

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420786

研究課題名(和文)半凝固金属加工条件最適化のための流動・凝固シミュレーション技術の確立

研究課題名(英文) Establishment of flow and solidification simulation technology for optimization of semi-solid metal forming condition

研究代表者

安齋 浩一 (ANZAI, KOICHI)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40232087

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：AC4Cアルミ合金について、半凝固スラリー特性を考慮した流動解析モデルについて検討した。計算を安定に実行できるアルゴリズムを考案し、自作の凝固流動解析プログラムに実装した。次に、半凝固スラリーの流動性を評価するための実験方法について検討した。ステンレス製のパイプにスラリーを圧入する方法で流動・凝固させたところ、従来から知られている数十ミクロンの球状初晶Alに加えて、数ミクロン程度の超微細な球状初晶Alが晶出することを見いだした。最終的には、ダイカストのスリーブ内で半凝固スラリーを作るスリーブ法を開発し流動性を評価したところ、スラリー固相率が高いほど流動性が向上することを見いだした。

研究成果の概要(英文)：Flow simulation model for semi-solid slurry of AC4C aluminum alloy was proposed. This model was implemented in our flow simulation program with calculation stable algorithm proposed. Next, fluidity evaluation experimental procedures for semi-solid slurry were proposed. In case of slurry insertion into stainless tube experiment, fine globular a-Al particles and very fine globular a-Al particles were observed. Finally, "Sleeve method", i.e. slurry making in the sleeve of die casting machine, was proposed. With this method, high fluidity was achieved with high fraction solid AC4C aluminum alloy slurry.

研究分野：鋳造工学

キーワード：鋳造法 半凝固スラリー 流動性

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 鋳造法は、複雑形状金属部品を製造するために必須の安価な金属加工技術である。しかし、鍛造等の素形材加工法に比較し欠陥が発生し易く、機械的な特性が劣るという欠点がある。こうした欠点を克服すべく、様々な鋳造法が考案されてきたが、コスト、生産性に勝るダイカスト法における改良が数多く提案されてきた。中でも半凝固ダイカスト法は、従来のダイカスト法に比較し次のような特徴がある。

- ①低温で鋳造するため、金型へのダメージが少ない。
- ②ペースト状の半凝固スラリーを用いるため、金型への充填時に巻き込む空気量が少ない。
- ③凝固に伴う収縮量が少ない。

(2) 半凝固ダイカスト法として様々な方法が提案されてきた。著者らのグループが開発してきた金属スラリー製造方法としては、次の方法がある。

- ①カップ法：アルミ合金を金属容器に注湯するだけで、瞬時に金属スラリーを製造する方法。従来法に比較し、より安価で迅速かつ簡便な方法であるが、一度に製造できるスラリー量に制限がある。
- ②二軸電磁攪拌法：アルミ合金を金属用途に注湯する際に縦方向と横方向の回転攪拌を電磁力により誘導することで、微細なアルミ初晶が均一に分散したスラリーを製造でしく。しかし、電磁コイルを用いるために設計値以外の溶湯量に対応できない。装置が効果である、等の欠点がある。

いずれにしても、半凝固ダイカスト法では、一度金属スラリーを製造し、その後金属スラリーをダイカスト機に装填し鋳造品を製造するので、金属スラリーの製造方法によって、得られる製品の品質が左右される。また、半凝固スラリーの流動・変形挙動は、得られた金属スラリーのレオロジー特性によって変化する。ダイカスト時の熔融金属の流動・変形挙動は一般にコンピュータシミュレーションされて、いわゆる鋳造方案を最適化する必要があるが、半凝固ダイカストの場合は、金属スラリー製造方法を特定しないとレオロジー特性を考慮したシミュレーションができない。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、著者らのグループが開発した半凝固スラリー製造法であるカップ法に対して、半凝固スラリーの流動・変形シミュレーションをより正確に実施するため、高粘性流体の流動を安定に精度良く解析するためのシミュレーション法を開発する。

(2) 高粘性な金属スラリーの流動性を評価する実験方法について検討する。

## 3. 研究の方法

(1) 高粘性流体の流動解析では、時間増分を十分小さくしないと安定に時間積分することが出来ないことが分かっている。そこで、Carman-Kozeny モデルを用いたダルシー則により考慮する際の数値解析上の工夫、すなわち、ダルシー項の寄与を陰的に考慮することで、場所によって粘性の大きさが大きく異なる問題でも安定に数値解析が実行できるようにした。

(2) 独自の流動性評価装置を開発済みであったが、金属スラリーのような高粘性体の流動・変形には適用できない。そこで、金属スラリーを鋳型を模擬した金属管や砂型に圧入する実験装置を試作し、Cup 法で製造した金属スラリーの流動性について評価することにした。

(3) 新規な半凝固ダイカスト法として、「スリーブ法」を検討した。この方法は、Cup 法で用いていた金属容器の代わりに、ダイカスト機のスリーブを利用した金属スラリー作成を特長とする。Cup 法では、金属容器内で金属スラリーを製造するため、作成した金属スラリーを金属容器から一度外部に取り出す必要があったが、高粘性のために取り出し時にトラブルが発生しがちであった。しかし、スリーブ法では、ダイカスト機のスリーブ内に直接スラリーが生成されるので、取り出しトラブルの心配が無いという特徴がある。

## 4. 研究成果

### (1) 流動解析

実鋳造品を対象に、開発したコンピュータプログラムにて、半凝固ダイカスト時の湯流れ解析を実施した。解析事例を図1に示す。

いわゆるショートショット実験の結果と湯流れ解析結果は良く一致しており、今回開発した数値解析が、半凝固ダイカスト法に対し有効であることを確認できた。

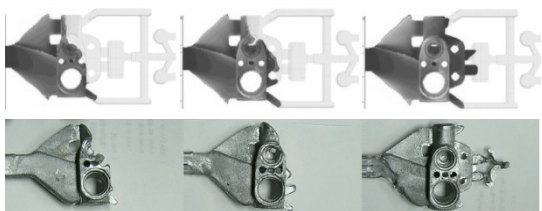


図1 ショートショット実験と湯流れ解析の比較（上がシミュレーション結果）

### (2) 流動性評価法（その1）

カップ内のスラリーをステンレス製パイプに対して押し出す流動長評価法を考案した。実験装置の写真を図2に示す。

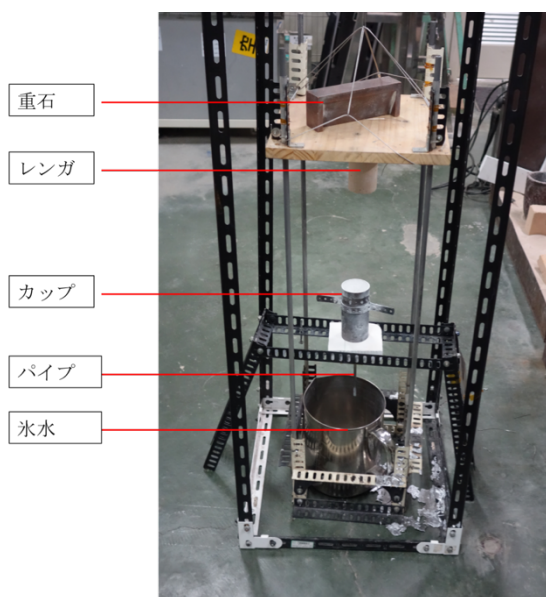


図2 押し出し型流動製評価装置

次の手順で実験を実施した。

- ①カップに対し注湯
- ②目標固相率になるまで保持
- ③カップ内のスラリー上部から圧力をかけつつ栓を開き、パイプ内にスラリーを圧入する
- ④パイプを装置から外し、水冷クエンチを行う

得られた流動長は、パイプの余熱条件によって大きく変化した。その結果を図3に示す。

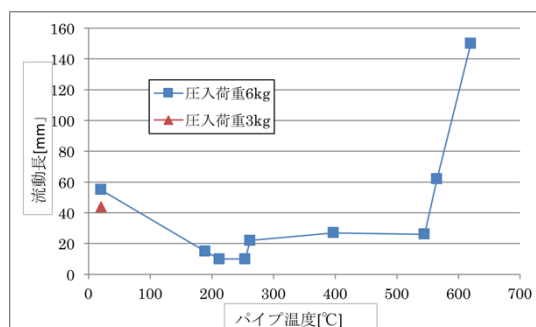


図3 流動長に及ぼす余熱の影響

### (3) 流動性評価法（その2）

次に、砂型に金属スラリーを圧入することで流動性を評価することを検討した。今回使用した装置を図4に示す。本実験ではカップ法で作製したスラリーを砂型に投入し、プレス機でプレスする方法をとった。圧入成形手順の概略図を図5に示す。以下にプレスに使用したプレス機とプレスツールを示す。



図4 実験装置

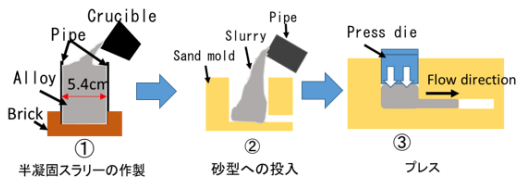


図5 圧入成形手順

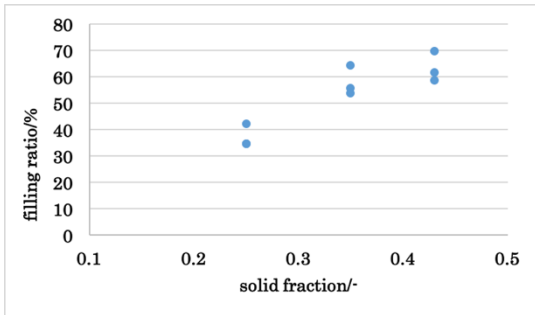
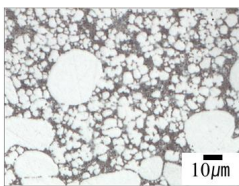


図6 固相率変化による充填率の違い

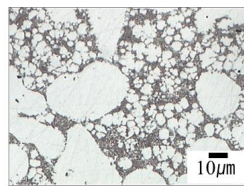
各固相率における充填性を図6に示す。図6より高固相率において高い充填性が確認した。また、低固相率においては充填率が高固相率よりも低い結果となった。

#### (4) スリーブ法の検討

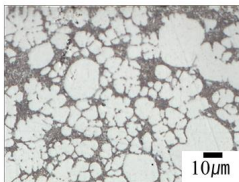
125ton ダイカストマシン、材料 AC4CH を用いて鋳造を行った。金属組織観察はビスケット・ランナー・ゲート・製品のすべての箇所組織観察を行ない、製品部について EPMA 分析を行った。



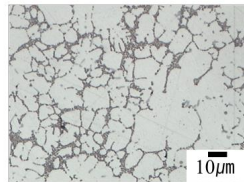
(a) 充填率10%, タイムラグ0s



(b) 充填率10%, タイムラグ10s



(c) 充填率30%, タイムラグ10s



(d) 充填率50%, タイムラグ10s

図7 スリーブ充填率と射出タイムラグの製品表面部の金属組織への影響

スリーブ充填率が 10, 30, 50%で射出タイ

ムラグ(Shot Time Lag; STL)が 0s と 10s のときにおける製品表面部の金属組織観察結果を図7に示す。スリーブ充填率が通常のダイカストより低い条件で、微細球状結晶(15~50  $\mu\text{m}$ ; 1次初晶)と超微細球状結晶(15  $\mu\text{m}$ 以下; 2次初晶)が多く観察された。スリーブ充填率が 30%~50%と高くなると、主に微細花弁状が多数観察された。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

① 李定洙, 安齋浩一, 板村正行, 平田直哉, 前田琢磨, 安達充, 半凝固ダイカストした AC4CH 合金の  $\alpha$ -Al 相の形態に及ぼすスリーブ充填率及び射出タイムラグの影響、鋳造工学、査読有り、第 88 巻、第 7 号に[掲載予定]

[学会発表] (計3件)

① 李定洙, 板村正行, 平田直哉, 安齋浩一, 前田琢磨, 安達充:“スリーブ法による組織形態に及ぼす鋳造条件の影響”, 日本鋳造工学会 167 回全国講演大会, 2015.10.25, 室蘭工業大学、室蘭

② 李定洙, 板村正行, 平田直哉, 安齋浩一, 前田琢磨, 安達充:“スリーブ法におけるアルミニウム合金の流動性に及ぼす鋳造条件の影響”, 日本鋳造工学会 166 回全国講演大会, 2015.5.23, 早稲田大学、東京

③ 李定洙, 板村正行, 平田直哉, 安齋浩一, 前田琢磨, 安達充:“スリーブ法による初晶形態に及ぼす鋳造条件の影響”, 日本鋳造工学会 164 回全国講演大会, 2014.5.31, みやこめっせ(京都市勧業館)京都

[その他]

ホームページ等

<http://www.material.tohoku.ac.jp/dept/course/metal/anzai/>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

安齋浩一 (ANZAI, Koichi)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 4 0 2 3 2 0 8 7