

## ゲート着磁法による型内 3 次元流動分布計測

Measurement of 3-D flow patterns of plastics magnetized at the gate inside an injection mold

横井秀俊\*・鎌田重人\*

Hidetoshi YOKOI and Shigeto KAMATA

## 1. はじめに

射出成形は今日最も代表的かつ汎用のプラスチック成形法として知られている。射出成形の問題点は、成形の際にひけ、そり、ジェットイング、ウェルドライン、残留応力などの各種不良現象が生じることである。これらの不良現象は、型内における樹脂の流動と密接な関係をもつことが知られている。これまで、不良現象を解明するために、フローフロントの挙動を静的に観察するショートショット法をはじめとし、金型の一部にガラスなどを用いて型内樹脂流動をリアルタイムで観察するなど実験的な検討が数多くなされてきた<sup>1)~3)</sup>。さらに、数値シミュレーションの手法により樹脂挙動、不良現象生成の予測をする手法も発展してきている<sup>4)</sup>。

これらの樹脂流動計測法はそのほとんどが 2 次元的なものであるのに対し、各種不良現象を正確に把握する上では板厚方向を含む 3 次元の流動現象を解明することが必要となっている。3 次元の流動計測法としては、(1) 多層着色板のプランジャによる型内への押しだし<sup>5)6)</sup>、(2) 未混練着色樹脂を射出するマスターバッチ<sup>7)</sup>、マール成形、(3) 着色擬似流体の観察(噴水流れ Fountain

Flow の観察)<sup>8)</sup>などが知られている。(1) はゲート通過以前での多層樹脂の混合を避けられず、(2) は流動方向は追跡できるもののゲート通過に対する時間的な検討が不可能といえる。また(3) は通常の成形過程との等価性に課題を残している。このように現実の成形条件下で時間経過に伴う 3 次元的な流動現象を精密に計測しうる汎用の計測技術は今日まで確立されていない。

そこで筆者らは、樹脂流動を 3 次元的に計測しうるゲート着磁法を新たに提案し、試作装置による計測実験を通して本手法の有効性を確認した。以下にゲート着磁法の概要と実際の計測結果とを報告する。

## 2. ゲート着磁法の原理

ゲート着磁法は、少量の磁粉を混入した樹脂をキャピティへ射出する際に、ゲート部またはその近傍において磁化を行う方法である。ゲート部分には強力な磁界を生じさせる着磁装置が組み込まれ、その磁化タイミングを制御することにより、型内に流れ込む任意の成形材料を着磁できる。成形品内部に分布した磁化領域は、所要の成形品断面に磁気検出液を塗布することによって、その面内分布を計測することができる。

つまり、ゲート着磁法は型内へ流れ込む任意の成形材料に磁化という手法でマーキングを施し、その着磁材料の型内分布計測結果から流動パターンを明らかにするものである。

## 3. ゲート着磁の方法

## 3.1 着磁装置の設計

着磁装置は一種の電磁石であり、基本的にはコイルとコアとからなる(図 1)。コイルの起磁力によりコアのギャップには磁界が生じ、磁粉を混入した成形材料がこの磁界中を通過すると、瞬時にその磁化が完了する。このとき磁界の強さは図 1 の記号により次式によって表される。

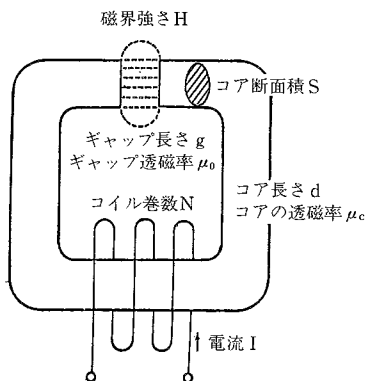


図 1 磁気回路

\*東京大学生産技術研究所 第 2 部

$$H = \frac{NI}{g} \cdot \frac{1}{1 + \frac{d}{g} \cdot \frac{\mu_0}{\mu_c}}$$

磁粉は一種の永久磁石材料である。磁化に必要なおのおのの磁界強さを表 1 に例示する。表 1 の磁界強さを得るためには、上式の各諸元、特にコイル巻数と電流値との積 NI を大きくとることが必要となる。本研究で用いた電流発生回路は基本的に AC 電源と変圧器、整流器、スイッチとからなっている。スイッチはパソコンなど外部信号により開閉し、着磁信号を制御できる。

3.2 ゲート着磁金型の基本構造

ある瞬間にゲートを通過した磁化材料がキャビティ内で次の瞬間どのように流動分布するかを正確に求めるためには、図 1 の磁気回路のコアギャップをゲート部そのもの、あるいはできる限りゲート部近傍に組み込むことが求められる。ここでは、図 2 の矩形キャビティをサイドゲートで成形するためのゲート着磁金型を設計・試作するものとした。

図 1 の磁気回路をゲート部に組み込む際に (1) コイルに流れる電流によって生じる磁束をコアのギャップ部分で集中させ、(2) 漏れ磁束による金型の磁化を最少限に抑える工夫が必要である。すなわち、着磁装置の本体と金型とを磁氣的に絶縁することが必要とされた。そこで、本計測装置では図 3 のように着磁装置のコアを非磁性体で支持するとともに、ゲート部、キャビティ部も非磁性体としている。その際、型強度および経済性を考慮し図 2 のような入れ子構造を採用した。なお着磁装置は磁束漏れがキャビティ内の成形品に影響をもたらすことを防止するために図 2 のようにゲート部近傍のランナに埋め込んだ。

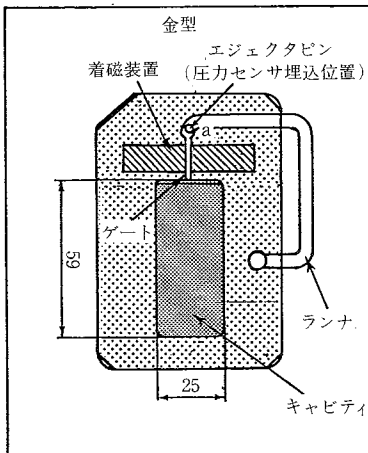


図 2 金型の Parting 面 (可動側)

表 1 磁石材料の飽和磁化力

| 磁性材料     | 飽和磁化力 [Oe] |
|----------|------------|
| クロム鋼     | 1000       |
| 高コバルト鋼   | 2000       |
| アルニコ     | 3000       |
| フェライト系磁石 | 12000      |
| 希土類金属磁石  | 12000      |

また樹脂の通過検出および樹脂圧計測のためにランナ部位のエジェクタピンの下側に圧力センサを装填した。

3.3 ゲート着磁の手順

図 4 をもとに以下にゲート着磁の手順を示す。(1) まず図 2-a の圧力センサからの信号により、パソコンにて流動樹脂先端のゲート近傍位置通過を検出する。(2) これにより任意の着磁パターンのタイミングプログラムにしたがって、パソコンにより通電指令を着磁回路に送る。(3) これを受けて着磁電流が電気回路に流れ、磁気回路に強力な磁界を発生させる。(4) ゲートを通過する成形材料を磁化により所要のタイミングでマーキングする。

4. 計測実験

4.1 成形材料

今回の実験では、ベースとなる樹脂をポリプロピレン (ダイヤポリマー TX946; 以下 PP と略記)、磁粉をフェラ

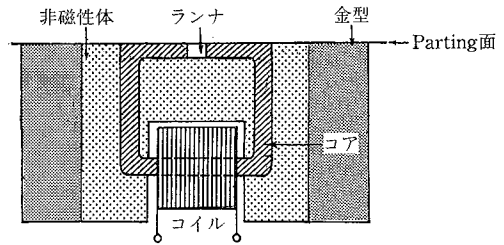


図 3 着磁磁気回路と金型

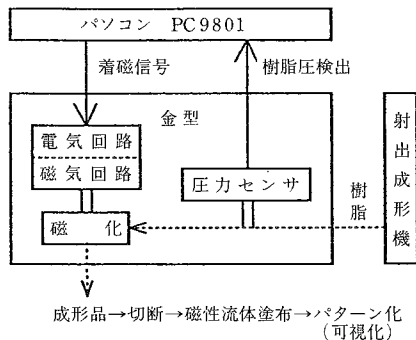


図 4 計測手順のシステム図

研 究 速 報

イト系磁石 (Srフェライト, 宇部興産㈱) とし, 磁粉を 20重量%の割合で樹脂に混入した成形材料を使用する。Srフェライトは粒径が $2.0\mu\text{m}$ , 保磁力が $3000\text{Oe}$ , 飽和磁化が $53\text{emu/g}$ である。ベース樹脂のPPと磁粉20重量%混入のPPの諸特性を図5および表2に掲げた。熱伝導率, 比重には磁粉混練による大幅な変化が認められなかったが, 粘度, MI値には予想以上の差異を生じた。これは通常の混合則に反する特異現象ともみられ, その原因についてはさらに今後の検討を待たねばならない。しかし上記特性の変動幅は樹脂一般の範囲を逸脱するものではなく, 磁粉混入樹脂による流動分布計測結果の普遍性を損なうものとはならないであろう。

4.2 着磁実験の方法

使用した射出成形機は, 住友重機械工業㈱のSYCAPシリーズS40/25 (型締め力 $25\text{ton}$ ), 圧力センサは日本キスラー㈱のType9221とした。成形条件を表3に掲げる。コイル巻数は170, 着磁電流は平均値が $13\text{A}$  (振幅 $1.2\text{A}$ )の振動波となり, これにより着磁装置のコアギャップにおける磁界の強さは理論上フェライト系磁石の磁化に必要な $12000\text{Oe}$ 以上を確保できた。

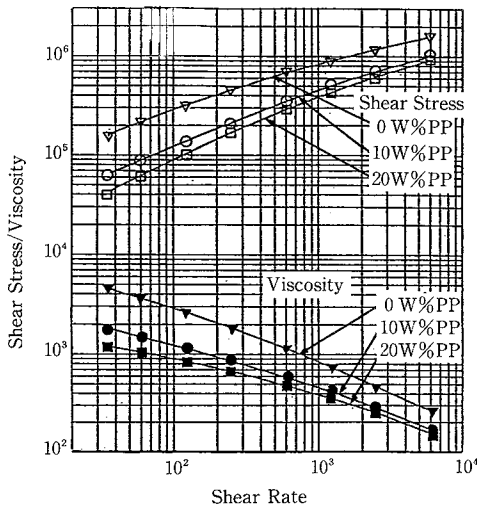


図5 成形材料のキャピログラフ

表2 成形材料 (PP) の諸特性

| 磁粉含有率                | 0w%   | 10w%  | 20w%  |
|----------------------|-------|-------|-------|
| 熱伝導率 <sup>*)</sup>   | 0.296 | 0.313 | 0.341 |
| 比重 <sup>**)</sup>    | 100   | 110   | 120   |
| MI 値 <sup>***)</sup> | 16    | 74    | 104   |

<sup>\*)</sup> [W/m·K], 20°C

<sup>\*\*)</sup> [g/mm<sup>3</sup>], 190°C

<sup>\*\*\*)</sup> [g/10min], 190°C

表3 成形条件

|      |         |
|------|---------|
| 型締め力 | 20tonf  |
| 型 温  | 35°C    |
| 樹脂温度 | 190°C   |
| 射出圧力 | 36.8MPa |
| 射出速度 | 5mm/s   |
| 充填時間 | 8.2s    |

4.3 磁化領域の分布計測法

あるタイミングで磁化された成形材料のキャビティ内での分布を計測するために, 成形品を切断・断面研磨し, 磁気検出液マグチェッカー (タイホー工業㈱) をその断面に塗布する。この液体は, 微量の磁気にも反応して, 磁化形態を可視化するもので, これを用いて成形品断面の磁化領域の分布を確認できる。その解像度は $0.1\text{mm}$ が保証されている。

4.4 測定結果と考察

各ショットごとに, ゲート着磁のタイミングをシフトさせ, その時々磁化領域がどのように遷移していくかを計測した。すなわち, 図6のように, ゲート通過時を起点として $T$ 秒後におおの約1秒間ゲート着磁回路を起動し, その後図7のA-A, B-B断面をとって磁化領域分布を可視化計測した。図8に磁気検出液による可視化処理後の磁化領域観察写真およびそのスケッチを例示する。同図は本手法による高精度な流動分布計測の可能性を如実に物語っている。図9に各 $T\text{s}$ におけるA-A断面の分布変化を, また図10には $T=3.4\text{s}$ のB-B断面の例を掲げた。

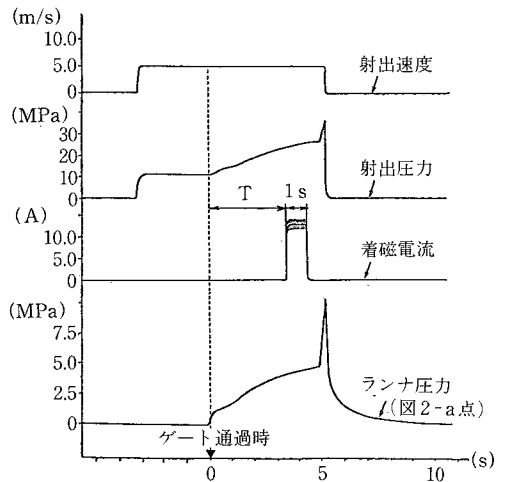


図6 成形条件の変化と着磁タイミング

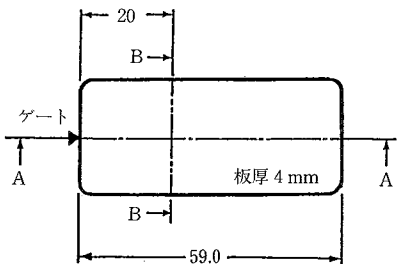
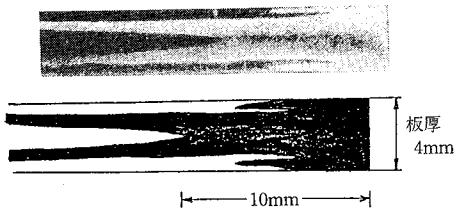


図7 成形品の切断位置



( $T=2.45$ , 図 9 の破線枠内の拡大図)

図 8 磁化パターンの拡大図の例

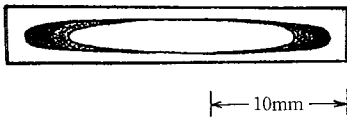
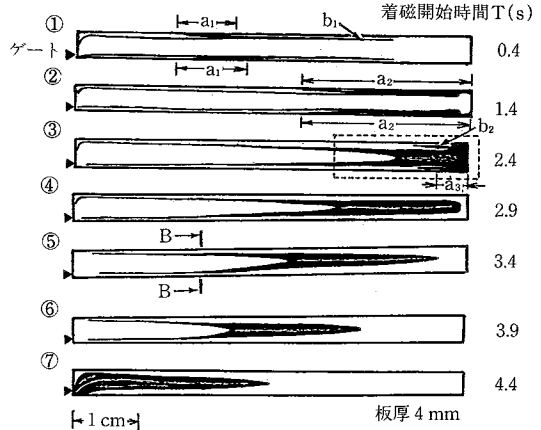


図10 横断面の磁化パターン ( $T=3.4$ )

型内に射出された樹脂は噴水流れ(Fountain Flow)によってキャビティ内を充填する<sup>8)</sup>。図9からこの過程の軌跡を間接的に読み取ることができる。同図③はCoyleらの擬似流体による噴水流れの結果とよい一致を示すことが確かめられる。一般に噴水流れでは板厚中心部をピークとする速度分布が知られ、中央部を流れる流動樹脂は型壁面近傍を流れる樹脂を追い越し、これを巻き込みながら次第に壁面側へと押しやられていく。この過程で図9-a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>に見られるように初期 ( $T=0.4\sim 2.4$  s)に射出された流動樹脂の大半が壁面に接触し、成形品表面層を形成する(図9①~③参照)。一方射出されたすべての樹脂は、ゲート側から順次固化を開始したスキン層との間でずりせん断を繰り返す。その過程でスキン層上に堆積し薄く広く層状のスキン層を形成する。同図b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>にはスキン層の逆転現象が観察される。これは板厚中心部の高い流動速度層が、このスキン層近くの低い流動速度層を追い越し、巻き込んだ痕跡とみなされる。横方向の断面を示す図10では、幅方向の噴水流れの結果、磁化樹脂の大半が端面部を通して流動している様子が示される。

5. ま と め

- (1) 型内 3 次元樹脂流動分布の精密計測法としてゲート着磁法を提案した。
- (2) 磁気回路を組み込んだゲート着磁金型を設計・試作し、パソコン制御によるプログラマブルなパターン着磁システムと磁気検出液による着磁領域の可視化計測手順を確立した。
- (3) 10重量%, 20重量% Srフェライト混入のPPによる計測実験を行い、各時間におけるゲート通過樹脂のキャ



T: 流動樹脂先端がゲート通過後に着磁開始するまでの時間

図 9 縦断面の磁化パターン

ピティ内 3 次元分布を計測した。

本手法では実際の成形機、型内での挙動を高精度に 3 次元分布計測できるため、各種不良現象、複合材料やセラミックス等の成形過程の解明、数値シミュレータの検証等、広く活用されることが期待される。今後、さらに磁化パターンの鮮明な可視化技術、磁粉量と成形材料特性との関係調査などが課題とされる。

謝 辞

本実験に御協力を頂いた元中央大学学生小倉智行、東海大学学生植木浩史の両君に謝意を表します。また本研究を行うにあたり特殊な本試作型の製作に全面的な御協力を賜ったムネカタ(株)に深謝いたします。射出成形機を御提供下さった住友重機械工業(株)、ならびに磁粉、磁気検出液を御供与下さった宇部興産(株)、タイホー工業(株)、樹脂特性、熱伝導率の計測に御助力を賜った三菱樹脂(株)、太源(株)の各社に厚くお礼を申し上げます。

(1988年 7 月 25日 受理)

参 考 文 献

- 1) C.D. Han and C.A. Villamizar, Polym. Eng. Sci., 18, 173 (1978)
- 2) 大柳: 高分子予稿集, 36, 1190 (1987)
- 3) 横井, 林, 平岡: 生産研究, 39, No. 7, 306 (1987)
- 4) W.L. Krueger and Z. Tadmor, Polym. Eng. Sci., 20, 426 (1980)
- 5) J.L. White and H.B. Dee, *ibid.*, 14, 212 (1974)
- 6) L.R. Schmidt, *ibid.*, 14, 797 (1974)
- 7) R.A. Worth, *ibid.*, 20, 551 (1980)
- 8) D.J. Coyle, J.W. Blake and C.W. Macosko, AIChE Journal, 33, 1168 (1987)