

題名	科学者という職業
Title	A Scientist by Choice
著者名	エドワード・ノートン・ローレンツ
Author(s)	Edward Norton Lorenz
言語 Language	日本語・英語 Japanese, English
書名	稲盛財団：京都賞と助成金
Book title	The Inamori Foundation: Kyoto Prizes & Inamori Grants
受賞回	7
受賞年度	1991
出版者	財団法人 稲盛財団
Publisher	The Inamori Foundation
発行日 Issue Date	4/30/1993
開始ページ Start page	110
終了ページ End page	135
ISBN	978-4-900663-07-7

科学者という職業

エドワード・ノートン・ローレンツ

科学者になってりっぱな仕事をするにはどんな人間でなければならないか？ この質問をいろいろな科学者に向ければ、たがいに食い違うさまざまな答えがたぶん返ってくるでしょう。科学畑以外の人達に尋ねれば、答えはなおのことバラバラになりそうです。私はこの記念講演で私なりの意見を申し上げたい。それからその意見を補強する意味で、事例として私自身の人生をお話したいと思います。

まず第一に、科学者になろうとする人は、科学にまつわる事柄に、世界や宇宙で起こるさまざまな現象に強い好奇心を持っていなければなりません。水に小石が落ちると波の輪が広がっていきます。季節が秋になるとカエデの葉が鮮やかな赤やオレンジや黄色に変わります。あるいは火山が真っ赤に燃えた粉塵を空高く噴きあげることがあります。そんな現象にふれたら、どうしてそうなるのかと疑問を持たなければいけません。けれども一流の科学者をめざすなら、なぜそうなるかを知るだけでは足りません。なぜそうならなければならないのかと問わなければならないのです。科学者以外の暮らしを送っている人なら、水の波紋の規則性に目を見張り、秋の森の色合いに心をふるわせ、噴煙をあげる火山の姿に肅然とさせられることはあっても、そうした現象がどうして、なぜ起こるのかの説明には退屈するかもしれません。科学者はそれではだめなのです。

次に、優れた科学者は自分の興味をひく問題の回答を追求し、最終的に発見できる力がなくてはなりません。才能は人それぞれ違います。この他優美な詩が書けたり、崇高な音楽を作曲できる人でも、科学的能力に恵まれているとはかぎりません。また当然ながら、掛け値なしに有能な科学者でも、他人の感心するような詩や音楽をつくれる人は少ないでしょう。

最後に、広く浸透して、おそらくは一般に受け入れられている説明以外の説明はないか、科学者たるもの常に注意を怠ってはなりません。明確に述べられた正しい説明を理解できるだけでは十分ではありません。ある説明の筋道を追いかねる場合には、たとえそれがその分野の第一人者が提出したものであっても、非はこちらの理解力ではなく、その説明そのものに潜んでいることがあるのを知する必要があります。どのポイントで議論をたどれなくなるかをつかまなければいけません。次にそれを理解できる形に説明し直すか、きっぱりはねつけて自分なりの説明を追求する用意ができなければならないのです。

こうした性質は小さい時すでにはっきりしているもののでしょうか？ 子供の頃に現れることはよくあると思いますが、もっと成長してから現れることがないという証拠を私は見ていません。

A SCIENTIST BY CHOICE

Edward Norton Lorenz

What must a person be like if he or she is to become an accomplished scientist? If you pose this question to a group of scientists, you will probably receive a number of conflicting answers. You can expect an even greater diversity of opinion if you ask people outside the scientific community. In this Commemorative Lecture I wish to offer my own ideas, and then use my own scientific and nonscientific life as a case study, in an attempt to support my assertions.

First of all, a potential scientist must have an intense interest in the subject matter of science — phenomena of all sorts that occur in our world and our universe. He must wonder how a stone falling into a pool can produce expanding rings of waves, or how the coming of autumn can turn maple leaves to brilliant reds, oranges, and yellows, or how a volcano can send glowing ash high into the sky, but, if he is to rise to the top, he must also want to know why these phenomena *must* occur, and not simply why they may. Some persons from other walks of life may be charmed by the symmetry of the waves, thrilled by the hues of an autumn forest, or awed by the vista of a smoking peak, but yet might find themselves bored by any explanation as to how or why these sights arise. This will not do for a scientist.

Next, the successful scientist must possess the ability to pursue and ultimately discover answers to the questions that intrigue him. Talents differ, and those who can write the most exquisite poetry or compose the most sublime music may nevertheless be lacking in scientific ability. Naturally, there are also many truly competent scientists who could never write any poetry or compose any music that anyone else would care to read or listen to.

Finally, the scientist must always be on the lookout for other explanations than those that have been commonly disseminated and perhaps commonly accepted. It is not enough for him to be able to understand the explanations that are correct and clearly presented; he must recognize that when he fails to follow an argument, even when it has been put forth by a leader in the field, the fault sometimes lies not with his ability to understand but with the argument itself. He must recognize at just what point he can no longer follow the argument, and he must then be prepared to restate it in an understandable manner, or else reject it altogether and seek an explanation of his own.

Are these traits something that must be apparent early in life? I believe that they often show up in childhood, but I have not seen the evidence that they cannot emerge at a more mature age.

Let me turn to the case study with which I am most familiar — my own life.

今度は私にごくなじみ深い事例を、つまり私自身の人生を見ることにしましょう。ただ皆さんに望みたいのですが、私の話をやや不完全な自伝としてもっばらお聞きになるよりは、一人の人間がどのようにして科学の道をたどるに至るか、また、その彼や彼女がどのように他の科学者の説にふれ、その説に反応し、自分自身のアイデアにぶつかってそれを育て、発展させた結果が、時には専門分野を越え、普遍的に価値のある貢献をするに至るか、そういう話として聞いていただきたいと思うのです。

コネチカット州のウエスト・ハートフォードで私は生まれました。8,000人ほどの町でしたが、私が大きくなる間にその人口は3倍に増えました。隣接するのが州都のハートフォードで、こちらの人口は約15万人です。豊かな近郊住宅街の例にもれず、ウエスト・ハートフォードにはこの町独自の庁舎と消防署・警察署、学校制度がありましたが、事業や会社といったものはほとんどなく、住民の大半がハートフォードで働いていました。私は17歳までウエスト・ハートフォードの公立学校に通いました。けれども私にとって本当の先生は両親でした。

父のエドワード・ヘンリー・ローレンツはハートフォード育ちの機械技師でした。ビンなどのガラス製品を製造する機械を設計するのが仕事でしたが、科学のあるゆる方面にひとかたならぬ興味を抱き、中でも数学が大好きでした。母のグレースは旧姓をノートンといい、シカゴで教職の経験があり、そこでは地域活動にも深く関わっていました。二人は1916年に結婚し、それを機にウエスト・ハートフォードに家を買いました。翌年私が生まれたのです。

幼い時から私は数字の魅力に取りつかれました。母の話では、2歳にもならない頃、乳母車で散歩に連れていくと、家々の番号を残らず読んだそうです。数年して掛け算というものを覚えると、完全平方の数が入って、1から100の2乗の10,000までをそらで言えました。もっと後では、父と何時間も数字のパズルで遊びました。平方根を手書きの計算で求めて楽しんだり、立方根を開く方法まで覚えたものです。これはいまでは無駄に面倒なだけと相手にされないやり方で、私もとうの昔に忘れてしまいましたが。

もうじき7歳になるという、ある日曜の午後をはっきりと覚えています。ハートフォードの数マイル東にある知人の農場に家族皆で遊びに行った時のことです。その頃私は地図にはまっていて、他の地図の一部分を拡大した図を眺めるのがとりわけ好きでした。自分で想像した土地の地図を描いて、その一部を拡大し、そのまた一部を拡大したりしたものです。その知人の家で地図を見つけて私は読み始め、あげくに、さまざまな大きさの円形の物体がいくつも載っているページに行きあたりました。特

I hope that you can view my talk not primarily as a rather incomplete autobiography, but instead as an account of how a person may decide to follow a scientific career, and how he or she may become exposed to the ideas of other scientists, may react to these ideas, may encounter and develop ideas of his or her own, and may sometimes make more universally valuable contributions by extending these ideas beyond his or her special field.

I was born in West Hartford, Connecticut, a town of about 8,000 that tripled its size while I was growing up, and that lay adjacent to Hartford, the capital of Connecticut, with about 150,000 inhabitants. Like many well-to-do suburbs, West Hartford had its own town hall, fire and police departments, and school system, but it had few businesses or industries, and most of the residents worked in Hartford. I attended the West Hartford public schools until I was seventeen years old, but my real teachers were my parents.

My father, Edward Henry Lorenz, was a mechanical engineer who had grown up in Hartford. His work involved designing machinery to make bottles and other glass articles, but he was fascinated by all aspects of science, and particularly mathematics. My mother, née Grace Norton, had been teaching in Chicago, where she was also deeply involved in community affairs. When my father and mother married in 1916, they bought a home in West Hartford, in which I was born the following year.

At an early age I became fascinated with numbers. My mother told me that before I was two years old, when she would take me for a walk in a go-cart, I would read all the numbers on the houses. A few years later, when I learned what multiplication was, I became fond of the numbers that were perfect squares, and I could recite them from 1 to 10,000. Still later I would spend many hours with my father, playing with mathematical puzzles. I also enjoyed taking square roots by the long-hand method, and even learned a method for extracting cube roots — a procedure which is now rejected as unnecessarily cumbersome, and which I have long since forgotten.

I clearly remember a Sunday afternoon when I was nearly seven, when our family went to visit some friends on a farm a few miles east of Hartford. I had by then become fond of maps, and I especially enjoyed looking at maps that were enlargements of sections of other maps. I even used to draw maps of places that I had invented, where I could enlarge a section, and then a section of a section. At our friends' house I found an atlas which I began to read, and eventually came to a page showing a number of circular objects of different sizes. I was especially struck by something that looked like a ball with a big ring around it that reminded

に気に入ったのは、周りに大きな輪のついたボールのように見える物体で、いつか漫画で見た変な帽子を私は連想しました。これは何なのと父に尋ねると、父はいろいろな惑星や土星の輪のことを話してくれました。その午後が、いまに至るまで消えない天文学への愛着の始まりでした。1年足らずのうちに私はその報酬をもらいました。ハートフォードに皆既日食が訪れたのです。凍てつくような寒い日で、雪に覆われた野原に影の帯がゆらめくのが見えました。

大人になって私が科学の道に進むのをその当時予測できたのでしょうか？ 数字と地図と惑星だけが興味の対象だったらおそらくできたでしょう。でも他にもあったのです。ほとんどありとあらゆるカードゲームとボードゲームが好きでした。大部分は母から習いました。家にいる時の私の退屈をまぎらせようと教えてくれたのです。母はチェスの名手でしたから、自然に私もチェスを覚えました。その後私はハイスクールのチェス・チームの主将になり、大学でも主将を務めました。いろいろ覚えた中に、残念ながら囲碁は入っていませんでした。

ふつうのゲームの他、クロスワードパズルとジグソーパズルがあり、いまもって愛好しています。子供の頃に遊んだ20組ほどの高級な手作りの木のジグソーパズルを私はいまだに持っています。父と私は全部のピースを文字通り覚えこんでいました。それぞれのパズルをどちらが速く完成できるか競争したものです。箱の裏カバーに書きつけた二人のタイムが現在も残っています。

音楽にかけていい耳を持っていた私は、母の歌が調子はずれなものを3歳にならないうちに知りました。それでも母の歌声を聞くのは好きでした。9歳の時、バイオリンを習うようになりました。初めはレッスンが楽しかったのですが、必要な指の器用さを私は持ちあわせず、本当に心地よい音を出すことも、ビブラートをかけることもできませんでした。いまになってわかりますが、私が本当に求めているのは音楽について学ぶことで、演奏のやり方ではなかったのです。

同年齢の男の子よりたいてい私は小柄でしたし、ほとんどのクラスメートより1歳年下でした。そのためもあって、私はチーム・スポーツがついにうまくありませんでした。試合に加わろうとしても格別いい顔はされませんでした。ハイスクールに進む頃には、水泳で仲間達になんとか追いつくことができました。たいていの友達のほうが泳ぎはいくぶん速かったものの、私は誰よりも長く潜水できたのです。いくつか夏を過ごすうちに水泳とともにハイキングも好きになりました。やがて私は誰よりも速く山の頂上にたどりつけるようになりました。運ぶべき体重があまりなかったからです。今日に至るまで、音楽とならんで山登りは余暇を過ごす最大の楽しみになってい

me of a peculiar hat that I had seen in a cartoon. I asked my father what it was, and he told me about all the planets, and about Saturn's rings. That afternoon was the start of a love of astronomy that I have never lost. I was rewarded less than a year later when a total eclipse of the sun came to Hartford on a bitterly cold day, and I could see the shadow bands shimmering across the fields of snow.

Could one have predicted at that time that as an adult I would turn to the sciences? Perhaps so, if numbers and maps and planets had been my only interests, but there were other things. I loved card games and board games of almost all sorts. Most of these my mother taught me, when she had to think of some way to amuse me when I was not at school. She was an excellent chess player, and naturally I learned the game; years later I became captain of my high-school and then my college chess teams. Unfortunately the games I learned did not include Go.

Besides regular games there were crossword puzzles and jigsaw puzzles, which I still love. I still have a collection of about twenty high-quality hand-cut wooden jigsaw puzzles that I had as a boy. My father and I both virtually learned all the pieces by heart. We used to compete to see who could put each puzzle together more rapidly, and our times are still recorded on the inside covers of the boxes.

I had a good ear for music, and knew before I was three that my mother was singing off key, but I loved to hear her sing anyway. At nine years of age I began lessons on the violin, but, although I enjoyed them at first, I didn't have the necessary dexterity in my fingers, and I never could produce a really pleasing sound or play with vibrato. I realize now that what I really wanted was to learn about music instead of how to play music.

I was smaller than most boys my age, and was also a year younger than most of my classmates, and partly for this reason I never became adept at team sports, nor was I particularly welcome when I tried to enter a game. By the time I reached high school I had managed to equal my companions in swimming. Even though most of them could swim a bit faster, I could swim farther under water than any of them. During the summers I also became fond of hiking, and soon I could reach the top of a mountain faster than most of my friends; I didn't have much weight to carry. To this day mountains, along with music, are my greatest spare-time interests.

I don't suppose that my activities as a child were any more varied than those of most other children whom I knew. Certainly many of them had interests that I lacked. Perhaps, however, my interests were diversified enough to have made

ます。

子供の頃やっていたいろんなことが、身近にいたいていの子供と違っていたとは思いません。私にない関心を持っていた友達が少なくなかったのは確かです。けれども科学以外の仕事に進んでもよかったほど、私の関心は多様だったとはいえるかもしれません。

とはいえ、ダートマス・カレッジに入学した時、数学を専攻する気持ちはもう固まっていた。例えば歴史などを専攻して、かたわらで数学のコースをとるほうがよくはないかと指導教師に勧められもしました。受講した物理学と地質学の初級コースも魅力はあったのですが、私の気持ちは変わりませんでした。この初級コースで説明される議論の筋道に単純についていけない例があったのです。後から振り返ると、教科書が簡単な説明を意図するあまり、簡略にしすぎて考え方の論理的つながりを壊してしまったようなのですが、当時の私にはそれがわかりませんでした。最上級生になって数学科の講座で数理解物理学のコースをとったとき、数式で表現されると、理解できなかったいくつかのポイントがはっきりしました。

卒業を前にして、数学の勉強を続けたいと改めて考え、それで1938年の秋、私はハーバード大学の大学院に入りました。科目のことごとくが楽しみなカリキュラムを思うと、想像がはちきれんばかりに引きつけられたのです。ダートマスでの基礎勉強はりっぱなものだったとわかりましたが、群論、集合論、組み合わせ位相幾何学など、皆目知らなかった概念や研究分野がたくさんあることに私はやや圧倒される思いでした。数学科の他の大学院生と親しくなって、あれこれ専門的議論を交わしたのはかけがえのない経験で、親しい思考方法になじむうえで役立ちました。

最終的にはジョージ・バーコフの指導のもとで数理解物理学の一分野に取り組むことにしました。このいくつかの問題について、物理学のようではないと物理学ではないと私が言ったのを認められたからかどうかはわかりません。バーコフ先生はアメリカを代表する数学者の一人で、彼の仕事は数学のほぼすべての分野をカバーしていました。美学の数学理論を定式化したことでも有名でした。初級コースでの彼の講義は時についていくのが困難でしたが、現に取り組んでおられる問題をしばしば扱った上級コースの授業は実に圧巻でした。時として、先生自身がそれまでつかんでいなかった結果を授業中に黒板上で引き出されるところを、私達はじっと注目したものです。

変な話ですが、もともと数字に目がなくてこの学問に引きつけられたというのに、0と1と2を除けば、数字にはめったにお目にかかりませんでした。数を象徴する記号はいくらも出てくるのですが、数そのものは、整数論の講義にすら、決してといっ

something other than a scientific career a possibility.

Nevertheless, when I entered Dartmouth College I had already made up my mind to major in mathematics. Neither the suggestion of one advisor that it might be better to major in something like history, and take mathematics courses on the side, nor the appeal of the elementary courses in physics and geology that I attended, changed my decision. There were instances where I simply could not follow the logic of the arguments presented in the latter courses. In retrospect, it seems likely that the textbooks, in trying to present simple arguments, had oversimplified them so much that the logical chain of ideas was broken, but I failed to recognize this at the time. When as a senior I took a course in mathematical physics, offered by the mathematics department, some of the points that I had not understood became clear when written as mathematical equations.

Before graduating I realized that I wanted to continue studying mathematics, and in the autumn of 1938 I entered the Graduate School at Harvard University. The idea of a curriculum where I would enjoy every subject was almost unimaginably attractive. I found that my basic preparation at Dartmouth was excellent, but I was somewhat overwhelmed by the number of concepts and fields of study of which I had been completely unaware, such as group theory, set theory, and combinatorial topology. Other graduate students in the mathematics department became my close friends, and our many technical discussions were invaluable in helping me adapt to the new ways of thinking.

I eventually chose to work under the guidance of George Birkhoff on a problem in mathematical physics. I am not sure whether he appreciated my reference to some of these problems as things that looked like physics but were not physics. Birkhoff was one of the very top American mathematicians, whose works covered virtually every branch of the field. He was noted for having formulated a mathematical theory of aesthetics. In elementary courses his classroom lectures were sometimes hard to follow, but in advanced courses, which often dealt with problems that he was currently investigating, he was fascinating. We would sometimes watch him derive on the blackboard, during class, some new results that he himself had not obtained before.

Oddly enough, in a field to which I had originally been attracted because of my love for numbers, I seldom saw any numbers except 0, 1, and 2. There were plenty of symbols representing numbers, but the numbers themselves almost never appeared, even in the lectures in number theory.

With the outbreak of the war it became apparent that I would not be able to complete my final year. The Army had meanwhile been circulating notices of

ていいほど登場しなかったのです。

大戦が勃発して、最終学年を完了できそうもないのがはつきりしてきました。一方、陸軍がいくつかの大学で気象学を学ぶ学生を募集するという告知を回覧していました。合格した者は兵籍に入った後入学を許され、卒業しだい気象予報官になる、というものです。気象と、それがいきなり変化する様子には昔から大いに興味がありました。こうして、ハーバードから博士号を受けとる予定にしていた数か月前、私はチャールズ・リバーをほんの2マイル下ってマサチューセッツ工科大学に移り、100人の仲間達と一緒に、表向きは気象予報官になる勉強をすることになったのです。

やがて明らかになったのは、われわれは予報官ではなく気象学者になるのだということでした。その区別をつかむのには時間がかかりました。気象学は大気のあらゆる様相を扱います。どの子供も尋ねそうな「雨はどうして降るの?」というような単純な疑問に答えるのも仕事ですが、例えば「気流の渦巻きと発散とではどちらが熱帯の気象変動に大きく影響するか?」といった、素人にはちんぷんかんぷんであろう専門的疑問に答えを出すのも気象学の仕事なのです。気象予報は確かに有力なテーマであり、それが人間活動と広くかかわるために、気象学者の多大な努力を要求してきました。しかし天気図の書き方や天気予報を仮にまるで知らなくとも、気象学で抜きでた仕事をするのは可能なのです。

実のところ、私達はM.I.T.で気象学の大学院課程に入れられたのでした。ただ、あたりまえなら2年間かかる課程を8か月で詰め込まれました。午後は、事例研究に過去の天気図から選んだ一連の経過を使って予報を学びました。午前中のクラスではもっぱら理論を扱いました。大半は予報と関係すると思われましたが、中には予報の改善につながるとはされないものもありました。M.I.T.の気象学科は世界のどこにもひけをとらない優れたもので、だから学生に本物の科学を教えたいと思うのは自然でした。士官はジェントルマンであるという陸軍の哲学と、これはおそらく矛盾しなかったのです。

私の数学的素養と一番無理なくかみあいそうなのは気象力学の分野でした。気象力学の研究者は、液体のしずくと固体の粒子がいくらか混じっている不等質な気体の巨大な塊として大気を眺め、凸凹のある表面を持ったほぼ球状の地球をそれが覆っているととらえます。現実にはこの不等質性と凸凹はしばしば無視されます。どの土地の気象も、気象力学者にとっては、その土地の気体密度、気圧、気温、三次元の風速、気体・液体・固体としての水分、そして厳密にいうなら塩分・ホコリ・煙といった不純物を加えた全体で構成されます。どんな土地であれ、これらの諸量が同時にとる値

courses in meteorology to be offered at a few universities, where suitably qualified persons would be allowed to enroll after enlisting, and upon graduation would become weather officers. The weather and its sudden changes had always fascinated me. Thus it was that a few months before I had expected to receive a doctorate from Harvard, I found myself moving just two miles down the Charles River to the Massachusetts Institute of Technology and joining a hundred other students, ostensibly to study to become weather forecasters.

It soon became evident that we were studying to be meteorologists. The distinction is one that I was slow to appreciate. Meteorology deals with all aspects of the atmosphere. It is concerned with answering simply worded questions that any child might ask, such as "Why does it rain?" or more specialized questions that would mean little to a layman, such as "Does vorticity or divergence exert a greater influence on tropical weather fluctuations?" Weather forecasting does occur among the prominent topics, and it has commanded a large share of the efforts of meteorologists because of its relevance to many human activities, but it is possible for one to have a distinguished career in meteorology without having any idea of how to draw a weather map or forecast the weather.

We were, in fact, enrolled in the regular graduate program in meteorology at M.I.T., except that what would ordinarily have occupied two years was crowded into about eight months. In the afternoons we learned to forecast, using selected sequences of past weather maps as case studies. In the mornings we attended classes devoted largely to theory, most of which seemed relevant to forecasting, but some of which had not been shown to lead to improved forecasts. Our faculty in meteorology was as outstanding as any in the world, and it was natural that they should want to teach real science to their students. This was probably compatible with the Army's philosophy that an officer is a gentleman.

The subject that seemed to fit in most naturally with my mathematical background was dynamic meteorology. The dynamic meteorologist looks at the atmosphere as a large inhomogeneous mass of gas infused with some liquid drops and solid particles, enveloping an approximately spherical earth with an irregular surface. In practice he often overlooks the inhomogeneities and irregularities. He regards the weather at any location as consisting of the local values of density, pressure, temperature, three-dimensional wind velocity, and gaseous, liquid, and solid water content, and strictly speaking, the concentrations of such impurities as sea salt, dust, and smoke. The simultaneous values of these quantities at all locations constitute the state of the atmosphere. This state changes from one time to the next according to a set of physical laws. The dynamic meteorologist

がその時の大気の状態を決めるのです。この状態は物理法則にのっとって刻々と変化します。気象力学者はこうした諸法則を方程式の体系として表し、その式を広範な問題にあてはめるのが気象力学なのです。

現場の予報官は、そんな大気のとらえ方をせいぜいのところ不完全と見るでしょう。気象が構造を形づくる過程に予報官は注目します。その構造に含まれるのは、地球をとりまくジェット気流、移動する亜大陸サイズの暴風^{ストーム}、もっと小規模の、台風・サイクロン・ハリケーンなどと呼ばれる強い嵐、スコールを起こし、時には旋風^{トルネード}を生むそびえたつ雲の峰、もっと小型の無害な雲。これで完全なリストとはとても言えません。こうした構造が日によって、時間によって位置と強さを変える経過を予報官は観察します。また、新たな構造が現れる兆候や古い構造が崩れていく兆候をとらえます。こうして獲得した知識を応用して天気を予報し、基本にある物理原則をはっきりと利用することはほとんどないでしょう。気象力学者にしても、こうした構造をむろん意識はしています。けれども彼の関心はその存在を説明することに限られるかもしれません。これとてもしばしばたやすい仕事ではないのです。

課程を修了した後、私は4人の級友とともにM.I.T.に残って次のクラスの講師を務めるよう命令を受けました。上級のクラスを受講する機会がこれでできたわけで、私はいっばしの気象学者になった気分を味わいかけていました。しかし優れた気象学科ではあっても、いくつかの基本思想が見あたらないように思いました。力学方程式を気象予報にどう使うか——そのために気象力学を研究するのだと私は素朴にも考えていました——を教わったことはついぞないばかりか、そのように利用できるという話すら聞いたことがなかったのです。のちになって知ったことですが、先生方は式を予報に使うすべを知らなかったのみならず、それが可能かどうかも知らなかったのです。不可能だと別の大学の傑出した気象学者達が考えていることも後で知りました。

そのうちに、私は予報官として熱帯地方に送られました。そこで発見したのは、あれほど綿密に学んだ温帯地方の予報ルールが多くが熱帯では通用しないということでした。予報技術を少なからず学び直さなければなりません。しかも今度は大学の教室の外で。それにまた、あらためて痛切に認識させられたのは、地球儀を見れば誰にもわかることですが、地球の多くの割合は熱帯であること、またそれほど明白ではありませんが、気象に対する熱帯の影響はその地理的境界をはるかに超えていることでした。

戦争が終わると、ハーバードで数学の研究に戻るか、M.I.T.で気象学を続けるかの

expresses these laws as a system of equations, and dynamic meteorology consists of the application of these equations to a wide variety of problems.

The practicing forecaster would regard any such view of the atmosphere as at best incomplete. He would note how the weather is organized into structures, which include globe-encircling jet streams, migratory storms of subcontinental size, smaller more intense storms known as typhoons, cyclones, or hurricanes, towering clouds that give rise to showers and sometimes spawn tornados, and smaller innocuous clouds. The list is far from complete. He would observe how these structures change their locations or intensities from one day or one hour to the next, and he would learn the telltale signs for the appearance of new structures or the decay of old ones. He would forecast the weather by applying this acquired knowledge, and would make little explicit use of the underlying physical principles. Of course, the dynamic meteorologist is also aware of these structures, but his interest in them may be confined to explaining their existence — often not an easy task.

After completing the course I received orders along with four classmates to remain at M.I.T. as instructors for the next class. This gave us the opportunity to attend some advanced classes, and I began to feel more like an experienced meteorologist, but, despite our excellent faculty, a few basic ideas seemed to be missing. Not only were we never shown how to use the dynamic equations to make weather forecasts, which I had naively assumed was the reason for our studying dynamic meteorology, but we were not even told whether they could be used in this manner. Only later did I learn that our instructors not only did not know how to use the equations for forecasting, but they did not know whether this was possible. I also learned that some outstanding meteorologists at other universities believed that it was impossible.

In due time I was sent to the tropics as a forecaster. There I discovered that many of the rules for forecasting in temperate latitudes that we had so carefully learned did not work in the tropics. To some extent I had to learn forecasting again, and this time not in a university classroom. I also became more acutely aware of what anybody can see by looking at a globe, that the tropics cover a huge portion of the earth, and, what is not so obvious, that their influence on the weather extends far beyond their boundaries.

Following the war I had to decide whether to return to mathematics at Harvard or continue in meteorology at M.I.T. After much deliberation I chose meteorology. Mathematics deals with concepts and their interrelations, and establishing a theory of any concept has required or will require much intensive

選択に迫られました。さんざん考えた末、私は気象学を選びました。数学は諸概念とその相互関係を扱う学問です。ある概念における理論を打ち立てるには、極めて集中した研究が要求されます。例えば素数の研究は何百年も前に始まったのですが、答えの出ていない問題がいまだにあります。数学者は、古くからの概念がまだしっかり理解されないうちに、いとも簡単に新しい概念をつくりだすように見えます。挑戦しがいのある問題がいつもたくさん出てくるのは疑いのないところでしょう。にもかかわらず、気象学上の未解決の諸問題のほうがより根本的だと私は考えました。その解決に寄与できる自信がありました。一例をあげれば、私が初めに教室で、次に現場で学んだ、予報官なら誰でも心得ている単純なルールがあります。すなわち、暴風は進んできた方向にそのまましばらく進み続ける、というものです。このルールを私も予報に使ってきましたが、暴風がその方向に進み続けるのはなぜなのか、その点でいえば、暴風がそもそもなぜ移動するのかも、学んだ覚えがありませんでした。こんな基本的問題が挑戦意欲をそそったのです。

気象力学への関心と、気象予報は気象学の重要な一部であるという考えを抱いたまま、私は博士論文に取り掛かりました。暴風の動きの予測に力学方程式をあてはめる方法を提案した論文です。いくらか修正を加えれば実用に使えたかもしれませんが、当時開発中だった他の方式よりも私の方法は面倒でした。だからこれが実用に供される時がくるとは思っていません。

けれども教室は論文を受け入れてくれました。この月は実際、私にとって素晴らしい月でした。数週間してジェイン・ローバンと結婚したのです。彼女は気象学科で研究助手をしていました。結婚後、私はそのままM.I.T.で博士課程修了の研究員として、数か月前に教室に着任したばかりのビクター・スターの指導するプロジェクトで働くことになりました。ジェインはしばらくの間仕事を続けました。

スターはまだ40歳前の若さながら、世界でも屈指の気象力学者と目されていました。彼は私の指導教師に、そして親友になりました。最初私は彼の弟子として、私がスタッフに加えられてからは同僚として、引退してほどなく彼が世を去るまで、4半世紀を越えて一緒に仕事をしました。

スターは講義でも論文でも、自分の理論を実に明快に提示しました。大気について、それまでの研究者が解決できなかった事柄に力学方程式を正しくあてはめ、意味深い結論を引き出す力量がありました。私達が知り合った数年のうちに、暴風がなぜあのように進むのかについて、初めての説明ではないものの、私が心底理解できる最初の説明を彼は提出しました。皮肉なことに、この論文は、私の知るかぎり、掲載を

research. The study of prime numbers, for example, began centuries ago, and there are still some unanswered questions. Mathematicians seem to have no difficulty in creating new concepts faster than the old ones become well understood, and there will undoubtedly always be many challenging problems to solve. Nevertheless, I believed that some of the unsolved meteorological problems were more fundamental, and I felt confident that I could contribute to some of their solutions. For example, I had learned, first in the classroom and then in the field, a simple rule that every weather forecaster knows, namely, that storms are likely to continue to move for a while in the directions in which they have been moving, and I had used this rule in making forecasts, but I had never learned *why* storms would continue to move in one direction, nor, for that matter, why they moved at all. It was basic questions like these that offered a real challenge.

With my interest in dynamic meteorology and my continuing belief that weather forecasting was an important part of meteorology, I proceeded to write a doctoral thesis that proposed a method of applying the dynamic equations to the prediction of the motions of storms. I believe that with some modifications the method might have been practical, but it was more cumbersome than some others that were concurrently being developed, and I do not expect that it will ever be put to use.

Our faculty did, however, accept the thesis. This was indeed my greatest month, for a few weeks later Jane Loban and I were married. Jane had been working in our department as a research assistant. After our marriage I began to work as a postdoctoral scientist, still at M.I.T., on a project directed by Victor Starr, who had joined the faculty a few months earlier. Jane continued with her job for a while.

Although not yet forty, Starr was already recognized as one of the world's top dynamic meteorologists. He became my mentor, and also a close friend, and I worked with him, first as a protégé and then as a colleague after I received a faculty appointment, for over 25 years, until his death shortly after his retirement.

He presented his ideas, in his lectures and in his writings, with remarkable clarity. He had the ability to draw meaningful conclusions about the atmosphere by properly applying the dynamic equations, where others before him had failed. During the early years of our acquaintance he presented what was, if not the first explanation of why storms move as they do, the first one that I could really understand. Ironically, this was his only paper, as far as I know, that was rejected for publication, not as being technically incorrect but as being somewhat ambiguous. Personally I still find Starr's explanation clearer than any other.

断られた彼の唯一の論文なのです。専門的に誤っているというのではなく、いくぶんあいまいだという理由で。私個人としては、スターの説明はいまなお他のどれにもまして明快だと思うのですが。

20世紀も中間点を迎え、気象学は急速に前進する兆しを見せていました。中でも注目すべき新展開は、力学方程式を解くことで気象を予測する数値予報でした。これは何年も前から可能性が説かれてはいたものの、不可能とする意見も根強かったのです。しかし、一部の気象学研究グループでコンピューターを利用するようになったため、現実性が高まってきたのです。私は作業の進展を熱心にフォローし、研究者の何人かと知り合いになりましたが、自分で直接かかわることはありませんでした。

アメリカの大学の気象学研究は当時もいまもほとんどそうですが、私達の研究も外部の団体の資金で行われていました。私達の契約は自由にやれる余地が大きかったとはいえ、大気の大循環を調べることは決められていました。大気の大循環というのは、地球をとりまく偏西風・偏東風の流れ、およびそれとともに南北の極や赤道方向に向かったり上や下に向かう偏流をいいます。それと、こうした動きにともなう気温や湿度のパターンも含めて考えるのが一般です。私はこの大循環の動態と主にかかわるようになりました。

研究の過程で、アリゾナ州フラッグスタッフにあるローウェル天文台にひと夏来てみないかと誘われました。ここでは同様な委託プロジェクトで他の惑星の大気循環を調査していたのです。私は喜んで応じました。そこで手に入れた若干の成果は、興味深いとはいえびっくりするようなものではありませんでした。ですから、気象学から天文学に鞍替えしようと真剣に考えることはなかったものの、大型屈折望遠鏡の操作を覚え、木星の観測に夜の幾多の時間を費やしたことで、子供の頃からの夢が一つになったのです。

私が初めて意味のある発見をしたのはそれから数年後のことでした。注目はされていながら未解決の問題がありました。地球に達する太陽エネルギーの小部分が大気を動かす運動エネルギーに変わり、それによって摩擦で消えるエネルギーと置き換わるという一連の現象です。スターと私は以前からこの問題をたびたび話し合っていたのですが、大気中にすでに熱の形で存在するエネルギーのどれだけが運動エネルギーへの変換にあてられるか、そこにはなんらかの尺度があるはずだというのが彼の意見でした。

気象力学の研究は数学的性格のため、大部分は黒板か紙と鉛筆を使ってやっていました。コンピューターはまだ一般的ではなかったのです。ただし全部を研究室でやっ

This was the midpoint of the 20th century, and meteorology was beginning to move rapidly ahead. The most exciting new development was numerical weather prediction — forecasting the weather by solving the dynamic equations — prophesied years earlier as being possible, even though others were maintaining that it was impossible, but now becoming practical because computers were becoming available to some meteorological groups. I followed the developments eagerly, and became acquainted with some of those involved in the work, but never became directly involved myself.

Like most meteorological research going on at American universities, then as well as now, our work was funded by an outside agency. Our contract gave us a great deal of leeway, but it did stipulate that we should investigate the general circulation of the atmosphere. This term refers to the globe-encircling westerly and easterly wind currents and the accompanying poleward and equatorward and upward and downward drifts. It is also generally taken to include the temperature and moisture patterns that must accompany these motions. I became principally involved with the dynamics of the general circulation.

In the course of my work I was invited to spend one summer at the Lowell Observatory in Flagstaff, Arizona, where a similarly organized project was investigating the general circulations of the atmospheres of the other planets. I accepted eagerly. I obtained some results that, although interesting, were not startling, and I did not seriously consider changing my field from meteorology to astronomy, but one of my childhood dreams was fulfilled when I learned to use the large refracting telescope, and spent many nighttime hours observing Jupiter.

My first significant finding came a few years later. One problem that had not lacked attention but was unsolved was the chain of events through which a small percentage of the solar energy reaching the earth is converted into the kinetic energy of the atmospheric motions, thereby replacing the energy that is dissipated by friction. Starr and I had often talked about the problem, and he felt that there ought to be some measure of how much energy already present in the atmosphere in the form of heat is *available* for conversion into the energy of the motions.

Because of its mathematical nature, most research in dynamic meteorology was carried out on the blackboard or with pencil and paper; computers were not yet generally available. Not all of this work was performed in the office. Starr soon acquired many postdoctoral associates and graduate students, and we would often have lunch together at one of the local eating places. As often as not, before we left, the paper napkins and place mats were filled with equations or diagrammatic sketches.

たわけではありません。スターはやがて博士課程修了の研究員や大学院生をたくさん抱えました。それで私達はよく町の食道で昼食を一緒にとりました。私達が引き上げる頃には、紙ナプキンやテーブルマットは、たいてい方程式やら図式のスケッチやらで埋まっていたものです。

ある日の夜、真夜中過ぎに自宅で目を覚ました私は、利用されるエネルギーについてまた考え始めました。妻と子供達はよそへ出かけていて、あたりはすっかり静まり返っていました。数分すると、利用されるエネルギーを定式化する方法を私は思いついていたのです。再び眠りにつく前、1時間かそこらのうちに、この「新たな」エネルギー形態を特定し、太陽熱でそれが生まれ、ついで上昇気流と下降気流のシステムによって運動エネルギーに変えられる割合を表すのに要する式をことごとく考えつきました。少なからず心が高ぶりましたが、ようやくまた眠りに落ちました。けれども1時間ほどですぐ目が覚めて、今度は、大気の流れに含まれるエネルギーが重畳する暴風のエネルギーに変換される過程を表す一群の方程式を引き出しました。これは大気エネルギー・サイクルで欠けていた最後の環だったのです。次に目覚めると明るくなっていました。私は鉛筆とメモ用紙をひつつかみ、あれは空想にすぎなかったのかどうか確かめようと、夜中に私の頭をよぎっていった方程式を書き始めました。数学的ミスは見あたりませんでした。出勤した後その方程式をスターに見せました。何もかもすっきりと解かれていることにスターは、最初やや驚いたふうでしたが、すぐに、できるだけ急いでこの成果を発表したまえ、といいました。そこから生まれた論文は、肝心な作業は鉛筆も明かりもなく1、2時間で完成したとはいえ、私の最も重要な仕事のひとつだといまでも思っています。

ここで、成果の樹立とその発表について、いささか私見を述べておくのが適当でしょう。論文を提出してみると、同じ内容をもう誰かが発表済みだったと知らされる—そんな羽目に陥りたくないのは誰だって同じです。ある問題を研究する前に、有能な研究者ならその問題に関連するそれまでの研究すべてを把握しておくだろう、という意見を見たことすらあります。私は必ずしも賛成しません。

一つの狭い主題に限定できない新しいアイデアをたえず発想している人だとすると、着手して自分で結果を樹立するよりも、文献に目を通して自分の仮説がもう証明済みか、成り立たないのが証明済みかを調べることのほうによい時間をとられるのは目に見えています。それにまた、他人の成果と同じ結果を生むことのほうが、結論をただ読むよりもその主題を深く把握できますし、応用の可能性を考えることもできるのです。

One night at home I woke up shortly after midnight and began to think about available energy again. Jane and the children were out of town, and everything was very quiet. Within minutes I had thought of a way in which available energy might be formulated. In the course of an hour or so, before falling asleep again, I had worked out all of the equations needed to specify this “new” form of energy and to express the rates at which it was produced by solar heating and then transformed into kinetic energy by systems of updrafts and downdrafts. I became rather excited, but finally fell asleep again, only to wake up after another hour or so and derive another set of equations showing how the available energy contained in the global currents was converted into the available energy of the superposed storms — the final missing link in the atmosphere’s energy cycle. When I awoke again and daylight had arrived I grabbed a pencil and a pad of paper and began writing down the equations that had passed through my head during the night, to see whether they were more than a fantasy. I could find no mathematical error, and, after arriving at work, I showed the equations to Starr, who was at first a bit surprised that everything worked through so nicely, but soon advised me to publish the results as quickly as I could. I still regard the paper that resulted as one of my most important, even though the real work was done in an hour or two, without a pencil or a light.

It seems appropriate at this point to make some remarks about establishing results and publishing them. Obviously you do not want to submit a piece of work, only to discover that someone has already published the same thing. I have even seen it stated that before investigating a problem a competent research scientist will familiarize himself with all of the previously performed work relevant to the problem. I do not entirely agree.

If you are continually coming up with new ideas that are not confined to a single narrow topic, you may well need more time to search through the literature and discover whether your hypotheses have previously been proven or disproven than to plunge in and establish the result yourself. You will also gain a much deeper appreciation for your topic and its possible extensions by succeeding in duplicating someone else’s result than by simply reading about the result.

If you do come up with something worth publishing, it is time to search the literature for possible duplication, but even then you should not make the search so extensive that it seriously delays the publication date. If you cannot find anything fairly soon, your result may be new, and, if it is not, perhaps a reviewer will be aware of this. In the paper that has been cited more often than any other that I have written, the original reviewer found that some of the results had

発表しがいのある成果を上げたら、研究の重複はないかと文献を調べるのはその時です。その場合でも、発表の日時を大きく遅らすほど幅広く調べるべきではありません。割合早くに重複が見つからなければ、その成果はたぶん初めてのものですし、仮にそうでなくても、審査者がおそらく承知していることでしょう。私の書いた中で言及されることの一番多い論文は、最初に読んだ審査者が、結果の一部は他で以前に発表されているが、後の大部分は初めての成果だと気づいてくれたものです。草稿を書き直して再提出するのは簡単でした。審査者にもらった文献を引用しながら頭の部分を背景資料として提示し、次に新たな成果をもとに形をつけ加えたのです。

それから1年ほどして、トマス・マローンが気象研究センターの新設のためにわれわれの学科を辞め、私が彼の後任ということになりました。マローンは統計を用いる気象予報のプロジェクトを統括していました。その主要なツールは線形回帰——気象を支配する力学方程式ではなく、過去に観測した気象のふるまいを基礎にした統計学的手法です。線形回帰による予報は、例えば明日の東京の気温は今日の京都の気温の0.7倍プラス昨日の鹿児島島の気温の0.3倍だろう、というように予測します。もっとも、いまあげた具体的計算からは、さほどいい結果はたぶん出ないでしょう。コンピューターの発達にともなって、数多くの場所の気象要素を総合することができるようになりました。確立した方式から定まる数をそれらの値に掛けあわせて、単一の公式を生み出すのです。マローンの地位とともに彼のプロジェクトを私は引き継ぎました。そこには優秀な大学院生も何人かいました。こうして私は統計学にも首をつっこむことになったのでした。

線形回帰の有効性は、数値予報を含むどんなやり方にも本来劣らない数学的証拠がある、と以前から主張されてきました。私は疑いを持っていました。そこで簡単な方程式のシステムを使って——そんなシステムを今日では「モデル」と言います——この方法をテストしてみようと私は提案しました。このシステムで人為的気象データをつくり、その後線形回帰の方法でそのデータを再現できるかを見極めるのです。まもなく気づいたのですが、人為的データが周期的で、以前の値を規則的間隔で繰り返すとすれば、線形回帰は完全な予報を生むはずで、それでテストのためには、現実の大気一般にそんなのとちょうど同じように、そのたびごとに解にバラツキが出るようなモデルを見つける必要がありました。

コンピューターは処理速度がしだいに速くなり、小型化してきていました。ある日、わが学科の博士課程修了研究員だったロバート・ホワイ特君が——彼はのちに米国気象局の局長になりました——オフィスに私専用のコンピューターを入れてはどう

appeared before, while most of them were new. It was easy to revise the manuscript and resubmit it, presenting the earlier part as background material, with references that the reviewer had given me, and then including the new part in its original form.

A year or so later Thomas Malone resigned from our faculty in order to establish a new weather research center, and I was appointed to fill his place. Malone had been directing a project in statistical weather forecasting. The principal tool was linear regression — a procedure based upon the observed past behavior of the weather rather than the dynamical equations that govern it. An example of a forecast by linear regression might be one that predicts that tomorrow's temperature at Tokyo will equal 0.7 times today's temperature at Kyoto plus 0.3 times yesterday's temperature at Kagoshima, although this particular rule would probably not give very good results. With the development of computers it became feasible to combine the weather elements at many locations, after multiplying their values by numbers that would be determined by established methods, to produce single formulas. With Malone's position I also acquired his project, which included some excellent graduate students, and I proceeded to learn something about statistics.

It had been claimed that there was a mathematical proof that linear regression was inherently capable of performing as well as any other procedure, including numerical weather prediction. I was skeptical, and I proposed to test the idea by using a simple system of equations — today we would call such a system a “model” — to generate an artificial set of weather data, after which I would determine whether a linear formula could reproduce the data. I soon realized that if the artificial sequences turned out to be periodic, repeating their previous values at regular intervals, linear regression would produce perfect forecasts, so, for the test, I had to find a model whose solutions would vary irregularly from one time to the next, just as the real atmosphere appears to do.

Computers were becoming faster and more compact, and one day Robert White, a postdoctoral scientist in our department who later went on to become Chief of the U.S. Weather Bureau, suggested that I acquire a computer for use in my own office. In this age of personal computers one might wonder why I had not already done so, but in 1958 such a thing was almost unprecedented, and the possibility had never occurred to me. I soon obtained a Royal-McBee LGP-30 computer about the size of a large desk. Suddenly I realized that my desire to do things with numbers would also be fulfilled.

After learning how to write computer programs and optimize them, I tested

かと勧めたのです。パソコンの時代だというのに、なぜ私がそれまでぐずぐずしていたのかと疑問を持たれる向きがあるかもしれません。でも1958年には、個人用コンピューターなどほとんど前例がなく、私にはそんな発想は思いもよらなかったのです。やがて私はロイヤル・マクビーLGP-30という大型デスクほどのコンピューターを手に入れました。数を使って物事を処理するという願いもまた満たされそうなことに、突然私は気づいたのでした。

コンピューター・プログラムの書き方と活用の仕方を身につけた後、私はいろいろなモデルを片っ端からテストにかけて、最後に12の方程式からなるモデルに到達しました。12の変数は、地球をとりまく偏西風の速度といった、気象の全体的特徴を表すものです。スタート時の気象パターンを表す12の変数を入力すると、コンピューターは6時間ごとのステップで気象パターンを計算していきます。各ステップには約10秒を要しました。4ステップごとに、つまりシミュレートした1日ごとに、12の変数の新たな値をコンピューターがプリントアウトします。これにも10秒かかりました。数時間後には大量の数字が生みだされ、12の欄の一つを眺めて数値の変化の様子を調べるのは簡単でした。周期性の徴候はまったくありません。さらに数週間、私は折にふれて、時にはスタートの条件を変えてコンピューターに計算の結果をはき出させました。全体的反応に周期性がないことは確実にになりました。シミュレートした気象に線形回帰の方法をいざあてはめてみると、平凡な結果が現れただけでした。

ある時点で一つの解をもっと詳しく検討したいと思った私は、コンピューターを止めて、その前にプリントされていた数字の列から12の数値をタイプインしました。再びコンピューターを作動させ、コーヒーで一服しようと外に出ました。1時間ほどして部屋に戻ると、コンピューターは約2か月分のデータを生産していました。ところが新しい解と最初のとがまったく食い違っているのです。初めはコンピューターのトラブルかと思いました。トラブルはけっこう多かったのです。しかし、新しい解をステップを追って前の解と照らしあわせていくと、最初の解の数値は同じで、次には小数位の最後に1だけ差が現れ、それからその差はしだいに大きくなっていき、シミュレーション上で約4日後には2倍の開きができました。あげく、6日後の両者の解は似ても似つかないものになってしまったのです。

ほどなくして私は何か起きたかを悟りました。コンピューターは小数点以下第6位くらいまでの数値を抱えていたのですが、12個の数値を1行にまとめて表示するために、プリントされた数値を小数第3位までで四捨五入するよう指示しておいたのです。ですから、タイプインした数値はもとの数値ではなく、近似値にすぎなかったの

one model after another, and finally arrived at one that consisted of twelve equations. The twelve variables represented gross features of the weather, such as the speed of the globe-encircling westerly winds. After being given twelve numbers to represent the weather pattern at the starting time, the computer would advance the weather in six-hour time steps, each step requiring about ten seconds of computation. After every fourth step, or every simulated day, the computer would print out the new values of the twelve variables; this required another ten seconds. After a few hours a large array of numbers would be produced, and it was easy to look at one of the twelve columns and see how the numbers were varying. There was no sign of periodicity. At times during the next few weeks I would let the computer grind out more solutions, sometimes with new starting conditions, and it became evident that the general behavior was nonperiodic. When I applied the linear-regression method to the simulated weather, I found that it produced only mediocre results.

At one point I wanted to examine a solution in greater detail, so I stopped the computer and typed in the twelve numbers from a row that the computer had printed earlier. I started the computer again, and went out for a cup of coffee. When I returned about an hour later, after the computer had generated about two months of data, I found that the new solution did not agree with the original one. At first I suspected trouble with the computer, which occurred fairly often, but, when I compared the new solution step by step with the older one, I found that at first the solutions were the same, and then they would differ by one unit in the last decimal place, and then the differences would become larger and larger, doubling in magnitude in about four simulated days, until, after sixty days, the solutions were unrecognizably different.

Soon I realized what had happened. The computer was carrying its numbers to about six decimal places, but, in order to have twelve numbers together on one line, I had instructed it to round off the printed values to three places. The numbers that I typed in were therefore not the original numbers, but only rounded-off approximations. The model evidently had the property that small differences between solutions would proceed to amplify, until they became as large as differences between randomly selected solutions.

At this point I became rather excited. I realized that if the real atmosphere behaved in the same manner as the model, long-range weather prediction would be impossible, since most real weather elements were certainly not measured accurately to three decimal places. During the following months I convinced myself that the lack of periodicity and the growth of the small differences were somehow

です。モデルには2つの解のわずかな差異を増幅していく性質があったと見えます。それで最後にはランダムに選んだ2つの解といえるほどの違いになったのでした。

ここにきて私はかなり興奮しました。実際の気象がこのモデルと同じようにふるまうとすれば、長期の気象予報は不可能だと知ったからです。なぜなら実際の気象要素の大半は、小数第3位まで厳密に測定できないのは確かなのですから。それから数か月の間に、周期性がないこととわずかな差異の拡大とは、なんらかの関係があると私は確信するに至りました。そして結局は、おおむね一般的な条件のもとでは、どちらのタイプの反応も他方を含んでいることを立証することができたのです。

こんな反応を表す現象を、今日ではしばしばひとまとめに「カオス」と呼んでいます。大気の予測可能性——気象のさまざまな要素をさまざまな範囲でどこまで予測することができるか——が、やがて私の第一の関心になりました。近年では、大気の大循環にとって代わって、最大の精力をふり向ける気象学のテーマになっています。あるセミナーで、講演者の私を紹介して司会者が「ミスター予測可能性」と呼びましたが、不正確な数値を入力したあの瞬間がなかったとすれば、予測可能性とかかわるようになったかどうかは知る由もありません。

大気のカオス的反応が重要なのは、予報能力に影響するからだけではなく、それをはるかに超えた意味を持つからです。科学実験を考えてみてください。物理学者や化学者が実験をする場合、別の誰かがやっても同一の結果を得られるのでなければならない、というのが常識です。結果に食い違いがあれば、実験のどちらかがあやしいと思われるでしょう。ところが気象学者など地球科学の研究者は、たがいにごく近似する実験結果を出せないことがたびたびあり、全体の質的類似で満足したりするので、だからといって気象学者が物理学者や化学者よりもいいかげんとはいえません。よりカオス的現象を相手にしているというだけのことなのです。

空気がたえず逆転している対流雲の形成に関する仮説実験を考えてみましょう。この種の雲を実験室で再現するのは困難です。だから実験といっても、ふさわしい場所に出かけて行って、都合のいい天候が現れるのを待つことになります。選んだ場所の付近一帯で、早朝2日間の気象条件が見たところ同じであるとし、正午が近づくとつれて、そのうち1日では小さな、どうということのない雲が現れるのに対して、他の1日では空高く雲がそびえたち、にわか雨になるかもしれません。この違いが起きるのは、大気の対流が本来カオス的だからではないでしょうか。それで、感知できない早朝のわずかの差異が何倍にも増幅していくのだと考えられます。雲を実験室で仮につくれたとしても、その後の実験では、目に止まらない小さな差異に始まって、

related, and I was eventually able to prove that under fairly general conditions either type of behavior implied the other.

Phenomena that behave in this manner are now often collectively referred to as “chaos.” Atmospheric predictability — the extent to which it is possible to predict various features of the weather at various ranges — soon became one of my principal interests, and in recent years it has replaced the general circulation as the meteorological topic that occupies the largest part of my attention. In introducing me as a seminar speaker a host once called me “Mr. Predictability,” but there is no way of knowing whether I would have become involved with predictability at all if it had not been for that minute or so when I typed the wrong numbers.

The importance of the chaotic behavior of the atmosphere extends well beyond its effect on our ability to predict. Consider experimentation. When a physicist or a chemist performs an experiment, it is commonly believed that someone else performing the same experiment ought to obtain the same result. If the results differ, one of the experiments may become suspect. Meteorologists and other earth scientists frequently find that they cannot repeat their results very closely, and they may be pleased with a general qualitative resemblance. This does not imply that meteorologists tend to be less careful than physicists and chemists; it simply indicates that they are dealing with phenomena that are more chaotic.

Consider a hypothetical experiment involving the development of convective clouds — the kind where the air is continually overturning. These clouds cannot easily be reproduced in the laboratory, and the experiment may consist of traveling to a suitable location and waiting for the right sort of weather to arrive. Suppose that throughout the vicinity of the chosen location the weather conditions on two different early mornings appear to be identical. As noontime approaches, small innocuous clouds may appear on one of the these days, while towering clouds and showers appear on the other. The difference may occur because atmospheric convection is inherently chaotic, so that undetectable small differences at sunrise can amplify many fold. Even if the clouds could have been simulated in the laboratory, the successive experiments might also have diverged after beginning with undetectably small differences.

In recent years many meteorological experiments have been performed on the computer. Here it would seem that any experiment should be repeatable, but this is still not the case unless the experimental set-up is repeated exactly. As simple a change as transferring the experiment to a different computer with a different rounding-off procedure can cause the experiments to diverge. When this happens,

結果は分かれていったかもしれません。

最近では気象学の実験をコンピューターでやるが増えてきました。これならどんな実験でも再現できそうに思えるでしょうが、実験のお膳立てを厳密に同じにしないかぎり、コンピューターといえどもそうはならないのです。実験を別のコンピューターに移すにしても、概数の扱いが異なるという単純な違いがあるだけで、実験結果が変わってくるおそれがあります。そんな時、どちらの実験が決定的だと誰が判定できるでしょうか？

終わりに、カオスの現象の存在で、正当でない、そればかりか不正直な実験結果が発表されたり広められるおそれが増しうることを指摘したいと思います。お粗末な科学と不正直な科学とは同じではありません。意図はどれほどよくても、気づかないまま誤りを犯すことはあります。結果を偽るのはいうまでもなく不正直ですが、カオスの現象に事欠かない科学では、不正直はもっと見えにくい形をとるものです。

例えば、気象学者がある仮説を想定し、その実験的検証を望むとします。何回もの実験を行って、その実験のうち何%が自分の仮説に有利であるかを報告するとします。これはりっぱな科学でありえます。それとは違い、数回の実験から仮説に一番有利な一つだけを選ぶとすれば、数値を偽ることなくそれができるわけですが、それでもこれは、証明のために有利な実験を選んだと特に断らないかぎり、不正直な科学といえます。

もし彼が実験を1回だけ行ってそれに基いて報告し、もう一度実験したら別の結果が出たかもしれないのをぜんぜん意識しないとすれば、お粗末な科学とはいえても不正直とはいえません。1回だけ実験して、その結果が自分の仮説に有利なのを見て、再び実験すれば不利な結果が出るかもしれないと思いつつ、実験はここでやめようと決めるとすれば、有利な結果が出た時点でやめたと説明を加えないかぎり、これもまた完全に正直とはいえません。有利なうちに手をひくのは賭博場では良策でしょうが、一連の科学実験はゲームではないのです。

一部の地球科学や生命科学のように、精密さで劣ると時にいわれる科学は、物理学や化学のいくつかの分野のようないわゆる精密科学と、科学である点でなんら変わるものではありません。これらはただ、カオス的な過程をより多く含むことから、実践にいつその慎重を要するというだけなのです。物理学者が時に成し遂げる高度な精密さにかねてから私は畏敬の念を覚えてきました。しかしそれほど精密とはいえずとも、気象学の道を選んだ自分の決断を悔やんだことは、かつて一度もありません。

who can say which experiment is more definitive?

I should like to close by noting that the presence of chaos can increase the likelihood that unjustified or even dishonest results may be published or otherwise disseminated. Poor science and dishonest science are not the same thing, since someone with the best of intentions can make a mistake without becoming aware of it. Falsification of results is obviously dishonest, but, in a science where chaotic phenomena are abundant, dishonesty can be more subtle.

Suppose that a meteorologist has formulated a hypothesis that he wishes to confirm experimentally, and suppose that he performs a large set of experiments and then reports what percentage of these experiments are favorable to his hypothesis. This can be good science. If instead he selects from the set only the one that is most favorable to his hypothesis, he can do so without falsifying any measurements, but this is nevertheless dishonest science, unless he specifically states that he has chosen a favorable experiment for demonstration purposes.

If he performs only one experiment and reports on it, and is quite unaware that a second experiment might have given a different result, this may be poor science, but it is not dishonest. If he performs only one experiment, and seeing that the result is favorable to his hypothesis, decides at that point not to perform any more, even though he suspects that a second experiment might be unfavorable, this again is not completely honest, unless he explains that he stopped when the indications were favorable. Stopping when you are ahead may be good policy in a gambling hall, but a series of scientific experiments is not a game.

The sciences that have sometimes been called less exact, like some of the earth sciences and life sciences, are sciences just as surely as are the so-called exact sciences, like some branches of physics and chemistry. They simply require additional care in their practice, because they are more likely to involve chaotic processes. I have been awed by the precision that physicists sometimes attain, but I have never regretted my decision to follow a less exact science.

稲盛財団1991——第7回京都賞と助成金

発 行 1993年4月30日

発 行 所 財団法人稲盛財団

京都市下京区四条通室町東入函谷鉦町87番地 〒600

電話〔075〕255-2688

製 作 榊ウオーク

印刷・製本 大日本印刷株式会社

ISBN4-900663-07-7 C0000