

MBD適用によるマグネシウム合金射出成形機の開発

The Development of Magnesium Alloy Injection Molding Machine by Introduction of MBD



菅原 貴弘*
Takahiro Sugahara



平川 友大*
Tomohiro Hirakawa



落岩 崇*
Takashi Ochiwa



博士(工学) 富山 秀樹*
Dr. Hideki Tomiyama



博士(工学) 木下 拓矢**
Dr. Takuya Kinoshita



博士(工学) 脇谷 伸**
Dr. Shin Wakitani



博士(工学) 山本 透**
Dr. Toru Yamamoto

要 旨

マグネシウム合金射出成形機は、油圧機構を採用することによって高加速・高速射出を実現している。この油圧機構は複数の機器が組み合わされた構成であるため、各油圧機器が流体を介して互いにどのような影響を及ぼしているかを予測し、動的挙動を把握するのが困難であった。

本開発では、マグネシウム合金射出成形機にモデルベース開発(MBD)手法を適用し、射出時における動的挙動を把握し、設計に活用することを目的として、油圧回路のモデリングとシミュレーションを行った。シミュレーション結果と実測データを比較し、モデルの妥当性検証を行った結果、実機の動的挙動を良好に再現できていることを確認した。

— Synopsis —

The magnesium alloy injection molding machine achieves high acceleration and high speed injection by using hydraulic mechanism. Since this hydraulic mechanism is composed multiple devices, it is difficult to predict how each hydraulic device affects each other through the fluid and comprehend the dynamic behavior.

In this development, we have introduced Model Based Development (MBD) to magnesium alloy injection molding machines, and simulated the hydraulic circuit for the purpose of utilizing in design by comprehending dynamic behavior in the injection operation. As a result of comparing the simulation results with the measured data and verifying the validity of the model, it is confirmed that the dynamic behavior of the actual machine is favorably reproduced.

*: 広島製作所 技術開発部
Technical Development Department, Hiroshima Plant

** : 広島大学 大学院先進理工系科学研究科
Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

1. 緒言

近年、脱炭素社会へ向けて、二酸化炭素などの温室効果ガスの排出を抑制する取り組みが世界的に進められている。世界の二酸化炭素排出量の多くを占める自動車は排出量削減を求められており、各自動車メーカーは、燃費の向上を目的として電動化や車体の軽量化などに取り組んでいるため、車体構造部材などにアルミニウムやマグネシウム、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) などの軽量素材の採用が進められている。その中で、電磁シールド性や放熱性に優れているマグネシウムは、構造部材だけではなく、メーターケースやヘッドアップディスプレイの筐体などへの採用も進められており、今後さらに需要が増加していくと予想されている(図1)⁽¹⁾。

マグネシウム合金の製品は、主としてダイカスト法やチクソモルディング法により製造されているが、当社ではチクソモルディング法を用いたマグネシウム合金射出成形機(以降、MG成形機)を製造・販売している(図2)。チクソモルディング法は、マグネシウム合金チップをシリンダ内で加熱・溶融し、金型に射出することにより製品を成形する方法である。ダイカスト法に比べて溶湯温度が低いことから、凝固収縮が小さく製品の寸法精度が高いなどの長所がある。

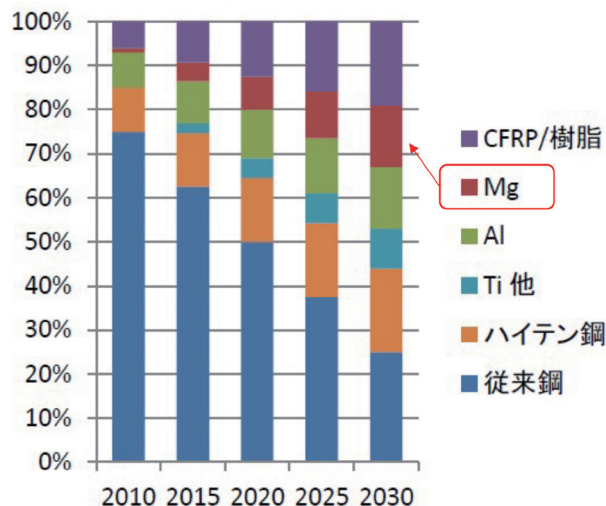
しかし、マグネシウム合金の凝固時間は非常に短いため、プラスチックの射出成形と比べて、射出の高速性、高加速性が求められる。そのためMG成形機は、動力として油圧機構を採用することによってこれらを実現している。この油圧機構は、複数の機器が組み合わされた構成であるため、各油圧機器が流体を介して互いにどのような影響を及ぼしているかを予測することが難しく、実機による試験を実施せずに動的挙動を定量的に把握することは困難であった。

一方、近年モデルベース開発(MBD: Model Based Development)が注目を集めている。本手法は、コンピュータ上で作成したモデルを活用し、シミュレーションで装置の挙動を再現することによって装置の品質や開発速度を向上させることが期待できる開発手法である。

当社は、広島大学大学院先進理工系科学研究科システム制御論研究室の山本教授と共同でMBD手法を導入し、自社製品の装置開発に展開する取り組みを進めている。その取り組みの一環として、本開発ではMG成形機にMBD手法を適用してシミュレーションで射出時の動的挙動を再現し、設計に活用することを目的として、MG成形機の油圧回路についてモデリングとシミュレーションを行った。具体的には、三次元モデルを用いた流体解析結果から代表的な特性を抽出し、この特性データを用いて次元を縮退した数式モデルを作成し、油圧回路モデ

(8)

ルに取り込む技術について検討した。本報では、MG成形機の性能を決定づけている射出ユニットの油圧回路に注目し、モデリング、および実測データに基づくモデルの妥当性検証を行った結果について報告する。



出典: 米国エネルギー省の資料を基に経済産業省が作成

図1 自動車を構成する素材の変遷と予想



図2 マグネシウム合金射出成形機外観

2. 射出ユニットのモデリング

2.1 モデリング手法について

MBDにおけるモデリングには、代表的な2種類の方法が使用されている。一つ目は、運動方程式などの数式で構成し、物理的な現象に基づいてモデリングする方法(ホワイトボックスモデリング)である。この手法は、使用するパラメータの物理的な意味をそのままモデル化することが可能であり、装置設計を行う上で有用な指標となる。二つ目は、実験データなど装置への入力と出力の関係を用いたシステム同定⁽²⁾などによりモデリングする方法(ブラックボックスモデリング)である。このような手法で作成したモデルは、物理的な現象や内部構造が把握できていなくてもモデリングが可能であるが、モデル

自体はブラックボックスとなってしまうため、システム同定によって求めた結果を装置設計に対して汎用的に活用することは難しい。

本開発では、物理的な現象に基づいてモデリングする方法を採用して、油圧回路のモデリングを行った。モデリングには、Mathworks 社の MATLAB/Simulink のツールボックスである Simscape Fluids を用いた。

2.2 射出ユニットの油圧回路について

図3に射出ユニットの油圧回路概略図を示す。射出ピストンは、アキュムレータに設定された圧力まで作動油を蓄圧したのち、カートリッジバルブを目標開度まで高速で開くことによって、作動油を射出シリンダに流すことで駆動する。また、当社の MG 成形機の射出ユニットには、射出ピストン自身で出口側のポートをふさぐことによって、射出シリンダ内の圧力が上昇し、その圧力によって射出ピストンを減速・停止させるブレーキ機構を搭載している。

MG 成形機の性能は、この射出ユニットの油圧回路の能力によってその大半が決定されるため、本開発では、この射出ユニットを対象としてモデリング、および実測データに基づくモデルの妥当性検証を行った。

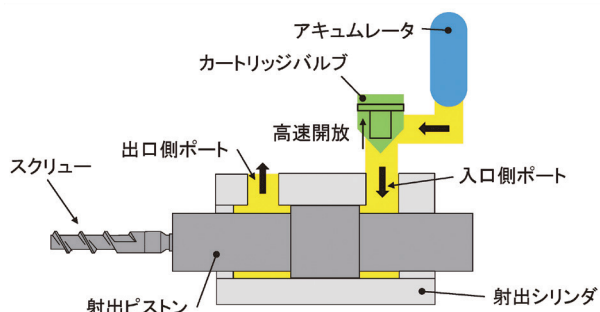


図3 射出ユニットの油圧回路概略図

2.3 油圧回路のモデリングの概要

油圧回路を構成する各油圧機器は、出入口間の圧力差と流量の関係を示す流量特性や、指令信号に対する応答性など機器固有の特性を持っている。本開発では、油圧回路を構成している各機器の特性を Simscape Fluids に用意されているモジュールをベースとしてパラメータフィッティングを行い、これらを組み合わせることによって油圧回路モデルを構成し、MG 成形機の射出時における動的挙動の再現を試みた。MG 成形機における射出ピストンの速度は、カートリッジバルブの開度によって制御されており、このバルブの特性が MG 成形機の射出挙動に大きな影響を与えていると考えられる。しかし、この流量特性を求める場合、実機で用いられているカート

リッジバルブを流れる作動油の流量は非常に大きいため、実際に計測することは困難である。そのため、本開発では、カートリッジバルブに対して三次元流体解析を行い、得られた結果から代表的な特性を抽出し、この特性データを用いて次元を縮退した数式モデルを構築した。得られた数式モデルを油圧回路モデルに取り込むことによって、射出ユニットの油圧回路の動的挙動解析を行った。

2.4 カートリッジバルブの流量特性

カートリッジバルブの流量特性を取得するため三次元流体解析を実施した。流体解析には Altair 社の Acusolve を使用し、タイムステップ 0.1ms で全 500 ステップの非定常解析を実施した。図4に解析に使用したカートリッジバルブのモデルと解析から得られた流速ベクトルを示す。また、図5に入力として使用した信号を示す。バルブの入口圧力を 0 ステップから 100 ステップ間で設定圧力までランプ状に変化させ、その後、100 ステップから 500 ステップまでその値を維持するような信号を入力として与えた。

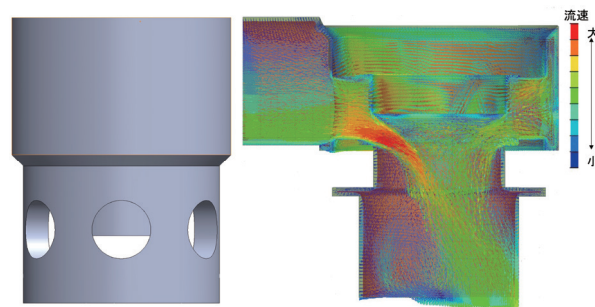


図4 カートリッジバルブ三次元モデル、および流体解析結果の流速ベクトル

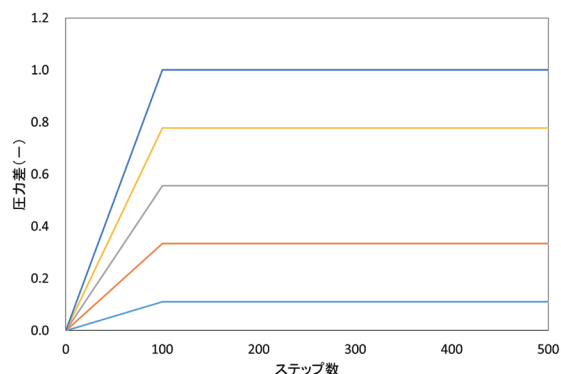


図5 三次元流体解析に用いた入力信号

図6に流体解析によって得られた、カートリッジバルブのある開度における圧力差毎の流量を示す。圧力差が大きくなるにしたがって、流量が振動的になるような傾向であった。開度を変更したモデルに対しても同様の解析を実施し、200 ステップから 500 ステップの間の平均

の流量を図7に示す。圧力差の増加に伴い、流量の増加量が減少する傾向が確認された。

得られた三次元流体解析結果から代表的な特性を抽出し、この特性データを用いて次元を縮退した数式モデルを作成した。図7に示す三次元流体解析結果は、一般的に知られているオリフィスの式(1)⁽³⁾によって近似した。

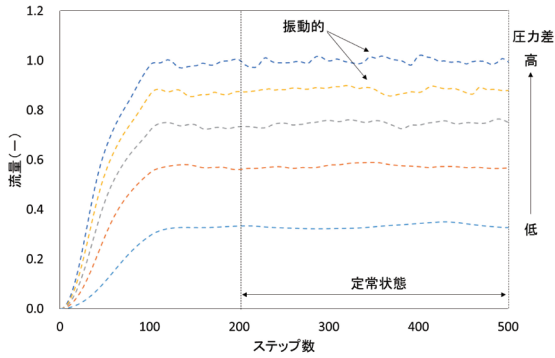


図6 三次元流体解析によって得られたカートリッジバルブのある開度における圧力差毎の流量

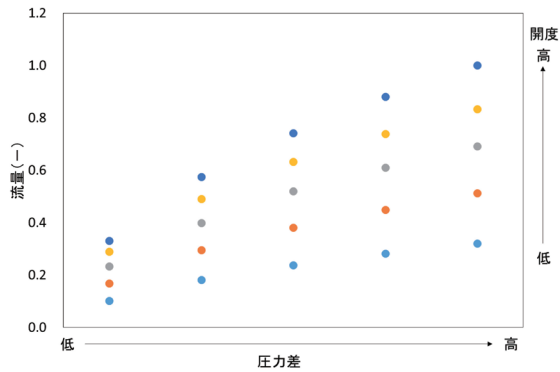


図7 三次元流体解析によって得られた開度毎の圧力差と流量の関係

$$Q = \alpha \cdot A \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots Q_i \quad (2)$$

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \dots \Delta P_i \quad (3)$$

ここで、 Q は流量 [m^3/s]、 ΔP は圧力差 [Pa]、 α は流量係数 [-]、 A はカートリッジバルブの流路断面積 [m^2]、 ρ は作動油密度 [kg/m^3] を表している。

本開発では、カートリッジバルブの開度によらず三次元流体解析結果を満たす流量係数を求めるため、カートリッジバルブ内の流路は、 i 個のオリフィスが組み合わされた構造と仮定し、式(1)、連続の式(2)、および式(3)を連立して導出できる関数を用いて、 i 個の流量係数を求めた。ここで式(3)は、各流路の圧力差の和が、カートリッジバルブの入口出口間の圧力差であることを示している。

(10)

流量係数は、Simulink のツールボックスである Simulink Design Optimization を使用し、パラメータ推定によって決定した。

図8に圧力差毎のカートリッジバルブの開度と流量の関係を示す。シミュレーション結果は、三次元流体解析結果を精度よく再現できており、三次元流体解析結果から抽出した代表的な特性データを用いて、次元を縮退した数式モデルで表現できたことを確認した。

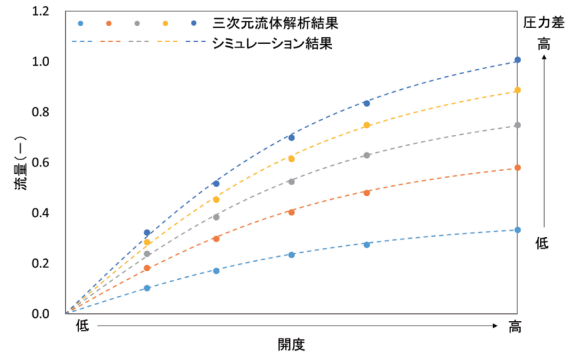


図8 圧力差毎の開度と流量の関係

2.5 油圧回路のモデリング

作成したカートリッジバルブのモデルを用いて、射出ユニットの油圧回路のモデリングを行った。本開発では、MG 成形機の射出動作の動的挙動に着目してモデリング、およびモデルの検証を行うため、射出動作とは無関係な配管や油圧機器については、モデルに含めないこととした。

また、前述した射出ユニットの油圧回路に搭載されているブレーキ機構について、同様の機能を油圧回路モデルにおいても再現することを検討した。具体的には、出口側のポートにバルブを設け、そのバルブの開度を射出ピストン位置に応じて変化させるモデルとした。射出ピストンが出口側のポートをふさぎ始める位置に到達すると、バルブが閉止し始め、出口側ポートをふさぎきる位置に到達した時、完全に閉止させることによって、ブレーキ機構を再現した。

3. モデルの検証

3.1 実測データの取得とシミュレーションの実施

射出ユニットの油圧回路モデルの妥当性を検証するため、シミュレーション結果と実機試験によって得られた実測データの比較を行った。JLM650-MG II e によって、スクリューを装着せず射出ピストンのみを射出する試験を行った。射出速度条件として、低速、中速、および高速の3条件について実施し、射出ピストン速度、および入口側と出口側の射出シリンダ内圧力を計

測した。本開発で作成した油圧回路モデルにおいても、実機試験と同じ条件でシミュレーションを行った。

3.2 射出ピストン速度について

図9に低速、中速、および高速の3条件における射出ピストン速度を示す。実測データにおいて、射出ピストンが加速して最大速度に到達した後、徐々に速度が低下しながら前進し、ブレーキ機構によって大きく減速している。また、高速の条件においては、ブレーキ機構によって大きく減速した際、射出ピストン速度が急制動により振動的に変化する挙動が見られたが、シミュレーションにおいても同様の挙動を再現することができた。

しかし、すべての条件において、シミュレーションにおける射出開始直後の射出ピストン速度の立ち上がりを実測データと比較して大きかった。また、低速と中速の条件において、射出ピストンが加速した後、ブレーキ機構によって減速するまでの区間における射出ピストン速度は、シミュレーション結果が実測データと比較して大きかった。これらについては、射出ピストンと射出シリンダ間の摩擦などの機械的な抵抗について、本開発で作成したモデルでは考慮していないため、射出ピストンの加速度や速度のシミュレーション結果が実測データよりも大きくなったと考えられる。

射出ピストンと射出シリンダの間には、わずかにクリアランスがあり、射出ピストンは射出シリンダ内で作動油に浮かんでいるような状態である。そのため、射出ピストン速度や周囲の圧力状態の違いによって、それらの接触状態が異なり、摩擦力も変化することが考えられる。今後、モデルの高精度化を目的とし、射出ピストン速度や射出シリンダ内の圧力に応じて摩擦力を変化させるような要素をモデルに組み込む予定である。

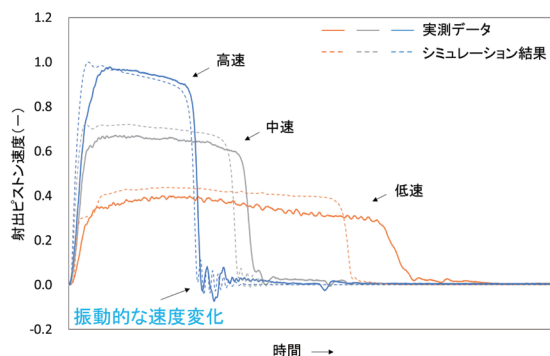


図9 実測およびシミュレーションによる射出ピストン速度

3.3 入口側、出口側圧力について

図10に高速の条件における射出シリンダの入口側圧力、図11に同じ条件における出口側圧力を示す。射出時の入口側圧力の立ち上がりやブレーキ機構によって圧力が上昇することによる射出ピストンの減速挙動については、シミュレーションで概ね再現できた。

しかし、入口側圧力の減速時のピーク値が、実測データと比較して約40%低い結果であった。実測データにおける減速時のピーク圧力は、駆動力源であるアキュムレータ圧力よりも大きな値であり、射出ピストンが急減速した際の油撃によるサージ圧力と考えられる。シミュレーション結果におけるピーク圧力は、アキュムレータ圧力と同等の値であることから、油圧回路モデルにおいて、作動油の慣性による影響が実機と異なっており、ピーク圧力の乖離が生じたと考えられる。

また、出口側圧力において、ピーク値と振動的な挙動は再現できたが、実測データよりも周期が短く振幅が大きい結果が確認された。油圧機器に使用されている作動油は、混入している空気によって体積弾性率が変化し、その圧縮性に影響を及ぼすこと⁽⁴⁾が知られており、油圧回路において振動的な圧力変化が生じた場合には、周期や振幅に影響を及ぼすことが考えられる。本シミュレーションで使用している作動油は、微量の空気が混入しているモデルを採用しているが、実機と

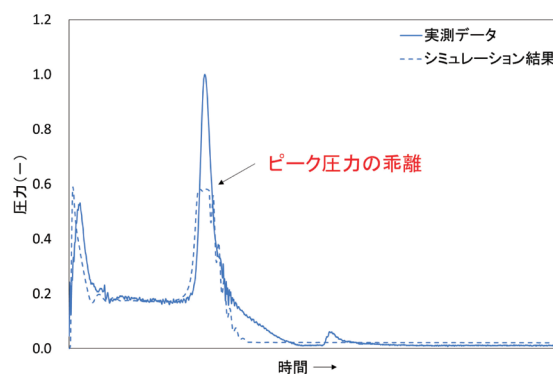


図10 高速の条件における入口側圧力

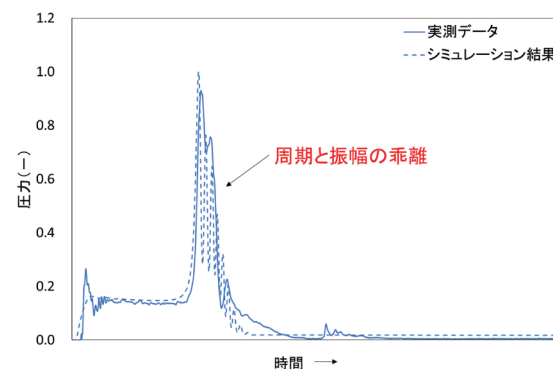


図11 高速の条件における出口側圧力

の空気の混入量による圧縮性の違いによって、実測データとシミュレーション結果に乖離が生じたと考えられる。

4. 結 言

本開発では、MG成形機にMBD手法を適用し、シミュレーションで射出時の動的挙動を把握し、設計に活用することを目的として、MG成形機の射出ユニットの油圧回路についてモデリングとシミュレーションを行った。作成したモデルによるシミュレーション結果は、MG成形機の射出ピストン速度や射出シリンダ内の圧力状態など動的な挙動を概ね再現することができたが、作動油の慣性によるサージ圧力や作動油の圧縮性の違いによる影響など、モデリングの課題も確認された。今後、モデルの精度をさらに向上させるとともに、作成したモデルを用いて構造や設計値の検討を行い、性能の最適化を行っていく所存である。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：“「革新的新構造材料等技術開発」の概要”，p.4, <https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11684678/www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/hyouka/haihu108/siryo2-2.pdf> (2014)
- (2) 足立修一：“システム同定の基礎”，pp.4-5, 東京電機大学出版局 (2009)
- (3) “円形管路の絞り機構による流量測定方法 - 第1部：一般原理及び要求事項”，pp.7-12, JIS Z 8762-1 (2007)
- (4) 竹中敏夫，浦田暎三：“油圧制御”，pp.4-5, 丸善株式会社 (1967)