

ADCP 観測資料からの潮流成分の除去について

磯 辺 篤 彦*

Studies on the removing tidal currents from ADCP data

Atsuhiko Isobe*

It has been expected to develop a method of separating ADCP data into two current components, namely tidal currents and residual currents. To eliminate tidal currents from ADCP data, we should calculate tidal currents during the period of ADCP surveys. The main objective of this study is to examine a method of approximating the cross sectional structure of the tidal current along a given survey line. This approach is convenient to yield the residual current by subsequent elimination of the tidal current from ADCP data. The data used in this study were from ADCP observation across the western channel of Tsushima/Korea Strait in September, 1989. In order to investigate the accuracy of the method, the tidal ellipse calculated from the method adopted here was compared with from historical data. As a result, the method used here was possible to remove the tidal current component from cross sectional ADCP data. One more method used by Simpson (S method), which is suitable to calculate tidal current harmonic constants over the cross section from ADCP data, was compared with the method mentioned above. In using the S method, the tidal current structure over all sections was not approximated, but was calculated directly from ADCP surveys. There is little, if any difference, after comparing the results derived from two methods.

1 はじめに

近年 ADCP (acoustic Doppler current profiler) による測流が頻繁に行われるようになり、各海域の流速データが蓄積されつつある。トレーサー (卵・稚仔魚、栄養塩、あるいは熱量など) の輸送量や輸送系路を知るためには、流

れの情報は不可欠である。ADCP は流れの情報を比較的簡便に、しかも空間的には多量に収集することができる。それ故、ADCP の活用には海洋物理学のみならず、化学・生物過程にも新しい知見を与える学際的価値を見いだすことができよう。通常、内湾域、あるいは陸棚域の流れは、潮流成分と残差流成分とに区分できる。このうち潮

水産大学校研究業績 第1359号, 1991年8月12日受付.

Contribution from Shimonoseki University of Fisheries, No. 1359. Received Aug. 12, 1991.

* 水産大学校漁業学科漁場学講座 (Laboratory of Fisheries Oceanography, Department of Fishery Science and Technology, Shimonoseki University of Fisheries).

口頭発表: 平成3年度日本海洋学会春季大会 (1991年4月, 東京) にて発表.

流成分は1日、もしくは半日程度で周期的に変化する流れである。したがって、トレーサーの長期的な移流過程には余り関与しない(例えば、柳¹⁾)。結果として、トレーサーの輸送量や経路を知るためには、海域の残差流成分を知る必要がある。また、流れの情報を種々の素過程に分解することは、物理的な研究でも重要なことである。ところが、われわれは ADCP によって、様々な素過程が入り交じった状態の流速データしか取得することができない。空間的には多量のデータが得られるが、少なくとも潮流成分と残差流成分に分離する必要がある。本研究では、その方法論について検討する。用いた ADCP 観測資料は、磯辺ら²⁾によって報告された対馬海峡西水道での1989年9月のものである。

2 既往の研究

最近 ADCP 観測に基づいた、海域の潮流成分、もしくは残差成分に関する研究がいくつか発表されている。それらの中で用いられた、ADCP 観測資料からの潮流成分の分離法を紹介する。

加藤³⁾は、ADCP 観測結果を用いて対馬暖流の流路について検討した。彼はこの中で、同一測線を24時間50分で4往復し、得られた資料を平均することで、日周潮流、および半日周潮流を除去した。この方法では、一測線を観測するのに8回の横断が必要となり手間がかかる。また、潮流調和定数の空間分布が得られないので、次に同じ測線で観測する場合、また4往復しなければならない。さらに、測線を24時間50分で4往復という綿密な観測計画が必要であり、諸機関によって蓄積されている ADCP データを後から解析するような際には当然ながら使えない。しかし、取得データの、潮流成分の除去のために必要な処理は、平均操作のみとなり、これは極めて簡易かつ確実であるといえる。

Simpson et al.⁴⁾はスコットランドの西海岸に面した水道部での流れの鉛直構造を、ADCP を用いて測定した。彼らは水道部を横切る方向に設けた測線を8回横断し、流速データを得た。8回の横断観測によって、同じ位置での流速データは8個得られる。したがって、残差流成分の値と、日周潮流、半日周潮流の調和定数各2個づつ、計5個の未知数は最小二乗法によって求めることができる。しかし、この方法を用いるためには、未知数の数以上、つまり5個以上の同一点における横断観測資料が必要となる。また、全観測が終了するまでの間、残差流の変動がごく小

さいことが前提条件として要求される。本論文では便宜上この方法をS法と呼ぶ。

武岡・菊池⁵⁾は豊後水道で過去5年間に蓄積されてきた ADCP 観測資料を用い、海域での調和定数の水平分布を算出した。これは調和定数が既に得られている過去の測点を基準点として設定し、各測点での潮流振幅の基準点との比、および位相差を最小二乗法によって算出するものであった。

Candela et al.⁶⁾は黄海で ADCP によって得られた流速の水平分布から、潮流成分を除去することを試みた。彼らは観測した範囲内の潮流調和定数の水平分布を、二次の多項式で近似した。そして、多項式の係数を ADCP によって得られている流速データを用い、最小二乗法によって求めた。この方法を用いるに当たっては、近似する関数の妥当性に留意しなければならない。さらに、S法と同様に、残差流成分の変動がほとんどない程度に短い期間内に、観測を終了しなければならない。しかし、この方法は、ADCP 観測の、空間的に多量のデータが得られるという特性をうまく利用している。また、同一測線での観測回数も、S法に比べ少なく済むと考えられる。したがって、残差流の時間的変動が少ないうちに観測を終了させ易い。なお、この方法を用いる際に、最小二乗法の相関係数が著しく低くなる場合がある。これは、流動の空間構造が設定した多項式では追いきれないことを示している。このような場合には、多項式の次数を上げ、再度計算すればよい。本論文では便宜上この方法をC法と呼ぶ。

C法を用いれば、先述したどの方法よりも短期間に観測を終えることができる。さらに、C法は取得されたデータ全てを使って行う最小二乗法である。従って、同じ位置での取得データだけでその場の潮流を計算するS法に比べ、少々のデータの欠測にも対応しやすい。ADCP データを処理するにあたって、C法の利用価値は今後高くなっていくと考えられる。また、残差流の流量を知る必要性からも、ADCP による流速の鉛直断面分布の観測は、今後頻繁に実施されると考えられる。そこで今回は、Candela et al.⁶⁾が流速データの水平分布に適用したC法を、対馬西水道で ADCP によって得られている流速の鉛直断面分布に対し適用できるか検討した。そして、測線周辺の観測から得られた潮流楕円と、C法によって算出されるそれとを比較し、この方法の精度を検討し、さらに、S法で算出した残差流の鉛直分布と、C法での計算結果を比較して、両者の整合性を検討した。

3 観 測

先述したように、本研究では1989年9月に対馬海峡西水道で得られた ADCP 観測資料を用いた。同海域には主に、残差流成分として東シナ海から日本海へと流れ続ける対馬暖流が卓越していると考えられる。また、Odamaki⁷⁾によ

れば、西水道中央部における潮流は最大振幅 1m/sec 程度とかなり大きい。したがって、ADCP 観測はこれらの流れの混在した状態をデータとして取得することになる。1989年9月18日から19日にかけて、Fig.1に示した Stn. 1 から Stn. 4 までの測線を、7回横断して ADCP 観測を実施した。Odamaki⁷⁾は、Stn. 4 近傍で4大分潮の潮流調和

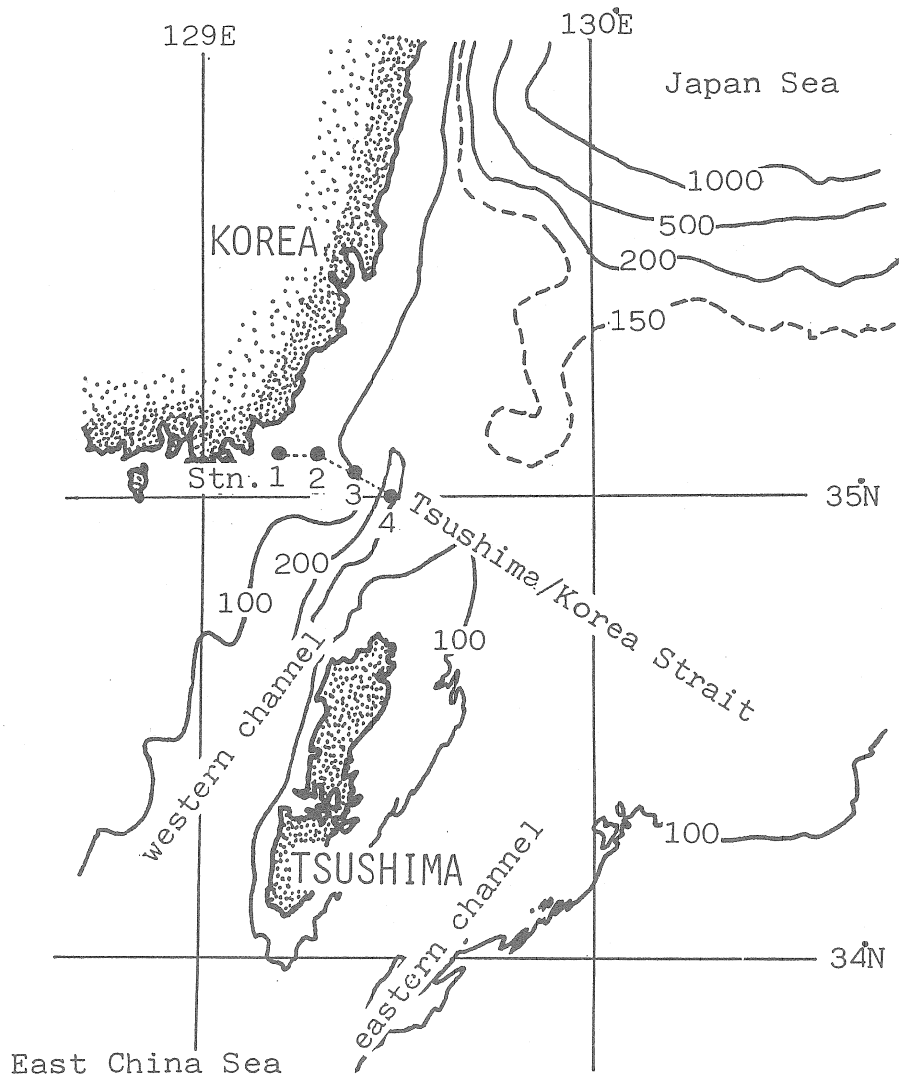


Fig. 1. The study area in the Tsushima/Korea Strait showing the ADCP transect line. Figures in the full and broken line show the depth in meter.

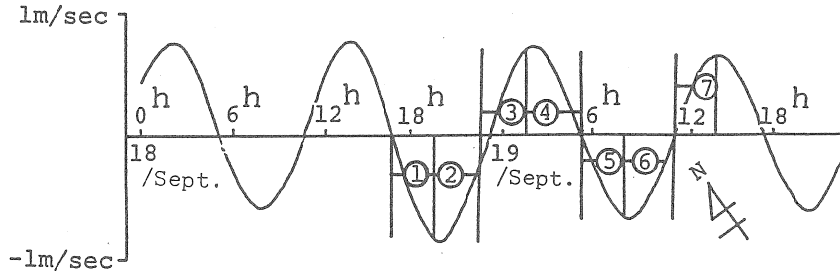


Fig. 2. Calculated tidal current at Stn. 4 with the period of ADCP surveys. Encircled numbers show the number of ADCP surveys.

定数を求めている。この値を用いて、Stn. 4での観測時における表層潮流の経時変化を計算した。Fig.2にその結果を示す。この図から、当該海域の潮流は半日周期成分が卓越しており、海峡の軸方向を主流向として、約1m/sec程度の振幅で変化している。しかも、それぞれのADCP横断観測は潮流の位相の違う時間帯にあたる。1回の横断には約3時間が必要であって、7回目の横断観測が終了したのは、1回目の観測開始から約21時間30分後であった。この中で5回目の横断観測には欠測が多く、本解析には使用しなかった。流速データは水平方向に1分毎、鉛直方向に8m毎に取得された。合計6回の横断観測で得られた水平方向 x -鉛直方向 z 平面におけるデータの総数は、約5000個であった。6回の横断観測によって得られた流速ベクトルをFig.3に示す。図中、上向きベクトルは北流を表す、下向きベクトルは南流を表す。1回目、2回目、および6回目の観測時には、潮流は日本海から東シナ海へ、つまり南西方向に流れていたことがFig.2から判る。一方、3回目、4回目、および7回目の観測時には、潮流は北東方向に流れていた。Fig.3に示した流速の鉛直分布は、1回目、2回目、および6回目には南西流が、他の観測時には北東流が卓越している。全観測に所要した時間は約21時間30分であり、このような短時間内では残差流の変動は少なかったと考えられる。したがって、流速ベクトルの時間的変動は、ほとんどが潮流の位相変化に起因すると考えられる。

先述したように、残差流である対馬暖流の流動構造や、トレーサーの輸送量を知るためには、これらの観測結果より潮流成分を除去することが要求される。以下にその方法論について述べる。

4 方 法

ある場所 x での時間 t における流れ $u(t)$ は、日周潮流成分と半日周潮流成分、さらには残差流成分との組合せで、以下のように表現される。

$$u(t) = u_0 + a_1 \cos \sigma_1 t + b_1 \sin \sigma_1 t + a_2 \cos \sigma_2 t + b_2 \sin \sigma_2 t \quad \dots (1)$$

ここで、 u_0 は残差流成分、 a_1 、 b_1 は日周潮流の調和定数、 a_2 、 b_2 は半日周潮流の調和定数、さらに σ_1 、 σ_2 はそれぞれ日周潮流、および半日周潮流の速度を示す。この式の中で未知数は u_0 、 a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 の5つである。したがって、同一点での流速データが5個以上あれば、最小二乗法によってそれぞれの位置での未知数を求めることができる。本研究のADCP観測では、一測線について6回の横断観測結果が得られているので、以上に述べたS法で各位置における残差流成分、および調和定数が算出できる。

今、(1)式の残差流成分、および潮流調和定数をそれぞれ水平方向 x と鉛直方向 z の関数にして、

$$f(x, z) = \sum_{j=0}^{DP} \sum_{k=0}^j \alpha_j x^{j-k} z^k \quad \dots (2)$$

の形におく。ここで α は定数、DPは多項式の次数、 $1 = (j-k, k)$ である。今、DP=2とおくと、(2)式は2次の多項式となり、

$$f(x, z) = \alpha_{0,0} + \alpha_{1,0}x + \alpha_{0,1}z + \alpha_{1,1}xz + \alpha_{2,0}x^2 + \alpha_{0,2}z^2 \quad \dots (3)$$

と表わせる。残差流成分、および4つの調和定数それぞれに対し、(3)式の6つの係数 α が設定されるので、未知数は総計30個となる。6回のADCP観測によって得られた

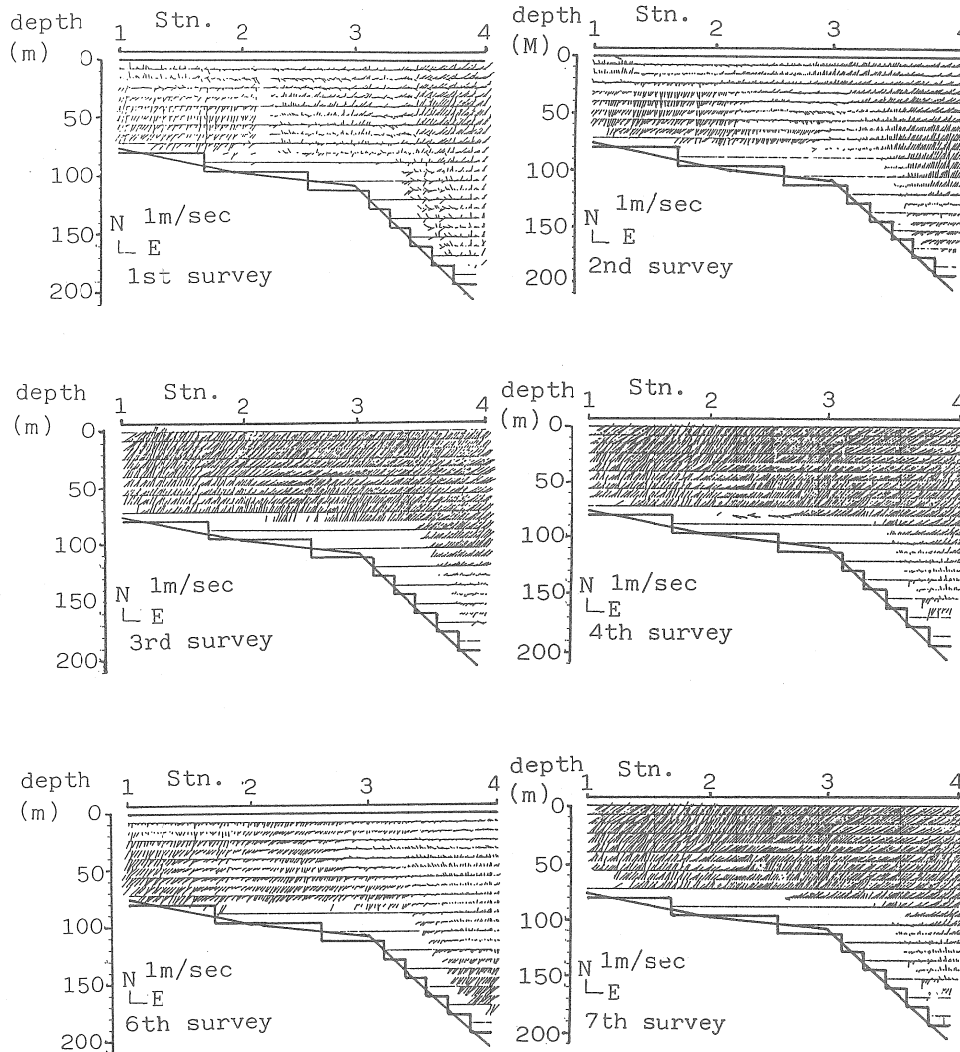


Fig. 3. Vector plots of the horizontal velocities obtained by ADCP surveys.

x-z 平面におけるデータの総数は約5000個であり、これらのデータをすべて用いて30個の未知数を求める最小二乗法は、十分に有意な水準で計算できることが期待される。

本研究では、C法を流速の鉛直断面分布に適用した(2)、(3)式を使い、対馬海峡西水道における潮流の調和定数、および残差流の鉛直断面分布を算出する。さらに、これらを(1)式のS法で求められるそれぞれの鉛直分布と比較し、

両方法の整合性を検討する。

5 結果

C法を本研究に適用して算出した、潮流調和定数の鉛直断面分布を Fig.4 に示す。图中、上から潮流楕円の長軸の長さ、遅角、および長軸の方向を示す。また、それぞれ左

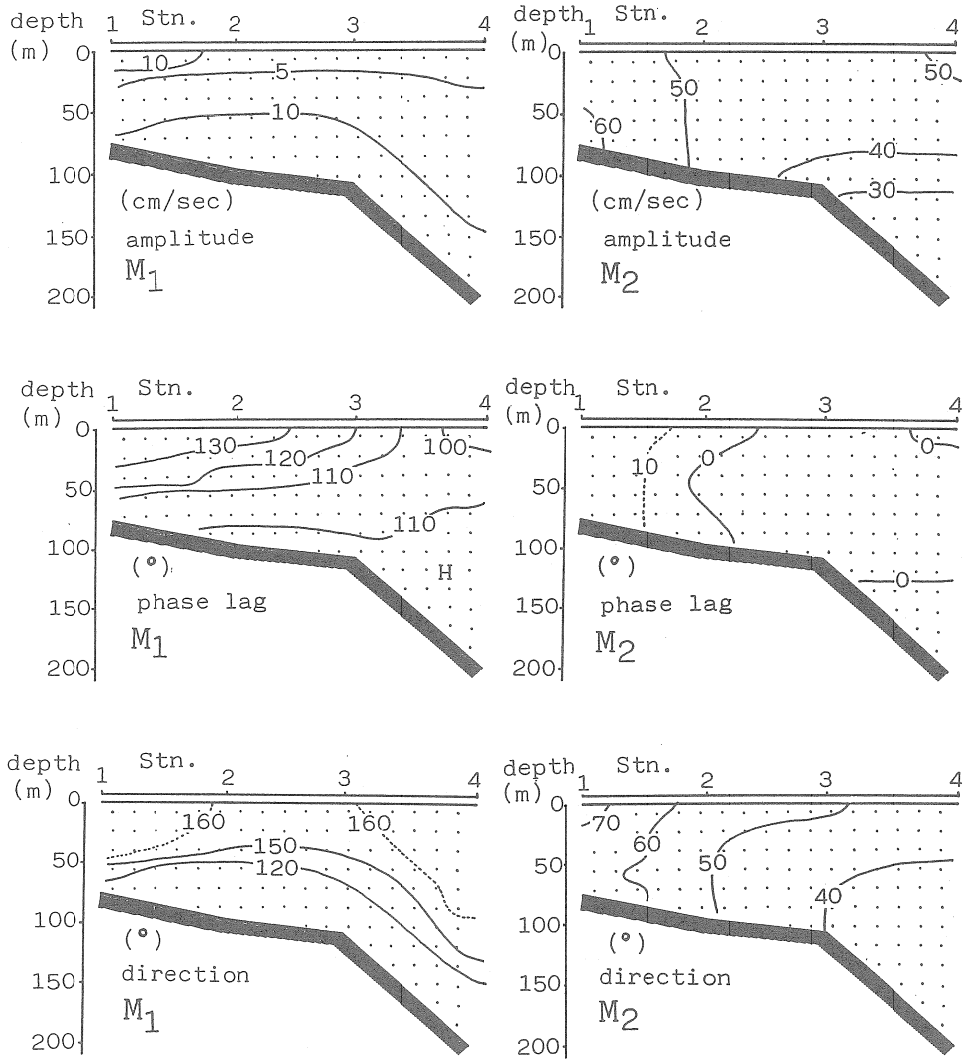


Fig. 4. Contour plots of the harmonic constants and the main direction of the tidal current calculated by the method of Candela et al. (1990).

側が日周潮流成分、右側が半日周潮流成分についての計算結果である。ここで、遅角は観測点の子午線を太陽が通過してから最大流速値になるまでの時間を示す。また、長軸の方向は、北から反時計回りに測った方位角で表現している。日周潮流の長軸の長さは、海域全体を通して5~10 cm/sec だったのに対し、半日周潮流の長軸の長さは30~60 cm/sec と大きな値となった。これは半日周潮流が卓越

する当該海域の潮流特性を考えれば、妥当な結果といえる。遅角は日周潮流が $100^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 、半日周潮流が $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ の値となった。共に、水深の浅い韓国側の Stn. 1~3の方が、深い Stn. 3~4よりも位相が遅れていた。これは水深の深い海域ほど潮汐波の位相速度が速くなることを考えれば理解できる。さらに、長軸の長さは、どちらの潮流成分とも海峡の軸方向（北東-南西方向）とほぼ一致していた。

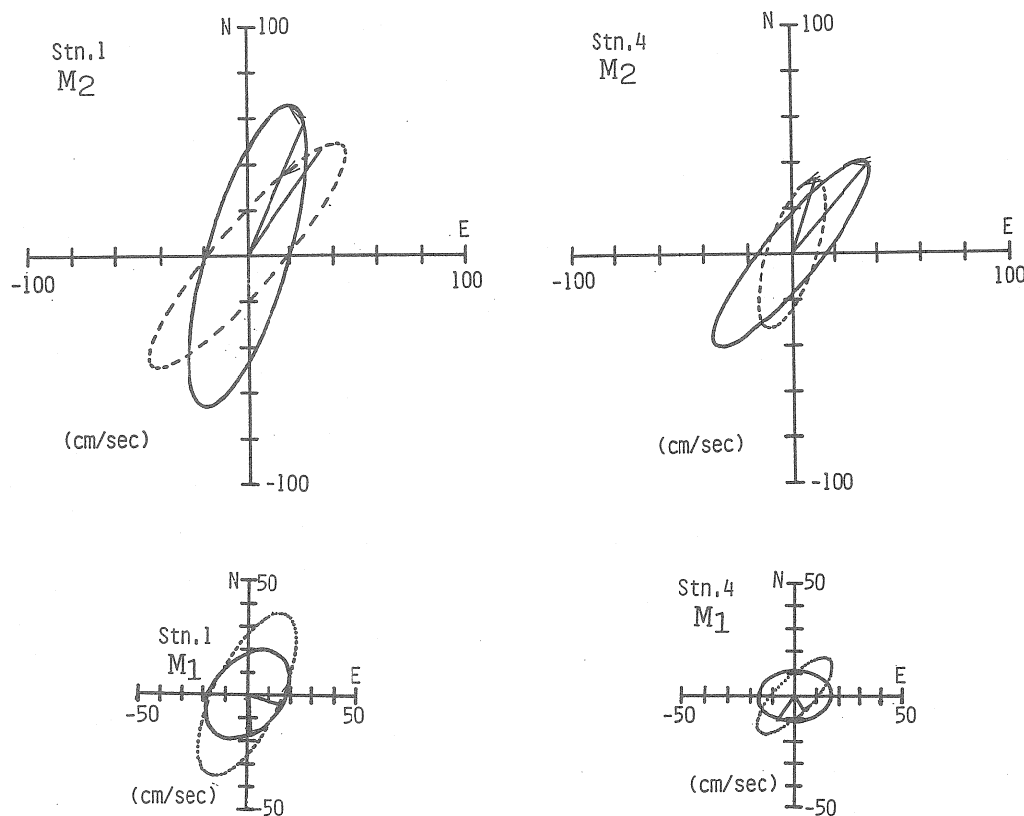


Fig. 5. The comparison between calculated (full line) and observed (broken line) tidal ellipse.

1933年、および1942年に Stn. 1 と Stn. 4 に相当する位置で一昼夜にわたる潮流が実施されている (JODC⁸⁾)。その潮流結果から得られた潮流調和定数を用いて潮流楕円を作成し、本研究の同じ位置での潮流楕円と比較した (Fig. 5)。図中で実線は本研究によって算出されたものを、また破線は1933年、および1942年の観測結果から得られたものを示している。どちらの観測結果からも潮流調和定数は日周潮、および半日周潮成分のものしか得られない。したがって、作成される潮流楕円もこの両成分のものでしかない。ところが、これらの調和定数は、15昼夜の観測結果から得られたものとは違って、観測日時の月齢と月の赤緯によって若干変化する。したがって、Fig. 5 に示した両者の潮流楕円はもともと厳密に一致するものではない。しかし、大まかにみて、海域における潮流の特性、つまり長軸の長さ、向

き、および遅角はよい一致を見た。したがって、本研究によって算出された潮流調和定数の鉛直断面分布は、当該海域における潮流の特性をよく表現していると考えられる。

当該海域における残差流成分は、算出された潮流調和定数から各位置の潮流を算出し、それを6回のADCP観測データから、それぞれ差し引くことで評価された。したがって、6回のADCP観測時毎にその時々々の残差流の鉛直断面分布が計算された。Fig. 6に6回の観測時における残差流の鉛直分布を示す。図中の数字は、海峡の軸方向の、つまりは測線に対し直角方向の流速値を示す。正の値は北東向きの流れを、負(斜線部)の値は南西向きの流れを表している。計算結果には、細かな攪乱を取り除くため、2 km×16mの矩形平均を施した。6回の観測結果から算出された残差流の鉛直断面分布にはどれも、Stn. 1、および

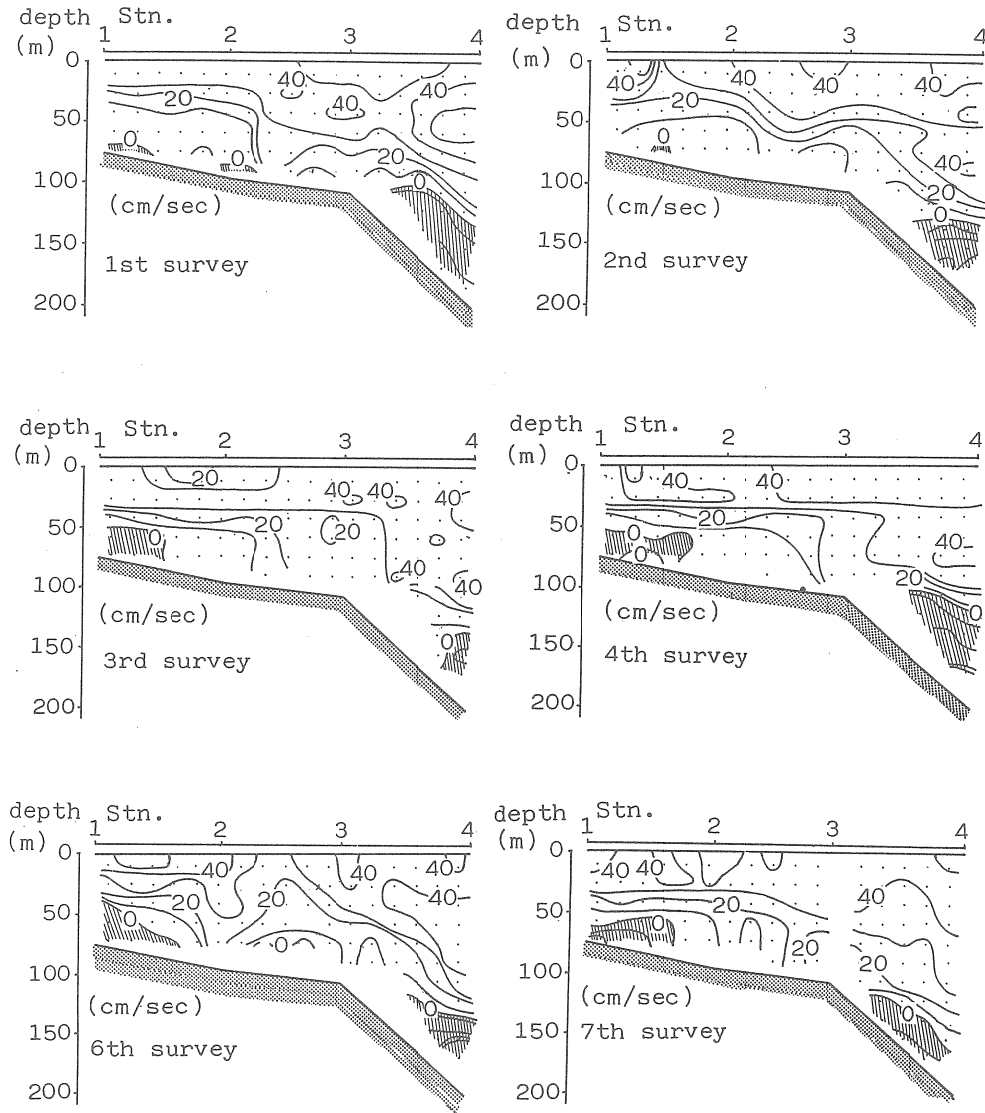


Fig. 6. Contour plots of the velocity component perpendicular to the section without the tidal current using the method of Candela et al. (1990).

Stn. 4の表層から中層において強流域 (40 cm/sec 程度) が存在していた。また、どの計算結果も全海域の中層で流域の鉛直シアが多かった。そして、この層によって流速分布は鉛直方向に2層構造をなしていた。さらに、どの計算結果にも、Stn. 1, および Stn. 4 の下層に南西流の存在

する海域が認められた。以上を総合すると6回の観測結果から算出された残差流は、ほぼ同様な流動構造を持っていた。また、流速値もほぼ同様の値を示した。なお、最小二乗法を適用した際に算出された相関計数は、0.61であった。

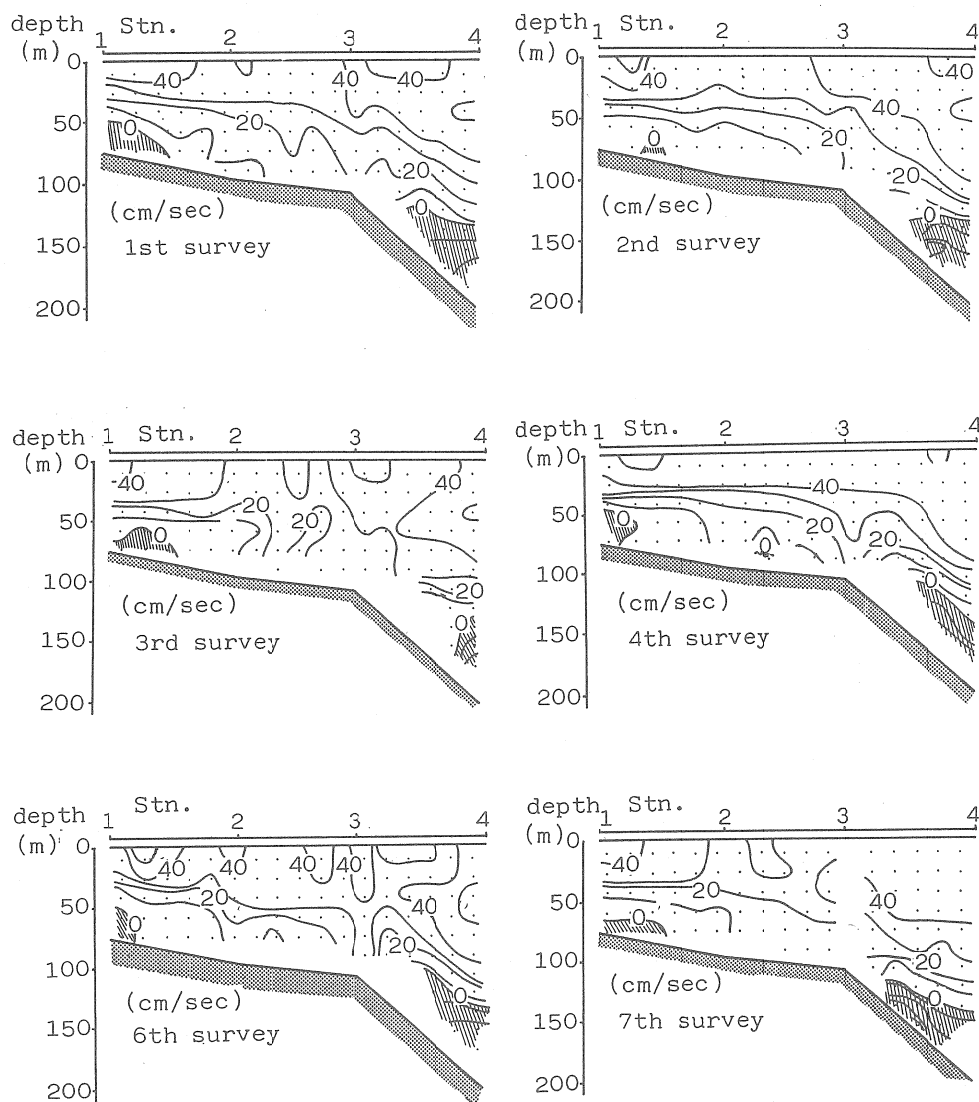


Fig. 7. Contour plots of the velocity component perpendicular to the section without the tidal current using the method in Simpson et al. (1990).

本研究に適用したC法と比較するため、S法で残差流の鉛直断面分布を計算した。まず、S法によって観測された鉛直断面内の各位置における潮流調和定数を算出した。算出された調和定数より、観測時における各位置での潮流を計算し、ADCPデータからそれらを差し引くことによって、残差流成分を算出した。したがって、C法と同様に、

観測された6回の流速の鉛直分布それぞれに対し、残差流の鉛直分布が計算され、その結果をFig.7に示した。Fig.6と同様に流速データには $2\text{ km} \times 16\text{ m}$ の矩形平均が施された。また、等値線上の数字は、Fig.6と同様に断面を直交する流速値で、正は北東流、負(斜線部)は南西流を示す。Fig.7のどの断面分布にも、Fig.6で示したような、断面分

における流動構造の特徴がある。さらに、流速値も Fig.6 とほぼ一致した。

6 考 察

本研究では、C法が ADCP 観測で得られた流速の鉛直断面分布に対して適用できるか検討した。その結果、C法を用いて算出した潮流調和定数によって作成された潮流楕円は、1933年、あるいは1942年の観測値とよく一致している。また、先述したように長軸の長さ、方向、および遅角は当該海域で適当な空間分布特性を持っていた。よって、それらは当該海域の潮流成分を適正に表現していると考えられる。次に、その調和定数をもとに計算された潮流を、6回の横断観測で得られた ADCP データから差し引いて求めた残差流も、お互いに良く一致している。先述したように全観測に所要した時間は約21時間30分であったので、この様な短時間では残差流の変動は少なかったと考えられる。したがって、6個の観測結果から算出された残差流の分布がお互いに類似していたことは、ADCP データからの残差流成分の抽出が適切なものであったとみなされる。対馬海峡西水道における ADCP 観測結果は、潮流調和定数の空間分布を二次の多項式で近似したC法によって、潮流成分を残差流成分に分離することができた。C法を本研究で示したような流速データの鉛直断面分布に適用しても、方法論としては問題はないことがいえる。

さらに、C法によって算出された残差流の分布形態と、S法によって算出されたそれとは、お互いによく一致している。以上の比較結果から判断すると、両方法は整合性があり、共に ADCP データを、潮流成分と残差流成分に分離する適切な方法であるといえる。もし、同一測線の観測回数が5回以上なら、S法でもC法でも潮流成分と残差流成分の分離は可能である。しかし、観測回数が5回を下回ったり、あるいは欠測が多くデータが少ない場合には、S法を用いるよりC法を用いる方が妥当であるといえる。

C法を適用するに当たっては、先ず第一に、測線横断の所要時間の総計が、少なくとも24時間50分程度を必要とすることに留意しなければならない。これは、12時間25分、あるいは24時間50分の周期を持つ潮流を解析するための必要不可欠の条件となる。本研究のように21時間30分の所要時間でも解析は可能であるが、時間短縮による精度の低下は免れない。また、一測線について、一回の横断観測資料のみを用いてC法を適用することは危険である。その理由

は、得られた流速データの時間的な変化と、空間的な変化を分離する根拠がなくなるからである。潮流の位相の違う時間帯を選んで、少なくとも一測線について二回以上の横断観測が要求される。

本論文で述べたような適切な修正を施さなければ、「新世代の海流計測器（金子ら⁹⁾）」としての ADCP は、潮流の強い内湾域や陸棚域では、その価値を十分に発揮できない。この点に留意して ADCP を利用し、化学・生物学的に有益な物理的情報を収集・提供することが、今後とも望まれる。

最後に本研究を進めるにあたって貴重な議論をして頂いた水産大学校漁業学科 俵 悟教授に深甚なる謝意を表す。

文 献

- 1) 柳 哲雄：沿岸海洋学，恒星社厚生閣，東京，1989，pp. 39.
- 2) 磯辺篤彦・金子 新・下相慶・張善徳・俵 悟：対馬西水道の海流の構造について，九州大学総合理工学研究科報告（1991，印刷中）。
- 3) 加藤 修：日本海南西部海域における夏季の対馬暖流の構造，学位論文（1990）。
- 4) Simpson, J. H, E. G. Mitchelson-Jacob and A. E. Hill : Flow structure in a channel from an acoustic Doppler current profiler, *Continental Shelf Research*, 10, 6, pp. 589-603 (1990).
- 5) 武岡英隆・菊池隆展：浅海定線観測の ADCP データを用いた潮流の解析，1991年度日本海洋学会春季大会講演要旨集，pp. 201-202 (1991).
- 6) Candela, J, R. C. Beardsley, R. Limeburner: Removing tides from ship-mounted ADCP data, application to the Yellow Sea, *Proceedings of the IEEE forth working conference on the current measurement*, Clinton, Maryland, April 3-5 (1990).
- 7) Odamaki, M: Tides and tidal currents in the Tushima Strait, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 45, pp. 65-82 (1989).
- 8) Japan Oceanographic Data Center: JODC カタログ，16(1985).
- 9) 金子 新・水野信二郎・小寺山亘・光易 恒：ADCP による海洋混合層のマッピング，号外 海洋，3，pp. 27-30(1990).