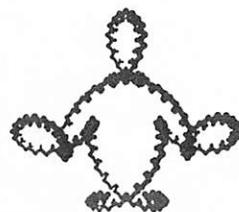


ソフトマターとは何か

好村 滋行



1. ソフトマターとは

ソフトマターという名称は、比較的最近、定着した言葉であり、国内でもソフトマターに関する書籍が相次いで出版されている^{1~4)}。化学の分野ではソフトマテリアルと呼ばれることも多い。ソフトマターとは、高分子、液晶、両親媒性分子、コロイド、エマルション、生体物質、ガラス、粉流体などの物質群に対する総称である。これらの物質に共通する性質は文字通り柔らかいことであるが、そのような特徴はなぜ生まれるのであろうか。

ソフトマターは一般にその構成分子が大きいため、10~1000 nm 程度のメソスコピックな内部構造を自発的に形成する点に重要な特徴がある。例えば、高分子溶液中の高分子鎖のフローリ半径、コロイド粒子や脂質二重膜ベシクル、マイクロエマルションのドロプレットの大きさなどはすべて数十から数百 nm 程度である。エアロゾル中の泡の大きさや、ブロックコポリマーのミクロ相分離構造のスケールも同様である。一般に、物質の内部構造の長さスケールを L とすると、その(エントロピー的な)剛性率はおおよそ $G \sim k_B T / L^3$ で与えられる。ここで、 k_B はボルツマン定数、 T は温度である。通常の固体の場合、 L として典型的な原子間距離を選ぶと、 G の値はおおよそ $10^{10} \sim 10^{11}$ Pa 程度となる。それに対して、例えばコロイド粒子が周期的に配置したコロイド結晶の場合、粒子間の距離 L が原子サイズよりもはるかに大きいため、 G は 1~100 Pa と圧倒的に小さくなる。したがって、ソフトマターは力学的に柔らかい応答を示す。

ソフトマターにおけるメソスコピックな内部構造の存在は、当然その動的性質にも大きな影響を及ぼす。およそ粒子間距離を拡散するのに要する時間を、仮にその物質の特徴的な時間 τ と考えれば、粒子の拡散定数を D として $\tau \sim L^2 / D$ となる。単純液体では $\tau \sim 10^{-12}$ s なので運動が瞬時に緩和してしまうが、コロイド結晶では τ が $10^{-3} \sim 1$ s となり、他のソフトマターと同様に、非常にゆっくりとしたダイナミクスを示す。言い換えると、ソフトマターは小さな外場で大きな構造変化を示す非線形性と、著しく遅いダイナミクスにともなう非平衡性を兼ね備えている。このため、ソフトマターは非線形・非平衡物理学における恰好の研究対象と考えられており、基礎および応用の両面から大きな注目を集めている。

新しい物質科学としてのソフトマター研究は、物理、化学、生物、工学などにまたがる学際領域研究として位置づけられる。特にほとんどの生物はソフトマターで構成されているため、生命現象の物理的解明を究極的な目的とした研究が行われつつある。一方で、様々なソフトマターの応用への展開には目を見張るものがあり、電子産業、情報技術産業、食品や化粧品産業など多岐にわたっている。ソフトマターが 21 世紀の科学で重要な役割を果たすことは間違いないだろう。

2. ソフトマターの歴史

歴史を紐解いてみると、ソフトマターの源流は 150 年近く前のイギリスの化学者グラハムが考

た「コロイド」に辿り着く。彼は固体でも液体でもない、もしくはその両方の性質を兼ね備えたような物質を「コロイド」(膠質)と呼び、「クリスタロイド」(結晶質)と区別した。その後、コロイドの研究は主に化学の一分野として発展し、例えばドイツの化学者シュタウディングーは高分子の概念に到達する。

一方、20世紀の物理学は量子力学の発見とともに幕をあげ、それを基礎にした固体物理学が飛躍的に発展して、人類の生活様式も一変させてしまった。そのような流れの中で、今日ソフトマターと見なされるような物質は、実験的にも理論的にも取扱いが難しい対象であるとみなされていた。しかし、1970年代に相転移における臨界現象が本質的に解明されたことにより、物理学者は「普遍性」や「スケーリング」などの新しい物質観を獲得することになる。フランスの物理学者ド・ジャンは相転移の理論で培われた新しい視点で高分子や液晶を捉え直し、これらの物質も美しい性質や法則性を示すことを明らかにした。この画期的な業績が評価されて、彼は1991年にノーベル物理学賞を受賞する。ちなみに、ド・ジャンのノーベル賞講演のタイトルは「ソフトマター」であった。

ド・ジャンの研究スタイルに触発された多くの物理学者は、必ずしも高分子や液晶などを個別に研究するのではなく、むしろソフトマターと呼ばれる物質群に共通する普遍的な性質を探究してきた。もちろん個々の物理学者の研究態度がすべて同じであったわけではないが、過去20年のソフトマター物理学はこのような背景の下で世界的に発展を続けてきた。

3. ソフトマターの数理科学的側面

上で述べたように、ソフトマター物理は臨界現象の理論の影響を強く受けており、スケーリングと呼ばれる議論がしばしば用いられる。一つの例として、高分子溶液と紐状ミセル溶液の粘性を考

えてみよう。高分子はモノマーと呼ばれる繰り返す単位を化学的に重合させた細長い紐状の分子であるのに対して、紐状ミセルは界面活性剤などの両親媒性分子が水中で自己会合した細長い集合体であるが、分子の出入りは自由であり、構造の組み換えも可能である。どちらの場合でも、溶液の粘性 η と濃度 ϕ の間には $\eta = C\phi^\alpha$ という関係が成り立つ。これをスケーリングの関係と言う。注目するスケールに対応して現象を的確に記述するモデルを構築することによって、高分子であれば分子種によらず $\alpha \approx 3.9$ 、紐状ミセルでも分子種によらず $\alpha \approx 3.7$ と理論的に予測される³⁾。これは、溶液中の高分子と紐状ミセルがよく似た振舞いを示すが、それらのダイナミクスにおいて少し異なる緩和機構が含まれていることを意味する。ソフトマター物理ではこのような普遍的な指数の値に注目し、背後に存在する物理的なメカニズムを探ろうとする。一方、分子種の個性は高分子でも紐状ミセルでも係数 C に反映される。指数 α と係数 C は車の両輪の関係にあり、両者が解明されて初めて注目する物質の全体像が明らかになる。

一方、スケーリングの議論は物理現象の本質を捉えているものの、定量性などが不十分であるという批判があるのも事実である。しかしながら、川勝年洋氏によって本特集に取り上げられている高分子の自己無撞着場理論などを用いれば、実験結果とも定量的な比較が可能であり、精密科学と言ってよいレベルの結果が得られることがわかりつつある。

参考文献

- 1) 今井正幸:『ソフトマターの秩序形成』, シュプリングー・ジャパン (2007).
- 2) 田中文彦:『ソフトマターのための熱力学』, 裳華房 (2009).
- 3) T.A. ウィッテン, P.A. ピンカス (好村滋行, 福田順一訳):『ソフトマター物理学』, 吉岡書店 (2010).
- 4) 土井正男:『ソフトマター物理学入門』, 岩波書店 (2010).
(こうむら・しげゆき, 首都大学東京大学院理工学研究科)