

成形条件の最適化による厚肉中空成形用金型の開発

泉川達哉、金城洋、奥原崇彦^{*1}、村上正憲^{*2}、新城孝彦^{*3}

拓南伸線(株)では、射出成形の条件や成形形状を工夫することによりトラス構造の部品として用いる樹脂製ボールジョイントを試作したが、現状ではヒケや成形品内部の融合不良のため想定していた剛性が得られない場合も多く商品化に至るにはまだ課題が残されている。本研究では、これらの課題を解決する手法としてガスアシスト成形に着目し、ガス圧力や圧力保持時間などを調整することでボールジョイントとして活用できる厚肉中空体の成形を試みた。

1 はじめに

金属材料価格の高騰に伴い、安価に高い剛性の得られる樹脂製品を簡単な構造体の部品として活用したいというニーズが増えてきた。例えば柱が少なく大規模な空間が確保できるトラス構造のジョイント部材は、通常、ネジ穴を加工した鋼球であるが、よりコストの安い樹脂材料への転換が求められている。トラス構造は屋根が大きく出来ることや自由に形状を構成できるというメリットがあるため、沖縄県内でも図1に示すように通路やアーケード街、多目的広場などの屋根として使われることが増えてきた。このようなトラス構造を安価な樹脂で製作することができれば、更に多くの需要が見込まれる。

拓南伸線(株)をはじめとする研究プロジェクトチームでは、平成19年に射出成形の条件や成形形状を工夫することによりトラス構造の部品として用いる樹脂製ボールジョイントを試作したが、現状では図2のように成形品内部の融合不良のため想定していた剛性が得られない場合も多く、成形不良の少ない安定した製品とするための課題が残っている。ボールジョイントとして活用するためには、所定のネジ長さが加工できるだけの肉厚が必要になるが、厚肉成形品では冷却速度のバラツキが大きくなり、ヒケ等の不良が発生しやすくなると考えられる。

従来、射出成形品の外観的不良を解決する手法として、成形金型内に熔融樹脂を射出した後、不活性ガスを注入し中空部を成形するガスアシスト成形法が開発されている。しかし、この手法ではガスを注入するタイミングが難しく、特に厚肉成形品においては中空部が偏ってしまい肉厚が不均一になりがちである。また肉厚を均等にする場合、最大でも10mm程度の厚さが限界だとされているため、高い剛性を実現することが困難である。

本研究では金型の設計段階における成形シミュレーションを駆使することにより、ガス注入のタイミングなど

を最適化し、ボールジョイントとして活用できる厚肉中空成形に取り組んだ。



図1 トラス構造の例



図2 剛性不足による破壊

2 成形シミュレーション

2-1 シミュレーションの手法

本研究での解析対象は、通常の射出成形では考えられないような厚肉形状であるため、使用する解析ソフトも、薄肉成形品だけでなくキャビティ内の三次元樹脂流動に対応できる必要がある。本研究では、数種類の樹脂流動解析ソフトに対して球体キャビティを用いたベンチマーク解析を行い、その中からSimcoe社製のSimcoe-Moldを選定した。

*1 有限会社奥原鉄工、*2 タイガー工業株式会社、*3 拓南伸線株式会社

図 3 に Simpoe-Mold におけるガスアシスト成形の解析手順を示す。まずキャビティ形状やスプルー、ランナーなどの 3 次元モデルを作成する。それらのモデルに対して計算メッシュを作成した後、樹脂材料や射出樹脂温度、射出圧力などの成形条件を入力する。成形プロセスには、金型冷却、樹脂充填、ガス保圧冷却という工程がある。キャビティ内の樹脂流動は、金型温度の設定値で大きく変化するが、Simpoe-Mold では、金型冷却と樹脂充填の工程を数回繰り返すことで成形時の金型温度を精度良く求めることができる。充填解析の結果からはショートショット（充填不足）や圧力分布の偏り等を確認することができる。通常の射出成形解析では、樹脂充填解析後に成形機のスクリーによる保圧解析を行うが、ガスアシスト成形では不活性ガス（窒素）による保圧冷却解析を実施する。解析結果としては、温度や圧力分布などの他、ガスアシスト成形特有の評価指標として樹脂材料とガスの比率を示すスキン材料比が得られる。これらの解析結果が容認できる範囲であれば成形条件が確定されるが、不良の発生が予測された場合は、成形条件の修正あるいは成形形状の修正が必要となる。

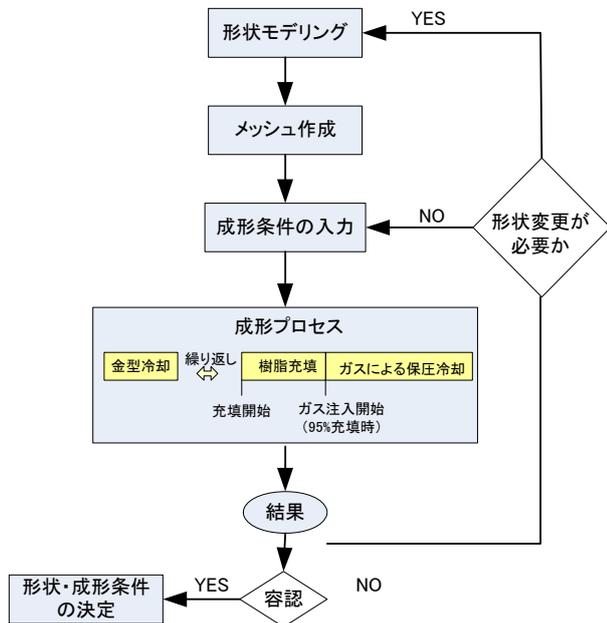


図 3 解析手順

ガスアシスト成形解析に使用したモデルは図 4 に示す直径 108mm の球体である。樹脂の充填率がキャビティ容積の 95% になった時点で窒素ガスの注入を開始する。その際に形成される中空部は理想的には直径約 40mm の球体となる。図中、三角形で示された球体表面にゲートを設定した。今回の解析では樹脂も窒素ガスも同じ位置から充填

する。表 1 に成形条件を示す。引張強度の高い材料としてガラス繊維が 50% 入ったナイロンを選定している。

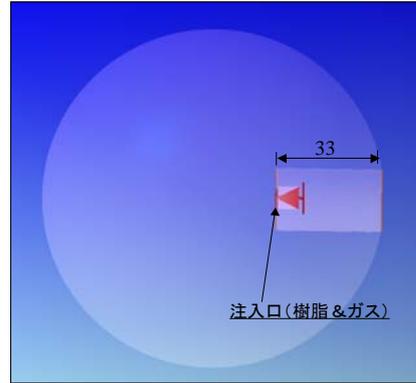


図 4 解析モデル

表 1 シミュレーションにおける成形条件

材料	PA-GF50
ゲート直径	7mm
樹脂温度	280℃
金型温度	80℃
射出圧力	156MPa (最大射出圧力の 85%)
窒素ガス温度	30℃
窒素ガス圧力	25MPa
ガス圧保持時間	500 秒

2-2 シミュレーションの結果

キャビティ内に樹脂が充填する過程を図 5 に示す。キャビティ構造が単純であるため、樹脂の充填される様子もいたってシンプルである。重力の影響で樹脂の流れが若干下方向へ噴出されている。また樹脂のゲートを球体の中心付近へ配置したため、ゲート後方への樹脂の充填が遅れ、キャビティ全体としては、充填時間のバラツキが大きい結果となっている。

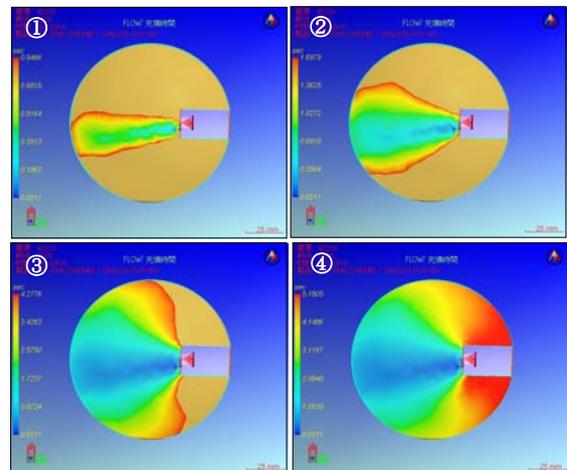


図 5 樹脂充填の様子

樹脂の充填完了時の温度分布を図 6 に示す。キャビティ表面に接する部分の温度は約80℃であるが、樹脂温度が280℃と高いために温度分布全体としては非常に高温となっている。このため、樹脂充填後のガスによる冷却、金型冷却の効率化が必要である。

図 7 に型開き直前の温度分布を示す。ガスによる冷却が中心付近に見られるが、高温部がまだ多く残っていることが分かる。製品取り出し後の形状収縮、樹脂流出などが懸念される。

図 8 に型開き直前のスキン材料比を示す。スキン材料比は、2つの射出材料（ここではナイロンと窒素ガス）の占める領域を表したもので、スキン材料比 1 の場合（赤色）が樹脂、0（青色）が窒素ガスとなる。その間の値については、両者が混合した状態だと考えられる。図 8 での最小値は0.23であり、完全にガスのみが存在する中空部がどの程度形成されるかは未知数である。

図 9 にはガス圧を5MPaへ小さくした場合のスキン材料比を示す。図 8 に比べて最小値が1/10程度に小さくなった。この結果から、中空部を形成するためのガス圧の大きさは、その時点における樹脂硬化の度合いによって変わることが予想される。つまり、樹脂の硬化がそれ程進んでいない場合は、ガス圧を大きくするとガスが樹脂の中に拡散してしまい明確な中空部を形成することが難しくなると考えられ、逆に樹脂が硬い場合は、ある程度大きな圧力で注入しないと全く中空部ができないことが予想される。球体の中心部に理想的な中空部を形成するためには、充填された樹脂の硬化状態を的確に把握し、それに応じた圧力でガスを注入することが必要であると考ええる。

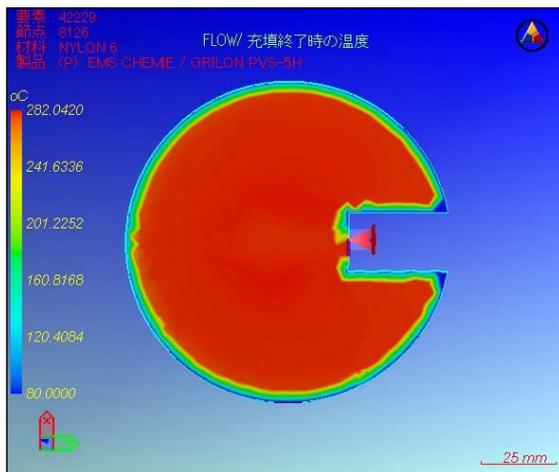


図 6 樹脂充填終了時の温度分布

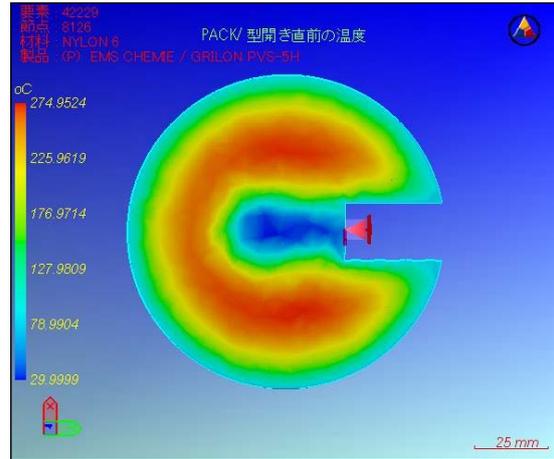


図 7 型開き直前の温度分布

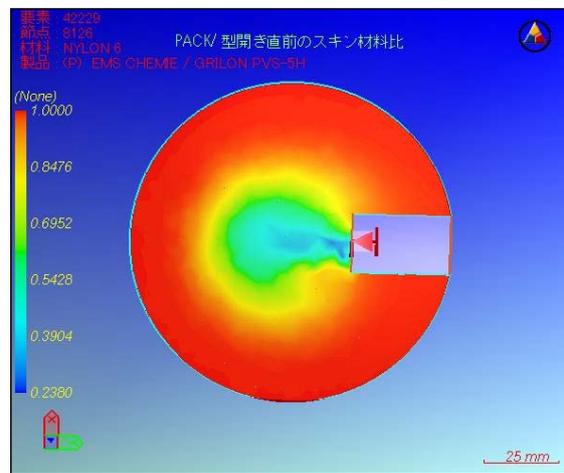


図 8 型開き直前のスキン材料比

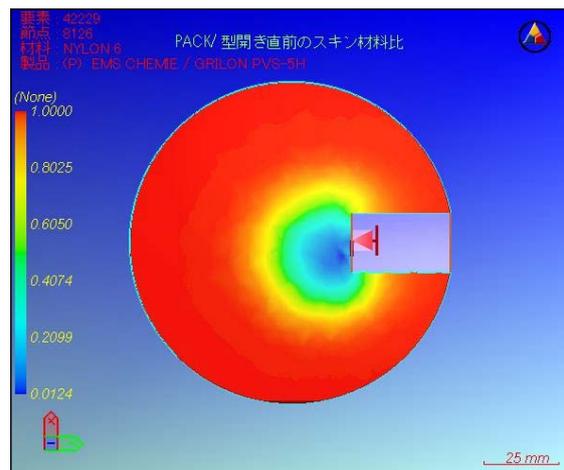


図 9 型開き直前のスキン材料比（ガス圧5MPa）

3. 試作成形

3-1 成形方法

試作成形に用いた装置の外観を図10に示す。これはタイガー工業(株)保有の震徳塑機社製380ton射出成形機に北京中拓機械製のガスインジェクション装置を付加したものである。使用した金型の構造を図11に示す。キャビティ周辺だけでなくスプルー周囲にも冷却管を配置し冷却効果を高めた。樹脂とガスは同一のゲートから充填し、その切替は金型外に設けた特殊なバルブによって行っている。充填口の向かい側には成形品を取り出す際に用いる押出ピンを設けた。

成形シミュレーションで用いた成形条件を参考に実際の成形条件を表2のように定めた。樹脂の充填時間は5秒（射出圧力156MPa）で、充填が完了した直後からガスによる圧力(25MPa)を300秒間かける。この条件で得られた成形品から判断し、樹脂充填時間やガス圧、ガス時間を微調整することで最適条件を探った。



図10 装置外観

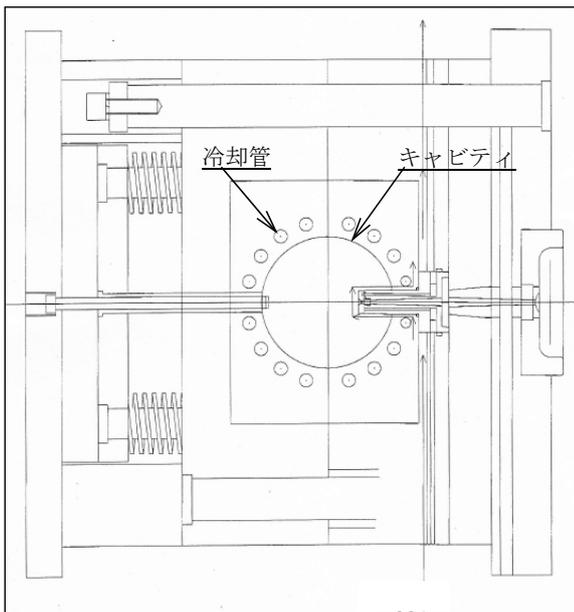


図11 金型概略

表2 成形条件

射出速度	最大値の 85%
樹脂充填時間	5 秒
金型温度	70 °C
ガス圧力	25MPa
ガス保持時間	300 秒

3-2 成形結果

基本条件（表2）での成形結果を図12に示す。ガス圧は25MPaで十分な大きさがあると考えられるが、成形品には殆どガスが入っていないことが分かった。これは樹脂の充填時間が長いため、初期段階でキャビティに注入された樹脂が既に硬化しガス流入を妨げたからだと考えられる。また図13に示すように樹脂量がキャビティ容積に比べ少ない場合にも、中空部が全く作られないことも分かった。これは、樹脂がスプルー周囲の周囲に完全に充填されていないために生じる隙間からガスが漏れ出すためである。このように中空品を成形するためには樹脂が硬化しない段階でガスを注入することや、成形品の外殻を成す部分の全体に行き渡る程度の樹脂量を充填することが必要である。



図12 基本条件での成形結果



図13 樹脂量が足りない場合

樹脂が硬化する前にガスを入れ、更にガスによる冷却時間を大きくし成形品内部に形成された中空部が崩れないようにした場合の成形結果を図14に示す。この場合、中空部ができる場合もあれば、まったくガスの入った形跡が見られない場合もあった。

図15は樹脂充填の終了する1秒前からガス注入を始めた場合の成形結果である。またガスの充填時間は900秒へ変更している。この場合、中空部のできる確率がかなり高くなった。やはり樹脂の硬化状態とガス注入の微妙なタイミングによって中空部が形成されるかどうかが決まるようである。ここで多くの成形を行い、形成される中空部の形状安定性を確認したが、中空部の形状は成形毎に異なり安定化させることが困難であった。



図14 成形結果（樹脂3.5秒、ガス3000秒）



図15 成形結果（樹脂3秒、ガス900秒）

中空部の形状安定化と同時に、ガスの充填時間を実用的なレベルまで短縮する試みを行った。図16にガスの充填時間を300秒とした場合の結果を示す。図に示すように成形品取り出し後に内部の溶融樹脂が流れ出てくることがあった。また樹脂の流出が無い場合でも、成形品の表面近傍に形成される高密度層が薄く、ネジを加工することができなかった。ガスの充填時間が短いため、樹脂の冷却が不十分となり、ガス圧を抜いた直後に中空部が崩

れてしまったと推測される。また充填時間を600秒とした場合は、図17に示すように中空部はできないが比較的厚い高密度層が安定して形成されることが分かった。



図16 成形結果（樹脂3秒、ガス300秒）



図17 成形結果（樹脂3秒、ガス600秒）

図17に示す成形品には中空部は形成されなかったものの、得られた成形品の表面近傍は非常に密度が高く、ヒケや融合不良が殆ど見られない。ボールジョイントとして成形品を活用する場合、少なくともネジ加工を行う部分のみ不良無く成形されていれば十分であることから、ここで得られた成形品を用いて一軸引張試験を行いネジ強度を確認した。

図18はネジ加工を行った部分の概略を示したものである。この場合、ネジ長さは表面近傍の高密度層の厚みである22～23mmとなった。引張試験の様子を図19に示す。半球状に切断した成形品の上部ネジにボルトを固定し引張荷重を与えた。試験の結果から、雌ネジの引張強度は87.8kNであった。通常の射出成形では、内部及びネジ加工を行う表面近傍部にもヒケや融合不良などが多数存在するため、引張試験の結果がばらつくが、今回のガスアシスト成形では安定した引張強度を得ることができた。使用した樹脂の物性値とネジ形状から算出した引張強度

は75.8kNとなるが、ガスアシスト成形ではその引張強度と同等以上の結果が得られたものと考えている。



図18 ネジ加工部



図19 引張試験（ネジ強度の確認）

4 おわりに

ガスアシスト成形を用いて樹脂製厚肉中空体の試作を行った結果、以下の成果を得た。

- ①中空部を形成するためのガス圧の大きさは、ガス注入時における樹脂硬化の度合いで決定される。
- ②成形条件を調整することで中空部を作ることはできるが、その形状を安定化させることは難しい。
- ③樹脂の充填時間を3秒、ガス保持時間を600とした場合、球体の表面近傍に成形不良の無い高密度層を安定して作ることができた。

本研究は「樹脂製トラス構造部材及びそれを利用したトラス構造の研究開発（2007 技 013）」の一環として行ったものである。

謝辞

本研究は平成 21 ～ 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業において行われたものである。共同研究者である（有）奥原鉄工、タイガー工業㈱、拓南伸線㈱の方々に感謝致します。

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。