

## 不活性粒子混合下における Pt 触媒粒子の集団運動の変化

大山 夏奈, 塩井 章久, 山本 大吾\*

### Chemically Driven Collective Motion in Mixtures of Catalytic and Inert Particles

Natsuna Oyama, Akihisa Shioi and Daigo Yamamoto\*

Received 29 September 2025; Accepted 3 December 2025

Active matter often exhibits ordered collective motion, such as in bacterial colonies or swarms of fish and birds. Understanding the mechanisms underlying the complicated collective behaviors is significant to develop innovative chemical systems. We discovered that Pt catalytic particles with simpler structures exhibit a unique collective motion, that is, repetitive cluster formation and disintegration in an aqueous ethanol solution. In this study, the collective behavior of Pt particles is demonstrated in mixtures containing inert particles. Two distinct types of cluster formation were observed by varying the mixing ratio of the Pt and Au particles: Pt/Au mosaic-like clusters and Pt/Au core-shell clusters. In contrast, no Pt/silica cluster formation was observed in the silica particles mixed with Pt particles. In the Pt/Au core-shell clusters observed in this study, the thickness of the Au particle shell could be controlled by adjusting the concentration of the Au particle. This finding suggests that the spatial separation of Pt and Au particles can be realized under controlled conditions.

**Keywords:** Collective motion, Catalytic particle, Active matter, Inert particle, Chemotaxis.

#### 1. 緒 言

非平衡条件下において化学エネルギーを運動エネルギーに変換して自発的に運動する系は、アクティブマターとよばれている。生物はアクティブマターの最たる例であり、それらが混み合った状況下ではしばしば秩序だった幾何学パターンを示す動的自己組織化（集団運動）が見られ、バクテリアのコロニー[1]、魚や鳥の群れ[2,3]などさまざまなスケールの集団運動が生物界において散見される。これらの現象は自然界に広く存在する一方で、集団運動の発現メカニズムはきわめて複雑であることから、その解明は重要な課題とされ、理論的な研究としては、Vicsekモデル[4]や Motility induced phase separation (MIPS) [5]を用いたアプローチがなされてきた。近年では、界面活性剤溶液中における油滴のパターン形成[6]やヤヌス粒子のクラスター形成[7]など無生物系における集団運動も報告されているが、このような複数の物体が集団運動や秩序立ったパターン形成を行うといった巨視的ダイナミクスを誘起する人工的な例はまだ少ない。生物系にみられる集団運動を、条件制御が容易である無生物系で同様に再

現し、運動メカニズムの解明につなげることで、複雑な生命系を物理化学的現象として捉えることが可能となり、新規の化学システムの構築に応用できるのではないかと考えられる。

本研究室では、これまでに、生物よりも単純な構造を有する Pt 触媒粒子がアルコールなどの有機燃料を含む水溶液中で、溶存酸素を用いた有機燃料の酸化反応のエネルギーの一部を利用して自律運動を行うことを見出している[8]。また、近年では、粒子濃度が高い条件においては以下のような特徴的な集団運動が発現することを報告している。まず、均一に分散した Pt 粒子が集合し、クラスターを形成する。そして、そのクラスターが周囲に散らばり解散し、その後また集合しクラスター化するという集団運動を行うことを見出している[9]。さらに、最新の成果として、この Pt 触媒粒子の集団運動を利用して、仕事を取り出すことができることを明らかにした[10]。具体的には Pt 触媒粒子の集団運動に Pt 粒子より数十～百倍ほど粒径が大きい不活性の歯車状粒子を配置すると、歯車状粒子が自転仕事を行った。非生物の微小アクティブマターから仕事を取り出すことを実験的に示せたことから、生物系でのモデルの一例となることが期待できる結果である。

本研究では、巨大な歯車状粒子の代わりに、Pt 粒子の集団運動の中に同程度のサイズでかつ形状も類似した不活性粒子を同程度の粒子数濃度で加えた混合粒子において集団運動におよぼす影響を検討した。

同志社大学大学院 理工学研究科  
(〒 610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3)  
Department of Chemical Engineering and Materials Science, Doshisha University  
(1-3 Tataru Miyakodani, Kyotanabe, Kyoto 610-0321, Japan)  
\* Corresponding Author dyamamoto@mail.doshisha.ac.jp

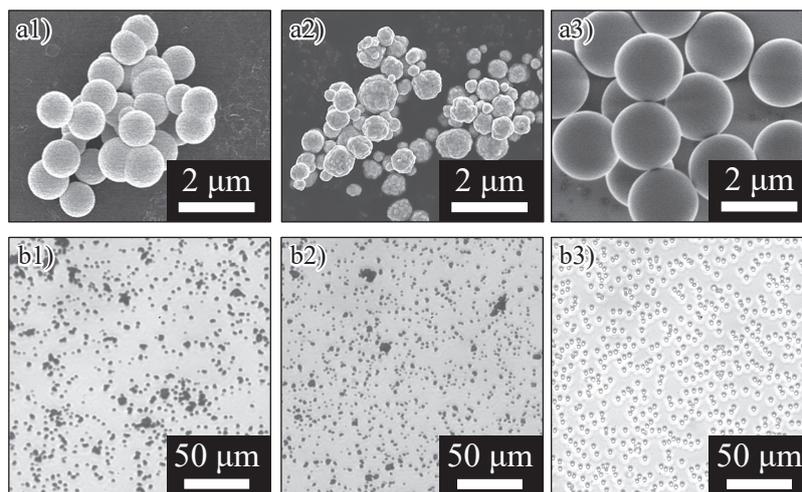


Fig. 1 Snapshots of particles observed with (a) an electron microscope and (b) an optical microscope: (1) Pt particles (2) Au particles (3) silica particles

## 2. 実験方法

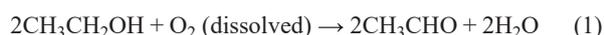
### 2.1 試薬

本研究では、触媒粒子として Pt 粉末 (PT-354015, ニラコ, 密度 21.5 g/cm<sup>3</sup>[11]), 不活性粒子として Au 粉末 (AU-174015, ニラコ, 密度 19.3 g/cm<sup>3</sup>[11]) およびシリカ粉末 (KE-P250, 日本触媒, 密度 1.9 g/cm<sup>3</sup> (公称値)) を用いた。使用した粒子を走査電子顕微鏡 (SEM) で撮影した画像を Fig. 1a に示す。ここで, Pt 粒子と Au 粒子は一次粒子で粒子径約 1 μm, シリカ粒子は粒子径約 2~3 μm である。各粒子の液中分散性を示すために, 各粒子サスペンション (分散媒: 超純水) を 10 分間静置した際のガラス底面上に存在する粒子の光学顕微鏡像を Fig. 1b に示す。分散媒中では Pt 粒子と Au 粒子はそれらが凝集した粒子径数 μm の構造的に似た形状の二次粒子としてふるまう。一方で, シリカ粒子はこれら二次粒子と同程度のサイズで一次粒子のまま分散している。

また, 触媒粒子によって溶存酸素による酸化反応が促進される反応物質として, エタノール (純度: 99.5%, 富士フイルム和光純薬) を用いた。粒子サスペンションあるいは水溶液を調製する際は, 超純水 (PURELAB flex 3, ELGA LabWater) を使用した。

### 2.2 溶存酸素濃度測定

本実験で用いたエタノール燃料では, 触媒存在下において, 以下の式で表される溶存酸素を用いた酸化反応が起きる。



そこでそれぞれの粒子の触媒活性の有無を調べるために, 各粒子存在下においてエタノール水溶液中の溶存酸素濃度の経時変化を調べた。

まず, Pt 粉末, Au 粉末, シリカ粉末を用いて, 粒子濃度 0.1 g/L の粒子サスペンション (分散媒: 0.34 M エタノール水溶液) をそれぞれ調製した。また, 対照実験として粒子を含んでいないエタノール水溶液も用意した。

各溶液 40 mL を, 口内径×胴径×全長が φ20.3×φ35×78 mm のそれぞれ別の 50 mL スクリュー管 (9-852-09, ラボラン) に注入し, 外気からの酸素の直接的な供給を抑制するためにパラフィルム (PM-992, Bemis) で密閉した。そして, マグネティックスターラー (RSH-1DN, アズワン) を用いて 500 rpm で攪拌しながら, 溶存酸素計 (HI98193, HANNA) を用いて 5 s ごとの溶存酸素濃度の経時変化を測定し, 各粒子の触媒活性の有無を確かめた。本実験では, 触媒粒子存在下においては反応物質であるエタノールを添加するとただちに酸化反応が開始するため, 測定直前に添加し, その時点測定開始 0 s とした。

### 2.3 不活性 Au 粒子と Pt 触媒粒子の混合下における集団運動の観察

Pt 粒子と Au 粒子を所定の質量比 (混合粒子の総質量に対する Au 粒子の質量割合  $x_{\text{Au}} = 0, 10, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 100$  wt%) で混合した。Pt および Au の密度より計算すると, それぞれ Au 粒子の体積割合は  $y_{\text{Au}} = 0, 11, 32, 53, 63, 72, 82, 91, 100$  vol% である。これらを超純水に入れ, 超音波洗浄機 (US-103, エスエヌディ) で約 10 分間攪拌した後, 葉さじで軽くかき混ぜることで粒子を均一に分散させた。また, 反応物質であるエタノールは観察直前に添加し, Pt/Au 混合粒子サスペンション (分散媒: 0.34 M エタノール水溶液) を調製した。ここで, 全粒子濃度 (Pt 粒子と Au 粒子濃度の総和) をすべて 2 g/L で固定した。

親水化処理装置 (CUTE-1MP/R, FEMTO SCIENCE) を用いて親水化したガラスボトムディッシュ (D910400, 松波硝子工業) の円形ホール (直径 27 mm) 内に, 18 mm 四方のカバーガラス (18180, 武藤化学) を置いて基板とし, そこへ上述の混合粒子サスペンションを 2.5 mL 注入した。その後, カバーガラス基板上の任意の箇所をデジタルマイクロスコープ (VHX-X1, キーエンス) で撮影し, カバーガラス底面上に沈降した Pt 粒子と Au 粒子 (ともに二次粒子) の二次元的挙動を観察した。本実験では, Eq. (1) の限定反応物質となる溶存酸素を外気から連続的

に供給するために、容器の蓋を開けた状態で実験を行った。

## 2.4 シリカ粒子と Pt 触媒粒子の混合下における集団運動の観察

Pt 粒子 1.0 g/L とシリカ粒子 0.15 g/L (混合粒子の総質量に対するシリカ粒子の体積割合  $y_{\text{silica}} = 63 \text{ vol}\%$ ) を混合し、エタノール (純度: 99.5%, 富士フィルム和光純薬), 超純水を混合して, Pt/シリカ混合粒子サスペンション (分散媒: 0.34 M エタノール水溶液) を調製した。以下, 2.3 と同様の手順で集団運動の挙動の観察を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 各粒子の触媒活性の有無の確認

Fig. 2 に 0.34 M エタノールを含む各サスペンションにおける溶存酸素濃度の経時変化を示す。Pt 粒子存在下では、エタノールを加えた直後から溶存酸素濃度が著しく低下した。測定開始 0 s では溶存酸素濃度は 8.8 mg/L だったが、100 s で 4.4 mg/L とほぼ半分まで減少し、500 s では 1.0 mg/L まで減少した。一方で、Au 粒子存在下では開始 0 s から 8.6~9.0 mg/L 程度で一定の値を示し、溶存

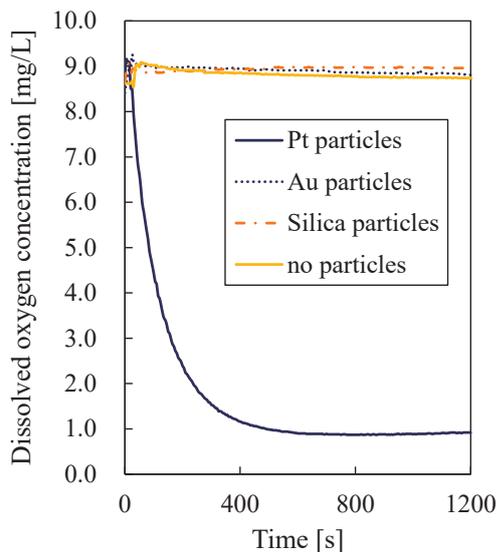


Fig. 2 Time course of dissolved oxygen concentration

酸素濃度の減少は見られなかった。シリカ粒子存在下でも同様に、開始 0 s から 8.6~9.0 mg/L 程度で一定の値を示し、溶存酸素濃度の減少は見られなかった。また、対照実験として行った粒子を含まないエタノール水溶液においても、溶存酸素濃度は 8.6~9.0 mg/L 程度で一定の値を示し、減少しなかった。このことから、Eq. (1) の酸化反応に対して Pt 粒子が触媒活性を有するのに対し、Au 粒子およびシリカ粒子は不活性であることが確認できた。

### 3.2 Au 粒子混合下における Pt 触媒粒子の集団運動

Pt 粒子と Au 粒子混合下において粒子の挙動を観察したところ、粒子の総質量に対する Au 粒子の質量割合 ( $x_{\text{Au}}$ ) に応じて、特徴的な 2 パターンのクラスター形成を伴う集団運動が確認できた。まず、 $x_{\text{Au}} = 50 \text{ wt}\%$  における代表的な観察結果を Fig. 3a に示す。光学顕微鏡像では Pt 粒子および Au 粒子は、それぞれ黒色、橙色で示されており、色によって識別することが可能である。ここでは Pt 粒子と Au 粒子が分散している状態から (0 min), 両粒子が集まりながら小さなクラスターが形成 (3 min) される。その後、これらの小さなクラスター同士が集合することで、さらに大きなクラスターが形成 (10 min) された。以降も、再び小さなクラスターが形成され、クラスター間での集合と解散を繰り返す集団運動が見られた。これは、過去の研究において Pt 触媒粒子のみで観察された集団運動[9]と類似した挙動であり、不活性である Au 粒子も Pt 粒子と同様のふるまいをしているように見えた。このクラスターは、Au 粒子と Pt 粒子に分布の偏りはなく、両者が混ざり合った粒子分布をしていることから、以降、これを Pt/Au モザイク状クラスターとよぶ。

次に、 $x_{\text{Au}} = 90 \text{ wt}\%$  における代表的な観察結果を Fig. 3b に示す。ここでは Pt 粒子と Au 粒子が分散している状態から、Pt 粒子がまず先に集まり、その Pt 粒子をコアとして周りに Au 粒子が集まる (80 s)。その後 Pt 粒子に引き寄せられていた Au 粒子が周囲に散らばり (90 s)、再び Pt 粒子の周りに Au 粒子が引き寄せられた (100 s)。以降、この運動が繰り返された。このクラスターは、中心部では Pt 粒子の存在割合が高く、外殻部では Au 粒子の存在割合が高いといった特徴を持つことから、以降、これを

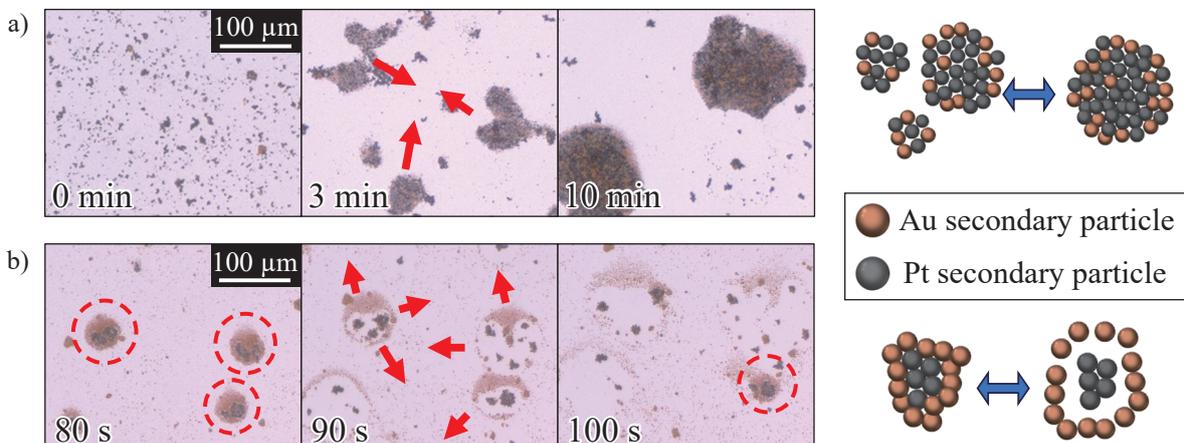


Fig. 3 Collective motion in Pt and Au particle mixtures: (a)  $x_{\text{Au}} = 50 \text{ wt}\%$  (b)  $x_{\text{Au}} = 90 \text{ wt}\%$

Pt/Au コアシェルクラスターとよぶ。

また、Pt 粒子のみが存在する場合 ( $x_{Au} = 0$  wt%) は、これまでに確認された Pt 粒子がクラスターを形成したのち解散する一連の集団運動[9]が観察できたが、不活性である Au 粒子のみが存在する場合 ( $x_{Au} = 100$  wt%) は、特徴的な集団運動は発現せず、ブラウン運動のみが観察された。

各  $x_{Au}$  条件において 3 回ずつ実験を行い、その結果から各  $x_{Au}$  における集団運動の発現確率を Fig. 4 に示す。 $x_{Au} = 10 \sim 60$  wt% では、Pt/Au モザイク状クラスターが形成するのに対し、 $x_{Au} = 70 \sim 90$  wt% では、Pt/Au コアシェルクラスターが形成した。また、 $x_{Au} = 100$  wt% ではブラウン運動のみが確認でき、 $x_{Au}$  によって集団運動パターンの分岐がみられることがわかった。この結果から、本実験条件においては  $x_{Au} = 60 \sim 70$  wt% あたりに Pt/Au モザイク状クラスターと Pt/Au コアシェルクラスターの形成における閾値が存在すると考えられる。また、今回の実験ではいずれの条件でも 3 回とも同様の運動が確認され、再現性よくクラスター形成がみられたといえる。

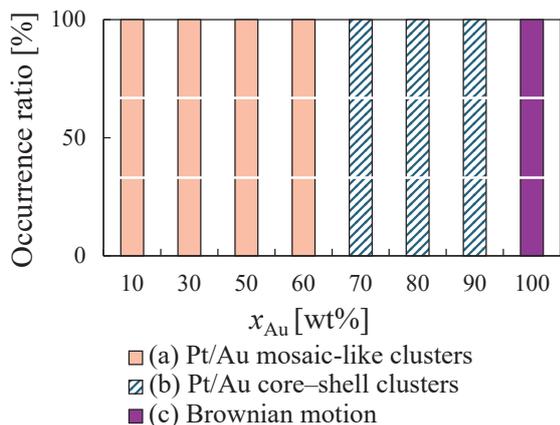


Fig. 4 Relationship between the mass fraction of Au particles ( $x_{Au}$ ) and bifurcation in cluster formation

また、各  $x_{Au}$  条件において形成されるクラスターのサイズの比較を行った。各  $x_{Au}$  条件において、クラスターの形状や構造が視覚的にわかりやすいものを選定し、クラスターの代表例として Fig. 5 に示す。クラスターのサイズを比較すると、Pt/Au モザイク状クラスターでは、直径が  $100 \mu\text{m}$  程度であるのに対し、Pt/Au コアシェルクラスターでは、直径が約  $50 \mu\text{m}$  である。このようにクラスターの構造によって、サイズに大きな差が生じていることがわかる。Pt/Au モザイク状クラスターでは Pt 粒子が多く存在しており、単一の Pt 粒子の集団運動のように微小なクラスター同士が合一して巨大なクラスターを形成したと考えられる。また、 $x_{Au} = 50 \sim 90$  wt% におけるクラスター形成までに要した時間およびクラスターの面積相当径を Fig. 6 に示す。Fig. 6a の縦軸はクラスター形成までに要した時間の平均を、Fig. 6b の縦軸はクラスターの面積相当径の平均を示している。Fig. 6b では、各条件において少なくとも 5 個以上のクラスターについて解析を行い、各プロットおよびエラーバーはクラスターの面積相当径の平均値および標準偏差を示している。

この結果から、 $x_{Au}$  が小さい条件ほどクラスターの面積相当径は大きく、形成に要する時間も長いことが明らかとなった。Fig. 3 の時間スケールを見ても確認できるように、(a) Pt/Au モザイク状クラスターでは集団が最大になるのに数分程度を要するのに対し、(b) Pt/Au コアシェルクラスターでは数十秒で集団形成が見られたことから、この結果を明確に示しているといえる。

### 3.3 集団運動のメカニズムの考察

Pt 粒子の個数濃度が高いときに観察される Pt/Au モザイク状クラスター (Fig. 3a)、および Au 粒子の個数濃度が高いときに観察される Pt/Au コアシェルクラスター (Fig. 3b) について、それぞれの集団運動のメカニズムを考察した。Fig. 7 は Figs. 3a, b の集団運動メカニズムの模式図である。まず、Pt 粒子によって酸素が消費されるため、Pt 粒子周りで溶存酸素濃度勾配が生じる。ここで過

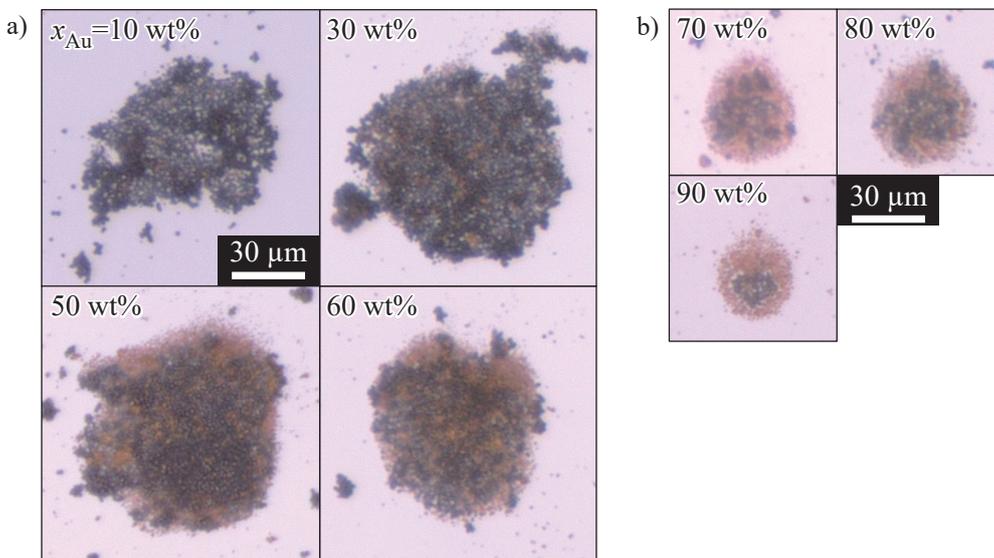


Fig. 5 Cluster size comparison: (a) Pt/Au mosaic-like clusters (b) Pt/Au core-shell clusters

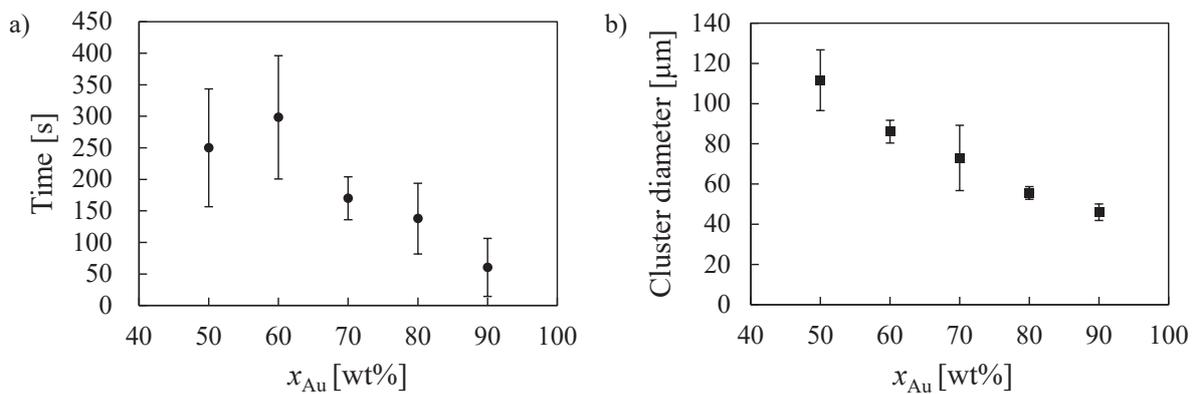


Fig. 6 (a) Relationship between  $x_{Au}$  and cluster formation time (b) Relationship between  $x_{Au}$  and cluster diameter

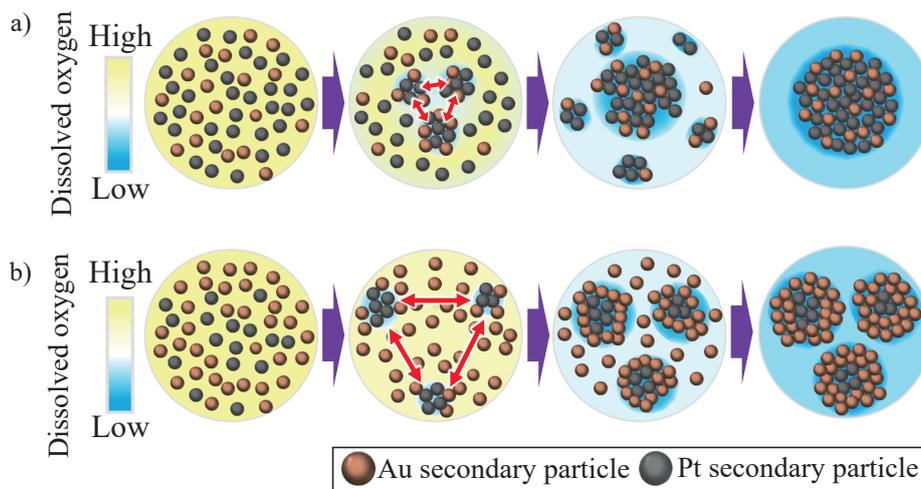


Fig. 7 Collective motion mechanisms: (a) Pt/Au mosaic-like clusters (b) Pt/Au core-shell clusters

去の研究より、Pt 粒子は化学走性を有し、溶存酸素濃度の低い方向へ移動することでクラスターを形成すると考えられている[9]。Pt 粒子と Au 粒子の混合下では、まず Pt 粒子を中心として Pt 微小コアが形成され、その周りに Au 粒子が集まることで、Pt/Au 微小コアシェルクラスターが形成される。ここで、Au 粒子が Pt 微小コアに向かって指向的運動を示す理由は、溶存酸素濃度勾配によって駆動力を得ているためであり、Au 粒子には触媒活性はないが Pt 粒子と同様に溶存酸素濃度勾配に従う化学走性があることを示唆している。この考察を踏まえると、以下のように集団運動メカニズムを矛盾なく説明することができる。

Fig. 7a のように、Pt/Au モザイク状クラスターでは、まず Pt 粒子を中心として Au 粒子が集まり、Pt/Au 微小コアシェルクラスターが形成される。この時 Pt 粒子の個数濃度が大きいと、Pt/Au 微小コアシェルクラスター同士が近接して存在しているため、クラスター同士が互いに合一し、大きなクラスターを形成する。その後、溶存酸素濃度勾配が崩れると、クラスター間での集合と解散が繰り返される。

一方、Fig. 7b のように、Pt/Au コアシェルクラスターが形成される場合も同様、まず Pt/Au 微小コアシェルク

ラスターが形成される。ただし、このとき Pt 粒子の個数濃度が小さいと、Pt/Au 微小コアシェルクラスター同士が遠距離に存在しているため、合一せずに周りの Au 粒子を巻き込んでクラスターが成長する。

以上の考察より、最初に形成される Pt/Au 微小コアシェルクラスターが合一してモザイク状クラスターになるか、成長してコアシェルクラスターになるかの最終形態の決定には、微小クラスター間の距離が依存していると考えられる。Fig. 4 において  $x_{Au} = 60 \sim 70$  wt%あたりにクラスターの閾値が存在する理由も、Pt/Au 微小コアシェルクラスター間の距離によるものと説明できる。

また、Fig. 6 におけるクラスターサイズの比較で、 $x_{Au}$  が小さい条件ほどクラスターの面積相当径は大きく、形成に要する時間も長いことが確認されたが、この傾向も、近傍に存在する Pt/Au 微小コアシェルクラスター同士が合一し、クラスターが成長する過程によって説明できる。これらの結果は、最初に形成される Pt/Au 微小コアシェルクラスター間の距離がクラスターの最終形態を決定づけるという考察を裏付ける根拠となりうる。

クラスターの形成過程が Pt/Au 微小コアシェルクラスター間の距離に依存していることを確かめるために、Pt 粒子量を固定して Au 粒子量を変化させる検証実験を行った。

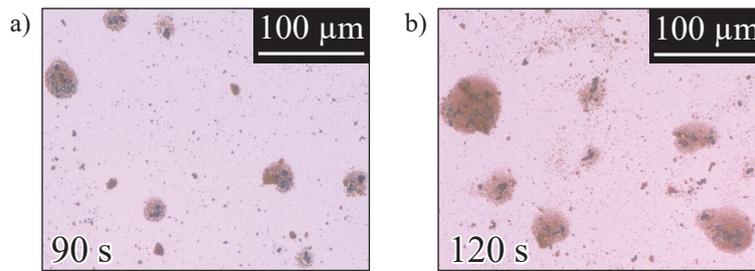


Fig. 8 Control of core-shell cluster size: (a) Pt 0.2 g/L+Au 1.0 g/L (b) Pt 0.2 g/L +Au 2.6 g/L

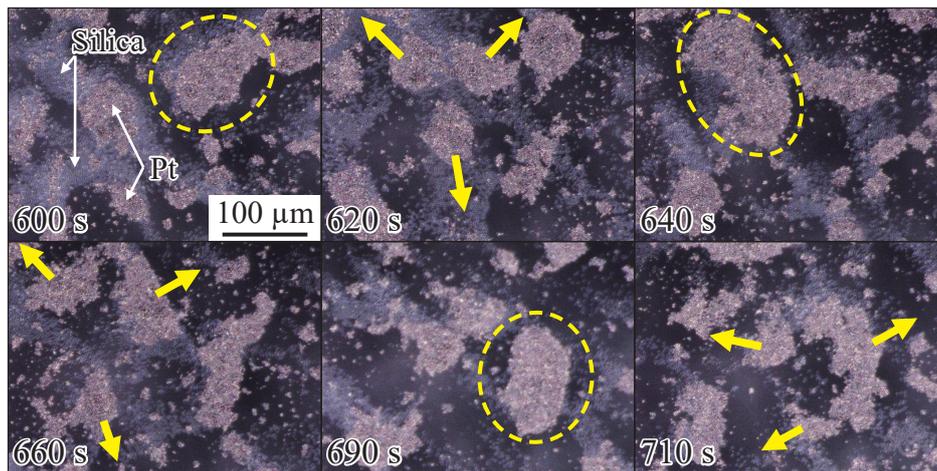


Fig. 9 Collective motion in Pt and silica particle mixtures

Pt 粒子濃度を 0.2 g/L に固定し、Au 粒子濃度を 1.0 g/L、2.6 g/L に変化させて集団運動の観察を行った。その結果形成されたコアシェルクラスターを Fig. 8 に示す。両者を比較すると、Au 粒子濃度が高い 2.6 g/L の場合に、より大きなサイズの Pt/Au コアシェルクラスターが形成されることが確認された。Pt 微小コア周囲の Au 粒子個数濃度を調整することで、クラスターサイズを制御可能であることが示された。一方で、さらなる検討として Au 粒子濃度を 10 g/L に変更して実験を行ったところ、Pt 粒子近傍の Au 粒子のみがクラスター化し、Pt 粒子から離れた Au 粒子のほとんどはブラウン運動により分散した状態で存在していることが確認された。このことから Pt 粒子が生成する酸素濃度勾配の影響が及ぶ範囲には限りがあり、その範囲内でのみ Au 粒子は化学走性を示す。そのため、Au 粒子によるシェルの厚みには上限が存在すると思われる。現段階では、この上限の定量的評価および支配因子については十分に検討できておらず、今後の検討課題としたい。

### 3.4 シリカ粒子混合下における Pt 触媒粒子の集団運動

シリカ粒子と Pt 粒子を混合した場合の集団運動の挙動を Fig. 9 に示す。この実験では、Pt 粒子とシリカ粒子を識別しやすくするために、背景に黒プレートを用いて撮影を行い、彩度を上げる画像処理を行っている。ここで、はっきりと観察される粒子が Pt 粒子、薄く半透明に

Table 1 Catalytic activity and chemotaxis: presence or absence

	Pt particles	Au particles	Silica particles
Catalytic activity	○	×	×
Chemotaxis	○	○	×

見える粒子がシリカ粒子である。まず、Pt 粒子は 600 s 付近でクラスターを形成し、その後 620 s にかけて周囲へ解散した。その後も 640 s から 660 s にかけて、および 690 s から 710 s にかけて集合と解散が繰り返確認された。このように、Pt 粒子は集合と解散を周期的に繰り返す挙動を示した。一方、シリカ粒子は自然対流によって Pt 粒子のクラスターに巻き込まれる様子は観察されたものの、Au 粒子混合下で見られたような Pt 粒子に追随する動きや、Pt 粒子に引き寄せられてコアシェルクラスターを形成する挙動は見られなかった。

これらの結果を踏まえ、今回観察した Pt 粒子、Au 粒子、シリカ粒子の 3 種類について、触媒活性および化学走性の有無を Table 1 にまとめた。溶存酸素濃度測定より、Pt 粒子には触媒活性があるが、Au 粒子とシリカ粒子には触媒活性がないことが確認できた。一方で、Pt 粒子と Au 粒子は溶存酸素濃度の低い方へ移動するという化学走性を有するのに対し、シリカ粒子にはそのような化学走性がないと考えられる。以上より、Au 粒子単独では自走運動を示さないが、Pt 粒子との混合系においては、Pt

粒子の触媒活性により生み出される溶存酸素濃度勾配に従って集団運動に関与することがわかった。この点において、Au粒子はPt粒子と類似した物理化学的性質を有するといえる。

#### 4. 結 言

Pt粒子に不活性であるAu粒子を混合した結果、Au粒子が低濃度の $x_{Au} = 10\sim 60$  wt%の場合は、Au粒子とPt粒子が混ざり合ったPt/Auモザイク状クラスター、Au粒子が高濃度の $x_{Au} = 70\sim 90$  wt%の場合は、中心部にPt粒子、外殻部にAu粒子が存在するPt/Auコアシェルクラスターという2種類の異なるクラスター形成が確認された。また、Au粒子はPt粒子によって生じる溶存酸素濃度勾配に従う化学走性を示したのに対し、シリカ粒子にはその

ような挙動は認められなかった。

本研究で確認されたPt/Auコアシェルクラスターは、中心部にPt粒子、外殻部にAu粒子の存在割合が偏っており、自己駆動力によって形成される。したがって、条件制御により同程度サイズのPt粒子とAu粒子を空間的に分離できる可能性を示唆しており、自己駆動型の新規分離プロセスへの応用が期待される。

[謝辞] 本研究は、科研費(課題番号: 24K08143)の助成を受けて実施されたものであり、ここに深く謝意を表す。あわせて、粒子の電子顕微鏡観察にご協力いただいた本研究室の西田晃大氏および玉川裕太氏に心より御礼申し上げる。

#### References

- [1] S. Araki, K. Beppu, Arif M. R. Kabir, A. Kakugo, Y. T. Maeda, Controlling collective motion of kinesin-driven microtubules via patterning of topographic landscapes, *Nano Lett.* 21 (2021) 10478–10485.
- [2] W. N. McFarland, S. A. Moss, Internal behavior in fish schools, *Science* 156 (1967) 260–262.
- [3] S. J. Portugal, T. Y. Hubel, J. Fritz, S. Heese, D. Trobe, B. Voelkl, S. Hailes, A. M. Wilson, J. R. Usherwood, Upwash exploitation and downwash avoidance by flap phasing in ibis formation flight, *Nature* 505 (2014) 399–402.
- [4] T. Vicsek, A. Czirók, E. Ben-Jacob, I. Cohen, O. Shochet, Novel type of phase transition in a system of self-driven particles, *Phys. Rev. Lett.* 75 (1995) 1226.
- [5] J. Stenhammar, An introduction to motility-induced phase separation, *arXiv* (2021) preprint. DOI:10.48550/arXiv.2112.05024.
- [6] T. Kojima, H. Kitahata, K. Asakura, T. Banno, Photoinduced collective motion of oil droplets and concurrent pattern formation in surfactant solution, *Cell Rep. Phys. Sci.* 4 (2023) 101222.
- [7] M. N. van der Linden, L. C. Alexander, D. G. A. L. Aarts, O. Dauchot, Interrupted motility induced phase separation in aligning active colloids, *Phys. Rev. Lett.* 123 (2019) 098001.
- [8] D. Yamamoto, T. Takada, M. Tachibana, Y. Iijima, A. Shioi, K. Yoshikawa, Micromotors working in water through artificial aerobic metabolism, *Nanoscale* 7 (2015) 13186–13190.
- [9] D. Yamamoto, T. Takada, Y. Io, M. Kubouchi, Y. Okamoto, E. Okita, K. Yoshikawa, A. Shioi, Collective motion of catalytic particles driven by abiotic aerobic metabolism, *Colloids Surf. A* 698 (2024) 134580.
- [10] Y. Oshiro, N. Matsuda, K. Hirano, A. Shioi, D. Yamamoto, Extraction of mechanical work from collective motion of Pt catalytic particles induced by chemical reactions, *J. Soc. Powder Technol., Japan* 61 (2024) 480–485.
- [11] *Nihon Kagakukai, Kagaku Binran Kisohen* 6th ed., Maruzen Shuppan (2021) p. 112, 116.