圧縮成形における繊維強化複合材料の充填挙動*

(第1報, ヒケ発生メカニズム)

山部 昌^{*1}, 平井 恒夫^{*2}
片山 伝生^{*2}, 坂 幸真^{*3}

RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIAL DURING COMPRESSION MOLDING (1ST REPORT, THE MECHANISM OF SINK)

MASASHI YAMABE, TSUNEO HIRAI, TSUTAO KATAYAMA, YUKIMASA BAN

Sink marks that occur on the outer surface of fiber-reinforced composite materials pose a problem because they lower the quality of a product. Various studies have been conducted on material composition, molding methods and shape factors in an effort to find effective methods of preventing sink marks. In this work, the mechanism causing sink marks have been investigated through numerical analysis and experimentation. The aim of this investigation was to find the optimum molding method and shape factor that would minimize sink marks on a sheet molding compound (SMC). The result makes it clear that sink marks are most likely to occur in the final process of anisotropic flow. Further, it is now possible to explain analytically the various factors that facilitate the molding of vehicle parts with excellent surface quality.

Key words: SMC, Compression Molding, Finite Element Method, Flow Analysis, Elastic Plastic Analysis, Sink Mark

1. 緒 言

樹脂とガラス繊維とを複合化して得られる繊維強化プラスチックは、軽量かつ成形自由度の高い材料として航空機や輸送車両の外板や構造部材へ適用が盛んである。自動車においても、GM-フィエロ、コルベットに見られるようにSMC (Sheet Molding Compound) やR-RI M (Reinforced Reaction Injection Molding) の適用例は多く、今後とも増加が予想される。しかし、成形品の表面品質、塗装性等の課題も依然残されている。たとえばSMCを一例にとると、表面品質向上に対しては、鋼板並みの表面平滑性を実現するため、低収縮材料の開発に見られるような材料側からのアプローチと、成形方法の改善による製造条件側からのアプローチが行われている。この中で成形条件の決定においては、試行錯誤が多く、これが部品開発期間の増大をもたらしている。このため種々の成形条件と成形品

品質との関係を定量化する成形解析技術の確立が急がれている。

射出成形の成形解析では、MOLD FLOW等の汎用ソフトが開発され、メルトフロントの予測や金型設計、成形最適化に幅広く活用されている。しかしこの解析では、樹脂のみの流れを取扱っており、強化繊維を含んだ不均質材に対しては適用不可能である。さらに、圧縮成形では材料流動中に金型(上型)が移動し、境界条件の定義が困難となるため、解析例は少ない。

このような状況のもとで、著者らは圧縮成形過程⁴⁾⁵⁾の材料流動を数値解析技術より求め、成形因子と流動との関係を明らかにしてきた。本研究では、さらに数値解析技術を発展させ、リップ付近に発生するヒケの生成メカニズムについて考察を行った。

2. 成形解析の体系

図1はSMCを圧縮成形した場合の、一般的な圧縮荷重曲線である。この場合、上型に材料が接した直後に荷重は直線的に増加し、次に増加はゆるやかとなりふたたび充填完了直前で急激に増加している。このように、圧縮成形における金型内の材料充填挙動を解析

* 昭和62年10月2日 北陸信越支部信越地方新潟講演会において講演、原稿受付 昭和62年2月2日。

*¹ 正員、日産自動車(株) (〒237 横浜賀市夏島町1)。

*² 正員、同志社大学工学部 (〒602 京都市上京区今出川通烏丸東入ル)。

*³ 同志社大学大学院。

するには、現象が複雑なため非常に困難であるが、著者らは、これを3つのステップに分けて簡略化を図っている。すなわち、材料の初期変形、メルトフロントが金型に到達するまでの流動、およびそれ以後の充填である。それらをそれぞれ固有値解析、流動解析、変形解析を用いてモデル化し、これらを連成させることにより種々の解析を行っている(図2)。

既報では、充填完了直前の挙動がリブ背面部に発生するヒケの大きな要因であることに着目し、充填が開始してからメルトフロントが下金型に到達するまでを流動解析、それ以後を剛塑性解析とした数値解析モデルを提案し、その有効性を明らかにしてきた。本報では変形解析として弾塑性解析を用い、材料の応力場および材料と金型との反力を求めることにより、さらに詳細なヒケ発生メカニズムを明らかにした。

3. 数値解析手法と結果

3.1 解析モデル リブ付近に発生するヒケ現

図1 圧縮荷重曲線

図2 解析の体系図

象を把握するために、形状はT字形断面(図3(a))とし、充填は平面ひずみ問題として取扱った。ここで材料および金型温度は室温としたが、これは繊維強化複合材料の基本的な充填挙動を調べるためであり、高温下(SMCの場合、140℃～150℃)での充填挙動も、材料粘度の温度、時間に対する構成関係を考慮することにより同様に取扱える。

3.2 流動解析 詳細は既報⁷⁾⁸⁾⁹⁾にゆずり、ここでは解析で用いた仮定と、最終的に導びかれた支配方程式を述べる。ガラス繊維と樹脂との不均質は、仮定(ii)より準均質な異方性流体として定義した。

(i) 成形過程の材料流動に伴ない、ガラス繊維はその流線方向に配向する。

(iii) ガラス繊維の軸方向と垂直方向では、流動抵抗に異方性がある。これを各要素内での擬塑性粘度の異

図3 充填モデルと解析の流れ

方性として取扱い、全体座標系に座標変換する。

支配方程式を(1)(2)(3)式に示す。

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} - \mu_x \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} - \mu_y \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 u 、 v は x 、 y 方向の速度、 p は圧力、 ρ は密度、 μ_x 、 μ_y は流動抵抗の異方性を考慮した擬塑性粘度である。

構成関係は、擬塑性流体として考え、 n 乗則に従うものとして(4)、(5)式を得る。

$$\sigma_{xx} = 2\mu_x \frac{\partial u}{\partial x} - p \quad \dots\dots\dots (4)$$

図4 流動解析結果

$$\sigma_{xy} = \mu_y \frac{\partial v}{\partial x} + \mu_x \frac{\partial u}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (5)$$

流動過程の非定常性は、Progressive Step by Step Methodにより取扱った。又、これらの偏微分方程式の数値解法は、ガラーキン型の有限要素法を用いた。

解析は流動開始からメルトフロントが下型に到達するまでとし、その間を数ステップに分けて、それぞれのステップでの材料の流速ベクトルを求めた(図4)。これより、ステップが増加するに従い、流速が大きくなっていくことがわかる。

3・3 弾塑性解析 ガラス繊維が流動により、図5に示すように配向するとし(断面測定結果より)、ヤング率の異方性定数を $E_L/E_T=5$ (繊維方向を E_L 、垂直方向を E_T)とにおいて、メルトフロントが下型に到達後から充填完了までを解析した。計算は流動解析結果を初期条件として、上型と接する節点に、ある一定の変位を与え、その時の節点反力と、各要素での相当塑性歪増分 $d\bar{\epsilon}^p$ を充填完了まで繰り返し求めた。

図6は各解析ステップ、各要素での相当塑性歪増分 $d\bar{\epsilon}^p$ を求めた結果である。最初はすべての要素で $d\bar{\epsilon}^p$ が正值となっている(塑性域)が、リブより離れた部分から、しだいに $d\bar{\epsilon}^p$ は負値となっていく。 $d\bar{\epsilon}^p$ が負値であれば、その要素は弾性回復を起こし、静水圧成分が増加していることを意味する。そのためこの領域では材料は変形しにくくなる。一方、 $E_L/E_T=1$ (等方性材料)として同様の解析を行った場合、いずれのステップ、要素においても $d\bar{\epsilon}^p$ は正值あり、材料は常に塑性状態であった。

図7、図8はそれぞれSMCおよび樹脂組成物(ガラス繊維を含まない等方性SMC)の場合の、上型と接する節点の節点反力をステップごとに表わしているSMCの場合、充填が進むにつれてリブ背面部分(図

図5 繊維配向角(水平軸に対して)

図6 弾塑性解析結果

図7 上型との節点反力 (SMC)

図8 上型との節点反力 (樹脂組成物)

中横軸 0 mm ~ 5 mm の部分) で反力が 0 となっている点が存在している。又、リブより離れた部分 (同 50 mm ~ 100 mm) では反力が高く、材料が金型により拘束され動きにくい状態となっている。一方、樹脂組成物の場合、反力は一様に増加し、かつ値も小さい。

以上より、メルトフロントが下型に達した後の異方性材料の充填においては、等方性材料に比べて、リブ

付近以外の領域の材料は金型により拘束されるために変形しにくく、そのためリブ付近の材料のみが充填に寄与すると考えられる。その結果、リブ背面部で上型と材料とが一時的に離れやすい状態となる。一方、等方性材料では最終過程の充填においても、材料全体が塑性変形により空洞部を充填するため、上型と材料とは常に接触した状態となっていると考えられる。

4. 実験

4・1 実験装置 数値解析による結果を検証するために、図9に示す金型を用いて圧縮成形実験を行ない、A、BおよびC点における圧力を、上型側にあらかじめ埋めこんである圧力センサーを用いて測定した。

成形に用いた材料は、SMC (組成を表1に示す) と比較のために樹脂組成物 (ガラス繊維を含まない等方性 SMC) の2種類とした。

4・2 実験結果 図10、図11はそれぞれ SMC (異方性流れ) と樹脂組成物 (等方性流れ) の場合の測定結果であり、横軸に時間、縦軸に圧力値を示している。SMCの場合、流動完了直前において、A点およびB点で一時的な圧力降下が発生し、C点では圧力が急激に高くなっている。一方樹脂組成物の場合では、これらの現象は見られない。以上の結果は、前述の弾塑性解析の解析結果と一致する。すなわち、異方性材料における一時的な圧力降下 (A点、B点) は、材料と金

表1. SMC組成

Component	Parts by Weight
Unsaturated Polyester Resin	40
Thermoplastic	17
Styrene	43
t-Butylperbenzoate	1.0
Zinc Stearate	4.0
Calcium Carbonate	180.0
Magnesium Hydroxide	1.0
Glass Fiber	25 wt. %

図9 実験装置および圧力測定点

型との間の反力が0という解析結果と一致し、かつ急激な圧力上昇 (C点) は、静水圧成分の上昇と一致している。同様に等方性材料においても、解析結果および実験結果とは一致している。

さらに、成形品のリブ背面部分での表面粗さを測定すると、SMCの場合、最大10 μ であるのに対して、樹脂組成物では最大4 μ であり、上述のような異方性材料の充填挙動とヒケ量との間に相関を見出すことができる。

5. ヒケ発生のメカニズム

前述したように、SMCのリブ背面部に発生するヒケは、充填完了直前において発生する、材料と金型との間の材料拘束と非接触が原因と考えられる。ここではヒケ発生に対するメカニズムを、ステップごとに考察する (図12)。

図10 圧力測定結果 (SMC)

図11 圧力測定結果 (樹脂組成物)

図12 ヒケ発生のメカニズム

ステップ1

流動によりメルトフロントが下金型底部に到達する。この時、材料と金型壁面との間に生ずる摩擦力により、U字形のメルトフロントができる。

ステップ2

メルトフロントと下金型底部との間に生じた空洞部分の充填が始まる。この時、リブ部分より離れた領域(図中の黒点部分)においては、材料が上型と下型により強く拘束されるために変形しにくく、その結果静水圧成分が高まる。

ステップ3

黒点部分では材料が動きにくいいため、リブ付近の材料が塑性変形により空洞を充填する。この時、上型と材料との間に、反力が0となる部分が生じ、材料が上

型と非接触となる。

ステップ4

さらに加圧・保持されると、ステップ3で生じた非接触面は、徐々に上型と接するように変形するが、この時、すべての面が接することがないため(周辺材料が弾性回復しているため、通常の成形圧では圧力不足)ヒケとなって成形品に残る。

6. ま と め

S M Cによるリブ部分への材料充填過程を、数値解析および実験により求め、成形品のヒケ発生に関して次のことが明らかになった。

1. 流動解析と弾塑性解析を連成させることにより、リブ背面部に発生するヒケを解析的に取扱うことが可能となった。
2. 変形解析として弾塑性解析を用いることにより、S M Cのごとく異方性材料では、金型との間で拘束される領域と、非接触となる領域とが、成形の最終段階(充填完了直前)において存在することが明らかになった。
3. ヒケは前述の現象によって、材料に生ずる反力が不均一となり、その結果生ずると考えられる。すなわち、材料と金型との反力が0となった時に生ずる非接触面が、保持過程で十分に加圧されることがないために、成形後もそれが残ってヒケが生じる。
4. 今後は、種々の成形因子や材料組成の変化によるヒケ量の定量的な把握と、ヒケ減少のための対策について研究を進める。

文 献

- 1) K. Demmler; Kunststoffe, 56, (1966), 606.
- 2) 浅川, 福島; 強化プラスチック 33-2(昭和62).
- 3) 榎本, 佐藤; 自動車技術 38-7(昭和59), 863.
- 4) Hirai, Katayama; Proc. of the 2nd Int. Conf. on Composite Materials (1978) 1283
- 5) 平井, 片山, 浜田; 塑性と加工 25-287(昭和59).
- 6) Yamabe, Hirai, Katayama, Fujiwara; 31th International SAMPE Symposium (1986), 1666.
- 7) 平井, 片山; 同志社大学理工学研究報告18(昭和52).
- 8) 平井, 片山; 同志社大学理工学研究報告20(昭和54).
- 9) 平井; 材料 30-335(昭和56), 842.

討 論

〔質問〕 笠野英秋〔東京工業大学〕

ヒケ発生の原因として、金型との間の拘束領域と非接触領域の存在をあげておられるが、より本質的にはリブ背面近傍におけるガラス繊維の流動特性、すなわち配向角（この場合は $\theta=30^\circ$ ）が直接関与していると考えてよろしいか。

〔回答〕 ヒケは SMC のごとく不均質な材料が流

動によって図5のようにガラス繊維が配向し、金型内である種の構造体を形成するために発生するものと推察される。すなわち、この構造体の変形による反力が、充てん完了直前で不均一となるためであると考えている（実験結果図10, 図11より）。したがって、リブ背面部近傍の配向角・流動特性だけが直接関与するのではないと思われる。