

# MPH法によるアルミニウムダイキャストシミュレーション

Aluminum die casting simulation using MPH method

赤崎健太郎<sup>1)</sup>, 近藤雅裕<sup>1)</sup>, 志賀敬次<sup>1)</sup>

Kentaro Akasaki, Masahiro Kondo, and Keiji Shiga

1) 産業技術総合研究所 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央事業所2群, E-mail: akasaki-kentaro@aist.go.jp)

Die casting is a metal casting process which the molten metal is injected into the mold under high pressure. In the process, the defect formation often occurs by inclusions and solidification shrinkage. For high quality manufacturing, it is effective to simulate the casting process with CFD (Computational Fluid Dynamics) to avoid the defect formation. Since the die casting process includes large deformation of the fluid or free surface flow, the particle method is suitable for simulation. In this study, the die casting process is simulated using MPH (Moving Particle Hydrodynamics) method. Some models, such as heat transfer and phase change, are introduced into the MPH method to reproduce the die casting process.

**Key Words :** Moving Particle Hydrodynamics method, die casting, multi physics analysis

## 1. はじめに

ダイキャストは、溶融した金属（溶湯）を高圧で金型に充填し製品を作る手法であり、アルミニウム製品などの製造に多く用いられている。最近では、自動車のフレームのような大きな製品を一体で鋳造する「ギガキャスト」と呼ばれる鋳造技術も注目を集めており、製造プロセスも大規模化することが予想される。

ダイキャストプロセスにおいては、酸化物などに代表される介在物の巻き込みや、凝固時の体積収縮などにより製品部分に欠陥が生じることが知られており、製品の強度や見た目に影響を及ぼすことから欠陥の発生を抑制することが求められる。特に大規模な製品を製造する場合、不良品の発生による損失も大きなものとなるため、欠陥抑制の重要度は増す一方で、実験による試行錯誤も難しくなる。そのため、CFD (Computational Fluid Dynamics) を活用した製造プロセスの方案検討が有効である。

ダイキャストでは流体の大変形や自由表面を伴うことから、粒子法による解析が適していると考えられる。中でもMPH (Moving Particle Hydrodynamics)法[1-4]は、体積弾性率や粘度が大きな場合でも安定的に計算できる手法であることから、高圧非圧縮の溶湯を扱うダイキャストへ適用することで、欠陥の予測や発生メカニズムの解明、欠陥抑制に向けた製造プロセスの改善などが期待される。

本研究では、MPH-I (MPH for Incompressible flows)法を用いてダイキャストシミュレーションを行う。MPH法に温度解析・相変化などのモデルを導入することで、溶湯の金型への注入から凝固まで連続的にシミュレーションを行い、MPH法のダイキャストシミュレーションへの適用可能性を検討する。

## 2. 手法

MPH法の計算手法については既出文献[1-4]を参照されたい。ここでは、温度解析・相変化モデルについて述べる。

温度解析の支配方程式は、式(1)に示すエネルギー保存則である。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T \quad (1)$$

ただし、 $H$ はエンタルピー [ $J/m^3$ ]、 $\lambda$ は熱伝導率 [ $W/(m \cdot K)$ ]、 $T$ は温度 [ $^\circ C$ ] である。式(1)をMPH法のラプラスアンモデルを用いて式(2)のとおり離散化することで、各粒子のタイムステップごとのエンタルピーを求めることができる。

$$H_i^{k+1} = H_i^k + 2\lambda \Delta t \sum_{j \neq i} (T_j^k - T_i^k) \frac{w'_{ij}}{|r_{ij}|} \quad (3)$$

ただし、 $\Delta t$ は時間刻み幅 [s]、 $w'$ は重み関数の微分、 $|r_{ij}|$ は粒子*i*と*j*の距離であり、右下の添え字は粒子番号を、右上の添え字はタイムステップを示す。

式(2)で求めたエンタルピーから、各粒子の温度を式(3)より求める[5]。

$$\begin{cases} T = T_m + \frac{H - H_0}{\rho C_s} & (H < H_0) \\ T = T_m & (H_0 < H < H_1) \\ T = T_m + \frac{H - H_1}{\rho C_l} & (H_1 < H) \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 $H_0$ は固体の物体が融点に達し、融解が始まる点のエンタルピー [ $J/m^3$ ]、 $H_1$ は液体の物体の凝固が始まる点の

エンタルピー[J/m<sup>3</sup>]であり、 $H_1 - H_0$ が凝固潜熱に相当する。また、 $T_m$ は融点[°C]、 $\rho$ は密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $C_s$ は固体の比熱[J/(kg · K)]、 $C_l$ は液体の比熱[J/(kg · K)]である。エンタルピーと温度の関係を示したグラフを図1に示す。グラフが水平になっている部分では固液共存状態であり、エネルギーの流入出がないあっても温度が変化しない。

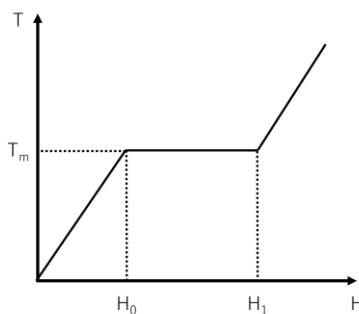


図 1 エンタルピーHと温度Tの関係

また、エンタルピーから固相率を算出し、固相率をもとに式(4)によって粘度を求める[6]。

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 \exp(2.5C\gamma) & (0 < \gamma < 0.7) \\ 1 \times 10^5 & (0.7 < \gamma) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $\mu$ は粘度[Pas]、 $\mu_0$ は液体粘度[Pas]、 $\gamma$ は固相率、 $C$ は定数であり、先行文献より $C=6.4$ とした[6]。固相率の増加に対応して粘度を上昇させることで凝固を表現する。

### 3. ダイキャストシミュレーション

アルミニウムダイキャストを模擬した体系で計算を行った。計算体系を図2に、計算条件を表1に示す。左端のピストンを右方向に1.0 m/sで移動させることにより、右側の金型内に溶湯を射出した。

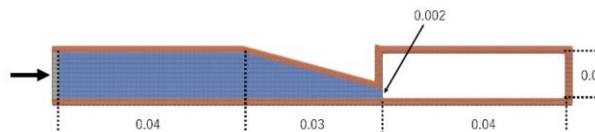


図 2 ダイキャスト計算の計算体系

表 1 ダイキャスト計算の計算条件

Parameter	Value
$\Delta t$ [s]	$5.0 \times 10^{-6}$
Particle Size [m]	$2.5 \times 10^{-4}$
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	2375
Liquid Viscosity [Pas]	$1.2 \times 10^{-3}$
Thermal Conductivity [W/(m K)]	90.7
Melting Point [°C]	660
Specific Heat of Solid [J/(kg K)]	1200
Specific Heat of Liquid [J/(kg K)]	1177
Latent Heat [J/m <sup>3</sup> ]	$9.43 \times 10^8$

溶湯の射出途中、充填完了直後、充填後0.4 sの温度分布を図3に示す。

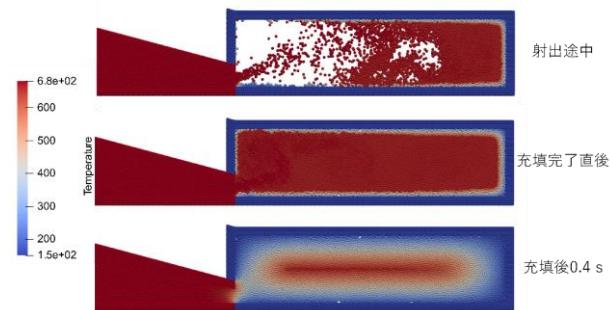


図 3 ダイキャスト計算における温度分布の変化

射出途中の図より、溶湯と比較して温度が低い金型に触れた粒子の温度が下がり、粘度が高くなるためその場にとどまっている様子が確認でき、凝固を表現できていることがわかる。また、時間が経つにつれて溶湯の熱が金型へ移動し、外側から冷却されている様子が確認された。

### 参考文献

- [1] 近藤雅裕, 松本純一: 高粘性非圧縮MPH法を高速化する圧力代入型陰解法, 日本計算工学会論文集, Paper No. 20210016, 2021.
- [2] Kondo, M., Matsumoto, J.: Surface tension and wettability calculation using density gradient potential in a physically consistent particle method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 385, 114072, 2021.
- [3] Kondo, M., et al.: A physically consistent particle method for high-viscous free-surface flow calculation, *Computational Particle Mechanics*, Volume 9, pp.265—276, 2022.
- [4] Kondo, M., et al.: A scalable physically consistent particle method for high-viscous incompressible flows, *Computational Particle Mechanics*, Volume 11, pp. 511—527, 2024.
- [5] Kawahara T., Oka, Y.: Ex-vessel molten core solidification behavior by moving particle semi-implicit method, *J. Nucl. Sci. Tech.*, Volume 49, Issue 12, pp. 1156—1164, 2012.
- [6] Yokoyama, R., et al.: Investigation of the Outflow and Spreading-Solidification Behaviour of Stratified Molten Metal, *J. Nucl. Eng.*, Volume 2, Issue 2, 168—189, 2021.