

寒候期後半におけるエルニーニョ現象に伴う東西波数1成分の卓越と負の北極振動

竹村 和人 (気象庁 気候情報課)、前田 修平 (気象庁 気象研究所)

1. はじめに

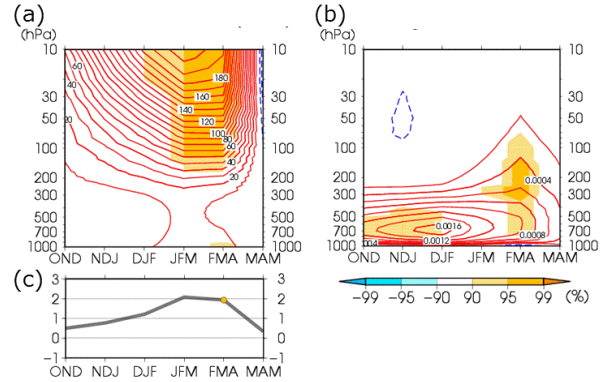
エルニーニョ現象は、太平洋赤道域の日付変更線付近から南米のペルー沿岸にかけての広い範囲で海面水温が平年と比べて高くなり、その状態が1年以上続く現象である。エルニーニョ・南方振動(ENSO)は、エルニーニョ現象を含む数年規模の周期をもつ大気・海洋の大きな変動であり、熱帯のみならず中・高緯度における大気循環場や天候にも大きく影響する(たとえば、Matthews and Kiladis 1999)。Taguchi and Hartmann (2006)は、エルニーニョ現象発生時には、東西波数1の循環が卓越し、成層圏の極うずが弱まる傾向があることを、数値モデルを用いた実験を通して示した。

一方、極域における成層圏-対流圏の力学的結合(以下、鉛直結合)に関して、Baldwin and Dunkerton (1999)は、北半球環状モード(Northern Annular Mode; NAM)あるいは北極振動(Arctic Oscillation; AO)に対応したシグナルが成層圏から対流圏へと下降する現象を示しており、ENSOが成層圏の極うずの変調を通して、対流圏極域の循環場に影響する可能性が示唆される。この下方影響に関してAmbaum and Hoskins (2002) (以下、AH02)は、地衡流調節に基づいて定量的に評価を行い、その力学過程について議論した。本稿では以上の先行研究を踏まえ、エルニーニョ現象の発生と直接的に関連する対流圏極域の循環場への影響について定量的に解析を行った結果を報告する。

2. 使用データと解析手法

大気循環場のデータには気象庁55年長期再解析(JRA-55; Kobayashi et al. 2015)による解析値を用い、季節内振動による影響を除去するために3か月平均した値を用いた。統計解析の期間は1958~2012年の55年間とし、11~4月を中心とする前後3か月の期間(すなわちOND~MAM; 以下、寒候期)を解析の対象とする。偏差は55年平均値からの差、平年値は1981~2010年の30年平均値とする。

本解析では、エルニーニョ現象発生年における合成図解析を実施した。発生年については、エルニーニョ監視海域(NINO.3)における海面水温に基づく気象庁の定義を用いて抽出した。



第1図 エルニーニョ現象発生年で合成した寒候期の期間における70°N~90°N・帯状平均偏差の時間-鉛直断面図及び時系列

(a)は高度(20m間隔)、(b)は鉛直p速度(4×10^{-4} Pa/s間隔)、(c)は海面気圧(単位はhPa)。陰影及び色付き丸印は信頼度水準を表す。

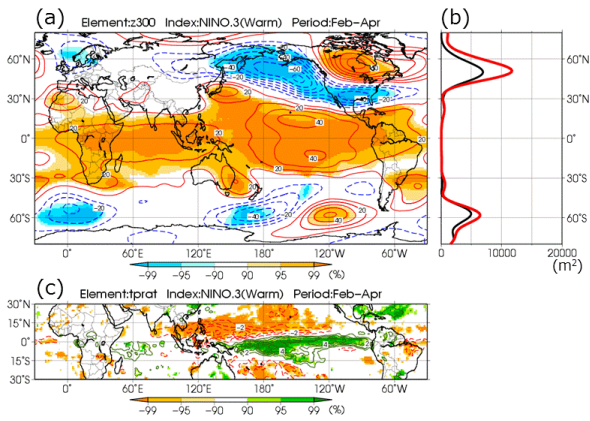
3. 解析結果

3.1. 寒候期における鉛直結合の季節依存性

はじめに、エルニーニョ現象発生年における鉛直結合の季節依存性を調べるために、極域における帯状平均した合成偏差の分布を第1図に示す。高度偏差をみると、寒候期後半、特にJFM~FMAの期間に成層圏で有意な正偏差となる傾向がみられるほか、FMAでは対流圏下層でも有意な正偏差が認められ、負のNAMやAOに対応する(同図(a))。FMAでは、有意な高度の正偏差と対応して、下部成層圏から対流圏にかけて有意な下降流偏差がみられ(同図(b))、海面気圧もまた有意な正偏差となる傾向を示している(同図(c))。以下では、有意な傾向がみられたFMAの期間における特徴に着目する。

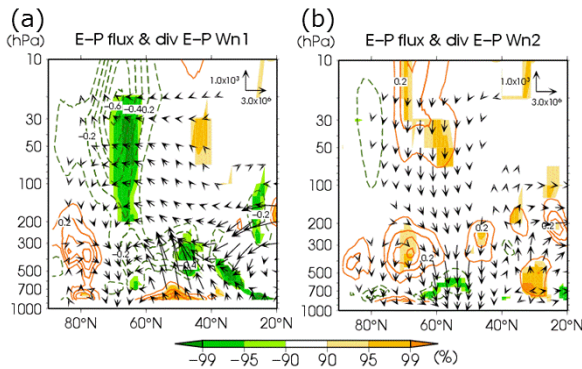
3.2. FMAにおける統計的特徴

はじめに、降水量偏差の合成図をみると(第2図(c))、エルニーニョ現象の発生に対応して、太平洋赤道域で降水量が増加、すなわち対流活動が活発となる傾向がみられる。300hPa高度偏差をみると(同図(a))、活発な対流活動に伴う加熱偏差への応答として日本付近~北太平洋東部の熱帯域や北米北部で正偏差、北太平洋北東部や米国南部で負偏差となる正のPNA(Pacific North America)パターン(Renwick and Wallace 1996)が明瞭である。この正のPNAパターンの発現と対応して、北半球中緯度域では東西波数1のパターンが卓越する傾向がみられる(同図(b))。



第2図 エルニーニョ現象発生年で合成した2~4月平均の偏差及び緯度分布

(a)は300hPa 高度偏差 (10m 間隔)、(b)は300hPa 高度の東西波数 1 成分の振幅 (赤線はエルニーニョ現象発生年での合成、黒線は平年)、(c)は降水量 (1mm/day 間隔)。(a)と(c)の陰影は信頼度水準を表す。



第3図 エルニーニョ現象発生年で合成した2~4月平均のE-Pフラックス及びその収束発散の偏差

(a)は東西波数 1 成分、(b)は東西波数 2 成分。矢印はE-P フラックス偏差 (単位は kg/s^2)、等値線と陰影はE-P フラックス収束発散の偏差 (0.1m/s/day 間隔) 及びその信頼度水準を表す。

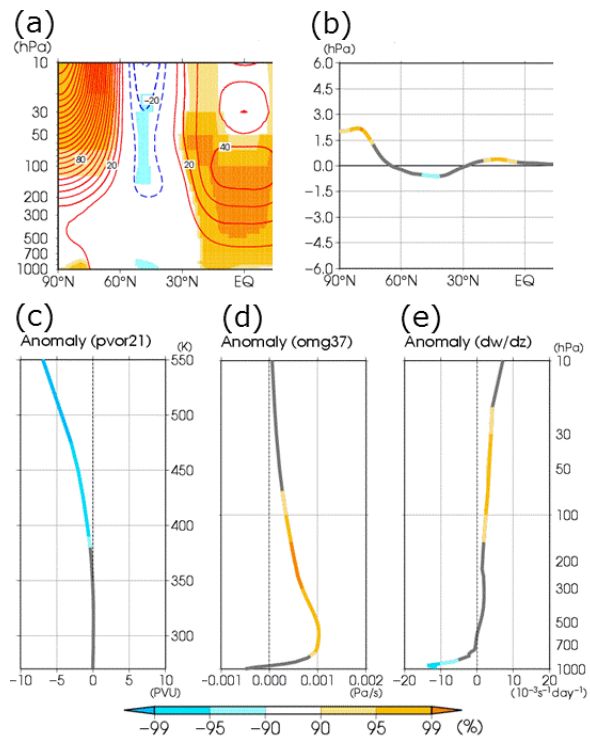
次にロスビー波の成層圏への鉛直伝播に着目するために Eliassen-Palm (E-P) フラックス (Edmon et al. 1980) の合成偏差をみると (第3図)、対流圏での東西波数 1 の卓越に対応して、対流圏中緯度域からの東西波数 1 成分のロスビー波の鉛直伝播が強まり、成層圏での極夜ジェットの減速に寄与する傾向がみられる (同図(a))。東西波数 2 成分のロスビー波の鉛直伝播は弱まる傾向がみられるが (同図(b))、全波数成分でみると鉛直伝播は強まる傾向となる (図省略)。以上で述べた傾向は、Taguchi and Hartmann (2006)の結果と整合している。

ここで、帯状平均した β 平面上の準地衡流渦位方程式を考えると、負の渦位変化傾向は北向き渦位フラックスの発散とバランスし、渦位フラックスはE-P フラックスの発散に比例する。このことから、極域における負の渦位偏差は、成層圏高緯度域にお

ける波束の収束と関連する。また、AH02 の議論に基づくと、次のことが言える。

- ・成層圏極域における負の渦位偏差は、地衡流調節を通して対流圏界面高度の下降とバランスする。
- ・極域での β 効果は無視できるものとし、東西一様な場を仮定した場合には、対流圏界面高度の下降は、対流圏における渦管の圧縮を通して地表面付近に高気圧性の渦度強制をもたらす。

これらを踏まえて帯状平均場の合成偏差に着目すると (第4図)、成層圏高緯度域で東西波数 1 の波束が収束する傾向と対応して、成層圏極域では有意な高度の正偏差及び負の渦位偏差がみられる (同図(a)と(c))。成層圏での負の渦位偏差と対応して、下部成層圏~対流圏では下降流偏差がみられ (同図(d))、対流圏での渦管の圧縮に伴う下層での高気圧性の渦度強制と対応して (同図(e))、負の AO に対応した海面気圧の有意な正偏差を示している (同図(b))。この力学過程は、AH02 の地衡流調節に基づく理論と整合している。



第4図 エルニーニョ現象発生年で合成した2~4月平均の帯状平均偏差

(a)高度偏差 (10m 間隔)、(b)海面気圧偏差 (単位は hPa)、及び 70°N~90°N で平均した(c)等温位面渦位 (単位は PVU)、(d)鉛直 p 速度偏差 (単位は Pa/s)、(e)鉛直方向の収束発散偏差 (単位は $10^{-3}\text{s}^{-1}\text{day}^{-1}$)。陰影及び色線は信頼度水準を表す。

3.3. 鉛直結合の定量的評価

最後に、エルニーニョ現象発生時の合成図から得られた偏差の値をAH02による鉛直結合の評価の手法に適用することにより、鉛直結合の定量的な評価を試みる。成層圏から対流圏界面への影響について、準地衡流渦位に式から導出した渦位のずれと対流圏界面気圧のずれの関係式において、バーガー数を1と仮定すると、500K面における約4PVUの渦位偏差(第4図(c))は、対流圏界面気圧の約16hPaの上昇(対流圏界面高度の低下)とバランスする。次に対流圏界面から地表面への影響について、上下端における境界条件を課した地表面渦度の式において、擾乱の水平スケールを1000kmと仮定すると、約16hPaの対流圏界面気圧の上昇は、地表面気圧の約5hPaの上昇とバランスする。この値は、第4図(b)で示した極域における約+2hPaの海面気圧偏差とオーダー的に一致する。両者の約3hPaの誤差については、以下の要因が考えられる：

- ・擾乱の水平スケール(1000km)の見積もり
- ・成層圏準2年周期振動(QBO)に対応した変動が合成偏差にみられ、QBOによる影響が含まれている可能性があること
- ・高周波擾乱といった対流圏での変動による影響が含まれている可能性があること。

AH02の地衡流調節に基づく鉛直結合に伴う対流圏の循環への寄与や、上記の誤差の評価については、今後詳細に解析する必要がある。

5. 議論とまとめ

本稿では、合成図解析の手法を用いて、エルニーニョ現象発生年における東西波数1成分の卓越と成層圏循環への影響、及びその下方への影響についての調査結果を報告した。その概要を以下にまとめる。

- ・エルニーニョ現象発生年における鉛直結合の強さや有意性には季節依存性がみられ、寒候期後半、特にFMAの期間に最も明瞭となる傾向がある。
- ・エルニーニョ現象の発生に伴う太平洋赤道域での活発な対流活動は、対流圏での東西波数1のパターンの卓越及びロスビー波の鉛直伝播の強化を通して、成層圏での極夜ジェットの減速に寄与する傾向がみられ、Taguchi and Hartmann (2006)の解析結果と整合している。
- ・極夜ジェットの減速と対応した成層圏極域の負の渦位偏差は、地衡流調節に伴う対流圏界面高度の

下降を通して対流圏の渦管の圧縮を通して地表面付近に高気圧性渦度強制をもたらす、負のAOに寄与する傾向がみられる。

- ・合成図解析で得られた偏差の値は、AH02の理論に基づいて算出した変動とオーダー的に一致しており、エルニーニョ現象発生時に統計的にみられる鉛直結合に対するAH02の力学過程の重要性が示唆される。

寒候期後半の極域における鉛直結合は、当庁における気候系の監視強化のみならず、季節予測システムによる中高緯度域における循環場の予測可能性という点においても着目すべき重要な力学過程といえる。AOは極域のみならず、日本付近を含む東アジア域における寒候期の天候にも大きく影響する循環場の特徴であることから、詳細な力学過程については今後引き続き調査が必要である。

参考文献

- Ambaum and Hoskins, 2002: The NAO Troposphere-Stratosphere Connection. *J. Climate*, 15, 1969-1978.
- Baldwin and Dunkerton, 1999: Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere, *J. Geophys. Res.*, 104, 30937-30946.
- Edmon, H. J., B. J. Hoskins and M. E. McIntyre, 1980: Eliassen-Palm cross sections for the troposphere. *J. Atmos. Sci.*, 37, 2600-2616.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 93, 5-48.
- Matthews, A. J., and G. N. Kiladis, 1999: Interaction between ENSO, transient circulation, and tropical convection over the Pacific. *J. Climate*, 12, 3062-3085.
- Renwick, J. A., and J. M. Wallace, 1996: Relationships between North Pacific Wintertime Blocking, El Niño, and the PNA Pattern. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2071-2076.
- Simpson, I. R., T. G. Shepherd, and M. Sigmond, 2011: Dynamics of the Lower Stratospheric Circulation Response to ENSO, *J. Atmos. Sci.*, 68, 2537-2556.