

### 3 ハイサイクルなダイカスト成形を可能にする金型冷却技術の開発（第2報） 金型－銅冷却孔間を効率よく冷却する充填材の検討

寺山 朗，府山伸行，大石 郁

Fabrication of thermal interface materials for rapid die-casting

TERAYAMA Akira, FUYAMA Nobuyuki and OHISHI Kaoru

In order to cool the aluminum die-casting mold, water-cooled copper pipes are inserted into holes of the mold. To enhance cooling property, thermal interface materials (TIMs) with higher heat transfer coefficient are filled into the gap between the mold and the copper pipe. In this research, TIMs which consist of the mixture of graphite particles and polymer were fabricated and their thermal characteristics were investigated. The heat transfer coefficient of the TIM increased with increasing the volume fraction of the graphite particle in the TIM. Decreasing the thickness of the TIM layer also increased the heat transfer coefficient because of lower interfacial resistance between the matrix and the graphite particle. The TIM which includes 30 vol.% graphite particles had highest heat transfer coefficient of approximately 63 kW/m<sup>2</sup>K. The value was almost ten times more than that of the no TIM use.

キーワード：ダイカスト，充填材，グラファイト，熱伝達係数，界面抵抗

#### 1 緒 言

アルミニウムのダイカスト成形では、金型冷却が非常に重要である。成形サイクルの中では金型冷却に要する時間が最も長いので、金型冷却を強化することでサイクルタイムが短縮できる。さらに、製品と金型が凝着する焼き付きの抑制には、金型表面温度を低くすることが極めて有効である<sup>1)</sup>。金型冷却には、金型に穴をあけ、その中を水冷する手法が一般的である。水冷孔内部は金型と水が直接接触するために腐食環境下であり、成形サイクル中に発生する熱応力が加わって、応力腐食割れを起こす懸念があるため<sup>2)</sup>、近年、図1に示すような冷却孔の内部に銅パイプを挿入し、そのパイプ内部を水冷する手法が採られている。銅パイプと金型の間には隙間があり、熱伝達向上のために高分子材料ベースの充填材で隙間を埋めるが、成形中にマトリックスの高分子材料が熱劣化して定期的なメンテナンスが必要となり、コストアップにつながっている。

本研究では金型と銅パイプの隙間に充填する充填材の成分や、それら充填材の評価方法を検討し、熱伝達に優れた充填材を開発することを目的とした。

#### 2 充填材成分の検討

本研究のようなダイカスト成形における熱伝達の向上を目的とした充填材の報告はほとんど見当たらない。一方、半導体関連では、パワーデバイスとヒートシンク間の熱伝達改善を目的とした充填材に関して多くの

研究が報告されている。充填材に必要な特性として、熱伝達係数が高く易変形性であり、取り外しが容易なことが挙げられる。よって、低融点金属の液相を使う方法<sup>3),4)</sup>や、サーマルグリスなどの高分子材料をベースに、熱伝導率の高い粒子等を分散させた材料が研究されている。本研究でも高分子材料ベースの充填材を検討することとした。ベースとなる高分子材料には、耐熱温度の高い特殊なものを選定した。高熱伝導粒子には、金属や炭素系の材料が研究されており、特に、炭素系材料では、熱伝導率が高いカーボンナノチューブの応用が盛んである<sup>5),6)</sup>。しかし、ダイカストへの適用では、コストも考慮しなければならない。よって、安価な黒鉛粒子を選定し、特殊な高分子材料とブレンドした充填材を作製した。黒鉛は結晶化度の違いにより熱伝導率が変わってくるが、一般に高熱伝導材料として知られている。

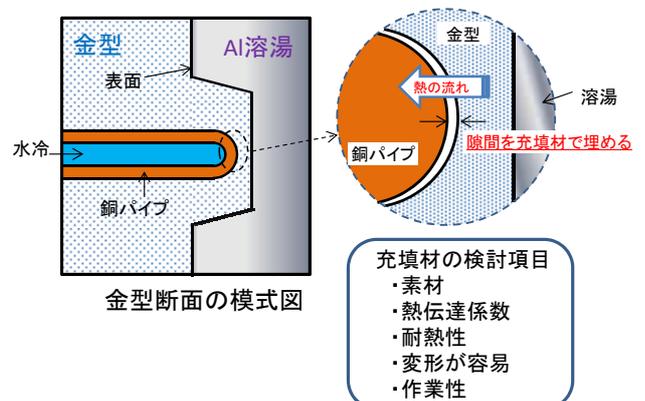


図1 充填材を使った金型の冷却方法

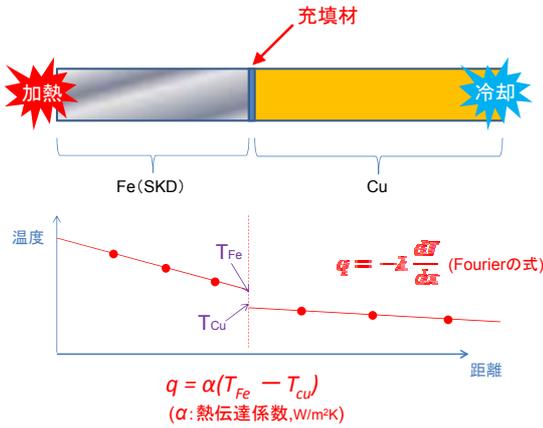


図2 充填材の熱伝達係数の測定方法

### 3 熱伝達係数に及ぼす分散粒子の影響

充填材の評価のため、熱伝達係数を測定した。測定試料は上述した黒鉛粒子を分散した充填材、および比較として金属の中でも高い熱伝導率を有する銅の粉末を分散した充填材である。それぞれの粒子の体積率は、高分子材料のマトリックスに対してどちらも 25vol.% である。熱伝達係数の測定方法を図2に示す。

まず、鉄鋼(SKD61)および銅(C1020)の棒を充填材を介して圧接した。このときの充填材の厚さは 20 μm である。鉄鋼の端面を加熱しながら銅の端面を冷却し、そのまま一定時間保持して定常状態にした。その際の鉄鋼および銅棒の内部温度は式(1)に示す Fourier の式に従って 1 次関数となる。ここで、 $q$  および  $\lambda$  は熱流束および熱伝達係数、 $dT$  および  $dx$  はそれぞれ微小温度および微小長さである。鉄鋼および銅の温度を複数点測定して、金属棒と充填材との界面温度  $T_{Fe}$  および  $T_{Cu}$  を算出し、式(2)に代入して熱伝達係数  $\alpha$  を求めた。

$$q = -\lambda dT/dx \quad \dots(1)$$

$$\alpha = q/(T_{Fe} - T_{Cu}) \quad \dots(2)$$

図3に充填材の熱伝達係数を示す。黒鉛を分散した充填材は、銅を分散した充填材の約 1.3 倍、熱伝達が優れている。参考のため、鉄鋼と銅の界面に充填材を挟まず、単にメタルタッチした場合の熱伝達係数も示しており、充填材を使った場合の約 1/7~1/10 の 3.5 kW/m<sup>2</sup>K という低い値である。充填材を使わなければ界面に隙間があり、空気層が抵抗となり熱伝達係数が低くなると考えられる。接触部の表面粗さは Ra0.3 相当であるが、Gwinn ら<sup>7)</sup>は界面抵抗を下げた熱伝達係数を高くするには、表面の粗さを低くするか押付圧力を上げる等して接触面積を増やすことが重要と報告している。これらの対策により、充填材を使わなくても熱伝達係数の一定の向上が見られると考えられるが、

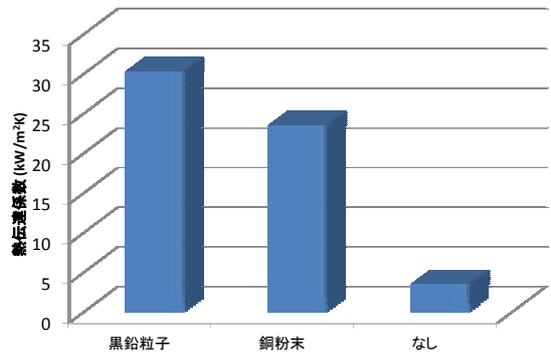


図3 熱伝達係数の比較

金型へのパイプ挿入作業を考えると、表面の平滑化や押付圧力の増加には限界があり、隙間を埋める充填材の使用は不可欠である。

### 4 黒鉛粒子の体積率および充填材厚さの影響

熱伝達係数が高い黒鉛粒子を含有した充填材の、熱伝達係数に及ぼす黒鉛粒子の体積率と厚さの影響を調べた。黒鉛粒子の量が 17.5 vol.%~30 vol.%の充填材を作製し、それら充填材の厚さを 20 μm, 30 μm, 50 μm および 100 μm と変化させ、先述の図2に示した方法で熱伝達係数を調べた。充填材の厚さは、界面の一部に断熱箔を挟んで調整した。図4にその結果を示す。黒鉛粒子の体積率が高い充填材ほど熱伝達係数が高い。黒鉛粒子はマトリックスの高分子材料よりも熱伝導率が高く、黒鉛含有量が熱伝達に対して支配的に作用するためである。さらに、いずれの組成でも充填材の厚さが薄いほど熱伝達係数は高くなる傾向を示している。V-Várnai ら<sup>8)</sup>は充填材のマトリックスに使われる各種グリスの熱抵抗を調べ、厚さに対して一次関数の関係になることを示している。一方で、図4に示した本研究の充填材の熱伝達係数と厚さの関係は一次関数では表せない。充填材は一種の複合

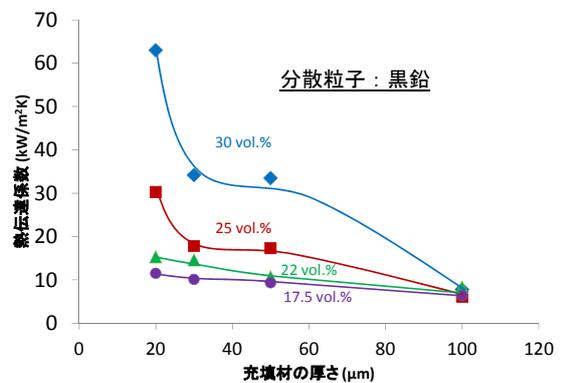


図4 熱伝達係数に及ぼす充填材厚さと分散粒子の体積率の影響

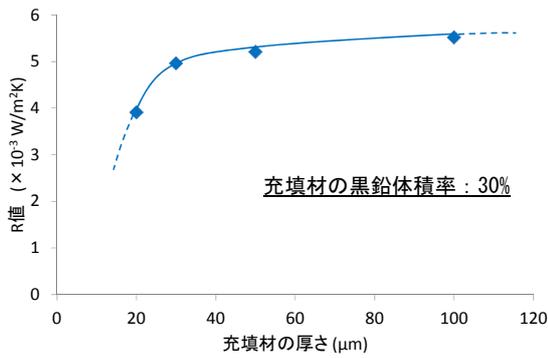


図5 黒鉛粒子の界面抵抗,  $R$ に及ぼす  
充填材厚さの影響

材料であり、マイクロ組織を考慮すると、黒鉛粒子を加えたことで、マトリックスと黒鉛粒子の界面に熱抵抗が生じたのではないかと考えられる。粒子分散型の複合材料ではこれら界面抵抗が存在するため、それを考慮した熱伝導率の推定式がいくつか提案されている。中でも Hasselman ら<sup>8)</sup>が提案した式を基に界面抵抗の項に変更を加え、式(3)のように表すことができる。

$$K_{eff} = K_d / V_d + K_m / (1 - V_d) - nR \quad \dots(3)$$

ここで、 $K_{eff}$ は有効熱伝導率であり、実測した充填材の熱伝導率である。 $K_d$ および $K_m$ は黒鉛粒子とマトリックスの熱伝導率を、 $V_d$ は黒鉛粒子の体積率を、 $n$ は充填材の一断面に含まれる黒鉛粒子とマトリックスの界面の数をそれぞれ示している。 $R$ は黒鉛粒子とマトリックス界面での熱伝達係数の低下量であり、界面抵抗とみなせる。図5に、黒鉛体積率30%の実測データから算出して求めた $R$ 値と充填材厚さの関係を示す。充填材厚さが20 μmでは、 $R$ 値が30および50 μmに比べて急に低下していることがわかる。図6に、界面抵抗の模式図を示す。これは、充填材を断面方向から見たイメージであるが、(a) 充填材厚さ $\geq 30 \mu\text{m}$ のとき、マトリックスと黒鉛粒子の界面には大きな界面抵抗となる空隙等が存在すると考えられる。しかし、(b) 充填材厚さが20 μmでは、厚さを薄くするために押付圧力が高くなり、空隙等が少なくなり界面抵抗も低くなったと考えられる。他の報告<sup>7)</sup>にもあるように、充填材の熱伝達係数を高めるには充填材の成分だけでなく、押付圧力等の最適化も重要である。

これまでに、充填材の熱伝達係数について考察してきたが、この熱伝達係数の違いが冷却効果に及ぼす影響を調べるため、仮想の金型モデルを使って温度をシミュレーションした。簡単のため、金型形状は単純な直方体とし、鉄鋼ブロックと水冷された銅ブロックが充填材を介して接触する形状とした。また、鉄鋼と銅

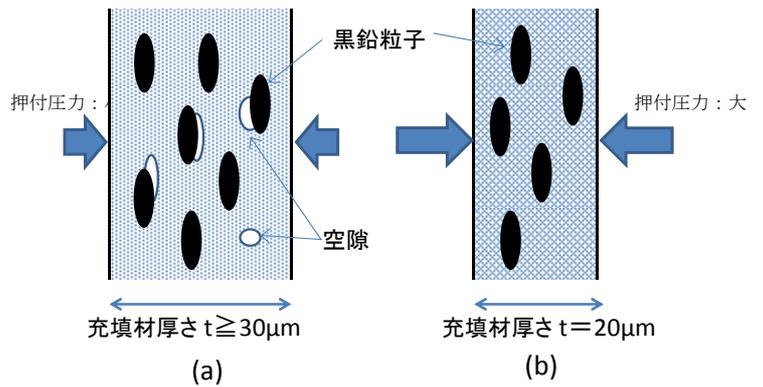


図6 充填材断面イメージ

の界面は平面とした。充填材厚さが20 μmで、黒鉛体積率が30 vol.%および22 vol.%充填材の2通りで計算を行い、それぞれ実測した熱伝達係数を鉄鋼と銅の間の熱抵抗値として使用した。計算の結果、黒鉛体積率が30 vol.%では熱伝達係数が22 vol.%の約3倍程度高く、金型内部の任意点の温度も最大で約50 °C低くなった。熱伝達のよい充填材の適用は金型の冷却に効果的であるといえる。

## 5 充填材の耐熱性評価

ダイカスト成形中は、金型表面には溶融したアルミニウム合金が接触するため、金型内部も高温にさらされる。近年は冷却効果を高めてハイサイクル成形するため、充填材を塗布した水冷配管を金型表面から5~10 mm程度の極めて近い距離に設置するケースも多い。このとき充填材は300 °C程度まで加熱されることが予想され、マトリックスの高分子材料が劣化し熱伝達が低下する懸念がある。よって、図7に示す簡易試験片を用いて充填材の耐熱性を評価した。穴の開いたSKD61製のブロックに、黒鉛を分散した充填材を塗布した銅パイプを挿入した。銅パイプを水冷しながらSKD61ブロックをヒーターで300 °Cに加熱・保持し

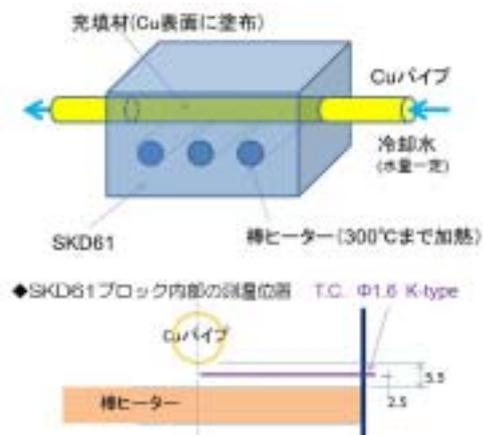


図7 耐熱試験方法

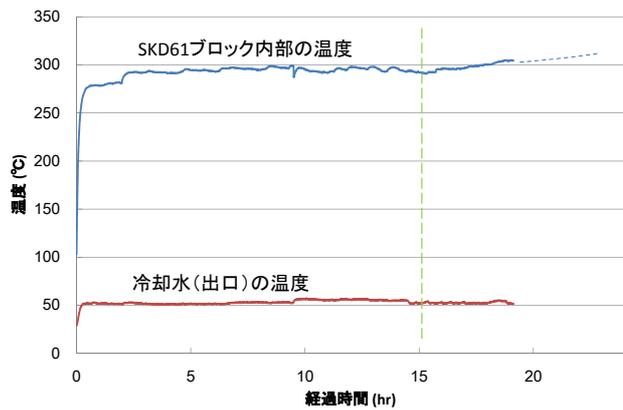


図8 耐熱試験結果

た。SKD61 ブロックの温度変化を図8に示す。加熱後はほとんど温度変化が見られないが、15時間程度経過すると緩やかに温度が上昇する傾向がある。20時間保持した後に銅パイプを取り出し、表面の充填材の状態を電子顕微鏡等で確認したところ、マトリックスの高分子材料が一部気化し、ポーラスな状態になっていることが確認できた。隙間が生じたことで熱伝達係数が低下し、温度が上昇したと考えられる。このため、高分子材料を含む充填材は熱劣化を避けることが難しく、当該充填材をダイカストで使う際には、定期的な塗り替え作業が必要である。

## 6 充填材のパイプ挿入性評価

充填材を塗布した銅パイプを金型に挿入する際に必要な力を評価した。アクリル製のパンチ表面に黒鉛を分散した充填材を塗布し、アクリル製のダイスに挿入しながら挿入に必要な力をロードセルで計測した。なお、ダイスとパンチのクリアランスは50 $\mu$ mである。図9にパンチ挿入時の荷重-変位曲線を示す。黒鉛体積率が低い17.5 および22 vol.%では、荷重が0に近いが、黒鉛体積率が多くなると荷重が高くなる。また、ストロークが長くなるほど荷重値は高くなることから、黒鉛体積率が高い充填材は長い銅パイプの挿入には大きな力が必要で、熱伝達係数が高い反面、挿入性が劣る。実地で適用する際には、これらパイプの挿入性も考慮する必要がある。

## 7 結 言

ダイカスト金型に挿入する金型-水冷銅パイプ間の熱伝達を向上するため、黒鉛粒子を用いた充填材を提案し、その熱特性について調べた。得られた結論は以

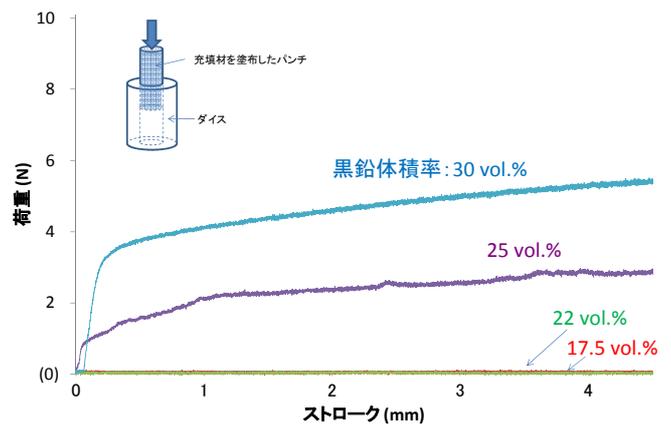


図9 荷重-変位曲線

下のとおりである。

- (1) 充填材の黒鉛含有量を増やすと、熱伝達係数が高くなる。
- (2) 充填材の厚さを薄くすると黒鉛粒子とマトリックスの界面抵抗を低くでき、熱伝達係数が高くなる。
- (3) 耐熱性を評価した結果、300°C加熱によりマトリックスの高分子材料が劣化し、加熱中に熱伝達係数が低下する。
- (4) 黒鉛粒子の含有量が増えるほど銅パイプを金型に挿入する際の抵抗力が大きくなる。

## 文 献

- 1) 糸井, 土肥, 南, 高塚, アルトピア, 5 (1999) 20-26.
- 2) 長澤, 素形材, 49 (2008) 1-5.
- 3) A.V-Várnai, Z.Sárkány, M. Rencz, Microelectronics Journal 43 (2012) pp661-668.
- 4) A.Hamdan, A.McLanahan, R.Richards, C.Richards, Experimental Thermal and Fluid Science 35 (2011) pp1250-1254.
- 5) B.A.Cola, J.Xu, T.S.Fisher, International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) pp3490-3503.
- 6) S.Sihn, S.Ganguli, A.K.Roy, L.Qu, L.Dai, Composites Science and Technology 68 (2008) pp658-665.
- 7) J.P.Gwinn, R.L.Webb, Microelectronics Journal 34 (2003) pp215-222.
- 8) D.H.P.Hasselman, L.F.Johnson, Journal of composite materials 21 (1987) pp508-515.