

令和7年6月4日  
北陸先端科学技術大学院大学  
科学技術振興機構 (JST)

## パターン形成：分割現象における「対称性の破れ」を実証

### ポイント

- 水の蒸発によって現れるパターン形成「界面分割現象」の新たな特徴を発見
- ポリマー分散液の蒸発界面が複数に分割するとき、「対称性の破れ」が現れることを実証
- 生体組織など自然界に見られる非対称なパターン形成の理解に有用

北陸先端科学技術大学院大学（学長・寺野稔、石川県能美市）サステイナブルイノベーション研究領域のグエン チキムロク大学院生（博士後期課程）、桶葭興資准教授らは、ポリマーが水に分散した粘性流体から現れる散逸構造<sup>[用語解説 1]</sup>「界面分割現象」において、対称性の破れ<sup>[用語解説 2]</sup>を実証した。これまで、界面<sup>[用語解説 3]</sup>で起こる幾何学変形が、時間とともにどう進んでいくかは、不明な点が多かった。今回、明確な境界条件のもと、確率統計を通した解析を進めた結果、分割時に現れる核の位置に、空間的な「対称性の破れ」が生じることが明らかになった。これは、生体組織など自然界に見られる非対称なパターン形成の理解に有用である。

### 【研究概要】

自然界には様々な幾何学パターンがあり、例えば雪の結晶の形は、気温と水蒸気の量で多様に変化する。また、乾燥環境は水の蒸発を引き起こし、生物であればその成長過程で非対称なパターンをつくる。これまで、この幾何学性や非対称性について、数理的な解釈がなされてきたものの、物理化学的実験に基づいた再現はなされてこなかった。一方、桶葭准教授らの研究グループはこれまでに、ポリマー水分散系の蒸発界面に着目し、散逸構造「界面分割現象」を報告してきた（※1）。これは、ポリマー水溶液などの粘性流体を明確な境界のある有限空間から乾燥環境下におくと、一つの蒸発界面が複数の界面に分割される幾何学化現象である。ここで、空間軸の一つを1ミリメートル程度の隙間にする事で毛管現象<sup>[用語解説 4]</sup>の物理条件が制御された空間となる。さらに、一定温度下で水の蒸発を一方向になるよう設定すると、蒸発界面直下の濃密なポリマーの密度がゆらぎ、複数の特異的位置でポリマーが析出して界面分割する。具体的には、多糖<sup>[用語解説 5]</sup>の水溶液を乾燥環境下におくと、まるで界面から芽が出るようにセンチメートル単位で多糖が析出し界面が複数に分割される。ここでは、ミクロ構造の秩序化と同時に、マクロなパターンが現れることが分かっていた。しかし、非平衡で開放的な蒸発界面から引き起こされる実際の分割現象は、核形成位置の平均的情報は得られるものの、その不確定さのため複数の核形成メカニズムについては未解明な特徴が多かった。

※1. <https://www.jaist.ac.jp/whatsnew/press/2023/09/22-1.html>

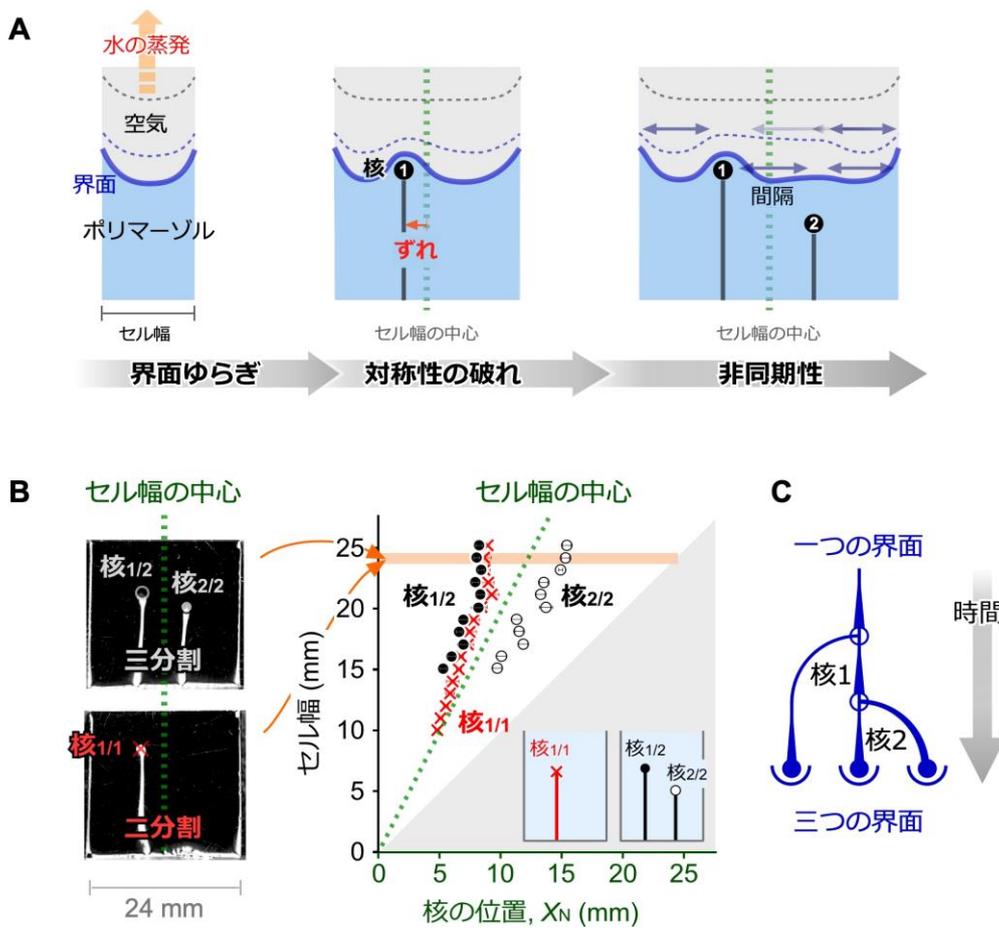


図. 界面分割現象における「対称性の破れ」: **A**. 空間軸の一つとしてセル幅を大きくしていくと、分割現象の特徴が現れる概念図。界面がゆらぎ、対称性が破れ、そして水中に分散していたポリマーが析出する核を非同期に形成する。**B**. 同一条件で得られる異なる分割（二分割、もしくは三分割）と、セル幅に対する核形成位置のデータ。**C**. 対称性の破れを加味した分岐モデル。核1と核2とは、タイミングがずれて発生する（時間的に同期していない）。

そこで今回、ポリマー分散液の一つの蒸発界面が、二つ、もしくは三つに分割される空間条件に焦点をあて、その核形成位置を詳細に検討した（図A）。確率統計論を通した界面科学的な解析から、それぞれの分割数に対して、「対称性の破れ」と「非同期性」が現れ、相互に関係し合う特徴であることが分かった。核の位置については平均化による統計評価ではなく、結果に対する場合分けを通し、特徴的な「ずれ」を評価した（図B）。すると、分割点の位置には偏りがあり、セル幅に対して均等に半分、もしくは均等に三分の一に分割するわけではない、という基本原理が明らかになった。実際、二分割される場合、核はセル幅の中心ではなく、中心からずれた位置に形成される傾向となった。この「ずれ」は、セル幅を少しずつ大きくすると顕著に現れ、三分割される場合、2番目の核形成が起こるタイミングや位置に大きく影響し、非同期性として現れた。この「対称性の破れ」と「非同期性」は、時間発展の現象理解に重要である（図C）。

また、この核間隔は、ポリマー水溶液の液相と空気の界面における毛管長が影響する。今回の実証実験では、粘性流体として多糖キトサン<sup>[用語解説6]</sup>の水分散系を用いており、5～8ミリメートル程度の間隔であった。これまでにいくつかの多糖でも分割現象は実証されており、研究グループは現在、様々な化学種・物質群への拡張や現象の特徴的メカニズムの解明を進めている。これらを通して、自然界にも通ずるパターン形成の普遍的理解が期待される。

本成果は、2025年6月4日に科学雑誌「Advanced Science」誌（WILEY社）のオンライン版で公開された。なお、本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）創発的研究支援事業（JPMJFR201G）、日本学術振興会科研費 基盤研究 B（JP23K21136）、日本学術振興会科研費 新学術領域研究（JP22H04532）、および公益財団法人旭硝子財団 若手継続グラントの支援のもと行われた。

### 【今後の展開】

生物を含め自然界には多様な散逸構造が在り、対称性の破れを明確に扱うことは重要である。パターン形成に関する歴史的研究にはチューリングパターン<sup>[用語解説 7]</sup>などがあり、ソフトマテリアルを題材とした研究例も多い。これは、生物における自己組織化の理解や実空間におけるマテリアル設計に重要なテーマと認識されているためでもある。今回のような実検証を通じたパターン形成の理解が進めば、今後、高分子科学、コロイド科学、界面科学、材料科学、流体力学、非平衡科学、生命科学などの分野への進展に留まらない。実時空間と仮想時空間を通じた数理科学、シミュレーション、データサイエンスなどとの融合によって、パターン形成の理解と材料設計に有用と期待される。

### 【論文情報】

掲載誌：Advanced Science (WILEY)

題目：Symmetry breaking in meniscus splitting: Effects of boundary conditions and polymeric membrane growth

著者：Thi Kim Loc Nguyen, Taisuke Hatta, Koji Ogura, Yoshiya Tonomura, Kosuke Okeyoshi\*

DOI：10.1002/advs.202503807

掲載日：2025年6月4日

### 【用語解説】

\*1 **散逸構造**：熱力学的に平衡でない状態にある開放系構造を指す。すなわち、エネルギーが散逸していく流れの中に自己組織化のものが発生する、定常的な構造である。定常開放系、非平衡開放系ともいう。散逸構造系は開放系であるため、エントロピーは一定範囲に保たれ、系の内部と外部の間でエネルギーのやり取りもある。生命現象は定常開放系としてシステムが理解可能であり、注目されている。マランゴニ対流、チューリングパターン、ペローソフ・ジャボチンスキー反応などが有名。

\*2 **対称性の破れ**：無秩序な系は、どの方向から見ても同様に無秩序であるという意味で、高い対称性を持つ、等方的であると考えることができる。ここで、高い対称性を持つ無秩序な系が、より規則的で、より対称性が低い状態へと変わることを、対称性の破れという。

\*3 **界面**：ある均一な液体や固体の相が他の均一な相と接している境界のこと。

\*4 **毛管現象**：細い管状物体（毛細管）の内側の液体が、外部からエネルギーを与えられることなく管の中を移動する物理現象である。毛細管現象とも呼ばれる。

\*5 **多糖**：グリコシド結合によって単糖分子が多数重合した物質の総称である。単糖であるブドウ糖が多数つながったデンプンのように、構成単位となる単糖とは異なる性質を示す。核酸やタンパク質と並んで、医工学に有用な生体高分子として期待されている。

\*6 **キトサン**：多糖の一種で、ポリ-β1→4-グルコサミンのこと。直鎖型の多糖でグルコサミンの1,4-重合体で、今回使用されたキトサンの分子量は10万程度の高分子。工業的には主にカニやエビなどの甲殻類の外骨格から得られるキチンを脱アセチル化して得る。アミノ基を有する高分子電解質

で、再生医療用素材への応用、ポリマーブレンド、化粧品、健康食品などへの応用が期待されている。

※7 **チューリングパターン**：イギリスの数学者アラン・チューリングによって 1952 年に理論的存在が示された自発的に生じる空間パターンである。後に、例えばシマウマやキリンの縞模様の形成はチューリングパターンで説明できることがわかった。

#### 【お問い合わせ先】

##### 研究内容に関すること

北陸先端科学技術大学院大学 サステイナブルイノベーション研究領域  
准教授 桶葎 興資（おけよし こうすけ）  
〒923-1292 石川県能美市旭台 1-1  
TEL：0761-51-1620 E-mail: okeyoshi[at]jaist.ac.jp

##### 報道発表に関すること

北陸先端科学技術大学院大学 広報室  
TEL：0761-51-1032 E-mail: kouhou[at]ml.jaist.ac.jp

##### 科学技術振興機構 広報課

TEL：03-5214-8404 E-mail: jstkoho[at]jst.go.jp

##### JST 事業に関する問合せ

科学技術振興機構 創発的研究推進部  
加藤 豪（かとう ごう）  
TEL：03-5214-7276 E-mail: souhatsu-inquiry[at]jst.go.jp