

## 1 論文 Article

## AC4C アルミニウム合金の湯流れ性に及ぼす鑄造条件及び塗型の影響

原稿受付 2021年4月20日

ものづくり大学紀要 第11号 (2021) 29~35

佐藤裕樹\*1, 西直美\*2

\*1 ものづくり大学 技能工芸学部 製造学科 (現 東京軽合金株式会社)

\*2 ものづくり大学 技能工芸学部 総合機械学科

## Effects of casting conditions and coating on the fluidity of AC4C Aluminum alloy

Yuki SATO \*1, Naomi NISHI\*2

\*1 Student, Department of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists

\*2 Department of Mechanical and Production Engineering, Institute of Technologists

## Abstract

In metal mold casting, various casting surface defects occur depending on the casting conditions. As a countermeasure, a coating is applied to the mold. However, coating is often done with experience and intuition. In this study, the effects of casting conditions and mold coating were investigated on the fluidity of AC4C aluminum alloy. As a result, it was found that the higher the casting temperature and the mold temperature, the longer the flow length. And that by applying the mold coating, the flow length becomes significantly longer and the casting surface defects were reduced. Also, the heat transfer coefficients between the molten metal and the metal mold were measured, the heat transfer coefficients were reduced to about 1/5 by applying the coating mold. In addition, CAE analysis using the obtained heat transfer coefficient confirmed that the measured flow length and the analyzed flow length were almost the same.

**Key Words:** Aluminum alloy, Permanent mold casting, heat transfer coefficient, fluidity test, mold coating

## 1. はじめに

金属を加工して製品を作る方法には、鍛造、プレス、鑄造、研削、切削、溶接など様々な種類があるが、鑄造は鍛造に次いで古くから行われている加工法である。鑄造は、機械加工では納期やコストの面で、量産では困難とされるような複雑形状のものを容易に作るができる。中でも、金型鑄造は寸法精度に優れ、品質の良い鑄物を作ることができ、今日の工業製品、特に自動車部品に多く用いられている。

しかし、鑄造は、熔融状態から固体状態への相変態を伴うことから様々な不良が発生する。特に金型鑄造では、鑄造温度、金型温度、注湯速度などの諸条件によって溶湯の流動状態が異なり、湯回り不良や「吹かれ」や「きらい」といった鑄肌不良が発生しやすい<sup>1),2)</sup>。これらの不良の発生を防止する目的で、金型鑄造では数百ショット毎に塗型が施

される。塗型の骨材は、カオリン、滑石、アルミナ、ジルコニアなどの粉末を用い、バインダーには珪酸ソーダ（水ガラス）が使用される<sup>3)</sup>。

金型への塗型の施工は、生産現場での勘と経験に基づいて行われることが多く、「暗黙知」の領域を出ない。そこで、本研究では、AC4C アルミニウム合金を用いて湯流れ性試験を行い、流動長さ、鑄肌状態に影響する鑄造条件及び塗型の影響について調査した。また、これらの影響を定量的に評価するため、CAE 解析を用いて湯流れ試験との整合性を評価した。

## 2. 実験方法

## 2.1 湯流れ性試験

湯流れ性試験に供した装置を Fig. 2.1 に示す。装置は、水平方向への流れを安定化させるために、流動末端側を 2deg 上方に傾斜させた。装置は S45C

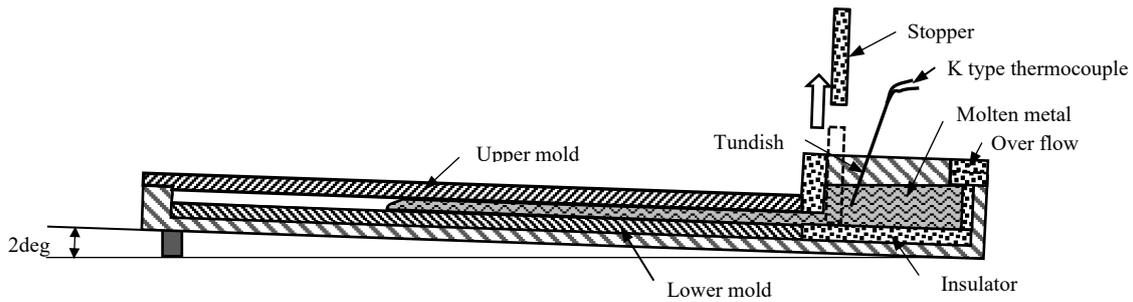


Fig.1 Schematic drawing of experimental apparatus

Table 2.1 Chemical composition of AC4C aluminum alloy(mass%)

Cu	Si	Mg	Fe	Zn	Ni	Cr	Ti	Pb	Sn	Al
0.12	7.08	0.38	0.29	0.08	0.03	0.02	0.16	0.00	0.00	Bal.

で製作し、装置には金型材として一般的に使用される SKD61 で作製した上型と下型を設置した。注湯部（湯溜まり部）及びオーバーフローには板厚 5mm のアルミ工業用耐熱材レセパル（(株)エーアンドエーマテリアル）を使用した。金型内の空洞（キャビティ）の寸法は、幅 40mm、高さ 5mm、長さ 450mm とした。

下型には塗型なし、塗型ありの 2 種類を用いた。塗型にはフォセコ 2500（フォセコ）を使用した。膜厚を 3 点で測定し、平均した結果、下型で 80 $\mu$ m、上型で 83 $\mu$ m であった。

Table 2.1 に実験に用いた鋳造用アルミニウム合金 JIS AC4C の化学組成を示す。物性値計算ソフトの JMatPro(Thermo Tech 社)の計算によると液相線温度が 612 $^{\circ}$ C、固相線温度が 545 $^{\circ}$ Cである<sup>4)</sup>。

溶湯は、約 700g を小型高周波溶解炉にて約 720 $^{\circ}$ C で溶製した。上下の金型は、室温 (25 $^{\circ}$ C)、型温 150 $^{\circ}$ C、型温 300 $^{\circ}$ C の 3 水準とした。溶湯のヘッド高さを一定 (約 50mm) とするため、試験中は溶湯を湯溜まり部背後からオーバーフローさせた。

鋳造は、注湯部に溶湯を注ぎ込み、所定の温度に達した時点で、ストッパーを開放して金型内に流動させて行った。なお、溶湯の温度は、660 $^{\circ}$ C $\pm$ 10 $^{\circ}$ C、710 $^{\circ}$ C $\pm$ 10 $^{\circ}$ C の 2 水準とした。

## 2.2 熱伝達係数測定

CAE 解析を行う際の境界条件となる溶湯-金型間の熱伝達係数を実測した。Fig.2.2 に熱伝達係数の測定に使用した装置の模式図を示す。装置は、溶湯を注湯するシリンダー部と金型に相当するチル

ブロックからなる。シリンダーは、高さ 30mm、直径 35mm、厚さ 0.5mm のステンレス鋼 SUS304 のパイプを使用した。下部のチルブロックは高さ 30mm、直径 35mm の合金工具鋼 SKD61 の丸棒を使用した。シリンダーの内面には、チルブロックへの熱流を一方向にするために、セラミックファイバーシート (BSFP300, 坂口電熱株式会社製) を張り付けた。

溶湯とチルブロック内の温度変化を測定するために、界面から 0mm、5mm、10mm の位置に  $\phi$ 0.3mm の K 種裸熱電対を設置し、チルブロック内には 5mm、10mm、28.75mm の位置に外径  $\phi$ 1mm の K 種シース熱電対を装入した。また、チルブロックの熱電対挿入穴には、隙間を埋めるために銀ペーストを装填した。温度測定は、サンプリング間隔 100ms で、約 2min 測定した。使用材料は Table 2.1 と同様の AC4C アルミニウム合金とした。溶湯温度は、700 $\pm$ 10 $^{\circ}$ C、チルブロック温度は、室温 (25 $^{\circ}$ C) とした。チルブロックは、塗型なしと塗型あり (塗型膜厚は 104 $\mu$ m) を用いた。

熱伝達係数は、式 2.1 を用いて計算した<sup>5)</sup>。

$$h = -K \left( \frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \frac{1}{(T_c - T_i)} \quad (2.1)$$

ここで、

$h$  : 熱伝達係数 (W/(m<sup>2</sup>·K))

$\Delta T$  : 時間  $t$  において、 $\Delta x$  での温度とチルブロック側界面温度  $T_i$  との差( $^{\circ}$ C)

$\Delta x$  : チルブロック側界面から 1.25mm の熱電対距離(m)

$T_i$  : 時間  $t$  におけるチルブロック側界面温度( $^{\circ}$ C)

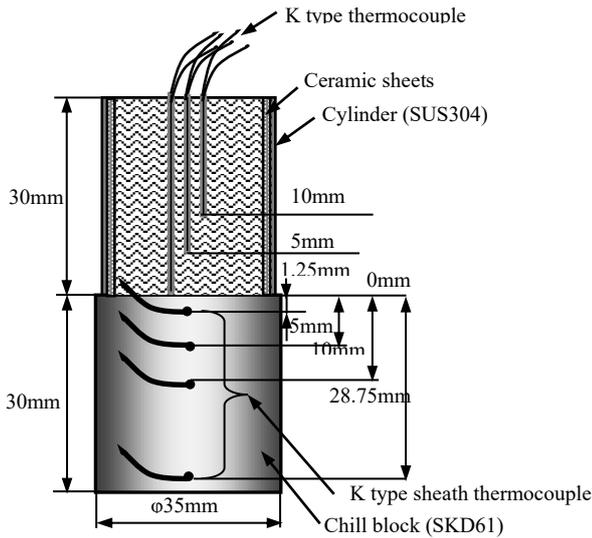


Fig.2.2 Experimental apparatus for heat transfer coefficient

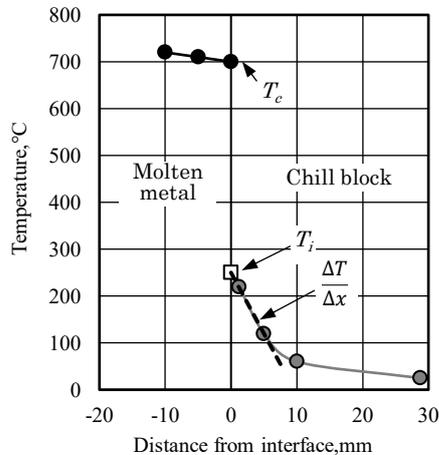


Fig.2.3 Temperature profile in molten metal and chill block.

$T_c$  : 時間  $t$  における溶湯側界面温度(°C)

$K$  : 熱伝導率 ( $W/(m \cdot K)$ ) , SKD61 では  $28.6W/(m \cdot K)$

Fig.2.3 にシリンダー内の溶湯及びチルブロック内の温度分布の例を示す。溶湯側界面温度  $T_c$  は界面に設置した熱電対から求めた。チルブロック側の界面温度  $T_i$  は、チルブロック内の4点の温度を多項式近似して外挿して求めた。またチルブロック側の温度勾配  $\Delta T/\Delta x$  は、 $T_i$  と 1.25mm の位置の温度を直線近似して求めた。

### 2.3 CAE 解析

実測した流動長と CAE 解析による流動長の整合性を検討するために、市販の解析ソフト「Pro Cast」

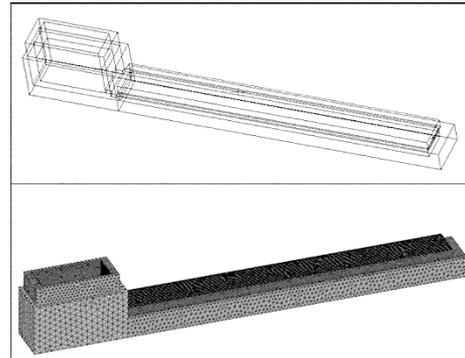


Fig. 2.4 Mesh model of fluidity test experimental apparatus

Table 2.1 Initial conditions

	Materials	Temperature(°C)
Mold	SKD61	25, 150°C, 300°C
Tundish	Insulation tile	25, 150°C, 300°C
Molten metal	AC4C	660°C, 710°C
Air	Air	25°C

Table 2.2 Boundary conditions

Material 1	Material 2	$kW/(m^2 \cdot K)^{-1}$
Castings	Metal mold	Non coating :9.5, Coating:1.4
Castings	Insulation	0.1
Insulation	Metal mold	0.1

(ESI Group) を用いて評価した<sup>4)</sup>。装置の 3D モデルは、SolidWorks を用いて作成した。Pro Cast でのメッシュ作成は、有限要素法で行い、Table 2.2 に示す条件で分割した。Fig.2.4 に解析モデルを示す。また、解析に用いた材料及び初期条件を Table 2.3 に、境界条件を Table 2.4 に示す。金型の温度条件には湯流れ試験での条件と同じく室温 (25°C) , 150°C, 300°C の 3 水準とし、溶湯温度は金湯流れ試験で測定された鑄込み温度を用いた。なお、溶湯-金型の熱伝達係数は、2.2 で測定した値を用いた。また、流動停止の固相率を 30% とした。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 湯流れ性試験

Fig. 3.1 に湯流れ性試験で得られた試験片の下部側の外観を示す。(a)~(c)は、塗型なしで溶湯温度が異なる試験片を示している。(a)の塗型なしの室温の金型では、鑄肌に凹みが見られる。これは金型に吸着されていた水分が溶湯の熱でガス化して形成された「きらい」や「吹かれ」の欠陥であると

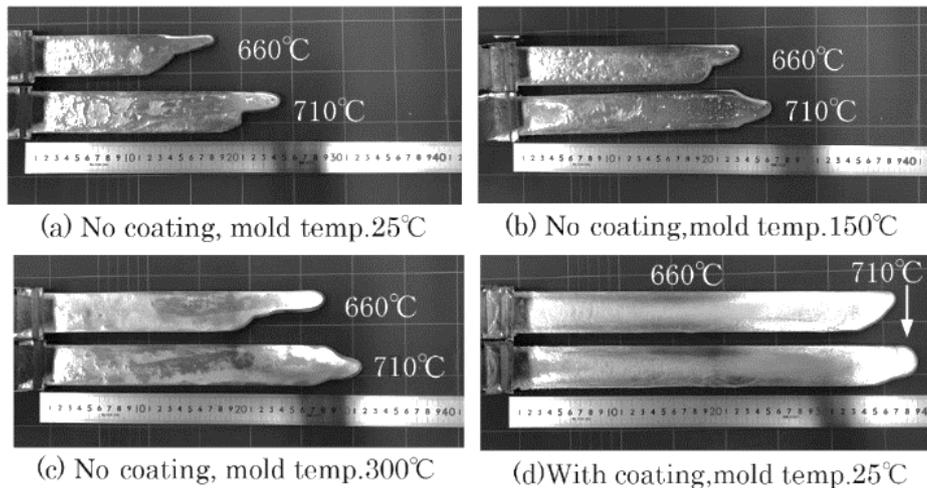


Fig. 3.1 Appearance of lower mold side of test pieces obtained by fluidity test

思われる<sup>2)</sup>。(b),(c)の金型を加熱した場合には(a)で見られるような深い凹みは見られないが、軽微な凹みが見られ、金型温度が高いほど浅くなる傾向にある。また、溶湯温度の違いで比較すると、溶湯温度が高いほど流動長さが長くなる傾向にある。(d)の塗型ありの場合は、金型温度が室温にもかかわらず、「きれい」や「吹かれ」といった鋳肌欠陥は見られず、また、流動長さも塗型なしの2倍程度長くなっている。

流動停止した先端部は、塗型なしの場合、部分的に突出した領域が認められる。これは、流れが均一となっておらず、金型の壁面と接触している溶湯が先行して冷却され、温度の高い部分の溶湯が流動を続けていたためであると考えられる。塗型のある試験片は先端形状が揃っており、塗型により溶湯が保温状態にあるために、均一な流れをしたものと考えられる。

Fig.3.2 に、鋳込み温度と流動長さの関係を塗型の有無、金型温度ごとに層別して示す。塗型なしの室温の金型では、鋳込み温度が上がるにつれ流動長さが長くなった。金型温度 150°Cも同様に鋳込み温度に対し流動長が向上したが、室温金型の場合と同程度の長さであった。金型温度が 300°Cになると、同じ鋳込み温度でも流動長さが長くなった。Fig.3.3 に、溶湯温度 660±20°Cと 710±20°Cの場合の金型温度と流動長さの関係を示す。

M.C.Flemings は、固液共存幅のある合金の流動長さを式 3.1 で表されることを提案している<sup>9)</sup>。これは、流動・凝固に伴い溶湯が失う熱量と金型が奪う

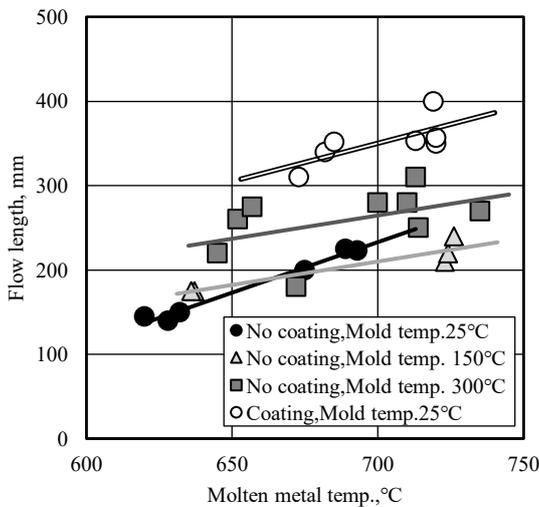


Fig.3.2 Relation between molten metal temperature and flow length

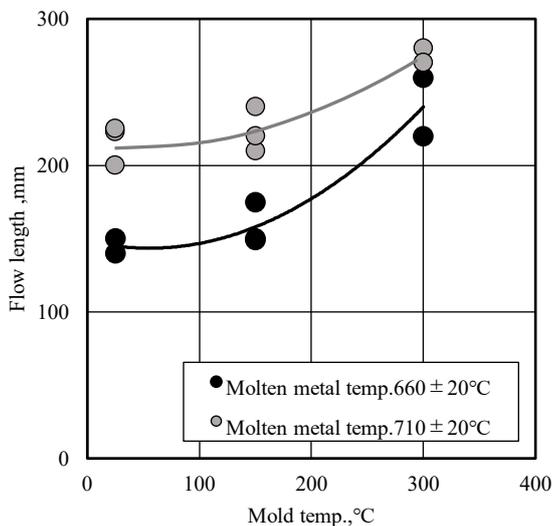


Fig.3.3 Relation between mold temperature and flow length(no coating)

熱量が等しく熱収支が成り立つとし、流動中の溶湯の先端にある程度の固相が晶出（流動停止固相率）した時点で、流動が停止するとして導かれたものである。

$$L_f = \frac{\rho[c(\theta_c - \theta_L) + f_c H_f]wS}{h(\theta_L - \theta_0)C} \quad (3.1)$$

ここで、 $L_f$ : 流動長(m),  $\rho$ : 溶湯の密度(kg/m<sup>3</sup>),  $c$ : 溶湯の比熱(J/(kg·K)),  $\theta_c$ : 溶湯温度(°C),  $\theta_L$ : 液相線温度(°C),  $f_c$ : 流動停止固相率,  $H_f$ : 凝固潜熱(J/kg),  $w$ : 溶湯の流速(m/s),  $S$ : 流動断面積(m<sup>2</sup>),  $h$ : 溶湯-金型間の熱伝達係数(W/(m<sup>2</sup>·K)),  $\theta_0$ : 金型温度(°C),  $C$ : 周長(m)である。

この式の意味する所は、流動長さは液相線温度  $\theta_L$  と金型温度  $\theta_0$  の差に反比例することである。つまり、流動長さは金型温度高いほど長くなるが、金型温度が低い場合には大きな差はなく、金型温度が液相線温度に近づくにつれて急激に流動長さが長くなる。Fig.3.2 で金型が室温と 150°C で流動長さに大きな違いが見られなかったのはこのためと考えられる。なお、鑄込み温度が高いほど流動長さが長くなるのは、式 3.1 の分子の第 1 項の( )内が大きくなるため、単純に鑄込み温度に比例するからである。

金型温度が室温で塗型の有無により流動長さが倍近い差がある。これは、塗型なしの場合に比較して塗型ありの場合は、式 3.1 の分母の熱伝達係数  $h$  が小さくなるためである。これについては次節で検討する。

### 3.2 溶湯—金型間の熱伝達係数

Fig.3.4 に塗型なしのチルブロックを用いたときの熱伝達係数の時間変化を示す。熱伝達係数は、時間の経過と共に急激に増加し、最大値を迎えた後低下して一定の値となる。初期は、溶湯とチルブロックの接触が不十分であるが、鑄込み完了時点で接触が最も良好となり、その後凝固が進むとチルブロック面との接触面に形成された凝固殻が収縮して、チルブロックから離れるために熱伝達係数が小さくなると考えられる。したがって、溶湯—チルブロック間の熱伝達係数は、Fig.3.4 の最大値と見なすことができるものと考えられる<sup>5)</sup>。ここでは、

最大値の前後 3 点の平均を取りこれを熱伝達係数とみなした。これより、塗型なしの熱伝達係数は、9.5kW/(m<sup>2</sup>·K)と見積もられる。

Fig.3.5 にチルブロックと接して凝固した鑄物の

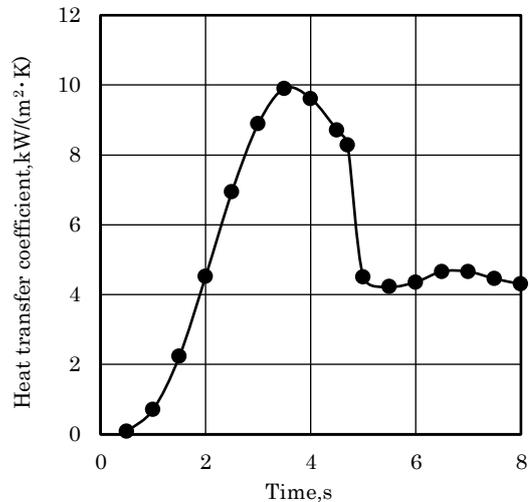


Fig.3.4 Variation of heat transfer coefficient (no coating)

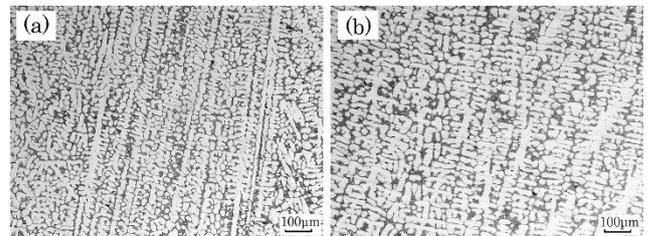


Fig.3.5 Longitudinal microstructures of castings (a)No coating, (b)With coating

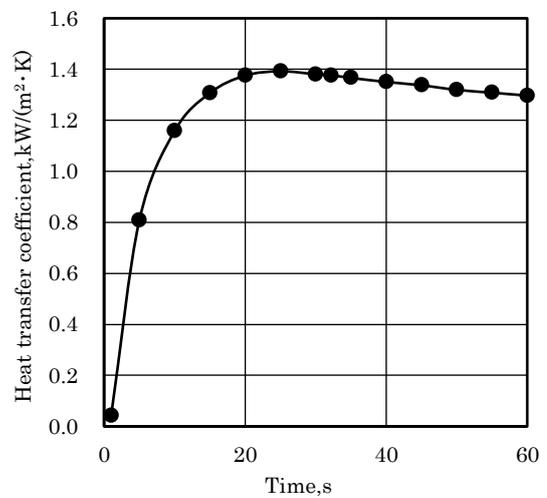


Fig.3.6 Variation of heat transfer coefficient (with coating)

置は界面から約 5mm である。図の下部がチルブロック方向で、熱流方向にデンドライトが成長しておりシリンダー内の溶湯の熱流が上部から下部に向かって一次元熱流となっていたことが確認できる。また、デンドライトの粗さは、塗型ありの場合が塗型なしに比較して粗大であり、塗型の断熱効果により冷却速度が小さくなったことによるものと考えられる。

Fig.3.6 に塗型ありのチルブロックの熱伝達係数の時間変化を示す。塗型なしに比較して熱伝達係数が最大値となる時間は、かなり長く 20s となっている。これは、当然ながら塗型の断熱効果により、冷却速度が遅くなったためである。塗型なしと同様に、最大値前後の 3 点の平均を取りこれを塗型ありの熱伝達係数とすると  $1.4\text{kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  となり、塗型なしに比べて 1/5 程度小さくなった。

### 3.3 CAE 解析との整合性

Fig.3.7 に湯流れ試験と CAE 解析の例として、金型温度  $150^\circ\text{C}$ 、溶湯温度  $720^\circ\text{C}$  で試験したときの試験片と CAE 解析で得られた結果を示す。計算に用いた熱伝達係数は 3.2 で得られた値を用いた。実験での流動長さは 215mm で、解析での流動長さは 248mm であった。

Fig.3.8 に各条件での湯流れ試験で得られた流動長さと CAE による解析で得られた流動長さを示す。

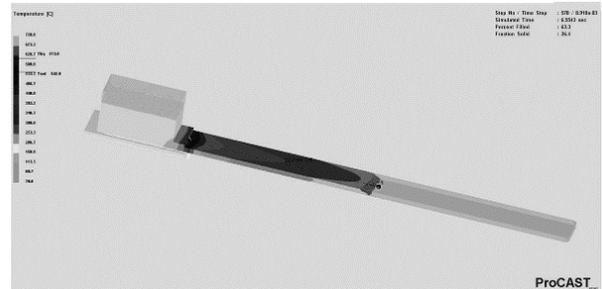


Fig.3.7 Example of fluidity experiment and CAE analysis

塗型なしで、室温の金型の場合、実験による流動長さは、解析値の流動長より約 50mm 短かった。これは、解析上の熱伝達係数は「きれい」や「吹かれ」といったガス欠陥による断熱性を考慮していないためであると考えられる。塗型なしで金型温度  $150^\circ\text{C}$  と  $300^\circ\text{C}$  では CAE 解析値の流動長が約 30mm 長い結果となった。実験値と解析の差が約 10%程度なので、解析により流動長さがほぼ再現できたものと思われる。

塗型ありの条件では、実験で得られた流動長さが 371mm であるのに対して CAE 解析による流動長さは 446mm と大きく、両者の差が大きく現れて

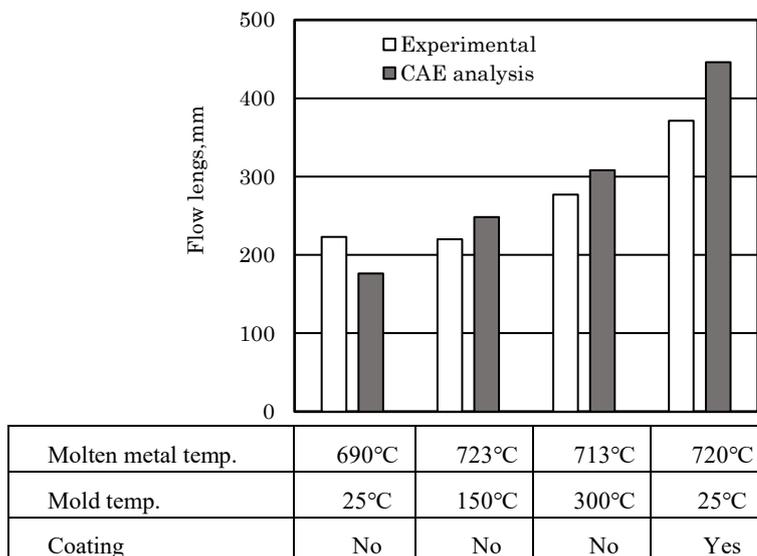


Fig.3.8 Comparison of fluidity experiment and CAE analysis

いる。湯流れ試験では、上型と下型のみに塗型をしているが、壁面には塗型をしていない。しかし、CAE 解析上では金型全体に塗型をしていることが一因と考えられる。

その他の原因として熱伝達係数の値が不適切であった可能性もある。そこで、逆解析、つまり実流動長さに合う熱伝達係数を繰り返しの計算によって求めた。結果は、 $3\text{kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であった。この点については今後更に検討する必要がある。

以上、金型に塗型を施すことで溶湯－金型間の熱伝達係数が 1/3 程度となり、流動性が大幅に向上することから、事前に流動長さの計算あるいは CAE 解析を行うことで、塗型の施工条件を検討できるものと考えられる。それには、塗型の種類、塗布条件などを変えてさらなるデータを取得する必要がある。

## 5.まとめ

従来、勘と経験で行われる金型鑄造用金型への塗型の施工に関して、その評価を定量的に行うために、AC4C アルミニウム合金を用いて湯流れ性試験を行い、流動長さ、鑄肌状態に影響する鑄造条件及び塗型の影響について調査した。また、塗型の有無による溶湯－金型界面の熱伝達係数を測定し、それに基づいて CAE 解析を行い、湯流れ試験との整合性を評価した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 流動長さは、鑄込み温度が高くなるにつれて向上した。また、金型温度が低い場合は流動長さに大きな差は見られないが、金型温度が  $300^\circ\text{C}$  と高くなると流動長が向上した。塗型を施工することによって流動長が大きく向上し、金型温度が室温ではほぼ 2 倍の流動長さとなった。
- (2) 塗型なしで室温の金型では金型に吸着されて

いた水分のガス化によると見られる凹みを観察された。金型温度を  $150^\circ\text{C}$ 、 $300^\circ\text{C}$  では凹みが少なく、室温金型より平滑な鑄肌となった。塗型を施工した金型では凹みは見られず平滑な鑄肌となった。

- (3) 溶湯－金型間の熱伝達係数は、塗型なしの場合には  $9.5\text{kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  と大きな値であったが、塗型ありの場合には  $1.4\text{kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  と大きく低下した。塗型により溶湯の保温性が大きく向上することが確認された。
- (4) 実験により求めた熱伝達係数を用いて、CAE 解析により流動長さを計算したところ、塗型なしの場合は実験値と解析値はほぼ一致し、CAE 解析により湯流れ性を評価することができる。しかし、塗型ありの場合は両者に差があるため、逆解析により熱伝達係数を求めたところ  $3.0\text{kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  程度が妥当であると判断された。

## 謝辞

本件研究を遂行するにあたり、金型の塗型施工にご協力頂いた(株)東京軽合金製作所様、CAE 解析のご指導を頂いた ESI Group の岩田様に感謝申し上げます。

## 文 献

- 1) 山浦秀樹：金型鑄造法，低圧鑄造法，鑄造工学，Vol.86，No.7，pp.569-574(2014)
- 2) 寺内 博：金型（金型鑄造法，低圧鑄造法），鑄造工学，Vol.86，No.7，pp.745-749(2014)
- 3) 西 直美：わかる！使える！鑄造入門，日刊工業新聞社，pp.116-117(2018)
- 4) ESI Group [https://www.esi-group.com/jp\(2020\)](https://www.esi-group.com/jp(2020))
- 5) 椋山正孝，梅田高照，竹内宏昌，加藤 寛：鑄型－鑄物間の熱伝達について，鑄物，Vol.47，No.3，pp178-183(1975)
- 6) M.C.Flemings：Solidification Processing，McGraw-Hill，

