

年周極運動に対する風の寄与*

菊地直吉・内藤勲夫**

要 旨

年周極運動(地球の1年周期の自転軸の運動)に対する大気の寄与が評価された。用いられたデータは1984年から1990年までの7年間におけるIRISで観測された極運動データと気象庁全球客観解析データに基づいて計算された大気角運動量関数データである。評価は励起極(励起関数)の計算値と観測値の比較でなされた。大気質量再分布による励起極は従来の結果とはほぼ同じ西経100度—東経80度方向の直線運動を示す。これに対し、新たに計算された大気相対角運動量による励起極はちょうどグリニッチ方向(東経0度方向)に長軸を持つ細長い楕円運動を示す。その結果これら二つの寄与の和による計算された大気励起極は西経90度—東経90度方向に長軸を持つ観測された楕円軌道の励起極に近付き、風の寄与(大気相対角運動量)は年周極運動の励起に重要な役割を果たしていることが分かった。

1. はじめに

地球の瞬間自転軸の北極の運動として知られる極運動には大気の季節変動で励起される年周極運動がある。年周極運動は主に大陸上の大気質量再分布(以下では気圧の寄与と呼ぶ)に依存しているが(Munk & MacDonald, 1960; Lambeck, 1980), それら以外の励起源として、風による相対角運動量変動(以下では風の寄与と呼ぶ)(Wilson & Haubrich, 1976; Wahr, 1983), 水質量再分布(以下では地表水の寄与と呼ぶ)(Van Hylckama, 1970; Chao & O'Connor, 1988; etc.), 大気圧変動に対する海洋の応答(Merriam, 1982; Wahr, 1983), 風の吹送効果による海水質量再分布あるいは海流の寄与(O'Connor, 1980; Wahr, 1983)が考えられている。しかし、これらの見積もり値は観測データの不完全さと解析期間の不統一のために部分的に大きく異なっている。

ところで、極運動に対する風の寄与は近年のVLBI(超長基線電波干渉計)などによる地球回転変動の高精度観測データが登場するまでは無視できるほど小さいと考えられていた。この考えは大気運動が地衡風バランスにあるならば、風の寄与は理論的にゼロとなるとの考えに基づいている(例えば、Munk & MacDonald, 1960; Wahr, 1982参照)。ところが、山岳を持つ現実の地球で

は大気運動は地衡風バランスから大きくずれており、また、一般に極運動に及ぼす風の寄与も、自転速度変動に寄与する帯状風の場合と同様に、山岳トルクと地表摩擦トルクの両方の反映と考えられ、一般に、風の寄与は無視できない大きさを持つと推測される。

風の寄与は原理的には近年実用化された数値予報の初期値として知られる全球客観解析データから容易に見積もることができる。実際、筆者等は気象庁データに基づいて極軸のまわりの季節変化における角運動量収支をほぼ完全に評価することに成功した(Naito & Kikuchi, 1990)。ところが、極運動に対する風の寄与は赤道軸のまわりの大気の相対角運動量の変動であるから、その評価精度は風の東西成分のみならず南北成分の精度にも依存する。従って、風の南北成分が一般に東西成分の1/10程度の大きさであることなどを考慮すると、風の寄与を評価するためには自転速度変動における場合に比べより高精度の風データを必要とする。

そこで、この論文では年周極運動に対する大気の寄与を高度10 mbまでの風データを含む気象庁の全球客観解析データに基づいて評価し、それとVLBIによる高精度極運動データとの比較から、風の寄与が年周極運動の重要な励起極の一部を形成していることを示す。

2. 解析方法とデータ

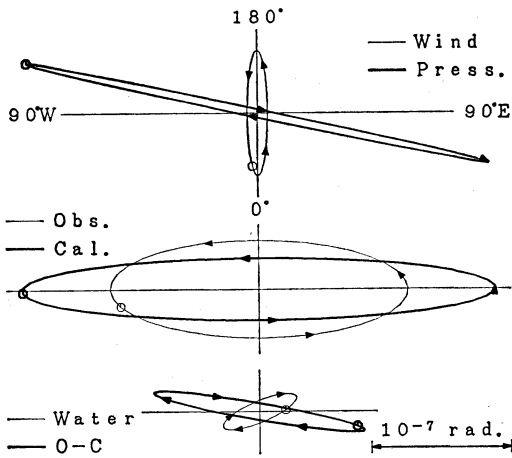
極運動は地球の瞬間自転軸が地球の形状軸(最大慣性エネルギー軸)でその方向は平均自転角速度ベクトルの方向には

* Wind Contribution to the Annual Wobble.

** Naokichi Kikuchi, Isao Naito, 国立天文台.

—1991年2月25日受領—

—1991年10月4日受理—



第1図 観測された年周励起極とそれに対する計算された大気寄与。図中の矢印の向きは励起極の運動の向きを表し、また、丸印は位相0度(1月1日)を示し、3つの矢印はそれぞれ90度(4月1日)、180度(7月1日)、270度(10月1日)の位相を示す。

上段：計算された気圧の寄与による励起極 (Press.) と風の寄与による励起極 (Wind) との比較。
 中段：極運動データからデコンヴォリュートされた励起極の観測値 (Obs.) および気圧と風の寄与の和による励起極の計算値 (Cal.) との比較。
 下段：観測値と計算値との差 (O-C) による励起極と Chao & O'Connor (1988) が見積もった地表水の寄与による励起極 (Water) との比較。

ば一致する)の北極(すなわち平均の北極)で接する平面との交点の2次元運動である(詳細は内藤, 1988第1図参照)。瞬間自転軸は瞬間角速度ベクトルに一致しているから、今、地心を原点とし座標軸の一つを形状軸にまた他の二つの軸を赤道面内の東経0度方向および東経90度方向にとる直交回転座標系を考えると、極運動は平均自転角速度に対する瞬間角速度ベクトルの赤道軸成分の比(赤道軸に対する瞬間角速度ベクトルの方向余弦)の運動とみなすことができ、その運動方程式は地球の角運動量保存式から以下のように導かれる(Munk & MacDonald, 1960; Lambeck, 1980)。

$$(i/\sigma_0) d\tilde{m}/dt + \tilde{m} = \tilde{\psi} \quad (1)$$

ここに、 \tilde{m} は平均自転角速度に対する瞬間角速度ベクトルの二つの赤道軸成分の比を複素変数で表したものであ

る。また、 $\tilde{\sigma}_0$ はチャンドラー・ウォプルの複素振動数でその実数部および虚数部はそれぞれチャンドラー・ウォプルの振動数および減衰係数である。(1)式において、左辺の加速度項に対する右辺の外力項($\tilde{\psi}$)はしばしば励起関数(あるいは励起極)とよばれている。

一般に、極運動に対する大気寄与は大気データに基づいて計算された大気励起極と天文観測された極運動データから(1)式の左辺を逆算(デコンヴォリュート)して得られる励起極(これは天文励起極と呼ばれている)との比較でなされる。このときデコンヴォリューションはチャンドラー・ウォプルの周期と減衰係数(あるいはQ値)を必要とするが、ここでは周期を1.19年、Q値を90と仮定した。用いた極運動データはIRIS(国際電波干渉計網)が決定したVLBIによる約5日毎のデータである(詳細はIRIS Bulletin参照)。また、デコンヴォリューションはWilson (1985)の4a式に依った。

一方、従来、大気励起関数は気象観測データから個々の研究者独自の方法でグリッド・データに変換して見積もられてきた(例えば、Wilson & Haubrich, 1976; Wahr, 1983参照)。しかし、近年では、数値予報における初期値として12時間毎に解析されている全球客観解析データに基づいて算出された大気角運動量(AAM)関数を用いられている(Barnes, Hide, White & Wilson, 1980)。AAM関数を用いると、(1)式の右辺の励起関数($\tilde{\psi}$)は次のように近似される(例えば、内藤, 1988参照)。

$$\begin{aligned} \tilde{\psi} = & -1.00 [r^2/(C-A)g] \\ & \int Ps \sin\phi \cos\phi \exp(i\lambda) dS \\ & - 1.43 [r/\Omega(C-A)g] \\ & \iint (u \sin\phi + iv) \exp(i\lambda) dPdS \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 Ps は地上気圧、 (u, v) はそれぞれ東向き・北向き風速、 (ϕ, λ) はそれぞれ緯度・経度、 dP および dS はそれぞれ気圧積分および表面積分、 r は地球の平均半径、 Ω は地球の平均自転角速度、 C および A はそれぞれ極軸および赤道軸のまわりの地球の主慣性モーメント、そして g は重力の加速度である。従って、AAM関数の気圧および風の寄与とは(2)式の第1項および第2項をそれぞれ指している。

(2)式において、気圧の寄与は、海洋上の気圧変動として海面気圧変動をそのまま用いるモデル(Non-Inverted Barometer Hypothesis Model)および全海洋で平均された海面気圧変動を用いるモデル(Inverted Barometer Hypothesis Model)の二つのモデルに基づいて

算出されている。前者では大気と海洋の圧力平衡は成立していないのに対し、後者では圧力平衡は海洋上いたるところで成立している。一般に、1年の時間スケールでは後者の仮定が十分に成立するから、ここでは後者のモデルに基づいて気象庁データより算出された気圧の寄与(Naito, Kikuchi & Yokoyama, 1987参照)を用いた。また、風の寄与(相対角運動量)の気圧積分は地上から10 mb までなされている。解析にはこれらの5日平均値を用いた。

ところで、(2)式はコアを含む地球全体の主慣性能率が用いられている。しかし、数年未満の時間スケールではコア・マントル非結合(コアとマントルが一緒に回っていないこと)が成立していると考えられているから(Wahr, 1982; Naito & Kikuchi, 1990; 内藤・菊地, 1990; etc.), ここではこれを考慮するために励起関数に1.12(マントルの主慣性能率に対する地球全体のその比)を乗じた値を用いた。なお、解析期間は1984年1月から1990年12月までの7年間である。

3. 励起極の比較

第1図の上段は気圧の寄与と風の寄与のそれぞれによる励起極を示したものである。気圧の寄与はほぼ西経100度-東経80度方向に直線的な振動を示し、これは従来の結果(Merriam, 1982; Wahr, 1983)におおよそ一致している。(2)式の右辺第1項から明らかなように、気圧は緯度45度で最大の励起効果を持ち、このとき励起極は気圧が作用している経度に対し180度ずれた経度方向に移動することが分かるから、ここで得られた結果は冬季におけるユーラシア大陸上の大気質量の集積が励起極をユーラシア大陸方向と反対の方向に移動させていることが分かる。

一方、新たに得られた風の寄与はちょうどグリニッチ方向(東経0度方向)に一致する長軸を持つ細長い楕円軌道を示す。Wahr(1983)は気象データに基づく解析から風の寄与は無視できるほど小さいと結論したが、ここで得られた結果は、Wahr(1982)が理論的に期待していたように、風の寄与が無視できない大きさであることを示している。(2)式の右辺第2項から明らかなように、風の寄与は二つの相対角運動量ベクトルの和で表されるので、励起極がグリニッチ方向に長軸を持つような風系を推定することは一般に容易ではなく、風の寄与による励起極が如何なる風ベクトルの全球分布の反映となっているかは今後の興味ある議論となるだろう。

第1図の中段は気圧の寄与と風の寄与の和による大気励起極の計算値と極運動データからデコンヴォリュートされた天文励起極の観測値との比較を示したものである。計算された大気励起極は観測された天文励起極の運動に近い楕円運動を示しているが、振幅の一致はよいとは言えない。しかし、両者の長軸の方向は共に西経90度-東経90度方向を示し、また、両者の位相もよく一致している。従って、風の寄与を含む計算された大気による年周励起極は従来の気圧の寄与のみを含むものに比べて観測された年周励起極に大きく近づいたことが分かる。

第1図の下段は観測値と計算値の差(O-C)とChao & O'Connor(1988)による大陸上の雪氷などの地表水の寄与のそれぞれの励起極の比較を示したものである。両者は振幅を大きく異にし、また、長軸の方向に約40度、位相に約60度(約2カ月)の相異が見られる。しかし、地表水の寄与の推定がきわめて困難であることを思えば、両者の長軸の方向の一致はむしろよいと見るべきかもしれない。今後は、地表水の寄与に加えて、風などによる海水質量再分布や海流の寄与などを加えた議論が必要となるだろう。

4. まとめ

大気質量再分布による励起極は従来の結果とおおよそ同じ西経100度-東経80度方向の直線的な季節変化を示す。これに対し、新たに見積もられた大気相対角運動量による励起極はちょうどグリニッチ方向(東経0度方向)に長軸を持つ細長い楕円軌道の季節変化を示す。その結果、これら二つの寄与の和による計算された大気による年周励起極は観測された楕円軌道を示す年周励起極に近付き、風は年周極運動の励起に重要な役割を果たしていることが分かった。

この研究は IERS (国際地球回転観測事業) AAM 補助局における気象庁データに基づく AAM 関数解析センター業務の一環としてなされたものである。気象庁数値予報課の長期にわたる協力に厚く感謝します。また、論文の改稿に有益なコメントをお寄せくださった査読者にも感謝します。

参考文献

- Barnes, R.T.H., R. Hide, A.A. White & C.A. Wilson, 1983: Atmospheric angular momentum fluctuations, length-of-day change and polar

- motion, Proc. R. Soc. Lond., A 387, 31-73.
- Chao, B.F. & W.P. O'Connor, 1988: Global surface-water-induced seasonal variations on the earth's rotation and gravitational field, Geophys. J.R. astr. Soc., 94, 263-270.
- O'Connor, W.P., 1980: Estimate of wind stressed sea level excitation of the earth's annual wobble, Geophys. J.R. astr. Soc., 60, 187-207.
- Lambeck, K., 1980: The Earth's Variable Rotation, 449 pp, Cambridge University Press.
- Merriam, J.B., 1982: Meteorological excitation of the annual polar motion, Geophys. J.R. astr. Soc., 70, 41-56.
- Munk, W. & G.J.F. MacDonald, 1960: The Rotation of the Earth, 323 pp, Cambridge University Press.
- Naito, I., N. Kikuchi & K. Yokoyama, 1987: Results of estimating the effective atmospheric angular momentum functions based on the JMA global analysis data, Publ. Int. Latit. Obs. Mizusawa, 20, 1-11.
- 内藤勲夫, 1988: 地球回転と大気海洋力学, 天気, 35, 291-311.
- Naito, I. & N. Kikuchi, 1990: A seasonal budget of the earth's axial angular momentum, Geophys. Res. Lett., 17, 631-634.
- 内藤勲夫・菊地直吉, 1989: 地球の角運動量収支とコア・マントル非結合, 天気, 36, 625-630.
- Van Hylckama, T.E.A., 1970: Water balance and earth unbalance, In Int. Assoc. of Hydrology, Proc. of Reading Symposium World Water Balance, Publ. 92, pp. 434-553, AIHS-UNESCO.
- Wahr, J.M., 1982: The effects of the atmosphere and oceans on the earth's wobble-1. Theory, Geophys. J.R. astr. Soc., 70, 349-372.
- , 1983: The effects of the atmosphere and oceans on the earth's wobble-2. Results, Geophys. J.R. astr. Soc., 74, 451-487.
- Wilson, C.R., 1985: Discrete polar motion equations, Geophys. J.R. astr. Soc., 80, 551-554.
- , & R.A., Haubrich, 1976: Atmospheric contributions to the excitation of the earth's wobble, 1901-1970, Geophys. J.R. astr. Soc., 46, 745-760.

日本気象学会および関連学会行事予定

行 事 名	開 催 年 月 日	主 催 団 体 等	場 所	備 考
第7回北方圏国際シンポジウム	1992年2月2日 ～4日	紋別市など	紋別市	Vol. 38, No. 9
中層大気に関する国際シンポジウム	1992年3月23日 ～27日	京都大学超高層電波研究センター	新都ホテル(京都)	Vol. 38, No. 9
International Symposium on GLOBAL CHANGE (IGBP)	1992年3月27日 ～29日	IGBP科学委員会, IGBP国内委員会, 早稲田大学	早稲田大学	Vol. 38, No. 9
地球惑星科学関連学会合同大会	1992年4月7日 ～10日	地球電磁気・地球惑星圏学会, 地震学会, 火山学会, 測地学会, 地球化学会	京都大学教養部(京都)	
Quardrennial Ozone Symposium	1992年6月4日 ～13日	IAMAP/IOC	アメリカ Virginia 大学	Vol. 38, No. 4
第4回水資源に関するシンポジウム	1992年8月3日 ～4日	日本学術会議, 気象学会など	日本学術会議	Vol. 38, No. 9
日本気象学会1992年度春季大会	1992年5月26日 ～28日	日本気象学会	工業技術院つくば研究センター(つくば)	
第11回雲と降水に関する国際会議	1992年8月17日 ～21日	IAMAP/ICCP	カナダモントリオール McGill 大学	Vol. 38, No. 4
第13回ニュークリエーションと大気エアロゾルに関する国際会議	1992年8月24日 ～28日	IAMAP, CNA, ICAP	アメリカユタ州 Utah 大学	Vol. 38, No. 1
日本気象学会1992年度秋季大会	1992年10月7日 ～9日	日本気象学会	教育文化会館(札幌)	