

SW-2000を使用した測流システムについて

村山 達朗¹⁾・吉原 康行²⁾

¹⁾ 島根県水産試験場, ²⁾ イーエムエス

緒 言

島根県水産試験場では、1993年に試験船島根丸の代船建造に伴ってサンウェスト・テクノロジー社製超音波式多層流速計を導入し、イーエムエス(株)と共同で測流システムの開発を行った。

当初導入した機種(SW1000)は、周波数測定方式が、PLL回路によるアナログ追従方式であったため、船体の動揺が比較的大きい島根丸クラス(140トン)の調査船では正確な計測を行うことが困難であった。そこで、1994年12月に、同機種の後継機種であるSW2000と交換した。同機種は、周波数測定方式がデジタルシグナルプロセッサによるFFT演算方式に変更され、データ転送方式も GPIB から DMA 転送となり、ドップラーシフト周波数だけでなく、FFT解析計算値も記録可能となった。SW-2000導入後、データ収録ソフトおよび解析ソフトを改造し、GPSによる船速を基準とした測流システムを開発した。その結果、対地船速が観測できない沖合域でも、水温分布図とよく対応した流況パターンを捉えることができたのでその結果を報告する。

材料と方法

(1) システム開発に使用した機種

表1にSW-1000とSW-2000の性能比を示した。

表1 SW-1000とSW-2000の性能比。

項目	SW-1000	SW-2000	向上点
周波数測定方式	PLL回路によるアナログ追従方式	デジタルシグナルプロセッサによるFFT演算方式	周波数応答のダイナミックレンジが拡大した
最大測定層数	63	128	
制御用コンピュータ	外部接続	内蔵	動作状態の設定が迅速に行える
データ転送方式	GPIB 接続	DMA 転送	多種のデータを高速に保存できる。
データの種類	4ビームの層毎のドップラーシフト周波数または信号強度	4ビームの層毎のドップラーシフト周波数 信号強度 FFT解析計算値 全層に渡る全受信信号	

比較的大型の船舶に搭載されているSW-1000では船体の動揺が緩やかなため、安定したデータが測定されている。島根丸では大型船に比べ船体の動揺が大きいことから、周波数追従について高い性能が要求された。SW-1000の場合、一般的には観測された鉛直プロフィールを数分間～10分程度平均化して、記録するように使用されている。しかし、島根丸では船首方位、船速がめまぐるしく変化するため、平均しないデータまたは10～20秒程度の平均値を記録することが必要となった。そこで、機種をSW-2000に交換し、取得した大量のデータをオフライン処理する手法を開発する事となった。表2にSW1000とSW-2000を用いて行ったシステムの開発経過の概略を示した。

表2 SW-1000ならびにSW-2000のシステム開発経過。

年・月・日	項目	内容
1993. 2. 26	SW-1000-115 導入	観測された流速・流向とも不規則であり、CI-30(古野電気)の観測値と大きく異なっている。 対地データがほとんど観測されない。
1994. 4. 18	機器交換および調整	船底のトランスデューサ取り付け分の蓋を海水流入口がないものに取り替えて試験したが、結果は変更前と同じで正常なデータが観測されなかった。
1994. 8. 11	機器交換および調整	トランスデューサの交換と残響防止工事
1994.10. 6	航行試験(浜田沖)	正常な観測値は得られず
1994.10.14	係留系試験 (浜田沖 水深 120 m)	正常な観測値は得られず。CI-30 の流速値が0.5 ノット、RCM-4S(アンデラー社)の流速値が16～25cm/sを示しても、SW-1000は0に近い。
1994.12. 6	機器交換および調整	SW2000 と交換
1995.5.24	係留系試験 (浜田沖 水深 120 m)	第3～5層の流速値が異常に大きく、進路により正負が逆転する。
1995. 7. 17	係留系試験 (浜田沖 水深 120 m)	基板交換を行いながら試験を行うが、ノイズレベルが高く(正常値：-110～-120dBのところは-80～-90 dB)、データが正常に取得出来ない。
1995. 7. 19	航行試験 浜田港～山口県見島～浜田港	BOTTOM TRACK の率は 66%。平均化を行わない観測値でも流速値は 50cm/s 以下で、比較的正常値に近かった。

表2 続き.

年・月・日	項目	内容
1995. 9. 26	係留系試験 (黒潮丸共同) 北緯 34 度 57.8 分 東経 131 度 38.7 分 水深 124 m	GPS ならびに CI-30 による船速値が 12~10 ノットで、SW-2000 による船速値は 6~5 ノットであった。 GPS ならびに CI-30 の船速値と SW-2000 の船速値が近い場合、SW-2000 の流速値は 500cm/s という異常値を表示する。 南向きに航行すれば、北の流れが、西向きに航行すれば東の流れが大きく (100cm/s 以上) になる。 ノイズレベルが高い (-80~-100dB)。
1995.11.21	機器交換および調整	レシーバー部分の基板を 2 枚交換 ケーブル部にシールドを行う。
1995.11.22	航行試験 (浜田沖水深 140 m)	ノイズレベルは約 20dB 改善され、-118dB 前後と正常値となる。 古野電気製カラー魚探(24KHz)からの干渉が認められる。 SW2000 のボトムトラック速度と GPS 速度に誤差が見られる。 ボトムトラック状況は不連続
1996. 3. 21	GPS 交換	GPS 受信機を Aquitime6(トリンプル社)に変更し、収録・解析システムを GPS 基準に変更
1996. 3. 25 ~26	航行試験(稚二-1線)	1レコード 25ping、層厚 12 m でデータを収録。 原因不明のシステムエラーにより沖合部の観測データが消失。 GPS からの船速データを記録していなかったため、位置データから船速を計算。
1996.5~6	ウィルス発生	英語版 MS-DOS 上で動くウィルスに感染し、HD 内のファイルが破壊されシステムダウン。
1996. 7. 2	ソフト修正	GPS 船速を記録するように収録ソフトを変更
1996. 7. 3	航行試験(浜田港~浜田北沖 約 30 マイル、水深 150 m)	北上中はほぼ正常な鉛直プロファイルを取得出来た。

表2 続き.

年・月・日	項目	内容
		<p>南下中は、中層域に大きなドップラーシフトの変化が見られ、浜田港入り口まで消えなかった。</p> <p>北上時のデータについて、GPS 船速(20 個)・流速(5 個)の平均化処理を行い、さらに、流速の 29 項移動平均をを行った結果、CI-30 の対地船速とほぼ同等の流速データが得られた。</p> <p>GPS を島根県水産試験場に固定して、観測を行った。</p>
1996. 7 .24 ～26	航行試験(沖合 R 線)	<p>水深設定に間違いがあり沖合部(水深 500 m 以深)のデータが全てエラーデータとなった。</p> <p>沿岸部のデータも、CI-30 ならびに水温分布から東向きの流れが卓越すると思われるのに、SW-2000 の流速データは西向きの流れが卓越していた。</p>
1996. 9 .2 ～ 3	航行試験(沿二一線)	<p>1 レコード 1 ping(約 3 秒間隔)、層厚 17 m でデータを収録(データ量は約 85MB)。</p> <p>ノイズのスレッシュホールドをあげる。</p> <p>GPS 船・流速とも 15 分間の移動平均処理を行った。</p> <p>沿岸部の測流結果は、CI-30 の対地速度と速度の絶対値がやや異なるものの流向の傾向は類似していた。</p> <p>沖合部の水温分布図と、測流結果は極めてよく対応していた。</p>
1996.10. 3 ～ 4	航行試験(沿二一線)	<p>1 レコード 5 ping(約 9 秒間隔)、層厚 12 m でデータを収録(データ量は約 45MB)。</p> <p>測流結果は 9 月とほぼ同じ。</p>

ADCPによって観測されたドップラーシフトから絶対流速を算出するためには、測定流速から船速を差し引かなければならない。船速を求めるには、ADCPによって得られた海底のドップラーシフト量を利用する方法と、航法装置の船位情報から求める方法の2種類がある。当初のシステム開発は、前者の手法を基に行ったが、以下のような問題が生じた。

- 1 本機種の開発が平坦な海底地形で行われており、深度変化の大きい島根県の海域ではボトムトラッキングが不連続になりやすい。
- 2 ボトムトラッキングからGPS基準に切り替わり、再び海底基準に切り替わる際、以前の水深データを保持していないため、海底サーチに時間がかかる。
- 3 ボトムトラッキングのパラメータ設定が複雑で、SW-2000に対してかなり知識を有する人でないと設定を変更しにくい。このため、必ずしも担当者が乗船するとは限らない定期観測には利用できない。

そこで、GPS装置をGP500(古野電気)からAqutime(トリンプル社)に変更し、GPSから得られた船速を基準とした方式に変更した。Aqutimeは、トリンプル社独自のフォーマットで情報をやり取りする特殊なものであるが、0.5秒毎の位置情報の更新、フィルターのパラメータの詳細な設定が可能のため採用した。

(2) ドップラー周波数から流速への変換

SW-1000とSW-2000が取得した4つのビームの層毎のドップラーシフトから目的の層の流速(船速を含む)を最小自乗法により求める。算出可能な成分はx, y, zの3成分であるが、鉛直成分は使用しない。この結果、流れの成分は、船首方向と右舷方向の2成分である。

上記の2成分を南北、東西方向の流れの成分に変換するためには、船首方向の速度、方位が必要となるが、速度はGPS受信機、方位は島根丸搭載のジャイロコンパスの値を使用する。これらの情報は、SW-2000から音波を発射するたびに収集、記録されたものである。現在、GPSシステムには、SAという誤差が人為的に加えられているが、後に述べる特定のパターンで航行中のデータに対し単純な平均化処理を行なうことにより、十分な流速の精度が得られると考えられる。

96年3月にGPSを設置し、計測プログラムを変更したが、GPS受信機から送出される速度、方位が記録されていなかった為、3月のデータの解析は緯度経度から計算された速度、方位を用いた、以降のデータにはGPS受信機からの必要な情報は全て保存されている。

ジャイロコンパスの指北方向は船が航行中の場合、地球の自転と船の運動の合成運動により誤差を生じる。これはジャイロコンパスの速度誤差と呼ばれている。この誤差は、船の緯度、速度、進路により求められるので船首方位の補正を行う。計算式を下に示す。

S:船速(ノット), θ :進路(ラジアン), Φ :緯度(ラジアン)とすると速度誤差修正値 Δ (ラジアン)は

$$\Delta = (S \times \cos \theta) / (900 \times \cos \Phi)$$

となる。

進路により下記のようにジャイロ方位を調整する。

1. 進路が $270\sim 0\sim 90^\circ$ の場合、ジャイロ方位より速度誤差修正値を引いた値が真方位となる。
2. 進路が $90\sim 180\sim 270^\circ$ の場合は、ジャイロ方位に速度誤差修正値を加えた値が真方位となる。この結果、船の速度、流れの速度を南北成分、東西成分に変換することが出来る。

(3) 異常データのチェック

4つのビームは鉛直方向に 30° の傾きをもって4方向に広がってゆく、これらのビームが捕らえる4個所の状態が同一であることがドップラー流速計の動作理論である。しかし海中のさまざまな要因、および船体の動態により、流れ以外の要素を含むことが多く発生する。これらのデータを異常値として自動的に判定することは、大量のデータを迅速に処理するために大変重要である。

今回開発したシステムでは、南北、東西成分について鉛直方向の平均値、標準偏差をもとめ経験的なしきい値(平均値 150cm/s 、標準偏差 75cm/s)を設定して異常レコードにマークをつけた。

(4) GPS、流れの移動平均処理

前述したように、GPSから得られた船速度には人為誤差、流れの値には船舶の動揺による変動が含まれている。このためGPS船速度、流速成分それぞれに任意の区間で移動平均処理を行えるようにプログラムの開発を行った。

前述の(2)・(3)項の処理を行ったデータを読み込み、任意のレコードが読み書き可能なランダムアクセスファイルへ変換する。この時、流速データは船速を差し引かない測定値のまま扱う。島根丸の調査時の航走パターンを考慮して、 10 ノット以上でほぼ一定方向に航行中のデータを平均計算に使用する。ジャイロとGPS進路が 10° 以上異なっている場合は、変針中とみなし使用しない。それらのレコードは計算値に含めず欠測として扱うことにした。

まず、適切な航行時の区間を探し、GPSから得られた船速度の平均処理を行う。その後、同区間における流れの情報の平均処理を行う。平均化した流れの情報から船速度を差し引いて、流速成分を求める。最後に、テキストファイル形式で出力する。

結果と考察

(1) GPSの平均時間

島根県水産試験場にGPS(トリンブル社Aqutime)を固定して 10 秒間隔で取得した速度(N成分・E成分)の観測値を図1に示した。GPS情報にはSAという誤差が人為的に加えられている。SAはランダムに発生しており、図2に示した測得値の自己相関からも明らかなように周期分析により完全に切り除くのは困難である。そこで、移動平均処理によりどの程度データの平準化が図れるか検討した。その結果、表3に示すように、 15 分間の移動平均で、速度はほぼ 5cm/s (0.1 ノット)以下に平準化が図れることが明らかとなった。そこで、本システムにおけるGPS情報の平均化時間は 15 分を採用した。流速データの平均

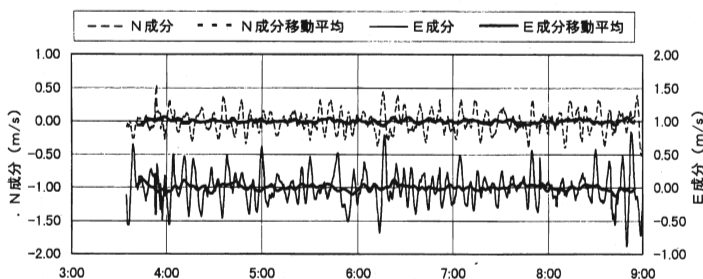


図1 島根県水産試験場にGPS(トリンプル社Aqutime)を固定して10秒間隔で取得した速度(N成分・E成分)の観測値と15分間移動平均値.

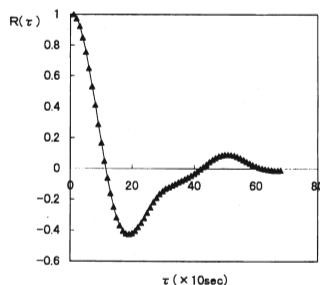


図2 GPS(トリンプル社Aqutime)から得られた速度(N成分)の自己相関.

表3 GPS(トリンプル社Aqutime)から得られた速度(N成分・E成分)の観測値と移動平均値の平均と標準偏差.

移動平均時間 (分)	北方成分 (cm/s)	東方成分 (cm/s)
原データ	-0.62 (15.9)	-0.14 (24.6)
5	-0.43 (7.4)	-0.01 (10.9)
10	-0.32 (3.8)	-0.02 (6.2)
15	-0.31 (2.6)	-0.06 (4.1)

時間は、その使用目的により異なるが、今回は便宜定にGPS情報の平均時間と合わせて15分間とした。

(2) エラーデータの処理

記録されたデータよりドップラーシフト周波数と信号強度のプロファイルを図3に示した。上段の4つの図はドップラーシフト周波数を図化したものである。中央は0Hzで、発射した音波の周波数と同一であることを示す。ビーム1, 4は後方を向いているため、走行中は負の方へ周波数がシフトする。ビーム2, 3は逆に正の方へシフトしている事が分かる。船の速度(10~13ノット)に比べ、流れの鉛直変化は小さいので、グラフではほぼ垂直に描かれる。下段の4つの図は受信信号強度を示す、2本のラインのうち右側の太い線は信号を一定の大きさに調整するためのAGC信号を示す。信号の強度は深度に沿ってほぼなだらかに減衰しており、約140m程度でノイズレベルに達している。ノイズレベルは海況により変化する。

算出された流速を図4に示した。信号強度の弱い140m以深では大きく変化することはあるが、全体的に表層から130m付近まで、流速を捕らえているようである。この図では、平均処理をしていない船速を使用しているため、流れの大きさにばらつきがある。

18 DATE> 10/ 3/96 TIME>18:58:41.43 FORE Kts: 11.90 STBD Kts: 0.95 Water
 HDG: 0.5° DIST N, nm: 111.64 DIST E, nm: -22.13 Tot nm: 111.64 MD:PRO
 GPS Lat: 36d 14m14s Lon:131d39m51.12.0 kts 359.7° FILE:GJADIJEQ REC:64/64
 Depth: 0.0m Age: 1000sec Temp: 24.0°C Ping: 0 Avail.Bins: 16 BinW:12.0m

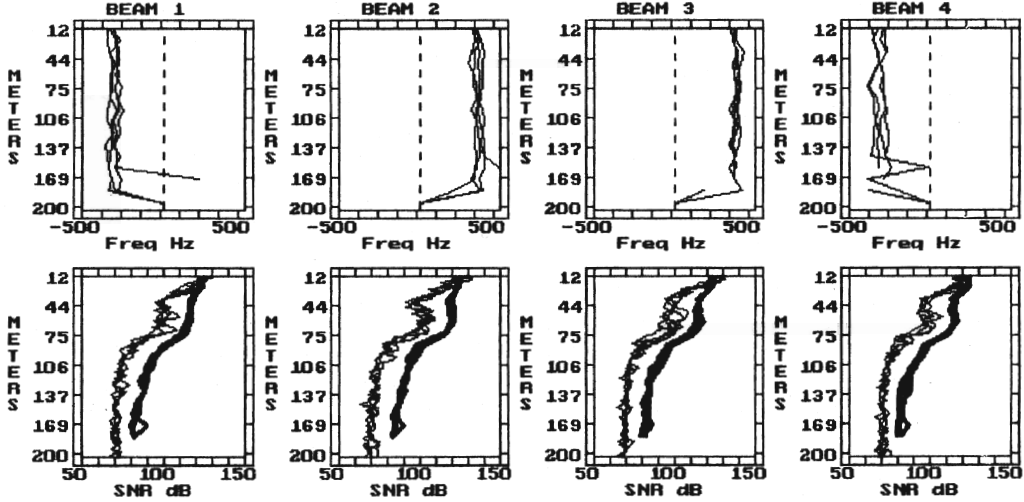


図3 記録されたデータから抽出したドップラーシフト周波数と信号強度のプロファイル例.

18 DATE> 10/ 3/96 TIME>18:03:46.71 FORE Kts: 12.42 STBD Kts: 0.36 Water
 HDG: 0.3° DIST N, nm: 112.70 DIST E, nm: -22.11 Tot nm: 112.70 MD:PRO
 GPS Lat: 36d 15m18s Lon:131d39m50.12.6 kts 358.5° FILE:GJADIJEQ REC:96/96
 Depth: 0.0m Age: 1000sec Temp: 24.0°C Ping: 0 Avail.Bins: 11 BinW:12.0m

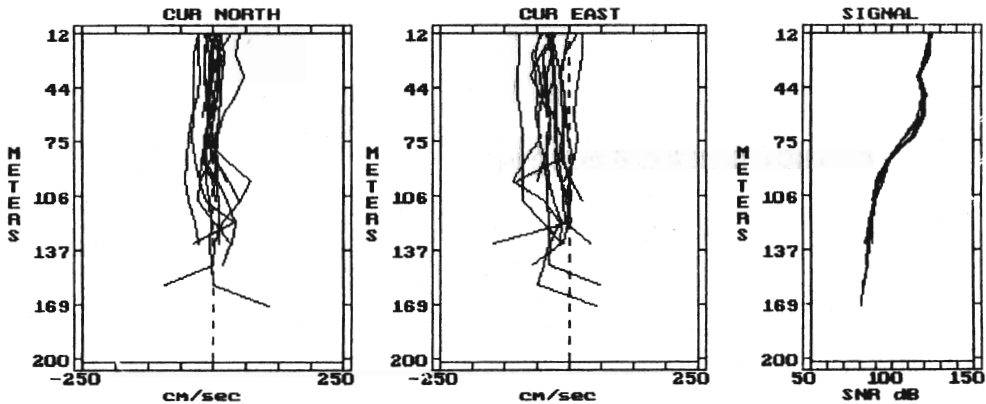


図4 エラー・平均処理を行っていない流速プロファイル例.

図5はピン(音波を放射すること)ごとに信号強度に変化が見られ、特に140m以深では、ドップラー信号強度が弱くなっている部分に、他の音響機器の信号が混入しているのが認められる。この結果FFTによる周波数解析に大きな鉛直方向の変化が見られ、流れ以外の情報が含まれていると考えられる。図6は計算された流速をすべてプロットしたもので、75m以深では大きなエラーが現れている。このように正常な周波数解析が行えない状況は、荒天時の海表面の気泡、魚群による音波の反射、密度躍層による反射、他の音響装置の干渉等が原因で発生する。

20 DATE> 10/ 3/96 TIME>20:03:55.09 FORE Kts: 12.88 STBD Kts: 0.28 Water
 HDG: 3.0° DIST N, nm: 121.94 DIST E, nm: -21.18 Tot nm: 121.94 MD:PRO
 GPS Lat: 36d 24m22s Lon:131d39m55 12.7 kts 359.3° FILE:GJADISTT REC:65/65
 Depth: 0.0m Age: 1000sec Temp: 24.0°C Ping: 0 Avail.Bins: 16 BinW:12.0m

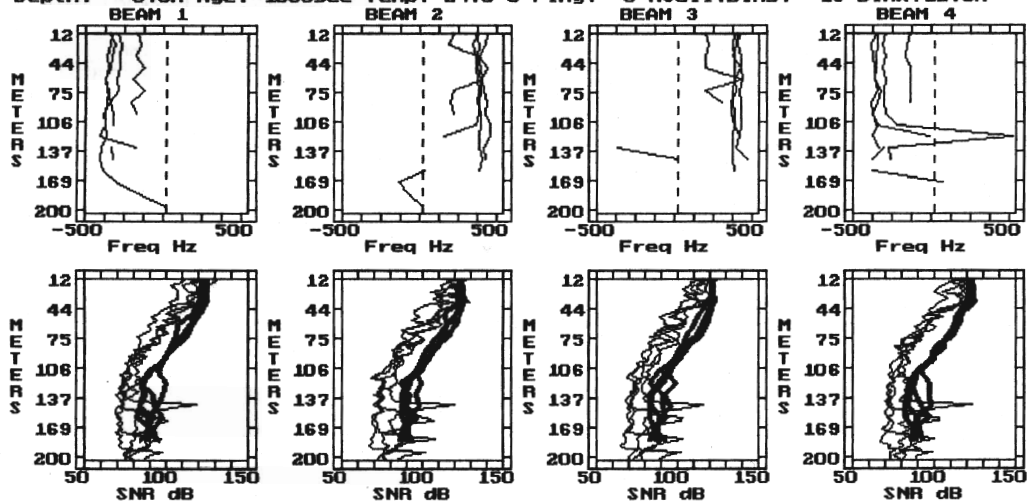


図5 ピン(音波を放射すること)ごとに信号強度に変化が見られる
 ドップラーシフト周波数と信号強度のプロファイルの例。

20 DATE> 10/ 3/96 TIME>20:03:45.04 FORE Kts: 12.60 STBD Kts: 0.24 Water
 HDG: 0.8° DIST N, nm: 121.90 DIST E, nm: -21.18 Tot nm: 121.90 MD:PRO
 GPS Lat: 36d 24m20s Lon:131d39m55 11.9 kts 358.2° FILE:GJADISTT REC:64/64
 Depth: 0.0m Age: 1000sec Temp: 23.0°C Ping: 0 Avail.Bins: 16 BinW:12.0m

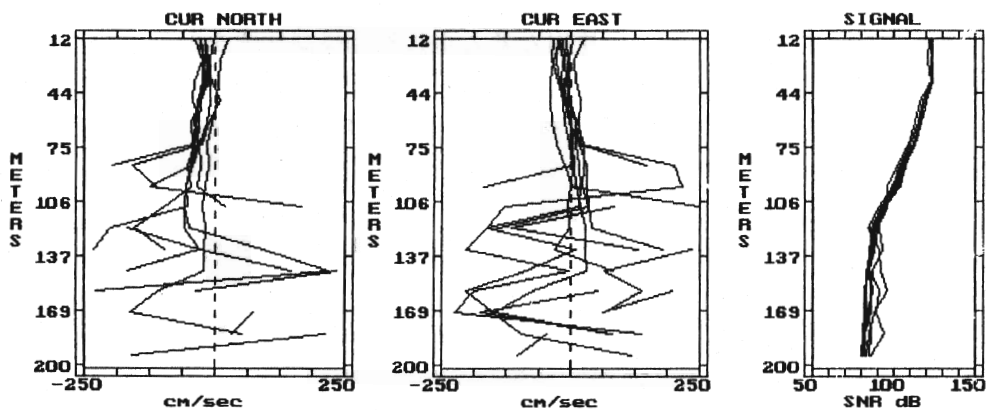


図6 図5に示したドップラーシフトからエラー・平均処理を行わず変換した流速プロファイル。

計算された流速値について鉛直方向の平均, 分散をもとめ, 偏差の大きいデータが現れている水深より深いデータは使用しないこととした。この診断の結果, 図7に示す流速が得られた。

20 DATE> 10/ 3/96 TIME>20:03:55.09 FORE Kts: 13.00 STBD Kts: 0.23 Water
 HDG: 2.2° DIST N,m: 121.94 DIST E,m: -21.18 Tot m: 121.94 MD:PRO
 GPS Lat: 36d 24m22s Lon:131d39m55 12.7 kts 359.3° FILE:GJADIST REC:65/65
 Depth: 0.0m Age: 1000sec Temp: 24.0°C Ping: 0 Avail.Bins: 8 BinW:12.0m

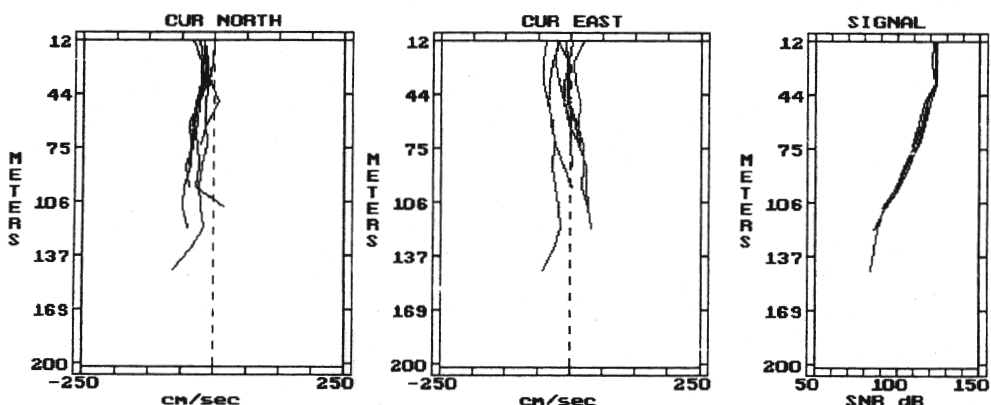


図7 図5に示したドップラーシフトからエラー・平均処理を行って変換した流速プロフィール。

(3) 流速ベクトルと水温分布の対応

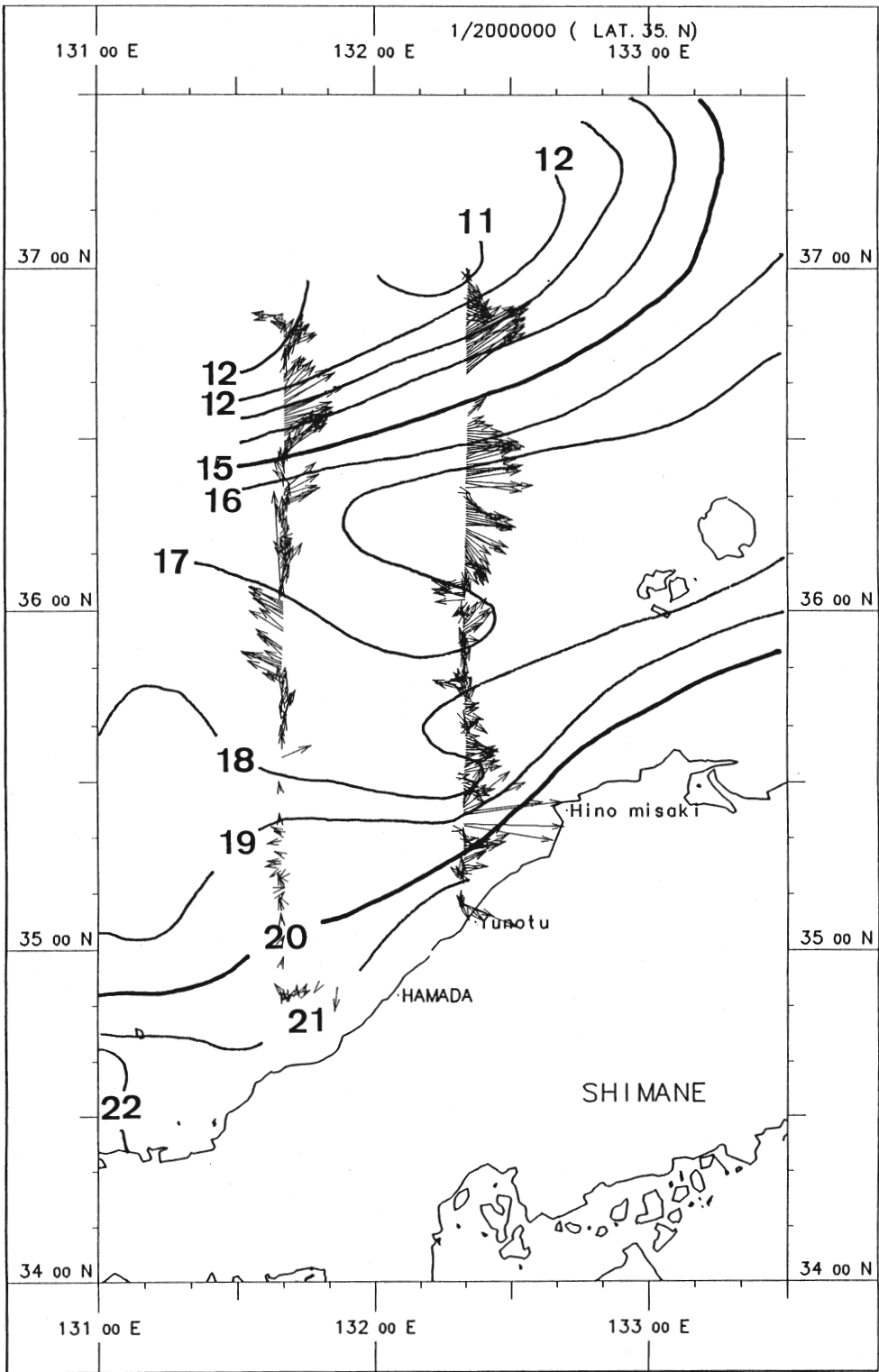
図8と図9に沿岸定線観測時に観測された流速ベクトルと水温の水平分布を示した。流速ベクトルは材料と方法で述べた方式でエラー処理ならびに平均化処理を行ったものを表示している。

図8は1996年9月2・3日の観測結果であるが、西側の定線の特に沿岸側で流速ベクトルの欠測が目立っている。これは、出航当初、北東の風が10m/s以上吹き、波高が2m、うねりも3以上の荒天であったことが原因と考えられる。観測期間を通じてのエラー出現率は約40%であった。また、収録データ量は約85MBにおよんだ。沖合には顕著な潮境が形成され、観測定線の西側沖には暖水域が、東側沖には冷水域が形成されている。流速ベクトルは、水温分布とよく対応しており、特に定線西沖の暖・冷水域による渦を良く捉えている。

図9は1996年10月3・4日の観測結果を示している。観測期間を通じてのエラー出現率は約35%であった。観測期間を通じて、波高1m、うねりも2以下であったため、図8のような顕著なデータの欠測はみられなかった。収録データ量は約44MBであった。観測定線の西側と、東側沖合に顕著な冷水域が認められる。図8同様、流速ベクトルはこの冷水域による渦や流向の変化を良く捉えている。

(4) 今後の課題

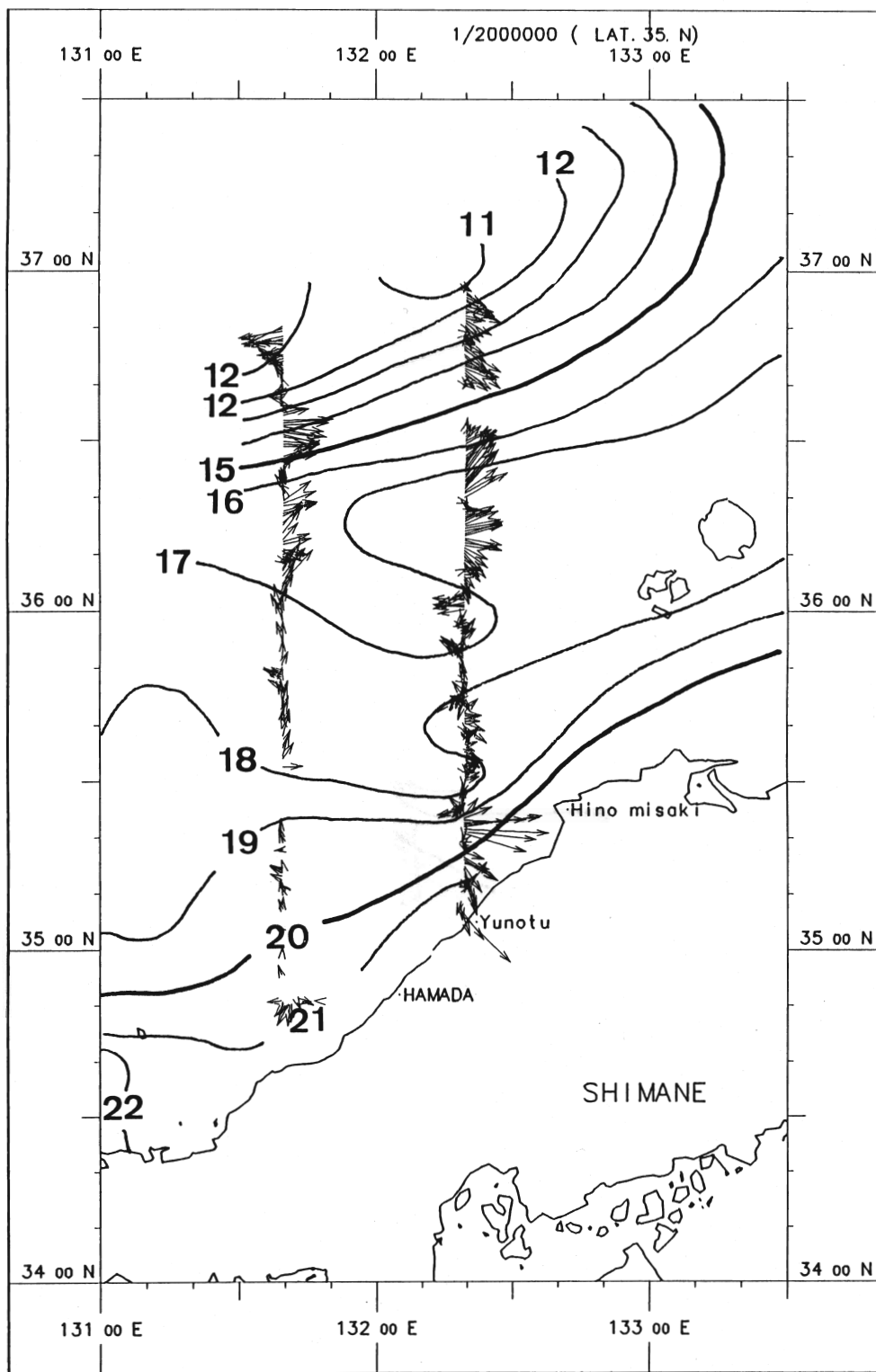
前項で本システムで得られた流速ベクトルが水温分布図とよく対応することを指摘した。次に、他のADCPシステム、具体的にはCI-30による対地流速との比較を検討する。図10に1996年10月3・4日に観測したCI-30の対地モードによる流速ベクトルとSW-2000によるGPS基準の流速ベクトルを示した。CI-30のデータは平均時間1分、データ記録間隔1分で観測した流速値をそのまま作図している。各層ともほぼ同じような傾向を示しているが、東側の定線の沿岸部では、SW-2000の流速値が2ノット近い大きさを示しており、CI-30の観測値とは大きく隔たっている。また、流速ベクトルのばらつきは、SW-2000の方が大きい。



9/ 2/96 Depth: 17.5

(1.0 cm / kt

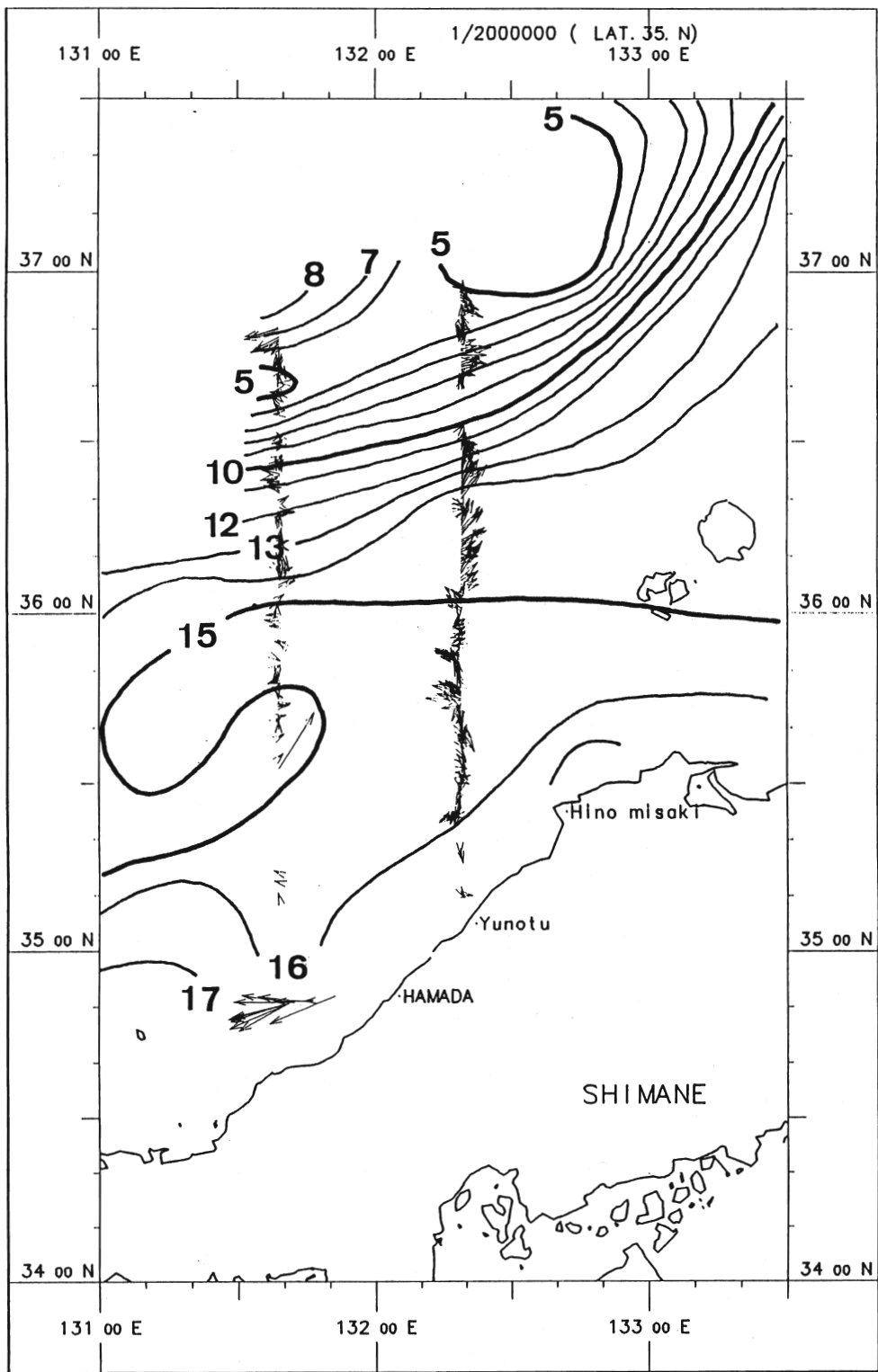
図8a 1996年9月2・3日の観測で得られた流速ベクトル(17.5m層)と水温水平分布(50m層).



9/ 2/96 Depth: 50.8

(1.0 cm / kt)

図8b 1996年9月2・3日の観測で得られた流速ベクトル(50.8m層)と水温水平分布(50m層).



9/ 2/96 Depth: 100.8

(1.0 cm / kt)

図8c 1996年9月2・3日の観測で得られた流速ベクトル(100.8m層)と水温水平分布(100m層).

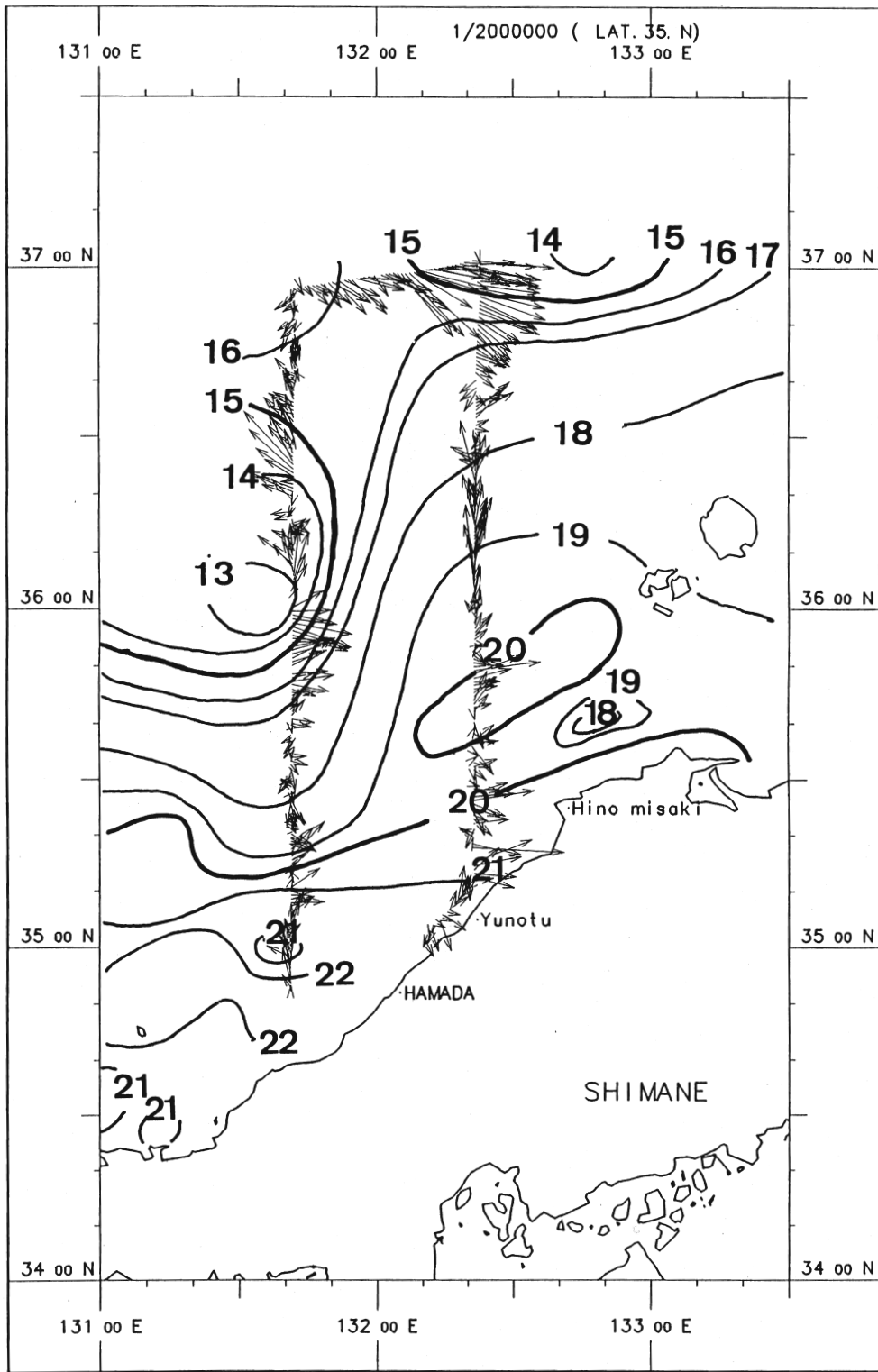
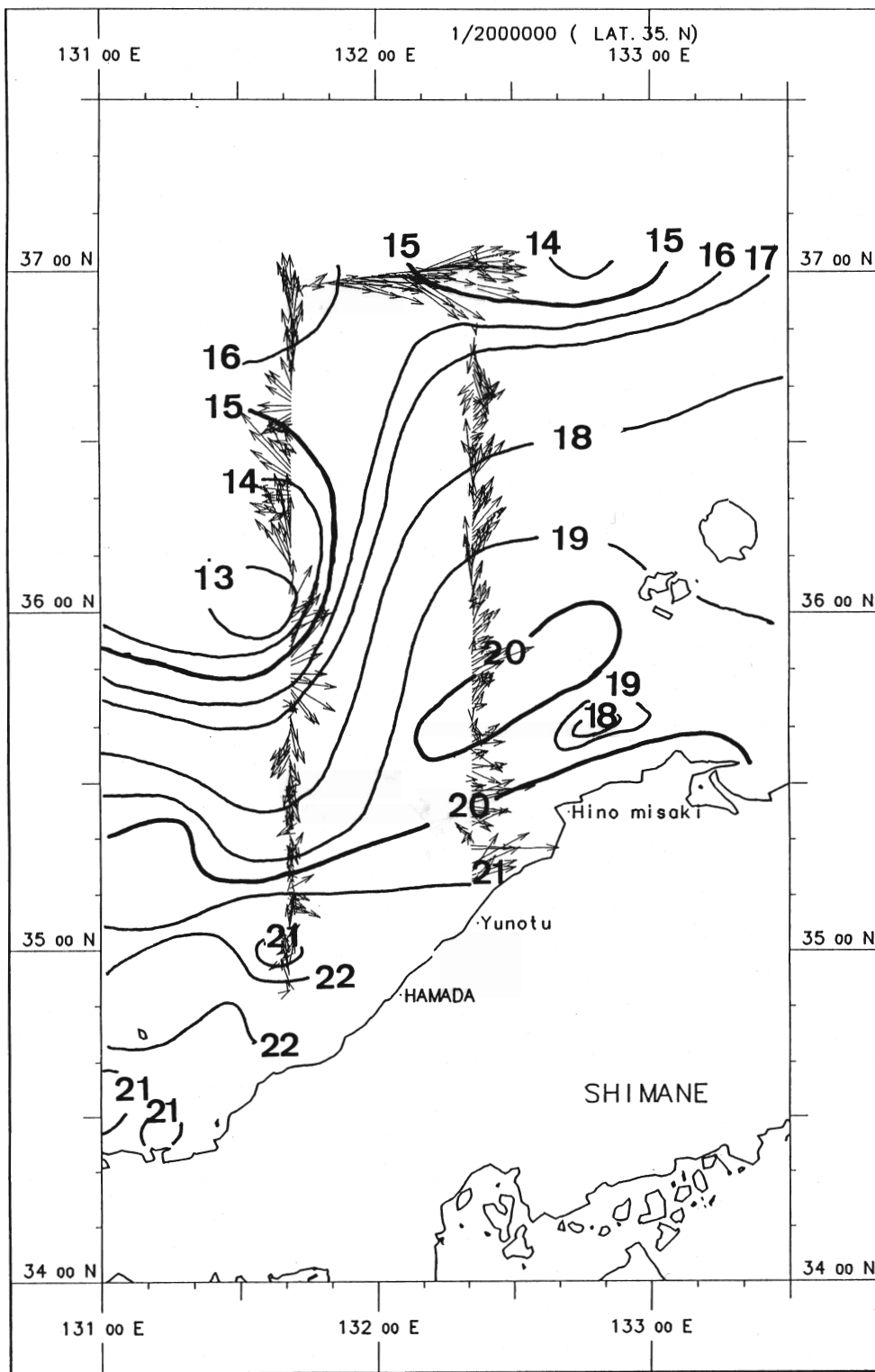


図9a 1996年10月3・4日の観測で得られた流速ベクトル(12.3m層)と水温水平分布(50m層).



10/ 3/96 Depth: 48.4

(1.0 cm / kt

図9b 1996年10月3・4日の観測で得られた流速ベクトル(48.4m層)と水温水平分布(50m層).

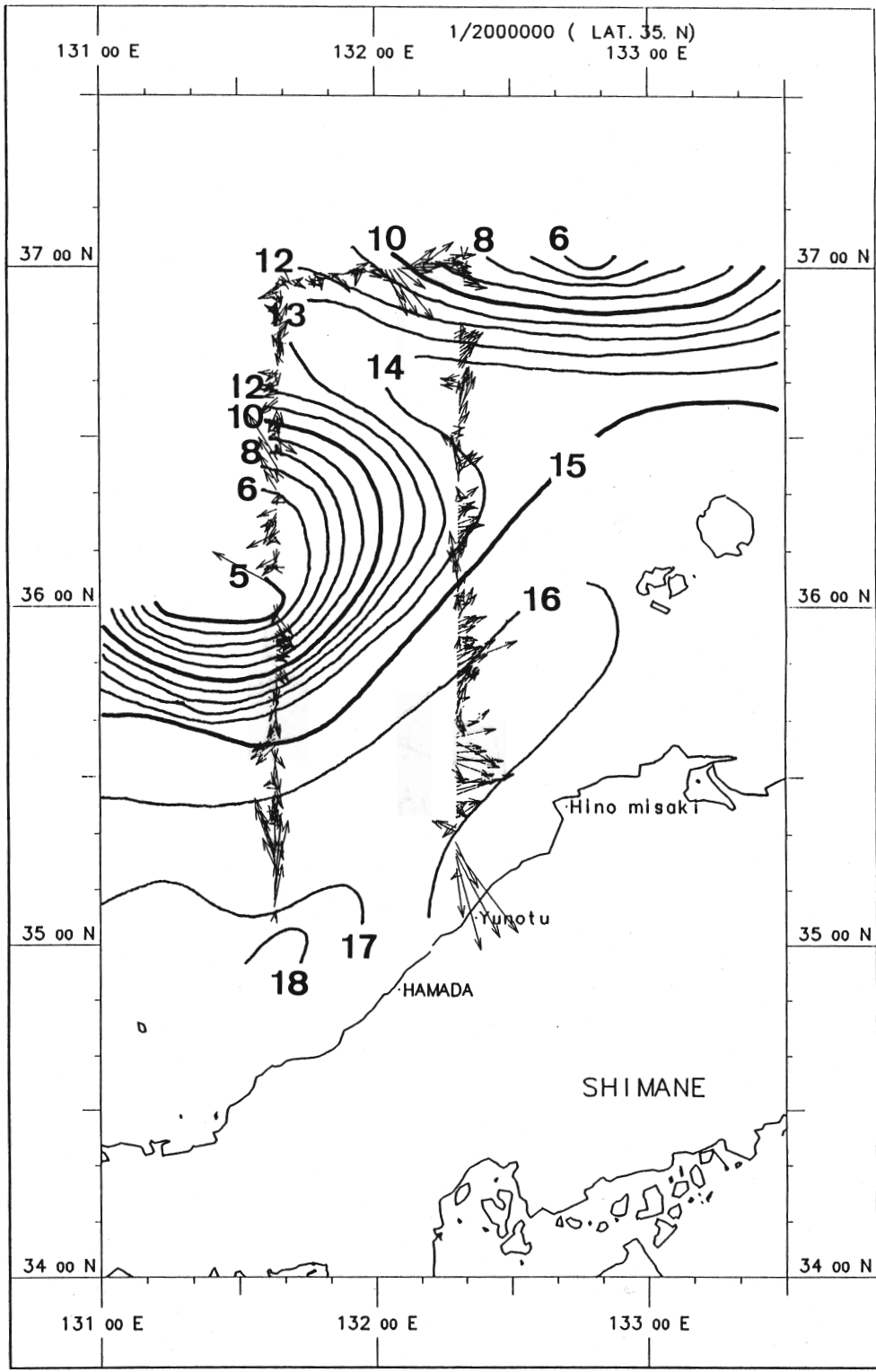
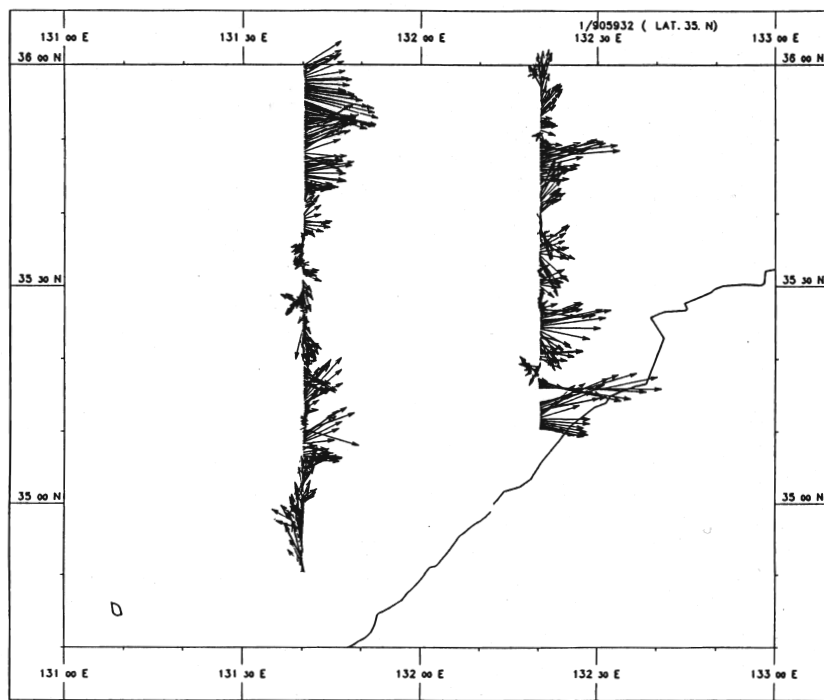
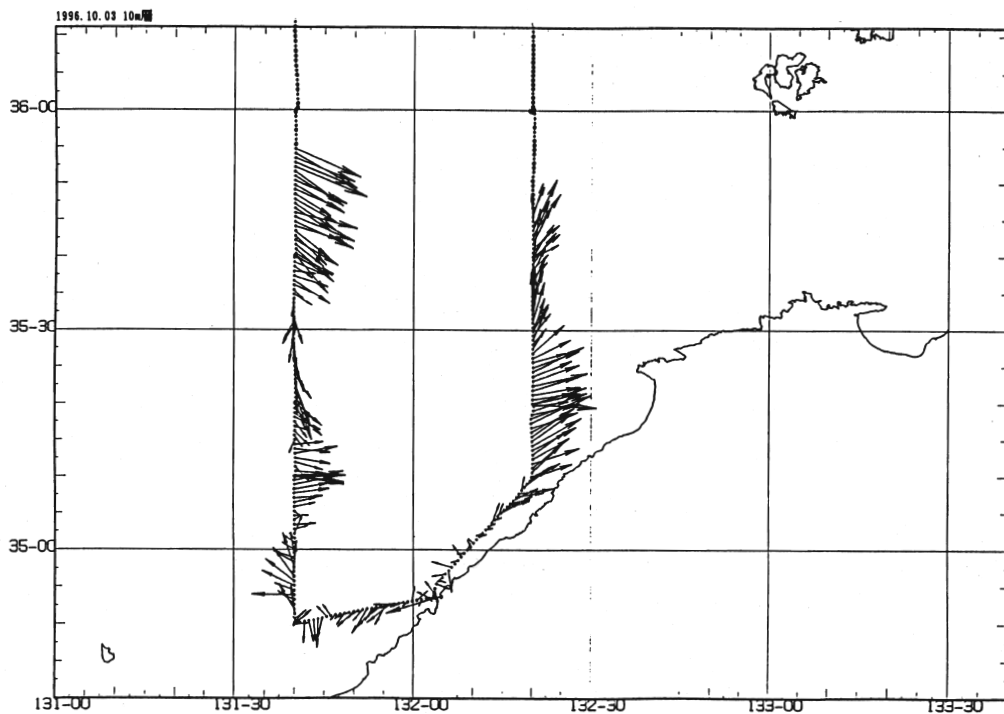
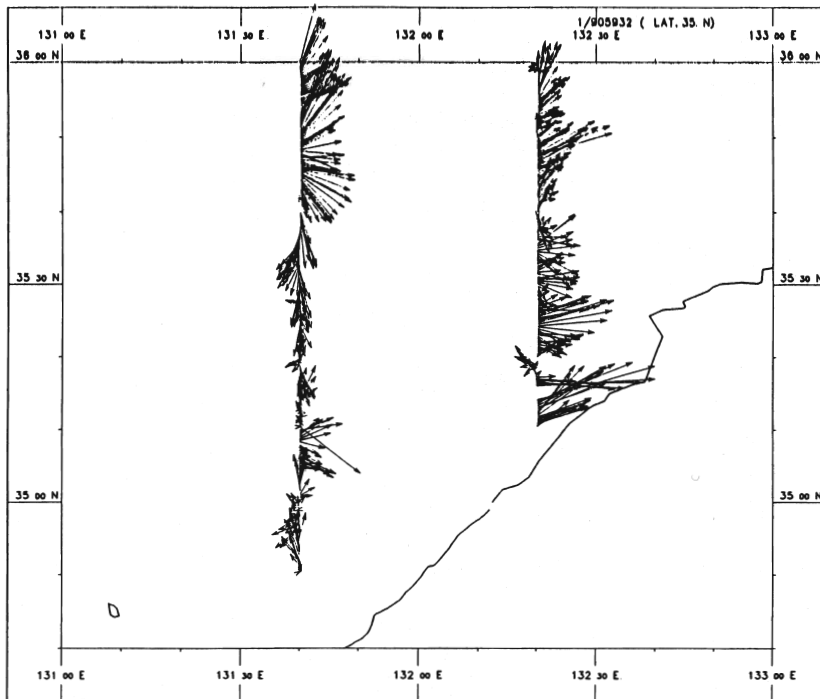
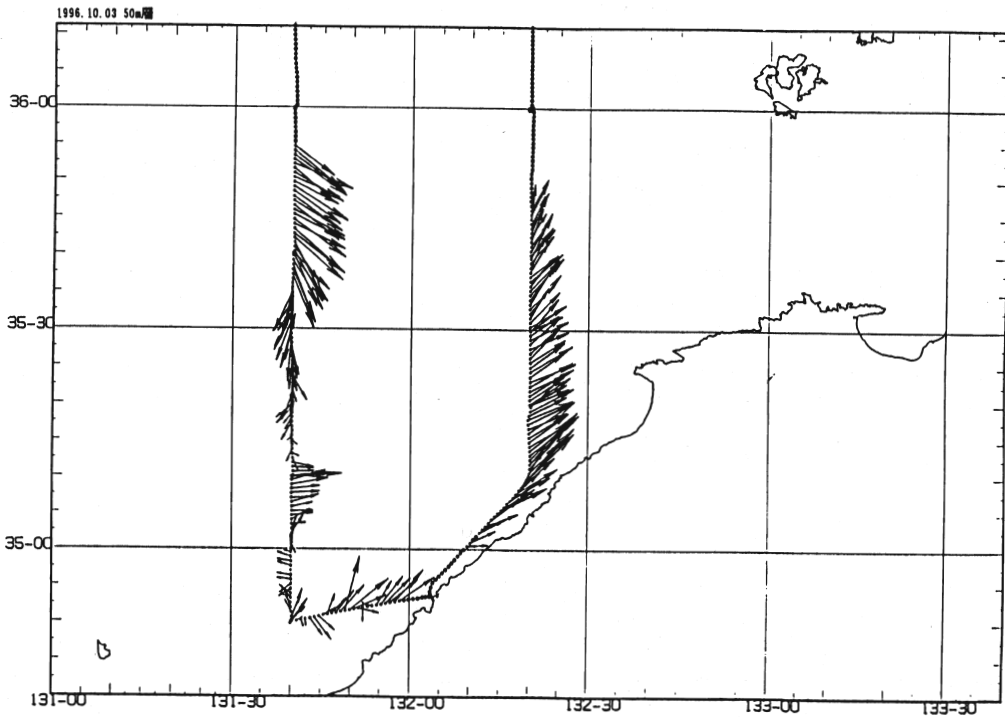


図9c 1996年9月2・3日の観測で得られた流速ベクトル(96.5m層)と水温水平分布(100m層).



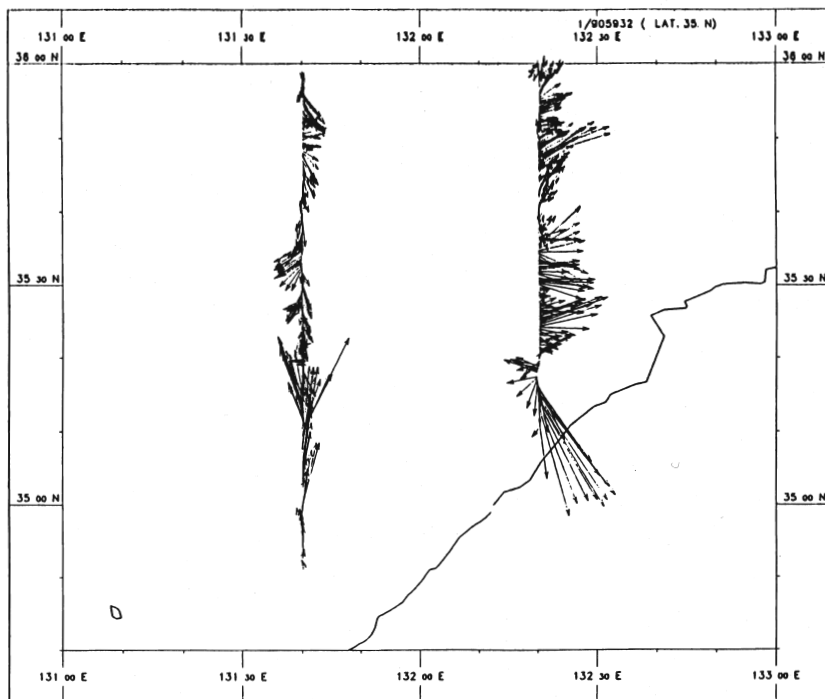
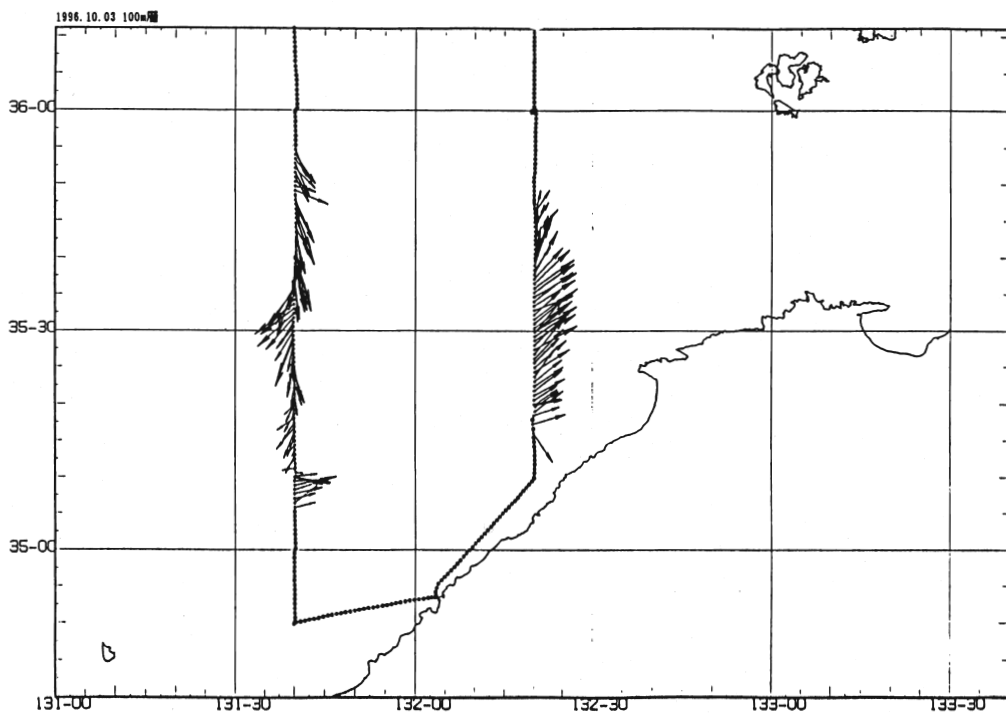
10/ 3/96 Depth: 12.3

図10a 1996年10月3・4日の観測で得られた流速ベクトル。
 上段がCI-30による対地流速ベクトル(10m層)。
 下段がSW-2000によるGPS基準の流速ベクトル(12.3m層。)



10/ 3/96 Depth: 48.4

図10b 1996年10月3・4日の観測で得られた流速ベクトル。
 上段がCI-30による対地流速ベクトル(50m層)。
 下段がSW-2000によるGPS基準の流速ベクトル(48.4m層)。



10/ 3/96 Depth: 96.5

図10c 1996年10月3・4日の観測で得られた流速ベクトル。
 上段がCI-30による対地流速ベクトル(100m層)。
 下段がSW-2000によるGPS基準の流速ベクトル(96.5m層)。

図8・9をみても、SW-2000の観測データは沿岸部でばらつきが大きいようである。沿岸域では、観測点の間隔が約50分と、沖合域の半分であり、また、航行する船も多いことから、船速や船首方向の変化も沖合域より頻繁に発生する。ADCPの観測は、一定速度で一定方向に航行すればするほど安定してデータの取得が行える。特に、GPS基準で観測を行う場合は、特にそれが顕著であり、連続した航行時間が短いと、移動平均処理を行っても十分なデータの平滑ができなくなる。これを避ける為には、沿岸域ではADCPによって得られた海底のドップラーシフト量を利用して、絶対流速を算出することが望ましい。SW-2000の現在の収録システムでは、GPS基準のデータと海底のドップラーシフトを同時に記録することができない。今後は、収録システムを改良して、GPS基準と、海底のドップラーシフト量基準の2つのモードのデータを記録させる予定である。また、海底のドップラーシフト量を連続して捉える為に、送信出力の増大、データ収録システムの改良も必要である。