

# 惑星動力学の研究に向けて

大江 昌嗣<sup>1</sup>

## 1. 地球力学と惑星科学の研究

ここ数年，月面に人工電波源を設置し，月周回衛星とペネトレーターを用いて月の重力場，秤動，潮汐の観測を行う計画に取り組んで来たが，VLBI人工電波源の開発がほぼ成功する見通しがついたので[6]，[20]，この機会に，地球力学と惑星科学の共通の諸問題を整理しておきたい。

近年の測地計測精度の向上により，地球の力学的ふるまいが，cm～mmの精度で求まり，プレート・モーションがSLR（人工衛星レーザー測距）やVLBIによって±cm/年以上の精度で捕えられるようになったことは良く知られている通りである[14]，[25]。また，地球の回転変動が，2，3年～数日のタイムスケールで大気の運動と驚くべき程よく一致していることが明らかになって来た。更に，近年の大気運動の精密観測データを用いて，

全地球的な大気運動の変化と地球回転の乱れの関連性から，地球深部を診断する試みが，我々に有力な地球深部研究の手法を提供しようとしている[16]，[22]。一方，超伝導重力計を用いた地球コアの観測[26]，[27]は，VLBIによる地球の章動の観測[8]，[24]と共に，コア・マンツルの力学結合やコア粘性，そして，固体核の運動について新しい知見を与えようとしている。超伝導重力計は，南極昭和基地にも設置され，国内観測点（江刺，柿岡，京都など）と合わせて，新しいコアモード振動の検出に向けて連続観測がなされている。こうした中で，従来困難とされて来た海面の全地球的な変動の把握も，TOPEX/POSEIDON海洋衛星の打ち上げによって2cmの精度での観測が可能になり[32]，いよいよ地球全体の動的な実態の解明が始まろうとしている。

こうした新しい測地計測手法による地球力学へ

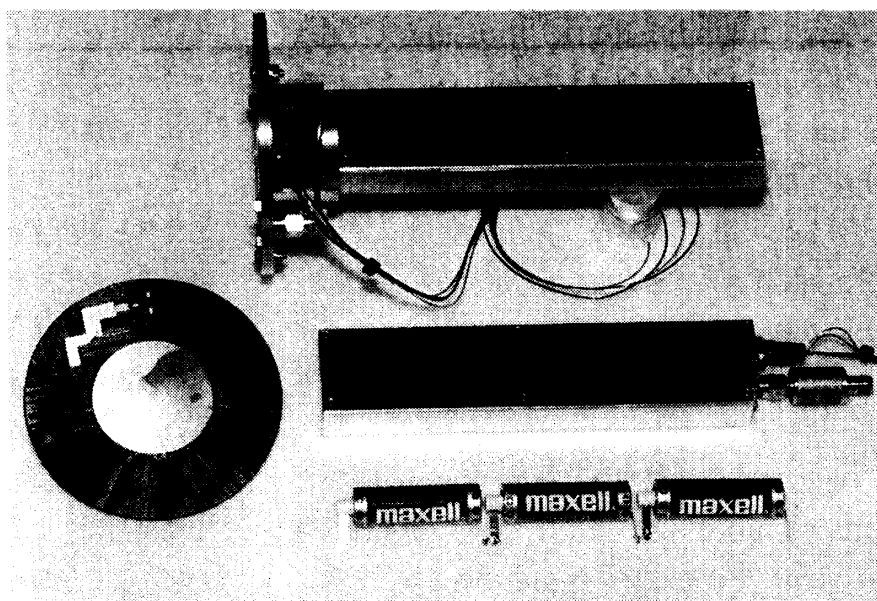


図1. VLBI月面電波源。下はアンテナ部分を外したところ。2.2GHzのSine波を発振する。重量は電池込みで約400グラム，サイズは乾電池との比較で明らかであろう。

<sup>1</sup>国立天文台・水沢

の取り組みは、計測方法の適応上色々な制約はあるにしても、基本的には他の惑星、特に地球型惑星の内部状態の解明のための手法となり得るものであろう。また、こうした計測の実施によって、他の惑星についての同様な情報を得ることは、地球自身の新しい参照データを得ることになり、また惑星の新しい側面を見て行くことに連ながる。物質科学として見た場合の地球力学研究の問題点の一つは、得られる計測値が、現在の地球の状態に極めて限定されるという事である。その得られた計測値から、他の補足的な情報なしに、過去の状態にさかのぼることはかなり制限される。例えば、プレート運動について、現在の計測値から推定できるのは、せいぜい過去2億年前までであろう。それ以前は、プレート全体が別の運動をしていたためである。従って、地球をその歴史的進化の過程まで見たいとする時には、地球の過去の姿を少しでもとどめているような他の惑星等にその推論の手がかりを見つけるしかないことは事実である。それは、地球のコアや大気の運動、そして地球の自転の進化の過程についても同様である。

## 2. 惑星の力学進化

地球・月系の力学進化は、月の起源および地球の過去を知る上で重要である[19], [3]。この問題を解明するためには、特に、地球の過去における大陸と海洋の分布、コアとマンツルの結合およびエネルギー消散、更には、月の内部の潮汐摩擦などの非保存力の効果を知ることが求められ、また、太陽の潮汐力の効果を含めて総合的に解くことが必要である[1], [33]。このことについては、後にもう一度触れる。

潮汐摩擦による効果は、他のいくつかの惑星においても重要である。水星は、現在、赤道傾斜角がほぼ $0^\circ$ で自転周期が58.65日であるが、太陽に

よる潮汐作用によって、自転速度が減速され、赤道傾斜角も初期には $90^\circ$ に近かったものが現在の状態まで減少してきた可能性が指摘されている[21]。また、金星も、太陽の潮汐作用によって自転速度が次第に減速し、現在のように243日の周期で逆回転するようになったことが理論的に推定されており、大気潮汐の影響が特に大きく、また、コア・マンツル間の粘性結合も無視できないことが明らかにされている[4], [12]。

火星は、現在の赤道傾斜角が $25.19^\circ$ であるが、それは、自転と軌道運動の共鳴によってもたらされたと考えられているが[13]、極冠による氷の荷重によって生じた可能性も指摘されており[23]、火星における気候変動、特に炭酸ガスや水の相変化による大気量の変化と天文学的摂動（自転軸の傾きや軌道離心率の変化など）との関連性などの問題が残されている。興味深いのは天王星の赤道傾斜角である。天王星は、太陽の周りの公転軌道に対して、赤道面が $97.9^\circ$ も傾いている。しかも、15個の天王星の衛星もほとんどこの赤道面にある。天王星がこのように傾いた原因として、①自転と公転の共鳴[7]、②潮汐摩擦[5]、③隕石の衝突[28]など数種の原因が上げられているが、決着がつかない。しかも、ボイジャー2号の観測によって、天王星の磁場が自転軸に対し $58^\circ$ 傾いており、磁場の中心軸も天王星の重心から大きくずれていることが発見されている。天王星は、岩石のコアとそのまわりの厚く濃い大気または氷の大洋とそれを取り巻くガスの大気から成ると推定されるが、このようなことが起きるのは磁場が天王星の表面に近い水やアンモニアの良導体に起因するためであろうか。ボイジャー2号は、次に、海王星の磁場も自転軸に対して $50^\circ$ 傾いていることを発見した。このことは、磁場の大きな傾きが、たまたま、磁場の向きが逆転する瞬間を観測され

たためではなく、また、単純に、赤道傾斜角が大きいためでもないことを示している。何故なら、海王星の赤道傾斜角は27.8であり、地球と余り変わらないからである。

こうした新しい課題と共に、木星の衛星イオや海王星の衛星トリトンに及ぼす母惑星の潮汐作用 [10], [11]なども地球・月系と共通する興味深い課題である。

### 3. プレート運動

金星探査機マゼランが、1990年から1992年にかけて、合成開口レーダーによる金星の地形マッピングを行った。その結果は、金星のプレートは単一のプレートから成り、地球のようなプレートテクトニクスが存在しないこと、また、クレーターの分布が月のようなかたよりがなく一様であることを示すものであった[31]。そのことから、金星は、今から5億年前に、大規模な地表の更新が起る程の火成活動があり、その後は静かになったと推定されている。探査機マゼランの研究グループは、金星に地球のようなプレートテクトニクスが存在しないのは、金星の地殻の厚さが薄く (10~30km)、またしなやか過ぎるために、地球のようなサブダクションが起きないためであり、また、現在のような8000m級の火山や5000m級の高地が存在するのは、内部のマントル対流によって火山形成されたり、水平方向の押し込みによって地域的に地殻が破碎されて堆積したことによるとの仮説を発表している。これは、モデル解析によって検証してゆく必要がある。

この仮説を裏づけるためには、特に金星の山岳や高地の地下部分の構造を知る必要がある[18]。地形を支える力がマントル対流によるものか、静的なバランス (isostasy) によるものかで地下部分が変わる。この解答を見出すために、マゼランは

1993年5月から軌道を下げ、円軌道に近づけて重力場の測定を行っている。金星の大気による影響が大きく、探査機の軌道を維持する事が非常に困難であると予想されるが、その結果が期待される。

それはともかくとして、大きさも質量も地球に近い金星が、地球とどうしてこのようにも違うのか、未だなぞの部分が多い。それを解く鍵は内部の熱にあると考えられる。従って、①金星は地球よりも早く内部が冷える構造をもっていたため、または②地球よりも最初から内部が冷たかったためにマントル対流が活発でなくプレートのサブダクションが起こりにくい。③金星の大気により地表が高温になっているため、地下の浅いところの岩石が延性的なふるまいをするため、など色々な可能性を検討する必要がある。

これらを解く手がかりとして、重力の精密測定の外に、金星の回転や振動などの計測が必要となるであろう。また、火星などのプレート運動と惑星内部についてもその実態を調べてみる必要がある。

### 4. 惑星の深部とコア

惑星のコアが、プレート運動や惑星の力学進化に無視できない影響を与えていることは、地球でのこれまでの研究から容易に推論できることである。地球においては、コアの熱的な影響がマントル対流を生じさせる大きな原因として取り上げられている[9], [28]。また、地球の過去においては、自転速度が現在よりも早かったために、コアの共鳴周期と潮汐の周期 (日周) が一致していた時代 (5億年前) があったと考えられ、それによって、赤道傾斜角が大きく変わった可能性を指摘する研究がなされている[34]。すでに述べたように地球だけではなく他の惑星においても章動における流体核の共鳴等が考えられ、また、自転速度の変化

に伴うコアとマントル間の相対運動が生じている可能性がある。それらの観測により、惑星のコアの大きさやその運動の性質を明らかにすることが可能であろう。

火星や金星、月においては、地球のような磁場が見い出されない。その原因が、自転周期やコアのサイズ等とどのように結びつくのかを見極めることは特に重要な問題であろう。

月の流体のコアは、その半径が200kmから500kmの間で色々推定されており[2], [17], 密度や流動性も未だ確定したものがない。秤動や潮汐からコアの状態を決めることは月の起源を解明するためにも重要である[7]。コアの質量によって月に含まれる鉄等の成分量が決まるからである。月は、地球の潮汐トルクによって赤道傾斜角および自転速度が大きな変化をとげたと考えられる。その場合に、月のコアも何らかの作用を及ぼした可能性がある。また、月の形の中心は重心に対して、2kmも地球の側にずれている。月の地殻の厚さは地球に向いている側が60km前後であるのに対して、裏側では100~150kmと大変厚いものになっている。こうした原因が何によるものか、月の進化の歴史と合わせて興味深い問題であろう。

## 5. 月および惑星の計測

多くの課題が林立している。しかしその研究体制が日本ではほとんど整っていないと言っている。惑星科学の推進のためには、その辺の整備が是非必要である。そして「また隗より始めよ」である。何と言っても月は地球に最も近い天体である。し

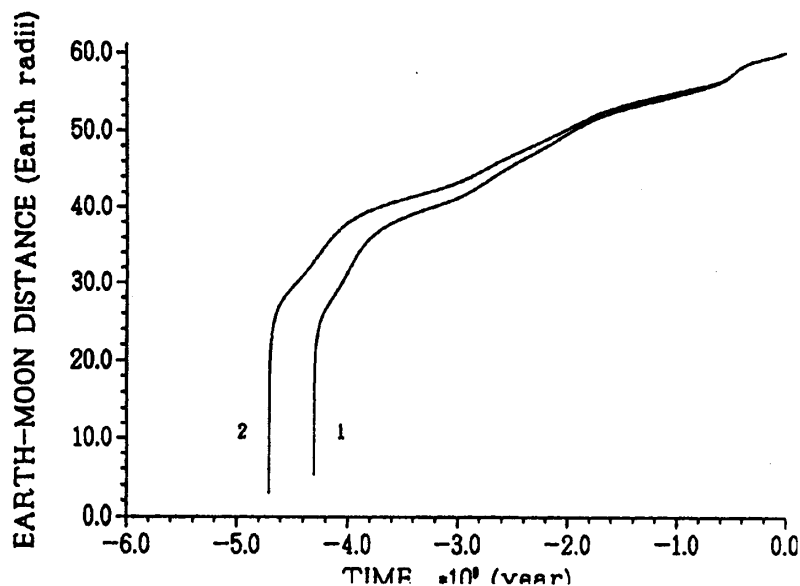


図2. 地球-月間の距離の潮汐進化. 横軸は時間で、右端が現在. 1は太陽潮汐力を入れない場合. 2は太陽潮汐力を入れた場合の推定値(安部他1992).

かも、地球の状態の変化に深く関わって来たのである。前節でも述べたように、コアについては未だ不明の点が多い。地球・月系の力学進化についても未解決の部分が多い。月についての計測が進めば、非保存系の力学についての理解が格段に進むであろう。その中で相対VLBIを主とする月の計測は今後特に有望なものになると期待される。米国を中心に、月面の高度分布の精密測定も間もなく始まろうとしている。日本での月探査計画等によって、我々が開発したVLBI電波源が月まで運ばれれば、月の秤動と重力場が精密に決定できる。宇宙開発事業団においても、来世紀にむけて、月の周回衛星および月面ローバーの計画の検討が開始されており、世界的にも月への再探査熱が高まっている。月での実験を通して、遠い天体の計測への準備が格段に進むであろう。そして、火星や金星に重力変化計を設置して潮汐や変形を観測したり、また、小さな電波源と受信器を組み込んだものを火星や金星上およびその周回軌道上に投下することにより、地上からの観測によって火星

や金星の回転を精密決定することも決して夢ではないであろう。そのような開発をここ数年の間に進めてゆく必要がある。

## 参考文献

- [1] 安部 正真, 水谷 仁, 大江昌嗣, 田村良明, 1992: 地球-月系潮汐進化における太陽潮汐力の効果, 第14回太陽系科学シンポジウム集録, 11月30日～12月1日, 宇宙科学研究所, 1-6.
- [2] Bill, B.G., and Ferrari, A.J., 1977: A lunar density model consistent with topographic, gravitational, librational, and seismic data, *J. Geophys. Res.*, **82**, 1306-1314.
- [3] Goldreich, P., 1966: History of the lunar orbit, *Rev. Geophys.*, **4**, 411-439.
- [4] Goldreich, P., and Peale, S.J., 1970: The obliquity of Venus, *Astr. J.*, **75**, 273-284.
- [5] Greenberg, R., 1974: Outcomes of tidal evolution for orbits with arbitrary inclination, *Icarus*, **23**, 51-58.
- [6] Hanada, H., Ooe, M., Kawaguchi, N., Kawano, N., Kuji, S., Sasao, T., Tsuruta, S., Fujishita, M., and Morimoto, M., 1993: Study of the lunar core by the VLBI observations of artificial radiosources on the Moon, *J. Geomag. Geoelectr.*, **45**, 1405-1414.
- [7] Harris, A.W., and Ward, W. R., 1982: Dynamical constraints on the formation and evolution of planetary bodies, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **10**, 61-108.
- [8] Herring, T.A., Buffett, B.A., Mathews, P.M., and Shapiro, I.I., 1991: Forced nutations of the Earth: Influence of inner core dynamics 3, Very Long Interferometry data analysis, *J. Geophys. Res.*, **96**, 8259-8273.
- [9] Jeanloz, R., 1990: The nature of the Earth's core, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **18**, 357-386.
- [10] Kawakami, S., and Mizutani, H., 1987: Thermal history of the Jovian satellite Io, *Icarus*, **70**, 78-98.
- [11] 川上紳一, 1989: トリトンの潮汐加熱と火山活動, 地球及び惑星内部研究会集録, 12月20～22日, 国立天文台水沢, 121-125.
- [12] Lago, B., and Cazenave, A., 1979: Possible dynamical evolution of the rotation of Venus since formation, *Moon Planets*, **21**, 127-154.
- [13] Laskar, J., and Robutel, P., 1993: The chaotic obliquity of the planets, *Nature*, **361**, 608-612.
- [14] Ma, C., Ryan, J.W., and Caprette, D., 1989: Crustal Dynamics Project data analysis-1988; VLBI geodetic results 1979-87, NASA Tech. Memo., 100723, Goddard Space Flight Center.
- [15] Mathews, P.M., and Shapiro, I.I., 1992: Nutations of the Earth, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **20**, 469-500.
- [16] Naito, I., and Kikuchi, N., 1990: A seasonal budget of the Earth's axial angular momentum, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 631-634.
- [17] Nakamura, Y., 1983: Seismic velocity structure of the lunar mantle, *J. Geophys. Res.*, **88**, 677-686.
- [18] 並木則行, 1993: 金星地殻の変成作用と山脈の隆起, 遊星人, 第2巻, 第1号, 2-11.
- [19] Ooe, M., Sasaki, H., and Kinoshita, H., 1990: Effects of the tidal dissipation on the Moon's orbit and the Earth's rotation, AGU, *Geophys. Monograph*, **59**, 51-57.
- [20] 大江昌嗣, 河野宣之, 花田英夫, 久慈清助,

- 岩館健三郎, 佐藤克久, 鶴田誠逸, 亀谷 収, 1993: VLBI用月面電波源, ペネトレーター貫入実験報告書 (第14回), 宇宙科学研究所, 10月13日, 75-84.
- [21] Peale, S.J., 1988: The rotational dynamics of Mercury and the state of its core, in *Mercury*, ed. F. Vilas, Chapman, C.R., and Matthews, M.S., pp.461-493, University of Arizona Press, Tucson.
- [22] Rosen, R.D., Salstein, D.A., and Wood, T.M., 1990: Discrepancies in the earth-atmosphere angular momentum budget, *J. Geophys. Res.*, **95**, 265-279.
- [23] Rubincam, D.P., 1990: Mars: Change in axial tilt due to climate?, *Science*, **248**, 720-721.
- [24] 笹尾哲夫, 1991: VLBIで見る地球中心核, 地球コア研究会集録, 12月, 国立天文台水沢, 377-380.
- [25] Sato, K., 1990: Plate motion parameters estimated from changing rates of VLBI and SLR baseline lengths, *Tohoku Geophysical Journal*, **32**, No.3,4, 107-126.
- [26] Sato, T., Shibuya, K., Okano, K., Kaminuma, K., and Ooe, M., 1993: Observation of Earth tides and Earth's free oscillations with a superconducting gravimeter at Syowa Station, *Proc. NIPR Symp. on Antarctic Geosciences*, **No.6**, 17-26.
- [27] 佐藤忠弘, 渋谷和雄, 福田洋一, 井田喜明, 中川一郎, 大江昌嗣, 1993: 南極超伝導重力計, 月刊地球, Vol.15, No.2, 102-107.
- [28] Schubert D.G., and Glatzmair, G.A., 1989: Three-dimensional spherical models of convection in the earth's mantle, *Science*, **244**, 950-955.
- [29] Slattery, W.L., Benz, W., and Cameron, A.G.W., 1992: Giant impacts on a primitive Uranus, *Icarus*, **99**, 167-174.
- [30] Solomon, S.C., et al, 1992: Venus tectonics, An overview of Magellan observation, *J. Geophys. Res.*, **97**, 13199-13255.
- [31] Stofan, E.R., 1993: The new face of Venus, *Sky & Telescope*, August, pp22-31.
- [32] Topex/Poseidon Research News, 1993: Issue 1, Sept. JPL.
- [33] Ward, W.R., 1975: Past orientation of the lunar spin axis, *Science*, **189**, 377-379.
- [34] Williams, G.E., 1993: History of the Earth's obliquity, *Earth-Sci. Rev.*, **34**, 1-45.