

## 地動説から古典力学へ

大橋由紀夫

第4回で述べたように、コペルニクスの歴史的意義は、プトレマイオスの天動説に匹敵する精度を持つ地動説の数学的理論を構築したところにある。もしプトレマイオス体系と違うモデルを考えるなら、第1図(後にティコ・ブラーエが実際に提唱する)のように太陽は地球の周りを回るが地球以外の諸惑星は太陽の周りを回るというモデルと、地動説(コペルニクス体系)と両方が考えられ、両者は幾何学的には同等である。プトレマイオス体系では外惑星の周転円や平均太陽の運動がすべて相似であるのは偶然にしか過ぎないが、これは第1図でも地動説でも、太陽または地球の運動の現れとして統一的に理解できる。コペルニクスも両方の可能性を考えた可能性があるが、地動説を選んだ理由について、スワードローの興味深い説がある<sup>1)</sup>。もし第1図のようであると太陽の軌道と火星の軌道が交差することになるが、天体は実在する固い天球に乗っていると信じていたコペルニクスは天球の交差を認められず、天球が交差せずにすむ地動説を選んだ、というものである。なお、天球の交差が困るなら、周転円と導円の交差も問題になると思うかもしれないが、当時は、第2図のように導円はドーナツ状の空間になっていて、その空間を周転円が転がっていくと考えられていたので、差し支えなかった。スワードローの説は非常に有力な説であるが、近頃の日本の概説書で、

コペルニクスは天球の交差を避けるために地動説を選んだことを事実であるかのように書いているものがあるのは問題である。スワードローの原論文を見ると、自身の説は文献的証拠のない推測(speculation)であると明言している。これは、まことに学問的に公正である。概説書でも、「～である」というのと「～という説が有力である」というのは区別すべきであろう。

さて、前回述べたようにコペルニクスが等速円運動に固執し、(スワードローの推測が正しければ)天球の実在を信じたのは、アリストテレス的自然観が当時いかに強固なものであったかを示している。これを打破するきっかけを作ったのは、ティコ・ブラーエやケプラーであった。ティコ・ブラーエ(Tycho Brahe, 1546~1601)<sup>2)</sup>は、1572年にカシオペア座に出現した新星を観測した。アリストテレス的自然観では地上界では生成消滅はあるが、月から上の天上界は永遠不滅の世界と考えるので、新星は大気中の現象ということになる。しかし、ティコ・ブラーエは、新星が日周運動する間に視差がまったく観測されないことなどから、それは月よりもはるかに遠い恒星界の現象であることを明らかにした。視差について教室で実感するために、第3図を使って実習するのも面白い<sup>3)</sup>。地球の中心Aと観測者Bから見た天体の方向の違いを「地心視差」といい、天体が天頂の

方向 C にあればゼロであるが、天体が地平線の方向 D にあれば最大値  $\theta$  になる。地平線の方向の地心視差  $\theta$  を「地平視差」という。さて、月の近辺にある天体の地平視差  $\theta$  を求めてみよう。教室で『理科年表』などを参照できれば、地球や月の軌道の半径を調べて計算すればよいが、大教室などでは、月の軌道の半径は地球の半径の約 60 倍と提示するとよい。すると、 $\sin \theta \doteq 1/60 \doteq 0.0166$  ということになる。教室で関数電卓などが使えれば、逆三角関数の計算をすればよいが、大教室などでは、あらかじめヒントとして  $\sin 57' \doteq 0.0166$  の前後の三角関数表を提示しておくとうい。さて、月の距離にある天体の地平視差は約  $57'$  (57 分) であることがわかるが、月の視直径(地球から見た月の見掛けの大きさで、角度で表わす)は約  $31'$  であるから、地平視差はこれよりも大きく、肉眼観測で十分にわかる大きさであることが実感できる。つまり、月の近辺の天体ならば、日周運動する間に、恒星との位置関係が肉眼で十分に分かるほど変化する、というわけである。

ティコ・ブラーエはまた、彗星の観測から、「固い天球」が実在しないことを明らかにした。現在では彗星の軌道は楕円などであることが分っているので、彗星が惑星天球を横切ることがただちに明らかになったと想像しがちであるが、ティコ・ブラーエが 1577 年に彗星を観測した時には、太陽の周りの円軌道を想定していたようである<sup>4)</sup>。したがって、その時すぐに固い天球を否定したわけではないと思われるが、その後、

他の人の観測データや解釈も参考にして、彗星までの距離の変化などから、1587 年までには固い天球の存在を否定するようになったようである<sup>5)</sup>。

さて、ティコ・ブラーエは、恒星の年周視差(地球の公転による一年周期の恒星の方向の変化)が観測されないことから、地球が動いているとは考えられず、第 1 図のようなモデルを提唱した。これは、地動説と幾何学的には同等であって、当時としては観測事実にも忠実な見識ある説だったと言える。もちろん、「固い天球」は否定していたので、軌道の交差は差し支えなかった。本当は、年周視差は存在するが、これは肉眼観測では検出不可可能な微小なもので、1838 年によくベッセルなどによって検出された。概説書などで、年周視差が地動説の証拠としてよく挙げられるが、歴史的には、19 世紀にはもはや地動説を疑う人はいなかったであろうから、年周視差によって地動説が立証されたとも言えない。(むしろ年周視差は、恒星までの距離の測定手段としての意義を持っている。)

ここで、内緒話をひとつ。歴史研究に「もしも」という非現実の仮定は禁物かもしれないが、もしも天動説が優勢だった時代に年周視差が検出されていたら、地動説の証拠になったのだろうか。実は、年周視差による恒星の見掛け上の位置変化は、周転円モデルにおける外惑星の周転円と相似である。(そもそも外惑星の周転円は、地球から外惑星を見た場合の年周視差の成分に相当するものである。) したがって、天動説論者

が年周視差は恒星の周転円にあたる、という説を唱えたりしなかつただろうか、と空想したくなる。もっとも、こんな話を教室でしたら、無用の混乱を起こすであろうから、内緒ということにしておく。

さて、ティコ・ブラーエの観測資料を受け継いだケプラー(Johannes Kepler, 1571~1630)は『新しい天文学』<sup>6)</sup>(1609)において、火星の軌道が楕円であることを明らかにした。ここでは紹介する紙面がないが、ケプラーの軌道決定の方法を教室で試みるのも面白い<sup>7)</sup>。ケプラーが、太陽が惑星に何らかの力を及ぼしていると考えたのも卓見である。

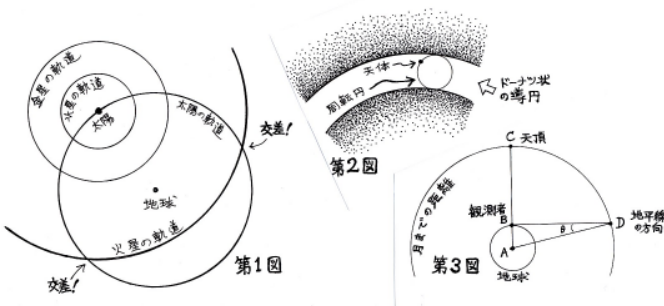
ケプラーと同時代のガリレーオ・ガリレーイ(Galileo Galilei, 1564~1642)をへて、ニュートン(Isaac Newton, 1642~1727)によって古典力学が確立する。それまでの幾何学的な惑星系モデルでは、なにを静止系と見るかの明確な基準がなかったが、古典力学によって初めて静止系(慣性系)の概念が成立した。地動説が受け入れられたのは、古典力学という新しい理論に裏付けられたからである。

Planetary Theory”, *Proceedings of the American Philosophical Society*, **117**(6), 1973, 423 - 512. なお、これに対する Rosen の反論が *Archives internationales d'histoire des sciences*, **25**, 1975, 82 - 92 にあり、Swerdlow の再反論が同誌 **26**, 1976, 108 - 158 にある。

- 2) ティコ・ブラーエについては、Dreyer: *Tycho Brahe*, Edinburgh, 1890, (再刊: Kessinger Publishing, n.d.)があるほか、Victor E. Thoren: *The Kord of Uraniborg*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990 が詳しい。
- 3) ティコ・ブラーエによる視差の測定について、広瀬秀雄『天文学史の試み』(誠文堂新光社、1981)、pp.123~128 および付録3が参考になる。ただ、そこでは「地心視差」と言うべきところも「地平視差」となっている。
- 4) Thoren 前掲書、p.126、Figure 4.4 参照。
- 5) Thoren 前掲書、pp.256~258 参照。
- 6) 『新しい天文学』の概要は、島村福太郎(記者代表)『ガリレー・ケプラー』(世界大思想全集)(河出書房新社、

1963)にある。英語への全訳は、Johannes Kepler (tr. by Donahue): *New Astronomy*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992 がある。

7) ケプラーの方法の教室での説明について、広瀬秀雄『初等天文学演習』(恒星社、1979)の第II章が参考になる。



### 注と参考文献

- 1) Swerdlow: “The Derivation and First Draft of Copernicus’ s