

宇宙観の革命

—天動説から地動説へ—

The Revolution of Cosmivision

—From the Geocentric to the Heliocentric System—

執筆プロフィール



中村 士
Tsuko NAKAMURA

◎1968年東京大学農学部農業工学科卒業, 1970年東京大学理学部天文学科卒業, 1975年東京大学理学大学院博士課程修了理学博士, 1976年東京大学東京天文台(現国立天文台)に入所, 1984-5年NASAスペース Telescope Science Institute 科学研究所研究員, 2006年国立天文台を定年退職, 2008年帝京平成大学教授・放送大学客員教授
◎研究・専門テーマは, 太陽系小天体の観測統計, および天文学史
◎帝京平成大学教授 現代ライフ学部 情報サイエンス学科
(〒170-0013 東京都豊島区東池袋 4-26-10 /E-mail: tsukonk@yahoo.co.jp)

1. はじめに

宇宙の中心は地球ではなく太陽であると述べた地動説の提唱は, 人類史上における世界認識の一大変革であったと言ってよい。進化論など, 他の革命的な考え方の場合と同様に, 地動説が受容されるまでには, 伝統的権威や既存のパラダイムとの間の長い闘争の歴史があった。

小学校の上級生を対象に行われた数年前の調査では, 約半数が太陽は地球の周りを回ると考えているという結果が出たそうで, 困ったことだという論調でマスコミがこぞ取り上げていた。しかし, 学校で教わった知識を鵜呑みにするより, 五感で物事を判断した小学生のほうが健全だという気もする。古代人であっても, 大地が動いていると見えず感覚的な証拠は何もなかったから, 天が回転し大地は宇宙の中で止まっている(天動説, 地球中心説)と考えたのはごく自然なことだった。

教科書で教えるような近代の科学的方法論とは, 客観的な観察や測定を繰り返してそこから規則性を見つけてモデルを作り, 新しい発見に導くというものであろう。しかし, コペルニクスによる地動説(太陽中心説)は, いくら精密な観測・測定を積み上げても真理に迫れるとは限らない一つの好例である。コペルニクスの場合, 惑星の全体像は, より単純で統一性のある構造と運動をなしているべきであるという強い思い込みに導かれた結果であった。

この小稿では, 古代ギリシャ以来の伝統的な天動説, コペルニクスが詳細な数理を初めて提出した地動説とその実的な意義, 地動説の証拠を観測的に確認するための年周視差の検出努力について, 簡単に解説する。

2. 惑星運動とギリシャの天動説

天文学は, 古代の四大文明と呼ばれるエジプト, メソポタミア, インド, 中国の地で, 面白いことにいずれも“ほぼ同じ頃”, 約4000~5000年前に誕生した。これは単なる偶然ではなく, 約5000年前に始まった汎地球的な寒冷化・乾燥化の結果であると解釈する説がある⁽¹⁾。メソポタミア, 中国では, 天体の地平線からの出没, 惑星の留や衝などの天文現象と, 日・月食が起こる周期を, 代数的な経験式に当てはめて天文表を作り, それらの現象を予測することが天文学の主な関心事だった。

それに対して, 少し後の古代ギリシャ文明では, 月・太陽, 惑星から構成される宇宙の構造と運動を幾何学的に説明する理論作りを目指したのが, 他の文明の天文学とは大きく異なる特徴である。月と太陽は星座の間を西から東にゆっくり移動してゆく。それに対して水星から土星までの5個の惑星は, 西から東への動きに加えて, 時として動きが止まったり(留), 数か月間逆向きに運動したりする(逆行)。ギリシャ天文学では, これら奇妙な動きをする天体を(そのためにギリシャ語で惑う星 [planeo] と名づけられた)いかに数理的に説明するかが最大の課題だった。ギリシャ人は大地が球体(地球)であることは早くから認識していた。しかし彼らの多くは上に述べた小学生と同様に, 地球は宇宙の中心で静止していると考えたし, 天体・恒星の日周運動は天球自体が回転するのが原因と理解した。たとえば, サモスのアリストアルコス(BC310ころ~230ころ)は, 月と太陽の実直径の比を観測から推定し, 太陽が月よりずっと大きかったことから, 地球は太陽の周りを公転すると主張したが⁽²⁾, 地球中心説の正統派からは異端とみなされた。

正統派による惑星運動の理論は, 次に述べるように発展してきた。最も初期の惑星理論は, プラトンの弟子ユードクソスによる同心球宇宙モデルで, すべての天体は地球を中心とするそれぞれの同心球上を等速回転するという説

だった。しかしこのモデルでは、惑星と地球の距離が常に一定だから、距離の変動が原因と考えられた惑星の光度変化を説明できない。惑星の距離変化と天球上の運行の遅速を説明するために最初に考案されたのが離心円モデルである。地球は円の中心から少し離れた所にあり、惑星は円周上を等速で運動する。このモデルでは距離が変化することになり、太陽の運動にはうまく当てはめることができた。

だが、火星などの惑星では、地球を挟んで太陽と 180 度反対方向に来たとき（衝という）に逆行し光度が最も明るくなるが、離心円では逆行現象は起こり得ない。しかも、離心円の場合、惑星が地球に最も近づき（近地点）最大光度になる位置が天球上の決まった方向に固定されてしまうのに対して、実際の惑星では、最大光度が生じる天球上の位置は、その時々で異なるのである。これらの困難を克服するために考え出されたのが周転円・導円モデルで、これがギリシャ天文学の代表的成果と言ってよいだろう。上に述べた惑星運動理論は、円錐曲線論で知られたアポロニウス、ギリシャ最大の天文学者と称されるヒッパルコス（BC190～125 ころ）らが考案・発展させた理論であるが、彼らの著作はいずれも散逸しており、後世の天文学者トレミー（プトレマイオスともいう、AD2 世紀ごろの人）による有名な天文書『アルマゲスト』の中で言及されているにすぎない⁽⁴⁾。

『アルマゲスト』に基づき周転円・導円モデルを図 1 で説明しよう。図は、火星など外惑星の場合である⁽⁴⁾。

このモデルでは外惑星は周転円上に、周転円の中心は地球中心の導円上にあってそれぞれ等速で回転する。惑星が導円の内側で地球と周転円の中心とを結ぶ線上付近に来たときは、地球からは逆行して見えるし、距離も最短になるから光度が最大になることも説明できる。ただし、常に $\angle A = \angle B$ で、しかもすべての外惑星について、惑星が周転円上を 1 周する周期は 1 年でなければならなかった。他方、内惑星（水星、金星）の周転円・導円の場合には、外惑星とは異なる条件が必要だった。

さらにトレミーは、惑星と月の複雑な運動を精密に表現するために、周転円の上に別な周転円を重ねたり（多重周転円）、エカント（equant）と名づけた特別な点に地球を置く工夫も行った。エカントは導円の中心から、離心円と

は反対側に少しはずれた点で、その点からは惑星の周転円の中心が等速円運動をするように見えるのである。エカント理論は、等速円運動というギリシャ天文学の伝統を放棄した苦肉の策だった。これらトレミーが『アルマゲスト』で集大成したギリシャの惑星運動理論は、ギリシャ文明が滅んだ後イスラム世界に受け継がれ、十字軍戦争などを通じて中世の西欧世界に伝達されていった。初期のギリシャ天文学では周転円・導円は惑星運動を説明するための単なる理論モデルと考えた。しかし、後のアリストテレス主義者、中世のイスラムおよび西欧世界では、宇宙が本当に周転円・導円の構造を持った水晶のような透明な固体できていると信じられた。そして、ルネサンス以後、ギリシャ天文学は次第に種々の批判にさらされ、コペルニクスに代表される近世の天文学に脱皮してゆくのである。

3. ギリシャ機械工学の頂点：アンティキテラの機械

古代ギリシャ文明は、芸術、文芸、哲学、科学などに優れていた反面、工学・技術などはあまり発展がなかったと従来は理解されてきた。例外はアレキサンドリアの数学者・機械工学者ヘロンで、ヘロンが製作したディオプトラ経緯儀は現代のセオドライトに近い構造と機能を持ち、微動回転のためのアルキメデスのらせんねじを備えていた⁽⁵⁾。ヘロンはこの装置を用いて、山の両側からトンネルを掘り進めてつなぐ測量法も提案したとされる。

ところで、ヘロンの経緯儀をはるかにしのぐ複雑な歯車機構を用いて、上に述べた惑星運動理論とギリシャの暦法を機械工学的に計算し、惑星現象や日・月食を予報した古代の装置の存在が近年明らかにされた。それを「アンティキテラの機械」と呼ぶ。1901 年にギリシャのアンティキテラ島沖の海底で、海綿採りが見つけた難破船の残骸中に、青銅製の複雑な歯車装置の断片が多数見つかった。一緒に発見された陶器の壺とコインの時代考証から、年代は BC150～100 年ごろと推定される。ある研究者がこの遺物を 1950～1970 年代に初めて詳しく調査し、月・太陽の暦と運動、日・月食の予報をするための一種の機械式アナログコンピュータだろうと示唆したが詳細は不明のままだった。

2006 年と 2008 年になって、英国の著名な科学誌 Nature に新たなグループの研究成果が発表された⁽⁶⁾⁽⁷⁾。彼らは、

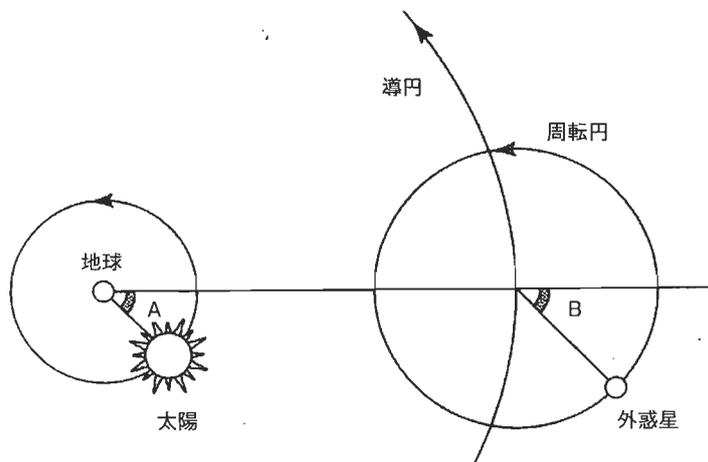


図 1 外惑星の場合の周転円と導円⁽⁴⁾

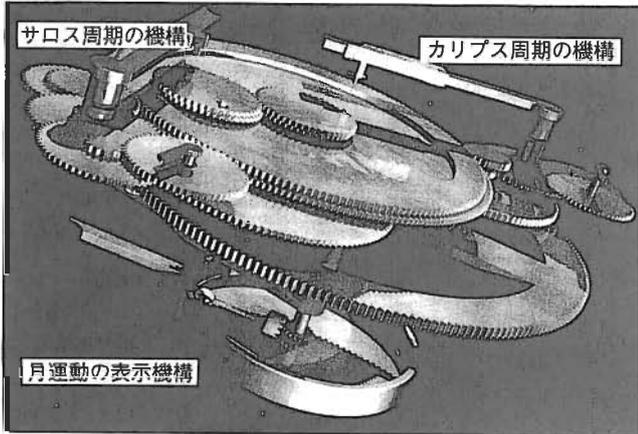


図2 アンティキテラの機械の復元モデル⁽⁶⁾

最新の X 線 CT 技術を駆使して調査し直した。その結果、少なくとも 37 個のギアの複雑な組合せから成ることが判明し、2 000 文字近い天文学に関するギリシャ語の単語表記と説明とが発見された。図 2 は、歯車機構の主要部分を復元したレプリカである。中心部の最大の歯車は直径約 13cm で、歯車機構の全体がおそらく木製の箱型ケースに納まっていたはずで、箱の両面には種々の天文現象を表示する複数のダイヤルがあった。前面はエジプトの太陽年の日付、月と太陽の位置、月の位相（満ち欠け、その周期が朔望月）の表示盤だった。とくに月では、その複雑な運動の表現と日・月食の予報のために、ヒッパルコス理論に基づきわずかに偏心させた歯車と溝に入ったピン機構が採用されていた。周転円・導円によって 5 惑星の位置も表示したらしい歯車と惑星の刻印文字も見つかっているが、具体的な復元には成功していない。

背面には、5 周分のらせん状溝機構を用いた表示盤が 2 個あり、これらはメトン周期とサロス周期を利用して長期的な太陰太陽暦と日・月食の予報計算をする部分である。メトン周期とは BC5 世紀にバビロニアで発見された太陽と月の運行関係で、19 太陽年 = 235 朔望月の長さに対応する。中国でも“章法”として同じころに独立に見つかり、太陰太陽暦（いわゆる旧暦）で閏月の挿入に非常に重要な役割をした法則である（カリプス周期も類似の関係でメトン周期の 4 倍）。また、サロス周期は 223 朔望月の長さで、似た条件の日・月食がこの周期で発生する。その他、2008 年の論文では、オリンピアの競技祭典を開催する年の日取りを計算する機能も報告された。

この古代の天文コンピュータを製作したのは、種々の間

接的証拠から、ロードス島のヒッパルコスのグループか、シチリア島のアルキメデスたちだろうと推測されている。この装置に匹敵する複雑な機械時計が西欧で出現するのは 14 世紀以降だから、アンティキテラの機械は実に驚くべき存在であり、ギリシャの工学技術に対する従来の認識を根本的に変える必要があると、とくに重要なのは、この種の装置がほかにも複数あったことをローマの文人政治家キケロが証言していること、および 5 世紀のビザンツ帝国や 10 世紀のイスラムの天文学者が同様な機械の記録と図を残している点である。科学と技術が融合した見事なギリシャの伝統が中世にまで伝承された可能性をうかがわせる。

4. コペルニクスの太陽中心説

中世の西欧ではギリシャの天動説はアリストテレス自然学やキリスト教会権力と結びつき、頑迷な宗教思想と地球中心説を人々に強要した。この抑圧的な社会風潮を打ち破ったのが 14 世紀にイタリアで起こったルネッサンス運動であり、コペルニクスの太陽中心説もそのような時代背景から誕生したのだった。

コペルニクス（1473～1543）はポーランドのカトリック系一族の間に生まれ、イタリア留学中に天文学に興味を持った。帰国後は聖職者として聖堂参事会員の職に就くかわら、トレミーの理論の研究を続けた。やがてコペルニクスにはトレミー理論が全く不完全なものに思えてきた。とくに月運動理論は現実の月の動きからは程遠いことを悟った。コペルニクスがトレミーの惑星運動論に最も不信感を抱いたのはその統一性のなさである。内惑星、外惑星、太陽、月に別種の周転円・導円、エカント運動を適用する必要があった。彼の言葉によれば、『アルマゲスト』に記述された惑星の宇宙体系は、“別々の箇所から手、足、頭などを持ってきて組み上げた怪物”であった。コペルニクスは研究を進めるにつれ、どの惑星の運動も単一の方法で説明できてこそ真の太陽系の姿だと確信するようになった。

図 3 (a) は、外惑星に対するコペルニクスの太陽中心説、(b) 図は (a) 図のベクトル表記（太字）を変形して、地球中心から惑星 (P) を見たように書き直した図である ((b) 図の導円と周転円とは、惑星と地球とがそれぞれの軌道上のいろいろな位置にあるときの軌跡として描かれている⁽⁴⁾)。両図を比較すれば、太陽 (S) が中心か、地球 (E) が中心かの違いだけで、互いに等価なことは自明である。ところが、ギリシャの天動説では地球中心が前提だったか

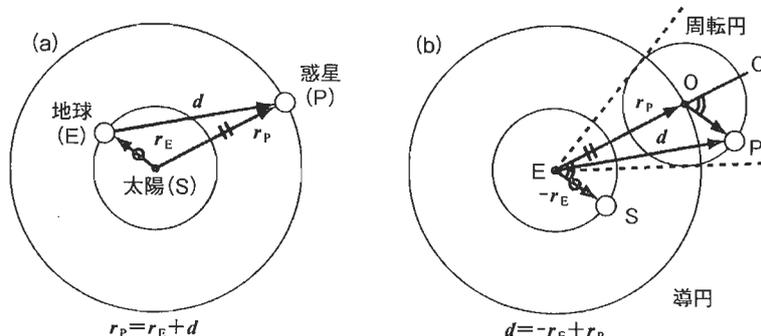


図3 外惑星に対する (a) 太陽中心説と (b) 地球中心説⁽⁴⁾

ら、(b) 図 (つまり、図 1) から出発した。たとえば、E から惑星が点線の方向に見えたとする。この場合、惑星が点線上のどこにあっても、図を相似的に拡大・縮小すれば、その惑星位置に相当する周転円と導円を描くことができる。言い換えれば、(b) 図の天動説に基づく限り、観測からは周転円と導円の大きさを一意に決めることはできないことがわかるだろう。さらに、コペルニクスの鋭い頭脳は、天動説では 3 個の外惑星の周転円の周期が皆 1 年であることと、常に $\angle OES = \angle O'OP$ (図 1 では $\angle A = \angle B$) であることから、これは地球の運動の反映に過ぎないことを看破したのである。

コペルニクスは太陽中心説を、1510 年代中ごろに『コンメンタリオルス (概要)』という短い草稿の形で少数の人々に配布した。だがほとんど反響がなかったため失望し、以後は秘密にして誰にも語ることはなかった。晩年の 1539 年になって、若い天文学者レティクスが弟子としてコペルニクスのもとを訪れて地動説を学んだ⁽⁸⁾。レティクスはこの理論に感激し、出版することをコペルニクスに強く勧める。その結果生まれたのが 1543 年に刊行された『天球の回転について』(以下『回転論』)である⁽⁹⁾。全巻 6 巻で、第 1 巻が非専門家も対象にした概論である。

ここではコペルニクス説がアリストアルコスらの思弁的な太陽中心説と根本的に異なる実際的な意義について、『回転論』の第 5 巻を元にその数理を述べる⁽¹⁰⁾。まず、各惑星の公転周期は、観測される会合周期 (惑星が衝の位置から次の衝に至るまでの時間) から簡単な公式⁽⁴⁾で求められる。次に、太陽・地球間の距離を単位とした各惑星の軌道半径 ($ES=1$) は、図 4 の説明に従って、角度 α 、 β を測定すれば、図の下部に示した関係式から計算することができる (衝から矩までの角度 β を求めるには、外惑星の公転周期を用いる)。これがコペルニクス理論の最も本質的な点であり、ギリシャの天動説では各惑星軌道の大きさの相互関係は決して一義的には決められなかった。コペルニクスは自己の太陽中心説によって、“5 惑星すべての公転周期の序列は軌道半径の序列に見事に対応している”ことを知った。この「驚くべき宇宙の秩序と調和」こそ、コペルニクスが探し求めていたものであり、太陽中心説の正しさの証明でもあった。

コペルニクスの地動説が天文学界に受容されるまでには、種々の理由から半世紀以上もかかった。しかも、当時

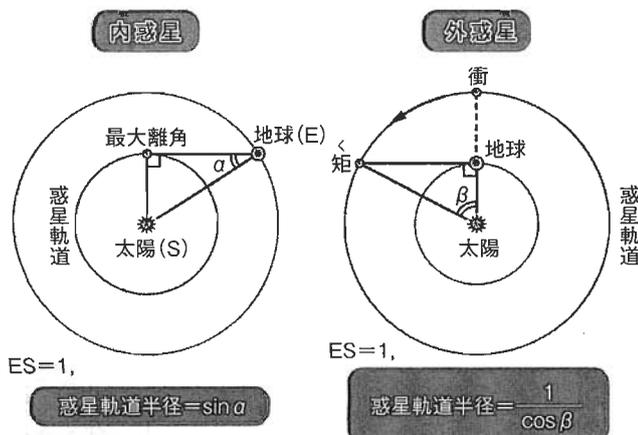


図 4 コペルニクスによる惑星軌道半径の決定法⁽⁴⁾

は地動説でなければ説明できない観測事実は何もなかった。それゆえにこそ、コペルニクスの地動説は革命的な宇宙認識の大転換として、現在では「コペルニクス革命」と呼ばれている⁽¹¹⁾。

5. 年周視差の検出

太陽中心説の最大の弱点は、恒星の年周視差が観測されない点だった。地球が太陽の周囲を回れば、軌道上の反対側から見た恒星の位置はずれて見えるはずで、これを年周視差と称する。年周視差が観測されない理由として、コペルニクスは恒星までの距離は地球軌道の大きさに比べて非常に大きいため、観測できないのだと主張した。しかし、1580~1590 年代に、当時肉眼で達成できた最高精度の観測を長年行ったデンマークの天文学者ティコ・ブラーエでさえ、年周視差を検出できなかった。彼は水星と金星は太陽の周囲を回るが、太陽と外惑星は地球の周りを回転するという新たな惑星系モデルを提案している。

年周視差が高性能望遠鏡を用いて初めて観測的に確認されたのは、『回転論』の出版から実に 300 年近くも経過した 1838~1839 年になってからだった。ロシアのストゥルベ、ドイツのベッセル、南アフリカのヘンダーソンらがあいついで年周視差の測定に成功した。中でもヘンダーソンが観測したケンタウルス座 α 星は年周視差が角度で約 1 秒で、今では地球に最も近い恒星 (約 4.4 光年) としてよく知られている——他の星の年周視差はもともとずっと小さい。コペルニクスが主張したように、恒星までの距離は昔の人々が想像したよりはるかに遠かったのである。

実は、年周視差が検出されるよりかなり以前から、多くの天文学者はニュートン力学の常識に基づき、質量が地球より圧倒的に大きな太陽が、地球の周りを回るはずはないと気づいていた。したがってこの時代、年周視差検出の主目的は、すでに地動説の証明ではなく、恒星の距離測定として変質し始めていたのだった。

(原稿受付 2010 年 1 月 4 日)

●文献

- (1) 中村 士, 天文学の発祥と地球環境, 天文月報, 100-12 (2007), 663-671.
- (2) Heath, T., *Aristarchus of Samos*, (1981, 原著 1913), Dover.
- (3) プトレマイオス, 数内 清訳, アルマゲスト (上下), (1958), 恒星社.
- (4) 中村 士, 宇宙観の歴史と科学, (2008), 第 2 章, 4 章, 放送大学教育振興会.
- (5) ヴァン・デル・ウォルデン, 村田 全・佐藤勝造訳, 数学の黎明, (1984), 129, みすず書房.
- (6) Freeth, T. et al., Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism, *Nature* 444, (2006), 534-38, 551-2, 587-91. *Nature* 454, (2008), 614-617 に補遺, 報告あり.
- (7) ジョー・マーチャント, 木村博江訳, アンティキテラ 古代ギリシアのコンピュータ, (2009), 文藝春秋社.
- (8) デニス・ダニエルソン, 田中靖夫訳, コペルニクスの仕掛人, (2008), 東洋書林.
- (9) コペルニクス, 高橋憲一訳, コペルニクス・天球回転論, (1993), みすず書房.
- (10) Duncan, A.M., *Copernicus: On the revolutions of the heavenly spheres*, a new translation from the latin, (1976), Book 5, Davids & Charles.
- (11) T. クーン, 常石敬一訳, コペルニクス革命, (1976, 原著 1957, 紀伊国屋書店).