

熱・統計力学の拡張を 目指して



茨城大学理学部数理科学科
長谷川 博

—— 「熱・統計力学の拡張を目指して」という小グループについて、茨城大学の長谷川さんと対談をしたいと思います。始めに、この小グループの目的について、簡単にまとめていただけますか。

長谷川 熱・統計力学は、今まで物理系を対象にしてきたわけですが、それをもっと広い、例えば経済系、生物系などにも適応できるように拡張したいということです。最近のナノテクノロジー、バイオ、金融工学などの発展によって、新たな現象が数理科学の適応範囲に入ってきました。それに対応できる広い意味での統計理論を作りたいということです。

—— 他にもう一つ、提案の中に蓄積したデータの中から法則性を見い出したいということもありました。

長谷川 複雑な現象を理解するには三つのアプローチの組み合わせが必要であると考えています。第一は演繹的なアプローチです。カオス力学、線り込み群などのダイナミクスが分かっている、そこから現象をいかに説明するかというアプローチです。第二はモデル・シミュレーションのアプローチです。コンピューターの中にマルチエージェントを入れて数値実験をすることで現象を説明するアプローチです。第三は測定データからの帰納的アプローチです。今、湯川さんの発言にあった蓄積したデータの中からの法則発見なども帰納的アプローチです。三つのアプローチの組み合わせが必要なのですが、最近の人工知能、統計数理の発展や巨大データの蓄積を意識して、特にデータからの帰納的アプローチを強調しました。

—— おおむね私も、熱・統計力学の応用範囲がどんどん広がっていて、それに適応できるような方法論を知りたいと考えていました。非平衡統計力学について言うと、例えばスパレフがはやった頃の非平衡統計力学と現在の非平衡統計力学は、どういうところが変わっていますか。

長谷川 対象が物理系から経済系や生物系になると系の従う力学もまったく異なってきます。それに伴って系の統計的性質もまったく違ってきます。私の研究室の大学院生の大滝君がやっている具体例で説明します。彼は金融トレーダーのマルチエージェント・モデルを考えています。閉じた仮想の世界でトレーダーが金融取引を行い、各トレーダーが資産を形成する。そのとき全資産一定の条件下でどのような資産分布が形成されるかという問題です。全エネルギー一定の条件下でどのような速度分布が実現するかといった気体系での問題と類似の問題ですが、各トレーダーの株の売買の規則は、ニュートン力学とはまったく異なっています。ニュートン力学に従っていれば、力学系カオスのためランダム性が強くなり、通常のボルツマン分布が成り立ちます。しかしトレーダーの場合、強いランダム性を生み出すメカニズムがありません。例えば少し暴落しそうになった時に一斉に売

りに動いてしまうなど、強いランダム性はありません。そこでの統計分布は通常のポルツマン分布ではなく、かなり偏った統計分布ではないかと考えています。

—— 大体、統計力学の方法を使うとすると、エルゴート定理などが成り立つということを想定しますが、そのような特別な系の場合であれば、統計力学にさえならないかもしれないですね。

長谷川 その通りです。統計力学と言うと、少々言い過ぎなのかもしれませんが、単に統計理論と言うべきかもしれません。



—— したがって統計力学の拡張といえども、今までやってきたような方法論、すなわち力学のある方向として統計力学があったというのは、ちょっと違うかもしれない。その点は、熱力学も同様であると考えられます。今までの熱力学は、基本的には平衡状態についてだけ扱い、時間がここに入っていない。熱力学の拡張という、そこで新しいものを扱おうとすると、例えば経済、生物などの場合、それらはもう平衡状態ではなく、全部が非平衡状態です。そうすると、非平衡状態の熱力学ということを念頭に置いて行うことができるかどうかという問題があります。

長谷川 統計力学については平衡にこだわることはないのですが、熱力学の場合は何らかの意味で定常分布が必要です。その定常分布に対して外から操作をしたときに、どういう応答をするかが重要です。経済系の場合、例えば株価に強いトレンドが存在して非定常でも、トレンドからのゆらぎに関して定常性が現れる場合など熱力学的理論の構築は可能です。

—— 普通の相転移ですべてゆらぎがもとになって平均が移る、と言えます。また、一般的な系だと、ゆらぎは熱浴の運動によっていると考えられていて、その平均値としての系の運動方程式がある。したがって、ホワイトノイズやガウシアンノイズなどのノイズの種類自体をあまり問題とせず、平均値の運動を決めることができるということがある。経済は、どちらなのでしょう。

長谷川 経済のゆらぎはたいへん難しい。株価の変化の絶対値や、ボラティリティーについての相関はなかなか落ちないというのは知られている。簡単なホワイトノイズみたいなものにはならないのは分かっています。平均値としての系の運動方程式があるか否かは、私にはまだ分かりません。

—— 北原・長谷川の小グループの中心的な活動としては、そのころの非平衡統計力学とか熱力学の新しい動向についてのセミナーを開催し、参加者も非常に多かった。長谷川さんはその中で、あるいはそれ以外にもさまざまなところで、熱力学における「関本・佐々理論」について非常に高い評価をしています。なぜ関本・佐々理論が重要なのかという点について聞きたい。

長谷川 関本・佐々理論は熱力学をランジュバン方程式またはフォッカー・プランク方程式から構成する理論です。私自身が可逆なカオス力学系からどのようにして不可逆な拡散方程式を導くかという研究をしていたので、フォッカー・プランク方程式から直接熱力学を構成できるということに、強い興味を持ちました。また一方時系列解析では、ランジュバン・タイプの方程式をシステム同定するので、時系列データから帰納的に熱力学構築が可能なのも魅力でした。ただ私の個人的興味を別にすれば、ちょっと関本・佐々両氏の寄与ばかりをやや強調し過ぎたきらいもあります。おそ

らく大野氏あるいは田崎氏の議論、すなわち「繰り込み群」のようなものを背景にした現象論の一連の発展をもっと強調すべきとも考えています。

——— ここで言う繰り込み群とは、相転移、しかも二次相転移の臨界点近くの振る舞いを「繰り込み群」的に理解できるという、昔のK・ウィルソンの繰り込み群ということですか。

長谷川 同じものです。

——— すると、フラクタル的、つまりスケールに依存しない構造が下から上までであるということとして捉えることができるということですね。

長谷川 そうですね。数理科学特集号「繰り込み群」鈴木・東島・田崎・大野らの記事で記述されたように、パターン形成の理論もそのようなスケールリングが起源になっていると考えられます。

——— そうですね。繰り込み群ではフォーマルではあるが、出てきたことはレバントパラメータとしての熱力学変数があります。そのように、分かっていたことがさらに数学的に分かることはできたわけですが、もっと分からないことも繰り込み群だと分かるということがありますか。例えば、時間依存性などの非定常、非平衡、非線形などです。私の知っている繰り込み群は、相転移のように、ミクロなゆらぎからマクロのゆらぎまで、分離できずに関係している系での規則性ですが。

長谷川 熱力学でのゆらぎは分離可能です。繰り込み変換で小さなスケールのゆらぎを全部ならしてしまったとき、マクロな少数自由度が分離して残ります。相転移では、湯川先生のおっしゃっているような、ミクロなゆらぎからマクロのゆらぎまで分離できずに関係しています。熱力学よりずっとノン・トリビアルな状況ですが、繰り込み変換で少数パラメータの普遍的な系に縮約されます。一般の非平衡、非定常状態に繰り込み変換を適用して普遍的な系に縮約されるとは思えません。しかしある状況での非平衡、非定常状態に巧妙な繰り込み変換を適用すると、系がノン・トリビアルに少数パラメータ普遍的な系に縮約されて、新しい非平衡・非定常統計力学が構築されると期待しています。

——— 統計的に時系列の処理をするようなやり方と、繰り込み群の考え方で時系列と熱力学がどのようにつながるかということ、関本・佐々理論では言っているのですか。

長谷川 系の相関時間より長い時間スケールで繰り込み、すなわち粗視化をした後の普遍的な方程式がランジュバン方程式です。関本・佐々両氏は、普遍的なランジュバン方程式から出発して普遍的な熱力学を再構成しました。もちろんランジュバン方程式からボルツマン分布が出てくるという議論は前から知られていたことですが、外部からの操作とその応答の理論として熱力学を構築しました。操作を基礎としての熱力学を構築するということは大野氏の影響ですが、彼らが実際にランジュバン方程式系に外部から操作をして、その応答から熱力学のさまざまな法則を導出してみせてくれたのは、私にとって新鮮な驚きであり、たいへん感銘を受けたのです。

——— そうすると、例えば株価ですが、株価は決してホワイトノイズの中で動いている粒子ではないわけですが、バックグラウンドが何であれ、そのバックグラウンドに対して熱力学を作るとは可能ですか。

長谷川 可能だと思います。関本・佐々両氏の話のエッセンスは、平衡分布があれば、その分布からボルツマン・エントロピーを考えると不等式を導出できることと言っていて、それが第2法則になっているということです。ノイズがホワイトである必要もなく、非常に一般的な理論になっているということです。

—— ボルツマン・エントロピーを正当化するために必要なコンディションとは何だったのでしょうか。ランダム場に対するある要件が必要になってくるのではないのでしょうか。例えばモレキュラー・カオスと言われるような。株価のアナリシスを時系列のアナリシスと統計熱力学と関係させようということを研究しているとのことですが、株価のバックグラウンドというのは明らかにホワイトノイズでないということは周知であり、熱力学の結果自体はバックグラウンドの性質によらないと考えられます。

長谷川 平衡分布へ緩和するということが熱力学の最も基本的なことです。熱力学は、平衡分布があるときそれに操作を加えたとき、必ずある不等号が成り立つという内容を持っています。ジャルジンスキーは彼の非平衡等式の帰結として不等式を導出できると言っています。

—— 平衡分布があり、それが外部的要因により変化したとすると、その系のエントロピーが必ず増えるというように示すことができるということですか。

長谷川 はい。ただし第2法則と第2種永久機関不可能性を注意深く、区別する必要があります。通常平衡分布は $\exp(-\beta H)$ のような格好をしています。ハミルトニアン H のパラメータを時間変化させて外部から操作すると、それに応答して第2法則に対応した不等式が導かれます。この不等式は第2種永久機関不可能性を意味します。ところが一般に平衡分布を $\exp(-\beta X)$ と書いたときに、その X の部分がハミルトニアン H であるという保証はない。その際に、私が言っているのは、この $\exp(-\beta X)$ で X と書いた部分を、ある意味でハミルトニアであると見なして熱力学的理論を構築すれば、やはり第2法則に対応した不等式が導かれるということです。しかしその不等式が第2種永久機関不可能性を意味するか注意が必要です。

—— そういう意味では、ボルツマン統計ではなく、例えばツァリス統計であればそうならないということですね。

長谷川 その通りです。ツァリス統計では分布関数の指数の肩の上に乗せた量 X がハミルトニアンではないことから、通常第2法則から微妙にずれた式になってくるのです。ただしツァリス統計で X はハミルトニアン関数になっているので、その不等式が第2種永久機関不可能性を意味する可能性はあります。

—— ところで、株価の熱力学を時系列から作ることはできますか。

長谷川 できると思います。しかし根本的な問題があります。熱力学不等式を導出するとき、仕事を定義します。通常はそのときの状態分布で内部エネルギーの時間変化の期待値を取って定義します。外部操作すなわち内部エネルギーの時間変化とその後の状態の応答によって定義される量です。経済系に仕事のようなものを定義するには注意が必要です。われわれが外部操作するということは、例えば公定歩合の引き上げに対応します。物理系では外部操作の応答として状態が変化しますが、経済系では外部操作の前に市場が変化してしまいます。すなわち公定歩合を上げようとする前に市場が先に動くのです。経済系と物理系との非常に大きなギャップの一つは、市場の参加者が勝手に「これは上がるぞ」と読んで状況を変えてしまうということです。したがって単純に仕事が定義できないということになる。

—— 社会学的な問題はすべてそうだと思います。選挙を見ると分かりますが、新聞などで「あいつは危ない」、「あいつはセーフだ」と報道されると、人々がセーフだと思って投票しなくなって落選したなどということがあつた。観測者と被観測体とが強く相互作用するために、観測者と観測体と全部入れた系で議論しなくてはいけないということです。

長谷川 経済物理の対象一つとして、暴落のような予見できなかった現象があります。非常に物理

的で、予見してないから因果的で、その結果としてきれいな規則が出ることもある。

—— 株価の問題では、株を持っている人と株価とは相互作用するが、それと全然関係ない人からその系を見ると、それは株と株を持っている人との相互作用も入れた中で、株価だけをオブザーバブルとして見たらそうなるということです。したがって株価がなぜ統計としてはレピー分布などの通常のガウス分布からずれるかということ、株と、人間の株の値に対するある特殊な相互作用のために起きると考えられる。したがって、全体として見れば、やはり熱力学系であると言えることができる。この意味では普通の力学的な統計よりも特殊な、人間が入ったから違うゆらぎをし始めるといふ、別の統計系になっていると考えられます。

長谷川 その意味で、株式市場はきわめて拡張した統計系であるといえます。

—— 熱力学法則がどんなに変わるかということを知りたいのですが、どうですか。

長谷川 それはまさに最もやりたいことです。しかし、それに答えることはきわめて難しい。経済系では、ミクロに系を見ている人は、特定の会社の財務指標や株価時系列だけを見ている。一方、マクロの熱力学的量というか、GDPや失業率などのマクロ経済指数を見て議論されることが多い。しかし本来、その二つは関係しているはずで、したがって、最も期待しているのは、そのシステムでの株価の統計性とマクロ統計量の対応のようなものが出てくれば、それはかなりの成果であると考えられます。

—— そこで、やや誤解されるかもしれないことをあえて言うと、株式市場の研究にも「複雑系」というべき部分と「還元的」という部分があって、複雑系ということであれば力学的な見方ということはありません、社会を全体として正しく把握していれば、株価の動きも正しく理解ができ、グローバルな量の把握も正しく行うことができると考えます。複雑系と考える研究者の中では、株価については、経済物理のような力学的なものよりも、シミュレーションで本当の社会らしいものを作ろうとするのが一つの方向であるとの見解であると、私は考えています。

長谷川 しかし、それは当然複雑な系での統計的な理論ということになりますが、そういうものが作られなければ、ただ何となくのシミュレーションだけで終わってしまうような気がします。実際に観測されている時系列データとの関係をつけることも必要です。

系全体を見ると、そこにはマクロの熱力学的な要素が存在します。それに対し、株価だけを見ているということは、株価の部分系を見て残りを全部熱浴にしているということです。したがってある意味で粗視化してしまって部分だけを取り出していることになる。

—— 高安理論について言えば、ランダム場のところに不明な部分をすべて入れているので一見、簡単に見えるけれども、要するにあのランダム場がパラメーターであり、現象に合わせるようなバックグラウンド、熱浴が必要です。そうすると熱浴がなぜこのような熱浴なのかということが、経済物理か経済を正しく記述するために必要となります。生物系の熱力学については、グループメンバーの吉川さん、北原さんは生物系について熱力学は可能だというようなことを強調していますが、生物系について熱力学はどのようなところで重要か、どのような考えを持っているかを聞きたいと思えます。

長谷川 例えば「分子モーター」について考えると、筋肉の中でどのようにして化学エネルギーが運動エネルギーに変わるかというメカニズムの理解に、どうしても熱力学的な議論が必要であるということがあります。熱力学的な議論が必要だとしたときに気になるのは、高分子のスケールに対しても熱力学が実際に成り立っているのか、どういう意味で成り立っているのかということをもっとはっきりさせないと、明確なことは言えないのではないかと考えます。例えば総研大ジャーナルに

おいて、嶋本先生（遺伝研）が強い調子で「熱力学は間違っている」と述べています。DNAのレベルで熱力学は成り立たないという意味は、エルゴート性はそのレベルで成り立たないということであると考えられますが、このレベルで「熱力学がおかしい」と言われると、私のように熱力学を専攻している者としては困惑します。そもそも、熱力学のようなマクロの理論が、どのような系で成り立つかどうか、例えばランジュバン方程式を基に構築した関本・佐々理論を基に、ミオシン高分子がラチェット状になっているのかどうかを本当に検証し、確かにそのレベルで熱力学が成り立っているのか、それでもおかしいのならば「おかしい」と明言できると考えます。

—— つまり、そのような系は熱力学系ではないと言っているだけということですか。

長谷川 その通りです。要するに、生物のタンパク質やDNAの専門家の見方として、そのようなマクロな理論など、成り立つはずがないではないかと言っているわけですね。しかし、物理学サイドから見れば、それでは、どうしたら熱力学的なものが作れるかということのプロポーズしなければならない。そういう意味で、嶋本論文は一つの問題提起になっていると考えられます。

—— そもそも佐々さんのセミナーでは、分子モーターや分子機械に対して彼らの理論を応用した経緯があります。その際、分子モーターという一つの分子機械が熱浴の中にあるとして、熱浴と分子機械を合わせた系を見ると、熱力学的な予言ができるというのが一つの結論でした。これもまた先程の経済学と同じように、ミクロ系を対象とした熱力学的な考え方です。しかし、経済全体を見ると、マクロなオブザーバブルも、典型的に、マクロスコピックな動きをして、それが拡張された熱力学で書けるかもしれないという期待があります。グループメンバーの名倉によると、個々の株価ではなく、ポートフォリオのような株の集合のようなものについて、熱力学的な記述が可能であるとしています。また、生物においても、実はいつも平衡状態ではないが、何らかの熱力学的な理解ができるのではないかと主張している小グループで「生態の時間秩序発現機構」があります。そこでは、生態についてエントロピーを定義できるとしており、そして、そのエントロピー増大を遅延する機構が生態に働いているという考えです。この「生態のエントロピー」ということについて、どのように考えますか。

長谷川 私は長谷川（建治）さん（北里大学）の論旨をまだよく理解していませんが、これについて私の理解の範囲で言えば、DNAの欠損のような状況を見てエントロピーとしている。そういう意味で、完全に「情報エントロピー」を基にしている。したがって、この情報エントロピーはわれわれが考えているようなミクロな高分子などがある系での熱力学エントロピーとは異質なものではないかという考えです。もちろん何らかの関係はあってもいいのですが・・・。

—— 私は完全に関係ないとは言えないと考えます。どういう意味で言えないかという、例えば、1次元イジングモデルを考えると、AとBという二つの文字で書いてあり、温度を変えていくと、 $A \cdot A \cdot A$ と連なっていたのが $A \cdot A \cdot A \cdot B \cdot A \cdot A$ と少しずつ乱れ、最終的には完全に乱雑になる。途中で秩序と乱雑の間のトランジションがあります。その際に、そのまま情報量という考え方で理解する考え方と、もう一つは、ニアレストネーバーの相互作用と考え、ある力学系にマップして情報を考えるという考え方もある。なぜ系の情報が乱されるかという、ラジカルなどが生成して、それが遺伝子のコピーのときに乱すことになる。情報の増減はラジカルの量と関係しているし、ラジカルの量から、ケミカルなエントロピーが変わることに関係することになる。したがって、ケミカルなエントロピーとこのような情報エントロピーは生体内では関係していると言えます。要するに「情報がなくなる」という事象は、必ずあるケミカルリアクションによって起きているわけだからです。

長谷川 それはあり得ることです。

——— これは計算できるのではないかと、長谷川（建治）さんと話したときに述べましたが、長谷川（建治）さんは、多くの人々からのあまりの批判に「あれは比喻として、例えばエントロピーというような概念が使えるということでの発言です」と、ちょっと後退したことになってしまいました。富田さん（慶應大学）のe-Cellプロジェクトでは、さまざまな化学反応のネットワークで細胞を構成していますが、これは化学エントロピーやエンタルピーとか、そういうような熱力学的なものが入るようなフォーマリズムを作っているわけです。その中にDNAも入っているし、その中にはラディカルはどれだけできるか、またDNAも化学反応の中に入っているの、コピーするときラディカルが働いてコピーが間違えるようになるなどということを書いて記述するわけです。このエントロピーは、定量的に書くことができるから、何か具体的な結果が出てくるのではないかと考えました。つまり、「生態のエントロピー」あるいは「生態の熱力学」と言うべきものが得られるかなと考えたわけです。

長谷川 関係はしていると思いますが、この嶋本論文にも出てくるようにエルゴードのようなものは成り立っていない可能性があります。

——— エルゴードは成り立っていません。

長谷川 ボルツマンのエントロピーは情報エントロピーとほとんど1対1です。あれはエルゴード性、つまり完全にランダムな面を取ることができるということが関係している。そこで関係はしているという意見には賛成ですが、熱力学におけるエントロピーと情報エントロピーとの間にギャップが存在するとしても不思議ではないと考えます。

——— 私は生物におけるエントロピーについてはあまり知見がありませんが、北原さん、長谷川さんがエントロピーというときは、ハミルトニアンが出てくるということですね。

長谷川 生物系については、時系列データからの帰納的熱力学構築について、現在とりかかろうとしています。定常分布があればその量に対して不等式が出てくるという意味で、熱力学的なものが出てきてもいいのですが、しかし、それだけでは本当に意味があるかどうかまでは結論できません。実際の物理系での熱力学では定常分布を特徴づける量がハミルトニアンになるということが、きわめて重要だということです。経済系において、もしこの定常分布を特徴づける量が経済学で意味のある量に対応してくれれば、この熱力学的理論はきわめて重要になります。

——— 経済についての応用において、エネルギー関数のようなものが得られたと言われましたが、そうすると経済に不変量があるのかということであり、もし存在するとなるとたいへん重要なことだと考えられます。株価について、価格は不安定であるという高安さんの「均衡価格」の相転移説があります。均衡点は、二次相転移点だから株価のゆらぎが最大になるという。不変量があったら、そこで安定化するような力も働くのでしょうか、一様にずれてしまうわけです。経済系が経済物理としてきわめて難しく、また興味深いのは、経済にそういう不変量がないからであるという考え方がありますが、それについてはどのように考えますか。

長谷川 それは、否定も肯定もできません。

——— しかし不変量は「エネルギー関数」として存在するのではないですか。

長谷川 エネルギー保存が閉じた物理系で存在するように、経済系の場合も、それが閉じているならば、例えば資産が不変量になる。ところが、実際の場合はオープン系です。そのような系では資産、貨幣、トレーダーが入ったり出たりということになる。

——— それはさまざまな熱力学的な系ができるというわけですね。

長谷川 不変性が厳密に言えるかどうかは疑問です。貨幣供給量なども時間的にずれてきます。例えばアメリカがドルを印刷すれば、たちまち貨幣供給量が変化します。完全に不変量ではないですが、そのずれを無視すれば不変量を経済に導入してもいいのではないかと考えます。

——— そもそも熱力学の法則は、閉じた系ではありません。熱浴とつながっているから熱流も粒子流も全部あって、そのような系で成り立っている第1法則、第2法則であるということです。

長谷川 しかしながら、この背後に通常ミクロカノニカルな系として完全に閉じた系があるという裏付けがあり得ます。

——— そのように、熱力学を統計力学で正当化しようとするとその通りでしょうけれども、多くの場合、統計力学をもって熱力学を正当化することはできないはずで、そもそも熱力学はきわめて特殊な完全な力学で、これのみで閉じていて、何の力学よりも予測能力はあるものです。

長谷川 普遍性、あるいはユニバーサルという意味ですね。

——— そういう意味で、私は熱力学のほうが統計力学より上位であると考えます。

長谷川 私は、大野氏のそのような考えを興味深い見解であると思っています。しかし私自身は統計力学と熱力学を、かなり混同して捉えています。

——— 長谷川さんの立場のバックグラウンドには「有効理論」があるのではないですか。この有効理論について考えてみると、還元学的な立場では「ミクロが分かればマクロも自動的に理解できる」とされ、複雑系の立場からすると、マクロの力学はミクロなどの力学にまったく関係なく、有効理論で十分であるということになる。有効理論について、例えばP・W・アンダーソンが「私たちはQCDとか素粒子のスタンダードモデルなどは全然、必要ない。そんなものは何であっても、われわれの物性の法則には何の変化もなく、それを知ったところで何の役にも立たない」と述べていますが、有効理論とはそのような意味として考えるべきでしょうか。

長谷川 そういう意味もあると思います。確かに階層で分離された場合に下の階層に依存しなくなるということがあります。

——— ここで少々言い訳しておきたいのは、素粒子論屋がすべて、還元論的態度でミクロが分かればマクロは自動的に理解できると考えているかということ、決してそうではありません。素粒子論の中の現象論の人は、スタンダードモデルを超える理論というのを一生懸命考えていますが、素粒子現象を見る限り、スタンダードモデルが間違っているというようなことは全然ありません。例えば、スタンダードモデルの便宜上のこととして、ニュートリノの質量を「ゼロ」としただけであり、あの値はゼロでなくてもモデルのスコープに入っています。スタンダードモデルの中にはこの種のパラメーターが20以上、存在する。そこで、素粒子論屋は、何でこんなパラメーターがこの値になるのだと考える人がいる。パラメーターがなぜそうなのかという問いに答えられないのは、スタンダードモデルができた理由を、分かってないからです。もう一つ還元論的に言うと、素粒子論では、基本的な力は重力、電磁力、核力、弱い核力だけだとされています。ミクロが分かればマクロが自動的に分かるということについては、ミクロが分かるということは、マクロの在り方にある条件を与えると考える。また、ミクロが分かってもそのミクロの以前のことは、やはり研究しないと分からない。このような階層というものはだれでも認めていることですから、階層の存在を述べているだけであると考えます。

次に「有効理論」のことを考えます。物性理論は典型的な有効理論ですが素粒子でも使います。通常、場の理論でいう「有効理論」とは、あるマクロスピックな運動について、例えば集団座標のよ

うな新しい座標を定義します。ミクロな自由度は、全部積分するわけです。そうすると、新しく定義した力学変数についての力学ができるわけです。一般には、その力学の法則はもとの力学のシンメトリーは破りません。厳密にはただ数学的に書き換えているだけのことからです。熱力学とはそういう意味では、有効理論とはちょっと違って、タイムリバーサルシンメトリーを破ってしまいます。普通有効理論では、力学変数があるグローバルな変数に置き換えて書き換えたとしても、タイムリバーサルは破れません。熱力学はミクロの有効理論ということになる。

長谷川 マクロな量だけの閉じたものだけ残して、あと全部を積分したというイメージで問題があるのでしょうか。

—— 私、熱力学が記述する力学系では他の量は全部ゼロであってP、V、Tのうちの二つだけが独立な熱力学変数であるような、きわめてピュアな、そういう意味では究極の理論だと考えます。あのように複雑な系であるにもかかわらず、二つしか変数がないわけです。そして、その法則は非常に良い精度で成立しているわけです。一方、エントロピー増大の法則など、通常、有限の箱の中の有限個数の粒子を入れて観測しているときには決して起こらないようなことが、まさに起こっているような状況です。

長谷川 そこは難しいところです。

—— ミクロスコピックな法則が可逆であれば、いくらグローバルな変数でも、それがミクロな変数の関数として書かれてるならば、それは可逆ですね。

長谷川 もう少し整理する必要があります。ミクロスコピックな法則が可逆であれば、いくらグローバルな変数でもそれは可逆です。例えば電子から光子を放射する問題を考えます。初期に電子が励起状態にあったとして、最終的に電子が基底状態に落ちて光子を放射する現象です。この現象の従うミクロスコピックな法則は完全に時間反転対称です。しかし放射光子場を積分して、電子だけの有効理論を作って、励起電子の生存確率をみると、指数関数的に減衰しています。励起電子の生存確率は指数関数的減衰を示す方程式に従って時間発展している。その意味で不可逆です。しかし励起電子の生存確率は相関関数で書けていますから時間反転対称です。同様なことは可逆なカオス力学系でも示すことができます。初期確率分布と観測量の相関関数を計算すると厳密に不可逆な拡散方程式に従うことを示すことができます。

—— 新しい熱・統計力学の試みについての一つの考え方として、ミクロな法則をどんどん応用することによって統計力学が熱力学に近付こうとしたように、熱力学を究極の正しい理論として出発して、それから力学を放り込むことによって少しずつ熱力学を力学系にまで適応できるようにすることになる。このような考え方があるのではないかと期待しています。

長谷川 私自身、まだ本当に熱力学のすごさを把握しきれていません。力学、統計力学、熱力学の関係が私自身いまひとつ分からないところです。湯川さんにはいろいろと興味深い見方を提示していただいてありがとうございました。