

風はチャンドラーウオブルを励起する*

—その気象学的問題点と地球物理学的意義—

内 藤 勲 夫**

「大学院生は若く、経験も浅いのですが、それだけに他の研究者より自由な発想、考え方ができます。それが大学院生に対する我々の期待です」。これは古在由秀先生が大学院生に向けたメッセージである。ここでは、まさにその若さがもたらした歴史的発見のドラマとその気象学的問題点及び地球物理学的意義を紹介しよう。

表題のチャンドラーウオブルとは地球自由振動の一つとして知られる地球自転軸の北極の運動（極運動）の自由運動のことである。その自由運動周期は約14か月で、極運動にはこの他に強制運動の年周ウオブルがある。このうち、年周ウオブルは大陸と海洋の間の空気や水の季節移動がシーソーのように自転軸を揺さぶって生じることが知られている（内藤，1995）。ちなみに、筆者が所属する国立天文台水沢の前身であった緯度観測所はこのチャンドラーウオブルと年周ウオブルを見極めようとしてはじまった世界最初の国際共同観測事業の一観測所として発足したものである。

さて、このチャンドラーウオブルが一体何で励起されているかはその発見以来の謎であった。最初に考えられた励起源は地震で、後にわが国原子物理学の父として知られる若き日の仁科芳雄も地震とウオブルの関係を論じている。しかし、その後の様々な変遷を経て地震励起説は現在ほとんど沈黙に近い状態にある。実際、宇宙測地による高精度地球回転観測が始まった1984年以降このかた、いくつかの巨大地震が起きているが地球の自転軸はびくともしていない。次に着目されたのが大気変動であるが、これは主として上述した空気の質量再分布効果（気圧の寄与）について論じられた。その結果、大気変動は励起源としては小さすぎるが、少なくとも励起に関与していることがわかった。そして、最近ではコア励起説すら登場している。

ところが、ここに来て、風が励起に重要な役割を果たしていることがわかってきた。それは東京大学大学院の古屋正人氏による次の発見から始まった。地球の変形パラメータを適当に選ぶと、大気角運動量（AAM）関数を外力として極運動方程式を数値積分して得られるウオブルが観測されるウオブルに一致することを見いだしたのである（古屋，1994）。ここに、AAM関数とは上述したような気圧の寄与と風の寄与からなり、これらは気象庁客観解析データに基づいて算出されている（内藤，1990）。そして、風の寄与とは地心と赤道を通る“赤道軸のまわりの風の渦（大気相対角運動量）”が作る大気のジャイロ”のことで、よく知られているように、ジャイロは常にそれに直交する軸を運動させる働きを持っている。また、変形パラメータとは回転で生じる地球の遠心力による変形や大気質量などによる地球の荷重変形を表す地球の弾性常数のことである。つまり、古屋氏はこの弾性常数に問題があるのではないかと考えたのである。これは固体地球指向の古屋氏ならではの大胆な発想であった。

しかし、彼が試みた数値積分の外力には定常な季節変化も含まれていた。と言うのも、実は、季節変化には過剰に大きい気圧の寄与が知られていて、年周ウオブルを説明するためにはその過剰を相殺する他の寄与を必要としていたからだ（内藤，1995）。ところが、適当なパラメータを選ぶと、この気圧の過剰が小さくなって、ウオブルの計算値が観測値にピッタリ一致してしまっただけだ。しかし、ピッタリ一致するためには風で励起されたウオブルも観測値にピッタリ一致していなければならない。これはとりもなおさず風もチャンドラーウオブルに寄与していることを意味している。古屋氏との本格的な共同研究はこのとき始まった。

けれども、これだけでは風がチャンドラーウオブルを励起していることにはならない。積分の初期には必ず定常な季節変化で生じる見掛けのチャンドラーウオブルも生じるからである。これはちょうど数値予報の

* The Wind Excites the Chandler Wobble.

** Isao Naito, 国立天文台地球回転研究所.

© 1995 日本気象学会

積分の初期に生じる見掛けの大气変動（リチャードソンの夢を壊した変動）と同じ性質のもので、数値予報ではこの見掛けの変動を除去するために“初期化”と呼ばれる前処理を行うことはよく知られている。そこで、この季節変化をあらかじめ除去した後の不規則変動だけを外力として積分したところ、なんと、観測されるものとほとんど同じチャンドラーウオブルが現れたのである。しかも、励起源の大半は風の寄与で、特に、14か月近傍の周期で変動する風の寄与にあることがわかった（Furuya *et al.*, 1994）。もちろん、このときの実験では変形パラメーターは変えずに教科書にある常数を用いている。

何だそれだけか、そんなことがなぜ今までわからなかったのか、と思われる方も多いと思う。なるほどその通り、現に、極運動方程式の積分解は地球回転の教科書の最初の数頁目でふれられているのだ（Munk and MacDonald, 1960）。ところが、専門馬鹿とは情けないもので、自分たちが算出したAAM関数の風の寄与、すなわち、赤道軸のまわりの大气相対角運動量を形成している赤道軸のまわりの風の変動があれほどの精度を持っているとは夢にも思わなかったのである。しかし、筆者だけが専門馬鹿ではなかったようである。古屋氏はこの結果を昨年開かれたSEDI（地球深部）国際シンポジウムにポスターとして発表したのだが、地球回転の教科書の著者の一人のランバックでさえ、それをチラッと見ただけでほとんど関心を寄せなかったとのことである。きっと、また「同じ間違い」をやっていると彼は思ったのだろう。

と言うのは、10年ほど前、AAM 関数を提案した英国のハイドラは、上述したような季節変化を含んだままの積分結果から、チャンドラーウオブルの励起源は大气であると早合点してしまい、多くの不評を買ったことがあったからである（Barnes *et al.*, 1983）。そればかりではない。よく知られているように、自由振動はまったくランダムなノイズでも励起されるから、適当なノイズの外力を選ぶとウオブルの計算値を観測値に合わせることもすらすらできるのである。そこで、従来はどうしたかと言うと、ウオブルの観測値から極運動方程式を微分して得られる外力と大气データから直接計算された AAM 関数などの外力との比較で励起源を論じてきた。この方法はウオブルの外力同志の比較であるから異論を挟む余地はまったくない。

話を元に戻すと、結局、ウオブル同志の比較で励起源を論じることができるのは地球物理観測データに基

づいて計算された外力が観測されたウオブルから期待される真の外力に限りなく近いときか、あるいは、少なくとも、そうした外力のもとに計算されたウオブルが観測されたウオブルに限りなく近い場合だけとなる。古屋らの結果はまさに後者の例に近く、ウオブルの計算値の振幅のみならず位相まで観測値のそれに一致したばかりか、気圧の寄与も従来の結果によく一致した。さらに、その後、14か月周期近傍での外力同志もよく一致することが判明した。従って、風がチャンドラーウオブルを励起していることはほぼ確かとなった。

では、これでチャンドラーウオブルの励起源の解明が終わったかと言うと、実はそうではない。上述したように、この風の渦の実体はその精度と共にほとんど明らかではないからである。従って、風を主要な励起源と断定するためにはさらに数年以上にわたる比較追跡で確認する必要があるのだ。一方、気象学はこの風の渦を長い間波動（プラネタリー波）として捉えてはきたが赤道軸のまわりの相対角運動量変動として捉えることはこれまでまったくなかったし、まして、14か月近傍の周期で変動するプラネタリー波など手の届かぬ難題であった。それを示唆しているかどうかはわからないが、ウオブルに対する気圧と風の二つの寄与を気象庁の数値予報モデルで予報すると、気圧の寄与の予報値は観測値にやや近づくものの、風の寄与の予報値は観測値にまったく近づかないとの結果を得ている（尾崎ら, 1993）。

さらに、奇妙なことに、NMC（米国気象センター）データに基づく AAM 関数の風の寄与を外力としたウオブルの計算値は観測値から大きくはずれることがその後の追跡で判明した。実は、NMC データは初期化後のいわゆる“初期化データ”で、一方、筆者らが用いた気象庁データは初期化前のいわゆる“解析データ”であるため、二つのデータは同じ客観解析データではあってもほんの少しだけ異なっていた。しかし、初期化の影響はローカルな変動が受けやすいから、その違いがチャンドラーウオブルの励起実験結果に影響したとは考えにくい。むしろ、この結果はデータソースとなる NMC と気象庁の予報システムの本質的な違いによっている可能性が高い。

振り返ってみると、10年ほど前、IERS（国際地球回転事業）の一環として AAM 補助局が提案されたとき、AAM 関数の算出を初期化データで標準化する可否かが問題となった。ところが、当時の気象庁が公開

していたデータは解析データだけであったから、気象庁データに基づく AAM 関数は他の三つの気象機関のそれらとわずかに異なる内容となった。しかし、幸いなことに、その後の国際比較研究で気象庁データに基づくものは最も地球回転変動をよく説明することが判明した(内藤, 1990)。そして、その決定的結果が今回の判定となった。いずれにせよ、この成果が多忙な業務の合間をデータのコピーやテープの輸送に割いて協力して下さった多くの気象庁職員の汗の結晶なくしてあり得なかったことをここに感謝を込めて記しておかねばならない。

では、我々が用いた気象庁の解析データはそれほどに現象を忠実に捉えていたのだろうか。もしそうなら、上述したような風の渦を示唆する根拠がこれまでの研究から見いだされても不思議ではない。サイエンスとは面白いもので、その根拠が用意されているのである。

チャンドラーウオブルによって自転軸が傾くと、地表から自転軸までの半径が変化して地表の遠心力に変化が生じるが、それに対する海洋の応答を極潮汐と呼んでいる。従って、極潮汐の周期は約14か月となるが、海水面変動データから約14か月周期の海水面変動を取り出すと、その大半は風の吹き寄せなどで生じていることが判明しているのである (Tsimplis *et al*, 1994; 他)。また、このような海水面変動に見られる極潮汐の奇妙な振る舞いをはじめて指摘したのは実は他ならぬ筆者で、10数年前のことである(例えば、内藤, 1990参照)。つまり、これらの事実を古屋らの結果に重ねると、グローバルな風の渦の変動は偶然にもチャンドラーウオブルの周期を含んでいることになる。言い換えれば、チャンドラーウオブルと約14か月周期の海水面変動の両方を励起している約14か月周期を持つグローバルな風の渦が存在するのである。

そうすると、次の疑問はこのような風の渦がなぜ存在するかと言うことであろう。すぐ思いつくのは、赤道成層圏帯状風の準2年振動(QBO)ではなかろうか。なぜなら、よく知られているように、帯状風QBOは時間軸に対して非対称構造を示すために、そのスペクトルには14か月周期も含まれるからである。しかも、この14か月周期は特に下部成層圏の圏界面付近で卓越している。面白いことに、チャンドラーウオブルの励起に最も寄与している風の渦はこの圏界面付近の対流圏と成層圏にある可能性が高いことがその後の解析で判明した。従って、QBOのエネルギー源となる対流圏最上部の帯状風変動やQBOの非線形性に由来する14

か月周期を持つ下部成層圏の帯状風変動が赤道軸のまわりの14か月周期の風の渦と如何なる関係にあるかが気象学上の関心事となる。

ところで、チャンドラーウオブルの振幅は1910年頃と1951年頃に極大、1930年前後と1970年前後で極小となるような40年程度の周期で経年変化することが知られている。そこで、もしチャンドラーウオブルが風で励起されているならば、この特異な経年変化を大気変動の反映と見なすことができる。不思議なことに、ウオブルの振幅は世界の地震活動と見事な相関を持つことが昔から知られている。何しろ、前述した地震励起説はこの事実に依拠していたのだ。しかし、地震励起説が沈黙した現在では、地震活動はチャンドラーウオブルに対する応答ではないかと考えられている(Kanamori, 1977)。これは自転軸の14か月周期の運動が地球の変形を伴っているからで、これがチャンドラーウオブルを地震で励起される地球の自由振動と同じ仲間とみなす根拠の一つとなっているのだが、このうちの海洋の変形が前述した極潮汐である。つまり、大気はマンツルの変形の14か月周期振動を励起しそれに地震活動が伴っている可能性が考えられるわけである。

一方、グローバルに見ると、地震活動は火山活動と不分離な関係にあることも昔からよく知られている。その結果、気候変動の要因の一つである火山活動はウオブルの励起源である大気変動と密接な関係にあると見ることができ、気候変動と火山活動はウオブルを通じて一つの閉じた系(リンク)を形成していることがわかる。興味深いことに、現在のウオブルの活動は1940年代末とよく似た振幅の上昇期に相当し、その1940年代末は地震火山の活動期としてよく知られているから、1990年代の現在は地震火山活動期に突入していることになるが、はたしてそのような見方は可能であろうか。これは地震火山の専門家諸氏にぜひ考えていただきたい筆者のもう一つの関心事である。

ここまで来ると、気象屋ならずとも、チャンドラーウオブルを励起する赤道軸のまわりの風の渦の14か月周期変動のそもそもの源は一体何なのかを知りたくなるに違いない。そして、その糸口をたどって行くと、再び、大気や海洋の14か月程度の時間スケールはどうして決まるのかと言う疑問に戻る。筆者が知る限りでは、その源には二つあるようである。一つは前述した赤道成層圏帯状風のQBOの非線形性に由来するものである。そして、他の一つは16か月程度とみなされて

いるエルニーニョの平均寿命である。後者は14か月からやや離れているが、QBO とてその周期を大きく変えることを思えば、大きな違いはないであろう。実際、ENSO と密接な関係にある海洋中の二つの赤道波（ロスビー波とケルビン波）で生じる赤道太平洋の緩和時間は14か月程度であることが知られている（Philander, 1990）。

不思議なことに、この14か月程度の時間スケールの変動はなぜかグローバルに存在するのである。一例を挙げると、温室効果気体の増加に伴う気候変化に関するわが国の作業部会の報告（気象庁, 1990）の中に、海面水温変動に見られる卓越周期の海域別一覧表がある。その中に、QBO や ENSO などの卓越周期に混じって、1.2年ないし1.3年の周期のグローバルな存在を見いだすだろう。

どうやら、14か月程度の時間スケールの大気変動は太平洋の海洋とグローバルな大気との相互作用で生じている可能性が見えてきた。それがマントルの変形を励起し、その変形によって地震火山活動が励起され、火山活動は大気や海洋の熱収支分布を変えて気候変動をもたらす、と言うリンクが存在するのではなかろうか。赤道太平洋は最も可能性の高いその作用点かもしれない。また、このリンクにはたぶん自転速度や磁場の数10年変動も関与しているはずである。なぜなら、自転速度、磁場、気候の数10年変動は互いに強い相関関係にあるからである（内藤, 1995）。

ついでに言及しておく、上述のマントルの変形の14か月周期振動の振幅をチャンドラーウオブルから見積もり、それを重力変化に換算すると、最大振幅を与える緯度45度で数マイクロガル程度となる。驚くべきことに、このわずかな重力振動が地上の高精度地球計測装置として知られる超伝導重力計で最近検出され、測地学分野にホットな話題を提供している。従って、このマントルの極潮汐が固体地球ダイナミクスにどんな風穴を空けるかは今後の楽しみである。

話がいきさか気象学の枠を超えてしまったので、そろそろ要点を整理して終わりとしよう。14か月程度の周期で変動するグローバルな風の渦がチャンドラーウオブルの励起に重要な役割を果たしている可能性が判明した。しかし、風励起説を完全に実証するためにはさらに数年程度の気象データの蓄積を必要としている。けれども、この風励起説を示唆すると思われる風

や海面温度の14か月周期変動をこれまでの研究に見いだすことができる。一方、風励起説に基づくと、ウオブルの振幅と地震火山活動との強い相関から、火山活動と気候変動はリンクを形成している可能性が予測される。従って、この問題の解決の鍵は一重に14か月程度の時間スケールの大気プラネタリー波の気象学的実証に掛かっている。

最後にもう一つ、地球科学の分野間の連絡がすこぶる悪いわが国では老若研究者間の連絡もすこぶる悪いと言うのが長い間地球回転と言う学際分野で暮らしてきた筆者の見方である。異分野・老若の研究者間の情報伝達は今後の地球科学の最大のテーマとなるであろう上述したような数10年スケールの地球変動の解明の一つの鍵ではなかろうか。

参 考 文 献

- Barnes, R. T. H., R. Hide, A. A. White and C. A. Wilson, 1983: Atmospheric angular momentum fluctuations, length-of-day change and polar motion, Proc. R. Soc. Lond., **A387**, 31-73.
- 古屋正人, 1994: Atmospheric Excitation of the Chandler Wobble, 東京大学大学院修士論文.
- Furuya, M., Y. Hamano, and I. Naito, 1994: Wind Excitation of the Chandler Wobble, Nature (投稿中).
- Kanamori, H., 1977: The energy release in great earthquakes, J. Geophys. Res., **82**, 2981-2987.
- 気象庁, 1990: 温室効果気体の増加に伴う気候変化(II), 大蔵省印刷局, 73 pp.
- Munk, W. and G. J. F. MacDonald, 1960: The Rotation of the Earth, Cambridge Univ. Press, 46 pp.
- 内藤勲夫, 1990: 地球の角運動量収支における大気水圏システムの役割, 天気, **37**, 231-241.
- 内藤勲夫, 1995: 大気が揺さぶる地球回転変動, 一、大気, 水圏, マントル, コアの相互作用一, 科学, **65**, 印刷中.
- 尾崎友亮, 隈 健一, 内藤勲夫, 1993: 気象庁数値予報モデルによるAAM関数の予報, 地球, **175**, 32-35.
- Philander, S. G., 1990: El Nino, La Nina and the Southern Oscillation, Academic Press, 245 pp.
- Tsimplis, M. N., R. A. Flather and J. M. Vassie, 1994: The North Sea pole tide described through a tide-surge numerical model, Geophys. Res. Lett., **21**, 449-452.