「趣味で相対論」サンプル

*本サンプルは、2020年3月6日時点のものです。

* 書籍仕様については、以下弊社 web サイトをご覧ください。 https://www.rikohtosho.co.jp/book/877/

広江克彦 著

理工図書

私の夢はずっと、重力制御装置を作ることだった。

音も無く、風も吹き出さず、静かに宙に浮く乗り物。タイヤと地面の摩擦を利用した現在の推進法などは、一気に過去のものとなるだろう。ああ、それが行き交う光景は私にとって何と美しいことか。

もしそんなものが実現していたら、私は整備工場で働く人生を選んでいたかも知れない。もちろん宙に浮く自動車のである。暇を作ってはその装置をいじって楽しむのだ。

しかし私は、それがまだ存在しない時代に生まれてしまった。さらに言えば、その実現のヒントとなりそうな理論さえ、人類はまだ手に入れてはいないのだった。

無いものは、作ればいい。

しかし偽物の理論をでっち上げても意味がない。我々は、現実のこの世界を良く観察して、この世界がどうなっているのかを正しく知らなければならない。

重力について知るには、一般相対論を学ぶ必要がある。まずはこれが基 礎であり、重力制御はその遥か先にあるはずなのだ。

しかし、私は甘かった。その基礎でさえ、簡単ではなかった。

私は相対論が正しいことを知っているが、それが現実に完全に当てはまるとは信じていない。しかし今のところ理論と現実との不一致は見付かっていない。どこか少しでも間違っていて欲しいくらいだ。そして、それが画期的な発明に繋がれば、と願う。

序文

この本の目的は、一般相対論までの内容をごまかしなく伝えることである。しかし私が挑戦したいのは、第一の目的を少しも損なうことなく、読者の負担が最小となるような形でまとめ上げることである。そういう本を手にすることが可能かどうか、私自身が知りたくて作るのだ。

相対論に関する本は幾らでも世に出回っているが、有給の研究者によって書かれた教科書の割合は少ないように思える。この本もまた、その割合を下げようとしている。

教科書というのは専門家を目指す学生を助ける為に書かれることが多いので、非常に厳しい書き方になっている。普通の人が興味本位でそういう本に手を出すとその中身が非常に不親切だと感じるわけだが、それは学生を鍛える為なのだから仕方がない。専門家は一般の人向けにも本を書くことがあるが、出版社の要望によるのか、今度は数式がほとんど出てこないものに仕上がってくる。相対論はアイデア自体は単純なので、数式なしで説明しようと思えば数ページで終わってしまう。本にするためには何とか話を膨らませて面白くしないといけないが、数式に頼ることなく理論の結果だけをあれこれと書かれても、狐につままれたような気分になるだけである。

学問というものは、初心者向けにわざわざ面白おかしく書こうと苦労しなくても、分かりやすく在りのままを書けば面白いだろうと思う。私は相対論が面白いと思っているので、それがそのまま伝わればいいと願っている。その際、「何を書かないか」という選択が重要であろう。余計なことでページを増やして本の価格を上げたくはないので言いたいことだけを書こうと思うのだが、それでも伝えたいことは山ほどあるのだ。私自身がこれまで勉強してきてつまづいた部分が多くあるので、今後同じことで多くの人が悩まなくても済むような秘訣みたいなものをさりげなく散りばめたい

という思いもある。

この本の内容のほとんどは、元々インターネット上で公開されたものである。私が趣味で始めた「EMAN の物理学」というサイトの中に相対論について解説した部分があり、それをベースにしてまとめられている。インターネットを使える環境にある人はこの本の元になった記事を今でも変わらず無料で読むことができる。それどころか、この本に載せることのできなかった記事も幾つかある。それらは私の勉強が進むにつれてこれからも増え続けるだろう。

しかしネットの記事をそのまま本にしたというわけではない。本にするからには、それなりに気を遣わないといけない。ネット上で書き始めたのはもう何年も前のことであり、今となっては誤解だったと気付くことのできた部分もあるし、時間をかけて勉強している内に考えが少しずつ変わってきて、思想が一貫していないところも出てきている。本として載せるには少々無責任だと思える議論も、面白そうだからという理由でネット上には残してあったりする。ネット上の記事はいつでも書き換えができるという安心感があって、手付かずになってしまうことが良くあるわけだ。

本としてまとめるにあたって、全ての誤りを取り除くことができたかというと、自信はない。私自身がまだ勉強中であるし、今でも時々、ある部分の説明の仕方が不適切だとか、数式の変形が間違っているとかいう指摘を頂いたりする。そういうことはこれからもたびたびあるだろうと思う。どうか私を過度に信用することなく、自分の知性に頼って読んで欲しい。

私はこの本を、できるだけ肩の力を抜いて、電車の中でも布団の中でも 読める本にしたいとも思っている。相対論の本というのはそれが啓蒙書で あっても、やれ光速の何十パーセントだ、そのときの時間の遅れは何パー セントだ、誰それから見た相対速度はこれくらいだという話で一杯になっ て、やがていちいち状況を把握するのが面倒になり、著者を全面的に信用 して読み流すようになってくる。そうなると読み進めること自体がだんだ ん無意味に思えてきて、もし明日元気があったらもう一度ここを読み直し てみようか、それとも今すぐ気力を振り絞ってベッドから起き出して紙と ペンを取って来て、検証しながら読んだ方がいいだろうかという葛藤が始 まるものである。 比較的自由な時間のある若者には、この苦しみが実感できないかも知れない。勉強する為には、実際に自分の手を動かして複雑な問題を解いてみるのは当然だとか思っている人もあるだろう。それによる効用は決して否定しないが、それができないほど疲れ切った状況にある人が、わずかな時間を使って学問を楽しんでもいいではないか、と私は思うのだ。

それで私は、状況把握の面倒臭さに読書の邪魔をされるのではなく、もっと問題の本質的な部分で頭を使ってもらえるようにしたいと思っている。たとえそこに紙とペンがなくても、目を閉じればいつでも心のスクリーンに問題が描けるような……。その問題の答えがどうしても気になってしまえば、その人はやがて自分の意志で紙とペンを取りに行くだろう。それがその人にとっての「趣味で相対論」の始まりだ。

ところで、これを読んで下さっている人の中には専門家を目指そうという人もいらっしゃるだろう。そういう人は、常日頃からペンを持って訓練を続けていて欲しい。その鍛えられた計算力と、多くの経験による物事の包括的な把握力が専門家の武器であるからだ。

しかしそのような研ぎ澄まされた武器を持たないからと言って、趣味の 人がこの分野に足を踏み入れるのをけしからんことだと非難しないで欲し いと思う。誰かがわざわざ彼らを追い返すようなことをしなくとも、もし その人が努力を続けないのなら、大自然が、その人に理解されるのを拒む だろう。

> 2007年11月15日 広江 克彦

目 次

第0章	準備	1
第1章	特殊相対性理論	5
1.1	相対論はなぜ生まれたか?	5
1.2	エーテル理論の失敗	7
1.3	アインシュタインの指針	11
1.4	同時であるとはどういうことか	15
1.5	ローレンツ変換の求め方	17
1.6	時空回転と不変量・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	22
1.7	悩むのは無駄	27
1.8	固有時の意味	28
1.9	4 元速度	31
1.10	$E=mc^2$ を導く	35
1.11	質量は増大するのか	40
1.12	物体は縮むのか	45
1.13	なぜ光の速さを越えられないのか	47
	〜哲学〜 科学とは何だろうか	51
第2章	座標変換の理論	53
2.1	座標変換とは何か	53
2.2	見かけの力	56
2.3	ガリレイの相対性原理	59
2.4	4 次元的世界観	60
2.5	光はなぜ一定速度か	62
2.6	多変数関数の微分	65
2.7	運動方程式のローレンツ変換	67

	2.8	偏微分の座標変換........................	69
	2.9	マクスウェル方程式が不変となる変換	73
	2.10	反変ベクトル・共変ベクトル	83
	2.11	縮約の意味	87
	2.12	省略記法の導入	90
	2.13	テンソル解析の基礎	93
	2.14	計量とは何か	96
	2.15	反変・共変の変換	98
	2.16	4 次元の演算子	104
第	3 章	相対性原理の実践	109
	3.1	相対論的な運動方程式	109
	3.2	運動量ベクトルの変換	113
	3.3	エネルギー運動量テンソル	115
	3.4	相対論的なマクスウェル方程式	120
	3.5	電荷の保存則	124
	3.6	ゲージ変換	125
		〜豆知識〜 ローレンツは二人いる!	128
第	4章	一般相対論の入り口	129
	4.1	結論から始めよう	129
	4.2	代表的な二つの公式	130
	4.3	測地線の方程式の展開	133
	4.4	重力場の方程式の展開	135
	4.5	項の数を数えてみる	138
	4.6	式の簡単化	140
	4.7	質量は2種類ある	142
	4.8	アインシュタインの解決法	145
	4.9	質量は錯覚だ	147
		~ 豆知識 ~重力と引力の違い	149
第	5 章	リーマン幾何学	151
	5.1	共変微分	151

	5.2	平行移動	162
	5.3	測地線	173
	5.4	局所直線座標系	177
	5.5	テンソルの共変微分	182
	5.6	リーマン曲率	186
	5.7	リーマン・テンソルは本当にテンソルか	190
	5.8	リッチ・テンソル	195
	5.9	スカラー曲率	199
	5.10	ビアンキの恒等式	201
	5.11	アインシュタイン・テンソル	204
	5.12	ニュートン近似	206
	5.13	重力場の方程式へ	212
	5.14	係数の値を決める・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	215
第	6章	一般相対論の検証	219
	6.1	シュバルツシルト解	219
	6.2	光の湾曲	226
	6.3	水星の近日点移動	239
	6.4	重力赤方偏移	247
	6.5	加速系の座標変換・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	253
あ	とがき	₹	265

第0章 準備

まずはこの本自体の説明をしておこう。目的は何か、何が学べるのか、どんな特徴があるのか、何に気を付けたら良いか。そして何が書かれていないか、など。そんなことを読み取って頂けたらと思う。第0章などという番号の振り方を好むのは私の本職がコンピュータ技術者だからかも知れないが、この章はまだ相対論の話に入る以前の前置きですよ、という意味を含ませてもいる。

ところで、相対論には「特殊相対論」と「一般相対論」の二通りがあるのはご存知だろうか。観測者が加速しないような特別簡単な場合だけを扱うのが「特殊」で、加速や重力の問題までも扱うような一般的な議論にまで拡張されたのが「一般」である。いや、そのように説明している入門書は多いのだが、実を言うと加速については「特殊」の範囲でも扱えたりする。しかし少し面倒なので、私は加速の話を「一般」の説明の中へ持っていくことにした。「特殊」と「一般」の本当の違いは、本書の終わり頃までに明らかにしたいと思う。

非専門家向けの入門書としては珍しいと思うのだが、この本では「特殊」と「一般」の両方の内容を数式を使ってごまかさずに説明する。しかし数式は、もし読者に余裕があったら解読してみたらいいと思うのだ。ちゃんと前後に言葉による説明を多く入れてあるので、数式からは雰囲気だけを感じ取ってもらえれば読み進めることはできるのではないかと思う。

数式を解読する為に必要となる数学知識は、第1章は高校レベルで何とかなる。第2章となると、多変数関数の微分が出てくるので高校レベルを少し越えるかも知れない。第3章では電磁気学の知識が必要になるが、これは興味がなければ軽く読み流しても大丈夫である。それ以降の章で必要となるのは、根気だけだ。難しいというより、ただただ面倒臭いのである。

相対論は天才たちだけのものだと思わない方がいい。一部の天才を除き、 みんな似たような苦労を乗り越えたのだ。

非専門家向けの入門書としては珍しいだろうと思う点はもう一つある。 それは、図をあまり使っていないことだ。言葉で説明するのがどうしても 難しいと感じるときだけ、図の助けを借りている。その理由を正直に言え ば、私が図を描くのが苦手で、非常な手間が掛かるからだ。また、下手な 図を示すことで読者を無駄に考え込ませたくないとも思っている。しかし 私自身はいつも自分の頭の中に図を描いて理解しようとしており、イメー ジを描くことの大切さは知っているつもりである。

そんな私であっても、4次元まではとてもじゃないがイメージできない。 それが普通だと思うし、それで大丈夫なんだということを伝えたい。イメージできなくとも論理で乗り切ることができるのだ。だからこの本は、図で 理解させる本ではない。図は必要に応じて各自で頭の中に描いてほしい。 そのためにできるだけ言葉でサポートしようと思う。

ところで、頭の中に 4 次元の風景を正しく思い描いて理解している人なんているものだろうか。天才と呼ばれる人がいて自分と比べてあまりにも能力に差があるので、ひょっとして中にはそういう人もいるかも知れないと思うことがある。いたとしても、私にはその人の頭の中は想像できないのだろう。たまに「いや、4 次元のイメージなんてものは簡単だ」と言う人がいて、例えば立体図をアニメーションにすればそれで 4 次元なのだと言う。まぁ、それは確かに 4 次元的ではある。しかしこれだとある時間軸に沿って移動した場合の個人の視点になってしまう。我々は 3 次元の立体を見たときに、それをどんな方向から見たらどんな形に見えるかがおおよそ掴めてしまうわけだが、4 次元をありのままに把握するというのは、4 次元の中に存在する 4 次元的立体配置を、4 次元の中で角度を変えて見たときにどうなるかを把握できるということだ。この本の読者にそんな才能は求めない。

以上の話し振りから、4次元なんてものをイメージできない普通の人が この本を書いていることを信じてもらえるだろうか。

もう少し細かい話もしておこう。この本は物理寄りの書き方がされてい

る。数学者が好むようなやり方ではないという意味だ。相対論というのは 論理的に非常に美しいので、近代的に整備された数学を使えば非常に美し く簡潔に表すことができるらしい。しかしこの本は相対論が発表された当 時の伝統的なやり方で書かれている。言い換えれば古臭いということだが、 大抵の入門書はみんな同じなので心配はしなくていい。

ただ古いやり方で学んでしまうと新しいやり方について行けなくなることが世の中には良くある。人というのは自分が最初に学んだものを絶対だと信じてしまう傾向があるからである。これよりさらに洗練された形式があることを予め認めるならば、古いやり方を知っておくのは新しいものを受け入れることへの妨げとはならず、むしろ良い土台として使えることだろう。どちらの形式でも自由に頭を切り替えて扱えるようになればかっこいいと思う。

- 趣味の提案 -

この本の内容を把握した後でいいから、現代数学を使った相対論が どのように表されるものなのか調べてみると良いかも知れない。微分 幾何と呼ばれる数学で、多様体などという用語が出てくるやつだ。私 もそのうちやりたいと思っている。

さらにこの本では、変分原理と呼ばれる数学手法を使うのをわざと避けている。変分原理は物理寄りの伝統的な手法ではあるのだけれど、初心者がつまづきやすいところでもある。その思想を納得の行くように説明してその扱いに慣れてもらおうとすれば、ちょっと手間が掛かってしまって、相対論どころではなくなってしまうだろうと思う。もしそれを使ったならばもっと簡単に説明できただろう箇所がこの本にも幾つかある。実際、他の教科書ではごく普通にそれが使われていたりするのだが、それは専門の学生向けだからだ。

なぜこんなことを書くかと言えば、学問にそのような広がりがあることを読者に知っていて欲しいと思うからである。相対論はアインシュタインのひらめきによって「突如わいて出た」理論ではなく、歴史的には電磁気学や解析力学といった分野を土台として深く繋がっている。そのため、そ

れらの分野で蓄積した技を使って論じることは本来は当然なのである。しかし工夫次第では、ある程度先の方までそれらを避けたまま説明することもできるというわけだ。もっと先を目指すつもりなら、変分原理もいずれは通らねばならぬ道である。

– 趣味の提案 -

他の教科書に載っている変分原理を使った説明の仕方を調べてはどうだろう。変分原理が何であるかは「解析力学」を学べば詳しく説明されているはずだ。私ももっと学んで、いつかそのような続編を書きたいと思う。

この本には他の点でもちょっと変わった特徴があると思っているのだが、 それは他の本と読み比べて自分で確かめてもらいたい。どの本にでも載っ ているようなことは思い切って省いてしまった。この本を読んだだけでは明 らかに知識が偏るだろうことを注意しておく。ではそろそろ本編に入ろう。

第1章 特殊相対性理論

1.1 相対論はなぜ生まれたか?

相対性理論と聞けば、多くの人がアインシュタインを思い浮かべる。私もそうだ。その理論のほとんどを彼一人で完成させたためである。しかし彼が特別に天才だったからというわけではない。電磁気学の結果を調べていけば、時間はかかるだろうが大抵の人が同じ結論にたどり着く。その証拠に有名なローレンツ変換式にはアインシュタインではなくローレンツの名前がついているではないか。アインシュタインよりも前にその理論の下地はすでに出来ていたのである。

当時の科学者たちは、ローレンツ変換から導かれる内容をそのまま受け入れることができずに苦し紛れにいろんな小細工を考えた。アインシュタインが天才だと言われる理由はその結果をそのまま受け入れたことによる。その際、何を根拠にそれを受け入れるか、という哲学的な指針を与えた彼の論文は芸術作品のようである。

アインシュタインの書いた相対性理論の論文の題名は「運動する物体の 電気力学」であった。なぜ電気と相対論が関係しているのだろうか? 相対 性理論は、文字通り、電磁気学から生まれたのである。

電磁気学がマクスウェル方程式としてまとめられたのが 1864 年のことだ。この年が電磁気学の完成だと言えるかも知れない。しかし、その方程式から予言される電磁波という現象が本当にあることが確認され始めたのが 1888 年以降であり、意外と最近のことなのだ。さらに、今では入門的な教科書にでも載っているような「運動する電荷のポテンシャル」が計算されたのが 1900 年頃だ。それからほとんど間を空けることなく 1905 年の特殊相対論が世に出ることになる。電磁気学の完成と相対論の登場は歴史的

にも連続した話であり、相対論が電磁気学の総仕上げのようにして出てくるのは必然だったのである。

ではどのような繋がりがあるのかを見てみよう。先ほども話に出てきたが、電磁気学の諸法則を4つの方程式系にまとめ上げた「マクスウェルの方程式」というものがある。この式の意味をじっくり考えていくと奇妙なことに気付いてくる。このマクスウェルの方程式は一体誰の視点で成り立つか、ということだ。

この方程式を解けば電磁場が波を作ることが分かる。今では我々の日常となっている電磁波がそれだ。光というのは電磁波の内、ある範囲の周波数を持ったものに他ならないということも分かった。つまり、電磁場が作る波の速さというのは実は光の速さのことなのだった。しかし一体、光の何に対しての速さかということが問題なのである。マクスウェル方程式からはそれが読み取れなかった。

光を追いかけたらどうなるだろう? 光に追いつくことはできるだろうか? 走っている列車の中でも電磁気学の諸法則はそのまま成り立つのだろうか? これが当時の科学界の関心事であった。しかし光はとても速いので、列車のスピードくらいの実験では全く違いが分からない。誤差の範囲である。なぜなら、光の速さを測定するほんの一瞬の間に列車は殆ど移動していないと見なせるからである。もっと速いものに乗って実験しなければならない。そこで思いついたのが、地球である。地球は太陽の周りを凄まじい速さ(秒速 30km = それでも光速の 0.01% でしかない!)で進んでいるのでこれを乗り物に見立てて実験してみればいい。その結果がどうなったかは次の節で説明することにしよう。

この他にもう一つ、これに関連してはいるのだが、電場や磁場は一体何なのかという問題もある。例えば、コイルに磁石を近付けると発電ができるという現象がある。この現象を二通りの視点から見てみよう。

コイルの上に立っている人から見れば、近付いて来たのは磁石の方である。磁石が近付くとコイルの周りの磁場が変化する。するとマクスウェルの方程式にもあるように、磁場が変化するときには電場が生じる。そしてその電場の影響でコイルの中の電子が運動を始め、これが電流となる。

ところがこれを磁石の上に立っている人の立場で見てみよう。近付いて

来たのはコイルの方であって自分は止まっていた。だから磁場は変化していない。コイルの中の電子が磁場の中に入ってきたので、電子は運動方向と直角の方向へローレンツ力を受けて移動した。これがコイルに生じる電流の原因であると説明するだろう。

同じ現象であるのに、立場によって説明の仕方が違うのである。一方は「磁場が変化したから電場が生じた」と言い、一方は「磁場は変化しなかったし、電場はなかった」と言う。そこに電場はあったのか、なかったのか? 一体、どちらの肩を持ったらいいのだろう? 本当に動いていたのはどっちなのか判断できるだろうか?

これが相対論の始まりなのである。一体、止まっていたとか動いていたというのは、何に対して言えることなのか? 光の速さというのは何に対しての速さなのか? どの立場にいる人が最も正しいと主張できるのだろうか? 果たしてそのような立場は存在するのだろうか?

電磁場の問題の解決については第2章以降で説明する予定なので、まずは光の速さの問題についての歴史的な流れを見ていくことにしよう。

1.2 エーテル理論の失敗

当時の人の気持ちになって考えてほしい。波と言えば、何かが揺れている現象である。では電磁波の場合は何が揺れているのだろう。良く分からないのでとりあえず「エーテル」という名前で呼ぶことにした。この「エーテル」の語源は、アリストテレスが火・水・土・空気の4元素説に加えて、天上界にある第5の元素として挙げている元素の名前であって、これを使ったネーミングセンスはなかなかのものである。このエーテルは宇宙を満たしているに違いない。なぜなら遠く離れた星からの光も地球に届いているのだから、途中の宇宙空間にもエーテルがなければならない。すると地球はエーテルの海の中を突き進んでいることになる!

もしそうならば、測定器の向きを変えて測定してみて光の速さがどれくらい変化するかを調べれば、我々がエーテルの中をどれくらいの速さで突き進んでいるかが分かる筈である。これが有名なマイケルソン・モーリーの実験である。(1887年)

ところが、どんなに精密に測定しても、光の速さは変化しなかった。季

節を変えても、場所を変えても、昼と夜を比べても。地球は自転しているので夜と昼とではエーテルの流れの方向が逆に感じられるはずだ。我々はエーテルに対して止まっているのだろうか? 太陽の周りの公転運動だけ考えても、地球はかなりの速さで宇宙を進んでいるはずなのに。

やはり宇宙の中心で止まっているのは地球の側で、他の星が周りを回っているのか!? そうなると天動説の再来である。そんなはずはない!

そこでエーテルについて色々な説が出た。エーテルは地球と一緒に回っているに違いない、とか、エーテルは物質に引きずられるのだろう、とか言うのである。これらの説は一理ありそうだが、矛盾が出てくる。光の速さは地球上でだけ測定したわけではないのだ。木星の衛星の食を利用しても測られている。また、エーテルが回転していたら星の光が流されて観察される現象が起きるはずだがそのようなことは起きていない。今このようなエーテルが存在することを主張すると笑われてしまうが、当時は誰もが真剣にこのような可能性を探ったのである。

もちろん、我々が光の速さを直接測定したのは地球のごく近くだけであって、将来、太陽系のはるか外へ出て行って光の速さを測定したら違っていた、という可能性がないわけではないことを認める謙虚さは必要である。それでも間接的には測られており、現時点ではこのことに大きな疑いはないようである。分かっている範囲で最良の理論を作り上げるのが物理学のやり方だ。そして数理物理学者ローレンツも当時分かっていた範囲でエーテルについての一つの説を出した。

- 趣味の提案 -----

今でもエーテルの存在を強く主張する人々が次々と現れる。そのほとんどが素人ばかりだが。彼らが笑われてしまう理由は、この古い時代に徹底して交わされた数々の議論を知らず、それを越えるような、注目に値する主張を何も持っていないせいであろう。当時、エーテルを認める説としてはどんなものがあって、それらがどのように否定されて行ったのかを調べてみるのも面白いのではないだろうか。

ローレンツは、エーテルの中を物体が進むときには、「エーテルの風」を受ける影響で物体が進行方向に縮むのだと考えた。(1895年)このために観測装置は光の速さの変化を捉えることができないだけだというのである。物差しも人間も全て進行方向に対して同じように縮むので我々はその「縮み」を感じることはできないという理屈である。この理論はなかなか馬鹿にしたものではない。

計算してもらえば分かるが、彼の主張する通り、エーテルに対して速度を持つとき、観測装置や我々自身を含む全ての物体が進行方向に対して $\sqrt{1-v^2/c^2}$ 倍に縮むならば、マイケルソン・モーリーの実験装置では光の速さの変化は測定できないことになる。これは相対論の結果としても出てくる「ローレンツ収縮」そのままの値である。

ではなぜ縮むのだろうか? これについても彼は計算している。もし物体がエーテルの中を進むとき、その質量が増加するならばこのことが説明できる、と。

では、なぜ質量が増加するのだろうか?当時の人々には分からなかった。我々なら何と答えるだろうか?確か相対論から導かれる内容にそんなものがあったのではないか、と思い浮かべる人もあるだろう。ならばこう答えようか。「相対論のように光の速さが一定だと仮定すれば質量の増加を説明できる!」と。これでは堂々巡りである。しかしこれは面白い。もし、なぜ光の速さが一定なのか?ということの答えが知りたければ、この論理の堂々巡りをどこかで断ち切って、物が縮む理由か、物体の質量が増加する理由かのどちらかを解明してやればいいのではないだろうか。残念ながら、そううまくは行ってくれないのである。もしこれでうまく行くならば今ごろ主流は「エーテル理論」であって、相対性理論は受け入れられなかったであろう。ローレンツの仮説には重大な欠陥がある。

彼の仮説が成り立つのは、当時の実験装置についてだけなのである。昔は精密に光の速さを測るためには、光を鏡で反射させて位相差を測るしかなかった。光の速さを往復で測定していた時代の理論なのである。しかし現在は測定技術も進歩して片道だけで測定できるようになっている。この他にも彼の理論の欠陥はいくらでも出てくる。しかし、それらは測定技術の進んだ現代の視点で言えることであって、科学史を調べていくと、どうもこれ以外の理由でローレンツの理論は破棄されたようなのだ。まだローレンツが納得しないうちに相対論が発表されているし、当時の技術ではま

だどちらが正しいかはっきりと言えなかったと思うのである。

これは私の意見だが、おそらくローレンツ自身が自分の理論の薄っぺらさに気付いたのだと思われる。これは彼が非常に悩みぬいた末のことであっただろう。彼の理論では光の速さが一定に観測されることは説明できるのだが電磁気学の方程式の解釈が非常に複雑になってしまうのである。そこで、彼は自分の理論を変更して、マクスウェルの方程式の形を変えない変換式、すなわち現在の「ローレンツ変換式」を導き出した。(1904年) これは相対論が発表される以前のことで、ローレンツの他にフォークト (1887年) も独自にこの式を導き出していた。前に言ったように、アインシュタイン以前に同じことを考えた人は多くいたのである。

- 趣味の提案 –

この辺りの歴史ではフィッツジェラルドやポアンカレも有名だ。誰 もが突然正解に至ったわけではない。それぞれの考え方の微妙な違い を調べてみるのも面白いだろう。

ところがこの変換式によると距離が縮むだけでなく、時間さえ変換されることが必要になってくる。そこでローレンツはさらに頭をひねり、時間の縮みを説明するために別の仮説(局所時間を導入)を作ったようであるが、これはとても難解なものになってしまった。

実は私自身も学生時代に「客観時間・主観時間」なる言葉を勝手に作って同じようなことを考えてみたことがあるがうまく行かなかった。当時は勉強不足だったためにローレンツのしたことについてはまだ知らなかった。とにかく、ローレンツの理論を生き残らせるために工夫して実際に合わせようとすると次から次へと色々な仮定が必要になってきてしまうのである。

そして物理学の歴史はそのようには進まなかった。もっと安全な道を選んだのだった。実験の結果をそのまま基礎として受け入れようという方向である。

1.3 アインシュタインの指針

アインシュタインの論文はなぜそれほど注目されたのだろうか。彼が論 文の中で言いたかったことを要約すれば次のようになる。

「マクスウェルの方程式をいじって求めた結果を怪しまなくても、二つのことを原理として認めるだけで同じ結果、すなわちローレンツ変換式が導けます。だから私の言う二つのことを受け入れて、物理学を、特にガリレイ変換を見直してはいかがでしょう? 力学の法則もローレンツ変換に従うと考えるのです。」

後半部分は分かりにくいかと思うが、それについては第2章で説明する ので今は読み流してもらってもいい。それよりも、ここで言われている二 つの原理というのを先に紹介してしまおう。

- ・光速不変の原理 光の速さは光源の速度に依らない
- ・相対性原理 どんな慣性系でも物理法則は同じ形で表せる

宇宙はそういうものだと認めてあきらめましょう、という感じだ。それに対する現在の物理学の態度は、「実際、実験結果が相対論の予言した通りになるのなら仕方がない、二つくらいなら信じてみようか」という具合である。

「信じる」という言葉が科学的でないと思うかも知れない。しかし、物理というのは「信じて試して、確認していく」という過程を取るという意味では宗教的なのだ。それが個人レベルで起きるか、グループとして起きるかの違いくらいだろうか? 念のために言っておくと、個人の心の中でこれを行うのが宗教である。日本人は宗教に疎くて、宗教とは「信じて信じて錯覚してゆく」過程だと誤解している人が多いようだが、真の宗教というのはそういうものではないと私は思うのだ。偽の宗教に騙されないようにしよう。科学と宗教を絡めて話すと反発される方も多いと思うので、これについての私の個人的な考えはコラムとして少し後に書いておくことにする。心に余裕のある時にでも読んで欲しい。(→51ページへ)

ではアインシュタインの提案した二つの原理にそれぞれどんな意味があるのかについて考えてみよう。

まず、光速不変の原理。これは光源がどんな速度で動いていようとも、そこから発せられた光の速さは光源の影響を受けない、というものだ。これは水面に生じる波を思い起こさせる。水上を移動する船が起こした波だろうが、固定した杭から出た波だろうが、波は出所に関係なしに同じ速度で周囲に伝わってゆく。これはまるで、エーテルのような存在を認めているようではないか。しかしこの原理はなぜそうなのかについては何も言わない。ある人が光を見たとき、どこから出てきた光であろうと同じ速さだと言っているだけだ。

次に、相対性原理。これはどんな慣性系にいても物理現象が同じ形式で 書けるということである。

予期せず「**慣性系**」という専門用語が出てきてしまったので、ここで簡単に説明しておこう。物体が慣性の法則に従っている限り、その物体は等速で移動し続けるか、あるいは静止し続けるかのどちらかである。そのような物体が静止して見えるような立場にいる人が、自分を基準にして時間や空間に目盛りを振って座標を設定したとき、それを頼りに世界を眺める視点を慣性系と呼ぶ。座標軸の目盛りが等速運動する物体と一緒に移動して行くようなイメージだ。等速運動と言ってもその速度には色々あるから、どんな速度の物体を基準にするかの違いによって慣性系は無数にあることになる。基準にした物体の速度が異なるとき、それぞれの慣性系は「異なる慣性系」などと表現され区別される。

以上の説明でこの原理の表面上の意味だけでも分かってもらえるだろうか。相対速度を持って等速運動するものどうし、それぞれは違う立場にあって違う座標を使っているけれども、なぜか物理法則は全く同じ形式で書けてしまうので、誰が本当に止まっているとかは、物理法則の形の違いによっては判別しようがないのだ、ということである。

ところで、同じ一つの出来事を色んな相対速度を持つ立場から観測した場合、それぞれがその出来事から得る観測値は当然それぞれに違うだろう。しかし、それは全く構わない。この原理は、一つの出来事が誰からも全く同じように見えなければならないとまでは言っていない。ただ法則の形式

が同じになると言っているだけである。

しかしさらに疑問は募る。それぞれの得る観測値が立場によって異なっていてもいいのなら、物理定数についてはどう考えたら良いだろう?物理定数といえども観測値なのではないか。それぞれの立場で物理定数が違っていても構わないということになるだろうか。例えば、光の速さというのは物理定数の一つだが、それぞれの立場でこの値が違っていたって構わないと言うのであれば、話に聞いた相対論とはえらく違った話だ。一体どういうことだろうか。少しあとで説明しよう。

この相対性原理には、「全ての慣性系は同等であるべし」という強い要求が含まれている。つまり、たとえ全ての慣性系で同じ形の法則が成り立っていたとしても、その式の中に、特定の慣性系を基準にした位置や速度が含まれているようではいけないのである。互いの慣性系の関係を表すような式を書く場合には相対速度や相対位置に依存した量だけが使用を許されることになる。

このことを理解するためにちょっと例を挙げておこう。高校の物理では音のドップラー効果というものを学ぶ。この公式を丸暗記しておくとテストで点を取るのに有利であるが、この式の中には「観測者の空気に対する速度」が含まれている。この場合、空気に対して静止している系が、基準としての特別な意味を持ってしまっているのである。いや、別にドップラー効果の式に欠陥があると言いたいわけではなく、このようなタイプの式は、宇宙の根本原理を表す式としてはふさわしくないのではないか、と相対性原理は述べているのである。理由? そんなものは無い。原理とはそんなものだ。

この要求から、もしある慣性系の中で定数と呼べるものがあり、それが どの慣性系でもやはり定数であるとするならば、その値は慣性系に依らず に同じでないといけないということが自動的に言えてしまうことになる。 光の速さもその一つである。これからそれを示そう。

自分から見てあらゆる光は一定速度である。また、自分とは別の慣性系にいる人にとっても光の速さは一定である。しかし、その人が自分と同じ速さの光を見ているかどうかまでは分からない。ここまでが「光速不変の

原理」が主張できる内容である。どの人から見ても光が同じ速さだとはこの原理からは言い切れない。

しかし両者とも光速は一定だと言っているのだから、両者の観測したそれぞれの光速の値c、c'の間に次の単純な関係式が成り立つはずだ。

$$c' = ac$$

ここでc、c' は正の値とする。またa はお互いの相対速度の絶対値によってのみ決まる正の定数である。お互いの慣性系は同等なので、a の値は相手から私を見るときにも同じになるだろう。

$$c = ac'$$

ここまでが相対性原理の主張を当てはめた結果である。二つの式を合わせれば、

$$c = a^2 c$$

であり、a=1 でなければならないことが分かる。つまりどの慣性系でも同じ速度の光を見ていると言える。

世間に出回っている入門的な解説書では「どの慣性系から見ても光速が一定」であることを「光速不変の原理」だと説明してしまっていることがあるが、これは誤りである。まぁ、「光速不変の原理」をこのように解釈してしまっても相対論自体の体系には影響はないので大きな問題ではないのは確かだ。しかし、これでは両方の原理に「慣性系」という言葉が出てきてしまうことになって、それぞれの原理の独自性が薄らいでしまうではないか。

「慣性系どうしの相対性」に関わる原理と「それ以外の原理」とを綺麗に分離させたところに、この二つの原理の美しさがある。また、マクスウェルの方程式というややこしいものを基礎として持ち込まなくても済むようにしたところにもこの原理の美しさがある。

特殊相対論の数式上の基礎になっているローレンツ変換式というのは、「誰から見ても光の速さが一定」であることだけから導けてしまう。だから原理がわざわざ二つに分けて用意されていることが初心者にとっては不可

解であったりする。しかし、この「相対性原理」という思想が相対論の向かうべき方向を決めているのである。そのことを詳しく話すのは第3章以降になるだろう。

なぜこの二つの原理で何もかもうまく行くのかと聞かれても理由は良く 分からない。だから「原理」と呼ぶのである。原理という言葉は「ここを 議論の基点にするからそれ以上深くは聞いてくれるな」という意味で使わ れることがあるわけだが、今回がまさにその例だ。そして実際、今のとこ ろ、これで何もかもうまく行っているのである。

1.4 同時であるとはどういうことか

どんな速度で運動している人から見ても光の速さが変わらないという非常識なことを認めるならば、今まで普通に使っていた「同時」という概念は大きく変更を迫られることになる。しかし「同時」という今まで我々が何となしに使ってきた概念の方が間違っていたということはないだろうか。この際、光を基準にして、同時に関する概念を見直してみてはどうだろう。アインシュタインの主張の中心はまさにこの点にある。

アインシュタインはこう考える。今この場で私が考える「今」と、遠く離れた場所にいる人が考える「今」との間に、一体何の関わりがあるというのだろう。離れた地点で起きる事と、私の腕時計の針がある数字を指すのが同時かどうかというのは、人間が何らかの方法で決めることによって初めて意味を持つことなのだ。なぜ今まで誰もそれを決めて来なかったのだ?そこで、誰から見ても同じ速度である光を使って、次のようなやり方を提案する。A地点で静止している自分の時計と、遠くのB地点でやはり静止している友人の時計が合っているかどうかを確かめたい。そのためにはこうすればいい。0時にA地点からB地点に向かって光を発射する。B地点ではAから来た光を受けたらAに向かってすぐに反射させる。光は10時にA地点に返って来たとしよう。B地点にいた人が、光が来たのは5時だった、と言えば二つの時計は合っていることになる。もしずれていたらその分だけ直してもらえばいい。

て変わってしまうことになるだろう。互いの相対速度がその速度に近付けば近付くほど、その影響は大きく出る。ある人にとって同時であると思っていたものが、別の人にとっては同時ではない。そもそも「同時」なんていうのは遠く離れた点と自分のいる点との関係を人為的に結びつけようとしただけのものだったのだ。

一気に話を元に戻すが、そんな危うい概念を使って、人は物の長さを測る。他にいい方法はなく、そうせざるを得ないのだ。ある人は「両端を同時に測った」と主張する。しかし別の人は「あなたが測定に使った両端のデータはそれぞれ別の時間に測ったものです」と主張する。

果たして運動する物体の長さは本当に縮んでいるのだろうか。それとも 単なるデータの読み間違えだろうか?

人は同時に両端を見ることはできない。ただ、しばらく後で手に入れた 情報を一つに合わせて分析すると、物体が縮んだと推論せざるを得ない結 果になっているというだけである。誰が本当の姿を見ているかなんてこと は誰にも言えない。我々は自分のいる一点のみを手探りで確認しながら移 動して、宇宙全体を推測するだけの哀れな存在なのだ。

---- 趣味の提案 --

新しい同時の概念を受け入れる限りは、運動しているときの方が止まっていたときよりも物体の長さが短くなっていると結論せざるを得ない。このことを自力で確認してみてはどうだろう。ローレンツ変換を使って計算してみてもいいが、それ以外でもいい。説明のやり方を自分で見つけるのが楽しいのだ。

1.13 なぜ光の速さを越えられないのか

自分から見て右手方向と左手方向に2基のロケットがそれぞれ光速の90%で飛び去ったとする。自分から見て、2基のロケットの相対速度は光速の180%である。これは相対論に反する事実なのではないかという質問を

たびたび受けるのだが、これは相対論的には何の問題もない。

相対論が問題にしている相対速度というのは、一方のロケットの視点に立ったときの、もう一方のロケットの速度のことである。これは180%にはならない。自分を基準にしたとき、光速以上で移動する物体は宇宙には一切無いらしいということがローレンツ変換から導かれるのである。簡単なのでやってみせよう。(ただし、最近では宇宙自体が膨張しているらしいことが分かってきたので、その場合には相対速度が光の速さを超えることもあり得る。これは特殊相対論が間違っていたわけではなくて議論の適用範囲外の現象が加わっているのだと考えてもらいたい。)

まずは場面をしっかり設定しておこう。O さんから見て、2 基のロケット A, B がそれぞれ v_A , v_B という速度で互いに反対方向へ進んでいるものとする。もう少し具体的に、ロケット A が x 軸上をマイナスの方向へ、ロケット B がプラスの方向へ向かっているものとしよう。これは O さんの視点ではロケット B が、T 秒の間に、 v_BT だけ移動するということである。しかしこれは飽くまでも O さんの使っている (x,t) という座標系を使った視点だ。t=0 のときに三者が同じ位置に重なっていたと考えると計算しやすくて、T 秒後のロケット B の位置は次のように表せる。

$$t = T$$
$$x = v_{\scriptscriptstyle B} T$$

これをローレンツ変換を使って、ロケット A の視点 (x',t') に移してやればいいのである。ローレンツ変換は次のように表せる。

$$t' = \frac{t + v_A x/c^2}{\sqrt{1 - v_A^2/c^2}}$$
$$x' = \frac{x + v_A t}{\sqrt{1 - v_A^2/c^2}}$$

22 ページに書いたのとは少し符号が違うが、これはロケット A が O さんから見て $-v_A$ で飛んでいるから v のところに $-v_A$ を代入したのである。

これを使って変換してやるとロケットBの位置は次のようになる。

$$t' = \frac{T + v_A v_B T/c^2}{\sqrt{1 - v_A^2/c^2}}$$
$$x' = \frac{v_B T + v_A T}{\sqrt{1 - v_A^2/c^2}}$$

ロケット A の視点では、ロケット B は t' 秒の間に x' だけ移動したことになるのだから、x'/t' を計算してやれば、それがロケット B の速度である。

$$\frac{x'}{t'} = \frac{v_A + v_B}{1 + v_A v_B/c^2}$$

この結果が「**速度の合成則**」と呼ばれる有名な公式だ。 v_A, v_B が光速 c に比べて極端に小さい場合には分母は 1 となり、普通の足し算になる。日常ではその状態を体験しているわけだ。そしてそれが当たり前だと勝手に思い込んでいる。この式を初めて見る人は色々いじって楽しんで欲しい。光速以下の速度を幾ら足し合わせても光速を越えることがないことが分かるだろう。

以上の話から、物体をどうしても光速以上に加速できない理由も分かってもらえるだろうか。同じことなのだ。我々は物体を加速しようとすれば、力を加えて徐々に速度を上げて行くしかない。ロケット A から x 方向にミサイルを発射して、速度 v_A にまで加速したとする。そのミサイルは O さんにとっては止まって見えるだろう。そのミサイルの中にはさらに強力な加速装置が仕組んであって、そこからさらに速度 v_B を加える素晴らしい加速をしたとしよう。それでも A から見れば、これは決して光速を越えることがないのだ。

自分が物体を光速以上に加速させるのは不可能。誰かが代わりに加速させたとしてもやはり同じことなので不可能。しかし、だからと言って、光速以上の物体がこの世に絶対に存在しないとまで言えるだろうか。誰かが徐々に加速したわけではなくて、最初から光速を越えているような物体があったらどうだろう?それは物体ではなくて光のようなものかも知れないが、実は相対論はそのような存在を否定できないのである。

否定できない以上はそういう粒子がひょっとするとあるかも知れないと 言うので、すでに「**タキオン**」という名前だけは付けられている。これは ギリシャ語を元にした造語であり、「速い粒子」くらいの意味である。残念ながらこれまで見つかったことはないし、存在する証拠もない。もしそういうものがあって制御できるようなものであったなら、工夫次第で過去に信号を送れることも分かっている。それでは因果律が成り立たなくなるので、そのようなものは無いだろうと考える人の方が多い。

タキオンが存在しないだろうと考える人が多いもう一つの理由は、その質量が虚数になることが導かれてしまうからだ。その理屈はすぐに示せる。幾つか前の節で $E=\gamma mc^2$ という式を導いて、運動する物体のエネルギーは静止時の γ 倍になることを説明した。(43 ページ)その式の γ の部分を左辺に移動させて両辺を 2 乗すれば説明の準備は完了だ。

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)E^2 = m^2c^4$$

ここで、もしv>cならば左辺は負となる。そのために右辺にある m は虚数でないといけないわけだ。ちなみに、m>0ならば、必ず v<cでなければいけないし、もし m=0 であるならば、光に限らず v=c でなければならないというのもこの式で説明できてしまう。

さあ、虚数の質量とは何だろうか? そんなものに果たして意味があるの だろうか。

科学者たちは一般の人が考えるよりも遥かにロマンチストであり、可能性のあるものはどんなに「在り得なさそう」であっても徹底的に探し求めるのである。そしてすでに散々努力を払ってきているので、素人が安易な考えで「こうしてみたらどうか」などと提案しようものなら、「そんなことくらいはとっくに考えてみた」と苛立ちたくもなるのである。そのせいで彼らは石頭のリアリストのように思われてしまっているのだろう。

参考文献・謝辞

この本を書くに当たって参考にさせて頂いた教科書を以下に挙げる。これらの本からは本当に良い助けを得た。これらは読者にもお勧めしたいものばかりである。

アインシュタイン 著・内山龍雄 訳「相対性理論」 岩波文庫(1988)藤井保憲 著「時空と重力(物理学の廻廊)」 産業図書(1979)内山龍雄 著「相対性理論(物理テキストシリーズ 9)」 岩波書店(1987)Gerard 't Hooft 著「Introduction to General Relativity」Rinton Press, Inc.(2001)松田卓也・木下篤哉 著「相対論の正しい間違え方」 丸善(2001)吉田伸夫 著「宇宙に果てはあるか」 新潮社(2007)砂川重信 著「理論電磁気学(第 3 版)」 紀伊国屋書店(1999)

私はこれら以外にも色々な教科書から良い影響を受けており、それらの著者たちにも同様に感謝している。しかし今回の執筆に当たっての直接の関係は薄いと判断し、誠に勝手ながら省略させて頂くことにした。出版されている教科書の他にも、ネット上で閲覧できる資料、百科事典、辞書等にも大変お世話になった。それらを用意して下さった方々にも感謝している。また、メールや掲示板にて私の誤りを直して下さったり、一緒に議論して知恵を下さった方々にも感謝している。その他、メールや葉書、手紙、または心の中で応援して下さった沢山の方々にも感謝している。

索引

■あ ■	共変微分153
アインシュタイン	共変ベクトル83, 86
― テンソル 130, 205	局所的座標変換146
—の省略記法91	曲率186
—方程式 130, 213	虚数時間25
一般相対性原理 147, 212	近日点移動239
因果律29, 50	クリストッフェル記号…130, 153
宇宙項214	第1種—154
宇宙定数214	第 2 種—154
宇宙論的赤方偏移248	クロネッカーのデルタ記号…106,
運動質量43	161
運動量密度115	計量97, 130, 132
エーテル7	計量条件185
エネルギー運動量テンソル‥116,	計量テンソル99
130	ゲージ変換125
エネルギー密度115	光速不変の原理 11, 147
	光秒23
■か ■	固有時30
外部解 222	混合テンソル94
ガウス曲率199	_
ガリレイ変換11, 59	■さ■
慣性系12	座標変換53
慣性質量142	時空図63
基底ベクトル164	斜交直線座標54
軌道長半径241	重力質量142
共変形式 111, 160	重力赤方偏移248
共変テンソル94	重力場の方程式 130, 213

主曲率200	■な■
縮約89, 94	ナブラ105
シュバルツシルト解219	ニュートン
シュバルツシルト半径226	―の運動方程式 56, 67, 109,
常微分66	206
スカラー曲率 135, 199	ニュートン近似208
スカラー量85	■は■
静止質量43	■は■ 反変テンソル······93
静電ポテンシャル121	反変ベクトル······83, 84
赤方偏移247	万有引力149
接続係数163	ビアンキの恒等式203
線素98	微分演算子
全微分66	ブラックウォール 258, 261
相対性原理11, 34, 59	平均曲率200
相対論的質量43	ベクトル・ポテンシャル 121
測地線131	偏微分66
測地線の方程式 130, 175	ポアッソン方程式 211, 215
速度の合成則49, 69	
	■ ま ■
■た■	マイケルソン・モーリー
大域的座標変換146	—の実験 ·······7, 9
タキオン49	マクスウェル方程式 75, 120
縦質量42	見かけの力58
ダランベール演算子106	ミンコフスキー空間 25, 104
ダランベルシャン \cdots 106	ミンコフスキー計量104 無限小線素98
直線座標156	無限小隊系90
直交直線座標54	■ や ■
デカルト座標54	ヤコビの関係式203
電荷の保存則81, 124	横質量42
電磁ポテンシャル122	4 元運動量 36, 115
等価原理212	4 元速度32
ドップラー効果248	4 元電流密度122

4 元力110
■ ら■
ラプラシアン 106, 211
ラプラス演算子106
リッチ・スカラー 135, 199
リッチ・テンソル 135, 195
リーマン曲率テンソル189
リーマン・テンソル137
リンドラー座標254
ローレンツ5
—係数24, 32
—収縮9
—変換10, 11, 22
—力83
ローレンツ (ローレンス)
一 ゲージ 126, 128
—条件 126, 128

【著者紹介】

広江 克彦(ひろえ かつひこ)

1972 年生まれ。岐阜県出身。 静岡大学理学部物理学科卒。 同大学院修士課程修了。 情報家電メーカーの開発部に勤務の傍ら、 物理学を解説するウェブサイト 「EMANの物理学」を趣味で運営してきたが、 本書を書き上げた直後に退職。 フリーでの活動を開始する。

趣味で相対論

2008年6月16日

2012年11月27日 2016年4月5日 初版発行 初版 2 刷

初版2刷 初版3刷

検印省略

者 広 江 克 彦
^{発 行 者} 柴 山 斐 呂 子

発行所 —

〒102-0082 東京都千代田区一番町27-2

理工図書株式会社

電話 03(3230)0221(代表) FAX 03(3262)8247 振替口座 00180-3-36087 番 http://www.rikohtosho.co.jp

© 広江克彦 2008年 Printed in Japan

ISBN 978-4-8446-0730-4 印刷・製本 丸井工文社

〈日本複製権センター委託出版物〉

*本書を無断で複写複製(コピー)することは、著作権法上の例外を除き、禁じられています。本書をコピーされる場合は、事前に日本複製権センター(電話:03~3401~2382)の許諾を受けてください。 *本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無防複製は著作権法上の例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも著作権法違反です。

自然科学書協会会員★工学書協会会員★土木・建築書協会会員