

## 太陽黒点周期変動による南半球環状モードの変調について

気象研究所 黒田友二

### 1、はじめに

太陽活動に伴う気候変動の研究については長い歴史がある。しかし、比較的合理的な研究がなされるようになったのは衛星データ等の観測データ自体の蓄積が比較的十分になってきた20世紀も後半以降になってからである。また、このような研究には炭酸ガス増加等人間活動に伴う気候変動を見積もる際に自然起源の変動を知る必要があるということも大きな研究上の動機づけになっている。

衛星観測データによると太陽の11年黒点周期変動に伴う太陽放射エネルギー変動は0.1%程度と非常に小さいものの、紫外線域の変動は数パーセント程度と有意に大きいこともわかってきた。実際、紫外線吸収が大きい上部成層圏では太陽黒点周期変動に伴う温度変動は数度の程度に及んでいることがわかっている。大気の力学=放射結合変動が大きな役割を果たしている成層圏ではこのような上層大気場の放射変動が成層圏変動の変調を引き起こすことによって下層大気の変動を引き起こしている可能性がある。

Kodera(1995)は比較的短い観測データから太陽活動の高い時期と低い時期の季節進行の違いについて調べた。その結果、北半球の東西平均風の偏差場が秋から冬にかけて極向き下向きに移動する形で伝播してくるを見出した。さらに、Kuroda and Kodera (2002)やKodera and Kuroda (2002)は南北両半球で共通して波の伝播の変化を伴って偏差場が極向き下向きに伝播することを見出した。これらは比較的短い観測データの解析によるものであり、これをより確かめるためには大気大循環モデルを用いたモデル実験も望まれるところであったが、このような実験もいくつかのグループによって実際になされ、観測同様に下層大気に上層の変化が伝播してくる可能性が強く示唆されるようになってきた(例えば、Shindell et al., 1999; Matthes et al., 2004)。

さらに、上述の平均場からの変動自体が太陽活動の変化に伴って変化する可能性も指摘されるようになった。Kodera(2002,2003)は北大西洋変動(NAO)が太陽活動に伴って変化する可能性について調べた。その結果、NAOに伴う変動は太陽活動が低いときには通常の北大西洋域のみにとどまるにも拘らず、太陽活動の高いときには影響範囲がユーラシア方向に広がり半球的いわゆる北極振動(AO)的になることを見出した。また、これに対応して太陽活動の高いときには平均東西風変動が上部成層圏まで伸びることを見出した。太陽活動に伴うNAO信号の持続性に着目したOgi et al. (2003)は、太陽活動の高いときには冬季平均のNAO信号に伴う変動が夏にまでもその持続性を維持することを見出した。

本研究ではKodera(2002,2003)、Ogi et al. (2003)の見出したような関係が南半球でも存在するかどうかを明らかにすることを目的とした。

### 2、データと方法

本研究ではECMWF作成の40年再解析データ(ERA40)のうち、南半球のデータ精度が比較的高くなった1968/69年以降2000/01年までのもの33年分を解析に用いた。太陽活動の指標である波長10.7センチの太陽電波強度(F10.7)はアメリカ大気海洋庁(NOAA)作成の月平均データを用いた。

解析方法としては、まず南半球環状モード(SAM)を月々の気候場からの月々変動の第一変動モードとして抽出し、その時係数(SAM指数)を計算した。そして、Kodera(2002,2003)、Ogi et al. (2003)と同様に、期間平均を基準として太陽活動の高い年と低い年に分けてSAM指数を基にした相関解析を行った。太陽活動の強弱は南半球冬季7月から10月平均のF10.7を基準とした。またSAMの基準指数の季節としては10月11月平均を取った。(実際には、試行錯誤的に様々な月で同様な解析を行ったがこの時期のものが特徴的な性質を持っていたので、この時期のものを基準SAM指数とした。)しかる後、この基準指数に対しての高度場、平均東西風の相関解析を行った。

### 3、結果

図1は10月11月平均のSAM指数(上段)とF10.7(下段)を年毎にプロットしたものである。図中で黒丸が高太陽活動年、白丸が低太陽活動年である。高太陽活動年は15年、また低太陽活動年は18年とほぼ同じ程度の年数となった。

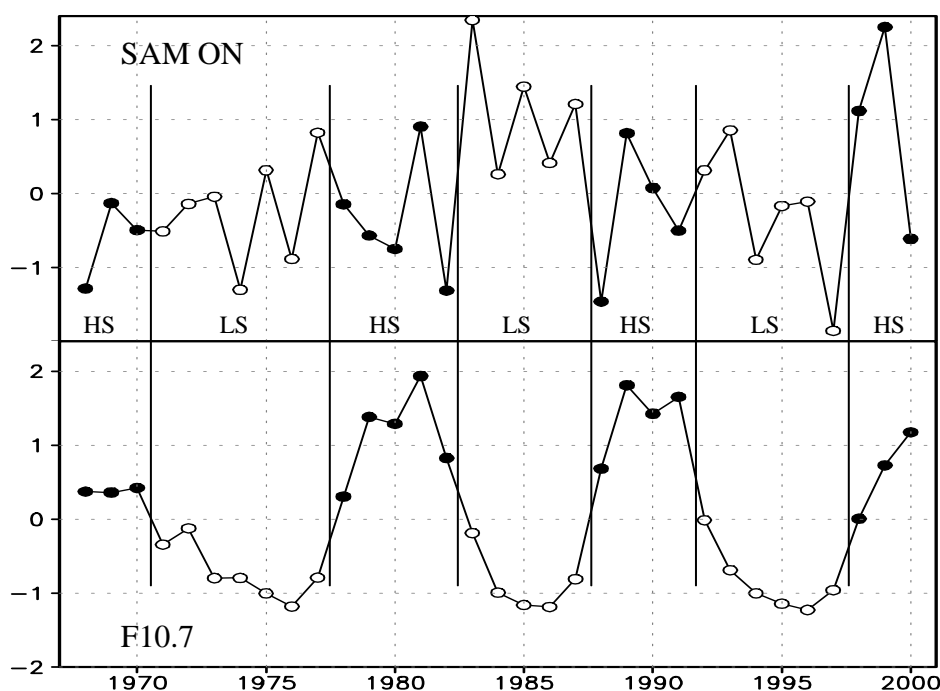


図1、年毎の10月11月平均のSAM指数(上段)とF10.7(下段)。黒丸は高太陽活動年、白丸は低太陽活動年を表わす。

図2は10/11月平均のSAM指数を基準とした10/11月平均の850hPa高度場の相関を高太陽活動年(HS)と低太陽活動年(LS)で比較したものである。ここで影は0.4以上、コンターは0.5以上に施してあり、0.5が大体95%有意な相関値である。図を見ると、HSでは環状モードの南極中心がLSの時と比べてより太平洋側、大西洋側に広がっていて大きくなっている。特に太平洋側への張り出しが大きくなっている。このことは、Kodera(2002)の見出した北半球NAOに見られた性質によく似ている。ただ、NAOの場合ほどの極端な違いはない。

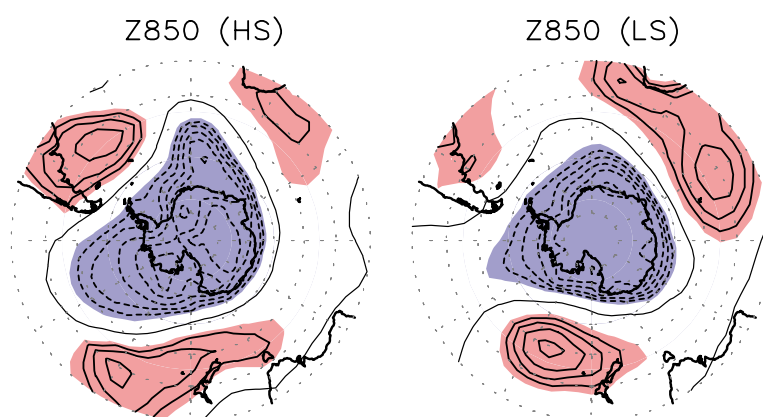


図2、太陽活動の高い場合(左図)と低い場合(右図)における10/11月平均のSAM指数を基準にした850hPa高度場の相関。コンター間隔は0.1でコンターは0.5以上に引いてある。陰は0.4以上。破線は負の値を表わす。

図3は10/11月平均のSAM指数を基準とした10月から3月の帯状平均した850hPa高度場の相関をHSとLSで比較したものである。図よりHSの時には10/11月時のSAM信号が3月頃まで弱まりながらも続くのにLS時には12月までしか続かないことが分かる。この点はOgi et al.(2003)の北半球NAOの場合とよく似ているが、NAOより単純でHSの場合に高緯度側は時間と共にその信号が減衰している。

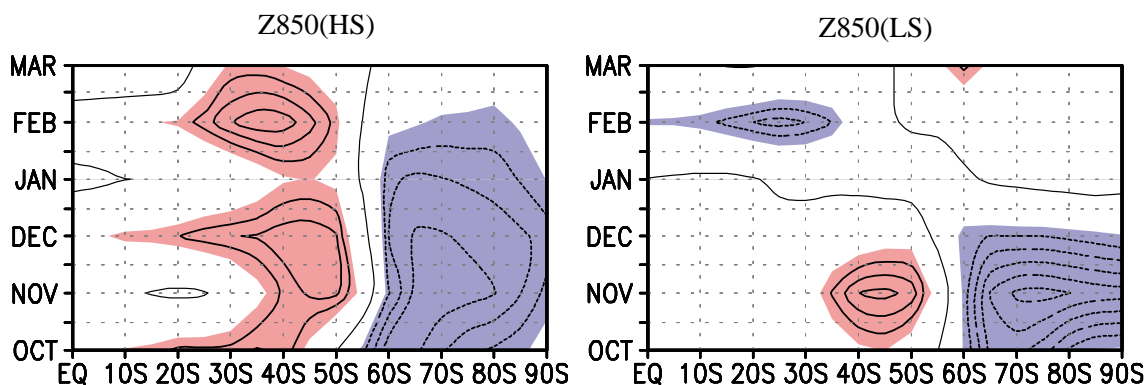


図3、図2と同様。ただし、10月から3月までの帯状平均した850hPa高度場の相関

図4は10/11月平均のSAM指数を基準とした10月から3月の帯状平均東西風の相関をHSとLSで比較したものである。HS時には下方から伸びてくるSAM信号の他に低緯度上部成層圏から降りてくる信号が現われ、これが10月にくっ付き合い11月には地面から上部成層圏まで伸びた信号となる。上部成層圏の信号は弱まっていくがSAM信号が上部成層圏まで伸びる状態は12月まで維持され、それ以降少しずつ弱まっていく。しかし、下部成層圏にある信号中心は2月になってもなお有意な強度を保っている。それに対し、LS時にはSAM信号は最も信号の強い11月でも対流圏内までしか伸びていない。また、その持続性は悪い。この信号がHS時に上部成層圏まで伸びるという性質はKodera(2002)の見出した北半球NAOのものとはよく似た性質といえる。

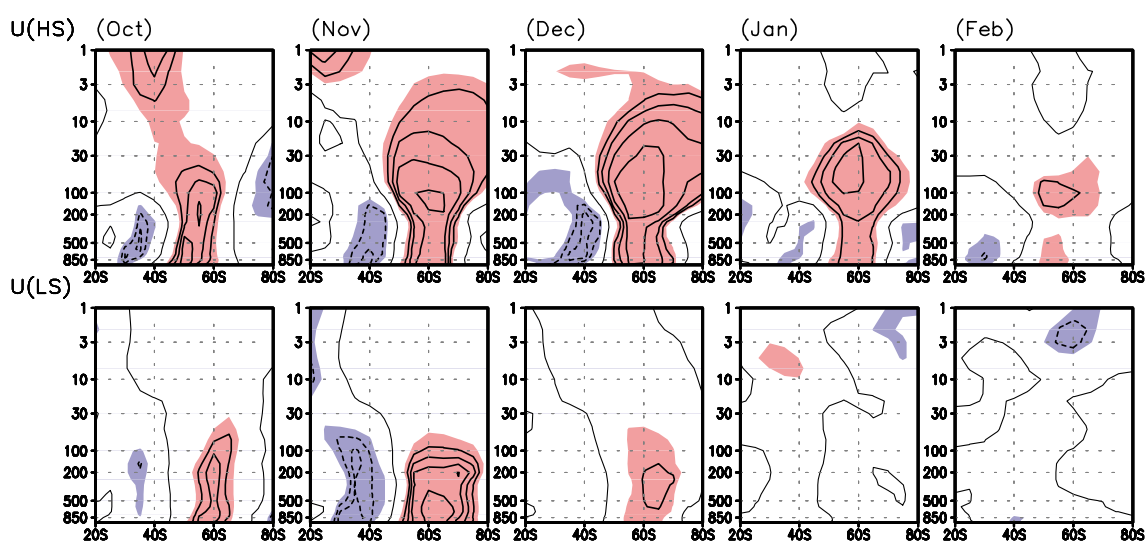


図4、図3と同様。ただし、10月から2月までの帯状平均東西風に対する相関。

HS時におけるSAM信号の持続の良さの原因を調べるためにHS時における10/11月平均のSAM指数に対する温度場とオゾン濃度の相関図を図5に示す。但し、ここではデータは1979年以降2000年までのものを用いた。それは、気温はともかくオゾン濃度は衛星観測が始まった1979年以降のみしか高い信頼性が無いと考えられる事による。但し、ここで用いたオゾン濃度はあまり信頼性の高くないERA40のものではなくERA40の風を用いて気象研究所の化学モデルで計算されたオゾン分布である。但しオゾン量は全オゾン量が地表で観測されているものと食い違わないようにするため観測量にナッジングさせてオゾン分布を計算して同化している。ここでのオゾン量はJRA25プロジェクトでの再解析データ同化に使われているものである。

図を見ると、SAM指数と11月の極域全体のオゾン濃度との相関が低くなっているが、このような負相関域が3月までも主に下部成層圏に残っている。このようにオゾン濃度の相関が下部成層圏で低い事に対応し、気温との相関も下部成層圏でずーと負のままである。このことは、下部成層圏での熱源がオゾンであり、またオゾンは下部成層圏では非常にそ

の寿命が長い事を考えると、HS 時で正の SAM 指数の時（極域の 850hPa 高度場偏差が負となる状態）には極域のオゾン濃度偏差が負となり、その状態が夏以降まで持続する事によって下部成層圏の気温が低めのままになっていることが示唆される。そして、温度風の関係からこの気温偏差が図 4 の東西風偏差を作っていると考えられる。従って、正の SAM 指数の時に 11 月に極域でオゾン濃度偏差が負であることがキーであると思われる。では、11 月の極域のオゾン濃度がなぜ低いかであるが、風の間を見ると(図 4)HS 時で正の SAM 指数の時には上部成層圏まで正相関域が伸びている。従ってこの時上部成層圏での波減衰が小さく、従って熱帯上部成層圏から極域へのブリュワー＝ドブソン(BD)循環が弱くなっていると考えられる。この BD 循環の弱まりが極域のオゾン量の負偏差を導いていると考えられる。

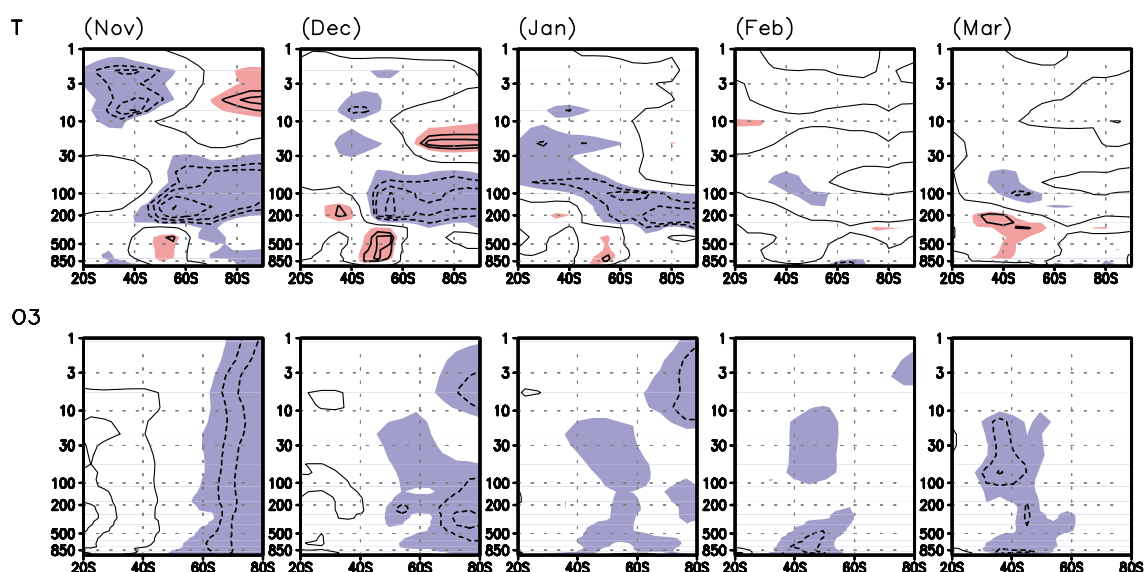


図 5、図 3 と同様。ただし、11 月から 3 月までの帯状平均気温（上段）とオゾン濃度（下段）に対する相関。データ期間が 1979 年以降である事に対応してコンターは 0.6 以上、影は 0.5 以上に施してある。

結局、SAM 信号の持続性の良さは下部成層圏でのオゾン濃度の持続性に依っていると考えられる。そして、HS 時で SAM 指数が正の場合に極域のオゾン濃度が小さい事は 10/11 月に東西風信号が上部成層圏まで強い事から来ていることになる。図 4 で見たように HS 時に 10/11 月に亜熱帯上部成層圏からの信号とつながって信号が上部成層圏まで強いまま伸びるということは、SAM 同期の信号が HS 時により成層圏でより強い波平均流相互作用を引き起こすという事を示唆している。実際、HS 時と LS 時における平均東西風の違いを見ると HS 時の方がその領域で平均的に風が弱い (Kuroda and Kodera, 2002)。これが、HS 時に波平均流相互作用をより強めているのに役立っていると考えられる。以上では、SAM 指数が正の場合のメカニズムを考えたが、負の場合も全く同様であることに注意する。

つまり HS 時に SAM 信号は上部成層圏まで伸びると共に持続性が良くなるのは、SAM 指数が正負いずれの場合でも成立することに注意しなければならない。

さて、ここで考えた SAM 信号持続の仕組みは Ogi et al.(2003)で考えられた陸面過程による持続効果とは異なっている。より詳しいメカニズム解明にはモデル実験を含めさらなる研究が必要であるがこれはこれからの課題である。

#### 4、まとめ

北半球 NAO と同様に、南半球環状モードにおいても成層圏対流圏結合の強まる 10/11 月に太陽活動の高い時期と弱い時期でその信号が大きく異なる事が見出された。即ち、高太陽活動時にはその信号は上部成層圏まで伸びると共にその持続性が飛躍的に高まった。低太陽活動時にはそのような性質は無かった。また、信号持続性の原因として風信号の伸びに伴うブリュワー = ドブソン (BD) 循環の強弱によるオゾン分布の変動が示唆された。

#### 参考文献

- Kodera K., On the origin and nature of the interannual variability of the winter stratosphere circulation in the northern hemisphere, *J. Geophys. Res.*, 100, 14,077-14,087, 1995.
- Kodera K., Solar cycle modulation of the North Atlantic Oscillation: Implication in the spatial structure of the NAO, *Geophys. Res. Lett.*, 29(8), 1281, doi:10.1029/2001GL014557, 2002.
- Kodera K., Solar influence on the spatial structure of the NAO during the winter 1900-1999, *Geophys. Res. Lett.*, 30(4), 1175, doi:10.1029/2002GL016584, 2003.
- Kodera K., and Y. Kuroda, Dynamical response to the solar cycle, *J. Geophys. Res.*, 107, doi:10.1029/2002JD002224, 2002.
- Kuroda, Y., Relationship between the Polar-night jet oscillation and the Annular mode, *Geophys. Res. Lett.*, 29(8), 10.1029/2001GL013933, 2002.
- Matthes K. and co-authors, Improved 11-year solar signal in the Freie Universitat Berlin Climate Middle Atmosphere Model (FUB-CMAM), *J. Geophys. Res.*, 109, D06101, doi:10.1029/2003JD004012, 2004
- Ogi, M., K. Yamazaki, and Y. Tachibana, Solar cycle modulation of the seasonal linkage of the North Atlantic Oscillation (NAO), *Geophys. Res. Lett.*, 30(22), 2170, doi:10.1029/2003GL018545, 2003.
- Shindell, D.T. and co-authors, Solar cycle variability, ozone, and climate, *Science*, 284, 305-308, 1999.