

## 対馬海峡を通過する体積輸送量の長期変動推定式

西村, 和也  
九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

広瀬, 直毅  
九州大学応用力学研究所東アジア海洋大気環境研究センター

福留, 研一  
九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

<https://doi.org/10.15017/14194>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 135, pp.113-118, 2008-09. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

# 対馬海峡を通過する体積輸送量の長期変動推定式

西村 和也\*1 広瀬 直毅\*2 福留 研一\*1

(2008年03月25日受理)

## Long-term estimation of volume transport through the Tsushima Straits

Kazuya NISHIMURA, Naoki HIROSE and Ken-ichi FUKUDOME

E-mail of corresponding author: [hirose@riam.kyushu-u.ac.jp](mailto:hirose@riam.kyushu-u.ac.jp)

### Abstract

Long-term, monthly-mean volume transport is estimated by an improved scheme using the coastal sea level data across the Tsushima Straits. At first, this study confirms the geostrophic and hydrostatic balances by comparing the surface velocity and the sea level gauge data. The surface current is separated into barotropic and baroclinic components corresponding to the net and zero transports through the straits, respectively. This study finds a strong seasonal variation of the reference level of the linear relationship between the sea level difference and the surface current. The new transport estimates based on the improved baroclinic correction are simpler but more accurate than a previous method (Takikawa and Yoon, 2005).

**Key words :** *Tsushima Warm Current, ADCP, sea level difference, long-term variation*

## 1. 緒言

応用力学研究所では、対馬海峡横断フェリーを利用した対馬暖流のモニタリングを10年以上継続しており、世界に類を見ない長期間の海流データベースが蓄積されている。東アジア縁辺海の海洋循環の研究に多大な成果をもたらしただけでなく、蒸発・降水過程を通じて領域的な気候変化にまで影響を与えることまで明らかとなってきた。しかしながら、当モニタリング開始以前は、直接観測が非常に少なかったため、長期的な体積輸送量(流量)変動を正確に求めることは困難である。

対馬海峡を通過する対馬暖流には地衡流平衡がおおよそ成り立っており、海峡間水位差が表層流速とよく対応していると想定される。Takikawa and Yoon (2005) (以後 TY2005 と略記)は、この基本的な関係を基に、対馬海峡流量の推定式を作成した。その結果、数日～数十日スケールの変動に関しては、水位差から推定した流量が ADCP とよく一致するのみならず、海底ケーブルの電圧変化から推定した海峡通過流量(Lyu and Kim, 2005)ともよく対応し(福留, 2004)、その推定精度の高さが裏付けられる。

しかしながら、より長周期の変動においては、傾圧流量を伴わない傾圧(内部)変化によっても水位変化が生じるため、その補正が大きな課題となっている。TY2005 においては、月毎の傾圧補正係数を算出して対応しているが、解析期間が短く(約5年)、信頼性が低い。実際に、対馬海峡を通過する熱量や塩分輸送量との対応も悪い (Senjyu et al., 2006; 西村, 2008)。

本研究では、蓄積したより長期間の海流データを用いて、TY2005 の推定手順、特に傾圧性に関する仮定を再検討する。推定精度の高い短周期変化は除外し、経月変化以上の長周期変動を解析対象とする。

## 2. 解析データ

博多-釜山間を往復する定期旅客船に設置されている ADCP (acoustic Doppler current profiler) により計測されている、航路断面の流速データを用いる。潮流の10分潮(Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, K2, Msf, Mf)を除去した後 (Takikawa et al., 2003)、断面流速を積算して対馬海峡の通過流量を求める。

また、対馬海峡モニタリングの観測期間は1997年以降であるので、さらに過去の流量を推定するために、対馬海峡の東水道と西水道それぞれの海峡間水位差を使用する。

\*1 九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

\*2 九州大学応用力学研究所東アジア海洋大気環境研究センター

東水道と西水道の水位差は、それぞれ博多と厳原、厳原と釜山の水位より求める。博多と厳原の水位データは日本海洋データセンター(JODC)、釜山の水位データは韓国海洋データセンター(KODC)により取得した。

### 3. TY2005 の流量推定式

海峡を横断する方向の運動方程式において地衡流平衡を仮定すると、コリオリ力と圧力傾度力の二項が、

$$-fu(z=0) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p(z=0)}{\partial y} \quad (1)$$

の関係を満たす。ここで、 $y, z, u, p, f, \rho_0$  はそれぞれ海峡を横断する方向の距離、深さ方向の距離、 $x$  方向流速、圧力、コリオリパラメータ、密度を表す。以降の式の  $u$  は全て表層における流速であるので、 $z=0$  を省略する。さらに静水圧平衡が成り立つ場合、上式は

$$-fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p(z=0)}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} = -g \frac{\Delta \eta - \Delta \eta_0}{\Delta y}$$

$$\therefore u = \frac{g}{f \Delta y} (\Delta \eta - \Delta \eta_0) \quad (2)$$

と変形できる。ただし  $\Delta \eta$  は海峡間水位差、 $\Delta \eta_0$  は水位基準面の補正值であり、 $u=0$  となるときの水位差  $\Delta \eta$  と定義する(TY2005)。さらに流速が全断面で一様である(つまり順圧流)と仮定した流量は

$$V_0 = Su = \frac{Sg}{f \Delta y} (\Delta \eta - \Delta \eta_0) \quad (3)$$

となる。その後、傾圧性の補正值  $\alpha_{BC}(t)$  を掛けた式

$$V = \alpha_{BC}(t) \frac{Sg}{f \Delta y} (\Delta \eta - \Delta \eta_0) \quad (4)$$

が TY2005 の推定式である。

つまり、TY2005 の推定方法は

1. 表層で地衡流平衡と静水圧平衡を仮定し、水位差から表層流速を見積る ((2)式)
2. 全断面で流速一様と仮定して表層流速から流量  $V_0$  を求め、傾圧性の補正をする((4)式)

という2つの段階に分けられる。これらの手順が適切であるかどうか、4節で第一段階を、5節で第二段階を検証する。

### 4. 表層における地衡流平衡と静水圧平衡

表層付近の流れ場に地衡流平衡と静水圧平衡が成り立つならば、海峡間水位差と表層流速の間に(2)式の比例関係があるはずである。水位差と表層流速の関係を調べてみると、相関係数は東水道が0.80、西水道が0.91であり、両水

道とも水位差が表層流速によく応答していることがわかる(Fig. 1)。また図中の直線は回帰直線であり(東水道が  $u = 1.38\Delta\eta + 7.62$ 、西水道が  $u = 1.24\Delta\eta - 108.47$ )、回帰直線からの RMSE(Root Mean Square Error)は東水道で 2.48 cm/s、西水道で 2.92 cm/s である。これは水位差から表層流速を、2~3cm/s という小さい誤差で推定することができることを表す。

回帰式の傾きは地衡流平衡の式(2)により、理想的には  $g/f\Delta y$  である。この理論値を各水道のパラメータ(TY2005より東水道で  $f=8.22 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $\Delta y=124.46 \text{ km}$ 、西水道で  $f=8.34 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $\Delta y=51.17 \text{ km}$ )を用いて計算すると、東水道が  $g/f\Delta y = 0.959 \text{ s}^{-1}$ 、西水道が  $g/f\Delta y = 2.299 \text{ s}^{-1}$  となる。この理論値は Fig. 1 の回帰式の傾きとやや異なる。

一方が過大、他方が過小評価となった主な原因は、水位観測点間の距離  $\Delta y$  と区間平均流速  $u$  が不整合であるためと考えられる。特に厳原(対馬)の水位観測点を正確に  $\Delta y$  に反映させることが難しい。さらに風応力項など、地衡流平衡を仮定したために無視された非地衡流成分の影響も考えられる。例えば Yoshikawa *et al.* (2008) はエクマン吹送流を表層流速から除くと、水位差と表層流速における回帰式の傾きが理論値に近づくことを指摘している。

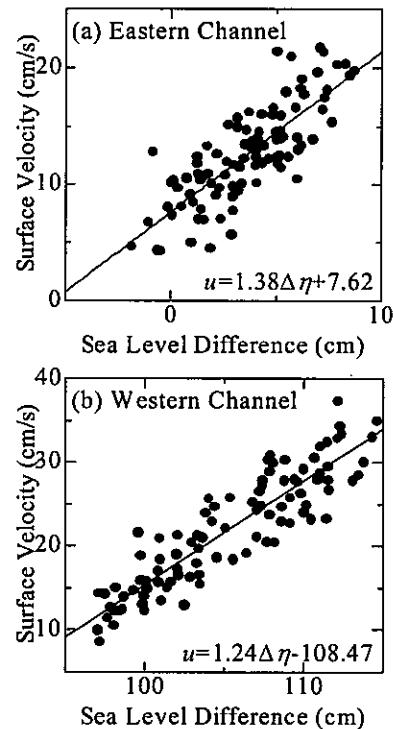


Fig. 1 Scatter diagram for monthly sea level difference and along-strait component of the near-surface velocity in the (a) Eastern and (b) Western Channels of the Tsushima Straits. The sea level data were sampled at Hakata, Izuhara, and Pusan. The ADCP data at the top level (18.4m) were averaged over each strait.

このように実際の水位差と ADCP 流速から得た傾きの大きさは理論値とやや異なるものの、水位差と表層流速は線形的によく対応しているため、対馬海峡の表層付近において、地衡流平衡と静水圧平衡の関係は(月平均以上の時間スケール)である程度成立しているとみなしてよいだろう。

## 5. 傾圧成分の補正方法

次に(4)式を検証を行う。まず、表層流速  $u$  を順圧成分  $u_{bt}$  と傾圧成分  $u_{bc}$  に分離する(Fig. 2)。

$$u = u_{bt} + u_{bc} \quad (5)$$

ただし、順圧成分  $u_{bt}$  は流速の鉛直方向の平均値であり、表層流速  $u$  と傾圧成分  $u_{bc}$  はいずれも  $z=0$  における値である。流量は順圧成分に断面積を乗じて

$$V = Su_{bt} = S(u - u_{bc}) \quad (6)$$

と定義される。表層流速  $u$  は、前節の方法によって水位差から見積もることができるため、既知である。しかし傾圧成分  $u_{bc}$  は未定である。本研究では、 $u_{bc}$  に関して、以下の2種類の季節変化する推定方法を考える。

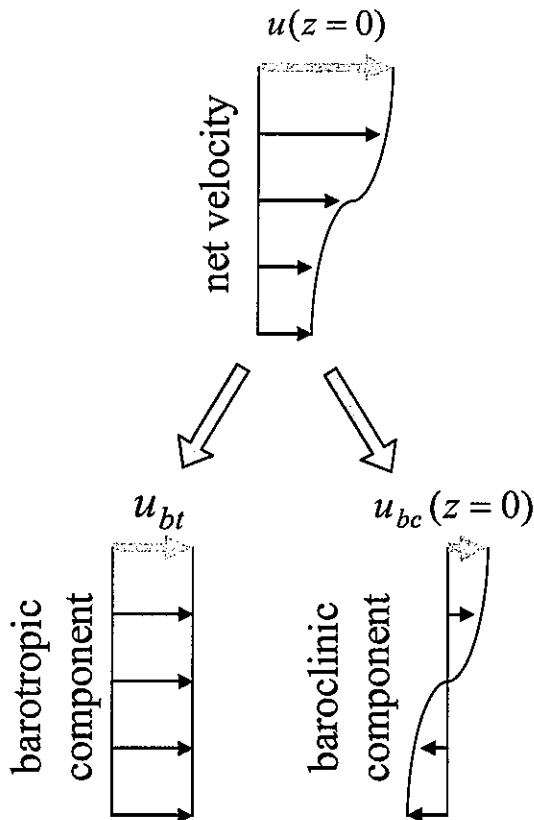


Fig. 2 Vertical decomposition of the velocity distribution to barotropic and baroclinic components. The surface velocity  $u$  can be separated to the two components  $u_{bt}$  and  $u_{bc}$ .

A. 傾圧成分  $u_{bc}$  が表層流速  $u$  に比例するとみなせる場合

$$u_{bc} = au \quad (7)$$

この場合の流量は(6)式より

$$V = S(u - au) = S(1-a)u \quad (8)$$

B. 傾圧成分  $u_{bc}$  と表層流速  $u$  が線形関係にあるが、切片 ( $b$ ) も無視できない場合

$$u_{bc} = au + b \quad (9)$$

この場合の流量も同様に

$$V = S(u - au - b) = S(1-a)u - Sb \quad (10)$$

A の場合の流量(8)式は TY2005 の推定式(4)と同形に帰着、即ち  $(1-a)$  が  $\alpha(t)$  と対応している。すなわち、TY2005 の推定式は傾圧成分に関して、表層流速に比例すると仮定していると解釈できる。A と B のどちらが適当か判断するには、表層流速  $u$  とその傾圧成分  $u_{bc}$  の関係を調べる必要がある。

Fig. 3に  $u$  と  $u_{bc}$  の散布図を示す。冬季と夏季の代表例として3月と9月に注目すると、まず東水道では、明らかに両月の回帰直線は原点を通らない。西水道の夏季も同様に、切片が無視できないほど大きい。つまり、表層流における順圧と傾圧各成分の変動比や基準値は、季節によって大きく変

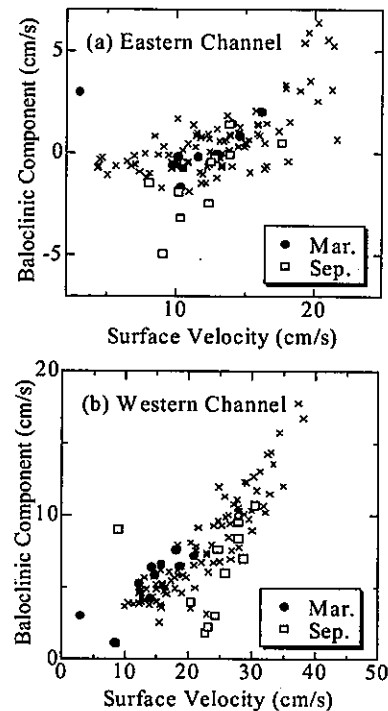


Fig. 3 Scatter diagram for the monthly-mean, near-surface velocity  $u$  and its baroclinic component  $u_{bc}$  in the (a) Eastern and (b) Western Channels of the Tsushima Straits. Closed circles, open squares, and crosses indicate March, September, and others, respectively.

化するというのである。よって傾圧成分を正確に推定するためには、Bの(9)式を用いた方がよいと判断する。

そこで、(10)式に地衡流平衡の式(2)を代入して

$$V = S(1-a) \frac{g}{f\Delta y} (\Delta\eta - \Delta\eta_0) - Sb \quad (11)$$

さらに  $S(1-a)g/f\Delta y$  を  $\alpha(t)$ 、 $-Sb$  を  $\beta(t)$  と置き換え、

$$V = \alpha(t)(\Delta\eta - \Delta\eta_0) + \beta(t) \quad (12)$$

を得る。本研究では、統計解析的にも取り扱いやすい本式を新しい推定式とする。傾きだけが季節変化するTY2005の推定式(4)と比較して、(12)式では切片も季節変化する。実際には、通過流量の実効断面積  $S$  を正確に把握することも容易ではない(季節変化する)ので、こうした不確定要素はなるべく未知の係数に含める方が合理的である。この修正によって、より正確に傾圧効果が補正され、推定誤差が小さくなるかと期待できる。また、途中で仮流量  $V_0$  を求める必要もなく、より簡便な方法といえる。

## 6. 流量推定式のパラメータ

(12)式の季節変化する回帰係数  $\alpha(t)$  と  $\beta(t)$  を、水位差と流量の回帰分析によって求める。半月平均の水位差と流量の回帰直線における切片と傾きを計算し、それをTY2005に準じて次式の年周期と半年周期の三角関数で近似する。

$$\begin{aligned} \alpha(t) = & \alpha_0 + \alpha_1 \cos\left(\frac{\pi}{6}t\right) + \alpha_2 \sin\left(\frac{\pi}{6}t\right) \\ & + \alpha_3 \cos\left(\frac{\pi}{3}t\right) + \alpha_4 \sin\left(\frac{\pi}{3}t\right) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \beta(t) = & \beta_0 + \beta_1 \cos\left(\frac{\pi}{6}t\right) + \beta_2 \sin\left(\frac{\pi}{6}t\right) \\ & + \beta_3 \cos\left(\frac{\pi}{3}t\right) + \beta_4 \sin\left(\frac{\pi}{3}t\right) \end{aligned} \quad (14)$$

ただし  $t$  は月であり、1月1日0時(12月31日24時)を  $t=0$  ( $t=12$ ) と定義する。推定式作成の手順は以下の通りである。

1. 各半月の平均水位差と平均流量を求める。
2. 水位差と流量の回帰直線における切片と傾きを半月毎に計算する。それぞれの月で2本、計24本の回帰直線が求められる。
3. 切片を(14)式の  $\beta(t)$  の多項式で近似する(Fig. 4a, b)。
4.  $\beta(t)$  を用いて、改めて回帰直線の傾きを計算する。
5. 傾きを(13)式の  $\alpha(t)$  の多項式で近似する(Fig. 4c, d)。

水位差と流量を月平均ではなく半月平均としたのは、切片や傾きを(13)式で近似するとき、フィッティングする点が多いほうが季節変化を正確に捉えることができたからである。結局、(13)式の各係数は Table 1 のように得られた。

また、水位基準面の補正值  $\Delta\eta_0$  を、(2)式では表層流速  $u=0$  となる時の水位差  $\Delta\eta$  と定義したが、ここで流量  $V=0$  となる時の水位差  $\Delta\eta$  と再定義する。東水道で  $\Delta\eta_0 = -3.4$  cm、西水道で  $\Delta\eta_0 = 86.0$  cm である。

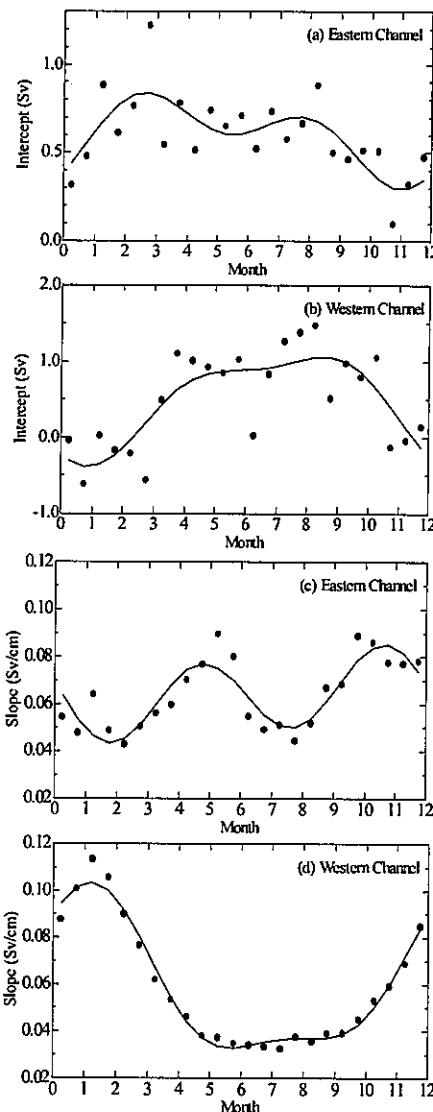


Fig. 4 Bimonthly coefficients of (a, b) the intercept  $\beta(t)$  and (c, d) the slope  $\alpha(t)$  with their fitting curves for the (a, c) Eastern and (b, d) Western Channels, respectively.

Table 1. Coefficients for equations (13) and (14).

Channel	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
Eastern	0.0639	0.0012	-0.0051	0.0037	-0.0167
Western	0.0586	0.0284	0.0181	0.0029	0.0111
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$
Eastern	0.602	-0.111	0.126	-0.102	0.113
Western	0.507	-0.558	-0.358	-0.173	-0.160

## 7. 推定誤差

本研究で求めた推定流量と、TY2005 の推定式による流量の推定誤差を比較する。TY2005 では約5年分の ADCP 観測データを用いたが、その後の観測データの蓄積により、ここではおよそ9年分のデータを用いて彼らの推定式の係数を再計算する。簡単のために(4)式の係数  $\alpha_{BC}(t)Sg/f\Delta y$  を  $\alpha_{TK}(t)$  と書き直すと、観測流量と水位差の比  $V/(\Delta\eta - \Delta\eta_0)$  から、直接毎月の傾き  $\alpha_{TK}(t)$  が求められる (Fig. 5)。図中の曲線は、次式による近似曲線であり、各係数は Table 2 のように決定された。

$$\begin{aligned} \alpha_{TK}(t) = & \alpha_{TY0} + \alpha_{TY1} \cos\left(\frac{\pi}{6}t\right) + \alpha_{TY2} \sin\left(\frac{\pi}{6}t\right) \\ & + \alpha_{TY3} \cos\left(\frac{\pi}{3}t\right) + \alpha_{TY4} \sin\left(\frac{\pi}{3}t\right) \end{aligned} \quad (15)$$

TY2005 の推定式 (4) によって推定される月流量を  $V_{TK}$ 、本研究の推定式 (12) により推定される月流量を  $V_N$  とする。 $V_{TK}$ 、 $V_N$  と観測流量  $V_{obs}$  を Fig. 6 で比較する。両水道、両推定ともに観測値とよく対応しているが、東水道で新推定値のばらつきが小さくなっていることが判別される。

相関係数と平方根残差(RMS)を求めると(Table 3)、西水道において、 $V_{TK}$  と  $V_{obs}$  の相関係数は 0.93、 $V_N$  と  $V_{obs}$  の相関係数は 0.94 であり、RMS は  $V_{TK}$  と  $V_{obs}$  が 0.13 Sv、 $V_N$  と  $V_{obs}$  が 0.12 Sv である。よって西水道では、TY2005 の推定式と本研究の推定式の精度は同程度であるといえる。

しかし、東水道では顕著な差がみられる。 $V_{TK}$  と  $V_{obs}$  の相関係数は 0.77 であるのに対し、 $V_N$  と  $V_{obs}$  の相関係数は 0.84 である。 $V_{TK}$  と  $V_{obs}$  の RMS が 0.21 Sv であるのに対し、 $V_N$  と  $V_{obs}$  の RMS は 0.12 Sv となり、およそ半分の推定誤差である。よって従来の推定式では誤差が大きかった東水道においても、本研究の推定式によって精度よく流量を再現できたといえる。両水道を合計した場合の相関係数も 0.9 に達した。

Table 2 Coefficients for equation (15)

Channel	$\alpha_{TK0}$	$\alpha_{TK1}$	$\alpha_{TK2}$	$\alpha_{TK3}$	$\alpha_{TK4}$
Eastern	0.1617	0.0064	0.0247	-0.0196	0.0069
Western	0.0809	-0.0020	0.0065	-0.0073	-0.0029

Table 3 Correlation coefficients and RMS differences between the estimated ( $V_{TK}$  or  $V_N$ ) and observed ( $V_{obs}$ ) volume transport

Channel	correlation		RMS (Sv)	
	$V_{TK} - V_{obs}$	$V_N - V_{obs}$	$V_{TK} - V_{obs}$	$V_N - V_{obs}$
Eastern	0.77	0.84	0.21	0.12
Western	0.93	0.94	0.13	0.12
Total	0.88	0.90	0.24	0.21

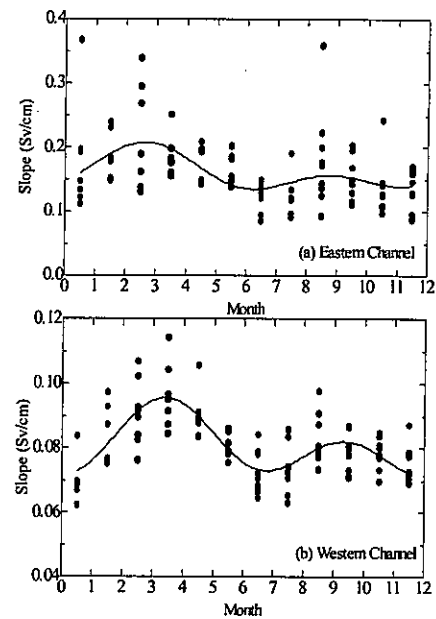


Fig. 5 Monthly coefficients of the slope  $\alpha_{TK}(t)$  (or  $V/(\Delta\eta - \Delta\eta_0)$ ) with the fitting curves (15) for the (a) Eastern and (b) Western Channels, respectively.

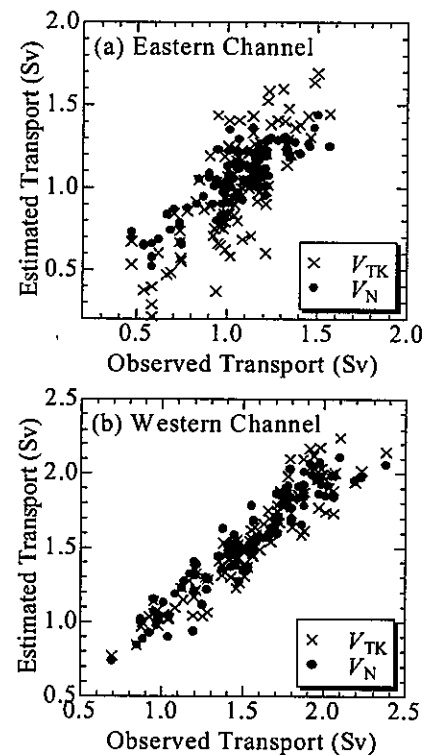


Fig. 6 Scatter diagram for the monthly-mean observed and estimated transport through the (a) Eastern and (b) Western Channels of the Tsushima Straits. Closed circles and crosses indicate  $V_{TK}$  and  $V_N$ , respectively.

## 8. まとめ

本研究によって、対馬海峡の通過流量をより精度よく推定することができた。TK2005 でも指摘されていた傾圧性の問題を、表層流における順圧成分と傾圧成分に分離することで整理し、推定式を簡略化した。傾圧性の補正のためには季節変化するスケールリングだけでなく、定数項の推定も不可欠であることが分かった。

終わりに、推定された30年間の月流量を Fig. 7に示す。1999年秋季の異常な増量は不十分であるが、それ以外の観測された変動傾向は、定量的にもよく再現されたといえる。経年変化の傾向を述べると、1970年代後半～80年代前半の夏季流量は大きく、その後1980年代後半から90年代前半に減少している。再び1995年以後は毎年3 Svを超える増量期にあるといえよう。冬季は、1977、1991年の減少が目立つが、逆に1980、1983年頃はあまり流量が低下していない。今後は、気候変化の影響など、流量変動のメカニズムをぜひとも解明したい。

推定された長期流量は、日本海や東シナ海モデルの水平境界条件として利用することが可能である。また、対馬暖流の指標として大気海洋相互作用の研究にも役立つだろう。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、滝川哲太郎博士と尹宗煥教授からは有意義な助言をいただいた。さらに、建設的な議論とコメントを頂いた増田章教授、吉川裕准教授に謝意を表す。本研究は特別教育研究経費拠点形成「東アジア海洋・大気環境激変の監視と予測システムの開発」によって支援された。

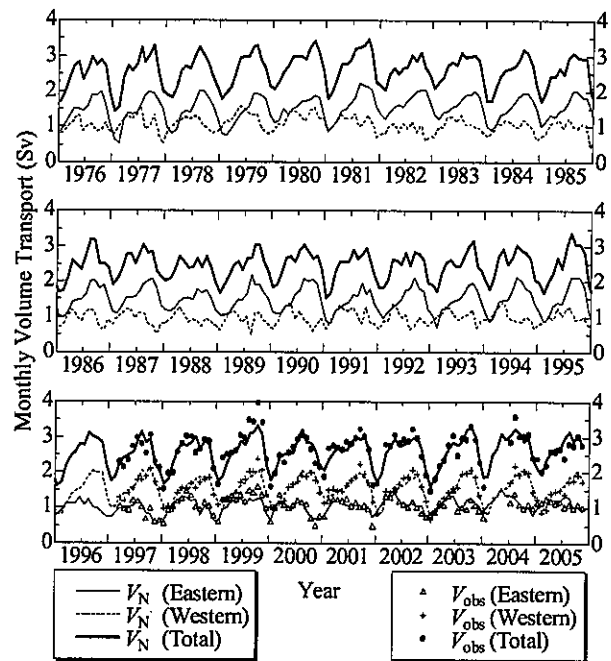


Fig. 7 Long-term variation of the estimated and observed volume transport through the Tsushima Straits. The thin solid, dotted, and thick solid curves indicate the estimated eastern, western, and total transports, respectively. The triangles, crosses, and closed circles show the measured transports.

## 参考文献

- 1) Takikawa, T. and J.-H. Yoon, 2005: Volume Transport through the Tsushima Straits Estimated from Sea Level Difference. *J. Oceanogr.*, 61, 699-708.
- 2) Lyu, S. J. and K. Kim, 2005: Subinertial to interannual transport variations in the Korea Strait and their possible mechanisms. *J. Geophys. Res.*, 110, C12016.
- 3) 福留研一, 2004: 対馬海峡を通過する流量の数日以下の短周期変動, 九州大学総理工修士論文, 43pp.
- 4) Senjyu, T., H. Enomoto, T. Matsuno and S. Matsui 2006: Interannual salinity variations in the Tsushima Strait and its relation to the Changjiang discharge. *J. Oceanogr.*, 62, 681-692.
- 5) 西村和也, 2008: 対馬暖流が冬季降水量に及ぼす影響, 九州大学総理工修士論文, 68pp.
- 6) Takikawa, T., J.-H. Yoon and K.-D. Cho, 2003: Tidal current in the Tsushima Straits estimated from ADCP data by ferryboat. *J. Oceanogr.*, 59, 37-47.
- 7) Yoshikawa, Y., A. Masuda, K. Marubayashi, M. Ishibashi and A. Okuno, 2008: Seasonal Variations of Surface Currents and Estimated Interior Currents at HF radar measurement depth in the Tsushima Strait. *J. Geophys. Res.* (submitted)