

令和元年9月10日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06813

研究課題名（和文）流動中の熔融金属中の温度履歴計測による金属凝固時の特性評価

研究課題名（英文）Experimental examination of solidification characteristics by measuring of melt temperature history in metal flowing

研究代表者

新川 真人（Nikawa, Makoto）

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：30369912

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、アルミニウム合金の溶湯が流動するときの溶湯中温度を連続的に取得する計測システムの開発とそれを用いた流動状態の評価を行った。また、その結果を用いたコンピュータシミュレーションにより溶湯の流動が停止するメカニズムの考察を行った。本研究により、流動停止時の湯先はマッシー型の凝固形態を示していたが、全体では表皮形成型の凝固形態を示しており、これが流動停止のメカニズムに影響していることを明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鋳造プロセスにおいて、熔融金属を適切に流動させて金型内に充填させることは重要である。そのためには、熔融金属がどのように凝固しながら金型内を流れて、最終的に流動停止するのかを明らかにする必要がある。本研究は、流動する熔融金属中の温度を連続的に取得する手法を提案するとともに、金型内でアルミニウム合金がどのように凝固しながら流動するのかを実験とコンピュータシミュレーションにより検討するとともに、そのメカニズムを考察した。

研究成果の概要（英文）：This study was developed a measurement system to continuously obtain the temperature in the flowing Al-Si-Mg alloy, and evaluated the flow state using it. In addition, computer simulation based on the experimental results was used to consider the mechanism that causes the flow of molten metal to stop. The flowing Al-Si-Mg alloy while a solid phase crystallizes, the solidified form shows the Massesy type in the melt front, and the skin formation type in the entire castings, and it was revealed that the flow is stopped by combining them.

研究分野：生産加工学

キーワード：鋳造 湯流れ 凝固 固相率 コンピュータシミュレーション

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

鑄造(重力鑄造,ダイカストを含む)は,溶融金属を閉空間内に充填させたのちに凝固させることによって閉空間形状を転写させる生産手法であり,多くの工業製品の製造方法として適用されている.鑄造のプロセスにおいて,溶融金属を閉空間に適切に流入させることは極めて重要であり,流入後の充填状態は凝固後の製品品質に大きく影響する.工業プロセスで考えた場合,閉空間を構成する金型は溶融金属の温度に対して低い温度に設定せざるを得ない.このことは,溶融金属は固相を晶出しながら流動していることを意味しており,この点が製品に欠陥が発生する一因ともなっている.このように,鑄造プロセス中の現象としては,溶融金属の流動と温度低下に伴う溶融金属の凝固に大別される.

溶融金属の流動状態を評価する方法としては,溶融金属を水で代用し,透明な型内を流動する状態を直接観察する方法,型の一部に観察窓を設けて実際の溶融金属の流動状態を局部的に直接観察する方法,および X 線透過装置内で鑄造を行うことによって型内を流動する溶融金属を観察する方法が考えられる,また,温度低下に伴う凝固の進展状況の評価するためには溶融金属の温度変化を各種温度センサにより計測する方法がある.このように,流動状態と凝固進展状態の両面から鑄造プロセスは評価されるべきであり,流動初期段階から凝固完了に至るまでの温度履歴を取得するとともに,そのときの流動状態を評価する手法が不可欠であると考えた.

### 2. 研究の目的

本研究では,水平方向に流動するアルミニウム合金溶湯(JIS-AC4CH)の湯先位置をカメラで撮影することにより湯先位置を特定し,その情報をもとにして光ファイバ温度計を流動溶湯中に浸漬させた状態で移動させることによって,流動開始から流動停止までの流動溶湯中の任意の位置の温度履歴を取得する新規計測方法の開発を行った.また,その結果をもとにして固相が晶出しながら流動するアルミニウム合金溶湯の流動状態を組織観察とコンピュータシミュレーションにより検討することを目的とした.通常,流動溶湯中の温度変化を取得する方法としては,熱電対を流路内に設置し,その設置における溶湯の温度変化を取得する.一方,本研究では,溶湯中のある位置が流動開始から終了に至るまでの温度履歴を取得するため,この2つの方法により得られる溶湯中の温度情報は異なるものである.

### 3. 研究の方法

本研究では,流動中のアルミニウム合金溶湯の任意の場所の温度履歴を取得することにより,その流動状態を評価することを目的としている.そのため,以下の実験を実施した.

- (a)湯先流動速度の計測
- (b)流動中に晶出する固相率の計測
- (c)開発した温度履歴評価システムによる温度履歴の計測
- (d)コンピュータシミュレーションによる流動状態の評価

(a)では観察窓を設けた金型に溶湯を注湯し,水平方向に流動する溶湯湯先を高速度カメラ(200fps)により連続的に観察した.次に画像解析により撮像結果から湯先速度を算出することによって評価した. Fig. 1 に実験装置の概略図を示す.金型温度 = 200°C,湯口カップ = 220°C とし,650°C に加熱された 150g の AC4CH 溶湯を湯口カップに注いだ.湯口カップの底部には孔が加工されており,注湯時には黒鉛製丸棒により孔をふさいだ状態で実施した.その後,溶湯温度 = 630°C となった段階でストッパーを引き抜き,金型内に溶湯を流入させた.金型キャビティ部の深さは 5mm とした.また,キャビティ部上部には幅 0.5mm の観察窓を設けており,上部から高速度カメラにより流動する溶湯を撮影した.

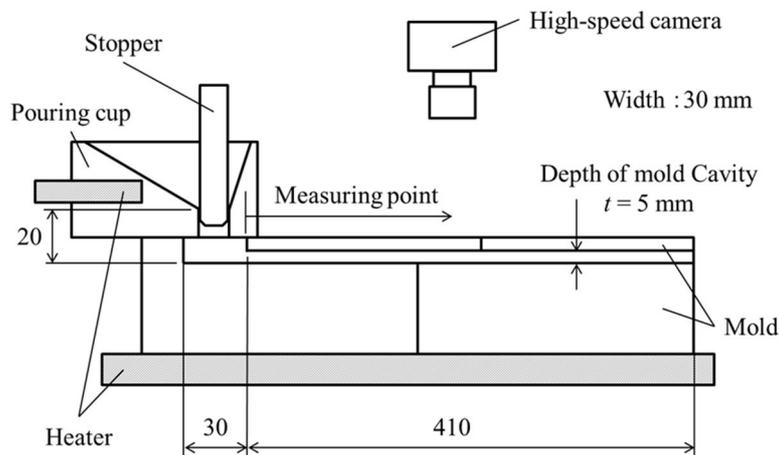


Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus for measuring flow speed of molten metal.

(b)では、流動中の溶湯を最大流動長に達する前に任意の位置で溶湯を水中に滴下させることにより固相の晶出を停止させ、組織観察した。観察視野中における初晶の面積率を画像解析により算出し、そこから固相率を推定した。Fig. 2 に実験装置の概略図を示す。注湯する溶湯温度、型内に溶湯を流入させる温度は、実験(a)と同じとした。

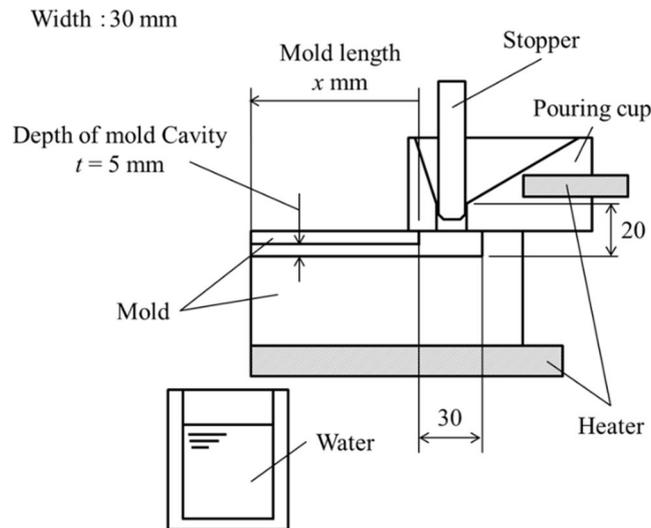


Fig. 2 Schematic illustration of experimental apparatus for measuring solid fraction until melt flow stops.

(c)では、浸漬型光ファイバ温度計を溶湯の流動方向と一致するように移動させることにより温度履歴を計測した。電動アクチュエータに設置した光ファイバ温度計を、(a)により取得した湯先の流動速度情報をもとにして位置制御することによって溶湯中の任意の位置における温度履歴を連続的に取得した。実験装置は、実験(a)で用いたものと同じとし、金型キャビティ内の板厚方向中央部に光ファイバ温度計を設置した状態で、電動アクチュエータを稼働させて所定の箇所の温度を計測した。また、鑄造条件は実験(a)と同じとした。

(d)では、(a)および(c)により得られた結果をもとにしてパラメータを同定し、実験的に取得が困難な肉厚方向の温度履歴を計算するとともに、その結果から得られる固相率の分布から流動状態の評価を行った。鑄造シミュレーションには、市販コードである ADSTEFAN を用いた。溶湯の熱的物性値は、使用した AC4CH の組成を分析し、その結果を用いて物性値計算ソフトウェア (JMatPro) により推定した結果を用いた。

#### 4. 研究成果

Fig. 3 に湯先の流動速度を測定した結果を示す。流動初期から流速は低下し続けるが、その後に変化割合が小さくなる領域 (図では 100mm-200mm) が存在する。その後、急激に流速が低下して流動が停止した。

Fig. 4 に流動中の溶湯の固相率の変化を測定した結果を示す。また、比較のために Scheil の式から算出した固相率の変化と、ソフトウェアにより計算した固相率の変化を示す。実験的に算出した固相率は、実験装置の原理上低い固相率の領域のみ算出することしかできないが、その値は Scheil の式およびシミュレーションにより算出した固相率の変化とほぼ一致していた。

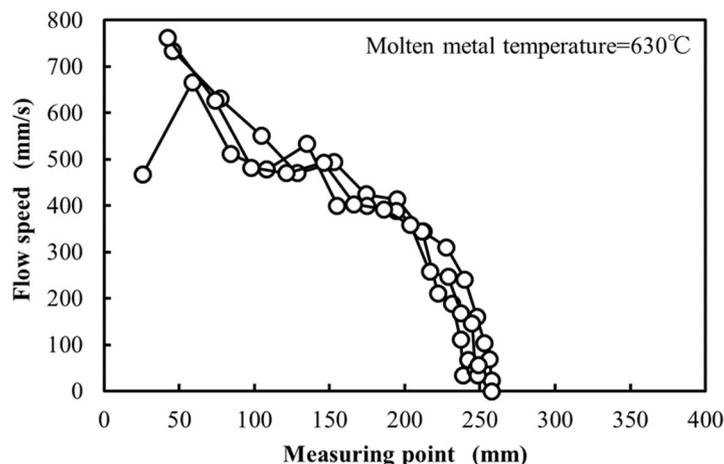


Fig. 3 Change of flow speed of melt front until melt flow stops.

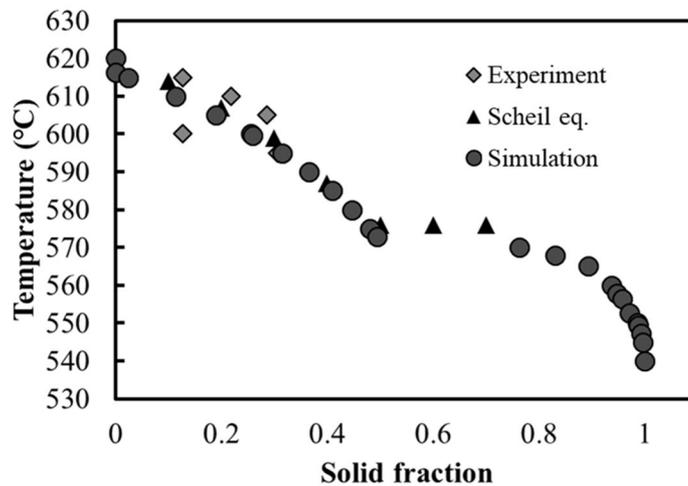


Fig. 4 Relation between the solid fraction and the melt temperature.

Fig. 5 に流動中の溶湯先端部の温度を測定した結果を示す．図中の実線は溶湯先端部の位置，破線は溶湯温度を示す．なお，横軸は最終的な流動長に対する湯先位置からの距離を無次元化した値により示している．流動初期での計測はできなかったが，初期位置から 100mm 程度流動してから流動が停止に至るまでの溶湯温度の変化を計測することに成功した．溶湯温度は流動とともに低下し，流動停止時にはおよそ 605°C であった．

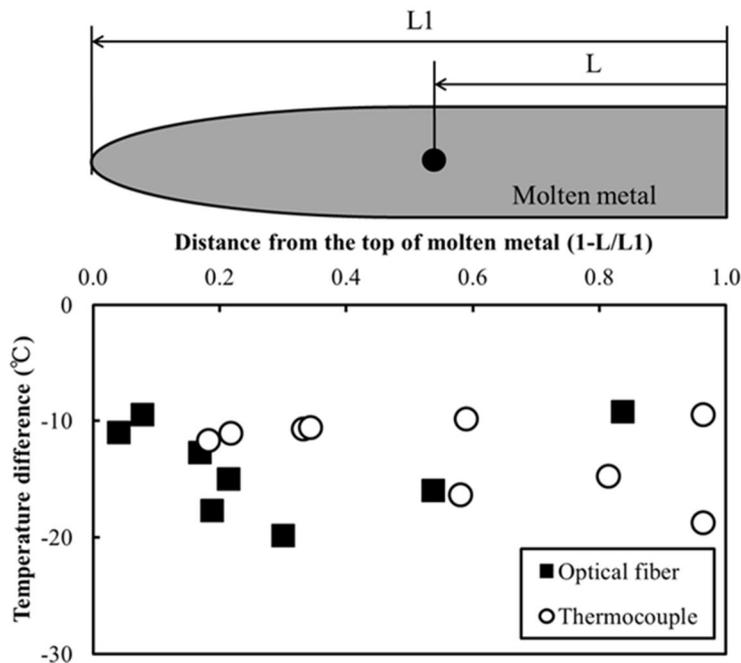


Fig. 5 Experimental results of the melt temperature during melt flow stops.

Fig. 6 に流動停止時における湯先各位置における溶湯温度と初晶の晶出温度との差，および Fig. 4 を用いて算出した固相率の分布を示す．また，比較として熱電対（K 型，素線径 0.3mm）を用いて同様に温度計測をした結果を示す．測定の結果，湯先先端部より根元側に向かっておよそ 0.2-0.3 の位置で初晶温度と溶湯温度との差が最も大きくなった．一方，熱電対で測定した結果では大きな変化はなかった．この温度から流動停止時の固相率を算出すると，湯先ではおよそ 0.2 であり，そこから根元側に向かって固相率は増加して，湯先から 0.3 の位置で固相率は最大となった．その後，固相率は減少し，根元側の固相率は湯先と同等，またはそれより若干低い値となった．

Fig. 7 に実験的に得られた流動停止時の湯先の固相率を用いて湯流れ解析を行った結果を示す．流動停止時に鋳物の長手方向（溶湯の流動方向）で固相率が分布していることが確認できる．鋳物の板厚方向中央部（3mm）をみると，先端部でおよそ 0.28 程度であり，根元側に向かって固相率が徐々に大きくなっている．流動長に対して先端から 0.3 付近で極大値となり，その後は徐々に低下し，根元側の固相率はおよそ 0.2 であった．この結果は，実験的に取得した固相率の値とほぼ一致していた．また，固相率は板厚方向に対しても同様に分布しており，製品板厚中央部から外側ほど固相率は高くなっており，金型付近では流動長に対して先端から 0.2 付近で先端

部の固相率より 0.15 ほど高い値となり，根元側に向かってその高い固相率が計算された．

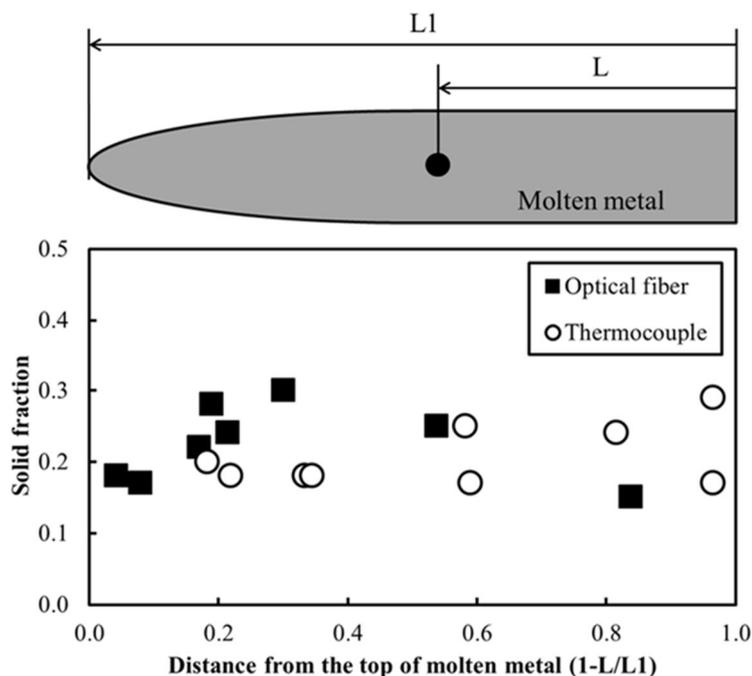


Fig. 6 Distribution of the solid fraction at melt flow stops in each position of castings.

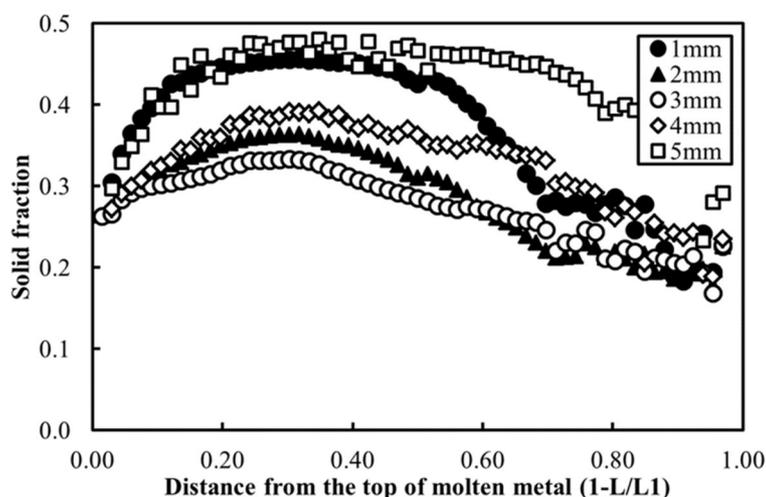


Fig. 7 Calculation results of the solid fraction distribution in thickness direction of castings at melt flow stops.

Fig. 8 に流動停止までの溶湯流動方向に対する流動速度をベクトル表示した結果を示す 図中，コンタ図で表現されていない領域は溶湯が流れていない領域を示している．図より，金型付近の溶湯は徐々に流動速度が低下し，流動停止に至る前に速度がゼロと計算された．また，板厚中央部付近は流動の終期に至るまで速度が計算されたが，流動方向の全域ではなく，先端から 2-4 割の位置では速度がゼロと計算された．

今回の実験で使用した AC4CH はマッシー型の流動停止機構を示すと考えられている．しかし，実験結果から湯先部より流動長に対して 2-3 割の位置で最も温度が低かった．また，シミュレーションからも同様の結果となっており，特に金型との接触部付近では流動時間の終期前に流動が停止していた．このことより，型内に侵入した溶湯は湯口付近で初晶が晶出し，流動しながら固相が成長するとともに，壁面付近では固相がより大きく成長する．その結果，流路断面が閉塞され始めて，溶湯が流れる駆動源である圧力の伝達が阻害され始める．そして，流路全体のみかけの固相率がおよそ 0.3 となると流路が閉塞して圧力の伝達が停止して急激に流速が低下し始めて最終的に閉塞した箇所より先端側の慣性力により溶湯は流動し続けて流動停止に至ると考えられた．このことより，流動停止時の湯先ではマッシー型の流動停止機構であると考えられるが，鋳物全体では表皮形成型と考えられる挙動を示しており，固相の晶出を伴う溶湯の流動ではこの 2 つの流動停止機構が同時に発生していると考えられた．Fig. 9 に流動停止機構のイメージ図を示す．

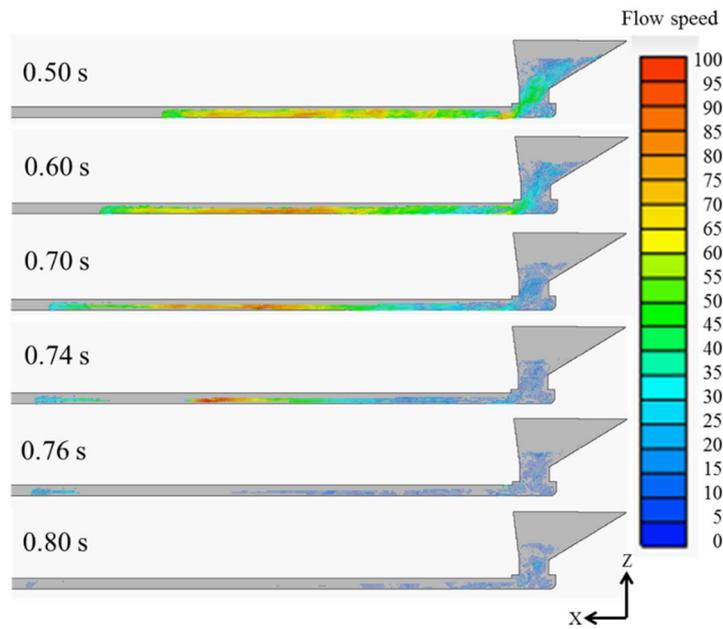


Fig. 8 Calculation results of the flow speed of molten metal to flow direction.

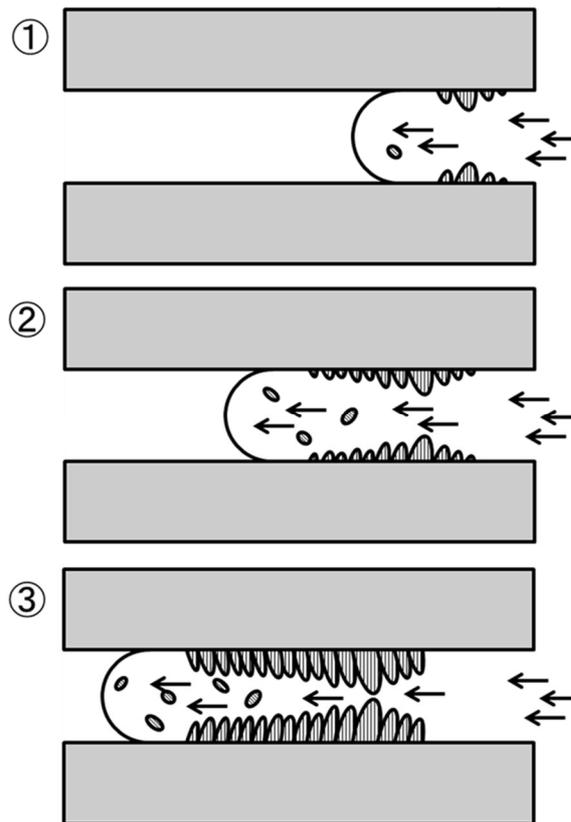


Fig. 9 Schematic image of the flow stopping mechanism when the crystallizing a solid phase in the molten metal while molten metal flows.

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計0件)