

令和 4 年 9 月 1 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05108

研究課題名（和文）凝固プロセスに着目したダイカスト鋳物の空孔欠陥の最小化手法の確立

研究課題名（英文）Establishment of a method for minimizing gas defects in die castings manufactured through high-pressure die casting

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、高圧鋳造法（ダイカスト法）において、金型内に熔融金属を流入させ、加圧しながら凝固させる過程における圧力の付加プロセスのメカニズムを解明し、得られる鋳造製品の内部の空孔を最小化させるための具体的手法について検討することを目的とした。本研究により、Al-Si-Cu合金における圧力伝達が停止する固相率はおおよそ70%であることを明らかにするとともに、圧力伝達時間を決定する因子である溶湯温度の推定を目的とした金型温度の予測モデルを構築できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究における学術的意義は、固相が晶出し続けている気相を含む熔融金属の凝固進展挙動と圧力伝達の関係の解明である。この学術的問いの解明は、素形材の製造方法である高圧鋳造法（ダイカスト）における圧力の最適な制御方法の確立のための重要な指針であり、金属の相変態を活用した成形加工方法の高効率化、高度化を実現することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to examine the mechanism of the process of adding pressure during the solidification process of molten metal flowing into a mold under pressure in the high-pressure casting method (die casting), and to investigate specific methods to minimize the internal porosity of the die castings. This study clarified that the solid fraction at which pressure transfer stops in Al-Si-Cu alloys is approximately 70%. A predictive model of die temperature was also developed to estimate the molten metal temperature, which is a factor that determines the pressure transfer time.

研究分野：生産加工

キーワード：鋳造 圧力伝達 固相率 鋳造欠陥 金型温度 機械学習

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鋳造は湯流れ時にガスを巻き込む、または熔融金属中の水素ガスが原因となって凝固後の製品に空孔が発生することがある。この空孔は製品の強度や疲労寿命低下を招く要因であり、製品中に発生させないことが凝固プロセス上極めて重要となる。ある空間内にガスを内包した熔融金属が一端から加圧されるとする。このとき、空間内の熔融金属から外部への熱移動が熔融金属の厚みに関係なく均一であり、かつ瞬間的に凝固完了すると仮定すると、熔融金属中のガスは圧力の作用によって初期よりも小さくなった状態で凝固金属中に閉じ込められることになる。しかし、実際には周辺への熱移動は肉厚に影響され、流路が先に凝固する。つまり、圧力の伝達経路が徐々に閉塞されることになる。このとき、ガスを内包する製品部の熔融金属の固相率が低い状態であれば圧縮されていたガスは膨張すると想定される。この状態で製品部の熔融金属が凝固すれば、大きな空孔欠陥を有する製品ができることとなる。

この問題を解決するためには、ガスに長い時間圧力を作用させ続け、その間に熔融金属を均一に凝固させることが考えられる。しかし、ダイカストの高い生産性を維持するためには長時間にわたり加圧し続けることは現実的ではない。そのため、熔融金属を伝達する圧力の最適な制御が必要となる。

2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、ダイカスト法において鋳物内部の空孔を最小化する手法を確立することである。ダイカスト法の工程中の熔融金属の凝固プロセスに注目したときに、最終目的を達成するため以下の検討項目を設定した。

- ① 凝固進展と圧力伝達状況の関係の解明
- ② 鋳物中の空孔サイズと熔融金属の凝固進展状況の関係の解明
- ③ 凝固進展状況に直接影響する熔融金属の温度変化を推定する金型温度変化の予測モデルの構築

これらを明らかにすることによって、固相が晶出し続けている気相を含む熔融金属の凝固進展挙動と圧力伝達の間関係を明らかとすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、金型内に充填した熔融金属に付加される圧力の変化を計測するとともに、ダイカスト品内に発生した空孔を測定することによって、圧力伝達と空孔サイズとの関係性を評価した(以後、実験 A とする)。また、金型温度変化の予測モデルを構築するため、圧力センサや温度センサを設置した金型を用いて 200 ショットの連続成形を行った(以後、実験 B とする)。このとき、成形機の出力信号も取得することによって特徴量を抽出し、機械学習を活用することによって金型温度変化と特徴量との相関分析を行った。

実験 A では、押しピンにひずみゲージを設置し、異なる表面処理を施した金型によりダイカスト実験を実施した。Fig. 1 にダイカスト品形状とひずみゲージを設置した押しピンの配置を示す。熔融金属に圧力が付加されることによって発生する押しピンの軸方向のひずみを測定することによって、圧力変化を推定した。鋳造材料には Al-Si-Cu 合金である JIS-ADC12 を使用し、注湯温度を 680 °C、鋳造圧力を 50 MPa、射出速度を低速時に 0.1 m/s、高速時に 1.0 m/s に変化させた。金型の表面処理方法は、未処理(以後 NC)、ナノカーボンコーティング(以後 CC)を採用した。Table 1 に実験条件を示す。

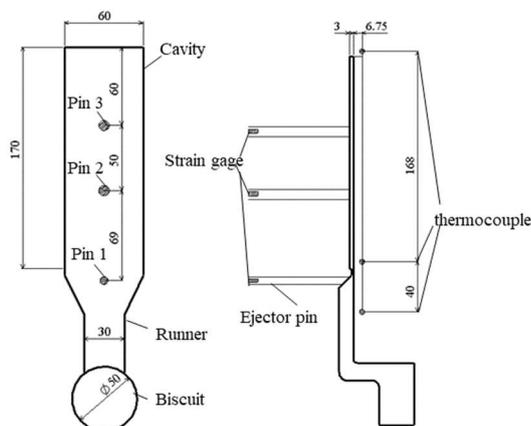


Fig. 1 2-D drawing of the die castings and location of the strain gages in experiment A

Table 1 Experimental conditions in experiment A

Item (Unit)	Value
Casting material	Al-Si-Cu alloy (JIS-ADC12)
Melting temperature (°C)	680
High / Low injection speed (m/s)	1.0 / 0.1
Casting pressure (MPa)	50
Strain / Temperature recording frequency (kHz)	1 / 0.01

実験 A のダイカスト品の評価は、X 線 CT (ZEISS METROTOM, カールツァイス (株)) による内部欠陥体積の測定を行った。取得したデータは、CT データの解析・可視化用ソフトウェア (VGSTUDIO MAX 3.4, ボリュームグラフィックス (株)) により欠陥解析を行い、内部の欠陥体積を算出した。

実験 B では、押しピン端部にロードセルを設置するとともに、金型へ熱電対を設置することによってダイカスト中の製品部の圧力変化と金型温度変化を測定した。Fig.2 に実験に使用した金型およびセンサの取付位置を示す。このとき、成形機から出力される各ショットの鑄造条件の実測値、および冷却水出口側の温度も測定した。Table 2 に実験条件を示す。ダイカスト実験の測定結果を用いて機械学習を行った。機械学習には設計空間探索ソフトウェア ((pSeven Ver.6.25) を用いた。測定結果から抽出した特徴量と金型温度の実測結果との相関分析を実施するとともに、応答曲面法 (RSM) を用いて金型温度の予測モデルを検討した。機械学習における教師データ数は 115 個であり、検証データには教師データに使っていない実測値を 5 個用いた。

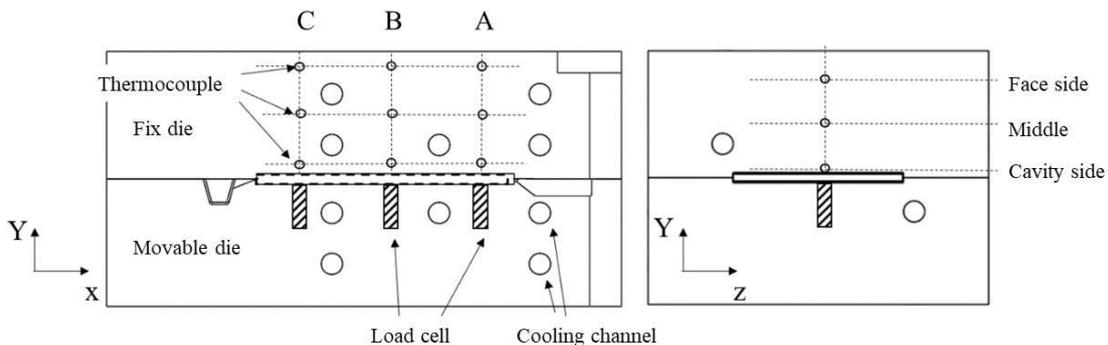


Fig. 2 2-D drawing of the experimental die and location of the strain gages in experiment B

Table 2 Experimental conditions in experiment B

Item (Unit)	Value
Casting material	Al-Si-Cu alloy (JIS-ADC12)
Melting temperature (°C)	650
Injection speed (m/s)	0.3, 1.0
Casting pressure (MPa)	30, 40
Flow rate of cooling water (L/min)	4.5, 1.3
Strain / Temperature recording frequency (kHz)	1 / 0.01

4. 研究成果

(1) 凝固進展挙動と圧力伝達の関係 (実験 A)

Fig. 3 に圧力負荷時間の平均値を示す。表面処理の違いにより負荷時間に違いがあり、CC 処理により負荷時間が増加した。

Fig. 4 にダイカスト品中の欠陥体積と総欠陥数の関係を示す。総欠陥数に大きな違いはなかったが、CC 処理の場合では欠陥体積が減少した。

Fig. 5 に計測したダイカスト 1 サイクル中のひずみの変化と、コンピュータシミュレーションにより計算した熔融金属中の固相率の変化を示す。固相率は充填直後から急激に増加するが、固相率 30 % 付近でその増加割合は低下した。このとき、ひずみも減少した。さらに、ひずみの変

化がゼロとなった付近の固相率はおよそ 70 %であった。

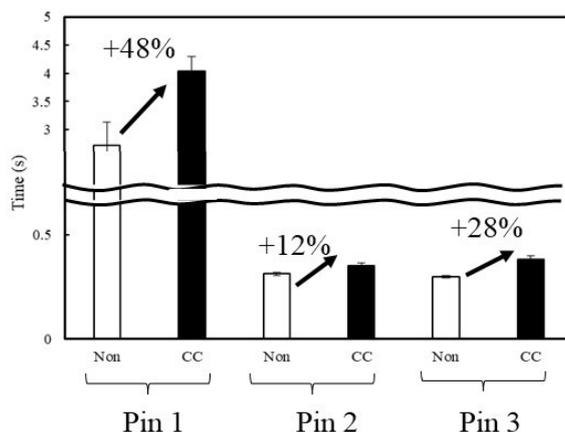


Fig. 3 Comparison of the pressure applied time for difference surface treatments

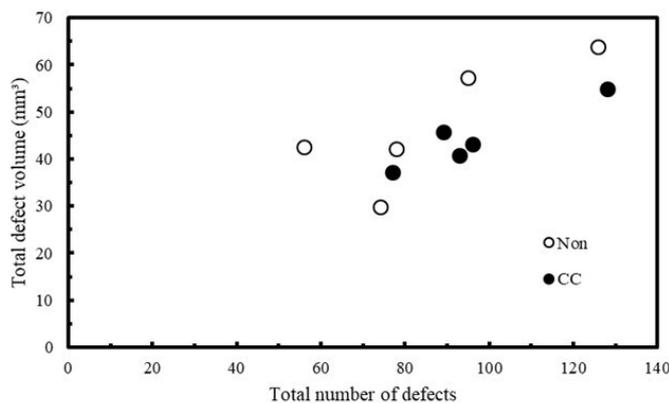


Fig. 4 Relation between the total defect volume and the number of defects

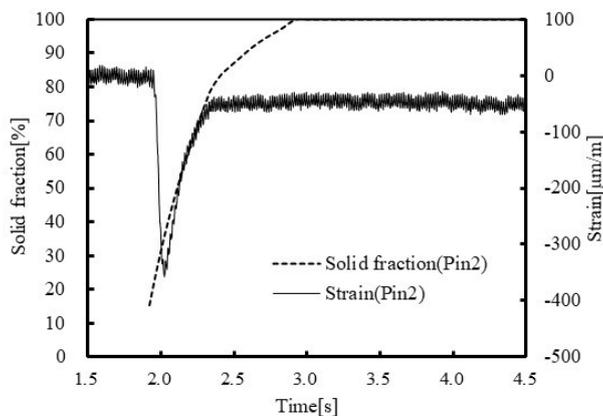


Fig. 5 Relation between the solid fraction and the strain during one cycle

これらの結果は、同じ铸造条件であっても CC 処理をした場合では凝固中により大きな圧力が長い時間にわたって負荷されていることを表している。つまり、本研究で適用した表面処理により本研究の目的である加圧に伴う凝固進展の挙動の評価が可能となることを示唆するものである。また、CC 処理では NC 処理と比較して欠陥数は同じでも欠陥体積が減少した。総欠陥数に違いが現れなかったのは、欠陥（ポロシティ）の要因となる空気の巻き込みや発生ガスそのものは表面処理による影響が現れないためであると考えられる。また、欠陥体積が減少したのは、凝固進展中の溶融金属内へ圧力がより大きく、かつ長く負荷されたことによって欠陥ひとつあたりの体積が減少したためであると考えられた。

凝固進展に伴い溶融金属中の圧力伝達経路が閉塞するときの固相率（限界固相率）の検討を行った結果、固相率 30 %付近までは圧力は負荷されつづけていると考えられる。しかし、固相率の増加に伴って圧力伝達経路が徐々に閉塞し始め、固相率 70%では完全に閉塞すると考えられる。この結果から、圧力伝達経路が閉塞する限界の固相率は 70 %であることが分かった。

(2) 成形中の凝固進展挙動の推定を目的とした金型温度予測モデルの検討（実験 B）

Fig. 6 に機械学習による相関分析の結果、予測対象箇所の金型温度との相関が確認された特徴

量を示す。本研究では、Pearson 係数が 0.5 以上の値を示した場合の特徴量を採用結果、キャビティ近傍の金型温度と最大型締め力であった。

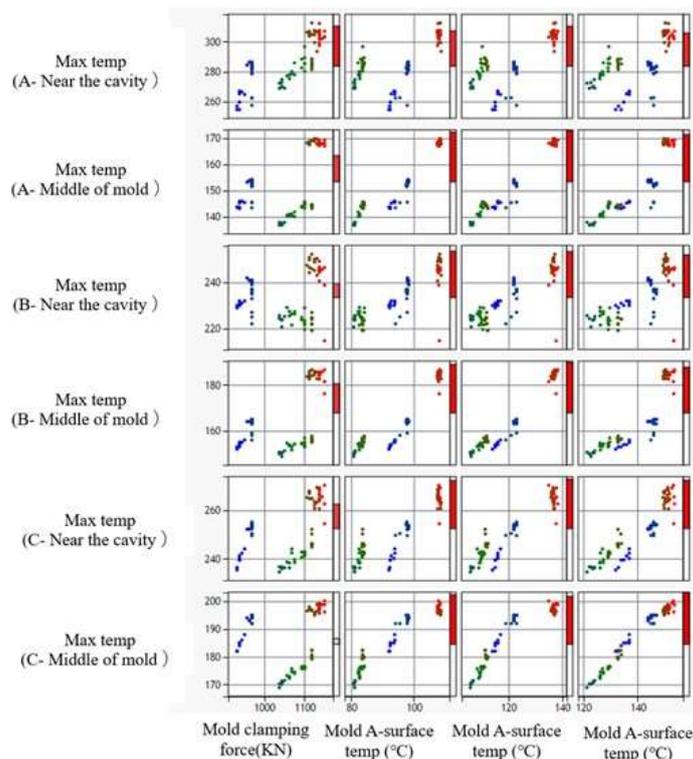


Fig. 6 Heat map of features with high correlation coefficient with the objective function

Fig. 7 に予測モデルにより算出した金型温度と検証データとの比較を示す。両者はほぼ一致していたが、キャビティ近傍の予測精度は中央部の予測精度よりも低下した。

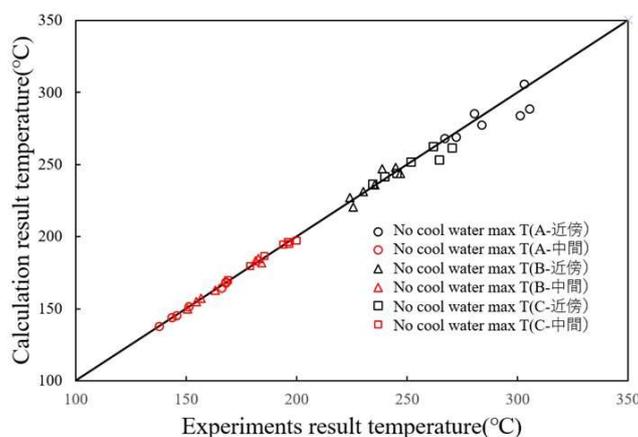


Fig. 7 Comparison of the predicted and measured die temperatures

目的関数との相関が高い特徴量に型締め力があった。型締め力は、成形機により設定値以内で金型分割面が適切に接触するように制御されている。このことは、金型温度の変化に伴う金型の変形を表現する特徴量となっていることを意味している。金型温度を予測するうえで成形機により出力される値は極めて重要であり、また、金型から直接取得すべき情報を少なくすることが可能となることを示唆している。

金型温度を精度よく予測することは、直接測定することができない金型内の溶融金属温度を推定するうえで重要である。本研究の成果から、金型内の溶湯圧力を直接測定することなく、最小限、かつ設備管理のしやすい金型温度と成形機情報からダイカスト品中の欠陥量を推定できる可能性を示すことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木星名, 新川真人, 濱田啓太郎, 山下実, 水谷予志生
2. 発表標題 Al-Si-Cu合金ダイカスト品中のポロシティ体積に及ぼす金型表面処理の影響
3. 学会等名 型技術ワークショップ2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------