

## 1. はじめに

夏季東アジアは小笠原高気圧と呼ばれる等価順圧な高気圧の影響下にある。小笠原高気圧の形成にはアジアジェットに沿って南欧から伝播するロスビー波が関わっており (Enomoto et al. 2003), その経年変動は夏季東アジア域の気象変動に大きく影響する (Enomoto 2004). 本研究では, 変動としてみられる夏季アジアジェット上の波列パターンをシルクロードパターンと呼ぶ。

シルクロードパターンのような変動パターンの構造は, 背景場(基本場)の構成に強く依存すると考えられる。World Climate Research Programme (WCRP) による third phase of Coupled Model Intercomparison Project (CMIP3)に参加した様々な気候モデルにおいて再現されている気候平均場はモデルによってかなり異なっており, それに対応して変動パターンの構造がどのように異なるかを調べることは, その変動パターンのメカニズムの理解に役立つと期待できるとともに, これらのモデルを用いた温暖化予測の精度を評価する上でも重要である。

本研究では, 再解析データおよび線形傾圧モデル(linear baroclinic model; LBM)を用いてシルクロードパターンのメカニズムを調べ, その特徴を 24 の CMIP3 気候モデルによる 20 世紀再現実験の結果を用いて確認する。

## 2. データとモデル

再解析データとして JRA-25(Onogi et al. 2007)月平均データを用いる。水平解像度は  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  で, 1979 年から 2007 年の各月の平均値を気候平均場, そこからのずれを偏差とする。また, この気候平均場を基本場とする LBM(Watanabe and Kimoto 2000, 2001)を用いる。

気候モデルデータは CMIP3 に参加したもののうち 24 のモデルによる 20 世紀再現実験の月平均データを用いる。可能な限り多くのアンサンブルメンバーを用い, アンサンブル平均の 1970-1999 年平均を気候平均場とする。水平解像度は JRA-25 データと同じ  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  に内挿しておく。

## 3. 再解析データにおけるシルクロードパターン

図 1(a, b)は 7 月および 8 月における 200hPa での南北風の経年変動に伴う標準偏差を示している。その極大域はアジアジェット(図 1c, d)に沿って並んでおり, アジアジェットに沿ったロスビー波の伝播を示唆している。図 1(e, f)は気候平均東西風から求めた定常ロスビー波数

$$K_s = \frac{1}{\cos\theta} \sqrt{\left(2a\Omega\cos\theta - \frac{\partial}{\partial\theta} \frac{1}{\cos\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \bar{u} \cos\theta\right) / \bar{u}}$$

を示している。アジアジェットは  $K_s$  の極大域になっており, ロスビー波の導波管として働くことを示している。また, ジェット上の  $K_s$  は 7 月に比べて 8 月の方がわずかに小さい。

200hPa 南北風の標準偏差(図 1a, b)はジェットに沿って一様な分布ではなく, 東西方向に局在化された分布を示す。このことは地理的に固定された特定の位相を持つ波列パターンが卓越することを示している。アジアジェットに沿った変動パターンを抽出するために,  $[20^\circ-60^\circ\text{N}, 30^\circ-130^\circ\text{E}]$ における 200hPa 南北風に対して EOF 解析を行った。7 月および 8 月における EOF 解析の第 1 モード(EOF1)の寄与率はそれぞれ 36.4%, 35.1%で, North et al. (1982)の基準で第 2 モードと分離でき, この位相を持つ波列パターンが卓越することが確かめられる。

図 2(a, b)は EOF1 に対応する主成分(PC1)

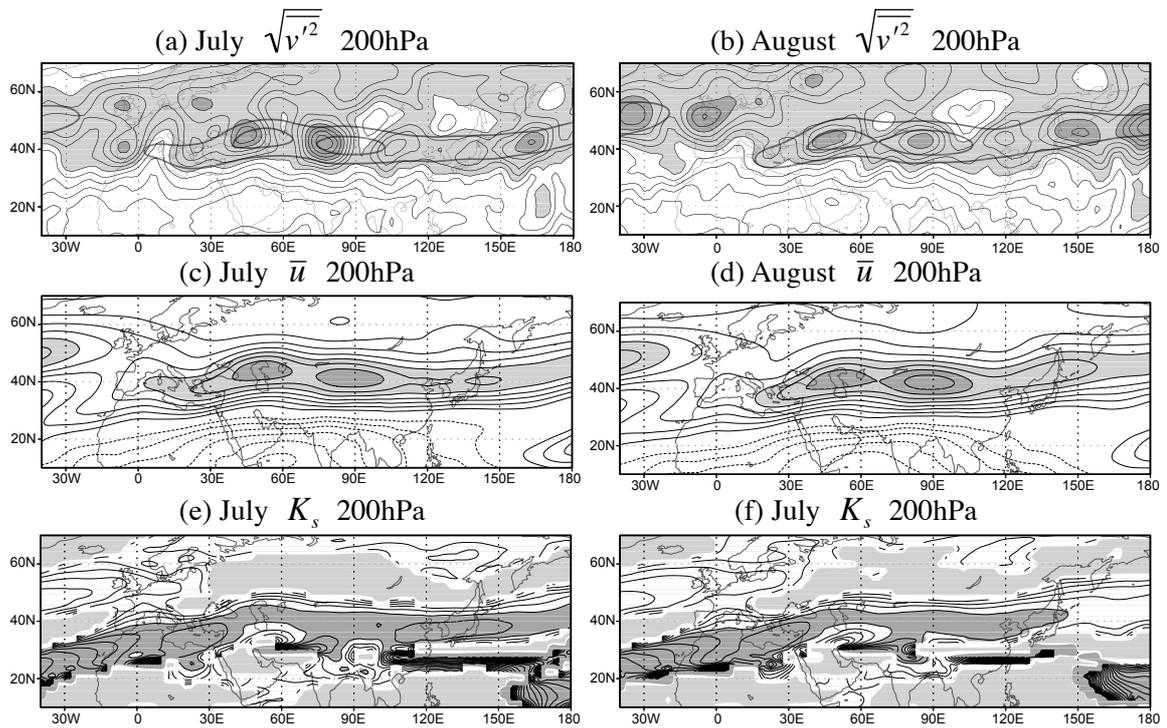


図1. JRA-25月平均データに基づく200hPaにおける(a, b)南北風の標準偏差, (c, d)気候平均東西風, (e, f)全波数. 左は7月, 右は8月. 等値線間隔は(a, b)  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ , (c, d)  $4 \text{ m s}^{-1}$ , (e, f) 1. (c, d)で0の等値線は省略. 薄影および濃影はそれぞれ(a, b)3および  $5 \text{ m s}^{-1}$ 以上の値, (c, d)20および  $28 \text{ m s}^{-1}$ 以上の値, (e, f)虚数および6以上の値を表す. (a)および(b)の太い等値線はそれぞれ(c)および(d)の  $20, 28 \text{ m s}^{-1}$ の等値線を表す.

に回帰した200hPa渦度偏差および回帰場から求めた波活動度フラックス(Takaya and Nakamura 2001)を示す. 7・8月ともに高・低気圧性偏差がアジアジェットに沿って並んでおり, シルクロードパターンの特徴を捉えている. いずれの月のパターンもアラル海の南東( $60^\circ\text{E}$ 付近)に最も強い低気圧性偏差の中心をもち, そこから下流に連なる波列は8月の場合の方がより長い波長を示し, 定常ロスビー波数  $K_s$ (図1e, f)と整合する. この結果はシルクロードパターンの定常ロスビー波列的な性質を示している. 一方, これらの波列パターンの鉛直構造を見ると(図は省略), 上層ほどわずかに西に傾いている.

7月の波列パターンは中緯度北東大西洋に起源を持つように見える(図2a)のに対し, 8月においては北海に起源を持つように見える(図2b). このように7月と8月とで波源は異なっているものの, 渦度偏差の振幅が最大

となるアラル海付近で波列の位相がほぼ一致するという結果は, 東西非一様な気候平均場が偏差場とのエネルギー変換を通して卓越する位相を選択している可能性を示唆する. 図2(c, d)および(e, f)はそれぞれ回帰場を用いて評価した200hPaにおける順圧エネルギー変換

$$CK = (v'^2 - u'^2)(\partial\bar{u}/\partial x - \partial\bar{v}/\partial y)/2 - u'v'(\partial\bar{u}/\partial y + \partial\bar{v}/\partial x)$$

および傾圧エネルギー変換

$$CP = -(f/\sigma)(v'T'\partial\bar{u}/\partial p - u'T'\partial\bar{v}/\partial p)$$

の地表から100hPaまでの鉛直積分値を示す. ジェットの西側のコアの北側で偏差場は気候平均場から運動エネルギーを獲得し, 東側のコアの南側で失う傾向にある. また上層ほど西に傾く鉛直構造を反映し, 傾圧的なアジアジェットの中で偏差場は熱を極向きに運んで正味では傾圧的に成長する傾向にある(図2e, f). これらのエネルギー変換の効率を

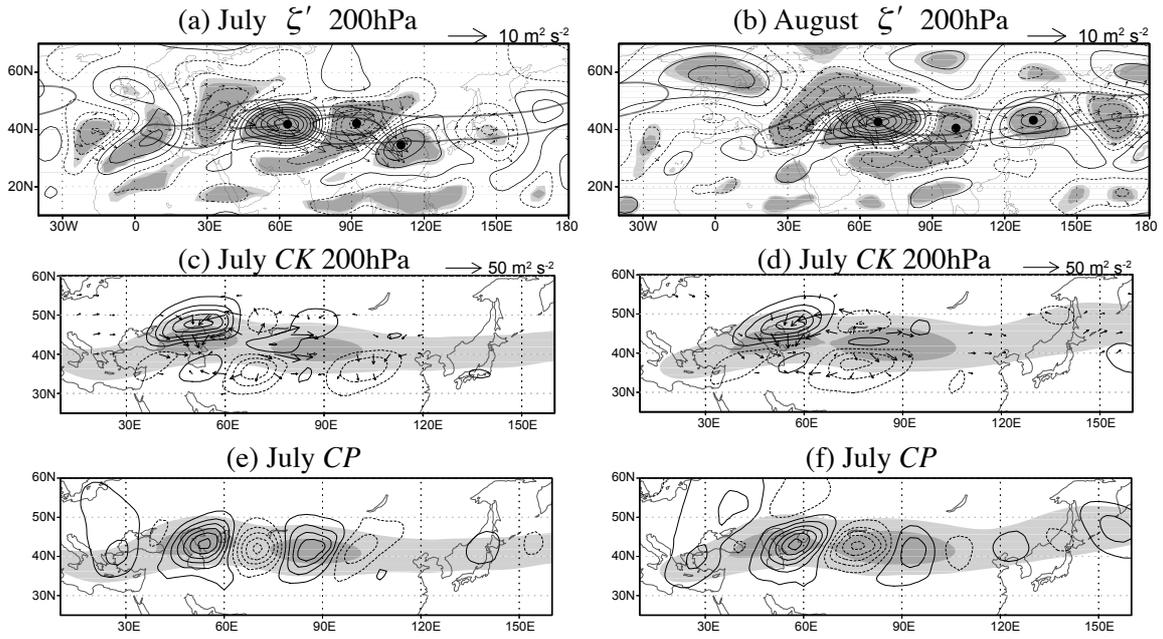


図2. JRA-25月平均データに基づく200hPa南北風の $[20^{\circ}\text{-}60^{\circ}\text{N}, 30^{\circ}\text{-}130^{\circ}\text{E}]$ におけるPC1回帰した200hPa渦度偏差(a, b), および回帰場から求めた(c, d)200hPaにおける順圧エネルギー変換, (e, f)地表から100hPaまで鉛直積分した傾圧エネルギー変換. 左は7月, 右は8月. 等値線間隔は(a, b)  $2 (\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots) \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , (c, d)  $1 (\pm 0.5, \pm 1.5, \pm 2.5, \dots) \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ , (e, f)  $0.2 (\pm 0.1, \pm 0.3, \pm 0.5, \dots) \text{ W m}^{-2}$ . (a, b)の矢印はTakaya and Nakamura (2001)の波活動度フラックスを, (c, d)の矢印はHoskins et al. (1983)の拡張Eliassen-Palmフラックスを表す. (a, b)の薄影および濃影はそれぞれ有意水準90および95%以上の偏差を表し, (a, b)の太い等値線と(c-f)の薄影および濃影は200hPa気候平均東西風が20および $28 \text{ m s}^{-1}$ 以上の領域を表す.

表1. (a)7月, (b)8月におけるPC1への回帰場が持つエネルギーをエネルギー変換によって満たすのに要する時間(単位: 日). エネルギー変換は気候平均場に対して回帰場を東西に移動させた場合についても評価している. 鉛直積分は地表から100hPaまでの積分を表す.

		(a) 7月				
		20°西へ	10°西へ	元の位置	10°東へ	20°東へ
$\tau_{CK}$	200hPa	-6.4	-794.4	10.7	-31.8	-7.7
$\tau_{CK}$	鉛直積分	-14.1	118.6	13.8	235.4	-17.2
$\tau_{CP}$	鉛直積分	6.8	5.1	4.2	4.9	6.0
$\tau_{CK+CP}$	鉛直積分	29.6	10.2	6.6	9.9	19.8
		(b) 8月				
		20°西へ	10°西へ	元の位置	10°東へ	20°東へ
$\tau_{CK}$	200hPa	-9.4	67.4	-68.1	-9.0	-12.3
$\tau_{CK}$	鉛直積分	-15.5	1124.2	321.9	-21.4	-36.2
$\tau_{CP}$	鉛直積分	5.6	4.0	3.6	4.1	4.2
$\tau_{CK+CP}$	鉛直積分	21.7	8.8	7.8	11.5	10.7

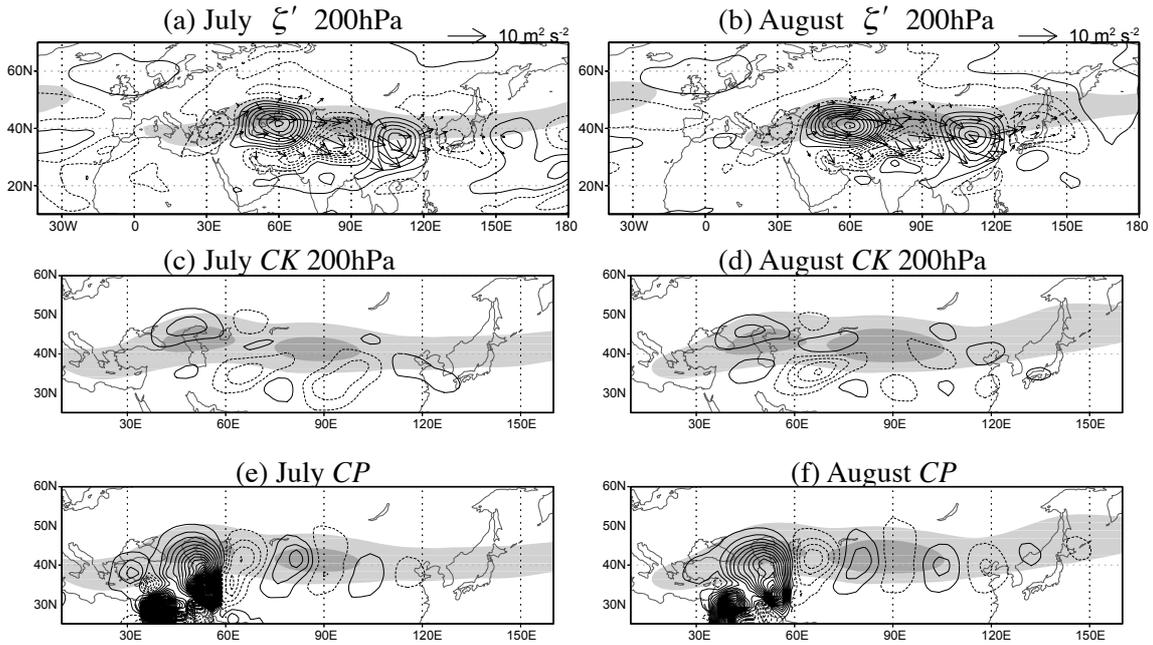


図3. 図2と同様. ただしLBMの第2特異モードについて. 薄影および濃影は200hPa気候平均東西風が20および28 m s<sup>-1</sup>以上の領域を表す.

$$\begin{aligned}\tau_{CK} &= \langle KE \rangle / \langle CK \rangle, \\ \tau_{CP} &= \langle APE \rangle / \langle CP \rangle, \\ \tau_{CK+CP} &= \langle KE + APE \rangle / \langle CK + CP \rangle\end{aligned}$$

で評価したものを表1に示す. ここで $\langle \rangle$ はある高度についてもしくは地表から100hPaまでの鉛直積分の北半球全体での水平積分を表す. 7月の順圧エネルギー変換は運動エネルギーを2週間程度で満たすことができ, 8月の200hPaではわずかに運動エネルギーを失うものの鉛直積分では正味ではほぼ得る運動エネルギーと失う運動エネルギーが等しい. 一方, 傾圧エネルギー変換は有効位置エネルギーを数日で満たすほど効率が高く, これらのエネルギー変換をあわせると月平均場として求められたシルクロードパターンの全エネルギーを1週間程度で満たすことができる. この結果は, シルクロードパターンが純粋な自由ロスビー波列ではなく中立モードもしくは不安定モードである可能性を示唆している.

シルクロードパターンにおける位相の固定に対しこれらのエネルギー変換が果たす役割を調べるために, 回帰場を気候平均場に対

して人為的に東西に移動させてエネルギー変換効率を再評価した(表1). 回帰場の東西変位に対し, 順圧エネルギー変換効率は急激に低下し, 7月・8月いずれの場合においても20°の移動で運動エネルギーを半月から1ヶ月程度で失うようになる. 一方, 傾圧エネルギー変換効率は回帰場の東西変位に対して大きく変化しない. 以上の結果から, シルクロードパターンのエネルギーには主に傾圧エネルギー変換が寄与しているものの, 気候平均場の東西非一様性が順圧エネルギー変換を通して卓越する位相を選択していると考えられる.

シルクロードパターンのモード的な性質を確かめるために, LBMの特異値分解(Navarra 1993)を行った. LBMはWatanabe and Kimoto (2000, 2001)によるもので, 解像度はT42L20とした. 基本場として7月および8月におけるJRA-25の気候平均場を用いた. 7,8月ともに第1特異モード(最も特異値が小さいモード)は南半球に大きな振幅を持つが, 第2特異モード(2番目に小さな特異値を持つ

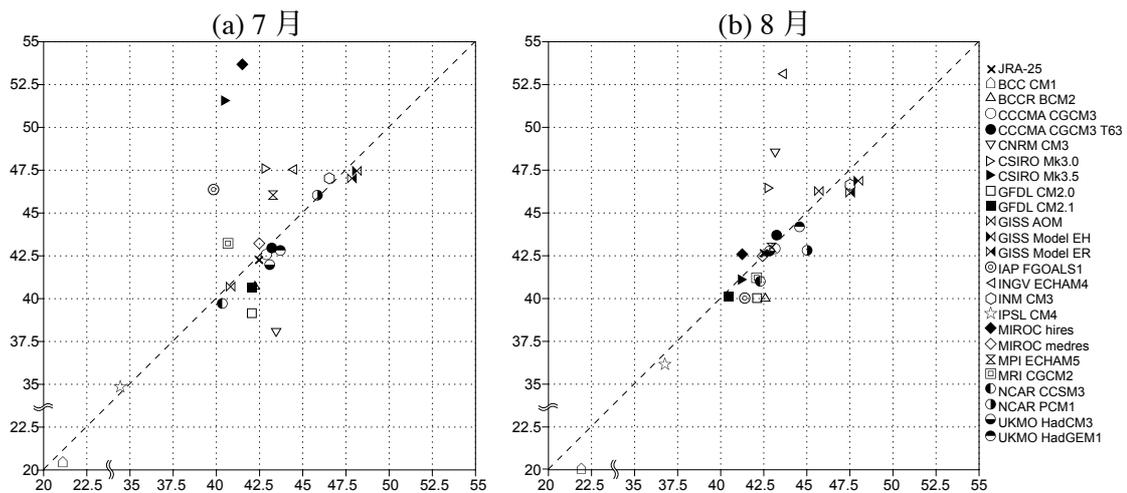


図4. 再解析データおよび各モデルにおける 200hPa 気候平均東西風の極大緯度(横軸)と、PC 1 への 200hPa 回帰場から求めた Takaya and Nakamura (2001)の波活動度フラックス東西成分の[40°-100°E]における東西平均の極大緯度(縦軸)を表す(a) 7月, (b) 8月の散布図.

モード)はシルクロードパターン(図 2a, b)に似た構造を示す(図 3a, b). これらの第2特異モードはアラル海の南東付近に低気圧性偏差の中心を持ち, EOF 解析で得られたシルクロードパターンに比べてわずかに波長が短いものの, 7月のもの(図 3a)に比べて8月の(図 3b)ものの方が波長が長いという特徴も再現している. これらのモードについて評価したエネルギー変換の分布(図 3c-f)は, 波長の違いとイランおよびアラビア半島上の強い傾圧エネルギー変換を除いて EOF 解析に基づくもの(図 2c-f)と整合している. 以上の結果から, シルクロードパターンが東西非一様な気候平均場によって位相を選択されるモードであると言える.

#### 4. CMIP3 モデルにおけるシルクロードパターン

再解析データを用いた以上の解析結果から, モデルにおけるシルクロードパターンの構造の特徴とそれに関わる気候平均場の特徴として, 以下の対応関係が予想される.

- i) シルクロードパターンの緯度とアジアジェットの軸の緯度
- ii) シルクロードパターンの波数と定常ロスビー波数  $K_s$

#### iii) シルクロードパターンの位相とアジアジェットの東西非一様性

24 の気候モデルのそれぞれについて JRA-25で行ったのと同様の EOF 解析を行った(個々のモデルに関する結果の図は Kosaka et al. 2009 を参照). 多くのモデルではアジアジェットに沿った波列パターンが抽出されるものの, 極前線ジェット上の波列を捉えるモデル, 波列状のパターンを示さないモデル, EOF 第2モードと分離できないモデルもある.

図4はアジアジェットと EOF1 パターンの軸の緯度の関係を表している. EOF1 が明らかにアジアジェット上の波列を捉えられていないいくつかのモデルを除き, 多くのモデルで EOF1 として捉えられる変動パターンはそのモデル内で再現されたアジアジェットの軸に沿っている.

図 5 は気候平均場から求められた定常ロスビー波長と EOF1 パターンの波長との関係を示している. アジアジェットに沿った波列が EOF1 として捉えられていないいくつかのモデルを除き, EOF1 パターンは気候平均場によって決まる定常ロスビー波長に近い波長を持っており, 定常ロスビー波長が長いモデルほど EOF1 の波長が長くなる傾向が認められる. 8月は比較的多くのモデルが JRA-25

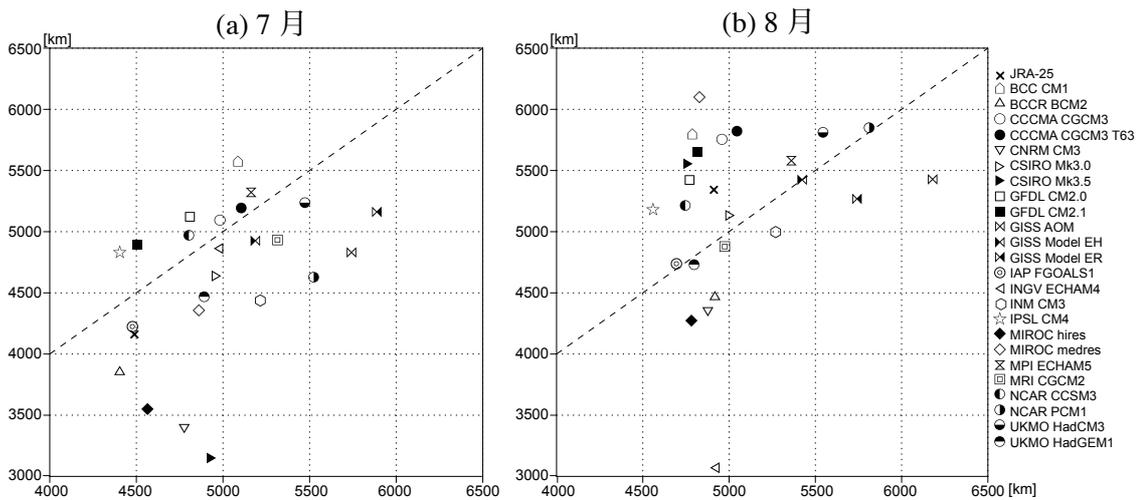


図5. 再解析データおよび各モデルにおける気候平均東西風から求めた定常ロスビー波長(横軸)と、EOF1パターンの波長(縦軸)を表す(a) 7月, (b) 8月の散布図. 定常ロスビー波数は 200hPa 気候平均東西風の [40°-100°E]における東西平均から評価し, 図4で示したジェットの本から±10°の南北幅で平均した値で示す. EOF1パターンの波長はPC1に回帰した200hPa 渦度偏差のアジアジェット上の極大位置で評価した.

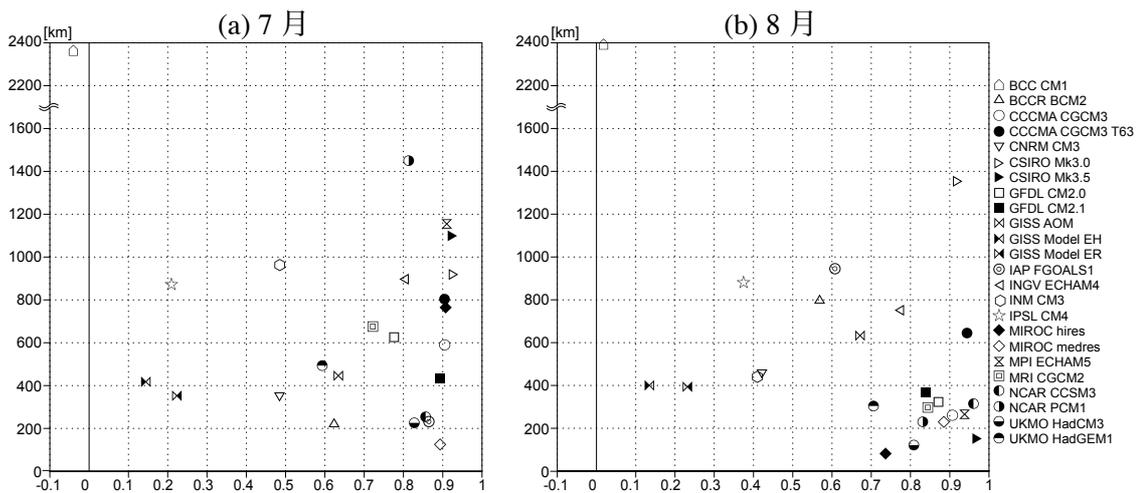


図6. 200hPa 気候平均東西風の東西勾配  $\partial \bar{u} / \partial x$  の各モデルと JRA-25 との [30°-50°N, 30°-90°E]におけるパターン相関(横軸)と, アラル海(~60°E)付近の渦度偏差の極大位置の各モデルと JRA-25 におけるものとの距離(縦軸, 単位: km)を表す(a) 7月, (b) 8月の散布図.

と同程度の波長を示すのに対し, 7月にはほとんどのモデルが JRA-25 に比べて長い定常ロスビー波長を示し, 対応して EOF1 パターンの波長も長くなっている.

気候平均場の東西非一様成分の再現性と EOF1 パターンの位相の再現性を図6に示す. 8月においては, 現実的な  $\partial \bar{u} / \partial x$  の分布を再現するほとんどのモデルがアラル海(~60°E)

付近の渦度偏差の極大位置を現実的な再現する. 一方, 7月の場合は  $\partial \bar{u} / \partial x$  の分布を現実的に再現するモデルでも EOF1 パターンの位相を現実的には再現しないものもあり, 気候平均場のこの要素意外にも位相の選択に關与する要素が存在する可能性を示唆している. このように, 気候モデルにおいては 8月よりも7月の方がシルクロードパターンの

再現が難しいと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では EOF 解析を通してシルクロードパターンの力学を解析した。JRA-25 再解析データで抽出されたシルクロードパターンは対流圏上層のアジアジェットによって決まる定常ロスビー波数と整合する波数を持っており、CMIP3 気候モデルにおいてもその傾向が確認された。このことはシルクロードパターンが定常ロスビー波列であるとするこれまでの捉え方と整合する。一方で、シルクロードパターンは傾圧エネルギー変換を通して気候平均場からエネルギーを受け取って維持／成長する傾向にあることが分かった。また、順圧エネルギー変換の効率は傾圧エネルギー変換に比べて低いものの、わずかに東西非一様なアジアジェットは順圧エネルギー変換を通してシルクロードパターンの位相を決定する傾向にあることも分かった。この傾向は CMIP3 気候モデルの特に 8 月について確認された。これらの結果はシルクロードパターンが自由ロスビー波列というよりも、むしろ中立モードもしくは不安定モード的な性質を持つことを示唆する。実際に、東西非一様な夏季気候平均場のまわりで線形化された LBM における第 2 特異モードとして、シルクロードパターンによく似た波列パターンが同定された。

## 参考文献

- Enomoto, T., 2004: Interannual variability of the Bonin High associated with the propagation of Rossby waves along the Asian jet. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1019-1034.
- Enomoto, T., B. J. Hoskins and Y. Matsuda, 2003: The formation mechanism of the Bonin high in August. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 157-178.
- Hoskins, B. J., I. N. James and G. H. White, 1983: The shape, propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems. *J. Atmos. Sci.*, **40**,

1595- 1612.

- Kosaka, Y., H. Nakamura, M. Watanabe and M. Kimoto, 2009: Analysis on the dynamics of a wave-like teleconnection pattern along the summertime Asian jet based on a reanalysis dataset and the CMIP3 climate model simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, submitted.
- Navarra, A., 1993: A new set of orthonormal modes for linearized meteorological problems. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2569-2583.
- North, G. R., T. L. Bell, R. F. Cahalan and F. J. Moeng, 1982: Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 699-706.
- Onogi et al., 2007: The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- Takaya, K. and H. Nakamura, 2001: A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 608-627.
- Watanabe, M. and M. Kimoto, 2000: Atmosphere-ocean thermal coupling in the North Atlantic: A positive feedback. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 3343- 3369.
- Watanabe, M. and M. Kimoto, 2001: Corrigendum. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 733-734.