

〈一般研究課題〉 アルミニウム合金ダイカストのラドル注湯及び
プランジャ射出時の熱流動挙動

助成研究者 大同大学 前田 安郭



アルミニウム合金ダイカストのラドル注湯及び プランジャ射出時の熱流動挙動

前田 安郭
(大同大学)

Dynamic Behavior for Ladle Pouring and Plunger Advancing in Aluminum Alloy Die Casting

Yasuhiro MAEDA
(DAIDO University)

Abstract :

The ladle pouring and plunger advancing processes are parts of the die casting with high speed, good quality, and mass production. The molten metal is quickly poured into the sleeve by tilting the ladle and immediately injected into the die cavity with high speed and high pressure by advancing the plunger. Since the entrapment of air and the generation of the solidified layer in the ladle pouring may cause defects in cast products, it is necessary to simulate the ladle pouring behavior.

In the present study, the pouring experiment into the sleeve using die casting aluminum alloy JIS-ADC12 is carried out to observe the flow behavior by tilting the ladle. Further, the molten aluminum alloy is injected into the cavity from the sleeve by advancing the injection plunger. The flow behaviors in ladle pouring and plunger advancing of molten aluminum alloy are simulated using "COLMINA CAE," the casting analysis software by particle method SPH. The experiments and simulation are executed with the shot time lag, which is the interval from the finish of ladle pouring to the start of the plunger advancing and plunger speeds. Wave behavior obtained by simulation almost agreed with the actual phenomena. Flow and heat transfer simulation using the SPH method with a function of the oxide film is an effective method that the ladle pouring and plunger advancing of molten aluminum alloy with the free surface flow can be simulated accurately.

Key words: Ladle pouring, plunger advancing, Wave behavior, Molten metal, Oxide film, SPH

1. はじめに

ダイカストは高速・高圧で溶湯をキャビティ内へ射出する生産性、寸法精度の優れた鑄造法である[1][2]。ダイカストプロセスにおいて、アルミニウム合金溶湯はラドル傾動によりスリーブに注入され、直後にプランジャが前進することでキャビティ内へ高速に射出される。しかしラドル注湯の際に溶湯の乱れが発生し、空気巻き込みが発生することがある。また、プランジャ射出において不適切なプランジャ速度は空気の巻き込みや破断チルによる欠陥を誘発すると言われている [3][4]。ラドル注湯およびプランジャ前進プロセスの動作条件を決定するために、ダイカストのプロセスシミュレーションを行うことは非常に有用と考えられる。しかし、ラドル傾動とプランジャ前進プロセスは移動境界問題であるため、従来のオイラー系手法でのシミュレーションでは難しく、粒子ベースのシミュレーションを実行する必要がある[5]-[7]。

本研究では、ダイカストにおけるスリーブへの注湯とプランジャ射出工程におけるアルミニウム合金溶湯の流動を、ラドル傾動による注湯の終了からプランジャの前進を開始するまでの間隔であるショットタイムラグとプランジャ速度を変化させて、直接観察する。またSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)粒子法ソフト、「COLMINA CAE」[6][7]を用いた流動挙動シミュレーションを解析することで欠陥抑制の知見を得ることを目的とする。

2. 可視化実験

2.1 実験条件

本研究で使用する実験装置概要をFig.1に示す。装置はラドル、ガラス管スリーブ、仮想キャビティ、プランジャ、電動アクチュエータ、ラドル傾動装置、パソコン、ビデオカメラから構成されている。直接可視化のためガラス管スリーブを採用している。ガラス管スリーブは、厚さ2mm、内径41 mm、長さ250 mmである。

実験条件をTable 1に示す。供試材には300g(スリーブ充填率33.7%)のダイカスト用アルミニウム合金ADC12を使用した。溶湯初期温度は680℃、ラドル傾動速度は0.28rad/sで固定し、ショットタイムラグを1, 2sと変化させて、またプランジャ前進速度を120, 180mm/sと変化させた。ラドル注湯からプランジャ射出までの一連のダイカストプロセスを高速度カメラ(120fps)で直接可視化した。

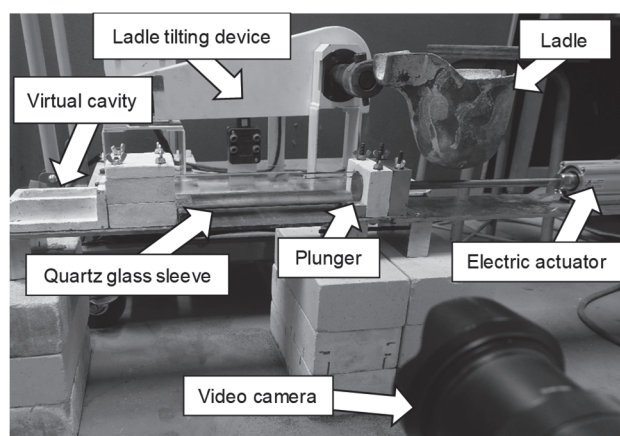


Fig.1 実験装置概要

2.2 可視化実験による流動挙動

Fig.2にラドル注湯終了から射出までの区間におけるアルミニウム溶湯流動を示す。図はラドル注湯終了を時刻ゼロとして、ショットタイムラグ1sと2sにおける流動挙動の比較である。ここで、

キャビティと接続されるスリーブ左側をビスケット側、右の前進するプランジャ側をプランジャ側と呼ぶ。図より、傾動終了後の0.5sまでは残流で溶湯が注がれており、1sにおいてはビスケット側およびプランジャ側で中央部より高い波高が観察される。この波高は2sになるとほぼ解消できており、もし波を抑制してからプランジャを前進させるならば2sのショットタイムラグが必要である。しかし、ショットタイムラグの増加は溶湯の温度低下、ひいてはチル層の生成および破断チル欠陥の誘発に繋がる恐れがあり好ましいとは言いがたい。

Fig.3にショットタイムラグ2sにおけるプランジャ前進中のスリーブ内の流動挙動を示す。

プランジャ前進速度は120mm/sと180mm/sで、プランジャ位置で比較してある。プランジャの前進に伴い、30mm位置でプランジャ前に波高ができ、その波はプランジャの進行に伴ってビスケット側まで移動し跳ね返り、プランジャまで戻ってきて押し返している。プランジャ位置150mmでプランジャ前進速度の違いを観察すると、前進速度120mm/sでは、ビスケット側で波高が高く、プランジャ前に空間ができている。すなわち、この状態では、溶湯が先にキャビティへ流入して、その後にプランジャ前の空気が流入することになって空気巻き込み欠陥になる可能性が高く、不適切な射出と考えられる。一方、前進速度180mm/sでは、プランジャ前の波高が高く、ビスケット側に空間がある。ゆえに先に空気をキャビティへ流入させてから溶湯を射出することになり、良好な射出条件であると言える。なお、先に流入した空気はキャビティに設けられたエアバントより先に排出されるので問題はない。

この結果は、1つの条件下での知見に過ぎず、適切なラドル傾動条件、ショットタイムラグ、プランジャ前進速度などを決めるためには、熱流動シミュレーションの活用が必要と考えられる。

Table 1. 実験条件

Test material	Aluminum Alloy, JIS-ADC12
Pouring temperature [°C]	680
Amount mass of materials [g]	300
Ladle tilt time [s]	5.0
Ladle tilting speed [rad/s]	0.28
Shot time lag [s]	1.0, 2.0
Plunger advancing speed [mm/s]	120, 180

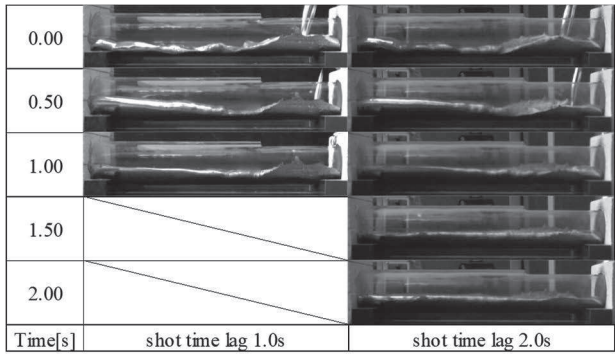


Fig.2 ショットタイムラグが波高挙動に及ぼす影響

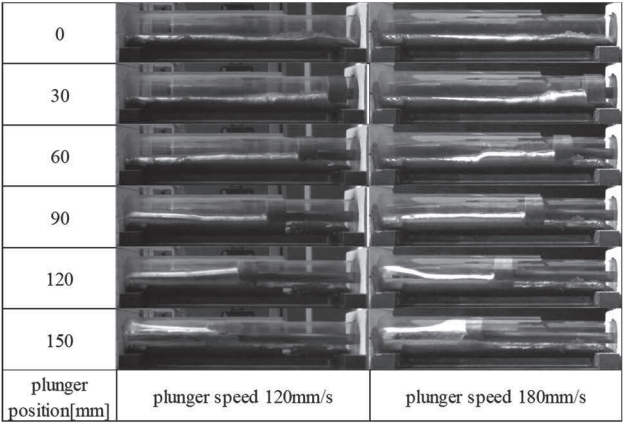


Fig.3 プランジャ前進速度が流動挙動に及ぼす影響

Table 2 計算条件

SPH software	COLMINA CAE
Particle size [mm]	1.0
Total number of particles	1,360,000
Influence radius	3.0 times of particle size
Parameter for Sonic Speed [m/s]	20

3. SPHシミュレーション

3.1 計算条件

富士通製COLMINA CAE [6][7]によるシミュレーションにより、実験で得られた流動挙動の再現を試みた。なお、COLMINAは移動境界問題の解法に適していると言われるSPH粒子法に基づいており、また著者らとの共同研究で開発した酸化膜モデルを導入している。

計算条件をTable 2に示す。またダイカスト用アルミニウム合金ADC12の物性値をTable 3に、酸化膜パラメータをTable 4に示す。酸化膜パラメータは、表面張力では考慮できない溶融合金の流動性の鈍さを表現するものであり、また酸化膜は破れることもあるため、破壊と再生成を再現するパラメータ[7]も組み込まれている。一例として、粘度を変化したときの結果、ラドルからの注湯シミュレーションをFig.4に示す。粘度の変化により流出する時間が変わることがわかる。今回は、酸化膜の粘度として27.28[kPa]を採用することにした。

3.2 シミュレーションによる流動挙動

Fig.5に、ショットタイムラグ1s、プランジャ前進速度120mm/sにおける流動挙動を示す。図はスリーブ正面からの観察結果で、ラドル傾動開始を時刻ゼロにしており、傾動開始後4.0～4.4sで溶湯がスリーブに注がれはじめる。注湯は5sで終了し、5s～6sはショットタイムラグ区間で、6sからプランジャは前進をはじめる。全体の流動挙動を比較すると、シミュレーション結果はほぼ実験結果を再現できていると考えられる。これはCOLMINAに搭載された酸化膜パラメータが有効に機能しているためである。

Table 3 供試材の熱物性値

Density [kg/m ³]	2480(Liquid phase), 2680(Solid phase)
Specific heat [J/(kg·K)]	1080(Liquid phase), 960(Solid phase)
Thermal conductivity [W/(m·K)]	96(Liquid phase), 237(Solid phase)
Latent heat [J/kg]	396800
Viscosity [Pa·s]	2.728×10 ⁻³
Surface tension [N/m]	0.886

Table 4 COLMINAの酸化膜パラメータ

Thickness of oxide film [μm]	0.1
Viscosity of oxide film [kPa·s]	27.28
Breakdown pressure of oxide film [Pa]	2000
Regeneration time of oxide film [s]	0.02

2728Pa·s					
27280Pa·s					
272800Pa·s					
Time[s]	1.5	2.0	2.5	3.0	3.2

Fig.4 酸化膜の粘度パラメータを変化させたときのラドルからの流出挙動

4.00		
4.40		
4.80		
5.20		
5.60		
6.00		
6.40		
6.80		
7.20		
7.60		
8.00		
Time[s]	Experimental results (front)	Simulation result (front)

Fig.5 ショットタイムラグ1s、プランジャ前進速度120mm/sにおける流動挙動の比較

次に、同条件下における、ラドル注湯、ショットタイムラグ、プランジャ前進と繋がる一連のスリーブ内波高の経時変化をFig.6に示す。ラドル注湯直後4.2s～5.5sで波高が生成され、その後ショットタイムラグの6sまでで減衰し、プランジャが前進をはじめると波高は上下運動(波はプランジャとピスケット間の往復運動)をして、8s手前でプランジャ上部まで充満する挙動が示されている。シミュレーション結果でもほぼ同じ波高挙動を再現できているが、5s付近に相違が見られる。これは、スリーブ壁に付着する溶湯挙動を再現できていないこと、

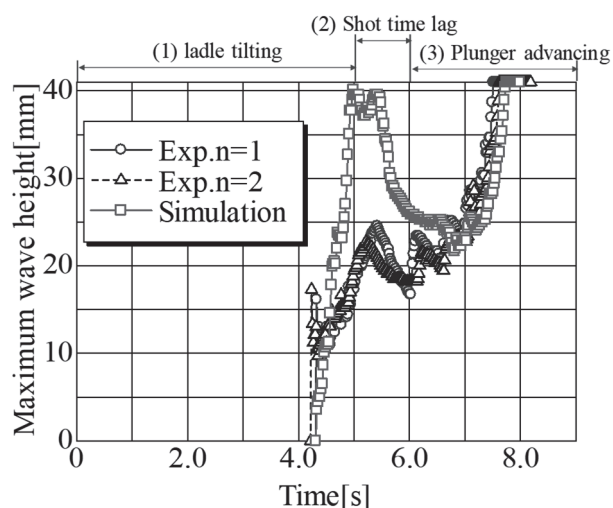


Fig.6 ショットタイムラグ1s, プランジャ前進速度120mm/sにおける波高変化の比較

現在の酸化膜パラメータがラドル傾動に注目してチューニングしたためと考えられる。パラメータのチューニングに関しては、今後検討して行きたいと考えている。

本研究の結果から、移動境界問題の解析に有効な粒子法ベースのシミュレーションを用いることで、ラドル傾動、ショットタイムラグ、プランジャ前進と繋がる一連の流動挙動をシミュレーションできたことは大きな進歩である。加えて酸化膜パラメータの有効性も必要であることがわかった。ダイカストのプロセス条件を決定する有効なツールになると考えられる。

4. まとめ

本研究では、ラドル注湯およびプランジャ前進中のアルミニウム合金溶湯の熱流動挙動を直接観察し、またSPH粒子法ソフトウェア「COLMINACAE」を用いてシミュレーションを行い、以下のことを明らかにした。

- 1) ショットタイムラグを大きくすることで、波高が減衰する。波高の減衰は空気巻き込み欠陥抑制効果として有効と考えられる。一方、波高を抑制するにはある程度の時間が必要であり、ショットタイムラグは溶湯温度を低下させスリーブ内にチル層を生成させるため、破断チル欠陥の危惧が高まる。
- 2) プランジャ前進速度を変化させると、プランジャ前進中のスリーブ内の空気閉じ込め挙動が変化した。空気巻き込み欠陥を抑制するには、この挙動をシミュレーションで把握し、制御する必要があると考える。
- 3) 粒子法シミュレーションによって得られた波高挙動はほぼ実験と一致した。酸化膜モデルが有効的に作用した結果と考えられる。まだ酸化膜パラメータのチューニングが完全ではないので、今後の調整が必要である。

参考文献

- [1] 日本鑄造工学会ダイカスト研究部会：“高品質保証ダイカスト鑄造技術”，日本鑄造工学会，研究報告91, (2003), p.1

- [2] 持田泰, 蓮野昭人, 風間正喜, 諏訪多聞, 前田安郭: “粒子法によるダイカスト薄肉湯まわり解析”, 日本ダイカスト会議論文集, (2018), JD18-21, pp.107-110
- [3] 岩堀弘昭, 戸沢勝利, 浅野高司, 山本善章, 中村元志, 橋本正興, 上西始郎: “アルミニウムダイカスト鑄物に存在する破断チル層の性状”, 軽金属, 34(1984), pp.525-530
- [4] 前田安郭, 野村宏之: “アルミニウム合金ダイカストにおける破断チル層の生成と移動の数値実験”, 鑄造工学, 78(2006), pp.654-660
- [5] 杉原拓実, 前田安郭: “粒子法によるダイカストショットスリーブ注湯時の伝熱と波動シミュレーション”, 鑄造工学, 92(2020), pp.272-277
- [6] 風間正喜, 諏訪多聞, 前田安郭: “酸化膜モデルを用いたアルミニウム注湯の粒子法シミュレーション”, 鑄造工学, 90(2018), pp.68-74
- [7] 諏訪多聞, 風間正喜, 畠中耕平, 小笠原圭太, 前田安郭: “SPH粒子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”, 鑄造工学, 92(2020), pp.285-289