

## ヤヌス粒子の2次元分散系における凝集構造

岩下 靖孝 〈九州大学大学院理学研究院〉

木村 康之 〈九州大学大学院理学研究院〉

近年の微粒子合成手法の発展により、様々な「パッチ粒子」—粒子表面に物性の異なる領域（パッチ）を持つ異方的なコロイド粒子—が実現できるようになり、従来の等方的な粒子とは異なるエキゾチックな振る舞いが注目されている。<sup>1,2)</sup> 近距離の粒子間相互作用は一般に表面物性に依存するため、パッチ粒子は方向に依存した異方的な相互作用を持つ。また直径が10 nm- $\mu$ m程度（メソスケール）の微粒子であるため、原子・分子よりは遥かに大きい、十分に熱運動できる程度には小さい。そのためパッチ粒子はパッチの数や配置などの異方性により、多様な秩序構造を自己組織的に形成すると予想されている。<sup>3)</sup> 例えば望ましいフォトンニックバンド、機械強度、触媒特性などに必要な微細構造（メソ構造）を、パッチ構造を通じ実現できる可能性がある。

また歴史的にコロイド分散系は、粒子多体系の相挙動を解明するためのモデル系としても研究されてきた。等方的な粒子の場合、例えば気-液相分離や結晶化など、かなりの部分が実験・理論の両面から解明されている。しかし異方的コロイド粒子系の研究は未だ端緒についたばかりである：コロイド分散系と言っても食品やインクなど実に多様であり、当然異方的な粒子も多い。特にタンパク質などの生体高分子は異方的コロイド粒子としての側面を持つため、その相挙動の理解は生物科学においても重要である。パッチ粒子系はこのような研究における単純なモデル系としても注目されている。<sup>4,5)</sup>

これまでのところ、パッチ粒子分散系特有の相挙動や新規な相に関しては、主に理論・シミュレーションにより研究が進められてきた。<sup>1,2)</sup> 一方、実験でもコロイド粒子によるカゴメ格子結晶が初めて実現されるなど、興味深い構造形成が報告されてい

る。<sup>6)</sup> しかし実験では異方的な相互作用の制御が困難であるため、理論と比べると研究例はかなり限られており、特に相挙動の系統的な研究には至っていない。

これに対して我々は分散媒の臨界現象により誘起される粒子間相互作用<sup>7,8)</sup>を利用して、パッチ間の引力を温度により連続的かつ可逆的に制御することに成功した。<sup>9)</sup>

そこで最も単純なパッチ粒子であるヤヌス粒子（半球パッチを持つ粒子）<sup>10)</sup>の2次元分散系に対しこの手法を用い、分散状態の引力依存性を調べた。<sup>9)</sup> その結果、平衡状態で有限サイズのクラスターを形成する「安定クラスター相」を見出した。また、クラスターサイズは引力の増加に伴い増大するが、その際に4粒子からなる4量体を単位構造として1次元的に成長し、構造に階層性が現れることが分かった。このような挙動は等方的な粒子で見られるものと大きく異なり、異方性により本質的に異なる凝集・自己組織化が現れることを明確に示している。凝集構造の階層性は最近シミュレーションによっても示唆されており、<sup>11)</sup> 様々な異方的コロイド粒子系の自己組織化との関連が興味深い。

またパッチ粒子の単純なモデル系を用いたシミュレーションを行ったところ、実験結果を非常によく再現し、作製した粒子が単純なパッチ粒子として振る舞っていることも分かった。よって本研究は、パッチ粒子系における有用な実験手法を確立したものとと言える。今後、本手法を含む実験による研究、更なる理論的研究の進展により、パッチ粒子系の多様な相挙動が解明されることを期待している。

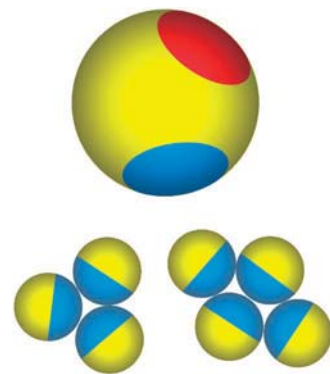
### —Keywords—

#### パッチ粒子：

粒子表面に物性の異なる領域（パッチ）を持つコロイド粒子。パッチによる異方的な粒子間相互作用を持ち、その自己組織化/自己集合が注目されている。また表面の異方性を利用した自己駆動粒子として、アクティブマターの研究にも活用されている。作成手法として、微粒子表面の部分的修飾、多相高分子液滴の重合、ブロック共重合体のミセル化など、様々なものが提案されている。

#### 安定クラスター相：

気体→液体あるいは結晶などの凝縮転移では、一般に凝縮相は巨視的なスケールに成長し、最終的な平衡状態では一つの大きなドメインとなる。一方、界面活性剤分子の場合、溶液中である臨界濃度を超えると球状・紐状などの形態の小凝集体（ミセル）を形成し始めるが、一定の濃度においてはミセルは有限な平衡サイズを持ち、成長し続けることはない。このように、有限サイズの凝集体が分散した平衡状態を総称して安定クラスター相と呼んでいる。



(上) パッチ数2の粒子の模式図、(下) ヤヌス粒子のクラスター。