包装機によってフィルムを成形する時に発生する応力解析*

森村 浩明^{*1}, 寺島 佳希^{*2}, 萩原 一郎^{*1}

Stress Analysis of Film during Molding Shape by the Packaging Machine

Hiroaki MORIMURA ^{*1}, Yosiki TERASHIMA and Ichiro HAGIWARA

^{*1} Tokyo Institute of Technology. Dept. of Mechanical Engineering and Science
Ookayama 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

Packaging is essential to most kinds of industries. The basic part of the vertical form, fill and seal packaging machine is the forming collar. The forming collar provides the shape over which packaging film is smoothly formed into a cylindrical shape at high speed. Describing the forming collar geometry and hence its design is, however, remarkably difficult. And performance assessment for designing correct forming collar is not existed. This paper presents, for the first time, a method for the assessment by calculating the stress of the film on the geometry of the forming collar. Developable surface and non-developable surface are discriminated with this created method. Effect of mesh size of the finite element method for this analysis is analyzed. And accuracy of this method is confirmed to be put to practical usage.

Key Words : Mechanical Engineering, Finite Element Method, Nonlinear Problem, Plasticity, Packaging Machine

1. 緒 言

包装は広く用いられており、一般に包装機の成型型でフィルムを折曲げて袋形状に成形する。この時にフィルムに傷を発生させる課題があり、近年、食の安全性に対する関心が非常に高まってきている。このため、傷を発生させない成型型が望まれている。この型の評価は成型型を作り成型機で包装して評価しているが、機械の設定やフィルムの状態によって、結果が大きく異なる。この成型型の精度の評価方法が確立できていないことが型開発の課題となっている。筆者らは成型型の解析による作成方法を既に提案しており、更に残った課題である成型型の精度を、フィルムに発生する応力を有限要素法によって解明し、評価解析法を明らかにした。

2 章では、包装機械の具体的な構造と課題を述べる。包装機械の成型型は包装フィルムを成型型に沿ってガイドし、折曲げて袋状に変形させる重要部品である。この成型型はフィルムを伸縮させないで歪み無く変形させる形状が求められるが、その形状を計算で求めることが困難であった。筆者らは解析で型形状を決定する新しい作成手法を提案し、さらに次の課題である成型型の精度を評価する方法を開発し、ここで提案する。この精度の定量評価によって試作して開発するプロセスが合理化することが期待できる。3 章では、成型型によって発生するフィルムの解析方法を具体的に示す。4 章では現行の成型型と新しい解析方法によって作成した成型型を用いた時のフィルムの応力を解析する。5 章ではここで提案している解析方法の精度を確認する。本解析法は要素分割によって誤差が混入するが、実用性の有る細かさの分割でも、この応力解析方法は有効であることを明らかにする。

2. 包装機械の成型型の作成方法と評価の課題

スナック菓子や薬品などの多くは、装飾や保護のために包装されている。これらの製品は図 1 に示されるような

* 原稿受付 2011 年 11 月 1 日

^{*1} 正員, 東京工業大学 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

^{*2} ヤマハ発動機 (株)

E-mail: himorimura@ybb.ne.jp

包装機械⁽¹⁾で包装される。これはリールに巻かれた平面状の包装用フィルム(図中の14)を成型型(15)に運び、成型型の上で一挙に折り曲げて、製品を封入できるように筒状にする機構である。(28)はフィルムを縦方向にシーム溶着する部分である。対象製品は上から袋に投入され、最後に横方向にもシーム溶着(42)されて切り離される。この包装機械において、最も重要で特異な機構は成型型であり、これによりロール状の包装用フィルムをコンパクトに袋形状に変換する。

ここで金属の円管は包装機とは別の成形方法であり、ロール状の平面から徐々に円筒形状に変形させる。ただしこの円管の成形方法では、変形させる為の長い距離が必要となる。このため、この方法は砂糖などの棒状の細長い包装の一部以外では採用されていない。包装では、ほとんどが成型型によるコンパクトな機構を用いている。

図1は特許図⁽¹⁾であり、成型型の形状や周辺装置のアイデアが昔から出願されている。ただし、この成型型は経験的に作成されており、また型の成形性能を定量的に評価する方法が無かった。これを採用した初期の検討は Monsees⁽¹⁾らによって行われており、これを図2に示す。これは成型型によって平面から円筒に折り曲げる構成であるため、基本的に成型型は可展面であることが条件となる。すなわち成型型は歪なく平面から折り曲げて作成できる形状である必要がある。逆に平面に歪なく戻すことができる可展面である必要がある。図2aは元になる平面を示しており、図中の平面の折曲げ線(flattened bending curve)から折り曲げる。この線の上は型の肩部(collar)、下は円筒部分の型に変形し、図2bの成型型(forming collar)を作成する。平面上に定義された flattened bending curve は図2bでは円筒上の bending curve に転写される。ただし、この方式では曲げて丸まった部分は図2cに示す様に可展面ではなく、成型型として精度が悪く、不適当な形状となっている。また型として剛性を確保する為に、厚い型を作成しようとすると、形状が可展面から乖離する。

次に、成型型の表面形状を幾何学に基づいて定義して型を作成する方法が Mot⁽²⁾らによって提案された。さらに微分幾何学に基づいて、型の表面形状を求める方法は、Boersma⁽³⁾や McPherson⁽⁴⁾が提示している。これらは幾何形状を提示したが折れ曲り線に制約があり、作成できるのは型の一部に限定される。フィルムを縦方向にシーム溶着する部分(本報ではサイドシール部と呼ぶ)はモデル化できていない。すなわちこれらの方法においては、成型型の collar の上の部分の一部は可展面を仮定して作成することができるが、包装で必要になるサイドシール近くの collar 下部は可展面では作成できない。

これらの不具合を解決する新しい方法を筆者らは内外に提案⁽⁵⁾⁽⁶⁾している。これは有限要素法を活用して、フィルムの歪エネルギーが最小になる成型型の形状を求めるものである。この方法を用いると可展面が可能な簡易な型形状では、可展面の形状が得られ、シーム部分などを含む複雑な型も作成することが可能である。

ただし、成型型でフィルムが変形する時の傷やしわ発生の精度を評価する方法がなく、成型型による袋成形の精度を定量評価できていない。現状の型の評価は、成型型を試作して包装機械に組込み確認している。この方法では包装機械やフィルムの仕様の影響があり、型の精度を単独に定量評価することができない。本論文では成型型上で発生する包装フィルムの応力を直接解析し、この応力レベルから成型型の精度を検討する事を試みる。

3. 成型型によってフィルムに発生する応力解析手法の提案

フィルムは型の前後で張力を加えて成型型の上で折り曲げられ、円筒形状に成形される。包装では成型型で折り曲げる時に発生するフィルムの傷が課題になる。この傷の発生は、張力の変動するフィルム送りの開始と停止時には顕著になる。また現状の成型型ではサイドシール部分を連続的に成形する適切な成型型が無い場合、シール近くに課題となる傷が発生する事が多い。

型の重要な性能はフィルムに傷を発生させない事である。これらはフィルムを型上で引く時にフィルム面の局部に発生する応力が高くなった結果であると考えられる。ここでは型の上のフィルムの応力状態を解析して、成型型の精度を評価することを試みる。評価の指数は『フィルム各点の応力/平均応力』の応力倍率とする。平均応力はフィルムに加えている張力を平面上のフィルムに加えて発生する応力である。成型型上に置いてフィルムに張力を加えると、折曲げ線(bending curve)近くなどで応力が増大する。この応力倍率が全ての点で1に近い値であれば理想の成型型と考えられる。

図3に成型型と成型型に沿うフィルムの応力解析モデルの概念図を示す。ここでは成型型は剛体と考え、フィルムはこの表面に沿って作成される。フィルムは成型型に沿って曲がる機構であるため、境界条件として、フィ

フィルムは型から垂直抗力だけを受けると仮定する。この抗力に直交する面にフィルムは自由に動ける条件とする。成型型とフィルムの間のフリクションは0と仮定する。

bending curve の部分はフィルムの前後の面の角度から垂直抗力の方向を計算する。図3の例では bending curve の前後で同一の条件であるため、垂直抗力の方向は2等分方向となる。bending curve の接点においても、この方向から垂直抗力を受けると仮定し、この面と垂直な面は拘束のない自由な面とする。この境界条件によってフィルムは成型面内上を自由に移動することが可能となる。

Fig.1 (a)Schematic diagram of a packaging machine⁽¹⁾; (b)real forming collar die

Fig.2 Forming collar of Monsees and Cooper⁽²⁾; (a)flattened forming collar; (b) forming collar;(c)section of bending curve.

ここでは成型型に沿うフィルムの有限要素法の解析モデルを考える。この要素は変位が連続しているが、角度は非連続である。このため接点に関連する要素の垂直方向を計算し、接点における要素の影響度を考慮した加重平均によって接点を代表する垂直方向とした。接点での要素の影響度の計算は色々な方法が考えられるが、ここでは接点の垂直方向に抗力を受けると仮定する。

ここでは4つの要素に関わる接点の例を、図4に示す。ここでは垂直ベクトルは式1で示すことができる。接点によって関連する要素数が異なるが、全ての接点で同様に定義することができる。bending curve の様に急激に形状が変化する部位も同様に定義する。

$$\vec{Z} = \frac{\vec{Z}_1\theta_1 + \vec{Z}_2\theta_2 + \vec{Z}_3\theta_3 + \vec{Z}_4\theta_4}{|\vec{Z}_1\theta_1 + \vec{Z}_2\theta_2 + \vec{Z}_3\theta_3 + \vec{Z}_4\theta_4|} \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \vec{Z}_1 &= \frac{\vec{a}_1 \times \vec{b}_1}{|\vec{a}_1 \times \vec{b}_1|}, \vec{Z}_2 = \frac{\vec{a}_2 \times \vec{b}_2}{|\vec{a}_2 \times \vec{b}_2|}, \vec{Z}_3 = \frac{\vec{a}_3 \times \vec{b}_3}{|\vec{a}_3 \times \vec{b}_3|}, \vec{Z}_4 = \frac{\vec{a}_4 \times \vec{b}_4}{|\vec{a}_4 \times \vec{b}_4|}, \\ \cos \theta_1 &= \frac{|\vec{a}_1 \cdot \vec{b}_1|}{|\vec{a}_1| |\vec{b}_1|}, \cos \theta_2 = \frac{|\vec{a}_2 \cdot \vec{b}_2|}{|\vec{a}_2| |\vec{b}_2|}, \cos \theta_3 = \frac{|\vec{a}_3 \cdot \vec{b}_3|}{|\vec{a}_3| |\vec{b}_3|}, \cos \theta_4 = \frac{|\vec{a}_4 \cdot \vec{b}_4|}{|\vec{a}_4| |\vec{b}_4|} \end{aligned} \quad (2)$$

この様に、接点で反力を計算する方式を採用すると、接点の垂直方向を計算する必要があるため、要素分割の影響を直接受ける。荒い分割では分割の影響が強くなる欠点があり、要素分割は形状に応じて細かに設定する必要がある。この影響による精度を後の章で検討する。

4. 成型型におけるフィルムの応力

まず現在広く使われている成型型の形状測定を行い、ここで提案するフィルムの応力解析を実施する。ここで用いた成型型は、他の成型型と同様にサイドシール部分に近い部分が存在しないので、形状を延長して型形状を創っている。

図5にこの結果を示す。結果はbending curve 部分の応力が他の部分に比べて高くなっている。これは成型型が可展面ではなく、フィルムを折り曲げている部位で高い応力を発生していることを示している。またサイドシールの部分は大きな応力を発生している。現在の成型型は、図1bに示す様にサイドシール部分の型形状がなく、包装機ではフィルムは型の制約を離れて、自由に折れ曲がっている。このため多くの場合で、フィルムが振動し、フィルム面に傷が生じることが多い。フィルムの応力解析では、図1bのモデル形状のままではサイドシールとその近辺部分が無く、フィルムの応力を計算することができない。このため図5のモデルでは他の部分から推定

Fig.3 Analytical Model for the Film Stress Calculation on the Die

Fig.4 Perpendicular Vector for the nodes of the film

してサイドシール部分の型形状を作成している。

図6は筆者らが提案している解析方法で作成した成形型を用いてフィルムの応力を計算した例である。この成形型では、**bending curve** 近くでも応力集中をほとんど発生しておらず、周りの平均応力に近いレベルに留まっている。このため、フィルムに傷等を発生させないで成形できる成形型であることを示している。この解析例ではサイドシール部分まで連続して成形型を有限要素法で作成しているが、この成形型が上手くフィルムをガイドして、応力集中の発生を防止している事を示している。

5. 本解析法の精度の検証

本解析は成形型上を滑って変形するモデルであるため、要素接点の垂直抗力を計算する方式となる。要素の垂直抗力は要素間で非連続であり、要素分割の影響が大きい。まずは要素分割の影響を確認する。図6は円周上を100分割したモデルであり、図7は円周方向に30分割と70分割したモデルの例を示す。ここでは対称条件を用いて右側だけで計算している。図7の右図は **bending curve** 上の応力と分割数の関係を示す。荒い分割では精度が劣り、円周上を100分割したモデルでは誤差が少ない結果になっている。この誤差のレベルは基準となる形状のモデルで次に検証する。なおここで用いた円周上で100分割のモデルの細かさであれば、CADで詳細な形状を作成できる。またこの細かさの要素分割であれば、小型パソコンで計算処理が可能である。

本解析法の手順は以下である。要素分割はLS-PrePostで作成し、式1,2の演算をexcelで実施し、力や境界条件を作成する。ソルバーはLS-DYNAを用いる。結果の図はLS-PrePostを用い、型形状とVon Mises応力を示す。応力の最大値と最小値と応力レベルを図中に示す。このレベルは図ごとに異なり、各々応力分布を表している。

5・1 可展面/非可展面の成形型の差異

平面を折曲げた可展面の成形型を用いた時のフィルム応力を計算し、図8に示す。ここでは平面は同一モデルとし、交差角度の異なる2例とする。式1,2の条件を加えれば、理論上は全ての点で応力倍率は1となり、2例のモデルは同一の結果になる。

これに対して本解析法による計算結果は、**bending curve** 近辺で応力が変動している。ただし、この応力倍率は最大で1.002、最小で0.999であり、誤差が少なく、他の部分の応力倍率は、ほぼ1である。また2例とも同様な結果であり、角度による誤差が発生しないことを確認している。

次に可展面でない形状の成形型で、本解析法でフィルム応力を計算する。図9は円筒の一部に直角に平面を組み合わせた型であり、円筒と平面の接続部分の中央で大きな応力を発生している。左右端はこの分だけ応力が低減している。ここではR300の円弧の円筒とR100の例を示す。ここで、R200の例も計算して右に応力倍率と円弧Rの関係を示す。小さな円弧を用いて非可展面の度合いを大きくすると、応力レベルが増大し、Rを大きくすると図8の例に近づき、応力倍率は1に接近する。

Fig.5 Stress of the Film with conventional Forming Die

Fig.6 Stress of the Film with the New Forming Die that is created by new Finite Element Method

5・2 本解析の実用上の精度

前項の検討で可展面と非可展面の差異と非可展面の度合いに応じた応力倍率が得られることを定性的に確認できた。ここで以下に可展面から徐々に非可展面に変化させて型形状を変えた時のフィルムの応力倍率を定量的に検討する。モデルは円周上で同一条件となる円筒形状とする。先ず図10の様に円筒を折り曲げて同一の円筒内に戻す形状を考える。これは図2aで検討すると flattened bending curve が平面内で水平方向に直線となり、上下とも同一の円筒面となる。この完全な可展面を0度の円錐面の形状と定義する。次に10度、45度、90度、135度、180度の円錐面を考え、おのおの円筒に対して組み合わせた成型型モデルを考える。

Fig.7 Effect of fineness for FEM model

Fig.8 Stress analysis of developable Die

Fig.9 Stress analysis of non_developable Die

これらのモデルでのフィルム応力は **bending curve** 近辺で最大となる。この応力倍率の評価は最小応力との比率で表すことができる。ここで右下に **bending curve** の応力倍率をまとめて示す。ここで円筒と円錐面の組合せは、この定義であれば、0 度と 180 度が可展面であり途中の角度が非可展面と考えられる。可展面では応力倍率の期待値は 1 であるが、少し大きな値になっている。180 度の例では 1.004 であり、これは有限要素モデルの荒さによる誤差と思われる。0 度は 1.06 である。180 度のモデルと異なり、差異が大きいのは、折り曲げ点の反力を接点で計算している本解析の方式が影響していると考えられる。この誤差は要素分割の影響であり、微細な要素を適用すれば低減できる。今回のモデルは各々円筒を 100 分割しており、このレベルの分割であれば、フィルムに発生する応力計算の誤差は約 6% である。

5・3 精度の考察

解析結果から、形状により、フィルムの応力解析精度が異なることが明らかである。図 8 の様な平面構造では、いずれも精度が高い。これは垂直反力の方の計算に誤差が生じないためと思われる。図 8 の分割例では **bending curve** の部分の反力の方の方向は、図 3 に示す様に 2 等分線上に定まり、誤差を生じない。これに対して図 9～図 14 は曲面であり、垂直方向は要素間で不連続となるため、式 1 に示す様に平均処理をしても誤差が導入されると考えられる。この誤差は要素分割を細かにすることによって精度を向上できる。図 6,7 から円筒を 100 分割するレベルの細かさで実用的な誤差になることが明らかである。

Fig.10 Stress of the Film of Circular Cone of 0 deg.

Fig.11 Stress of the Film of Circular Cone of 10 deg.

Fig.12 Stress of the Film of Circular Cone of 45 deg.

Fig.13 Stress of the Film of Circular Cone of 90 deg.

Fig.14 Stress of the Film of Circular Cone of 135 deg.

Fig.15 Amplitude Ratio of Film Stress

6. 結 語

包装機の成形型的设计・製造が合理的に進展しない原因の一つは、成形型の精度や効果を適切に評価する方法がないことと考えられる。ここでは有限要素法を活用して成形型に沿って成形する時のフィルム応力を解析して、成形型を評価することを検討した。

この結果、以下を明らかにすることができた。

- ① 成形型の上でフィルムが成形されるときフィルムの応力は、フィルムが成形型から垂直抗力を受けるモデルから検討することが可能である。ここでは具体的な解析モデルとして以下を提案した。
 - ・成形型に沿ってフィルムの有限要素モデルを作成する。
 - ・フィルムの上端／下端に同一の張力を付加する。
 - ・要素の垂直方向を計算する。
 - ・接点の垂直抗力の方向は、接点を構成する要素の影響度を考慮した垂直方向の加重平均から定義する。
- ② 本解析法は要素間で不連続となる傾き（垂直方向）を用いるために、要素分割数の影響が発生するが、実用可能な精度が得られることを示した。この精度は以下に具体的に確認した。
 - ・可展面の成形型ではフィルム全面で応力倍率の増大は発生しない。非可展面の成形型では、非可展面の度合いに応じて応力倍率が增大することを確認した。この応力は折り曲げ線（bending curve）の近くで発生する。
 - ・成形型の形状の影響を避けるため、円筒と円錐（角度を 0 度から 180 度に変換）の組合せの型を作成し、可展面の組合せでは円筒を 100 分割したモデルで誤差が最大で約 6%であることを確認した。
 - ・解析で作成した包装型を用いて、本解析の応力解析モデルの荒さの影響を検討した。円筒を 100 分割する程度のモデルで解が収斂することを確認した。
 - ・包装型の形状の解析は円筒を 100 分割する程度のモデルであり、フィルムの応力解析も同様なモデルを用いれば、上記から誤差は最大で約 6%であり、小型のモデルで解析が可能であることを確認できた。

以上で、成形型の上でフィルムに発生する応力を実用的に解析する手法を明らかにした。この応力倍率の高い部位はフィルムに傷を発生させると考えられるため、本解析法は型の精度の評価に有効と考えられる。

本研究の一部は、戦略的基礎技術高度化支援事業_受付番号 22131102130 および科研費基盤研究(S)No. 20226006 の援助を受けてなされた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) C. E. Monsees and F. H. Cooper, "Tube former and method of making same", In United States Patent Office, number 2940408 (1960)

- (2) E. Mot., “The shoulder problem of forming, filling and closing machines for pouches” , Appl. Sci. Res., 27(1973),pp.1-13.
 - (3) J. Boersma and J. Molenaar, “Geometry of the shoulder of a packaging machine”, SIAM Rev., 37(2) (1995),pp.406-422.
 - (4) C. J. McPherson, G. Mullineux, C. Berry, B. J. Hicks, and A. J. Medland, “Design of forming shoulders with complex Cross-sections”, Packaging Tech. Sci., Vo.18(2005),pp.199-206,.
 - (5) 森村浩明, 鯉沼義典, Ahmed Desoki, 萩原一郎, “包装機械における形型の設計の検証”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 765 (2010), pp. 1316-1322.
 - (6) Ahmed Desoki, Hiroaki Morimura, Ichiro Hagiwara, “General Design of the Forming Collar of the Vertical Form, Fill and Seal Packing Machine Using the Finite Element Method”, PACKAGING TECHNOLOGY AND SCIENCE, Packag.Technol.Sci., DOI:10.1002/pts. 919(2010).
-