

題名	システム理論とはなにか
Title	What Is System Theory?
著者名	ルドルフ・エミル・カルマン
Author(s)	Rudolf Emil Kalman
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	1
受賞年度	1985
出版者	財団法人 稲盛財団
Publisher	The Inamori Foundation
発行日 Issue Date	10/1/1990
開始ページ Start page	94
終了ページ End page	133
ISBN	

## システム理論とはなにか

ルドルフ・E・カルマン

稲盛氏、そしてご列席のみなさま。

この講演では、ベルイストレム博士のように、みなさまに感動を与えることはできないかと思います。シャノン博士のように、みなさま方になにかおもしろいものをお見せできるわけでもありません。みなさまにご覧に入れることができるのは、この小さなレンガ状のものだけです。

この講演を知的な内容のものにしたいと思います。これからシステム理論とはなにかについてご説明したいと思います。この理論がなぜ必要なのか、それがなぜ物理学などのほかの科学分野と異なっているのか、これがなぜ未来にとって重要なのかについて、ご説明いたします。

そしてみなさまに、まったく私的な内容になりますが、長い年月のあいだに私自身がどのように知的に発達してきたかについて、お話ししたいと思います。[このことが( )でかまれた部分の内容であり、そのうちのいくつかは講演後つけ加えたものです。]

この講演のなかで、私は多くの有名な方がたの名を挙げさせていただきます。といっても、その方がたの名前を失墜させようというわけではありません。それは嫌なことですから。そうではなく、その方がたの言葉を借りることによって、おそらくみなさまがすでに馴染んでいらっしゃる考え方に警告を与え、私自身の科学に関する見解の説明に早く進ませていただきたいのです。科学に関する私の見解は、アメリカの政治家が伝統的な知識といっているものとは、多くの点で、かなり異なっております。

最初に挙げさせていただく偉大な、たいへん偉大な名前は、バートランド・ラッセル卿です。彼はこういいました。

「世間に通用しているすべての前提を吟味せよ」。

私はラッセル卿のこの言葉に同意します。科学研究を行うにあたって欠かせないことに、理解していると思っていることを疑ってかかる姿勢があります。これらは、ほんとうに真実なのだろうか。われわれはほんとうにわかっているのだろうか。科学とは、知りたいと望むことだけでなく、客観的に知ることなのです。新しい研究を始めるにあたって、どんな場合にもまず明確に認識しておくべきことは、私たちの先祖から受け継いだものがほんとうの知識であり、たんに知識の幻覚ではないということです。このことを認識することは、数学の分野でさえ困難なことで、ほかの科学分野にあってはなおさらのことです。たとえばニュートンの、「重力が距離の自乗に反比例する」という法則を知ったあとで、なにをほんとうに理解するのでしょうか。

ラッセル卿のことを知らずと前、学生だったころのことですが、私はなにかと悪評の立つようなことをしておりました。私は、考えるべきことをいつも考えていたわけではなかったのです。習熟度テストを受けたときのことです。私はその内容に関係のないエッセイを書きました。テストのあとで私を合格させるべきかどうか、かなりの論議があったようでした。その結果、私のとった行為は確かに好ましいものではないが、まったくおろかというわけで

## WHAT IS SYSTEM THEORY?

Rudolf E. Kalman

Mr. Inamori, Ladies and Gentlemen:

In this lecture I will not pull on your heartstrings as Dr. Bergström did earlier. I cannot compete with Dr. Shannon who has had some very interesting things to show you. The only concrete object I will show you is this (small blick-like object) thing.

I intend to make this an intellectual lecture. I will try to explain to you what System Theory is about. Why it is needed. Why it is different from other scientific fields (such as physics) and why it is important for the future. And I would like to tell you, in a purely personal way, something about how my own intellectual development proceeded through many years. (This will be the content of bracketed expressions below, some of which were added after the lecture.)

I will mention a lot of famous names. Not to practice name dropping — we all detest that — but to alert you to ideas that you are probably already familiar with so that I can proceed more rapidly to explain my own view of science which, in many ways, is quite different from what American politicians call conventional wisdom.

The first big name, very big name, I want to mention is Bertrand Russell. He wrote:

“Examine all accepted assumptions.”

I agree with Russell. One of the imperatives in scientific research is to worry about things that we are supposed to know. Are these really true? Do we really know them? Science means not only wanting to know, but to know objectively. In any new research the first thing to try to be sure of is that what we inherited from our forefathers is real knowledge and not merely the illusion of knowledge. This is difficult even in mathematics and much more so in other sciences. What do we really know, for example, after we have been told of Newton's inverse square law of gravitation?

A long time before I had heard of Russell I developed an obnoxious trait in school. I was not always thinking about what I was supposed to be thinking about. When I was taking my maturity examination I wrote an essay that did not confine itself to treating the subject I was examined on. Afterwards, I suppose, there were some discussions as to whether I should be allowed to pass. And it was decided that, although I was surely obnoxious, I was probably not completely stupid. So they let me pass. On some future occasions it was not always quite so easy.

Now I would like to start to explain to you what System Theory is. This is very difficult, even in discussions within the narrowest limits of my own fields of work. Therefore I need help. I shall appeal to Einstein. He was quoted as having said:

“A scientific explanation must be as simple as possible but not simpler.”



はないだろうと判断されました。そして私は合格しました。その後、物事がいつもこのように簡単に運んだわけではありません。

さて、システム理論とはなにかをご説明しましょう。これはずいぶん難しい問題で、私の研究分野というもっとも狭い範囲にしほったとしても、議論することは難しいものです。そこで、助け舟が必要です。アインシュタインに助けてもらいましょう。彼は、次のように言ったと伝えられています。

「科学の説明はできるかぎり単純でなくてはならないが、単純化しすぎてはならない」。

この言葉を心にとめて話を進めてゆきましょう。

正確にいうと、システムとはいったいなんなのでしょう。これが第一の問題です。こういう問いに対しては、説明を始めることさえできませんが、一般になにか複雑な、相互に作用しあう、単純化しえない、そういった種類のものを、私はシステムとよんでいます。そのシステムの概念に密接に関連するある特定の科学的概念をご説明するほうが、システム概念（定義はしませんでした、それでもたいへん具体的です）を理解するうえで、より役立つのではないかと思います。

システム研究を必要とするもっとも基礎的な事柄は、おそらく安定性の問題でしょう。あるいは不安定性であるかもしれません。安定性とは、システムが不利に作用する外的要因があるにもかかわらず、通常状態で存在し機能しつづけることを意味します。生命がその一例です。不安定性とは、システムに自滅する傾向があることを意味します。こういったことは物理学者には理解できない事象といいますが、もうすこし思いやりのある言い方をしますと、物理学者の通常の直観の枠組みのなかでは理解しえない事象なのです。物理学の発展の歴史的過程は、単一で孤立した事象の研究を基礎としています。これらは通常安定しています。そうでなければ、研究そのものができないでしょう。原爆はその反対例です。

安定性と不安定性は、システムの事象です。それはシステムのさまざまな部分の相互関係の産物です。安定性はおもに人工的システム、および生物学のシステムにおいて興味深い問題です。ほとんどの物理学者は、そんなことに興味をもっていません。彼らは原子に関心を示します。それもまた複合システムですが、原子は通常たいへん安定しているために、物理学者は安定性よりも原子のもつほかの特徴に関心を向けているのです。

私の小道具をご覧ください。これをレンガであると仮定しましょう。物理学者の感覚では、これはたいへん安定しています。壊すことはたいへん困難です。しかし、このレンガが、ある軸の周りを回転させられていると仮定してみましょう。そうすると、安定の問題が出てきます。レンガは規則的で、なめらかに回転しつづけるのでしょうか。それとも、その回転がどんどん不規則になって、ついには変化したり、止まってしまうのでしょうか。これは原始的なシステムの問題です。物理学によってのみ論じられるものではありません。通常、レンガは静止したままで、回転はしません。数学が必要となります。オイラーの有名な定理は、なにか起こるかを私たちに教えてくれるのです。慣性モーメントが最大の軸にそって物体を回

I will proceed keeping this requirement in mind.

The first question is this. What *exactly* is a system? This is something I can't even begin to explain, though generally I will call a system something complex, interactive, nonsimplifiable, and that sort of thing. It is more informative to explain certain scientific notions which are closely related to the undefined (but still very concrete) idea of a system.

Perhaps the most basic phenomenon which requires the study of systems is *stability*. Or *instability*. Stability means that a system will continue to exist and function in a normal way in spite of adverse outside effects. (Life is an example of this.) Instability means the system has a tendency to self-destruct. These are phenomena that physicists do not understand — well, let us say more kindly, do not understand within the framework of their usual intuition. The historical development of physics is based on the study of simple, isolated phenomena. These are usually stable since otherwise they could not be studied anyway. Bombs are a counterexample.

Stability and instability are system phenomena. They are the result of interaction between different parts of a system. Stability is an interesting problem mainly in man-made and biological systems. Most physicists are not concerned with such things. They are concerned with atoms, which are also complex systems, but since atoms are usually very stable, physicists tend to worry about other properties of atoms than stability.

Look at my little props. Let us suppose this is a brick. It is very stable in the physicist's sense; it is quite difficult to destroy. But let us suppose that the brick is made to rotate about some axis. Then we have a stability problem: will the brick continue to rotate in a regular, smooth way or will its rotation become more and more irregular and eventually change or stop? This is an embryonic system problem. It is not treatable just by physics. Usually bricks sit still and do not rotate. We need mathematics. There is a famous theorem of Euler which predicts what will happen. If I rotate the body along the axis for which its moment of inertia is maximal (the speaker illustrates this by showing such a rotation to the audience), then the rotation will be stable. If the brick rotates around another axis (the speaker again illustrates this with the same object) then the rotation will be unstable. This is sure knowledge because it is mathematics. Therefore it passes Russell's test.

Given these established and undisputed facts, a physicist would then generalize, in the manner of physics. He would argue as follows. "No matter what object you may take, no matter how complex, rotating it about the axis of its maximal moment of inertia will be stable and rotating it around other axes will be unstable." This has been sometimes called the "MAX-AX Principle."

A friend and colleague of mine, Professor Tom Kane of Stanford University was given the task, about 15 years ago, of researching this principle and, hopefully, proving it. In going from a simple brick, which could hardly be called a system, to a mechanical system of any complexity (for example, satellites with



転させますと(話者このような回転をレンガで示す)、その回転は安定であり、もしレンガをほかの軸の周りで回転させると(話者再びこのような回転を示す)、回転は不安定になります。これは数学によって説明されていますから、確実な知識です。ですから、この件ではラッセル卿の基準には合格です。

これらの明白な既成の事実を与えられたならば、物理学者は、物理学の方法で一般化しようとし、次のように議論します。「どんな物体を用いて行おうと、いかに複雑であろうとも、慣性の最大軸の周りに回転させれば安定しており、ほかの軸の周りを回転させれば不安定である」。これが時に、「最大軸の原理」とよばれているものです。

私の友人であり、同僚であるスタンフォード大学のトム・ケイン博士は、15年前にこの法則を研究し、できれば証明するようにとの任務を与えられました。彼はほとんどシステムとはよべないようなたんなるレンガから、複合体の機械的なシステム、たとえば可動部を内蔵する人工衛星へと研究を進めてゆきました。そして、それが物理学ではなく、数学であることに気づかないまま、自分が確信していることから、それに類似すると思える物理学的状況へと類推していったにすぎないのです。結局のところ、すべての人工衛星は質量をもち、最大慣性モーメントをもつような回転軸はいつもあるのです。彼は、システムがなんであるかにあまり関心を寄せませんが、物理学の方法論は普遍的であると固く信じているのです。

ケイン氏は、システム理論家ではなく、また正統の物理学者でもありませんでしたが、数学によって最大軸の原理を証明しようとして失敗したとき、それは夏のことでしたが、ほんとうに啞然としたようでした。しかし、彼は優秀な研究者でした。彼はすぐに物理学の方法によって、最大軸の原理が間違っていることを立証したのでした<sup>1)</sup>。事実、最大軸の原理は極度に間違っているように思えます。レンガの例はもちろん例外ですが……。これを物理的に実証するためにケイン氏が必要としたのは、輪ゴムでつないだ紙のモデルだけでした。

なぜ、最大軸の原理が間違いなのでしょう。なぜならば、それがシステムの事象になんら関係のない物理学の原始的な直観に基づいているからです。システムの結果は、たんなる類推によっては解けないのです。複雑さの役割を理解しなければなりません。私たちはそれについてほとんど知りませんが、問題は研究可能なものであり、私たちは着実に進歩しているのです。不幸な最大軸の原理の場合、安定性を研究する標準的方法があります。この方法を用いることで、システムを構成している部分の数が大きくなるにつれて、純粹に数学的な理由で安定性の「確率」はどんどん少なくなると、ケイン氏は結論づけています。最大軸の原理は、大胆な科学的概念ではなく、たんに物理学の旧来の方法論が適応できない問題についての混乱した考え方の一例にすぎないのです。

1700年ごろ、ニュートンの時代には、人工衛星について語ることは実際、非常に大胆なSF物語だったでしょう。可動部を内蔵した人工衛星についてなど言うまでもありません。しかし私は、ニュートンが最大軸の原理の無名の発明者と同じほど未熟な間違いを犯したであろうとは思いません。ニュートンは基礎物理とシステムとの違いを理解していました。天体

internally moving parts), the physicist simply extrapolates from what he is sure of (not realizing that this is often mathematics and not physics) to other physical situations which to him seem analogous. After all, every satellite has a mass, there is always some axis of rotation corresponding to its maximal moment of inertia, etc. The physicist does not much care what a system is but he firmly believes that the methodology of physics is universal.

My friend Kane (not a system theorist and not a card-carrying physicist either) was rather surprised when, in the course of a summer, he did not succeed in proving the MAX-AX principle by means of mathematics. But he was a good researcher. He quickly established, partly by physical methods, that the MAX-AX principle was false!<sup>1)</sup> Indeed, the MAX-AX principle seems to be maximally false; except as it applies to bricks, of course. Kane needed only paper models connected by rubber bands to give a physical demonstration of this fact.

Why is the MAX-AX principle false? Because it rests on primitive physical intuition which has no relation to system phenomena. System results do not work by simple extrapolation. One must understand the role of complexity; we know very little about that but the question is researchable and we are making steady progress. In the case of the unlucky MAX-AX principle, there is a standard method for investigating stability. In applying this method, Kane concluded that, as the number of parts making up the system becomes larger and larger, the “probability” of stability becomes smaller and smaller, for purely mathematical reasons. The MAX-AX principle is not a daring scientific idea; it is simply an example of confused thinking about problems to which the conventional methodology of physics is not applicable.

In Newton's days, around 1700, it would have been very daring science fiction indeed to talk about satellites, not to speak of satellites with internal moving parts. Yet I don't think that Newton would have erred as crudely as the unknown inventor of the MAX-AX principle. He understood the difference between basic physics and systems. His investigations about the forces affecting planetary motion, which lead him to his demonstration of his law of gravitation, were the first big success in mathematical system theory. The Sun and a planet constitute a two-body problem, they form a system, and Newton always analyzed them as such.

[The discovery of moderately high temperature superconductivity in ceramics, which is contradictory to elementary physical intuition and the preexisting theory of superconductivity, is surely an example of a system problem which physicists (but not Newton) have always had difficulty with. This is the work for which Müller and Bednorz shared the Nobel Prize in Physics in 1987.]

My second example is about control, another important system problem. A newspaper article was published in the American media around 1962, in the early stages of the US effort at space exploration. The article was by a well-known physicist. I have forgotten his name and, unfortunately, also forgot to keep a copy of the article. The rest of my recollection, I hope, is precise.



の動きに影響する力についての研究は、ニュートンを引力の法則の証明に導いたのですが、それは数学的システム理論の最初の大きな成功でした。二体問題としての太陽と惑星は一つのシステムになっています。そしてニュートンは太陽と惑星を常にシステムとして分析したのです。

〔比較的高い温度でのセラミック超電導の発見は、初歩的な物理的直観に矛盾し、従来の超電導理論とも矛盾するのですが、確かにシステム的問題の一例です。物理学者は（ニュートンではありません）いつもシステムの問題にてこずっているのです。そしてこの発見こそ、ミュラーとベドノルツが1987年にノーベル物理学賞を分けあった業績なのです。〕

第二の例は、制御についてです。これはもう一つの重要なシステム的問題です。1962年ころ、アメリカである新聞記事が掲載されました。ちょうどアメリカが宇宙探検へ向けての研究を開始したころのことです。その記事は有名な物理学者によって書かれたものでした。その学者の名前は忘れてしまいましたし、残念なことに記事のコピーも残っておりません。私の覚えていることが間違っていないければよいのですが……。

この名前のわからない科学者は、月に行くことは不可能であると論じました。どうしてそう考えたのでしょうか。結局、月は夜空ではたいそう大きな存在に思えますし、宇宙船にとっては、難しい的ではないはずなのですが……。その議論の内容は専門的なものでした。地上から月へ向かうロケットの動きは、ある微分方程式によって支配されています。この方程式に入っている主な力は引力と、宇宙船を軌道に乗せるために使われるロケットエンジンの推進力です。ロケットはたいへん大きな装置のかたまりです。ロケットエンジンの推進力を正確に制御することは難しいことです。しかし、もし推進力が時間どおり正確に動かなかったならば、ロケットの推進力が止まったあとに宇宙船がたどる自由軌道はたいへん不正確になり、宇宙船は目的である月に到達できないに違いありません。そうすると、月面上のある地点に正確に着陸することは、明らかに期待できないものとなるということです。この記事は正確さの基準として、1962年当時のロケットエンジンがもちうる技術的可能性よりはるかに上の1,000分の1秒単位の数値をあげていました。

すこし専門的な話になりまして恐縮ですが、しばらくのあいだ、この結論にいたる分析について説明させていただきます。数値的手法により、このニュートンの時代から知られている微分方程式を摂動の解析に使用することができます。この摂動はロケットエンジンの機能の不正確さや、たとえば地球から月までの距離のような多くの物理的要因の情報が正確でないことなどによるもので、それが方程式に入ってくるのです。こういうことですから、たとえばロケットの機能に関することや、それが運転停止される時間などの全システム内で起こるごく小さな不正確ささえもが、飛行軌道にたいへん大きな影響を及ぼすことになります。ですから、それが原因で宇宙船は最終的に月に到達できなくなるという結論にいたるのも、まったくもったもなことです。とはいいいましても、自分で確かめたわけではありません。算定するにはかなりの労力を必要とするからです。ともかく、ここまでの結論は正しいように

This nameless physicist argued that it was impossible to go to the Moon. How so? (After all, the Moon seems pretty large in the sky and should not be a difficult target for a space ship.) The argument was technical. The motion of a rocket from the Earth to the Moon is governed by a differential equation. The main forces entering this equation are gravitation and the thrust exerted by the rocket engine used to lift the space craft into orbit. The rocket is a very big piece of equipment. It is difficult to control the thrust of the rocket engine. But if the thrust is not timed very accurately (the article mentioned an accuracy of the order of milliseconds which was far beyond the engineering possibilities for rocket engines available in 1962) then the free-motion trajectory, followed by the space-craft after the thrust of the rocket is shut down, may be so inaccurate that the space craft may miss the Moon. Landing at a precise geographic spot on the Moon would be therefore clearly too much to hope for.

If you permit me to be also rather technical for a moment, let me indicate the kind of analysis which lead to this conclusion. Using numerical techniques, the differential equations (known since the time of Newton) could be analyzed for perturbations due to the inaccurate functioning of the rocket engine and the inaccurate knowledge of the many physical factors (for example, the distance from the earth to the moon) which enter into these equations. It is then entirely plausible to conclude (but I have not checked the calculation which would have required considerable effort) that even very small uncertainties in the whole system, for example, in the functioning of the rocket, the time when it is shut down, etc. can result in such large effects on the trajectory that the spacecraft might ultimately miss the Moon. Up to this point, the conclusions appear to be correct.

Yet this is also a typical example of competent use of standard scientific and mathematical technical reasoning which results in a grossly incompetent conclusion. Why should I make such a nasty attack on a supposedly objective article? (There were undoubtedly also professional, business, political, and power motives in the background but these are irrelevant for us now.)

The trouble is the underlying assumptions. Let us examine these, implementing Russell's advice. The physicist assumed that:

- (i) the system problem is governed by the elementary laws of physics (correct) and these laws are the only important considerations (incorrect);
- (ii) the man-made system carrying something or someone to the Moon does not differ, in its important features, from a purely physical "system" like a meteor (wrong).

The physicist had obviously no conception of the broader aspects of the problem. A spacecraft moving from the Earth to the Moon is evidently a



みえます。

にもかかわらず、これはまた、標準的な科学的、数学的推論方法の適正な使用が、たいへん不適当な結論をもたらす典型的な例でもあるのです。なぜ、おそらくは客観的と考えられている記事に対してこのような悪質な攻撃をしなければならないのでしょうか。(その背景には、職業、仕事、政治、権力がらみの動機があることは疑いのないところです。しかしそれらはいま、私たちには関係のないことです) やっかいなのは、根底にある仮定なのです。ラッセル卿の忠告を満たしながら、考察してみましょう。

その物理学者は次のように仮定しました。

i) このシステムの問題は、物理学の基本的法則に支配されている。(正しい)

そして、これらの法則が、唯一の考慮すべき重要な項目である。(正しくない)

ii) 月に人、または物を運ぶ人工のシステムは、その主要な特性において、流星のような純粋に物理学的「システム」と同じである。(誤り)

彼は明らかに問題のもっと広い側面を理解していませんでした。地球から月へ移動する宇宙船は、明らかに人工のシステムです。流星はそのような移動はしません。人工のシステムとして、宇宙船は不安定になりがちです。事実、これが記事の結論でした。といっても、無意識のうちにですが……。不安定なシステムは、現実の用をなしません。ですから、制御方法が見出されなければならないのです。

人工のシステムと純粋に物理的なシステムとのあいだには、人工のシステムが技術の現状に依存しているという点で、大きな相違があります。問題を正しく分析するには、次のような疑問を投げかける必要があります。

「1962年当時の技術は、宇宙船を制御することができるほど充分に発達したのだろうか。月表面への着陸は、充分な制御によって正確に成し遂げられるだろうか」。その物理学者はメディア論争に敗れたのです。月探査プロジェクトは停止されることなく、ついには成功したのでした。

この論争において物理学者は、役立つ貢献をまったく与えることができませんでした。自分自身の狭い物理学の世界以外に、彼にとって考察の対象ではなかったからです。彼は事実を認識していなかったのです。ほかの多くのことが関連していること、とくに物理の世界に人間が介在していること、そして今日、これらの関連していることの総体が科学技術とよばれているのだということを。事実、私の考えでは、ニュートン以来の科学技術の発展は、人間の達成した業績としては物理学の発展よりさらに偉大なものです。と申しましても、現代の科学技術が、かつての物理学の知識に依存していることを忘れるわけにはゆきません。そして、これらの偉大な業績のなかには、制御の問題や技術に関係の深いものがあります。それはまた、もっとも重要なシステムの問題の一つでもあるのです。

1962年までに、宇宙船に適用可能な制御技術は、充分に開発されました。小さな修正用ロケットが、主ロケットエンジンのいわゆるオープンループの軌道の誤りを直すために使われ

man-made system; meteors do not do such things. As a man-made system, the spacecraft is likely to be unstable — in fact, this was the main conclusion of the article, though only unconsciously. An unstable system is of no practical use, unworkable. So a method of control must be found.

There is an enormous difference between man-made systems and purely physical ones because the former depend on the state of technology. The correct analysis of the problem requires asking questions like the following: “Is current (1962) technology sufficiently developed to provide means of controlling the spacecraft? Is the accuracy achievable by control sufficient to allow pinpoint landings on the Moon?” As it turned out, the physicist lost the media debate; the Moon project was not stopped and eventually it was successful.

The physicist's contribution to the debate was grossly incompetent because for him no considerations existed outside his own narrowly defined field of physics. He has no conception of the fact that many other things were involved, especially human interference with the physical world, which today is called technology. Indeed, in my opinion, the development of technology since Newton is an even greater human achievement than the development of physics, although it is important to remember that modern technology is dependent on prior knowledge in physics. And one of these great achievements concerns the problem and technology of control, which is also one of the most important system problems.

By 1962 the technology of control applicable to spacecraft was adequately developed. Small correction rockets were used to counteract the so-called open-loop inaccuracies of the main rocket engine. These correction rockets are used in the closed-loop mode, that is, actuated on the basis of accurately measured and rapidly processed information about the spacecraft's trajectory. This requires a formidable array of modern technology, especially electronics and computers.

And, I should add, the U.S. space program culminated in extremely accurate (within roughly 50 meters of the preassigned target spot) and wholly successful landings on the Moon. This fact was the clearest proof of the gross incompetence of the article discussed above. Such technological achievements as manned flight, the transistor, computers, integrated circuits, the laser and many others might well be far more important to humanity as a whole than advances in the basic sciences, and they are largely system problems. The individuals who have contributed to them are not easily identifiable. But that should not diminish our thanks for the contributions involved.

[Presumably at Nobel's time and perhaps in his will the word “physics” had a meaning quite close to what we now call advanced technology. The Nobel prizes, however, tended to reflect the academic meaning of the word used as self-definition by physics departments at universities. In his Nobel celebration lecture in 1981 Professor Bergström proudly recalled that inventions, that is, advanced technology, had been occasionally honored by a Nobel Prize (“invention” is a word that is explicitly used in Nobel's will); but in fact the year 1912,



ました。これらの修正ロケットは、クローズドループのモードで使用されています。つまり、宇宙船の軌道が正確に計算され、迅速に処理された情報を基に動かされているのです。これには近代科学技術、とくに電子工学とコンピュータといった、強力な援軍が必要なのです。

そして、つけ加えさせていただきますと、合衆国の宇宙計画は頂点に達し、月着陸はあらかじめ定められた標的点のほぼ50メートル以内に着陸するというたいへんな正確さで成功したのです。この事実により、先ほど議論の対象となった記事がまったく適当でないことが、はっきりと証明されました。有人飛行、トランジスター、コンピュータ、集積回路、レーザーといった科学技術の偉業は、人類全体にとって、基礎科学の進歩よりもおそらくはるかに重要であり、その大部分はシステムの問題です。その個々の貢献は、簡単には特定できません。しかし、だからといって、そのような貢献に対して私たちの感謝の念が少なくてよいということではありません。

[たぶんノーベルの時代には、そしてノーベルの遺言の中では「物理」という言葉が、今日先進技術とよばれるものと、たいへん近い意味をもっていたのでしょう。しかしノーベル賞には、その言葉が大学の物理学科で自己定義として使われる学問的な意味を反映しようとする傾向がありました。ペルイストレム博士は1981年のノーベル賞祝賀記念講演で誇らしげに発明が、つまり先進技術が、しばしばノーベル賞の栄誉に輝いてきたと述べました(「発明」という言葉はノーベルの遺言のなかではっきりと使われている言葉です)。しかし実際は、ダレンがノーベル物理学賞を受賞した1912年ののちには、事実上、発明にノーベル賞が与えられたことはなかったのです。実際、ダレンが灯台用調整器を発明したことは、システム技術、とくに制御に対する明らかな貢献でしたが、今日では取るに足らないものになりました。しかしながら制御の基本的な考え方は、1912年ごろすでに、急速にかつ永続的に展開されていたのです。これらの発展がなかったなら月には行けなかったでしょう。あの無名の物理学者は制御に注意を払わなかったのですが、それはたぶん制御でノーベル物理学賞を受賞するのはダレンが最後であると知っていたからです。]

第三の例は、安定と制御の関係に関することです。これはつい最近、「日本航空123便」という見出しで、各種の新聞をさがせました。飛行中に起こったその事故は、制御とまったく関係がありませんでした。しかし、その事故にともなって制御起動部へつづく連動装置の破壊が起こり、機体は制御不可能となったのです。そのために、機体は墜落しました。機械的な事故が直接の原因ではなかったのです。

飛行機は人工の物体であり、本来不安定で、制御されねばなりません。長いあいだ、動力飛行の試みが成功しなかったのは、物理力の法則を考慮しなかったり、無視したからではなく、制御の必要性を無視したからであることを、よく覚えておくべきです。本質的に不安定なシステムは、制御によって不安定性が安定へと変えられるまで、実用は不可能です。

動力飛行の発展と、飛行機とよばれるシステムには制御が必要である、という認識は産業技術の成長に大きく貢献しました。制御はいまや至るところにみられます。(動力飛行に関係

when the physics prize was awarded to Dalén, marked the last time that this actually happened. Dalén's invention of a regulator for harbor light houses was indeed a clear contribution to system technology, and specifically to control, but turned out to be too small to deserve mention today. Yet the basic ideas of control were undergoing very rapid and permanent development already around 1912. Without these developments, going to the Moon would have been impossible. Perhaps our nameless physicist did not pay attention to control because he knew that Dalén was the last to get a Nobel prize in physics for it.)

My third example, concerning the relationship between stability and control, was in all the newspapers very recently, under the heading "Japan Airlines Flight 123." The accident that occurred during that flight had nothing to do with control. But one incidental consequence of the accident was that it destroyed the communication links to the control actuators. So the plane could not be controlled. It crashed because of that, and not as a direct consequence of the mechanical accident.

An airplane, as a man-made object, is inherently unstable and must be controlled. It is well to remember that for a long time attempts at powered flight had failed, not because of disregard or ignorance of the laws of physics, but because of ignorance of the necessity of control. An inherently unstable system is not viable until the instability is changed into stability by control.

The development of powered flight and the recognition that the system called airplane required control, contributed greatly to the growth of industrial technology. Control is now ubiquitous. (But no Nobel prizes have been given for anything related to powered flight.) Control was a discovery, an invention. It developed just as slowly as the physical sciences. There seems to be some evidence that irrigation in Mesopotamia was scientifically managed five thousand years ago. In the Hellenistic world, there have been many artifacts, ingenious machines, automata, all of which nearly triggered technological development, but somehow nothing happened. The really rapid development of control technology and then of control theory (which in turn led to system theory) began only in the late nineteenth century.

Why is control possible at all? Is it a physical law? Is it merely a clever trick? These questions were understood in a scientific sense only recently. One of the nicest early achievements in the evolution of system theory was a generalization and strengthening of certain aspects of classical control theory. We now know the following precise result.

*If all parts of a system can be influenced by external physical forces, then the system can also be controlled.*

This means that in practice almost any system can be controlled. If this weren't a scientific fact, we would not have an industrial civilization today. The ancient Greeks tried but did not arrive at an understanding of control (my conjectures) and they remained at a very low level of industrial civilization (a well-known fact).



したことにノーベル賞が与えられたことはありませんが) 制御は発見であり発明でした。制御は物理科学と同じくらいゆっくりと発展してきました。5,000年前のメソポタミアの灌漑には科学的に管理された形跡があるように見えます。ギリシア世界には多くの人工物、精巧な機械、自動装置があって、それらすべてはもう少しで技術の発展につながるところでした。しかし結局、なにも起こりませんでした。制御技術の急速な発展そして制御理論の発展(次にシステム理論が導かれるのです)が始まったのは19世紀末でした。

いったい全体、制御がなぜ可能なのでしょう。それは物理的法則でしょうか。それともただたんに巧妙なからくりなのでしょう。これらの疑問が科学的な意味で理解されたのは、つい最近になってからのことです。システム理論の発展段階で、もっともすばらしい初期の成果の一つは、古典制御理論のある側面を一般化し、強化したことでした。われわれは、いまや次の正確な結果を知っています。

「システムのすべての部分が、外からの物理的な力の影響を受けるならば、システムはまた制御されうる」。

このことは實際上、ほとんどどんなシステムでも制御されうることを意味します。もし、これが科学的事実でないならば、今日のような工業文明社会はなかったでしょう。これは私の推測ですが、古代ギリシア人は努力しましたが、制御を理解するところまでには到達しなかったと思います。ただ、彼らは工業文明に関しては、たいへん低いレベルにとどまっていたということは、よく知られた事実です。

制御は数学的なものとして考察されるべきです。物理的状況には、ほとんど関係はありません。それは飛行機や宇宙船、科学反応、経済といったものの制御、そして生物学上の制御過程に同等に応用されるものです。それは、物理的法則ではありません。物理的法則に一致するものでもなければ、反するものでもありません。もっと一般的で、確かに即座に役立つものなのです。数学が現実世界と大いに関係があるという驚くべき事実<sup>2)</sup>をとおして、現実世界との関係が起ってくるのです。

システム概念としての「制御」は、質量あるいは温度といったような物理的概念と同じくらいに科学的であるといえます。しかし「制御」は、本質的に異なったものなのです。制御理論は、科学的に重要なものです。なぜならば、私の考えでは、物理的特徴を数学的に表現できるやいなや、どんなシステムでもほとんど制御が可能となるということを知ることは重要だからです。反対の例、すなわち制御されない「システム」は、運動量の保存が適用できる状況において、物理学によって与えられます。しかし、この状況は、ほとんど「システム」ではありません。保存則は、物理学ではたいへん重要ですが、生物学あるいは人工のシステムには、関係深いというものではありません。物理学者は保存則を好んで、システム理論は理解しません。システム理論家は、これらの「法則」に美的固定観念はもっておらず、彼らは、どうやってこれらの法則に打ち勝つかを探ることに、より多くの興味をいだいているのです。率直にいいまして、現代物理学の研究の方法論はあまりに融通がきかないことから、

Control should be viewed as a mathematical thing. It has little to do with any physical circumstance; it applies equally well to the control of an airplane, control of spacecraft, control of a chemical reaction, control of an economy, and biological control processes. It is not a physical law; it neither agrees with nor contradicts any physical law, but it is something more general and certainly more immediately useful. The connection with the real world comes about through the miraculous fact<sup>2)</sup> that the mathematics has much to say about that world.

“Control,” as a system concept, has just as much claim to being scientific as any physical concept such as mass or temperature: but “control” is something essentially different. Control theory is scientifically significant because — in my opinion — it is important to know that almost any system can be controlled once we can express its physical characteristics in mathematical language. A counterexample, namely a “system” that cannot be controlled, is given by physics in situations where conservation of momentum is applicable. But these situations are hardly “systems.” Conservation laws are very important in physics but they are not very relevant to biology or to man-made systems. Because physicists like conservation laws, they cannot understand system theory. System theorists do not have an aesthetic fixation on these “laws,” they are more interested in probing how to get around them. To be blunt, the methodology of research in contemporary physics has become too inflexible to be useful for research on systems. But this was not always so.

As a mathematical result, the fact of “controllability of almost any system” is related to very famous work of Hilbert at the end of the nineteenth century on invariant theory. This is where high mathematics is joined with high technology. The roots of mathematical system theory are much older, however. I shall come back to this point after explaining to you another system problem, *filtering*.

[The name, “Kalman filter” has become extremely famous. I was told in Moscow a year ago that there exist over a hundred thousand published papers on the subject. If not an exaggeration, this is a bit surprising since the problem — so it seemed to me — was already solved in my first paper and thoroughly explored in three or four papers following it. Fame is not always kind; there should be many more Wiener filter papers (and there were, before 1960) but there are few today. Moreover, there should have been papers on Kolmogorov filters, but there were almost none. The future may bring new things, for example papers on Kallman filtering.<sup>3)</sup>

Filtering is a basic system problem. There is now an enormous variety of applications. The current literature is exclusively concerned with these applications (how to use a computer? What to filter?) and not with basic principles. Those have remained unchanged since 1959.

Well, what exactly is filtering? It is the creation of new kinds of data from physical measurements, by removing the “noise” from the measured data. Filtered data is then used for control, for example. To control a system, its physical characteristics must be very accurately known; in particular, the values



システムの研究には有用ではありません。しかし、いつもそうであったわけではありません。

数学的な結果として、「ほとんどあらゆるシステムがもっている制御の可能性」は、19世紀末にヒルベルトが不変理論に関して行った有名な研究と関係があります。ここにおいて、高等数学は高度の技術と結びつくのです。しかしながら数学的システム理論のルーツは、ずっと古いのです。この点につきましては、もう一つのシステムの問題であるフィルタリングについてご説明したあとで、再びふれることにいたします。

「カルマン・フィルタ」の名前は、ずいぶん有名になりました。1年前、モスクワで聞いたところでは、この主題について10万を越える論文があるとのことでした。これが大きな話でなければ、ちょっとした驚きです。といいますのは、この問題につきましては、私がすでに最初の論文で解決し、それに続く3、4の論文で完全に解明されているからです。

世評は厳しいものです。もっと多くのウィナー・フィルタの論文があるはず（1960年以前にはありました）。しかし今日ではほとんどありません。さらに、コルモゴロフ・フィルタについての論文があるべきでしたがほとんどありませんでした。将来はようすが違うかもしれませんが。たとえばKALLMAN フィルタリングについての論文<sup>(3), (訳注)</sup>のように。]

フィルタリングは、システムの基本的な問題です。適用範囲はまったくさまざまです。現在ある文献は、もっぱらこれらの適用方法、つまりどうやってコンピュータを使うのか、なにをフィルタにかけるのかに関わる内容となっており、基礎的な原則には関係のないものです。1959年以来、この傾向に変わりはありません。

さて、フィルタリングとは、正確にはなんなのでしょう。それは、測ったデータから「ノイズ」を取り除くことによって、物理的な測定から新たなタイプのデータを創り出すことです。フィルタにかけられたデータは、たとえば制御のために使われるのです。システムを制御するには、その物理的特性は正確に知られているべきであり、とくにシステムのある変数の値は、わかっていなければなりません。フィルタリングとは、直接測ることのできないシステムの変数を計算によって実質的に測定することであると考えられることもできます。これは、直接的に測ることのできる変数に可能な測定を施すことによって得られます。この視点からみると、フィルタリングは、測定装置の勢力を拡大する方法といえます。

フィルタには、なにも不思議なものはないのです。それはたんにコンピュータのプログラムなのです。フィルタには、その仕事をするコンピュータが必要であり、コンピュータに命令を下すためにフィルタリング理論が必要なのです。フィルタのためにコンピュータ・プログラムを書くことは、比較的簡単です。なぜならば、フィルタリング理論は、プログラムを書くのに必要な明確な処理方法を与えてくれるからです。すべては、正しい理論を得ることにかかっているのです。

ここで、マックス・ボルン氏が、1954年12月11日に行ったノーベル賞受賞記念講演から引用したいと思います。原文はドイツ語です<sup>(4)</sup>。彼は一つの例で、フィルタリングとまったく同じ問題に関心を寄せています。彼はある結論に到達したのですが、その講演が30年以上も前

of some variables in the system must be known. Filtering may be viewed as manufacturing (by computation) virtual measurements on those system variables which are not accessible to direct measurement. This is done by using the available measurements on those variables that can be directly measured. From this perspective, filtering is a way of extending the power of measuring apparatus.

There is nothing mysterious about a filter; it is simply a computer program. A filter needs a computer to do its job. Filtering theory is needed to tell the computer what to do. Writing a computer program for the filter is relatively easy because filtering theory provides an explicit recipe for doing that. Everything depends on having the right theory.

At this point I should like to quote from the Nobel lecture of December 11, 1954 of Max Born (originally in German<sup>(4)</sup>). He is concerned, in one of his examples, with exactly the same problem as filtering; he reaches a conclusion which is very surprising even considering that the lecture was given more than thirty years ago. The conclusion is similar to that of the nameless physicist mentioned above and it is equally nonsensical as science. (Now, however, there are no reservations concerning the physicist's qualifications since I am quoting from his Nobel lecture.)

Born is addressing the question of determinism in physics. He is asking, "Is it possible to have very accurate predictions in physics using the classical equations of motion?" And now I quote:

It can be easily seen that this is only the case when the possibility of absolutely exact measurement, of position, velocity, etc. is assumed.<sup>(5)</sup>

Easily seen, Born says, by simple examples. Then he gives an example.

Let us think of a particle which bounces back and forth between two complete elastic walls. The particle moves with constant initial velocity,  $V_0$ , and we can say exactly where it is, provided we know  $V_0$  exactly. If we allow, however, a small uncertainty in the value of  $V_0$  then the uncertainty of prediction of the position of the particle will grow with time so that, if we wait long enough the initial uncertainty will grow to become more than the distance between the walls and after that time, no prediction whatever is possible about the position of the particle.<sup>(5)</sup>

Then he summarizes:

Thus determinism lapses completely into indeterminism as soon as the slightest inaccuracy in data on velocity is permitted.



に行われたことを考慮に入れても、まったく驚くべきものなのです。その結論とは、先ほどふれた名前の思い出せない物理学者の考えと類似しており、科学としては同様に無意味なものです。(しかしながら、この場合、彼のノーベル賞受賞記念講演を引用しているのですから、物理学者の資格に関しては、なんら問題はありません)

ボルン氏は、物理学における決定論への疑問を投げかけています。物理学の分野で、「古典的な運動の方程式を用いて、正確な予見をすることは可能であろうか」と彼は問いかけます。さて、引用しましょう。

「位置とか速度などの絶対的に厳密な測定の可能性が想定される場合にのみ、可能であることは、容易にわかります」<sup>9)</sup>。

ボルン氏は、簡単な例でよくわかるといいます。そして、例を挙げます。

「二つの完全な弾性をもつ壁のあいだをいったりきたりしてはぶ粒子があると考えましょう。その粒子は、一定の初速度  $V_0$  で動きます。そして、 $V_0$  を正確に知っていたならば、それがどこにあるかを正確にいえま。しかしながら、 $V_0$  の値にすこしでも不確実性の存在を許したならば、粒子の位置を予知することは、時間とともに難しくなり、結果的に初期の不確実性は、もし十分に長いあいだ待ったなら壁と壁のあいだの距離以上に大きくなってゆき、それ以後は粒子の位置についてのあらゆる予見が不可能となるのです」<sup>9)</sup>。

それから彼は要約します。「このように、速度に関するデータに、ほんのささいな不確実性でも認められるとたちまち、決定論は完全に非決定論へと変わってゆくのです」。

これらのすべては、まれなほどの明瞭さで論じ記されており、物理学の初心者用教本のスタイルで書かれていました。私がフィルタリング理論についての初めての論文を書いたちょうど4年前のことではあるものの、同じ主題について書かれたボード氏やシャノン氏の論文<sup>9)</sup>の5年後であり、コルモゴロフとウィーナーが基礎的な貢献をして以来、何年もたつたからのことなのです。

さて、すこし休憩いたしましょう。

明瞭性は、真実と同じでしょうか。

30年が経過したいまとなつては、1954年に一人の著名な物理学者がそんな幼稚で不適切な科学的主張をどうやって発表したのかを理解するのは、難しいことです。ボルンと同時代の物理学者たちが、当時の物理学の知識にかんがみて、彼の主張を受け入れたかどうかの疑問についてはここではふれません。私のいいたい点は単純です。ボルンは、物理学の非決定論は測定法の難しさにあるとしました。しかし初速度測定のとでは、それ以上の測定を行うことは不可能であるという自分の仮定を物理学に基づくとしたとき、彼は大きな誤りをおかしたのでした。もし、さらに測定することができ、その測定がどの程度正確であるかが問題でなければ、最適フィルタリングを用いることで、最初の測定方法の質を高めることができるのです(実際、ボルンの例は1954年以降に著わされた多くの本の中に現われる最適フィルタリングの教育的な例です。たぶんウィーナーの「黄禍」とよばれた黄表紙の戦時秘密報告

All this was said and written with rare clarity, in the style of elementary textbooks in physics, exactly four years before my first paper on optimal filtering theory, but also five years after Bode and Shannon's paper<sup>9)</sup> on the same subject and many years after the basic contributions of Kolmogorov and Wiener.

Let us pause.

Is clarity the same as truth?

After the passage of thirty years it is difficult to understand how in 1954 a distinguished physicist could make such a crudely unacceptable *scientific* statement. (I leave aside the puzzle whether physicists who were Born's contemporaries found his statements acceptable in the light of knowledge of physics at the time.) My point is simple. Born attributes indeterminacy in physics to the difficulty for measurements. But he commits a gross error when he attributes to physics his own assumption that after the initial velocity measurement no further measurements are possible. If we can make some further measurements, and it doesn't matter much with what sort of accuracy, we can improve the quality of the original measurement by using optimal filtering. (In fact, Born's example is a pedagogical example of optimal filtering that may be found in many books written after 1954 and perhaps even in Wiener's "yellow peril," a wartime, secret report with a yellow cover. It is amazing how far the scientific cultures of physics and system theory must have drifted apart, as early as 1954.)

To repeat: Born's argument about indeterminacy hinges on the idea that physics can somehow prohibit the observer to record and optimally (mathematically) exploit measurement data. It is not very convincing to use such a prejudiced view of physics as a prop for the argument that "determinism lapses into indeterminism." Many applications of Kalman filtering owe their origin to the discovery by competent nonphysicists that the conventional physical point of view, as caricaturized by Born's example, is false or irrelevant. The *real* physics of the situation resides in the problem of explaining an intrinsic noise level that limits the accuracy of measurements. It is widely believed that noise in this sense is quantum-mechanical in origin. We do not have a full theoretical understanding of this at present. Born's primitive argumentation is not to be found in any good book on system theory; the kindest thing that may be said for it is that filtering theory (and the system point of view) is perhaps not as irrelevant to quantum mechanics as it seemed to Born in 1954.

Born's opinions are only incidental to this lecture, but the point he raised remains important. How does one do physics when it may have to be accepted that measurements are unavoidably inaccurate? Or, calling inaccuracies in measurement, equations, constants, etc. by the generic name "noise," what can we do about noise? If we use the word *noise* to remind ourselves of the many unpleasant areas of fuzziness remaining in our present scientific knowledge, then this is certainly a very general and very basic problem, and its importance reaches far beyond physics. Personally, I do not see "determinism versus indeterminism" as a basic issue; but I see it as requiring a better understanding of physical



書<sup>(註)</sup>の中にさえ見いだされたかもしれません。1954年という早い時期にすでに、科学文明である物理学とシステム理論のあいだが、そうとうな距離で離ればなれになってしまったというのは驚くべきことです。

繰り返します。非決定論についてのボルンの論旨は、観測者が測定データを記録し、適切に用いることは物理学ではとにかく禁じられている、という考え方によるものです。このような偏った物理学の見方を、「決定論は非決定論へと移行する」というような議論の基礎として用いることは、説得性に欠けるものです。

カルマン・フィルタリングは、たいてい有能な非物理学者による発見からその応用が始まるのです。その発見とは、ボルンの例で揶揄したように、型どおりの物理学的なものの見方は、間違っているか見当違いであるというものです。

この状況における真の物理学は、測定の正確さに限界を与えている内在的なノイズのレベルを説明する問題にあります。この意味におけるノイズは、元来量子力学的であると広く信じられています。これについては現在、十分に理論的に理解されているとはいえません。

ボルンの幼稚な論法は、システム理論を内容とするいかなる優秀な本にも見当たりません。それについてあえて弁護するならば、フィルタリング理論とシステムの視点は、1954年当時、ボルンが思っていたほどに量子力学に無関係ではないといえるのではないのでしょうか。

ボルンの見解は、この講演にとってはたんに付随的なものですが、彼の提起した問題点は、いまなお重要です。測定が避けようもなく不正確であることを受け入れざるをえないとき、どうやって物理学の研究をするのでしょうか。あるいは測定や方程式、定数などの不正確さを、なににでも通用する名前の「ノイズ」とよぶことで、ノイズについて私たちは、なにができるのでしょうか。私たちがもし、現在の科学知識に存在する不愉快なはつきりしない多くの分野を自分自身に想起させるためにノイズという言葉を用いるならば、これは明らかに、たいへんに一般的、かつたいへん基礎的な問題です。それらは物理学の枠を超えて、さらに重要であります。私個人としては、「決定論対非決定論」を基本的問題として見ていません。それは、絶対的なノイズのレベルを確立する物理的メカニズムのよりよい理解を要求するものであると考えています。

直前の何分かの議論をまとめますと、コンピュータの助けをかりてフィルタリング理論を適用することにより、測定のトータルとしての実質的な精度を改善することができるということです。私たちはもう、「わずかな測定誤差による決定論から完全な非決定論への移行」を恐れなくてよいのです。なぜなら、最適フィルタリングを使えるからです。私たちが物理学を必要とするのは、耐えなければならないノイズがどれだけあるかを知るためです。物理学を越えて私たちが知りたいのは、もしあるとすればですが、正確なデータに基づいた科学と、不正確なというよりたいていノイズの多いデータから、とにもかくにも知識を抽出しなければならぬ科学とのあいだに、どれだけの違いがあるかということです。

これが社会科学に存在するジレンマです。私は社会科学やその他のものをソフトな科学と

mechanisms that establish an absolute noise level.

To summarize the last few minutes of discussion: By using filtering theory with the help of a computer we can greatly improve the overall effective accuracy of our measurements. We have lost our fear of “lapsing from determinism into complete indeterminism through small measurement errors,” because we can use optimal filtering. We need physics to tell us how much noise we have to put up with. Beyond physics, we want to know what differences, if any, there are between science based on exact data and science that must somehow extract knowledge from inexact, often rather noisy data.

This is the dilemma of the social sciences. I would rather call them (and others) soft sciences to indicate that they have not yet been able to resolve the problems involved in soft (noisy) data.

We have now motivated my major remaining topic in system theory. This is what is usually called *realization theory*. My own work goes back to only 1961 although related problems (network synthesis) were explored many years ago by Foster, Cauer, Darlington, and Guillemin (the last my first teacher), always from the point of view of using mathematics as a research tool to be employed in trying to understand systems.

I was and will remain fascinated by the realization problem. It served to educate me about how classical science evolved, to reveal the shallowness of conventional interpretations by historians of science, to understand what Newton had meant by his delphic phrase,

“Hypotheses non fingo”<sup>7)</sup>,

and to begin to understand what mathematics has to do with the real world.

I will now explain in nontechnical terms the nature of the realization problem. Suppose I am given data concerning the behavior of a system under some concrete conditions. From this data, I want to know how the system functions. This has two aspects. First, how a system is put together is expressed by a family of equations, or, if you prefer the current jargon, by a model. So I want a model. Second, I do not want to use brain power to find out what the model is, I do not want to guess, I want a computer to find the model. If a computer is to do it, guessing is useless anyway because the computer must be given precise instructions to do its task. The realization problem calls for converting data into a model, and the problem must be described in mathematical terms with such a high precision that even a computer can do it. Realization is, at least abstractly speaking, an absolutely pure mathematical problem.

The end result of the solution of a realization problem, as of any mathematical problem, is a completely precise and true statement, which we mathematicians call a theorem. I cannot explain here how this process works in realization theory, but I want to give you some feel for the essentials.

Any mathematics proceeds by idealization. In realization theory, we regard



よびたいと思いますが、それはこれらの分野において、いまだソフトな（ノイズを含んだ）データにまつわる問題が解決されていないことを示すためからです。

システム理論の主要な論題のなかで、まだご説明していないものについて、お話しするべきときがきました。これが通常、実現理論とよばれているものです。私自身が研究を行ったのは1961年に遡りますが、それに関連する問題（ネットワークのシンセシス）は、フォスター、カウワー、ダーリントン、ギレミン（私の最初の師）などによって、ずんぶん昔に研究されておりまして。彼らはシステムを理解するために、常に数学を研究の手段として使用するという観点から研究に従事していました。

私は実現の問題にかなり前からとりつかれており、これからも興味をもちつづけるでしょう。この問題は、どのように古典的科学が発展してきたかを理解し、科学史家による慣習的解釈が浅薄であることを明らかにし、

「私は人為的な仮説はたてない」<sup>7)</sup>というデルフォイの神託のような言葉で、ニュートンはなにをいいたかったのかを理解し、また数学が実社会とどのように関わるかを理解し始めることに役立ったのです。

次に、実現の問題の本質を、専門用語を用いずに説明しましょう。なんらかの具体的な状況のもとでシステムの挙動に関するデータを与えられていると仮定してください。このデータから私は、どのようにシステムが機能するのかを知ろうとします。これには、二つの側面があります。まず第一に、システムがつくられている方法は一連の方程式で、いま流行の専門用語を使っているものと、モデルで示されています。そこで、私はモデルがほしいのです。第二に、なにがモデルかを見いだすために、頭脳の力を使いたくありませんし、いいかげんな推量もしたくありません。私は、コンピュータにモデルを見つけてもらいたいのです。もしコンピュータがそれをやり遂げるなら、どちらにしても推量する必要はありません。コンピュータは、その仕事をするための正確な指令が与えられているはずだからです。実現の問題には、データをモデルへ転換することが必要です。また、この問題は、コンピュータでも実行可能なほど、精度の高い数学言語で記述されねばなりません。すくなくとも抽象的にいえば、認識とは完全に純粋な数学の問題です。

実現問題の解の最終的結果は、ほかの数学の問題と同様に完全に精密で、正しい主張であり、それを私たち数学者は定理とよんでいます。実現理論において、この過程がどのようなになっているのかはここで説明はできませんが、その本質に関してある感触をおもちただけようご説明したいと思います。

数学はすべて理想化によって歩を進めます。実現理論において、データはなにが理想化されたものと見なされ、二つの特性が期待されます。まずデータは正確であると仮定されます（正確であるとは、その言葉の通常の意味において、ノイズがなくまったく正しいということです）。それからデータは完全であるとみなされます。完全とは、私たちに必要とされるだけの情報のすべてが、そのデータに含まれていることを意味します。また、その後いか

“data” as something idealized and look for two properties. We first assume that the data are *exact* (in the usual sense of the word: absolute accuracy, no noise). We then assume that the data are *complete*, by which we mean that we have as much data as we would ever want, and it is unnecessary (even though it might be possible) to perform any more experiments on our system in the future. “Completeness” in this sense is of course a highly idealized and abstract notion, but it is precisely what is needed to formulate some deep problems.

The main result of realization theory may be expressed quite accurately in ordinary English:

*Data that are exact and complete are realized (that is, explained) by precisely one minimal model.*

The phrase “precisely one” in this statement means that the explanation of the data by a minimal model is *unique*. There is always an explanation and no more than one: any two explanations, even though they may seem to be different, must mean the same. But for the statement to be true, we must require the model to be *minimal*, namely as simple as possible. Einstein’s dictum, quoted above, that an explanation *must* be as simple as possible but not simpler, now forms a part of the realization theory. A vague *bon mot* has been transformed into a scientific principle. We shall call the result quoted above the *Uniqueness Principle* of (minimal) modeling.

This result is so important that I will say it once more. Always under the assumption of exact and complete data (this is the best possible situation, a goal), the data must speak for itself, there is only one acceptable explanation, the minimal explanation, which means that I must not add any personal element to interpreting the data. Uniqueness means that the minimal explanation is method-independent, it does not matter how we arrive at it because this minimal explanation is already intrinsic in the data. Under these conditions on the data scientific modeling is a deductive exercise, not a creative act. The work consists of getting, somehow, the information out of the data; the processes for actually achieving this are of secondary importance. It is perfectly all right to use computers; it is not a matter of human pride or ingenuity.

The message of the uniqueness principle is seldom disputed by researchers in the hard sciences. But it is terribly unpleasant to those in the soft sciences, or shall we say presciences, where contriving an explanation, building a model, inventing a theory is still regarded in some wistful way as the supreme creative act. Everyone who practices research, and many do that without a license, thinks he has a right to become the Newton of his field.

There are many dissenting voices, however from such a naive dream as science. Leontiff (Nobel Prize in Economics, 1974) diagnosed the current malaise in econometrics (which is statistics applied to economic model building) by observing,



うな実験を行うことも（それが可能だとしても）不必要であるということです。「完全さ」はこの意味において、もちろん高度に理想化された抽象的な概念です。しかしそれは深い問題を定式化するのにまさに必要なのです。

実現理論の主要な成果は、普通の言葉で非常に正確に述べることができます。

「正確で完全なデータはすべて、ただ一つの最小モデルで実現することができる（つまり説明される）」。

この言明のなかの「ただ一つの」という言葉の意味は、モデルによるデータの説明がまさに一つしかないということです。つねに一つの説明のみで、それ以上はありません。二通りの説明があって、それが違うように見えたとしても、同じことを意味していなければならないのです。しかしこの言明が真であるために、モデルは最小でなければなりません。すなわち、できるだけ単純でなければならないのです。前に引用したアインシュタインの金言、「説明はできるかぎり単純でなくてはならないが、単純化しすぎてはならない」は、いまや実現理論の一部となっているのです。漠然とした考えが、科学原理に変身したのです。前に引用した成果を、最小モデル化の一意性の原理とよぶことにしましょう。

この成果は非常に重要ですのでもう一度いいます。つねに、正確で完全なデータという仮定のもとで（これは可能なかぎり最高の状況で、最終目標であるわけですが）、データは自らを物語っているはずのものであり、ただ一つの容認される説明、最小の説明があるということです。したがって、決してデータの解釈に個人的な要素を与えてはならないのです。一意性の意味するところは、最小の説明は方法によらないということです。どうやってそれに到達したかということは問題ではないのです。なぜなら、この最小の説明はデータのなかにすでに本来そなわっているものであるからです。データにこれらの条件がそろっていれば、科学的なモデル化は演繹的な課題であり、創造的な行為ではありません。作業はデータからとにかく情報を得ることなのです。これを実際に達成するための過程は、二次的な重要性しかもっていないのです。コンピュータを使うことは、まったくかまいません。それは人間の尊厳であるとか創意の問題ではないのです。

一意性の原理のいわんとすることがハードサイエンスの研究者の論争の種になることはほとんどありませんが、ソフトサイエンスの研究者にとってはとても不愉快なものになります。ソフトサイエンスというよりは、前科学とよんだほうがよいでしょうか。そこでは説明を考案することが、モデルを作り上げることが、理論を発明することが、いまだにすばらしく創造的な行為と見なされているのですが、それはなにか物欲しげでさえあるのです。研究に従事するものはみんな、そして多くは資格なしにそれを行い、自己の分野でニュートンになる権利があると思っているのです。

科学であるということになっている素朴な夢想から発した、意見を異にする声が多くあります。レオンティフ（1974年度ノーベル経済学賞受賞者）は計量経済学、つまり経済モデルに適用される統計学における現在の問題点を、次のように分析しました。

...the econometricians fit algebraic functions of all possible shapes to essentially the same sets of data without being able to advance, in any perceptible way, a systematic understanding of the structure and the operations of a real economic system.<sup>8)</sup>

Admittedly, Leontiff's language is emotional and intuitive; no matter. By the Uniqueness Principle, there is just no point of fitting more than one (minimal) model to the same data, assuming the data is good (ideally, exact and complete). So there must be something wrong with econometricians. Either their data are bad and then there is little fun or profit in fitting models, or the data are good but econometricians don't know what models or how to fit them.

There are many research groups today that try to develop models for the same thing, for example, for the global economy. For them the uniqueness principle is something very hard to accept, assuming they have heard about it at all. After all, why should there be two groups building two models when there is only one meaningful model? What does each group of modelers contribute? And what's the use of even one group of human modelers when the computer can do their job better?

Leontiff and I agree that the econometric practice today (it should not be dignified by calling it methodology) is very very bad; in fact, it is a dead end. But neither Leontiff nor I can claim this to be an original contribution to science. Scientists and would-be scientists have been warned long ago, by Newton himself, when he wrote "Hypotheses non fingo."

Professor Bentzel, member of the Nobel Committee on Economics, asked after this lecture, but not from me directly, "Why does he (Kalman) say there is something wrong with economics? What's wrong?" The lecture tried to explain that; it cannot be done in a few words. Still, it is surely true that one of the things wrong with economics is that it is not a science — otherwise economics, whose basic problems involve systems would be close to system theory which is not, as yet, the case. Since in science data must (somehow) be related to explanation, models, theories, this must happen also in economics; and it hasn't happened because econometrics, which is supposed to be the tool that relates economic data to theorizing, has been haplessly and hopelessly inadequate for this task up to the present.

Newton had a wicked sense of humor as must be obvious to all those who were taken in by the silly story about the apple, a journalistic canard that he set into circulation at the very end of his life. His contemporaries had no choice but to believe him, but did they understand him? "Hypotheses non fingo"<sup>9)</sup> was mistranslated two years after Newton died as "I do not frame hypotheses." The correct translation ought to be something like "I disdain (explaining natural phenomena by) contrived hypotheses."

By the middle of his life, Newton has educated himself to become the first great system theorist. Of course Newton was also a great physicist and made



「計量経済学者は、現実の経済システムの構造および動きの体系的理解を、目に見えてわかるかたちで進展させることができないまま、ありとあらゆる形の代数的関数を本質的に同一のデータにあてはめています」<sup>8)</sup>。

レオンティフの言葉は明らかに感情的で直観的ですが、問題はありません。一意性の原理によれば、データが良いもの（理想的には、正確かつ、完全なもの）であると仮定して、二つ以上の（最小の）モデルを同一のデータに適合させても意味がありません。ですから、計量経済学者たちは、どこかで間違っているに違いありません。彼らのデータが悪いのか（そのときはモデルを適合させることには、ほとんど興味も益もありません）、データは良いのだけでも計量経済学者がいかなるモデルであるべきかと、どうやってそれらを適合させるのかを知らないからなのです。

今日では同じ事例、たとえば地球規模の経済についてのモデルを開発しようと努力している多数の研究グループがあります。彼らにとっては、一意性の原理を容認することは、非常に難しいことです。といっても、彼らがそれについても聞いたことがあればの話です。結局、意味のあるモデルがたった一つしかないときに、なぜ別のモデルを打ちたてようとする二つのグループがなければならないのでしょうか。それぞれのモデルの設計者はどういった貢献をするのでしょうか。そして、コンピュータがその仕事を人間以上にすばらしくやってくれる場合、人間のモデル設計者のグループが、一つであっても存在することに、なんの益があるといえるのでしょうか。

レオンティフと私は、今日の計量経済学の実情（それは方法論とよぶことで権威づけられるべきではありません）は、ずいぶん、いえまったく悪いと認識しています。事実、行き詰まりの状態です。しかし、レオンティフも私も、これが科学に対してのオリジナルな貢献であると主張しているわけではありません。科学者や、科学者のタマゴたちは、すでにニュートンが、「私は検証できない仮説はたてない」<sup>9)</sup>と述べた時点で、警告を受けていたのです。

ノーベル経済学賞選考委員会のメンバーであるベンツェル博士が、この講演のあとで質問しました。それは私に対して直接なされたものではありませんでしたが、「どうしてカルマンは、経済学にどこか間違ったところがあるというのだろうか。なにが間違っているというのだろうか」というものでした。講演では、次のことを説明しようとしたのです。二言三言では説明できないのですが、それでもなお、経済学に間違ったところがあり、その一つである経済学が科学ではないということは確かに正しいのです。そうでなければ基本的な問題にシステムが含まれている経済学は、もっとシステム理論に近かったでしょうが、まだそうやってはいないのです。なぜなら科学であるならばデータは、とにかく説明、モデル、理論に結びつけられなければならない、経済学においてもそうでなければならないのです。しかしそうならなかったのは、経済学データを理論化に結びつける道具であるべき計量経済学が不運にも、そして絶望的に、この課題に対して現在までのところ、適切ではないからなのです。

ニュートンには、いたずらっぽいユーモアのセンスがありました。リングについてのたわ

very great contributions to optics in his youth. But I shall speak about a different side of him, his “proof,” after twenty years of work, of the inverse square law of gravitation. It is very much related to what I was saying earlier.

The nature of gravitation was the subject of much speculation in Newton's time. It was easy to guess that the force of gravitation between two bodies is inversely proportional to the square of the distance between them. It is almost as easy to derive this conclusion (as Newton may well have done himself) by combining Kepler's third “law” of planetary motion with the formula expressing the centrifugal force on a body in uniform circular motion. The derivation is not a proof, however. (It is not even convincing heuristics because Kepler's first “law” claims emphatically that a planet moves in an *elliptical*, and not in a circular, path around the sun.)

Newton proceeded to study the problem of gravitation by a method which is essentially the same as realization theory is today. He took all three of Kepler's empirical “laws” of planetary motion as his *data*, and it was a truly remarkable historical accident in the development of Western science that this data automatically satisfies the two crucial requirements of being both exact and complete. Exact, because Kepler's “laws” were stated in mathematical language and therefore automatically exact. Complete, because the most natural assumption for a physicist (and that Newton also was, as I mentioned) is to say that all planets around all suns move in accordance with Kepler's “laws;” if so, then Kepler's “laws,” viewed as data about planetary motion, are indeed complete in the sense of the definition I gave earlier.

Newton then worked out the consequences of some difficult mathematical experiments. If the motions are such and such (data), what must the forces (model) be? And conversely, given the forces, what are the motions? These are two sides of the question of realization; what model, “realizes,” i.e., reproduces, a given set of data, and how does the data set restrict the possible models that realize it. Newton rigorously established, by means of mathematics, that the gravitational force satisfying the inverse square law makes a (single) planet orbit its sun on an elliptical path so that all three of Kepler's “laws” are satisfied; he also showed, again by rigorous mathematics, that Kepler's three “laws” together imply that the gravitational force must necessarily obey the inverse square law. In this way Newton proved that planetary motion around a Sun, (the two-body problem) and the inverse square law for the gravitational force are in one-to-one correspondence. This is the content of the Uniqueness Principle; Newton rigorously “verified” that the principle was actually a theorem in the special case of planetary motion. Newton did not explicitly state the Uniqueness Principle; that he was well aware of most of its contents will become clear as I complete my lecture.

Newton was absolutely insistent that a physical law is meaningful only if all the data is explained in a *unique* way. Had he himself originated the Uniqueness Principle, he would have surely said that a physical law may arise only through



いもない話、ニュートンが晩年に流したジャーナリスティックな作り話にだまされた人には、すぐわかると思います。ニュートンと同時代の人は信じるしかありませんでしたが、彼らははたして理解したでしょうか。

「私は人為的な仮説は立てない」という言葉がニュートンの死後2年たって、「私は仮説を立てない」というように誤訳されました。正確には「私は人工的な仮説によって自然現象を説明するのを潔しとしない」とでも訳されるべきものでした。人生の半ばまでにニュートンは、自分自身を磨いて最初の偉大なシステム評論家になりました。もちろんニュートンは偉大な物理学者でもあり、若い時代には光学について偉大な貢献をしました。ここで私はニュートンの別な面について話しましょう。ニュートンが20年もの歳月をかけた、「重力が距離の自乗に反比例する」という法則の「証明」についてです。これは私が先にいっていたことと深く結びついているのです。

引力の性質は、ニュートンの時代には、考察の対象として大いにもてはやされたのでした。二つの物体間の引力が、それらのあいだの距離の自乗に反比例することは容易に推測できました。この結論を（ニュートンが自身も行ったかもしれないように）、ケプラーの惑星運動の第三「法則」と、一樣円運動を行う物体に働く遠心力を表わす公式とを結びつけることによって導き出すことは、ほとんど同様に容易です。しかしそれは証明ではありません（また納得のいく推量でもありません。なぜならケプラーの第一「法則」は、惑星は太陽の周りを円ではなく、楕円の形で動いているとはっきりと述べているからです）。

ニュートンは、今日の実現理論と本質的に同じ方法で引力の問題の研究を進めました。彼は、ケプラーの経験による惑星運動の三つの「法則」を自分のデータとして用いました。そしてこのデータが、正確で完全という二つのきわめて重要な必須条件を自動的に満たしていることは、西欧科学の発展におけるまことに注目すべき歴史的出来事でした。正確である理由は、ケプラーの「法則」が数学言語で式として表されているからです。それゆえに、自動的に正確なのです。完全であるという理由は、物理学者（ニュートンもまたその一人ですが）にとってもっとも自然な仮定とは、すべての太陽の周りのすべての惑星はケプラーの「法則」に従って廻るということだからです。もしそうならば、惑星運動についてのデータとしてみたときのケプラーの「法則」は、私が先ほど述べた定義の意味で、事実、完全なのです。

ニュートンはそれからある難しい数学的な実験の帰結を導きました。もし動きがそのようなもの（データ）であるならば、その力（モデル）は、いったいどのようなものであるだろうか。そして逆に力を与えられれば、いったいどのような動きになるのだろうか。これらは実現問題の二つの面であります。どのようなモデルが、与えられたデータのセットを「実現する」のだろうか。すなわち、再現するのだろうか。そしてデータはどのようにしてそのデータを実現するモデルを限定するのだろうか。ニュートンは、距離の自乗に反比例する重力により単体の惑星は太陽の周りをケプラーの三つの「法則」をすべて満たす楕円軌道で回るということを数学的に厳密に立証しました。ニュートンはまた厳密な数学によって、ケプラ

the validity of the Uniqueness Principle; that no one can talk meaningfully about a physical law unless the Uniqueness Principle holds. He regarded as the main accomplishment of his life his “proof” of Kepler’s empirical “laws.” I prefer to be on Newton’s side in not referring to Kepler’s “laws” that is, Kepler’s rules, as true physical laws, and I am aware of the fact that three hundred years after Newton most physicists still do not appreciate this nuance. Newton categorically did not agree that Kepler established his laws, claiming that “Kepler knew only that the planets moved in noncircular orbits and guessed that these orbits were ellipses”<sup>9)</sup> and he would concede only that “Kepler guessed right.”<sup>9)</sup> Incidentally, Newton’s precise mathematical treatment of the two-body problem by the classical technique of conic sections made it clear to him that there are not only elliptical but also hyperbolic orbits (the latter unknown to Kepler). Newton got a bonus for having “mathematicized” Kepler’s “laws”: the motion of Halley’s comet could be immediately explained by the inverse square law.

By hindsight, Newton might have been more generous toward Kepler; after all Kepler not only gave Newton his data but gave him data which was both exact and complete — the critical requirement of the Uniqueness Principle. In any case, my impression is that Newton used all aspects of the Uniqueness Principle exactly as if he himself had formulated it.

[The only strictly analogous case I know of in the history of science is Mendel’s laws of genetics. Posterity has been at times ungenerous to Mendel. He has been *accused* (by statisticians) of “cooking” his data to be exact and complete, not by the intermediary of a now -forgotten Kepler of plant genetics but by himself.]

Newton did much more than use the Uniqueness Principle as a kind of philosophical crutch. He knew — whether consciously or subconsciously — that to implement the Uniqueness Principle, that is, to actually find the unique minimal model that explains the data, there is no alternative to mathematics. This was a major part of Newton’s intellectual achievement. He created new mathematics, which later turned out to be very helpful to him in this task. He found the minimal model (the inverse square law) by mathematics. He was proud of this. He regarded himself as a hard-working mathematician (as he surely was) and resented being accused of plagiarism by someone (Hook) whose intellectual powers were limited to guessing the end result of a tricky process. I think Newton would have been generous in giving credit to computers (and their developers) if computers had existed in 1680 because he understood that realization was a deductive, laborious task, not a creative act.

Newton had a very sophisticated view of science, a view that is much closer to system theory today than to what has become later classical theoretical and mathematical physics. It is a view that is not easy to popularize. Who among us can say that he understood immediately that “proving Kepler’s laws” and “letting the data speak for itself,” are really the same thing? And that this is crucial? In the Scholium Generale (in Latin<sup>10)</sup>, Newton tried verbal explanations but (in my



一の三つの「法則」が一体となって重力が距離の自乗に反比例しなければならないということを通導することを証明しました。このようにしてニュートンは、太陽の周りの惑星の動き（二体問題）と「重力が距離の自乗に反比例する」という法則とが一対一の対応にあることを証明したのです。これが一意性の原理の内容です。ニュートンは惑星運動の特殊な場合には原理が事実定理であることを厳密に「実証」しました。ニュートンは一意性の原理をはっきりとは述べませんでしたが、ニュートンが一意性の原理の内容のほとんどについてよく気づいていたことは、この講演が終わるにしたがって明らかになるでしょう。

ニュートンは、すべてのデータがただ一つの方法によって説明されるときにのみ、物理法則は意味をもつということを決して譲りませんでした。もしニュートン自身が一意性の原理を創設したのであれば、一意性の原理が成り立つときにのみ物理法則が存在するのだといったでしょう。そして一意性の原理が適用できないかぎり、誰も物理法則について語ることはできないのだと。ケプラーの経験的な「法則」を証明したことは自身の生涯の主要な業績であるとニュートンはみなしていました。ケプラーの「法則」、すなわちケプラーの規則を真の物理法則とはよばないということに関して、私はニュートンの側に立ちたいと思います——ニュートン後300年たって、このニュアンスを真に理解しない物理学者が多いのですが。ニュートンは断固、ケプラーがケプラーの法則を確立したとは認めませんでした。「ケプラーの知っていたのは惑星が非円軌道で動いているということだけであり、ケプラーはその軌道が楕円であると推量したにすぎない」と主張しました。そして譲歩したとしても、「ケプラーは正しく推量した」といったことでしょう。ついながら、ニュートンは二体問題を数学的にかつ正確に処理するのに円錐曲線という古典的な技術を用いたのですが、それにより楕円だけでなく双曲線の軌道があることが明らかになりました（ケプラーは後者のことを知りませんでした）。ケプラーの「法則」を「数学化」することは、ニュートンにボーナスをもたらしたのです。ハレー彗星の動きは、「重力は距離の自乗に反比例する」という法則によって即座に説明されえたのです。

のちのことを知っている者としては、私たちはニュートンがケプラーに対してもう少し寛大であったのではないかと、いえるかもしれません。結局、ケプラーはニュートンにただデータを与えただけでなく、そのデータは正確で完全だったのです。そしてそれは一意性の原理の重要な必須条件なのです。いずれにせよ、ニュートンは一意性の原理のすべての面を彼自身が定式化したかのように使ったように思われます。

私の知るかぎり、唯一厳密に類似している科学史のなかの例は、メンデルの遺伝法則です。後代の人びとはメンデルに対して、時に批判的でした。統計学者は植物遺伝の分野の、いまでは忘れられたケプラーのような仲介者によってではなく、メンデル自身がデータを正確で完全であるように「捏造」したと非難したのです。

ニュートンは一意性の原理を哲学的な支えのようなものとして使う以上のことをしました。意識的にか潜在意識でか、一意性の原理を実行に移すには、すなわちデータを説明する唯一

view) not quite successfully. We now know that he tried hard because five handwritten drafts of portions of this rather short (two printed pages) scholium have survived in Newton's handwriting. He expressed himself most clearly (in my opinion) when he wrote, in referring to ad hoc hypotheses which are added to the data in an attempt to produce a more palatable explanation,

“Prejudicia sunt et scientiam non pariunt.”<sup>11)</sup>

*In English:* [Such extraneous hypotheses] are [merely] prejudices which cannot engender [good] science.

This is unmistakable: Newton warns, *prejudice is no way to do science, you cannot advance science by prejudice*. If you dislike a blunt word like “prejudice” then I could soften Newton for you by saying *you cannot do science by wishful thinking*. (But there is absolute evidence that Newton did write “prejudice,” at least twice.) Unfortunately, in the end Newton replaced several paragraphs of explanations with a single sentence “hypotheses non fingo,” and let it go at that.

By calling *prejudices* those assumptions which are added to data as an attempt to generate a “better” theory Newton was extraordinarily farsighted. For “prejudice” is probably the most accurate word in English or Latin to express the futility of imposing a subjective personal judgment (which in science is seldom more than a guess) to the data, trying to pass it off as part of the scientific process. Newton thunders that you just cannot do science in that way. And he was right; in the very famous concluding paragraph of the Scholium Generale, he made a remarkably good guess at neurophysiology, but added that it is bound to take a long time to get scientific research moving in that area. Indeed, it took two hundred years.

(I suppose Newton would not be proud of physics today if he were told about superstring theory. He would make fun of it as the most extreme case of “hypotheses fingere” ever. The burden of proof is not on him.)

Newton would have had no patience with excuses for slow progress in the soft sciences. His data (that is, Kepler's) were very good. On the other hand, the soft scientists never tire of complaining that they cannot do experiments and that, as a consequence, their data are very bad and that they cannot be expected to do better. Consequently, they say, Leontief's criticism (quoted above) is not fair.

I have no love for this argument and I am not lacking in powerful supporters. A qualified critic, von Neumann, reminded us, thirty years ago,<sup>12)</sup> that it is impossible to experiment in astronomy (at least it was then) yet astronomy has not been a soft science. Newton's problem was in astronomy and he had gotten around the impossibility of experiments by inventing realization theory which can be understood intuitively as a very searching way of asking questions of data. A kind of mathematical substitute for experiments. That this is essential to science was well known not only to the lofty Newton but also to Russell whom I have quoted at the beginning, and to many others. Medawar (Nobel Prize in Medicine,



の最小モデルを実際に発見するためには、数学の代わりになるものがないことをニュートンは知っていました。このことはニュートンの知的な業績の主要な部分を占めています。ニュートンは新しい数学を創造し、その数学はあとでこの課題に対して、たいへん役に立つものとなりました。ニュートンは最小モデル（「重力が距離の自乗に反比例する」という法則）を数学によって発見したのです。ニュートンはこれを誇りに思っていました。ニュートンは自分自身を勤勉な数学者だと見なしていましたし、確かにそうでした。それで他人（フック）に剽窃と責められたことに対して憤慨しました。フックの知力とは巧妙な過程の最終的な成果を、たんに推量するところまでに限られていました。私はニュートンがコンピュータ（そしてその開発者）に対しては、もし当時それが存在したならば、おおらかにその成果を認めたであろうと思います。なぜならニュートンは実現が演繹的で、労力のかかる作業ではあるものの、創造的な行為ではないと理解していたからです。

ニュートンの科学的なものの見方は非常に洗練されたものでした。その見方は、のちに古典的な理論あるいは数理物理学になったものよりもずっと今日のシステム理論に近いものです。その見方を大衆化することは容易ではありません。ニュートンはケプラーの「法則」を証明することと「データ自身に物語らせる」ことが、まったく同じであると即座に理解したのですが、私たちのなかで誰がいったいそれを、そしてそれが非常に重要であることを述べることができるでしょうか。スコリアム＝ジェネラル（ラテン語・一般注解）<sup>10)</sup>のなかでニュートンは言葉による説明を試みました。しかしそれは私の見るところ、うまくゆきませんでした。いま私たちはニュートンが一所懸命だったことを知っています。なぜならこのどちらかといえば短い（印刷されたもので2ページ）注解の部分的な手書き原稿が五つ、ニュートンの手書きのままで残っているのですから。もっと意にかなう説明をしようとして、データに追加する先験的な仮定について言及しながら、彼が、

「Prejudicia sunt et scientiam non pariunt.」<sup>11)</sup>——「そのように無関係な仮説は、良い科学を生むことのできない偏見にすぎない」、

と書いたとき、ニュートン自身を、私が思うにたいへん明瞭に表現したのです。

これは間違いようのないことです。ニュートンが警告しているのは、偏見は絶対に科学を行う道でなく、偏見によって科学を進歩させることはできないということです。もし偏見というような直截な言葉がお嫌いでしたら、ニュートンの表現を和らげて、希望的観測では科学を行うことができない、とでもいいましょうか。しかしニュートンが、すくなくとも2回は「偏見」と書いた確かな証拠があります。残念ながら、最後にニュートンは説明の何節かを、「私は検証できない仮説は立てない」という一文に置き換え、それをそのままにしておいたのです。

ニュートンが卓越した識見をもっていたことは、「よりよい」理論を生み出そうとしてデータにつけ加えられた仮説を偏見とよんだことでわかります。なぜなら、英語またはラテン語のなかで——科学ではほとんど推量以上のものではありませんが——主観的かつ個人的な判

1961) had said that “experimentation in science is a kind of criticism.” I would put it the other way: criticism of the theoretical and intellectual bases of science is a substitute for experiments. Lack of easy experimentation makes the job of the soft sciences harder but does not excuse the lack of performance.

There remains, however, the excuse that data in the soft sciences are always bad. Their data *are* noisy. This is a superficial complaint. The hard scientist should ask instead: What can be done about noise? How much noise does a piece of data contain? How do we know?

Such questions require an answer. The answer ought to come from the methodology of the soft sciences, which at the present time is roughly the same as applied statistics. Leontiff’s criticism, that “mathematical” papers in economics are fruitless, also needs to be answered. These two problems are closely related.

From a scientific view the most obvious failing of theoretical statistics is its reliance on prejudice. The literature of statistics, as far as realization and model building is concerned, consists mainly of the study of various kinds of prejudices. These prejudices are assumptions about noise, invariably made in advance, before any data is available or before the available data has been examined. Statistical procedures (confidence intervals, tests of significance, error estimates) do come up with some educated guesses about the noise, but the validity of such guesses depends critically on the prejudice that has been fixed at the beginning. If the prejudice that leads to the guess about the nature of noise is nearly true the results of data analysis will be acceptable; otherwise the results may be meaningless. The situation with data analysis is similar to experiments in biology; one must be terribly careful not to introduce artifacts into the phenomena one wants to study. Prejudices in statistics correspond to artifacts in other fields; just as bad and more hidden. Contemporary statistics is concerned far too much with the study of its own artifacts. I am aware that “prejudice” is not a polite word, but then neither was “fingere.”

I have implied that the field of statistics, the standard way of dealing with noisy data, is not now a science. I should explain this concretely. The trouble began exactly one hundred years ago when Galton, a once-famous British biologist, introduced the hypothesis of regression.<sup>13)</sup> His goal was a theory of heredity (now called genetics). He collected data concerning father-son pairs (for example, the height of each, or their arm lengths, etc.) Using this data, which was not exact but relatively accurate as regards measurement errors, Galton thought he has proved that all living organisms must regress toward the mean. Since this conclusion presupposed what was delicately called “random mating,” Galton enthusiastically promoted eugenics, the attempt to counteract random mating by — well, trying to breed an elite.

The echoes of Galton’s nonsense are still everywhere today, especially in the popular press. The sad fact is that Galton, a mediocre scientist, was misled by his own prejudice. He assumed that all the noise in his data was in the sons; if he had assumed the opposite, that all noise is in the fathers (another reasonable preju-



断が、データにつけ加えられ、そしてそれを科学的な過程の一部としておいておこうという無益さを表す単語としては、「prejudice=偏見」ほど正確なものはほとんどないといえるからです。ニュートンは、科学的な研究をそのような方法で行うことは不可能だと、声を大にしていっているのです。そしてニュートンは正しかったのです。一般注解を締めくくるとても有名な節で、ニュートンは神経生理学について非常に優れた推量をしました。しかしつて加えて、その領域で科学研究を進展させるには長い時間がかかるはずであるといいました。実際、200年かかったのです。

〔ニュートンが超弦理論のことを聞いたとしたら、今日の物理学を誇らしくは思わないでしょう。ニュートンならばそれを最大級の「偽りの仮説」として馬鹿にするでしょうが、拳証責任はニュートンにはありません。〕

ニュートンは、ソフトサイエンスの遅々とした進展に対する弁解を受け入れようとはしなかったでしょう。ニュートンのデータ、すなわちケプラーのデータはとてもよいものでした。ソフトサイエンティストたちは飽きもせず、実験は不可能である、だからデータが悪く、これ以上よい研究にならないのだと不平をいいます。その結果、前に引用したレオンティフの批判は不当であるということです。

私はこの手の議論には、とうてい賛成できませんし、私に同意する力強い味方もいます。それにうってつけの批評家、フォン・ノイマンは30年も前に<sup>12)</sup>、「天文学で実験することは、すくなくとも当時は不可能である、それでも天文学はソフトサイエンスではなかった」といってくれました。ニュートンの問題は天文学でした。ニュートンは、データの問題を緻密に取り扱うのに非常によい方法であると直観的に理解されうる実現理論を発明することによって、実験の不可能性を克服しました。実験に対する一種の数学的代用です。データを緻密に処理することが科学にとって本質的であるということは、偉大なニュートンばかりでなく、最初に引用したラッセル、そして他の多くの人びとによく知られていました。メダワル(1961年度ノーベル医学賞受賞者)は、「実験は、科学においては一種の批評である」といいました。別の言い方をすれば、科学の理論的、知的基盤に対する批評は実験の代わりになるものだとします。容易な実験法のないことはソフトサイエンスの仕事をやりにくくしますが、成果に乏しいことの言いわけにはなりません。

しかしながら、ソフト科学のデータはいつも悪いデータであるという弁解が残ります。彼らのデータはノイズーなのです。これは、表面的な苦情です。そのかわりにハードサイエンティストは次のように疑問をなげかけねばなりません。ノイズについてなにができるだろうか。一つのデータに、どれくらいの量のノイズがあるのか。どうやって私たちはそれを知るのか。

そのような疑問には答えが必要です。その答えは、ソフト科学の方法論から出てくるべきです。ソフト科学とは、現在のところ大ざっぱにいえば応用統計学と同じです。経済学における「数学的」論文は、成果の少ないものであるというレオンティフの批判にも、また答えが必要です。これら二つの問題は、とても密接に関連しあっています。

dice), he would have had to conclude that the population in the distant past was a bunch of clones of the primordial mean and then drifted steadily apart. An examination of Galton's data, which is still available, shows that his conclusion was entirely the result of his prejudice; the data itself does *not* allow any conclusion to be made either in favor of or against the hypothesis of regression. Galton needed different data to study the problem of inheritance.

We should recall that Mendel's hard (low-noise) data *antedated* Galton's fuzzy thinking by twenty years.

Mendel had been able to find the laws of genetics not only because his data was nearly noise-free but mainly because he allowed the data, and not his own prejudices, to speak. Galton thought he should and could introduce quantitative methods, even mathematics, into biology. He measured the heights of individuals. But he never took the trouble to reflect over what Newton had done and how Newton had succeeded. The relationship between mathematics and science is not nearly as simple as present-day propaganda would have us believe. (As an aside, let us note also that in some cases Newton's insights into pure mathematics are still ahead of what is established knowledge today.<sup>14)</sup>)

To be fair, let us not forget that Galton was unlucky. He did not know that the method of regression (or, by its classical name, least-squares), which was inspired by and named after his own regression hypothesis (but which is pure mathematics and thus unrelated to biology), is unusually treacherous. Regression, as a scientific method, is useless because it can only be applied after some basic prejudiced assumptions have been made, as Galton, too, unwittingly had done. Any such prejudice results in creating noise relative to hypothetical exact data. Regression is unusual because it can create noise for any prejudice. Noise will always appear as though it were the true noise in the data. If the right prejudice happens to be applied to the data, all is well, though the lucky guesser may not know it. Otherwise "results" from regression are just an artifact.

Newton would have been unsympathetic, saying: "You must not allow prejudice. If your data is noisy, analyze it in some other way than by just guessing about noise." Galton and his statistical descendants never understood this point. Einstein was much kinder but even less helpful. He had said:

"God is not malicious but he can be very tricky."

Indeed, Einstein and God must have got a big chuckle out of regression. No matter how you apply it, it seems to give a logically correct result. And so it always gives the wrong answer. Or almost always and one never knows why. This seems somehow unfair. But it is only tricky. As one of my teachers put it, in a published article, "What is Nature's error criterion?"<sup>15)</sup> There is no answer to the question because the question itself is meaningless. Nature doesn't have an error criterion. It doesn't need one. That's how it is. *So deska*.

I hope you like my poetic language. But what I am saying is hard mathemati-



科学的観点からすれば、理論統計学のもっとも明らかな失敗は、偏見に依存していることです。実現とモデリングに関するかぎり、統計学の文献はおもにさまざまな偏見を研究することから成り立っています。これら偏見はノイズに関する仮定であり、いつも決まって前もっているのです。データが入手される前とか、入手したデータが調べられる以前に設けられるのです。統計的手続き（信頼区間、重要度の検定、誤差の評価）には、ノイズについての高度な推量をともないますが、その推量の妥当性は、最初に設定された偏見に決定的に左右されます。偏見はノイズの性質についての推量を導くものですが、その偏見が真実に近いならば、結果は納得できるものでしょう。そうでなければ、結果は意味のないものであろうと思えます。データ解析の状況は生物学の実験によく似ています。研究対象に人工的な手が加わったものを導入しないよう、非常によく注意しなくてはなりません。統計学での偏見は、ほかの分野での人工的なものに相当します。同じくらい悪く、かつもっと隠されています。今日の統計学は、それ自身が創り出した人工的なものの研究に、あまりにも深く関わりすぎています。「偏見」が、上品な言葉でないことは承知しておりますが、だからといって、「偽り」であるともいえません。

私は、ノイズの多いデータを取り扱う標準的な方法という統計学の分野は、いまや科学ではないことを示してきました。これを具体的に説明せねばなりません。問題は正確に100年前に始まりました。昔は有名だったイギリスの生物学者ゴールトンは回帰仮説を出しました<sup>13)</sup>。彼の目標は遺伝理論でした（現在は遺伝学とよばれています）。ゴールトンは父一子の組に関するデータを集めました（たとえば背の高さや腕の長さなど）。測定誤差に関しては完全には正確ではありませんでしたが、比較的正しいこのデータをつかってゴールトンは、すべての生物体が平均値に向かって回帰することを証明できたと思いました。この結論は、「任意交配」と上品によばれていたものを前提としていたため、ゴールトンは優生学、つまりエリートを生ませることにより、任意交配に逆らう試みを熱心に推進しました。

ゴールトンのナンセンスの影響はいまだにあちこちで、とくに通俗的な出版物のなかに見られます。悲しむべきことに平凡な科学者であったゴールトンは、自分自身の偏見により道を誤ったのです（ゴールトンの仮定は、ノイズがすべて子たちのデータにあるというものでした。もしゴールトンが反対のことを仮定していたら、つまり彼のデータのすべてのノイズは父たちのほうにある（別のもっともらしい偏見）としていたら、ゴールトンは遠い昔の母集団が原初的平均値のクローンの一団であり、着々と離れていったのだと結論しなければならなかったでしょう）。ゴールトンのデータをよく調べると、それはいまでも可能ですが、ゴールトンの結論はまったく偏見の結果だったということがわかります。データ自身からはなにも結論がでないのです。回帰仮説を支持する結論も、または回帰仮説に反対するどのような結論もでないのです。遺伝の問題を研究するにはもっと異なったデータが必要だったのです。

メンデルのノイズの少ない、しっかりしたデータがゴールトンのあいまいな考えよりも20

cal fact. There is a theorem which states that least squares is compatible with *any* prejudice, irrespective of the data. (Take any prejudice you like, apply it to the data and it will appear as though your prejudice was confirmed by the data. But it is only an illusion because the prejudice was picked before the data.)

A prejudice-free methodology of dealing with noisy data does not exist at present. Conventional ideas of statistics cannot lead us to it. Yet it is surely not impossible to find a way. It may take another Newton to accomplish the leap from exact (noise-free) realization theory to noisy realization theory. I am more modest in my hopes; I predict that someday someone will stand here to receive your very generous prize for it. He will surely have deserved it.

There is reason for this optimism. The uniqueness principle is not directly applicable when the data are noisy, but it is still quite relevant. Using the very old idea of continuity, if the noise is sufficiently small (as in the case of Mendel's data), uniqueness must still hold, approximately. In this situation it does not matter what prejudices are applied in data analysis because the uniqueness principle guarantees that the results are, approximately, method-independent and therefore prejudice-independent, at least as long as the prejudice is not so glaringly false as to destroy continuity near the small-noise limit. There are many textbook examples of data having small noise, but this fact may be camouflaged by an outrageous prejudice of the modeler<sup>16)</sup> who presents the data.

I would like to conclude with a thought quite unlike those that went before. Obviously there are things far beyond high technology, far above what we know about science today, things that are beyond anything our generation can analyze, think about, imagine, feel. I take as my last words the beginning of a medieval hymn which Mahler used to begin his Eighth Symphony,

Veni Creator spiritus.

("Oh come, Creator of the human soul.")

Thank you very much.

## Notes

- 1) T. R. KANE and D. R. TEIXERA FILHO, "Instability of Rotation about a Centroidal Axis of Maximum Moment of Inertia," *AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics) Journal*, 10 (1972) 1356-1358.
- 2) E. WIGNER, "The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences," *Communications in Pure and Applied Mathematics*, 13 (1960) 1-14.
- 3) R. R. KALLMAN, "Construction of Low-Noise Optical Correlation Filters," *Applied Optics*, 25 (1986) 1032-1033.
- 4) Les Prix Nobel, 1954, p. 79-90.
- 5) ibidem, p. 87.
- 6) H. W. BODE and C. E. SHANNON, "A Simplified Derivation of Linear



年も前からあったことを思い起こす必要があるでしょう。

メンデルが遺伝法則を見つけることができたのは、たんに彼のデータにほとんどノイズが含まれていなかっただけでなく、主として偏見よりもデータに語らせたからです。ゴールトンは、生物学に定量的方法、数学さえをも導入すべきで、またそれができると思いました。彼は個々例について背の高さを測定しました。しかしニュートンのやりとげたこと、および成功したやり方について考えてみようとはしませんでした。数学と科学の関係は決して、人びとに信じ込ませようと今日宣伝されているほど単純ではないのです。余談になりますが、ニュートンの純粋数学に対する洞察の一部には、今日確立されている知識よりも進んでいるものがあることを心に留めておいてください<sup>14)</sup>。

公正を期すために、ゴールトンは不運だったことを忘れないようにしましょう。ゴールトンは回帰の方法が、あるいは古典的な名前では最小自乗、それはゴールトン自身の回帰仮説に端を発して名前をとったものです。しかし、回帰は純粋数学であり、それゆえに生物学とは何の関係ありません。まったくあてにならないことを知りませんでした。回帰は科学の方法としては役に立たないものです。なぜなら、ゴールトンも知らず知らずのうちにいったように、偏見に満ちた基本的な仮定があって、そのあとでしか回帰が適用されないからです。そのような偏見はすべて結果においては、正確であると仮定されたデータに関してノイズの生成を招くものなのです。回帰は、すべての偏見に対してノイズを生成する点において、まれに見るものです。ノイズはいつも、まるで真実のノイズであるかのように現われます。当の幸運な推量者にはわからないかもしれませんが、もし正しい偏見がデータに偶然適用されたとしたら、すべてはうまくゆきます。そうでなければ回帰による「結果」は、人工的なものにすぎないのです。

ニュートンは同情などしないで、こういった違いありません。「偏見を許してはならない。もしデータにノイズが多ければ、ただたんにノイズについて推測するのではなく、それ以外の方法で分析しなさい」。ゴールトン、そしてゴールトンの統計学の継承者は決してこの点を理解しなかったのです。アインシュタインの言い方はもっと優しいのですが、そのぶん助けになりません。アインシュタインは言いました。

「神は意地悪ではないが、たいへん巧妙で人は迷わされやすいのだ」。

じっさい、アインシュタインと神さまは回帰に対して声をあげて笑ったに違いありません。回帰はどのように適用されても、論理的に正しい答えを出すように見えるからです。そしていつも間違った答えを出すのです。いつもでなくとも、ほとんどいつも間違った答えを出すのですが、人がその理由を知ることはないので。なにか不公平なようですが、私の先生だったある人が論文で「なにが自然の誤りの基準であるか」<sup>15)</sup>という問いを出したように、ただ迷わされやすいということにすぎないのです。この質問に答えることはできません。なぜならこの質問自体が無意味だからです。自然には誤りの基準というようなものがないのです。自然はそれを必要とせず、それが自然のありかたなのです。So deska?

Least-Squares smoothing and Prediction Theory,” *Proceedings IRE*, 38 (1950) 417-425.

- 7) In the penultimate paragraph of “Scholium Generale,” second and third editions of “*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.” (This passage appears in print in the middle of page 530 of the third edition of the *Principia* (on page 764 of Volume II of the modern facsimile reedition by A. KOYRE and I. B. Cohen, Harvard University Press, 1972).)
- 8) W. LEONTIEF, *Science*, 217 (1982) 107.
- 9) Letter by NEWTON to HALLEY, 20 June 1686. Published as Letter no. 288 in *The correspondence of Sir Isaac Newton*, vol. 2, edited by H. W. TURNBULL. Cambridge University Press, 1960.
- 10) *ibidem*.
- 11) See I. B. COHEN, *Introduction to Newton's 'Principia'* Harvard University Press, 1978, p. 243.
- 12) J. von NEUMANN, “The Impact of Recent Developments in Science on the Economy and on Economics” (summary of Speech before the National Planning Association). *Looking Ahead*, 4 (1955) 11; reprinted in the author's *Collected Works*, Vol. VI, pp. 100-1.
- 13) The usual references are the following: F. GALTON, “Family Likeness in Stature,” *Proceedings of the Royal Society of London*, 40 (1886) 42-63; and “Regression Towards Mediocrity in Hereditary Stature,” *Journal of the Anthropological Institute*, 15 (1886) 246-266.
- 14) *The Mathematical Intelligencer*, vol. 9, no. 4, pages 28-32, interview with V. I. ARNOLD.
- 15) E. A. GUILLEMIN, “What is Nature's Error Criterion?,” *IRE Transactions*, CT-1 (1954) 76.
- 15) Such a prejudice is the subtle defect inherent in a pedagogical example employed in E. MALINVAUD, *Méthodes Statistiques de l'Econometrie*, Dunod, 3rd edition, pages 228-237 to illustrate regression calculations.



私の詩的な言葉を気に入っていただけたらうれしいのですが、私のいっていることは、しかし厳然とした数学的事実です。最小自乗がデータに関係なくどのような偏見とも矛盾しないとして述べている定理があります。(お好きな偏見を選んでデータにあてはめてみてください。そうすると、まるでその偏見がデータで確かめられているかのように見えるでしょうが、それは幻覚にすぎません。なぜなら、その偏見がデータより先に選ばれているからです。)

現在のところ、ノイズの多いデータを取り扱う方法で、偏見から自由であるものはないのです。統計学の決まりきった考え方によっては、その方法は得られないのです。しかしそれに至る道を見つけれないというものでもありません。たぶん正確(無ノイズ)実現理論からノイズ実現理論へ飛躍するには、もう一人のニュートンが必要でしょうけれども。私は私の望みに対して自分というものを知っておりますので、いつか誰か他の人がここに立って、ノイズ実現理論でこの高潔な賞を受賞することを予想しております。その人は確かに受賞に値するでしょう。

この楽観説には理由があります。一意性の原理は、データがノイジーなときに直接的に適用できるものではありません。しかし、それでもかなり重要です。連続性というたいへん古くからの考え方をを使うと、もしメンデルのデータの場合と同様にノイズが充分小さいとするなら、近似的な意味あい一意性が成り立たねばなりません。この状況では、データ解析でどんな偏見が使用されようとも、なんの問題もありません。といいますのは、すくなくとも偏見がスモールノイズの限界付近の連続性を破壊するほど、はっきりと間違いでないかぎり、その結果は方法に依存しておらず、ゆえに偏見にも依存していないことが、一意性の原理により保証されるからです。小さなノイズをもつデータに関する教本例は多数ありますが、この事実はデータを発表するモデル設計者<sup>16)</sup>の悪質な偏見でごまかされているようです。

これまで述べたことと、まったく異なった考えを示すことで、この講演をしめくりたいと思います。高度技術をはるかに超えたもの、科学について今日の私たちが知っていること以上のもの、私たちの世代が分析し、考察し、想像し、感じる以上のものが、明らかに存在します。マーラーが交響曲第八番の冒頭に使った中世の賛美歌の最初の部分を引用して、しめくくりの言葉とさせていただきます。

Veni creator spiritus. (来れ、人間の魂の創造者よ)

ありがとうございました。

[注]

- 1) T. R. ケイン D. R. テイクセラ=フィルホ(共著)「慣性最大モーメントの重心軸にての回転不安定性」『米国航空宇宙工学協会誌』1972年 第10巻、1356-1358ページ
- 2) E. ウィグナー 「自然科学の中での数学の不合理な有効性」『純粹・応用数学通信』1960年 第13巻、1-14ページ
- 3) R. R. カルマン(KALLMAN)「低ノイズ光学相関フィルタの構成」『応用光学』1986

年 第25巻

- 4) 『ノーベル賞』、1954年、79-90ページ
- 5) 同上、87ページ
- 6) H. W. ボード、C. E. シャノン(共著)「直線最小二乗補整および予測理論の単純化展開」『IRE議事録』1950年第38巻、417-425ページ
- 7) 『プリンキピア』第2、第3版の一般注解の最後から2番目の節(この一節が出てくるのは『プリンキピア』第3版530ページの中段(A. コイレとI. B. コーエンによる複製本第2巻764ページ、1972年ハーバード大学出版)
- 8) W. レオンティフ、『サイエンス』、1982年217巻、107ページ
- 9) 「ニュートンよりハレーへの手紙」1686年6月20日。H. W. ターンブル編『サー・アイザック・ニュートンの書簡』第2巻の中の手紙、第288番として出版された。ケンブリッジ大学出版 1960年
- 10) 同上
- 11) I. B. コーエン『ニュートンの「プリンキピア」入門』参照。ハーバード大学出版 1978年、243ページ
- 12) J. フォン・ノイマン「経済および経済学に対する科学の中の最近の展開の影響」(ナショナルプランニングアソシエーションの前の講演の要約)『ルッキングアヘッド』1955年第4号、11ページ、『J. フォン・ニューマン全集』第6巻、100-1ページに再版
- 13) 普通の参照は次のとおり。F. ゴールトン、「身長の家系類似」『英国学士院議事録』1886年第40巻、42-63ページ、および「身長遺伝における普通性への回帰」『人類学学会』1886年第15巻、246-266ページ
- 14) 『マセマティカル・インテリゲンチア』第9集第4巻、28-32ページ、V. I. アーノルドとのインタビュー
- 15) E. A. ギレミン「何が自然の誤りの基準であるか」『IRE会報』CT-1 1954年、76ページ
- 16) そういった偏見こそは回帰計算を説明するために、E. マリンボード『計量経済学の統計的手法』デュノ 第3版、228-237ページの中で使用された、教育的な例に固有の微妙な欠点なのである。

p.108) 訳者注 講演者 Kalman 教授とは別人であることに注意。

p.112) 訳者注 Wiener による“Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series, with Engineering Applications”というあとに MIT Press から出版されたウィナー・フィルタを発表した本。戦時中黄表紙で内部レポートとして書かれ、その難解さのため当時電気工学者のあいだで黄禍(yellow peril)として恐れられていたのは有名な話である。

(訳監修・山本 裕)



# 稲盛財団1985——第1回京都賞と助成金

発 行 1990年10月1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鉾町87番地 〒600

電話〔075〕255-2688

制 作 京都通信社

装 本 納富進

印 刷 株式会社文功社

製 本 株式会社吉田三誠堂製本所