

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17996

研究課題名(和文) 摩擦を活かした新規微細加工法に対し材料表面が与える影響の解明およびその応用

研究課題名(英文) Investigation of influence of material surface on new microfabrication method utilizing friction

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)：一般的には抑制されるべきスティック・スリップと呼ばれる摩擦を活かした独自の微細加工法(SS加工)に関し、摩擦発生箇所である材料表面がSS加工および形成される微細構造に与える影響を調査し、形成される微細構造と材料の発揮する機能の関係を検討した。その結果、表面材の材料種、材料物性、材料形状が与える影響を明らかとし、微細な金属層を周期的に持つフィルムと微細構造を有する繊維を創出した。なお、前者は異方導電性フィルムとしての可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Original microfabrication method (SS processing) utilizing friction called stick-slip was developed. In this study, the influence of the material surface (the part where SS occurs) against the SS processing was investigated, and the relation between the formed microstructure and the function of the fabricated material was also studied. As a result, the influence of material type, material property, material shape of the surface material was clarified, and a film with fine metal layers periodically and a fiber with fine structures periodically was created. The former has the possibility as an anisotropic conductive film.

研究分野：工学

キーワード：スティック・スリップ 微細加工 微細周期構造

1. 研究開始当初の背景

材料表面への微細構造形成により、材料の機能性向上や新機能発現が期待できる。現在の微細構造形成（微細加工）の主流技術は、ナノインプリントや精密ビーム加工であるが、各々コスト等に問題点がある。ところで、このような加工プロセスにおいて、摩擦は天敵と言える。特にスティック・スリップ（SS）が発生した場合には、系に細かな振動が生じてプロセスの制御が困難になる上、場合によってはナノ～センチメートルレベルの傷が生じてしまう。そのため、摩擦に関してはその抑制こそが課題である。

これに対し、研究代表者は、上記の様な SS の負の特徴を活かした独自の微細加工法（SS 加工、図 1）を開発した。先行研究において、SS 加工時の力学的条件と、それにより形成される微細構造の関係については解明済であったが、摩擦発生箇所である材料表面が SS 加工および形成される微細構造に与える影響は未解明であった。また、形成される微細構造と材料の発揮する機能の関係も未解明であったため、これらの点に焦点をあて、研究を行った。

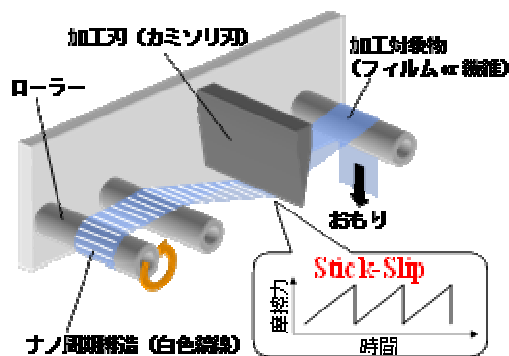


図 1 SS 加工

2. 研究の目的

本研究では、「SS 加工を如何なる材料表面にも適用可能とする」と、「SS 加工による応用の創出」を目的とした。そのために、材料種や材料物性、表面形状等の“表面状態”と“SS 加工によって形成される微細構造”の関係解明を目指した。さらには、その成果を活かした応用を創出すべく、金属皮膜した高分子フィルムの金属層を SS 加工により周期的に削り取った“ナノ周期で金属部を持つフィルム”と、高分子繊維に SS 加工を施した“ナノ周期構造を有する繊維”の開発にも挑戦した。

3. 研究の方法

【SS 加工法】

前出の図 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、加工対象物を曲げるための刃位置調整機構、加工対象物を巻き取るローラー、加工刃（市販のカミソリ刃）から成る。本加工法では加工対象物を刃に押し当てながら

巻き取っていく際に、加工対象物と刃との間に生じた SS 現象により、加工対象物表面が刃に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。本装置では、(a)刃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（ローラーの回転速度に依存）、(c)刃の種類、(d)刃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はない。

【ナノ周期構造の観察・評価】

形成された微細構造は図 2 の様になる。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。

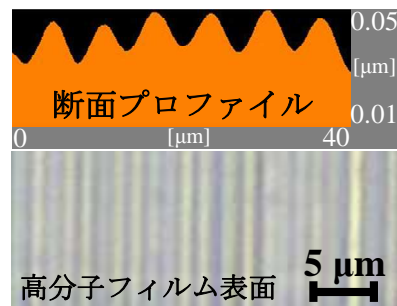


図 2 SS 加工により形成される微細構造

【材料種および材料物性の影響解明、ナノ周期で金属部を持つフィルムの開発・評価】

まず、真空蒸着法により、ポリエチレンテレフタレート（PET）フィルム表面に銅（Cu）を蒸着したフィルム（Cu/PET フィルム）を作製し、この Cu/PET フィルムに加工条件（ここでは接触力）を変えながら SS 加工を施すことにより、フィルムがナノ周期で金属部を持つための加工条件を調査した。また、この時、無蒸着の PET フィルムと Cu/PET フィルムのそれぞれに対して同一条件で SS 加工を施し、形成された微細構造を観察・評価することにより、材料種（高分子、金属）が微細構造の形成に及ぼす影響も調査した。

次に、同様の方法により PET フィルム表面に銀（Ag）を蒸着したフィルム（Ag/PET フィルム）を作製し、無蒸着の PET フィルム、Cu/PET フィルム、Ag/PET フィルムのそれぞれに対して同一条件で SS 加工を施した後、形成された微細構造を観察・評価することにより、表面材料の物性（ヤング率、摩擦係数）が微細構造の形成に及ぼす影響を調査した。なお、この時、摩擦係数は万能試験機を用いて測定した。

その後、SS 加工を施した Cu/PET フィルム（SS 加工 Cu/PET フィルム）の電気特性を明らかにするために、表面の電気抵抗値を測定し、その電気伝導性と異方性を調査した。

【表面形状の影響解明、ナノ周期構造を有す

る繊維の開発・評価]

ポリプロピレン (PP) の単繊維に対して SS 加工を施し, PP 単繊維がナノ周期構造を有するための加工条件を調査した. その際, SS 加工された高分子繊維表面に形成された微細構造を観察・評価し, フィルム (表面形状: 平滑面) の場合との比較により, 繊維の表面形状 (曲面) が微細構造の形成に及ぼす影響, および微細構造が高分子繊維に形成されるメカニズムを調査した.

4. 研究成果

図 3 は SS 加工によりフィルム表面に形成された微細構造の周期 (構造周期) の接触力依存性を示す. 結果, SS 加工 Cu/PET フィルム, SS 加工 Ag/PET フィルムともに, 本試験条件下では構造周期が数ミクロンとなり, 目標より長かったものの, 周期的に金属層を持つ PET フィルム (図 4) を得ることに成功した.

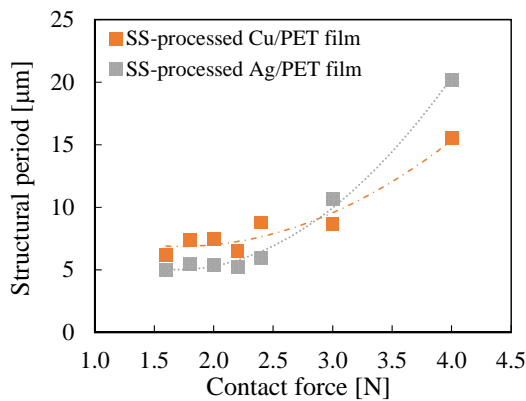


図 3 構造周期の接触力依存性

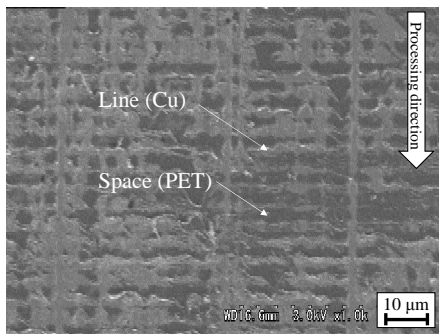


図 4 周期的に金属層を持つフィルム

図 5 は SS 加工によりフィルム表面に形成された微細構造の深さ (構造深さ) の接触力依存性を示す. 加工条件が同一であれば, SS 加工 Cu/PET フィルムの方が SS 加工 Ag/PET フィルムよりも, 構造深さが浅くなった. これは, Cu の方が Ag よりも弾性率が高く, 加工刃が刺さりこみにくかったためである. 但し, 先行研究によると, 構造深さが浅いほうが構造周期は狭まるが, 本研究では低接触力側でこれが反転した. この点に関しては, Cu-PET 間の摩擦係数の方が Ag-PET 間の摩擦係数に比べ大きいことに起因すると考えられる. いずれにせよ, 表面材料の物性 (ヤ

ング率, 摩擦係数) が微細構造の形成に及ぼす影響を明らかとした. なお, 構造のナノ周期化に関しては, 刃と試料の接触を弱くすることにより達成できる. 但し, その場合には構造深さが浅くなるため, ナノ周期で金属層を持つ様にするためには金属層が十分に薄くなければならない.

次に, SS 加工 Cu/PET フィルム表面の電気特性を調べた結果, フィルム表面は導電性を有し, 異方導電性を示した. しかし, 残念ながら, 図 6 に示す様に, 加工刃先端に存在する先天的欠陥の影響により, SS 加工方向と平行な方向 (図 4 の上下方向) に引掻き傷が生じてしまい, これが原因となり導電性は低く, 異方性発現の確率も低くなってしまった. 刃の欠陥を無くして導電性等を高めることは現状では簡単ではないが, 本研究は少なくとも, SS 加工による応用 (異方導電性フィルム) 創出の可能性を示した.

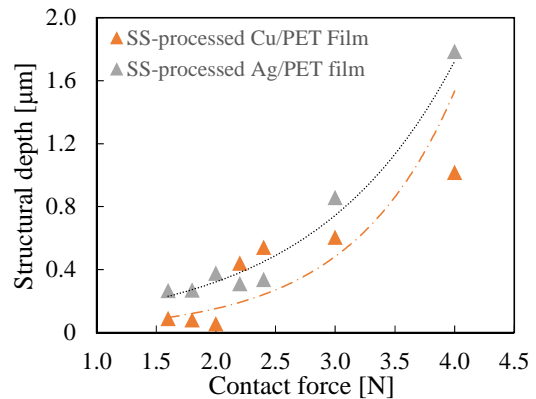


図 5 構造深さの接触力依存性

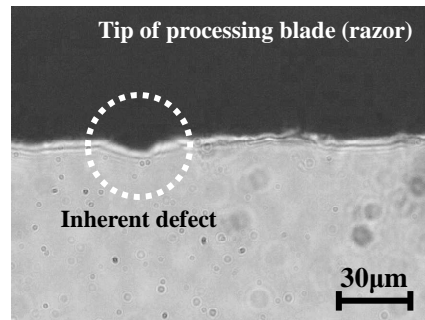


図 6 加工刃先端に先天的に存在する欠陥

図 7 は SS 加工により表面に微細構造を形成された PP 単繊維の SEM 像である. SS 加工繊維の構造周期は本実験条件下では数十ミクロンとなり, 目標よりも長かったものの, 本研究により周期構造を有する繊維を恒常的に作製できる加工条件を見出した. また, SS や摩擦の原理を基として SEM 像等から総合的に検討した結果, 繊維と加工刃との接触面ではアブレシブ摩擦が起こっていることが分かった. 加えて, SS はアブレシブ摩擦により試料表面が削りとられる過程で起こり, 切削により新たに生まれた表面上に周期構造が形成されていることが明らかとなった. また, SS 加工前後の繊維に対し引張試験を実

施した結果、SS加工後の繊維はSS加工前の繊維と同等の力学強度を示すことが明らかとなった。なお、構造のナノ周期化に関しては、繊維の場合にもフィルムの場合と同様に、刃と試料の接触を弱くすることにより達成できる。但し、接触力を弱くすると、やはり構造深さが浅くなってしまふ。そのため、現状では残念ながら、構造色の発現は確認できていない。しかし、本研究により、フィルム（長方形断面）と繊維（円形断面）では、形成される周期構造の形態に大きな違いが生じないということが明らかとなった。

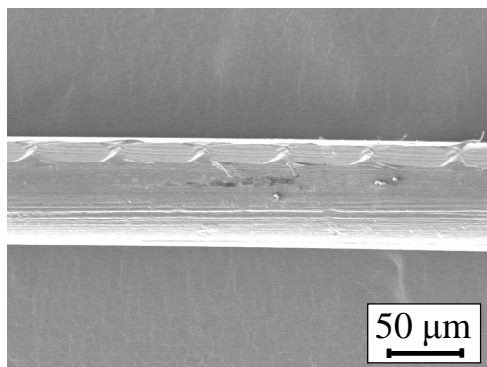


図7 周期構造を有する繊維

また、SSの数理モデル（中野ら、日本ゴム協会誌、85(10)、33-318 (2012)）によると、その波長は速度上昇に伴い長周期化するが、本研究においては構造周期（波長に対応）が、速度上昇に伴って短くなった（図8）。検討の結果、これは、前述の数理モデルが「摩擦係数に速度依存性はない」とするクーロン則を前提としていることに対し、実際のSS加工の系では摩擦係数が速度に対して対数関数的に減少しているためであることが明らかとなった。

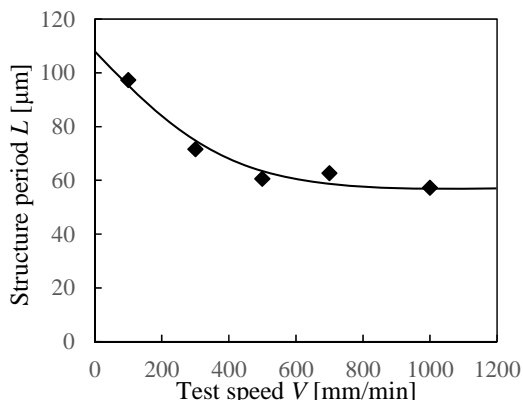


図8 構造周期の加工速度依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計1件）

- (1) 内藤圭史, 二村晟平, 屋代如月, ポリプロピレン単繊維に擦る刃に摩擦振動が生じた際の摩擦への影響, *Journal of Fiber Science and Technology*, 査読有, Vol.74, No.2, 2018, pp.47-52,

https://www.jstage.jst.go.jp/article/fiberst/74/2/74_2018-0008/_pdf

〔学会発表〕（計4件）

- (1) 松井拓也, 内藤圭史, 屋代如月, 針のスティックスリップ現象による微細周期構造の形成, 機械学会東海支部 第49回学生会卒業研究発表講演会, 2018年
- (2) 安藤領馬, 内藤圭史, 屋代如月, スティック・スリップ現象を活用した微細周期加工における加工刃の劣化評価, 機械学会東海支部 第49回学生会卒業研究発表講演会, 2018年
- (3) 内藤圭史, 繊維もしくはフィルムを接触する刃に生ずる摩擦振動～その影響と活用法～, 第48回中部化学関係学協会支部連合秋季大会, 2017年
- (4) 二村晟平, 屋代如月, 内藤圭史, ポリプロピレン単繊維に対するスティックスリップ現象の影響, 第47回繊維学会夏季セミナー, 2017年

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)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

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし

(4)研究協力者
屋代 如月 (YASHIRO, Kisaragi)
岐阜大学・工学部・教授
研究者番号：50311775

武野 明義 (TAKENO, Akiyoshi)
岐阜大学・工学部・教授
研究者番号：70227049

高橋 紳矢 (TAKAHASHI, Shinya)
岐阜大学・工学部・助教
研究者番号：40377700