

墨割のパターン形成ダイナミクスに関する実験的研究
—美術作品から創発されるソフトマター物理における普遍法則の探求—

Experimental study on the dynamics of pattern formation of Sumi-Wari
-Exploration for universal laws in soft matter physics emerging from art-

| | |
|--------|---|
| 奈良女子大学 | 下川 倫子 |
| 研究期間 | 2025年9月1日～2026年3月30日 |
| 滞在研究機関 | FAST (Fluides, Automatique, Systèmes Thermiques), CNRS Rue André Rivière 91405 Orsay cedex, France |
| 共同研究者等 | Prof. Ludovic Pauchard |
| 区分 | 個人 B |

Sumi-wari is a traditional Japanese art form characterized by star-like crack patterns. These patterns emerge when a needle or toothpick coated with a detergent is inserted into a thin film of Japanese ink (sumi) floating on water. In this study, we investigated sumi-wari as a model system for investigating fracture phenomena in two-dimensional soft matter. Our objective is to elucidate the fracture dynamics of soft matter through a series of sumi-wari experiments. The sumi-wari pattern changes with the amount of the glycerol in the solution which the sumi film floats. Specifically, we examined how glycerol concentration influences both the resulting crack patterns and the physical properties of the sumi film. We observed that the number of spikes in the pattern increases with glycerol concentration, whereas Young's modulus of the film decreases. By comparing these experimental results with results obtained from a phenomenological model, we discussed the underlying dynamics of the sumi-wari phenomenon. Our findings suggest that in the elastic regime, the stiffness of the sumi film is the primary factor governing pattern formation.

研究目的

本研究で扱う墨割は日本の伝統芸術の一つである。水面に浮かぶ墨の粒子が凝集してできた墨膜を洗剤で塗布した爪楊枝で突くと墨膜にひびが入り、星のような美しいひび割れ模様が自発的に形成される(図1)。この現象を墨割と呼ぶ。水面に浮かぶ美し

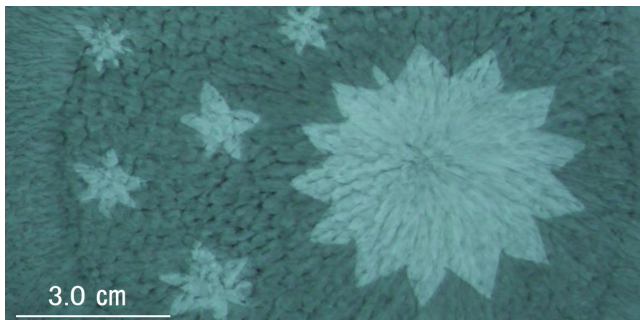


Fig. 1 Sumi-wari pattern. Cited from M. Shimokawa, *et al.*, *Soft matter* 22(13), 2568 (2026).

いパターンを和紙や布などに写し取り、染物がつくられてきた。

墨割現象は、墨膜内外の界面張力差によって墨膜に応力が加わること生じる破壊現象である。そのため、墨割のダイナミクスは破壊力学を用いて考えることができる。剛性が大きな物質の破壊現象は、既存の学術体系である線形弾性論を用いて理解できるが、ソフトマターとよばれるやわらかい物質は破壊過程で大変形を起こすため、既存の線形弾性論の枠組みで理解することができない。そのため、ソフトマターの学術体系の確立に向けて普遍的な物理法則の究明が求められている。

我々は、ソフトマターである墨膜の物性を変化させる簡易な実験手法を見出した。また、墨膜は 100 nm 程度の薄膜であり、2次元のソフトマターの破壊現象とみなすことができる。以上のことから、墨割実験はソフトマターの破壊研究における優れたモデ

ル実験といえるため、墨割のパターン形成のダイナミクスの解明を通して、ソフトマターの破壊現象における普遍的な物理法則を見出すことを本研究の目的とした。

共同研究者である Ludovic Pauchard 氏 (FAST) は、ソフトマターの破壊現象において深い造詣と豊富な経験を有している。同氏はその知見を活かし、名画「モナ・リザ」の表面に生じたひび割れ (クラック) の解析を通じて、作品に秘められた歴史的背景の解明に貢献するなど、芸術と科学を融合させた顕著な研究実績を持っている。本研究では、ソフトマター物理学の視点から、日本の伝統芸術である墨割の現象解明に向けた共同研究を同氏と共に実施した。

研究経過

本助成を受けて以下3つのことを実施した。

1. 墨割パターンのグリセリン濃度依存性

前述したように、ミョウバン水溶液表面に墨汁を拡散させて墨膜を界面に生成させた後、界面活性剤を塗布した爪楊枝を墨膜に挿入すると、水面に美しい墨割パターンが出現する。本実験では、ミョウバン水溶液にグリセリンを混合し、グリセリン濃度に伴う墨割パターンの変化を調べた。墨割パターンの角の本数はグリセリン濃度とともに増加する。また、墨割パターンの角の長さの時間変化はグリセリン濃度に依存した。

2. 墨膜の物性値測定

墨膜の物性値の測定は墨割のパターン形成のダイナミクスの解明のために欠かせない。前節で報告したミョウバン水溶液中のグリセリン濃度による墨割のパターンの変化は、墨膜の物性変化によるものと考えられる。そこで、ナノインデンテーション試験及び AFM を用いた観察や測定から、グリセリン濃度の変化に伴う墨膜の物性値の変化を測定、観察した。Pauchard 氏とナノインデンテーション試験機 (Anton Paar) を使用して墨膜の粘弾性特性を測定したところ、貯蔵弾性率 E' と損失弾性率 E'' の比率がグリセリン濃度とともに変化していることが分かった。

また、Goehring Lucas 氏 (ノッティンガムトレント大学) とともに、AFM を使用し、墨膜中の凝集状態の非一様性といった墨膜の表面状態の観察および墨膜の厚みやヤング率を測定した。墨膜の厚みは

100nm 程度で、墨コロイドの凝集体であることが確認できた。また、墨膜のヤング率はグリセリンの濃度の増加とともに減少していた。本測定結果より、ミョウバン水溶液へのグリセリンの混入は墨コロイドの凝集過程に影響を及ぼし、その結果として墨膜の物性変化が変化したものと考えられる。

3. 墨割の亀裂パターンの形成ダイナミクスを表現する現象論的モデル

実験で得られたグリセリン濃度に伴う墨割パターンの変化や墨膜の物性値の測定結果をもとにした現象論モデルが、坂口英継氏 (九州大学、日本大学) によって提案された。提案された現象論モデルは減衰するバネのネットワークモデルを基礎としている。バネのネットワークで表現された墨膜内の亀裂の面積に応じて、墨膜にかかる応力を変化させている。モデルに含まれるバネ定数を変化させ、亀裂のパターンや亀裂の長さの時間変化を調べた。現象論モデルは、実験で観察されるものと類似した墨割パターンを示した。また、バネ定数の増加とともに亀裂の角の本数は減少する傾向を示し、亀裂の長さの時間変化はバネ定数に依存することが分かった。

考察

AFM による墨膜の測定で、グリセリンの濃度とともに墨膜のヤング率が低下することがわかった。この結果をうけ、現象論モデルに含まれるバネ定数が墨膜のヤング率の変化を表現できる物理量であると考えた。具体的には、高いバネ定数をもつモデルは高ヤング率の墨膜を表現し、低いバネ定数をもつモデルは低ヤング率の墨膜を表現していることを想定している。この対応関係の中で、現象論モデルは角の本数や亀裂の成長に関する時間変化において、実験と類似した傾向を示す。以上のことから、墨膜が弾性体であると仮定できる領域においては、墨膜の強度が墨割のパターン形成において重要な役割を占めていると考えられる。

一方で、グリセリン濃度をさらに増加させると墨膜は弾性よりも粘性の性質を強く持つようになることをナノインデンテーション試験の結果は示していた。弾性領域と粘性領域をつなぐ墨割の破壊現象の理解は今後の課題である。日本の伝統芸術・墨割を通して弾性から粘性に至る広範なレオロジー領域を網羅するソフトマターの破壊現象の理解を目指し、

今後も研究を進めていく。

ソフトマターの研究者が多く所属する FAST や ESPCI での日常的な議論や交流を通し、本研究を発展させることができた。墨膜の詳細な構造を知るため、ILL での中性子散乱による観察も予定されている。本助成にて構築できた研究コミュニティで今後も実りある議論を継続し、墨割研究を発展させていく。本助成により、国際的な学術ネットワークを築け、国外の研究所でのセミナー講演といった貴重な体験ができました。また、研究成果を国際学術雑誌にて発表できました。心より感謝申し上げます。

研究の発表

口頭発表

1. Michiko Shimokawa, Séminaire PMMH (2026).
2. Michiko Shimokawa, Séminaires du laboratoire FAST (2026).
3. Michiko Shimokawa, Pacificchem 2025 (2025).

ポスター発表

1. 木下晶絵, 坂口英継, Ludovic Pauchard, Lucas Goehring, 下川倫子, 第 35 回 非線形反応と協同現象研究会 (2025).
2. Michiko Shimokawa, Sixth Japanese-American-German Kavli Frontiers of Science Symposium (2025).

誌上発表

1. Michiko Shimokawa, Lucas Goehring, Akie Kinoshita, Ludovic Pauchard, Hidetsugu Sakaguchi “Crack patterns of black ink film: sumi-wari.”, Soft matter 22(13), 2568-2577 (2026).