

研究部会紹介

7000系アルミニウム合金の時効硬化挙動研究部会
Age-hardening behavior of 7000 series aluminum alloys

成田 麻未

Mami MIHARA-NARITA

1. 研究部会発足の背景と目的

7000系アルミニウム合金は、一般に、溶体化・焼入れ処理後に室温において急速に時効硬化する。これは、焼入れ時に過飽和固溶原子とともに焼入れ過剰空孔が導入されて溶質原子からなるクラスタやGPゾーンが形成され、転位運動の妨げになるためとされている。しかし、本系合金では焼入れ速度を遅くした炉冷の場合においても、2000系、6000系合金と異なり時効硬化が生じ、水冷材に近い強度が得られることが最近の研究で明らかになっており、炉冷中に特異な微視組織が形成することが熱分析の結果から示唆されている¹⁾。炉冷の場合に焼入れ過剰空孔が関与しているかは、時効硬化理論にとって大きな問題である。そして、焼入れおよび時効条件が、微視組織や強度、耐SCC性へ及ぼす影響の更なる究明は、学術および産業の両面において重要な課題である。本研究部会では、大学および企業の最先端の研究技術の集結により、化学結合論を含む新たな視点からの時効硬化メカニズムの理解を達成することを目的として、活動を開始した。

2. 部会構成

2024年2月現在の構成委員を表1に示す。委員は、学側から9名、産側から9名、官側から1名、合計19名により構成されている。このほか、学生が4名参加している。本研究部会は2022年4月よりスタートし、年3回程度で会議をハイブリッド方式にて開催している。委員からの話題提供や、共通試料を用いた実験に関して報告・議論を行っている。

3. 活動内容

本研究部会では研究課題として以下の3つを掲げ、研究活動を行っている。

- Al-Zn-Mg系合金およびAl-Zn合金を対象とした、時効初期の微視組織形成メカニズムの究明
 - 高分解能TEMによる構造解析やX線小角散乱法を用いた微視組織形成メカニズムの究明
 - 第一原理計算や拡張ヒュッケル法による安定構造の検討
- Al-Zn-Mg系合金の焼入れ時の冷却速度と強度、マイクロ組織、応力腐食割れ性との関係究明
 - 焼入れ時の冷却速度の最適化（粒界析出抑制+GPゾーン生成促進）
 - 応力腐食割れに対する焼入れ、時効条件の影響評価
 - 応力腐食割れメカニズムの究明（計算化学との連携）

- Cu添加、Zr添加が応力腐食割れ性に及ぼす影響究明（製造プロセス（板または押出）についても検討）
- Al-Zn-Mg系合金のバークハード性向上プロセスの究明
- バーク時の昇温速度の影響究明、二段時効処理によるGPゾーン生成促進、時効速度の短時間化の検討

表1 7000系アルミニウム合金の時効硬化挙動研究部会の構成委員（2024年2月現在、順不同）

氏名	所属	備考
成田 麻未	名古屋工業大学	部会長
水野 正隆	大阪大学	副部会長
安藤 哲也	室蘭工業大学	副部会長
本間 智之	長岡技術科学大学	副部会長
小松 健人	株式会社神戸製鋼所	幹事（令和5年度）
大沼 正人	北海道大学	
池田 賢一	北海道大学	
清水 一行	岩手大学	
伊藤 吾朗	茨城大学	
小椋 智	大阪大学	
高谷 舞	株式会社UACJ	
愛須 優輝	株式会社UACJ	
箕田 正	株式会社UACJ	
宍戸 久朗	株式会社神戸製鋼所	
荒田 昌宏	株式会社神戸製鋼所	
邢 劼	日本軽金属株式会社	
王 樹美	三協立山株式会社	
丸岡 智樹	京都市産業技術研究所	アドバイザー
吉田 英雄	超々ジュラルミン研究所	アドバイザー

4. 活動実績

4.1 研究部会の開催

- 第1回研究部会
(2022年5月20日、名古屋工業大学+オンライン)
 - 研究部会の方針について
 - 今後の実験分担について
 - その他議論
- 第2回研究部会
(2022年7月27日、日本アルミニウム協会会議室+オンライン)
 - 研究進捗報告（電気炉の温度制御を中心に）（安藤先生）
 - 7000系合金の低温でのSAXS測定結果（大沼先生、学生）

委員)

- ・溶体化処理後の焼入れ速度が硬さとナノ組織に及ぼす影響 (予備実験) (本間先生, 学生委員)
- ・炉冷速度およびSCC性評価に関して議論
- ・話題提供: スピノーダル分解とA7003合金 (本間先生)
- ・Al-Zn二元合金作製の相談

(3) 第3回研究部会

(2022年11月25日, 日本アルミニウム協会会議室+オンライン)

- ・Al合金における空孔-溶質クラスタに関する理論計算 (水野先生)
- ・拡張ヒュッケル法の概要と応用事例の紹介 (丸岡委員)
- ・山本の速度式によるAl-6%Zn-0.75%Mg合金時効析出過程の解析 (吉田委員)
- ・研究進捗報告 (電気炉・ソルトバスによる溶体化処理の影響) (安藤先生)
- ・自動車部材への7000系合金の適用動向および押出材施策案 (荒田委員)

(4) 第4回研究部会

(2023年3月15日, 名古屋工業大学+オンライン)

- ・話題提供: アルミニウムの水素脆化防止方法 (清水先生)
- ・話題提供: 粒界腐食感受性と水素脆性からみたアルミニウム合金の応力腐食割れ (箕田委員)
- ・炉冷材および水冷材の耐SCC性試験案 (高谷委員)
- ・進捗報告 (炉冷時の冷却速度の影響) (安藤先生)
- ・進捗報告 (時効初期過程の微視組織観察) (安田委員)
- ・計算グループ分科会からの報告 (成田部会長)
- ・テーマセッションについて

(5) 第5回研究部会

(2023年5月31日, 名古屋工業大学+オンライン)

- ・話題提供: Al-Zn-Mg-Cu合金の粒界析出と応力腐食割れ・水素脆化の関係 (伊藤先生)
- ・話題提供: アルミニウム合金の粒界破壊と化学結合 (吉田委員)
- ・進捗報告 (炉冷条件および室温予備時効が時効曲線と組織に及ぼす影響) (安藤先生, 学生委員)
- ・進捗報告 (炉冷材および水冷材のSCC試験進捗) (高谷委員)
- ・SAXSによる組織評価報告 (水冷と炉冷の組織発展の比較) (大沼先生)
- ・Al-Zn-Mg系合金における空孔-溶質クラスタに関する理論計算 (Al-Mg, Al-Zn, Al-Mg-Zn系合金におけるモンテカルロ計算の途中経過) (水野先生)
- ・拡張ヒュッケル法によるAl合金の計算 (凝集エネルギー, Atomic Bond populationの温度および組成による変化) (丸岡委員)

(6) 第6回研究部会

(2023年11月25日, 日本アルミニウム協会会議室+オンライン)

- ・XRDによる検討結果 (本間先生)
- ・炉冷条件と時効硬化挙動, TEM組織 (安藤先生)
- ・水冷および炉冷材のSCC性比較結果 (高谷委員)

- ・拡張ヒュッケル法によるアルミニウム中での水素の取り扱いについて検討進捗 (丸岡委員)
- ・第一原理計算による検討進捗 (水野先生)
- ・X線小角散乱による検討進捗 (大沼先生)
- ・その他議論 (押出材の作製および特集記事について)

(7) テーマセッション「7000系アルミニウム合金の時効硬化挙動」(2023年11月11日, 第145回秋期大会)

- ・研究部会の内外より, 11件の報告

(8) 軽金属「特集」

「7000系アルミニウム合金の時効析出と諸特性」

- ・2024年2月号より記事の募集を開始している。

なお, 第7回研究部会は2024年3月19日に予定している。

4.2 研究進捗状況

部会共通試料 (Al-6.0%Zn-0.75%Mg合金, 冷間圧延材) を用いて評価した結果, これまでに以下の知見が得られている。

(1) 溶体化処理温度を450°Cとして炉冷を実施した際, 室温まで冷却したままの状態において, クラスタやGPゾーンの形成が水冷材と比べて促進されることがわかった。

炉冷に関しては高温側 (およそ200°C~450°C) と低温側 (100°C~室温) の冷却条件がその後の時効硬化に大きな影響を及ぼすことがわかった。高温側では冷却が遅くなると粒界析出や粒内析出が進行し, 強度低下をもたらす。一方, 低温側では冷却が遅いほうがクラスタやGPゾーンの形成が促進され, 時効硬化しやすいことが明らかとなった。また炉冷によって材料内部に微視的なひずみが蓄積することが示唆された新たなデータも得られた。

【課題】メカニズム解明に向けた基礎検討に加えて, 現状は水冷と同等かわずかに高い硬さが得られるのみであるため高強度化を達成するプロセスの探索が必要である。

(2) 耐SCC性評価の結果, 水冷材と比べて炉冷材のSCC性が優れる傾向が得られた。

【課題】高強度化を達成することに加えて, 粒界析出状態を制御した試料における耐SCC性評価と, 押出材におけるSCC性評価によるメカニズム解明が必要である。

(3) 理論計算に基づく検討より, Al-Zn-Mg系合金における安定構造はMgが頂点サイト, Znが面心サイトを占有するL1₂構造をZnが取り囲む構造であり, Lervikらの報告²⁾にあるGP Iの構造と一致することが見出された。

【課題】本合金の時効析出メカニズム解明に向け, 計算過程のZn-Zn, Zn-Mg結合の変化や, Zn/Mg比の影響を検討することが必要である。

5. おわりに

本研究部会では, 「炉冷」がひとつのキーワードであるが, 話題提供などの際, 粒界割れやSCCの観点で「水素」も頻出し, さまざまな視点での議論が繰り広げられている。今後も幅広い視野で7000系合金を多角的に研究・議論し, 新プロセス・新材料開発につなぐ場としていきたい。

参考文献

- 1) C. Rowolt et al.: J. Mater. Sci., **56** (2021), 20181-20196.
- 2) A. Lervik et al.: Acta Mater., **205** (2021), 116574.