

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

自動車部品用アルミニウム合金の凝固割れ欠陥予測と防止に関する研究

Study on Prediction and Prevention of Hot Tearing and
Solidification Cracking in Aluminum Alloys for Automotive

申請者

永田 益大

Yoshihiro NAGATA

総合機械工学専攻 輸送機器・エネルギー材料工学研究

2023年2月

(1) 審査経緯

博士論文審査の経緯を以下に示す。

- ・ 2022年10月13日 予備審査会
- ・ 2022年10月20日 教室受理決定
- ・ 2022年11月17日 創造理工学研究科運営委員会受理決定
- ・ 2022年12月13日 論文案修正版を主査および副査へ提出，または送付
- ・ 2022年12月21日 公聴会
- ・ 2023年2月8日 審査分科会

(2) 論文の背景，内容，評価

以上の審査を経た本論文は，全8章から構成されている．以下に各章の概要と審査結果を述べる．

第1章は緒言で，自動車部品に用いられるアルミニウム合金の組成多様化に伴う凝固割れ欠陥発生リスクの増加に対して，流動凝固熱応力解析による凝固割れ予測とそれに基づく防止が望まれていることを述べている．

第2章では，まず熱応力解析による凝固割れ欠陥の未然予測とそれに基づく防止に関する従来文献のレビューを行っている．その結果，凝固割れ予測には半凝固状態の力学挙動を模擬するために実験的根拠のある粘性構成モデル（Norton則など）が必要であるが，半凝固状態の合金の粘性特性を含む力学特性が合金種や冷却速度，金属間化合物相の晶出量により変化することの支配因子が解明されていないことを示している．次に合金組成の制御により凝固割れ欠陥を防止するニーズに対して，自動車足回り部品への適用が望まれている非熱処理型のAl-Mg系ダイカスト合金開発の従来研究をレビューしている．従来の開発合金のほとんどが割れ欠陥抑制のため1.0%以上のSiを添加していることに対して，Si添加が機械的性質の破断伸びを低下させることを示し，従来の開発合金では部品によっては要求される延性を満たさない可能性を指摘している．これらの調査結果より，本研究の目的を半凝固状態における粘性特性の支配因子の解明と，高延性と低凝固割れ感受性を両立した非熱処理型Al-Mg系合金の開発および試作レスな凝固割れ欠陥の未然予測と設定している．

第3章では，微視損傷および冷却速度による半凝固状態の粘性特性変化の支配因子を明らかにしている．マイクロポロシティなどの発生による粘性特性の変化のメカニズムは，これら微視損傷形成によってアルミニウム合金の見かけのひずみ速度が増加するためであることを実験的に示している．また粘性特性の冷却速度依存性は，粒界の溶質元素のマイクロ偏析が支配的であることを明らかにしている．

第4章では，合金系を超越した半凝固状態の粘性特性の支配因子を明らかにしている．異なる合金系（Al-Mg系合金とAl-Cu系合金）の粘性特性を実験的に取得した結果，合金系を超越したNorton則の応力のひずみ速度感受性 m 値の支配因子は固相结合率であることを明らかにしている．また材料定数 $\ln k$ 値に関しては，固相率や固相结合率よりもアレニウス則が支配的であることを明らかにしている．

第5章では、実験を行わずして種々のアルミニウム合金の半凝固状態における粘性特性を取得する手法の構築を目的としている。第4章で解明した合金系を超越した支配因子である固相結合を主因子とした簡易的な組織モデリング手法を構築し、その解析モデルを引張解析することで得られる粘性特性と第4章の実験値を比較することで本手法の有効性を検証している。その結果、本手法の解析値は実験値と良い相関を示すことを明らかにしている。また、半凝固状態の組織の解析モデルに対して凝固過程における固相結合を考慮する必要があることを示している。

第6章では、Fe系金属間化合物相による半凝固状態の力学特性および凝固割れ感受性の変化の支配因子を明らかにしている。熱交換器用 Al-Mn-Cu 系合金に対してFe量を増加させると、半凝固状態の引張強度が向上するため、凝固割れ感受性が低減することを明らかにしている。引張強度が向上するメカニズムは初晶 α 相同士の結合を促進するFe系金属間化合物相の晶出量が増加するためであり、Feを変量した Al-Mn-Cu 系合金の半凝固状態における引張強度の支配因子はFe系金属間化合物相を考慮した固相結合率であることを明らかにしている。

第7章では、Al-4.5Mg-1.0Mn系合金に対して0.2%SiとSr, Ti, Bを共添加した合金を一般的な溶湯内水素量である0.5mL/100gAl程度の条件下で高圧ダイカストすることで、15%程度の破断伸びと相対的に低い凝固割れ性を両立する車体構造部品が得られることを示している。また上記の共添加による凝固割れ感受性低減のメカニズムを明らかにしている。鋳造した自動車足回り部品ロアリンクに生じた凝固割れ欠陥発生箇所に対して実験的根拠のある粘性構成モデルを実装した FEM 流動凝固熱応力解析を実施しており、凝固割れ欠陥発生リスクが高い箇所を予測できることを示している。

第8章では、以上の知見を総括し、本研究で明らかにした半凝固状態におけるアルミニウム合金の力学特性の支配因子と開発した Al-Mg 系ダイカスト合金の活用方法について述べている。

以上、本論文は、自動車用アルミニウム合金の鋳造時に生じる凝固割れ欠陥予測のための要素技術研究開発として、熱応力解析に必要な半凝固状態の粘性特性の支配因子を明らかにし、粘性特性の簡易的な予測および取得方法を提案したものである。また、熱処理不要で高延性を有し、かつ凝固割れ感受性が相対的に低い Al-Mg 系合金を開発し、その開発合金のダイカスト試作評価および試作品に生じた凝固割れ欠陥の流動凝固熱応力解析による予測まで一貫して調査している。本論文の成果より、熱応力解析に必要な半凝固状態の粘性特性の取得が迅速化および効率化すると考えられる。開発された Al-Mg 系ダイカスト合金は、従来まで車体構造部品に適用されてきた Al-Si 系合金に比べて熱処理コストがないため、比較的廉価な車種の車体構造部品への適用が見込める。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値のあるものここに認める。

2023年2月

審査員

主査 早稲田大学教授

博士（工学）早稲田大学 吉田 誠

早稲田大学教授

博士（工学）早稲田大学 宮下 朋之

早稲田大学教授

博士（工学）東京大学 石村 康生

早稲田大学客員教授

博士（工学）東京大学 岡根 利光
