

論文 Article

AC4C アルミニウム合金の湯流れ性に及ぼす金型表面溝の影響

原稿受付 2020 年 7 月 31 日

ものつくり大学紀要 第 10 号 (2020) 35 ~ 42

加藤祐樹^{*1}, 西 直美^{*2}^{*1} ものつくり大学大学院 ものつくり学研究科 修士課程 (現 三井精機工業株式会社)^{*2} ものつくり大学 技能工芸学部 総合機械学科

Effect of Surface grooves of Die on Molten Metal Fluidity of AC4C Aluminum Alloy

Yuki KATO^{*1}, Naomi NISHI^{*2}^{*1} Graduate school of Technologists, Institute of Technologists^{*2} Department of Mechanical and Production Engineering, Institute of Technologist

Abstract

The effects of V type groove of die surface, which is often applied to gravity die casting and low-pressure casting, were evaluated by molten metal fluidity test of AC4C alloy. In the case of no coating, the effects of V-groove of die surfaces on fluid flow were not recognized. However, in the case of coated die, the flow length increases by V-groove. The flow length did not become long in the cross groove, but the flow in the direction perpendicular to the flow direction was good.

Key Words: Aluminum alloy, Permanent mold casing, Surface groove, Fluidity test, Mold coating

1. はじめに

鋳造は、溶解した金属を砂や金属で作られた型に流し込み、目的の形状を得る加工である。鋳造のプロセスでは鋳型内の目的の形状をもった空間(キャビティ)に熔融金属を充填・凝固させるため形状の自由度が高く、複雑な形状の製品が比較的容易に成形できる¹⁾。

しかし、鋳造では熔融金属(以後、溶湯)の流れや凝固、冷却などのさまざまな要因を考慮して方案を設計する必要があるうえ、温度や湿度などの環境、鋳物や鋳型の材料などは厳密な管理が必要で、不良率は他の加工法に比べて高くなる。さらに鋳物の形状や肉厚などは製品によって異なるため、欠陥の防止や改善のための対策は個別に検討する必要がある。これは鋳型の内部で進行する熔融金属の流れや凝固の計測が難しいことも要因の一つになっており、鋳物を作るために多くの経験や暗黙知を必要としている。

特に、重力金型鋳造や低圧鋳造において、湯流れ

性や通気性を確保するために経験的に金型表面に凹凸状やV字状の溝を付けることが行われている^{2),3)}。しかし、これらの形状による効果の違いは明らかになっておらず、各社の経験で使い分けられている。

本研究では、溝加工により流動性が向上するメカニズムを明らかにするとともに、その効果を定量化することで金型の溝形状の最適化につなげることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 実験装置

湯流れ性を評価するため、Fig. 1の模式図に示す装置を用いて流動長を測定した。キャビティ先端部の上型には、背圧防止のため5mm四方程度の空気穴を設けた。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で製作し、下型部には金型材料として一般的に使用されるSKD61で製作したインサ

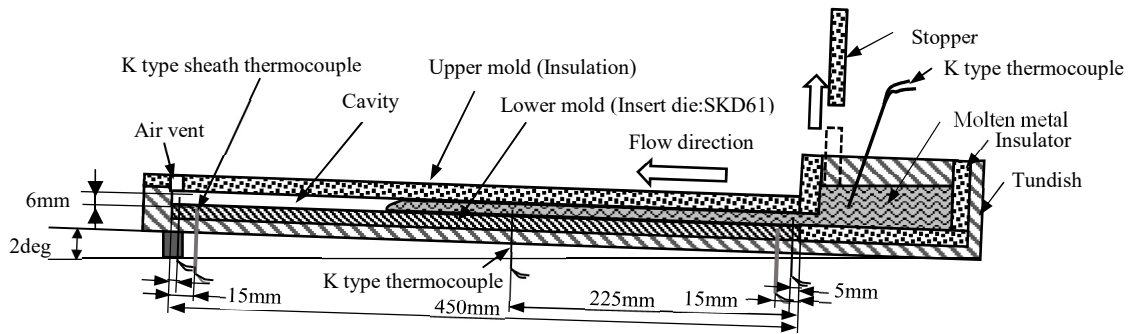


Fig. 1 Schematic drawing of experimental apparatus

Table 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.

ート型を設置した. インサート型は, 溝のない平滑なもの, 深さ 1mm 先端角度 60deg の V 溝を流動方向に 9 本(4mm ピッチ)加工したもの, 19 本(2mm ピッチ)で加工したもの, V 溝を十字に配置したものの 4 種類を使用した. 以後, それぞれ, 溝なし, V 溝 9 本, V 溝 19 本, 十字溝と呼ぶ.

インサート型上面の形状を Fig. 2 に, 短辺方向の断面図を Fig. 3 に示す. 4 種類の異なる V 溝条件に, それぞれ塗型のない型とある型で铸造し, 湯流れ性を評価した. 塗型の厚さは約 200 μ m に統一し, 実製品の铸造に近い条件とした. 塗型剤は, ディレクト・セン・房株式会社製の YM-10 を使用した.

インサート型には, 金型温度を測定するために線径 ϕ 1mm の K 種シース熱電対を, キャビティ入口 (インサート型端部) から 15mm, 435mm の 2 点挿入した. また, 流動中の溶湯温度を測定するために K 種裸熱電対 (線径 0.3mm) を, キャビティ入口から 5mm, 225mm, 445mm に設置した.

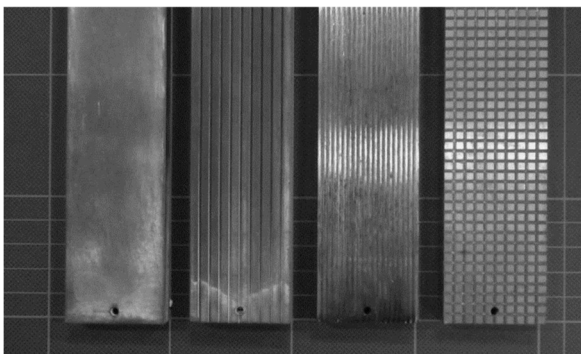


Fig. 2 Surface shape of insert die

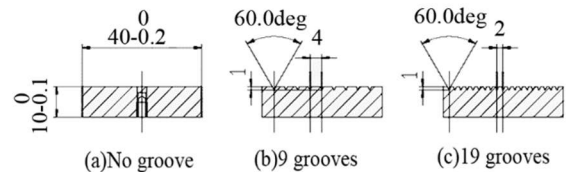


Fig. 3 Cross-sectional shape of insert die

2.2 供試合金

実験には Table 1 に示す化学組成を有する铸造用アルミニウム合金 JIS AC4C を使用した. 物性値計算ソフト JMatPro(Thermo Tech 社)⁴⁾によれば液相線温度が 612 $^{\circ}$ C, 固相線温度が 545 $^{\circ}$ Cである.

2.3 実験方法

溶湯は, 400g \pm 5g に切断したインゴットを小型高周波溶解炉で 660 $^{\circ}$ Cまで加熱して溶製した. 金型の予熱は行わず室温 (25 $^{\circ}$ C) とした. ストッパーでキャビティと分離した湯溜め部に溶湯を注ぎ, 熱電対で温度を測定して铸造温度 640 $^{\circ}$ Cに到達した時点で, ストッパーを引き抜き, キャビティに流動させた. 装置内の熱電対による温度測定と得られた試験片の流動長および空気層の大きさを評価した.

2.4 試験片の評価

試験片は湯溜め部を切断してキャビティ入口から先端までの長さをスケールで測定, 流動長とした.

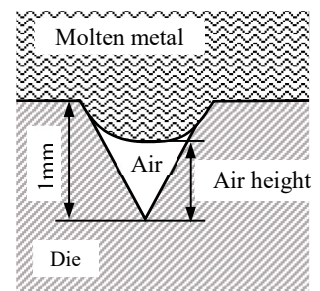


Fig. 4 Height of the air layer

湯流れ実験における V 溝部の空気層の大きさの定量化及び試験片とインサート型の接触状況の評価のため、流動試験片のインサート型側表面を 3次元形状測定機で測定した。測定には(株)キーエンス製のワンショット 3D 形状測定機ヘッド VR-3200を用いた。高さ測定精度 $\pm 3\mu\text{m}$ 、表示分解能 $1\mu\text{m}$ である。Fig. 4 に示すように、インサート型の上面に機械加工によって形成した V 溝の深さから、試験片を 3D 形状測定機で計測した溶湯侵入高さを差し引いた寸法を「空気層高さ」とした。

2.5 CAE 解析

今回の実験をモデル化し、CAE で解析を行った。モデリングには SolidWorks、解析には ESI Group の Pro CAST⁴⁾を使用した。空気層の再現のため平面部から 0.3mm (空気層高さ 0.7mm)の位置にサーフェスを設定し、熱伝達係数を鋳型と独立して設定できるようにした。塗型の有る場合の空気層高さは流動に伴って変化し、 0.8mm 程度であることが分かっているが、本解析では空気層高さ 0.7mm 一定としてモデリングした。十字溝についてはモデルが複雑になり、3D-CAD 上でのモデリングに非常に時間がかかることと、メッシュ数、解析時間が莫大になることが想定されるため本解析では取り扱わないこととした。

Fig. 5 にメッシュモデルの例、Table 2 にメッシュ条件、Table 3 に材料と熱物性の設定、Table 4 に熱伝達係数を示す。

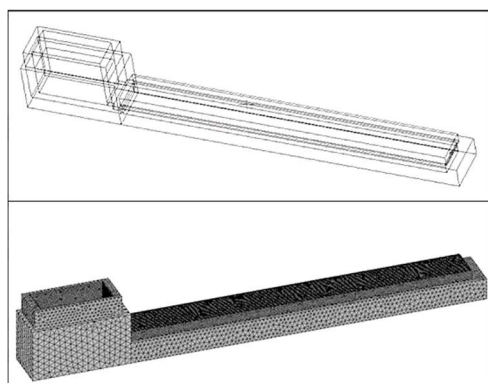


Fig. 5 Mesh model of fluidity test experimental apparatus

Table 2 Mesh conditions

	Non-groove	9 grooves	19 grooves
Number of tetra elements	1,450,539	2,225,910	2,478,797
Number of nodes	303,950	472,279	538,844

Table 3 Materials of experiment model

	Materials	thermophysical properties
Thermophysical	S50C	JMatPro
Insulation	Insulation	ProCAST data base
Cast	AC4C	JMatPro
Air	Air	ProCAST data base

Table 4 Heat transfer coefficient between two materials

Material 1	Material 2	$\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^*$
Castings	Coated die	1
Castings	No coating die	3
Insulation	Castings	0.1
Castings	Air	0.01

熱伝達係数は、溝なしの実験で得られた流動長になるように合わせ込みを行い決定したもので、V 溝のある 2 つのモデルについても同じ値を使用した。塗型の有無については、熱伝達係数の入力値のみを変更した。

鋳物とインサート型とのスリップ条件は Non-slip で設定した。インサート型の表面は塗型されており、抵抗が大きいと考えられるためである。現状のソフトウェアでは溶湯の接触面毎に条件を設定できないため、塗型の無い金型側面と断熱材の上型に対しては過剰に拘束されていると考えられる。また、流動停止固相率は 30% で設定し、表面張力は無視した。

3. 実験結果及び考察

3.1 塗型なしの流動試験結果

塗型なしで V 溝の異なる 4 つのインサート型で得られた流動試験片のインサート型側表面を Fig. 6 に示す。実験をそれぞれ 2 回実施して得られた流動長の平均を Fig. 7 に示す。流動長は 4 つの実験で差が見られなかったが、表面の状態や幅方向の充填に違いが見られた。溝なし、V 溝 9 本のインサート型で鋳造した鋳物の表面には「吹かれ」や「きらい」と呼ばれる凹部が多数観察された⁵⁾。これらの鋳肌欠陥は、金型の表面に吸着していた微量の水分が溶湯の熱で瞬間的にガス化して発生する⁵⁾。本来なら溝なしや V 溝 9 本は、溶湯と金型との接触が良好なので、流動長が短くなるはずであるが、「ふかれ」、「きらい」の発生によ

り、溶湯とインサート型の接触が悪くなるために V 溝 19 本や十字溝と同程度の流動長となったものと考えられる。

これに対して V 溝 19 本や十字溝の金型に鋳造した試験片には大きな凹部は観察されなかった。V 溝 19 本の金型はピッチ 2mm に対して V 溝開口

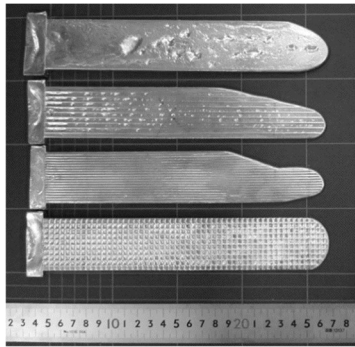


Fig. 6 Fluidity test pieces (Non-coat die)

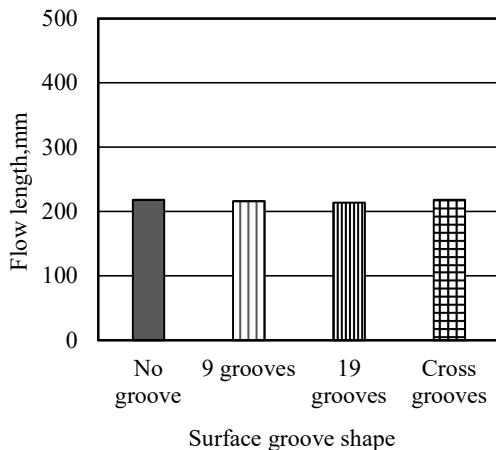


Fig. 7 Average flow length (Non-coat die)

部の幅が図面上 1.15mm であり、平面部が非常に小さいためガスがトラップされず、V 溝を利用して排出されたためと考えられる。十字溝の試験片では、凹部は V 溝で区切られた各平面部に分散し、比較的小さく観察された。

また、平面部と V 溝の境界付近は良好な接触をしている箇所も見られた。V 溝の実施によりガスが排出されやすく、トラップされにくい状態になったことで熱伝達に差を生じ、流動長の差を減少させたことが考えられる。

幅方向の充填については、十字溝のものが最も良好になり、V 溝 9 本、V 溝 19 本では先端付近が片側に片寄る形状になった。金型設置の際に水平

が十分でなかったこと、溝によって湯流れ挙動が変化したことが考えられる。

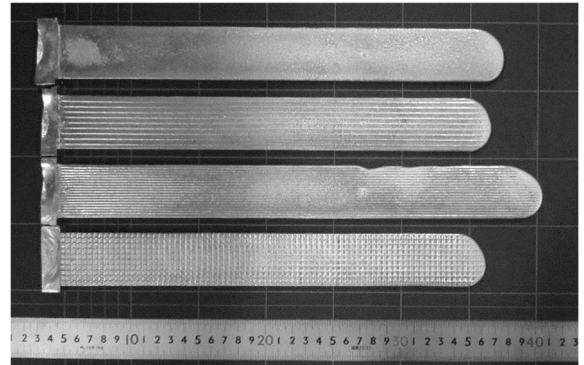


Fig. 8 Appearance of liquidity test pieces (coating die)

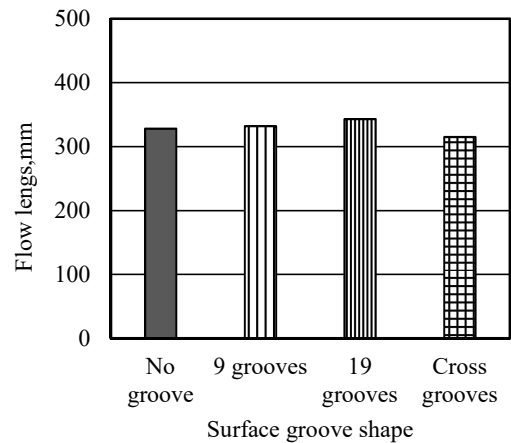


Fig. 9 Average flow length (Coated die)

3.2 塗型ありの流動試験結果

Fig. 8 に塗型を施した流動試験片のインサート型側表面の例を示す。

溝なし、V 溝 9 本、十字溝の流動長はほぼ同程度で、V 溝 19 本が僅かではあるが長い。それぞれ、2~3 回の繰り返し実験を行い、流動長の平均を取ったものを Fig. 9 に示す。十字溝が最も短く、溝なし、V 溝 9 本、V 溝 19 本の順に長くなった。

V 溝による熱伝達低減効果により流動長が長くなることが想定されたが、他の条件と大きな差は見られない。溝なしの試験片のキャビティ入り口付近には凹部が見られ、溝が多い型の試験片では金型側面と接触していないものが見られた。金型室温なので、塗型に吸着された水分のガス化が原因と考えられる。十字溝の試験片では、他の条件に比較して溶湯とインサート型の接触が良好となり、流動長が短くなったものと考えられる。

3.3 空気層高さ

3D 形状測定機を用いて計測した塗型のある場合のV溝9本及び十字溝のキャビティ入口から20mmの流動初期の流動試験片表面形状例を Fig. 10 に示す。これらの点群データからV溝への溶湯の侵入状況が確認でき、空気層の高さを見積もることができる。(a), (b)を比較すると、V溝9本に比較して十字溝の方が溶湯の侵入量多く、流動方向及び直角方向の溝やその交点では侵入量が異なることが認められる。

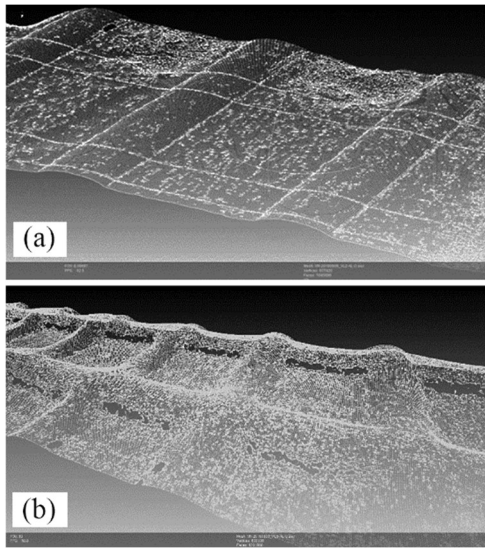


Fig. 10 Shape of castings surface
(a) 9 grooves, (b) Cross grooves

塗型のある条件で铸造した流動試験片の空気層高さを Fig. 11 に示す。測定は、キャビティ入口から20mmの位置(以後、流動初期と呼ぶ)と200mmの位置(以後、流動後期と呼ぶ)で行った。測定したすべての試験片で流動後期に空気層高さが大きくなることが確認できる。

Fig. 10 (b) の点群データに見られるように、十字溝の試験片では測定箇所によって空気層の大きさが異なる。これはV溝の開口部の大きさに起因するもので、溝の交点では開口部が対角線になり、流動方向のV溝の開口部より長くなったことによるものと考えられる。

Fig.12 に塗型がない金型および塗型のある金型で測定した流動試験片の空気層高さを示す。塗型なしは塗型ありに比べて流動初期と後期の差が小さい。流動の初期の空気層高さの差は溶湯圧力と表面張力によるものと考えられる。

塗型のある試験片の測定位置は、流動長さ全体の3分の2程度の位置であるため、金型の傾斜による圧力低下と温度低下による表面張力の増加が考えられる。

塗型のない試験片の場合、流動中の溶湯温度が急激に低下して表面張力が増加するため、流動初期と後期の空気層高さに差が出なかったものと考えられる。

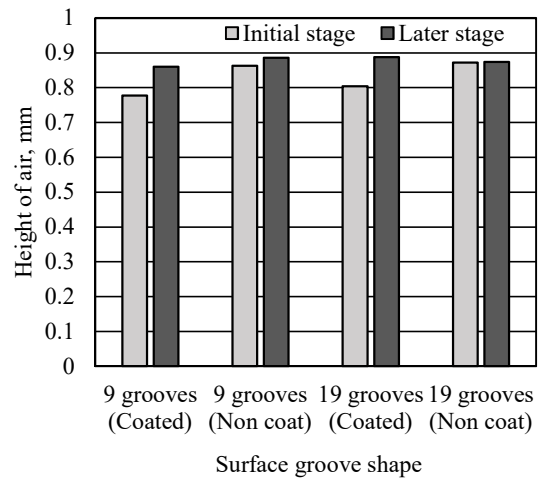


Fig. 11 Height of air (Coted die)

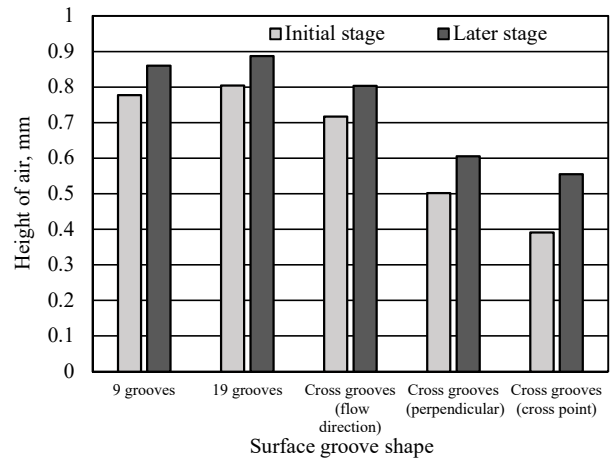


Fig. 12 Height of air (Coated and non-coat die)

3.4 CAE 解析結果

Fig. 13 に CAE の解析結果を示す。図は下型側から観察した温度のコンター図であり、流動が停止した直後の時刻で記録した。V溝の違いで下型側の流動停止時刻に差は現れなかったが、V溝のある型で流動長が長くなる結果になった。塗型なしの場合には塗型ありと比べて一様に流動長が短くなり、傾向の変化は見られなかった。V溝内に熱伝

達係数の小さい空気層を設定したことで流動中の温度低下が軽減され、流速や流動長に差が出ていると考えられる。

Fig. 14 に塗型有り溝 9 本の解析結果の流動停止付近の挙動を示す。湯面が重力に従って水平の状態では流動が進行し、下型側が最初に流動停止し

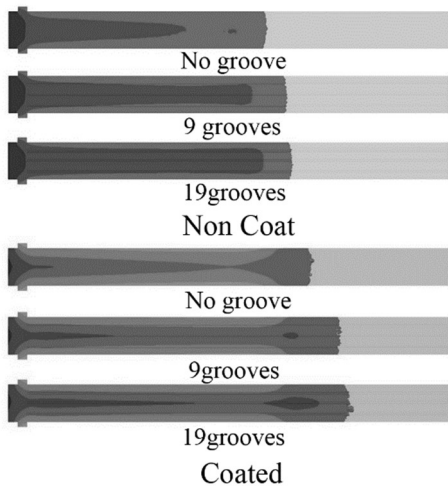


Fig. 13 Flow length calculation result by CAE

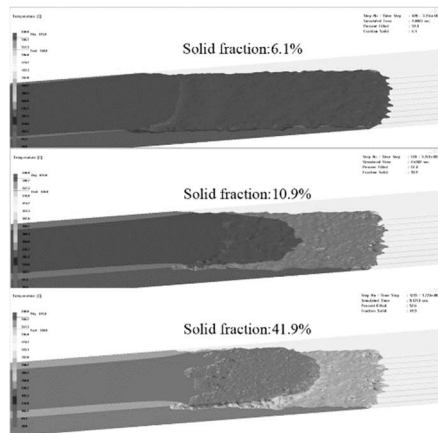


Fig. 14 Shapes of flow end by CAE

ている。これは断熱材を使用した上型に比べて、塗型の施された下型の熱伝達係数が大きく、より早く流動停止固相率になったためと考えられる。下型側が流動停止した後上型付近では流動可能な温度が維持されるため、流動停止した箇所を乗り越えるように先端が形成されている。ここで形成された先端は鋳型側面からの冷却で側面付近が先行して流動停止するように丸みを帯びており、実験で得られた試験片と良く一致している。しか

し、下型側の最終形状には流動中の水平な面が残っており、実験と一致していない。この計算では表面張力や金型との濡れ性を考慮していないためと考えられる。

3.5 M. C. Flemings の式による理論計算

CAE と併せて実験の妥当性を検討するとともに、空気層部のモデル形状を変えた場合の流動長の変化を検討した。CAE でモデル形状を変更する場合にはメッシュ生成時の問題を回避するために形状の制限があるが、理論式上では制限なく検討が可能である。

M.C.Flemings は、固液共存幅のある合金の流動長を Eq. 1 で表されることを提案している⁷⁾。これは、流動・凝固に伴い溶湯が失う熱量と金型が奪う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。

$$L_f = \frac{\rho[c(\theta_c - \theta_L) + f_c H_f] w S}{h(\theta_L - \theta_0) C} \quad (1)$$

ここで、 L_f : 流動長(m), ρ : 溶湯の密度(kg/m³), c : 溶湯の比熱(J/(kg·K)), θ_c : 溶湯温度(°C), θ_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(m²), h : 熱伝達係数(W/(m²·K)), θ_0 : 金型温度(°C), C : 周長(m)である。

この計算式では、一定断面の流路に溶湯が一定速度、充満状態で流れることを仮定している。溶湯の先端は流動過程で分母に示された型への熱伝達により温度が低下する。この際、溶湯先端は型の特定部分をきわめて短い時間で通過するため、鋳型の熱飽和の影響を受けない。溶湯先端の温度低下で液相線温度を下回ると凝固潜熱を放出しながら固相が晶出し、固液混合流として流動を続ける。固液混合流のみかけ粘性は流動停止固相率付近で急激に増加する特性をもち、最も温度低下が速く固相率が高い先端の閉塞により流動が停止する。

本研究における計算では CAE による計算同様、V 溝の一定深さまで溶湯が侵入、金型と接触し、それより下には空気層が存在する

Density, g/cm ³	2.43
Specific heat, J/(g·K)	1.15
Critical fraction of solid	0.3
Latent heat, J/g	448.3
Velocity, m/s	0.15
Metal temperature, °C	640
Liquidus temperature, °C	610
Die temperature, °C	25

モデルを想定した。計算には Microsoft Excel を使用し、V 溝内に侵入する溶湯部分で増加する流動断面積、金型との接触長さ、空気層との接触長さを考慮して計算ができるようにした。Eq. 1 では溶湯と流路の熱伝達係数を一定にしているが、本実験では異なる材料を使用したため工夫の必要がある。そこで分母の熱伝達係数と周囲長の積を材料毎に求め、その総和を使用した。計算に使用した入力値を Table 5 に示す。熱伝達係数は CAE による計算と同じ値を用いた。

V 溝内の空気層高さを 0.7mm として計算した流動長を Fig. 15 に示す。実験や CAE の結果と同様、V 溝により流動長が長くなる結果になった。金型との接触面積が V 溝によって低減することで流動長が向上することが理論式からもいえることがわかった。

空気層高さの値を 0mm から 1mm まで変化させて流動長を計算した結果を Fig. 16 に示す。空気層の大きさによって型との接触面積が変化し、流動長の計算結果が変化している。空気層高さが 0.5mm を上回る場合に溝のない型に比べて流動長が長くなる結果が得られた。本研究で実施した湯湯流れ実験での空気層高さは 0.7mm から 0.8mm 程度であり、V 溝によって流動長が長くなる領域であるといえる。空気層高さが 0.5mm よりも小さい場合に流動長が短くなる計算が得られたが、本計算モデルは、接触面積を過剰に評価しているため実際の casting 過程でこのような影響が生じるかは明らかではない。本研究で実施した実験では、十字溝型の交点で空気層高さが 0.5mm を下回っている。試験片山部の表面からは金型と良好に接触した様子は観察されないが、より現場に近い条件で casting した場合に接触面積が減少するか検討が必要である。

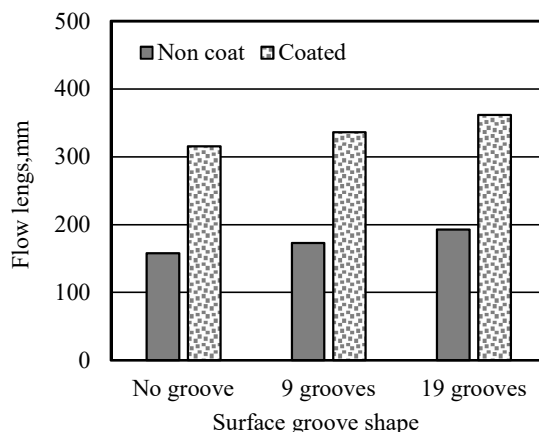


Fig. 15 Calculation flow length by Flemings's equation

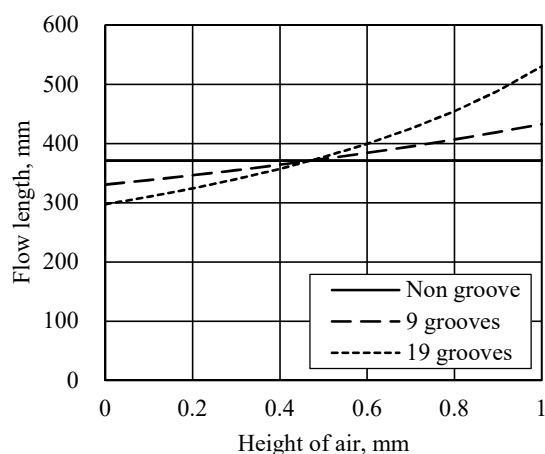


Fig. 16 Effect of height of air on flow length (Coated)

3.6 流動長の比較

湯流れ実験、CAE、Flemings の式で得られた流動長を Fig. 17, Fig. 18 に示す。塗型のない条件では V 溝により流動長が長くなる傾向は一致しているものの、Flemings の式による理論計算では短い結果となった。

一方、塗型の有る条件では CAE と理論計算の結果はよく一致した。これは塗型ありの CAE の結果から流速の入力値を決定した影響も含まれるが 1 割程度の誤差であり、計算モデルによる違いと考えられる。しかし、実験結果は、V 溝による効果が十分表れていない。CAE 及び理論計算では、熱伝達係数と流動限界固相率の入力値によって、流動長が大きく変わるので、今後はさらに検討が必要と思われる。

特に熱伝達係数は、定数で与えており、温度や時

間に依存する関数として与えることで計算精度の向上が見込めると考えられる。塗型のない条件では表面のガス欠陥の影響についても考慮する必要がある。

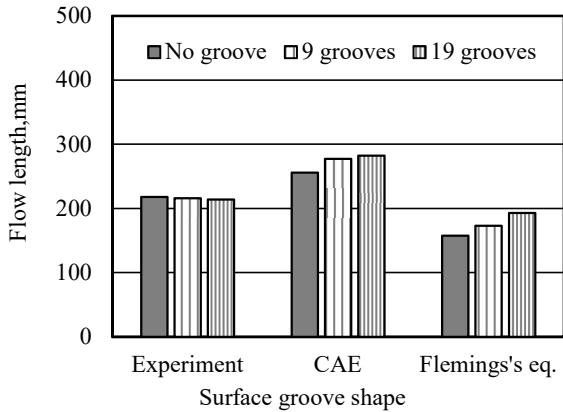


Fig. 17 Comparison of flow length (No coat)

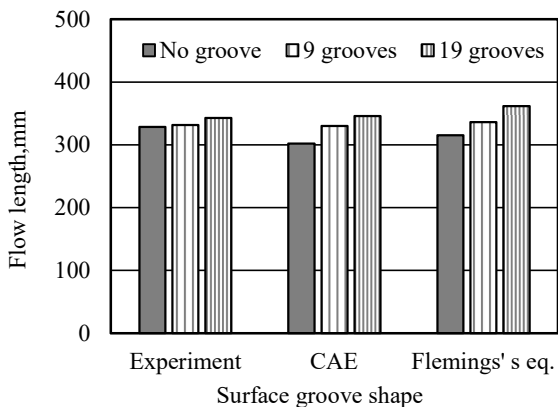


Fig. 18 Comparison of flow length (Coated)

4. まとめ

従来経験的に行われていた金型表面への溝加工により流動性が向上するメカニズムを明らかにし、効果を定量化するため、V溝加工を施した鋳型を用いて AC4C 合金の湯流れ実験を行った。また実験をモデル化し、CAE および流動長の理論式による解析および計算を行い、実験結果との整合性を評価した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 湯流れ実験において、塗型なしでは差を生じなかったが、塗型がある場合には V 溝加工により流動長の向上が見られた。
- (2) 十字溝では流動長は長くならなかったが、特

に塗型なしで幅方向の充填が良好で、充填プロセスにおいて V 溝が湯流れ挙動に影響する可能性が示唆された。

- (3) 塗型なしの実験では塗型ありの実験や計算のように流動長に差が表れず、試験片表面にはその原因と考えられる次の特徴がみられた。
 - ・ 塗型のない条件では溝のない平面部にガスの巻き込みと考えられる凹部を生じた
 - ・ ガスの巻き込みは平面部の少ない溝 19 本では生じなかった
 - ・ 十字溝ではガスは多数の平面部に分散し、大きな凹部が生じなかった
- (4) V 溝が溶湯と金型との接触面積を低減することで熱伝達が小さくなることを想定したモデルにより CAE、理論式で流動長を計算し、実験と同様 V 溝で流動長が長くなる結果を得た。計算による流動長の増加は実験のものより大きく、本モデルにはさらなる検討の余地がある。

謝辞

本研究に取り組むにあたり、終始懇切丁寧に御助言いただいた鈴木克美名誉教授、解析について多大な御指導・御協力をいただいた株式会社ユーイーエス・ソフトウェア・アジアの木島秀弥様、データ提供などさまざまな御協力をいただいた株式会社ヤマハ発動機の小倉純一様とご協力いただいた皆様に深く感謝致します。

文献

- 1) 公益社団法人日本鋳造工学会 編集委員会, 基礎から学ぶ鋳造工学 (2015)
- 2) 西直美: わかる! 使える! 鋳造入門, 日刊工業新聞社, pp.114-115(2018)
- 3) 牧海佑, ものつくり大学大学院 平成 26 年度修士論文 「金型鋳造における熔融アルミニウム合金の流動性に関する基礎研究」
- 4) 株式会社ユーイーエス・ソフトウェア・アジア, JMatPro 製品情報, <http://www.usi-asia.com/index.html>
- 5) 山浦秀樹: 金型鋳造法, 低圧鋳造法, 鋳造工学, Vol.86, No.7, pp.569-574(2014)
- 6) M.C.Flemings : Solidification Processing, McGraw-Hill, pp.219(1974)