

## 国立天文台ビデオシリーズ 「不思議の星地球」

宇宙空間に浮かぶ地球の回転には、自転速度の変化、コマのように首を振る歳差・章動、自転軸が地球の中心軸からずれて回転する極運動、の三種類の変動がある。回転変動の観測から地球の素顔にせまるこの学問分野で日本の研究者たちが世界的な業績を積み上げてきたことはあまり知られていない。

物語の舞台は岩手県水沢。20世紀初頭木村栄が発見した「Z項」のエピソードに始まり、現在進行中の月探査計画へと引き継がれてきた研究の歩みをたどる。再現ドラマや生のインタビューを交えて惑星「地球」に取り組む人々の姿を描き、回転変動や潮汐の観測で解き明かされてきた地球の意外な姿と、月惑星研究への展望を紹介した。

明治32年、わが国で初めての国際共同天文観測が岩手県のとある町で始まりました。その二年後ドイツの中央局からきた手紙によって若き所長木村栄は窮地に立たされます。しかしそれを契機に予測をこえた地球の自転運動の複雑さが明らかになってゆきます。

絶え間なく何者かに揺さぶられる地球、その奥深く隠された巨大な金属の海、風でふらつく一日の長さ、不思議の星の研究者達が地球の次に目指す星はどこでしょう。百年の時の流れを追いながら地球回転の研究、地球システムの理解、惑星科学への発展等をご紹介します。



江戸の伸縮計・傾斜計

企画：文部科学省国立天文台  
制作：株式会社 イメージサイエンス  
販売元：財団法人 天文学振興財団  
住所：〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内  
制作：2003年 / 発売：2003年12月 / 定価 2,950円(税込)

国立天文台  
ビデオシリーズ

第6巻

不思議の星・地球



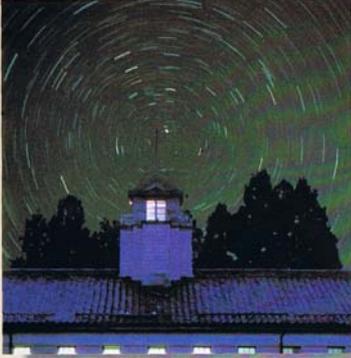
VHS25分

国立天文台ビデオシリーズ 6

### 不思議の星・地球

最も身近な星・地球、でも普段は星として意識することは多くありません。地球を星としてみてはじめてわかることもあります。

そんな地球を対象とした天文学の物語です。



旧本館の観測塔とその背後の北極星

企画：文部科学省国立天文台  
制作：株式会社 イメージサイエンス

## 内容の解説

### 地球の回転とその変動

地球の回転（自転）はわずかですが様々な原因で変動しています。その計測や変動の原因を探る研究は昔から天文学と地球科学の境界にある重要な学問分野として多くの研究者を惹きつけてきました。このビデオ「不思議の星地球」は国立天文台の地球回転研究系・

水沢観測センターの研究内容を通じて普段見過ごされがちながら魅力にあふれた学問分野「地球回転」の一端をご紹介します。この解説はビデオだけでは理解が難しいもの、より理解を深めてほしいことについて多少詳しく説明しています。対象としては中学や高校の理科の先生、理科系の大学生程度を考えています。文章だけではわかりづらい点多々ありますので、ビデオのCGと合わせて理解して下さい。

地球の回転には三種類の変動があります。一つは自転速度の変化で、文字通り自転の速さ（一日の長さと考えても良い）が変化するものです。もう一つは極運動、ビデオで登場する水沢の「臨時緯度観測所」は当時発見されたばかりの極運動を測るために世界展開された観測所の一つなのです。極運動は地球の自転軸、すなわち北極と南極が地球に対して動くものです。三番目が歳差・章動、ビデオではz項の謎解きのところで登場します。これは地球の自転軸が、コマの首振りのように様々な周期で星々に対して動く現象です。一言でいえば極運動は地球の極の動き、歳差・章動は天の極の動きということになります。

歴史的にみた地球回転研究の天文学上の意義は、地球上のある点である時刻に星が見える位置を正確に予測することです。地球回転を測るということは、星々が存在する空間に対する地球の姿勢とその時間変化を測ることに他なりません。なお「星」には地球から惑星探査に出かける宇宙船も含まれます。はるか遠方の宇宙船を地球から追尾するためには地球の回転変動を正確に知る必要があるのです。これは地球回転変動研究の実用的な側面です。

しかし研究の興味の対象は、回転変動する地球そのものと言って良いでしょう。巨大な地球の回転をゆるがす力、その力に対する地球の応答、そこから見える地球深部の構造、それらは他の地球型惑星や衛星たちとの比較を通じて太陽系の起源と進化の研究にも関わってきます。地球には未知のことがたくさんあります。ビデオ「不思議の星地球」で地球惑星物理学の最先端を垣間見ることにしましょう。

## 木村栄博士と臨時緯度観測所

ビデオは明治時代の岩手県を舞台にはじまります。冒頭に登場するのは臨時緯度観測所の所長木村栄、眼鏡の若者は観測技師の中野徳郎です。木村栄は金沢出身、東京帝国大学星学科を卒業しました。1870年の9月生まれですからビデオの当時の年齢はおよそ30歳になります。オイラーが予測した地球の自由極運動がキュストナーやチャンドラーといった当時の天文学者によって発見されたのを受けて、世界中で緯度変化を同時に観測する国際協同計画「ILS:国際緯度観測事業」が始まりました。北緯39度8分という同じ緯度線上の点で観測を行い(世界中で同じ星を同じ高度で観測することにより系統誤差の発生を避けようとした)、その結果をドイツの中央局で解析して地球の極運動の様子を調べようという壮大な計画です。ドイツは当初水沢に観測要員の派遣を提案してきたのですが、それを断って国の威信をかけた観測事業に取り組んだのです。

極が地球上を動くと、それぞれの観測局の極からの角度つまり緯度が変化します。夜空の星は北極星の回りを反時計回りに日周運動していますが、北極星の地平線からの高さが緯度(天文緯度)です。当時の緯度観測では、眼視天頂儀とよばれる緯度変化観測専用の望

遠鏡を用いて、天頂付近の子午線を東から西へ通過する星が子午線を横切る時の高さ(南中高度といいます)を毎晩測ってその変化を求めていました。14ヶ月周期の緯度変化がチャンドラー運動と呼ばれる地球の自由極運動なのです。

地球の極がある方向にずれると、ずれた方にある観測局は極に近くなって緯度が高くなり、その反対側の局では逆に緯度が低くなります。局の経度を $\lambda$ とすると緯度変化  $\Delta \phi$  は、

$$\Delta \phi = x \cos \lambda + y \sin \lambda$$

という式で表されます。ここで  $x$  と  $y$  がその日の極の位置、つまり極の  $x$  軸方向および  $y$  軸方向へのずれを表します。地球上の様々な経度の観測局で測った緯度変化から、上の式を用いて  $x$  と  $y$  の値を求めます。しかし観測には誤差がありますから、すべての局の緯度変化の値を矛盾なく満足する  $x$  と  $y$  の組み合わせが求められることはありません。そこで最小自乗法と呼ばれる手法を用いて、観測された緯度変化にぴったり合わなくとも、全体をそこそこ良く再現するような  $x$  と  $y$  の値を推定するのです。



こうして推定した  $x$  と  $y$  の値から上の式で計算される緯度変化と、現実に天頂儀で観測された緯度変化の差を残差と呼びます。残差の大きさは観測誤差の大きさの目安となります。冒頭で木村がドイツの中央局のアルブレヒト局長から届いた書簡に書かれていたのは、「水沢局の残差が異常に大きい、観測に問題があると思われるので対処せよ」という内容でした。木村栄たちの面目はつぶれ、窮地に陥ったのです。ビデオの木村は一旦気落ちしますが、やがて気を取りなおして中野とともにその原因究明に立ち上がります。

### **z 項!**

観測装置や観測手順を徹底的に調べた結果それらに問題がないことを確かめた木村たちは、水沢の観測データの大きな残差の原因は自然現象の中にあるに違いないと考えました。世界各地の緯度観測局のデータを詳しく調べた結果、残差の中にある規則性が見いだされました。それは、観測された緯度変化には上の式の  $x$  と  $y$  の項に加えて、観測局の経度に関係ない第三の項があり、その項の大きさが一年周期で変化するというものでした。新しい項を  $z$  とすると、

$$\Delta \phi = x \cos \lambda + y \sin \lambda + z$$

となります。z 項を入れた式でもう一度世界中の緯度観測データを整理し直してみると水沢の観測データの残差が逆にもっとも小さくなりました。z 項が未知の自然現象を表すものと確信した木村はこの結果を天文学の専門誌 **Astronomical Journal** に発表、アルブレヒト局長も直ちにその価値を認め、木村の新しい式を中央局で採用しました。木村はピンチを乗り越え、それを逆にチャンスとしてしまったのです。

木村の z 項の発見は新興国家である日本から発信され、世界に認められた最初の科学成果の一つでした。木村は 1911 年の学士院恩賜賞、1937 年の文化勲章のいずれも最初の受賞者となりました。緯度観測所のあった水沢市ではいまでも文化会館を Z ホール、市内を走るバスを Z バス、スポーツ施設を Z アリーナと呼んで木村の快挙を今に伝えています。ビデオ撮影の舞台にも使用された明治 32 年の臨時緯度観測所創立当時の建物は国立天文台水沢観測センター内で木村記念館として木村初代所長の遺品や当時の観測装置などとともに大切に保存され、一般に公開されています。また木村の生い立ちや業績は金沢市の「ふるさと偉人館」でも見ることができます。

## 柔らかい地球とその回転

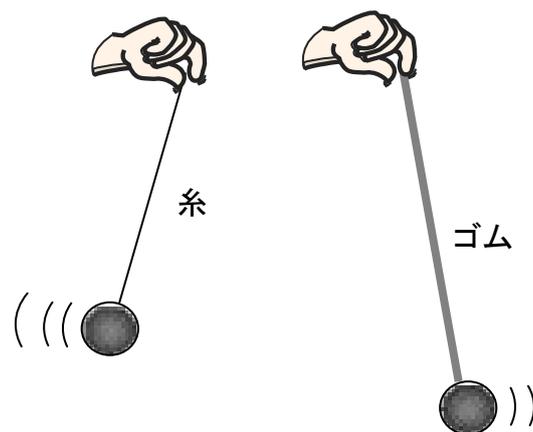
ビデオでは z 項が認められたことを喜ぶ中野技師の横で、木村が神妙な顔で「z 項の意味するものをつきとめる新たな課題が生じたことになる」と述懐する場面があります。z 項は観測された緯度変化と極運動のつじつまを合わせるために導入した経験的な項であり、その科学的な意味付けがその後の研究の課題として残ったのです。その解決は 1970 年の若生康二郎の登場を待たねばなりませんでした。ここではその前に地球の内部構造と回転変動の関係について解説することにしましょう。

まず地球の形です。公園の回転遊具で遊ぶ子供たちの映像とともに、回転する物体に働く遠心力、それに伴い地球も赤道部分が出っ張った回転楕円体（楕円をある軸の回りにぐるりと回してできる立体）になることが説明されます。地球中心と極の距離（極半径）と赤道までの距離（赤道半径）の差は地球半径約 6000km に対して 20km 程度の小さなものですからほぼ球形といっても良いのですが、CG ではわかり易くするために扁平率を強調しています。しかしわずかながらも遠心力で地球が扁平になることは、地球が剛体ではないことを意味しています。「地球は結構柔らかい」ことを理解するのはこのビデオの主旨の一つでもあります。では地球はどれくらい柔らかいのでしょうか。そのてがかりは極運動の周期にあります。

回転軸がずれると極運動が起こるわけを直感的に理解するのは簡単ではありません。地球が「出来の良いコマ」として、楕円体の中心軸の周りを回っているとしましょう。すると赤道部分の出っ張りに働く遠心力はうまく釣り合い、コマは直立してきれいに回り続けるでしょう。地球が「出来の悪いコマ」で少しずれた軸の周りを回ったらどうでしょうか。赤道部分の出っ張りに働く遠心力はバランスを崩し、コマの回転軸を傾けてなんとか中心

軸に一致させようとしします。この力は座標系をコマに固定することによって生じる見かけの力なのですが、これが極運動をもたらします。極運動の周期はこの力の大きさによって決まります。実際には自転速度が速いほど、また扁平率が大きいほど極運動の周期は短くなります。スイスの数学者オイラーは地球の扁平率と自転速度から剛体地球の極運動の周期を10ヶ月と割り出したのです。

チャンドラーが観測した地球の極運動の周期は10ヶ月ではなく14ヶ月でした。この違いは地球が剛体ではなく（力を加えると変形する）弾性体であることに由来します。振り子を用いてその理由をご説明しましょう。振り子の周期は錘の大小に関係なく糸の長さ  $l$  と重力加速度  $g$ （地表で約  $9.8\text{m/s}^2$ ）できまります。丈夫な糸で作った振り子は予測どおりの周期で振れることでしょう（実際昔はこの方法で逆に  $g$  を決めていたのです）。では柔らかいゴムひもで同じ長さの振り子を作ったとしましょう。ゴムは錘の重みで伸び、その分振り子は当初の予測よりゆっくりと振れることでしょう。柔らかい地球は、ずれた回転軸に合わせた遠心力で赤道の膨らみを新しい軸の周りに作り直してしまうので、軸がずれているという「自覚」が希薄になるため極運動がゆっくりになるのです。この周期の伸びから、地球が全体として「鋼鉄程度の柔らかさ」であることがわかっています。



#### 臨時緯度観測所から緯度観測所へ

振り子を放っておくとやがてとまるのと同じく、地球の自由極運動（チャンドラー運動）も理論的にはいつか止まります。「臨時緯度観測所」の名前には極運動の問題はすぐ解決するだろうという当初の考えが反映されています。ところが  $z$  項が発見されただけでなく、極運動自身もいつまでたっても消えるそぶりをみせません。国際緯度観測事業はそのまま継続し、大正9年には「臨時」が消えて「緯度観測所」が正式にスタートしました。また木村の働きによって上がった日本の地位を反映して、1922年には水沢局が国際緯度観測事業の中央局となり、木村が1934年まで局長を勤めることとなります。花巻出身の詩人・童話作家の宮沢賢治が水沢の緯度観測所を訪れ、木村博士が登場する作品（風野又三郎）を生んだのもこの頃だろうと考えられています。

自由極運動がいつまでも続くのは何を意味するのでしょうか。振り子がいつまでも振れ続けるには、時々重りをつついたり振り子をつまんだ指を揺らしたりしないといけません。

何が地球を揺さぶっているのかの謎解きは今日に到るまで続いています。原因としてまず考えられたのが地震です。大地震のあとにはしばしば地面の恒久的な変形、つまり地殻変動がみられます。これは地球の「形」が変わったことを意味します。従来の回転軸が突然中心軸でなくなる、いわば出来のいいコマが急に出来の悪いコマになってしまうようなものです。そうすると地球は極運動を始め、地震が次々に起これば極運動も続きます。しかしその後の研究で、世界中で発生する地震の地殻変動を全部足しても極運動の原因には小さすぎることがわかってきました。次に考えられたのが海や大気が地球上を動き回ることによって極運動が励起されるというアイデアです（振り子の錘の上を虫が動き回っているところを想像してみてください）。この考えは今主流になっています。自由極運動の励起源は今でも測地学の大きな問題ですが、大気がその本命であることを疑う人は多くありません。ビデオでは地球回転速度の変動原因として大気が再び登場します。「風が地球を揺さぶる」のは現代の地球科学では普通の考えなのです。

### 潮汐力と歳差・章動

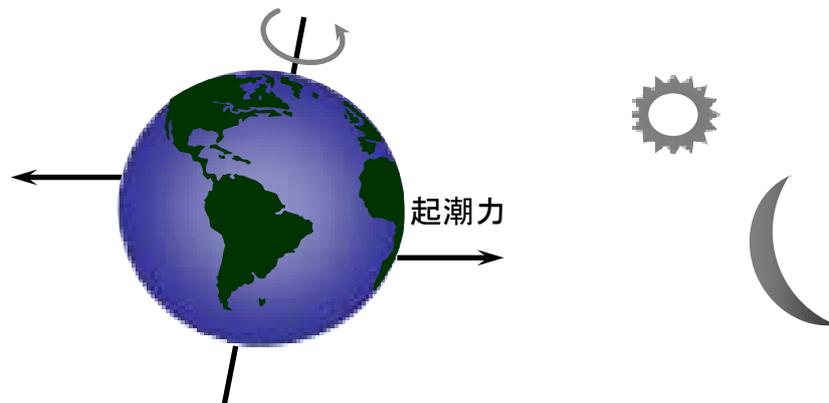
もう一つ地球に関する重要な話題として潮汐があります。海岸で見た潮の満ち引きの映像がビデオに登場しますが、その原因が月と太陽の引力であることは多くの方がご存じでしょう。正確にいうと引力そのものというより、月の引力が地球上の様々な場所で少しずつ違うことがその原因です。同じ地球上でも月に近いところでは引力が大きく、反対側では引力が弱くなります。この違いの分は潮汐力あるいは起潮力といわれ、地球の月の側は月の引力が「強い」分だけ（月の方向に）持ち上がり、一方反対側は月の引力が「弱い」分だけ（月と反対方向に）持ち上がります。こうして起潮力によって膨らみが月の側と反対側に二カ所できます。ちなみに月より弱いですが太陽の潮汐力もあり、両者が重なる満月と新月のとき潮の干満は最大（大潮）になります。潮汐力は固体地球全体に働きますから、その結果地球はわずかに変形します。ビデオに登場する江刺地球潮汐観測施設では、北上山地の花崗岩の岩体に掘った横穴の中で地球潮汐による地面の伸び縮み（水晶管伸縮計）、傾き（水管傾斜計）、重力の変化（超伝導重力計）などを精密に測っています。

地球回転の変動として極運動とならんで重要なのが歳差・章動です。これはコマが止まる前に行う「首振り運動」と似ています。極運動では「地球上」の北極の位置が変わるだけで、回転軸は外の世界に対してはほとんど動きませんでした。歳差・章動では逆に地球の北極の位置はほとんど変わらず、外の空間すなわち「天球上」を極がぐるぐる動きます。その最大のものが周期 25,800 年の歳差です。現在地球の自転軸が向いているこぐま座のアルファ星を我々は北極星と呼んでいます。しかし歳差によって天の北極はそこからゆっくり離れてゆき、13,000 年ほど先には織姫星（こと座アルファ）を北極星と呼ぶことになるでしょう。一方章動は歳差以外の比較的短い周期の首振り運動の総称で、最大の 18.6 年周期の成分以下、半年、半月、一年、一ヶ月など様々な周期のものが知られています。

歳差・章動の原動力が潮汐力なのです。潮汐力は地球を両側に引っ張って変形させます。地球は赤道部分が出っ張った回転楕円体で、かつ太陽や月から見た自転軸が 23 度ほど傾いています。傾いた楕円体地球に働く潮汐力は傾きをもとにもどそうとする力（トルク、偶力）

を生みだします。地球の模型でインドネシアとブラジルのあたりに糸を一本ずつ張り付けて、糸を両側から引っ張ってみるとどうなるでしょうか。傾いた地球がまっすぐに立ちあがろうとするでしょう。実際には自転する地球は大きな角運動量を既に持っていますから、ジャイロ効果のため立ち上がりせずに自転軸が傾いたまま空間をぐるりと回るのです。月や太陽による潮汐力トルクは一定ではなく、公転に伴う距離の変化や、地球が傾いている向きに対して月や太陽の方向が周期的に変化することによって変動します。ちなみに歳差は月と太陽が地球に及ぼす潮汐力トルクの時間平均による効果で、半年や一ヶ月などの周期をもつ章動がその変動分に対応するものです。

極運動があると、北極を挟んだ二つの観測局で星の南中高度のずれ(緯度変化)が反対になることはすでにお話しましたね。では歳差・章動の場合はどうでしょう。この場合天の極(星の日周運動の中心)が動くわけですから、同じ星の南中高度のずれは地球上の経度によらず、どこでも同じになります。極運動の観測値に歳差・章動による見かけの緯度変化が混じっていると邪魔ですから、国際緯度観測事業の開始当時からあらかじめその分は差し引く約束になっていました。当時未知だった極運動に比べて歳差・章動は百年前には既に十分理解されていたと思われていたのです。では我々の知識が不完全で歳差・章動による分が残っているとしたらどうでしょう。極運動なら経度によってプラスになったりマイナスになったりするべき緯度変化に加えて、「経度によらない」一定の緯度変化が残るはずですね。



### 流体核共鳴 z 項の謎がとけた!

潮汐、歳差・章動と登場人物が揃ったところでいよいよ z 項の謎解きの話題に移りましょう。木村が発見した z 項の原因についての研究は遅々として進みませんでした。地球回転変動の研究はチャンドラー運動の励起と減衰、チャンドラー周期の精密決定など様々なテーマを持った一つの学問分野として発展してゆきました。当初毎晩四時間だった緯度観測の時間は六時間に延長され、当初の国際緯度観測事業は、南半球を含む様々な緯度の局も多く観測に参加する「IPMS:国際極運動観測事業」に引き継がれました。緯度観測所は 1962 年に IPMS 中央局になり、ビデオで若き日の若生康二郎が登場する 1970 年には鉄筋コンクリートの新庁舎が完成していました。

地震の波の伝わり方の研究の進展で、地球内部に関する理解も深まってきました。軽い

岩石から成る地殻、重い岩石で構成されるマントル、その下に溶けた高温の金属でできた外核、同じ金属ながらさらなる高圧のため再び固化した内核という地球の大規模層構造がわかってきたのです。金属でできた流体核は、海や大気をはるかにしのぐ地球最大の規模の流体です。地震波には縦波と横波があり、縦波は音と同じで空気中も水中も伝わります。一方横波は岩石のような固体中しか伝わりません。地球の中心を通る地震波が縦波だけであることから地震学者が流体核の存在に気づいたのです。流体核をもつ地球とすべて固体から成る地球では回転の仕方がやや異なります。同じ重さの生卵とゆで卵の違いは目でみてもわかりません。でも回してみたら生卵は中身が素直に殻と一緒に回らないので簡単に区別できますね。それと同じ原理で、地球に流体核があることは回転の変動からもわかるのです。

流体核を持つ地球独特の回転変動の代表格が「自由核章動 (Free Core Nutation)」です。一般に振動現象には自由振動と強制振動があります。自由振動はその物体固有の周期で揺れるもので、何らかの力で励起されたあとは振り子のように勝手に揺れながら徐々に減衰してゆきます。地球ではチャンドラー極運動がこれに相当します。強制振動は物体の都合に関係なく外から強制的にある周期で揺さぶるもので章動がこれに相当します。強制振動の周期と物体固有の自由振動周期が一致した場合、共鳴によって外力の大きさから期待されるより大きく揺れます。ビデオではブランコで遊ぶ子供が登場します。ブランコの揺れは自由振動、その周期に合わせて外から強制振動させてやると共鳴を利用して揺れを大きくできるわけです。

地球の章動にも、一年よりやや長い周期の自由振動モードがあります。これは流体核とマントルが別の軸の回りに自転することによって、楕円体である核マントル境界面を通じて互いにトルクを及ぼし合うことによって起ります。この自由核章動の周期に近い強制章動があれば、共鳴によって本来の振幅が増幅されます。実際には年周や半年周の章動がこの流体核共鳴の影響を受け、流体核がないときの理論的な章動の振幅と異なった振幅で揺れます。木村の  $z$  項の原因はもうおわかりですね。当時の国際緯度観測事業で採用されていた剛体地球に基づく歳差・章動理論が流体核を持つ現実の地球の章動と合ってなかったことによって、その一部が極運動の観測データに洩れ込んでいたものが  $z$  項だったのです。

若生はこれを複数の証拠で確かめました。一つは六時間に延長された一晩の緯度変化の観測の中で  $z$  項の値そのものが変化することです。章動は観測局の経度によらない緯度変化をもたらしますが、その値は観測される星の天球上の経度（赤経と呼びます）によって変わります。したがって南中する観測対象星を次々と切り替えていく過程で  $z$  項の値も少しずつ変化するのはです。ビデオでは若生が「おや、一晩の間に  $z$  項が変化しているぞ」と叫んでいますね。もう一つは現在の若生氏の談話にあるように、当時一般的になりつつあった流体核を考慮した章動の新理論と古い理論の差が丁度観測された  $z$  項の値と一致したことです。木村の  $z$  項の謎は発見から 70 年後に緯度観測所の後輩によって解かれたのです。

## 自転速度の変化

明治時代の地球回転変動の観測は光学望遠鏡を用いた目視観測によっていましたが、現

在では電波望遠鏡を用いた干渉計(VLBI:超長基線電波干渉計)に代表される宇宙測地技術を利用した観測が主流となっています。ビデオでは水沢キャンパスに最近建設された直径20mの電波望遠鏡が登場します。VLBIでは電波望遠鏡を複数組み合わせることで目に見えない星からの電波を同時に受信し、観測局ごとの受信電波の位相差から地球の向きを割り出します。次々に電波星を切り替えて観測してゆくと地球の回転を精密に測ることができます。新しい方法による地球の姿勢の決定精度は1ミリ秒角、従来の光学観測より二桁良くなったこととなります。

宇宙技術を用いた地球回転の観測で最近明らかになってきたことは沢山ありますが、とりわけ重要なのは地球の回転変動に及ぼす大気の影響です。チャンドラー運動の励起に大気の関わりが重要であることについてはすでにお話しました。大気はさらに自転速度の変動にも重要な役割を果たしています。外界から孤立して回転する物体は角運動量(角速度に慣性モーメントを掛けた量)と呼ばれる回転の勢いを保存します。地球の場合その自転の角運動量が保存されます。そのかなりの部分は南極と北極を貫く軸の回りを回る固体地球が担っていますが、さらに偏西風、貿易風などの、緯度線上を東西に吹く大規模な風(帯状風といいます)もある程度の角運動量を持っています。地球の場合、固体部分の角運動量と風の角運動量の「和」が一定になるので、どちらかが速くなったらもう片方が遅くなって全体の角運動量が一定に保たれます。



ビデオで山に風がぶつかる映像が登場します。風が西から東へ吹いて、山にぶつかる場合を考えてみましょう。ぶつかった風はその分勢いを失って速度をゆるめます。風の角運動量が減るのです。一方山(固体地球)は風に押された分加速され、角運動量がわずかに増えます。こういった作用・反作用を通じて地球上のあらゆるものが互いに角運動量をやりとりしているのです。ビデオではVLBIで測られた地球(の固体部分)の回転速度の変化と、気象学的に測定された世界中の風が持つ角運動量の変化が対比されます。それらは別の物の回転を別の方法で観測したものなのにそっくりな変化を示しており、この考えの正しいことを示しています。宇宙からみた大気は地球の外側をはかなげに被う薄い層に過ぎません。その大気が地球本体の自転速度をコントロールするなんて「不思議の星」の面目躍如といえるでしょう。

角運動量が保存されるなら、風によるわずかな変化を除けば地球は遥か昔から未来永劫ほぼ同じ自転速度で回り続けるのでしょうか。実は何十億年という長い時間幅で考えると

そうでもないのです。月が少しずつ地球の角運動量を掠め取っているからです。月の潮汐力によって月の側とその反対側の海水が盛り上がります。このとき海水の移動には時間がかかるため、海水の盛り上がりが最大になる時刻は月が真上にくる時刻よりやや後になります。海水の膨らみの方向と月の方向が微妙にずれてしまうのです。地球の赤道のふくらみに月や太陽の潮汐力が働くと地球の傾きをもとにもどそうとするトルクが働いて地球の首振り運動が生じることは既に説明しましたね。それと同じ要領で、月の方向からややずれた方向に盛り上がった海に働く潮汐力は地球の回転を止めようとするトルクになります。その結果地球の自転は徐々に遅くなり、一日の長さは長くなってゆきます。

一方地球が太陽の回りを回る周期（一年、公転周期）は変わりませんから、一年に含まれる日数がだんだん減っていくことになります。これは何億年前という昔の珊瑚の化石の成長線（木の年輪のように珊瑚の成長に伴って一日や一年に対応する線ができる）を調べることによって確かめられています。また歴史に記録されている千年、二千年という比較的最近の日食の記録から、地球自転速度を一定としたときに日食が見られる地域と実際に日食が観測された地域のずれからも自転速度の永年減速の手がかりが得られています。

## 地球から月へ：月の測地学

地球の自転が少しずつ遅くなるということは角運動量保存の法則が成り立たないことを示しているわけではありません。この場合地球と月を合わせた全体(地球一月系)の角運動量が保存されているのです。月が地球自転にブレーキをかける反作用として月は地球から角運動量を受け取り、毎年数センチずつ地球から遠ざかってゆきます。時間を遡れば月はかつて地球のごく近くにいたことになります。40億年以上前、生まれたての月は地球のすぐ近く（軌道半径約2万キロ、現在は38万キロ）を公転し、一方地球はわずか五時間で一回転(自転)していたのです。地球の海は比較的早い時期に生まれたと考えられていますが、当時の潮の満ち引きは、速さ、振幅ともに想像を絶するものだったでしょう。

月の起源に関する諸説は、昨今巨大衝突説という有力な説に収束しつつあります。これは生まれて間もない地球に火星サイズの他の天体が衝突、その時飛び散った岩石のかけらが集まって月ができたというものです。飛び散ったかけらは土星の輪のように地球の回りを取り囲みます。それらはひとつに集まろうとする自己重力と、集まった塊を引き裂こうとする地球の潮汐力のせめぎあいをかいくぐり、やがてロシュ半径（その半径を境に内側では潮汐力が強く外側では自己重力が強い）のすぐ外側に月が誕生するといわれています。こうして生まれた月は、現在に至るまで海洋潮汐を通じて地球の角運動量を奪いつつ地球から遠ざかってきました。月には意外な役割もあります。地球は月という比較的大柄な衛星を与えられたせいで地球一月系として大きな角運動量を持っています。そのおかげで地球は惑星の影響で自転軸が極端に大きく傾くことを免れてきたと考えられています。月は地球の自転軸を適度な傾きに保持して季節変化をマイルドに保つことによって文明の発達にも寄与してきたのです。

ビデオの最後に、地球から月へと向う測地学の流れ、それに取り組む研究者グループが登場します。このビデオで一貫してご紹介してきた、地球の形や回転変動、重力、潮汐、

地殻変動等を扱う学問は「測地学(Geodesy)」と呼ばれます。この場合研究の対象が地球ですが、他の天体の形や重力を調べても良いのです。そんな流れのひとつとして国立天文台が取り組んでいるのが月の測地学です。数年後に打ち上げが予定されているわが国の月探査周回衛星 (SELENE) 計画ではカメラや磁力計などに加え、月の素顔に測地学的に迫る観測装置がいくつか搭載される予定です。月を周回する衛星の軌道のわずかな変化から月の重力場の詳細な様子を知ることができます。また衛星から月に向かってレーザ光線のパルスを発射してその往復時間を計ることによって月表面の地形を求めることができます。このような月の測地学を我々は「測月学(Selenodesy)」と呼んでいます。

重力と地形の組み合わせからわかるのは月の「硬さ」です。地球は生きた星ですから現在も山が造られています。月にはそのような造山運動はありませんが隕石の衝突によってクレーターができます。地面にでこぼこがあると重力もでこぼこになります(重力の強い場所と弱い場所ができる)。硬い星と柔らかい星ではでこぼこがその後たどる運命が異なります。柔らかい星のでこぼこは時間がたつと平らになったり、地形のでこぼこは残っても重力のでこぼこが消えたりします(「アイススタシーが成り立つ」といいます)。固体の岩石でも温度が高いと長い時間の間に流動・変形しやすくなります。岩石で出来た地球型惑星や衛星の硬い柔らかいは、内部の温度を反映していると考えられます。岩石のかけらが集まって生まれた月の表面は溶岩の海で覆われていました。この熱い月がどのように冷えていって現在の状態になったのでしょうか。

月にも地球と同じような回轉變動があると言われています。月の中心にも地球のような流体核があって月の章動や極運動に影響をおよぼしているのでしょうか。月にチャンドラー運動のような自由極運動があるとしたら、大気も海もない月で誰がそれを励起しているのでしょうか。地震や火山でにぎやかな地球と対照的に、すっかり冷え切ってしまったかのように見える月。でもその最深部ではとけた鉄の中心核がまだひそやかに動いているのかもしれない。臨時緯度観測所で木村栄たちが地球の回転を測り始めて百年、その間に地球についての謎は次々に解かれてきました。でも同じような謎が月ではまだまだ謎のまま残っています。惑星についても同じことが言えます。自転が止まったかのような金星、地球のように傾いて同じような速さで回る火星。そこでも大気が自転の変動に一役買っているのでしょうか。地球にz項をもたらした強制章動と自由核章動の共鳴はあるのでしょうか。次の百年、木村の後継者たちが開拓すべき処女地はまだたくさんありそうです。

(文責 国立天文台水沢観測センター長 日置 幸介)