

日本海におけるサブメソスケール乱流に伴う 極前線および対馬暖流の季節変動について

内山 雄介¹・宮崎 大²・神吉 亮佑³・宮澤 泰正⁴

¹正会員 神戸大学准教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp

²兵庫県 但馬県民局新温泉町土木事務所 (〒669-6701 兵庫県美方郡新温泉町芦屋522-4)

³出光興産株式会社 (〒100-8321 東京都千代田区丸の内3-1-1)

⁴国立研究開発法人 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ
(〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25)

リマン寒流と対馬暖流とが邂逅する北緯40度付近の日本海に出現する極前線と、それを構成する対馬暖流の季節変動特性について、高解像度ダウンスケーリング海洋モデルを用いて解析した。高解像度化に伴って日本海におけるエネルギー収支構造は大きく変化し、サブメソスケール (SMS) 乱流を表現可能なモデルでは表層での運動エネルギー捕捉とそれに伴う混合層の発達が顕著となる。表層渦運動エネルギーはSMS渦の消長と関連し、冬季・春季の海面冷却による対称不安定によって発達し、夏季・秋季は減衰する。極前線および対馬第1、第3分枝流は対馬海峡からの通過流量が大きく、かつSMS渦減衰時に強化され、反対にSMS渦発達時には水平渦拡散に伴う表層運動量の散逸により対馬暖流と極前線はより不明瞭になる。

Key Words : *suppolar front, submesoscale stirring, Japan Sea, Tsushima Warm Current, JCOPE2-ROMS downscaling system*

1. はじめに

日本海はアジア大陸と日本列島に囲まれた閉鎖性の強い縁辺海であり、水産資源、天然ガス、鉱物資源などが豊富に賦存するなど、我が国の経済・政治にとって極めて重要な海域である。日本海では、対馬海峡から流入して北上する黒潮起源の高温・高塩分の対馬暖流、間宮海峡から流入して南進するアムール川起源の低塩分のリマン寒流によって北緯40度付近に極前線(亜寒帯前線)が形成される。強い熱塩フロントである極前線は、朝鮮半島東岸を北上した東韓暖流が分岐して東に転じ、北緯39~42度にかけて日本海を横断する対馬暖流第3分枝流の一部を構成している。このような日本海における海流系は、対馬海峡-津軽・宗谷海峡間の水位差や、年間を通じた海面冷却¹⁾によって駆動されていると考えられている²⁾。日本海のほぼ中央部に横たわる極前線の消長が海域の海洋生物やスルメイカなどの水産有用種に及ぼす影響は大きく³⁾、日本沿岸における急潮や漂流ゴミ分布とも密接に関連していることから、その変動パターンの詳細の解明が急務となっている。しかし、国際観測体制構築の立ち遅れなどから、日本海における広域海況の

定量的な評価は太平洋沿岸域や北西太平洋縁辺海などと比較して十分とはいえず、観測と平行して高精度海洋モデリングによる再解析などを鋭意実施していくことが海域の海洋構造や変動パターンを精緻に把握する上で重要な意味を持つ。また、海洋表層のダイナミクスや物質分散に対する $O(10\text{ km})$ 以下のサブメソスケール現象の影響に関する重要性が指摘されつつあるが(例えば、内山ら⁴⁾)、日本海の海洋構造に及ぼす影響については未解明な部分が多く、高精度海洋数値モデルによる研究は緒に就いたばかりである。

これに対して内山ら⁵⁾(以下、前報と呼称)は、領域海洋循環モデルROMS⁶⁾をベースに、3次元変分法データ同化を用いた日本沿岸中規模渦解像海洋再解析データセットJCOPE2⁷⁾を初期・境界条件とした2段階ネスティングによるダウンスケーリング実験を実施し、サブメソスケール現象を表現可能な高解像度日本海全域海洋モデルを構築した。モデル出力と観測データやJCOPE2再解析値などとの比較を通じて、対馬・津軽海峡の通過流量、海表層温度(SST)の空間分布などについて良好な再現性があることを確認した。さらに、黒潮を主な起源とし、対馬海峡から流入して北進する対馬暖流や、ロシ

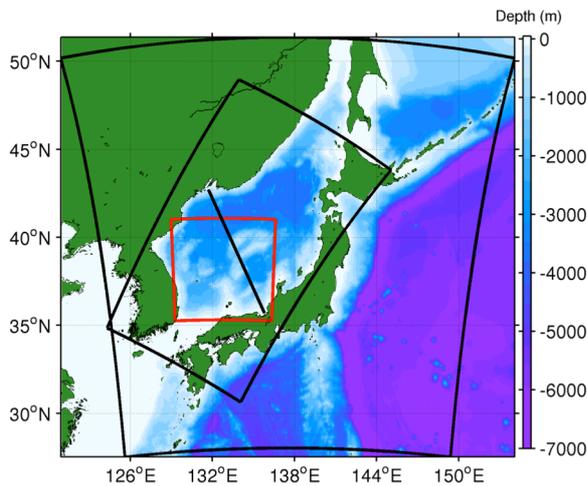


図-1 ROMS 計算領域 (外側黒枠: L1 領域, 内側黒枠: L2 領域) および乱流統計解析に用いる正方領域 (赤枠), 鉛直構造の検査線 (黒線; VW 線)。

ア・朝鮮半島を南下するリマン寒流の流路など, 日本海の主要な海流構造についても概ね一致していることを確認し, 構築した高解像度日本海全域海洋モデルの再現性が良好であることを示した。さらに, 高解像度 ROMS-L2 モデルの結果から, 夏季には北緯 40 度以南においてメソスケール渦の発達が顕著である一方で, 冬季には日本海のほぼ全域において, 時空間的により小規模なサブメソスケール渦の発達が卓越することを見出した。

本研究では, 前報で開発したJCOPE2-ROMSダウンスケーリングによるサブメソスケール渦解像日本海全域海洋モデル (ROMS-L2) を用いて, 2010年1月~2014年6月の4年半にわたる精緻な中期再解析を行った。本報では特に, 高解像度化に伴う乱流特性の変化, 極前線の季節的な発達・衰退, それらと関連する対馬暖流等の各主要海流の季節変動特性との関係について解析したので, その結果を報告する。

2. 高解像度日本海全域流動モデル

(1) ダウンスケーリングモデルの概要

本研究では, ROMS⁶⁾ による2段ネスト高解像度日本海流動モデル⁵⁾ を用いた (図-1参照)。親領域モデルである日本沿岸域を対象とした中解像度モデルROMS-L1 (水平解像度3 km, 784 × 864 × 鉛直32層) では, JCOPE2 再解析データの日平均値を時空間内挿して側方境界条件として与えた。子領域モデルである日本海全域を対象とした高解像度モデルROMS-L2 (水平解像度1 km, 1024 × 1760 × 鉛直40層) では, ROMS-L1出力の日平均値を時空間内挿して側方境界条件に用いた1-way offline nestingによるダウンスケーリングを行った (図-1, 表-1)。海上風応力には, ROMS-L1では気象庁GPV-GSMの日平均値を, ROMS-L2ではGPV-MSMの3時間値を用いた。その他の

表-1 ROMS-L2 モデルの計算条件。

要素	ROMS-L2 の設定
計算期間	2010年1月~2014年6月
水平格子数 (鉛直層数)	1024 × 1760 (×鉛直40層)
水平解像度	1 km
側方境界条件	ROMS-L1 (日平均値)
風応力	JMA GPV-MSM (3時間値)
海面フラックス	COADS05 (月平均気候値)

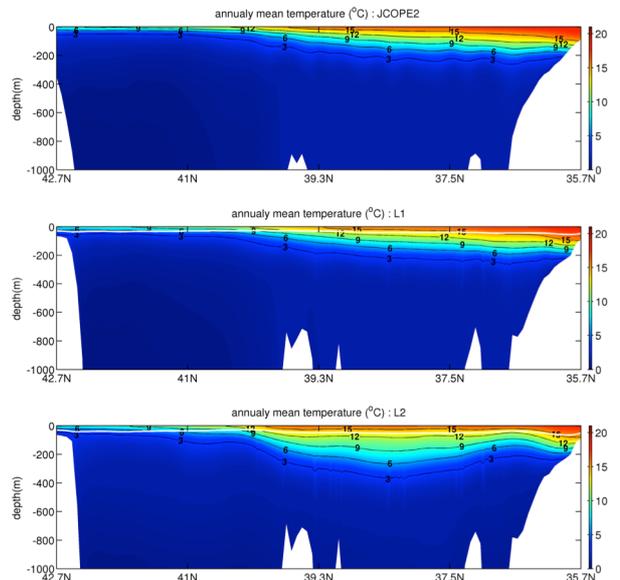


図-2 ウラジオストク-若狭湾横断面 (VW 線; 図-1 黒線) における 2011 年の年平均水温鉛直分布. 上段: JCOPE2, 中段: ROMS-L1, 下段: ROMS-L2.

海面フラックスについてはCOADS05の月平均気候値を, SST緩和にはAVHRR-Pathfinderの月平均気候値を与えた。海底地形にはJODC-JEGG500 (沿岸域, 解像度約500 m) をSRTM30 (全球データ, 解像度30秒) で補完したデータを使用した。また, ROMS-L1では対馬海流などのメソスケール海洋構造の再現精度を確保するため, 全領域を対象に簡易4次元データ同化の1つであるTS nudging⁸⁾を導入し, JCOPE2の塩分と水温の10日平均値に対して緩和計算を実施するが, ROMS-L2では一切の制御を行わないforwardモデリングを行った。計算期間は, ROMS-L1およびL2ともに2014年6月中旬まで延長した。その他の詳細な計算条件等については前報⁵⁾を参照されたい。

(2) モデルの再現性: 鉛直断面構造

ROMS-L1およびL2の再現性については, 観測値による対馬・津軽海峡における通過流量, 気象庁のMGDSST, 衛星海面高度計データAVISOによる海面高度 (SSH) 偏差・分散, 海面表層流速の絶対値, JCOPE2による表層渦運動エネルギー (EKE) などとモデル出力とを比較し, いずれも良好に一致していることを確認している⁵⁾。本報では再現性確認の一例として, 鉛直断面内の水温構造につ

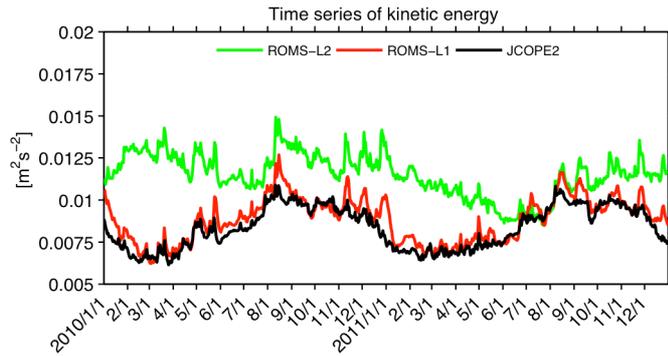


図-3 海洋表層 ($z > -100$ m) で体積平均した運動エネルギー (KE) の時間変化.

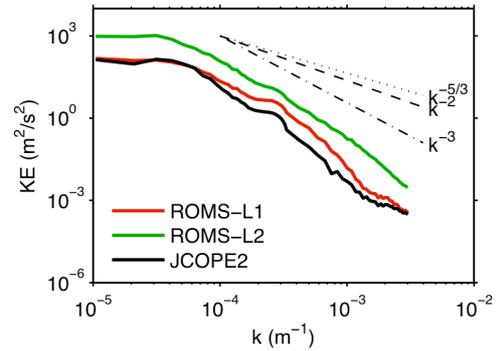


図-4 解析領域 (図-1 赤枠) における表層運動エネルギー (KE) の波数スペクトルの比較.

いて比較した結果を紹介する. ロシア沿岸を南下するリマン寒流, 北緯40度付近を通過する対馬暖流第3分枝流, 日本沿岸を北上する対馬暖流第1分枝流を含む断面内として, ウラジオストク沖から若狭湾までを検査線に設定する (図-1黒線. 以下VW線と呼称する). 2011年について年平均された水温分布を見ると (図-2), 3者の傾向は概ね一致しており, いずれも表層に強い成層を生じ, ロシア側から日本側に向かって躍層水深が深くなっている. また, 水深200~400 m以深の水温はほぼ一様であり, 0~1度程度の極低温水であるという特徴を持つ日本海固有水が再現されている. 高解像度モデルであるROMS-L2による水温は, JCOPE2, L1に比べると北緯38度付近 (極前線周辺) で等温線が下方に膨らんで躍層水深が若干深くなっている (3章参照). なお, 紙面の都合上示さないが, 塩分についても水温とほぼ同様の傾向が見られ, 3者の間には大きな矛盾がないことを確認している.

3. 日本海の乱流特性

日本海流動モデルによるダウンスケーリング効果を評価するために, 日本海領域の海洋表層 (水深 100 m 以浅) で体積平均した KE の時間変化を JCOPE2, ROMS-L1 および L2 について調べる (図-3). KE は 3 月頃に極小値, 8 月頃に極大値を取るよう季節変動しており, 高解像度化 (JCOPE2 \rightarrow L1 \rightarrow L2) に伴って短周期変動振幅が増加している. ROMS-L2 は, ほぼ全ての期間で JCOPE2 および L1 を大きく上回っているほか, 季節変動性がやや不明瞭になっている. 次に, 計算領域内に極前線を中心とした 640 km 四方の解析領域 (図-1 の赤枠) を設定し, 日平均表層流速を用いて, azimuth 方向に平均した表層 KE 波数スペクトルを求める (図-4). モデルの解像度の向上に伴って全波数帯で KE パワースペクトル密度が順次増大するものの, スペクトル勾配はいずれも高波数帯では k^3 に近いことから, k^2 に漸近する太平洋側黒潮続流域の表層乱流場⁴⁾と比較すると, 日本海ではサ

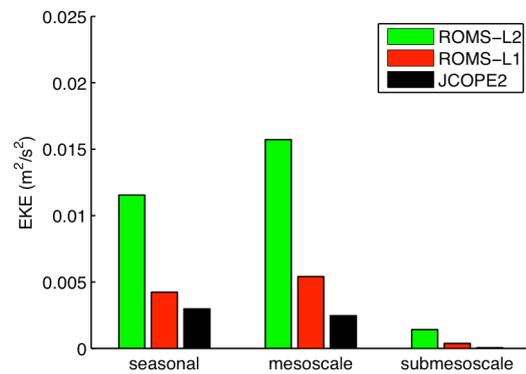


図-5 季節変動成分, メソスケール成分, サブメソスケール成分に分解された渦運動エネルギー (EKE) の時空間平均値.

ブメソスケール乱流の発達がやや弱く, 2次元乱流的な特徴がより強く現れるものと解釈される. また, 図-4 から, ROMS-L2 はエネルギー保有領域を含む全波数帯で JCOPE2, L1 よりも KE 変動が大きいことが分かる.

次に, 極前線を中心とした解析領域内の日平均海洋表層流速を用いて, 季節変動成分, メソスケール成分, サブメソスケール成分に分解した渦運動エネルギー (EKE) を求め, モデル間の比較を行うことでダウンスケーリング効果を評価する. 本研究では周期 90 日以上 of 長周期成分を季節変動成分と定義し, これを Butterworth 周波数フィルタを用いて分離する. そこからの残差成分のうち, 波長 20 km 以上をメソスケール, それ以下をサブメソスケール成分と定義し, Gaussian 波数フィルタを用いて両者を分離する. このように 3 成分に分離された EKE の時空間平均値を見てみると (図-5), 高解像度モデルである ROMS-L2 はサブメソスケール成分だけでなく, メソスケール成分, 季節変動成分のいずれにおいても JCOPE2, L1 よりも大幅にエネルギーが増大していることが分かる. 一方, 分解された EKE の空間分布 (図-6) を見ると, JCOPE2, L1 では季節変動成分は東韓暖流の影響下にある北緯 39 度以南の朝鮮半島東部, および日

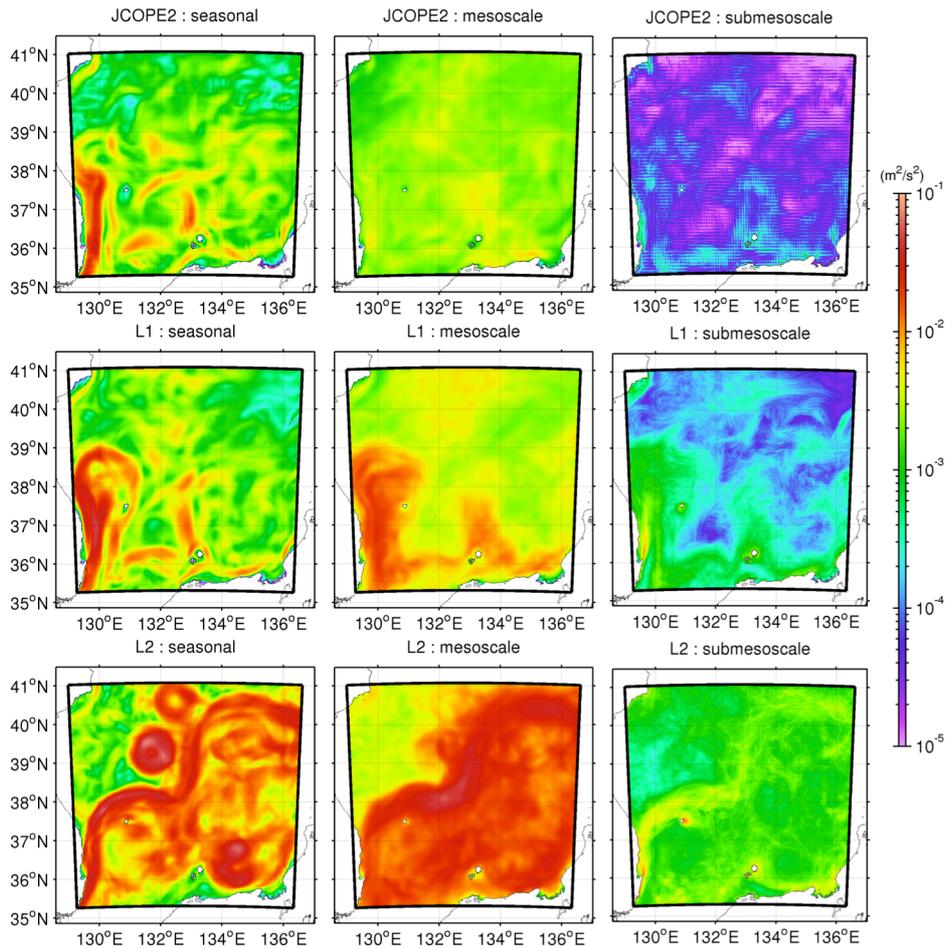


図-6 渦運動エネルギー (EKE) の空間平均値 (2011 年の 1 年間) . 左から, 季節変動成分, メソスケール成分, サブメソスケール成分. 上段 : JCOPE2, 中段 : ROMS-L1, 下段 : L2 による.

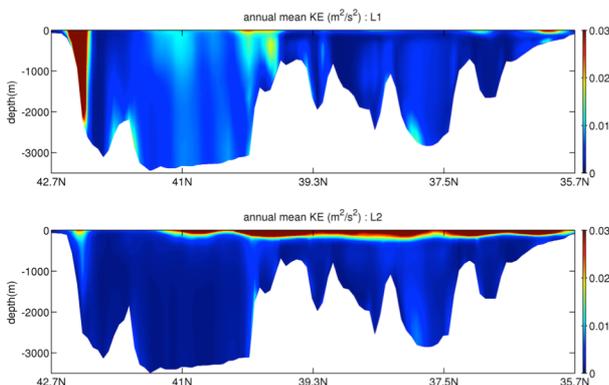


図-7 ウラジオストク-若狭湾横断面における年平均された KE 鉛直分布 (2011 年の 1 年間) . 上段 : ROMS-L1, 下段 : ROMS-L2 による.

本沿岸に発達する対馬暖流第 1 分枝流周辺で強化されているのに対し, L2 では対馬暖流第 3 分枝流 (極前線) 周辺で特に強化され, 極前線以南の広い領域において EKE 値が増大している. メソスケール成分分布を見ると, JCOPE2 では空間的にほぼ一様であるが, L1 および L2 では季節変動成分と同様に朝鮮半島東岸と日本沿岸,

極前線以南においてそれぞれ EKE 値が大きくなっている. サブメソスケール成分も, 解像度の差による空間分布パターンの特徴は季節成分, メソスケール成分と概ね同様であるが, 解像度の向上に伴って EKE 値がそれぞれ 1 オーダー程度ずつ増大していることが分かる.

このように, 極前線周辺海域の表層においては, L2 モデルでは KE および EKE 全成分でエネルギーレベルが高いことが分かった. 海域全体ではエネルギー保存が概ね成立しているはずなので, 海洋表層下のエネルギー分布が解像度によって違っていることが予想される. そこで VW 線 (図-1 黒線) 断面の KE の鉛直構造を比較したところ (図-7), L1 ではメソスケール渦に代表される準地衡乱流的性質が強く出現して水深 1000 m 程度以深の下層にまで KE の増大域が拡大しているのに対し, 高解像度モデルである L2 では海洋表層に捕捉されるサブメソスケール渦の発達が卓越するため, KE 上昇の範囲は概ね表層の混合層内に限定され, 結果として表層での KE レベルが著しく増大することが分かる. 日本海亜表層では比較的鉛直混合が弱く, 300 m 程度以深の下層に低温・高塩分の高密度水塊である日本海固有水が形成されるこ

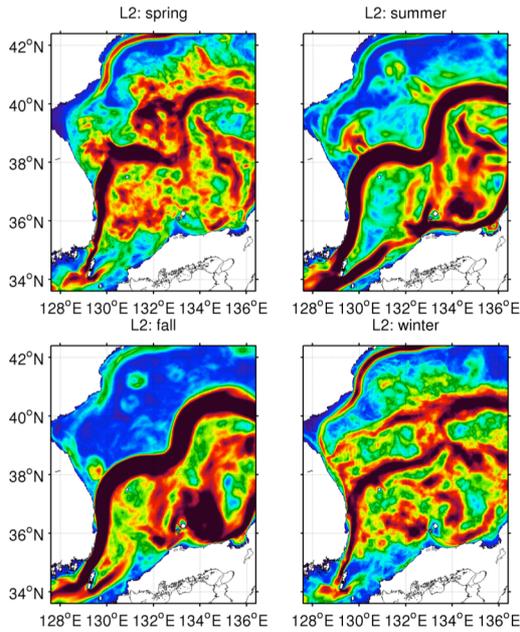


図-8 表層流速絶対値の季節平均値の空間分布. ROMS-L2の計算結果を用いた. (左上) 春季, (右上) 夏季, (左下) 秋季, (右下) 冬季.

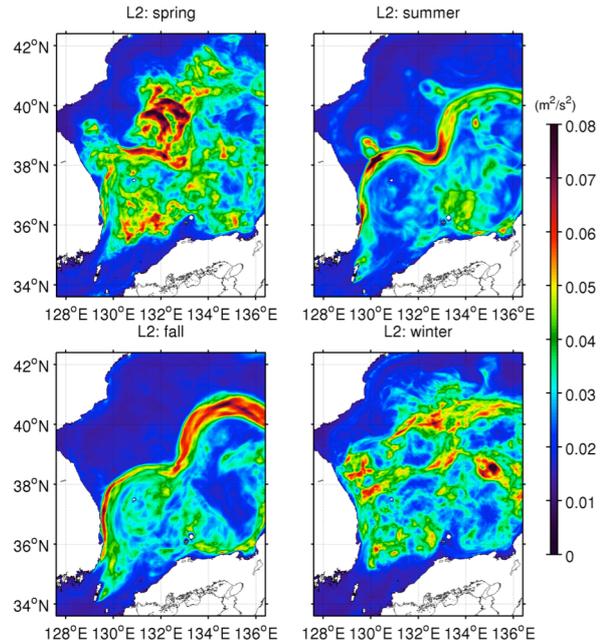


図-9 図-8 と同じ. ただし, 表層 EKE 季節平均値の空間分布.

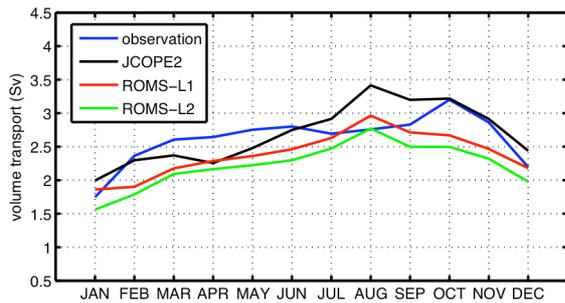


図-10 対馬海峡における通過流量の月平均値. 観測値 (青線) は, Takikawaら (2005) による 1997年2月~2002年8月の平均値. JCOPE2 (黒), ROMS-L1 (赤), および L2 (緑) は 2011年~2013年の3年間の平均値.

とが知られているが, 本研究で示されたサブメソスケール乱流の発達に伴う表層での運動エネルギー捕捉機構は固有水の形成を助長するものであり, その詳細については, 今後さらなる解析を実施していく予定である.

4. 極前線および対馬暖流の季節変動特性

極前線およびそれを構成する対馬暖流系の季節的な変動と, 海洋乱流特性との関係について, L2による流速絶対値 (図-8), EKE (図-9) の海洋表層での季節平均分布を用いて検討する. ただし本章では, EKEは季節変動成分を除去した短周期成分と定義している. いずれも明確な季節差が見られ, 例えば夏季および秋季では, EKEは全般的には弱い極前線周辺では強く, 日本西岸

に沿って北上する対馬暖流第1分枝流と, 極前線を構成する第3分枝流の両者が著しく強化されている. このとき, 極前線におけるフロント横断方向の密度勾配やSSH勾配も強化され, 結果として地衡流的に第3分枝流が発達していることが分かった (図は割愛). 一方, 冬季および春季は, 海面冷却に伴う対称不安定と傾圧不安定によってサブメソスケール乱流が広範囲で発達し⁹⁾, EKEの増大域は極前線周辺を中心に広範囲に拡大している. この強いサブメソスケール渦による水平混合作用によって平均運動エネルギーが広範囲に散逸するため, 第1, 3分枝流はともに減衰したものと解釈され, 特に第1分枝流については冬季から春季にかけてその構造がほぼ消失している. 対馬暖流の流量や構造に関するこれらの季節変動特性は, 現地データ^{9, 10)} や広域流動モデル¹¹⁾ を用いた既往の研究結果と整合している.

さらに, 極前線の消長と対馬海峡における通過流量との関係性を考察するために, 1997年2月~2002年8月に ADCPを用いて観測された月平均気候値¹²⁾ と, 各モデルによる2011年~2013年の3年間分の月平均気候値により通過流量を比較する (図-10). 4者の一年間の変動は概ね一致しており, 夏季から秋季にかけて通過流量が多く, 冬季および春季では流量が少ないという特徴が共通して見られる. 流量値は1.5~3.5 Svと見積もられ, 各モデルとも比較的良好に観測値を再現しているが, 3次元変分データ同化を施しているJCOPE2が最も一致しており, ROMS-L1, L2はわずかに過小評価する傾向にある. 通過流量ピークは観測値では10月に, モデルではいずれも8月に出現するが, これは気候値の評価期間の差に起因

していると推察される。以上の季節変動性から、通過流量が多い夏季から秋季にかけては慣性力がより大きくなるため対馬暖流および極前線がより明瞭に形成され、反対に通過流量の少ない冬季から春季にかけては、対馬暖流の勢力が弱体化して流路が不安定になると解釈される。

5. おわりに

本研究では、2段ネスティングによるJCOPE2-ROMSダウンスケーリング日本海流動モデルを用いて、極前線の季節的な発達・衰退、それらに関連する対馬暖流などの各主要海流の季節変動特性の関係について解析した。モデル解像度の向上に伴う乱流特性の変化は明白であり、解像度が向上するに伴い、海洋表層ではKEが順次増大する。KEの鉛直構造の比較から、ROMS-L1には準地衡流的性質が強くなり、水深1000 m程度の深層までKEの増大域が拡大するのに対し、高解像度モデルL2では海洋表層に捕捉されるサブメソスケール渦の発達が卓越するため、渦の影響が混合層内程度に限定されることで、水深200 m程度までの表層でKEが著しく増大する。日本海中央部に発達する極前線周辺では、サブメソスケール渦の発達が弱い夏季・秋季では表層EKEが相対的に小さくなり、日本西岸に沿って北上する対馬第1分枝流と、極前線を構成する第3分枝流の両者が強化される。反対に、冬季・春季は海面冷却に伴う対称不安定によってサブメソスケール渦が広範囲で発達し、その強い水平渦混合作用によって平均運動エネルギーが広範囲に散逸するため、第1、3分枝流が減衰し、極前線が不明瞭になる。以上のことから、極前線と対馬暖流の季節的な変動がサブメソスケール渦の消長と極めて密接に関連している可能性が強く示唆された。

謝辞：本研究は科学研究費基盤研究C(24560622)の援助を受けた。

参考文献

- 1) Hirose, N., Kim, C.-H. and Yoon, J.-H.: Heat budget in the Japan Sea, *J. Oceanogr.*, Vol. 52, pp. 553–574, 1996.
- 2) 磯田 豊：熱輸送経路からみた日本海の深層水と極前線、海の研究, Vol. 12, pp. 69–84, 2003.
- 3) Kidokoro, H., Goto, T., Nagasawa, T., Nishida, H., Akamine, T. and Sakurai, Y.: Impact of a climate regime shift on the migration of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) in the Sea of Japan, *ICES J. Mar. Sci.*, pp.1314-1322, doi:10.1093/icesjms/fsq043, 2010.
- 4) 内山雄介, 石井翔大, 宮澤泰正：JCOPE2-ROMS 多段階ネスティングによる黒潮続流域でのダウンスケーリング効果の検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, p. I_436–I_440, 2012.
- 5) 内山雄介, 宮崎 大, 神吉亮佑, 宮澤泰正：日本海全域を対象としたダウンスケーリング海洋モデルによる広域海況評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, p. I_451–I_455, 2014.
- 6) Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C.: The Regional Oceanic Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates oceanic model, *Ocean Modell.*, Vol. 9, pp.347–404, 2005.
- 7) Miyazawa, Y., Zhang, R., Guo, X., Tamura, H., Ambe, D., Lee, J.-S., Okuno, A., Yoshinari, H., Setou, T. and Komatsu, K.: Water eddy resolving ocean reanalysis, *J. Oceanogr.*, Vol. 65, pp.737–756, 2009.
- 8) 内山雄介, 神吉亮佑, 高野祥子, 山崎秀勝, 宮澤泰正：海面高度計および Argo データに基づく 3 次元密度推定値を同化した海洋流動モデルの再現精度について, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 71, No. 2, 2015.
- 9) Toba, Y., Tomizawa, K., Kurasawa, Y. and Hanawa, K.: Seasonal and year-to-year variability of the Tsushima-Tsugaru warm current system with its possible cause, *La mer*, Vol. 20, pp.41–51, 1982.
- 10) Chu, P. C., Lan, J. and Fan, C.: Japan Sea Thermohaline Structure and Circulation. Part I: Climatology, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 31, pp. 244–271, 2001.
- 11) 重岡裕海：MOVE/MRLCOM-WNP データを用いた日本海の極前線の指標水温, 測候時報, 第 77 巻特別号, S109–S118, 2010.
- 12) Takikawa, T., Yoon, J.-H. and Cho, K.-D.: The Tsushima warm current through Tsushima straits estimated from ferryboat ADCP data., *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 35, pp. 1154–1168, 2005.

(2015.3.18 受付)

EFFECTS OF SUBMESOSCALE EDDIES ON SEASONAL VARIABILITY OF THE SUBPOLAR FRONT AND THE TSUSHIMA WARM CURRENT IN THE JAPAN SEA

Yusuke UCHIYAMA, Dai MIYAZAKI, Ryosuke KANKI
and Yasumasa MIYAZAWA

Seasonal variability of the subpolar front (SPF) and associated East Korea Warm Current (EKWC) and Tsushima Warm Current (TWC) is examined with the double nested JCOPE2-ROMS downscaling oceanic circulation model. The submesoscale (SMS) eddy-resolving model successfully reproduces the EKE trapping in the surface layer due to emergence of energetic SMS eddies mainly attributed to symmetric instability induced by surface cooling during winter and spring. The SMS eddy-driven horizontal stirring leads to weakening of the SPF, EKWC and TWC significantly. In turn, the decreased SMS mixing along with the increased influx from the Tsushima Straight stabilize the EKWC and TWC to sharpen the SPF.