

## 対馬東部南西向き反流の生成機構に関する数値的研究

丸山, 直子  
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

広瀬, 直毅  
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

尹, 宗煥  
Dynamics Simulation Research Center, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

<https://doi.org/10.15017/16702>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 25 (2), pp.279-283, 2003-09. 九州大学大学院総合理工学府  
バージョン :  
権利関係 :

# 対馬東部南西向き反流の生成機構に関する数値的研究

丸山 直子\*1・広瀬 直毅\*2・尹 宗煥\*2

(平成15年7月31日 受理)

## Numerical Experiments on the Mechanism of the Southwestward Countercurrent East of the Tsushima Islands

Naoko MARUYAMA\*1, Naoki HIROSE\*2, Jong-Hwan YOON\*2,

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

A southwestward flow has been observed at the eastern side of the Tsushima Islands by ADCP observations. The generation mechanism of the flow which is considered as a countercurrent of the Tsushima Warm Current is investigated using shallow water equation models. Simulations by a baroclinic and a barotropic model explain that two major conditions are important for the generation of the countercurrent: One is the presence of the earth's rotation and the other is the seasonal change in baroclinic structure at the Tsushima Straits. The southwestward flow is interpreted as a boundary flow between clockwise and anticlockwise eddies at the lee-side of the Tsushima Straits. The lee-side eddies are not stationary but are advected toward the downstream of the Tsushima Warm Current.

**Key words:** *Tsushima Warm Current, reduced-gravity model, barotropic model, lee-side eddy*

### 1. はじめに

対馬海峡は九州と朝鮮半島に挟まれた、幅およそ 200 km, 平均水深 130 m 程度の海峡である。そのほぼ中央には南西から北東に延びた全長 70 km ほどの対馬があり、東シナ海から日本海へ流入する対馬暖流を対馬海峡内で東・西水道に分岐させる。日本海へ流入する唯一の海流が通過する対馬海峡の流動構造の解明は、日本海の循環を解明し、予測する上で重要な鍵となる。また、本海峡では日韓を中心に漁業が盛んに行われており、対馬海峡の流動構造の解明は、漁業活動の面からも重要である。

九州大学応用力学研究所では韓国釜慶大学と共同で定期旅客船「かめりあ」に設置したADCP (acoustic Doppler current profiler) により、対馬暖流の長期モニタリングを行っている。この観測は日本海に流入する対馬暖流の流動構造を解明する目的で行われている。この継続的な流動観測により、対馬下流側 (対馬上島の東約 40 km) において北東流が主流の対馬暖流に対し、明瞭な南西向き反流が観測された。ADCP観測から得られた18m水深における平均流速をFig. 1 に示す(Takikawa et al., 2001)。潮流成分は最小二乗

法により除去されている。この図より、測線上の対馬上島東に南西向き流速が確認される。対馬南東の海域ではこの他にも断片的なADCP観測等により度々このような反流が捉えられているが、本モニタリングによって初めて反流が平均的に存在することが示された。Takikawa et al. (2001) により、その時空間的構造が詳細に解析されたが、その成因はまだ明らかではない。

本研究では2種類の浅水波モデルを用いて対馬海峡における主な流動構造を再現し、南西流の発生機構を明らかにすることを目的として数値実験を行う。モデル中のパラメータ及び初期条件は既往の研究及び観測に基づいた流動特性値を用いる。また、対馬下流で起きている現象の発生要因を追求するため、設定条件の異なる幾つかの場合について感度実験を行い、その結果を検証する。

### 2. 数値モデル

対馬周辺は比較的浅いが、局所的に表層付近と海底付近には 10 cm/s から 30 cm/s ほどの流速差が見られ、夏季にこの差が最大となる。Figure 2は Takikawa et al. (2001) がADCP観測の結果を元に、測線に沿って平均流速の鉛直構造を求めたものである。これによると、冬季には東水道において順圧的な構造

\*1 大気海洋環境システム学専攻

\*2 応用力学研究所力学シミュレーション研究センター

が観測され、夏季には北緯 34° から 34.5° にかけての東水道に幅広い流軸を有する傾圧構造が発達する。西水道では年間を通して傾圧的構造が認められる。本研究では、夏季の成層構造と冬季の鉛直一様性を考慮して、1.5層 reduced-gravity (RG)モデルと順圧モデルの2種類のモデルを用いて実験を行う。

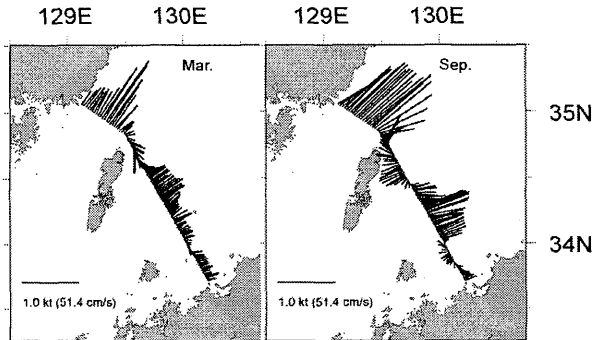


Fig.1 Monthly-mean velocity in March (left) and September (right) at 18m depth (Takikawa et al., 2001).

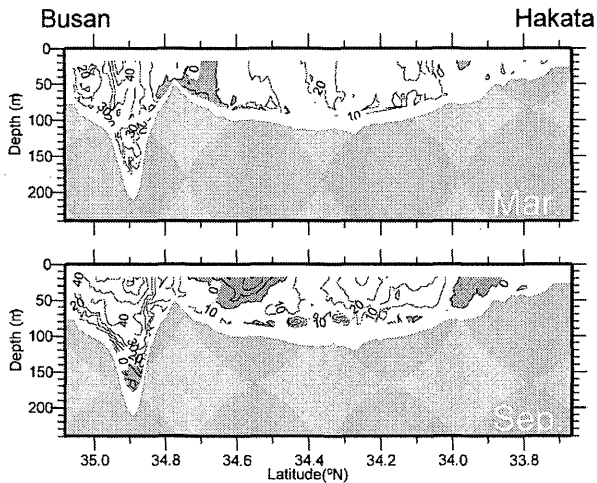


Fig.2 Monthly distribution of normal component of the measured velocity for March (top) and September (bottom) at the monitoring section. Shaded area indicates south-eastward flow.

### 2.1 1.5層RGモデル

傾圧構造の強まる対馬海峡の夏季の流動構造を再現するため、1.5層RGモデル(Kim and Yoon, 1996)を用いた。本モデルは密度躍層を境として海洋を密度の異なる二つの層に近似し、両層内での密度は均一とする。さらに下層の厚さが無限大であると仮定することにより下層における運動を無視し、傾圧第一モードについての上層の流れのみを考える。また、対象領域の規模が十分小さいことからf面近似を行い、局所直交座標系を用いる。基本方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g' \frac{\partial \eta}{\partial x} - Ru + A_h \nabla^2 u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g' \frac{\partial \eta}{\partial y} - Rv + A_h \nabla^2 v$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{u(H_0 + \eta)\} + \frac{\partial}{\partial y} \{v(H_0 + \eta)\} = -\gamma \eta$$

ただし、

$$g' = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} g$$

であり、 $u$ 、 $v$ はそれぞれx方向、y方向の流速を、 $\eta$ は海面変位と内部境界面変位の和を表す。 $\gamma$ はNewtonian damping 係数、 $H_0$ は上層の初期における厚さ、 $f$ はコリオリパラメータである。水平渦動粘性係数  $A_h$  の値は幾つかの感度実験の結果から  $1.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$  を採用した。また、コリオリ項を考慮した場合としない場合の実験を行い、コリオリ項が流れに及ぼす影響についても調べた。時間的には leap-frog scheme、空間的には Arakawa C-grid を用いて方程式を差分化し、移流項にはポテンシャルエンストロフィー及びエネルギーを保存する荒川スキーム (Arakawa and Lamb, 1981) を用いる。Figure 3の太枠で囲った領域をモデル海域とし、流入出条件を簡略化するため、座標軸を真東から 39.9度反時計周りに回転させる。

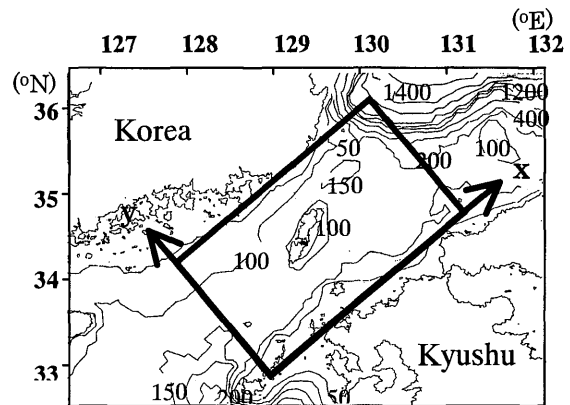


Fig.3 Coverage area of RG and barotropic models. Water depths are shown by isolines.

水平解像度は、約 30 km~50 km の幅で観測された南西流のスケールを考慮し、5 km と 2 km を用いる。

モデル海域の南西境界から対馬暖流が流入し、北東境界から流出するよう設定した。x軸に平行な側壁境界では no slip 条件とし、壁面における流速は 0 である。一方、y軸に平行な流入・流出境界では周期的境界条件を与え、下流側から流出した流れは上流境界より流入するものとする。ただし、流量や流れの方向を調整し、定常な流れ場を形成させるために流入際で流

速プロファイルを基底値に強く拘束している。本実験では Takikawa et al. (2001) が求めた対馬海峡における流量の季節変動を元に、境界からの流入量を各変数のダンピングによって夏季はおよそ 3 Sv、冬季はおよそ 2 Sv に維持するものとする。

対馬暖流は海峡に流入する際、ほぼ中央に流軸を有する (Katoh, 1993)。この流軸を再現するため、回転系では地衡流を仮定し、 $\eta$  に海峡の中心を 0 とする双曲線正接 (tanh) 型の海面変位を与え、 $u$  にはその変位の勾配に基づいた地衡流速を与えた。この tanh 型の変位は日本側が正、韓国側が負となる。 $v$  には全て 0 を与えた。また、非回転系では変位  $\eta$  のダンピングは行わず、流速のみダンピングを行った。この場合の流速  $u$  は回転系の場合と相似形で、流量が約 3 Sv (夏季) 及び 2 Sv (冬季) になるように与えている。境界における  $y$  方向の流速  $v$  は回転系と同様 0 である。ダンピングの時間スケールはすべて 1 日とした。

## 2.2 順圧モデル

夏季と比較して順圧性が強まる冬季の構造を再現するため、浅水波順圧モデルによる数値実験を行う。計算領域及び設定条件は 1.5 層 RG モデルの場合とほぼ同様である。ただし、順圧モデルでは底摩擦係数の値として 0.1 cm/s, 0.01 cm/s, 0.001 cm/s の 3 通りについて計算し、回転系についてのみ実験を行う。また、冬季の対馬海峡への流入量として約 2 Sv を用いる。水平解像度は 5 km とする。

## 3. 実験結果

### 3.1 RGモデルによる実験結果

前述したように、シミュレーションは全ておよそ 3 Sv の流入量に設定した。また、流速については夏季の西水道における極大流速 (約 60 cm/s) には達しないものの、全ての場合で平均して 30 cm/s~40 cm/s の安定した値となっている。ただし、これらの数値実験によって得られた数値は簡略なモデルの限界から常に誤差を含んでいるため、本研究では定量的評価よりむしろ定性的な物理現象の解釈に用いられる。

格子幅 5km の場合の数値実験により得られた流速を Fig. 4 に示す。これらは流れ場が十分に定常に達した後、100 日間平均して得た流速分布で、Fig. 4 (a) はコリオリ項を考慮した場合、(b) はコリオリ項を無視した場合である。これらの平均流速場を見ると、回転系では対馬の東側に暖・冷水渦が平均的に存在していることがわかり、それらの境界付近には南西向きの流が形成されている。一方、非回転系においては平均流速場における定性的な渦構造や逆流は認められない。

Figure 5 はそれぞれ格子幅が 2 km の場合の (a) 回転系及び (b) 非回転系の流速場で、同様に定常に達してか

らの 100 日間を平均して求めた流速分布である。対馬下流域に注目すると、やはり回転系においては暖・冷水渦及び南西流が存在しているのに対し、非回転系においてはこれらの構造が認められない。

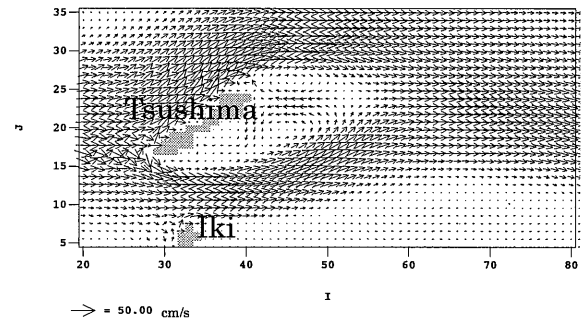


Fig.4(a) Average velocity field with the earth's rotation simulated by 5km grid model. Horizontal axes are shown by grid numbers.

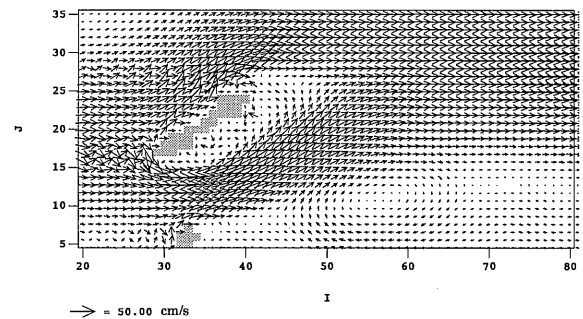


Fig.4(b) Same as Fig. 4(a) but for without the earth's rotation

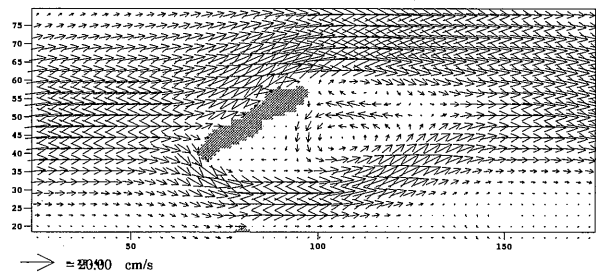


Fig.5(a) Average velocity field with the earth's rotation simulated by 2km grid model.

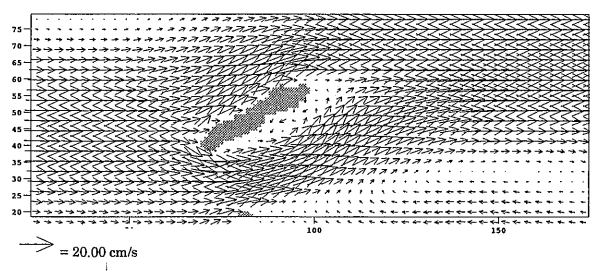


Fig.5(b) Same as Fig. 5(a) but for without the earth's rotation

さらに、これらの現象の一日毎の変化を追うと、回転系・非回転系共に上島北端からは時計回りの渦が、下島南端からは反時計回りの渦が周期的に生成されていることが確認できた。これら対馬南北端から生成された渦はある大きさになると島影から剥離し、下流に流され消滅する。ただし、一度発生した暖・冷水渦が消滅するまでの時間は、回転系で十数日、非回転系で2~3日程度と、コリオリ項の有無によって大きく異なった。また、回転系における東水道下流に形成される冷水渦は上島の30~40 km 下流にほぼ定在的に存在していた。

実験によって得られた非回転系における対馬下流の流動構造は、回転系に比べて時間変動が大きいと言える。下島南岸付近で形成された反時計回りの渦は対馬列島に沿って東に流されていく様子が捉えられたが、渦が消滅するまでの期間は2~3日程度と短い。また、非回転系では西水道を通過した流れは必ずしも時計回りの渦を形成せず、上島東部にはむしろ反時計回りの渦が存在する傾向が見られ、回転系とは大きく異なった結果が得られた。

### 3.2 順圧モデルによる実験結果

次に、順圧モデルによる実験結果を Fig. 6 に示す。これらは底面に実際の海底地形を加え、より現実的な対馬下流の流れ場の再現を試みた結果である。底摩擦係数は (a) 0.001 cm/s, (b) 0.01 cm/s, (c) 0.1 cm/s を用いた。底摩擦係数が 0.001 の時には対馬下流に弱い渦構造が生成されている。しかし、底摩擦係数を上げていくに連れ、対馬下流の渦構造は消えていった。

原田(2003)は対馬海峡における ADCP 流量データを基準として、1/12 順圧モデルにおける適切な底摩擦係数を約 0.1 cm/s と結論した。つまり、順圧構造を仮定した場合、現実的と思われる流動特性値を用いると対馬東部の南西向き反流はほとんど形成されない。

また、海底地形の流れ場に及ぼす影響を調べるための比較実験として、水深を一様に 80 m に設定し直して同様の実験を行ったが、対馬下流の流動構造に決定的な変化は見られなかった。

### 4. 結果と考察

RG モデル及び順圧モデルを用いて回転系及び非回転系における数値実験を行ったところ、それぞれの結果に大きな相違が見られた。RG モデルにおいて、回転系では西水道を通過した流れは、その一部が対馬上島北岸付近に下流渦として暖水渦を形成し、東水道を通過した流れは下島南岸付近に冷水渦を形成した。

一方、非回転系では東水道下流の冷水渦は形成されるが、暖水渦が形成される頻度は低く、発生後もすぐ

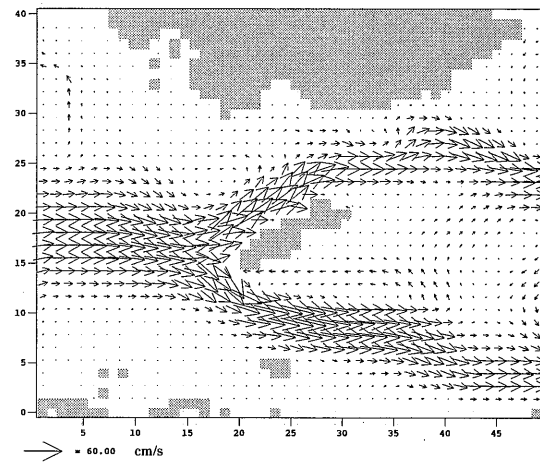


Fig.6(a) Average velocity field with bottom friction coefficient of 0.001 cm/s.

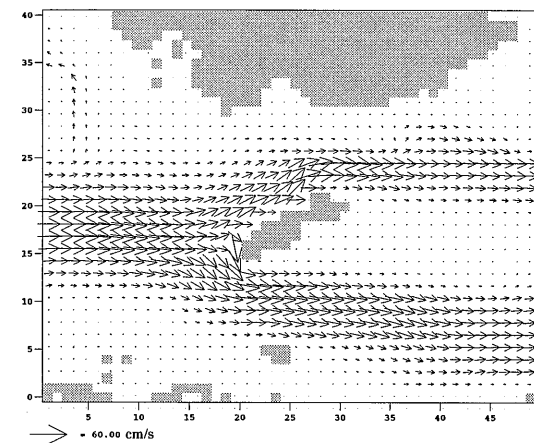


Fig.6(b) Same as Fig.6 (a) but for 0.01 cm/s.

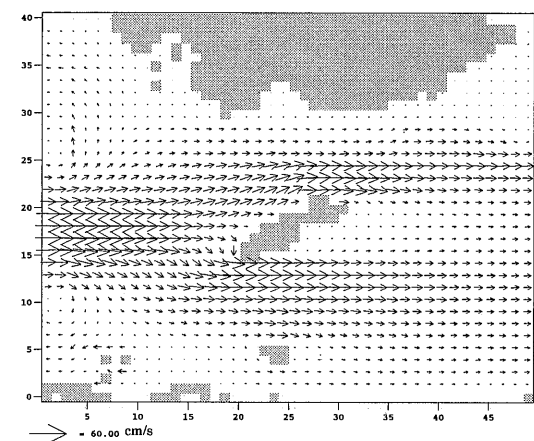


Fig.6(c) Same as Fig.6 (a) but for 0.1 cm/s.

に消滅する。回転系では上島付近で形成された暖水渦がコリオリ力の働きによって保存され、成長しながら下流へ押し流されると考えられる。その結果、対馬上島の東 10 km~40 km 沖の上層において暖冷水渦の境界付近に南西向き反流が定在的に存在した。また、順圧モデルによる実験結果から、下流渦及び反流形成は

夏季に強まる対馬海峡の傾圧構造に起因していると考えられる。

## 5. 結 言

対馬海峡を通過した東西分岐流は、コリオリ項と夏季に強まる対馬海峡の傾圧構造の影響を受け、対馬下流に渦構造を形成する。回転系において、東水道を通過した北東流はその一部が対馬の下流渦となって対馬東側に比較的変動周期の長い（十数日程度）冷水渦を形成する。一方、西水道を通過した分岐流はコリオリ項の影響により、同様に対馬下流に持続性の高い暖水渦を形成する。非回転系における流れ場では西水道下流に形成される時計回りの渦の変化が早く（数日程度）、東水道下流に生じる反時計回りの渦も対馬列島に沿って東進し、短期間のうちに上島の北東まで及び、定在的な南西流は形成されない。これらの実験の結果、これまで論じられてきた対馬東部の南西向き逆流は、傾圧的構造の下で生じた暖・冷水性の地衡渦の境界流として現れるものであると説明された。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、九州大学応用力学研究所 増田 章 教授、柳 哲雄 教授には多くの資料提供をしていただきまして、厚く御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) Arakawa, A and V. R. Lamb: A potential enstrophy and energy conserving scheme for the shallow water equations (1981), *Mon. Wea. Rev.*, 109, 18-36
- 2) Kim, C.-H. and J.-H. Yoon: Modeling of the wind-driven circulation in the Japan Sea using a reduced gravity model (1996), *J. of Oceanogr.*, Vol. 52, 359-373.
- 3) Takikawa, T., J.-H. Yoon and K.-D. Cho: The monitoring of the Tsushima Current through the ferry line between Hakata and Pusan (2001), *Proc. of 11<sup>th</sup> PAMS/JECSS*, 25-28.
- 4) Katoh, O.: Detailed current structure in the Eastern Channel of the Tsushima Strait in summer (1993), *J. of Oceanogr.*, Vol. 49, 17-30.
- 5) 原田浩二: 対馬海峡を通過する流量の短周期変動 (2003), 九州大学総合理工学府修士論文