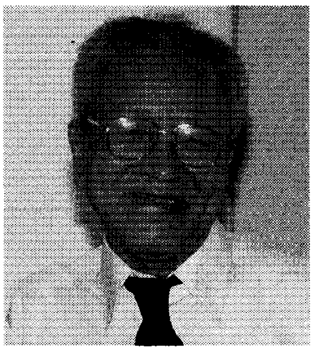
非平衡統計力学事始め

川崎 恭治



本稿では研究会の趣旨に従い私が本格的に研究をはじめた 1957 年から一つの区切りである 1970 年代初頭までの非平衡統計力学の限られた分野の発展を私の経験を中心にして書いてみる。その前に 1957 年ころまでの発展を [前史] として概観し最後に関連した現代的な課題について簡単に触れる。内容が多岐にわたりわかりにくいとの批判があるが、あとから振り返ってみられれば全体が coherent につながった話になっていることがお分かりと思う。非平衡統計力学という題で 30 分で異分野の人にわかる様に話すことは始めから無理なので今回はどんなものか印象だけもってもらえれば十分である。

1 前史

私が統計力学の研究を始める前までの歴史を箇条書きにする。

- Boltzmann (1844-1906): 熱力学第 2 法則のミクロな基礎付け（H 定理）
  気体の輸送現象　（1 体分布関数 $f_1(\mathbf{r},\mathbf{p};t)$ に対するボルツマン方程式）
- Einstein: ブラウン運動の理論 (1905)
  粒子の十分長い時間 t 内での変位を Δx としたとき $<(\Delta x)^2>=2tD$, D は拡散係数。
- ボルツマン方程式からマクロな式（Navier-Stokes 方程式など）を導出 [Chapman-Enskog (1911-1919)]
- 線形非可逆過程の熱力学　Onsager の相反定理（1931）
- Boltzmann 方程式 の可逆な微視的方程式 (Liouville 方程式) からの導出（Bogolyubov、1946）
- 線型応答理論　（久保他、1955 －）
  電気伝導度など輸送係数の "久保公式" $\sigma=\int_0^\infty dt <J(t)J(0)>$
  正式には Green-Kubo formulae 、源流は Einstein のブラウン運動の理論

非平衡問題で特に重要なのは、非可逆過程を理解する際の自然認識の階層性である。非可逆過程は典型的にはマクロな運動がミクロな熱運動に転化する過程である。上の "久保公式" ではマクロな電気伝導 σ がミクロな電流の熱的揺らぎ $J(t)$ に起因することがあらわに見てとれる。更にこの階層性は何段にもわたる事がある。気体はその典型である。まず完全にミクロな運動を記述する方程式（相互作用している古典的多粒子の Liouville 或いは Newton 運動方程式）から分子の平均自由行程のスケールで成り立つボルツマン方程式を導き（Bogolyubov、1946）最後に、ここからマクロなスケールの流体力学的方程式をだす（Chapman-Enskog、 1911-1919) に到達する。ここでは気体が希薄である事が本質的である。この事情を表 1 にしめした。液体の様に希薄でない時にはボルツマン方程式は存在しない。しかしミクロとマクロを直接結びつける" "久保公式" はこれに関係なく成り立つ。" 久保公式" の導出で代表される非平衡統計力学における線形応答理論の発展は 1955 年ころにわが国で起こった科学史上でも特筆すべき出来事であった。

表 1　気体の階層構造

レジーム	方程式	長さのスケール	時間のスケール
力学的領域	リウビユ方程式	r_0	r_0/v_{th}
運動学的領域	ボルツマン方程式	$l=1/nr_0^2$	$1/nr_0^2v_{th}$
巨視的領域	流体力学方程式	L_{macro}	T_{macro}

記号の説明：r_0（分子間力の到達距離）v_{th}（分子の熱運動の平均速度）$l=1/nr_0^2$（分子の平均自由行程）r_0/v_{th}（分子の平均自由時間）L_{macro}（巨視的長さ, 例えば音波の波長など）T_{macro}（巨視的時間, 例えば, 音波の周期など）

これによって、それまでの希薄気体に限られていた非平衡統計力学の応用が一挙に液体の様な高密度系に広げられた。この様な輸送係数に対する一般的な公式を導く試みは 1952 年ころから M.S. Green[*1] その他によって提唱されてきたが量子系もふくめて適用できる一般公式の導出はわが国で初

[*1] 実は私が後年テンプル大学につとめる事になった折の同僚でもあった。

めて達成された*2。

2 事始め

私は 1953 年に九大物理を卒業したが大学院では素粒子の研究室にはいった。しばらくして、これが無謀であることを悟り、学部の時から興味があった物性にかかわりたいとおもったが、当時の事情として同じ場所で分野を変えることはできなかった。そこで米国に留学することにした。幸い Fulbright 奨学金と先方の研究助手の仕事がえられて 1957-1959 の間 Duke 大学に滞在した。

Duke 大学は南部の名門でアイヴィリーグ校に次ぐと言われていた。超流動、超伝導の先駆的な理論で著名な F. London がいたが残念ながら私が行くしばらく前に亡くなっていた。しかしそこの低温物理グループは定評があった。当時力を入れていたテーマに液体ヘリウムのラムダ転移点近傍の比熱の精密測定がある。当時は相転移、臨界現象の理論としては平均場理論しかなく、その唯一の例外は Onsager による 2 次元 ISING 模型の厳密解で、それは臨界点における比熱の対数発散を予言していた。Duke の研究はその実験的検証の意味もあった。得られた最も精密なデータは、当時としては驚異的な百万分の 1 度の精度を持っている。臨界現象の研究が盛んになるのは 1960 年以降であることを考えるとこれは本当に画期的な実験であった。私は M.J. Buckingham 先生のもとで理論を志していたが、先生は実験の詳細に詳しく、色々アドバイスをあたえておられた。私も徹夜の実験に何回かつきあった。これから私が何か具体的な成果を得たわけではないが、一流の実験家にじかに接して、彼らに対する尊敬の念と実験事実を重要視する姿勢は終生続くことになった。

私は 1959 年に Duke で PhD を取り帰国した。しかし高度成長期以前の日本で職があるわけがない。しばらくぶらぶらしていた所に学術振興会奨励研究員制度がその時に始まり私は第 1 回の奨励研究員に採用された。九大で先輩の、森肇さんが基研の助教授をされていた関係で私は 1960 以降以後しばらく基研に滞在した。当時基研物性部門の教授は松原武生さんで彼を中心にした基研長期研究計画「Dynamical Many Body Problem 」がはじまっていた。その頃になると”久保公式”の枠組みは少なくとも日本では完成されたと考えられ、また 1955 年の松原グリーン関数に端を発したグリーン関数がブームを迎えようとしていた。特にロシアで 2 時間グリーン関数が作られ、それが Zubarev のレビューによって日本に広まった。“久保公式”とグリーン関数法の確立によって非平衡統計力学のフォーマルな面が以前に比べて格段に整備された。次の課題はこうして整備された見事な額縁に絵を入れる、即ち内容を与えることである。これがこの基研長期研究計画の主目的であったと私は理解している。当時この新しい枠組みを使って既に知られている結果を再導出する仕事は色々出されていたが、ここで留まるわけには行かない。そこでそれまで理論がなかった動的臨界現象が目標の一つに選ばれた。一方そのころ磁性体の動的臨界現象の有力な実験手段としてフランス Saclay group の中性子非弾性散乱の実験結果がでほじめていた*3。1961 の京都磁性体国際会議では磁性体の動的臨界現象がとりあげられる事もあって基研や京大物理の多勢の人々がこれに取り組んだ。当時この問題の理論としては De Gennes や van Hove のいわゆる conventional theory がある。基本的なアイデアは尤もなもので動的な性質に現れる臨界異常が静的性質に現れる臨界異常に帰着されるというものである。具体的例として常磁性ー強磁性転移を取り上げる。ここで動的な性質の異常ははスピン拡散係数が臨界点近傍で消失することである。一般に臨界点では体系が平衡状態から僅かにずれたとき、系をもとに戻すための駆動力（復元力）がゼロになる。駆動力は帯磁率に逆比例するので、この異常は帯磁率の発散と捉えられる。そこで conventional theory ではスピン拡散係数が臨界点近傍で帯磁率に逆比例して消失すると考える。本当はその比例係数の臨界異常も当然問題になるが、それについての理論がないとして問わない。非平衡統計力学ではその比例係数（より一般には Onsager 係数という）が“久保公式”であらわされ、こちらの方が肝心である。したがって京都の人々の努力もこちらに集中した。私も森さんと共同でこれに当たったが予想したより遥かに難題で、結果から見ればわれわれも含めてすべての努力は失敗した。即ち conventional theory 以上のものは出なかった。問題のポイント

*2 この歴史的な事柄については国内で色々議論された。例えばこの分野におけるわが国の先駆者である中野藤生名大名誉教授を囲む座談会の記録が物性研究 2005 年 5 月号に出ている。外国ではグリーンー久保公式と呼ぶのが一般的である。歴史的には色々問題があるがここでは簡単のために久保公式とよぶ。

*3 そのころ発表された Saclay group の実験を見るとスピン拡散係数の温度変化の大きなエラーバーのついたデータが 3 点ありそれらの中間を結び図の原点を通るような直線を引き、これから臨界点で拡散係数がゼロになると主張していた。物性実験では常識はずれの粗さである。講演したとき誰も驚かなかったが素粒子の方ではこの様な粗い実験は普通なのかと思った。１９６０年代末ころから Brookhaven など、より進んだ原子炉から精密なデータが得られている。

は久保公式に現れる時間相関関数 $< J(t)J(0) >$ の短時間での振舞いは例えば時間のべき展開などでたとえ面倒であっても計算可能であるが必要な長時間の振る舞いにはどうしても手がでなかった事である[*4]。

私はしばらくして名大工学部の助手になったが、個人的な理由でそこを1年ほどで辞して MIT のポストドクになった[*5]。MIT では 1964 年秋から化学教室の Oppenheim group に所属し気体の輸送現象について研究することになった。"久保公式" は外国ではまだ目新しく、この公式の妥当性を疑問視する人々もいた。私に与えられた問題は3次元希薄気体の自己拡散係数や粘性係数の密度補正を久保公式を用いて計算し結果を Bogolyubov の一般化されたボルツマン方程式をもちいて計算した Choh-Uhlenbeck の結果と比較する事であった。これは状態方程式のビリアル展開に相当するが輸送係数では計算が格段に煩雑になる。ただこれだけの事でも Physical Review で何ページにもわたる数式だらけの論文になる。結果は Choh-Uhlenbeck と一致したが面白くもなんともない。その頃 NBS[*6]から人がたずねてきて、2次元気体では最初の密度補正項、3次元では次の密度補正項が発散するという衝撃的なニュースを伝えた。早速自分の計算ではどうなっているのか調べてみると、確かにそうなっている。この原因は粒子は衝突したあとでその記憶が相互作用が届かなくなっても相関という形で遠距離まで残ることによる。更に高次の補正項の形をみるとより強く発散する項が次々に見つかる。一つの着目した粒子が別の着目した粒子と2回衝突する過程の途中で第3、第4、第5、、、、の粒子と何回も順繰りに衝突する過程がより強い発散に寄与している事がわかる。後にリング衝突と名づけられた。これら全部足し合わせると発散はなくなって密度の対数項が現れる。物理的には、次のことに気がつけば明らかである。即ち着目した粒子が2回衝突を繰り返す途中は希薄気体では自由に飛行している筈であるが平均自由行程以上に飛ぶことはできなくて平均自由行程程度で自然に切断がはいる。結果として気体の輸送係数を単純に密度で冪展開することは一般にはできなくて対数のような冪以外の項があらわれる。この様な事は他にも例があり、例えば荷電粒子系の状態方程式の単純なビリアル展開は存在しない事はよく知られている。しかしここではビリアル係数の発散の原因は粒子間の長距離相互作用そのものにある。非平衡の希薄気体では剛体球模型のように相互作用が短距離で切れる場合でも発散に導く長距離相関はのこる。これは平衡と非平衡で問題の性格が如何に異なるかを示す典型的な例になっている。気体の輸送係数の密度展開における対数項は色々話題になったが実験的にはほとんど影響はない。まず希薄気体の密度補正そのものを精度よく決めることが難しく、実在の3次元気体では2次の補正で初めて対数項が現れる。これは40年ほど前のことで、その後対数項の存在が実験室で確認されたという話は聞いていない。計算機シミュレーションではみいだされたということを聞いたような気がするが詳細は記憶していない。

気体の輸送係数の研究は、発散の問題がでて彩りが加わったことを別にすれば" 労多くして功少なし" という言葉がピッタリ当てはまる。しかし私個人にとってはこの経験は貴重な宝になって残った。前述したように気体の輸送現象の微視的な理解は2ステップでなければならない。即ちミクロとマクロの間にボルツマン方程式というキネチックな中間領域が存在しこれを抜きにしてミクロからいきなりマクロな性質を解析的に出すことは不可能である。このことはどの教科書にも書いてあり我々は頭では十分理解したと思っている。しかしこの問題で複雑な計算を手がけて、それによって自然認識の階層性を心で認識できた事の影響は大きい。後述する動的臨界現象を考える際、これがとりわけ重要になる。

1965 年春にワシントンの臨界現象国際会議に出席した。日本からも松原さんや桂さんのような大家が出席した。これはまた国外で初めて動的臨界現象が取り上げられた会議で、問題意識が日本より5年ほど遅れている。私にとって興味深かったのは液体の臨界点での輸送係数の異常性の実験のレビューであった。この様な研究は 19 世紀の末ころからなされており、液体ー気体臨界点近傍での熱伝導の発散が 20 世紀初頭には見出されている。これに刺激され、また気体論の方は一段落ついて

---

*4 $< J(t)J(0) >$ を単に時間について冪展開したままでは久保公式に現れる時間積分は項ごとに発散する。そこでよく使われる手は $< J(t)J(0) >$ を時間の冪展開級数かけるガウス関数の形において現れる未知係数を元の冪展開と較べてきめるやり方である。これでも一見 $< J(t)J(0) >$ の尤もらしい長時間の振る舞いがでてくるが先の conventional theory 以上のものは出ない。

*5 考えてみれば贅沢な話であるが以前九大大学院で素粒子を専攻したときに巻き込まれたある事件が遠因になっている。結果として当時の研究室の志水正男教授には大変なご迷惑をかけてしまった。この場を借りて改めてお詫びしたい。

*6 National Bureau of Standards。今の National Institute of Standards and Technology(NIST)

いた事もあり、動的臨界現象に戻ることにした。当時唯一この問題に挑戦した理論として Marshall Fixman のものがある。彼は才能豊かな人であるが人づきあいが悪く私も議論する機会がなかった。元来高分子の理論で有名でエール大学にいたが、何かの事情でコロラド州立大学に移っている。しかし彼の 1962 年にでた粘性係数の発散を予言した論文をみてもなにがなされているのか解読しがたい。統計力学の本来の目的は微視的な模型から出発して巨視的な振る舞いを導き出す事である。彼の論文には微視的な出発点がなく、巨視的な、即ち連続体的な出発点から粘性係数の異常をだしている。他には何も手がかりがないまま私はこの仕事を自分の言葉で即ち久保公式の枠組みで理解しようと試みた。そこでまた久保公式 $L=\int_0^\infty dt < J(t)J(0) >$ に戻る。話は電気伝導に限らないので σ の代わりに L とかいた。したがって J は電流とは限らず一般的な"流れ"の揺らぎをあらわす。

以前に J はミクロな量であると言ったがその正確な意味を見てみよう。系のマクロな振る舞いを支配するのは保存則や相転移の秩序変数に結びついた、遅く変化する局所的な変数(粗視変数)である。今これらのセットを $A_j(\mathbf{r}),\quad j=1,2,3,\cdots$ と書きその平均値をゼロにとる。ミクロな量であると言ったときの正確な意味は J は $A_j(\mathbf{r})$ に直交することである。即ち $< JA_j(\mathbf{r}) >= 0$。しかし、この事は J が A の非線形関数、典型的には $A_j(\mathbf{r})A_l(\mathbf{r})$ と直交する必要はまったくない。そうであれば[*7]

$$J=\sum_{jl}\mathcal{V}_{jl}[A_j(\mathbf{r})A_l(\mathbf{r})-<A_j(\mathbf{r})A_l(\mathbf{r})>]+\cdots$$

の様な展開が考えられる。$\mathcal{V}_{jl}$ などの未知係数はこの式の両辺に $A_j(\mathbf{r})A_l(\mathbf{r})$ などを掛けて平均をとって求める。これらの平均はスタチックな量である。大事なことは $A_j(\mathbf{r})$ が粗視変数の密度として遅く変化する量であれば、その積 $A_j(\mathbf{r})A_l(\mathbf{r})$ も遅く変化する。上の展開式は元々ミクロで速く変化する部分しかないと思われていた流れ J の中に含まれていた遅く変化する部分を取り出す式である。これのフーリエ成分を見てみよう:

$$J(\mathbf{k})=\sum_{jl}\mathcal{V}_{jl}\frac{1}{V}\sum_{\mathbf{q}}A_j(\mathbf{q})A_l(\mathbf{k}-\mathbf{q})+\cdots$$

ただし V は系の体積で $\mathbf{k}\neq 0$ とした。一般に、ある粗視変数 $A_i(\mathbf{k})$ の時間変化は線形では、おなじ $\mathbf{k}$ を持った粗視変数に関係付けられ、これらの関係から固有モードの複素振動数がもとめられる。そのモードの緩和は久保公式であらわされる輸送係数で決まる。しかし上のフーリエ成分であらわした展開式は、ある $\mathbf{k}$ の粗視変数の緩和過程が無数の $\mathbf{q}$ と $\mathbf{k}-\mathbf{q}$ の波数ベクトルを持つ緩和チャネルに分かれる事を表している。更にこの非線形的結びつきを利用して異なった $\mathbf{k}$ を持つ緩和過程の長時間部分をセルフコンシステントに決めることができる。これがモード結合理論 (mode coupling theory, 略して MCT) の骨子である。この方法を Fixman が扱った溶液の臨界現象に応用し、その上いくつかの近似を用いると彼の出した結果が再現されることがわかった (1966)。

上に述べた展開は一般的なもので、これによって前述した磁性転移も含めてすべての動的臨界現象が取り扱えるようになった。一方臨界点近傍では揺らぎの大きさが微視的スケールをこえて成長する。これに伴う時間スケールも同時に増大する。したがって流体力学的方程式に代表される通常の時間、空間的に局所的な巨視的法則に含まれる種々の輸送係数が異常を示すたけではなく、その法則自体が破綻する。その詳細も、この理論で調べられる。1970 年代になると Wilson の臨界現象の繰り込み群理論が大成功をおさめた。モード結合法は繰りこみ群理論と組み合わされてより包括的な動的繰り込み群理論が出来上がった。こうして 1980 年代には臨界現象は静的、動的側面を含めて基本的には解決した。即ち労力さえ厭わなければ臨界点近傍のユニバーサルな性質をいくらでも精度よく解析的理論で計算できる様になった。この意味では QED と同格な理論ができたことになる。

ここで述べた巨視的法則の破綻や動的繰り込み群理論を作るには久保公式の枠組みだけでは不充分である。気体の場合と同様にミクロとマクロの中間の運動学的領域の方程式が必要になる。これは長波長の臨界揺らぎ粗視変数に対する Fokker-Planck または Langevin 型の方程式であらわされる。液体の場合について後者の方程式を掲げる (1970)[*8]:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}+q^2\frac{\lambda^0}{\chi_{\mathbf{q}}}\right)\rho_{\mathbf{q}}(t)=-\frac{i}{\sqrt{V}}\sum_{\mathbf{k}}\mathbf{k}\cdot\mathbf{v}_{\mathbf{q}-\mathbf{k}}(t)\rho_{\mathbf{k}}(t)+f^{\rho}{}_{\mathbf{q}}(t)$$

[*7] 以下の式ではより正確には $J=\int d\mathbf{r}j(\mathbf{r})$ になる様な流れ密度 $j(\mathbf{r})$ 及びそのフーリエ成分 $j(\mathbf{k})$ の展開である。そうすると展開係数や色々面倒なことになるのでここではすべて省いた。基本的なアイデアだけ汲み取って頂ければと思う。

[*8] 繰り込み群では静的、動的側面を同時に取り扱うので少し違った方程式になるが詳細は省略。

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}+q^2\frac{\eta^0}{\rho}\right)\mathbf{v_q}(t)=-\frac{ik_BT}{2\rho\sqrt{V}}\sum_{\mathbf{k}}\left(\frac{1}{\chi_{\mathbf{q}}}-\frac{1}{\chi_{\mathbf{q-k}}}\right)\left(\mathbf{k}-\frac{\mathbf{q}}{q^2}(\mathbf{q}\cdot\mathbf{k})\right)\rho_{\mathbf{q}}(t)\rho_{\mathbf{q-k}}(t)+\mathbf{f}^v_{\mathbf{q}}(t)$$

f^ρ, $\mathbf{f}^v$ は次の揺動散逸関係を満たす熱的揺らぎである。

$$< f^\rho{}_{\mathbf{q}}(t)f^\rho{}_{-\mathbf{q}}(t') > = 2q^2\lambda^0\delta(t-t')$$

$$< f^{v\alpha}{}_{\mathbf{q}}(t)f^{v\beta}{}_{-\mathbf{q}}(t') > = 2q^2\frac{\lambda^0}{\rho}(\delta_{\alpha\beta}-q^{-2}q_\alpha q_\beta)\delta(t-t')$$

ここでクロス相関はゼロ。上式で

$\rho_{\mathbf{q}}(t)$: 密度揺らぎのフーリエ成分, $f^\rho{}_{\mathbf{q}}(t)$: 対応するノイズ
$\mathbf{v_q}(t)$: 速度場のフーリエ成分, $\mathbf{f}^v_{\mathbf{q}}(t)$: 対応するノイズ
$\chi_{\mathbf{q}} \equiv <|\rho_{\mathbf{q}}|^2>$: 一般化された圧縮率, λ^0 はミクロな（繰り込まれていない）熱伝導度
η^0 はミクロな（繰り込まれていない）粘性係数

この様な中間領域が存在する為には気体の時と同様に中間領域を特徴付ける長さと時間のスケールが必要になる。これを下の表に示す。

表 2　臨界液体における階層構造

レジーム	方程式	長さのスケール	時間スケール
微視的領域	リウビユ方程式	r_0	r_0/v_{th}
運動学的領域	運動学的方程式 （非線型ランジュバン又はフォッカープランク）	ξ	$6\pi\eta\xi^3/k_BT$
巨視的領域	流体力学方程式	L_{macro}	T_{macro}

記号の説明 : r_0（分子間力の到達距離）, v_{th}（分子の熱運動の平均速度）, ξ（臨界揺らぎの相関距離）, η（液体のシア粘性係数）, L_{macro}（巨視的長さ, 例えば音波の波長）, T_{macro}（巨視的時間, 例えば音波の周期）

動的臨界現象の実験的研究は１９世紀末ころからなされており前述した液体－気体臨界点における熱伝導の発散の程度は MCT の予言と一致し臨界揺らぎの相関距離に比例する事がわかった。一方巨視的法則の破れは散乱実験、特に光散乱の実験で詳しく調べられている。一方これらは臨界揺らぎの効果が顕著に現れる現象で、理論、実験とも特別高い精度を必要としない。理論の厳格な検証は異常性が僅かで高い精度が要求される場合に可能になる。液体－気体臨界点近傍におけるシア粘性係数はその典型例である。19 世紀末になされた注意深い実験では異常が発見されなかった。1990 年に発表された研究では 40 %程度の増加が報告されている。問題は液体－気体臨界点で圧縮率が無限に大きくなる、即ち、液体が無限に柔らかくなる為に重力効果が無視しえない事にある。臨界点近くでは資料の上と下で密度が大きく異なる。そこで 1999 年発表の実験は衛星内の無重力状態でなされた。結果は理論的に予言された弱い発散を示している。シア粘性係数の振動数依存性も測定され理論とよく一致している。

この他にも多くの研究がなされた結果、1960 － 70 年代に世界を風靡した臨界現象は精密科学になりフロンティアではなくなった。私も 70 年代半ばには臨界現象の研究から離れた。

3 その後の話題、将来の課題

MCT は動的臨界現象を理解する努力のなかで生まれ動的臨界現象が解決されれば忘れ去られる命運にあった。しかしこの理論は集団運動を非平衡統計力学に持ち込む有力な手段として定着し、液体のダイナミクスが問題になる時よく使われる。アルゴンのような単純な液体や高分子のような複雑な系では雑多な空間、時間スケールの運動が混在している。10^{-14} 秒程度の短い時間でオングストローム程度の微少な空間内に限られる運動は計算機で対応できる場合が多いが、自然界の重要な運動、特に蛋白分子の折りたたみの様な生物絡みでは多数の分子の長時間の運動が問題になる。計算機の能力が如何に進んでも対応できない重要な問題は常にのこされる。対応できたとしても計算機によりえられた膨大なデータをどう読み解くかが課題になる。計算機で対応できない多くの問題に直面したときに、MCT を含め使える理論的道具をそろえておくことの重要性はこれからも変わらない。いくつか具体例を以下に列挙する。

- ガラス転移、特に高密度コロイド系のガラス転移
ガラス転移は古くから今に至るまで未解決の、凝縮系物理で最後の残されたフロンティアであると言われている。１９８０年代半ばになってこの問題を第一原理からアタックする手段として MCT が注目され始めた。勿論昔の MCT とは異なる内容を含んでいるが同じ枠組みである。更に MCT の応用に触発されて、この問題を場の理論で定式化することが盛んになってきた。一例として A. Andreanov, G. Biroli, A. Lefevre, "Dynamical field theory for glass-forming liquids, self-consistent resummation and time-reversal symmetry", cond-mat/0510699 を挙げる。過冷却液体やガラスなどと言ったダサいテーマが見違えるようなスマートな理論に仕上げられている。今この分野には臨界現象が盛んになり始めた１９６０年代を彷彿とさせられる熱気が感じられる。しかし、これらが大部分、ウェッブサイトを通して外国から入ってくる情報によっていることは残念である*9。
そのほかには
- 粉体（散逸粒子系）の物理、（非弾性衝突をする気体のモデル）*10
- ソフトマター等生物からの諸問題

がある。現役をやめてから久しいので最後の二つについてのコメントは控えたい。またここで全く触れなかった分野に非線形動力学がある。森肇氏、蔵本由起氏その他の人々によって基研を中心に活発な研究活動が展開された。

蛇足

この原稿を書くにあたり、これまでの研究生活で色々感じて来たことを、いくらか付け加えようという気になった。おもに個人の体験に基づいてはいるが問題自体はある普遍性をもっていると考える。

前述したように大学院では始めに素粒子論の研究室にはいった。これが間違いだと悟ったのは、当時の研究室の特殊事情の他に学問の内容が自分の能力をはるかに超えることを実感したからである。それから半世紀たった今ふりかえってみると始めの予想以上に自己の能力を超えた成果があった。凡庸な才能しかない自分にとって何故そうなったかにつき思う所を述べる。

第一にいえる事は、自分の意思というよりも当時の事情に強制された形ではあるが若いときに日米の間を何度も往復したことがあげられる。本文でのべた業績の中でよく知られているもの、即ち気体論のリング衝突とモード結合理論は共に米国滞在中に芽が出た研究である。国内に職をもちある期間外地で研究するのはごく普通であるが全人生を賭けるのとは全く異なる。現地で職を得ようとすればそこの文化に深く浸るしかない。日米で生活して最も顕著に感じたことは、米国滞在中に実感した思考の自由さの程度であった。日本も戦後は民主主義になって何を考えようと言おうと表立って人ににらまれることはなくなった。しかしどういうわけか国内では思考が見えない枠にはまっているとの思いが絶えなかった。この事は研究をする上でも想像以上に大きいものがあるのではないか。

以上の事を解明するのには社会心理学者の助けが必要になるが直感的に日ごろ感じていることを述べる。突飛な例と思われるかもしれないが皇室に関する議論を取り上げる。皇室をめぐる最近の大きな話題は雅子様の健康問題もあったが女系天皇の是非であった。しかし考えてみれば、そもそも皇室の存在意義を国民の一人としてどう考えるかについては、戦時中を生きてきた世代の一人として未だに釈然としない所がある。所がこの問題を論じた新聞、雑誌の記事はこの所ほとんど見かけない。この事を取り上げるのが何かタブーになっている感じである。今これを取り上げたとて誰かににらまれるわけではないと思うが見えない枠があるように感じられる。ニューズウィークの 12 月 7 日号（和文）でこの問題を正面から取り上げてあるのをみてハッとした。これは突飛な例であるが我々の研究活動にもこの様な雰囲気がありそうである。特にこれから職を求めなければならない人、昇格を望む人にとっては無言の圧力になっているのではないか。即ちこんな事をしゃべるとおかしい人間だとしてシャットアウトされるかもしれないとの恐れから**無意識のうちに自己規制**している。

---

*9 臨界現象では１９７０年ころまでは物性の研究者によってゆっくりとすすめられた。所が１９７０年代の初めに Wilson が繰り込み群理論の有効性を示し４次元からの展開で解析的な計算ができることがわかり、素粒子論の優秀な研究者がどっと流れ込み３－４年の内におおよその事はわかってしまった。日本からは阿部、氷上氏の $1/N$ 展開がオリジナルな寄与として注目されたが肝心なポイントは大体外国人にとられてしまった。ガラスの問題は遥かに難しく臨界現象の様にあるとき突然解決する事は期待できない。しかし MCT の部分的成功を契機とした次の段階の発展には目をみはるものがある。ここでも又大事なことを外国人にすべてとられてしまう事にならなければ幸いである。

*10 日本では早川尚男氏が専門家である：「散逸粒子系の力学」(2003 年、岩波書店)

誤解の無いように一言のべたい。私は何事も米国が優れていると主張する積もりは全くない。実は 2001 − 2002 年 1 年間米国ロスアラモス研究所に滞在した。ここでは私が昔知っていた米国の自由な雰囲気は影を潜めていた。勿論研究所が秘密に囲まれている事と私が当地についてしばらくして起こった同時多発テロが大きく影を落としていることは間違いない。しかし折々伝え聞くように、かっての様な自由で創造的な雰囲気が米国の社会から失われているとすれば残念でならない。

そのほか日頃から我々に問題があると思っていることに次の２点がある：

- 思考が甚だ内向き、即ち内輪の小さなグループに閉じこもりがちになっていること*[11]。これは物理の様にかけはなれた現象、問題に共通な原理を求めようとすると致命的である。
- 事実にまともに向き合う姿勢が希薄で何事もカバーアップする傾向がある*[12]。自然科学では実験事実が神様であり、事実とまともに向き合ったときに初めてえられる核心をついた物理的内容に欠ける理論を、いくらエレガントなフォーマリズムで覆って見ても無益である。

この様なことについて書きだせば際限がないのでここで終わりたい。要するに、オリジナルな仕事をするのには一見研究と無関係に見える社会あるいは所属する組織の雰囲気や文化的な背景が我々の想像以上に大きな影響を与え得ることを主張したかった迄である。

討論

佐々：どうもありがとうございました。何か質問、コメントはありませんか。

早川：２次元系の話についてお聞きしたいのですけれども、long time tail があるから、２次元系をナイーブに考えると、輸送係数が log 発散しますよね。

川崎：厳密に言えばそうです。

早川：川崎先生のやつは有限になってしまって、有限の結果をリングダイアグラムで。

川崎：そうですね。それはまた別の問題になります。ああいうリングダイアグラムだけ考えると、本当は先ほど示したダイアグラムのなかのライン、即ち衝突、衝突のあいだの propagator が hydrodynamic なものを含むので、そこから余分な pole が出てくるのです。ここから long time tail が出てくるのです。リングダイアグラムをやったころは、そういう事まで考えおよびませんでしたから、単に mean free path 程度で decay するというふうになりました。本当はそこに、もっとマクロなモードが隠されているのです。MCT で出てくるものと本質は同じです。それまで取り出せば、ちゃんとそれは出てくる。べつに矛盾はしていません。これを指摘したのは早くに亡くなった P. Résibois です。ただ量的には非常に小さいですね。

佐々：ほかに何か、ありますでしょうか。僕が大学院生のときに、論文を読ませていただいたのですが、まったく理解できないことが多かったのです。

川崎：その論文の書き方にもよります。

佐々：最終的には成功した mode coupling theory の話も、非常にごちゃごちゃといっぱい計算されていて、理解するのがたいへんだったのです。先ほどの講演のなかで、森先生とやられた初期のころの話で、「ごちゃごちゃとたくさん計算されて、これは意味がないですよ」ということをおっしゃられたと思うのですけれども、傍目には、同じようなごちゃごちゃした計算のように見えるのですが、片方は意味がなくて、片方は最終的にものすごく意味があるわけです。お聞きしたいのは、やられているときに「これは成功しそうか」という確信はあったのですか。

*[11] １例をあげれば、我々の社会は普通と違った経歴を持つ人に非常に冷たいことである。日本で人脈を築く前に海外にでて活躍している人々には国内での就職の機会が極端にかぎられる。また幸い国内で職につく事ができても待遇で色々差別を受ける。私も退職金や年金は同年代の同僚の平均より相当減額されている筈である。正確な額を見るときっと腹がたつと思うので一切目をつぶる事にしている。40 歳ちかくなってからドイツの大学に就職したドイツ人の友人によると外国で研究した期間も経験年数に数えられるとの事である。日本と対極にあるのがイスラエルである。大学での昇格には外国での研究の経験の有無が条件になると聞いた。ここで誤解のないように言うと明治時代のように遅れた日本から先進欧米に学ぶために行けというつもりは全くない。現在の日本はれっきとした先進国であり、この意味で出かける必要はない。一方バブル期に一部の人たちが「もう欧米にまなぶものは何もない」と言っていたが当時も現在もそれには全く賛同しかねる。日本と欧米は同列の先進国ではあるが文化的には対極にある。そういう全く異なった社会に身をおくことによって初めて自身やその属する社会について見えてくることが必ずある。またそれによってその後の生き方や考え方の基本がかわる事もある。若いときに海外の文化にふれ平均と違った考えをもつ人々を日本の社会に入れる事はわが国の様に閉鎖的な傾向がある社会にとって特に大事なことではないのか。

*[12] この前の戦争で「転進」、「終戦」という、それまでに無かった言葉が作られたが、ここには事実を新しい言葉を作ってカバーアップする精神がみられる。

川崎：それは直感しかありません。最初にアイディアを思いついたときは、これはたぶんいけるかもしれないと思ったのです。だけど、誰もそういうことを言っても信用をしてくれないのです。

佐々：MCT のときには、論文を書かれる前から、これはごちゃごちゃした計算ではないと思われていたわけですか。

川崎：はじめから確信は持てません。MIT のボスが Irwin Oppenheim だったので、彼に話したのです。こういうことをやっていると。私は彼のポスドクでしたから、共著者になってくれと私は言ったのです。そうしたら彼に「Kyozi、you are too courageous.」と言われたのです。要するにするに乱暴すぎると言うのです。それで結局、共著はできなかったのです。最近は Irwin も MCT に関係した仕事をやっているから、いまは考えが変わったのだと思います*13。だけど、そのときはわからないのです。だからあらゆることを心配しなくてはいけないのです。そうすると、ひとりでに計算が複雑になって、わけがわからないものになってしまうのです。だから、あとから来た人たちが、例えば先ほど言った Kadanoff などは非常にスマートな人ですから、かなりわかりやすくしてくれたのです。私が世に出たのは Kadanoff のおかげだと私は思っています。しかし論文発表当初はまったくレスポンスがなかったのです。そういうことではないでしょうか。ちゃんとわかりやすくしてくれる人というのは、非常に貴重です。(笑) それは非常に重要な役割を果たしています。最初にやったときは、本当に何と何を couple していいのか、それさえわからないし、だんだんいろいろな人たちがいろいろな意見を言って、それでだんだん固まってくるということなのです*14。

佐々：成功したときの話は、何でも楽しい話になるのですけれども、失敗した話はどうでしょうか。あのときは、そういう確信は、もっと弱かったわけですか。

川崎：その当時、やっぱり久保公式が確立されてから、そんなに経っていませんでした。その魔力というのは、絶大だったのです。それから松原グリーン関数が少し前に出ましたけれども、その２本柱で何でもできるのではないかという幻想が皆の間にあったのは事実です。しかし中島貞夫先生の様な頭の良い方は、それは額縁を与えたにすぎないと、これは中を入れなければだめだということを、ずっと前から言っていらしたらしいのですが、額縁に幻惑されていたということがありました。特に日本でそういう傾向は強かったです。久保 formula や松原グリーン関数の様な美しい理論を出してきたわけですから、それを何かに使わなければいけないという認識が強かったと思います。

もう１つ言わせていただけば、異分野の交流という話が先ほど出ましたけれども、私は異分野の交流というのは、同じところにいて、いろいろな人がいっしょになるのも交流ですけれども、同じ人が別のところに行き、別のグループの人々とコンタクトをするのも時間の遅れがある異分野の交流ではないかと思っているのです。先ほど、気体の話で計算で苦労したと言いましたが、実は後で非常に生きてきているのです。あのような気体論については、教科書に書いてあること以上に誰も勉強しないのです。空間、時間のスケールが、階層構造になっているというのも、頭でわかっていても、心ではわからないのです。だから実際に苦労して、手を使ったことは、物事を考える上でものすごく役に立ちました。ここで大切だと思うのは始めからそういうことをわかっていてやったわけではないのです。それはまったくの偶然です。就職難からそういうことがあって、結果的にはそういうことがあります。事実、こんな事は我々凡人に見通せる筈がありません。その時、その時の問題に真剣に取り組み後で振り返ったとき、それまで見えなかったものが見えてきたのが真実です。

佐々：いかがでしょうか。どうもありがとうございました。続きまして最近の非平衡物理の発展ということを、短く６、７分でコメントをしたいとおっしゃるので、早川尚男さんにお願いします。

---

*13 Irwin はボスとして恐らく理想的な人であろう。当時自分と考えが違うからといって発表を抑え付ける姿勢は微塵もなかった。物性なら何をやってもかまわないと言われていた。たのめばテーマを捜してくれる。気体論の研究はこうして彼に与えられた。彼の人柄を慕って、今では著名になっている人々が次々に彼の所から巣立っていった。蛇足の所でのべた私のよく知られている仕事 (kawasaki dynamics も含め) はすべて Irwin の所にいたときに始まった。私が研究者として最も油が乗り切っていた時期に Irwin の所で過ごせたことは何よりも幸運であった。この機会に改めて Irwin に感謝したい。

*14 ついでに思い出を一つ付け加えたい。１９６６年に MIT でのポストドクを終えて欧州経由で帰国した。その途次 Leiden に立ち寄り P. Mazur に MCT の話をした。そのとき That's astonishing と言われたことが記憶に残っている。その折 Utrecht でも講演したがどんな反応があったかいまでは全く記憶にない。