研究論文

液滴落下法による Al-4.5% Cu 合金と
チル・ブロック間の熱伝達係数測定

竹本 舜一*・竹内 宏昌*・鈴木 俊夫**

Measurement of heat transfer coefficient between molten
Al-4.5%Cu alloy and chill blocks by melt drop methodShun-ichi TAKEMOTO*, Hiromasa TAKEUCHI*
and Toshio SUZUKI**

Heat transfer coefficient at metal-mold interface during die casting was evaluated by the metal drop method. Solidification time at certain positions of a specimen was measured using thermocouples. It was also numerically calculated under corresponding experimental conditions with different values of heat transfer coefficient. The values of heat transfer coefficient were determined so as for both solidification time to coincide.

Keywords: Al-Cu alloys, heat transfer, heat flux, droplet, unidirectional solidification

(Received May 6, 1987)

1. 緒 言

近年、鋳物部品の品質に対する要求がますます厳しくなっている。ダイカスト鋳物においても例外でなく、その鋳造組織の制御が必要であると共に、表面欠陥の除去、さらに薄肉の大型鋳物の凝固時における熱変形も十分考慮せねばならない。ダイカスト鋳物における、これらの問題は凝固初期に形成される凝固シェル層と深く関係している。この初期凝固現象の解明には、その時点での鋳型-鋳物間の熱伝達係数（以下、単に熱伝達係数と略記する。）の値なしに取り扱うことはできない。したがって、ダイカスト法によって健全な鋳物を製造するには、その鋳造条件に見合った熱伝達係数を決めておく必要がある。この熱伝達係数は、これまで、筆者の一人によって、一方向凝固鋳物について熱収支の式（heat flux 法）を用い検討されてきた¹⁾。しかし、ダイカストのように急速凝固する鋳物の場合、この heat flux 法は熱電対の応答性の問題から誤差が大きいと考えられる。本研究では、ダイカスト鋳物の凝固に類似していると考えられる液滴落下法²⁾を用い、その液滴（鋳物）

の温度変化を測定して数値計算により熱伝達係数を求める方法を試みたので報告する。

2. 実験方法

2.1 測定方法

本実験の液滴落下装置の概略を Fig. 1 に示す。鋳鉄 (FC25)、黒鉛、純銅などのチル・ブロック（直径35 mm、厚さ30 mm）の表面上に石英管（内径8 mm）を用い、溶解炉（容量3 kW）内の4番の黒鉛るつぼから吸い上げた Al-4.5%Cu 合金を落下させた。その時の液滴（3~10 g）および各種チル・ブロックの温度変化は、それぞれ素線径0.1 mm のクロメル・アルメル熱電対および素線径0.3 mm のシース熱電対（外径1.6 mm）の熱起電力をトランジェント・コンバータに記憶させ、これを高感度記録計に再現させることによって求めた。なお、液滴側の熱電対の応答性を考慮し、熱接点部は被覆せずに行った。また、Fig. 1 の熱電対は、チル・ブロック表面から約1 mm と2 mm となるよう設置したが、実際には得られた試料ごとに熱電対の熱接点部を探しだし、チル・ブロック-液滴界面位置からの距離として表

* 東海大学工学部（平塚市）。School of Engineering, Tokai University (Hiratsuka).

** 長岡技術科学大学工学部（長岡市）。Faculty of Engineering, The Technological University of Nagaoka (Nagaoka).

Fig. 1 Experimental apparatus.

示した。液滴の落下時の温度は液相線上90°Cから220°Cとした。そして、目標とする液滴厚さを得るため石英管からチル・ブロックまでの落下距離を10 mm から500 mm の範囲で変化させた。なお、チル・ブロック表面粗さは、試料表面層組織に影響するため³⁾、チル・ブロック表面を毎回800番のエメリー紙で仕上げた。

2.2 計算方法

本研究の熱伝達係数の評価は、数値計算により液滴の温度変化を計算し、実際に熱電対により測定した温度変化と比較検討することによって行った。数値計算には、位置に関しては中心差分、時間に関しては、前進差分を用いた陽の差分法によるプログラムを使用した。また、潜熱の取り扱いには等価比熱法を用いた。液滴およびチル・ブロックの位置の分割は同一とし、液滴あるいはチル・ブロックいずれかの厳しい収束条件により時間きざみを決定した。液滴-チル・ブロック境界では熱伝達係数を有するニュートン冷却条件を与え、液滴、チルの両端接点温度の差分式を連立することにより、各接点温度を決定した。また、液滴上面は断熱とした。プログラム中では、すべての変数を無次元化したが、標準的な計算の場合の時間きざみは10 ms、液滴の厚さ方向の分割は25 μm 程度であった。計算に使用した Al-4.5%Cu 合金とチル・ブロックの物性値を Table 1 および Table 2 に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 マクロ組織と冷却曲線

液滴の断面マクロ組織の代表例を Fig. 2 に示す。このマクロ組織の底部がチル・ブロックとの接触面に相当する。その部分には、チル晶が存在し、液滴最上面まで柱状晶がよく発達しているのが分かる。本実験では、すべての液滴試料がこのような組織を呈した。Fig. 1 に示したように、液滴の落下場所には熱電対が設置されてい

Table 1 Thermal properties of droplets (Al-4.5% Cu Alloy) used

Liquidus temperature ($^{\circ}\text{C}$)		647
Solidus temperature ($^{\circ}\text{C}$)		569
Specific heat ($\text{cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$)	Liquid	0.22
	Solid	0.21
Thermal conductivity ($\text{cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}$)	Liquid	0.241
	Solid	0.431
Density (g/cm^3)	Liquid	2.645
	Solid	2.750
Latent heat of fusion (cal/g)		75.23

Table 2 Thermal properties of chill blocks

Chill block materials	T ($^{\circ}\text{C}$)	k ($\text{cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}$)	ρ (g/cm^3)	c ($\text{cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$)
Cast iron (FC25)	20	0.15	7.3	0.10
	400	0.14	7.1	0.17
Copper (99.9%)	20	0.94	9.0	0.09
	400	0.88	9.0	0.10
Graphite	20	0.50	2.27	0.165

T : Temperature k : Thermal conductivity
 ρ : Density c : Specific heat

Fig. 2 Macrostructures of Al-4.5%Cu alloy droplets.

る。液滴はこの熱電対を包むように凝固する。Fig. 3 は、その熱電対により測定された冷却曲線を示している。液滴試料内に熱量対の熱接点部が完全に入ったとき、その熱電対が示した冷却曲線を Fig. 3 の(a)に示す。

Fig. 3 Cooling curves of droplets. a: A thermocouple was placed at 5 mm from interface (Droplet thickness 6 mm, Droplet temperature 800°C, Chill block temperature 20°C). b: A thermocouple was placed at 3.6 mm from interface (Droplet thickness 3.8 mm, Droplet temperature 760°C, Chill block temperature 20°C).

Fig. 4 Thermal variation of droplet and chill block. (a) Cooling curve of location at 1 mm from interface. (b) Cooling curve of location at 2 mm from interface. (c) Thermal profile of cast iron chill block.

一方、接点部が試料内に十分に入らなかった場合の熱電対が示した冷却曲線を Fig. 3 の (b) に示す。液滴試料内に完全に入らなかった熱電対、あるいは液滴とチル・ブロックの間に位置した熱電対などの場合の冷却曲線は Fig. 3 の (a) と異なり、初期の最大値は存在せず緩慢な変化を示すか、または最大値を示した後、非常にゆるやかな変化を示すかの二者のどちらかである。したがっ

て、本実験では、最も正しいと解釈される冷却曲線 (Fig. 3 (a)) を示した試料のみ検討の対象とした。

3.2 数値計算による熱伝達係数の決定

Fig. 4 は 26.5°C の鋳鉄チル・ブロックに Al-4.5%Cu 合金液滴を落下させたときの液滴試料 (厚さ 4.5 mm) の熱電対の温度変化 (図中の黒丸) を示している。

Fig. 4(a), (b)は液滴のチル・ブロック側界面位置から1 mm と2 mm に挿入された熱電対の温度変化であり、Fig. 4(c)はチル・ブロックの表面から1.2 mm に設置されたシース熱電対の温度変化にそれぞれ相当する。図の熱電対の冷却曲線に液滴落下直後の値が記入されていないのは、熱電対の応答性に起因する。図中に併記されている実線は予め決めておいた熱伝達係数を用い、数値計算で求めた冷却曲線である。界面から2 mm の熱電対に注目すれば、実測の冷却曲線は数値計算の熱伝達係数 $0.12 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ より下側に、熱伝達係数 $0.16 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ の冷却曲線より上側に存在している。そして、熱伝達係数 $0.14 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ の冷却曲線と実測値がほぼ一致していることが分かる。一方、1 mm の熱電対の冷却曲線も熱伝達係数 $0.14 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ として求めた冷却曲線とほぼ一致していることが分かる。したがって、液滴内の異なる位置においても、算出された熱伝達係数は一致した。Fig. 4の(c)は実測値 (CA 1.2 mm) と熱伝達係数を $0.14 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ として求めた計算値の加熱曲線に相当する。鋳型界面温度は液滴落下直後から急上昇している。そして、界面から2.5 mm 入った位置の鋳型温度は液滴落下から数10 ms 後に温度上昇が見られ、その上昇率は鋳型表面のそれより小さい。一方、実際に熱電対が挿入された位置は界面から1.2 mm であるから、実測値は Fig. 4の(c)の両曲線の間値をとらねばならないが、シース熱電対の鋳型との接触抵抗あるいは応答性の問題から計算値とかなり異なっている。なお、Fig. 4の(a), (b)において液相線温度以降の実測値と計算値に差が生じているのは、計算における潜熱の取り扱いにおいて等価比熱法を用いたためである。

heat flux 法で求めた熱伝達係数は、熔融金属がチル面に接触してからの経過時間に伴い、最小値から最大値を経て、その後ゆるやかな減少を示す¹⁴⁾。そこで、熱伝達係数を変化させた場合について検討を試みた。Fig. 5は、これまで議論してきた Fig. 4(b)の実測値に熱伝達係数が一定値でない場合の4つのタイプを併記したものである。それらは、熱伝達係数が液滴落下から1 sec 後に $0.1 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ (○印) あるいは $0.3 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ (●印) の最大値を示した後、その最大値を維持する2種と、熱伝達係数が落下直後の大きな値 $0.3 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ (◇印) あるいは $0.2 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ (◆印) から1 sec 後に $0.1 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ まで減少し、その後は $0.1 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ の値を維持する2種の計4種類である。熱伝達係数が液滴落下から1 sec 後に最大値を示すと考えた場合の冷却曲線は、初期の冷却速度が小さく、実際の熱電対の冷却曲線と異なる。一方、熱伝達係数が最大値から減少すると考えた場合の冷却曲線は、初期の冷却速度が著しく大きく、これも実際の熱電対の冷却曲

Fig. 5 Cooling curve of location at 2 mm from interface of droplet (Thickness 4.5 mm).

Fig. 6 Relationship between cooling time up to liquidus temperature and heat transfer coefficient.

Fig. 7 Thermal variation of droplet and chill block.

(a) Cooling curve of location at 1 mm from interface of graphite chill block (Graphite mold, Droplet thickness 5.3 mm). (b) Cooling curve of location at 2 mm from interface of graphite chill block (Copper mold, Droplet thickness 3.4 mm). (c) Thermal profile in graphite chill block. (d) Thermal profile in copper chill block.

線と異なる。したがって、液滴温度が液相温度に到達するまでの熱伝達係数は、一定値とした方が実測値とよく一致することが分かった。

つぎに、熱伝達係数の値を決定する方法について述べる。Fig. 6は数値計算による液相線温度到達時間と熱伝達係数の関係を示したものである。この液滴の落下温度は860°C、試料厚さは4.5 mm、铸铁チル・ブロックの初期温度は26.5°Cである。なお、図中の黒丸は計算値である。液滴のチル・ブロック界面から1 mmと2 mmの位置の凝固開始時間は、熱伝達係数の値にかかわらず、1 mmの方が130~140 ms程度速かった。液滴に挿入された1 mmと2 mmの熱電対の液相線温度到達時間は図中に矢印で示したように800 msと870 msであったので、熱伝達係数はそれぞれ0.133と0.148と読み取れる。この

ように、両者に差を生じた理由は、熱電対の挿入位置の測定、熱電対の感度、得られた素データの読み取りなどの誤差によるものと考えられる。したがって、誤差を考慮すれば、この液滴の熱伝達係数の値はほぼ0.14 $\text{cal/cm}^2\text{sec}^\circ\text{C}$ と考えた方が妥当であろう。

3.3 熱伝達係数に及ぼすチル・ブロック材料の影響

チル・ブロック材料が黒鉛と純銅の場合の液滴の冷却曲線とチル・ブロックの加熱曲線をFig. 7に示す。試料製造条件は、液滴落下温度が800°C、チル・ブロックの初期温度が30°Cであった。チル・ブロックが黒鉛の場合、液滴の試料厚さは5.3 mm、熱電対位置は界面から1 mmに存在した。実測の冷却曲線は、熱伝達係数を0.078として計算した冷却曲線に一致している。また、熱電対が液相線温度に到達した時間は980 msであった。

一方、純銅の場合、液滴の試料厚さは3.4 mm、熱電対は界面から2 mmの位置に存在していた。実測の冷却曲線は熱伝達係数が $0.12 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ と $0.14 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ として計算で求めた冷却曲線の中間に位置した。熱電対が液相線温度に到達した時間は480 msであり、熱伝達係数は $0.13 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ であった。

チル・ブロックの温度変化は鋳鉄 (Fig. 4(c)) 同様に計算値と異なっている。そして、熱電対の応答性は純銅、グラファイト、鋳鉄の順によくなっている。純銅の場合は1 secで応答しているので、これ以降であれば、heat flux法で熱伝達係数を評価することはできるであろう。これに対して、グラファイト、鋳鉄の場合は、1 sec後も、熱電対と計算値の差は大きい。したがって、1 sec以内での、この二つに関してはheat flux法で正しく熱伝達係数を評価することは無理であることが分かった。

4. 結 言

本実験の結果、つぎのことが明らかになった。

(1) 液滴落下法により鋳物-金型間の熱伝達係数を評価し、下記の値を得た。

純銅チル・ブロックの場合、 $0.13 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$

グラファイトチル・ブロックの場合、 $0.08 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$

鋳鉄チル・ブロックの場合、 $0.14 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$

(2) チル・ブロック内の温度測定に関しては、純銅の場合短時間に応答するが、グラファイト、鋳鉄の測定に、遅れがみられる。したがって、この場合 heat flux法より液滴落下法が優れている。

参 考 文 献

- 1) たとえば、西 直美, 竹内宏昌, 内田荘祐: 鋳物, **5** (1982), 718.
- 2) 竹内宏昌, 西 直美: 日本金属学会誌, **48** (1984), 633.
- 3) 西 直美, 竹内宏昌, 内田荘祐: 東海大学紀要工学部, **24** (1984), No. 1, 97.
- 4) 梶山正孝, 梅田高照, 竹内宏昌, 加藤 寛: 鋳物, **49** (1975), 178.