

# 太陽活動に関する北極振動シグナルの変調

山下陽介、高橋正明 (東京大学気候システム研究センター)

## 1 はじめに

太陽活動 11 年周期変動に伴う放射の変化は、紫外線域でのエネルギー変化に着目すれば大きな値 (> 5%) を示す。このため、オゾンが多く存在する成層圏は、11 年周期変動に伴う熱的な影響を直接受け、下層には力学的な相互作用を通じた影響が及ぶと考えられる (Kuroda and Kodera, 2002)。11 年周期の変動に伴い、準二年周期振動 (Quasi-Biennial Oscillation; QBO) と極成層圏付近の温度との関係が変調されることが知られている。Labitzke (1987) が行った冬季 (NDJF) の解析では、QBO が西 (東) 風フェーズの際には、太陽活動の極大期 (high solar activity; HS) に極付近が高 (低) 温、極小期 (low solar activity; LS) に低 (高) 温となり、11 年周期変動に伴う変調が見られた。水平構造は、極と中緯度で逆符号を示す (Labitzke and van Loon, 1988)。これは、北極振動 (Arctic Oscillation; AO) の水平構造と似ている。

DJF Mean 10.7 cm Solar Radio Flux (1979 - 2005)

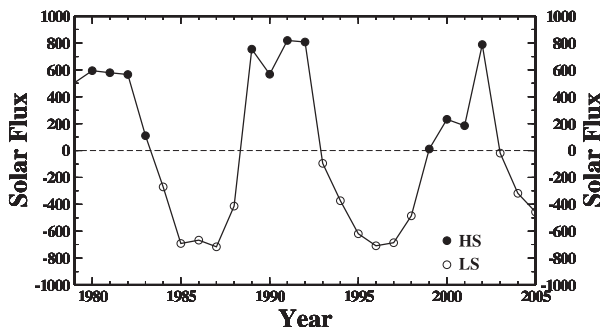


図 1: DJF 平均した 10.7cm solar radio flux. flux の平均値を基準として太陽活動の極大期 (HS)、極小期 (LS) に分けた。

AO あるいは北半球環状モード (Northern Hemisphere annular mode; NAM) は、北半球中高緯度で卓越し極渦の強さと関連する変動パターンである。温度風の関係から AO/NAM は極付近の温度偏差とも関連付けられる。AO は伝統的には、海面更正気圧 (sea level pressure; SLP) 偏差に対して経験直交関数 (Empir-

ical Orthogonal Function; EOF) 解析を行なった際に第一主成分 (EOF-1) として取り出されるモードである (Thompson and Wallace, 2000)。EOF-1 は極域と中緯度域で南北逆符号の環状構造を示し、EOF-1 のスコア時系列 (PC 1) が正 (AO+) の際に極域が負、中緯度域が正のパターンに対応する。

AO は北大西洋振動 (North Atlantic Oscillation; NAO) として議論されることもある (本研究では、AO と NAO, NAM の本質的な違いには踏み込まない)。NAO と関連のあるシグナルは、LS では大西洋に留まる local なパターンであるが、HS の際には大西洋と太平洋で同符号で環状的な構造を示す。鉛直構造も異なり、LS では対流圏のみにシグナルを持つが、HS では成層圏まで伸びたパターンを示す (Ogi et al., 2003; Kodera and Kuroda, 2005)。Ogi et al. (2004) では、環状構造の季節変化を調べるため、対流圏の 200-1000 hPa, 40-90°N の帯状平均したジオポテンシャル高度の偏差に対しカレンダー月ごとに EOF 解析を行い、取り出した PC 1 を seasonally varying NAM (SV NAM) index と定義した。冬季 (DJFM) の SV NAM index と関連の高い領域は、HS, LS とも大西洋、太平洋に同符号を持つ環状構造であるが、HS では LS と異なり北極とユーラシアの偏差が大きい。また、季節変化に関しても 11 年周期の変調が見られ、HS には冬季の SV NAM index と夏季の環状構造との相関が高いが、LS では相関が低いという違いを示した。

また、Naito and Hirota (1997) によれば、11 年周期変動に伴う変調は early winter (ND) と late winter (JF) で異なり、late winter では QBO が西 (東) 風フェーズの際、HS で極付近が高 (低) 温、LS で低 (高) 温で Labitzke (1987) と同じ傾向となるが、early winter では有意な相関が見られないという違いが示された。このため、極付近の気温と関連する AO/NAM を議論する際にも冬季を細かく分けて議論する必要があることが示唆される。

本研究では、Ogi et al. (2004) 同様、帯状平均したジオポテンシャル高度の偏差に対し、カレンダー月毎に EOF 解析を行い PC 1 を NAM

index とする。成層圏の変動に着目するため、Ogi et al. (2004) と異なり成層圏の 10-200 hPa, 40-90°N の範囲を計算に用いる。このようにして取り出した NAM index を基に HS, LS でどのように AO/NAM の空間構造が異なるのか解析する。また、NAM index と QBO のシグナルが現れる赤道成層圏の帯状平均風とのラグ相関をとり、NAM と関連する QBO のシグナルを議論する。今回は 12 月の結果のみを示す。

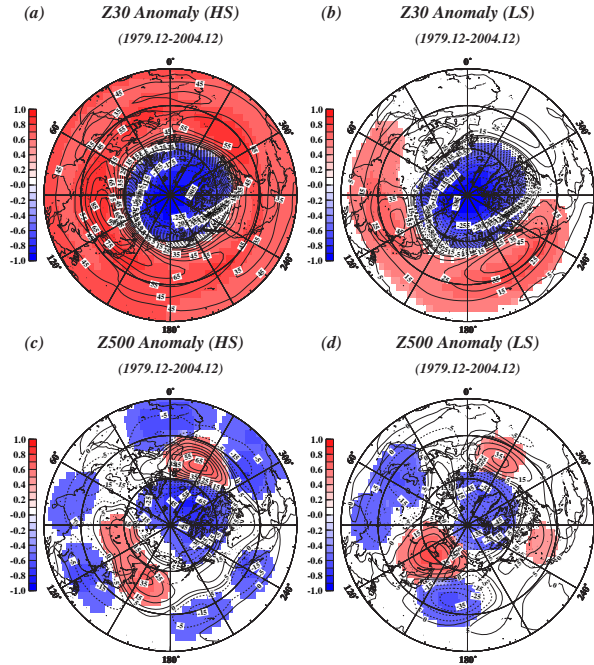


図 2: (a) 30hPa, (c) 500 hPa のジオポテンシャル高度の偏差を、HS のみで計算した PC 1 に回帰した。contour は回帰係数 (m), shade は相関係数を表す。相関係数は 90% の有意水準を越えた領域のみを示す。LS のみで計算した PC1 に (b) 30hPa, (d) 500 hPa のジオポテンシャル高度を回帰した。

## 2 データと解析手法

11 年周期変動は 10.7cm の solar microwave flux を用いて評価される。本研究では、NOAA/NGDC で提供されている solar microwave flux の 1979 年から 2005 年までのデータを DJF 平均して用いた。flux の値を平均し、平均よりも上か下かで太陽活動の極大期 (HS)、極小期 (LS) の年を決めた (図 1)。78/79-82/83, 88/89-91/92, 98/99-01/02 が HS, 83/84-87/88, 92/93-97/98, 02/03-04/05 が LS であった。この分類方法は、Kodera (2002), Ogi et al. (2003) と同じである。

解析の際には、1979 年から 2005 年までの NCEP/NCAR 再解析データの月平均データを用いた。前述の方法で HS, LS の 2 ケースに分

け、それぞれのケースについてカレンダー月ごとに EOF 解析を行なった。解析範囲は 10-200 hPa, 40-90°N で、帯状平均したジオポテンシャル高度の気候値からの偏差を用いた。分散に対し同じ面積と質量が寄与するようにするため、Ogi et al. (2004) 同様、緯度方向に  $\sqrt{\cos(lat)}$ 、鉛直方向に  $\sqrt{\cos(p)}$  の重み付けを行った。計算された 12 月の EOF-1 は、中緯度と高緯度で逆符号の構造を示した。HS, LS 毎に 12 月の EOF-1 に対する PC 1 を計算し、各物理量の気候値からの偏差を HS, LS それぞれの PC 1 へ回帰した。なお、回帰図を作成する際には緯度、鉛直方向の重み付けは行わない。

## 3 解析結果

### 3.1 水平構造の太陽活動による変調

ジオポテンシャル高度の偏差を HS のみで計算した 12 月の PC 1 に回帰した (図 2 左)。HS では、回帰係数が 60°N を境に南北逆符号の構造を示す。鉛直的にも 30 hPa (図 2a), 500 hPa (図 2c) とともに北極を中心とした環状構造が見られる。LS の場合、成層圏に限れば 60°N を境にした環状構造を示し、特に太平洋側で有意性が高い (図 2b)。対流圏の場合、正偏差がシベリア、北アメリカ、北大西洋に見られる。しかし、極の負偏差は弱く、中緯度の北西太平洋には有意な負偏差が存在し、環状構造は崩れている (図 2d)。この特徴は 1000-100hPa まで見られ、LS の 12 月では環状構造が成層圏に限られる傾向にある。

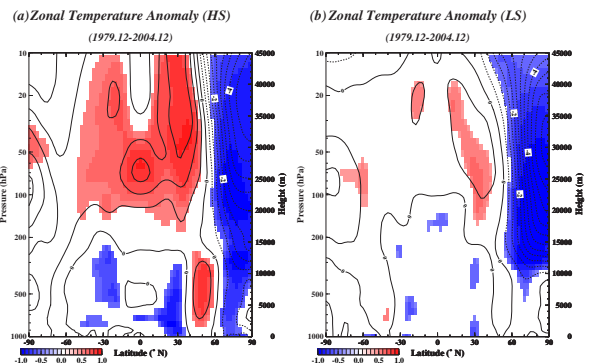


図 3: (a) HS の場合で計算した 12 月の PC 1 に回帰した帯状平均温度偏差の分布。contour は回帰係数 (contour 間隔は 0.5K), shade は相関係数で 90% 以上の有意水準を持つ領域のみを描いた。(b) (a) と同様。但し、LS の場合。

### 3.2 鉛直構造の太陽活動による変調

水平構造を見た場合、HS, LS で鉛直的な違いが明瞭であったため、帯状平均した構造を調べた。帯状平均した温度場を HS で計算した PC

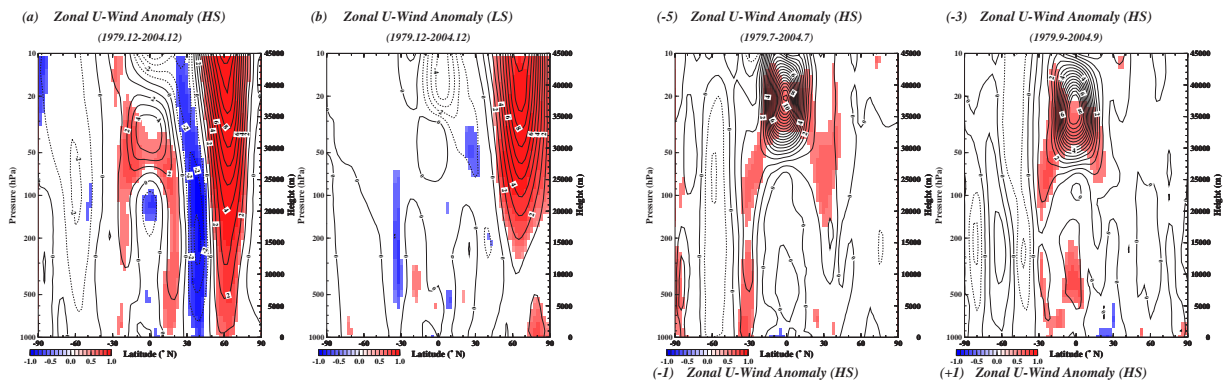


図 4: 図 3 と同様. 但し, 帯状平均東西風偏差を回帰した. contour 間隔は  $1\text{ms}^{-1}$ . (a) HS の場合と (b) LS の場合.

1 に回帰した結果を図 3(a) に, LS で計算した PC 1 に回帰した結果を図 3(b) に示す. 温度場では  $60^\circ\text{N}$  を境に南北逆符号の構造が見られ, AO/NAM の特徴を示した. HS の場合と LS の場合を比較すると, 高緯度対流圏の負偏差は HS のみで有意な相関を示し, 図 2 で HS のみ成層圏から対流圏まで環状構造を示したことから整合的である. 帯状平均東西風の偏差を PC 1 に回帰した場合 (図 4), LS では温度場の偏差と対応し高緯度対流圏で正の偏差が弱い.

比較の為, Ogi et al. (2004) と同様, 対流圏の 200-1000 hPa,  $40\text{-}90^\circ\text{N}$  の範囲を計算に用い EOF 解析を行った. LS の 12 月で PC 1 と相関の高いシグナルは, 高緯度対流圏に見られ成層圏では弱い (図略). これは, 成層圏を解析範囲として作成した PC 1 と相関が強いシグナルが, 成層圏のみに限定されることと整合的である. これらの違いは, LS の 12 月には成層圏と対流圏のつながりが弱く, 鉛直スケールの小さな環状構造が見られることを示唆する.

赤道付近に着目すれば, 図 3 で 11 年周期変動に伴う変調が顕著で, HS の場合のみ成層圏に正偏差のシグナルが見られた. 赤道付近の帯状平均東西風を見ると (図 4a), 30-40 hPa 付近に有意な正偏差が見られた. 南北には  $20^\circ\text{S}$  から  $20^\circ\text{N}$  付近までの広がりを持つ.

### 3.3 赤道付近のシグナルの時間変化

HS の場合に赤道付近のシグナルが顕著であったため, シグナルの時間変化を調べた. カレンダー月毎に計算した帯状平均東西風偏差を HS の 12 月で計算した PC 1 にラグ回帰した. ラグ 0 月にかき  $20^\circ\text{S}$  から  $20^\circ\text{N}$  付近で時間とともに成層圏を下降するような正偏差のシグナル

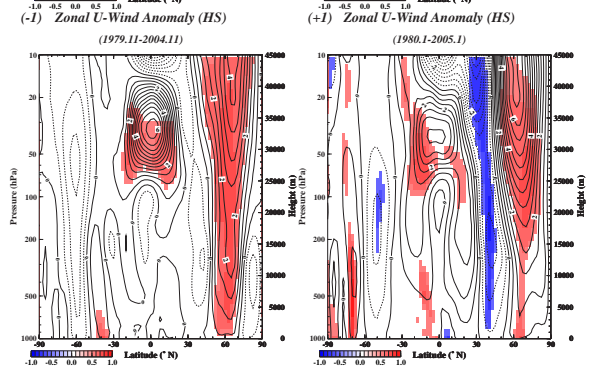


図 5: 図 4 と同様. 但し, HS の PC 1 に対するラグ回帰係数, ラグ相関係数を示す. 図の左上の数字は, 12 月からのラグ月を示す.

が見られた (図 5). 赤道上でシグナルが最も顕著であったので, 赤道上でのラグ回帰係数の時間変化を描いた (図 4). 100 hPa より上空で下降する正偏差のパターンが明瞭で, 下降する速度は 2 年超であった. 周期, 南北方向の広がりから QBO のシグナルを取り出したものと考えられる.

## 4 まとめ

成層圏で計算した NAM index に対してジオポテンシャル高度の偏差を回帰し, AO/NAM の構造の 11 年周期変動に伴う変調を調べた. シグナルの空間構造を調べると, 特に対流圏において 11 年周期の変調が顕著であった. HS では成層圏から対流圏まで環状構造が見られた. LS の場合, 下層では北西太平洋に極と同符号のシグナルが現れ, 環状構造が崩れた. 帯状平均温度, 帯状平均東西風偏差は, LS で下層の環状構造が崩れたことを反映し成層圏のみに有意なシグナルを示した.

AO/NAM と相関のあるシグナルは, 赤道成層圏でも 11 年周期の変調を示し, HS の場合のみ帯状平均東西風の有意な正偏差が赤道成層圏に見られた. 赤道付近の正偏差は, 時間とともに下降する. 下降する速度は 2 年超で, QBO のシグナルであった.



(0° N) Zonal U-Wind Anomaly (HS)  
(1980.12-2005.12)

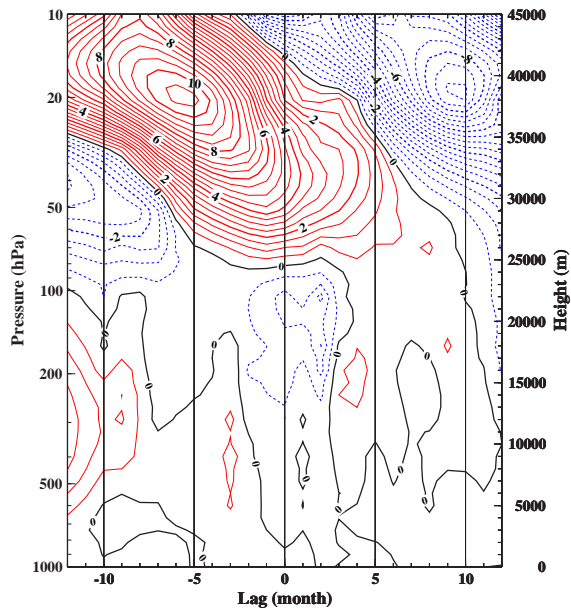


図 6: HS の場合で計算した 12 月の PC 1 に回帰した帯状平均東西風偏差。横軸は、12 月からのラグ月を表す。contour 間隔は  $0.5\text{ms}^{-1}$ 。

## 参考文献

- [1] Kodera, K., 2002: Solar cycle modulation of the North Atlantic Oscillation: Implication in the spatial structure of the NAO, *Geophys. Res. Lett.*, **29**(8), doi:10.1029/2001GL014557.
- [2] Kodera, K., and Y. Kuroda, 2005: A possible mechanism of solar modulation of the spatial structure of the North Atlantic Oscillation, *J. Geophys. Res.*, **110**, D02111, doi:10.1029/2004JD005258.
- [3] Kuroda, Y., and K. Kodera, 2002: Effect of solar activity on the Polar-night Jet Oscillation in the Northern and Southern Hemisphere winter, *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 973-984.
- [4] Labitzke, K., 1987: Sunspots, the QBO, and the stratospheric temperature in the north polar region, *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 535-537.
- [5] Labitzke, K., and H. van Loon, 1988: Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part I: the troposphere and stratosphere in the

northern hemisphere in winter, *J. Atmos. Terres. Phy.*, **50**, 197-206.

- [6] Naito, Y., and I. Hirota, 1997: Inter-annual variability of the northern winter stratospheric circulation Related to the QBO and the solar cycle, *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 925-937.
- [7] Ogi, M., K. Yamazaki, and Y. Tachibana, 2003: Solar cycle modulation of the seasonal linkage of the North Atlantic Oscillation (NAO), *Geophys. Res. Lett.*, **30**(22), doi:10.1029/2003GL018545.
- [8] Ogi, M., K. Yamazaki, and Y. Tachibana, 2004: The summertime annular mode in the Northern Hemisphere and its linkage to the winter mode. *J. Geophys. Res.*, **109**, D20114, doi:10.1029/2004JD004514.
- [9] Thompson, D.W.J., and J.M. Wallace, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability, *J. Climate*, **13**, 1000-1016.