

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1報)

7 アルミニウム鋳造用 鉄鋼-銅ハイブリッド金型の冷却性能

寺山 朗, 府山伸行, 本多正英, 大橋俊彦, 山崎拓哉*

Cooling property of steel-copper gravity casting mold (1st Report)

TERAYAMA Akira, FUYAMA Nobuyuki, HONDA Masahide, OHASHI Toshihiko and YAMASAKI Takuya

Cooling property of steel-copper metallic mold was investigated. The steel-copper mold consists of steel surface layer bonded to water-cooled copper die block. Molten AC4C aluminum alloy was poured into the steel-copper and conventional steel molds. Measurements of the mold temperatures during the casting were carried out. The temperature of the steel-copper mold was almost 100 °C lower than that of the conventional steel mold because of higher thermal conductivity of copper. In aluminum casting process, a large part of the casting cycle time is spent in cooling of the casting mold. Thus, the steel-copper mold can shorten the casting cycle time of aluminum alloy. Prediction of the change in steel-copper mold temperature was performed by using cast simulation software and the predicted temperature was compared with the experimental temperature. Optimizing steel / copper interfacial thermal resistance led to reduce the difference between the predicted and the experimental temperature.

キーワード：鉄鋼-銅 金型, 鋳造用アルミ合金, 重力鋳造, 金型冷却

1 結 言

アルミニウム合金のダイカスト成形は軽量化・低燃費が進む自動車製造に欠かせない技術の一つである。低価格化ニーズを背景にダイカスト業界でも製造コスト低減が急務であり, 成形時間の短縮 (ハイサイクル化) が推進されている。ダイカスト成形のサイクルでは製品凝固と製品取り出し後の金型冷却に大きな時間を割いており, ハイサイクル成形には金型冷却の強化が重要である。また, 金型冷却は製品品質の安定にも有効であり, 成形後に金型とアルミ製品が凝着する“焼き付き”は金型表面温度を低くすることで抑制できる¹⁾。さらに, 金型冷却により製品の凝固時間も短縮できれば, 結晶粒の微細化による機械的性質の向上も見込める。

金型冷却強化のため, 金型構造の工夫²⁾や耐ヒートクラック性の高い金型材料の開発³⁾などが報告されているが, 金型に穴をあけて水冷することが一般的に行われている。水路をキャビティ面近くに配置すれば金型は十分に冷却されるが, 成形中の繰返し熱応力によりキャビティ面に発生したヒートクラックが内部に向かって進展し, 水路まで達すると水漏れ等のトラブルを引き起こす。対策として, キャビティ面直下から水路の間に熱伝導のよい銅を配置すれば, 水路をキャビティ面近くに配置しなくても十分な冷却効果が得られる可能性がある。

本研究ではキャビティ面のみ鉄鋼で下部に熱伝導のよい銅を配置したハイブリッド金型により, ダイカスト成形の金型冷却能の向上を試みた。最初のステップとして, 簡便な重力鋳造法で鉄鋼-銅ハイブリッド金型の冷却能を調査した。

2 拡散接合による鉄鋼-銅金型の作製

2.1 鉄鋼-銅接合部の機械的性質と熱衝撃特性

鉄鋼と銅の間を効率よく伝熱するには, 隙間なく接合されていることが必要である。また金型としての使用に耐えるには, ある程度の接合強度も要求される。

本研究では, 拡散接合法で熱間工具鋼(SKD61)と無酸素銅(C1020)を接合した。拡散接合法は材料同士を融点以下に加熱しながら加圧して接合する方法であり, 溶融金属で接合するロウ付けや接合する材料自体を溶融する溶接とは異なる。図1に熱間工具鋼(以下, 鉄鋼)と無酸素銅(以下, 銅)が拡散接合された界面の顕微鏡写真を示す。界面は隙間無く接合されている。この接合材を引張試験した結果, 図2に示すように銅母材で破断し, 引張強さは約 200 MPa であった。破断位置が母材であるため鉄鋼と銅の接合強度を正確に把握することはできなかったが, 少なくとも 200 MPa 以上であることがわかった。

ダイカスト成形用の金型は鋳造時に加熱され, その後冷却されるが, この間に急激な温度変化にさらされる。鉄鋼と銅の熱膨張率はそれぞれ $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ および $17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ であり, この差によって生じた熱応力で接

*株式会社積層金型

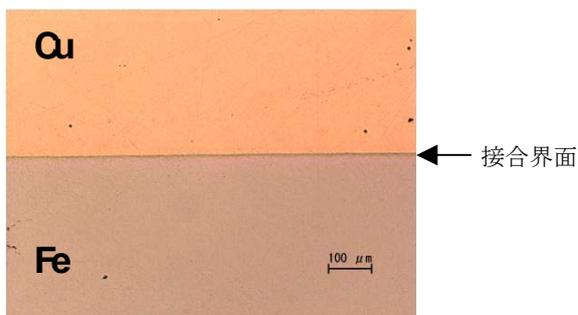


図1 鉄鋼—銅拡散接合材の接合界面写真

合界面にクラックが発生する懸念がある。よって、この接合材を繰り返し熱衝撃試験した。535℃に加熱した炉内に接合試験片を静置し、接合部の表面温度が500℃になった直後に30℃に保持した槽内で水冷するという熱衝撃を1,000回繰り返した。実際の金型ではキャビティ面からある程度離れた場所に鉄鋼—銅接合部が位置するため、接合部が500℃まで加熱されることはないと考えているが、加速試験とするために加熱温度を500℃と高く設定した。試験後に強制破断した結果、接合界面にはクラックの発生は確認できず、拡散接合した鉄鋼—銅接合界面は一定の耐熱衝撃特性を有していると言える。この鉄鋼—銅の拡散接合材を使って鉄鋼—銅ハイブリッド金型を試作した。

2.2 鉄鋼—銅ハイブリッド金型の概要

図3に作製した重力铸造用の金型の模式図を示す。金型は二種類あり、一つは鉄鋼と銅のブロックを拡散接合した後に機械加工して作製した金型(鉄鋼—銅金型)、もう一方は同じ形状の鉄鋼製の金型(鉄鋼金型)

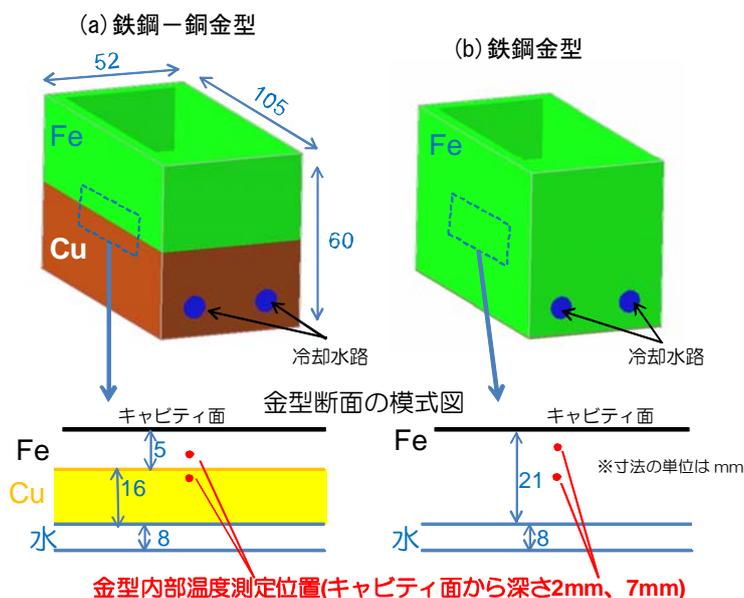


図3 作製した金型の模式図

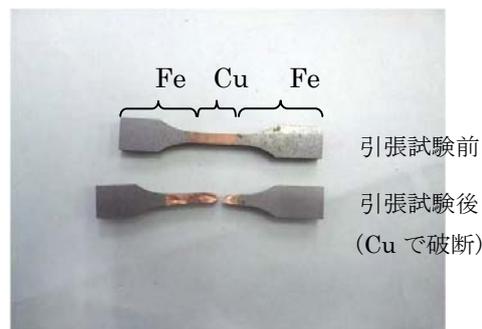


図2 鉄鋼—銅拡散接合材の引張試験前後の様子

であり、比較用である。金型は箱形でキャビティ底面は階段状になっており各寸法は図示のとおりである。どちらの金型も底部に冷却水路があり、铸造中は15℃の水を一定量流して金型冷却する。これらの金型を使って780℃で溶解した铸造用アルミニウム合金AC4Cを約230g重力铸造し、铸造中の金型内部温度および铸物温度変化を計測した。金型内部の温度はキャビティ底面から下方の水路に向かって2mmおよび7mmの位置に奥行き12mm(冷却水路の直上)の穴を開け、そこにφ1.6mmの熱電対を挿入して測定した。図4に注湯後の金型の様子を示す。

3 鉄鋼—銅ハイブリッド金型の冷却特性

3.1 金型および铸物の冷却に及ぼす銅の影響

図5に鉄鋼—銅および鉄鋼金型の铸造中の温度変化を示す。注湯直後から金型温度は急激に上昇し、時間の経過とともに下がってゆく。冷却過程のうち図中に矢印で示す部分は温度が若干上昇する傾向がある。こ



図4 鉄鋼—銅 金型を使った重力铸造の様子

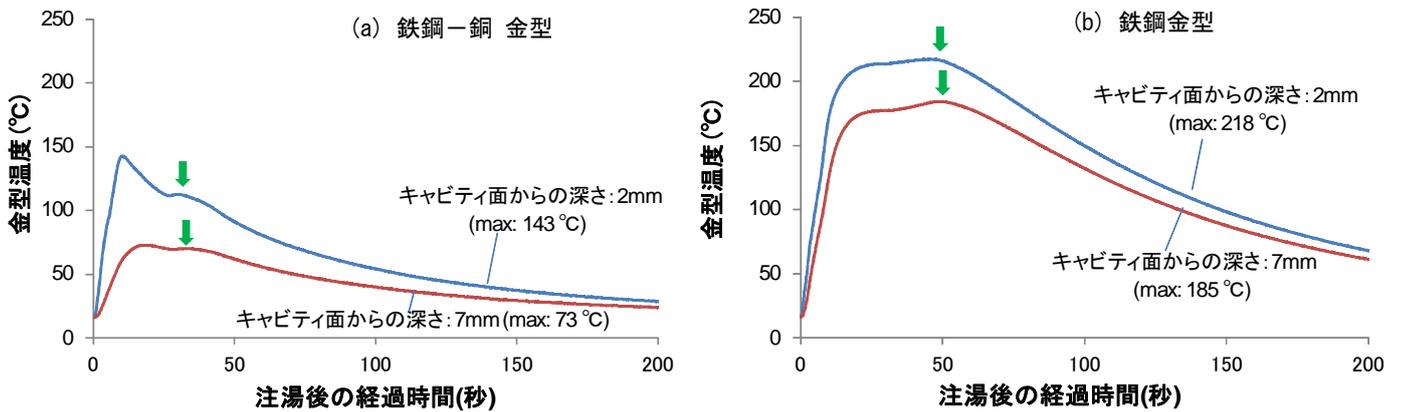


図5 注湯後の金型内部の温度変化

の現象は溶湯がAC4Cの固相線である555℃以下になった後に現れることから、凝固に伴う発熱反応により金型が加熱されていると考えられる。金型キャビティ面から深さ7mm位置の温度を金型別に比較すると、鉄鋼-銅金型は casting中に73℃まで上昇するが、鉄鋼金型はそれよりも110℃高い185℃まで上昇している。また、同位置の金型温度が50℃以下に冷却されるまでの時間を比較すると、鉄鋼-銅金型は60秒程度であるのに対し、鉄鋼金型では200秒以上要しており、鉄鋼-銅金型の冷却時間が短い。

図6に casting中の金型側面の温度分布をサーモグラフィで測定した結果を示す。全ての時間において鉄鋼-銅金型の表面温度は鉄鋼金型の表面温度よりも低くなっている。これらのことから、鉄鋼-銅金型の適用が冷却強化に効果的であることは明らかである。

3.2 金型温度の castingシミュレーション

鉄鋼-銅金型の温度変化や冷却効果がシミュレーション

で試算できれば金型設計の上で便利である。

castingシミュレーションシステムADSTEFAN(茨木日立情報サービス株)を用いて図3に示した鉄鋼-銅金型を使った casting中の金型温度をシミュレーションした。図7に鉄鋼-銅金型の内部温度の計算結果と実測値を比較して示す。実線が実測値で、点線がシミュレーション値である。シミュレーション値は実測値よりも低く、両者の差は最も大きいところで約80℃の開きがある。シミュレーション値が実測値よりも低いことから、熱抵抗値を見直すことにした。金型内部の鉄鋼-銅接合界面は、図2に示したとおり隙間が無いいため熱抵抗値は0m·K/Wとしていた。しかし、この値を高めめにチューニングすると、図7中の一点鎖線で示すように実測値にある程度近づくことがわかった。鉄鋼-銅の接合界面は光学顕微鏡レベルでは隙間なく接合されていた。しかし、仮に少量でも酸化物等の不純物が存在していれば、熱伝達が阻害され熱抵抗値が高くなった可能性があるため、今後詳細な検討が必要である。

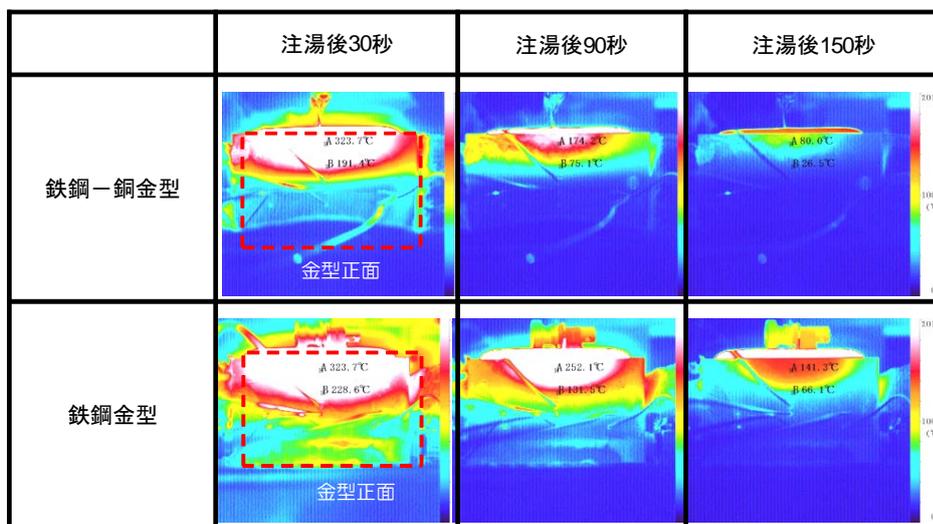


図6 金型温度分布の経時変化

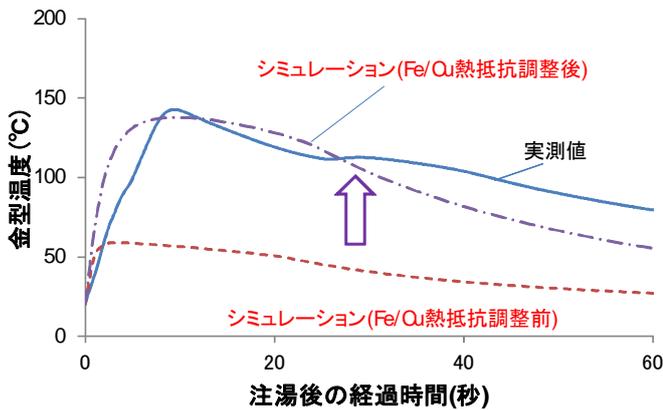


図7 鉄鋼-銅金型の温度変化における実測値とシミュレーション値の比較

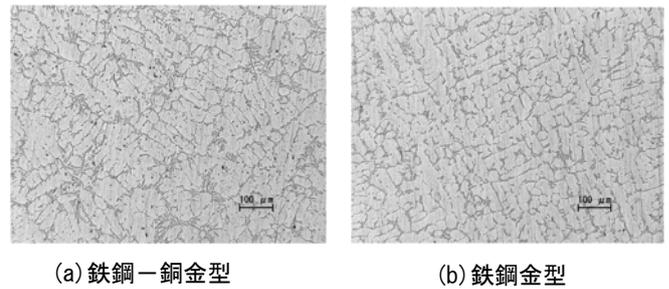


図8 重力铸造したAC4C合金の組織

3.3 アルミ 鋳物組織に及ぼす銅の影響

図8に鉄鋼-銅金型及び鉄鋼金型で重力铸造したアルミニウム合金AC4Cのマイクロ組織を示す。初晶アルミニウムのデンドライトセルの大きさはどちらもほぼ一定であり顕著な差はない。これら結晶粒の大きさは冷却速度に依存し、冷却速度が速いほど粒径は小さくなる。

図5に示したように、注湯後の金型温度は鉄鋼-銅金型が鉄鋼金型と比べて早く冷却されていた。一方、この図には鋳物の温度曲線は示していなかったが、鋳物が凝固し終わるまでの時間は両者に大きな差異はなかった(鉄鋼-銅:約17秒, 鉄鋼:約18秒)。よって、今回実験した重力铸造の条件ではマイクロ組織に差がないと考えられる。

鋳物の冷却には鋳型と鋳物の接触面の熱抵抗が大きく影響する⁵⁾。本研究の重力铸造では重力のみで金型に充填するが、予圧するダイカストやスクイズキャストでは重力铸造よりも鋳物-金型接触面の接触熱抵抗が低くなると考えられる。今後、鉄鋼-銅金型を適用する予定のこれらの鋳造法では今回の重力铸造よりも鋳物の冷却速度向上による機械的性質の向上が期待できる。

4 結 言

拡散接合により鉄鋼-銅金型を試作し、その金型を使ってアルミニウム合金を重力铸造した。金型への銅接合が金型冷却に及ぼす影響を調べた結果、得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 鉄鋼と銅を拡散接合した結果、接合部の引張強さは200 MPa以上、(500 °C⇔30 °C)×1,000サイクルの繰返し熱衝撃を受けてもこの接合部にはクラックが

発生しなかった。

- (2) 鉄鋼-銅金型を使って重力铸造した結果、鉄鋼金型よりも金型内部温度を約110°C低減できた。また金型冷却に要する時間も短いことから、鉄鋼-銅金型の適用はハイサイクル化に有効であると考えられる。
- (3) 鋳造時の鉄鋼-銅金型の内部温度をシミュレーションした結果、鉄鋼-銅接合界面の熱抵抗値を最適化すると実測値に近い値が得られた。
- (4) どちらの金型も鋳物の凝固までに要する時間がほぼ等しく、そのため鋳造材のマイクロ組織に大きな差異は確認できなかった。

今後は、同様の金型を用いて重力铸造法よりも冷却速度が速いダイカストやスクイズキャスト法で鋳物冷却速度を調査する必要がある。

文 献

- 1) 糸井, 土肥, 南, 高塚, アルトピア, 5 (1999) 20-26.
- 2) 井澤, 素形材, 9 (2010) 6-10.
- 3) 加田, 素形材, 9 (2011) 30-34.
- 4) 神尾他: アルミニウムの組織と性質, (1991), 520, 軽金属学会
- 5) 西田, 日本金属学会誌, 34 (1970) 1135-1139.