

二重周転円モデルとコペルニクス

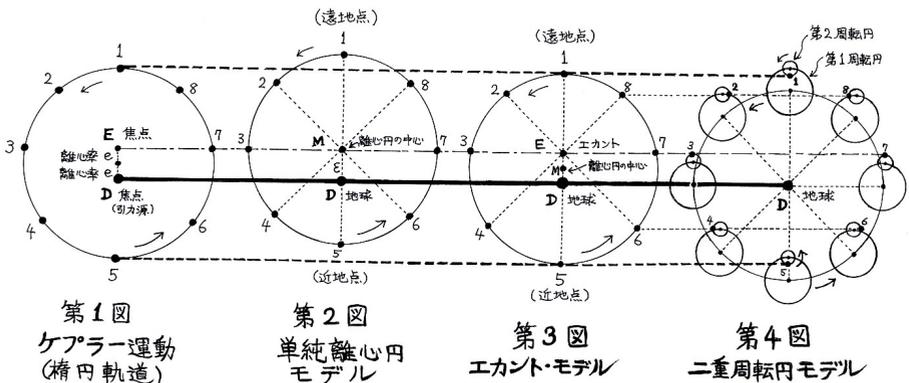
大橋由紀夫

すでに第1回で述べたように、ヒッパルコス(BC 2世紀)は、離心円を用いて太陽の中心差(楕円軌道を動くことによる平均位置との差)に相当するものを説明した。これは、天体が離心円上を等速円運動するので、これを「単純離心円モデル」と呼ぶことにする。さて、第1~4図のモデルで、点1から点8までが時間的に等間隔の天体の位置を表わすとする。第1図のようなケプラー運動(楕円軌道)を第2図のような「単純離心円モデル」によって天体の方向(黄経)を近似的に表わそうとすると、離心距離(第2図の $\varepsilon = DM$)を楕円軌道(長半径を1とする)の離心率の2倍(第1図の $2e$)にしなければならない¹⁾。したがって、第2図のように天体までの距離の変化は過大になる。

プトレマイオス(AD 2世紀)は金星の運動を周転円モデルで考えるにあたって、導円の離心距離を金星の平均太陽からの最大離角の変化、つまり地球から見た周転円の見掛けの

大きさの変化によって求めたので、離心円までの距離は実際の楕円軌道と同様になり、第3図のように離心距離 DM は楕円軌道の離心率 e に等しくなった。すると、等速円運動では天体の方向(黄経)が合わなくなるので、第3図の点3や点7の位置をケプラー運動に合わせるなら、 $ME = e$ となるような点 E (のちに「エカント」と呼ばれる)を考えて、そこから見て天体が一様に動くようにする必要がある。この「エカント・モデル」は、天体までの距離も妥当であるし、天体の方向に関しても「単純離心円モデル」より精度が良い²⁾。

さて、「エカント・モデル」は精度は良いが、アリストテレス的自然観から言えば、天上界の運動が等速円運動でないのが難点であり、イスラーム世界で、等速円運動の組み合わせだけで同様の結果を出す工夫が行われた。そのうちの 하나가アッ・シャーティル(ash-Shāṭir, 14世紀)の二重周転円モデルである³⁾。



第4図のように、第1周転円は導円に沿って(北から見て)反時計回りに等速運動し、第2周転円は常に第1周転円の遠地点側にあり、天体は第2周転円に沿って反時計回りに第1周転円の半分の周期(つまり2倍の角速度)で回転するとすれば、等速円運動だけの組み合わせでエカント・モデルとほぼ同様の結果が得られる。(なお教室での演習問題として、第3図との比較から第4図の2つの周転円の半径を計算してみるのも面白い。導円の半径を R 、第1周転円の半径を r_1 、第2周転円の半径を r_2 とし、第3図の DE から $2e = r_1 + r_2$ 、同様に $D5$ から $R - e = R - r_1 + r_2$ つまり $e = r_1 - r_2$ より、 $r_1 = \frac{3}{2}e$ 、 $r_2 = \frac{1}{2}e$ となる。)

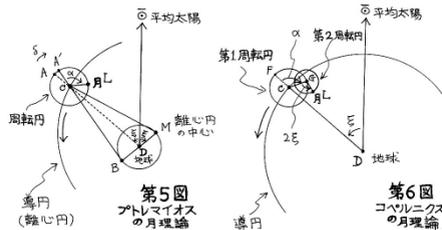
コペルニクス (Nicolaus Copernicus, 1473~1543)⁴⁾ も「二重周転円モデル」を利用した。アッ・シャーティルのコペルニクスに対する直接的影響の有無は不明である。コペルニクスは、二重周転円モデルや、あるいは、離心円と周転円の組み合わせ(二重周転円モデルでは、第2周転円はいつも第1周転円の遠地点側にあるので、第1周転円の役割を離心円でおきかえることも可能)によって、等速円運動だけの組み合わせによって、プトレマイオス理論の精度をそこなわずに理論の再構成に成功したのである。さて、コペルニクスは、地球以外の惑星である金星・火星・木星・土星については二重周転円モデル(あるいはそれに相当する離心円と周転円の組み合わせ)を用いたが、地球の軌道については単純離心円モデルを用いている。(水星の運動は非常に複雑な

ので、ここでは除外して考える。)つまり、コペルニクスの体系では地球は他の惑星と平等ではなく、依然として特別扱いなのである。このことは、プトレマイオス体系で惑星の導円にはエカント・モデルが使われているが、太陽の軌道にはヒッパルコス of 単純離心円モデルが踏襲されていることに起因する。上記のことから、コペルニクスは、単なる太陽信仰などのような思想的理由で地動説を唱えたのではなく、プトレマイオス理論にできるだけ忠実に(精度を損なわずに)座標変換を行なって、独自の数理天文学の体系を構築しようとしたのだろうと考えられる。コペルニクスが、太陽そのものでなく平均太陽(地球軌道の中心)を基準として体系を構築したのも、プトレマイオス理論を堅実に尊重しようとした現れと言えよう。(なお、地球が本当に諸惑星と平等になるのは、ケプラーが地球も含めた諸惑星の軌道を楕円と考えてからである。)

なお、二重周転円モデルという、今から見れば単なる数学的テクニックに見えるかもしれないが、そうとばかりも言えない。月の運動は複雑で、平均位置からのずれとして、「中心差」のほかに、「出差」などがある。中心差と出差を組み合わせると一つの周転円で考えようとする、朔望の時には周転円が小さく、半月の時には周転円が大きいかのように見え、さらに、朔望・半月以外の時には、遠地点の方向がすこし変化(第5図の δ に相当)するように見える⁵⁾。これを、プトレマイオスは、第5図のように、周転円までの距離(DC)が変化することなどによって

説明しようとした。たとえば、朔望の時($\xi = 0^\circ ; 180^\circ$)には、周転円が地球から遠くなり、半月の時($\xi = 90^\circ ; 270^\circ$)には周転円が地球に近くなる。このようにすると、月の方向(黄経)はうまく説明できるが、月への距離(したがって月の見かけの大きさ)の変化が非常に過大になる。このことを、コペルニクスは第6図のように二重周転円を用いて、距離の過大な変化をうまく避けて方向を説明できるようにした。これは、一つの見識である。(なお、アッ・シャーティルはすでに同様の月の理論を考えていた。)

地動説は、古代ギリシャのアリストタルコスも唱えていたが、プトレマイオスの理論と対等の精度を持つ地動説の数学的理論を構築したのはコペルニクスが最初であった。コペルニクスの歴史的意義は、地動説を天動説と対等な実用になる理論にしたところにある。(地動説が優位に立つのはケプラー以降である。)



注と参考文献

- 1) 「単純離心円モデル」で $\varepsilon = 2e$ となることの説明は、広瀬秀雄『天文学史の試み』(誠文堂新光社, 1981)の付録に説明がある。また、大橋由紀夫「離心円・周転円モデルとその東方への伝来についての試論」、『天文学史研究会』集録』

(国立天文台, 2006)、pp.19-31でも述べた。

- 2) 単純離心円モデルとエカント・モデルの精度については、前掲の大橋(2006)で論じた。
- 3) アッ・シャーティルについては、Roberts (*ISIS*, 48, 1957, 428-432), Kennedy and Roberts (*ISIS*, 50, 1959, 227-235), Abbud (*ISIS*, 53, 1962, 492-499), Roberts (*ISIS*, 57, 1966, 208-219) などがあり、これらは、E.S. Kennedy: *Studies in the Islamic Exact Sciences*, American University of Beirut, Beirut, 1983, にも収録されている。
- 4) コペルニクスの主著については、日本語では高橋憲一訳・解説『コペルニクス・天球回転論』(みすず書房, 1993) (第1巻の宇宙論的部分の訳) がよい。全訳は英語で3種あり、Wallis (tr.): *On the Revolutions of Heavenly Spheres*, (もと *Great Books of the Western World*, vol.16, Chicago, 1952 所収), 再刊: Running Press, Philadelphia, 2002 (この再刊はHawking (ed.)として出ている); Duncan (tr.): *Copernicus: On the Revolutions of the Heavenly Spheres*, New York, 1976; Rosen (tr.): *Nicolaus Copernicus: On the Revolutions*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1992 (1972年のものの再刊)である。
- 5) 月の中心差と出差の合成については、前掲の大橋(2006)参照。ただし、そこでの第4図の δ の位置が不適切だったので、本稿の第5図で置き換えてもらいたい。■