本田財団レポート　No.145
第123回 本田財団懇談会（2012年10月1日）

「自然はゆらぎを好むが無駄を嫌う
～熱エネルギー・エントロピーの魔力～」

東京大学名誉教授
鈴　木　増　雄

公益財団法人 本田財団

講師略歴



鈴木　増雄（すずき　ますお）

東京大学名誉教授

《略　　歴》

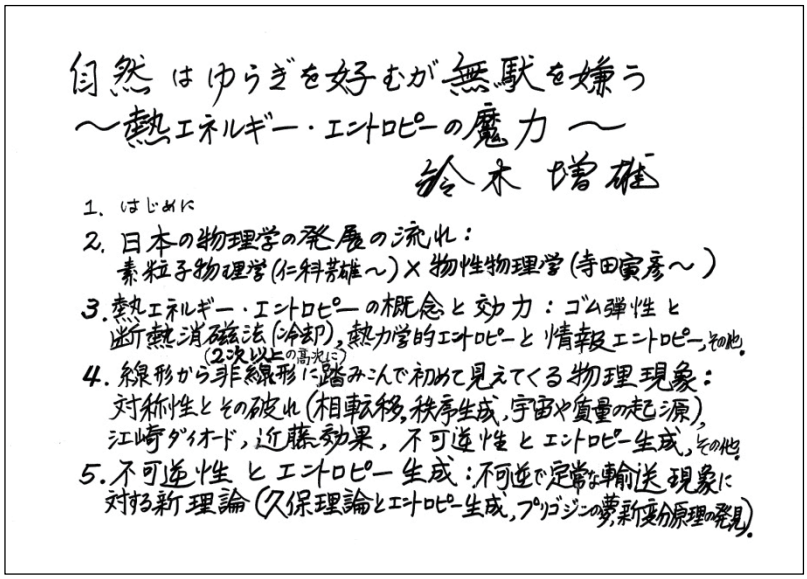
１９３７年	茨城県古河市生まれ
１９６６年	東京大学 数物系大学院博士課程卒業、理学博士
１９６６年	同　理学部助手
１９６８年	同　物性研究所助教授
１９６９年	文部省派遣米国コーネル大学客員研究員（～1970 年）
１９７０年	オランダユトレヒト大学客員教授（～1971 年）
１９７３年	東京大学理学部助教授
１９７７年	カナダアルバータ大学、米国ハーバード大学客員教授
１９８２年	IUPAP 熱力学統計力学専門委員会委員（～1989 年）
１９８３年	東京大学理学部教授
１９８６年	文部省科学官（～1990 年）
１９９０年	東京大学評議員（～1993 年）
１９９１年	本田財団評議員、理事、本田賞選考委員
１９９３年	東京大学理学系研究科教授
１９９６年	仁科記念財団常務理事（～2008，1988 年　評議員）
１９９７年	東京理科大学理学部教授（～2012 年）
１９９７年	東京大学名誉教授
１９９９年	宇宙開発事業団宇宙環境利用研究システム招聘研究員（アドバイザー） 同センター参事
２０００年	日本物理学会会長（～2001 年）
２００４年	久保亮五賞運営委員長（～現在）
２００６年	仁科記念賞選考委員長（～2011 年）
２０１１年	仁科記念財団常務理事（～現在）
２０１２年	理化学研究所客員研究員

《主な受賞歴》

松永賞（1978 年）、仁科記念賞（1986 年）、井上学術賞（1987 年）、東レ科学技術賞（1989 年）、独フンボルト賞（1995 年）、紫綬褒章（1998 年）、英国 IOP フェロー（2001 年）、瑞宝中綬章（2012 年）

《主な著書・編著、他関連刊行物》

１９９４年	『岩波講座　現代の物理学４　統計力学』岩波書店
２００７年	『活力を与える「物理」　限界を探ることで見えてくる新しい世界』 オーム社
２０１２年	鈴木増雄：手順の分離と統合 —— 指数積分解、秩序生成およびエントロピー生成『数理物理　私の研究』 荒木不二洋、江口徹、大矢雅則編、丸善出版　　ほか多数

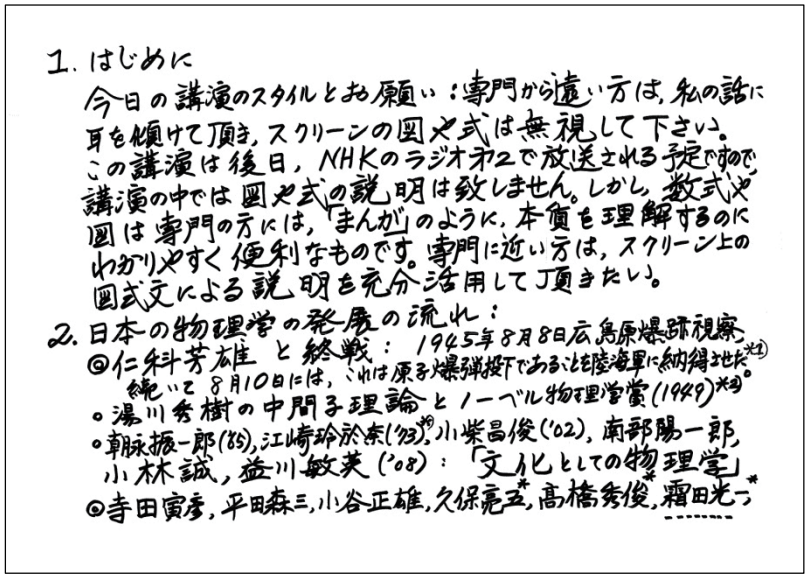


みなさま、こんばんは。私が本田財団懇談会の講師をやらせていただくのは、本日で 2 回目となります。私の専門は物理でして、今日はいろいろな分野の方がいらっしゃいますが、それぞれの立場から理解して楽しんでいただければと思います。特に専門から遠い方には、あまり数式にこだわらず、何か少しでも教訓的なことを受け取っていただければ幸いです。今日の内容としては、まず日本の物理学の発展の流れから始まり、最近私が興奮しながら研究していることまでお話したいと思っています。

物理学の流れは、大きく素粒子物理学と物性物理学という分け方が昔から行われています。それぞれ仁科芳雄、寺田寅彦から始めたいと思っていますが、両分野の交流は、日本の物理学の発展において、非常に重要です。素粒子、特に自発的対称性の破れでノーベル賞を受賞した南部陽一郎先生も聞くところによると、東大物理教室で物性物理の大家であり私の恩師である久保亮五先生と同じ場所で研究をされていて、物性のことにも強く関心を持っておられたそうです。超伝導や、ラルス・オンサーガが解いた相転移の厳密解など、専門以外の問題にも興味を持っておられたことが、自身のその後の研究にも役立ったと伺っています。

今日は広い分野の方がおいでになっていますが、そういう意味で、この機会に私の専門の話も何かの参考にしていただければと思い、お話をさせていただきます。

■ 日本の物理学発展の流れ



図－1

〈図－1〉　では、仁科芳雄と寺田寅彦から始めたいと思いますが、仁科芳雄の仕事は実験から理論まで実に幅広く、そのお話だけで 1 時間は過ぎてしまうかもしれません。特に、中間子の研究に対しては多大な寄与があり、日本の伝統をつくってこられた先生です。

そこで今日は、仁科芳雄という物理学者が日本の戦後の発展にいかに寄与したかということを、1 つだけ申し上げておきたいと思います。それは皆さんご存じのように、8 月 6 日に広島に原爆が投下されましたが、仁科先生は 2 日後には自分の身の危険も顧みず視察に行かれ、続けて長崎にも行かれ、10 日には軍の幹部に、この爆弾は当時新聞で報道されていたような単なる大型爆弾ではなく、物理学の根本原理を揺るがすような法則を使った新しい原子爆弾であるということを、納得させたという事実です。

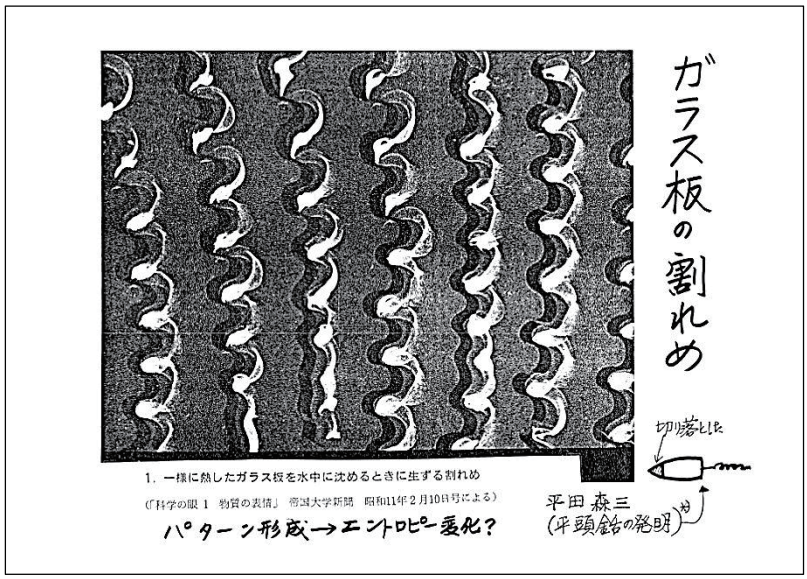
これが大きな要因の一つとなって、8 月 15 日という非常に早い時期に終戦を迎えることができたのかとも思います[※1]。この戦争が原爆投下後も長く続いていたらどうなっただろうかと、惨たんたる気持ちになります。仁科芳雄という当時最先端を行っていた物理学者が、日本の軍部、内閣、最終的には天皇陛下のご決断にまで大きな影響を与えたのであろうと、私は信じています。

その後日本に明るいニュースを与えたのは、湯川秀樹の中間子理論によるノーベル物理学賞の受賞です。当時少年だった方の中には、このニュースで物理学の研究に進もうと思われた方も多いかと思います。私もその 1 人です。以降、朝永振一郎、江崎玲於奈、小柴昌俊、南部陽一郎、益川敏英、今日ご出席の小林誠先生と、日本人がノーベル物理学賞を受賞し、少年たちだけではなく、現役の先生方にも大きな励みになっているのではないかと思います。こういう研究はすぐに世の中の役に立つというものではなく、非常に基礎的な物理学です。私が日本物理学会会長を

※1 江沢洋他編『仁科芳雄往復書簡集 補巻』（みすず書房、2011 年）
鈴木増雄「物理探求の楽しさ（解説）」（ロゲルギスト『新 物理の散歩道 第５集』、筑摩書房、2010 年）

していたときにも書きましたが[※2]、これは文化としての物理学であることを強調しておきたいと思います。

また寺田寅彦は、いろいろな意味で日本のその後の物理学の発展に大きく寄与しています。彼は随筆家として知られているかと思いますが、実は物理学の中でもたいへん大きな発見をしています。当時できたばかりの量子力学を物性、特に結晶に応用してその構造を解明する公式を、後にノーベル賞を受賞したブラッグ親子とは別に発見しましたが、寺田寅彦が論文を投稿する前に、すでに彼らの論文が出てしまったようです。惜しいことでした。



図－2

〈図－２〉　その流れをくむ平田森三、小谷正雄、久保亮五、髙橋秀俊、霜田光一という流れがありますが、平田先生は特に寺田寅彦流の自然界の縞模様に関心を持ち、さまざまな現象の写真を収録しておられます。その中でもとりわけ美しいのが、ガラス板の割れ目です。この研究は、一様に熱したガラス板を水中に沈めるときに割れ目ができるというものです。単純に考えるとひどく不規則な割れ目ができると思われるかもしれませんが、条件によっては実に周期的な美しい構造が出てきます。

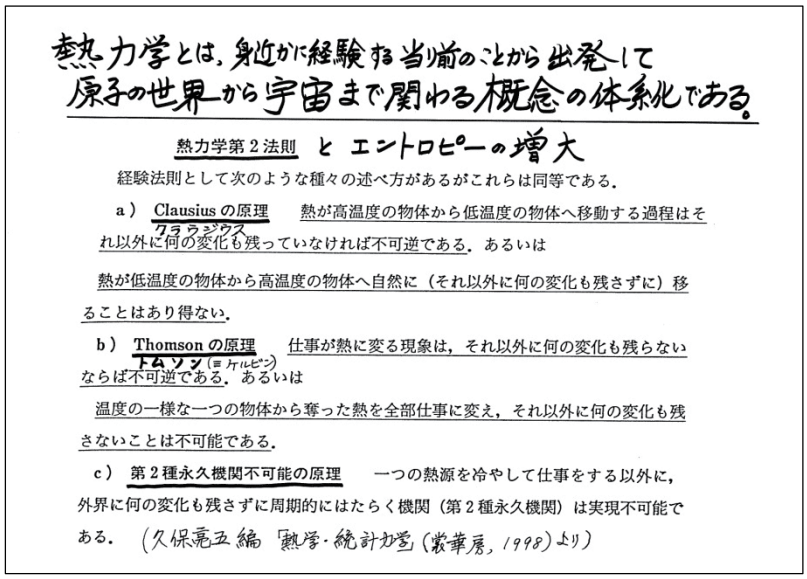
こういう現象はかなり多く存在し、これらを理論的に理解するにはどうしたらいいかということが、今日の話のモチベーションの 1 つです。すなわち、こういう構造ができるときに、熱がどのようにかかわっているのか。それが長年の大きな研究課題になっています。後でエントロピーの説明をしますが、これもこの現象にかかわっています。

余談ですが、平田先生が捕鯨船に乗って観察をしている中で思いついたアイデアを紹介しましょう。日本人は器用ですからクジラに銛がよく当たりますが、あまりに先が尖っていたために滑ってしまい、当時クジラを獲る確率はとても低かったそうです。そこで独創的な平田先生が、先をカットして平らにしたところ、かなりの命中率でクジラが獲れるようになったそうです。これ

※2 鈴木増雄「文化としての物理学 ――その継承、発展、および普及」（大学用図書目録 2003、培風館（2003））pp. 121

を「平頭銛（へいとうもり）」と呼んでいます。実は私が東大の物理学科に入ったときには、担任制度がありまして、その平田先生が担任でした。お酒の席ではいつも銛の自慢話を聞かされた思い出があります。

■ 熱エネルギー・エントロピーの概念と効力


熱力学とは，身近に経験する当り前のことから出発して
原子の世界から宇宙まで関わる概念の体系化である。

熱力学第２法則 と エントロピーの増大

経験法則として次のような種々の述べ方があるがこれらは同等である．

a） Clausius（クラウジウス）の原理　熱が高温度の物体から低温度の物体へ移動する過程はそれ以外に何の変化も残っていなければ不可逆である．あるいは

熱が低温度の物体から高温度の物体へ自然に（それ以外に何の変化も残さずに）移ることはあり得ない．

b） Thomson（トムソン（＝ケルビン））の原理　仕事が熱に変る現象は，それ以外に何の変化も残らないならば不可逆である．あるいは

温度の一様な一つの物体から奪った熱を全部仕事に変え，それ以外に何の変化も残さないことは不可能である．

c） 第２種永久機関不可能の原理　一つの熱源を冷やして仕事をする以外に，外界に何の変化も残さずに周期的にはたらく機関（第２種永久機関）は実現不可能である．（久保亮五 編「熱学・統計力学」（裳華房，1998）より）

図－3

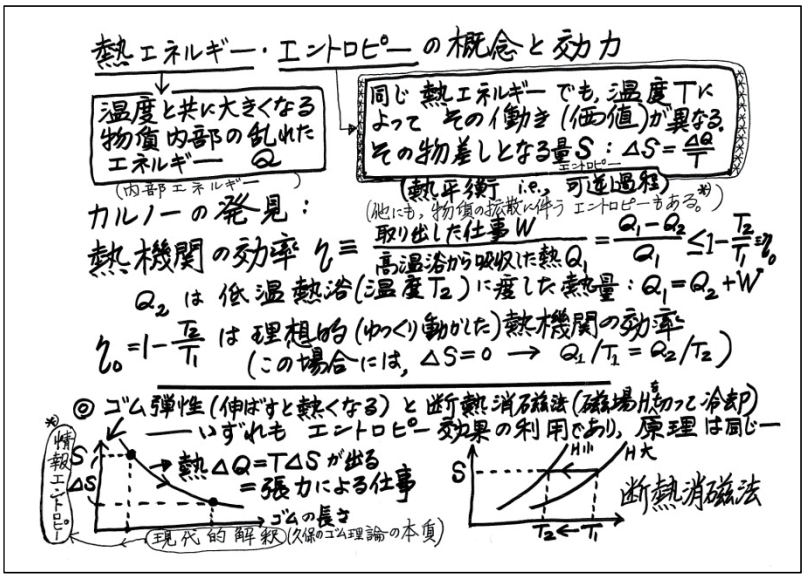
〈図－３〉　では、今日の話のポイントである熱力学の第 2 法則を説明していきます。熱力学は熱に関する学問ですが、以下に詳しく述べるように、物理学としてはユニークな分野です。というのは、あまりにも身近に経験する当たり前のことから出発して、当たり前ではない原子の世界から、宇宙にまでかかわるような概念を体系化したものだからです。

出発点は、熱は高温から低温に移るが、逆のことは自然には起こり得ないという「不可逆性の本質」です。どなたでも、これを聞いたらそんなことは当たり前だとおっしゃると思います。これは言い換えると、仕事は熱に変わるけれども熱を全て仕事に変えることはできない、と言えます。もしこれができるなら、海から熱を取り上げていくらでも仕事に変えられるわけですが、そんなことは不可能です。これは、第２種永久機関が実現できないということにも当たります。

では、熱エネルギーとは何なのか。この熱の概念の歴史は非常に古いもので、最初は物質の一種である、「熱素」という概念でした。そういう「熱い物質」という概念を使っていた時期もあります。物質であるか、エネルギーであるかというのは、その当時の大問題でした（その後のアインシュタインの相対性理論によると、質量mの物質は「$E = mc^2$」のエネルギーに等価であるということになってきました）。現在の物理学において、熱というのは、気体であれば分子の運動エネルギーの大きさで表されます。分子の運動エネルギーが大きいと熱エネルギーが大きく、それを記述する性質として「温度」という概念が使われています。

ただ、熱力学がほかの物理学と大きく違うのは、こうした身近なものから出発するというだけではありません。電磁気学や量子力学など他の物理学は、時間に関して対称的な法則にもとづい

ており、価値観とはあまり関係ない学問ですが、熱力学はある意味で価値観と強いかかわりをもっています。それは、熱エネルギーというのはどのような温度にあるかによってその利用価値が違うからです。すなわち、高い温度の熱は低い温度の熱よりも利用価値が大きい。その変化の度合い（価値の下がり方）を表現するのが、今日の主題である「エントロピー」という概念です。



図－4

〈図－４〉　熱エネルギーが高い温度で変化した場合、その価値の変化が小さいので、エントロピーの変化（ΔS）は少ないと定義します。低い温度で熱の変化があった場合には、その価値の変化は大きいので、エントロピー変化は大きいと定義します。ですから、高温の熱エネルギー（小さいエントロピーの状態）から、低温の熱エネルギー（大きなエントロピーの状態）に変わるというのが不可逆性です。すなわち、高い温度の価値のある熱エネルギーから低い温度の熱エネルギーに変わると、熱エネルギーの価値が下がり、エントロピーが増大します。

最近の原子力の問題でも、原子力により超高温の熱エネルギーをつくり、そのエネルギーでタービンを回して電力に変えています。しかし、廃棄した熱エネルギーが問題です。それを低い温度で海に流すためには、どうしても大量の水が必要となるため、日本のような地震国でも海岸に造らざるを得ないのです。そうして高い温度でエントロピーの小さい状態から、低い温度でエントロピーが大きい状態に移っていきます。

これに関連した最初の発見は、18 世紀の産業革命で蒸気機関などの熱機関が使われるようになった頃に行われました。それは、熱機関の効率はどのように上げられるかということを初めて学問的に考えた、ニコラ・レオノール・カルノーによるものです。彼は熱機関の効率が高温と低温の熱源の温度によることを発見しました。その背後にはエントロピーの概念があり、高い温度と低い温度の比が熱効率を決めるというのが、〈図－4〉に示した式で表されます。

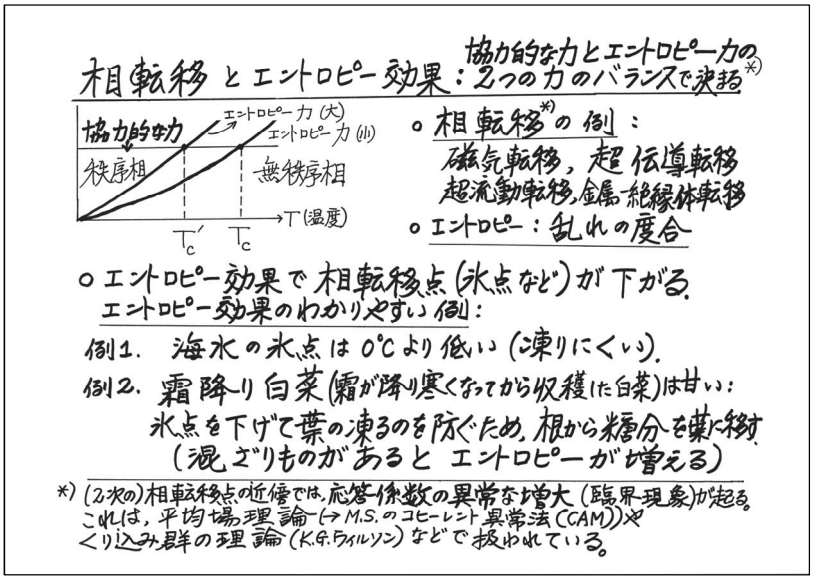
少し具体的な応用例をお話しますと、皆さんの下着などにゴムひもが使われていますが、ゴムひもをちょっと引っ張って唇に当てると、熱くなっていることにお気付きでしょうか。ゴムは引っ張ると熱くなる。なぜでしょうか。これをまともに学問としてとらえたのが、私の恩師の久保亮五博士です。「ゴム弾性」という論文を書いて博士号を取得されました。

ゴムは分子からできていますが、ゴムが縮んでいるときには、その分子は横に絡み合っている非常に複雑な状態です。エントロピーとは、微視的に見るとボルツマンの原理により複雑な度合いを表すような概念なので、ゴムが縮んでいるときはエントロピーが大きいと言えます。ゴムを伸ばすと、分子が一直線に並んだような状態になりエントロピーがほとんどゼロになるので、その差に比例して熱エネルギーが発生することになります。

私はこの理論を読んだときに、とても不思議な気がしました。それはこの理論では、分子が横になっていても縦になっていても、もともとの分子状態のエネルギーは同じであるというモデルで熱の発生を説明しているからです。統計力学におけるルードヴィッヒ・ボルツマンのエントロピーSは、複雑さの度合いを表す状態の数 W の対数（$S = k_{\mathrm{B}} \log W$）で与えられる。それはエネルギー$E$ によって変化する($W = W(E)$)からです。ですから、エントロピーS というのはエネルギーE の関数として与えられる。温度 T は熱力学の関係式$\partial S(E)/\partial E = {}^{1}/_{T}$で与えられる。上に述べたゴム弾性の理論では、一見そことつながっていかないように思えます。実際、久保先生の出されたゴム弾性の本[※3]の序文を読むと、当時の東大の先輩の先生方からはだいぶ反論を受けたようで、すぐには認められなかったようです。今は情報化時代となり、クロード・シャノンによって出された情報エントロピーという概念はよく知られています。情報エントロピーというのは一見エネルギーと関係なく、AA、AB などの並び方により、情報が多いか少ないかということを表す量です。いま振り返ってみると、こうした情報のエントロピーが、力がかかわってくる条件の下では熱力学エントロピーに転換できるということを最初に言った論文が、このゴム弾性の論文だったと思います。当時、情報エントロピーという言葉はあまり使われていませんから、このゴム弾性の理論を読んでもその２つの概念の関係を議論していると理解されている方はほとんどおられなかったかと思います。しかし条件によっては、情報エントロピーは熱力学エントロピーに転換し得るものであります。ゴムの場合には、その理由はゴムを引っ張るときの張力による仕事が、熱エネルギーに変わるからです。このように、仕事が熱に変わるというところが私の話の１つのキーポイントです。

※3 久保亮五『ゴム弾性（初版復刻版）』（裳華房、1996 年）
鈴木増雄「久保亮五先生に学び創る感動」（「数理科学」2012 年 6 月号、No.588、サイエンス社）pp. 70

■ 相転移とエントロピー効果



図－5

〈図－５〉　実際のいろいろな物質は、その構成粒子の間に相互作用が働きます。例えば磁性体では、それを構成する小磁石（専門的には「スピン」）が同じ向きを向いたほうがエネルギーは低くなります。その向きやすくするような力を、「温度によらない協力的な力」と呼びます。それに対し、温度が上がっていくほど物質系の乱れ方が増えますから、その系の乱れの度合いを表すエントロピーは温度が上がるとともに大きくなります。これを「エントロピー力」といいます[※4]。

さて、エントロピーが小さい物質と大きい物質を比較すると、協力的な力とのバランスの仕方が上のグラフのように変わり、エントロピーが大きい物質ほど相転移が起こりにくくなります。すなわち、その起こる温度を「相転移点」と言いますが、乱れ方の大きい、つまりエントロピーの大きい物質ほどその相転移点が低くなります。こういう現象は自然界ではよく起こります。

この説明は一般的ですが、具体的な相互作用によって、磁気相転移、超伝導転移、超流動転移、あるいは金属と絶縁体転移とか、いろいろな相転移が起こります。これら相転移に関するいろいろな問題が学会、研究会等で盛んに議論されています。それらも一口に言えば、先ほどのように 2 つの力（協力的な力とエントロピー力）のバランスで起こるものであると説明できるかと思います。

このエントロピー効果によって氷点が下がるという分かりやすい例を、いくつかお話したいと思います。皆さんご存じのとおり、海水の氷点は 0℃より低く凍りにくい。これは水に塩が混ざり、エントロピーの効果で凍りにくくなっているからです。

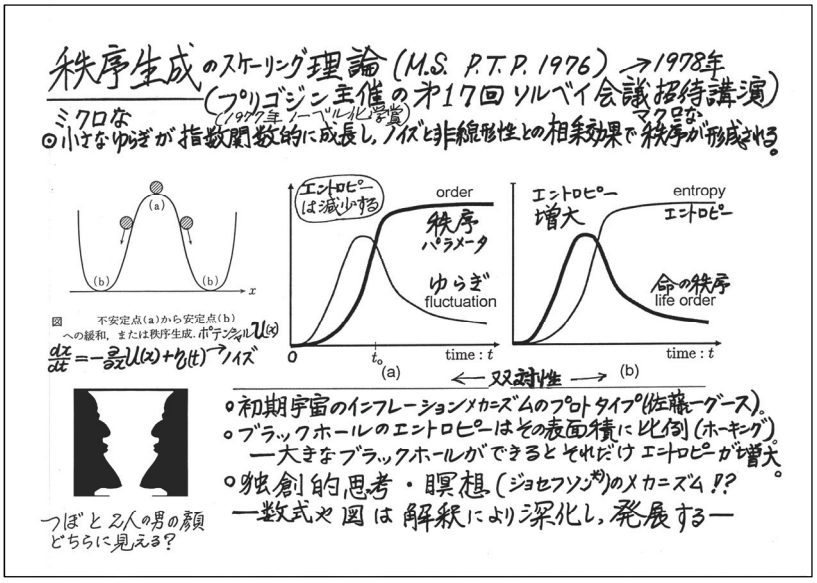
また、霜が降ってから収穫した白菜はひときわ甘い。これは主婦のみなさんにはよく知られていることです。私の専門的立場から解釈すると、白菜が凍ると体積が増えて葉が壊れてしまうので、根から糖分を吸い上げてエントロピー効果を利用し、凍りにくくしているのです。これを進化の過程で学んだ白菜だけが生き延び、今に至っているのではないかと思います。

※4 鈴木増雄『統計力学』（岩波書店、2000 年）

次に、時間的に相転移がどのように起こっていくか。言い換えれば、世の中の秩序というものはどのようにできていくかということについてお話します。私は若いころからこのテーマに強い関心を持って、精力的に研究してきました。私の恩師の久保先生の研究理念を受け継いで申しますと、統計物理学でもより簡単なモデルで、より一般的な結論を導けるような理論が美しいと思われます。

私も、アインシュタインのブラウン運動の理論で扱われた、ランジュバン方程式と呼ばれる簡単な 1 次の線形の微分方程式を非線形に拡張して、秩序生成のメカニズムを研究しました。しかし、アインシュタインの場合は、平衡状態に戻る過程を議論するので 1 次の係数がマイナスで安定していますが、不安定な状態で秩序ができるときにはそこがプラスになります。その点で、アインシュタインの話とは取り扱いが全く違ってきます。ご存じのように、アインシュタインは 1905 年に 3 つの大論文を書きました。引用が一番多いのは、上に述べたブラウン運動の理論だそうです。

現実の物質には温度や圧力など、いろいろな自由度があります。その温度や圧力も場所によって連続的に変わります。つまり無限の変数があるのです。私は、その中でも一番簡単なモデルである 1 変数の微分方程式を用いて、秩序がどのようにできるかという研究に 1970 年代に取り組みました。最初は四苦八苦しましたが、何とか 1976 年には、「秩序生成のスケーリング理論」を発表することができました。これは相転移のスケーリングとは違い、時間に関する指数関数的なスケーリングの理論です[※5]。



図－6

〈図－6〉　この理論は、最初はほぼゼロのミクロなゆらぎから、指数関数的に秩序が成長してある程度（マクロに）成長すると非線形の効果で秩序は安定化する、という理論です。これは言

※5 M. Suzuki, Prog. Theor. Phys. 56 (1976) 77, 477; ibid 57 (1977) 380.
M. Suzuki, Adv. Chem. Phys. 46 (1981) 195.
鈴木増雄「手順の分離と統合 ――指数積分解、秩序生成、およびエントロピー生成」（荒木不二洋、江口徹、大矢雅則編『数理物理 私の研究』、丸善出版、2012 年）

われてみるともっともだと思われるでしょうが、私はこの理論を発表してから数年間、国際会議に毎年何回も招待され講演する機会に恵まれました。この理論では小さなゆらぎが指数関数的に成長し、ノイズと非線形性との相乗効果で秩序が形成されます。この理論はいろいろな現象に応用されました。

この理論を直接使ったというわけではないでしょうが、後にいろいろな研究をながめてみると、この秩序生成のスケーリング理論がプロトタイプになっているように思われます。例えば、アインシュタイン方程式の解が指数関数的に成長し、宇宙ができていく初期宇宙のインフレーション（膨張）のメカニズムなど、いろいろなところに関連があります。

エントロピーの宇宙への応用の１つを上げると、ブラックホールのエントロピーは表面積に比例するという理論があります（これはスティーヴン・ホーキングによって出されています）。つまり、大きなブラックホールができるほどエントロピーが宇宙でどんどん増えていく。こうした話も先ほど申しましたように、原子の世界から宇宙の世界まで、エントロピーという概念が大きな役割を果たしているということです。

またこれは物理から離れてしまいますが、独創的な思考やメディテーションという世界も、実はこのプロトタイプ的なモデルでいろいろと説明できます。実はこのスケーリング理論を発表してから、超伝導のジョセフソン効果で有名なブライアン・ジョセフソン氏と 2 時間ほどこのモデルについてお話する機会がありました。すると彼のモデルから見ると、実はメディテーションも前述の秩序生成のメカニズムと同等なものだと言っていました。

ちなみに、ジョセフソンは学生のときに P.W.アンダーソンの講義を聞いてすぐに思いついて書いた論文で、ノーベル賞をもらいました。その論文を私は大学院生のときに図書館で見つけて読んで、ショックを受けてその晩は眠れなかったことを記憶しています。それは単純明快かつ画期的な論文で、しかも無名の新人の論文でした。

ついでに、その論文の要点を簡単に説明してみましょう。超伝導とはその中の電子が非常にマクロに可干渉性（コヒーレント）になっている状態であり、それを特徴付けるのは位相というものですが、その位相の違う 2 つの超伝導体を薄い絶縁体を通して接触させると、その位相差によって、電圧をかけなくても絶縁体を通して電流が流れます。これがトンネル効果の一種である「ジョセフソン効果」です。直流電圧をかけると交流電流が流れます。この論文がすごいのは、この結果が 2、3 行の式で出てくることです。つまり計算の難しさではなく、アイデアがポイントなのです。

彼は 11 年後、江崎玲於奈氏と同じ年に 33 歳でノーベル物理学賞をもらっています。どちらもトンネル効果ということで共通性があるので、同時に受賞しました。

■ ソルベイ会議での招待講演



図－7

〈図－7〉　私の理論のその後の発展についてもう一つ付け加えますと、1978 年に開かれたソルベイ会議で招待講演を行いました。これは 1977 年に、プリゴジン博士がノーベル化学賞を受賞した記念として、彼の専門である非平衡統計物理学をテーマにベルギーのブラッセルで開催されたものです。そもそもソルベイ会議とは、ベルギーの大財閥であるソルベイ一族のサポートを受けて 1911 年から開かれていますが、その初回の参加者は約半分がノーベル賞をもらった人、もう半分のほとんどが後にノーベル賞をもらった人というような豪華な会から始まったものです。

そのソルベイ会議で、私の行った 1 時間の招待講演に対し、2 時間もの討論を行うという経験を初めてしましたが、それがその後の私の研究の大きな力になったと考えています。

一族のジャック・ソルベイ氏はまた、1989 年に開催された日本文化をヨーロッパに伝えるイベント「ユーロパリア 89 ジャパン」において本田宗一郎氏と並んで組織委員長を務め、彼がスポンサーとなったシンポジウムも開かれました。

■ 小休止―離岸流について



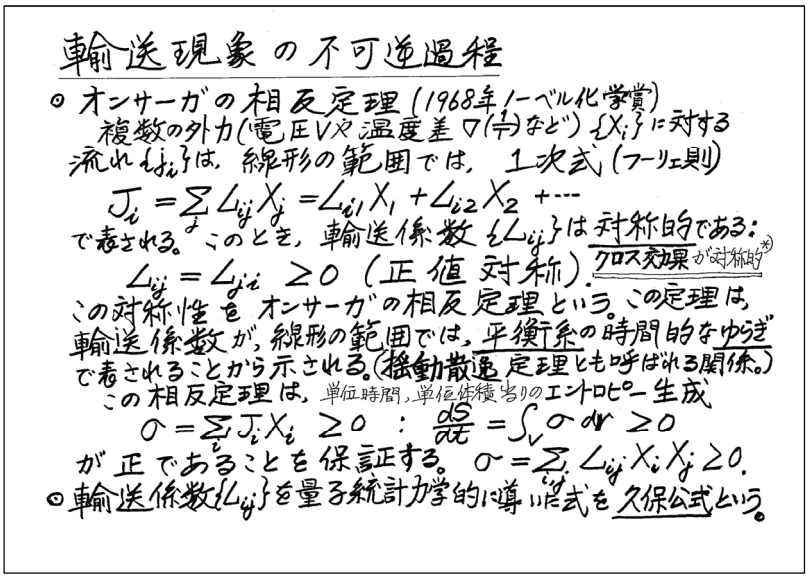
図－8

〈図－８〉　さらに難しい話になる前に、息抜きとして離岸流の話をしたいと思います。皆さんは離岸流という言葉をご存じでしょうか。海でおぼれて死ぬ事故の大部分はこの離岸流が原因です。今日帰ってこの話をご家族に伝えるだけで、命が助かることが将来あるかもしれません。私は数十年前に命がけの実体験をしました。ブラジルで泳いでいるときに、あっという間に数百メートル沖に流され、岸に戻ろうとしてもとても私の力では戻れないことが流速を計算してすぐに分かりました。流速は秒速 2m 近くあり、私の泳ぐ速度では到底戻れない。

しかしここで死ぬわけにはいかないし、この現象は自然現象であり物理学の基本に従って起こっている現象なのだから、解決法を見つけられずに死んだら私の物理学は本物ではないだろう。そう思い２、３分真剣に考えたところ、もしこの流れが海岸全体に起きているのであれば、海岸の水はすぐなくなってしまうはずだ、どこかに寺田寅彦の言うような自然界の縞模様的な構造ができているに違いない。

こう考え横に数十メートル泳いだところで、波が沖から来ているのに気が付き、ここは逆に流れていると悟って岸に泳ぎ着きました。ホテルに戻ってボーイにこの話をしたら、「あそこの海岸では毎年死ぬんですよね」とさりげなく言われたのが印象に残っています。これもいろいろなところに書きましたので、私のこの話を聞いて命拾いされた方もおられます（この実体験の数年後に、図のような同じ説明をしている朝日新聞の記事を見つけました）。

■ 輸送現象の不可逆過程



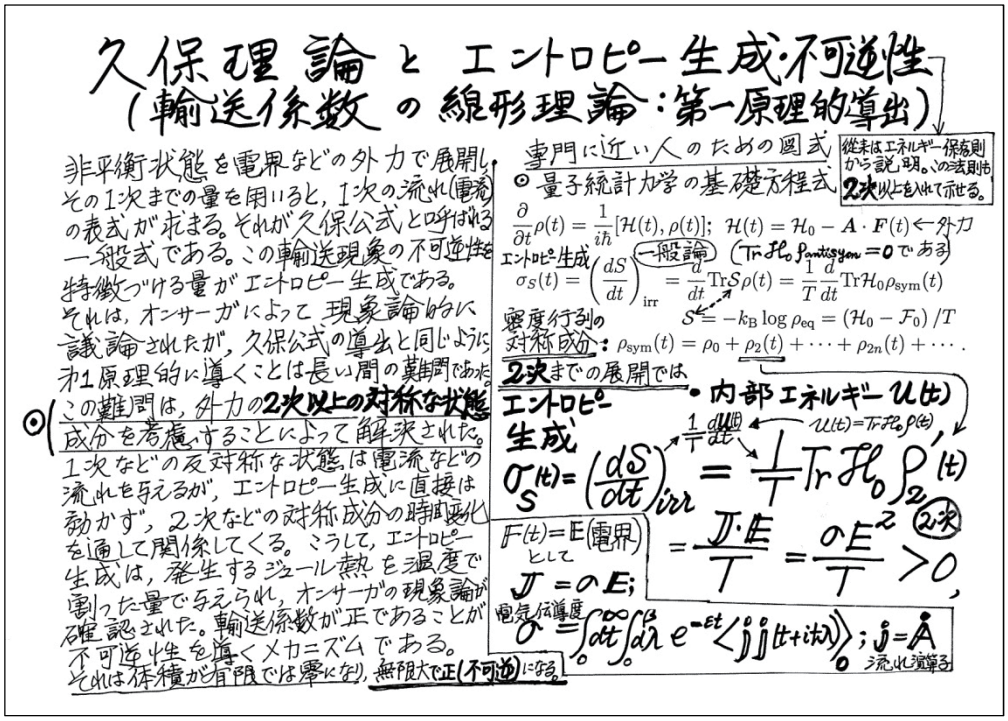
図－9

〈図－9〉　それでは、もう少し物理学の本論の話をします。それは輸送現象の不可逆過程に関する理論です。最初の金字塔はオンサーガの相反定理と言われるもので、電圧や温度差という外からの力を複数かけたときに、そのクロス効果（交叉効果）が係数まで含めて線形の範囲では等しい。もっと平たく言うと、電圧をかけると熱流も流れます。電圧をかけたクロス効果として熱流が流れることと、両端に温度差を与えて電流が流れる効果は同じで、係数まで一致するというのが相反定理です。これで彼は1968年にノーベル化学賞を受賞しています。

この定理によって、瞬間のエントロピー生成が最小になるという条件のもとに、定常状態が実現することが示せます。ですから、相反定理の成立と瞬間のエントロピー生成最小の原理（熱エネルギーの消費を最小にすること）とは、線形応答の範囲では1対1に対応します。ここが専門的な話に入るキーポイントです。オンサーガは瞬間のエントロピー生成を扱うことにより、線形近似では成功しました。

それから何年かたち、日本の統計物理学をリードしてきた久保先生が、こういう現象を直感的（現象論的）に扱うのではなく量子力学的にきちんと導こうとされて、「久保公式」と呼ばれている、輸送係数を微視的なゆらぎで与えるごく一般的な理論を提唱されました。これを「線形応答理論」と呼んでいます。

■ 久保理論とエントロピー生成・不可逆性



図－10

〈図－10〉　金属などに電圧をかけると電流が流れます。その大きさが電気伝導度、あるいはその逆数の抵抗であることは、皆さんご存じのとおりだと思います。抵抗の大きいものとしては、例えば電球の中に使われるタングステンなどがあげられます。抵抗の小さいものとしては金、銀、銅などがあります。金は高価なので、金より抵抗の大きい銅線で電気を送電します。そのように、物質によっていかに電気の流れ方が異なるかを調べる理論的方法が、量子力学を使って表現されます。これが久保理論です。

それは一口に言いますと、平衡状態の時間的なゆらぎで決まるのです。平衡系というのは時間の向きがありませんので、ゆらぎは時間を反転しても同じになります。そのためにオンサーガの相反定理が出てきます。これは本当に素晴らしい理論です。

かたや久保先生より少し先輩の、先ほどご紹介したプリゴジン博士は、非線形非平衡の熱力学の樹立に向けて精力的に研究を進めていました。私は 1978 年のソルベイ会議に招待されて以来、プリゴジン博士の研究所をしばしば訪問するようになりました。プリゴジンに会うと、「線形応答の不可逆過程でエントロピー生成が概念的に極めて重要だけれども、どうなっているかね」という質問をよく受け、彼が納得するようにきちんとはなかなか答えられませんでした。その後何十年もかかり、ここ２年程前からそれに答えられるようになったというのが、次の話のキーポイントです。

非平衡状態を電界などの外力で展開し 1 次までの近似を用いると、電流のような流れが一般的に求められます。この輸送現象は熱が出るので不可逆過程です。プリゴジンは、「不可逆過程を特徴づけるのはエントロピーが増えることである。そのエントロピーが増えるということを、ミクロの量子力学を使って説明しなさい」と言われたわけですが、この問題はいろいろな方が議論しています。

私の理論が出て以降振り返ってみると、エネルギー保存則を使ったもの（それにもとづくオンサーガのような現象論的議論）以外は、どこかで論理的に無理（矛盾）があるということがわかりました。要点は何かというと、非平衡状態を記述する状態を平衡から外力に関して 1 次、2 次、3 次と展開していきます。1 次までで久保理論が出てきますが、2 次以上の対称的な状態を取り込まないと、エントロピー生成が「正しくは」出てこない。このことは思いがけない研究から気がつきました。

もちろん、2 次の状態は 1 次の状態と双対的な関係にありますから、久保先生の公式を使って最終的には計算ができます。エントロピーの生成は、状態の 2 次以上の高次の対称な項から出てきます。それが最終的には、ジュール熱を温度で割ったものという熱力学的な法則から出てくるものと一致するので、この理論が本質を突いているものと信じています。このように、定常状態を扱っているにもかかわらずエントロピーの時間変化（増加率）が求められるのは、定常にいたる途中の過程を考察し、状態の１次の項と２次の項の絡み合いに着目したからです。

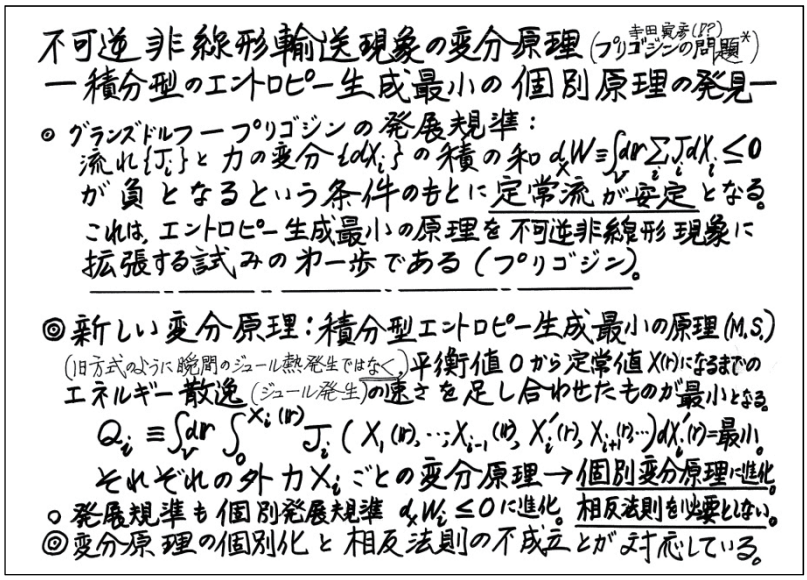
非線形のエントロピー生成まで進むと 2 次から 4 次に行き、非線形の（電流のような）流れは、まず 3 次で決まります。ですから 3 次と 4 次が対になり、流れは 3 次、エントロピー生成（不可逆性）は 4 次の対称的な状態から、というふうに順次高次項で決まります。こういう構造（流れは奇数次の項、エントロピー生成は偶数次の項で与えられるスキーム）になっていることが、無限次まで示せます。これは非線形の応答理論にもなっています（ちなみに線形応答理論の久保公式は、平衡系における流れの時間相関関数で書けるという、きわめてきれいな公式です）。これで、輸送現象の不可逆性を特徴づけるエントロピー生成、すなわち熱の発生の数理的構造（状態の高次対称成分の寄与であること）が解明されました。次に、この結果の物理的解釈に進みましょう。

それでは、時間反転対称な量子力学の基礎方程式から、時間反転対称性の破れる現象、すなわち不可逆性が輸送現象でなぜ出てくるかを、〈図－10〉の数理的解明にもとづいて説明してみましょう。では、どこで時間反転対称性の破れが現れたか。この問いに答えるには〈図－10〉のエントロピー生成の表式（$\sigma_S(t) = \sigma E^2/T$）からわかるように、輸送係数σが正であることを論証しなければなりません。実はこれを有限系で真面目に代数的に計算すると、恒等的にゼロになってしまいます。そこで、扱う系の体積を無限大にしてから時間積分すると、輸送係数σがゼロではなく正の値になる。私の理論でも結果としては、例えば電気伝導で説明すると、電気伝導度の値を使ってジュール熱を求め、それを温度で割ったものがエントロピー生成になっているので、電気伝導度がゼロではなく正の値になることが、電気伝導という輸送現象が不可逆過程であることのキーポイントです。

ですから、こういう統計力学の考え方では、輸送現象の不可逆性は自由度が無限大になることから説明できます。有限系を力学的に解くと周期的になります。その周期、すなわちポアンカレ・サイクルが無限に長くなり元へ戻るのに無限に時間がかかるということと対応して、不可逆性が出てくる。これを私の理論ではエントロピー生成という概念を使って輸送現象の不可逆性を導いたので、プリゴジンの批判にも耐えられるところまで来たのではないかと考えています。

その他、緩和現象や拡散における不可逆性についても最近多くの研究が行われつつあり、これらはカオスとも関連して興味深い問題でありますが、ここでは省略します。

■ 不可逆非線形輸送現象の変分原理―新変分原理の発見[※6]



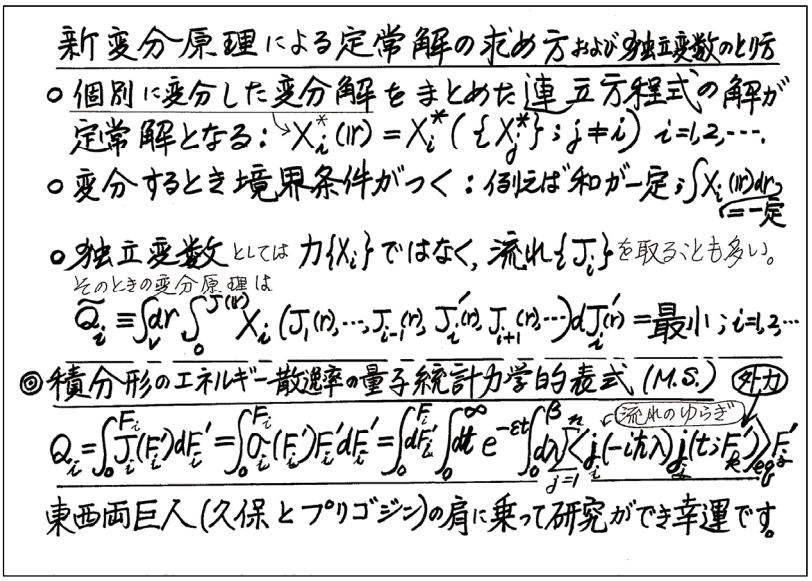
図－11

〈図－11〉　線形の範囲を超えて、非線形輸送現象が非常に重要であるという話をはじめにしました。確かに非線形現象を数理的に表現して、それを本格的に計算すればよいという形には持っていけますが、直感的に理解しようとすると、やはりオンサーガ、プリゴジンの流れをくむ変分原理で理解したほうが物理がよく分かるのではないかという信念で、非線形の変分原理にチャレンジしてみました。

数十年前からプリゴジンが述べていますように、非線形の不可逆過程の変分原理をつくるのは至難の業です。グランズドルフとプリゴジンの教科書の中で、定常状態の流れが安定化するための条件（「発展規準」と言います）の発見は、一般の変分原理の構築への第一歩であると強調しています。この発展規準は化学反応やいろいろな分野で、安定性の条件として使われています。後で述べますように、これは私の新変分原理から、もっと強い形で導かれます。

※6 M. Suzuki, *Irreversibility and entropy production in transport phenomena. I*, *II*, *III* and *IV*, Physica A390(2011) 1904, A391(2012) 1074, A392(2013) 314 and submitted.

■ 個別変分原理とその定常解の決定法



図－12

〈図－12〉　相転移などの問題を解くときに、非線形の効果まで入れて状態方程式を出すのはきわめて難しいのです。線形の範囲で方程式を立て、その不安定点（相転移点）を探すのは易しい。これによって、非平衡や非線形性に一歩踏み出しますが、それでもこれは非線形の全体を見る方法ではないのです。

ここから式なしに説明するのは至難の業ですが、まず答えを先に言いますと、輸送現象に対する新しい変分原理が見つかりました。その変分原理は瞬間のエネルギー消費を問題にするのではなく、平衡から非平衡状態になる途中の過程を全部考慮した取り扱いであります。皆さんの中には、「それは当たり前だ。量子力学を見てごらんなさい。時間積分でちゃんとファインマンの経路積分が書かれているではないか。」とおっしゃる方がおられるかもしれません。しかし、量子力学の発展方程式を議論することは最初から時間発展の問題ですから、時間積分が入るのは当たり前なのです。

ところが統計物理学の不可逆過程の最初のターゲットは、定常に流れているにもかかわらず、エントロピーが時間とともに増え続けることを理解しようというものです。定常とは時間によらないので、どこを見てもよいはずです。その定常のある瞬間を取って、その瞬間の単位時間当たりのエネルギーの消費量、例えば人間社会が定常的になっているのであれば、今年のエネルギー消費量を問題にしようとか、そういうことになります。しかし流れが非線形的に増えていき、流れによって輸送係数が変わる場合には、最初から現象の発展の仕方を問題にしなければ物理の本質は見えてきません。

私の研究について、それはオンサーガの理論とはどういう関係にあるか、プリゴジンの発展規準とはどういう関係にあるのかなど、今までの歴史的研究成果との矛盾点がないかどうかといろいろ疑問が出てくるでしょう。けれども、私の研究結果はそれをすべて説明できるということも、前もって申し上げておきます。しかもそれは、非線形でも成り立つ変分原理です。

そればかりではなく、実は非線形になると相反定理が破れます。電圧をかけて熱が流れるのと温度差を与えて電流が流れるのは、非線形で一致するはずがありません。そういう対称性が破れてくると、今までの変分原理は一般に成り立たないのが常識です。よほど突拍子もないことを考えないといけません。私のストラテジーは、まず外力が 1 変数という相反定理とかかわりのない場合から始めることでした。そのときには、積分形の変分関数を扱えばよいことが分かってきました。

また最近、多変数の外力でも、流れの種類ごとに個別に 1 変数のときに発見した「積分形のエネルギー消費率最小の原理」を適用すればよいということに気が付きました。これを「個別変分原理」と呼んでいます。変分にはたくさんあります。線形のときには個別変分原理を足し合わせた総和です。線形というのは実に面白くて、皆さんもオンサーガの理論を見て驚いたと思いますが、電流の出す熱と温度差による熱流の出す熱量（熱が流れて熱が出るとは変な言い方かもしれませんが）といった消費量の総和が最小になるという条件で、定常状態が実現されています。

私が気付いたのは、これらは別々に変分してもよいのではないかとする考え方です。すなわちそれは、電流が流れて消費量が最小になることと、熱流が流れることによる消費量は別々に変分原理を作ってよいということです。こういうことが、非線形の場合も線形の場合にも分かってきました。ただし、それを誤解されてはいけません。オンサーガの場合には瞬間のエントロピーを問題にしたので、個別に変分すると現実と違った（誤った）結果になります。ここは非常に重要なところです。

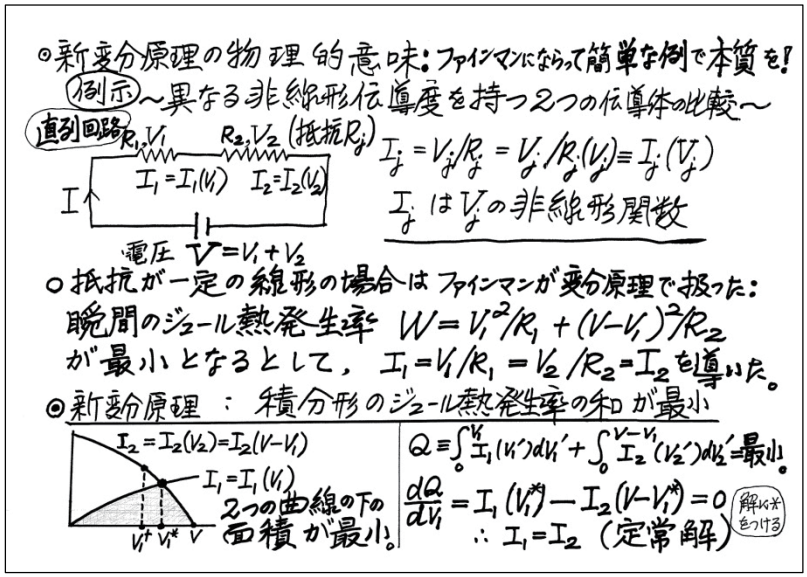
線形の場合に成功したのは瞬間のエントロピー生成ですから、これは異なる現象の総和で見ないと変分原理は成り立ちません。ところが過去にさかのぼり、あるいは平衡から非平衡になる途中の過程も考慮した変分原理を考えると、現象ごとに個別に変分することが許されることになります。

新しい変分原理では、多数の外力があるときにそれぞれの変分の値をどう決めるかが問題となります。その決め方は、それぞれの変分を最小にする値に関する連立方程式を解けばよいということが出てきます。そのときに注意していただきたいのは、電圧を変えるという変え方と電流を独立変数にする見方があります。電流をコントロールしたときはどうなるか。そういうふうに力と流れを逆転させて、変分を取ることもできます。

こういう直感的な話をすると、統計物理学というのは計算も何も要らない話で、散歩しながらできる物理学だなと思われる方も多いかもしれません。ここまでは散歩しながら考えたほうがいいアイデアが出てきますが、それを量子力学でミクロに出そうと思うとかなりの集中力を要し、何日も数理的な解析が必要になります。そのようにして積分系のエネルギー散逸とはどうなるかということも、最近導くことができました。これは非線形のゆらぎを平衡から非平衡まで積分したもので与えられます。

このように、私は久保とプリゴジンという東西両巨人の肩に乗って研究ができたことを、誠に幸運に思います。

■ 新変分原理の物理的な意味―電気回路による例示



図－13

〈図－13〉　それでは、今の一般的な話をできるだけ簡単な例で説明したいと思います。物理学の世界で偉大な仕事をしておられた、リチャード・ファインマンという方がいます。朝永先生と一緒にノーベル賞をもらった方です。とてもシンプルな例を使って本質を説明するのが得意な先生で、「ファインマン・レクチャー」と呼ばれる講義集は若者にたいへん重宝されています。

彼にならって中学生でも分かる例を挙げ、今の私の議論の本質を説明したいと思います。例えば 2 つの抵抗体を直列に並べ、抵抗が違う、特性も違うものを並べたとします。片方は線形理論でよいような抵抗体、片方は電流が流れるとどんどん抵抗が大きくなるような非線形の抵抗体です。これが定常になる条件はどういう原理で記述できるか。もちろん、ミクロにオームの法則を使ったりして解くこともできます。図解で解くこともできます。しかし、私の目標は変分原理をつくることです。解くことではなく、こういう系を一般的に扱う理論の体系をつくることです。

実はファインマンの教科書でも、この問題を取り上げています。彼は線形の場合は変分原理がつくれると言っています。彼が高校生のときに、物理があまりにも得意で、先生の講義がつまらなかったそうです。力学の講義などではいつも何かほかのことをしているとかあくびをしていたのですが、その高校の先生は立派で、「物理学というのは見方がいろいろある。力学も変分原理で記述するように考えてごらんなさい」と言われました。以来、物理学がぐんと面白くなったと、教科書にも書いておられます。

ファインマンの説明では、それぞれにかかる電圧 V_1 と V_2 の 2 乗をそれぞれ抵抗で割ったものがジュール熱の和ですが、2 つの電圧は一定であるという境界条件を付けて変分を取ると、それぞれの抵抗には同じ電流が流れます。このような簡単な電気回路でも、実際はいろいろな電流の状態があり、平衡状態では電流は流れていませんから、片方だけ電流が流れてもう片方では電流が止まっているかもしれません。そういうさまざまな過程を考慮に入れ、最終的に定常というのは、瞬間のエントロピーが最小になるということで線形の範囲では記述できます。

このレクチャーノートには前述の説明は 2、3 行しかなく、しかも付録に書いてあるので私は長い間読み落としていました。その後自分が統計力学の教科書を書いたときに、電気抵抗というのは変分原理で説明できると 2 ページにもわたって自慢げに書いてしまいましたが、幸いに変数が電圧ではなく電流だったため、ホイートストンブリッジというようなもっと複雑な回路で、独立変数も異なる変分原理を解説していたのでよかったと思います。

いずれにしても、線形の理論では瞬間のエントロピー生成が最小で記述できていますが、私の話はこういう問題に対して非線形ではどう取り扱うかということです。こういう非線形の場合にはそれぞれの抵抗体の電流が電圧の非線形の関数になるので、その電流と電圧の微小変分 dV の積を平衡値から取り得る任意の定常状態まで足し合わせ（電流を電圧で積分し）、それらを各抵抗体について全体の和を取ります。その二重の和を取って最小にすると、正しい定常の電流が出てくるのです。数式というのは便利ですね。言葉で言うとこんなに長々とかかりますが、数式では 2 行ぐらいで説明できます。

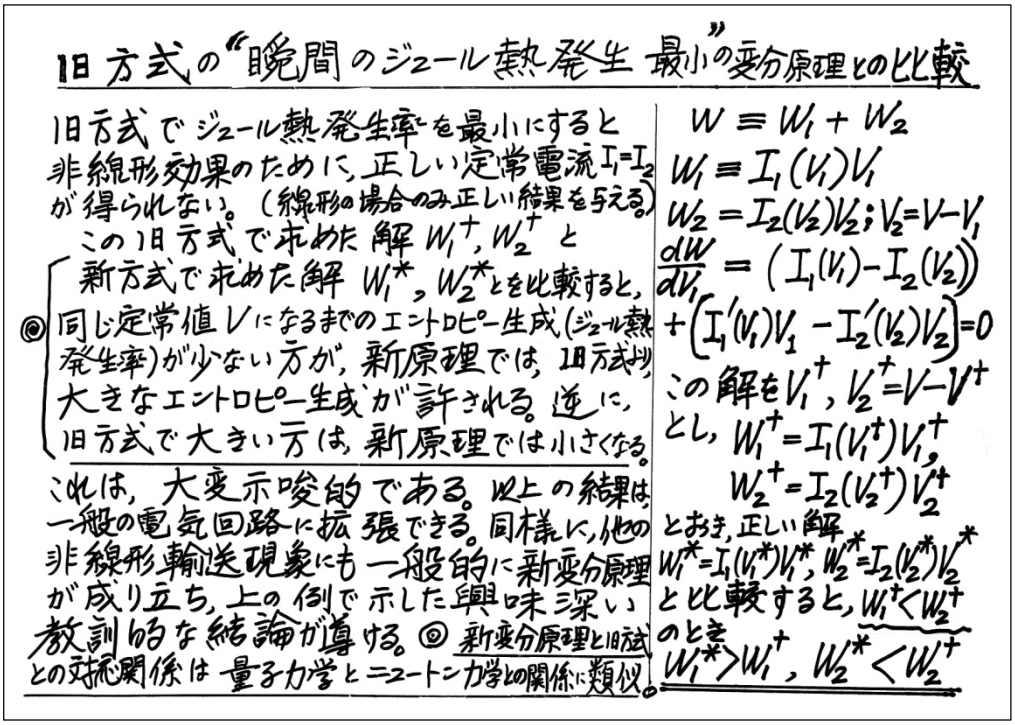
■ 数式の効用―「数式は漫画である」

去年、『物理学汎論』という高橋秀俊先生の本が出版されました。書いたのは先生ではなく、お弟子さんが東大で長年聞いた講義をもとにして書かれたものです。その序文に、「数式は漫画である」と書かれています。つまり数式で説明すると、専門に近い人にはその本質がわかりやすいということです。今日は専門家も多いので、数式による説明も入れました。ちなみに、高橋秀俊先生は後藤英一先生と一緒にパラメトロンを発明し、日本で初めて電子計算機を設計された先生で、物理学のあらゆることに精通していると言われた先生です。私は学部学生のときから高橋研に入り浸っていました。そして、パラメトロン計算機を学術研究に最初に活用したのは、私の修士論文ではないかと自負しています[※7]。

[※7] M. Suzuki and R. Kubo, *Theoretical calculation of N. M. R. spectral line shapes*, Mol. Phys. 7 (1964) 201.

■ 新旧変分原理の比較―２つの抵抗体からなる電気回路による説明

このように、不可逆非線形輸送現象の変分原理が分かって「そういう見方ができるのか」で終わってしまっては、「それでどうした」と思われるかもしれません。そこで次の問題です。原理が分かると、今のエネルギー問題などに対する教訓やヒントが得られるのではないかと、私は夢を膨らませています。それは旧来の瞬間のジュール熱発生が最小になるという変分原理と、途中の過程を全部考慮した新変分原理で決めたものを比較するとよく分かるのではないかと思います。



図－14

〈図－14〉　旧方式でジュール熱発生率を最小にすると、非線形効果のために正しい定常電流の関係式は得られない。仮にこの方式を踏襲して非線形の場合にも適用して、それで決まるジュール熱を先ほどの２つの抵抗体にどのように割り振ったら自然法則にかなうかということを、２つの方式（旧方式と新方式）で決めてみました（これは比ゆ的に言いますと、アメリカ、日本、インドなどでどういうエネルギー消費量を許すかという問題にもかかわってきます）。

そうすると非常に面白い結果が得られます。旧方式で決めたときと同じ定常値になるまでのエントロピー生成（すなわちジュール熱発生率）が少ないほうが、新しい原理では旧方式よりも大きなエントロピー生成が許されます。逆に、今までの決め方で大きなエントロピー生成を出していたほうは、正しい決め方では少ないエントロピー生成にしなければなりません。こういう解が新しい変分原理で出てくるのです。

もう一回説明しますと、新しい方式での２つの決め方によると、旧方式では少なかったほうはもっと大きいところが許されます。これは前より少ないということではなく、旧方式で決めた値より少ないということです。この 2 つの決め方を用いますと、例えばエネルギー消費の削減率を決める時に、今年 1 年間の消費量から割り振って何パーセント削減というような議論ではなく、

過去にどれだけ過激にエネルギーを消費したかということを考慮した上で決めるほうが、さらに公平になります。これがポイントです。

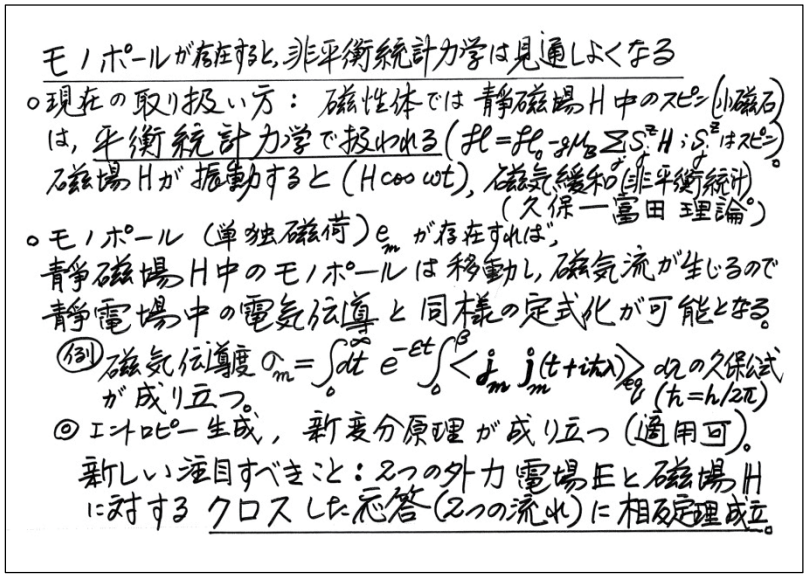
これはたいへん示唆的ではないかと思います。以上の結果は、一般のどんな複雑な電気回路にも拡張できますし、同様にほかの非線形の輸送現象でも成り立ちます。温度差がある場合、あるいは物質の流れがあって不可逆である場合、この原理はいろいろな一般的問題に適用することができます。そういう意味で、実に興味深い教訓的な結論ではないかと思っています。

■ グランズドルフ―プリゴジンの発展規準の新変分原理による導出

グランズドルフとプリゴジンは、非線形非平衡の熱力学を建設しようとして、まず不可逆定常系の安定性の条件、すなわち「発展規準」を提唱しました〈図－11〉。それは、n 種類の外力$\{X_i\}$の微小変分$\{dX_i\}$とそれに対応する流れ$\{J_i\}$との積の n 種類の和の体積積分が負（または 0）になるという不等式です。彼らは非線形の熱伝導や化学反応を例に具体的に議論し、その妥当性を主張しました。

ところで、新しい個別変分原理が発見されてみると、実は、彼らの発展規準よりも強い「個別発展規準」、すなわち、外力の種類ごとに（i で和をとらないで）不等式が成り立つことが個別変分原理から導けます。こうして、i で和をとれば、もちろんグランズドルフ―プリゴジンの不等式も導けます。詳しくは、原著論文（M. Suzuki, Physica A (2011-2013)）を参照してほしいと思います。

■ 非平衡統計力学に対するモノポールの役割



図－15

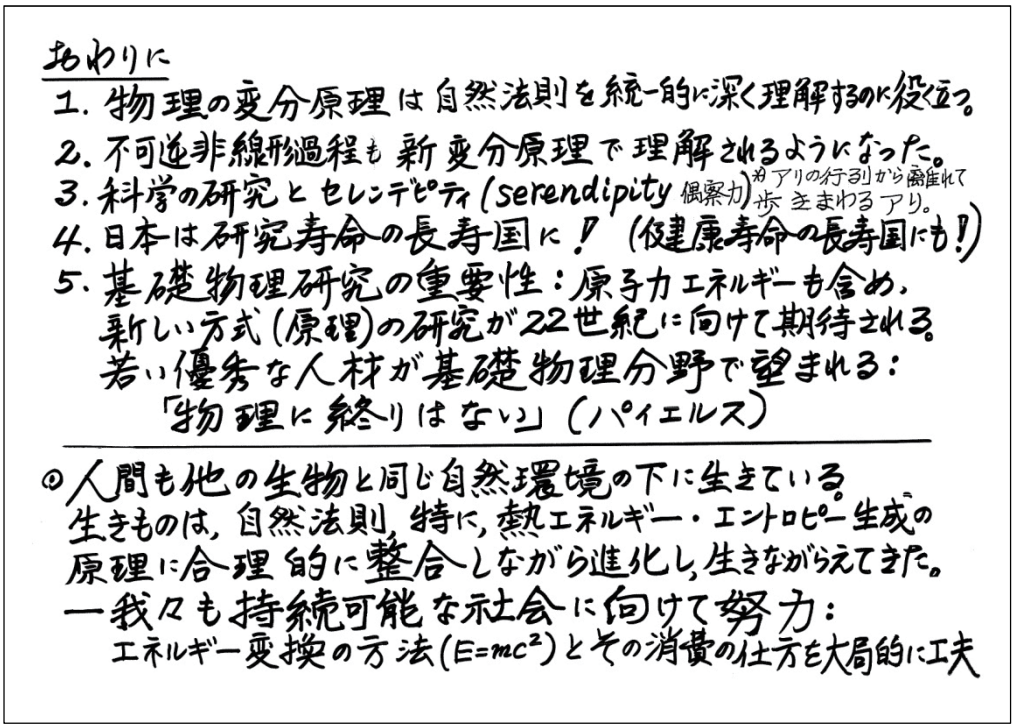
〈図－15〉　時間の関係上少しだけ触れさせていただきますが、モノポール（単独磁荷）が存在すると、非平衡統計力学は見通しがよくなります。今までモノポールが発見されていないので、磁気の非平衡統計力学（例えばμSR、すなわちミュオンスピン回転のような磁気緩和現象などでも、今はいろいろと久保理論が使われていますが）の理論ができてから電気伝導度の理論まで行くのに数年かかりました。ですから、非平衡統計力学の立場では、磁気現象と電気現象はずいぶん違った統計力学的取り扱いになっていました。

なぜかというと、磁気現象の場合は時間に依存しない磁場をかけると平衡状態になってしまうので、平衡統計力学ですべて扱うことができます。ところが、電気伝導の場合には時間によらない電圧、一定の電圧をかけても電子は流れるので、扱う問題は非平衡で不可逆過程になります。しかしモノポールがあると、時間によらない磁場中でもモノポールが移動するのでエントロピーが発生し、不可逆現象が起こります。

つまり、最初からモノポールがあれば、非平衡統計力学の発展はもっと早かったのかもしれないと思います。私はこのモノポールの存在に期待をかけていて、もしできたときには使ってほしいと思い、〈図－15〉のように磁気伝導度の公式も書いてみましたが、これは夢物語になるかもしれません。

エネルギーの構造が全く同じなので、この磁気伝導度の公式によって、相反定理も直ちに導くことができます。これは唯一の相反定理が成り立つ非線形現象ではないかと思います。それはすなわち、クロスした効果があるということです。化学のほうでは、鈴木章先生と宮浦憲夫先生がクロスカップリングということでノーベル化学賞を受賞されました。そういう意味でクロス効果というのは今いろいろな分野で盛んになってきていますが、このクロス現象に対しても、新しい知見が得られるのではないかと思います。

■ おわりに



図－16

〈図－16〉　最後にまとめです。全部読み上げると時間がありませんので、この中から 2, 3 のテーマを取り上げてみたいと思います。1 つは科学の研究とセレンデピティです。セレンデピティには「偶察力」という訳があるようですが、思いがけないところで見つかったものが、大発見につながることはよくあります。これを例えて言うと、「アリの行列から離れて歩き回るアリ」がセレンデピティを見つけるコツです。そういうことをしないアリの社会はすぐ滅びてしまうのか、アリの行列の中には、ウロウロと行列から離れて働かないように見えるアリが必ず何パーセントか存在します。これもプリゴジンがいろいろな機会によく話をしていたことです。もちろん研究したのはプリゴジンではなく生態学者だと思いますが、これはたいへん教訓的なことではないかと思います。

今回お話しました私の研究でも、長年いろいろと失敗を重ねながら暗中模索をしているうちに、明るい光が射してきました。それは、ものの見方を変えてみたことによります。定常状態を議論するのに、前半のミクロな統計力学的研究（すなわち、エントロピー生成が正になる理論）でも、後半の変分原理でも、平衡から非平衡定常状態に至るまでの途中を考察する（すなわち、取り込む）定式化をすることが本質です。

次に申し上げたいのは、基礎物理の重要性です。現在でもすぐには役に立たないことをコツコツと研究している研究者が多数いますが、これからもそういう基礎研究を進んでやっていく若い人が出てこないと、日本の将来、ひいては世界の将来はないのではないかと危惧します。物理に終わりはないのですから、これからの若い人におおいに期待したいと思っています。

原子力の問題なども話し出すと切りがありませんが、今の原子力発電の方式は原子爆弾と同じ

原理です。それをコントロールしながら上手に使っているわけですが、もっと原理的に違う原子力、「$E = mc^2$」の使い方が何十年か後にはできるのではないか。例えば加速器を使う。加速器が止まったらそのメカニズムは止まってしまいますから、地震があったら自動的にそのプロセスが止まります。京都大学やヨーロッパでも、そういった原理的に新しい研究がいろいろと進みつつあるようです。

最近はみんな原子力にアレルギーを持っていて、若い人も原子力や原子物理学と聞くとこれは危険な物理学であるというような先入観を持ってしまっています。これではこの分野の発展に非常に大きな差し障りがでる恐れがあります。そんな今だからこそ、こういう基礎研究の重要性を特に強調しておきたいと思っています。

最後の締めくくりとしては、人間も他の生物と同じ自然環境の下に生きています。生き物は自然法則、特に熱エネルギーやエントロピー生成の原理に合理的に整合しながら進化し、生きながらえてきたのですから、我々も持続可能な社会に向けて努力していきましょう。それにはエネルギー変換の方法やその消費の仕方について、大局的に、抜本的に、そして本質的に研究を進めていかなければいけないのではないかと思います。ご清聴ありがとうございました。

■このレポートは平成 24 年 10 月 1 日東京會舘において行われた、第 123 回本田財団懇談会の講演要旨に、聴講者からの要望により加筆・修正を加えたものです。掲載内容は本田財団のホームページにも掲載されております。
講演録を私的以外に使用される場合は、事前に当財団の許可を得て下さい。

発 行 所　公益財団法人 本田財団
104−0028 東京都中央区八重洲2−6−20ホンダ八重洲ビル
Tel.03-3274-5125 Fax.03-3274-5103
http://www.hondafoundation.jp
発 行 者　原 田 洋 一