

第四章 研究計画としての「形の物理学」

基礎物理学研究所

一九八〇年十一月一〇日から一二日まで、京都大学基礎物理学研究所、通称基研で、「形の物理学」の第一回研究会が開催された。基研は、湯川秀樹先生のノーベル賞受賞記念事業として設立された京大の湯川記念館が、全国の理論物理学者の討論を経た後、一九五三年、わが国初の共同利用研究所として発展したものである。

研究計画として、素粒子論、原子核物理、宇宙線研究、物性理論など基礎物理学の中心課題が一貫してとりあげられてきたことはいうまでもないが、生物物理（一九五五〜）、プラズマ物理（一九五六〜）、天体物理（一九五四〜）、地球物理（一九六三〜）などのような、既成の諸分野の境界に位置しているために異った分野の研究者の共同研究によって発展する可能性を含んでいる境界領域の重視育成もとりあげ、大きな成果を得てきた。（「京都大学基礎物理学研究所一九五三〜一九七八」に記載の「小史」より引用）

とりわけ、天体物理と生物物理、プラズマ物理の前進に、基研の果たした役割は大きい。「形」に関連したテーマでは、一九六二年に「図形認識」の研究会が開かれている。

研究会「形の物理学」^(14・15)

われわれは、一九八〇年の研究計画を討議する研究部員会議に、次の要旨の研究会提言を行なった。「最近、構造形成の問題に対する物理学研究者の関心が高まりつつある。そのアプローチの一つは、非平衡状態、非線型現象として形態形成の機構や時間発展を研究する立場であるが、これとは別に、幾何学的な構造、秩序をいかに認識し、いかに定量化するか、という問題も重要である。物性物理学の比較的身近な例でいえば、通常、結晶秩序は周期秩序として定義されているが、結晶核生成や結晶成長を論じる際には局所的な結晶秩序の概念が必要になる。アモルファスや液体での短距離秩序をどう捉えるかという問題もある。また生物学や地球科学の分野でも樹木の枝ぶりや河川の蛇行の特長を定量化する問題、動物のなわばり等々……、いろいろな問題がある。

幾何学的秩序定量化の問題は、科学のさまざまな分野に亘っており、困難な中にもいろいろな試みがなされている。この問題の研究に実際に携わっている諸分野の研究者が一堂に会して討論することは大変有意義なことである。」

世話人 森肇、樋口伊佐夫、小川泰

森氏は統計力学、樋口氏は幾何統計の専門家である。

この提案に対して、「どういう意味で物理学か」「学問としての成果が期待できるか」等の質問や意見が出されたが、結局規模を縮小して採用された。

興味深い形の問題は多様であるが、幾多の分野にわたって問題が共通していて、実り多い討論が期待でき、趣意に合致した参加者の人選が可能、という諸条件にかなうものとして、

A、枝分れ系

B、空間分割

の二つを主題に選んだ。Aには、分岐図形としての河川、樹形、血管系、絶縁破壊のリヒテンベルグ図形等が入る。河川の分岐について現象論的に発見されたホートンの法則は、他の分岐系でも成立し、一種の保存則であるとともに相似則にもなっている。この観点は樹形の研究にもとり入れられ、現に影響をおよぼしている。Bについては、前章でふれたポロノイ分割の手法は、液体や非晶質の粒子配置だけでなく、動物のなわばりや、植物の葉が日光を効率よく受けようとして重ならないように配置し、立体的な樹形を決定する要因となっていることの解析にも使われている。集落や住居の構造についての解析法や問題意識も、空間分割や、部分のつながり具合と密接に関連している。河川の分岐も、流域という見方をすれば空間分割である。

この研究会での講演題目を列挙しておく。

「形の物理学」(小川泰)

「単位要素(分子)の形が相転移に及ぼす影響」(中野藤生)

「非晶質構造におけるパッキング問題」(二宮敏行)

「雪の結晶構造」(小林禎作)

「雪結晶の形についての理論的考察」(黒田登志雄)

「金米糖の形態」(戸田盛和)

「樹枝状結晶及び絶縁破壊パターンについて」(沢田康次・本庄春雄)

「河川の分岐について」(徳永英二、柏谷健二)

「血管の分岐とその構築」(戸川達男)

「植物形のパイプ・モデル理論とその展開」(大島誠一)

「生物体にみられる幾つかの空間分割」(本多久夫)

「なわばりの形」(長谷川政美)

「二次元石鹸泡の統計的形」の問題」(種村正美)

「集落・住居の形態分析の手法について」(原広司)

「ランダムな図形の物理的表現」(森肇)

「数理的にみた形」についての諸問題」(樋口伊佐夫)

この研究会の報告は、基研内の物性研究刊行会で発行されている月刊誌「物性研究」の一九八一年

四月号(第三六卷第一号)に八七頁にわたって掲載されている。参加記帳者四一名、うち物理学者二七名であった。

講演者には、成果の発表報告というより、形への関心を前提として、異分野の研究者にも判りやすく討論の基になる問題提起を、とお願ひした。また講演時間と討論時間はできるだけ長くとするように心掛けた。

A B以外のテーマとしてとりあげた雪の結晶の問題は、形のもつ情報を解読する科学として、先進分野である。自己相似性を抛りどころに、ランダムな構造の幾何学的特徴を捉えるフラクタル理論が関心を呼んだ。形の研究者は、各分野でも少数派であり、このような研究会は大変励ましになる、との感想もあった。しかし、十分に討論ができたとはいえない。数理的な面に偏っているという感想もあった。

二回目の基研研究会

第二回の研究会は、約一年後の一九八一年二月七日〜九日、やはり基研短期研究会として開催された。研究部員会での提案時の雰囲気は、このような試みは数回はやってみなければ意味がない、少し長い目で見なければ——と、前回よりも暖かいものであった。

一回目の研究会の人選にも役立った好著『「かたち」の探究』⁽¹⁶⁾の著者、高木隆司氏と、鋭い問題意識をもつ実験物理学者長谷田泰一郎氏にも世話人に加わっていただいた。一回目の時、高木氏は滞

独中で参加していただけなかった。

このときのプログラム

「はじめに」(小川泰)

「結晶の多面体成長から樹枝状成長への移行」(黒田登志雄)

「界面活性剤による結晶形態の変化」(本庄春雄、沢田康次)

「分子の形と秩序」(木村初男)

「単位要素(分子)の形の相転移に及ぼす影響」(星野正人、中野藤生)

「二成分コロイドにおける構造形成」(蓮精)

「融解の幾何学モデル」(川村光)

「非晶質構造の多面体解析」(二宮敏行)

「相転移における秩序の発達と消滅」(長谷田泰一郎)

「ポテンシャル・エネルギーの消費と浸食地形」(徳永英二)

「道路網について」(腰塚武志)

「ランダム・カッティングのサイズ分布」(原啓明、藤田重次)

「ランダム充填について」(種村正美)

「生物における形をどう考えるか」(原田市太郎)

「生物学的に意味のある幾何学的解析」(本多久夫)

「樹の枝分れ構造」(安久正紘)

「自己複製体を形成する開放系——境界条件の内生化」(松野孝一郎)

「転位のある結晶中の粒子の量子論的運動のリーマン幾何学的説明」(北原和夫)

「地域分析における構造・領域概念」(藤井明、原広司)

「乱流の秩序構造」(高木隆司)

「力学系カオスとフラクタル」(相沢洋二)

「ランダム・パターンのフラクタル性質」(山崎光昭、太田正之輔、沢田康次)

「運動の秩序と形態」(戸田盛和)

「分枝の代数的記述」(志方守一)

参加記帳者五二名、前回の研究会でお互いに問題意識を理解しているため、議論になり始めた、という感じがあった。異分野の話に意見が述べあえる雰囲気ができつつある。今後何らかの形で、この研究会のような計画を継続することを確認した。この研究会の報告は出版が遅れているが、近いうち一回目の場合と同じく、「物性研究」に掲載される予定である。

「形の科学的研究」

著者の構想としては、新しい型の学際研究として、どの分野の研究者も同等に協力しあえるよう、

物理以外の分野の人が物理屋の中に混ったという印象が一切ないようなものを考えていた。しかし、私自身も含めて世話人の交際範囲や情報の伝わり方、研究会発足のいきさつ等々もあり、どうしても参加中に占める物理屋の割合は大きい。いたずらに拡大した規模で物事を考えなくても、常識的な意味での物理学の中でも、形のテーマの有効な研究計画はできるだろうし、そのほうが着実な成果が期待できるのではないか、という考え方もある。確かにそれも重要なことだと私も思う。しかし、私の関心の持ち方は、どうもそれだけでは尽せない。結局、両方が必要ということになる。

ことさらに分野を広げることがよいとは思わないが、常識的な意味での物理学という学問へのこだわりは捨てたところでの研究組織を考えるならば、お世話になった基研からはひとまず離れて、文部省の科学研究費総合研究の広領域Aというのが趣旨に叶ったものである。しかし、数年という時間尺度で何かを解決するなどというほど、短期的な具体的計画を用意しているわけではない。今必要なのは異分野間の討論と、それによって協力の絆を作ることだと思う。そこで集会費を主とした総合研究Bへの申請を志すことにした。しかし、総合研究Bには広領域という審査部門はなく、既成の学問分類の中から選ばなければならない。私たちの発想が理解してもらえるか、計画を意味あるものと認めてもらえるか、まったく見当がつかないが、小細工は弄せず、すべて正論と考えているとおりに主張することとした。通りやすい常識的な計画にして研究費が交付されるということよりも、結果として通らなくても、するべき主張をおくということを重視した。

昭和五七年度総合研究Bに申請書類(計画調書)に記したことを以下に抜粋する。

〔研究課題〕形の科学的研究

〔研究目的〕「形」(広く、幾何学的秩序全般を含む)は、定量化が困難なため、科学の対象になりにくく、その重要性にも拘わらず、科学は形のからむ問題を困難故に避けてきたといえよう。しかし、以下に記すように、避けずに立ち向って来た研究者達が、科学の諸分野にいる。形にまつわる困難の多くは、個別分野にはよらないかなり普遍的なものである。従って、一分野で成功した概念や方法が、他の分野に適用することも期待でき、共通の問題点を整理することは重要である。

実際、河川学での経験則ホートンの法則は、樹形や血管分岐の問題等、分岐系一般に通用するし、ポロノイ多面体、多角形による統計幾何学的手法は、液体やアモルファスの構造をはじめ、動物のなわばりや葉の重なりと樹形の関係等、生物学や都市計画、地理学等、空間分割に関わる問題に広く適用できる。また自己相似性に基ついて、構造の複雑さを定量化するフラクタルの概念も、諸分野の形の捉え方に大きな影響を与えつつある。

科学の立場で形を研究しようという発想は、わが国では約半世紀前の寺田寅彦氏に初まるといえるが、その意図が充分に理解されてきたとは言いがたい。しかし、上述のように有効な概念が数多く出てきていること、電算機の図形解析能力の向上によって、理論的発想をシミュレーションで詳しく試すことができるなど、寺田氏の時代とはかなり状況が異ってきている。

一方、形のもつ情報を読みとることの重要性は、一般人も衛星からの気象写真等を日常的に見る現在、一段と増し、そのための基礎科学が要求されている。科学の専門分化の著しい現在、このよ

うな発想に基づく学際的なかつ総合的共同研究は、国際的にも先進的であり、形の認識には文化的背景が強く反映すると考えられるので、我が国特有のものをもつ科学に発展することも期待できる。

〔他の組織との関連性〕同様の発想に基づく研究会は、既に京都大学基礎物理学研究所の短期研究会「形の物理学」として、第一回目を昭和五五年一月に行つた。(第二回目は五六年一二月)その結果、「研究目的」の項に記したような問題の共通性、重要性が確認され、広汎な分野の研究グループができかけている。しかし、基礎物理学研究所での研究計画としては、物理学以外の分野の参加者を増加させることには限界がある。将来、科学研究費総合研究(A)「広領域」に申請することが適当であると考えているが、現段階ではまだ準備不足である。今年度は、物理学に偏らないように問題整理を行い、今後の一層の発展に備える研究会が必要である。しかし、総合研究Bには「広領域」という審査部門がないので、公募要領に従って三審査細目を選んだ。

各分野での研究成果は、個別科学の成果としてそれぞれの分野の学術誌に発表されているが、「形」という観点からの発表の場所は現在はない。(以下略)

審査分科(細目)として、物理学(物理学一般)、生物学(植物形態・分類学)、建築学(建築計画・都市計画)を選び、著者が代表者となって申請し、採択された。

分担者として、戸田盛和、森肇、長谷田泰一郎、高木隆司、二宮敏行、沢田康次、黒田登志雄(以上物理学)、樋口伊佐夫(統計学)、原田市太郎、本多久夫、戸川達男(以上生物学)、原広司、腰塚

武志（以上建築学、都市工学）、徳永英二（地形学）の一四名の方に協力していただき、このような研究の進め方について討論を行った。

一九八三年二月一六日〜一八日、筑波大学における研究会では次のような講演があった。

- 「形の科学的研究」(小川泰)
- 「界面の運動」(太田隆夫)
- 「超イオン導体の分子動力学的研究」(上田顕)
- 「形の解析——発生系における二、三の例」(加藤淑裕)
- 「細胞性粘菌の形成、体制ということ」(原田市太郎)
- 「化学反応系に生じる形」(甲斐昌一)
- 「アモルファス構造」(二宮敏行)
- 「形の研究をどう進めるか」(戸田盛和)
- 「渦巻く銀河」(松田卓也)
- 「コンピュータ・グラフィックス」(河口洋一郎)
- 「景観の構造」(樋口忠彦)
- 「パターン認識」(石井治)
- 「曲線の長さ計測に関する統計的手法」(万成勲)

詳しい報告は、やはり「物性研究」に掲載される予定である。「形が属性ではなく、本質に関わっている事例を探す」という意識をもって討論を行うことを一つのテーマとし、討論時間を長く確保した。形をどう定義するか、ということをはじめ、活発な討論があったが、参加者の間での物の見方の幅はかなり広いように見受けられた。形というものが、もともと学問の出発点に近い所にある分野もあれば、考えてみれば形という見方は重要なものかもしれないという分野もある。プログラムを組織した側としては、少くとも依頼した講演については、それなりに脈絡がついているのだが、その脈絡が参加者全員に理解していただけたとは思えない。今後はこのような広範囲な研究者による討論も時折必要であるが、もう少し狭いテーマごとの討論、研究協力を中心として行く必要があることを痛感した。しかし、過去二回の蓄積の上に、新しい参加者にも異分野の話にくちばしをはさみやすい雰囲気ができていることは重要である。

形の研究についての研究発表のほとんどは、各個別分野の研究として発表される。文献情報のデータベースが整備されつつある中で、形という問題意識での検索にはかなり困難がある。この科研費研究計画の一環として、他分野の研究者にも意味があると思われる文献を紹介しあい、収集する計画を実行に移しつつある。高木隆司氏と種村正美氏が第一次分について、分類と目録作りを担当し、他の研究者が追加、修正してゆく手筈になっている。継続的サービスについての財源や体制について具体案はないが、とにかくできることから始めている。

過去二回の基研研究会から、筑波での開催に切り換えて、研究集会を組織する実務面で感じたことがある。基研は、三〇年の共同利用研究所としての歴史をもち、研究の論理を優先している。研究会世話人が事務上のわずらわしさから解放されて、研究会の内容の充実に集中できるよう、裏方の機構が整っている。このことが、基研利用者である物理学研究者グループにとって、非常に大きな財産であることを、あらためて認識した。筑波研究学園都市は、交通の不便さは別にしても、学問の論理を優先させ、官僚機構の枠を越えた研究交流を容易にする必要がある。大学をも含めて、各種研究集会の組織を補佐する機構が、研究学園都市としての機能の上で不可欠ではなからうか。

第五章 「形」の物理論、科学論、文化論

形のもつ情報

「雪は天から送られた手紙」

A snowflake is a letter to us from the sky.

中谷宇吉郎

「ダイヤモンドは地底からの手紙」

A diamond is a letter to us from the bottom.

F. C. Frank

岩波新書『雪』(17)をこの詩的な言葉で結んだ中谷宇吉郎は、雪の一片一片の形に、結晶化の過程で経てきた気象条件が刻み込まれているとして、人工条件下での実験を通じて雪結晶の形の解説表、中谷ダイヤモンドをこしらえた。フランクは天然ダイヤモンドの表面状態や欠陥等に、地底の高圧状態

のたよりを見、中谷の詩への対句とした(18)。「雪』の中で中谷の詩は、前のページの、火山の噴出物がそれぞれにちがった経歴を秘めかくしたロゼッタ石なのに、「悲しいことにはわれわれはまだ、その聖文字を読みほごす知能が恵まれていない」という寺田寅彦「小浅間」(19)からの引用を受けるこの詩で、中谷の『雪』はしめくくられている。

宇宙の知的生物との交信を目指すオズマ計画なるものがあるが、われわれは、自然からのオズマ信号を感知し、解読するに充分知的であろうか、と思わずにはいられない。科学はいろいろの成功をおさめているとはいえ、形のもつ情報を読みとることのような定量化の困難な問題は避けて済ませ、やり残してきている。形から経歴や環境条件を読みとるということだけではない。われわれの五官は確かにある秩序の存在を感じ、感覚的、情緒的には捉えることができるのに、現在の科学では記述や説明が困難なものは少くない。どういう概念を使って形を表現、記述し、科学の立場でどう処理するか、がまず問題である。その上で成因の説明、機能との関わり等、背後の本質に迫ることになる。「形」的なものが本質的な役割を果たしている場合もあるだろうし、現象にとっては本質的でなくても、「形」的なものの探究を避けては解明できない現象、迫ることのできない本質もあるだろう。ここで、「形」という言葉が何を指すかは明確ではない。一応、空間的、幾何学的な秩序に関わるものと限定はするが、「形の科学研究」の組織者の立場としては、一つの研究計画あるいは集会として、意味があるか、まとまりうるか、という組織上の観点で判断するのが現実的である。「形」とは何かについてある定義を下すことにより、その定義の下でなら何が結論できるといふ場合には、定義にこだ

わることにも意味がある。そうでないならば、私にとっては空論の感がある。

定量化と科学

ときおり、定量化こそが近代科学成功の因であるといわれる。この言葉は、重要な指摘である反面、形のような定量化困難なものは、科学の対象から除外されてもしかたがないといっているようでもある。科学の立場で形を問題にするならば、まず、どんな概念を使って定量化するのか、ということが問題になる。定量化の努力は、科学の立場として必要な態度である。しかしである。定量化が本当に不可能と示すことは至難の業ではあるが、定量化不能なものがあり、定量化せずに科学にできるならば、なおさら意義深いことと思う。定量化自体が科学なのではない。まして定量化しきれないはずなものも、定量化が可能な部分だけで安易に済ませてしまうのは、決して科学などではない。ここで、科学とは何か、物理学とは何かという大問題につながってしまい、一言では尽せないが、科学とは客観的な法則の探究であるという必要条件をあげておく。

「形」という言葉が、「心」という言葉と対比されるとき、形は表面的、外見的なものであって、決して本質ではない。しかし、「相似」という概念を思い浮かべるならば、形は量的なものを捨象したところに、質的なものとして抽象されるものであって、「定量化だけでは捉えきれない質」の代表でもある。

切り取られた自然

第一章、第二章で、変分原理という大域的な考え方が、エレガントで便利なことを述べた。法則表現として単純で美しく、自然界を支配する絶対的真理のように思われるかもしれない。また、最適化という形で、工学的にも社会行動の決定にも使われている。

しかし、次のことを注意しておかねばならない。われわれが変分原理を適用する系は、大自然から切り取られた一部分にすぎないということである。そして、問題設定に際して限定した範囲内の正しさに、自ずと限られているのである。これは当然のことで、いちいち明らかにいうのはわずらわしいことではあるが、人は時たまこのことを忘れ、傲慢になるように思われる。変分原理に限らず、科学的な真理が絶対的な真理であると思ひ込みがちである。科学の真理には、必ずその適用範囲に限りがあり、その枠内でのみの真理なのであって、無制限に成り立つ「絶対的真理」と思ったとたんに科学は非科学へと転じてしまう。科学が真理なる所以は、限界の存在を謙虚にわきまえていることである。

自然の中に対象とする系を区切り、その系の性質を問題にするのが、今われわれのもっている科学の立場である。観測者の席は、常に系の外部に用意され、系の条件を整えたり、系の状態を観測したりする。当然のように、それらがすべて可能であるということ前提にしている。本当は、観測するということが、多かれ少かれ系の状態に影響をおよぼす。量子論が対象とする極微の世界では、その影響を無視しえない。量子力学の観測問題は、その意味で、科学がやっていることが、いったい何で

あるのかの問題を提起したのもいえる。これは、科学がミクロな世界に向かったときに、観測者はどういう立場になるのかにかかわる問題であるが、マクロ、超マクロに向かったときにはどうだろうか？ 系の条件を制御することは常に可能なのか？ 制御しようという前提に立つ科学だけで充分なのだろうか？ 生態学的な観点からも知られるように、自然界は非常に多数の要素が入り組んで、微妙な調和を保つことで安定化している。ある部分についてという条件の下に正しい事柄が、もう一まわり大きくとった系での結論と矛盾してしまうこともある。特に社会が関わる場合にはその時代の制度に依存するので、時間尺度にも依る。

「科学」ということばは、明治初期に日本で誕生した日本漢語で、中国でも使われている。福沢諭吉の『学問のすすめ』にある「一科一学」が、やがて日本社会で、「科学」ということばに定着したものとわれ、分科された学問領域を意味することばであったらしい(20・21)。当時の学問の状況を反映した意味で名訳なのかもしれない。現在、「科学的」というときには特に「科」の意味については意識せずに使い、サイエンスの訳語とされるが、science と conscience (良心) とは同語源だという。大所高所から見れば誤った、御都合主義的な系の区切り方は、正に「科」学なのかもしれない。系の区切り方にも、科学の利用にも conscience が必要である。また、「科」のイメージを避けようとするば、究理という言葉がよいのかもしれない。

系の区切り方として、閉じた系、開いた系ということにも言及しておきたい。平衡統計力学の立場では、対象とする自由度の大きい系のエネルギーが厳格に一定値を保つ代りに、熱浴との接触でエネ

ルギーの収支はあるが、平均として保存しているとし、温度がその平均値に相当すると考える。熱浴には十分なゆとりがあって、エネルギーのゆらぎは何ら影響がないと見なせる。重要なのは、大数の法則によって、統計的な法則性が自然現象で成立しているという事実である。

生体系のように、外界との間に代謝がある系をこのような立場で扱おうとすれば、物質やエネルギーについて、定常的な流入があるという条件で系を区切るのが一番簡単である。このような区切り方を定常開放系というが、ある種の時間的・空間的秩序、自己組織化の原形のような現象を扱うことができる。盛んに研究されているこの立場からの成果が期待される。

しかし、系の維持に必要なものは常に補給され、不要物は系外で処理可能という観点だけでは済まなくなってきた。環境問題、資源の問題では、熱浴の助けも借りないでもっと厳しく閉じた系としての扱いも要求されている。その内部には実効的に定常開放系として扱える部分があっても、そのような部分の出現をもその中で起こることとして、切り離さずに論じ、観測者自身の席も系内にとり込んだ形の観点が要求され始めている。

つながりで認識する

メロディは単なる音の集まりではなく、一つのつながりとして認識される。形も単なる点の集まりではなく、何らかのつながりである。人間にはつながりをつけて認識する能力があり、法則認識もこの能力によっている。多かれ少かれ、つながりをつけて認識しているからこそ科学があるには違いな

いが、分析と総合という科学の二つの柱のうち、総合のほうはどう見ても遅れがちである。

部分が正しくても、全体が正しいとは限らない。エッセイの絵に見られるように、部分的にはユークリッド空間的でありながら、全体としてはユークリッド空間として矛盾していることがある。これは結晶転位と同じであって、必ずしも正しいとか誤りであるとかいうことではないが、科学についても、部分の正しさを全体の正しさで見誤ることがままある。部分について成功している定量化の方法を、総合的判断にも拡張しようという試みは、行われるのが当然であろうが、これを安易に過信してはならない。総合には別の方法が必要なのだと思っているほうがずっと安全である。形の問題に取り組めばこの意味での何か解決しようとは限らないが、間違いなく密接な関係があるし、その関係を意識して、形の問題にあたることは必要であろう。

人間が、生まれたばかりの赤ん坊から、言葉を覚え、次第に複雑なことを理解してゆく。ものが見えてくる、ものが理解できるといふことは、言葉のような基礎になる概念を必要としている。現実の複雑さに比べると、単純化しすぎて、そのままでは役には立たないような模型、いわばおもちやのようなものでも、そこから認識の基本要素となる概念を生み出すことがある。極言すれば人間の成長にとっておもちやが必要なように、要素的概念を豊かにするための模型作りこそが、基礎科学の役割りではなからうか？ 形の科学においても、概念を豊かにすることがまず必要である。

階層自然観に対する批判

自然は階層構造をしているという見方が、かなり広く受け入れられている。「自然界には、生体系を含むマクロな物質から小さいほうに向かっては、分子—原子—原子核—素粒子—クォーク？」大きいほうに向かっては、地球—太陽系—銀河系…と、質的に異なるいくつもの階層が存在し、階層ごとに固有の法則が支配している」という描像である。確かに、自然はこのような階層構造をもっているし、現在の学問の分科の間の関係とも対応していて、それなりに意味のある観点だとも思う。しかし、「形」の立場からは、この考え方にひそむ危険性を批判しておきたい。

第一に指摘すべきことは、階層構造という捉え方が極めて一次的なことである。大なる側の法則は小なる側の法則を前提として、反映するという。認識の過程においては、大なる側の概念が小なる側に役立っても、客観的な自然法則としては、大なる側は小なる側に影響力をもたないとしているように見える。「クォークのような根源物質が従う宇宙方程式が判れば、基本的にはすべて解決し、物理屋は失業してしまう」などとも、ときおりいわれる。

二〇世紀に入って、量子力学の成立、さらに原子核、素粒子へと、究極の法則を求める立場での物見方として、気持ちは判る。しかし、究極に迫る最前線を自認するあまり、極端に言えばそれ以外は物理ではないという一種の思い上がりのようなものを感じてしまうのは、私だけであろうか？ 問題は、ミクロに向かってしか、一般的な基本法則の発見や、新しい自然観の誕生を期待できないかの如き錯覚に陥りやすいことである。

尺度によらずニュートン力学を絶対視して機械的に適用する古典力学的世界観への対比として、すべての法則には適用限界があることの指摘が階層自然観の眼目であろうが、この階層自然観にも当然限界がある。階層という捉え方も一つの模型である、自然はミクロからマクロへの単純な一次元階層構造ではなくて、もっと複雑に織りなされている。というよりも絡みあって、思いがけない所と短絡していたりする。

異なる階層の間で共通の基本法則が成り立っていることはいくらでもある。カタストロフィーとして捉えられる相転移的現象、臨界現象一般、ソリトンなど、決して便宜的概念ではなく、かなり基本的かつ普遍的な法則であるが、それらの発見の緒口は、いろいろな階層にある。基本法則発見の有望な鉱脈を極微の世界にだけ期待するのは偏見であるし、何が本質かということに対しても柔軟性を欠く感を免れない。

自然をどの断面で見るといふことについても、もっと自由に各自の視点をもつべきである。現代では、科学は制度化し、職業化した科学者の大多数にとって、新しいパラダイムを築くなどということとは、やたらに目指せるものではないことは知っている。しかし、ある研究上の問題を解決しようとするに際して、集団の一員としての役割に完全に徹してまったくの没我ならいざ知らず、自分がもう一つ深い所では何を明らかにしようとしているか、自分なりの位置づけが必ずあるはずである。当然各自が求めているものは、大なり小なり差異がある。研究の最前線というものは、大多数が最前線と認め、先陣争いをしているようなところだけにあるのではなく、規模こそ違え、到る所に転がって

るはずである。

一般的に言って、世の常識的な位置づけに逆らって、頑固に自分独特の問題意識に徹するという態度は、日本人科学者には乏しいのではあるまいか。これは日本の近代化の一種の履歴現象^{ヒストリック}であろう。開国後、一刻でも早く先進諸国のレベルに追いつくことを目的とした。そのためには、位置づけを客観化し、価値を一元化して、打って一丸となって当るのが効率が良い。もちろんそのときに先進国のレベルという認識にも、当然価値観が入っている。効率の上でも、分担を決めて、専門分野ごとに「科」学として追いつくほうがよいし、そのため思想としての科学のような側面は等閑視された。伝統的な自然観は、科学を生み出せないものとして、「科学」のほうを優先してきた。その結果、現在の日本の社会が、日本の文化が、科学というものの全体について理解しているとは思えない。追いつこうとしなければどうなっていたか？ 追いつけなかったらどうなっていたか？ こう考えると、（このような区切り方で系をとるならば）実利偏重も効率の上でやむをえなかったかもしれない。としても、先進国の仲間入りをしたというならば、追いつこうという姿勢のときには目をつぶってきた側面にも、いまや目を向けなければならぬ。その時代の文化を築くことは先進国の役割である。すでに最前線と認定されているところで速さを競い、われわれにも同等かそれ以上の能力があることを示すだけで満足してよいのは、追いつき、そのレベルを維持する力をつけるまでのことである。われわれの文化的背景を生かした科学を築き、科学をわれわれの文化として消化しきる態度が必要である。古来、中国や朝鮮から渡来した文化については、充分に消化し尽し、独自のものにまで高めたと思う。

西欧文化の場合は、追いつこうとするあわただしさ、科学万能一元化の中に、貴重なものを失っている面がある。築いた文化を失ってしまうということは取り返しのつかないことであるし、無責任なことである。

個人としても民族としても、特性・適性を生かした寄与こそが最も望まれることであろう。いうまでもなく、科学は客観的、普遍的、国際的なものであって、誰にでも理解できるものである。ある民族にだけ理解可能な科学などはない。しかし、発想の必然性、気づきやすさには、文化的背景が効くことは間違いない。速さを競うような仕事は、やらなくても誰かがやる。余人に任せようとしたら何時になるか判らないようなことこそが、分担する価値がより高いことである。自分の発想をもっと大事にしたい。

形態発生からの思想

広く自然界一般、場合によっては社会現象をも含めて視野に収めようとする科学者達、サイバネティックスのウィーナー、思考自動機械のチャーリング、散逸構造のプリゴジン、高速化学反応のアイゲン、シナジェティックスのハーケン、カタストロフィー理論のトムとジーマン。彼等は、いずれも原発想に非常に近い所で形態発生の問題に興味を抱いている。現代科学から世界観、思想を生む一つの原点が形態発生の問題であるといっても、決して過言ではない。

ある条件の下で空間的なムラ、不均一が生じ、ある種の秩序が形成されてゆく。その条件を究め、

現象の本質に迫る。これが妥当な手法であり、事実、本質を究めつつあると思う。これらの巨人達に、対抗して、別の主張ができるアイデアを私が用意しているわけではない。不均一化の機構には、物質が負っている面と、空間の性質が加える制限とがあるが、現在の諸科学一般と同様、後者については不充分さを感じる。空間の性質は次項で述べるように、決して科学にとっての二義的なことではないと思う。

空間学

通常われわれは、空間という舞台に登場して現象を演じる物質の法則を探究するのが科学だと思っている。それならば主役の演技を限定している舞台の機構は、全科学にとっての大前提である。空間の性質について、数学の立場で厳密に判りうることは、仮にすべて判っているとしても、科学の大前提として必要な空間の諸性質、諸事実の認識・理解は、決して充分ではない。任意次元への一般化や非ユークリッド空間の性質も、もちろん大切ではあるが、科学の前提としては、三次元ユークリッド空間にこだわることは、かなり重要である。たとえば、最密ランダム充填密度のように、厳密でなくとも、経験的事実やシミュレーションで求めるといふようなことも必要である。

八と一六との違い

科学の前提としての空間の性質について述べる。筑波の研究会の際に出た話題だが、受精卵の卵割は、一、二、四、八、一六、三二……と、ガマの油売りの口上のように二の n 乗で増えて行く。このとき、一六細胞期から機能分化が見られるとのことである。

これに関連して、「形」の観点から直ちにいえることは、一、二、四、八については、三次元ユークリッド空間で、対等な点配置が可能であるが、一六になるともはや、すべてが平等になる配置はないということである。これが機能分化の本質と掛わるかどうかは判らない。仮に、非常に重要な指摘であるとしても、空間の幾何学的性質が決定的な例であると主張するつもりはない。関与している物質の性質を抜きにして、安易に形が本質なのだといえるわけではない。しかし、空間の性質として、八と一六とは非常に違うのだということに気づく感覚が大切だということとは主張できよう。形を問題にすることで迫れる本質というものは、いろいろとありそうに思う。形のもっている情報を読みとることの基礎学問として、この例のような空間の性質についての知識の体系化は必要であり、「形」の重要なテーマの一つである。

図形情報の客観化

近年、活字離れということをきく。正確には判らないが、研究者全体の中で、劇画世代の占める割合も増加している。一方、コンピュータ・グラフィックスの普及が著しい。科学の研究についても、研究スタイルや、発表方法が変わってくると思われる。

実際、学術雑誌に現われる立体感のある計算機作図のグラフは増えている。同じ計算結果でも、ヒ

ヨロビヨロした素人製図の自信のない線よりも権威づいて感じられるが、それは別にしても、表現方法が豊かになったことは確かである。さらに、劇画世代あたりから新しい図形表現の工夫がなされるものと、これは期待する。しかし、私が主張する「形」の思想は、むしろ、図形化で済ましてしまうことへの警戒のほうが強いの。

私は、キリンのまだら紋様と田圃の干割れの類似性の指摘(2)を愉快に思うし、この指摘から何かをつきつけられている感じをもつ。しかし、意外性ある対比の妙に酔って、理性的であるべき科学を、感性や情緒に任せ切つてはいけな思っている。無機物と有機物、ミクロとマクロ等、かけはなれた世界に現象の本質の共通性、あるいは共通の扱いの可能性を嗅ぎとる感性は尊重すべきことである。いわゆる寺田物理学が、小屋掛け物理学、俳句的、随筆的等という悪口をいわれるのは、感性的認識で満足しているかの如き誤解に基づいている。次の一節を引用しよう。

(金米糖、噴泉塔、構造土、リーゼガング現象、割れ目、等々の自然界の縞模様 II "natural, statically periodic patterns" といつて)これらの現象の多くのものは、現在の物理的科学的領域では、その中でのみわめて辺鄙な片田舎の一隅に押しやられて、ほとんど顧みる人もないような種類のものであるが、それだけにまた、将来どうして重要な研究題目とならないとも限らないという可能性を伏蔵しているものである。今までに顧みられなかったわけは、単に、今までの古典的精密科学の方法を適用するのに都合がよくないため、平たく言えばちょっと歯が立たないために、やっかいなものとして敬遠され、片すみに捨てられてあったもののように見受けられる。しかし、もし

もこれらの問題をかみこなすに適当な「歯」すなわち「方法」が見いだされた暁には、形勢は一変してこれらの「骨董的」な諸現象が新生命を吹き込まれて学界の中心問題として檯舞台に押し出されないとも限らない。そういう例には従来でも決して珍らしくはなかった。たとえばブラウン運動でも、表面膜の「よごれ」の問題でもそうである。ましてや、古典物理学の基礎をなしていた決定的因果律に根本的な修正が問題になり、統計物理学の領域にも全く新しい進出の曙光が見られる今日において、特にここで問題とするような諸現象を列挙して読者の注意を促すのも決して無益のわざではあるまいと思われるのである。

寺田寅彦『自然界の縞模様』(一九三三)より(2)

これを見ても、寺田氏が感性的認識で満足していたわけではなく、形の問題の重要性、可能性について、的確な認識をもっていたと思う。感性的な認識というならば、精密科学においても、測定値を示す諸点と、理論に基づく曲線とを同じ図に描き入れ、その一致不一致の判断を読者の感性的判断に委ねているというべきではなからうか。図形が似ているとか、同じ形に見えるということについて、もっと明らかにしなければならぬ。

寺田氏の時代と何が違うか

寺田氏のもっていた興味、問題意識は、六九頁に挙げた人々のものと明らかに通じている。問題提

起とわずかな勘定や例示に終っているものもあり、小屋掛け云々という悪口につながるものであろうが、量子力学完成直後の物理学変革期にもあたっていて、このようなくさいものは避けて近代化しなければならぬという意識での批難・攻撃があったのだろう。

今、目指す「形の物理学」の発想は、決して寺田物理学再興の思いから出発したものではないが、先見性に敬意を表し、基本的には受け継いでゆきたい。われわれが、どんな歯を獲得したかを見ておく必要がある。

三回の研究会で発表されたような研究が現に行われていること。非線型現象、非平衡系、形態形成への関心の高まり。図形情報活用の必要性。ソリトン、フラクタル、ポロノイ多面体等々の有効な概念。計算機の発達。状況は確かに違っている。

この中で計算機は、到底人間技では処理できない分量のことをこなし、質的に新たな役割を負っているが、それ自体が図形認識能力を持っているわけではない。計算機を生かして役立てるためにも、形の認識を客観化する人間の側の役割が果される必要がある。

物理学とは何だろうか

これは敬愛する朝永振一郎先生の遺著⁽²⁴⁾の題名である。「形の物理学」を主張する立場として、常に自分に問い続けなければならない問いである。今の段階で考えていることを記しておく。

物理学とは、物理学の対象はこの範囲に限るべしというように、対象によって限定されているのではなく、未知のものを解明しようとするある態度である。その態度は、厳密な数学的法則を目指すのではなく、その法則表現に駆使する数学は、必ずしも初めから用意され、限定されているのではなく、場合によっては必要に応じて作り出してゆくべきものである。必要というのは、対象自身のもつ論理からくるものを指している。必要に応じて新しい法則表現方法を創り出して行かねばならない。その意味で、それまでの物理学の概念からはみ出してしまおうような法則表現をも受け入れ、それによって物理学が、そして人類のもつ認識が豊かになってゆく。熱力学の場合には、熱機関の効率の限界を主張し、その客観的表現を求めるところが、物理学のやらなければならない仕事であった。さらに統計的法則表現を受け入れるということも、決して物理学がよごれてゆくのではなく、豊かになってゆくことであった。形についても、感性的理解を理性的理解に転化する表現を工夫してゆかねばならない。物理学という必要はなく、科学といっても済むことだという方もあろう。しかし、私は、専門分化の昂進とともに、物理学が柔軟な態度を失ってゆくのを黙視できない。形の問題に対して、物理学の態度で臨む決意を強めるとともに、いろいろな対象に物理学の態度が向けられ、物理学自身も豊かになってゆくことを期待している。たとえば、エネルギー問題、資源問題に対しても、個々のエネルギー変換技術への寄与というだけでなく、総合的な見地に立っての巨視的対応も物理学の態度である。その意味で槌田敦氏らの資源物理学の問題提起⁽²⁵⁾を物理学の異端と考えるべきではない。

ノウハウから科学へ、文化へ

確かに最近の日本の産業技術は、何らかの意味で進歩しているに違いないと思う。しかし、ノウハウとか、開発という言葉を中心に「科学技術」が語られることに問題を感じる。形問題を例にしよう。一枚の鉄板から何個の部品が、商品が作れるか？一枚の布地から何と何を何着作れるか？いわゆる型紙問題である。うまく組み合わせれば無駄がなくなり、コストを下げ、資源も有効に使える。計算機が普及した今、各企業ごとにこのような工夫はいろいろ行われ、ノウハウとして蓄積されていることであろう。しかし、このような問題をさらに普遍化し、科学に仕上げようとする姿勢を、日本社会はもっているだろうか？これは企業の側にも、科学者の側にも、双方に問題があることだと思ふ。

国際社会の中で、日本文化を知ってもらうことは、文化の力だけでは極めて困難である。文化理解のために日本語を習う人はわずかでも、経済の力で日本語を習おうという人が増え、その結果、文化の理解にもなる。この意味での経済の力を重要だと思ふ。しかし、日本が経済の面で一流国になったというならば、仮に日本経済が凋落した後にも残る文化を築かなければ、単に景気が良かっただけで決して一流国などではない。産業界には、まずノウハウを科学に普遍化することの意義を理解してもらいたい。科学者は、自由で健全な遊び心を大切に、あらゆるものを題材にして自分の科学を描くという姿勢、そしてそれが、文化の創造の当然の態度だと認めあう姿勢が要求されている。

学際研究と分業

現在の科学は、対象ごとの専門分化が激しいと同時に、各分科ごとの均整のとれた能力を要求している。問題提起の能力、解決の能力、本質を掴む能力、証明の能力、理解力……、人それぞれに長所、短所があるが、画一的な均整を重視しすぎているのではなからうか。そのくせ対象ごとの分科という面では狭く、なかなか全体が見渡せない。現在の学問分科のあり方に逆らったような、形研究の連絡役を買って出たからには、現在の分業のあり方をも問題にするのが役割だと思ふ。各自の能力特性を生かした、自由な協力体制を目指したい。問題提起の得意な人は、解決する見込みのない問題を秘めておくよりも、公表したほうがよい。それをヒントにした者は、発想者を尊重する態度が必要である。学問分科のなわばりを超えての提言ももちろんである。その意味では、「形の物理学」という名よりも、「形の科学」「形学」「形の文化」のほうがふさわしいかもしれない。

この折に、文科系の方への一つの問題提起をしておく。私は形に関する本は、できうる限り見ようと努めている。最近の本では『日本文化の型と形』²⁶『日本の形』²⁷など興味深いものがある。主として取り上げられているのは道具の形、紋様、装飾等々であり、見えている形を基にして、生活の特色、文化の特色等、民俗学的、比較文化論的に論じられている。いろいろ勉強になることがあり、有意義な仕事だと思っている。私が不勉強なのかもしれないが、形についての日本語の語彙の特徴や日本人の形の認識の特徴を論じたものは見たことがない。同じ物を見て、形をどう表現するかには、個人的経験ももちろんであるが、母国語の語彙や、文化的背景が効いていると思われる。古河城主、土

井利位が顕微鏡を通してみた雪結晶のスケッチは『雪華図説』として一八三三年に出版され、科学的客観性をもつものであるが、形の認識に家紋の影響が見られると、小林禎作氏は指摘している(28)。

形の総合科学

形と名のつくものはすべて入れて広げればよいと思っただけではないが、広く問題を整理しておく必要があると思う。図形認識の問題は重要であるが、本書ではふれない。コンピュータ・グラフィックスは、芸術の問題は別として、科学の立場では感性と理性の媒介役として期待したい。プログラムによる計算機作図は、図形の論理的記述と密接な関係がある。科学者の側からいうならば、芸術家の直観的把握をシミュレーションに活用することもできる。数理科学者マンデルブローは「雲、山、海岸、木などの自然の形を記述できない冷たく干からびた従来の幾何学」に代るものとして、自己相似モデルで自然を探るフラクタル理論を提出した(29・30)が、その発展におけるコンピュータ・グラフィック・アーティストとの協力は無視しえない。レオナルド・ダ・ヴィンチは芸術家と科学者の才能を兼備し、「大洪水」の絵では、さまざまの大きさの渦の共存を、科学が問題にするはるか以前に絵画表現しているが、われわれ常人科学者にとって芸術家の直観的把握の協力は有効である。

総合科学としての形の研究の一方の極は、形の普遍法則を探る、広い意味での物理学的研究であるが、他の極として、風景学をあげたい。ここでは中村良夫氏の定義(31)を基に、私なりに風景学を定義する。科学を全体として、どのように人間社会に役立てるのか？ 自然環境とどう調和を保つのか？

この問題を論じる学問を、環境科学と名づけよう。その中で、形の認識が関連する分野を風景学と呼んでよからう。形についてのいかなる研究も、この風景学と関連しているに違いない。すべての形研究が風景学への寄与を目指して行われる必要はないが、このような学問領域の存在を視野の片隅に入れておく価値があるということである。

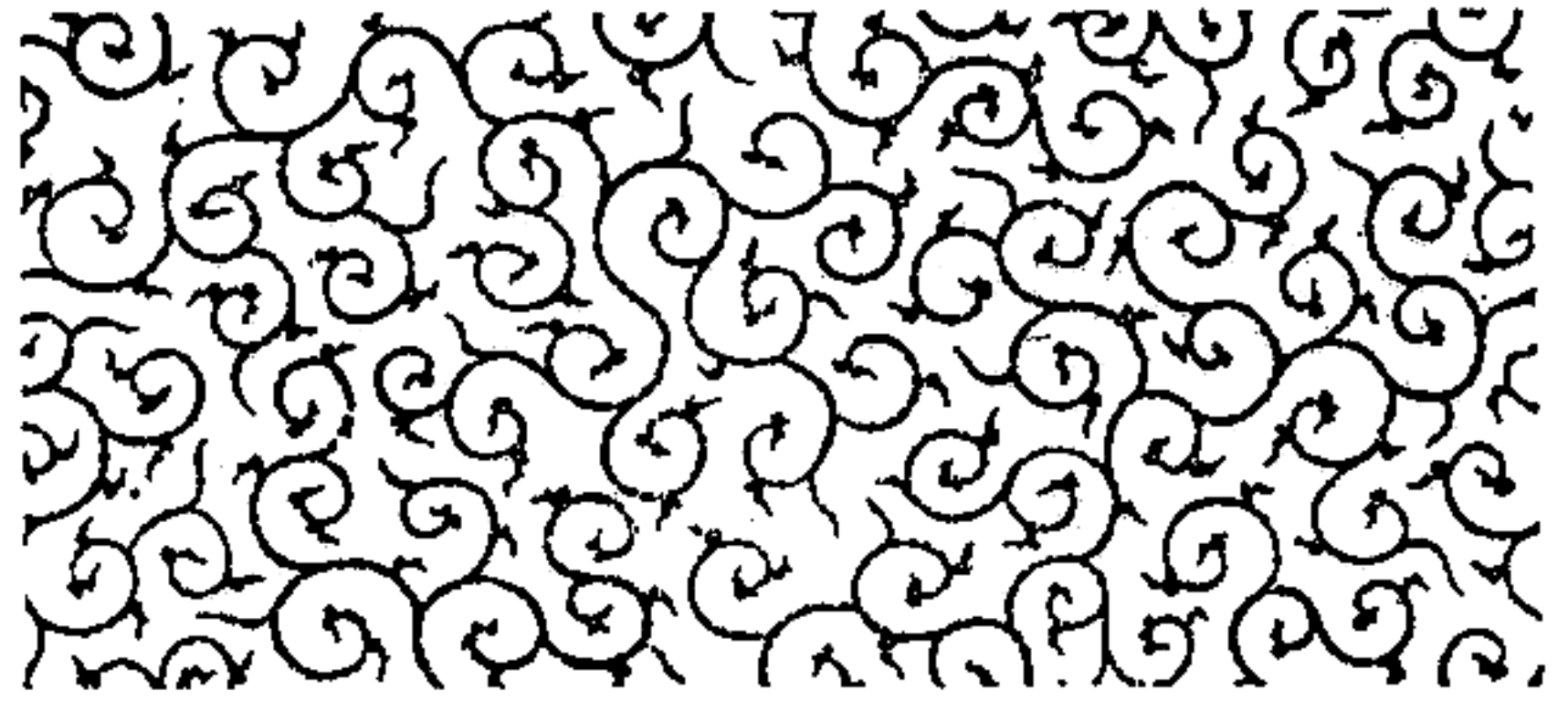
唐草の大風呂敷

日本庭園のもつ秩序は西洋庭園のもつ秩序ほど明確ではない。しかし、決して乱れているわけではなく、理想的な日本庭園では、すべてがあるべきところにはまっている。

ノーベル物理学賞受賞の李政道博士が、湯川先生と訪れた京都の離宮で、「日本の庭園は西洋の庭園のように規則正しくできていません。でも、エントロピーは低いふんわり低く思います」といわれ、同行の松田博嗣氏の「ちょうど、生物の体のようにですね」という言葉に、「ええ、まったく」とうなずかれたという(32)。

仮に、秩序という言葉、概念を、西洋庭園美の規則性を指すのに用いるとすれば、日本庭園美の規範をも含めて表わすためには、たとえば、調和という言葉や概念が有効であろう。科学の対象でも、現在の秩序という概念で捉えるには規則性の明確さに欠け、その淡い調和的秩序を捉えるのに工夫を要するようなのはいろいろある。アモルフラスや液体の構造もそうである。

日本語のもつ文法的法則性を虚心に探るならば、主語+述語の概念を基幹に据える捉え方は、最近



第16図 唐草模様。

よくいわれるように、ふさわしくない(33)ように思う。西洋語文法に刺激されて、日本語のもつ規則性を初めて科学しようという段階で、西洋語文法概念をそのまま適用してみることは、一つの段階としては当然であろう。しかし、あくまでもそれは一つのモデルにすぎない。独立の言語現象として分析してこそ、日本語自身についての認識を高めると同時に、言語現象全般のもつもう一つ高次の規則性についての発見も期待しうるわけである。

NHKの番組「テレビ気象台」などを見てみると、気象などについて各地に残ることわざや俗説の類が紹介され、現在の気象学で基礎づけられると指摘している。気象以外にも、俗信や「生活の知恵」的なことについても、現代科学で説明できるということがしばしばいわれる。このような話でいつも気になるのは次のことである。

科学を生み出すことができなかったといわれるわれわれの文化にも、科学で説明できることを知っていたというだけではなく、今からでも科学をもっと豊かなものにしよう何かが

あるのではないか、ということである。日本文化と科学の関わりを論じるとき、この側面は不当に軽視されているのではなからうか。多くの基礎科学者は、その分野での世界的最前線は気になっても、文化一般との関わりはそれより遠くにあり、普遍的な科学に、地域的な文化に関わりあるなどとはほとんど思っていない。

唐草紋様、アラベスクは、古代エジプトに端を発し、ギリシャで完成されたといわれるが、シルクロードを経て中国に渡り、日本に伝来した。元来が端をもたない一様な紋様であるが、庭園の場合と同様、日本に近づくほど、単純な規則性は薄れ、調和とよぶにふさわしい感じになる。一様性というのは、到るところで力の均衡がとれ、すべてがあるべきところにあるということである。一様性を保ちながら規則配置でない点は、アモルファスの構造と似ている。感性として単調な規則性よりも調和ある乱れを好む日本から、その感覚を理性の世界にも生かす寄与ができれば素晴らしい。アモルファス構造の科学はその課題として適している。身のほど知らぬ大風呂敷を閉じるにふさわしい唐草の話題でペンを置くことにする。

- (1) ボイズ著、野口広訳『シヤボン玉の世界』、東京図書、一九七五
- (2) 立花太郎『しゃぼん玉 その黒い膜の秘密』、中央公論社、一九七五
- (3) E・J・アルムグレンⅡ、J・E・テイラー「シヤボン玉の幾何学」、サイエンス、一九五一年九月号
- (4) 坪田張二氏の発案。NHKのTV番組(一九七九)で紹介された。
- (5) トムソン著、柳田友道他訳『生物のかたち』、東京大学出版会、一九七三(原著は一九一五)
- (6) 戸田盛和・松田博嗣・樋渡保秋・和達三樹『液体の構造と性質』、岩波書店、一九七六
- (7) L・ブラッグ、J・ハナル他『物質の構造をさぐる』、講談社、一九七二
- (8) 蓮精「表面」第一四巻第一〇号、一九七六
- (9) 小川泰「数理科学」、一九八二年九月号
- (10) M. Tanemura, Y. Hiwatari, H. Matsuda, T. Ogawa, N. Ogita, and A. Ueda; *Prog. Theor. Phys.* 58, 1079 (1977)

(11) ヒルズはヘルムズ著『植物計量学』と書いたが、その原題 *Vegetable Statics* を、最近まで私は、『野菜力学』として紹介してきた。コクセター『幾何学入門』の邦訳書(明治図書)でその書を知り、充填問題との関連に加えて、そのほほ笑ましい語感が気に入っていた。ヘルムズの意図を知りたかったが、一八世紀の本をどうしたら探せるか判らなかつた。その後ある時、外国の大学の図書館のカードで復刻版が出ていることを知り早速注文して入手した。一方、かねてより積読中である安田徳太郎訳の『ダ

ンネマン大自然科学史』(一九七八)の第六巻を見ると、物理学の定量的研究方法を植物の生活現象に始めて応用した科学者として、ヘルムズについて二〇頁ほどの記述があり、著書は『植物の静力学』となっている。旧版(一九五五)では第五巻に一五頁の記述がある。ダンネマンが書いた本文の分量はもちろん同じで、増えているのは安田氏蔵のオランダ語訳(二七五〇)から引用の多数の図版と、かなりの訳者註である。

また最近出版された『科学史技術史事典』(弘文堂)のヘルムズの項(島尾永康担当)では、「植物計量学」とあり、「statics(現在では statics)は、一五世紀のニコラウス・クサヌスによって秤量の意味に用いられ、一七世紀のサントーリオの医学書の表題にも用いられてヘルムズに及ぶので、静力学という訳語を避けて計量学としておく」とあるので、この機会にこれに従って訂正し、*Vegetable* = 野菜と思いついてくれたこれまでの不明を恥じお詫びしたい。

- (12) M. R. Hoare, *Advances in Chemical Physics*, vol. 40, p. 49 (1979)
- (13) T. Ogawa and S. Nari, *Z. Phys. B* 33, 69 (1979)
- (14) 小川泰「日本物理学会誌」、一九八一年二月号
- (15) 「物性研究」、一九八一年四月号
- (16) 高木隆司『「かたち」の探究』、ダイヤモンド社、一九七八
- (17) 中谷宇吉郎『雪』、岩波新書、一九三八
- (18) 樋口敬二『科学者寺田寅彦』(宇田道隆編)、NHKブックス、一九七五
- (19) 寺田寅彦随筆集、第五巻、岩波文庫
- (20) 辻哲夫『日本の科学思想』、中公新書、一九七三
- (21) 鈴木修次『日本漢語と中国』、中公新書、一九八一
- (22) 平田森三『キリンのまだら』、中央公論社、一九七五
- (23) 寺田寅彦随筆集、第四巻、岩波文庫

- (24) 朝永振一郎『物理学とは何だろうか』(上・下)、岩波新書、一九七九
- (25) 報告集「第四回シンポジウム」物理研究者のみたエネルギー問題”(一九八二・二・八)」、理化学研究
所、一九八三
- (26) 杉山明博『日本文化の型と形』、三一書房、一九八二
- (27) 『日本の形』、朝日新聞社、一九八二
- (28) 小林禎作『雪華図説新考』、築地書館、一九八二
- (29) B. B. Mandelbrot, *Fractal Geometry of Nature*, Freeman (1982)
- (30) 小川泰「数理科学」、一九八一年一月号
- (31) 中村良夫『風景学入門』、中公新書、一九八二
- (32) 松田博嗣『ランダム系の物理学』(日本物理学会編)、培風館、一九八一
- (33) 三上章『象は鼻が長い』、くろしお出版、一九六〇