

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文概要

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 Components

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

2022年11月

第 1 章 本研究の社会的背景

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い凝固割れ欠陥発生リスクが増加している。また試作により製品形状や生産プロセスを作りこむ開発工程から設計段階においてCAE技術を活用して作りこむ工程に移行しつつある。そのため、流動凝固熱応力解析により凝固割れ欠陥を未然に予測し、それに基づいて欠陥を防止することが望まれている。

第 2 章 従来研究

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と、合金元素がアルミニウム合金の凝固割れ感受性に及ぼす影響に関する従来文献をレビューした。それにより、下記の研究課題群を抽出した。

(1) 凝固割れ欠陥予測のための要素技術研究開発

熱応力解析による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が示唆された。第 3 章から第 6 章において、これらの支配因子を明らかにし、粘性特性の予測及び取得方法を提案する。それにより、凝固割れ欠陥予測の効率化を実現することを目的とする。

(2) 実機ダイカスト品の凝固割れ欠陥予測

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、足回り部品への適用が望まれている非熱処理型 Al-Mg 系合金に関する従来研究をレビューした。その結果、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、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が示唆された。第 7 章において、高延性と低凝固割れ感受性を両立した非熱処理型 Al-Mg 系合金を開発し、ダイカスト試作評価、試作品の凝固割れ欠陥予測まで一貫して調査する。これにより、試作を必要とせず凝固割れ欠陥を未然に予測することを目的とする。

第 3 章 半凝固状態における粘性特性の冷却速度依存性と微視損傷の影響

第 3 章では、半凝固状態における粘性特性の冷却速度依存性及び微視損傷の影響を実験的に明らかにした。

実操業における鋳物の冷却速度は、半連続鋳造では 0.4 ~ 10 K/s と言われている。しかしながら、先行研究の調査範囲は半連続鋳造の 10 分の 1 も満たない。これに対して、本研究では最大で 7.0 K/s まで冷却速度を変量可能な半凝固状態の

引張試験装置を開発し，Al-5mass%Mg合金の1.0 K/sと5.0 K/sにおける粘性特性の温度依存性を実験的に取得した．その結果，粘性特性の冷却速度依存性は粒界の溶質元素のミクロ偏析が支配的であることが明らかになった．

粘性特性の取得方法は2種類ある．1つ目は，ひずみ速度を変量して半凝固状態における引張試験を行い，各応力-ひずみ曲線における流動応力とその時のひずみ速度によって粘性特性を決定する方法（歪速度変量法）である．2つ目は，応力-ひずみ曲線の流動応力に達する前の応力とひずみ速度の関係から粘性特性を決定する方法（Matsushitaらの手法）である．各方法により得られる粘性特性を比較した報告はない．これに対して，歪速度変量法で得られる粘性特性は，応力-ひずみ曲線の流動応力時において試験片内部で微視損傷が発生する場合に，Matsushitaらの手法の値と異なることを明らかにした．これは微視損傷の発生によるひずみ速度の増加に起因することが示唆された．

第4章 凝固過程における固相結合が半凝固状態におけるアルミニウム合金の粘性特性に及ぼす影響

第4章では，半凝固状態における粘性特性の合金系を超越した支配因子を実験的に明らかにした．従来報告では，凝固過程における初晶 α 相同士の結合（固相結合率）が合金系で異なる半凝固状態の強度及び伸び値の支配因子であることが示されていたが，異なる合金系の粘性特性と固相結合率の関係は従来までに調査されていなかった．本章では，Al-5mass%Mg合金及びAl-2mass%Cu合金の半凝固状態における粘性特性（Norton則における m 値， k 値）とCampbellの理論モデルにより算出した固相結合率との関係を実験的に調査した．その結果，半凝固状態における m 値の支配因子は固相結合率であることが明らかになった．また k 値はアレニウス則が支配的であることが明らかになった．本章で提案した粘性特性の予測手法を用いれば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簡易的に予測できる可能性が示唆された．

第5章 固相結合を主因子とした数理モデルに基づく有限要素解析による半凝固状態のアルミニウム合金の粘性特性取得とその有効性の検証

第5章では，実験を行わずして半凝固状態の粘性特性（Norton則における n_{eff} （ $= 1/m$ ）値と k 値）を取得する手法の構築を行った．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組織モデリング手法を構築した．この手法はCampbellモデルに基づいており，固液界面の二面角 θ が既知ならば，任意の合金系の半凝固状態における等軸組織を模擬できる．本章では微細等軸晶を持つAl-5mass%Mg合金（ $\theta = 39^\circ$ ）とAl-2mass%Cu合金（ $\theta = 12.5^\circ$ ）を解析対象とした．2合金の解析モデルを引張解析して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た．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がわかった。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结合を考慮する必要があることが示された。

第6章 金属間化合物相を考慮した固相结合が Al-Mn-Cu 系合金の半凝固状態における力学特性及び凝固割れ感受性に及ぼす影響

第6章では、半凝固状態の力学特性及び凝固割れ感受性が Fe 系金属間化合物相 (Fe-rich IMC 相) により変化することの支配因子を明らかにした。従来文献では、Fe 量増加が凝固割れ感受性及び半凝固状態の力学特性に及ぼす理由は「Fe-rich IMC 相による初晶 α 相同士の補助的な結合」であると指摘されていたが、実験的に明らかではなかった。本章では、Fe 量の異なる熱交換器用 Al-Mn-Cu 系合金の固相结合率と凝固割れ感受性及び半凝固状態の引張強度の関係を調査した。固相结合率の算出には、Campbell モデルと本研究で開発した金属間化合物相を考慮したモデルを用いた。その結果、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が明らかになった。引張強度向上のメカニズムは初晶 α 相同士の結合を促進する Fe-rich IMC 相の晶出量が増加するためであり、Fe を変量した Al-Mn-Cu 系合金の引張強度の支配因子は IMC 相を考慮した固相结合率であることが示唆された。

第7章 高延性と低凝固割れ感受性を両立した自動車構造部品用非熱処理型 Al-Mg-Mn 系ダイカスト合金の開発

第7章では、高延性と低凝固割れ感受性を両立する車体構造用の非熱処理 Al-Mg-Mn 系ダイカスト合金を開発した。従来よりも微量な Si (0.2 %程度) と Sr の共添加が非熱処理型 Al-Mg 系合金の機械的性質及び凝固割れ感受性に及ぼす影響を足回り部品ロアリンクの高圧ダイカスト試験で調査した結果、溶湯内の水素量が 0.5 ~ 0.6 mL/100gAl 程度でかつ Al-4.5Mg-1.0Mn-0.2Si 系合金に 0.025 %Sr, 0.08 %Ti, 0.016 %B を共添加すれば、要求される機械的性質(0.2%耐力: 140 MPa, 破断伸び: 15 %)と低い凝固割れ性を両立することが明らかになった。Sr の添加による凝固割れ感受性低減のメカニズムは、Sr を添加しない場合に比べて低い固相率で水素ガスポロシティが形成されることで、凝固割れの駆動力となる引張の熱荷重が低下したためであることが示唆された。上記のメカニズムを発現させるためには、固相線近傍における初晶 α -Al 相内の水素の固溶限よりも多い水素量が必要であることが示唆された。また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流動凝固熱応力解析を行い、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た。

第8章 総括

第8章では各章の研究で得られた結果と今後の展望をまとめた。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 永田 益大

印

(2023年 1月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 査読付き 研究論文	<p>○ 1) <u>Yoshihiro Nagata</u>, Ryosuke Takai, Toshimitsu Okane, Muhammad Khairi Faiz, Makoto Yoshida: Influence of solid cohesion on viscous properties in Norton law for aluminum alloys during partial solidification, Materials Science and Engineering A, Vol. 832, (2022), 142339.</p> <p>○ 2) <u>永田益大</u>, 加藤青空, 宍戸拓真, 土屋蒼, 北岡山治, 大城直人, 西直美, 野中直樹, 小池貴之, 大池俊光, 林憲司, 神戸洋史, 岡根利光, ムハマドハイリファイズ, 吉田誠: 高延性と低凝固割れ感受性を両立した自動車構造部品用非熱処理型Al-Mg-Mn系ダイカスト合金の開発, 鑄造工学, 94 (2022), 690-699.</p> <p>○ 3) <u>永田益大</u>, 鬼澤力也, 染谷方哉, 小瀧皓, 高井量資, 江端幹夫, 岡根利光, ムハマドハイリファイズ, 吉田誠: 高周波誘導加熱引張試験による半凝固状態のAl-5mass%Mg合金の粘性特性の取得, 軽金属, 71 (2021), 255-262.</p> <p>4) Ryosuke Takai, Rei Hirohara, Naoki Endo, <u>Yoshihiro Nagata</u>, Toshimitsu Okane, Makoto Yoshida: Controlling factor for maximum tensile stress and elongation of aluminum alloy during partial solidification, Materials Transaction, 60 (2019), 2406-2415.</p> <p>5) Naofumi Takatori, Mami Amano, Ryosuke Miyachi, <u>Yoshihiro Nagata</u>, Muhammad Khairi Faiz, Makoto Yoshida: Viscosity properties prediction of semi-solid aluminum alloys using finite element analysis based on quenched solidified structure, and experimental validation, Materials Transaction, 61 (2020), 2371-2377.</p>
2. 査読付き 研究速報	<p>1) <u>永田益大</u>, 清水雅人, 合田智男, 林憲司, 神戸洋史, 團野瑛章, 宮尻聡, 大城直人, 吉田誠: Al-4.5Mg-1.0Mn-Si系合金ダイカストの凝固割れ感受性と機械的性質に及ぼすSi, Sr, Ti, B添加の影響, 鑄造工学, 91 (2019), 427-435.</p> <p>2) <u>永田益大</u>, 清水雅人, 合田智男, 林憲司, 神戸洋史, 團野瑛章, 宮尻聡, 大城直人, 吉田誠: Al-4.5Mg-1.0Mn-Si系合金ダイカストの凝固割れ感受性と機械的性質に及ぼすSi添加量の影響, 鑄造工学, 91 (2019), 432-435.</p> <p>3) 清水雅人, <u>永田益大</u>, 大城直人, 宮尻聡, 團野瑛章, 吉田誠: 自動車車体用非熱処理Al-Mg系ダイカスト合金の凝固割れ性に及ぼす微量Si添加の影響, 鑄造工学, 91 (2019), 436-438.</p> <p>4) 清水雅人, <u>永田益大</u>, 大城直人, 宮尻聡, 團野瑛章, 吉田誠: 自動車車体用非熱処理Al-Mg系ダイカスト合金の凝固割れ性に及ぼすSr添加の影響, 鑄造工学, 91 (2019), 439-441.</p> <p>5) <u>永田益大</u>, 加藤青空, 宍戸拓真, 茂泉 健, 神戸洋史, 大城直人, 北岡山治, 吉田 誠: ダイカスト用Al-4.5Mg-1.0Mn系合金の凝固割れ性に及ぼす溶湯内水素ガス量及びSr, Ti, B添加の影響, 鑄造工学, 93 (2021), 400-403.</p> <p>6) 永田益大, 加藤青空, 林憲司, 神戸洋史, 大城直人, 北岡山治, 吉田 誠: ダイカスト用Al-4.5Mg-1.0Mn系合金を適用した車体部品の凝固割れに及ぼす離型剤及びTi, B, Sr添加の影響, 鑄造工学, 93 (2021), 404-407.</p> <p>7) 永田益大, 加藤青空, 相田悟, 藤本亮輔, 林憲司, 神戸洋史, 大城直人, 北岡山治, 吉田 誠: ダイカスト用Al-4.5Mg-1.0Mn系合金を適用した大型車体部品ストラットハウジングの機械的性質, 鑄造工学, 93 (2021), 408-413.</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 永田 益大

印

(2023年 1月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
3. 総説	1)永田益大, 塩田正彦, 吉田誠: Al-Mg系ダイカスト合金の機械的性質と凝固割れ感受性に及ぼす合金元素の影響に関するレビュー, 鑄造工学, 94 (2022), 558-565.
4. 講演	1)永田益大, 遠藤直輝, 清水雅人, 岡根利光, 吉田誠: 半凝固状態におけるAl-Mg系, Al-Cu系合金の粘性特性に及ぼす支配因子の検討, 日本鑄造工学会全国講演大会, 172 (2018). 2)清水雅人, 永田益大, 大城直人, 宮尻聡, 團野瑛章, 吉田誠: 自動車車体用非熱処理Al-Mg系ダイカスト合金の凝固割れ性に及ぼすSi, Sr添加の影響, 日本鑄造工学会全国講演大会, 173 (2019), 21. 3)永田益大, 清水雅人, 合田智男, 林憲司, 神戸洋史, 團野瑛章, 宮尻聡, 大城直人, 吉田誠: 低い凝固割れ感受性と機械的性質を両立する車体用非熱処理型Al-Mg-Mn系ダイカスト合金組成の検討, 日本鑄造工学会全国講演大会, 173 (2019), 22. 4)永田益大, 鬼澤力也, 染谷方哉, 小瀧皓, 江端幹夫, 岡根利光, ムハマドハイリファイズ, 吉田誠: 高周波誘導加熱引張試験による半凝固状態のAl-5mass%Mg合金の粘性特性の取得, 軽金属学会, 140 (2021), 103. 5)永田益大, 宮地諒輔, 高取尚文, Muhammad Khairi Faiz, 岡根利光, 吉田誠: Campbell数値モデルを用いた有限要素解析による半凝固状態のAl合金の粘性特性値予測とその有効性の検証, 日本鑄造工学会全国講演大会, 177 (2021), 92. 6)永田益大, 中川亮平, 西村啓佑, 松下 彬, 谷口兼一, 坂本敏夫, 吉田誠: 半凝固状態におけるAl-Mn-Cu系合金の引張強度及び固相結合率に及ぼすFe添加の影響, 軽金属学会, 141 (2021), 120. 7)永田益大, 林憲司, 神戸洋史, 宮下朋之, 吉田誠: FEM流動凝固・熱応力連成解析を用いたAl-4.5Mg-1.0Mn系合金製ロアリンクダイカストの凝固割れ予測, 日本鑄造工学会全国講演大会, 179 (2022), 16. 8)土屋蒼, 宍戸拓真, 加藤青空, 永田益大, 大城直人, 神戸洋史, 西直美, 岡根利光, 吉田誠: SiおよびSrの共添加による車体用Al-4.5%Mg-1.0%Mn合金の凝固割れ感受性メカニズムの検討, 日本鑄造工学会全国講演大会, 179 (2022), 56. 9)Yoshihiro Nagata, Ryohei Nakagawa, Keisuke Nishimura, Akira Matsushita, Kenichi Yaguchi, Toshio Sakamoto, Muhammad Khairi Faiz, Makoto Yoshida: Influence of Fe addition on tensile strength and fraction of solid cohesion of Al-Mn-Cu based alloys during partial solidification, The International conference on Aluminum Alloys, 18 (2022), O5-6-2. 10)大森春弥, 吉田誠, 千葉浩行, 岡根利光, 小岩井修二, 永田益大, 宮下朋之: 運動方程式による液中運動の振動解析と鑄造欠陥の予測, 日本鑄造工学会全国講演大会, 180 (2022), 69. 11)中村侑未, 沖村康彦, 永田益大, 宮下朋之, 吉田誠, 高木健輔, 寺山朗, 頃安貞利, 志賀秀俊, 神戸洋史, 前田安敦, ムハマドハイリファイズ, 岡根利光: 積層鑄型とアルミニウム合金溶湯の間の熱伝達係数算出方法とその課題, 日本鑄造工学会全国講演大会, 180 (2022), 112. 12)熊木拓海, 西村啓佑, 永田益大, 折尾寛太, 松下彬, 坂本敏夫, 谷口兼一, 吉田誠: Al-Mn-Cu系合金におけるFe系化合物が凝固割れ感受性に及ぼす影響, 日本鑄造工学会全国講演大会, 180 (2022), 128.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 永田 益大

印

(2023年 1月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
4. 特許	13)平野椋己, 尾崎祥悟, 永田益大, 宮地諒輔, 岡根利光, 吉田誠: Al-Si系合金の共晶凝固過程における粘性特性及び力学特性に及ぼすSrの影響, 日本鑄造工学会全国講演大会, 180 (2022), 129.
	14)永田益大, 北岡山治, 西直美, 大城直人, 林憲司, 神戸洋史, 吉田誠: Al-Mg系ダイカスト合金の機械的性質と凝固割れ感受性に及ぼす合金元素の影響に関する従来研究, 日本鑄造工学会全国講演大会, 180 (2022), 113.
	15)永田益大, 北岡山治, 西直美, 大城直人, 林憲司, 神戸洋史, 吉田誠: 非熱処理Al-Mg系合金ダイカスト実体品における機械的性質と凝固割れ発生因子の検討, 日本鑄造工学会全国講演大会, 180 (2022), 114.
	16)永田益大, 北岡山治, 大城直人, 西直美, 大池俊光, 小池貴之, 野中直樹, 内田準也, 林憲司, 神戸洋史, 吉田誠: 車体用非熱処理型Al-Mg系合金ダイカストの動向とダイカスト用アルミニウム合金委員会の取り組み, 日本ダイカスト会議 (2022), JD22-15.
	1)早稲田大学, 日産自動車, 大紀アルミニウム工業所: 鑄造割れ感受性の小さいアルミニウム合金およびこれを用いたアルミニウム合金鑄物 特開2020-105545
	2)三菱アルミニウム, 三菱マテリアル, 早稲田大学: アルミニウム合金の粘性特性算出方法と粘性特性算出プログラム 特開2022-35388 (特許査定)