

調査船「さがみ」における ADCP 観測について

樋田 史郎

Property of the observations by R/V SAGAMI's ADCP.

Shiro TOIDA*

緒言

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler : 音響ドップラー流速計) は、超音波を海中に発射し、海中の懸濁物等からの反射音響のドップラーシフトを測定することで、いくつかの層の流向流速を計測することができる。ADCP の観測データは、船に対して一定の方向に偏った系統誤差を含む場合がしばしばである。この系統誤差は、トランスデューサの取り付け角の不整合が主な原因として知られており、Joyce¹⁾の方法により補正する必要がある。

調査船「さがみ」には相模湾・相模灘における海洋構造の立体的把握を目指し、多層観測が可能な Sun West 社製の SW2000 が搭載された。しかしながら、SW2000 による観測は、系統誤差を含め多くの問題を抱え、良好な観測結果が得られていない。多層式 ADCP の良好な観測結果の多くは Sun West 社の競合メーカーである RD 社の製品によるものであり、その誤差は輸入代理店が制作したパソコン用プログラムで補正されている²⁾。一方、3層式の ADCP である古野電気製の CI-30 は、東北ブロックで共同開発したパソコン用プログラム「コンパス不整合角演算ソフト」が配布され、系統誤差の処理が可能となった³⁾。このプログラムを用いることで、漁業指導船「江の島丸」に搭載された CI-30 による観測結果についても、系統誤差を検出し補正することが可能となった (樋田, 未発表)。

本報は、調査船「さがみ」における ADCP 観測について誤差補正に至る検討経過を記録するとともに、ADCP 観測結果を「コンパス不整合角演算ソフト」に適用し誤差補正を行なった観測結果について論じる。

方法

ADCP 観測

ADCP (Sun West 社製, SW2000) による観測は、調査船「さがみ」(2001年3月廃船)の各種航海において実施した。沿岸定線観測以外の航海も多いが、観測位置

の記述は定線観測の測点を準用し、図 1 に定線観測の測点を示した。

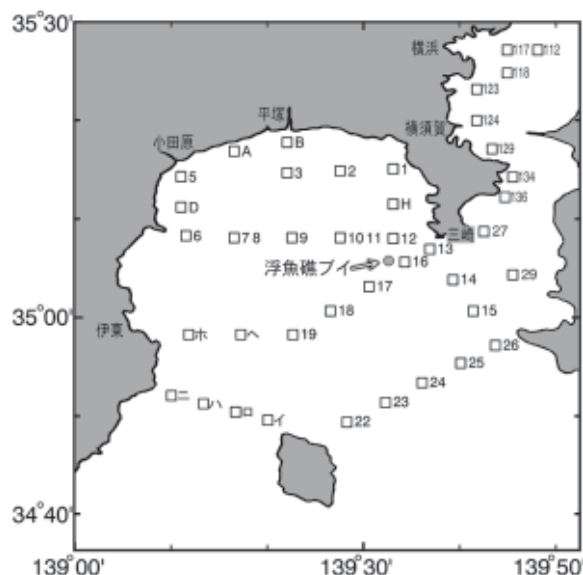


図 1 定線観測測点図

の記述は定線観測の測点を準用し、図 1 に定線観測の測点を示した。

系統誤差の補正

ADCP で収録されたデータは付属の変換プログラムにより、バイナリ形式からテキスト形式に変換した。

Joyce の方法¹⁾による補正定数及び 1+ は、「コンパス不整合角演算ソフト³⁾」を用い、「対水モード法」により算出した。「対水モード法」において検討対象となる往復航行あるいはそれに類似した航行によるデータ区間については結果で示す。

「コンパス不整合角演算ソフト」による処理に供するため、テキスト形式に変換されたデータを新規にプログラムを作成してデータの形式を変換した。この形式変換では、速度等の単位換算の他、必要な入力データを整え

るため次のとおりの処理を行なった。「コンパス不整合角演算ソフト」では、(1) 航法船速・航法真針路、(2) 基本層船速・基本層針路、(3) 船首方位及び(4) 各層流速・流向を要求するが、SW2000で得られるデータは(5) 航法船速・航法真針路、(6) 船首方位及び(7) 各層流速(南北成分・東西成分)となっており、(1)及び(5)、(3)及び(6)ならびに(4)及び(7)が対応し、(2)は対応が無い。(2)の基本層船速・基本層針路はCI-30(古野電気)が音響で観測した船速であり、「コンパス不整合角演算ソフト」の「対地モード法」において検討対象となり重要であるが、「対水モード法」においては重要でないと考えられ、本報では(1)及び(2)に対してともに(5)を対応させることとした。

補正結果は、新規にプログラムを作成し、各速度を調査船の運動を基準とした相対的な座標系におけるベクトルとして逆算し、「コンパス不整合角演算ソフト」で得られた補正定数によりその座標系を回転させ、その後調査船の運動のベクトルを引くことで算出した。補正定数1+については、1.00と見なした。

関連海況情報

関連する海況情報として、城ヶ島沖浮魚礁ブイの観測結果及び一都三県漁海況速報⁴⁾を参照した。

結果及び考察

観測条件の経過

本機の信号周波数は115kHzである。設置当初から観測層厚は6mとしていたが、この周波数では層厚をより厚くする必要があり、2000年8月に層厚を8mに変更した。それまでは、観測中表示される生データが10m/sを超える極端な異常値を示すことが多かったが、この変更によりそのような異常値は目立たなくなった。

良好な観測結果が得られないもう一つの原因として出力信号の異常が考えられた。反射信号強度を診断した結果、出力信号が弱かったため、2000年8月に出力回路ユニットを交換した。しかし、反射信号強度の改善はみられず、第4層以深のデータは使えないことが明らかとなった。

2000年8月に層厚を6mから8mに変更したことで、観測中に極端な異常データが目立たなくなったが皆無にはならなかった。そこで、2000年10月4日に層厚を12mとした。その結果、観測中表示される生データにおいて、極端な異常値が大幅に減少した。全体的な異常データの出現が減った一方、第1層に比べ第2、3層で異常値が多いことが読み取られ、反射信号強度が不足していることがここでも明確になった。

2000年11月末に調査船「さがみ」のドック入渠の際にトランスデューサーを点検した。トランスデューサー表面に防汚塗料が厚く塗り重ねられていることが明らかとなり、トランスデューサー表面の塗装を全て落とし、その後の防汚塗料の塗布は極力薄くした。ドック工事完了後、2000年12月6日の航海において、観測中の生データの収録状況を観察したところ、200m層以深のデータも見受けられ、反射信号強度の問題は一つ解決した。しかし、200m層の観測は漂流中に限られ、航行中にはおよそ100m層以深で極端な異常データがしばしば観察された。この現象は反射信号強度の著しい低下が原因と考えられる。そのメカニズムとしては、船底の泡切れやトランスデューサー周辺の反響等の関与が考えられるが、それらの解決には、設置状況の精密な調整が必要である。系統誤差の検討

2000年10月以前は観測条件が大きく異なるため、本報ではそれ以降の観測に基づいて検討した。2000年10月4日以降で、「コンパス不整合角演算ソフト」の「対水モード法」による検討が可能な往復航行あるいはそれに類似した航行が含まれている航海は、2000年10月20日、2001年1月24日及び2001年1月31日であった(図2)。なお、2000年10月20日は、観測条件の経過で示したとおり、深い観測層のデータは反射信号強度が不足しているため、第1層のみを検討に供した。

2000年10月20日、2001年1月24日及び2001年1月31日における往復航行部分について、「コンパス不整合角演算ソフト」の「対水モード」による補正定数の算出を行なった。同ソフトによる処理に供する観測データは、各往復航行部分についてそれぞれ、「範囲1」及び



図2 系統誤差の検討対象とした航海の航跡
矢印で示した区間のデータを検討の対象とした。

「範囲2」の長さをいくつか変えて選択し、表1に示す結果が得られた。

表1 系統誤差の検出

日付	範囲1		範囲2		第1層		第5層		第10層		第15層	
	開始時刻	終了時刻	開始時刻	終了時刻	1+	1+	1+	1+	1+	1+	1+	1+
2000/10/20	10:58	11:06	11:10	11:20	3.7	1.00						
	10:46	11:06	11:10	11:30	3.6	0.99						
	11:01	11:06	11:10	11:15	3.6	0.99						
	平均				3.6	0.99						
2001/1/24	11:00	11:20	11:22	11:42	4.6	1.02	4.6	1.02	4.0	1.02	5.0	1.01
	10:50	11:20	11:22	11:52	3.8	1.01	3.8	1.01	3.7	1.01	4.1	1.01
	12:50	13:10	13:12	13:32	3.5	0.97	3.6	0.97	3.9	0.98	3.1	1.02
	12:40	13:10	13:12	13:42	3.5	0.97	3.5	0.97	3.5	0.97	3.5	0.97
	13:35	13:45	13:50	14:00	3.3	1.00	3.3	1.00	3.3	1.00	3.3	1.00
	13:25	13:45	13:50	14:10	3.3	1.00	3.3	1.00	3.3	1.00	3.3	1.00
	14:07	14:27	14:30	14:40	2.9	1.00	3.5	1.01	2.9	1.00	2.9	1.00
	平均				3.8	1.00	3.7	1.00	3.5	1.00	3.6	1.00
2001/1/31	10:10	10:30	10:32	10:52	2.8	1.01	2.8	1.01	2.4	1.00	2.8	1.00
	10:20	10:30	10:32	10:42	2.7	1.00	2.9	1.01	2.6	1.00	2.8	1.00
	10:00	10:30	10:32	11:02	2.6	1.00	2.6	1.00	2.5	1.00	2.6	1.00
	11:45	11:55	11:58	12:08	3.2	1.00	2.6	1.02	2.8	1.00	3.2	1.00
	12:20	12:30	12:32	12:42	3.5	1.00	3.8	1.00	2.9	1.00	3.3	1.00
	12:45	12:55	13:00	13:10	3.3	1.17	2.9	1.00	2.7	1.01	3.1	1.01
	平均				3.0	1.03	2.9	1.01	2.7	1.00	3.0	1.00

第1層についてみると、2000年10月20日は $\bar{u} = -3.6$,

$1+ = 0.99$ 、2001年1月24日は $\bar{u} = -3.6$, $1+ = 1.00$ 、2001年1月31日は $\bar{u} = -3.0$, $1+ = 1.03$ であり、平均(及び標準偏差)は、 $\bar{u} = -3.4$ (0.3), $1+ = 1.01$ (0.02)であった。

第1層、第5層、第10層及び第15層の各層平均についてみると、2001年1月24日は $\bar{u} = -3.6$, $1+ = 1.00$ 、2001年1月31日は $\bar{u} = -3.3$, $1+ = 1.00$ であった。いずれも、標準偏差は $\sigma = 0.1$, $1+ = 0.00$ であり、観測層の違いによる補正定数の違いはほとんどなかった。

図3に $\bar{u} = -3.4$, $1+ = 1.00$ として補正した様子を示した。補正前は不整合角に起因する左舷側に著しく偏った観測結果が得られていたが、補正後はその傾向は解消された。図は異常データも削除せずに示した。船速が変化した付近や浅い場所での異常データが目立つが、ほとんどのデータは不整合角補正及びその後の移動平均処理により概ね良好な結果が得られた。

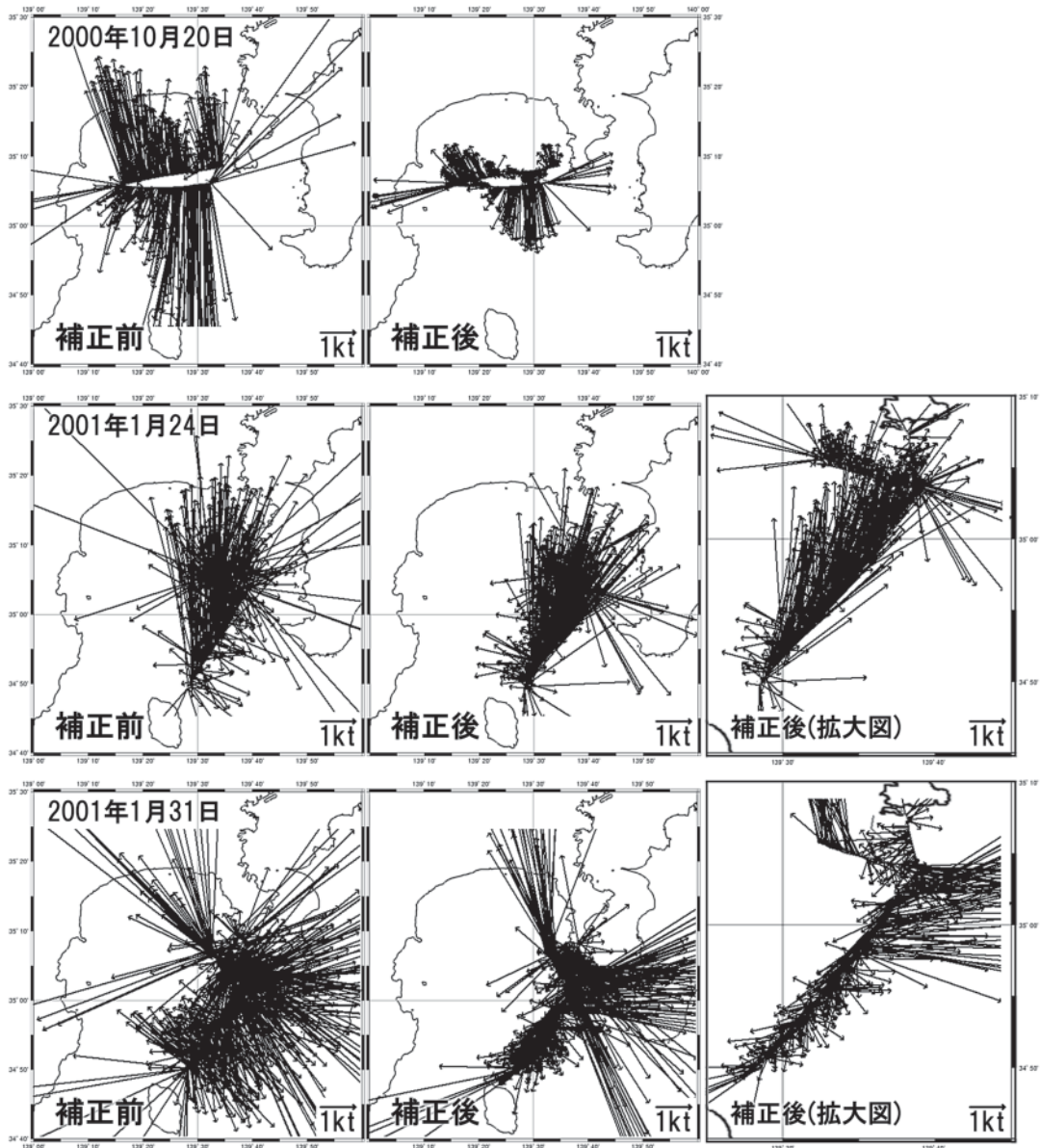


図3 系統誤差補正の様子
補正前と補正後の流速ベクトル図。($\bar{u} = -3.4$, $1+ = 1.00$)

誤差補正を行なった観測結果及び考察

(1)2000年9月20日の例

2000年9月20日の観測結果を図4に示した。 $\alpha=3.4$, $1+\alpha=1.00$ で補正し、移動平均(n=5)を施した。異常データは除去していない。大島東水道から相模湾中央にかけて北西方向に概ね1ノット前後の流れがみられた。

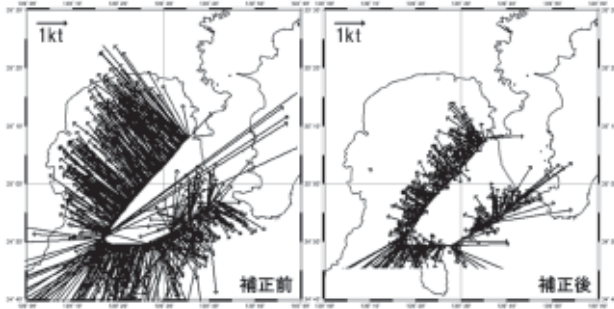


図4 2000年9月20日の観測結果
補正前と補正後の流速ベクトル図。
($\alpha=3.4$, $1+\alpha=1.00$)

関連情報を図5に示した。城ヶ島沖浮魚礁ブイでは西北西に1ノット前後の流れが観測されており、翌9月21日未明には1.4ノットを超えていた。一都三県漁海況速報によると、黒潮流路は規模の大きな特異的なC型であり、蛇行北上部がS字状の形態を示し、房総半島で著しく接岸していた。この蛇行北上部から伊豆諸島北部及び相模灘にかけて黒潮系水が波及していた。

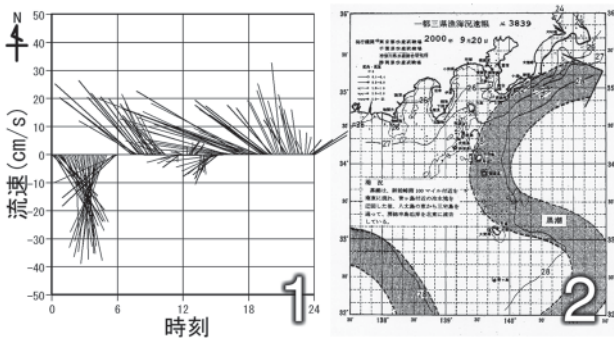


図5 2000年9月20日における関連情報
1 城ヶ島沖浮魚礁ブイにおける流速ベクトル図
2 一都三県漁海況速報

「さがみ」は浮魚礁ブイ付近を15:20ごろ通過している。この時の観測値はそれぞれ、「さがみ」のADCPでは33cm/s、浮魚礁ブイでは19cm/sであり、完全には一致しなかった。しかし、浮魚礁ブイの観測値は20分後には37cm/sを観測している。この日全体を眺めてみると、上記のとおり北西方向に概ね1ノット前後の流れがみられた。この付近における流れの構造の空間的な変動や潮汐に起因する時間的な変動については、流れの構造の時間的・空間的平均場を解明していないため、詳細な議論はできない。しかし、ADCPによる観測結果と関連情報に

よる海況を総合的に比較すれば、よく一致した結果であったといえよう。

(2)2000年10月20日の例

2000年10月20日の観測結果は図3に示したとおりである。 $\alpha=3.4$, $1+\alpha=1.00$ で補正し、移動平均(n=5)を施した。異常データは除去していない。相模湾の中央付近で時計回りの順環流がみられた。平均的に反時計回りの循環流の存在を指摘した既往の知見^{5,6)}と異なっており、例外的な流れであると考えられる。

関連情報を図6に示した。城ヶ島沖浮魚礁ブイでは、この日は南北成分は南向きの流れのみ観測されており、未明の3時頃に30cm/sに達したほかは概ね15cm/s以下のゆっくりとした流れであった。「さがみ」の航海中は南から南東に向けて概ね10cm/s以下のごくゆっくりとした流れのみが観測された。一都三県漁海況速報によると、黒潮流路は著しく離岸しており、相模湾から伊豆諸島北部にかけての海域は温度差が少なく等温線がきわめて疎であった。

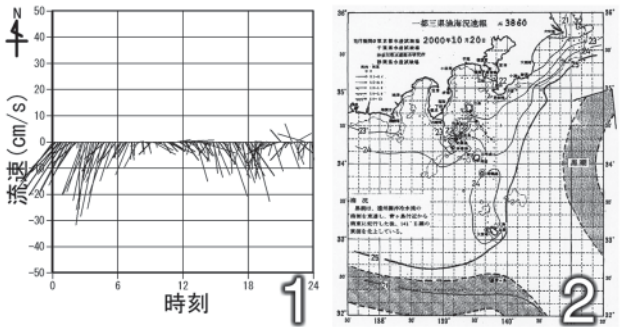


図6 2000年10月20日における関連情報
1 城ヶ島沖浮魚礁ブイにおける流速ベクトル図
2 一都三県漁海況速報

「さがみ」は10:05ごろに浮魚礁ブイに最も接近し、ブイから約1km北を通過した。その付近におけるADCPの観測値は南に46cm/sであった。相模湾を東西に横断した後、12:15ごろに再び浮魚礁ブイに接近したが、その時はブイから4キロ以上北を通過した。その付近におけるADCPの観測値は、北へ6cm/sであった。しかし、それより前は南へ向かう流れが観測されており、12:10ごろには南へ15cm/sと観測された。往路はADCPと浮魚礁ブイの観測結果とでは流速が大きく異なるが、復路の流速は両者に大きな違いはなかった。浮魚礁ブイ付近の観測で注目されるのは、復路の観測においてブイの付近で流向がほぼ180°変わっている点である。この流向が変わる前後(約4km隔てた位置)の流れのベクトルの差は、南北方向に40cm/s程度に及んだ。往路ではADCPとブイとで観測された流れは、南北方向に40cm/s程度の差を含み一致しなかったが、復路でみられた流向が逆転する傾向と一致する。つまり、流れのベクトルが復路以外でもブイの近くで大きく変化することを仮定すると、ADCP観測の結果とブイの観測結果は、往路においても一致していると考えられる。

(3)2001年1月23日の例

2001年1月23日の観測結果を図7に示した。 $\alpha = 3.4$, $1+ = 1.00$ で補正し、移動平均 ($n=5$) を施した。異常データは除去していない。大島東水道から北に向かう流れ、大島北の相模灘では北東に向かう流れ、相模湾南東部では西～北西に向かう流れ、東京湾口では西に向かう流れがそれぞれ観測された。流速の絶対値は概ね1～1.5ノットであった(第2層:水深26m)。また、定線観測の定点19の南東近くを中心とする反時計回りの循環流の形成が見られた。

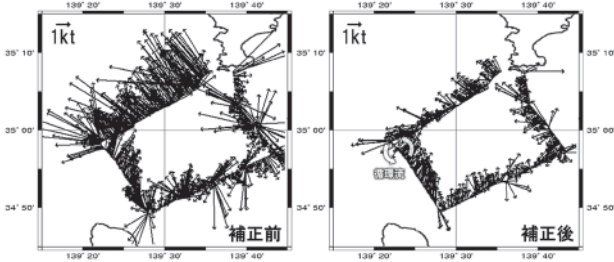


図7 2001年1月23日の観測結果
補正前と補正後の流速ベクトル図。
($\alpha = 3.4$, $1+ = 1.00$)
第2層の結果を示した。

ADCP観測時の表面水温及び関連情報を図8に示した。表面水温は、定線観測の定点22付近を中心に相模灘南部で20℃を超え、定点19の南東に著しい水温ジャンプを伴う16℃以下の水温極小域が見られ、定点17、18及び19の付近は比較的低温であった。一都三県漁海況速報によると、C型流路における蛇行北上部のS字状の上部屈曲から黒潮の分枝が発生し、房総沖から大島東水道を通過して相模湾にむけて直接的に到達した。この日には、

大島東水道からの黒潮分枝に起因する大規模な急潮が相模湾沿岸で発生した⁷⁾。

「さがみ」は14:45ごろに定点16付近を通過し、同日の航程の中でもっとも浮魚礁ブイに近付いた。その時のADCPの観測値は72cm/s、ブイの観測値は10cm/sであり大きく異なっていた。水温の水平分布及び鉛直分布(図8)をみると、定点16と17の間の等温線が密であった。また、ADCP観測による流速は、定点16は70cm/s程度であるのに対して、定点17付近は40cm/s程度であった。これらのことから、定点16及び17の付近の狭い範囲で流れの構造が著しく変化することが明らかとなった。浮魚礁ブイは定点16の西北西、定点17の北東に位置しており、「さがみ」がADCP観測した断面とは流れの構造が異なる可能性がある。

同日の各層の観測結果を図9に示した。補正等の条件は図7と同一である。まず、東京湾口の深い観測層を中心として、船の進行方向に速い流れが示されているのが目立つが、異常データであると推察される。この付近は同日の航程上の他の場所よりも水深が浅いのが特徴であり、海底からの反射音響の影響が考えられる。本報では、比較的浅い場所の深い観測層は定性的に異常データとして議論から外すこととした。第1層から第15層までの各層は、流速は第1層で著しく大きく、他は概ね上層ほど大きく、流向はいずれの層も概ね一致している。定線観測の定点22から19にかけての航程では、第6層以下は移動平均 ($n=5$) で1ノットを超えるデータがみられない。この航程の水温の鉛直断面をみると、水深50～70m付近で等温線が密になっており、この流速の変化との関連が示唆される。定点19の南東近くの渦構造は、第15層まで読み取れる。水温の水温の水平分布及び鉛直分布は、周囲より著しく水温の低い水塊がこの付近に位置していることが示されており、渦構造との関連が示唆された。

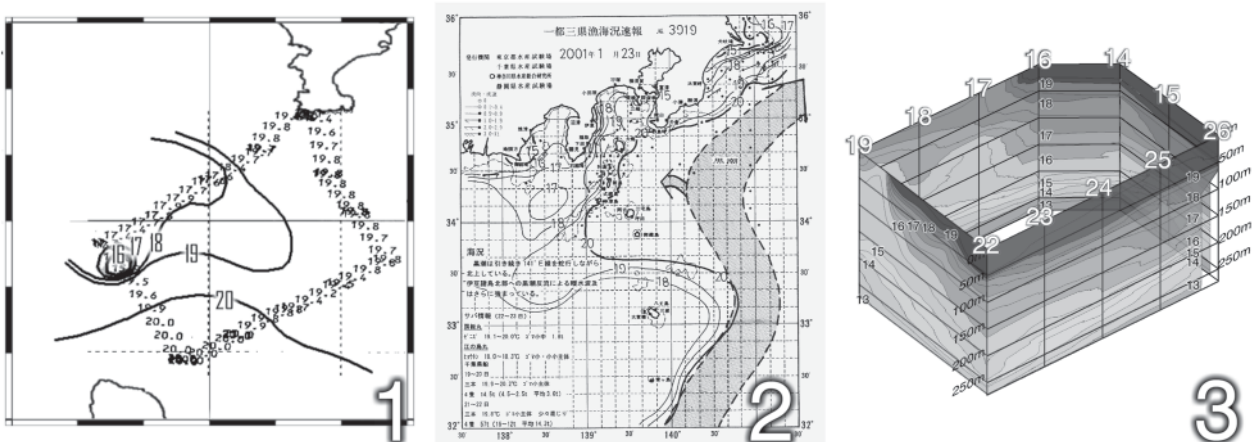


図8 2001年1月23日における関連情報
1 表面水温分布図
2 一都三県漁海況速報
3 水温の鉛直断面図(樋田・中田, 2002)

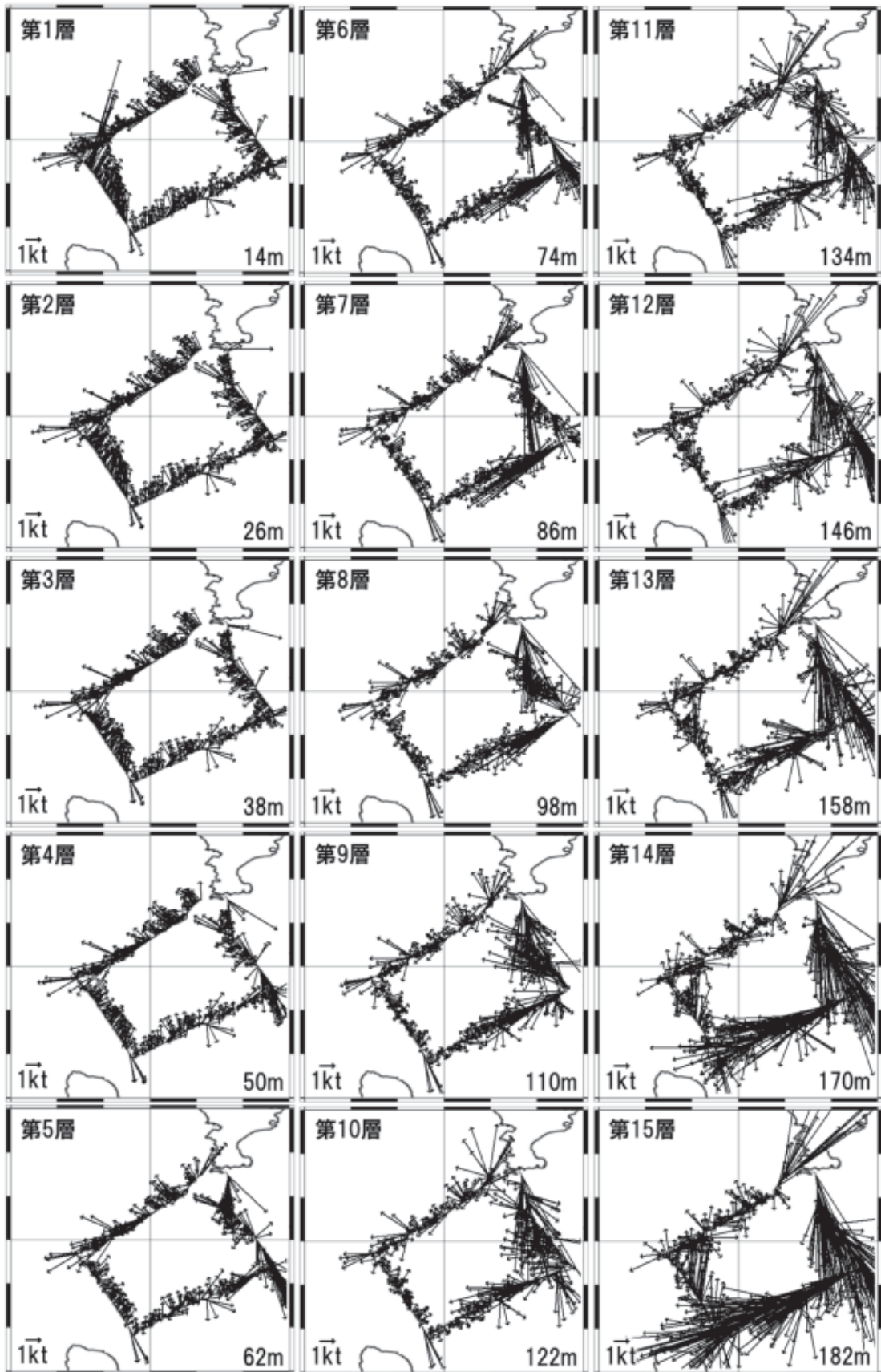


図9 2001年1月23日の各層の観測結果
各層の流速ベクトル図。($\sigma_t = 3.4$, $1\sigma = 1.00$)

まとめ及び総合考察

上述の結果及び議論から次のとおりまとめる。

- ・調査船「さがみ」に搭載されたADCPの観測データは、不整合角の補正 (≈ 3.4 , $1+ \approx 1.00$) により使用可能である。
- ・観測層に関らず同じ補正定数を適用可能である。
- ・2000年8月以前は、層厚の設定が異なる。本報の検討結果が適用可能であるかは未検討である。
- ・2000年12月以前は、表層付近については良好な結果が得られた。しかし、深い観測層については、本報の検討結果が適用可能であるかは未検討である。
- ・非常に狭い範囲（浮魚礁ブイの付近を含む）で大きく流れの構造が変化する例を明らかにした。
- ・相模湾における海況の短期変動予測（急潮予測等）の精度向上には、浮魚礁ブイの観測結果と沖合水流入の立体的構造を定量的に検討する必要があるが、狭い範囲で大きく流れの構造が変化する例に注意を払わねばならない。
- ・流れの構造を定量的に検討するためには、潮汐成分除去が必要である。潮汐成分の除去には、長期間にわたる詳細なADCP観測に基づく立体的な流れの平均場の解明が前提となる。

謝 辞

海洋観測を支えてくださった調査船「さがみ」(当時)の奥村弘幸船長をはじめ乗組員の方々にお礼申し上げます。

懇切なご助言を下された、中央水産研究所 川崎清博士、斉藤 勉博士、秋山秀樹博士、そして中央ブロック各都県の水産調査担当の皆様にお礼申し上げます。有益なプログラムをご提供くださった東北水産研究所 清水勇吾博士、そして東北ブロック各都県の水産調査担当の皆様にお礼申し上げます。

引用文献

- 1) Joyce, T. M. (1989) : On in-situ "calibration" of ship-board ADCPs. J. Atmos. Oceanic Technol., 169-172.
- 2) 中央水産研究所他(2002) : 海洋構造変動パターン解析技術開発試験事業報告書(平成9~13年度), 349-573.
- 3) 東北水産研究所他(2002) : 海洋構造変動パターン解析技術開発試験事業報告書(平成9~13年度), 3-316.
- 4) 東京都・千葉県・神奈川県・静岡県(2000, 2001) : 一都三県漁海況速報, No.3839, 3860, 3919.
- 5) 宇田道隆(1937) : 「ぶり」漁期における相模湾の海況及び気象と漁況との関係. 水産試験場報告, 8, 1-59.
- 6) 岩田静夫(1984) : 相模湾の流動特性. 水産海洋研究会報, 47・48, 100-102.
- 7) 樋田史郎・中田尚宏(2002) : 2001年1月23日に急潮をひきおこした相模灘における黒潮系暖水流入の特徴, 神水研研報, 7, 109-115.