

粒子法と有限体積法を連成させた鋳造解析

Casting Analysis with Coupling Particles Method and Finite Volume Method

久保田哲行¹⁾, 風間正喜²⁾, 諏訪多聞³⁾

Tetsuyuki Kubota, Masaki Kazama, Tamon Suwa

1) 博(理) エフサステクノロジーズ株式会社 (〒212-0014 神奈川県川崎市幸区大宮町1-5 JR川崎タワー, E-mail: t.kubota@fujitsu.com)

2) 博(理) エフサステクノロジーズ株式会社 (〒212-0014 神奈川県川崎市幸区大宮町1-5 JR川崎タワー, E-mail: kazama.masaki@fujitsu.com)

3) 博(理) エフサステクノロジーズ株式会社 (〒212-0014 神奈川県川崎市幸区大宮町1-5 JR川崎タワー, E-mail: suwa.tamon@fujitsu.com)

A casting analysis technique coupling the particle method and Finite Volume Method (FVM) is described. Molten metal behavior and temperature is calculated by particles method using the distribution of air velocity obtained by FVM to reduce computation time. Two examples are demonstrated, one is air cooling of casting, and another is metal melting by high-temperature airflow.

Key Words : Casting, Coupling Analysis, SPH, FVM, OpenFOAM

1. はじめに

鋳造プロセスは溶融した金属(溶湯)を鋳型に充填して成型するプロセスであり、製造業において広く用いられている。鋳造プロセスは複雑な形状の製品を大量に製造できる一方で、プロセスの設計においては溶融時間短縮・充填時の空気巻き込み・冷間シャットの抑制・凝固時の内部欠陥発生・熱収縮による形状変化など、多くの考慮しなければならない課題がある。近年、軽量化等の目的で金属製品が薄型化しており、鋳造プロセスの設計において上記の課題解決のためシミュレーション技術がより重要となってきた。

鋳造プロセスのシミュレーションでは移動境界や自由表面をもつた流体挙動を精度よく計算する必要がある。メッシュを使ったオイラー型では、特に鋳造製品の薄肉部ではメッシュの作成が困難な場合があり、十分な計算精度を得るためにメッシュ作成に多くの時間がかかる。そのため、我々はメッシュを必要としない粒子法をベースとした鋳造解析向けのシミュレーション技術の研究開発を行っている[1]。

鋳造に関連するプロセスには鋳型や製品の空冷や熱風による金属の溶融などがある。そのようなプロセスをシミュレーションする場合、溶湯の挙動に加えて空気の流れを考慮する必要がある。粒子法は上記のようなメリットはあるものの、空気の流れのように自由表面の無い流体の解析は有限体積法等のオイラー型と比較して計算時間が長くなる傾向にある。そのため、溶湯の挙動は粒子法、空気の挙動は有限体積法でシミュレーションする事で計算時間を短くする事が可能だと考えられる。本研究ではメッシュベースの流体解析ができるオープンソースソフ

トウェア(OSS)と粒子法を連携する事で、空気の影響を考慮した鋳造シミュレーション技術の開発を行った。流体解析のOSSとしてはOpenFOAMを用いた。本稿ではその事例を示す。

2. 粒子法

粒子法では連続体である流体の運動を粒子の集合体で表現する。本研究では粒子法の1つの手法であるSmoothed Particle Hydrodynamic法(SPH法)を用いた。以下に示すように、溶湯を準圧縮性流体として取り扱う。

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu(T) \left(\frac{\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^t}{2} \right) \right) \quad (2)$$

$$p = c^2(\rho - \rho_s(T)) \quad (3)$$

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\kappa \nabla T) \quad (4)$$

ここで、 t , ρ , \mathbf{v} , p , c , ρ_s , μ , T , u , κ はそれぞれ時間、密度、速度、圧力、音速、基準密度、粘性係数、温度、内部エネルギー、熱伝導係数を示す。(1)-(4)の基礎方程式をSPH法によって下記のように離散化する。

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b) \cdot \frac{\partial W(|\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b|, h)}{\partial \mathbf{x}_a} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = & - \sum_b m_b \left(\frac{p_a + p_b}{\rho_a \rho_b} \right) \frac{\partial W(|\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b|, h)}{\partial \mathbf{x}_a} \\ & + \sum_b \frac{4m_b}{\rho_a \rho_b} \left(\frac{\mu_a \mu_b}{\mu_a + \mu_b} \right) \left(\frac{(\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b) \cdot (\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b)}{|\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b|^2} \right) \\ & \cdot \frac{\partial W(|\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b|, h)}{\partial \mathbf{x}_a} + \mathbf{g} \end{aligned} \quad (6)$$

$$p_a = c_s^2 (\rho_a - \rho_{a,0}(T_a)) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{du_a}{dt} = & -4 \sum_b \frac{m_b}{\rho_a \rho_b} \frac{\kappa_a \kappa_b}{\kappa_a + \kappa_b} \frac{T_b - T_a}{|\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b|} (\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b) \\ & \cdot \frac{\partial W(|\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b|, h)}{\partial \mathbf{x}_a} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで, x , m , g はそれぞれ, 位置, 質量, 重力加速度を示す. 添え字の a および b は粒子番号を示す. W は着目粒子から他粒子への重み付けを表すカーネル関数である.

溶湯の凝固収縮現象には Cleary の方法を用いている [2]. $\rho_{a,0}(T_a)$ は圧力が 0 となる場合の密度で, 温度低下により増加する. 式(5)は連続の式であり, 密度は粒子間の距離に依存するようになっている. これによって, 式(7)の $\rho_{a,0}(T_a)$ が温度低下により増加すると粒子の持つ圧力が低下し, 式(6)の右辺第1項の圧力勾配項によって粒子が凝集する方向に力を受ける. これによって凝固による収縮現象を表現している. さらに(2)式に示すように粘性係数は温度に依存しており, 温度低下に伴い粘性係数が増大する事で粒子間の相対速度を低減させる. それによって, 凝固による変形しにくさを表現している.

また, 溶湯表面の酸化膜や空気巻き込み等を計算する事で, 鋳造プロセスをシミュレート可能にしている [3].

図-1 に溶湯を容器に流し込むシミュレーションの例を示す. 自由表面を持った溶湯の挙動が計算できている. また, 図-2 に厚さ 5mm, 幅 500mm 程度の板金の鋳型内に充填される溶湯の挙動と温度分布を示す. このように薄い流路であっても粒子法では安定に計算が可能である. 溶湯を鋳型に高速で押し込む際に溶湯が飛沫として飛散する挙動がとらえられている.

3. 有限体積法と粒子法の連成

鋳造プロセスにおける熱輸送には鋳型と溶湯間の熱伝達や, 空気と溶湯や鋳型の間の熱伝達がある. それらのうち, 空気との熱伝達は空気の流れによる熱伝達を促進する効果がある. そのため, 鋳造プロセスのシミュレーションのためには空気の流れによる熱輸送の計算が必要となる. 本研究では 2 章で示した粒子法ソフトウェアと汎用の有限体積法流体解析ソフトウェアである OpenFOAM を連成させる事で空気の流れを有限体積法, 溶湯の挙動を粒子法で計算できるようにした.

OpenFOAM によって空気の流れを計算し, そこから得られた空気の速度分布を用いて粒子法で空気の温度変化

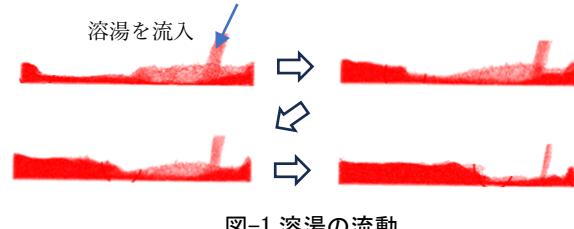


図-1 溶湯の流動

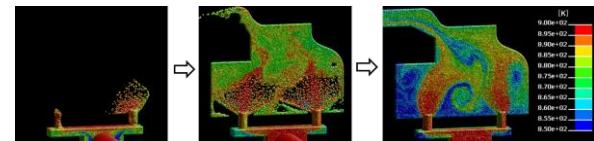


図-2 鋳型内への溶湯の充填挙動と温度分布

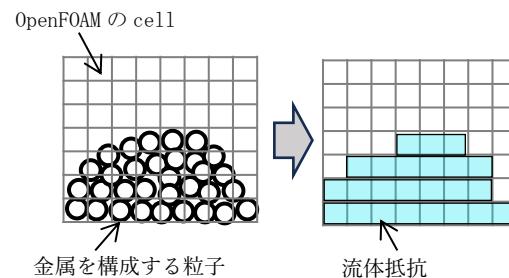


図-3 粒子法から OpenFOAM への粒子位置のマッピング

や金属と空気間の熱伝達を計算した. そこから得られた金属表面の熱流を粒子法における金属温度の計算に利用した. これによって, 鋳物や鋳型が空気によって加熱や冷却される場合の計算を行えるようにした.

粒子法で得られた粒子の分布を OpenFOAM に受け渡す方法を図-3 に示す. 粒子位置に相当する OpenFOAM の cell に対して十分に大きな流体抵抗を与える, かつ流速を 0[m/s] とした. 粒子位置の OpenFOAM の cell を抜き去って内部境界とする事も可能であるが, 簡便な方法を用いる事で処理の高速化を図っている. OpenFOAM から得られた流速を粒子法に受け渡す際には, 対象粒子に近接する cell の流速を粒子位置に内挿補間し粒子の流速としている.

4. 計算事例

有限体積法の OpenFOAM による流体解析によって計算

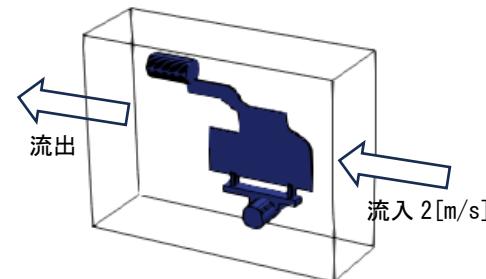


図-4 流体解析における境界条件

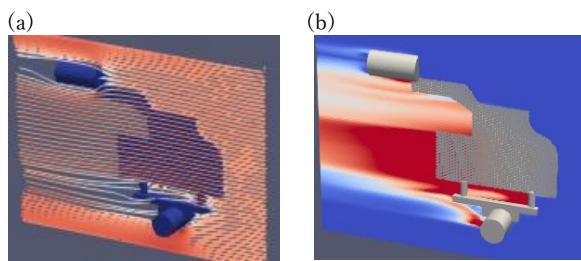


図-5 鋳物周辺の気流
(a) OpenFOAM で計算された流入面からの流線. (b) 粒子法で計算された温度分布

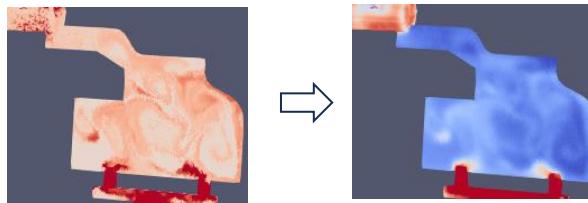


図-6 鋳物の温度分布の時間変化

した空気の速度分布を粒子法に転送し熱輸送を粒子法で計算した事例を示す. 流体解析の境界条件を図-4に示す. 鋳物を囲む直方体の1つの面に流入速度2[m/s]を設定し, 反対の面に流出境界条件を設定する. その他の面は流速0[m/s]の壁面とする. 鋳物の初期温度は図-2で示した鋳型への溶湯の充填解析で得られた温度分布を用いた. 図-5に鋳物周辺の気流を示す. 図-5(a)はOpenFOAMで計算された流入面からの流線であり, 図-5(b)はOpenFOAMから得られた空気の速度分布を用いて粒子法で計算された空気の温度分布である. 粒子法において熱の移流拡散が再現できている. 図-6に鋳物の温度変化を示す. 热の移流拡散によって, 温度が下降する結果を得られた.

また, 高温の熱流束によって金属塊を溶融するシミュレーションを実施した. その計算条件を図-7に示す. それぞれの熱源から温度2187.6[K]の空気が速度4.7[m/s]で流入する. これによって, 溶融炉内の金属塊が溶融する. その計算結果を図-8に示す. OpenFOAMで得られた速度分布を粒子法に導入し, 金属塊が溶融する様子をとらえる事が出来ている.

5. まとめ

本研究では鋳造プロセス向けの粒子法シミュレータに有限体積法の流体解析ソフトウェアを連成させる事で, 粒子法と有限体積法の双方の長所を生かした鋳造解析ができるようにした. これを用いて, 鋳物の空冷や高温の気

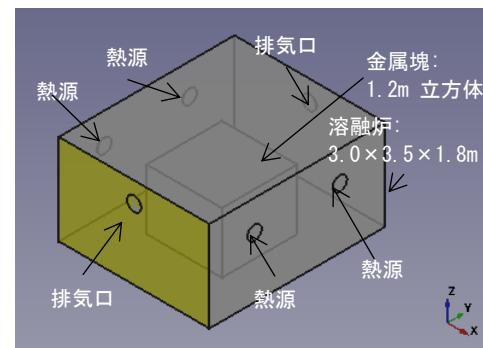


図-7 金属溶融解析の条件

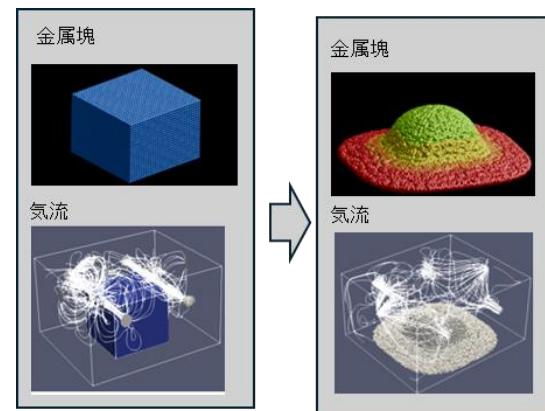


図-8 金属塊の溶融

流による金属の溶融がシミュレート出来る事を示した. 今後, 鋳造工程における他のプロセスにも適用を広げていく.

参考文献

- [1] Kazama, M., Suwa, T., Maeda, Y.: Modeling and Computation of Casting Process by Particle Method, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol 28, No 7, PP3941–3949, 2019.
- [2] Cleary, P.W.: Extension of SPH to Predict Feeding Freezing and Defect Creation in Low Pressure Die Casting, *Appl. Math. Model.*, Vol.34, pp.3189–3201, 2010
- [3] 諏訪 多聞, 風間 正喜, 畠中 耕平, 小笠原 圭太, 前田 安郭, SPH法シミュレーションによる酸化膜と気泡の欠陥に関する解析手法の開発とその応用, 鋳造工学, 2020, 92 卷, 6 号, p. 285-289
- [4] <https://www.openfoam.com/>
- [5] <https://openfoam.org/>