

対馬海峡を通過する対馬暖流とその流量

滝川, 哲太郎
水産大学校

尹, 宗煥
九州大学 : 名誉教授

福留, 研一
九州大学応用力学研究所

広瀬, 直毅
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/27148>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 143, pp.135-140, 2012-09. 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対馬暖流とその流量

滝川 哲太郎*¹ 尹 宗煥*² 福留 研一*³ 広瀬 直毅*³

(2012 年 7 月 31 日受理)

The Tsushima Warm Current and its volume transport through Tsushima Straits

Tetsutaro TAKIKAWA, Jong-Hwan YOON, Ken-ichi FUKUDOME, Naoki HIROSE

E-mail of corresponding author: tetu@fish-u.ac.jp

Abstract

Characteristics of the current structure and seasonal variations of the Tsushima Warm Current through the Tsushima Straits are estimated using acoustic Doppler current profiler (ADCP) data from ferry based monitoring during about 10 years. In this paper, the features and mechanisms of current structures and volume transports are discussed, referring to recent and previous studies. The volume transport through the Tsushima Straits, averaged from February 1997 to February 2007, is 2.65 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) and those of the eastern and western channels are 1.20 and 1.45 Sv, respectively. The transport has strong seasonal variations with two maxima from spring to autumn (double peaks). Inflow transport through the Tsushima Straits into the Japan Sea is consistent with the outflow transport through the Tsugaru and Soya Straits of the results by other studies.

Key words : *Tsushima Warm Current, Tsushima Straits, Volume transport through straits in the East Asian marginal sea*

1. はじめに

対馬暖流は東シナ海から対馬海峡を経て日本海へ流入し、その一部を津軽海峡から太平洋へ、残りを宗谷海峡からオホーツク海へ流出している。対馬暖流の日本海への入口にあたる対馬海峡では、博多-釜山間往復フェリーを利用した対馬暖流のモニタリングが行われている^{1, 2, 3, 4)}。このモニタリングは、九州大学応用力学研究所を主体として、韓国釜慶大学校 (1997~2004)、韓国国立水産科学院 (2005~2010)、韓国海洋大学校 (2011~) との共同研究として、博多-釜山間往復フェリー「かめりあ」の船底に設置した acoustic Doppler current profiler (ADCP) を用い、対馬海峡における対馬暖流の長期モニタリングを 1997 年 2 月から開始し、現在もモニタリングを継続している。

本論では、10 年間の ADCP データを用い、対馬海峡を通過する対馬暖流の流動構造と流量の季節変動について記す。さらに、対馬暖流の上流域にあたる東シナ海や日本海の出口にあたる津軽海峡と宗谷海峡の流量と比較し、その収支についてまとめる。また、関連文献

を引用しつつ、本モニタリングデータを用いた研究の現状と今後の方向性について議論する。

2. 対馬海峡通過流のモニタリング

博多-釜山間往復フェリー「かめりあ」の船底に設置した ADCP は、18 m 深から 8 m 間隔で流速を計測している。フェリー航路上の最大水深は、約 220 m と浅く、対地船速を得ることができるため、精度良い流速データを得ることができる。

Fig. 1 に示されるように、フェリーの航路は、博多港と釜山港を結び、対馬の東側を通過する。対馬から博多側 (北緯 34.75 度以南) を東水道、釜山側 (北緯 34.75 度以北) を西水道と呼ぶ。2004 年の 2 月まで、フェリー「かめりあ」は、博多-釜山間を 1 週間に 3 往復していた。2004 年の 7 月から、新船「ニューかめりあ」の就航に伴い、この航路を 1 週間に 6 往復しており、観測頻度が以前と比べ 2 倍となった。

この ADCP モニタリングの目的は、対馬海峡を通過する対馬暖流の流動構造・流量を明らかにすることである。しかしながら、対馬海峡のような浅海域・沿岸域では、

*1 水産大学校

*2 九州大学名誉教授

*3 九州大学応用力学研究所

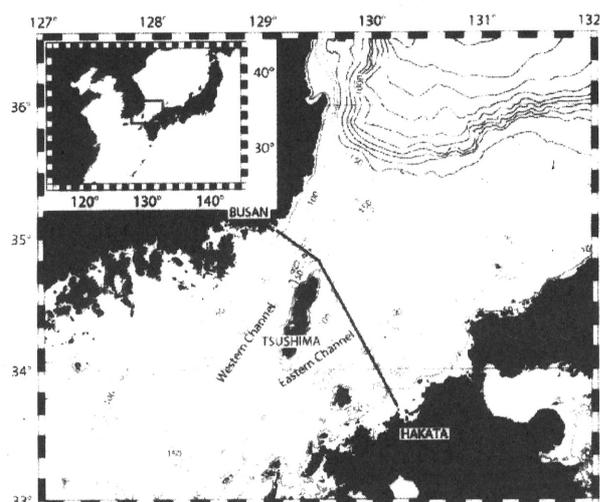


Fig.1 The cruise line of the ferry *Camellia* and *New Camellia* in the Tsushima Straits. Black and gray contour lines show bottom topography at 200 and 50 m intervals, respectively.

潮流成分が卓越しており、数日以上のタイムスケールの流速変動を把握するためには、観測で得られた流速データから潮流成分を除去する必要がある。ADCP による観測間隔が約 1 日 (または半日) と疎のため、観測された流速データには、潮流成分によるエイリアジングエラーが含まれる。しかしながら、フェリーの運航時間が、正確に一定ではなく、ばらつきを持つこと、それぞれの分潮を分解するのに十分な期間の観測を行っていることから、このエイリアジングエラーを回避し、観測された流速データから潮流成分を分解することができる⁵⁾。Takikawa et al. (2003)¹⁾ は、ADCP によって観測された流速を最小 2 乗法を用い 10 分潮 ($Q_1, O_1, P_1, K_1, N_2, M_2, S_2, K_2, MSK, MF$) まで調和分解し、これらの潮流成分を ADCP データから除去することに成功した⁶⁾。その後、Ostrovskii et al. (2009)⁷⁾ によって、52 分潮までの分解と M_2 の季節変化を考慮した方法に拡張された。

この ADCP モニタリングによって、博多-釜山間の鉛直断面全域をカバーする欠測の少ない流速データベースが作成され、対馬暖流の流動構造及び時空間変動が明らかとなった²⁻⁴⁾。ここでは、1997 年の 2 月から 2007 年 2 月までの月平均データを用いる。偶数月の測線に直交する流速成分の鉛直断面図を Fig. 2 に示す。この結果、以下に示す特徴的な対馬海峡における対馬暖流の流動構造とその季節変動が明らかとなった。

一 観測期間を通して、東西両水道中央部に強い北東流が存在する。両水道ともに、これらの流れは夏季から秋季にかけて強くなり、特に韓国沿岸における北東流増加が顕著である。

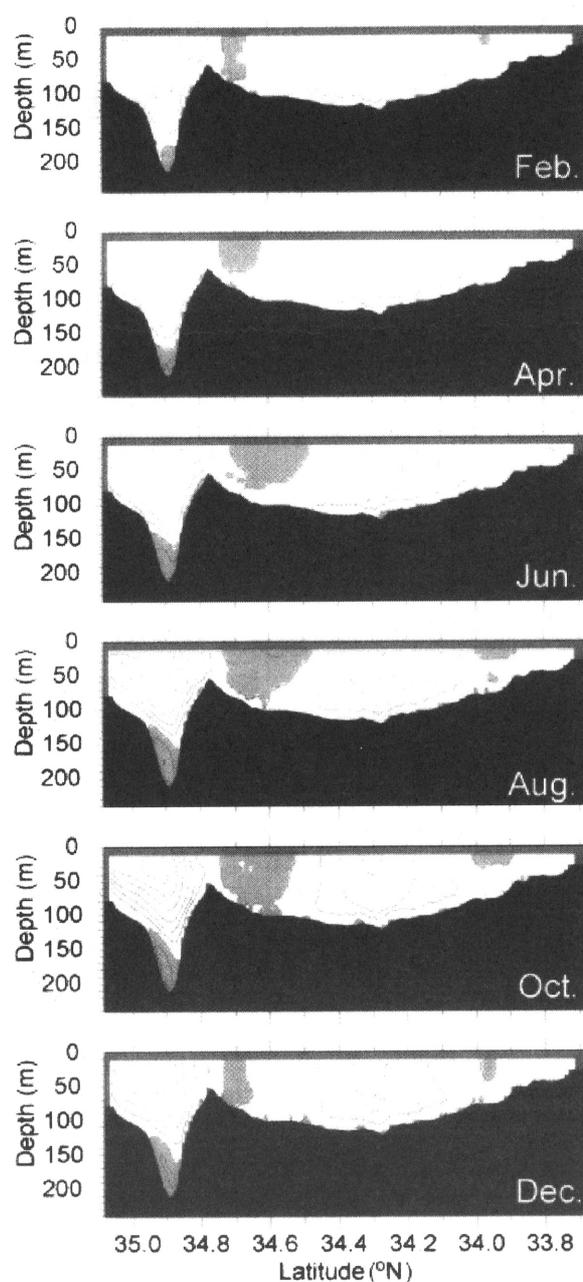


Fig.2 Vertical section of the climatological monthly mean velocities normal to the observation section estimated from *Camellia* ADCP data. Positive velocities are toward the Japan Sea. White (shaded) regions indicate positive (negative) values. The contour interval is 10 cm s^{-1} .

- 一 対馬・壱岐の両島影には、南西向き反流を形成し、比較的流れが弱い。対馬東部の反流は、傾圧性の高い夏季に発達する。
- 一 西水道の 150 m 以深には、南西向き反流が夏季から冬季にかけて発達する。

対馬東部の反流域には、夏季から秋季にかけて、水平スケール 50 km 程度の反時計回り（低気圧性）渦が頻繁に観測される^{8, 9, 10)}。フェリー ADCP データの解析によると、この反時計回り渦は、東水道通過流と対馬間の水平流速シアに伴う順圧不安定によって形成されることが考えられている¹⁰⁾。渦の発生周期は、約 5~8 日とカルマン渦列の周期と一致し、渦の強弱は 13 日程度で変動する。同様の特徴は、HF（短波海洋）レーダによる表層流の時空間変動にも現れている¹¹⁾。

西水道底部の南西向き反流は、韓国側の斜面に現れ（Fig. 2）、海底地形の影響を受けて斜面に補足されていることが示唆される、この反流域では、日本海から対馬海峡への冷水の侵入が報告されている^{12, 13, 14)}。

2. 対馬海峡通過流量

対馬海峡を横断する ADCP モニタリングによって、対馬海峡を通過する対馬暖流の流量の時間変動が明らかとなった^{2, 4)}。1997年2月から2007年2月までの月平均流量を Fig. 3 に示す。Fig. 4 は、この 10 年間の流量データから求めた月平均流量の気候値である。対馬海峡を通過する平均流量は 2.65 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、東水道: 1.20 Sv、西水道: 1.45 Sv) であった。流量は大きく季節変動し、その変動幅は 1.09 Sv（東水道: 0.40 Sv、西水道: 0.81 Sv）であった。

年による差異はあるが、春季から秋季に二重極大が現れる。Moon et al. (2009)¹⁵⁾ は、主に台風に伴う北東風によって、夏季の流量極小を説明している。この流量極小は、Yi (1970)¹⁶⁾ によって、水位差から見積もられた西水道の表層流の季節変動パターンにも現れている。

冬季の流量は、ほぼ毎年 1 月に最小となる。Tsujino et al. (2008)¹⁷⁾ の数値シミュレーション結果によると、オホーツク海に吹く風の海岸線に沿う成分が、日本海の出口の一つである宗谷海峡の海面高度偏差に寄与している。このため、北寄りの冬季季節風によって、宗谷海峡の海面高度が上昇すれば、対馬暖流の流量が減少する。

博多・厳原・釜山の沿岸潮位を用い、これらの水位差から、対馬海峡通過流量を推定することが可能となった^{18, 19)}。この推定式には、流れの傾圧構造の典型的な季節変化をパラメータとして組み込んでいる。西村ら (2008)²⁰⁾ は、順圧流量の季節変動パターンも組み込み、この推定式を改良した。Takikawa and Yoon (2005)¹⁹⁾ と比べ、西村ら (2008)²⁰⁾ の推定流量は、経年変動幅が小さく見積もられることに注意する必要がある。

3. 各海峡の通過流量

対馬海峡の海底に ADCP を設置して、対馬暖流の

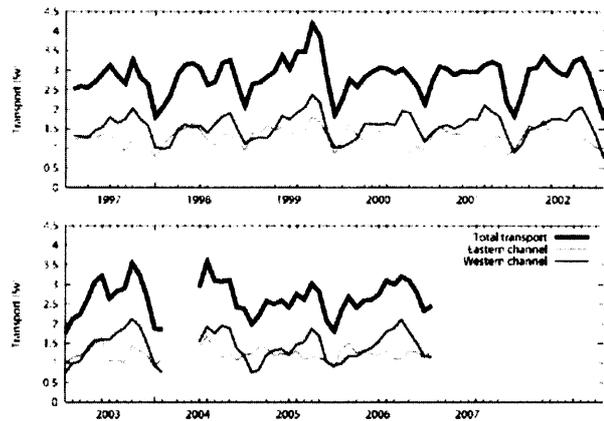


Fig. 3 Monthly averaged total volume transport through the Tsushima Straits into the Japan Sea, and transports through the eastern and western channels.

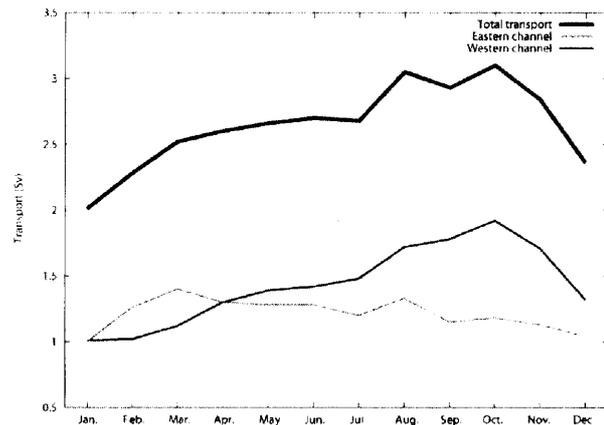


Fig. 4 Climatological monthly mean total volume transport through the Tsushima Straits into the Japan Sea averaged for 10 years, and transports through the western and eastern channels.

観測が、U.S. naval research laboratory を主体として行われていた²¹⁾。この観測は、対馬海峡通過流量の多い 1999 年を中心に行われ（観測期間: 1999 年 5 月~2000 年 3 月）、流量は 2.65 Sv と見積もられている。この期間のフェリー「かめりあ」による流量は、3.09 Sv であった。両者の差は、釜山付近の北東流が強化される夏季から秋季に大きくなり、フェリー観測と比べ、海底設置による観測では、沿岸付近の流速を観測できないためと考えられる。

Isobe (2008)²²⁾ は、台湾海峡と対馬海峡通過流量の収支から、黒潮の東シナ海大陸棚への流入量を見積もった。これまでの台湾海峡を東シナ海へ通過する流量

の統計をとると、平均流量は 1.2 Sv となり、初夏に流量が最大となり、冬季の流量が殆どなくなる。対馬海峡通過流の季節変動を考慮すると、10~1 月頃の対馬海峡通過流の大部分は黒潮域から流入しており、6~7 月頃には、台湾海峡を通過した台湾暖流が対馬海峡を通過する。

対馬暖流の日本海の出口にあたる津軽海峡²³⁾と宗谷海峡^{24, 25)}でも、流量の見積が行われている。Ito et al. (2003)²³⁾は、フェリー「びるご」の船底に ADCP を設置し、1999 年 11 月から 2000 年 3 月までの流量を見積もっており、現在も、このモニタリングを継続している。この期間の津軽海峡通過流量は 1.5 Sv となる(最大: 11 月、最小: 1, 3 月)。Fukamachi et al. (2008)²⁴⁾は、海洋表層流の時空間変化を計測できる HF レーダと海底設置 ADCP を用い、2004 年 6 月から 2005 年 5 月までの宗谷海峡通過流量を見積もっており、平均流量は 0.94~1.04 Sv であった。その季節変動は、対馬海峡通過流量と類似しており、冬季に最小、春季から秋季に 2 つの極大を持つ。ただし、Fukamachi et al. (2010)²⁵⁾によって見積もられた 2006 年 9 月から 2008 年 7 月までの平均流量は、0.62~0.67 Sv と小さい。Fukamachi et al. (2008)²³⁾との ADCP 観測点の相違も考えられるが、対馬暖流の経年変動の可能性も残されている。

日本海の入口の流量(対馬海峡: 2.7 Sv⁴⁾)と出口の流量(津軽海峡: 1.5 Sv²³⁾, 宗谷海峡: 1.0 Sv²⁴⁾)の収支は、比較的良い一致を示す。これらの多少の差は、観測期間の相違が考えられる。特に、津軽海峡では、年平均流量ではなく、流量の少ないと考えられる冬季を中心とした観測期間であることに注意する必要がある。

3. おわりに

10 年間の対馬海峡横断フェリーによる ADCP データから、航路上の対馬暖流の鉛直構造とその季節変化を明らかにした⁴⁾。このフェリーは、博多から釜山まで、対馬海峡を完全に横断することから、対馬海峡通過流量を見積もることができた。この 10 年間の ADCP 観測結果は、データセットにまとめられている²⁶⁾。

フェリー「かめりあ」では、ADCP 観測だけではなく、表層の水温・塩分・クロロフィル・濁度をモニターしている²⁷⁾。これらのデータと ADCP データを組み合わせれば、中国大陸からの淡水輸送過程や海洋生態系に関する研究が進歩するであろう。

日本海の入口(対馬海峡)と出口(津軽海峡と宗谷海峡)の流量の収支は、よい一致を示し、各海峡でのモニタリングが成功していることを裏付けている。日本海の各海峡での流出量の収支については、Na et al. (2008)²⁸⁾によって、まとめられている。対馬暖流の上流域に目を向けると、対馬暖流の起源(台湾暖流や黒潮起原水)についての研究も進んでいる²²⁾。今後、台湾

海峡でのフェリー ADCP モニタリングの結果から、さらなる理解が深まるであろう²⁹⁾。

フェリー ADCP モニタリングによって得られた結果は、太平洋循環モデルの検証や、日本海循環モデルやその予報モデルの境界条件として利用されている^{30, 31, 32, 33, 34)}。このモニタリングによって、対馬暖流の変動メカニズムの解明が飛躍的に進み、且つ日本海や東シナ海の研究に貢献している。

対馬暖流の流量は、日本海側の冬季の降水量と関係していると報告されている³⁵⁾。また、近年、東シナ海から輸送される大型クラゲの日本海沿岸への漁業被害が問題となっている³⁶⁾。このように、対馬暖流の知見が、海洋の分野だけでなく、今後、気象や水産分野への応用に役立つことを期待したい。

謝 辞

対馬海峡における対馬暖流の研究の進歩は、口韓の研究者の協力が重要でした。また、本観測結果を多くの方に引用して頂き、励みとなりました。この場をかりて、本研究に携わった方々に感謝いたします。最後に、長期にわたり対馬海峡におけるモニタリングが行えるのは、カメラライン株式会社の社員及び船員の皆様のご理解とご協力の賜であります。心から感謝いたします。

参考文献

- 1) T. Takikawa, J.-H. Yoon and K.-D. Cho, Tidal currents in the Tsushima Straits estimated from ADCP data by ferryboat. *Journal of Oceanography*, Vol. 59, (2003) 37-47
- 2) T. Takikawa, J.-H. Yoon and K.-D. Cho, The Tsushima Warm Current through Tsushima Straits estimated from ferryboat ADCP data. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 35, (2005) 1154-1168
- 3) 滝川哲太郎, 尹宗煥, 福留研一, 東アジア縁辺海の環境変動に対してフェリー・モニタリングが果たす役割. *沿岸海洋研究*, Vol. 44, (2006) 25-32
- 4) K. Fukudome, J.-H. Yoon, A. Ostrovskii, T. Takikawa and I.-S. Han, Seasonal volume transport variation in the Tsushima Warm Current through the Tsushima Straits from 10 years of ADCP observations. *Journal of Oceanography*, Vol. 66, (2010) 539-551
- 5) 市川香, 繰り返し観測時刻にゆらぎのある場合のエイリアシングについて. *海の研究*, Vol. 13, (2004) 565-573

- 6) 滝川哲太郎, 酒井健一, 福留研一, 森本昭彦, 鬼塚剛, 渡邊敦, 尹宗煥, 富賀見清彦, 鎌野忠, 秦一浩, 対馬海峡フェリー航路に沿った航走ADCP観測データからの潮流成分除去. 沿岸海洋研究, Vol. 45, (2007) 61-68
- 7) A. G. Ostrovskii, K. Fukudome, J.-H. Yoon and T. Takikawa, Variability of the volume transport through the Korea/Tsushima Strait as inferred from the shipborne acoustic Doppler current profiler observations in 1997-2007. *Oceanology*, Vol. 49, (2009) 338-349
- 8) T. Takikawa, G. Onitsuka, K. Fukudome, J.-H. Yoon, A. Morimoto, M. Moku and A. Watanabe, Spatial and temporal variation of a cyclonic eddy detected downstream of the Tsushima Islands in November 2007. *Estuaries and Coasts*, Vol. 34, (2011) 775-784
- 9) Y. Yoshikawa, A. Masuda, K. Marubayashi and M. Ishibashi, Seasonal Variations of the surface currents in the Tsushima Strait. *Journal of Oceanography*, Vol. 66, (2010) 223-232
- 10) T. Takikawa, G. Onitsuka, K. Fukudome, J.-H. Yoon and A. Morimoto, Seasonal variation of counterclockwise eddies downstream of the Tsushima Islands. *Progress in Oceanography* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2012.04.006>
- 11) 中園隆司, 吉川裕, 増田章, 丸林賢二, 石橋道芳, 対馬海峡東水道に見られる反時計回り渦の変動特性. 九州大学応用力学研究所所報, Vol. 134, (2008) 47-52
- 12) D.-B. Lim and S.-D. Chang, On the cold water mass in the Korea Strait. *Journal of the Oceanographical Society of Korea*, Vol. 4, (1969) 71-82
- 13) Y.-K. Cho and K. Kim, Structure of the Korea Strait bottom cold water and its seasonal variation in 1991. *Continental Shelf Research*, Vol. 18, (1998) 791-804
- 14) D. R. Johnson and W. J. Teague, Observations of the Korea Strait bottom cold water. *Continental Shelf Research*, Vol. 22, (2002) 821-831
- 15) J.-H. Moon, N. Hirose, J.-H. Yoon and I.-C. Pang, Effect of the along-strait wind on the volume transport through the Tsushima/Korea Strait in September. *Journal of Oceanography*, Vol. 65, (2009) 17-29
- 16) S.-U. Yi, Variations of oceanic condition and mean sea level in the Korea Strait. (1970) p. 125-141. In *The Kuroshio (A Symposium on the Japan Current)*, ed. by J. C. Marr, East west Center Press.
- 17) H. Tsujino, H. Nakano and T. Motoi, Mechanism of currents through the straits of the Japan Sea: Mean state and seasonal variation. Vol. 64, (2008) 141-161
- 18) Y.-J. Kim, T. Takikawa, H.-S. An and J.-H. Yoon, The seasonal and interannual variability of the volume transport through the western channel of the Korea Strait. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 39, (2004) 155-162
- 19) T. Takikawa and J. H. Yoon, Volume transport through the Tsushima Straits estimated from sea level difference. *Journal of Oceanography*, Vol. 61, (2005) 699-708
- 20) 西村和也, 広瀬直毅, 福留研一, 対馬海峡を通過する体積輸送量の長期変動推定式. 応用力学研究所所報, Vol. 135, (2008) 113-118
- 21) W. J. Teague, P. A. Hwang, G. A. Jacobs, J. W. Book and H. T. Perkins, Transport variability across the Korea/Tsushima Strait and the Tsushima Island wake. *Deep-Sea Research II*, Vol. 52, (2005) 1784-1801
- 22) A. Isobe, Recent Advances in Ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea shelves. *Journal of Oceanography*, Vol. 64, (2008) 569-584
- 23) T. Ito, O. Togawa, M. Ohnishi, Y. Isoda, T. Nakayama, S. Shima, H. Kuroda, M. Iwahashi and C. Sato, Variation of velocity and volume transport of the Tsugaru Warm Current in the winter of 1999-2000. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, (2003) 1678, doi:10.1029/2003GL017522
- 24) Y. Fukamachi, I. Tanaka, K. I. Ohshima, N. Ebuchi, G. Mizuta, H. Yoshida, S. Takayanagi and M. Wakatsuchi, Volume transport of the Soya Warm Current revealed by bottom mounted ADCP and ocean-radar measurement. *Journal of Oceanography*, Vol. 64, (2008) 385-392
- 25) Y. Fukamachi, K. I. Ohshima, N. Ebuchi, T. Bando, K. Ono and M. Sano, Volume transport in the Soya Strait during 2006-2008. *Journal of Oceanography*, Vol. 66, (2010) 685-696

- 26) Yoon, J.-H., K. Fukudome, A. Ostrovskii, T. Takikawa, Camellia ADCP dataset 2012. Research Institute for Applied Mechanics, DVD, (2012)
- 27) K. Mori, T. Matsuno, T. Senju, N. Hirose and I. S. Han, Short-term temperature and salinity variations in the Tsushima Strait in 2004: Behavior of the surface low salinity water in the strait. *Journal of Oceanography*, Vol. 65, (2009) 301-310
- 28) H. Na, Y. Isoda, K. Kim, Y. H. Kim and S. J. Lyu, Recent observations in the straits of the East/Japan Sea: A review of hydrography, currents and volume transports. *Journal of Marine Systems*, Vol. 78, (2009) 200-205
- 29) 松野健, 福留研一, 市川香, C.-T. Liu, H. W. Chen, 台湾海峡通過流量の長期モニタリング. 2012年度日本海洋学会春季大会, (2012)
- 30) H.-J. Lee, J.-H. Yoon, H. Kawamura and H. W. Kang, Comparison of RIAMOM and MOM in modeling the East Sea/Japan Sea circulation. *Ocean and Polar Research*, Vol. 25, (2003) 287-302
- 31) S.-H. You and J.-H. Yoon, Modeling of the Ryukyu current along the Pacific side of the Ryukyu Islands. *Pacific Oceanography*, Vol. 2, (2004) 44-51
- 32) N. Hirose, Least-squares estimation of bottom topography using horizontal velocity measurements in the Tsushima/Korea Straits. *Journal of Oceanography*, Vol. 61, (2005) 789-794
- 33) N. Hirose, H. Kawamura, H. J. Lee and J.-H. Yoon, Sequential forecasting of the surface and subsurface conditions in the Japan Sea. *Journal of Oceanography*, Vol. 63, (2007) 467-481
- 34) 広瀬直毅, 小林亮祐, 高山勝巳, 対馬暖流分枝説の検証—データ同化の結果—. *海と空*, Vol. 85, (2009) 1-11
- 35) N. Hirose and K. Fukudome, Monitoring the Tsushima Warm Current improves seasonal prediction of the regional snowfall. *Scientific Online Letters on Atmosphere*, Vol. 2, (2006) 61-63
- 36) 滝川哲太郎, 秦一浩, 上野俊士郎, 河村真理子, 森本昭彦, 宮地邦明, 2009年初夏, 隠岐諸島東方海域における海洋構造と大型クラゲ (*Nemopilema nomurai*) の分布. *海と空*, Vol. 86, (2010) 13-22