

Title	多糖分散液の界面分割現象における揺らぎと流れの寄与
Author(s)	呉, 磊杰
Citation	
Issue Date	2025-09
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/20089
Rights	
Description	Supervisor: 桶蔭 興資, 先端科学技術研究科, 博士

氏 名	WU, Leijie
学 位 の 種 類	博士（マテリアルサイエンス）
学 位 記 番 号	博材第 616 号
学 位 授 与 年 月 日	令和 7 年 9 月 24 日
論 文 題 目	Interfacial Fluctuation and Fluid Convection in Meniscus Splitting of Polysaccharide Dispersions
論 文 審 査 委 員	桶 菫 興 資 北陸先端科学技術大学院大学 准教授
	山 口 政 之 同 教授
	高 村 禪 同 教授
	本 郷 研 太 同 准教授
	宮 田 隆 志 関西大学 教授

論文の内容の要旨

Splitting patterns in nature, such as geometric patterns of Salt Lake, wrinkles patterns of hydrogels, and Rayleigh–Bénard patterns in heated fluids, are not randomly generated, but rather are self-organizing in nonequilibrium systems. Closely related to the dissipative structures, the evolution from disorder to ordered patterning through continuous exchange of energy and matter in open systems. This thesis focuses on the meniscus splitting patterns in drying polysaccharides dispersion systems and aims at exploring the kinetic mechanism both on the interfacial behavior and inter-fluid behaviors during the evaporation process, specifically. In Chapter 2, the recognition of spatial finiteness in “meniscus splitting phenomena” in aqueous polymer dispersions is demonstrated during water evaporation. By providing heat energy to polymer dispersions in a Hele-Shaw cell, an interface fluctuation with concentration unevenness is induced to split the evaporative interface. The results of the quasi-natural experiments revealed that the nonequilibrium drying period for repositioning polymer clusters allows for considerable changes in Reynolds number in a low range ($<10^{-6}$) to form multiple nuclei, like the life in living organisms. In Chapter 3, by studying the internal flow during nonequilibrium process, the evolution of unique mass flows as Marangoni circulations is demonstrated during the growth of splitting pattern. The confluences of multiple circulations are distinctly aligned one-to-one with the nucleation positions. This convection patterns periodically integrates the polymers in a quasi-two-dimensional space. By studying the Marangoni convection in different capillary environments, the disappearance of convection implies a different role of capillary

forces and surface tension. In Chapter 4, we investigate how evaporation-induced convection influence interfacial fluctuations and nucleation behavior in meniscus splitting. Using pectin dispersion, we compared the synchronous and asynchronous nucleation process. Through introducing the asymmetry bottoms (flat, step-like, sloped) to break convective symmetry, confirmed the influence of spatial symmetry on convective nucleation. Furthermore, we compare pectin and xanthan gum dispersions, which exhibit dramatically different flow behaviors under evaporation: Marangoni circulations in the former, and almost no internal flow in the latter. From the emergence of convection to interfacial fluctuations and flocculation-induced nucleation, the hydrodynamic mechanism in meniscus splitting offers new insights into the evaporation induced self-assembly of polymer dispersion/colloidal. This has significant implications for understanding pattern formation in nature, particularly interfacial structures in biopolymer and soft matter systems spanning micro to macroscopic scales.

Keywords: Dissipative structures, Fluctuations, Polysaccharides, Skin layer, Marangoni effect, Capillary effect.

論文審査の結果の要旨

自然界のパターン形成は非平衡系によるもので、自己組織化が重要である。散逸構造と密接に関連し、開放系で外界とのエネルギーや物質の授受を通じて、無秩序な系から秩序立ったパターンへと時間発展する。本論文は、乾燥中の多糖ペクチンの水分散液における界面分割パターンに焦点を当て、特に蒸発過程における界面挙動と流体挙動に関するメカニズムを探究した。

第二章では、空間有限性による界面ゆらぎとの非同期核形成を評価した。ヘレ・ショウセル内のポリマー分散系に熱エネルギーを与えると、濃度不均一性を伴って界面が揺らぎ、蒸発界面が分割する。この時間変化を蒸発界面でポリマーが高濃度となったプレ核を再配置する非平衡期と捉えた。特に、低レイノルズ数域で大幅に小さくなり、複数の核が形成されることが明らかになった。

第三章では、分割現象が起こる初期液相の流れを分析した。分割パターンが成長する初期過程において、発生するマランゴニ対流が環流化するプロセスを解析した。特に二つの対流が合流する蒸発界面でプレ核が形成し、その生成／消失が重要となる。セルサイズなど空間条件を変えて様々な毛細管環境で対流方向や速度を分析したところ、毛管力よりも表面張力が支配的になる条件が分割現象を起こす重要な因子であることが示唆された。

第四章では、対流と界面ゆらぎが核形成に与える影響を評価した。ペクチン分散液では、マランゴニ対流が生じて界面が揺らぐ。粒子蓄積が1箇所に加速したあと、2つ目の核の成長が進む非対称内部流動が観察され、非同期な核形成として現れた。一方、キサンタンガム分散液ではマランゴニ流は

観察されず、同期核形成が見られた。これは、対流運動を抑制する粘性の高さのためと考えられる。今後、流動シミュレーション等を通して、空間スケールや物質に依存しない評価、および自然界と通ずるパターン形成の理解に結びつくものと期待される。

以上、本論文は実験モデルをコロイド科学や流体力学から解釈し、種々の物理パラメータを評価可能となった。よって博士（マテリアルサイエンス）の学位論文として十分価値あるものと認めた。