金型内のゴムの流動，加硫挙動と金型設計

西 沢 仁

The Flow Properties and Curing Behaviors in Mold and Mold Design

Hitoshi NISHIZAWA (Nishizawa Institute of Technology 245-7 Kamiidacho, Izumiku, Yokohama, 245-0018, Japan)

The performances of metal mold will influence the properties and cost of rubber products.

Generally, the metal mold design for rubber products is more difficult than those for plastics because the rubber materials show the characteristic flow properties and curing behavior in mold cavities.

These fundamental rubber properties, such as flow properties, pressure loss and stress relaxation, are considered in order to design the metal mold, especially of vent hole, runner, gates structure, and gate layout.

At present these mold design technology has not been completely established yet. From now on, these study should be continued to elucidate more details.

Key Words : Power Law Index, Pressure Loss, Stress Relaxation, Vent Hole, Runner, Gate, Cavity

1. は じ め に

金型加硫は，プレス成形，射出成形加工において使用される最も重要な加硫方式である．金型の良否がゴム成形品の品質，コストに大きく影響する．

ゴム用金型は，プラスチック用金型と比較して設計がやや複雑であると言われている．これはゴム特有の流動性，加硫挙動によっていると考えられる．金型設計の基本的な設計思想はプラスチックと殆ど変わらないが，先ずゴムの特徴を良く理解した上で設計する必要がある．

ここでは，先ずゴムの金型内での流動性，加硫挙動と金型設計の基本技術の概略を述べ，次にこれらが金型設計にどのように反映されるかについて述べる．

2. 金型内におけるゴム流動性と加硫挙動

高分子材料は，基本的に非ニュートン流動を示し，その粘性とせん断速度，温度との関係は式(1)，(2)によって表される^{1,2)}．

$$\eta = \tau / \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

$$\eta = A \exp(B/T) \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

ここで η は粘度(Pa・s)， τ は応力(Pa)， $\dot{\gamma}$ はせん断速度(s^{-1})， n はべき乗数， A, B は定数， T は温度(K)である．

ゴムの流動性，加硫挙動，成形加工性を説明するためにプラスチックと比較した流動性，成形加工性を表1にまとめた．すなわち，ゴムの粘性は，温度依存性が小さく温度変化による粘性の変化が小さい．成形加工温度はプラス

チックスの100～290℃に比較して低く，60～140℃である．せん断速度依存性は材料，配合によってあまり変わらず，べき乗数 n は0.3位である．

ゴムが細管の中を流れる場合の圧力降下を示す圧力損失はプラスチックと比較して大きく，これがゴムの大きな特徴の一つである．圧力損失は，ゴムと細管内壁との摩擦による発熱とゴム自身の弾性損失係数による発熱により起こると思われる．

応力緩和は，グリーン強度と関連する特性であるが，キャビティ内での未加硫ゴムの滞留保持時間に関係し，適正な値を設定すればキャビティ内で留まる時間を稼ぎ，簡単にパーテングライン(PL)面から流れ出さないで留まるため緻密な加硫ゴムを作ることが出来る．逆に圧力緩和が大き過ぎると弾性が勝ちすぎて流れ難くなるため，適正値の設定が重要である．

図1，2，3は，それぞれ，ゴム粘度のせん断速度依存性，ゴム射出成形における圧力損失，応力緩和機構付ムーニー可塑性計による応力緩和曲線と応力緩和係数を示す¹⁻⁴⁾．

図1に示す粘性のせん断速度依存性は，ゴムの種類や配

西沢 仁；西沢技術研究所代表(〒245-0018 横浜市泉区上飯田町245-7)．1956年新潟大学工学部応用化学科卒業．同年，昭和電線電纜(株)入社．1998年，同社退社．西沢技術研究所設立．専門は，ゴムエラストマー物性，成形加工技術，振動減衰技術(防振，制振，免震)，高分子難燃化技術．日本ゴム協会技術委員会幹事．

表1 ゴムとプラスチックを比較した流動性、加硫挙動と成形加工性

特性	ゴム	プラスチック
粘性, 流動性の温度特性	温度依存性が小さく, 温度を上げても柔らかくならない。加工温度は60~140℃	低温で硬く, 温度を上げると急速に流れやすくなる。温度依存性が大きい。加工温度は高く, 100~290℃
粘性のせん断速度依存性, ベキ乗数 n	せん断速度依存性は, 材料, 配合によって余り変わらない。 n 値は材料, 配合によってほぼ一定で, 約0.3である。	せん断速度依存性は, 材料の種類によって変化する。ベキ乗数 n 値は, 材料の種類によって変化する。
圧力損失	プラスチックと比較して大きい。特に流路の内径の変化する箇所での圧力降下が大きい。圧力損失とは, 細管内壁とゴムとの摩擦熱, ゴム材料自身の流動中の動的損失による発熱によって起こると推定される。	ゴムに比較して小さく, 圧力降下が小さい。
応力緩和(グリーン強度)	プラスチックと比較して大きい。キャビティ内での滞留保持時間が長くなり, 緻密な加硫ゴムが出来易い。	応力緩和が小さい。キャビティ内での滞留保持時間が短く, PL面から流れ易く, キャビティ内圧が上がりにくい。
スコーチ, 加硫挙動	スコーチ, 加硫する。加工中に粘性が変化し易い。加硫中キャビティ内圧上昇挙動を示す(PL面での早期加硫によるシール効果と熱膨張による)。加硫剤分解生成物, 配合剤中の揮発分によるガス発生によるボイドの生成し易さ。	加硫(架橋)しない。
その他成形加工性	細管内でプラグフローを起こし易い。金型汚染性が大きい。	金属への粘着性大。

図1 ゴム粘度のせん断速度依存性

合に左右されず, ベキ乗数 n の値がほぼ一定の0.3を示すことが特徴である。

図2に示す圧力損失は, 従来ゴムの成形加工性評価指標として殆ど使用されていないが, 日本ゴム協会の成形加工技術研究分科会とゴム練り研究分科会の共同実験の結果から指標として有効であることが報告されている²⁾。この圧力損失はゴムと細管内面との摩擦熱, ゴム自身の流動時の動的損失に基づく発熱によるエネルギー損失と考えられている。圧力損失を指標とすると, 練りと成形加工性との関

図3 応力緩和機構付ムーニー可塑性計による応力緩和曲線と応力緩和係数

(1) 射出成形機における圧力変化

(2) 細管流動計の圧力変化と圧力損失

(3) 圧力損失推算用バークレイプロット

図2 ゴム射出成形における圧力損失

係、配合剤の種類、添加量と流動性との関係等が明確に評価できることも明らかにされてきている²⁾。

図4は、EPDMカーボン配合の圧力損失のせん断速度依存性を示す。更に各種ゴム配合の圧力損失のせん断速度依存性を求めると、総ての測定試料で図4に示すような曲線形態が得られている。図中せん断速度に依存しないで一定の圧力損失を示すA領域があり、この領域のせん断速度において優れた成形加工性を示すことが明らかにされている。この圧力損失は、図2(3)に示すように細管流動計の細管径(R)と長さ(L)の比率(L/R)を変えて圧力変化を追跡して求めるバグレイプロットによって推算することが出来る³⁾。

図3の応力緩和は、応力緩和機構付ムーニー可塑性計によって緩和係数として測定される値であり、未加硫ゴムが金型キャビティ内に留まり内圧を保持する力を評価する指標として里吉が提唱している加工性指標である⁴⁾。里吉は、この応力緩和係数をムーニーローターの回転数を変えて測定して、2回転と15回転の応力緩和係数の比率をPI指標(Processing Index)と定義し、この値が1に近いほど成形加工性が優れていることを報告している。このゴムの流動性を評価する指標は、ゴムの成形加工性の評価と共に金型設計にも有効に使われている。

次に、ゴムの金型内における流動状態について述べる。図5は、プレス加硫金型内のゴムとボイドの流れを示す。プレス加硫用金型内のゴムの流れを白色ゴムと着色ゴムを交互に積層してキャビティ内に充てんし加硫時間を変えて

図4 EPDMカーボン配合の圧力損失のせん断速度依存性

図5 プレス加硫金型内のゴムとエアーの流れ

取り出し、切断面の流れを観察したものである。ゴムの流れはPL面のベントホール部に向かって流れていき、ゴム中に含まれるエアーは同じ方向に移動する。パンピングにより交互に上下から加えられる圧力によってキャビティ内にゴムが充てんしながらエアーが抜けていく。この時応力緩和係数の大きいゴムはキャビティ内に留まろうとして容易にPL面から流れ出さないためキャビティ内は充満して余分のエアー、揮発分が先に逃出する。

図6は、プレス加硫金型内の加硫時のゴムとボイドの進行方向とキャビティ内圧上昇挙動を示したものである。加硫はキャビティ外側から内側に進み、ボイドの移動もそれに準じて進行し、PL面に向かう。ベントホール部ではゴムが薄く延ばされるため早く加硫し、PL面への内部からのゴムの移動を妨げる。そのため内部のゴムは行き場を失いキャビティ内で熱膨張し、内圧上昇を示すようになる。

図7は、射出成形時のキャビティ内のゴムの流れを示す。図8は、ゲートよりキャビティ内への射出状態の比較を示す。太田⁵⁾の実験からも解るようにゲートから射出されたゴムは対面の壁に向かって飛び出し、その後手前に折りたたまれるようにゲート側に戻ってくる。これは、当然射出されるキャビティの大きさによって異なるが、それは射出圧力が大きいことによる基本的な流れだと考える。一方、ランナー等の細管中の流動状態が色ゴムを使用して調べられている。流速にもよるが比較的対称的なスムーズな流れを示していることが明らかになっている。

図6 プレス加硫金型内の加硫時のゴム、ボイドの進行方向とキャビティ内圧上昇挙動

図7 射出成形時のキャビティ内のゴムの流れ

NBRとLDPEのゲートからの射出状態の比較

NBRのキャビティ内対面射出後、手前への折たたみ流動現象

図8 ゲートよりキャビティ内への射出状態の比較(可視化技術による観察)

射出成形金型内でのゴムの加硫挙動は、基本的にはプレス加硫と同じではあるが射出圧力がプレス加硫に比較してワンオーダー高く、加硫温度が高いことが異なる点である。

射出成形の場合、通常P-V-T曲線で加硫挙動が示される。図9は、NBR射出成形加硫でのP-V-T曲線と加硫曲線をキャビティ内圧上昇挙動との関係を示す。図9の中で最も注目すべき点は、4から5で示される金型キャビティ内での加硫中の圧力上昇挙動である。ゴムの加硫曲線におけるトルク上昇傾向がそのままキャビティ内の圧力変化と連動している。この圧力上昇挙動は、加硫中に発生する加硫剤の分解ガス、揮発分を除去する重要な効果を示す。

3. ゴム用金型設計の基本と流動性、加硫挙動による調整

ゴムの流動性、加硫挙動は総ての設計項目に影響するが特に影響の大きい設計項目との関係を説明する。

図10は、プレス成形加硫、射出成形加硫金型の基本構造と設計項目を示す。ゴム用金型は、図10に示すようにプレス成形用、射出成形用に分類されるが基本構造は変わらない。金型の基本設

(1) プレス成形金型

計は、表2に示す設計手順によって進められる²⁾。流動性、加硫挙動に最も関係の深い項目としてベントホール部、ランナー、ゲートの設計、キャビティ取数、配置等が挙げられる。

ゴム用金型設計がプラスチック金型設計と比べて特に注意すべき点として日本ゴム協会金型研究分科会において議論され強調されていることは、次の2点である。

- 1) ゴムは巻き込みエア、揮発分を多く含み、しかも加硫時に発生する加硫剤の分解ガスの発生等からガスの除去が重要なポイントとなる。ベントホール部は、圧力が集中する所でもあるためPL面のベントホール構造の設計が極めて重要になる。不良の多くがベントホール部に集中している。
- 2) 加硫反応が起こるためゴムの流動中のスコーチ安定性を充分考慮することと、加硫中のキャビティ内圧上昇挙動、配合剤の分散、配向等への配慮が必要になる。

表2に示す金型設計項目の中で特に流動性(粘性、圧力損失、応力緩和)、加硫挙動と関連性の高い項目を中心に検討する。しかし定量的に検討されていないので金型設計

NBR 射出成形 P-V-T 曲線

加硫曲線とキャビティ内圧上昇挙動との連動

実線は、NBR (A)、1は、充てん率 (1.2)
点線は、NBR (B) 2は、充てん率 (1.05)

図9 NBR射出成形加硫でのP-V-T曲線と、加硫曲線とキャビティ内圧上昇挙動

(2) 射出成形金型

図10 プレス成形、射出成形金型の基本構造と設計項目

の方向付けについて説明する。

(1) ベントホール

先に述べたようにゴム用金型設計で重要な位置付けにあるベントホールの基本構造と種類を，図11に示す。ゴム用金型の標準的なランド長は，キャビティの容積にもよるが0.3～4.5 mmと考えられ，シングルベントホールが基本である。PL面の間隔は，0.02～0.03 mm程度を取りPL面とキャビティの接する面はわずかにRを取る。これはこ

の部分での応力集中を避けることが目的である。

キャビティ内のゴムの流れはPL面のベントホールに向かって流れ，ここから水分，揮発分，加硫剤の分解ガス等が逃出する。ここに応力が集中してバックラインデング等のトラブルが発生し易い。図12は，ベントホールランド長とキャビティ内圧との関係を示す。ランド長は，キャビティ内圧と関係があり，簡単なモデル金型による実験を行うと図12に示すようにランド長が長くなるとキャビティ内圧が上昇する傾向にある。流動し易い熱可塑性エラストマー(TPE)ではキャビティ内圧を保つために10～20 mmのランド長を設けることもある。

バリレス金型では，ばりを食いちぎるためにランド長は短く設定される。このベントホール構造とゴムの流動性，圧力損失，応力緩和係数との関係を表3に示す。ゴムの流動性，圧力損失，応力緩和係数を評価して表3に示す考え方に従ってベントホール構造の修正を行う²⁾。

(2) ランナー，ゲート

ランナーは，図10に示すように射出成形機のノズルからスプルーを通してキャビティに至るゴムの細管通路であり，次の条件を満たすことが望ましい。図13は，代表的なゴム用金型のランナー構造を示す。一般には図13に示すように円形，半円形，台形が使われ⁶⁾，円形状を使用する場合，径は形状によって異なるが4～10 mmの

図11 ベントホールの基本構造と種類

図12 ベントホールランド長とキャビティ内圧との関係

ものが多い。

- 1) 流動抵抗が最小となる最大断面積
- 2) 金型温度の影響を受けない最小表面積形状
- 3) 加硫後取出し易い構造

ランナー形状は，ゴムの流動性，成形品容積，ランナー長によって経験的に決められる場合が多い。CAE解析を活用しているプラスチックの場合で

表3 ゴムの流動性，圧力損失，応力緩和係数とベントホール構造

項目	設計の概念
流動性	高流動性を示すゴムでは，ランド長を長く，PL面間隔を狭く，断面形状は変更せず。
圧力損失	圧力損失を示すゴムでは，ベントホール容積を大きく，PL面間隔を広く，ランド長を短くする。射出スクリュー内，細管内での発熱に注意する。
応力緩和係数	高応力緩和係数を示すゴムでは，ランド長を短く，PL面間隔を広くする。

図13 代表的なゴム用金型のランナー構造

図14 ランナー構造設計の目安となるノモグラフの補正係数⁷⁾

図15 代表的なゲートの種類と構造

も樹脂温度や樹脂圧力は得られるが、ランナー形状を求めることは難しいと言われており、過去の実績値を使用している。

図14は、ランナー構造設計の目安となるノモグラフと補正係数を示す⁷⁾。福島は、プラスチックについて行った実験結果から図14に示すノモグラフを作成している。これはゴムのEPDM, TPEにも適用できると考えられる。スプルーからゲートまで50 mm以下の厚さ1~4 mmの成形品金型にて適用出来るノモグラフである。ランド長が長くなれば図14の右図に示す補正係数によって補正できる。

ゲートは、キャビティ内にゴムを射出するための重要な役割を担っており、短時間で充てんできるような形状、径、位置、数を工夫する必要がある。また、加硫後金型から製品を取出し易くするために台座で浮かせる構造も採用されている。代表的なゲートの種類、構造を図15に示す^{6,8)}。ゲートの断面形状は、殆どが円形である。福島⁷⁾が提唱

表4 ゴムの流動性、圧力損失、応力緩和係数とランナー、ゲート構造

項目	設計の概念
流動性	高流動性ゴム材料は、ランナー径、ゲート径を細く(0.1 mm単位で調整)設定。
圧力損失	高圧力損失のゴム材料は、径を大きく、細管内の表面(仕上げ)平滑度を上げ、抵抗を低減する。ランナー長を出来るだけ短くする。
応力緩和係数	高応力緩和係数のゴムは、径を大きく、ランナー長を出来るだけ短くする。

している円形ゲート径の寸法を決める経験式を式(3)に示す。式(3)はプラスチックを対象としているが、EPDMのようなプラスチックフローを示す材料にも適用できる。

$$d = mkA^{1/4} \quad (3)$$

ここで d はゲート径(mm), m は材料定数(高流動性0.6, 中流動性0.7, 低流動性0.8), k は肉厚係数(0.1~0.15) $\times \sqrt{l}$, l は製品肉厚(mm), A はキャビティ面積(mm²)である。

上式は、1点ゲート当たりの式であり、多点ゲートの場合は、1点ゲート当たりのキャビティの面積で計算される。計算値が0.5~2 mm ϕ に入らないものには適用出来ない。このランナー、ゲートに対する流動性、圧力損失、応力緩和の影響を表4に示す。

多数個取り金型のランナーの配置は、流動性と圧力損失を考慮して次の二つの考え方で決められる。一つはスプルーから同一到達距離に対称的に配置すること。もう一つは同一圧力損失になるように配置することである。実際に使用されているキャビティ、ランナー配置は、円形、卵形配置が多く使われており、四角配置は使われない。細かい調整は実際に作られた金型の試作時に行われる場合が多い。

(3) 加硫挙動

ゴムの加硫挙動の中では、スコーチ性、加硫速度、ガス発生量が金型設計と関係がある。表5には、加硫の速いゴムでスコーチ時間が短く、ガス発生量の多いゴムの場合の金型設計の考え方を示す。金型設計には流動性と加硫挙動が絡み合っており、明確に分けることが難しいので、現象を加硫に絞って説明する。

加硫の速いゴムは，キャビティ内での加硫の立ち上がりが速く，スコーチ時間も短くなる傾向があり，加硫剤の分解ガスの発生も早期に急速に起こる．このような挙動に対してはベントホールランド長を短くし，ランナー，ゲート径の大きな，PL面間隙がやや大きな金型が必要になる．ガスの発生が急速に起こることはベントホール容積の大きな，PL面間隙をやや広げた設計になる．

加硫立上がりの速さが，急速なキャビティ内の圧力上昇挙動に繋がるために，PL面とキャビティ部での急速な応力集中になり易い．これがバックラインディング，外観不良，ボイド生成となり，特にベントホール構造の設計に影響する．

4. あ と が き

金型内のゴムの流動，加硫挙動を述べ，これらと特に関係の深いベントホール，ランナー，ゲート，ランナー配置に関する関係を説明した．この内容は，日本ゴム協会成形加工技術研究分科会，ゴム練り研究分科会の練りと成形加工に関する共同実験において久保田和久，里吉光洋，高次博，原田誠，西沢仁のチームが，実際に実験，議論を行いながら検討してきた内容と，その後金型研究分科会において補強された内容をまとめたものである．流動性，加硫挙動と金型設計の関係の定量的なデータをまとめるまでに至っていないが，本稿が多少でも参考になればと願っている．皆様のご叱正を頂ければ幸いである．

References

- 1) Ohyanagi, Y.: *Polyfile*, **33**(330), 86 (1998)
- 2) Nishizawa, H.: Dai 148kai Nippon Gomu Kyokai Gomu Gijutsu Symposium Text, p.45 (2008)
- 3) Ohyanagi, Y.: “Polymer Rheology Processing”, Agune Shoufusha, Tokyo, p.82 (1996)
- 4) Satoyosi, M.: Dai 106kai Nippon Gomu Kyokai Gomu Gijutsu Symposium Text, p.7 (2004)
- 5) Ohta, T.: Dai 118kai Nippon Gomu Kyokai Gomu Gijutsu Symposium Text, p.1 (2005)

表5 ゴムの加硫挙動と金型設計(加硫速度の速いゴム材料の場合)

項目	金型設計のコンセプト	材料設計(参考)
スコーチ性	スプルー，ランナー，ゲート構造 内径は大きめに設定(温度の変動は細い方が小) 内面の低摩擦抵抗仕上げ処理 スプルーレス，ランナーレス構造導入 温調金型導入(やけ対策) キャビティ取り数の制限 ベントホール構造 ランド長は，短めに設定 PL面間隔 やや広く(バリレスは上下密着，粗面処理) 温調機構はバックラインディングの改良に効果 PL面－キャビティエッジのR付け	適正スコーチタイム 予熱，バンピング時間内でスコーチしない加硫系の設計 高熱伝導性配合によるバックラインディング対策
加硫速度による金型内圧上昇挙動の制御	ベントホール構造 圧力緩和構造(ダブルベントホール等) 温調構造，真空引構造 ランド長は，短めに設定 PL面間隔 やや広く(ガス抜き効果とのバランス) PL面－キャビティエッジのR付け スプルー，ランナー，ゲート径 大きめに設定 構造設計 金型内圧の上昇に対する剛性安全係数見直し	加硫系の選択 スルフェンアミド＋超促進剤の選択 過酸化物＋共架橋剤
ガス発生挙動	ベントホール構造 ランド長は，短く，ベントホール容積大 真空引き構造(真空プレス) PL面 上下金型間隔は，やや大きく，ガス抜き効果促進 金型材質，表面処理 耐腐食性タイプ選択	過酸化物架橋系の高ガス発生量に注意 (共架橋剤による加硫速度アップ，架橋密度アップによる発泡抑制)

- 6) Shimizu, H.: “Gomu Elastomer You Kanagata Gijutsu”, Kougyo Chosakai, Tokyo, p.148 (2004)
- 7) Fukushima, Y.: *Plastics*, **54**(12), 6 (2003)
- 8) Kamishima, K.: “Gomu Elastomer You Kanagata Gijutsu Q&A”, Kougyo Chosakai, Tokyo, p.55 (2006)

日本語表記参考文献

- 1) 大柳康：ポリファイル，**33**(330)，86 (1998)
- 2) 西沢仁：第148回ゴム技術シンポジウムテキスト，p.45 (2008)
- 3) 大柳康：ポリマーレオロジープロセッシング，アグネ承風社，東京，p.82 (1996)
- 4) 里吉光洋：第106回ゴム技術シンポジウムテキスト，p.7 (2004)
- 5) 太田隆：第118回ゴム技術シンポジウムテキスト，p.13 (2005)
- 6) 清水弘：ゴム・エラストマー用金型技術，工業調査会，東京，p.148 (2004)
- 7) 福島有一：プラスチック，**54**(12)，6 (2003)
- 8) 上嶋桂二：ゴム・エラストマー用金型技術Q&A，工業調査会，東京，p.55 (2006)

*

*

*

*

*