

# 近年の大气による北極域へのエネルギー輸送の変動について

門野美緒<sup>1</sup>、浮田甚郎<sup>1</sup>、本田明治<sup>1</sup>、岩本勉之<sup>2,1</sup>、原田祐輔<sup>3</sup>、神沢博<sup>3</sup>

1:新潟大学、2:国立極地研究所、3:名古屋大学

## 1. はじめに

近年、北極域では急速な温暖化が進行している。この北極の温暖化、またその増幅について、海水域面積の減少によるアイス-アルベドフィードバックの効果や極向きのエネルギー輸送、ブラックカーボンによるアルベドの変化といった様々な要因が提唱されている。

この中で、北極域における極向きのエネルギー輸送に関しては、Nakamura and Oort (1988) によってレーウィンゾンデ観測データを用いた研究が行われ、北緯70度における極向きのエネルギー輸送の季節変動が示された。また全球における極向きのエネルギー輸送の研究では、Trenberth and Stepaniak (2003) がNCEP/NCAR再解析データ Reanalysis-1 (Kalnay *et al.* 1996) の6時間毎のデータを用いて、1979年から2001年の期間における全球の極向きのエネルギー輸送を解析し、年平均、季節変動、年々変動を示した。この研究では極向きのエネルギー輸送を乾燥静的エネルギー、潜熱、運動エネルギーの各成分に分解して解析を行い、月平均の準定常成分と1ヶ月未満の擾乱成分の特徴について、各エネルギー成分ごとに明らかにした。更にHwang *et al.* (2011) は、世界気候研究計画 (WCRP) 第3次結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP3) で使用された複数のモデルのA1B及びA2シナリオの結果を用いて、北緯70度以北で気温が上昇したとき、北極域で極向きのエネルギー輸送が減少することを報告している。

大气による極向きのエネルギー輸送は、赤道-極域間の温度勾配によって駆動される気候システムの基本的な側面の1つであり、その変動は気温場に直接的影響を与えると考えられる。そのため、極向きのエネルギー輸送の変動の理解は気候変動を理解する上で必須である。しかしながら、北極域における極向きのエネルギー輸送について、再解析データを用いた長期変動の解析は、現在まだ十分に成されていない。そこで本研究では、大气による極向きのエネルギー輸送について、北極域へ輸送されるエネルギー輸送の長期変動と、その気温場への影響を明らかにすることを目的とする。

## 2. 使用データ・手法

### 2.1. 使用データ

本研究ではECMWFによる再解析データ、ERA-Interimの月平均データを使用した。物理量は気温、比湿、ジオポテンシャル、東西風、南北風と地表面気圧とし、期間は1979年から2010年の32年間とした。なお水平解像度は緯度経度格子点上で0.75度×0.75度、鉛直層数は1000hPaから1hPaまでの37層である (Dee *et al.* 2011)。

また、解析結果の比較を行うために気象庁によ

る再解析データ、JRA-55の月平均データも併せて使用した。JRA-55の水平解像度は1.25度×1.25度、鉛直層数は比湿が1000hPaから100hPaまでの27層、気温、ジオポテンシャル高度、東西風、南北風は1hPaまでの37層である (Ebita *et al.* 2011)。

### 2.2. 手法

ある緯度円を境界として定義される大气柱において、鉛直方向に積分した大气による極向きのエネルギーフラックス ( $F_A$ ) と、太陽放射 (ASR) と長波放射 (OLR) の関係は以下のように表される (Fasullo and Trenberth 2008)。

$$\frac{\partial A_E}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}_A = ASR - OLR + F_s$$

ここで $F_s$ は海洋からのエネルギーフラックス、 $A_E$ は正味の大气のエネルギーである。 $A_E$ と $F_A$ はそれぞれ

$$F_A = \frac{1}{g} \int_0^{p_s} (C_p T + \Phi + k + L_e q) v dp$$
$$A_E = \frac{1}{g} \int_0^{p_s} (C_p T + \Phi + k + L_e q) dp$$

と表される。 $k$ 、 $T$ 、 $v$ 、 $q$ 、 $p$ 、 $\Phi$ はそれぞれ運動エネルギー、気温、南北風、比湿、気圧、位置エネルギーを表す。また、 $F_A$ は顕熱 ( $C_p T$ )、位置エネルギー ( $\Phi$ )、運動エネルギー ( $k$ )、潜熱 ( $L_e q$ ) の各エネルギー成分に分解することができ、顕熱と位置エネルギーの和を乾燥静的エネルギーと定義する。

更に、この極向きのエネルギーフラックスの変動を精査するために、東西平均を用いた分解を行った。本稿では東西平均成分を「子午面循環成分」、東西平均からの差から得られる成分を「定常渦成分」と呼ぶ。なお、子午面循環成分はハドレー循環など、定常渦成分は定常ロスビー波などによって生じるエネルギー輸送である。

## 3. 結果

### 3.1. ERA-Interimによる解析

極向きのエネルギー輸送の年平均をFig. 1に示す。月平均の正味の極向きのエネルギー輸送は低中緯度で最大となり、極に近づくにつれ減少している。熱帯において正味のエネルギー輸送並びに乾燥静的エネルギーが極向きとなり、潜熱が赤道向きになる点はTrenberth and Stepaniak (2003)で示された結果と整合的である。この極向きのエネルギー輸送の32年間の中での変化を調べるため、期間の最後の10年 (2001年~2010年) の平均から期間の最初の10年 (1979年~1988年) の平均の差を求めると (Fig. 2)、北極域を含む北半球高緯度では極向きのエネルギー輸送が、特に乾燥静的エネルギーにより増加していた。

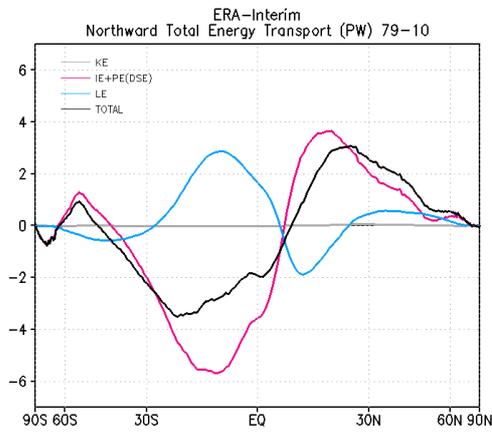


Fig. 1 ERA-Interimの極向きのエネルギー輸送 (PW)。1979年～2010年の年平均。黒：総和、赤：乾燥静的エネルギー、青：潜熱、灰：運動エネルギー。

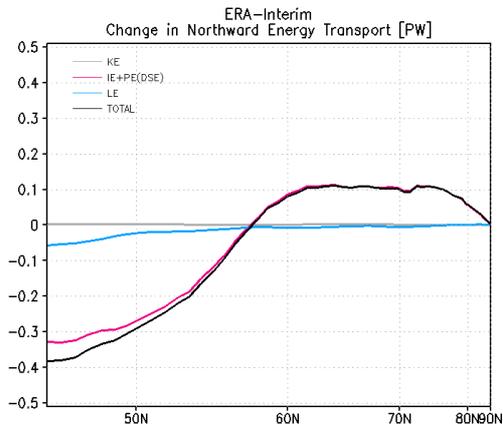


Fig. 2 ERA-Interimの極向きのエネルギー輸送 (PW)。1979-1988年と2001-2010年の各平均の偏差 (後者-前者)。黒：総和、赤：乾燥静的エネルギー、青：潜熱、灰：運動エネルギー。

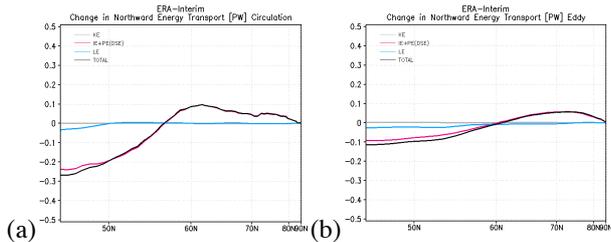


Fig. 3 Fig. 2に同じ、ただし(a)子午面循環成分、(b)定常渦成分。

更に、Fig. 3に乾燥静的エネルギーによる輸送について東西平均による分解を行い、Fig. 2と同様に期間の最初と最後の10年の平均から求めた偏差を示す。極向きのエネルギー輸送の増加には子午面循環成分と定常渦成分の双方が寄与していた。また、それぞれの季節変動を調べると子午面循環成分は主に夏、定常渦成分は主に冬において極へのエネルギー輸送が増加していることが分かった。Fig. 4に7月の子午面循環成分 (Fig. 4a) と12月の定常渦成分 (Fig. 4b) の月平均の偏差を示す。子午面循環成分は輸送が最も増加しているのは主に北緯65度から70度にかけて、高度800hPa以下の対流圏下層

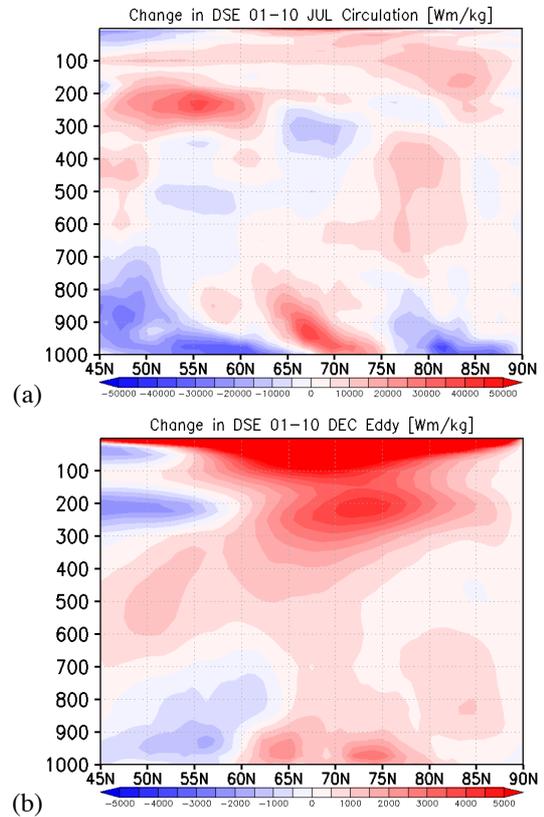


Fig. 4 ERA-Interimの極向きの乾燥静的エネルギーによる輸送 (Wm/kg)。1979-1988年と2001-2010年の各平均の偏差 (後者-前者)。(a)7月における子午線面循環成分、(b)12月における定常渦成分。

であった。一方定常渦成分は主に200hPaより上空の対流圏上層から成層圏において、エネルギー輸送が増加していた。

### 3.2. JRA-55による解析

次に、JRA-55を用いて同様にエネルギー輸送を求め、1979年から2010年の期間の中での変化を調べ、ERA-Interimを用いた解析結果と比較を行った。Fig. 5にERA-InterimとJRA-55を比較した極向きのエネルギー輸送の年平均を示す。ERA-Interimの結果と比べ、JRA-55では低中緯度でエネルギー輸送が大きくなっている。また北極域についてERA-Interimと同様に期間の最後の10年 (2001年～2010年) の平均から期間の最初の10年 (1979年～1988年) の平均の差を求めると (Fig. 6)、JRA-55では同じ期間で、北緯65度付近でエネルギー輸送は減少していた。

次に、JRA-55の結果について東西平均による分解を行った結果をFig. 7に示す。定常渦成分 (Fig. 7b) においてその気候値はERA-Interimの結果と一致していたが、子午面循環成分 (Fig. 7a) ではJRA-55による極向きのエネルギー輸送の気候値が低中緯度で相対的に大きくなっていた。またその偏差は定常渦成分では双方のデータセットで一致していたが (Fig. 3bとFig. 8b)、子午面循環成分ではERA-Interimでは増加 (Fig. 3a)、JRA-55では減少を示した (Fig. 8a)。

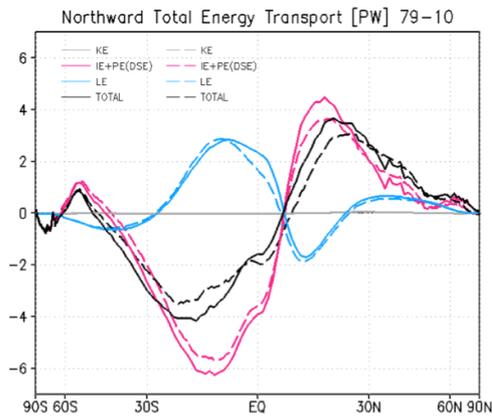


Fig. 5 極向きのエネルギー輸送 (PW)。1979年～2010年の年平均。実線：JRA-55、破線：ERA-Interim、黒：総和、赤：乾燥静的エネルギー、青：潜熱、灰：運動エネルギー。

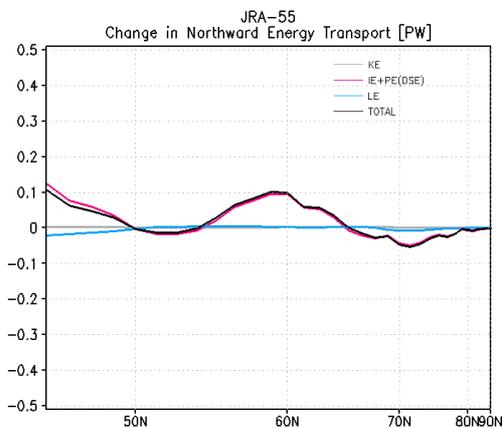


Fig. 6 Fig. 2に同じ、ただしJRA-55。

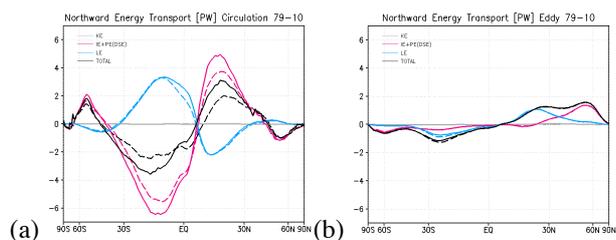


Fig. 7 Fig.5に同じ。ただし(a)子午面循環成分、(b)定常渦成分。

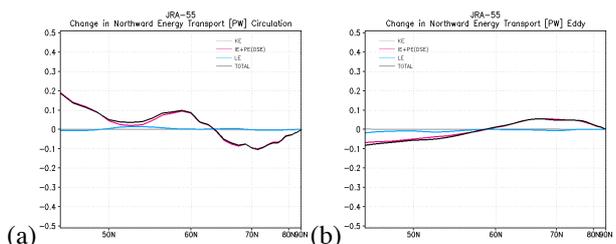


Fig. 8 Fig. 6に同じ、ただし(a)子午面循環成分(b)定常渦成分

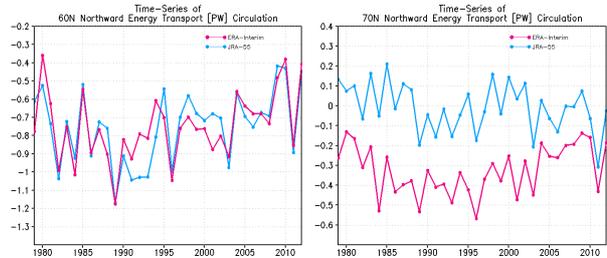


Fig. 9 子午面循環成分による極向きのエネルギー輸送 (PW)。1979年からの時系列。右：北緯60度、左：北緯70度、赤：ERA-Interim、青：JRA-55。

子午面循環成分において、ERA-InterimとJRA-55の結果が一致しないことを踏まえて、北緯60度及び70度における極向きのエネルギー輸送の時系列グラフをFig. 9に示す。北緯60度では両者の時系列の傾向と輸送の大きさが一致していた。しかしながら、北緯70度の時系列においては、位相は一致しているものの、JRA-55はERA-Interimと比較するとエネルギー輸送が系統的に大きいことが分かった。更にエネルギー成分ごとに分けると、乾燥静的エネルギー、特に内部エネルギーの時系列が、2つのデータセットで一致していないことが分かった (図略)。

#### 4. 議論とまとめ

北極域において、ERA-Interimを用いた解析では極向きのエネルギー輸送は1979年から2010年の期間で増加していた。この増加の大部分は乾燥静的エネルギー成分によるものであり、他の潜熱や運動エネルギーは大きな変化をしていないことが分かった。更に東西平均による分解を行うと、子午面循環成分と定常渦成分の双方でエネルギー輸送は増加している結果となった。また、この熱輸送の変化について季節変動を調べると、子午面循環成分では主に夏に、対流圏下層でエネルギー輸送が増加していた。他方、定常渦成分では主に冬、対流圏上層から成層圏にかけてエネルギー輸送が増加しており、この増加は定常ロスビー波の変化に起因していることが考えられる。

またJRA-55を用いて同様の解析を行ったところ、エネルギー輸送の変化に寄与していたのは、ERA-Interim同様に乾燥静的エネルギーであったものの、同様の期間で極向きのエネルギー輸送は減少するという結果になった。更にJRA-55の結果について東西平均による分解を行うと、定常渦成分のエネルギー輸送は増加、子午面循環成分は減少していた。Hwang *et al.* (2011) によるCMIP3の複数のモデルによるA1B並びにA2シナリオの結果を用いた解析では、2001年から2020年の20年間と比べて相対的に平均気温が上昇する2081年から2100年の20年間で、北極域で乾燥静的エネルギーが減少、潜熱輸送が増加する結果が報告されている。これは温暖化によって全球気温が上昇することにより、大気中の水蒸気量が増加し、潜熱輸送が増

加、結果として極向きエネルギー輸送が増加するためであると推測される。しかしながら、今回の2つの再解析データを用いた極向きエネルギー輸送の解析では、どちらのデータセットにおいても乾燥静的エネルギーが変化していたが、ERA-Interimでは増加、JRA-55では減少しているという2通りの結果となった。また東西平均による分解により、2つの再解析データでの結果の差は子午面循環成分にあることが分かった。

ERA-InterimとJRA-55で求めた極向きエネルギー輸送について、子午面循環成分と定常渦成分についてそれぞれ時系列グラフを比較すると、広い緯度帯で子午面循環成分の乾燥静的エネルギー、その内特に内部エネルギー ( $C_p T$ ) で、時系列の傾向や輸送の大きさが一致していなかった。なお、定常渦成分に関しては4つのエネルギー成分すべてにおいて、2つの再解析データでその傾向と輸送の大きさは極めてよく一致していた。

今後は極向きエネルギー輸送の長期変動を調べるため、これらの2つの再解析データの間での結果の違いがなぜ生じるのか、更に詳しく解析していく必要がある。また今回は月平均の成分のみの解析であったため、擾乱成分を含めたエネルギー輸送の変動についても解析を行っていく必要がある。

## 5. 謝辞

本研究で使用した再解析データ、ERA-Interimは、ECMWFより提供された再解析データです。またJRA-55は、気象庁55年長期再解析 (JRA-55) プロジェクトにより提供されたものを使用させて頂きました。

## 6. 参考文献

原田祐輔 (2012), 大気による極向きエネルギー輸送の変化:ERA-Interimデータを用いた解析, 名古屋大学大学院環境学研究科修士論文.

Dee, D. P. and co-authors (2011), The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 553-597. doi:10.1002/qj.828.

Ebita, A., S. Kobayashi, Y. Ota, M. Moriya, R. Kumabe, K. Onogi, Y. Harada, S. Yasui, K. Miyaoka, K. Takahashi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, M. Soma, Y. Oikawa, and T. Ishimizu (2011), The Japanese 55-year Reanalysis "JRA-55": an interim report, *SOLA*, 7, 149-152, doi:10.2151/sola.2011-038.

Fasullo, J. T., and K. E. Trenberth (2008a), The annual cycle of the energy budget. Part I: Global mean and land-ocean ex- changes, *J. Climate*, 21, 2297-2312, doi:10.1175/2007JCLI1935.1.

Fasullo, J. T., and K. E. Trenberth (2008b), The annual cycle of the energy budget. Part II: Meridional structures and poleward transports, *J. Climate*, 21, 2313-2325, doi:10.1175/2007JCLI1936.1.

Hwang, Y.-T., and D. M. W. Frierson (2010), Increasing atmospheric poleward energy transport with global warming, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L24807, doi: 10.1029/2010GL045440.

Hwang, Y.-T., and D. M. W. Frierson, J. E. Kay (2011), Coupling between Arctic feedback and changes in poleward energy transport, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17704, doi:10.1029/2011GL048546.

Kalnay, E., and co-authors (1996), The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.

Nakamura, N. and A. H. Oort (1988), Atmospheric heat budget of the polar regions, *J. Geophys. Res.*, 93, D8, 9510-9524.

Mayer, M., and L. Haimberger (2012), Poleward atmospheric energy transports and their variability as evaluated from ECMWF reanalysis data, *J. Clim.*, 25, 734-752, doi:10.1175/JCLI-D-11-00202.1.

Trenberth, K. E., and J. T. Fasullo (2009), Global warming due to increasing absorbed solar radiation, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07706, doi: 10.1029/2009GL037527.

Trenberth, K. E., and D. P. Stepaniak (2003a), Covariability of components of poleward atmospheric energy transports on seasonal and interannual timescales, *J. Clim.*, 16(22), 3691-3705.

Trenberth, K. E., and D. P. Stepaniak (2003b), Seamless Poleward Atmospheric Energy Transports and Implications for the Hadley Circulation, *J. Clim.*, 16(22), 3706-3722.