

成層圏循環を通しての太陽活動の熱帯積雲対流活動に及ぼす影響

小寺邦彦（気象研・気候研究部）

1. はじめに

従来太陽活動の気候への影響は太陽活動の変化により地球が太陽から受けるエネルギー（太陽常数）の増減によりおこると考えられてきた。しかし人工衛星による大気圏外からの観測によると11年の黒点周期での変化は約0.1%（1.34W）に過ぎない。ところで紫外線帯ではエネルギーの全体に占める割合は約1.5%と小さいが、オゾンの生成・消滅に關与する波長200~300ナノ・メートルの紫外線部の変動幅は可視域より大きくて1~7%ある。太陽紫外線は短い部分では酸素を解離してオゾンを生じるとともに、より長い波長部分ではオゾンに吸収されて成層圏の大気を加熱する。成層圏は空気の密度が薄いので小さなエネルギーの変化も大きく現れ、40~50キロメートル付近では太陽黒点周期で気温が約1度変化する。従って、紫外線の変化により成層圏に生じた気温の変化が成層圏循環の変化をもたらす、それが力学的効果をとおして下方に伝搬し対流圏の気候に影響を与えることが考えられている(Kodera and Kuroda, 2002)。

このようなプラネタリー波の変化を通して北半球の冬の循環 - 北大西洋振動（NAO）や北極振動（AO）等に太陽活動の変化が影響が現れるというメカニズムはモデル実験によっても確かめられる様になってきた（例えば Shindell et al., 2001）。いっぽう対流圏の熱帯に認められる11年太陽活動周期と同期した変動は太陽からの放射の変動によるという考え方が依然支配的である(例えば Gleisner and Thejll, 2003; van Loon et al., 2004)。ここではこのような熱帯対流圏の太陽活動に關連した変動もやはり成層圏循環の変動の結果として起きうる事を示す。

図1に太陽活動の影響がどのように成層圏循環を変化をさせ熱帯対流圏に影響を与えるかを模式的に示しておく。太陽活動の極大期には太陽紫外線とオゾンの増加のため上部成層圏の赤道域で気温が上昇する。それに伴い、特に冬半球では赤道と極の温度差が増加し、西風ジェットは加速が起る。このジェットの変化は対流圏から伝わってくるプラネタリー波との相互作用により増幅する。またその影響はプラネタリー波の鉛直伝播の変化を通して対流圏にまで及んでくる(Kuroda and Kodera, 2002)。

ところで成層圏での波による平均帯状流の加速、減速は必然的に平均子午面循環の変化を伴う。このため、冬半球での波の伝播の変化とは別に成層圏子午面循環を通して熱帯下部成

への直接の影響が考えられる。つまり、夏半球の熱帯域で上昇、冬半球中高緯度で沈降する成層圏子午面循環、つまりブリュワー・ドブソン循環が太陽活動によって変調されることを意味する。このような成層圏子午面循環の変化は対流圏界面付近の安定度を変え対流圏の積雲加熱率を変化させる事が単純化した大気大循環モデルによる実験から知られている(Thuburn and Craig, 2000)。従って、太陽活動が変化すると熱帯の積雲対流活動が変化する事が期待される。また、ある領域で積雲対流が盛んになると隣接する領域の積雲対流を抑制する傾向があるので熱帯における積雲対流の大規模なシーソーが期待される。

以下、このような太陽活動の影響についての大循環モデル、観測データの解析の結果について紹介する。

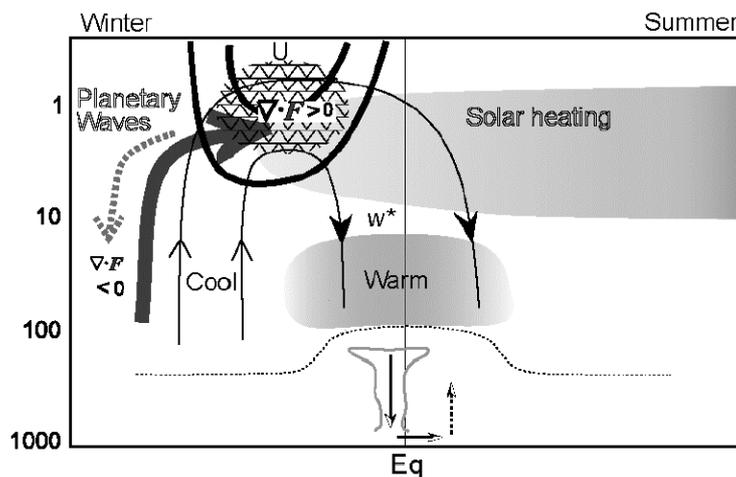


図1 成層圏循環過程を通じた太陽活動の変化が熱帯積雲対流活動に影響を及ぼす過程の模式図。(本文参照)

2. 大循環モデル実験

太陽活動による紫外線加熱、成層圏オゾンの変化がどのような形で対流圏に現れるかベルリン自由大学で行われた大気大循環モデル実験の結果をしめしておく。実験結果では大循環モデルに太陽活動極大、極小期に対応する太陽放射スペクトルとオゾン濃度を与えそれぞれの条件で各15年積分したものの差である。ところでプラネタリー波と成層圏ジェットの間相互作用は成層圏熱帯域の風の場合、特に準2年周期(QBO)の影響を受けるので、この実験では熱帯赤道域にQBO東風相の風を強制した基本場を用いている(Matthes., 2003)。

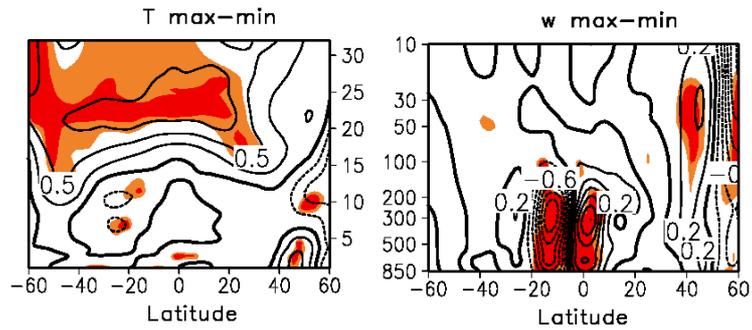


図2 ベルリン自由大学大気大循環モデル実験で得られた1月における太陽活動極大期と極小期との差。(a)気温(等値線0.25Kおき)と(b)鉛直流(0.2mm/sおき)統計的に有意な部分に影(Matthes, 2003より)

1月におけるを帯状平均した(a)気温と(b)鉛直流の太陽活動極大期と極小期の差を図2に示す(Matthes, 2003)。成層圏子午面循環の変化から熱帯下部成層圏の気温の偏差が11月から上昇する。これにともない12月から1月にかけて対流圏の上昇流が変化する。モデルの1月の気候値のハドレー循環の上昇域にあたる南半球で上昇が抑制され、いっぽう北半球側で上昇流が大きくなるという積雲対流活動の南北シーソーが出現する。これを1月平均の雨量の差として見ると図3のようになっており、特に、赤道域のインド洋から西太平洋にかけてシーソーが顕著に見られる(Matthes et al., 2005)。

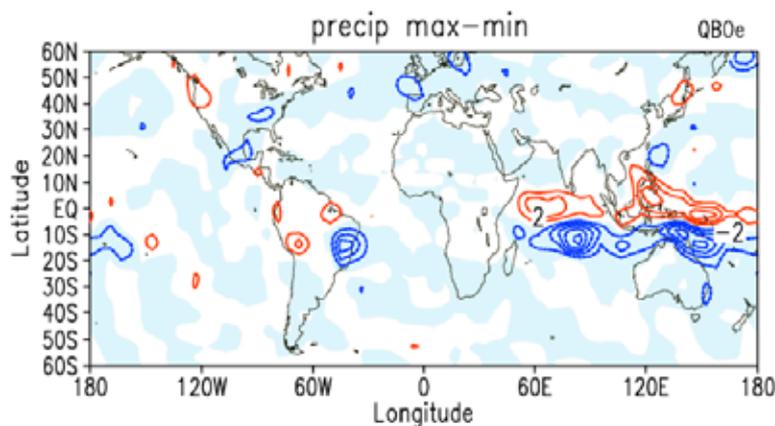


図3 ベルリン自由大学大気大循環モデルで得られた1月における太陽活動極大期と極小期との雨量の差。等値線は1mm/day間隔、0線は除去(Matthes et al., 2005より)

この実験では海面水温に気候値を用いているので年々の変動がないためこのような成層圏循環の変化の影響が熱帯対流圏に顕著に認められる。しかしながら、現実には特に北半球冬季にはエルニーニョ現象による変動が卓越しこのような太陽活動の影響を見いだすのは容易ではない。しかしながら、南半球の冬、つまり北半球の夏には次に示すように同様な現象が観測からも見いだされる。残念なことに、現在の気候大循環モデルはどのモデルも南半球の循環をうまく再現できないので太陽活動の影響の実験もうまくいっていない(Matthes et al., 2003)。

3 . 観測データ解析

インドモンスーンの雨量と11年太陽周期の間には関連があることがいくつかの解析の結果から示されている(例えば Bhattacharyya and Narasimha, 2005)。また数百周年規模の太陽活動の変動とインドモンスーンの間にも非常に良い関係があったことが石筍(Burns et al., 2002)や海底堆積物(Gupta et al., 2005)の解析から知られている。ここでは、NCAR/NCEP (Kalnay, 1996)の再解析データを用いてインド洋モンスーンと太陽活動の関係を解析した結果 (Kodera, 2004) を紹介する。

図4は太陽活動の指数として用いた10.7cm太陽電波強度(以下F10.7)と各緯度、高度の7・8月平均帯状平均気温と気圧座標系鉛直流(ω)の相関係数を示している。成層圏赤道域、南半球の観測データは衛星観測データが導入されるまでは非常に少ないのでここでは衛星観測データの使用が可能になった1979年以降の期間についての相関解析結果を示す。また解析に先立ち1:2:1のフィルターで短周期ノイズを落としてある。なお鉛直流は100hPaまでしか解析されていない。

熱帯の対流圏には相関は見られないが、成層圏の気温と太陽活動の間には良い正の相関が見られる(図4a)。一方、冬半球の南半球60度付近では負の相関になっている。この温度変化のパターンは熱帯域の沈降、冬極域の上昇流により生成されていることを示唆している。これはまたモデル実験の北半球の冬の結果と良い対応を示している。この成層圏の気温の変化に対応して、対流圏で上昇流の変化がやはり認められる。赤道域で上昇が抑えられ、逆にモンスーン域の北緯10-20度帯では上昇がより促進されている様子がうかがえる(図4b)。インド洋域の500-hPaの ω とF10.7の相関をみると(図4c)大陸上で上昇傾向、インド洋上赤道の南で下降の傾向にある事がわかる。この、赤道の北と南での上昇流のシーソーの結果はソマリージェットの強さの変動としても現れていることが地上の南北風とF10.7の相関から判る(図4d)。

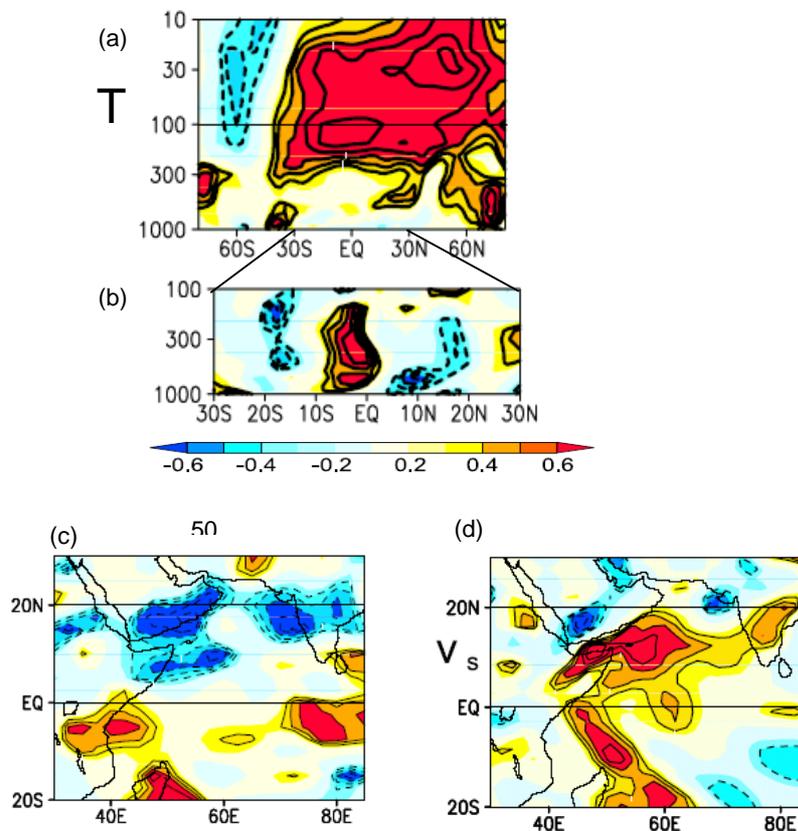


図4 太陽活動の指数 (F10.7) と各緯度、高度の7・8月平均帯状平均(a)気温と (b)気圧座標系鉛直流 (ω) の相関係数。(c, d): (a) に同じ、ただし F10.7 とインド洋域の(c)500-hPa の ω あるいは(d)地上風の南北成分との相関。相関係数は 0.1 おき 0.4 以上を図示。負値は破線。(Kodera, 2004 より)

4 議論

太陽活動の熱帯域への影響という太陽放射エネルギーの増減による地表面、海洋の直接の加熱の変化と捕らえる事が一般的である。しかし、ここで示すように太陽活動の影響は成層圏循環の変化をとおして、対流圏子午面循環を変化させモンスーンの活動に影響する。このメカニズムは11年太陽周期のみならず数百年の太陽活動周期に対しても同様に有効である。これまでは人工衛星で観測された11年太陽周期にともなう太陽常数の変化は小さいが数百年の時間スケールの変動ではもっと大きな太陽常数の変化が期待されてきた。しかし、数百年スケールの変動でも太陽常数の変化は11年太陽周期の変動幅とあまり変わらないという見方が強くなってきた(Foukal et al., 2004)。このことは、太陽活動の対流圏への影響は直接の放射の効果ではなく力学的効果によりものであるという本研究の結果と整合的である。ただし、数百年の変動を考えると海洋の応答も考慮する必要がある。

参考文献

- Bhattacharyya S., and R. Narasimha (2005), Possible association between Indian monsoon rainfall and solar activity, *Geophys. Res. Lett.*, *32*, L05813, doi:10.1029/2004GL021044.
- Burns, S. J., D. Fleitmann, M. Mudelsee, U. Neff, A. Matter, and A. Mangini (2002), A 780-year annually resolved record of Indian Ocean monsoon precipitation from a speleothem from south Oman, *J. Geophys. Res.*, **107**(D20), 4434, doi:10.1029/2001JD001281.
- Foukal, P., G. North, and T. Wigley (2004), A Stellar view on solar variations and climate, *Science*, *306*, 68-69.
- Gleisner, H., and P. Thejll (2003), Patterns of tropospheric response to solar variability, *Geophys. Res. Lett.*, *30*(13), 1711, doi:10.1029/2003GL017129.
- Gupta, A. K., M. Das, and D. M. Anderson (2005), Solar influence on the Indian summer monsoon during the Holocene, *Geophys. Res. Lett.*, *32*, L17703, doi:10.1029/2005GL022685
- Kalnay, E., et al. (1996), The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, *77*, 437-471.
- Kodera, K. (2004), Solar influence on the Indian Ocean Monsoon through dynamical processes, *Geophys. Res. Lett.*, *31*, L24209, doi:10.1029/2004GL020928.
- Kodera, K., and Y. Kuroda (2002), Dynamical response to the solar cycle, *J. Geophys. Res.*, **107**(D24), 4749, doi:10.1029/2002JD002224, 2002.
- Kuroda, Y. and K. Kodera (2002), Effect of the solar cycle on the Polar-night jet oscillation, *J. Meteor. Soc. Jpn.*, *80*, 973-984.
- Matthes K., (2003), Der Einfluss des 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus und der QBO auf die Atmosphäre - eine Modellstudie (The influence of the 11-year solar cycle and the QBO on the atmosphere - a model study), Doctor theses, Free University of Berlin. Available from <http://www.diss.fu-berlin.de/2003/325/indexe.html>,
- Matthes, K., K. Kodera, J. D. Haigh, D. T. Shindell, K. Shibata, U. Langematz, E. Rozanov, and Y. Kuroda (2003), GRIPS Solar Experiments Intercomparison Project: Initial Results, *Papers in Meteorol. Geophys.*, *51*, 71-90.
- Matthes, K. Y. Kuroda, K. Kodera, and U. Langematz (2005), The transfer of the solar signal from the stratosphere to the troposphere: Northern winter, *J. Geophys. Res.*, Accepted.
- Shindell, D. T., G. A. Schmidt, R. L. Miller, and D. Rind (2001), Northern hemisphere winter climate response to greenhouse gas, ozone, solar, and volcanic forcing, *J. Geophys. Res.*, *106*, 7193-7210.
- Thuburn, J., and G. C. Craig (2000), Stratospheric influence on tropopause height: The radiative constraint. *J. Atmos. Sci.*, *57*, 17-28.
- van Loon, H, G. A. Meehl and J. M. Arblaster (2004), Decadal solar effect in the tropics in July-August, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, *66*, 1767-1778.