

令和 2 年 5 月 7 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13669

研究課題名(和文) 針に生ずるスティック・スリップ現象を活かした構造色プリンティング技術の開発

研究課題名(英文) Development of structural color printing technology utilizing the stick-slip phenomenon on a needle

研究代表者

内藤 圭史 (NAITO, Keishi)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：50759339

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、研究代表者らが開発した微細加工法(スティック・スリップ(SS)加工法)を活用した簡易・安価かつ描画可能な構造色プリンティング技術の開発を念頭に置き、加工工具に針を用いたSS加工法を確立するために針のSS挙動等を調べたものである。研究の結果、原子間力顕微鏡用マイクロカンチレバーの様に十分に鋭い針を用いたうえで、加工条件を適切に調整することにより、針のSSによるスクラッチラインが構造色を発現することを見出した。また、その過程で、針のSS加工による微細周期構造形成メカニズムを検討し、1つのモデルを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、原子間力顕微鏡用マイクロカンチレバーの様に十分に鋭い針を用いたうえで、加工条件を適切に調整することにより、針のスティックスリップ(SS)によるスクラッチラインが構造色を発現することを見出した。但し、カンチレバーは取り扱いが難しいうえに高価であり、SS加工装置は基礎研究用のため自由度が低い。そこで、代替手段としてダイヤモンドペンおよびXYプロッタを使用した結果、SS加工による構造色プリンティング(描画)の可能性を見出した。今後、本研究結果を基に、装置や加工条件が最適化されれば、世界初の機械的な構造色プリンタが実現できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated the stick-slip (SS) behavior of a needle in order to establish the SS processing method, which is developed by the principal investigator et al., using a needle as a processing tool, keeping in mind the developing a simple, inexpensive and printable structural color printing technique. As a result, it was found that a scratch line by the SS of a needle develops structural color by using a sharp needle like a microcantilever for atomic force microscope and adjusting the processing conditions appropriately. Moreover, we investigated the mechanism of fine periodic structure formation by SS of a needle and proposed one model of that.

研究分野：高分子物性・高分子加工

キーワード：スティック・スリップ 微細加工 微細周期構造 構造色プリンティング

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

## 1. 研究開始当初の背景

近年、インクの色褪せ問題に対する新たな解決策として、物質表面の微細構造によって発色する「構造色」が注目を集めており、これを利用した印刷（構造色プリンティング）技術の報告も増加してきている。申請者が開発した微細加工法（スティック・スリップ（SS）加工法）は、構造色を発現する構造と同規模の構造を簡易かつ安価に形成可能なため、構造色プリンティングへの応用が期待できる。但し、構造色における構造と色の関係は複雑で、類似構造であっても構造の高さや幅、ピッチ等が異なれば色も異なる。現状（本研究開始前）、SS加工でも虹色構造色は確認できているが、その機構が未解明なため単色発色は達成できていない。また、加工工具に刃を利用しているため、塗分け（描画）は難しい。

## 2. 研究の目的

本研究では、SS加工法を活用し、簡易・安価かつ描画可能な構造色プリンティング技術を開発するために、加工工具に針を用いたSS加工法を確立することが本研究の目的である。針のSS挙動を解明し、針のSSにより形成された構造と発現する色の関係を明らかとする。

## 3. 研究の方法

### 3.1 SS加工法

図1はSS加工装置の模式図である。本装置は、加工対象物に張力を負荷するためのおもり、加工対象物に工具を押し当てて曲げるための工具位置調整機構、加工対象物を巻き取るウインチ、加工工具（刃もしくは針を装着できるが、本研究では針を使用）から成る。本加工法では加工対象物を加工工具に押し当てながら巻き取っていく際に、加工対象物と工具との間に生じたSS現象により、加工対象物表面が工具によって周期的に削り取られる。これにより、加工対象物表面に微細構造が形成される。本研究の場合には工具が針のため、加工対象物表面には微細な穴が周期的（サブミクロン～ミクロンピッチ）に一列に形成されることを見込まれる。

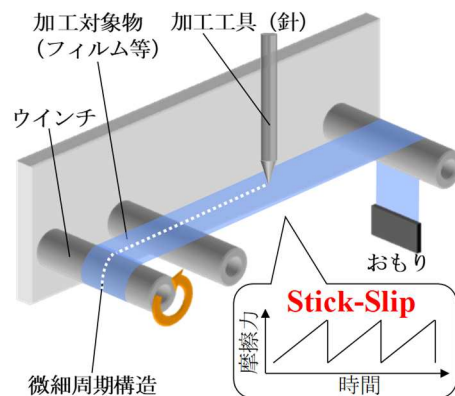


図1 SS加工装置

本装置では、(a)針と加工対象物の接触力（おもりの重量と加工対象物の曲げ角度に依存）、(b)加工対象物の移動速度（ウインチの回転速度に依存）、(c)針の種類、(d)針の自由端の長さを各々変えることが出来る。これらの入力項目を変化させることにより、微細構造の形態を変化させ、それを出力として得る。なお、本加工法は加工対象物が適度な摩擦係数を有すれば、原理的には材料に制限がないため、本研究では安価かつ軽量のポリエチレンテレフタレートフィルム（FE-2000、フタムラ化学製）を用いる。また、工具である針には、縫い針（きぬ針きぬ、みすや忠兵衛製）、原子間力顕微鏡（AFM）用マイクロカンチレバー（SI-DF40、日立ハイテクサイエンス製）、ダイヤモンドペン（Dポイントペン、オグラ宝石精機工業製）の3種を使用した。

### 3.2 ナノ周期構造の観察・評価

加工工具が刃の場合には、加工対象物表面には図2に示すような波状（鋸刃状）微細周期構造が形成される。本研究の場合には工具が針のため、図2とは少し異なり、前述の様に微細な穴が周期的（サブミクロン～ミクロンピッチ）に一列に形成されることを見込まれる。そこで、表面構造や断面形状、表面粗さを走査型電子顕微鏡（SEM）もしくは走査型プローブ顕微鏡（SPM）によって調べ、微細構造のピッチや凹部分の深さを出力項目として評価した。

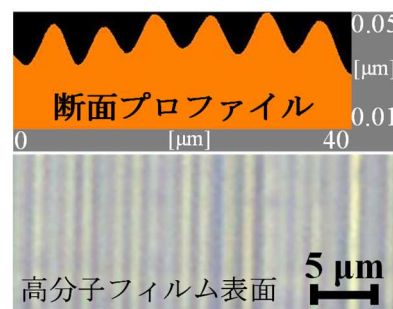


図2 加工工具に刃を用いた場合に加工対象物表面に形成される微細周期構造

## 4. 研究成果

### 4.1 加工工具：縫い針

結論から述べると、市販の針の中で最も鋭いレベルの縫い針を加工工具として使用したが、構造色は確認できなかった。針先の鋭さ（実測曲率半径：9.8μm）が十分ではなかったことが原因と考えられる。しかし、SS加工による微細周期構造の形成と制御には、加工工具が刃の場合と同様に成功した。従って、この節では、針を使用したSS加工の制御とメカニズムについて説明し、以降の節では、より鋭い針を加工工具として使用した場合の結果を示す。

図3に、縫い針を用いたSS加工により微細周期構造を形成できた場合のフィルム表面のSPM画像を示す。針が通過した部分（針とフィルムの接触点）では、表面が削られて周期的な円弧状の構造が形成され、さらにその両側が盛り上がっていた。そこで、縫い針を用いたSS加工により微細構造を形成するための条件を検討する。まず、微細周期構造の形状に及ぼす加工荷重  $T$  と

加工角度  $\theta$  の影響を調べた。加工荷重の検討では、加工荷重以外の条件を固定した ( $\theta=175^\circ$ ,  $L=1.25\text{mm}$ ,  $V=10\text{mm/min}$ )。同様に、加工角度の検討では、加工角度以外の条件を固定した ( $T=0.196\text{N}$ ,  $L=1.25\text{mm}$ ,  $V=10\text{mm/min}$ )。

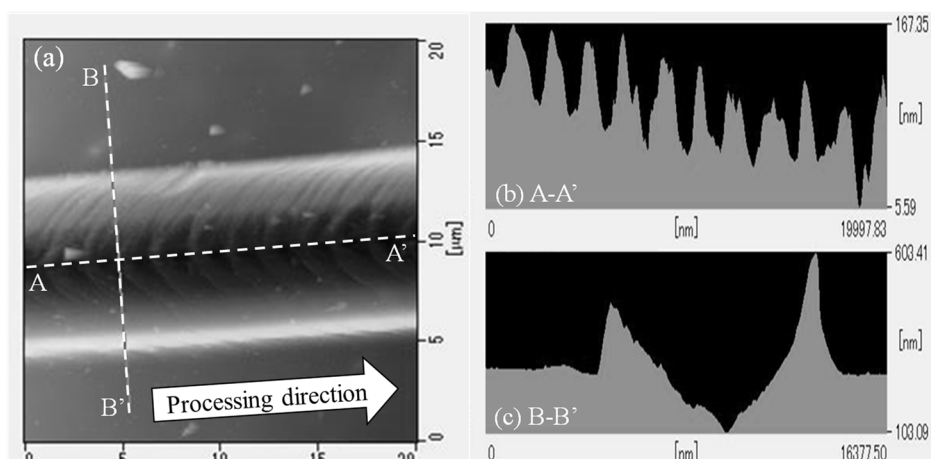


図3 SS加工を施したフィルムのSPM像。(a)表面像、(b)A-A'断面における断面プロファイル、(c)B-B'断面における断面プロファイル

図4(a)および図4(b)は、構造周期  $L_{ss}$  の加工荷重  $T$  および加工角度  $\theta$  依存性を示している。加工荷重が高くなる、もしくは、加工角度が小さくなるに従い、構造周期は長くなる。これは刃を加工工具として使用した場合と同様の傾向であった。但し、針の接触圧は刃の接触圧よりも高いため、針の場合には、刃の場合と同じ周期の構造を形成するために必要な加工荷重は小さくなる。

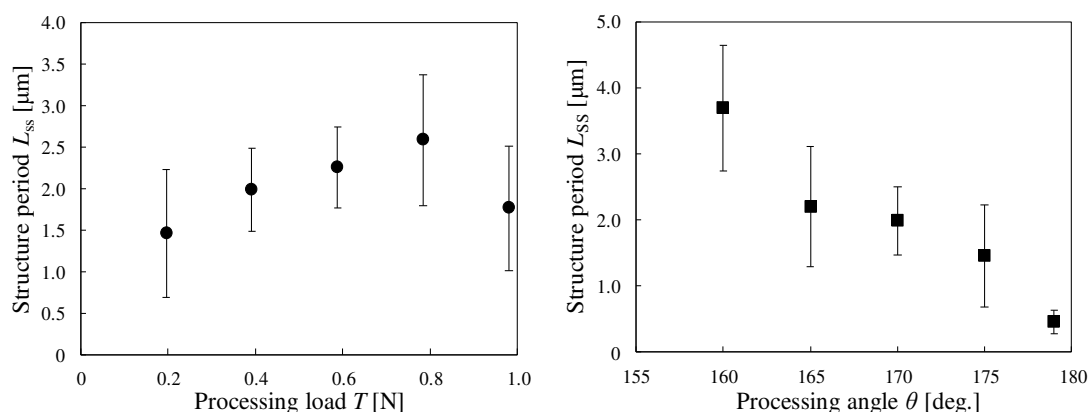


図4 SS加工を施したフィルムに形成される構造の周期。(a)加工荷重依存性、(b)加工角度依存性

下記の式(1)~(3)は、摩耗の影響を考慮しないSSのモデルである。このモデルは、SS加工の様に摩耗を伴うSSを定量的に予測することはできないが、加工条件と構造周期の関係を定性的に予測するのに役立つ。実際に、このモデルでは接触力が増加するにつれてSSの波長が増加する。これはSS加工の傾向と一致している。

$$\lambda = \frac{(\mu_s - \mu_k)W}{V\sqrt{mk}} \quad \dots (1)$$

$$f_{ss} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k}{m}} \left( \frac{1}{\pi + \lambda - \tan^{-1} \lambda} \right) \quad \dots (2)$$

$$L_{ss} = V / f_{ss} \quad \dots (3)$$

なお、式中の  $W[\text{N}]$  ( $=2T\cos(\theta/2)$ ) は垂直荷重 (接触力)、 $V[\text{m/s}]$  は駆動速度、 $k[\text{N/m}]$  は剛性 (ば

ね定数),  $m$  [g] ( $=W/g$ ,  $g$  [m/s<sup>2</sup>]) は質量,  $\mu_s$  は静摩擦係数,  $\mu_k$  は動摩擦係数,  $\lambda$  は無次元パラメータ (SS パラメータと呼ばれる),  $f_{ss}$  [s<sup>-1</sup>] は周波数,  $L_{ss}$  [m] は SS の波長 (接点の移動距離) である。

次に, 周期構造の形成メカニズムを検討した. 図 5 に針を用いた SS 加工による周期構造形成のメカニズムを考察した模式図を示す. 図 5(a) は鳥瞰図を示し, 図 5(b)~(f) は図 5(a) の点線部分の断面図を示している. まず, 針をフィルムに深く押し込むと, 針の近くのフィルムが局部的に塑性変形する (スティック状態: 図 5(b)). 次に, 張られたフィルムの作用力により針は曲がり, フィルムが巻き取られるにつれてこの撓みは徐々に増加し, それに応じて針の復元力が増加する. その後, 針の復元力がフィルムの作用力を超えると, 針は元の状態に戻り, その過程でフィルムが削り取られる (スリップ状態: 図 5(c)). この現象が繰り返されるため, 周期的に構造が形成される (図 5(d)~(f)).

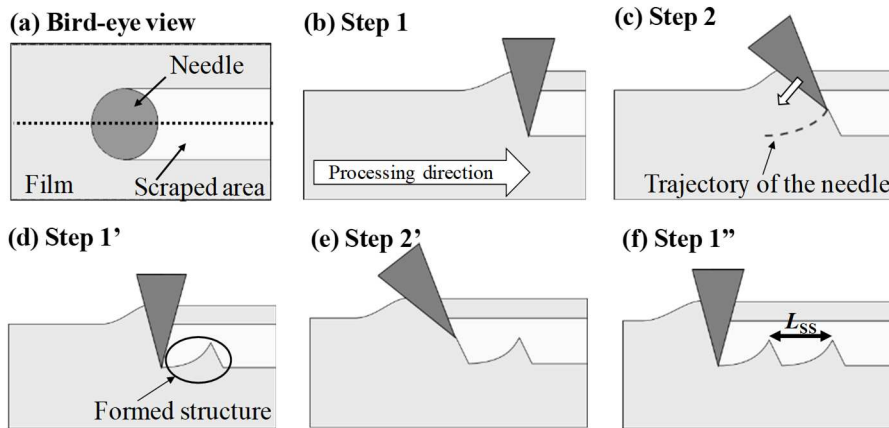


図 5 針を備えた SS 加工による微細周期構造形成に対し検討されたメカニズム. (a) 鳥瞰図, (b)-(f) 図(a)の点線部分の断面

#### 4. 2 加工工具: マイクロカンチレバー

前節の方法では, 針の鋭さが不十分であったため, 本節ではコストと取り扱いの容易さを一旦無視し, AFM 用マイクロカンチレバー (先端曲率半径 10 nm) を加工工具として使用した. その結果, 加工条件を調整することにより, 構造色を表すスクラッチラインを形成することに成功した (図 6). その際, 構造周期は縫い針の場合とほぼ同スケールであったが, 構造深さは縫い針の場合よりも深かった. また, 形成された構造はドット状であり, 縫い針による円弧状の構造よりも, その境界が明確であった. これらが構造色の発現に影響を与えていると考えられているが, 現状では未解明である. なお, 形成された構造と加工条件の関係は縫い針の場合と同様であった.

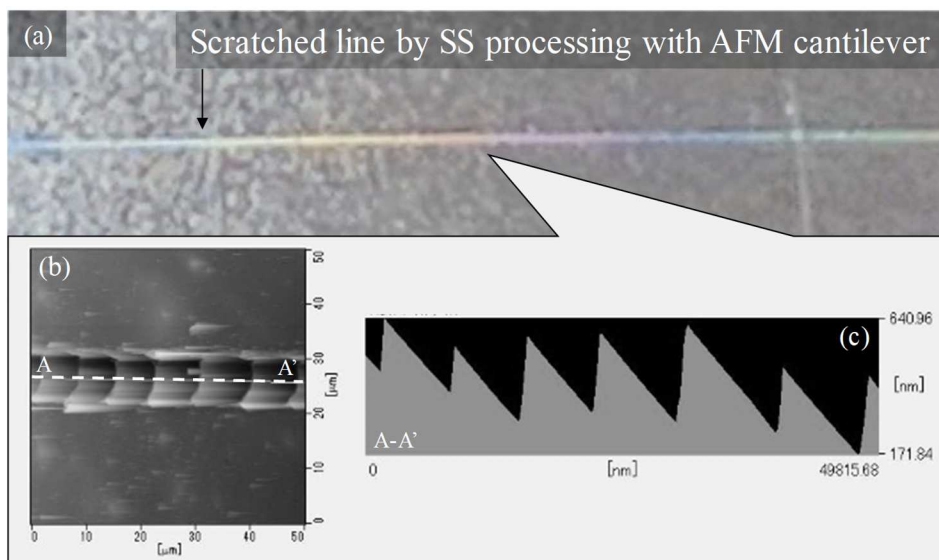


図 6 マイクロカンチレバーを備えた SS 加工によって形成されたスクラッチライン. (a) 外観, (b) SPM による表面像, (c) SPM による断面像 (図(b)の B-B'部分の断面)

#### 4. 3 加工工具: ダイヤモンドペン (装置: XY プロッタ)

前節では, AFM 用マイクロカンチレバーを備えた SS 加工装置を使用した構造色プリンティングの可能性を見出した. 但し, マイクロカンチレバーは取り扱いが難しく, 高価である. また,

SS 加工装置は基礎研究用に製作されているため、自由度が低い。従って、これらの欠点を克服するための代替手段として、ダイヤモンドペンと XY プロッタの使用を検討した。本節では、これらを使用した SS 加工の結果を示す。図 7(a)に示す様な構造色が観察された。これは、コンパクトディスクの裏面の様に、溝間の複数の干渉（図 7(b)の破線）の影響を大きく受ける。但し、マイクロカンチレバーを使用した場合と同様に、単一のスクラッチラインも構造色を表す（図 8）。つまり、ダイヤモンドペンを用いた SS 加工により、微細な周期構造を形成し、構造色を表現することは可能である。但し、ダイヤモンドペンおよび XY プロッタによる SS 加工は未だ制御できていない。今後、装置や加工条件が最適化されれば、世界初の機械的な構造色プリンタが実現できる可能性がある。

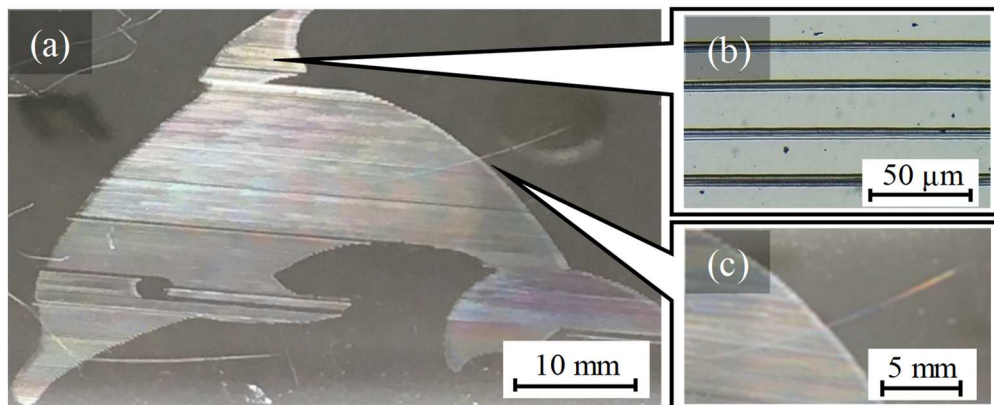


図 7 ダイヤモンドペンを備えた XY プロッタによる SS 加工（描画）. (a) 全体像, (b) スクラッチラインの光学顕微鏡像, (c) 図(a)の拡大図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Keishi Naito, Yuji Kataoka and Kisaragi Yashiro	4. 巻 3
2. 論文標題 Possibility of Fabricating Anisotropic Conductive Film with a Line-and-Space-Like Pattern by Stick-Slip Accompanying Abrasion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Manufacturing and Materials Processing	6. 最初と最後の頁 60(1-10)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.3390/jmmp3030060">https://doi.org/10.3390/jmmp3030060</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松井拓也, 内藤圭史, 屋代如月
2. 発表標題 スティックスリップを活用した微細加工における工具 試料間の見かけの摩擦係数の測定
3. 学会等名 機械学会東海支部 第68期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上野花奈子, 内藤圭史, 屋代如月
2. 発表標題 AFM用カンチレバーを使用したスティックスリップ加工による高分子フィルムへの微細周期構造の形成
3. 学会等名 機械学会東海支部 第50回学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松井拓也, 屋代如月, 内藤圭史
2. 発表標題 スティックスリップを活用した微細加工によるマルチスケール構造の形成
3. 学会等名 2019年度繊維学会秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----