

3 湯流れ解析による自動注湯パラメータの評価

柏井茂雄, 兼吉高宏, 野崎峰男

1 目的

注湯速度は鋳物の品質を大きく左右する重要な要素であり、製品ごとに適切な注湯作業が要求される。このため手作業による鋳造では、熟練作業者が微妙に注湯速度を変化させ、鋳型への溶湯流入をコントロールしている。一方、量産鋳物を中心に自動注湯機が広く普及しているが、自動注湯においても製品ごとの注湯速度の設定が必要である。しかし、注湯速度の微妙な設定は試行錯誤で行われている場合がほとんどで、多くの時間と労力を必要としているのが現状であり、このことが少量、中量生産での利用を制限している。熟練者の注湯挙動をシミュレーションし、取鍋の傾動速度関数（注湯パラメータ）を自動注湯装置に設定することができれば、短時間で自動注湯装置の最適設定が可能であると考えられる。

そこで本研究では、自動注湯パラメータ最適化システムの開発を目的とし、熟練作業者および自動注湯機の注湯速度の測定と、湯流れ解析による注湯作業のシミュレーションを行い、これらを比較することで注湯パラメータを評価する方法を検討した。

2 実験方法

2.1 注湯速度の測定

注湯速度の測定は、約6kgの銅合金を熟練作業者と自動注湯機により鋳造し、鋳造中の取鍋の重量変化を記録することにより行った。熟練作業者の注湯速度の測定には、（独）産業技術総合研究所が開発した注湯速度測定装置を用いた。その作業外観を図1に示す。



図1 注湯速度測定装置

また、自動注湯機としては共同研究者の丸三工業（株）で開発、実用化されている多点式・小取鍋式自動注湯機を用いた。図2に自動注湯装置を示す。



図2 多点式・小取鍋式自動注湯機

2.2 自動注湯機のパラメータ

自動注湯機では、取鍋の傾動角度0度～90度を3分割し、回転角度 $\theta_1 \sim \theta_3$ 、回転速度パラメータ $w_1 \sim w_3$ の6種類のパラメータを用いて注湯速度を制御している。各パラメータは、熟練者が鋳込んだ場合の鋳込み時間を元に試行錯誤により決定され、鋳込み重量に応じて細かく設定されている。

自動注湯機の注湯速度は、るつぼの角度 θ と角速度 ω または回転時間 t ($t = \theta / \omega$) により決定される。自動注湯機では ω 値を直接与えるのではなく、駆動モータの回転速度 w で指定する。このため、湯流れ解析、熟練作業者の注湯速度から注湯パラメータを設定するためには θ 、 ω 、 t と w の関係を明らかにする必要がある。角度 θ における角速度 ω は式1で与えられる。

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{24}{57k} w \cos^2(45 - \theta) \quad (1)$$

k は装置定数（本実験では57.5）

また、角度 $\alpha \sim \beta$ まで回転速度 w で回転させた場合の所要時間は式2で求められる。

$$t = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{\omega} d\theta = \frac{57k}{24w} [\tan(45 - \alpha) - \tan(45 - \beta)] \quad (2)$$

式1、2から θ 、 ω 、 t 、 w の相関を求め、湯流れ解析と熟練作業、自動注湯機による注湯速度の測定結果と

を比較した。

2. 3 湯流れ解析

鋳型が傾動しながら注湯する傾斜鋳造法の湯流れ挙動の解析には、重力方向を時間と共に変化させる方法が開発、利用されている。そこで本研究においても重力方向を取鍋の回転角度 θ と速度 ω にあわせて変化させることで、取鍋からの注湯状態をシミュレーションした。解析のモデルを図3に示す。左側半球状の器は取鍋であり、直方体の形状はダミーの鋳型である。注湯速度は、ダミー鋳型への溶湯の流入重量変化を調べることにより求めた。また表1に解析条件を示す。解析には市販の鋳造シミュレーションソフトウェアJSCAST（（株）クオリカ）を用いた。

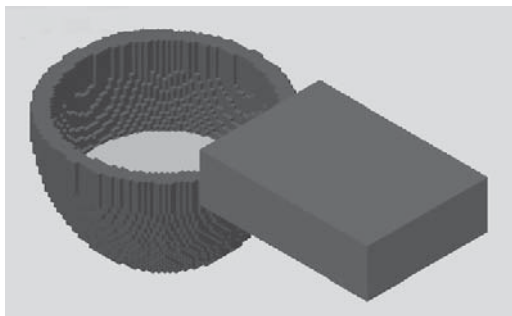


図3 湯流れ解析モデル

表1 湯流れ解析条件

要素分割	総物数	鋳物部重量	最大溶湯重量
4mm 正方メッシュ	430000 要素	13kg	24kg

鋳造合金	鋳込み重量	境界条件	動粘性係数
JIS BC6 (銅合金)	4~8.5kg	自由表面境界	0.01cm ² /s

3 結果と考察

湯流れシミュレーションによる各傾斜角度における取鍋からの流れ状態を図4に示す。取鍋は水平状態から傾斜を開始するが、最初は溶湯は鋳型内に流入しない。図3の解析の場合、溶湯は47.7度で流入を開始した。自動注湯機では θ_1 に流入開始角度を設定し、 $0 \sim \theta_1$ までを比較的速い速度で回転させる。流入開始角度は溶湯量、すなわちつぼにおける湯面高さにより変化する。この角度はシミュレーションにより容易に求めることができ、その結果を表2に示す。自動注湯機で使われている θ_1 の値と比較したところ、シミュレーションにより求めた θ_1 より大きな値であった。

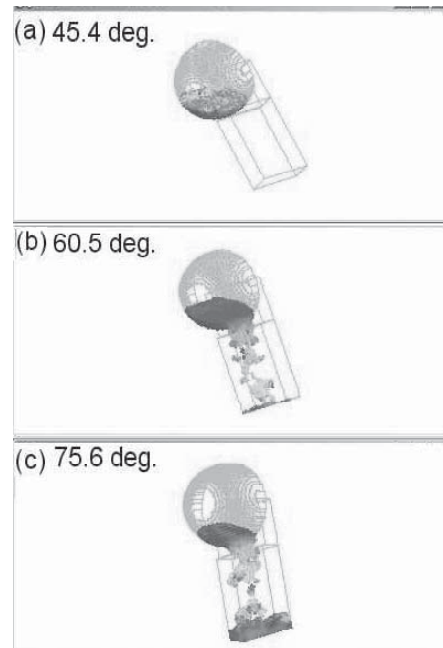


図4 AUTO-01の湯流れシミュレーション結果

表2 シミュレーションにより求めた流入開始角度

溶湯重量 (kg)	流入開始角度 θ_1 (度)
4.0	54.6
5.5	51.2
6.5	47.7
7.1	46.6
8.5	43.0

次に、シミュレーションによる熟練作業者による注湯作業の評価を行った。自動注湯機の場合と同様に、角度と回転速度を3段階に変化させてシミュレーションを行った。実測結果とシミュレーション結果が最も一致した時のパラメータを表3に示した。さらに、シミュレーションにより求めた取鍋内の溶湯重量変化（注湯速度）と熟練者の注湯作業の測定結果の比較を図5に示す。シミュレーションと実測結果は良く一致している。

表3 シミュレーションに用いたパラメータ

解例No	角度(度)			回転速度(%)			回転時間(s)			鋳込み時間(s)	
	θ_1	θ_2	θ_3	w1	w2	w3	t1	t2	t3		
解例1	AUTO-01	48	70	90	21	4.8	8	2.07	2.41	2.51	7.00

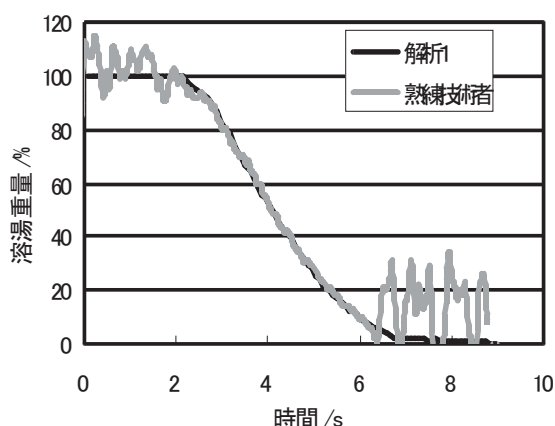


図5 シミュレーションと熟練作業者の
取鍋内の溶湯溶湯重量変化の比較

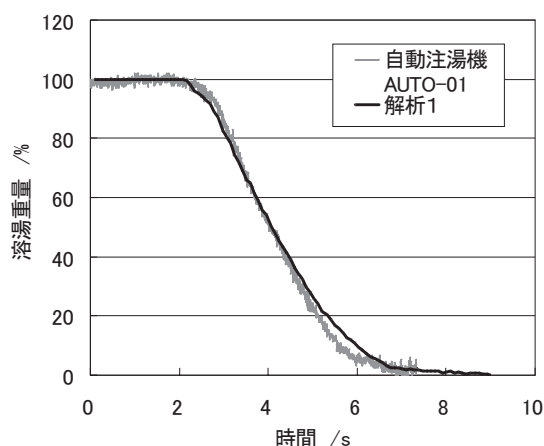


図6 シミュレーションと自動注湯機の
取鍋内の溶湯溶湯重量変化の比較

次に、表3で示したパラメータを用いた時の自動注湯機の取鍋内の溶湯重量変化の測定結果とシミュレーション結果の比較を図6に示す。大まかな傾向は両者で一致しているため、シミュレーション結果から自動注湯機の制御パラメータを設定できることがわかった。一方、自動注湯機の注湯速度はシミュレーションに比較して後半で速くなっている。すなわち、熟練者の注湯作業を測定しシミュレーションで注湯パラメータを設定した場合、熟練作業者の場合に比較して自動注湯機の注湯速度が、後半で速くなることを示している。このシミュレーションと自動注湯機実測値とのずれについて、次の原因が考えられる。

- ① 自動注湯装置では角速度 ω は θ の関数で角度とともに変化するが、シミュレーションでは ω は θ に依存せず、設定角度範囲で一定として設定している。
 - ② るつぼ形状のロットによるばらつき、および使用中に溶損による形状変化
 - ③ シミュレーションの立方体要素分割の影響
- ①については今後ソフトウェアの改良で対応は可能であり、②③については影響が少ないと考えられる。ただし、シミュレーションと熟練作業者の注湯速度の測定結果が良く一致していることから、むしろ自動注湯機の手動制御系の精度や機械的精度も無視できないことから、自動注湯機の手動制御の再調整を行うことにより改善されると考えられる。

以上の結果、熟練作業者の注湯作業からシミュレーションによりパラメータを求め、自動注湯パラメータの評価および設定が可能であることがわかった。

4 結 論

熟練作業者の注湯状態を測定し、その結果を基にシミュレーションにより自動注湯パラメータを設定する方法を検討した結果、次のことが明らかとなった。

1. シミュレーションにより流入開始角度 θ 1の評価が可能である。
2. 自動注湯機のパラメータを用いて、熟練者の注湯作業をシミュレーションにより再現でき、両者の結果は非常に良く一致した。
3. 自動注湯機の注湯速度は、注湯後半で湯流れシミュレーションより速くなる傾向を示したが、大まかな傾向は両者で一致しており、シミュレーションによる自動注湯パラメータの設定が可能である。

(文責 柏井茂雄)

(校閲 富田友樹)