

サイエンスはどこから来たか

中世スコラ哲学, そして古代自然哲学 (with アダム・タカハシ)

Jimmy Aames

舞鶴工業高等専門学校
asonosakan@gmail.com

高知工科大学「理工学のフロンティア」 2022/12/20

Outline

- 1 Introduction
- 2 プトレマイオスの数理天文学
- 3 アリストテレスの自然哲学
- 4 アリストテレスとプトレマイオスの論証性格の違い
- 5 Copernicus の革新
- 6 Kepler の天体物理学
- 7 新しい力学：Galileo から Newton へ
- 8 まとめ

Introduction

- なぜ・どのようにして西欧近代において科学が生まれたのか？
- 本発表では，16 世紀～17 世紀にかけて成し遂げられた天動説から地動説への転換（Copernicus 革命）に注目する
- Copernicus 革命は単に天文学における革命にとどまらない
- それは人類の宇宙像の大きな転換であるとともに，世界の数学的記述と綿密な観測に基づく新しい学問手法の誕生を告げるものであった

Copernicus 革命の立役者たち

- Nicolaus Copernicus 『天球回転論』 (1543 年)
- Tycho Brahe の天体観測 (16 世紀後半)
- Johannes Kepler 『宇宙の神秘』 (1597 年), 『新天文学』 (1609 年), 『世界の調和』 (1619 年)
- Galileo Galilei 『星界の報告』 (1610 年), 『二大世界体系についての対話』 (1632 年), 『新科学論議』 (1638 年)
- René Descartes 『哲学原理』 (1644 年)
- Isaac Newton 『自然哲学の数学的諸原理』 (『プリンキピア』) (1687 年)

Copernicus 革命の知的背景

- Copernicus 革命の背景には、古代ギリシアに由来する二つの知的伝統があった：**プトレマイオスの数理天文学**と**アリストテレスの自然哲学**
- あえて現代の学問的カテゴリーを用いれば、プトレマイオスの数理天文学は「科学的」、アリストテレスの自然哲学は「哲学的」な伝統と言える
- Copernicus 自身はプトレマイオスの数理天文学の伝統に属する学者だが、アリストテレスの自然哲学も彼の思考に無視できない影響を及ぼしている

プトレマイオスの数理天文学

- Copernicus の地動説は、ルネサンス期（15～16 世紀）に復興された数理天文学の概念枠組みの中から登場した
- この伝統は、紀元 2 世紀のアレクサンドリアの天文学者プトレマイオスの『アルmageスト』に由来する



Figure: プトレマイオス

天体の見かけの運動

- 夜空に輝く星の大多数は、相対的な位置関係を保ったまま、約 24 時間をかけて東から西へ空を周転する → 「固定された星」 (fixed stars) ないし「恒星」と呼ぶ
- 恒星以外にも、恒星と同様の日周運動に加えて、西から東への逆向きの年周運動を見せる星も存在する → 「惑星」 (πλανήτης 「彷徨うもの」)
- 古代ギリシアでは、水星・金星・火星・木星・土星の五惑星に加えて、太陽と月も惑星の仲間に数えられていた (本発表で「惑星」と言えば上記の五惑星を指すことにする)

天体の見かけの運動：惑星の変則性

- 太陽・月・惑星は、一年をかけて星座の間を西から東へ移動するが、その運行速度は一様ではない → 「**第一の変則性**」
(惑星の運動が一様な円運動ではなく、非一様な楕円運動であることによる効果)
- さらに惑星は、年周運動の最中に周期的に止まり（これは「留」と呼ばれる）、東から西へ「**逆行**」し、再び留となった後に順行運動に戻る → 「**第二の変則性**」(惑星が太陽の周りを回転していることによる効果)

天体の見かけの運動：惑星の変則性

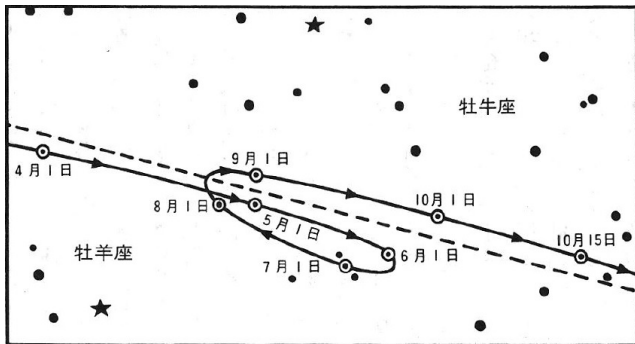


Figure: 火星の逆行運動（第二の変則性） Kuhn (1989), p. 79 より

離心円とエカント

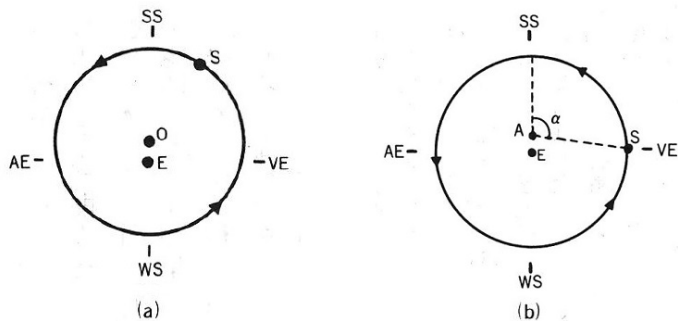


Figure: (a) 離心円. (b) エカント. Kuhn (1989), pp. 106, 108 より

プトレマイオスの数理天文学の特徴

- 厳密な数学的モデルによって自然現象を記述しようとするものだった
- 天体観測器具を用いて得られた観測データによってモデルの種々のパラメータが決定されており、モデルとデータとの定量的な一致が求められていた → 現代的な**仮説検証型の科学**にかなり近い
- 天体の「本性」や天体を運動させる「原因」には関心を向けず、天体の「位置」や「運動」や「大きさ」といった定量的に扱うことのできる事柄だけを主題としていた

アリストテレスの著作の再発見と影響

- アリストテレスの著作は、一部の論理学系の著作を除いて、中世のラテン語圏では長らく失われていたが、12世紀から13世紀にかけて「再発見」され、アラビア語からの翻訳という形で西欧に輸入された
- その後、Thomas Aquinasをはじめとするスコラ哲学者・神学者たちの手によって、アリストテレスの哲学と正統キリスト教神学の融合が成し遂げられ、その結果として形成された世界像・宇宙像は、17世紀頃まで西欧の知識人の根本的な思想の枠組みとなった

アリストテレスの宇宙論

- アリストテレスの宇宙論では、地球は球体であり、より大きな球体である宇宙の中心で静止している
- 宇宙は物質で充満しており、真空が存在することは不可能なので、宇宙の外側には真空を含め何も存在しない
- 天体は、「天球」ないし「天球殻」と呼ばれる地球を取り巻く固形の透明な球体に固定されており、天球が地球を中心として回転することによって天体が空を運動しているように見える

アリストテレスの同心球宇宙

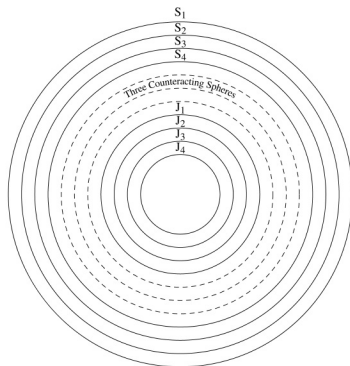


Figure: アリストテレスの土星と木星の同心球モデル (『形而上学』 XII.8, 1073b–1074a). Lindberg (2007), p. 93 より

アリストテレスの同心球宇宙

- 同心球によって惑星の逆行運動を再現できるというアイデアは、プラトンのもとで学んだ数学者・天文学者であるエウドクソスの「同心球モデル」に由来する
- アリストテレスは、あくまで数学的なモデルにすぎなかったエウドクソスの理論に、物理的なメカニズムを与えた
- アリストテレスは、天体の運動を一種の巨大な「ぜんまい仕掛け」によって説明した

同心球モデルの問題点と影響

- エウドクソスの同心球モデルは、あくまで天体の運動の定性的な説明を与えるだけで、のちのプトレマイオスの導円・周転円モデルのように定量的に正確な予測を可能にするわけではない
- 同心球モデルでは、惑星の地球からの距離は常に一定であるが、これは外惑星（火星・木星・土星）が逆行のときに最も明るく輝く（最も地球に近づく）という観測事実と一致しない
- しかし、同心球モデルはアリストテレスの宇宙論に組み込まれたことで、後世の自然哲学に絶大な影響を及ぼした → 「天球」の概念

アリストテレスとプトレマイオスの論証性格の違い

- アリストテレスの自然哲学の一つの特徴は、主に原理からの演繹によって議論が組み立てられている点
- これらの原理自体は経験からの一般化によって得られているが、導かれた結論を観測によって検証するというような発想はアリストテレスには見られない
- アリストテレスの『天界論』とプトレマイオスの『アルマゲスト』冒頭の宇宙論に関する議論を比較すれば、両者の論証性格の違いが際立つ

『天界論』と『アルマゲスト』の論証の比較

	アリストテレス	プトレマイオス
宇宙の球体性	「図形の本性」から論証 (『天界論』 II.4, 286b-287a)	天体の運動を最もよく説明する 仮説として要請
地球が宇宙の中心で 静止していること	元素とその運動の本性から演繹的に 論証 (『天界論』 II.14, 296a-297a)	地平線が天球全体を二分する などの観測事実に基づいて議論
地球の球体性	元素の運動論から論証 (『天界論』 II.14, 297a-298a)	地球上の異なる場所で月蝕が観測 される際の時差の考察より議論

数理天文学と自然哲学のそれぞれの特徴

- アリストテレスの自然哲学のもう一つの特徴は、プトレマイオスの数理天文学とは対照的に、物事の「本性」や「原因」を主な考究の対象としており、「位置」や「運動」や「大きさ」といった定量的な性質にはあまり関心を向けない点
- プトレマイオス天文学が現象の数学的記述による定量的な予測を目的としているのに対して、アリストテレスの自然哲学は、物事の本性或原因の把握による定性的な説明を目的としていると言える

数理天文学と自然哲学の相互関係

- これらの二つの知的伝統は歴史的に没交渉であったわけではない
- プトレマイオス自身、その著作『惑星仮説』において、アリストテレスの「天球」概念を利用して各惑星軌道の大きさを推定する議論を行っている (山本 2014, Vol. 1, pp. 62–71)
- 中世においても哲学者サイドからプトレマイオスの導円・周転円モデルに対する批判がたびたび寄せられていた
- その中でも特に興味深いのは、12 世紀アンダルシアの哲学者アヴェロエス (イブン・ルシュド) による批判である

アヴェロエスのプトレマイオス批判

我々はこの古代の〔ヒッパルコス・プトレマイオス以前の〕天文学を新たに探し求めなければならない。というのも、この天文学こそが、物理的原理の観点から可能な真の天文学だからである。(…) 今日、〔真の〕天文学なる学問は存在しない。今日の天文学は、あくまで計算に合致するのみで、実在とは合致しないのである。

Genequand (1986), comm. XII.45, 1663–64 (p. 179)

新たな天文学に向けて

- アヴェロエスによるこの批判は、現代の科学哲学者が量子論について行っている議論と類比的 (cf. Maudlin 2019, Intro.)
- アヴェロエスが地動説を予見していたわけではないにせよ、彼はプトレマイオス天文学の弱点——物理的原理の欠如——を正確に見抜いていたと言える
- 他方で、アリストテレス流の自然哲学の弱点は、定量的正確さの欠如であった
- これら両方の弱点を克服し、自然学的な根拠付けを有するとともに、定量的に正確な天文学が求められていた → Copernicus へ

Copernicus の革新

- Nicolaus Copernicus (1473–1543) はポーランドの天文学者
- ルネサンス期に復興されたプトレマイオス天文学の知的伝統の中で育つ
- 1543年『天球回転論』を出版，地球が自転しながら太陽の周りを公転するという「**地動説**」を提唱

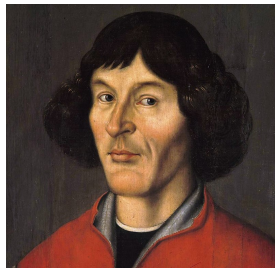


Figure: Copernicus

Copernicus の革新性と保守性

- Copernicus の地動説は、その革命的性格が強調されることが多いが、同時に、彼は非常に保守的な理論家でもある
- 彼は古代ギリシア以来の天文学の大前提だった「**一様円運動**」の原理をプトレマイオス以上に徹底させることで地動説に到達した
- 彼は地球の運動と整合する限りで、旧来のアリストテレス的宇宙像を極力保持しようとした
- 『天球回転論』は「革命的」な著作というよりは「革命を作り出した」著作 (Kuhn 1957, p. 134)

地動説にいたる思考の道筋

- Copernicus は、プトレマイオスのエカントを排除し、惑星運動の第一の変則性を説明するために代わりに一様に回転する周転円を導入
- プトレマイオスの惑星理論に対してこの修正を試みる過程で彼は地動説モデルに思い至った (Swerdlow 1973; 高橋 2017, pp. 632–40)
- 逆説的ながらも、Copernicus は伝統的な「天球」の物理的実在性を信じていたからこそ、地動説という革新的な発想にたどりついた

Copernicus の体系の利点

いったん地動説を仮説として認めてしまえば、それが天動説よりも優れていることを見て取るのはそれほど難しくない

- 惑星軌道の大きさ（そしてそれゆえ惑星軌道の配列順序）を観測によって一意的に決定できる
- 惑星の逆行運動を、公転する地球が外惑星を追い越したり、内惑星に追い越されたりすることによる効果として自然に説明できる
- 水星と金星が太陽から一定の角度以上離れない理由を幾何学的に説明できる

Copernicus は、かつてアヴェロエスが希求した「真の天文学」に向けた第一歩を踏み出した

Copernicus の理論が内包していた問題

Copernicus の理論は、様々な新たな自然学的・哲学的・宗教的な問題を内包していた

- もし地球が運動しているならば、地球上で真上に投げられた物体が元の地点に落下するのはなぜか？ → 「慣性」概念に基づく新たな運動学の確立が必要だった (Galileo, Descartes, Newton)
- Copernicus の理論では、宇宙がそれまで考えられていたよりも遥かに大きいことが要請される → 宇宙の無限性や世界(太陽系)の複数性をめぐる哲学的思索を喚起 (Giordano Bruno)

惑星運動の物理的メカニズム

- Copernicus の体系では、恒星天球は回転しないものの、惑星が天球によって運ばれるという伝統的なアリストテレスの宇宙像は保持されていた
- しかし 16 世紀後半、Tycho Brahe らによる彗星の観測がきっかけとなって、天球は天文学から消滅
- そうすると、天球の代わりとなる惑星運動の物理的メカニズムが必要となる → 天体間に働く「遠隔力」という Kepler の発想へ

正多面体太陽系モデル（『宇宙の神秘』）

- 正多面体（プラトンの立体）と球体を組み合わせることで、惑星の数と各惑星軌道の大きさを説明できると Kepler は考えた
- このモデルは現代人には荒唐無稽に映るかもしれないが、当時の惑星の観測データとそれなりにうまく合致していた
- 発想としては現代の数理論理学者のそれに近い（？）

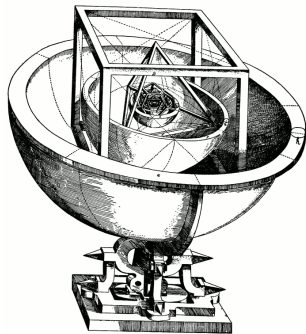


Figure: Kepler の正多面体太陽系モデル

Kepler の第一・第二法則 (『新天文学』)

- Kepler の第一法則：惑星は、太陽を焦点の一つとする楕円上を運動する
- Kepler の第二法則 (面積速度一定の法則)：各惑星と太陽を結ぶ線が単位時間あたりに掃く楕円の面積は常に一定である

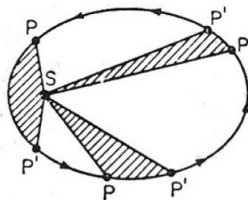


Figure: 面積法則

→ それまで誰一人として疑わなかった「**一様円運動**」のドグマを葬り去る！

Kepler の法則の発見

- Kepler は、Tycho が残した火星の観測データとの格闘を通じて惑星の楕円軌道と面積法則を発見した
- しかし、Kepler の法則の発見を可能にしたのはそれだけではなく、その背景にはプラトンの「原型」の思想があった
→ 神の創造のアイデアとしての数学的秩序
- さらに興味深いのは、太陽から放射される「**駆動靈魂**」(anima motrix) と呼ばれる磁力のような力に関する独自の直観から、Kepler が惑星の楕円軌道と面積法則を発見した点

Kepler の「駆動靈魂」

- 太陽から惑星に届く駆動靈魂の強さは、惑星が太陽から離れるのに比例して弱まる
- したがって惑星の運動速度は、太陽からの距離に逆比例すると Kepler は考えた
- この関係の近似として面積法則が導入され、それを用いて惑星の楕円軌道が導かれる → 誤った前提から正しい結論を導出

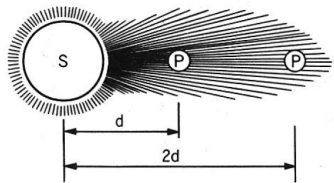


Figure: 駆動靈魂のイメージ. Kuhn (1989), p. 333 より

天体物理学の創始

- Kepler の科学史上の重要性は、Kepler の法則の発見にとどまらない
- それと同じくらい重要なのは、彼が遠隔力の概念によって惑星の運動を動力的に基礎付け、「天体物理学」という新しい思考様式を創始した点である (山本 2014, Vol. 3, Chap. 12) → Kepler はある意味で Copernicus よりも革新的
- Kepler の法則と遠隔力の考えはやがて Newton に受け継がれ、彼の『プリンキピア』の力学体系に結実することになる

新しい力学：Galileo から Newton へ

- 地球の運動と整合するように運動学・力学を刷新するという課題がまだ残っていた
- この問題の解決に貢献した代表的人物は Galileo と Newton である
- Galileo Galilei (1564–1642) はイタリアの物理学者・天文学者で、初めて望遠鏡による天体観測を行ったことで知られる

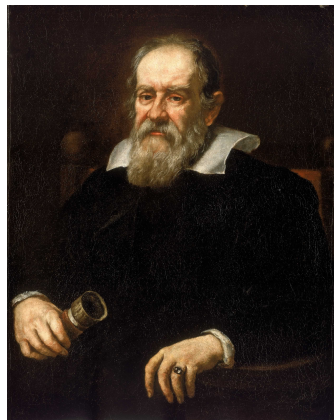


Figure: Galileo

Galileo の慣性概念：円形慣性

- 新しい力学を作り上げるのにまず必須だったのは、適切な「慣性」の概念である
- 慣性の法則（Newton による定式化）：物体は、外力が加わらない限り、静止もしくは等速直線運動の状態を続ける
- この考えの萌芽を Galileo に見出すことができるが、彼は、慣性を地球の表面に平行な方向にだけ認め、力を受けていない物体は地球の周りを一様円運動すると考えた（円形慣性）
- Galileo は古代以来の一様円運動の呪縛にまだ囚われていた

万有引力の法則と地上界・天上界の統合

- Hooke は、引力が距離の 2 乗に反比例する「逆 2 乗則」を提唱していたが、これを証明することができなかった
- Newton は、Kepler の三法則から、惑星が太陽からの距離の 2 乗に反比例する引力で引かれていることを示した
- 彼はこの結果をさらに一般化し、あらゆる（球形の）物体は距離の 2 乗に反比例する力で引き合うことを提唱 → **万有引力の法則**

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Copernicus 革命の終結

- Newton は、地球中心説（天動説） vs. 太陽中心説（地動説）をめぐる論争に思わぬ形で終止符を打った
- Newton の体系では、宇宙は一様等方的な無限空間であり、「宇宙の中心」なるものはそもそも存在しない
- 太陽系の中心（重心）を考えることはできるが、太陽も惑星の引力によって動いているため、太陽系の中心は太陽の付近にあるものの、その中心からは外れている（『プリンキピア』Bk.3, Prop. XII)





まとめ

- Copernicus の地動説は、プトレマイオスの数理天文学とアリストテレスの自然哲学の両方の弱点を克服する新たな天文学——定量的に正確であるとともに、物理的原理による根拠付けを有する天文学——に向けた第一歩だった
- Kepler は、惑星の楕円軌道や面積法則を発見し、また天体間に働く「遠隔力」というアイデアによって惑星運動を動力学的に基礎付けることで、Copernicus の理論を完成させた
- Copernicus の理論によって提起された運動学上の問題は、Galileo や Newton らの新しい力学によって解決された




まとめ

- 以上は、近代科学の誕生の一つの側面にすぎず、他にもルネサンス期における地理学や博物学（動物誌・植物誌）の興隆、Vesalius による解剖学の創始、活版印刷の普及などにも目を向ける必要がある
- しかし、人類の宇宙像の根本的な転換、そして世界の数学的記述と綿密な観測に基づく新しい学問手法をもたらした点で、やはり Copernicus 革命は近代科学が生まれる上で中心的な役割を果たしたと言えるのではないか

References I

-  Genequand, Charles. 1984. *Ibn Rushd's Metaphysics: A Translation with Introduction of Ibn Rushd's Commentary on Aristotle's Metaphysics, Book Lām*. E. J. Brill.
-  Kuhn, Thomas. 1957. *The Copernican Revolution: Planetary Astronomy in the Development of Western Thought*. Harvard University Press. (邦訳：トーマス・クーン『コペルニクス革命 科学思想史序説』(常石敬一訳) 講談社, 1976 (1989年に文庫化))
-  Lindberg, David C. 2007. *The Beginnings of Western Science: The European Scientific Tradition in Philosophical, Religious, and Institutional Context, Prehistory to A.D. 1450*, 2nd Edition. Chicago University Press.
-  Maudlin, Tim. 2019. *Philosophy of Physics: Quantum Theory*. Princeton University Press.

References II

-  Swerdlow, Noel M. 1973. “The Derivation and First Draft of Copernicus’s Planetary Theory: A Translation of the Commentariolus with Commentary.” *Proceedings of the American Philosophical Society* 117 (6): 423–512.
-  高橋憲一．2017．「解説・コペルニクスと革命」『完訳 天球回転論 コペルニクス天文学集成』（高橋憲一訳・解説）みすず書房．
-  山本義隆．2014．『世界の見方の転換』（全3巻）．みすず書房．