

# 定在波と非定常擾乱による南北熱輸送に見られる補償関係

渡部雅浩（東大気候システム）

岩崎俊樹（東北大院地球物理）

小玉知央（海洋研究開発機構）

廣田渚郎（東大気候システム）

## 1. はじめに

中高緯度において、大気による極向きエネルギー輸送の担い手がさまざまな渦であることはよく知られている。これらの渦は多くの場合、定在性の渦(以下 SE)と非定常擾乱に伴う渦(以下 TE)に分けられる。冬季において前者はモンスーンと、後者はストームトラックとそれぞれ強く関連しており、ともに大気下層で多くの顕熱を輸送することで中緯度の帯状平均温度勾配を緩和するように働いている。

本研究では、これら南北エネルギー輸送の変動に着目して主に再解析データを用いた解析を行う。とくに、Nakamura et al. (2002)で部分的に示されている SE と TE による熱輸送の逆相関関係を詳しく調べ、その力学を理解することを最終的な目標とする。

解析には、ERA40(1957年9月～2002年8月)およびJRA25/JCDAS(1979年1月～2008年8月)を用いる。水平解像度は各々、 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 、 $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$  である。SE は月平均場から帯状平均を抜いて定義し、TE は6時間ごとの場から月平均場を引いて定義する。この定義ではTEが性質の異なる擾乱を複数含むので、上記の submonthly の場に15日のローパス、8-15日および2-8日のバンドパスフィルタをかけた場も計算し、あわせて解析する(TE<sub>LF</sub>, TE<sub>MF</sub>, TE<sub>HF</sub>と表記)。エネルギー輸送量として、乾燥静的エネルギー $s$ の月平均南北輸送量 $F_s$ をSE, TEから求め、帯状平均・鉛直積分・中緯度( $30^{\circ}$  - $60^{\circ}$  N)平均の操作を行って各々の偏差時系列を作成する。

## 2. 観測事実

図1aは、 $F_s$ の年々変動の時系列である。おおまかに、SEおよびTEによる輸送が逆位相にある場合が多いことが見てとれる。すなわち、定在渦が熱を運ばないときには非定常擾乱がより多くの熱を運ぶことで全熱輸送を補償する関係にある。この補償関係をDJF, JJAの南北半球で見ると、最も顕著な逆相関(相関係数-0.57)が見られるのは北半球DJFであり、回帰直線からTEの偏差はSEによる輸送偏差の約半分の大きさであることがわかる(図1b)。また、変動の鉛直構造を調べると、逆相関は下層に中心をもち、対流圏全体にわたっていた(図示せず)。これらの結果は用いる再解析データにはほとんどよらない。

上記の結果は、補償関係が例えば「全熱輸送の上限が何らかの理由で決まっているため、SEが一方に変わればTEは逆方向に変わる」といった一般的な法則ではなく、特定の循環変動に起因するものであること、および因果関係はSE→TEの方向であることを示唆する。前

述のようにTEを3つの周波数帯で分けてSEとの関係を見るとすべての周波数帯で補償関係があったが、その強さは $TE_{LF}$ ,  $TE_{HF}$ ,  $TE_{MF}$ の順であったことから、熱輸送の補償が必ずしもストームトラックのみによるものではないと考えられる。 $F_s$ の変動は主に顕熱輸送 $vT$ によっているので、SE, TEによる顕熱輸送の帯状平均場に対してSVD解析を行い、卓越する変動を取り出した(図2)。時係数に対する回帰偏差場は、SE-TE間の補償関係が主にアリューシャン低気圧の変動に伴うものであることを示しており(図3a)、過去の研究と整合的である。

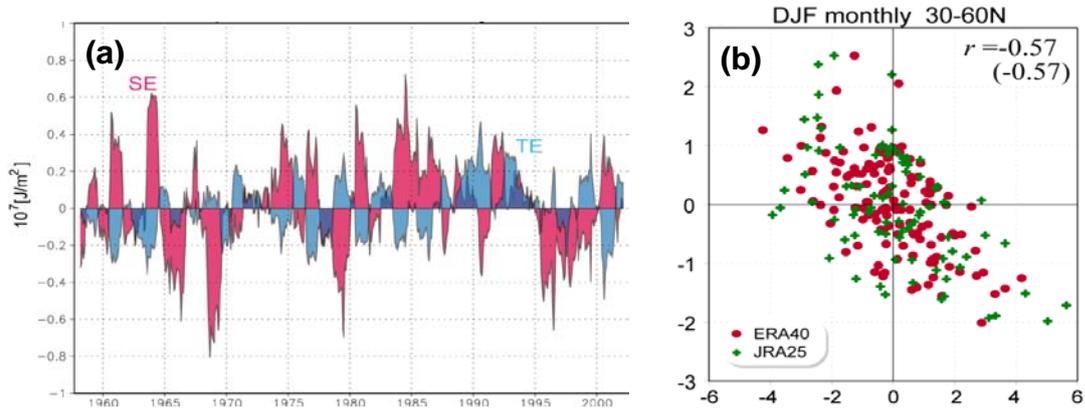


図1 (a) 北半球で平均した鉛直積分乾燥静的エネルギーの極向き輸送量の時系列. 赤は定在波, 青は非定常擾乱によるもので、ともに13カ月の移動平均をかけてある. (b) (a)の時系列(ただし移動平均はせず、12-2月の各月のみ)の散布図. 横軸は定在波, 縦軸は非定常擾乱による輸送.

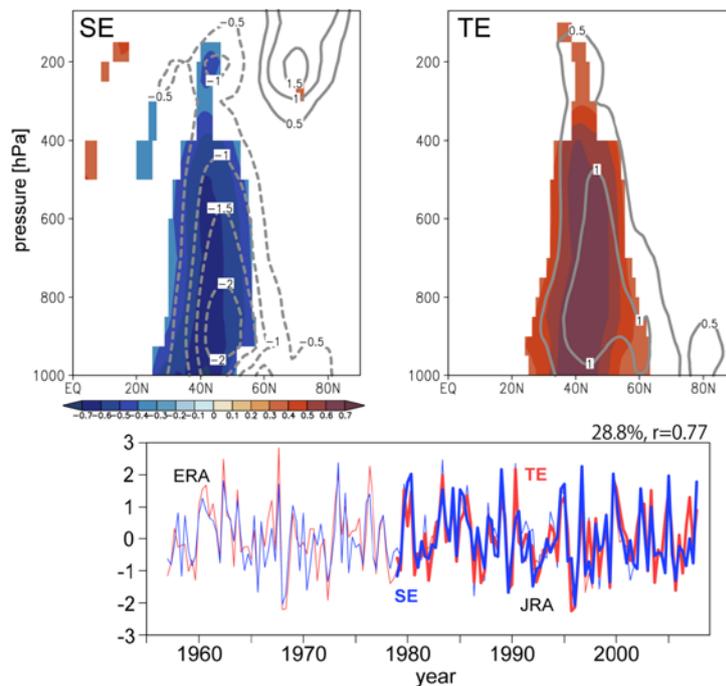


図2 東西平均した北半球DJFのSE, TE各々による南北顕熱フラックスのSVD第一成分. 単位は $mK/s$ , 左上はSEの, 右上はTEの異種回帰分布を表わす. 展開係数はERA40, JRA25/JCDASの結果をともに示すが、回帰分布はJRAを用いた結果.

### 3. 力学

補償関係を生じる力学を、擾乱から平均場へのフィードバックをパラメタ化した線形傾圧モデル(以下LBM)を用いた定常応答診断で調べた。LBMへ与える強制は、SVD1に射影したJRAで推定された非断熱加熱偏差である(図4)。中高緯度の定常応答計算ではストームトラックからの強制が重要であるため、それらもデータから与えることが多いが、ここでは、非定常擾乱の熱・渦度強制はLau (1988)およびTing and Lau (1993)に従って局所的な定常偏差場の関数としてパラメタ化する。非定常擾乱の渦度強制をこのようにパラメタ化することは、Kug and Jin (2008)で言われている大気長周期変動とストームトラックの間の相互作用を陽に表現していることになる。

図3bに、LBMの定常応答における海面気圧(SLP)と500hPa高度偏差場を示す。図3aの客観解析による偏差とよく似ており、特にアリューシャン低気圧の弱化が目立つ。図3a,bの偏差にともなう南北熱輸送をみると、実際にSEが弱くTEが強いという逆相関関係が存在する(図3c)。LBMがある程度の再現性をもつことが確認されたので、強制の有無、基本場の経度依存性、非定常擾乱のフィードバックの有無などをさまざまに変えて同様の診断計算を行った。その結果、補償関係に重要/重要でない過程が簡潔に以下にまとめられる。

- 非断熱加熱と擾乱による渦度のフィードバックはともにSE偏差の形成に重要
- 基本場の傾度依存性はSE偏差の形成に重要
- 帯状平均場の偏差と定在波偏差の結合はSE偏差の形成に重要
- 擾乱からのフィードバックの経度依存性はさほど重要でない
- 帯状平均場と非定常擾乱の結合はさほど重要でない

これらの結果から見えてくるのは、補償関係がまずは外部強制(加熱偏差)に対して経度依存性をもつ基本場が定常偏差として図3aのような分布を選択し、それがTEを変化させるとともにTEからのフィードバックで増幅する、という形成過程である。この解釈によると、TE自身は補償関係を積極的に生じる原因とはならない。これは、図1bにおいてTE偏差がSE偏差の半分程度であることと整合的で、またSE偏差形成にSEにともなう帯状平均偏差場との結合が重要であることは、SE偏差がKimoto et al. (2001)、Watanabe and Jin (2004)で指摘されているtilted troughメカニズムが働いていることを示唆している。

詳述しないが、気候モデルMIROCの20世紀再現実験およびCMIP3マルチモデルデータを用いても同様に熱輸送変動を調べたところ、ほぼすべての気候モデルにおいて補償関係が見られ、補償の大きさもモデルに対してさほど依存していないことがわかった。このことは、補償関係が(モデルのパラメタ化の詳細によらない)robustな現象であることを意味している。一方で、補償関係が熱帯の加熱変動を本質的に必要とするのか、より地球流体的な視点で補償関係を生じる一般的な条件は何か、といった重要な疑問が残っており、これらは現在取り組みつつある課題である。

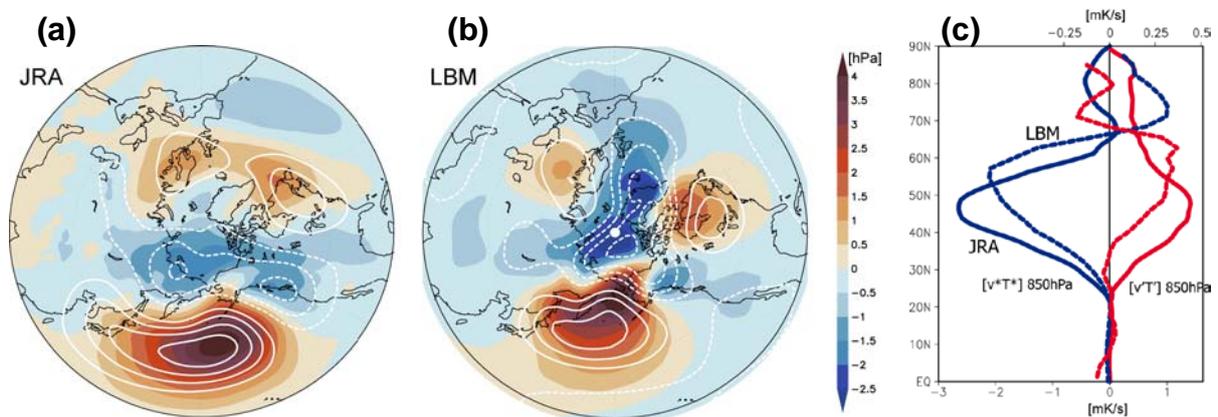


図3 (a) 図2に示したSVD1の展開係数に回帰したSLP(色)および500hPa高度(等値線)の偏差分布. (b) (a)に対応する非断熱加熱偏差を与えたLBMの線形定常応答. 非定常擾乱の効果はパラメタ化してある. (c) (a)-(b)の偏差にともなう, 850hPaにおける経度平均南北顕熱フラックス. 青はSE, 赤はTEによるもの.

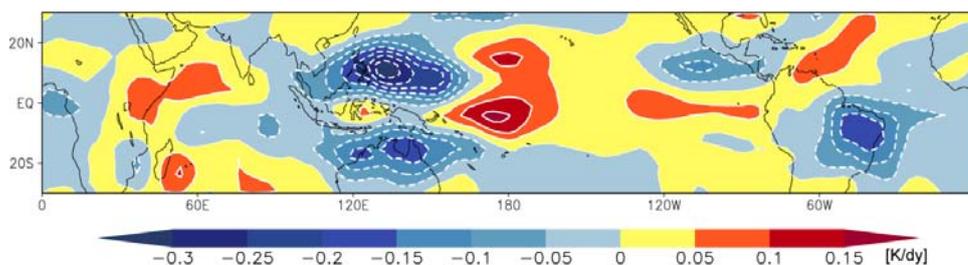


図4 図3aと同様, ただし鉛直積算した非断熱加熱偏差.

## 文献

- Kimoto, M., F.-F. Jin, M. Watanabe, and N. Yasutomi, 2001: Zonal—eddy coupling and a neutral mode theory for the Arctic Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 737–740.
- Kug, J.-S., and F.-F. Jin, 2008: Left-hand rule for synoptic eddy feedback on low-frequency flow. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L05709, doi:10.1029/2008GL036435.
- Lau, N.-C., 1988: Variability of the observed midlatitude storm tracks in relation to low-frequency changes in the circulation pattern. *J. Atmos. Sci.*, 45, 2718-2843.
- Nakamura, H., T. Izumi, and T. Sampe, 2002: Interannual and decadal modulations recently observed in the Pacific storm track activity and East Asian winter monsoon. *J. Climate*, 15, 1855-1874.
- Ting, M., and N.-C. Lau, 1993: A Diagnostic and modeling study of the monthly mean wintertime anomalies appearing in a 100-Year GCM experiment. *J. Atmos. Sci.*, 50, 2845-2867.
- Watanabe, M., and F.-F. Jin, 2004: Dynamical prototype of the Arctic Oscillation as revealed by a neutral singular vector. *J. Climate*, 17, 2119-2138.