

5 新たな組織制御による高強度アルミニウムの成形技術の開発 (第1報) 断熱性離型剤の熱伝導率測定

寺山 朗, 府山伸行, 大石 郁, 森下勇樹, 兼外足穂*, 田畑潤二*

Estimation of thermal conductivity of powder lubricant

TERAYAMA Akira, FUYAMA Nobuyuki, OHISHI Kaoru, MORISHITA Yuki, KENGAI Taruho and TABATA Junji

To evaluate heat-resistant property of powder lubricant, the thermal conductivity of the lubricant was determined. First, the powder lubricant was heated up to three temperatures of 200°C, 400°C and 600°C. Next, these lubricants were moulded at various pressures between 25 and 100 MPa into cylindrical compacts. Then, the thermal conductivity of the compacts was measured by steady state thermal conductivity measurement method. The thermal conductivity of the compact became lower as the heating temperature became higher. The thermal conductivity of the compacts of the lubricant heated at 600°C were a constant with various moulding pressure. The powder lubricant contains talc and graphite flakes, the interfacial thermal resistance of the flakes was calculated. This thermal resistance of the compact of the lubricant heated at 600°C was three times higher than that of the compact of the lubricant heated at 200°C.

キーワード：ダイカスト, 粉体離型剤, 熱伝導率

1 緒 言

溶融したアルミニウム合金を鉄鋼製の金型内で铸造するダイカスト成形は、寸法精度の高いアルミニウム部材を安価に大量生産できる技術として、自動車産業をはじめとする工業界で広く応用されている。

部材の強度と信頼性を高める製法の一つに、アルミニウム溶湯を固・液混合領域で成形する半凝固成形がある¹⁾。この成形では铸造欠陥や偏析の少ない均質な金属組織を得られるうえ、成形温度が低いため成形時間の短縮と金型寿命を長くできる利点がある。一方で、溶湯温度の管理が極めて重要であるため、溶湯と接する金型との間の熱伝達を制御することが必要である。

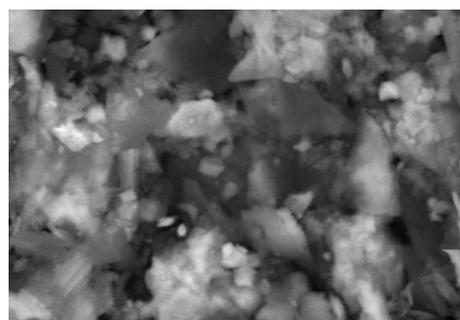
この熱伝達制御には、離型剤の塗布が最も簡単かつ有効な手段である。離型剤の熱伝導率が低ければ溶湯を断熱でき、熱伝導率が高ければ冷却を促進できる。離型剤は铸造中に溶湯と接して 600°C 程度の高温に加熱されるため、その時の熱伝導率を評価する必要がある。また、生産の際には湯流れや凝固シミュレーション等を活用し铸造法案を決定することが一般的になっているが、離型剤の熱伝導率を正確に把握することで計算精度の向上も見込める。

本研究では、ダイカスト成形用離型剤のうち、断熱性が高い粉体離型剤に注目し、その熱伝導率を求めるとともに、加熱温度による熱伝導率の変化を調査した。

2 実験方法

2.1 粉体離型剤の特性

本研究では、(株)MORESCO 製の粉体離型剤 GW-23 を用いた。粉体離型剤の SEM イメージを図 1 に示す。この離型剤の主成分はタルク、黒鉛およびワックスの粉末であり²⁾、それぞれ鱗片形状を呈している。粉体離型剤は、断熱性が高いため溶湯の保温性が良く、また铸造後の離型性も優れる特長を持つ。Kimura ら³⁾は、重力铸造時の粉体離型剤の断熱メカニズムについて調べ、溶湯と離型剤が接触した際に含有するワックスが気化・ガス層が発生することで溶湯と金型が直接に接触しないため断熱性が高いことを示している。一方ダイカスト成形では溶湯を加圧するため、溶湯-金型界面に発生したガス層は押しつぶされると考えられる。このとき溶湯の熱は圧縮された離型剤を介して金型へ伝熱される。よって、本研究では加圧圧縮された離型剤層の厚さ方向の熱伝導率を計測することにした。



5 μm

図 1 粉体離型剤の SEM イメージ

*広島アルミニウム工業株式会社

2.2 熱伝導率測定用試験片の作製

粉体離型剤はダイカスト成形中に溶融アルミニウムと接触するため最高で 600 °C 程度まで加熱される。離型剤の熱伝導率に及ぼす加熱温度の影響を調べるため、離型剤を大気中で 200 °C、400 °C および 600 °C で 1 時間熱処理した。ここで、200 °C は離型剤が金型に塗布された温度を、600 °C は鋳造中の温度を想定している。粉体離型剤は粉末状であり、そのまま熱伝導率を測定することが難しいため、熱処理後は円盤状のペレットに成形しハンドリングした。φ 20 mm のステンレス製ダイスに離型剤を充填し、25~100 MPa で単軸圧縮して厚さ 0.7~4.0 mm のペレット試験片を成形した。これら試験片の作製条件を表 1 に示す。実成形では溶湯加圧力も条件により異なるため、熱処理温度 600 °C のみ成形圧力の影響も調べた。

2.3 熱伝導率の測定方法

熱伝導率は定常法⁴⁾で測定した。測定装置の概要および測定原理を図 2 に示す。まず、成形した試験片の両端をそれぞれ加熱および冷却された鉄鋼製の棒で挟み 0.45 MPa で加圧した。定常状態に達した後、各鉄鋼棒内部の数点の温度から、試験片両端の温度差 ΔT を求め、全体の熱抵抗 R_t を算出した。この値は試験片両端と鉄鋼棒の間の接触熱抵抗 R_c も含んでいるため、

表 1 熱伝導率測定用試験片の作製条件

Symbol	RT-75	200-75	400-75	600-75	600-25	600-50	600-100
Heating condition	—	200°C × 1h	400°C × 1h	600°C × 1h	600°C × 1h	600°C × 1h	600°C × 1h
Moulding pressure (MPa)	75	75	75	75	25	50	100

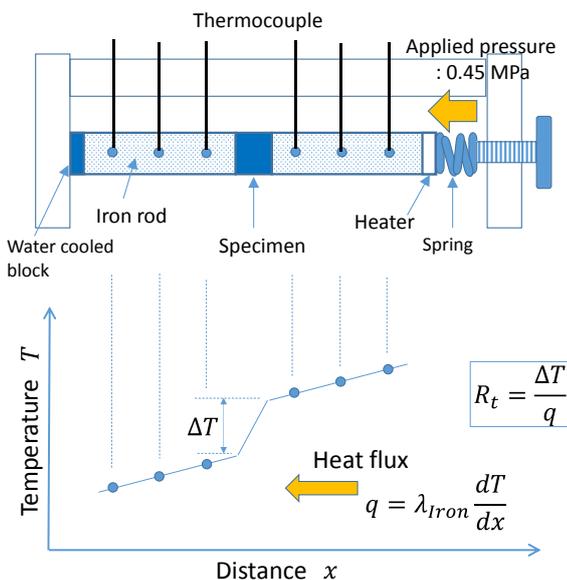


図 2 熱伝導率の測定装置および原理

厚みの異なる 5 つの試験片の全体の熱抵抗 R_t をそれぞれ計測し、熱伝導率に換算した。なお、鉄鋼棒の内部温度勾配から求められる試験片を通過する熱流束 q は 2 つの鉄鋼棒の熱流束の算術平均値を用いた。

3 実験結果および考察

3.1 熱伝導率に及ぼす熱処理温度および

加圧力の影響

図 3 (a) に熱処理なし・成形圧力 75 MPa (RT-75), (b) に熱処理温度 600 °C・成形圧力 75 MPa (600-75) の粉体離型剤の試験片厚さ t と熱抵抗 R_t の関係を示す。図示のように試験片の厚さに対して各熱抵抗をプロットし、それらの値を直線近似する。このときの勾配の逆数が試験片の熱伝導率 k_{eff} となる。さらに、厚さ 0 のとき (近似直線の切片) が試験片の両端面と鉄鋼棒間の接触熱抵抗 $2 \times R_c$ に相当する。(a) および (b) とともに測定時の試験片押付圧力は同じだが接触熱抵抗 R_c は異なる値を示している。また、(b) では試験片厚みが薄くなるとプロットが近似直線から外れている。熱処理温度が高い 400 °C および 600 °C では同様の傾向が見られた。熱天秤 (TG) で粉体離型剤の加熱温度に対する重量変化を調べた結果、200 °C を超えると緩やかに重量が減少し始め、600 °C では約 25% の重量が減少した。離型剤の主成分のうち、黒鉛とタルクが揮発するとは考えにくく、また減少量がワックスの含有量とほぼ一致することから、この重量減少はワックスの揮発分と考えられる。試験片の成形ではワックスがつなぎの役目をしており、熱処理温度 400 及び 600 °C ではこのつなぎがないため、熱処理なしおよび熱処理温度 200 °C に比べて脆い印象であった。このため試験片が厚くなると、ハンドリング時に内部クラックなどの隙間が生じやすく、厚いほど熱抵抗が高くなっている可能性がある。

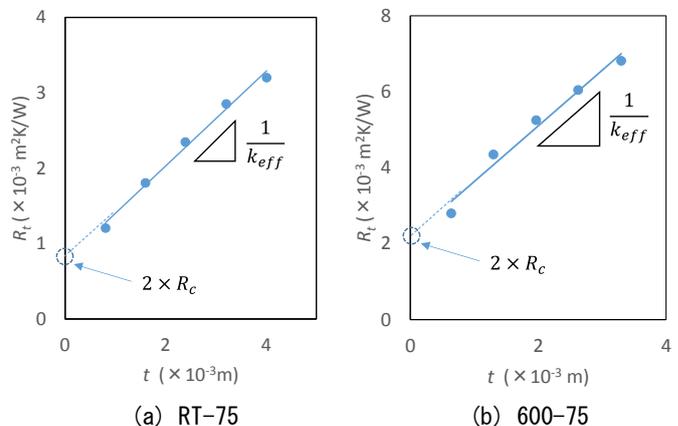


図 3 試験片厚さ t と全体の熱抵抗 R_t の関係

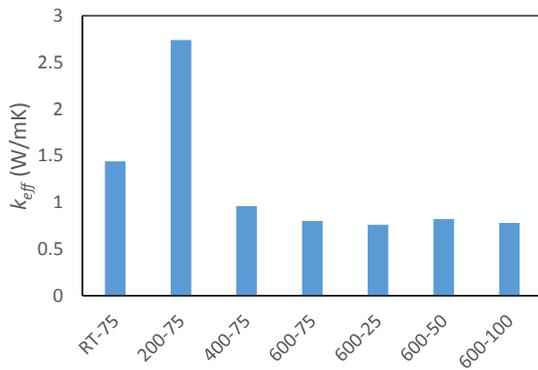


図4 熱伝導率 k_{eff} に及ぼす熱処理温度および成形圧力の影響

図4に測定した熱伝導率 k_{eff} を示す。ここには熱処理していない試験片の値も示している。 k_{eff} が最も高いのは熱処理温度 200°C(200-75)で 2.75 W/mK である。熱処理温度 200°C以上では温度が高くなるほど k_{eff} は低くなる傾向がある。鋳造中の想定温度である 600°Cでは、0.8 W/mK であり、これら k_{eff} 値を他の断熱性離型剤と比較すると、Hamasaïid ら⁵⁾は重力鋳造時の酸化チタン系および黒鉛系離型剤の熱伝導率を 0.45~0.6 W/mK と報告している。重力鋳造では離型剤が受ける加圧力が低く、離型剤層もポーラスである。今回得られた粉体離型剤の熱伝導率は成形圧力が 75 MPa と高いにも関わらずそれらと同等に低い値である。離型剤層のバルク熱抵抗は、離型剤の厚さを熱伝導率で除した値に相当する。得られた熱伝導率を基に、実成形では金型の部位によって離型剤層の厚みを変化させることで熱伝達の制御が可能と考えられる。

熱処理温度によって熱伝導率が変化する原因を調べるため、各試験片を割り、その断面を SEM 観察した。図5(a)に 200-75 (k_{eff} : 2.75 W/mK)の試験片、(b)に 600-75 (k_{eff} : 0.80 W/mK)の試験片の断面 SEM 写真を示す。ともに加圧方向に対して鱗片の長手方向が垂直に層状に配列している様子が伺える。これら一層の厚みは数 μm 程度で、鱗片状のタルクおよび黒鉛は成形の過程でこのように層状に自己配列したと考えられる。(b)では場所によって図示のような層間の隙間が観察できたが、(a)ではこのような隙間はほとんど見られなかった。熱処理温度 200 °C以下では成形時に加圧を受けたときに軟らかいワックスがタルクと黒鉛粒子の隙

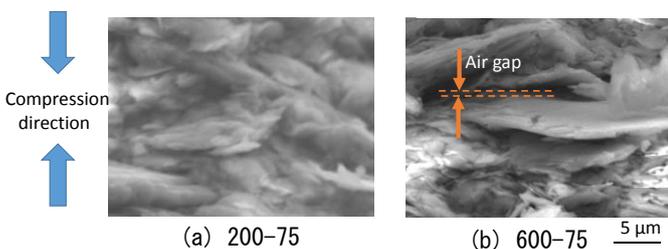


図5 試験片の断面 SEM イメージ

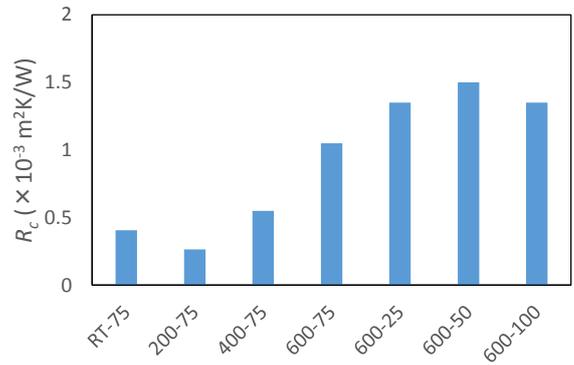


図6 接触熱抵抗 R_c に及ぼす熱処理温度および成形圧力の影響

間を埋めるように配置するが、熱処理温度 400 °Cおよび 600 °Cでは熱処理でワックスが揮発しているためこのような隙間が生じやすいと考えられる。これら隙間が熱抵抗となり、熱処理温度の上昇が熱伝導率を低下させていると考えられる。なお、図4から熱処理温度 600°Cのときの k_{eff} を試験片の成形圧力で比較すると、25~100MPa は何れもほぼ同じ値である。SEM で断面を観察したところ、すべての試験片で図5(b)に見られたような隙間が確認でき、このため熱伝導率はほぼ一定値であると考えられる。

図6に試験片と鉄鋼棒の間の接触熱抵抗 R_c の値を示す。熱処理温度 200°C(200-75)が最も低く、熱処理温度が上昇すると R_c も高くなっている。図5で見られたような隙間は試験片の表面にもあり、このため熱処理温度が高くなると R_c が高くなると考えられる。 R_c が最も高い 600-50 では、 R_c が全体の熱抵抗に対して約 4 割($R_c/R_t \approx 0.4$)と大きな値となっていた。

3.2 加圧鋳造における粉体離型剤の伝熱メカニズム

熱処理温度 400°Cおよび 600°Cでは粉体離型剤内部の層間に隙間があることを示したが、一つの層間の熱抵抗を R_i と定義して、具体的数値を考察する。試験片

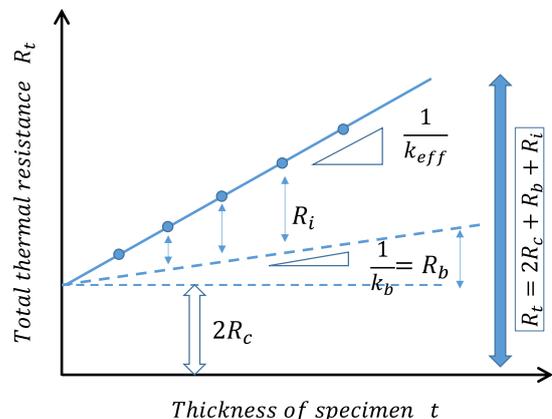


図7 離型剤内部の層間界面熱抵抗を考慮した試験片厚さ t と全体熱抵抗 R_t の関係

内部の熱抵抗はタルクおよび黒鉛を主成分とする鱗片状粒子のバルク熱抵抗の総和 R_b と層間の隙間の熱抵抗の総和 R_{it} と仮定すると、全体の熱抵抗は式(1)で、 R_b および R_{it} はそれぞれ式(2)および(3)で表される。またこのとき、試験片厚さ t と全体の熱抵抗 R_t の関係は図7のように考えることができる。

$$R_t = 2R_c + R_b + R_{it} \quad \dots(1)$$

$$R_b = t/k_b \quad \dots(2)$$

$$R_{it} = n \times R_i \quad \dots(3)$$

ここで、 k_b はタルクおよび黒鉛から成る複合体の熱伝導率を、 n は離型剤内部の層間の数をそれぞれ示している。 k_b は複合材料が取り得る上限の熱伝導率を示す推定式(4)で見積もった。

$$k_b = k_t \times V_t + k_g \times (1 - V_t) \dots(4)$$

k , V は熱伝導率と体積率を、添え字の t および g はそれぞれタルクおよび黒鉛を示している。なお、タルクおよび黒鉛の熱伝導率はそれぞれ 10 W/mK, 800 W/mK で計算した。界面の数 n は鱗片状粒子 1 層の厚さを 2 μm と仮定して試験片の厚みから求めた(試験片厚さ $t=3 \text{ mm}$ のとき $n=1500$)。図8に算出した一層間の熱抵抗 R_i を示す。ここで、熱処理なし(RT-75)と熱処理温度 200 °C(200-75)の計算では、ワックスはタルクおよび黒鉛と同様に粒子状に分布していると仮定して計算している。ワックスが揮発している熱処理温度 400°C(400-75)および 600°C(600-25,50,75,100)では、図5に示した通り層間に空隙があるが、計算では空隙を考慮していないため、空隙の熱抵抗は層間の熱抵抗 R_i に含まれている。実際にはすべての層間に隙間があるわけではないが、得られた R_i は鱗片状粒子の接

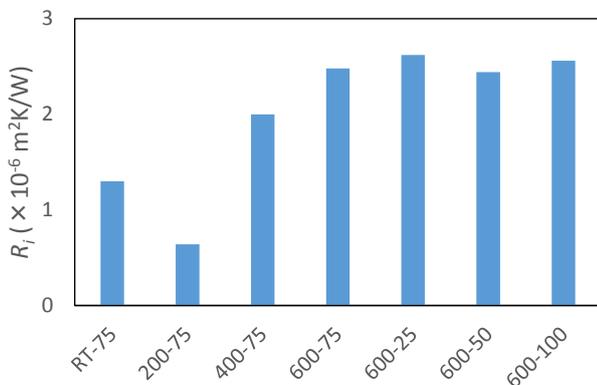


図8 離型剤内部の層間界面熱抵抗 R_i に及ぼす熱処理温度および成形圧力の影響

触界面の熱抵抗の平均値に相当する。熱処理温度 400°C および 600°C は試験温度 200°C よりも 3 倍以上高い値を示している。加圧鋳造の場合、粉体離型剤はワックスが揮発し、主成分であるタルクおよび黒鉛の層間に隙間が生じることで熱伝導率が低下することが示唆された。

4 結 言

粉体離型剤の熱伝導率を測定し、熱処理温度や成形圧力が熱伝導率に及ぼす影響について調べた結果、以下の結論が得られた。

- (1) 粉体離型剤の熱伝導率は熱処理温度 200°C が 2.75 W/mK と最も高かった。一方で 600°C は 0.8 W/mK と低い値だった。
- (2) 熱処理温度が高くなるとワックスが揮発し、離型剤内部の粒子層間に隙間が生じやすくなる。このため熱伝導率が低下することがわかった。
- (3) 離型剤内部の層間の熱抵抗を見積もった結果、熱処理温度 600°C では 200°C の 3 倍以上高いことがわかった。

文 献

- 1) 板村, 安齋, 平田, 素形材, 56 (2015) 36-44.
- 2) 藤井, 府山, 荊山, 土取, 広島県西部工技研究報告, 43 (2000) 35-38.
- 3) R. Kimura, M. Yoshida, G. Sasaki, J. Pan, H. Fukunaga, J. of Mater. Proc. Tech., 130-131 (2002) pp289-293.
- 4) 例えば, 大串, エレクトロニクス実装学会誌, 18 (2015) pp61-65.
- 5) A. Hamasaiid, M. S. Dargusch, C. J. Davidson, S. Tavor, T. Loulou, F. Rezaï-Aria, and G. Dour, Metall. Mater. Trans. A, 38A (2007) pp1303-1316.