BMC の材料流れの様相に及ぼす型締速度の影響について*

平 井 恒 夫** 片 山 伝 生*** 木 村 照 夫****
石 瀬 寿 一** 浜 田 泰 以*****

Effect of Closing Speed on Flow State of BMC

by

Tuneo HIRAI

(Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto)

Tutao KATAYAMA

(Osaka Prefectural Industrial Research Institute, Sakai)

Teruo KIMURA

(Department of Mechanical Engineering, Fukui University, Fukui)

Toshikazu ISHISE and Hiroyuki HAMADA

(Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto)

In the field of composite materials, such as glass fiber reinforced plastics, the molding process using a matched die is attracting wide attention as a mass production technology. BMC has been developed for the process, but it seems to have some troubles. One of them is a surface appearance with thin wall. Another one is brittle weakness at the bottom of a fin portion caused by a stress concentration in the resin rich fillet part.

In order to prevent these troubles, it is necessary to investigate the flow state of BMC during the molding process. In BMC glass fibers are randomly oriented at the initial state. However, in order to prepare a specimen with fibers oriented initially in the flow direction, a block of BMC is prepressed from 50 mm to 6 mm in its height. So, the flow of BMC shows an anisotropic nature, such as different fluid resistances in normal and parallel directions to the flow, as reported in the previous paper.

In this paper, the dependence of flow state of BMC on the closing speed and the influence of temperature were considered. At first, the experiments were carried out at room temperature so as to avoid the effect of polymerization and obtain only the effect of closing speed. Then the experiments were made at 110°C, which is close to the actual product condition.

The results indicate that the flow state of BMC shows more anisotropic nature with increasing closing speed. With decreasing closing speed, the troubles described above disappear at room temperature but at 110°C only a limited closing speed prevents the troubles. And the "surge phenomenon" appears remarkably with increasing speed.

(Received May 10, 1979)

キー・ワード：BMC，異方性，強度低下，ヒケ，波うち現象

1 緒 言

FRP (BMC 材など) の加熱圧縮形成は、その大量生産性と複雑な形状の部材が形成可能であることなどの多くの利点を有している。そこには、金型温度の制御を除いては金属材料を対象としたプレス成形の技術が応用され、同時にその場合にみられると同様の難点

が FRP 成形品にもあらわれてくる。例えば製品の商品価値を著しく減ずる“ヒケ”と称されるへこみの問題がある。その対策として金属プレス加工技術を応用すると部材の断面急変部での強度低下などの違った難点があらわれてくる。これらの欠点を解消するためにも金型形状および成形条件に基づく材料の流動状態を把握する必要がある。

筆者らは金属材料の場合と比較するため鉄鋼材の熱間状態のシミュレーション材であるプラスチックと BMC の材料流れの様相を対比させ、両者に相違があ

* 原稿受理 昭和54年5月10日
** 正 会 員 同志社大学工学部 京都市上京区烏丸今出川
*** 正 会 員 大阪府立工業技術研究所 堺市神南辺町
**** 正 会 員 福井大学工学部 福井市文京
***** 学生会員 同志社大学大学院 京都市上京区烏丸今出川

ることを認めた。さらに、その相違は金属材料が準均質体であるのに対し BMC の強化材を含んだ不均質性と流動に伴う強化材の配向に基づく異方性がその主原因であると考え、まず、流動に伴う繊維の配向を考慮し、流れの方向とそれに直角方向の流動抵抗が異っているものと仮定し、BMC の支配方程式 (均質直交異方性擬塑性流体方程式) を誘導し、数値計算の結果 BMC の流れの様相をよく表し得たことを報告した。¹⁾²⁾

本報では、材料流れの様相に大きな影響を与える因子のうち型締速度を取り上げ、BMC 材の材料流動特性について述べる。ここでは、断面急変部での強度低下に結びつく材料流れのう回と背面部でのヒケを解消できる条件を求めるとともに、材料流れの異方性についても検討、考察する。

2 実験方法

2・1 試験片の作成

BMC 材の加熱圧縮成形では、成形過程中的材料流れは、成形用金型の形状に沿って三次元的な様相を呈する。そのため、材料流れを全域にわたって、同時に観察・解析することは非常に複雑かつ困難となる。そこで流れの様相の基礎的解釈と、解析の簡単化のために、二次元的な取り扱いが必要となる。また、断面急変部での強化繊維の疎密ならびに背面部でのヒケの欠点を解消するためには、強化繊維の流動特性の把握が重要となる。そこで以下のようなモデル化した試験片を作成した。

BMC 材の成形前には、強化繊維がランダムに配向されているが、成形時の流動に伴い、強化繊維は流れの方向に配向されてくるというように非定常な流動特性を示す。そこで BMC 材を厚さ 6 mm に予備成形を行うことにより、強化繊維を水平方向に配向させ、これを三枚積層することにより高さ 18 mm の試験片 (132×100×18) を作成した。流動状態の把握のために、予備成形された BMC 材に 6 mm 間隔に同質の色違い標点を埋め込み、金型壁面の摩擦の影響を受けない中央断面での加工前後の位置の変化を測定し、有限変位ベクトルを求めた。また成形品の標点位置と各層の様相より垂直方向および水平方向変位図を求めた。なお本論文において用いた BMC 材の組成を Table I に示す。

2・2 実験条件

本論文で使用した金型の諸寸法を Fig. 1 に示す。成形品の形状は、断面急変部での強度低下およびヒケの欠点を考慮して T 字形断面とした。実験条件を Table II に示す。金型肩部半径 R_f としては、その極端な場合として直角、すなわち 0 mm の場合とかなり大きい曲率半径をもつものとして 6 mm の 2 種類とし、その両場合について流れの相違について検討した。

Table I. Contents of BMC.

Unsaturated polyester resin	25 wt. %
Glass fiber (1/4")	10 wt. %
Catalyst (PBZ)	0.025 wt. %
Thickener (MgO)	0.025 wt. %
Filler	The rest

- ① Heater
- ② Mold
- ③ Die

Fig. 1. Schematic diagram of matched-metal die.

Table II. Experimental conditions.

Fillet radius R_f (mm)	0, 6
Height of specimen H_0 (mm)	18
Length of rib h (mm)	12 (R-1), 24 (R-2), 36 (R-3)
Width of rib B_0 (mm)	30
Closing speed V_c (mm/min)	18, 50, 100, 200, 300
Temperature T (°C)	Room temp, 110

試験片の高さ H_0 は, 18 mm である. リブ長さ h は, 12, 24, 36 mm の 3 段階に分け, 12 mm まで成形したものを R1, 24 mm までを R2, 36 mm まで成形したものを R3 と呼ぶことにする. リブ幅 B_0 は, 30 mm 一定とした. 型締速度 V_c は, 加工時間の短縮を考慮して, 18, 50, 100, 200, 300 mm/min とした. また実際の加工では, 金型を予熱した後に材料を設置し圧縮成形を行うが, この場合, 材料温度は刻々と変化し, 材料流れの様相は非常に複雑となる. そこで温度に関して定常的に取り扱うことのできるように金型温度を常温とし, これにより材料流れの様相には, 型締速度のみの影響が現れてくるものと思われる. さらに実際の加工状態下での型締速度の影響をみるために, 金型温度を 110℃ とした場合について比較検討を行った.

3 実験結果および考察

3・1 環境温度の影響を考慮しない場合（金型温度が常温の場合）

型締速度 $V_c=18 \text{ mm/min}$, 加工段階 R1 の場合の有限変位ベクトルを Fig. 2 に示す. Fig. 2 (a) は金型

Fig. 2. Deformation process in the vertical section of specimen. (Finite displacement vectors)

肩部半径 $R_f=0$ mm, (b)は $R_f=6$ mm の場合である。 $R_f=0$ mm の場合は, 流れの様相は金型肩部をう回する傾向がみられるのに対し, $R_f=6$ mm では型に沿って流れ, う回の傾向はみられない。したがって, 断面急変部での強化繊維の疎密による強度低下は, $R_f=6$ mm と断面急変部に曲率をもたせることによって解消される。しかし, それと相反してヒケの生成に影響を及ぼ

す流れに関しては, リブ背面部での中間層上部の流れの方向変換がゆるやかなときヒケが生じやすいと判断すれば, $R_f=6$ mm の場合に, ヒケが生成しやすいことが推測される。したがって, 以下型締速度の影響について, まず $R_f=0$ mm では強化繊維の疎密について, $R_f=6$ mm ではヒケに注目して考察する。

3・1・1 金型肩部半径 0 mm の場合 R1段階での V_c が 50, 300 mm/min の変位状態図を, それぞれ Fig. 3(a), (b)に示す。Fig. 3において (L) は水平方向変位であり, (R)は垂直方向の変位である。R1段階では, 金型肩部でう回の様相は, 型締速度が大きくなってもほぼ差はみられない。段階が進みR2段階では, 型締速度が大きくなるとう回の傾向は増し, その度合はR1段階よりも激しい。またう回の様相も金型肩部で盛り上がるような回から, 型締速度が大きくなるにつれて金型肩部よりさらに水平に中央部に流れ, そこより急速に旋回し, 金型側面によってくるような様相を示し, 断面急変部での強度低下を招くと思われる。R3段階での V_c が 50, 300 mm/min の変位状態図を, それぞれ Fig. 4(a), (b)に示す。 V_c が 50 mm/min では, う回の傾向はみられないが, 型締速度が大きくなり, $V_c=300$ mm/min では, 金型肩部でう回の傾向が現れてくる。ここで Fig. 5 (a), (b)に $V_c=18$, 300 mm/min の場合の有限変位ベクトル図を示す。 $V_c=18$ mm/min の場合, 中間層下部の変位ベク

Fig. 3. Diagram of deformation state, (L) Horizontal (R) Vertical section.

Fig. 4. Diagram of deformation state, (Vertical section).

トルは水平方向により下方を向いているのに対し、300 mm/min では、金型肩部で大きく上向きのベクトルがみられる。この盛り上がっているベクトルが、Fig. 4 (b)の変位状態図の金型肩部でのう回の傾向に結びついている。また、リブ内部のベクトルは、型締速度が小さいとリブ中心へ向く傾向を示すが、 $V_c=300$ mm/min と大きくなるとリブ中心に対して外側を向く傾向にある。これは型締速度が大きくなるとリブ背面の中心部で互いに強く押合うため、その作用として外側に向くベクトルが現れると思われる。断面急変部の強化繊維の疎密につながるう回の傾向は、型締速度が大きくなるにつれて激しくなるので、欠点解消には、型締速度を遅くする方が望ましい。

3・1・2 金型肩部半径 6 mm の場合 R1, R2, R3 各加工段階において、型締速度が大きくなるにつれて、リブ背面部での中間層上部の変位よりヒケを生成する流れの傾向は少くなる。これを Fig. 6 (a), (b) に示す型締速度 $V_c=18, 200$ mm/min の有限変位ベクトル図より判断すると、 $V_c=18$ mm/min では、中間

Fig. 5. Deformation Process in the vertical section of specimen. (Finite displacement vectors)

Fig. 6. Deformation process in the vertical section of specimen. (Finite displacement vectors)

層上部の背面部での方向変換はゆるやかであるのに対して、 $V_c=200$ mm/min となると急激な方向の変換がみられている。したがってヒケの問題については、型締速度を大きくすれば改善の方向をとる。しかし、R1 段階、Fig.3 (a), (b)を比較すると型締速度が大なる場合、金型肩部でのうの回の傾向が現れ、金型肩部半径 R_f が 6 mm のとき、金型肩部でのレジソリッチの様相が現れる。同様な現象が R2, R3 段階においてもみられている。 $R_f=6$ mm においては、型締速度が小さい場合では、リブ背面部でのヒケの問題について注目すれば良いが、型締速度が大きくなるにつれて断面急変部での強化繊維の疎密の問題が生じ、そのことから型締速度を大きくすることにも限界があるように思われる。その限界速度は、本報の実験範囲では、R1, R2 段階では 200 mm/min, R3 段階では 50 mm/min であった。

3・2 環境温度の影響をうける場合（金型温度が 110℃ の場合）

実際の加工に近い成形として、金型温度をあらかじめ 110℃ にし、その後材料を設置し、圧縮成形した場合の材料流れについて検討する。なお本報においては、材料を設置し、圧縮成形を開始するまでの時間を 30 秒一定とした。

金型温度の相違により、材料の流動性の違いがみられるものと思われるので、まず、その検討として数種の金型温度における等速圧縮変位 (20 mm/min) 下で

Fig. 7. Relation between molding load and displacement at various molding temp.

の荷重との関係を求め、Fig.7 に示す。この荷重と変位との関係により、金型温度が 140℃ の場合、荷重が最も高く、ついで 110℃, 30℃, 80℃の順になっている。したがって供試材は、金型温度が 80℃ で最も軟かく、流動性が良好であり、110℃, 140℃ と金型温度が上昇すると硬化がみられ、流動性が悪くなるようである。この流動性の相違が材料流れに大きな影響を及ぼすであろう。

金型温度が 110℃ の場合の成形と常温での成形とを比較すると、材料流れの相違は、変位状態図の水平方向変位にみられる。常温での成形では、材料の流動特性が材料内部で一様であるため、型締速度が大きくなるにつれ、段階を増すごとに中間層の変位が大きくな

Fig. 8. Diagram of deformation state, (L) Horizontal (R) Vertical section.

っている。しかし、金型温度が 110°C では、中間層表面層の変位が、ほぼ等しくなっている。以上のことは、常温での成形の Fig. 3 と金型温度が 110°C での成形をあらわす Fig. 8 とを比較すると明らかであろう。

加工段階 R1, 型締速度 V_c が 50, 300 mm/min での変位状態図をそれぞれ Fig. 8 (a), (b) に示す。金型肩部半径 $R_f=0$ mm の場合、型締速度が大きくなると金型肩部でのう回の傾向が大きくなる。また $V_c=50$ mm/min では、中間層上部のリブ背面部での流れの方向変換がゆるやかであるため、ヒケの要因となるもので、常温での成形ではみられなかったものである。 $R_f=6$ mm では型締速度を大きくした場合、金型肩部でのう回の傾向はみられず、ヒケに対しても解消できる流れを示している。加工段階 R2 では、 $R_f=0$ mm の場合、R1 段階と同様に型締速度が大きくなるとう回の傾向が大きくなっている。 $R_f=6$ mm では、型締速度が小さいとヒケの要因となる流れがみられる。 $V_c=300$ mm/min では、ヒケに対しても解消でき、さらに金型肩部でのう回の傾向はみられていない。R3 段階での型締速度 $V_c=50, 200, 300$ mm/min での変位状態図を Fig. 9 (a), (b), (c) に示す。 $R_f=0$ mm では、いずれの型締速度においても金型肩部でのう回の傾向がみられている。う回の様式は、 $V_c=50$ mm/min と $V_c=200, 300$ mm/min では盛り上がるう回と水平に中央部に流れ、そこより急速に旋回するう回と違いがある。 $R_f=6$ mm の場合、 $V_c=50$ mm/min では、中間層上部の流れよりヒケを生成するものと思われるが、 $V_c=200$ mm/min では、中間層上部はヒケを解消しうる流れであり、中間層下部で型に沿って流れており、強化繊維の疎密も生じない。しかし $V_c=300$ mm/min となると再びヒケを生成する流れがみられている。金型温度が 110°C の場合の欠点解消の条件を常温での成形と比較して考察する。 $R_f=0$ mm では型締速度が大きくなるとう回の傾向は大きくなるので、欠点解消のためには、型締速度を遅くする方がよい。 $R_f=6$ mm では、常温での成形のように型締速度に比例して欠点が大きくなるのではなく、型締速度と金型温度との影響によりある限定された速度に欠点解消の余地がある。その速度は R1, R2 段階では 300 mm/min, R3 段階では 200 mm/min であった。

3・3 材料流れの異方性について

Fig. 10 は前述の有限要素法による数値計算結果を示す。これは BMC 材を擬塑性流体として取り扱い、擬塑性粘度の比を 1, 2, 3 と変化させた場合の流速ベクトル図である。これは、BMC 材が強化繊維の配向に基づく異方性流れを仮定して計算した結果であり、異方性を大きくするにしたがって金型肩部でう回する流れの傾向が大きくなる。以下、これらを基にして

(a) $V_c=50$ mm/min.

(b) $V_c=200$ mm/min.

(c) $V_c=300$ mm/min.

Reduction Process; R3, $T=110^{\circ}\text{C}$

Fig. 9. Diagram of deformation state, (Vertical section).

材料流れの異方性について考察を進める。

まず、金型形状による流れの相違は、金型肩部半径 $R_f=0$ mm であると金型肩部をう回する流れが顕著であるのに対し、 $R_f=6$ mm と曲率をもたせることによってう回の傾向は緩和される。したがって、金型肩部に曲率を有する形状の方が異方性の影響が少い流れである。また、リブ長さが長くなるにつれて、つまり加工段階が R1, R2, R3 と進むにつれて、金型肩部で

Fig. 10. Velocity vectors calculated for the canal with ribbed boss.

のう回が現れてくるので、リップ長さが長いほど異方性の影響が強い流れとなる。これは加工段階が進むにつれて、BMC材が受ける配向の影響が大きくなり、流れの異方性の影響が大きく現れるものと思われる。型締速度に関しては、金型形状によらず、その速度が大きくなるにつれて、金型肩部でのう回の傾向は、大きく現れている。したがって、型締速度が大きくなるにつれて該部での異方性の影響が強い流れである。

3・4 平面部での波うち現象

Fig. 3, 4, 8, 9 に示した変位状態図の平面部で中間層の厚さが場所によって変化している“波うち現象”がみられている。この波うち現象は型締速度が大きくなるにつれ、加工段階が進むにつれて大きくなっている。Fig. 5 (a), (b) より型締速度が18 mm/min の場合、平面部において中間層上部、下部の変位ベクトルは、それぞれほぼ平行で変位量も場所によって大きな相違はみられないが、 $V_c=300$ mm/min では、中間層上部、下部の変位ベクトルは、水平方向に対する角度がそれぞれ違い、変位量も場所によって違っている。また変位量は、 $V_c=18$ mm/min の方が大きく、水平方向に流れやすいことを示している。さらにBMC材の流れとの相違をみるために行った等方性材料であるプラスチックの結果より波うち現象はみられなかった。このことは、等方性の材料の成形を行った場合、その流れの様相は型締速度に影響を受けないことを示している。また Fig. 10 の異方性を仮定した計算結果には、この波うち現象はみられておらないが、異方性

流れの傾向は示されている。特殊な条件下で起る波うち現象のようなBMC材の非定常な流れの挙動を考察するには、異方性連続体としての定式化を再評価する必要がある。

4 結 言

BMC材の材料流れの様相に大きな影響を与える因子のうち型締速度を取り上げ、金型温度を常温とした場合と実際の成形に近い形として金型温度を110℃とした場合の型締速度に基づく材料流れの様相について考察を行った結果、以下のような結果が得られた。

(1) 環境温度の影響のない場合

- (a) 型締速度が大きくなるにつれて異方性の影響の強い流れとなる。
- (b) 断面急変部での強度低下に結びつく強化繊維の疎密および背面部でのヒケという欠点を解消しうる条件は、金型肩部半径が0 mmでは、型締速度を遅くする方が良く、6 mmでは、R1, R2段階においては200 mm/min, R3段階では50 mm/min以下であった。

(2) 環境温度の影響を受ける場合

- (a) 上述の欠点を解消できるような条件がみつめられた。
- (b) 欠点解消の条件は、ある限定された型締速度に現れる。たとえば本報における実験範囲内では、R2段階では300 mm/min., R3段階では200 mm/min. であった。

(3) 型締速度が大きくなるにつれて平面部の波うち現象が強まる。これは、異方性流れと移動環境における条件を考慮する必要があるものと思われる。

以上のことより、適切な金型温度と型締速度の組み合わせにより、さらに改善した流れを得、かつ加工のサイクルアップをはかることができるとと思われる。そのためには温度の影響を受ける流れについて、さらに厳密な解析が必要となってくるとと思われる。

終りに、本研究の遂行にあたり、試料を提供していただいた日本触媒化学工業株式会社に感謝の意を表します。また、実験に協力していただいた、当時同志社大学工学部学生深見靖彦、茨木信彦両氏に感謝の意を表します。

(昭和54年3月26日 第8回FRPシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Hirai, T., and T. Katayama, Proc. of Int. Conf. on Composite Materials, 1283 (1978).
- 2) 三木英雄, 平井恒夫, 片山伝生, 佐子真司, 日本材料学会第26期総会学術講演会前刷集, 221 (1977).