流体制御バルブ部品への長繊維 GFPP の適用検討

佐々木 幹英^{*1}・平河 智博^{*2}・高木 浩二^{*1}
中島 康紀^{*1}・合田 宏史^{*3}・矢野 公規^{*3}

1. はじめに

長繊維 GFPP は従来の汎用プラスチックとしての PP のイメージを覆す革命的な金属代替材料となりうる可能性を秘めており、今回は、高い機械的強度や寸法精度が要求される、流体制御バルブ部品をターゲットに、その適用を検討した。本報では、長繊維 GFPP 成形品の特徴と、耐水圧性能を向上するための、成形品の評価、解析等による設計事例を述べる。

2. 流体制御バルブ

今回検討を行ったのは、水流制御バルブの一次耐水圧部分（以下、本バルブという）であり、その金属代替材（コストダウン）として、強度、耐薬品性、成形性などの観点から、長繊維 GFPP に着目した。本バルブは、図1のように本体部品、差込部品、開閉弁により構成され、図中パイロットポートの開閉を制御することにより、止水、通水を行うことが可能な機構となっている。つまり、パイロ

図1 流体制御バルブの構造概図

^{*1} Sasaki, Mikihide/Takagi, Kouji/Nakashima, Yasunori
東陶機器(株) 生産技術研究所
北九州市小倉北区中島 2-1-1 (〒802-8601)

^{*2} Hirakawa, Tomohiro
東陶機器(株) 商品研究所
茅ヶ崎市本村 2-8-1 (〒253-8577)

^{*3} Gouda, Hirofumi/Yano, Kouki
出光石油化学(株) 樹脂テクニカルセンター
市原市姉崎海岸 1-1 (〒299-0193)
2001. 12. 10 受理

ットポートが閉状態のときは、水が給水口より流入路を経て、開閉弁の小孔を通過し背圧室へと流入する。これにより、背圧室内と流入路内の圧力が同一となり、受圧面積の差によって開閉弁は閉方向（図の下方向）へ移動し止水となる。また、パイロットポートが開状態のときは、背圧室内の水が外部へ排出されることで開閉弁が開方向（図の上方向）へ移動し流出口への通水が開始する、というものである。

3. 長繊維 GFPP 成形と成形品の特徴

長繊維 GFPP は、出光石油化学社製のモストロン L L-3060 P（GF 30%；以下本材料という）を使用する。本材料は、繊維長約 8 mm のペレットである（図2）。長い繊維長を有する GF により、高剛性でかつ高衝撃強度を実現しており¹⁾、本バルブの最も基本的な要求性能である耐水圧強度を満足できる可能性があると考えた。また、長繊維強化材料の特徴を生かし、良好な性能を得るためには、成形品内の残存繊維長を長く保つことが望ましく、成形時のせん断を抑える成形条件、ゲート設計等が必要である¹⁾。ちなみに、今回の本体部品は、製品の基本肉厚 5 mm、ゲー

図2 モストロン L L-3060 P ペレット

図3 残存繊維長分布（本体部品）

ト断面は4×4 mm、樹脂温度 250℃、冷却水温 40℃、スクリュは一般的なフルフライトスクリュで回転数 50 rpm である。図 3 に、成形品内の残存繊維長の測定結果を示した。通常スクリュでも平均で 2 mm 程度の繊維長を保っている。長繊維専用スクリュでは、平均で 4 mm 程度と残存繊維長が長くなるのがわかる。なお、本報告の評価試験等に使用した成形品は、全て一般的なスクリュでの成形によるものである。

また、開閉弁を挟み込むシール部は寸法精度が要求される。一般的に PP は、ひけ、変形を生じやすいが、本材料は、スプリングバック現象という興味深い膨張挙動により(図 4)、成形収縮率で 4/1000 程度、収縮率の異方性も小さく、良好な寸法精度が達成できている。その例として、表 1 に差込部品の円筒部の寸法測定結果を示すが、他の樹脂と比較して、良好であることがわかる。

図 4 スプリングバックによる膨張挙動

表 1 差込部品円筒部の寸法比較 (平均値；N=5)

	樹脂材料		
	PPS(GF30)	POM(GF25)	L-3060P
縦寸法(mm)	43.53	43.42	43.55
横寸法(mm)	43.30	43.07	43.39
縦/横	1.0053	1.0081	1.0037

差込部品
測定箇所

4. 耐水圧試験

以下より、本バルブの止水状態を保ち、高水圧を周期的に負荷する耐久試験(ウォーターハンマー(W. H)耐久試験)にともなって実施した成形品評価、解析等を行った事例を述べる。

4.1 早期クラック漏水

最初の試験で、本体部品が数百回レベルという早い段階でクラック漏水となった(図 5-G 1)。当クラックの箇所はウエルド部であった。CAE による樹脂流動計算(図 6-(a))や応力計算(図 6-(b))でウエルド位置への対向応力の発生については予測していたが、クラック断面を観察すると(図 7-G 1)、内部に激しい空隙の発生が見られた。これは空気 の 巻 込 み に よ る も の で あ り、本材料の熔融粘度が比較的低いことに加えて、成形品肉厚が 5 mm と厚肉であることも影響していると考えられる。

図 6 CAE-樹脂流動計算と応力計算 (本体部品)

図 7 クラック箇所断面写真 (ゲート位置の違い)

図 5 ゲート位置、形状と WH 耐久回数試験結果 (本体部品；▲ゲート位置 △クラック箇所)

4.2 ゲート位置と内部空隙

まずは、ウエルド部の空隙状況を変える目的で、ゲート位置を前節の上方から、中央、下方、と変えて成形を行った。耐久結果（図5-G1, G2, G3）と断面観察（図7-G1, G2, G3）より、耐久回数とコーナー部近傍の空隙状況に関連があり、およそゲート位置 $G1 \approx G2 \geq G3$ の順でコーナー近傍の空隙が少ない。ウエルド部樹脂会合角の違いによる、繊維配向状況の違いもあるが、同一ゲート位置でも、クラックが早いものは、常にコーナー近傍の空隙が多く、空隙の状況が耐久に大きく関与していると考えられる。さらに、成形ショット数を重ねていくと、金型内で樹脂が収縮する過程での、ウエルド部への引張応力により、ウエルド位置に目視可能レベルの初期クラックが発生してしまった（図8）。

図8 成形初期クラック発生状況写真

図9 内壁側リブの追加によるウエルド部の補強

図10 リブ追加部断面写真

4.3 ウエルド部の補強策

上述した状況を考察して、CAE-応力計算を基にウエルド部の補強を狙ったのが、図9に示す内壁面側リブの追加である。当リブ内部には、樹脂の収縮過程や水圧による引張り力がほとんど発生しないことから、リブ内部に空隙を潜入させること、ウエルド表面への直接の引張り応力を回避することで、ウエルド部が補強できると考えた。図10が、成形品リブ内部の断面写真であり、空隙がリブ内部に潜入しているのが確認できる。また、その耐久試験結果は、図5-G1_r, G3_rに示すように、耐久回数としては約3倍～5倍に向上し、漏水状況も改善でき、当対策の効果が確認できた。

4.4 クラック箇所ウエルドの回避

ところで、水圧負荷面にウエルドが発生しないようにしている本バルブの差込部品（図1）は、耐久試験において数十万回レベルの耐久能力を持つことが確認できている。そこで、本体部品において図11のようにゲート位置を反対側に廻しウエルド位置をさらに応力の低い部分に回避すると、図5-G4に示すが、さらなる耐久レベルの向上が確認できた。

ただし、クラックの発生箇所は図12に示すように、これまでとほぼ同位置であり、当クラック箇所は、引張応力と垂直方向に繊維が配向する箇所である。このように、長繊維の配向方向とその応力方向も、強度に関連するため、その能力を最大限に発揮するためには配向（流動方向）にも注意が必要であることがわかった。

図11 反対側ゲート成形品

図12 クラック箇所写真（反対側ゲート）

5. W. H 耐久設計データ

われわれは、これらの耐久試験結果と CAE 解析をベースに、バルブの基本性能となる W. H 耐久設計データを構築することを考えている。CAE 解析と試験結果を結び付けることが、今後、本材料を利用する製品開発において、非常に有用なデータとなる。以下より、現在実施中の検討事項を簡単に述べる。

5.1 成形品の耐久強度設計データ

これまでに述べてきたように、本材料で注意すべき点の一つはウエルド部である。図 13 に示す引張り試験結果でわかるように、GF の含有量に関係なく、ウエルド強度が極端に低い。本材料の製品設計において、ウエルドの位置の予測は必要不可欠であり、樹脂流動計算がその予測ツールとして役立つ。近年では、完全 3 次元の樹脂流動計算が実用的に適用されており、今回の検討では、Moldflow 社の MPI/FLOW-3 D を活用している、また、応力計算には SDRC 社の I-DEAS を活用している。

図 14 に、本材料の振動引張疲労特性（温度：23℃，周波数：10 Hz）の結果を示す。このようなテストピースによる基礎試験は、ある一定条件下で得られる。そのため、実際の製品の耐久回数を、CAE 応力計算結果から予測しようとした場合、基礎試験結果の応力値に単純に当てはまらない場合が多々ある。我々は、これら基礎試験結果などを参考に、実際の耐水圧試験で水圧を変化させたときの、クラック回数、クラック箇所とその時の CAE による応力値をプロットし、その際に、一般面、配向垂直応力、ウエルド対向応力で場合分けすることで、より実用的な設計データを構築することを現在実施している。

図 13 GF 含有量と引張強さ（一般面とウエルド部）

図 14 振動疲労特性（一般面測定結果例）（温度：23℃，振動モード 0～引張，周波数 10 Hz）

今後は、このような CAE による応力計算、流動計算でより詳しく事前検討を行い、製品設計や金型設計に反映させる技術が、より良いものづくりへの重要な設計手法の一つになってくると考えている。

5.2 タッピン強度設計データ

最後に、本材料のタッピン設計に関する事項を特筆する。本バルブの差込部品と、本体部品を、タッピンねじで締結した際、WH 耐久試験途中で、締結部の隙間より水漏れが発生する場合があります。本材料のタッピン設計には、注意を払わなければならない。

図 15 に示すような試験片を用いて、JIS 2 種 M 4 ねじの下穴径 (dh) とはめあい長さ (L) を変化させた場合の引抜き強度を計測した結果を図 16 に示す。当試験結果を基に、

図 15 タッピン引抜き試験

図 16 タッピン引抜き強度，JIS 2 種 M 4 (Ds=ねじ外径，dh=下穴径，L=はめあい長さ)

図 17 バルブのタッピン安全率と隙間漏れ発生回数

本バルブの WH 耐久試験で、水圧とねじはめあい長さを変え、その安全率（＝バルブ全体のねじ引抜強度/負荷水圧による引抜力）と隙間漏れの発生回数をプロットしたものが、図 17 に示す結果である。当結果を基にタッピンに関する安全率の設計が可能である。なお、本データは単純に引抜き方向のみで考えているため、今後は様々な荷重の負荷方向を包含した形のタッピン設計データも構築する必要があると考えている。

6. ま と め

以上、流体制御バルブ部品を題材に、長繊維 GFPP の成形品の特徴や、耐水圧設計に関する適用検討を行ってきた。

これまでの検討によって得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 本材料における、バルブ本体部品のウエルド強度の低下要因として、内部の空隙があった。ゲート位置の変更等で空隙状況は変化し、またウエルド部の内壁面側リブにより補強可能であることを確認した。
- 2) 本材料の成形プロセスにおける特徴である、スプリン

グバック膨張挙動により、良好な寸法精度が確保できる。通常の PP 成形品にはない特性をもつ、非常に興味深い材料である。

- 3) 本材料による成形品の設計を行うにあたっては、特にウエルド位置に注意する必要があるが、CAE 樹脂流動計算や応力計算で状況を把握し、設計検討することが必要不可欠と考える。
- 4) タッピンに関する引抜き強度試験を行ない、耐久試験と照らし合わせ、単純引抜き方向の安全率で本バルブのタッピン隙間漏れに関する評価をまとめた。

今後は、本材料の設計データをさらに強化補充していきながら、流体制御バルブ部品への適用技術を確立するとともに、更なる適用範囲の拡大の可能性を検討する。

参 考 文 献

- 1) 合田宏史, 嶋 徹, 齋藤義昭, 矢野公規: 成形加工 '01, 223 (2001)
- 2) 佐々木幹英, 平河智博, 高木浩二, 中島康紀, 合田宏史, 矢野公規: 成形加工 '01, 221 (2001)

■ 文 献 抄 録 ①

・ Vol. 90(2000), No. 9

Daucher, M. : Higher Value Added (p. 6)

Vermeehren, P. : Reorganization with an ERP System (p. 7)

Klein, G. : Innovation with Polyurethane (p. 9)

Klein, G. : Design for Innovative Materials (p. 10)

Jaeger, A. : A Comparison of Hybrid Machines (p. 11)

Niemann, K. : Preventive Maintenance of Injection Moulding Machines (p. 14)

Michaeli, W. and Spennemann, A. : Injection Moulding Microstructured Functional Surfaces (p. 16)

Holzhauser, M. and Zippmann, V. : Moulds for Micro-Injection Moulding (p. 18)

Ehlert, W. : Injection Moulding Water Taps (p. 20)

Jensen, R. et al. : Automatically in the Mould (p. 21)

Böumann, K. : Inserting, Foaming and Coating (p. 23)

Martin, W. : Automation Around Injection Moulding Machines (p. 25)

Bohringer, C. : Automated Manufacture of Mobile Phones (p. 27)

Tome, A. and Ehrenstien, G. W. : Joints with Self-Tapping Screws Subject to Temperatures Effects (p. 28)

Hinrichsen, G. et al. : Continuous Production of Polymer Nanofilms (p. 30)

Weber, M. et al. : Dimensional Stability and Impact Strength (p. 32)

Kagan, V. A. : Joining Polyamide Inexpensively (p. 34)