

平成 27 年度 卒業論文

スティック・スリップ現象を活かした
新規ナノ周期加工法の開発

設計力学講座

指導教員 内藤圭史

屋代如月

岐阜大学 工学部 機械システム工学科

堤 貴文

目次

第一章 緒論	1
1.1 はじめに	1
1.2 微細周期構造と微細加工	1
1.3 スティック・スリップ現象について	2
1.4 本実験の目的	3
第二章 実験	4
2.1 試料	4
2.2 加工刃	5
2.3 ナノ周期構造の形成（スティック・スリップ加工）	6
2.3.1 スティック・スリップ（SS）加工装置と加工手順	6
2.3.2 加工条件	7
2.4 SS 加工フィルムの表面形状評価	8
2.4.1 走査型電子顕微鏡（SEM）による表面観察	8
2.4.2 走査型プローブ顕微鏡（SPM）による表面観察	9
2.5 エネルギー分散型 X 線分析（Energy Dispersive X-ray spectrometry）によるフィルム表面の元素分析	10
第三章 結果及び考察	11
3.1 SS 加工による微細周期構造	11
3.2 SS 加工フィルムの表面形態	14
3.2.1 加工荷重の影響	14
3.2.2 加工角度の影響	18
3.2.3 接触力一定の場合	22
3.2.4 加工刃の自由端長さの影響	27
3.3 総合考察	32

第四章 結論	37
参考文献	38
謝辞	39
第五章 付録	40
5.1 加工刃のばね定数（剛性） K の算出	40
5.2 引張試験	45
5.2.1 ポリエチレンテレフタレート(PET)フィルム	45
5.2.2 加工刃(炭素鋼 TE-2)	47
5.3 摩擦係数測定(静止摩擦係数及び動摩擦係数)	49
5.4 密度測定(アルキメデス法)	52

第一章 緒論

1.1 はじめに

近年、光学分野を中心に材料への微細（マイクロナノ）周期構造形成の必要性が高まっている。この微細周期構造の形成には、精密レーザー加工等が一般的であるが、これらは加工工程が簡易でなく高コストなことが難点である。機械加工による微細周期構造形成の例もあるが、これにはサイズ面で難しさがある。さらに、これを難しくする他の要因として摩擦が挙げられる。特に、スティック・スリップ（SS）と呼ばれる振動を伴う摩擦が発生すると、プロセスの制御は一段と難しくなる。よって、通常、摩擦とは抑制されるべき現象である。

これに対し、我々はSSの振動周期がナノからマイクロメートルのオーダーにもなりえる点に注目した。本研究ではSSを活用した微細周期構造形成法の開発に挑戦する。

1.2 微細周期構造と微細加工

材料に微細構造を形成すると、それまでのマクロな構造では得られなかった機能を発現するようになる。ほとんどの場合、この機能は微細構造が規則的（周期的）に並ぶことにより発現しているため、一般に言う微細構造とは微細“周期”構造のことを指す。この微細周期構造で近年最も注目を集めるのは、モスアイ構造である。これは、ナノ突起が材料表面に二次元で規則的に配列した構造であり、これにより外光の映り込みを防止し、ディスプレイの視認性を上げる効果がある。また、他の例としては、微細な凹凸構造による材料表面の超撥水化や、機械摺動部の摩擦ロス低減効果、コーティング膜の密着性向上効果などがある。このように微細周期構造に対しては、多くの分野でその必要性が高まっている。

さて、この微細構造を材料に形成することは微細加工と呼ばれ、現在までに様々な手法が提案・実用化されている。例えば、阿部¹⁾らはフェムト秒レーザーを利用してSCM415製のシリンダ内部や球表面に対して微細周期構造を形成することに成功している。また、半導体分野においては、石英をモールドに使用したナノインプリントが主な加工法として台頭しているが、廣島ら²⁾は光ナノインプリント法を用いることで熱をかけずにモールドの形状を材料に転写する手法を開発している。しかし、前者はレーザーを適用できる材料が限られているという問題点があり、後者は石英モールドの製作等により全体のコストが高額になるという問題点がある。このように、現在の微細加工法はどれも一長一短で、多くの場合、工程の複雑さとそれに起因するコストの上昇という問題点がある。そのため、これらを解決する新たな加工法が望まれている。

1.3 スティック・スリップ現象について

スティック・スリップ現象は、摩擦現象の一種で摩擦振動や固着滑りとも呼ばれ、摩擦部分で発生するすべりと付着の繰り返し現象である。この SS 現象は、材料が二面間ですべり運動を起こす際に、その静摩擦係数と動摩擦係数に差があり、運動系が弾性自由度を有する場合に発生する³⁾。Figure1-1 に一般的な SS 現象における摩擦力の時間変化を示す。

この SS 現象は我々の身の回りでも頻繁に発生している。代表的なものは、車のブレーキペダルを踏んだ際に起こる車体振動（ブレーキジャダー）や、黒板をチョークで引っかいたときに起こる振動である（その結果、黒板には破線が描かれる）。これらが、忌むべきものであるように、一般的に SS が注目されている理由は、それが使用環境に悪影響を及ぼすためである。そのため、SS はその抑制こそが課題とされ、メカニズムの解析及び、各々の条件下における抑制法の研究がさかんに行われている。そして、実際の現場では、これらの研究を基に、潤滑方法、潤滑油種、案内面形状、給油みぞ形状などを工夫して、SS を抑制している。

以上のように、SS は本来抑制されるべき現象として注目されているが、我々は SS による振動の周期がマイクロからナノメートルのオーダーにもなりうることに着目し、本研究を着想した。

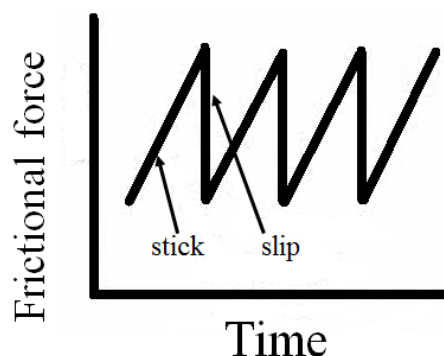


Figure 1-1 Typical regular stick-slip (Time dependency of frictional force.)

1.4 本実験の目的

前述のように、材料に微細周期構造を形成すると、それまでのマクロな構造では得られなかった機能を発現するようになるため、多くの分野でその必要性が高まっている。しかし、現在の微細加工法はどれも一長一短で、多くの場合、工程の複雑さとそれに起因するコストの上昇という問題点がある。そのため、これらを解決する新たな加工法が望まれている。

また、上記のような微細周期構造形成法の一つに機械加工が挙げられる。しかし、これにも、加工の際に発生する摩擦がプロセスの制御の難しくするという問題点がある。特に、スティック・スリップ (SS) と呼ばれる振動を伴う摩擦が発生すると、プロセスの制御は一段と難しくなる。よって、通常、SS は抑制されるべき現象である。

以上のように、SS は本来抑制されるべき現象として注目されているが、我々はこの SS が簡易に起こる点、またその振動周期がマイクロからナノメートルのオーダーにもなりうる点に着目した。本研究では、簡易で安価に微細周期構造を形成するために、この SS の特長を活かした新規の微細周期構造形成法の開発に挑戦する。最終的には、このプロセスの制御と可視光波長域 (380nm~750nm) レベルのナノ周期構造の形成を目指す。

第二章 実験

2.1 試料

本研究では試料として加工刃よりも硬度および弾性率が低く柔軟であり，加工中に大きな伸びを生じない高分子フィルムを選択しえた．その中でも今回は，スマートフォンやタブレット端末のタッチパネル部材，液晶ディスプレイ部材等を中心に我々の身の回りで広く利用されているポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムを選択した．PET は芳香環を有するとともに分子鎖が直線になりやすいことから，分子鎖が流動性を持つ温度では芳香環や分子鎖の配向が起こりやすく，結晶部分を作りやすい高分子材料である．Table 2-1 に本研究で使用した PET フィルムの物性を示す．

本実験では，フタムラ化学株式会社製で膜厚 37 μm の二軸延伸処理を施した PET フィルム (FE2000, 表面処理なし) を使用した．

Table 2-1 Properties of PET

Density [g/cm ³]	Tensile strength [MPa]	Elastic modulus [MPa]	Breaking strain [%]
1.38	172	3.98	229

2.2 加工刃

硬さおよび強度が十分にあり，鋭角な先端部分（実測先端角度 15.5 deg）を持つことに注目し，PET フィルムとの間に SS を生じさせる加工刃に市販の剃刀（フェザー製，FAS-10）を用いた．

今回使用した剃刀の材料は SKS81M である．Table 2-2 に SKS81M の一般的な特性を示す．SKS81M は，JIS 規格ではこのような名称であるが，それと同等の TE-2 という金属材料が存在する．TE-2 は炭素工具鋼 SK120 の改良鋼種で，成分の調整及び製造履歴の厳重な管理によって焼入れ性を増し，炭化物を微細化して，切れ味・耐摩耗性を高めた材料である．Table 3 には TE-2 の化学成分割合を示す⁵⁾．特殊鋼である SK120 は，焼鈍仕上やロール仕上げなどの仕上状態により硬さや引張強さが変化する．我々はこの TE-2 を用いて加工刃の機械的物性を調査した

Table 2-4 に，本実験で用いた加工刃の原材料である炭素鋼 TE-2 のヤング率の実測値を示す．なお，TE-2 の引張試験方法に関しては付録（第 5 章）に記した．

Table 2-2 Property of SKS81M⁴⁾.

Density	Tensile strength	Modulus of elasticity
[kg/dm ³]	[N/mm ²]	[kN/mm ²]
824	324	114

Table 2-3 Chemical component of TE-2⁵⁾.

Ingredient [%]						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
1.20~1.30	0.15~0.35	≦0.35	≦0.020	≦0.020	0.30~0.50	≦0.25

Table 2-4 Mechanical properties of TE-2

Young's modulus	Tensile stress
E	σ
[GPa]	[N/mm ²]
202.2	325.28

2.3 ナノ周期構造の形成（スティック・スリップ加工）

2.3.1 スティック・スリップ（SS）加工装置と加工手順

スティック・スリップによる微細構造の形成には Figure 2-1 に示すような加工装置（SS 加工機）を使用した。この装置はフィルム巻取用ウィンチと、ローラー、加工刃を設置するホルダからなる。ウィンチには回転速度を決定する制御装置が取り付けられており、この調整により加工（フィルム巻取）速度 V を変更することが出来る。また、ホルダの上下方向位置も任意に変更できるようになっており、この調整により加工角度 θ を変更することが出来る。このホルダは数種類用意されており、用いるホルダの種類によって加工刃先端の自由端長さ L を変更することが出来る。さらに、フィルムの一端をウィンチに固定し、反対側の端におもりを吊り下げることにより、フィルムに張りを与え、フィルムに加わる荷重 T を変更することが出来る。

上記の加工条件（加工速度 V 、加工角度 θ 、自由端長さ L 、加工荷重 T ）を設定した後、装置を起動させてフィルムを巻き取ることで、フィルムと刃の接触部でスティック・スリップが発生する。

なお、SS 加工の手順は以下の通りである。

- ① フィルムを短冊状に切り出す（本研究では、幅 2.0cm、長さ約 20cm とした）。このとき、短冊状フィルムの長辺方向が MD（Machine direction）方向、短辺方向が TD（Transverse direction）方向となるように切り出す。
- ② 加工刃（剃刀）の先端部分をアセトンを染み込ませた布で丁寧に拭いた後、加工刃をホルダに取り付ける。この時、加工刃の自由端長さ L は選択するホルダによって決まる。
- ③ ホルダを SS 加工機本体に設置する。
- ④ 試料フィルムの一端の両表面それぞれに 2cm×2cm の厚紙を両面テープで貼り付け、フィルムを補強する。
- ⑤ 厚紙を貼り付けた側と反対側のフィルムの端をガムテープでウィンチに固定する。続いて、試料の厚紙部分をつかみ具でつかむことによりおもりを吊り下げ、試料に張力をかける。
- ⑥ 加工刃の幅方向に対してフィルムの送り方向が垂直となるように、Figure 2-1 のようにフィルムを設置する。このとき、加工中に常にフィルムと加工刃が接触するように慎重に設置する。
- ⑦ 加工速度 V 、加工角度 θ を設定し、SS 加工機を起動してフィルムを 10cm 程度巻き取る。その結果、フィルムと刃が接する部分において、スティック・スリップが起こる。

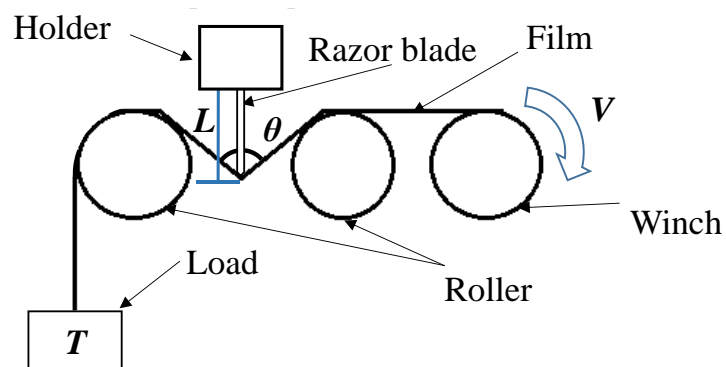


Figure 2-1 Schematic diagram of SS processing

2.3.2 加工条件

SS 加工では、おもりの重量により加工荷重 T を、加工刃の上下位置により加工角度 θ を、使用するホルダの種類により自由端長さ L を、モータの回転速度により加工速度 V を、それぞれ変更可能である。Table 2-5 に本実験における SS 加工条件の範囲を示す。なお、本実験では、SS による刃の損傷劣化の可能性を考慮し、加工時には毎回新品の加工刃を用意した。

Table 2-5 Processing condition of SS processing

	Load T [kg]	Processing angle θ [deg]	Free-edge length L [mm]	Speed V [mm/min]
Max	1.5	165	3	20
Min	0.3	130	0.1	3

2.4 SS 加工フィルムの表面形状評価

2.4.1 走査型電子顕微鏡 (SEM) による表面観察

スティック・スリップ加工後の PET フィルム表面に微細周期構造が形成されているかを、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した。

SEM は、電子線を電子レンズによって細く絞りながら、試料表面上を走査させて、表面から発生する二次電子や反射電子を検出して試料表面の顕微鏡を得る。そして、二次電子や反射電子と同時に放出される特性 X 線を利用して元素分析を行うことも可能である。

本実験では、試料を約 5mm×5mm 程度に切り取ってカーボン両面テープで試料台に接着させる。試料台に接着したフィルムに対して、オスミニウムコーターでオスmiumをコーティングする。その後、試料台を SEM 内に設置することで試料を 20 μ m 角~150 μ m 角の範囲で観察した。本研究では、コンデンサレンズを ON にし、コースを 4 に設定した。また、多くの場合、加速電圧 5 kV, エミッション電流 10 μ A, ワーキングディスタンス (W. D.) 約 15 mm で観察を行った。

Figure 2-2 および Figure 2-3 に、本研究で使用した SEM(日立ハイテクサイエンス製, S-4300)とオスミニウムコーター(メイワフォーシス製, NE-01044)の外観図をそれぞれ示す。



Figure 2-2 Appearance of SEM (S-4300) **Figure 2-3** Appearance of osmium coater (NE-01044)

2.4.2 走査型プローブ顕微鏡 (SPM) による表面観察

スティック・スリップ加工後の PET フィルム表面に微細周期構造が形成されているかを、また形成が確認できた場合にはその周期と深さを、走査型プローブ顕微鏡(SPM)を用いて測定した。

SPM は微小な針(探針:プローブ)で試料をなぞって、その形状や性質を観察することが可能な顕微鏡である。探針を試料に近づけ、試料と探針間の力学的・電磁氣的相互作用を検出しながら操作することで、ナノスケールで試料表面の情報を得る。また、原子・分子レベルの観察も可能であり、大気中や液体中などの様々な環境で使用できるという特徴から、物理学や材料化学、生物学など幅広い分野で使用される。Figure2-4 に、本研究で使用した SPM(日立ハイテクノロジー製 AFM5400L)の外観図を示す。

本実験では、表面構造サイズに合わせてキャプチャ範囲を変更した。また、本論文で提示する画像には、画像ごとに解像度のばらつきがあるが、これはキャプチャ時間を短縮するため、必要最低限の解像度に設定しているためである。なお、画像キャプチャ範囲は 2 μm 角から 100 μm 角である。Figure 2-4 に本研究で使用した SPM(AFM5400L 日立ハイテックスサイエンス製)を示す。



Figure 2-4 Appearance of SPM (AFM5400L)

2.5 エネルギー分散型 X 線分析 (Energy Dispersive X-ray spectrometry)によるフィルム表面の元素分析

スティック・スリップ加工後の PET フィルムに存在する元素を調べるために、エネルギー分散型 X 線分析 (EDX: Energy Dispersive X-ray spectrometry) を使用した。EDX は、電子線や X 線などの一次線を物体に照射した際に発生する特性 X 線もしくは蛍光 X 線を半導体検出器などのようなエネルギー分散型検出器にて検出し、そのエネルギーと強度から、物体を構成する元素と濃度を調べる元素分析手法である。

本実験で使用した EDX は SEM (S4300) に取り付けられているため、まず SEM で元素分析したい部分を観察し、その後、EDX によって試料表面の元素分析を行った。使用した機器は堀場製作所製の EMAX EX-220 である。

第三章 結果及び考察

3.1 SS 加工による微細周期構造

Figure3-1 に SS 加工後のフィルム (SS 加工フィルム) の外観写真を示す. 図の左右方向が加工 (フィルム巻取) 方向であり, フィルム中の白化している部分が SS 加工によりフィルム表面に微細周期構造が形成された部分である. この写真からは表面の微細構造の形状を知ることは出来ないため, SEM および SPM によって表面の構造を分析することとした. Figure3-2 は SS 加工フィルム表面の SEM 像であり, Figure3-3 は SS 加工フィルム表面の SPM による形状像である. Figure3-2 は, 図の左右方向が加工方向であり, 図中上下方向の白線はその部分に急激な段差があることを示している. また, Figure3-3 は, 図の左右方向が加工方向であり, 図中上下方向の明線がその部分に急激な段差があることを示している. これらの図より, まず本研究では, SS 加工によって PET フィルム表面に微細周期構造を形成することに成功していることが分かる.

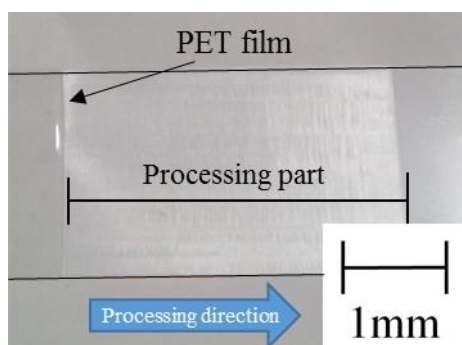


Figure 3-1 Appearance of SS processed film.

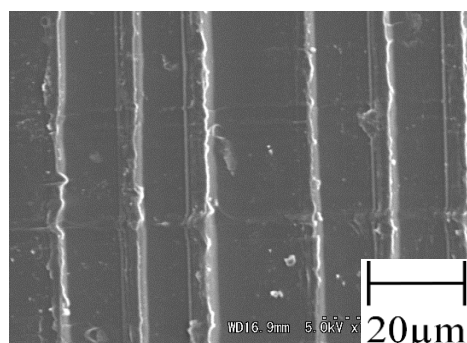


Figure 3-2 SEM image of surface of SS processed film.

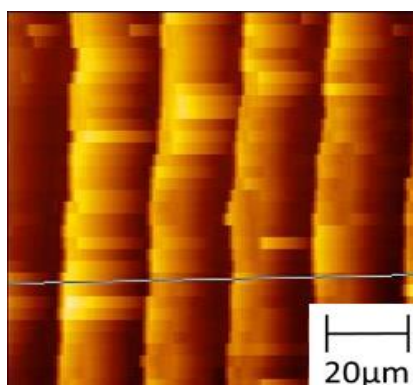


Figure 3-3 SPM image of surface of SS processed film.

なお、Figure3-4 に示すように、SS 加工フィルム表面には、未加工フィルム表面 (Figure3-5) には見られない異物のようなもの (図中の白色物体) が観察されることがあった。これに対し、剃刀の先端の一部が SS 加工中に欠け、フィルム表面に刺さりこんで残留した可能性が考えられたため、EDX を用いて SS 加工フィルム表面の元素分析を行った。なお、Figure3-4 の表面には SS 加工が施されていないように見えるが、これは、フィルム表面に出来上がる構造の深さが数nm しかなく、オスミウムでコーティングする際に溝の中にオスミウムが入ってしまうためである。

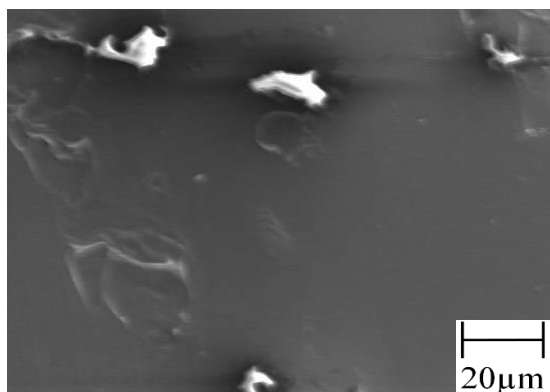


Figure 3-4 SEM image of surface of SS processed film.

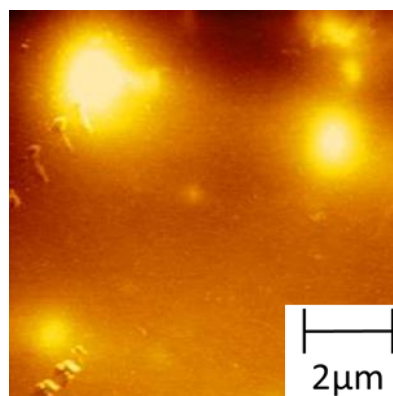


Figure 3-5 SPM image of surface of PET film.

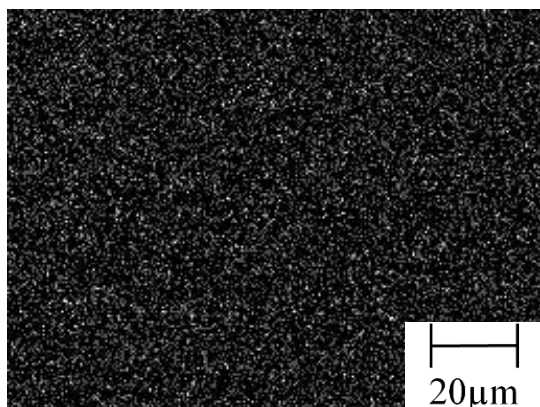


Figure 3-6 Distribution of carbon (White dots indicate carbon)

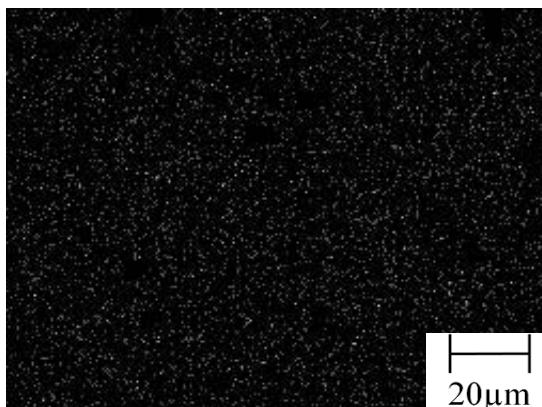


Figure 3-7 Distribution of oxygen (White dots indicate oxygen)

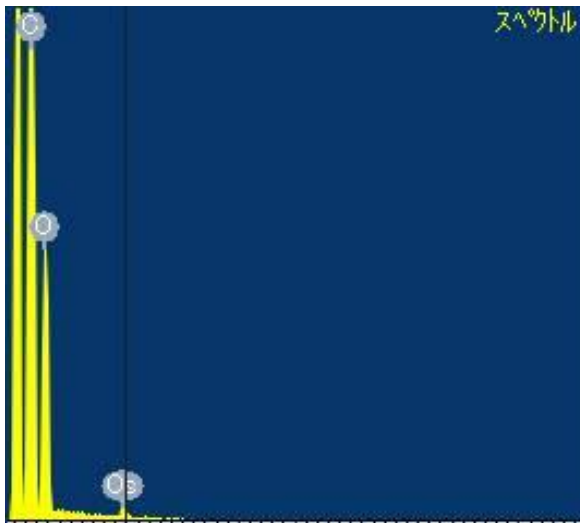


Figure 3-8 EDX spectrum

Figure3-6 および 3-7 はフィルム表面の C および O の分布を示し, Figure3-8 はフィルム表面に存在する各元素の割合を示す. 結果, フィルム表面に存在したのは PET の構成元素である C, O のみであり, Fe は存在しなかった. よって, 異物は剃刀の欠けによる残留物ではないことが分かる. ところで, SS 加工では, フィルム表面の掘り起こし (アブレーション) が起こるため, 加工後の表面には掘り起こされた PET のカスが大量に残っている. 加工直後および SEM や SPM の観察前にはエアダスターでこのカスを丁寧に吹き飛ばしているが, 中には表面に残ってしまったカスもあると考えられる. つまり, 以上の事実をまとめると, 表面に残留した PET フィルムのカスが異物の正体である可能性が高い.

さて, まず本節において, SS 加工によりフィルム表面に微細周期構造を形成できることが明らかとなったので, 次項では加工条件が SS 加工によって形成される微細周期構造の形状に与える影響を調べていく. さらに, その過程において SS 加工によってナノ周期構造を形成するための加工条件を割り出していく.

3.2 SS 加工フィルムの表面形態

3.2.1 加工荷重の影響

初めに、加工荷重 T が SS 加工によって形成される微細周期構造の形状に与える影響を調べた。ここでは加工荷重以外のパラメータ（加工条件）は固定した。加工条件は $\theta=140[\text{deg}]$, $v=10[\text{mm/min}]$, $L=1[\text{mm}]$ である。

Figure 3-9 から Figure3-11 は作製した SS 加工フィルムの SPM 像である。それぞれ加工荷重 0.3 kg, 0.5 kg, 1.1 kg の場合の結果である。また, Figure3-12 は構造周期の加工荷重依存性を示し, Figure3-13 は構造深さの加工荷重依存性を示す。そして, Table 3-1 は両結果を数値でまとめたものである。まず Figure3-12 より, 加工荷重が大きくなるに従って, 構造周期が長くなることが分かった。また, Figure3-13 より, 加工荷重が大きくなるに従い, 構造深さが深くなることが分かった。これは, 加工荷重が大きくなるに従い, 刃の刺込深さが深くなったためである。但し, 加工荷重が 1.1 kg の時には構造深さは浅くなり, 構造周期は短くなってしまった。これは, 高い加工荷重の場合には, 接触圧や摩擦熱によって構造がつぶれてしまうため起こる現象であると考えられる。

また, 本実験の結果より, 低加工荷重での SS 加工によってフィルム表面へのナノ周期構造の形成に成功していることが分かる (Figure3-9)。これは, 加工荷重が小さくなるに従い, SS 現象の周期が短くなるためと予測される。つまり, 加工荷重の調整により構造周期および構造深さを変化させることができ, 構造周期をナノメートルオーダーにもできることが明らかとなった。

さて, 本項において, 加工荷重 T の影響が明らかになった。そこで次項では, 加工角度 θ の影響を調べる。

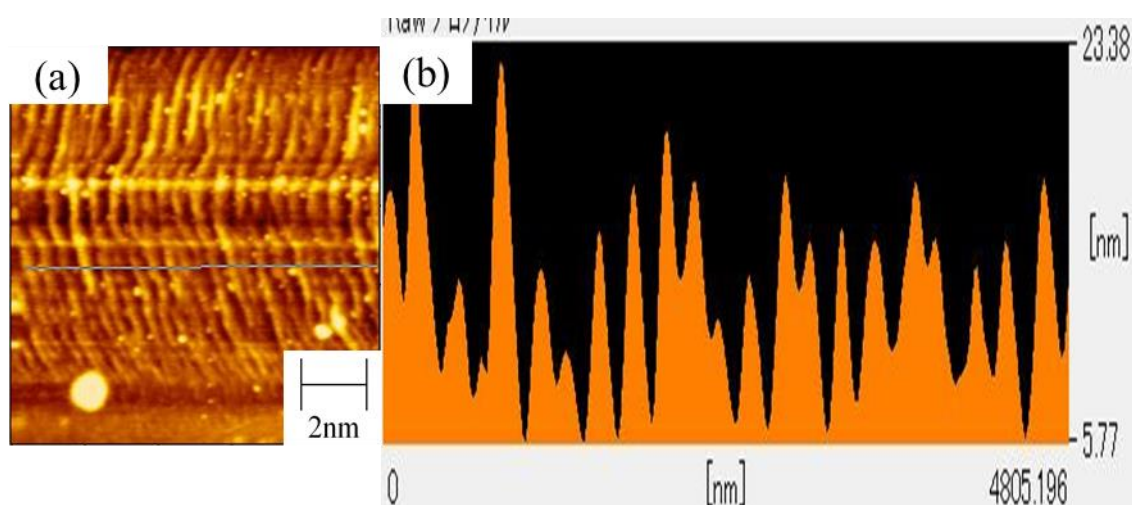


Figure 3-9 SPM image of SS processed film at processing load $T=0.3$ kg. (a) surface image, (b) cross-sectional profile at blue line on (a).

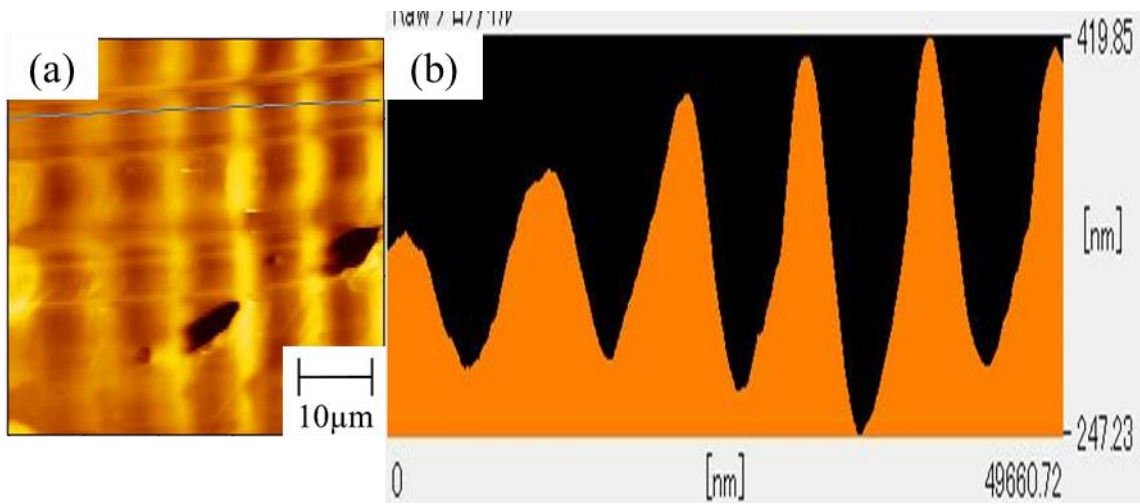


Figure 3-10 SPM image of SS processed film at processing load $T=0.5$ kg. (a) surface image, (b) cross-sectional profile at blue line on (a).

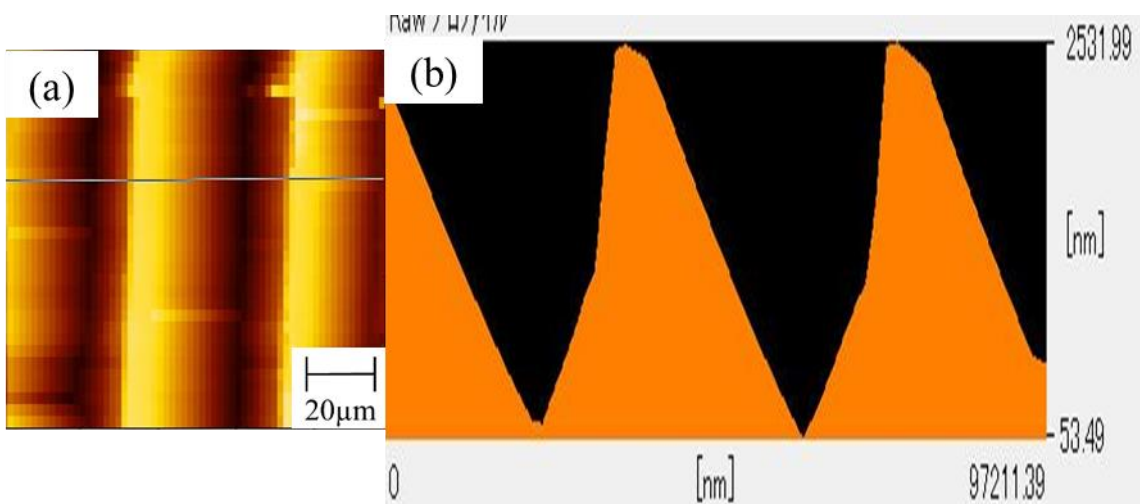


Figure 3-11 SPM image of SS processed film at processing load $T=1.1$ kg. (a) surface image, (b) cross-sectional profile at blue line on (a).

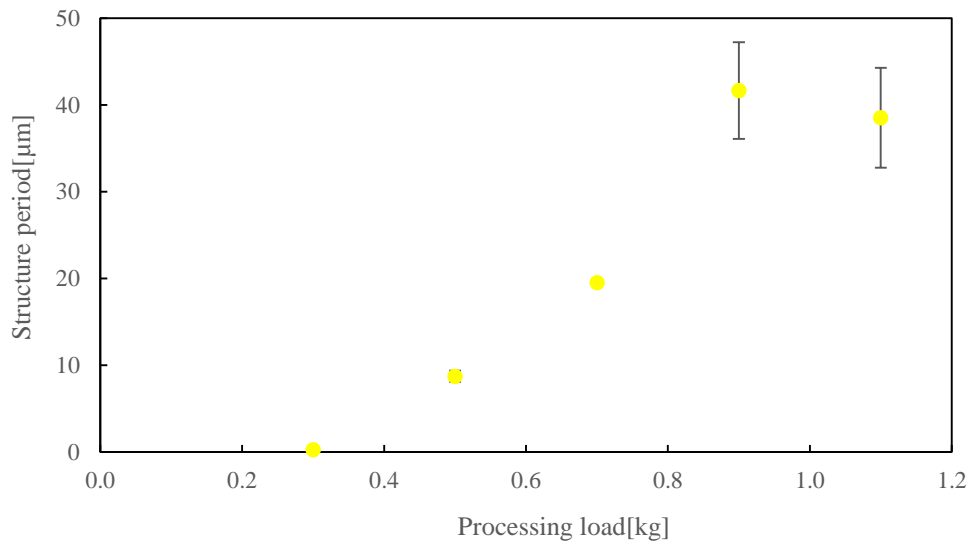


Figure 3-12 Processing load dependency of structure period of SS processed film.

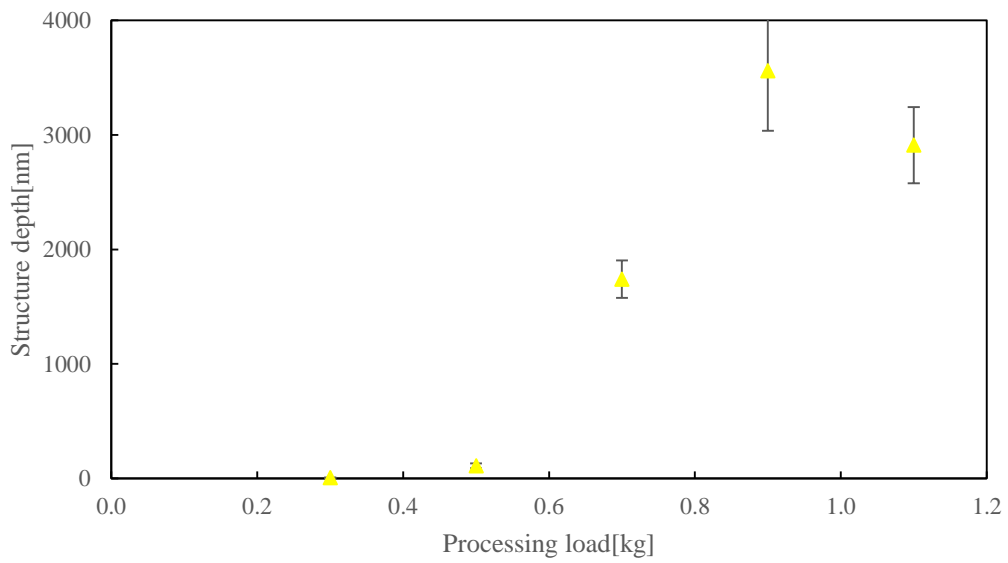


Figure 3-13 Processing load dependency of structure depth of SS processed film.

Table 3-1 Structure period and structure depth

Processing load[kg]	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1
Structure period[μm]	0.27	8.73	19.54	41.65	38.53
Standard deviation [μm]	0.11	0.65	0.16	5.56	5.75
Coefficient of variation	0.39	0.07	0.01	0.13	0.15
Structure depth[nm]	5.5	110	1740	3560	2910
Standard deviation [nm]	2.87	20.00	162.48	523.83	332.26
Coefficient of variation	0.52	0.18	0.09	0.15	0.11

3.2.2 加工角度の影響

前項において加工荷重の影響が明らかになったため、次に本項では加工角度 θ の影響を調べる。今回は加工角度以外のパラメータを固定した。加工条件は $T=0.4$ [kg], $v=10$ [mm/min], $L=1$ [mm]である。

Figure 3-14 から Figure3-16 は作製した SS 加工フィルムの SPM 像である。それぞれ加工角度 165 deg, 140 deg, 130 deg の場合の結果である。Figure3-17 は構造周期の加工角度依存性を示し、Figure3-18 は構造深さの加工角度依存性を示す。そして、Table 3-2 は両結果を数値でまとめたものである。まず Figure3-17 より、加工角度が小さくなるに従って、構造周期が長くなることが分かった。また、Figure3-18 より、加工角度が小さくなるに従い、構造深さが深くなることが分かった。Figure3-17 および Figure3-18 に示される傾向は、Figure3-12 および Figure3-13 に示された傾向をちょうど左右反転させたような形になっている。実際、加工角度が大きい場合には、加工荷重が小さい場合と同様に、フィルム表面にナノ周期構造が形成できている。これより、角度が鋭角になることと荷重が大きくなることは同質であると分かる。また、両者はともにフィルムと刃との接触力に関わると推測できる。そこで次項では、フィルムと刃との接触力 W が一定となるように荷重 T および加工角度 θ を設定して実験を行い、その時にフィルム表面に形成される微細周期構造の形状を調べる。

なお、本実験では 125 deg 以下での加工も試してみたが、その場合はフィルムがせん断破壊を起こしてしまった。

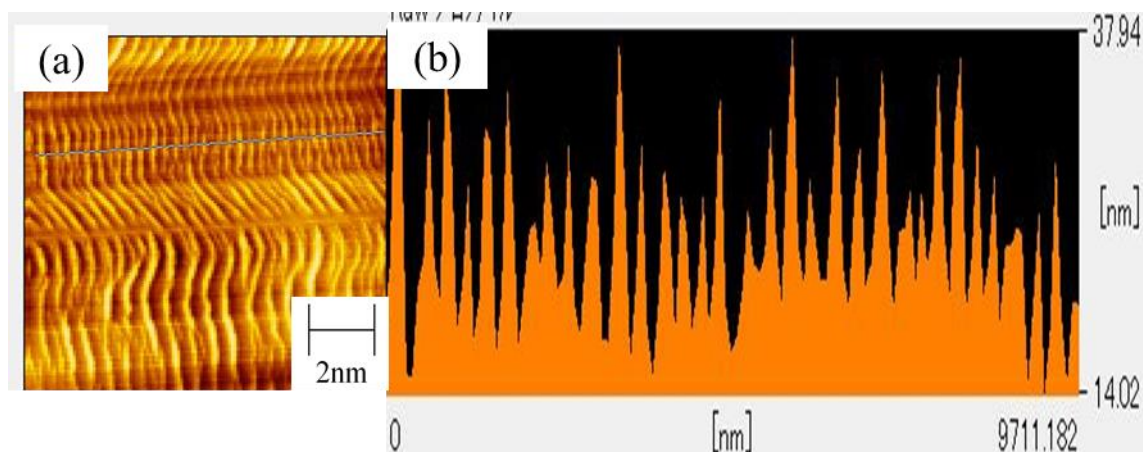


Figure 3-14 SPM image of SS processed film at processing angle $\theta=165$ deg. (a) surface image, (b) cross-sectional profile at blue line on (a).

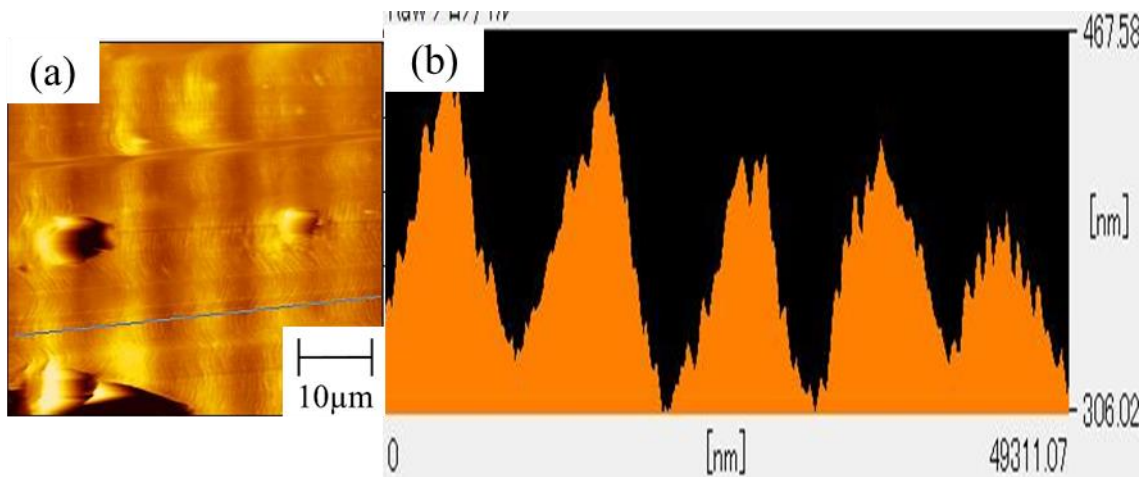


Figure 3-15 SPM image of SS processed film at processing angle $\theta=140$ deg. (a) surface image, (b) cross-sectional profile at blue line on (a).

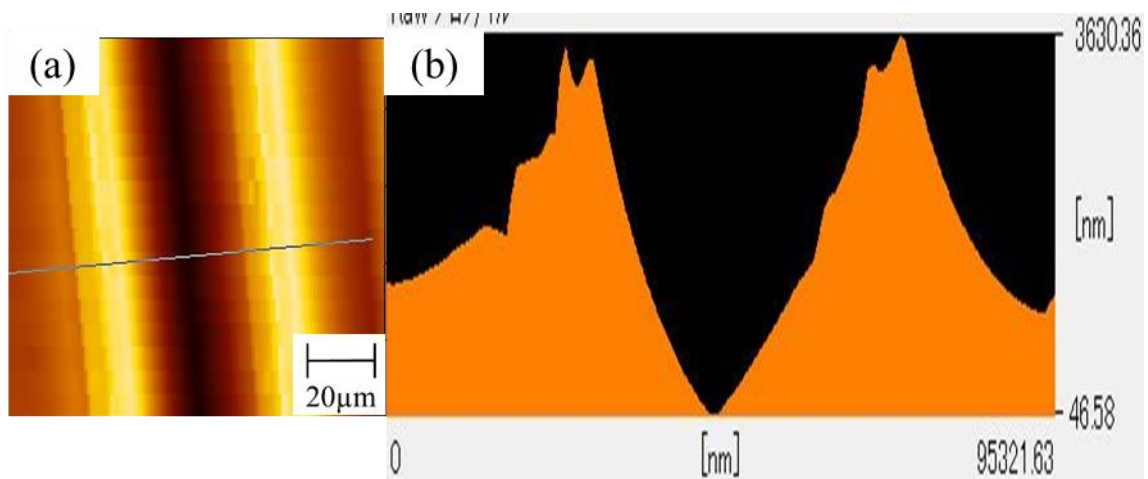


Figure 3-16 SPM image of SS processed film at processing angle $\theta=130$ deg. (a) surface image, (b) cross-sectional profile at blue line on (a).

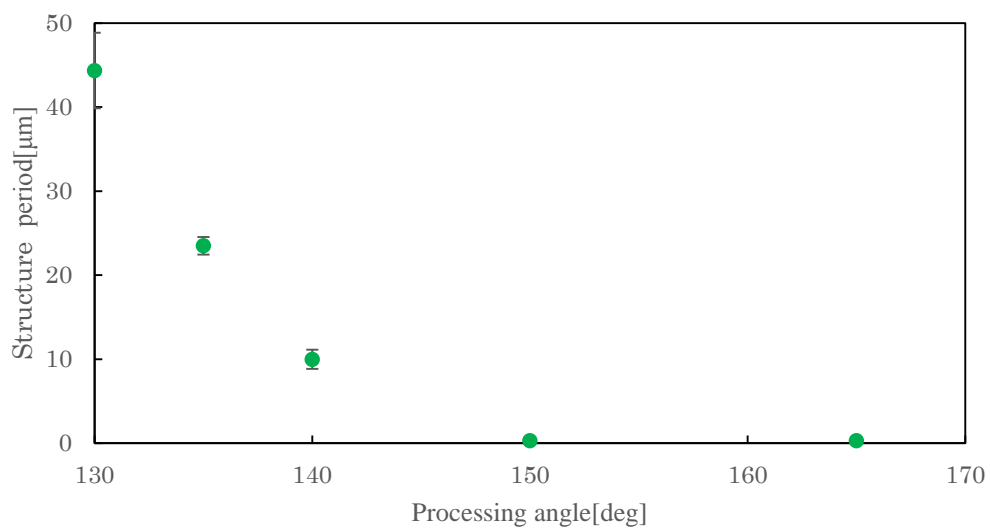


Figure 3-17 Processing angle dependency of structure period of SS processed film.

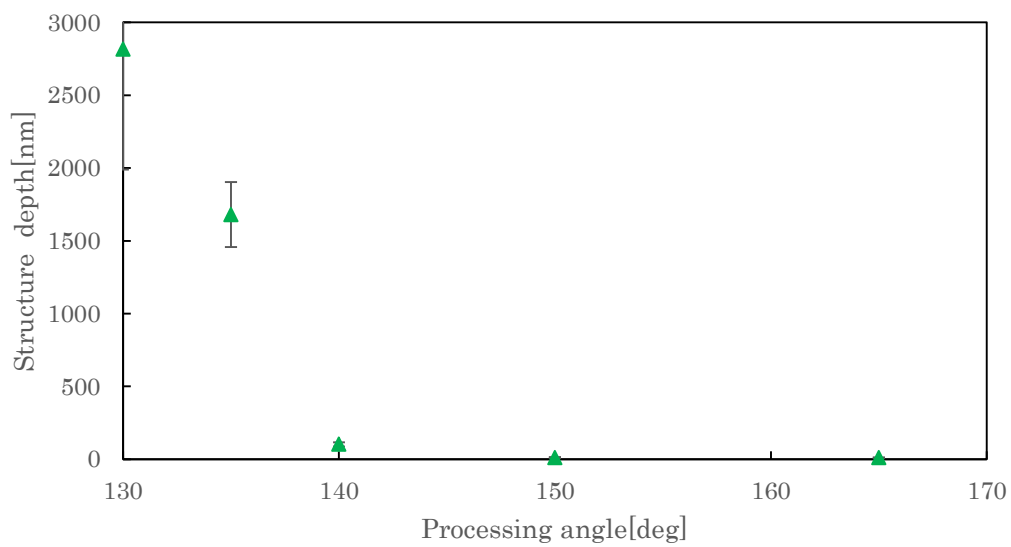


Figure 3-18 Processing angle dependency of structure depth of SS processed film.

Table 3-2 Structure period and structure depth

Processing angle [deg]	130	135	140	150	165
Structure period [μm]	44.34	23.50	10.00	0.33	0.32
Standard deviation [μm]	4.50	1.04	1.15	0.08	0.04
Coefficient of variation	0.10	0.04	0.11	0.25	0.13
Structure depth [nm]	2816.8	1680.0	102.0	10.4	9.8
Standard deviation [nm]	827.44	222.71	14.70	5.12	3.49
Coefficient of variation	0.29	0.13	0.14	0.49	0.36

3.2.3 接触力一定の場合

本項では、フィルムと刃との接触力 W が一定となるように荷重 T および加工角度 θ を設定して実験を行い、その時にフィルム表面に形成される微細周期構造の形状を調べる。接触力が同一であれば、刃がフィルムに刺込む量は、加工荷重や加工角度によらず一定になると予測されるため、フィルム表面に形成される微細周期構造の形状には影響がないと考えられるが、本項では実験結果をもってこの仮説の真偽を調べる。

まず、SS 加工装置は加工刃を中心に左右対称な構造になっているため、接触力 W は $W=2T\cos(\theta/2)$ で表される（式中、 T の単位はニュートン[N]）。また、本実験では前述のように、荷重 T を変化させていっても接触力 W が一定となるように加工角度 θ を設定し、加工速度および加工刃の自由端長さについては、それぞれ $v=10[\text{mm}/\text{min}]$ 、 $L=1[\text{mm}]$ で固定して実験を行った。

Figure 3-19 は接触力 $W=3.3\text{N}$ で作製した SS 加工フィルムの SPM 像であり、加工荷重 $T=0.398\text{ kg}$ 、加工角度 $\theta=130\text{ deg}$ である。Figure 3-20 は接触力 3.3N の場合の構造周期の加工角度依存性を示し、Figure 3-21 は同じく接触力 3.3N の場合の構造深さの加工角度依存性を示す。そして、Table 3-3 は両結果を数値でまとめたものである。

同様に、Figure 3-22 は接触力 $W=1.8\text{N}$ で作製した SS 加工フィルムの SPM 像であり、加工荷重 $T=0.332\text{ kg}$ 、加工角度 $\theta=146.1\text{ deg}$ である。Figure 3-24 は接触力 1.8N の場合の構造周期の加工角度依存性を示し、Figure 3-25 は同じく接触力 1.8N の場合の構造深さの加工角度依存性を示す。そして、Table 3-4 は両結果を数値でまとめたものである。

結果、接触力 3.3N の場合は構造周期がマイクロメートルのオーダーとなり、接触力 1.8N の場合は構造周期がナノメートルのオーダーとなった。また両者共に、接触力が同一であっても加工角度が小さくなるに従って、構造周期は長く、構造深さは深くなることが分かった。これは上記の仮説を覆す結果である。これに関しては、フィルムが刃を水平方向に押す力 $T\sin(\theta/2)$ が関係していると推測される。前述のように SS 加工機は刃を中心に左右対称であるため、この $T\sin(\theta/2)$ は刃の左右で対象となる。そのため、この力によって刃が左右どちらかに移動することはないが、刃は両側から押されるため、加工荷重 T が大きくなるほど、その自由度が低下すると考えられる。よって、同じ接触力でも $T\sin(\theta/2)$ が大きくなるに従い、構造周期は短くなったと推察される。

さて、ここまでフィルムに加わる力に対して注目してきた。そこで次項以降では、加工刃の自由端長さや加工速度の影響を調べていく。

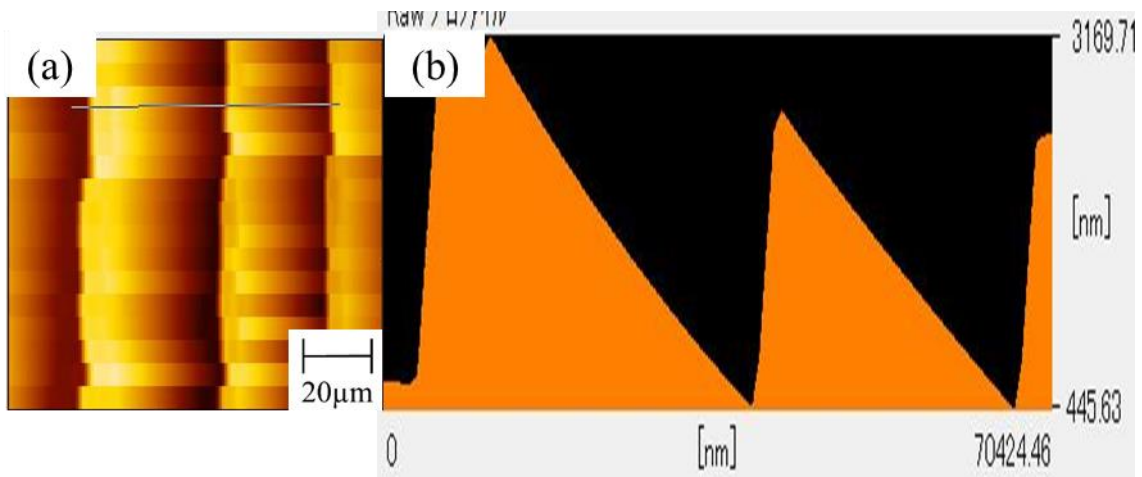


Figure 3-19 SPM image of SS processed film at contact force 3.3N (processing load $T=0.398$ kg, processing angle $\theta=130$ deg). (a) surface image, (b) cross-sectional profile at blue line on (a).

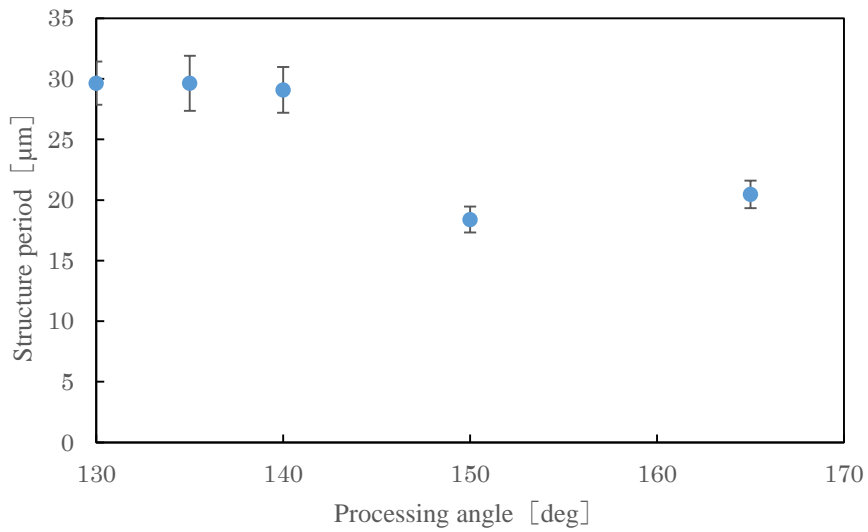


Figure 3-20 Processing angle dependency of structure period of SS processed film at contact force $W=3.3$ N.

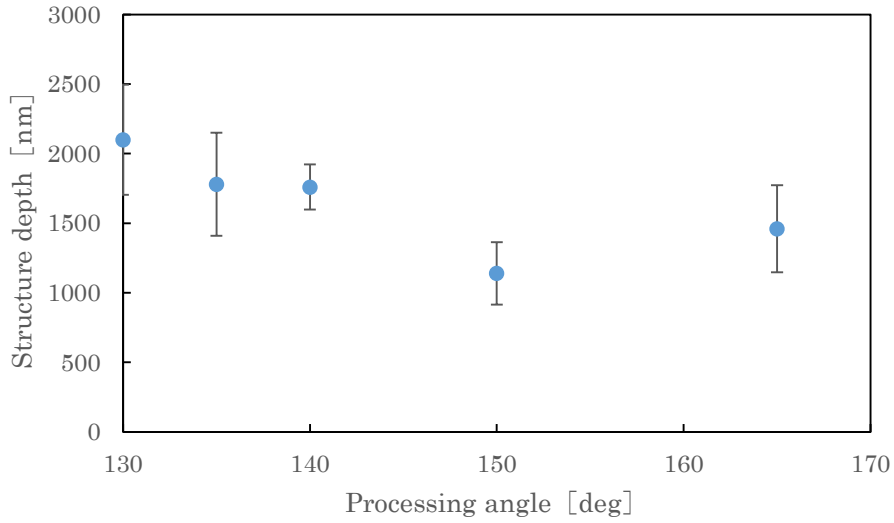


Figure 3-21 Processing angle dependency of structure depth of SS processed film at contact force $W=3.3\text{N}$.

Table 3-3 Structure period and structure depth ($W=3.3\text{N}$)

Processing load [kg]	0.398	0.440	0.492	0.651	1.290
Processing angle [deg]	130	135	140	150	165
$T\sin(\theta/2)$ [N]	3.53	3.98	4.53	6.16	12.53
Structure period [μm]	29.64	29.63	29.09	18.39	20.46
Standard deviation [μm]	1.78	2.28	1.89	1.07	1.14
Coefficient of variation	0.06	0.08	0.07	0.06	0.06
Structure depth [nm]	2100	1780	1760	1140	1460
Standard deviation [nm]	394.97	370.94	162.48	224.50	313.69
Coefficient of variation	0.19	0.21	0.09	0.20	0.21

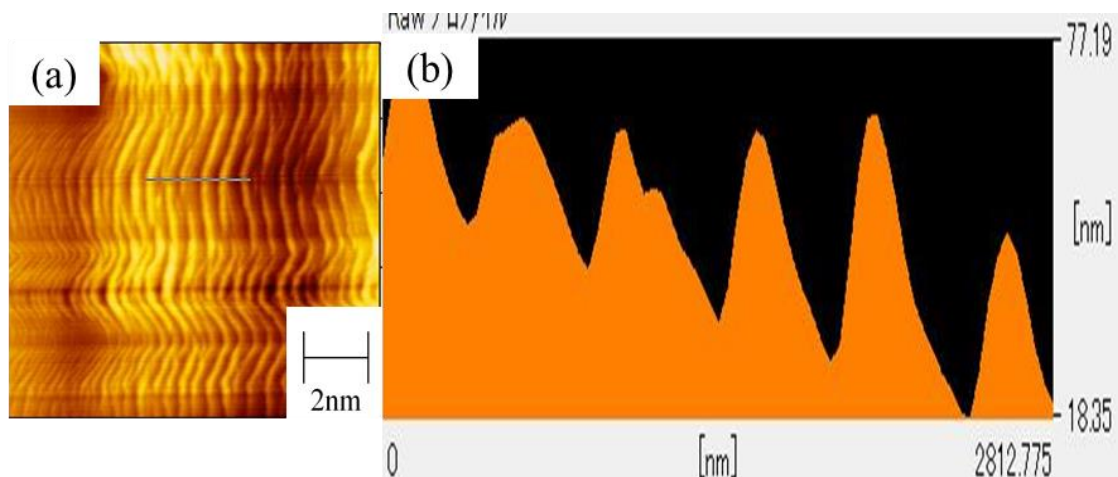


Figure 3-22 SPM image of SS processed film at contact force 1.8N (processing load $T=0.332$ kg, processing angle $\theta=146.1$ deg). (a) surface image, (b) cross-sectional profile at blue line on (a).

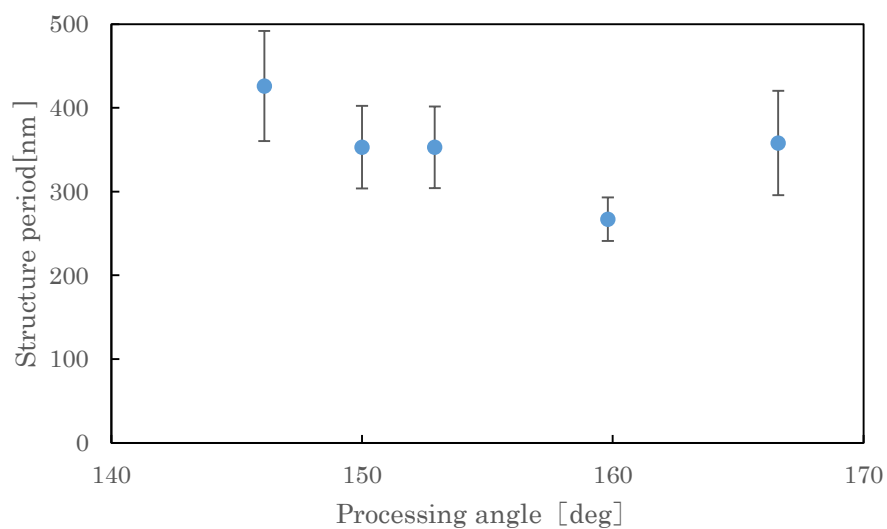


Figure 3-23 Processing angle dependency of structure period of SS processed film at contact force $W=1.8$ N.

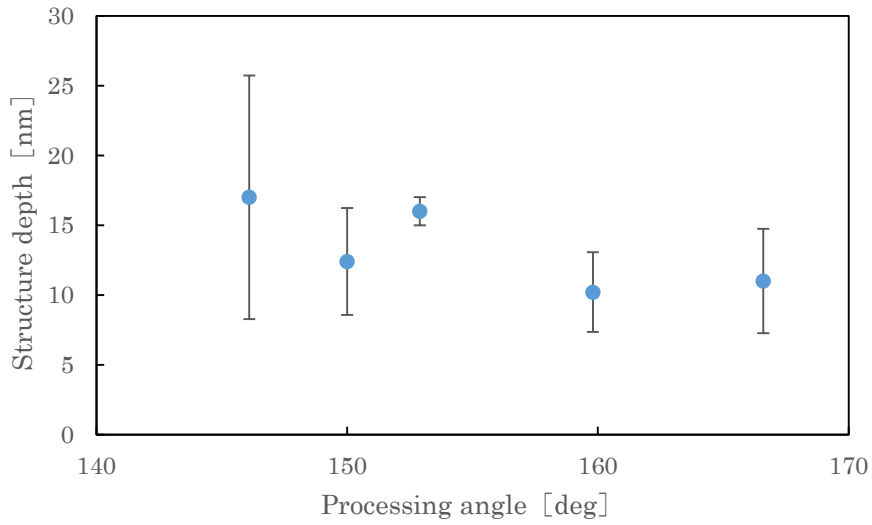


Figure 3-24 Processing angle dependency of structure depth of SS processed film at contact force $W=1.8\text{N}$.

Table 3-4 Structure period and structure depth ($W=1.8\text{N}$)

Processing load [kg]	0.332	0.363	0.400	0.535	0.804	1.630
Processing angle [deg]	146.1	150.0	152.9	159.8	166.6	173.4
$T\sin(\theta/2)$ [N]	3.11	3.44	3.81	5.16	7.83	15.95
Structure period [nm]	426.1	352.9	352.9	267.1	358.1	319.3
Standard deviation [nm]	65.8	49.3	48.7	26.1	62.4	56.3
Coefficient of variation	0.15	0.14	0.16	0.10	0.17	0.18
Structure depth [nm]	17.0	12.4	16.0	10.2	11.0	9.0
Standard deviation [nm]	8.72	3.83	1.00	2.86	3.74	3.41
Coefficient of variation	0.51	0.31	0.06	0.28	0.34	0.38

3.2.4 加工刃の自由端長さの影響

本項では、加工刃の自由端長さ L が SS 加工によって形成される微細周期構造の形状に与える影響を調べた。ここでは自由端長さ L 以外のパラメータ（加工条件）は固定した。加工条件は加工速度 $V=10\text{mm}/\text{min}$ ，加工荷重 $T=0.4\text{kg}$ ，加工角度 $\theta=152.9^\circ$ である。

Figure 3-25 から Figure3-27 は、作製した SS 加工フィルムの SPM 像であり、Figure3-25 は $L=0.1\text{mm}$ ，Figure3-26 は $L=1.0\text{mm}$ ，Figure3-27 は $L=3.0\text{mm}$ の場合の結果である。また、Table3-5 には各自由端長さ L での構造周期と構造深さの値がまとめられている。結果、 $L=0.1\text{mm}$ および $L=1\text{mm}$ では形状に大きな差異は見られなかったが、 $L=3\text{mm}$ の場合には、構造周期が長くなった。これは、加工刃の自由端長さが長くなるほど、加工刃のばね定数（剛性）が小さくなり、その結果として SS 現象の周期が短くなるためであると考えられる。つまり、構造周期を短くしたい場合には、加工刃の自由端長さ L を短くすべきであるが、本実験の結果からは $L=1\text{mm}$ 以下では、結果に差異が現れ難いことが分かった。

さて、本項において、加工刃の自由端長さ L の影響が明らかになったので、次項では、加工速度 V の影響を調べる。

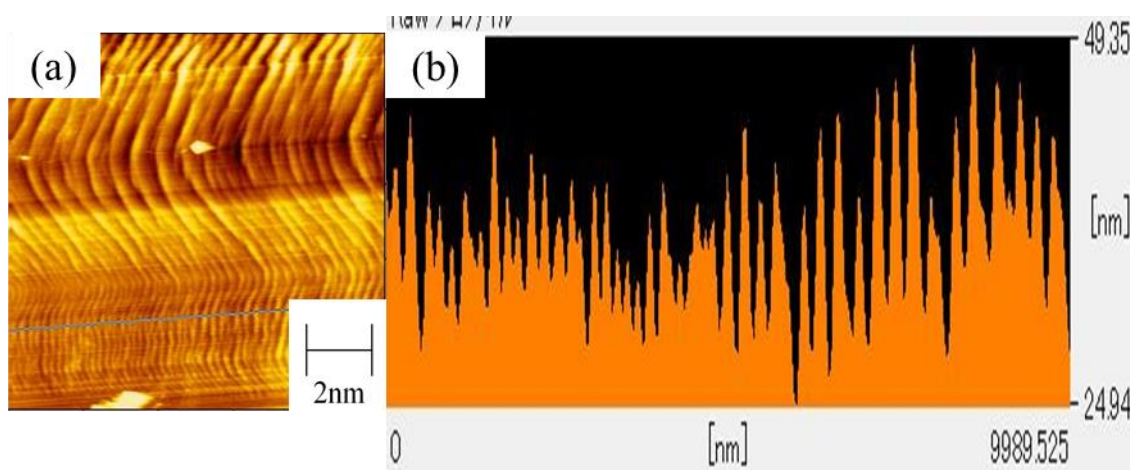


Figure 3-25 SPM image of SS processed film at free-edge length 0.1 mm. (a) surface image, (b) cross-sectional profile at blue line on (a).

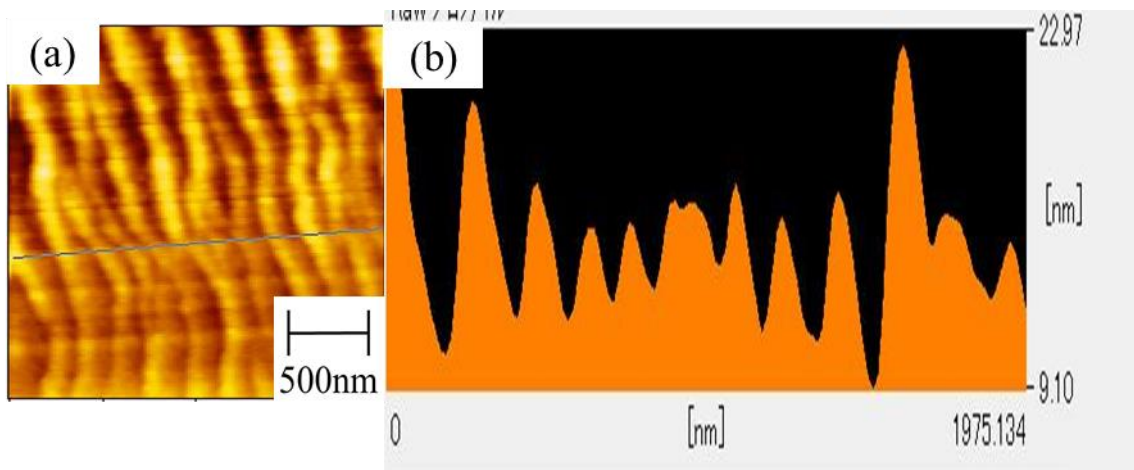


Figure 3-26 SPM image of SS processed film at free-edge length 1.0 mm. (a) surface image, (b) cross-sectional profile at blue line on (a)

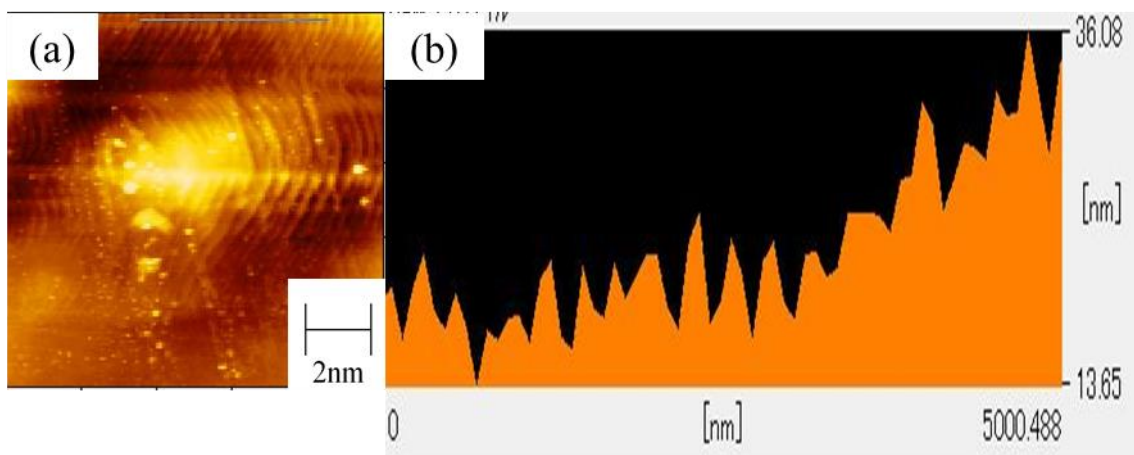


Figure 3-27 SPM image of SS processed film at free-edge length 3.0 mm. (a) surface image, (b) cross-sectional profile at blue line on (a)

Table 3-5 Structure period and structure depth

Free end length [mm]	0.1	1.0	3.0
Structure period [nm]	198.07	132.97	367.26
Standard deviation [nm]	26.73	11.88	76.27
Coefficient of variation	0.135	0.090	0.207
Structure depth [nm]	6.8	6.8	8.2
Standard deviation [nm]	1.09	2.05	1.83
Coefficient of variation	0.16	0.30	0.22

3.2.5 加工速度の影響

本項では、加工速度 V が SS 加工によって形成される微細周期構造の形状に与える影響を調べた。ここでは加工速度 V 以外のパラメータ（加工条件）は固定した。加工条件は、加工角度 $\theta=146.1^\circ$ 、加工荷重 $T=0.4\text{kg}$ 、自由端長さ $L=1\text{mm}$ である。

Figure 3-28 は加工速度 10 mm/min で作製した SS 加工フィルムの SPM 像である。Figure 3-29 は構造周期の加工速度依存性を示し、Figure 3-30 は構造深さの加工速度依存性を示す。そして、Table 3-6 は両結果を数値でまとめたものである。結果、本実験条件の範囲内では、加工速度が 30mm/min を超すと、表面に微細周期構造が形成されなくなった。また、加工速度が 25mm/min の場合、形成される構造はマイクロメートルオーダーとなり、加工速度が 20 mm/min 以下では、ナノメートルオーダーとなった。この時、加工速度が 20 mm/min 以下では、形成される微細周期構造の形状は、加工速度にほとんど影響を受けなかった。SS 現象では、その周期や振幅は速度に影響を受けるはずであるが、本実験で設定した加工条件程度では、その影響が現れにくかったと考えられる。

さて、ここまでで、各加工条件が SS 加工によって形成される微細周期構造の形状に与える影響を調べ、それらを明らかにしてきた。しかし、この SS 加工法を制御するためには、入力（加工条件）から出力（微細周期構造の形状）を直接的に予測できるようになる必要がある。そこで次節では、SS 現象の理論と本研究で得た実験結果を基に、入力から出力を予測することに挑戦する。

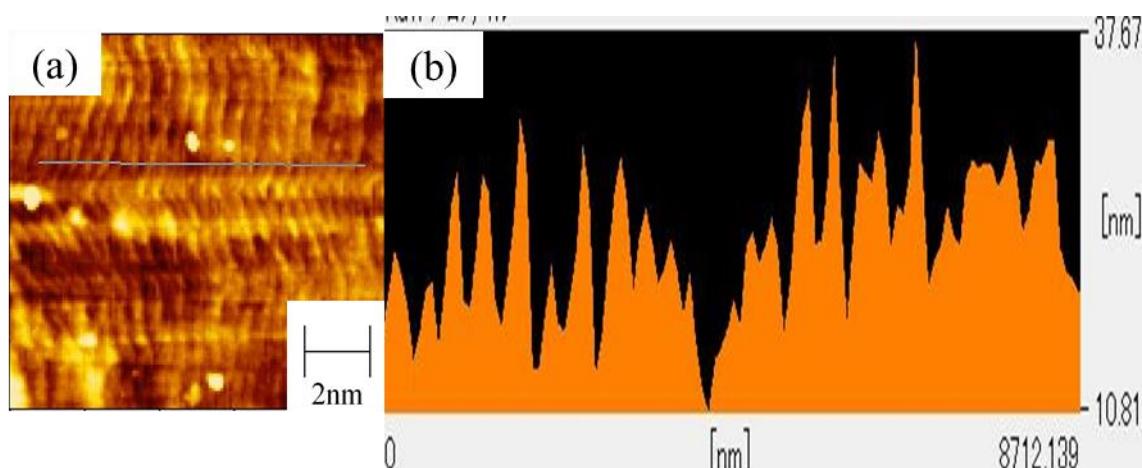


Figure 3-28 SPM image of SS processed film at processing speed 10 mm/min .
(a) surface image, (b) cross-sectional profile at blue line on (a).

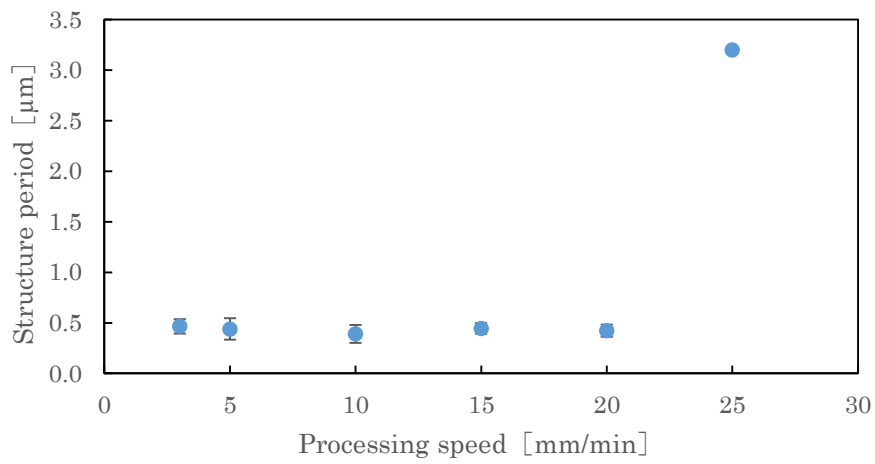


Figure 3-29 Processing speed dependency of structure period of SS processed film.

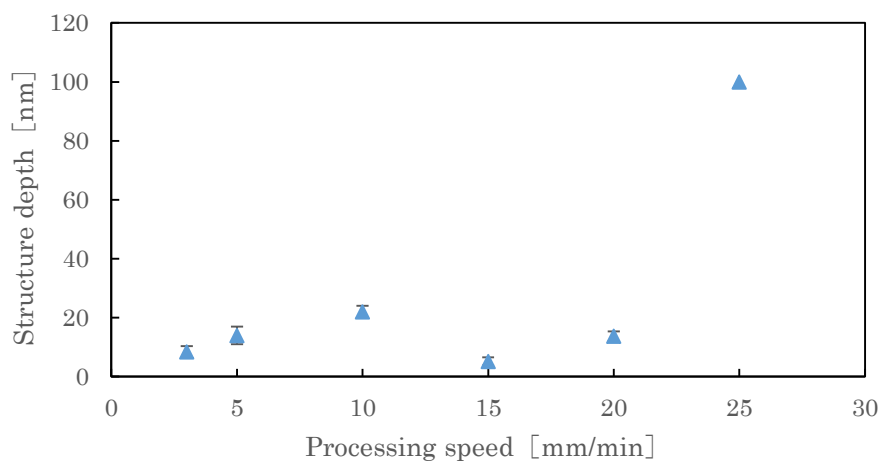


Figure 3-30 Processing speed dependency of structure depth of SS processed film.

Table3-6 Structure period and structure depth

Processing speed [mm/min]	3	5	10	15	20	25
Structure period [μm]	0.47	0.44	0.39	0.44	0.42	3.2
Standard deviation [μm]	0.07	0.11	0.09	0.05	0.06	-
Coefficient of variation	0.15	0.24	0.23	0.12	0.14	-
Structure depth [nm]	8.40	14.00	22.00	5.20	13.73	100
Standard deviation [nm]	1.98	3.02	2.03	1.31	1.66	-
Coefficient of variation	0.48	0.59	0.42	0.42	0.37	-

3.3 総合考察

中野ら³⁾によると SS 現象は以下の式のより表される。

$$\lambda = \frac{(\mu_s - \mu_k)W}{V\sqrt{mk}} \quad (3.1)$$

$$A_{SS} = V \cdot \sqrt{\frac{m(1+\lambda^2)}{k}} = \sqrt{\frac{m}{k}V^2 + \frac{(\mu_s - \mu_k)^2 W^2}{k^2}} \quad (3.2)$$

上式は剛性体およびクーロン摩擦則を前提としている。 λ はスティックスリップパラメータと呼ばれ、質量 m 、剛性 k 、垂直荷重 W 、駆動速度 V 、静摩擦係数 μ_s 、動摩擦係数 μ_k を集約した無次元量であり、 A_{SS} は振幅である。SS 加工においては、刃（剛性体とみなす）がフィルムとの接点で SS を起こし、1 周期で元の位置に戻るため、形成される構造周期は振幅の 2 倍である $2A_{SS}$ と同質である。

まず、式 3.2 に本実験の条件を代入し、算出される $2A_{SS}$ と本実験の結果（構造周期）を比較した。なお、ここでは 3.2.1 項の加工荷重依存性の実験結果および 3.2.2 項の加工角度依存性の実験結果を用いた。ただし、加工荷重 1.1kg のデータは、高い接触圧や摩擦熱によって構造がつぶれていると考えられるので、除外した。

Table3-7 および Table3-8 に、計算に用いたパラメータと計算結果および実験結果（構造周期）を示す。Table3-7 は加工荷重依存性を調べた際の実験条件および計算であり、Table3-8 は加工角度依存性を調べた場合の実験条件および計算である。また、Figure3-31 および Figure3-32 は上記の結果をグラフ化したもので、Figure3-31 は加工荷重依存性の場合、Figure3-32 は加工角度依存性の場合である。結果、計算結果は両実験結果と大きな差があることが分かる。この差が生まれる理由としては、SS 加工ではアブレーション⁶⁾（摩耗を伴う SS）が起こっていることが挙げられる。つまり、式 3.2 を用いて、SS 加工の結果を表すには、ここにアブレーションの寄与（アブレーションに関わる係数）を導入しなくてはならない。そこで次に、この係数に関して検討する。

Table 3-7 Analysis conditions and comparison between the calculated result and the experimental result. (Processing load dependence)

Load T [N]	2.94	4.9	6.86	8.82
(Load m [kg])	(0.3)	(0.5)	(0.7)	(0.9)
Angle θ [deg]	150	150	150	150
Contact force W [N]	1.52	2.54	3.55	4.57
$T\sin(\theta/2)$ [N]	2.84	4.73	6.63	8.52
Speed V [m/sec]	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017
(Speed V [mm/min])	(10)	(10)	(10)	(10)
Spring const. of blade k [N/m] @ free-edge length = 1mm	793492	793492	793492	793492
Coefficient of static friction μ_s	0.216	0.216	0.216	0.216
Coefficient of kinetic friction μ_k	0.158	0.158	0.158	0.158
$\Delta\mu (= \mu_s - \mu_k)$	0.058	0.058	0.058	0.058
SS parameter λ	1.09	1.40	1.66	1.88
Calculated SS period $2A_{ss}$ [nm]	302.50	455.53	606.22	755.97
Structure period [nm]	269	8730	19544	41653

Table 3-8 Analysis conditions and comparison between the calculated result and the experimental result. (Processing angle dependence)

Load T [N]	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92
(Load m [kg])	(0.4)	(0.4)	(0.4)	(0.4)	(0.4)
Angle θ [deg]	130	135	140	150	165
Contact force W [N]	3.31	3.00	2.68	2.03	1.02
$T\sin(\theta/2)$ [N]	3.55	3.62	3.68	3.79	3.89
Speed V [m/sec]	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017	0.00017
(Speed V [mm/min])	(10)	(10)	(10)	(10)	(10)
Spring const. of blade k [N/m] @ free-edge length = 1mm	793492	793492	793492	793492	793492
Coefficient of static friction μ_s	0.216	0.216	0.216	0.216	0.216
Coefficient of kinetic friction μ_k	0.158	0.158	0.158	0.158	0.158
$\Delta\mu (= \mu_s - \mu_k)$	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058
SS parameter λ	2.05	1.85	1.66	1.25	0.63
Calculated SS period $2A_{ss}$ [nm]	539.10	498.38	457.90	379.48	279.98
Structure period [nm]	44344	23502	9995	327	318

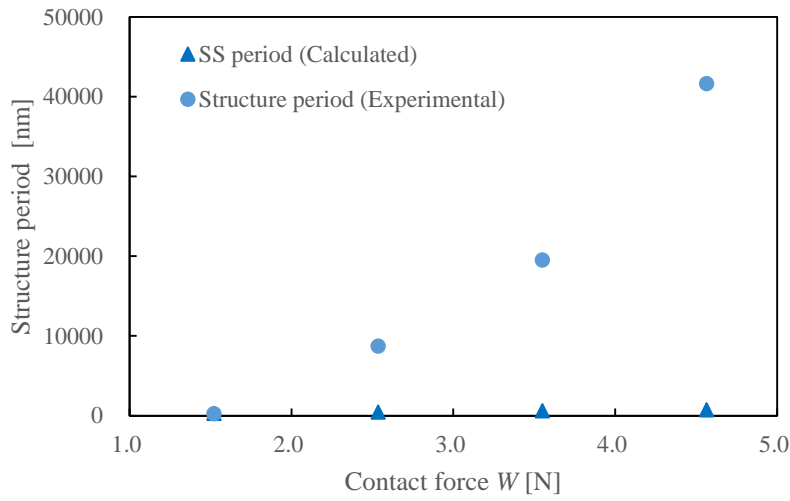


Figure 3-31 Comparison of structure period between the calculated result and the experimental result. (Processing load dependence)

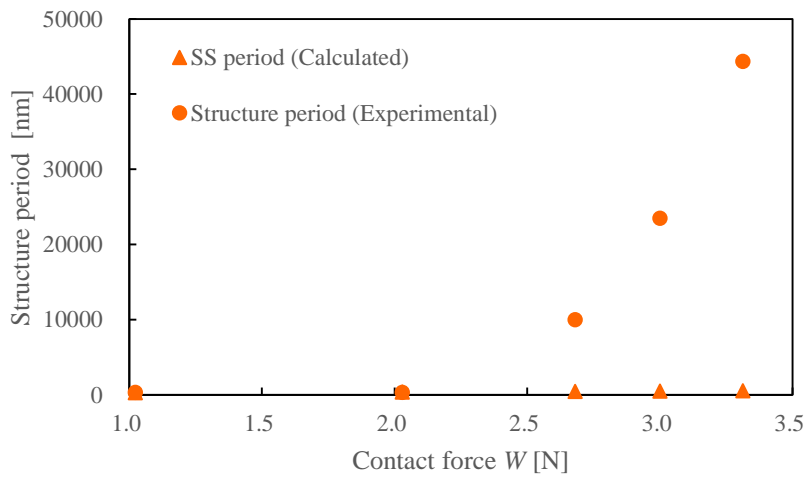


Figure 3-32 Comparison of structure period between the calculated result and the experimental result. (Processing angle dependence)

まず、式 3. 2 にアブレーションの寄与を導入した場合、構造周期の計算は以下の様になる。

$$L_{ss}=2A_{ss} \times b \quad (3.3)$$

上式で、 L_{ss} [nm]は構造周期の計算値、 $2A_{ss}$ [nm]は式 3.2 により計算される SS 振幅、 b はアブレーション係数である。ここでアブレーション係数 b は加工条件や材料物性の関数であると考えられる。

次に、このアブレーション係数について考える。まず、アブレーションは刃がフィルムに刺さりこむことによって起こり、この刺込みは刃とフィルムの接触力が大きくなるに従い大きくなる。そして、刺込み量が大きくなると、摩耗量(掘り起こし量)も多くなり、その結果、周期も長くなる。よって、接触力は正の数乗で構造周期に影響すると考えられる。一方、3.2.3 項で考察したように、加工刃はフィルムにより地面と水平な方向から押さえつけられている。この力は $T\sin(\theta/2)$ であり、これが大きくなるに従い刃の自由度が低下するため、形成される構造周期は短くなる。よって、刃を水平方向から押さえつける力 $T\sin(\theta/2)$ は負の数乗で構造周期に影響すると考えられる。そして、これらの点を考慮すると、アブレーション係数は以下のように表される。

$$b = a \times W^\alpha \times \{T\sin(\frac{\theta}{2})\}^\beta \quad (3.4)$$

上式で b はアブレーション係数、 W [N]は接触力、 $T\sin(\theta/2)$ [N]はフィルムが刃を水平方向から押さえつける力、 a 、 α 、 β は定数である。式 3.3 および式 3.4 より、予測式は最終的に以下のようになる。

$$L_{ss} = (2A_{ss}) \times a \times W^\alpha \times \{T\sin(\frac{\theta}{2})\}^\beta \quad (3.5)$$

なお、上記の考察に従い、 α は正の実数、 β は負の実数になると考え、ともに 0.5 の倍数とした。そして、式 3.5 による計算結果が実験結果とうまく合うように、 a 、 α 、 β のフィッティングを行った。Figure3-33 にその計算結果と実験結果の比較を示す。これより、計算結果は、加工荷重依存性、加工角度依存性の両結果に対して高い精度で一致することが分かった。フィッティングで決定された値は、それぞれ、 $a = 4.5$ 、 $\alpha = 4.5$ 、 $\beta = -2$ であったことより、SS 加工により形成される微細周期構造を予測する式は、最終的に以下の様になる。

$$\begin{aligned}
L_{SS} &= (2A_{SS}) \times 4.5 \times W^{4.5} \times \left\{ \text{Tan} \left(\frac{\theta}{2} \right) \right\}^{-2} & (3.6) \\
&= (2A_{SS}) \times \frac{18W^{2.5}}{\tan^2 \left(\frac{\theta}{2} \right)} \\
&= (2A_{SS}) \times \frac{18 \times \left\{ 2T \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \right\}^{2.5}}{\tan^2 \left(\frac{\theta}{2} \right)}
\end{aligned}$$

これより、SS加工により形成される微細周期構造に対し、接触力は2.5乗で影響することが分かった。なお、 a は加工条件以外の材料物性等の関数であると考えられる。

本研究の結果は、SS加工の精密制御につながる結果である。また、この結果が、アブレーション制御の一助となることが期待される。

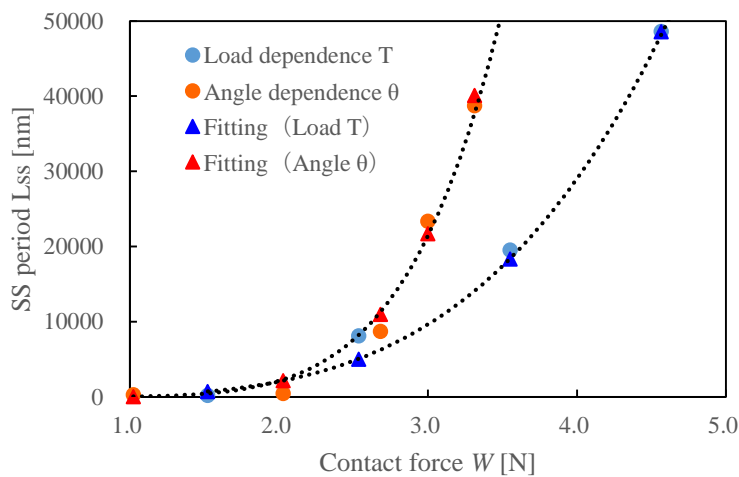


Figure 3-33 Comparison of structure period between the calculated result and the experimental result. (Processing load dependence and Processing angle dependence)

第四章 結論

本研究では、簡易で安価な新規の微細周期加工法を創出すべく、通常はその抑制こそが課題となる **SS** 現象の特徴に注目し、これを活用した微細周期構造形成法の開発を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 剃刀を表面に押し当てながらフィルムを巻き取っていただくだけの簡単な方法で、フィルム表面に微細周期構造を形成することに成功した。
- ② 加工荷重を小さく、加工角度を大きくすることで、**SS** 加工によってフィルム表面に形成される微細周期構造の構造周期が短くなることが明らかとなり、さらにナノ周期構造の形成に成功した。
- ③ フィルムと刃の接触力が一定であっても、加工荷重や加工角度によって、形成される微細周期構造の形状が異なることが明らかとなった。これは、加工荷重が大きくなる、もしくは加工角度が小さくなるに従い、フィルムが刃を押しさえつける力が増し、刃の自由度が低下するためである。
- ④ 刃の自由端長さが長くなるに従い、形成される微細周期構造の構造周期が長くなることが明らかとなった。これは、加工刃先端部分が片持ち梁状態になっているためである。つまり、自由端長さが長くなるに従って、刃のばね定数が小さくなり、刃が振動しやすくなったためである。
- ⑤ **SS** 現象では、その周期や振幅は速度に影響を受けるはずであるが、本実験範囲内では、加工速度は形成される微細周期構造の形状に影響を及ぼさないことが明らかとなった。
- ⑥ **SS** 現象の理論式にアブレーションに関わる係数を導入し、**SS** 加工により形成される微細周期構造の構造周期を予測する式を作成した。その結果、この式は実験結果と良い精度で一致を見せた。また、構造周期には接触力が 2.5 乗で影響することが明らかとなった。

以上、本研究で開発した **SS** 加工法により、フィルム表面にマイクロメートルからナノメートルオーダーの微細周期構造を形成できることが明らかとなった。今後、この制御や応用の研究が進み、**SS** 加工が工業界に展開していくことが期待される。

参考文献

- (1) 阿部信行, 加藤貴行 レーザー研究 Vol. 36 (2008) No. Supplement p. 96-97
- (2) 廣島洋 精密工学会誌 Vol. 76 (2010) No. 2 P 148-151
- (3) 中野健・田所千治・前川覚, 日本ゴム協会誌, 85 - 10 (2012) ,313
- (4) SKS81M - Special Alloy – Tool & Die Steels
<http://www.tool-die-steels.com/grades/Special-Alloy/45/845/SKS81M.html>
- (5) 株式会社エクセル 刃物用材料 (TE-2, SK4, SK5, RB-S, SUS420J2)
http://www.tokkin.co.jp/materials/high_performance/knives
- (6) 深堀美英 日本ゴム協会誌 Vol. 68 (1995) No. 3 P 156-165

謝辞

本研究を進めるにあたり終始懇切丁寧にご指導下さった、内藤圭史 助教，屋代如月 教授に心より感謝申し上げます。また，実験室および実験機器をお貸し下さった，武野明義 准教授，高橋紳矢 助教ならびに武野研究室の皆様，疲労試験機をお貸し下さった植松美彦 教授ならびに植松研究室の皆様心より感謝申し上げます。そして，本研究にあたり PET フィルムを御提供下さったフタムラ化学株式会社様に厚く御礼申し上げます。最後に，日常の議論を通じて多くの知識や示唆を下さった，屋代・内藤研究室の学友の皆様深く感謝致します。なお，本研究の一部は越山科学技術研究助成金を受けて実施しました。

第五章 付録

5.1 加工刃のばね定数（剛性） K の算出

3.3 節の式 3.2 から分かるように、SS 現象の振幅を算出するためには、ばね定数（剛性） K が必要である。本研究においては、加工刃がフィルムとの間で SS を起こすため、加工刃の K を算出する必要がある。そこで本節に、この導出方法を記す。なお、加工刃はホルダを介して SS 加工機に固定されているが、その先端は Figure5-1 に示すように片持ち梁状態となっている。なお、導出過程で使用する変数は、それぞれ以下の通りである。

b : 加工刃の幅[m]

h : 加工刃の固定端側の高さ[m]

x : 加工刃先端 ($x=0$) から固定端方向への距離[m]

$h(x)$: 加工刃先端の傾斜部分の高さ[m]

L : 加工刃の自由端部分の長さ[m]

l_1 : 加工刃先端の傾斜部分の長さ[m]

l_2 : 加工刃の固定端側の高さ一定部分の長さ[m]

E : 加工刃のヤング率[N/m²]

I : 加工刃の固定端側の高さ一定部分の断面二次モーメント[m⁴]

$I(x)$: 加工刃先端の傾斜部分の断面二次モーメント[m⁴]

P : 加工刃に加わる力[N]

M_x : 位置 x におけるモーメント[Nm]

θ : たわみ角[deg]

Y : たわみ[m]

K : ばね定数（剛性）[N/m]

C_1, C_2 : 積分定数

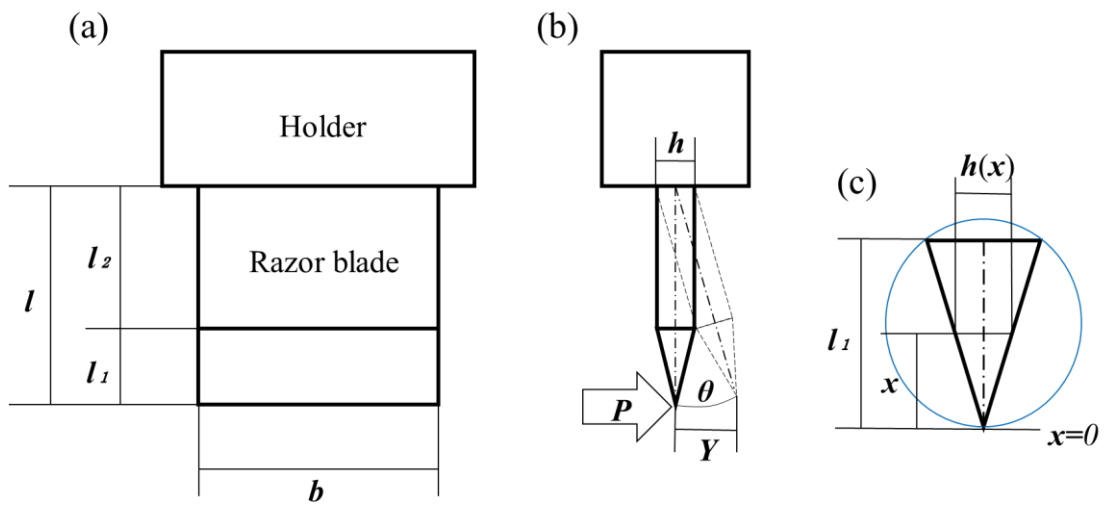


Figure 5-1 Schematic diagram of processing blade (a) Front view (b) Side view (c) Enlarged view of the blade edge of (b)

$0 \leq x \leq l_1$ のとき

$$h(x) = \frac{hx}{l_1}, \quad I(x) = \frac{bh(x)^3}{12} = \frac{bh^3x^3}{12} = I \frac{x^3}{l_1^3} \quad (5.1)$$

$l_1 \leq x \leq l$ のとき

$$h(x) = h \quad I = \frac{bh^3}{12} \quad (5.2)$$

x の位置でのモーメントは $M(x) = -P(x)$ であり,

たわみの式は以下のようになる.

$$\theta = - \int \frac{M_x}{EI_z} dx + C_1 \quad (5.3)$$

$$Y = - \iint \frac{M_x}{EI_z} dx dx + C_1 x + C_2 \quad (5.4)$$

$0 \leq x \leq l_1$ のとき, たわみの式は以下の式となる.

$$\begin{aligned} \theta &= - \int \frac{-Px l_1^3}{EI x^3} dx + C_1 = \frac{Pl_1^3}{EI} \int x^{-2} dx + C_1 \\ &= \frac{Pl_1^3}{EI} (-x^{-1}) + C_1 \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$Y = - \frac{Pl_1^3}{EI} \ln x + C_1 x + C_2 \quad (5.6)$$

$l_1 \leq x \leq l$ のとき, たわみの式は以下の式となる.

$$\theta = - \int \frac{-Px}{EI_z} dx + C_3 = \frac{P}{2EI} x^2 + C_3 \quad (5.7)$$

$$Y = - \frac{P}{6EI} x^3 + C_3 x + C_4 \quad (5.8)$$

$x=l$ のとき $\theta=0$ $Y=0$ となり,

$$C_3 = -\frac{P}{2EI}(x^2 - l^2)$$

$$C_4 = -\frac{Pl^3}{6EI} + \frac{Pl^3}{2EI} = \frac{Pl^3}{3EI}$$

これらを(5.7), (5.8)に代入し $l_1 \leq x \leq l$ の θ , Y を求められる.

$$\theta = \frac{P}{2EI}(x^2 - l^2) \quad (5.9)$$

$$Y = -\frac{P}{6EI}(x^3 - 3l^2x + 2l^3) \quad (5.10)$$

境界条件 $x=l_1$ のとき, 式(5.5)と式(5.9), 式(5.6)と式(5.10)がイコールとなり

$$\frac{P}{2EI}(l_1^2 - l^2) = \frac{Pl_1^3}{EI}(-l_1^{-1}) + C_1$$

$$-\frac{P}{6EI}(x^3 - 3l^2x + 2l^3) = -\frac{Pl_1^3}{EI} \ln x + C_1x + C_2$$

以上二式より C_1 , C_2 を求め, 以下の式となる.

$$C_1 = \frac{P}{2EI}(3l_1^2 - l^2) \quad (5.11)$$

$$C_2 = \frac{Pl_1^3}{EI} \ln l_1 - \frac{Pl_1}{2EI}(3l_1^2 - l^2) + \frac{P}{6EI}(l_1^3 - 3l^2l_1 + 2l^3) \quad (5.12)$$

この積分係数を(5.5), (5.6)に代入し, $0 \leq x \leq l_1$ の θ , Y 求められる.

$$\theta = \frac{P}{2EI}(x^2 - l^2 - \frac{2l_1^3}{x}) \quad (5.13)$$

$$Y = -\frac{Pl_1^3}{EI} \ln x + \frac{Px}{2EI}(3l_1^2 - l^2)$$

$$+ \frac{Pl_1^3}{EI} \ln l_1 - \frac{Pl_1}{2EI}(3l_1^2 - l^2) + \frac{P}{6EI}(l_1^3 - 3l^2l_1 + 2l^3) \quad (5.14)$$

また、ばね定数は以下の式によって求められる。

$$K = \frac{P}{Y}$$

よって、最終的にばね定数は以下の様に表される。

$$K = \frac{6EI}{6l_1^3 \ln x + 3(3l_1^2 - l^2)x + 6l_1^3 \ln l_1 - 3l_1(3l_1^2 - l^2) + (l_1^3 - 3l^2 l_1 + 2l^3)}$$

上式に各値をそれぞれ代入することによって K を算出することができる。但し、本来、刃の先端とは $x=0$ であるが、この式ではその性質上 $x=0$ では K は求められない。そこで、本研究では $x=10^{-10}$ とし、ばね定数を算出した。この値は PET フィルム表面に存在するナノサイズの凹凸よりも 1 桁小さい値である。

以下に、ばね定数算出のために用いた各パラメータの値と、そこから算出されたばね定数を記す。

$$b=0.02\text{m}$$

$$h=245 \times 10^{-6}\text{m}$$

$$x=10^{-10}\text{m}$$

$$L=1.0 \times 10^{-3}\text{m}$$

$$l_1=930 \times 10^{-6}\text{m}$$

$$l_2=70 \times 10^{-6}\text{m}$$

$$E=202 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$K=793492 \text{ N/m}$$

5.2 引張試験

5.2.1 ポリエチレンテレフタレート(PET)フィルム

本実験で使用したPETフィルム(フタムラ化学製, FE2000)のMD方向(Machine direction:流れ方向)とTD方向(Transverse direction:流れに垂直方向)のそれぞれの力学特性を引張試験により調べた。試験には小型卓上試験機(島津製作所製, EZ Test EZ-L)を用い, ロードセルは最大容量 1kN のものを使用した。試験にあたっては, まずPETフィルムを幅 10mm, 長さ 80mm の短冊状に切り出す。次に切り出した試料両端の表裏面それぞれに, 10mm 角の厚紙を両面テープで貼りつける。続いてこの厚紙部分を試験機のつかみ具でつかみ, 試料を試験機に取り付ける。そして 10mm/min のストロークでPETフィルムが破断するまで引張り, 得られた荷重-変位(応力-ひずみ)線図より, ヤング率 E と破断応力 σ_b , 破断ひずみ ε_b を求めた。Table 5-1 および Table 5-2 に MD 方向および TD 方向の結果をそれぞれ示し, Figure 5-2 に応力-ひずみ線図を示す。

Table 5-1 Mechanical properties of MD of the PET film (FE2000)

Young's modulus	Breaking stress	Breaking strain
E	σ_b	ε_b
[GPa]	[MPa]	[%]
3.98	172	229

Table 5-2 Mechanical properties of TD of the PET film (FE2000)

Young's modulus	Breaking stress	Breaking strain
E	σ_b	ε_b
[GPa]	[MPa]	[%]
4.21	203	209

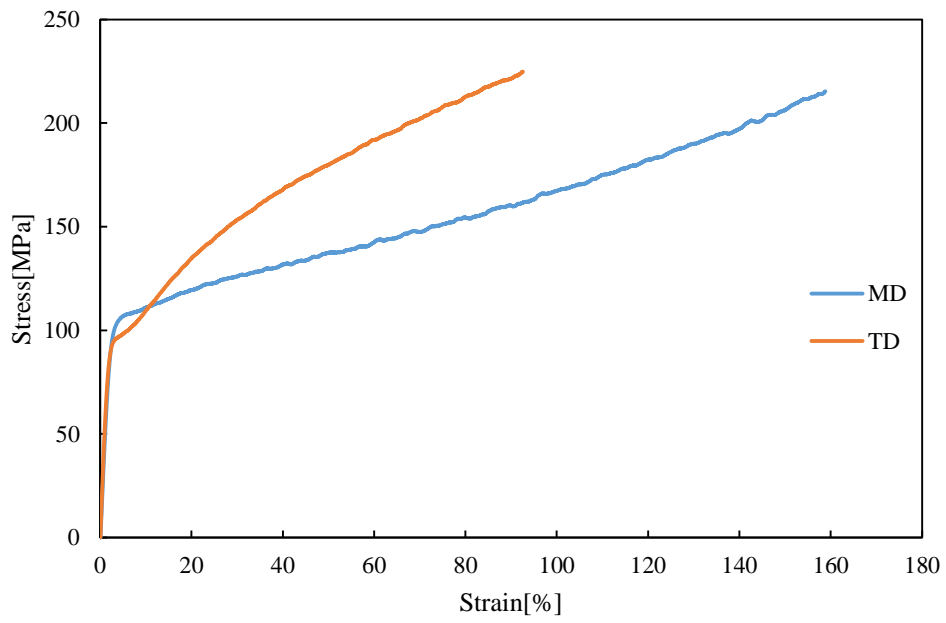


Figure 5-2 Stress-Strain curve of PET film (FE2000).

5.2.2 加工刃(炭素鋼 TE-2)

本実験で使用した剃刀(フェザー製, FAS-10)の材料である, TE-2 のヤング率を引張試験によって求めた. 厚さ約 0.60mm と 0.63mm の試料を用意し, それらを幅 10mm, 長さ 100mm の短冊状に切り出す. 今回の試験には油圧サーボ式強度試験機 SERVOPULSER(島津製作所製 MODEL EHF-LV020K1-020)を用いた. まず粗い紙やすりで, 短冊状に切った試料表面を軽く削る. その後, 削り終えた試料の中心部にひずみゲージを取り付ける. 次に, アセトンを染み込ませた布で試料の両端を脱脂する. その後, 試料の両端を試験機のチャックで固定する. 固定した試料を一定の速度で引張ることにより, 試料が破断するまでのひずみと試験力を測定し, その結果から加工刃のヤング率を求める. Table 5-3 には本実験で導出したヤング率を示し, Figure 5-3 には応力-ひずみ曲線を示す.

Table 5-3 Young's modulus of TE-2

Sample No.	Young's modulus[GPa]
1	210.8
2	204.8
3	194.7
4	200.6
5	207.8
6	199.7
7	197.8
8	201.6
Average	202.2
SD	5.0
CV	0.02

SD and CV are standard deviation and coefficient of variation,

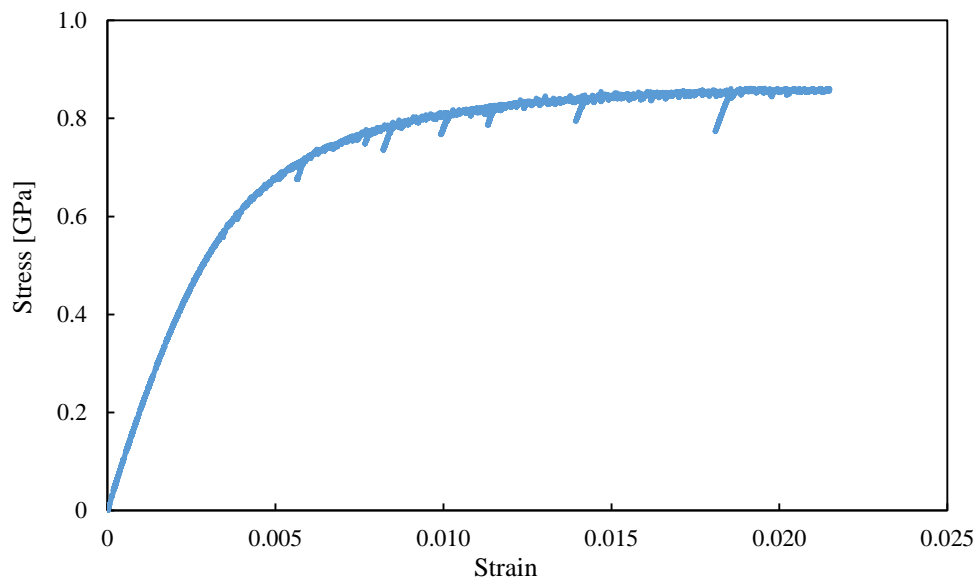


Figure 5-3 Stress-strain curve of TE-2

5.3 摩擦係数測定(静止摩擦係数及び動摩擦係数)

JIS 規格の JIS K 7125 に基づき、PET フィルム (FE2000) と炭素鋼 TE-2 の間の摩擦係数を測定した。まず自作した摩擦係数測定治具を小型卓上試験機(島津製作所製, EZ Test EZ-L)に連結させる。その様子を Figure 5-4 に示す。次に治具の台部分全体を PET フィルムで覆い、四辺をガムテープで固定する。そして、その PET フィルム上に TE-2 板を設置し、その上に OMIL 分銅 200g (A&D 製, AD1601-200) を設置する。なお、TE-2 板は、台面上の PET フィルムとの接触面積が 40mm^2 となるように、 $80\text{mm}\times 50\text{mm}$ の長方形のサイズに切り出したものを使用した。そして、伸びにくく柔軟で丈夫なワイヤー(ニッサチェーン製, Y-501)で試料と試験機のつかみ部分と繋ぎ合わせた。試料とワイヤーを取りつける際には別治具を用いており、ワイヤー治具と試料は両面テープで接着される。Fig. 26 にその様子を示す。そして、小型卓上試験機を起動し、試験機のつかみ部分を引き上げていくことにより、PET フィルム表面で TE-2 板が滑り始める。そのとき得られる摩擦力-変位線図より、動摩擦係数及び静摩擦係数を算出した。Figure 5-6 には摩擦力-変位線図を示し、測定した摩擦力と算出した摩擦係数をそれぞれ Table 5-4 と Table 5-5 に示す。



Figure 5-4 A jig for the measurement of coefficient of friction.

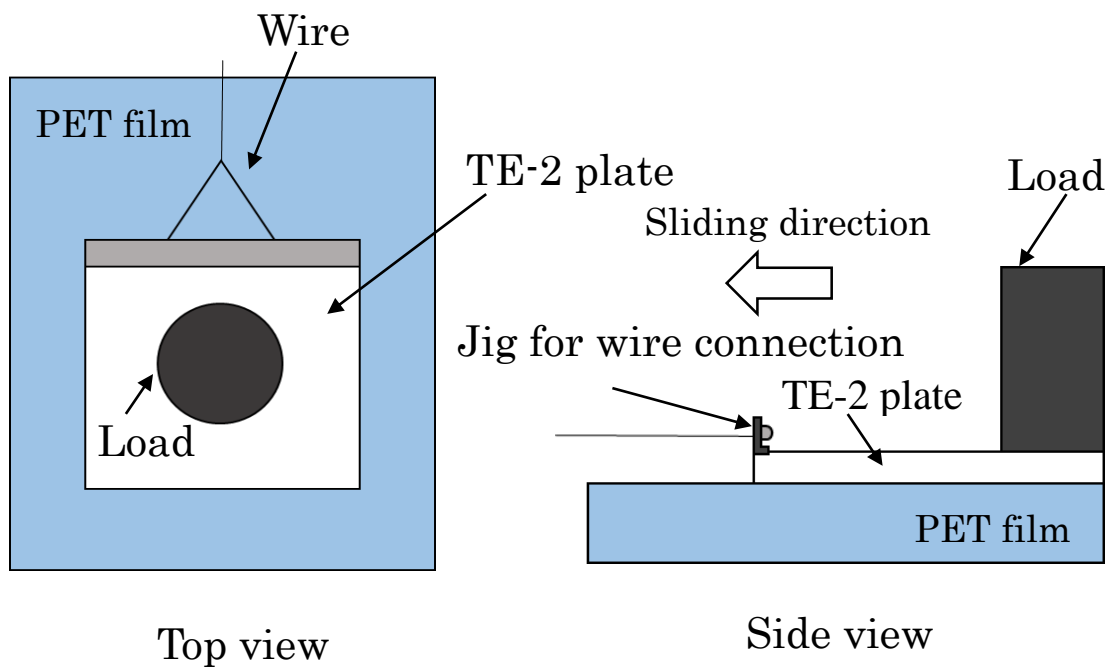


Figure 5-5 Schematic diagram of installation of sample for measurement of coefficient of friction.

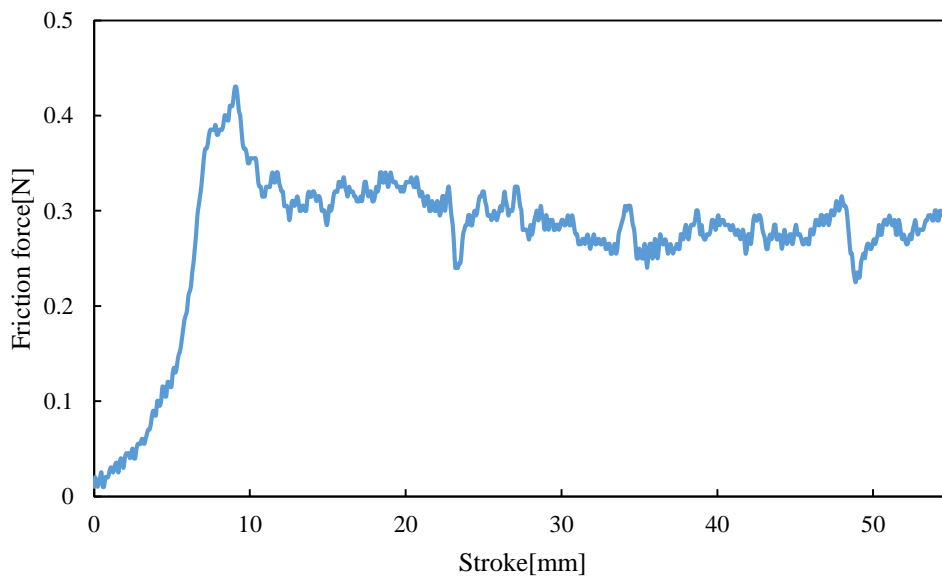


Figure 5-6 Force-Stroke curve at measurement of coefficient of friction.

Table 5-4 Friction force between TE-2 plate and PET film (FE2000).

	<i>t</i> =0.60mm			<i>t</i> =0.63mm		
	Friction force	SD	CV	Friction force	SD	CV
	(N)	(N)		(N)	(N)	
F_{max}	0.43	0.03	0.06	0.51	0.05	0.09
F_{ave}	0.32	0.02	0.07	0.36	0.05	0.14

F_{max} , F_{ave} , SD and CV are maximum friction force, average of kinetic friction force, standard deviation and coefficient of variation, respectively.

Table 5-5 Coefficient of friction between TE-2 plate and PET film (FE2000).

	<i>t</i> =0.60mm			<i>t</i> =0.63mm		
	Coefficient of friction	SD	CV	Coefficient of friction	SD	CV
μ_s	0.20	0.01	0.06	0.23	0.02	0.09
μ_k	0.15	0.01	0.07	0.17	0.02	0.14

μ_s , μ_k , SD and CV are coefficient of static friction, coefficient of kinetic friction, standard deviation and coefficient of variation, respectively.

5.4 密度測定(アルキメデス法)

一般的に PET の密度は約 1.4g/cm^3 であるが、試料によって多少の差があるため、ここではアルキメデス法により本研究で用いた PET フィルムの密度を実測した。厚さ $37\mu\text{m}$ の試料を $3\times 3\text{cm}^2$ のサイズに切り取り、測定を行う。試験には電子天秤(メトラー・トレド製, AT-261 Delta Range)と密度測定キット(メトラー・トレド製, AT 天秤用 2110485)を用いた。

アルキメデス法から PET フィルムの密度測定を行う。アルキメデス法は液体中の固体が、同体積の重力と同じだけ浮力を受けることを用いた測定である。本実験では置換液に超純水を用いた。まず大気中の試料の質量を測定した後に、水中での質量 M を測定する。この二つの質量から以下のようにして密度 ρ を算出する。

$$\rho = \frac{m}{m - M}(\rho_0 - \rho_L) + \rho_L \quad (5.15)$$

(M : 水中の質量 ρ_0 : 水の密度 ρ_L : 大気の密度)

Table 5-6 に測定した結果を示す。結果より試料の密度は $1.37\text{ (g/cm}^3\text{)}$ であった。

Table 5-6 Density of PET film (FE2000) by the Archimedes' method.

Density	SD	CV
ρ		
[g/cm ³]	[(g/cm ³)]	
1.37	0.08	0.06

SD and CV are standard deviation and coefficient of variation, respectively