

マグネシウム合金射出成形機を対象とした連成解析技術の構築

The Development of Coupled Analysis Technology for Magnesium Alloy Injection Molding Machine



日原 啓太*
Keita Hihara



菅原 貴弘*
Takahiro Sugahara



平川 友大*
Tomohiro Hirakawa



浜本 裕貴*
Hiroki Hamamoto



曾利田 雄希*
Yuki Sorida



落岩 崇*
Takashi Ochiwa



博士(工学) 富山 秀樹*
Dr. Hideki Tomiyama



菅田 憲人**
Kento Sugata



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では、油圧機構を採用することで高速・高加速な射出動作を実現している。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、各機器が作動油を介してどのように相互作用しているかを予測して、射出ユニットの動的挙動を把握することが困難であった。

本開発では、マグネシウム合金射出成形機を対象として制御・機構・構造・流体の四要素を連成させた解析技術を構築することで、射出ピストンの動的挙動を把握して設計に活用することを目指した。解析結果と実測データを比較して連成解析の妥当性を検証した結果、実機の射出ピストンの動的挙動を良好に表現できることを確認した。

— Synopsis —

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

In this development, we have intended to comprehend the dynamic behavior and utilize it in the design by building coupled analysis technology of control, dynamics, structural, and fluid analysis for magnesium alloy injection molding machines. As a result of the analysis, it is confirmed that the dynamic behavior of the injection piston is favorably matched with the experiment.

*: イノベーションマネジメント本部 先端技術研究所 Advanced Technology Laboratory, Innovation Management Headquarters

** : 日鋼設計(株) Nikko Sekkei Co., Ltd.

*** : 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。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、炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP)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たマグネシウムは、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⁾。

マグネシウム合金を用いた製品は、主としてダイカスト法やチクソモールディング法により製造されているが、当社ではチクソモールディング法を用いたマグネシウム合金射出成形機(以下、MG成形機)を製造・販売している(図2)。チクソモールディング法は、マグネシウム合金チップをシリンダ内で加熱・溶融して金型内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といった長所がある。

一方で、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成形機では、射出ユニットの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せられた構成であるため、各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の予測が難しく、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。

ここで、近年、モデルベース開発(Model Based Development : MBD)手法⁽²⁾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て、数値解析で装置の挙動を表現することによって性能・品質を試作前に予測することで開発速度の向上を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、油圧機構を制御するバルブの流動特性を三次元流体解析結果から抽出した数式モデル(1Dモデル)を作成して、当該1Dモデルを組み込んだ油圧回路モデルが実機の動的挙動を良好に表現できることをこれまでに確認した⁽³⁾。そこで本開発では、油圧

回路モデルを制御モデルとして用いつつ、射出ユニットの三次元形状を考慮した機構解析、構造解析および流体解析と組み合わせることで、射出ユニットの動的挙動を予測する連成解析手法を構築した。本報では、連成解析におけるモデリングと、実測データに基づく解析の妥当性検証を行った結果について報告する。

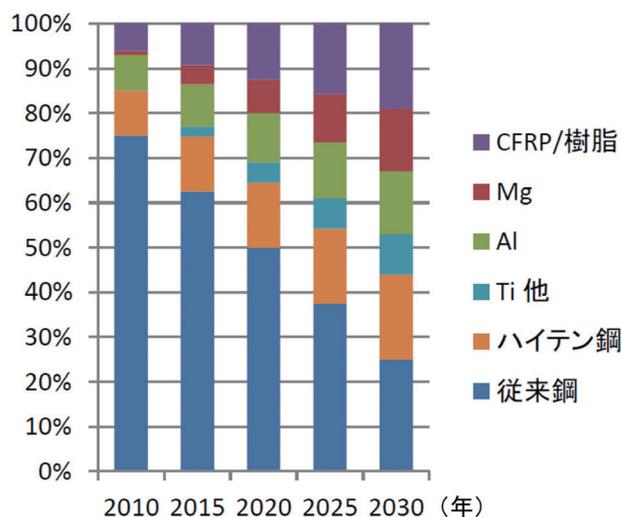


図1 自動車を構成する素材の変遷と予想



図2 マグネシウム合金射出成形機

2. MBD手法と連成解析技術

一般的に、製品開発は図3に示すV字プロセスに従って進められる。MBD手法では、開発の初期段階である製品企画や基本設計の段階から、製品や部品の機能を表現した数式モデル(1Dモデル)を用いた数値解析による検討を行うことで、製品開発の手戻りを防ぎ、開発速度の向上や試作コストの低減を実現することを最大のメリットとする。

一方で、1Dモデルを用いた数値解析を高い精度で実現するためには、対象のメカニズムを把握して数理的に記述することが必須である。そのためには、三次元形状を考慮した種々の数値解析や実機試験による検証が基盤として必要になる。

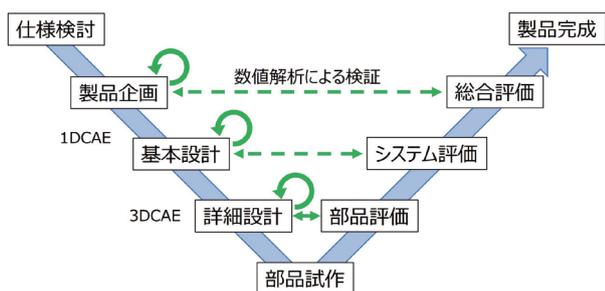


図3 MBD手法によるV字プロセス

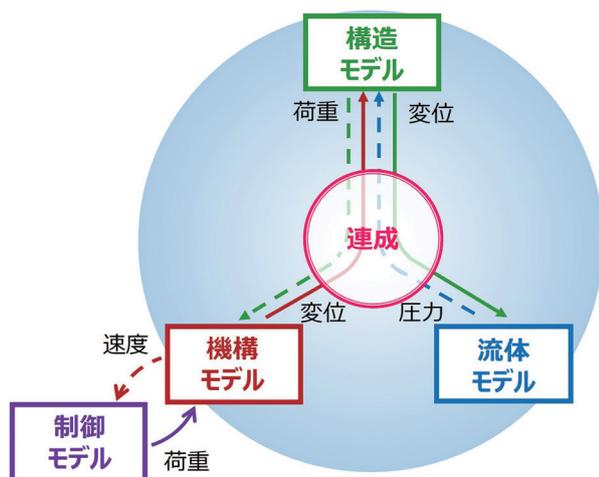


図4 連成解析の構成

ここで、本開発で対象としたMG成形機の場合、油圧機構を採用していることから、機械部品と作動油の相互作用を考慮しつつ、高速・高加速な動的挙動を把握する必要がある。そのため、構造解析、流体解析、機構解析といった数値解析を単独ではなく、組み合わせて実施できることが望ましい。

そこで本開発では、図4に示す構成により、制御-機構-構造-流体の四要素を組み合わせた連成解析について検討した。ここで、制御モデルは油圧回路、機構モデルと構造モデルは主として射出ピストン、流体モデルは射出シリンダ内の作動油を表現する。制御モデルで算出した油圧回路内作動油の流量と圧力を流体モデルに伝えて射出シリンダ内の挙動を表現する。モデリングの詳細を射出ユニットの構成と併せて3章に記載する。

3. 射出ユニットのモデリング

3.1 射出ユニットの構成とモデリング

射出ユニットの構成を図5に示す。射出シリンダ内部は射出ピストンによって前後(流入ポート側と流出ポート側)に区切られており、射出ピストン前後の差圧によって射出ピストンが駆動する。射出動作を行う際には、作動油をアキュムレータに蓄圧した後、バルブを目標開

度まで高速で開くことによって、作動油を流入ポートから射出シリンダに流入させる。これにより流入ポート側の圧力を瞬間的に高くすることで、射出ピストンの高速・高加速な動作を実現する。

また、当社のMG成形機の射出ユニットには、射出ピストンの位置に応じて流出ポートの開度を調整することで、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。具体的には、射出ピストンが一定以上前進すると射出ピストン自身で流出ポートの一部(流出ポートA)をふさいでいく構造となっている。これにより、流入ポート側と流出ポート側の圧力差を射出ピストン位置によって調整することで、高速・高加速で駆動させた射出ピストンを機械的に減速・停止させることが可能な構成となっている。

本開発では、MG成形機の動的挙動を表現できる連成解析手法の構築を目指して、油圧回路による制御に加えて、ブレーキ機構を表現する射出ピストンと射出シリンダの三次元形状を考慮したモデリングを行った。モデルの構成を図6に示す。まず、射出ピストンは動的な変位と各部の変形を表現するために機構モデルと構造モデル

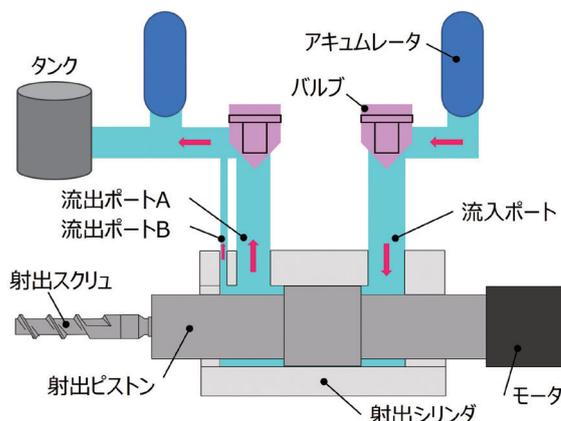


図5 射出ユニットの構成

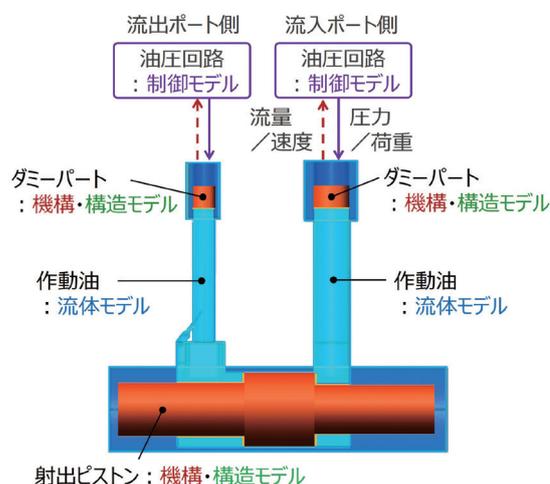


図6 射出ユニットモデルの構成

の2つで作成して、変位と荷重を共有する構成とした。次に、射出シリンダ内の作動油が入る領域を流体モデルで作成した。また、1Dモデルで作成した油圧回路を制御モデルとして組み込んだ。

ここで、1Dモデルで扱う作動油の流量と圧力は三次元の分布を持たない値であるため、三次元形状を考慮した流体モデルと直接共有することが難しい。そこで、機構・構造モデル上で流入・流出ポートにダミーパートを作成して、作動油の流量をダミーパートの速度、作動油の圧力をダミーパートに作用する荷重に換算して機構・構造モデルに共有した。併せて、ダミーパートと作動油の境界を受圧面と定義して、ダミーパート受圧面に作用する圧力を流体モデルの壁面に作用する圧力として共有した。これにより、制御モデルで扱う作動油の流量と圧力を機構・構造モデルを介して流体モデルと共有して解析を行う。

3.2 制御モデルについて

制御モデルでは、アキュムレータから射出シリンダに流入するまでの油圧回路(流入ポート側油圧回路)と射出シリンダから流出してアキュムレータとタンクに至る油圧回路(流出ポート側油圧回路)をモデリングした。制御モデルを図7に示す。流入ポート側油圧回路と流出ポート側油圧回路は互いに独立して機構モデルと情報をやり取りする構成とした。

制御モデルの特徴として、実機バルブの流量特性を表現した数式モデルを備えていることが挙げられる。これにより、操作量であるバルブの開度に対する作動油の流量と圧力を算出して、射出シリンダ内の挙動の予測に用いることを可能とする。

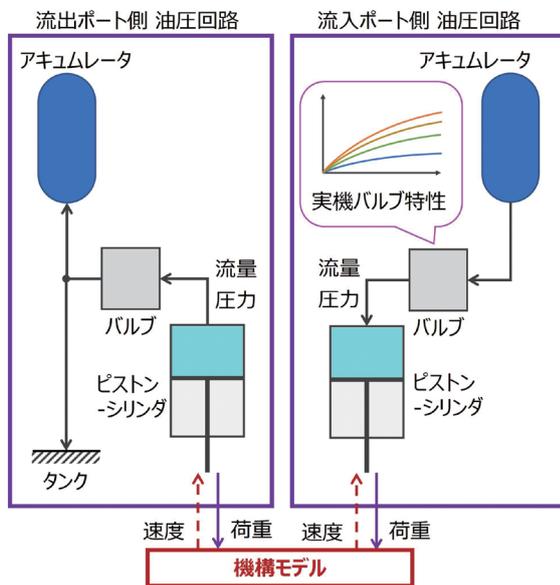


図7 制御モデル

また、流量と圧力を機構・構造モデル上のダミーパートを介して流体モデルと共有するために、仮想的なピストン-シリンダ部品を設けた。これにより、バルブを通過した作動油の圧力を仮想的なピストン断面に作用する荷重に換算して機構モデルと共有する。同様に、機構モデルで算出したダミーパートの速度を体積流量に換算して制御モデルに取り込む。

3.3 機構モデルと構造モデルについて

機構モデルと構造モデルでは、射出ピストンとダミーパートについて、三次元空間上で重複するようにモデリングした。これらを図8と図9に示す。

まず、機構モデルの各部品は変形を考慮しない剛体要素で表現しており、構造モデルと変位・荷重を共有する節点(接続点)に作用する荷重を外力とする運動方程式を解くことで変位および速度を算出する。制御モデルで算出した作動油の圧力を換算した荷重もダミーパートの接続点に作用させた。

次に、構造モデルの各部品は変形を考慮できる弾性体要素で表現しており、受圧面に流体モデルで算出した圧力を作用させることで、部品の変形と応力状態を算出する。

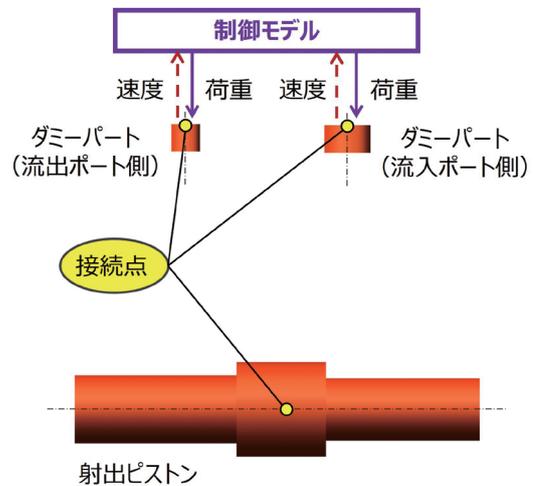


図8 機構モデル

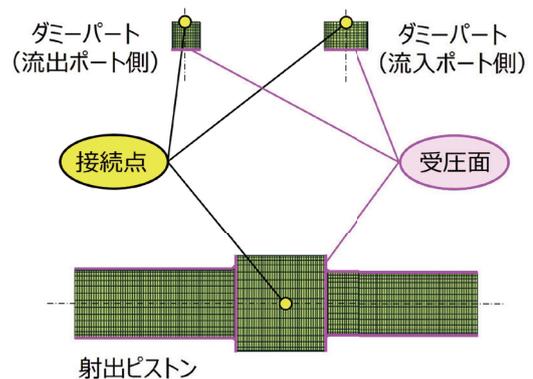


図9 構造モデル

同時に、受圧面に作用する圧力は弾性体要素を介して接続点に集約されるため、流体モデルで算出した圧力を機構モデルに共有することができる。

3.4 流体モデルについて

流体モデルでは、流入・流出ポートの作動油が入る領域をモデリングした。流体モデルを図10に示す。流体モデルの特徴として、射出ピストンの動きに合わせて解析領域を変更するように構成した。具体的には、射出シリンダの内側を表現する円柱形状の領域(射出シリンダ側領域)と射出ピストンの外側を表現する円筒形状の領域(射出ピストン側領域)を作成して、これらの重複する領域を解析領域とした。加えて、射出ピストン側領域の内面を受圧面として構造モデルの変位を共有することで、射出ピストン表面の変形と剛体変位が流体モデルに反映される構成とした。

ここで、実機の射出ピストンは射出シリンダと径方向の隙間を持った状態で動作するが、隙間からの漏れ量は少ないことから、流体モデルでは径方向の隙間を設けず、流入ポート側と流出ポート側が独立したモデルとした。また、流出ポートBは流入ポートや流出ポートAと比較して流量が少なく、バルブ等を介さずにアキュムレータとタンクに直結する流路であるため、簡易形状によるモデリングとして流出口に一定圧力を作用させた。

解析にあたり、MG成形機の射出動作は高速性・高加速性が大きく作動油の圧縮性を無視できないため、圧縮性粘性流体として定式化を行った。流体の密度 ρ 、圧縮率 β 、および粘性係数 μ は作動油の特性に倣った。また、受圧面を除く全ての壁面は滑りなしとした。

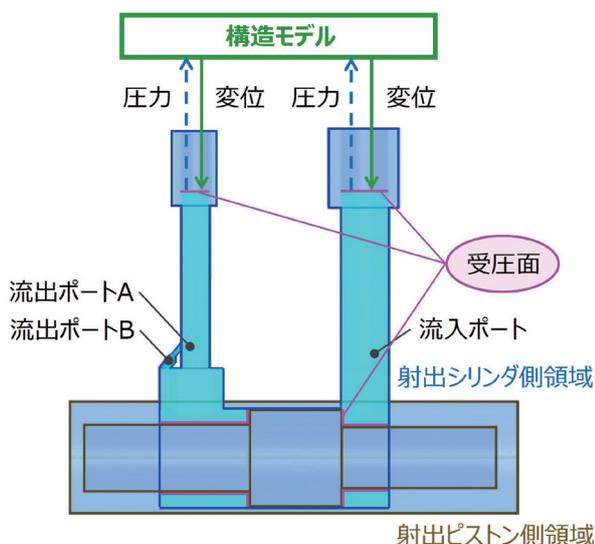


図10 流体モデル

4. 連成解析の検証

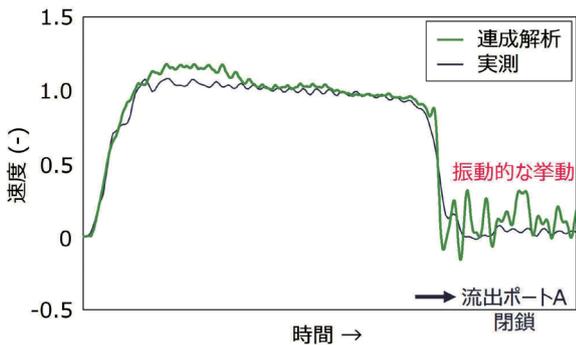
連成解析の妥当性を検証するために、解析結果と実機で計測したデータとの比較を行った。計測にはJLM1300-MGIIeLを用いて、射出スクリュを装着せずに射出ピストンのみで射出動作を行った。結果を図11に示す。比較する項目として、射出ユニットの主たる性能である射出ピストン速度と、射出ピストンの挙動を決める要因となる流入ポート圧力と流出ポートB圧力を選定した。

まず、射出ピストン速度について、最大値は解析の方がやや過大なものの、加速の挙動や定速で動作する領域の挙動はよく一致した。一方で、流出ポートAの閉鎖開始から射出ピストンが停止するまでの挙動については、実機と比較して振動的な挙動となった。

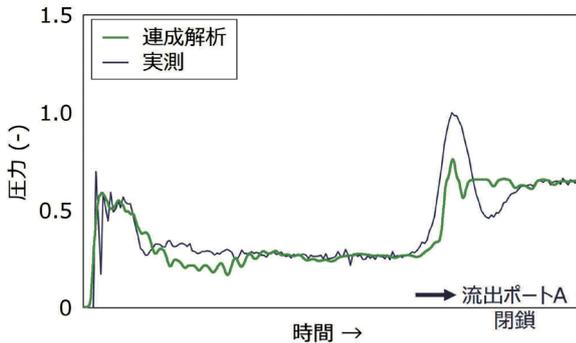
次に、流入ポート圧力と流出ポートB圧力についても、加速の挙動や定速で動作する領域の挙動は比較的よく一致した。一方で、流出ポートAの閉鎖開始から射出ピストンが停止するまでの挙動については、流入ポート圧力の最大値が解析では小さいことに加えて、流出ポートB圧力に振動的な挙動が見られる点が、実測データと乖離していることが分かった。

解析結果と実測に乖離が見られた原因として、流出ポートA閉鎖以降の圧力挙動に乖離が見られたことから、流体モデルで流出ポートAの断面積を時間的に変化させる手法に問題があった可能性がある。また、射出ピストンと射出シリンダの隙間からの漏れ量が少ないと考えたが、流出ポートA閉鎖以降は漏れ量の割合が相対的に大きくなるため、無視できなくなった可能性がある。ただし、実機の隙間寸法は非常に小さく流体モデルのメッシュ分割が難しくなるため、そのままの形状での解析は現実的ではない。そこで、図12に示すように本来より隙間寸法を大きくしたモデルについて、ダルシー則に基づく流動抵抗の補正を加えたナビエ・ストークス方程式を適用することが考えられる。今後、流入・流出ポートの時間的な圧力挙動を表現できるよう解析手法の検討と実機検証を進める。

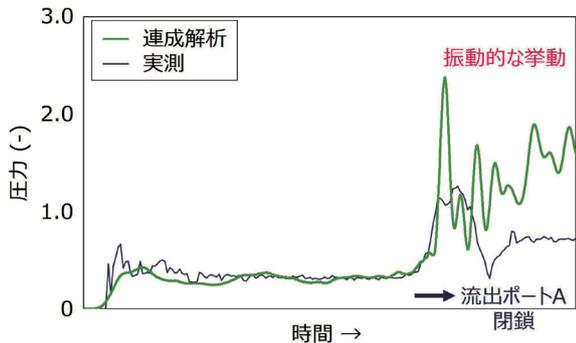
最後に、連成解析の結果例として、射出ピストンの応力状態と流出ポートからの流れの様子を図13に示す。ここで、MG成形機では射出動作時に作動油が瞬間的に高圧になることから、射出ピストンに生じる動的な応力状態を高精度に予測したい、という設計上の要望がある。連成解析では、射出ピストンの動きに合わせて動的な応力状態を表現できることはもちろん、作動油の速度ベクトル等も表示できることから、これまで難しかった機械部品と作動油の相互作用を視覚的に把握することが可能となり、設計を行う上で大きなメリットになり得る。



(a) 射出ピストン速度



(b) 流入ポート圧力



(c) 流出ポート B 圧力

図 11 連成解析と実機の比較

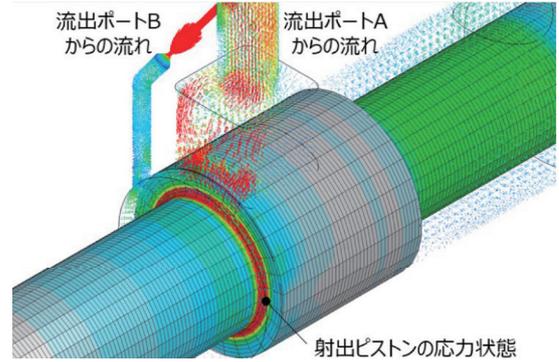


図 13 射出ピストン応力状態と流出ポートの流れ

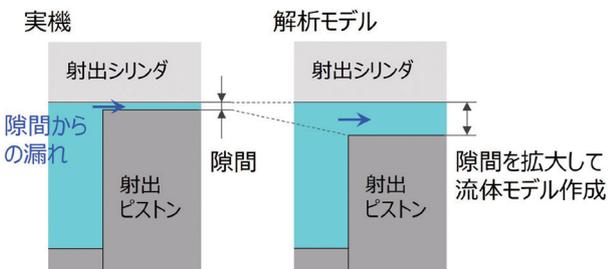
5. 結 言

本開発では、MG 成形機を対象として制御・機構・構造・流体の四要素を連成させた解析技術を構築することで、射出ユニットの動的挙動を表現することを目指した。解析結果と実測を比較して連成解析の妥当性を検証したところ、実機射出ピストンの速度を良好に表現できることを確認した。ただし、射出ピストンの挙動を決める要因となる流入・流出ポートの圧力については、特にブレーキ機構が作動している際の挙動が振動的となり、実測と乖離が見られた、この原因として、ブレーキ機構である流出ポート流路断面積の時間変化の表現に課題があったことが考えられる。また、射出ピストンと射出シリンダの間からの漏れを考慮していなかったことも原因に挙げられる。今後、流入・流出ポートの時間的な圧力挙動を高精度に表現できるよう解析手法の検討と実機検証を進める。

さらに、連成解析で表現した油圧機構の挙動を 1D モデルに落とし込むことで、開発初期段階での数値解析を用いた検討を可能とする。これにより、製品開発の手戻りを防ぎ、開発速度の向上と試作コストの低減を実現した MBD 手法による製品開発プロセスの確立を目指す所存である。

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, <https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/hyouka/haihu108/siryu2-2.pdf> (2014), p. 4
- (2) 山本 透 (編著), 脇谷 伸, 原田 靖裕, 香川 直己, 足立 智彦, 沖 俊任, 原田 真悟: 実習で学ぶモデルベース開発 -『モデル』を共通言語とする V 字開発プロセス-, “モデルベース開発 (MBD)”, pp. 1-14, (株) コロナ社 (2018)
- (3) 菅原 貴弘, 平川 友大, 落岩 崇, 富山 秀樹, 木下 拓矢, 脇谷 伸, 山本 透: “MBD 適用によるマグネシウム合金射出成形機の開発”, 日本製鋼所技報, No. 72 (2021), pp. 7-12



◎ 流動抵抗の補正項を加えたナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{\mu}{\rho K} \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla^2 \mu \mathbf{v}$$

ダルシー則に基づく流動抵抗の補正項 (K : 透過率)

図 12 隙間からの漏れを表現するモデリング