

地球自転速度の不規則変動に対する大気の寄与*

内 藤 勲 夫・菊 地 直 吉**

要 旨

地球自転速度の不規則変動に対する大気変動の寄与が論じられた。用いられたデータは1984年1月から1990年12月までの7年間の IRIS で観測された一日の長さ (LOD) 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。まず、自転速度の1年未満の時間スケールの不規則変動は主に赤道対流圏における帯状風変動の寄与であることが確認された。また、自転速度の約2年の時間スケールの変動は赤道成層圏における帯状風変動 (準2年振動) の寄与であることも再確認された。さらに、2, 3年程度の時間スケールの帯状風変動は赤道対流圏にも存在し、これも観測される自転速度変動に寄与していることが明らかとなった。これら大気変動効果を自転速度変動から差し引いた残差は 5.0×10^{-9} ラジアン/年にも及ぶ大きさを持つ5年程度の時間スケールの顕著な変動を示す。この差の変動は El Nino と密接な関係にある赤道太平洋の海水面変動と顕著な逆相関係にある。しかし、量的な議論によれば、この差の変動の励起源の最有力候補はコア・マントル結合トルクと考えられる。

1. はじめに

地球の角運動量収支に対する大気水圏システムの寄与を完全に見積もり、それらを観測される地球回転変動から除去して、その残差からマントルに及ぼすコアの寄与 (つまり、コア・マントル結合トルク) を検出することは観測精度の飛躍的向上を実現した近年の地球回転の研究分野の重要な目標の一つである。

最近、筆者らは年周変化における極軸のまわりの角運動量収支が帯状風による相対角運動量変動および空気と水の質量再分布等の寄与でほぼ完全に成立していることを示し、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確認した (Naito & Kikuchi, 1990; 内藤・菊地, 1990)。ここに、コア・マントル非結合とは地球の慣性能率の約11%を占めるコアがマントルと一緒に回っていないこと、あるいは、コアとマントルの間の角運動量の交換が無視できるほど小さいことを意味する。これによって、コア・マントル結合トルクが自転速度変動に寄与する時間スケールは短くとも1年より長いことが明らかとなった。

さて、地球の角運動量収支からコア・マントル非結合の確認が可能になったのは自転速度変動に寄与する大気変動効果 (つまり、大気角運動量変動) が誤差数パーセント以内で見積もられるようになったからである。従って、1年よりわずかに長い数年の時間スケールおよび1年に比べ十分短い1, 2カ月の時間スケールの自転速度の不規則変動 (以下ではそれぞれ自転速度の数年変動および季節内変動と呼ぶ) に寄与する大気変動効果を同程度の精度で見積もることも不可能ではなく、地球の角運動量収支からのコア・マントル結合トルクの検出は実現の方向に近づいてきたと考えられる。

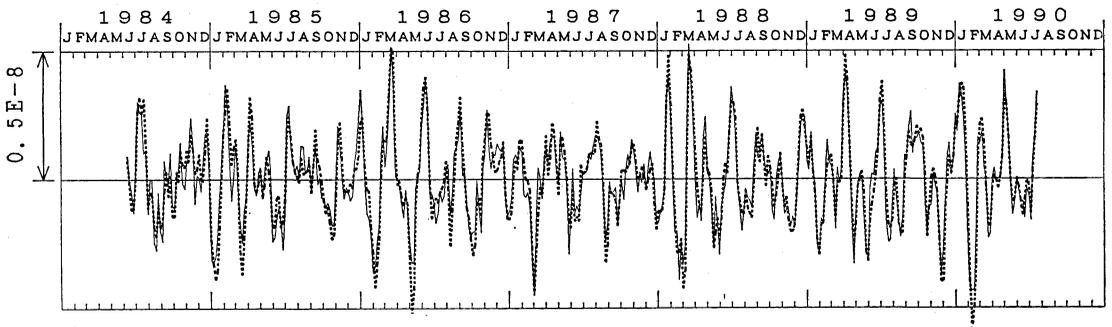
ところで、赤道成層圏における帯状風の準2年振動 (QBO) が自転速度の準2年振動をもたらしていることはすでに定説になっている (Lambeck, 1980 参照)。また、自転速度の季節内変動が帯状風の寄与であることも現在定説になりつつある (Langley *et al.* 1981; Barnes *et al.* 1983; Eubanks *et al.* 1985; Madden, 1987; etc.)。これらの事実は、大気変動が自転速度変動に寄与する上限の時間スケールが約2年であることを意味している。一方、数10年の時間スケールの自転速度変動がコア・マントル結合トルクによる可能性はこれまで多くの研究者達によって提案され、近年、ようやくその定量的な議論がなされるようになってきた (Rochester, 1960; Hide, 1969; Yukutake, 1973; Jault & Le Mouél, 1990; etc.)。

* Atmospheric Contributions to the Irregular Variations of the Earth's Speed of Rotation.

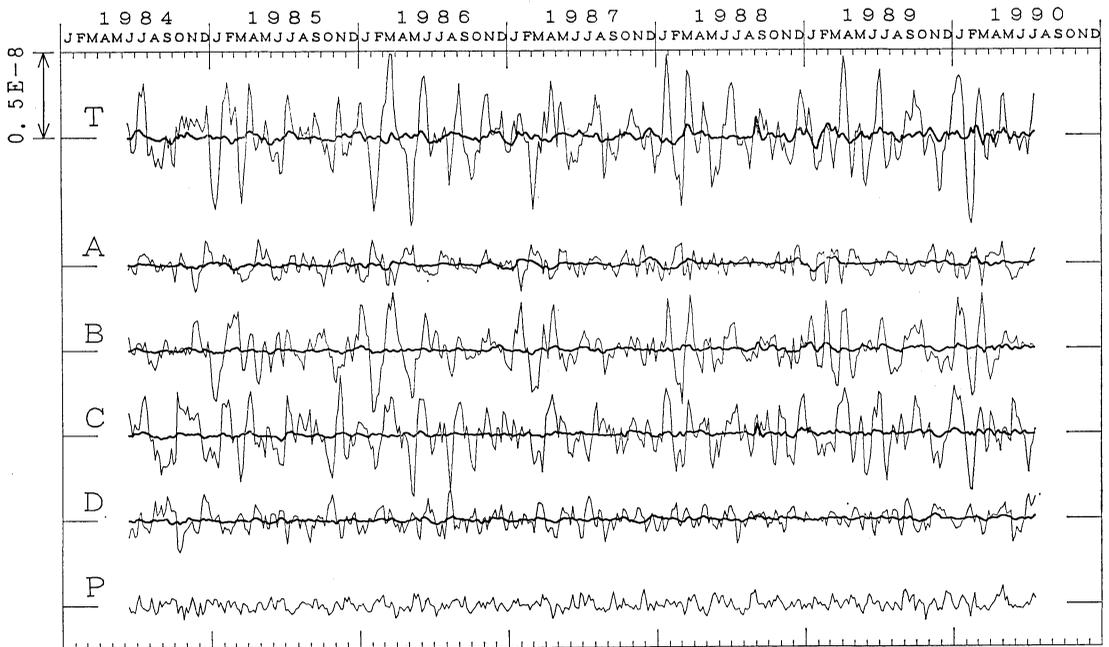
** Isao Naito, Naokichi Kikuchi, 国立天文台。

——1991年2月18日受領——

——1991年10月4日受理——



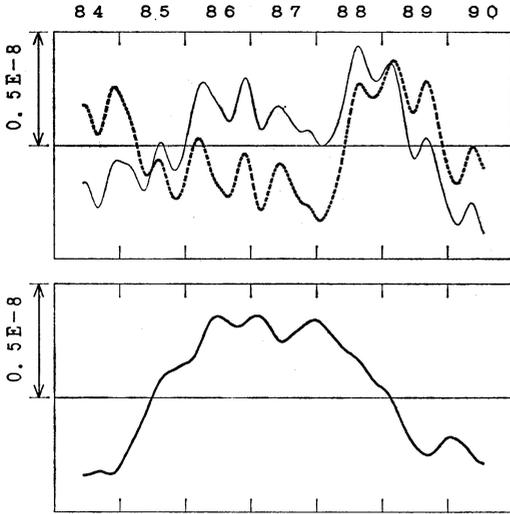
第1図 1984年から1990年までの7年間における150日のハイパスフィルターを通して得られた自転速度の季節内変動の観測値(実線)とそれに対する大気の寄与の計算値(点線). 単位は 0.5×10^{-8} ラジアン.



第2図 1984年から1990年までの7年間における150日のハイパスフィルターを通して得られた対流圏および成層圏のそれぞれにおける帯状風の寄与の緯度分布. 対流圏(100 mb以下)は細線で, 成層圏(100 mb-10 mb)は太線で, また, 緯度に対しては, T(全球), A(北緯90度-北緯30度), B(北緯30度-0度), C(0度-南緯30度), D(南緯30度-南緯90度)で, それぞれ, 示されている. 最下段のPは Inverted Barometer Hypothesis Model に基づく大気質量再分布の寄与を示す. 単位は 0.5×10^{-8} ラジアン.

従って, 大気水圏システムの寄与が期待されているにもかかわらず定量的議論がまだ不十分な自転速度変動は約2年から10年程度の時間スケールの変動である. Lambeck & Hopgood (1981) は自転速度変動と大気変動効果との差に約5年の時間スケールの顕著な変動を検

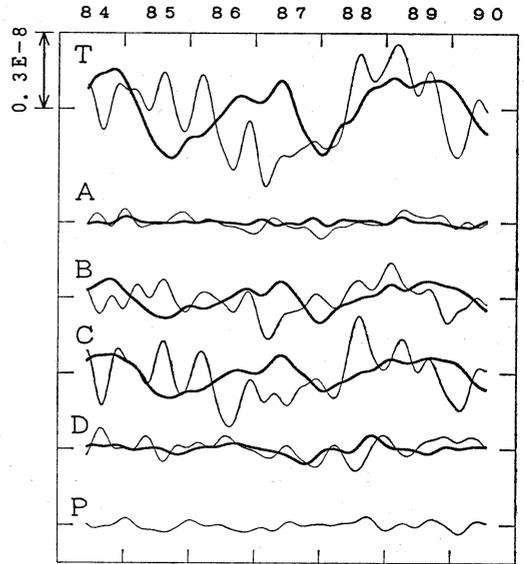
出し, その励起源をコア・マントル結合トルクに求めている. Chao (1989) は赤道成層圏における帯状風の準2年振動と南方振動指数でモデル化された大気変動効果が自転速度の数年変動と顕著な相関関係にあることを見いだしている. また, Rosen *et al* (1990) は自転速度変動



第3図

上段：1984年から1990年までの7年間における150のローパスフィルターを通して得られた自転速度の数年変動の観測値(実線)とそれに対する大気の寄与の計算値(点線)。

下段：上段の観測値(実線)と計算値(点線)との差。単位は 0.5×10^{-8} ラジアン。



第4図 1984年から1990年までの7年間における150日のローパスフィルターを通して得られた対流圏および成層圏のそれぞれにおける帯状風の寄与の緯度分布。図中の記号の意味は第2図に同じ。単位は 0.3×10^{-8} ラジアン。

と大気変動効果との差の変動を論じ、それが海洋変動あるいはコア・マントル結合トルクのどちらかに由来する可能性を論じている。

以上のように、自転速度の数年変動の励起源として、大気変動、海洋変動およびコア・マントル結合トルクの三つの候補が挙げられているが、いずれに帰せしめるにしても未解決の多くの問題が残されている。そこで、ここでは、自転速度変動に及ぼす大気変動効果を高度10 mbまでの風データを含む象気庁全球客観解析データに基づいて評価し、まず最初に、自転速度の季節内変動を含む1年未満の時間スケールの変動が主に赤道対流圏の帯状風の寄与でほぼ完全に説明されることを確認する。次に、自転速度の数年変動に及ぼす大気変動効果について論じ、自転速度変動と大気変動効果との差の数年変動がコア・マントル結合トルクに由来する可能性について論じる。

2. データと解析

用いられた自転速度データは IRIS (国際電波干渉計網) によって観測された約5日毎の潮汐効果が補正された一日の長さ (LOD) データである (詳細は IRIS

Bulletin 参照)。解析にはこれを平均の一日の長さで無次元化した自転角速度変動 (m_s) を用いた。

一方、大気変動効果は Barnes *et al* (1983) による大気角運動量 (AAM) 関数を象気庁の12時間毎の全球客観解析データ (例えば、Japan Meteorological Agency, 1990参照) に基づいて算出した値を用いた (Naito *et al*, 1987)。ただし、ここでは、観測される自転速度変動をマントルの自転速度変動とみなして (つまり、コア・マントル非結合を仮定して)、AAM 関数における地球の主慣性能率をマントルのそれに置き換えて用いた (内藤・菊地, 1989; Naito & Kikuchi, 1990 参照)。さらに、AAM 関数の極軸成分の大部分を支配している帯状風の寄与 (すなわち、無次元化された大気の西向き相対角運動量変動) を、高度に対して100 mb以下の対流圏と100 mbから10 mbまでの成層圏に分け、また、緯度に対して北緯90度から北緯30度まで、北緯30度から0度まで、0度から南緯30度まで、南緯30度から南緯90度までの4つの緯度帯に分けて、全球客観解析データに遡って算出した。解析にはこれらの大気変動効果データの5日平均値を用いた。

解析は以下の手順で行った。まず、各データの年周変化、半年周変化および1次のトレンドを最小二乗法で当てはめ、これらを各データから除去した後、10日のローパスフィルターを通した。次に、これらに150日のハイパスフィルターおよびローパスフィルターを通して各々の季節内変動と数年変動をそれぞれ算出した。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. 自転速度の不規則変動に対する大気の影響

第1図は季節内変動における自転速度変動の観測値とそれに及ぼす大気変動効果の計算値との比較を示したものである。自転速度の季節内変動は大気変動ではほぼ完全に説明されることが分かる。このことは極軸のまわりのコア・マントル非結合が1年未満の時間スケールにおいても成立していることを意味している。しかし、図では判別困難であるが、観測値（マントルの運動）の位相が計算値（大気の運動）のそれに対して平均して約1.5日進んでいる。この位相差はLODデータの時間分解能が低いことや大気変動効果の計算誤差に由来していると推測される。図では10日未満の時間スケールの変動はフィルターされているが、Rosen *et al* (1990) は約10日未満の時間スケールでは大気地球系の角運動量収支が成立していないことを指摘している。

第2図は計算された大気変動効果に対応する対流圏および成層圏のそれぞれにおける帯状風の寄与（すなわち、無次元化された大気の西向き相対角運動量変動）の季節内変動の緯度分布を示したものである。帯状風の季節内変動は対流圏で卓越し成層圏ではほとんど無視できる程度であることが分かる。また、最下段に参考のために示されている大気質量再分布の寄与も小さい。対流圏の寄与を詳細に見ると、中高緯度と赤道のそれぞれの変動がほぼ逆位相関係を示しているが、赤道の寄与が中高緯度のそれを大きく上まわっている。その結果、自転速度の季節内変動の位相およびその振幅の大部分は赤道対流圏の帯状風の寄与であることが再確認される。

第3図の上段および下段の二つの図は数年変動における自転速度変動の観測値とそれに及ぼす大気変動効果の計算値との比較およびそれらの差の変動をそれぞれ示したものである。観測値と計算値は共に2年程度の時間スケールの変動と約7か月周期の変動を示し、これらの周期における両者の位相も互いによく一致を示している。しかし、時間スケールが長くなると両者の一致は良くな

いことが分かる。その結果、観測値と計算値との差は約5年の時間スケールの変動を示し、また、その変動の大きさは 5×10^{-9} ラジアン/年にも及ぶ。以下では、この自転速度変動の観測値と大気変動効果の計算値との差を「非大気起源の自転速度変動」と呼ぶことにする。

第4図は、第2図と同様にして、対流圏および成層圏のそれぞれにおける帯状風の寄与の数年変動の緯度分布を示したものである。帯状風の準2年振動は赤道成層圏のみで卓越し、その振幅は第3図の上段の点線で示された大気全体の寄与の変動に接近する大きさを持っている。一方、第3図上段の自転速度変動とよい対応関係を示す約7か月周期の変動は赤道対流圏の寄与であることが分かる。また、赤道対流圏では2、3年程度の時間スケールの変動が見られ、これも第3図の上段の大気全体の寄与を形成していることが分かる。その結果、自転速度変動と同位相で変動する大気変動効果の上限の時間スケールは3年程度であることが確認される。

ところで、約5年の時間スケールを持つ非大気起源の自転速度変動（第3図の下段）はRosen *et al* (1990) が1976~1988年における解析で検出した同様の数年変動とも部分的に一致するばかりでなく、Lambeck & Hoggood (1981) が1962~1978年における解析で検出した同様の数年変動の位相ともよく対応している。Rosen *et al* が用いたNMC（米国気象センター）データは高度100 mb以上の風が考慮されていないが、彼らの結果と気象庁データに基づくここでの結果との違いは100 mb以上の成層圏の帯状風の寄与（第4図最上段の大線の変動）だけであることがすでに明らかにされている(Naito & Kikuchi, 1988)。従って、彼らの結果(Rosen *et al* の第13図)と第3図の下段との部分的な一致は非大気起源の自転速度変動の時間スケールが3年程度より長いことの当然の帰結とみなすことができ、その結果、Rosen *et al* の第13図で示される数年変動は第3図の下段とほぼ等価であると推測される。また、第4図の最上段の細線で示される2、3年程度の時間スケールを持つ対流圏の帯状風変動の寄与はChao (1989) が南方振動指数を用いてモデル化したENSO (El Niño-Southern Oscillation) に由来すると考えられる大気変動効果に対応しているようにも見える。

4. 非大気起源の自転速度変動の励起源

そこで、次に、自転速度変動と大気変動効果との差として見いだされた約5年の時間スケールを持つ非大気起

源の自転速度変動の励起源について考えてみよう。励起源候補としては、一般に、全球客観解析データに反映されていない大気変動、海洋変動およびコア・マントル結合トルクの三つが挙げられる。第3図の下段の変動には7カ月程度の時間スケールの小さな変動が含まれている。これは第4図の赤道対流圏などの寄与に見られた約7カ月周期の変動が自転速度変動から完全に除去されていないために生じたものと考えられ、全球客観解析データに含まれる誤差や10 mbより上層の上部成層圏の寄与がこの計算では考慮されていないことに起因していると推測される。同様に、2, 3年程度の時間スケールの変動も含まれているはずであるが、それらは明瞭ではない。つまり、5年程度の時間スケールに限ると、全球客観解析データは大気変動をほぼ完全に反映していると推測される。従って、考えられる励起源候補は海洋変動とコア・マントル結合トルクの二つだけである。また、このとき、第4図の最上段の対流圏の寄与やChaoによってモデル化されたENSO起源の大気変動効果は共に海洋変動に対する大気の応答と推測される。

そこで、まず、海洋変動による励起源について考えよう。最も可能な励起源として帯状海流の寄与と海水質量再分布(海面変動)の寄与が考えられる。唯一の帯状海流として知られる南極還流において最も卓越する半年周変化でさえも自転速度のそれへの寄与は1%のオーダーに過ぎないことから(内藤・菊地, 1989; Naito & Kikuchi, 1990)、帯状海流が寄与する可能性はほとんど期待できそうもない。一方、第3図の下段の変動の励起に必要な海面変動の大きさは、もしそれが南極大陸の雪氷変動に由来すると仮定すると、簡単な計算から(例えば, Lambeck, 1980, p. 268 参照), 6 cm/年のオーダーとなり、これは南極大陸における氷の厚さの1 m/年のオーダーの変動に相当する。しかし、海面変動における最大の変動として知られる大陸上の雪氷などの地表水の季節変化でもたらされる海面の年周変化の振幅でさえ1 cmのオーダーであること(例えば, Baumgartner & Reichel, 1975 参照)を考えると海面変動に期待することも極めて困難と考えられる。このことは季節変化における極軸のまわりの角運動量収支で海洋の固有の変動に由来する海面変動の寄与が無視されていること(Naito & Kikuchi, 1990; 内藤・菊地, 1989)からも理解することができる。

しかしながら、非大気起源の自転速度変動はENSOと顕著な相関関係にあり、それは特にENSOが関与し

ている赤道太平洋における海洋変動との間に見られる。例えば, Wyrki (1985) によって見いだされたEl Nino出現の指数となる赤道太平洋における広範囲の海洋上層部の体積変動(Enfield, 1989の第12図)とここでの非大気起源の自転速度変動(第3図の下段およびRosen *et al.*, 1990の第13図)は互いに極めて相似の関係にあることを示している。しかも、この赤道太平洋の体積変動は同じ海域における2, 30 cmにも及ぶ海面変動に対応している。すなわち、El Ninoは非大気起源の自転速度変動および赤道太平洋の海面変動が共にほぼ極大を示すときに出現していることが分かる。しかも、この海面変動の大きさは、それがもしネットの海水質量変動を反映しているならば、非大気起源の自転速度変動を励起するオーダーである。

ところが、たとえ赤道における海面の上昇が海水質量の増加を意味しているとしても、それは自転速度の減少をもたらすことになり、両者の関係は物理的に矛盾する結果となる。従って、ENSOに伴う赤道太平洋の海面変動の大半は海水の熱膨張に存在していると考えざるを得ない。結局、海洋変動は定量的にも定性的にも非大気起源の自転速度変動の励起源には成りにくく、その結果、最も可能な励起源はコア・マントル結合トルクと言うことになる。これは、5年より長い時間スケール側でコア・マントル結合トルクの寄与が卓越することを考え合わせれば、決して無理な結論ではない。しかし、コア・マントル結合トルクが励起源であるとする地球磁場の変動に関する積極的な根拠は見いだされていない。これは電気電導度の低いマントルがこの時間スケールにおけるコア起源の磁場の変動を乱して地表での検出を困難にしているからである(例えば, Lambeck, 1988, p. 635 参照)。

以上のように、ここで得られた非大気起源の自転速度変動の励起源は現在の段階では「地球変動」の謎と言わねばならない。第3図の下段を見ると、非大気起源の自転速度変動は1990年で極小を示しているように見えなくてもない。これが再び増加に転じて極大を示すかどうか、またそのときEl Ninoが出現するかどうかがこの謎の解明の大きなヒントとなるだろう。

6. まとめ

自転速度の1年未満の時間スケールの不規則変動は主に赤道対流圏の、また、自転速度の準2年振動は赤道成層圏の、それぞれにおける帯状風変動の寄与である。さ

らに、赤道対流圏の2、3年程度の時間スケールの帯状風変動も自転速度変動に寄与している。これらの自転速度変動と大気変動効果との差の変動は約 5.0×10^{-9} ラジアン/年の大きさを持つ5年程度の時間スケールの顕著な変動を示す。この差の変動は El Nino の出現と密接な関係を持つ赤道太平洋の海水面変動と顕著な逆相関関係にある。しかし、量的な議論によれば、この差の変動の励起源の最有力候補はコア・マントル結合トルクと考えられる。

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、この論文の査読者のきめ細かなコメントは論文の改稿と本研究の今後の展開に極めて有益であった。査読者に心から感謝します。

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.*, A 387, 31-73.
- Baumgartner, A. & E. Reichel, 1975: *The World Water Balance*, Elsevier.
- Chao, B.F., 1989: Length-of-day variations caused by El Nino-Southern oscillation and quasi-biennial oscillation, *Science*, 243, 923-925.
- Enfield, D.B., 1989: El Nino, past and present, *Rev. Geophys.*, 27, 159-187.
- Eubanks, T.M., J.A. Steppe, J.O. Dickey & P.S. Callahan, 1985: A spectral analysis of the earth's angular momentum budget, *J. Geophys. Res.*, 90, 5385-5404.
- Hide, R., 1969: Interaction between the Earth's fluid core and solid mantle, *Nature*, 222, 1055-1056.
- Japan Meteorological Agency, 1990: Outline of Operational Numerical Weather Prediction at Japan Meteorological Agency, Appendix to Progress Report on Numerical Weather Prediction, Numerical Prediction Division, Japan Meteorological Agency.
- Jault, D. & J.L. Le Mouél, 1990: Core-mantle boundary shape: constraints inferred from the pressure torque acting between the core and the mantle, *Geophys. J. Int.*, 101, 233-241.
- Lambeck, K., 1980: *The Earth's Variable Rotation*, Cambridge University Press.
- , 1988: *Geophysical Geodesy*, Oxford Science Publ.
- , & P.H. Hopgood 1981: The earth's rotation and atmospheric circulation, from 1963 to 1973, *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 64, 67-89.
- Langley, R.B., R.W. King, I.I. Shapiro, R.D. Rosen & D.A. Salstein, 1981: Atmospheric angular momentum and the length of day: A common fluctuation with a period near 50 days, *Nature*, 294, 730-732.
- Madden, R.A., 1987: Relationship between change in the length of day and the 40- to 50- day oscillation in the tropics, *J. Geophys. Res.*, 92, 8391-8399.
- Naito, I. & N. Kikuchi, 1988: International comparison of the atmospheric angular momentum functions based on the four meteorological agency data, unpublished.
- 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.
- Naito, I. & N. Kikuchi, 1990: A seasonal budget of the earth's axial angular momentum, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 631-634.
- , —— & 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.
- Rochester, M.G., 1960: Geomagnetic westward drift and irregularities in the earth's rotation, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A 252, 531-555.
- Rosen, R.D., D.A. Salstein & T.M. Wood, 1990: Discrepancies in the earth-atmosphere angular momentum budget, *J. Geophys. Res.*, 95, 265-279.
- Wyrteki, K., 1985: Water displacements in the Pacific and the genesis of El Nino cycles, *J. Geophys. Res.*, 90, 7129-7132.
- Yukutake, T., 1973: Fluctuations in the earth's rate of rotation related to changes in the geomagnetic dipole field, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 25, 195-212.