

熱パラメータ取得技術の開発 (第2報) 2 局所熱伝達を考慮した鋳造金型の温度シミュレーション

寺山 朗、筒本隆博、森下勇樹

Temperature Analysis using Local Heat Transfer Coefficient in Aluminum Metal Casting

TERAYAMA Akira, TSUTSUMOTO Takahiro and MORISHITA Yuki

ADC12 aluminum alloy was cast using a sleeve-shaped mold, and temperature changes in the molten metal and inside the mold were measured. Interfacial heat transfer coefficient (HTC) between the casting and the mold was calculated by inverse analysis of the temperature profiles using two different heat transfer models. Using the HTC, the temperature analysis of the mold was performed to investigate the error between the measured and calculated temperatures. The obtained HTC varied with time and location. The HTCs calculated with the two heat transfer models showed generally similar behavior, but slightly different values. Temperature simulation with HTC varying with time and location had smaller error values between measured and calculated temperatures compared to simulation results with constant HTC. The error value was the smallest when the HTC obtained from the three-dimensional heat transfer model was used.

キーワード：鋳造温度シミュレーション、スリーブ状金型、熱伝達係数

1 緒 言

金属のダイカストや樹脂の射出成形など、金型を用いた熔融成形は短時間に複雑形状の部品を大量生産できる製法として、自動車をはじめとした工業分野で広く応用されている。その生産設計にはシミュレーションが活用されており、実成形を精度良く反映した解析結果を求めることが極めて重要となっている。温度解析の精度向上には溶湯と金型間の伝熱状態を表す熱伝達係数(Heat Transfer Coefficient、HTC)を適正に設定することが必要である。しかし、HTCは溶湯と金型の接触状態によって変わるため、時間と場所により変化し、適正な値を事前に予測することが難しい。このため、定まった設定指針も存在しない。このため、各種鋳造条件がHTCに及ぼす影響について数多く調査され、鋳物厚さ¹⁾、金型表面粗さ²⁾及び合金種³⁾などの因子がHTCに影響し、ミクロな接触状態とHTCの関係などの伝熱メカニズム解明も進んでいる。著者らもHTCの導出方法や各種鋳造条件下でのHTCを求め、成形圧力や離型剤がHTCに及ぼす影響を報告してきた⁴⁾。

これら報告の多くは溶湯と金型の接触界面近傍のみをモデル化し、一次元非定常伝熱を仮定してHTCを求めたものである。しかし、実際の成形における伝熱は三次元的である。さらに、HTCを求める本来の目的である、温度シミュレーションに測定したHTCを導入して解析精度を検証した報告は皆無である。このため計算で得られたHTCの妥当性は明らかでない。

本研究では、まずアルミニウム合金を金型鋳造し、溶湯及び金型内部の温度測定を実施した。HTCは場所と時間により変化するため、複数箇所の温度変化を測定した。得られた温度から一次元と三次元的な熱流を考慮した二つの伝熱モデルを用いてHTCを求めた。それらHTCを温度シミュレーションに適用して解析精度を調べ、場所と時間によって変わるHTCの導入及びHTC計算方法が温度解析精度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2 実験方法

2.1 鋳造及び溶湯と金型内部の温度測定方法

図1(a)に鋳造に用いたスリーブ状金型(SKD61製)の模式図を示す。この金型の湯口から750℃で溶解したアルミニウム合金ADC12を充填率50%まで注湯し、溶湯及び金型内部の複数点の温度を測定した。温度測定点は図1(a)中の①～⑫の位置とした。それぞれの位置について図1(b)に示すように溶湯内部から金型の厚み方向に向かって、溶湯内1点及び金型内2点に熱電対を設置し、合計で3点×12箇所、36点の温度を測定した。

2.2 HTCの計算方法

金型内部の熱伝導のみを考慮し、温度計算結果と実際の温度履歴を照らし合わせ、それらの差が最小になるように溶湯-金型間のHTCを決めた。金型内の熱伝導計算には、次に示す一次元と三次元の熱流を考慮した二つのモデルを用いた。

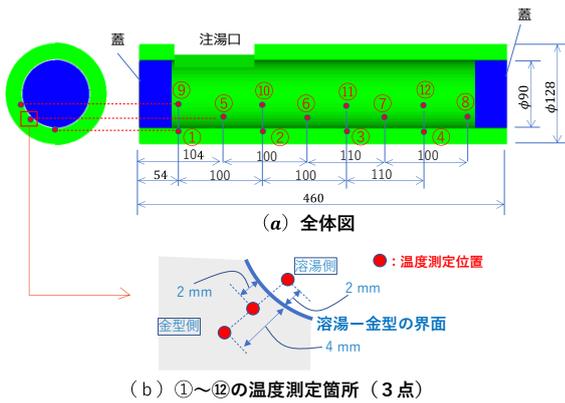


図1 スリーブ状金型と温度測定位置

2.2.1 一次元熱伝導モデル

図1に示した①~⑫位置の HTC をそれぞれ求める。各位置の3点の温度測定箇所の近傍を一次元非定常熱伝導と仮定する。図2に計算で用いた伝熱モデルを熱等価回路表示で示す。 T_c 、 T_m 及び T_{mf} は3点の測定温度を、 C_m は金型の熱容量を示している。 λ_c と λ_m は溶湯と金型の熱伝導率で、 $\Delta r = 4 \times 10^{-3}m$ である。

各時間における溶湯側の温度 T_c 及び金型側の温度 T_{mf} は実測温度に固定し、金型の表面付近の温度 T_m の時間変化のみを考える。温度の時間変化は式(1)に示す円筒座標系の一次元非定常熱伝導方程式で表される。

$$C_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \dots (1)$$

式(1)の時間微分項を前進差分で、空間微分項を中心差分で離散化した数式により、金型の表面付近の温度 T_m を計算した。ここで λ は熱伝導率であるが、溶湯から金型への熱移動には、溶湯と金型間の HTC である h を含む熱伝導率 λ' の式(2)を用いた。

$$\lambda' = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_c} + \frac{1}{2\lambda_m} + \frac{1}{h\Delta r}} \dots (2)$$

鑄造開始から0.1秒ごとに各時間の h を推定した。鑄造開始時の実測温度を初期条件として h の値を変化させて次のタイムステップの各接点温度を計算する。次のタイムステップの実測温度と計算温度の誤差が最小となる h を求めた。この手順で鑄造開始から60秒間における①~⑫の温度測定位置12点の HTC ($h_1 \sim h_{12}$ とする)の変化をそれぞれ求めた。

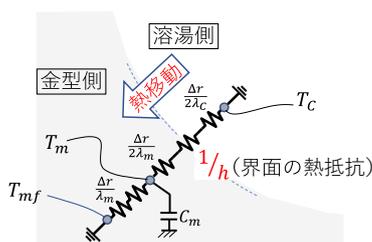


図2 一次元伝熱モデルの熱等価回路

2.2.2 三次元熱伝導モデル

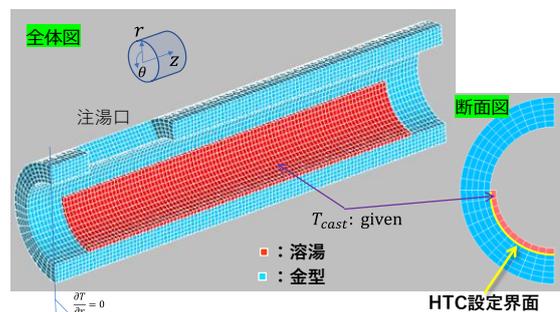
三次元熱伝導モデルでは、実際の金型を模した形状として図3に示す金型の1/2軸対称モデルを使用した。当初は溶湯内部の熱伝導計算も試みたが、対流の影響等により誤差が大きくなったため、2.2.1と同様に溶湯温度は測定温度を与え、そのタイムステップにおける溶湯の温度変化は考慮せず、金型内部のみの熱伝導を計算することとした。図3中のモデル表面の白線が要素境界を示しており、当該モデルの要素数及び要素長さは表1の通りである。金型内部の温度変化は式(3)に示す円筒座標系の三次元非定常熱伝導方程式で表される。

$$C_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots (3)$$

式(3)を一次元モデルと同様に離散化した式により各要素の温度変化を計算した。HTCの定義は2.2.1に示した内容と同様に式(2)を導入した。HTCは溶湯と金型が接触している要素界面(1,140点)全てに異なる値を設定した。 $h_1 \sim h_{12}$ の12点のみ HTC を指定して、残りの HTC (h_{ip} と表す)は式(4)にて12点の h から内挿補間した。

$$h_{ip} = \frac{\sum d_i h_i}{\sum m d_i} \dots (4)$$

d_i は、 $h_1 \sim h_{12}$ の HTC を設定した位置とそれ以外の HTC を設定する界面位置間の距離であり、 m は重みパラメータで $0 < m < 1$ である。なお、金型内面のうち、溶湯と接しない上半分については、溶湯表面からの放射による加熱も考慮して計算した。一次元伝熱モデルと同様に鑄造開始から0.1秒刻みで各時間の $h_1 \sim h_{12}$ を推定した。金型内の全実測温度24点に対して計算温度の誤差が最小となる時の $h_1 \sim h_{12}$ を求めた。



アルミ溶湯により加熱される金型の温度分布のみを計算 (溶湯-金型のHTCを変えて 実測温度との誤差が最小になるときのHTCを探す)

図3 三次元伝熱モデル

表1 三次元伝熱モデルの要素数及び要素長さ

全要素数	Δr	$\Delta \theta$	Δz
14,315	$4 \times 10^{-3}m$	$\pi/24 \text{ rad}$	$4 \times 10^{-3}m$

2.3 HTC を用いた金型温度の熱伝導シミュレーション及び実測温度との比較評価

2.2で求めたHTCを用いて温度シミュレーションし、実測温度と比較して解析精度を確認した。比較のため、HTC を時間と場所に依らず一定値とした場合も計算した。計算モデルは図3に示した金型の1/2軸対称モデルとし、金型内部のみの熱伝導計算を実施した。温度解析精度は金型内部の24点の実測温度 T_{mes} と同位置の計算温度 T_{cal} の差として、式(5)にて平均絶対誤差 \bar{E} を評価した。

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum |T_{mes} - T_{cal}| \dots (5)$$

以上の2.2.1~2.3で示した計算にはC言語で作成したプログラムを使用した。

3 実験結果及び考察

3.1 HTC 計算結果及び溶湯の凝固挙動

図4に一次元モデルで得られたHTCの経時変化を示す。いずれの場合も鑄造開始後からHTCが上昇し、ピーク値となった後から徐々に低下する傾向がある。しかし、値や経時変化は測定位置により異なっており、時間や場所によってHTCが異なることが確認できた。ここには図示しないが、温度測定結果と照らし合わせると、注湯したアルミ溶湯が到達したタイミングを境にHTCは上昇し始めることが分かった。HTCがピーク値の後に徐々に低下することについて、Loulouら³⁾は溶湯表面が凝固を開始することで溶湯と金型表面の界面に物理的に隙間が生じて伝熱量が低下するためと推定している。本実験結果において、各位置のHTCが低下し始めるタイミングの溶湯表面温度を確認すると、おおむね580℃付近または550℃付近のいずれかであった。これらの温度はそれぞれADC12の液相線及び共晶点に該当することから、HTCの挙動は溶湯の凝固と関係すると推測される。

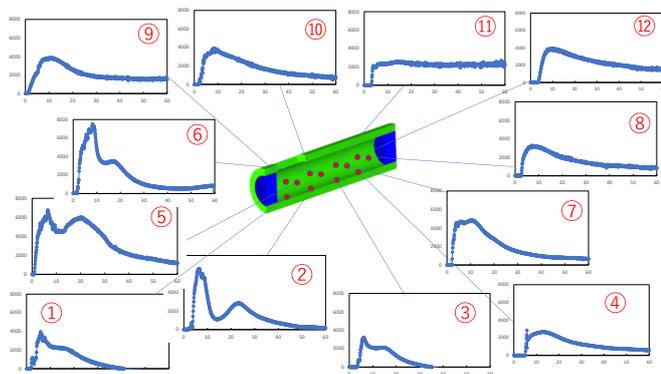


図4 一次元モデルで得られたHTCの経時変化

次に物性計算ソフトJ-Mat Proで算出したADC12の温度-固相率の関係から、①~⑫の溶湯測定温度を固相率に変換した。図5に各位置の固相率を示す。縦軸の0が液相率100%を、1が固相率100%を示している。注湯口から遠い③、④、⑦及び⑧の位置は他の位置に比べて早く固相率が高くなり凝固が進行している。溶湯が金型内を流動する間に脱熱されるため、注湯口から遠く流動距離が長い位置ほど溶湯温度が低くなると考えられる。HTCが低下する時間帯では、凝固により界面に隙間が生じたと仮定し、この隙間の厚さについて考える。鑄物表面(溶湯が凝固した表面)と金型表面の接触部分をミクロ的に見た場合、物理的に接触している部分と隙間が生じている部分のどちらも存在すると考えられるが、ここでは①~⑫の各位置における隙間の厚さを相対的に比較するため、界面は空気で満たされた一定の隙間を介して鑄物側から金型側へ伝熱していたと想定し、式(6)で隙間厚さ t_{air} を見積もった。

$$t_{air} = \frac{\lambda_{air}}{h} \dots (6)$$

λ_{air} は空気の熱伝導率で、 h は一次元伝熱モデルで得られたHTCである。図6に隙間厚さ t_{air} の経時変化を示す。HTCが低下し始める鑄造開始後10秒からの結果を示している。いずれの位置でも t_{air} は時間の経過とともに増大する傾向がある。また、注湯口から遠く、図5から凝固タイミングが早い③、④及び⑧等の位置が最も t_{air} が大きくHTCは低くなる傾向があることが分かった。なお、より詳細には凝固解析を含めた確認が必要である。

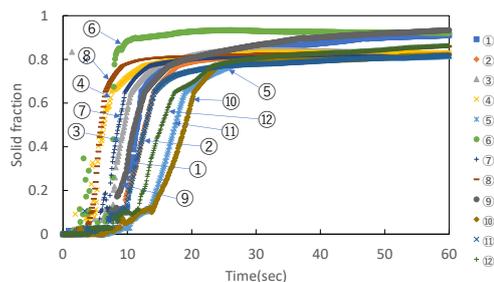


図5 溶湯の固相率に及ぼす位置の影響

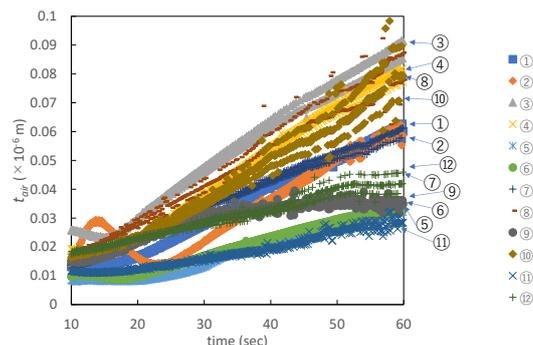


図6 t_{air} の変化に及ぼす測定位置の影響

3.2 伝熱モデルの違いが解析精度に及ぼす影響

図7に一次元伝熱モデル及び三次元伝熱モデルで計算した HTC の経時変化を並べて示す。おおむね似た挙動を示しているが、一次元伝熱モデルで得られた HTC の値は全体的に高く、三次元伝熱モデルが低い値を示していることが分かった。

図8に一次元モデル及び三次元モデルで計算した HTC を用いて金型の熱伝導シミュレーションをした場合の実測温度と計算温度の誤差 \bar{E} の経時変化を示す。なお比較のため、HTC を時間と場所によらず一定(溶湯が到達するまでは $h=0 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、溶湯到達後は $h=1,000 \text{ W/m}^2\text{K}$ 一定値)として温度解析した場合の \bar{E} も図中に示している。一次元伝熱モデル及び三次元伝熱モデルで求めた HTC を使ってシミュレーションした場合はどちらも HTC 一定とした場合よりも \bar{E} が小さくなっている。ここに示す HTC を $1,000 \text{ W/m}^2\text{K}$ で一定とした場合以外にも $h=500\sim 3,000 \text{ W/m}^2\text{K}$ の範囲でシミュレーションしたが、いずれも同様に \bar{E} が大きくなる傾向があった。よって、場所と時間によって HTC は変化し、温度解析精度は HTC を正確に予測することで向上できると分かった。さらに、三次元伝熱モデルで得られた HTC を使えばより \bar{E} が小さくなることから、金型の径方向だけの伝熱を考慮した一次元モデルよりも、周方向と長手方向の伝熱も考慮した三次元モデルで得られた HTC を使ったほうが、より実態に近い温度計算となり、解析精度が向上したと考えられる。

図9に(a) HTC を一定($h=1,000 \text{ W/m}^2\text{K}$)とした場合と(b) 三次元伝熱モデルで得られた HTC を用いて温度シミュレーションした場合の鑄造後 30 秒の金型温度分布を示す。(a) HTC 一定とした場合は、溶湯と触れていた金型の下半分の温度が均一的に上昇している。一方で(b)は温度分布が均一でない。図8から三次元伝熱モデルの HTC で計算すると \bar{E} が小さくなるため、(b)の方がより実態に近い温度分布と考えられる。①~⑫の溶湯と金型界面を通過した熱量を計算した結果、注湯口直下の溶湯が最初に金型に接触する①及び⑤等の位置では金型が受け取る熱量が大きく、このため当該部分の金型の計算

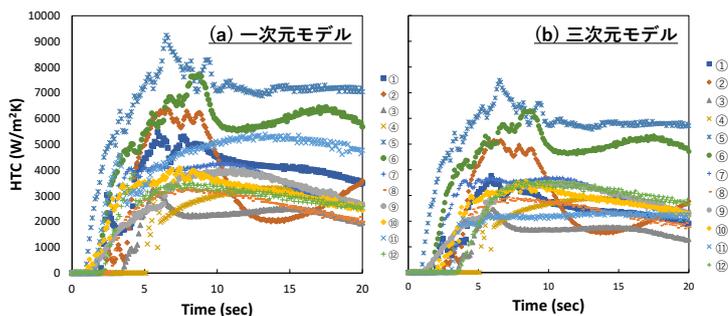


図7 HTC に及ぼす伝熱モデルの影響

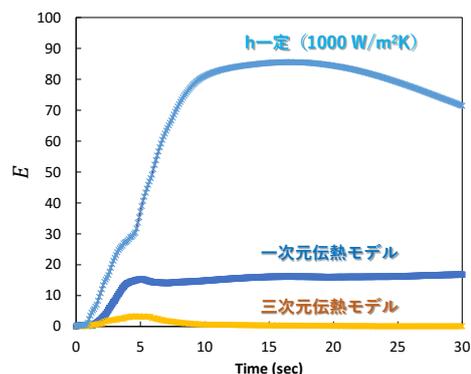


図8 \bar{E} に及ぼす伝熱モデルの影響

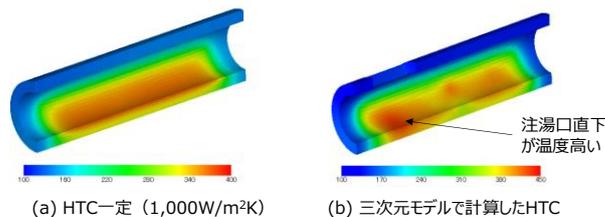


図9 金型の温度分布に及ぼす HTC の影響

温度が特に上昇したのと考えられる。

4 結 言

スリーブ状金型にアルミニウム合金を鑄造し、溶湯及び金型内部の温度変化から異なる2つの伝熱モデルを用いて HTC を算出し、それら HTC を用いて温度シミュレーションして解析精度を調べた結果、以下の結論が得られた。

- (1) 鑄造実験により測定した温度から HTC を計算した結果、時間と場所によって HTC は異なることが確認できた。
- (2) 2つの伝熱モデルで計算した HTC は、おおむね似た挙動であったが若干異なる値となった。
- (3) 時間と場所によって HTC を変化させて温度シミュレーションすると、HTC 一定とした場合と比べて温度解析の精度を向上できた。三次元伝熱モデルで得られた HTC を用いた場合が最も計算誤差を小さくできた。

文 献

- 1) A. Hamasaiid et.al., J. Manufacturing Processes, 47(2019) 229
- 2) F. Wang et.al., J. Thermal Science, 152(2020) 106300
- 3) T. Loulou et.al., Heat Mass Transf., 42 (1999) 2129
- 4) 寺山: 日本鑄造工学会中四国支部会報”こしき”, 45(2022) 24