

海洋変動における微細現象と大規模循環の相互作用

課題責任者

升本 順夫 東京大学 大学院理学系研究科

著者

佐々木 英治*1, 升本 順夫*2,1

*1 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

*2 東京大学 大学院理学系研究科

本課題では、海洋の数 km から数 10 km 規模の微細なサブメソスケール現象を再現する高解像度海洋シミュレーションを行い、サブメソスケール現象の時空間変動とそれと異なる規模の中規模渦や大規模循環場とのスケール間相互作用を明らかにすること、さらに従来とは質的に異なる海洋循環像を示すことを目的としている。平成 30 年度は、北太平洋域の水平解像度約 3 km の海洋大循環モデル出力を用いて、サブメソスケール現象の領域による特色を調べた。黒潮続流域、亜熱帯反流域では混合層不安定で冬季にサブメソスケールの微細現象が活発になり、その活発なサブメソスケールの現象が大規模場に影響を及ぼす。一方、北東太平洋の亜寒帯域ではサブメソスケールの微細現象が冬季に穏やかであるため、その微細現象から大規模場への影響は小さくなっていた。NASA と CNES による SWOT ミッションで 2021 年秋に開始される予定である高解像度の海面高度観測で、サブメソスケールの微細現象の特徴が全球規模で捉えられることが期待されている。

キーワード: 海洋サブメソスケール許容シミュレーション、エネルギー逆遷移、北太平洋、季節変動

1. 本課題の概要

海洋では、大規模循環場と数 10 km から 100 km 規模の中規模渦が熱や物質輸送に重要な役割を担い、全球規模の地球環境の維持とその変動に多大な影響を及ぼしていることが知られている。一方、衛星観測による水温、海面データから、中規模渦よりも微細な数 km から数 10 km 規模の渦や筋状構造を持つサブメソスケール現象が多く、海域で観測されている。また、理想的な設定の数値計算を用いた最近の研究では、海洋のサブメソスケール現象は、物理場に加えて物質循環、生態系にも影響を及ぼすことが示唆されている。しかし、微細なサブメソスケール現象を考慮して、海洋内部を含む循環場を理解するための広範囲で高解像度の観測は困難であり、そのデータは存在しないため、数値計算の手法を用いざるを得ない。そこで本研究課題では、海洋の微細なサブメソスケール現象から大規模循環場の幅広い空間スケールの海洋現象を同時に再現する全球規模の高解像度海洋シミュレーションを実施し、サブメソスケール現象の時空間変動、中規模渦や大規模循環とのスケール間相互作用の研究を行うとともに、膨大なデータから従来とは質的に異なる海洋循環像を示すことを目的としている。

平成 30 年度の成果として、北太平洋と領域は限定されるが、サブメソスケール現象をほぼ解像する高解像度モデルの結果を用いて、サブメソスケール現象の季節変動とスケール間相互作用に注目し、黒潮続流域、亜熱帯反流域、北東太平洋の亜寒帯域の海域毎の特徴を示した。

2. サブメソスケール許容シミュレーション

本研究では、北太平洋域を対象領域として海洋大循環

モデル OFES (OGCM for the Earth Simulator; Masumoto et al. 2004 [1], Komori et al. 2005 [2]) をベースとして構築したサブメソスケールの微細現象をかなり再現する水平解像度約 3 km のモデルを用いる。モデル領域は 100° E - 70° W, 20° S - 68° N で、最大水深は 6,000m、鉛直層数は 100 である。初期値は、2000 年 1 月 1 日の水平解像度約 10 km のモデルの温度、塩分の出力を用い、静止状態から 2003 年末までの 4 年間のシミュレーションを、JRA-25 再解析データ (Onogi et al. 2007[3]) の大気データを用いて実施した。

本モデルは、北西太平洋域のサブメソスケールの微細現象が冬季に活発になる季節変動を良く再現している (Sasaki et al. 2014[4])。以下では、2001 年から 2003 年までの出力を用いて、サブメソスケールの微細現象とスケール間の相互作用について、海域による特徴を示す (Sasaki et al. 2017[5])。

3. 結果

3.1. サブメソスケールの微細現象

北太平洋モデルで再現された冬季の海面相対渦度の分布 (図 1) では、サブメソスケール現象の活動度が海域によって異なっている。黒潮続流域、亜熱帯反流域および東部亜熱帯では、数 10 km 以下の規模の微小渦や筋状構造のサブメソスケールの現象が活発である。一方、20° N 以北の亜寒帯域と東部亜熱帯モード水 (130° - 140° W, 30° - 40° N) の海域を除く中緯度東部太平洋域の大部分では、相対渦度の大きさが小さく、サブメソスケールの現象はあまり活発ではなく、数 10 km 規模より大きなメソスケールの現象が相対的に多く見られる。

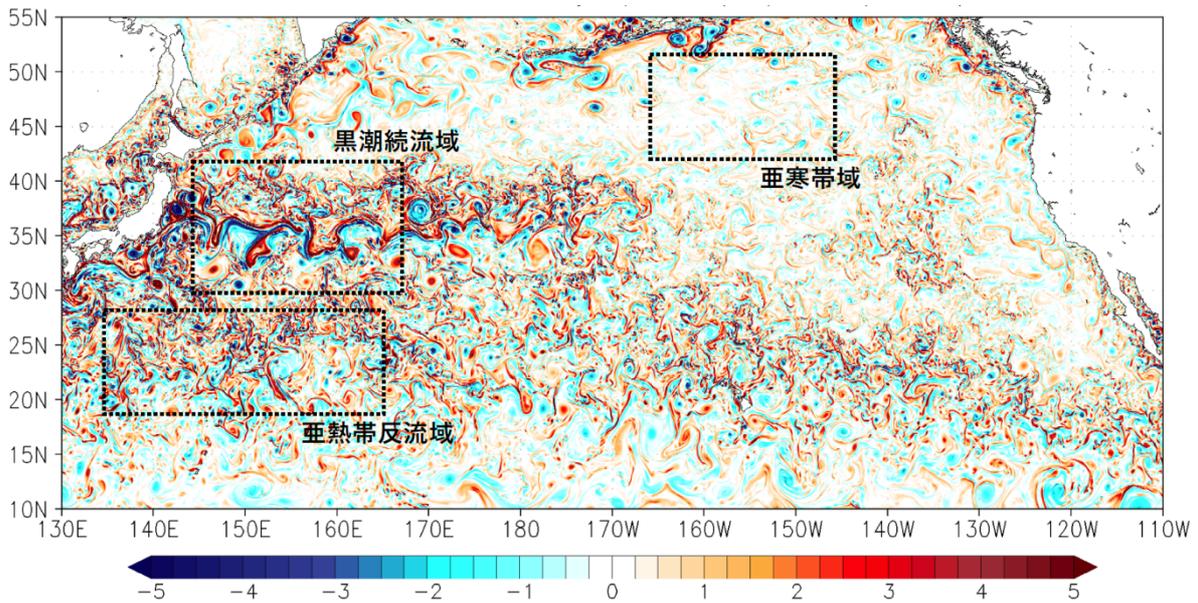


図1. 2002年3月1日の海面流速の相対強度 (10^{-5} s^{-1})。本研究では黒潮続流域 (144°E-168°W, 30°-42°N)、北太平洋亜熱帯反流域 (135° - 165° E, 18° - 28° N)、北東太平洋の亜寒帯域 (145° - 165° W, 42° - 52° N) の領域を解析する。

3.2. スケール毎の運動エネルギー

サブメソスケールの微細構造の季節変動とその他のスケールへの影響を明らかにするために、海面流速から算出したスケール毎の海面運動エネルギーの2001年から2003年の変動を領域毎に調べた。図1で冬季の微細構造が活発な黒潮続流域 (図2a) と亜熱帯反流域 (図2b) では、100 km スケール以下 (紫線) の運動エネルギーは冬季に大きく、夏季に小さくなり、これらの海域では微細現象の季節変動が明確である。一方、北東太平洋の亜寒帯域 (図2c) では、100 km 以下の運動エネルギーが1桁小さく、明確な季節変動は見られない。

他のスケールの運動エネルギーの変動に注目すると、黒潮続流域 (図2a) では、100 - 200 km (緑線) の運動エネルギーのピークが、100 km 以下 (紫線) より約2ヶ月遅れている。この時間差は、サブメソスケールの微細現象からメソスケールにエネルギーの逆変換によって生じている可能性がある。

亜熱帯反流域 (図2b) では、黒潮続流域同様のエネルギーの逆変換を示唆する結果が見られる。さらに、200-300 km (赤線) と300 km 以上 (青線) の運動エネルギーは夏季にピークが見られる。このスケールの大きな運動エネルギーの季節変動は、夏季に亜熱帯反流に伴う前線の傾圧性が強くなることによって生じる不安定現象によると考えられる (Qiu et al. 2014[6])。また、300 km 以上の大規模場の運動エネルギー (青線) には、突発的に運動エネルギーが増加するイベントが見られるが、台風の通過による運動エネルギーの増加に対応していた。

亜寒帯域 (図2c) では、メソスケールの100 - 200 km (緑色) の運動エネルギーの変動が相対的に大きい。その

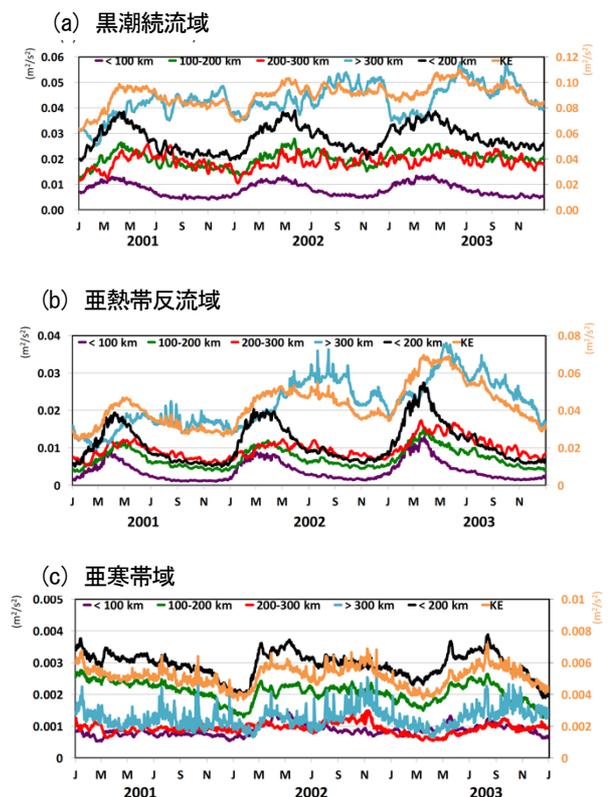


図2. 海面流速から算出した領域平均のスケール毎の運動エネルギーの変動。100 km 以下 (紫線)、100 - 200 km (緑線)、200 - 300 km (赤線)、300 km 以上 (青線)、200 km 以下 (黒線)、全スケール (橙線、スケールは右軸)。(a) 黒潮続流域、(b) 亜熱帯反流域、(c) 北東太平洋の亜寒帯域。

変動は、2002年と2003年は夏季に大きくなっているが、2001年は年中にわたり小さくなっており初期値からの影響も考えられる。また、亜熱帯反流域（図2b）と同様に300 km以上の大規模場の運動エネルギー（青線）に突発的なピークが見られるが、大気擾乱による運動エネルギーの増加と考えられる。

3.3. 運動エネルギーのスペクトル流束

前節でスケール毎の運動エネルギーの季節変動のピークが、より大きなスケールの方が遅れており、エネルギーの逆遷移の可能性があることを指摘した。このスケール間相互作用を確認するために、運動エネルギーの移流をスケール k から格子の最大スケール k_s まで積分したスペクトル流束、

$$\Pi(k) = \int_k^{k_s} Re \left(\widehat{\mathbf{u}}_g^* \cdot (\mathbf{u}_g \cdot \widehat{\nabla}_H \mathbf{u}_g) \right) (k) dk \quad (1)$$

を各領域毎に算出する。 \mathbf{u}_g は海面の地衡流速、 ∇_H は水平微分、 Re は実数部、 $*$ は複素共役、 $\widehat{}$ は水平スペクトル変換である。

冬季の黒潮続流域のスペクトル流束（図3a 黒線）は、100 kmスケールで $-6e-8 \text{ m}^2/\text{s}^3$ の負の流束があり、100 km以下のサブメソスケールの微細現象から、100 km以上のメソスケール以上の大きなスケールへの多大な運動エネルギーが遷移している。また、およそ30 km以下のスケールでは、エネルギー流束の値は小さいが正となっている。この正のエネルギー流束は、サブメソスケール現象からさらに小さなスケールの現象にエネルギーが遷移、消散していることを示している。一方、夏季（図3a 赤線）は100 kmスケールで、 $-2e-8 \text{ m}^2/\text{s}^3$ の負の流束となっており、エネルギーの逆遷移を示しているが、冬季よりも小さくなっている。なお、冬季、夏季ともにメソスケール（100 km - 300 km）で負の流束が最大を示し、メソスケールから大規模場へのエネルギーの逆遷移は、季節を問わず大きくなっている。

亜熱帯反流域では、黒潮続流域と同様に冬季にサブメソスケール現象からより大きなスケールへの大きなエネルギーの逆遷移が見られ（図3b 黒線）、夏季（赤線）はその大きさが小さく、黒潮続流域より季節による差が明確であった。また、冬季には25 km以下の正のエネルギー流束が見られ、黒潮続流域と同様にサブメソスケールからさらに小さなスケールの現象へのエネルギー遷移が起きている。これらの結果は、冬季に活発なサブメソスケール現象が見られる黒潮続流域、亜熱帯反流域の海域では、サブメソスケールからより大きなスケールへのエネルギーの逆遷移で、大きなスケールの現象が活発化されていることを示している。

一方、冬季の北東太平洋の亜寒帯域では100 kmで $-5e-10 \text{ m}^2/\text{s}^3$ の負の流束が見られるが、その値は黒潮続流域、亜熱帯反流域の約1/100である（図3c 黒線）。また、夏季でもその値は $-2.5e-10 \text{ m}^2/\text{s}^3$ （赤線）と冬季の約1/2であり、黒潮続流域、亜熱帯反流域より季節変動は小さい。この要因は、亜寒帯域では冬季に活発なサブメソスケールの微細現象が見られないことが要因と考えられる。

4. まとめ

冬季のサブメソスケールの微細現象を良く再現する北太平洋の高解像度モデルの出力を用いて、黒潮続流域、亜熱帯反流域、北東太平洋の亜寒帯域の地域によるサブメソスケール現象の特徴を比較した。冬季にサブメソスケール現象が活発になる黒潮続流域と亜熱帯反流域では、その季節変動に加えて、冬季により大きなスケールの現象へのエネルギーの逆遷移でメソスケール以上の循環場を活発化させていた。一方、冬季の活発なサブメソスケール現象が見られない亜寒帯域では、上記の特徴は見られなかった。2021年秋に衛星の打ち上げが予定されているSWOTミッションによって、全球規模で高解像度海面高度が測定され、世界海洋のサブメソスケール現象の特徴が捉えられることが期待されている。

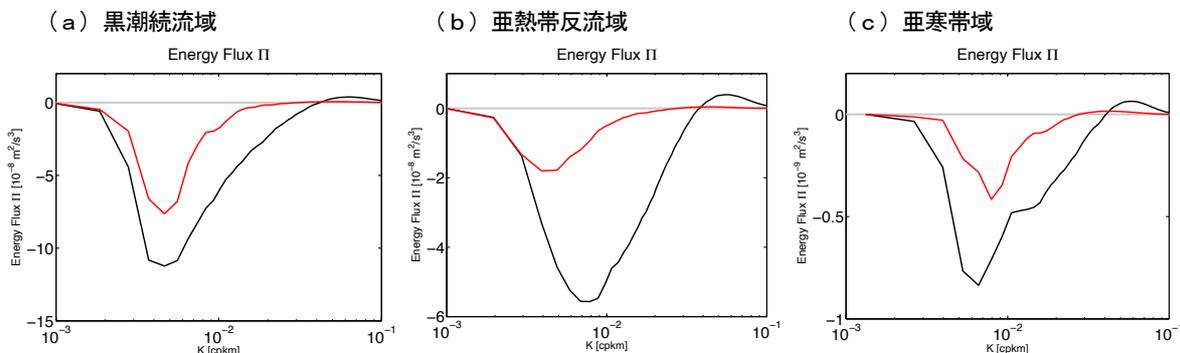


図3. 冬季（2月と3月、黒線）と夏季（8月と9月、赤線）の運動エネルギーのスペクトル流束。(a) 黒潮続流域、(b) 亜熱帯反流域、(c) 北東太平洋の亜寒帯域。横軸の 10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} cpkmはそれぞれ1000、100、10 kmに対応。

文献

- [1] Y. Masumoto, et al., “A fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean: Preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator)”, *Journal of Earth Simulator*, 1, 35–56, 2004.
- [2] N. Komori, K. Takahashi, K. Komine, T. Motoi, X. Zhang, G. Sagawa, “Description of sea-ice component of coupled ocean–sea-ice model for the Earth Simulator (OIFES)”, *Journal of Earth Simulator*, 4, 31–45, 2005.
- [3] K. Onogi, et al., The jra-25 reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85(3), 369–432, 2007.
- [4] H. Sasaki, P. Klein, B. Qiu, Y. Sasai, “Impact of oceanic scale-interactions on the seasonal modulation of ocean dynamics by the atmosphere”, *Nature Communications*, 5, 5636, 2014.
- [5] H. Sasaki, P. Klein, Y. Sasai, B. Qiu, “Regionality and seasonality of submesoscale and mesoscale turbulence in the North Pacific Ocean”, *Ocean Dynamics*, 67(9), 1195–1216, 2017.

Interactions between Oceanic Fine-scale Phenomena and Large-scale Circulations

Project Representative
Yukio Masumoto

Graduate School of Science, The University of Tokyo

Authors

Hideharu Sasaki*¹, Yukio Masumoto *^{2,1}

*¹Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Center

*²Graduate School of Science, The University of Tokyo

In this project, we conducted the high-resolution oceanic simulations permitting submesoscale motions. The characteristics of the submesoscale motions in different regions were examined in the outputs from the North Pacific simulation. In the Kuroshio Extension and Subtropical Countercurrent regions, the submesoscale motions are ubiquitous in winter. The spectra of kinetic energy flux in winter show the kinetic energy cascade inversely converted from the submesoscale to the larger scales. In the subarctic, this inverse energy cascade is very small because the submesoscale motions are not active in winter. It is expected that the high-resolution satellite observation of sea surface height by the SWOT mission, scheduled to be launched in 2021, captures the characteristics of oceanic fields with the scales from the submesoscale to large scale in the global ocean.

Keywords : submesoscale permitting simulation, inverse energy cascade, North Pacific, seasonal variations

1. Introduction

The oceanic submesoscale motions with the scales from several to several tens km can be observed by satellite images. However, the cloud-free images are very rare. The resolution of the conventional satellite altimeter is about 100km, which is not enough to capture the submesoscale motions. Currently, there are no observations to capture well the submesoscale motions in the large area. On the other hand, the recent numerical studies suggested non-negligible impacts of the submesoscale motions on the oceanic fields including biogeochemical tracers. In this project, we construct the datasets from high-resolution simulations reproducing the submesoscale motions and investigate their temporal and spatial variations and their interactions with the larger-scale circulations. In this report, we examined the characteristics of submesoscale motions and their contributions on the oceanic fields in the Kuroshio Extension (KET), Subtropical Countercurrent (STCC), and Subarctic (SA) regions by using the outputs from a North Pacific submesoscale permitting simulation (Sasaki et al. 2017 [1]).

2. Submesoscale permitting simulation

We conducted a North Pacific submesoscale permitting simulation at the horizontal resolutions of about 3 km using the OFES (OGCM for the Earth Simulator; Masumoto et al. 2004 [2], Komori et al. 2005 [3]). The simulation was integrated from 2000 to 2003 using an atmospheric reanalysis of JRA-25 (Onogi et al. 2007 [4]). The initial conditions are temperature and salinity fields on 1 January 2000 from the simulation at the horizontal resolution of about 10 km.

3. Results

3.1. Submesoscale motions in winter

The distribution of surface relative vorticity in the late winter (Fig. 1) highlights the regionality of submesoscale motions. In the Northwestern Pacific including the KET and STCC regions and in the eastern subtropical Pacific, small eddies and elongated filamentary structures with the scales smaller than several tens kilometers are ubiquitous. In contrast, these submesoscale motions are calm in the subarctic region and the eastern mid-latitude Pacific, where the motions with the scale larger than several ten kilometers have a presence more than the smaller scale motions.

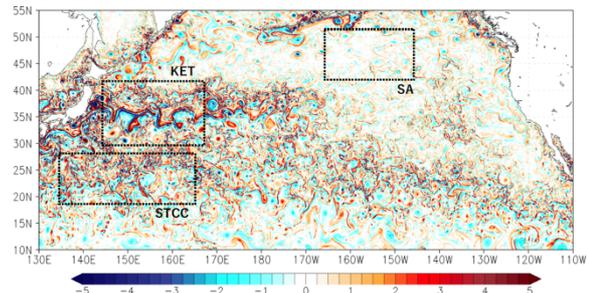


Fig.1 Surface relative vorticity (10^{-5} s^{-1}). The KET (144°E - 158°W and 30° - 42°N), STCC (135° - 165°E and 18° - 28°N), and SA (145° - 165°W , 42° - 52°N) regions.

3.2. Kinetic energy variations

The kinetic energy variations with the scales smaller than 100 km in the KET region (purple curve in Fig. 2a) and the STCC region (not shown) highlight the seasonality of submesoscale motions: active in winter and calm in summer. The peaks of kinetic energy with the scales from 100 km to

200 km (green curve) follow those with the scale smaller than 100 km (purple curve) by about 2 months. This time lags suggest the contributions of the submesoscale motions on the motions with the larger scales by the inverse energy cascade. In the STCC region, this time lag is also found (not shown).

In the SA region, the variations of kinetic energy with the scales smaller than 100 km (purple curve in Fig. 2b) are small and the magnitude of the kinetic energy is much smaller by one order than that in the KET (purple curve in Fig. 2a) and STCC (not shown) regions. This small magnitude is consistent with Fig. 1: calm submesoscale motions in winter in the SA region.

3.3. Spectral kinetic energy flux

The spectral kinetic energy flux is estimated from the surface geostrophic currents to examine the scale interactions. The large negative flux at 100 km in winter in the KET region (black curve in Fig. 3a) shows the inverse energy cascade from the scales smaller than 100 km to the larger scales. This result shows that the submesoscale motions lead to the activation of the motions with the larger scales. In the scales smaller than 25 km, the positive flux explains the energy cascade to the smaller scales. This cascade may lead to the energy dissipations at the much smaller scales. In summer (red curve), the small negative flux at 100 km represents the small inverse energy cascade. The characteristics of the energy flux in the STCC region (not shown) are similar to those in the KET region.

In the SA region, the negative flux at 100 km in winter (black curve in Fig. 3b) is found as well as in the KET region. However, its magnitude is much smaller by about 1/100 times than that in the KET region because the submesoscale motions in winter in the SA region are calm (Fig. 1). Therefore, their contributions to the motions with the larger scales are much less than those in the KET region.

4. Summary

This report shows the regionalities of the submesoscale motions and their contributions to the motions with the other scales by using the outputs from a submesoscale permitting North Pacific simulation. In the KET and STCC regions, the submesoscale motions in winter are ubiquitous, which leads to the activation of the motions with the larger scales via the inverse energy cascade. In contrast, the inverse energy cascade in the SA region is much less than that in the KET and STCC regions because the submesoscale motions are calm in winter. The coming satellite observation of high-resolution sea surface height in the SWOT mission, scheduled to be launched in 2021, is expected to capture the oceanic fields including submesoscale to large scale motions in the world ocean.

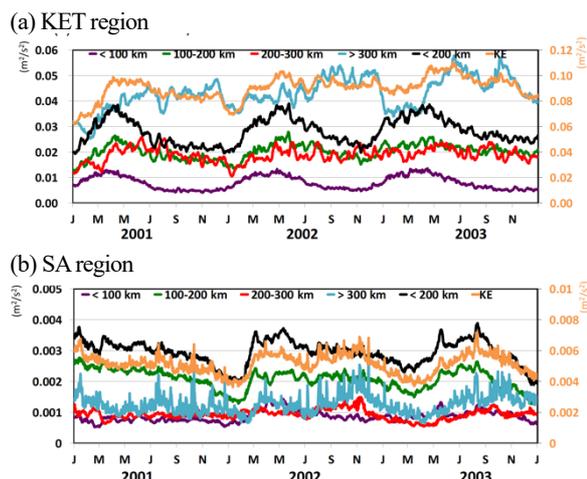


Fig. 2 Kinetic energy variations from 2001 to 2003 with the scales of the smaller than 100 km (purple curve), between 100 km and 200 km (green curve), between 200 km and 300 km (red curve), the larger than 300 km (blue curve), and the smaller than 200 km (black curve). The total energy is orange curve with the scales of the right axis. The top and bottom panels show the variations in the KET and SA regions, respectively.

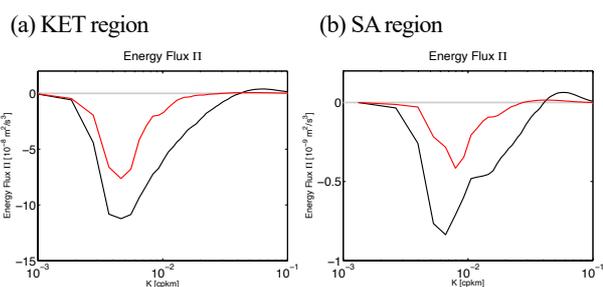


Fig. 3 Spectral energy flux in the (a) KET and (b) SA regions in winter of January and February (black curve) and summer of August and September (red curve). 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} cpkm correspond to 1000, 100, 10 km respectively.

References

- [1] H. Sasaki, P. Klein, Y. Sasai, B. Qiu, “Regionality and seasonality of submesoscale and mesoscale turbulence in the North Pacific Ocean”, *Ocean Dynamics*, 67(9), 1195–1216, 2017.
- [2] Y. Masumoto, et al., “A fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean: Preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator)”, *Journal of Earth Simulator*, 1, 35–56, 2004.
- [3] N. Komori, K. Takahashi, K. Komine, T. Motoi, X. Zhang, G. Sagawa, “Description of sea-ice component of coupled ocean–sea-ice model for the Earth Simulator (OIFES)”, *Journal of Earth Simulator*, 4, 31–45, 2005.
- [4] K. Onogi, et al., The jra-25 reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85(3), 369–432, 2007.