

大気変動はチャンドラーウオブルを励起する*

— 気象庁データが解明した100年の謎 —

内 藤 勲 夫**

チャンドラーウオブル (Chandler Wobble: 以下では CW と呼ぶ) は地球自転軸の運動 (極運動) の約14 か月周期を持つ自由振動である。そのルーツをたどると200数十年前のオイラーの理論にまでさかのぼる。オイラーとは流体の運動方程式でおなじみのあのオイラーで、彼が剛体地球の自由運動周期 (約10か月) を理論的に予言していたからである。しかし、実際の地球の自由振動はその100数十年後の1890年代に米国のチャンドラーによって発見され、CW はその名に由来している。さて、極運動の国際共同観測はその数年後の1889年暮に開始されたから、昨年暮はちょうど100年目にあたる。観測技術の大変革がありながら、これほどに長期にわたる国際共同観測が続いたのは極運動の“地球変動”としての重要性が認識され続けてきたからであろう。

ところで、CW には地球の構造や力学を論じる上で重要な2つの情報が含まれている。1つは自由周期の約14か月が地球の構成要素やその物性と如何なる力学関係にあるかで、他の1つは自由振動のCWを揺さぶっている外力 (励起源) は何かと言うことである。前者に関しては1950年代にはほぼ定説に至った。すなわち、CW 周期は地球質量の大半を占めるマントルおよび海洋の慣性能率 (あるいは慣性乗積) と粘弾性に依存し、流体コアを持つコアはCW 周期にはほとんど関与していないことがわかった。

一方、後者すなわちCWの励起源はどうかと言うと、最初に登場したのは1960年代の地震説であった。これはCWの振幅と地震発生数の間に強い相関が存在することに依拠していたが、1970年代に入って地震による断層変形は励起源としては2桁も小さいことが

判明し、その後の宇宙測地による高精度地球回転観測もそれを裏付ける結果となった。地震説と前後して大気圧変動説も登場したが、大気圧変動も励起源としては十分ではないことが判明した。そして、数年前までの10数年間は陸水変動が有力な励起源候補として浮上し、CWの励起源は永遠の謎の様相を呈してきた。

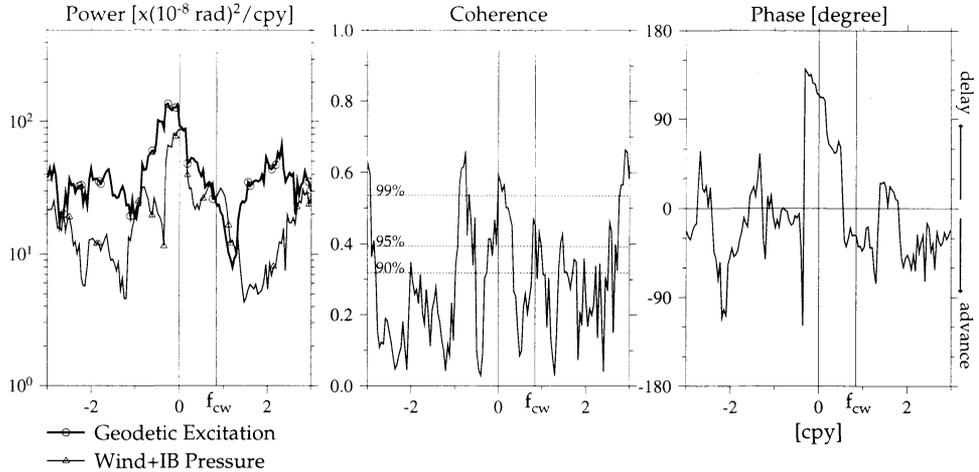
ところが、数年前、風がCWの有力な励起源である可能性が気象庁データに基づく大気角運動量 (AAM) 関数によって見出された (Furuya *et al.*, 1995, 1996)。ここにAAM関数とは風による大気相対角運動量と気圧による大気慣性乗積あるいは慣性能率の和をマントルの平均角運動量で無次元化して表される地球回転変動に対する大気変動の寄与のことで、1983年以降、これらは気象庁 (JMA) をはじめとする世界の気象センターの全球客観解析データに基づいて算出され宇宙測地による地球回転の観測データと共にデータベース化されている。つまり、ここでの風とは極運動を励起するAAM関数における風の寄与のことである。しかし、よく知られた米国環境予測センター (NCEP) の再解析データによる風はなぜかCWをほとんど励起しないことも判明していた。従って、CWの風励起説の正否は、さらなるデータの蓄積に加えて、この風の振る舞いの解明を必要としていた。ここまでが5年ほど前のこの欄で紹介した経過 (内藤, 1995) である。そこで、今回はその後の結果を紹介したいと思う。

今回もまた大学院生がさっそうと登場する。青山雄一氏である。彼は、数年前、地震などで励起される地球自由振動や極潮汐などの超伝導重力計による観測担当者として南極昭和基地で越冬観測に従事した後、筆者の所属する総合研究大学院大学で重力の極潮汐の研究を行っていた。ここに極潮汐とはCWや1年周期の極運動 (年周ウオブル) に対するマントルや海洋の応答として生じる cm オーダーの振幅を持つ潮汐現象のことである。しかし、それまでの観測データの長さは

* Atmospheric Wind and Pressure Variations Excite the Chandler Wobble.

** Isao Naito, 国立天文台地球回転研究系.

© 2000 日本気象学会



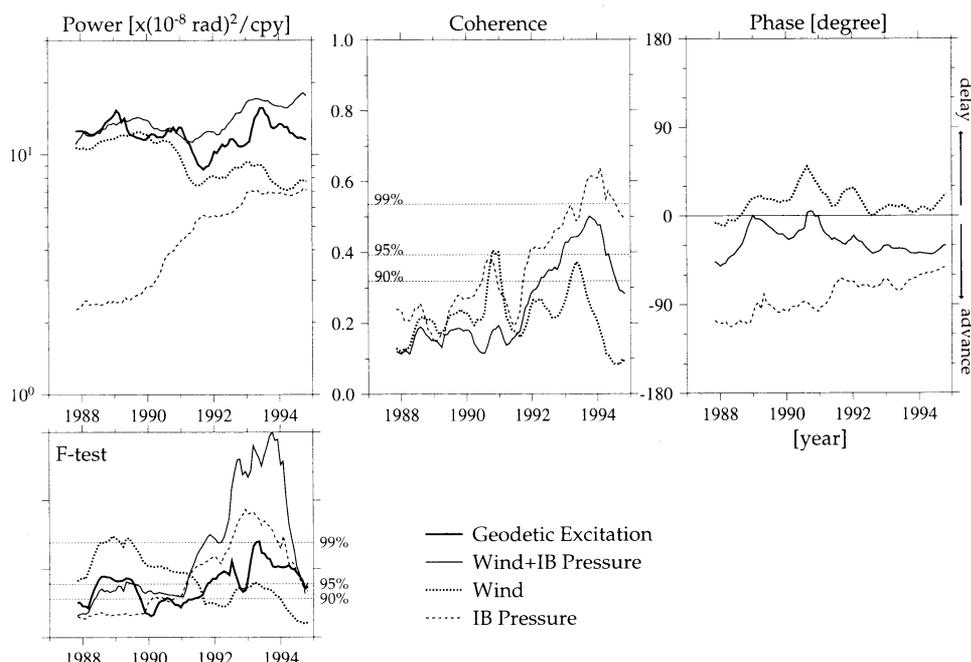
第1図 1983年～1998年における、測地励起関数とそれに対する風と気圧の寄与の和のパワースペクトル(左)、およびそれらの間のコヒーレンス(中央)と位相差(右). f_{cw} はCWの振動数を示す. 左図中の丸印と三角印はF-Testによる90%以上の信頼度を示し、また中央図中の3本の細い横点線も信頼限界を示す. Aoyama and Naito (2000b) による.

わずか5年で極潮汐の解析は年周極潮汐に止まった. そこで、彼はさらに年周極潮汐の原因となる年周ウオブルの励起に取り組むこととなった. 今回のドラマはこうして始まった.

最初に取り組んだのは上述したJMAデータとNCEPデータに基づく二つの風の寄与の間に見られた相違点の原因究明であった. 幸いに、NCEPが再解析データを公開していたので、NCEPとJMAの異なる二つの全球客観解析データに基づくAAM関数を同一算出法で計算し、年周ウオブルに寄与するそれらの振る舞いを比較することができた(Aoyama and Naito, 2000a). その結果、データベースを通じて公開されてきたNCEPデータによる風の寄与にはチベット高原などの山岳の内部を吹く“実際にはありえない”風も取り込まれていることがわかった. これに対しJMAデータによる風の寄与は山岳上の風のみを取り込むように工夫されている. 従って、JMAデータの風はNCEPデータのそれに比べて年周ウオブルをよく説明することが確認された. しかし、より本質的な相違点は全球客観解析データの風そのものにあることがまもなく判明した. と言うのは、年周ウオブルに寄与するのは主として対流圏下層の南北風であって、とりわけそれはモンスーンが卓越する南アジアから東アジア地域の寄与であることが判明したのだが、NCEPデータの対流圏の風はまさにこのモンスーン地域でJMAデータの風と大きく異なっていたからである.

そこで、これらの事実を念頭においてCWの励起を詳細に調べた結果、以下に示すように、大気変動によるCW励起のほぼ完全な実証に成功した(Aoyama and Naito, 2000b). CWの観測がちょうど100年目に当たる昨年暮のことである. このとき励起源の同定にはCW周期における励起の大きさを直接比較する方法が用いられた.

第1図は、1983年～1998年の15年間における、観測された極運動データから逆算された励起関数(以下では測地励起関数と呼ぶ)とJMAデータによるAAM関数の風と気圧の寄与の和(大気変動)のパワースペクトル、およびそれらの間のコヒーレンスと位相差を示したものである. このとき、横軸の正・負の振動数はそれぞれ東向き・西向き運動を表し、東向きに運動するCWの自由振動数(f_{cw})の位置は縦線で示されている. またIB Pressureとは海洋上の気圧変動が海洋変動で補償されるとの仮定(Inverted Barometer Model)のもとで算出された気圧の寄与を意味する. さて、一見して明らかなのは、CW周期では、測地励起関数と大気変動がほぼ同程度のパワーを持ち、しかも両者のコヒーレンスも有意で、また位相差は大気変動の進みを示していることである. つまり、CWは大気変動だけで励起されていることがわかる. 一方、NCEPデータではどうかと言えば、大気変動とりわけ風のパワー不足のために、CWを励起するには不十分であった.



第2図 CW 励起を表す CW 周期における測地励起関数，風と気圧の寄与の和，風の寄与，気圧の寄与のパワー（左），およびそれらの間のコヒーレンス（中央）と位相差（右）の経年変化。左下図は F-Test によるパワーの信頼度を示す。Aoyama and Naito (2000b) による。

そこで、解析期間を8年としてCW周期におけるパワー、コヒーレンス、位相差を計算し、それらを1か月毎に移動させて、JMAデータによるCW励起の経年変化を示すと第2図となる。ただし、この図では風と気圧の和（大気変動）に加えて、風と気圧の独自の寄与も示されている。図から、大気変動（風と気圧の和）のパワーは測地励起関数のそれに対してやや上回りながらほぼ平行して変化していること、しかもその大半は風の寄与（しかも対流圏の風）であるが、風だけではやはり不十分な大きさであることがわかる。ここで注目する事実は1991年頃からの風の寄与の減少を気圧の寄与が補償するように増加していることである。つまり、風と気圧が“相補的關係”を維持しながらCWを励起していることがわかる。このとき、位相差の経年変化を見ると、大気変動はほぼ測地励起関数に対して20~30度の進みを示し、やはり大気変動がCWを励起していることを示唆している。一方、NCEPデータによる結果では、気圧の寄与の振る舞いはJMAデータのそれとほぼ似ているが、風の寄与は、全期間を通じて小さな振幅と不連続な位相差を示し、CWの励起にはほとんど寄与していない。つまり、

NCEPデータの風と気圧はそれぞれ勝手な変動を示しているわけである（詳細はAoyama and Naito (2000b) 参照）。

以上のようにJMAデータの大気変動がCWを励起していることはほとんど疑問の余地はないのであるが、それでもいくつかの疑問が残る。その一つはJMAデータの気圧と風の相補的關係が大気・マントル系の角運動量保存を反映したものかどうかということである。と言うのは、上述したように、年周ウオブルを説明せず、またCW励起に対してもそれぞれ勝手な変動を示すNCEPデータの風と気圧の寄与が大気・マントル系の角運動量保存を反映していると考えられるには明らかに無理があるからである。もう一つの疑問はやや過剰な大気変動の励起を補償する負の励起が存在するかということである。筆者はこれに関しては極めて楽観的で、たぶん、その役割は海洋が果たしているのではないかと考えている。事実、青山氏は第2図の大気変動と測地励起関数の差の変動がエルニーニョ現象と密接な関係にあることを見出している。最近、Celaya *et al.* (1999) は、コロラド大学が開発した気候モデルを用いたシミュレーションで、海洋も大気と同程度の

励起パワーを持つことを示している。たぶん、大気と海洋が数十年程度の時間スケールで交互にCWを励起しているのかもしれない。そして、現在は、大気がCWの励起の主役を演じているのであろう。しかし、前回のこの欄でも指摘したように、潜在的には海洋が重要な役割を持っていると筆者は考えている。これは気候力学に共通した海洋の性質であろう。加えて、CW励起に寄与するのは対流圏の風であることから、前回言及したことだが、第1図の大気変動のパワースペクトル(左図)に見られるCW周期近傍にピークを持つ14か月~16か月の時間スケールの弱い周期変動に、QBOが関与している可能性は遠のき、赤道太平洋のENSOが関与している可能性は相対的に高くなったと言えそうである。

100年に及ぶCWの励起源の謎はこうして解明されようとしているが、上述したような海洋の寄与の見積もりや年周ウobbleを含む極運動全体の励起源の解明には海洋、陸水、雪氷などのグローバルな水質量分布変動の精密な(水位に換算してmmオーダーの精度の)情報を必要とする。地球回転を通して見える地球はそれほど精密にできているのであるが、それには今後二つの観測研究手法が主要な役割を果たすと筆者は考えている。一つは従来とまったく異なる「測地手法による宇宙からのリモートセンシング」で、その主力としてGPSを介した衛星軌道観測から地球重力場変動を高精度で捉えるSST(Satellite to Satellite Tracking)技術などが開発されている(古屋・内藤, 2000)。他の一つはいわゆる「高分解能気候モデル」で

ある。前者は測地手法特有の積分値ではあるがほとんどドリフトのない高い精度の地球表層の水質量分布情報を提供し、一方後者はそうした積分情報とデータ同化することによって地球上の水の動態を高時空分解能でわれわれに見せてくれるはずである。これらは長期にわたる監視を必要とする地球温暖化予測研究の基幹技術でもある。

参考文献

- Aoyama, Y. and I. Naito, 2000a: Wind contributions to the Earth's angular momentum budgets in seasonal variation, *J. Geophys. Res.*, **105**, 12417-12432.
- Aoyama, Y. and I. Naito, 2000b: The Atmospheric Variations Excite the Chandler Wobble, 1983-1988, *J. Geophys. Res.*, 投稿中.
- Celaya, M., A., J. M. Wahr and F. O. Bryan, 1999: Climate-driven polar motion, *J. Geophys. Res.*, **104**, 12813-12829.
- Furuya, M., Y. Hamano and I. Naito, 1996: Quasi-periodic wind signal as a possible excitation of Chandler wobble, *J. Geophys. Res.*, **101**, 25537-25546.
- Furuya, M., Y. Hamano and I. Naito, 1997: Importance of wind for the excitation of Chandler wobble as inferred from wobble domain analysis, *J. Phys. Earth.*, **45**, 177-188.
- 古屋正人・内藤勲夫, 2000: 新しい質量分布のリモートセンシング, *天気*, **47**, 347-355.
- 内藤勲夫, 1995: 風はチャンドラーウobbleを励起する, *天気*, **42**, 163-166.



一覧表

TRMM(熱帯降雨観測衛星)の研究公募について	526
第5回トヨタ先端科学技術研究助成プログラム課題募集	526
教官(東京大学大学院理学系研究科地球惑星学専攻)の公募	531
教官(京都大学宙空電波科学研究センター)の公募	532
助手(北海道大学低温科学研究所寒冷海洋圏部門)の公募	541
「第22回沖繩研究奨励賞」候補者の推薦募集	543