

特別企画

森肇氏インタビュー

インタビュアー: 吉森 明^a、石崎 龍二^b

(^a九州大学理学研究院物理部門、^b福岡県立大学人間社会学部)

九州大学国際研究交流プラザにて

1 はじめに

このインタビューは、物性研究に掲載されるシリーズの2つめにあたります。現代の統計力学に大きな影響を与えた日本の研究者の話を伺うという企画です。1回目は、川崎恭治氏でした [1]。

森肇氏の業績はたくさんありますが、ここでは「森理論」と呼ばれている射影演算子の研究 [2, 3] を簡単に説明します。森肇氏が開発した射影演算子法は、ある階層の基礎方程式をより微視的な階層から導く強力な方法です。例えば、ランジュバン方程式のような確率的な式は、ブラウン運動などのある巨視的な階層を表すことができます。一方、より微視的な階層は、ニュートン方程式やハイゼンベルグ方程式のような決定論的な式で支配されています。森肇氏の射影演算子はこの2つの階層を系統的に結び付けることができるのです。

「森理論」ではこの射影演算子法により、2時間相関関数を微視的に表すことができます。物理量の揺らぎは2時間相関関数 (量子力学では緩和関数) で特徴づけられますが、これを揺動力で表し、ミクロな力学法則と結び付けることができます。さらに森肇氏は、この2時間相関関数を具体的に計算するために、連分数展開の手法を開発しました [4]。

実は射影演算子を使った理論は他にもいくつかあるのですが、森肇氏の射影演算子が特にたくさんの文献で使われています [5]。インタビューの中で森肇氏自身が述べているように、この射影演算子がとても便利だからです。この便利さのために「森理論」は、広い範囲に応用され、川崎恭治氏のモード結合理論 [1, 6] をはじめ、後の非平衡現象の研究に与えた影響は、はかり知れません [7]。

この「森理論」は、いろいろな応用がされましたが、最近、化学現象への応用が目立っています [8]。化学者は、おもに分子の個性に興味があります。特に動的な現象を理論的に考えるとき、分子の個性を調べるためには、微視的な相互作用から直接導く理論が必要です。「森理論」は、まさにこの必要性を満たし、分子間の相互作用から、実験で測定できる物理量のダイナミクスを導くので、何人かの化学者が研究しています [8]。

森肇氏のもう1つの大きな業績はカオスの統計力学です。これは、カオス軌道群の位相空間上での秩序を表す幾何学的記述と運動のランダムさを表す統計的記述の統合を目指した研究で、蔵本由紀氏と共著の文献 [9] に詳しく書かれています。また、文献 [10] は、森肇氏のカオスに対する考え方を一般向けに書いたものです。最近では、カオスや乱流による輸送現象を射影演算子を用いて解明する研究に意欲的に取り組まれています [11, 12]。

インタビューをするにあたって、いくつかの文献を参考にしました。文献 [13] は、インタビューをまとめるのに参考にしました。森肇氏の略歴も文献 [13] に載っています¹。

インタビューは、2002 年 11 月 18 日九州大学国際研究交流プラザで行われました。時間は、午後 2 時から始め、約 2 時間 40 分かかりました。文中、M は森肇氏で、Y は吉森、I は石崎です。

2 生い立ち、大学卒業まで

Y: 今日はインタビューに時間を取って頂きまして、どうも有難うございました。質問は時間の古い順に並べましたので、まず、御出身からお伺いします。御出身は福岡とお聞きしているのですが、ずっと福岡におられたのですか。

M: 中学が福岡で、当時は筑紫中学と言っていましたが、今は新製の筑紫丘高校です。旧制の高等学校は、熊本の五高でした。

Y: 高校は熊本だったんですか。

M: それは先輩が熊本にいたので、そのせいですね。だいたい中学の同級生は福岡が多いんですけど。それで終戦の年は学徒動員で、僕は長崎の三菱造船所に行っていたわけです。この前、イギリスの客船が火事になりましたね。そこで被爆したわけです。

Y: 被爆したんですか。

M: びっくりしました。ただ、爆心地から遠く一里、5 キロぐらい離れていたもので、その時、三菱造船所にいた同級生は皆、大丈夫でした。ガラスが割れたりして、そういう被害はあったらしいです。被爆者手帳も持っています。

Y: それで、科学を志すきっかけは何でしたか。

M: 旧制高校での教育ですね。ある化学の先生がいて、そのかたは理論の化学を勉強されていたようです。その先生が課外に教えてくれたわけです。色の化学とか、有機化合物の話が中心でしたが、Pauling² の理論とか、量子論も使えないといけないうわけです。電子のレベルやその間の遷移を、感覚的に理解させようとされたわけです。化学実験で色がパッと変わるのは、もともと好きでした。

それから、新しい生物学をやろうとしている若い先生がいて、そのかたが Schrödinger³ の話をしだしたのです。不確定性原理の話をしました。よくわかりませんでした、今の生物学に近い話をしていました。量子力学を知ったのはその時が初めてでした。

¹ 1965 年に森 肇氏が九大に教授として赴任して 1990 年に退官するまで、物性理論という名前の講座には、助教授として川崎 恭治氏 (1966-1971)、郷 信広氏 (1971-1987)、藤坂 博一氏 (1989-1998) がいた。助手は、吉田 健氏 (1962-1993)、岡本 壽夫氏 (1966-1986) だった。また、インタビューで触れているように、赴任当時、1.5 講座任せられたということで、実験の講座を半分理論として運営していた。そこでの助教授は、都築 俊夫氏 (1966-1974)、助手は蔵本 由紀氏 (1969-1976) だった。

² Linus Car Pauling (1901-1994)。アメリカの物理化学者。化学結合論。1954 年ノーベル化学賞受賞、1962 年ノーベル平和賞受賞。

³ Erwin Schrödinger (1887-1961)。1933 年ノーベル物理学賞受賞。

高校の物理ではもちろん量子力学はやりませんが、相対性理論が専門の小貫という先生がおられました。それに、若い数学の先生から相対論の幾何の変換、ローレンツ変換とか、接触変換など新しい幾何学の話があって、だんだん興味が物理に移っていきました。

Y: じゃあ、高等学校の頃には、既に物理に進もうと決められていたのですね。

M: そう、高等学校の次は大学ですから、一応何をやりたいか決めないといけません。もっとも、中学、小学校の時は技術将校になりたいとか、戦争中ですから、そんなことを考えたこともありましたが、本気で何をやりたいというのは高等学校ですね。高等学校の教育で影響を受けました。

Y: 大学は最初から九大を考えられていたのですか。

M: そうですね。家が福岡にありましたので、決めました。友人の中には京大とか東大などに行った人もかなりいます。

Y: 入学する時に学科というのは決まっているのですか。

M: ええ旧制ですから。教養課程があれば、違うかも知れませんが、教養課程は、新制です。大学はいきなり物理学科に入りました。

Y: いつ、統計力学を研究しようと決められましたか。

M: 統計力学は大学院ですね。学部の際は、何をしていたかという、昔は最終学年で研究をやったんですね。あの頃はまだ学生が多くいるわけではありませんでしたので、研究をやったのです。僕は、その時は量子力学をやりました。分子のレベルの遷移を計算しました。

卒業の時に九大は、昭和 25 年ぐらいだったんですが、先生方は皆外国に行っていて、指導教官がいなかったのですよ。それで工学部に小野周⁴ という先生がおられて、そのかたが非常に活発だったんです。

あのころは学部学生のくせに、物理学会の九州支部会に出ていました。だいたい支部会は九大でやっていたのですが、そこに聞きに行っていたわけです。中身はわかりませんが、この先生はアクティブであるとか、この先生は駄目だとか、学生の間で採点してたんです。それで小野周先生は非常に活発にやっておられました。

Y: そうすると、大学院は工学部に行かれたわけですか。

M: そうです。小野周先生は液体論などを研究されていました。僕は学部では物理学科にいたのですが、大学院は工学部に行ったんです。

Y: 理論物理というのはすぐ決められたのですか。

M: そうですね。実験というのはまったく考えませんでした。

⁴ 小野 周。九大助教授から東大教授、群馬大学学長等。東大名誉教授。故人 (1995 年)。

3 大学院

Y: 先生の退官記念誌の略歴に、研究奨学生と書いてあるのですが、研究奨学生というのは何でしょうか。

M: 旧制というのは大学院のコースがないわけです。

Y: コースがないということは、授業がないということですか。

M: そうです。ですから学位を取るのはすべて論文博士になるわけです。けれども、戦後、大学院制度をつくろうというので大学院が出来、研究奨学生といって、給料が出たわけです。それで研究奨学生というのはクラスに1人か2人ぐらいいて、非常に優遇されていました。同じ時期に助手になった人がいて、その人よりも給料はいいわけです。それで5年たった後で、助手の人がその給料に追い付くというわけです。奨学生ですから、その後、教員になれば返さなくてもいいわけです。

Y: 教員にならない場合は返す必要があるのですか？

M: そうです。そういう意味では、日本の奨学制度は非常に貧弱ですね、アメリカに比べて。本質的には借金でしょう。ただ、研究奨学生はもらえる額は多かったのも、今のよりは良いとは思いますが。

Y: それで、大学院は工学部の応用理学に行かれて、最初にされた御研究は、こういったものですか。

M: 最初にやった仕事は、ボルツマン方程式の量子力学版についてです。フェルミ粒子やボーズ粒子ですと、遷移の時に、ボルツマン統計とは違った効果が入ってくるわけです。たとえば、ボーズ粒子は遷移しやすくなるわけです。

Y: ボルツマン方程式に量子統計効果が入っているということですか。

M: Uehling-Uhlenbeck 式というのがあったわけです。朝永先生⁵ もドイツ留学時代にそういうことをされました。その統計力学的な基礎付けをやりたいと思って、論文を書いたのが、最初の論文です。M1の時にやった仕事で、出版されたのがM2です。Mori-Ono[14]で出しました。

Y: 先生が入られる前から小野先生はそういう研究をされていたのですか。

M: 小野先生は液体論⁶とか表面張力の研究をされていました。クラスター展開というのがあって、ビリヤル展開を分子描像ではっきりさせて、基礎付けようとしたものですが、それが、日本の統計力学で流行っていました。小野先生もそういうことをされていました。

Y: そうすると、テーマは先生が自分で考えられたのですか。

⁵ 朝永 振一郎 (1906-1979)。1965 年ノーベル物理学賞受賞。1937 年から 1939 年までドイツのライプチヒ大学に留学。この時の研究で理学博士を取っている。

⁶ 何度か液体論という言葉が出て来るが、詳しく勉強したい人は文献 [15] を見ると良い。

M: 小野先生はもちろん関心がありました。だけどその当時は動的なことをやってる人は、大変少なかったのです。その当時は久保さん⁷ もやっていませんでした。非平衡現象を一番最初から研究していたのは、僕だけじゃないですかね。

Y: 1953年に国際会議が開かれていますが、そこで発表されたのですか。

M: その国際会議で僕はしゃべったんですが、それは量子統計ではなかったですね。フォッカー-プランク方程式のような確率過程の式があるでしょう。ああいうのをマスター方程式というのですが、そのマスター方程式を一般的に導出すると、そういう理論をつくったと思ったわけです。これは少しおかしかったですね。

Y: 1953年の国際会議について、物理学会誌 [16] が手に入りましたので思い出す参考にしてください。

M: これは日本で初めて、やったんですね。それとこれは理論物理を中心にやったんですね。日本で初めての国際会議だったのです。

Y: 先生は口頭で発表されたわけですか。ポスター発表とかは、なかったんですか。

M: それはなかったです。ポスター発表は研究者が増えてからですね。1970年代以降だと思います。何分しゃべったか覚えていませんが、あまり長くはなかったです。山本さん⁸ に対するコメントとして話した気がしますね。Prigogine⁹ を知ったのは、この時が初めてで、私の発表に対して、Prigogineはおかしいと言っていました。

その他、有名人がたくさん来ていました。一番若いのは Prigogine で 36 歳だったと思います。そのほかは Uhlenbeck¹⁰、それから Onsager¹¹、Kirkwood¹²、それから J. E. Mayer¹³、P. Anderson¹⁴ も来ました。Anderson は、日本にその前から来ていたようです。そのころ会長は Mott¹⁵ だったと思います。いろいろな人が来たので、だいぶ刺激になりました。

その時は戦後すぐだったので、英語教育は全く貧弱だったわけです。それで、小野周さんの音頭で、国際会議用に英会話の練習をかなりやりました。

Prigogine は 4、5 年前日本でソルベー会議で会って、その時もう 80 歳でしたね¹⁶。他の方は亡くなっている人もいます。

Y: 他にはどうかたが学生として小野研におられましたか。

⁷ 久保 亮五 (1920-1995)。東大名誉教授。線形応答理論の久保公式が有名。1977 年ボルツマン賞受賞。

⁸ 山本 常信、京大名誉教授。1953 年の国際会議では、「不可逆過程の統計力学」という題で輸送現象の小分化で講演している。ちなみに森 肇氏のこの時の講演題目は、「時間に依存する現象の統計力学」[17]。

⁹ Ilya Prigogine。Brussels 大学。不可逆現象の研究、特に散逸構造で有名。1977 年ノーベル化学賞受賞。

¹⁰ George Eugene Uhlenbeck (1900-1988)。1956 年当時は、Michigan 大学物理。スピンの発見 (1925) で有名。

¹¹ Lars Onsager (1903-1976)。1956 年当時は、Yale 大学化学。1968 年ノーベル化学賞受賞。

¹² J. G. Kirkwood。1956 年当時は、Yale 大学化学。

¹³ J. E. Mayer。1956 年当時は、Chicago 大学。

¹⁴ Phillip W. Anderson, Princeton 大学。1977 年ノーベル物理学賞受賞。

¹⁵ Sir Nevill Francis Mott, ケンブリッジ大学。固体物理学。1977 年ノーベル物理学賞受賞

¹⁶ このインタビューの後 Prigogine は、2003 年 5 月 29 日に亡くなった。

M: 池田和義¹⁷ という僕の同級生の人っていて、今、阪大にいます。九大の物理出身の人です。クラスター展開をやっていました。池田さんも国際会議でしゃべりました。

そのころは久保さんがアメリカから帰ってきて、非常にアクティブに研究していました。国際会議の時に話をしておられました。その時は久保・富田の理論 [18] を話されました。線形応答の話でした。そのころから大勢、非平衡をやり出しました。

Y: で、ドクターは Uhlenbeck の式で取られたのですか。

M: ドクターは違うんです。Uehling-Uhlenbeck は M1 の時です。一番最初の時です。ドクターは、1956 年に Journal¹⁸ に出した熱的応答の論文 [19] でとりました。

Y: 済みません。ドクターを取られたのはそのだいぶ後ですものね。

4 渡米:ブラウン大学 (工学部の助手時代)

Y: で、そのまま工学部の助手になられたのですか。

M: 助手になったのは 1956 年ですね。1955 年の 12 月に John Ross¹⁹ からブラウン大学に来ないかという招聘状が来ました。あのころは招聘というのは珍しかったので、招聘されたということが新聞に載ったわけです。そうすると工学部長が、助手のポストを持って来てくれました。1956 年の 9 月に行くことにしていましたが、ポストがまだ決まっていなかったのです。

Y: そうすると招聘されたのが、助手になるきっかけになったわけですか。

M: そうですね。応用理学にはポストがなく、造船のポストが余っていたので、造船のポストを貸してくれました。渡米すると休職扱いなので、それで良かったようです。

Y: John Ross とは以前からの知り合いだったのですか。

M: 全然知りませんでした。John Ross も量子論的な運動方程式や、ボルツマン方程式の量子力学版等、Kirkwood とそういうことをやっていたんです。それで僕も同じようなことをやっていたので招聘してくれたのでしょう。ただ呼ぶといっても年は同じぐらいなのです。Ross は若かったのですが、科研費を持っていたんですね。

Y: なるほど。

M: 日本とはだいぶ制度が違うから。

Y: まるで話したことはなくて、先生のお仕事を知って呼ばれたわけですか。

¹⁷ 池田 和義。阪大名誉教授。1960 年から九大助教授で、森氏が教授として九大に来る 1965 年に阪大へ移った。

¹⁸ Journal of the Physical Society of Japan のこと。現在は、JPSJ と略す。

¹⁹ John Ross。この頃、Brown 大学化学。後に、Stanford 大学に移る。

M: そうだと思いますね。国際会議にも来てないし。ただ、彼は戦時中、日本に来たことがあって、学徒兵として沖縄に来たわけです。

Y: そうですか。

M: 私がアメリカに行ったときは、戦争が終わってあまり間がないですから、まだ、戦争の影響が残っていました。今はほとんどないと思います²⁰。

Y: で、56年にブラウン大学に行かれて、化学教室に。

M: そうですね。そこで解説が必要なんですけど、化学物理というのがあるでしょう。あれは化学教室なんです。Kirkwoodとか Onsager とか、John Ross もそうでした。その時は、そういう統計力学の話題は物理よりも化学の方が活発でした。

物理は Paul Martin²¹ がハーバード大学の物理教室でした。Kadanoff²² とか Hohenberg²³ も彼の弟子で物理出身でした。Ross とか M. S. Green²⁴、Zwanzig²⁵、Oppenheim²⁶、全部、Kirkwood の弟子で化学出身でした。

で、特に Kirkwood スクールはその時何をやっていたかということ、非平衡統計力学をつくろうとしていたわけです。シリーズで論文を出していました。十幾つかの輸送現象の論文を書いていました。その中に Irving²⁷ の仕事とか、Ross との仕事とか、Zwanzig のがあるわけです。彼らが大学院の頃にやった仕事です。

Y: John Ross も Kirkwood の弟子だったんですね。

M: Kirkwood がいたエール大学は、ブラウン大学から近くにありました。ちょうど僕のいたころ、Kirkwood は、大学の学部長をしていました。Onsager も化学教室でした。Onsager はこの頃、エール大学にいましたが、その前はブラウン大学にいたわけです。

Y: 先生もエール大学に何度か行かれたわけですか。

M: そうですね。車で1時間ぐらいかけて、Kirkwood 参りを何度かしたのですよ。Kirkwood はたくさん弟子がいましたが、Onsager は弟子が少なかったです。というか、Onsager の学問の性格から、弟子を取るというのは少ないですね。Uhlenbeck は弟子を取りました。

Y: Kirkwood はその頃、具体的にどういう研究をしていましたか。

²⁰ 以前、森先生にアメリカ留学について伺った時に、当時のアメリカの人は、日本人に対して真珠湾攻撃の悪いイメージをもっていて、大変苦労したとおっしゃっていたことから、この場合の戦争の影響というのは、日本人に対する偏見という意味だと思われる。(石崎注)

²¹ Paul Martin. 1956年当時は、Harvard 大学物理。

²² Leo P. Kadanoff, Chicago 大学。臨界現象のスケーリング理論で有名。1989年ボルツマン賞受賞。

²³ Pierre C. Hohenberg, Yale 大学。

²⁴ M. S. Green. グリーン・久保公式で知られている。1956年当時は、National Bureau of Standards (NBS)。後に Temple 大学に移った。故人。NBS は、現在、National Institute of Standards and Technology に名前を変えている。

²⁵ Robert Zwanzig. 1956年当時は、NBS。「森理論」より少し前に射影演算子を使った理論 [20] を発表している。「森理論」との違いは、インタビューを参照。

²⁶ Irwin Oppenheim. 1956年当時は、MIT 化学。

²⁷ J. H. Irving. 文献 [21] 発表当時はカリフォルニア工科大学 Gates and Crellin 化学研究所。

M: 輸送現象と液体の統計力学ですね。例えば流体力学の連続の式があるでしょう。密度の時間微分をとるとカレントになるわけですね。で、カレントの時間微分は圧力がでますでしょ。それらに対して、ミクロの表式を出すことが出来ます。カレントだったら分子の運動量の足し合わせ。

そういう分子の運動量と座標で全部を表した保存法則を密度、それからカレント、エネルギーに対して、最初に出したのは、Irving-Kirkwood[21] だったのですね。それは先ほど言った輸送現象のシリーズの最初の方にあるのです。

それと液体論ですね。ゴードン会議というのが今でもあると思いますが、夏にあって、液体論なんかあると 50 人ぐらい、ほとんど Kirkwood スクールですね。Kirkwood スクールが半分以上を占めていました。

Y: Irving-Kirkwood というのは、Irving という人の仕事ですか。

M: Irving は、Kirkwood の弟子ですね。今でも連続流体の保存法則を、原子分子のレベルで表わした式というのは、統計力学で必要ですから、これは必ず引用されていますね。最近の教科書は引用していないのかもしれませんが、引用すべきだと思います。

Y: Zwanzig に会われたのもこの頃でしょうか。

M: ええ、アメリカで会いました。Green と Zwanzig は National Bureau of Standards という所にいました。日本語では基準局とでも言うようです。

Y: そこは、研究所ですか。

M: 研究所ですね。いい仕事がたくさん出ています。

Y: Zwanzig はずっとそこにいたわけですか。

M: 定年になるまでそこにいたんじゃないですかね。定年になって、生物物理をやるということで、大学でなく別のところに行きました。

Green は、テンプル大学に移りました。川崎さん²⁸ もそこに行きました²⁹。

Y: 僕はアメリカの地理がよく分からないんですが、NBS は、ブラウン大学からはだいぶ離れているのですか。

M: NBS は、ワシントンにあって、ブラウン大学からかなり遠いです。

Y: そうしたら、Zwanzig とはどのような機会でお会いになったんですか。

M: それは Kirkwood スクールだったからでしょうねえ。

Y: Kirkwood のところに Zwanzig もよくいたわけですか。

²⁸ 川崎 恭治。1966 年から 1971 年まで九大助教授(ただし、69 年から休職)。1973 年から 1994 年まで九大教授。九大名誉教授。文献 [1] 参照。2001 年ボルツマン賞受賞。

²⁹ 川崎 恭治氏は、1970 年にイリノイ大学からテンプル大学に移っている。

M: エール大学では会いませんでした。ワシントンで会いました。ブラウン大学にも何度か来たと思います。ブラウン大学とハーバード大学、MITで、時々ジョイントセミナーをしました。Paul Martin もそこで会ったわけです。だから Kadanoff や Hohenberg も学生時代から知っています。

Y: Kadanoff たちもジョイントセミナーで話していたわけですか。

M: そうですねえ、Kadanoff は記憶にありますが、Hohenberg はちょっとわかりません。

Y: 次にその他、アメリカの統計力学で活躍していた人について、お伺いしようと思うのですが、やはり、Kirkwood スクールが中心でしたか。

M: そうですね。クラスター展開とかビリアル展開とか液体論が中心でした。今ですとコーネルにも統計力学やっている Fisher³⁰ という人がいますが、彼はイギリスから移ってきたんですね。そのころはいませんね。それから、Lebowitz³¹ という人がいますが、あのころはちょっと記憶がありません。

Y: そのころは輸送現象や液体論がはやっていたわけでしたか。

M: そうですね。日本では液体論は、戸田盛和さん³² [22] や小野周さんがやっていたようです。だけど静的ですね。だいたい平衡の液体構造とかそういう仕事が多かったです。

Y: そのころ先生はどういったことに興味がおありだったのですか。

M: 僕は液体論にはあまり興味がなくて、だいたいずっと輸送現象をやっていました。

Y: 論文リストを見ると、量子ガスの研究をされていると思いますが。

M: 量子ガスはですね、アメリカから帰ったあとです。いや前だったかな。とにかく、応用理学の大学院に西村さん³³ というかたが来られ、その人が、フェルミ粒子系の輸送現象をされていました。輸送係数の計算ですが、それを一緒にやりました [23]。

アメリカに行っている間は輸送現象の一般論ですね。その時は、局所平衡分布を初期値にとって、そうすると、局所平衡ですから、リューヴィル方程式に従わないのですが、時間が経つと正しい分布に近づくわけですね。それで輸送現象を議論できます。量子的に密度行列でちゃんと統計力学が展開できるのです [24]。

で、M. S. Green の仕事は 1952 年 [25] で、これは現象論的なフォッカー-プランク方程式を仮定して、輸送係数と相関関数の関係を出してるわけですね。それをちゃんとやったのを覚えてますね。時たま引用されます。

Y: Green は古典論だったのですね。

³⁰ Michael E. Fisher. ロンドンの King's College から Rockefeller 研究所を経て Cornell 大学に移る。現 Maryland 大学。1983 年ボルツマン賞受賞。

³¹ Joel Lebowitz, Rutgers 大学。統計力学全般に幅広い業績を残している。1992 年ボルツマン賞受賞

³² 戸田 盛和、東京教育大学名誉教授。戸田格子の発見で有名だが、インタビューにもあるように液体論の研究もしていた [22]。

³³ 西村 久。大学院修了後九大教養部物理。九大名誉教授。

M: そうですね。それに現象論だったわけです。問題は現象論ですね。だからリューヴィル方程式とか、そういうものから出すのではないのです。

Y: 先生の御研究では、輸送係数を微視的に量子論的に導出されたわけですか。

M: 厳密ではありません。物理的にですね。アメリカでは、そういうことをやっていた。50年代の後半ですね。1959年に、アメリカから帰りました。

Y: 帰ってすぐ流動研究員で東大の久保研に行かれたわけですね。

M: そうですね。これは第1回ですね。帰ってきたら、その年から流動研究員ができるから来ないかと、久保さんから話があって、それで9月から流動研究員になりました。

Y: どういう制度なのでしょう。

M: 籍はそのままなわけです。僕は九大の助手に復職していたわけですが、籍はそのままで行くわけです。研究のためだけに行くわけですね。だから、講義がある人は講義を何とかしないといけないですね。僕は助手だったのでよかったのです。

Y: その頃、久保研はどんな雰囲気でしたか。

M: 助手に小幡行雄³⁴という人がいて、磁性体をやっていました。小幡さんは、原研に移って行って、今は神奈川大学の教授だと思います。磁性体のクラスター展開などを研究していました。それから長岡洋介さん³⁵が院生でいました。長岡さんとは、あとで基研で一緒にいるわけです。それから橋爪夏樹さん³⁶がおられました。橋爪さんは僕より先輩です。そのころは輸送現象をやっていました。輸送現象というか確率過程論でした。Onsager-Machlup[26]に引用されていますね[27]³⁷。

この頃の久保さんは線形応答を、非線形に拡張しようとしていましたね。なかなかうまくいかなかったようです。僕も変分原理を使ったりしていました。

で、そのうち基研にポストが空いたので、基研の助教授になりました。結局、久保研は半年しかいませんでした。半年でしたね。だから流動研究員の第1回が出来て、第1回は半年だったんですよ。1959年の8月にアメリカから帰ってきて、9月から久保研に行きました。そしてその次の年の4月から基研に行ったわけです。アメリカから帰ってきて、九大でちゃんとやらずに何事だ、と言って、しかられたことがありました。数学の金原先生というかたに叱られました。

5 基研の助教授時代

Y: 1960年に基研に移られたわけですが、当時の基研はどんな風でしたか。

³⁴ 小幡 行雄。現在は、神奈川大学を退官している。

³⁵ 長岡 洋介。京大基研教授、名大教授、基研所長を経て現在関西大学教授。

³⁶ 橋爪 夏樹、お茶の水女子大学名誉教授。岩波講座 現代物理学の基礎「統計力学」7章から9章を執筆している。

³⁷ 橋爪氏の研究[27]は、Onsagerの不可逆過程論とブラウン運動との関係を議論したものだが、その点でOnsager-Machlup[26]より先駆的な研究だったといえる。

M: 基研では研究会を組織する仕事が忙しかったです。輸送過程とか相転移とかの研究会をやりました。

相転移の臨界指数は、研究が始まっていて、ちゃんとはしていませんでしたが、Fisherが数値計算をしていたわけです。そういう指数とかで、一番有名だったのは乱流における、Kolmogoroff³⁸の3分の5乗則でした。流速の2乗が運動エネルギーですね。この運動エネルギーの平均値の波数依存性が、3分の5乗になるという法則です。次元解析より少し高級なんですけど、まあ次元解析ですね。今からいうと、乱流の渦分裂について、ある自己相似性を仮定して出すわけです。Kadanoffは流体力学のそれを見て、スケーリング則を考えついたわけです [28]。

スケーリング則が出て、物理の理解の仕方が変わりました。それまでは指数で理解するという仕方ではなくって、ちゃんとエネルギーとか熱力学関数を書いてみて、それがどういう関数かを議論していました。そうではなくて、普遍的な性質だけを議論するわけです。乱流の3分の5乗は流体によらないでしょう。スピンの種類とか、液体の種類とか、そういうのによらず、指数が決まる。そういう理解の仕方が60年代に出来たわけです。

湯川先生³⁹がいる時は、基礎物理学研究所ですから、基礎物理とは何かというシンポジウムがありました。それは湯川先生がお元気でいらっしゃる時に、基研15周年記念で開かれました [29]。そこで湯川先生の、基礎物理の研究とは何か、というお話しがあるんですけども、常日頃、基礎がはっきりしない分野をやることがそうだとおっしゃっていました。

例えば、湯川先生はBoltzmann⁴⁰が好きなんです。だから話に良くBoltzmannが出てくるんですが、特に力学現象は可逆的であるのに、熱力学現象は不可逆であるのはなぜか、どうなっているか、何度か僕も聞かれたことがあります。そういうのを基礎物理の例として、話されているわけです。

それから、液体も例として挙げておられました。固体は構造がわかっていますね。液体は構造があるのか、ないのか、分からないし、やっぱり混沌としているわけでしょう。液体はよくわからない。構造を持たないとは言われなかったですね。何か構造があるのではないかと。そういうのを基礎物理と言っていました。

基礎物理の話の他には、相転移とか超高压とか、さらには、地球内部の現象とか、表層大気とか、そういうのに拡大しないといけない、生物物理もそうですが、物理学は拡大しないといけないとおっしゃっていました。

Y: 可逆、不可逆の話は、その頃、先生はどのように考えておられましたか。

M: 当時、僕は川崎さんとスピン拡散の研究⁴¹をしていました。スピン系で、スピンの上向きや下向きが広がっていく現象です。その他、ヘリウムの超音波吸収や、いろいろ輸送係数を計算していたのですが、それは実験と比べるようなことです。

³⁸ Andrej Nikolajewitsch Kolmogoroff (1903-1987)。1931年にモスクワ大学教授。

³⁹ 湯川 秀樹 (1907-1981)。京大名誉教授。1949年日本人として始めてノーベル物理学賞受賞。

⁴⁰ Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906)。オーストリアの物理学者。

⁴¹ このあたりのことは、文献 [1] に詳しい。

そういうことをやっていて、ただ、さっきの不可逆性とか可逆性の問題は、やっぱり気になるわけです。僕もだいたい物理は、ニュートン方程式みたいな、1行の方程式からいろいろ出てくるというのが好きで、Boltzmann の $S = \ln W$ とか H 定理とかそういう基礎的なもの、そういうのが感動するし、だけどそういうのはなかなか簡単には出来ないので、実際の計算をいろいろやっていました。

6 ドイツ(ブラウン運動の理論)

M: で、基研にはいろいろな外国人が来ていたわけですが、ドイツの Haken⁴² が3カ月ほど基研にいたことがありました。その時に Haken を初めて知ったのですが、意気投合して、ドイツに必ず招聘するので来てくれと言われて、ドイツに行ったわけです。彼はレーザーをやっていました。だからいろいろな非平衡の例として、Haken はレーザーを挙げています。

Y: その頃はもうだいぶ有名だったんですか。

M: ええ。それと、Haken の所には何人かの日本人が行きました。蔵本さん⁴³ が行ったと思います。山田さん⁴⁴ もそうだったと思います。ただ、Haken の物理は特色がありますから。まあ僕も癖がありますが。

Y: それでブラウン運動の理論 [2, 3] はドイツで考えられたのですか。

M: 1964 年にドイツに行って、ドイツで講義をやることになったわけです。それがきっかけです。

Y: どういう講義を持たれたのですか。

M: 輸送現象の講義をやりました。週に1回の講義を定期的にやりました。その中で出来てきたんですが、その年の7月に統計力学の国際会議がアーヘンであって、そこで発表をしたんです。

Y: ドイツで最初に発表されたわけですね。

M: そうですね。日本でも射影演算子はいろいろやられていた [30] のですが、僕のは具体的な式をつくるのに、時間がかかってしまいました。僕以外の普通の射影演算子は抽象的でしょう。それを僕は物理量をベクトルと考えて、そのつくる空間に射影したのですが、そういうやり方はなかなか思いつきませんでした。しかし、それですべてが簡単になったのです。

Y: 物理量に射影するという考え方は、先生より以前にはなかったのですか。

⁴² Hermann Haken. ドイツ、Stuttgart 大学。シナジェティクスで有名。

⁴³ 蔵本 由紀。1969 年から 1976 年まで九大助手。現京大教授。森肇氏と共著の教科書 [9] がある。

⁴⁴ 山田 知司、九工大工学部教授。

M: それ以前にはありませんでした。中嶋さん⁴⁵ [30] とか Zwanzig[20] のは密度行列にかけてるわけです。だから非常に抽象的なんです、僕は物理量を取り出したわけです [2, 3]。だからランジュバン方程式の一般化というか、運動方程式を直接出すことができたわけです。

Y: アーヘンの会議で発表した時、まわりの人たちの評判はどうでしたか。

M: そうですねえ、あまり記憶はありません。Haken は面白いと言っていました。彼は私が講義をした時に聞いていましたから。

この方法を使って、輸送現象をいろいろやったわけです。そういう応用を計算するには、連分数展開なんかが便利だと思って、連分数展開などをやりだしました [4]。

Y: Zwanzig とはまだ交流はあったのですか。

M: Zwanzig の [20] は知っていました。

Y: 論文を読む前にも知っていましたか。

M: いやいや論文で知っていました。ちゃんと引用はしていたと思いますよ。ただ密度行列を使っていたので、演算子のままでばらせないわけです。具体的でない抽象的なものだったのです。古典力学では Zwanzig は、その後具体化しましたが [31]。

要するに 2 種類の潮流があるわけですね (表 1 参照)。Green のフォッカー-プランク方程式なんかを考えると、そこで系譜が別れてくるわけです。

だから僕のは、運動論の方法と書いていて (表 1 参照)、物理量の時間発展の方程式、つまり、運動方程式を直接扱うわけです。例えば、ボルツマン方程式というのはある空間的な細胞の中の分子の数という物理量の時間発展の式ですね。力学系理論は運動方程式を使って、非周期運動とか、積分できないとか、カオスとかを議論するわけです。もちろん Poincaré⁴⁶ は、カオスという言葉は使っていませんでした。ブラウン運動論のランジュバン方程式も運動方程式ですし、Onsager も物理量を議論していたわけです。

もうひとつの流れは Gibbs⁴⁷ の統計集団で、例えば Boltzmann は、気体運動論で、分子の集団として熱力学の法則を出したいと、こう思ったわけですね。分子論はまだ確立されてなかったのですが、分子の集団から出したいと。で、その時にボルツマン方程式や H 定理等の重要な概念が出されたわけです。ところがこれは、可逆な力学と不可逆の熱力学の本質的な矛盾があって、Gibbs はこの矛盾を避けるために熱平衡を考えて、そして統計集団を導入したんですね。この統計集団という考え方が後で確率過程のフォッカー-プランク方程式に発展して、さらに、統計集団自身の時間変化をリユービル方程式という形で書くようになるわけです。たいていの統計力学の教科書はこれから出発しますね [32]。これが 1938 年ですけども、その後、BBGKY、つまり、Bogolyubov、Born、Green、Kirkwood、Yvon 方程式 [33] とか、久保さんの

⁴⁵ 中嶋 貞雄、東大物性研元教授。Zwanzig[20] より早く射影演算子を使った。

⁴⁶ Jules Henri Poincaré (1854-1912)。フランスの数理物理学者で、力学系理論の創始者。

⁴⁷ Josiah Willard Gibbs (1839-1903)。Yale 大学。

表 1: 非平衡統計力学の 2 つの潮流 ^a

1. 運動論の方法
・ 気体運動論 (Clausius, Maxwell, Boltzmann)^b ・ ボルツマン方程式と H 定理 (Boltzmann 1872)^c ・ 力学系理論 (再帰性、非可積分系、カオス: Poincare 1890-99) ・ ブラウン運動論 (Einstein 1905, Langevin 1908 など) ・ 揺らぎと不可逆過程の相反定理 (Onsager 1931) ・ 線形確率方程式と揺動散逸公式 (Mori 1965[3]) ・ カオス・乱流の統計性 (粗視的軌道拡大率の揺らぎ、確率測度の特異性スペクトル、状態変数の揺らぎと時間相関など: 1980-) ・ カオスの 2 重性と自然の階層性 (Mori <i>et al.</i> 2003[11])^d
2. 統計集団の方法
・ 統計集団による熱平衡統計力学の定式化 (Gibbs 1902)^e ・ 確率過程のフォッカー-プランク方程式 (1914, 1917) ・ リュービル方程式 (1838) ・ BBGKY 方程式 (1935-1949[33]) ・ 線形応答理論 (Kubo-Tomita 1954[18], Kubo 1957[34]) ・ マスター方程式 (Zwanzig 1961[20], 1972[31]) ・ 動的臨界現象のモード 結合理論 (Kawasaki 1970[6]) ・ 非平衡統計演算子の方法 (Zubarev 1971[35], 1994[36])^f

(表 1 の注)

^a この表は森肇氏がインタビューのために用意してくれたものを吉森が書き直したものである。

^b 気体運動論の理念: 気体は多数の分子からなる保存力学系であるとし、それら分子群の運動論から気体の熱力学の諸法則を導出しようとする。

^c ボルツマン方程式と H 定理は、19 世紀の重要な遺産である。可逆な力学と不可逆な熱力学との本質的に矛盾する様相の相克と融和が、19 世紀のもう一つの重要な遺産である。

^d カオスの 2 重構造: 力学系のカオス軌道は、短時間スケールでは決定論的で予測可能であるが、長時間スケールでは確率論的でランダムになる。このようなカオスの 2 重構造が自然のいろいろな階層構造を作るとして、その長時間スケールのランダムな運動から、カオス・乱流によるエネルギー散逸や輸送現象の理論を作ろうとする。これは、気体運動論の理念の拡張であるといえよう。

^e Gibbs は、力学の可逆性と熱力学の不可逆性の相克の問題を避けるために、対象を熱平衡状態に限定して、統計集団の概念を導入した。

^f 熱平衡から遠く離れた散逸力学系のカオス・乱流では、相空間のカオス領域は奇妙なアトラクターで、自己相似な非整数次元のフラクタルとなり、統計密度分布は singular になる。したがって、Zubarev の方法には問題がある。実際、統計集団の方法は、散逸力学系のカオス・乱流では有効でないと思われる。

線形応答 [34] など、リュービル方程式から出してくるわけです。これはだいたい 1 番目の運動論の方法と違うんですね。

Y: 2 番目ののは、分布関数を使う方法ということで、よろしいですか。

M: そうですね。

Y: 量子力学のたとえで、シュレーディンガー描像とハイゼンベルグ描像というのがありますが、1 番目の運動論の方法がハイゼンベルグ描像、2 番目の分布関数を使う方法がシュレーディンガー描像という対応でよろしいのでしょうか。

M: ええ、そうです。ただし、カオスの奇妙なアトラクターでは、統計分布密度は singular になりますので、統計集団の方法は使えなくなります。つまり、熱平衡から遠く離れたカオス・乱流では、2 つの描像は同等でなくなります。

Y: ブラウン運動の理論の問題意識は、前からずっと持っておられたわけですか。

M: そうではないですね。統計集団の方法というのも僕はやっていて、その時、僕はいつも局所平衡を、初期分布にとっていたわけです [24]。それも統計集団なわけですね。局所平衡を初期値にとって、そうするとその分布は、ミクロの時間スケールで本当の平衡に近付くから、それを使っていろんな議論をしていたわけです。

けど、局所平衡はあくまで仮定だから、やはり、初期値をちゃんとしたいと思っていたわけです。初期値の問題というのは難しいわけですよ。久保理論は、初期値をマイナス無限大に持っていくわけですね。でも、それは、一般にはおかしいと思っているわけです。

それで、最初は運動方程式でも平均値を考えていましたね。そのうち平均ではなくて統計集団を外せと思ったわけです。外すと式が非常に簡単になってきました。その代わり揺動力が入ってくるわけです。平均をかけると揺動力は入ってこないわけです。

で、平均をはずして揺動力を入れると、揺動力と輸送係数の間に関係が付いてきて、非常に具体的になってきたわけです。統計集団を外して、力学量の変化を直接追いかけると、ランジュバン方程式が出てきたわけです。

Y: 平均値をやめたというところが鍵になったわけですか。

M: そうですね。だから、それがあるでしょうね。

Y: 平均値をやめるというのは、やはり、初期値が気になってたわけですか。

M: そうですね。

Y: 局所平衡を仮定されていたのは何年前だったのでしょうか。

M: 50 年代に Physical Review [24] に論文を書いていますね。まあ、昔は年に論文を 1 篇書けばよかったんですが、最近は若い人と一緒にするのでたくさん書いてますけど。

Y: 集中されるときは 1 年に何本も書いておられるようですが。

M: 射影の論理構造は、連分数展開までいってはっきりしましたけど [4]。やり方の特色というか、ラプラス変換を計算するのに、ちょうど向いているようなやり方をやっていたわけです。

Y: 先程、話された2つの潮流ということでは、だいたい先生は1の方(表1参照)でやられたわけですか。

M: 50年代の後半と60年代の前半は2の方で関係していることをやってるわけですよ。さっきも言ったように。だけど厳密にやろうとして統計集団の射影演算子を使うと、抽象的になって中身が分からなくなる。それと運動方程式が好きだっていうことが出てきたんでしょうねえ。意識的に。

Y: 運動方程式の方法は、ブラウン運動の理論をつくる前から、好きだったわけですか。

M: ニュートン方程式は好きでしたから、もっと前からですね。

Y: なるほど。それで、結局おもに1の方法(表1参照)をされているのは、運動方程式が好きだったこともおありだったんでしょうけれども、統計集団を使うと射影演算子が抽象的になりすぎるということと、初期値の問題がどうしても解決できないという、主に2つの理由ということでしょうか。

M: そうですね。

7 帰国、九大時代

Y: それで、日本に戻られて、すぐ九大に行かれたわけですか。

M: 1965年か、66年ですかね。

Y: 略歴では1965年に帰国されて、その年に九大に行かれたことになっていますが。

M: そうですね。帰った年です。ほとんど同じ時期に素粒子では大槻教授⁴⁸、原子核では丸森教授⁴⁹が来られました。大槻さんは僕より、2つか3つ年下ですね。

Y: 先生が九大に戻るにあたって、どなたかが尽力された方がおられたのですか。

M: えっと、実験の澁谷先生⁵⁰という方がおられ、今もお元気ですけども。それから小野周先生ですね。小野先生が帰った方が良いと。小野周さんも九大出身なんですよ。

Y: 先生は1.5講座を任されたとお聞きしましたがけれども。

M: 物性と統計力学の両方をやらないといけないので、将来2講座にするために、まず最初は、1.5講座で出発したわけです。

⁴⁸ 大槻 昭一郎。1966年から1993年まで九大教授。九大名誉教授。

⁴⁹ 丸森 寿夫。1966年から1972年まで九大教授。東大教授を得て、現在東京理科大学教授。

⁵⁰ 澁谷 喜夫。1960年から1974年まで九大教授。

Y: 2 講座にするのは最初からの予定だったわけですか。

M: それが条件で移ったわけですから。

Y: 条件だったのですか。それで、川崎先生と都築先生⁵¹ を呼ばれたわけですか。

M: そうですね。川崎先生が来られたときに完全に 2 講座になりました。

Y: それは、川崎先生が教授で来られた時のことですね。

M: あそこは活発でしたね。川崎さんも活発だったので。

Y: それで、1968 年に統計力学の国際会議があったと思うのですが、どんな会議でしたか。

M: そうですね。世代交代が起こったのが印象的でしたね。その頃は Kadanoff が 1 番元気でしたね。九大に Kadanoff や Stanley⁵² が来ました。そのころの若手ですね。今では大御所ですけども。

Y: Stanley は前にアメリカに行かれた時に、お会いになっていましたか。

M: いや Stanley には会いませんでした。Stanley は知りませんでした。Kadanoff が九大に来る時に、Stanley は自分も一緒に行きたいと言って、ついて来たようです。今では Stanley は非常に有名です。どんな仕事をしたのか私はよく知りませんが、Stanley はいろんなことをよく知っていますね。

Y: ここに、その国際会議のプロシーディングス [37] があります。

M: 1968 年は日本でやって、1970 年はメキシコとなっていたわけですが、メキシコでは開けなかったんですよ。それで 1971 年にアメリカでやりました。で、アメリカで組織したのは Stuart Rice⁵³ でした。彼は Kirkwood の弟子でしたね。シカゴの研究所の所長をやっていました。

Stuart Rice は、その次の課題を考える、そういう意図を鮮明に出して会議を開きました [38]。だから生物物理とか流体、乱流とか、力学系カオスとかを、議論しました。カオスというのはまだはっきりしていませんでしたが、離散的なマップの理論について、Smale⁵⁴ と Ornstein⁵⁵ とか、そういう人たちを呼んで話を聞きました (付録 B 参照)。

Y: 1971 年の会議ですか。

M: そうです。70 年代はそんな感じでした。そういう意味での思想は、1968 年の国際会議には残念ながらないですね。

⁵¹ 都築 俊夫。1966 年から 1974 年まで九大助教授。東北大名誉教授。

⁵² H. Eugene Stanley。この頃 California 大学。現 Boston 大学。

⁵³ Stuart A. Rice, Chicago 大学。Advances in chemical physics というシリーズの編集者を Prigogine と共にしている。

⁵⁴ Steve Smale, California 大学 Berkeley 校数学教授。1966 年フィールズ賞受賞。

⁵⁵ Donald S. Ornstein, Stanford 大学の数学者。エルゴード理論。

そのころは臨界現象が盛んに研究されていました。で、Kadanoffの理論というか、セルに分けて自己相似形を使うのが出た後でした。それとHohenbergが有名でした。そういえば、1968年の会議にはHohenbergは来ませんでしたね。招待をしなかったからかも知れません。

この会議から統計力学の国際会議の出席者が増えたんですね。それまではパラレルセッションというのはやったことがなかったんです。全部ひとつの会場で、ポスターセッションなんか、もちろんなくて、それで悠々としゃべる時間がありました。僕はそれが国際会議だと思っていました。ところが、それからどんどん出席者が増えてきて、シカゴでやったときはだいぶしぼったみたいです。

Y: それは1971年の会議ですか。

M: 71年の会議です。その次はオランダだったと思います。

Y: 2年ごとにやっていたわけですか。

M: そうです。2年ごとやっていたわけですが、メキシコでやらなかったのも、1年ずれてしまったわけです。2年ごとだったんですが、その後3年ごとに変えましたね。それは低温と、もうひとつ半導体だったですか、順番にやることにして、今は3年ごとだったと思います。

Y: 今のというのはSTATPHYSという会議のことでしょうか。確かに3年ごとですね。

M: そのころは2年ごとにやっていました。アムステルダムであった時は500人ぐらいになって、今では1000人ぐらい集まるでしょう。そんなの会議とは言えないでしょう。昔はconcluding remarksというのをUhlenbeckがやっていて、彼は問題点を締めくくるわけです。将来の問題と言ってまとめたわけです。Uhlenbeckは冷徹というか、しかも客観的で本質を見るような人で、Uhlenbeckが死んでからそういう人はいなくなったですね。全体を見渡しながら非平衡も相転移も、全部両方を見渡すような人でした。

数年前のパリの会議⁵⁶では、PrigogineとかRuelle⁵⁷とかLebowitzとかが、パネルディスカッションをやりましたね。不可逆性とは何かを議論していたようです。あれはPomeau⁵⁸なんかが意識的にしたんでしょうね。だれかそういう人がいないと、単に大勢集まってバラバラ会議があって、終わりということになりますね。

とにかく、今は当時に比べて、だいぶ出席者の数が増えたですね。この日本の会議から増えてきたわけです。この時に初めて出た人は多かったわけです。Hakenのところの人たちも多勢来たし。

Y: 次にカオスの話に入らせて頂くわけですが、その前にブラウン運動の理論のその後の発展に関して、お話しがあればお伺いしようと思います。いかがでしょうか。

⁵⁶ 1988年7月20日から24日に行われたSTATPHYS20のこと。

⁵⁷ David Ruelle, フランス科学高等学院 (IHES) 名誉教授。

⁵⁸ Yves Pomeau, C.N.R.S.(フランス国立科学研究所)、École Normale Supérieure。

M: そうですね。その後というか、えーっと、僕が作ったブラウン運動というのは線形でしたね。ですから、輸送係数は線形が出てくるわけです。カオスや乱流も、同じようにやるから線形輸送係数なんですけど、線形輸送係数は、プロジェクトアウトするのは、マクロな変数の線形の部分だけなんです。

マクロな変数の2次の項とか3次の項は、揺動力の中に入っていて、それが輸送係数の中に入っているわけです。そうすると、それがあらわに効くことがあるわけですね。臨界現象とかでは非常に重要になってくるわけです。川崎さんとかはそれを取り出したわけです。

それで、熱平衡の近くではなくて、熱平衡からずっと離れた場合、カオスや乱流を考えているのですけれども、その時でも観測は、マクロな変数のパワースペクトルや時間相関や線形輸送係数になるわけです。輸送係数に巨視変数が入ってきて、それは取り出さなければならぬわけです。カオスや乱流の場合はどうなるかというのは、まあ、モード結合では、うまくいくかどうかまだ分からないので、連分数展開でもやろうと思っているわけです。

とにかく、輸送係数が異常になるのは、測定する輸送係数が線形だからで、揺動力の中に、マクロな遅い変数が入ってくるからなんです。それが乱流なんかは、最も劇的な形で起こっているわけです。

したがって、それを調べるには、その中に入っている巨視変数の揺らぎの部分を取り出す必要があるわけです。臨界現象の場合はモード結合でうまくいっているんですが、カオスや乱流の場合は、そこは分からないわけです。ですから発展と問題点はそこにあるわけです。

Y: 先生は、いわゆる非線形ランジュバン方程式の仕事もされているわけですが、それはどうなのでしょう。

M: まあそれですね。藤坂⁵⁹さんとやった時[39]も巨視モードを取り出そうとして、非線形に戻ったわけです。非線形というのは非線形項を消去しないわけで、線形の場合は繰り込んでるわけですが、繰り込まないやつで議論しないといけないわけです。

ですから1つの目的はそうだったわけですが、まだそこはちゃんと出来ていないんですね。適切な例が必要でしょうね。例を作らないといけないわけです。モード結合なんかは複雑ですね。川崎先生の本[40]を読むと複雑だと思います。一般的にやろうとすると複雑ですね。カオスや乱流では別の方法を考えなければいけません。

Y: ではカオスの話をよろしいでしょうか。

8 カオスの統計力学[41]

I: それでは、始めさせていただきます。僕は、森先生が九大理学部教授を務められた最後の2年間に、修士課程を過ごしたいわば最後の弟子にあたるわけですが、僕が森研

⁵⁹ 藤坂 博一。1989年から1998年まで九大助教授。現京大教授。

に入った1988年ごろは、森研ではカオスの統計力学の構築を目指して研究されていて、ある程度成果を出されていた印象が残っています。そもそもカオスの統計力学に興味をお持ちになったきっかけと、カオス現象の面白さについてお話し頂けますか。

M: 直接には、ローレンツ系ですね。ローレンツ系でアトラクターが計算機で出るわけですね。あのローレンツアトラクターというのが、カントールセットがあって非常に複雑なわけです。それはLorenz⁶⁰の論文[42]にも書いてあります。

そういう構造というのは、統計力学には今までなかったわけです。それに魅せられました。これはどう扱うのか、ということで幾何学的な構造に最初関心を持ったですね。研究室ではいろんな人が紙でそういう形を作ったりして、やっていたわけです。その次元を計算しようと最初思って、2.06次元[43]というのを出した、それがカオスへの関心の始まりですね。

I: それは何年だったのでしょうか。

M: あれは何年でしたかねえ。1980年でした。1977年のハイパーカンファレンスでMandelbrot⁶¹の話を聞いてフラクタルは変わってるなあとは思っていました。

Y: ハイパーと言うのはどこの国ですか。

M: イスラエルです。その時、Mandelbrotの話があって、面白いなあと思いました。で、ローレンツアトラクターのフラクタル次元なんかを計算して、Mandelbrotは私の本[44]に載せていますね。

フラクタル次元というのは知られてはいたんですが、それを力学系に対してどう計算するかは、分かっていませんでした。それがリヤプノフ指数を使えば、出来ることがわかって計算しました。それでしょうね。ストレンジアトラクターの構造ですね。構造が変わっていて、自己相似で、かつカントール集合というか、普通でない。そこに魅せられました。

だからそうすると、相空間の分布関数というのは特異的になるわけです。密度は定義できません。フラクタル次元ですから、非整数次元ですから、相空間の確率分布は全部特異的になるわけです。統計集団の方法というのは使えないわけです。

ところが、平衡から充分離れても局所平衡は必要かもしれませんが、流体力学の式は成り立つと考えられているわけです。ですから運動論の方法が、平衡から充分離れていても使えると思っています。力学はつねに成立しているわけですから。そういう意味では統計集団は空間がフラクタルになると特異的になってしまうわけです。

I: そうしたきっかけでカオスの研究を始められたんですね。それでは、カオスの本質はどう考えていらっしゃるのでしょうか。

⁶⁰ Edward Norton Lorenz. MIT 名誉教授。3変数からなる気象モデルの微分方程式（ローレンツ系）がカオスを示すことを発見した。

⁶¹ Benoît B. Mandelbrot, Yale 大学数学。フラクタル幾何学の創始者。

M: カオスの本質は、今のフラクタル構造と、カオスの2重構造とにあると思っています。物理学会誌[12]にも書いていますが、ニュートン方程式とか、ハイゼンベルグ方程式とかの、決定論的な方程式から出発するとですね。短時間スケールでみると、決定論的で将来が予測でき、しかも保存系では可逆なわけです。ところがカオスになると、長時間スケールで、ちょっとした初期の誤差が拡大されて、確率論的になって、ランダムになり、しかも不可逆になるので、だから短時間スケールで見ると場合と質的に違ってきてるわけです。

それを2重構造とっていて、そうすると、例えば、よくマクロとミクロというのは、質的に違うといえますね。マクロは不可逆ですが、ミクロは可逆だと。それはカオスの2重構造のせいだと思っています。ですから、カオスがあるからそうなっていると。そのことはあまり皆さん言いませんが、僕はそう思っているわけです。

マクロのいろんな運動方程式について、そういう考え方を出す必要があるわけですね。それは射影演算子の方法で出せるわけで、そうすると、カオスや乱流の散逸やランダム化が説明できるわけです。それから輸送現象が理解できるわけですね。そういうものを理解する理論はそこからつくれると、そう思っています。

そうすると、ここに少し書いてありますが(表1参照)、ボルツマンの気体運動論の理念に関係してくるわけです。それは、平衡系の熱力学とミクロとの関係を付ける、ということだったんですが、平衡から離れている場合に、ミクロと関係付ける理論は、必ずしも出来ていないわけですね。けれどもエントロピー生成なんか、平衡からずっと離れていても存在するし、でも熱とは直接結び付いてはいないわけです。そういう形で、平衡からずっと離れたところの、マクロとミクロの関係までも、カオスの2重構造を考えれば、気体分子運動論の理念の拡張として解明できると思っているんです。

I: 最近、そのようなことをよくお話になられますが、1980年ぐらいからカオスや乱流の統計力学の研究を始められて、達成できていない点はございますか。

M: 乱流の場合はKolmogoroffのスペクトルみたいに、そういう研究は1941年からあるんです。それに対する散逸効果の間歇性といいますけれども、そういうものを中心に、いろんなカオスの統計性を調べていたわけです。でも、それは統計力学にはなっていないですね。基礎方程式から導いているのではありません。

だから統計力学にするには、乱流のランダム化の理論が出来ないとダメなわけです。それで、今、ランダム化の理論を作りつつあるというわけです。まあ何がカオスの本質かというのは、なかなか人によって違うわけですが。

I: カオスの統計力学は、まだ出来ていないということなんですね。今までは、カオスのランダム化は、成立すると仮定したうえで研究されていたと、考えればよろしいでしょうか。

M: いや、それは証明できるわけです。正のリヤプノフ指数があれば、証明できるわけです。仮定ではありません。それから、2重構造も仮定ではなくて、そうなってるわけです。

そういう2重構造から、分子粘性係数とか熱があると考えないといけないのですが、この2重構造を捉えた理論が出来てないわけです。そういうものを作らなければならぬわけです。それはボルツマンたちがやろうとしたことを、実現することになるわけです。

I: 今おっしゃったことの他に、達成できていない点はございますか。

M: 実験はまだ出ていないですね。マクロな変数のパワースペクトルや時間相関を求める実験をやらないといけないでしょうね。計算機では出来るわけでしょうが。

それから、どう役に立つかというのもまだ分らないですね。ただし自然を理解するのに不可欠なことは分かっています。

それと、熱平衡から外れた場合の、非平衡統計力学を考えると、本当は非平衡の量子統計力学が必要なんですね。ところが量子論のカオスが出来ていない。量子論では、束縛系ではない、連続系を研究しないといけないわけです。いろんなエネルギーレベルのランダムステートというのは、調べられているわけですが、カオスはそういうところでは起こらなくて、衝突の場合、正のエネルギーの場合に起こるのです。しかし、そういう研究はないですね。

しかもハイゼンベルグ表示でみると方程式は非線形ですから、量子カオスが存在してもいいと思いますが、シュレーディンガー方程式の場合は面倒ですね。あれは線形方程式ですので、カオスは存在しないとする人はたくさんいるわけです。

束縛系では非周期運動は存在しないので、カオスがないのは当然ですが、衝突とか正のエネルギーの場合は、カオスやランダム性は存在します。したがって統計性はあると思っています。物性の研究を進めるには量子統計力学が不可欠ですね。

I: 最近、先生は、カオスや乱流による輸送現象を、ブラウン運動の理論で開発された射影演算子法を応用して、研究されていらっしゃるんですね。ブラウン運動の理論を、どのようにカオスや乱流の研究に、使おうと考えていらっしゃるんですか。

M: ブラウン運動は熱平衡系のカオスの揺らぎなんですね。今は熱平衡から離れたところで起こっているカオスや乱流を考えているわけです。本質的なことは、カオス軌道によってランダムになる、それを揺動力でとらえたとすれば、運動方程式の形はブラウン運動と同じになると思うんですね。熱平衡系の揺らぎと同じ形になると思っているわけです。

それはOnsagerの考えと同じだと思います。Onsagerは、不可逆過程が平衡系の揺らぎの減衰で現れると思っていたわけです。そうすると理論は非平衡から展開して良いと思うんですが、ブラウン運動の揺らぎの減衰と、パラレルになると思いますね。

I: それはカオスだけではなくて、乱流にも応用できるとお考えですか。

M: そうですね。それはどうしてかという、決定論的な式から、偶然性が出てこないといけないわけでしょう。それはそう簡単には出てこないんですよ。それはカオスでなければ出てこないわけです。そうすると乱流を、決定論的方程式から、位相空間のカオスとして理解できるかどうか分かりませんが、多分できると思います。

それから熱平衡系の統計力学を導出するときも、決定論的な式のランダム化が必要なので、カオスが必要と思っているわけです。たくさんの分子があると、カオスになるという証明は今はないですが、カオス軌道があって始めて、分子粘性係数を含む流体力学の式が出せる。カオス以外にはないと思っているわけです。

ランダムになる理由はカオスしかありません。それはリヤプノフ指数が正であるということに立脚して、微少な誤差が指数関数的に拡大される、それに立脚するほかないと思います。そう簡単に決定論的な式がランダムにはなりません。統計的なダイナミックスは全部、カオスに帰着すると思うんだけど。

I: 今年の11月号の日本物理学会誌 [12] に掲載されたカオスの2重構造と自然の階層性について、簡単に説明して頂けますか。

M: 階層性で分かりやすいというと、ミクロなレベルとマクロなレベルというのが、それは熱平衡であれ、熱平衡からずれている場合でも、そういうものはあると思ってるわけですね。そして経験的に、マクロなレベルでは不可逆性が成立している、覆水盆に返らず、そう思ってるわけですね。ところがミクロにみると可逆であるということは、量子力学なんかでも実証されているわけです。

だからそうするとそういうミクロなスケールでの運動と、マクロなスケールでの運動が質的に違っていると、それが階層性なわけですね。カオスの時はそれが起こり得るわけです。それは出せるわけですね。計算機でも出せるし、考え方でも出せるわけです。だからそういう階層をつくる根拠というのは、カオスにあると、そう考えるわけです。

今のは、ミクロとマクロなわけですが、他にもいろいろと階層があるわけです。一番わかりやすい例は、大気の運動で、それは数百キロにわたるのですが、済州島という島があって、千メートルぐらいの山があるのです。

それは柱があるのと同じで、そこに季節風が吹くと、後ろに渦ができるわけです。カルマン渦ができる。スケールが数百キロと数センチと違うのですが、流れは同じパターンで起こるわけです。で、流体は相似だと考えているわけ。従ってレイノルズ数が同じだ考えるわけです。

で、それを出したいということですね。レイノルズ数が同じだということを。そこには超マクロとマクロの階層があるわけです。数百キロの流れの散逸に、分子の粘性が効いているとは、ちょっと考えられないわけです。オーダーが全然違うし。

だから、乱流粘性というのが分子粘性の代りにあるはずなんですね。しかも大きさは10の7乗以上大きいやつ、それは乱流、あるいはカオスになって、初めて説明できると、そう思ってるわけです。まあ、オーダーの計算は出来ますけれど。それがもうひとつの極端な例ですね。

本当は実験室レベルでもあるわけですけど、水槽を大きくすると2ケタぐらいはすぐ大きくなるわけです。その時でも乱流粘性は存在します。ただし、自然の構造としてはやはり大気や海洋ですね。

それから、もちろん違う階層性もあります。原子や分子はいろんな原子核から出来ていて、原子核は素粒子から出来ていて、素粒子はまた違った階層性がある。それはカ

オスがあるからそう言ってるわけではなくて、大きさのレベルが違うのでそう言ってるだけで、その間の関係というのは、普通の力学の関係だと思います。

だから、カオスが関係している階層性は、エントロピー生成が関係してると思います。2つのレベル間で、質的に違ったエントロピー生成があるというわけです。そういうわけで、ちょっと今までの熱力学と違った熱力学がいるのですが、そうするとカオスや乱流は、新しい熱力学を要求するぐらいは、面白いと思っていますね。今までの熱力学ではすまないと思っています。

I: 貴重なお話、どうもありがとうございました。

9 最後に

Y: 時間は過ぎていますが、最後に3つほど質問をしたいと思います。森先生はアメリカやドイツなど海外に行かれていましたが、日本との違いをいろいろ感じておられると思います。そのへんはいかがでしょう。

M: 僕なんかはまあ比較的好きなことしかやっていないのですが、何をやるかによって、非常に日本が不利だとか、そういうのはあると思いますね。僕のまわりだと川崎さんみたいな人は実験が不可欠なわけで、彼は、出来るだけ外国にいるようです。

その理由はなかなか厄介ですね。日本の固有の性格というのがあるでしょう。それは鎌倉時代に遡れると思います。僕は科学史を九州共立大学で、経済の学生に講義するために勉強したのですが、そうすると日本あるいは東洋と、西洋の違いというのは、例えば幾何学というのは東洋では出来なかったのです。代数は出来たわけです。インドなんかは0を発見したのですが、幾何は発見できなかったわけです。それはどうやら美意識の違いが原因だったようです。

幾何というのは、例えば、ピタゴラスは幾何ですよ。彼は、宇宙を幾何で理解しようとしたわけです。基本は簡単だと考えているから、天体は全部丸く球で、かつ運動は円運動と、こうするわけ。円運動という考えは、ガリレイまでいくんですね。ガリレイはなかなかケプラーを認めなかったんですよ。あれは、円じゃないでしょ。

それで、もうひとつ有名なのは、プラトンとアリストテレスで、プラトンが正多面体は5つだと証明したわけ。ピタゴラスも正多面体は研究したんだけど、まあ、証明はしていないわけ。それは非常に基本なわけです。だから5つから宇宙を作ろうと、アリストテレスはするわけです。水、木、空気、火、それとエーテル。で、5つ。これで宇宙をつくったわけ。

Y: それは、正多面体の5つと関係しているわけですか。

M: そう。それから、ケプラーも最初はね。太陽の周りの惑星は5つだと考えていたんですよ。正多面体の数と同じなんです。幾何がね、自然認識の基本だったわけ。それは、簡単で、しかもなんて言いますかね、美意識なんですよ。

たとえば、西洋の美意識は庭園なんかみると幾何学的でしょ。シンメトリックでしょ。イギリス庭園にしる、フランス庭園にしる、対称的でしょ。日本はそうでなくて、い

ろんな物がこう混ざっているわけ。で、調和の美なんですね。日本の庭園は。桜の木もあれば、別のいろいろな木もある。まあ、幾何学的にきれいに並んでなくて、対称的でないんですね。非対称な混沌の美です。

徒然草にね、桜も、散り際が良いとか、月もね、欠け始めがいいとか、こういつているわけ。で、対称的な球ではなくて、むしろそれが欠けると美しいと感じる。それがわびさびにいて、そういう概念は鎌倉時代から室町時代に出来たみたいですね。で、宗教もそうだし、それから神風という思想もそうだし。日本を支配しているでしょ。非常に非合理的ですけどね。

そういう美意識がね、サイエンスの創造に影響していると思うんです。しかし、サイエンスは普遍的ですから、もちろん東洋人にも出来ます。ですが、ただ、冒険は、日本はあまり奨励しないでしょ。冒険しても、次に敗者復活できるような組織になってないんですよ。その点はアメリカやヨーロッパは違いますよね。むしろ冒険をやらせようとする。そういうんで、有利不利とか、便利とかはあるんじゃないですかね。

Y: 今のわれわれも含めて研究している若い研究者、あるいは今、大学院にいて、研究を志す人たちにアドバイスがありましたら、お願いします。

M: いや、特にないです。

Y: そうですね。冒険があまり奨励されていないということでしたけど。

M: やっぱ、日本には応用とかそういうのは、放っておいても出来るんだと思うんですが、問題は基礎的なことですよね。あるいはちゃんとした自然観を持つとか、物理の基礎的なこともやって、そういうことも出来るようにすると良いですよ。ちょっと、社会的な制度もいるから、それを言い出すと、きりがいいから。

技術だと、羅針盤とか、紙とかね、火薬とかは、皆中国の発見ですよ。だけど、それは中世までであって、それから先の近代化は、東洋では出来なかったのです。それは、さっき言っただろんな考え方の中に、原因があるのではないかと、そう思うんですけどね。日本は、読み書きそろばんは、子供の頃からちゃんと心がけているから、それは大丈夫なんだけど。しかし、失敗するような冒険というのは、なかなか出来ないうですよ。

それから、大学について、気になっている点があります。僕らの頃は、例えば講義は週1.5回だったわけ。

Y: 1.5回ですか。

M: 1.5回。学部と大学院。僕は学部では統計力学をひとつですね。大学院は2年に1回で、あまりやらなかった。だから、研究は出来るんですね。

今は、忙しすぎるんじゃないですかね。少なくとも若い人は自由にできて、時間があることは非常に大切ですね。それは、見ていて、つくづくそう思いますよ。教授さんも忙しいしさ、若い人も忙しい。

会議が多すぎるじゃないんですかね。万機公論と言ってもさ、基本的なことは万機公論でやればいいけどさ。何でもかんでもやらずに、任せたら良いと思うんですけど。研究をやってもらわないと、困るんだけどね。

Y: 研究をしていく上で心がけるようなことはありますか。

M: だけど、研究というのは人によって違うからさ。僕がさっき言った、式に書けるような簡単なことは好きだし、そのためには、物に即するけれども、物に囚われないということが重要だと思いますが、しかし、非常に役に立つ、物に密着した研究というのも、もちろんあっても良いわけですよ。良いけど、それだけでは、サイエンスは進まないですよ。そういうところは、日本と海外は、どうも違いますね。

Y: 最後に、統計力学の研究は、特に今後、こういう風に進む方が良いということが、もし、ありましたらお願いします。

M: そうですね。計算機というのがだいぶ昔と違って、さかんで、わりと影響力を持っているので、今は、必要不可欠ですね。計算機というのは、あれば便利ですね。昔と比べると実験と理論のほかに、コンピューターシミュレーションの役割が、ちゃんとあると思いますね。

特にカオスは、そうですね。ローレンツアトラクターみたいな図が出て、初めていろいろ分かってきたですね。Poincaréがカオスを知っていたわけですが、積分不可能なので、複雑で絵にも書けないと言っているわけです。だから進まなかったんでしょうね。それは、コンピューターのおかげだと思いますね。ますます必要になるでしょうね。

ただ、コンピューターにも限界があって、例えばある計算は1日で出来ない、2週間以上かかると言われるので、もっとコンピューターが発展すると良いですね。

Y: 計算機を使って研究する上で気を付けなければならない点はあるですか。

M: そうですね。計算機を使う場合でも、理念があって計算してもらわないと進まないですね。理論を作る時も、理念が必要なわけだから、計算機もそうだし、実験もそうです。

Y: どうも今日は本当にありがとう御座いました。

謝辞

このインタビューを行うにあたって、早川尚男編集長、九大の成清修先生、崇城大学の柴田博史先生には、準備の段階から有益な助言を頂きました。謹んで御礼を申し上げます。また、森肇先生には、インタビューを快く引き受けて頂いたばかりでなく、原稿を何度も見直して頂きました。深く感謝致します。

A 付録: 森肇氏関係年表

略歴

1926 年	5 月 5 日生	
1951 年	九大理学部卒業	同大学院研究奨学生前期入学
1952 年		最初の論文 [14]
1953 年		理論物理国際会議
1956 年	九大工学部助手	理学博士 [19]、渡米 (ブラウン大学)
1957 年		
1958 年		統計集団の方法を使った論文 (局所平衡)[24]
1959 年		流動研究員 (久保研)
1960 年	京大基研助教授	
1961 年		フェルミ粒子の粘性の論文 [23]
1964 年		ドイツ (シュツガルト)、森理論 (letter)[2]
1965 年	九大理学部教授	森理論 (本論文)[3]、連分数展開 [4]
1968 年		統計力学国際会議 (日本)
1971 年		統計力学国際会議 (Chicago)
1973 年		非線形ランジュバンの論文 [39]
1980 年		カオスのフラクタル次元 [43]
1982 年		カオスの統計力学で本格的に論文が集中
1986 年	九大 理学部長	
1990 年	九大退官	九大名誉教授
1990 年	九州共立大工学部教授	
1999 年	九州共立大 学長	

受賞暦

1968 年	仁科記念賞
1974 年	山路自然科学賞
1992 年	紫綬褒章
1997 年	東レ科学技術賞
1997 年	勲二等瑞宝章

B 付録: 1971年のChicago会議のプログラム

I. Fundamental Principles

1. Personal Perspectives on Mathematics and Mechanics, Steve Smale
2. Some New Results in Ergodic Theory, Donald S. Ornstein
3. Exact Results in Equilibrium Statistical Mechanics, Robert B. Griffiths
4. Hamiltonian Flows and Rigorous Results in Nonequilibrium Statistical Mechanics, J. L. Lebowitz

II. Developments in Biology

5. Nonlinear Rate Processes, Especially Those Involving Competitive Processes, Elliot W. Montroll
6. Phase Transitions as Catastrophes, Rene Thom
7. Stochastic Models of Neuroelectric Activity, Jack D. Cowan
8. Cell Migration and the Control of Development, Morrel H. Cohen and Anthony Robertson

III. Generalized Hydrodynamics

9. Microscopic Description of the Linearized Hydrodynamic Modes, Pierre Resibois
10. Number and Kinetic Energy Density Fluctuations in Classical Liquids, Aneesur Rahman
11. Some Modern Developments in the Statistical Theory of Turbulence, Robert H. Kraichnan
12. Collective Modes in Classical Liquids, Robert Zwanzig
13. Nonlinear Dynamics of Collective Modes, Robert Zwanzig

IV. Phase Transitions

14. Dynamical Behavior near Critical Points, Kyozi Kawasaki
15. Static Scaling in the Critical Region, Robert Brout
16. The Steady State Far from Equilibrium: Phase Changes and Entropy of Fluctuations, Rolf Landauer and James W. F. Woo
17. Macroscopic Wave Functions, F. W. Cummings

V. Liquids

18. Distribution Functions in Classical and Quantum Fluids, J. K. Percus
19. Comments on the Theory of Quantum Fluids, Eugene Feenberg
20. Equilibrium Theory of Classical Liquids, Loup Verlet
21. Kinetic Theory of Dense Fluids, H. Ted Davis

参考文献

- [1] 早川尚男、物性研究 **76**, 299 (2001).
- [2] H. Mori, Phys. Lett. **9**, 136 (1964).
- [3] H. Mori, Prog. Theor. Phys. **33**, 423 (1965).
- [4] H. Mori, Prog. Theor. Phys. **34**, 399 (1965).
- [5] 森の射影演算子だけを扱い、他の射影演算子を説明しない教科書は多い。例えば、L.E.Reichl 著、鈴木増雄監訳:「現代統計物理学」下、(丸善株式会社、1984)、藤坂博一:「非平衡系の統計力学」(産業図書、1998)、宗像豊哲:「物理統計学」(朝倉、1996)。また、文献 [15] も森の射影演算子を解説している。
- [6] K. Kawasaki, Ann. Phys. New York, **61**, 1 (1970).
- [7] 射影演算子法に関して最も新しいレビューとして、U. Balucani, M. H. Lee and V. Tognetti, Physics Reports **373**, 409 (2003)がある。
- [8] 例えば F. Hirata, J. Chem. Phys. **96**, 4619 (1992); S.-H. Chong and F. Hirata, Phys. Rev. E, **57**, (1998) 1691; **58**, (1998) 7296; T. Yamaguchi and F. Hirata, J. Chem. Phys., **117**, (2002) 2216.
- [9] 森肇・蔵本由紀:「散逸構造とカオス」現代の物理学 15 (岩波書店、1994 年)、ただし現在は絶版。現代物理学叢書として再刊される。(岩波書店、2000 年); H. Mori and Y. Kuramoto, Dissipative Structures and Chaos, (Springer, Berlin, 1998).
- [10] 森肇:「カオス—流転する自然」(岩波書店、1995).
- [11] H. Mori and H. Fujisaka, Phys. Rev. E **63**, 026302 (2001); H. Mori, S. Kuroki, H. Tominaga, R. Ishizaki and N. Mori, Prog. Theor. Phys. **109**, 333 (2003).
- [12] 森肇, 日本物理学会誌, 第 57 巻第 12 号 (2002 年 11 月号), 835.
- [13] 「森 肇 教授退官記念誌」(1990 年 9 月森肇先生退官記念事業会編).
- [14] H. Mori and S. Ono, Prog. Theor. Phys. **8**, 327 (1952).
- [15] J. P. Hansen and I. R. MacDonald, 1986, Theory of Simple Liquids, Academic press, London.
- [16] 江夏弘他、日本物理学会誌、**9**, 42 (1954).
- [17] 一柳正和:「不可逆過程の物理、日本統計物理学史から」数理物理シリーズ (日本評論社、1999)、p. 87.
- [18] R. Kubo and K. Tomita, J. Phys. Soc. Japan **9**, 888 (1954).

- [19] H. Mori, J. Phys. Soc. Japan **11**, 1029 (1956).
- [20] R. Zwanzig, Phys. Rev. **124**, 983 (1961).
- [21] J. H. Irving and J. G. Kirkwood, J. Chem. Phys. **18**, 817 (1950).
- [22] 戸田盛和他: 「液体の構造と性質」 (岩波出版、1976).
- [23] H. Nishimura and H. Mori, Prog. Theor. Phys. **26**, 967 (1961).
- [24] H. Mori, Phys. Rev. **112**, 1829 (1958).
- [25] M. S. Green, J. Chem. Phys. **20**, 1281 (1952); **22**, 398 (1954).
- [26] L. Onsager and S. Machlup, Phys. Rev. **91**, 1505 (1953).
- [27] N. Hashitsume, Prog. Theor. Phys. **8**, 461 (1952).
- [28] L. P. Kadanoff, Physics **2**, 263 (1966).
- [29] 基研 15 周年シンポジウム委員会編、「基礎物理学の進展」 (理論物理学刊行会、1968).
- [30] S. Nakajima, Prog. Theor. Phys. **20**, 948 (1958).
- [31] R. Zwanzig, 文献 [38], p. 241.
- [32] 例えば、R. C. Tolman: The principles of statistical mechanics (Clarendon Press, Oxford, 1938).
- [33] J. G. Kirkwood, J. Chem. Phys. **3**, 300 (1935); N. N. Bogolyubov, J. Phys. USSR, **10**, 257 (1946); M. Born and M. S. Green: A general kinetic theory of Liquids (Cambridge University Press, 1949).
- [34] R. Kubo, J. Phys. Soc. Japan, **12**, 570 (1957).
- [35] D. N. Zubarev, Physics letters A, **36**, 343 (1971); Physica, **56**, 345 (1971).
- [36] D. N. Zubarev, Condensed Matter Physics **4**, 7 (1994).
- [37] Proceeding of International conference on Statistical mechanics. (Supplement to J. Phys. Soc. Japan) **26** (1969).
- [38] Proceeding of the Sixth IUPAP Conference on Statistical Mechanics. (Univ. Chicago Press, 1972).
- [39] Mori and Fujisaka, Prog. Theor. Phys **49**, 764 (1973).
- [40] 川崎恭治、非平衡と相転移 —メソスケールの統計力学— (朝倉書店、2000).
- [41] H. Mori, H. Hata, T. Horita and T. Kobayashi, Prog. Theor. Phys. Suppl. **99**, 1 (1989).

- [42] E. N. Lorenz, J. Atmos. Sci. 20, 130 (1963).
- [43] H. Mori, Prog. Theor. Phys. 63, 1044 (1980).
- [44] B. B. Mandelbrot, The Fractal Geometry of Nature (Freeman, San Francisco, 1982).