

フルオープン型および谷部自動開閉型ビニールハウスに生じる プラスチックフィルムの損傷の考察とその実験的シミュレーション

野田 尚昭^{*1}, 長友 博之^{*2}, 羅 奇峰^{*2}

王 路宇^{*2}, 佐野 義一^{*3}, 高瀬 康^{*3}

Rolling contact fatigue investigation and experimental simulation for plastic film used for full-opening and partially-opening automatic ventilation greenhouses

Nao-Aki NODA^{*1}, Hiroyuki NAGATOMO^{*2}, Qifeng LUO^{*2},

Luyu WANG^{*2}, Yoshikazu SANO^{*3} and Yasushi TAKASE^{*3}

^{*1,*2,*3} Dept. of Mechanical engineering, Kyushu Inst. of Tech.

1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka 804-8550, Japan

Received 6 June 2014

Abstract

The green house is widely used to add the quality and value of agricultural products. Newly developed full opening type green house has a lot of attracted attention because the roof opens and closes automatically in order to control the inside temperature. However, since the roof opens and closes very often, the cover sheet can be used only for 3-4months. This is because the plastic film is damaged between the support and rolling pipes during opening-closing affected by fatigue and wear. In this study, by using Scanning Electronic Microscope (SEM) and roughness test machine, the damage mechanism is investigated for the several plastic films. Then, FEM analysis is performed to evaluate the mechanical damage of plastic film between the pipes under different conditions and film materials. Also rolling fatigue experiments are performed to investigate the damage under different film materials. Then the results are compared with the FEM analysis. It is found that the thickness reduction of the film obtained under static contact analysis is the most important factor to control the damage of the film.

Key words :Contact problem, Finite element method, Polymer materials, Tribology, Friction and wear

1. 緒 言

現在、多くの農場で農作物の生産性を高めるためにビニールハウスが用いられている。ビニールハウスには温度などの自然環境の変化から農作物を守り収穫量を安定化させるというメリットがある。最近では使用されているビニールシートの材料が、農業用ビニールシート（農ビ）から農業用ポリオレフィン系特殊フィルム（農PO）へと急速に入れ替わっている。農POはポリオレフィン系樹脂を素材としフィルムを多層化することで、耐久性、保温性、光線選択性、防曇性、および防霧性などの多数の機能を備え、農ビに比べて強度が高く裂けにくいという長所があるが、こすれ破れに弱いなどという欠点等も指摘されている（日本農業気象学会, 2003）,（日本農業システム, 2014）。現状のビニールハウスの問題点の一つとして、ハウス内の温度が上昇しすぎる。農作物全般の品質低下や着果不良、いちごの芯止まり、きゅうりの収穫時期の短縮などを招くことが最近報告されている（宮崎県農水産業温暖化研究センター, 2012）。

* 論文 No.14-00303 [DOI:10.1299/transjsme.14-00303]

^{*1} 正員, フェロー, 九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学研究系 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

^{*2} 九州工業大学大学院工学研究科

^{*3} 正員, 九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学研究系

E-mail of corresponding author: noda@mech.kyutech.ac.jp

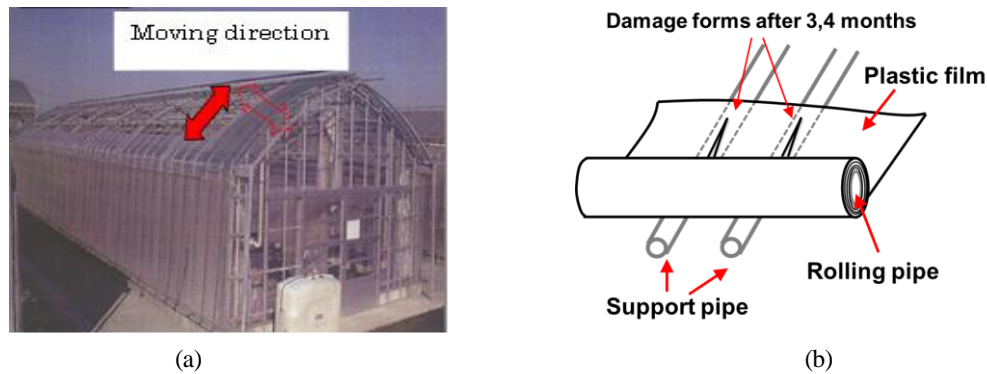


Fig.1 (a) Full-open type green-house. In order to control the inner temperature automatically, full-open roof system is used in the greenhouses. The plastic film opens and closes automatically on the roof. (b) Schematic diagram for automatic open-close system. Plastic film rolls up and down to control the temperature by the rolling pipe driven by the motors.

その解決方法として換気窓の取り付け、谷自動開閉装置、フルオープン型ビニールハウスなどが提案されているが、その中で最も効果的であるのが、図 1 (a) に示すのは天井を自動開閉して温度調節することができるフルオープン型ビニールハウスである。このハウスでは天井部のプラスチックフィルムを巻き上げて開放状態にすることで、ハウス内に停滞する高温域を他の方法と比べて短時間で解消することができる。それにより、農作物の品質向上や付加価値を大幅に向上させることが期待され、開発が進められている。また、屋根を部分的に自動開閉する谷部自動開閉装置は多数のビニールハウスに採用されている。これは天井を谷部分のみに留めることで、温度調節機能はやや不十分なものの、風でビニールがばたつくのを抑えるバンド調節が容易で低コストという長所がある。しかし、このような自動開閉型ビニールハウスでは、頻繁に開閉が繰り返されるため、カバーシートに数ヶ月で図 1 (b) に示すように早期損傷が生じ、頻繁に取替える必要がある。このため通常のハウスのように耐用年数が 2 年以上となるような改良が期待されている。

そこで本研究では、まずフルオープン型ビニールハウス開閉時のまき上げの際に、フィルムに生じる損傷について、観察により損傷プロセスを想定する。そして、予想される損傷メカニズムに従ってフィルムに対する応力や変形を解析し、実験と比較して考察する。特にフィルムの使用実態を基に、解析結果をも加味して、損傷を再現するための試験方法を考案し、試験機を製作する。供試材料として、現在用いられている 4 種類の農業用ポリオレフィン系特殊フィルム（農 PO と呼ばれ、本論文ではプラスチックフィルムまたはフィルムと称する）を対象とする。このような転がり損傷を受けるプラスチックフィルムに関して、工学的な観点からとらえた調査、研究例はこれまでに見当たらない。現状では、問題の解決はもっぱら農家や農業用設備関係者の経験に委ねられているので、抜本的な解決は極めて困難と考えられる。再現実験と解析により、複数のフィルムの比較、様々な条件での考察を行うことで、ビニールハウスに用いられるフィルムの寿命を延ばし、農業の発展につなげることを本研究の最終的な目的とする。

2. 実態損傷の調査とメカニズム

2・1 実態損傷の調査

対象とする自動開閉型ビニールハウスの構造上、開閉時にローリングパイプが巻き取るフィルム量が少ないほど巻き取りフィルムによる緩衝効果が小さくなって、サポートパイプとの間に介在するフィルムへの負荷が大きい。さらに、開閉時のローリングパイプ両端での挙動が不安定なため、損傷は端部に近く、開閉範囲の下方部に生じやすい。よって、その部分から損傷を含むフィルム片を切り出して観察した。また、図 2 に 3 か月程使用して裂け目が大きくなった後述するフィルム B の損傷の例を示す。図 2 に損傷の観察結果を示し、(a) は全体、(b) はフィルム破断部の上部、図 2 (c) は損傷の初期状態と思われる線状傷、図 2 (d) は下部でそれぞれの損傷を示す。このように、プラスチックフィルムの上部では、しわから成長した複数の線状傷が成長、合体して破損しているのに対して、下部では繊維がローリングと直角方向に伸び、引きちぎられるように破断していることが分かる。図 2 (b) の線状傷は、二つパイプで挟まれたプラスチックフィルムの圧縮変形と摩擦により生じるものと推察され、プラス

チックフィルム損傷発生過程中的重要な現象と考えられる。

図3はフィルムの比較的損傷の少ない部分を選び、その表面をSEMを用いて観察したもので、図3(a)は外側から、図3(b)は内側から見たものである。図3(a)では目立った傷は見当たらないが、図3(b)では比較的明瞭な毛ば立ち状の肌あれがみられる。図4にプラスチックフィルムの内外表面の粗さを粗さ測定器で測定した結果を示す。ここで、内側とはフィルムのサポートパイプ側、外側とはローリングパイプ側を指す。図4(a)は測定状況を示すもので、巻き上げパイプの転動方向と垂直方向に測定した。図4(b)にフィルムの外側面の粗さを、図4(c)に内側面の粗さを示す。最大粗度高さ R_y は外側の粗さ $R_y=5.1$ よりも内側の粗さ $R_y=11.6$ の方が粗く、図3に示す表面観察結果とも一致する。

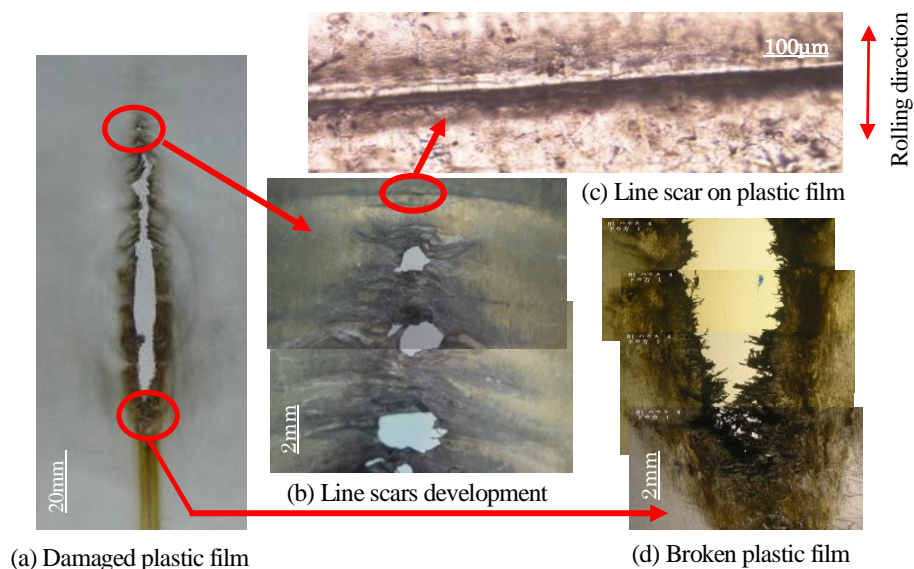


Fig. 2 Damaged plastic film observed from inside support pipe side surface by microscope. (a) Damaged plastic film, (b) Line scar on plastic film, (c) Line scar development, (d) Broken plastic film.

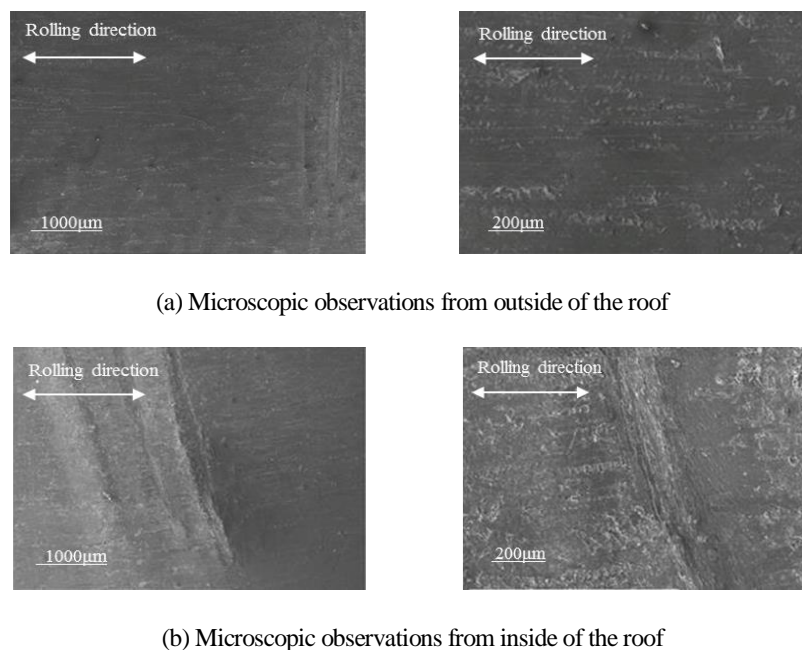


Fig. 3 Damaged plastic filmB observed from both outside and inside by SEM. (a) Microscopic observations from outside. (b) Microscopic observations from inside. The number of line scars observed from inside surface is more than the number of line scars observed from outside surface.

2・2 プラスチックフィルムの転がり接触疲労による破壊メカニズムの推定

図5は実体損傷の観察から推測したプラスチックフィルムの破断生成過程を推定したものである。図5(a)に示すフィルムはサポートパイプとローリングパイプとの間で転がり圧縮を受けて帯状に延伸される。そこに図5(b)に示すしわが形成される。それが折れ込まれて図5(c)に示す線状傷が発生する。さらに、図5(d)に示すように面内張力により線状傷が進展し広がり、図5(e)に示す破断に至ると考えられる。それらの損傷の程度や早さは、パイプやフィルムに関連する環境条件を含む複数の要因が関係していると考えられる。

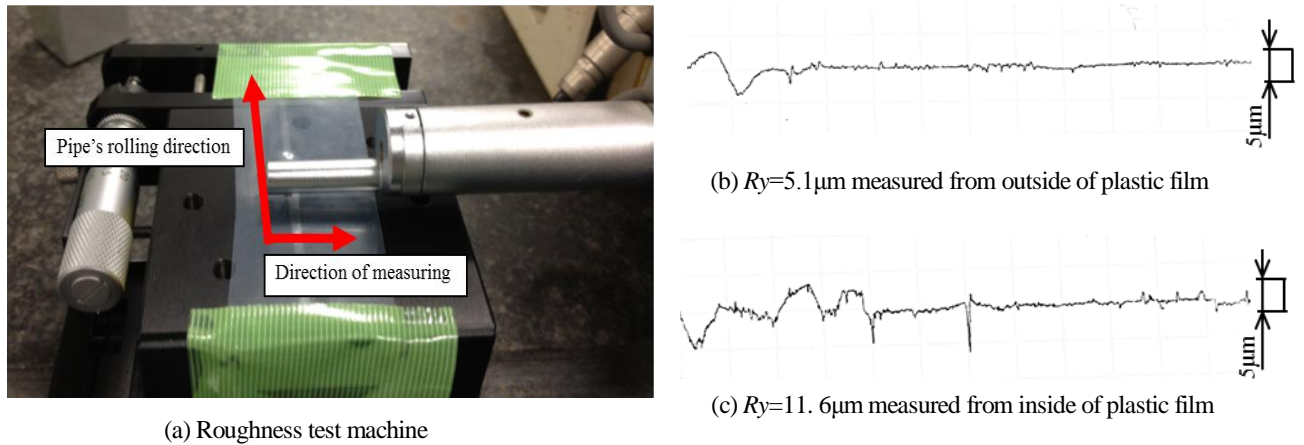


Fig. 4 (a) Surface roughness of plastic filmB measured along the transverse direction of rolling. (b), (c) Maximum height: R_y is measured based on JIS (JIS B 0601). The results show that R_y observed from inside surface is about two times larger than the one observed from outside surface.

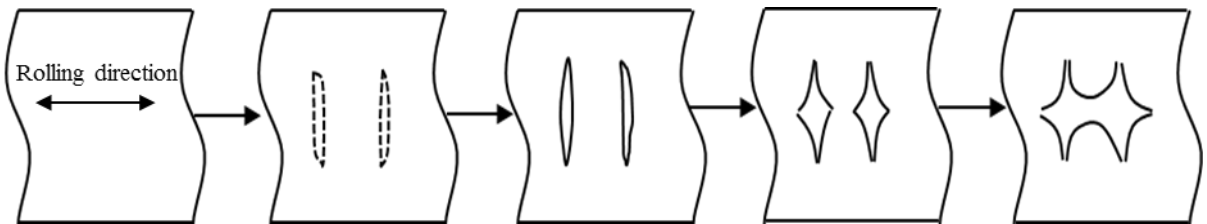


Fig. 5 Schematic explanation of damage process appearing on the film. (a)Intact plastic film, (b) Crease formation, (c) Line scar formation, (d) Line scar development, (e) Broken and splitted.

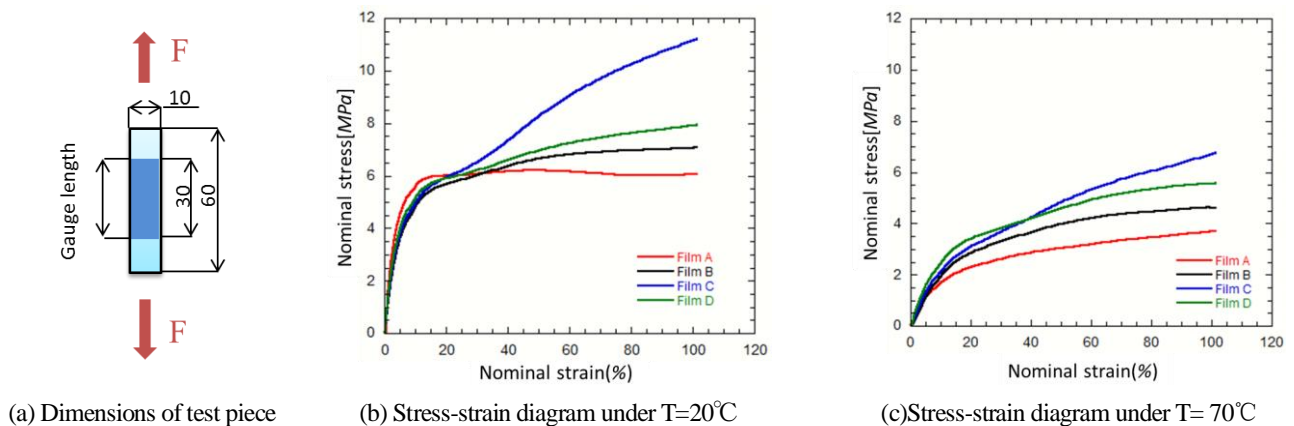


Fig. 6 Stress-Strain Diagram for different plastic filmA,B,C,D. (a) Dimensions of test piece. (b) Tensile test results under $T=20^{\circ}\text{C}$. (c) Tensile test results under $T=70^{\circ}\text{C}$.

3. プラスチックフィルムの応力歪特性

3・1 引張試験の方法

試験には、共同研究先の宮崎県総合農業試験場から提供された通常のビニールハウスでよく用いられるフィルム材と鋼製パイプを使用した。このフィルムは低密度ポリエチレンやエチレン酢酸ビニル共重合樹脂を含み、インフレーション成型法により作られている。透過性や保温性などの強調する性能により多くの種類があり、ここで用いるのは4種類のフィルムで、それぞれを材料 A, B, C, D と呼ぶ。パイプは JIS G3314 に相当する溶融亜鉛メッキ鋼管である。直交する2本のパイプ間に挟まれたフィルムに生じる応力や変形を求めるためには、フィルムの応力-歪特性が必要である。雰囲気温度は、常温 $20\pm 15^{\circ}\text{C}$ と高温 70°C の2通りとする。これは、夏期のビニールハウスにおけるパイプ表面温度が 70°C まで達することを考慮している。常温ならびに加熱灯を用いた高温において、100%歪までの応力-歪関係を求めた。フィルムの引張試験には、JIS K7127 (1999) に基づく試験片が用いられるが、加熱灯を用いる方法では100mmの範囲しか温度を均一 ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) に保持できないため、変形後も100mm以内に収まるように図6 (a) に示す長さ60mm、厚み0.15mmの短縮試験片を考案し試験に供した。試験片は引張方向が実体における巻上げパイプの転がり方向と一致するように切り出した。また、チャッキングの際に硬質ゴムを介在させることでチャック部からの試験片の破れや滑りを抑え、均一な力で保持できるように工夫した。引張速度はひずみ速度 $\dot{\epsilon}=0.05\text{s}^{-1}$ とした。一方、開閉時のフィルムに生じるひずみ速度は $\dot{\epsilon}=5\text{s}^{-1}$ 程度と見積もられるが、両者の歪速度の差であればその応力ひずみ関係への影響は10%程度以内であることが報告されている (谷村他, 2011)。

3・2 引張試験結果

前述の方法で、常温 $T=20^{\circ}\text{C}$ ならびに $T=70^{\circ}\text{C}$ で引張試験を行い、得られた応力-歪線図を図6 (b), (c) に示す。通常、アルミなどの材料では強度設計の目安にする降伏応力が明瞭でないため、塑性歪み0.2%に相当する応力0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ が用いられる。しかし、プラスチック材料は変形が大きいので、0.2%耐力では正確な特性を得ることができない。そこで、引張試験結果から算出した応力-歪線図を基に、フィルムの変形が高々60%であることを考慮して代表強度として60%耐力 σ_{60} (塑性歪60%に相当する応力) を求めた。表1に常温と 70°C での60%耐力およびそれらの比率を示す。これより、温度を 70°C まで上昇させると、60%耐力が常温の60%程度まで大きく低下することが分かった。プラスチック材料では 80°C まで温度が上がると引張強さが常温の50%ほどに低下することが指摘されている (廣恵, 本吉, 1996)。ビニールハウスに用いられるフィルムでも同様の傾向が見られることが確認できた。

4. 常温での解析と転がり損傷試験結果

4・1 解析方法

まず基本的な条件下でどのような損傷が起きるのかを考察するため、常温 20°C での解析と転がり損傷試験を行う。これまでに、剛体と弾性体の種々の形状に対する接触問題が取り扱われている (Johnson, 1985)。しかし、弾性筒体で挟まれたプラスチックフィルムの接触問題は圧延では見られるものの、直交する円柱間にフィルムが介在する接触解析は見当たらない。そこで、本論文では鋼製パイプに挟まれたプラスチックフィルムに生じる応力と変形を弾塑性接触解析で求める。図7に1本のサポートパイプに注目した基準モデルの模式図を示す。ここで用いたモデルの要素タイプは、パイプとフィルム共に六面体の一次要素で、要素数は約 1.5×10^5 である。要素サイズは、パイプの接触部で $0.1\text{mm}\times 0.1\text{mm}\times 0.08\text{mm}$ 、フィルムのメッシュサイズは $0.1\text{mm}\times 0.1\text{mm}\times 0.0375\text{mm}$ とした。メッシュの妥当性を確認するため、予め直交する2本の弾性パイプが接触する場合のヘルツ応力を解析し、その結果が誤差1%以内で一致することを確認した。その他の解析条件は次のようにする。解析コードはMultiFront法によるスパースソルバであり、解析タイプは静的構造解析、材料構成則はパイプを弾性体、プラスチックフィルムを弾塑性体とする (MSC Software Corporation, 2012)。パイプとフィルムはフルオープン型ビニールハウスで使用されているものと同一寸法のもので、ローリングパイプの外径 $d_1=38$ (内径 34mm)、サポートパイプの外径 $d_2=38\text{mm}$ (内径 34mm)、プラスチックフィルム厚さ $t=0.15\text{mm}$ とする。接触部に加わる荷重はサポートパイプ1本当たりに、ローリングパイプ重量が均等に加わるとして求めた荷重 $P=15\text{N}$ を基準にして与える。材料定数は、パイプはヤング率 210GPa 、ポアソン比0.3、フィルムモデルの構成則は図6 (b), (c) に示す

応力-歪線図を用い，ポアソン比は 0.45 である．境界条件として，ローリングパイプ断面では xz 軸方向移動，サポートパイプ断面で xyz 軸方向移動を 0 で拘束し，フィルムモデルでは図 7 (d) の $x = y = z = 0$ の点において， xz 軸方向移動を 0 で拘束する．以上の条件を基準条件とする．

Table 1 60% offset yield strength obtained from Fig. 7 (b), (c)

	$\sigma_{60\%}^{20^{\circ}\text{C}}$ [MPa] at $T=20^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{60\%}^{70^{\circ}\text{C}}$ [MPa] at $T=70^{\circ}\text{C}$	$\sigma^{70^{\circ}\text{C}} / \sigma^{20^{\circ}\text{C}}$
Film A	6.2	3.2	0.52
Film B	6.8	4.3	0.62
Film C	9.2	5.4	0.58
Film D	7.3	5.0	0.68

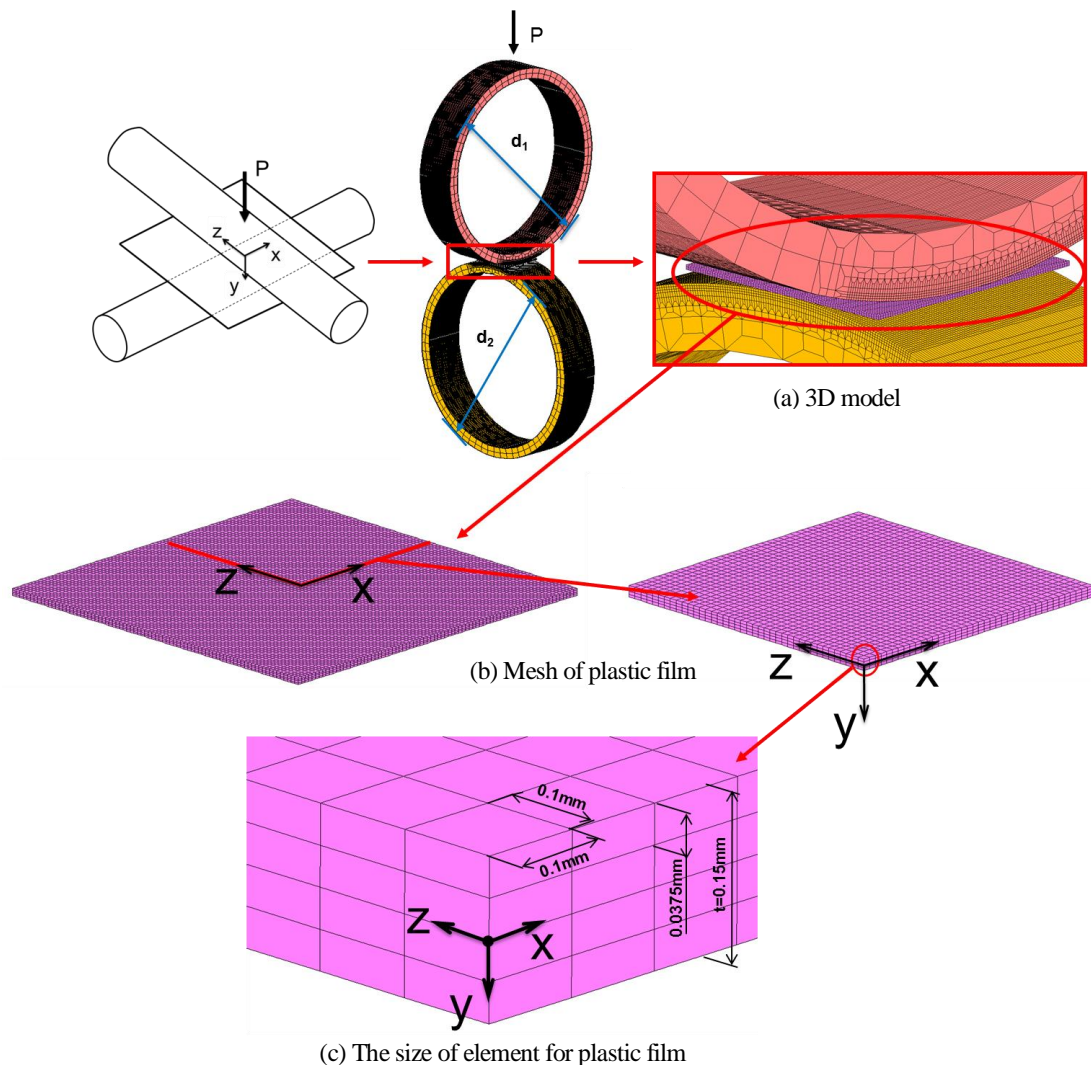


Fig. 7 FEM mesh for standard model focusing on single support pipe. Here, it is assumed that a single support pipe is subjected to the load P . (a) 3-Dimensional model for contact analysis of plastic film between the two pipes. The local mesh on contact area is refined for the accuracy of analysis. (b) Mesh for the finite element method simulation of plastic film. (c) The dimension of the element is $0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm} \times 0.03\text{mm}$.

4・2 常温でのプラスチックフィルムの変形

図 8 に基準条件におけるフィルムとパイプとの接触状態を示す。温度は常温，荷重 $P=15\text{N}$ ，二本のパイプはともに外径 $d_1=d_2=38\text{mm}$ で，フィルム B を用いている。なお，ここでは摩擦係数 μ は 0 として扱った。図 8 (a)，(b) は y 軸方向の接触応力分布を示しており，最大接触応力 p_{\max} は接触中心部で 7.14MPa である。図 8 (c) は接触面の形状を明らかにするために，接触・非接触部の境界をプロットしたものである。図 8 (c) で示される図形を円形と仮定して ($x^2 + z^2 = 0.88^2$) で表される円と想定したところ，プロット点の最大誤差は 5.1% となり，円形と見なして差し支えないことが分かった。ここで半径 0.88mm は原点から $x=0$ の点と $z=0$ の点までの距離の平均値を用いた。図 8 (d) はプラスチックフィルムの変形状態を示す。

これらの結果から，パイプ径が等しければ 2 本のパイプが直交して薄いフィルムが介在していても接触部はほぼ円形になることがわかる。また図 8 (b)，(c) からわかるように接触中心部の応力が最大で，フィルム上下面ともパイプ断面形状に沿って変形している。

表 2 は 20°C と 70°C の場合それぞれにおける応力・変形の解析結果を示す。この結果によると， 20°C に対して 70°C では最大厚み減少量 Δt が約 2 倍になる。また，接触面積は 20°C に対して 70°C では約 1.8 倍になる。

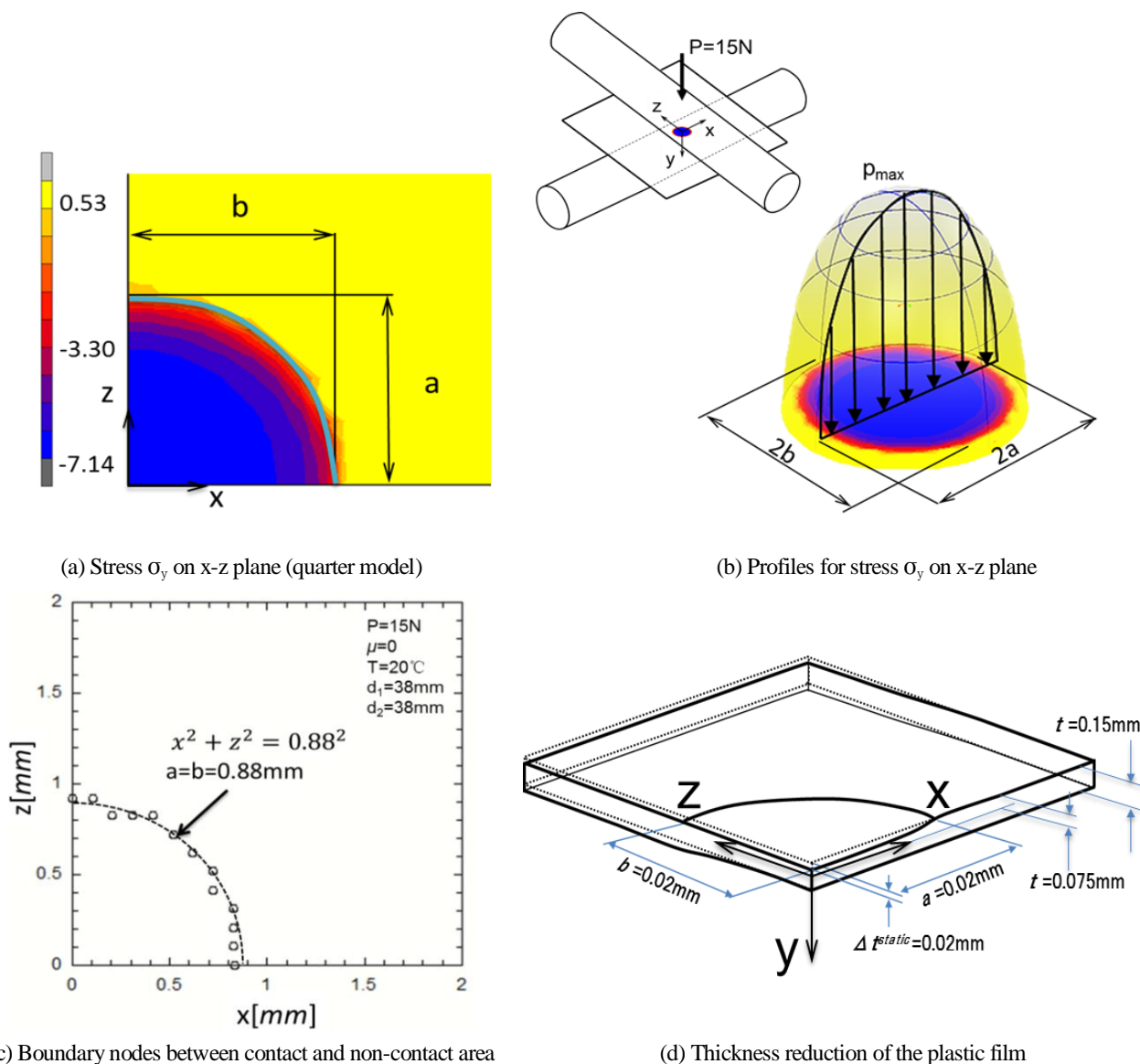


Fig. 8 The stress and deformation of the film when $P=15\text{N}$, $\mu=0$, $T=20^\circ\text{C}$ and $d_1=d_2=38\text{mm}$. (a) Stress σ_y at the contact area on the x - z plane. (b) The maximum stress at x - z plane is $p_{\max}=7.14[\text{MPa}]$ appears on the center of plastic film. (c) Contact area with dimensions $a=b=0.88$ (dotted line). (d) The maximum thickness reduction appears at the center of the plastic film ($\Delta t/2=0.01\text{mm}$).

Table 2 Stress and deformation for film B under different temperature T when $P=15\text{N}$, $\mu=0$ and $d_1=d_2=38\text{mm}$

Rolling pipe temperature T	20°C	70°C
Maximum contact stress p_{\max} [MPa]	7.14	3.90
Contact length a [mm]	0.88	1.18
Contact length b [mm]	0.88	1.18
Contact area $A_{\text{contact}}=\pi ab[\text{mm}^2]$	2.43	4.37
Maximum thickness reduction Δt [mm]	0.020	0.038

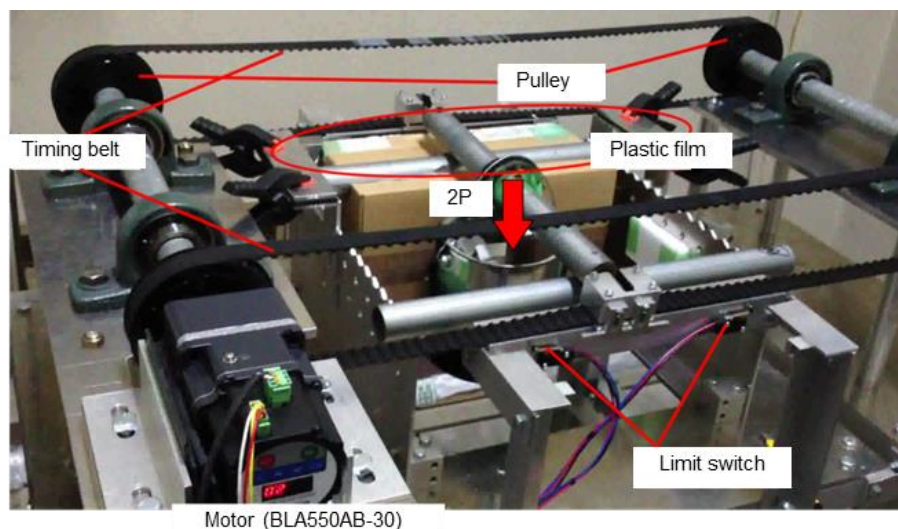


Fig. 9 Rolling contact machine for plastic film

4・3 転がり損傷試験機の設計・作製

図9に考案した転がり損傷試験機を示す。これはサポートパイプ1本当たりに荷重 P を加えた状態で、巻き上げパイプを自由に転がさせながらサポートパイプ上側で両端を固定されたフィルム上を25cmの範囲で繰り返し往復可能とさせるものである。これにより、巻き上げパイプに加える荷重やフィルムの材質、サポートパイプの円周粗度や表面温度などの試験条件を変え、条件ごとにフィルム試験片に生じる損傷を評価することができる。転がり損傷試験機においてローリングパイプを転動させる動力には、ローリングパイプの往復速度を0.75m/minから30mm/minまで制御することができる回路一体型ブラシレスモーターを使用した。また、モーターの定格トルクは8.5Nmより、転動パイプの摩擦係数を0.3、転動機構の効率を0.3としたとき、最大で試験片に $P=195\text{N}$ (基準荷重 $P=15\text{N}$ の13倍)まで荷重を加えることができる設計をした。この試験機で、フィルムの破損プロセスにおいて重要と考えられる線状傷の再現を目指す。

4・4 常温での転がり損傷試験結果

前述した転がり損傷試験機を用いて巻き取りパイプによる荷重と転動回数のフィルム損傷への影響を繰り返し荷重を受けるフィルムの20cm範囲のしわと線状傷の数で調査した。試験条件は、常温(20±2°C) 往復300回、往復速度1m/min、荷重 $P=75\text{N}$ 、 $d_1=d_2=38\text{mm}$ とし、試験片は転動方向が巻き上げパイプの転動方向と一致するように実体フィルムから切り出した。用いたフィルムは4種類で、フィルムA、B、C、Dとする。荷重 $P=75\text{N}$ は、サポートパイプの曲がりによる不均一支持や風雨によるフィルムへの圧下力さらには実態ハウスにおけるフィルム損傷が巻き上げパイプ端部付近に生じやすいことから端部効果も加味し、かつ損傷生成加速効果も期待して大きめの値とした。

表 3 に損傷条件の基準となる荷重による影響を見るために荷重を、 $P=30\text{N}$, 60N , 75N それぞれにかえて行った転がり損傷試験の結果を長さ当たりのしわの数を n_{crease} , 長さ当たりの線状傷の数を $n_{linescar}$ で示す. ここで, 「しわ」の判定は以下のようにして行う. 試験後のフィルムを黒いボードの上に置き, 転動方向に沿う上方に置いた光源に対して反対側から観察をし, 波状の変形を反射光でとらえたものを「しわ」としてカウントする. フィルム試験材には, 図 6 の応力-歪線図において最も変形抵抗の小さいフィルム A を用いた. 表 3 の結果から, しわの数は荷重に比例して増加するが荷重 P を増加させても線状傷は見られなかったが, フィルム損傷の初期段階と考えているしわが最も多く生じた荷重 $P=75$ を今後の実験や解析に用いることにする.

表 4 は転動回数の影響を調べた実験結果である. 往復回数を 300 回から 1000 回に増やしたところ, しわの数は 14 個から 18 個に増加した. 回数を 3 倍以上にしたにもかかわらず, しわの数は約 29% しか増加しなかった. さらに, 線状傷は全く生じなかった.

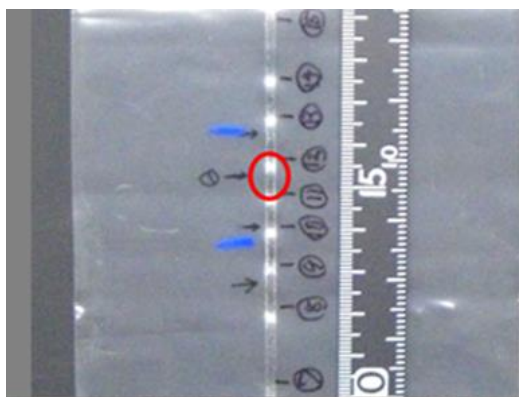
図 10 に常温での転がり損傷試験結果を示す. 図 10 (a) の白色部分は帯状に延伸された領域であり, しわも含まれる. 図 10 (b) にしわの中心に見られた最も大きな損傷を示す. この傷はサポートパイプ面の凹凸に対応して見られるもので, 線状傷に特徴的な転がりに直角方向に傷は見られない. このように常温条件ではしわは見られるものの, フィルム破断につながる特徴的な損傷である線状傷を生成させることはできなかった.

Table 3 Number of crease and line scar per centimeter for film A under different load P
when $T=20^{\circ}\text{C}$, 300 rolling cycles and $d_1=d_2=38\text{mm}$

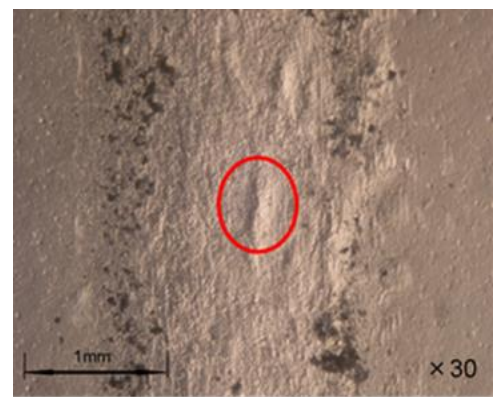
Rolling load P	30N	60N	75N
The number of crease per centimeter n_{crease}	0.5	1.05	1.35
The number of line scar per centimeter $n_{linescar}$	0	0	0

Table 4 Number of crease and line scar per centimeter for film B under different rolling cycles
when $P=15\text{N}$, $T=20^{\circ}\text{C}$ and $d_1=d_2=38\text{mm}$

Rolling cycle	300	1000
The number of crease per centimeter n_{crease}	0.7	0.95
The number of line scar per centimeter $n_{linescar}$	0	0



(a) Rolling test piece



(b) Detail view of test piece surface at the support pipe side

Fig. 10 Creases observed for film B when $P=15\text{N}$, $T=20^{\circ}\text{C}$, 300 rolling cycles and $d_1=d_2=38\text{mm}$. However, line scar is not found in the test piece when $T=20^{\circ}\text{C}$.

5. 高温での解析と転がり損傷試験結果

転がり損傷試験機を用いて、常温 $T=20^{\circ}\text{C}$ で荷重、回数を増やして試験を行ったところ、しわ生成数は増加するが線状傷の生成は見られなかった。そこで夏期のサポートパイプ到達温度である 70°C の条件下で試験をしたところ多くの線状傷が見られた。すなわち、サポートパイプ加熱温度の損傷への影響は大きく、 70°C 加熱が重要な条件であることが分かった。その解析と試験の結果を以下に示す。

5・1 高温での解析結果

(1) 荷重の影響

表 5 は、フィルムに負荷する基準荷重 $P=15\text{N}$ と試験荷重 $P=75\text{N}$ においてフィルムに生じる応力分布、厚さの減少量および接触面積の解析結果である。荷重が 5 倍になると、最大接触応力 p_{\max} が約 1.8 倍、最大厚み減少量は約 2 倍、そして接触面積 $A_{\text{contact}}=\pi ab$ が約 2.3 倍にそれぞれ増加する。

(2) 摩擦係数の影響

表 6 に静的状態において摩擦係数を変えて、接触応力と厚み減少量に与える影響を解析した結果を示す。金属とプラスチック材料の摩擦係数 μ を求めた文献では $\mu=0.15\sim 0.3$ 程度であることが示されている（山口, 1981）。さらに広範囲での摩擦係数の影響を見るために 0.6 まで解析を行った。図 11 はフィルム最大厚減少量 Δt と摩擦係数 μ の関係を示す。摩擦係数 μ が大きくなると、最大接触応力 p_{\max} が増加し、フィルム最大厚減少量 Δt が小さくなる。摩擦係数 μ が大きいと摩擦によってプラスチックフィルムが滑り難くなり、接触面が広がりにくくなる。その結果 μ の増加に伴い高圧面化が見られる。これは同一荷重下で接触面積 A_{contact} が小さく止まるからである。

Table 5 Stress and deformation for film B under different load P when $\mu=0$, $T=70^{\circ}\text{C}$ and $d_1=d_2=38\text{mm}$

Rolling load P	15N	75N
Maximum contact stress p_{\max} [MPa]	3.90	6.98
Contact length a [mm]	1.18	2.14
Contact length b [mm]	1.18	2.14
Contact area $A_{\text{contact}}=\pi ab[\text{mm}^2]$	4.37	14.3
Maximum thickness reduction Δt [mm]	0.038	0.086

Table 6 Effect of friction coefficient μ on the deformation of film B when $P=75\text{N}$, $T=70^{\circ}\text{C}$ and $d_1=d_2=38\text{mm}$

Friction coefficient μ	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
Maximum contact stress p_{\max} [MPa]	17.54	19.84	23.64	26.98	30.03	32.71
Contact length a [mm]	1.769	1.74	1.621	1.594	1.491	1.475
Contact length b [mm]	1.769	1.74	1.621	1.594	1.491	1.475
Contact area $A_{\text{contact}}=\pi ab[\text{mm}^2]$	9.831	9.511	8.255	7.982	6.984	6.835
Maximum thickness reduction Δt [mm]	0.0803	0.0749	0.0671	0.0615	0.0575	0.0539

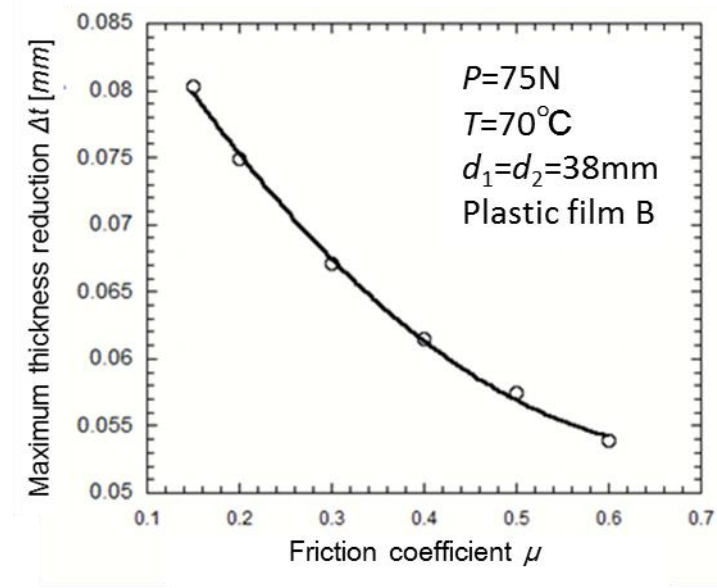


Fig. 11 Effect of friction coefficient μ on Δt . With increasing the friction coefficient μ , the maximum thickness reduction Δt decreases.

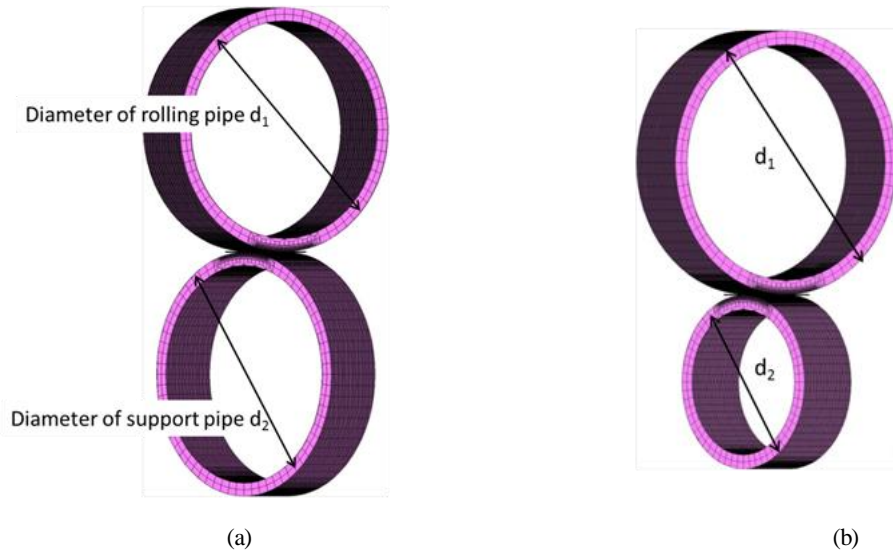
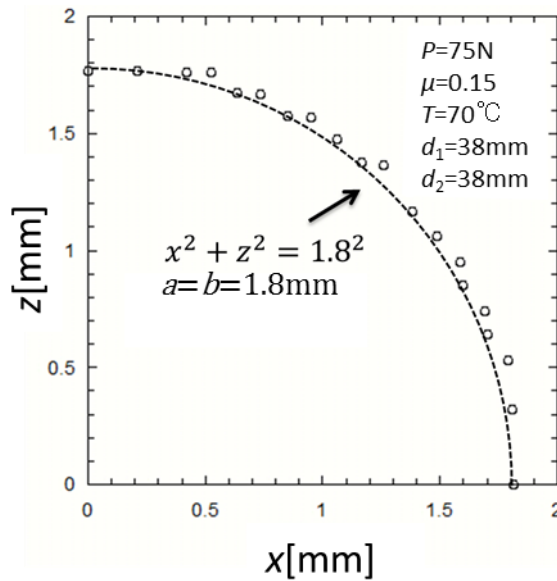


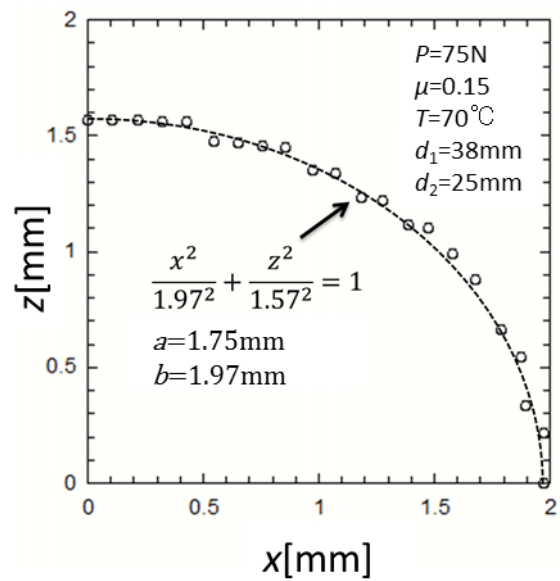
Fig. 12 3D contact models for the different dimension of support pipe. (a) Both support and rolling pipes have the same dimensions $d_1=d_2=38\text{mm}$. (b) Rolling pipe has the dimension $d_1=38\text{mm}$, and support pipe has the dimension $d_2=25\text{mm}$.

Table 7 Stress and deformation of film B for different dimensions of support pipes when $P=75\text{N}$, $\mu=0.15$ and $T=70^\circ\text{C}$

Diameter d_1, d_2	$d_1=38\text{mm}, d_2=38\text{mm}$ in Fig.12 (a)	$d_1=38\text{mm}, d_2=25\text{mm}$ in Fig.12 (b)
Maximum contact stress p_{\max} [MPa]	17.54	19.01
Contact length a [mm]	1.8	1.57
Contact length b [mm]	1.8	1.97
Contact area $A_{\text{contact}}=\pi ab$ [mm ²]	10.18	9.73
Maximum thickness reduction Δt [mm]	0.080	0.093



(a) Contact area for $d_1=38\text{mm}$, $d_2=38\text{mm}$ in Fig.13(a)



(b) Contact area for $d_1=38\text{mm}$, $d_2=25\text{mm}$ in Fig.13(b)

Fig. 13 The profile of contact area. (a) Quarter circular arc for $a=b=1.8\text{mm}$. The profile of contact area is a circle. (b) Quarter elliptical arc for $a=1.57\text{mm}$, $b=1.97\text{mm}$. The profile of contact area is an ellipse.

Table 8 Stress and deformation for several plastic films when $P=75\text{N}$, $\mu=0.15$, $T=70^\circ\text{C}$ and $d_1=d_2=38\text{mm}$

Kind of plastic film	Film A	Film B	Film C	Film D
Maximum contact stress p_{\max} [MPa]	16.03	17.54	19.49	18.02
Contact length a [mm]	1.88	1.80	1.68	1.66
Contact length b [mm]	1.88	1.80	1.68	1.66
Contact area $A_{\text{contact}}=\pi ab[\text{mm}^2]$	11.10	10.18	8.87	8.66
Maximum thickness reduction Δt [mm]	0.0897	0.0804	0.0744	0.0719

(3) サポートパイプ直径の影響

表 7 はパイプの外径を変化させた場合の解析結果である。サポートパイプ外径 d_2 のみを 38mm から 25mm に小径化する場合を考える。この結果から、最大接触応力 p_{\max} が 8.4% 増加し、厚み減少量は 11% 増加することが分かった。8.6% 減少する。

図 12 はサポートパイプの径を変えたときのモデルである。図 13 (a) は二つのパイプの径が同じとき、図 13 (b) は異なるときそれぞれの接触部分と非接触部分の境界を示したものである。パイプが同一径の場合、接触面の輪郭を円形と仮定するとプロットとの最大誤差は 3.8%、パイプ径が異なる場合の接触面を楕円形と仮定するとプロットとの最大誤差は 5.2% であった。このことから接触部の形状は、直交するパイプの径が同じときは円形に、異なるときは楕円形に近似できることがわかった。

(4) プラスチックフィルム材が異なる場合の影響

表 8 は各フィルム材質における最大接触応力 p_{\max} と最大厚み減少量 Δt の解析結果を示す。ここでは、4 種類のフィルムを用いて、パイプ圧縮力による最大厚み減少量 Δt と最大接触応力 p_{\max} を解析した。この結果によると、 p_{\max} はフィルム C で最大であるが、 Δt が一番大きいのはフィルム A で、接触応力と厚み減少とは逆の関係にあることが分かる。また、引張試験で求めた耐力が大きい材質の方が、 Δt が小さいという傾向が明らかとなった。

5・2 転がり損傷試験機による実験結果

パイプ温度 70℃, 荷重 75N, 転がり速度 1m/min, 往復 300 回の条件で, 転がり損傷試験を行った. サポートパイプの温度を 70℃に加熱する方法として, 加熱灯による照射を採用する. これは太陽光によるフィルムとパイプの温度上昇を考慮したものである. フィルム下面側に固定されたサポートパイプの下から加熱灯を当てることでパイプを加熱する. さらに加熱部分を断熱箱内に収めて箱内の空間をできるだけ密閉させることで, 評価範囲 (20cm) のパイプ温度が $\pm 2^\circ\text{C}$ になるように調節した. また, 加熱灯の位置を調節可能にし, 転がり試験を中断させることなく温度を制御できるようにした. 図 14 は光学顕微鏡で損傷部分を観察した画像である. この写真では線状傷が等間隔に発生した部分を示すが, 実際のパイプでは表面の状態が不均一であるため, 線状傷は等間隔ではないことの方が多い. 図 15 は損傷部分をプラスチックフィルム内側 (試験で下側) から SEM を用いて観察したもので, ビニールハウスで損傷を受けたプラスチックフィルムと同様である (図 2 (b) 参照). 図 15 より, 転がり方向に延伸された部分が転がり直角方向に, 線状に折れ重ねられているように見える. 表 9 に試験後にプラスチックフィルムに生じた線状傷の発生密度 (1cm 当たり発生数) とプラスチックフィルム厚減少量を整理して示す. 図 16 は表 9 の結果を整理して, 4 種類の試験片それぞれの線状傷の密度とフィルム厚み減少量との関係を示したものである. この結果により, 最大厚み減少量 Δt が増加すると傷の数 n_{linescar} も増加していることが分かる. ここで明らかになったフィルムの厚み減少量と線状傷の発生数について以下に考察する. フィルムの厚み減少量が大きくなると, 減少量に比例してパイプの転がり方向にフィルムが延伸される. この接触部の局所的な延伸に対してその両側の非接触部からの拘束によって伸びようとする部分が波状に変形して伸び量が抑制され「しわ」が生成するものと考えられる (図 10 (a)). 転動の繰り返しのよって波状の「しわ」が転がり方向に折りたたまれるように変形したものが「線状傷」になることが確認されているので (図 15), ①厚み減少量大, ②接触部の延伸大, ③しわ傷多, ④線状傷多, という流れにより厚み減少量を線状傷と結びつけて考えることができる.

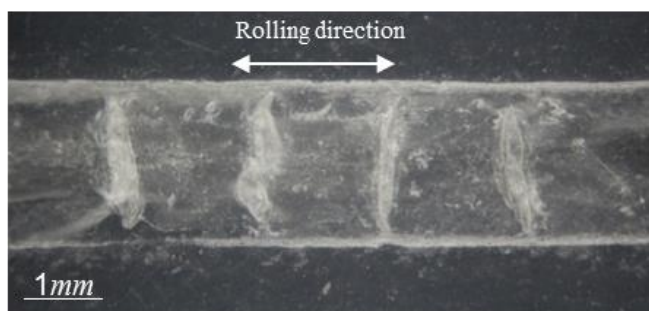


Fig. 14 Microscopic view of film B after rolled 300 cycles when $P=75\text{N}$, $T=70^\circ\text{C}$ and $d_1=d_2=38\text{mm}$. Four line scars are found in the figure, and all the line scars are perpendicular to the rolling direction.

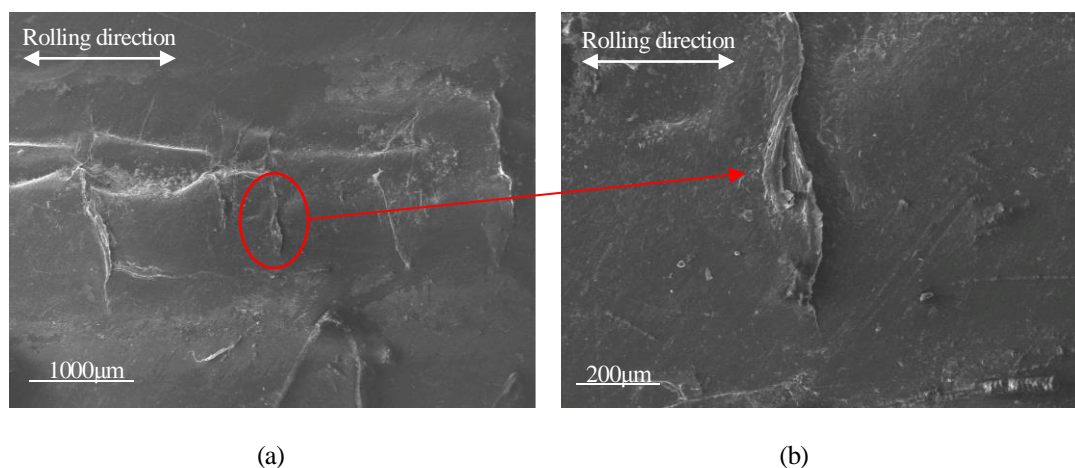


Fig. 15 Damaged plastic film B observed by SEM at the support pipe side surface after rolled 300 cycles when $P=75\text{N}$, $T=70^\circ\text{C}$ and $d_1=d_2=38\text{mm}$. (a) Line scar of plastic film B observed from inside. (b) Detail of the line scars.

Table 9 Number of line scar per centimeter $n_{linescar}$ along the rolling direction for four kinds of plastic films when $P=75N$, $T=70^{\circ}C$ and $d_1=d_2=38mm$

Kind of plastic film	Film A	Film B	Film C	Film D
Number of line scar per centimeter $n_{linescar}$	3.85	2.95	1.2	0.15
Maximum thickness reduction Δt [mm]	0.0897	0.0804	0.0744	0.0719

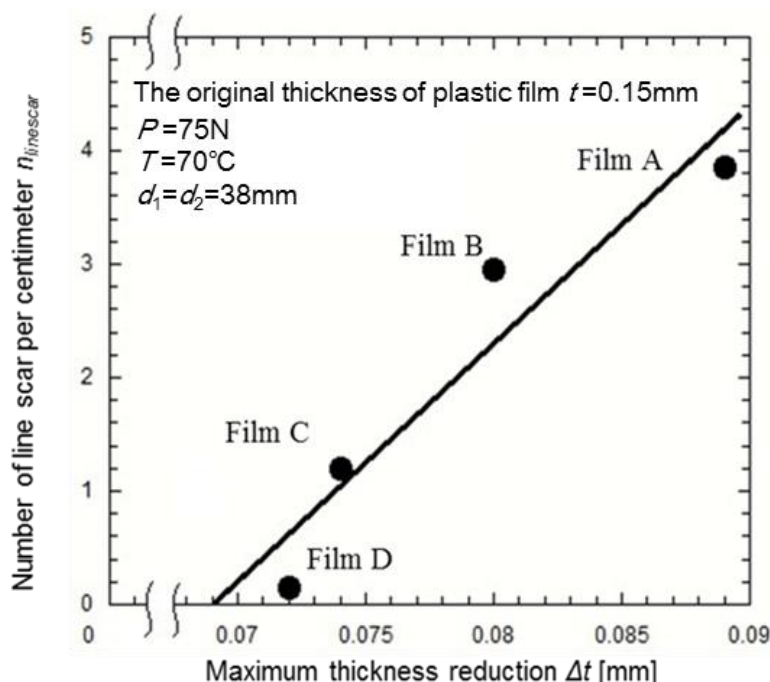


Fig. 16 The number of line scar per centimeter $n_{linescar}$ for four kinds of plastic films. The number of line scar $n_{linescar}$ is controlled by the thickness reduction Δt obtained by the static contact analysis. With increasing the maximum thickness reduction Δt , the number of line scar $n_{linescar}$ increases.

6. 結 言

本研究では、フルオープン型および谷部自動開閉型ビニールハウスに用いるプラスチックフィルムの損傷要因を考察した。力学的要因に関して有限要素法解析を行うとともに、自動転がり損傷試験機を設計・製作して、しわや線状傷を実験的に再現し、それらをマイクロ観察した。それらの結果から明らかとなったことを以下にまとめる。

- (1) 使用後のフィルム表面の損傷を両面から観察した結果、損傷はサポートパイプと接触する内側で生じていることが分かった。また表面粗さに関しても、外側の粗さ $Ry=5.1\mu m$ に対して、内側の粗さは $Ry=11.6\mu m$ であり、内側の方が粗いことが分かった。フィルムはサポートパイプと直交するパイプ間で転がり圧縮を受けて帯状に延伸される。そこにしわが形成された後、しわがサポートパイプ側で折れ込まれて線状傷が発生する。さらに、その線状傷が進展し広がり、破断に至るものと考えられる。
- (2) 弾塑性有限要素法解析により、直交するパイプ間のフィルムに生じる応力や変形を考察した。パイプ径が同じであれば、接触面は円形、パイプ径が異なる場合には楕円形にそれぞれ近似できる。接触面の応力分布は中心で最大となり、それに応じてフィルムの圧縮変形も中心が最も大きい。
- (3) フィルムの損傷を再現するために転がり損傷試験機を設計・作成した。この試験機は1本のサポートパイプが荷重を受けた状態で、サポートパイプ上のフィルムの上で巻き上げパイプを繰り返し往復させるものである。これを用いて、巻き上げパイプに加える荷重やフィルム材質、サポートパイプの表面温度などの試験条件を変えて、試験片の損傷を比較することが可能となった。試作した試験機を用いて、常温で荷重と転がり回数を変えて試験を行い、しわを生成できることを確認した。

(4) 転がり損傷試験により常温では、線状傷に結びつくような損傷は生じない。一方、夏期のサポートパイプ到達温度 70℃での実験を行ったところ、フィルムに線状傷が再現できた。すなわち、サポートパイプの温度上昇が損傷生成に対して大きな要因であることが分かった。本試験機によって、しわや線状傷を再現できることから、結言 (1) で述べた損傷プロセスを裏付けることができる。

(5) 実際に使用されている 4 種類のフィルム（厚さ 0.15mm）を比較した結果、フィルムに生じる線状傷の発生密度は、フィルム厚み減少量によって支配されている。すなわち、厚み減少量が大きいフィルムほど線状傷の発生が多い。

なお、本研究で明らかとなったハウス内側からフィルムに傷が発生することは、まだ解析モデルや解析条件に反映させていないので、今後の課題として、例えば内側に小さな欠陥の存在を想定して転がりの解析を行うなど、より実態に近い解析を進める計画である。

謝 辞

本研究を進めるにあたって様々な御協力をして頂いた、株式会社長友農機の久保田保氏、宮崎総合農業試験場の石原農氏、武内和俊氏、藤田勝見氏に深く感謝致します。また、研究の一部は九州工業大学工学研究科大学院学生の左亦根氏、焦万中氏、ならびに工学府卒論学生の中島健氏、林佑樹氏の助力を得たことを記し、心から御礼申し上げます。

文 献

- 廣恵章利, 本吉正信, 成形加工技術者のためのプラスチック物性入門, 第 3 版 (1996), p.98, 日刊工業新聞社.
日本農業システム, PO フィルムとは, <<http://www.nougyo-vinylhouse.com/po/>>, (参照日 2014 年 5 月 17 日).
JIS K7127, プラスチック—引張特性の試験方法—第三部: フィルム及びシートの試験条件 (1999).
Johnson, K.L, Contact mechanics (1985), Cambridge University Press.
宮崎県農水産業温暖化研究センター, 宮崎県農水産業地球温暖化対応方針 (2012), p.47.
MSC. Software Corporation, Marc User's Guide (2012), p.1786.
日本農業気象学会施設園芸研究部会編, 施設園芸読本, <http://phdsamj.ac.affrc.go.jp/topic/2_3.html>, (参照日 2014 年 5 月 17 日).
谷村眞治, 林寛幸, 山本照美, 各種プラスチック材料の広ひずみ速度域での動的引張強度特性, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.77, No.780 (2011), pp. 4-5.
山口章三郎, プラスチック材料の潤滑性—その特性と摺動部への応用 (1981), pp. 120-125, 日刊工業新聞社.

References

- Hiroe, S. and Motoyoshi, M., Introduction to material properties of plastics, third edition (1996), p.98, Nikkan Kogyo Shimbun, Ltd. (in Japanese).
Japan Agriculture System Company, PO film (online), available from<<http://www.nougyo-vinylhouse.com/po/>>, (accessed on 17 May, 2014).
Japanese Industrial Standards (JIS-K7127) Test conditions and sheet film - part 3: Tensile test method for properties-plastics (1999) (in Japanese).
Johnson, K. L., Contact mechanics (1985), Cambridge University Press.
Miyazaki agricultural and fishery industries, Warming research center, Global warming countermeasure by miyazaki prefecture agricultural and fishery (2012), p.47 (in Japanese).
MSC. Software corporation, Marc user's guide (2012), p.1786.
Society of Agricultural Meteorology of Japan(Ed), Protected Horticulture Research Group (Ed), Protected horticulture, (online), available from<http://phdsamj.ac.affrc.go.jp/topic/2_3.html>, (accessed on 17 May, 2014).
Tanimura, S., Hayashi, H. and Yamamoto, T., Dynamic tensile properties of plastics over a wide range of strain rates, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.77, No.780 (2011), pp. 4-5 (in Japanese).
Yamakuchi, S., Lubricity of the plastic material: Application to the sliding portion and its characteristics (1981), pp. 120-125, Nikkan Kogyo Shimbun, Ltd. (in Japanese).