

SGC ライブラリ-49

ソリトンと物理学

戸田 盛和 著

サイエンス社

まえがき

もう 40 年も前のことであるが、著者は非線形格子（やや不正確であるがソリトンといってもよい）の研究に熱中し、それによって面白いように短期間につきつぎと困難をのりこえて目標とした成果を挙げることができた。いわば精神的に高揚した状態にあったのである。それがどのようにしてもたらされたのか、それはわからないが、その頃のことを記しておくことも研究環境を考えたりするのに役立つかもしれないという気がする。

1960 年代の頃、著者たちは「振動子グループ」とか「格子グループ」とか略称された研究グループをつくって理論物理学の研究活動をおこなっていた。その趣旨を一言でいえば「厳密で基礎的な理論を目標とする」というようなことであろうか。不確かな近似計算を正し、すぐに役立つテーマや流行のテーマを追うよりも研究者が自分で疑問とする深刻な問題を追求することなどともいえると思う。これを京都大学の基礎物理学研究所で提案し、このグループを結集させたのは京都大学の寺本英教授であった。具体的な研究課題の一つとして著者が考えたのは力学の時間的可逆性と熱的な平衡状態への近接が両立することを、厳密な扱いができる格子模型を用いて明白に証明するという問題であった。そこで結晶格子の熱伝導を考えると、不純物や格子欠陥のほかに格子振動の非線形を考えなければならないことになる。

1 次元力学系を伝わる非線形の波としてはすでに 19 世紀に発見されている浅水波の孤立波（ソリトン）があり、これを記述する偏微分方程式は非線形格子振動の方程式に似ている。このように対象を煮つめた末に著者は厳密な解（周期解やソリトン解）をもつ非線形格子を発明した（1967）。これは多自由度の可積分力学系の新しい発見としても注目された。

以上が第 1 編の内容のあらましである。

第 2 編では著者が発明した非線形格子（戸田格子）の運動を数値的に積分したアメリカの J. フォード（Ford）の結果について述べる。これによって明らかにされたなめらかな軌跡は戸田格子の可積分性を明白に証明するものだったので、これに触発された H. フラシュカ（Flaschka）などが戸田格子の解析的な積分方法を発見するのに成功した（1974）。これが契機になってその後いろいろの積分方法が見出され、戸田格子以外の可積分な非線形波動も発見されるにいたった。

このように第 2 編はほとんどが外国でなされた仕事である。

第 3 編「物理学とは何か」（『数理科学』2002 年 5 月号～2004 年 5 月号から転載）では多くの物理学者の見解や生活などについて述べている。物理といっても学者ごとにちがうものであることを受けとってほしい。またどのような環境がどのような研究者を育てるのに適したものであろうかと考える読者もあるだろう。そういうことを若い人には学んでほしいし、よりよい世の中をつくるのに寄与してほしい。

1967 年秋から 68 年春までの半年間、著者は日本学術振興会の援助を得て京都大学に滞在することができたが、これも寺本さんの尽力によるものであった（彼は 1996 年 2 月に亡くなった）。

後に京大から九州大学の数理生物学教室へ移られた松田博嗣さんには研究のみならずいつも相談相手になっていただいた。また京都工芸繊維大学の武野正三さんは研究グループに絶えず活力を与えてくれ

たし、さらに多くの研究室の方々にいろいろお世話になり、いろいろと教えていただいた。そして一緒に学び楽しくすごした当時の若い大学院生諸君にも厚くお礼をいいたい。振動子グループからは相当多くの研究者が巣立っていった。器用に巣立った人、いくらか不器用に巣立っていった人など、今でも彼らのことをなつかしく思い出すことがしばしばである。

本書の出版ではサイエンス社の伊崎修通さんに御めんどうをかけた。期限をつけても中々それに仕上がらない著者に対していつも根気よく待ってくれたのは大変有難かった。

2006 年 5 月

戸田 盛和

目次

まえがき

i

第1編 ソリトンの歴史 1

第1章 ソリトンの発見 2

1.1 運河のほとりで (1834)	2
1.2 浅水波の KdV 方程式 (1895)	4
1.2.1 KdV 方程式とその解	4
1.2.2 孤立波解と周期解	4
1.3 Fermi らの再帰現象 (1955)	5
1.4 ソリトンの発見 (1965)	8
1.5 KdV 方程式の解法の発見 (1967)	10
1.6 バーガーズ方程式	12

第2章 ソリトンの固有値 15

2.1 ソリトン解	15
2.1.1 ソリトン解	15
2.1.2 2 ソリトン解	16
2.1.3 標準的な 2 ソリトン解	16
2.2 ソリトンの固有値	17
2.2.1 KdV 波の固有値	17
2.2.2 ソリトン波の固有値	18
2.2.3 2 ソリトンの固有値	18
2.2.4 N ソリトン波の固有値	19
2.2.5 固有値が等間隔の場合	19
2.2.6 固有値は保存量である	20
2.3 エネルギー伝達 (1967)	20
2.4 非線形破壊	22

第3章 格子振動グループの発足 24

3.1 グループの始まり	24
3.1.1 浅水波の KdV 方程式	27
3.1.2 波と粒子とソリトン	27

3.1.3	ブラウン運動の模型	28
3.2	熱伝導の問題	29
3.3	1次元格子の局在振動	31
3.3.1	一様な連続体の波動	32
3.3.2	規則格子	32
3.3.3	2原子規則格子	33
3.3.4	局在振動	34
3.3.5	無秩序格子の振動スペクトル	35
3.4	1次元双対系の定理	36
3.4.1	局在振動と双対系	36
3.4.2	最も簡単な双対系	37
3.4.3	一般的な双対性	38
3.5	非線形格子の双対ハミルトニアン	40
3.5.1	非線形の場合の運動方程式	41

第2編 ソリトンの数理 43

第4章 非線形格子の理論 44

4.1	可積分な非線形格子の発見	44
4.1.1	周期解の発見	45
4.1.2	周期波とソリトン	48
4.2	格子ソリトンの衝突	49
4.3	再帰現象	54
4.4	指数型ポテンシャル	56
4.4.1	格子振動の模型	57
4.4.2	非線形のはしご型回路	57
4.4.3	最隣接相互作用	58
4.5	ソリトンのエネルギーなど	60

第5章 非線形格子の積分 62

5.1	1960年代を超えて	62
5.2	力学系のカオス	64
5.2.1	可積分系	64
5.2.2	アトラクタ	65
5.2.3	初期値敏感性	67
5.3	エノン・ハイレス系	67
5.3.1	ポアンカレ写像	67
5.4	可積分性のテスト	69

5.4.1	3 次の非線形項がある場合	70
5.4.2	相互作用が指数型の場合	71
5.4.3	固定端の場合	72
5.5	指数格子の保存量	73
5.6	多数のソリトンを含む解	77
5.6.1	KdV 方程式の解	77
5.6.2	指数格子の多ソリトン解	79
5.7	テータ関数	80
5.7.1	周期波とソリトン	80
5.7.2	リーマンのテータ関数	81
5.7.3	周期的指数格子の一般解	82
付録	楕円関数	84
1	sn 関数, cn 関数, dn 関数	84
2	ヤコビの楕円関数の微分	88
3	積分公式	89
4	加法定理	90
	これからソリトンを学ぶ人へ	92
第 3 編	物理学とは何か	93
第 1 章	物理と非物理 (ギリシャ科学)	94
第 2 章	自然 (ニュートン力学)	100
第 3 章	社会 (科学がきらわれる理由)	106
第 4 章	哲学 (理論の美しさ)	112
第 5 章	歴史 (地球の年齢)	118
第 6 章	技術 (科学と技術)	124
第 7 章	情報 (熱力学の基礎)	130
第 8 章	心 (創造と意志)	136
第 9 章	宗教 (自然界の階層)	142
第 10 章	教育 (薄膜の物理)	148
第 11 章	文化 (何もない空間)	154
第 12 章	人間 (波と粒子)	160
第 13 章	生命 (生命とは何か)	166
第 14 章	倫理 (進化と退化)	172
第 15 章	宇宙 (相対性理論)	178
第 16 章	時空 (膨張宇宙)	184
第 17 章	エピローグ	191

コラム

KdVの2ソリトン解…11／クルスカル…12／ザブスキー…13／熱化遷移…23／大学院…26／ラグランジュ…29／ルビン…30／フラシュカ…78／可積分力学系…81／デンマークで…82／M. カッツ…83／プラス・マイナスは約束ごと…99／ビリアル定理…105／物質波…111／コモ湖の思い出…123／遠達作用と近接作用…129／磁気は電流によるもの…135／大学卒業の頃…141／プランク定数…165／すべての法則は近似か…171／科学の危うさ…183／レイリー卿…190／

第3編は、「数理科学」(月刊)の連載「物理学とは何か」に掲載されたものを再編集し、これに書き下ろしを加え、構成されています。再録したものについては、増補・訂正を加えてありますこととおことわりいたします。

初出一覧

〈=は原題名〉 () は掲載年月号.

第1章	物理と非物理(ギリシャ科学)〈=プロローグ—物理と非物理〉	(’02.05)
第2章	自然(ニュートン力学)〈=物理と自然〉	(’02.06)
第3章	社会(科学がきらわれる理由)〈=物理と社会〉	(’02.08)
第4章	哲学(理論の美しさ)〈=物理と哲学〉	(’02.09)
第5章	歴史(地球の年齢)〈=物理と歴史〉	(’02.11)
第6章	技術(科学と技術)〈=物理と技術〉	(’02.12)
第7章	情報(熱力学の基礎)〈=物理と情報〉	(’03.02)
第8章	心(創造と意志)〈=物理と心〉	(’03.03)
第9章	宗教(自然界の階層)〈=物理と宗教〉	(’03.05)
第10章	教育(薄膜の物理)〈=物理と教育〉	(’03.06)
第11章	文化(何もない空間)〈=物理と文化〉	(’03.08)
第12章	人間(波と粒子)〈=物理と人間〉	(’03.09)
第13章	生命(生命とは何か)〈=物理と生命〉	(’03.11)
第14章	倫理(進化と退化)〈=物理と倫理〉	(’03.12)
第15章	宇宙(相対性理論)〈=物理と宇宙〉	(’04.03)
第16章	時空(膨張宇宙)	(新 規)
第17章	エピローグ	(’04.05)

各編題字・装画=著者

第 1 編

ソリトンの歴史



第 1 章

ソリトンの発見

ふつうの波の理論では、波の重ね合わせの原理が出発点になる。簡単な重ね合わせの原理に従わない波，すなわち非線形波動の研究が粒子性をもった波，ソリトンの発見につながった。100 年以上のソリトンの発見の歴史を振り返る。

1.1 運河のほとりで（1834）

ソリトンの起源をたずねると、それが物理学からきたものではなく、もちろん数学からきたものでもなく、むしろ工学者のちょっとした発見から由来したものであることがわかる。

19 世紀の初めスコットランドのエジンバラにラッセル（John Scott Russell, 1808–1882）という船舶工学者がいた。彼は 16 歳でグラスゴー大学を卒業し、その後エジンバラ大学で教えて非常な成功を収めたということである。運河会

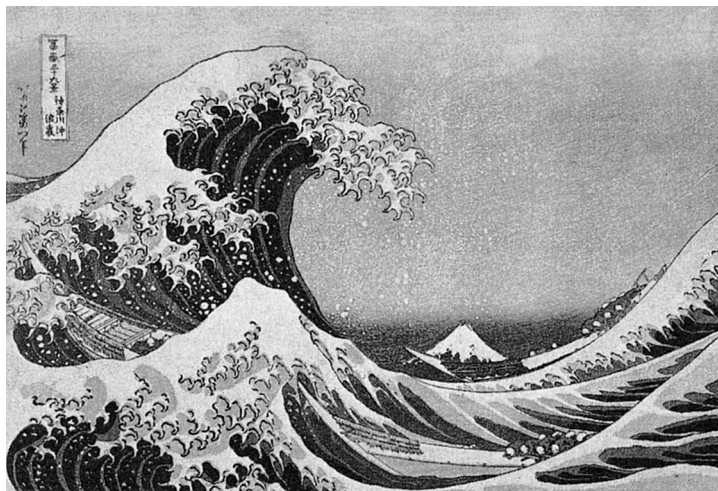


図 1.1 葛飾北斎「富嶽三十六景・神奈川沖浪裏」.

第 2 章

ソリトンの固有値

2.1 ソリトン解

N 個のソリトンのみからなる解を N ソリトン解と言う．KdV 方程式を

$$\boxed{\frac{\partial u}{\partial t} + 6u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0} \quad (1.10)$$

としたときの N ソリトン解は

$$\boxed{u = 2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \log \det B_N} \quad (1.11)$$

と書ける．ここで B_N は N 行 N 列の行列

$$B_N = \left(\delta_{ij} + \frac{c_i c_j}{\kappa_i + \kappa_j} e^{\eta_i + \eta_j} \right). \quad (1.12)$$

ただし

$$\eta_i = \kappa_i x - 4\kappa_i^3 t$$

であり $\det B_N$ はその行列式である．また $\delta_{ii} = 1$, $\delta_{ij} = 0 (i \neq j)$ はクロネッカーの δ 関数, $\kappa_i (i = 1, 2, \dots, N)$ は i 番目のソリトンの強さ (大きさ) を表すパラメータ, c_i はソリトンの位置に関係したパラメータである．

2.1.1 ソリトン解

$$u(x, t) = 2\kappa^2 \operatorname{sech}^2(\kappa x - 4\kappa^3 t + \delta) \quad (c = e^\delta).$$

ただし $c = e^\delta$ と書いた．このソリトンは

$$B_1 = \cosh(\kappa x - 4\kappa^3 t + \delta),$$

あるいは

$$B_1 = 1 + \frac{c^2}{2\kappa} e^{2(\kappa x - 4\kappa^3 t)},$$

あるいは

第 3 章

格子振動グループの発足

1960 年代の初めの頃に戻ろう。その頃、結晶格子の振動をモデル化して、不純物を含む体系の局在振動や非線形波動を厳密に扱うことによって数理論理学に寄与しようとする研究グループが生まれ、10 年以上にわたって著しい成果を挙げることができた。

3.1 グループの始まり

物理の理論では、自然を記述する理論式があり、これを解くという問題がある。理論式は自然をモデル化したもので、そのためにある程度の省略、あるいは近似を含む。また理論式を解くときに近似が入ることが多いが、これらのための不確かさはできるだけ避けたいものである。

1950 年代には、少量の不純物を加えることによって半導体の性質を微妙に変える研究が盛んであった。これを遂行するには、電子準位のギャップにできる不純物準位に関する正確な理論が必要であった。この場合、ある近似解によれば不純物は電子帯の端をぼやけさせることになるが、電子計算機を用いた結果によれば、不純物準位のスペクトルには鋭いピークをもつことが期待された。

半導体の電子状態の不純物による変化をモデル化した理論は、不純物を含む結晶の格子振動の理論によく似ている。そして後者のほうがより簡単であることが知られている。

その頃、イギリスのディーン (P. Dean) たちは、当時盛んになり出した電子計算機を用い、不純物の入った格子の固有振動のスペクトルを厳密に調べた。その結果によれば格子振動は軽い不純物によって生ずる鋭いスペクトルをもち、振幅自身が軽い不純物のところで鋭い山をもつことが示された。このような局在振動は、2 次元や 3 次元の格子よりも 1 次元の格子において著しく現れる。

一般に摂動計算に付随しがちな不確かさを避けて、厳密な取扱いを研究しようとする動きもあった。それは当時 1950 年代に電子計算機やそれによって得

第 2 編

ソリトンの数理



第 4 章

非線形格子の理論

モデル化された非線形波動の理論的研究から，指數的相互作用をもつ格子モデルが発明された．

4.1 可積分な非線形格子の発見

1 次元格子のモデルとして，隣接粒子間だけの相互作用が働いている様な体系を考える．粒子の質量はすべて等しく m であり， n 番目の粒子の変位を x_n とする（図 2.1 (a)）． n 番目の粒子と $n-1$ 番目の粒子の間の相互作用のポテンシャルを $\phi(x_n - x_{n-1})$ とすると力は $\phi'(x_n - x_{n-1})$ であるから，運動方程式は

$$m\ddot{x}_n = -\phi'(x_n - x_{n-1}) + \phi'(x_{n+1} - x_n) \quad (2.1)$$

と書けるが，相対変位

$$r_n = x_n - x_{n-1} \quad (2.2)$$

を用いると

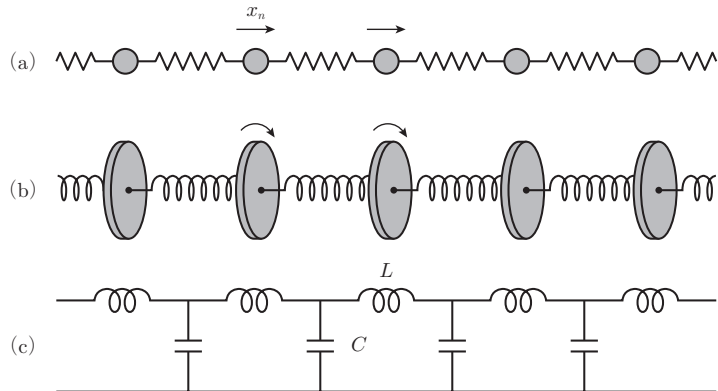


図 2.1 格子模型.

第 5 章

非線形格子の積分

5.1 1960 年代を超えて

1960 年代の終りの頃は、大学にとっても学界にとっても内外多事な時代であった。1959 年から 1960 年に全国規模で展開された安保闘争（日米安全保障条約改定に対する反対闘争）があり、ことに 1960 年 5 月から 7 月にかけては連日数万人がデモ行進し、国会を包囲して学生の死者も出た。この闘争に対する大学の対応などから学生がいくつかのセクトに分かれて争いを繰り返すようになった。大学の至る所にアジテーションのビラが張られ、アジ演説、投石、火炎ビンなどの騒ぎも稀でなかった。今の学生には想像もつかないことであろう。

初めは米国との安全保障条約の改定反対が焦点であったが、物理学会関係では軍事研究に対する反対だけでなく、米軍に関係のある資金が研究や国際会議に流れることに対する反対にも広がり、いわゆる学園紛争に火がついたのであった。日本物理学会や応用物理学会関係の関係する国際会議でアメリカの学者が米軍機に乗って来日することに対する反対なども問題になり、物理学会の委員長が辞職する騒ぎまで起こったのは 1968 年のことであった。

京都から東京へ戻った私の所へ大阪大学の伊藤順吉さんから突然の電話があり、辞任した前委員長に代って委員長になるので副委員長を引き受けてほしいと依頼された。

当時の日本物理学会は委員会が決定権をもち、委員長は委員会の意見を取りまとめるだけの権限しかもたなかった。そのため、例えば研究集会に反対する集団が会場に押しかけて会を阻害しようとするなどの事態が起こっても学会は急な対応ができない。それで最初の仕事は委員長制をやめて、会長が決定権をもつ学会にするために定款を改めることであった。学会が騒ぎを収拾できなければ、学会がとり潰されるおそれもあった。そのような状況だったので、それからは学会を再出発させる仕事に数年間参加しなければならなかった。

それに加えて数年前から筑波学園都市構想というのが出てきて、私のいた東

付録

楕円関数

ヤコビの楕円関数に不慣れの読者のために，簡単な解説と公式数を記すことにする．すでに慣れている人は飛ばして読み，話の概要だけで十分な人は省いて見て下されば結構である．

1 sn 関数，cn 関数，dn 関数

ヤコビ（Jacobi）の楕円関数について基本的なことを記しておこう．この関数は三角関数を拡張したものと考えることができるので，まず三角関数から始めることにする． u の関数

$$x = \sin u \tag{1}$$

を微分すると

$$\frac{dx}{du} = \cos u = \sqrt{1-x^2} \tag{2}$$

となる．したがって

$$u = \int_0^x \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}}. \tag{3}$$

ここで u は x の関数，すなわち (1) の逆になっている．これを

$$u = \sin^{-1} x \tag{4}$$

と書こう． $\sin^{-1}$ （アークサイン）は $\sin$ の逆関数を表す．

今 (3) を拡張して積分

$$u = \int_0^x \frac{dx}{\sqrt{(1-x^2)(1-k^2x^2)}} \tag{5}$$

を考える（ここで k は 0 と 1 との間の定数である）． x と u の関係を

これからソリトンを学ぶ人へ

大学1年生のとき、物理数学演習とかという授業があった。午後の時間で先生はついているのだけれど、ほとんど時間に制限のない勉強時間であった。教室の外へ出ると近くに第2食堂という学内食堂があって、授業の途中でお茶を飲んだり、軽食をとることもあった。そしてまた教室へ戻ってきて演習問題と取り組んだりする。先生と一緒に考えて込んでしまうこともある。夕方になって、学生も先生も飽きてしまったら、解答が得られないまま来週また続きをやりましょうということで散会してしまうこともあった。

もちろん参考書を見たり、公式集を見たりするのは自由であるが、先に答を教えてくれれば証明しやすいだろうと思ったり、参考書に似た問題や答がないかと探したりするのはよくない。人に頼らずに自分で解法を工夫しなさいと先生にくぎを打たれた。高校までの授業とは違って、むしろ自分で疑問を発見し、自分なりの解決方法を見出す習慣を身につけるようにしなさいというのである。

大学を卒業してからあとで気がついたのであるが、これは研究者が本を読んだり、考えたり、実験したりして、そこから新しい疑問、問題点を発見し、さらにみずから解決方法を工夫する努力と同じである。そういう努力をしても問題が解けない場合が多いかもしれない。しかし努力した時間は必ずその人の実力になるに違いない。

数学や物理の問題の解法が一つしかないと思うのは全く間違いである。たとえばピタゴラスの定理（3平方の定理）の証明方法は10通り以上もある。量子力学でもシュレーディンガーの量子力学だけでなくハイゼンベルクの量子力学もあり、ディラックの、あるいはファインマンの量子力学がある。一つの解法が見出せたら、さらに別の証明法を見出すこともできるだろう。それができたら解決のプロセスを楽しむことができるようになるに違いない。もしもそれが今までになかった新しい解法であったりしたら、それは努力した人の定理と呼ばれるようになるだろう。そういうことはほんとにまれにしか起こらないだろうが、全く起こらないというものでもない。

ある先輩の先生から教えられたのであるが、「計算はていねいに書いて、計算まちがえをしたら消ゴムできれいに消して書きなおすのがよい」と言われた。ことに検算のときは計算を飛ばして早く結果を求めようとしたくなるが、それではかえって間違えてしまうことになる。ソリトンの式の計算はけっこう面倒なことが多いので気をつけなければならない。

第 3 編

物理学とは何か



第 1 章

物理と非物理 (ギリシャ科学)

1. はじめに

今から 100 年ぐらい前までは、物理学という学問を具体的に説明するのにあまり困難はなかった。ニュートン力学、音響学、弾性体の力学、流体力学、熱学、光学、電磁気学と言え、物理学の全分野がほとんどすべて尽くされたからである。20 世紀には相対性理論、量子力学が加わり、化学の基礎も物理学の中に包括された。

大学などで教えている物理学をまとめると、だいたい次のように言えるだろう。

『物理学の目標は、自然界の現象をできるだけ広く捉えることができるような基本法則を求めることである』

しかし、我々人類がこのような物理学、あるいはもっと広く言って、現在の自然観をもつようになったのは極めて最近のことであって、ここまでくまでに人類の自然観は何度も大きく変わってきている。多くの人が真理と思っている事柄でも、いつかは変えられることがあるかもしれない。たとえば 21 世紀には科学の主な興味は脳科学や人工知能などの研究分野に移り、物理学や数理科学の方法がそこへ集中されるようになることも考えられる。そうなれば生物と無生物との境界に対する考え方も変わり、物理学とは何かという問いに対する答えも大きく変わるだろう。

現在の物理学は無生物のほうへ大きく傾いているが、「自然科学」というときは動植物の科学も含

まれるとするのが一般的なようだ。誤解かもしれないが、physical という言葉に‘物理学の’と‘肉体の’と両方の意味があるのは同じ語源から出ているからなのだろう。科学思想事典によると、「自然」という言葉はギリシャ語の physis に発し、それがラテン語では nature と訳されたのだと言う (natural science は social science に対する言葉である)。

古代ギリシャにおいては、生命のある有機的自然が「自然」の原型であった。伊藤俊太郎：『現代科学思想事典』(講談社現代新書) から少し引用させていこう。

『(古代) ギリシャの自然観においては「自然」はなんら「人間」に対立するものではない。… 神ですらそこでは「自然」を超越するのではなく、それに内在的である。実際「万物は神々に満ちている」(タレス) …それは近代におけるように、われわれにまったく無縁で異質なこの自然に「実験」という「拷問」をかけ、それを「支配」するのではなく、われわれに親縁な同質者として、それを内から「直観」し「理解」することである。そしてそこに直観し把握さるべきものは外的現象としての自然の「法則」でなく、そのものの内的本質としての「形相」であった。…』

後に、運動に対するアリストテレスの考え方や、ニュートンに対するゲーテの批判について述べるが、そのときに上の文章を思い出してもらいたいの、少し長いが引用させてもらった。

第 2 章

自然 (ニュートン力学)

1. 力学的自然観

地球が誕生してから間もなく、日夜の周期があり、春秋の変化があることが、地球の地勢や生物の進化に大きな影響を与え出したに違いない。人類は季節の変化や星座の運行から自然界に存在する周期性を確実に意識するようになると同時に、これを生活に利用するようになった。しかしまた人類は大雨や日照りなどによる予期できない災害にも絶えず見舞われた。こうして人類は大自然の中には確実な秩序があると同時に予期できない無秩序があることを知らされたであろう。

科学技術によって自然を服従させるなどと言うことがあるが、虚心坦懐に考えれば自然はやはり偉大で、人知をはるかに超えた存在であることを認めざるを得ない。この点は有史以来少しも変わっていないと思うのである。

「自然」という言葉には、およそ 2 通りの意味がある。その一つは、「自然林」とか「ふしぎ大自然」というように、「人工的でないもの、人の手の加わっていないもの」という意味である（「自然科学」というときの「自然」は人文科学とか社会科学に対する言葉で、「自然界に存在する物体に対する科学」の意味である）。

別の使われ方は、たとえば「こう考えるのが自然だ」というように、「当然な」「あたりまえな」という意味である。この反対は「不自然な」ということになる。アリストテレスの時代には、学問は

自然界に存在する動植物と無生物を対象とする自然学と哲学（形而上学）および数学に大別された。ギリシャに限らず古代における関心は主に生物に向けられていたから、自然はみずから成長し変化するものとして捉えられていた。この時代の思想を実感するのはむしろ困難であるが、生物の成長はいくつかの異なる段階を経て変化するので、自然界においては周期現象はまれにしか起こらないと言えるだろう。この文脈から「あまり規則正しいのは不自然だ」などという言葉も理解できるように思う。

このように、アリストテレス時代の自然学の関心は主に生物学的な進化・成長にあったが、アリストテレスから約 100 年後にアルキメデスが出ている。彼はてこの釣り合い（てこの原理）と浮力の原理の発見によって知られる静力学の創始者であり、ニュートンなどによる微積分学の発見に先立つ無限小幾何学の創始者でもある。彼は古代ギリシャ科学のほとんど最後に輝いた偉大な星であり、その仕事は約 200 年をへだててパスカル、ガリレイ、ホイヘンス、そしてニュートンへとつらなって近代物理学を誕生させたのであった。その意味でアルキメデスは数理物理学史上に突出した特異点であったと言える。

17 世紀になるとコペルニクスの地動説とこれを精密化したケプラーの業績（ケプラーの 3 法則の発見）によって太陽系における惑星の運動の秩序が明白なものとなった。またこれと平行してガリ

第 3 章

社会 (科学がきらわれる理由)

1. 二つの文化

何年も前から理工系の学生の学力がひどく低下していると言われている。今回はこれに関係した事柄について述べよう。

第 2 次世界大戦が終わった 1945 年の頃のことである。爆撃にとことんまでやられた日本の都市の写真に、『科学なき国の末路』とか書かれたものがアメリカのニュース映画に出ていたらしい。レーダーすらもなかった日本があちらの科学力に負けたというのは確かに言いすぎでなかった。

そのためでもあろうが、戦争が終わってからの初めての国政選挙のときは、「科学振興」を宣伝する候補者が数多く見られた。しかしいつの世でも科学は選挙の票にならない（これは学力低下と同じ原因のことではないだろうか）らしく、次の選挙には科学の宣伝などまったく見られないようになってしまったのである。

小学校低学年ではほとんどすべての子供が科学的なことに興味をもっている。それが高学年に進むにつれて興味を失い、中学校では半分以上の子供がいわゆる理科嫌いになっていく。これらの数字は正確ではないにしても、だいたい正しいだろう。そして高校では物理は一番人気がないらしい。

テレビの番組「日本人の質問」(NHK) などを見るまでもなく、日本人の大人の理科的常識はだいたい小学校低学年程度であるようだ。すなわち理科的常識がまったくないということである。

しかし、これはとくに日本人の大人の欠点というわけでもないらしい。外国の人だってほとんど同様かもしれないのである。C.P. スノーが書いた有名な『二つの文化と科学革命』(みすず書房、1967) がある。ここで「二つの文化」というのは文系と理工系の文化のことで、これらの文化の間の大きなギャップが社会の正常な進歩を阻害していることをスノーは警告しているが、彼はこれをイギリスの伝統的な教育の欠陥に由来していると考えている。この本の中でスノーは、理工系の人だってシェークスピアは読んでいるが、文系の人には熱力学の第 2 法則も知らない、というような意味のことを言っている。スノーは言いすぎているようであるが、イギリスでも文系と理工系の間のギャップは大きいに違いない。そしておそらくイギリスや日本に限らず、大人の理科的常識が足りない状況は世界中どこでも似たようなものではないかと思う。もちろんイギリスと日本では、教養の内容に大きな差があった。イギリスの大学では、最近まで神学も重んじられていたようであるし、カリキュラムにはギリシャ語やラテン語があって、シェークスピアなどの文学も教養の中心にあったのではなかろうか。そしてこれらはすべての日本の大学の一般的な課程には入っていない。しかし現代は科学と技術の急速な拡大が、多くの国の大学に押し寄せているので、イギリスの社会も大きく変わってきたに違いない。だが、新聞などで時折見かける統計では、科学者と技術者のレベルが

第 4 章

哲学 (理論の美しさ)

1. 実践的な哲学へ

哲学 (philosophy) は何かと言うとむずかしいが、フィルは愛することソフィアは知のこと、したがって哲学は知を愛する、すなわち愛知を意味すると言えばわかりやすい。哲学は学問というものについての学問であるとも言えるだろう。学問の上の学問、最も高貴な学問という感じもある。具体的に言うと、人生とは何か、存在とは何か、時間とは何か、と考えることである。したがって物理学とは何かと考えることの全体も哲学であると言ってよいだろう。

哲学について特に学んだことはないが、何となく哲学というものにひかれて哲学のことを書いた本をいくつか読んでみた。ある本には、哲学とはこれこれであるといった定義はない。その人が考えたことがその人の哲学であるというようなことも書いてあった。しかし哲学も学問と言われるからには、いいかげんな考えは哲学と言えないのだろうが、哲学は合理的な考えであるとも言い切れない。合理性ということ自体が哲学の対象の一つであるかもしれない。哲学はかっちりとした範囲のあるものでなく、多分に主観的であるような気がする。しかし哲学論争などという言葉もあったようである。論争するとすれば、哲学的な命題に対しても正しいとか間違っているとか、白か黒か、真か真でないかという決着点がある場合もあるだろう。

学問のための学校の始まりとしてはプラトンによって創設されたアカデメイアが名高い。これはアテネの郊外につくられた。トロイ戦争の英雄アカデモスの所有地であったことからつけられた名前であると言われている。アカデメイアは約 900 年続き 6 世紀に廃された。ルネサンスの頃にイタリアで多くのアカデミーがつくられ、ガリレイやその弟子の活躍がプラトン主義の復活の場となった。

プラトンによれば哲学とは真の学問であり、プラトン主義とはプラトン自身の哲学思想を意味する。第 1 章 (物理と非物理) で述べたイデア論、理想主義、肉体に対する心の優位、哲学者が統治する理想国家、数学の重視などがプラトン哲学の中心であるとされている。プラトンの学問はいわば手でなく頭による学問であり、これが近代科学と異なる古代科学の特徴であったが、プラトン主義が近代科学に大きな影響をもっていることも確かである。

ロージャー・ベーコン (Roger Bacon, 1219 頃–1292 頃) は諸学問の成果の活用をめざし、数学を重視、光学の研究などを実践した。

実験の重要性をさらに強調したのはフランシス・ベーコン (Francis Bacon, 1561–1626) であった。主著『学問の進歩』(ノヴム・オルガスム) において彼は実験哲学を提唱した。それは次のように要約される。

(1) 知覚される事象をできるだけ多く提示す

第 5 章

歴史 (地球の年齢)

1. 歴史的イベント

物理学の勉強を始めるときには、力の釣り合い条件などを扱う静力学から入るのがふつうであるが、物理学の多くの対象は時間的に経過する現象である。そして歴史と違って自然科学で扱うのは実験や観察によって繰り返し経験できる現象に限られるというのがふつうである。そしてこれは自然科学が客観的であるための必要条件であるかのように言われることさえある。

しかし考えてみると、物理学を専門としない人も含めた大多数の人たちにとって科学的に最も興味深い関心事は「宇宙はどのようにして、いつ生まれたのだろうか」というような、繰り返し再現することはおろか、経験することもできない事柄が少なくない。「生命はどのようにして生まれたのだろうか」という問に答えることも物理的視野に入ってきている現在では、いわゆる繰り返し経験できない歴史的なイベントも物理学の対象から締め出すことができないことがあると思わなければならない。物理学は宇宙や生命の始まりのような歴史的イベントを対象にすることができるまで成長してきたということもできる。

ギリシャ時代には自然に秩序があることを前提にして自然現象を理解しようとした。この立場を越えて近代自然科学が生まれた時代には、何よりも事実を重んじる実証的立場がとられた。そして自然科学の成功により今や我々は繰り返しの不可

能な事柄にも自信をもって科学理論を押し進めようとしている。これが成功するか否かという点は議論の分かれるところであるが、このような自然科学の変遷は自然科学自身が歴史の産物であることを反省させるものである。

それはさておき、科学自身が「自然界の歴史」と大きく関わった有名なイベントがいくつかあった。その一つは地球の年齢の問題である。

2. 地球の年齢

19 世紀末になっても、地球の年齢を推定する物理的な方法はまったく見つかっていなかった。その頃の手掛りは地質調査による方法がほとんど唯一のもので、「地層が堆積していると思われるところでは、下の地層は古く、上の地層は新しいに違いない」というようなことであったらしい。そして神が天地を創造してから高々数千年程度しか経っていないと思われていたので、ヒマラヤの高い山地で貝の化石が発見されたりすると、それを説明することもできなかったという話である。

太陽や地球の年齢を物理の理論で初めて推定したのはイギリスのウィリアム・トムソン (W. Thomson, 後のケルビン卿 (Lord Kelvin) 1824-1907) であった。現在では太陽や地球内部のエネルギー源は主に原子核エネルギーであることが知られているが、これを知らなかったトムソンは、太陽熱の起源として重力によって太陽が収縮することによって位置エネルギーが熱に変わる現象を考え、

第 6 章

技術 (科学と技術)

1. ギリシャ時代の技術

科学の研究には種々の機械、器具が使われ、機械、器具の改良、発明には科学で得られた知識や技術が使われる。こうして科学と技術は互いに関連しながら発展してきた。科学の理論、予言を確かめるために高度の技術が要求される。こうして理論と技術との間にはニワトリと卵の間のような関係がある。エジプトの大ピラミッドを建てるときには、てこや坂道のような簡単な技術しか用いられなかったらしい。車輪のついた荷車がシリアなどに現れた紀元前 3000 年の頃には、帆のあるエジプトの舟が地中海を航行していたということである。製鉄の技術が広まったのは紀元前 1100 年以後で、これによって農具などが発達し生活は著しく向上した。

こうして技術上の進歩はあったが、学問的な進展はほとんどまったくなかった。たとえば紀元前 6 世紀頃のギリシャのアテネでは輸出用の陶器が成形、紋様描き、窯焼きをそれぞれ専門とする奴隷によって作られていた。重労働にも奴隷を使うほうが機械を設計して組み立てるよりも簡単で安上がりである。手の仕事もそれを監督する仕事も奴隷の役目だったので上の階級の市民から蔑視された。そのため支配階級は技術に無関心であり、技術をもった奴隷は技術の改良をする時間をもたなかった。この時期の技術の進歩をはばんだ第 2 の原因は、地中海世界が多数の小都市国家に分かれ

ていて、それが絶えず戦争を繰り返していたことである。そのためにギリシャが衰えたところにアレキサンダー大王（紀元前 356–323）がマケドニアから出てきて、ギリシャ世界を統一し拡大したが、大王が死ぬとその領土はいくつかの帝国に分かれ、エジプトに作られた都市のアレキサンドリアがしばらく商業と学術の中心になった。

アレキサンドリア時代のヘロン（Heron, 紀元前 100 年頃）はいろいろな機械の考案を記述したものを残している。その中には車の回転を機械じかけで数えて距離を測る装置や祭壇に火を供えると開く寺院の扉とか、蒸気を噴き出すことによって回る一種の反動タービンなどいろいろのものがある。ヘロンのこのような装置は実用的な目的よりもむしろ遊戯的なものであったらしい（ヘロンの名は 3 角形の辺の長さ a, b, c とその面積 S との関係を表すヘロンの公式 $S = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$ （ただし $s = (a+b+c)/2$ ）でも知られている）。

直角 3 角形に関するピタゴラスの定理（ $c^2 = a^2 + b^2$ ）はピタゴラス（紀元前 570–497 頃）か、その学派の誰か、あるいはエジプトの石工か測量士などによって経験的に発見されたものかもしれない。ユークリッドの幾何は多くの人の間で知られた幾何学の集大成に違いないと思われる。幾何学（geometry）の geo はもともと土地のことであり、metry は測ることを意味する。ギリシャの数学者の功績は素晴らしいが、技術的な経験から発見された幾何学の知識はユークリッド幾何学の理

第 7 章

情報 (熱力学の基礎)

1. 情報量

「情報」と言うと、何となく怪しい胡散臭いものを感じる人は、戦前と戦中にあった内閣情報局やアメリカの CIA、諜報機関などを思い出すからかもしれない。もともと情報というのは必要な知識や知らせのことである。テレビ番組で「気象情報」などと言うが、これは以前には天気予報と言っていたものが「情報化時代」の影響で呼び方が変わったのだろう。天気予報と言ったほうが素直なように思われるが、予報と言ってはずれると具合が悪いから情報と言って責任をばやかしているようでもある。

最近では情報化時代ということをよく聞くが、情報の数学的理論が始まったのは 1948 年で、アメリカの電気工学者・数学者のシャノン (Shannon) がその開拓者であった。情報理論は情報 (information)、あるいは通信の量を定義し、情報の変換や伝送を数学的に扱うものである。この理論は通信技術の急速な発展によりコンピュータなどの情報機械、情報処理、あるいは分子生物学などの新しい科学に大きな影響を与えている。

情報は常に正しい知識をもたらすとは限らないが、ここでは情報を受けとることによってある事柄の不確かさが減ると考えると、不確かさの減少によって受けとった情報の量を定義できる。

わかりやすい例として推理小説のような話を考えよう。あるところに泥棒が入って宝石が盗まれ、 P_1 人が犯人として疑われたという話にしよう (入

た泥棒は 1 人だとする)。この人たちがみんな等しい同じ度合いで疑わしいとする。ここで何人かの人にアリバイの情報が入り、疑わしい人の数が P_2 人に減ったとしよう。するとこのアリバイ情報の価値は P_1 と P_2 の比 P_1/P_2 のある関数であると考えられるだろう。実際、情報量の定義によれば、このときのアリバイの情報量は

$$I = \log_2 \frac{P_1}{P_2} \quad (3.2)$$

である ($\log_2$ は 2 を底とする対数。すなわち $P_1/P_2 = 2^I$ である)。情報量 I の単位はビットと言う。このときのアリバイの情報量は I ビットである。

情報量を対数 $\log$ で定義するのは、情報の加法などが意味をもつからである。たとえば上の譬え話において、泥棒が入った日の不確かさが n_1 日間であるとしよう。すると P_1 の人のうちの誰かが、ある日に泥棒に入ったという不確かさは $P_1 n_1$ となる。そしてアリバイと、宝石の存在を調べたときの情報から、疑わしい人の数は P_2 人になり、泥棒が入った日が n_2 日間にしぼられたとすると不確かさは $P_2 n_2$ に減少する。この場合のアリバイと宝石の存在の情報がもたらした情報量は

$$I = \log_2 \frac{P_1 n_1}{P_2 n_2} = \log_2 \frac{P_1}{P_2} + \log_2 \frac{n_1}{n_2} \quad (3.3)$$

となる。アリバイと宝石の存在の有無は独立な情報であって、それぞれの情報 $\log_2(P_1/P_2)$ と $\log_2(n_1/n_2)$ を加えたものが全体の情報量となる。

第 8 章

心 (創造と意志)

1. 疑問と納得

素粒子物理学の「標準理論」で有名なワインバーグ (S. Weinberg) が書いた『究極理論への夢』(小尾信弥・加藤正昭訳, ダイヤモンド社, 1994) の第 2 章で, 彼はなぜ多くの科学者が素粒子の研究にひかれるのかを説明しようとしている。

「科学の諸発見は, それぞれが独立の孤立した事実ではない. ある科学的一般法則の説明は別の一般法則により与えられ, 後者はさらに別の一般法則で説明される. この説明の矢をその源に向かって逆にたどることで, われわれはいちじるしい収束パターンを発見した. 多分これは, 宇宙についてわれわれが学びとったもっとも深いことである」

と彼は述べ, 1 本のチョーク (白黒) から話を始める. チョークが白いのはなぜか——それはチョークから反射される光が可視光に関してそれを照らす光とほぼ同じ波長分布をもっているからである. なぜある物質は特定の可視光を強く吸収し, 他の物質はしないのか——それは原子のエネルギーと光のエネルギーの関係である. なぜ原子や分子はそれぞれ決まったエネルギーをもつ状態になっているのか——それは原子や分子の中に電子があるからである. なぜ電子を支配する量子力学はある特定の形をもっているのか——また, なぜ物質は電子と原子核とから成り, 光と素粒子などの間に

相互作用があるのか. このようにして, なぜか, なぜかと説明の矢をたどって行けば, 物質の究極, すなわち素粒子の問題に行きつく.

ワインバーグに限らず, 多くの人は常により基本的な説明を求める心をもっているに違いない. 人間は有史以来, このような「なぜか」を自然に問ひかけ, 自問自答し, 話し合っているうちに, ある種の説明の中に美しさを感じるようになったのであろう. こうして科学的な美を求める心が育った. それは芸術や文学などにおける美の感覚とは違うが, 何か共通点のある感覚であって, これについてはすでに触れている.

「なぜか」とか「説明」とか言ってきたが, 何がなぜなのか, 説明とは何なのか, などと考え出すと我々は多くの場合, たいへん不確かな問をして, 不確かな納得, あるいは理解をしていることに気がつく. 同じ説明をしても, 人によって納得の仕方は異なる. 科学的な説明と言えども, 単なる言い換えにすぎないと思うこともある. 納得というのは心の動き, 心の状態の問題である. そして, 同じ話を聞いても, あるいは同じことを読んでも, 人によって納得, 理解の在り方はまちまちなのが普通であらう. このような不確かな心によって我々の世界が成り立っているということはたいへん不思議でもある. 心の不思議さにひかれて, 若いときには, 心理学者の島崎敏樹さんの本などを好んで読んだこともあった. そしてまた反対に最も確かな知識を与えられる物理学にもひかれたのであった.

第 9 章

宗教 (自然界の階層)

1. スピノザの神

物理学でデカルト (Descartes, 1596–1650) について語ることは少ないが、考えてみると我々の知識の中にはデカルトに負うものが非常に多い。おそらく彼の言葉で一番有名なのが「我思う。故に我あり」と訳されている言葉 (コギト・エルゴ・スム) であろう。これはラテン語で書かれた『方法序説』(理性を正しく導き、もろもろの学問において真理を求めるための) の中に出ているが、訳しにくい言葉らしい。この訳だと「考えの浅い人は生きていないのも同然」などと誤解されかねない。デカルトが言いたいことを意識すれば、「考えつつある私がここに存在することだけは疑えない」ということだろう。

デカルトの時代には、中世のスコラ学者などによる莫大な量の論考の蓄積があったが、その多くは不確かな知識であると彼は考え、そのすべてを疑うことから始めなければならないとした。そのとき、そのように考えている自分というものが存在することだけは疑えないことに気づき、これをデカルトは出発点 (第一原理) としたのであった。こうして中世と決別した近世が生まれ、その近世哲学の父がデカルトということになる。

デカルトは解析幾何学の創始者としても知られている。彼はまた力学の法則を自然の基本法則と考え、自然は機械であるという機械論的自然観を樹立した。また宇宙の根本原理を精神と物質の二

実体によるものとするデカルトの二元論 (物心二元論) はその後の哲学に大きな影響を与えた。

デカルトの二元論では、動植物は心をもたない機械とされ、人間だけが精神と物質からなる二元的なものとされるようであるが、意識や自由意志などの説明においても二元論が重大な困難をもつことは明らかである。これを避けるには精神と物質をある一元的なものの二つの属性とする一元二属性論か、あるいは世界が互いに独立な多くの根本原理から成り立っているとする多元論をとるかということになるだろう。

デカルトの考えを徹底させて一元二属性論を唱えたのはスピノザ (Spinoza, 1632–1677) であると言われている。スピノザは、オランダのユダヤ教団に属していたが、無神論者として破門され、最後にはレンズを磨くことで生計をたてながら哲学に没頭した。

デカルトは自然を成り立たせている実体は精神と物質の2つであると考えて全自然を合理的に理解しようとしたが、これに対しスピノザは精神も物質も元をただせば神すなわち自然という一つの実体であるとした。神は精神や物質のほかにも無限に多くの属性をもつが、人間はこの2つの属性しか知ることができない。こういうのがスピノザの考えであった。この神はいわば汎神論の神である。

昔、大学生であった頃、『世界大思想全集』(春秋社) という茶色の表紙の全集があって、その中のニュートンの巻とスピノザの巻とをもっていた。

第 10 章

教育 (薄膜の物理)

1. シャボン玉の膜

分子の形や集合状態による機能の研究は物理と化学の中間にあって、むしろ物理化学と呼ばれることが多い。今回はシャボン玉の物理化学から始めよう。ニュートンはシャボン玉の美しい色に魅せられ、その著『光学』に精細な研究記録を残している。彼は曲率が小さい、ほとんど平板状のガラスを平らなガラスにのせたときに見られる光の干渉模様（いわゆるニュートン・リング）の発見者でもあった。ニュートンは光の粒子説を唱えたとされているが、これらの現象は光の波動説への手がかりを与えるものであった。波動説はオランダのホイヘンス（1629–1695）、イギリスのヤング（1773–1829）、を経てフランスのフレネル（1788–1827）によって確立された。

針金でつくった枠をシャボン液に浸して引き上げると枠にシャボン膜が張られる。1873年にベルギーの物理学者プラトー（J.A.F. Plateau）は「空間内の閉曲線で囲まれた曲面のうちで面積極小のものを見出せ」という極小問題が石けん膜を使って解かれることを示した。これは液体の表面積を極小にしようとする表面張力が働くからである。

シャボン玉の中の圧力 P と外の圧力 P_0 の差は

$$P - P_0 = 4\gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

で与えられる。ここで γ は表面張力であり、 R_1 と R_2 は曲面の主曲率半径である。したがって 1

つのシャボン玉の平均曲率 $\frac{1}{2} (1/R_1 + 1/R_2)$ は一定であり、これが極小表面積の曲面を与える条件である。

プラトーはシャボン玉の不思議な魅力を次のように述べている（立花太郎著『シャボン玉』中央公論社、1975）。

「輝くばかりの色に飾られ、脆さに耐えて数学的な曲面をかたちづくりつつ、いつまでも吊りさがったままにいる、あのかかるがるとした姿を眺めることのおもしろさ」

イギリスの王立研究所で毎年冬の冬に行われるクリスマス講演（最近日立製作所の外村彰氏が招かれて講演された）はファラデーの「ロウソクの化学」（1860–61）でも有名であるが、1889年にボイズという人が行った講演「シャボン玉とシャボン玉を形づくる力」は邦訳されていて、これにはシャボン玉を使った多くの実験が示されている（ボイズはキャベンディッシュと異なる方法で万有引力定数を求めたことでも知られている）。

シャボン玉に白色光をあてると虹色に輝いて見える。これはシャボン膜の表と裏で反射した光の干渉による現象である。干渉が生じるためには膜の厚さは可視光線の波長に比べてあまり厚くなく、薄くもない程度でなければならない。可視光線の波長は1ミリメートルの1万分の4程度、すなわち $\lambda = 4 \times 10^{-4} \text{ mm} = 400 \text{ nm}$ 程度であり（nm はナノメートル、 $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ）、干渉色が見え

第 11 章

文化 (何もない空間)

1. ルネサンスをはさんで

人間の現在の生活は科学・技術の上に乗っているが、昭和 30 年代よりも前の日本では、たとえば手押しポンプの井戸が至る所にあって、基本的には江戸時代の生活が色濃く残っていたように思われる。日本が近代化されたのは明治維新であったということが多いが、生活と科学の接点から見ると、日本が本当に変わり出したのは昭和 30 年代、1955 年以後であったと思う。その頃を境にして古いものは悪いもの、使い捨てこそ繁栄の象徴といった思想が広く普及するようになった。それは生活面だけでなく倫理的、道徳的な面においても顕著な変化であったが、一言で言えば物質主義の蔓延であった。人間はもともと楽を求め物質主義に走る弱さがあり、そして目先のことに引かれて何でもやってしまう傾向があるらしく、科学技術がもたらす公害について熟慮するのは不得意である。人間の未来は科学技術によって救われるだろうという楽観主義が依然としてあるし、原子力発電の廃棄物の処理にしても、将来の科学で何とか片付くだろうと思っている。これはまったく無責任な楽観主義である。

ニュートンの時代からまだ 300 年しかたっていないのであるから、何と言っても科学は新しい知的産物である。これが将来どういう変貌をとげるか、人類を亡ぼすことになるか、それとも人類を救うことになるかということはまったくわからない。

い。自然の創造物は互いに複雑に絡み合った運命をそれぞれたどっている。科学も、それに将来をゆだねている人類もそういう創造物の一つにすぎないような気がするのである。

科学、あるいは物理学の将来を占うにしても、いっそ科学のなかった時代を反省してみるのもいいだろうという気がする。そこで科学が育った西欧の歴史を手短かに振り返ってみることにしよう。

ギリシャ時代のことは前に少し述べたことがある。これに続くローマ時代の科学や哲学はギリシャの模倣の域を大きく出なかった。そして中世の終りに十字軍が東方のイスラム文化圏と接触してその文化を吸収するという事件があった。イギリスとフランスの間に百年戦争があって、ジャンヌ・ダルクの活躍があり、その後宗教改革があって、フランスは新教と旧教とに分かれて争った。フランス王のアンリ 4 世は初め新教についたが、後には旧教に改宗して 1589 年に即位し、1598 年には勅令で信仰の自由を認めるなどの変遷があった。この間にギリシャ・ローマの古典の復興と個性の重視を主眼とする革新運動が起こり、神を中心とする中世文化から、人間を中心とする近代文化への転換が行われた。これがルネサンス（文芸復興）である。

この時代を生きた代表的な知的人としてモンテーニュ (Michel de Montaigne, 1533–1592) がいた。彼は科学がまだ存在しなかった時代の人であるが、自由な立場で自然と人間を見直した人文学者なの

第 12 章

人間 (波と粒子)

1. 古典的な客観性

自然科学では観察と実験によって自然を正しく認識できるとして、このような信条は、フランシス・ベーコン（1561–1626）に始まるとされている。デカルトより少し前のことである。彼の信条は、これによって自然を支配することのように解され、「知は力なり」と要約されて有名であるが、さらに「知によって自然を征服せよ」などと誤解されるかもしれない。むしろ学生の頃に何かで覚えた「格物致知」という言葉に近いのではないかと思う。この言葉は、個々の事物をきわめることにより普遍的な理解に達することができるというふうに解釈される。

さて、自然を正しく認識するなどというが、もともと自然はこれが正しいと教えてくれないから、これは人間の側の判断であり、この場合「正しい」というのは「普遍性をもっている」ということにほかならないこと、言い換えれば、「客観性をもつ」ということであろうか。

古典物理学はニュートン力学とマクスウェルの電磁気学という 2 つの柱によって構成されている。ニュートン力学では自然現象に無関係に存在する絶対空間と絶対時間の枠の中で物体が運動法則に従って運動すると考える。19 世紀末に電子が発見され、次いで 20 世紀の初めに原子核が発見されて、これらや原子などが物体の究極的な粒子であると考えられるようになった。ここで粒子（物質

粒子）とは微小な空間を占める球のような粒のことで、まったく直観的な概念である。

他方で古典物理学において、ホイヘンス以来、光は波であると言われてきた。波とはバネの波、水の波、音の波のようにある程度の広がりや周期性をもった運動を指すもので、これもまったく直観的な概念である。

粒子と波とは全然違うカテゴリーの概念であるが、粒子の運動と波の運動の 2 つを並べて基本的な運動と呼んだりするのが習わしである。物理学においても日常的な、経験的に取得された概念を用いることを余儀なくされることがある（粒子とか波とかいうのもその例の一つである）。厳密に吟味しないで導入した概念が再検討を要するものであるか否かはその必要が出てきたときに考えるのが物理学のやり方であろう。

とにかく電子の存在を示した J.J. トムソンの実験などにより、電子は粒子であり波ではないことが証明されたと思われた。また光の干渉実験などは光が波であり粒子ではないとすることによりすべて説明されると思われた。そしてこの時点では、電子と光の性質が正しく認識されたと考えられたのであった。

2. 波と粒子の二重性

しかし実は光も電子も上に述べたような古典的な認識をはるかに超えた存在であった。まずプランクの熱輻射の法則（1900）とアインシュタイン

第 13 章

生命 (生命とは何か)

1. 量子力学と原子・分子

前章や第 8 章において述べたように、量子力学を創設したシュレーディンガーは 1944 年に『生命とは何か (What is Life)』を出版した (岡小天・鎮目恭夫訳, 岩波新書, 1951)。もちろん彼は純然たる理論物理学者であって生物学の専門家ではない。そして彼がこれを書いた時代には、科学者は自分が専門としていない問題について書いたりしゃべったりしないことが、ほとんど約束のように思われていた。最近の科学者は専門外のことに相当気楽に発言したりするようになったが、これは学問が多方面へ向けて広がり、境界領域の研究が盛んになったためでもあって、決して悪いことではない。とにかくシュレーディンガーが物理学者の殻を破って生物学の基本的な問題について発言したのは当時としては画期的なことであった。今この本を再び読んでみると、それほど驚くべきことが書いてあるような気がしない。むしろ当然のことが書かれているような気もする。ということは、その後の分子生物学がシュレーディンガーの述べた方向に近い線をたどって発展してきたということである。

確かに 20 世紀以前には、物理学の対象と生物学の対象との間には生命のあるものとないものという大きな違いがあり、そのためこれらの学問には考え方にも進め方にも根本的な差があるのが当然と、多くの人が思っていた。相当多くの人は、生物には生命力、あるいは魂というようなものがあっ

て、そのために生物は無生物のできない働きをす
ると考えていた。今でもそう思っている人がいる
かもしれない。しかし現在では、生物の体の組織
や営みにおいても物理的な法則が成立しているに
違いないと考えている人が圧倒的に多いであろう。
生物の体の構造や物理的・化学的な働きが、人工的
な創造物をはるかに越えた精密さをもったもので
あるのは当然だが、いつかは科学的に解明される
に違いないと思われる。

生物の営みに対する理解がこのように大きく変
化してきたのは、もちろん科学の着実な進歩による
ものである。ことに量子力学の発展がこれを可能
にした。量子力学は古典物理学に比べてはるかに
物質の性質に深く関わっているという特徴がある。
逆に言えば古典物理学は量子力学に比べて形式的
で、いくらか空疎でもある。古典物理学では野球
のボールも電子も物体の運動としては同じように
扱われるが、量子力学(もっとはっきり言えば素粒
子物理学)ではこれらはまったく異なるカテゴリー
の存在である。このような差異は古典物理学と量
子物理学の長所でもあり、短所でもあると言える
ように思う。この 2 つの物理学はそれぞれが興味
深い特色をもち、それぞれの活躍の場をもってい
る。おそらく哲学的には、異なる 2 つの学問と言っ
ていいのだろう。古典物理学は形式的で絵空事め
いているのに対し量子物理学は現世的で生々しい
とも言えそうである。この対比はたいへん面白い
が、知っている範囲では立ち入った議論が少ないよ

第 14 章

倫理 (進化と退化)

1. 技術の発展

1 万年ぐらい前の人類は、主として野性の植物や狩猟などに頼って生活していた。人類が他の動物と異なる存在になったのは、自分で食べ物を作ることになってから、すなわち農業や牧畜を始めてからであった。人びとは集落を作って共同作業をするようになり、いくらか余分な食料を得ることができるようになると知力や腕力によって集団を統率する聖職者や権力者が現れる。彼らは自然の力や外敵の侵攻から集団を守ると同時に集団を強迫して食料を取り上げる。こうして古代の都市が作られ、古代文明が生じたと思われる。古代のエジプト、ローマ、中国、インカなどの文明はいわば強制的、あるいは搾取的な社会であった。たとえばヨーロッパで水車は 6 世紀に発明されたが、これを使うには税金を支払わなければならなかったと言う。領土を拡張、その住民を奴隷化した搾取的な帝国主義国家が 20 世紀まで続いてきたのは、むしろ驚くべきことに思える。

この数千年間に人類が成し遂げた技術的な発展はむしろ散発的で、進歩があったと同時に退歩もあった。たとえば古代ギリシャやアラビアでは幾何学や代数学が発達したが、これに続くローマ帝国の時代には科学の停滞があった。しかし中世を通して小さな技術的発展があり、それが次第に蓄積されるようになった。そこヘルターによる宗教改革、コペルニクスの地動説などが現れ、それ以

前の考え方と異なる思想や新しい生活の在り方がヨーロッパに芽生えたのであった。前章で触れたボールディングによれば、9 世紀の馬の軛（くびき、荷車を馬につなぐ馬具）の発明は奴隷に勝る労働力の供給を可能にし、舵の発明と造船・航海術の発達後のアメリカ発見（1492）へ導くことになった。

15 世紀半ばにはドイツのマインツ市のグーテンベルグが鋳造活字を用いた印刷術を発明した。この印刷術は間もなくヨーロッパ中に広まり、宗教改革をうながした。これが人文主義運動（ルネサンス）を引き起こし、神中心の中世文化から人間中心の近代文化への転換となった。こうして 17 世紀には科学が起り、18 世紀には産業革命が起り、19 世紀には科学が熱学、電磁気学などに組織化され、20 世紀の研究・開発の時代へと急速にピッチを上げて現代に至っている。あまり進歩が速いので、多くの人にとって「物心ついた時期より後に起こった世の中の変化は、それ以前の数千年に起こった変化よりもはるかに大きい」ということが真実になってきている。

2. 道徳律

18 世紀から 20 世紀初めの頃までは、ヨーロッパの文化が全世界の中心であったとも言えるだろう。この時期には世界は一応の安定さを保ち、ヨーロッパの文化は世界の文化であり、その道徳は世界の道徳でもあった。昔、よく言われたようにイ

第 15 章

宇宙 (相対性理論)

1. 大きな世界と小さな世界

科学は 2 つの方向へ進んでいく。大きいほうは宇宙へ、小さいほうは素粒子の科学へと進む。人間はその中間にある。もちろん人間尺度の科学もある。科学を志す人の多くはこの 3 つの極のどれかに引かれて、学問の道へ進んだに違いない。

小さいほうから言うと原子 1 個の大きさは 10^{-10} m 程度であり、代表的な素粒子である陽子の大きさはさらに 10 万分の 1 くらい、すなわち 10^{-15} m 程度、電子もその程度である。原子は電子顕微鏡を使えば写真やコンピュータの画面で「見る」ことができる。不思議なことであるが、このように小さな物体を見たり扱ったりするのは大きくて高価な装置が必要である。陽子などのハドロンと呼ばれる素粒子はクォークと称されている構成要素からできているが、この小さなものを研究するためには、それこそ一国の費用で賄いきれないほどの費用と大きさをもった装置を作って 10^{-15} m 程度の微小な世界を探らなければならない。このように小さなものは果たして物と言えるであろうか。現存の量子力学の先端的な知識によると、大きさにはおそらく最小の限度があり、それは 10^{-35} m の程度（プランクの長さと言う）であると言う。これは陽子などの世界のはるか先で $10^{-15}/10^{-35} = 10^{20}$ 分の 1、すなわち 20 桁も小さい。これからの科学がこのように深いミクロの世界の奥底へ行き着くことができるとはとても思

えない。もしもなお進むならば理論物理学は今後とも思いがけないような変革を重ねるに違いない。

大きなほうの進路は宇宙全体の理解を求める。多くの民族が大昔の宇宙に関する神話をもっている。その多くは神や人間を中心としている。その頃は人間の地位が神に次いで高かったし、地球が宇宙の中心であった。しかしコペルニクスの転回により地動説が現れ太陽中心の宇宙観に移った。太陽・月・惑星を含む太陽系に比べて夜空に見える無数の星がはるか遠くにあることは昔から直観的に信じられていたらしい。しかしコペルニクスの時代になっても、太陽系のはるか彼方には恒星のちりばめられた天空が宇宙を覆っていると思われていた。

無限に広がる宇宙を初めて考えたのはイタリアの哲学者ジョルダノ・ブルーノ (1548–1600) である。彼はコペルニクスの説に傾倒し、これを押し進めて、星座の星はそれぞれ太陽と同じであり、宇宙は無限であると唱えた。ブルーノによれば宇宙には地球と同じような惑星が無限にあり、それぞれに人間と同じような生物がいることになる。しかしこの説は人間が神の特別な寵愛を受けているとするキリスト教の教えに反し人間の地位をおとしめる異端の説であるとされて、ブルーノはローマで火刑に処せられた。

レンズを組み合わせた望遠鏡がオランダで偶然発明され、これを聞いたガリレイはただちに望遠鏡を自作した。彼はそれを用いて月を観察し、太

第 16 章

時空 (膨張宇宙)

1. 最も根本的なもの

自然界に対する純真な驚きの感情から自然科学への道を歩き始めた多くの人がいた。たとえばイギリスのファラデーは電気と磁気の不思議な現象を解き明かそうとして一生をその研究にささげた。彼はこの研究から電磁気的な場という考えに到達し、これはマクスウェルによって引き継がれ、電磁気学として完成された。ニュートンは万有引力理論を樹てたが、それ以来約 200 年たってファラデーとマクスウェルによって自然界の新しい力が発見されたのであった。この発見は電磁場によって満たされた空間という新しい概念の確立を意味するものでもあったのである。

自然界の成り立ちの基礎を力と運動、あるいは空間と時間の中の粒子や波の運動として捉えるのが物理学であるとすれば、最も根本的な不思議さは（我々人間の存在を別にすれば）空間と時間の存在ではなかろうか。これこそ物理学の中で最も純粋な疑問であると思われる。そこで「物理学とは何か」という設問に対する考察の終盤として、今までの話と重複するところもあるが、物理学で最も純粋に基礎的である時空の問題を再考してみたい。

2. 古典的な時間

ニュートンは主著『プリンキピア』を書き始めるにあたって、ずいぶん苦労しただろうと思う（第

2 章でも同じことを書いた）。結局、彼は「時間」の公理から始めた。彼は言う。

絶対的な時間は、その本性からして、それ以外の何ものとも関係なく、一定の速さで流れる。

多くの人は、これを当然のこと、調査もいらないモデルであると考えた。ニュートンは、光がある有限の速さで空間を飛んでくるというレーマーの推論を認めたが、その速さを直接測定する手段をもたなかった。地上で光速度が初めて測定されたのは後のことである（フィゾー、1849）。

しかしそれに先立ってホイヘンスは光が一種の波であると考え（1678）、光を伝える仮想的な媒質をエーテルと名づけた。これは宇宙を広く満たしていると考えられたが、宇宙の中を惑星などが抵抗を受けることもなく運動していること、光の速さが非常に大きいこと、光は偏りがある（横波である）ことなどから、エーテルを物質とすると、それは非常に希薄で、固いまったくあり得ない奇妙な物質であるということになる。しかしほかに考えようもなかったので 20 世紀初めにアインシュタインの特殊相対性理論が出るまでは、エーテル説が容認されていた（エーテルはまったく奇妙だが仮に認められていたという点で後に述べるダークマターと似たところがある）。

3. 地球の年齢

19 世紀のイギリスの偉大な物理学者ウィリア

第 17 章

エピローグ

1. 20 世紀初頭の大改革

物理学に限らず科学というものは、その前の時代の成果を踏まえてその上に積み重ねられてきたものである。物理学もあるときには前の時代の考え方にそってさらに知識を増やす努力をし、また行きづまったときや新たに興味ある現象に出会ったりしたときには、前の時代の考え方を棄てて新しい考察の上へ飛躍してきた。そのため物理学という学問は、現代に至るまでに何度も変化し改革を重ねてきている。それぞれの時代にそれぞれの時代の物理学があったわけで、これが永劫に変わらない物理学の不変のテーマであるとか主義であるとかいうようなものはない。これからも、人間の知的好奇心がしばまない限り物理学は何度でも変わっていくであろう。

それはともかくとして、一応の物理学の定義を求めると、朝永振一郎先生の『物理学とは何だろっか』（岩波新書）には次のように述べられている。

「(物理学は) われわれをとりかこむ自然界に生起するもろもろの現象——ただし主として無生物にかんするもの——の奥に存在する法則を、観察事実に拠りどころを求めつつ追求すること」

ここで朝永先生も注意しておられるところであるが、何か（たとえば物理学とは何かということ）について語り始めるときは、言葉を使わなければならない。言葉がなければ何事について語ること

もできないのは当然であるから、上の文章でもはじめに用いる言葉である「自然」とか「観察」などは定義されないままに使われる。これらの言葉は定義なしで常識にまかせ、漠然としたままにしておくことになるが、この方法は無定義のものの公理群から出発して意味のある体系を構築する数学の方法に似ているわけである。

たとえば古典物理学においては、「自然界」は「人間以外の自然」を意味し、「主として無生物」ではなく「無生物だけ」を対象とする。このようなせまい土俵における物理学が古典物理学であるということができる。

これに対し、現在の物理学は人間の体や脳の中で生起する現象までも扱うようになってきた。したがって物理学に対する上の定義を保存しようとするれば、我々は「自然界」を「人間を含む」とし、「ただし主として無生物」というただし書きも削除しなければならない（「生物物理学」なども現在最も活発な物理学の分野である）。

また、たとえば「観察事実」も古典物理学では、肉眼で見ることができるもの、手で触れたりして感覚で確かめることができる事柄を対象とし、顕微鏡や望遠鏡などはむしろ肉眼や虫眼鏡を補助する程度のものと考えられがちである。電場、磁場なども我々が直接に五感で確かめることができるもの、あるいはその延長線上にあるものとして捕えられる古典物理学的な物理量である。

測定によって知られる自然現象は、測定機器や

索引

ア

アトラクタ 66
位相空間 64
ヴィッシャー 8, 13, 20
Velarde 63
ウェルゲランド 29
ウラム 5
エアリー 3
エネルギー伝達 20
エノン 67, 73
エノン・ハイレス系 67, 71
エルゴード性 5, 49
追い越し衝突 51
オイラーのコマ 81

カ

ガードナー 10
カオス 67
可積分系 64
可積分性のテスト 69
可積分力学系 81
カット 82, 83
基礎物理学研究所 25
逆散乱法 10
京都大学基礎物理学研究所 25
極限軌道 65
局在振動 36
Christiansen 82
グリーン 10
クルスカル 9, 12
KdV 波の固有値 17
KdV 方程式 4
結晶欠陥 31
決定論的カオス 67
Cole-Hopf 変換 13
格子振動グループ 25
格子振動の模型 57
格子ソリトンの衝突 49

向心衝突 51
固有振動 6
固有値方程式 17
固有値保存の変形 20
コルテヴェーグ 3
コルテヴェーグ・ド・フリース方程式 4
コワレフスカヤのコマ 81

サ

3 粒子周期格子 70
3 粒子周期的指数格子 73
再帰現象 5, 49, 54
斎藤信彦 7, 72
ザブスキー 9, 13
指数型ポテンシャル 56
指数格子 47, 81
シュレーディンガー方程式 18
初期値敏感性 67
Scott 57
Scotti 63
ストークス卿 3
ストレンジ・アトラクタ 67
正準共役 40
積分可能系 74
線形波動理論 3
双対系 36
ソリトン 9
ソリトン解 15
ソリトンの固有値 17

タ

第 3 積分 81
楕円関数 5
楕円積分 85
楕円テータ関数 81
高橋秀俊 59
武野正三 29
伊達悦朗 82
田中俊一 82

ter Haar 63
ディーン 24
テータ関数 81
寺本 英 25
特殊振動数 36
戸田格子 47
ド・フリース 3

ナ

永宮健夫 58
ナビエ・ストークス方程式 12
2 個のソリトンを含む解 51
2 粒子指数格子 73
熱化 6
熱的平衡状態 6
熱伝導の理論 30
粘性流体 12

ハ

バーガーズ方程式 12
バイエルス 30
はしご型回路 57
パスタ 5
非線形現象 6
非線形破壊 22
標準的な 2 ソリトン解 16
ファン・デル・ポールの方程式 65
フェルミ 5
FPU 5
FPU の再帰現象 7
フォード 8, 13, 69
不可逆現象 31
ブシネ方程式 13
負抵抗 65

ブラウン運動 28
フラシュカ 73, 78
ヘンマー 28
Poincaré 64
ポアンカレ写像 64, 67
母数 85
補母数 89
堀 淳一 25

マ

マクラフリン 78
マスター方程式 31
松田博嗣 25, 36
Miura 10
メールバック 82
モントロール 13, 53

ヤ

ヤコビの楕円関数 45, 84
湯川記念館 25

ラ

ラグランジュ 3, 29
ラグランジュのコマ 81
ラックス形式 75
ラッセル 2
リーマンのテータ関数 81
リミットサイクル 65
ルビン 29, 30
レイリー卿 3
ローレンツ 67

ワ

ワイルの撞球 5

著者略歴

戸田 盛和

とだ もりかず

1917 年 東京に生まれる。

1940 年 東京大学理学部物理学科卒業。

東京教育大学教授，千葉大学教授，横浜国立大学教授，放送大学教授を歴任。

東京教育大学名誉教授，ノルウェー王立科学アカデミー会員，理学博士。

藤原賞，日本学士院賞受賞。

2010 年 逝去。

専攻，理論物理学。

液体の理論や「戸田格子」と呼ばれる非線形理論で世界的に著名な理論物理学者。学問のみならず教育にも深い関心を持ち続け，金米糖を研究したことでも有名であるが，おもちゃが大好きなので「おもちゃ博士」の異名を持つ。

主要著書：『おもちゃと金米糖—戸田盛和エッセイ集 I』『物理学 30 講』（朝倉書店），『力学』『熱・統計力学』『ベクトル解析』『統計物理学』（共著）『非線形格子力学』（以上，岩波書店），『おもちゃの科学』（日本評論社），『液体理論』（河出書房）ほか。

主要訳書：『ファインマン物理学Ⅳ 電磁波と物性』（岩波書店），『ハテ・なぜだろうの物理学』（培風館）ほか。

臨時別冊・数理科学 SGC ライブラリー-49

『ソリトンと物理学』（電子版）

著 者 戸田 盛和

2017 年 8 月 10 日 初版発行 ISBN 978-4-7819-9928-9

この電子書籍は 2006 年 7 月 25 日初版発行の同タイトルを底本としています。

数 理 科 学 編 集 部

発行人 森 平 敏 孝

TEL.(03)5474-8816

FAX.(03)5474-8817

ホームページ <http://www.saiensu.co.jp>

ご意見・ご要望は sk@saiensu.co.jp まで。

発行所 © 株式会社 **サイエンス社**

TEL.(03)5474-8500 (代表)

〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷 1-3-25

本誌の内容を無断で複製複製・転載することは，著作者および出版者の権利を侵害することがありますので，その場合にはあらかじめサイエンス社著作権担当者あて許諾をお求めください。

組版 三美印刷