

フロギストン

スーパーインシュレーター super-insulator

スーパーインシュレーションともいう。アルミ蒸着ポリエステルフィルムにポリエステルのネットやガラス繊維等を層状に重ねた多層断熱材である。熱放射に対する反射率が高い材料（アルミニウム）とポリエステルのような熱伝導率の小さな材料を組み合わせることによって、輻射と熱伝導による熱移動を通常の真空断熱のみの状態に比べて、真空断熱とスーパーインシュレーターを組み合わせると10倍ほど熱伝導率を軽減させることができる。

(千葉工業大学 筑紫 格)

レプリカ対称性 replica symmetry

普通、相転移と名の付く現象は、何等かの「対称性」の变化を伴う。強磁性転移であれば、磁化 $M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle S_i \rangle$ ($\langle S_i \rangle$ はスピンの平均値) は、高温で $M = 0$ だが、低温でスピンの向きが凍結 (対称性が変化) し、有限の値に変化する。ガラス転移 (あるいはそのスピン版であるスピングラス転移) ではどうか。この場合も転移点 (もし転移点があればの話だが) を境に、スピンの向きが凍結するのは強磁性転移と同じだが、磁化 M は、スピンの正負のランダムな値を取るため、常にゼロとなってしまう、適切な秩序変数とは言えない。そこで二つの系のコピー (これをレプリカと呼ぼう) を用意して、そのスピン配置の「重なり」の度合い $Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle S_i \rangle_\alpha \langle S_i \rangle_\beta$ を秩序変数とすればよい。 α や β はレプリカのラベルだ。どのレプリカも区別はつかないはずだから、このラベルを外して $Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle S_i \rangle^2$ とすっきりとした形に書きたくなる。ところが、スピングラス転移では、転移点以下でレプリカの入替えによって Q の値が変わってしまふ。これをレプリカ対称性の破れと呼ぶ。たくさんの谷底から成る凸凹の自由エネルギーの中で、同じ谷間 (Q が大きい配置) にいる状態と、異なる谷間 (Q が小さい配置) にいる状態が共存している様子をイメージするとわかり易い。

(名古屋大学 宮崎 州正)

レプリカ液体論 replicated liquid theory

スピングラス転移を記述するために整備された理論がレプリカ理論である (例えば西森秀稔「スピングラス理論と情報統計力学」(岩波書店))。そしてこのアイデアを液体のガラスに移植した理論がレプリカ液体論である。本文中で議論したようにガラスは、たくさんの山に隔てられた自由エネルギーの谷間に落ち込んだ状態である。この系全体の分配関数 (自由エネルギー) を計算することは原理的に困難である。液体がどの谷間に落ち込んでいるかを記述する

術がないからだ。そこで、 m 個の全く同じ液体 (レプリカ) を用意して、それを弱く相互作用させて、全体を一つの m 成分液体とみなすというトリックを使う。多成分液体の分配関数は、液体論の伝統的な方法を使えば計算することができる。密度相関関数 (動径分布関数あるいは構造因子のこと) も計算できる。ここで異なる成分間の密度相関は、液体分子の配置の類似度の目安となっている。これは、スピングラスにおける「重なり関数」とそっくりの、液体のガラスの秩序変数に他ならない。このようにレプリカを導入することで、ガラスの秩序変数が液体論の枠組みの中で自然に登場するのである。そしてここから液体のガラス転移の振る舞いも計算できるようになるのである。詳しくは M. Mezard, *et al. J. Chem. Phys.* **111**, 1076 (1999)などを参照。
(名古屋大学 宮崎 州正)

ランダム磁場イジング模型 random field Ising model

統計力学の教科書で必ず登場する模型が、 $S_i = \pm 1$ の二つの値を取るイジングスピン系で、そのハミルトニアンは

$$\mathcal{H} = - \sum_{ij} J_{ij} S_i S_j - \sum_i h S_i$$

で与えられる。 J が相互作用、 h が磁場である。このモデルは、強磁性相転移や気液転移のような多体相互作用が本質となる現象を記述するミニマルモデルである。ランダム系の問題でも、このような単純なハミルトニアンを出発点に考えることができる。系のランダムさをモデルに埋め込む方法には二つある。一つはスピン間の相互作用 J をランダムな変数にすることで、これがスピングラス模型である。もう一つが磁場 h をランダムにすることで、これがランダム磁場イジング模型である。ランダムなスピンに一定の磁場をかけるのと、向きが揃ったスピンのランダムな磁場をかけるのは、スピンの配向秩序が壊されたまま凍結するという点で似ているが、その転移の性質は二つの模型で大きく異なる。現実のガラス転移が、本質的にどちらに近いのか、現在も活発に議論されている (例えば, Biroli *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 175701 (2014)を参照)。(名古屋大学 宮崎 州正)

構造エントロピー structural entropy

液体の持つ局所分子構造の秩序性を示す量であり、液体の持つエントロピーから分子の内部自由度及び、並進、回転自由度に由来する振動エントロピーの差分として表現される。一般に対象の乱雑さの度合いを示す指標としてエントロピーが使われるが、これは統計力学的には系の微視的な状態数 W とボルツマン定数 k_B を用いて、 $S = k_B \ln W$ のように表される。このエントロピーをその起源まで遡って分類することを考えると、結晶状態においては、物質の分子内振動に由来するエントロピーと、分子間振動、即ち格子振動に由来するエントロピーに大別することが出来、このエントロピーの温度変化が実験的に熱容量として観測されるわけである。ここで、ガラス状態のエントロピーも同様にして理解することが出来るのだが、ガラス転移点を経て液体状態へと系が遷移すると、こうした振動エントロピー

の他に、温度の上昇と共に液体構造が徐々に変化する効果を考慮する必要がある。それを反映しているのが構造エントロピーであり、低温では秩序だった液体構造を反映して小さな値をとっているが、温度の上昇と共に大きく上昇する。(東京工業大学 辰巳 創一)

局所最適構造 locally favored structure

少数個の分子集団がエネルギーを最小化するように作る構造。一般にバルクとしての分子集団が安定な構造を作ったときの構造と、この局所最適構造は異なることが多い。例えば、分散力のみが働くような球形の分子が少数個集まって作る構造は、全最近接分子のペア数を出来る限り大きくする、という要請から、分子集団の具体的な数にもよるが、正 20 面体構造、もしくはそれを少し崩したようなものになることが知られているが、この正 20 面体構造は決して長距離秩序構造を作ることは出来ず、全体として結晶状態になることはあり得ない。しかしながら、長距離秩序構造を作ることのない液体のある種の素構造や、結晶化する前の準安定状態として局所的にこうした局所最適構造が実現されている可能性は高い。実際、近年の超局所電子線回折実験から金属ガラスにおいて、局所最適構造としての正 20 面体構造が実現されていることや、コロイド分散系の数値実験において、こうした局所最適構造が実現されていることが報告されている。(東京工業大学 辰巳 創一)

自発的エンタルピー緩和速度 spontaneous enthalpy relaxation velocity

ガラス転移点や、一次転移点など、平衡状態に達するのに非常に長い時間がかかる試料の緩和現象をエンタルピーの視点で表現したもの。断熱型熱量計を用いた測定においては、エネルギー印加の前後で試料を平衡状態に戻しその温度を測定することで平衡熱容量を測定するのだが、この緩和過程の温度依存性を、印可するエネルギーを一定に保ち、待ち時間を固定したときの緩和速度に着目することで、取り出すことが出来る。これは試料のある時間スケールにおける緩和挙動の温度依存性を取り出す、ということであり、例えば誘電緩和などで周波数を固定したときの温度依存性に注目した測定に対応すると言える。この自発的エンタルピー緩和速度測定を通じて着目する時間スケールは典型的には 1000 秒程度の長さに対応し、特にガラス転移を示す試料を徐冷したものを測定することにより、ガラス転移点は吸熱ピークの温度として検出される。本解説記事では低温液体相の構造緩和や、ガラス転移をこの自発的エンタルピー緩和速度を通じて測定した結果を示している。(東京工業大学 辰巳 創一)

超常磁性 superparamagnetism

バルクの強磁性体は一般にいくつかの磁区(ドメイン)

を形成して静磁エネルギーを低く保っている。磁性体のサイズが小さくなるとドメインの数も次第に減り、ついには単磁区構造をとるようになる。単磁区内の粒子の異方性エネルギーは異常性定数 K と体積 V の積で KV のように表されるが、体積が小さくなると単磁区内の磁気モーメントは熱揺らぎに負けて、スピンの強磁性的にそろった状態のままゆらいで、あたかも常磁性のようにふるまう。磁性体が多磁区から単磁区へ変化する場合の粒子サイズは、静磁エネルギーと磁壁のエネルギーの兼ね合いにより決まり、物質によっても異なるが、約 100 nm 程度であるといわれている。微細な粒子で単磁区構造をとることは、1950 年ころに Kittel や Néel らの正確な計算により確認された。

(横浜国立大学 一柳 優子)

ネール緩和 Néel relaxation

磁性体に磁場変化を与えた場合に、磁化の変化に時間的遅れを生ずる現象を磁気緩和現象という。微粒子の磁気緩和現象はブラウン緩和とネール緩和に大きく 2 つに分けられる。ネール緩和は磁気モーメントのみが回転して外部磁場に追従しようとする機構で、緩和時間を τ_N 、異方性定数を K とすると、 $\tau_N = \tau_0 \exp(Kv/k_B T)$ のように表される。 v は微粒子の体積、 k_B はボルツマン定数である。一方ブラウン緩和は微粒子内の粒子自体が回転する機構で、 $\tau_B = 3\eta v/k_B T$ のように表される。溶液中でおこるため η は粘性を表す。

(横浜国立大学 一柳 優子)

温熱療法

(主に使用周波数と患部侵襲性および磁気微粒子活用の点から)
hyperthermia treatment
(from the view point of available frequency and invasiveness using magnetic nanoparticles)

がん温熱療法(ハイパーサーミア)は、がん細胞が正常細胞と比べて熱に弱いという性質を利用したがんの治療法である。未だ研究段階ではあるが、従来は人体に直接針を刺したり、電極を当てたりしていた。しかしながら痛みを伴い患者への負担が大きく、出力にも限界があった。そこで磁性体を用いた磁気ハイパーサーミアが提案され、現在はこの研究が世界中で進められている。磁性体は変調外部磁場を印加することで、そのエネルギーの一部を内部に熱を蓄えることが出来るため、その効果を利用し局所的な非接触の加熱を起こすことができる。磁性体がナノサイズであれば、十分細胞へ導入できる大きさである。熱に弱いがん細胞へナノサイズの磁性体を注入し、外部から交流磁場を印加すれば、がん細胞のみが発熱して死滅させることが可能である。この方法が実現すれば、低侵襲で副作用のない治療が期待できる。国際非電離放射線防護委員会のガイドラインでは、人体へ許容される交流磁場を磁場振幅と周波数の積で概ね $5 \times 10^8 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下に制限している。

(横浜国立大学 一柳 優子)