



Title	短波海洋レーダを用いた宗谷暖流の長期連続観測
Author(s)	江淵, 直人; 深町, 康; 大島, 慶一郎; 三寺, 史夫; 西岡, 純; 高塚, 徹; 小野, 数也; 石川, 正雄; 大坊, 孝春; 白澤, 邦男; 若土, 正暁
Citation	低温科学, 82, 17-23
Issue Date	2024-03-29
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/91851
Type	bulletin (article)
File Information	02_p017-023_LT82.pdf



[Instructions for use](#)

短波海洋レーダを用いた宗谷暖流の長期連続観測

江淵 直人^{1), 2)}, 深町 康³⁾, 大島 慶一郎^{1), 2), 3)}, 三寺 史夫²⁾,
西岡 純^{2), 3)}, 高塚 徹¹⁾, 小野 数也¹⁾, 石川 正雄¹⁾, 大坊 孝春^{1), 4)},
白澤 邦男^{1), 2)}, 若土 正暁^{1), 2)}

2023年10月17日受付, 2023年12月17日受理

北大低温研は、宗谷暖流のモニタリングを目的として、宗谷海峡域および紋別-雄武海域に5基の短波海洋レーダを設置し、2003年8月から表層流速場の連続観測を行ってきた。無線局免許の問題や機材の老朽化により、2022年3月に海洋レーダの運用は終了したが、18年7か月の貴重なデータが得られた。本稿では、この海洋レーダと得られた観測結果について概説する。

Long-term observation of the Soya Warm Current using HF ocean radars

Naoto Ebuchi^{1, 2)}, Yasushi Fukamachi³⁾, Kay I. Ohshima^{1, 2, 3)}, Humio Mitsudera²⁾,
Jun Nishioka^{2, 3)}, Toru Takatsuka¹⁾, Kazuya Ono¹⁾, Masao Ishikawa¹⁾, Takaharu Daibo^{1, 4)},
Kunio Shirasawa²⁾, Masaaki Wakatsuchi^{1, 2)}

We installed five High Frequency (HF) ocean radars at the Soya Strait and Mombetsu-Ohmu region in the Sea of Okhotsk to monitor the Soya Warm Current (SWC), which flows from the Sea of Japan to the Sea of Okhotsk through the Soya/La Perouse Strait. The ocean radars had been operated for 19 years since August 2003. In this article, we summarize results from the long-term observation of the Soya Warm Current by the HF ocean radars.

キーワード：宗谷暖流, 短波海洋レーダ, 表層流速, オホーツク海

Soya Warm Current, HF ocean radar, surface current velocity, Sea of Okhotsk

1. はじめに

宗谷暖流は、日本海を南から北へと流れる対馬暖流系の一部で、宗谷海峡を通過して日本海からオホーツク海へ高温・高塩の水を供給し、オホーツク海の海洋環境や沿岸の気候に大きな影響を与える。青田 (1975, 1984), Aota and Matsuyama (1987), Matsuyama et al. (2006) など

によって、宗谷暖流の観測結果が報告されている。しかしながら、国境の海域における政治的な問題や、活発な漁業活動、海水の存在を含む冬季の気象条件の厳しさなどによる観測の難しさから、宗谷暖流の全体像は必ずしも明らかになっていない。宗谷暖流は、順圧成分が大きな割合を占めることから、水温・塩分の鉛直構造のみから流速場を推定することは容易ではなく、流

連絡先

江淵 直人

北海道大学 低温科学研究所

〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目

Tel: 011-706-5470

Email: ebuchi@lowtem.hokudai.ac.jp

1) 北海道大学 低温科学研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University,

Sapporo, Japan

2) 北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター
Pan-Okhotsk Research Center, Institute of Low Temperature

Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

3) 北海道大学 北極域研究センター

Arctic Research Center, Hokkaido University, Sapporo, Japan

4) 逝去

Deceased

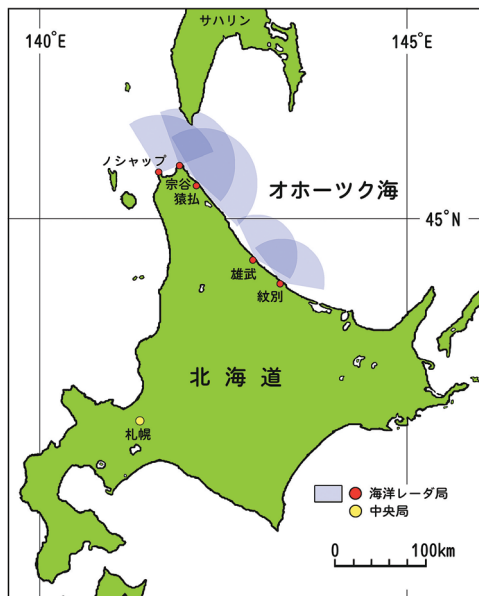


図1：北大低温研短波海洋レーダの配置図。
Figure 1: Location of the HF ocean radars.

速や流量を把握するためには直接測流が必要である。また、日周潮成分を主とした潮流が大きいいため、その除去には繰り返し観測が必要となる。

短波海洋レーダは、陸上に設置した短波帯のレーダによって沖合域の海洋表層の流速・流向を観測する装置であり、高頻度で長期にわたり繰り返し観測が可能である (Barrick et al., 1977; Prandle, 1991 など)。北海道大学低温科学研究所では、2003年8月から宗谷海峡域および紋別—雄武海域に短波海洋レーダを設置して宗谷暖流の連続観測を開始した。九州大学応用力学研究所が我々より1年先行して、対馬海峡域において短波海洋レーダの運用を開始した。彼らが、それまで日本では海洋レーダへの利用が認められていなかった13 MHz帯の無線局免許を獲得したことは、我々にも非常に大きな恩恵があった。2022年3月に無線局免許更新の問題や機材の老朽化のため北大低温研短波海洋レーダの運用は終了したが、18年7か月分の貴重なデータが得られた。

2. 北大低温研短波海洋レーダの概要

図1は、北大低温研短波海洋レーダの配置図である。宗谷海峡域のノシャップ岬、宗谷大岬、猿払の3か所に設置したレーダは、米国CODAR社製のSeaSondeで、中心周波数は 13.9 MHz、レンジ方向、アジマス方向の分解能は、それぞれ、3 km および 5° であった。また、紋別および雄武では、中心周波数を 25.4 MHz、分解能 1.5 km および

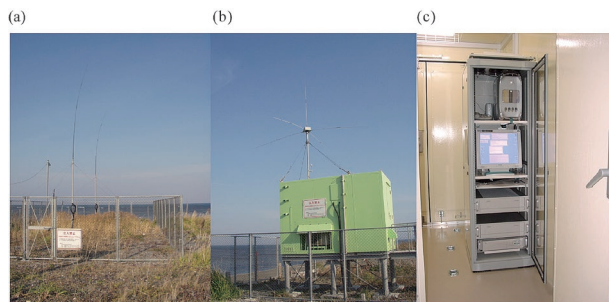


図2：ノシャップ岬局の写真。(a) 送信アンテナ、(b) 受信アンテナとシェルター、(c) 送受信システム。

Figure 2: Photographs of the Noshappu radar station. a) Transmitting antennas, (b) receiving antennas, (c) radar instruments.

5° に設定した。札幌に設置した中央局から各レーダ局の監視・制御・データ収集などを行った。図2に、一例としてノシャップ局の写真を示した。

短波海洋レーダは、それぞれのレーダ局から発射した電波が海面から後方散乱（反射）されて返ってくる信号のドップラーシフトから、視線方向の表層流速成分を計測する。CODAR/SeaSondeでは、direction finding 方式を採用しており、視線流速の算出には現場で実測したアンテナパターンを用いた。また、各レーダ局のアンテナパターンは、数年おきに実測値を行い更新した。同一地点に2局以上の視線流速の観測データが存在すれば、それをもとに表層流速ベクトル（流速・流向）を算出することが可能である。各局の毎時の視線方向流速から、最小二乗法を用いて、表層流速ベクトルを 3 km 格子（宗谷海峡域）および1.5 km 格子（紋別—雄武海域）で合成した。図3に宗谷海峡域で観測された表層流速ベクトルの一例を示した。データ処理の詳細については、Ebuchi et al. (2006) を参照されたい。

19年間にわたって5局の海洋レーダを維持するためには、多大な労力と費用が必要であった。年2回の保守作業（草刈り、ペンキ塗りを含む）、頻繁に発生する停電、通信途絶、PCやエアコンなどの機器不調に対応する必要があった。また、オホーツク海沿岸域の過酷な自然環境のため、強風によるアンテナ折損や凍結によるGPSアンテナの破損、高波によるアンテナの流失、塩害によるエアコン室外機の破損なども何度か発生した。長年のレーダ局の維持においては、低温研の技術部および事務部の方々のご尽力が欠かせないものであった。

図4に、宗谷海峡域の海洋レーダによって観測された表層流速と漂流ブイによる観測値との比較結果を示した (Ebuchi, et al., 2006)。東西成分、南北成分ともによい

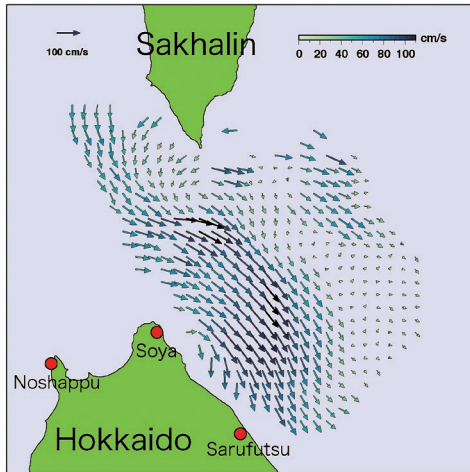


図3: 観測スナップショットの例 (2003年8月3日17時, 日本時間).
Figure 3: A snapshot of observed surface current field (1700, August 3, 2003, JST).

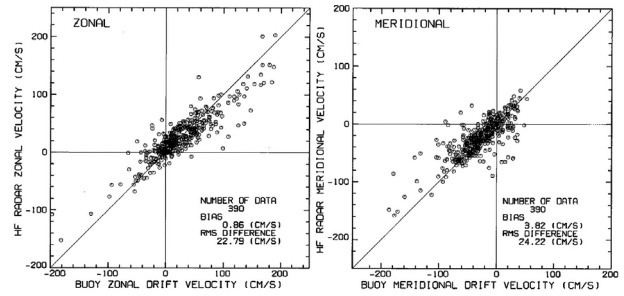


図4: 宗谷海峡域の短波海洋レーダで観測された表層流速と漂流ブイの観測値の比較. (左)東西成分, (右)南北成分. Ebuchi et al. (2006) より引用.

Figure 4: Comparison of surface current velocity observed by the HF ocean radars with drifting buoy measurements in the Soya Strait. (a) zonal component and (b) meridional component. Cited from Ebuchi et al. (2006).

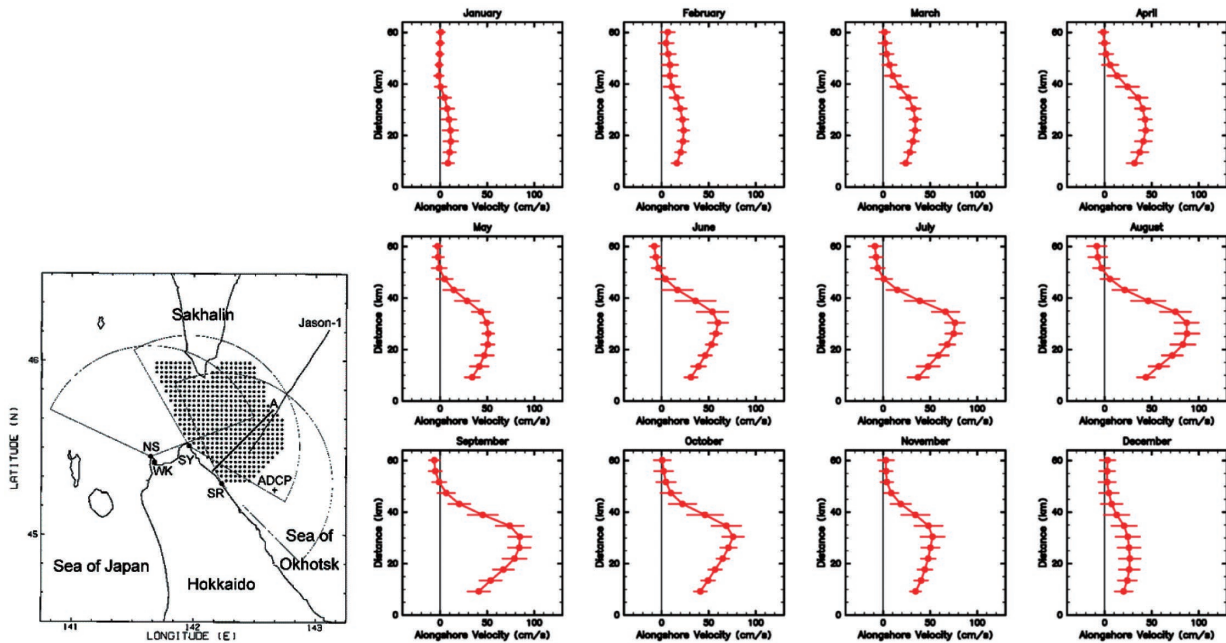


図5: (左)宗谷海峡域の海洋レーダ観測範囲および測線A, (右)測線Aを横切る流速成分の季節変化.
Figure 5: Observation area of the HF ocean radars and location of Line A (left), and seasonal variations in the horizontal profile of surface current velocity component across Line A (right).

致を示しており, 残差の標準偏差は 20 cm s^{-1} 程度であった. 船舶搭載ADCPや海底設置ADCPなどの観測結果との比較においても同様の結果が得られている. ただし, 現場観測との比較においては, 観測水深の違いや平均時間・空間スケールの違いに留意が必要である.

3. 宗谷海峡域における観測データの利用例

短波海洋レーダによって図3のような表層海流ベクトルの面的な分布が1時間ごとに観測可能である. 得られた

データは, 潮汐や慣性振動から, 季節変動, 経年変動など様々なスケールの現象を捉えている. ここでは, 宗谷海峡域の観測データから潮汐成分を取り除いた日・月平均値のデータを使った解析結果を紹介する. なお, 同海域の潮汐成分に関しては Ebuchi et al. (2006) によって潮流楕円等の解析結果が示されている. また, 海洋レーダの観測データの調和解析に基づいた潮流推算結果を使って, 稚内水産試験場および宗谷漁業協同組合と共同で「宗谷岬沖潮流カレンダー」を作成し, 地元のミズダコ漁などに貢献している (佐野他, 2012, 2015)

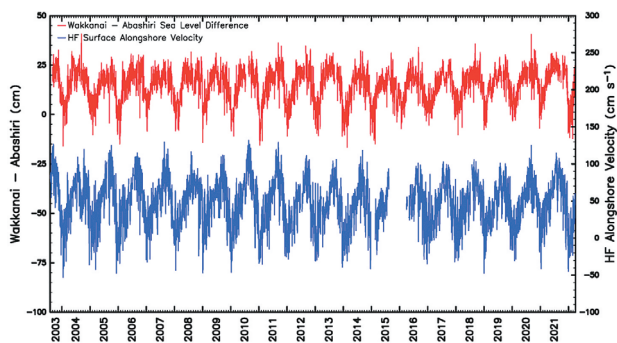


図6：稚内－網走の水位差と宗谷暖流の流速(日平均値)。
Figure 6: Time series of the sea level difference between Wakkanai and Abashiri, and alongshore surface current velocity of the SWC (daily mean).

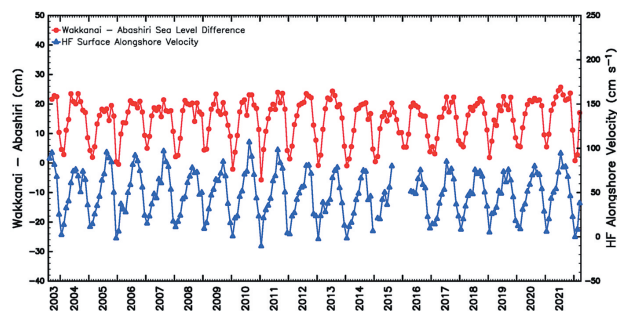


図7：稚内－網走の水位差と宗谷暖流の流速(月平均値)。
Figure 7: Time series of the sea level difference between Wakkanai and Abashiri, and alongshore surface current velocity of the SWC (monthly mean). Cited from Ebuchi et al. (2024).

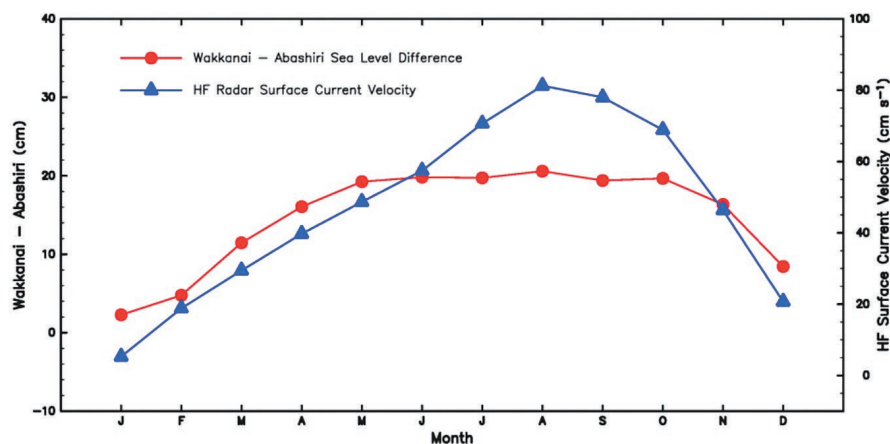


図8：稚内－網走の水位差と宗谷暖流の流速の19年平均の季節変動。
Figure 8: Seasonal variations in the alongshore surface current velocity and the sea level difference between Wakkanai and Abashiri averaged over the entire observation period.

各観測点の毎時の観測データに25時間の移動平均をかけて潮汐成分を除去した後、日平均値を計算した。また、この日平均値に、Zhang et al. (2016) で提案された方法で、吹送流成分を除去した。風速の入力データには、気象庁GPV MSMデータを用いた。その後月平均データを作成した。

図5に、宗谷海峡域の海洋レーダ観測範囲と測線Aの位置(左)と測線Aを横切る流速成分の季節変化(右)を示した。誤差棒は、19年間の標準偏差を表している。宗谷暖流が明瞭な季節変動を持つことが示されている。流れは夏季に強く、最大流速は 1 m s^{-1} 近くに達し、冬季には非常に弱い。流速の最大値(流軸)は岸から 30 km 付近に存在する。また、誤差棒で示した標準偏差があまり大きくないことから、この19年間は、多少の経年変動がありつつも、ほぼ同じ季節変動を繰り返していることが示されている。

図6は、測線A上の流軸位置における流速と稚内－網走

の水位差の時系列(日平均値)を示したものである。稚内－網走の水位差は、従来から宗谷暖流の強さを表す指標として用いられてきた(青田, 1975, 1984; Aota and Matsuyama, 1987など)。水位差データは、それぞれの検潮所の観測データに、花輪・三寺(1985)のタイドカラーフィルターをかけて潮汐成分を除去した後、日平均値を計算し、最寄りの気象官署の日平均気圧を用いて気圧補正を行った。また、稚内と斜里の国土地理院電子基準点(GPS)データを用いて地殻変動の影響を補正した。図6の日平均値の比較では、宗谷暖流の流速と稚内－網走の水位差は非常によく対応し、相関係数は 0.799 であった。また、図6には、宗谷暖流の季節変化に加えて、周期10～20日程度のsub-inertial スケールの短周期変動が見られる。Ebuchi et al. (2009) は、この短周期変動を、風の変動による沿岸捕捉波で説明した。

Fukamachi et al. (2008, 2010) は、海洋レーダで観測された表層流速と海底設置ADCPの流速鉛直プロファイル

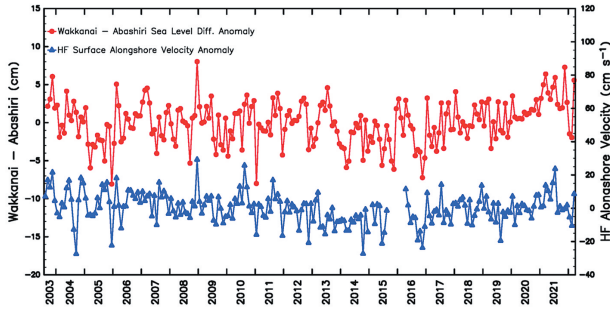


図9：稚内－網走の水位差と宗谷暖流の流速の季節変動を除いた偏差。Ebuchi et al. (2024) より引用。

Figure 9: Anomalies of the alongshore surface current velocity and the sea level difference between Wakkanai and Abashiri from the mean monthly average over the entire observation period. Cited from Ebuchi et al. (2024).

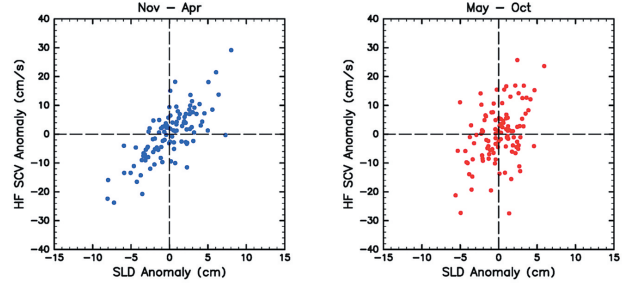


図11：稚内－網走の水位差と宗谷暖流の流速の季節変動を除いた偏差。(左)冬季(11-4月)。(右)夏季(5-10月)。

Figure 11: Scatter plots of the alongshore current velocity and the sea level difference between Wakkanai and Abashiri without seasonal variation for (a) winter (November-April) and (b) summer (May-October).

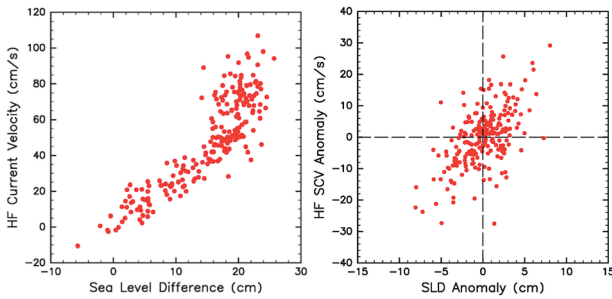


図10：稚内－網走の水位差と宗谷暖流の流速の散布図。(左)季節変動を含む絶対値。(右)季節変動を除いた偏差。

Figure 10: Scatter plots of the alongshore current velocity and the sea level difference between Wakkanai and Abashiri (a) with and (b) without seasonal variation.

を組み合わせ、宗谷暖流の流量を見積もった。その結果、年平均で $0.62\text{--}0.67\text{ Sv}$ ($1\text{ Sv} = 10^6\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$)、最大値となる8月で 1.13 Sv 、最小となる1月で 0.08 Sv となった (Fukamachi, 2010)。Ohshima et al (2017) は、短波海洋レーダの観測データと船舶観測および沿岸潮位データを組み合わせて、宗谷暖流の流量と熱及び塩輸送量を見積もり、対馬海峡および津軽海峡での流入・流出量のバランスを議論した。また、紋別－雄武海域の25MHz海洋レーダ (1.5 km 分解能) を使って、海水分布や漂流速度を算出する試みも行われている (Shirasawa et al., 2013; Zhang et al., 2020)。

4. 宗谷暖流の長期変動および沿岸潮位との関係

短波海洋レーダによる19年間にわたる長期連続観測によって、宗谷暖流の経年変動についての研究が可能となった。前節で述べた通り、従来、宗谷暖流の変動は、沿岸潮位、

特に稚内－網走の水位差を用いた議論が主であった。これは、宗谷暖流の駆動源が、日本海とオホーツク海の水位差によること (Ohshima and Wakatsuchi, 1990; Ohshima, 1994) に基づいている。また、青田 (1975, 1984)、Aota and Matsuyama (1987) などの観測結果からも、流れに沿う方向の稚内－網走の水位差が宗谷暖流の強さをよく表すことが示されている。

図7は、海洋レーダで観測された測線A上の流軸位置における流速 (岸に沿う方向成分) と稚内－網走の水位差の月平均値の時系列である。図6同様、宗谷暖流の季節変動・経年変動の様子が捉えられている。月平均値の比較では、両者の相関係数は 0.871 であった。図8は、図7のデータをもとに、19年間の宗谷暖流の流速および稚内－網走の水位差の平均的な季節変動を示したものである。両者とも、夏に大きく、冬に小さい変動を示すが、変動の形は必ずしも一致せず、水位差の方が夏のピークがより扁平になっている。

図9は、図8の平均的な季節変動を図7のデータから差し引いた偏差の時系列である。両者の相関係数は 0.584 に下がった。部分的に一致するピークもいくつか見られるが、全体的には、よく一致しているとは言い難い。図10は、図7、図9のデータを散布図にしたもので、季節変動を差し引いた偏差では相関が下がる様子が明らかである。図11は、図9の偏差のデータを冬季 (11-4月) と夏季 (5-10月) に分けて書いたものである。冬季の相関 (0.750) に比べ夏季の相関 (0.441) が低いことが示されている。Ohshima et al. (2017) でも同様の結果が得られている。この結果は、夏季と冬季の宗谷暖流の変動メカニズムが異なることを示唆している。冬季の宗谷暖流は順圧的で、オホーツク海

北西岸沿いの風応力による Arrested Topography Wave (Csanady, 1978) による変動が支配的であると考えられる (Ohshima et al., 2017, Tsujino et al., 2008; Kida et al., 2021など)。これに対して, 夏季は, 傾圧成分が大きくなり, 流れに沿う方向の水位差と流れの強さが必ずしも1対1で対応するとは限らないことが考えられる。流れの傾圧性を考慮したメカニズム (例えば Karaki et al., 2018) を考慮する必要がある。いずれにしろ, 稚内-網走の水位差は, 単純に宗谷暖流の経年変動を表現する指標としては適当ではないと考えられる。Ohshima and Kuga (2023) では, 宗谷暖流の傾圧性の効果を実験に取り入れた方法で稚内-網走の水位差から50年間にわたる流量の推定を試みた。しかしながら, 沿岸潮位のデータに含まれる地殻変動の影響の除去が難しい点が問題となっている。

5. おわりに

本稿では, 北大低温研短波海洋レーダの概要と観測データを利用した研究について概説した。海洋レーダの19年間にわたる連続観測データは, まだまだ, 多様な時空間スケールの現象の研究に利用可能であると考えられる。本稿で紹介した短波海洋レーダの観測データは, 低温科学研究所の共同利用・共同研究の枠組みの下で提供が可能である。利用目的によって, 処理レベルや時間間隔などが多様なため, 現在は受注生産で対応している。今後, 需要が増えれば, 定型処理のデータをウェブ上で公開することも考えている。

謝辞

北大低温研短波海洋レーダの設置・運用には, 総務省北海道総合通信局, 北海道稚内建設管理部, 網走建設管理部, 稚内市, 紋別市, 雄武町, 稚内水産試験場, 宗谷漁業協同組合ほか, 各レーダ局の地元の関係者の皆様, および低温研技術部・事務部の皆様のご協力をいただいた。また, 琉球大学工学部・藤井 智史 名誉教授, 九州大学応用力学研究所・増田 章 名誉教授および同研究所技術部の皆様, 情報通信研究機構沖縄電磁波技術センター・灘井 章嗣 センター長には, レーダ局の設計・設置・無線局免許の取得やデータ処理・利用などで多くのアドバイスをいただいた。心から謝意を表す。

参考文献

- 青田昌秋 (1975) 宗谷暖流の研究. 低温科学, 物理編, **A-33**, 151-172.
- 青田昌秋 (1984) 宗谷暖流域の海況変動. 沿岸海洋研究ノート, **22**(2), 30-39.
- Aota, M. and M. Matsuyama (1987) Tidal current fluctuations in the Soya Current. *J. Oceanogr. Soc. Jpn*, **43**(5), 276-282. <https://doi.org/10.1007/BF02108695>
- Barrick, D. E., M. W. Evans and B. L. Weber (1977) Ocean surface currents mapped by radar. *Science*, **198**, 138-144. <https://doi.org/10.1126/science.198.4313.138>
- Csanady, G. T. (1978) The arrested topographic wave. *J. Phys. Oceanogr.*, **8**, 47-62. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1978\)008<0047:TATW.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1978)008<0047:TATW.2.0.CO;2)
- Ebuchi, N., Y. Fukamachi, K.I. Ohshima, K. Shirasawa, M. Ishikawa, T. Takatsuka, T. Daibo and M. Wakatsuchi (2006) Observation of the Soya Warm Current using HF radar. *J. Oceanogr.*, **62**(1), 47-61. <https://doi.org/10.1007/s10872-006-0031-0>
- Ebuchi, N., Y. Fukamachi, K.I. Ohshima and M. Wakatsuchi (2009) Subinertial, and seasonal and variations in the Soya Warm Current revealed by HF radars, coastal tide gauges, and a bottom-mounted ADCP. *J. Oceanogr.*, **65**(1), 31-43. <https://doi.org/10.1007/s10872-009-0003-2>
- Ebuchi, N., Y. Fukamachi, K.I. Ohshima, H. Mitsudera, J. Nishioka, T. Takatsuka, K. Ono, M. Ishikawa, T. Daibo, K. Shirasawa and M. Wakatsuchi (2024) Long-term observation of the Soya Warm Current using HF ocean radars. *J. Oceanogr.* (submitted).
- Fukamachi, Y. I. Tanaka, K.I. Ohshima, N. Ebuchi, G. Mizuta, H. Yoshida, S. Takayanagi and M. Wakatsuchi (2008) Volume transport of the Soya Warm Current revealed by bottom-mounted ADCP and ocean-radar measurement. *J. Oceanogr.*, **64**(3), 385-392. <https://doi.org/10.1007/s10872-008-0031-3>
- Fukamachi, Y., K. I. Ohshima, N. Ebuchi, T. Bando, K. Ono and M. Sano (2010) Volume transport in the Soya Strait during 2006-2008. *J. Oceanogr.*, **66**(5), 685-696. <https://doi.org/10.1007/s10872-010-0056-2>
- 花輪公雄, 三寺史夫 (1985) 海洋資料における日平均値の作成について —日平均潮位を扱う際の留意点—. 沿岸研究ノート, **23**(1), 79-87.
- Karaki, T., H. Mitsudera and H. Kuroda (2018) Buoyancy shutdown process for the development of the baroclinic

- jet structure of the Soya Warm Current during summer. *J. Oceanogr.*, **74**, 339–350. <https://doi.org/10.1007/s10872-018-0465-1>
- Kida, S., K. Takayama, Y. N. Sasaki, H. Matsuura and N. Hirose (2021) Increasing trend in Japan Sea Throughflow transport. *J. Oceanogr.*, **77**(1), 145–153. <https://doi.org/10.1007/s10872-020-00563-5>
- Matsuyama, M., M. Wadaka, T. Abe, M. Aota and Y. Koike (2006) Current structure and volume transport of the Soya Warm Current in summer. *J. Oceanogr.*, **62**(2), 197–205. <https://doi.org/10.1007/s10872-006-0044-8>
- Ohshima, K. I. and M. Wakatsuchi (1990) A numerical study of barotropic instability associated with the Soya Warm Current in the Sea of Okhotsk. *J. Phys. Oceanogr.*, **20**(4), 570–584. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1990\)020<0570:ANSOBI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1990)020<0570:ANSOBI>2.0.CO;2)
- Ohshima, K.I. (1994) The flow system in the Sea of Japan caused by a sea level difference through shallow straits. *J. Geophys. Res.*, **99**(C5), 9925–9940. <https://doi.org/10.1029/94JC00170>
- Ohshima, K. I., D. Simizu, N. Ebuchi, S. Morishima and H. Kashiwase (2017) Volume, heat, and salt transports through the Soya Strait and their seasonal and interannual variations. *J. Phys. Oceanogr.*, **47**(5), 999–1019. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0210.1>
- Ohshima, K.I. and M. Kuga (2023) 50-year volume transport of the Soya Warm Current estimated from the sea-level difference and its relationship with the Tsushima and Tsugaru Warm Currents. *J. Oceanogr.*, **79**(5), 499–515. <https://doi.org/10.1007/s10872-023-00693-6>
- Prandle, D. (1991) A new view of near-shore dynamics based on observations from HF radar. *Prog. Oceanogr.*, **27**(3-4), 403–438. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(91\)90030-P](https://doi.org/10.1016/0079-6611(91)90030-P)
- 佐野稔, 坂東忠男, 江淵直人, 高柳志朗 (2012) 宗谷海峡のミズダコを漁獲対象とする樽流し漁業における漁具の漂流速度の推定. *水産海洋研究*, **76**, 123–130.
- 佐野稔, 坂東忠男, 本前伸一, 江淵直人 (2015) 宗谷岬沖潮流カレンダーによるミズダコ樽流し漁業活動の変化. *水産海洋研究*, **79**, 141–148.
- Shirasawa, K., N. Ebuchi, M. Leppäranta and T. Takatsuka (2013) Ice-edge detection from Japanese C-band radar and high-frequency radar coastal stations. *Ann. Glaciol.*, **54**(62), 59–64. <https://doi.org/10.3189/2013AoG62A007>
- Tsujino, H., H. Nakano and T. Motoi (2008) Mechanism of currents through the straits of the Japan Sea: mean state and seasonal variation. *J. Oceanogr.*, **64**(1), 141–161. <https://doi.org/10.1007/s10872-008-0011-7>
- Zhang, W., N. Ebuchi, Y. Fukamachi and Y. Yoshikawa (2016) Estimation of wind drift current in the Soya Strait. *J. Oceanogr.*, **72**(2), 299–311. <https://doi.org/10.1007/s10872-015-0333-1>
- Zhang, W., N. Ebuchi, Y. Fukamachi, F. Cheng, K. I. Ohshima, B. Emery, T. Toyota, H. Abe and K. Shirasawa (2020) Sea ice observation with oceanographic HF radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **58**(1), 378–390. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2936576>