

## アインシュタインの思考をたどる

内井惣七

### まえがき

アインシュタインに関わる本は、伝記や解説を含めておびただしい数にのぼる。しかし、彼の科学的業績のうちで最高傑作である一般相対性理論については、その大筋を一般の人々にむけてわかるように解説したものはほとんど見あたらない。英語圏では、古くはアーサー・エディントンの名著（1920年）、もっと新しくはジョン・アーチボルド・ホイーラーやキップ・ソーンの名著がいくつかあるのだが、日本語で書かれたオリジナルなものとなると皆無である。特殊相対性理論についてはいいものがあるのに、これはどうしたことだろうか。ある程度納得できる理由があるにはある。それは、一般相対性理論が特殊相対性理論に比べて格段に難しいということ。

物理学の専門家でもなく、一般相対性理論について勉強した経験も、50歳をはるかに過ぎてからわずか数年しかないわたしが、このような大それたことを企てるとは「笑止千万」と専門家の方に叱られるかもしれない。しかし、わたしに言わせれば、日本の専門家の方々の教科書や著作は一般の読者に対してきわめて不親切であって、一般相対性の面白さを素人にも十分に伝えてくれるような記述にはなっていない。他方、科学哲学や科学論の著作について言えば、科学哲学が日本に導入されてすでに50年以上経つが、相対論がらみの時空の哲学はずっと無視されてきた。欧米でのこの分野の研究のレベルは高く、日本のレベルは限りなく無に近い。こういった状況を少しでも改善しなければならないという思いから、ここ数年間、わたしは相対論の物理学と哲学を勉強してきたわけである。

実は、アインシュタイン自身の手になる一般向けの本がある。ドイツ語の初版は1917年、英訳は1920年に出たのち版を重ね、いまだに1954年の15版が入手できる。邦訳も出ている。

*Ueber die spezielle und allgemeine Relativitaetstheorie, gemeinverstaendlich,*

1917.

*Relativity: The Special and the General Theory*, 1954.

そこで、まずこの本（言及するときには、もっとも入手しやすい英訳本をとって、「Einstein 1954」と示す）をもとにして、特殊相対性から一般相対性へのアインシュタインの思考をたどり、一般相対性理論を組み立てている考え方を明らかにしたのち、時空の哲学の話題を導入してみたいというのがわたしのもくろみである。アインシュタインのこの本は、一般向けの本とはいえ、内容をきちんと理解しようとすれば、たびたび立ち止まって、書かれてない内容を補ったり、アインシュタインの真意を確認したり、あるいはアインシュタイン以後の一般相対論の展開を補ったりしなければならない。もちろん、必要な限りにおいて数学も補わなければならない。アインシュタイン自身はこの本に必ずしも満足していなかったと言われているが、特殊相対性から一般相対性までの内容を一望するには、いまだに得難い一冊である。その理由は、次のように列挙できよう。

(1) アインシュタインみずからが、一般相対性理論完成の直後に、自分の思考の歩みをたどっている。もちろん、アインシュタインが見た当時の考え方にも触れられ、それとの対比でカギとなった発想、解決策がわかる。

(2) それまでの専門的な論文とつき合わせてみても、アインシュタインの叙述には裏付けがとれる。ただ一つ大きな欠落は、1913年から15年にかけて、アインシュタインが陥った混乱とそれからの脱却について言及がないこと。これについては、別の資料から補う。

(3) 現代の宇宙論は一般相対性を抜きにしては考えられないが、アインシュタインみずからの「宇宙論的考察」も、この本には盛り込まれている。（ただし、本書では宇宙論には立ち入らない。）

それにしても、科学哲学をやっているわたしが、なぜこのような本を書く必要があるのか、といぶかる読者が多いかもしれない。そこで、その答を単刀直入に述べさせていただこう。新しい科学理論が一般の人々にわかりにくい、理解されないと言うとき、その原因は、専門性や数学的な道具立ての難しさだけでなく、概念的な変革の方にもあるということが、往々にして見逃されがちで

ある。相対性理論や量子力学の場合には、まさにこのファクターが大きい。そして、この概念的変革に対しては、その道にどっぷり浸かった専門家、科学者よりも、概念にうるさい哲学者の方が敏感である、ということが時にはあり得る。もちろん、不勉強な哲学者は一般相対性に含まれる概念的変革に気づきようがないが、まじめに勉強した哲学者には、これが最も面白いと感じられることである。アインシュタインの思考の歩みをたどってわたしが最も感銘を受けるのは、アインシュタインの発想の転換、概念的な工夫によって、古い問題を新しい光のもとで考え直すというステップである。また、アインシュタインほどの頭脳をもってしても、いくつかの先入見を克服するために大きな努力を払ったことがわかり、印象深い。これらは、いずれも哲学的な営みであるといっても過言ではない。したがって、本書がねらいとするところは、単なる「わかりやすい解説」ではなく、新しい概念や、古い概念に盛り込まれた新しい意味などを、角を立ててしつこく追究し、それによって理解のための障害を取り除く、というところにある。例えば、「重力場」という言葉一つとってみても、その意味の飛躍的な拡張に、普通の人々についてはいきにくいはずである。そこで、このような障害を取り除けば、一般相対論の筋書き自体はきわめて興味深くたどれるはずである。もちろん、元祖アインシュタインにまだ残っていた混乱を指摘するという課題にも取り組む。これも、相対論の専門家には長年にわたってなおざりにされてきたという観がある仕事である。

こういった課題に応え、日本でも時空の哲学を考えていくための第一歩として、わたしはこの本に取り組んできたつもりである。当然、もっと踏み込んだ続編も構想しており、ある程度書きためた原稿もあるが、どの程度実現できるかは心許ないので、とりあえず手始めの部分のみ公表することにした次第である。原稿の一部は、わたしが所属する京都大学文学研究科の科学哲学科学史研究室の創立 10 周年記念講演で発表したが、その際に原稿に目を通してコメントャーになっていただいた大阪市大理学部、菅野禮司名誉教授と北大理学研究科の石垣壽郎教授から、貴重なコメントと誤りの指摘をいただいたことに感謝したい。まだ残っているかもしれない誤りや不備については、すべてわたし自身の責任である。

最後にどうしても付け加えておきたいのは、わたしの一般相対性理論の理解は、

テイラーとホイラーのすばらしい教科書 (Taylor and Wheeler 2000) に負うところが大きいということである。この教科書により、テンソル解析を抜いても、一般相対性理論の重要な部分は十分に理解できること、また素人に対しても理解できるように解説できることをわたしは確信した。ホイラーは 1960 年代より一般相対性理論研究を先導してきた指導者の一人であるが、この難しい理論を普通の人にもわかるように、巧みな比喩や具体例、そして懇切丁寧な語りによって解説し続けてきた功績も大である。科学の哲学に携わる者も、この姿勢と努力とを見習うべきだとわたしは考える。

### 以下での略記法

文献はすべて巻末に挙げてあり、本文中では「著者名、年号、言及箇所（あるいはページ数）」で言及する。例えば、「Mach 1933, ch.ii, 6.3」あるいは「Barbour 2000, 105」など。現在刊行中のアインシュタイン著作集（プリンストン大学出版）に言及するときは、「CP2, doc. 23, 141」のように略記する。これは、「著作集第 2 巻、文書 23、141 ページ」の意味である。

## もくじ

### 第1章 古典力学と電磁気学から特殊相対性理論へ (1905)

1. 同じ相対運動、異なる説明
2. ガリレオの相対性
3. なぜ不調和か？
4. アインシュタインの提案
5. 古典力学での空間と時間
6. 絶対時空に対する反対
7. アインシュタインによる古典的時空の再構成
8. 特殊相対性理論ではどうなるか
9. 異なる場所で同時とは？
10. 同時性の相対性
11. 空間的距離の相対性
12. ローレンツ変換
13. 速度の合成則
14. 電磁気学ではどうなるか
15. ミンコフスキ時空
16. ローレンツ幾何学の基本
17. わたしの座標系から見ると？
18. 間隔の不変性
19. 座標と幾何学
20. 四次元のミンコフスキ空間
21. 双子のパラドックスと自然運動
22. エネルギー、運動量、質量

### 第2章 等価原理の着想 (1907-1911)

23. 特殊相対性理論はなぜ不備か
24. 重力をどのように扱うか
25. 重力場
26. 慣性質量と重力質量
27. 等価原理

- 28. 等価原理の使い方
- 29. 混同の始まり？
- 30. 1907年論文
- 31. 重力場の異なる場所での時計
- 32. ミンコフスキ時空でアインシュタインの推理を再現する
- 33. 重力場で光は曲がる
- 34. 1911年の論文
- 35. 重力場での光速の変化
- 36. 重力場での光の湾曲
- 37. 等加速度系、または一様重力場から学ぶこと
- 38. 法則を変えない座標変換

### 第3章 曲がった時空 (1912-1915)

- 39. 回転系の考察
- 40. ガウスの曲面論
- 41. 不変量
- 42. 曲率は相対的でない
- 43. 一般相対性原理の再定式化
- 44. 1913年の「草案」
- 45. 静的重力場に関する誤り

### 第4章 穴の謎 (1913-1915)

- 46. 重力場の方程式は一般共変ではあり得ない？
- 47. 穴の議論
- 48. 穴からの脱出
- 49. エーレンフェストへの手紙
- 50. 水星の近日点移動
- 51. 太陽の周りの重力場
- 52. 重力場の方程式

### 第5章 シュヴァルツシルト幾何学とブラックホール

- 53. 地球内部の重力場

- 54. 星の外部にシュヴァルツシルト座標を設定
- 55. シュヴァルツシルト幾何学
- 56. 重力場における物差し
- 57. ブラックホール
- 58. シュヴァルツシルト座標の性格
- 59. シュヴァルツシルト地平に接近する
- 60. 地平を越えてブラックホールに近づく

## 第6章 時空の哲学入門

- 61. ニュートンのバケツ
- 62. マッハのニュートン批判
- 63. 質量の操作的、運動学的定義
- 64. 絶対回転の批判
- 65. 慣性の法則をどう解釈するか
- 66. ポアンカレの貢献
- 67. アインシュタインの衝撃
- 68. 一般共変性とは？
- 69. アインシュタインの最大の貢献
- 70. マッハと相対主義力学は破綻したか？
- 71. マッハの路線での古典力学の再構成
- 72. マッハ流力学の二条件
- 73. 内在的な差と配置空間の測地線
- 74. マッハ流力学の観点から見た一般相対性
- 75. 変化から時間を再構成する
- 76. おわりに

## 図のリスト

### (第1章)

1. 磁石とコイル
2. エーテルと地球
3. ガリレオの相対性
4. 慣性系
5. 絶対時空
6. 時空の関係説
7. 列車とプラットフォーム
8. 同時性
9. 同時性 2
10. 同時性 3
11. 通過列車
12. 同時性の相対性
13. 距離の相対性
14. ローレンツ変換
15. ローレンツ
16. ローレンツ変換で物差しは縮み時計は遅れる
17. 速度の足し算
18. フィゾーの実験
19. ミンコフスキ
20. 二次元のミンコフスキ空間
21. ローレンツの時間的メトリック
22. ローレンツの空間的メトリック
23. 対称的で同じメトリック
24. 二つの間隔
25. 間隔一定のカーブ
26. 座標の意味
27. 三次元ミンコフスキ時空
28. 四次元ミンコフスキ時空
29. アリストテレスの自然運動



- 30. 双子の世界線
- 31. 固有時間最大値の原理
- 32. 仕事とエネルギー
- 33. 古典的運動量
- 34. モメエネルギー 1
- 35. モメエネルギー 2

(第2章)

- 36. 加速系
- 37. 慣性の法則は？
- 38. 法則が変わる
- 39. ニュートンの万有引力
- 40. 位置エネルギーと重力場
- 41. 自由落下の法則
- 42. 二種の質量
- 43. 加速度による力
- 44. 投射体の運動
- 45. 自由落下系での運動
- 46. ローレンツ系と等加速度系
- 47. 加速系と重力場
- 48. 同じ法則？
- 49. 三つの系
- 50. ミンコフスキ時空での三つの系
- 51. 二種の時間
- 52. 重力場での時計の振る舞い
- 53. ミンコフスキ時空でアインシュタインの推理を再現
- 54. ローレンツ系から見た光の軌跡
- 55. 重力場での光の湾曲
- 56. 加速系でのエネルギー転送
- 57. エネルギーは時間と同様に伸びる
- 58. 重力とエネルギー
- 59. ドップラー効果

- 60. 平面波は光速の遅いほうへ曲がる
- 61. 太陽の周りでの光線
- 62. 一様重力場のある時空
- 63. 法則を同じに保つ座標変形

(第3章)

- 64. 回転系の空間
- 65. 回転系の時間
- 66. 曲面上の曲線
- 67. 曲面上の番地
- 68. 直交座標とガウス座標の違い
- 69. 局所ローレンツ系での測定
- 70. 線の曲率
- 71. 球面の曲率
- 72. 負の曲率
- 73. 曲面内部で曲率を測る
- 74. 平面を記述する種々の座標
- 75. 潮汐重力
- 76. 重力場での自然運動
- 77. 一様重力場と静的重力場

(第4章)

- 78. 穴の議論
- 79. 穴の中の二つの点
- 80. 穴の議論、解決
- 81. 時空一致点
- 82. エーレンフェストの問い
- 83. 座標変換と代入は一連の転写に相当
- 84. 固定点をおいた変形
- 85. 水星の近日点移動
- 86. 太陽外部の重力場
- 87. 重力場の方程式を解く

(第5章)

88. 地球内部への自由落下
89. 二つの球の軌跡
90. 球面のポウル内での振動
91. A から見た軌跡、B から見た軌跡
92. 三次元極座標
93. 巨視的な図
94. シュヴァルツシルト座標
95. 極座標表示
96. 時間の曲がり方
97. 地球の赤道面
98. 円と放物線をスムーズにつなぐ
99. 星の等分面の埋め込みダイヤグラム
100. 重力場におかれた物差し
101. 太陽の質量と半径
102. ブラックホールはいかにして可能か？
103. ブラックホールの等分面空間
104. 埋め込みダイヤグラムの平面図と断面図
105. ダイバー座標系
106. 座標速度と局地的観測者が見る速度との違い
107. 地平の外側を見る
108. 地平の内側に座標を拡張
109. ダイバーと光の軌跡
110. 地平の内外での光円錐
111. 光行差
112. 最後の景観

(第6章)

113. ニュートンのバケツ
114. マッハによる質量の運動学的定義
115. マッハのバケツ
116. 初期値問題

117. 二つの回転体
118. 一般共変なユークリッド幾何学
119. 三質点系
120. 三質点の配置空間
121. 絶対空間での三質点系
122. 相対主義力学の初期条件
123. 相対主義での運動エネルギー
124. 三角形の間の暫定間隔
125. 二種の力学の比較
126. ジョン・アーチボルド・ホイーラー
127. 二次元空間の近似
128. スーパー空間と二次元幾何学の時間的发展
129. スーパー空間から四次元時空へ

## アインシュタイン年譜（前半生のみ）

- 1879年3月14日 ウルムにて生まれる
- 1896年10月-1900年7月 チューリヒ工科大学（ETH）で学ぶ
- 1902年6月 ベルンの連邦特許局で働き始める
- 1903年1月 ミレーヴァ・マリッチと結婚
- 1905年 特殊相対性理論の二つの論文を含む、五つの重要な論文が出版される
- 1907年 「わが生涯の最もすばらしい考え」、加速運動と重力場の等価性の着想。一般相対性理論への歩みを始める
- 1908年2月 ベルンで私講師。同年、9月、ミンコフスキが4次元時空を提唱
- 1909年10月 チューリヒ大学で準教授
- 1911年4月 プラハで教授、6月 太陽の周りでの光の湾曲を予測
- 1912年9月 チューリヒ工科大学の教授、グロスマンとの共同研究
- 1913年 「一般相対性理論および重力理論の草案」（グロスマンとの共著論文）
- 1914年 ベルリンのプロシア科学アカデミーの教授。「一般相対性理論の形式的基礎づけ」、〈穴の議論〉によって一般共変性を否定
- 1915年11月 一連の論文により、一般相対性理論が完成、重力場の方程式
- 1916年 「一般相対性理論の基礎」、重力場の方程式の初の厳密解（シュヴァルツシルトによる）
- 1917年 『特殊および一般相対性理論について』、「一般相対性理論についての宇宙論的考察」
- 1918年 「一般相対性理論の基礎について」という短編で、「マッハ原理」を提唱（1916年頃から考えられていたらしいが、内容はたびたび変わる）
- 1919年5月 イギリスの観測隊が、太陽周辺での光の湾曲を検証。この結果は11月に公表され、新聞等でも大々的に喧伝される。
- 1922年11月 日本を訪問、12月ノーベル賞