本田財団レポート　No.110

「非線形科学の発展」

東京大学大学院理学系研究科教授
日本物理学会　会長

和　　達　　　三　　樹

財団法人　本田財団

講師略歴

和　達　三　樹（わだち　みき）

東京大学大学院理学系研究科教授
日本物理学会　会長

《略　　歴》

１９４５年2月	東京生まれ
１９６７年3月	東京大学理学部物理学科卒業
１９７０年5月	米国・ニューヨーク州立大学大学院物理学科卒業(Ph,D,)
１９７１年5月	東京教育大学光学研究所助手
１９７５年5月	同助教授
１９７６年9月	カナダ・アルバータ大学客員研究員
１９７８年4月	筑波大学物理工学系助教授
１９８０年4月	東京大学教養学部助教授
１９９０年3月	東京大学理学部教授
１９９３年4月	同大学院理学系研究科教授

《主な受賞歴》

１９９０年１２月	日本ＩＢM科学賞（物理分野）
１９９１年１２月	第3回仁科記念賞「ソリトン物理学とその応用」
	日本物理学会　論文賞
２００４年	紫綬褒賞 等

《主な著書》

『物理のための数学』　（岩波書店）
『微分積分』　（岩波書店）
『非線形波動』　（岩波書店）
『結び目と統計力学』　（岩波書店）
等

このレポートは平成 17 年 7 月 26 日パレスホテルにおいて行われた第 94 回本田財団懇談会の講演の要旨をまとめたものです。

世界物理年と科学技術の普及

本田財団、川島理事長を始め、本日はお招きいただきましてありがとうございます。本日の講演課題は横道にそれだしますと、いくらでもそれます。それは懇親会のほうでお話ししたいと思います。それと同時に、私自身、研究している一つの中に、まるで本田宗一郎とそっくりと私が思える人間が出てきました。今日はその本を持ってこなかったのですが、広い日本にはいろいろ人材がいらして、そういう方を研究している方もおります。

まずは、商売領域の宣伝でありまして、今年は「世界物理年」というので、ユネスコでも認められている活動をしております。何が今年は特別かといいますと、1905 年、ちょうど 100 年前にアインシュタインが、26 歳の若さで 3 大発見をしました。皆さんご存じのように、特許庁に勤める役人として、実際には 6 個の論文を書きます。同じ分野が二つずつぐらいありますので。

光量子説、光電効果。これは今のテクノロジーで言えば、光そのものであります。それからブラウン運動、これは私の専門でもあります、統計力学の最初の理論的な成果であると思います。さらに、特殊相対論、これは皆様あまり関心がないと思っている、自分らの生活に関係ないと思っておられる方がいると思いますが、実はカーナビの精度はこの特殊相対論と一般相対論を入れないと 10 メートルを切れません。重力ポテンシャルによる補正と動いている地球と人工衛星の速度を入れた補正を入れないと、このような精度にならないのです。

よく考えてみますと、ある 1 人の人間が 100 年、我々の科学・技術を導きました。彼は 1999 年でしょうか、タイムズ誌で世紀の人間に選ばれました。それを記念しまして、理科離れうんぬんとか言う前に、日本物理学会として日本中の小さい町まで物理と科学技術の普及を、特に今年やっております。今からでも遅くありませんので、もし参加されたいという方がおりましたら、講師を派遣しますのでよろしくお願いします。

「人生は複雑だが楽しい」

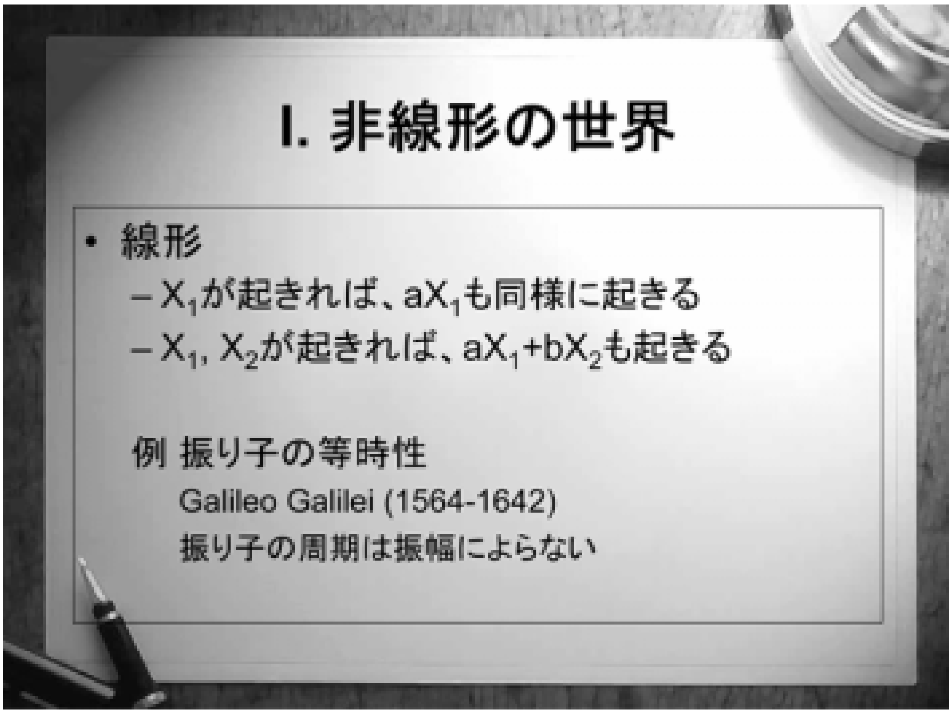
今日は副題として、「人生は複雑だが楽しい」ということにしました。非線形というのは徐々に話をしていきますが、線形ではないという意味であります。アメリカ人にはなかなかおもしろい人がいます。おもしろい人がおりまして。非線形、線形というのは、ウラムという数学者ですけれども、人間を動物園に連れていって象(elephant)を見せた後、残りはノーエレファント(no-elephant)だと言うのと同じだと。分かっていただけましたでしょうか。

象を知っている人間に、残りはノーエレファント。線形のことを知っている人に、ノンリニアという言葉になります。非線形についてはいくらでも仕事または例題を出そうと思えばできますけど、問題は各論をやっているのではしようがないわけです。好きな非線形項を付けて科学技術を研究する。それを一生やっていても結構ですけれども、一方そこから何か普遍的な概念、新しい言葉で言えばパラダイムというのでしょうか、それを提出しなければおもしろくない。そういう例の話をしていきたいと思います。

今日の朝、招待状を見ましたところ、これは講演録になるのですか。というのを聞きまして、普通はかなりきわどいジョークを二、三入れるんですけど、今日はあまり入らないと思います。（笑）この頃なかなか難しいのです。昔、物理なんていうのには女子学生はあまりいなかったのですけど、我々の年代からいうと普通のジョークを言うといろいろいけない部分がありまして、皆様も職場でお困りになっている点もあるかと思いますが、その辺は気をつけていきたいと思います。

線形と非線形

それでは話を始めます。非線形性というのは、まず線形を定義します。線形というのは何かと言えば、ある事象です。X1 が起きればその乗数倍、AX1 も同様に起きる。または X1 と X2 というのが起きれば、AX1＋BX2 というのも起き得るということです。（図－１）



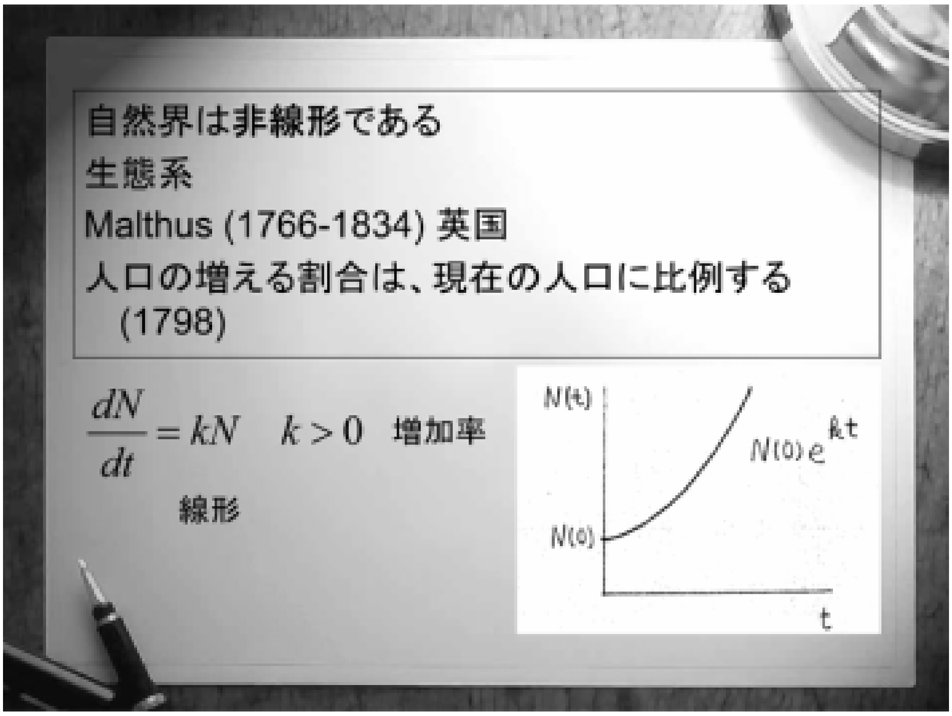
図－１

それで力学の本を読んでみますと、例としてはガリレオが 17～18 歳のときに発見したという、振り子の周期は振幅によらないというのがあります。彼は脈拍でそれを確かめて、ある意味で時計になったわけです。

ですけど私の世代は、これはうそだというのは実は知っています。柱時計というのが昔ありました。柱時計はゼンマイのエネルギーを使いますが、止まる直前になると進んでしまうのです。それは子供ながらにこういう非線形現象を経験することができて、振幅が大きければやはり周期も長いのです。それは線形近似というのをやると等時性が出てきます。というように、だんだん実社会で経験する部分も少なくなってきました。

でありますが、実は自然界で起きていることは全部、線形、非線形であります。わざとこの例から始めるのは、なんとなく文科系の方が多いという情報も得ましたので。「おれはこんなものは知っているわ」と言われると困る例が多少あるかもしれませんが。

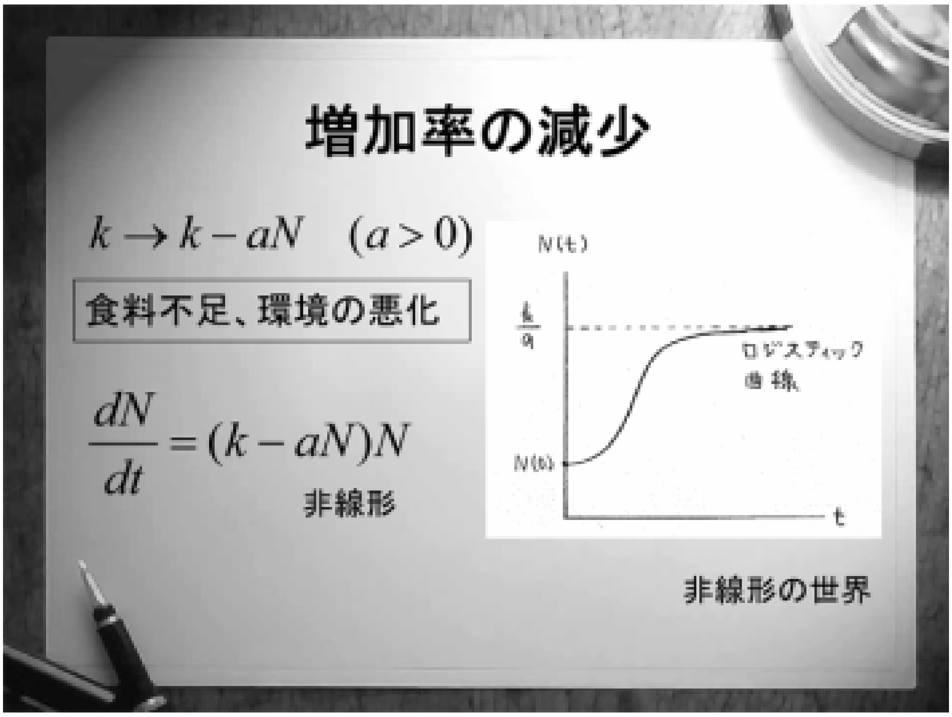
マルサスの人口論はおもしろいことに前の前のミレニアム、世紀末の意味で人々に恐慌をもたらしました。人口の増える割合は現在の人口に比例する。これを微分方程式に書いてみますと、たぶん方程式としては 2〜3 あるうちの 1 個ぐらいだと思いますが、こういう線形方程式になります（図－２）。これを解きますと指数関数的、すなわち、ねずみ算的に人口が増えていくのです。



図－２

だいたいはこんなふうには実際はならない。いま書店に行くと、経済を含め、または中国のうんぬんまで含めて、（今日は政治的なことは話しませんが、）線形的予想の本ばかりです。2050 年にこれをエクストラポレート（外挿）するとどうなるかという本がいっぱいあります。18 世紀の最後ぐらいに、こういうことが言われました。

これはたぶん一般社会で生きていれば多く経験することですけれども、増えるといっても食糧はなくなる。それからエネルギーがなくなる、環境が悪くなったら、それはマイナスの状況が続きますよね。そうしますとこれは人口数Ｎで見れば、Ｎだけではなく、右辺ではＮの二乗の項が出てまいります。こういうのが非線形であります。この方程式を解いてみますと、ある時間ｔ＝0 から出発して、ある一定値に近づいていきます（図－３）。



図－３

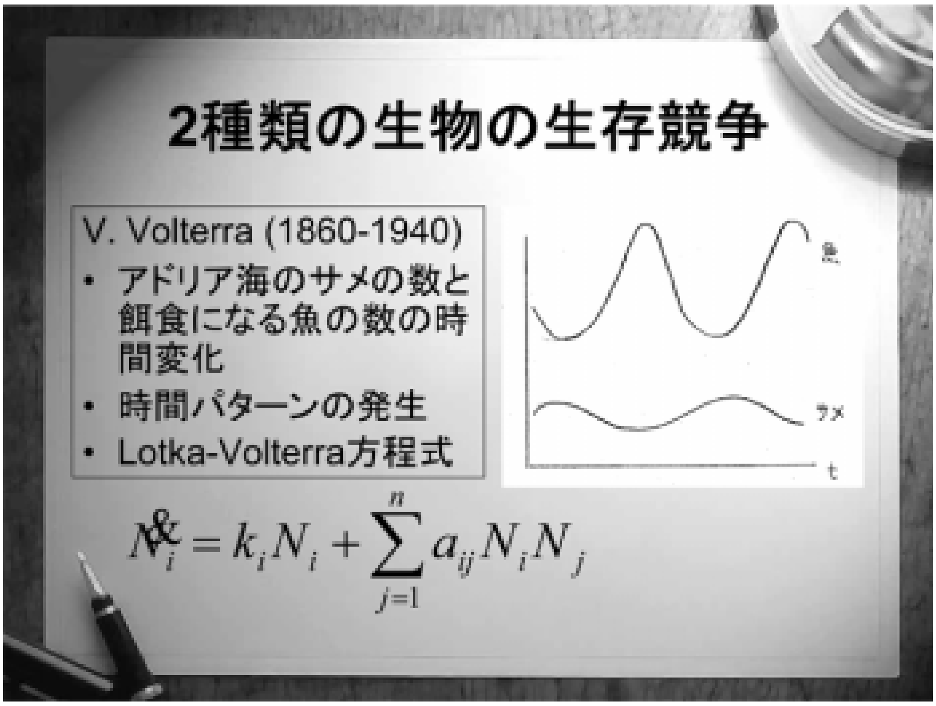
各道のプロというのは、これがどうも頭に入っているらしいのです。金融工学もそうです。このグラフを出版社の人に見せたら、もちろんそうですよと言うのです。それはなぜかというと、自動車の売上台数もそうかもしれません。ｔ＝0での値N0と初期の上がり方を見れば、将来は何台売れるか。本屋でいえば何冊売れるか。それをこの微分方程式で解いてみせなくても、たぶん各業界でいわゆる玄人が知っていたことではないかと思われるわけです。

このようにして非線形性というのは我々の世の中では多く存在し、成り立っているということが分かると思います。Nの2乗であろうが3乗であろうが、だいたい同じ傾向になります。

ロトカ・ボルテラ方程式

この話をもうちょっと精密にしてみます。これはエコロジーの問題に近いわけですが、ボルテラという人が前々世紀の最後の頃に次のようなことを言いました。アドリア海という海ですから、ギリシャの近くでしょうか。サメの数と餌食になる魚の数の時間的変化というものをプロットしました。

そうしますといま予想がつくのは、魚が増えれば、すなわち、えさが増えれば、それを食べるサメが増える。えさを食べ尽くしてしまったらサメの数が減って、サメの数が減ると魚が増えますから、時間的なパターンが発生します。一般的には下に書いてあるような方程式を、ロトカ・ボルテラ方程式と言います。これがだいたい生態系の方々が研究している方程式です（図－４）。

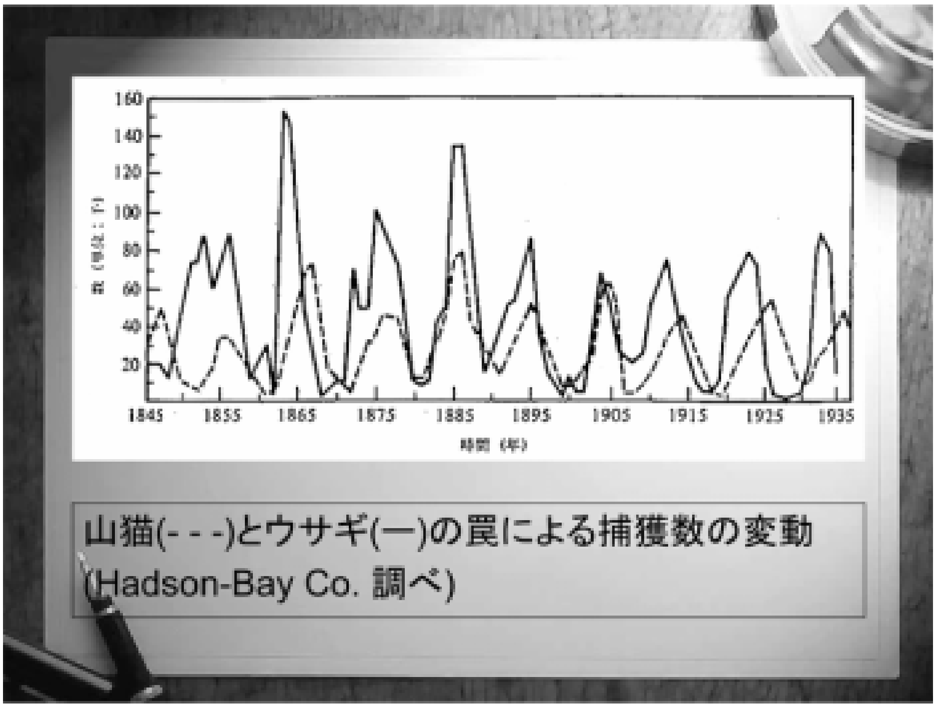


図－４

この右側の図は私がだいたい書いたのですが、イギリスというのはすごい国でありまして、この図は何かというと、植民地のうさぎの皮を本国に持って帰るための資料です。そのために、カナダにハドソン・ベイというのがありますけど、そこの会社が用意したものです。これはすごいですよ。1845 年から 1935 年まで、毎年こういうプロットを作りました。他でもそうです。地磁気についても、世界中にイギリスの船があって、各所で測っているのです。地球物理にたいへん役立っている。

図に戻りますと（図－５）、点線が山猫です。うさぎが実線です。横軸の目盛りは 10 年か、そのぐらいの長さなので、半年おきぐらいに一方が増えたら一方が減るとか、一方が減ったらこっちも減るのかというような振動が見えると思います。

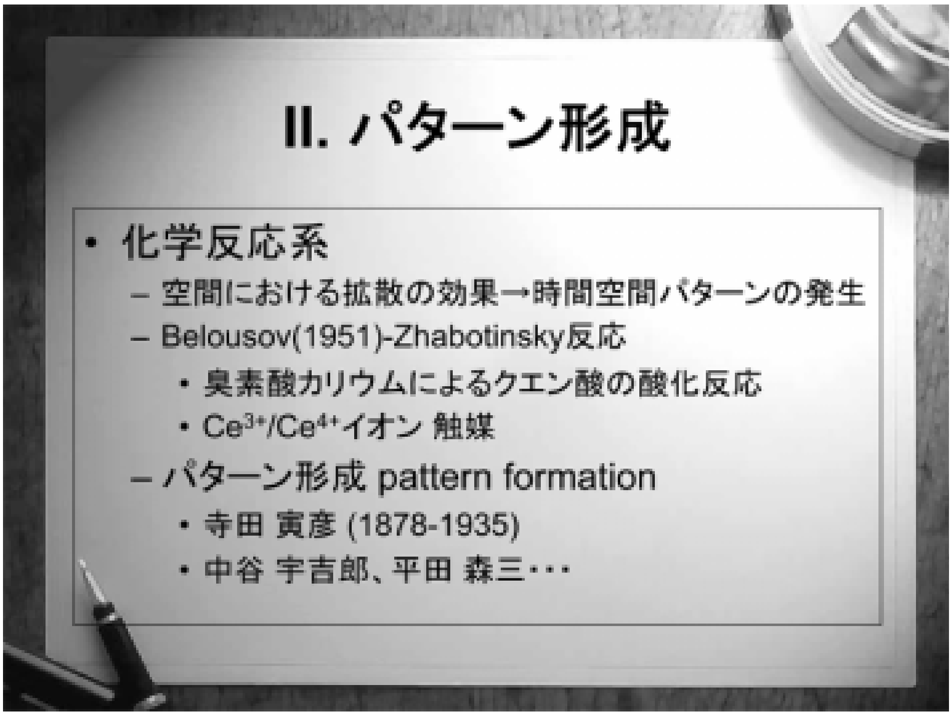
これで分かりますのは、世の中には相互作用、すなわち、お互いに影響を及ぼし合って、振動する現象があるということです。今度は、時間だけでなく、空間の影響も取り入れてみます。先ほどのロトカ・ボルテラ方程式でも同様でありますが、例えば化学反応の系でものが広がっていくという効果も取り入れたらどうなるでしょうか。



図－5

反応拡散系や対流

これはロシアの、その頃ソ連だったでしょうか、ベローゾフとジャボチンスキーという人が研究した。一方の方がいなくなってから、一方の人が再発見したのですが、ここに書いてあるような物質を混ぜて反応を見ます（図－６）。



図－6

これは今よく高校の化学賞とか、そういうのによく使われる系です。単に自分で溶液を二つか三つ持ってきてシャーレーに入れておくと、いろいろなパターンが見えるということになります。

そういう研究は、よく考えてみれば実はわが国もありまして、寺田寅彦以来、雪の結晶の分類の中谷宇吉郎だったり、それから平田森三先生です。平田先生はは私たちが学生の頃にちょうど退官して、残念ながらその年というか、ちょうど退官するときに亡くなった方です。そういう方々の国際的研究が実はありました。

時間の振動というものが拡散の効果を入れると、時間・空間のパターンとして発生する。これは時間を止めた写真ですが（図－７）、あるところからうず巻き状、または同心円状に成長する。この波面というか、同じ濃度のところがぶつかったらどうなるか。

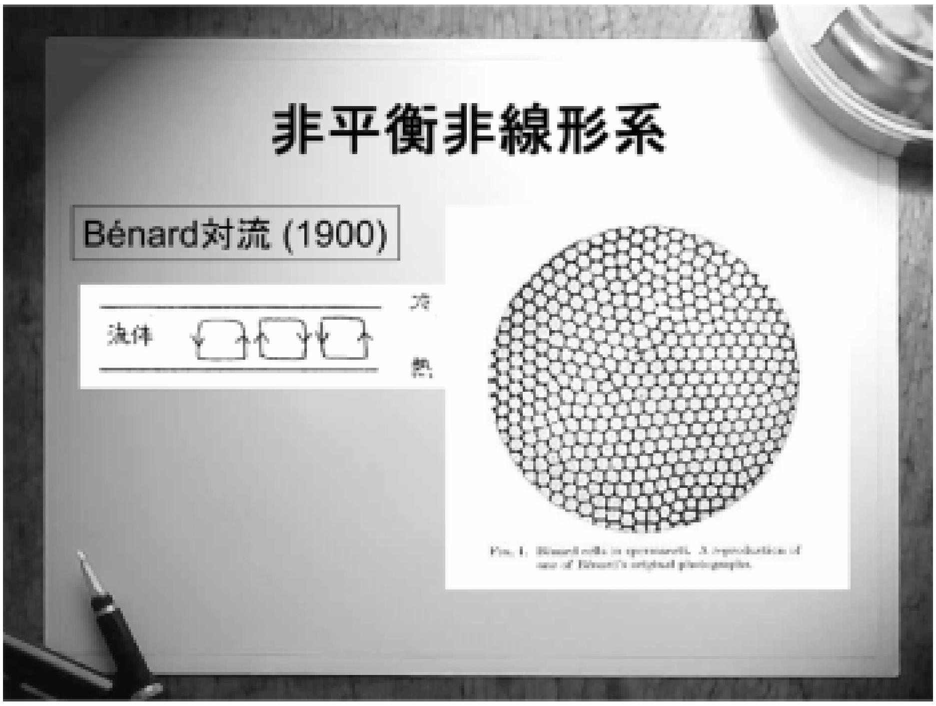
図－7

それからどのぐらいのスピードで進むかというような研究を行うことができます。色が違うのは先ほどの物質です。C3＋と C4＋4 というのが、実はこの反応では触媒になっていて、それらが色が違うので、このように見えます。

それからこれ（ベナード対流、図－８）は寺田物理などでもよく議論されたものです。寺田物理ではどういうふうに言うかというと、朝のおみおつけを見てくださいと。対流とはどうやって起きるかといえば、小学校のときに習いましたように、熱いものが下で、冷たいものが上ならば、普通はあまり差がなければ伝導で熱が伝わるわけです。それが熱いものと冷たいものの差が大きいと対流が始まります。

もっと差が大きくなればもちろんまた違う相に行くのですが、これはベナード対流といいます。1900 年に写真を撮った論文に書いてあります。これをよく見ると六角形のものができて、構造ができていたり、またよく見ると金属の研究をされた方は分かると思うのですが、ディス

ロケーション（転位）というのが入っていたり、いろいろな構造ができています。流体のある不安定性から生じる空間パターンが多いですが、時間的変化を考えると時間空間のパターンになっています。



図－８

非平衡非線系といって、非平衡というのは、今の場合、エネルギーが下から入って上に抜ける状況になっている。これは飛行機から見ることもできます。こういう感じの雲がぼこぼこと上がっては下がりという構造になっているのが分かると思います。その本もあります。気象庁の５代ぐらい前の長官高橋浩一郎氏が岩波書店からこのいろいろな雲のパターンの写真を集めて、出版しています。

臨界現象におけるべき乗則

それからこの言葉（自己組織化）も新聞とか雑誌でよくお聞きになっていると思いますが、話は簡単でありまして、我々が海岸で砂山を作る。子供のときに砂場で砂山を作ったとしましょう。そうしますと上からぼそぼそ砂を落としますと、あまり１箇所にたまってしまうとばらばらと崩れてしまうわけです。それが今ここに書いてある avalanche、雪崩です。砂は、今度少ないところにはたまりやすい。多くなると、この斜面を転げ落ちてしまう（図－９）。

そういう意味でちょうど三角錐みたいな構造ができます。三角錐みたいなものというのは何かと言えば、それはべき乗でものが変わって、構造が見えているというものです。べき乗というのは特徴的な長さがないのです。これはちょっと専門的になりますが、臨界現象と呼ばれるものによく現れる性質です。普通のときは指数関数的に相関が変わるのですが、臨界現象、ま

た臨界状況においては、相関はべき乗的に変わる。このべき乗というのも一つの中心的用語であります。

図－9

非線形と自己組織化

説明してきましたように、雪崩を含んで、自分自身がある構造を作っていく。これがこの頃よく使われる言葉で、自己組織化というものです。自分自身がある作業を行いながら形を作ってしまうという概念です。こういう概念の導入は外国人が大変うまい領域でありまして、最後に用語まで含んでまとめてしまいます。どういうわけか、語学のせいか、日本人にはなかなか難しい。それがもうちょっとうまくいくと、日本が科学などで改良だけではなくて、ある概念を導入したということを言える。より尊敬を集めるまとめ方になるのではないかと思っております。

これまではそのパターン形成といいましょうか、非線形性があると空間的にも時間的にもいろいろなパターンができてくるという話をしました。そして、非常に多くの場合に自分自身が内在している力学的な様子によって自己組織化というのが行われるということをお話ししました。

周期 3 が現れたらカオス

さらに、いくつか概念をお話しします。そのうちの一つの概念はカオスという概念であります。これは定義としては二つ書いておきました。初期値変化に敏感な力学系。ですから初期条

件をちょっとだけ変えると、指数関数的にどんどん離れてしまう。普通ならば、ちょっとしか離れていなかったら、かなり近くて時間に比例して離れていくのですが、まったく変わってしまう、という現象です。

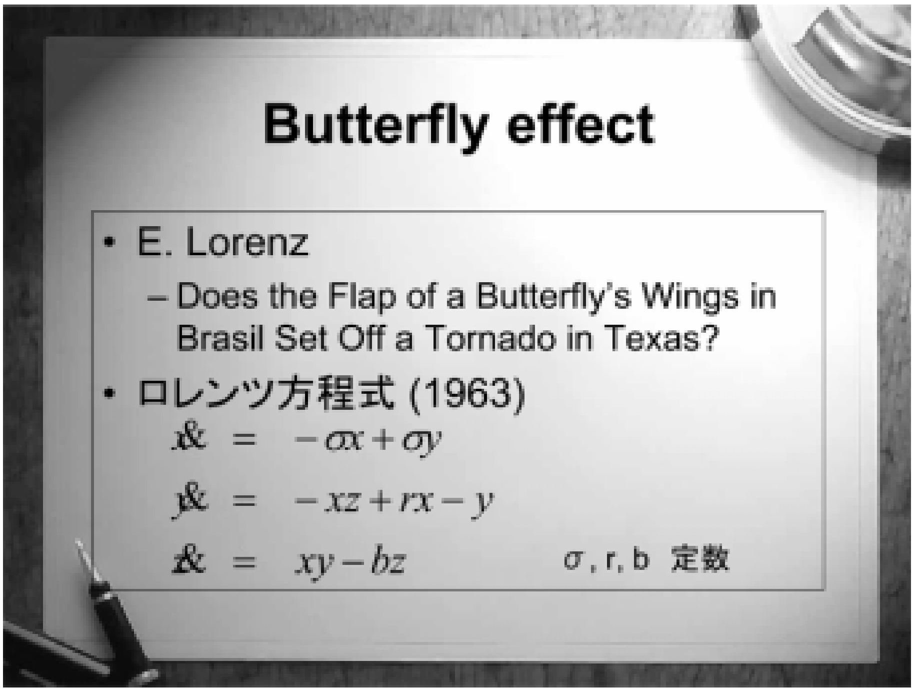
それがどういうときに起き、またどのような意味をもつかといえば、予測不可能性という結論になります。予測不可能性というのは、この用語の約束として、そのもの自身の時間発展はある決定論的な法則、または力学で支配されているけれども、ちょっとずれた場合に将来何が起きるか分からないという種類の現象であります。これは先までいきますと、今の金融工学につながる種類のものです。実際には次に申しますが、天気予報も同様であります。

カオスという言葉はリーとヨークによって導入されました。ヨークは、今はメリーランド大学の教授です。前からこういう言葉はあったし、それから我々がこういうのを研究しているときはレギュラーモーション、イレギュラーモーションと言いまして、統一が取れている通常の運動、または変わった運動というような分け方をしていました。

彼らの論文のタイトルがなかなかうまくて「Period 3 implies Chaos」、周期 3 というのが現れたらカオスになりますというタイトルです。このタイトルをもって、2 年前の日本国際賞をヨーク氏がもらいました。やはり言葉と同時に概念を定着させるというのが、最後のいちばんいいところを持っていくという感じのことです。これは実際には多くの日本人研究者を含んで、最初から日本が貢献している分野の１つです。

ロレンツのバタフライ効果

これもたいへん有名な、そして、うまい言葉の導入です。ロレンツというアメリカの MIT の教授が下のような方程式を書きました（図－１０）。



図－１０

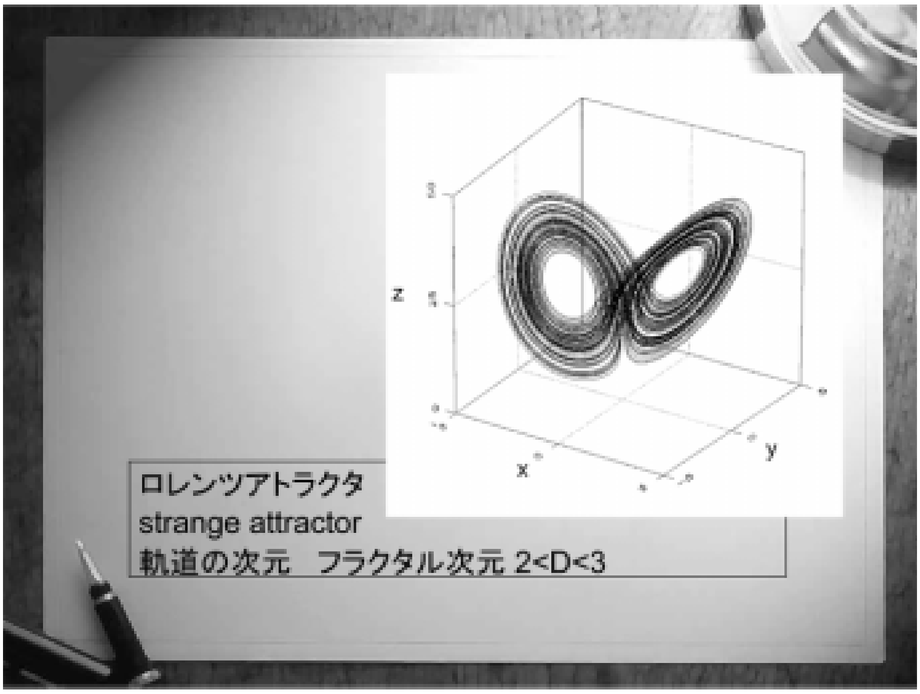
まず方程式から見ていただくと、単に三つ変数です。ドットいうのは 1 階微分の方程式です。右辺を見ると、σとｒとｂというのが定数ですから、なんということはない。非線形性が入っているのはマイナスｘｚという 2 番目の式と、3 番目のｘｙという式だけです。三つしか変数がありません。

これは先ほどのベナード渦に近い方程式から、フーリエ変換の係数を 3 つ選び、そこから導いた式です。この方程式は予測不可能になります。ちょっと条件を動かすと、まったく違う運動になってしまう。もちろんこのσとかｒとｂとかいう定数の取り方にもよります。

バタフライ効果といいますのは、ブラジルで 1 匹の蝶々が羽をパサッと 1 回はばたいたら、テキサスで竜巻が起きるか。やはりこういう表現はうまいですよね。文化的には難しいのは、私もときどき論文でこのぐらいのジョークはわざと書いてみせるときがあるんですけれども、レフリーの日本人の方はやはりまじめで、アカデミックな社会にこのような冗談は要らないとか、そういうふうにおっしゃるのです。

これはロレンツの有名な、バタフライ効果と呼ばれるものです。実際にはそんなことは起きないけど、ものすごく小さい擾乱でもちょっと何かを加えてしまったら、まったく違うことが引き続いて起きる可能性があるのではないかということを言っています。

再び、ロレンツ方程式をみてみましょう。こんな簡単な方程式なのです。実はこういうことが起きます。これはストレンジアトラクター、と呼ばれます。アトラクターというのは、状態がその近くに行くという意味です。実はこのアトラクターというのが二つ連結していてそれを記述する解析的な式はいずれにしろ分からない。例えば右側を 2 回まわった後、左側を 3 回まわって、右側を 4 回まわって、左側を 2 回まわるとか、そういうような運動です（図－１１）。



図－１１

それは筆舌尽くしがたしというか、この軌道はいま三次元空間で書いていると、運動軌道の次元が二次元と三次元の間になります。単なる面ではない難しい構造をしています。

天気予報は当たらない？

これはあまり強調すると、社会的にはおもしろい効果にならないのですが、天気予報とか地震の予知が当たらないと言っている学者がよく出す例があります。家内とよくけんかするのですけど、私は生まれ上、天気予報というのはだんだん当たるようになってきたと思っています。家庭の主婦というのはなかなか怖くて、天気予報はだんだん当たらなくなってきているわよと。当たらなくなってきているのかどうかというのはよく分からないけれども、ロレンツは気象学者で、ああいうモデルを作ったら、結果は予言不可能である。

もともとこういう研究は何から始まったかというと、戦争中、アメリカが計算機の開発をやります。それでフォン・ノイマンとか、その周辺の人が計算機を作ります。いまシカゴとかロスアラモスにありますが、真空管のばかでかい計算機です。それで戦争が終わった後、何をやったかというと、彼らは二つやり始めて、一つは数値予報、それからもう一つは後で話す非線形力学系の研究を始めます。その真空管の計算機で新しい現象を発見してしまうというのは、すごいなと思います。

彼らはどのようなことをやったかというと、例えば、ある期間の天気をもちろん知っているわけです。それである期間の情報を与えて、その値を予測できるかという競争をやっています。いま生物のほうで化学物質とそのユニットを与えて、どういうタンパクができるかというのをいま競争している感じでもあります。

それが将来予測で、実際には天気予報というのはそれの最初の例でありました。ノイマンやフェルミが計算機の利用として始めた種類のものです。

それから日本の研究者たちもこれに近いことを発見しております。ですけど、そのカオスという言葉では残らなかったし、それからストレンジアトラクターとか、その種の言葉でも残らない、残念な結果になりました。

ラッセルと本田宗一郎

それからもう一つの普遍的概念は、ソリトンという概念です。これはジョン・スコット・ラッセルという人が見出した現象です。彼は、エジンバラに住んでいたエンジニアです。必ずしもそう考えなくてよろしいのかもしれませんが、私はどうもこのビクトリア朝というのが昭和天皇期に相当して、その頃の科学技術者であったラッセルが本田宗一郎に関係しているような感じがしてならないのです。

この人間はエジンバラの大学を卒業します。それで大学に勤めようと思うのですが、大学には職は得られません。それで就職します。そこである発見をします。その後、なぜ本田宗一郎に似ているかというのは、彼は鉄製の船を造ります。部分的にはあったかもしれないけど、全部鋼鉄製というのは、彼が最初のようです。その頃 F1 に対応するものとして何をやっていたかというと、ロンドンーニューヨーク往復の競走をやるのです。

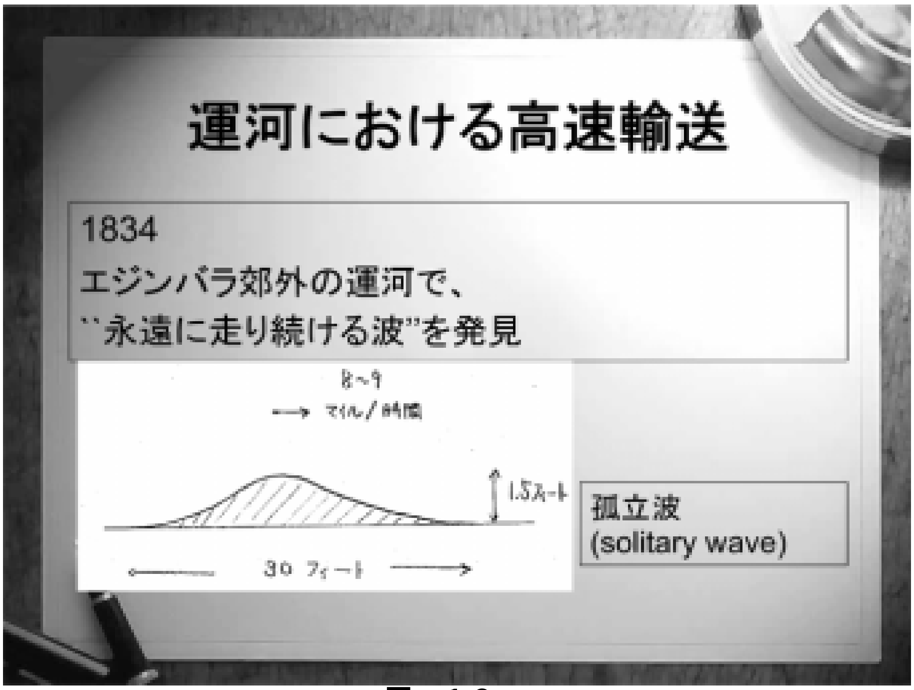
彼は自分で鉄の船を造って、それに参加します。そこは違うと強調しなければいけないかも

しれないけれども、そのあと大散財をして会社をつぶして。あまりいいジョークじゃないですね。（笑）イングランドの大きな島のちょっと南にある島で亡くなりました。大変おもしろかった人生のようです。

運河での発見

彼がやりましたのは、その頃の最先端の技術としての高速船の研究です。スコットランドに行くと分かるのですが、多くの運河があります。その運河で高速輸送をやろうという役割を与えられます。1834 年ですから、26 歳です。偶然ながら、最初にお示ししたアインシュタインの三大発見と同じ年です。彼は大学を出て、数年会社に勤めておりました。そこでいろいろなことを発見します。何をやっているかというと、その運河、私も見ましたが 10 メートルぐらい、深さは 3〜4 メートルだと思いますが、そこをできるだけ早く船を走らせて物を運ぶという技術です。

彼が発見したのはそのうちの１つとして、運河でこういう波（水の盛りあがり）が走っていくというのを発見しました(図－１２)。例えば横幅が 30 フィートで、高さが 1.5 フィート。ですから 45 センチぐらいで、横が 10 メートルぐらいでしょうか。それが毎時 8〜9 マイルというのですから、14〜15㎞/h でしょうか、そのぐらいのスピードで形を変えずに走っていく。優雅な時代でありまして、彼はそれを馬で追い掛けます。15 分から 20 分追い掛けて、ある曲がり角で消えてしまった。ですから彼としては発見なんですけれども、学会が認めません。

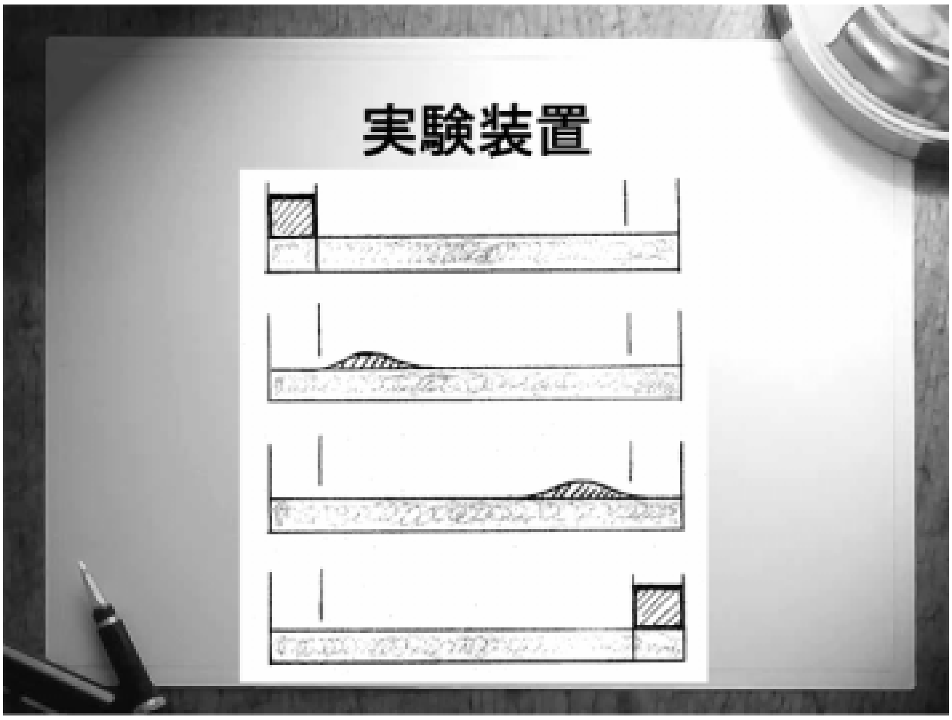


図－１２

いろいろ調べてみるとおもしろいのは、このあと例の有名なファラデーの金曜講話でこの話をするのです。しかし、流体力学では認めない人が多かった。なぜかといえばサイン、コサイ

ンみたいな波で、そのうちの一部だけを追い掛けたのではないかというのがナイーブな反論です。その頃はエアリーという偉い人がいたのですが、彼の反対もありました。

スコット・ラッセルはソリタリーウェーブ（孤立波）という名前を付けます。ソリタリーというのは孤立している、こういう波が１個走っていくということです。実験装置の復元が、エジンバラのエリオット・ワット大学にあります（図－１３）。何をやるかというと、例えば5～6メートルの狭い水槽に二つ敷居を付けまして、左側に水を50センチぐらい高くして入れます。それで敷居をパッと開けます。その水が右側に走って出てきて、伝播して向こうにぶつかります。そこで敷居を閉めると、左側の上にある水が、右側に運ばれたことになります。



図－１３

彼は技術者として、それを最初に不思議に思うのです。どっちかからどっちかに運んでいたとします。１日の運送が終わると、こっち側の終点のほうが水が高くなっている。それは物を運んだと同時に、サイン、コサインの波ではなくて、本当に水を持っていってしまった。水を運んでいくのがこのソリタリーウェーブ（後のソリトン）という実体だった。この波はこのまま何キロもずっと走り続けます。速度も変わらないし、形も変わらないという性質を持っています。

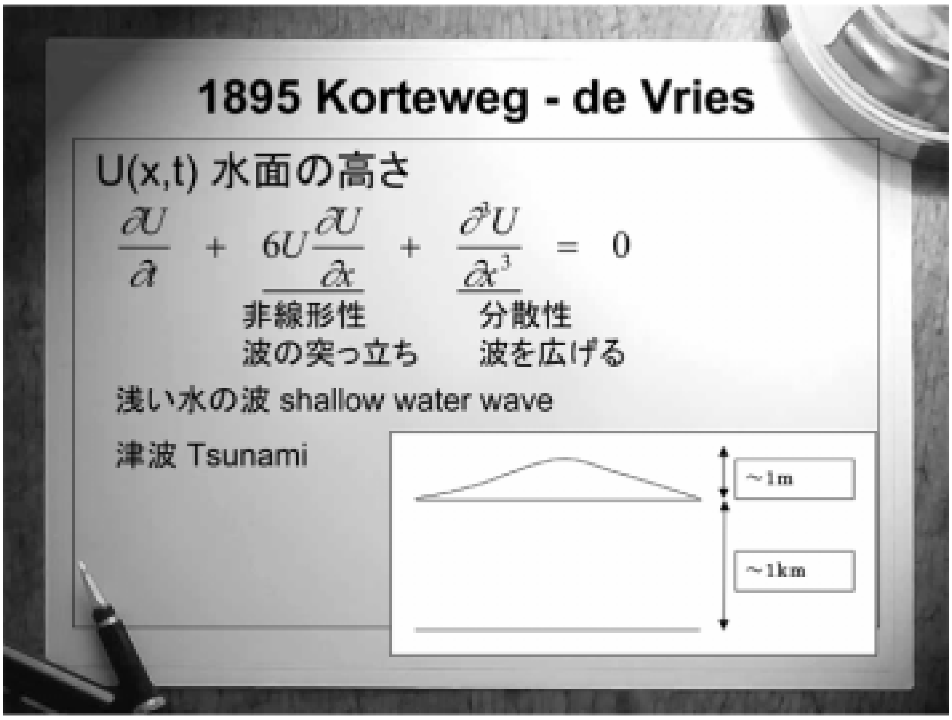
わが国の科学リテラシー

私はドクターを取った学生によく言うことがあります。会社のほうにも実は問題があるんですけれども、ドクターを取った学生諸君は会社になかなか行きたがらない。または採用してくれないのです。世の中にはいっぱいおもしろい問題があります。会社のほうもうまく使ってい

ただければありがたいし、学生のほうはもうちょっと頭が柔らかくならなければいけないと思うのですが、お互いに不幸に終わる場合が多い。これは講演録から外した方が良いかもしれませんが。（笑）

実際、多数のおもしろい問題があると思うのですが。スコット・ラッセルという人は、自分が関与していた運河における高速輸送というところから、実は大変重要なことを発見してしまった。そして、自分でその現象を確かめた。

もっと複雑な実験も彼はやりました。昔は研究というのはゆっくりだったもので、1834 年の発見から 60 年後の 1895 年に理論式が提出されます。ちょうど 110 年前です。これはオランダ人のコルトヴェーグ・ド・フリースという人が簡単な模型（図－１４）として提出しました。



図－１４

水面の高さをｕとすれば､ある動いている系から見るのですが､第 1 項は非線形性の項です。第 2 項は、分散性というのはちょっと知識がいるかもしれませんが、振動数が波数ｋの 3 乗に比例しますので、分散性があって波が広がっていくということになります。

よく経験する例でいいますと、波打ち際で見ている波がだいたいこれであります。波の突っ立ちが起きてきまして、最後にはバシャーッと砕けてしまうのですけれども、それがなければハワイみたいな遠浅のところだとすると、そのままザーッと進み続けます。

流体力学では Shallow Water Wave、浅い水の波と呼ばれているものです。これは最近また注目を浴びました。津波はこの種類の浅い水の波です。浅い水の波というのは何かというと、1 キロメートルぐらいの深さでも波長がもっと長い。10 キロぐらいです。高さは数十センチから数メートルでありますが、これがずっとそのまま伝わって来るのです。

怖いのは、盛りあがった水がそのまま運ばれてくるからです。単にサイン、コサインの波ではなくて、水のかたまりが運ばれ、また戻ってくる。でき方としてはたぶん海底が下がって急

に上がったりとか、先ほどの水槽で作ったような波がそのまま来るというわけです。

『非線形波動』（岩波書店）という本を書いたのですが、このことをもうちょっと書いておけばよかった。もっと売れ行きが伸びたかなと。本の出版自体はタイムリーではなかったのですが、こういう種類の波打ち際の波もそうですし、津波もこういう現象であるというわけです。

これはだいたい高さまで入れまして、どういう速さかというと、G（重力加速度）×（深さの平方根）という速さです。G が 10m/sec ですから、1 キロの深さだとすると毎秒 100 メートルぐらいの速さです。数キロだとすると、例のジャンボジェットと同じぐらいの速さでチリから日本に津波が来ました。

こういう種類の式は日本国民、義務教育の中学生に教えるべきことであろうと私は思うのです。津波の速さはどのぐらいですか。いろいろな重要なことがありますが、台風ではどういうふうに風が吹き込むのかとか、津波はどのぐらいの速さで襲ってくるのかとか、そのような知識こそ、わが国の科学リテラシーの重要な部分ではないかと思います。

孤立波－ソリタリーウェーブ－からソリトンへ

実際にはもうちょっと精密な議論ができまして、これがフェルミが言った計算機の利用のうちの１つです。先ほどの非線形偏微分方程式と数学的には呼ばれるものですが、それを数値的に解くことにします。それで得られる現象は、ある周期で元の状態に戻る（再帰現象）。それは周期的境界条件で解いているからです。それからいま述べたような孤立波というのが伝播していった。孤立波はたいへん安定でありまして、粒子のように等速で走り、衝突しても壊れない。ですから非線形みたいな波は非常に安定である。

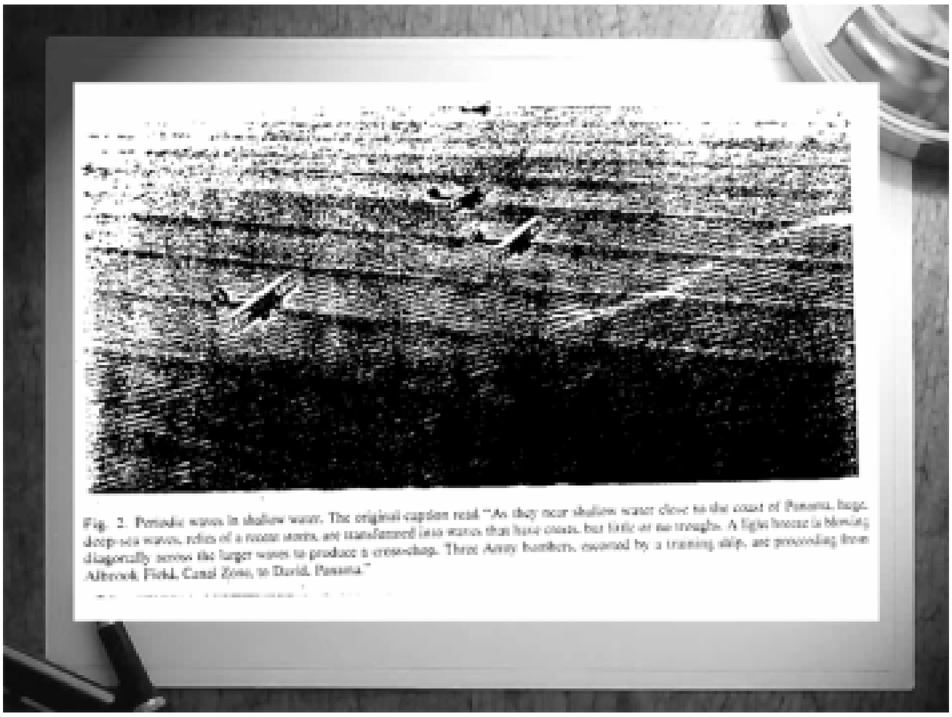
今日のテーマのもう一つとして、やはり外国人は名前を付けるのがうまいのです。ソリタリーウェーブという、スコット・ラッセルが発見した孤立波というものが粒子的な性質を持っているというので、ソリトンという名前になった。これに近い外国の会社の名前はいっぱいありますが、いずれにしろ、こういう造語まで含んで概念として提出します。そういうところが欧米社会のすごいことであろうと思います。

この写真は今日聞きに来られている方がより親しみやすいといっても、これはちょっと古すぎるのですけれども。スエズ運河の上を飛ぶ複葉機です。ですからアメリカ軍機だと思うんですけど。別にそれを示したいわけではなくて、その下の１列１列の波が、すなわち、ソリトン波がこちら側に向かって伝播しているという写真です（図－１５）。

写真の説明（caption）によれば、どこかに船があり、複葉機はそれを護衛している。ですからこの頃スエズ運河はもうできていた。これが一次元のソリトン、または孤立波というものを撮った写真であります。

それからこれはちょっと小さくなってしまっているのですが、ちょうど 15 年ぐらい前に『サイエンス』の表紙に載ったソリトン波です。この前、大地震があったのとちょうど同じ、アンダマン海の近くです。驚くべきは、これが海の内部波と言われるものです。密度が違う液体の境界面をこういうのが走っている。もっと怖いのは、アメリカとかイギリスは偵察衛星でこん

なのをずっと見ているのです。この写真は石油探査用とのことですが、ときどきボロッと表に出てくるのです。これが内部波ソリトンです。



図－１５

実際には、もうちょっときれいな写真です。場合によっては潜水艦が内部波ソリトン沈むという、まことしやかな話もあります。海の中は密度が異なる層ができていると、このようなソリトンまたは孤立波というのが進んでいくということです。

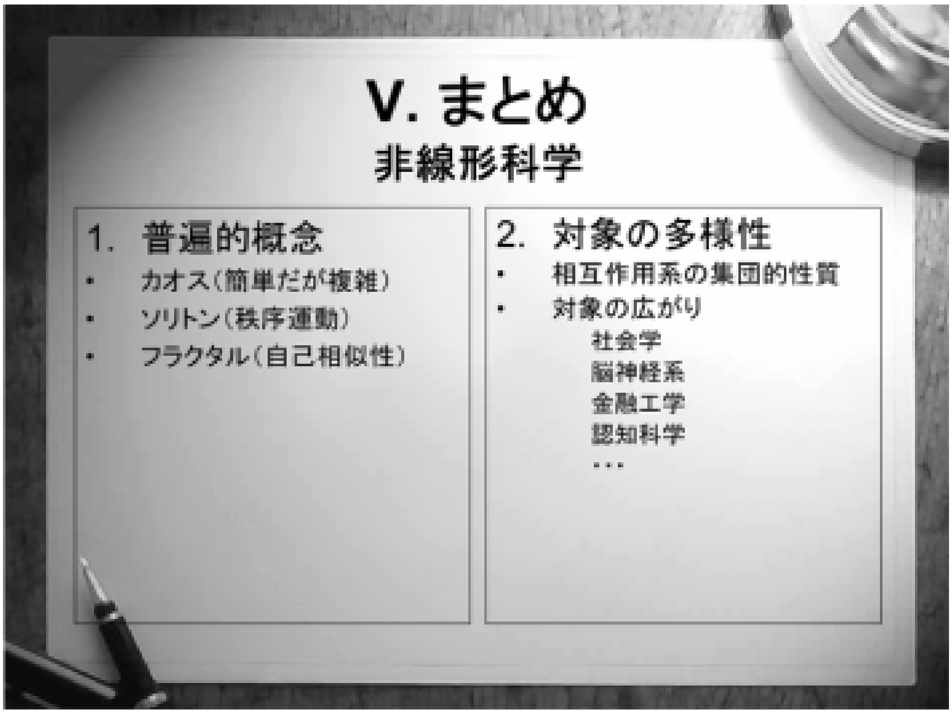
対象は何でもいい

今日話してまいりましたのは非線形科学、線形性ではない状況になりますと、いろいろなことが起きるということです。ですけれども１つ１つ議論していてもしようがない。今日話しましたのは、非常に簡単な系でありますが、想像がつかないぐらいの複雑な挙動を示すカオスという現象がある。一方、自由度が非常に大きい力学系であっても、流体系みたいなものであっても、秩序だった運動が起こりうる。それはソリトンと呼ばれるものです（図－１６）。

それから今日は話しませんでしたが、フラクタル（自己相似形）という概念があります。

そのようなものは、実は対象は考えてみれば何でもよろしいのでありまして、ある相互作用をしている集団系の性質が、普遍的に説明できるということになります。

そういう観点から見ますと、対象というのが実は人間個人、または社会的な状況であってもよろしいと言えます。脳と神経がどのように構築されているか。株価の値上がり、値下がりを予想できるか。それからだんだん教育学とか人文科学に近くなってきますが、物はどうやって見て、知って、判断するのか。あと「…」というように対象が広がっていくわけです。



図－１６

教育のほうは話をしますとちょっと長くなるし、教育問題というのはなかなか危ない面もありますので、これは純学問的な考察として聞いていただきたいのですが、いろいろな専門分野というのは進化するとともに、実は境界の領域というのがたいへん拡大してしまっている。それでよく考えると、全然違うと思っている分野で実は共通の概念が成り立っているのではないかということです。

やはりある分野を極めてから他の分野の再編成とか、境界領域の拡大とか、共通する概念というものに行くのでしょうけれども、その味付け加減がなかなか難しくて、いま大学も生き残りを懸けておりますので、文科融合などからやり始める学校もあるわけです。

そうしますと学校の名前として、また学部の名前として、国際と福祉と環境と情報、このぐらいを組み合わせまして何通り学校ができるか。冗談ですが、全部付けてしまえば国際情報福祉環境大学になります。そうしますと、会場にはいらっしゃらないと思いますが、文科省は本当によく考えた大学だなというので、よい評価になりえます。その面でいま議論しているのではなくて、研究に絞りますと、現在の段階では、これまでに述べてきたことには対処しにくいということになります。

私の経験から言いましても、まず人生において理科か文科か、どっちか選べと言われるわけです。それで困るわけです。あとで怒られてもいいから言いますけれども、いま政治家で偉くなっている方などには、おれ数学できないから文科へ行くという人もおりました。それで今の財務省で偉くなっている方ももちろんいるわけです。

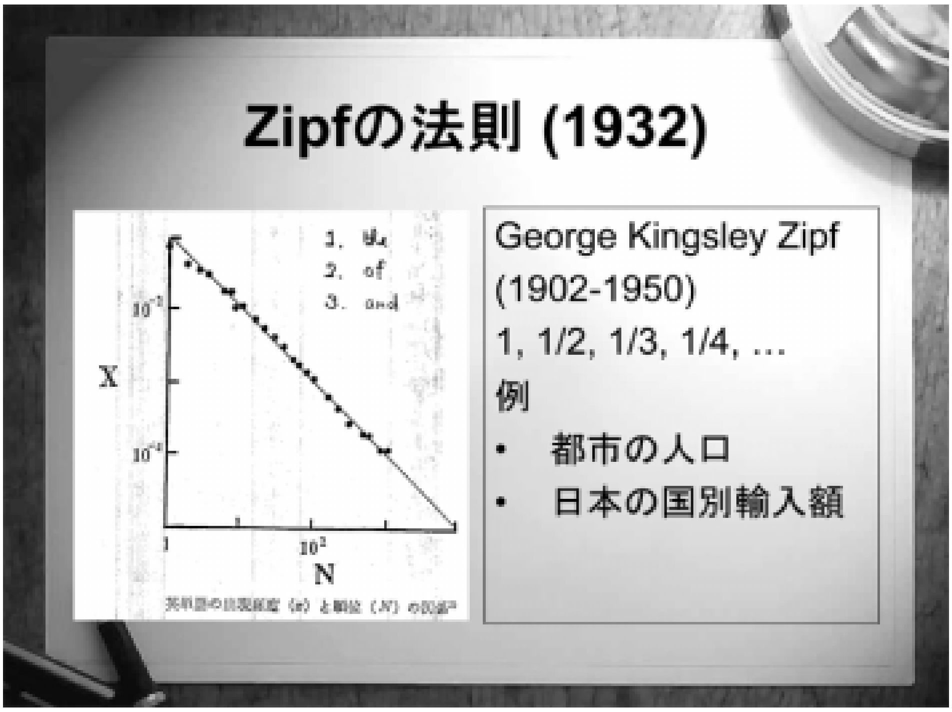
次に理科を選んだのはいいんだけれども、理学でいくか、工学でいくか。また悩みます。次に理学に来たのはいいんだけれども、数学、物理、科学、生物どうするのと言われると、また選びます。例えば物理を選んだとしたら、素粒子物理か、物性物理のどちらをやるのかと言われます。

物性物理を選んだとしても、さらに、4 年生ぐらいで、金属がいいの、半導体がいいの、磁性がいいの、誘電体がいいのと言われる。それでハッと気が付くと後戻りできないということになるのです。これを私はあみだくじ人生と呼んでいます。人材を生かすためにもどこかで何かできると大変よろしい。オーバーに「融合へ」と書いたのですが、少なくとももう 1 つの見方、または、他の側面がちょっと見える状況を若者達に作ってあげたい。

Zipf の法則

これは最後の話題です。すごいですね。完全に 1 時間、プラスマイナス 5 秒ぐらいで終われると思います。Zipf の法則というのがあります。この人は実に奇妙な人でありまして、前世紀の最初、前半ぐらいにいた方です。何の専門家というのはなかなか難しいのですが、言語学に近いらしいです。または、統計学でしょう。

彼が発見したのは、1 番を 1 とすれば、2 番は 2 分の 1、3 は 3 分の 1、4 は 4 分の 1。n 分の 1 で順位が付くというのです。左側に書いてあるのが英単語の出現順位で、「the、of、and、as…」となります（図－１７）。



図－１７

こういうのを言い出すといくらでも、研究というのは、浜の真砂みたいなところがありまして、例えば、都市の人口です。昔、東京 1000 万、大阪 600 万とか 700 万とか、何分の 1 みたいな傾向があります。再びですが、1932 年ぐらいのときに Zipf が発見した例として、英語の単語の出方。それから 20 年ぐらい前によくこの種の本に書いてあったのは、都市の人口とか日本の国別輸入額。

この原稿のタイプを打ちながらハッと気が付いたのは、これからの時間的変化でもおもしろいのです。国別輸入額では、明らかにアメリカが1番だった時代の統計で、いま中国が抜いた場合にどうなっているのかなと。中国を1として、ひょっとすると、いつかアメリカが2分の1になっているかもしれない。

逆に言いますと、こんなものが正しいかどうかはまた別としまして、2位が二つある場合には、Zipf 則からずれたのは何が原因かというのは、ある意味では分かるという状況も言えると思います。それはなぜかというと都市の人口、このごろ合併がはやっておりまして、この分野の研究者に言わせると、この分布からだんだん外れてきてしまっている。政府が合併しようというと、ちょうどいい数ぐらいの人口の市が多くなってしまうからです。

それから最近これを調べていておもしろかったのは、日本のファミリーネーム、家の名前を名工大の研究者達が調べたのが数年前です。それで論文になったのです。そうしたら次に、新しい論文としては、これもあまり深刻にとっていただきたくないんだけど、韓国の方が同じ研究をやりまして、いかに韓国と日本が違うかというのをお示しになった。それは当たり前でありまして、そのかわり3家族のキムまで含めると Zipf 則に案外近いとか、それなりの有意義な由緒正しき分析がありました。

というわけで、非線形ということをお分かりいただけたと思います。こういう社会科学的な問題まで含んで、実際にその裏にあるのは同じような数学が隠されているのだ、と想像しております。それらを勉強するには、ちょっとだけ心の余裕がないとできないかなと思っております。ご清聴、感謝いたします。（拍手）