

運動の相対性の教材としての天動説と地動説から ガリレイの相対性原理へ

—— 基礎物理学用 Web-Based Learning System の教材部品の開発 ——

池 村 勉

From the Geocentric and Heliocentric Theories as Educational Materials for Relativity of Motion,
to Galileo's Principle of Relativity

—— Toward the Development of a Web-Based Learning System for Fundamental Physics ——

Tsutomu IKEMURA

アブストラクト

In order to assist learners of physics in grasping how Galileo Galilei discovered Galileo's principle of relativity on the basis of his own concept of inertia, the law of free fall, both theory and experiment on parabolic motions, and relevant thought experiments on a ball falling freely from the top of the mast of a sailing ship, several animations simulating various parabolic motions and the above-mentioned thought experiments have been developed under various typical conditions.

Before the discovery process of Galileo's principle of relativity is explained with the use of handmade animations, some discussions on relativity of motion and various conflicts between the geocentric and heliocentric theories are presented as educational materials for relativity of motion, leading to a crucial point for discovering Galileo's principle of relativity. In addition, an introduction is given to Einstein's principle of special relativity as an advanced form of Galileo's principle of relativity.

キーワード：ガリレイの相対性原理，運動の相対性，シミュレーション，思考実験，天動説，地動説，放物運動，慣性，落下の法則，ガリレオ。

目 次

1. はじめに
2. 運動の相対性を取り扱う理論的枠組みの誕生
 2. 1 運動の相対性について
 2. 2 プトレマイオスの天動説からコペルニクスの地動説へ

2. 3 地動説からガリレイの相対性原理へ
3. ガリレイの相対性原理とその限界
 3. 1 船のマストの頂上からの自由落下 (思考) 実験に基づくガリレオの主張
 3. 2 水平面に沿った「円」慣性運動の直線近似と投射体の放物運動
 3. 3 船のマストの頂上からの自由落下 (思考) 実験と運動の相対性
 3. 4 ガリレイの相対性原理
 3. 5 ガリレイの相対性原理からアインシュタインの相対性原理へ
4. おわりに
 4. 1 まとめ
 4. 2 余談

付録 運動の相対性の教材としての天動説と地動説

- A 1. 地動説は天動説より優れているか
- A 2. 地動説を裏付ける地球の自転と公転の証拠

1. はじめに

近代力学が産声を上げたのは、自然現象を「観測・実験」してそこに潜む原理・法則を帰納し、あるいはそれらを演繹して新しい現象を説明ないし予言するに当たって、「数学的記述・表現」を活用するようになった17世紀の“科学革命”の時代であったと考えられる。この時代には、近代物理学の実証科学としての基礎が確立されたのみならず、「思考実験」のような“原理・法則に基づいた論証”の手法が重要な役割を果たすようになった。

さて、今回は、前回¹⁾からの続きとして、主にガリレオ・ガリレイ (Galileo Galilei, 1564-1642) の近代物理学揺籃期における足跡を、今回のメインテーマである「ガリレイの相対性原理」が発見・確立される基礎になった船のマストの頂上からの自由落下「(思考) 実験」および水平「投射体の実験」にスポットライトを当てつつ辿る。具体的には、関連する学習用教材を提案すると同時に、そのシナリオに沿って適宜配置した“手作り”アニメーション教材を紹介する。

次の第2節では、最初「運動の相対性」について少し理解を深めた後、プトレマイオス (Ptolemaios Klaudios, 85-165頃、別説に100-178頃がある。) の天動説からコペルニクス (Nicolaus Copernicus, 1473-1543) の地動説への変革を出発点として、「運動の相対性」を取り扱う理論的枠組みが歴史的にどのように着想されたかなどについて概観する。

第3節では、船のマストの頂上からの自由落下「(思考) 実験」および水平「投射体の実験」を基礎として、ガリレオの「円」慣性の概念が、等速直線運動を行う慣性系に関して成り立つ「ガリレイの相対性原理」の発見にどのようにつながって行ったかに強い関心を払いつつ編成

した教材を提案し、船上の自由落下「(思考) 実験」および水平「投射体の実験」を再体験する手作りアニメーションを紹介する。さらに、この古典力学の相対性原理の困難・限界が克服されて行った経緯と、その先に現れた「アインシュタイン (Albert Einstein, 1879 -1955) の特殊相対性原理」について、その根底にある2大基本原理の1つとして、もう1つの「光速不変の原理」と共に紹介し、この理論からの帰結について概観する。

第4節では、本報告の核心について“まとめ”を行った後、余談として「アインシュタインの一般相対性理論」について軽く言及する。

最後に付録として、本報告を書き始めるきっかけとなったテーマ「運動の相対性の教材としての天動説と地動説」の下に編成した教材を添付した。

2. 運動の相対性を取り扱う理論的枠組みの誕生

この節では、最初「運動の相対性」について解りやすい説明を行った後、天動説と地動説の相克を経て「運動の相対性」が学問的に取り扱われるようになる歴史的背景を踏まえて、本報告のメインテーマである「ガリレイの相対性原理」がどのように着想されたかについて考察する。

2. 1 運動の相対性について

ここでは、本報告のメインテーマの基礎となる「運動の相対性」について、解りやすい日常体験2例ほどを材料にしながら理解を深めたい。

まず1つ目の例は、例えば駅に停車している電車（便宜上“自分”と呼ぶ。）の車窓からボーと外を眺めていたら、丁度そのとき対向車線に入って来た電車（便宜上“相手”と呼ぶ。）が目前で停車し、しばらくしてその電車が動き出したように思ったが、とっさにどちらの電車が動き出したのか判断できず、その瞬間地面の枕木（便宜上“第3者”と呼ぶ。）に目を向けて初めてどちらの電車が動き出したかを知り、一瞬の錯覚から抜け出した、という体験である。

次に2つ目の例は、さざ波だけの穏やかな海面上を航行している船の船尾デッキから（“自分”が）海面をジッと眺めていたら、一瞬、船（“自分”）が動いているのを忘れて海面（“相手”）のさざ波が見る見るうちに遠ざかって行くように見えたが、ふと近くの小島（または陸地、“第3者”）に目をやると自分が（船と共に）動いているのに気づいた、という体験である。

このような体験から、まず単純に、ある物体が動いているかどうかを判断するには、基準となるもう1つの物体が必要であることが解る。これを「基準系」と呼ぶことにする。2つの物体が互いに動いているか否かを判断するには、ただ単にお互いをそれぞれ「基準系」と考えれ

ばよい。つまり、自分が動いていると判断する基準系は相手である。

次に、第3者の存在は、自分と相手の運動について、しかるべき観測手段を持ち合わせていなければ大雑把になるが、新しい情報を与えてくれる。1つ目の例において、もしも停車していた電車（“自分”）と対向車線に停車した電車（“相手”）が同時に発車したのであったならば、地面の枕木（“第3者”）は、平行する軌道上を走る両者（“自分”と“相手”）の相対運動（相対速度）に加えて、大地との相対運動についての新しい情報を与えてくれる。また、2つ目の例において、小島（“第3者”）は、ジーと眺めていた海面の部分（“相手”）と船（“自分”）とで三角形を形成し3者間の相対運動（どのような角度で遠ざかっているのか、あるいはその周りを回っているのかなど、相互の位置関係と相対速度）についての情報を与えてくれる。つまり、位置／速度ベクトルの情報を与えてくれる。ただし、自分、相手、および第3者は、便宜的な呼び方であり、一般には互いに対等の関係にある。

このように、物体の運動は、2つ以上の物体が互いをそれぞれ「基準系」とすることによって初めて、つまり“相対的に”決定される。

宇宙空間においても、例えば地球が動いているか否かは、他の星などを「基準系」として判断する必要がある。アイザック・ニュートン（Sir Isaac Newton, 1642-1727）は、宇宙のどこか（または何か）に対して“絶対静止”しているという「絶対空間」を導入したが、具体的にどれが「絶対空間」であるか判断できないとした。結局「絶対空間」は、絶対的な「基準系」とはなり得ないのである。やはり、物体（または天体）が動いているか否かは、2つ以上の物体（または天体）の間で“相対的に”に判断する以外に、絶対的な方法はないのである。たとえ3つ以上の物体があっても、どれが動いていてどれが静止しているかの判断は相対的である。例えば、3つの物体が互いに等距離にあり自転していないとすると、3つ一緒に静止していると判断してもよいし、3つ一緒に動いていると判断してもよいが、後者の判断は無意味であろう。

さて、昔の人が、太陽が地球の周りを1日に1回転している（天動説）と考えたのは、実は地球が1日に1回自転していたからである。もしも、地軸に傾きがなく地軸が地球軌道面に垂直であり、かつ地球が1年に1回しか自転していなかったのであれば、地球と太陽の距離がほぼ一定である限り、太陽が地球の周りを回っているなどと誰も考えなかったであろう。従って、地動説にもなかなか辿り着けなかったであろう。

コペルニクスによって、惑星を記述する「基準系」つまり「相対座標系」²⁾の原点が地球から太陽に移され、複雑怪奇に見えていた惑星軌道の記述も簡単になったかのように説明されることがある。しかし、そのような地動説においても、実は天動説において導入されたような搬送円（従円、導円などともいう。）や周転円はもちろんのこと離心円の考えを用いる必要があったという³⁻⁵⁾（表4を参照）。

このことに疑問を抱いたヨハネス・ケプラー（Johannes Kepler, 1571-1630）は、ティコ・ブラーエ（Tycho Brahe, 1546-1601）による20数年にわたる持続的で精密な火星等の軌道観測デー

タを分析し、太陽を「基準系」とする太陽中心論の場合、当時発見されていた6惑星の軌道が太陽を中心とする円ではなく、太陽を1つの焦点とする楕円であること（ケプラーの第1法則）を突き止めた。

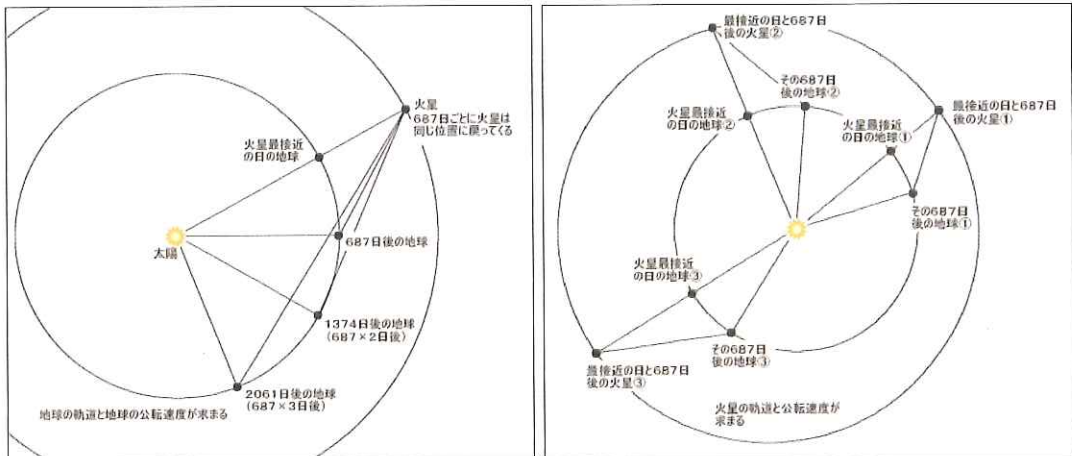


図1(a) ケプラーによる地球と火星の軌道の決定³⁻⁷⁾

ケプラーは、まずティコ・ブラーエによる火星軌道の観測データを解析して地球軌道を決定した。太陽の周りを回る火星は、公転周期の687日毎に同じ位置を通過する。その時その時の火星の同じ位置から、左の図のように地球軌道を決定した。ただし、ケプラーは最初地球軌道がわずかに中心のずれた離心円であると仮定し、その中心のずれ、円の大きさおよび周辺速度を求めたという。そしてケプラーは、地球が太陽から遠いときは遅く、太陽に近いときは速く動くことを見付け、惑星の速さは太陽からの距離（動径） r に反比例する（実際には、惑星の公転角速度 \times 距離 $[\omega \times r]$ が距離 r に反比例するとした： $\omega r \propto 1/r$ ）という仮説を立て「ケプラーの第2法則」（角運動量保存の法則あるいは面積速度一定の法則： $(1/2) \omega r^2 = \text{一定}$ ）を発見した。

次にケプラーは、右の図のように、決定した地球軌道を元に火星軌道を決めようとしたが、火星軌道も離心円だとすると、「面積速度一定の法則」が正確に成立しないし、ティコ・ブラーエの観測データとの間の、角度にして8分ほどのずれ（ただし、1分は1度の1/60を表す！）を看過できないことに気付いた。すなわち、ケプラーはティコ・ブラーエの観測結果を信じていたので、円軌道（離心円）の仮定を疑い試行錯誤を重ねた結果、火星軌道が太陽を焦点の1つとする「楕円」であるという「ケプラーの第1法則」を発見した。最終的に、地球はもちろんのこと、残りの4つの惑星も「楕円」軌道を公転していることに気付いたのは言うまでもない。

【図の出所】竹本信雄氏（茨城県立小瀬高等学校）のHP「天動説と地動説」2004年9月29日（四訂版）：
<http://www008.upp.so-net.ne.jp/takemoto/chidousetsu.htm>

これは、2者つまり地球と太陽の相対運動を観測しただけでは発見できなかった結果である。地球以外の惑星があったからこそ軌道の決定ができたのである。例えば、ケプラーは、地球と

火星の楕円軌道と速さ（周辺速度または角速度）を，太陽，地球，および火星が一直線上に来る「衝」から始めて火星と地球の周期の違いを利用し，3者つまり自分（地球），相手（太陽），および第3者（火星）が作る三角形を順次決めて行くという巧妙な幾何学的手法によって，地球，火星の順に決定したという⁵⁻⁷⁾（図1(a)を参照）。

最初に述べた2つの例でも，第3者が重要な役割を果たした。それは，1つ目の例では“地面の枕木”であり，2つ目の例では“近くの小島”である。それら第3者を「基準系」にすることによって，自分（乗っている電車または船）および自分の眺めている相手（対向車線の電車または海面の部分）がどのように動いているか判断できた。なお，いずれの例でも，第3者はたまたま地球に対して不動の物体であったが，火星のように動く物体でもよい。さらに，ここにいう3者は，どれが別格ということではなく対等であり，どのような運動をしていても構わない。

第3節で扱う本報告のメインテーマに関する3者の例としては，ガリレオの船のマストの頂上からの自由落下「(思考) 実験」の場合（3. 3を参照），船（または船上の観測者），陸地（港の岸）の観測者，および自由落下するボールであり，「ガリレイの相対性原理」の場合（3. 4を参照），2つの慣性系（等速直線運動をする座標系で，そこでは「慣性の法則」が成り立つ！），および2つの慣性系それぞれにおいて記述される共通の1つの物体（質点）である。

2. 2 プトレマイオスの天動説からコペルニクスの地動説へ

人類の自然認識の発展過程において長い時間をかけて当然の如く育まれてきた天動説（地球中心論：the Geocentric Theory；詳細は付録を参照）は，人類が世界はもちろんのこと宇宙の中心的存在であるという精神的構造に深く根ざすものであろう。また一方，人類が無意識のうちに，自分たちに共通の「基準系」として“不動である”から安心できる地球を選んだことに何の不思議も無い。

アリストテレスの宇宙体系から出発して長い歴史のうちに観測結果と矛盾のないように改良が極限まで積み重ねられてきたプトレマイオスの宇宙体系（天動説，図5(a)の右の図に見るように搬送円や周転円が導入されているので「周転円説」とも言われる！）は，片やキリスト教の教義と合体してキリスト教社会において強固な思想となっていた。

その頃現れたコペルニクスは，この極度に複雑化した天動説モデルから180度転回した視点に立ち宇宙体系を再構築した地動説（太陽中心論：the Heliocentric Theory；詳細は付録を参照）を提唱した。しかし，これを公表した彼の著書『天球の回転について』（1543）には，コペルニクスの理論は現実を表すものであるととるべきではなく，単に種々の天体の位置を計算するための有用な方法とみなされるべきであるという但し書きが付けられたという³⁾。この但し書きが，キリスト教会からの迫害を恐れる印刷業者によって付けられたものであるとするならば，やはりコペルニクス自身は，地動説が単に数学的方便ではなく，現実の宇宙体系であると信じ

ていたのではなかろうか。

いずれにしてもコペルニクス以後の歴史は、初期の半信半疑の時代を経て、確実に地動説を受け入れる方向に動いて行った。ティコ・ブラーエが天動説と地動説を折衷した中間説（図5(c)を参照）を提唱し、しばし時代が逆行したかに見えたが、その後ケプラーが現れ、太陽中心論（地動説）にのっとり太陽の周りを公転する惑星すべて（水星、金星、地球、火星、木星、土星）が従うとする「ケプラーの法則」⁸⁾を発見した。また、同時代（17世紀前半）に活躍したガリレオは、「落下の法則」や「慣性」の概念等自ら発見した法則と改造望遠鏡を武器としてローマ教皇庁（バチカン）の圧力と命懸けで闘い、地球は自転しながら他の惑星と同様太陽の周りを公転するという地動説を支持・擁護した。

さらに、これよりおよそ半世紀後に活躍したニュートンは、ケプラーやガリレオの研究成果に基づき、「万有引力の法則」⁸⁾と「運動の3法則」⁸⁾を帰納・発見すると共に自らの法則を演繹してケプラーやガリレオの発見した諸法則を導けることを、彼の著書『プリンキピア』（1687）において示し、地動説を力学的に不動のものとした。以後地動説は、キリスト教会から迫害されることもなく、事実上当然のこととして受け入れられるようになって行った。

さらに言うならば、地球中心論（天動説）において、地球が軽い月を従えているのはよいとしても、地球より圧倒的に（約30万倍）重い太陽や相当（約300倍）重い木星などを従えているのはもちろんのこと、同程度の惑星たちを従えているのも“力学的に”アンバランスである。ましてや、ラプラス（Pierre-Simon Laplace, 1749 - 1827）をして1796年刊行の著書『世界体系の解説』において「太陽ほどの質量を持ち太陽ほどの距離にある天体が、1日で地球の周りを一周するほどの高速で運動していると考えたよりも、われわれの住む地球が自転していると考えの方がはるかに単純ではないだろうか」⁹⁾と言わしめた天動説に力学的な有用性はなさそうである。

余談ではあるが、地球の公転が科学的に証明されるまでには1728年（ニュートンの死の1年後）の「年周光行差」の観測と1838年の「年周視差」の観測を待たなければならなかった（詳細は付録を参照）。一方地球の自転が科学的に証明されるまでには1835年の「コリオリの力」の発見と1851年の「フーコーの振り子」の発明を待たなければならなかった（詳細は付録を参照）。これは、地球の公転に話を限定したとしても、地動説が世に出てから約2世紀弱、「ケプラーの法則」の発見から約1世紀余り、さらにニュートンによって近代力学の命を吹き込まれてから41年の間「仮説」であったことを意味する。地球の自転に至ってはそれよりさらに1世紀余りも長く「仮説」に甘んじて来たのである。

このようにして天動説が誤りで地動説は正しいとする常識が出来上がってしまった感があるが、ここで話を、天動説と地動説の相克の時代（17世紀前半）に戻し、これを「運動の相対性」の理論的取扱い開始の原点と位置付ける。

力学の教科書的表現をすれば、当時の宇宙体系（太陽系）モデルは、それを記述する「相対座標系」の原点として、地球を選んだとき天動説（地球中心論、図5(a)と図1(b)を参照）と

なり、太陽を選んだとき地動説（太陽中心論，図 5 (b)を参照）となる¹⁰⁾。このように記述する視点が変わると運動の姿も違って見えることが、取りも直さず「運動の相対性」であった。

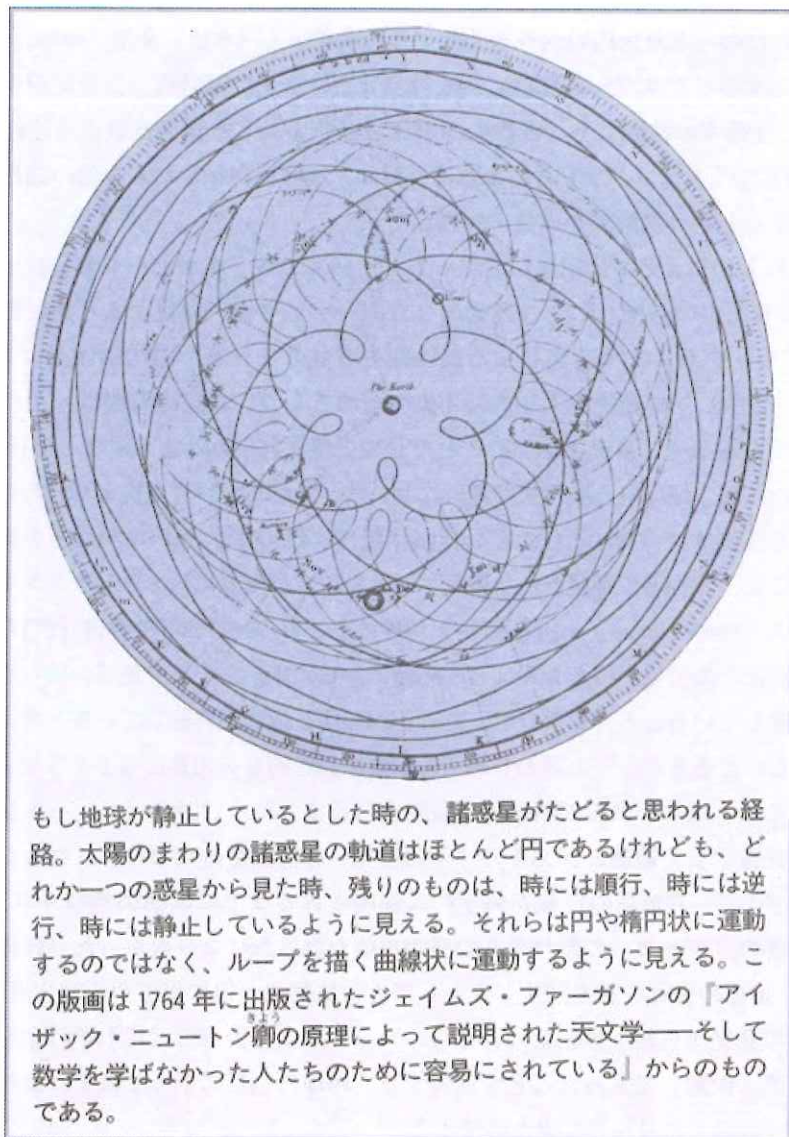


図 1 (b) 地球を相対座標系の原点に置く天動説の太陽と惑星の軌道計算

ニュートン力学により天体の軌道計算が正確にできるようになった頃、万有引力の法則とニュートンの運動方程式に基づいて数値計算が行われたものと推定される。これには、天体間の距離が正しく反映された天動説における太陽と地球以外の惑星の正しい軌道が描かれている。

【説明付きの絵の出所】 P.M.ラッタンシ著、吉仲正和訳『ニュートンと重力』玉川大学出版部（1993） p.92

さて、「ケプラーの法則」が発見された1609年（第1・2法則）⁸⁾、1619年（第3法則）⁸⁾以降、ガリレオがローマ教皇庁による異端審問に苦しめられた時代（とくに1633年の第2回宗教裁判で幽閉状態に置かれた晩年）において、天動説に比べて地動説の方が、力学的に意味があるのか、あるいは惑星の軌道を記述する数学的手段が優れているのかなどについて、まだ人々は（おそらく当時の知識人と言えども）科学的な判断力を持ち合わせていなかったであろう。

このような時代にあってガリレオは、彼の異端審問¹¹⁾のきっかけとなった著書『天文対話』（1632）¹²⁾を著して、地球自転を否定する天動説論者に対する反論を展開し、科学的根拠に基づいて地動説の可能性を人々に訴えようとした。

以下（2. 3）の説明から分るように、地動説を擁護するガリレオによって批判された天動説が、全く別の視点から、言わば反面教師の立場から「運動の力学的相対性を取り扱う理論的枠組み」の誕生を促す歴史的役割を果たしたことを知るであろう。すなわち、2世紀から16世紀までの長きにわたり発展的に存続し時代の要請にこたえて来たプトレマイオスの宇宙体系（天動説）が近代力学誕生の前夜にそのトリガー的役割を果たしたという意味において、天動説にそれなりの歴史的価値を認めることができるであろう。

2. 3 地動説からガリレイの相対性原理へ

ガリレオ・ガリレイは、当時発明されて間もない望遠鏡を自ら製作・改良し、それを用いて地動説を支持・擁護する根拠を示した。例えば、木星の4つの衛星を発見して地球が太陽の周りを公転している可能性を示唆し、また太陽黒点の観測により太陽の自転を発見して地球自転の可能性を主張した。ガリレオは、これらの成果を『星界の報告』（1610年3月）^{13,14)}で公表した。さらに金星を観測して、金星が満ち欠けしかつその大きさが変化することを発見した（1610年10月）^{5,14)}。とくに金星の大きさが変化することは、地球と金星の距離が一定であるはずの天動説では説明できないことに気づき、地動説への支持を強めたようである^{5,14)}。

また一方においてガリレオは、自ら発見した「慣性」の概念（円慣性）、「落下の法則」、および両者を組み合わせて構築した「投射体の実験」と「放物運動の理論」に立脚して地球自転の可能性を主張した。この主張、とくにその論拠については、次の節で手作りアニメーションを活用して詳述する。

さて、ガリレオは著書『天文対話』（1632）¹²⁾において、地球自転を否定する天動説論者に対する反論として、船のマストの頂上から自由落下したボール（原著では場面によって小石や鉛の球とあるが、本報告では球を意味する「ボール」に統一した！）は、船が静止していても水上を等速で「直線」走行していても船のマストの足もと（真下）に着床する（ボールが甲板の床に着くという意味）ことは自明であり、「実験」で示すこともできると主張した^{12,15)}。

朝永振一郎の『物理学とは何だろうか 上巻』（1979）¹⁵⁾によれば、ガリレオによる動く船のマストの頂上からの自由落下「実験」の結論は、おそらく実際に行われた実験ではなく、水

平「投射体の実験」で得られた帰結とその理論的考察に裏打ちされているという。本報告の目的は、歴史的考証を行うことではなく、手作り教材を紹介することにあるので、上に述べた朝永振一郎の著書の意見に素直に従い、アニメーションを用いた教材作りを進めることにする。

すなわち本報告を通して、ガリレオによる船のマストの頂上からの自由落下「(思考) 実験」を、実験と論証に基づく「思考実験」であったとして取り扱うことにする¹⁵⁾。ただし、その表現は、「思考実験」ではなく「(思考) 実験」をそのまま用い続ける。

船のマストの頂上からの自由落下「(思考) 実験」と同じ論法でガリレオは、地球が自転していても地上の塔の頂上から自由落下した小石は塔の根もと(真下)に着地する、と主張する^{12,15)}。従って、現実には地上の塔の頂上から自由落下した小石が塔の根もとに着地するからと言って、この事実が大地は不動であるとする天動説を保証する論拠とはならない、と論じた^{12,15)}。

さらに、大砲の例を用い、大地が西から東へ動いていても、同じ条件(投射角度と初速度)で大砲を撃った場合、東向きに撃った砲弾の射程(距離)と西向きに撃った砲弾のそれとの間に違いはない^{12,15)}。また、真北または真南に撃った砲弾も、動く大地によって東西にぶれることはないと言いつつ^{12,15)}。

このように(地球の公転より自転の影響の方が十分大きく効いている) 大地の運動が地上の自然現象として観測されない理由について、ガリレオは次のように説明している(参考文献15のpp.75-76から引用転写した)^{12,15-17)}：

「たとえ大地になんらかの運動が帰属されるとしても、この運動は大地の住民であり従って同じ運動を分有している我々には全く知覚されず、地上の事物のみを見ている間はまるでその運動が存在しないようであるにちがいない。」

このガリレオの宣言の含意するアイディアが、後世において、とくにニュートンによって絶対時間と絶対空間(古典力学的時空概念)が導入されて以降いつ頃からか、一般化された形(3. 4を参照)で「ガリレイの相対性原理」、または「ガリレイ-ニュートンの相対性原理」などと呼ばれるようになった。この原理は、ニュートン力学の時空概念に基本的枠組みを与えると同時に、「アインシュタインの特殊相対性理論」の出現まで約2世紀余りの間、古典力学の屋台骨としての役割を果たしてきた。そしてこの原理は、非相対論的な力学現象に関する限り今なお立派に現役なのである。

3. ガリレイの相対性原理とその限界

この節では、「ガリレイの相対性原理」の発見につながった船のマストの頂上からの自由落下「(思考) 実験」と水平「投射体の実験」について、これらの現象をシミュレートする手作

りアニメーション教材を適宜利用しつつ説明する。その上で、それらの思考実験と投射体の実験に裏打ちされた、地動説を擁護するガリレオの宣言（2. 3を参照）が、「ガリレイの相対性原理」と呼ばれる姿に整理されて行った過程を考察し、さらにその内包している限界をアインシュタインが解決するまでの経緯に言及し、その帰結についてまとめた。

3. 1 船のマストの頂上からの自由落下（思考）実験に基づくガリレオの主張

ガリレオは、天動説の打破を目論んだ著書『天文対話』（1632）において、まず天動説を奉じるアリストテレス派の次のような主張を紹介している^{12,15)}：

「誰でも知っているように重い物体が高所から落とされると、大地の表面に垂直な直線に沿って落ちてくるが、このことは議論の余地なく大地の不動なことを証明している。なぜかという、もし大地が動くなら、たとえば塔の上から小石を落としたとき、小石が着地するまでに塔は大地の運動（地球の自転）によって西から東へ運ばれているから、小石は塔の根もとに落下せず、より西のほうに落下するはずだ。」

このアリストテレス派の主張を無力化するために、ガリレオは次のような「（思考）実験」を提案した^{12,15)}：

「船のマストの頂上からボールを（初速度0で）落としてみる。船が水上でじっと（静止）しているなら、そのボールはたしかにマストの足もと（真下）に落下する。そこで、その落下点（着床点＝ボールが甲板の床に落ちた箇所）にしるしをつけておく。次に、船が水上を走っているときに同じことをやってみる。」

そうすると、もしアリストテレス派の論法が正しいなら、ボールが着床するまでに船は前方に動いているから、落下するボールはマストの同じ足もとに着床せず、それより後方に着床するはずである。

しかし、後述のガリレオの自由落下（思考）実験（3.3を参照）に基づく正しい結果は、アリストテレス派の主張を支持しない。すなわち、船が水上を走っているときでも、そのボールはマストの同じ足もと（船がじっとしていたときと同じ着床点）に落下する。

3. 2 水平面に沿った「円」慣性運動の直線近似と投射体の放物運動

3. 2. 1 ガリレオの慣性の概念、「円」慣性について（復習）¹⁾

前回の報告で詳述したように、ガリレオの慣性の概念は、最初一定の速さで転げ始めたボールは、巨大な球面である地球表面（水平面）に沿って、ゆるやかにカーブする巨大な円を描きながら同じ速さで永久に転がり続ける（つまり等速円運動を続ける）というものであった。ただし、空気抵抗や摩擦抵抗を無視できるものと仮定しているの言うまでもない。

このような「慣性」の概念は「円」慣性と呼ばれる。この「慣性」には、最初運動していた物体（ボール）は“外力”が働かない限り永久に等速直線運動を続けるという「慣性の法則」

と本質的に違う点がある。それは、ガリレオの円「慣性」には“重力”という“外力”の作用が含まれているからである。

しかしながら、ガリレオは“自然運動”は「円」であるとするアリストテレス的自然観にまだ疑問を感じていなかったからか、ボールが転げる地球表面（球形の水平面）に垂直（鉛直）下向きに働く重力の概念を知らなかったからか、「円」慣性に何ら疑念を挟まなかったものと推定される。

3. 2. 2 ガリレオの「円」慣性の近似としての「直線」慣性¹⁵⁾

さて、ガリレオは、水平方向に投射された物体の運動を考察するとき、それは水平方向の慣性運動と鉛直下向きの自由落下運動を合成した運動であると考えた。これは、ガリレオが逆に投射体の運動を鉛直成分と水平成分に分解して考えていた証拠であり、まさにベクトルの合成と分解の考え方の先駆である。

ここで、今回の報告の核心について述べる。「円」慣性の概念に疑問を感じなかったガリレオが、地球の大きさに比べて十分短い水平距離に限って、「直線」慣性に相当する概念を導入した。つまり、等速直線運動を行う物体について成立する「慣性の法則」に辿り着けなかったガリレオが、水平面に沿ったゆるやかなカーブの短い部分を直線で“近似”したのである。

必要に迫られた結果とは言え後世から見ると、いわば“局所的に”正しい「慣性の法則」を用いたことになる。ただし、ガリレオは「円」慣性の方が正しいと考えていたので、「直線」慣性を「円」慣性の“近似”として用いた（“等速円運動”を局所的に“等速直線運動”で近似した！）ことに留意しよう。

具体的には、以下の3. 2. 4に見るように、投射体の射程距離が十分短いので、投射体の水平方向の運動成分が“局所的に”「直線」慣性に従うとした。また3. 3. 2 (2)においても、“水平面”上を走行する船のマストの頂上から自由落下するボールの軌跡を陸地（港の岸）から観測する「(思考) 実験」においても、ガリレオは船の走行距離が短いとして、少なくともボールが床に着くまでの間、船は局所的に“平面”とみなされる水面上を一定の速さで走行する、つまり等速直線運動を行うとしたであろう、と推定される。

今日の表現を用いて後述の水平「投射体の実験」の解析に使えるように、今一定の速さ v_0 で水面上を等速直線運動する船の水面上の位置座標を $x(t)$ とし、船のマストの頂上からボールが自由落下した瞬間（ $t=0$ ）のマストの位置座標を x 軸の原点とすると、 $x(t)=v_0 t$ が成り立つ。

上述のような局所的“近似”という発想が、いずれにしても結果として、正しい「ガリレイの相対性原理」の発見につながったと考えられる。

3. 2. 3 ガリレオの落下の法則について（復習）¹⁾

前回の報告で詳述したように、「落下の法則」とは、初速度0で落下するつまり“自由落下”する物体は、物体の重さ（当時質量の概念はなかった！）の大小に関係なく垂直（鉛直）下向きに一様な加速度で落下するというものである。

換言すれば、自由落下する物体の落下距離 y は落下時間 t の 2 乗に比例する。すなわち、 $y(t) \propto t^2$ である。今日の表現では重力加速度 g を用いて $y(t) = (g/2)t^2$ となるが、次の「投射体の実験」の解析に備えて、簡単のため落下距離 y と落下時間 t の単位を任意に選び、 $y(t) = t^2$ と表しておく。隣接する落下地点間の距離（間隔）； $y(t+1) - y(t)$ は、落下の瞬間から時間が“1 単位”経過する毎に 1 から始まる奇数値 1, 3, 5, 7, … をとる。これらの数値は、ガリレイが斜面の実験で得た観測データである。

3. 2. 4 投射体の放物運動

ガリレイは、最初斜面で加速されたボールを、緩やかなカーブで方向転換し短い水平距離を駆け抜けた所で水平投射し、その軌跡を観測する実験を行い、即座にその水平投射体の軌道が“半放物線”（放物線の半分）であることを認識したという^{12,15,18-20}（図 2 (a),(b) を参照）。

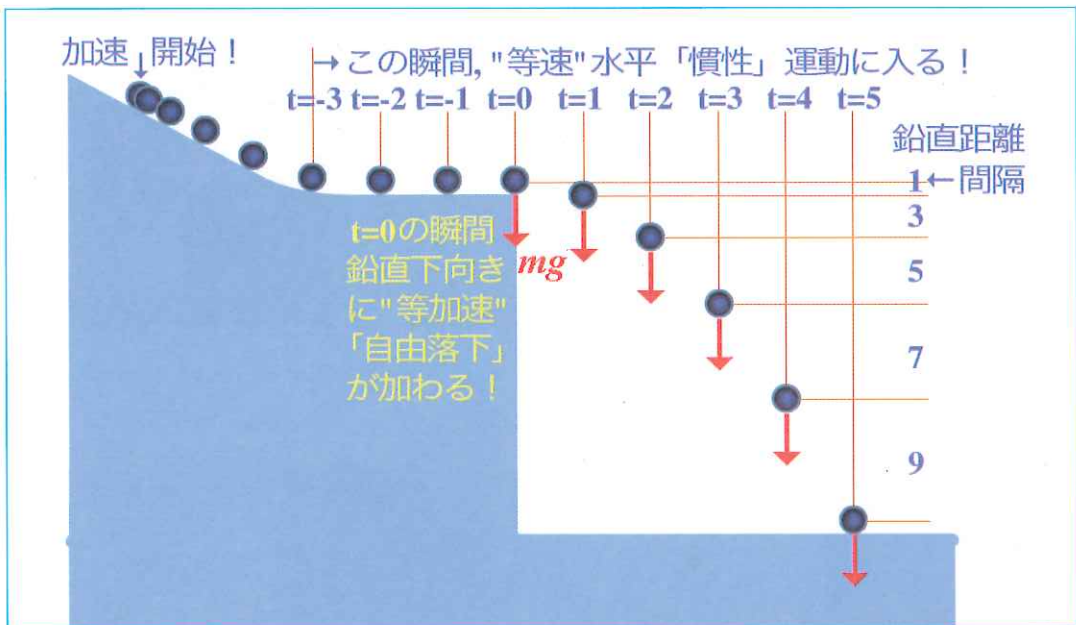


図 2 (a) ガリレイによる水平投射体の実験

ガリレイは、斜面で加速され、水平方向に一定の速度を得た後、水平方向に投射されたボールは、“半放物線”を描いて、着地することを検証した。さらに、このような放物線の運動は、水平方向の等速「慣性」運動と鉛直下向きの等加速「自由落下」運動がベクトルの的に合成された結果であることを証明した。

図中赤色の矢印は、鉛直下向きの重力 (mg) を表す。ただし、ガリレイの時代には重力や質量という概念はなかったので、ガリレイはこのように重力が働いていたとは考えなかった。それは、当時の人々が、重さのあるものが下方に落下するのは自然的運動であるとするアリストテレス学派の考え方に染まっていたからである。ガリレイといえどもその例外ではなかったが、彼がとくに、重いものほど速く落ちるとするアリストテレス学派の説には疑問を抱き、物体が“どのように”落下するかを実験・測定して「落下の法則」を発見したことは革命的なことであった¹⁾。

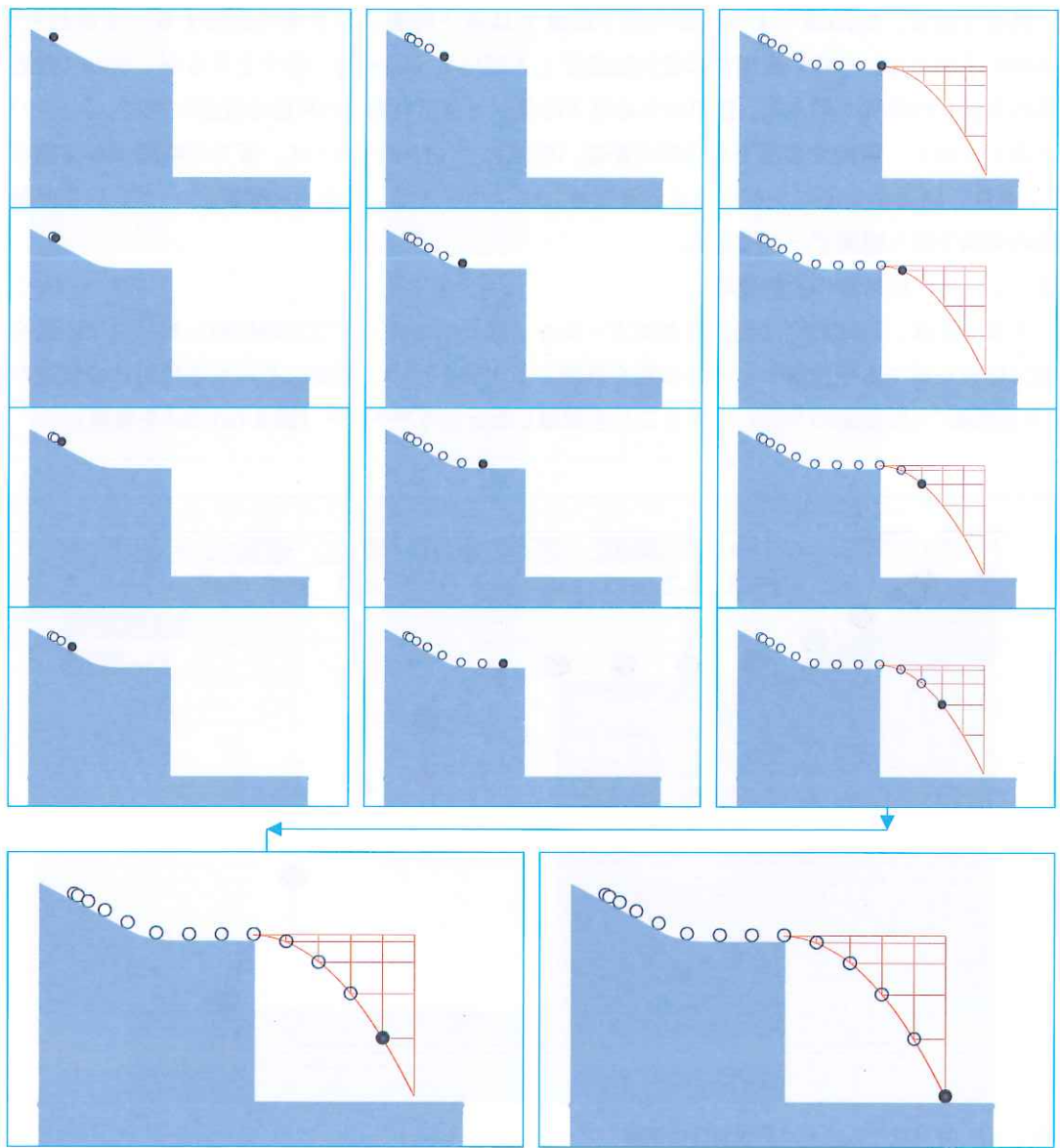


図 2 (b) 水平投射体の実験：図 2 (a) のアニメーション

手作りアニメーションの典型的なキーフレームを、それぞれの列では上から下へ、列は左、中央、右の順に、時系列で図示した。図中、●はボールを、○はボールの軌跡を表す。

実際にガリレオは、斜面の実験を発展させた「思考実験」から得られた「慣性」の概念、および「落下の法則」に基づいて、水平「投射体の実験」データの数学的解析を行った。すなわち、水平方向の等速慣性運動と、「落下の法則」に従う鉛直下向きの等加速自由落下運動とを合成するという運動のベクトルの合成を行い、水平投射体の軌道が幾何学（アポロニウスの円錐曲線論）において定義されている放物線（の半分）であることを論証した^{12,15,18-20}。これらの詳細は彼の著書『新科学対話』²⁰（1638）において報告されている。

さらにガリレオは、水平投射された物体の軌跡を“逆に辿る”運動が可能であることに気づき（図2(c),(d)を参照）、地面から斜め上方に発射された物体の軌跡は“完全な放物線”になると推論し、これを実験的に検証したという^{15,20}。

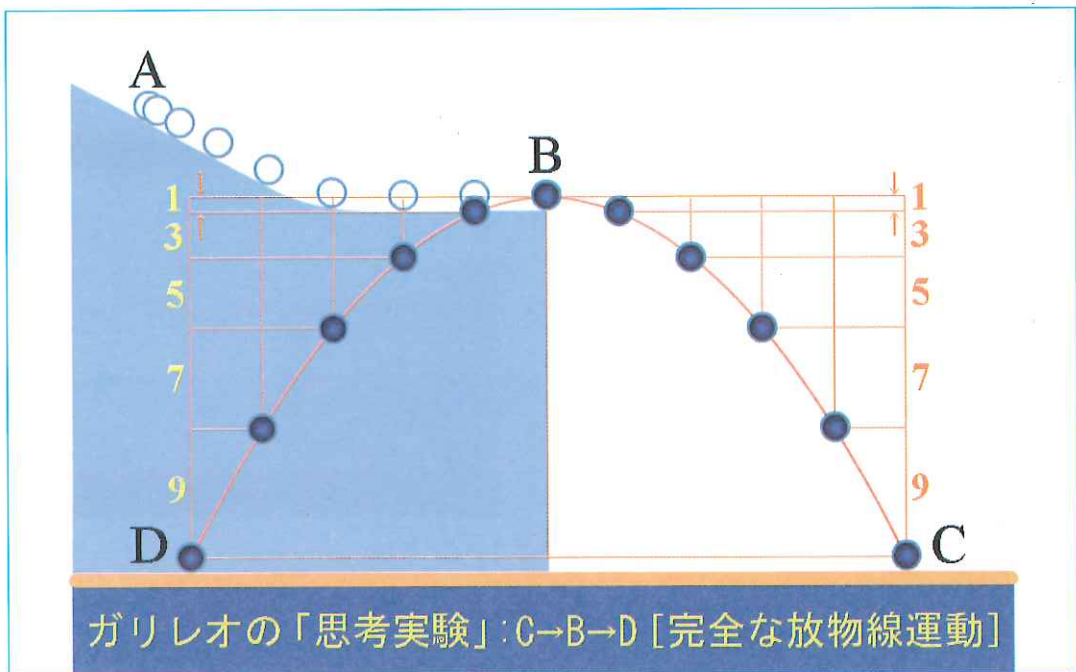


図2(c) 放物線運動についてのガリレオの思考実験

ガリレオは、最初A→B→Cの実験を実際に行って、水平投射された物体のB→Cの軌跡が“半放物線”であることを検証した（図2(a)を参照）。そのとき、その軌跡を“逆に辿る”つまりC→Bの運動が可能であることに気づき、その先はB→Cの軌跡と（左右対称なだけで）本質的に同じB→Dの軌跡を辿るに違いないと論証した（思考実験）。このようにしてガリレオは、地面から斜め上方に投射された物体の軌跡は“完全な放物線”になると予言し、これを、様々な投射角について実験的に検証したという。

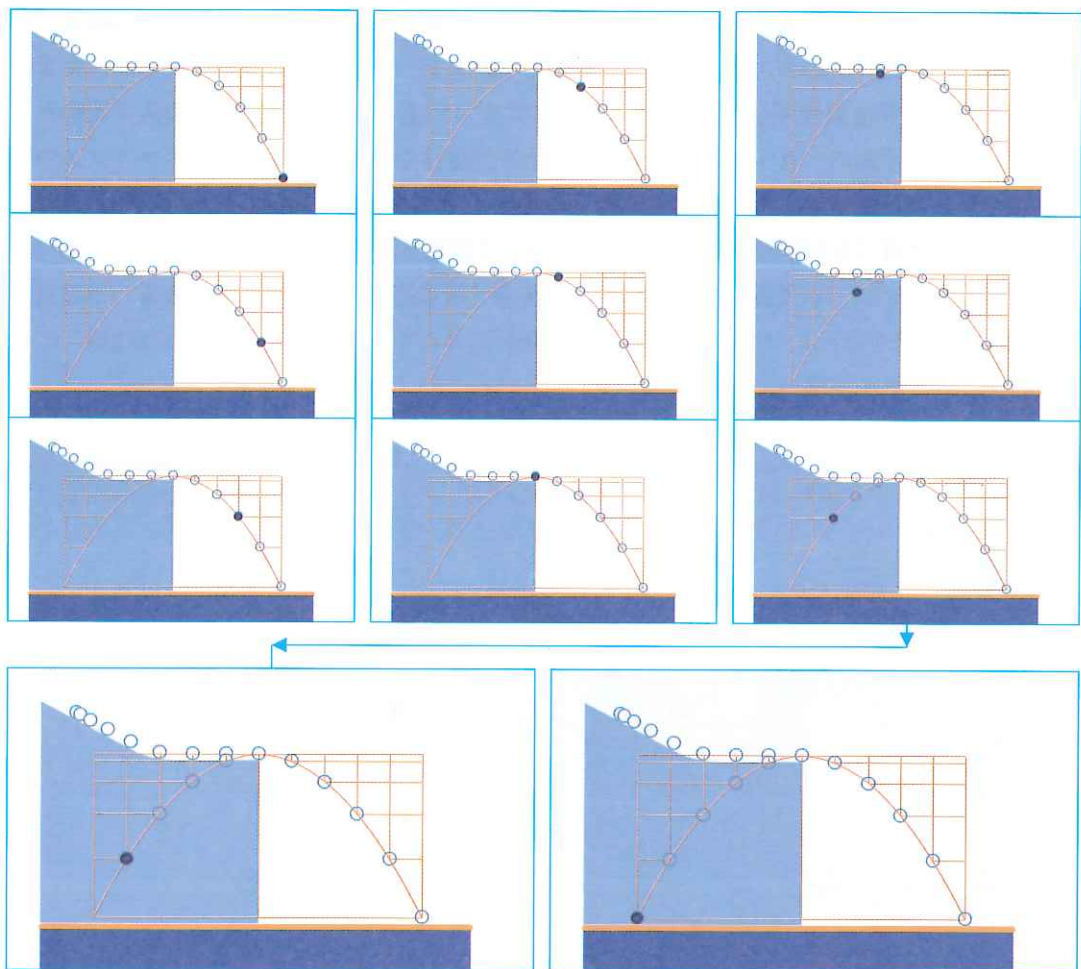


図 2 (d) 放物運動についての思考実験：図 2 (c) のアニメーション

この場合についても、手作りアニメーションの典型的なキーフレームを、それぞれの列では上から下へ、列は左、中央、右の順に、時系列で図示した。図中、●はボールを、○はボールの軌跡を表す。

3. 3 船のマストの頂上からの自由落下（思考）実験と運動の相対性

3. 3. 1 静止している船のマストの頂上から落下するボールの軌跡

観測者が船上にいても陸地（港の岸）にいてもボールは「落下の法則」に従って自由落下し、船のマストの足もと（真下）に着床する。その軌跡はマストに沿った鉛直下向きの直線となる^{12,15)}。

3. 3. 2 水平面上を走行中の船のマストの頂上から落下するボールの軌跡

(1) 観測者が船上にいる場合（図 3 (a),(b)を参照）

ボールは「落下の法則」に従って自由落下し、船のマストの足もと（真下）に着床する。その軌跡はマストに沿った鉛直下向きの直線となる^{12,15)}。

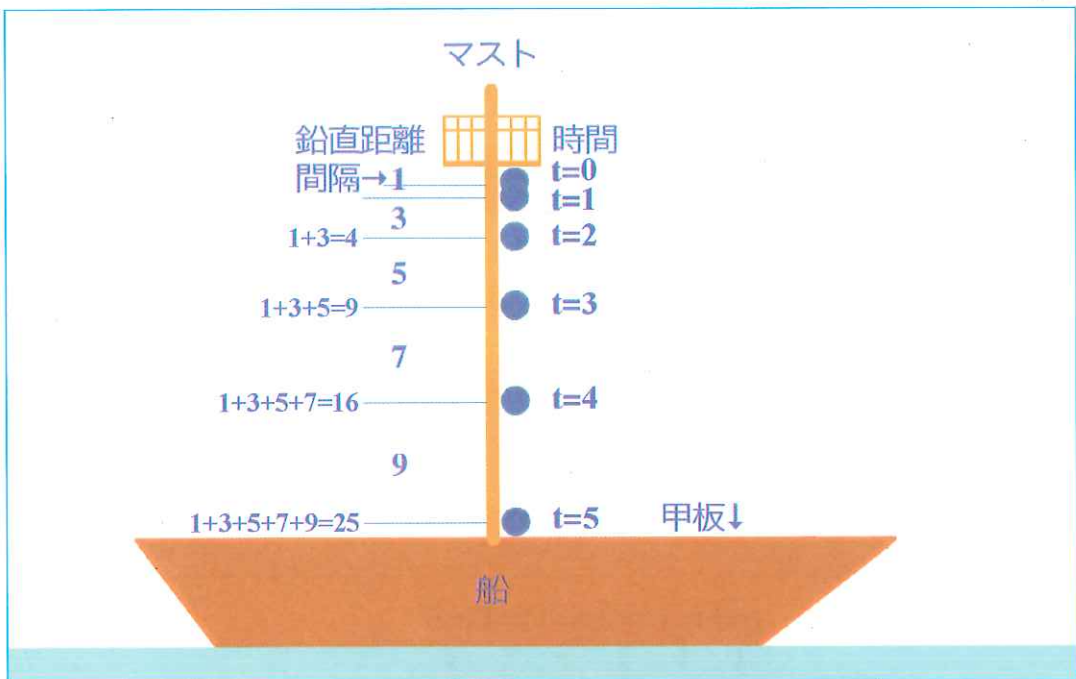


図3 (a) 船上での自由落下の（思考）実験：観測者が船上にいる場合

船のマスト（帆の描画は省略した！）の頂上からボールを自由落下させたとき、船上にいる観測者は、船が静止していても動いていても、ボールがマストの足下に落ちるのを観測する、とガリレオは主張した。この主張は、ガリレオが実際の実験で検証した結果ではなく、「思考実験」に基づくものと推定されている¹⁵⁾。その正しいことは、ガリレオが実験室で行った「投射体の実験」によって裏付けられている¹⁵⁾。とくに、船が動いている場合に関しては、図3 (c)の説明文中で詳細に説明した。

(2) 観測者が陸地（港の岸）にいる場合（図3 (c),(d)を参照）

ボールが船の進行方向に一定の速さ v_0 で放り出された瞬間から、その進行方向（ x 軸）に沿った運動成分は「直線」慣性に従って等速直線運動（ $x = v_0 t$ ）をし、その鉛直下向き（ y 軸）の運動成分は「落下の法則」に従って等加速運動（ $y(t) = t^2$ ）を行う。故に、ボールの軌跡は、水平方向の等速直線慣性運動と鉛直下向きの等加速自由落下運動を合成して、船のマストの頂上を頂点とする上に凸の“半放物線”となる（ $y = kx^2$ 、ただし、 $k = 1/v_0^2$, $x \geq 0$ 。括弧内の数式はライプニッツ以降の表現である。当時の論証は幾何学的表現で行われた）。

もちろんこの場合も、ボールが着床する箇所は、(1)の場合における船上の観測者が観測する船のマストの足もと（真下）と同じでなければならない^{12,15)}。このことは、3. 2. 4の投射体の放物運動についての実際の実験結果とその数学的解析によって必ず起きることが保証されている¹⁵⁾（図2 (a)と図3 (c)を比較参照）。

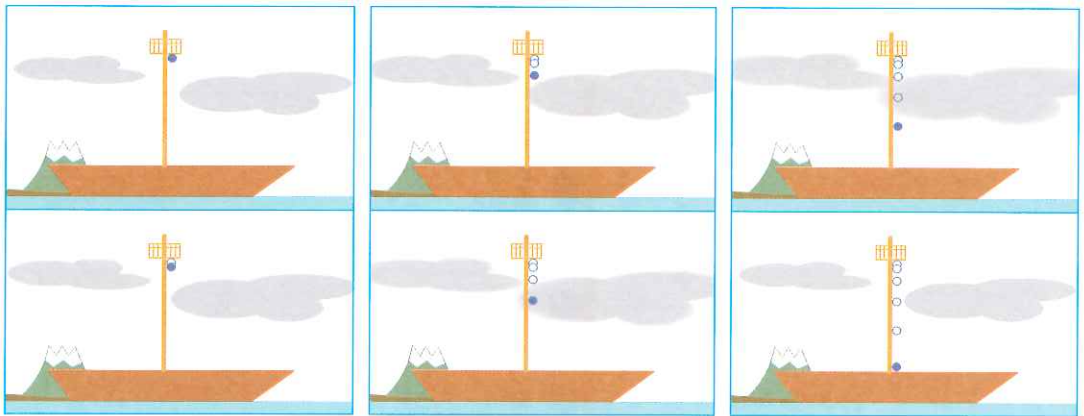


図 3 (b) 船上での自由落下の（思考）実験：図 3 (a) のアニメーション

この場合についても、手作りアニメーションの典型的なキーフレームを、それぞれの列では上から下へ、列は左、中央、右の順に、時系列で図示した。図中、●はボールを、○はボールの軌跡を表す。

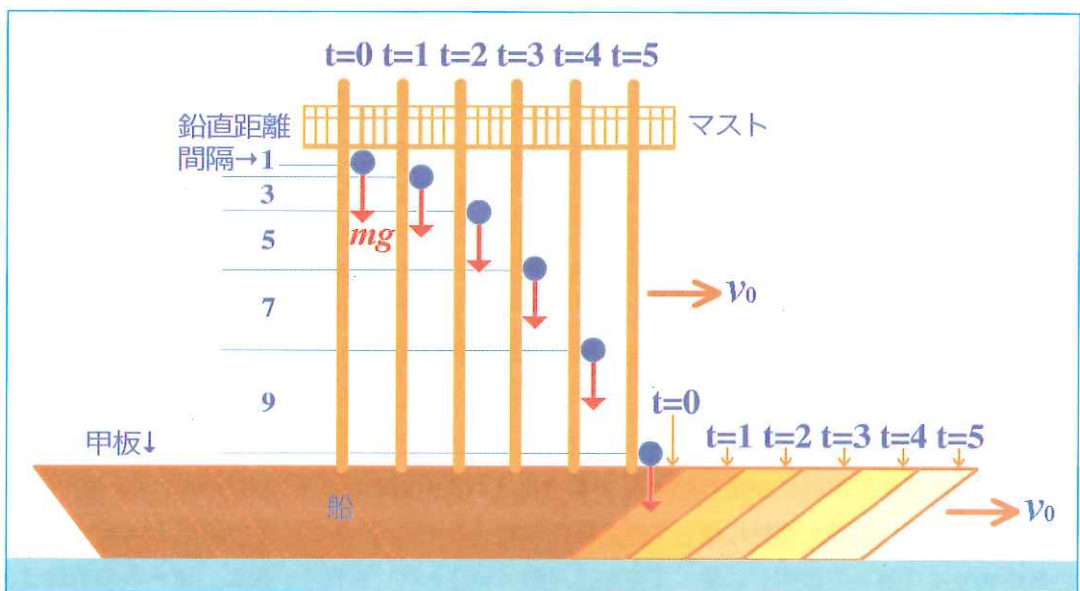


図 3 (c) 動く船上での自由落下の（思考）実験：観測者が陸地にいる場合

一定の速さで動いている船（帆の描画は省略した！）のマストの頂上からボールを自由落下させたとき、陸地（港の岸）にいる観測者は、ボールが、自由落下させられた瞬間、船の進行方向に船の速さに等しい水平方向の初速度で投射され、“半放物線”を描いてマストの足下に落ちるのを観測する、とガリレオは主張した。この主張は、図 3 (a) の場合と同様、ガリレオの「思考実験」に基づくものと推定されている。

なぜなら、この「思考実験」は、図 2 (a) とその説明から分かるように、水平投射されたボールの運動およびその軌道の数学的解析から得られた知見に論理的に裏打ちされているからである。すなわち、図 3 (c) の運動軌跡“半放物線”が確実に実現されるということは、図 2 (a) の水平投射体の実験結果、およびその運動軌跡が“半放物線”であるという理論的解析によって保証されており、それ故図 3 (a)、なかなか動いている船の場合についての結論・主張も正しいということである。

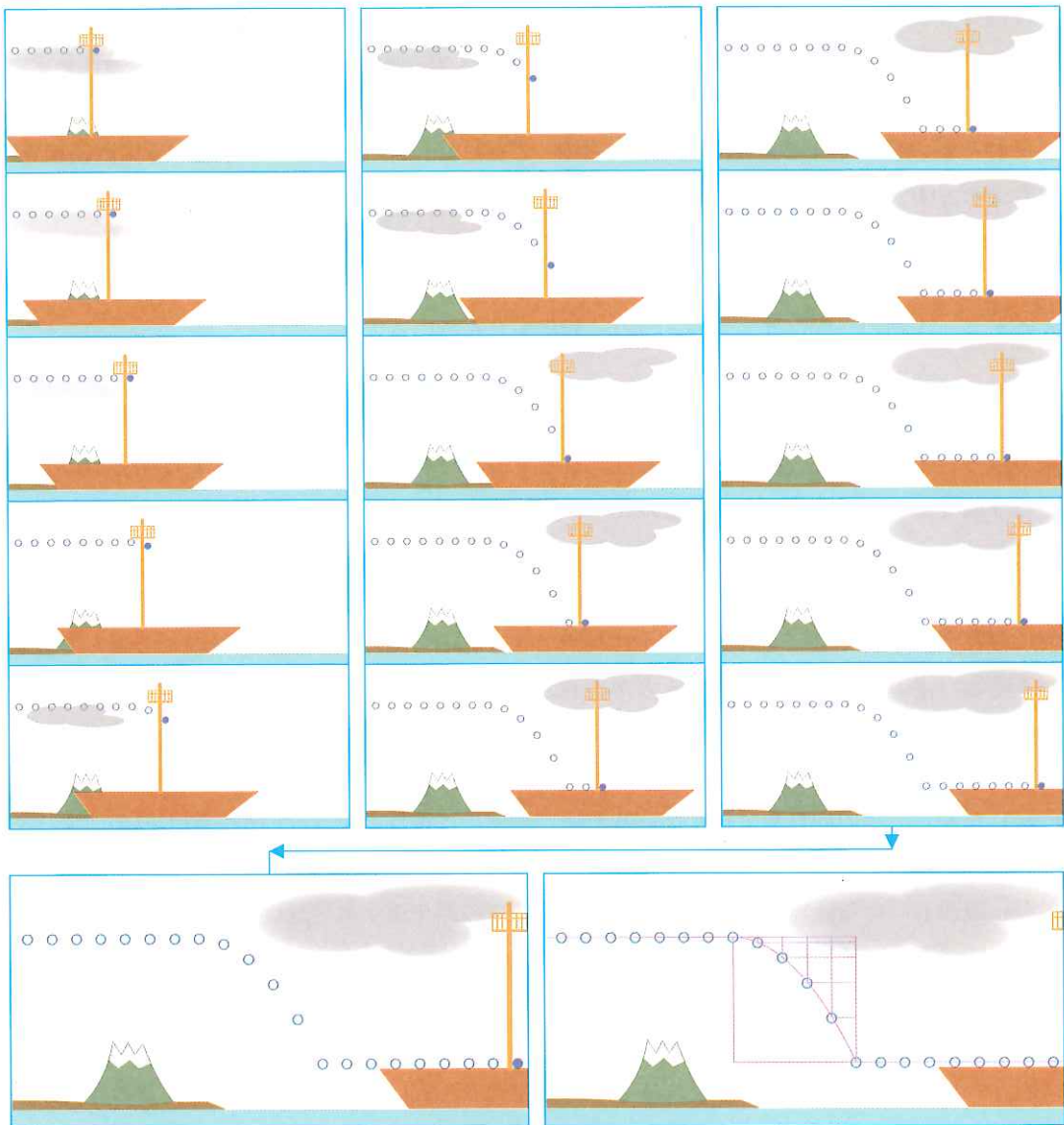


図 3 (d) 動く船上での自由落下の（思考）実験：図 3 (c) のアニメーション

この場合についても、手作りアニメーションの典型的なキーフレームを、それぞれの列では上から下へ、列は左、中央、右の順に、時系列で図示した。図中、●はボールを、○はボールの軌跡を表す。

3. 4 ガリレイの相対性原理

ガリレオの著書『天文対話』¹²⁾ (1632) における地動説をめぐる論争において、後世に残る「ガリレイの相対性原理」の基礎的概念を把握した“ガリレオの宣言”が行われたことは、2. 3において紹介した。これを、3. 2と3. 3の議論（とくに図2と図3の説明を参照）を踏まえて一般化すると次のように言える。

今例えば、簡単のため x 軸に沿って、互いにある一定の相対速度 v_0 で等速直線運動を行う任意の2つの慣性系（「慣性の法則」が成り立つ座標系） $O\text{-}xyz$ と $O'\text{-}x'y'z'$ を考え、両慣性系それぞれから、1つの物体（質点） P の両慣性系に共通の任意の運動を観測しよう。

それぞれの慣性系から観測した、同じ物体（質点） P の任意の運動を記述する位置座標を、それぞれ $x(t)$ と $x'(t)$ とするとき、関係式 $x(t) - x'(t) = v_0 t$ が成立する（表1と図4を参照）。ただし、 t は両慣性系の原点がすれ違いざまに一致（ $x(t) = x'(t)$ ）した瞬間から計った経過時間を表す。すなわち、初期条件を $x(0) = x'(0) = 0$ とした。

ただし、上述の一般化は、次の2つの一般化を含んでいる：

(1) 1つ目の一般化は、船のマストの頂上からの自由落下（思考）実験に現れる2つの慣性系のうち、1つは陸地（港の岸）であり、もう1つはそれに対して相対速度 v_0 で等速直線運動を行う船であったが、これらを任意の2つの慣性系としたことである。

これは、古典物理学における慣性系は無数に存在すると考えられ、それらのうちのどれ1つとして特別のものはなく、もちろん絶対静止している慣性系（ニュートンの「絶対空間」）が仮に存在するとしても、それがどれかは判別できないのであるから、慣性系の1つとして扱われる陸地（港の岸）も静止しているのかそれとも動いているのか、誰も判別できない（絶対的“静止”は存在しない！）という事情によって許される。結局、話はすべての慣性系を含む。

なおここで、次の点に留意したい。すなわち、我々の座標系としての地球（陸地／大地）は、自転しながら太陽の周りを公転しているため、厳密には慣性系ではないが、海上の船の走行やボールの自由落下／投射運動のように地球の自転に比べてテンポの速い運動を観測・記述する場合、観測者のいる陸地はもちろんのこと、停泊中の船や海上を等速直線走行中の船も、通常近似的に（あるいは実質的に）慣性系として扱われる。

(2) 2つ目は、船のマストの頂上から自由落下するボールの運動はガリレオの（思考）実験に固有のものであるが、これを、ニュートンの運動方程式によって記述される任意の運動に一般化したことである。これは、「落下の法則」から一般の力学法則への拡張を意味する。

ここに、物体（質点）の任意の運動を記述する舞台（「絶対空間」に対して等速直線運動を行う慣性系）が、3次元空間（デカルト座標系）であり、そこではニュートンの「絶対時間」が流れる。ただし、記述を簡単にするため2つの慣性系の相対運動は x 軸に沿った方向に限定しているが、それで一般性を失うことはない。

近代力学発展の歴史的過程において、おそらく上記のような一般化を経て形成されて来たであろうと推定される「ガリレイの相対性原理」が、人々の自覚の有無に関わらず、様々な力学的現象を記述するニュートン力学（古典力学）のバックボーン的役割を果たしてきたことは、

その限界が見えてきた19世紀末までの約2世紀余りの間に実証し尽くされたと言えよう。

つまるところ、ある任意の慣性系で記述される力学法則は、表1で定義される「ガリレイ変換」を行えば、もう1つの任意の慣性系においても同じ形（の数式）で記述される、ということである（図4を参照）。ここに、両慣性系において流れる時間は共通である。

結局、このようにして力学的相対性を取り扱う理論的枠組みとして確立された「ガリレイの相対性原理」は、次のように表現される^{8,21)}：

「どの慣性系においても力学法則（ニュートンの運動方程式）は同じ形（の数式）で記述される（または、記述されなければならない）。」

表1 ガリレイ変換^{8,21)}

慣性系 $O\text{-}xyz$ およびその x 軸の正方向に一定の相対速度 v_0 で動くもう一つの慣性系 $O'\text{-}x'y'z'$ において、ある質点 P の存在する時刻および3次元座標が、それぞれ (t, x, y, z) および (t', x', y', z') で表されるとき、次の「ガリレイ変換」が成立する。				
$t' = t \cdots (1),$	$x' = x - v_0 t \cdots (2),$	$y' = y \cdots (3),$	$z' = z \cdots (4),$	$v_0 \ll c.$
【説明】式(1)は、時間がすべての慣性系で共通の「絶対時間」であることを意味する。慣性系 $O\text{-}xyz$ から慣性系 $O'\text{-}x'y'z'$ への「ガリレイ変換」で、 <u>ニュートンの運動方程式</u> は不変であるが、 <u>マクスウェルの電磁波方程式</u> は変形を受ける。この電磁波方程式が本来の形で成立する座標系は、唯一つ、静止「エーテル」即ち「絶対空間」である。このことが、「絶対時間」と「絶対空間」の難点となり、以下に説明する「アインシュタインの特殊相対性理論」の登場によって解決された。				

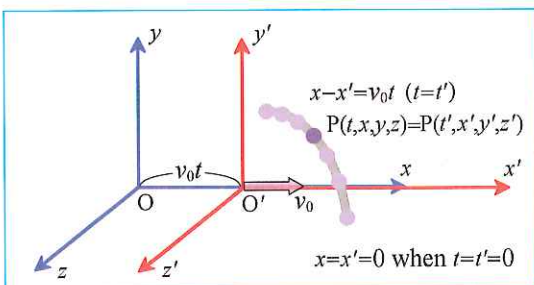


図4 2つの慣性系間のガリレイ変換に対して質点 P の運動方程式は共変である

2つの慣性系 $O\text{-}xyz$ と $O'\text{-}x'y'z'$ において、質量 m の質点 P の運動を記述するニュートンの運動方程式は、それぞれ、 $m\mathbf{a}=\mathbf{F}$ と $m\mathbf{a}'=\mathbf{F}$ となり、同じ形の数式となる。つまり「ガリレイ変換」に対して“共変”である。何故ならそれは、 v_0 ＝一定 ($dv_0/dt=0$) に留意して表1の式(1)、(2)を用

いると、加速度の x 成分は不変であること ($a_x \equiv d^2x/dt^2 = d^2x'/dt'^2 \equiv a'_x$) が導かれるから、 $ma_x = F_x$ と $ma'_x = F_x$ が成り立ち、かつ残りの y 成分と z 成分についても表1の式(1)、(3)、(4)から、加速度が不変であること ($a_y = a'_y$ と $a_z = a'_z$)、従って運動方程式の形が不変であることが証明されるからである。ここに、2つの慣性系における加速度、および外力のベクトルは、 $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$ 、 $\mathbf{a}' = (a'_x, a'_y, a'_z)$ 、および $\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z)$ で定義される。

なお、このように、物理学の法則を記述する方程式（通常、微分方程式）が座標変換によって変形を受けず不変であることを、物理法則（方程式）は“共変である (covariant)”という。この言葉を用いれば、「ガリレイの相対性原理」は、「ガリレイ変換に対して力学法則は共変である。」とも表現できる。

3. 5 ガリレイの相対性原理からアインシュタインの相対性原理へ

3. 5. 1 ローレンツ変換とアインシュタインの特殊相対性理論

上に述べた「ガリレイの相対性原理」によれば、力学的現象は、互いに一定の相対速度で動くすべての慣性系において、同じ形のニュートンの運動方程式によって記述できる。つまり、運動方程式は共変である。

しかるに、電磁・光学現象は、同じく互いに一定の相対速度で動くすべての慣性系において、同じ形のマクスウェル (James C. Maxwell, 1831-1879) の電磁波方程式によって記述できない。換言すれば、「ガリレイ変換」を用いて2つの任意の慣性系の間で座標変換を行うと、電磁波方程式の形が不変に保たれない。つまり、電磁波方程式は共変ではない。

このようにして、電磁・光学現象は「ガリレイの相対性原理」に従わないという困難・限界にぶつかる。この困難を解決するため、アインシュタインは、電磁波の典型としての「光」を伝える媒体として考え出された「エーテル」(ニュートンの「絶対空間」の実体であると想定されていた!) が存在しないことを示唆するマイケルソン-モーレーの実験 (1887) の結果などを考察して、有名な「アインシュタインの特殊相対性理論」を提唱した (1905)²¹⁻²³⁾。

アインシュタインは、「特殊相対性理論」において光（を含む電磁波）の媒体としての「エーテル」すなわちニュートンの「絶対空間」(絶対静止座標系) は不要であり、すべての慣性系は互いに対等であり、同時にすべての慣性系に共通のニュートンの「絶対時間」も不要であり、それぞれの慣性系は、それぞれ固有の時間を持つとするコペルニクスの転回を行った。

具体的には、次の2つの原理を要請した²¹⁻²³⁾：

- (1) 「光速不変の原理」⇒「どの慣性系から観測しても真空中の光速 c は同じである。」⇔「真空中において光は、その光源の運動に関係なく、一定の光速 c で伝わる。」
- (2) 「アインシュタインの特殊相対性原理」⇒「どの慣性系においても物理法則 (ニュートンの運動方程式とマクスウェルの電磁波方程式) は同じ形(の数式)で記述されなければならない。」

アインシュタインは、これら2つの要請から、既にローレンツ (Hendrik A. Lorentz, 1853-1928) が得ていた「ローレンツ変換」と同形の座標変換式を導いた。

アインシュタインに先立ち、「ガリレイ変換」ではマクスウェルの電磁波方程式が不変に保たれない(変形を受ける)というヘルツの研究結果を受けて、ローレンツは、「エーテル」の存在を認めた上で、「エーテル」の静止系において記述されるマクスウェルの電磁波方程式が、それに対して一定の相対速度 v_0 で動く任意の慣性系に変換されても不変の形を保つような座標

変換を求めた。この変換は、ポアンカレ (Jules-Henri Poincar, 1854-1912) によって「ローレンツ変換」と名づけられた。その呼称は「アインシュタインの特殊相対性理論」においてもそのまま引き継がれ、後出の「ローレンツ短縮」と共にその名を歴史に留めた。

表2 ローレンツ変換²¹⁻²³⁾

慣性系 $O\text{-}xyz$ およびその x 軸の正方向に一定の相対速度 v_0 で動くもう一つの慣性系 $O'\text{-}x'y'z'$ において、ある質点 P の存在する時刻および3次元座標 (4元時空間またはミンコフスキー空間と呼ばれる!) が、それぞれ (t, x, y, z) および (t', x', y', z') で表されるとき、次の「ローレンツ変換」が成立する。				
$t' = \frac{t - (v_0/c^2)x}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}} \dots (1'), \quad x' = \frac{x - v_0 t}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}} \dots (2'), \quad y' = y \dots (3'), \quad z' = z \dots (4').$				
<p>【説明】式(1')は、時間が、違う慣性系では違う速さで流れること、従ってもはや「絶対時間」など存在しないことを意味する。如何なる慣性系においても<u>マクスウェルの電磁波方程式</u>が不変となるよう導入された「ローレンツ変換」に対して、<u>ニュートンの運動方程式</u>も不変になるよう修正され「ニュートンの相対論的運動方程式」となった。なお、式中の c は光速の大きさを表す。</p>				

アインシュタインの革命的なところは、光 (を含む電磁波) の媒体としての静止「エーテル」を棄て、光は媒体を必要とせず、いかなる慣性系においても一定の速さ c で伝わりとする「光速不変の原理」を着想したことにある。これが、アインシュタインがその立場をローレンツたちの立場から180度違うコペルニクスの転回を行ったと言われる所以である。

ここで、「光速不変の原理」と同時に忘れてはならないことは、光の速さが c (秒速30万km) という有限の大きさであるという事実である。従来のニュートン力学では、事実上 (近似的に) 光の速さは無限大であるとされていたが、 v_0/c の値が1に比べて無視できるほど小さくない場合、「ガリレイ変換」は無効となり、「ローレンツ変換」が有効となる。

さらに、 v_0/c の値が1に比べて無視できるほど小さくない場合、「同時の相対性」あるいは「同時性の崩壊」という問題が生じる。このような場合、ある慣性系において同時に起きたと観測される出来事が、それに対して高速の相対速度 v_0 で等速直線運動を行うもう1つの慣性系においては同時に起きた出来事であると観測されない状況が生じる。これは、2つの出来事が同時に起きたという判断が、いずれの慣性系においても有限の同じ速さ c の光が運ぶ情報により行われるからである。

なお、「ローレンツ変換」は、非相対論的極限 ($v_0/c \rightarrow 0$) において、「ガリレイ変換」に帰着する。すなわちこの極限では、任意の相対速度 v_0 は光速 c に比べて無視できるほど小さいということであるが、情報を運ぶ光速 c が事実上無限大になると見ることもできる。このような古典力学の世界では、すべての慣性系において時間は共通となり、ある慣性系において同時に

起きた出来事は、他の慣性系においても同時に起きた出来事である。つまり我々の日常生活における常識が通用する世界である。

3. 5. 2 ローレンツ変換から導かれる帰結

(1) ローレンツ短縮²¹⁻²³⁾

静止系（観測者に対して静止している慣性系）O-xyz から見て、相対速度 v_0 で等速直線運動を行う慣性系 O'-x'y'z' 上の物体の運動方向の長さ L' は、静止系 O-xyz にあったときの同じ物体の長さ L に比べて、短縮して見える：

$$L' = L \sqrt{1 - (v_0/c)^2} < L$$

従って、動いている物体の運動方向の長さは、静止していたときの長さに比べて $\sqrt{1 - (v_0/c)^2}$ 倍に縮んで見える。

(2) 時間の遅れ²¹⁻²³⁾

静止系 O-xyz に対して相対速度 v_0 で等速直線運動を行う慣性系 O'-x'y'z' における時計が刻む時間間隔 T' と静止系 O-xyz における時計が刻む時間間隔 T との関係は、

$$T = T' / \sqrt{1 - (v_0/c)^2} > T'$$

で与えられる。すなわち、静止系で考えると、静止系の時計の1秒毎に、動いている時計は $1 - \sqrt{1 - (v_0/c)^2}$ 秒ずつ遅れることになる²³⁾。この遅れは、 $(v_0/c)^2 \ll 1$ のとき、 $(v_0/c)^2/2$ 程度になる。ただし、これら2つの時計は、同じ座標系にあったとき同じ時間間隔で時を刻んでいたものとする。

(3) 速度の合成則²¹⁻²³⁾

速度 u とそれと同じ方向の速度 v との和は、「ガリレイ変換」では $u + v$ となるが、「ローレンツ変換」では $(u + v) / (1 + uv/c^2)$ で与えられる。表3に見るように、「ローレンツ変換」から導かれた合成則が正しい結果を与える ($u, v, u + v \leq c$)。

表3 速度の合成則²⁴⁾

2つの速度 u と v の合成則		ガリレイ変換の場合	ローレンツ変換の場合
u	v	$u + v$	$(u + v) / (1 + uv/c^2)$
$0.3c$	$0.6c$	$0.9c$	$0.763c$
$0.5c$	$0.5c$	c	$0.800c$
$0.75c$	$0.75c$	$1.5c$	$0.960c$
c	c	$2c$	c

これらの結果は、様々な実験によって検証されている。

3. 5. 3 相対論的力学

(1) ニュートンの相対論的運動方程式²¹⁾

表2において説明したように、力学法則（ニュートンの運動方程式）も、電磁場の理論（マクスウェルの電磁波方程式）と同様に「ローレンツ変換」に対して不変でなければならない。

この要請により、速度 \mathbf{v} で動く質量 m の物体（質点）の運動を記述するニュートンの運動方程式 $m d\mathbf{v} / dt = \mathbf{F}$ は修正を受け、相対論的運動方程式 $d\mathbf{p} / dt = \mathbf{F}$ となる。ただし、 \mathbf{F} は外力を表し、 \mathbf{p} は次の（2）で定義される「相対論的運動量」である。

(2) 相対論的運動量²¹⁾

「特殊相対性理論」においても、「運動量保存の法則」は、形式的にはそのまま成立するが、運動量 \mathbf{p} の表式は次のような修正を受ける：

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} / \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

ただし、この m は静止質量であることに留意したい。ここでもし相対論的質量なるものを定義するなら、それは $m / \sqrt{1 - (v/c)^2}$ となる。その速さ v （速度 \mathbf{v} の大きさ）への依存性は実験的に検証済みであり、 $v \rightarrow c$ の極限で、 $m / \sqrt{1 - (v/c)^2} \rightarrow \infty$ となる。これは v の最大値が光速 c を超えないことを意味する、と考えられている。

(3) 相対論的エネルギー²¹⁾

「特殊相対性理論」では、速さ v で運動する物体（質点）のエネルギーは、

$$E = mc^2 / \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

で与えられる。これから、物体が静止している場合（ $v = 0$ ）の相対論的エネルギーと質量との関係式 $E_0 = mc^2$ が得られる。この場合の E_0 を「静止エネルギー」という。この関係式は、質量とエネルギーが等価であるという重要な内容を包含している。

(4) 運動エネルギー²¹⁾

上記の相対論的エネルギーの定義式から計算されるエネルギー・運動量の関係式； $E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$ を用いると、相対論的運動エネルギー K が p の関数として得られる：

$$K = E - E_0 = \sqrt{c^2 p^2 + m^2 c^4} - mc^2 \quad (v \text{ の関数として, } K = mc^2 / \sqrt{1 - (v/c)^2} - mc^2)$$

今、 $(v/c)^2 \ll 1$ の極限を考えて、上の括弧内の式を $(v/c)^2$ について展開して最低次の項を残すと、 $K \approx (1/2)mv^2$ となる。つまり非相対論的極限において、相対論的運動エネルギーが古典力学の運動エネルギーに帰着することが確認された。

4. おわりに

4. 1 まとめ

本報告のまとめを以下に箇条書きで行う。

(1) 船のマストから放たれた物体は、等速直線運動を行う船の上でも、静止（停泊）中と同様、鉛直下向きに自由落下しマストの足もと（真下）に着床する^{12,15-20)}

「地動説」を支持するガリレオは、もし大地が動く（自転する）なら、たとえば塔の上から自由落下した小石は塔の根もとに着地せず、より西の方にずれて着地するはずであるという「天動説」論者たちの主張を無力化するため、船のマストの頂上（床から h の高さ）から自由落下したボールは、船が静止している場合はもちろんのこと、水上を一定の速さ（等速） v_0 で直線走行している場合も、船のマストの足もと（真下）に着床することは自明であり、「(思考) 実験」で示すこともできる（図 3 (a),(c) を参照）と主張した。

これを裏付けるため、ガリレオは、まず、地面から h の高さから水平方向に速さ v_0 で投射されたボールは“半放物線”（放物線の半分）を描いて着地することを検証する「投射体の実験」を行った（図 2 (a) を参照）。次に、速さ v_0 で走行する船の、高さ h のマストから自由落下するボールは、陸地（港の岸）から観測するとき、床から h の高さから船の進行方向に速さ v_0 で水平に投射され、「投射体の実験」におけるボールの軌跡とそっくり同じ“半放物線”を描いて着床しなければならないと論証した（思考実験、図 2 (a) と図 3 (c) を比較参照）。

マストから放たれたボールは、船上と陸地のどちらから観測しても常にマストに沿って自由落下する。何故ならば、陸地から観測したとき、「投射体の実験」の場合の軌跡と同じ“半放物線”を描くことが保証されているからである（図 2 (a) と図 3 (c) を比較参照）。換言すれば、船が動いていても、等速直線運動をしている限り、そのマストから放たれたボールは、マストに沿って自由落下しその足もと（真下）に着床するのは確実である。

この結論を、2. 3 において紹介した“ガリレオの宣言”流に書き直してみると、次のようになる：

「たとえ動いている船になんらかの運動が帰属されとしても、この船の（等速直線）運動は船の乗組員（および乗客）であり従って同じ運動を分有している我々には全く知覚されず、船上の事物のみを見ている間はまるで船の運動が存在しないようであるにちがいない。」

ガリレオは、故に、塔から自由落下する小石がその足もと（真下）に着地するという事実が大地の不動の証拠とはならない、つまり地動説を否定できないと主張した。

(2) 船上の自由落下「(思考) 実験」(図 3 を参照) と水平「投射体の実験」(図 2 を参照) のアニメーション教材を作った

船のマストの頂上からの自由落下についての「(思考) 実験」およびそれを裏付ける「投射体の実験」をシミュレートするアニメーション教材を手作りし、図 3 (b),(d) および図 2 (b),(d) でそれらのキーフレーム画面を紹介した。

(3) 水平面に沿った船の等速運動は局所的に等速「直線」運動に近似された¹⁵⁾

ガリレオは、船の走行距離が相対的に短いとして、少なくともボールが甲板の床に着くまでの間、船は局所的に“平面”とみなされる水面上を一定の速さ v_0 で走行する、つまり等速直線運動を行うとした。

(4) 水平面に沿った投射体の慣性運動は「直線」慣性に近似された¹⁵⁾

ガリレオは、地球の大きさに比べて十分短い水平距離に限って、ボールや投射体の水平方向の運動成分が“局所的に”「直線」慣性に従う速さ v_0 の等速直線運動を行う、つまり結果的に正しい「慣性の法則」に従うとした。

(5) 任意の 2 つの慣性系において同じ「落下の法則」が成立する

上記 (1) から (4) までをまとめると、船が動いていても直線上を等速で動く限り、静止している船上または陸地におけると同様、動く船上においても同じ「落下の法則」が成立する。これを任意の 2 つの慣性系の場合に一般化しても、本質は変わらない。

(6) すべての慣性系において同じ形の“力学の法則”が成立する

さらに、互いに等速直線運動を行う慣性系は無数に存在するから、(5) の任意の 2 つの慣性系の場合をすべての慣性系の場合に拡張すると同時に、「落下の法則」を“力学の法則”に一般化すると、整理された「ガリレイの相対性原理」に辿り着く。すなわち、すべての慣性系において同じ形の“力学の法則”が成立する (表 1 と図 4 を参照)。

4. 2 余談

ここでは、余談として、話を慣性系に限定した「アインシュタインの特殊相対性理論」の限界について簡単に触れる。この特殊相対性理論では、宇宙の基準としての特別な慣性系（「絶対静止座標系」ないし「エーテル」）である「絶対空間」は存在しないまたは不要とされ、互いに等速直線運動を行う無数の「慣性系」は、「ローレンツ変換」の導入によって互いに対等な座標系として扱われた²³⁾。

「慣性系」において、外力の働かない物体は静止または等速直線運動を行うとされるが、どの（基準）座標系に対してこの座標系が静止または等速直線運動を行うと判定できるのか。あるいは、この宇宙の至る所に存在する万有引力等の影響（外力）を受けない座標系が存在できるのか。結局、「アインシュタインの特殊相対性理論」における「慣性系」とは、現実には特定できない抽象的な存在であり、言わば「古典力学」における「絶対空間」のなごりである。

例えば、地球のある地点に固定された座標系、あるいはそれに対して等速直線運動を行う座標系は、通常近似の範囲内（例えば、地球運動に比べてテンポの速い運動物体の記述など）で

「慣性系」として扱われるが、実際には地球は自転しながら太陽の周りを公転しており、さらに太陽系が銀河系の中心の周りを大きく回転しており…などと際限なく、厳密には「慣性系」ではあり得ない。

このように考えて来ると、“特殊”な座標系でありかつ厳密な定義の困難な（無数に存在する）「慣性系」に限定して同じ物理法則が成立するとする「特殊相対性理論」は不完全であり、「慣性系」のみならず「加速度系」（速さを変えたり、カーブしたり、または速さを変えながらカーブする座標系のことで、非慣性系ともいう！）をも含めた「あらゆる“一般”の座標系において同じ物理法則が成立する」とする「アインシュタインの一般相対性原理」を、「等価原理」と共に要請する「アインシュタインの一般相対性理論」（1916）^{21,22)} が誕生した理由を理解できるであろう。

ここに、「等価原理」^{21,22)} とは、慣性力と重力（または慣性質量と重力質量）が本質的に等価であるとする原理である。すなわち、「加速度系」においては慣性力（古典力学における“見かけの力”）が生まれるが、それは万有引力による重力と区別できないので、最早“見かけの力”ではないということである。

さて、「アインシュタインの一般相対性理論」によれば、時間と空間は互いに切り離すことができない時空連続体であり、有限質量の物体の周辺では“空間の歪み”つまり「重力」を生み出す。そこで定義されるすべての座標系（例えば、地球表面、宇宙船の中、あるいは巨大な天体の表面など）は互いに独立対等であり、それぞれ固有の時空を持つとされる。

この発想は、似て非なるものであるが、ケプラー以前の天動説（地球中心論）の主張に何となく似ている。それぞれが、自分の軽重に関係なく、自分の居る時空が宇宙の中心であるかのように感じさせてくれる主張の痛快さは、実に小気味が良い。

付録 運動の相対性の教材としての天動説と地動説

ここでは、本報告のテーマを取り上げるきっかけの1つとなった背景について教材を意識しつつまとめた。

A 1. 地動説は天動説より優れているか

A 1. 1 地動説を正解とするアンケート結果の波紋

さて、最近の新聞記事^{25,26)}によると、「小学4～6年生の4割は、太陽が地球の周りを回っていると思っている。」という。これは、一昨年（2004年9月）に開催された日本天文学会において縣 秀彦・国立天文台助教授が発表した調査結果である。この調査は、2001年から2004年にかけて北海道や広島など8都道府県の14小・中学校約1700人にアンケートを行ったうち、太陽と地球の関係について天文を学習し終えた公立小4校の4年～6年生までの348人が回答

し、「地球は太陽の周りを回っている。」と正解したのは56%、「太陽は地球の周りを回っている。」を選んだのは42%であった、というものである。

短絡的に、小学校で地動説を教えないから天動説を信じている子供たちが4割（正確には42%）もいるのであり、小学校の指導要領ひいては「ゆとり教育」が悪いのではないかと、言いたい人たちもいるようであるが、一方、板倉聖宣・国立教育政策研究所名誉所員の言うように、「地球の自転と公転、惑星は中学校で習う。習わなければ知らないのは当然で、逆に6割（正確には56%）が知っている方が驚きだ。」という見解もある。

いずれにしても、古今東西いかなる時代であろうが、地球上を這いつくばって日常生活を営んでいる人間が、老若男女を問わず特別の学識も装置もなく居ながらにして、大地の動き（地球の公転と自転）を自ら体感できるはずもないことは、衆人の認めるところであろう。

A 1. 2 地動説は天動説より惑星運動を“美しく”記述できる

ところで、地球が自ら自転しながら太陽の周りを公転しているという描像は、16世紀から18世紀にかけて順次活躍した天才たちが、ときには生命を危険にさらしながら、ときには激しい論争を戦わせながら、しかし生涯のほとんどは地道な天才的努力を積み重ねることによって、ようやく到達したものである。

ここにいう天才たちとは、『天球の回転について』を著し「地動説」（1543）を提唱したニコラス・コペルニクス、ティコ・ブラーエによる20数年間の精密な惑星の（肉眼による）観測データから「ケプラーの法則」（第1・2法則1609、第3法則1619）を帰納したヨハネス・ケプラー、斜面の実験と思考実験から「落下の法則」と「慣性」の概念（1638）を発見したガリレオ・ガリレイ、最後にケプラーの法則（天上の法則）やガリレイの落下の法則（地上の法則）などに天才的総合力を加えて「万有引力の法則」と「運動の3法則」（1687）を発見し近代力学の基礎を築いたアイザック・ニュートンたちのことである。

これらの天才たちはすべて、地動説を具現した「コペルニクスの宇宙体系」の強い信奉者ないし支持者であったが、コペルニクスの死後、輩出したティコ・ブラーエは、地球の公転の証拠となるはずの「年周視差」を、肉眼観測による分解能に限界があったため検出できなかった事実（A 2. 2. 1を参照）を根拠に地動説を否定し、不動の地球の周りを月と太陽が回り、その太陽の周りを惑星（水星、金星、火星、木星、土星）が回るという、天動説と地動説を折衷したモデル（図5(c)を参照）を主張するようになったと言われる。

さて、天動説（地球中心論、図5(a)を参照）によれば、すなわち地球に原点を固定された「相対座標系」において地球から太陽系の運動（ほぼ2次元の運動とみなされる！）を観測して記述しようとするれば、太陽を除いて、地球以外の惑星（水星、金星、火星、木星、土星）の運動、なかんずく火星の運動は、地球上の観測者から見て速くなったり遅くなったり、止まったり、さらに逆行したりする（これらの現象をそれぞれ順行、留、および逆行という。）ため、

それらの数学的（幾何学的）取り扱いまたは現象論的説明が、次に述べる如く複雑怪奇とならざるを得なかった。

このことは、プトレマイオスがこのような複雑な惑星の軌道（実は楕円軌道であった！）を“「円」だけを用いて”記述するため、地球に中心を持つ「搬送円（従円）」の周上に中心（搬送点）を持つ「周転円」を導入し、さらに「搬送円」を地球が中心から少し離れた点にあるとする「離心円」としたり、惑星の速さの非一様性をなぞるためエカントを導入するなどの工夫³⁻⁵⁾を加えて構築した「プトレマイオスの宇宙体系」を見れば明らかである（表4を参照）。天文学史上この宇宙体系こそ、地球中心モデルが惑星軌道の観測データを合理的に説明できる限界を示す“およそ美しくない”究極の姿であったのではなからうか。

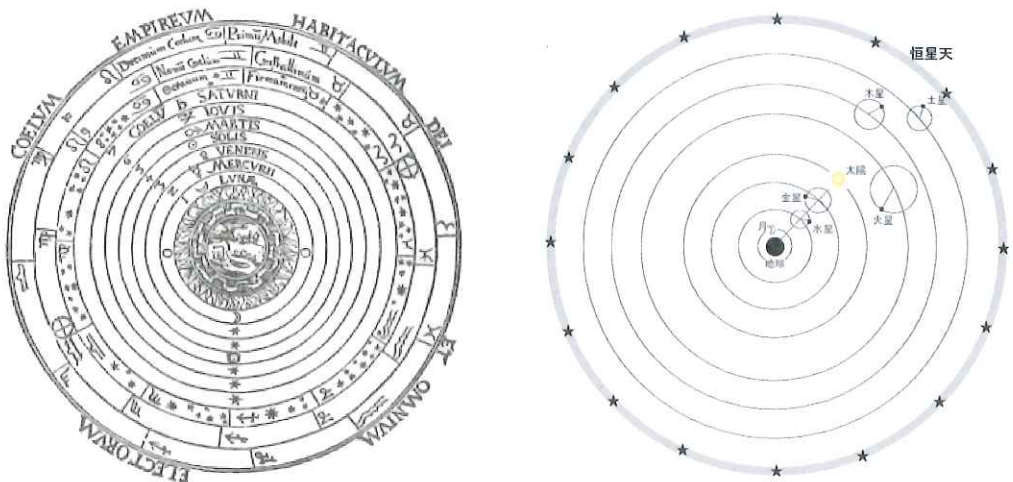


図5 (a) 古代ギリシア人の宇宙像（左）とプトレマイオスの宇宙体系（右）

不動の地球の周りを、太陽と5つの惑星が「円」軌道を描いて回る。どちらの宇宙モデルにも土星の外側には星々を散りばめた天球（恒星天）がある。プトレマイオス・モデルでは、5つの惑星がそれぞれの搬送円（従円）上に中心を持つ周転円上にある様子が描かれている。この周転円の導入によって惑星軌道（とくに逆行現象）の説明が行われ、搬送円に対して離心円とエカントの考えを導入して惑星軌道の観測結果からのずれを解消すると共にその予言（占星術）の精密化が図られた。しかし、望遠鏡もなかった当時の観測技術では、天体間の距離の測定には限界があり、周転円の大きさ等は観測値と一致すればよいように決められていたと推定される。

【左の図の出所】： http://kakuda.ed.niigata-u.ac.jp/semi/ob/thesis/99niwata_thesis2-21/space/before/before.html

【右の図の原図の出所】 竹本信雄氏（茨城県立小瀬高等学校）のHP「天動説と地動説」2004年9月29日（四訂版）の第1部における図「プトレマイオスの天動説」： <http://www008.upp.so-net.ne.jp/takemoto/chidousetsu.htm>

【右の図に関する注意】 図5 (a)の右の図は、上記原図の一番外側に筆者が恒星天（天球）を加筆したものであることをお断りしておきたい。

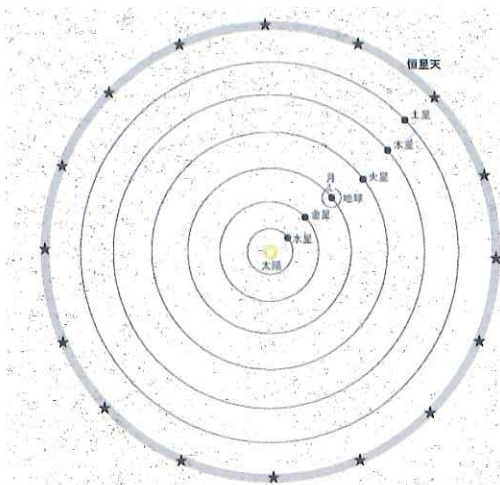


図 5 (b) コペルニクスの宇宙体系

不動の太陽の周りを 6 つの惑星が「円」軌道を描いて回る。土星の外側には星々を散りばめた天球（恒星天）がある。図には記入されていないが、コペルニクス・モデルでも、地球を除く 5 つの惑星について、搬送円や周転円が用いられた。ただし、ケプラー以後は、惑星の正しい軌道は「楕円」であることが実証されたので、そのような搬送円や周転円などは不要となった。地球の軌道は非常に円に近い楕円であったので、ケプラー以前でもそれらを用いず円で近似された。

【原図の出所】竹本信雄氏（茨城県立小瀬高等学校）のHP「天動説と地動説」2004年9月29日（四訂版）

の第 1 部における図「コペルニクスの地動説」：<http://www008.upp.so-net.ne.jp/takemoto/chidousetsu.htm>

【図に関する注意】図 5 (b) の図は、上記原図の一番外側に筆者が恒星天（天球）を加筆したものであることをお断りしておきたい。

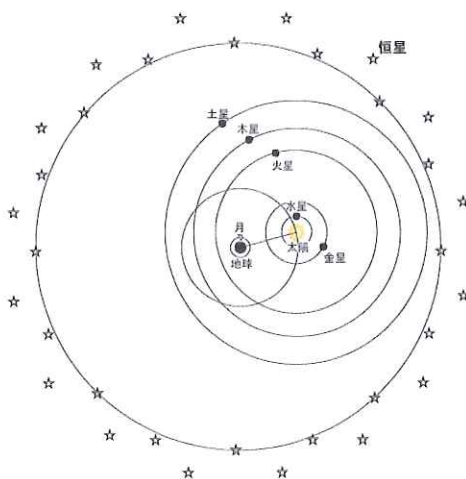


図 5 (c) ティコ・ブラーエの宇宙体系

天動説と地動説を折衷したもので、不動の地球の周りを月と太陽が回り、太陽の周りを地球以外の 5 つの惑星が回る。地球を中心とする太陽の軌道を搬送円（従円）と見たてると、搬送円上の太陽に中心を持つ周転円上を惑星が動くと見たてることができる。ティコ・ブラーエ（1546-1601）は、コペルニクス・モデルが世に出た1543年から45年経過後の1588年にこの折衷案モデルを提唱したとされる⁵⁾。肉眼による観測（望遠鏡の発明は、彼の死後の1608年のことであった！）ではあるが精密観測のエキスパートであったティコ・ブラーエは、恒星群が点在する天には奥行きがあることに気付いていたため

か、天球の存在を支持していなかったという。

【原図の出所】竹本信雄氏（茨城県立小瀬高等学校）のHP「天動説と地動説」2004年9月29日（四訂版）の第 1 部におけるティコ・ブラーエの宇宙体系の図：<http://www008.upp.so-net.ne.jp/takemoto/chidousetsu.htm>

【図に関する注意】図 5 (c) の図は、上記原図の一番外側の大円上およびその外部周辺（天球ではない！）に筆者が恒星群を加筆したものであることをお断りしておきたい。

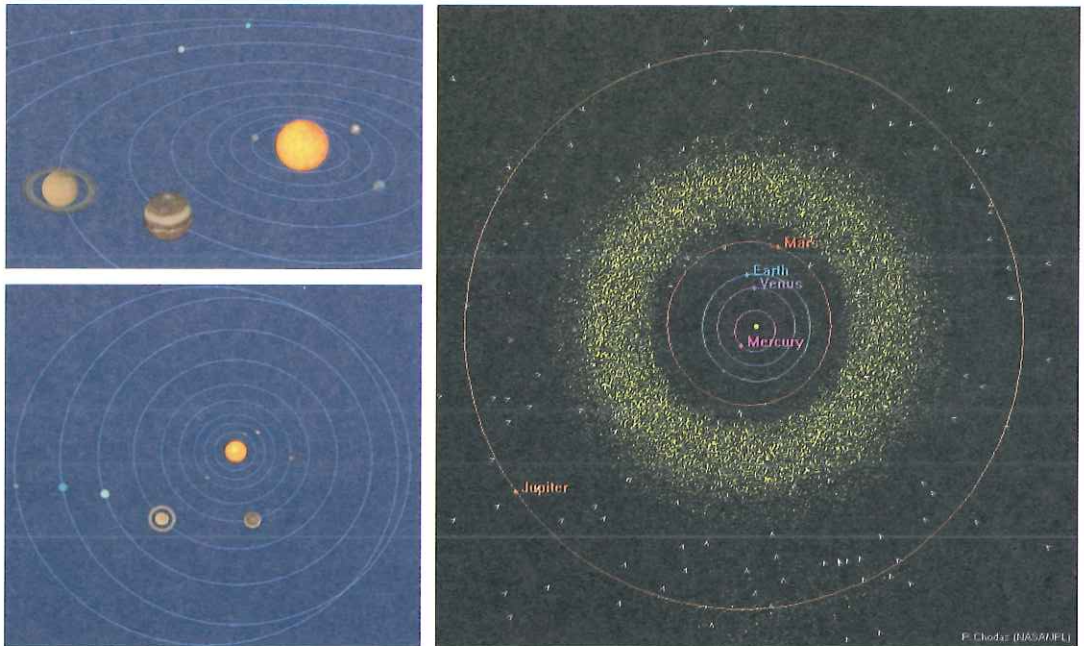


図 5 (d) 現代の太陽系の描像（左上の図は俯瞰図，左下の図は平面図，右の図は火星と木星の間にある小惑星帯である）

太陽系の惑星の公転軌道は、内側から水星（Mercury）、金星（Venus）、地球（Earth）、火星（Mars）、木星（Jupiter）、土星（Saturn）、天王星（Uranus）、海王星（Neptune）、冥王星（Pluto）の順に、ほぼ一つの平面上に並び、北極星側から見ると左回りで円に近い「楕円」を描いている。ただし、冥王星の公転軌道は、他の惑星とは大きく違い、やや細長い楕円であり、他の惑星の軌道に比べて約17度も傾いている上に、1979年から1999年までの約20年間（左下の図から分かるように）海王星の公転軌道より内側にあった。また、右の図で火星と木星の軌道の間に黄色いドーナツ状に描かれているのが、十数万個の小惑星（Small Bodies）から成る「小惑星帯」であり、原始太陽系のなごりであると考えられている。さらに、図には描かれていないが、多数の彗星（Comets）があり、それらの一部は細長い楕円を描いて太陽の周りを公転していることが知られている。なお、今日太陽系は、宇宙を構成する無数の大規模構造⇒超銀河団⇒銀河団⇒銀河の中の1つである我々の銀河（銀河系、別称「天の川」）⇒星団⇒恒星の中の1つに過ぎないことが分かっている（ただし、 $A \ni B$ は、多数または無数のBがAを構成する、という意味）。恐らく17世紀前半頃までは、恒星天に囲まれた太陽系が宇宙そのものであったかも知れないが、その後望遠鏡の発明（1608）とその目覚ましい進化により宇宙の概念は急速に拡大して来たのである。

【左上と左下の図および説明文の前半約2/3の出所】『自然現象（地球と惑星）』、IPA「教育用画像素材集サイト」：<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>

【右の図の出所】Inner Solar System Orbit Diagrams, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology：http://ssd.jpl.nasa.gov/?ss_inner

それとは対照的に、地動説（太陽中心論、図5(b)を参照）によれば、つまり太陽に原点を固定された「相対座標系」において太陽系の運動を記述すれば、惑星（水星、金星、地球、火星、木星、土星）の運動を数学的にはるかに“美しく”あるいは“シンプル”かつ正確に記述できることが、とくにケプラーからニュートンに至る天才たちによって示された。

具体的には、惑星は太陽を1つの焦点とする楕円軌道を運行するという「ケプラーの第1法則」、太陽から惑星に引いた動径が単位時間に掃く面積は一定であるという「ケプラーの第2法則」（面積速度一定の法則）などに始まり、ニュートンの「万有引力の法則」、「運動の3法則」などの形で確立された力学体系がシンプルな数学的表現となることであり、とくに太陽と任意の惑星の運動の記述は、今日いう2体問題あるいは2質点系力学の出発点でもある。

もちろん、地動説が惑星の運動を正確にかつ“美しく”記述できたのは、太陽中心モデルに立脚していたからだけではなく、ケプラーがティコ・ブラーエの精密な惑星観測データから帰納した実験法則である「ケプラーの法則」のお陰であった。この法則に命が吹き込まれたのは、ケプラーが人間ティコ・ブラーエ（の観測データ）を信頼して、天体の軌道は「円（真円）」でなければならないとするアリストテレス的かつキリスト教的呪縛から逃れ、惑星の軌道として「楕円」を認めた瞬間であった。

しかしながら、地動説が天動説より優れていることを実証的に示した最初の人物であるケプラーや、望遠鏡を用いて他の惑星を詳細に観測し地動説を確信したというガリレオはもちろんのこと、ケプラーの法則をシンプルな数学で見事に記述できる近代力学を確立し、地動説が優れているというよりも地動説でなければならないことを示した天才ニュートンでさえ、地球の自転と公転の科学的な証拠を示した訳ではない（A2を参照）。

いずれにしても19世紀末までには、地動説が正しく天動説が間違っているという見解が定着してしまったようであるが、地動説の方が“近代的”天動説（図1(b)を参照）よりも太陽系の惑星の運動を“美しく”あるいは“シンプルに”記述できるだけのことである、と言えないこともない。

結局、人類の自然認識の進化はもちろんのこと物理学の発展の過程において、地動説が、素朴な自然認識と占星術の道具の域を出なかった天動説に対して、実証科学的精神に裏打ちされた“力学的”勝利を収め、近代力学の発展に寄与したことはまぎれもない事実であり、これも衆人の認めるところであろう。

A2. 地動説を裏付ける地球の自転と公転の証拠

今日我々は誰でも、「フーコーの振り子」の発明（1851）と「コリオリの力」の発見（1835）のお陰で、地球自転の証拠を観察できる。また、専門家によって検出が可能な「年周視差」（1838）と「年周光行差」（1728）が地球公転の証拠として知られている。1728年がニュートンの死の1年後であることからわかるように、実験法則から始まった万有引力を含む力学理論に

表4 天動説と地動説の特性の比較 (参考文献3,4,5を参考に作成)

宇宙モデル	天動説* (地球中心モデル)		中間説	地動説 (太陽中心モデル)	
イメージ図	図5 (a)の左	図5 (a)の右	図5 (c)	図5 (b)	図5 (d)**
基本モデルの変遷; ①～⑤	①プトレマイオス前	②プトレマイオス	④ティコ・ブラーエ	③コペルニクス	⑤ケプラー以後
相対座標系	地球に原点を置く			太陽に原点を置く	
軌道の形	円				楕円
搬送円 (従円/導円)・離心円と周転円とエカント (回転の中心)	アイディアはあったが、理論は未完成であった。	プトレマイオスが究極の理論を完成させた。	? (詳細不明?)	エカント以外は、導入が必要であった。	ケプラーの法則があるから最早不要である。
地球から観測し天体の位置を決める角度	太陽や惑星等の位置は肉眼による観測で決められたので精度には限界があったが、ティコ・ブラーエの最高精度の観測値はケプラーによる楕円軌道の発見を可能とした。				望遠鏡の出現で精度は向上した。
地球から観測した太陽、地球以外の惑星等への距離	距離の決定は、肉眼による視差の測定による以外に方法がなかったため、天体間の距離は正しく測定できなかったようである。従って、周転円の大きさ (半径) を必ずしも惑星・太陽間の距離に等しくする必要もなかったようである。				望遠鏡が視差測定での距離決定を可能にした。
天動説の特徴:			特徴:	特徴:	特徴:
☆太陽や他の惑星は、地球を中心とするそれぞれの同心球面 (天球) にある (地球中心の同心天球説)。恒星天は恒星を含む一番外側の天球である。 ☆プトレマイオス理論では、外惑星 (火星・木星・土星) の場合に周転円が、内惑星 (水星・金星) の場合に搬送円が、地動説における地球の公転運動に対応している。運動の相対性の例題である火星の逆行運動は周転円の導入で説明された。 ☆離心的搬送円・周転円・エカントには、地動説出現後のケプラーの法則 (とくに楕円軌道と面積速度一定の法則) で記述される特徴が、力学的説明ができなくても、実質的には表現されている。			新星の発見や彗星の観測により、天界は火でできており、さらに星の生成消滅もあり、天球は存在しないとされた。	惑星の運動は、エカントを用いず、搬送円や周転円等の一様円運動の組み合わせで説明するため、天球が導入された。	惑星の運動は、ケプラーの法則等から帰納・発見された万有引力の法則、および運動の法則を用いて正確に記述できる。
* 古代ギリシアにおいて、アリストアルコス (Aristarchos, BC301-230頃) が地動説を唱えたが、歴史ではアリストテレス (Aristoteles, BC384-322頃) 等の天動説が主流となり、後のプトレマイオスに引き継がれた。 ** 天王星の発見 (1781) までは、図5 (d)の左下の図の土星までの6惑星である (小惑星帯も未発見)。					

よって地動説を不動のものとし人々に納得させたケプラー、ガリレオ、ニュートンたちが活躍した時代には、地球が自転しながら太陽の周りを公転しているという描像を裏付ける“決定的な”証拠を、既に述べた如く、誰も押さえることができなかったのである。

A 2. 1 地球自転の科学的な証拠

A 2. 1. 1 「フーコーの振り子」の公開実験^{27,28)}

さて、地球の自転が初めて科学的に誰でもわかる形で示されたのは、「フーコーの振り子」の公開実験によるという。1851年フランスのレオン・フーコー (Leon Foucault, 1819-1868) は、パリ天文台の子午線ホールで長さ11mの振り子を振らし、パンテオン寺院では長さ67m、おもり28kgの振り子を振らし、その振動面が徐々に回転していく様子を示した。

この現象がなぜ地球の自転の証拠となるのであろうか。ここで最も理想的な実験の舞台として、重力の方向が回転軸と平行である北極を考えよう。重力しか働かない北極で振り子を振動させたとき、その振動面を変えようとする力が働かないので、宇宙空間 (19世紀には絶対空間を具現するエーテルが想定されていたと思われるが、今日ではエーテルは存在しないとされるので、仮に宇宙の基準系を想定する!) から見れば振り子の振動面は不変であり、地球自身が回転すると解釈される。北極にいる観測者から見れば、「運動の相対性」により逆に大地は動かず、振り子の振動面は上から見て時計回りで1日につき 360° つまり1回転する。

なお、赤道では地球の自転が感じられないが、例えば、北緯 θ の地点では、振り子の振動面の回転速度は、北極での回転速度に比べて $\sin \theta$ (1より小さい) 倍だけ小さくなり、時計回りで1日につき $360^\circ \times \sin \theta$ (360° より小さい角度) 回転する。東京では北緯 $\theta = 35^\circ 40'$ なので、上記公式より振り子の振動面は1日につき約 210° 回転すると計算される。

A 2. 1. 2 「コリオリの力」の発見・解明^{27,29)}

さらに、地球の自転のもう1つの証拠は、回転している地球の上で運動している物体に対してその進行方向を北半球 (南半球) では右の方 (左の方) に曲げようとする「コリオリの力」 (見かけの力の1つで転向力ともいう。) が働くという現象である。この力の命名は、ガスパール＝ギュスターヴ・コリオリ (Gaspard Gustave de Coriolis, 1792-1843) が、軍艦から高速で投射された砲弾の着地点が北半球では標的の右方向にずれる現象を1835年力学的に解明したことに由来するという。この力の大きさは、物体の速さと自転の角速度と $\sin \theta$ に比例する。

この解明の理解には大学の理系学科レベルの力学の素養を必要とするので、ここではコリオリの力の現象論的理解のための教材として台風を考えよう。大規模なスケールで外周から気圧の低い中心に向かって高速で流入する風の渦巻き、つまり台風 (通常暴風雨) は、北半球では常に左巻き (反時計回り)、南半球では常に右巻き (時計回り) になる。これは、外周 (のすべての方角) から台風の中心に向かって流入するすべての風がコリオリの力によって北 (南) 半球では台風の中心より右 (左) 方向にずれ、全体として左 (右) 巻きの渦巻きが形成されるからである。同規模の台風の場合、例えば北半球において、渦の強さは北極 ($\theta = 90^\circ$) で最大、緯度 (θ) が下がれば小さくなり、赤道 ($\theta = 0^\circ$) で渦は消滅する。今日では誰でも、テレビの天気予報で映される台風の気象衛星写真 (とくに時間連続写真による動く渦) を見ることによって地球の自転を確認できる。

A 2. 2 地球公転の科学的な証拠

A 2. 2. 1 ベッセルによる「年周視差」の検出^{27,30)}

同一の近くの恒星（太陽のように巨大で自らの核融合反応で輝いている星）を、太陽の周りを公転する地球から半年の間隔を置いて2回観測すると、地球の位置が公転軌道の距離（直径）分だけ変わるため、近くの恒星が、遠くにあるため不動に見える背景の恒星との間に相対的に生じる位置のずれを見たときの角度差（正確には、近くの恒星を頂点、半年を隔てた地球の2つの位置を結ぶ線分を底辺とする二等辺三角形の頂角の半分）を「年周視差」という。公転している地球からは、近くの恒星が背景の天空において円（または楕円）形の軌跡を描くように見える。

コペルニクスの時代から「年周視差」の検出が試みられたが、恒星が当時の専門家の想像を絶する遠方にあったこともあり、その視差は微小であったので、肉眼による惑星の精密観測の第一人者であったティコ・ブラーエさえ、それを検出できなかった（このため彼は地動説を否定した）という。その後ガリレオの時代に望遠鏡が天体観測に使われるようになったが、まだその分解能は低く、その後2世紀余の歳月を経て望遠鏡の分解能が大幅に改良された結果、ようやく1838年、ドイツのヴィルヘルム・ベッセル（Wilhelm Bessel, 1784-1846）が、初めて白鳥座61番星について年周視差0.29"を検出し、地球公転の検証に成功した。同時にベッセルは、恒星までの距離を初めて決定したことで知られている。

A 2. 2. 2 ブラッドレーによる「年周光行差」の検出^{27,30)}

例えば風のない雨の日に、停車している車から見たとき鉛直方向に速さ c で降っていた雨は、車が動き出すと進行方向斜め前から降ってくるように見え始め、さらに加速後一定の速さ V の直進状態に入った車から、進行方向斜め前から鉛直方向に対して一定の角度 θ で降ってくるように見える。これは、誰でも日常経験する現象であり、速度の合成則から関係式 $\tan \theta = V/c$ が成立することを知っている。

今ここで、車を地球に、雨を光に置き換えてみよう。この場合も同様に考えてよいから、光の速さ c に比べて無視できない速さ（地球公転の速さ） V で動いている地球では、恒星から降ってくる光も地球の進行方向斜め前から、鉛直方向に対して一定の角度 θ で降ってくるように観測されるものとする、同じ関係式 $\tan \theta = V/c$ が成立する。この場合、地球は、観測の瞬間近似的に等速直線運動をしているとみなしたが、実は太陽の周りを公転しているから、半年後には逆方向（反平行）に運行しているので、同じ恒星から降ってくる光も逆方向、つまり半年後の地球の進行方向斜め前から同じ角度 θ で降ってくるように見える。このように定義される微小角度 θ を「年周光行差」という。この角度 θ は、ジェームズ・ブラッドレー（James Bradley, 1693-1762）によって初めて測定され、1728年に報告された。その値は20.5"であったという。この年周光行差の検出が、地動説の最初の証拠になったとされる。

ちなみに、ベッセルが微小年周視差0.29"の検出に成功したのは、より口径の大きい高分解能

の望遠鏡が発明されたからであり、それには、年周光行差20.5"の検出から1世紀余、望遠鏡が使用され始めたガリレオの時代からおよそ2世紀もの歳月を要したのである。

参考文献

- 1) 池村 勉：ガリレオの斜面の実験と思考実験をシミュレートするアニメーションの製作 —基礎物理学用Web-Based Learning Systemの部品の開発—, 情報科学研究, 阪南大学情報処理研究センター, 第19号, pp.1-18 (2005.3)。
- 2) 池村 勉：2体問題のシミュレーションを通して質点系力学の基礎概念を理解する —基礎物理学学習用マルチメディアCALシステムのモジュールの開発—, 情報科学研究, 阪南大学情報処理研究センター, 第15号, pp.30-45 (2001.3)。
- 3) N.スピールバーグ, B.D.アンダソン共著, 小野 周訳：物理学七つの革命, 森北出版, pp.24-35 (1990)。
- 4) 安孫子誠也：歴史をたどる物理学, 東京教学社, pp.14-17 (1992)。
- 5) 岡本拓司著：第I章 3 天文学—天動説から地動説へ—, はじめての地学・天文学史, ベレ出版, pp.96-120 (2004)。
- 6) 竹本信雄：天動説と地動説, 2004年9月29日(四訂版) ;
<http://www008.upp.so-net.ne.jp/takemoto/chidousetsu.htm>
- 7) 朝永振一郎：物理学とは何だろうか(上), 岩波新書, pp.35-41 (1985)。
- 8) 戸田盛和：物理入門コース1 力学, 岩波書店 (1983)。
- 9) A.D.アクセル著, 水谷 淳訳, フーコーの振り子, 早川書房, p.42,43 (2005)。
- 10) 天動説と地動説の幾何学的関係についての解説とすばらしいアニメーションが見られるWebサイトを2つほど紹介する：
①天動説(周転円説)と地動説との幾何学的関係；
<http://kakuda.ed.niigata-u.ac.jp/semi/java/program/planet/planet.html>
②それぞれの惑星を中心と仮定したときの惑星の運動；
<http://kakuda.ed.niigata-u.ac.jp/semi/java/program/taiyokei/taiyokei.html>
- 11) 青木靖三：ガリレオ・ガリレイ, 岩波書店(岩波新書, 1971)。
- 12) ガリレオ・ガリレイ著, 青木靖三訳：天文対話(上・下), 岩波文庫(上1959, 下1961)。
- 13) ガリレオ・ガリレイ著, 山田慶児, 谷 泰共訳：星界の報告他1編, 岩波文庫(1976)。
- 14) ガリレオ・ガリレイの業績の「天文学」の項目, ウィキペディア(Wikipedia) ;
<http://ja.wikipedia.org/wiki/>
- 15) 朝永振一郎：物理学とは何だろうか(上), 岩波新書, pp.67-78 (1985)。
- 16) 豊田利幸：ガリレオの生涯と科学的業績, ガリレオ, 中央公論社, pp.115-118(世界の名著26, 1995)。
- 17) アレキサンデル・コイレ著, 菅谷 暁訳：ガリレオ研究, 法政大学出版局, p.206 (2000)。
- 18) スティルマン・ドレイク著, 赤木昭夫訳, 第七章 自然運動と水平投射, ガリレオの思考をたどる, 産業図書, pp.125-145 (1993)。

- 19) S.ドレイク著, 田中一郎訳: ガリレオの生涯 ③ ―二つの対話と宗教裁判―, 共立出版, p.477 (1985)。
- 20) ガリレオ・ガリレイ著, 今野武雄, 日田節次共訳: 新科学対話 (上・下), 岩波文庫 (1948)。
- 21) 中野菫夫: 物理入門コース 9 相対性理論, 岩波書店 (1984)。
- 22) アインシュタイン, インフェルト共著, 石原 純訳: 物理学はいかに創られたか (下巻), 岩波新書 (2003 [初版1940])。
- 23) A.アインシュタイン著, 内山龍雄訳・解説: 相対性理論, 岩波文庫 (2004)。
- 24) N.スピールバーグ, B.D.アンダソン共著, 小野 周訳: 物理学七つの革命, 森北出版, p.207 (1990)。
- 25) 天文苦手な小学生, 朝日新聞 (2004年9月21日)。
- 26) 天動説×と言い切れますか, 朝日新聞 (2005年1月25日)。
- 27) 山賀 進: 第一部ー2ーの第1章, 天体(惑星)としての地球;
<http://www.s-yamaga.jp/nanimono/uchu/tentaitoshitenochikyuu.htm>
- 28) A.D.アクゼル著, 水谷 淳訳, フーコーの振り子, 早川書房 (2005)。
- 29) 羽鳥尹承: 8 慣性力, 力学, 産業図書, pp.107-117 (2003)。
- 30) 岡本拓司著: 第II章 3 天文学―近代天文学の展開―, はじめての地学・天文学史, ベレ出版, pp.157-171 (2004)。

(2006年 3 月23日受理)