

全球大気海洋結合シミュレーションにおける低気圧活動とオホーツク海の海氷

吉田 聡・小守 信正・大淵 済 (海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター)

1. はじめに

オホーツク海は冬季北半球で最も低緯度で海氷が発達する海であり、その海氷分布の変動は漁業や海運に影響するだけでなく、大気大循環の変動原因の一つとも考えられている (Honda *et al.* 1996, Honda *et al.* 1999)。海氷分布の変動に関するこれまでの研究では、Tachibana *et al.* (1996) はアリューシャン低気圧の強弱がオホーツク海の海氷面積と関係していることを示し、Yamazaki (2000) はオホーツク海上の西風と気温低下が海氷の拡大の要因であると述べている。

一方、冬季日本付近は低気圧活動が活発であり、特に爆弾低気圧と呼ばれる急激に発達する低気圧は日本に大きな風雪害をもたらすため、防災上その正確な予測が求められている。Yoshida and Asuma (2004) は爆弾低気圧の経路が大陸寒気の張り出しの季節変動と関係し、太平洋上の水蒸気分布が爆弾低気圧の発達に影響することを示した。

しかしながら、個々の低気圧の発達に対する海氷分布の影響や、海氷分布の変動と低気圧活動との関係の研究はこれまでほとんど行われておらず、海氷と低気圧の相互作用を通じた季節進行メカニズムについてはいまだ明らかではない。オホーツク海の海氷は海面からの熱フラックスやアルベドの変化を通して大陸寒気の気団変質に影響を与え、逆に爆弾低気圧に伴う温度移流や風の変動が海氷の生成や移動に影響することから、これらを通じた中緯度大気海洋相互作用が潜在していることは想像に難くない。

そこで本研究では、全球大気海洋結合モデルによるシミュレーション結果と大気再解析データ、海氷分布データを用いて、オホーツク海の海氷分布と日本付近の低気圧活動の関係について解析を行った。

2. モデル概要とデータ

使用したモデルは地球シミュレータセンターで開発された全球大気海洋結合モデル CFES (Coupled atmosphere-ocean-sea ice model For the Earth Simulator) である。本モデルの大気モデルは CCSR/NIES AGCM 5.4.02 (Numaguti *et al.*

1997) を参考に地球シミュレータ用に開発された AFES (Ohfuchi *et al.* 2004) に、陸面モデル MAT-SIRO (Takata *et al.* 2003) および放射モデル MSTRN-X (関口 2004) を導入したものである。海洋モデル OIFES は GFDL MOM3 (Pacanowski and Griffies 2000) を元に地球シミュレータ用に最適化された OFES (Masumoto *et al.* 2004) に海氷モデルを導入・結合したものである (Komori *et al.* 2005) である。本研究では大気モデルが T106 (水平解像度約 110km)L48 を用いたものと T239 (水平解像度約 55km)L48 を用いたものの 2 種類のシミュレーションを行った。海洋モデルはどちらも 0.25 度 54 層である。大気モデルの積雲パラメタリゼーションには、T106 に Arakawa-Schubert、T239 には Emanuel スキーム (Emanuel and Živkovic Rothman 1999) を用いた。初期値には大気モデルのみで ECMWF の 40 年再解析データ (ERA40、Simmons and Gibson 2000、水平解像度 2.5 度 × 2.5 度) の 1981 年 11 月 1 日 00UTC から 2ヶ月スピンアップした大気データと、WOA98 の水温と塩分の 1 月気候値 (海洋速度場は静止状態) を使用し、結合計算はこれらのデータを 1 月 1 日 00UTC と見なしてそれぞれ 5 年半積分した。結合間隔は 1 時間である。解析には、2 年目の 11 月からのデータを使用した。

また、観測データとして ERA40 とハドレーセンターの 1979 年 11 月から 2004 年 3 月までの月平均海氷密度データ (HadISST、Rayner *et al.* 2003、水平解像度 1 度 × 1 度) をシミュレーション結果との比較に用いた。

低気圧は 6 時間間隔で出力した海面気圧を用いて、半径 500km 以上の極小を nearest neighbor 法で追跡し、2 日以上持続したものを抽出した。爆弾低気圧の抽出は Yoshida and Asuma (2004) にならい、

$$\text{発達率} = \left(\frac{p(t-6) - p(t+6)}{12} \right) \left(\frac{\sin 60^\circ}{\sin \frac{\phi(t-6) + \phi(t+6)}{2}} \right)$$

で定義される発達率が 1 以上のものを爆弾低気圧と定義して行った。但し、ここで p は低気圧の中心気圧、 t は時間、 ϕ は低気圧の中心緯度である。

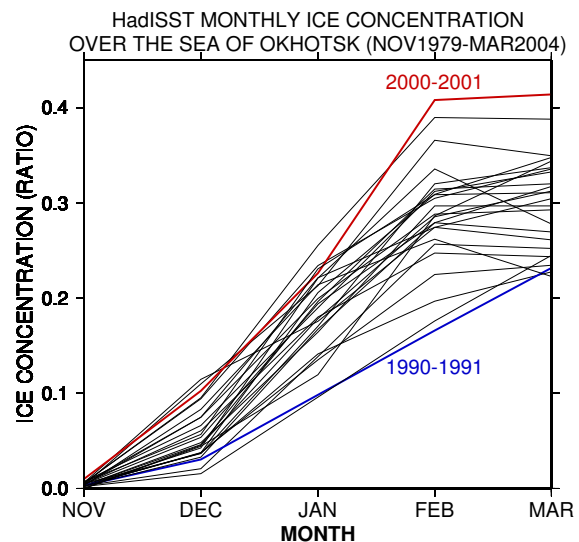
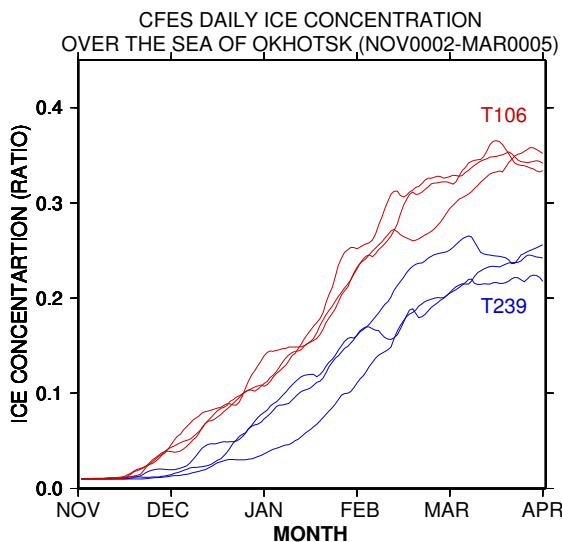


図1 オホーツク海領域で平均した海水氷密接度の時間変化。(左)CFES, 赤:T106, 青:T239. (右)HadISST, 赤:2000-2001年, 青:1990-1991年.

3. 結果

まず、図1にシミュレーションとHadISSTそれぞれのオホーツク海領域で平均した海水氷密接度の時間変化を示す。シミュレーションの海水氷面積の時間変化は観測で見られる変動の範囲内に収まっており、シミュレーション結果が妥当であることを示している。また、T106の結果は海水氷面積の大きい傾向を示し、T239の結果は海水氷面積の少ない傾向を示している。HadISSTと比較すると、それぞれのシミュレーションが海水氷面積の大きい年と小さい年と似た時間変化を示しており、実際にあり得る変動であると考えられる。

そこで本研究では、積分期間が短いこともあり、シミュレーション間の傾向の違いを大気モデルの解像度の違いとして議論するのではなく、海水氷面積の年々変動の極端なパターンと見なして解析を行う。つまり、T106の結果を海水氷面積が大きい年、T239を海水氷面積の小さい年の例と考え、議論を進める。

次に、シミュレーションの積分3年目から5年目の冬季(1月~3月)の平均海水氷密接度分布と爆弾低気圧経路を示す(図2、3)。T106の結果では海水がオホーツク海の3分の2以上に大きく広がっているが、T239では西部に集中している。一方、同期間の爆弾低気圧の移動経路を見ると、T106では爆弾低気圧の発生数が少なく、移動経路もオホーツク海や日本の北側を通る経路が多いのに対し、T239では日本南岸を通る低気圧の割合が相対的に多く、オホーツク海上に進む低気圧が比較的少ない。

実際の大気海洋での傾向を確めるため、ここでは海水氷面積の大きい年の例として、過去25年間の観測で海水氷面積最大年の2001年1月から3月、海水氷面積の小さい年の例として最小年の1991年1月から3月について解析を行った。図4は、海水氷面積最大年の2001年1月から3月の平均海水氷密接度と爆弾低気圧の経路である。これを見ると、爆弾低気圧の数はシミュレーションと比べて少ないが、海水氷面積の大きいT106の結果(図2)と同様に日本海・オホーツク海を移動する爆弾低気圧の割合が多い。一方、図5に示した海水氷面積最小年の1991年1月から3月では、爆弾低気圧のほとんどが日本南岸から北太平洋上を北東進している。T239の結果(図3)では東西に移動する低気圧の数が多いため観測と異なるが、太平洋上の経路をとる低気圧が比較的多い点では同様の傾向を示している。

さらにこの時の大気場の特徴を見るために、それぞれの300 hPa面でのジオポテンシャル高度と風および地表の気温と風、海面気圧の平均場を図6、7に示す。まず、全体的な特徴として、ERA40に比べシミュレーションでは大陸上の寒気がより低温な傾向が見られ、それに対応して300 hPa面のジェットもより強く東西に長い傾向がある。Yoshida and Asuma (2004)によれば、大陸起源で日本を横断し太平洋上で発達する爆弾低気圧は東西に延びたジェットの環境場で発生しやすいので、このジェットの傾向がシミュレーションでの爆弾低気圧が観測に比べて東西に移動するものが多い原因と考えられる。

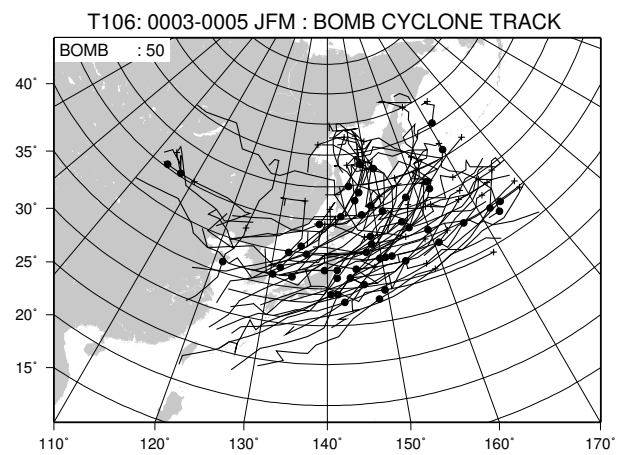
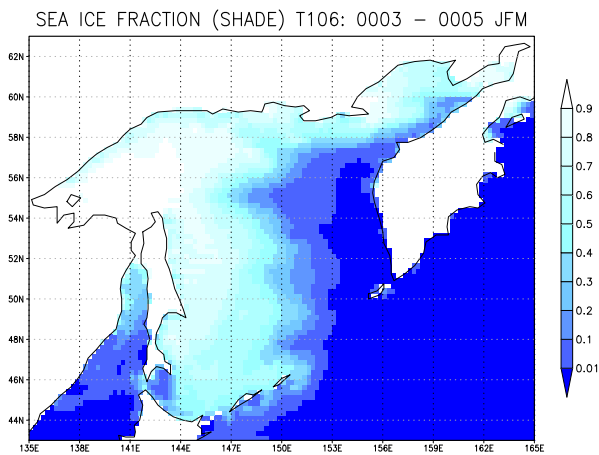


図2 T106の3-5年目1月から3月の平均海水氷接度(左)と爆弾低気圧の移動経路(右)。

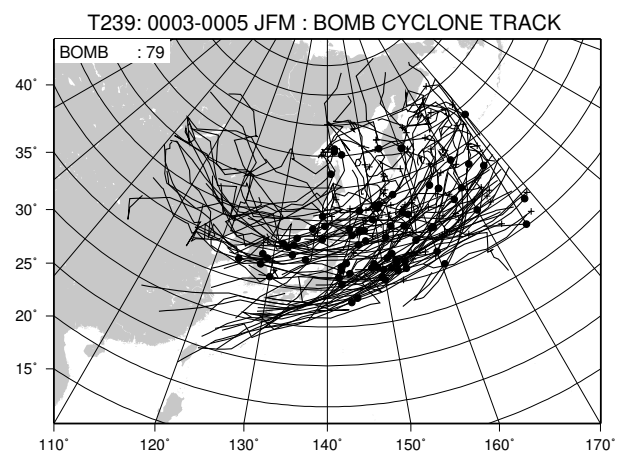
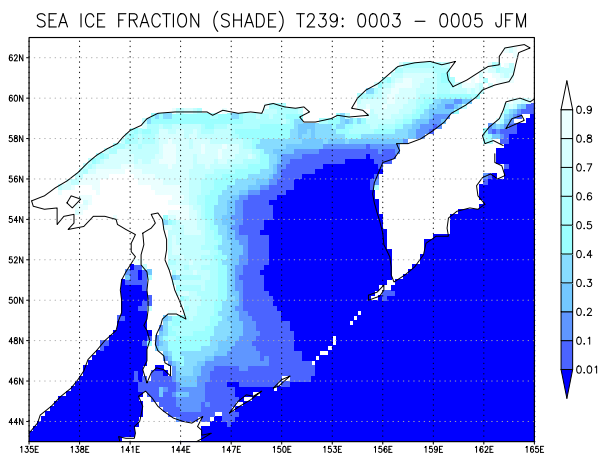


図3 T239で図2と同様。

このようなモデルバイアスにも関わらず、海水面積が大きかったT106と2001年では上空のジェットが比較的強く、アリューシャン低気圧の中心がアラスカ湾に位置し、寒気がより東に張り出している(図6上段、図7上段)のに対し、海水面積の小さいT239と1991年では、上空のジェットがより弱く、アリューシャン低気圧の中心が西側に位置し、寒気がオホーツク海上までしか張り出していない(図6下段、図7下段)という同様の傾向を示している。

これらの結果は、シミュレーションで得られた爆弾低気圧と海水面積の関係が実際の地球でも起こりうることを示しており、シミュレーション結果の詳細な解析によって、爆弾低気圧の経路とオホーツク海の海水変動を結びつけるメカニズムが明らかになると思われる。

4. 結論

全球大気海洋結合シミュレーションの結果と大気再解析データ、海水分布データを用いて、オホーツク海の海水と日本付近の低気圧活動との関係について解析を行った。シミュレーションで得られたオホーツク海の海水分布は観測で得られる海水分布とほぼ同様の発達をしていた。海水面積が大きい傾向があったT106の結果は爆弾低気圧が比較的北よりの移動経路のものが多いのに対し、海水面積の小さい傾向であったT239の結果では、日本南岸を通る爆弾低気圧の頻度が多い傾向が見られた。過去25年の中で海水面積が最大だった2001年1月から3月、最小だった1991年1月から3月の爆弾低気圧経路でも、同様の傾向が見られた。

大気の世界平均場を比較したところ、海水面積の大きい年にはアリューシャン低気圧の中心が西側に位置し、上空のジェットが強く、寒気がより東まで張り出していた。一方、海水面積の小さい年には、アリューシャン低気圧の中心は東よりに位置

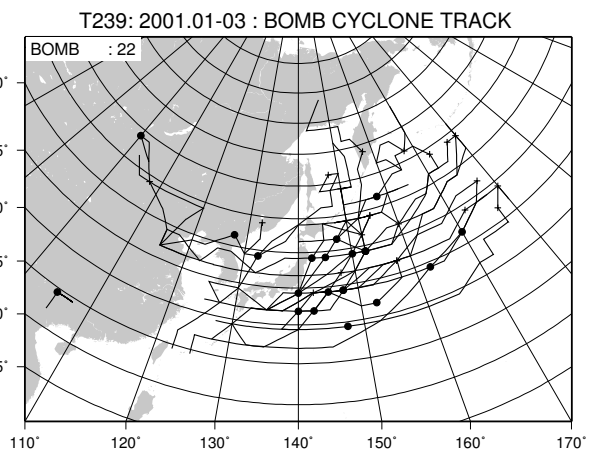
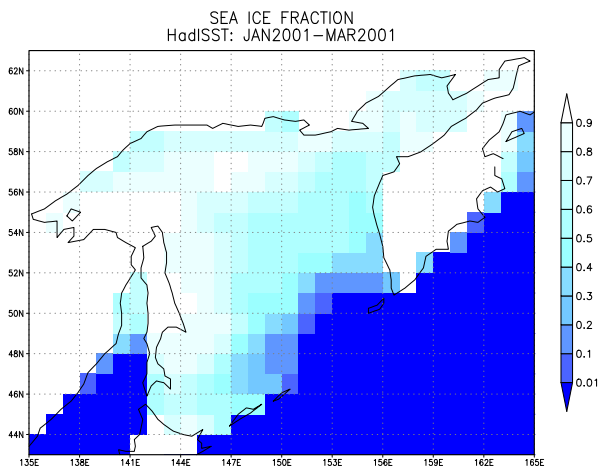


図4 2001年1月から3月の平均海水氷接度(左)と爆弾低気圧の移動経路(右)。

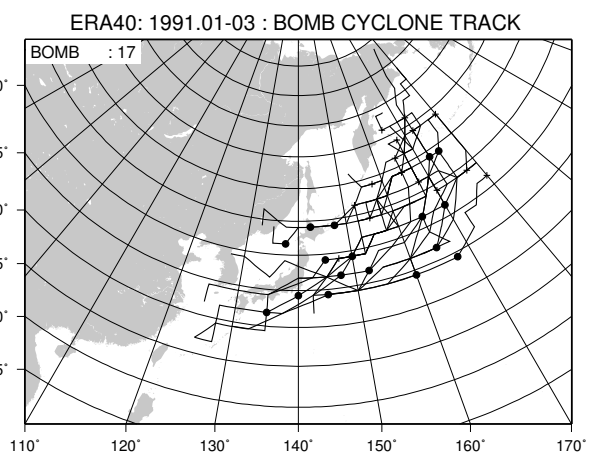
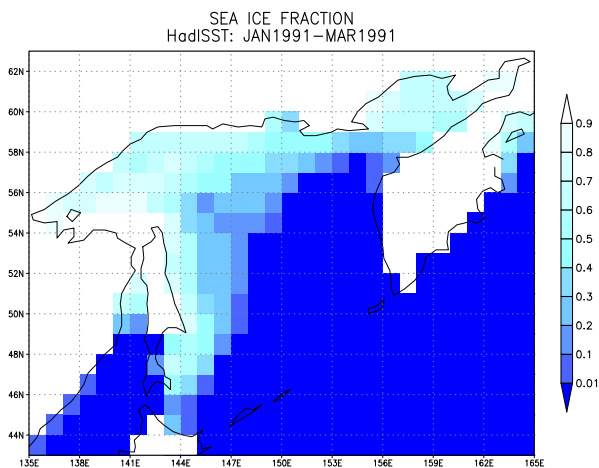


図5 1991年で図4と同様。

し、上空のジェットは海水氷面積が大きい年より弱く、寒気はオホーツク海上までしか張り出していなかった。

以上の結果は、爆弾低気圧の経路とオホーツク海の海水氷面積の変動を結び付けるメカニズムの存在を示し、アリューシャン低気圧や上空のジェットがその変動に影響していることを示唆するものである。今後は、統計的解析によって両者の関係を明らかにするとともに、個々の爆弾低気圧の発達と海水との関わりや海水分布変動に対する爆弾低気圧の影響、季節進行における大気海洋相互作用の役割など、より具体的なメカニズムの解明を行う必要がある。

References

Emanuel, K. A. and M. Živkovic Rothman 1999: Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1766–1782.

Honda, M., K. Yamazaki, Y. Tachibana and K. Takeuchi 1996: Influence of Okhotsk sea-ice extent on atmospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 3595–3598.

Honda, M., K. Yamazaki, H. Nakamura and K. Takeuchi 1999: Dynamic and thermodynamic characteristics of atmospheric response to anomalous sea-ice extent in the Sea of Okhotsk. *J. Climate*, **12**, 3347–3358.

Komori, N., K. Takahashi, K. Komine, T. Motoi, X. Zhang and G. Sagawa 2005: Description of sea-ice component of Coupled Ocean-Sea-Ice Model for the Earth Simulator (OIFES). *J. Earth Simulator*, in press.

Masumoto, Y., H. Sasaki, T. Kagimoto, N. Komori, A. Ishida, Y. Sasai, T. Miyama, T. Motoi, H. Mitsudera, K. Takahashi, H. Sakuma and T. Yamagata 2004: A

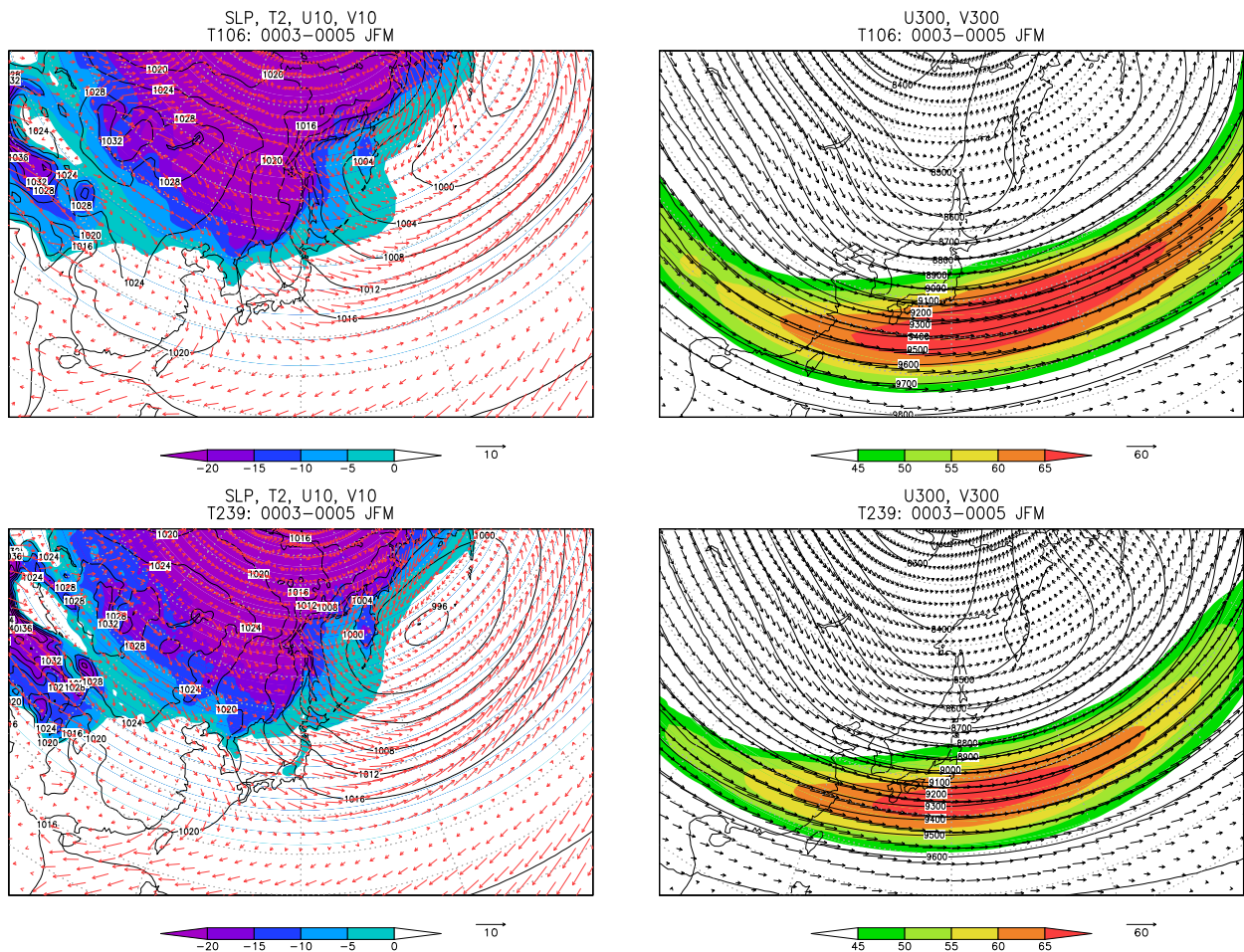


図6 CFES T106(上段)とT239(下段)の3-5年目1月から3月で平均した(左)海面気圧(コンター), 2m 気温(カラー), 10m 風(ベクトル)と(右)300 hPa 面ジオポテンシャル高度(コンター)、風速(カラー)、風(ベクトル)。

fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean: Preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator). *J. Earth Simulator*, **1**, 35–56.

Numaguti, A., M. Takahashi, T. Nakajima and A. Sumi 1997: Description of CCSR/NIES Atmospheric General Circulation Model. *CGER's Supercomputer Monograph Report*, **3**, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan, 1–48.

Ohfuchi, W., H. Nakamura, M. K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara and K. Niomiya 2004: 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator: Preliminary outcomes

of AFES (AGCM for the Earth Simulator). *J. Earth Simulator*, **1**, 8–34.

Pacanowski, R. C. and S. M. Griffies 2000: *MOM 3.0 Manual.*, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory/National Oceanic and Atmospheric Administration, 680 pp.

Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent and A. Kaplan 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4407, doi:10.1029/2002JD002670.

Simmons, A. J. and J. K. Gibson 2000: *The ERA-40 Project Plan, ERA-40 Proj. Rep. Ser. 1.*, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, UK 63 pp.

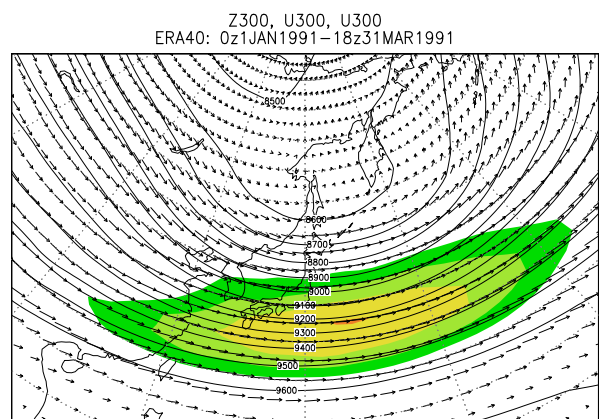
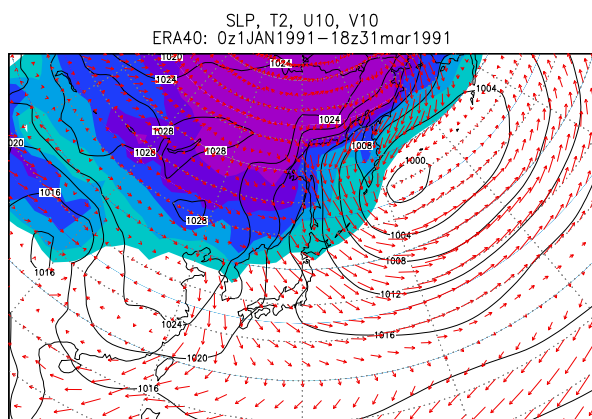
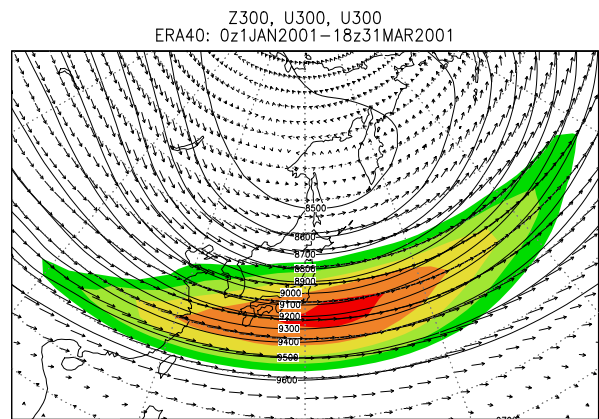
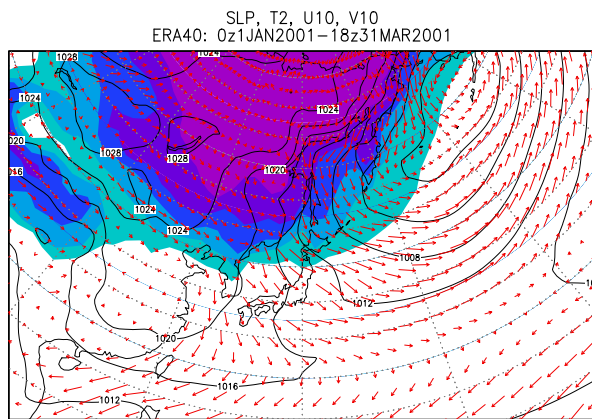


図7 2001年(上段)と1991年(下段)の1月から3月の平均で図6と同様。

Tachibana, Y., M. Honda and K. Takeuchi 1996:
The abrupt decrease of the sea ice over the southern part of the Sea of Okhotsk in 1989 and its relation to the recent weakening of the Aleutian low. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 579–584.

Takata, K., S. Emori and T. Watanabe 2003: Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Global and Planetary Change*, **38**, 209–222.

Yamazaki, K. 2000: Interaction between the wintertime atmospheric circulation and the variation in the sea ice extent of the Sea of Okhotsk. *Seppyo*, **62**, 345–354.

Yoshida, A. and Y. Asuma 2004: Structures and environment of explosively developing extratropical cyclones in the northwestern Pacific region. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1121–1142.

関口美保 2004: ガス吸収大気中における放射フ

ラックスの算定とその計算最適化に関する研究. 博士論文, 東京大学, 121 pp.