

対馬海峡における海流の構造と流量

金子 新*・卞 相慶**・張 善徳***・高橋 実****

1. 序 論

対馬海峡は、日本海に暖かい黒潮系水を流入させる唯一の通路であり、そこを通過する海流の構造と流量を知ることが、日本海の問題のみならず日本列島の気候を考える上で重要な意義をもつ。対馬海峡から日本海への流入部に広がる海域は活発な漁場として知られ、対馬海峡の海流の研究はこの漁場の形成と移動過程を知るためにも役立つ。さらに、対馬海峡は、一方向流の対馬海流と振動流である潮流の共存する世界でも珍しい海域であり、海洋流体力学的観点からも興味深い。

以上述べたように対馬海峡の海流は、陸棚海洋学(shelf oceanography)の興味深い研究対象であるにもかかわらず、日韓両国の領海存在のため海峡全域にわたる総合調査は、これまでほとんどなされなかった(三井田, 1976)。本研究では、最新の計測器を使用した日韓両国の共同観測により、対馬海峡全域にわたる海流の構造と流量に関する新しい知見を得たのでその結果を報告する。

2. 観測海域と方法

図-1に、観測海域の等深図と測線を示す。対馬海峡は、通常、対馬を境にして韓国側を西水道、日本側を東水道と称する。曳航式 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) による海流の横断計測は、西水道の W-line 上で 1987 年 9 月 14 日に、東水道の E-line, F-line 上で 1987 年 9 月 15 日と 8 月 3 日にそれぞれ行われた。W-line, E-line 上の計測では国立釜山大学練習船「釜山 402 号」を、F-line 上の計測では福岡水産試験場観測船「げんかい」を使用した。

図-2に曳航式 ADCP の模式図を示す。九州大学応用力学研究所で開発した曳航式 ADCP は、不特定の観測船を持ち込み、荒天時でも海流の鉛直断面構造を精密に計測できる新しい海流計測システムとして世界的に認知されている(Kaneko and Koterayama, 1988; 金子, 1989; Kaneko et al., 1990)。本研究に使用した周波数 150 kHz

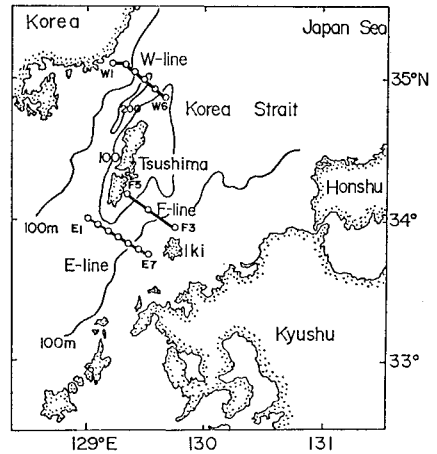


図-1 観測海域の等深図と測線

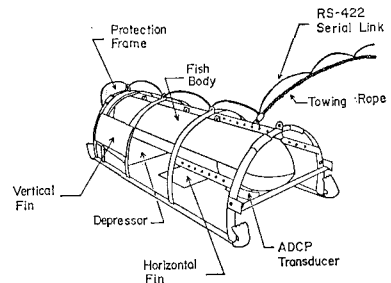


図-2 曳航式 ADCP の模式図

の ADCP は、約 400 m の深度までの海流のプロファイルのリモートセンシングできる。対馬海峡は、最深部でも水深 225 m であるため全水深にわたって計測可能であるが、全水深の 15~20% にあたる海底に接する層が、測定原理上の制約のため計測できない。ADCP は、海底からの反射音波を利用して船速と水深を計測することができる。流速のサンプリング間隔は、深度幅 8 m, 時間幅 1 分(船速を考えれば水平距離幅に換算できる)に設定した。流速データ中の微細な変動は、16 m × 10 分の矩形ウィンドーを通すことにより除去した。曳航式 ADCP による一度の横断計測では、対馬海流と潮流を分離することができない。本研究の主たる対象は対馬海流である

* 正会員 工 博 九州大学助教授 総合理工学研究所

** 理 博 韓国海洋研究所室長 海洋物理部

*** 理 博 国立釜山水産大学教授 海洋工学科

**** 水産修 福岡県水産林務部漁政課

表-1 各測線に対する流速データの総数と船速と船首方向の平均値

	データ総数	船速 (cm/s)	船首方向 (°)
W-line	8130	294.6	126.3
E-line	2553	301.1	317.8
F-line	2313	286.8	303.5

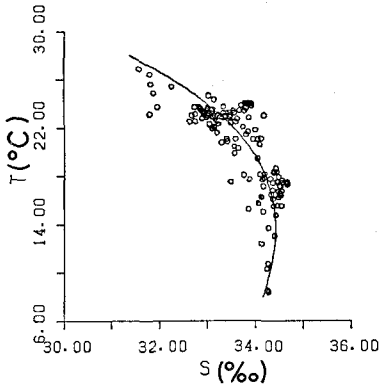


図-3 観測海域の周辺で同時期に得られた水温・塩分データから求めた T-S 図。実線は最小自乗法で求めた関係式を示す。

ため、過去に多くの潮流データが蓄積されている E-line, F-line に対しては、海上保安庁水路部の推算値を使用して測定データから潮流成分を除去した。西水道の W-line に対しては、特に韓国側で過去の潮流データが不足しているため、潮流成分の除去は行えなかった。ADCP は、フラックスゲートコンパスと 2 軸の傾斜計を内蔵しており、計測した流速データを南北、東西、鉛直の直交 3 成分に自動的に変換できるようになっている。表-1 に、各測線に対する流速データの総数、船速と北から時計回りに計った船首方向の平均値を示す。

水温と塩分の CTD 計測は、W-line 上の測点 W1~W6 と E-line 上の測点 E1~E7 上で行われた。測点 E1 における全データと、全測点の塩分データは、電氣的トラブルのため欠測した。このため、塩分データについては、同時期に周辺海域で得られた福岡水産試験場と山口外海水産試験場の水温・塩分データから 図-3 に示すような T-S 図を作成し、最小自乗法で求めた次式から水温を与えて推定した。

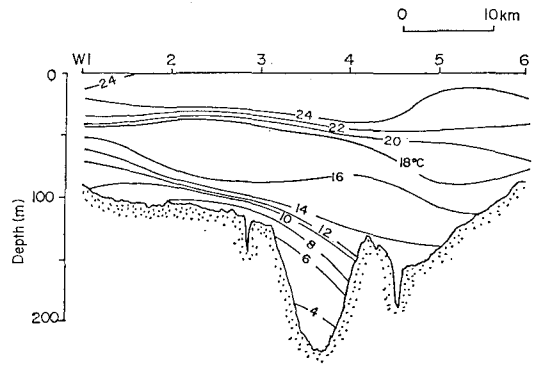
$$S = 33.4018 + 0.0840T + 0.0039T^2 - 0.0003T^3$$

3. 観測結果

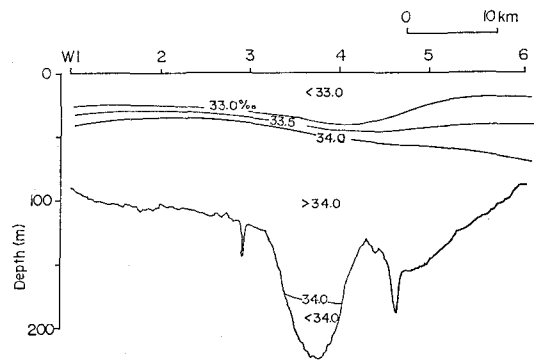
(1) CTD データ

図-4 (a), (b) に、W-line で得られた水温と塩分の鉛直断面分布をそれぞれ等値線図で示す。対馬の後流域にあたる測点 W5 と W6 の間を除いて、水温・塩分ともに

ほぼ 40 m 深度に明瞭な躍層を形成している。測点 W3 と W4 の間の海溝（トラフ）の中には、水温 5°C 以下の冷水が存在する。この冷水の上部には、弱い水温躍層が形成されている。表層の 40 m 以浅には、33‰ 以下の低塩分水が分布している。対象海域において、コリオリ力と圧力間に地衡流平衡 (geostrophic balance) が成り立つと仮定すると、基準層 (reference layer) から密度場を積分することにより地衡流場を求めることができる。図-5 に、海底を基準層 (流速=0) にして求めた、W-line に直交する方向の地衡流に対する等流速線図を



(a) 等水温線図



(b) 等塩分線図

図-4 W-line に沿った鉛直断面内の CTD データ

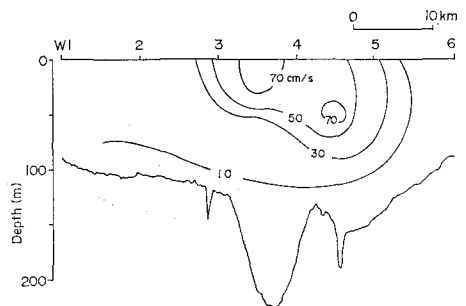


図-5 W-line に沿った鉛直断面内の地衡流分布 (海底を基準層にとり、正值は北東流を示す)

示す。北東流（正值）の最大値は 72 cm/s に達し、測点 W3 と W4 の中間の海面近くで発生している。また、流速が 30 cm/s を越える強流部は、測点 W3 と W5 の間の 70 m 以浅の領域に集中している。流速を断面内で積分することにより W-line を横切る海流の流量を求めれば、 $1.4S_0 (=1.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s})$ となった。

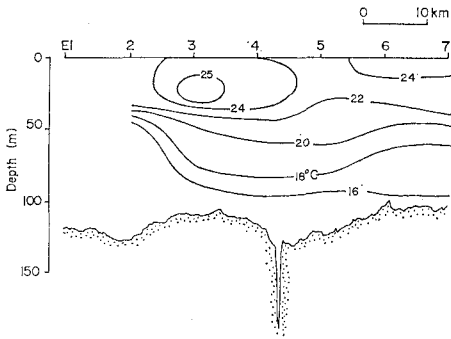
図-6(a), (b) に、E-line で得られた水温と塩分の鉛直断面分布をそれぞれ等値線図で示す。測点 E2 の近くを除いて、水温・塩分分布にはともに明瞭な躍層が存在しない。図-4(a) の測点 W1 と W4 の間に水温躍層を形成していた 18~24°C の等温線は、図-6(a) では乱さ

れ緩やかな成層を構成している。図-6(b) の 33.0~34.0 ‰ の等塩分線にも、図-4(b) と比較すると同様な傾向が認められる。図-7 に、海底を基準層にとり密度場を積分することによって求めた、E-line に直交する方向の地衡流場を示す。北東流（正值）は、主として測点 E3 の左側で発生し、測点 E4~E6 の間では南東方向に流れる反流（負値）となっている。このような反流の存在は、測点 E4~E6 の間で、18~22°C の等温線が右上がりとなっていることから示唆される（図-6(a) 参照）。

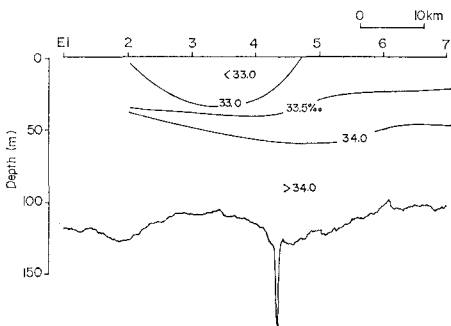
(2) ADCP データ

図-8 に、ADCP で求めた W-line に沿った鉛直断面内の流速分布を示す。同図は、10分×16m の矩形ウィンドーを通した後の W-line に直交する流速成分を等値線図で示している。北東流（正值）が測点 W3 と W4 の中央部で最強となること、流速 50 cm/s を越える強流部が測点 W2 と W5 の間に存在することなどの流れ場の全体的特徴は、図-5 の地衡流分布と良く一致している。しかしながら、流速の絶対値は、図-8 の方が図-5 より 30 cm/s 程度大きくなっている。図-8 と図-5 の流速分布の間の相関係数を求めれば 0.908 となった。測線中央部にある海構の内部の海水は、ほとんど静止していた。海上保安庁水路部で求めた同時刻の潮流の推算値は、測点 W4 の近くで東方向に 10 cm/s、W5 の近くで南東方向に 7 cm/s であった。潮流の影響を含んでいるけれども（特に測点 W1 と W2 の間で強い）、流速を断面内で積分することにより W-line を横切る海流の流量を求めれば、 $2.2S_0$ となった。

図-9(a), (b) に、ADCP で求めた E-line に沿った鉛直断面内の流速分布を示す。両図ともに、10分×16m の矩形ウィンドーを通した後の E-line に直交する流速成分を等値線図で示している。図-9(a) は、潮流を含む流速分布であり、図-9(b) は、海上保安庁水路部の潮流の推算値を用いて潮流を除去した後の流速分布である。図-9(a), (b) の比較により、潮流を除去すれば、北東流（正值）は強まり、断面内の北東流の領域は拡大



(a) 等水温線図



(b) 等塩分線図

図-6 E-line に沿った鉛直断面内の CTD 結果

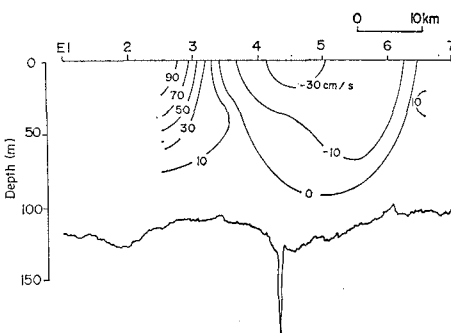


図-7 E-line に沿った鉛直断面内の地衡流分布（海底を基準層にとり、正值は北東流を示す）

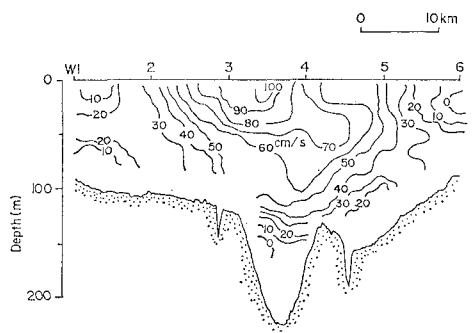


図-8 ADCP で求めた W-line に直交する流速成分に対する等値線図（潮流を含み、正值は北東流を示す）

することがわかる。北東流の最強部(中心)は、測点E2とE3の中間の25m深度に存在する。測点E4とE6の間に南西流(負値)の中心部が存在するが、これは、図-7の地衡流結果とも良く一致している。ADCPと地衡流計算で求めた流速分布との間の相関係数を求めれば、図-9(a)に対して0.523、図-9(b)に対して0.758となった。E-lineを横切る流量は、図-9(a)に対して $-0.3S_0$ 、図-9(b)に対して $0.6S_0$ となった。

図-10(a),(b)に、ADCPで求めたF-lineに沿った鉛直断面内の流速分布を示す。両図ともに、10分×16mの矩形ウィンドーを通した後のF-lineに直交する流速成分を等値線図で示している。図-10(a)は潮流を含む流速分布であり、図-10(b)は、海上保安庁水路部の潮流の推算値を用いて潮流を除去した後の流速分布である。両図ともに、北東流(正値)の中心は測点F4とF5の中間の50m深度に存在する。南西流(負値)の領域は、図-10(a)においては測点F3の周辺に存在するが、潮流を除去した図-10(b)では消失している。F-lineに対する流速の鉛直勾配は、W-line、F-lineの場合に比べてかなり小さく、水深の浅いF-lineの周辺で流れはより順圧的(barotropic)になっていることがわかる。F-lineを横切る流量は、図-10(a)に対して $0.5S_0$ 、図-10(b)に対して $0.7S_0$ となった。

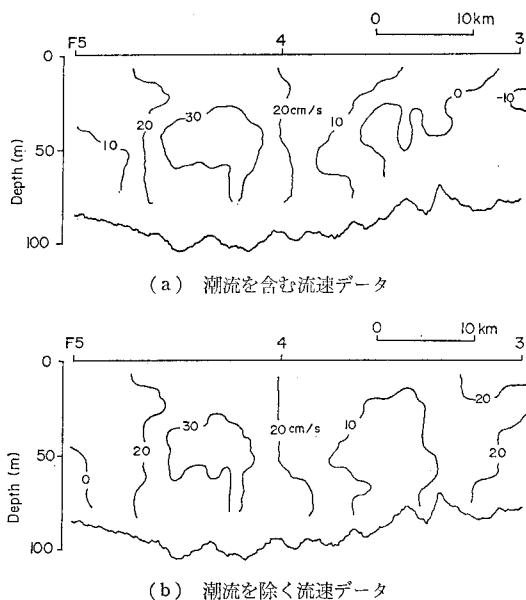


図-10 ADCPで求めたE-lineに直交する流速成分に対する等値線図(正値は北東流を示す)

表-2 各測線で得られた流速場の特性値

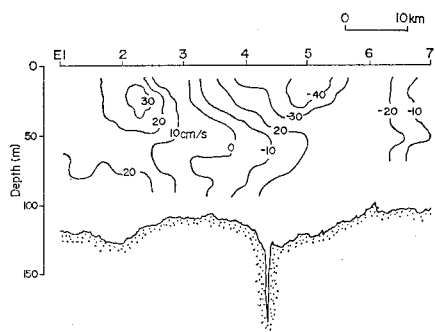
	W-line	E-line	F-line
ADCPと地衡流計算により			
求めた流速場の相関係数			
潮流を含む	0.908	0.523	—
潮流を除去	—	0.758	—
流量(Sv)			
ADCP結果			
潮流を含む	2.2	-0.3	0.5
潮流を除去	—	0.6	0.7
地衡流計算の結果			
	1.4	0.4*	—

*全断面でなく測点E2とE7の間の流量を示す。

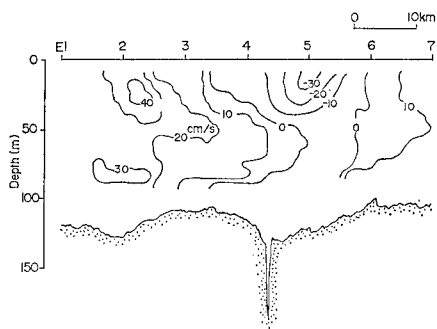
表-2に、各測線で得られた流れ場の特性値をまとめて示している。

4. 考 察

本研究においても明らかとなったことであるが、温度躍層は、対馬東水道よりも西水道で良く発達することが知られている(Byun, 1989)。対馬海峡のような強い潮流の存在する海峡で、地衡流平衡がどの程度満たされているかという問題は、これまでほとんど検討されたことがない。ADCP結果と地衡流計算の結果との比較より、東水道より西水道において地衡流平衡が良く満たされていること、東水道では、潮流成分を含む流れ場より潮流成分を除いた流れ場の方が、地衡流平衡を良く満たすことがわかった。このことにより、潮流の周期は、地衡流調節(geostrophic adjustment)に要する時間よりかなり短



(a) 潮流を含む流速データ



(b) 潮流を除去流速データ

図-9 ADCPで求めたE-lineに直交する流速成分に対する等値線図(正値は北東流を示す)

いものと推察される。潮流によってどの程度地衡流調節が行われるのか、なぜ東水道より西水道において地衡流平衡が良く満たされるのかといった問題は、今後の重要な研究課題である。

Yi (1966) は、地衡流計算により、西水道で $0.9S_0$ 、東水道で $0.3S_0$ なる流量を得た。Lee (1974) は、係留した観測船から流速計を吊り下げる方式で西水道の海流を直接測流し、 $1.3S_0$ なる平均流量を得た。地衡流計算は傾圧流量 (baroclinic transport) を与えるため、西水道に対する前記の流量差は、順圧流量 (barotropic transport) の存在を示唆する。三井田 (1976) は、1924~1974 年の間に主として旧海軍と海上保安庁水路部により集められた海流の直接測流結果を解析した。その結果、対馬海流の流量は、西水道で $1.8S_0$ 、東水道で $1.6S_0$ と見積られた。三井田の使用した測流データは、少数の係留式自記流速計データを含むけれども、多くは、観測船から流速計を吊り下げる方式で得られたもので、観測期間も 1~2 日ものがほとんどである。このため、計測精度と計測データから潮流を完全に分離できないことに問題が残されている。ADCP で求めた流量は、西水道で三井田の結果と概ね一致するものの、東水道で三井田の結果より大幅に小さくなっている。ADCP で求めた流量は、東水道より西水道の方が 2~3 倍大きくなっているが、このような傾向は、むしろ地衡流計算にもとづく Yi の結果と一致している。本観測においても得られているが、九州の北部沿岸には、東水道中央部より冷たい海水が存在する。このことは、地衡流平衡を考えると九州の北部沿岸に南西方向の反流が形成されることを意味する。本観測においても得られている南西方向の反流は、東水道の流量を著しく減少させるものと推察される。

5. 結 論

本研究で得られた主要な結論を以下に列挙する。

- 1) 曳航式 ADCP による横断計測により、対馬海流の断面構造を詳細に精度良く計測できた。
- 2) 水温および塩分の躍層は、西水道で良く発達し、東水道では不明瞭となる。
- 3) 地衡流平衡は、東水道よりも西水道で良く成立する。東水道では、潮流を含む流れ場よりも潮流を除いた流れ場の方がより地衡流平衡を満たす。
- 4) 観測時の対馬海流の流量は、西水道で $1.4\sim 2.2S_0$ 、東水道で $0.6\sim 0.7S_0$ となり、西水道の流量の方が東水道のそれより 2~3 倍大きい。

参 考 文 献

- 金子 新 (1989): 黒潮により陸棚斜面上に誘起されるフロントと内部波, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 188~192.
- 三井田恒博 (1976): 定置測流からみた流れ, 水産海洋研究会報, 第28号, pp. 33~58.
- Byun, S-K. (1989): Sea surface cold water near the south-eastern coast of Korea; wind effect, J. Oceanol. Soc. Korea, Vol. 24, pp. 121~131.
- Kaneko, A. and W. Koterayama (1988): ADCP measurements from a towed fish, EOS Trans. AGU, Vol. 69, pp. 643~644.
- Kaneko, A., W. Koterayama, H. Honji, S. Mizuno, K. Kawatate and R. L. Gordon (1990): A cross-stream survey of the upper 400-m of the Kuroshio by an ADCP on a towed fish, Deep-Sea Res. Vol. 37, pp. 875~889.
- Lee, C-K. (1974): A study on the currents in the western channel of the Korea Strait, Bull. Fish. Res. Dev. Agency, Vol. 12, pp. 37~105.
- Yi, S-U. (1966): Seasonal and secular variations of the water volume transport across the Korea Strait, J. Oceanol. Soc. Korea, Vol. 1, pp. 7~13.