

## 根本 幸児

スケールフリーネットワーク(SFN)は次数が冪分布に従っているが、近年、自然界や人間社会で広く認められるネットワーク構造であることがわかり、研究は物理学、生物学から社会科学まで多岐に亘る分野で盛んに行われている。近年、非一様なネットワーク上では特異な相転移現象、すなわちある相領域で常に臨界的振る舞いをするような現象が起こることがわかってきて注目を集めている。我々はその典型のモデルとして、標準的な感染症モデルであるSIRモデルをもちいて、伝播する攻撃に対するネットワークの頑健性と次数相関の関係について調べた。SIRモデルでは感染率 $\lambda$ を大きくしていくと、ある値 $\lambda_c1$ 以上で巨視的割合に感染が広がる「大流行」が起こる。また、値 $\lambda_c2$ 以上で非感染ネットワークの大きさが巨視的ではなくなる。通常格子系などでは二つの値は一致しているが、SFNなどでは $\lambda_c1 < \lambda_c2$ であることが知られている。 $\lambda_c2$ が大きいということは大流行は免れないにしても非感染者クラスターがまだ生き残れるという、ネットワークの特性が現れていると考えられる。そこで、SFNに次数相関を導入することによってこの「頑健性」がどのように変化するかを知ることは重要な知見となることが期待される。我々の数値計算によれば、正の相関、負の相関両方でこの頑健性が増加することがわかった。それぞれの相関がネットワーク構造に与える影響は異なるが、双方ともコミュニティ構造（結合のクラスター化）が引き起こされるために頑健となることが理解された。このような、格子系では縮退している二つの転移点分離して新しい相（臨界領域）が現れるという現象は他にも存在する。我々は厳密に繰り込み可能な木構造をもつ階層的ネットワーク上のポッツモデルを取り扱い、その臨界領域の性質を調べた。その結果、境界条件を正しく設定した双対性を利用して、秩序相-臨界相（無秩序相-臨界相）の不連続相転移を支配する固定点の性質を完全に解析することに成功した。我々の結果は臨界相とネットワークの性質との関係を明らかにする上で重要な知見を与えるものであるといえる。

## 有限時間熱機関の研究(奥田浩司)

非平衡現象の理論的研究として、有限時間熱機関の研究をおこなった。昨今、地球温暖化は世界的な問題となっている。より効率の良い熱機関を開発することは、この問題の解決に貢献するだろう。また、最近の原子力発電の安全性に対する疑問から、代替エネルギーへの要求が増しているが、その候補の一つである地熱発電は原理的には熱機関と考えることができるであろう。物理学では、熱機関の効率は熱力学の基本的課題として古くから扱われてきた。特に重要な結果は、熱機関の効率の上限を与えるCarnot効率 $\eta_C = 1 - T_c/T_h$  ( $T_c$ : 低温熱源の温度,  $T_h$ : 高温熱源の温度)の発見である。通常Carnot効率が実現されるのは、準静的極限の場合だけである。しかし、準静的熱機関は無限の時間をかけて有限の仕事を取り出すという点で、パワーが0であり、現実的な熱機関としては役に立たない。現実の熱機関は、有限時間で動作することで効率を犠牲にする代わりに有限のパワーを得ている。そこで、準静的でない有限時間で動作する熱機関の性質を調べることは熱力学の重要な課題であると思われる。有限時間熱機関の過去の研究において、1975年にCurzon and Ahlbornが等温過程と断熱過程を組み合わせたCarnotサイクルを有限時間に拡張し、Carnotサイクルの仕事率が最大となるときにはその効率が $\eta_{CA} = 1 - \sqrt{T_c/T_h}$  (CA効率)となることを比較的一般的な条件のもとで導いたことは特に重要な成果である。非平衡な熱機関に対して、このような簡単で美しい結果が成立するというのは驚くべきことである。また、2005年にvan den Broeckは2つの熱源の温度差 $\Delta T = T_h - T_c$ が小さい場合の熱機関を記述する一般的な枠組として、線形不可逆熱力学に基づいた線形不可逆熱機関を提案し、最大仕事率時の効率およびその上限値を解析的に得ることに成功した。我々は、この線形不可逆熱機関を拡張して、有限時間動作に伴う熱源へのエネルギー散逸を考慮した最小非線形不可逆熱機関を提案し、最大仕事率時の効率およびその上限値・下限値を解析的に得ることに成功した。また、我々の提案した熱機関のモデルは、2

010年にEspositoらによってCarnotサイクルの有限時間拡張の一般的モデルとして提案された低散逸Carnotサイクルを含んでいることを示すことができ、我々の熱機関のモデルの一般性を明らかにすることができた。

---

## Dufour効果を用いたヒートポンプの研究(奥田浩司)

---

Dufour効果は濃度差から熱流を生み出す非平衡熱力学的現象である。我々はこれを用いて、低温熱源から高温熱源へ熱を汲み出すヒートポンプができないかと考え、2成分混合気体を用いたモデルを提案した。このモデルの分子動力学シミュレーションを行ったところ、確かにあるパラメータ領域ではヒートポンプとして動作することが確認できた。しかし、ヒートポンプとしての効率は非常に小さく、その効率を大きくするための方法もまだ分かっていない。また、このヒートポンプの動作を理解するための理論の構築にもまだ成功していないため、さらなる研究が必要である。Dufour効果は通常、線形不可逆熱力学を用いて理解されるため、上で述べた線形不可逆熱機関のような枠組で理解できれば理想的であると考えている。

---

## 2つの回転おじさんのカオス同期の研究(奥田浩司)

---

回転おじさんは、カオス的挙動を示すおもちゃである。この回転おじさんを2つ用いてカオス同期させる実験をおこなった。カオス同期は、コンピューターシミュレーションや電気回路系では詳しく研究されているが、手軽にカオス同期を観察できる系はあまり知られていないので、このようなおもちゃで実現できれば面白いと考えている。しかしながら、2つの回転おじさんが周期的挙動をする場合には同期を観察することができたが、カオス同期は観察できなかった。この原因としては、2つの回転おじさん間の結合の強さが十分でなかったことに加え、結合の仕方にも問題があったのではないかと考えている。

---

## 大川房義

---

モットの金属・絶縁体転移あるいはモット絶縁体の問題は、磁性分野における最も重要な問題の一つであり、また銅酸化物における高温超伝導機構の解明にもつながる問題でもある。この問題を解決するには強い電子相関効果を正確に扱う必要がある。とくに、局所電子相関効果については正確に扱う必要がある。この局所電子相関効果は希薄磁性合金の問題である近藤効果と密接に関連する。この理論視点に沿って開発された近藤格子理論を利用し、モット絶縁体の本性解明に取り組んだ。得た結果はつぎのとおりである。もし基底状態で対称性の破れがないのに一粒子励起に完全ギャップのあく絶縁体の実現したとすれば、それは残留エントロピーが残り熱力学の第三法則の破れた基底状態であるべきことを示した。

---

## ボーズ・アインシュタイン凝縮相の素励起[T. Kita: J. Phys. Soc. Jpn. 80 (2011) 084606](北孝文)

---

ボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) 相において、個別励起 (一粒子グリーン関数の極) と集団励起 (二粒子グリーン関数の極) が全く別物であること、そして、それらが共に南部-ゴールドストーン (NG) ・ボゾンとみなせることを明らかにした。広く知られたガボレ-ノジエール理論 (1965年) によると、BEC相における個別励起と集団励起は、同

じ密度揺らぎであり、弱い相互作用の極限でボゴリユボフ・モードに一致し、また、強結合領域では超流動 $4\text{He}$ で観測されるフォノン-ロトン曲線に移行する。今回得られた結果は、この通説を覆すものであり、ポーズ・アインシュタイン凝縮の基礎理論に変革を迫る重要な結果である。さらに、別物とわかったBEC相の個別励起と集団励起が、共に、自発的対称性の破れに伴うNGモードであることも指摘した。従来は、BECに伴う「ゲージ対称性の破れ」により、ただ一種類のNGモードが出現すると考えられていた。しかし、ゴールドストーンの定理の証明には二種類あり、それらを詳細に再検討した結果、二つが異なる意味を持ち、BEC相では個別励起と集団励起に対応することを明らかにした。この結果は、基礎物理学一般にとって、非常に重要な成果であると考えている。

---

## 超伝導状態に対する簡潔な自己無撞着摂動展開

[T. Kita: J. Phys. Soc. Jpn. 80 (2011)  
124704] (北孝文)

---

超伝導相に対して、すべての対形成過程を簡潔に取り込む新たな自己無撞着摂動展開法を開発した。BEC相は、バーディーン-クーパー-シュリーファー (BCS) 理論によって記述される弱結合フェルミ超流動状態から、引力を強めて行った極限状態であると見なせる。しかし、このBCS-BECクロスオーバー問題は、従来、平均場理論や一部の対形成過程のみを取り込む理論で解析されてきた。この状況を大きく改善し、すべての対形成過程を取り込む系統的自己無撞着摂動展開法を開発した。これは、超伝導の理論にとり、大きな成果である。