

MU レーダーを用いた下部成層圏・上部対流圏の風の日変動の解析

坂崎貴俊¹・藤原正智¹・橋口浩之²

¹北海道大学環境科学院 ²京都大学生存圏研究所

1. はじめに

風の日変動は、日降水などの顕著現象や汚染物質の輸送過程にとって非常に重要な役割を果たす。また、一日1~2回程度のゾンデ観測で大気場の平均値を知るためには、観測値に“日偏差”という下駄が付いているので、これを正確に見積もって取り除く必要がある。このような観点から、日変動の研究は非常に重要だと考えられる。

風の日変動を支配する現象としては、大気境界層付近では局地循環(海陸風・山谷風)が卓越している一方、中・上層大気(中間圏~熱圏)では大気潮汐(Chapman and Lindzen, 1970)と呼ばれる全球規模の大気波動が卓越している。さらに、中緯度対流圏界面付近には中間規模波(Sato et al., 1993)と呼ばれる東西波長 2~3000km 程度で東進する波が存在している。この現象の時間周期は、先行研究では 20~30 時間(およそ一日)であるとされているが、最近の研究(Kodama et al., 2008)においては、場所によっては“ぴったり”一日周期であるという報告もなされている。

このように、大気圏内では各高度領域によって、空間スケールの異なる各種日変動現象が存在している。しかし、下層大気(対流圏~成層圏)における日変動の実態については、近年まで適切な観測手法が存在しなかったこともあり、意外にもよくわかっていない。そこで本研究では、主に大気レーダーのデータを用いて、下層大気の日変動の実態(高度・季節依存性)とその物理メカニズムを明らかにすることを目的としている。前回の発表(坂崎と藤原, 2008)では、気象庁のウィンドプロファイラネットワーク(WINDAS)のデータを用いて、下部対流圏(地上~5km)の風の日変動を報告した。今回の発表はその発展として、MU レーダーのデータを解析し、主に上部対流圏~下部成層圏について明らかになった風の日変動の実態を報告する。

2. 使用データと解析手法

使用したデータは、京都大学所有の滋賀県信楽町(136E, 35N)に設置された MU レーダーのデータである。データの期間は 1986-2008 年 の 23 年間で、月に一回 5 日程度の連続観測データを 269 回分用いて統計的に解析した。レーダーの観測可能高度は地上 2-25km で、時間・高度分解能はそれぞれ 1 分、150m である。ただし、今回の解析では、時間方向に 1 時間、高度方向に 1km で平均したデータを使用した。なお、レーダーの東西風成分には飛行機エコーが原因とみられる異常値が含まれており、現在のところ適切に処理できていない。したがって、今回の発表では南北風のデータを用いた結果のみについて発表する。

レーダーデータに加えて、得られた結果の空間構造を見るために、全球再解析データ 4 種類(NCEP1, NCEP2, ERA40, JRA25/JCDAS)のデータを併せて使用した。水平分解能は 2.5×2.5 (JRA25/JCDAS のみ 1.25×1.25)、時間分解能は 6 時間である。さらに、代表的な大気潮汐診断モデル(GSWM02) (<http://www.hao.ucar.edu/public/research/tiso/gswm/gswm.html>)を観測結果と比較した。

解析手法は以下の通りである。まず、すべてのデータを各月(前後 1 カ月を含む 3 カ月間)において、ローカルタイムでコンポジットをとり、1 時間ごと(全球再解析データは 6 時間ごと)のデータを作成する。続いて、これから日平均値を差し引き、日偏差成分を求める。さらに、日偏差成分をフーリエ展開し、調和関数としての一日、半日周期成分に分解し、各成分の振幅・位相を求めて結果を議論した。ここで、位相は南北風が最大値をとるローカル時刻(LST)で表す。

ただし、全球再解析データについては時間間隔が6時間なので、一日周期成分の振幅・位相のみ求めることができる（半日周期成分については求まらない）。

3. 結果

2で示したように、以下の結果はすべて南北風成分についてのものである。

3.3.1 半日周期成分

まず、結果の解釈が容易な半日周期成分の結果を示す。図1はJJA、DJF期間平均の半日周期成分の振幅・位相の高度プロファイルを示したものである。位相は南北風が最大値をとるローカル時刻（LST）で表している。図には、MUレーダーの結果に加え、大気潮汐モデルGSWM02の結果も併せて示している。まず振幅は、全高度領域にわたって0.1-0.5m/s程度であるが、対流圏（～10km）ではDJFの振幅がJJAの振幅に比べて大きくなっている。実際、振幅には夏に極小となる季節変化が存在していることがわかった（図はなし）。これは坂崎と藤原（2008）のWINDASの結果とも整合的である。続いて、位相を見ると、季節によらず00-01LSTで高度方向に一定であり、GSWM02の結果もこれと整合的である。古典潮汐理論（Chapman and Lindzen, 1970; Whiteman and Bian, 1996）によれば、南北風の半日周期潮汐のうち、太陽と同期して西進する成分（いわゆるmigrating成分）は0044LSTに最大値をとるとされ、観測された値はこれと整合的である。したがって、半日周期成分は大気潮汐（うちmigrating成分）によって生じていると結論付けられる。

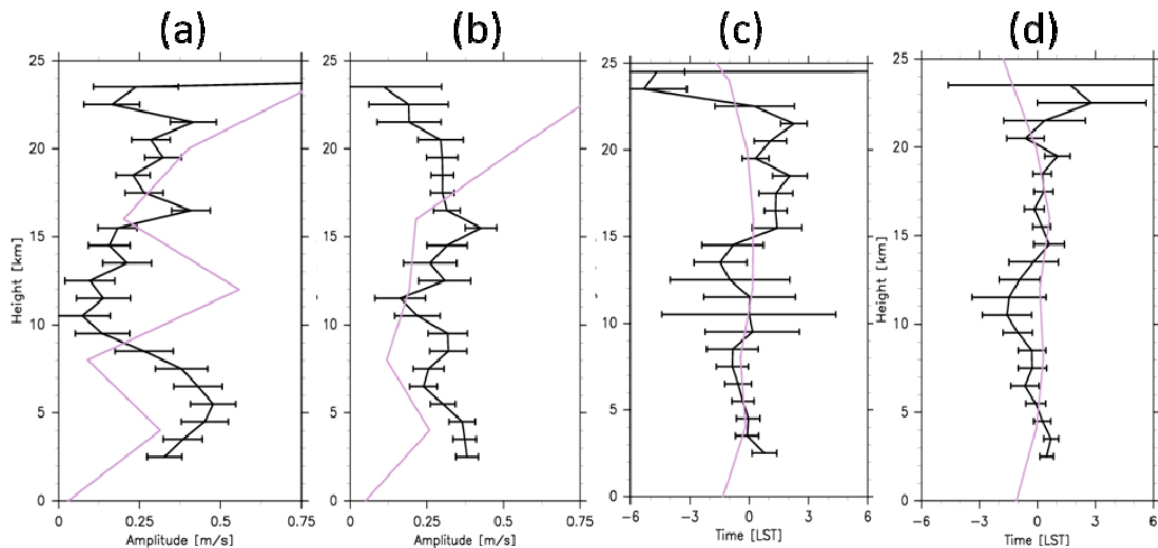


図1: 南北風の半日周期成分の振幅および位相の高度プロファイル。(a)DJFの振幅、(b)JJAの振幅、(c)DJFの位相、(d)JJAの位相。黒線はMUレーダーの結果、紫線はGSWM02の結果。位相は南北風が最大値をとるローカル時刻（LST）で表している。横バーは1標準誤差の範囲を示す。

3.3.2 一日周期成分

続いて一日周期成分の結果を図2に示す。図2にはMUレーダー、GSWM02の結果に加えて、全球再解析データ4種類の結果も併せて示している。まず、全球再解析データは振幅・位相ともに観測の値をよく再現しており、各再解析データ間の差は小さいこともわかる。振

幅は 0.1-1.0m/s 程度で、半日周期成分よりは大きい。また、DJF と JJA の結果を比べてわかるように、全高度領域にわたって明瞭な季節変化が存在する。一方、位相については、半日周期成分と異なり高度方向の変化が大きい。さらに、DJF と JJA で位相がほぼ逆転しており、振幅と同様、明瞭な季節変化が存在することがわかる。ただし、これらの結果は GSWM02 では表現されておらず、この段階では一日周期成分が大気潮汐によるものだと結論付けることはできない。図 3 には、MU レーダーおよび ERA40（他の全球再解析データを用いても結果は大きく変わらない）から得られた一日周期成分の振幅の季節－高度断面図を示す。下部成層圏～上部対流圏に着目すると、図 2-ab から推定されたように、高度 10-20km の領域で夏に振幅が極大となる季節変化が存在することがわかる。ただし、圏界面のすぐ下（~10km）においては、春にも振幅の極大が見られる。これらの特徴は ERA40 のデータでも大まかに再現されている。また、図には示さないが、位相についても再解析データは観測をおおよそ再現していた。したがって以下では、グローバルにデータがある再解析データを用いて、上記の季節変化に注目しつつ、当領域の一日周期成分を支配する要因について調べた。

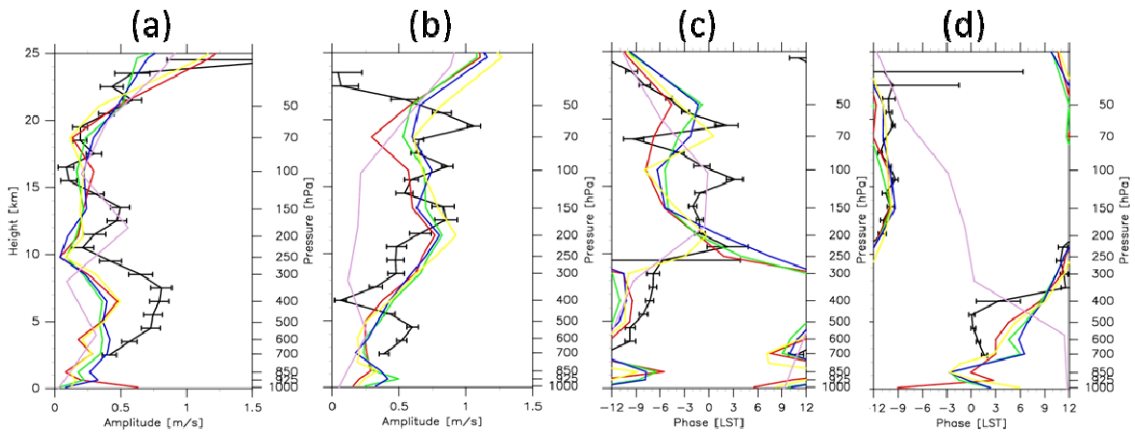


図 2: 図 1 と同じ。ただし、一日周期成分の結果。黒線は MU レーダー、紫線は GSWM02、青線は NCEP1、緑線は NCEP2、黄線は ERA40、赤線は JRA25/JCDAS の結果を示す。

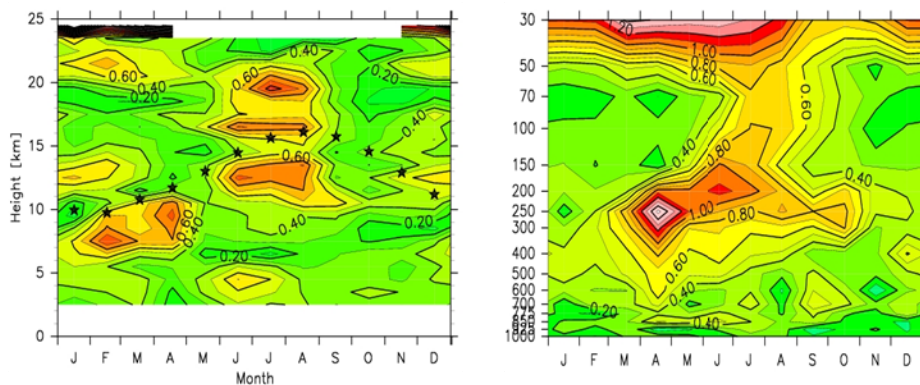


図 3: 一日周期成分の振幅の季節－高度断面図。(左) MU レーダーの結果、(右) ERA40 の結果。左図において、星印は米子における圏界面高度を示す。左図は高度座標(km)で、右図は気圧座標(hPa)で表示している。

4. 一日周期成分の要因

ここでは、一日周期成分の要因について、全球再解析データを用いた議論を行う。図 4 は 100hPa（下部成層圏）と 300hPa（上部対流圏）における全球再解析データの一周期成分の振幅と位相の季節変化を示したものである。図には、東西波数 6 以下の成分のみで再構成した一日周期成分（つまり、いわゆる“大気潮汐”；大気潮汐はおよそ東西波数 6 以下のスケールをもった日変動として定義される）の振幅および位相の季節変化も示している。まず 100hPa 面においては、振幅・位相の季節変化はいずれも大気潮汐の季節変化とほぼ一致しており、当該領域においては大気潮汐が日変動を支配していると同時に、潮汐の季節変化によって日変動に季節変化が生じていることがわかる。次に 300hPa 面においては、100hPa 面と同様、おおまかには大気潮汐で説明できるものの、春の振幅の極大については、大気潮汐では説明できない。

最後に、この春の振幅極大をつくる要因について議論する。図 5 は振幅の極大が見られた 4 月、300hPa 面の南北風の一周期成分を時間方向に繰り返し用いて描いたホフメラー図である。図から、当季節・領域の一周期成分としては、東進する擾乱が卓越していることがわかる。図から読み取れる東西波長は～2500km、東進速度は～25m/s である。続いて、この波（東西波数 10-20 で東進する成分）が卓越する季節、高度を調べたところ、春の圏界面のすぐ下でエネルギーは最大となることがわかった（図はなし）。これらの特徴はいずれも中間規模波の特徴(Sato et al., 1993)と一致しており、春の振幅極大が中間規模波によるものであることを示すものである。ただし、得られた振幅は 1m/s 程度で、中間規模波についての先行研究で示された値（～5m/s）よりも小さく、中間規模波が“ぴったり”一日周期の現象であると言えるかどうかはなお検討を要する。

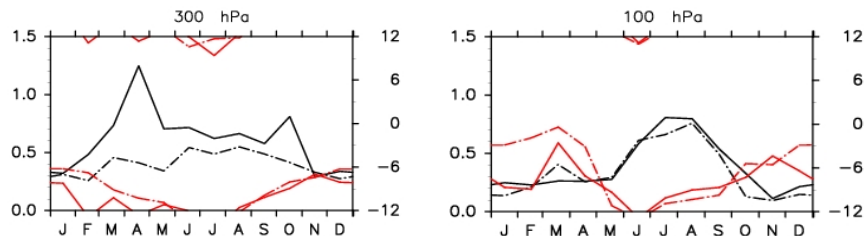


図 4：(左) 下部成層圏 (300hPa) および (右) 上部対流圏 (100hPa) における振幅 (黒線) と位相 (赤線) の季節変化。左 (右) の縦軸は振幅 (位相) を示す。実線は MU レーダーの観測地点に近い格子点値の結果を、一点鎖線はそのうち東西波数 6 以下の成分 (すなわち“大気潮汐”) の結果を示す。

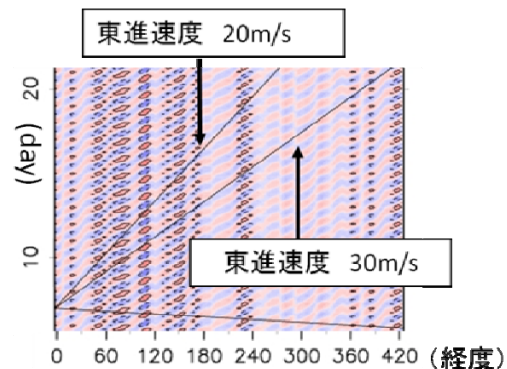


図 5：4 月、300hPa 面における南北風の一周期成分を時間方向に繰り返し用いて描いたホフメラー図。35-45° N 平均の値を示す。暖色 (寒色) 系のトーンは正 (負) の値を表す。コンターは 0.5m/s ごと。

5. まとめと今後の課題

MU レーダーを用いて、上部対流圏～下部成層圏における風の日変動の実態とその要因を調べた。まず、半日周期成分は全高度領域にわたって大気潮汐（うち **migrating** 成分）で説明できる。ただし、対流圏内の振幅の季節変化については今後要因を調べる必要がある。続いて、一日周期成分については、下部成層圏においては大気潮汐で説明でき、大気潮汐に明瞭な季節変動が存在することが初めて明らかとなった。上部対流圏においても、大気潮汐がおおまかには卓越しているものの、春には中間規模波に伴う日変動成分により、振幅が増大することがわかった。

本研究で、全球再解析データの日変動成分の再現性が良いことがわかったので、今後は当データを積極的に用いることにより、下層大気における大気潮汐の四次元構造（全球構造・時間（季節・年々）変動）を明らかにしたい。中間規模波については今回明らかになった“日変動”という新しい視点から、未だよくわかっていない励起メカニズムの解明に繋がりたいと考えている。

参考文献

- ・ Chapman S., and R. S. Lindzen, 1970, Atmospheric tides, D. Reidel, Norwell, Mass., 1970.
- ・ Sakazaki T., and M. Fujiwara, 2008: Diurnal variations in summertime surface winds in Japanese plains: Hodograph rotation and its dynamics, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **86**, 787-803.
- ・ 坂崎 貴俊、藤原正智、2008：第 22 回大気圏シンポジウム講演収録、URL: http://www.isas.jaxa.jp/j/researchers/symp/2008/image/0227_proc/P-10.pdf.
- ・ Sato K., M. Yamamori, and I. Hirota, 1993: Medium-scale travelling waves detected in the extra-tropical upper troposphere, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **71**, 427-436.
- ・ Kodama Y., K. Egawa, and M. Takahashi, 2008: Medium-scale tropopausal waves visualized by upper-level clouds to the east of the Tibetan Plateau, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **86**, 279-295.
- ・ Whiteman, C. D., and X. Bian, 1996: Solar semidiurnal tides in the troposphere: Detection by radar profilers. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 529-542.