

# 物理学者の冒険

—— 原子分子の集団から人間の集団へ ——

坂 東 昌 子

(日本物理学会キャリアセンター長・  
愛知大学名誉教授)

(本文中の敬称は省略させていただきます)

## 1 多数の集団は面白い

物理学者とはどんな複雑な現象でもそのエッセンスを抽出し、単純な法則を見出すことが得意でもあり好きな人種です。複雑に見える現象から偶然の要素を取り除き、本質を探りあてて喜びます。それは、おそらく物理学が今まで対象としてきた、物体運動の力学、電磁気の現象、波動の性質などが、生物現象や社会現象に比べて単純だった為、エッセンスを探り当てるのが比較的容易だったからでしょう。

基本法則から出発して予測可能だとはいえ、たとえば天気予報1つ考えても、初期条件を完全に決めるには膨大な情報の収集が必要です。システムを完全に記述するには地球全体、いやおそらく太陽あたりまで含めた膨大な情報なしには予測できないでしょう。他のいろいろな要素が混在する場合はさらに複雑になります。イギリス気象局のEskdalemuir 測候所の所長であったリチャードソンが、天気予報の原型ともいえる数値予報システムを提案したことは有名です。もっとも最初の計算は「6時間の予報に2ヶ月を要したのに予測は外れた」そうです。しかし、彼は、数値計算の速

度さえ高くなれば原理的には予測できると信じていたのです<sup>1)</sup>(「リチャードソンの夢」)。この夢は、「地球シミュレーター」が誕生した今日でもなお、夢の課題であるともいえるでしょう。

さらに、多体系でも計算能力が充分であった場合、個々の粒子の情報と性質とそこに働く力を明確に知ればそれらを積み上げだけで記述できるか、という疑問が残ります。単純な物理学の対象である「原子分子の多体系」でさえ、いきなりある温度になると急に磁石になる、水が氷になる、そういった現象は予測不可能に思えたのです。かつては、予測できない現象は、すべて「複雑系」という一言で片付けていました。しかし、それで満足できないのが物理学者です。個々の原子間の相互作用は分かっているのだから、その積み重ねである多体系でも原理的に分かるはずだ、きちんと計算できる筈だと思うのが当然です。本当に予測不可能なのでしょうか？ この問いかけに対しては、最近になってやっとわかってきたのです。

## 2 多体系の特徴、相転移の解明

磁気モーメントをもっている原子をここでは原子磁石と呼んでおきます。原子磁石の多体系を考

えます。温度が高いときは、個々の原子磁石はランダムに激しい運動をしているので、必然的に磁石の向きはばらばらです。従って、系全体としては磁石の性質を持ちません。ところが、温度が低くなってくると原子磁石の間のコミュニケーションが効いてくるようになります。ハイゼンベルグは原子磁石の間の相互作用力を取り入れた簡単なモデルを作りました。リチャードソンが気象シミュレーションを始めたのと同じ頃、ハイゼンベルグモデルにアタックしたのが大学院生だったイジングです（以後、彼の使ったモデルはイジングモデルと呼ばれています）。彼は1次元の多体系では磁石の向きが揃う（相転移）現象は起こらないことを示しました。後にバイエルスが2次元なら相転移が起こることを示しました。

一方、1911年には、水銀を冷やしていくと超低温（この場合は4.2K）で、突然電気抵抗がゼロになることが発見されました。いわゆる超伝導です。これはどう説明するのでしょうか？ この問題を解いたのがBardeen, Cooper, Schriefferの3人です（BCS理論）。ここでも、原子間（正確には原子の周りの電子）の間の相互作用が効いています。

この2つの説明は共通点があります。原子間の熱運動が活発ならお互いに好き勝手に動いているのに、温度が下がってくると相互作用が効いてきて協調現象（集団運動）を起すということです。多体系にはこういう面白い性格を示すことがあるのですね。しかし、相転移に共通したメカニズムは何なのか、という論理の整理がないと分かったような気になりません。この現象を普遍的な言葉で統一的理解に導いたのが南部陽一郎ではないかと私は思っています。それは「対称性の自発的破れ」というより透明な論理でした。さらに、1961

年南部はこのメカニズムを素粒子の世界に持ち込みました。ちょうど私が大学院生の頃で、同級生が教えてくれ、早速、いっしょに活版印刷のボゴリウボフの教科書からBCS理論を勉強したものです。多体系が示す、個々の特徴が相乗効果となって全体のマクロな状態に表れる相転移現象は、ある種の対称性（回転対称やカイラル対称性<sup>2)</sup>）をもつシステムが、ダイナミカルな効果でマクロに対称性が破れた結果として生じるものであるという形で統一的に理解できたのです。物理学のこのexcitingな現象とその解明の歴史は、大学での基礎物理教育では学ぶことが出来なかったもので、この時の感激は今も忘れられません。

### 3 自発磁化の実験授業…原子になってみる

私は私立大学の文系の学生に自然科学概論を教えています。そこで、相転移実験を授業で試みました。磁石の向きを(s, n)として、集団全体が磁化する実験です。学生を原子磁石に見たてます。まず「誰か、超伝導を説明できる？」といったら、T君が「温度をどんどん下げていくと、急に鉄など磁石をひきつけるようになる物質があって、その物質が磁石になる現象です」と答えました。このT君、いつも自然科学の知識を披露してくれる子です。「鉄やニッケルの原子の集まりは、ある温度より低くなると、急にマクロに磁石になる（強磁性）のです。これらの物質は、実は原子磁石の集まりですが、温度が高いと、好き勝手な方向に揺さぶられて、磁石の性質を示しません。ところが、温度を下げて、ある臨界温度（キュリー点）に達すると、磁極の向きをそろえ、マクロな磁石になります。たまりたまてある臨界点に達すると急に起こるこういう現象を、物理では「相転移」

とっています。超伝導・超流動・自発磁化などはみんな同じ現象です。素粒子の理論や宇宙論でも、この概念なしには論じられません。」という、いろいろ質問が出ました。「マクロってなんですか?」「素粒子の統一理論って?」「宇宙のビッグバンとどう関係しているのですか?」、質問が続出です。

さて、実験は、私の手製テキスト(表はピンク、裏は青)を使います。最初、好きな色を前方に向け、号令に合わせて何回か同じルールで色を変えていく、という単純なゲームです。ルールは、(1) 前後左右を見て多数決で次の色を決める。(2) 回数だったらどちらでもいい というものです。2次元のイジング模型のシミュレーションですね。15回目ぐらいで、700人近くの受講生全員の色がそろいます。実験のあとで、「自発磁化なんて、もっと難しいものかと思っていたけど、まわりとのコミュニケーションの結果なのですね。若者の服装や髪型の流行も同じような現象ですね。このような現象を物理では、相転移などという難しい言葉を使うのですね」とか、「鉄のくぎを永久磁石にこすり付けるとくぎも磁石になりますね。この現象は温度が下がって原子磁石の向きがそろったのではなく、外部からの磁場で強引に揃ったのだから、他発磁化というのですか? 数学ができなくて文系にすすんだ私ですが、科学に対して興味が出てきました。面白いことがわかるのですね」。すごい観察力で、自発磁化の概念がよく理解できていて感心しました。私自身も視野が広がります。おそらく、私が、人間の多体系まで広く考えてみようと思ったきっかけはこんなところにあったかもしれません。原子分子の多体系で解明された相転移現象は、果たしてどこまでその対象を広げることができるのでしょうか。

原子分子の多体系から、自由意志の働く人間の多体系へ進む場合、いきなり複雑な現象に取り組むのは大変ですが、実はよい題材があります。「交通流」です。交通流では、運転者が車を運転しますが、運転技術はできるだけ規則的でなければなりません。そうでないと、交通事故に見舞われます。大切なのは、個人の流儀によらない共通の運転挙動に着目する事です。個性をなくすと、運転者の入れ替えに対して対称な集団になります。運転手の間には相互作用が働きます<sup>3)</sup>。免許取得のために訓練された運転手は当然他の車の動きを見て自分の挙動を決めます。交通流の考察をした最初の例は、寺田寅彦のエッセイ「電車の混雑について」に見られます<sup>4)</sup>。ここで特徴的なことは、渋滞がなぜ起こるかに焦点をあてているということです。そして、渋滞現象を同一の運動規則に従う枠組みで捉えているのです。

#### 5 交通流理論

さて、交通流理論の始まりはモータリゼーションが盛んになった1950年後半です。交通流を記述するには速度( $v$ )と密度( $k$ ,あるいは密度に比例する変数であるオキュパンシイ $P$ など)と交通量( $Q$ )の3つの物理量を用います。定常流では、

$$Q = kv \quad (1)$$

という関係があります。まず、密度と速度の関係(密度速度曲線)ですが、密度が高くなると(つまり車間距離が小さくなると)車は速度を落とすので、おおむね減少関数になり、現象論的な式がいくつか提案されています。典型的な例としてドレイクが提案した曲線を図1(a)に示しました。

さて、交通量と密度との関係は「基本図」と呼ばれますが、式 (1) から、ドレイクモデルの場合の基本図を作成すると、図 1 (b) のようになります。交通量  $Q$  は、増加関数と減少関数の掛け算ですので、ある中間の密度（臨海密度）で最大値をとるのです。ピークの左側（低密度）では交通量は密度の増加関数ですが、臨界密度を越えると渋滞領域になり交通量は減少関数に転じます。ところが、実測データは図 2（中央高速での実測値）のように、一般にラムダ型とか人字型とかいわれる、臨界密度付近で鋭く変化する傾向を示します。このような鋭いカーブは、速度密度曲線が連続的であるとしたのでは導けないので、従来から交通工学では交通状態を自由流と渋滞流領域に分け別々に論じる事が多かったわけです。

一方、理論的には、流体力学などをもとにしたマクロなアプローチに加え、ミクロな理論も現れました。Pipes, Newell 等は、「道路を走行する運転者は、直前車両の挙動を見て自分の車の速度をコントロールする」として追従モデル (Follow the Car Theory) を提案しました。どちらも物理学者だそうです。後に、追従モデルは、ドライバーの反応の遅れ (time lag) を導入しない限り渋滞が起らない事を、佐々木、米谷等が明らかにしました。

ではどうしたら、この2つの領域のギャップを埋めて、統一的な理論構築ができるでしょうか？

そこで、素粒子論専門の私たちが提案したのが「最適速度モデル」(Optimal Velocity Model : OV モデル) です。「運転者は目の前の車との車間距離に応じて最適速度に近づけるよう、車の速度を調整する」という模型で最適速度関数を仮定して簡単

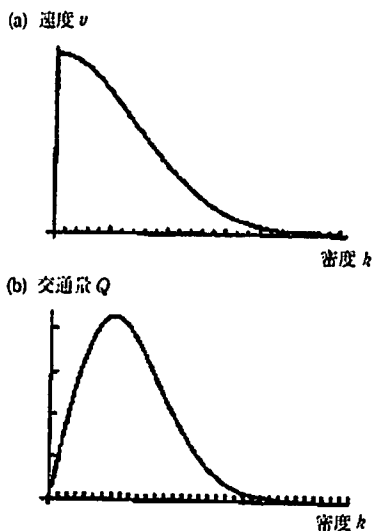


図 1 ドレイク式の密度・速度分布 (a) とそれから計算した密度・交通量の基本図 (b)

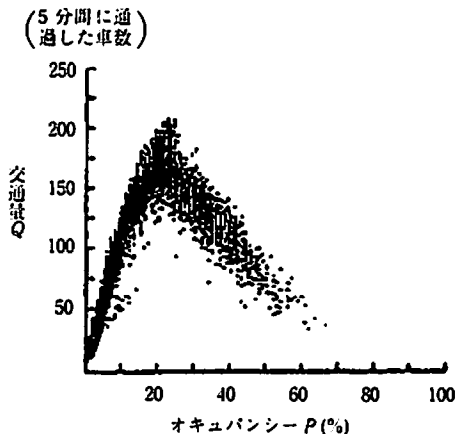


図 2 基本図実測データ (中央高速道路) 横軸はオキュパンシー  $P$  で密度  $k$  に比例する変数 ( $P \propto k$ ) である。縦軸は交通量  $Q$

な運動方程式を立てます。

$$\frac{dv}{dt} = \alpha(OV(\Delta x) - v)$$

但し、 $v$  は速度、 $OV(\Delta x)$  は車間距離  $\Delta x$  のとき運転者が最適と判断する速度 (最適速度関数)

これは2階微分方程式で、自発的に交通渋滞 (Dynamical Generation of Congestion) がひき起こされることが導かれるのです。図3は我々が仮定した最適速度関数と、観測データによる実際の車の動きをプロットしたものです。実際の車の動きはほぼ「加速領域」と「減速領域」に分かれます。これが決め手でOVモデルがうまく働くことがわかりました。

さらに、個々の車の、車間距離—速度平面 (物理系での位相空間にあたるもの) での時間的変化をプロットすると、リミットサイクル的な運動の様子が記述でき、渋滞領域と自由流領域の時間的移動がグローバルに理解できたのです。物理的なセンスで新しい観点から、交通現象を眺められたのです。そしてシミュレーションで渋滞形成を再現させたのです。この論文が採択されるまでには、従来の学会の方々からの「今まで30年間もやってきたモデルにけちをつけるのか」などといわれ葛藤がありました。それを考えると、OVモデルとして国際的によくぞ通用するようになったものだと思います。交通流理論では有名なI. Gasserが組

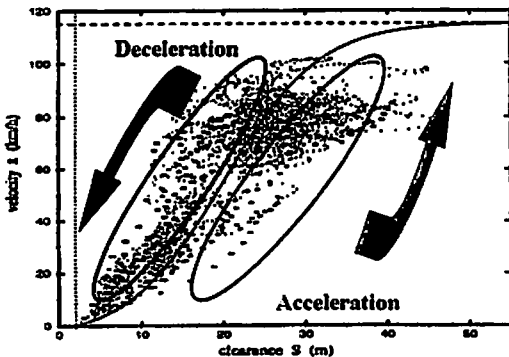


図3 OVモデルによる相空間 (車間距離  $s$ 、速度  $v$ ) での最適速度関数 (実線) と実験データ (点)。ただし、ここでは密度  $k$  の代わりに車間距離  $s$  を使っている。 $k \propto 1/(s - \Delta)$   $\Delta$  は車の平均長

織したワークショップ「Traffic Flow: A Microscopic and Macroscopic Perspective」がハンブルグ大学 Center for modeling and Simulation で研究会を開くので、「話をしてほしい」と招待されたのは、昨年10月でした。ここ10年ほどニュートリノに集中していたので、交通流から離れていたのですが、一度くらい様子を見ようかと参加しました。理由は、経済物理に「OVモデル」を適用する仕事を始めていたからです。行ってみて招待してくれた訳がわかりました。研究会の話は殆どどれもOVモデルが引用されるのです。「あれは簡単でしかもよく合うので、みんな好きさ」との事。Gasser博士には、「Now, you have realized how your model is famous here, more than in Japan」と冷やかされました。

## 6 テレビ博物館出演の記

OVモデルにはもうひとつ思い出があります。東海テレビで「交通渋滞解明」のテレビ博物館の企画(2000年10月)に出たことがありました。交通渋滞は一見複雑系とみえるのに、非常に単純なメカニズムで解明できたのが一番の売りだと思っていましたので、当時流行の複雑系科学ではなく、物理的処方フルに使った複雑系の解明という話だと何度も説得したものです。「実験してくれるなら喜んで」ということで壮大な実験計画ができました。知多半島の広い漁港にサーキットを描いて、そのサーキット上に車を並べて走らせる実験です(図4)。この車の運動をクレーンの上から撮影するのです。専門の素粒子論では、実験と理論は分業しており、理屈だけで納得するのは得意でも、実験に対する緊張感は薄い私です。その私がサーキット上を走る車による実験で理論の検証ができ

るのです。25台の車を目前にしてときどきでした。

## 7 経済物理学へ

交通流理論は、枠組みがある程度確立していますが、経済物理学は比較的新しい分野で、まだ物理量として何をとるべきかそれほど明確ではありません。

実は、経済物理学の分野には、1年ばかり前から、中山章宏（名城大学教授）・谷口正明（物理学会キャリア支援センタープロジェクトマネージャ）と挑戦を始めました。きっかけは、GDP（実質国内総生産）の年変化量  $\Delta\text{GDP}$  と景況判断指数（DI: Diffusion Index）が位相空間を構成するのは？という議論でした。各年の日本のデータをプロットすると、 $(\Delta\text{GDP}, \text{DI})$  空間で景気上昇と景気下降領域に分かれることがわかりました（図5）。これを基にして動的景気循環モデルを考えてみたのです。生産量は景況判断指数（DI）がよければ増産に転じるし、悪ければ抑えられる。この傾向をうまく取入れたモデルです。これで予測してみると、けっこう観測データに合致することがわかりました（参考論文<sup>9)</sup>）。さらに、「経済現象に保存量があるか」という第2弾の論文もできました。経済社会では、個性のある人間もルールに則って活動しないと経済社会から落ちこぼれるので、結局運転免許を取るのと似て、経済のルールにある程度従う（つまり経済免許をもった）人間の多体系になっている、だから経済も物理学の処方を使えるのだ、これが最近の感觸です。

## 8 新しい分野の開拓

20世紀を通じて、物質科学・生命科学・宇宙科



図4 東海テレビの渋滞実験（後方に直径約100mのサーキットを描いて25台の車を走らせた）

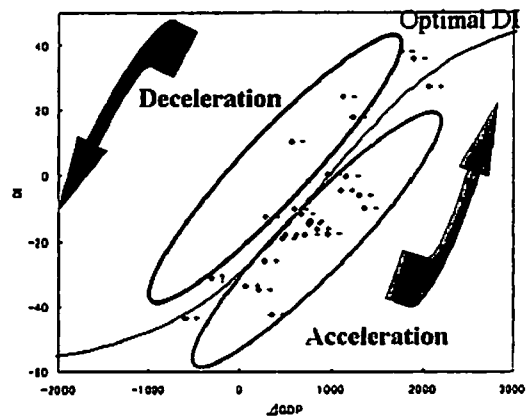


図5 動的景気循環モデルによるDI- $\Delta\text{GDP}$ プロット GDP（実質国内総生産）の年変化量  $\Delta\text{GDP}$  と景況判断指数（DI: Diffusion Index）が位相空間を構成することを前提にしたモデルである。日本の景気データがプロットされ景気上昇と下降の領域があることが分かる。

学、そしてその応用領域に広く展開している工学や医学なども、個別の科学技術は大いに発展し成果を挙げました。今、21世紀、それらの点をつなぐ広大な領域が残っていて、まだまだ面白い事があるように思われます。点が線になり、そして更に面となり、新しい領域へとその翼を広げていった時、あらたな展開が期待できそうです。基礎的理論と社会での応用という分野の人達がともに議論をする機会の少ないのが日本の欠陥です。私も

こういう分野に挑戦してみて、新たな学問の新しい息吹を持ち込みたいもの、とまだまだ若い気持ちになります。交通流の研究を始めて、物理と工学を埋める新しいスタイルの研究会に出る機会が増えました。交通流における渋滞形成のメカニズムを見つけたといって喜んでいた物理屋さんたちは、工学系の方々から、「それでなんの役に立つのですか」と聞かれて、びっくりしたものです。学会も分野別に分かれ、その間には広大な領域が、空白のまま残されている事を感じたのもこの頃でした。

新しい分野で論文が掲載決定に至るまでの苦勞もさることながら、未知の鉱脈を見つけ、先に光を見つけた時の躍動感ほど楽しいことはありません。さらに、実験で確かめる機会に恵まれた私は幸運でした。

社会物理学という概念は、1835年に、ケトレが提唱しました。湯川は、物理学により宇宙や生物分野を開拓する精神を、基礎物理学研究所に吹き込みました。しかし、湯川は、人間の多体系、社

会科学は専門外として社会科学者にゆだねたようです。今私たちは、リチャードソンや湯川の夢を実現できる時代に到達したのかも知れません。

〈参考〉

- 1) 1922年に著書の中で彼は、64,000人の計算者を巨大なホールに集めて指揮者の元で整然と計算を行えば実際の天候の変化と同じくらいの速さで予報が行えると思積もったということである。
- 2) 化学ではカイラルといわず「キラル」と呼ぶそうである。右巻きスパイラルと左巻きスパイラルとを区別する対称性のことをカイラル対称性という。
- 3) 坂東昌子著『物理と対称性』丸善出版
- 4) 私はこれを故山口昌哉から教えてもらった。素粒子の仲間と交通流のシミュレーションを始めた1992年ごろである。山口が、カオスの世界に飛び込んだのは、50歳すぎで新領域開拓者としての勗まは私たちを勇気付けた。山口門下から脳神経科学分野など異分野で活躍する多彩で魅力あふれる人材が輩出しているわけがよくわかった。
- 5) Masa-aki Taniguchi, Masako Bando, Akihiro Nakayama, "Economic Fluctuations Based on Optimal Diffusion Index Model" Published: November 26, 2007, J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 76, No. 12, p. 124003

あなたを、アピールしてください。

**本誌への広告掲載、募集中!**

**ビジネスのチャンスが、ここにあります。**

CIAJ Journal に広告を掲載してみませんか。

通信機器業界にコンタクトをとる手軽な道、  
本誌であなたを、アピールして下さい。

An easy avenue to reach info-com industry—CIAJ JOURNAL

※CIAJ会員、非会員を問わず、本誌への広告掲載を募集中。

(問い合わせ: CIAJ 広報部へ 03-5403-9351)