

鑄造企業におけるデジタル技術高度化に向けた取組（第1報）

3 鑄造用砂型の熱伝導率測定方法の検討

寺山朗、長岡孝、藤本直也、尾津俊介

Thermal conductivity measurement of a Casting Sand Mold

TERAYAMA Akira, NAGAOKA Takashi, FUJIMOTO Naoya and OZU Shunsuke

Methods of measuring the thermal conductivity of a sand mold were investigated. Thermal conductivities of an inorganic mold were measured at various temperatures ranging from 20°C to 740°C using two methods: the transient hot wire method (HWM) and a parameter optimization technique (POT). In the POT, molten pure aluminum was poured into the sand mold, and temperature changes inside the molten metal and the sand mold were measured. The thermal conductivities at various temperatures of the sand mold were optimized to match the results of the temperature analysis with the measured temperature changes. Between 100 and 600°C, the thermal conductivity ranged from 0.1 to 0.3. However, its values below 100°C and above 600°C were higher than those values. Temperature analysis using the measured thermal conductivity showed that the error between the measured and calculated temperatures could be smaller than when the thermal conductivity was assumed to be a constant value.

キーワード：鑄造シミュレーション、砂型、見かけの熱伝導率

1 結 言

鑄造は溶融した金属を型に流し込み凝固させ、複雑形状の金属部品を大量生産できる。欠陥(巣、割れなど)の発生を防ぎ高品質な製品を製造するためには最適な鑄造方案を選択する必要がある、この方案設計に鑄造シミュレーション(鑄造CAE)が活用されている。

広島地域では2024年から県の関連機関である、ひろしまデジタルイノベーションセンター(HDIC)が“鑄造CAE塾”を主催し、地場鑄造企業のCAEを活用した競争力強化・デジタル化を支援している¹⁾。西部工業技術センターも当該活動を技術的にサポートしてきた。CAE活用では、実態と合致した高精度なシミュレーション結果を得ることが重要である。正確な温度を計算するには、溶湯や型の熱伝導率や比熱などの熱物性値の適正化が必要である。溶湯の熱物性値は物性計算ソフトによって比較的正確な値を見積もることができる。一方で、鑄造用の砂型は砂粒子と粘結材で構成されており、これらの種類や配合、充填密度なども考慮すると無限に組み合わせが存在するため、各条件で作製した砂型をそれぞれ測定し、物性値取得する必要がある。

砂型の熱伝導率(砂型は骨材である砂粒子、粘結材および空隙で構成される不均質材料であるため、ここでは“見かけの熱伝導率”と表現する)測定に関して、二宮と片島²⁾は熱線法で測定した結果を報告している。福迫³⁾は砂型に注湯した際の砂型内部の温度変化を熱伝導方程式の解析解と照らし合わせて、見かけの熱伝導率を推定する方法(注湯法)を報告している。砂型の見かけ

の熱伝導率測定は盛んに報告されてきたが、測定方法の違いが測定値に及ぼす影響や、測定値を温度解析へ適用した結果について詳細に検討した報告は少ない。

本研究では、二つの方法で砂型の見かけの熱伝導率を測定した。得られた値を比較するとともに、測定値を用いて簡易的な温度解析を実施し、解析精度を評価した。

2 砂型の見かけの熱伝導率測定方法

見かけの熱伝導率の測定には、熱線法と注湯法を選択した。測定用の砂型は自硬性鑄型とした。珪砂と無機粘結材を混練したものを後に示す各測定方法に適した試験片形状に成形し、二酸化炭素ガスを流し込むことで硬化させた。次に砂型の見かけの熱伝導率の測定方法を説明する。

2.1 熱線法

熱線法の模式図を図1に示す。円柱状の砂型試験片を二個成形し、これらを重ねた間に熱線を挟み込む。熱線を通電して加熱し、熱線の温度変化を測定する。熱伝導率 λ は式(1)から算出した。砂型の見かけの熱伝導率を測定した報告によると、砂型に含まれる粘結材等が加熱によって分解や変質すると考えられるため、顕著な温度依存性が確認されている²⁻⁴⁾。本研究でも、温度依存性

$$\lambda = \frac{I^2 R}{4\pi \Delta\theta} \times \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (1)$$

I : 電流値

R : 熱線の電気抵抗

$\Delta\theta$: $t_1 \sim t_2$ までの熱線の温度上昇

$t_1 \sim t_2$: 任意の時間

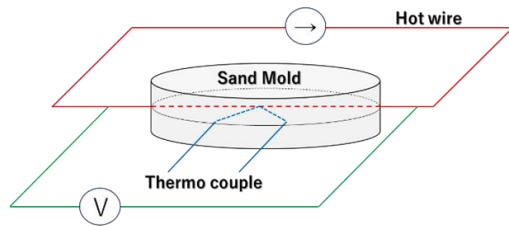


図1 熱線法の模式図

を確認するため試験温度範囲は $20^{\circ}\text{C} \sim 740^{\circ}\text{C}$ として、約 100°C 刻みで見かけの熱伝導率を求めた。これらの試験は、電気炉内に試験片を設置して実施した。

2.2 注湯法

円柱状鋳物の鋳造中の型内温度を測定するため、熱電対を埋め込んだ砂型を作製した。当該型の概略を図2に示す。この型に 800°C で溶解した純アルミニウム(純度 99.9%)を注湯し、 $\phi 100\text{ mm}$ で高さ 80 mm の鋳物を作製した。その際の砂型内部 17 点(図2の①～⑬、⑮)および溶湯内部 4 点(図2の⑭～⑯)、合計 21 点の温度変化を測定した。砂型内部の正確な測温位置を知るため、鋳造後の型ばらし時に各熱電対の埋め込まれていた位置を測長した。図2には測長して得られた砂型および溶湯内部の温度測定位置も示している。測温位置の座標を表1に示す。

溶湯および砂型内部の温度変化を熱伝導方程式の数値解と照らし合わせ、砂型の見かけの熱伝導率を算出した。久保と大中ら⁴⁾は溶湯および砂型内部の 8 点の温度を測定し、一次元非定常熱伝導方程式の数値解と合致するように、鋳型の見かけの熱伝導率を最適化して求めている。本研究では、溶湯および砂型内部の熱伝導による二次元的な熱移動を考慮することとした。図2に示した形状の溶湯および砂型内部の温度変化は、式(2)に示す円筒座標系の二次元非定常熱伝導方程式で表される。

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

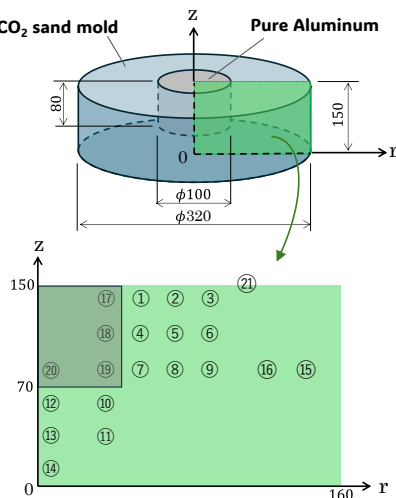


図2 注湯法で用いた砂型形状と測温位置

式(2)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、溶湯および砂型内部の温度 T を計算した。なお、溶湯の凝固計算については、温度回復法を用いた。溶湯の固相率を g_c とすると、液相線温度 T_c からの低下量 ΔT を用いて、計算ステップにおける凝固率の変化量 Δg_c は溶湯の比熱 C_c と凝固潜熱 L を用いて式(3)から得られる。

$$\Delta g_c = C_c \Delta T / L \quad (3)$$

g_c が 1 になると凝固は完了したのものとして、液相線以下への温度低下を許容した。表2に計算に用いた物性値を示す。本方法では、 $0 \sim 700^{\circ}\text{C}$ における見かけの熱伝導率を 50°C 刻みで求めることとして、離散点の間は線形補完することとした。砂型の見かけの熱伝導率 $\lambda^m(T)$ は以下の式で表される。

$$\lambda^m(T) = \begin{cases} \lambda_0, & T = T_0, \\ \lambda_i + \frac{\lambda_{i+1} - \lambda_i}{50} (T - T_i), & T_i < T < T_{i+1}, \quad i = 0, 1, \dots, 13, \\ \lambda_{14}, & T \geq T_{14}. \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $T_i = 50i$ ($i = 0, 1, \dots, 14$) および $\lambda_i = \lambda^m(T_i)$ である。鋳造開始時間を t_0 、終了時間を t_f として $t_0 \leq t \leq t_f$ の溶湯および砂型内部温度を数値解として求めた。その際に、見かけの熱伝導率 $\lambda^m(T)$ に異なる値を代入して繰り返し計算し、実測温度との誤差が最も小さくなる砂型の見かけの熱伝導率を求めた。21 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 1 点当たりの平均絶対誤差 $\bar{E}$ を求め、これを最適化における目的関数とした。

$$\bar{E} = \frac{1}{21 \times t_f} \sum_{n=1}^{21} \sum_{t_0}^{t_f} \{ |T_{mes}^{n,t} - T_{cal}^{n,t}| \} \quad (5)$$

最適化において、初期値を変化させて計算をすると、得られる解も変化した。最適化するパラメータの数が合計 15 個 ($\lambda_i, i = 0, 1, \dots, 14$) と多く、無数に局所解が存在するものと予想された。そこで、2.1 に示した熱線法で求めた温度依存の見かけの熱伝導率値を初期値として選択

表1 温度測定位置の座標

No.	r	z	No.	r	z
①	50.5	120	⑪	47	67.5
②	51	125	⑫	0	88
③	53	122	⑬	0	89
④	50.5	108	⑭	0	140
⑤	53	108	⑮	72	93
⑥	55	108	⑯	66	100
⑦	51	80	⑰	48	139
⑧	54	80	⑱	48	104
⑨	55	80	⑲	48	76
⑩	47	68.5	⑳	0	70
			㉑	80	149.5

表2 温度計算条件および計算に用いた物性値

—	Initial temperature of casting(°C)	800
—	Initial temperature of sand mold(°C)	11
t_f	Calculation end time(s)	3500
C_c	Specific heat of casting(J/kgK)	1176
C_m	Specific heat of sand mold(J/kgK)	900
L	Latent heat of casting(J)	387×10^3
ρ_c	Density of sand mold(kg/m ³)	1180
λ^c	Thermal conductivity of casting(W/mK)	220

し、最適化を実施した。 $\bar{E}$ が最小となる場合の λ_i を求め、これを注湯法における見かけの熱伝導率とした。

2.3 簡易温度解析

測定した見かけの熱伝導率を温度解析に入力し、解析精度向上の効果を確認した。解析モデルは注湯法で用いた図2のモデルとした。熱線法で求めた値を用いて熱伝導計算し、解析温度と実測温度の誤差を式(5)で評価した。比較のため、熱伝導率を0.1 W/mK~0.75 W/mKの一定値とした場合も同様に計算した。

3 実験結果

3.1 見かけの熱伝導率測定結果

(1) 熱線法

図3に熱線法で求めた見かけの熱伝導率を示す。温度によって値は若干異なり、温度依存性があることがわかる。見かけの熱伝導率は、0.2 W/mK程度の値となっている。20 °Cと740 °Cでは、それよりも少し高くなり、0.3 W/mK程度である。

(2) 注湯法

図4に注湯法で求めた砂型の見かけの熱伝導率を示す。グラフには、 λ_i ($i = 1, 2 \dots 13$)の値をプロットしている。

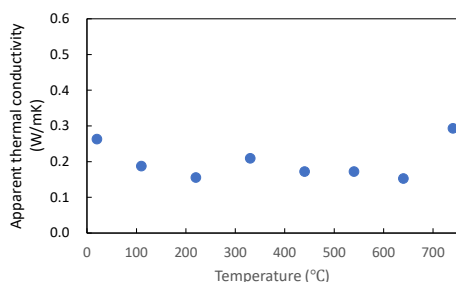


図3 熱線法により求めた砂型の見かけの熱伝導率

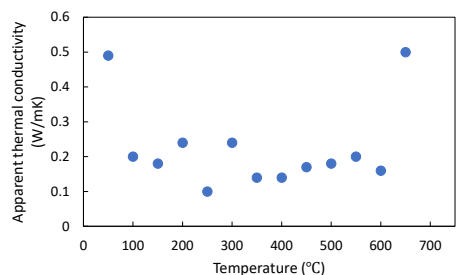


図4 注湯法により求めた砂型の見かけの熱伝導率

100 °C~600 °Cまでの間は0.1~0.3 W/mK程度の値で推移しているが、50 °Cおよび650 °Cの値がそれらよりも高く、0.5 W/mK程度となっている。

3.2 温度解析結果および実測値との比較

図5(a)に注湯法で実測した、溶湯および砂型内部温度の時間変化を示す。グラフには実測した21点のうち、7点を抜粋している。横軸の時間は注湯開始からの時間を示している。注湯開始後、溶湯温度は時間の経過とともに低下し、純アルミニウムの凝固温度である660°C付近で潜熱放出に伴い温度停滞する。凝固が完了すると、温度はさらに低下する。砂型内部は注湯後に上昇し、溶湯の凝固が完了したのちに緩やかに温度低下している。注湯法では、実測温度に合致するように見かけの熱伝導率を最適化している。図5(b)に注湯法で得られた熱伝導率を用いた温度解析の結果を示す。今回は温度のみの計算であり、鋳物内部の欠陥発生位置の予測はできないが、欠陥発生位置の予測するためには、溶湯の凝固特性(凝固時間や指向性など)を精度よく計算できることが望ましい。よって実測温度と解析温度で、鋳物の凝固を示す660°Cの温度停滞時間を比較する。実測結果である図5(a)では、溶湯温度が660°Cで停滞する時間(図中に矢印で示す)が約800秒であったものが、注湯法の値を用いた解析結果である図5(b)では約1000秒であり、実測結果に比べて200秒程度長くなっている。この差が欠陥発生位置にどの程度影響するのか、今後CAEで検証する必要がある。

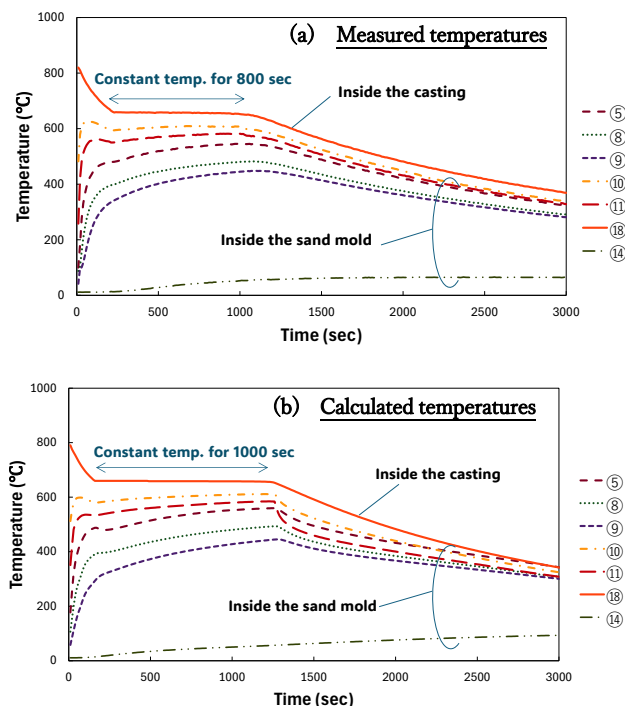


図5 溶湯および砂型内部の実測温度および注湯法で得られた熱伝導率を用いた計算温度

4 考 察

4.1 見かけの熱伝導率の温度依存性

図3の熱線法および図4注湯法の結果を確認すると、どちらも100℃～600℃の間は0.1～0.3W/mK程度であるが、100℃以下と600℃以上でそれらよりも高い値となっている。久保ら⁴⁾が報告している乾燥鋳型の測定結果は200℃以下と600℃以上で熱伝導率が高くなり、本研究結果と同様の傾向がある。

100℃以下で熱伝導率が高いのは、砂型が内包する水分の影響と考えられる。図示していないが、砂型の内部温度に注目すると、温度上昇中に100℃付近で温度停滞がみられた。砂型は砂と粘結材と空気とで構成されているが、これに加えて水分を含んでいることを示唆している。つまり100℃で内包する水分が蒸発するので、伝わった熱量が水分蒸発に使われるため温度停滞したものと考えられる。100℃以上になると水分は存在せず空気に置き換わると考えられ、水のほうが空気よりも熱伝導率が高いため100℃以下の熱伝導率が高かった可能性がある。

600℃以上の熱伝導率上昇については久保らの報告⁴⁾にもあるように、放射伝熱の影響と考えられる。すなわち、砂型内部の伝熱は、砂粒子や粘結材およびその隙間(空気層)の熱伝導が支配的と考えられるが、高温になると、砂や粘結材表面からの放射伝熱量が大きくなる。図示していないが、熱線法で測定温度1,000℃までの値を調査したところ、さらに見かけの熱伝導率は高くなり、0.5 W/mK程度まで上昇することを確認した。一般に物体の温度が高くなるほど放射伝熱量は大きくなるため、600℃以上で見かけの熱伝導率が高くなるのは放射伝熱量の増大の影響と考えられる。

4.2 温度解析に及ぼす見かけの熱伝導率の影響

熱線法および注湯法で求めた値を砂型の熱伝導率として温度解析し、精度向上効果の有無を確認した。図2の計算モデルで注湯後3,500秒までの温度変化を計算した。図6に、式(5)にて求めた1点当たりの平均絶対誤差 $\bar{E}$ の時間変化を示す。比較のため、熱伝導率を温度依存性のない一定値として計算した結果も示している。熱線法(図6HWMで表記)および注湯法(図6POTで表記)で求めた値を用いた場合、熱伝導率を一定値とした場合に比べて $\bar{E}$ が小さくなっている。温度解析において、砂型の熱伝導率に温度依存の測定値を用いることで実測値に近い結果を得られることがわかった。

4.3 熱線法と注湯法の測定値の比較

図3および図4から、熱線法と注湯法の見かけの熱伝導率を比較すると、注湯法の測定値が高い。両手法の異なる点として、熱線法では算出に比熱を必要としないこ

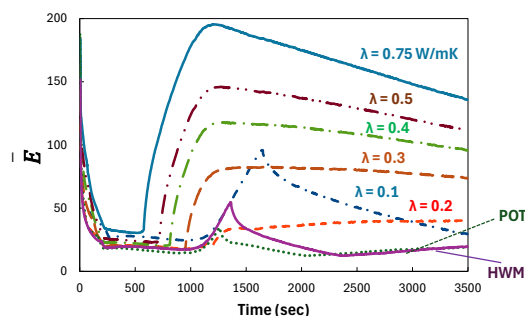


図6 平均絶対誤差 $\bar{E}$ の時間変化

と、解析解と数値解を用いていること等が挙げられる。熱線法では原理上、砂型の比熱や比重を事前に把握しておく必要はないが、注湯法ではこれら物性値を表2に示す一定値として計算している。この値は砂(珪砂)の物性値であり、粘結材や空隙を含んだ実際の物性値と乖離していた可能性がある。さらに、注湯法は数値解をもとに算出するため、ある程度の誤差を含んでいることが予想される。このような物性値や計算方法の違いにより両手法の測定値に差が生じた可能性がある。なお、シミュレーションの温度解析精度の観点からは、溶湯温度も含めて実測値と合致するように最適化する注湯法(図6POT)のほうが、実測値と計算値の誤差を小さくできた。

5 結 言

砂型の見かけの熱伝導率を測定し、得られた値を用いて温度解析して実測温度に対する解析精度を調べた結果、以下の結論が得られた。

- (1) 熱線法および注湯法で測定した見かけの熱伝導率は温度によって変化し、温度依存性を示した。
- (2) 熱線法、注湯法どちらも100℃～600℃は0.1～0.3W/mK程度で100℃以下と600℃以上ではそれよりも高い値となった。2つの方法で求めた見かけの熱伝導率は注湯法のほうが若干高い値となった。
- (3) 熱線法および注湯法で測定した温度依存の見かけの熱伝導率を用いて温度解析すると、砂型の熱伝導率一定とした場合と比べて温度解析の精度を向上できた。測定値を用いることで実測に近い温度解析結果が得られることがわかった。

文 献

- 1) 大澤：日本鋳造工学会中四国支部会報こしき，47(2024)22-25.
- 2) 二宮，片島：鋳物，58(1986)22-27.
- 3) 福迫，久保，大中：鋳物，51(1979)27-32.
- 4) 久保，大中，福迫，水内：鋳物，53(1981)627-634.