

令和元年度

修士学位論文

スティックスリップを活用した微細加工における加工メカニズムの検討

岐阜大学大学院自然科学技術研究科

物質・ものづくり工学専攻

設計生産領域

松井 拓也

目次

第1章 緒論.....	4
1.1 研究背景・動機・目的	4
1.2 微細周期構造と微細加工.....	5
1.3 スティックスリップ現象.....	6
第2章 実験.....	7
2.1 スティックスリップ加工.....	7
2.1.1 工具.....	7
2.1.2 試料.....	8
2.1.3 実験装置と実験方法.....	9
2.1.4 加工条件.....	11
2.2 見かけの摩擦係数の測定.....	12
2.3 その場観察.....	15
2.4 フィルムの観察.....	16
2.4.1 光学顕微鏡を用いた観察.....	16
2.4.2 走査型プローブ顕微鏡（SPM）を用いた観察.....	17
2.4.3 走査型電子顕微鏡（SEM）を用いた観察.....	18
第3章 実験結果.....	21
3.1 微細周期構造の形態.....	21
3.1.1 階層構造.....	21
3.1.2 サブミリ周期構造.....	23
3.1.3 マイクロ周期構造.....	26
3.1.4 サブマイクロ周期構造.....	32
3.2 フィルムにかかる荷重.....	37
3.3 その場観察の結果.....	48
3.3.1 刃の運動.....	48
3.3.2 フィルムの運動.....	54
第4章 考察.....	59
4.1 サブミリ周期構造の形成メカニズム.....	59
4.1.1 SS加工モデルの提案と評価.....	59
4.1.2 刃の刺さり込みの影響の検討.....	69
4.2 マイクロ周期構造の形成メカニズム.....	79
第5章 結論.....	87
参考文献.....	88
謝辞.....	89

第6章 付録.....	90
-------------	----

第1章 緒論

1.1 研究背景・動機・目的

近年、材料表面にマイクロナノメートルレベルの周期構造（微細周期構造）を形成することで、その材料に様々な特性を付与できることが明らかとなり、微細周期構造への関心が高まっている。現在、この微細周期構造の形成方法としては、高精度な精密加工が可能であることからレーザー加工が主流となっているが、設備コストが高いことや適用材料が限られること、加工時間が長いことなどがデメリットとなっている。これに対し、本研究室ではスティックスリップ（SS）現象を利用して、安価かつ適用範囲の広い独自の加工法（SS加工法）を開発し¹⁾、その制御と応用に関する研究を精力的に実施してきた。具体的には、SS加工によって主に高分子材料を対象に微細周期構造の形成を行い、その構造がサブミクロンから数十ミクロンオーダーの波状（鋸刃状）の周期構造であることを解明してきた。但し、筆者らの近年の研究により、この周期構造が階層構造になっている可能性が新たに生じてきた。また、本研究室ではSS加工により形成される微細周期構造の周期（構造周期）予測に関しても取り組んできたが、現状では予測は経験的なものに留まってしまっており、これを基にした制御は大まかなものとなってしまっている。この原因は当然ながら、SS加工のメカニズムに不明な点が多いためである。例えば、上記の経験式は加工刃の振動を前提としているが、その真偽に関しては未だ確認できていない。近年の研究により、振動は加工刃だけでなくフィルムにも起こっている可能性が出てきた。さらに、SS加工では加工刃が試料に刺さり込んだ状態で振動が生じているため、それが加工に対して影響を与えていることは間違いないが、これに関しても、未だ定量評価に至っていない。

そこで、本研究ではSS加工時の階層構造出現の有無、振動源、加工刃の刺さり込みによる抵抗増加の影響を解明する。そのうえで、これらの結果を基に、SS加工における構造形成メカニズムの予測を詳細化させ、その形成メカニズムに基に、より精度の高い周期予測を試みる。本研究が成功すれば、その成果はSS加工の制御の精密化に大きく貢献でき、SSを用いた加工の応用可能性はさらに高まると考えられる。

1.2 微細周期構造と微細加工

材料に光学特性²⁾、濡れ性³⁾、摩擦特性^{4), 5)}などの機能を付与する場合、従来では、材料に対して化学的な処理を施したり、材料の組成そのものを変えたりすることが一般的であった。ところが、近年の研究で材料表面に微細周期構造を形成することで、これらの機能を材料に発現させることができると分かり、多くの分野で高い関心を集めている。

ところで、微細周期構造の形成方法としてはレーザー加工が最も一般的であるが、前述のようにデメリットも存在する。また、半導体分野ではナノインプリント技術の研究が盛んであり、これを用いた微細周期構造の形成が可能となっているが、こちらにも、型を作成する必要があることや、適用できる材料に限られるなどデメリットが存在する。つまり、微細周期構造の形成方法に関して、これらのデメリットを解決しうる新たな手法が求められている。

1.3 スティックスリップ現象

スティックスリップ (SS) 現象は、材料が二面間で滑り運動をする際に、摩擦部分に発生する滑りと固着の繰り返し運動であり、摩擦振動や固着滑りとも呼ばれる。Fig.1-1(a)に SS 現象を説明する簡易なモデルを示す。ばねの一端は壁と繋がれており、他端は材料 A に繋がれている。また材料 A は材料 B の上に密着して乗っている。この状態で材料 B を Fig.1-1(a)の右方向にゆっくり動かすと、材料 A は静摩擦力により材料 B に密着したまま動き出す (スティック状態)。ここで材料 A はばねに繋がっているため、材料 A の変位が大きくなるにつれて、ばねの復元力は大きくなり最大静摩擦力に近づく。さらに、材料 B を動かしていくと、ばねの復元力は最大静摩擦力を越えて、この瞬間に材料 A は材料 B の上を滑り始める (スリップ状態)。滑り始めた材料 A はばねの復元力によって左に動き始める。材料 A の変位が小さくなるにつれて、ばねの復元力は小さくなり動摩擦力に近づく。ばねの復元力が動摩擦力を下回ると材料 A は静止し、再び材料 B に密着したまま動き出す (スティック状態)。上記のような運動 (スティック状態—スリップ状態の繰り返し運動) が SS 現象のメカニズムである。Fig.1-1(b)に一般的な SS 現象における摩擦力の時間変化を示す。

なお、SS 現象が発生した場合には、例えば工作機械では加工精度の低下や工具の破損など、一般的には悪影響が生ずる。したがって、SS 現象に関する研究においては、その抑制方法の模索^{6),7),8)}が主流となっており、実際の生産現場では、それらの研究成果を基にした潤滑状態や加工条件の工夫によって SS の抑制を図っている。

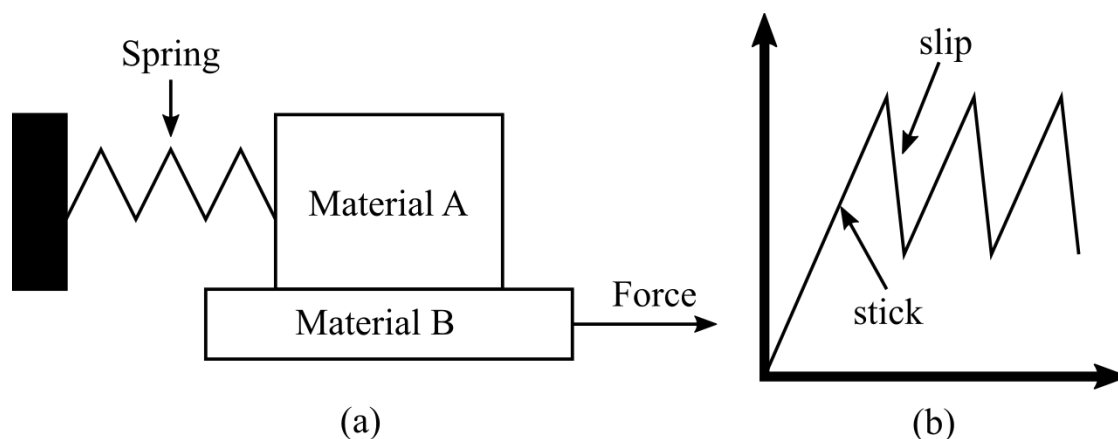


Fig.1-1 Schematic diagram of stick-slip (SS) phenomenon. (a) Stick-slip model. (b) Time variation of frictional force in typical stick-slip.

第2章 実験

2.1 スティックスリップ加工

2.1.1 工具

本研究では、試料との間にSSを生じさせる加工刃として硬さ及び強度が十分にあり、鋭角な先端部分を持つ市販の剃刀（フェザー製，FAS-10）を選択した。今回使用した剃刀の材料はTE-2（JIS規格名称：SKS81M）である。Table2-1にSKS81Mの一般的な特性を示す⁹⁾。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。Table2-2にTE-2の化学組成を示す。また、Table2-3にTE-2の弾性率を示す。

Table2-1 Property of SKS81M.

Density [g/cm ³]	Tensile strength [MPa]	Elastic modulus [MPa]
824	114	324

Table2-2 Chemical component of TE-2.

Ingredient [%]						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
1.20~1.30	0.15~0.35	≤0.35	≤0.03	≤0.02	0.30~0.50	≤0.25

Table2-3 Mechanical property of TE-2¹⁰⁾.

Tensile strength [MPa]	Elastic modulus [GPa]
202	325

2.1.2 試料

試料として、加工刃よりも硬度および弾性率が低く、低剛性であるがゆえに加工性の高い、高分子フィルムを選択した。その中でも今回は、容器や包装、高分子繊維などとして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）を選択した。さらに、試料の物性の違いによる加工結果への影響を調べるため、PETよりも弾性率及び引張強度が低く、破断ひずみが非常に小さいアクリル（PMMA）を比較材料に選択した。PMMAはPET同様に加工性が高く非常に高い透明性を持ち、レンズやガラスの代替として利用される。

本研究では、膜厚 37 μm の PET フィルム（フタムラ化学製，FE2000（表面処理なし））及び膜厚 53 μm のアクリルフィルム（三菱ケミカル製，HBS006H）を使用した。Table2-4 に PET フィルムの物性値を、Table2-5 にアクリルフィルムの物性値をそれぞれ示す。なおアクリルフィルムの引張強さと弾性率と破断ひずみについては引張試験によってデータを得た。引張試験の方法と結果は 6 章付録に記す。

Table2-4 Properties of PET film⁹⁾.

Density [g/cm ³]	Tensile strength [MPa]	Elastic modulus [GPa]	Breaking strain [%]
1.38	172	3.98	138

Table2-5 Properties of acrylic film.

Density [g/cm ³]	Tensile strength [MPa]	Elastic modulus [GPa]	Breaking strain [%]
1.15	41	1.34	22

2.1.3 実験装置と実験方法

SS 現象を利用した微細周期構造の形成には Fig.2-1 に示す加工装置 (SS 加工機) を使用した。この装置は装置本体に加工刃を固定するホルダ、ローラー、および、ウインチとロードセル (エー・アンド・デイ製, UR-1KN-D) の役割を担う万能試験機 (エー・アンド・デイ製, RTG-1310) から構成されている。装置本体に固定されたホルダに加工刃を固定し、この加工刃の先端をフィルムに接触させる。この状態でフィルムを移動させることで接触部において SS を発生させ、フィルム表面に微細周期構造を形成する。なお、上述の様に、本加工装置には万能試験機が組み込まれているため、加工時のフィルムの移動距離 (加工距離) L_{Feed} とフィルムにかかる荷重 W を測定できる。以下に、SS 加工の手順の詳細を示す。

- ① フィルムを帯状に切り出す (本研究では、幅 20 mm, 長さ約 1300 mm とした)。
- ② フィルムの両端の両表面それぞれに 2.0 cm×2.0 cm のガムテープを貼り付け、フィルムを補強する。
- ③ 補強したフィルムの一端を万能試験機のチャックで挟んで固定する。続いて、フィルムの他端におもりを吊り下げ、フィルムに張力をかける。この際、おもりの重さを変えることで加工荷重 T を変更することが可能である。フィルムの送り方向に対してフィルムの長辺方向が傾かないように注意する。
- ④ 加工刃の先端部分をアセトンで洗浄した後、加工刃をホルダに取り付ける。この際、ホルダは複数あり、それぞれ加工刃の先端の突き出し量が異なっているため、ホルダの選択によって刃の自由端長さ L を変更することが可能である。
- ⑤ ホルダを SS 加工機本体に設置する。
- ⑥ 刃の先端がフィルムに接触するようにホルダの上下位置を調整する。この際、ホルダの位置によって加工角度 θ を変更することが可能である。
- ⑦ 万能試験機の引張速度を設定することで加工速度 V を設定し、万能試験機を起動してフィルムを 50 mm 程度移動させる。その結果、フィルムと刃の接触部において、ステイクスリップが発生し、構造が形成される。

なお、本実験では SS による刃の摩耗による劣化の可能性を考慮して、加工時には毎回新品の加工刃を使用した。

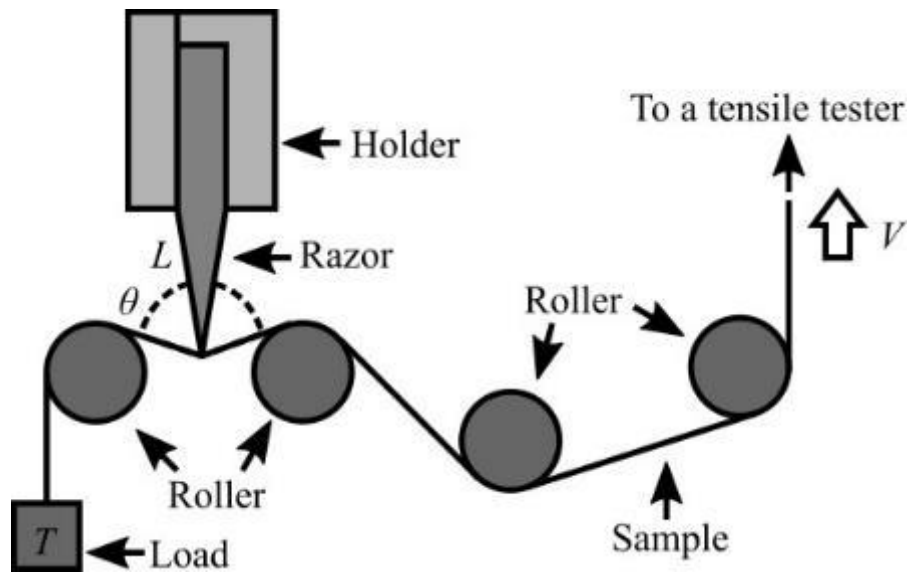


Fig.2-1 Schematic diagram of SS processing.

2.1.4 加工条件

SS 加工では、前述のように 4 つの加工条件を変更可能である。Table2-6 に PET フィルムに加工を行う際の SS 加工条件の範囲を、Table2-7 にアクリルフィルムに加工を行う際の SS 加工条件の範囲をそれぞれ示す。

Table2-6 Processing condition of SS processing on PET film.

Processing load T [N]	Processing angle θ [deg.]	Free end length L [mm]	Processing speed V [mm/min]
3.924 – 11.772	140 - 160	1.0 – 7.0	10 - 500

Table2-7 Processing condition of SS processing on acrylic film.

Processing load T [N]	Processing angle θ [deg.]	Free end length L [mm]	Processing speed V [mm/min]
1.962 – 5.886	145 - 165	1.0 – 7.0	10 - 500

2.2 見かけの摩擦係数の測定

1.3 で述べたように SS の発生には物体間の摩擦係数が重要である。Fig.1-1(a)に示した SS のモデルは純粋な SS のモデルであり、物体 A,B 間には摩擦力のみが作用する。しかし、本研究においては刃がフィルムに刺さり込むことにより、摩擦力以外にフィルムから受ける抵抗力が作用する。Fig.2-2 に純粋な摩擦モデルと、刺さり込みを考慮した摩擦モデルを示す。Fig.2-2 中の記号は F が摩擦力、 F' が見かけの摩擦力、 R が刃がフィルムから受ける進行方向と反対方向の抵抗力、 N が垂直荷重、 μ が摩擦係数、 μ' が見かけの摩擦係数を表す。この時、摩擦力とフィルムから受ける抵抗力を合わせて見かけの摩擦力と考えると、フィルムにかかる荷重と、刃とフィルムの接触部での垂直抗力 N から見かけの摩擦係数を求めることができる。

なお、本研究においては 2.1.3 で述べたように、SS 加工中のフィルムにかかる荷重を測定することができる。ここで、 T を加工荷重、 θ を加工角度、 N を垂直荷重、 F' を見かけの摩擦係数、 T_2 を SS 加工時のフィルムにかかる荷重とすると、以下の式 (1) から (3) により見かけの摩擦係数 μ' を求めることができる。

$$F' = F + R = T_2 - T \dots\dots\dots (1)$$

$$N = 2T \cos \frac{\theta}{2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\mu' = \frac{F'}{N} \dots\dots\dots (3)$$

ここで Fig.2-1 に示したように、SS 加工中のフィルムにかかる荷重 T_2 は万能試験機で測定可能であり、Fig.2-3、Fig.2-4 に SS 加工中の荷重 (T_2) - 加工距離線図の一例を示す。Fig.2-4 は Fig.2-3 の加工距離 20mm から 22mm の範囲の拡大図である。荷重 (T_2) - 加工距離線図及び式 (1) から (3) により、見かけの摩擦係数を求める時、フィルムにかかる荷重 T_2 をグラフの波形が直線的となった部分 (Fig.2-3 の加工距離が 20 mm 以降の部分) の振動のピークの値の平均値から読み取り、式 (1) から式 (3) を計算すると見かけの静摩擦係数 μ_s' が求められる。また、フィルムにかかる荷重 T_2 をグラフの波形が直線的となった部分の全体の値の平均値から読み取り、式 (1) から式 (3) を計算すると見かけの動摩擦係数 μ_k' が求められる。

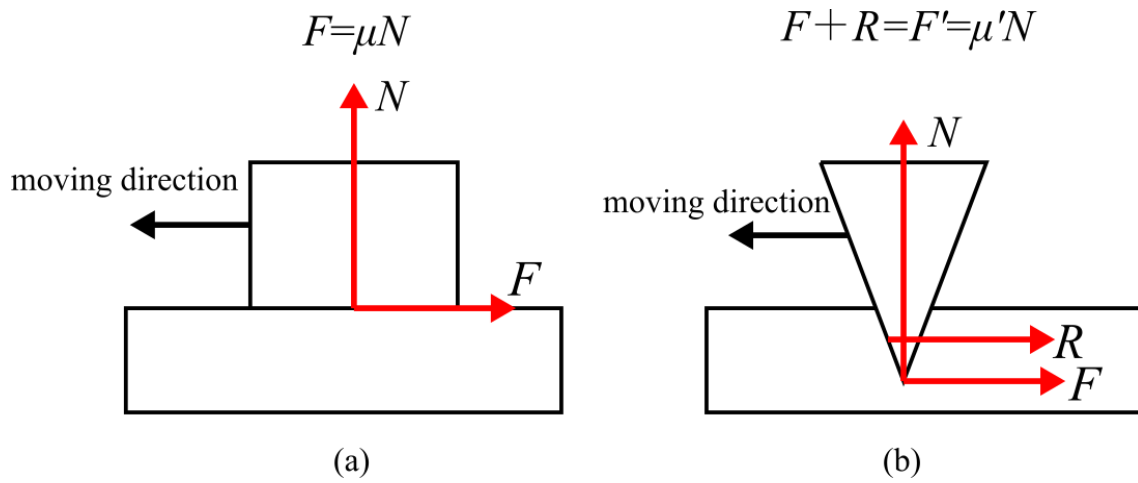


Fig.2-2 Schematic diagram of frictional motion. (a) The normal case (contact only). (b) The case where the blade sticks into the sample.

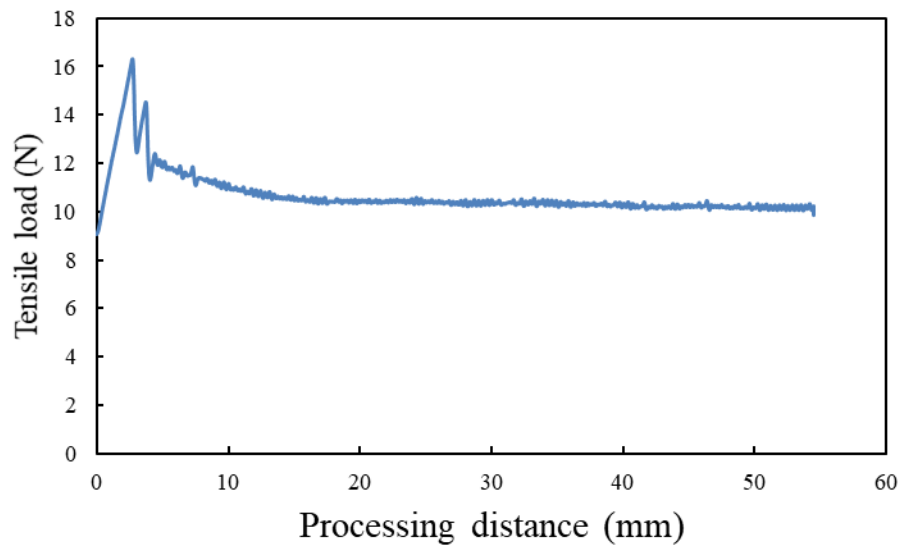


Fig.2-3 A example of relation between tensile load and processing distance in SS processing.

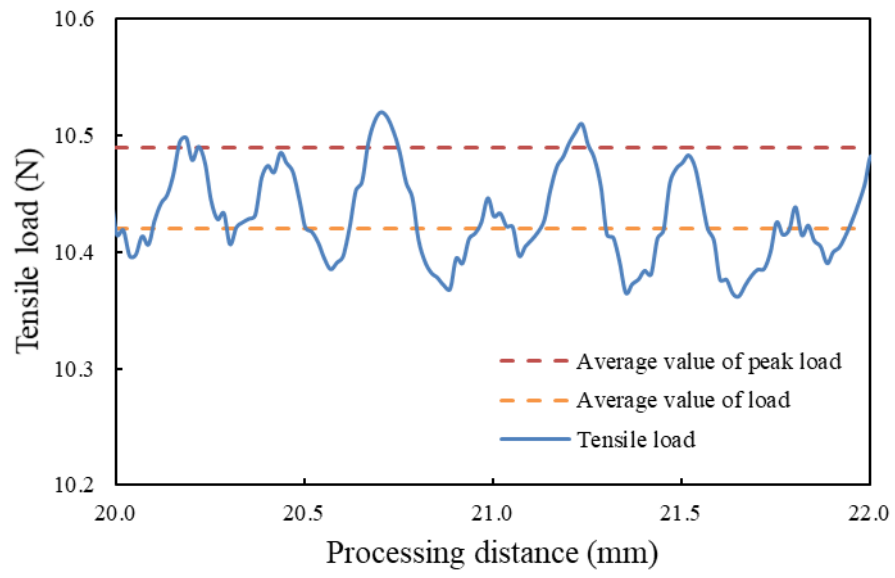


Fig.2-4 Enlarged view of the part where the tensile load looks constant in Fig.2-3.

2.3 その場観察

SS 加工時の刃の動き及びフィルムの動きをその場観察するために 2.1.3 の実験装置を改良した。Fig.2-2 にその場観察用の実験装置を示す。装置には光学顕微鏡が組み込まれており、加工刃とフィルムの接触部を鉛直方向から観察することを可能とするため、Fig.2-1 と比較して 90 度だけ刃とフィルムの向きを変更した。この際、ワイヤーとフィルムをチャックで連結する。また、動力にはモーター（オリエンタルモーター製、PKE564MC-PS25）を用いた。本モーターはステッピングモーター（1 ステップ=3.016 μ m）であり、使用中、共振は観察されなかったため実験への影響はない。その場観察における加工条件として、おもりの重量により加工荷重 T を、ホルダの固定位置（図の上下方向位置）により加工角度 θ を変更可能である。なお、本実験における加工条件は光学顕微鏡の観察範囲に刃及びフィルムの運動を収めるため 2.1.4 の加工条件とは異なっている。その場観察における加工条件を Table2-8 に示す。本実験では、加工条件を $T=1.962\text{N}$, $\theta=155\text{ deg.}$ とした場合を基準の加工条件として、荷重を大きくした場合と加工角度を小さくした場合の 3 通りの条件で実施する。

本研究では、光学顕微鏡（オリンパス製、STM5）にカメラマウント（オリンパス製、U-TV0.5XC）を取り付け、これに CCD カメラを取り付けて加工時の様子を記録した。その際、CCD カメラにはホーザン製の USB カメラ L-835 および松電舎製の高速度カメラ CHU30-B を使用し、それぞれ 25fps, 1000fps で加工時の様子を記録した。なお、光学顕微鏡は、焦点が刃あるいはフィルムのどちらか一方にしか合わせることができないため、刃とフィルムを別々に観察した。

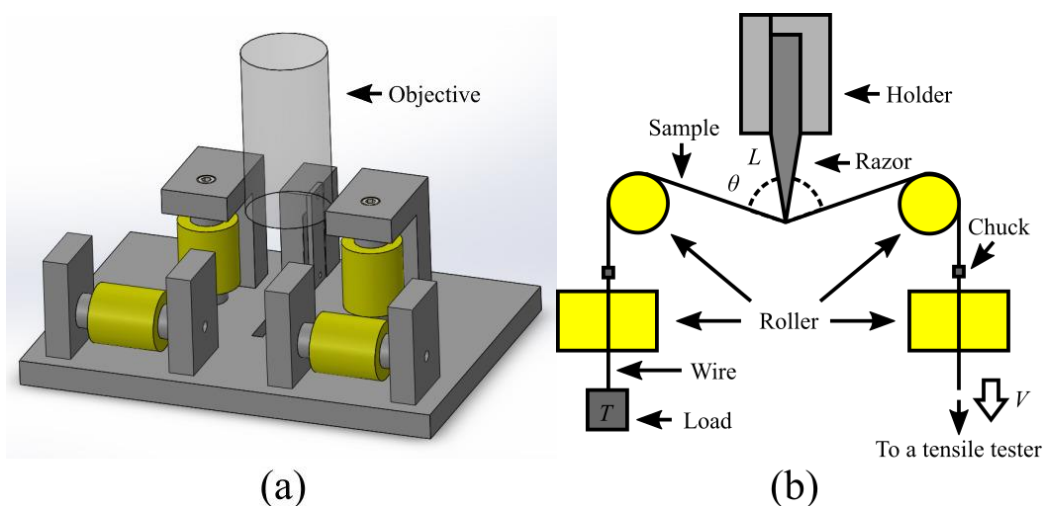


Fig.2-5 In-situ observation device. (a) Overall view. (b) Schematic diagram of top view

Table2-8 Processing condition of in-situ observation.

Processing load	Processing angle	Free end length	Processing speed
$T[\text{N}]$	$\theta[\text{deg.}]$	$L[\text{mm}]$	$V[\text{mm/min}]$
1.962, 2.943	145, 155	7.0	1.0

2.4 フィルムの観察

2.4.1 光学顕微鏡を用いた観察

SS 加工後の試料表面に形成される構造を、光学顕微鏡（オリンパス製，STM5）を用いて観察し，その構造の周期（構造周期：Structure period）を調べた．その際，約 30 データの平均値を構造周期の測定結果とした．また，顕微鏡での観察は USB カメラ（ホーザン製，L-835），カメラアダプタ（U-TV0.5XC），3 倍対物レンズを使用した．

2.4.2 走査型プローブ顕微鏡 (SPM) を用いた観察

SS 加工後の試料表面に形成される構造を、走査型プローブ顕微鏡 (SPM) を用いて観察し、形成された構造の形状とその構造周期及び構造の深さ (構造深さ : Structure depth) を調べた。なお、ここで、構造深さとは形成される構造の凹凸の山から谷までの高さであり、構造周期、構造深さともに、約 30 データの平均値を測定結果とした。

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。SPM は、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。本研究で使用した SPM は日立ハイテクサイエンス製の AFM5400L である。その外観図を Fig.2-3 に示す。AFM5400L には AFM (原子間力顕微鏡) モードと DFM モード (Dynamic Force Mode) 及び DFM モードを基とする SIS モードがあり、本研究では DFM モードを使用した。DFM モードはカンチレバーを共振させた状態で、レバーの振動振幅が一定になるように探針・試料間の距離を制御しながら表面形状を測定する測定モードで、AFM では安定な観測が難しい場合がある柔軟な試料や、吸着がある試料などにも有効な表面形状測定モードである。また、本研究ではカンチレバーとして日立ハイテクサイエンス製、SI-DF-40 を使用した。

本研究では、観察用試料として、加工後のフィルムをはさみで幅 2 cm×長さ 1 cm 程度の大きさに切断し、試料台にカーボンテープで加工表面が鉛直上方向を向くようにフィルムを接着した。また、SPM 観察では、走査範囲を構造のスケールに合わせて 10 μm 角~100 μm 角に適宜設定し、データ点数を走査範囲に合わせて、x 方向、y 方向それぞれ 128~512 データとした。測定条件は画質、接触圧、試料凹凸試料柔らかさの項目を全て標準とした。



Fig.2-6 Appearance of SPM (AFM5400L).

2.4.3 走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた観察

SS 加工後のフィルム断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) により調べた。これは、SS 加工において、フィルム表面が一様に削られながら、その切削された面の底面に微細周期構造が形成されるのか、それとも、フィルム表面は削られずに、微細周期構造が形成されるのかを調べるためである。つまり、フィルムの加工面の高さが非加工面の高さより低い位置にあれば、フィルムは刃によって全体的に削られていることがわかる。反対に、フィルムの加工面の高さが非加工面の高さと同じであれば、全体的に削られていないことがわかる。なお、この種の測定では SPM を用いることが多いが、SPM では測定範囲が狭いため、非加工面と加工面の同時観察を加工開始位置の近傍でしか行うことができない。また、SS 加工は加工開始初期には大きな刺さり込みを生じるため、加工開始位置の近傍は深い溝が形成されており、SPM は観察に適さない。そこで、本研究では SEM を用いて断面観察を行った。

SEM は、電子線を電子レンズで絞って電子ビームとして試料に照射して、試料表面から放出される二次電子や反射電子を検出して試料表面の形態を観察する装置である。試料からは同時に特性 X 線が放出され、X 線検出器を取り付けることで元素分析を行うことも可能である。本研究で使用した SEM は日立ハイテクノロジーズ製の S-4300SE である。その外観図を Fig.2-4 に示す。

本研究では、観察用試料として、初めに加工後のフィルムを形成した構造が傷つかないように剃刀で 1 cm 程度の幅に切断した。次に試料台にカーボンテープで六角ナットを接着し、さらにこの六角ナットの側面にカーボンテープでフィルムを接着した。この際、切断した断面が鉛直上方向を向くように接着した。Fig.2-5 に六角ナット及びフィルムの模式図を示す。また、電子照射による帯電を防ぐためにオスミウムコーター (メイフォーシス製, Neoc-Pro) を用いて、SEM 観察の前処理として試料にオスミウムをコーティングして導電処理を行った。その際のコーティング時間は 15 sec とした。SEM 観察では、観察条件を加速電圧 3.0 kV, エミッション電流 10 μ A, ワーキングディスタンス (WD) 約 17 mm で観察した。

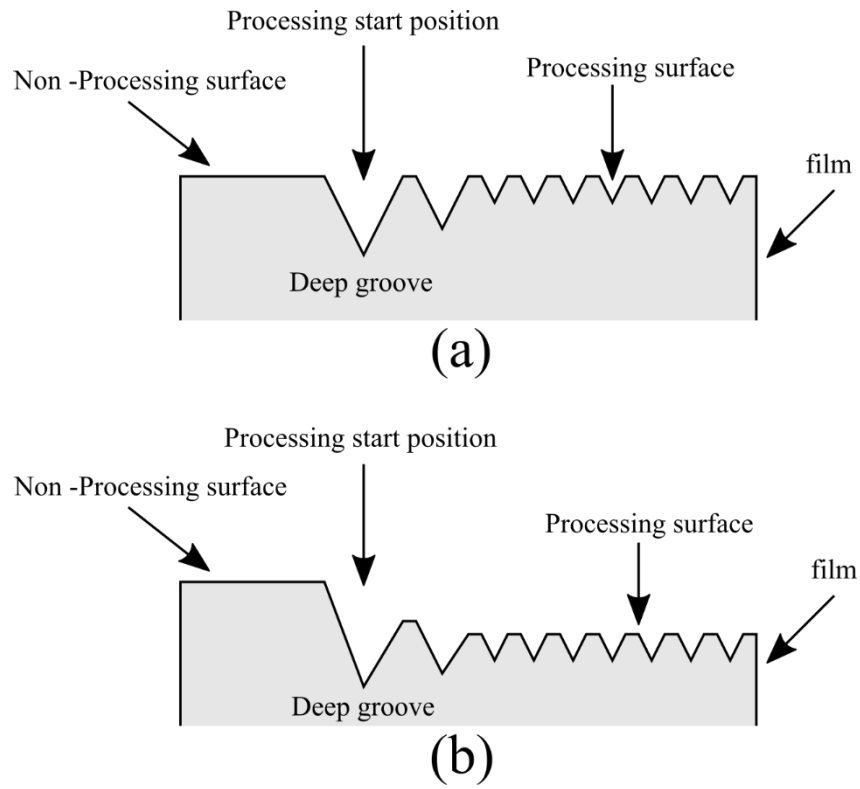


Fig.2-7 Illustration of Processing start position and deep groove position



Fig.2-8 Appearance of SEM (S4300-SE).

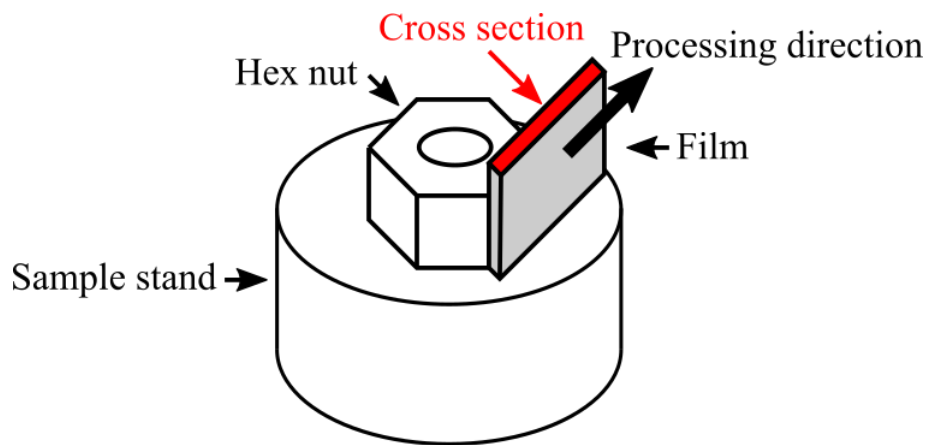


Fig.2-9 Schematic diagram of observation method for cross section of film.

第3章 実験結果

3.1 微細周期構造の形態

3.1.1 階層構造

まず、加工後のフィルム表面を観察し、形成された構造の形態を調べた。Fig.3-1はSS加工後のフィルム表面の光学顕微鏡像及びSEM観察による断面画像である。Fig.3-1 図中右が万能試験機側（ウインチに相当）で左がおもり側となり、加工は右方向から左方向に向かって進行する。Fig.3-1 図中の上下方向に伸びる細い黒線が加工によって形成された溝となっており、これが繰り返されることで周期構造を形成している。この溝と溝の間隔が構造周期である。また、SEMの断面画像から、加工前（構造の右側）と加工後（構造の左側）でフィルムの高さは同じであり、フィルム表面は削られておらず、構造の溝部分だけが削られている。

Fig.3-2(a)はSS加工後のフィルム表面のSPM観察による形状像であり、Fig.3-2(b)はFig.3-2(a)に引かれた線上の断面プロファイルである。また、Fig.3-2(a)はFig.3-1のサブミリ周期構造の間を観察したものである。加工はFig.3-2 図中の左方向から右方向に向かって進行する。Fig.3-2(a)図中の上下方向に伸びる暗色の線部分がFig.3-2(b)図中の谷部分であり、谷と谷の間隔が構造周期、谷底から山の頂点までの高さが構造深さである。

また、PETフィルムに加工を行った場合にのみ、マイクロ周期構造の間にさらに小さい周期をもつ構造が確認できた。Fig.3-3(a)はSS加工後のフィルム表面のSPM観察による形状像であり、Fig.3-3(b)はFig.3-3(a)に引かれた線上の断面プロファイルを示す。また、Fig.3-3(a)はFig.3-2(a)の中央部を拡大して詳細に観察した図である。加工はFig.3-3 図中の左方向から右方向に向かって進行する。Fig.3-3(a)図中の波状模様の暗線はFig.3-3(b)図中の谷部分であり、谷と谷の間隔が構造周期、谷底から山の頂点までの高さが構造深さである。

以上の観察結果からSS加工では、たった一度の加工によって、最大で三階層の周期構造が形成されることが明らかとなった。これらの構造は構造周期の長さが異なり、それぞれサブミリメートル程度、数マイクロメートル程度、サブマイクロメートル程度である。ここから、これらの構造をサブミリ周期構造、マイクロ周期構造、サブマイクロ周期構造とそれぞれ呼ぶこととし、その構造周期を $L_{\text{sub-mm}}$ 、 $L_{\mu\text{m}}$ 、 $L_{\text{sub-}\mu\text{m}}$ とする。また、マイクロ周期構造とサブマイクロ周期構造については構造深さを $D_{\mu\text{m}}$ 、 $D_{\text{sub-}\mu\text{m}}$ とする。

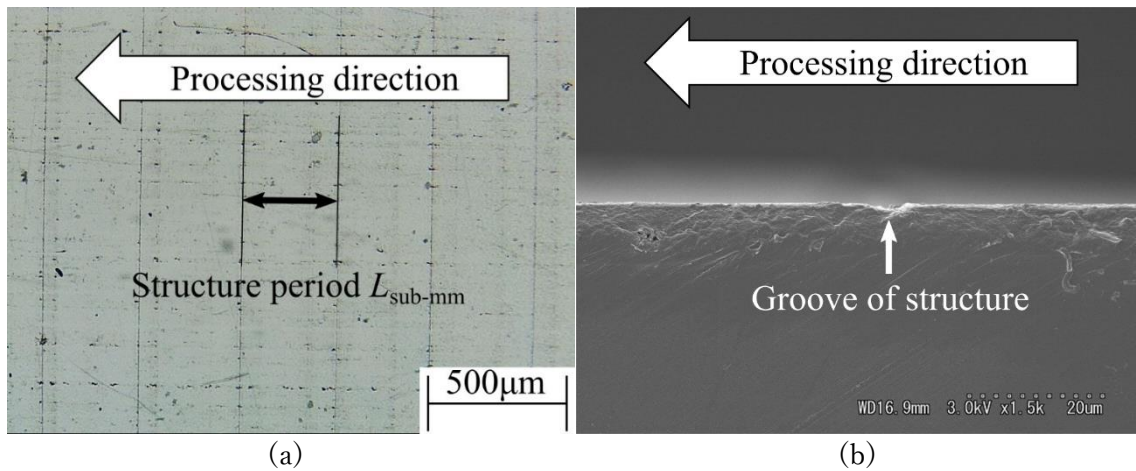


Fig.3-1 Structure form. (a)Optical micrograph of SS processed PET film with submillimeter periodic structures. (b) SEM image of cross-sectional shape.

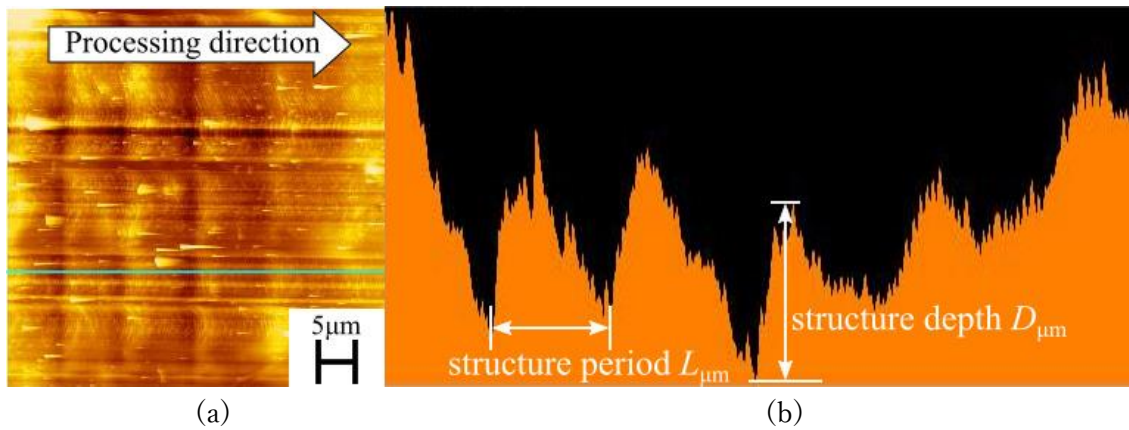


Fig.3-2 SPM image of SS processed PET film with micrometer periodic structures. (a) Surface image, (b) cross-sectional profile at blue line on (a).

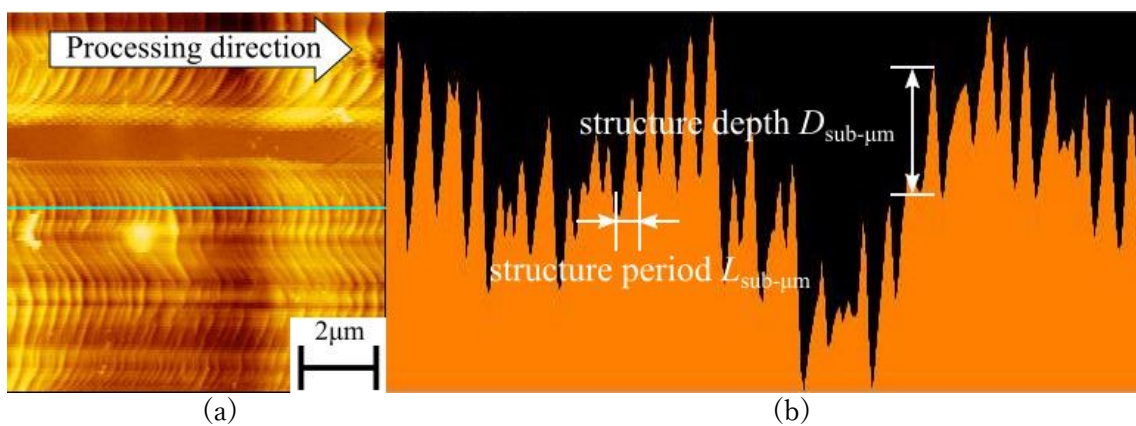


Fig.3-3 SPM image of SS processed PET film with submicrometer periodic structures. (a) Surface image, (b) cross-sectional profile at blue line on (a).

3.1.2 サブミリ周期構造

各加工条件がサブミリ周期構造の形態に与える影響を調べた。ここでは、調べたい条件以外の加工条件は固定して加工を行った。Fig.3-4 に PET フィルム及びアクリルフィルムに形成されたサブミリ周期構造の構造周期 $L_{\text{sub-mm}}$ の加工荷重依存性を示す。PET フィルムに加工を行った時、サブミリ周期構造の構造周期は、加工荷重が大きくなるに従って長くなった。また、アクリルフィルムに加工を行った時、サブミリ周期構造の構造周期は、加工荷重に関わらずほとんど一定であった。

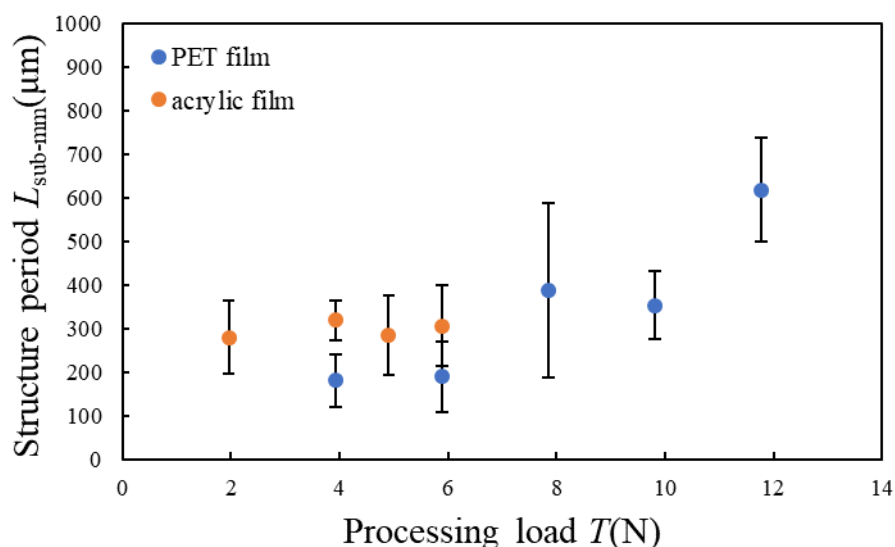


Fig.3-4 Processing load dependency of structure period of submillimeter periodic structure. Processing conditions for PET film.: $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min. Processing conditions for acrylic film.: $\theta=165$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

Fig.3-5 に PET フィルム及びアクリルフィルムに形成されたサブミリ周期構造の構造周期の加工角度依存性を示す。なお、PET フィルムにおいて、加工角度を 155deg. 、 160deg. に設定して加工を行ったが、フィルム表面にサブミリ周期構造は形成されなかった。また、加工角度を 150deg. に設定した時、サブミリ周期構造は局所的に形成され、観察できた 7 データの平均値をプロットしている。PET フィルムに加工を行った時、サブミリ周期構造は加工角度が大きい場合に形成されないことが分かる。構造が形成されなかったためにプロット数が少なく、特定の傾向は示さなかった。また、アクリルフィルムに加工を行った時、マイクロ周期構造の構造周期は、加工角度が小さくなるに従って長くなった。なお、加工角度を小さくすると式 (2) の関係からフィルムにかかる垂直荷重が大きくなる。同様に、加工荷重を大きくした時にもフィルムにかかる垂直荷重が大きくなる。Fig.3-5 が Fig.3-4 を左右反転させたような傾向となるのはこのためである。

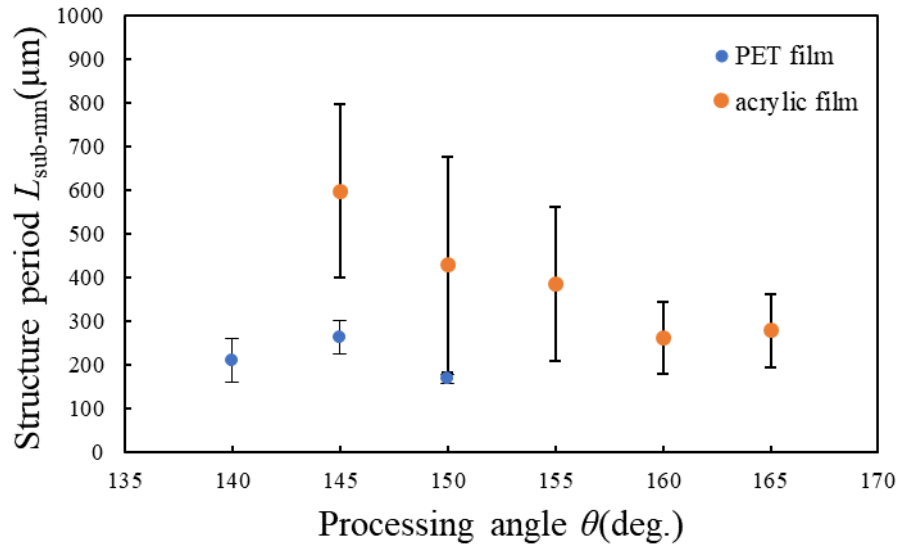


Fig.3-5 Processing angle dependency of structure period of submillimeter periodic structure. Processing conditions for PET film.: $T=3.924\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$. Processing conditions for acrylic film.: $T=1.962\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$.

Fig.3-6 に PET フィルム及びアクリルフィルムに形成されたサブミリ周期構造の構造周期の加工速度依存性を示す。なお、PET フィルムにおいて、加工速度を 300 mm/min 、 500 mm/min に設定して加工を行ったが、フィルム表面にサブミリ周期構造は形成されなかった。また、アクリルフィルムにおいて、加工速度を 500 mm/min に設定して加工を行ったが、フィルム表面にサブミリ周期構造は形成されなかった。PET フィルムに加工を行った時、サブミリ周期構造の構造周期は、加工速度が速くなるに従って長くなった。また、アクリルフィルムに加工を行った時も同様に、サブミリ周期構造の構造周期は、加工速度が速くなるに従って長くなった。ただし、加工速度が 300 mm/min の場合に形成される周期構造は誤差範囲が大きくなった。

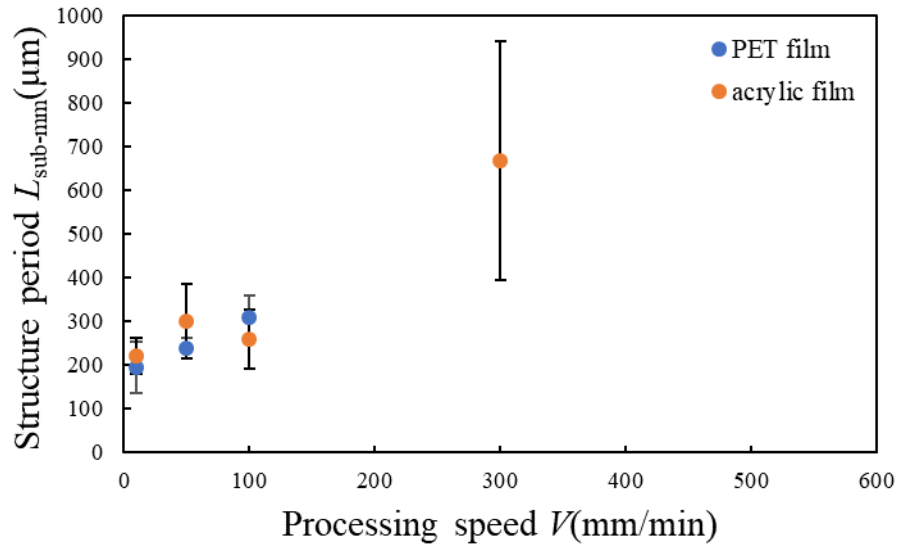


Fig.3-6 Processing speed dependency of structure period of submillimeter periodic structure. Processing conditions for PET film.: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm. Processing conditions for acrylic film.: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $L=1.0$ mm.

Fig.3-7 に PET フィルム及びアクリルフィルムに形成されたサブミリ周期構造の構造周期と刃の自由端長さの関係を示す. PET フィルム及びアクリルフィルムに加工を行った時, どちらも同じ傾向を示し, サブミリ周期構造の構造周期は刃の自由端長さに関わらず一定である.

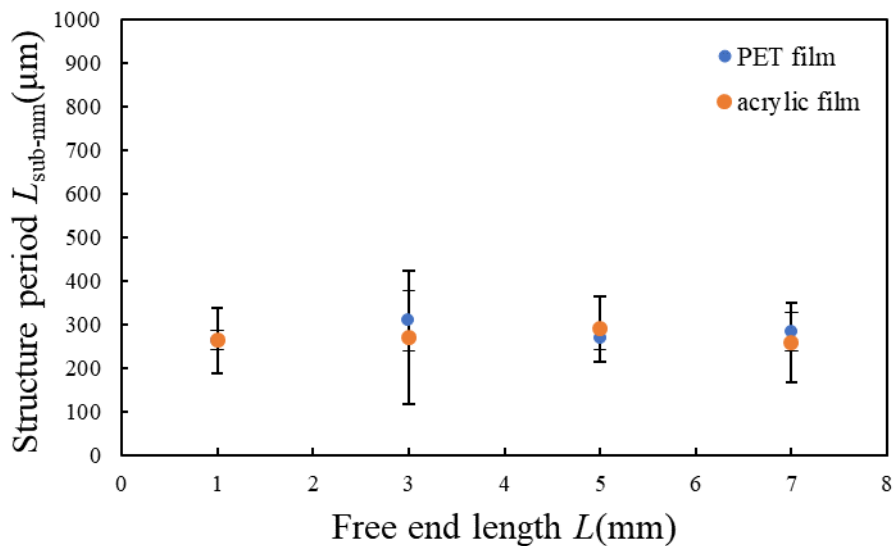


Fig.3-7 Free end length dependency of structure period of submillimeter periodic structure. Processing conditions for PET film.: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $V=100$ mm/min. Processing conditions for acrylic film.: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $V=100$ mm/min.

3.1.3 マイクロ周期構造

各加工条件がマイクロ周期構造の形態に与える影響を調べた。ここでは、調べたい加工条件以外の加工条件は固定して加工を行った。Fig.3-8 に PET フィルム及びアクリルフィルムに形成されたマイクロ周期構造の構造周期 ($L_{\mu\text{m}}$) の加工荷重依存性を示す。また、Fig.3-9 に PET フィルム及びアクリルフィルムに形成されたマイクロ周期構造の構造深さの加工荷重依存性を示す。Fig.3-8 が示すように、PET フィルムに加工を行った時、マイクロ周期構造の構造周期は、加工荷重が大きくなるに従って長くなる。また、アクリルフィルムに加工を行った時、マイクロ周期構造の構造周期は、加工荷重を変化させても特定の傾向を示さない。Fig.3-9 が示すように、PET フィルム及びアクリルフィルムに加工を行った時、マイクロ周期構造の構造深さは加工荷重に関わらずほぼ一定である。

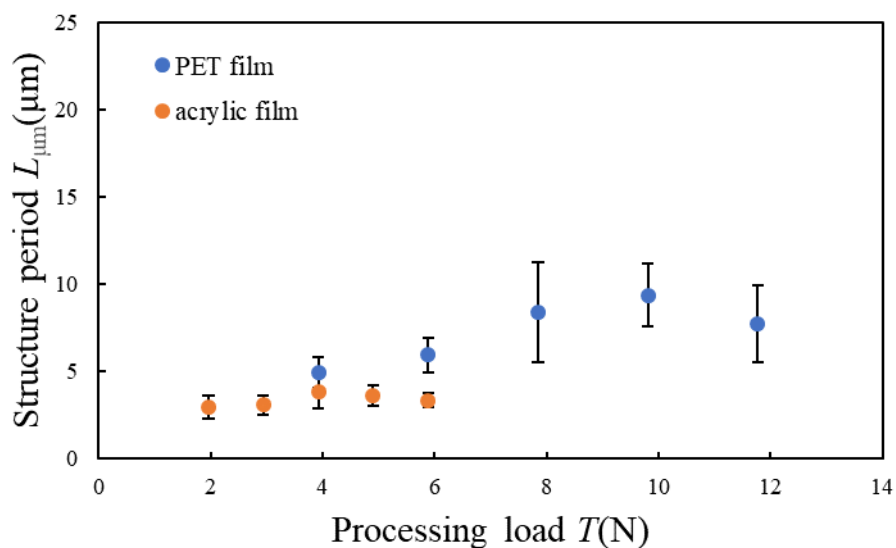


Fig.3-8 Processing load dependency of structure period of micrometer periodic structure. Processing conditions for PET film.: $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min. Processing conditions for acrylic film.: $\theta=165$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

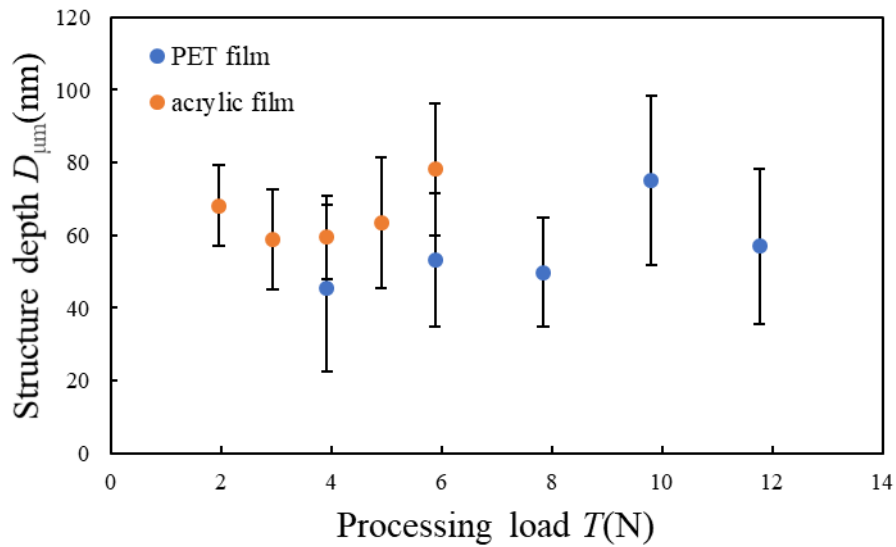


Fig.3-9 Processing load dependency of structure depth of micrometer periodic structure. Processing conditions for PET film.: $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min. Processing conditions for acrylic film.: $\theta=165$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

Fig.3-10 に PET フィルム及びアクリルフィルムに形成されたマイクロ周期構造の構造周期の加工角度依存性を示す。また, Fig.3-11 に PET フィルム及びアクリルフィルムに形成されたマイクロ周期構造の構造深さの加工角度依存性を示す。Fig.3-10 が示すように, PET フィルムに加工を行った時, マイクロ周期構造の構造周期は, 加工角度が小さくなるに従って長くなった。また, アクリルフィルムに加工を行った時, マイクロ周期構造の構造周期は, 加工角度を変化させても特定の傾向を示さない。Fig.3-11 が示すように, PET フィルムに加工を行った時, マイクロ周期構造の構造深さは加工角度が小さくなるに従って深くなった。一方, アクリルフィルムに加工を行った時, マイクロ周期構造の構造深さは, 加工角度に関わらずほぼ一定である。

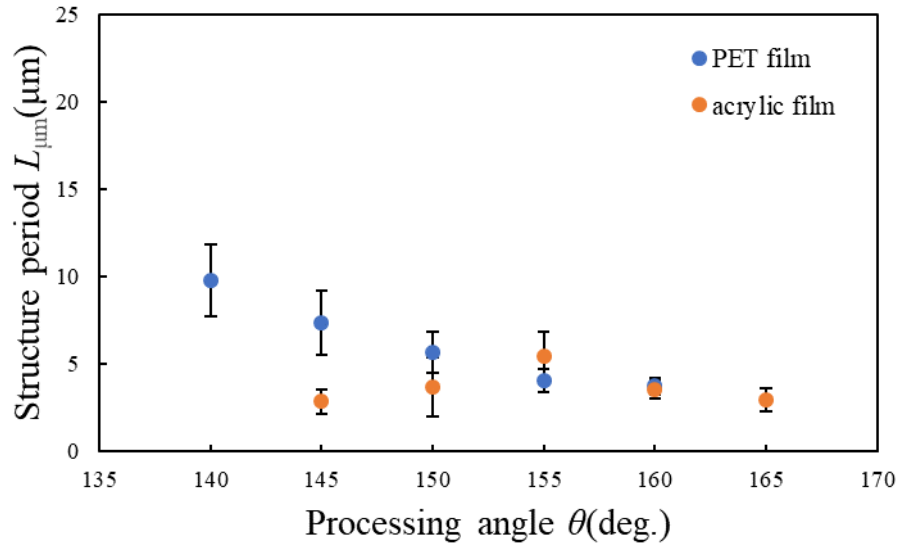


Fig.3-10 Processing angle dependency of structure period of micrometer periodic structure. Processing conditions for PET film.: $T=3.924\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$. Processing conditions for acrylic film.: $T=1.962\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$.

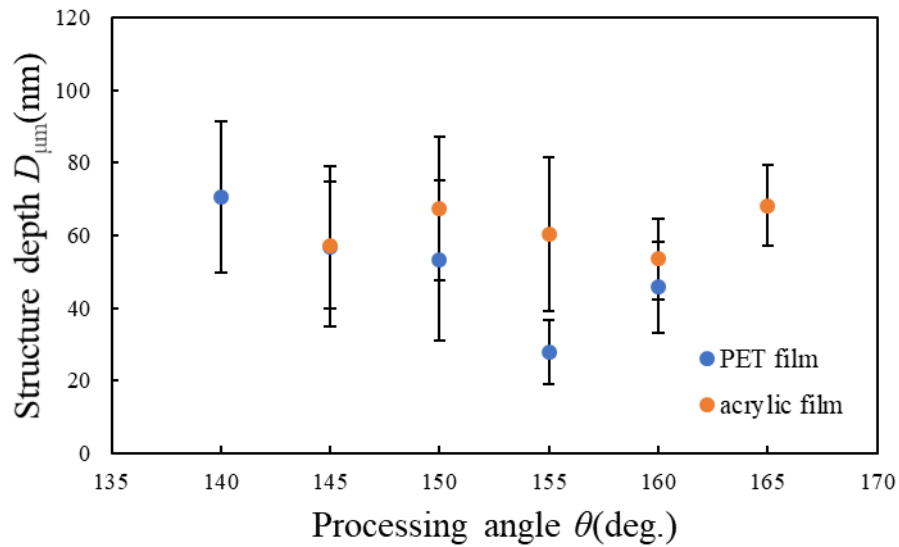


Fig.3-11 Processing angle dependency of structure depth of micrometer periodic structure. Processing conditions for PET film.: $T=3.924\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$. Processing conditions for acrylic film.: $T=1.962\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$.

Fig.3-12 に PET フィルム及びアクリルフィルに形成されたマイクロ周期構造の構造周期の加工速度依存性を示す。また、Fig.3-13 に PET フィルム及びアクリルフィルムに形成されたマイクロ周期構造の構造深さの加工速度依存性を示す。なお、Fig.3-12 及び Fig.3-13 において、PET フィルムに加工を行った時、加工速度が 300 mm/min 及び 500 mm/min の時、マイクロ周期構造の形成は部分的にしか確認できず、それぞれ 6 データ及び 8 データの平均値でプロットしている。Fig.3-12 が示すように、PET フィルムに加工を行った時、マイクロ周期構造の構造周期は、加工速度が速くなるに従って長くなった。同様に、アクリルフィルムに加工を行った時も、マイクロ周期構造の構造周期は、加工速度が速くなるに従って長くなった。ただし、加工速度が 500 mm/min の場合は構造周期が短くなった。Fig.3-13 が示すように、PET フィルム及びアクリルフィルに加工を行った時、マイクロ周期構造の構造深さは、加工速度に関わらずほぼ一定である。

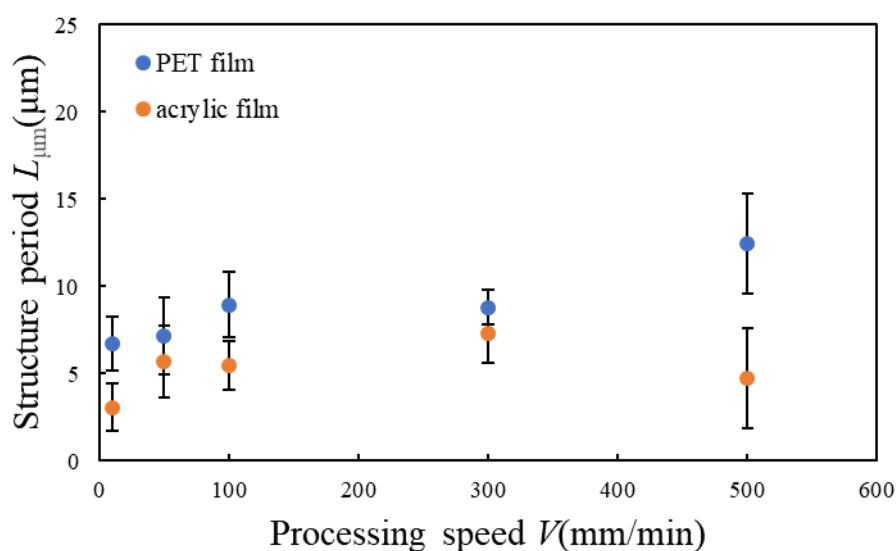


Fig.3-12 Processing speed dependency of structure period of micrometer periodic structure. Processing conditions for PET film.: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm. Processing conditions for acrylic film.: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $L=1.0$ mm.

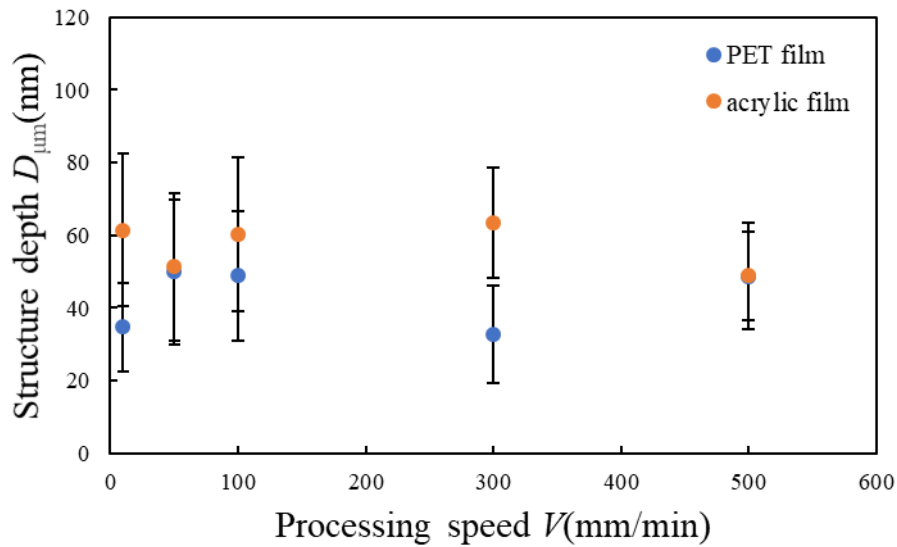


Fig.3-13 Processing speed dependency of structure depth of micrometer periodic structure. Processing conditions for PET film.: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm. Processing conditions for acrylic film.: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $L=1.0$ mm.

Fig.3-14 に PET フィルム及びアクリルフィルムに形成されたマイクロ周期構造の構造周期と刃の自由端長さの関係を示す. Fig.3-15 に PET フィルム及びアクリルフィルムに形成されたマイクロ周期構造の構造深さと刃の自由端長さの関係を示す. Fig.3-14 が示すように, PET フィルムに加工を行った時, マイクロ周期構造の構造周期は, 刃の自由端長さが長くなるに従って長くなり, 特に刃の自由端長さが 3.0mm を超えると急激に長くなった. 同様に, アクリルフィルムに加工を行った時, マイクロ周期構造の構造周期は, 刃の自由端長さが長くなるに従って長くなり, 特に刃の自由端長さが 5.0mm を超えると急激に長くなった. Fig.3-15 が示すように, PET フィルムに加工を行った時, マイクロ周期構造の構造深さは, 刃の自由端長さが長いほど深くなった. アクリルフィルムに加工を行った時, マイクロ周期構造の構造深さは, 刃の自由端長さが長いほど深くなった.

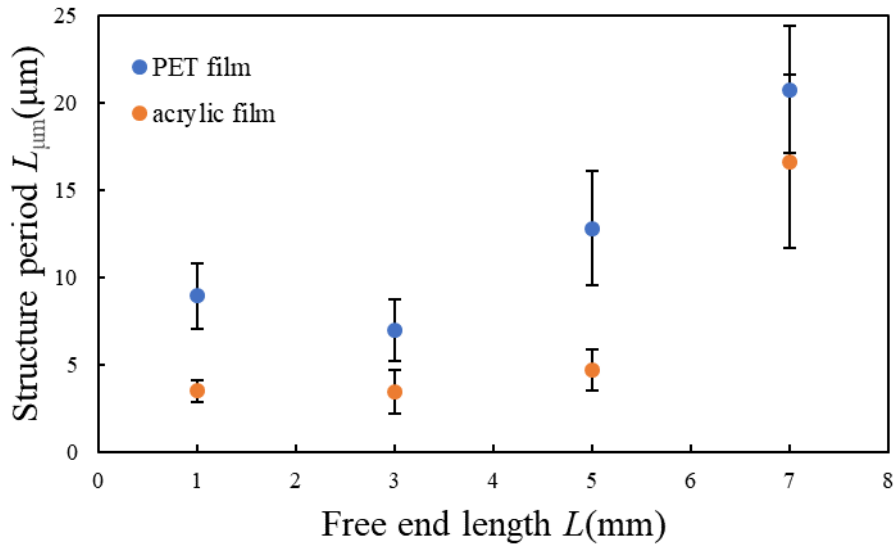


Fig.3-14 Free end length dependency of structure period of micrometer periodic structure. Processing conditions for PET film.: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $V=100$ mm/min. Processing conditions for acrylic film.: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $V=100$ mm/min.

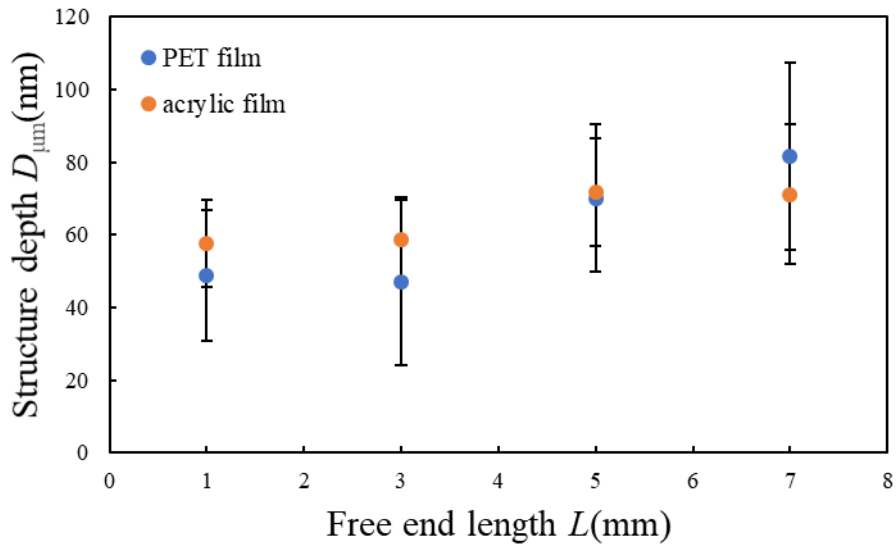


Fig.3-15 Free end length dependency of structure depth of micrometer periodic structure. Processing conditions for PET film.: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $V=100$ mm/min. Processing conditions for acrylic film.: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $V=100$ mm/min.

3.1.4 サブマイクロ周期構造

各加工条件がサブマイクロ周期構造の形態に与える影響を調べた。ここでは、調べたい加工条件以外の加工条件は固定して加工を行った。Fig.3-16 及び Fig.3-17 に PET フィルムに形成されたサブマイクロ周期構造の構造周期 ($L_{\text{sub-}\mu\text{m}}$) の加工荷重依存性と、構造深さ ($D_{\text{sub-}\mu\text{m}}$) の加工荷重依存性を示す。Fig.3-16 が示すように、サブマイクロ周期構造の構造周期は、加工荷重が大きくなるに従って長くなる。同様に、Fig.3-17 に示すように、サブマイクロ周期構造の構造深さも加工荷重が大きくなるに従って深くなる。

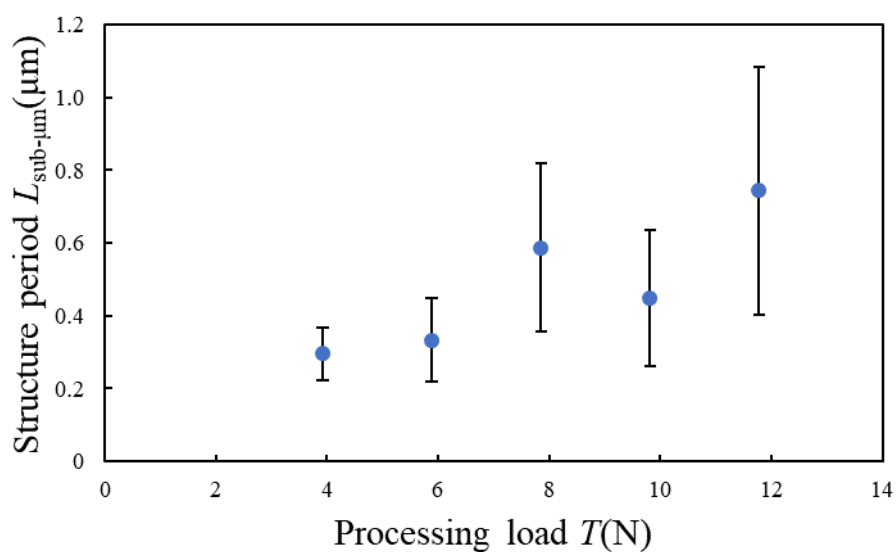


Fig.3-16 Processing load dependency of structure period of submicrometer periodic structure of PET film. Processing conditions: $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

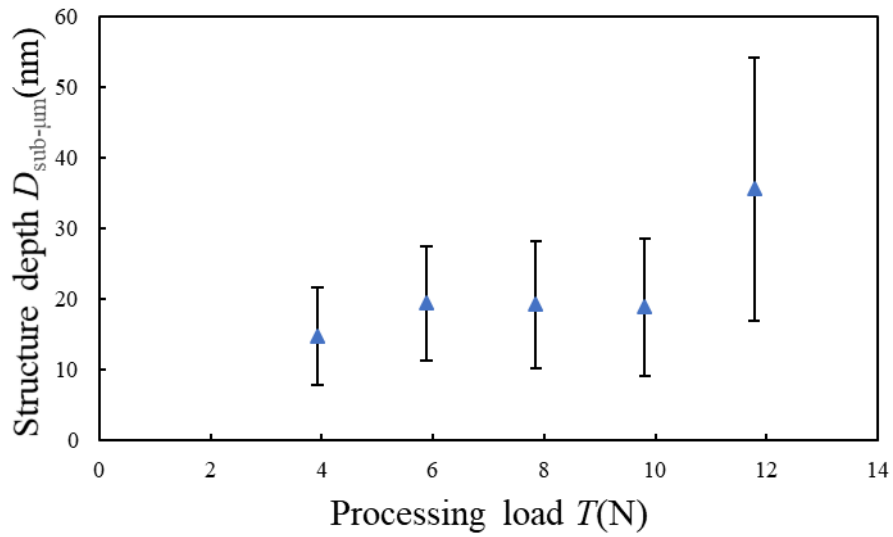


Fig.3-17 Processing load dependency of structure depth of submicrometer periodic structure of PET film. Processing conditions: $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

Fig.3-18 及び Fig.3-19 に PET フィルムに形成されたサブマイクロ周期構造の構造周期の加工角度依存性と、構造深さの加工角度依存性を示す。 Fig.3-18 が示すように、マイクロ周期構造の構造周期は、加工角度に関わらずほぼ一定となった。同様に、 Fig.3-19 が示すように、マイクロ周期構造の構造深さも、加工角度に関わらずほぼ一定となった。

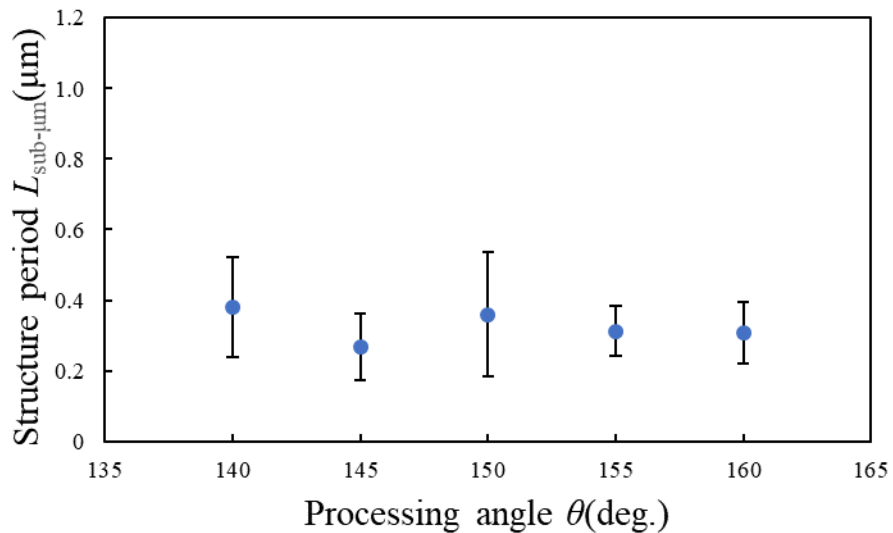


Fig.3-18 Processing angle dependency of structure period of submicrometer periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=3.924$ N, $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

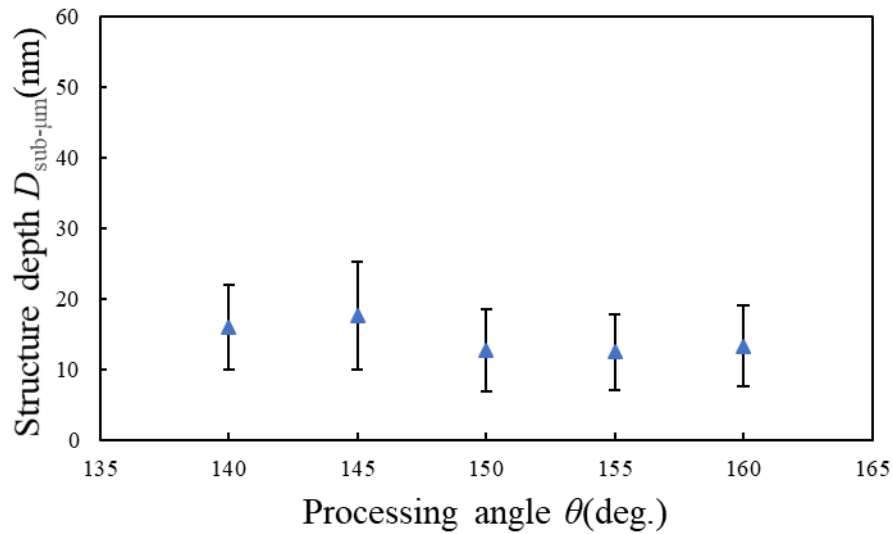


Fig.3-19 Processing angle dependency of structure depth of submicrometer periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=3.924\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$.

Fig.3-20 及び Fig.3-21 に PET フィルムに形成されたサブマイクロ周期構造の構造周期の加工速度依存性と、構造深さの加工速度依存性を示す。Fig.3-20 が示すように、サブマイクロ周期構造の構造周期は、加工速度が 10 mm/min の場合に長くなった。加工速度が 50 mm/min 以上の場合、加工速度に関わらずサブマイクロ周期構造の構造周期はほぼ一定となった。同様に、Fig.3-21 が示すように、サブマイクロ周期構造の構造深さも、加工速度が 10 mm/min の場合に深くなった。加工速度が 50 mm/min 以上の場合、加工速度に関わらずサブマイクロ周期構造の構造深さもほぼ一定となった。加工速度が 300 mm/min , 500 mm/min の時、マイクロ周期構造の形成はほとんど確認されなかったが (3.1.3 項参照)、サブマイクロ周期構造の形成は加工面全体に確認された。

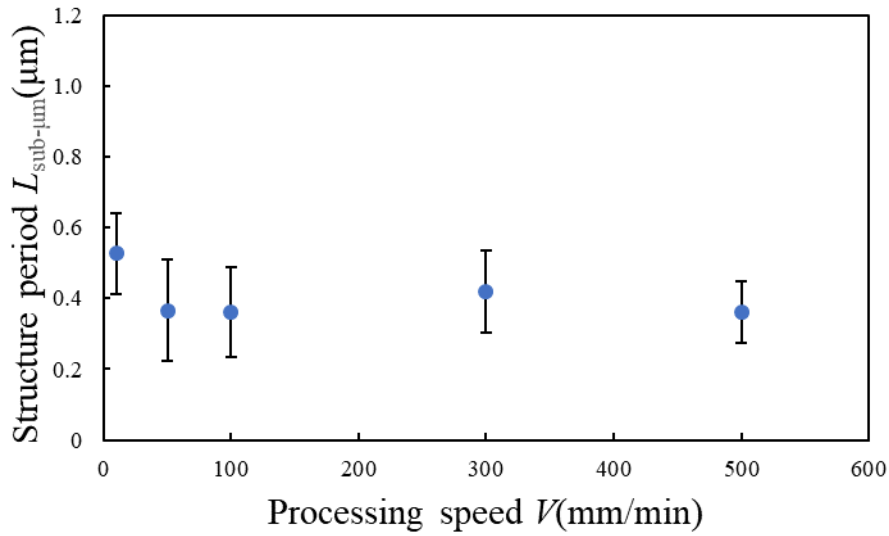


Fig.3-20 Processing speed dependency of structure period of submicrometer periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm.

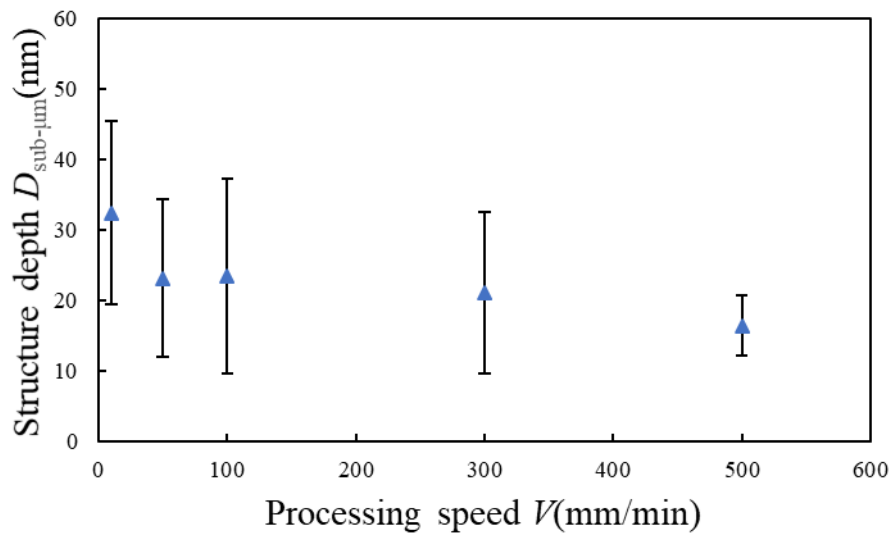


Fig.3-21 Processing speed dependency of structure depth of submicrometer periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm.

Fig.3-22 及び Fig.3-23 に PET フィルムに形成されたサブマイクロ周期構造の構造周期と刃の自由端長さの関係と、構造深さと刃の自由端長さの関係を示す。 Fig.3-22 が示すように、マイクロ周期構造の構造周期は、刃の自由端長さに関わらずほぼ一定となった。同様に、Fig.3-23 が示すように、サブマイクロ周期構造の構造深さも、刃の自由端長さに関わらずほぼ一定となった。

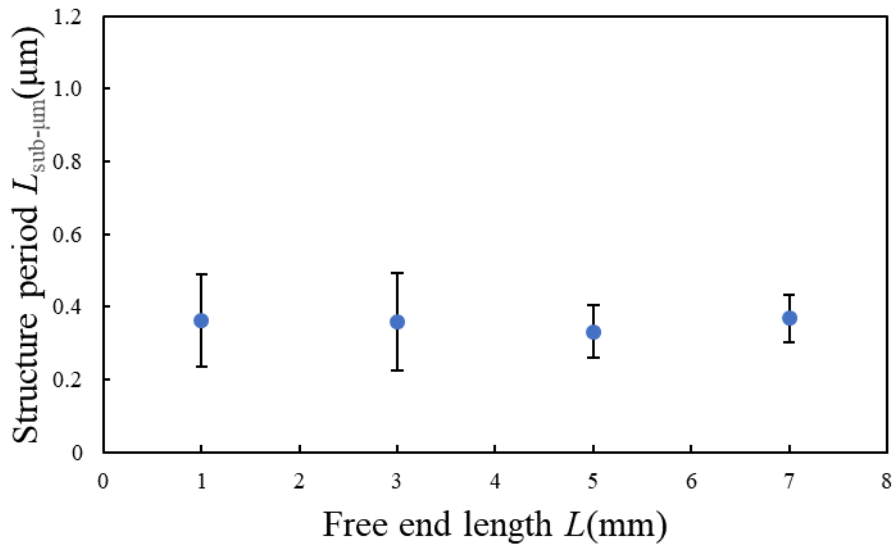


Fig.3-22 Free end length dependency of structure period of submicrometer periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $V=100$ mm/min.

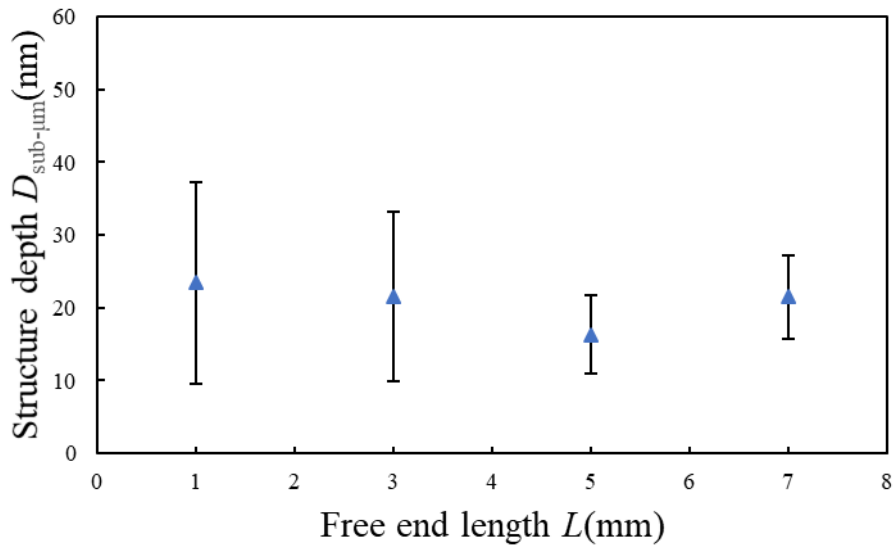


Fig.3-23 Free end length dependency of structure depth of submicrometer periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $V=100$ mm/min.

3.2 フィルムにかかる荷重

万能試験機を用いて SS 加工中にフィルムにかかる荷重を計測した。Fig3-24 から Fig.3-32 に万能試験機で実測した加工中の加工距離とその時のフィルムにかかる荷重を示す。Fig.3-30 は Fig.3-28 の拡大図である。なお、フィルムの移動距離が 0 mm の時にフィルムにかかる荷重と加工荷重が一致しないのは刃を降下させてフィルムに接触させた時に、刃がフィルムに刺さり込むことでフィルムが拘束され、フィルムに引張力が発生したためである。

Fig3-24 から Fig.3-32 より、どの加工条件においても、フィルムにかかる荷重は加工開始直後から直線的に増加し、最初のピークに達する。これは初期の状態で刃がフィルムに深く刺さり込んでしまうためであり、フィルムが刃から受ける反力は大きくなる。この時、式(1)から T_2 は大きな値をとることが示されている。ピークを過ぎると、フィルムにかかる荷重は直ちに急降下する。その後、フィルムにかかる荷重は再び増加を始め、以後、増加と減少を交互に繰り返す。この時、フィルムにかかる荷重が増加する時、刃はフィルムに刺さり込んでおり、刃とフィルムは一体となっている（スティック状態）。一方、フィルムにかかる荷重が減少する時、刃とフィルムは滑りを生じて相対的に運動している（スリップ状態）。ここで Fig.3-32 に Fig.3-28 の拡大図を示す。Fig.3-28 では平坦に見えた部分を拡大すると振動が生じていることが分かり、この振動が SS 振動である。

Fig.3-24 及び Fig3-25 より、PET フィルム及びアクリルフィルムに加工を行う時、加工荷重を大きくするとフィルムにかかる荷重は大きくなる。さらに、加工荷重を大きくすると、SS 振動の振幅が大きくなることが分かる。

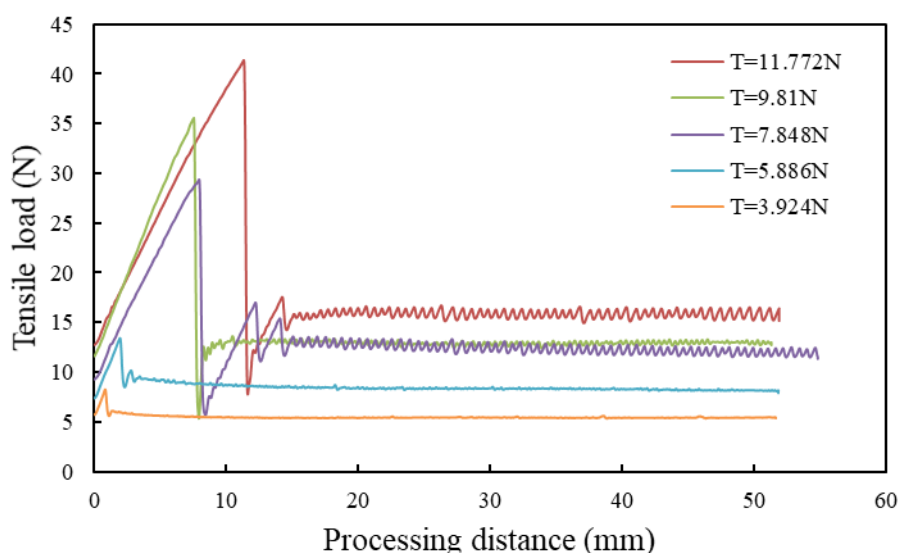


Fig.3-24 Relationship between tensile load and processing distance in SS processing on PET film at each processing load. Processing conditions: $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

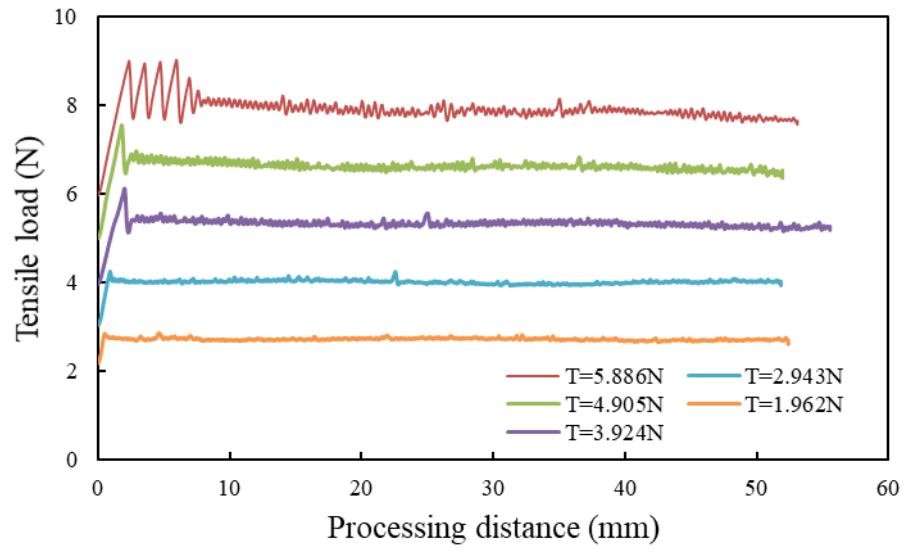


Fig.3-25 Relationship between tensile load and processing distance in SS processing on acrylic film at each processing load. Processing conditions: $\theta=165$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

Fig.3-26 より，PET フィルムに加工を行う時，1 回目の振動以降のフィルムにかかる荷重は加工角度が 140 deg.及び 145 deg.の時に大きくなった．加工角度が 150 deg.以上の時，フィルムにかかる荷重はほとんど一定である．また，Fig3-27 より，アクリルフィルムに加工を行う時，加工角度を小さくするとフィルムにかかる荷重は大きくなる．

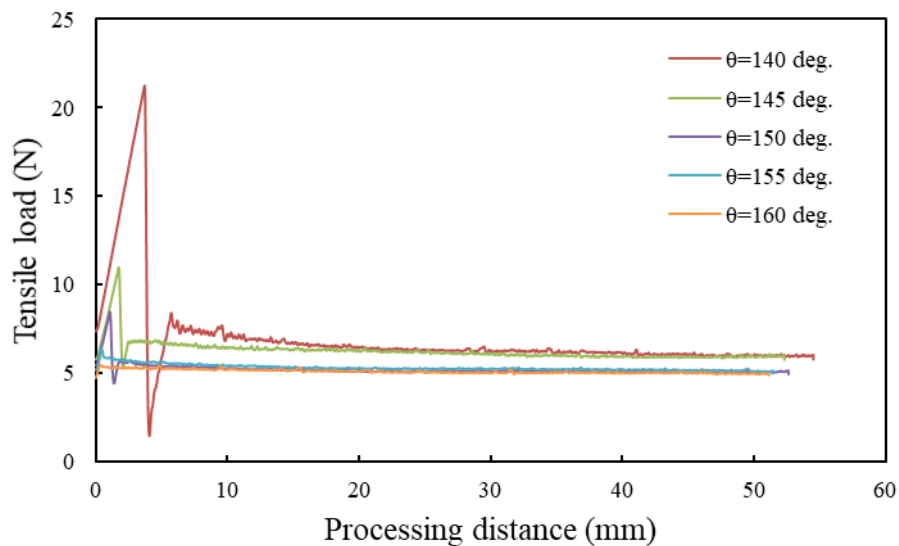


Fig.3-26 Relationship between tensile load and processing distance in SS processing on PET film at each processing angle. Processing conditions: $T=3.924\text{N}$, $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

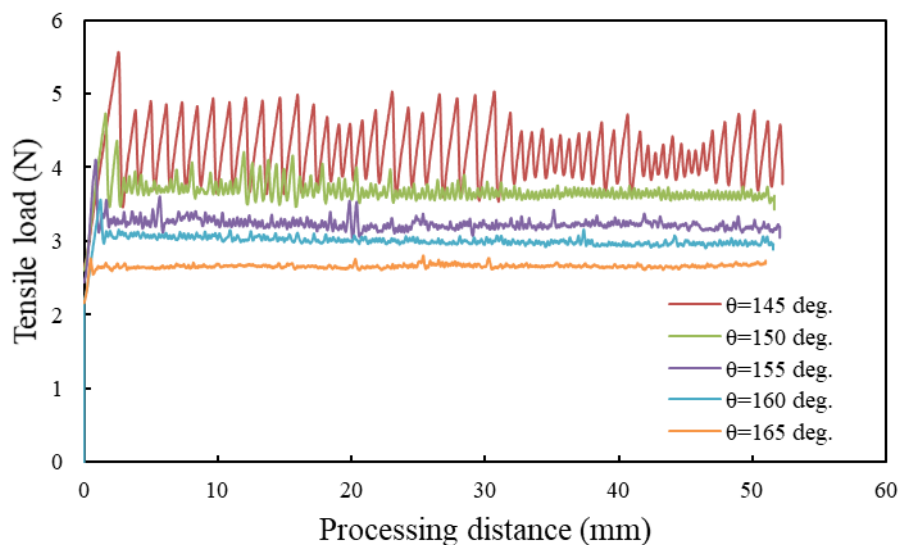


Fig.3-27 Relationship between tensile load and processing distance in SS processing on acrylic film at each processing angle. Processing conditions: $T=1.962\text{N}$, $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

Fig.3-28 及び Fig.3-29 より，PET フィルム及びアクリルフィルムに加工を行う時，加工速度を変えてもグラフの形はほとんど変化しないように見える．しかし，実際は Fig.3-30 が示すように，加工速度が 10 mm/min の時，振動は鋸刃状の波形をしており，その振幅は大きい．加工速度が 50 mm/min 及び 100 mm/min と速くなるに従って，振動の波形は正弦波に近づき，振幅は小さくなる．加工速度が 300 mm/min を超えると振動はほとんど観察できない．加工速度に対するこのような変化は中野らの報告¹⁰⁾と同じ傾向を示している．

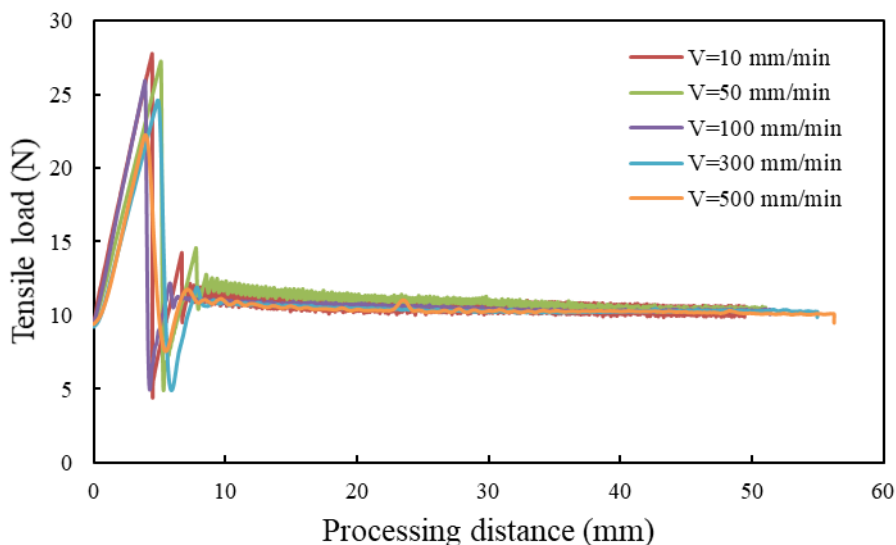


Fig.3-28 Relationship between tensile load and processing distance in SS processing on PET film at each processing speed. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm.

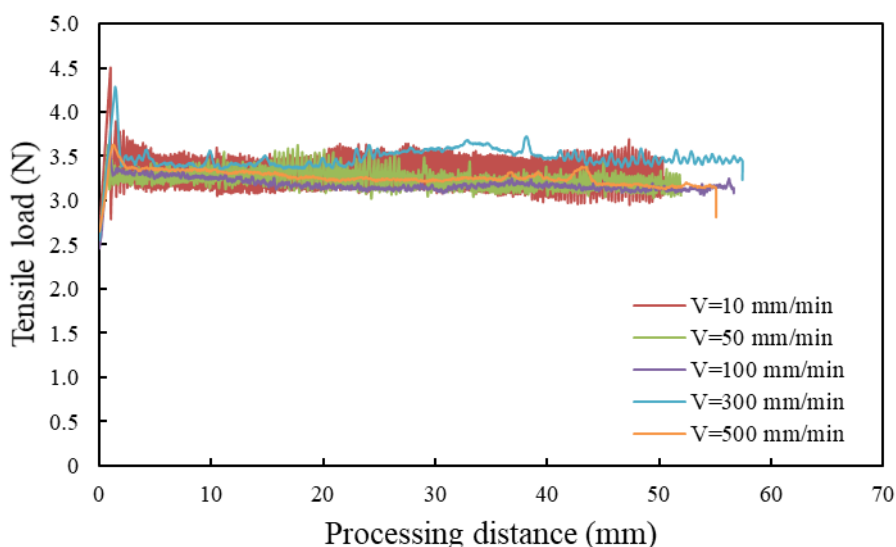


Fig.3-29 Relationship between tensile load and processing distance in SS processing on acrylic film at each processing speed. Processing conditions: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $L=1.0$ mm.

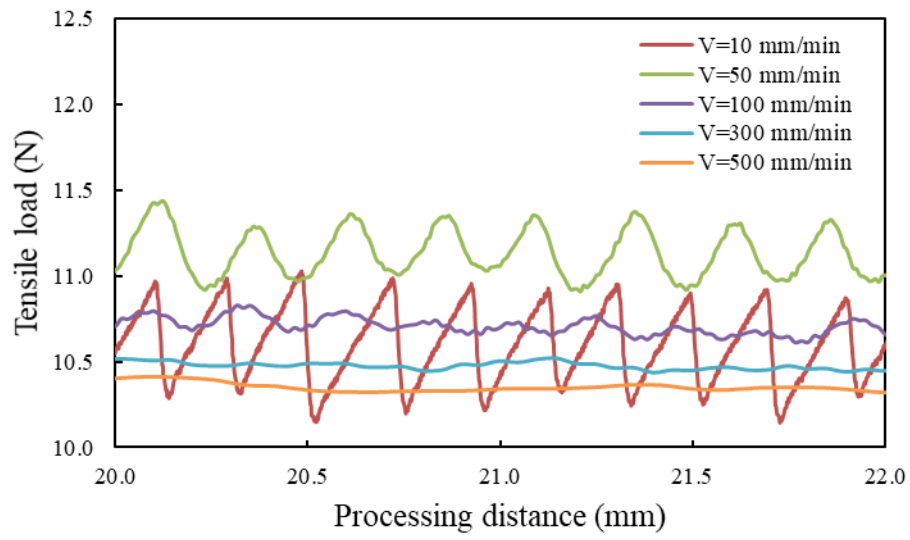


Fig.3-30 Enlarged view of the part where the tensile load looks constant in Fig.3-28.

Fig.3-31 及び Fig.3-32 より，PET フィルム及びアクリルフィルムに加工を行う時，1 回目のスリップ以降のフィルムにかかる荷重は刃の自由端長さに関わらずほとんど一定である。

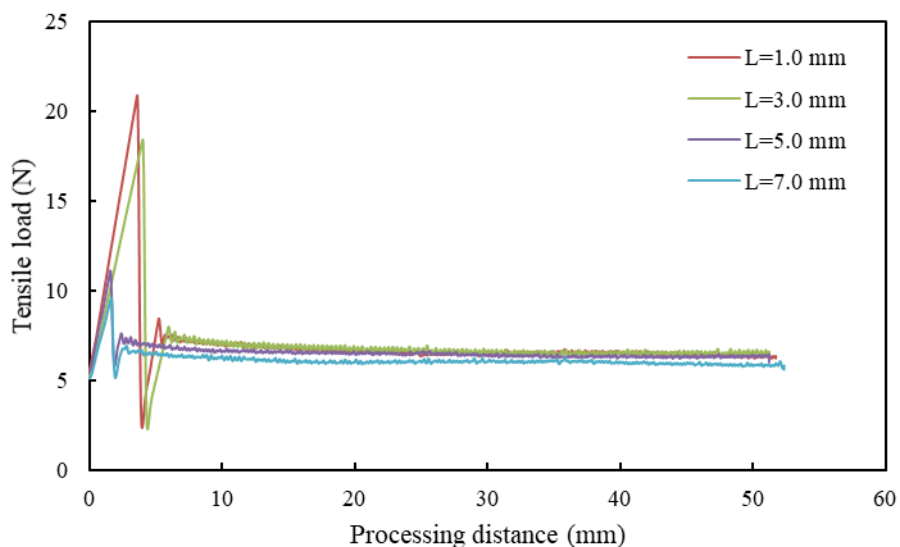


Fig.3-31 Relationship between tensile load and processing distance in SS processing on PET film at each free end length. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $V=100$ mm/min.

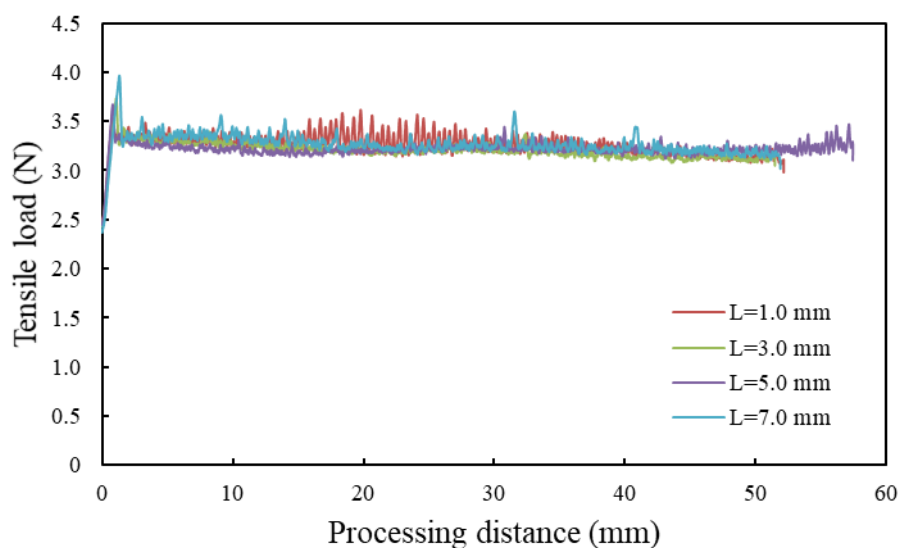


Fig.3-32 Relationship between tensile load and processing distance in SS processing on acrylic film at each free end length. Processing conditions: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $V=100$ mm/min.

Fig.3-33 から Fig3-40 は PET フィルム及びアクリルフィルムに加工を行った時の見かけの摩擦係数を加工条件ごとに示したグラフである。また、この数値を Table 3-1 にまとめて示す。なお、この方法により求めた見かけの摩擦係数は 4 章考察において計算に使用する。Fig.3-33 より、PET フィルムの見かけの摩擦係数は加工荷重が 7.848N と 9.81N の間で大きく傾向が異なり、9.81N より大きいときに見かけの摩擦係数は小さくなった。また、Fig.3-34 より、アクリルフィルムの見かけの摩擦係数は加工荷重が大きくなるほど小さくなった。また、見かけの静摩擦係数と見かけの動摩擦係数の差は、加工荷重が大きいくほど大きくなった。

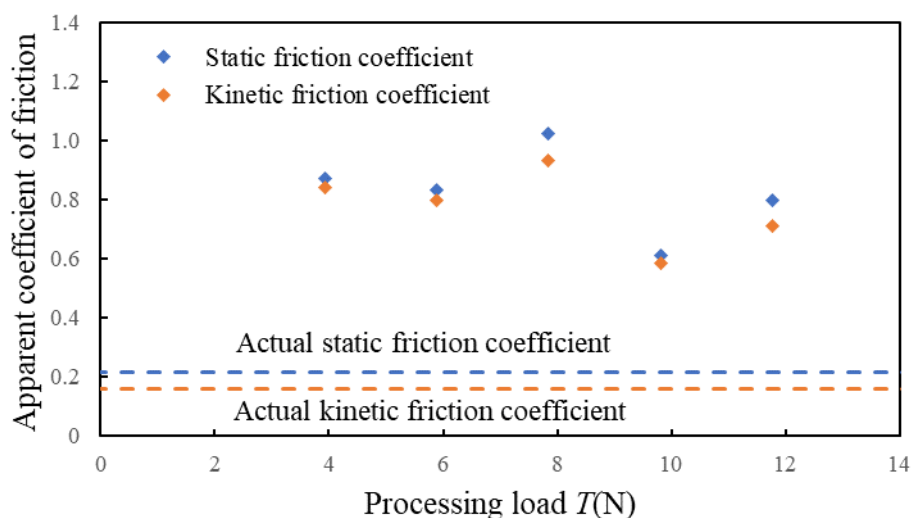


Fig.3-33 Processing load dependency of apparent coefficient of friction in SS processing on PET film. Processing conditions: $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

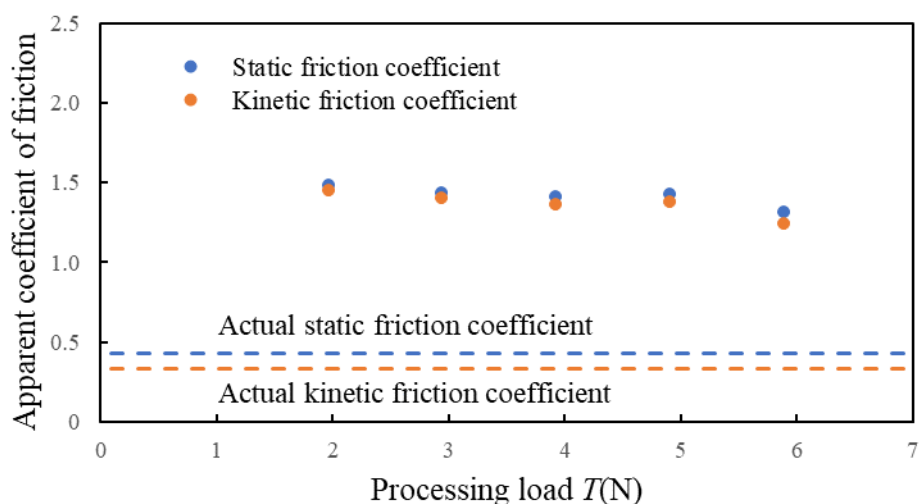


Fig.3-34 Processing load dependency of apparent coefficient of friction in SS processing on acrylic film. Processing conditions: $\theta=165$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

Fig.3-35 より，PET フィルムの見かけの摩擦係数は，145deg. と 150 deg. の間で大きく傾向が異なり，加工角度が 145deg.より小さい時に大きくなった．この閾値はサブミリ周期構造の形成の有無が分かれた時と同じであった． Fig.3-36 より，アクリルフィルムの見かけの摩擦係数は加工角度が小さくなるに従って大きくなり，見かけの静摩擦係数と見かけの動摩擦係数の差も大きくなった．

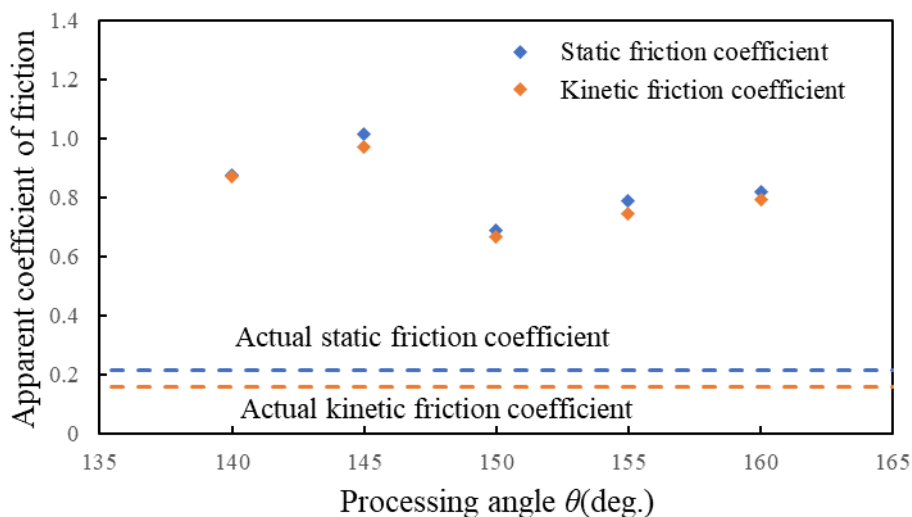


Fig.3-35 Processing angle dependency of apparent coefficient of friction in SS processing on PET film. Processing conditions: $T=3.924\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$.

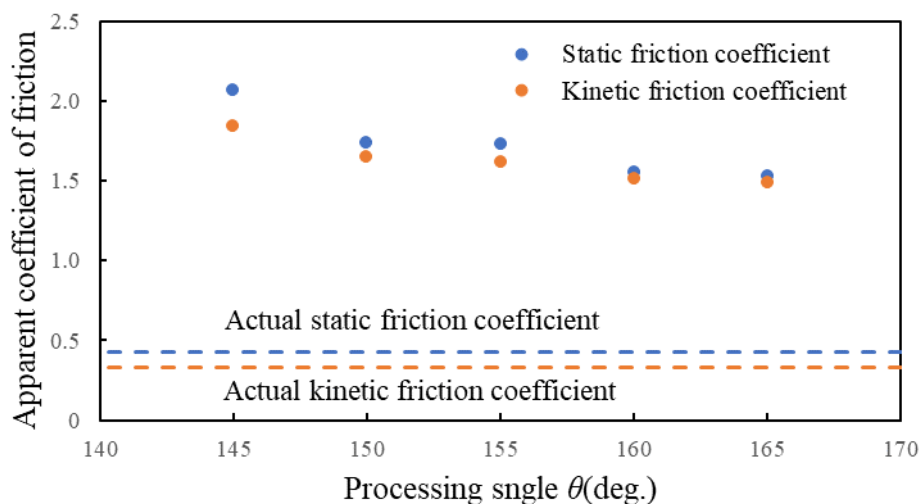


Fig.3-36 Processing angle dependency of apparent coefficient of friction in SS processing on acrylic film. Processing conditions: $T=1.962\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$.

Fig.3-37, Fig.3-38 より, PET フィルム及びアクリルフィルムの見かけの摩擦係数は, ほぼ一定となった. また, 加工速度が 100 mm/min より小さい時, 見かけの静摩擦係数と見かけの動摩擦係数の差は大きくなった.

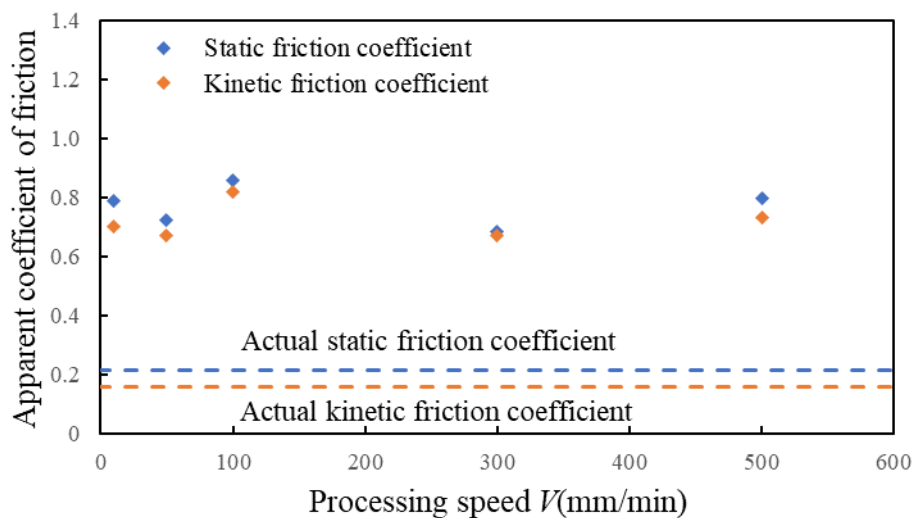


Fig.3-37 Processing speed dependency of apparent coefficient of friction in SS processing on PET film. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm.

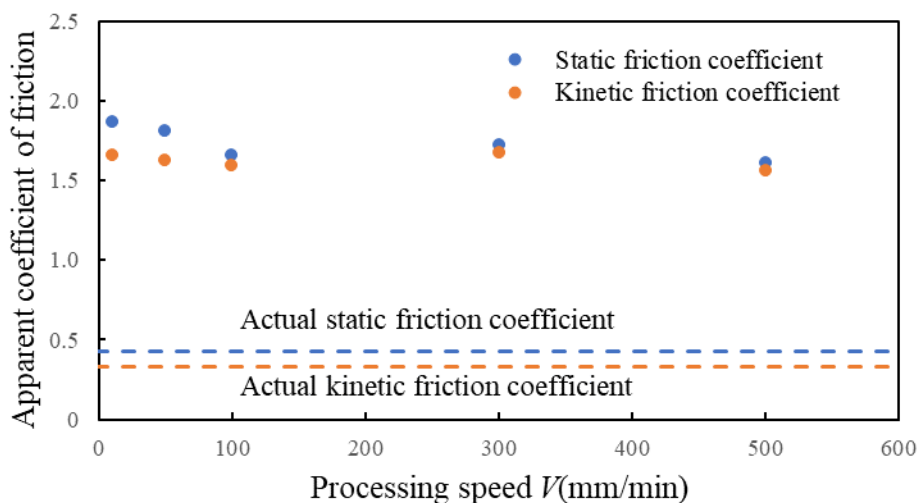


Fig.3-38 Processing speed dependency of apparent coefficient of friction in SS processing on acrylic film. Processing conditions: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $L=1.0$ mm.

Fig.3-39, Fig.3-40 より, PET フィルム及びアクリルフィルムの見かけの摩擦係数は, ほぼ一定となった. また, PET フィルムは, 刃の自由端長さが長い時, 見かけの静摩擦係数と見かけの動摩擦係数の差は大きくなった.

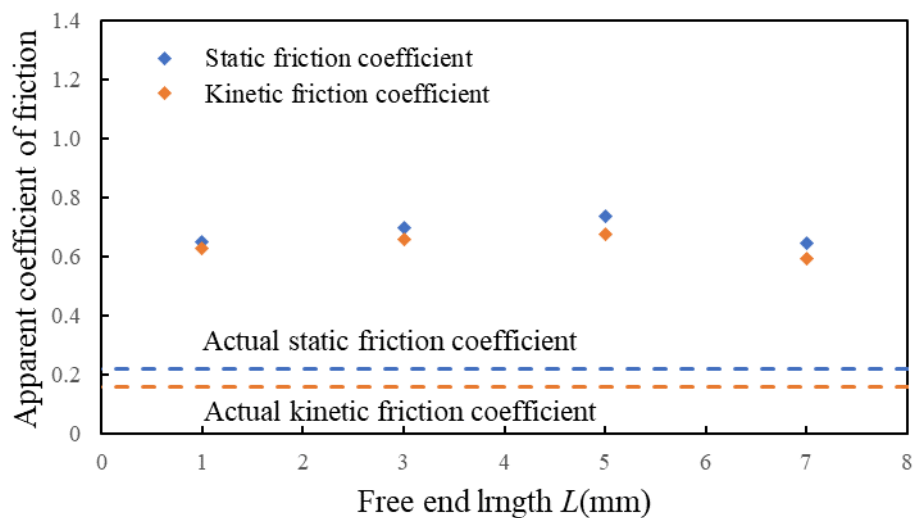


Fig.3-39 Free end length dependency of apparent coefficient of friction in SS processing on PET film. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $V=100$ mm/min.

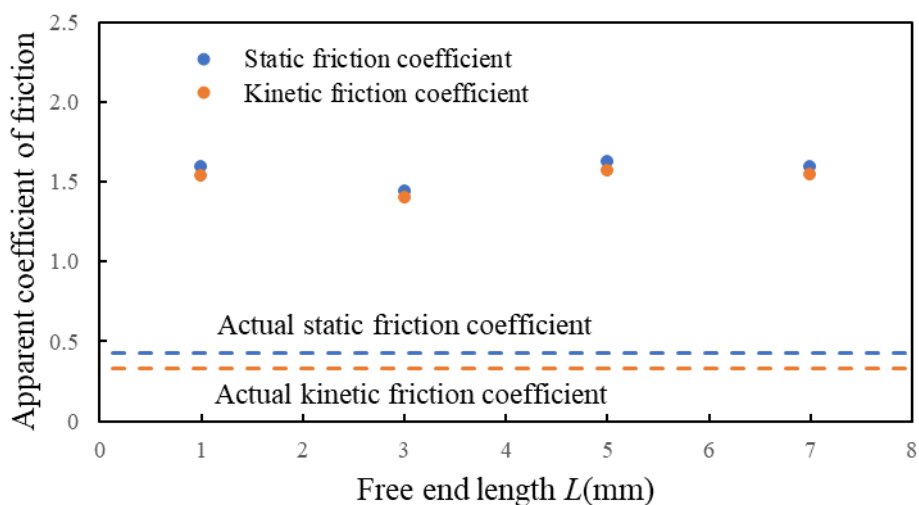


Fig.3-40 Free end length dependency of apparent coefficient of friction in SS processing on acrylic film. Processing conditions: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $V=100$ mm/min.

Table 3-1 Apparent coefficient of friction in SS processing.

PET film					
Processing load T 【N】	3.924	5.886	7.848	9.81	11.772
μ_s'	0.874	0.835	1.025	0.613	0.800
μ_k'	0.843	0.798	0.933	0.587	0.711
Processing angle θ	160	155	150	145	140
μ_s'	0.821	0.791	0.690	1.013	0.878
μ_k'	0.793	0.744	0.667	0.972	0.871
Processing speed V	10	50	100	300	500
μ_s'	0.791	0.722	0.858	0.686	0.799
μ_k'	0.702	0.671	0.821	0.669	0.733
Free end length L	1	3	5	7	
μ_s'	0.650	0.696	0.734	0.644	
μ_k'	0.627	0.657	0.674	0.594	
Acrylic film					
Processing load T	1.962	2.943	3.924	4.905	5.886
μ_s'	1.486	1.432	1.412	1.424	1.320
μ_k'	1.453	1.400	1.365	1.378	1.227
Processing angle θ	165	160	155	150	145
μ_s'	1.530	1.554	1.732	1.736	2.069
μ_k'	1.492	1.513	1.615	1.653	1.844
Processing speed V	10	50	100	300	500
μ_s'	1.870	1.815	1.656	1.722	1.613
μ_k'	1.657	1.625	1.598	1.678	1.566
Free end length L	1	3	5	7	
μ_s'	1.591	1.439	1.625	1.60	
μ_k'	1.546	1.401	1.570	1.548	

* Friction coefficients of PET film are $\mu_k = 0.158$ and $\mu_s = 0.216^{(1), 10)}$. Those of acrylic film are $\mu_k = 0.431$, $\mu_s = 0.329$.

3.3 その場観察の結果

3.3.1 刃の運動

光学顕微鏡を用いて、加工中の加工刃に焦点を合わせ、刃の動きを観察した。この時、刃は全長の半分以上が固定されており、刃の先端が 7.0mm だけ突き出した片持ち状態でフィルムに接触している。この状態でフィルムを図の左方向から右方向に移動させている。

Fig3-41 はその場観察の様子を USB カメラで録画した動画のスナップショットであり、上から順に(1)加工開始直後、(2)刃の先端の変位が最大となった瞬間、(3)刃が復元した直後、(5)再び刃の先端の変位が最大となった瞬間のスナップショットである。

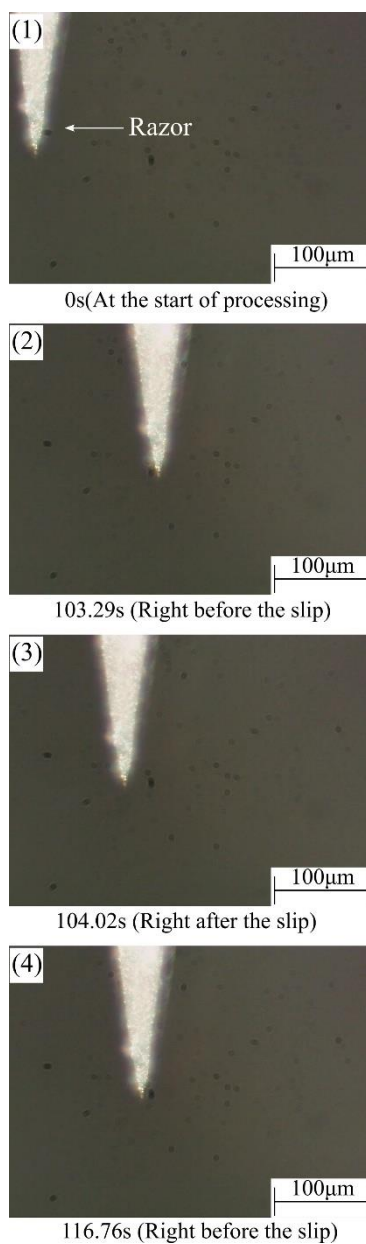


Fig.3-41 Snapshot of in-situ observation. Processing conditions: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg. , $V=1.0$ mm/min., $L=7.0$ mm.

Fig.3-42 はそれぞれ、加工条件を(a)基準の条件 ($T=1.962\text{N}$, $\theta=155\text{ deg.}$, $V=1.0\text{mm/min}$, $L=7.0$), (b)加工荷重を大きくした条件 ($T=2.943\text{N}$, $\theta=145\text{ deg.}$, $V=1.0\text{mm/min}$, $L=7.0$), (c)加工角度を小さくした条件 ($T=1.962\text{N}$, $\theta=145\text{ deg.}$, $V=1.0\text{mm/min}$, $L=7.0$)とした場合の USBカメラによるその場観察動画のスナップショットであり、(1)刃が復元した直後、(2)刃の先端の変位が最大となった瞬間、(3)再び刃が復元した直後のスナップショットである。

Fig.3-41(1)及び(2)より、刃の先端は刃が固定されているにもかかわらず左方向から右方向に移動していることが分かる。これは片持ち状態である刃の先端が曲げ変形をしていることを意味する。この時、刃の先端はフィルムに刺さり込んでおり、フィルムを移動させるに従って刃はフィルムから力を受け、フィルムと一体となって運動している（スティック状態）。また、Fig.3-41(2)及び(3)より、刃の先端は変形が最大となると右方向から左方向に急速に移動することが分かる。これは変形していた刃が急速に復元したことを意味する（スリップ状態）。この時、刃の先端の位置は Fig.3-41(1)の位置まで戻っていないことから、刃は完全には復元していないと言える。また、この時、刃の先端の移動方向はフィルムの移動方向とは反対方向であることから、刃とフィルムは相対的に移動している。この時、刃の先端がフィルムと離れて動き出した可能性と、刃の先端がフィルム表面を削りながら動き出した可能性の2つの可能性が考えられる。

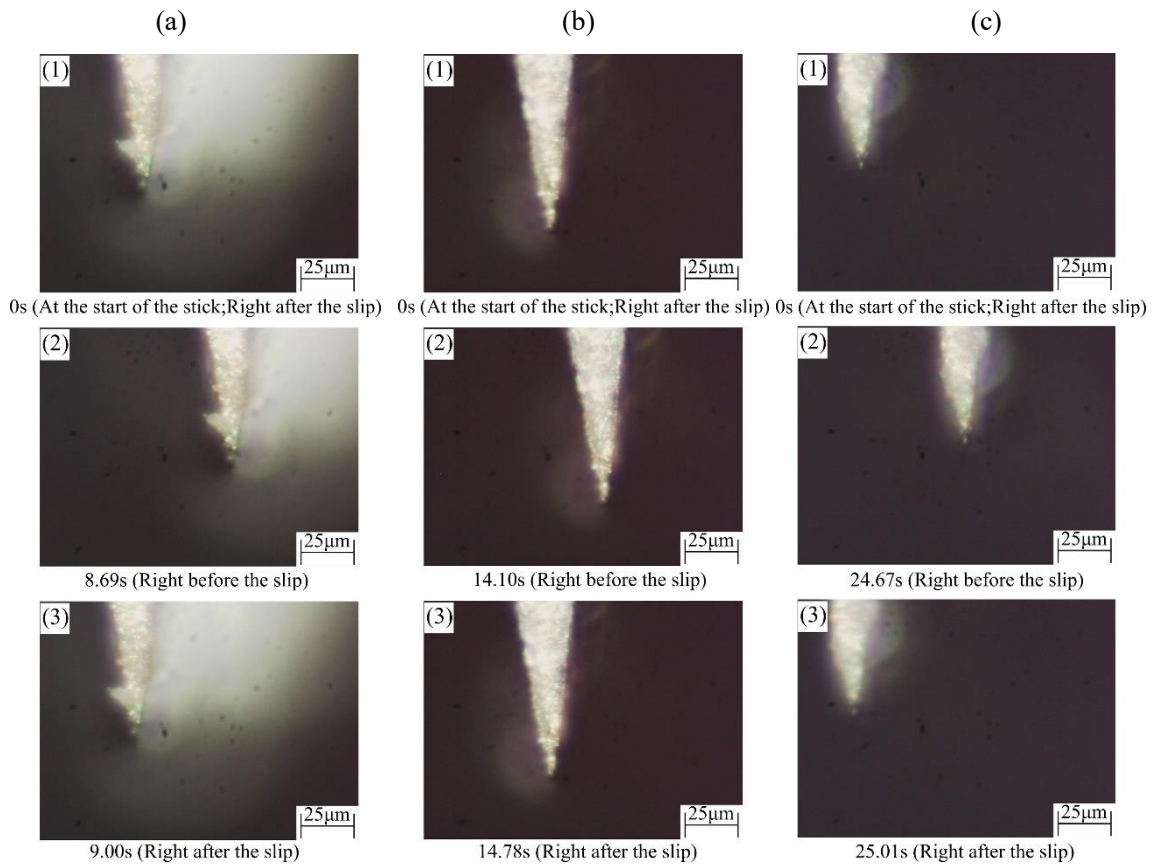


Fig.3-42 Snapshot of in-situ observation of blade motion. (a) Reference conditions.: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg. (b) Higher load condition. : $T=2.943$ N, $\theta=155$ deg. (c) Smaller angle condition. : $T=1.962$ N, $\theta=145$ deg.

Fig.3-43 から Fig.3-45 はそれぞれ、加工条件を、基準の条件、加工荷重を大きくした条件、加工角度を小さくした条件とした場合の、ハイスピードカメラによるその場観察動画のスナップショットであり、刃の先端の変位が最大となった瞬間から 1 フレーム (0.001 秒) ずつ進めたスナップショットである。なお、Fig.3-43 から Fig.3-45 の左側の縦線はハイスピードカメラの傷によるものであり、SS 加工とは無関係である。以後、フィルムの観察においても同様に結果を示す。

ハイスピードカメラではこのスリップ状態における刃の運動をより詳細に記録している。Fig.3-43(1)から(2)、(2)から(5)、(5)から(6)の刃の先端の位置を比較すると、刃は図の左右方向に振動していることが分かる。この振動は時間の経過と共に減衰しており、最後には Fig.3-41(1)の位置へと収束していき、再びスティック状態へと移行していく。

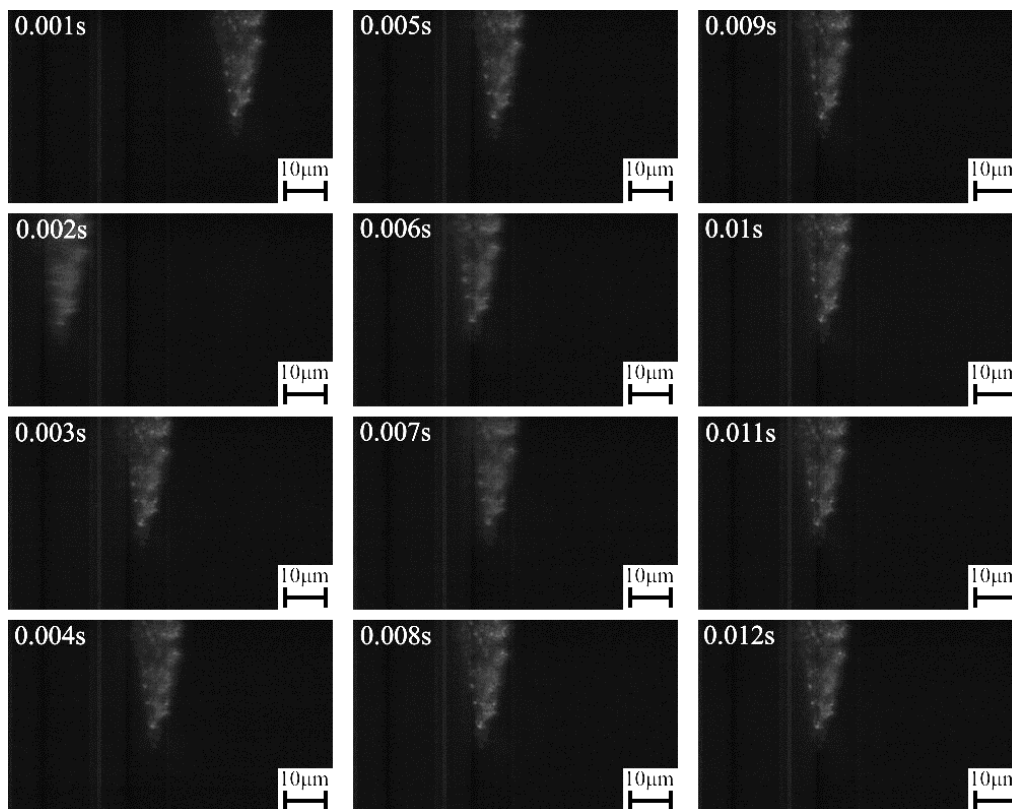


Fig.3-43 Snapshot of in-situ observation of blade motion. Processing conditions: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg. , $V=1.0$ mm/min., $L=7.0$ mm.

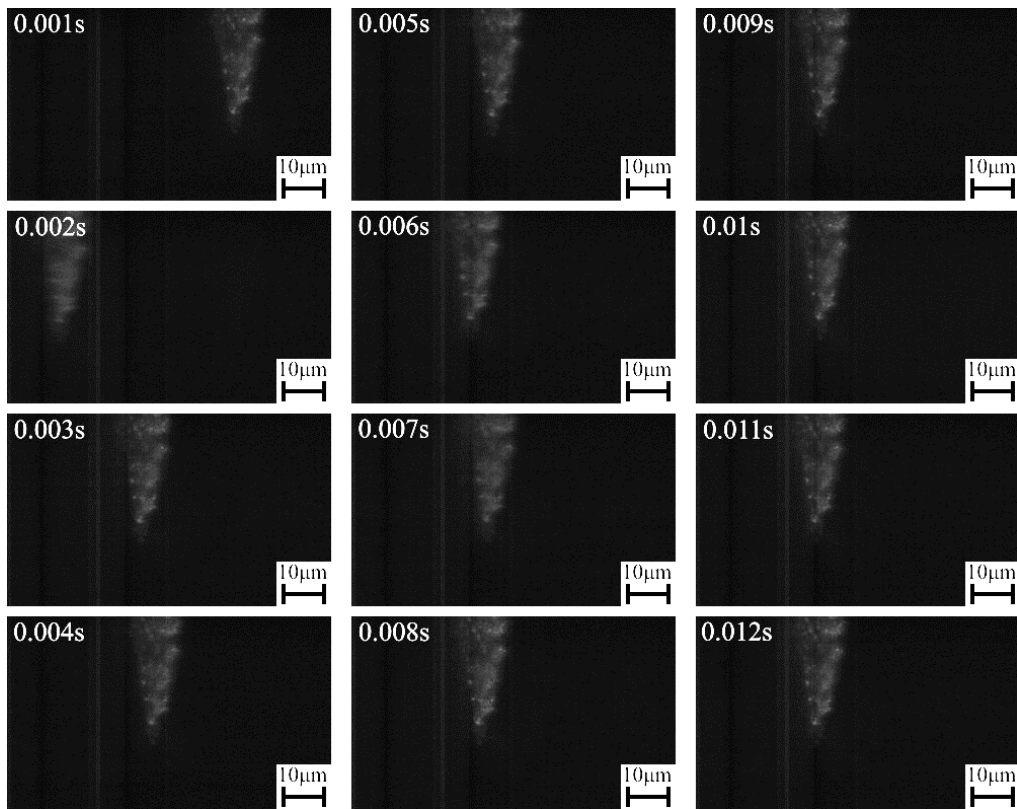


Fig.3-44 Snapshot of in-situ observation of blade motion. Processing conditions: $T=2.943\text{N}$, $\theta=155$ deg., $V=1.0$ mm/min $L=7.0$ mm.

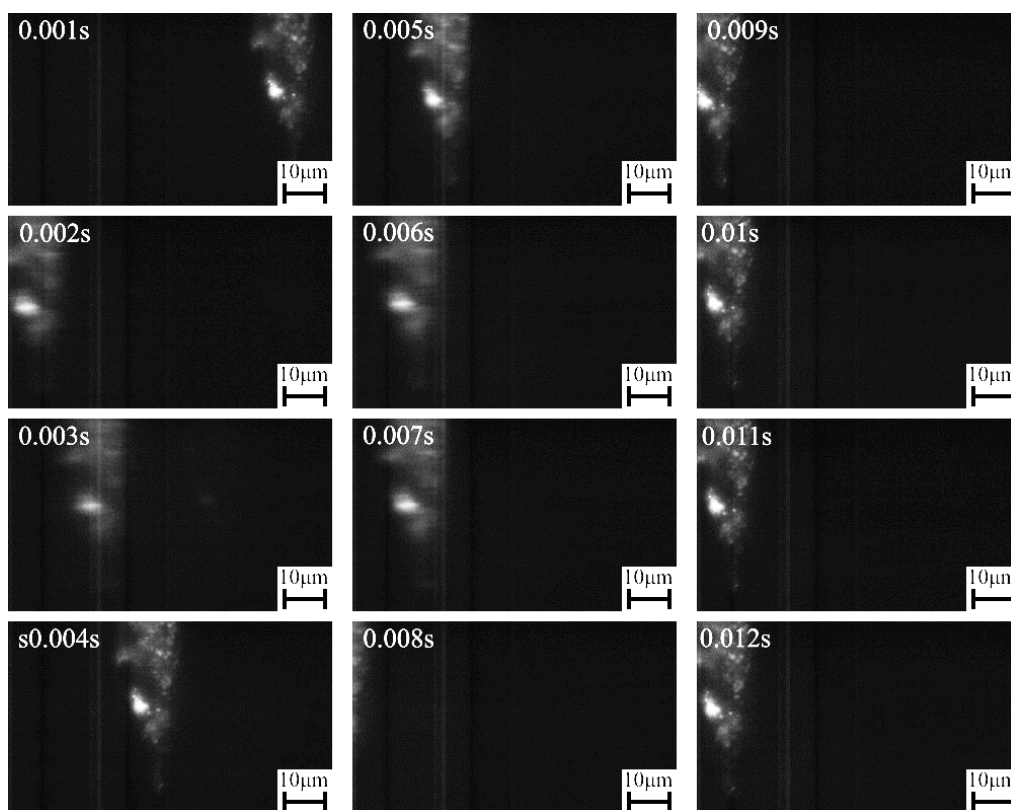


Fig.3-45 Snapshot of in-situ observation of blade motion. Processing conditions: $T=1.962\text{N}$, $\theta=145$ deg., $V=1.0$ mm/min $L=7.0$ mm.

3.3.2 フィルムの運動

光学顕微鏡を用いて、加工中の加工刃に焦点を合わせ、刃の動きを観察した。この時、刃は固定されており、刃の先端はフィルムに接触している。この状態でフィルムを左方向から右方向に移動させている。

Fig.3-46 はそれぞれ、加工条件を(a)基準の条件、(b)加工荷重を大きくした条件、(c)加工角度を小さくした条件とした場合の、USB カメラによるその場観察動画のスナップショットであり、(1)フィルムが復元した直後、(2)フィルムの伸びが最大となった瞬間、(3)再びフィルムが復元した直後のスナップショットである。フィルムの断面には試料の切断時に生じた微細な凹凸が存在し、これによって光を強く反射する位置がランダムに現れている。この位置を矢印で示す。

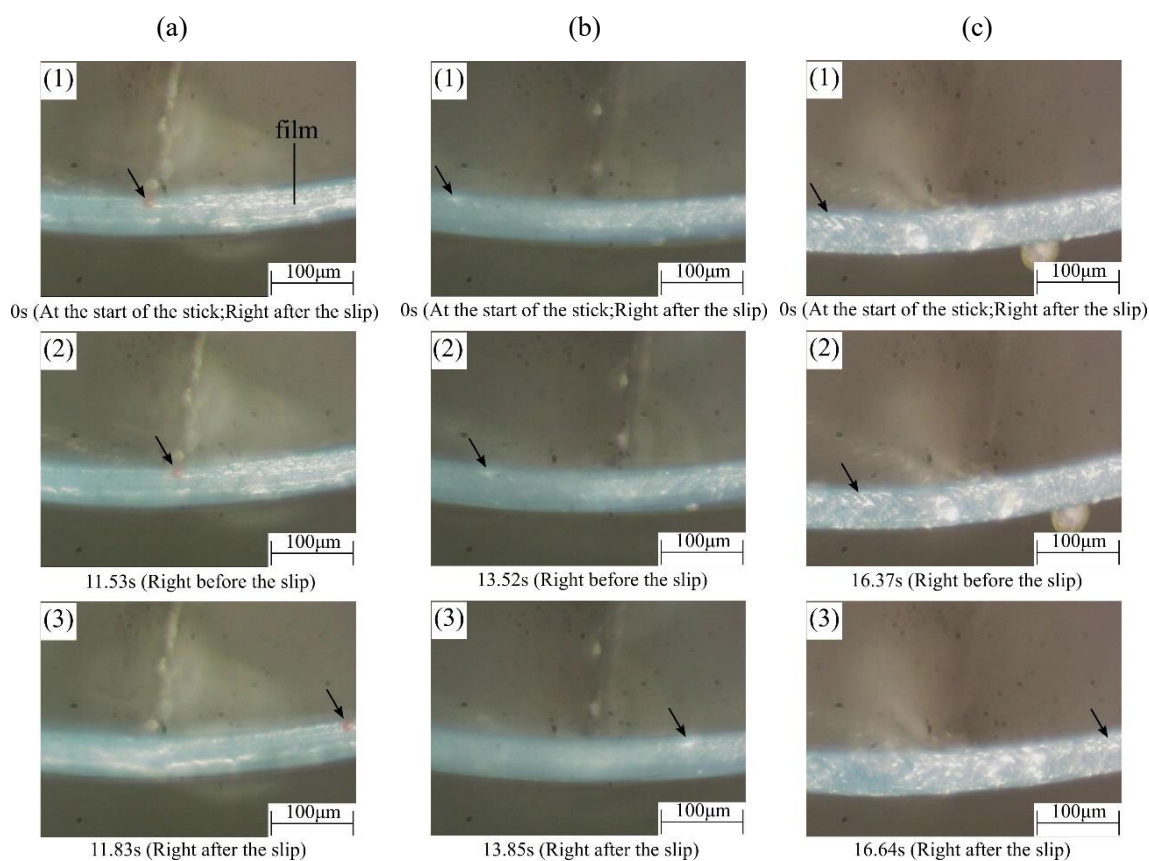


Fig.3-46 Snapshot of in-situ observation of film motion. (a) Reference conditions. : $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg. (b) Higher load condition. : $T=2.943$ N, $\theta=155$ deg. (c) Smaller angle condition.: $T=1.962$ N, $\theta=145$ deg. * Black arrow is observation point of displacement.

Fig.3-46(a) (1),(2)より、フィルムは左方向から右方向に動いていることが分かる。この時、フィルムの移動速度はモーターに設定した加工速度より遅くなっていた。また、Fig.3-46(a) (2),(3)より、フィルムは左方向から右方向に移動していることが分かり、この時の移動速度は非常に速く、モーターに設定した加工速度より速くなっていた。ここで、加工中のフィル

ムの移動速度を調べる. Fig.3-46 からフィルムの移動速度を計算した結果を Table3-1 に示す. (1), (2)の間で, フィルムの移動速度は設定した加工速度より一桁小さい速度であった. この時, モーターは正常に運転しており, 設定した加工速度でフィルムを巻き取っていた. これは, (1), (2)の間にフィルムに伸びが生じていることを示している. また, (2), (3)の間で, フィルムの移動速度は設定した加工速度より一桁以上大きい速度であった. これは, (1), (2)の間でフィルムに生じた伸びが, (2), (3)の間で瞬間的に復元されたことを示している.

ここで, 刃の運動とフィルムの運動を合わせて考えると, 初めに刃はフィルムに刺さり込んだ状態である. ここで, モーターを起動すると, フィルムの巻き取りが開始される. この時, 刃がフィルムに刺さり込んでいることで, フィルムは拘束された状態となっているため, フィルムの移動速度は遅くなり, 刃と一体となって移動する (スティック状態). この際に, 刃には曲げ変形が生じ, フィルムには伸びが生じる. 刃の変形及びフィルムの伸びが最大に達すると, 刃とフィルムは同時に復元を開始する (スリップ状態). 以後, 刃とフィルムはスティック状態とスリップ状態を交互に繰り返す.

Table3-1 Moving speed of film.

	(a) Reference conditions	(b) Higher load condition.	(c) Smaller angle condition
Speed in stick state [$\mu\text{m/s}$]	3.17	3.15	2.34
Speed in slip state [$\mu\text{m/s}$]	726.83	753.12	1118.14

* Processing speed $V=16.77\mu\text{m/s}$

Fig.3-47 から Fig.3-49 はそれぞれ, 加工条件を, 基準の条件, 加工荷重を大きくした条件, 加工角度を小さくした条件とした場合の, ハイスピードカメラによるその場観察動画のスナップショットであり, フィルムの伸びが最大となった瞬間から 1 フレーム (0.001 秒) ずつ進めたスナップショットである. なお, Fig.3-49 においては観察範囲のほとんど全体がフィルムとなっている. Fig.3-47, Fig.3-48 と同じ倍率で観察しているため, フィルムがねじれて, 表面部が見えている可能性がある. また, フィルムの移動量は USB カメラで観察した場合と同様に, 光を強く反射している位置の変化から観察する.

Fig.3-46(a)(2)及び(3)のフィルムが急速に移動した時 (スリップ状態) の様子を, ハイスピードカメラでより詳細に記録している. Fig.3-47(2)から(3), (3)から(6), (6)から(7)の比較より, フィルムの移動速度は加速と減速が交互に繰り返されている. また(8)以降はフィルムの動きが非常に小さく, ほとんど変化していない. 従って, (8)の時点でスリップ状態からスティック状態に移行したと考えられる. 同様に Fig.3-48 では(10)の時点で Fig.3-49 では(9)の時点でスリップ状態からスティック状態に移行したと考えられる.

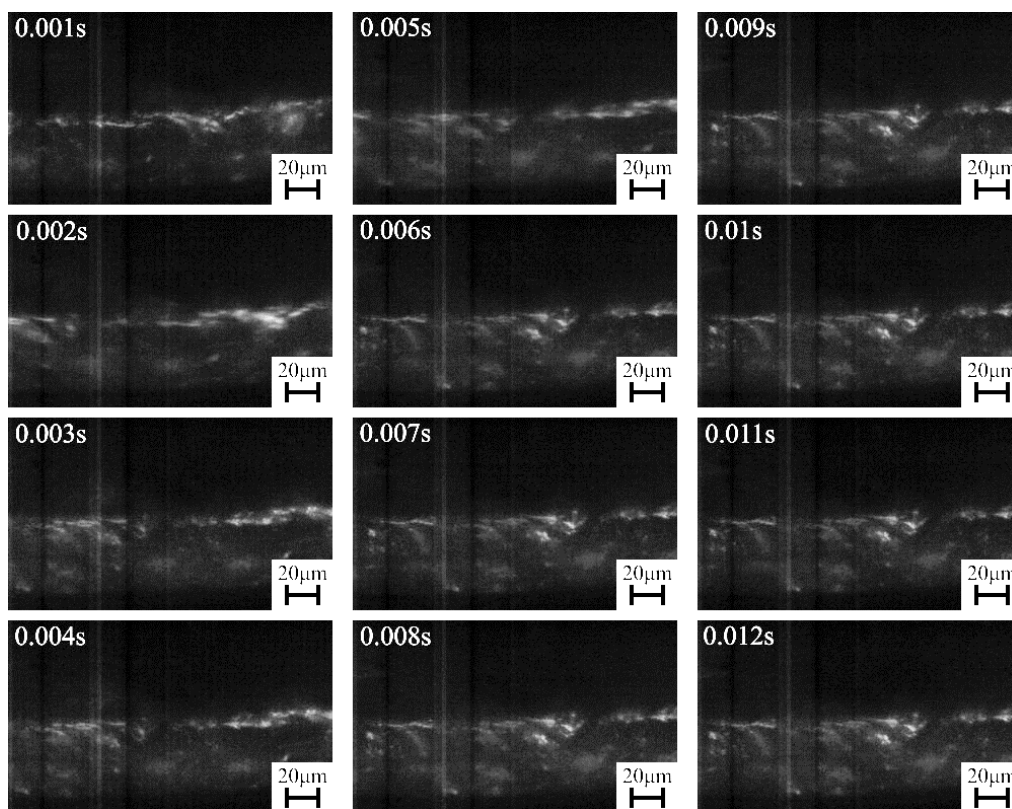


Fig.3-47 Snapshot of in-situ observation of film motion. Processing conditions: $T=1.962\text{N}$, $\theta=155$ deg., $V=1.0$ mm/min $L=7.0$ mm.

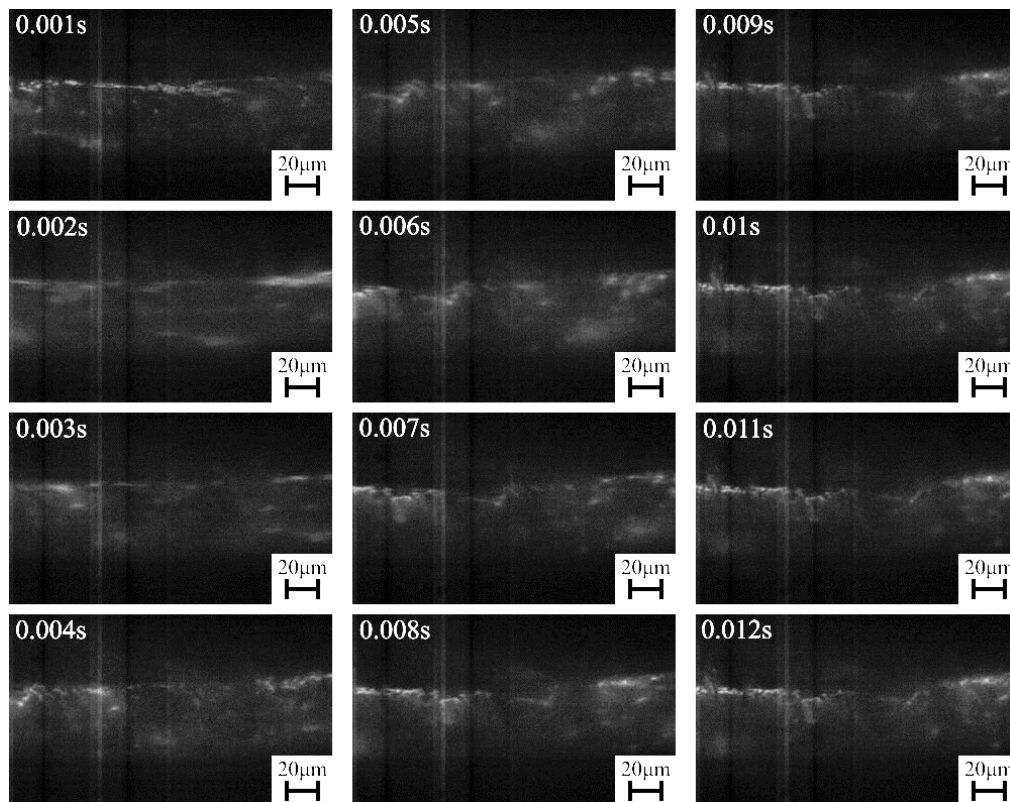


Fig.3-48 Snapshot of in-situ observation of film motion. Processing conditions: $T=2.943\text{N}$, $\theta=155$ deg., $V=1.0$ mm/min $L=7.0$ mm.

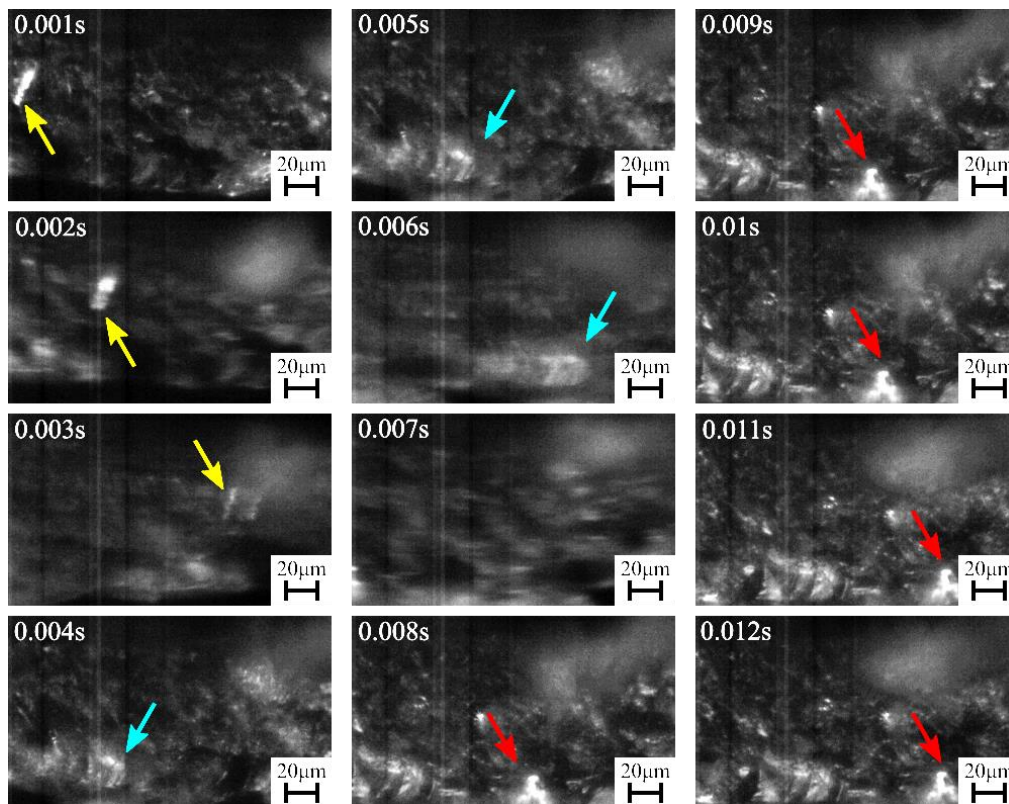


Fig.3-49 Snapshot of in-situ observation of film motion for each frame. Processing conditions: $T=2.943\text{N}$, $\theta=145\text{ deg.}$, $V=1.0\text{ mm/min}$ $L=7.0\text{ mm}$. * arrows is observation point of displacement.

第4章 考察

4.1 サブミリ周期構造の形成メカニズム

4.1.1 SS加工モデルの提案と評価

まず、サブミリ周期構造の形成メカニズムを考える。その場観察の結果より、スティックスリップ振動は、刃とフィルムそれぞれの変形と復元によるものであった。刃の運動は刃の曲げ変形と復元の繰り返し運動であり、フィルムの運動はフィルムの伸びと復元の繰り返し運動であることが分かった。ここから刃及びフィルムの運動をまとめた模式図を Fig.4-1 に示す。ここで、Fig.4-1(a)から(c)は Fig.3-42 及び Fig.3-46 の(1)から(3)に対応しており、それぞれ(a)スティック状態開始時、(b)スリップ状態開始直前、(c)スリップ状態終了時（次のスティック状態開始時）である。また Fig.4-1 中の量記号は、 l_0 が刃とフィルムが最初に接触した位置から万能試験機までの長さ、 ΔL が刃の変形量、 Δl がフィルムの弾性変形に相当する量、 V が加工速度、 t が(b)から(c)の間に経過した時間（スリップ状態に要した時間）、 $L_{\text{sub-mm}}$ がサブミリ周期構造を示す。

Fig.4-1(a)において、刃はフィルムに刺さり込んでいる。フィルムを左方向から右方向へ移動させると、刃は曲げを、フィルムは伸びを生じて、その変形が最大となった時に Fig.4-1 (b)の状態になる。スティック状態からスリップ状態に移ると、刃とフィルムは復元して Fig.4-1 (c)の状態になる。なお、図中の Vt とは(b)から(c)の間にフィルムを移動させた距離である。ここで、Fig.4-1(c)において(a)から(b)の間に生じた刃の変形及びフィルムの伸びが全て復元されたと仮定すると、刃の刺さり込んでいた跡と次に刃が刺さり込む位置の長さはサブミリ周期構造 $L_{\text{sub-mm}}$ に等しい。この時、サブミリ周期構造 $L_{\text{sub-mm}}$ は Fig.4(b)及び(c)の位置関係から以下の式で示される。

$$L_{\text{sub-mm}} + l_0 = \Delta L + l_0 + \Delta l + Vt_{\text{slip}} \dots\dots\dots (4)$$

$$L_{\text{sub-mm}} = \Delta L + \Delta l + Vt_{\text{slip}} \dots\dots\dots (5)$$

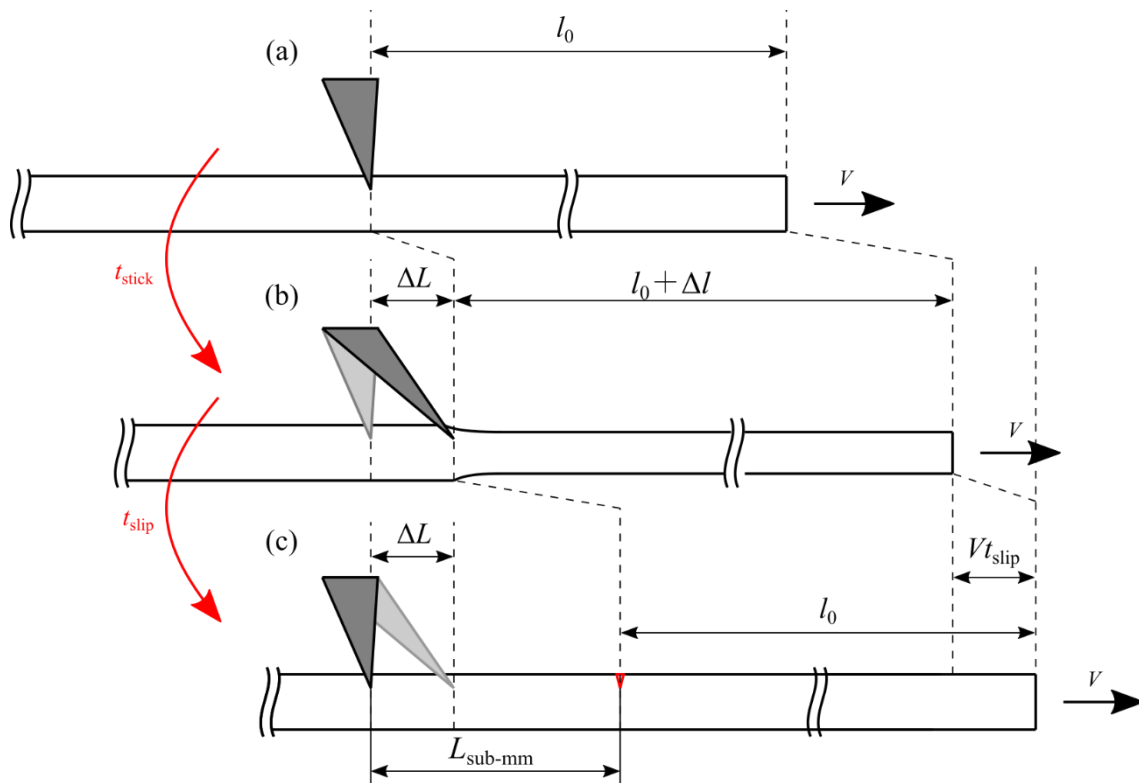


Fig.4-1 Schematic diagram of motion of the blade and the film during the SS processing. (a)At the start of the stick. (b)Right before the slip. (c)Right after the slip. l_0 is length between the first contact point of the blade and a clamp of the tensile tester, ΔL is deflection of the blade, Δl is amount equivalent to film elongation, V is the processing speed, t is Elapsed time between (b)and (c), $L_{\text{sub-mm}}$ is the structure period of the submillimeter periodic structure.

さらに、Fig.4-2 にフィルムの伸びを考慮した SS 現象を説明するモデルを示す。これはフィルムに伸びが生じた時、伸びの大きさに比例する復元力が働くため、これをばねとして考えて Fig.1-1(a)を修正したものである。なお、Fig.1-1(a)は、剛体（材料 B）に対する弾性体（剛体である材料 A とばねを一体として考える）の SS モデルである。これと同様に剛体とばねを一体として考えると、Fig.4-2 は弾性体（剛体である材料 A とばね）と弾性体（剛体である材料 B とばね）の SS モデルである。Fig.4-2 中の量記号は、 k_1 が刃のばね定数、 k_2 がフィルムのばね定数、 W が垂直荷重を示す。

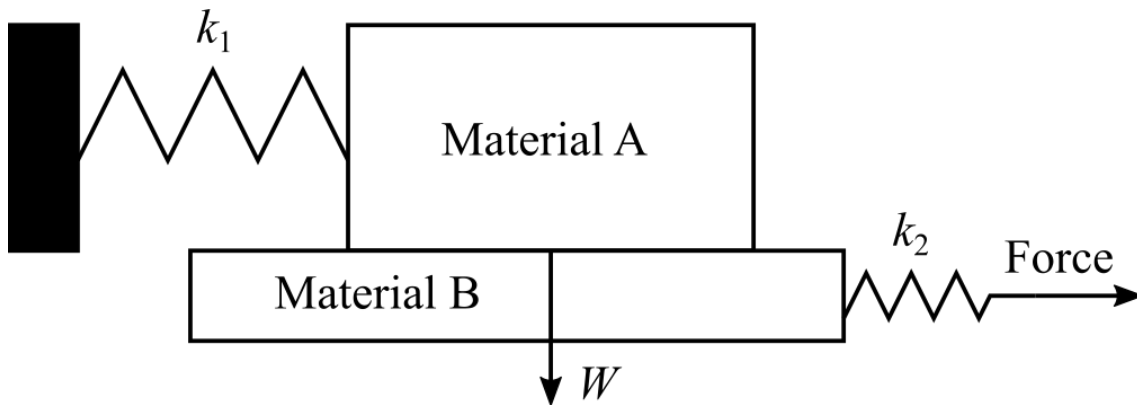


Fig.4-2 Modified stick-slip model.

ここで材料 A 及び材料 B について力の釣り合いを考えると、刃とフィルム間の静止摩擦係数を μ_s として

$$k_1 \Delta L = \mu_s W \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$k_2 \Delta l = \mu_s W \quad \dots\dots\dots (7)$$

(5)から(7)より

$$L_{\text{sub-mm}} = \frac{\mu_s W}{k_1} + \frac{\mu_s W}{k_2} + Vt = \frac{(k_1 + k_2)\mu_s W}{k_1 k_2} + Vt \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(8)において、 k_1 、 k_2 は計算によって与えられ、 W 、 V は加工条件から決定するため、静止摩擦係数 μ_s とスリップ状態に要した時間 t が分かれば式(8)は計算が可能である。ここで、 μ_s には 3.2 で求めた見かけの静止摩擦係数を導入する。また、 t はスリップ状態に要した時間であるから、Fig3-24 から Fig.3-32 のフィルムにかかる荷重が減少するのに要する時間を調べることで求めることができる。また、スリップ状態に要した時間 t は各加工条件に対して 30 データの平均値をとった。Table4-1 に刃のばね定数 k_1 を、Table4-2 にフィルムのばね定数 k_2 を示し、Table4-3 にスリップ状態に要した時間 t を各加工条件について示す。なお、刃のばね定数 k_1 の計算方法及び、フィルムのばね定数 k_2 の導出方法は、6 章付録に示す。

Table4-1 Spring constant of blade for free end length of blade.

Free end length L [mm]	1	3	5	7
k_1 [N/m]	296525	216574	107691	50837

Table4-2 Spring constant of PET film and acrylic film.

Film	PET film	Acrylic film
Spring constant k_2 [N/m]	23855	12918

Table4-3 Elapsed time during the slip state (between the stick states) for each processing condition.

PET film					
Processing load T [N]	3.924	5.886	7.848	9.81	11.772
t [s]	0.06	0.073	0.127	0.102	0.153
Processing angle θ [deg.]	160	155	150	145	140
t [s]	0.03	0.029	0.039	0.082	0.061
Processing speed V [mm/min]	10	50	100	300	500
t [s]	0.207	0.125	0.087	0.072	0.073
Free end length L [mm]	1	3	5	7	
t [s]	0.078	0.093	0.086	0.085	
acrylic film					
Processing load T [N]	1.962	2.943	3.924	4.905	5.886
t [s]	0.042	0.064	0.092	0.095	0.116
Processing angle θ [deg.]	165	160	155	150	145
t [s]	0.071	0.106	0.109	0.119	0.146
Processing speed V [mm/min]	10	50	100	300	500
t [s]	0.200	0.151	0.074	0.056	0.045
Free end length L [mm]	1	3	5	7	
t [s]	0.087	0.064	0.074	0.084	

ここで、Fig.4-1 の形成メカニズム及び Fig.4-2 のモデリングの妥当性を検証するため、式(8)による計算値について、中野らが提案する純粋な SS の理論式から導かれる計算値及び実験値と比較を行う。中野らによると、SS 現象の振動数 f_{SS} 、振動周期 T_{SS} は、一自由度振動系、剛性体、クーロン摩擦則を前提とした場合、以下の式で表される¹¹⁾。

$$f_{SS} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \left\{ 1 + \frac{1}{\pi} (\lambda - \tan^{-1} \lambda) \right\}^{-1} \dots\dots\dots (9)$$

$$\lambda = \frac{(\mu_s - \mu_k)W}{V\sqrt{mk}} \dots\dots\dots (10)$$

$$T_{SS} = \frac{1}{f_{SS}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \left\{ 1 + \frac{1}{\pi} (\lambda - \tan^{-1} \lambda) \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 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 (ばね定数) 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る。

この振動が構造周期を形成すると考えるとサブミリ周期構造の構造周期 L_{sub-mm} は以下の式で表される。

$$L_{sub-mm} = T_{SS} \times V \dots\dots\dots (12)$$

以上の考えに基づいて式(8)及び式(12)によって求めた各加工条件に対する L_{sub-mm} の計算値と、実験値を Fig.4-3 から Fig.4-10 に示す。ここから、式(12)によって求めた計算値はオーダーが 1 桁以上異なり、サブミリ周期構造の予測には不適であることが示された。これは、中野のモデルではフィルムを剛体として扱っており、フィルムの伸びを考慮していないためであると考えられる。また、式(8)によって求めた計算値は実験値と近い値を示した。ここから、Fig.4-2 でフィルムを弾性体と考えたことで、モデルは実際の SS 加工に近づいたと言える。

ここで、計算値と実験値の比較を各加工条件に付いて詳しく調べる。Fig.4-3 より、PET フィルムの計算値は加工荷重が大きくなるほど大きくなり、実験値と同様の傾向を示すが、加工荷重が大きくなると計算値と実験値の差は大きくなる。Fig.4-4 より、アクリルフィルムの計算値は加工荷重が大きくなるほど大きくなった。実験値と比較すると、荷重が大きいときに計算値と実験値は近い値をとるが、加工荷重が小さくなると数値の差が大きくなった。

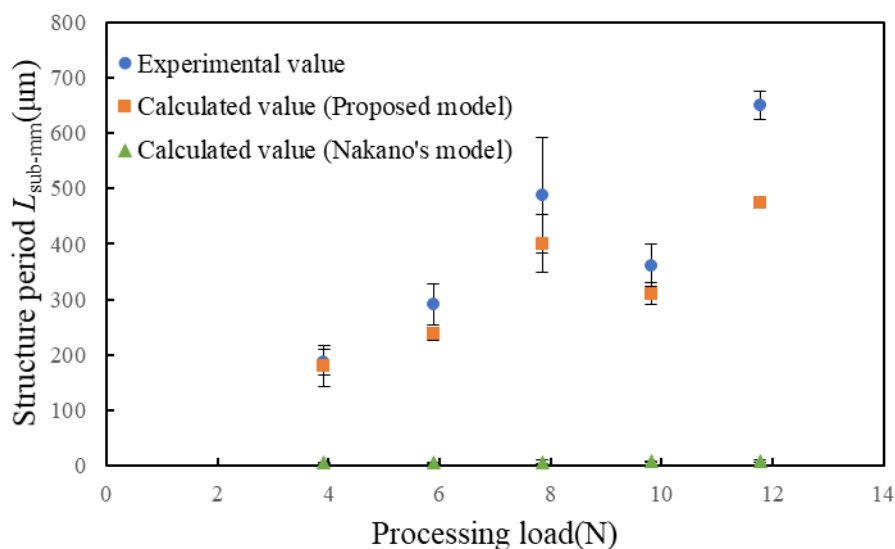


Fig.4-3 Processing load dependency of structure period of submillimeter periodic structure of PET film. Processing conditions: $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

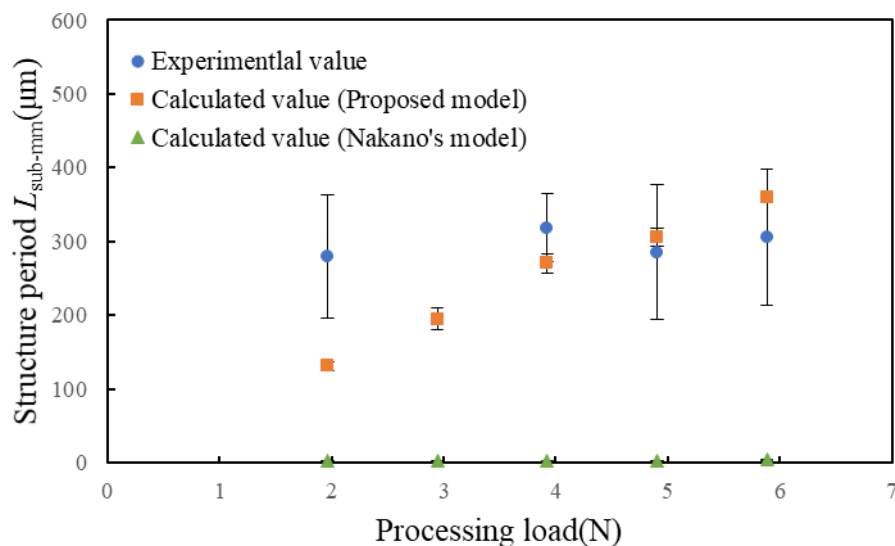


Fig.4-4 Processing load dependency of structure period of submillimeter periodic structure of acrylic film. Processing conditions: $\theta=165$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

Fig.4-5, Fig.4-6 より, PET フィルム及びアクリルフィルムどちらの計算値も, 実験値と近い値を示した. 計算値は加工角度が小さくなるほど大きくなる傾向を示した.

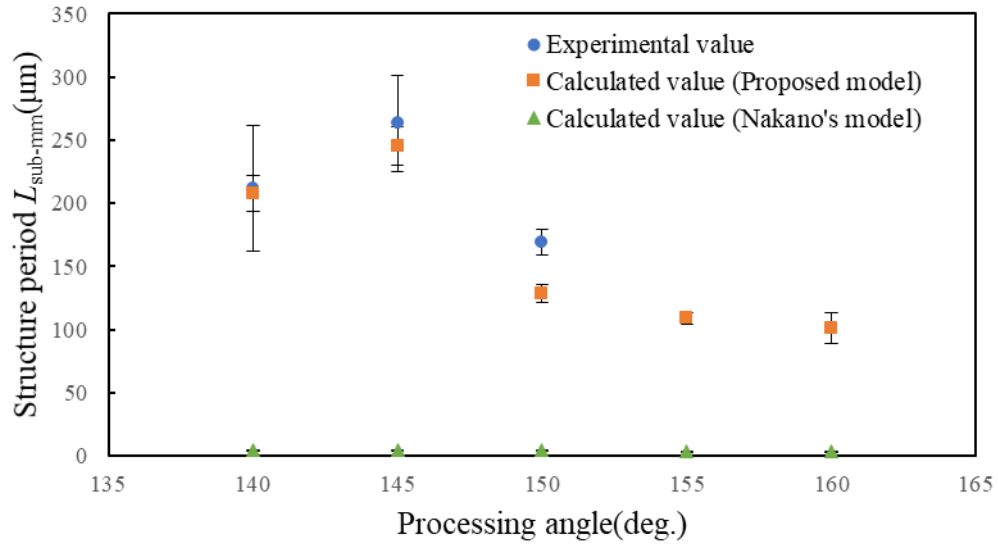


Fig.4-5 Processing angle dependency of structure period of submillimeter periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=3.924\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$.

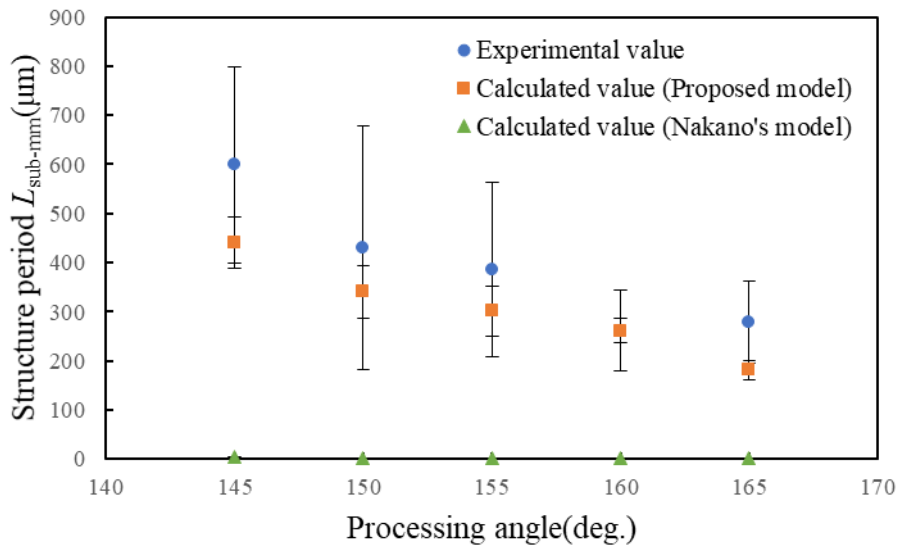


Fig.4-6 Processing angle dependency of structure period of submillimeter periodic structure of acrylic film. Processing conditions: $T=1.962\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$.

Fig.4-7, Fig.4-8 より, PET フィルム及びアクリルフィルムどちらの計算値も, 加工速度が 100 mm/min までは, 実験値に近い値を示す. 加工速度が 300 mm/min を超えると, アクリルフィルムの計算値は実験値と大きく離れた.

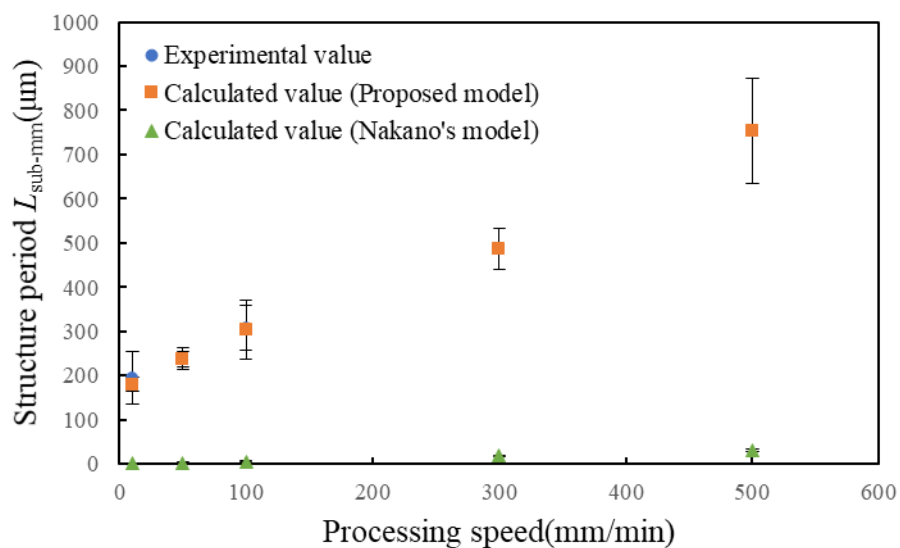


Fig.4-7 Processing speed dependency of structure period of submillimeter periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm.

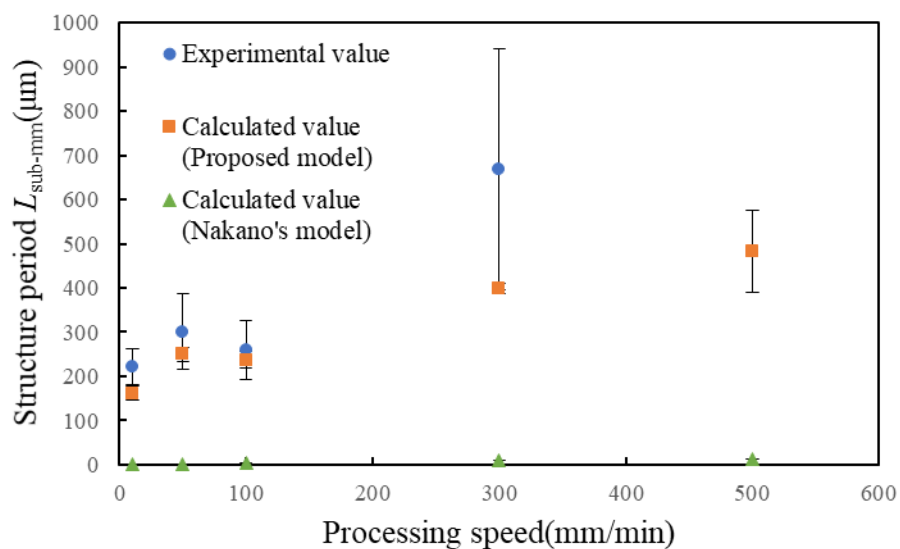


Fig.4-8 Processing speed dependency of structure period of submillimeter periodic structure of acrylic film. Processing conditions: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $L=1.0$ mm.

Fig.4-7, Fig.4-8 より, PET フィルム及びアクリルフィルムどちらの計算値も, 実験値と同様に自由端長さに関わらず一定であった. またその値も実験値の誤差範囲内の近い値を示した. 全加工条件を通して, 式(8)によって求めた計算値は実験値の傾向と類似しており, その数値は実験値よりやや低いものの, 近い値を示した.

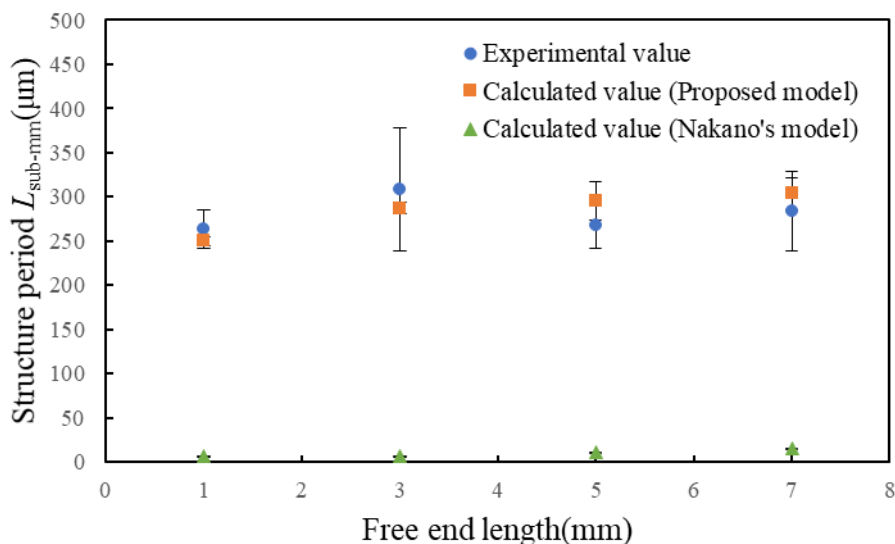


Fig.4-9 Free end length dependency of structure period of submillimeter periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $V=100$ mm/min.

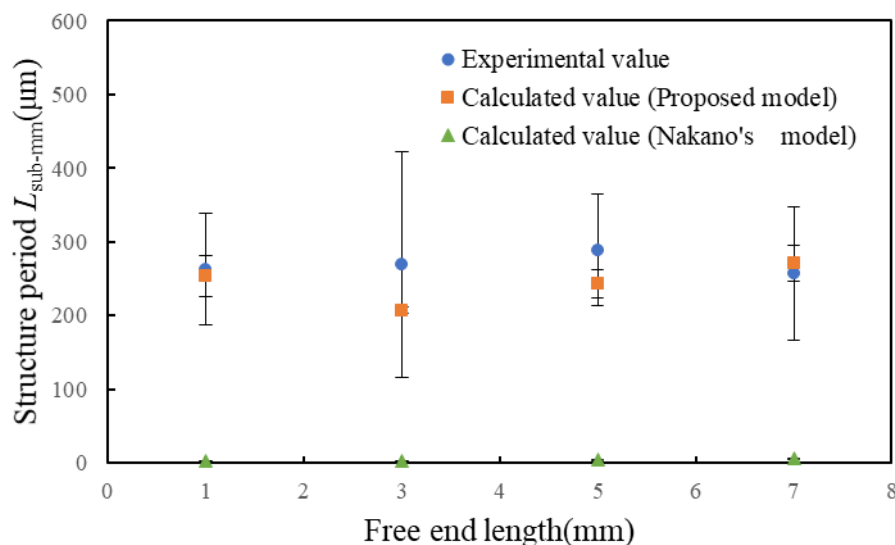


Fig.4-10 Free end length dependency of structure period of submillimeter periodic structure of acrylic film. Processing conditions: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $V=100$ mm/min.

以上の結果より，式(8)によって求めた計算値と実験値は各加工条件に対して近い値を示すことから，Fig.4-1 及び Fig.4-2 のモデリングは適切であったと言える．一方，式(12)から求めた計算値は実験値より大幅に低い数値となった．筆者の提案したモデルと中野のモデルの違いはフィルムの伸びを考えているか否かの差である．ここで，大きな差が生じたことからフィルムの伸びはサブミリ周期構造の構造周期の長さを決定する大きな要因であると言える．

また，SS 加工におけるサブミリ周期構造の形成メカニズムが，刃の曲げと復元及びフィルムの伸びと復元による周期的な運動によるものであることが明らかとなった．なお，本研究では，式(8)を計算するにあたって，実験から得られた値を用いている．従って，見かけの静止摩擦係数 μ_s 及びスリップに要する時間 t の 2 つのパラメーターについてさらに調べる必要があり，これらを予測できればマイクロ周期構造の構造周期の予測が可能になると期待できる．具体的には刃の刺さり込みを予測することができれば刃がフィルムから受ける反力が分かるため，見かけの摩擦係数 μ_s は予測が可能であると考えられる．

4.1.2 刃の刺さり込みの影響の検討

Fig.4-2 のモデル及び式(8)を提案し、サブミリ周期構造の構造周期を計算によって求めた。この時、式(8)の計算を行うにあたって、刃の刺さり込みによる、フィルムが刃から受ける抵抗力の増加を見かけの摩擦力として導出した見かけの静止摩擦係数 μ_s' を用いて計算を行った。その結果、計算値は実験値に近い値を示した。ここで、見かけの摩擦係数を導入したことによる影響を評価するため、式(8)に対して見かけの摩擦係数を使用して計算した場合と、通常の摩擦係数を使用して計算した場合の計算結果を比較する。

また、中野の式から導出した式(12)については、サブミリ周期構造の構造周期の予測には不適であったが、純粋な SS 現象の予測には適用可能であると考えられるため、式(12)についても同様に見かけの摩擦係数と、通常の摩擦係数を用いて計算を行い、これを比較することでその影響を評価する。

式(8)を通常の静摩擦係数 μ_s 及び見かけの静摩擦係数 μ_s' を用いて計算したサブミリ周期構造の構造周期 $L_{\text{sub-mm}}$ の計算値とサブミリ周期構造の構造周期 $L_{\text{sub-mm}}$ の実測値を Fig.4-11 から Fig.4-18 に示す。この結果から、通常の静摩擦係数 μ_s を用いた時の計算値は全ての加工条件において、見かけの静摩擦係数 μ_s' を用いた時の計算値よりも数値が小さくなって、実測値とは遠ざかることが分かった。このことから、筆者の提案したモデルにおいて、見かけの摩擦係数として刃の刺さり込みの影響を導入することは、構造周期の計算の精度を上げるためには必須な要素であると言える。

また、筆者の提案した Fig.4-2 のモデルはばねと剛体を一体と考えることによって弾性体を表現しており、刃もフィルムも剛体である（ばねと一体としてみれば弾性体である）。従って、Fig.4-2 のモデルでは剛体であるフィルムに刃は刺さり込まない。ここで見かけの摩擦係数に、刃が刺さり込むことによる、フィルムが刃から受ける抵抗の増加を集約することで、Fig.4-2 のようなモデルについても刃の刺さり込みの影響を評価できるようになる。このような点で、刃の刺さり込みを扱いやすく集約した見かけの摩擦係数は優れていると言える。

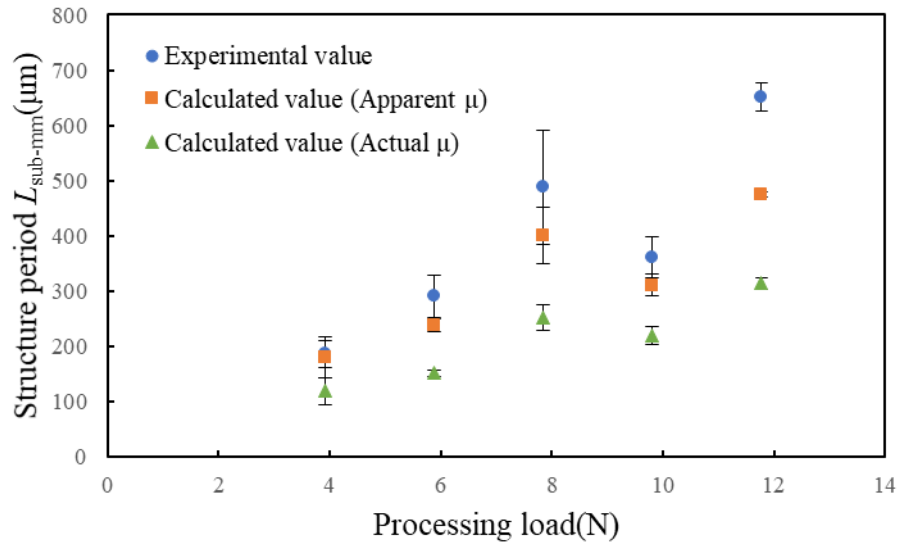


Fig.4-11 Processing load dependency of structure period of submillimeter periodic structure of PET film. Processing conditions: $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

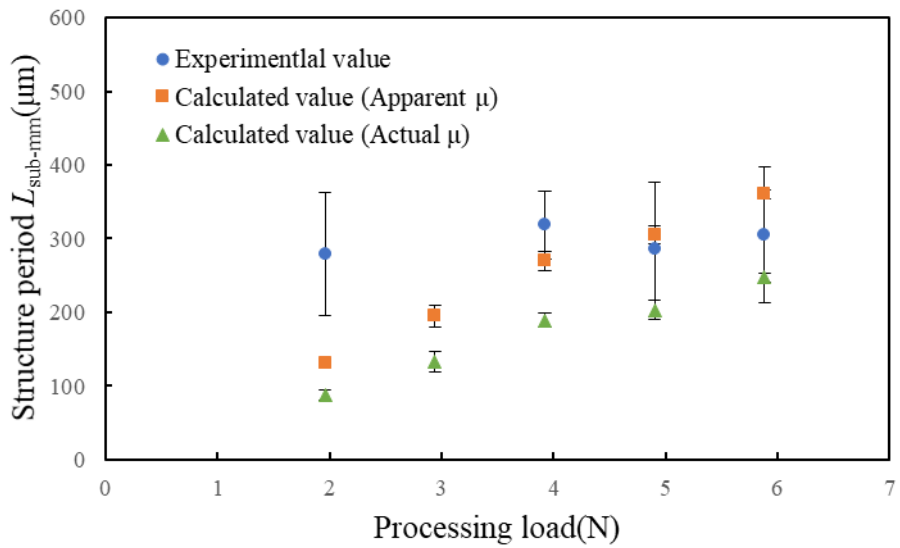


Fig.4-12 Processing load dependency of structure period of submillimeter periodic structure of acrylic film. Processing conditions: $\theta=165$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

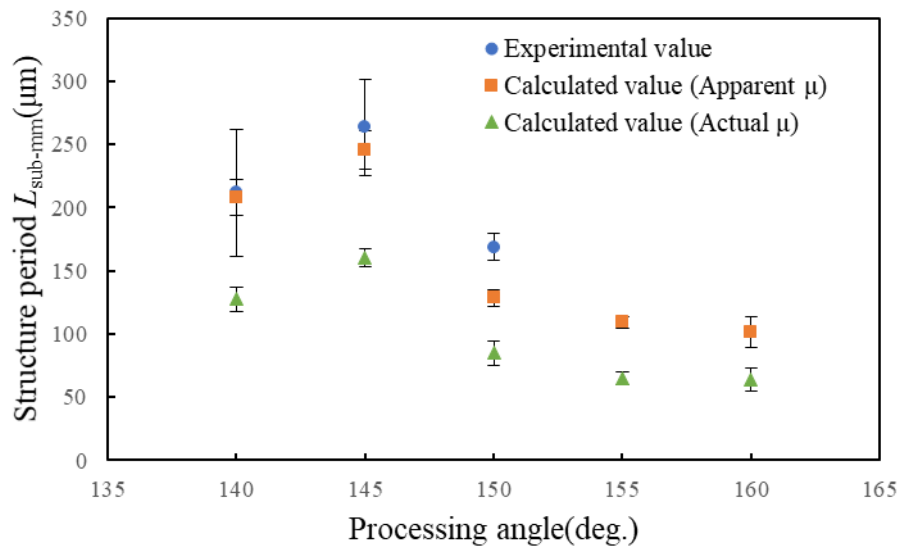


Fig.4-13 Processing angle dependency of structure period of submillimeter periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=3.924\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$.

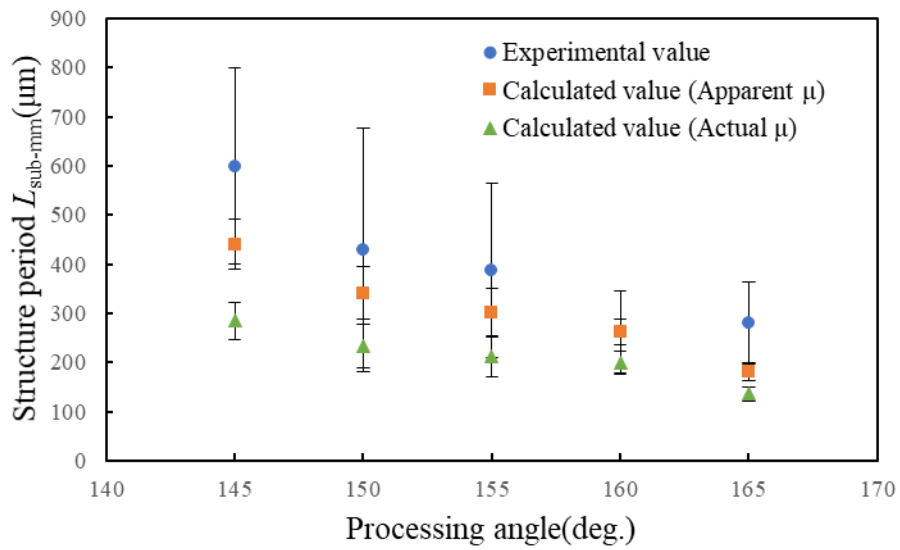


Fig.4-14 Processing angle dependency of structure period of submillimeter periodic structure of acrylic film. Processing conditions: $T=1.962\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$.

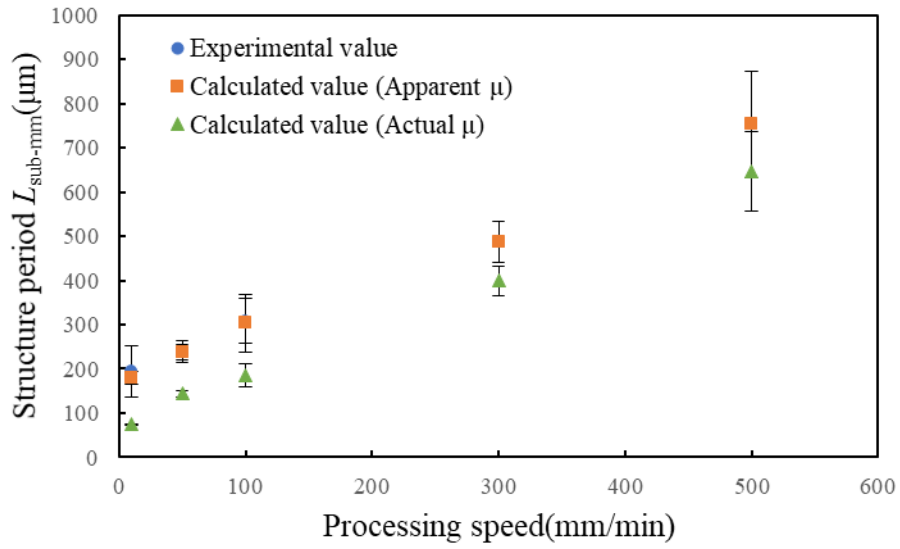


Fig.4-15 Processing speed dependency of structure period of submillimeter periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm.

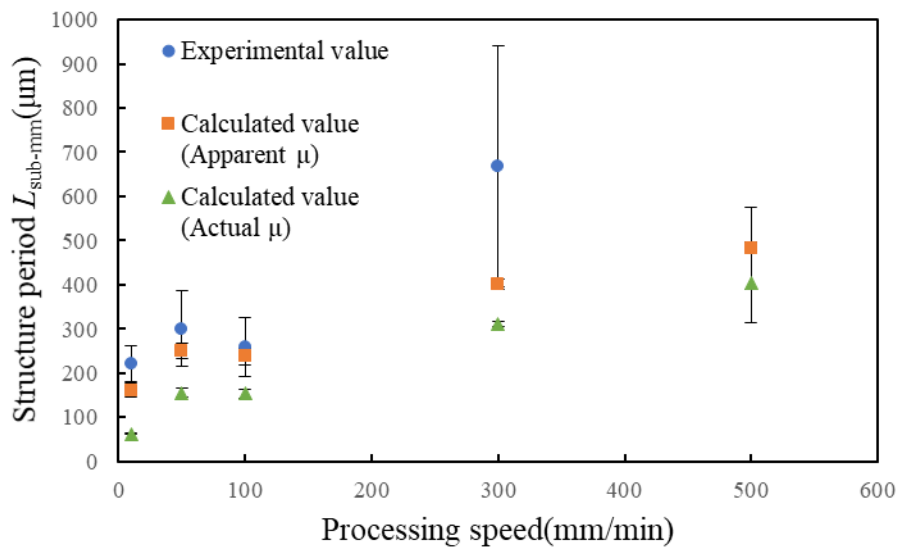


Fig.4-16 Processing speed dependency of structure period of submillimeter periodic structure of acrylic film. Processing conditions: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $L=1.0$ mm.

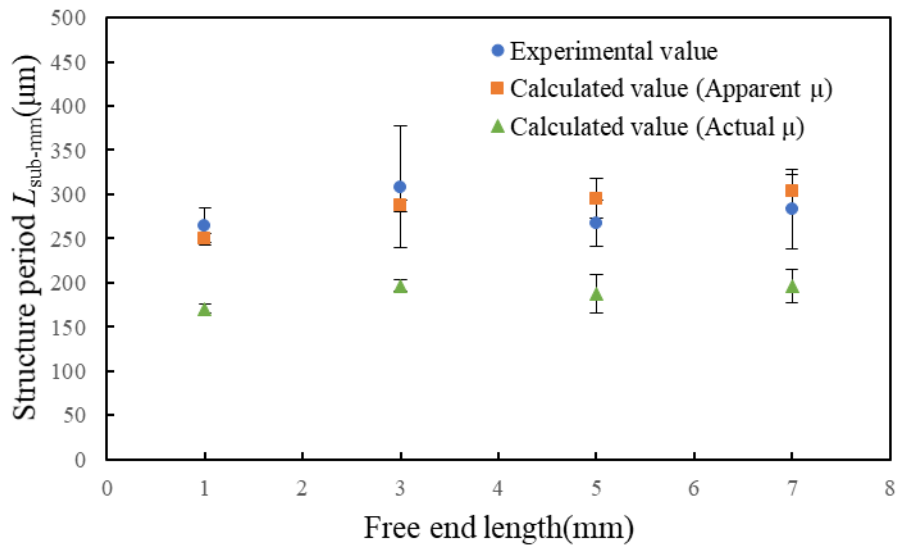


Fig.4-17 Free end length dependency of structure period of submillimeter periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $V=100$ mm/min.

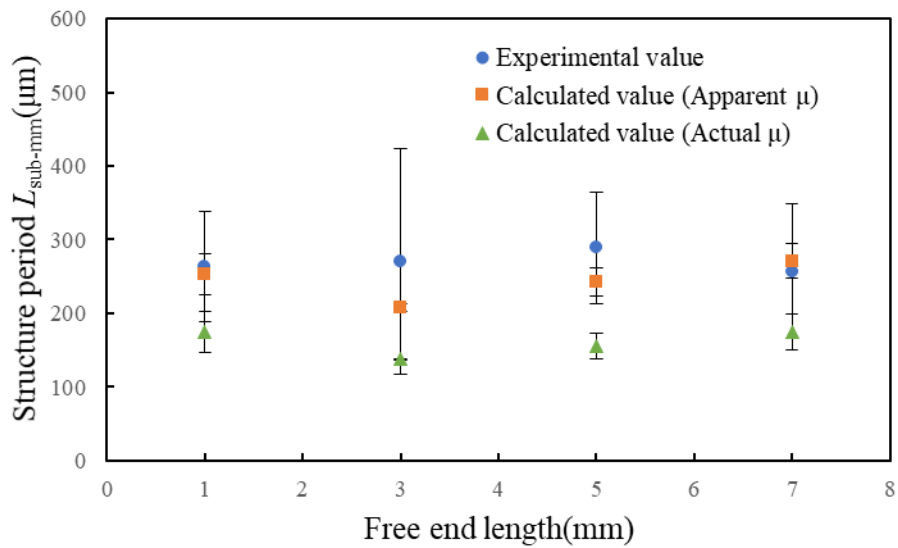


Fig.4-18 Free end length dependency of structure period of submillimeter periodic structure of acrylic film. Processing conditions: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $V=100$ mm/min.

次に中野の式に見かけの摩擦係数を導入した場合について考える。なお、中野の式は実験値と数値の差が大きいため、同時にプロットすると見かけの摩擦係数による変化が小さくなってしまふ。従って、ここでは実験値との比較は行わない。式(12)を通常の静摩擦係数 μ_s 、通常の動摩擦係数 μ_k を用いて計算した場合の計算値と、見かけの静摩擦係数 μ_s 、見かけの

動摩擦係数 μ_k を用いて計算した場合の計算値を Fig.4-19 から Fig.4-26 に示す. この結果から, 中野の式に見かけの摩擦係数を導入しても計算結果はほとんど変化しないことがわかる. これは, 式(10)に注目すると, 静摩擦係数 μ_s と動摩擦係数 μ_k の差の値が影響することがわかる, ここで, 3.2 の結果から, 見かけの摩擦係数は静摩擦係数も動摩擦係数も, 通常の摩擦係数より大きくなっているが, その差の値はほとんど変化しないことが分かる. ただし, Fig. 3-27, Fig.3-29 に示すような激しい振動が生じている場合, 見かけの静摩擦係数 μ_s と見かけの動摩擦係数 μ_k の差の値が大きくなっている. この時の式(12)による計算値の結果を見ると, Fig.4-22 の加工角度 θ が 145 deg.の場合と, Fig.4-24 の加工速度 V が 10mm/min の時に数値としては小さいが変化が表れていることが分かる. このことから, 大きな刃の刺さり込みが起きるような条件であれば, 中野の式においても刃の刺さり込みの影響が表れると言える. ところで, 本研究においては試料としてフィルムを使用しており, フィルムは大きすぎる荷重には耐えられないために, 中野の式に影響を与えるほどの条件では加工ができなかった. 従って, 本実験では中野の式に見かけの摩擦係数の影響はほとんど現れなかったが, 見かけの摩擦係数が全く影響しないということではなく, 加工条件によって影響する場合もあるということが示された.

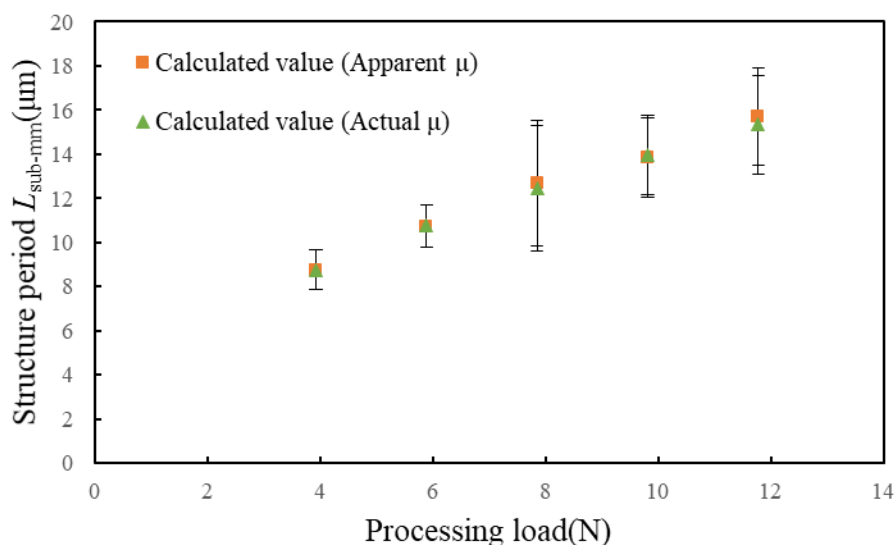


Fig.4-19 Processing load dependency of structure period of submillimeter periodic structure of PET film. Processing conditions: $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

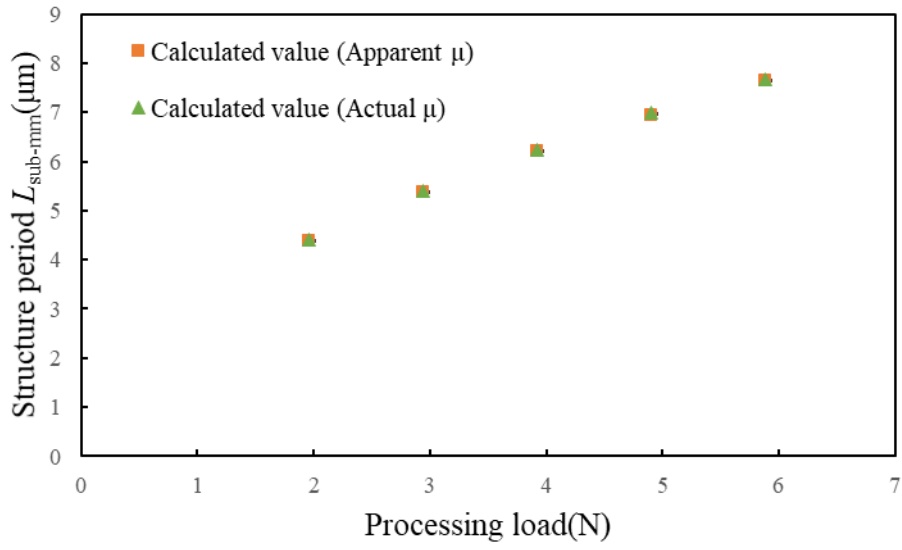


Fig.4-20 Processing load dependency of structure period of submillimeter periodic structure of acrylic film. Processing conditions: $\theta=165$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

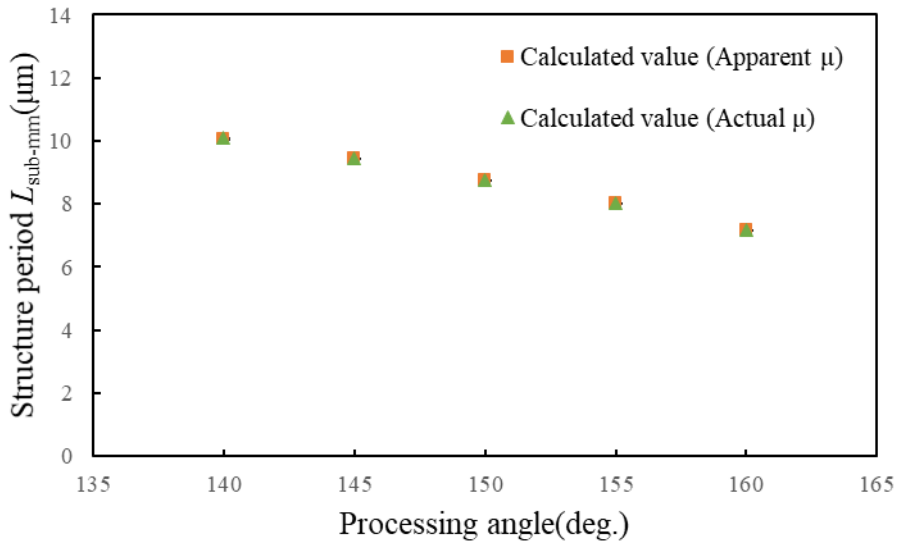


Fig.4-21 Processing angle dependency of structure period of submillimeter periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=3.924$ N, $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

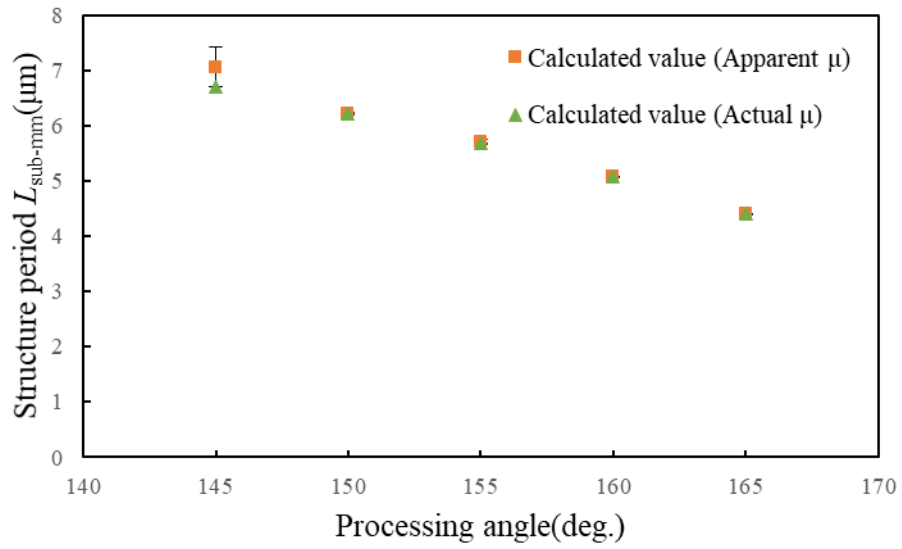


Fig.4-22 Processing angle dependency of structure period of submillimeter periodic structure of acrylic film. Processing conditions: $T=1.962\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$.

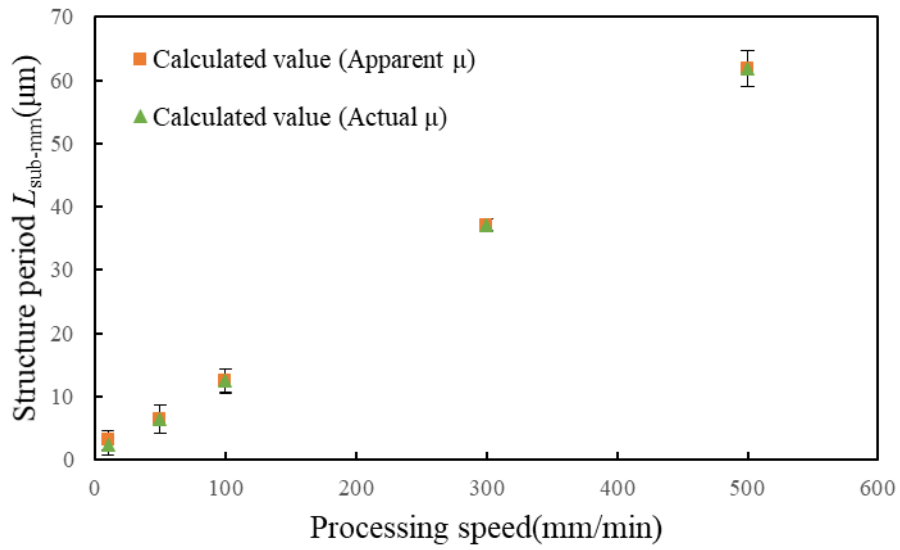


Fig.4-23 Processing speed dependency of structure period of submillimeter periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm.

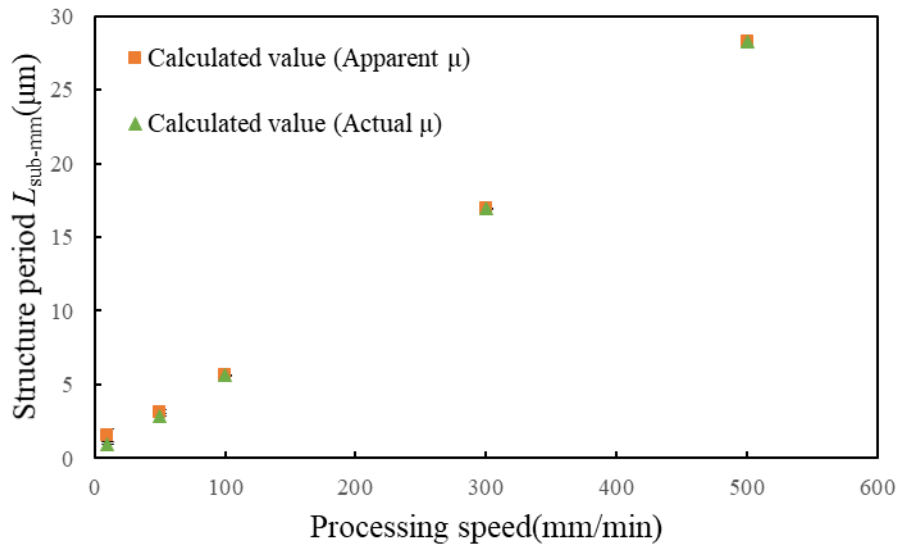


Fig.4-24 Processing speed dependency of structure period of submillimeter periodic structure of acrylic film. Processing conditions: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $L=1.0$ mm.

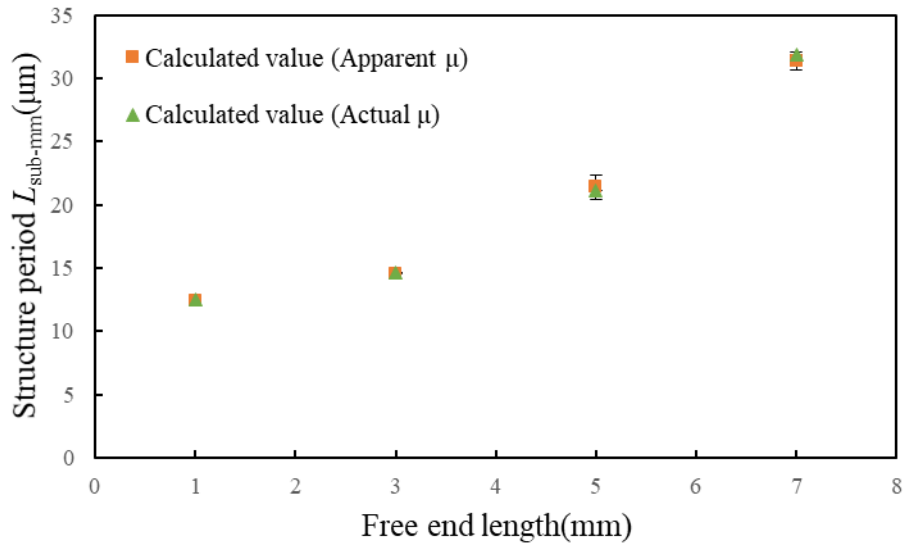


Fig.4-25 Free end length dependency of structure period of submillimeter periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $V=100$ mm/min.

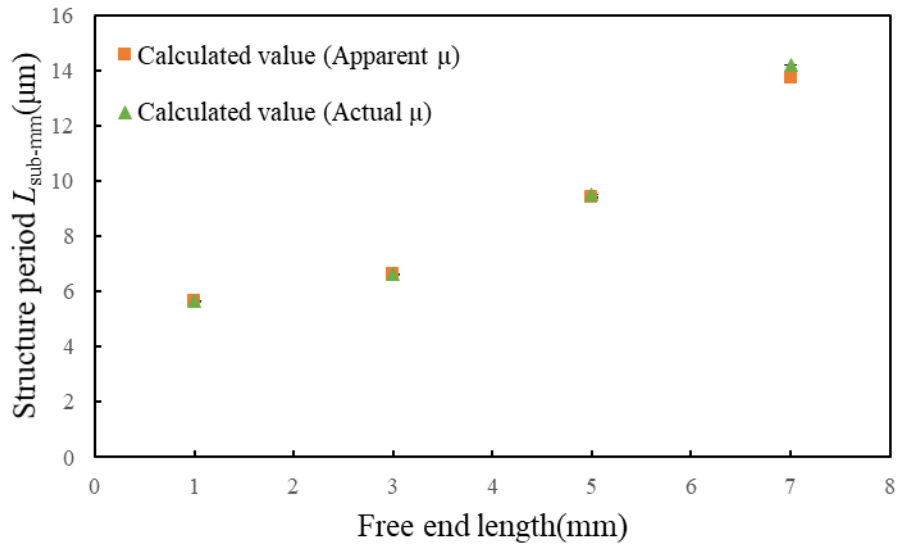


Fig.4-26 Free end length dependency of structure period of submillimeter periodic structure of acrylic film. Processing conditions: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $V=100$ mm/min.

4.2 マイクロ周期構造の形成メカニズム

次にマイクロ周期構造の形成メカニズムを考える。形成されたマイクロ周期構造の形状に注目すると、フィルム表面の形状像から、構造は加工方向と直交する方向に一直線に伸びており、これが周期的に繰り返されている(3.1.1項参照)。この特徴から、マイクロ周期構造はサブミリ周期構造と同様に刃がフィルムに接触して塑性変形した跡か削り取られた跡のいずれかであると考えられる。また、マイクロ周期構造はサブミリ周期構造の間に存在するため、マイクロ周期構造の形成過程において、刃とフィルムはスリップ状態にある。

その場観察の結果から、SS振動は刃とフィルムが一体となって、同じ方向に動く運動と、刃とフィルムが滑り出して、反対方向に動く運動の繰り返し現象であった。ここで、マイクロ周期構造が形成される過程ではフィルムは一方向に復元運動をしており、刃は左右方向に振動している。この時、刃は周期的に運動の向きが変化し、フィルムと反対方向に向かう運動と、フィルムと同じ方向に向かう運動を繰り返す。この現象はSS振動と同じ状態であることを示しており、マイクロ周期構造についてもサブミリ周期構造と同様にSS振動が生じて、構造が形成されると考えられる。

マイクロ周期構造が形成される時、フィルムは復元の途中である。マイクロ周期構造がサブミリ周期構造と同様のメカニズムで形成されると仮定すると、フィルムはその復元中に、復元とは逆方向へ伸びを生じることになる。しかし、その場観察結果では、そのような大規模な弾性変形は確認できない。よって、ここでは、仮に前述の様な弾性変形を起こしていたとしても無視できるほど小さいと仮定し、フィルムを剛体とみなす。つまり、モデルが剛体に対する弾性体のSSになり、式(12)が適用できる条件となる。また、筆者の提案したFig.4-2のモデルにおいても、フィルムのばね定数 $k_2=\infty$ とおくことで、剛体に対する弾性体のSSを考えることができる。この時、式(8)は以下のように書き直すことができる。

$$L_{\mu m} = \frac{\mu_s W}{k_1} + V't' \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 V はフィルムの移動速度であり、サブミリ周期構造の構造周期 L_{sub-mm} を4.1.1項で(9)式の計算で使用したスリップ状態に要する時間 t で除することで導出する。Table4-4にスリップ状態におけるフィルムの移動速度 V を各加工条件について示す。式中の記号 t' はマイクロ周期構造を形成するSS振動のうちスリップ状態をとる時間である。 t' は不明であるが、ハイスピードカメラで観察できないことから0.001s未満であり、ここでは最大の影響を考慮して計算の際には $t'=0.001$ を用いる。また、マイクロ周期構造の形成過程においては、フィルムに生じる弾性変形が無視できるほど小さいと仮定しているため、刃の刺さり込みは非常に小さい。この時、刃がフィルムから受ける抵抗力は小さくなり、見かけの摩擦係数は通常の摩擦係数に近づく。従って、計算の際には μ_s に通常の静止摩擦係数を用いることとする。

Table4-4 Moving speed of film in slip state for each processing condition

PET film					
Processing load T [N]	3.924	5.886	7.848	9.81	11.772
V' [$\mu\text{m/s}$]	3294	3970	3874	3587	4272
Processing angle θ [deg.]	160	155	150	145	140
V' [$\mu\text{m/s}$]			4425	3208	3521
Processing speed V [mm/min]	10	50	100	300	500
V' [$\mu\text{m/s}$]	945	1918	3635		
Free end length L [mm]	1	3	5	7	
V' [$\mu\text{m/s}$]	3372	3380	3124	3345	
acrylic film					
Processing load T [N]	1.962	2.943	3.924	4.905	5.886
V' [$\mu\text{m/s}$]	6764		3474	3022	2637
Processing angle θ [deg.]	165	160	155	150	145
V' [$\mu\text{m/s}$]	4013	2522	3705	3786	4202
Processing speed V [mm/min]	10	50	100	300	500
V' [$\mu\text{m/s}$]	1112	2010	3511	11865	
Free end length L [mm]	1	3	5	7	
V' [$\mu\text{m/s}$]	3144	4195	3984	3164	

さらに、仮定の妥当性及び、式(13)の妥当性を調べるため、4.1節と同様に、中野の式から導かれる計算値及び実験値と比較を行う。4.1節と同様にして、マイクロ周期構造の構造周期 $L_{\mu m}$ を以下の式で示す。なお、ここでも仮定により刺さり込みを無視しているため計算には、通常の静摩擦係数 μ_s と動摩擦係数 μ_k 用いる。また、フィルムの移動速度には V を用いる。この時、マイクロ周期構造の構造周期 $L_{\mu m}$ は以下のように表される。

$$L_{\mu m} = T_{SS} \times V' \dots\dots\dots(14)$$

以上の考えに基づいて式(13)及び式(14)によって求めた各加工条件に対する $L_{\mu m}$ の計算値と実験値を Fig.4-27 から Fig.4-34 に示す。ここで、サブミリ周期構造が形成されていなかった加工条件については、 V' を導出できない。従って、 V' を導出できない場合には計算を行うことができないため計算値を表示していない。

Fig.4-27, Fig.4-28 より、提案した計算式による計算値は PET フィルム及びアクリルフィルムに対して加工を行った時、実験値とかなり近い数値となった。ただし、式(13)式を計算する際に $t'=0.001$ としており、 $V't'$ の影響が最大の場合の計算値であることに注意が必要である。また、中野の式で計算した計算値は PET フィルムに加工した時に同じ傾向を示した。また、その数値は実験値より一桁程度大きくなった。

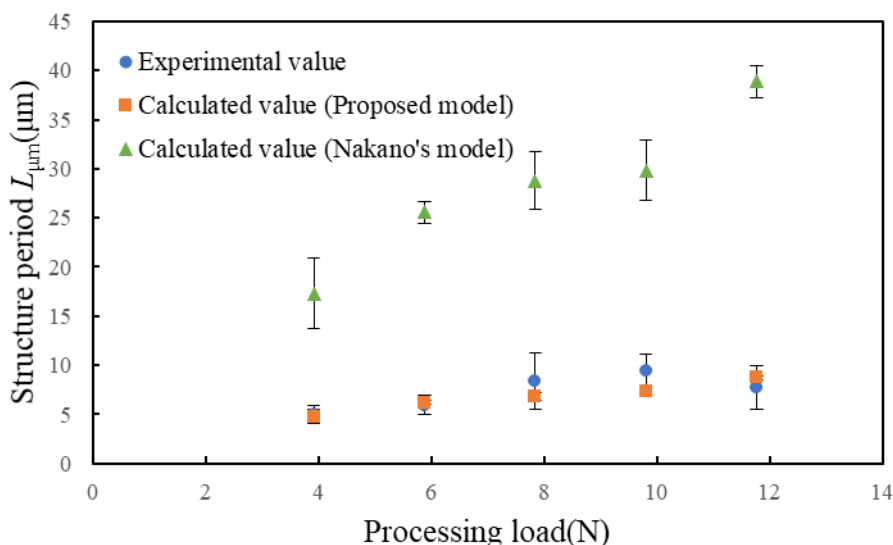


Fig.4-27 Processing load dependency of structure period of micrometer periodic structure of PET film. Processing conditions.: $\theta=150$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

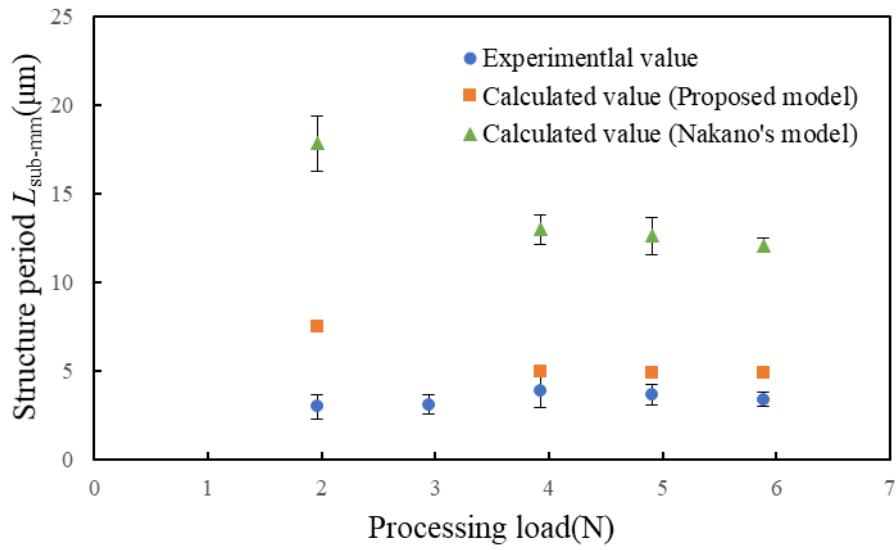


Fig.4-28 Processing load dependency of structure period of micrometer periodic structure of acrylic film. Processing conditions.: $\theta=165$ deg., $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

Fig.4-29, Fig.4-30 より, 提案した計算式による計算値は実験値と近い数値を示した. PET フィルムに加工した場合には, その傾向も一致している. また, 中野の式で計算した計算値はここでも実験値より一桁程度大きくなった. 特に Fig.4-14 で加工角度が 150 deg.の時には実験値の数値から大きく外れている.

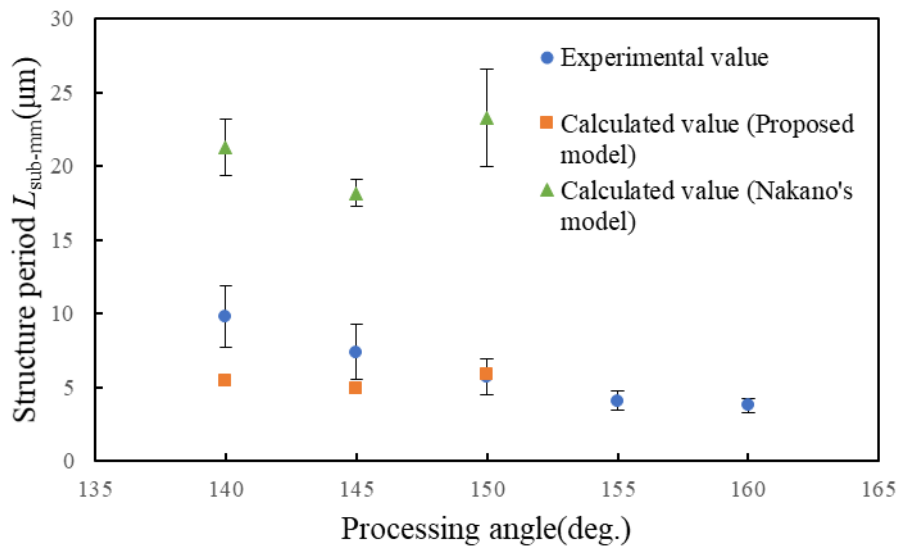


Fig.4-29 Processing angle dependency of structure period of micrometer periodic structure of PET film. Processing conditions.: $T=3.924$ N, $L=1.0$ mm, $V=100$ mm/min.

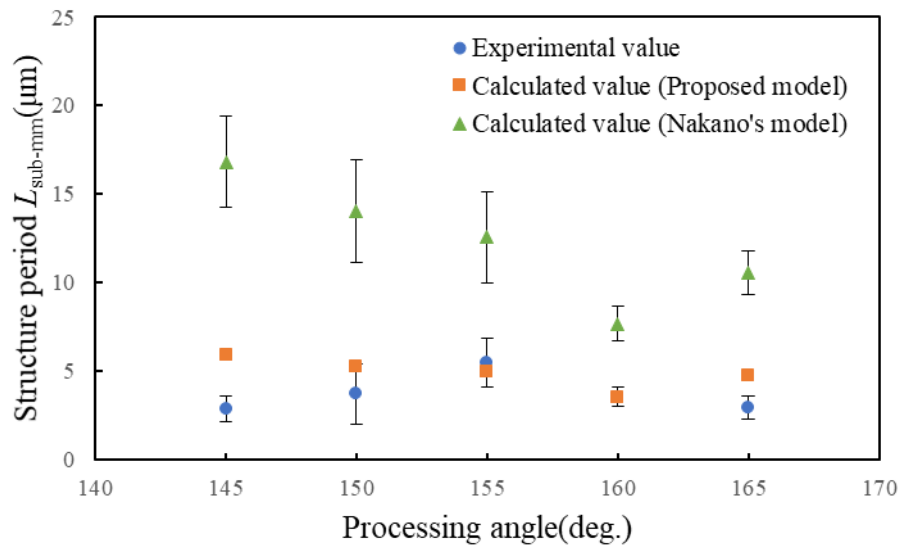


Fig.4-30 Processing angle dependency of structure period of micrometer periodic structure of acrylic film. Processing conditions.: $T=1.962\text{N}$, $L=1.0\text{ mm}$, $V=100\text{ mm/min}$.

Fig.31, Fig.4-32 より, 提案した計算式による計算値は実験値と同じ傾向を示した. またその数値は実験値より小さくなった. また, 中野の式による計算値は実験値と同じ傾向を示したが, 数値は一桁以上大きな数値となった. なお, 前述の通り, 加工速度が速い場合は, V を導出できなかったため高速度域での傾向は調べる事ができなかった.

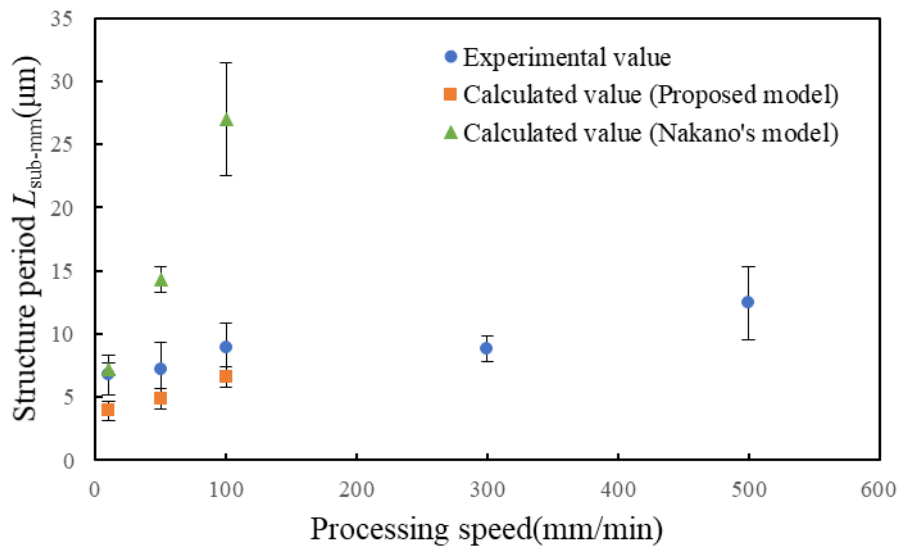


Fig.4-31 Processing speed dependency of structure period of micrometer periodic structure of PET film. Processing conditions.: $T=7.848\text{ N}$, $\theta=150\text{ deg.}$, $L=1.0\text{ mm}$.

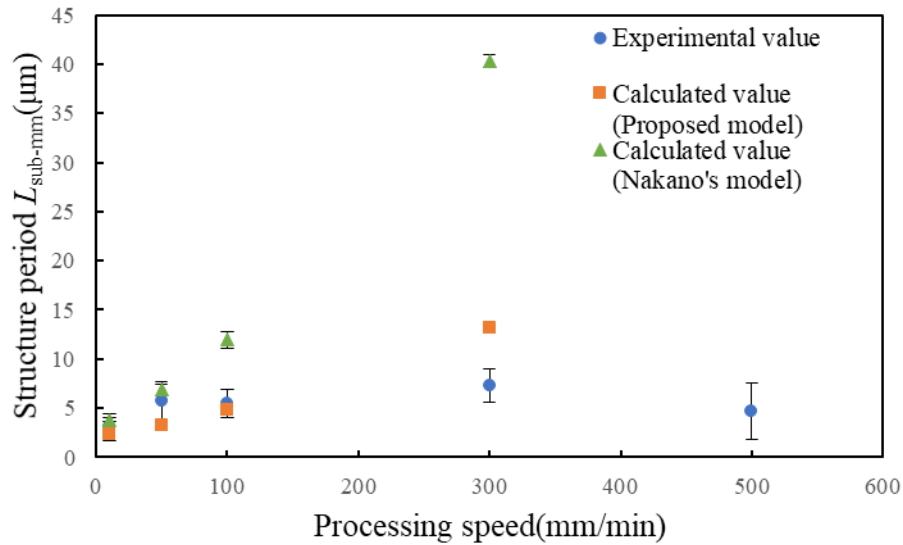


Fig.4-32 Processing speed dependency of structure period of micrometer periodic structure of acrylic film. Processing conditions.: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $L=1.0$ mm.

Fig.4-33, Fig.4-34 より提案した計算式による計算値と中野の式で計算した計算値はどちらも実験値と同じ傾向を示す。また、その数値は PET フィルムに加工をした時、提案した計算式による計算値は実験値とほぼ一致し、中野の式による計算値は実験値より大きくなった。アクリルフィルムに加工をした時、どちらの計算値も実験値と同じ傾向を示し、数値も近い数値を示した。

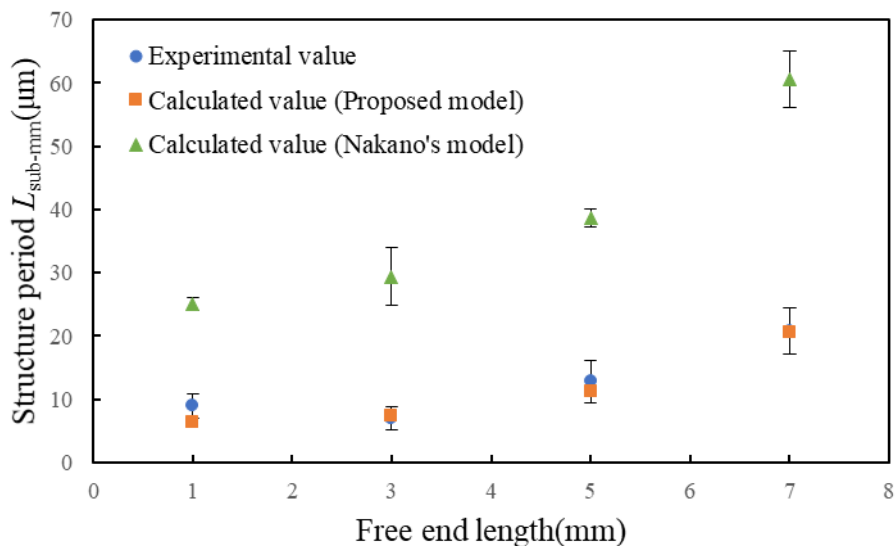


Fig.4-33 Free end length dependency of structure period of micrometer periodic structure of PET film. Processing conditions: $T=7.848$ N, $\theta=150$ deg., $V=100$ mm/min.

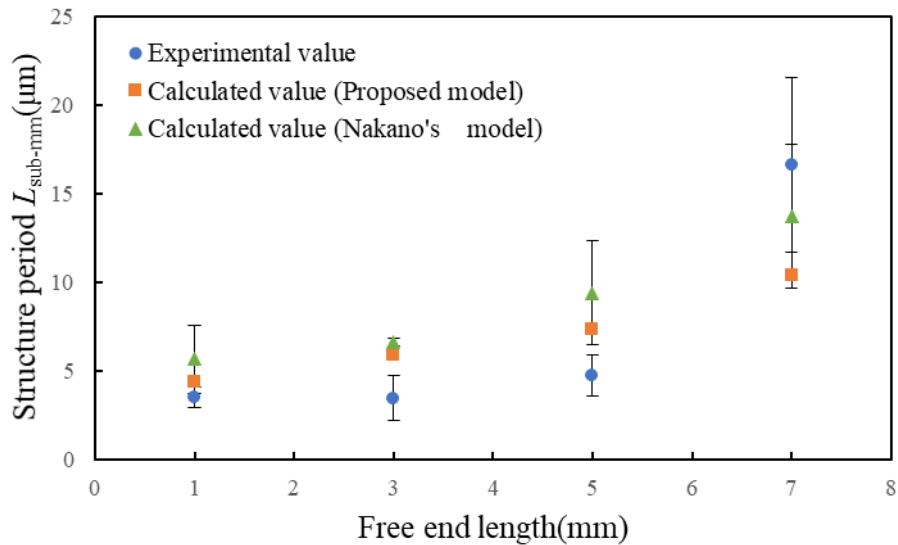


Fig.4-34 Free end length dependency of structure period of micrometer periodic structure of acrylic film. Processing conditions.: $T=1.962$ N, $\theta=155$ deg., $V=100$ mm/min.

以上の結果より、各加工条件において、提案した計算式による計算値は、中野の式で計算した計算値より実験値に近い結果を示すことが分かった。ただし、前述の通り Vt' の影響が最大の場合の計算結果であるため、実際の計算値は示した値より低くなりうることに注意が必要である。また、中野の式が適用可能な条件であるにもかかわらず、実験値より大きな値となった原因を考える。マイクロ周期構造の形成過程におけるフィルムの移動速度 V は実際にはフィルムの復元力が作用しているため加速度運動である。しかし、ここでは移動距離と時間から平均の速度を計算して用いるため、移動速度を過剰にとっている可能性が存在する。ここで、中野の式にも提案した計算式にもフィルムの移動速度 V が作用しているが、提案した式では Vt' として存在し、 $t=0.001$ である。一方、中野の式では $T_{ss}V$ として存在する。各加工条件で T_{ss} は常に 0.001 より大きく、数値が大きい時には 0.01 を超える場合もあり、 V が過剰に与えられている場合、計算値が大きく変化してしまう。

本実験において、求めることはできなかった t' を調べるためには、さらに高いフレームレートのハイスピードカメラで観察を行うことや、加速度計などを用いて振動を調べる必要がある。Fig4-2 に示したモデルから得られた式(8)及び式(13)はサブミリ周期構造、及びマイクロ周期構造をそれぞれ予測可能であることから、Fig.4-2 のモデルは SS 加工を表現するのに適切であると言える。

ところで、加工後の PET フィルム表面にはさらに小さい構造周期をもつサブマイクロ周期構造が形成されている。しかし、本実験で用いたハイスピードカメラのフレームレートではサブマイクロ周期構造の形成要因を調べるには不足しており、また、光学顕微鏡での観察

も倍率が不足している。

形成された構造周期を調べた結果からは加工荷重以外の条件に対して一定の構造周期を示したことから、固有振動か、あるいはそれに近い要因によって形成されたのではないかと考えられる。また、構造の形状が刃の形に沿った直線ではなく、うねるような形状であり、ここまで見てきた二つの構造の形成要因との関連性が発見できなかった。以上のことから、本実験においてはメカニズムの解明には至らず、構造の観察の結果だけを示すこととする。

第5章 結論

本研究では、SS加工のメカニズムの解明を目的として、筆者らの近年の研究で浮上したメカニズムの不明点について調査を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 剃刀を加工刃として高分子フィルムにSS加工を行った結果、一度の加工により3階層の構造の形成が確認された。これらの構造はそれぞれサブミリメートルの周期、数マイクロメートル程度の周期、サブマイクロメートルの周期をもつことが判明した。
- ② 加工中の刃及びフィルムの運動をその場観察によって調査し、SS加工におけるサブミリメートルの周期をもつ周期構造の形成メカニズムを特定した。このメカニズムとは刃とフィルムのSS振動であり、その正体は刃の曲げ変形とその復元、フィルムの伸びとその復元が周期的に繰り返される現象であった。さらに、このSS振動に対して、剛体に対する弾性体の1自由度系で表現したSSモデルに倣って弾性体に対する弾性体のSSモデルを提案し、このモデルとその場観察の結果から得られた式によってこの構造の周期を予測した。その結果、計算結果は実験値に近い値を示し、提案したモデルの妥当性が示された。
- ③ SS加工におけるマイクロメートル程度の周期をもつ周期構造の形成メカニズムを検討した。この構造の形成過程においてもSS振動が生じており、この時の振動は刃のSS振動であると仮定して、提案したモデルを用いて構造の周期を計算した。その結果、計算値は実験値に近い値を示し、ここでも提案したモデルの妥当性が示された。
- ④ 加工刃の刺さり込みによって増加するフィルムが刃から受ける抵抗力を見かけの摩擦力の増加と解釈することで、見かけの摩擦係数を導出し、これを計算に用いることで、刃の刺さり込みの影響を評価した。筆者の提案したモデルにおいて、見かけの摩擦力を導入することで、サブミリ周期構造の構造周期の計算値は実験値に近づき、予測の精度を向上させることに成功した。また、本実験の加工条件の範囲においては、見かけの摩擦力は中野の式から求めた計算値に、大きな影響は与えなかった。

以上、SS加工における振動の正体を突き止め、簡易な形式でのモデリングに成功した。このモデルは弾性体に対する弾性体のSS現象を示し、これを示したことでSS現象の加工への応用可能性が高まることが期待される。

参考文献

- (1)K.Naito et al., *J. Mater. Proc. Technol.*, 238, 267-273(2016)
- (2)菊田久雄, 精密工学会誌, Vol.74, No.8, 781-784(2008)
- (3)長谷川智紀他, 日本塑性加工学会論文誌, Vol.60, No.698, 75-79(2019)
- (4)加藤貴行, 阿部信行, レーザー研究, Vol.37, No.7, 510-514(2009)
- (5)杉原達哉, 榎本俊之, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.771, 373-379(2010)
- (6)前川覚, 糸魚川文広, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.879, (2019)
- (7)中野健, 日本ゴム協会誌, Vol.80, No.4, 134-139(2007)
- (8)松崎淳, 日本機械学会論文集, Vol.35, No.273, 977-987(1969)
- (9)JIS G3311:2016, みがき特殊帯鋼
- (10)堤貴文(2015), 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, 岐阜大学機械システム工学科学士学位論文
- (11)中野健他, 日本ゴム協会誌, Vol.85, No.10, 313-318(2012)

謝辞

本研究を遂行するにあたり，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，本研究にあたり，PET フィルムをご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，論文作成にあたり，多くの励ましをいただき，背中を押して下さった屋代内藤研究室の学友の皆様に深く感謝致します．

第6章 付録

引張試験

本実験で使用したアクリルフィルムの TD 方向(Transverse direction:流れに垂直方向)の力学特性を引張試験により調べた。試験には万能試験機 (エー・アンド・デイ製, RTG-1310) を用い, ロードセルは 1 kN (株式会社エー・アンド・デイ製, UR-1KN-D) を使用した。試験にあたっては, まずアクリルフィルムを幅 20mm, 長さ 150mm 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, 20mm 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 100mm/min のストロークでアクリル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, 弾性率, 引張強さ, 破断ひずみ, アクリルフィルムのばね定数を求めた。Fig.6-1 に応力-ひずみ線図の一例を示し。Table 6-1 に TD 方向の試験結果を示す。

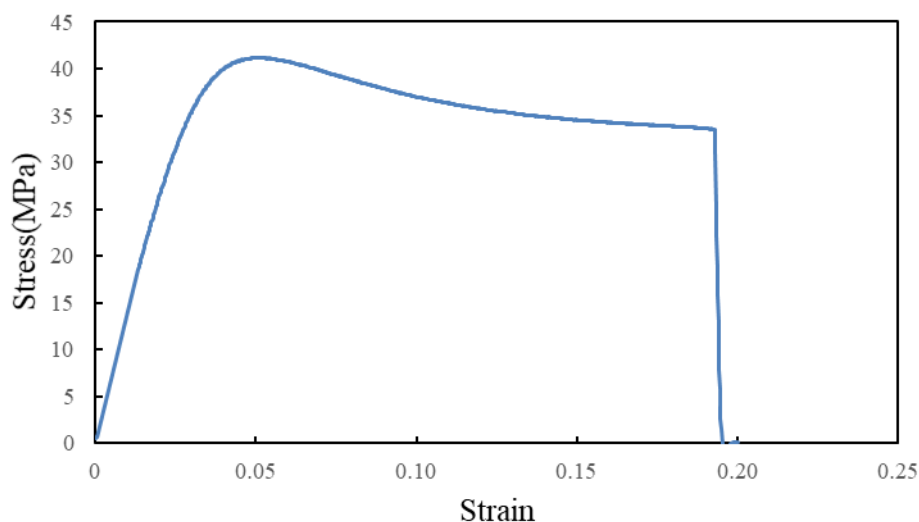


Fig.6-1 Stress-Strain curve of acrylic film.

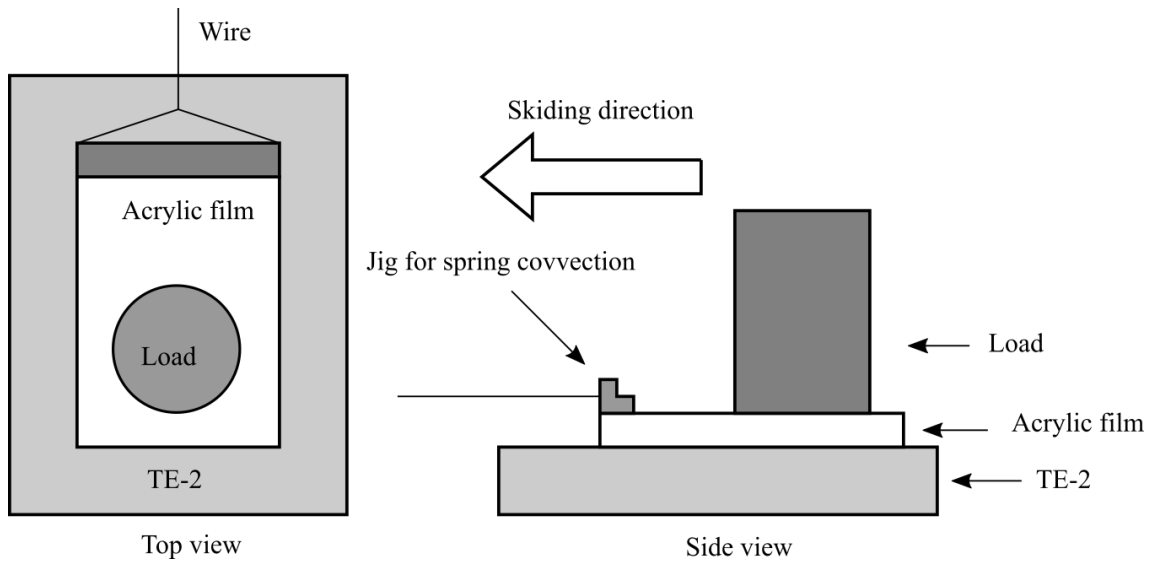
Table 6-1 Properties of acrylic film.

Tensile strength	Elastic modulus	Breaking strain	Spring constant
[MPa]	[GPa]	[%]	[N/m]
41	1.34	22	12918

摩擦試験

Fig.6-2に本研究で使用したアクリルフィルムと炭素鋼 TE-2 間の摩擦係数の測定方法の模式図を示す。また以下にその実験手順を示す。本実験ではロードセルは 1 kN（株式会社エー・アンド・デイ製，UR-1KN-D）を使用し，移動速度は 100 mm/min である。データの記録は実験開始直後から開始した。

- ① 自作した摩擦係数測定治具の上面が水平になるように引張試験機（株式会社エー・アンド・デイ製，TENSILON RTG-1310）に固定する。
- ② 摩擦係数測定治具にアセトンで洗浄した TE-2 板を設置して，4 辺をガムテープで固定する。
- ③ 引張試験機の上部締付具に，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），スプリング，ワイヤー，フィルム貼付け用治具，PET フィルムの順に繋ぎ合わせる。この時，PET フィルムとフィルム貼付け用治具は両面テープを用いて繋ぎ合わせる。
- ④ 引張試験機から③のように繋がれたアクリルフィルムを摩擦係数測定治具に固定された TE-2 板の上に置き，さらに PET フィルムの上に 200g のおもりを置く。
- ⑤ 引張試験機を起動してフィルムを引っ張り始めると，フィルムは TE-2 板の上を動き始める。この時，得られる荷重および変位を測定する。
- ⑥ フィルムの引張距離が 100mm となったところで測定を終了する。得られたデータの一例を Fig.6-3 に示す。
- ⑦ ④から⑥を 10 回繰り返す。得られたデータの荷重のピークを最大静止摩擦力，値が安定している区間の荷重の平均値を動摩擦力として，それぞれの値をおもりに作用する重力で除して，静摩擦係数，動摩擦係数を得る。得られた摩擦係数を Table6-2 に示す。なお，通常は動摩擦係数の測定時にはスプリングを用いずに試験を行うことが多いが，本研究ではスプリングを用いて行った試験のデータから，静摩擦係数と動摩擦係数の両方を算出した。



Top view

Side view

Fig.6-2 Schematic diagram for measurement of coefficient of friction between acrylic film and TE-2 plate

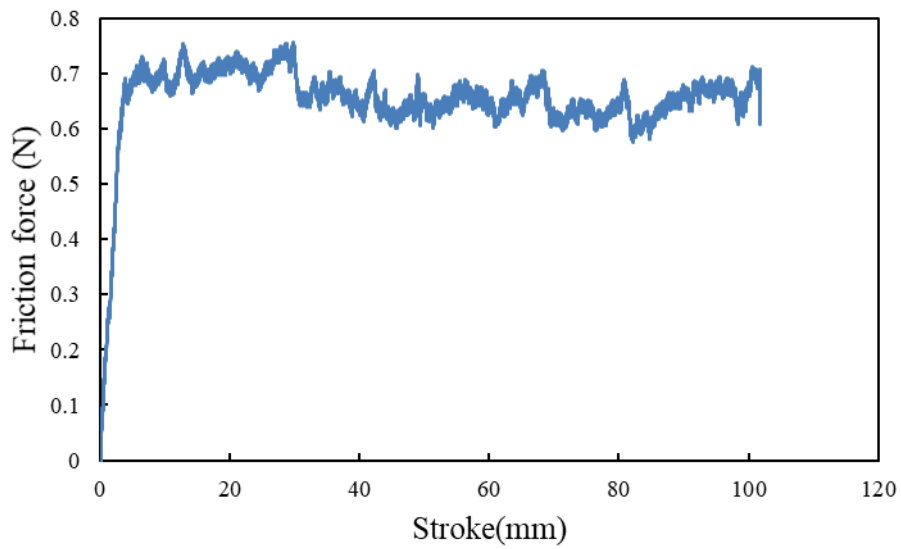


Fig.6-3 Force-Stroke curve at measurement of coefficient of friction.

Table 6-2 Coefficient of friction between TE-2 plate and PET film.

	Coefficient of friction	Standard deviation	Coefficient of variation
μ_s	0.43	0.03	0.06
μ_k	0.33	0.01	0.04

刃のばね定数の計算方法

本研究においては加工刃の振動が発生しており，その計算を行うために刃のばね定数を求める必要がある．従って，ここで刃のばね定数の導出方法を示す．刃はホルダで固定されており，その先端が突き出した片持ち梁の状態である．この時の刃の形状の模式図を Fig.6-4 に示す．また，導出過程で使用する変数を以下に示す．

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]

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]

Mx : 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]

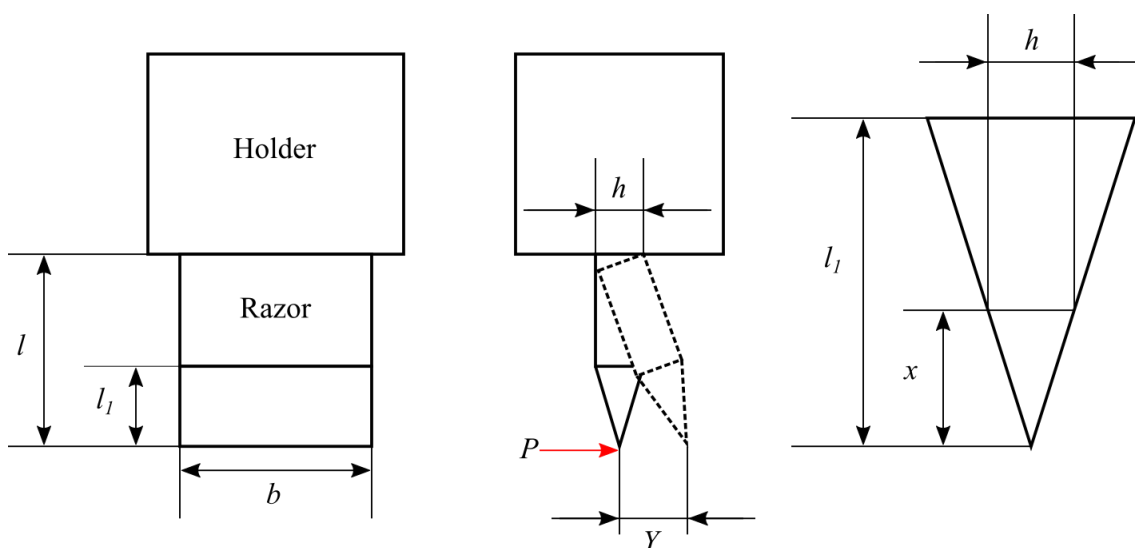


Fig.6-4 Schematic diagram of processing blade (a) Front view (b) Side view (c) Enlarged view of the blade edge of(b).

$0 \leq x \leq l_1$ のとき

$$h(x) = \frac{hx}{l_1}, \quad I(x) = \frac{bh(x)^3}{12} = \frac{bh^3x^3}{12} = I \frac{x^3}{l_1^3} \dots \dots \dots (15)$$

$l_1 \leq x \leq l$ のとき

$$h(x) = h, \quad I = \frac{bh^3}{12} \dots \dots \dots (16)$$

x の位置でのモーメントは $M(x) = -P(x)$ であり,

たわみとたわみ角は以下のようなになる.

$$\theta = - \int \frac{M_x}{EI_z} dx + C_1 \dots \dots \dots (17)$$

$$Y = - \iint \frac{M_x}{EI_z} dx dx + C_1 x + C_2 \dots \dots \dots (18)$$

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

$$\begin{aligned} \theta &= - \int \frac{-Px l_1^3}{EI x^3} dx + C_1 = \frac{Pl_1^3}{EI} \int x^{-2} dx + C_1 \\ &= \frac{Pl_1^3}{EI} (-x^{-1}) + C_1 \dots \dots \dots (19) \end{aligned}$$

$$Y = - \frac{Pl_1^3}{EI} \ln x + C_1 x + C_2 \dots \dots \dots (20)$$

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

$$\theta = -\int \frac{-Px}{EI_z} dx + C_3 = \frac{P}{2EI} x^2 + C_3 \dots\dots\dots(21)$$

$$Y = -\frac{P}{6EI} x^3 + C_3 x + C_4 \dots\dots\dots(22)$$

$x=l$ のとき $\theta=0$ $Y=0$ となり、

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

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

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

$$\theta = \frac{P}{2EI} (x^2 - l^2) \dots\dots\dots(23)$$

$$Y = -\frac{P}{6EI} (x^3 - 3l^2 x + 2l^3) \dots\dots\dots(24)$$

境界条件 $x=l_1$ のとき、式(5.5)と式(5.9), 式(5.6)と式(5.10)より

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

$$-\frac{P}{6EI} (x^3 - 3l^2 x + 2l^3) = -\frac{Pl_1^3}{EI} \ln x + C_1 x + C_2$$

ここから C_1 , C_2 をについて解くと、以下の式となる。

$$C_1 = \frac{P}{2EI} (3l_1^2 - l^2) \dots\dots\dots(25)$$

$$C_2 = \frac{Pl_1^3}{EI} \ln l_1 - \frac{Pl_1}{2EI} (3l_1^2 - l^2) + \frac{P}{6EI} (l_1^3 - 3l^2 l_1 + 2l^3) \dots\dots\dots(26)$$

この C_1 , C_2 を(5.5), (5.6)に代入し, $0 \leq x \leq l_1$ の θ , Y 求められる。

$$\theta = \frac{P}{2EI} (x^2 - l^2 - \frac{2l_1^3}{x}) \dots\dots\dots(27)$$

$$Y = -\frac{Pl_1^3}{EI} \ln x + \frac{Px}{2EI} (3l_1^2 - l^2) + \frac{Pl_1^3}{EI} \ln l_1 - \frac{Pl_1}{2EI} (3l_1^2 - l^2) + \frac{P}{6EI} (l_1^3 - 3l^2 l_1 + 2l^3) \dots\dots\dots(28)$$

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。

$$b=0.039\text{m}$$

$$h=220 \times 10^{-6}\text{m} \text{ (ただし, } L=1 \text{ の時には } h=190 \times 10^{-6}\text{m)}$$

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

$$l_1=1160 \times 10^{-6}\text{m} \text{ (ただし, } L=1 \text{ の時は } l_1=1000 \times 10^{-6}\text{m)}$$

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

Table6-3 Spring constant of blade for free end length of blade.

Free end length $L[\text{mm}]$	1	3	5	7
$K [\text{N/m}]$	296525	216574	107691	50837