

対馬海峡における流速および流量の経月変動

河野光久*

Monthly changes of velocity and volume transport of the Tsushima Warm Current in the Tsushima Strait

Mitsuhsisa KAWANO*

Abstract

ADCP surveys were conducted in the Tsushima Strait (from Kawajiri, Japan, to Ulgi, Korea) to monitor the variation of the Tsushima Warm Current every month from 1989 to 1992 except for midwinter season.

The tidal current components were removed from the raw ADCP data to understand the residual current.

The current structure near the region of Ulgi was baroclinic in September to December, when the surface current velocity increased. On the other hand, that near the region of Kawajiri was almost barotropic in all seasons. The seasonal variation of the volume transport across the strait was not necessarily characterized by a single maximum in summer to autumn reported by previous geostrophic calculations; The mean volume transport determined by this work increased in November-December and March-April.

1. 緒言

対馬海峡は日本海と東シナ海をつなぐ海峡で、マアジ、マサバ、ブリなど多くの暖流性魚種がここを通じて東シナ海から日本海へ補給される。このうちいくつかの魚種については、対馬暖流の変動が日本海への来遊量に大きく影響していることが知られている（たとえば小川, 1968, 1969; 原, 1990a, 1990b; 田中ほか, 1991）。このため、対馬海峡における流れの変動をモニターすることは、日本海における暖流性魚種の来遊量変動を解明する上で、重要な作業であると考えられる。

対馬海峡における流れの変動をモニターする方法としては、(1) 対馬海峡の水位差を流量の指標とする方法 (MIZUNO et al., 1989), (2) 地衡流を計算する方法 (宮崎, 1952; YI, 1966; TOBA et al., 1982), (3) 超音波流速計により流れを実測する方法 (加藤, 1988; 金子ほか, 1990; ISOBE et al., in press) がある。このうち (1) の方法は、対馬海峡の流れが順圧的でない

と流量の指標とならないという問題がある (川合, 1992)。また、(2) の方法では無流面の設定が困難である。さらに、(3) の方法では、この海域の流れは潮流成分が大きい (俵ほか, 1984; 加藤, 1990) ので、観測値から潮流成分を除去する必要がある。潮流成分を除去する方法として、加藤 (1988) は4往復調査法を考案した。この方法は潮流成分を除去する方法としては大変有効な方法であるが、24時間50分の間に約30海里しか測流できないため、対馬海峡の流れを定期的にモニターするには時間と経費がかかりすぎるといった難点がある。潮流成分を除去する他の方法としては、潮流の調和定数を基に潮流を推算する方法がある (小田巻・熊谷, 1986; 武岡・菊池, 1991; ISOBE et al., in press)。この方法は推算潮流の精度に若干問題が残される (佐藤, 1988) が、対馬海峡の流れを定期的にモニターするには最も簡単で実用的であると考えられる。

そこで著者は、ISOBE et al. (in press) が本研究と同じ測線で ADCP 観測を行い、得られた資料に対して用いた方法と同じ方法を用い、1989年～1992年の月例定線観測で得られた超音波流速計による測流データか

1993年5月7日受理。

* 山口県外海水産試験場 Yamaguchi Prefectural Open Sea Fisheries Experimental Station, Senzaki, Nagato, 759-41, Japan.

ら潮流成分を除去し、対馬海峡の流速と流量の経月変化を調べた。その結果、対馬海峡における流量がこれまで考えられてきたような夏～秋に増加し、冬～春に減少するという季節変化(宮崎, 1952; YI, 1966; TOBA et al., 1982)を毎年必ず示すとは限らず、むしろ流量は平均的には、11-12月期および3-4月期に増加することが明らかになったので報告する。

2. 資料と方法

測流は山口県川尻と韓国ウル山を結ぶ調査線 (Fig. 1) で、山口県外海水産試験場調査船黒潮丸 (149 総トン) を用いて、1989年5月から1992年11月まで冬期を除き毎月1回行った (Table 1)。超音波流速計

(ADCP: 日本無線 JLN 616) の測流深度は 10 m と 50 m に設定した。記録は 1989年5月～1990年10月までは 8分平均値を Stn. 1～Stn. 7 の調査点毎に打ち出し、1990年11月～1992年11月までは 4分平均値を 10分間隔で打ち出した。測流調査と同時に各測点で水温および塩分の観測を行った。水温および塩分の観測は 1989年5月～1990年6月まではナンゼンボトルとサリノメーター (Autolab 社製) を用い、1990年7月～1992年11月までは塩分水温水深記録計 (STD: フレック電子 AST1000) を用いた。なお、STD の塩分値の器差補正は行わなかった。

流速データの解析は次のようにした。まず、各測点における 10 m 深および 50 m 深における ADCP の測

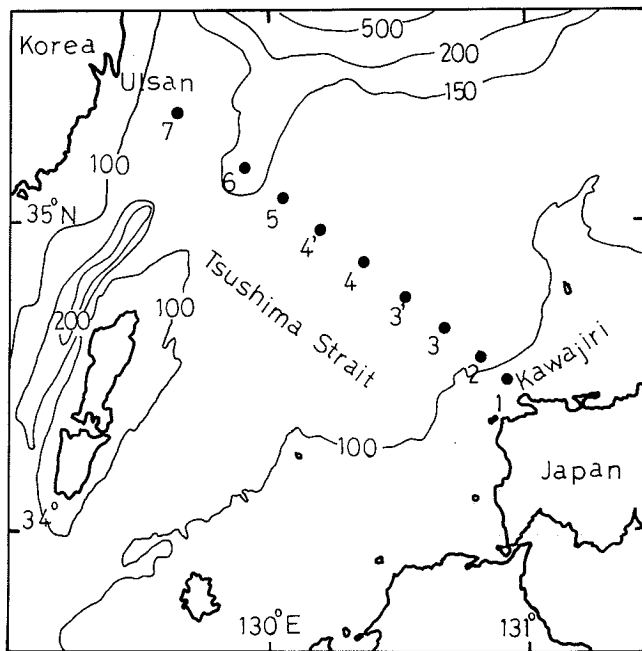


Fig. 1. The study area in the Tsushima Strait. Closed circle indicates the observational stations of ADCP and STD.

Table 1. List showing the period of ADCP and STD surveys. The asterisk indicates the date in the previous month.

Year	Month & Date	Mar.	Apr.	May.	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
1989		—	—	10-11	31*	4-5	4-5	7	5	15-16	6
1990		6	10-11	9	5	4	3	5	3	31*	—
1991		4-5	3	30*	17	3	6-7	2-3	1-2	6	—
1992		10	8	1	2	2	7	2-3	1	5	—

流速から ISOBE et al. (in press) と同一の方法で推算した潮流成分を除去し、各水深の流速とした。この値を隣合った測点間で平均することにより、10 m 深および 50 m 深における測点間の平均流速を求めた。次に、Stn. 1~Stn. 2 間では 75 m 深、Stn. 2~Stn. 3 間では 100 m 深、その他の測点間では 125 m 深を無流面として地衡流計算を行った。また、以下の方法によって 10 m 以浅および 50 m 以深における流速を推定した。1989 年 5 月から 12 月の 10 m 深における平均流速と地衡流流速との差、および 50 m 深における平均流速と地衡流流速との差の相関をとると、両者の相関係数 (r) は $r=0.912$ と高く、しかも回帰式の傾きはほぼ 1 に、切片は 0 に極めて近かった (Fig. 2)。このことは、10 m 深および 50 m 深における流速差が順圧流成分として評価できることを意味する。そこで加藤(1990)の方法を、夏期のみでなく周年適用して、各測点間の 0 m 深の流速は 0 m 深における地衡流流速値に 10 m 深における平均流速と地衡流流速との差を加えることにより、また 75 m 深、100 m 深および 125 m 深における流速は各水深における地衡流流速に 50 m 深における平均流速と地衡流流速との差を加えることにより求めた。このようにして求めた各測点間の流速を、北東方向を正值、南西方向を負値として鉛直分布図で示した。

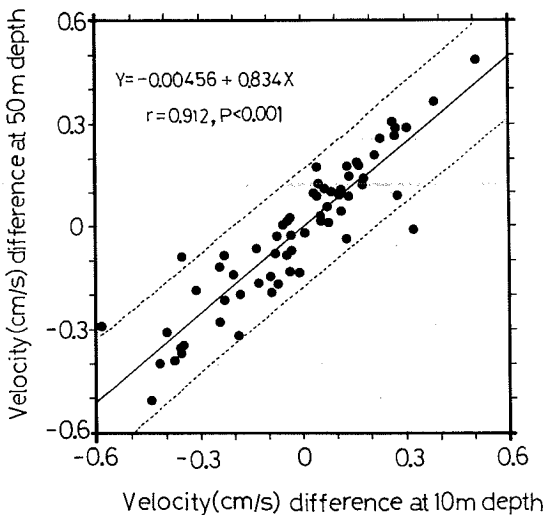


Fig. 2. The relationship between the velocity differences at 10 m depth and at 50 m depth. Each value was obtained by the subtraction the geostrophic velocity from the residual velocity at each depth.

さらに、流量の計算を Stn. 1~Stn. 7 間において地衡流計算の無流面以浅の鉛直断面について行った。

3. 結果

(1) 流速の鉛直分布の経月変化

1989 年、1990 年、1991 年および 1992 年における潮流を除去した後の測点間の平均流速の鉛直分布を Fig. 3 に示す。調査期間を通してみると、ウル山寄りの Stn. 6~Stn. 7 間および川尻寄りの Stn. 1~Stn. 3' 間に北東方向の強流域が形成されることが多く、その中間の Stn. 4~Stn. 6 間では南西方向の流れ (反流域) が形成されることが多かった。しかし Fig. 3 を細かくみると、Stn. 6~Stn. 7 間では 1989 年 5 月、6 月、8 月、11 月、1990 年 4 月、1992 年 5 月および 6 月に負値を示しており、また Stn. 1~Stn. 3' 間では Stn. 6~Stn. 7 間においてよりもひんぱんに負値を示した。Stn. 4~Stn. 6 間の反流域も恒常的なものではなく、1989 年 11 月、1990 年 3 月、4 月、1991 年 3 月、5 月、9 月および 1992 年 6 月には反流域は形成されなかった。

40 cm/s 以上の強流域の出現状況を経月的にみると (Fig. 3), Stn. 6~Stn. 7 間では 8 月~11 月を中心に 12 回みられたのに対し、Stn. 1~Stn. 3' 間では 3 月~7 月、および 10 月に 10 回みられた。最大流速は 1992 年 9 月の Stn. 6~Stn. 7 間における 80 cm/s で、Stn. 1~Stn. 3' 間では 60 cm/s に達することはなかった。Stn. 4~Stn. 6 間の反流域の流速が -20 cm/s に達したのは、5 月~12 月の期間で、中でも 8 月~11 月に反流が発達する傾向が認められた。しかし、Stn. 6~Stn. 7 間の流れが発達すると、Stn. 4~Stn. 6 間の反流が発達するという関係は認められなかった。

流速の月別累年平均分布をみると (Fig. 4), 3-4 月期~7-8 月期には流速は 20 cm/s 以下で小さく、流れはほぼ順圧的である。9-10 月期および 11-12 月期には Stn. 6~Stn. 7 間で傾圧性の強い流れが発達し、表層の流速は 9-10 月期には 40 cm/s、11-12 月期には 30 cm/s に達している。それより日本側では、9-10 月期に Stn. 2~Stn. 3 間で流速が比較的大きくなり、20 cm/s を示しているが、ほぼ順圧的な流れの構造をしている。反流域は 3-4 月期には出現していないが、5-6 月期になると Stn. 5~Stn. 6 間および Stn. 4 の底層に 10 cm/s 以下の弱い反流域が出現し、7-8 月期以降は反流域の中心は Stn. 4~Stn. 5 間に移動している。反流域の流速は 9-10 月期に最大で -10 cm/s に達する。

平均流速に対する標準偏差の分布をみると (Fig.

5), 標準偏差が最も大きいのは3-4月期の Stn. 1 ~ Stn. 2 間, および 5-6 月期の Stn. 2 ~ Stn. 3 間の表層で 30 cm/s に達する。Stn. 1 ~ Stn. 3 間は 11-12 月期を除き標準偏差が 20 cm/s 以上と比較的大きい。また Stn. 6 ~ Stn. 7 間の表層においても, 平均流速が 10 cm/s 以上を示す 5-6 月期 ~ 11-12 月期において標準偏差が 20 cm/s 以上と大きくなっている。反流域の標準偏差は Stn. 6 ~ Stn. 7 間および Stn. 1 ~ Stn. 3 間の

標準偏差に比べると小さいが, 反流が最も発達する 9-10 月期および 11-12 月期には 20 cm/s を示している。標準偏差が 10 cm 以下と小さいのは, 3-4 月期の Stn. 3' ~ Stn. 5 間, 5-6 月期の Stn. 3' ~ Stn. 4' 間, および 11-12 月期の Stn. 3' ~ Stn. 4' 間である。Stn. 3' ~ Stn. 4' 間は 7-8 月期および 9-10 月期においても他の測点間に比べて標準偏差が小さい。

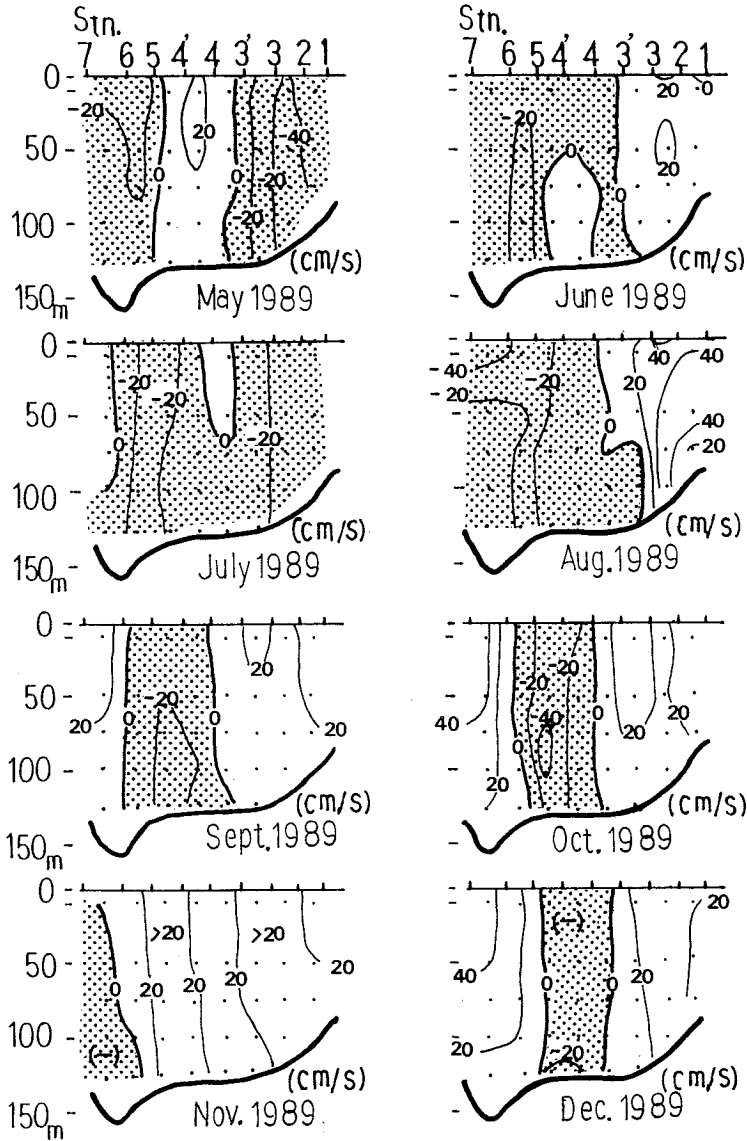


Fig. 3. Contour plot of the velocity component perpendicular to the section shown in Fig. 1 without tidal current. Shaded region indicates southwestward current zone.

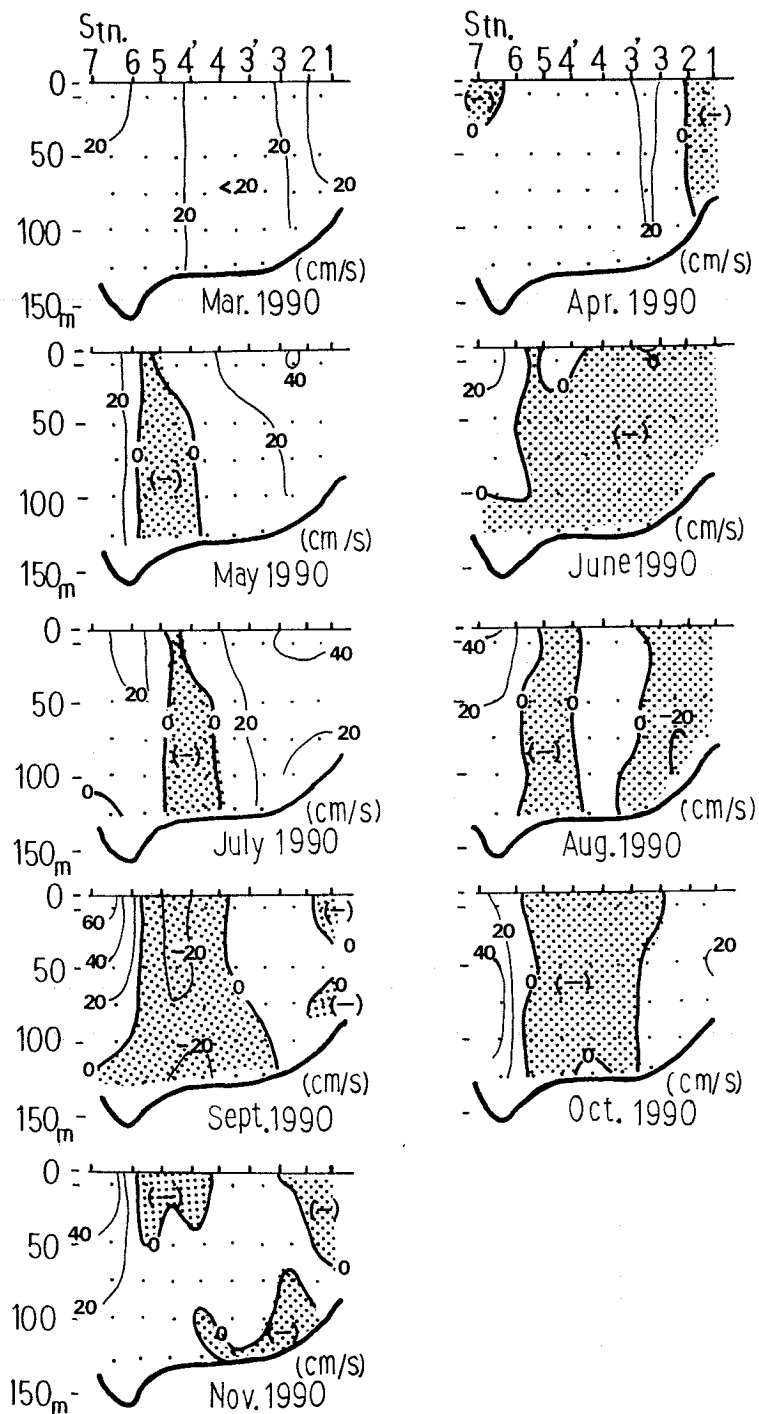


Fig. 3 Continued

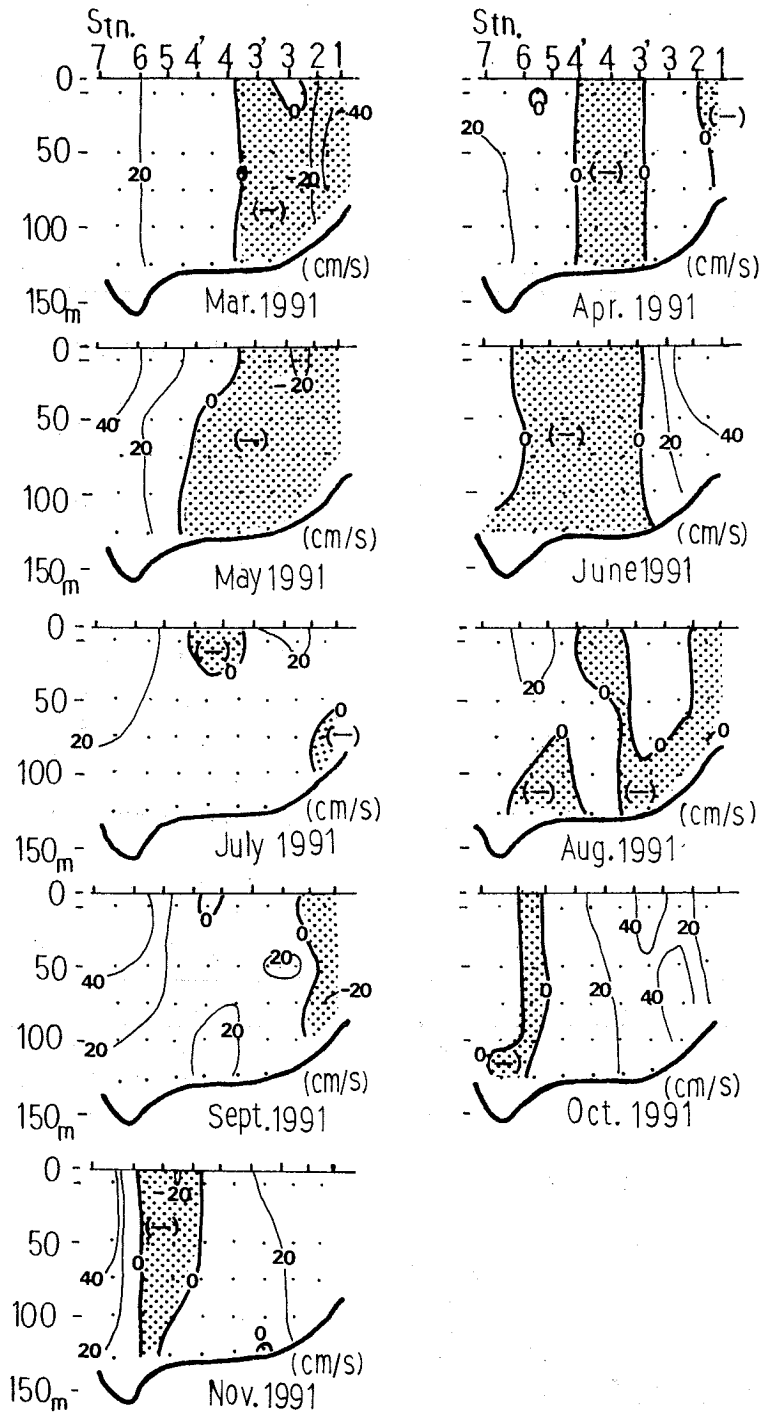


Fig. 3 Continued

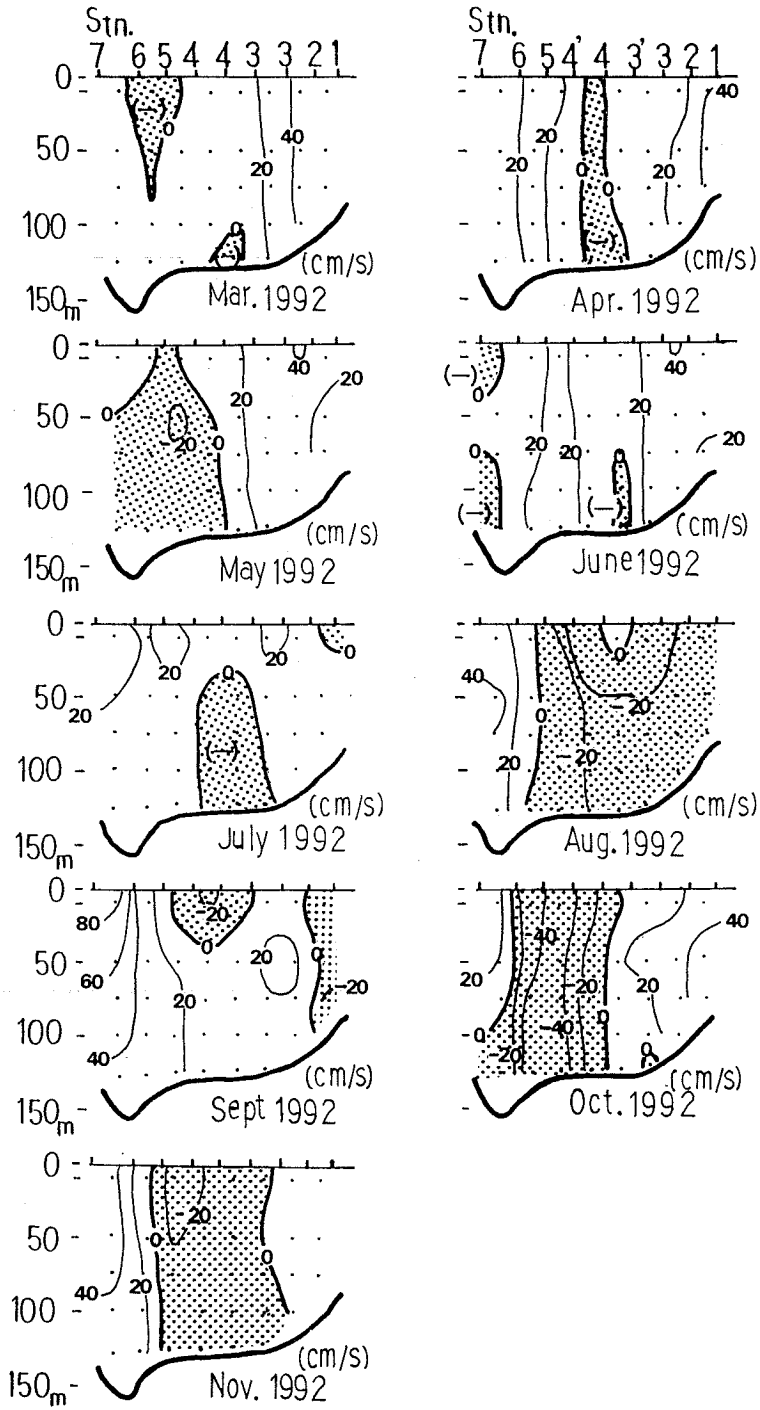


Fig. 3 Continued

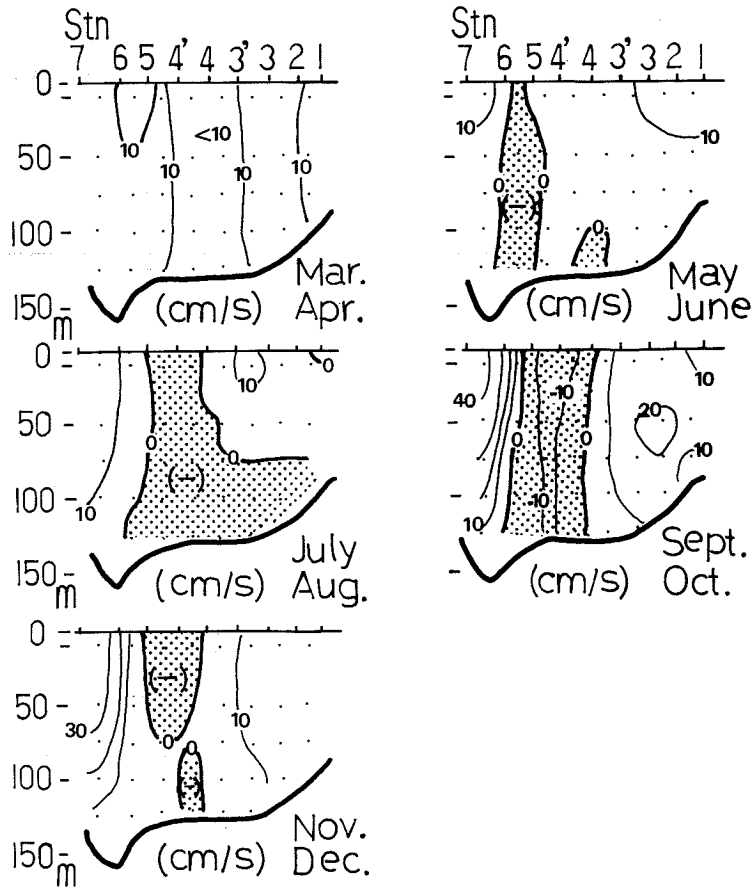


Fig. 4. Monthly mean velocity component perpendicular to the section shown in Fig. 1.

(2) 流量の経月変化

Fig. 3を基に計算した測点間の流量の経月変化をFig. 6に示す。各月における測点間の流量を合計して求めた海峡の流量は、1989年5月～8月には負の値を示したが、その後正の値に転じ、1989年10月～12月には1～3 Svと高い水準にあった。1990年には流量は3月、5月、7月と隔月で2～3 Svの高い水準を示したが、8月からは低水準となった。1991年には流量は3月～6月までは低水準であったが、その後7月～11月までの流量は数ヶ月続くものとしては4年間で最も高水準にあった。1992年においても3月～7月までは1～3 Svと高い水準が持続していた。しかし、その後は変動が大きくなり、8月に負値に転じ、9月には3.9 Svと4年間で最高を記録し、10月以降再び低水準に戻った。このように総流量の経月変化のパターンは、1991年のように春に減少し、夏～秋に増加するというパターン

を必ずしも毎年示すわけではなく、年による変動がかなりあることがわかった。4年間の平均値をとって季節変動を調べてみると (Fig. 7)、流量は5-6月期および7-8月期には1 Sv以下と小さいが、9-10月期、11-12月期および3-4月期には1～2 Svに増加した。特に11月-12月期および3-4月期には他の時期に比べ標準偏差が小さく、比較的安定して流量が多くなっていることが注目される。

海峡の流量が経月的に順圧成分と傾圧成分のどちらに大きく影響されて変動しているかを調べるために、地衡流流量を傾圧成分、その値を海峡の総流量から引いた値を順圧成分とみなして、各々の値を月別に Fig. 8に示した。海峡の総流量は順圧成分とほぼ平行に変動しており、傾圧成分よりも順圧成分が流量変動に大きく影響していることがわかる。一方、傾圧成分は毎年ほぼ決まって春に値が小さく、夏以降に値が大

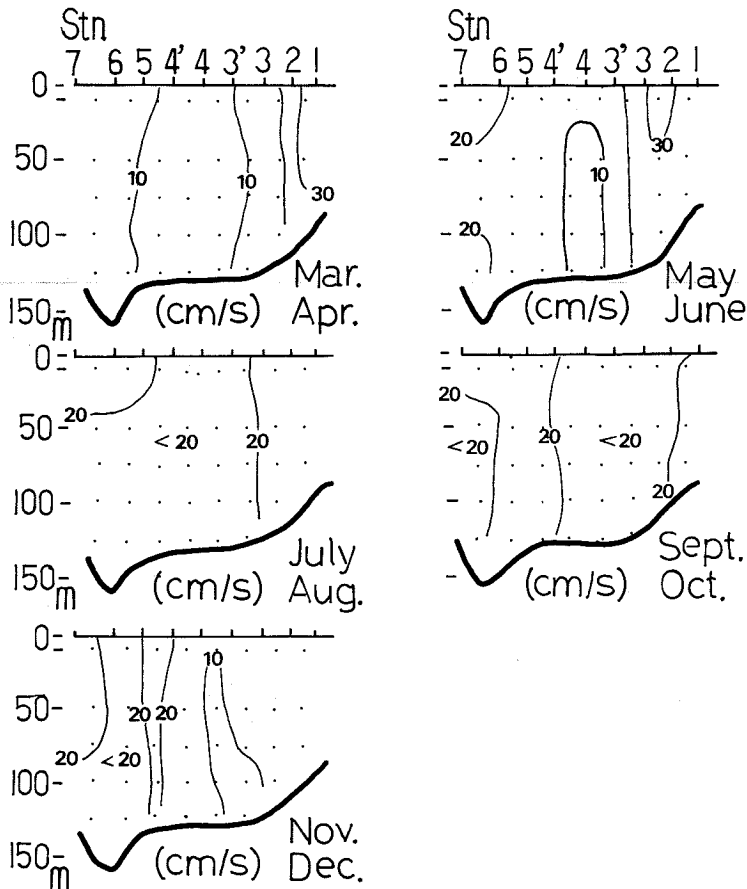


Fig. 5. Monthly standard deviation of velocity component perpendicular to the section shown in Fig. 1.

きくなった。変動の幅は傾圧成分が 6.0 Sv と大きかったが、傾圧成分は 2.2 Sv と小さく、比較的安定していた。

測点間の流量を比較すると、Stn. 6~Stn. 7間の流量が最も多くなる頻度が高いが、たとえば 1991 年 10 月のように月によっては Stn. 1~Stn. 2間、Stn. 2~Stn. 3間、および Stn. 3~Stn. 3'間の流量の方が Stn. 6~Stn. 7間のそれより多いこともあった (Fig. 6)。また、Stn. 6~Stn. 7間の流量と Stn. 1~Stn. 3'間の各測点間の流量との相関をとってみても統計的に有意な相関は認められなかった。

測点間の流量を 4 年間の平均値でみると (Fig. 9)、ウル山寄りの Stn. 6~Stn. 7間の流量が最も多く、次いで川尻寄りの Stn. 2~Stn. 3間、Stn. 3~Stn. 3'間の順で流量が多い。また、それらの中間の Stn. 4~Stn. 6間の流量は著しく少なく、Stn. 4~Stn. 5間では負値を

示している。標準偏差が 0.3 Sv 以上と大きいのは、Stn. 4~Stn. 7間および Stn. 2~Stn. 3'間で、特に Stn. 6~Stn. 7間では標準偏差は 0.6 Sv と最も大きい。

これらの値を地衡流計算値と比較してみると (Fig. 9)、Stn. 2~Stn. 3'間および Stn. 6~Stn. 7間で実測流に基づく流量の平均値が地衡流計算のそれよりかなり大きいという相違がある。また、各測点間における標準偏差も実測流に基づく値の方が地衡流計算値よりかなり大きく、測点間の実測流量の分布パターンが地衡流のそれに比べ安定しないことがわかる。

4. 考 察

今回の調査により、対馬海峡における対馬暖流は日本側の強流域ではほぼ傾圧的な流れの構造を示すが、韓国側の Stn. 6~Stn. 7間では表層の流速が大きくなる 9 月~12 月に傾圧性の強い流れの構造を示すこと

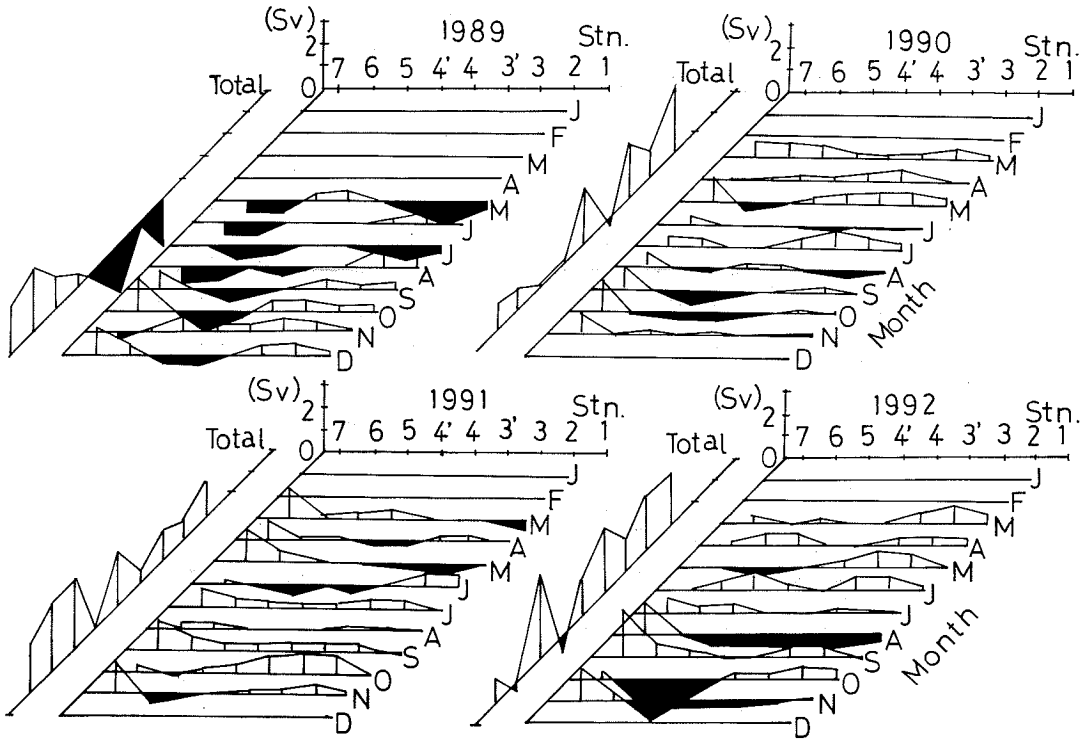


Fig. 6. Monthly change of the volume transport obtained by the integration of velocities between adjacent stations in Fig. 3 (right-hand side). Shaded region indicates southwestward volume transport. The temporal variation of the total volume transport across the strait obtained by the integration over whole section (left-hand side).

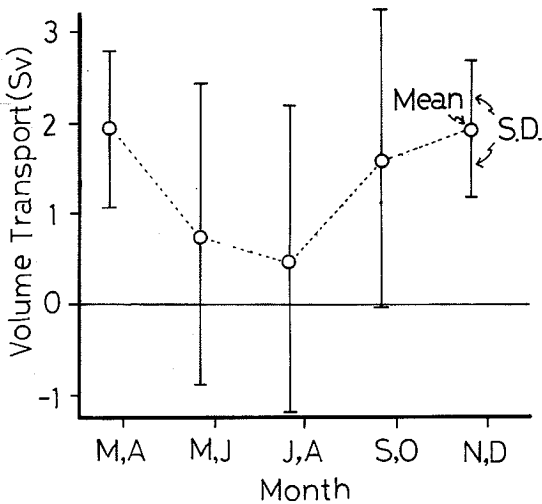


Fig. 7. Monthly change of mean volume transport across the strait.

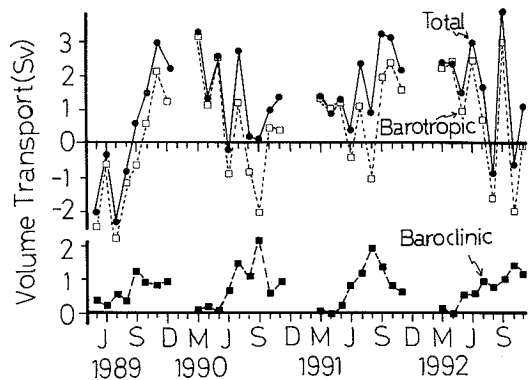


Fig. 8. Monthly changes of total volume transport, barotropic component and baroclinic component across the strait. The baroclinic component was estimated by calculation of geostrophic current. The barotropic component was the remainder after subtracting the baroclinic component from the total volume transport.

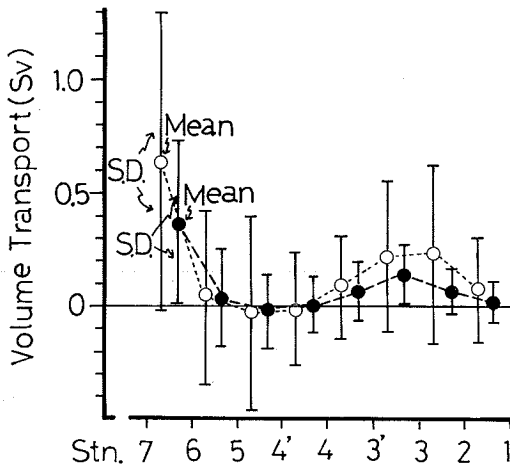


Fig. 9. The mean values and standard deviations of volume transport between adjacent stations. Open circle indicates the volume transport based on observed velocity. Closed circle indicates the volume transport based on calculation of geostrophic current.

が明らかになった (Fig. 3 および Fig. 4)。日本側の強流域の流れがほぼ順圧的な構造を示したことは、対馬東水道および山陰沖での測流結果 (MIZUNO et al., 1989; 加藤, 1990; 磯田・村山, 1990) と一致している。韓国側の海域で傾圧性の強い流れが発達したことについても、金子ほか (1990) の ADCP 観測結果と一致する。浜田沖では陸棚縁域に周年傾圧的な構造を持つ強流域が観測されている (磯田・村山, 1990) が、この強流域と韓国側の強流域との間にどのような関係があるのかについては、今後同時に観測を行い確かめる必要がある。

対馬海峡における流量は、これまで地衡流計算により夏～秋に増加し、冬～春に減少すると考えられてきた (宮崎, 1952; YI, 1966; TOBA et al., 1982)。しかし、今回の調査結果から対馬海峡における流量は必ずしもそのような明瞭な季節変化を示すとは限らないことが明らかとなった (Fig. 6)。最近, EGAWA et al., (1993) は海上保安庁の巡視船および測量船による 1987 年～1990 年の対馬海峡における ADCP 資料を解析し、夏季よりも 11 月～12 月の初冬に流量が大きくなると報告している。本研究においても対馬海峡の流量は、平均的には夏季よりも 11 月～12 月を中心とした初冬に多かった (Fig. 7)。

この調査で用いた流速および流量の計算方法は、実

測流のデータが少なく、潮流の推算精度についても改善の余地があるが、(1) 実測流を利用する方法がかつ簡単な方法であること、(2) 流速の分布パターンがほぼ妥当なものと考えられること、(3) 流量の平均的季節変動が EGAWA et al. (1993) と同様な結果となったこと、からかなり良い評価を与えることができると考える。

観測された事実と他の現象との関連をみると、1991 年 7 月～11 月に流量が高水準にあった (Fig. 6) ことは、同年 10 月～11 月に山陰沿岸域で亜熱帯～温帯性の頭足類であるアオイガイの大量漂着があったこと、および同時期にクロマグロの好漁があったこととの関係が示唆され、注目される。これらの南方系の生物の日本海への来遊量は、対馬海峡の流量の増加に伴い増加した可能性が強く、今回の観測で日本海への生物の来遊量に影響を及ぼすような流量の経月変動をかなり良くとらえ得たと考えられる。以上のことから、今後実測流のデータを増やし、さらに潮流の推算精度を向上させながら、対馬海峡における流れの変動をモニターしていきたい。

5. 謝 辞

潮流の計算方法について御指導いただき、さらに原稿にも目を通していただいた水産大学校漁業学科漁場学講座磯田篤彦助手、草稿の段階で貴重なコメントをいただいた日本海区水産研究所海洋環境部部長小川嘉彦博士および山田東也技官に心からお礼申し上げます。また、沖合定線観測で多大な努力をしていただいた山口県外海水産試験場調査船黒潮丸の乗組員の皆様に深く感謝する。

文 献

- EGAWA, T., Y. NAGATA, S. SATO (1993) Seasonal Variation of the Current in the Tsushima Strait Deduced from ADCP Data of Ship-of-Opportunity. *Journal of Oceanography*, **49**, 39-50.
- 原 哲之 (1990a) 日本海へ来遊するブリ成魚の来遊量指数とその年変動. *日本水産学会誌*, **56**, 19-24.
- 原 哲之 (1990b) 日本海沿岸域におけるブリ成魚漁獲量の年変動について. *日本水産学会誌*, **56**, 25-30.
- ISOBE, A., S. TAWARA, A. KANEKO, M. KAWANO (in press) Seasonal variability of the Tsushima Warm Current in the Tsushima/Korea Strait. *Continental Shelf Research*.
- 磯田 豊・村山達朗 (1990) 浜田沖の底部冷水と対馬暖流の流動構造. *沿岸海洋研究ノート*, **28**, 85-95.

- 金子 新・卞 相慶・張 善徳・高橋 実 (1990) 対馬海峡における海流の構造と流量. 海岸工学論文集, **37**, 784-788.
- 加藤 修 (1988) 超音波式潮流計による残差流の測定. 西海区水産研究所研究報告, **66**, 59-67.
- 加藤 修 (1990) 日本海南西部海域における夏季の対馬暖流の構造. 京都大学提出学位論文, 49 pp, +13 表 + 52 図.
- 川合英夫 (1992) 浮魚類の環境としての対馬暖流系の捉え方. 水産海洋研究, **56**, 78-85.
- 宮崎道夫 (1952) 日本海の熱経済(海況予想の研究 I). 北海道区水産研究所研究報告, **4**, 1-44.
- MIZUNO, S., K. KAWATATE, T. NAGAHAMA and T. MIITA (1989) Measurements of the East Tsushima Current in winter and estimation of its seasonal variability. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **45**, 375-384.
- 小田卷実・熊谷 武 (1986) 海洋情報システムにおける潮流・潮汐予報. 水路部技報, **4**, 51-55.
- 小川嘉彦 (1968) 沿岸暖流の消長と漁況変動. 水産海洋研究会報, **13**, 158-166.
- 小川嘉彦 (1969) マアジ当歳魚の漁況に及ぼす暖流効果. 水産海洋研究会報, **14**, 140-148.
- 佐藤 敏 (1988) 超音波流速計による海潮流データ処理方式に関する研究(超音波流速計データ処理用潮流推算プログラム). 水路部技報, **6**, 38-41.
- 田中伸和・下山俊一・大谷徹也・河野光久 (1990) 日本海西部沿岸域におけるトビウオ類の漁獲量変動について. 1990 年度水産海洋学会研究発表大会講演要旨集, 22-23.
- 俵 悟・三井田恒博・藤原建紀 (1984) 対馬海峡の海況とその変動特性. 沿岸海洋研究ノート, **22**, 50-58.
- TOBA, Y., K. TOMIZAWA, Y. KURASAWA and K. HANAWA (1982) Seasonal and year to year variability of the Tsushima Warm Current System and its possible cause. *La mer*, **20**, 41-51.
- YI, S.U. (1966) Seasonal and secular variations of the water volume transport across the Korea strait. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **1**, 7-13.