

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560896

研究課題名(和文)環境調和型軽合金の casting シミュレーションに関する基礎研究

研究課題名(英文)Fundamental Study on Casting Simulation of Environmentally Friendly Light Alloys

研究代表者

尾崎 公一(Ozaki, Koichi)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号：20224206

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：真空吸引式流動試験により、アルミニウム合金ADC12の流動長に及ぼす吸引圧力、溶湯過熱度、金型温度、流路厚さの影響を実験的に調査した。次いで、数値解析により、アルミニウム合金ADC12およびマグネシウム合金AZ91Dの流動長に及ぼす諸因子の影響を検討した。実験結果と数値解析結果の比較により金型表面の熱抵抗値を推算し、アルミニウム合金ADC12の吸引式流動性試験では約 $3.3 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ 、マグネシウム合金AZ91Dの射出成形では約 $5.8 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ の熱抵抗値とすることで実験結果に近い流動停止状態を再現できることを示した。

研究成果の概要(英文)：The fluidity length of aluminum alloy ADC12 was investigated experimentally by using suction tests under various suction pressure, molten metal temperature and cavity thickness conditions. Numerical simulations were also conducted under various conditions to investigate the fluidity length of aluminum alloy ADC12 and magnesium alloy AZ91D. Comparisons between experimental and numerical results revealed that the suitable value of the thermal resistance between the mold surface and the molten metal is about  $3.3 \text{ mm}^2 \text{ K/W}$  for aluminum alloy ADC12, and  $5.8 \text{ mm}^2 \text{ K/W}$  for magnesium alloy AZ91D.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属生産工学

キーワード：鋳造 数値計算

1. 研究開始当初の背景

自動車や家電製品など、我が国の主要工業製品において、ダイカスト部品は多数用いられている。近年、材料費の削減や製品軽量化のために成形品の薄肉化が進み、特に流動性の低下により、成形の難易度が上がっている。その反面、薄肉化による強度低下を補うべく、成形品自体の強度向上も望まれており、そのためには casting 欠陥の少ない製品を如何に効率的に製造するかがキープポイントとなっている。この様な背景から、 casting シミュレーションへの期待が高まっており、大企業はもとより、多くの中小企業でも casting シミュレーションソフトを導入するに至っている。しかし、現状のシミュレーションソフトでは欠陥を的確に予測するには至っておらず、解析精度の向上が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、 casting シミュレーションと実際の casting 結果との差の原因として、溶湯物性値の温度依存性と金型との熱的境界条件が不明確なことに着目し、真空吸引式流動性実験により流動長および流動停止時間に及ぼす各種条件の影響を定量的に評価すると共に、数値解析との比較により、逆解析的に溶湯の物性値と金型表面での熱抵抗値の最適値を求めめることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) アルミニウム合金の真空吸引式流動性実験装置と実験方法

本研究では、注湯作業によるばらつきが少ないことから、真空吸引装置を用いることとした。真空吸引装置の概略を図 1 に示す。本装置は主として真空ポンプに接続された減圧タンク①、Y ステージ②に取り付けられた試験部③、溶湯の入ったるつぼ⑤を設置した電気炉⑥、初期にそれぞれ開閉状態にある二つの電磁弁⑦、⑧により構成される。

実験は以下の手順で行った。まず、溶湯の酸化を防ぐため、電気炉内および試験部内にアルゴンガスをパージする。次いで、電気炉⑥内のるつぼ⑤に所定量のアルミニウム合金 (ADC12 合金) を投入し、断熱材で電気炉の

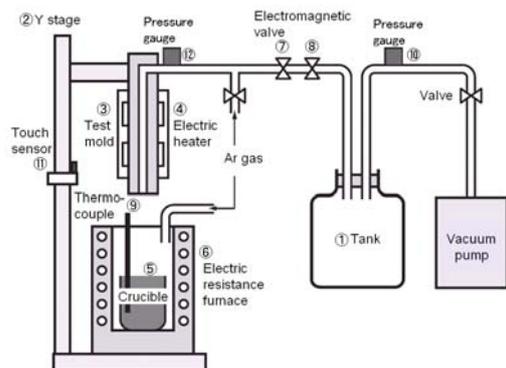


図 1 真空吸引装置の概略

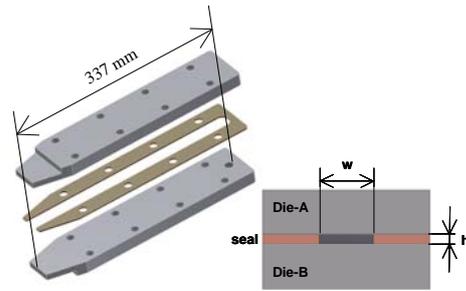


図 2 試験部の詳細

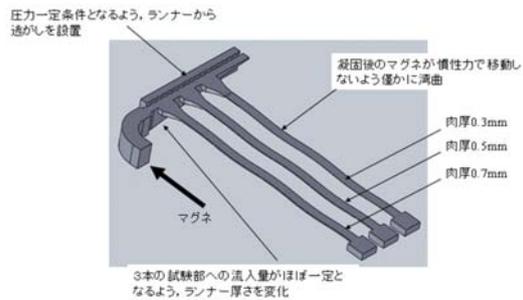


図 3 マグネシウム合金流動性実験用金型の概略

上部に蓋をして設定温度まで加熱・融解する。次いで、電気ヒータ④に通電し、金型である試験部の温度を所定の値まで上昇する。その後、真空ポンプにより減圧タンクを所定のゲージ圧まで減圧する。以上の準備が整ったら、試験部内へのアルゴンガスパージを停止する。次いで、電気炉上部の蓋を取り外し、手で試験部を Y ステージに沿って下方へ素早く移動させる。試験部の先端 15 mm が溶湯内に浸漬されたときにタッチセンサ⑪が作動し、その瞬間に電磁弁⑧に弁開放の電気信号が送信され、溶湯の吸引を開始する。弁開放の電気信号は制御用 PC にも送信されており、所定の時間経過後、PC から弁閉鎖の電気信号が電磁弁⑦へと送信され、吸引を完了する。なお、本実験装置では開放用と閉鎖用の二つの電磁弁を用い、それぞれの弁の動作遅れをキャンセルしたので、弁開放時間の誤差は 1ms 未満と推定される。二つの電磁弁への電気信号と試験部上流に設置した圧力センサ⑫の出力は、高速データロガーにより測定・記録し、流動停止時間の評価に用いた。

試験部である金型の詳細を図 2 に示す。SKD61 製の 2 枚の平板状金型の間、銅製シールを挟み込む構造とし、試験部の流路厚さは、銅製シールの厚さにより調整可能とした。銅製シールの厚さは、1.0mm および 2.3mm の 2 種類とした。試験部の流路幅は  $w=12\text{mm}$  で固定した。

(2) マグネシウム合金の流動性実験装置と実験方法

マグネシウム合金の流動性実験は、過去の研究で行ったものであるが、後で数値解析結果と比較を行うので、実験装置と方法について簡単に述べる。マグネシウム合金流動性実験用金型の概略を図 3 に示す。複数の肉厚に

関するデータを1つの金型で収集できるように、肉厚 0.3mm, 0.5mm および 0.7mm の流路を設けた。凝固後のマグネシウム合金が慣性力で移動するのを防ぐため、各流路は正弦波状にわずかに湾曲させた。また、ランナーの肉厚を手前から奥に向かって薄くすることで、各流路に均等に湯が入るようにした。さらに、流動停止はまず薄肉流路で生じるが、この際、成形機からの吐出量に変化しないとすると、肉厚の流路への流量が増大する。この流量の変動を抑制するため、ランナーには逃がし部を設置し、細かい櫛状の流路で接続した。実験には、型締め力 75tonf のマグネシウム合金射出成形機を用い、AZ91D 合金を成形した。

### (3) 数値解析法

#### ① 基礎式および計算法の概略

金型内の溶湯の熱流動解析には、基礎式として連続の式、NS 方程式、流体率 (VOF) の式およびエネルギー式を用い、これらの微分方程式を有限差分法で離散化して解いた。流体率の解法には MARS 法を、エネルギー式の解法にはエンタルピ法を用いた。エネルギー式の解析に際しては、金型-溶湯間に温度ギャップの存在を仮定した。また、NS 方程式の体積力としては、重力項以外に表面張力も考慮した。表面張力は CSF モデルにより評価した。

解析に用いた物性値は、以下のように評価した。温度-エンタルピの関係は測定結果に基づいて評価し、融解潜熱の温度変化を無視して固相率と温度の関係式に変換した。熱伝導率は固層と液層の熱伝導率に基づき、固相率の一次式として表現した。凝固による流動停止を表現するため、粘性を温度と固相率の関数として表現した。具体的には、森-乙武型の粘性式を採用した。

#### ② 境界条件

アルミニウム合金の真空吸引式流動性実験の数値解析に際しては、金型への流入条件として圧力境界条件を用いた。

マグネシウム合金の流動性実験の数値解析に際しては、解析モデル入り口近傍での圧力の値から射出成形機の P-Q 特性により流速を求めるようにした。

## 4. 研究成果

### (1) アルミニウム合金の真空吸引式流動性実験結果と考察

図 4(a)~(c)は、流路肉厚 2.3mm, 溶湯過熱度 100 K, 金型温度 298K で、吸引圧力 P

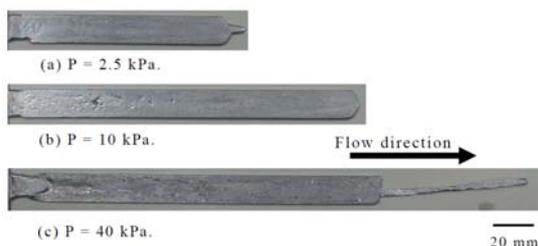


図 4 流路肉厚 2.3mm, 溶湯過熱度 100 K, 金型温度 298K における試験片形状

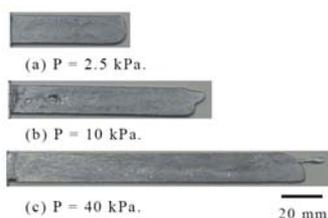


図 5 流路肉厚 2.3mm, 溶湯過熱度 20 K, 金型温度 298K における試験片形状



図 6 金型温度の影響 (流路肉厚 2.3mm, 溶湯過熱度 100K, 吸引圧力 40kPa)

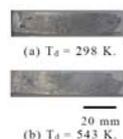


図 7 金型温度の影響 (流路肉厚 1.0mm, 溶湯過熱度 100K, 吸引圧力 40kPa)

を変化させた場合の試験片形状を示す。吸引圧力 P の増大に伴い流動長は増加している。また吸引圧力が高い図 4(c)では、試験片先端に細長い突起の生じることが確認された。

図 5(a)~(c)は、溶湯過熱度を 20K とし、他の条件は図 4 と同じにした場合の結果を示す。溶湯過熱度の大きい図 4 に比べて、全体的に流動長は短くなっている。また、吸引圧力が高い図 5(c)において先端部に細長い突起が確認されるが、その長さは溶湯過熱度の大きい図 4(c)に比べて短くなっている。

図 6 および図 7 は、それぞれ流路肉厚 2.3mm および 1.0mm に関して、金型温度の影響を比較したものである。流路肉厚 2.3mm の図 6 では、金型温度の上昇に流動長は増加しているが、流路肉厚が 1.0mm の図 7 では、流動長は金型温度に依存していない。試験片の表面状態は、金型温度の低い場合には粗く、金型温度の高い場合には滑らかになっていることから、金型温度が高い場合に溶湯表面と金型との接触が良好となり、同時に熱伝達も良好となったものと考えられる。特に、流路厚さが小さい場合には、試験片断面積に比べて相対的に伝熱部長さが大きいため、表面の接触状態の影響が顕著に表れたと推測される。

溶湯の流動長は、試験片の先端部に生じる突起の影響を排除し、流路幅の 95%以上の試験片幅となる領域の長さから、るつぼへの浸漬長 15mm を減じて求めた。金型温度、溶湯過熱度、流路の等価直径および吸引圧力と流動長の関係を次式の関数系に整理した。

$$L^* = CRe^n \theta^m$$

ここに、 $L^* = L/De$ 、 $Re = uDe/\nu$ 、 $\theta = (T_f - T_s)/(T_s - T_d)$ 、L は流動長、De は流路の等価直径、u はベルヌーイの定理により有効

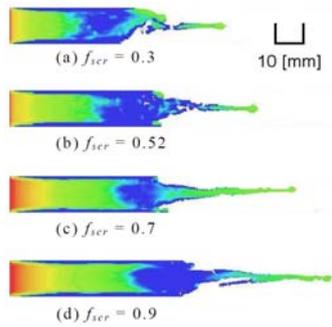
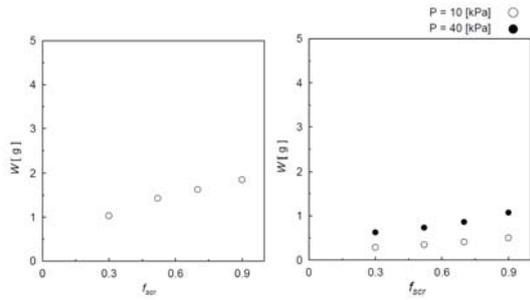


図8 流動長に及ぼす  $f_{scr}$  の影響(ADC12)



(a) ADC12 (b) AC7A  
図9 流入質量  $W$  と  $f_{scr}$  の関係

圧力(吸引圧に表面張力の影響を考慮)から算出される流速,  $T_f$  は溶湯温度,  $T_s$  は固相線温度,  $T_d$  は金型温度である. 実験データに際して最小自乗法を適用したところ,  $C=1.57 \times 10^{-2}$ ,  $n=0.96$ ,  $m=1.12$  を得た.

(2) 数値解析結果

① アルミニウム合金 ADC12 および AC7A

本研究では, 粘性係数を次の関数形で評価した.

$$\nu = \nu_0 \{1 + \alpha \phi / (1 - \phi)\}$$

ここに,  $\alpha$  は定数(球状の固体粒子が分散する場合には 1.56),  $\phi = f_s / f_{scr}$ ,  $f_s$  は固相率,  $f_{scr}$  は流動限界固相率(球状の固体粒子が分散する場合には 0.52)である.  $f_s \rightarrow f_{scr}$  で  $\nu \rightarrow \infty$  となるが, 数値計算では不安定を回避するため,  $\nu / \nu_0 = 1000$  を上限とした.

まずは,  $f_{scr}$  を種々に変化させ, 流動長への影響を調査した. 図8は, 吸引圧力 40kPa, 溶湯過熱度 100 K, 金型表面の熱抵抗を  $R = 5 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$  の条件で, 流動限界固相率  $f_{scr}$  を 0.3, 0.52, 0.7, 0.9 と変えた場合の流動停止時の温度分布と流入状況を示す. また図9には, 流動停止時の溶湯質量と流動停止限界固相率の関係を示す. これらの結果より, 流動停止限界固相率の増加に伴い流動長は増加するが, その変化割合は顕著ではないことが分かる.

一方, 図10, 図11に示すように, 流動限界固相率を 0.52 に固定して金型表面の熱抵抗を変化させた場合, 流動長は熱抵抗値が大きいほど長くなり, その変化割合も大きい.

図12には乱流モデル(LES)の有無による溶湯質量の変化を示す. 乱流モデルを用いた場合には, 溶湯の粘性係数と熱伝導率の両方が増加するため, 溶湯質量は乱流モデルを使

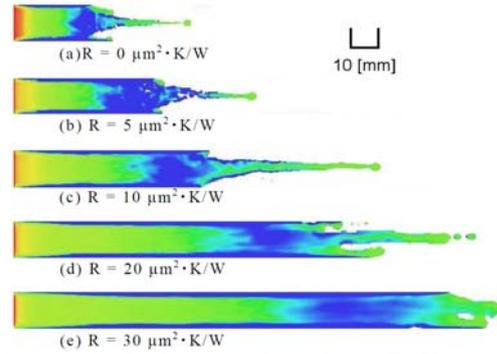
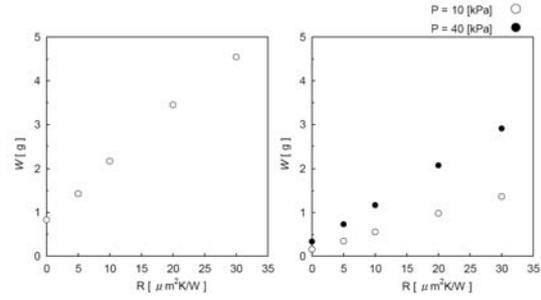
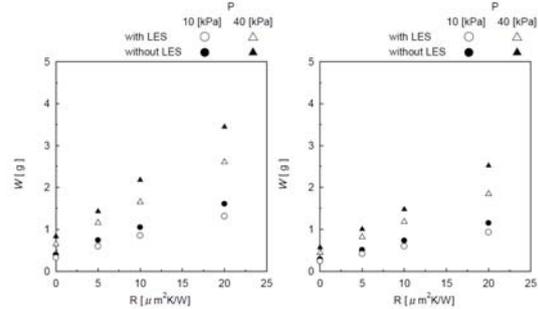


図10 流動長に及ぼす熱抵抗の影響(ADC12)



(a) ADC12 (b) AC7A  
図11 流入質量  $W$  と熱抵抗の関係



(a) ADC12 (b) AC7A  
図12 流入質量  $W$  と熱抵抗の関係に及ぼす乱流モデルの影響

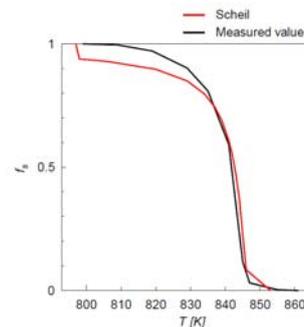


図13 固相率と温度の関係

用しない場合に比べて減少する. 減少割合は, 流速が大きくなる吸引圧力が大きい場合の方が顕著となっている.

固相率と温度の関係式が解析結果に及ぼす影響を検討するため, 固相中の拡散を無視した Scheil の式から得た凝固時の温度と固相率の関係を図13に, Scheil の式から得た固相率と温度の関係をを用いて得た流動長の解析結果を図14に示す. 図14において,

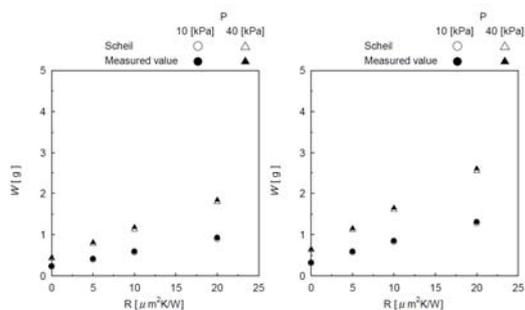


図 14 流入質量に及ぼす固相率-温度関係の影響

Scheil の式による結果を解析に用いた場合と、実測による温度-固相率の関係を用いた場合とでは、ほとんど差が見られなかった。これは、図 13 に示す固相率-温度の関係において、固相率が 0.8 以下の領域では、Scheil と実測値は概ね一致しているためと考えられる。

また、乱流モデルを考慮しない解析で求めた ADC12 合金の流動長 ( $h=0.9\text{mm}$ ) を次の関数形でまとめると、

$$L^* = CRe^n \theta^m (1 + R/R_0)^k$$

$C=1.26 \times 10^{-5}$ ,  $n=1.47$ ,  $m=0.268$ ,  $k=1.87$  となった。なお、上式中の  $R_0$  には  $R_0=10 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$  を用いてある。これらの指数の値より、流動長には  $Re$  数すなわち吸引圧力と、熱抵抗値  $R$  が大きく影響することが分かる。前述の ADC12 の実験データに関する整理式と比較すると、

$$R/R_0 = \max(44.8Re^{-0.273} \theta^{0.455} - 1, 0)$$

が数値解析に用いる最適な熱抵抗値となる。なお、負の熱抵抗値は不合理なので、 $\max$  を用いた。参考のために本条件の範囲について概略値を示すと、 $R$  は  $0 \sim 8.39 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$  の範囲で変化し、平均は  $3.3 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$  である。

### ②マグネシウム合金 AZ91D

過去に行ったマグネシウム合金 AZ91D の流動長実験により得られた試験片の一例を図 15 に示す。前述の図 3 で示したモデル入り口断面積に基づく流速は  $8.4\text{m/s}$  であり、溶湯温度と金型温度はそれぞれ  $883\text{K}$  および  $423\text{K}$  である。なお、マグネシウム合金 AZ91D の流動長実験では、温度条件は上記の値に固定してある。図 15 において、流路厚さは、図の上方より、 $0.3\text{mm}$ ,  $0.5\text{mm}$ ,  $0.7\text{mm}$  であり、その順に流動長が長くなっていることが確認できる。



図 15 AZ91D 流動長実験結果の一例

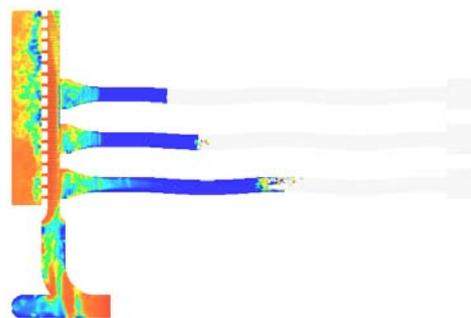


図 16 マグネシウム合金の流動長解析結果例

流速  $4.2\text{m/s}$ ,  $8.4\text{m/s}$  および  $16.8\text{m/s}$  に関する実験結果を、前述のアルミニウム合金と同様の方法で整理したところ、

$$L^* = 0.139Re^{0.659}$$

を得た。ここに、 $L^*=L/De$ ,  $De=2h$ ,  $Re=uDe/\nu$  である。なお、溶湯温度と金型温度は一定なので、温度のパラメータである  $\theta$  は関数に含めていない。

マグネシウム合金 AZ91D の流動長に関する数値解析結果の一例を図 16 に示す。同図より、定性的な傾向は図 15 の実験結果に等しいことが分かる。流速  $4.2\text{m/s}$ ,  $8.4\text{m/s}$  および  $16.8\text{m/s}$  のそれぞれについて、金型表面と溶湯との間の熱抵抗値  $R$  を  $0, 5, 10 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$  として数値解析により流動長を求めたところ、次式の結果にまとめることが出来た。

$$L^* = 9.92 \times 10^{-3} Re^{0.854} (1 + R/R_0)^{2.14}$$

なお、式中の  $R_0$  には  $R_0=10 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$  を用いてある。上式より、流動長には熱抵抗値  $R$  が顕著に影響することが分かる。実験データを整理した式との比較により、数値解析に用いる最適な熱抵抗値は、

$$R/R_0 = \max(3.43Re^{-0.0909} - 1, 0)$$

となった。本条件の範囲での熱抵抗値  $R$  は、 $R=4.3 \sim 7.5 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$  であり、平均値は  $5.8 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$  であった。

### (3)まとめ

アルミニウム合金およびマグネシウム合金の流動長を実験的に調査すると共に、数値解析により流動長に及ぼす諸因子の影響を検討した。また、実験結果と数値解析結果の比較により金型表面の熱抵抗値を推算し、アルミニウム合金の吸引式流動性試験では約  $3.3 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$  が、マグネシウム合金の射出成形では約  $5.8 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$  の熱抵抗値とすることで実験結果に近い流動停止状態を再現できることを示した。なお、上記の熱抵抗値は数値解析法や数値解析メッシュにも依存することが予想され、今後も継続的な検討が必要である。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

鈴木正紘, 氏平信輔, 小武内清貴, 福田忠生, 尾崎公一, ADC12 合金の流動長に及ぼす金型

温度の影響, 日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集 CDROM, G040062 (2011).

氏平信輔, 鈴川正紘, 小武内清貴, 福田忠生, 尾崎公一, 真空吸引装置による ADC12 合金の流動長に及ぼす金型温度の影響, 日本鉄鋼協会・日本金属学会 中国四国支部第 23 回若手フォーラム (2011).

氏平信輔, 鈴川正紘, 小武内清貴, 福田忠生, 尾崎公一, 金型温度が ADC12 合金の流動長に及ぼす影響, 第 3 回軽金属学会中国支部講演大会 (2011).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

尾崎 公一 (Koichi Ozaki)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号: 20224206

### (2) 研究分担者

福田 忠生 (Tadao Fukuta)

岡山県立大学・情報工学部・准教授

研究者番号: 20423965