

対馬暖流に対する対馬列島の地形効果*

磯 田 豊**

Topographic Effects of the Tsushima Islands
on the Tsushima Warm Current

Yutaka Isoda

対馬海峡周辺の水温・塩分資料を解析し、東西両水道の密度構造の違いより対馬暖流に対する対馬列島の地形効果について考察した。その結果冬季の対馬暖流は対馬列島の影響をほとんど受けずに日本海に流入するのに対し、夏季において西水道下流域では顕著な二層の密度構造による鉛直方向に流速勾配を持った流れが卓越し、東水道下流域では沿岸密度流による水平方向に流速勾配を持った流れが卓越していることが推察された。またこのような流動構造の中で西水道の出口上層には直径60 km から80 km, 厚さ50 m から70 m の暖水渦が2 ヶ月から3 ヶ月間形成されることがわかった。

Data of temperature and salinity around the Tsushima Straits were analysed to investigate the topographic effects of the Tsushima Islands on the Tsushima Warm Current from the difference of density structure between west and east channels. In winter, the Tsushima Warm Current which is little affected by the Tsushima Islands inflows into the Japan Sea. In summer, the current in the outlet of west channel has the vertical shear flow due to the 2 layered density structure and that in the outlet of east channel has the horizontal shear flow which exhibits the coastal trapped density current. Besides, at the upper layer on the outlet of west channel a warm eddy is formed during a few months period with 60km to 80km in diameter and 50m to 70m in depth.

1. はじめに

対馬海峡は Fig. 1 に示すように日本海と東シナ海とを結ぶ平均水深約100 m, 平均幅約200 km の海峡であり、海峡出口には日本海の中で最も発達した大陸棚が形成されている。日本海内部領域の平均的な流動構造については、対馬海峡から朝鮮半島に沿って北上する東鮮暖流は西岸境界流で、日本沿岸分枝流は日本列島に沿って発達した陸棚斜面上に捕捉された流れで説明できることを対馬・津軽両海峡を流入・流出口とした矩形の日本海モデル数値実験結果より、Yoon (1982a, b)¹⁾²⁾ と Kawabe (1982a)³⁾ が示した。この結果は、内部

領域の流れが流入口にあたる対馬海峡内の流れを逆に二分枝化することを示している。しかし実際の地形をみると海峡のほぼ中央には長さ約80 km の対馬列島が存在しているため、対馬暖流は海峡内を通過する際、強制的に東西両水道に二分枝化され日本海に流入している。対馬列島下流域の流動構造について Byun and Seng (1982)⁴⁾、俵ほか (1984)⁵⁾ は水温・塩分資料を用いた韓国—日本断面図及び力学計算の結果から、また Miita and Ogawa (1982)⁶⁾ は流れの直接観測結果から、夏季において東西両水道通過流の間には反流域が存在し、顕著な二分枝化の起こることを報告している。しかしながら、この反流域の水平的な拡がり及び形成の原因についてはまだ明らかにされていない。

* 1989年1月24日受領 1989年5月31日受理

** 愛媛大学工学部海洋工学教室

対馬暖流に対する対馬列島の地形効果

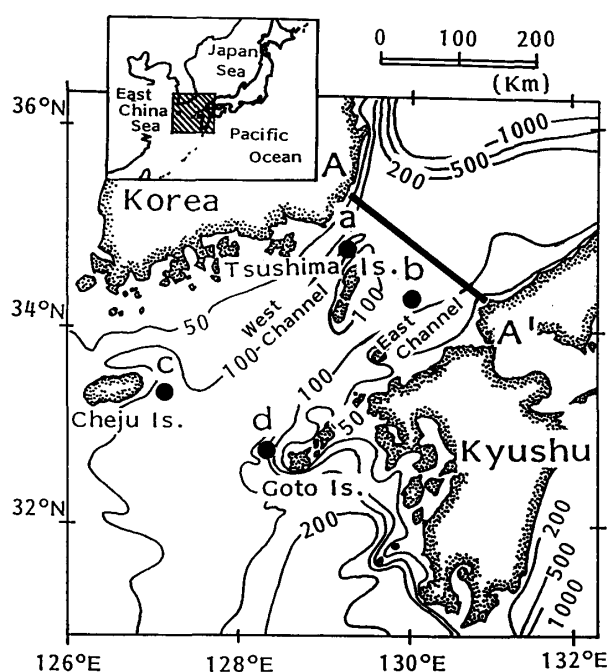


Fig.1 Bottom topography around the Tsushima Straits. a, b, c and d indicate the observation points. A-A' line indicates the observation line. Numerals show the depth in meter.

この論文では対馬列島下流域に注目した50 m 深水温塩分水平分布を用いて、この反流域が先に述べた日本海内部領域の平均的な流れによる二分枝化に関係したものではなく、局所的な地形効果、すなわち対馬列島の下流域に形成された暖水渦によるものであることを示す。そして特に対馬列島により二分枝化された東西水道の流れ及び密度構造の季節変化とこの暖水渦の形成・消滅との関係に注目し考察を行った。

対馬海峡付近の水温・塩分資料は1970年から1976年の水産庁海洋観測資料を用い、ほぼ毎月観測されていた1970年の資料について主に解析を行った。

2. 対馬海峡周辺の50 m 深水温・塩分水平分布

Moriyasu (1972)⁷⁾, Ichiye and Takano (1988)⁸⁾らは日本海内部の流れパターンが水深100 m の水温水平分布とよく対応していることを示している。しかし対馬海峡付近においては、平均水深が100 m と浅く成層期の水温躍層が水深30 m から50 m に存在しているため(小川, 1983⁹⁾), 50 m 深

の水温・塩分水平分布が対馬海峡付近の流れパターンを最も良く表現していると考えられる。Fig. 2(a)(b)は1970年各月毎の50 m 深水温(上段)・塩分(下段)の水平分布を示している。塩分分布における濃いハッチは34.5 ‰以上の領域を、薄いハッチは34.0 ‰から34.5 ‰の領域を表している。

対馬列島下流域における2月から6月にかけての流れパターンは対馬列島の存在にもかかわらず海峡全体から高温高塩分水が流入している様子がうかがえる。そして4月から6月にかけて陸棚北端冷水域(島根沖冷水)の水温上昇はほとんどなく、陸棚域との間に強い水温勾配が形成される。この現象は少なくともこの時期、対馬暖流は対馬海峡の中央に存在している対馬列島の影響を受けず日本海に流入し、海峡の出口に発達した陸棚上にトラップされた流れであることを示している。

8月・9月になると陸棚北端冷水域(島根沖冷水)の存在は50 m 深水温水平分布からは認められず、変わって東西水道それぞれに水温勾配の大きな領域が存在し始める。15℃等温線で代表される西水道の水温急勾配域は韓国沿岸に、20℃から22℃の等温度で代表される東水道の水温急勾配域は日本沿岸にへばりつく形でそれぞれ存在している。そして西水道の出口には東シナ海から流入してきた表層の低塩分水を取り込んだ直径60 km から80 km の暖水渦が、1970年の場合少なくとも8月・9月の2カ月間形成されている。また同時に対馬列島のすぐ背後には冷水域が形成され、暖水渦消滅後の11月までその存在が認められる。この暖水渦を取り巻く20℃等温線は陸棚上を日本沿岸に沿って伸びており、これは Kawabe (1982b)¹⁰⁾が100 m 深水温水平分布より指摘している夏季に対馬西水道から陸棚端に沿って形成される顕著な水温勾配に対応している。そして11月・12月には再び高温低塩分水が海峡全体から日本海に流入し始める。

夏季、西水道出口付近に形成される暖水渦はこの年だけではなく Fig. 3 に示すように1971年から1976年の各年にも同程度のスケールを持ち存在

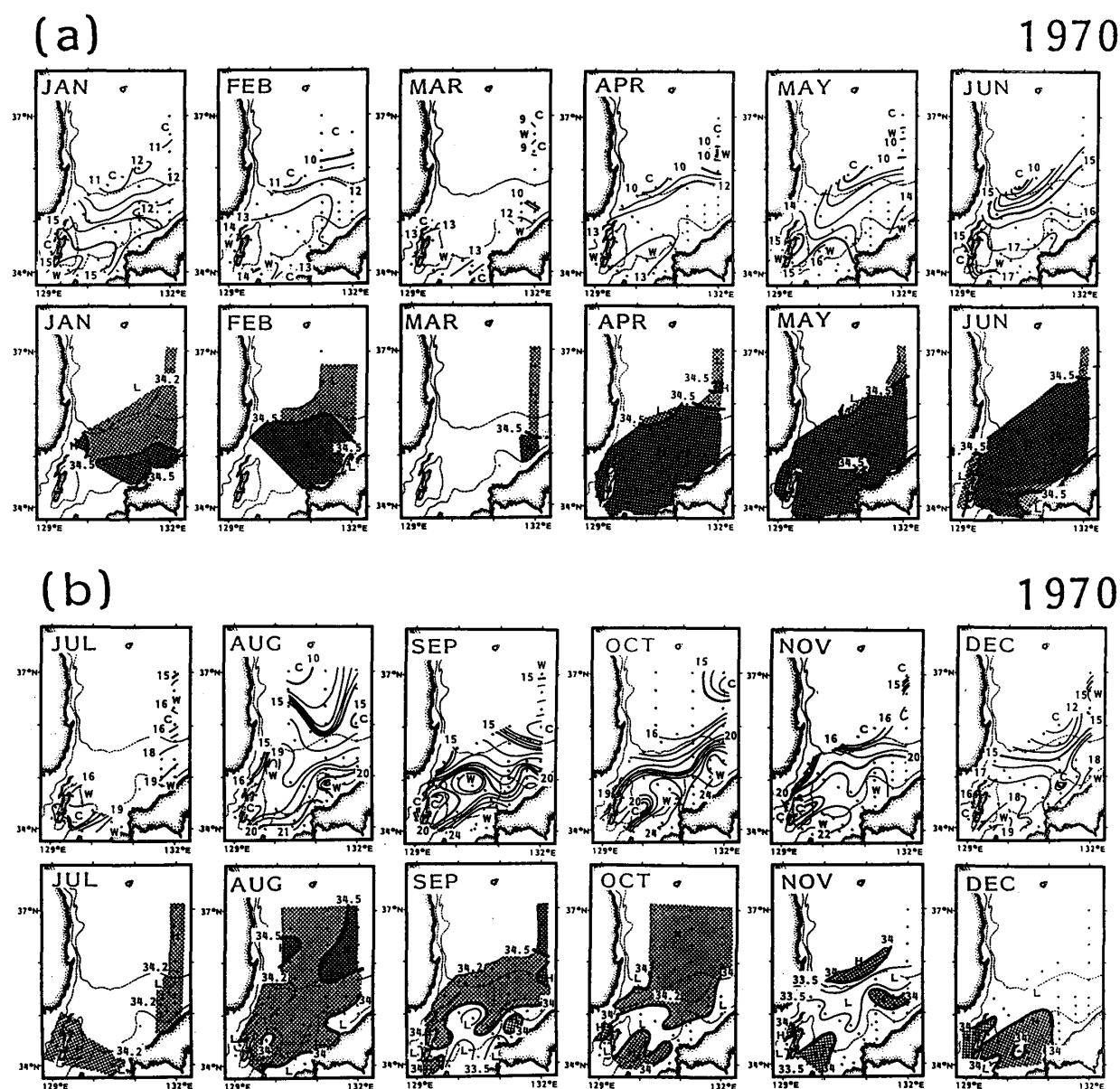


Fig. 2 Horizontal distribution of temperature and salinity at a depth of 50m from January to June (a), July to December (b) in 1970. The 100 m and 200 m isobaths are indicated by broken lines. Dark and light shadow region shows the salinity distributions more than 34.5 ‰ and from 34.0 ‰ to 34.5 ‰, respectively.

し、その寿命は小川(1983)⁹⁾が反流の存在期間として指摘している2カ月から3カ月程度であると推測される。しかしながら暖水渦の位置については1973年と1974年のように陸棚北端に位置する場合もあり、暖水渦が西水道出口で消滅する場合だけでなく、北方向に移動する場合もあることが推察される。

3. 対馬海峡・東シナ海の鉛直密度構造

Fig. 4はFig. 1に示した対馬海峡・東シナ海におけるa～dの各地点(Fig. 1, a:西水道・b:東水道・c:東シナ海九州側・d:東シナ海済州島側)の1970年水温・塩分・密度鉛直分布の季節変化を示している。この図のハッチの部分は冬季(2月から4月)東シナ海で鉛直混合により形成されたと推定される水温13℃から15℃、塩分34.5

対馬暖流に対する対馬列島の地形効果

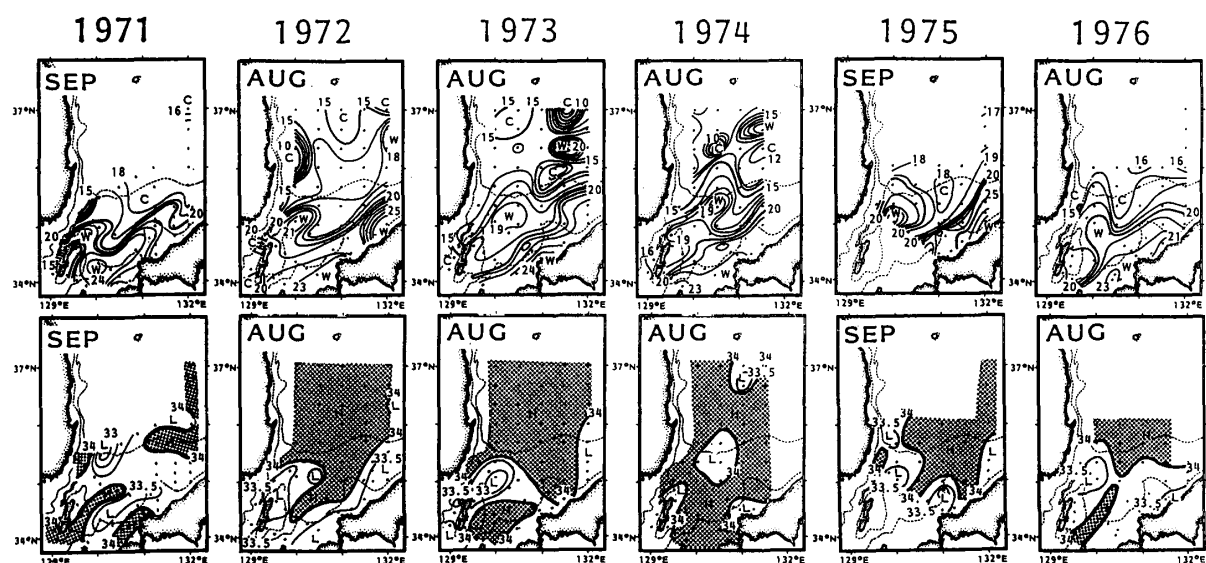


Fig. 3 Horizontal distribution of temperature and salinity at a depth of 50 m from 1971 to 1976 in summer. The 100 m and 200 m isobaths are indicated by broken lines. Dark and light shadow region shows the salinity distributions more than 34.5 ‰ and from 34.0 ‰ to 34.5 ‰, respectively.

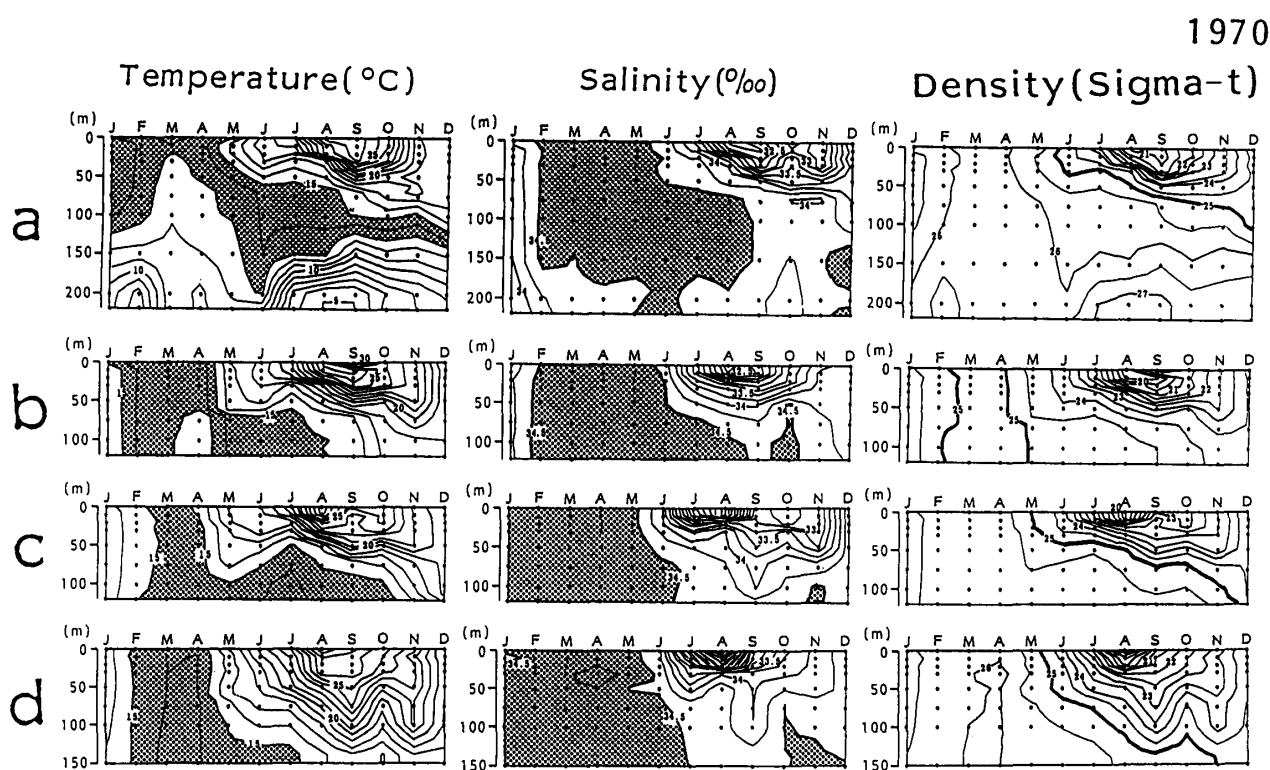


Fig. 4 Seasonal variations of vertical distribution of temperature, salinity and density at a, b, c and d points in 1970. (a: West channel, b: East channel, c: Kyushu side in the East China Sea, d: Cheju Is. side in the East China Sea) Shadow region shows vertically mixed water with 13 °C to 15 °C temperature and more than 34.5 ‰ in winter.

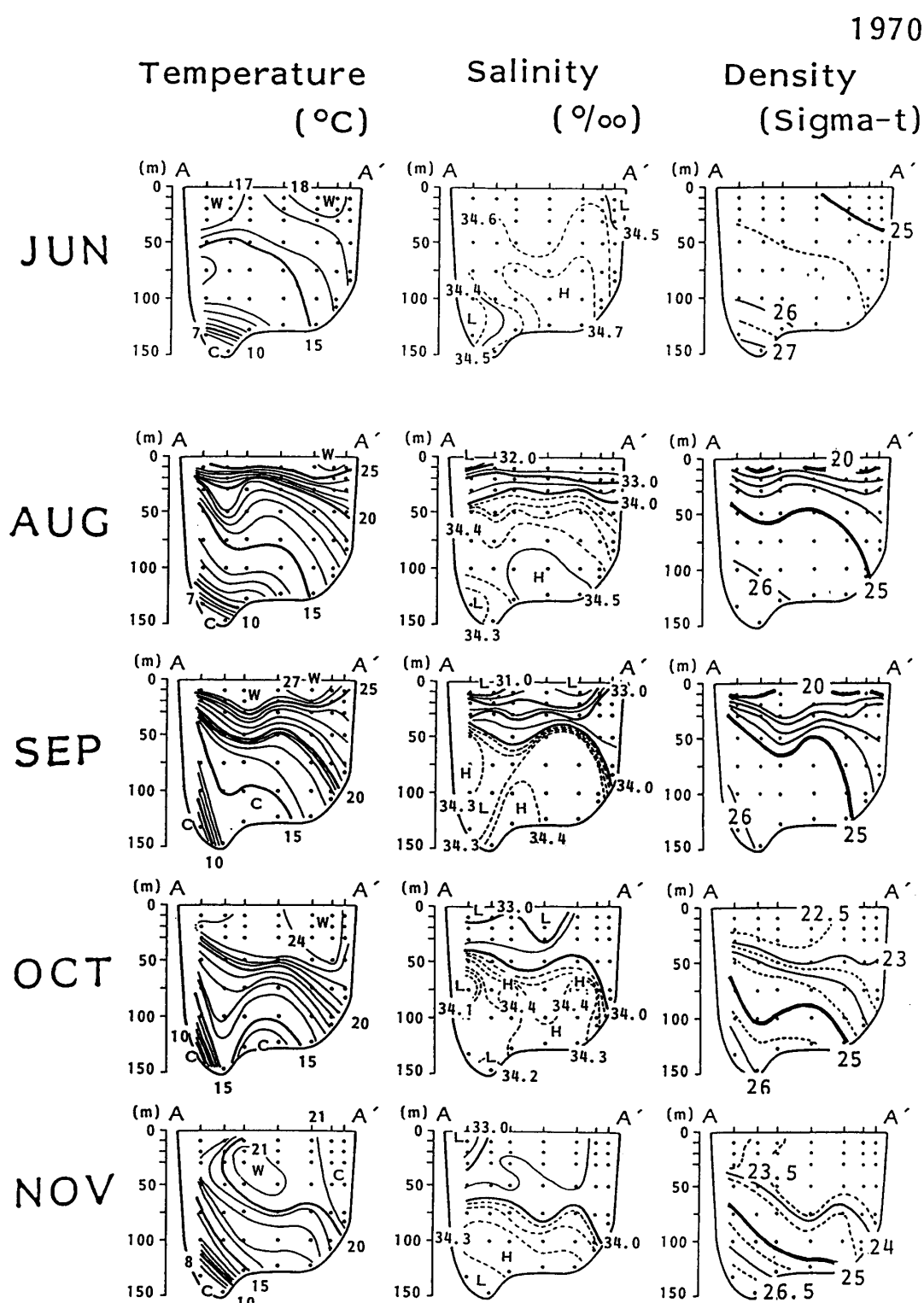


Fig.5 Vertical distributions of temperature, salinity and density from June to November in 1970 along A-A' line.

‰ 以上の水である。

まず東シナ海の水温構造をみると夏季の水温躍層の水深は九州に近いd点で100 m 深にあるのに対し、済州島に近いc点では50 m 深と浅い。一方

低塩分水の鉛直分布は両点に顕著な違いがなく約30 m 以浅に存在している。その結果、東シナ海の密度構造の季節変化は1月から4月では表層から海底まで鉛直に混合され、まず5月に海面加熱に

よる水温成層が始まり、6月から水深30 m以浅への低塩分水の流入のため表層に強い密度成層が形成される。そして6月から9月における密度躍層は主に水温構造に対応して九州側で厚く済州島側で浅い傾向にある。これは対馬海峡に流入する流れが九州側にトラップされた沿岸密度流の構造を持っていると考えられる。

対馬海峡の東水道b点の密度構造は東シナ海とはほぼ同様な季節変化をしている。一方西水道a点の密度構造は東シナ海から表層に低塩分水が供給される7月ころ下層100 m以深に中層よりも低塩で10℃以下の低温水が存在し、他の地点では見られない σ_t 26以上の重い水が下層を占めている。Byun and Seung (1982)⁴⁾は夏季に日本海の年中冷たい下層水が西水道底層に流入し、その流入水の密度が σ_t 26.5より重い水であることを報告している。またこの時期は暖水渦形成時にも対応しており、東シナ海からの表層低塩分水の流入が引金となって西水道底層への日本海低温水の強い流入そして西水道出口における暖水渦の形成が起こることを示唆している。すなわち西水道では夏季顕著な二層構造となりバロクロニックな流れ成分が卓越していると考えられる。

Fig. 5は対馬列島下流域のA—A'ライン (Fig. 1)における1970年6月から11月(7月は欠測)の水温・塩分・密度の鉛直断面分布を示している。Aが韓国(西水道)側、A'が日本(東水道)側である。この断面図からは、まず8月・9月において韓国沿岸に接するような暖水渦の構造がみられ、水温22℃以上、塩分34‰以下、密度 σ_t 25以下の渦であり、その厚さは50 mから70 m程度であることがわかる。また韓国側の水温勾配は暖水渦が形成される9月に最も大きくなり、底層低温水の流入は韓国沿岸底層に沿ったものであることを示している。日本側では暖水渦を形成している水と同じ高温低塩水が海底にまで達し、30 kmないし40 kmの狭い幅で沿岸にトラップされた密度構造をしている。このことから東水道下流域は西水道側の二層構造とは異なり表層から海底まで連続成層した構造を持っている。次にこの断面の

中央部にあたる対馬列島背後の底層では各月の中で最も高塩の水がいつも存在し、これは50 m深水平分布にみられた冷水域に対応している。従って対馬列島背後の底層冷水域は西水道低温水のように日本海下層水を起源とするものでなく、東シナ海からの流入水で構成されていると考えられる。

4. 東西水道の流れ構造と暖水渦形成条件についての考察

Toba *et al.* (1982)¹¹⁾は大気海洋相互作用によって水温変動の大きい東シナ海と冷たい亜寒帯寒流の西端である津軽東方海域との間の水位差によって対馬暖流が駆動されていると推定した。すなわち対馬海峡を通過する対馬暖流の正味の輸送量は東シナ海と日本海の水位差によるバロトロピックな流れ成分が受け持っている。よって、横断面内の密度が均一に近い冬季(混合期)の対馬海峡ではロスビーの外部変形半径

$$\lambda = \sqrt{gH/f} \quad (1)$$

に支配された流れが卓越していると考えられる。ここで g は重力加速度、 H は水深、 f はコリオリパラメータである。対馬海峡の平均水深を $H = 100$ m、 $f = 8.58 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ とすると $\lambda = 365$ kmとなり、このスケールは対馬海峡幅の約2倍に当たる。これは冬季に対馬海峡を通過する対馬暖流

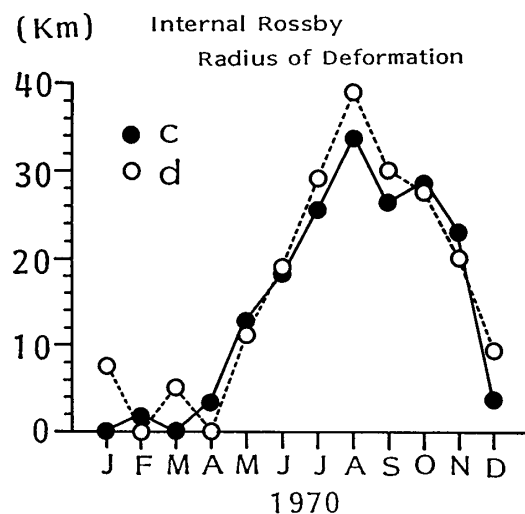


Fig. 6 Seasonal variations of internal Rossby radius of deformation at c and d points in the East China Sea in 1970.

は海峡横断方向の水平流速勾配が小さく、ほぼ海峡全体一様な流速で日本海に流入していることを示している。そのため海峡中央の対馬列島によって分けられた東西水道の流動構造に顕著な違いはないと推察される。すなわち冬季の対馬暖流は Fig. 2 の水温・塩分水平分布に示されたように対馬列島の影響をほとんど受けず日本海に流入していると考えられる。

一方夏季における西水道の二層構造とその出口上層に形成される暖水渦及び東水道下流域の沿岸にトラップした密度構造は、回転系の密度流の現象と考えられる。すなわち水位差によるバロトピックな流れ成分に密度流によるバロクリニックな流れ成分が加わり、ロスビーの内部変形半径 λ_i に支配された流れが夏季の東西水道の密度構造の違いに影響を与えていると考えられる。Fig. 6 は対馬海峡の上流にあたる東シナ海の c 点・d 点の鉛直密度分布から求めた λ_i の季節変化を示したものである。 λ_i は連続成層を仮定し下記の式で計算される。

$$\lambda_i = NH/f \quad (2)$$

$$N^2 = -(g/\rho_0) \cdot \partial\rho/\partial Z \quad (3)$$

ここで N^2 はブラント・パイサラ振動数、 ρ_0 は鉛直平均密度、 $\partial\rho/\partial Z$ は鉛直方向の密度勾配を示している。また g , H , f は λ を計算するのに用いたパラメータと同じである。

東シナ海における λ_i の季節変化は混合期の 1 月から 4 月の間はほぼ 0 km で、成層の発達する 5 月から急激に大きくなり、低塩分水が東シナ海から流入し暖水渦が形成される 8 月には 30 km から 40 km と最大になる。Fig. 7 は夏季におけるこの最大の λ_i と対馬海峡の地形及び密度構造の空間スケールとの比較を模式的に示したものである。またこの図には資料解析結果より推定される流れも模式的に示してある。夏季最大となる λ_i の空間スケールは、東西水道の最も狭い側の水道幅と同程度になり、対馬列島の長さに対しては約 1/3 程度の空間スケールを持っている (Fig. 7(a))。この時西水道出口に形成される暖水渦の空間スケールは λ_i の約 2 倍、そして東水道の日本沿岸にト

ラップされた暖水域の岸沖方向のスケールはほぼ λ_i に一致している (Fig. 7(b))。そして東西水道の密度構造から推定される夏季の流れパターンをまとめると次のようになる。西水道では厚さ 50 m 程度の上層が流出後時計回りの暖水渦を形成し、同

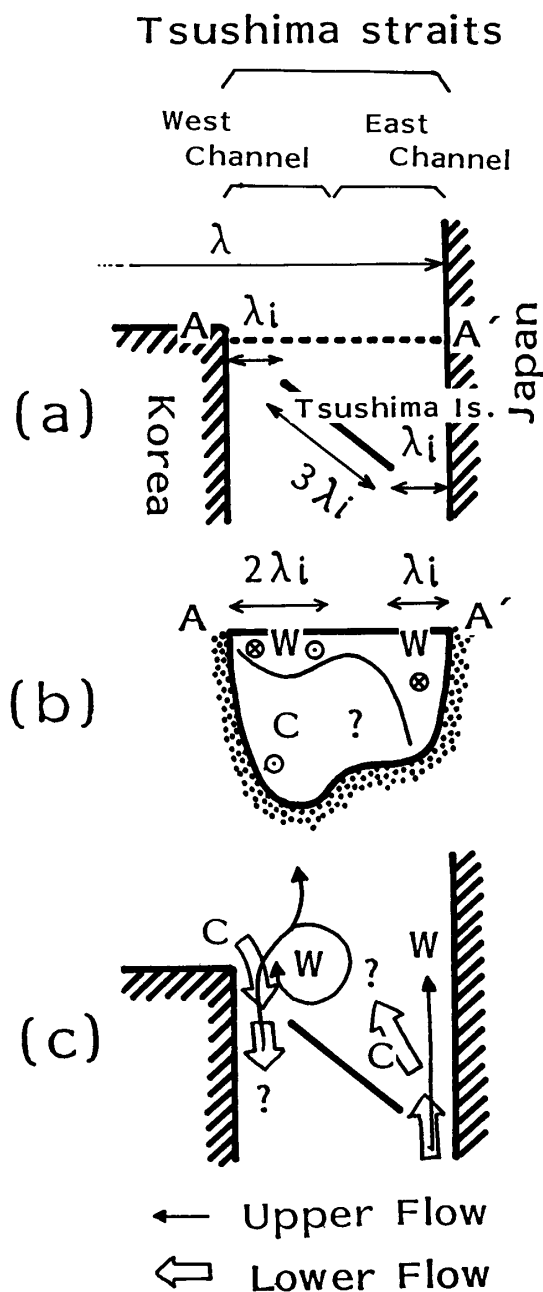


Fig. 7 Schematic view of comparison between internal Rossby radius of deformation and topography (a), vertical section of density structure (b) in the Tsushima Straits in summer. Schematic view (c) shows the flow patterns suggested by the west and east channel density structure in summer.

時に下層では韓国沿岸底層に沿って日本海低温水が流入する。このように西水道及びその下流域では鉛直方向に流速勾配を持った流れが卓越していることが推察される。一方、東水道下流域では西水道の上層に当たる軽い水が日本沿岸にトラップされ対馬列島の背後に形成された重い低温水との間に水平方向に流速勾配を持った流れが卓越していることが推察される。ここで西水道及び対馬列島背後のそれぞれの底層低温水の空間的な拡がりについては明らかにすることができず今後の課題である (Fig. 7(c)).

Whitehead and Miller (1979)¹²⁾ (以下 WM で略す) は海峡から低密度水が流出する際の流れの形態に関する回転水槽実験より、海峡幅が λ_i よりも小さい場合に強い時計回りの Gyre が形成されることを示した。Conlon (1982)¹³⁾ はこの結果を参考にして津軽暖流の流出形態の季節変化 (Gyre モード・沿岸モード) が説明できることを示した。また Ichiye (1982)¹⁴⁾ は WM のパラメータを拡張し内部フルード数 (F) とロスビー数 (R) の比 (F/R) に依存して流出形態変化の起こることを示した。暖水渦が形成される西水道をひとつの海峡としてみた場合、まず西水道の幅は最大の λ_i と同程度であっても小さいので WM の結果には適合しない。更に Ichiye (1982)¹⁴⁾ のパラメータを用いると $F/R = (V \cdot B) / (f \cdot \lambda_i^2) = 0.30$ (ここで $V = 0.5 \text{ m/s}$ は流速, $B = \lambda_i = 40 \text{ km}$, B は海峡幅である) となり、この値は津軽暖流の流出形態では沿岸モードの領域である。以上のことから対馬海峡の暖水渦形成条件として WM や Ichiye の理論は適用できないことがわかる。すなわち西水道出口に存在する暖水渦の形成条件は、西水道の地形・流れ・密度構造だけを眺めたパラメータ化では説明できず、先に述べた東水道の流れとの相互作用そして東西水道を分離している対馬列島の地形効果 (流軸に対しての傾き・長さ) 等、対馬海峡全体の流れ構造に関与したパラメータ化が必要であると考えられる。例えば地形効果について、川崎・杉本 (1984)¹⁵⁾、永田ほか (1984)¹⁶⁾ は低密度水放出の回転水槽実験より、その放出角度 (対

馬海峡の場合、海峡横断方向に対する対馬列島の角度) が鋭角の場合には直角・鈍角の場合よりも渦が生じ易いことを報告している。

5. おわりに

本研究の資料解析の結果、対馬暖流に対する対馬列島の地形効果について以下のことがわかった。冬季の対馬暖流は対馬列島の影響をほとんど受けず日本海に流入している。一方夏季の対馬海峡では、低塩分水の表層流入による成層の効果と対馬列島による地形の効果によって東西水道の流れ構造の違いが生じ、海峡全体で複雑な流動構造になっている。すなわち、西水道及びその下流域では顕著な二層の密度構造による鉛直方向に流速勾配を持った流れが卓越するのに対し、東水道下流域では沿岸密度流の構造による水平方向に流速勾配を持った流れが卓越していると推察される。

またこのような流動構造の中で、対馬海峡下流域に形成される暖水渦は次の性質を持っていることがわかった。

- (1) 暖水渦の構造は高温低塩分水で構成された直径 60 km から 80 km, 厚さ 50 m から 70 m であり、西水道の表層出口に形成される。そしてその寿命は 2 カ月から 3 カ月程度である。
- (2) その形成時期は東シナ海から表層に低塩分水が供給される 7 月から 8 月の間であり、流入してくる東シナ海の内部変形半径がほぼ西水道の水道幅と同程度になる時期にあたる。この時西水道底層には韓国沿岸に沿って日本海底層低温水が強く流入する。

今後は資料解析からは十分に明らかにすることができなかった暖水渦の形成に最も影響を与える条件は何か、そして渦のスケールは何が決定し、どのようなメカニズムで渦の維持・移動がなされているかについて、夏季の対馬海峡を想定した回転水槽実験を行うことによって明らかにしていきたいと考えている。

本研究を進めるあたり貴重な議論をして頂いた愛媛大学工学部柳哲雄助教授、同武岡英隆助教授、同秋山秀樹技官、資料整理に協力して頂いた愛媛

大学工学部山岡弘文氏（現：コンピュータブレーン㈱）に深く感謝を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) Yoon, J. H. (1982a): Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, part 1. Formation of the East Korean Warm Current. J. Oceanogr. Soc. Japan, **38**, 38-43.
- 2) Yoon, J. H. (1982b): Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, part 3. Mechanism of the nearshore branch of the Tsushima Current. J. Oceanogr. Soc. Japan, **38**, 125-130.
- 3) Kawabe, M. (1982a): Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea, part 2. Numerical experiment. J. Oceanogr. Soc. Japan, **38**, 183-192.
- 4) Byun, S. K. and Y. H. Seung (1984): Description of current structure and coastal upwelling in the southwest Japan Sea-summer 1981 and spring 1982. pp. 83-93. In: Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Sea, ed. by T. Ichiye, Elsevier.
- 5) Miita, T. and Y. Ogawa (1984): Tsushima Current measured with current meters and drifters. pp. 67-82, In: Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Sea, ed. by T. Ichiye, Elsevier.
- 6) 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. 沿岸研究ノート, **22**, 50-58.
- 7) Moriyasu, S. (1972): The Tsushima Current. p. 353-369. In, Kuroshio-Its physical aspects. ed. by H. Stommel and K. Yoshida, Univ. Tokyo Press, Tokyo.
- 8) Ichiye, T. and K. Takano (1988): Mesoscale eddies in the Japan Sea. La mer, **26**, 69-75.
- 9) 小川嘉彦 (1983): 対馬海峡から日本海へ流入する海水の水温・塩分の季節変化. 水産海洋研究会報, 第43号, 1-8.
- 10) Kawabe, M. (1982b): Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea. Part 1. Data analysis. J. Oceanogr. Soc. Japan, **38**, 95-107.
- 11) Toba, Y., K. Tomizawa, Y. Kurasawa and K. Hanawa (1982): Seasonal and year-to-year variability of the Tsushima-Tsugaru Warm Current system with its possible cause. La mer, **20**, 41-51.
- 12) Whitehead, J. A. and A. R. Miller (1979): Laboratory simulation of the gyre in the Alboran Sea. J. Geophys. Res., **84** (c7), 3733-3742.
- 13) Conlon, D. M. (1982): On the outflow modes of the Tsugaru Warm Current. La mer, **20**, 60-64.
- 14) Ichiye, T. (1982): A commentary note on the paper "On the outflow modes of the Tsugaru warm Current" by D. M. Conlon. La mer, **20**, 125-128.
- 15) 川崎康寛・杉本隆成 (1984): 津軽暖水渦の生成, 消滅機構—VI 海峡開口部の地形が渦形成に及ぼす効果. 1984年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 20-21.
- 16) 永田豊・道田豊・中井圭二 (1984): 回軽水槽による温排水の拡がり方に対する地球自転の効果の研究(2). 第31回海岸工学講演会論文集, 625-629.