九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

対馬海峡東水道に見られる反時計回り渦の変動特性

中園, 隆司
九州大学大学院総合理工学府

吉川, 裕
九州大学応用力学研究所

増田, 章
九州大学応用力学研究所

丸林, 賢二
九州大学応用力学研究所

他

https://doi.org/10.15017/14176

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 134, pp.47-52, 2008-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

対馬海峡東水道に見られる反時計回り渦の変動特性

中園　隆司*1　吉川　裕*2　増田　章*2
丸林　賢二*2　石橋　道芳*2
(2008年1月31日受理)

Spatial and Temporal Variations of Anti-clockwise Eddy Formed in the Eastern Channel of the Tsushima Strait

Ryuji NAKAZONO, Yutaka YOSHIKAWA, Akira MASUDA,
Kenji MARUBAYASHI and Michiyoshi ISHIBASHI
E-mail of corresponding author: *yosikawa@riam.kyushu-u.ac.jp*

Abstract

HF radar measurement in the Tsushima Strait reveals frequent appearance of anti-clockwise eddy in an eastern channel of the Tsushima Strait. In this study, spatial and temporal variations of this anti-clockwise eddy are investigated. The eddy generally appears from the southern part of the eastern coast of Tsushima Island and is shed to the northeast by the Tsushima Warm Current (TWC). Three modes (4~6, 10~12, and more than 30 days) are found in frequency distribution of eddy formation intervals. Location of the eddy and the highest mode of the eddy formation interval suggest that the eddy is lee-side eddy formed behind Tsushima Island by the incoming TWC. Second mode indicates that the eddy formation is affected by variations of intensities of TWC and tidal currents. The third mode corresponds to seasonal variation of the eddy generation, which is probably caused by a seasonal variation of vertical structure of TWC.

Key words : *HF radar, Tsushima Strait, anti-clockwise eddy, lee-side eddy*

1. 緒　言

2002年2月に本格運用を開始した対馬海峡表層海峡監視海洋レーダーシステム（以下海洋レーダーシステムと略す）は、従来の観測手法では計り得なかった流動変動の詳細を明らかにしてきた（例えばYoshikawa et al. 2007[1]; 奥野・吉川ほか2005[2]など）が、中でも対馬海峡東水道に現れる反時計回り渦は、最も特徴的な流動変動として、運用開始当初から着目されてきた。この渦（以下対馬渦と呼ぶ）の典型例の一つをFig. 1に示す。このように、多くの場合対馬渦は観測海域南西部から見え初め、徐々に成長しながら北東方向に移流される。対馬下流域で渦によると思われる変動が卓越することは近年の観測（Teague et al. 2005[3]; Takikawa et al. 2005[4]）により示唆されていたが、渦をこれほどまでに明瞭に捉えることができたのは海洋レーダーによる観測が初めてであり、この事例は、海洋レーダーの潜在観測能力の高さを示す好例である。

この観測の重要な点は、単に渦を明瞭に捉えられたということにとどまらない。Fig. 2に人工衛星で計測された海面蛍光高度（クロロフィル濃度に対応）の分布と、同時期に海洋レーダーで計測した表層流速場を示す。対馬渦の出現域でクロロフィル濃度が高いことがわかる。つまり、この反時計回りの渦が（植物プランクトン量に対応する）クロロフィル濃度の増加を引き起こしていることを強く示唆している（鬼塚ら2007[5]）。

低次生態系である植物プランクトンの増加は魚などの高次生態系の増減に影響を及ぼし、その影響は海流によって下流にまで運ばれる。また近年の観測（[6]）により、外洋域表層の植物プランクトン濃度は海上の雲量に影響を及ぼすことが明かとなっている。雲量はアルベドを変化させるため、重要な気候変動因子である。これらのことは、島影にできる渦は、単にその場の海洋低次生態系の増減に影響を与えるだけでなく、より広範囲な海洋・大気環境に関与している可能性があることを示唆している。

しかし、どのような状況で渦が発生した場合にクロロフィル濃度が増加するのか、またそれはどの程度かなど、渦とクロロフィル濃度の増減を関係づける機構は不明な点が多い。そこで、これらの点を明らかにする第一段階として、対馬渦の出現位置や出現周期を調べたので報告する。

*1 九州大学大学院総合理工学府
*2 九州大学応用力学研究所

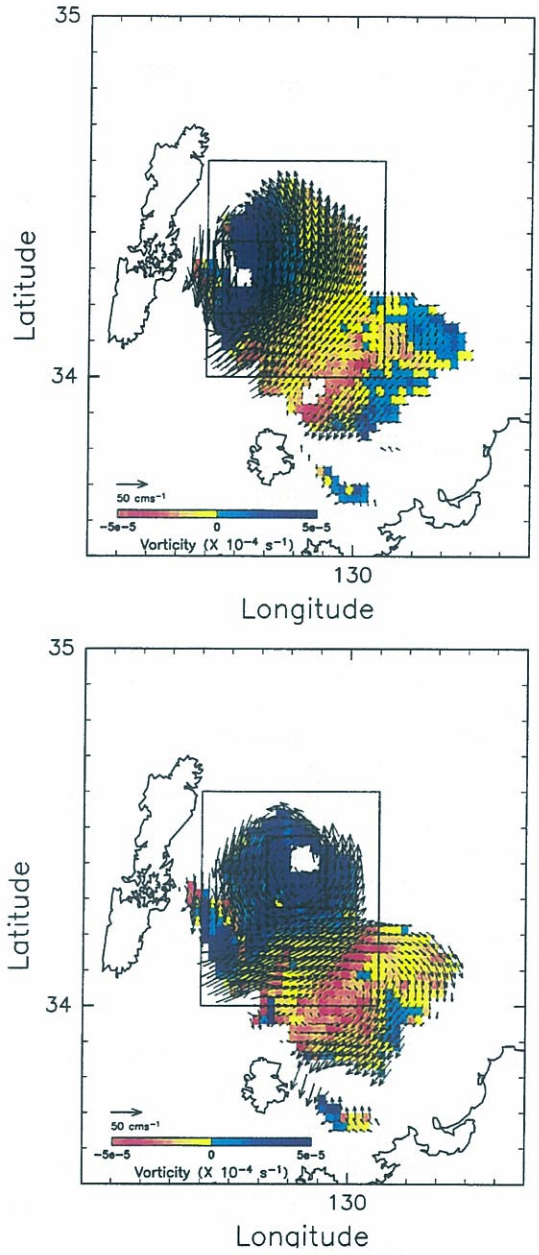

Fig. 1　Example of anti-clockwise eddy formed in the eastern channel of the Tshushima Strait. Upper and lower panels show velocity (arrow) and vorticity (color) fields on Oct. 3rd and 5th of 2005, respectively. Rectangles represent areas used to calculate eddy index (section 3.).

2.　解析資料

2.1　海洋レーダー

本研究では、対馬海峡に設置された海洋レーダー (Fig. 3) のうち、東水道を計測している 5 基 (C1~C3、N1、N2) を使用した。本海洋レーダーシステムの詳細については、例えば奥野・吉川ら (2004)[7] を参照されたい。本研究では、潮流の影響や計測誤差を除くため、まず各レーダー局が一時間毎に算出する視線流速を日平均し、東西・南北幅 0.025 度の格子点上に線形内挿した。日平均流速ベクトルを、二つ以上の視線流速が得られた格子点上で算出し、さらに格子点上の流速ベクトルから、日平均渦度を算出した。解析にはこの日平均渦度を主に用いた。解析期間は C3 局が稼働開始した 2003 年 7 月から 2006 年 12 月までである。

2.2　潮位計

2004 年 10 月に壱岐に設置した潮位計から得られる潮位データと、海上保安庁海洋情報部が公開している厳原の潮位データを解析に用いた (Fig. 3)。前者は 2 分毎に、後者は 1 時間毎にデータがあるが、どちらも日平均して解析に用いた。ただし後述するように、厳原の潮位は一時間毎のデータも一部用いた。なお壱岐のデータは 2004 年 10 月から 2006 年 12 月まで、厳原のデータは 2003 年 7 月から 2006 年 12 月までを解析に用いた。

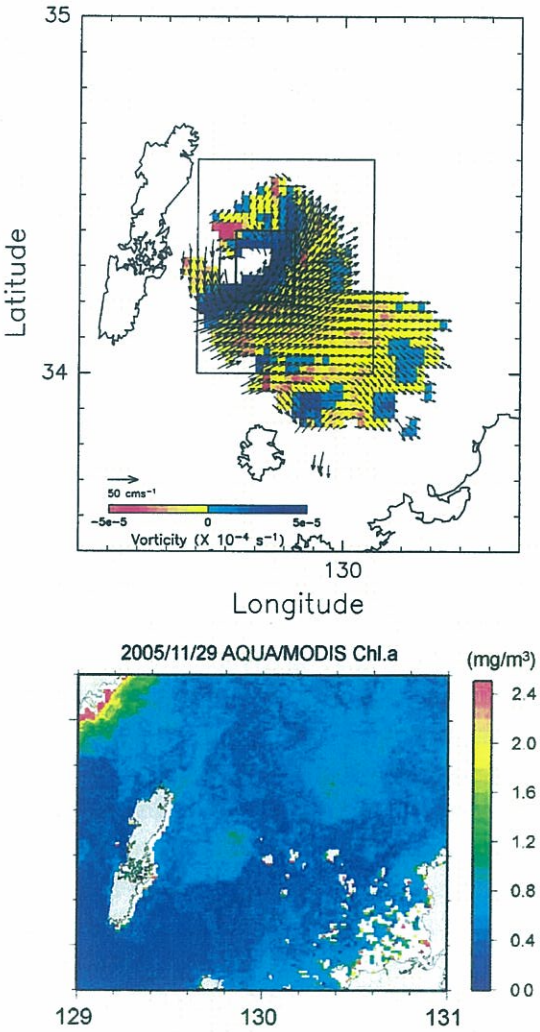

Fig. 2　Upper: Surface velocity and vorticity measured with HF radar on Nov. 27th of 2005. Lower: Surface chlorophyll a measured from MODIS on Nov. 29th, 2005.

2.3 ADCP

2006 年 7 月から 2007 年 7 月まで、対馬海峡東水道の中央部（Fig. 3）に RDI 社製 ADCP（Workhorse 300kHz）を設置し、水平流速を深さ 2m 毎に計測した。この海域は底引き網を用いた漁業活動が活発であるため、TRBM(Trawl Resistant Bottom Mount) に ADCP を格納して設置し、底引き網対策とした。ADCP の計測時間間隔は 10 分であるが、解析には 24 時間平均を使用した。

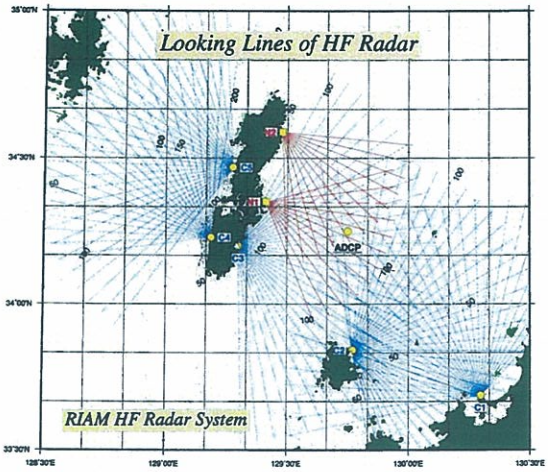

Fig. 3 Location of HF radar sites (C1 ~ C5, N1 and N2). Looking lines and range coverage of each radar are drawn by lines. Yellow circle represents ADCP deployment position. Triangles represent sea level station at Iki and Izuhara.

3. 渦の出現位置と出現周期

Fig. 1 に示すような対馬渦の出現位置や出現周期を定量評価し、さらにその発生要因を明らかにするため、渦の指標を以下のように定義した。まず東西南北幅 20 分の矩形領域における渦度の平均値を「平均渦度」とした。この「平均渦度」を北緯 34.0 度～北緯 34.6 度、東経 129.5 度～東経 130.1 度の矩形領域内の各地点で日毎に算出し、その最大値をその日の渦指標とした。このように東西南北幅 20 分の領域での平均渦度を採用したのは、計測誤差の影響を小さくするためであり、また最大値を探す範囲を限定したのは、極めて稀であるが、九州沿岸に別の要因で形成されると思われる渦が見られる場合があるためである。次に渦指標がある閾値以上であれば渦と認定した。閾値は流速ベクトルや渦度の大きさと渦指標を見比べ、筆者が主観的に設定した。また渦指標が閾値を超えた時、その渦指標を算出した 20 分幅の矩形領域の中心位置を渦の中心位置とした。

渦は連続して発生することがあり。その場合渦指標は連続して閾値を超えていても、その指標は異なる渦を表している場合があった。そこで渦の前日と当日の渦の中心位置間の距離に閾値を儲け、この距離が閾値以上であれば別の渦と判断した。閾値は、南西方向であれば 15km、それ以外の方向であれば 30km とした。南西方向のみ閾値を小さくしたのは、前述のように渦はおおむね領域南西付近から発生し、北東方向に移動するためである。

まず渦の出現位置の空間分布を調べた。Fig. 4 には、渦指標に基づいて認定された渦の全ての中心位置と、そのうち最初に渦と認定された位置を頻度表示したものである。色がより濃い程頻度が高いことを示す。この図から、渦の多くは解析領域南西部の厳原沖で初めて観測され、その後

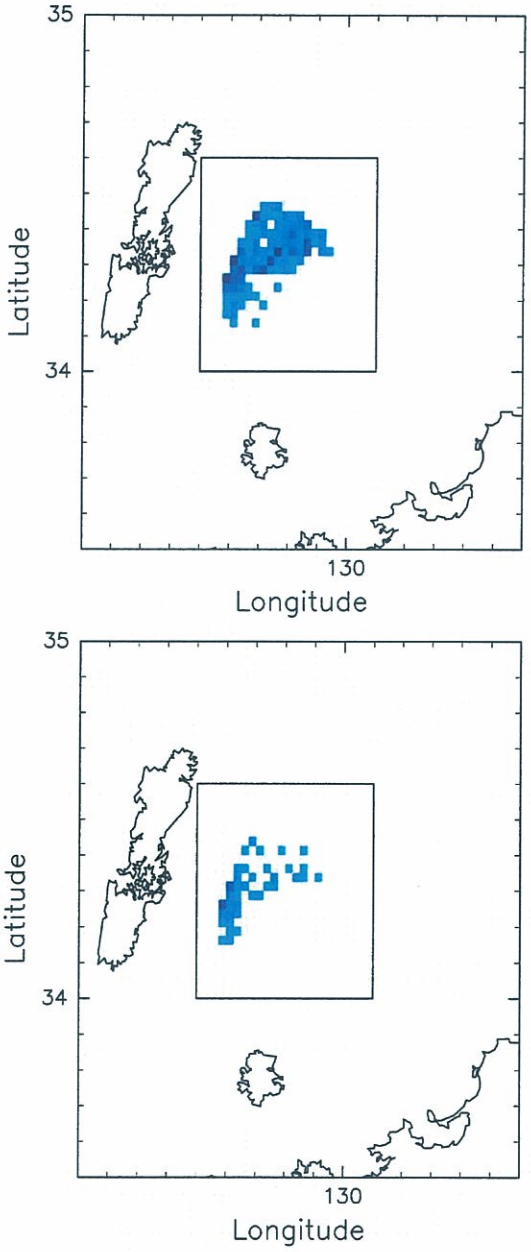

Fig. 4 Frequency distribution of eddy location. Upper: frequency of all location. Lower: frequency of initial location, at which eddy begins to be observed.

北東方向に移流されてゆくことがわかる。また多くの渦は徐々に成長しながら北東方向に移流する。これらの結果は、本研究で解析している渦が、対馬暖流が対馬の島陰に作る剥離渦であることを強く示唆する。

次に渦の出現時期を調べた。Fig. 5 に渦指標の時系列を示す。実線が渦指標の時系列、破線は 30 日の移動平均値である。横の点線は、先ほど述べた渦発生の閾値で、渦指標がこの値以上であれば、渦と認定する。また前述のように渦指標が連続して閾値を超えていても、その閾値に該当する渦が代わっている場合がある。そのため、一つの渦の存在期間を赤または青で示し、渦が代わる毎に色を変えて示した。また、縦の点線は渦の指標値が閾値を超えてから下回るまでの中で最も指標値が高い日を示す。

まず渦指標は 6 月 ~11 月にのみ高く、渦の発生に季節変動があることが分かる。また、指標値が閾値を超える期間で最大となる間隔、つまり渦頻発期の間隔は、およそ 10 数日毎であることもわかる。さらに一つ一つの渦の発生は、数日周期で生じている様子が見て取れる。

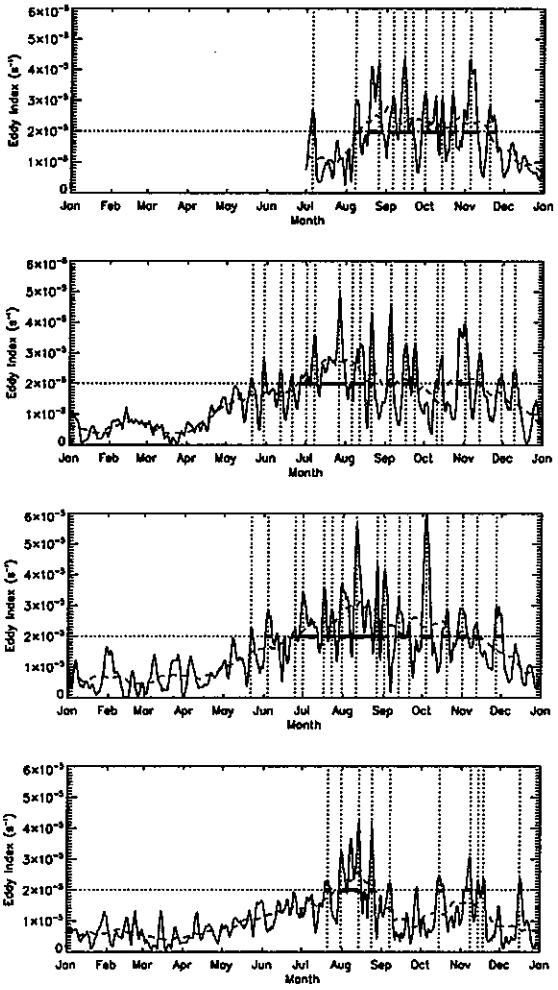

Fig. 5　Time series of the eddy index from 2003 to 2006 (from upper to lower panel).

これらの渦発生周期を定量評価するため、渦の出現間隔の頻度分布を調べた（Fig. 6）。出現間隔とは、渦が観測海域に出現してから次の渦が出現するまで期間である。その結果 4~6 日、10~12 日、30 日以上において、出現間隔の頻度が高かったことが分かった。4~6 日は一つ一つの渦の発生周期、10~12 日は渦頻発期の間隔、30 日以上は渦発生の季節変化に対応する。

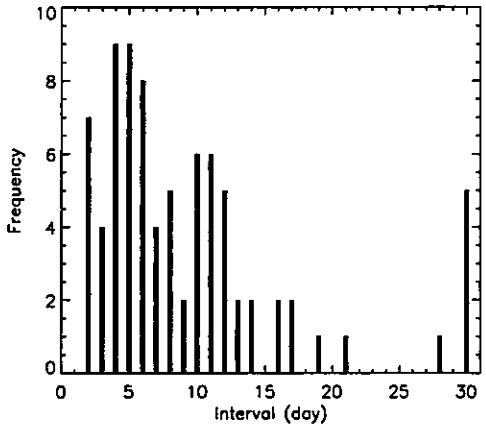

Fig. 6　Frequency distribution of the interval of eddy generation.

4.　議論

本節では、前節で明かとなった頻度の高い渦の出現周期を生む機構を考察する。まず対馬渦は、出現場所から対馬の島影に形成される剥離渦と考えられるが、その一つ一つの渦の発生周期 4~6 日が、剥離渦発生の固有周期に対応するかどうか確認する。円柱物体の後流には、レイノルズ数が数 10~100 前後の時にカルマン渦が発生し、その時ストローハル数は 0.2 程度となることが知られている。4~6 日の発生周期と対馬暖流のおよその流速（0.2~0.5 ms^{-1}）および対馬暖流を横切る方向の対馬の幅（約 30 km）を用いてストローハル数を計算すると 0.12~0.42 であり、0.2 に近い。レイノルズ数も先行研究で用いられている粘性係数値（100~200 m^2s^{-1}）を用いると、およそ 30~150 となり、カルマン渦の発生条件と同程度に収まる。これらの結果は、4~6 日の発生周期は、平均流（対馬暖流）の作る剥離渦の固有発生周期と言える。

対馬渦が剥離渦とすると、その発生にはまず平均流の強さが支配的であり、従って渦頻発期の間隔 10~12 日は対馬暖流の強弱に影響を受けていると予想される。そこで、対馬暖流の流速の指針となる、壱岐と厳原の日平均潮位差の時系列を調べた。Fig. 7 には渦が最も良く現れた 2005 年における壱岐・厳原の潮位差の時系列を示す。図中縦の点線が、渦の指標値が閾値を超えてから下回るまでの中で最

も指標値が高い日を表し、およそ 10 数日の発生周期に対応する。まず 6~11 月に着目すると、渦指標のピークと潮位差のピークがある程度一致していることが分かる。これより渦の発生が対馬暖流の流速変動と対応している様子がみられる。しかし、渦指標のピークと潮位差のピークが一致しない場合もある。Fig. 7 には毎時の厳原の潮位データも合わせて示すが、これらの日のいくつかは、大潮の日と一致している場合も多い。この結果は、潮流の大小が剥離渦の発生に影響を及ぼしていることを示唆する。潮流（振動流）が剥離渦の発生に影響を及ぼすという報告例は無いが、筆者らの数値実験（吉川 2005[8]）ではそれを支持する結果が得られている。以上から 10~12 日の渦の発生周期は、流速と潮汐の変動が引き起こしていると考えられる。

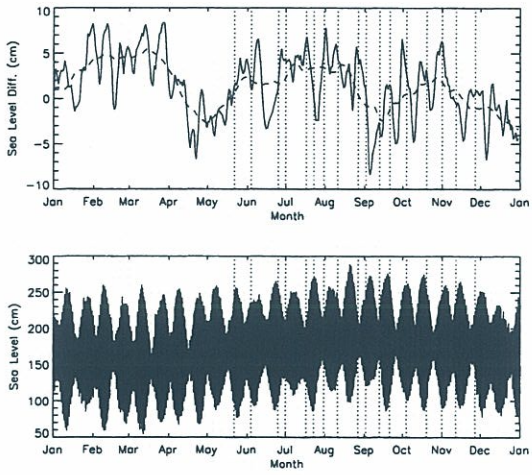

Fig. 7　Time series of sea level difference between Iki and Izuhara (upper panel) and sea level at Izuhara (lower panel) of 2005.

また、30 日以上の発生周期は、6~11 月に渦が頻発し、12~5 月には見られないという季節変動に対応する。興味深いことに、対馬暖流の流速の指標となる壱岐・厳原間の潮位差は、12~5 月と 6~11 月で顕著な違いは見られない。つまり、流速がそれほど季節変化していない。にも関わらず、渦の発生に顕著な季節変化が起きている。この原因は、おそらく密度成層の季節変化に伴う、流れの鉛直構造の変化にあると考えられる。Fig. 8 は対馬海峡東水道中央部（Fig. 3）に約一年間設置した ADCP によって計測された、水平流速の鉛直分布の季節変化を示す。渦が発生しない 12 月から 5 月は順圧的な構造、渦が発生する 6 月から 11 月までは傾圧的な構造をしていることがわかる。流れの鉛直構造が傾圧的な場合、上層の流れは海底地形の制約を受けないため渦を形成し易いが、順圧的な場合には海底摩擦の影響が大きくなるなどの影響により、渦の発生が抑制されているものと考えられる。

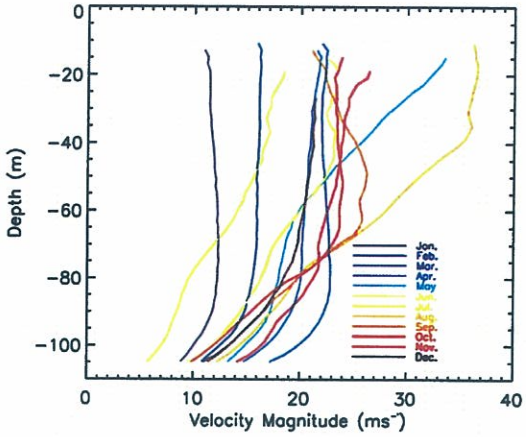

Fig. 8　Monthly vertical profile of velocity magnitude measured with ADCP deployed in an eastern channel of the Tsushima Strait (Fig. 3).

5.　結言

本研究では、対馬海峡に設置した海洋レーダーにより観測された東水道に発生する反時計回り渦（対馬渦）の出現位置や出現頻度の詳細を明らかにし、その発生要因を考察した。渦の出現位置は、主に対馬海峡主軸左側にあたる北緯 34.15 度～北緯 34.35 度、東経 129.55 度～東経 129.75 度の海域であることがわかった。また渦の漂流方向が対馬暖流下流方向にあたる北東方向であることもわかった。このことから、対馬海峡東水道に発生する渦は、対馬暖流が対馬島陰に作る剥離渦であることが強く示唆された。渦の変動周期は、4～6 日周期、10～12 日周期、30 日以上の周期が卓越することが分かった。4～6 日周期は、それに対応するストローハル数が 0.2 に近いことから、対馬暖流の作る剥離渦の固有発生周期と考えられる。10～12 日周期は、対馬暖流の流速変動と大潮小潮の潮汐変動に影響を受けていることが示唆された。30 日以上の周期は、対馬暖流の鉛直構造の季節変化に伴う、海底地形の影響の季節変化が主な要因と考えられた。

以上のように、渦指標を作成することで渦の出現位置や発生頻度を明らかにし、発生要因を示唆することができた。今後は、数値実験などを用いた詳細な検証が必要と考える。また、最初に述べたように、渦はクロロフィル濃度と相関関係があると思われる。このような関係は、対馬海峡だけに限られた現象では無く他の海域でも示唆されているが、対馬海峡で展開されている海洋監視体制はそれらを定量的に評価することを可能にする。今後は、本研究で明らかになった渦発生域で集中的な観測を行い、地形性剥離渦と海洋低次生態系収支との関係を明らかにする予定である。

謝辞

長崎大学水産学部実習船長崎丸には、ADCP の設置・回収にご協力頂きました。水産大学校の鬼塚博士および名古屋大学の森本博士には、クロロフィル濃度に関する情報を多く頂きました。また海上保安庁海洋情報部には、潮位データを提供していただきました。記して感謝致します。

参考文献

1) Yoshikawa, Y., T. Matsuno, K. Marubayashi, and K. Fukudome: A surface velocity spiral observed with ADCP and HF radar in the Tsushima Strait, *J. Geophys. Res.*, 112, C06022, doi:10.1029/2006JC003625, 2007.

2) 奥野 章, 吉川 裕, 増田 章, 丸林 賢次, 石橋 道芳: 短波レーダーにより観測された対馬海峡の潮流, 九州大学大学院総合理工学報告, 第 27 巻, 第 1 号, 9-18 頁, 2005.

3) Teague, W. J., P. A. Hwang, G. A. Jacobs, J. W. Book, and H. T. Perkins: Transport variability across Korea/Tsushima Strait and the Tsushima Island wake, *Cont. Shelf Res. II*, *52*, 1784-1801, 2005.

4) Takikawa, T., J. H. Yoon, and K. D. Cho: The Tsushima Warm Current through Tsushima Straits estimated from Ferryboat ADCP data, *J. Phys, Oceanogr.*, *35*, 1154-1168, 2005.

5) 鬼塚 剛, 森本 昭彦, 滝川 哲太郎, 渡邊 敦, 吉川 裕, 柳 哲雄: 対馬海峡東水道における反時計回り渦とクロロフィル a 濃度の関係, 2007 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 69 頁, 2007.

6) Meskhidze, N. and A. Nenes: Phytoplankton and Cloudiness in the Southern Ocean, Science, vol.314, p.1419. doi:10.1126/science.1131779, 2007

7) 奥野 章, 吉川 裕, 増田 章, 丸林 賢次, 石橋 道芳: 対馬海峡表層海況監視海洋レーダーシステム, 九州大学応用力学研究所所報, 第 126 号, 57-67 頁,2004.

8) 吉川 裕: 対馬海峡の海流変動: 第 54 回理論応用力学講演会講演論文集, 21-24 頁, 2005.