

# 地球回転と大気運動

内 藤 勲 夫\*

## 1. はじめに

今、テストコース上を疾走する試走車をカメラで懸命に追跡している人達がいる。彼らは開発されたばかりの高性能カメラで試走車を外からモニターするチームなのである。試走車の中にはもう一つのチームがいて、エンジンなどの動力部のモニターを担当しているはずである。さて、このカメラは車軸の運動、タイヤの回転速度や変形はもとより、“風圧による車体の変形”までとらえることのできる高分解能・高速度カメラである。一方、車内のレコーダーには動力部に生ずる歪みなどの微細なデータがおさめられるはずである。テストコースのかたすみで気象条件のモニターを担当している筆者もこのあとのデータ解析に大きな期待をかけている。なぜなら、この試走車はあらゆる人達に愛用されるよう設計されたからだ。

ところで、地球は宇宙のテストコースを疾走しているこの試走車に似ていて、その性能を探るためには監視の手を一時でも休めることはできない。中でも地球の回転と変形のモニターは最も重要な役割を担っており、数年ほど前にこの高性能カメラに匹敵するような、新しい技術も開発された。高精度・高時間分解能で地球を外から監視することのできる VLBI (超長基線電波干渉測位)、SLR (人工衛星レーザー測距)、GPS (汎球測位システム) などの宇宙技術手法がそれである。そこで、これらが本格的にデータをはじき出す前に、地球の回転と変形にとって外力となる大気運動の役割について今後の展望をまじえながら紹介しておくことにしよう。

## 2. 角運動量法とトルク法

話を進める前に、地球回転の基本的考え方についてふれておこう。今、回転する地球に固定された直交座標系の原点を地球の重心近くに置き、その一つの軸を平均自転角速度ベクトルの方向 (平均の北極の方向) にとると、瞬間自転角速度ベクトルの方向と大きさのそれぞれの変動は北極の運動 (極運動) と自転角速度 (Length of Day: LOD) の変動として観測され、これらは地球回転パラメーター (ERP) と呼ばれている。一般に、物体の回転は「物体の角運動量変化が外からのトルクに等しい」とするオイラーの式で展開されるから、これを地

球に適用すると、月や太陽の潮汐力などの外力 (トルク) が作用しないとき、オイラーの式は大気・海洋・固体地球系の角運動量保存式となる。従って、観測される ERP の変動を説明するためには、固体地球に相対的な大気や海洋などの角運動量変化を見積れば良いわけである。マングとマクドナルド (1960) は地球の平均角運動量で無次元化されたこれらの角運動量の変化を ERP の運動に対する外力に相当するとして励起函数と名付けた。

さて、回転流体の角運動量は速度と質量分布に依存する。従って、大気角運動量を見積る場合、固体地球と分離して運動している風の効果と固体地球に密着して回っている質量 (気圧) の効果とに分けて見積ることができる。このように、角運動量の見積りから ERP の変動を解明する立場を角運動量法と呼び、現在の最も有効な手段となっている。しかし、この方法は固体地球と大気や海洋などとの境界で生じているはずの角運動量交換の過程を全く考えていない。言い換えれば、地表に作用する風などのストレス (運動量輸送) を知らなくとも良いわけである。そこで、角運動量を考えるシステムを固体地球で閉じるようなオイラーの式を作ると、風などのストレスはトルク (外力) となり、このトルクが励起函数そのものとなる。このように、大気や海洋の運動の効果をトルクとみなして地球回転を輪ずる立場をトルク法と呼んでいる。

このトルク法と前述の角運動量法は地球上におけるナビエ・ストークスの粘性流体の方程式を介して全く同一のものである。ただし、「地球は赤道方向にふくらんだ回転楕円体である」ことが条件である。なぜなら、扁平な地球の表面 (ジオイド) に加わる気圧は地心方向の成分の他に赤道面に平行な成分を持ち、これが赤道面の軸のまわりのトルクとなって極運動を励起するからである。地球が完全な球体の場合にはトルクは生じない。トルク法ではこの項を遠心力項と呼び角運動量法での質量 (慣性乗積) 項に対応する。一方、角運動量法での風の効果はトルク法での地表摩擦ストレスや山岳におよぼす圧力などの効果に対応することは言うまでもない。このように、地球回転とは扁平地球の回転のことであって、気象学などの一部の地球物理学との立場の違いは地球の扁平率の存否にあるわけである。

## 3. 気象起源の地球回転パラメーター

地球回転の変動の励起源は、何も大気運動に限られた

\* 緯度観測所 Isao Naito: The Earth's Rotation and Atmospheric Motion

ものでなく、海洋変動、巨大地震、流体核の運動など、人類が今まで感知したことのある地球内外のすべての地球規模の変動現象である。しかし、その中でも最も豊富な知識と観測データを有する励起源は大気運動であろう。しかも、大気は地球の最も外側にあるため、地球回転の変動を励起するのに最も効率の良い位置にある。ついでに言及すると、大気は地球の構成の中で太陽放射を運動エネルギー源とする最も活動的な物質でもある。従って、地球回転を通じて地球内部の研究をさらに前進させるためには、大気運動によるすべての効果を定常的に算出し、これらをオイラーの式に入力して得られる応答出力、つまり、大気運動で励起された ERP の変動を観測された ERP の変動から除去しておく必要がある。その結果、まるはだかの固体地球の回転変動を通じて海洋変動や巨大地震などのふるまいを見ることができる。その意味で、大気運動から計算して得られる ERP はもう一つの ERP となるもので、ここでは気象起源の地球回転パラメーター (MERP) と呼ぶことにしよう。ただし、MERP の算出の際にはチャンドラー運動の周期と減衰係数 (Q 値) を定めておかねばならないが、これらの定数の決定はむしろここでの研究対象の一つでもあるから、ちょっと考えると矛盾するように思われる。しかし、この矛盾はいずれもコンピューターが解決するはずである。

MERP を ERP の精度で定常的に算出する場合の最も困難な作業は気象観測データを一樣な 3 次元格子点データとして規格化することである。ところが、10 数年ほど前に気象学分野における国際研究事業として知られる GARP (地球大気開発計画) が活動を開始し、その総まとめとして FGGE と略称される地球規模の気象観測実験が実施され、そのときはじめて MERP の算出に耐える気象要素の 3 次元格子点データがヨーロッパ中規模天気予報センター (ECMWF) で作成された。地球回転分野の近年の国際研究事業、MERIT (地球回転の監視と観測・解析技術の相互比較) がはじまる前年のことである。もっとも、米国の国立気象センター (NMC) はそれ以前にすでに同様のデータを作成していたが、MERP の算出には精度が不十分と考えられていた。その後、この事業は日本の気象庁 (JMA) でも 1984 年 3 月から実施されている。これらのデータは、気象要素間の物理的関係をたくみに利用しコンピューターで最小 2 乗法的に決定されるので、全球客観解析データと呼ばれている。

このデータから、角運動量法にもとづく大気励起関数を見積って、MERP の算出を最初に試みたのは EC の研究グループである (Barnes, Hide, White & Wilson, Proc. R. Soc. Lond. A387, 31-73, 1983)。彼らは、マ

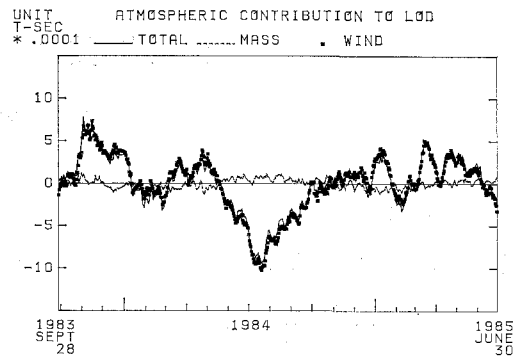


図1 LOD (1日の長さ)の変動におよぼす風 (Wind)、質量 (Mass) 及びそれらの和 (Total) のそれぞれの効果の変動。気象庁全球客観解析データによる。

クとマクドナルドの時代では不可能であった風の午前面成分なども取り込めるオイラーの式の積分解法を独自に開発し、FGGE 期間中の ECMWF 作成の 6 時間毎の全球客観解析データから MERP を算出した。これを機に IUGG と IAG はこの事業を国際的に推進するために「大気による地球回転励起」と呼ばれるワーキング・グループを作った。そして、気象庁データにもとづいて MERP の算出を独自に試みていた筆者もこれに合流することとなった。

図1は自転速度変動におよぼす大気の質量分布変化 (Mass)、風の変化 (Wind) 及びそれらの和 (Total) のそれぞれの効果を気象データから算出し LOD 換算で示したものである。つまり、これらは MERP の自転速度成分である。図から、風による角運動量変化の寄与が全体を支配し、質量 (気圧) 分布変化の寄与は高々 10% 程度にとどまっていることがわかる。ただし、この計算では気圧変化に対する海洋の応答が一様に Isostatic であると仮定した。これらの全効果 (Total) を観測された LOD の変動と比較すると図2のようになる。実線の AAM と記されている変化が MERP の LOD 成分で、他の 2 つは光学位置天文観測データから IPMS が決定した LOD と SLR データからテキサス大学宇宙研究センター (CSR) が決定した LOD である。ただし、これら 2 つの観測データには MERIT 規準と呼ばれる海洋を含むモデル地球における潮汐変形の効果があらかじめ除去されて含まれていない。その結果、大気の効果は観測によく一致し、それらの差が 0.1 m sec のオーダーの範囲内にあることがわかる。ちなみに、気象庁 (JMA) と NMC のそれぞれのデータにもとづく風による角運動量の寄与を比較すると図3のようになる。MERP にはこの自転速度成分のほかに極運動成分もあるが、それらを厳密に算出するためにはもうしばらく気象観測データを蓄積しなければならない。これは前述したチャンド

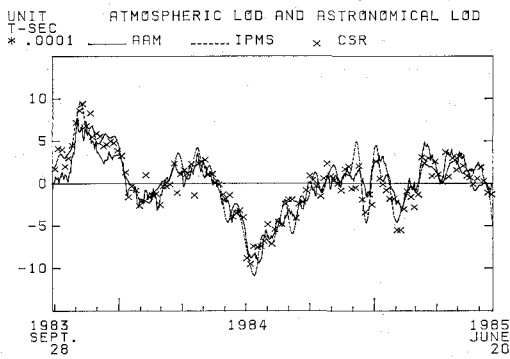


図2 LODの変動とそれにおよぼす大気角運動量変動(AAM)との比較。

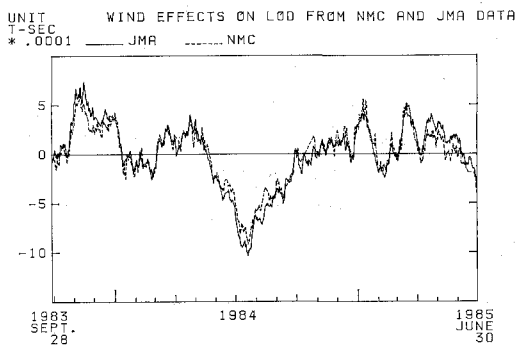


図3 気象庁(JMA)と米国立気象センター(NMC)のそれぞれのデータにもとづくLODにおよぼす風の効果の比較。

ラー運動の2つの未知パラメーターの決定の問題がからんでいるからである。

#### 4. 高精度・高時間分解能地球回転データ

ところで、図2をよく見ると、自転速度変動と大気角運動量変動の両方に30~40日程度の周期的な変動が存在していることに気付く。今、大気はその平均風速(≈10 m/sec)程度の速度で運動していると考え、この速度で地球を一周するのに要する時間は30~40日程度となる。そして、大気の運動エネルギーの大部分はこの時間スケールより短い時間帯に集中しているのである。つまり、この30~40日は大規模な大気運動の平衡(調整)時間に相当するわけで、大気大循環論において現在最も注目されている時間スケールの一つである。一方、地球回転の立場から見ると、これより短い時間帯は言わば大気・海洋・固体地球系における回転運動の“消散時間帯”とでも呼ぶべき全く未知の時間帯であり、後述するように、今後最も重視される時間帯の一つである。

さて、図2のような比較を少くとも数年以上続けると

どうなるだろうか。実は、大気は図2に見られる季節変化の約2倍の大きさの東向きの角運動量を常に持っているのであるが、図2ではそれが除去されていたのである。つまり、大気はその分だけ固体地球より早く回っていることになるが、その貯えは固体地球の貯えに比べればほんのわずかであるから、大気が受け持つ自転速度変動は高々季節変化の2倍程度の大きさにとどまり、それより大きなしかも長い時間スケールの自転速度変動は海洋や流体核などの容量の大きな励起源に求められねばならない。その結果、図2で見られる現在の一致はいずれ時間と共に大きくくい違いを見せるはずである。問題はどの程度の時間スケールからくい違いが現われるかにあり、実はMERPを定常的に算出するねらいの一つがここにあるわけで、そうした積み重ねの結果、海洋や流体核などの角運動量変動の大きさとその時間スケールが明らかにされるわけである。以上のシナリオでは角運動量交換の過程そのものについて全く知る必要がなく、また、同様の算出を海洋上に空白がまだ残る現在の気象データから前述したトルク法で見積ることも大変困難である。ところが、ここ数年来、状況は大きく変わりつつある。はじめにふれたVLBIなどの宇宙技術を利用した新しい地球回転監視手法が登場したからである。

これらは次のような優れた特徴を持っている。まず、(1). 従来の手法より2桁ほど高精度(≈0.001, 1 cm)であること、(2). 高時間分解能(≈1時間)のデータを得ることができること、そして、(3). それらが3次元(幾何的、物理的)測定で決定されること、などである。その結果、(A). 局所的な基準系を結合してそれらを地球基準系の下で監視すると同時に、(B). 地球回転の監視も行う、と言う地球のグローバル・ダイナミックスの解明にとって極めて基本的な役割を果たすことができる。言い換えれば、低精度の従来の手法が地球をただの回転体としてとらえていたのに対し、新手法は歪みながら回る変形回転楕円体としてとらえることができるわけである。しかも、前述した大気・海洋・固体地球系における回転運動の消散時間帯での観測が可能であることから、大気の活動的なストレスを受けている状態での固体地球の表面や内部の変形を検出することができる。ついでに言及しておく、大気のストレスで生ずる地殻の歪みの大きさは1 cmのオーダーと考えられ、これは新手法で容易に検出される大きさである。ところが、従来の角運動量法では、海洋の効果をExplicitに取り入れることができないから、海洋のストレスによる固体地球の変形を見積ることはできない。従って、海洋上と大陸上で別々に評価が可能なトルク法が必要となるわけで、その最初の成果も海洋の地球規模のふるまいの検出となるはずである。

こうして、地球の回転と変形の新しい監視手法と今後の気象観測情報の充実によって、長い間地震波と潮汐に頼るほかなかった短時間スケールにおける地球力学情報のギャップが埋められることとなり、これらの時間スケールにおける地球力学上の実証の積み重ねによって、チャンドラー運動の励起源をはじめとする未解決課題が解明されるばかりでなく、今までに想像もおよばなかった新しい地球像が描き出されるだろう。特に、地球の形状の変化（つまり、海水面や極氷などの変動）と地球回転の同時モニターは、極の30年程度の振動の可否や自転速度の数10年変動の励起源などを解決に導くほか、大気・海洋・陸水系の物理学における現在の最大の課題と言われる数10年程度の時間スケールの気候変動の研究と予測にも大きなImpactsを与えるはずである。なぜなら、新手法と気象情報の連携は水と角運動量の循環に依存する気候変動の原因・過程・結果の全側面をとらえることができるからである。その際、従来の気象観測データの客観解析手法に時間を考慮した4次元客観解析手法を導入し、角運動量法だけでなくトルク法にもとづくMERPの高時間分解能化も計らねばならないことは言うまでもない。そうした過程を通じて、はじめて地球

回転を励起する巨大地震の存在を確認することができるのである。また、そのような高精度・高時間分解能データは大気・海洋・流体核系の運動を線型問題から非線型問題へ進ませる最初のきっかけを与える役割を果たすことになるだろう。その結果、地球内外のエネルギー収支も従来の角運動量収支程度の確からしきで論じられることになるだろう。

## 5. おわりに

海洋潮汐効果が除去された地球潮汐の観測データからは“流体核共鳴”と呼ばれる現象が検出されつつある。今、地球から大気の皮をはぎ取ったら一体何が顔を出さるだろうか。それにはもうしばらく時間がありそうだが、このシナリオの行き着く先も大変楽しみである。

天文学や地球物理学は時間軸上の蓄積科学でもある。毎日の小さな積み重ねが21世紀への大きな遺産となる。この報文の主題である大気角運動量変化もそうした日頃の作業（ルーチン）のたまものである。この誌上を借りて、全球客観解析データの利用に際し協力いただいた気象庁数値予報課に対し敬意をこめて感謝する次第である。

## 雑 報

### 小惑星 1986 DA と 1986 EB

静岡市の鬼沢 稔氏は1986年2月16日に撮影したフィルム上で、異状な運動をする小惑星を発見した。清水市の浦田 武氏により、このフィルムから小惑星の位置が測定され、IAUの小惑星中央局に報告された。IAUでは1986 DAと仮符号を与えた。1986年2月5日～3月16日までの33個の位置観測から得られた軌道要素は次の通りであり、火星軌道の内側に入り込むアモール型のものである。(MPC 10545)

Epoch=1986年6月19.0 ET

$M = 15^{\circ}09'49''$

$\omega = 126^{\circ}7'16.12''$	} 1950.0	$a = 2.8163300$
$\Omega = 64.53707$		$e = 0.5860153$
$i = 4.29910$		$P = 4.73$ 年

日本人による特異小惑星発見の第1号である。

次にアメリカのシューメーカー夫妻は1986年3月4日 UT にパロマー山天文台の46 cm シュミット望遠鏡で、高速で移動中の小惑星を発見した。IAU小惑星中央局では、この小惑星に1986 EBという仮符号を与えた。1986年3月4日～3月20日の間の12個の観測か

ら求められた軌道要素は次の通りで、これは地球軌道に近いアテン型に属すると考えられる。(MPC 10545)。

Epoch=1986年3月11.0 ET

$M = 163^{\circ}28'56''$

$\omega = 359.31759$	} 1950.0	$a = 0.9738415$
$\Omega = 358.03811$		$e = 0.2806237$
$i = 23.41216$		$P = 0.96$ 年

これら2個の地球に接近するタイプの小惑星の赤外線観測がジェット推進研究所のデデスコ達によってハワイのNASA 3 m 鏡とキットピーク国立天文台の1.3 m 鏡で行われた。反射能や測光のデータから、この2個の小惑星はM型に分類されるものであることが判明した。

小惑星は大別するとコンドライトを主成分とするらしいC型と、シリケートを主成分にするらしいS型、そして(金属ニッケル鉄)を主成分とするらしいM型になる。そしてC型とS型がほとんどを占めている。特異小惑星に現在までではC型とS型しか見つかっていなかったのが、今回の観測からM型の特異小惑星も存在することが初めて確認されたことになる。ついでながら1986 EBの直径は $2.0 \pm 0.1$  km、1986 DAの直径は約2.5 kmという値が求められたという。

(香西洋樹)