

超高強度アルミニウム合金中の
溶質配置のナノスケール解析

茨城大学 倉本 繁

北海道大学 大沼正人

東京工業大学 小林郁夫

2021年10月

目次

I 本統合的先端研究の概要

研究組織	2
研究経費	4
研究成果の公表	5

II 研究成果

1. はじめに	10
2. 本研究の目的	11
3. ラボ高エネルギーSAXSによるバルク試料の その場ナノ構造解析	20
4. 90%冷間圧延材時効組織の電子顕微鏡観察	52
5. アルミニウム合金の高強度化と溶質配置との関係	85
6. 総括	113
謝辞	116

I 本統合的先端研究の概要

研究組織

研究代表者・茨城大学グループリーダー：

倉本 繁 茨城大学 工学部 機械システム工学科・教授

共同研究者・北海道大学グループリーダー

大沼正人 北海道大学 大学院工学研究院 応用量子科学部門・教授

共同研究者・東京工業大学グループリーダー

小林郁夫 東京工業大学 物質理工学院 材料系・准教授

茨城大学グループ

分担内容：研究全体の総括、高強度アルミニウム合金試料の作製、
機械的特性評価、強化機構解析

メンバー：倉本 繁	茨城大学 工学部 機械システム工学科・教授
小林純也	茨城大学 工学部 機械システム工学科・助教
伊藤吾朗	茨城大学 工学部 機械システム工学科・教授
M. Safyari	茨城大学大学院生
三浦拓真	茨城大学大学院生
石井裕樹	茨城大学大学院生
横田慎介	茨城大学大学院生
福澤宏基	茨城大学学部生

北海道大学グループ

分担内容：X線および中性子小角散乱実験と解析

メンバー：大沼正人 北海道大学 大学院工学研究院
応用量子科学部門・教授
林 恭平 北海道大学大学院生
鈴木朝己 北海道大学学部生
福田 深 北海道大学学部生

東京工業大学グループ

分担内容：高分解能 TEM 観察および組織形成機構の解析

メンバー：小林郁夫 東京工業大学 物質理工学院
材料系・准教授
O Minho 東京工業大学 物質理工学院
材料系・助教
Chen Xuanliang 東京工業大学大学院生
Rhee Yujin 東京工業大学大学院生
喜連川直人 東京工業大学大学院生
富田友稀 東京工業大学学部生

研究経費

2019 年度	12,000,000 円
茨城大学グループ	7,000,000 円
北海道大学グループ	4,000,000 円
東京工業大学グループ	1,000,000 円
2020 年度	12,000,000 円
茨城大学グループ	5,000,000 円
北海道大学グループ	2,000,000 円
東京工業大学グループ	5,000,000 円
2020 年度追加交付分	2,000,000 円
茨城大学グループ	0 円
北海道大学グループ	2,000,000 円
東京工業大学グループ	0 円
総計	26,000,000 円

研究成果の公表

【学術雑誌・国際会議論文】

- (1) M. Moshtaghi, M. Safyari, S. Kuramoto, T. Hojo: Unraveling the effect of dislocations and deformation-induced boundaries on environmental hydrogen embrittlement behavior of a cold-rolled Al-Zn-Mg-Cu alloy, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(2021), 8285-8299.
- (2) M. Safyari, M. Moshtaghi, S. Kuramoto: On the role of traps in the microstructural control of environmental hydrogen embrittlement of a 7xxx series aluminum alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 855(2021), 157300.
- (3) M. Safyari, M. Moshtaghi, S. Kuramoto: Environmental hydrogen embrittlement associated with decohesion and void formation at soluble coarse particles in a cold-rolled Al-Cu based alloy, *Materials Science and Engineering A*, A799(2021), 139850.
- (4) X.L. Chen, C.D. Marioara, S.J. Andersen, J. Friis, A. Lervik, R. Holmestad, E. Kobayashi: Precipitation processes and structural evolutions of various GPB zones and two types of S phases in a high purity cold-worked Al-Cu-Mg alloy with low Cu/Mg ratio, *Materials & Design*, 199(2021), 109425.
- (5) X.L. Chen, C.D. Marioara, S.J. Andersen, J. Friis, A. Lervik, R. Holmestad, E. Kobayashi: Data on atomic structures of precipitates in an Al-Mg-Cu alloy studied by high resolution transmission electron microscopy and first-principles calculations, *Data in Brief*, 34(2021), 106748.
- (6) X.L. Chen, D.H. Kim, M. O, C.D. Marioara, S.J. Andersen, A. Lervik, R. Holmestad, E. Kobayashi: Effect of pre-deformation on age-hardening behaviors in an Al-Mg-Cu alloy, *Materials Science & Engineering A*,(2021), 141557.

【国際会議発表】

- (1) S. Yokota, J. Kobayashi, S. Kuramoto, G. Itoh: Tensile properties and hydrogen embrittlement susceptibility of severe cold-rolled Al-Zn-Mg-Cu alloys, 17th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA17), 2020年10月, Grenoble (online).

(2) Y. Ishii, J. Kobayashi, S. Kuramoto, G. Itoh: Effect of low temperature aging on mechanical properties and microstructure in 2219 aluminum alloy, 17th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA17), 2020 年 10 月, Grenoble (online).

(3) X. L. Chen, E. Kobayashi. Effects of Pre-strain on Age-hardening Behaviors of an Al-3Mg-1Cu Alloy. 17th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA17), 2020 年 10 月, Grenoble (online).

【国内学会発表】

(1) 林恭平, 大沼正人, 倉本繁, 2024 合金における溶体化処理後のナノ構造変化, 日本金属学会・日本鉄鋼協会両北海道支部合同サマーセッション, 2019 年 7 月, 北見工業大学

(2) M. Safyari, J. Kobayashi, S. Kuramoto, G. Itoh: Effect of solution treatment temperature on mechanical properties and hydrogen embrittlement behavior of severely cold-rolled Al-alloys, 一般社団法人軽金属学会第 137 回秋期講演大会, 2019 年 11 月, 東京農工大学小金井キャンパス

(3) 三浦拓真, 小林純也, 倉本繁, 伊藤吾朗: Al-Mg-Si 系合金冷間圧延材の機械的特性に及ぼす合金組成の影響, 一般社団法人軽金属学会第 137 回秋期講演大会, 2019 年 11 月, 東京農工大学小金井キャンパス

(4) 大沼正人, 林恭平, 平賀富士夫, 原かおる, 倉本繁, ラボ X 線小角散乱およびインハウス中性子小角散乱によるバルク状アルミニウム合金のナノ組織非破壊評価, 一般社団法人軽金属学会第 137 回秋期講演大会, 2019 年 11 月, 東京農工大学小金井キャンパス

(5) 林恭平, 大沼正人, 倉本繁, ラボ X 線小角散乱による 2024 アルミニウム合金の室温時効におけるナノ構造形成初期過程, 一般社団法人軽金属学会第 137 回秋期講演大会, 2019 年 11 月, 東京農工大学小金井キャンパス

(6) 石井裕樹, 小林純也, 倉本繁, 伊藤吾朗: 2219 アルミニウム合金の耐水素脆性に及ぼす粒界近傍組織, 一般社団法人軽金属学会第 138 回春期講演大会, 2020 年 5 月, 香川大学幸町北キャンパス (大会中止、講演発表は成立)

- (7) 横田慎介, 小林純也, 倉本繁, 伊藤吾朗: Al-Zn-Mg-Cu 系合金冷間圧延材の引張特性及び耐水素脆性に及ぼす Zn 量の影響, 一般社団法人軽金属学会第 138 回春期講演大会, 2020 年 5 月, 香川大学幸町北キャンパス (大会中止、講演発表は成立)
- (8) 李 有眞, 喜連川直人, 倉本繁, 伊藤吾朗, 小林郁夫, 7000 系アルミニウム合金板材の析出挙動に及ぼす 90%冷間圧延と Zn 添加量の影響, 一般社団法人軽金属学会第 138 回春期講演大会, 2020 年 5 月, 香川大学幸町北キャンパス (大会中止、講演発表は成立)
- (9) 李 有眞, 喜連川直人, 倉本繁, 伊藤吾朗, 小林郁夫, 強加工を行った Al-Zn-Mg 合金の 120°C時効中の時効析出挙動, 一般社団法人軽金属学会関東支部令和 2 年度若手研究者ポスター発表会, 2020 年 8 月
- (10) 石井裕樹, 小林純也, 倉本繁, 伊藤吾朗: Al-Cu-Mg 系合金冷間圧延材の機械的特性と水素脆化特性に及ぼす合金組成の影響, 一般社団法人軽金属学会第 139 回秋期講演大会, 2020 年 11 月, オンライン
- (11) 横田慎介, 小林純也, 倉本繁, 伊藤吾朗: Al-Zn-Mg-Cu 系合金冷間圧延材の引張特性及び耐水素脆性に及ぼす熱処理の影響, 一般社団法人軽金属学会第 139 回秋期講演大会, 2020 年 11 月, オンライン
- (12) 林恭平, 大沼正人, 田中俊希, 倉本繁, X 線小角散乱法を用いたアルミニウム合金のナノ組織生成初期過程の評価, 一般社団法人軽金属学会第 139 回秋期講演大会, 2020 年 11 月, オンライン
- (13) 田中俊希, 林恭平, 大沼正人, 倉本繁, ラボ高エネルギー SAXS による 2000 系アルミニウム合金の析出過程のその場観察, 日本金属学会・日本鉄鋼協会両北海道支部会, 2020 年 1 月, オンライン
- (14) 林恭平, 山崎仁, 大沼正人, 加美山隆, 平賀富士夫, 倉本繁, ラボ/インハウス SAXS/SANS による 7000 系アルミニウム合金の析出過程, 日本金属学会・日本鉄鋼協会両北海道支部会, 2020 年 1 月, オンライン

- (15) 福澤宏基, 石井裕樹, 小林純也, 小林郁夫, 大沼正人, 倉本繁, 伊藤吾朗: Al-Mg-Si 系合金冷間圧延材の機械的特性と水素脆化特性に及ぼす添加元素の影響, 一般社団法人軽金属学会第 140 回春期講演大会, 2021 年 5 月, オンライン
- (16) 石井裕樹, 小林純也, 小林郁夫, 大沼正人, 倉本繁, 伊藤吾朗: Al-Cu-Mg 系合金冷間圧延材の機械的特性と水素脆化特性に及ぼす溶体化処理温度の影響, 一般社団法人軽金属学会第 140 回春期講演大会, 2021 年 5 月, オンライン
- (17) 横田慎介, 小林純也, 小林郁夫, 大沼正人, 倉本繁, 伊藤吾朗: Al-4.5%Zn-2.0%Mg-2.5%Cu 合金 90%冷間圧延材の引張特性に及ぼす時効の影響, 一般社団法人軽金属学会第 140 回春期講演大会, 2021 年 5 月, オンライン
- (18) 李有眞, オミンホ, 小林純也, 大沼正人, 倉本繁, 伊藤吾朗, 小林郁夫, 90%冷間圧延を施した Al-xZn-2Mg(x=4.5, 5.5, 8)合金の時効析出挙動の TEM 観察, 一般社団法人軽金属学会第 140 回春期講演大会, 2021 年 5 月, オンライン
- (19) 喜連川直人, オミンホ, 小林純也, 大沼正人, 倉本繁, 伊藤吾朗, 小林郁夫, 6000 系アルミニウム合金 T6 処理材と強加工材の時効析出挙動と HRTEM 観察組織の比較, 一般社団法人軽金属学会第 140 回春期講演大会, 2021 年 5 月, オンライン
- (20) 田中俊希, 林恭平, 大沼正人, 倉本繁, 伊藤吾朗, 小林純也, 小林郁夫, ラボ X 線小角散乱法による 2000 系アルミニウム合金時効過程のローオペランド解析, 一般社団法人軽金属学会第 140 回秋期講演大会, 2021 年 5 月, オンライン
- (21) 林恭平, 田中俊希, 大沼正人, 倉本繁, 伊藤吾朗, 小林純也, 小林郁夫, 中性子小角散乱(SANS)/X 線小角散乱(SAXS)強度比較による 7000 系アルミニウム時効初期過程の検討, 一般社団法人軽金属学会第 140 回秋期講演大会, 2021 年 5 月, オンライン

II 研究成果

1. はじめに

本報告書は、2019-2020 年度に実施された公益財団法人軽金属奨学会の統合的先端研究「超高強度アルミニウム合金中の溶質配置のナノスケール解析」の研究成果をまとめたものである。本研究は、茨城大学、北海道大学、東京工業大学の3つの研究グループの共同研究として実施された。新型コロナウイルス感染症の影響により、当初の予定通りには研究を実施できなかったが、様々な制約の元で、可能な範囲で研究を進めて、一定の成果を得ることができた。本報告書においては、まず研究の目的を述べ、それに引き続いて各グループの研究成果を示し、最後に研究期間内に明らかにできたことを総括するとともに今後の課題をまとめる。

2. 本研究の目的

2.1 アルミニウム合金の高強度化研究の現況

アルミニウム合金の高強度化に関しては、これまでに多くの研究がなされてきた。長らくアルミニウム合金の高強度化の主な強化機構は析出強化であったが、昨今の巨大ひずみ加工プロセスを利用した研究の成果を見ると、転位強化や結晶粒径微細化強化も、アルミニウム合金を高強度化する上で重要な役割を果たすことがわかって来ている。軽金属奨学会の統合的先端研究においても、関連するテーマ[1,2]が採択され、多くの成果が得られている。

特に本研究に関係の深い重要な結果が、2010年に報告されている。この年に、Al-Zn-Mg-Cu系合金（7075および7475合金）のHPT(high-pressure torsion)による高強度化に関して3件[3-5]の報告がなされ、いずれの報告においても引張強さが1GPa程度まで向上することが報告されている。従来の析出強化材

（7075-T6）の引張強さが570MPaであることを考えると、75%程度の強度上昇が冷間加工により達成されている。一方、延性の値は0-10%の範囲で報告によりバラツキが大きい。これは合金組成、HPT加工前のプロセス、HPT加工プロセス自体の条件が異なるためであると考えられるが、その原因は明らかでない。

その後、HPT加工以外の巨大ひずみ加工プロセスを利用した場合や、巨大ひずみ加工の後に析出を目的とした熱処理を組み合わせた場合の機械的特性や微視組織についても報告がなされており、この分野研究は盛んに進められている。しかし、巨大ひずみ加工プロセス中の組織変化とそれが機械的特性に及ぼす影響については理解が必ずしも進んでいない。以下に高強度化に関係する因子について個別に現状と課題をまとめる。

(1) 転位強化

巨大ひずみ加工により、材料中には高密度の転位が導入されるが、転位密度は加工ひずみ量の増大に伴って一様に上昇するわけではない。巨大ひずみ加工

により高密度の転位が試料中に導入され、加工中の動的回復等による転位の再配列によって粒界が生成し、結果として結晶粒径の微細化が生じるものと考えられる。実際に、10回転のHPT加工後の7075合金の結晶粒内の転位密度は、Fig. 2-1に示されるように一般的な冷間加工材に比べて低い[6]。ただし、加工プロセスが終了して除荷する際に転位密度が著しく低下する[7]という報告もあり、機械的特性と関係する転位密度の評価自体が困難であることも、強化機構を考察する上での課題となっている。

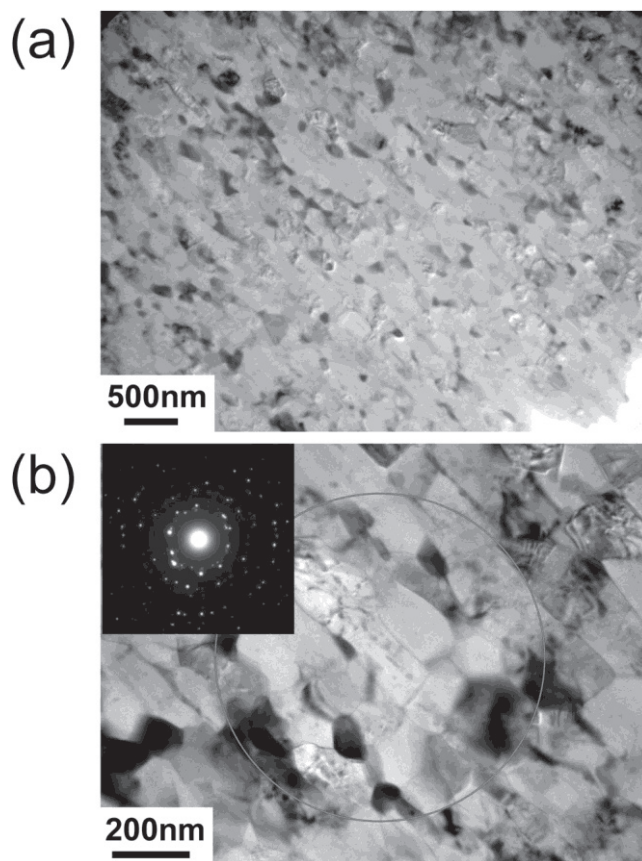


Fig. 2-1 10回転のHPT加工後の7075合金のTEM明視野像観察結果 [6]

(2) 結晶粒微細化強化

これまでに巨大ひずみ加工材の強度には、①転位密度、②結晶粒径、③粒界偏析、④粒内ナノクラスタ等が関与する可能性が報告されている[3-5]。結晶粒径と強度との相関を表すHall-Petch(H-P)の関係において、①、④は摩擦応力

に、③は H-P 係数に影響する因子である。したがって、結晶粒径が強度に及ぼす影響を解析する上では、それらの組織因子を明確にした上で議論する必要がある。アルミニウム合金において結晶粒径が $1\ \mu\text{m}$ より小さくなると、粒内転位と粒界との反応やそれと関係した粒界すべりが生じやすくなり、H-P 関係から予想される値より低強度となることも報告されている[8]。一方、純アルミニウムに関しては、結晶粒径の微細化に伴い、H-P 関係から予想される値より逆に高強度となる例も報告されている[9, 10]。このように H-P 関係からのずれが生じる結晶粒径は報告例により異なっており、試料作製方法や不純物の影響についても未解明である。

なお、冷間圧延材によって 7075 合金の ST 方向の結晶粒サイズは HPT 材と同等とすることが可能であるが、強度は HPT 材に及ばない[11]ことも報告されている。Fig. 2-2 に、7075 合金 90%冷間圧延材の TEM 観察結果の例を示す。強冷間圧延により、結晶粒は圧延方向に引き伸ばされ、ST 方向の結晶粒サイズは $100\text{-}200\text{nm}$ となっている。これは、Fig. 1-1 の HPT 材の結晶粒サイズと同等である。冷間圧延材と HPT 材との違いに関しては、結晶粒の形状だけでなく、導入する加工ひずみ量の違いが、溶質配置に影響を及ぼしている可能性も考える必要がある。

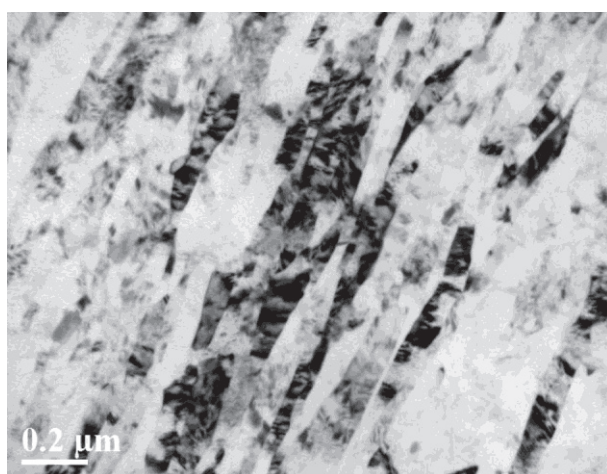


Fig. 2-2 7075 合金 90%冷間圧延材の TEM 観察結果 [11]

(3) 析出強化

巨大ひずみ加工材の析出強化に関しては、加工後に時効処理を施した際の影響に関して多くの検討[1-3,12-14]が行われている。これにより、加工と時効条件の最適化については、合金系ごとに実験的に明らかにされている。一方、巨大ひずみ加工中に母相に固溶していた主溶質元素が粒内および粒界に析出する現象も報告されている[4,6]が、これらの機構や機械的特性に及ぼす影響は明確になっていない。

巨大ひずみ加工中には、転位密度の上昇とその後の動的回復による粒界の生成、塑性変形によって導入された転位や粒界に沿った高速拡散が生じると考えられるが、これらのほかにせん断変形による原子相対位置の変化も同時に生じる。HPT加工のように相当ひずみで100を超えるような加工を施す場合には、特にこの変形による寄与を無視することができない。HPT加工前の過飽和固溶体は、加工中の温度（100°C以下）の平衡状態あるいは準安定状態に向かって相分離が進行すると考えられる。相分離の初期過程では、粒内および粒界での溶質クラスタの生成が生じると考えられる。Liddicoatらは3DAP解析によりそのようなクラスタ[4]を検出している。粒界への溶質濃化についてはSTEMによる観察結果[6]も報告されており、その例をFig. 2-3に示す。なおこれらの冷間加工中に溶質原子の再配置が生じて生成した「析出物」の組成や生成過程の詳細、また機械的特性との関係については不明であり、今後の詳細な解析が必要である。

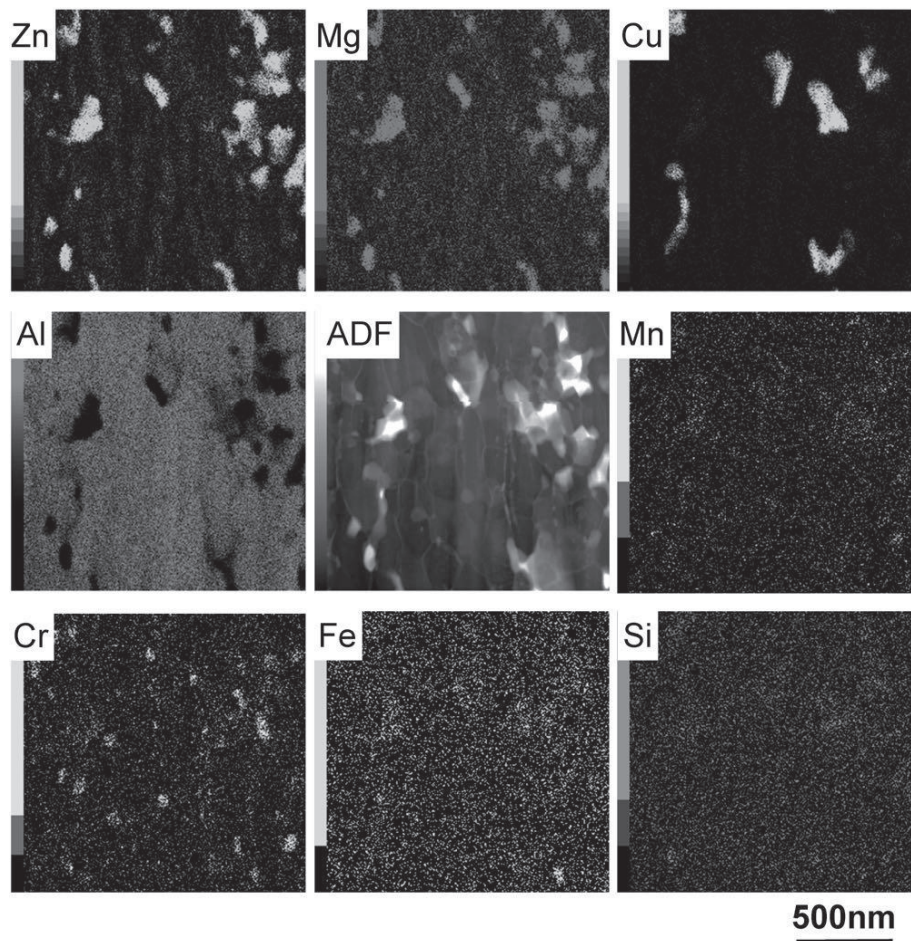


Fig. 2-3 10 回転の HPT 加工後の 7075 合金の STEM 観察結果 [6]

(4) 強化因子に及ぼす溶質元素の影響

溶質元素の種類と量は、固溶強化に影響することは言うまでもないが、単なる固溶による強度上昇は、転位強化、結晶粒径微細化強化、析出強化に比べて影響は小さいものと思われる。ここでは、巨大ひずみ加工において、溶質元素の種類と量が加工プロセス中の組織変化に及ぼす影響についても考える。これまでに Al-Zn-Mg 系合金の冷間加工前の溶質固溶量を変化させた場合、溶質濃度が高いほど高強度化する[15]ことが分かっている。

加工時に母相に存在する溶質の量と種類は、加工中の転位組織の形成、結晶粒径、そして加工中に生じる析出挙動等に影響を及ぼすことが考えられるため、加工による高強度化に基づく合金設計を行う場合に極めて重要な因子とな

る。しかし、従来の市販高強度アルミニウム合金は、時効析出させた場合に最も高強度化するような合金設計がなされており、冷間加工により高強度化を目指した場合に合金組成が最適化されているわけではない。

2.2 高強度アルミニウム合金研究部会[16]

本研究は、一般社団法人軽金属学会の高強度アルミニウム合金研究部会と連携して実施した。この部会では、前項で述べたような現況を踏まえ、アルミニウム合金の高強度化に及ぼす合金組成・プロセス因子を系統的に整理し、実用高強度合金の開発に資する基礎的知見として体系化することを目的として平成30年度より活動している。委員は、学側、産側、アドバイザーにより構成され、特定製品への応用技術に限定せず、アルミニウム合金の高強度化に必要な技術について検討することを目的としている。

この研究部会では、以下の3つの項目について活動を行っている。

(1) 巨大ひずみ加工による高強度化に寄与する金属組織学的因子を整理する。

(2) Al-Zn-Mg-Cu、Al-Cu-Mg 系合金等を対象として、高強度化に及ぼす合金組成・プロセス因子を調べる。

(3) 高強度化が、破壊靱性、疲労特性、耐環境脆化特性等に及ぼす影響について検討する。

(2)に関しては、研究部会独自の共通試料を用いた検討を行い、合金組成やプロセス条件が高強度化に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。本研究の実施においてもこの部会の Table 2-1 に示す9つの共通試料を用いて検討を実施した。

Al-Cu-Mg 系に関しては、2024 合金に近い組成の合金をベースに合金組成を選定した。これは、これまでに強加工による高強度化に関しては、2219 合金のような Al-Cu 系合金よりも、2024 合金のような Al-Cu-Mg 系合金の方が顕著な高強度化を示す[14]ことが知られているからである。Cu と Mg の添加量に関しては、2024 をベースにしてそれぞれを増加させた組成を選定した。

Al-Mg-Si 系に関しては、Al-Cu-Mg および Al-Zn-Mg-Cu 系に比べると強度の絶対値は劣るものの、実用的な観点からは重要な組成であるとの認識から選定した。高強度化元素としては強加工材の強度向上に有効であることが報告されている Cu 量を増加させた組成を選定するとともに、不純物としての Fe 量を増加させた組成も選定した。

Al-Zn-Mg-Cu 系に関しては、7075 合金に近い組成の合金をベースに合金組成を選定した。強加工材の強度に大きな影響を与えることが報告されている[15] Zn 量を増減させた合金組成を選定し、高強度化に及ぼす Zn 量の影響を検討することとした。

なお、一般的に市販合金には結晶粒微細化を目的として、クロム、マンガン、ジルコニウム等が添加される。部会共通試料においては、結晶粒微細化の目的で、すべての試料に 0.15Cr を添加している。微細化元素の種類や添加量も強度に影響を及ぼす可能性があるが、本研究では結晶粒微細化元素が機械的特性に及ぼす影響については検討を行わなかった。各グループの検討において使用した試料については、各グループの研究成果を述べる際に説明する。

Table 2-1 高強度アルミニウム合金研究部会の共通試料 (mass%)

合金系	目標組成
Al-Cu-Mg 系	Al-4Cu-1.5Mg-0.15Cr
	Al-4Cu-3Mg-0.15Cr
	Al-5Cu-3Mg-0.15Cr
Al-Mg-Si 系	Al-0.6Mg-1Si-0.5Cu-0.15Cr
	Al-0.6Mg-1Si-1Cu-0.15Cr
	Al-0.6Mg-1Si-0.5Cu-0.15Cr-0.7Fe
Al-Zn-Mg-Cu 系	Al-4.5Zn-2Mg-2.5Cu-0.15Cr
	Al-5.5Zn-2Mg-2.5Cu-0.15Cr
	Al-8Zn-2Mg-2.5Cu-0.15Cr

2.3 目的

以上の通り、巨大ひずみ加工や強冷間圧延により、従来プロセスよりも高強化する「超高強度」アルミニウム合金においては、転位密度の増加や結晶粒微細化以外に、「加工誘起による溶質再配置」がナノスケールで生じていることが示唆されている。本研究では、合金組成やプロセスを系統的に変化させた試料を用い、「加工誘起による溶質再配置」による粒内クラスターの形成や粒界偏析について定量的解析を実施し、超強力化に必要な組織とそれを作り込むために必要なプロセス条件を明確にする。

参考文献

- [1] 堀田善治, 松田健二, 廣澤渉一: 統合的先端研究成果報告書「巨大ひずみ超微細粒アルミニウム合金の時効析出強化技術の開発」, 公益財団法人軽金属奨学会, (2011).
- [2] 辻 伸泰, 足立大樹, 寺田大将: 統合的先端研究成果報告書「超微細粒アルミニウムが示す特異な力学特性の発現機構の統一的解明」, 公益財団法人軽金属奨学会, (2019).
- [3] 堀田善治: 軽金属, 60(2010), 134–141.
- [4] P. V. Liddicoat, X.-Z. Liao, Y. Zhao, Y. Zhu, M. Y. Murashkin, E. J. Lavernia, R. Z. Valiev and S. P. Ringer: Nat. Commun., 1 (2010), 63.
- [5] R. Z. Valiev, N. A. Enikeev, M. Y. Murashkin, V. U. Kazykhanov and X. Sauvage: Scr. Mater., 63 (2010), 949–952.
- [6] 倉本 繁, 堀渕嘉代, 青井一郎, 大石敬一郎: 軽金属, 64(2014), 241–248.
- [7] 足立大樹, 寺田大将, 辻 伸泰: 軽金属, 69(2019), 555–561.
- [8] 東 健一, V. Patlan, 北川和夫, 川添正孝: 軽金属, 51(2001), 646–650.
- [9] N. Kamikawa, X. Huang, N. Tsuji and N. Hansen: Acta Mater., 57(2009), 4198–4208.
- [10] H. J. Choi, S. W. Lee, J. S. Park and D. H. Bae: Mater. Trans., 50(2009), 640–643.

- [11] 中島祐樹, 倉本 繁, 小林純也, 伊藤吾朗, 大石敬一郎, 青井一郎, 清水吉
広: 軽金属, 68(2018), 621–626.
- [12] 赤間大地, 李 昇原, 堀田善治, 松田健二, 廣澤渉一: 軽金属, 62(2012), 448–
453.
- [13] 渡邊克己, 丸野 瞬, 松田健二, 李 昇原, 堀田善治, 寺田大将, 才川清二, 廣
澤渉一: 軽金属, 63(2013), 406–412.
- [14] 増田高大, 堀田善治: 軽金属, 67(2017), 519–520.
- [15] S. Kuramoto, I. Aoi and T. Furuta: Light Metals 2013, Ed. by Barry Sadler, TMS,
(2013), 255–258.
- [16] 倉本 繁: 軽金属, 70(2020), 449–450.