

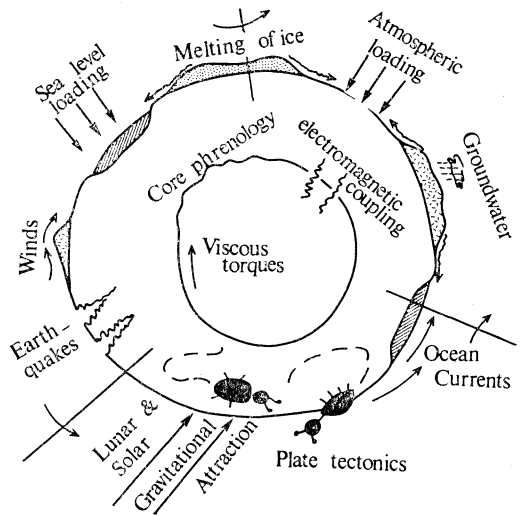
地球の角運動量収支における大気水圏システムの役割*

——平成元年度堀内基金奨励賞受賞記念講演——

内 藤 勲 夫**

堀内基金奨励賞をありがとうございました。地球回転の研究分野はグローバルな地球だけを対象とする天文学と地球物理学にまたがる典型的な学際分野です。この地球回転の変動に大気水圏システムの変動を通じて取り組もうとするのが私の立場ですから、言わば、私は大気水圏科学の成果を利用させていただいているわけです。そうした私の未完成の研究を今回このような形で評価していただき大変恐縮しています。また、今、地球回転の研究分野は極めてエキサイティングな段階を迎えようとしています。VLBI（超長基線電波干渉計）などによる高精度の地球回転変動データがぞくぞくと新しい情報をもたらし始めているからです。研究者としてそうした場面に居合わせることでいただけても幸運なのですが、さらにこのような励ましをいただき深く感謝しています。これを機により一層の研鑽を重ねたいと思っています。

10年ほど前までは、地球回転の研究分野はどちらかというと目立たない地味な分野であったかと思えます。実際、それまでの地球回転変動の観測精度は地球物理学に新しい知見をもたらすほど高くはありませんでしたし、また、地球物理学においても現在ほどグローバルな欲求が強くはありませんでした。しかし、1980年代に入ると極めてドラスティックな変化が起こります。上述しましたように VLBI をはじめとする宇宙技術の導入によって地球回転変動の観測精度が飛躍的に向上しましたし、地球物理学では各種のグローバルな数値モデルが実用段階に入りました。そして、これらの干渉が新しい地球像を描きはじめたわけです。私が最近手がけてきました数値予報における客観解析データに基づく大気角運動量のルーチンの見積りもそうした新しい地球像の構築に側面からサポートするものです。そこで、ここでは今



第1図 地球回転に乱れを作る力のイラスト。(Lambeck, 1989による)

後の地球科学の進展に大気水圏科学が果たす役割について私のこれまでの研究を紹介しながら述べてみたいと思います。

1. 地球回転の変動

観測される地球の回転変動とは厳密に言えば地殻・マントルの回転変動を指します。コア（核）が流体外核を持っているからです。地殻・マントルの回転変動を引き起こす力（励起源）はいろいろありますが、それらを絵にしますと、第1図のようになります。この図から励起源の大半は地球表層部の大気水圏システムの変動に依存していることがよくわかります。これらの変動が地球全体の角運動量保存のもとに地殻・マントルに回転変動を励起しているのですが、このうち、風・海流は地殻・マ

* The atmospheric and hydrospheric contribution to the earth's angular momentum budget.

** Isao Naito, 国立天文台地球回転研究系.

第1表 地球の力学的結合システムを構成する諸現象(角運動量収支のジグソーパズル)。

地球の構成要素		大気	雪氷・陸水	海洋	地殻	マントル	コア(核)
地球回転の変動	短周期変動(～20日)	移動プラネタリー波(?)	?	非大気圧応答(?)			
	年周ウォブル	停滞プラネタリー波(質量再分布)	海陸水循環	大気圧応答			
	チャンドラー・ウォブル(434日)	～14ヵ月振動(海気結合モード)	?	極潮汐(ウォブル応答)	非地震性地殻変動	粘弾性変形	慣性結合(?)トルク
	永年揺動	(気候変動)	極氷変動	海水面変動	リバウンドプレート運動	マントル対流	慣性結合(?)トルク
自転速度変動	短周期変動(30～60日)	帯状風(赤道対流圏)	?	南極環流			
	半年周変化	帯状風(赤道成層圏)	雪氷量変化(北半球)	南極環流			
	年周変化	帯状風質量再分布	雪氷量変化(北半球)	大気圧応答			
	数年変動	帯状風(QBO)(赤道成層圏)	?	ENSO	海嶺火山活動(?)	マントル対流(?)	地形結合(?)トルク
	数十年変動	(気候変動)	極氷変動	深層循環(?)	地震火山活動	マントル対流(?)	電磁結合トルク

(注) 自由コア章動と外力(潮汐力)で励起される歳差・章動・自転速度変動を除く。

ントルに対する相対角運動量(あるいはトルク)の変動を通じて、大気荷重・地下水・融氷・海水面荷重は地殻・マントルの慣性能率や慣性乗積の変動を通じて、それぞれ、回転変動を励起します。通常、前者は相対角運動量の効果と呼ばれ、後者は質量再分布の効果と呼ばれています。地殻・マントルは空気などの質的再分布によって荷重変形しますので、慣性能率や慣性乗積の変動は質量再分布による変形とそれに伴う荷重変形の和として表されます。つまり、第1図の Loading (荷重)とは地球表面の物質が地殻・マントルに変形を与えるほど地殻・マントルと完全に結合して回転する状態を意味します。その意味で、後者は空気や水の地殻・マントルとの完全結合回転効果と言い換えてもよいかも知れません。そうすると、前者は空気や海水の地殻・マントルとの部分結合回転効果と言い換えることができますが、この場合の部分結合とは言うまでもなく運動量交換を意味しています。一方、地殻・マントルの内側のコアの効果は前者に属します。Core phrenology とは地形結合トルクを指し、大気力学における山岳トルクに相当するものです。また、二匹のかぶと虫は大陸移動の効果を意味していま

す。地震を伴うこれらの効果は地殻・マントル自身の変形ですから前者にも後者にも属しません。

これら以外の励起源として月・太陽による潮汐力(外力)があります。よく知られている歳差・章動はこの潮汐力(潮汐トルク)で励起される自転軸の運動です。また、潮汐力は海洋や地殻・マントルに変形をもたらす潮汐周期を持つ自転速度変動を励起します。このとき変形に伴う潮汐流による海底摩擦や地球内部摩擦は地球の自転にブレーキを掛け自転速度の永年減速をもたらします。このような外力で励起される回転変動を除きますと、他のすべての回転変動は地球システムの内部の変動で励起されます。天文学では伝統的にこれらを極運動と自転速度変動に分けて論じてきました。ここでなぜ自転軸の運動と呼ばずに極運動と呼ぶのかと言いますと、瞬間自転軸(瞬間角速度ベクトル)が北極接平面をよぎる点(すなわち地球の瞬間極)の運動が天球上の運動として天文観測されるからです。しかし、極運動と同じ自転軸の運動である歳差・章動から観測によって分離することはできません。そこで、通常、極運動の解析は歳差・章動を既知として行います。瞬間自転軸の運動は赤道軸

のまわりの角運動量変動で生じますから、極運動の解明は赤道軸のまわりの角運動量収支の解明を意味します。一方、大気大循環を支配する極軸のまわりの角運動量収支が自転速度変動を通じて解明されることは言うまでもありません。

そこで、第1図の絵の外力以外で励起される回転変動を極運動と自転速度変動に分けて整理しますと第1表のようになります。大気水圏システムは種々の時間スケールで変動していますから、天文観測される地球の回転変動もそれらが反映した種々の時間スケールを持ちます。ただし、後述しますが、極運動のチャンドラー・ウォブルは海洋を含む地球のノーマル・モード（自由振動）の一つですので他の変動とはやや異なります。地球回転の変動が大気水圏システムの変動の時間スケール帯に大きなパワーを持っていることは地球システムの理解にとって重要な意味を持ちます。なぜなら、この時間スケールが地震波と磁場の変動のそれぞれの時間スケールの中間に位置しているからです。そして、地球回転の研究の主眼は大気水圏、地殻・マントル及びコアのそれぞれの角運動量の和が保存されているかどうか（すなわち角運動量収支）を時間スケール毎に確かめることによって地球システムの力学的側面を理解することにあります。私はこの地球システムの力学的側面を「地球の力学的結合システム」と呼ぶことにしています。

2. Bigger's mind が見た地球

私の最初の研究は極の永年揺動とZ項の経年変動に関するきわめて初歩的なものでした(Naito & Ishii, 1974; Naito, 1974; etc.). 言わば、それはOort (1989)の言うBigger's mindが当時の地球回転変動現象にはじめて接した印象をただ述べたに過ぎないものです。ここで言う極とは14カ月周期を持つチャンドラー・ウォブルや年周ウォブルなどの周期変動が取り去られた極の平均位置（平均極）のことです。一方、Z項とは当時の極位置決定方程式（すなわち緯度変化の観測方程式）における経度に依らない未知変数のことで、極位置と共に緯度変化から最小二乗法で決定されるパラメーターの一つでした。といいますのも、現在の宇宙技術に基づく地球回転観測手法にはZ項は存在しないからです。当時はプレート・テクトニクスがようやく定着しつつあった頃で、この平均極の移動を大陸移動で説明しようとする試みが多方面でなされていました。調べてみますと、平均極とZ項の屈折は確かに世界の巨大地震の活動と相関があるよ

うに見えましたが、同時に調べた黒潮の大蛇行をはじめとする大気海洋の大規模変動との間にはより強い相関があることに気がきました。ちょうどこの頃はビャークネスによって提案された赤道からのテレコネクションやナマイアスによって見いだされた北太平洋における大規模大気海洋相互作用がようやく認識され、日本では黒潮システムの変動が盛んに議論されていました。

そこで、私は、平均極の移動を慣性乗積の変化にまたZ項の経年変動を地球重心の南北移動に帰せしめて、これらの間の関係を説明しようと試みたのですがうまくいきませんでした。今思うと、当時の緯度変化の観測精度はそうした議論が全く不可能なほど低かったわけです。けれども、その後の自転速度変動の議論を加えた一連の地球変動の現象学的研究は私に「大気海洋系の速い変動が固体地球の緩やかな変動を励起する」というとんでもない地球像を記憶させました(内藤, 1977; Oort, 1989). 5節でふれますが、この地球像は最近の数年の時間スケールの自転速度変動の研究で再び私を悩まします。なお、当時の緯度変化の観測データに基づく平均極は30年程度の周期変動を伴いながら北米のワシントンの方に移動していることが知られていましたが、はたして、現在の宇宙技術に基づく高精度観測データがそれらを再現するかどうかについてはデータの長さが十分でないためにまだ議論されていません。また、その間にも巨大地震が発生しているのですが、地震が極運動を励起したとの事実はまだ見いだされていないようです。

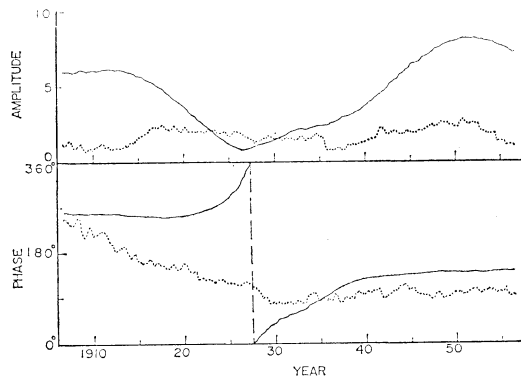
3. 極潮汐の解析

私の次の研究は地球の自由振動の一つのチャンドラー・ウォブルに回答して生じる海洋の極潮汐の解析でした(Hosoyama, Naito & Sato, 1976; Naito, 1977, 1979, 1983; etc.). チャンドラー・ウォブルによって瞬間自転軸が平均の自転軸に対して傾きますと、地球表面で受ける遠心力が変化して大気や海洋などにチャンドラー・ウォブルの周期（約443日）を持つ潮汐振動が生じます。地球表面での遠心力は余緯度を θ としますと $\sin \theta$ に比例しますから、瞬間自転軸の傾きによる地球表面の余緯度の変化 $\Delta \theta$ で生じる遠心力変化の大きさは $\sin \theta \cos \theta \Delta \theta$ に比例します。従って、潮汐摩擦がないと仮定したときにウォブルから予測される極潮汐（これを平衡極潮汐と呼んでいます）は瞬間自転軸の方向とは逆方向の経度における緯度45度で極大となるように変化します。つまり、極潮汐は球関数の P_2^1 モードの変形が約14カ月

で東向きにひとまわりするように振る舞うわけです。このとき予測される海水面変動の振幅は瞬間自転軸の傾きの大きさ（つまりチャンドラー・ウォブルの振幅）に依存して変わりますが平均して 5 mm 程度となります。ところが、世界の海水面変動データから観測される極潮汐を取り出しますと平衡極潮汐の約 2 倍の振幅を示すことが知られていました（例えば、Miller & Wunsch, 1973）。つまり、観測される極潮汐は平衡極潮汐ではないわけです。

極潮汐はチャンドラー・ウォブルに対する海洋の応答ですから、もし海洋が存在しないならば、地球はその分だけ身軽になり、チャンドラー・ウォブルの周期は短くて済み且つ運動エネルギーの消散も少なくて済みます。実際の地球には海洋が存在するわけですが、その平衡極潮汐はチャンドラー・ウォブルの周期を 30 日程度引き伸ばすことが理論的に知られています（例えば、Munk & MacDonald, 1960）。従って、もし観測される極潮汐が平衡極潮汐に一致しないならば、この不一致はチャンドラー・ウォブルの周期と減衰に効果を持っていることとなります。さらに、もし観測される極潮汐がウォブルの応答としての潮汐振動と海洋の独自の 14 カ月周期変動（すなわち非極潮汐起源の 434 日振動）とが結合した変動ならば、この極潮汐はウォブルを減衰させるばかりでなく励起することもできるわけです。そこで、このことを確認するために、私はチャンドラー・ウォブルから予測される平衡極潮汐と海水面変動の 434 日振動のそれぞれの振幅と位相の経年変化の比較を試みました。なぜなら、チャンドラー・ウォブルは第 2 図からも推測されるような特異な経年変化を示すことが知られていたからです。その結果、全世界の海水面変動の 434 日振動には平衡極潮汐に似た経年変化を持つものと第 2 図のように全く似ない経年変化を示すものが混在していることが明らかになりました。その後さらに、北太平洋の海面水温 (SST) の解析も行い非極潮汐起源の 14 カ月振動の存在を確認しました。なお、この SST の 14 カ月振動は黒潮の源流近くの低緯度西太平洋で卓越し、しかも、平衡極潮汐に対し全く逆の位相を持っています。

こうして、実際の極潮汐にはウォブルに対する応答とは異なる海洋の 14 カ月振動が含まれていることがわかりました。そうしますと、すでに見いだされていた大気の大気 14 カ月振動（詳細は、例えば、マクシモフ, 1979 参照）もウォブルに対する応答ではない可能性が考えられます。その前身、自由振動はその自由周期と同じ周期で振



第 2 図 Aberdeen (57° 9'N, 2° 5'W) における極潮汐の振幅と位相の経年変化。実線が平衡極潮汐を示し、点線が観測された海水面変動の極潮汐を示す。振幅の単位は実線が mm, 点線が cm である。チャンドラー・ウォブルの振幅と位相は実線の変化に相当する経年変化を示す。(Naito, 1977 による)。

動する外力で最も効率よく励起されますから、これら大気や海洋の非極潮汐起源の 14 カ月振動はチャンドラー・ウォブルの最も効率のよい励起源である可能性が考えられるわけです。ついでに言及すると、このときの海水面変動の解析の副産物として、世界の海水面変動に見られる種々の周期変動が互いに高調波構造を作っていて、例えば、14 カ月 (1.2 年) 振動は準 2 年振動 (QBO) などの高調波として振る舞っていることを見いだしています。後に、私はこの非極潮汐起源の 14 カ月振動や海洋の QBO などが大気と海洋が結合して生じたものであると推測しました。つまり、もし大気海洋結合モードがこのような構造を持っているならば、現在未解決のチャンドラー・ウォブルの励起源の解明は大気海洋の QBO システムのより厳密な解明の延長線上にある可能性が考えられるわけです。SST の 14 カ月振動が卓越している低緯度西太平洋はその意味でも極めて興味ある源と言えるかもしれません。しかしながら、このような大気海洋結合モードの存在を厳密に検証するためには、固体地球からのフィードバック効果を含まない大気海洋結合 GCM (大循環モデル) でこれらを再現する以外に方法がないことから、この分野においても GCM の必要性を痛感していたのですが、最近オレゴン州立大学の気候海洋結合 GCM (OSU モデル) がこの大気圧の 14 カ月振動を

再現しそれらが観測される振幅とよく一致することを確認しています (Hameed & Currie, 1989). 今後の GCM の進展に大いに期待したいところです。

4. 大気角運動量関数のルーチンの算出

極潮汐の解析を試みていた頃、私は地球回転のための大気や海洋の全地球的な観測データを4年がかりで集めるという大事業(?)にも取り組んでいました。極潮汐の解析もこのとき集めた海水面変動データに基づいたものです。しかし、この事業は私の悪戦苦闘も虚しく完全な失敗に終わりました。集められた大気変動データに基づいた一篇の論文も世に出なかったからです。失敗の原因は当時の私がグローバルな大気変動データの実際とその量の大きさに全く無知であったことにあります。つまり、グローバルな情報を意のままに操るためにはそれ相応のハードウェアとソフトウェアを備えた「システム」が不可欠であったわけです。当時の旧緯度観測所には十分なハードウェアをまた私にはソフトウェアを欠いていました。例えば、後に地球回転に関する2冊目の教科書 (Lambeck, 1980) で詳述されることとなる Lambeck らの自転速度変動に及ぼす大気変動の効果の研究は当時米国内で組織的に推進されていた大気大循環データ収集プロジェクト (Newell, Kidson, Vincent & Boer, 1972; *etc.*) をうまく利用して得られたものです。

この大気海洋データ収集事業で私はもう一つ大きな誤りを犯してしまいました。それは、当時米国立気象センター (NMC) ではすでに全球客観解析データをルーチ的に算出していたのですが、そのデータを利用するよりの NMC 担当者のアドバイスにもかかわらず、私は予算の関係で客観解析データの導入に踏み切らなかったことです。この誤った判断の原因が数値予報に対する私の無知にあったことは否定できません。数年後、FGGE (First GARP Global Experiment) データに基づいて ECMWF (ヨーロッパ中期天気予報センター) が作成した全球客観解析データから算出された極軸のまわりの角運動量収支の解析によって、数カ月未満の時間スケールにおけるコア・マントル非結合が英国のグループによって確認されるや (Hide, Birch, Morrison, Shea & White, 1980), 私は客観解析データの威力をまざまざと知らされることになります。つまり、客観解析データは「システム」が作り出した理想的ともいえる大気変動データであったわけです。後述しますが、このコア・マントル非結合とはコアがマントルと一緒に回転してい

ないことを意味します。

気象庁が全球客観解析データを算出し始めたのは1983年だったと思います。全球客観解析データを地球回転の研究に利用したいとの私の申し入れに対し当時の気象庁電子計算室 (現在の数値予報課) は快く協力してくれたのですが、地球回転の研究に実際に使えるかどうかについては疑問を持っておられたようでした。ところが、私がこの研究に取り組んで半年後、英国気象局の Hide らのグループが地球回転変動に及ぼす大気角運動量関数を提案すると同時に、ECMWF 作成の FGGE 以後数年間の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関数が観測される自転速度変動をよく説明することを示しました (Barnes, Hide, White & Wilson, 1983). ここで大気角運動量関数とは最初にふれた空気の状態再分布の効果と風による相対角運動量の効果の和 (これらは共に地球の慣性性能率と平均自転角速度の積で無次元化されている) のことです (詳細は内藤, 1988 参照). まもなく、水沢の動きを聞きつけた Hide は地球回転変動に及ぼす大気変動の効果の算出にこの大気角運動量関数を採用するよう申し入れてくると同時に「大気による地球回転励起」に関するワーキング・グループを IUGG/ IAG に組織しました。そして、私も気象庁データ担当(?) ということでそれに加わることとなりました。

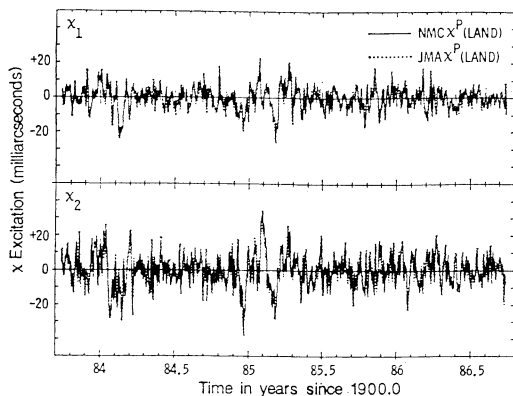
このワーキング・グループは主に次の二つの目標を持っています。第1は地球回転変動に及ぼす大気の影響を可能な限り見積もりそれを観測される地球回転変動データから除去しようというものです。これはいわば大気の衣を剥ぎ取ってコア・マントル結合トルクなどの地球内部の変動を覗き見ようとするものです。第2は数日から数週間先の地球回転変動を数値予報の予報値を使って予測しようというものです。それによってボイジャーなどの深宇宙探査船の追跡と制御 (すなわち宇宙通信) の信頼度を高めることができます。前者が大気水圏科学の固体地球科学への挑戦を意味するのに対し、後者は大気水圏科学の宇宙科学への貢献を意味しています。特に後者は我々地球人が宇宙に進出する上で極めて重要な意味を持っています。

ところで、数値予報における予報解析サイクルが出力するデータには客観解析データとそれを方程式系に馴染ませた初期化データがあります。実は Hide らが用いた全球客観解析データは初期化データでしたが、私は初期化しない客観解析データそのものを用いました。当時の気象庁が初期化データを公開していなかったからです。

しかし、このことが後の大気角運動量関数の国際比較で決定的な違いをもたらします。ECMWF が山岳によるドラッグ（例えば、重力波ドラッグなど）の効果を強めるために Envelope Mountain Model を数値モデルに実験的に取り入れたからです。その結果、ECMWF データに基づく大気角運動量関数は、例えば、主に風による相対角運動量が寄与する数カ月未満の短い時間スケールの自転速度変動をよく説明するにもかかわらず、主に空気の質量再分布が寄与するそれより長い時間スケールの極運動の季節変化（年周ウォブル）などを全く説明しない、という極めて奇妙な結果をもたらしてしまいました（例えば、Sakellarides, 1989）。つまり、Envelope Mountain Model の導入は数日程度先の天気予報の精度を上げることに貢献したのですが、逆にそれに基づく初期化データはモデルに組み込まれている山岳（すなわち地球の形）の効果を強く受け、おかしな質量再分布の効果をもたらしてしまったわけです。これに対して私達の結果が時間スケールに依らず自転速度変動のみならず極運動もよく説明することはいうまでもありません(Naito & Yokoyama, 1985; Naito, Kikuchi & Yokoyama, 1987; etc.). 後に NMC データに基づいて大気角運動量関数を算出している米国の Salstein らのグループは彼らの結果をチェックするために気象庁データに基づく私達の結果を引用しています (Eubanks, Steppe, Dickey, Rosen & Salstein, 1988)。第3図は彼らによる NMC と気象庁 (JMA) の両データに基づく大気角運動量関数の気圧項（すなわち空気の質量再分布の効果）の赤道軸成分を比較したものです。なお、気象庁データに基づく大気角運動量関数データは新しい地球回転の国際事業 (International Earth Rotation Service: IERS) を通じて広く利用されています。

5. 極軸のまわりの角運動量収支の解析

気象庁データに基づく大気角運動量関数を用いた最初の研究は季節変化における極軸のまわりの角運動量収支の解析でした (内藤・菊地, 1989; Naito & Kikuchi, 1990; etc.). 第2表はその収支決算結果を示したものです。表では VLBI で観測された自転 (角) 速度変動に対する大気水圏システムの諸効果のそれぞれの年周・半年周変化における振幅比と位相差が示されています。従って、振幅比が1.0で且つ位相差が0度のとき、角運動量収支が100% 満たされていることを意味しています。つまり、この表は大気水圏システムの諸効果が角運動量

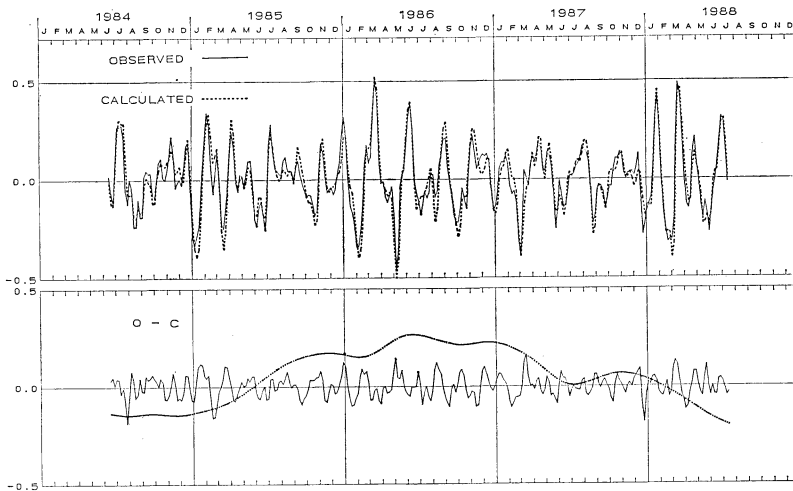


第3図 NMC データと JMA データに基づいて算出された大気角運動量関数の気圧項の赤道軸成分の季節内変動の比較。ただし、海洋上では IB-モデル(第5節参照)に基づいて算出されている。(Eubanks et al, 1988 による)。

第2表 季節変化における地球の角運動量収支決算表。位相差の単位は度。(内藤・菊地, 1989 による)。

項	年周変化		半年周変化	
	振幅比	位相差	振幅比	位相差
(1) 風速項	1.238	- 4.2	0.931	- 3.5
(2) 気圧項(NIB)	0.191	151.6	0.016	32.7
(3) 気圧項(IB)	0.157	-178.9	0.005	69.5
(1)+(2)	1.067	- 0.0	0.944	- 3.0
(1)+(3)	1.081	- 5.0	0.932	- 3.3
(4) 地表水	0.075	-178.1	0.033	-116.1
(5) 南極環流	0.008	76.5	0.018	41.8
(1)+(2)+ (4)+(5)	0.993	0.3	0.943	- 4.1
(1)+(3)+ (4)+(5)	1.008	- 5.1	0.932	- 4.4

収支に寄与する割合（寄与率）を表しているわけです。ここで、気圧項とは空気の質量再分布の効果を、風速項とは帯状風による相対角運動量の効果を、地表水とは大陸上の雪氷などの質量再分布の効果を、そして、南極環流とは南極環流による相対角運動量の効果を指しています。ただし、気圧項は海洋上の評価法が異なる二つのモデルで計算されています。一つは海洋が大気圧変動を完全に補償する Inverted Barometric Hypothesis (NIB-モデル) に基づくもので、他の一つは海洋を大陸と同じ



第4図

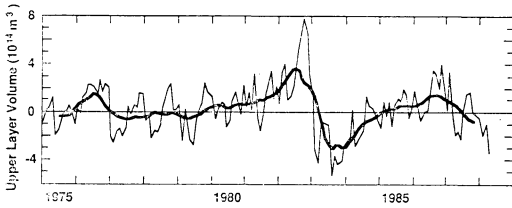
上段：自転速度の季節内変動（実線）とそれに及ぼす大気の効果（点線）の比較。これらは共に150日のハイパス・フィルターが掛けられている。
 下段：自転速度変動とそれに及ぼす大気の効果との差。太線は150日のローパス・フィルターが、細線は150日のハイパス・フィルターが掛けられている。単位は 10^{-8} ラジアンである。

ように扱う Non-Inverted Barometric Hypothesis (NIB-モデル) に基づくものです(詳細は、内藤, 1988 参照)。また、地表水の効果は Chao & O'Connor (1988) の見積もりを引用しています。ここで念頭においていただきたいことは、この表の大気水圏システムの寄与を計算するに当たって、観測される地球回転変動をコアを含まない地殻・マントルの回転変動とみなしていることです。つまり、ここではコアとマントルの間の角運動量の交換を無視できるほど小さいと仮定したわけです。前述しましたコア・マントル非結合とはこのことを指しています。

最も注目すべきことは年周変化における角運動量収支が地球システムの力学的側面の理解にとっていくつかの重要な事実を明らかにしていることです。第1はここで引用された大気水圏システムの全効果が収支をほぼ完全に満たしていることです。このことは1年の時間スケールでもコア・マントル非結合が成立していることを示しています。実は、コア・マントル非結合が1年の時間スケールで成立していることは理論的には大分前から知られていました。チャンドラー・ウォブルの周期(約1.2年)の理論的解釈などの大前提の一つであったからです(詳細は、例えば、Smith & Dahlen, 1981 参照)。従って、この結果は大気水圏システムの観測データに基づい

て角運動量収支の立場から得られた1年の時間スケールにおけるコア・マントル非結合の最初の確認を意味しています。第1表においてコアの寄与の1年未満の欄を空白としたのはこの事実に基づいているわけです。第2は帯状風が約24%も過剰に寄与していることです。私はこれを大気の時節変化における Super Amplitude Rotation と呼んでいます。第3はこの帯状風の過剰な寄与が空気質量再分布と地表水の寄与でほぼ完全に相殺されていることです。つまり、地球の角運動量収支は風だけで満たされているのではなく水圏も寄与しているわけです。しかし、なぜか南極環流の寄与は極めて小さいようです。一方、半年周変化における角運動量収支では大気水圏システムの寄与に約6%の不足がみられます。この不足は我々の赤道成層圏と南半球における風の理解がまだ十分でないことを示唆しているものと考えられます。以上は季節変化における場合ですが、これより時間スケールが短くなると水や空気質量再分布の寄与は徐々に少なくなり、そして、大気大循環の教科書が示すような風だけが寄与する角運動量収支は10日程度未満の時間スケールで実現していると私は考えています。

これらの年周・半年周変化とトレンドをデータから差し引きますと自転速度の不規則変動が得られます。第4図の上段はそうして得られた自転速度の観測値とそれに



第5図 赤道太平洋 (15° N-15° S) における海洋上層の体積変動。(Enfield, 1989による)。

及ぼす大気の効果の計算値のそれぞれの不規則変動を比較したものです。また、図の下段はそれらの差 (O-C) の変動を示したものです。まず、上段の150日のハイパス・フィルターを通した二つの不規則変動をみますと、大気角運動量関数に基づいて計算された自転速度の季節変動がVLBIで観測されたそれによく一致していることがわかります。計算値の大半は中低緯度の帯状風の寄与ですから、自転速度の季節内変動が30日~60日振動の反映であることはほぼや疑う余地はありません。次に下段の150日のハイパス・ローパスの二つのフィルターを通したO-Cの変動を見ますと、季節内変動と同じ程度の時間スケールの速い変動に加えて、1986年で極大を持つ5年程度の時間スケールの緩やかな変動が見られます。このうち、速い変動はVLBIによる自転速度変動の観測が不等時間間隔で行われているために生じた観測値と計算値の時間軸の不一致による位相のずれに主に起因していますが、この変動の中には大気から固体地球に輸送される角運動量の海洋による遅れも含まれているはずで、一方、ここでは示されていませんが、緩やかな変動は主に大気の効果のみに由来しています。といいますのは、ここでは示されていませんが、計算された大気効果が1986年を境として減少から増加に転じているにもかかわらず、VLBIで観測された自転速度変動には何らの変化も見られないからです(内藤・菊地, 1989第1図参照)。従って、この緩やかな自転速度変動は、もし大気効果が100%見積もられているならば、海洋あるいはコアで励起されていると推測できます。

そこで、この緩やかな自転速度変動の励起源として、まず、第1候補の海洋について考えてみますと、すぐ気付く現象にENSOに伴う赤道太平洋の海洋変動があります。しかも、図の期間ではEl Ninoは1986年に出現しています。つまり、自転速度変動の極大でEl Ninoが出現しているわけです。El Ninoの出現は赤道太平洋

全域にわたる海洋上層部の体積変動(これは海水面変動に相当します)の極大とよい相関があることはWyrткиによって示されていますから、その図をここで再現しますと第5図のようになります(Enfield, 1989)。明らかに第4図下段の緩やかな自転速度変動は赤道太平洋における海洋質量変動と同位相で変化していることがわかります。ところが、赤道での質量増加は慣性能率の増加を通じて自転速度の減少をもたらすはずですから、これらの関係はあきらかに矛盾します。また、この自転速度変動を水の質量再分布の効果に帰せしめると、全海洋で10cmのオーダーの海水面変動に相当する水の南北循環が存在しなければなりません。このことは自転速度の年周変化の約8%を占める地表水の寄与が約1cmの海水面変動に相当する水の高陸循環に由来することからも容易に理解できます。従って、ENSOを伴う赤道太平洋の海洋変動がこの自転速度変動を説明しないことは明らかです。

そうしますと、この自転速度変動の励起源は第2候補のコアに帰せられることとなります。この場合、コア・マントル結合トルクを反映した5年程度の時間スケールの地球磁場の変動が存在するかどうかの一つの鍵となりますが、残念なことに、マントルが電気的不完全伝導体であるためにこの程度の短い時間スケールの磁場の変動はマントルに遮蔽され、地表でこれを観測することは困難と考えられています(例えば、Lambeck, 1989参照)。一方、コアとマントルは1年の時間スケールでは非結合を示していますから、この緩やかな自転速度変動がコア・マントル結合トルクで励起されていると考えますと、コア・マントル境界(CMB)は「非結合から結合への遷移が2, 3年程度の極めて狭い時間スケール帯で起こる」という奇妙な結合特性を持つこととなります。

このように、この緩やかな自転速度変動の励起源として、海洋が完全に除外され、代わって、コアが完全に受け入れられたわけではありません。2節でふれましたが、私は15年ほど前にこれとよく似た問題に遭遇しています。しかし、15年前と現在とは大きな違いがあります。現在の地球回転の観測精度が当時に比べ格段に高いからです。従って、この場合、もしデータに問題があると考えますと、自転速度変動から除去したはずの大気の効果の精度が問題となります。つまり、第4図の下段の緩やかな自転速度変動は大気の効果の除去が不完全なために見掛け上生じた可能性があるわけです。一般に、大気の相対角運動量変動の精度は、回転半径が最大で、地

衝風が成立せず、また観測データが中緯度には極度に不足している、赤道近傍に大きく依存しているはずで、しかも、赤道成層圏では QBO などの数年程度の時間スケールの帯状風の緩やかな変動が卓越しています。そこで、もし赤道近傍における帯状風の緩やかな変動量が客観解析データに反映していないならば、観測された自転速度の1986年における不変は大気全体の相対角運動が「実際は」不変に保たれていたことの反映と推測することができます。つまり、ここでの大気の効果は主に中高緯度における帯状風の反映に過ぎない可能性があるわけです。従って、ジグソーパズルにも似たこの問題の最終的な決着は今後の「低緯度における帯状風の数年程度の時間スケールを持つ緩やかな変動」の理解の向上に負っているといわねばなりません。そして、もし低緯度における帯状風の緩やかな変動の不完全さが高々10%程度を越えないことが明らかになりますと、ここでの自転速度変動はコア・マントル結合トルクに帰着される可能性が強くなりますが、ENSO に密接に関係する海洋変動も無視できません。いずれにしても、そのとき、我々は現在の地球観を大きく変えねばならないかもしれません。

6. 赤道軸のまわりの回転変動

水沢に緯度観測所が開設されたのは1899年末ですから、地球回転の研究は今年で90年になります。この長い歴史の中でも Earth Rotationists が Meteorologists と共有した最初のトピックスは上述しました自転速度の30日～60日振動（季節内変動）ではないかと思えます。けれども、極運動にも季節内変動がないわけではありません（第1表参照）。第3図の大気角運動量関数の赤道軸成分に見られる20日程度の時間スケールの変動が赤道軸のまわりの回転変動を励起しているからです。しかも、極運動は自転速度変動の約100倍の大きさの変動を持っています。それにもかかわらず、極運動の季節内変動の解明が自転速度のそれより遅れたのにはそれなりの理由があります。そこで、現在の私の最大の関心事である極運動（すなわち、赤道軸のまわりの回転変動）について少々述べておきたいと思えます。

極運動の大半は空気や水の質量再分布の効果で励起されます。この場合の質量再分布の効果とは地球の慣性乗積の変動を意味しますから、それを極座標で表現した球関数の P_2^1 モードの質量分布変動に極運動は強く依存します。しかも、極運動には地球の自由振動であるチャン

ドラー・ウォブルが存在するために、励起された極運動はそれと共鳴して増幅されます。その結果、チャンドラー周期（14カ月）近傍の周期を持つ0.1 mb程度のほんのわずかな P_2^1 モードの圧力変動でも極運動を容易に励起します（3節参照）。例えば、第3図の大気角運動量関数の赤道軸成分の変動は1.5 mb程度の P_2^1 モードの気圧変動に由来しています。従って、大陸上の気圧変動の寄与の評価は可能であっても、地球表面の3/4を占める海洋底での微弱な圧力変動の寄与の評価は極めてむずかしいといわねばなりません。大気と海洋の圧力平衡は風の吹き寄せで生じる海水質量再分布も考慮しなければ成立しないからです。つまり、極運動の季節内変動の解明が遅れたのは主に大気変動に応答する海洋の時空運動特性がまだ未解決であることによっているわけです。加えて、風の南北成分による赤道軸のまわりの相対角運動量変動が十分な精度に達していないことも要因の一つです。同様のことはさらに長い時間スケールの年周ウォブルやチャンドラー・ウォブルの大気による励起についてもいえます。これに対して大半が帯状風に依存する自転速度変動の解明が容易であることは明らかです。

極運動を励起するほどのグローバルな大気波動にプラネタリー（ロスビー）波があります。現在では種々のモードのプラネタリー波（球面波）の存在が理論的にも観測的にも明らかにされていますが（例えば、広田, 1987）、厳密に言えば、それらの大部分が極運動を励起します。海洋が地球表面の大半を占め、しかも、種々のモードが重ね合わさった複雑な分布を持っているからです。つまり、大気プラネタリー波は、大陸分布、大気変動に応答する海洋の時空運動特性、慣性乗積（ P_2^1 モード）、およびチャンドラー・ウォブルの周波数応答関数（すなわち、マントルの非弾性）といった、4つの時空フィルターを経て極運動を励起しているわけです。極運動は大気プラネタリー波の一種のセンサーといえるかもしれません。そこで、私はこのような大気プラネタリー波の役割を第1表のようにまとめてみました。すなわち、20日程度の周期の極運動は主に移動性（？）プラネタリー波で、また、年周ウォブルは同じ位相速度で東進・西進するプラネタリー波の干渉で生じる停滞性プラネタリー波で励起されると考えたわけです。最近、Volland (1989) はこれと同じ考えに基づいて線形モデルによる年周ウォブルの理論的説明を試みています。この場合、気圧分布による慣性乗積の変動に加えて、「風の南北成分の極めて緩やかな変動生じる赤道軸のまわりの相対角

第3表 地球の回転変動を通じて得られた大気水圏システムと固体地球システムの理解の変遷と地球回転の研究の今後の役割。

大気水圏システム		固体地球システム	
1960年代	大気圧	弾性変形, CMB	電磁結合
1970年代	(海洋潮汐荷重), 風	(流体核共鳴),	マントル非弾性
1980年代	大気数値モデル	コア・マントル非結合	
1990年代	雪氷陸水, 海洋循環	CMB 地形結合,	マントル・レオロジー

CLIMATE DYNAMICS

—

EARTH ROTATION
(DIAGNOSIS 10⁻⁹)

—

GEODYNAMICS

運動量の季節変化」も年周ウォブルの励起に寄与していなければなりません、残念なことに、このような風の南北成分の緩やかな変動を現在の客観解析データから見いだすことはまだ困難といわねばなりません。大気モデルのより一層の向上に期待しなければなりません。一方、第3節でふれましたチャンドラー・ウォブルを励起する14か月近傍の周期を持つ大気海洋結合モードもこのような構造を持つプラネタリー波の干渉で生じている可能性が考えられます「ロスビー波の系譜」は極運動が完全に解明されるまで閉じないのかもしれない。

7. 地球の力学的結合システム

地球システムは大気水圏システムと固体地球システムの二つのサブ・システムで構成されています。このうち、大気水圏システムはしばしば気候システムとも呼ばれ、従って、その研究は「気候力学 (Climate Dynamics)」と呼ばれることはすでに知られている通りです。そこで、もう一方の固体地球システムの研究を「地球力学 (Geodynamics)」と呼ぶことにしますと、地球回転の研究は気候力学と地球力学のインターフェースの役割を果たしていることとなります。第3表は地球回転の研究が捕えてきた大気水圏システムと固体地球システムの理解の変遷を示したものです。ところが、近年の観測精度の飛躍的向上によって、今後の地球回転の研究は単なる情報のインターフェースにとどまらず言わば Diagnosis の役割に移行すると私は考えています。現在の Diagnosis の精度を測地学でよく使われる尺度で表しますと 10⁻⁹ となります。これはちょっと分かりにくいので、例えば、これに地球の半径を乗じると、0.6 cm 程度になります。つまり、現在の宇宙技術手法はこの程度の地球の変形をとらえることができるわけです。ちなみに、大気圧による地球の荷重変形や山岳トルクによる地球のねじれ

変形の大きさは共に 1 cm のオーダーです。従って、今後 VLBI などの観測精度がもう一桁向上しますと、慣性乗積や慣性能率をもたらすような従来の回転モードの地球の変形に加えて、このような非回転モードの地球の変形も地球力学の主要な研究課題となると考えられます。なぜなら、1節でふれましたように、これら大気水圏システムの変動で励起される地球の変形の時間スケールが地震波の時間スケールと磁場の変動の時間スケールの中間に位置しているからです。

そこで、最後にもう一言ふれておきたいことがあります。それは地球回転の研究が気象庁などの数値予報システムの開発に極めてよく似たシステム・サイエンスであるということです。例えば、数値予報システムに地球回転の力学フレームを組み込みますと、それはそのまま1節でふれました地球の力学的結合システムとなります。この場合、大気水圏システムの既知の変動をこのシステムに入力しますと出力として固体地球システムの情報が得られます。上述しましたプラネタリー波とチャンドラー・ウォブルはそれぞれこのシステムの入出力に相当しています。つまり地球回転や地球力学の研究を今後さらに発展させるためには、その研究形態を地球システム科学にしっかりと組み込む必要があります。それによって、地球システムの力学的側面の理解は確実に進展すると私は考えています。

極度に細分化された我が国の地球科学にあっては地球回転の研究は育ちにくい学際分野の一つです。私の研究をそうした分野の壁を乗り越えて支えて下さった多くの先輩研究者に心から感謝します。また、角運動量収支の研究の基礎データとなった気象庁データに基づく大気角運動量関数データは今や世界の Earth Rotationists から最も信頼されている情報の一つです。長期にわたって協

力と助言をいただいている気象庁数値予報課にあらためて厚く感謝します。そして、水沢の気象データ管理官であり私の共同研究者でもある菊地直吉氏に感謝します。

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. & P.O. O'Connor, 1988 : Global surface-water-induced seasonal variations in the earth's rotation and gravitational field, *Geophys. J.*, 94, 263-270.
- Enfield, D.B., 1989 : El Nino, past and present, *Rev. Geophys.*, 27, 159-187.
- Eubanks, T.M., J.A. Steppe, J.O. Dickey, R.D. Rosen & D.A. Salstein, 1988 : Causes of rapid motions of the earth's pole, *Nature*, 334, 115-119.
- Hameed, S. & R.G. Currie, 1989 : Simulation of the 14-month Chandler wobble in a global climate model, *Geophys. Res. Lett.*, 16, 247-250.
- Hide, R., N.T. Birch, L.V. Morrison, D.J. Shea & A.A. White, 1980 : Atmospheric angular momentum fluctuations and changes in the length of day, *Nature*, 286, 114-117.
- 広田勇, 1987 : ロスビー波の系譜. 気象研究ノート, 156, 1-11.
- Hosoyama, K., I. Natio & N. Sato, 1976 : Tidal admittance of pole tide, *J. Phys. Earth*, 24, 51-62.
- Lambeck, K. 1980 : *The Earth's Variable Rotation*, Cambridge Univ. Press.
- _____, 1989 : The earth's variable rotation: some geophysical causes, in *Reference Frames*, (eds) J. Kovalevsky *et al*, Kluwer Academic Publ.
- マクシモフ, N. B., 1979 : 地球・月・太陽による海洋・気候の長期変動, (高野健三・遠藤昌宏訳), 東海大学出版会.
- Miller, S.P. & C. Wunsch, 1973 : The pole tide, *Nature Phys. Sci.*, 246, 98-102.
- Munk, W. & G. MacDonald 1960 : *The Rotation of the Earth*, Cambridge Univ. Press.
- Naito, I. & H. Ishii, 1974 : Secular variations and spectral structures of Z-term in latitude variations, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 26, 485-494.
- _____, 1974 : Mean pole, Z-term and Kuroshio, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 30, 168-178.
- _____, 1977 : Secular variations of pole tide, *J. Phys. Earth*, 25, 221-231.
- _____, 1979 : Effects of the pole tide on the Chandler wobble, *J. Phys. Earth*, 27, 7-20.
- _____, 1983 : Responses of the ocean of the Chandler wobble, *Marine Geodesy*, 7, 345-357.
- _____ & K. Yokoyama, 1985 : A computation of atmospheric angular momentum functions for the earth's rotation based on JMA global analysis data, *Proc. Int. Conf. on Earth Rotation and the Terrestrial Reference Frame*, 434-439, Ohio State Univ.
- _____, N. Kikuchi & K. Yokoyama, 1987 : Results of estimating effective atmospheric angular momentum functions based on the JMA global analysis data, *Publ. Int. Latit. Obs. Mizusawa*, 20, 1-11.
- _____ & N. Kikuchi, 1990 : A seasonal budget of the earth's axial angular momentum. *Geophys. Res. Lett.*, in press
- 内藤勲夫, 1977 : 大気・海洋と地球回転, *天気*, 24, 645-669.
- _____・菊地直吉, 1988 : 地球回転と大気海洋物理学, その新しい連携. *天気*, 35, 291-311.
- _____, 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.
- Newell, G.E., J.W. Kidson, D.G. Vincent & G.J. Boer, 1972 : *The General Circulation of the Tropical Atmosphere and Interactions with Extratropical Latitudes*, The MIT Press.
- Oort, A.B., 1989 : Angular momentum cycle in the atmosphere-ocean-solid earth system, *Bull. American Meteorol. Soc.*, 70, 1231-1242.
- Sakellarides, G., 1989 : Atmospheric effective angular momentum functions for 1986-1987, *Res. Dept. Tech. Rep. No. 62*, ECMWF.
- Smith M.L. & F.A. Dahlen, 1981 : The period and Q of the Chandler wobble, *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 64, 223-281.
- Volland, H., 1989 : On the seasonal components of polar motion, *Geophys. Res. Lett.*, 16, 303-305.