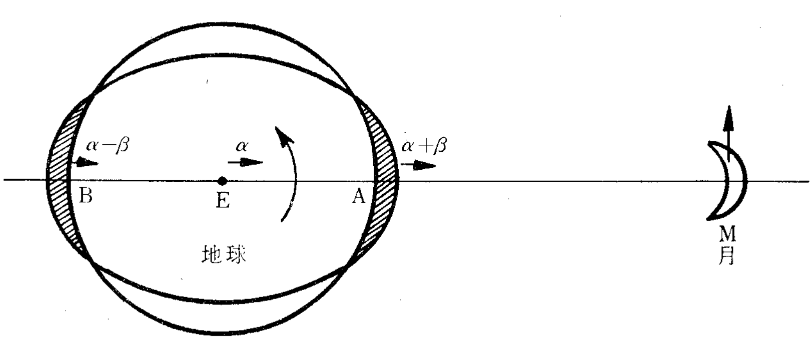
月・惑星の自転と公転の関係

古　在　由　秀*



第1図　潮を起す力

1. 最近の電子工学の急激な発達により，ここ数年来金星や水星のレーダー観測が行なわれるようになり，今まで天文単位でしかくわしく表わされていなかったこれらの惑星と地球との距離を直接測定し，一天文単位の長さが

149 598 200±300 km

と求まったことは既によくご存知のことと思う.

レーダーの発信電波の周波数はよく分っているから，反射波の周波数を測定すれば，ドップラー効果により地球と惑星との相対速度が cgs 単位 (km/sec) で計算できる．相対速度も天文単位ではくわしく表わされていたから，このドップラー効果の測定からも天文単位が km で表わされることになる.

この場合，正確にいえば直接測定されるのは地球の自転運動にのった観測者と，電波を反射した惑星面上の点との相対速度である．このうち，観測者の地球重心に対する動きは，地球の自転運動についての我々の知識により充分よく分る．これに対し，惑星の，とくに水星や金星の自転運動ははっきりと分っていなかったし，電波が惑星面上のどの部分で反射したのたかも，現在の電波望遠鏡では決めかねる.

しかし，惑星面のみかけの中央部で反射した電波と，へりの部分で反射した電波とでは，観測者までの距離の違いにより，受信の時刻に差が生ずる．また，この2つの部分では自転の速度に差があるから，受信電波の周波数もちがってくる．とくに，へりの部分はそのおのおのの点でも自転速度に差があり，そこに相当した時刻に受信した電波の周波数はひろがりをもつはずである.

このような，受信時刻の差による周波数の違いを測定できれば，これから惑星の自転周期，自転軸の方向なども決定できる.

このようにして，レーダー観測から金星の自転は逆行でその周期は 247±5 日，自転軸は公転の軌道面と 84°±2° 傾いているという結果が求まり，また水星についても，コーネル大学のプエトリコにある口径 200 m の電波望遠鏡を使って，自転周期 59±9 日，自転軸の方向は軌道面にほぼ垂直ということが分ってきた.

2. もともと金星の自転周期は，地球や火星ににてほぼ 24 時間と考えていた人も多かったようだし，19 世紀のはじめまでは，水星も同じく 24 時間位の周期で自転をしていると考えられていたようだ．19 世紀の終りになって，スキアパレリは水星の表面の模様をていねいに観測し，水星の自転速度はもっとずっとおそく，その周期は公転周期と同じ 88 日という結論をだした．すなわち水星はいつも同じ面を太陽に向けているというのである.

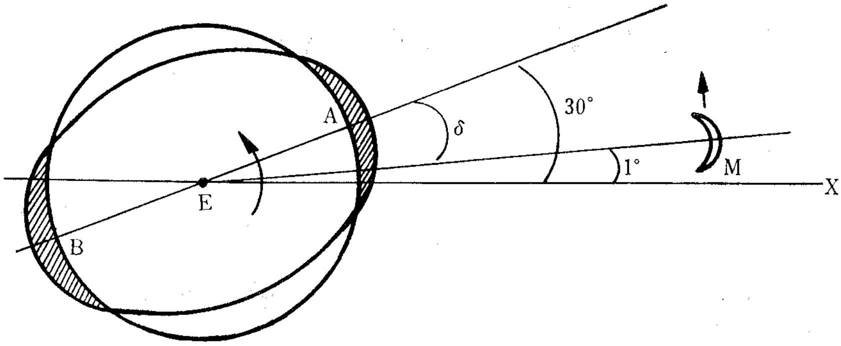
この結論はその後多くの人によってたしかめられ，もはや疑いのない事実として長い間うけいれられてきた．ところが，レーダー観測で周期が 59 日とはかられてから，昔の表面観測のデーターを調べ直してみると，59日周期というのもこれらと必ずしも矛盾しないことが分った.

そもそも自転周期と公転周期とが一致している天体は月で，これは潮汐摩擦のためと考えられている.

月は地球上に潮汐を起す．月と地球とはお互いの万有引力によって運動をしているのだが，月の重心Mと地球の重心Eとの間の引力は公転運動に使われる．(第1図) 月によりE点には α という大きさの引力が働いているが，地球は大きさをもっているので，地球上の各点に働く月の引力は等しくはない．すなわち，月に近いA点(第1図) での引力は $\alpha+\beta$，遠いB点では $\alpha-\beta$ となっている．このうちの α は公転運動に使われ．それ以外の力が潮汐を起す，A点では β，B点では $-\beta$ という引力が起潮力で，したがってA点では海水が月の方向に引きよせられ，B点では $-\beta$ という引力，すなわち β

---

* 東京天文台
Yoshihide Kozai: Spin-Orbit Interactions for the Moon and Planets



第２図　潮汐のおくれ　おくれる時間を Δt とすれば　$\delta=\Delta t(\omega-n)$ となる．

という斥力がそこでの海水をおしあげる．そこで，Ａ点とＢ点とで満潮となる．

ところが，起潮力によって海水はスムーズに動かず，満潮は月が子午線を通過して２，３時間後におこることが知られている．これは海水と海庭や海岸との摩擦のためで，とくにはばのせまい海峡や浅い海，ベーリング海などでは潮の流れもはやく，大きな摩擦が生ずる．

このために，EM と AB との方向は一致しない．満潮が２時間おくれるとすれば，その間に地球は 30 度もとの方向に対し回転し，月はほぼ１度公転して第２図のような具合になる．第１図の様な場合には何事もおこらないが，第２図のような状態になると，月Ｍにより地球にその自転角速度 ω を小さくするような偶力が働く．

もし，月の公転の角速度ｎの方が ω より大きいと，EM の方が AB よりはやくまわり，偶力により自転速度は速くなる．もっと正確に地球の赤道面と月の軌道面とのなす角 ε を考えに入れれば $\omega\cdot\cos\varepsilon$ とｎとの大小により自転速度は加速されたり，減速されたりすることが分る．

潮汐力は海水だけに働くのではなく，地殻にも働き，潮汐をおこし，ここでも摩擦が生じている．地殻の比重は水にくらべて大きいので，偶力の大きさはむしろ地殻の潮汐で決るといっても差支えない．この場合の δ という角は１度ほどであるが，もちろんこの δ という角が大きいほど，すなわち摩擦の大きいほど働く偶力の大きさも大きくなる．

3.　地球の自転速度がおそくなりつつあるということは，100 年のスケールでは月や太陽の動きをしらべ，また 1000 年ほどのスケールでは昔の日食の記録を調べることによって知られている．また，数億年のスケールでの１日の長さの変化は，その頃の珊瑚の化石をしらべることによって分る．

珊瑚には年輪とともに，１日毎の昼と夜との温度の違いによる成長の差が現われている．これを数えてみると，３億 5000 万年前には１年の長さは 400 日，すなわち，１日の長さが 22 時間たらずであったことが分る．

このように自転速度が変ると，月の公転の角速度も変ってくる．地球の自転軸にかんする慣性能率をＣとすると，その角運動量は $C\omega$，月の質量をｍ，地球からの距離をｒとすると，その公転の角運動量は mr^2n である．この２つの角運動量のベクトル的な和は保存される．すなわち ω，したがって $C\omega$ がへれば，mr^2n はふえなければならない．円運動の場合はケプラーの第３法則により n^2r^3 は一定であるから，n^2r はｒの平方根に比例する．そこで n^2r がふえるということは，ｒが大きくなること，すなわち月が地球から遠ざかることで，現在は一年に 3 cm ほどの割合で遠ざかっている，ｒがふえればｎは小さくなり，月の公転角速度は減速されている．

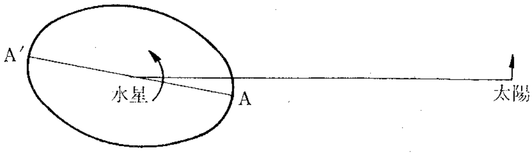
ω の値が小さくなると，第２図の δ の角度も小さくなってくる．そして最後には ω の値がｎにひとしくなる．この時，δ はゼロとなり，第１図の状態になる．すなわち，この状態ではもはや地球に偶力が加わらず，地球の自転周期と，月の公転周期が等しい状態が永久につづくことになる．こんなになるのは地球の場合は数十億年先のことである．

もし，ｎの値が ω より大きければ，自転角速度は加速され，公転の角運動量はへり，２つの天体は近ずく．

月は，その 81 倍の質量をもつ地球の潮汐作用をうけ，また月中にも摩擦があって自転速度が小さくなり，地球より前に自転周期と公転周期とがひとしくなってしまったのである．そこで，いつも同じ面を地球に向けているわけである．

4.　月と地球との質量比 1/81 という値は，太陽系内の衛星のうちでも最大であるが，次にこれが大きいのは海王星の衛星トリトンの 1/800 である．この衛星は海王星の中心から３万 5000 km（月と地球の距難は 38 万 km）のところを 5.9 日の周期で，海王星の赤道面と 20 度の傾斜角をなす軌道面上を逆行している．

逆行であるから，第２図で EM は時間がたつと EX よりも下にきて，δ の値，すなわち偶力は順行の場合より大きくなる．そこで，海王星の自転速度，角運動量 $C\omega$ が小さくなると同時に，トリトンの公転の角運動量 mr^2n はふえることになる．ただ，公転の角速度ｎは逆行でマイナスであるから r^2n の絶対値は小さくならなければならない．すなわち，この場合はトリトンが海王星に近ずきつつあるのである．トリトンと海王星が近ずく



第３図ａ　近日点での水星の赤道面
これに太陽潮汐による変形が加わる

と，起潮力もだんだんに大きくなり，近ずき方も距離の6乗に比例して大きくなる．また，逆行の角速度も大きくなって，δ という角度もまし，海王星への近ずき方も次第にまして１億年もかからないうちに，トリトンは海王星に衝突する．あるいはその前に，トリトンが海王星の大きな起潮力をうけ，分裂し，丁度土星の環のようなものが，海王星のまわりにもできるのではないかといわれている．

環になるとその１つ１つの粒子の質量は小さくなり，各々が勝手な方向の小さな潮汐を海王星におこすので，もはや海王星の自転周期も変らず，環もその位置にとどまるわけである．

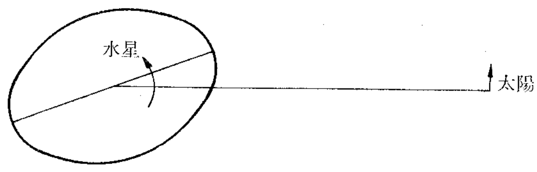
火星，木星，土星の１番内側の衛星も，わずかながらその中心の惑星に近づきつつあることが，観測から知られている．しかし，火星の衛星をのぞけば，惑星の自転角速度と公転角速度との関係からみると，潮汐摩擦によってむしろ遠ざかるはずの衛星で，その理論的説明はついていない．

5.　さて水星の自転周期であるが，これが公転周期にひとしいと理論的にも推定されていたのは，太陽の潮汐力のためである．ともかく水星は太陽に一番近い惑星であるので，たとえば地球より数百分の１の時間で，自転周期と公転周期とが一致してしまうはずである．

ところが，自転周期は 59 日とすると，まだ自転速度の方が1.5倍ほど速く，角速度がへりつつある状態がつづいていることになる．公転周期は正確には87.9693日で，その 2/3 倍は 58.65 日となり，これは観測された自転周期に一致する．

もし水星が扁平な回転楕円体ではなく，赤道面も第３図のように楕円形をした３軸不等の楕円体であると考えよう．第3図ａのようだと，この赤道面の扁平さに太陽の力が働き水星の自転速度は加速され，ｂ図のようだと減速される．水星の公転軌道が円であったり，また楕円でも公転周期と自転周期とが無関係だと，この加速と減速とがくりかえされ，長い目でみると水星の自転速度が大きく変ることはない．

しかし，いまかりに水星の自転角速度が，公転の丁度２倍と仮定しよう．そしてａ図で水星はその軌道上の近日点にいたとする．水星の軌道は惑星のなかで最も扁平なものの１つで，遠日点までの距離は，近日点までの太



第３図ｂ　太陽と水星の赤道面

陽からの距離の 1.5 倍ある．そして，太陽の偶力はその距離の３乗に逆比例するから，近日点では遠日点での３倍の偶力が働く．ところで近日点ではａ図のように加速されるが，この加速の方が途中でおこる減速より大きい．そして近日点ではいつもａ図のようになっているので，水星の自転速度は全体として加速されることになる．

水星の自転周期が 59 日と，公転周期の 2/3 倍になっている場合も同じように考えられる．はじめに水星が近日点にいてａ図のような状態だと，自転速度は加速される．そして，水星が１回軌道上を公転しまた近日点にもどってくると，水星はその間に１回半自転したことになり，A点と A′ 点とが入れかわるだけで図としてはまたａ図になる．この時も加速である．ともかく近日点での力が一番大きく，近日点通過の時はいつも加速されているのだから，全体として水星の自転速度が加速されていくことはたしかである．

もちろんこの他太陽の潮汐力により，水星には自転を減速させる力がはたらいている．これが上の力とつり合って現在の 59 日という自転周期が維持されるためには，赤道の長軸と短軸の差はほんの数十センチもあればよいという．水星の自転周期は潮汐摩擦により長くなってきたのであるが，公転周期と一致する前に，その 2/3 倍の 59 日でとまってしまったというわけである．

6.　金星の方は自転周期はレーダー観測から 247±5 日で逆行と求まっているが，これがもし 243.16 日ならば，金星と地球との１会合周期584日たつと，金星と地球とを結ぶ線に対し，やはり３軸不等と仮定した金星の赤道面の長軸が，これといつも等しい角度をなしていることになる．この金星に地球が偶力を及ぼすわけであるが，もちろんこの２つの惑星が一番近ずいた時，力も一番大きい．この時，金星の自転速度が加速されるようになっていれば，１会合周期後ふたたび地球と金星が近ずくと金星は加速される．このようにくりかえして働く地球の偶力と，潮汐摩擦のための太陽の偶力とがつり合えば，金星の今の自転周期も保持されるわけである．

7.　このようにすれば月，水星，金星の現在の自転周期は潮汐摩擦で説明でき，月だけが自転と公転の周期が一致してしまったわけである．これは月の自転にかんするカッシーニの第１法則で，今までのべてきたように偶然こうなってしまったのではない．

カッシーニの第２，第３法則は，月の赤道面と黄道面

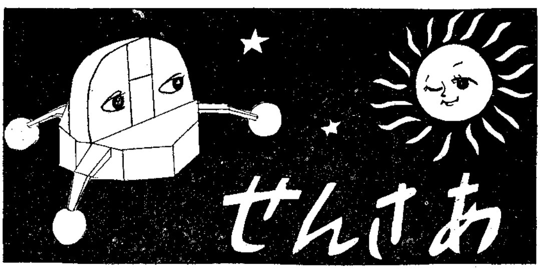
との傾斜角は常に1.5度で，黄道面を基準にすれば，月の軌道面の昇交点と，赤道面の降交点とはいつも一致しているとのべている．このふたつの法則は，必ずしも厳密には成立たないのであるが，これも第1法則が成立った場合に，理論的にみちびきだせる関係なのである．そして，赤道面と黄道面とのなす角は，月の力学的扁平率 (C-A)/C をあたえるのである．ここでCは自転軸のまわりの，Aは赤道上，地球に向く軸のまわりの慣性能率である．

月はいつも同じ面を地球に向けているわけだから，第1図でMを地球，Eを月と考えれば，地球の潮汐力により，月の赤道面はいつもこのようになっているはづである．すなわち，月の赤道面の長軸は地球の方向に向いているわけである．すなわち，月は3軸不等の楕円体をしていると推定できる．このように，月の形が球ではないための影響は，月自身の公転運動，とくに近地点や，軌道面昇交点の動きに現われる．もちろん，地球の形状による影響もこれらの動きに現われるが，地球の形状は人工衛星の動きからよく分っているので，それらは理論的に計算できる．

月の形状による影響を知るためには，月の赤道面の形と，$g=C/ma^2$（m は月の質量，aは赤道半径）という密度分布によって決る量を知らなければならない．逆に，近地点と昇交点の動きから，月の赤道面の扁率とgとが計算できる．こうしてgの値を求めてみると，月は内部がほとんどがらんどうで，表面にだけ物質が集中しているという結果がでてきてしまう．

また，月の3軸不等の形は，3軸の差が 1km 以上と求まるが，これに対して地球の潮汐の働きで，つり合いのとれている流体でできていると考えた月では，その差は 100m 以下でなければならない．

このような矛盾は，現在月のまわりをまわっている人工衛星の動きが解決してくれるであろう．現に，これらの軌道の変化は，月にも赤道面にかんする南北の非対称さのあることを示しているという．



☆月の裏側に日本人の名前　ソ連の A. J. **43**, No. 5 (1966) にゾンド3号で撮影した月の裏側の地形153についての命名が発表されていて，その中に木村栄，平山清次両氏の名が附けられている．Kimura というクレーターは月面経度−138°.5，緯度−18°.0，直径 26km，Hirayama は月面経度−127°.5，緯度−22°.5，直径34km.，両者は月面の比較的近い場所である．註によると，Kimura は 1870–1943 年の日本人天文学者で K. Hirayama は 1874–1943 年の日本人天文学者となっている．

☆〝せんさあ〟とは　本欄の題名〝せんさあ〟とは，いったい何のことかときかれることがよくある．これは英語の sense（感じるという動詞）に or をつけた sensor（感知するもの）という名詞であって，使用頻度が少なかったためか普通の辞書には出ていないが，新語ではないそうである．ことば本来の意味からは何かを「感知」するための道具をさす，最近，人工衛星やロケットなどに積んで，太陽の方向をさがしたりする道具などに「Solar Sensor」などと盛んに使われはじめた名前である．本欄の題名として採用したのも，おもしろいニュース，トピック，ゴシップなどをすばやく〝感知〟して，会員のみなさんにしらせるためという様な意味である．数年前本欄の題名として使われていた〝ぴんとぐらす〟も，同じ様な発想に基づいていることは云うまでもない．