

冬季アジアモンスーンに伴う 偏差パターンの形成要因に関する研究

* 太田真衣¹、高橋正明¹、廣田渚郎¹、山下陽介²
¹ 東京大学大気海洋研究所、² 国立環境研究所

1 はじめに

冬季東アジアの気候は、西高東低の気圧配置、東アジアトラフ、中緯度での大きな南北温度勾配、日本の南に軸をもつ上層ジェットによって特徴づけられる。ここ 20 年ほどはモンスーンの弱い暖冬の年が続いており、地球温暖化との関係も指摘されている。こうしたモンスーン活動の変動は、冬季の気候場だけでなく季節内擾乱にも影響を与えている。冬季モンスーン活動の弱体化に伴い、ジェットが弱まり、北太平洋における総観規模擾乱すなわちストームトラック活動が卓越する [e.g., Nakamura, 1992; Nakamura et al., 2002; Lee et al., 2010]。地表面付近の風速は弱いため、上空の西風ジェットは下層の傾圧性の弱体化を意味する。このため、モンスーン弱体化年に擾乱が卓越することは、傾圧不安定に関する線形論に反する。しかし、太平洋ジェット (250hPa, 130~170°E 平均) が 45m/s より大きいとき、線形論とは逆に西風が弱まると擾乱は発達する [Nakamura, 1992]、という観測結果とは整合的である。なお、Nakamura[1992] は線形論に従わない可能性のひとつとして、ジェットが強すぎると擾乱が傾圧帯に留まる時間が短くなるからと説明している。

ところで、ストームトラックやアジアジェットが存在する位置、局在化については、Charney and Eliassen[1949] や Smagorinsky[1953] などによる、山岳や加熱分布で励起された定在ロスビー波のトラフとの関係性の古典的な議論の他、非断熱加熱の重要性が指摘されている。たとえば、Valdes and Hoskins[1989] では、気候値の東西流で線形化した渦度方程式モデルを用いて、観測から見積もった非断熱加熱分布を強制力とした応答問題を考えた。彼らは、熱帯での非断熱加熱は東アジアのジェットを決める上で重要であるこ

とを示唆した。さらに Hoskins and Valdes[1990] は、観測から見積もった渦フラックス、熱フラックス、非断熱加熱を強制した線形モデル実験を行い、非断熱加熱がストームトラック上に局在化する傾圧性の高い領域を維持し、熱フラックスが減少させること示した。

このように、モンスーンの強弱に伴うストームトラックの違いや、非断熱加熱のジェットやストームトラックへの影響が知られている。しかし、モンスーンの強弱に伴う偏差に対する擾乱活動や非断熱加熱の影響は、定量的には十分には理解されていない。そこで本研究の目的は、冬季アジアモンスーンの強弱に伴う亜熱帯ジェットの変動と、それに関する擾乱活動及び非断熱加熱からの影響を、客観解析データを使った解析と線形モデル実験により理解することである。まず、客観解析データから冬季モンスーン活動に伴う偏差パターンを調べ、テレコネクションに関しても議論する。得られた偏差パターンをもとに、季節内擾乱と 3ヶ月平均偏差場との関係を波の活動度フラックスを使って解析する。本研究では、総観規模擾乱の周期を 3~10 日、準定常な擾乱の周期を 10~90 日と定義し、それぞれの周期の擾乱から平均場への非線形強制を解析的に見積もる。

モンスーン強化年と弱体化年に対応する偏差場の要因を定量的に解釈するため、線形モデルを用いた実験を行う。解析的に評価した擾乱による非線形強制の他、Valdes and Hoskins[1989] で重視された非断熱加熱による強制をモデルの外部強制として与え、応答パターンとして強化年と弱体化年に対応する偏差が現れるかを検証する。次に、外部強制の与え方を変えて応答パターンを調べ、偏差場の要因を定量的に解釈する。

2 解析手法とモデル実験設定

2.1 データと解析手法

使用データは JRA25 の再解析データ [Onogi *et al.*, 2007] と UK Met Office Hadley Center で提供された HadISST [Rayner *et al.*, 2003] の海面水温データで、1979/80 年から 2004/05 年までの 26 年間の冬季 (12、1、2 月の 3ヶ月平均) を解析した。冬季モンスーンの定義として、Jhun and Lee [2004] の East Asian Winter Monsoon Index (EAWMI) を用いて、26 年からモンスーン強化年と弱化年を 7 年ずつ取り出し、コンポジット平均に対して 26 年間の平均気候値からの偏差を求めた。次に Hamming フィルターを用いた時間スペクトル解析により冬季 3ヶ月から、短周期成分を 3~10 日、長周期成分を 10~90 日として取り出し、それぞれの擾乱について振幅や波活動を調べた。擾乱の各周期成分の強さを表す指標として、振幅 c_k を 2 乗したパワースペクトル P_k を用い、モンスーン強化年と弱化年でコンポジット平均した。

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^n c_k \exp^{i2\pi kt/T}$$

$$P_k = \langle |c_k|^2 \rangle$$

季節内擾乱に伴う波の伝播と、冬季 3ヶ月平均場と擾乱との相互作用を診断する手法として、保存則を満たすような波の活動度フラックスを適用する。ここで使用したのは、短周期擾乱に対しては Plumb [1986] の M_R 、長周期擾乱に対しては Takaya and Nakamura [2001] による W である。これは、Plumb [1986] では擾乱の時間スケールは平均場に比べて十分小さいと仮定されており、長周期擾乱には適用できないためである。擾乱と平均場との相互作用を評価するために、フラックスの収束・発散と 3ヶ月平均東西風との整合性を調べた。これにより、モンスーン活動に伴う擾乱の変動に伴って、波の伝播やフラックスの発散と 3ヶ月平均場との関係を解析していくこととする。

擾乱による平均流への強制は、簡単には以下の関係式に従う (Plumb, 1986)。渦の平均流への作用を表す式

$$\frac{D\bar{\mathbf{u}}}{Dt} + f\mathbf{k} \times \bar{\mathbf{u}}_a = \frac{1}{p}\mathbf{G} + \bar{\mathbf{X}}$$

$$\mathbf{G} = -p(\overline{\mathbf{u}'q'} \cdot \mathbf{n})\mathbf{s} + p(\overline{\mathbf{u}'q'} \cdot \mathbf{s})\mathbf{n}$$

に対して、近似

$$\mathbf{n} \cdot \overline{\mathbf{u}'q'} \approx \nabla \cdot \mathbf{M}_R / p \cos \phi$$

を適用すれば、 $\nabla \cdot \mathbf{M}_R$ と $\bar{\mathbf{u}}$ との関係を考察できる。但し、 $\bar{\mathbf{u}}$ は 3ヶ月平均であり、 $'$ は気候値からの偏差に時間フィルタを施した成分である。ここで、 \mathbf{u} は水平風、 q は準地衡の渦位、 $\bar{\mathbf{u}}_a$ は非地衡風成分の残差、 \mathbf{X} は摩擦力に比例する非保存項、 f はコリオリパラメータ、 p は気圧である。Takaya and Nakamura [2001] の $\nabla \cdot \mathbf{W}$ と平均東西風との関係も同様に考察した。

2.2 線形モデルの概要と実験設定

本研究で使用した線形プリミティブモデルは、水平解像度 T42、鉛直解像度 20 層で湿潤プロセスは含んでいない (詳細は Hirota [2009] を参照されたい)。このモデルでは、擾乱による非線形効果や非断熱加熱による強制を外部強制として与え、その強制に対する力学系の線形応答を求めることができる。

標準実験では、モンスーン強化年と弱化年の場合の $\nabla \cdot \mathbf{M}_R$ や $\nabla \cdot \mathbf{W}$ といった、擾乱に伴う非線形強制に加え、非断熱加熱を外部強制として全球的に与え、モンスーン強化年と弱化年に対応する東西風の応答パターンが現れるかを調べた。標準実験に対し、外部強制として短周期擾乱、長周期擾乱による非線形強制と非断熱加熱による強制をそれぞれ個別に与えた 3 つの実験を行い、応答の強さを定量的に見積もった。

3 解析結果

3.1 EAWM 変動に伴う偏差パターン

モンスーン強化年には亜熱帯ジェットが強まり、対流圏上層 (300hPa) における東西風は 30~40°N 付近で西風偏差であった。この西風偏差が見られる領域の中でも、中国付近と日付変更線付近は偏差が特に大きかった。弱化年ではジェットは東風偏差となり、緯度幅が強化年に比べて広がっている。偏差パターンとしては緯度方向に 3 極パターンで、モンスーン強化年と弱化年で若干構造が異なっているが、逆符号のパ

ターンである (図 1a,b)。ジオポテンシャル高度偏差で見ると、強化年では東アジア付近で負偏差、その北側で正偏差であり、弱化年は逆符号となっている (図 1c,d)。強化年の偏差は西太平洋 (Western Pacific: WP) パターンと似ている。なお、WP パターンは La Niña 年に発生する傾向があり、月平均東西風やストームトラック活動にも影響する [Lau, 1988]。

赤道付近の SST は、モンスーン強化年に Cold ENSO (La Niña)、弱化年に Warm ENSO (El Niño) と似たパターンを示し、日本の東の海上では強化年に南北温度勾配を大きくし、弱化年に小さくするようなパターンが見られた (図略)。これらの結果は、モンスーン変動に伴う偏差に ENSO や WP に伴う波の伝播が含まれることを示唆する。

3.2 短周期擾乱 (3~ 10 日周期) に伴う波の伝播と平均場への作用

図 2 はモンスーン強化年と弱化年における、3~10 日成分の P_k , \mathbf{M}_R , $\nabla \cdot \mathbf{M}_R$ の分布である。モンスーン強化年と弱化年のジオポテンシャル高度のパワースペクトル P_k を調べたところ、弱化年の方が強化年に比べて、北太平洋付近でピークが大きかった (図 2a,b)。よって、モンスーン弱化に伴いストームトラック活動が卓越することが分かる。 \mathbf{M}_R は 3~10 日周期の擾乱に伴う波の伝播を表しており、南寄りのベクトルと鉛直上向きフラックスが卓越することが分かる (図 2d)。さらに傾圧エネルギー変換項も大きい (図略)、ストームトラック活動が活発であることと整合的である。3次元フラックスの発散 $\nabla \cdot \mathbf{M}_R$ は、日本付近で収束偏差つまり擾乱による東風加速偏差となっており (図 2f)、図 1b の日本付近における東風偏差の形成と整合的である。

他方、熱帯や高緯度では $\nabla \cdot \mathbf{M}_R$ の発散偏差と西風偏差の整合性が低いことが分かる。これは、短周期擾乱以外の影響、例えば長周期擾乱や非断熱加熱からの効果が働いている可能性が考えられる。

3.3 長周期擾乱 (10~ 90 日周期) に伴う波の伝播

図 3 は、モンスーン強化年と弱化年における 10~90 日成分の P_k , \mathbf{W} , $\nabla \cdot \mathbf{W}$ の分布である。短周期擾乱の場合と同様に P_k を調べたところ、モンスーン強化年の方が弱化年に比べてアリューション付近でピークが大きかった (図 3a,b)。 \mathbf{W} は長周期擾乱に伴う波活動度の伝播を表しており、擾乱が活発なアリューション付近で、北よりのベクトルと鉛直上向きフラックスが卓越していることがわかる (図 3c)。3次元フラックスの発散 $\nabla \cdot \mathbf{W}$ は、日本付近で弱いながらも発散偏差となっており (図 3e)、図 1a における日本の南付近の西風偏差の形成と整合的である。図 3e と図 1a を比較すると、たとえば中国の南側やバイカル湖の北側など $\nabla \cdot \mathbf{W}$ と \bar{u} が対応していない領域が多くみられる。これに関しては、短周期擾乱の場合と同様、他の要因が絡んでいる可能性を示している。

その一方で、北アメリカ付近でも南東方向のベクトルが顕著である (図 3c)。図 1c で北米付近に偏差中心があることから、太平洋/北アメリカ (Pacific/North America: PNA) パターンとの関係も考えられる。PNA についてはここでは詳しく述べないが、今後注目していきたい点である。

3.4 3章のまとめ

データ解析では主に以下のことを示した。

- モンスーン強化年では 30~40°N 付近のジェットが強まり、10~90 日周期の長周期擾乱がアリューション付近で卓越する。この擾乱による非線形強制項は、ジェットを加速する傾向にあった。
- モンスーン弱化年ではジェットが弱まり、3~10 日周期の短周期擾乱が北太平洋付近で活発化する。この結果は「暖冬の年にストームトラック活動が活発化する」という、先行研究の結果と整合的である。この短周期擾乱による強制の分布が亜熱帯ジェットを減速する傾向にあったが、熱帯や高緯度では非断熱加熱など他の影響も示唆された。

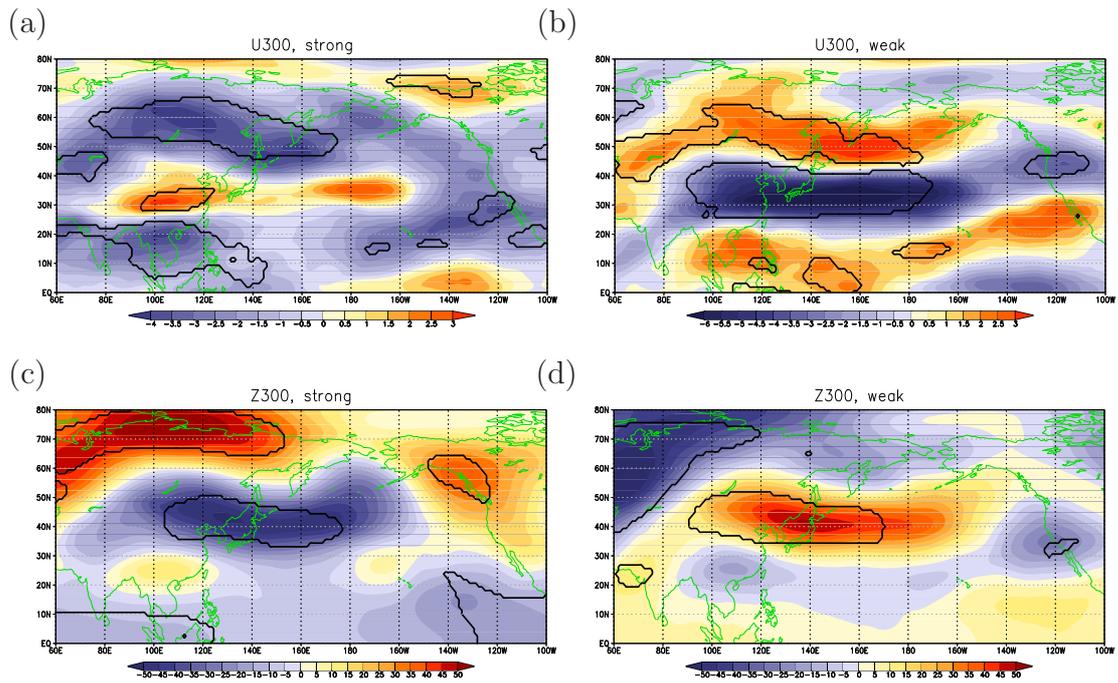


図 1: モンスーン強化年と弱化年における偏差(陰影)。(a), (b) 300hPa 東西風 (ms^{-1}); (c), (d) 300hPa ジオポテンシャル高度 (m)。黒線は 95 % で統計的に有意な領域を表す。

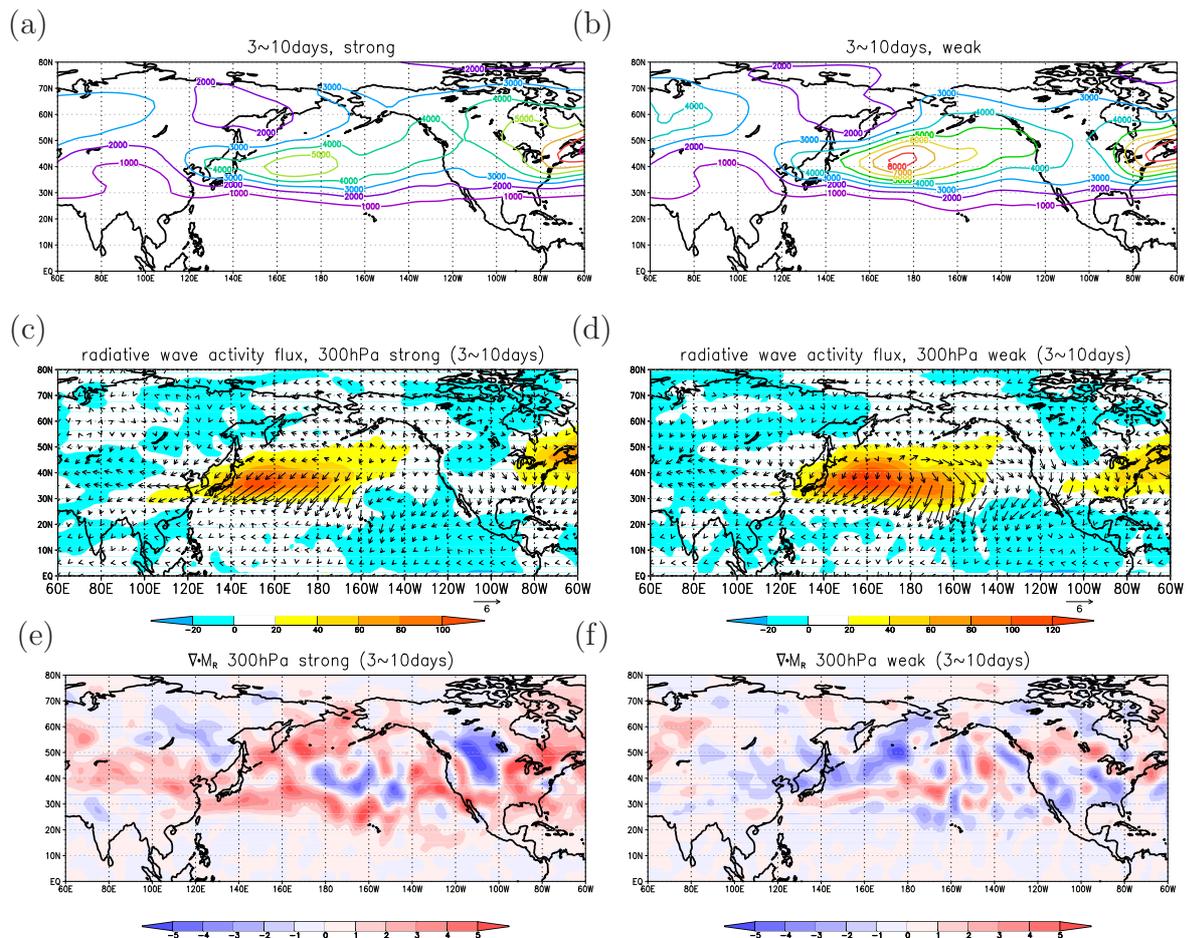


図 2: モンスーン強化年と弱化年の 300hPa における水平分布図。3~10 日の短周期成分から計算された、(a), (b) パワースペクトル P_k (等値線、単位は m^2); (c), (d) 波活動度フラックス \mathbf{M}_R のコンポジット平均。矢印が水平成分、陰影が鉛直成分 (m^2s^{-2}) で、矢印の基準は右下に置いた; (e), (f) $\nabla \cdot \mathbf{M}_R$ の偏差 (陰影、単位は 10^{-6}ms^{-2})。左側がモンスーン強化年、右側がモンスーン弱化年。

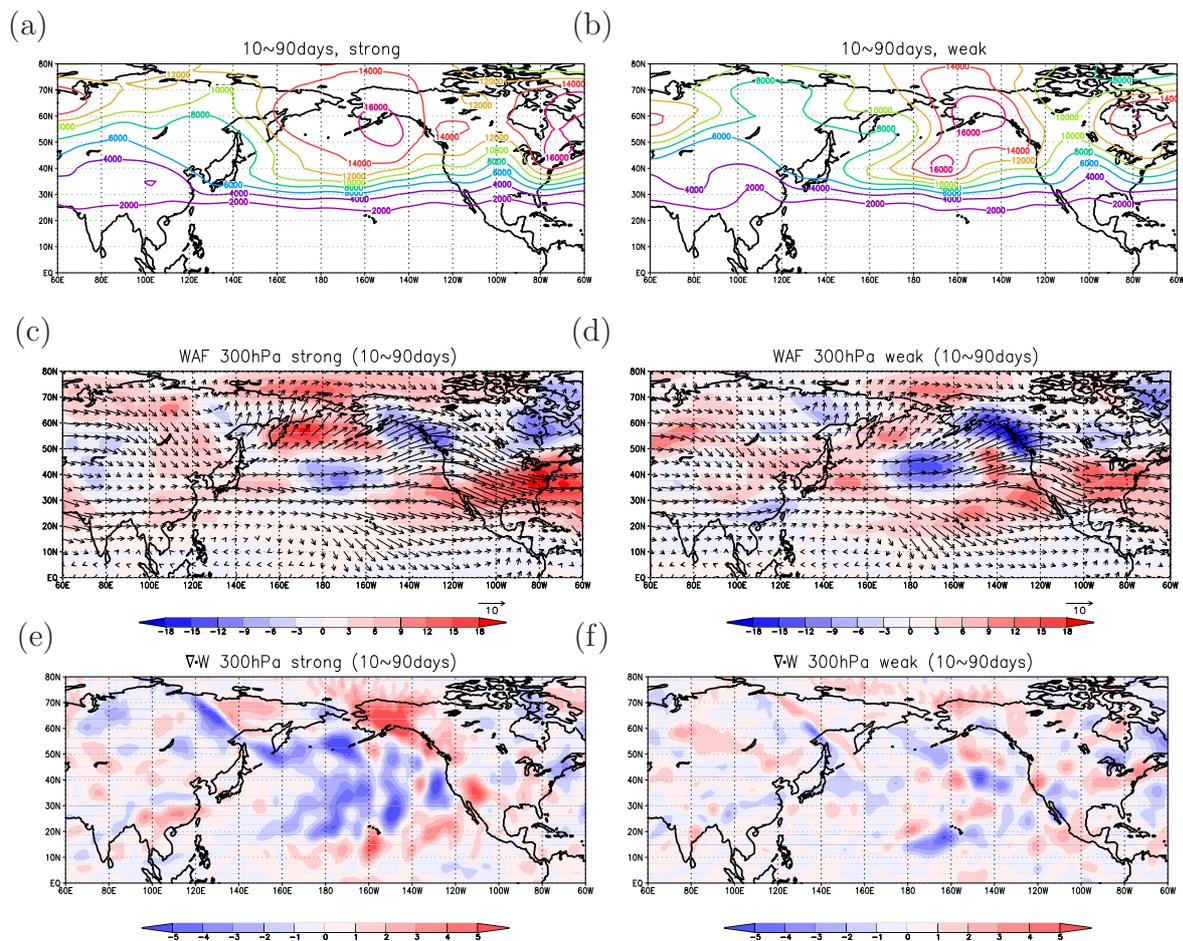


図 3: モンスーン強化年と弱化年の 300hPa における水平分布図。10~90 日の長周期成分から計算された、(a), (b) パワースペクトル P_k (m^2); (c), (d) 波活動度フラックス \mathbf{W} のコンポジット平均。矢印が水平成分 (m^2s^{-2})、陰影が鉛直成分 ($\times 10^{-4}m^2s^{-2}$) で、矢印の基準は右下に置いた; (e), (f) $\nabla \cdot \mathbf{W}$ の偏差 (陰影、単位は $10^{-6}ms^{-2}$ 、9 点スムージングを施している)。左側がモンスーン強化年、右側がモンスーン弱化年。

4 線形モデルによる応答実験

3章の解析結果をふまえ線形モデルによる応答実験を行った。解析結果からモンスーン強化年と弱化年に関して、短周期、長周期の擾乱による非線形強制の他、非断熱加熱の影響も示唆された。これらの効果を線形モデルの外部強制として与えた実験を行い、線形モデルの応答としてモンスーン強化年と弱化年の偏差パターンを再現した。さらに強制を個別に与えた場合の応答を調べることで、偏差の形成要因を定量的に評価した。

4.1 モンスーン強化年

図4は短周期・長周期擾乱による非線形効果と非断熱加熱を外部強制としたときの、線形モデルの東西風偏差の応答である。図4aと図1aを見比べると、モンスーン強化年に特徴的な3極の偏差パターンがある程度再現されていることが分かる。しかし、細かく評価すると、図4aではアリューシャン付近に弱い正偏差領域が存在するように、若干異なる部分もある。再現されにくかった部分に関しては今後調べる必要がある。

外部強制として与えた要因の偏差への影響を定量的に見積もるために、それぞれを単独で与えた場合の応答を評価した(図5)。非断熱加熱のみを与えた場合は熱帯領域で強い応答が見られる(図5a)。非線形強制についても同様に考察すると、日本の東の海上では短周期成分による非線形強制、ユーラシアからアリューシャン付近にかけては長周期成分による非線形強制が主に働いていることが分かる(図5c,5e)。以上からモンスーン強化年には、解析で重要性が示唆されたアリューシャン付近の長周期擾乱の強制がジェットを強化するように働くことが分かった。これは、モンスーン強化年に亜熱帯ジェットが強化され、それがアリューシャン付近の長周期の波活動を変えてジェットを強めるフィードバックの存在を示唆する。一方で、熱帯から北アメリカ付近の偏差パターンや中国の南側の偏差パターンには、熱帯域の非断熱加熱に伴う影響が示唆された。

4.2 モンスーン弱化年

図4bでは図1bと同様の3極偏差パターンが再現されており、モンスーン弱化年は強化年に比べて再現性が高いことが分かる。次に、図5b,d,fは非断熱加熱と、短周期・長周期成分による非線形強制をそれぞれ単独で与えた場合の応答である。図5bから、正-負-正パターンの形成には、非断熱加熱が最も寄与していると考えられる。図5fでも似たような3極パターンが見られるが、高緯度方向に少しずれている。

一方で、モンスーン弱化年は短周期擾乱が活発化することをデータ解析で示したことから、短周期成分による非線形強制の影響が大きいと予想された。しかし、実際の応答は小さく正-負-正パターンは現れなかった(図5d)。なお、図5dに見られるユーラシアから日本付近にかけての正偏差の場所は図4bと部分的には合っており、この領域で短周期成分による寄与が大きいと考えられる。

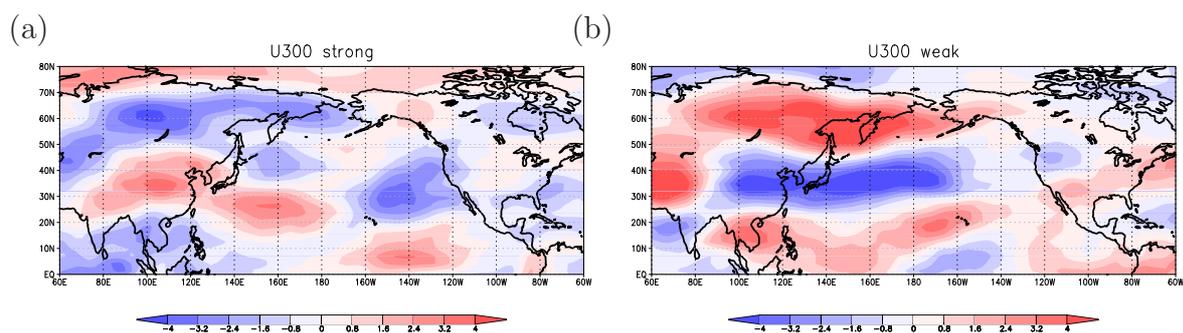


図 4: 短周期・長周期擾乱による非線形効果と非断熱加熱を与えた場合の 300hPa 東西風の定常応答 (陰影、単位は ms^{-1})。 (a) モンスーン強化年, (b) モンスーン弱化年。

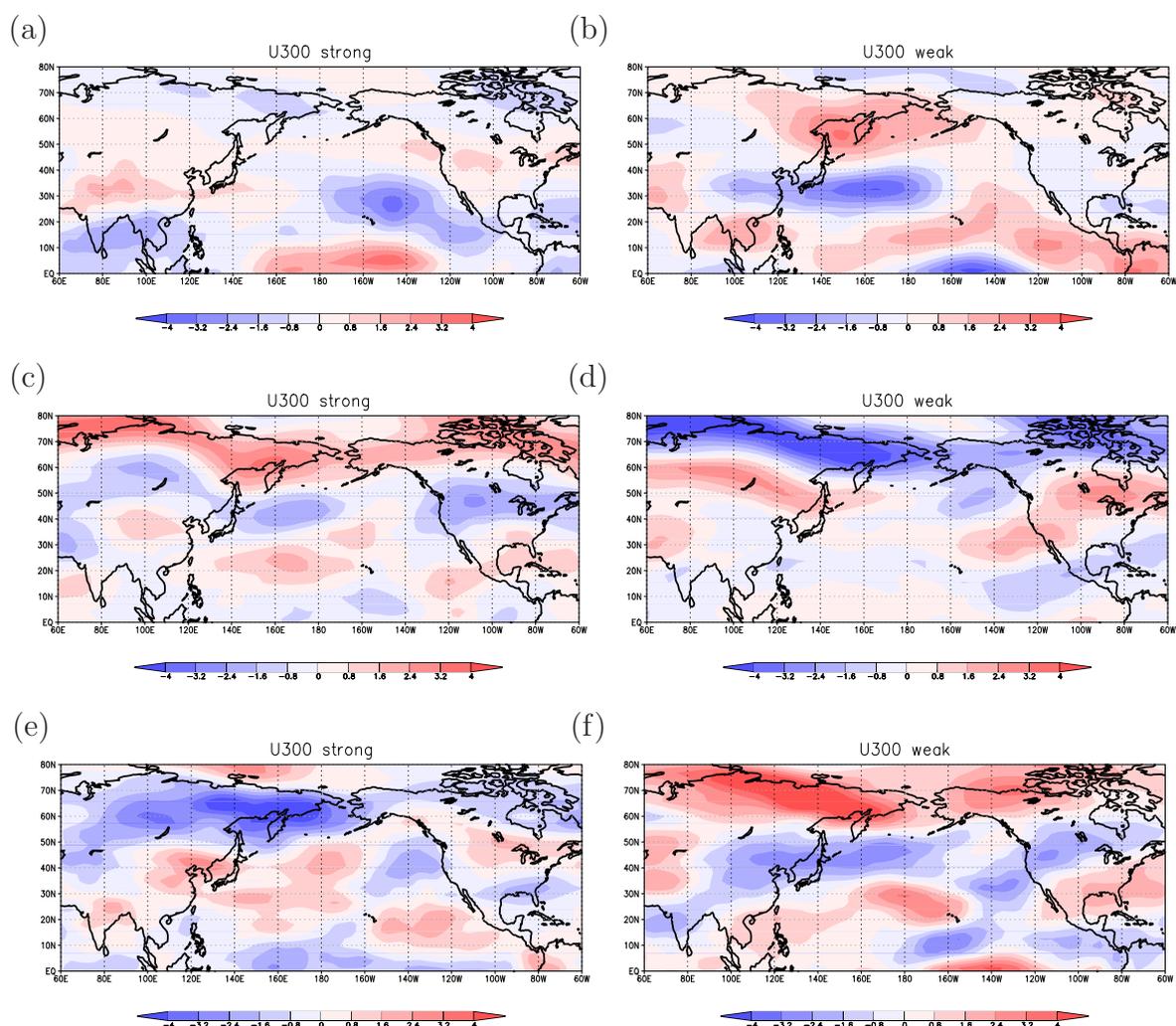


図 5: 図 4 で与えた強制を個別に分けて与えた場合の 300hPa 東西風の定常応答 (陰影、単位は ms^{-1})。 (a), (b) 非断熱加熱; (c), (d) 短周期擾乱による非線形強制; (e), (f) 長周期擾乱による非線形強制。左側がモンスーン強化年、右側がモンスーン弱化年。

5 まとめと今後の展開

データ解析と線形モデル実験を通して以下のことを示した。

- モンスーン弱化年で短周期擾乱(ストームトラック)がより活発になり、それに伴う波活動も強化していた。これを非線形強制とするフィードバックは定量的には弱く、非断熱加熱や長周期成分の効果が大きかった。
- モンスーン強化年のアリューシャン付近において長周期擾乱が活発で、それに伴う非線形強制は解析結果と線形モデル実験ともに亜熱帯ジェット強化と対応し、非線形フィードバックが示唆された。また線形モデルによる応答実験では、熱帯付近の非断熱加熱、日本の東の海上での短周期成分の影響がみられた。

モンスーン強化年と弱化年ともに、非断熱加熱が偏差場の形成に重要であることが示唆された。今後はこの非断熱加熱の要因を調べることが課題である。非断熱加熱の強制のパターンは熱帯域で ENSO に伴うものと似ており、ENSO が関わっていると予想される。他方、中緯度域では擾乱に伴う非断熱加熱も考えられる。そこで、強制を熱帯のみに限定して実験することで、ENSO に伴う応答をより詳しく調べていくこととする。一方で、長周期成分による非線形強制では、強化年と弱化年ともにシベリア付近で応答が大きかった。これについても、強制を高緯度に限定して考察していきたい。

謝辞

本文中で JRA-25 と表記して利用したデータセットは、気象庁及び電力中央研究所による JRA-25 長期再解析プロジェクトにより提供されたものである。

参考文献

- [1] Charney, J. G. and A. Eliassen (1949), A numerical method for predicting the perturbations of the midlatitude westerlies, *Tellus*, *1*, 38–54.
- [2] Hirota, N. (2009), Formation processes of tripolar climate anomaly over the East Asia in summer, Ph.D. thesis, University of Tokyo, Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science.
- [3] Hoskins, B. J., and P. J. Valdes (1990), On the existence of storm-tracks, *J. Atmos. Sci.*, *47*, 1854–1864.
- [4] Jhun, J. G., and E. J. Lee (2004), A New East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon, *J. Climate.*, *15*, 711–726.
- [5] 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*, 2718–2743.
- [6] Lee, Y.-Y., G.-H. Lim, and J.-S. Kug (2010), Influence of the East Asian winter monsoon on the storm track activity over the North Pacific, *J. Geophys. Res.*, *115*, D09102, doi:10.1029/2009JD012813.
- [7] Nakamura, H. (1992) Midwinter suppression of baroclinic wave activity during the life cycles of low-frequency circulation anomalies, *J. Atmos. Sci.*, *47*, 1100–1116.
- [8] Nakamura, H., et al. (2002), Interannual and decadal modulations recently observed in the Pacific storm track activity and East Asian winter monsoon, *J. Climate.*, *15*, 1855–1874.
- [9] Onogi, K., et al. (2007), The JRA-25 Reanalysis., *J. Meteor. Soc. Japan.*, *85*, 369–432.
- [10] Plumb, R. A. (1986), Three-dimensional propagation of transient quasi-geostrophic eddies and its relationship with the eddy forcing of the time-mean flow, *J. Atmos. Sci.*, *43*, 1657–1678.

- [11] 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.
- [12] Smagorinsky, J. (1953), The dynamical influence of large-scale heat sources and sinks on the quasi-stationary mean motions of the atmosphere, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, *79*, 342–366.
- [13] Takaya, K. and Nakamura, H. (2001), A formulation of a phase-independent wave activity flux for stationary and migratory quasi-geostrophic eddies on a zonally basic flow, *J. Atmos. Sci.*, *58*, 608–627.
- [14] Valdes, P.J., and B. J. Hoskins. (1989), Linear stationary wave simulations of the time mean climatological flow, *J. Atmos. Sci.*, *46*, 2509–2527.