未加硫ゴムの圧縮成形時における流動現象に関する研究*

重 光 亨^{*1}, 河 田 匡 仙^{*2}
境 真 太 郎^{*3}, 福 富 純 一 郎^{*1}The Study on the Flow Phenomena of Unvulcanized Rubber
in Process of FillingToru SHIGEMITSU^{*4}, Masanori KAWADA,
Shintarou SAKAI and Junichiro FUKUTOMI^{*4} Institute of Science and Technology, The University of Tokushima,
2-1 Minamijosanjima-cho, Tokushima-shi, Tokushima, 770-8506 Japan

Rubber products, e.g. oil seal, are produced by vulcanization molding and the vulcanization molding of rubber product is performed by past experience, trial and error. In order to reduce surplus rubber and defective product, numerical analysis of flow phenomena of unvulcanized rubber was performed using FIDAP. The analysis was conducted taken the characteristic of unvulcanized rubber obtained by experiment, without considering the effect of the heat. The results showed that the filling state of numerical results represented good agreement with the experimental results. And it was clarified from the numerical results that high shear stress acted during unvulcanized rubber fill up to a narrow channel such as side surface of metal insert. In this paper, the flow phenomena under the condition of vulcanization molding are shown and the optimum flow condition would be discussed with experimental and numerical results.

Key Words: Rubber Products, Oil Seal, Vulcanization Molding, Flow Phenomena

1. ま え が き

オイルシールなどに代表されるゴム製品は、ポンプ、自動車、船舶などあらゆる産業分野において使用されている。これらのゴム製品は射出成形、圧縮成形などの成形手法を用いて、所定の形状に成形されるが、自動車などに使用されるオイルシールなどのゴム製品は圧縮成形時において、接着不良、未充てん、ひけおよびエア入りなどの不良が起こる場合がある⁽¹⁾。しかし、その不良発生メカニズムはいまだに解明されておらず、過去の経験や現場での試行錯誤によって改善策が施されているのが現状であり、本質的な解決策の考案はなされていない。その理由の一つとして、ゴムが不透明であることや構造上の問題から金型に可視化窓を設けることができず、金型内でのゴムの圧縮成形過程を可視化することが困難であることが挙げられる。また、ゴムが粘弾性流体であることや加硫特性をもつことにより、同じ非ニュートン流体であるプラスチック

ク等に比べ数値解析の例も少ない⁽²⁾。そのために、ゴム製品の成形過程における内部流動については未知な部分が多く、上記に挙げる問題の根本的な解決策は見つかっていない状況である。

ゴムの射出成形に関する実験および数値解析に関する研究はなされているが^{(3)~(6)}、圧縮成形に関する研究は極めて少なく、その内部流動に着目した報告は皆無に等しい。圧縮成形時に発生する諸問題はゴムの流動と大きくかかわっているものと考えられるため、本研究ではゴム製品の圧縮成形時における流動現象と圧縮成形時における諸問題の発生メカニズムを明らかにすることを目的に実験から取得された流動特性などのデータをもとに数値解析を実施した。圧縮成形時の流動状態を解析し、不良発生メカニズムを解明することはオイルシールなどのゴム製品の開発期間の短縮および不良率の減少につながるものと期待される。さらに、その流動状態が明らかになれば、最適なゴムの充てん量などに関する貴重なデータを提供することにもなり、余剰ゴムの削減に貢献できるものと考えられる。

本報では、オイルシールをモデルとした未加硫ゴムの可視化実験結果を示すとともに、実験より得られた流動特性をもとに実施した数値解析結果と実験結果との比較を行う。そのうえで、数値解析結果により示さ

* 原稿受付 2008年1月4日。

^{*1} 正員、徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
(〒770-8506 徳島市常三島町2-1)。^{*2} 学生員、徳島大学大学院先端技術科学教育学部。^{*3} 正員、徳島大学大学院先端技術科学教育学部。

E-mail: t-shige@me.tokushima-u.ac.jp

れる未加硫ゴムの内部流動について明らかにするとともに、ゴムの不良と内部流動との関連性についても考察を行う。

2. 実験および数値解析条件

図1に解析対象となるオイルシールの金型内部の数値解析モデルを示す。金型モデルは軸対称であり、図1の左右端がそれぞれ上下の金型に対応する。下金型にはL字形の金属環が設置されている。この金属環はオイルシールを、ハウジングに固定するためのはめあい力を保持するために必要となる部品である。圧縮成形初期での上下金型間すきまは $\delta=28\text{ mm}$ であり、上金型は図1中右方向に金型間すきま $\delta=0\text{ mm}$ に至るまで移動する。金型内には直径60 mm、厚さ7 mmの円盤形状の未加硫ゴムを金属環上に設置している。圧縮成形初期での格子数は27 787点(図2)であり、上金型の移動に伴い解析領域が縮小するに従い、格子数も順次減少していく。本解析では、はん用熱流体解析ソフトであるFIDAPを使用し、軸対称二次元非定常等温問題として、VOFモデルを用いた。金型の移動速度は $6\times 10^{-3}\text{ m/s}$ であり(実験での金型移動速度と同一)、金型および金属環表面では滑りなし条件としている。なお、ゴムは粘弾性流体であるが、本圧縮成形過程は非常に短い時間で完了し加硫特性(弾性特性)が現れる前に流動が完了するため、本解析ではゴムの弾性特性の影響を考慮していない。また、熱流動解析より圧縮成形過程におけるゴムの平均的な温度は約 80°C であったため、粘度評価試験において得られたこの温度に対応するゴム粘度 $6500\text{ Pa}\cdot\text{s}$ を解析条件に導入している。本実験および解析に用いたゴムはひずみ速度の増加に伴い粘度が低下する傾向にあるが、ここでは、各領域におけるひずみ速度を計測し、そのひずみ速度に対応した粘度を各領域に計算条件として導入することは極めて難しいことから、圧縮成形過程において粘度は一定としている。解析において使用されるおもな支配方程式は以下のとおりである。

連続の式

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ナビエ・ストークス方程式

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{f} \quad \dots\dots\dots (2)$$

VOF関数

$$\frac{\partial}{\partial t} F + \mathbf{u} \cdot \nabla F = 0 \quad \begin{cases} F=1 \text{ (液相)} \\ F=0 \text{ (気相)} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ 、 ρ 、 p 、 $\mathbf{f}$ 、 F はそれぞれ速度、密度、圧力、体積力、マーカー濃度を示す。体積力はここでは、単位質量当たりの重力を表す。

実験では、プレス試験機を使用し、圧縮成形過程における充てん状態を着色した多層ゴム(直径60 mm、厚さ7 mmの円盤)の充てん状態を観察することで可視化した。ここでは、各金型間すきまにおける充てん

(a) Initial mold distance δ (b) Mold distance $\delta=0\text{ mm}$
= 28 mm

Fig. 2 Computational grids

(a) $\delta=2.2\text{ mm}$ (b) $\delta=1.8\text{ mm}$

(c) $\delta=1.1\text{ mm}$ (d) $\delta=0.0\text{ mm}$

Fig. 3 Experimental results of filling state at each mold distance (four layers)

Fig. 1 Computational model

状態を確認するために、成形を途中でやめゴムを取り出し切断することで、ゴム断面の充てん状態を観察した。なお、金型温度は180°Cであり、圧縮成形初期段階ではゴムおよび金属環は室温(約20°C)である。

3. 実験および数値解析結果

3・1 実験と数値解析結果の比較 図3(a)～(d)に金型間すきま $\delta=2.2, 1.8, 1.1, 0$ mmにおける多層ゴムを用いた可視化実験結果を示す。図3より、金型間すきまの減少に伴いゴムの充てんが進み、 $\delta=1.1$ mmでは狭小流路[図3(c)中のA部]での充てんも完了し、ほぼ充てんが完了していることがわかる。また、金型間すきまが大きい状態($\delta \geq 1.8$ mm)では、ゴムはほぼ均一に充てんされているが、ゴム充てん完了後($\delta=1.1$ mm)は余剰ゴムの流出過程の間に複雑な流動を示しているものと考えられ、金型間すきま $\delta=0$ mmでは各層は不均一な分布を示していることが明らかとなった。この充てん過程における不均一なゴムの層分布は局所的な流れの集中や過充てんによるもので、接着不良やひけなどの問題に密接に関連しているものと考えられ、充てん状態としては望まし

いものではない。

図4(a)～(d)に金型間すきま $\delta=2.2, 1.8, 1.1, 0$ mmでのゴムの充てん状態を示した数値解析結果を示す。図3, 4の金型間すきま $\delta=2.2$ mmの充てん状態に着目すると、金型内周部(図3, 4中のだ円で囲まれたF部)での充てんはほぼ一致しているが、金型外周部狭小流路(図3, 4中のだ円で囲まれたB部)など金型外周部への充てんに差が見られ、実験結果のほうが数値解析結果よりも若干充てんが早い傾向にあることがわかる。また、この傾向は金型間すきまの小さい $\delta=1.8, 1.1$ mmにおいても確認できる。しかし、 $\delta=1.8, 1.1$ mmにおける充てん状態を見ると、各狭小流路への充てん状況、充てん順序やゴムの流動が最終的には金型外周部金属環側面での狭小流路(図4中のだ円で囲まれたA部)に集中する傾向は実験および数値解析において一致していることがわかる。したがって、実験および数値解析結果においてゴムの充てん速

Fig. 4 Filling state at each mold distance (numerical analysis results)

Fig. 5 Filling state at each mold distance (numerical analysis results)

度に違いはあるものの、数値解析結果は実験結果を定性的に再現できているものと考えられる。そこで、数値解析結果をもとに金型内部の流動状態について調査することとした。

3・2 金型内部の流動状態(数値解析結果) 図5(a)～(c)に数値解析より得られた金型間すきま $\delta=6, 4, 2$ mmにおける充てん状態を示す。図5より、圧縮成形過程においてゴムは各部へ充てんし、金型間すきま $\delta=2$ mmではゴム内の空気はほぼ排出され、ゴムの充てんが各狭小流路に進行していることがわかる。図6(a)～(f)には各金型間すきま($\delta=5, 4, 3, 2, 1, 0$ mm)における金型内部でのゴムの速度ベクトル図を示す。図6(a)を見ると、上金型とゴムとの接触により、金型内周部での流速が大きく、その影響は図6(b)の金型間すきま $\delta=4$ mmにおいても確認でき、金型内周部の狭小流路〔図6(b)のだ円で囲まれた箇所〕に向かいゴムが流れていることがわかる。内周部での充てんが完了するとゴムは金型外周部に向けて流動し始め($\delta=3$ mm)、金型が1 mm移動した $\delta=2$ mmでは狭小流路以外の領域での充てんはほぼ完了したために、内周部での余剰ゴムの流出に伴う外周部への流れが強くなり、各狭小流路での流速が大きくな

1, 0 mm)における金型内部でのゴムの速度ベクトル図を示す。図6(a)を見ると、上金型とゴムとの接触により、金型内周部での流速が大きく、その影響は図6(b)の金型間すきま $\delta=4$ mmにおいても確認でき、金型内周部の狭小流路〔図6(b)のだ円で囲まれた箇所〕に向かいゴムが流れていることがわかる。内周部での充てんが完了するとゴムは金型外周部に向けて流動し始め($\delta=3$ mm)、金型が1 mm移動した $\delta=2$ mmでは狭小流路以外の領域での充てんはほぼ完了したために、内周部での余剰ゴムの流出に伴う外周部への流れが強くなり、各狭小流路での流速が大きくな

Fig. 6 Velocity distribution at each mold distance (numerical analysis)

る。そして、金型間すきま $\delta=1\text{ mm}$ では、図 4(c) からわかるように外周部の金属環側面 [図 6(e)中のだ円で囲まれた A 部] および半径中央部の金属環下部 [図 6(e)中の破線で囲まれた C 部] の狭小流路以外での充てんが完了しているため、充てんが完了した金型狭小部での流速は小さくなり、未充てんの狭小流路に流れが集中する。そのため、半径中央部から未充てんの狭小流路 [図 6(e)中の A 部] の存在する外周部へと向かう流れと同時に、半径中央部および内周部から未充てんの金属環下部の狭小流路 [図 6(e)中の破線で囲まれた C 部] に向かう流れも発生しており、複雑な流動を示している。金型締切り時 ($\delta=0\text{ mm}$) には外周部の金属環側面の狭小流路 [図 6(f)中のだ円で囲まれた A 部] に流れが集中するため、いったん充てんされた金型中央部および内周部のゴムが外周部に向かう流れ [図 6(f)中のだ円で囲まれた G 部での流れ] が誘起される。この流れは、いったん充てんしたゴムが充てん方向とは逆方向に流れることから逆流とも解釈できる。したがって、未加硫ゴムは未充てんの金型狭小部に充てんされながら、全体的には金型内周部から金型外周部へと流動しており、金型間すきまが小さい条件下での複雑な流動と内周部から外周部への流れ(逆流)が図 3(c), (d)で見られる不均一な充てんに密接に関連しているものと考えられる。

図 7(a)~(c)に金型間すきま $\delta=2.0, 1.0, 0.0\text{ mm}$ における金型半径中央部における速度ベクトル

の拡大図を示す。図 7より金型間すきま $\delta=2.0\text{ mm}$ において外周部への流れが発生しているが、 $\delta=1.0\text{ mm}$ では、金属環下部の狭小流路 [図 7(b)中の円で囲まれた C 部] に向かう流れが発生し内周部からの流れと対向している箇所が確認できる [図 7(b)中の破線部]。また、金型締切り時 ($\delta=0.0\text{ mm}$) においては、内周部から外周部へと流れるゴムと充てん完了した狭小部でのゴムとの境界面 [図 7(c)の破線部] が存在し、ひけなどの問題が懸念される。図 8(a)~(c)には金型間すきま $\delta=3.0, 2.0, 1.0\text{ mm}$ での金属環下部の狭小流路 [図 6(e)中の C 部] における速度ベクトル図を示す。金型間すきま $\delta=3.0, 2.0\text{ mm}$ では、内周部から外周部に向かう流れにより充てんが進行しているが、 $\delta=1.0\text{ mm}$ では金型中央部からのゴムの流れにより充てんが進んでおり、金型間すきまの小さい条件下では内部流動の変化に伴い、狭小流路への充てん状態も変化することがわかる。

図 9(a)~(c)に金型間すきま $\delta=4, 2, 0\text{ mm}$ における金型内の圧力分布を示す。図 9より、金型間すきまが小さくなるに従い、金型内の未加硫ゴムの圧力が上昇し、金属環側面の狭小流路以外での充てんが完了した $\delta=2\text{ mm}$ では、未充てん箇所を除く充てんが完了した領域では圧力が高く、ゴムは高压側から低压側へと流れていくことが確認できる。また、ゴムの領域に着目すると、先に金型内周部での充てんが完了するため、内周部での圧力が高く、図 6 の速度ベクトル図において見られた内周部から外周部への流動はこの圧

Fig. 7 Velocity distribution at mid position (numerical analysis)

Fig. 8 Velocity distribution at a narrow channel (numerical analysis)

Fig. 9 Pressure distribution at each mold distance (numerical analysis)

Fig. 10 Shear stress distribution at each mold distance (numerical analysis)

力分布に起因するところが大きいものと考えられる。さらに、図 9(b), (c) より狭小流路へ流入するゴムの自由表面において圧力が低く、ゴムの充てん状態の把握は金型内部の圧力場の計測からも可能であることが知られる。図 10(a)～(d) に金型間すきま $\delta=4, 2, 1, 0$ mm における金型内のせん断応力分布を示す。図 10(a) より、金型間すきま $\delta=4$ mm では強いせん断応力は発生していないが、 $\delta=2$ mm 以下において狭小流路などの未充てん箇所 [図 10 中のだ円で囲まれている箇所] に流入するゴムに強いせん断応力が作用していることがわかる。また、図 10(c) では、金型内にゴムがほぼ充てんされているために、ゴムが金属環側面の狭小流路 [図 10(c) 中のだ円で囲まれた A 部] に集中し、強いせん断応力が作用している。そして、締切り時 ($\delta=0$ mm) には、金属環側面の狭小流路に加え、金属環表面のゴム [図 10(d) 中の G 部] にも強いせん断応力が発生する。ゴムと金属環との圧着用に金属環表面には接着剤が塗布されており、この箇所への強いせん断応力は接着不良などの問題を起こす可能性がある。この強いせん断応力は金型間すきまが小さい条件下において均一な充てんがなされていないことに起因しているものと考えられ、金型締切り付近まで均一な充てんを維持することにより局所的なゴムの増速傾向を軽減することが重要であるものといえる。ゴムの均一な充てんにはゴム充てん量、金型形状、ゴム形状などの各パラメータの適切な選定が重要となるものと考えられるため、今後は各パラメータと金型内の流動との関連性についても調査を行っていく予定である。

4. ま と め

未加硫ゴムの圧縮成形時における流動状態を実験と数値解析により調査した結果、以下の結論を得た。

(1) 金型内のゴムの充てん状態に関して、数値解析結果と実験結果の差異は小さく、充てん状態はほぼ

一致する。

(2) 金型間すきまが大きい状態では、ゴムはほぼ均一に充てんするが、金型間すきまが小さい条件下では余剰ゴムの流出過程において複雑な流動を示し、金型間すきま $\delta=0$ mm では各層は不均一な分布を示す。

(3) ゴムの充てんは金型内周部から完了し、次第に外周部へと移る。金属環側面等の狭小流路へ充てんする際にゴムには強いせん断応力が作用する。

文 献

- (1) Morimoto, S. and Rubin, Y., *Journal of The Society of*

Rubber Industry Japan, Vol. 69, No. 5 (1996), pp. 344-351.

- (2) Oyanagi, Y., *Journal of The Society of Rubber Industry Japan*, Vol. 68, No. 2 (1995), pp. 76-85.

- (3) Thomas, M. D. H. and Dolby, P. C., *Journal of The Society of Rubber Industry Japan*, Vol. 68, No. 2 (1995), pp. 86-91.

- (4) Satou, S., *Journal of The Society of Rubber Industry Japan*, Vol. 68, No. 2 (1995), pp. 92-100.

- (5) Wan, M. and Isayev, I., Injection Molding of Rubber Compound with Rheology Affected by Vulcanization: Part II. Modeling and Experiment, *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 69 (1996), pp. 294-312.

- (6) Hanspal, N. S., et al., Numerical Analysis of Rubber Molding Using Finite Element Modelling, *Hanser Publishers*, Munich, (2005), pp. 238-244.