

「独自性の展開」 — 物理学一般

神部 勉

独自性のある研究をテーマにして、マクロ物理学の発展の 100 年を顧みるとき、独創的でしかも国際的にその影響が萎えることのない研究がいくつもある。個人レベルの研究に加えて、大型プロジェクト研究も大きな役割を果たしてきた。わが国での「物理学一般」の研究の展開をみよ。

1. はじめに

日本の物理学の歴史を振り返るとき、明治初期から 1920 年代あたりまでの黎明期には、(a) 欧米の派遣教師の手ほどき、(b) 育った学者が欧米に留学して先進の学問を学んで帰国、(c) 一流学者の来日、などのパターンがあった。(a)の例としては、1883 年にノット(C.G.Knott)がスコットランドから来日したことが挙げられよう¹⁾。英国グラスゴウの W.ウィルソン(後の Lord Kelvin)が、東京帝国大学からの要請を受けて、彼を“高い素質のある物理学の教授”として指名したのであった²⁾。(b)の例では、田中館愛橋³⁾、長岡半太郎、仁科芳雄などが典型であろう。(c)はアインシュタイン、ボーア、カルマンなどの来日であろう。

20 世紀最初の 30 年は黎明期のものであったとはいえ、今からみて先駆的な研究がいくつもあった。本稿はそのような研究からスタートしてみる。

2. 量的と質的と統計的と

戸田ソリトンでその名を知られる戸田盛和は、若い頃の一時期を次のように回想している⁴⁾。『高校に入ったころ、私は工学部の建築へ進もうと思っていたが、寺田寅彦の随筆を読みふけて物理学の面白さに触れてから志望を物理学に変えた。東京帝国大学に入ったのは 1937 年で、寺田寅彦が亡くなったのは 1935 年であるから、講義はきいたことはない。しかし、随筆などを通して強く影響を受けているわけである。』このように回想する物理学者は戸田一人だけではなく、寺田寅彦はその後の日本の物理学、特に地球物理学の発展に、限りなく大きな影響を与えている。

寺田寅彦(図 1)は、尺八の研究で理博の学位を得て(1908)、1909 年に新設講座の助教授に任ぜられると同時に、この年から欧州留学をしている。帰国後の X 線回折の研究については、すでに本特集⁵⁾でも述べられている。その後、胃潰瘍吐血による自宅療養(1920, 21)と関東大震災(1923)が寺田の物理学に大きな転換をもたらした。随筆「量的と質的と統計的と」(1931)に⁶⁾、寺田の物理学の思想を特徴づける一節がある。『ラウエ、菊池の実験といえども、第一着に本質的に何よりもだいじなことは、写真板の上にあのような点模様が現われることであつた。それが現われた上での量的討究の必要と結果の意義の大切なことはもとより言うまでもないことであるが、第一義たる質的発見は一度、しかしてただ一度選ばれたる人によってのみなされる。質的に間違つた仮定の上で量的には正しい考究をいくら積み上げて科学の進歩には

ほご
反古紙しか貢献しないが、質的に新しいものの把握は量的

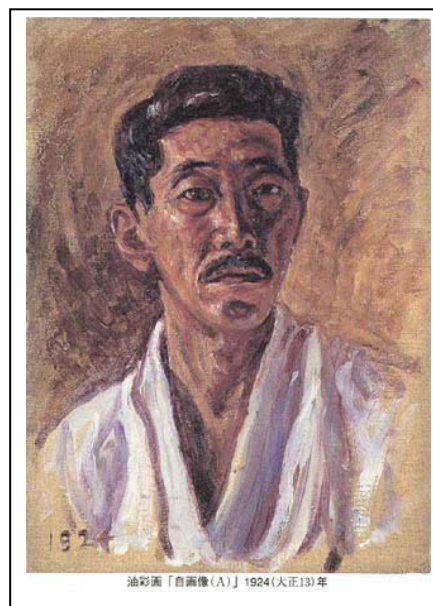


図 1. 寺田寅彦自画像.

油彩画『自画像』1924(大正13)年.
(高知県立文学館所蔵).

に誤っていても科学の歩みに一大飛躍を与えるのである。ダイヤモンドを掘り出せば加工はあとから出来るが、ガラスはみがいても宝石にはならないのである。』質的に新しい研究の強調は、現代的視点からも、再評価に値する。それは以下の点である。

『当代の流行問題とはなんの関係もなく、物理学の圏外にあるように見える事からの研究でも、将来意外に重要な第一線の問題への最初の歩みとなり得ないとは限らない。』⁷⁾ 例えば、“ガラス板の割れ目や、岩石破壊の現象”、“窓ガラスの水滴が流れ落ちるときの軌跡、あるいは河川の樹枝状の形”など、寺田がとり挙げた問題は、半世紀後の今日、フラクタル幾何学⁸⁾の典型的な問題となっている。

特に注目されるのは、“熱せられた水平板上の流れ”の研究(1928)である⁹⁾。これは流れと熱対流の組み合わせで縞模様(細長い渦)が生ずることを明らかにした研究である。図2は、水の流れのロール状対流渦を色素で可視化した写真であるが、同じパターンは今日では衛星画像として冬季日本海上の雲の縞模様として目にすることができる

(図3)。これは自然現象のモデル化実験と考えられ、大気の流れの先駆的研究であった。これは10年前に実験室で偶然、アルミ粉末の混じった約1mmの薄いアルコール層の入った磁器の水盤を傾けたときに観察した現象が発端となったもので⁹⁾、欧米の研究よりもずっと早かった。

この研究および“金平糖の角の成長とその数”¹⁰⁾の研究などは、いまは不安定性と非線形力学の典型的な問題である。理論物理の言葉にすると、対称性の破れの研究である。というのは、前者は一様な水平層に一様性を破る縞模様が生ずる現象であり、後者は一様な球面に離散的な角が生ずる現象だからである。以上の他に、“水流や風で砂地に生ずる、水紋・風紋の研究”、“墨汁を水面に流して作る墨流し”、“土壌の力学あるいは地殻断層の粉体力学”¹⁰⁾の研究もある。

寺田寅彦は生まれるのが50年早過ぎたと言われることがあるが、私はそうは思わない。寺田寅彦がこの時期に出ていなかったとしたら、その後の日本の物理学界は、今と比べたら半身不随に見えることだろう。それだけ無数の物理学者(のみならず日本全体)が陰に陽に大きな影響を受けている。同時に寺田は先駆者としての苦悩も味わっている。1926年の頃「生命にはかへられない」思いで東京大学教授を辞して、理化学研究所(理研)、地震研究所、航空研究所(航研)の三研究所で研究をするようになった。

寺田にみる的確で鋭い自然観察は、日本の伝統の万葉、古今和歌、俳句の自然観察眼を継ぐものであるろうし、寺田はそれに新たな科学の座標軸を付け加えた。一方、科学論文の方には、同僚から俳句的と評される新感覚の論文を書いたのであった。それが単なる遊びではなかった証拠に、渦の縞模様の研究は、外国の流体力学的安定性の研究に引用されているという。

“天災は忘れた頃来る”¹¹⁾は、寺田寅彦の名言として世によく知られているが、それと好一對の名言は、“雪の結晶は、天から送られた手紙である”であろう。これは寺田の直弟子の中谷宇吉郎が、自らの雪の研究をまとめた「雪」¹²⁾の最後にあり、それに続いて『その中の文句は結晶の形及び模様という暗号で書かれている』とある。中谷は1920年代に関東大震災の後、理研で寺田の助手を3年勤め、欧州留学から帰国の後、北海道大学理学部創設時の助教授として赴任したのが1930年であった。そこで雪の研究を開始し、実験室の中で、雪の結晶を人工的に作ることに世界で初めて成功した

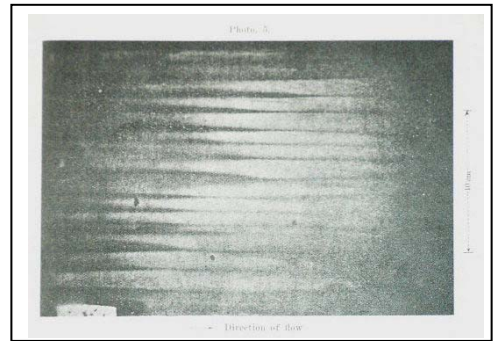


図2. 熱せられた底面の上を流れる水

ロール状対流渦 (色素で可視化)⁹⁾.

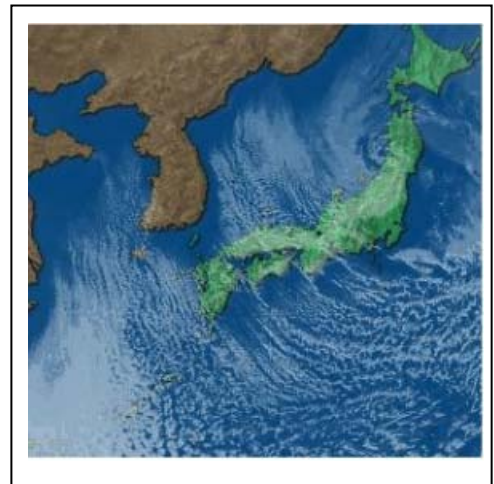


図3 気象衛星ひまわり可視画像(2003年12月20日12:00、日本気象協会提供).

のは有名な話である(図4)。初めは、雪の結晶の写真(Snow Crystals, ベントレー著、米国)を見て、自分も自然の雪結晶の写真を撮ろうとした。そのために十勝岳の山小屋の零下の気温の中で数時間を過ごすこともあったが、体力的限界を感じずともあって、ついには予期もしてなかった、人工雪を低温の室内実験室で作る方向に進み、ついに成功した(1936年3月12日)。その時の苦労話は前記の「雪」に記されている。雪の結晶を得ようとする低温のガラ冷却板を、最初は実験装置の下において水蒸気を通し、次には上に設置したが、いずれも雪の結晶は得られず、霜の結晶を得るのみであった(霜は壁に付着し結晶を意味する)。天然の雪は、水蒸気を含んだ空気が対流で昇し、上空では低圧のため断熱膨張で温度が低下して過飽和になる。その気温が零下の時は、何か核があると、そこから雪の結晶が生じる。これがその後の実験から得た結論であった。この考えに沿って新しい装置を考案し、その年の2月にたまたま北大に常時低温実験室が設置されたのを機会に、新しい装置をその実験室の中に持ち込んだ。雪の結晶形成に必要な核のために、兎の腹毛を使ったのも偶然の発見からであった。顕微鏡で見ると兎の毛には瘤がところどころにあった。かくして人工雪が実験室で作られた。



図4. 中谷宇吉郎 (U.N.Limited 提供).

3. 航空研究

20世紀前半は航空機の発展の時代であった。航空機の研究には風洞実験設備が欠かせない。その研究のために航空研究所(航研、1921年創立)が1930年に東京駒場に移設され、同時に大型の風洞が設置された。当初の所員の中には寺田寅彦、本多光太郎の名前もある。斯波忠三郎初代所長を継いだ和田小六所長のもと、当時の世界記録を目指した航研機の開発が行われ、1938年に完成し、無着陸周回航続距離の世界記録を達成した。これは日本での最初の大型プロジェクトの研究開発だったのではないだろうか。

和田は欧州留学(1919-21)の際にドイツでプラントル(Prandtl)、カルマン(von Karman)と面識を得た。日本全体の航空研究の発展のために外国から指導者を招くには誰がよいか、という質問に対する経緯は次のようであったと、戦後に航研所長にもなった谷一郎が対談記録¹⁴⁾で述べている。『和田先生は「プラントル」と答えた。そこで高尾さん(川西航空機会社、現在の新明和工業、幹部)はゲッチンゲンに行って、プラントルに頼んだのだそうです。そうしたら、'若いカルマンに話せばと言われた。(中略)カルマンの回想録によれば、アメリカからも同様の招待があり、しかし母堂はあまり賛成せず、まして日本は未開国として反対され、断るつもりで報酬の倍額を要求したら、あっさり通ってしまったとあります。』(カルマンの来日は1927年、月給は1000円。東大航空工学科初代主任の横田教授は約400円だったという)。会社がカルマンに頼んだのは、研究指導と風洞建設だったが、航空学についての連続講演も航研彙報(カルマン講演集)として残っている。谷の対談記録の続きを引用すると『1929年には万国工業会議が東京で開かれ、国会議事堂で講演が行われました。プラントル先生もこの会議に招かれて来朝し、'乱流の役割'という講演をしたほか、航研でも3日連続の講義をしました。GIテイラー先生もそのあと間もない頃来られたようですが、クラカタウ島(インドネシアの火山島)訪問の帰りの私的旅行で、講演などはされなかったように思います。』続けて、『カルマン先生については、乱流境界層の有名な対数速度分布¹⁵⁾を導いた論文の中に、その僅か前に発表された和田先生の乱流摩擦抵抗の計算に触れているところがあります。(これを)対数速度分布導出の一つの根拠としたのは、カルマン先生の慧眼であろうと思います。このような相互作用がカルマン先生の来朝と無縁でないことは、改めて言うまでもありません。』余談になるが、同じ対談の中

で湯川秀樹先生についても、『玉城嘉十郎先生の講座が湯川さんに引きつがれ、湯川さんが京都大学に帰った頃（1940）、流体力学は自分が担当しなければならない講義だと言っておられました。（中略）小さい風洞が物理教室に設置されていました。しかし湯川さんは風洞を動かす興味がなく、助手の白銀善作さんが実験をやっておられました。』と述べている。

戦後はGHQの命令で航空機の研究は停止になり、航空研究所も1946年に理工学研究所となり、航空研究所、宇宙航空研究所（1964）、国立宇宙科学研究所（1981）、JAXA¹⁶⁾（2003）と名称を変えて現在に至っている。旧航空研究所のあった所は、現在は東大先端科学研究センターとなり、そこに今でもある古い大型の3米風洞がゲッチングン型風洞（図5）であるのは、その歴史を物語っている。

宇宙航空研究所、宇宙科学研究所の時代になって打ち上げたX線天文衛星は最高レベルの技術を有するものであった。1979年の「はくちょう」以来、X線天文衛星は数々の貴重な成果を生みだしたが¹⁷⁾、後で述べる、太陽コロナX線の画期的観測にもつながった。

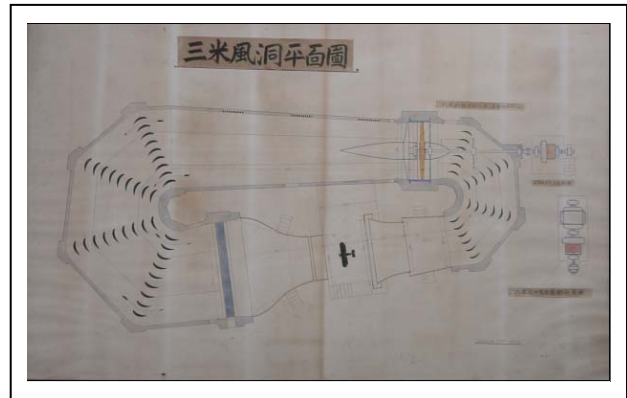


図5. 航空研究所の風洞の壁にある額。風洞の縦横は約16.5m x 33mで、飛行機平面図のある測定部の吹出口直径が3m、右下にMARCH 25TH 1930とある。

4. 物理とモデル

戦後の1945年以後、日本の物理学の研究が爆発的な勢いで質と量を増したことは、我々のよく知るところである。湯川先生のノーベル物理学賞受賞が陰に陽に影響を与えていたことは論をまたない。しかし、物理学一般といえる分野でも、独創的で、現在でもその影響が衰えることのない研究がいくつもある。それらに注目してみたい。

(a) 地磁気反転のモデル

地球磁場がどうして存在しているかは、1950年頃まではほとんど謎であった。現在有力なのは、地球内部に発電作用があるとするダイナモ理論である。地震波の測定から、地表より2900km以深を占める中心核内では、鉄などが熔融状態になっている。そのような導電性液体が磁場の中で、自転の影響下で対流運動することで、ダイナモ作用が持続すると考えられる。

1960年代の自然残留磁化に基づく古地磁気研究は、現在の地球磁場とほぼ逆方向に帯磁している地層の存在を明らかにしたのみならず、過去においてしばしば地磁気が逆転していた事実を明らかにした。最後の逆転は約70万年前に起ったとされている。地磁気がダイナモ作用によって維持されるとするならば、地球ダイナモは地磁気の逆転をも説明できなければならない。金属の円盤が自己磁場を発生しながら、その中心軸のまわりに回転する円盤ダイナモを考えてみる（図6(a)）。その円盤の縁にはブラシがあって、そのブラシから円形コイルを経て（コイルは円盤面とは異なる他の平行平面内にある）、再び円盤軸に戻

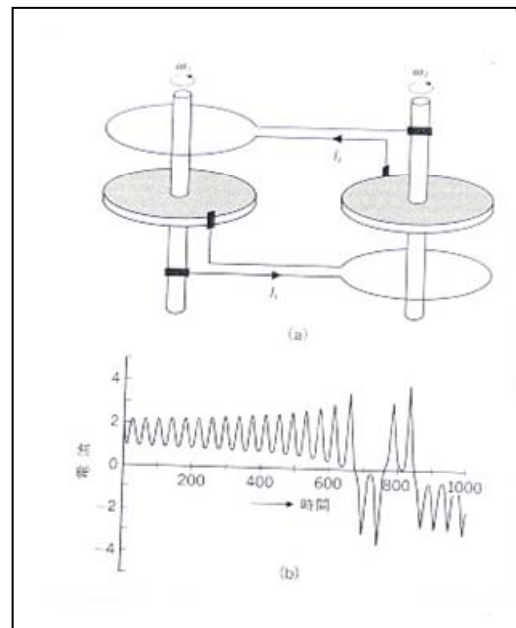


図6. 力武の結合円盤ダイナモ・モデル。(a) 結合円盤ダイナモ、(b) 数値積分で得られた電流 $I(t)$ の反転は磁場の反転をも意味する。¹⁸⁾

る電気回路があるとする。地球核内の複雑な対流構造を2個の円盤が結合した円盤ダイナモとしてモデル化したのが力武モデルであり、軸方向の磁場 H に注目する。¹⁸⁾ 円盤1および2の(電流, 角速度)を (I_1, ω_1) および (I_2, ω_2) とし、それぞれ時間 t の関数とすると、規格化した非線形の4元の結合方程式系(力武モデル)は、 $dI_1/dt + \mu I_1 = \omega_1 I_2$, $dI_2/dt + \mu I_2 = \omega_2 I_1$,

$d\omega_1/dt = 1 - I_1 I_2 = d\omega_2/dt$ と表わせる。これが力武モデル(1958)の微分方程式系¹⁹⁾である(μ は

定数であり、 μ はコイル抵抗、自己誘導係数、相互誘導係数、円盤の慣性モーメント、地球自転によるトルクなどに依存)。磁場 H は電流 I に比例する。この方程式系を適当な初期値のもとに、時間 t の長い区間にわたって数値積分していくと、電流が一定値の周りに振動しながら、振幅が次第に増加する解が得られる。やがてそれは突然に符号を変えて電流が反転し、異符号の一定値まわりの振動に遷移する(図6(b))。

これが地球磁場反転のモデルと考えられている。結合円盤ダイナモ・モデルは、その後の地磁気の生成および逆転機構の研究の発展に大きく貢献した。力武モデルのように、系の時間発展が数式で与えられるシステムは「力学系」と呼ばれる。

(b) カオス・アトラクター

電気・電子回路に生じる不規則振動現象のカオスを意味する Ueda attractor の発見者、上田皖亮の

回想²⁰⁾によると、カオス理論が流行りだした時には、当人はカオスからすでに離れて電力工学分野で仕事をしていた。上田の1994年の記述によると、『私が1961年11月27日に得ていたアナログ計算機の実出力データ(図7、説明は後述)が最古のカオス(データ)だとか、私の提唱してきた不規則遷移現象が実はカオスそのものだった、と多くの方が認めて下さってからすでに数年の歳月が流れた。(中略)長年抱き続けた疑問を解くために、己の問題意識に忠実に仕事を続けてきたに過ぎない。今でも疑問は感じているが、自分のやってきたことがそんなに大きなことだったのか?ということに気付いた時(1979年)には、すべてが終わっていた。「おまえ、まだ van der Pol や Duffing を触ってるのか、ええ加減に止めた方が良いのと違うか!」と忠告してくれた知人・友人が数人いたことは確かだ。しかし、少なくとも私自身に限っていえば、継続は力になったようだ。本文を読んでくださる若手研究者諸君、己の疑問に忠実に毎日毎日を大切に確かな仕事を積み上げるよう心掛けて下さい。洋の東西を問わず少なからぬ研究者が流行りの研究テーマに群がる傾向があります。だが、流行りだした時に始めたのでは実は遅いということも心に留めておいて下さい。』また、

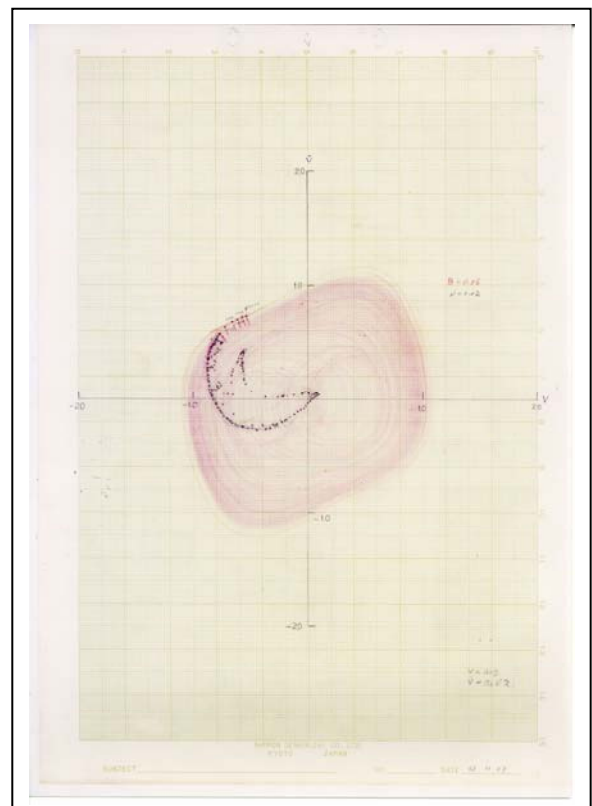


図7. アナログ計算機の実出力(枠外右下に' DATE 61.11.27' とある)。図のうすく細い連続曲線は方程式の解から得られる点の軌道である。時刻 t が $2\pi/\nu$ の整数倍の時だけ太いドットを出力する。

$\nu = 1.01, 1.012, 1.014, 1.016, 1.018$ の5個の場合には純周期解なので、それぞれ固定点となり、図の左上の曲線の境界に接する5点にプリントされた。 $\nu = 1.02$ の場合、ドットは不規則に動くが最終的に割れた卵の形を形成した(黒丸を連ねた形が割れた卵の殻に似ている)。現在この原図は米国のBrookhaven National Laboratoryに保管されている。²⁴⁾

上田²¹⁾は次のようにウェブ上に書いている。『私が出遭った実験データの中に、従来から多くの人がそうだと思っている理論的説明では、どうしても腑に落ちないものが有りました。(中略) 私の見た実験データは、従来から言われているものとは異なる、自分はこう考えると発表していたものが、実はカオス現象だったのです。』これを上田は不規則遷移現象(randomly transitional phenomena)と名づけていた。カオスChaosという用語が定義されて使われだしたのが 1975 年のリ(Li)とヨーク(York)の「周期 3 はカオスを意味する」²²⁾からだったから、それよりも 10 年以上前のことであり、これがカオス・アトラクターの別の言い方であることが理解されるまでに時間が必要であった。

カオス理論では、それはストレンジ・アトラクターと呼ばれているもので、軌道が最終的に収束する集合であるが、集合の中では各要素は不安定であるのが特徴である。言い換えると、集合を構成する無限個の不安定周期解が漸近(軌道)安定性をもつ構造である。カオス状態というのは、系の状態(電気回路の電圧・電流の瞬時値)を表す動作点は、一個の周期解に沿っては短時間しか滞在できず、別の周期の解へ次から次へと永遠に遷移し続ける状態と理解される²³⁾。カオス力学系は、各瞬間から次の瞬間への発展は一意的に決定されるのに、長時間の軌道が予測不可能になるという性質(決定論的カオス)で特徴づけられる。

上田が京大電気工学教室で、アナログ計算機を使って、非線形振動を研究したのは、関数 $v(t)$ に対する次の 3 次非線形の常微分方程式、

$$\ddot{v} - \mu(1 - \gamma v^2)\dot{v} + v^3 = B \cos \nu t \quad \text{であった}$$

($\dot{v} = dv/dt$, $\ddot{v} = d^2v/dt^2$)²⁴⁾。この方程式を計算機上で時間 t について積分すると関数 $v(t)$ が得られる。

右辺の外部強制振動の周期 $2\pi/\nu$ 毎に v, \dot{v} の値を出力して、 (v, \dot{v}) -面に点をプロットすると(ポアンカレ写像という)、もし $v(t)$ が純周期振動なら同じ一点となる。しかし、強制振動数 ν のある値では、それらが一点にならずに不思議な図形が出現する。それは不思議なアトラクターと呼ばれる。図 7 は強制振動数

$\nu=1.02$ に対して得られた割れた卵型のストレンジ・アトラクターを示している^{24,25)}。世界で最初の図示されたカオス・アトラクターで、これは日本で得られたのである(1961)。続いて、1962 年から 63 年にかけて、ダフィン(Duffing)方程式 $\ddot{v} + k\dot{v} + v^3 = B \cos t$ ($k=0.05, B=7.5$) のカオス・アトラクターを同定し、今はウエダ・アトラクターと呼ばれている(図 8)。ローレンツ(E.N. Lorenz)による有名なローレンツ・アトラクターが発表されたのは 1963 年のことである。

上田のカオスがアナログ計算機の出力である点は重要である。与えられた微分方程式をデジタル計算機で解く場合は、差分などの近似法が使われるので、近似解である。上田のカオスの場合はアナログ計算機の中で起っている物理現象そのもので、それがカオスであることを示している。このアナログ計算機は、上田と同じ林研究室の 3 年先輩の安陪稔氏が、真空管を用いて手作りで開発・製造したものであった。²⁶⁾

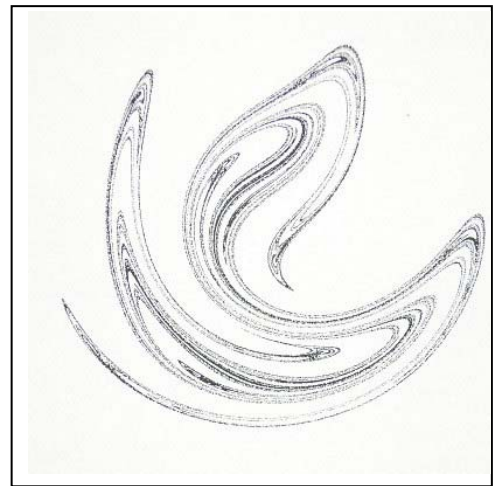


図 8. ダフィン方程式のウエダ・アトラクター (図 7 と同様のプロット)。²⁴⁾

(c) ソリトン

水面波の孤立波の存在は 1834 年のスコット・ラッセル(Scott Russel)の観測とその後の実験で知られていたが、流体力学方程式の解としては、1895 年のコルテヴェーグ(Korteweg)およびド・フリース(de Vries)による KdV 方程式の導出まで待たなければならなかった。それは、非線形効果と分散効果の微

妙な釣り合いで非線形孤立波が生ずるからである。広田良吾²⁷⁾の言をそのまま借りれば、「非線形性と分散性はそれぞれ単独ではパルス波形を壊す働きをするが、2つ同時に存在すれば互いに釣り合っていて、実質的にその効果を打ち消しあい、パルス波を形成する」ことによる。

調和振動子系のような相互作用が線形の結晶格子系では、自由度の数だけ保存量があることから、系の軌道が位相空間の保存量一定の面上に拘束されてエルゴード的にならない。ところが、非線形相互作用であってもフェルミ-パスタ-ウラム(FPU, Fermi-Pasta-Ulam, 1955)の格子系では、計算機実験の結果はエルゴード的とはならなかった。これに関連してザブスキ-クラスカル(Zabusky-Kruskal, 1965)が示したのは、FPUの非線形格子の連続体極限が長波長の波に対してKdV方程式で表わせることであった。さらに加えて、複数個の孤立波の相互作用が、あたかも粒子のように衝突前後で個々の性質を保持することを発見し、それら孤立波をsoliton (ソリトン)と命名した。これらの研究に触発されて戸田格子ソリトンが発見された。戸田²⁸⁾の回想によれば、『線形格子が正弦波の周期的波動を伝えるように、非線形格子が周期的な波を伝える現象を見出す努力から生れたものである』という。

戸田格子とは、指数関数の相互作用を有する結晶格子のモデル(1966)である。1次元格子を考え、粒子の質量を m 、変位を y_n ($n=1, 2, \dots$)とする。最隣接の粒子間(間隔 r)の相互作用ポテンシャルを指数型の関数 $\phi(r) = (a/b)e^{-br} + ar$ で表わすと($a, b > 0$)、 n 番目の粒子に対する $n+1$ 番目の相対変位 $r_n = y_{n+1} - y_n$ の運動方程式が $m \ddot{r}_n = a(2e^{-br_n} - e^{-br_{n-1}} - e^{-br_{n+1}})$ と書ける。その解は

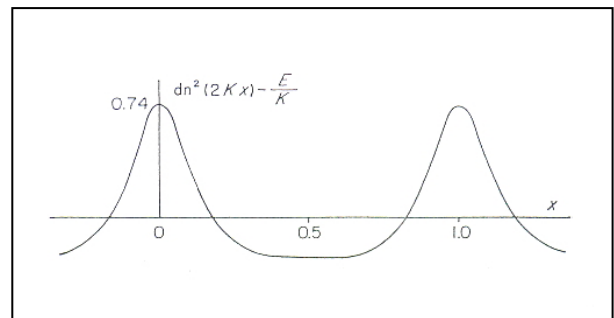


図9. クノイダル波 ($k^2=0.992$). ²⁹⁾

$$\exp(-br_n) - 1 = A [dn^2(2Kx) - E/K],$$

($x = vt \pm n/\lambda$, A :定数) と表わせる²⁹⁾。

ここで、 $K(k)$, $E(k)$ は第1種、第2種の完全楕円積分(k は母数)、関数 $dn(\xi, k)$ はヤコビの楕円関数で、 ξ について周期 $2K$ の周期関数であることから右辺は波列を表わす(図9)。上式から孤立波のソリトン解も得られ、戸田格子ソリトンと呼ばれる。ソリトン解はKdV方程式で最初に見出され、その周期解は別の楕円関数 $cn^2(\xi, k)$ で与えられ、クノイダル波(cnoidal wave)と呼ばれていた。

$cn^2 = (dn^2 - 1)/k^2 + 1$ の関係があることから、戸田格子の方もクノイダル波と呼ばれているが、こちらは離散系での最初のソリトン解と思われる。

非線形発展方程式を解く方法で強力なのが広田の直接法²⁷⁾である。ソリトン解の計算を自分で納得しようとして独自にあみ出した計算方法(1971)である³⁰⁾。これは単なる計算法に留まらず、10年後には日本の数学者(佐藤幹、伊達、柏原、神保、三輪)によって、その数学的構造が明らかにされた。

5. 流体

(a) 粘性流と定在剥離渦

戦後は、航空機の研究が停止させられたことで、流体力学の研究は、基本的な問題の研究からの再出発となった。非圧縮性流体の基礎方程式のナビエ・ストークス方程式(NS方程式)は、代表速度 U および代表長さ L で無次元化すると、定常な流れ場はレイノルズ数と呼ばれる一つの無次元数 $R = UL/\nu$ だけを含み(ν は動粘性係数)、 R が制御変数となり、流れ場は R の値に応じて一連の遷移を示す(レイノルズ数の相似法則)。

流体力学の基本問題の一つは、流れに垂直におかれた円柱のまわりの定常流である。 R が1より小さいおそい流れのときは、前後対称の流れが実現するが、流速が増し、 R が大きくなるにつれ、

流れの方向に対して前後非対称の流れに移行する。同時に、円柱表面から流線が剥離し、円柱後部に

定在する渦対が生ずる (図 11)。問題はレイノルズ数 R がどの値で剥離するのか、その臨界値 R_c はどうか、それは当時知られていなかった。線形のおセーン方程式は、NS 方程式の非線形

の対流項を線形化して得られる。理論家のアプローチはこの線形方程式を解くことであった。

最初の試み³¹⁾は $R_c \approx 0$ を示唆する結果であったが、その数値的な不正確さを修正したのが山田彦児で³²⁾、 R_c の有限値 1.51 を得た。山田の助手だった種子田定俊は流線を可視化する検証実験(1956) に着手し、多くの実験写真から、 $R_c \approx 6$ の結果(図 10) を得た³³⁾。すなわち、

流線の形が R_c のこの値で分岐する。種子田の実験 (図 11) は、流れの可視化実験法として、その後わが国で盛んになり、国際的にも発展していった。

非圧縮粘性流体の基礎方程式である NS 方程式に対する精密な解を求めることは、流体力学の研究を始めた頃からの今井功の念願だった。解析的にできることは、物体から遠く離れた点で正確に成り立つ解、NS 方程式について無限遠での漸近解を求めることであった。おセーン方程式の R 展開の第 3 近似に相当する精密な解を求めて、当時ファイロンのパラドックスといわれていたおセーン近似の問題点を解決し³⁴⁾、見掛けのパラドックスであったことを示した。このあたりの歴史的事情は、日本物理学会の 50 周年記念 (1996) の特集に今井自身が詳しく回顧している³⁵⁾。

元々の非線形の NS 方程式が定在双対渦を予言できるか否かも問題であったが、それは種子田の実験よりも 3 年早く論文がでていた。1950 年代の初めはまだ手回し計算機の時代であった。川口光年³⁶⁾はこの問題を数値的に解く研究に挑み、タイガー計算機 (手動) で毎週 20 時間、約 1 年半の時間を費やして、上述の今井の漸近解を使って、抵抗値をモニターしながら、その問題に肯定的な答えをだした (図 12, 1953)。計算だけなら今の PC で秒の単位かそれ以下の短時間の計算であったと思われるが、プログラム計算ではできない、無駄な計算を省く巧妙な手計算が可能であった。川口の数値計算は、日本で最初の流体力学の直接数値計算 (DNS) であった。今井の念願が一つかなえられたのだといえよう。このような剥離定在渦をめぐる研究は、外国のテキストに

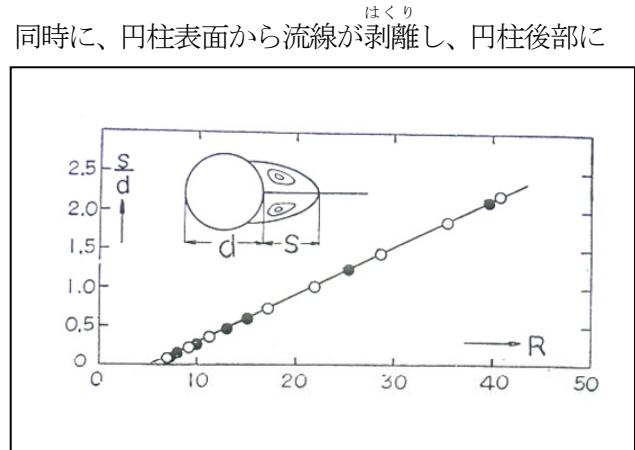


図 10. 異なる R の実験で得られた、円柱の直径 d に対する定在剥離渦の長さ s の比 (R はレイノルズ数). ³³⁾ R の値が約 6 のとき、 s/d の値が 0 となる。

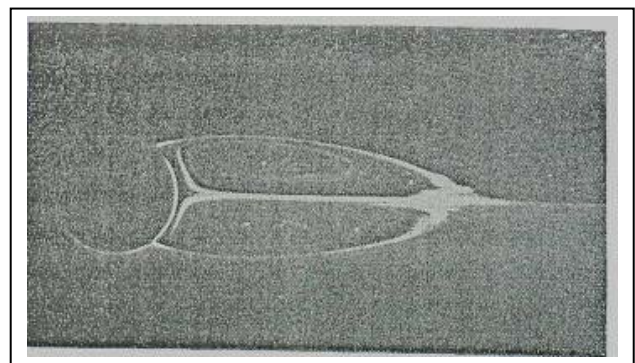


図 11. 円柱面から剥離したコンデンス・ミルクで可視化された定在剥離渦 ($R=40$, 図 12 参照). ³³⁾

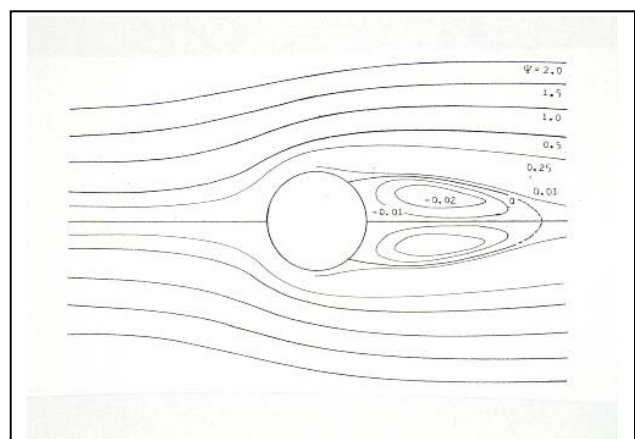


図 12. 円柱周りの粘性流の流線. NS 方程式で $R=40$ として得られた数値解 (図 11 参照). ³⁶⁾

も引用されている。³⁷⁾

(b) 渦運動

波動に対してもう一つの流体運動の基本要素は渦運動である。1960年代後半に、橋本（英典）研究室の助手だった神部勉と高尾利治（東京電機大）が渦輪の実験研究を始めたのは、渦運動が基本要素であるという視点と、それから単に実験者がタバコの煙で輪を作れるということが発端だった。円形からずれた楕円型・三角型の渦輪がどのような運動をするのかを実験して、ムービーで解析した。その運動がいわゆる局所誘導方程式³⁸⁾でよく近似できることを線形近似で確認した(1971)。同じ実験で、2個の渦輪が並進するとき、内側で渦線の再結合（繋ぎ替え）が起ることも観測した³⁹⁾。その後しばらくして橋本は、局所誘導方程式からソリトン解を得たが、それは予期に反して楕円渦のような周期解ではなく、無限に長い渦の解であった、ということを経験室の会話で述べた。これが今日知られる橋本渦ソリトンの発見であった(1972)。⁴⁰⁾

橋本の方法の要点は、次の橋本変換にある。細い渦を空間曲線 $x(s, t)$ で表わす。曲線に沿って定義される曲率 $\kappa(s, t)$ および捩率 $\tau(s, t)$ を

使って、次の複素関数 $\psi(s, t) = \kappa \exp(i \int_0^s \tau ds)$, を導入すると、局所誘導方程式は非線形シュレディンガー方程式、 $-i\partial_t \psi = \partial_s^2 \psi + (1/2)(|\psi|^2 + A)\psi$

に変換される(A は定数)。この方程式は橋本渦ソリトン解 (図 13) : $\kappa(s, t) = 2v \operatorname{sech} v(s - ct)$ を

与える ($\tau = \tau_0 = c/2 = \text{const}$; v, c は定数)。この解は進行する捩れた渦線を表わしている。

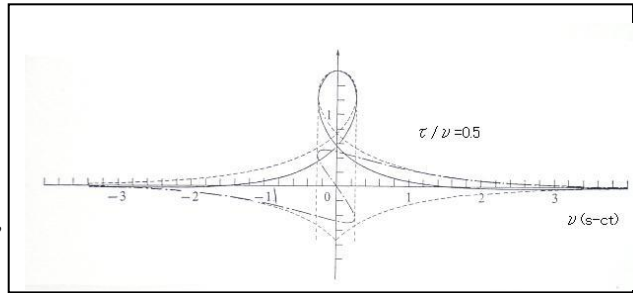


図 13. 渦ソリトンの解。⁴⁰⁾

(c) 渦音

渦の運動は音波を放射する。その渦音が 1979 年に初めて検出され、特に、2つの渦輪が正面衝突するときの音波は 4 重極性を有することが実験的に明らかにされた (図 14) ⁴¹⁾。2つの渦輪の斜め衝突では、渦線の再結合が起るが、その場合に放射される音波についても実験的検出と理論の定式化がなされた。⁴²⁾

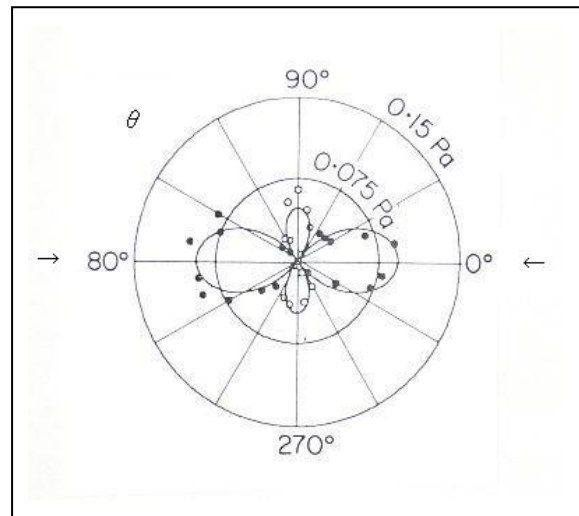


図 14. 放射音波の音圧の 4 重極分布。

2 渦輪の正面衝突, $0^\circ - 180^\circ$ が衝突軸 (矢印), θ は対称軸を含む面内の方位角⁴¹⁾

(d) 乱流

寺田寅彦も意識していたように、自然界に存在する形は非常に不規則で、マンデルブローは新しい幾何学を考察する必要に迫られて、ラテン語の fractus から fractal (フラクタル) という語をみだした⁸⁾。これは“壊れて不規則な断片ができる”という意味を含んでいる。ある物体の部分が全体と幾何学的に相似であるとき、自己相似であるといわれるが、それはフラクタルの典型である。破壊のカスケードが起るとき、部分が全体と統計的に相似になる場合がある。フラクタルな系は、円のような単一スケール (例えば直径) の形とは対照的で、その中に限りなく多くのスケールを内蔵している。海岸線のようなフラクタル曲線は、一般に 1 より大きい、例えば 1.25 といった非整数の次元で表わされる。他方、3 次元空間の中でフラクタルな面は、3 より小さい非整数の次元で表わされたりする。フラクタル力学系の典型は乱流場である。

乱流は時間的に不規則に変動し、空間的にもランダムな流れである。乱流場は数多くの自由度を有し、統計的な自己相似構造を内蔵し、それらの要素が非線形に相互作用するカオス力学系である。詳しい解析には、高速計算機によるNS方程式のDNS計算が現在最も有力な手段である。乱流の把握には各時刻、無数の空間点でのデータが必要となるが、実験の難点は乱流に影響を与えずに（リモートセンシングなどによる）データを取得するための精密な手段がないことである。

3次元乱流のDNSのためには、膨大な計算グリッド数と高速計算が必要で、計算機の大型化が始まった1970、80年代では空間1次元のシェルモデルが試みられた。そのような力学系は、簡略化する前の元のNS方程式とできるだけ多くの共通点を持っていることが望まれる。グレザー (Gledzer,1972) により実数モデルとして最初に提案され、大木谷耕司・山田道夫 (1989)⁴³⁾ によって複素数モデルに拡張された力学系では、自己相似性を前提に、波数空間を半径 $k_n = 2^n k_0$ の球面 ($n=0, 1, 2, \dots, N$) によって球殻 (シェル S_n) に分割し (k_0 は最小半径)、各シェルの成分についての力学系を導いた。これは、非線形項を最近接・次近接のシェルの成分だけで表わした微分方程式系である。その定常解のエネルギースペクトルは $E(k) \propto k^{-5/3}$ となる。これは3次元の発達した乱流が自己相似的であると仮定して得られるコルモゴロフ・オブコフのスペクトルと同じである。(後者は大きいウズ(eddy)が小さいウズ(eddy)へカスケード的に崩壊して自己相似構造を呈するという仮説から、次元解析で導かれるが、実験のスペクトルをよく近似していると解釈されている。) さらに、次元数 $2N$ のすべてのリアプノフ指数²⁵⁾ が計算され、いくつかの指数が常に正であるので、定義としてこの系はカオス的である。 $2N=48$ の計算では、フラクタル次元が 29.8 と得られた。これは、系の軌道が波数空間全体の次元 48 よりもずっと小さい次元のフラクタル的なアトラクター集合に収束することを示唆している。計算機性能の飛躍的向上と計算機の並列化によって、風洞実験と遜色ない結果、場合によっては実験以上のデータをだせる数値風洞が開発された (1993)⁴⁴⁾。これはその後の地球シミュレータ (2002)⁴⁵⁾ のモデルにもなった。これら高性能計算機の出現によって、乱流場に細長い微細な渦からなる散逸構造があり^{46,47)}、自己相似的なフラクタル性の一面が明らかにされた (図 15)。地球シミュレータなどの超高速計算機の開発で新しい計算科学の世界が開かれようとしている。

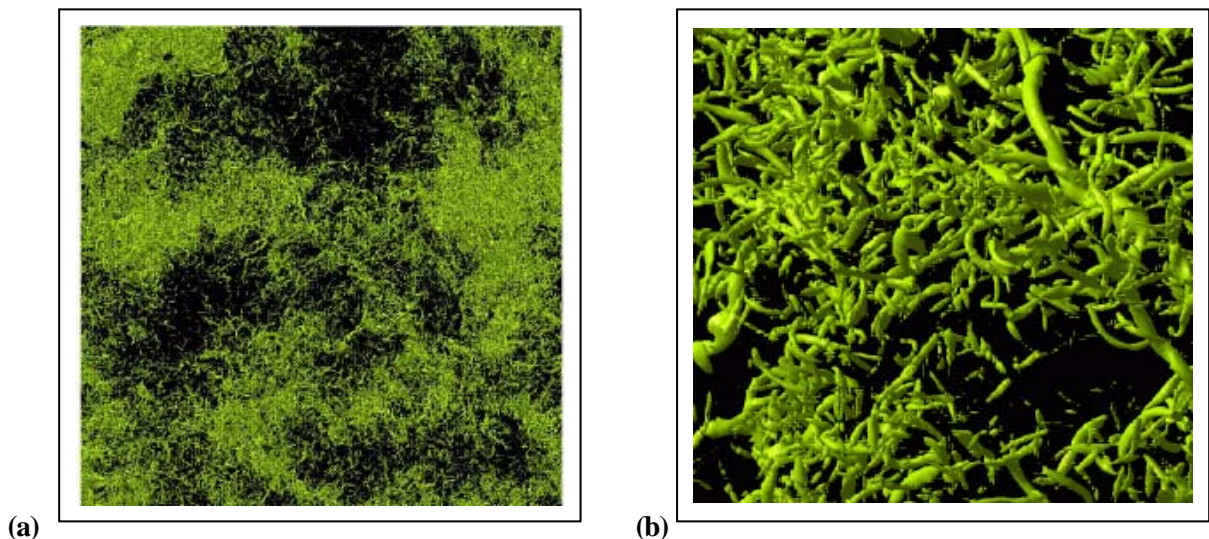


図 15. 地球シミュレータ上の立方体乱流の直接数値計算 (DNS,格子点数 2048^3) で可視化された乱流の渦構造 (等渦度面の画像)⁴⁶⁾。右は、左図の中央部を8倍に拡大した図 (面積は $1/64$) で、自己相似の様相を示す。

6. プラズマ

電離などによって生じた荷電粒子を含む気体がプラズマであるが、自然界には様々な形のプラズマが存在している。星間空間、太陽あるいはコロナ、そこから吹き出す太陽風、地球大気の高層電離層など

など。

(a) 核融合研究

恒星内部で起っている核融合反応を、実験室で制御して実現するための研究が1950年代後半から国際的に始まった。日本では加速器・放電・原子炉などの分野の研究者で組織化が行われ、1961年にプラズマ研究所が、名古屋大学に伏見康治を初代所長として付置された。当初は、安定な静かなプラズマを作り、プラズマの物性を調べることを目的として、基礎研究を目指してスタートした。その後1989年には、プラズマ研究所は核融合科学研究所に統合された。核融合をめざした日本のプラズマ研究については、日本物理学会の50周年記念(1996)の特集で、宮本健郎が回顧した詳細な解説がある⁴⁸⁾。核融合研究所の発足とほぼ並行して、国際熱核融合実験炉(ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor)⁴⁹⁾の計画が進行し、2005年になってフランス国内にITERが建設されることが決定された。ITERの目標は、核融合炉と同じレベルの温度、密度のプラズマを実現し、トリチウム+重水素という実燃料の反応(${}^2D + {}^3T \rightarrow {}^4\alpha + {}^1n + \gamma$)で、大出力長時間の燃焼実験を行うことである。エンジニアリングの段階になったと、伏見は述懐している。

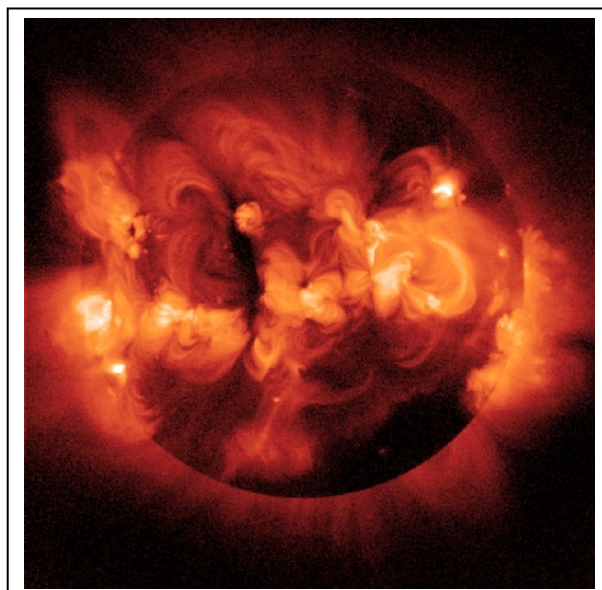


図16. X線でみた太陽コロナの画像(JAXA/ISAS提供。米国の天文雑誌Sky and Telescopeで、20世紀の最も印象的な10の画像の1つに選ばれた)。⁵²⁾

(b) 太陽磁気プラズマ

太陽のX線・ γ 線観測を目的にして1991年に宇宙科学研究所が打ち上げた太陽物理学衛星Solar-Aは「ようこう」というニックネームを与えられているが、寿命の2001年までの10年以上の間(太陽周期活動のほぼ半周期に相当)継続し、貴重な観測データを提供した⁵⁰⁾。これは太陽コロナの光球面上の姿の貴重な画像データを提供したのみならず(図16)、それがさまざまな空間・時間スケールでダイナミックに構造を変えていることを明らかにした。特に、フレアの爆発現象が太陽コロナ中の磁力線再結合現象であることを、観測データに基づいた解析で初めて明らかにした⁵¹⁾ことは、一つの発見にとどまらず、長年の懸案であるコロナ100万度の成因解明のキーを提供しているともみられる。これは、Solar-Aプロジェクトの観測・解析・理論チームの総合力の勝利といえよう。中谷宇吉郎流に言えば、さしずめ「太陽X線は、コロナから送られた手紙である」といったところだろうか。これからのSolar-Bプロジェクトの進展が待たれる。

7. むすび

「日本の物理学100年とこれから」というとき、過去については、大方は資料があるので書くことはできる。しかし「これから」というのは難題である。本記事は独自性を主テーマにして、しかし大型プロジェクトも含めてレビューしてきた。中で引用した上田氏の「流行りだした時にはすべてが終わっていた」という言葉は、経験者の言葉として大変重みがある。時間スケールの長い大型プロジェクト(ITER、地球シミュレータ、太陽物理学衛星)に対しては、これからはある程度は予想がつく。しかし、主テーマの「独自性の研究」となったとき、第三者に何がいえようか。

誰にでも選ばれた人になるチャンスは、一生の内に必ずや一度はあるだろうと思う。その機会をものにできるか否かは、その人の能力・洞察力・創造力にあるだろうと思う。将来の日本の物理学の世界に対して、著者はその点オプティミスティックである。上田のいう「己の疑問に忠実に毎日毎日大

切に確かな仕事を積み上げるよう心掛ける」なら、きっと先が開けるものと、著者も信じている。

参考文献

- 1) Craik, Alex DD: Science and technology in 19th century Japan. *Fluid Dynamics Research* (2006) 投稿.
- 2) 1883年に来日したノットは東京数学物理学学会の設立(1884)とその初期の発展に大きく貢献したと言われている(文献1)。その前身は1877年に創立された東京数学会社で、1919年には日本数学物理学学会に改組された。さらに1946年に日本物理学会と日本数学会に分かれた。
- 3) 田中館愛橋(たなかだて あいきつ)は1888-9年、GlasgowのKelvinのもとで学んだが、その弟子の間でLord Kelvinと愛称された。Kelvinからも尊敬され、日本からのその後の訪問者は厚遇された。
- 4) 戸田盛和:物理学の楽しみ,「科学」66(1996)736.
- 5) 石黒武彦:量子物性の物理,日本物理学会誌,60(2005)518.
- 6) 寺田寅彦随筆集第三巻、岩波文庫.
- 7) 寺田寅彦,随筆「物理学圏外の物理的現象」(1932,文献6)。
- 8) マンデルブロー,B.B:フラクタル幾何学(広中平祐監訳、日経サイエンス、1988)。
- 9) Terada, T and Second-year students of physics : *Rep. Aeron. Res. Inst. Tokyo*, 3 (1928) 3.
- 10) 最近の粉体力学については次の文献、佐野理:日本物理学会誌,60(2005)440.
- 11) 寺田の随筆には、これと全く同じ表現の文章はないが、同じ内容の表現は「天災と国防」(1934)の中にある。表記のこの文章は、中谷が千古の名言として東京日日新聞に1940年頃に引用したものであるという。(「天災は忘れた頃来る」、文献14)。
- 12) 中谷宇吉郎,1938。「雪」,岩波新書。
- 13) 樋口敬二編:中谷宇吉郎随筆集(岩波文庫,1988)。
- 14) 谷一郎:ながれ(日本流体力学会誌),4(1985)3.
- 15) $u = (1/k) \log y + c$,ここで u および y は規格化された速度および壁からの距離、 k,c は定数。
- 16) JAXA: <http://www.jaxa.jp/>
- 17) 松岡勝:日本物理学会誌,60(2005)337.
- 18) 力武常次:科学,66(1996)730.
- 19) Rikitake, T.:*Proc. Camb. Phil. Soc.* 54(1958)89.
- 20) 上田皖亮(うへだ よしすけ):「カオス発見のころ」,電子情報通信学会誌,77(1994)481.
- 21) 現在、はこだて未来大学:<http://www.fun.ac.jp>
- 22) Li, T-Y and York, T.Y.: Period three implies chaos, *Am. Math. Monthly*, 82(1975)985.
- 23) 上田,西村,稲垣:複雑系を超えて(筑摩書房,1999).
- 24) ファンデルポル-ダフィン(van der Pol - Duffing)混合型方程式。
Ueda, Y.: *The Road to Chaos - II. (The Science Frontier Express Series)*, (Aerial Press, 2001).
- 25) 周期振動なら一点、多重周期振動なら閉曲線、そうでない場合はstrangeと呼ばれる。ストレンジ・アトラクターの定義は、軌道運動の安定性を特徴づけるリアプノフ指数 λ が少なくとも一つ、正值であることである。リアプノフ指数 λ とは、アトラクター上の軌道に沿って「状態の誤差」が $\exp[\lambda t]$ の形の線形結合で変化するとしたとき(t は時間)、係数 λ を指す。特性値 λ は一般に自由度の数だけ存在する。 λ が正值の項は誤差の増大を意味する。
- 26) Grebogi and York 編(訳代表香田徹),カオス・インパクト(森北出版,1997).
- 27) 広田良吾:直接法によるソリトンの数理(岩波書店,1991)。
- 28) 戸田盛和:非線形波動とソリトン(日本評論社,1983)
- 29) Toda, M.: *J. Phys. Soc. Jpn.* 22(1967)431; および同23(1967)501. ν, λ は振動数および波長、 K, E は第1種、第2種の楕円積分、 A は定数。
- 30) Hirota, R.: *Phys. Rev. Lett.* 27(1971), 1192.

- 31) Tomotika, S. and Aoi, T. : *Quart. J. Mech. Appl. Math.* **3** (1950) 140.
 32) Yamada, H. : *Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.* **3** (1954) 11.
 33) Taneda, S. : *J. Phys. Soc. Jpn.* **11** (1956), 302; 同, **11** (1956) 1104.
 34) Imai, I. : *Proc. R. Soc. Lond.* **A208** (1951) 487.
 35) 今井功, 1996. 「50年をかえりみる:ある流体物理屋の軌跡」, 日本物理学会誌, **51** (11).
 36) Kawaguti, M. : *J. Phys. Soc. Jpn.* **8** (1953), 747.
 37) Van Dyke, M. : *Perturbation methods in Fluid Mechanics* (Acad.Pr.,1964); Batchelor, G.K. : *An Introduction to Fluid Mechanics* (Cambr. Univ. P., 1967).
 38) 空間曲線 $\mathbf{x}(s, t)$ が細い渦を表わすとする (t は時間、 s は曲線に沿ってのパラメータ)。局所誘導方程式とは、渦線の各点 s が陪法線 \mathbf{b} の方向に、曲率 $\kappa(s)$ に比例する速度で運動することを表わす。その方程式は $\partial_t \mathbf{x} = \kappa \mathbf{b}$, あるいは $\partial_t \mathbf{x} = \mathbf{x}' \times \mathbf{x}''$ とも書かれる ($'$ は s 微分)。
 39) Kambe, T. and Takao, T. : *J. Phys. Soc. Jpn.* **31** (1971) 591.
 40) Hasimoto, H. : *J. Fluid Mech.* **51** (1972) 477.
 41) Kambe, T. and Murakami, T. : *Mechanics of Sound Generation in flows* (Springer, 1979) 123; Minota, T. and Kambe, T. : *J. Sound and Vib.* **111** (1986) 51.
 42) Kambe, T., Minota, T. and Takaoka, M. : *Phys. Rev. E*, **48** (1993), 1866.
 43) Ohkitani K. and Yamada, M. *Prog. Theor. Phys.* **81** (1989), 329.
 44) 山本稀義: *ながれ* (日本流体力学会誌) **21** (2002) 429; Yamamoto, K. and Hosokawa, I. : *J. Phys. Soc. Jpn.* **57** (1988), 1532.
 45) <http://www.es.jamstec.go.jp/esc/jp/index.html>
 46) M. Yokokawa, K. Itakura, A. Uno, T. Ishihara, and Y. Kaneda: Proc. IEEE/ACM SC2002 Conf., (2002); <http://www.sc-2002.org/paperpdfs/pap.pap273.pdf>
 47) Miura H and Kida S: *J. Phys. Soc. Jpn.* **66** (1997) 1331
 48) 宮本健郎: 日本物理学会誌, **51** (1996) 549.
 49) <http://www.naka.jaeri.go.jp/ITER/>
 50) 渡邊鉄哉: 日本物理学会誌, **57** (2002) 738.
 51) Tsuneta, S., Hara, H., Shimizu, T., Acton, L.W., Strong, K.T., Hudson, H.S. and Ogawara, Y. : *Publ. Astron. Soc. Japan*, **44** (1992) L63; Masuda, S., Kosugi, T., Hara, H., Tsuneta, S. and Ogawara, Y. : *Nature*, **371** (1994), 6 Oct., 495.
 52) Robinson, L.J. : *The 10 most inspiring images of the century*, *Sky and Telescope* (Jan. 2000) 37.

著者紹介: 神部 勉
 専門: 流体物理学, 数理物理学, 物理学一般.
 国際理論応用力学連合 (IUTAM) 理事.
 南開大学 (中国) 数学研究所 客員教授.
 趣味: 印度・中国史跡巡り

Development of Originalities: Physics General
Tsutomu Kambe

abstract: **When we look back one hundred years of development of macroscopic physics in Japan with eyes on uniqueness, we witness a lot of studies which were original and keep its international influence even now. In addition to studies of personal level, big research projects played important parts. We review those developments in various fields of physics general.**

