



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

内山, 雄介
宮崎, 大
神吉, 亮佑
宮澤, 泰正

(Citation)

土木学会論文集B2(海岸工学), 70(2):I_451-I_455

(Issue Date)

2014

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2014 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002942>

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

Oceanic Downscaling Effects on the Circulations in Japan Sea with a JCOPE2-ROMS System

内山雄介¹・宮崎 大²・神吉亮佑²・宮澤泰正³

Yusuke UCHIYAMA, Dai MIYAZAKI, Ryosuke KANKI and Yasumasa MIYAZAWA

In Japan Sea, effects of submesoscale dynamics on the mean structure, eddies, etc. have not been fully understood yet. Towards a rigorous submesoscale Japan Sea modeling, a detailed oceanic downscaling experiment is conducted with a double nested ROMS at horizontal resolutions of 3 km (ROMS-L1) and 1 km (L2), forced by the assimilative JCOPE2 at 1/12 deg. as the lateral boundary condition. The results from ROMS-L1, L2 and JCOPE2 are compared to the observation and satellite altimetry dataset to show a good agreement with an appropriate parameter choice. Submesoscale eddies are quite active in the southern half of Japan Sea, leading to enhancement of prevailing Tsushima and Liman Currents.

1. はじめに

日本海には水産資源、天然ガス、メタンハイドレート、鉱物資源などが豊富に賦存し、我が国の経済にとって重要な海域である。地勢的には海峡部の水深が概ね50～140 mと極端に浅いために外海との海水交換が少なく、約300 m以深には水温0～1°C、塩分34.1程度のほぼ均一な日本海固有水と呼ばれる孤立した水塊が形成されるなど、閉鎖性の強い海域である。日本海に対する外海からの影響のうち代表的なものは、対馬海峡から流入する黒潮分岐流である対馬暖流と、間宮海峡から流入する低塩分のリマン寒流である。しかしながら、国際観測体制構築の立ち遅れから、太平洋沿岸域と比べて日本海における広域海況の定量的な評価は総じて就いたばかりであり、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おける O (10 km) 以下のサブメソスケール現象の重要性について指摘されつつあるが（例えば、内山ら、2013），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い。

本研究では、対馬海流やリマン海流を含む日本海全域の流動構造を精緻に評価するためのツールとして、3次元変分データ同化を用いた日本近海の海況再解析・予報システムJCOPE2（水平解像度約10 km：Miyazawaら、

2009）日平均データを最外側境界条件に用い、領域海洋モデルROMS（Shchepetkin・McWilliams, 2005）をベースとした多段ネスティングによるダウンスケーリングを行い、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する。これに先立ち、大局的

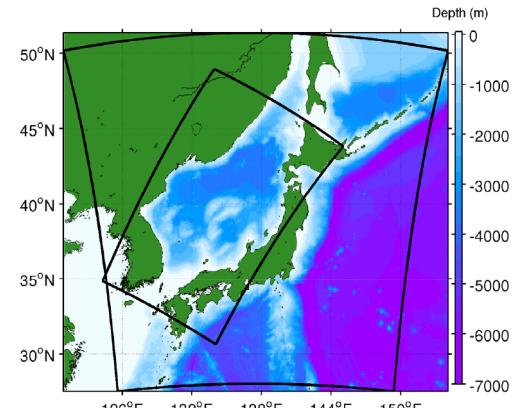


図-1 ROMS計算領域。外枠：L1領域、内枠：L2領域

表-1 ROMS-L1およびL2モデルの計算条件。

	ROMS-L1	ROMS-L2
計算期間	2009年1月～2013年6月中旬	2010年1月～2011年1月中旬
水平格子数 (鉛直層数)	784×864 (×鉛直32 layer)	1024×1760 (×鉛直40 layer)
水平解像度	3 km	1 km
境界条件	JCOPE2	ROMS-L1
風応力	JMA GPV-GSM (日平均値)	
海面フラックス	COADS05 (月平均気候値)	
海面水温	AVHRR-Pathfinder (月平均気候値)	
海底地形	JEGG500 ($dx = 500$ m) + SRTM30 (30秒)	

1 正会員 博(工) 神戸大学准教授 大学院工学研究科市民工学専攻

2 学生会員 学(工) 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻
3 博(理) (独法) 海洋研究開発機構 地球環境変動
領域

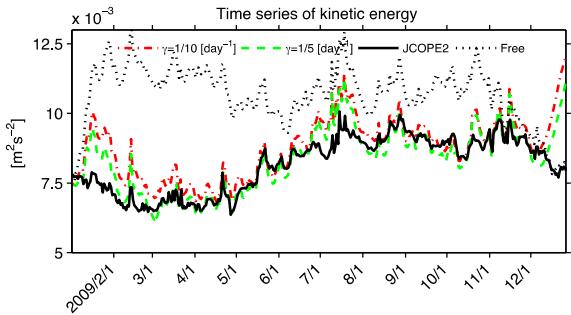


図-2 JCOPE2およびROMS-L1計3ケースによる、海洋表層($z > -100\text{m}$)で体積平均した運動エネルギー(KE)の時間変化(2009年の1年間)。

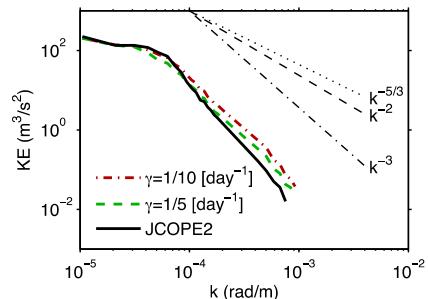


図-3 日本海を対象とした表層運動エネルギー(KE)の波数スペクトルの比較。

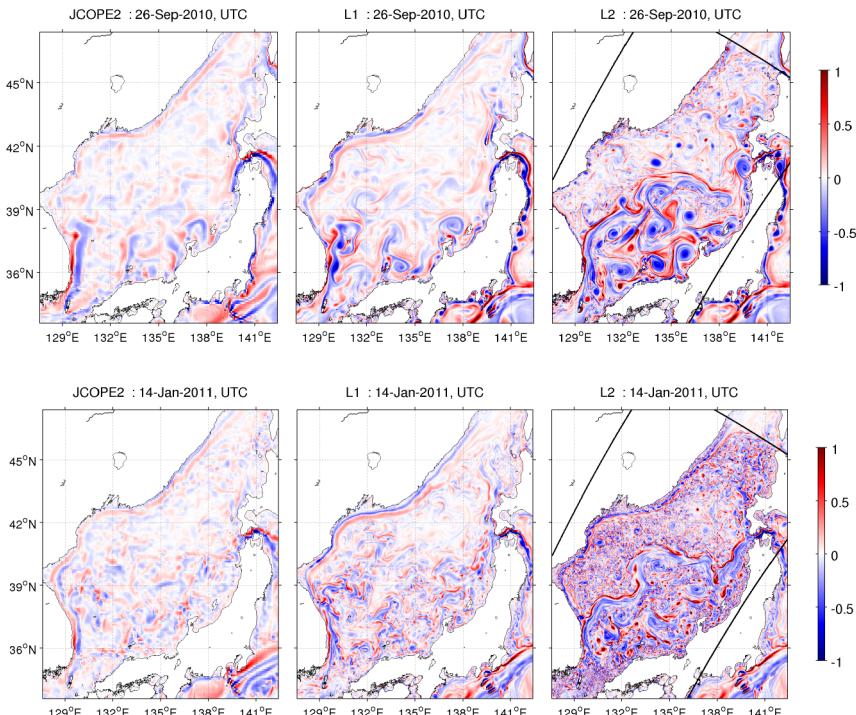


図-4 JCOPE2(左), ROMS-L1(中, 緩和強度 $\gamma = 1/10$), ROMS-L2(右)による表層無次元渦度のスナップショット(日平均値). (上図)2010/09/26, (下図)2011/01/14.

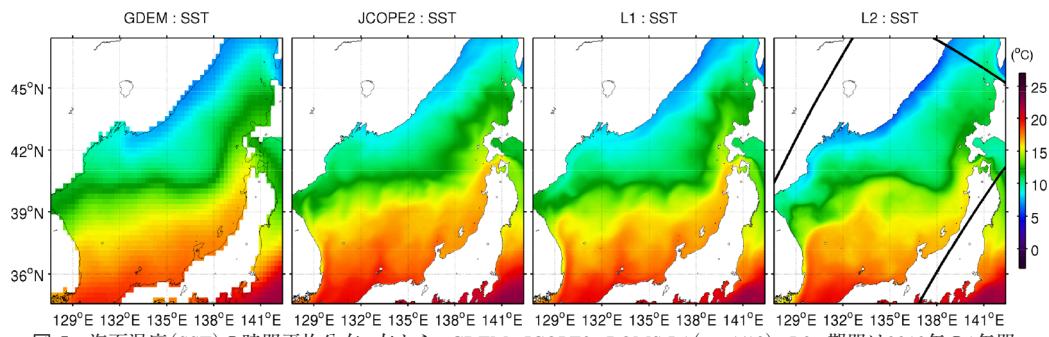
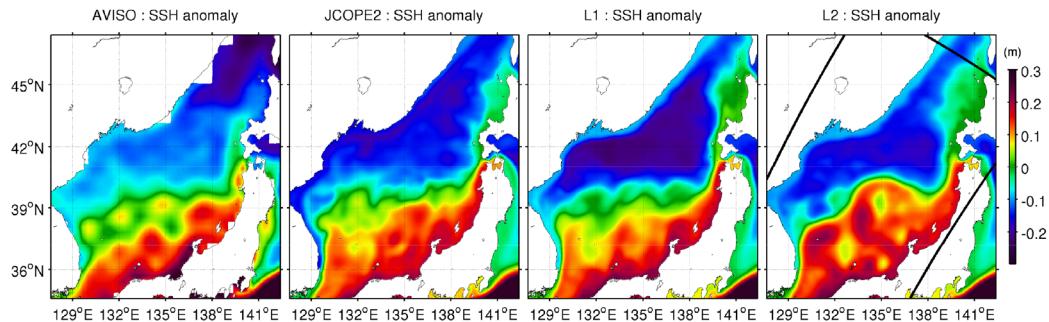
なメソスケール流動の再現に必要な簡易データ同化手法であるT-S nudgingの必要性と緩和強度に関する感度実験を行い、観測データやJCOPE2再解析値との比較を通じてモデルの妥当性を確認する。さらに、海峡通過流量、表層地衡流、メソスケール変動強度、渦運動エネルギー(EKE)などを解析し、日本海広域流動に対するダウンスケーリング効果を明らかにすることを目的とする。

2. 解析モデル

日本周辺海域を対象とした2段階のROMS計算領域を構築した(図-1)。JCOPE2再解析データの日平均値を時空間内挿して最外境界条件とし、ROMSを用いた1-way

offline nestingによって、ROMS-L1(水平解像度3 km, 鉛直方向32層)からROMS-L2(水平解像度1 km, 鉛直方向40層)へと順次ダウンスケーリングを行った。ROMS-L1およびL2モデルの計算条件は表-1に示すとおりであり、海上風応力については気象庁GPV-GSMの日平均値、その他の海面フラックスについてはCOADS05の月平均気候値、SST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。

ROMS-L1モデルでは、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、簡易4次元データ同

図-5 海面温度(SST)の時間平均分布。左から、GDEM, JCOPE2, ROMS-L1($\gamma = 1/10$), L2. 期間は2010年の1年間。図-6 海面高度(SSH)偏差の時間平均分布。左から、AVISO, JCOPE2, ROMS-L1($\gamma = 1/10$), L2. 期間は2010年の1年間。

化の1つであるT-S nudging（例えば、内山ら、2012）をJCOPE2の塩分と水温の10日平均値に対して全領域を対象に導入した。さらに、T-S nudgingにおける感度分析を行うため、緩和強度（nudging strength） γ を $1/5\text{ (day}^{-1}\text{)}$ と、その半分の強度である $1/10\text{ (day}^{-1}\text{)}$ の2通りに変化させた数値実験を行った。また、参考のため、T-S nudgingを行わないケース（Free）も併せて実施し、JCOPE2データと比較検討した。感度実験の計算期間は2009年初頭～2010年末までの2年間である。次章で述べるように、T-S nudgingにおける緩和強度はいずれの値であってもメソスケールの再現性は確保され、しかも緩和強度の弱いケース（ $\gamma = 1/10\text{ day}^{-1}$ ）の方がより細かな海洋現象を表現できることが判明した。したがって、ROMS-L2モデルの境界条件には $\gamma = 1/10$ としたROMS-L1モデルを用い、L2ではT-S nudgingなどの制御を一切加えない計算を行うこととした。ROMS-L2モデルの計算期間は2010年1月から2011年1月中旬までの1年強である。

3. T-S nudgingに関する感度実験

JCOPE2-ROMS ダウンスケーリングシステムのメソスケール海洋構造再現精度を確認するため、海洋表層（水深100 m以浅）で体積平均した運動エネルギー（KE）の1年間の時系列をJCOPE2およびROMS-L1のT-S nudgingを施した2ケースとFREEの計4ケースについて調べた（図

表-2 対馬海峡・津軽海峡における平均流量の比較。観測値は四竈(1994), Takikawaら(2005)による。

流量 (Sv)	対馬海峡	津軽海峡
観測値	2.64	1.40
ROMS-L1	2.29	1.58
ROMS-L2	2.25	1.60

-2）。FREEケースは他の三者と比べて全期間においてKEが大きく、データ同化を含むJCOPE2のKEレベルが真値に近いと考えると、FREEケースではKE散逸が不十分であり、表層の海洋流動を過大評価していると言える。これは黒潮続縦にに関するダウンスケーリングモデル（内山ら、2012）にも見られた傾向であり、格子解像スケール以下の渦によるKE散逸を適切に評価するためには何らかの制御が必要であることを示している。

一方、T-S nudging を施した2ケースではKEレベルがJCOPE2と同程度まで低減しており、季節変動パターンについても概ね良好に再現することに成功していることから、nudging項がKEを適切に散逸させる役割をしていることがわかる。緩和強度の値については、 $\gamma = 1/10$ およびより緩和強度を強めた $\gamma = 1/5$ の結果を比較すると、両者の間に大きな差異はない。しかしながら、緩和強度の弱い $\gamma = 1/10$ のほうが1年を通してやや大きなKEを示していることから、KEのダンピングが少なく、より詳細な海洋現象が表現できることが分かる。なお、L1では冬～春

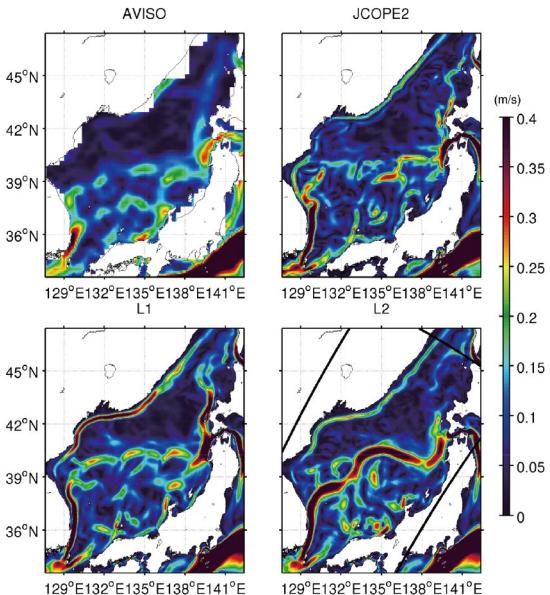


図-7 平均表層流速の絶対値(m/s)の比較。計算期間は2010年の1年間。(左上)AVISOによる地衡流速、(右上)JCOPE2、(左下)ROMS-L1($\gamma = 1/10$)、(右下)L2。

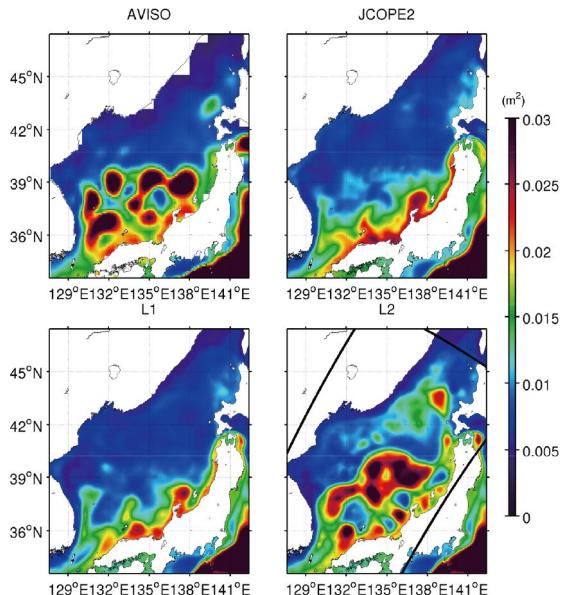


図-8 海面高度(SSH)の分散(m^2)の比較。計算期間は2010年の1年間。(左上)AVISO、(右上)JCOPE2、(左下)ROMS-L1($\gamma = 1/10$)、(右下)L2。

季にサブメソスケール渦の発達が顕著となり、JCOPE2よりもKEが強化されている(図-2)。

次に、ROMS-L1モデルおよびJCOPE2による日平均表層流速を用いて、日本海におけるazimuth方向に平均された表層KEの波数スペクトルを求めた(図-3)。JCOPE2に比べROMS-L1の方が、また緩和強度で比較すると強度の弱い $\gamma = 1/10$ (day^{-1})の方が高波数帯のエネルギーが増加していることが示されている。その結果、高波数側の勾配がより緩やかになり、波数 k の-3乗に漸近している。この傾向は表層無次元相対渦度のスナップショット(図-4)での比較からも確認され、ダウンスケーリングに伴いROMS-L2では対馬海峡周辺の島嶼群から発生するサブメソスケール渦度が強化され、渦活動がより活発になっている。また、図-4から、夏季には比較的空間スケールの大きなメソスケール渦が発達しているのに対し、冬季ではサブメソスケール渦の発達が顕著に確認される。これは、海面冷却による対称不安定の強化に伴うサブメソスケール渦への遷移(例えば、内山ら、2013)を表すものと考えられる。以上のことから、L2の境界条件および以下の解析では、 $\gamma = 1/10$ (day^{-1})としたROMS-L1モデルの結果を用いることとする。

4. 対馬・津軽海峡通過流量の比較

構築したダウンスケーリング日本海全域モデルの妥当性を検討するために、まず、対馬海峡と津軽海峡における平均通過流量の観測値との比較を行う(表-2)。両海峡

の観測値は、それぞれTakikawaら(2005)、四竜(1994)によるADCP観測に基づく推算値を参考にした。観測値、ROMS-L1およびL2による通過流量は、対馬海峡ではそれぞれ2.64, 2.29, 2.25 Sv、津軽海峡では1.4, 1.58, 1.6 Svであり、L1, L2モデルのいずれも観測値と良好に一致していることが確認される。

5. 広域海況の比較

(1) 海洋表層の時間平均構造の比較

ダウンスケーリング効果を検証するために、以後では主にJCOPE2、ROMS-L1およびL2の計算結果の比較を行なう。図-5は海表面温度(SST)を、図-6は海面高度(SSH)偏差を示しており、いずれも2010年平均値で、SSHは空間平均値からの偏差を表示している。比較のため、観測値として、SSTはGDEM(<http://www.usgs.gov/>)、水平解像度1/4度)気候値、SSHはAVISO衛星海面高度計データ(同1/4度)を併せて示している。いずれのケースも40°N付近にSST約12°Cの等温線が日本海を横断するように形成されており、ロシア沿岸において北部から南に向かって差し込むように低温域が発達するなど、SSTの平均構造は概ね一致している。SST分布に対応して、SSH偏差は40°N付近を境に南側で高く、反対に大陸側沿岸部で低いなど、大局的な構造は整合的である。一方で、JCOPE2に比べて高解像度のROMS-L1, L2モデルでは、大陸沿岸域においてSSHの上昇域が生じ、SSTの低温帶の南下傾向がより鮮明になる

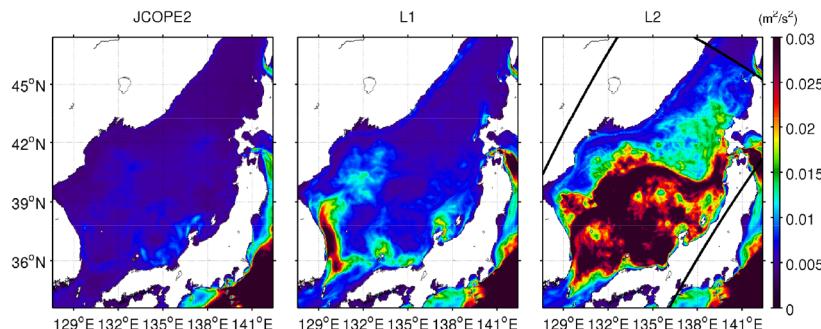


図-9 季節変動成分を除去した海洋表層運動エネルギーEKEの空間分布(m^2/s^2)。計算期間は2010年の1年間。(左)JCOPE2、(中央)ROMS-L1($\gamma=1/10$)、(右)ROMS-L2。

とともに、 40°N 付近ではSSH勾配が最大となるフロントが強化されている。そこで次に、2010年の年平均海面表層流速の絶対値を、AVISOによる地衡流速も含めて比較した(図-7)。AVISO海面表層流速はJCOPE2、ROMSよりもやや小さな値となっているが、低解像度のAVISOではシャープなSSH勾配やフロント構造が表現できないため、海流による表層流速は過小評価されていると考えられる。四者のパターンは定性的に同様であり、ROMS-L1およびL2モデルは日本海の海流分布をよく再現できていると言える。同時に、高解像度化に伴ってロシア・中国沿岸を南下するリマン寒流、朝鮮半島東岸を北進する東鮮暖流、日本沿岸を北上する対馬海流(特にフロントに沿って 39° 付近を東進する対馬分枝流)、太平洋へ抜ける津軽暖流の流路はより細くなり、流速値が増大している。低解像度のAVISOやJCOPE2では、特にリマン海流の再現性度が低い傾向にある。ROMS-L2に見られたSSH上昇域は強化されたリマン海流に対応しており、SSH勾配の増大によって地衡流的にリマン海流が強化され、それに伴う鉛直混合によってSSTが下降したものと考えられる。

(2) 海洋表層の乱流変動の比較

メソスケール変動強度の指標として、AVISO、JCOPE2、ROMS-L1およびL2によるSSH分散を比較する(図-8)。観測値であるAVISOによるSSH分散と比較するとJCOPE2およびROMS-L1では、分散の発達域が日本海南部に限られており、日本沿岸に張り付いたような分布になっている。一方、最も高解像度のROMS-L2では北緯 41° 以南のより広範囲において分散が大きく、AVISOデータとの良好な一致が確認される。

最後に、表層流速データに対して周波数フィルタを用いてReynolds分解を行い、季節変動成分を除去した表層EKEの空間分布を求めた(図-9)。JCOPE2→L1→L2と、解像度の向上に伴ってEKEは著しく増大する傾向が確認できる。EKEの増大と海表面無次元渦度(図-4)は密接に関連があり、低解像度モデルでは再現することのでき

なかったサブメソスケール渦が高解像度モデルでは表現され、EKEが著しく強化される。この傾向はROMS-L1では対馬海峡から朝鮮半島東部海域で、L2では日本海ほぼ全域で顕著に現れていることが分かる。

6. おわりに

本研究では、日本海全域を対象にJCOPE2-ROMSを用いた多段階ネスティングによるダウンスケーリング海洋モデルを構築した。親領域であるROMS-L1では、メソスケール海洋構造の再現性を向上させるために簡易データ同化であるT-S nudgingを導入する必要があることが確認された。観測値や再解析値との比較をすることで、モデルの高い再現性を示すとともに、ダウンスケーリング効果を検証した。高解像度化に伴い、日本海の主な海流である対馬暖流、その分枝海流およびリマン寒流が強化された。また、ROMS-L2では対馬海峡の島嶼群周辺などにおいてサブメソスケール渦が発生し、北緯 41° 以南の広域においてEKEが増大することが分かった。

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

- 内山雄介・石井翔大・宮澤泰正(2012)：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. L436-L440.
- 四電信行(1994)：日本海・水と物質の循環 海外設置型ADCPにより実測された津軽海峡内の流量変動、月刊海洋, 第26号, pp. 815-818.
- Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu (2009) : Water eddy resolving ocean reanalysis, J. Oceanogr., Vol. 65, pp. 737-756.
- Takikawa, T., J. H. Yoon and K. D. Cho (2005) : The Tsushima warm current through Tsushima straits estimated from ferryboat ADCP data., J. Phys. Oceanogr., Vol. 35, pp. 1154-1168.