

地球の角運動量収支とコア・マントル非結合*

内藤 勲 夫・菊地 直 吉**

要 旨

VLBI 技術による高精度地球自転速度変動データと数値予報モデルを仲立ちとした客観解析データなどを用いて、数年未満の時間スケールにおける大気・水圏・地球系の極軸のまわりの角運動量収支を誤差1%のオーダーで評価した。その結果、1年の時間スケールにおけるコア・マントル非結合が確認されると共に、約23%にも及ぶ帯状風による大気の相対角運動量の過剰な変化が空気の質量再分布と雪氷などの地表水による角運動量変化で完全に相殺されると言う、従来とは異なる年周変化における角運動量収支が見いだされた。

1. はじめに

地球システムは主に二つのシステムから成っている。一つは大気・海洋・雪氷・陸水などの地球表層部を形成する大気・水圏システムで、他の一つは地殻・マントル・コア（流体外核・固体内核）などの地球内部を形成する固体地球システムである。これら結び付けている物理過程の一つに角運動量交換過程がある。地球回転では、しばしば、この角運動量交換を力学的結合と呼ぶことがあるから、地球システムを力学的結合システムと見なすこともできる。すなわち、地球の全ての構成要素がほぼ一様な角速度で自転しているのはこれら二つのシステムの間で角運動量を交換しているからである。地球回転変動はそうして維持されている固体地球システムの平均自転角速度からのゆらぎのことであり、大気・水圏システムはこのゆらぎの主要な励起源である。

地球回転変動をもたらす大気・水圏系の変動には次の二つの機構が考えられている。一つは風や海流による相対角運動量変化（あるいは地表および海底における摩擦トルク）で、他の一つは空気や水の質量再分布で生じる地球の慣性乗積変化や慣性エネルギー変化に伴う角運動量変化である。大気・水圏・地球系の角運動量収支の成立はこれらの角運動量変化と地球回転変動として観測される固

体地球の角運動量変化の和がゼロであることを意味している（詳細は、例えば、内藤、1988参照）。これまで、外力に起因する潮汐変形に依らない数年未満の時間スケールの極軸のまわりの角運動量変化の大部分は帯状風の寄与に支配され、残りは海面変動や海流の寄与に依存している可能性が大きいと考えられていた (Munk & MacDonald, 1960; Lambeck & Hopgood, 1981)。しかし、季節変化について見ると、大気質量再分布の寄与は約10%に達するとの見積もりもあり (Wahr, 1983)、また、水収支に関する最も新しい資料によれば、積雪などによる地表水の寄与も観測可能な大きさを持つとの見積もりがある (Chao & O'Connor, 1988)。従って、帯状風以外の寄与が一体何に依存しているかは大気・水圏系の季節循環の理解にとっても基本的に重要な論点の一つである。

一般に固体地球と言えば地殻・マントルおよびコアを指しているが、観測される回転地球とは厳密には地殻・マントルのことである。なぜなら、流体外核を持つコアがマントルの速い回転変動に付いて行けず、コアはマントルと一緒に回転していない（これをここではコア・マントル非結合と呼ぶことにする）と考えられているからである。例えば、章動理論や地球の自由運動であるチャンドラー・ウォブルの周期（約1.2年）を説明するこれまでの理論もコア・マントル非結合の仮定のもとに構築されてきた（例えば Smith & Dahlen, 1981参照）。しかし、コア・マントル非結合を示す力学的根拠がはじめて見いだされたのは最近のことで、15日や1カ月の周期

* The Earth's Axial Angular Momentum Budget and the Core-Mantle Decoupling.

** Isao Naito & Naokichi Kikuchi, 国立天文台。
—1989年3月16日受領—
—1989年7月13日受理—

を持つ地球の潮汐変形で励起される自転速度変動がマントルの弾性との関連で厳密に議論されたときである (Merriam, 1980; Yoder, Williams & Parke, 1981; Wahr, Sasao & Smith, 1981). 同様の根拠は FGGE における帯状風データに基づいた数カ月未満の時間スケールにおける大気・地球系の極軸のまわりの角運動量収支の議論からも見いだされた (Hide, Birch, Morrison, Shea & White, 1980) が, この場合, 数カ月未満の時間スケールの角運動量変化には帯状風のみが寄与するとの仮定に依拠している. 一方, 電磁結合トルクなどのコア・マントル相互作用で励起される自転速度変動の時間スケールが数十年程度であることは従来からよく知られている (例えば, 内藤, 1988 参照). この場合, コア・マントル相互作用を支配するダイナミクスのみならず大気・水圏系の数年程度の時間スケールの変動の解明にとっても重要な問題である. 従って, 角運動量収支の立場から 1 年の時間スケールのコア・マントル非結合を厳密に検証することはこうした議論にとっての必要条件にもなっている.

コアは地球の全主慣性能率の約 11% を占めているから, 観測される回転地球にコアを含めるかどうかによっては大気・水圏・地球系の角運動量収支に約 11% の不一致が生じることとなる. ところが, 上述したように, 帯状風以外の寄与の総和は 10% 程度と推測されるので, コア・マントル非結合の確認は空気や水の質量再分布の寄与を含む大気・水圏系全体の角運動量変化を誤差 1% のオーダーで評価してはじめて可能となる. 従って, 例えば, Rosen & Salstein (1985) は, コア・マントル非結合を考慮した上で, 100 ミリバールまでの帯状風に加えて Hirota, Hirooka & Shiotani (1983) による 1 ミリバールまでの成層圏の帯状風を用いて, 年周変化においても相対角運動量の寄与のみで角運動量収支が成立したとしているが, この解釈にはまだ検討の余地が残されていると言わねばならない.

そこで, この問題をより厳密に扱うためには, まず第一に, 従来より格段に高い精度を持つ地球回転変動データと大気・水圏系の角運動量データなどを必要とする. 幸いにして, これまでに, VLBI (超長基線電波干渉法) 技術で決定された従来より二桁ほど高い精度を持つ自転速度変動データと気象庁などの予報解析サイクルにおける全球客観解析データに基づく大気角運動量データが約 5 年間蓄積されている. この論文は主にこれらのデータを用いて数年未満の時間スケールにおける極軸のまわり

の大気・水圏・地球系の角運動量収支を誤差 1% のオーダーで評価し, コア・マントル非結合の確認とこれまでとは異なる季節変化における地球の角運動量収支結果について報告する.

2. データと解析

ここで使用した自転速度変動データは VLBI による地球回転の国際観測網 IRIS (International Radio Interferometry Surveying) が 1984 年から 1988 年までの 5 年間に決定した 5 日毎の 1 日の長さ (Length of Day: LOD) データである. 解析には, これに $-1/86400$ を乗じて無次元自転角速度変動に変換した値を用いた. ただし, この LOD データはあらかじめ Yoder, Williams & Parke (1981) のモデルに基づいて潮汐変形効果が除去されている. 従って, データには大気・水圏系を含む地球の閉じた力学系の角運動量交換過程のみが反映していると考えられる. 一方, 大気角運動量データは気象庁の予報解析サイクルにおける全球客観解析データに基づいて算出され, このうち, 空気の質量再分布で生じる慣性能率変化の寄与には地球の荷重変形効果が考慮されている (Naito, Goto & Kikuchi, 1989). 算出された期間は自転速度変動データと同じ期間である. ただし, ここでの解析には, これらを地殻・マントルの平均角運動量 (すなわち, 極軸のまわりの地殻・マントルの主慣性能率と地球の平均自転角速度の積) で無次元化した値の 5 日平均値を用いた. ここで地球の平均角運動量ではなく地殻・マントルの平均角運動量で無次元化したのはあらかじめコア・マントル非結合を考慮しておくためである. 従って, この無次元大気角運動量変化に -1 を乗じて符号を変えた量は大気変動で励起される地殻・マントルの無次元自転角速度変動に相当している. その結果, 大気・水圏・地球系の角運動量収支は観測された地殻・マントルの無次元自転角速度変動と気象データなどから計算されたそれらとの比較によって議論される.

使用した気象庁の全球客観解析データの上限の気圧面は 10 ミリバールであるから, 客観解析データに含まれる誤差を別にすれば, 計算された無次元自転角速度変動にはおおそ大気全体の 99% の相対角運動量変化が反映していると考えられる. 一方, この無次元自転角速度変動における空気の質量再分布の寄与は, 大気圧変化に対する海洋の応答の取り扱いに依存して, 二つのモデルに基づいて算出されている. 一つは圧力平衡モデル (Inverted Barometer Model: IB モデル) で, 他の一つは圧力非平

第1表 1984年1月から1988年12月までの5年間に IRIS (VLBI) で観測された地殻・マントルの無次元自転角速度変動とそれに及ぼす大気変動などの効果のそれぞれの年周および半年周変化における振幅と位相。ここで、大気変動の効果は気象庁データに基づいて計算されている。表には、参考のために、Chao and O'Connor (1988) が主に気候値に基づいて見積もった地表水の効果と Whitworth and Peterson (1985) による Drake 海峡を通過する 1977 年から 1982 年までの体積輸送データに基づいて筆者らが見積もった南極還流の効果も載せてある。なお、振幅の単位は 10^{-8} ラジアン、位相の単位は度である。

項	年周変化		半年周変化	
	振幅	位相	振幅	位相
(1) 風速項	0.507	237.9	0.330	24.6
(2) 気圧項 (NIB)	0.078	33.7	0.006	60.8
(3) 気圧項 (IB)	0.065	63.2	0.002	97.6
(1)+(2)	0.437	242.1	0.334	25.1
(1)+(3)	0.443	237.1	0.330	24.9
(4) 地表水	0.031	64.0	0.012	272.0
(5) 南極還流	0.003	318.6	0.006	69.9
(1)+(2)+(4)+(5)	0.407	242.4	0.334	24.1
(1)+(3)+(4)+(5)	0.413	237.0	0.330	23.8
VLBI 観測値	0.410	242.1	0.354	28.1

衡モデル (Non-Inverted Barometer Model: NIB モデル) である。ただし、IB モデルでは各時間毎に海洋上の気圧をいたるところ一定と近似して算出されている。一般に、NIB モデルは1カ月程度未満の時間スケールで、また、IB モデルはそれより長い時間スケールで、それぞれ、成立すると考えられている (例えば、内藤, 1988参照)。以下では、計算された無次元自転角速度変動における帯状風の寄与を風速項、空気の質量再分布の寄与を気圧項と呼び、気圧項はさらに IB モデルによる気圧項 (IB) と NIB モデルによる気圧項 (NIB) とに区別して扱うことにする。

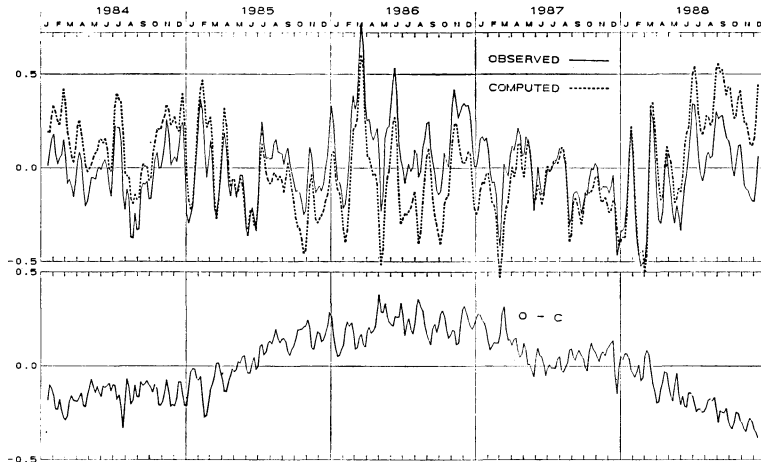
以上のデータに加えて、季節変化における角運動量収支には、Wilmot, Rowe & Mintz (1985) の水収支の気候値に基づいて Chao & O'Connor (1988) が見積もった地表水の寄与、および Whitworth & Peterson (1985) による1977年から1982年までの Drake 海峡を通過する体積輸送データに基づいて筆者らが見積もった南極還流

第2表 大気・水圏・地球系の季節変化における角運動量収支決算表。この表は地殻・マントルの無次元自転角速度変動の観測値と計算値のそれぞれの年周および半年周変化における振幅比と位相差を第1表に基づいて算出されたもので、大気・水圏系の種々の変動が角運動量収支に寄与する割合(寄与率)を表している。なお、負の位相差は計算値の観測値に対する位相遅れを示し、位相差の単位は度である。

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) 南極還流	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

の寄与も参考のために引用した。なお、Chao & O'Connor (1988) の地表水の寄与の見積もりには水の地球全体での質量保存と荷重変形効果が考慮されているが、南極大陸とグリーンランドにおける雪氷量変化は考慮されていない。

解析は、まずはじめに、時系列として与えられている VLBI で観測された地殻・マントルの無次元自転角速度変動および気象データから計算された風速項と気圧項のそれぞれの年周および半年周変化の振幅と位相を1次のトレンドと共に最小二乗法で決定した。それらの結果に地表水および南極還流の振幅と位相を加えた結果を第1表に示す。さらに、季節変化における角運動量収支を解りやすくするために、VLBI 観測値に対する大気・水圏系の各々の計算値の振幅比と位相差を第2表に示す。つまり、第2表は年周および半年周変化のそれぞれにおける角運動量収支に寄与する大気・水圏系の各々の変動の寄与率を表している。次に、不規則変動における角運動量収支の成立状態を見るために、VLBI 観測値と大気・水圏系の種々の計算値の総和からそれぞれの年周および半年周変化を差し引いて得られる不規則変動を第1図の上段に、また、それらの差を下段に示す。ただし、この場合の気圧項は IB モデルにおける値を採用している。



第1図

上段：VLBIで観測された地殻・マントルの無次元自転角速度の不規則変動（実線）とそれに及ぼす大気変動の効果（点線）。ただし、この図では大気変動の効果における気圧項はIBモデルに基づいている。

下段：上段の二つの不規則変動の差。

上下段の図は共に15日のLow Pass Filterが掛けられている。また、単位は 10^{-8} ラジアンである。なお、上向きが自転速度増加を示す。

3. 季節変化における角運動量収支

第2表によると、まず、年周変化では、大気・水圏系全体における振幅比はほぼ1.0を示している。従って、この結果はコアを含まない地球が年周変化での極軸のまわりの角運動量収支をほぼ完全に満たしていること（すなわち、コア・マントル非結合）を示している。同時に、この結果は、コア・マントル相互作用で励起される自転速度変動の下限の時間スケールが数年程度より長いことも示唆している。興味ある事実は風速項における約23%の過剰な寄与が気圧項と地表水の寄与でほぼ完全に相殺されていることである。このことは気圧項と地表水の寄与が年周変化における角運動量収支に大きな役割を果たしていることを示している。また、ここで得られた気圧項の寄与はWahr (1983)の見積もり値によく一致している。Rosen & Salstein (1985)は年周変化における角運動量収支においても相対角運動量変化のみが寄与するとしたが、第2表は相対角運動量変化の他に空気の状態再分布と地表水の寄与を加えてはじめて地球の角運動量収支の立場からの年周変化におけるコア・マントル非結合の確認が可能であることを示している。このことは大気・水圏システムの季節循環を理解する上で基本的に重要な情報の一つとなるだろう。

ここで注目すべきは海洋上の取り扱いが異なる二つのモデルに基づく気圧項を用いているにもかかわらず、大気・水圏系全体における二つの振幅比がほぼ同じ値を示していることである。同様に、位相差の収支決算もこれらの結果を支持している。すなわち、NIBモデルとIBモデルのそれぞれの気圧項の位相は互いに約30度ずれているものの、IBモデルでの気圧項を採用した場合の大気・水圏系全体の観測値に対する位相差は約-5度を、また、NIBモデルの場合のそれは0.3度を示し、データ間隔が5日（約5度）であることを考えると、これらの値は極めて小さいと言えよう。このように、ここでのIBモデルが実際の海洋の応答を陽には考慮していないものの、これら二つのモデルにおける振幅・位相が共に大きな差を示さないことは慣性性能率変化を通じて自転速度変動に効果を持つ東西波数がゼロの大気圧分布の変動に対する海洋の応答が小さいことを暗示している。これに対し、慣性乗積変化を通じて極運動に効果を持つ東西波数が奇数であるような大気圧分布の変動に対する海洋の応答が大きいであろうことは容易に想像できる。その結果、角運動量収支を通じての赤道軸のまわりのコア・マントル非結合の確認は収支の大部分を支配している気圧項のより厳密な評価なしには不可能であろうと考えら

れる(詳細は、例えば、Wahr, 1982参照)。なお、ここで得られた極軸のまわりの年周変化における角運動量収支結果で見落としてはならないことは、地表水の寄与にはグリーンランドと南極大陸の効果が考慮されていないが、収支結果はそれらが互いに相殺していることを示唆していることである。

一方、半年周変化では、大気・水圏系全体における振幅比は約6%小さい。大気・水圏系の寄与にこのような不足が生じている原因として主に次の二つが考えられる。第一はここで引用した南極還流の寄与がこれまでの見積もり(例えば、Lambeck & Hopgood, 1981)に比べ小さ過ぎることである。南極還流で半年周変化が卓越する機構はまだ明らかにされていないから、この結果は季節変化の立場から地球規模の大気・海洋相互作用を考える上で今後の一つの論点となるだろう。第二は全体の大部分を占める風速項が赤道成層圏の帯状風を完全には取り込んでいない可能性があることである。これは帯状風の半年周変化が赤道成層圏で卓越し、しかも、低緯度における観測データの不備が客観解析データに強く反映していると考えられるからである。いずれにしても、これらが北半球以外の大気・水圏システムの理解の不足に起因している可能性は極めて大きいと考えられる。なお、以上の他にこの不足を満たす原因として LOD データから除去されていない海洋潮汐の非平衡性の効果が考えられる。

4. 自転速度の不規則変動

第1図の上段の不規則変動にはよく知られた30日~60日振動が明瞭に見られる。これらの大部分は風速項の寄与で、大気・海洋相互作用によって赤道帯に励起された帯状風変化の反映と考えられる(例えば、Madden, 1987参照)。一方、下段の観測値と計算値の差には 10^{-9} ラジアン程度の大きさの高周波変動を伴う5年程度の時間スケールの経年変動が見られる。このうち、高周波変動は、VLBIによるLOD決定誤差を含んでいるものの、主に、15日ないし1カ月の周期の海洋潮汐の非平衡性の効果、大気変動に対する地殻・マントルの応答の遅れ(すなわち、海洋の角運動量変化)などの反映と考えられる。従って、この高周波変動には主に南極還流などにおける数カ月未満の時間スケールの変動が関与している可能性が大きく、この問題の解明も南半球における今後の情報の蓄積に大きく依存している。

さて、問題は観測値と計算値との差に見いだされた5

年程度の時間スケールの経年変動が地球のいかなるダイナミクスに支配されているかである。上段の二つの不規則変動をよく見ると、5年程度の時間スケールの経年変動は、観測値(実線)には見られず、大気効果の計算値(点線)に見られることが明らかであろう。すなわち、これらの図は、5年程度の時間スケールを持ち、大気効果を相殺するように振る舞う何らかの変動の存在を示唆している。年周変化における角運動量収支で言及したように、そのような振る舞いを示すものに地表水の寄与が考えられるが、量的にはほとんど困難であろうと思われる。その他に南極還流の寄与が考えられるが、最も卓越している半年周変化においても極めて小さいことから、これに期待することも困難であろう。しかし、大気効果と逆相関を持つ点に焦点を絞れば、この5年程度の時間スケールの経年変動の励起源が海洋の何らかの変動と無関係ではないかもしれない。最近、Chao (1989)は、ENSO(厳密には、タヒチとダーウィンの気圧差として知られる Southern Oscillation Index)と赤道成層圏の帯状風の準二年振動(QBO)をモデル化し、これらの和(ENSO+QBO)とLODとの見事な相関関係を見いだしているが、注目すべきであろう。

この5年程度の時間スケールの経年変動を説明するもう一つの可能性はコア・マントル電磁結合トルクなどのコア・マントル相互作用である。Lambeck & Hopgood (1981)は大気・水圏系の寄与の上限を見積もり、大気・水圏系の変動に依らない5年程度の時間スケールの自転速度変動を検出した。そして、その最も有力な励起源としてコア・マントル相互作用を挙げている。注目すべきは、ここで得られた5年程度の時間スケールの経年変動が彼らが検出したそれとほぼ同じ振幅を示し、また、位相もよく一致していることである。この変動が上述のENSO+QBOと異なる点は、ENSO+QBOが間歇的な強い変動を示しているのに対し、この5年程度の時間スケールの経年変動は緩やかな変動を示していることである。この問題は1990年代に解決されると思われる最も興味ある課題の一つである。

6. まとめ

VLBIで決定されたLODデータと気象庁の客観解析データなどに基づいて、数年程度までの時間スケールにおける大気・水圏・地球系の極軸のまわりの角運動量収支を誤差1%のオーダーで議論した。得られた角運動量収支結果は第2表のとおりである。それによると、年周

変化では大気・水圏系がコアを含まない地球とほぼ完全に角運動量保存系を形成しているが、半年周変化では大気・水圏系に約6%の不足が生じている。さらに、VLBI観測値と大気効果の計算値との差(第1図下段)に5年程度の時間スケールの経年変動が見いだされた。

この論文の基礎となった気象庁データに基づく大気角運動量データは気象庁数値予報課の全面的な協力のもとにルーチ的に算出され IERS (International Earth Rotation Service) を通じて世界の研究者に利用されている。この報告をまとめるにあたり気象庁数値予報課に深く感謝する。

参考文献

- Chao, B.F., 1989: Length-of-day variations caused by El Nino-Southern Oscillation and Quasi-Biennial Oscillation, *Science*, **243**, 923-925.
- , & W.P. O'Connor, 1988: Global surface-water-induced seasonal variations on the earth's rotation and gravitational field, *Geophys. J.*, **94**, 263-270.
- Hirota, I., T. Hirooka & M. Shiotani, 1983: Upper stratospheric circulations in the two hemispheres observed by satellites, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **109**, 443-454.
- Lambeck, K. & P. Hoggood, 1981: The earth's rotation and atmospheric circulation from 1963 to 1973 *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **64**, 67-89.
- Madden, R.A., 1987: Relationships between changes in the length of day and the 40- to 50-day oscillation in the tropics, *J. Geophys. Res.*, **92**, 8391-8399.
- Merriam, J.B., 1980: Zonal tides and changes in the length of day, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **62**, 551-562.
- Munk, W. & G. J. F. MacDonald, 1960: *The Rotation of the Earth*, Cambridge University Press.
- 内藤勲夫, 1988: 地球回転と大気海洋力学, その新しい連携, *天気*, **35**, 291-311.
- Naito, I., Y. Goto & N. Kikuchi, Effective atmospheric angular momentum functions computed from the JMA data, Annual Report of the IERS for 1988, in press.
- Rosen, R.D. & D.A. Salstein, 1985: Contribution of stratospheric winds to annual and semiannual fluctuations in atmospheric angular momentum and the length of day, *J. Geophys. Res.*, **90**, 8033-8041.
- Smith, M.L. & F.A. Dahlen, 1981: The period and Q of the Chandler wobble, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **64**, 223-281.
- Wahr, J.M., 1982: The effects of the atmosphere and oceans on the earth's wobble-I. Theory, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **70**, 349-372.
- , 1983: The effects of the atmosphere and oceans on the earth's wobble and on the seasonal variations in the length of day -II. Results, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **74**, 451-487.
- , T. Sasao & M.L. Smith, 1981: Effects of the fluid core on changes in the length of day due to long period tides, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **64**, 635-650.
- Whitworth, T. & R.G. Peterson, 1985: Volume transport of the Antarctic Circumpolar Current from bottom pressure measurements, *J. Phys. Oceanography*, **15**, 810-816.
- Wilmott, C.J., C.M. Rawe & Y. Mintz, 1985: Climatology of the terrestrial seasonal water cycle, *J. Climatol.*, **5**, 589-606.
- Yoder, C.F., J.G. Williams & M.E. Parke, Tidal variations of earth rotation. *J. Geophys. Res.*, **86**: 881-891.