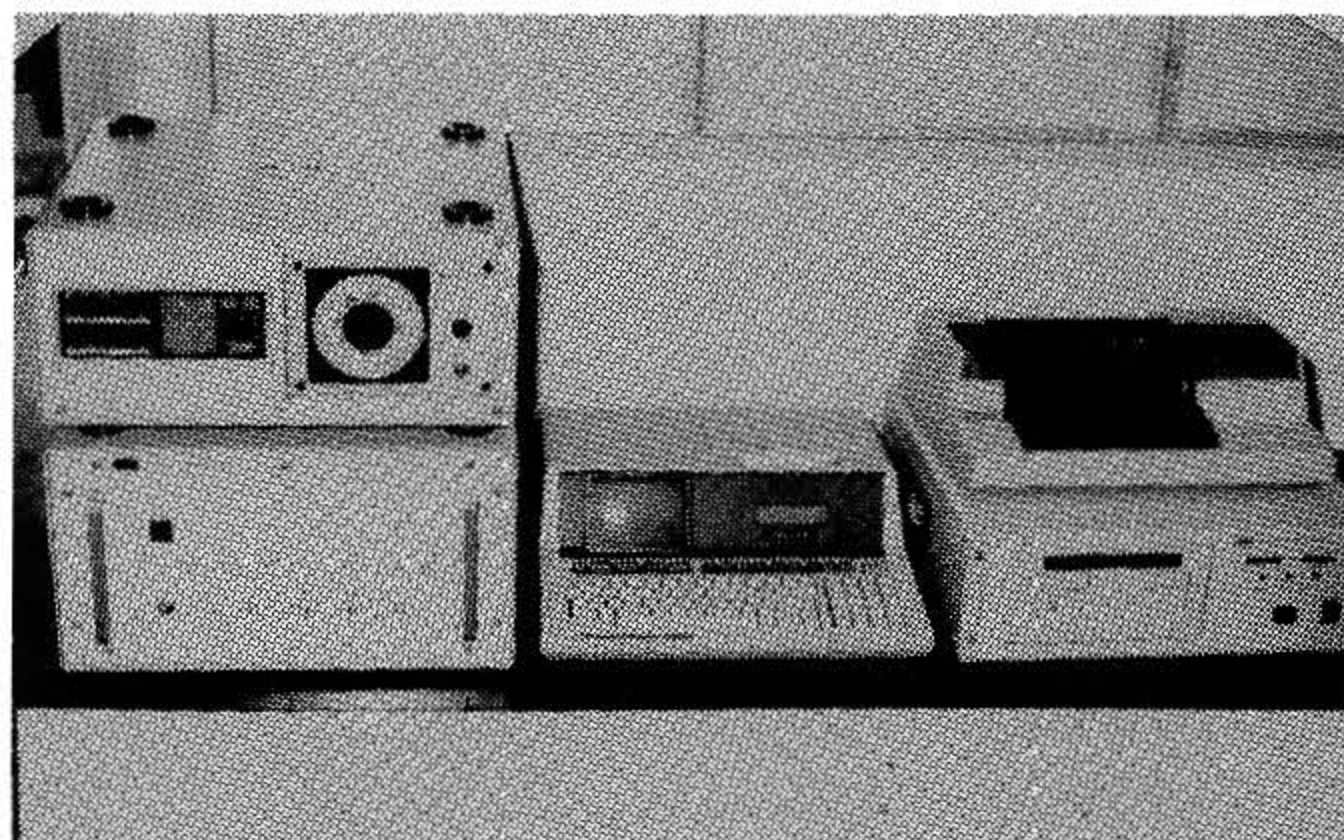


写真1 送受波器
Transducer

3.4 船上表示例

船上では、HP-85のCRT上に、通常表示として、日時、船位、船速、船首方位、水深、表層水温、測定層厚、平均時間および任意の3層の流速、流向がリアルタイムで表示される。表層水温は、超音波送受波器部に組み込まれたセンサで測定される。したがって、測定地点の表層水温の変化が流況とともに観測できるため、利用価値の高いものとなっている。図3に通常表示例を示す。

鉛直プロファイルは、ファンクションキーの操作により通常表示から切り替え、直ちに表示できる。流向流速および音響散乱強度の表示例を図4に示す。

X-Yプロッタによる描画は、制御表示部で作図範囲、プロット測定層およびベクトル表示等を設定後、開始する（表示例は、5.海域実験を参照）。

```

24/02/89 11:24 05497
-----
POSITION  N34-21.96  E133-50.11
SPEED    5.4 Kn      HEAD 337.0 deg
DEPTH    61 m       TEMP. 6.5 deg
LAYER( 2m, ST 2.5m) AVE 30.5
CURR( 2.5m) 37 cm/s 280.3 deg
CURR( 15.5m) 21 cm/s 279.6 deg
CURR( 30.5m) 25 cm/s 280.1 deg
-----
STOP
LAYER  graph  PLOTTER  COPY
  
```

図3 通常表示
Ordinary display

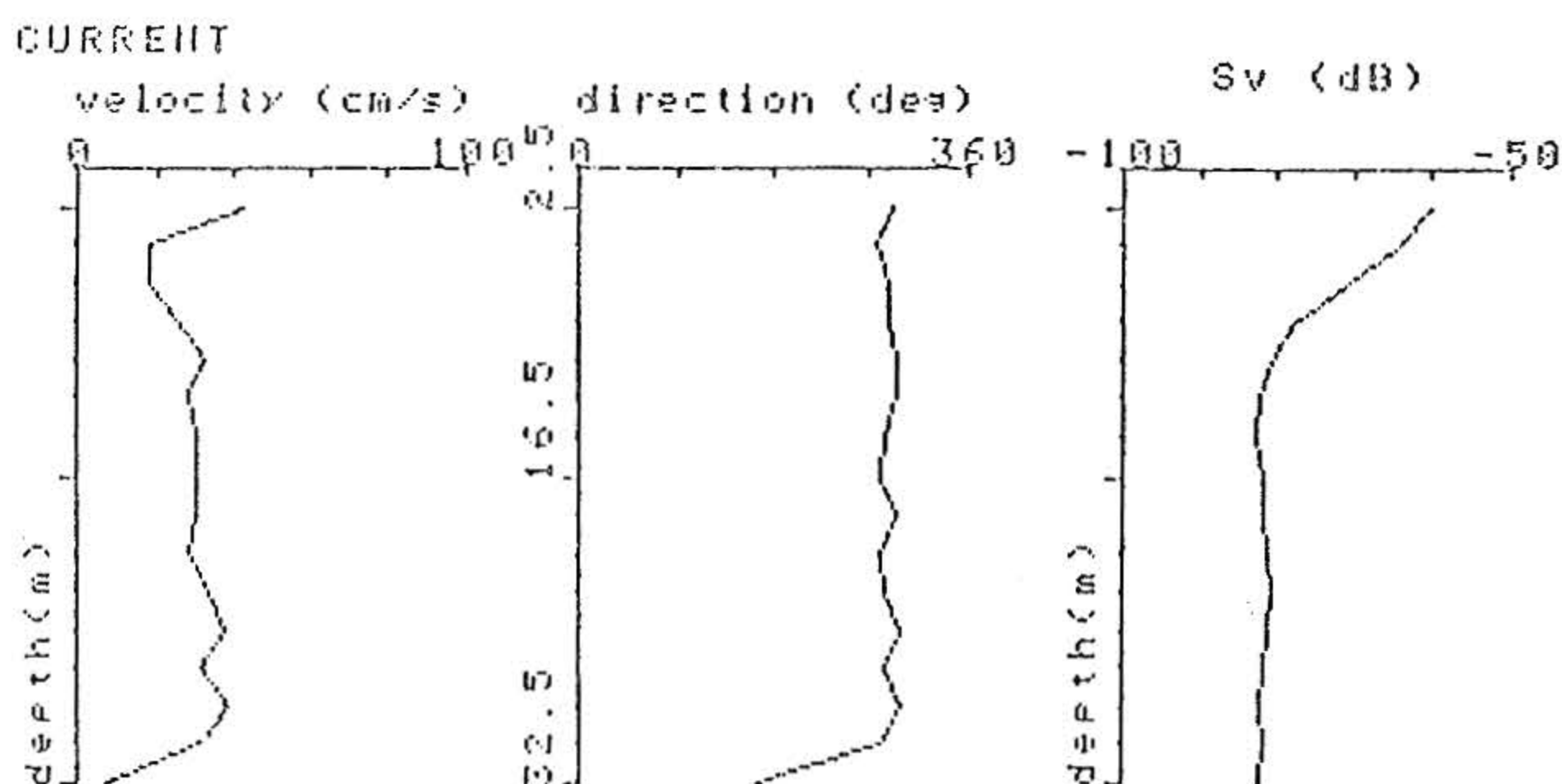


図4 鉛直プロファイル
Vertical current profiles

4. 機械式流速計との比較

4.1 比較測定の実施

超音波ドップラー式の本装置では、機械式流速計と計測原理が異なり、海中では、微小物体が流れとともに移動しているという仮定の下に、反射信号の検知および流速算出が行われている。

本装置を使用するにあたり、前もって機械式流速計との特性の違いを把握することが不可欠であるため、1984年2月および同年8月の2回にわたり香川県坂出沖および静岡県初島沖において、それぞれ係留比較測定を実施した。比較対象の機械式流速計には、MTCM-4（鶴見精器製）が使用された。

4.2 比較測定結果

4.2.1 坂出沖

この比較測定は、1984年2月9日に香川県坂出沖の備讃瀬戸大橋橋脚周辺において実施された。MTCM-4は、橋脚工事用の鋼製バースから、索長24.0mで垂下、設置された。一方、流況精査装置は、小型船舶の舷側に取り付けられ、バースから約50m離れた係船ブイに係留された。当日は、西風が強かったために、測定は潮流の方向と風向

を考慮し、海面が比較的穏やかになる転流直後の14:00から2時間に限定して実施された。

MTCM-4の測定記録は25秒間隔、流況精査装置の測定記録は、平均時間30秒に設定された。

図5および図6に、それぞれ、流況装置およびMTCM-4の流向・流速値の経時変化を示す。これらの図から明らかなとおり14:00から14:15にかけては、転流直後のために、両者ともに流向のバラツキが見られるが、それ以降は、流速の増加とともに両者とも同じような変化を示し、15:30時からほぼ90度方向の安定した流れを示している。流速の値は、14:00から15:00にかけては、数cm/secから40cm/secへ同じ傾向で増加している。15:00から16:00にかけては、流況精査装置では平均60cm/secであるのに対して、MTCM-4では平均50cm/secと、約10cm/secの違いが出ている。これは、機械式流向流速計MTCM-4の係留が海洋構造物のごく近傍であったのに対し、流況精査装置は、そこから50m沖合に離れたところで使用されたので、結果として、構造物周辺での流速の値の方が小さかったものと考えられる。

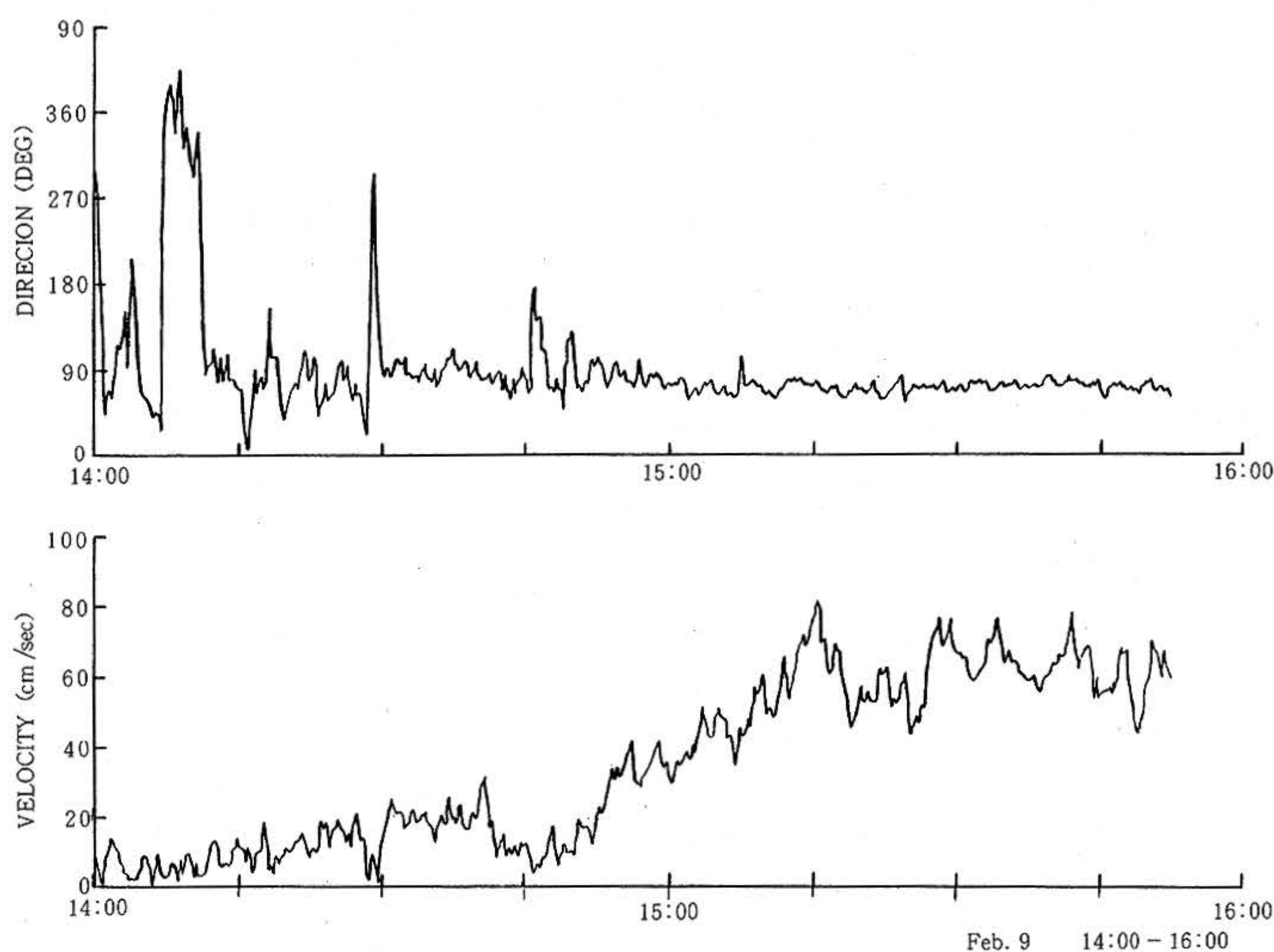


図5 経時変化図（流況精査装置，24.5 m）

Current time series, recorded by Doppler Current Profiler

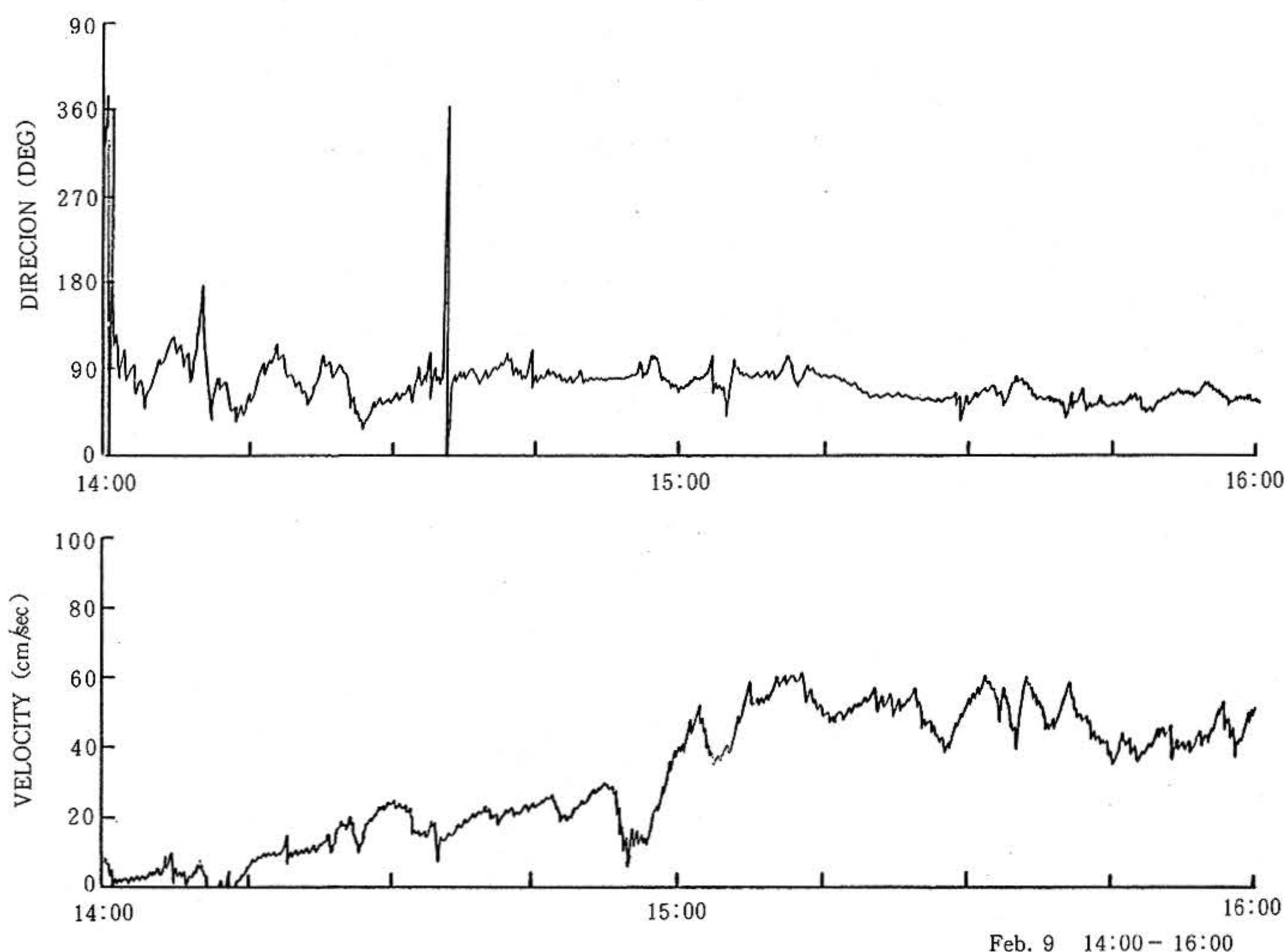


図6 経時変化図 (MTCM-4, 24.0 m)

Current time series, recorded by MTCM-4

4.2.2 初島沖

この比較測定は、静岡県初島沖において1984年8月29日11:00から8月30日12:00までの25時間にわたり、実施された。

初島西側海域は、潮汐による南北流が最大で0.8 kt程度であるものと実験を実施する以前には、予想されていた。

比較測定海域には、漁網および漁船の操業に影響のない地点を選び、水深約40mの地点に、機械式流向流速計MTCM-4が深度20mとなるよう設置され、流況精査装置を取り付けた小型漁船は、MTCM-4と約100mの距離をおいて1点係留された。実験船の定点からの移動を防ぐためには3点係留が望ましいが、今回は、MTCM-4は1点係留されていたために、流れとともに一定範囲を移動するので、実験船とMTCM-4の位置関係を相対的に保つために、実験船も1点係留された。係留比較測定の実施前日に、測定海域で流況精査装置による単独の航走測定を実施した。その結果、流速の値は10cm/secを超えず予想より流速の値が小さいことが判明した。

1984年8月29日13:00から16:00までの3時

間に実施された比例測定の結果を、図7に示す。

13:00前後に転流があり、南流から北流に変化している。流向値は、両者とも同様の変化を示している。流速値の全体的な変化の傾向は、転流時を挟んでの測定結果であるため、似ているが、予想よりバラツキが多かったものと考えられる。このバラツキの原因は、全般的に流速が小さかったために、実験船およびMTCM-4の、波による上下動の影響と考えられる。⁶⁾

比較測定は、測器開発に不可欠なステップであると考えられる。超音波ドップラー式流速計と他の方式の流速計との比較測定法については、実験海域のさまざまな制約や、流速が大きい場合には測器の係留設置が困難となるなど今後検討すべき課題が残されているものと考えられる。

5. 海域実験

5.1 香川県坂出沖

この実験は1984年2月8日、坂出沖の備讃瀬戸大橋橋脚周辺で方形構造物による流れの変化を見るために実施された。小型船舶に流況精査装置を取り付け、構造物を周回しながら、各層の流向、

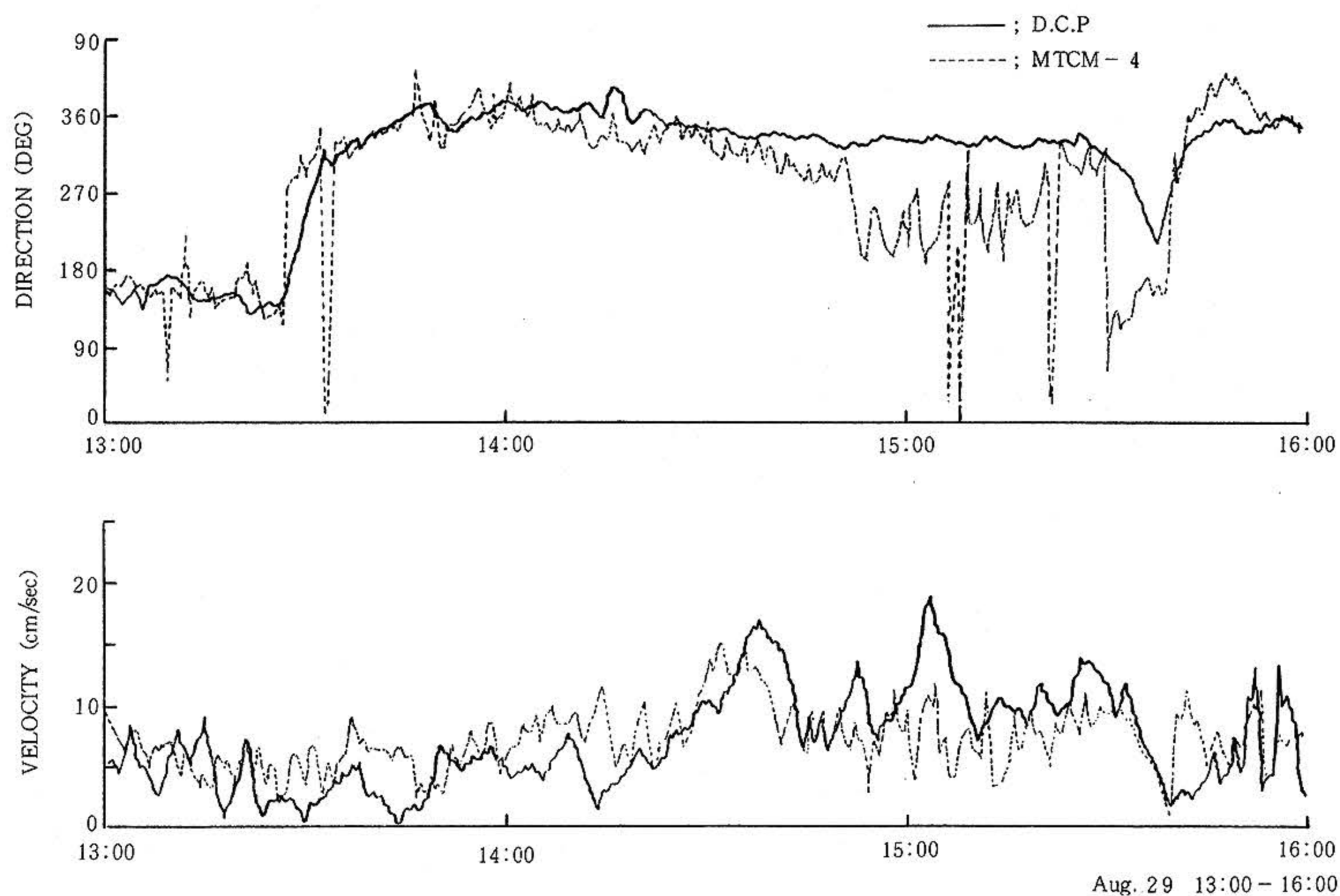


図7 流況精査装置とMTCM-4の比較経時変化
Comparison of Doppler Current Profiler and MTCM-4

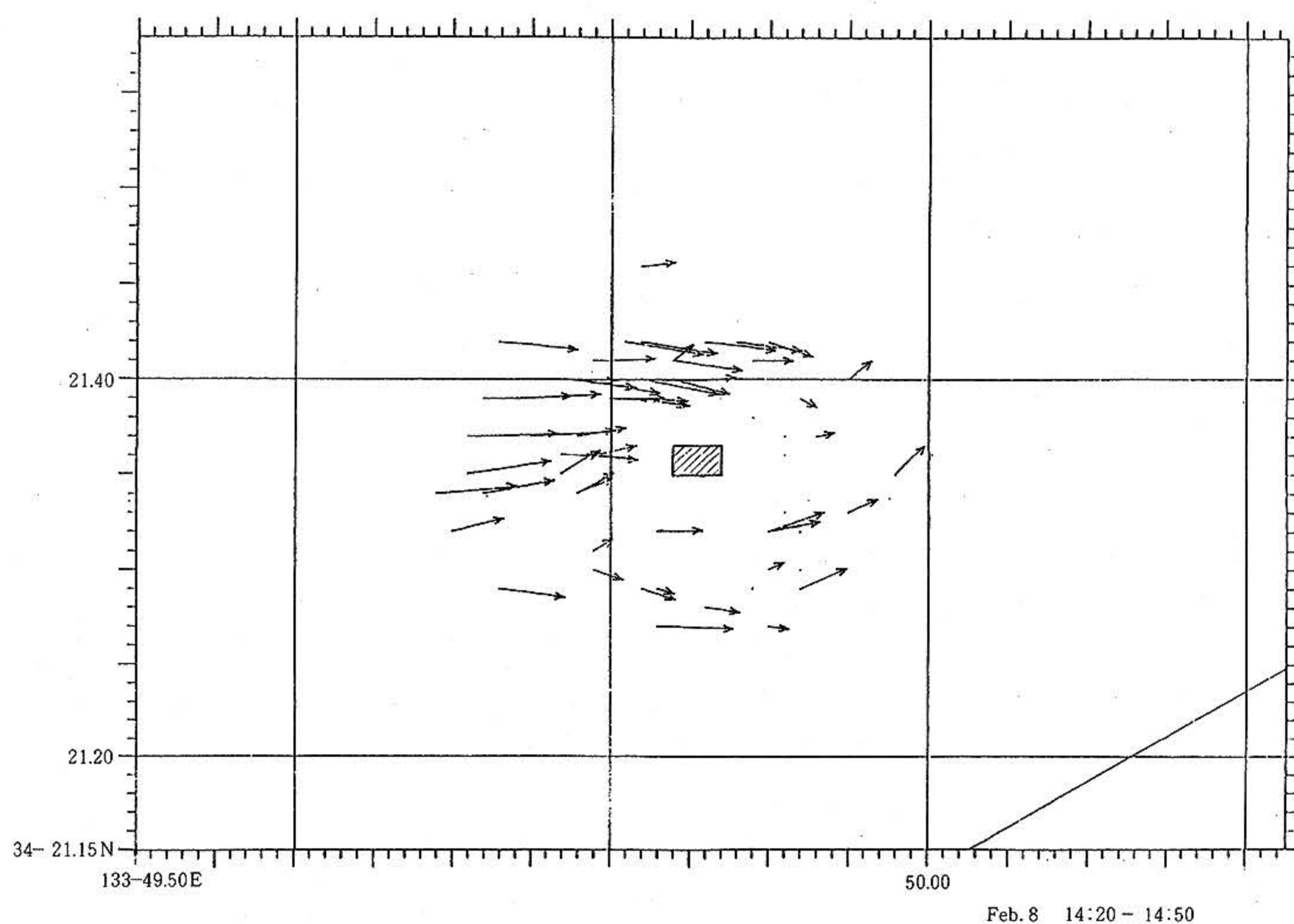


図8 平面ベクトル
Horizontal vectors

流速および音響散乱強度の測定を行った。現場海域の水深は40m前後であったので、測定層厚は2mに設定された。図8に深度12.5m層の平均ベクトル図、図9に鉛直プロファイルを示す。図8の平面分布図から、構造物の背面での、流れの回り込みの傾向が確認できる。測定は、構造物から約50m離れて航走したため背面乱流の様子までは記録できなかった。この装置では超音波パルスが、海底に向って直交する4方向に発射されているため、船が構造物に接近し過ぎると、パルスの一部が構造物によって反射されるので、流向流速の測定が不可能となってしまう場合がある。図9の鉛直プロファイルからは、各層ともに、流速は約50 cm/sec, 流向は約90度を示し、上層から下層まで一様に流れていることが分かる。

次に、同海域の航走測定が実施された。2月9日10:00から11:11にかけて実施された。流況精査装置の開発の重要な目的は、広範囲の海域を短時間に測定できることであった。

図10および図11に、それぞれ、深度4.5m層および16.5m層の平面分布図を示す。図11においては、ベクトル表示がなく点航跡のみとなってい

る部分は、水深が15m以浅のために、16.5m層の測定ができなかったことを示している。

測定時の海況は、穏やかであり、約70分間で坂出、三ツ子島周域の測定は完了することができた。4.5m層と16.5m層ではほとんど変化が見られないので、ここでは上下層とも一様な流れの状態であったものと考えられる。4.5m層を見ると、三ツ子島西側では島の影響による渦流が認められる。

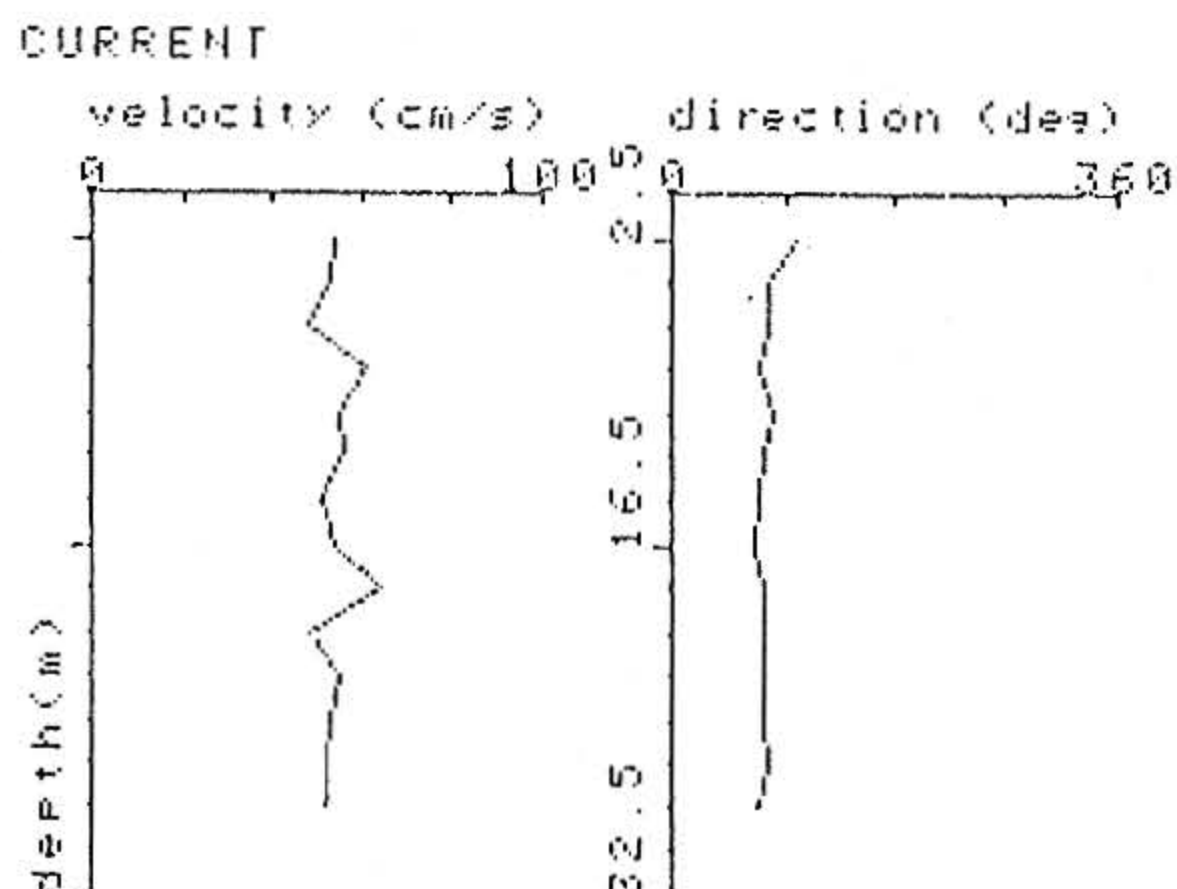


図9 鉛直プロファイル
Vertical current profiles

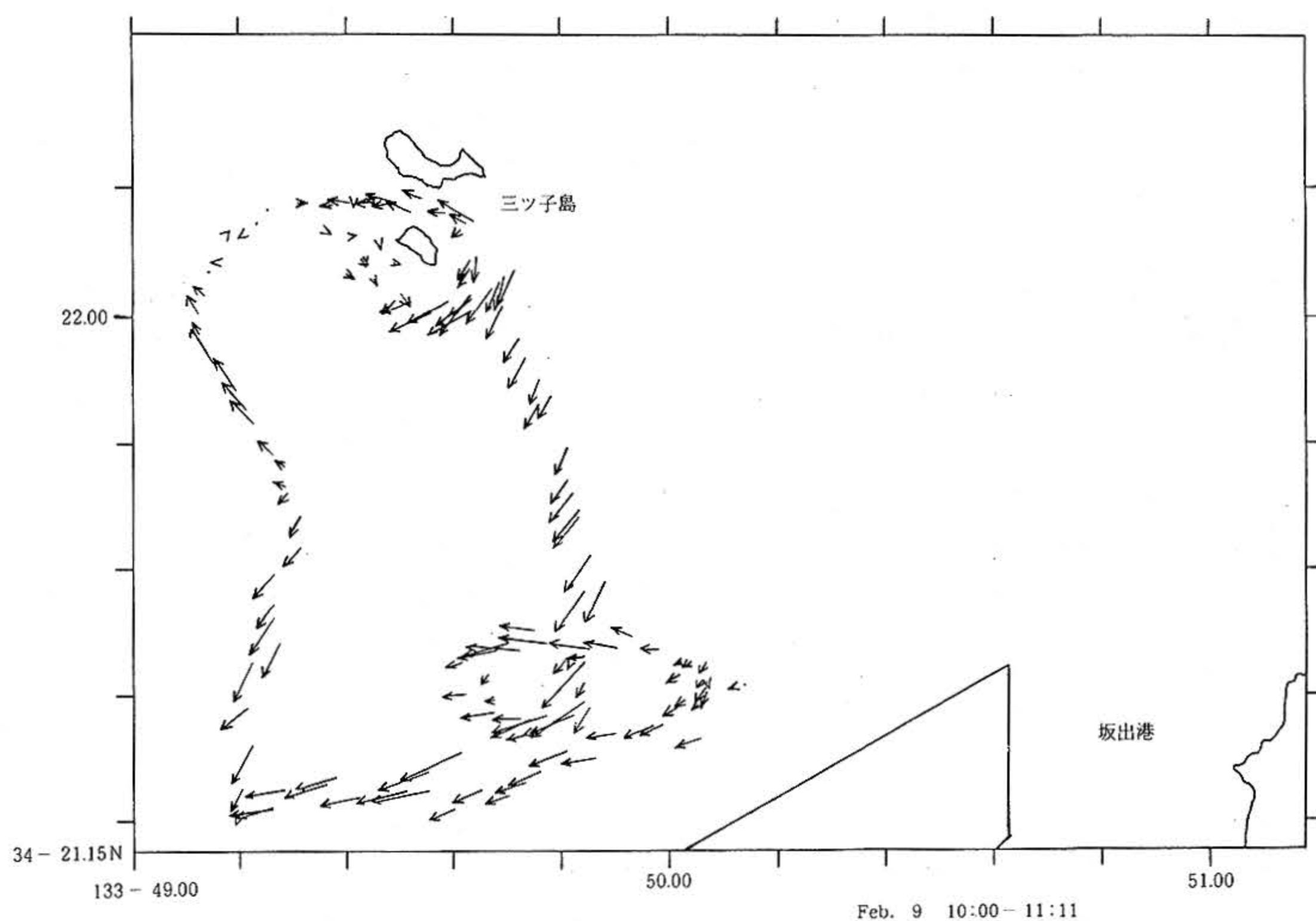


図10 平面ベクトル図 (4.5m)
Horizontal vectors

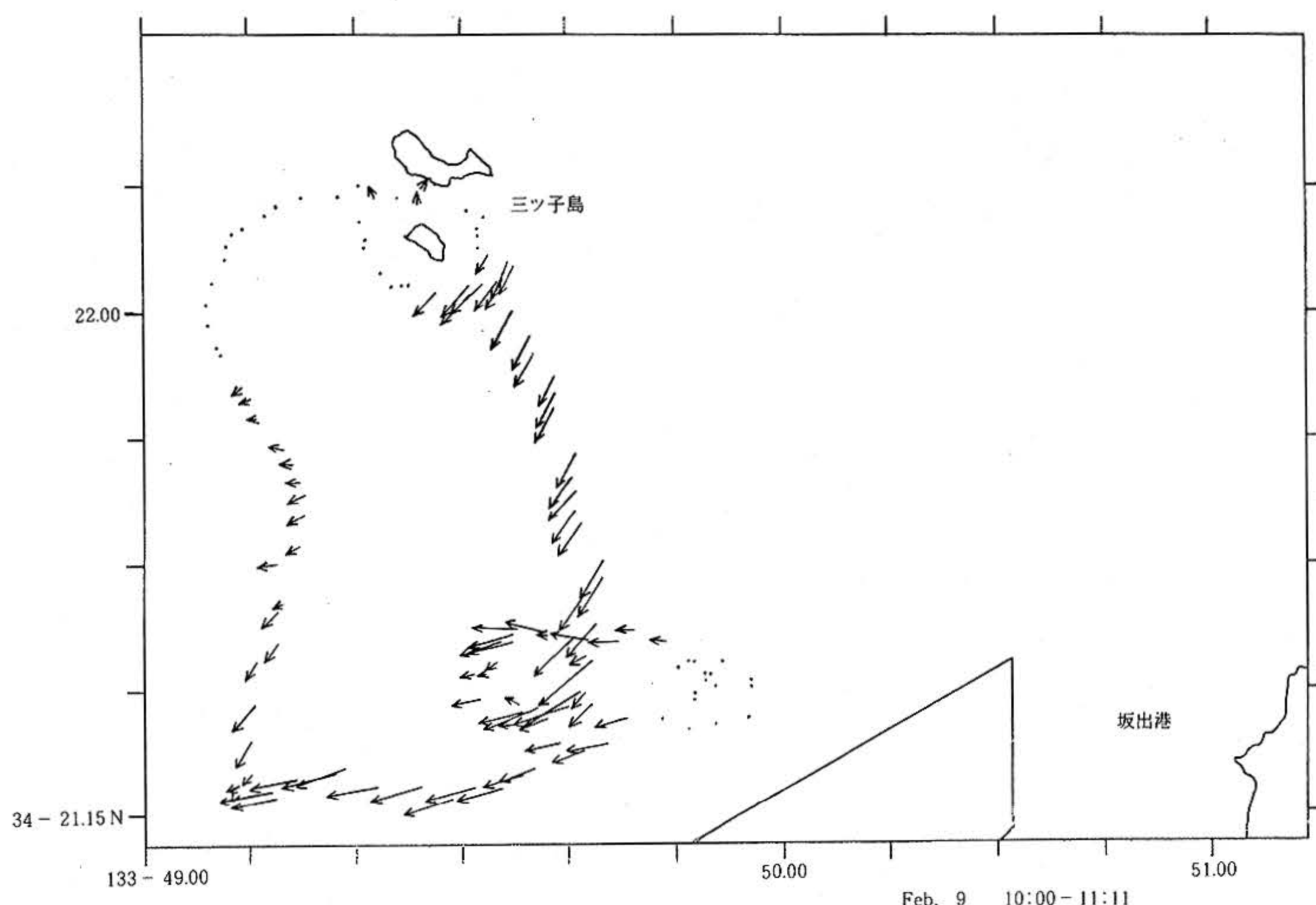


図 11 平面ベクトル図 (16.5m)
Horizontal vectors

5.2 明石海峡

この実験は1984年10月に、明石海峡において実施された。約1カ月の間、大潮、中潮、小潮の流況変化が測定エリアを限定して計測された。

明石海峡は幅約2 kmで、中央部が航路に指定されている。また航路の水深は、60m～100 mあり、大型船舶の往来が絶え間ない場所である。

明石海峡は、過去にも各種の流速測定が実施されており、大潮最強時には、9 kt以上の流速が測定されているという報告もある。小潮時にも、3 kt程度の流速があり、船舶の航行量も多いために、係留式流速計の設置は極めて困難な海域である。

今回の測定実験では、航路の南北外側に、500 m×300 mの測定エリアを設定し、50m間隔に7本の測定線を決めて実験船を運航した。限定されたエリアの測位を正確に行うために、電波測位システムを採用し、あらかじめ入力した予定測定線データと自船の位置がCRT上で即座に確認できるようにした。この結果、実験船は、ほぼ予定測定線に沿って走航することができた。

図12に、10月19日08:00から09:00に航路南側で測定した深度12m層の結果を示す。この時間帯は小潮の東流であり、最大流速は2.4 ktと記録された。上層から下層まで一様の流れであるこ

とが観測された。

図13に、10月23日09:00から10:20に航路北側エリアで測定した深度9 m層の結果を示す。この測定は、転流時の流況の変化を観測することを目的として実施された。

測定エリア南端の測線から、船速4 ktで測定を開始し、北端の測線で終了した。初めは、西流60 cm/sec (1.2 kt)程度であるが、西流のまま徐々に弱まり、09:50からわずか10分間程度で完全に東流に変化してしまうことが判明した。図14に、その経時変化のグラフを示す。この図からも明らかなように、流速は徐々に変化しているが、流向はごく短時間に急激に変化していることがよく理解できる。

明石海峡でこれまでに実施された流速測定では、主に最大流速値の検知が目的であり、今回のように転流時の水塊の変化をとらえたものは見られなかった。

7. おわりに

ここで報告した新しい原理による流速測定装置は、実海域における試験結果から、新しい装置として十分利用できることが明らかになった。

特に、流れが速く、かつ、船舶の往来が激しい

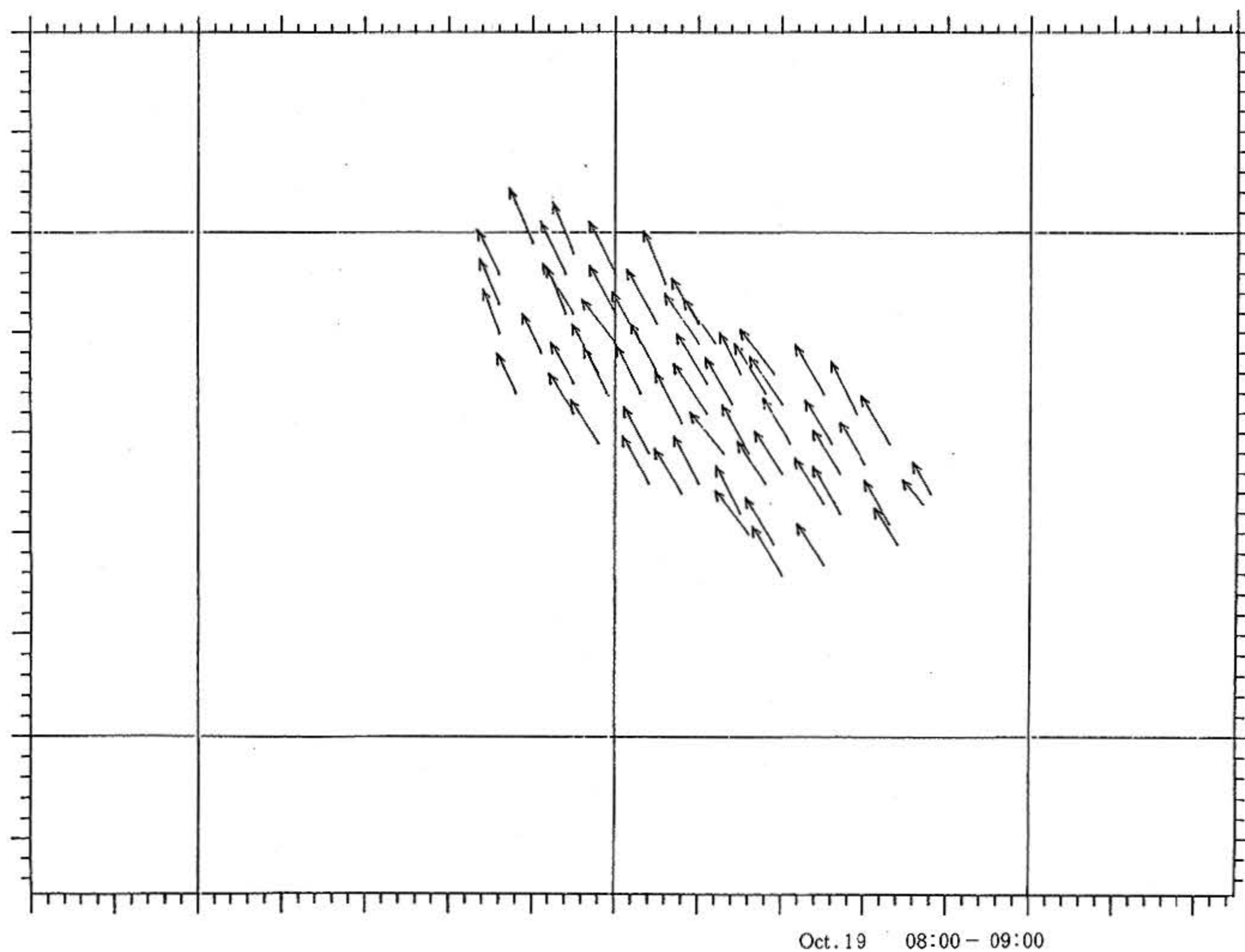


図 12 平面ベクトル図 (12.0 m 層)
Horizontal vectors

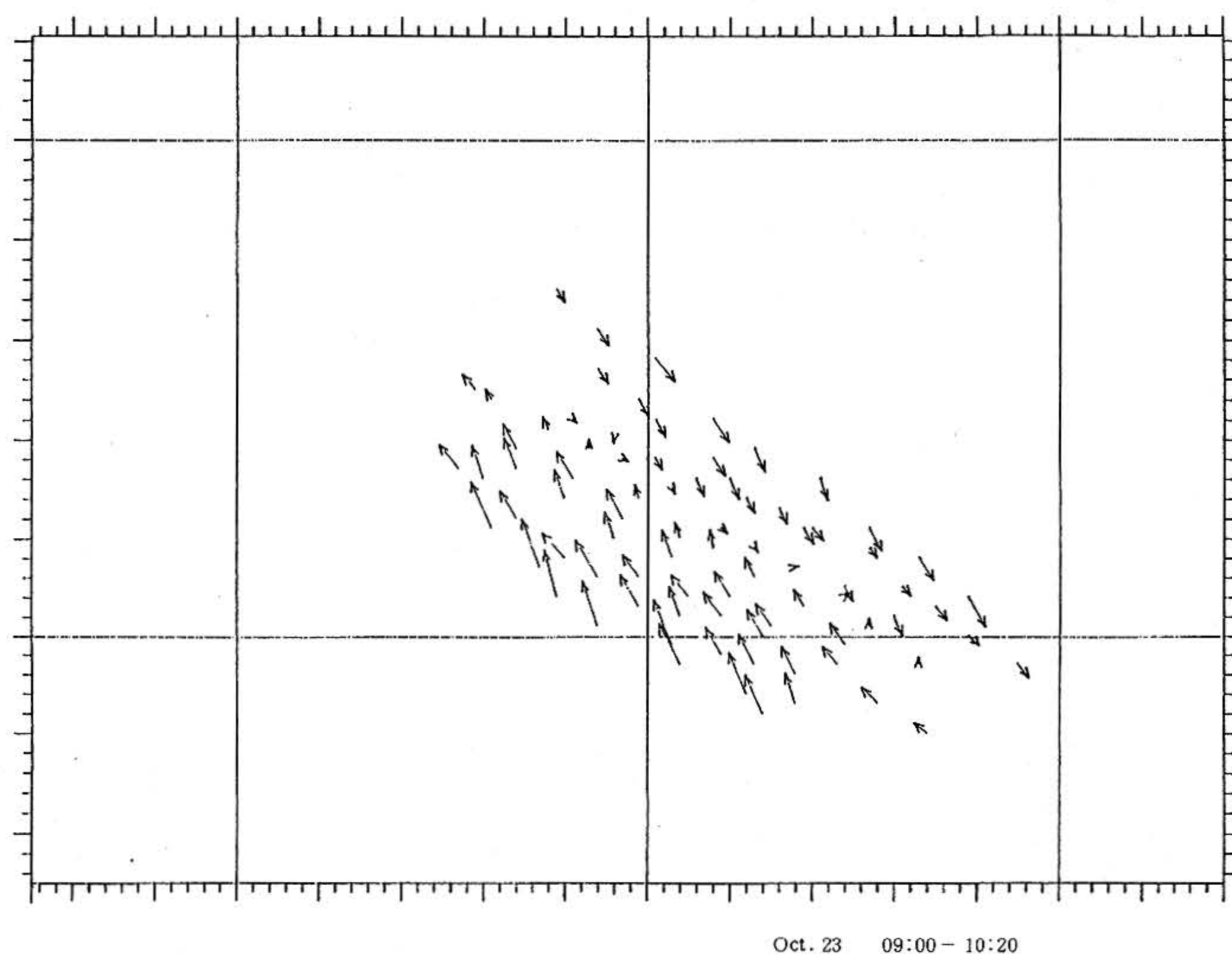


図 13 平面ベクトル図 (9.0 m 層)
Horizontal vectors

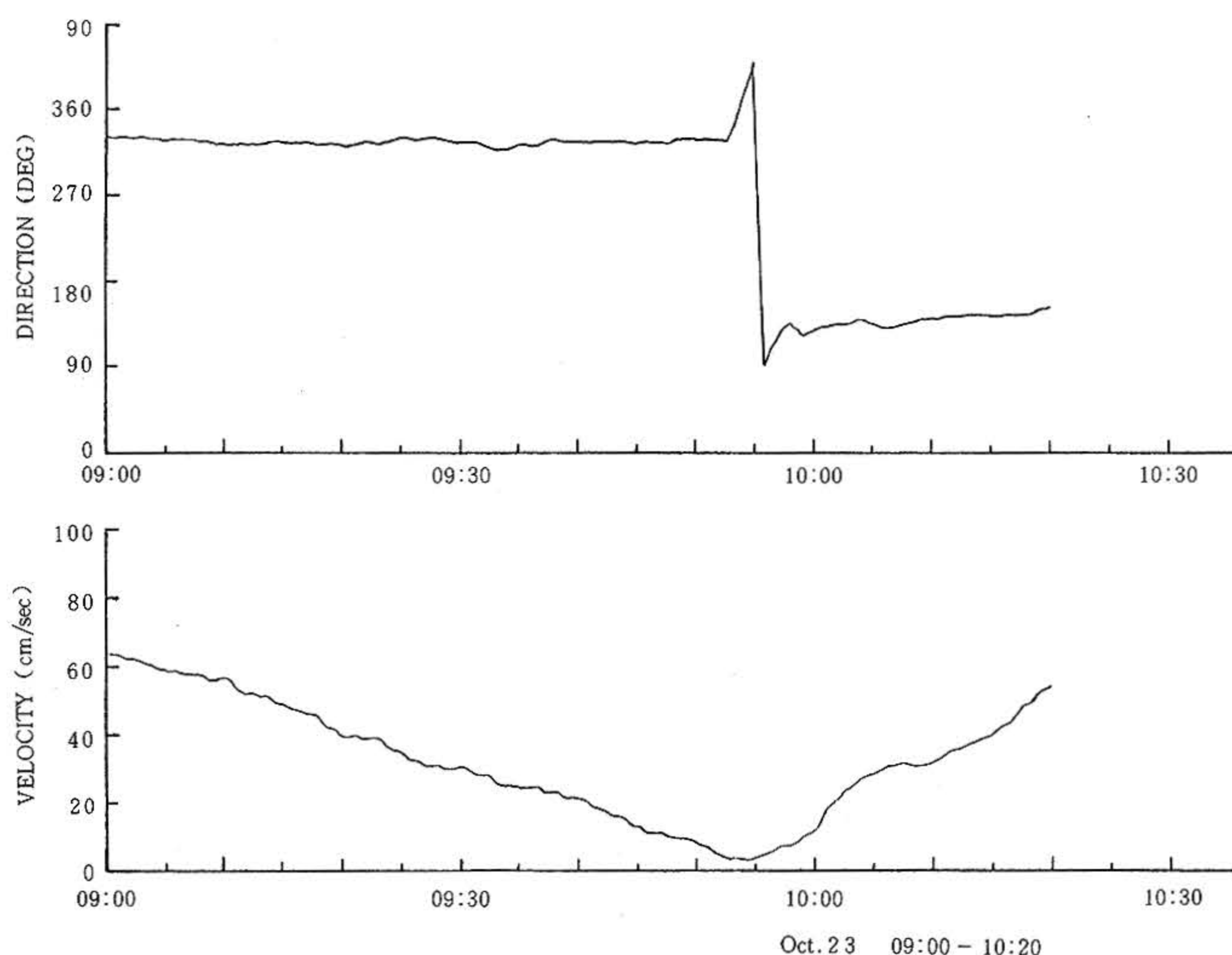


図 14 経時変化図

Current time series, recorded by Doppler Current Profiler

海峡部では、機械式流速計の係留作業などに困難が伴うために、この方式の流速測定装置の活用が大いに期待されている。

本装置の、他の特徴は、測定データが船上で、しかも、ほぼ実時間で表示できるので、観測者はいつも、自分のいる海域の流況を知ることができる。

また、測定データはすべてCMT上に収録されるので、オフライン・コンピュータによるデータの2次処理も可能になっている。われわれは、現在、すでに、2次処理および表示用のプログラムの開発も行っている。

この方式の装置の活用法としては、ここに述べたように船舶に装備して走航しながら流況の測定に利用できるばかりでなく、海底に設置することにより、海底から海面に向っての流況定点観測用としての活用法もある。

この報告では、小型の超音波ドップラー式流況精査装置について報告したが、われわれは、現在より深い海域で流れの状況を知るために、より大型の超音波ドップラー・プロファイラーの開発を実施している。

文 献

- 1) 海洋科学技術センター，“最新の音響を利用した海洋観測技術”，(1983)
- 2) 海洋科学技術センター，“強い潮流域の海洋調査手法確立の研究”，(1983)
- 3) Crocker, T. R., 1983, “Near-surface Doppler Sonar Measurements in the Indian Ocean”, Deep-Sea Research 30 (4A) 499 - 461
- 4) Rowe, F. D., Young, J. W., 1979, “An Ocean Current Profiler Using Doppler Sonar”, Proc. OCEANS '79, San Diego, 1979 - 9, MTS/IEEE, 292 - 297
- 5) 奥野清則ほか，1984，“広域流速分布測定システム”，日本無線技報 (22) 32 - 36
- 6) 高杉由夫，1984，“ローター型流速計の特性—MTCM-ST, MTCM-4の特性試験より—”，中工試報告 (22) 1 - 11

(原稿受理：1985年4月19日)