

統合的先端研究成果報告書

アルミニウム積層造形体のひずみ速度感受性 に関する統合研究

Integrated Research on Strain-Rate Sensitivity
of Additively Manufactured Aluminum

研究代表者

名古屋工業大学
東京都立産業技術研究センター
東京都立大学

渡辺 義見
大久保 智
北薊 幸一

July 2026



公益財団法人東洋アルミ軽金属みらい財団

アルミニウム積層造形体のひずみ速度感受性 に関する統合研究

名古屋工業大学
東京都立産業技術研究センター
東京都立大学
防衛大学校

渡辺 義見
大久保 智
北薊 幸一
西田 政弘

2026 年 7 月

目次

I. 研究の概要	1
I-1 はじめに	2
I-2 研究組織	3
I-3 研究経費	4
I-4 研究成果公表	5
 II. 研究の成果	14
II-1 パウダー式指向性エネルギー堆積法により造形した Al-10mass%Si- 0.4mass%Mg 合金の造形性と組織に及ぼす TiC ヘテロ凝固核粒子添加の 効果	15
II-2 単結晶 Al ₃ Ti ヘテロ凝固核を用いた PBF-LB によるアルミニウムの造形と 鑄造実験	19
II-3 ワイヤ式指向性エネルギー堆積法により造形した A7003 アルミニウム 合金の機械的特性に及ぼすヘテロ凝固核粒子添加の効果	23
II-4 Al-10Si-0.4Mg 合金ラティス構造体の圧縮特性に及ぼすヘテロ凝固核粒子 添加の影響	26
II-5 A6061 アルミニウム合金ラティス構造体の圧縮特性に及ぼす TiC ヘテロ 凝固核粒子添加の影響	30
II-6 A6061 アルミニウム合金ラティス構造体の圧縮特性に及ぼすアウトライ ンスキャンの影響	36
II-7 金属粉末レーザ積層造形により作製された Al-10Si-0.3Mg 合金ラティス 構造体の異方性圧縮挙動	41
II-8 金属粉末レーザ積層造形により作製された Al-Mg-Sc 合金ラティス構造体 の圧縮挙動に及ぼす温度とひずみ速度の影響	46
II-9 指向性エネルギー堆積法により造形したアルミニウム合金 Al-10Si- 0.4Mg の衝突破壊挙動	52
II-10 積層造形 Al-10%Si-0.4%Mg 合金ジャイロイド構造体への 衝突破壊挙動に及ぼすセルサイズの影響	56
II-11 A6082 アルミニウム合金をベースとした高 Si 組成アルミニウム合金 の流動応力に与えるひずみ速度の影響	60
 III. 謝辞	64

I. 研究の概要

I-1 はじめに

粉末床溶融結合(PBF)法を中心とした金属積層造形では、急速加熱・急速凝固・巨大温度勾配と言った既存の溶融プロセスからは逸脱した温度場で造形することが知られている。そのため、特有な非平衡組織を有し、それと同時に特有な力学物性を示す。現在、多くの研究者たちが組織と力学物性との関係を原理原則より解明すべく実験を重ねているが、他の金属材料と同様に最も重要な、強度と延性の両立は達成できていない。積層造形の応用の一つとしてラティス構造の造形があるものの、構造体に変形を加えた場合、局所的な変形が発生し、同じ構造体の中でもひずみ速度が大きく異なる。ところで、アルミニウム合金の降伏応力、変形抵抗、破断伸びなどについてのひずみ速度感受性は古くから知られており、多くの報告がある。最近のイメージセンサの高精度化およびデジタル画像相関(DIC)法の普及とともに、引張強さ、破断伸び（特に、局所伸び）が精度よく測定できつつある。そこで、本統合研究では、積層造形用素材の専門家、積層造形の専門家、ポーラス体・ラティス構造研究の専門家、材料力学の専門家による統合的研究を行い、異なるひずみ速度でアルミニウム合金積層造形体の力学特性を拾得し、積層造形体のひずみ速度感受性の統合的な見解を得ることを目的とした。更に、ラティス構造の変形挙動を調査し、ひずみ速度感受性に関する知見を元に、ラティス構造の変形をひずみ速度感受性の観点から議論を行ってきた。これらの研究を遂行するにあたり、健全な試料の造形が不可欠であり、ヘテロ凝固理論を適用することにより、造形性の向上や組織、力学物性の改善を行った。

本統合的先端研究は、最も汎用的に用いられる Al-Si-Mg 合金を対象としているが、これに加え、Al-Mg-Sc 合金、6000 系合金、7000 系合金および Ti-6Al-4V 合金も研究対象とした。また、PBF 法のみならず、指向性エネルギー堆積(DED)法を用いた造形も実施し、PBF 法の特徴を抽出した。これら造形プロセスが生み出す特異な組織と力学物性を、ラティス構造とひずみ速度感受性という立場より統合的な研究を実施した。

I-2 研究組織

研究代表者 渡辺 義見（名古屋工業大学 大学院工学研究科・教授）

- A グループ
- 渡辺 義見（名古屋工業大学 大学院工学研究科・教授）
 - 西田 政弘（名古屋工業大学 大学院工学研究科・教授）
 - 山田 素子（名古屋工業大学 大学院工学研究科・研究員）
 - 佐藤 達彦（名古屋工業大学 大学院工学研究科・大学院生）
 - 左口 凌成（名古屋工業大学 大学院工学研究科・大学院生）
 - 鎌田 航大（名古屋工業大学 大学院工学研究科・大学院生）
 - 關山 史門（名古屋工業大学 大学院工学研究科・大学院生）
 - 鮫嶋 美空（名古屋工業大学 大学院工学研究科・大学院生）
 - 東郷 岳大（名古屋工業大学 工学部・学生）
- B グループ
- 大久保 智（東京都立産業技術研究センター 物理応用技術部
・副主任研究員）
- C グループ
- 北薊 幸一（東京都立大学 大学院システムデザイン研究科・教授）
 - Rusheng Zhao（東京都立大学 大学院システムデザイン研究科
・大学院生）
 - 高坂 真生（東京都立大学 大学院システムデザイン研究科・大学院生）
 - 小幡 勇太郎（東京都立大学 大学院システムデザイン研究科
・大学院生）

I-3 研究経費

2023 年度	12,000,000 円
---------	--------------

A グループ	6,000,000 円
--------	-------------

B グループ	3,000,000 円
--------	-------------

C グループ	3,000,000 円
--------	-------------

2024 年度	12,000,000 円
---------	--------------

A グループ	6,000,000 円
--------	-------------

B グループ	3,000,000 円
--------	-------------

C グループ	3,000,000 円
--------	-------------

総計	24,000,000 円
----	--------------

I-4 研究成果公表

(学術論文, プロシーディングス, 講演論文)

1. **Masahiro Nishida**, Tatsuhiko Sato and **Yoshimi Watanabe**:
Hypervelocity Impacts on Aluminum Alloy/Titanium Alloy Composites Fabricated by Powder-Type Directed Energy Deposition,
International Journal of Impact Engineering, **206** (2025), 105391 (11 pages).
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2025.105391>
2. Rusheng Zhao and **Koichi Kitazono**:
Strain Rate Sensitivity of Additively Manufactured Al-Mg-Sc Alloy Lattice Structures at Room Temperature,
Materials Today Communications, **49** (2025), 113728 (9 pages).
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.113728>
3. **北菌幸一**, 小幡勇太郎:
AM 法で作製された規則セル型アルミニウム合金ラティス構造体の圧縮特性,
AM フューチャー, **1** (2025), 81-84.
https://doi.org/10.69410/amfuture.1.1_81
4. Yuta Kushiya, Yuki Wakai, Takuya Hiranuma, Naoki Seto, Naoko Sato, Dennis Jodi, **Yoshimi Watanabe** and Shinsuke Suzuki:
Effect of TiC Heterogeneous Nucleation Site Particles on the Melting Behavior of Ti-6Al-4V Powder by In-Situ X-Ray and Thermal Imaging during Laser Powder Bed Fusion,
Materials Transaction, **67** (2026) 327-335.
<https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-ME2025008>
5. Mao Kosaka, Rusheng Zhao and **Koichi Kitazono**:
Enhanced Energy Absorption Efficiency of Cellular Aluminum Alloy with a Bimodal Cell Structure,
Materials Transactions, **67** (2026), 371-375.
<https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-ME2025003>
6. Rusheng Zhao and **Koichi Kitazono**:
Strain Rate and Temperature Dependence of Compressive Mechanical Properties of Al-Mg-Sc Alloy Lattice Structures,
Materials Transactions, **67** (2026), 365-370.
<https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-ME2025004>
7. **Yoshimi Watanabe**, Kodai Kamata, Mami Mihara-Narita, Hisashi Sato, Shota Nakamura and **Satoshi Okubo**:

Microstructural Control of Cast and 3D Printed Aluminum using Al₃Ti Heterogeneous Nucleation Site Single crystal,

Materials Characterization, **238**, 116596 (10 pages) (2026).

<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2026.116596>

8. **Yoshimi Watanabe**, Takehiro Togo, Motoko Yamada, Mami Mihara-Narita, Hisashi Sato, Hiroki Tanaka, Takaharu Suzuki, Hirotaka Kurita and Daiji Morita:

Effects of Inoculation of Heterogeneous-Nucleation-Site-Particles on Microstructure and Mechanical Properties of A7003 Aluminum Alloy Manufactured by Wire-type Directed Energy Deposition,

Materials & Design, **268**, 116293 (14 pages) (2026).

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2026.116293>

9. 關山史門, 山田素子, 成田麻未, 佐藤尚, 斧督人, 小林正和, 鈴木進補,

渡辺義見:

TiC ヘテロ凝固核粒子接種が指向性エネルギー堆積法で造形した Ti-6Al-4V 合金の組織および造形性に及ぼす影響,

軽金属 (投稿中)

(国際会議・国際シンポジウム・国内会議 発表)

1. ○鎌田航大, **渡辺義見**, 成田麻未, 山田素子, 佐藤尚, 中村翔太, **大久保智**:

Powder Bed Fusion Type 3D Printing of Pure Al on Single Crystal of Al₃Ti Heterogeneous Nucleation Site,

軽金属学会東海支部ポスター講演会 (ポスター発表)

2023 年 11 月 6 日, 名古屋工業大学

2. ○左口凌成, 山田素子, 佐藤尚, **渡辺義見**, 佐藤直子, 鈴木進補:

Thermal Stability of TiC Heterogeneous Nucleation Site Particles in Ti-6Al-4V Alloy under Super-Thermal Field,

軽金属学会東海支部ポスター講演会 (ポスター発表)

2023 年 11 月 6 日, 名古屋工業大学

3. ○關山史門, 山田素子, 佐藤尚, **渡辺義見**, 斧督人:

指向性エネルギー堆積法を用いた Ti-6Al-4V 積層造形に及ぼす TiC ヘテロ凝固核粒子添加の効果,

軽金属学会第 145 回秋期大会 (ポスター発表)

2023 年 11 月 10 日~12 日, 東京都立大学 南大沢キャンパス

4. ○寺本武司, 田中克志, 佐藤尚, **渡辺義見**:

第一原理計算による Al/Al₃Ti 整合界面の界面エネルギーの評価,

軽金属学会第 145 回秋期大会 (口頭発表)

2023 年 11 月 10 日～12 日, 東京都立大学 南大沢キャンパス

5. ○Yoshimi Watanabe:

Grain Refinement of Cast and Additively Manufactured Aluminum by Heterogeneous Nucleation Site Particles,

PRICM11 (The 11th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing) (口頭発表)

2023 年 11 月 19～23 日, Jeju, Korea

6. ○Ziyi Su, Masahiro Nishida and Yoshimi Watanabe:

Hypervelocity Impact Behavior of Direct Energy Deposition Fabricated Aluminum, Titanium Alloy, and Their Functionally Graded Materials,

The 11th International Symposium on Impact Engineering (ISIE2023)

2023 年 12 月 3～5 日, Perth, Australia

7. ○Ryosei Saguchi, Motoko Yamada, Hisashi Sato, Yoshimi Watanabe, Naoko Sato and Shinsuke Suzuki:

Thermal Stability of TiC Heterogeneous Nucleation Site Particles in Ti-6Al-4V Alloy under Super-Thermal Field,

1st International Conference on Creation of Materials by Superthermal Field 2023, (CMSTF2023) (ポスター発表)

2023 年 12 月 15～17 日, Osaka, Japan

8. ○Kodai Kamata, Motoko Yamada, Mami Mihara-Narita, Hisashi Sato, Yoshimi Watanabe, Shota Nakamura and Satoshi Okubo:

Powder Bed Fusion Type 3D Printing of Pure Al on Single Crystal of Al₃Ti Heterogeneous Nucleation Site,

1st International Conference on Creation of Materials by Superthermal Field 2023, (CMSTF2023) (ポスター発表)

2023 年 12 月 15～17 日, Osaka, Japan

9. ○渡辺義見, 東郷岳大, 山田素子, 成田麻未, 佐藤尚, 田中宏樹, 鈴木貴晴, 栗田洋敬, 森田大嗣:

ヘテロ凝固核粒子を添加した A7003 アルミニウム合金によるワイヤー式指向性エネルギー堆積法,

軽金属学会 2024 年春期大会 (口頭発表)

2024 年 5 月 10 日～12 日, 名古屋大学

10. ○關山史門, 山田素子, 佐藤尚, 渡辺義見, 斧督人:

Effects of inoculation of TiC heterogeneous nucleation site particles on formability and

strength of Ti-6Al-4V manufactured by powder-type directed energy deposition,

軽金属学会 2024 年春期大会 (ポスター発表)

2024 年 5 月 10 日～12 日, 名古屋大学

11. ○佐藤達彦, Su Ziyi, 西田政弘:

指向性エネルギー堆積法による Al・Ti の積層造形した強度評価,

軽金属学会 2024 年春期大会 (ポスター発表)

2024 年 5 月 10 日～12 日, 名古屋大学

12. ○Yoshimi Watanabe:

Effects of Heterogeneous Nucleation Site Particles on Microstructure and Mechanical Properties of Additively Manufactured Metal and Alloys,

5th International Conference on Materials Science & Engineering (口頭発表)

2024 年 6 月 10 日～13 日, San Francisco, USA.

13. ○Yoshimi Watanabe:

Effects of Inoculation of Heterogeneous Nucleation Site Particles on Microstructure and Mechanical Properties of Additively Manufactured Light Metals, 【Invited】

TS04. Hybrid Nanomaterials for Next Generation Convergence Technology

NANO KOREA 2024 Symposium (The 22nd International Nanotech Symposium)

(口頭発表)

2024 年 7 月 3 日～5 日, Seoul, Korea

14. ○左口凌成, 山田素子, 佐藤直子, 鈴木進補, 佐藤尚, 渡辺義見:

PBF-LB 法における Ti-6Al-4V に添加した TiC ヘテロ凝固核粒子の変化,

日本金属学会 2024 年秋期講演大会 (ポスター発表)

2024 年 9 月 18 日～20 日, 大阪大学豊中キャンパス

15. ○關山史門, 山田素子, 佐藤尚, 渡辺義見, 斧督人:

パウダー式指向性エネルギー堆積法にて造形した合金の造形性・組織に及ぼすヘテロ凝固核粒子添加の影響,

日本金属学会 2024 年秋期講演大会 (ポスター発表)

2024 年 9 月 18 日～20 日, 大阪大学豊中キャンパス

16. ○Yoshimi Watanabe:

3D Printing of Metals with Heterogeneous Nucleation Site Particles to Improve Formability, Microstructure and Mechanical Properties,

17th International Symposium on Functionally Graded Materials (ISFGMs2024)

(口頭発表)

2024 年 9 月 29 日～10 月 2 日, Braga, Portugal

17. 北園幸一

SLIM 着陸衝撃吸収システムにおける 3D 積層造形材の可能性

第 68 回宇宙科学技術連合講演会 (口頭発表)

2024 年 11 月 6 日, アクリエひめじ

18. ○Kodai Kamata, Motoko Yamada, Mami Mihara-Narita, Hisashi Sato, Yoshimi Watanabe and Shota Nakamura:

Control of Texture of Pure Al Cast by Using Al_3Ti Single Crystal Platelets,

軽金属学会第 147 回秋期大会 (ポスター発表)

2024 年 11 月 8 日～10 日, 群馬大学太田キャンパス

19. ○東郷岳大, 渡辺義見, 山田素子, 成田麻未, 佐藤尚, 田中宏樹, 鈴木貴晴, 栗田洋敬, 森田大嗣:

ヘテロ凝固核粒子を添加した溶接用 A7003 アルミニウム合金ワイヤーの作製と指向性エネルギー堆積法への応用,

軽金属学会第 147 回秋期大会 (ポスター発表)

2024 年 11 月 8 日～10 日, 群馬大学太田キャンパス

20. ○鮫嶋美空, 山田素子, 成田麻未, 佐藤尚, 渡辺義見, 折井晋, 斧督人:

TiC ヘテロ凝固核粒子添加による Al-10mass%Si-0.4mass%Mg 合金の casting および積層造形組織への影響,

軽金属学会第 147 回秋期大会 (ポスター発表)

2024 年 11 月 8 日～10 日, 群馬大学太田キャンパス

21. ○小幡勇太郎, 高坂真生, 趙 汝升, 北薮幸一

変形モードの異なる規則セルを含んだアルミニウム合金ラティス構造体の力学特性

軽金属学会第 147 回秋期大会 (口頭発表)

2024 年 11 月 10 日, 群馬大学

22. ○高坂真生, 小幡勇太郎, 北薮幸一

規則セル構造を有するポーラスアルミニウム合金におけるブレース追加による機械的異方性制御

軽金属学会第 147 回秋期大会 (ポスター発表)

2024 年 11 月 9 日, 群馬大学

23. ○渡辺義見, 佐藤尚, 成田麻未, 森谷智一, 西田政弘, 山田素子, 左口凌成, 關山史門, 鈴木貴晴, 鮫嶋美空, 宮嶋陽司, 藤井要, 谷内大世, 西海綾人, 斧督人:

ヘテロ凝固核粒子添加と傾斜化技術を用いた金属積層造形,

日本学術振興会 R054 カーボンニュートラル実現のための耐熱材料委員会
(口頭発表)

2024 年 11 月 11 日～12 日, 東北大学青葉山キャンパス

24. ○鎌田航大, 渡辺義見, 成田麻未, 山田素子, 佐藤尚, 中村翔太, 大久保智:
粉末床熔融結合法を用いた高純度アルミニウム造形体の単結晶 Al_3Ti による結晶学的方位制御,
軽金属学会東海支部「若手ポスター発表会」 (ポスター発表)
2024 年 11 月 15 日, 豊橋市民センター
25. ○左口凌成, 關山史門, 山田素子, 佐藤尚, 渡辺義見, 上野遥か, 櫛舎裕太, 上田雄翔, 門井洸衛, 鈴木進補, 小林正和:
SPring-8 を用いた Ti-6Al-4V 積層造形体中の TiC ヘテロ凝固核粒子の 3 次元形状評価,
軽金属学会東海支部「若手ポスター発表会」 (ポスター発表)
2024 年 11 月 15 日, 豊橋市民センター
26. ○關山史門, 山田素子, 佐藤尚, 渡辺義見, 斧督人, 小林正和, 鈴木進補:
パウダー式 DED 法によって造形した Ti-6Al-4V 合金の SPring-8 による内部欠陥解析,
軽金属学会東海支部「若手ポスター発表会」 (ポスター発表)
2024 年 11 月 15 日, 豊橋市民センター
27. ○渡辺義見:
ヘテロ凝固機構と傾斜化技術を適用した指向性エネルギー堆積法による 3D プリント
ティンク,
日本鉄鋼協会北海道支部 湯川記念講演 (口頭発表)
2025 年 1 月 24 日, 室蘭市
28. ○佐藤達彦, 西田政弘, 渡辺義見:
指向性エネルギー堆積法による Al・Ti 積層造形体の高速衝突破壊現象,
日本材料学会 東海支部第 19 回学術講演会 (口頭発表)
2025 年 3 月 4 日, 名古屋工業大学
29. 東郷岳大, 山田素子, 成田麻未, ○渡辺義見, 佐藤尚, 田中宏樹, 鈴木貴晴, 栗田洋敬, 森田大嗣:
ワイヤー式指向性エネルギー堆積法により造形した A7003 アルミニウム合金の機械的特性に及ぼすヘテロ凝固核粒子添加の効果,
軽金属学会第 148 回春期大会 (口頭発表)
2025 年 5 月 16 日~18 日, 北九州国際会議場
30. ○關山史門, 山田素子, 佐藤尚, 渡辺義見, 斧督人, 小林正和, 鈴木進補:
パウダー式 DED 法で造形した Ti-6Al-V 合金微細組織における TiC ヘテロ凝固核粒子添加の効果,
軽金属学会第 148 回春期大会 (ポスター発表)

2025 年 5 月 16 日～18 日，北九州国際会議場

31. ○高坂真生，小幡勇太郎，北藺幸一

変形モードの異なる規則セルを含んだアルミニウム合金ラティス構造体の力学特性

軽金属学会第 148 回春期大会（ポスター発表）

2025 年 5 月 17 日，北九州国際会議場

32. ○北藺幸一

ポーラス金属の機械的特性に及ぼすマクロなセル構造とミクロな材料組織の影響

軽金属学会第 148 回春期大会（口頭発表）

2025 年 5 月 18 日，北九州国際会議場

33. ○渡辺義見:

ヘテロ凝固機構とそのデポジション式積層造形法への応用

一般社団法人 日本溶接協会 ろう部会 技術委員会 先端材料接合委員会
(口頭発表)

2025 年 7 月 25 日，溶接会館

34. ○西田政弘，佐藤達彦，渡辺義見:

指向性エネルギー堆積法により作製した Al/Ti 複合材の超高速衝突現象，

日本 Additive Manufacturing 学会第 1 回講演大会（口頭発表）

2025 年 9 月 1 日～3 日，東京都立産業貿易センター浜松町館

35. ○Rusheng Zhao and Koichi Kitazono

Negative Strain Rate Sensitivity of Al-Mg-Sc Alloy Lattice Structures

Metfoam 2025（ポスター発表）

2025 年 9 月 2 日，早稲田大学

36. ○Mao Kosaka, Rusheng Zhao and Koichi Kitazono

Mechanical Properties of Flexible and Rigid Aluminum Alloy Lattice Structures

Metfoam 2025（ポスター発表）

2025 年 9 月 2 日，早稲田大学

37. ○渡辺義見，東郷岳大，山田素子，成田麻未，佐藤尚，田中宏樹，鈴木貴晴，栗田洋敬，森田大嗣:

ワイヤー式指向性エネルギー堆積法により造形した A7003 アルミニウム合金の組織および機械的特性に及ぼすヘテロ凝固核粒子添加の効果，

日本金属学会 2025 年秋期講演大会（口頭発表）

2025 年 9 月 17 日～19 日，北海道大学札幌キャンパス

38. ○關山史門，山田素子，佐藤尚，渡辺義見，斧督人，戸田敦基:

パウダー式指向性エネルギー堆積法における TiC ヘテロ凝固核粒子の添加による

Ti-6Al-4V 合金の成形性および組織の変化,
日本金属学会 2025 年秋期講演大会 (口頭発表)
2025 年 9 月 17 日～19 日, 北海道大学札幌キャンパス

39. ○高坂真生, 趙汝升, 北藺幸一

ブレースにより変形モードを変化させたアルミニウム合金ラティス構造体の圧縮特性
軽金属学会第 149 回秋期大会 (口頭発表)
2025 年 11 月 9 日, 横浜国立大学

40. ○M. Sameshima, H. Sato, M. Mihara-Narita, Y. Watanabe:

Effects of TiC heterogeneous nucleation site particles on microstructure of Al-10Si-0.4Mg alloy manufactured by directed energy deposition method,
5th Norwegian-Japanese Seminar on Aluminium Alloys (口頭発表)
2026 年 3 月 23 日, Toyama, Japan

41. ○渡辺義見, 大久保智, 北藺幸一, 西田政弘:

アルミニウムおよびチタン合金積層造形体の力学物性調査の為にヘテロ凝固核粒子の添加,
軽金属学会第 150 回春期大会 (口頭発表)
2026 年 5 月 15 日～17 日, 富山国際会議場

42. ○大久保智, 南里真平, 渡辺義見, 北藺幸一:

A6061 合金ラティス構造における TiC ヘテロ凝固核添加による欠陥形成および機械的特性への影響,
軽金属学会第 150 回春期大会 (口頭発表)
2026 年 5 月 15 日～17 日, 富山国際会議場

43. ○鮫嶋美空, 内藤大樹, 山田素子, 成田麻未, 佐藤尚, 西田政弘, 渡辺義見, 斧督人:

Al-10Si-0.4Mg 合金 DED 積層造形体の組織および機械的性質に及ぼすヘテロ凝固核添加の効果,
軽金属学会第 150 回春期大会 (口頭発表)
2026 年 5 月 15 日～17 日, 富山国際会議場

44. ○Rusheng Zhao and Koichi Kitazono:

Compression behavior of additively manufactured Al-Mg-Sc alloy lattice structures,
軽金属学会第 150 回春期大会 (口頭発表)
2026 年 5 月 16 日, 富山国際会議場

45. ○西田政弘, 渡辺義見, 佐藤達彦:

指向性エネルギー堆積法により造形した Ti-6Al-4Al 材の超高速衝突現象の圧延材

との比較

軽金属学会第 150 回春期大会 (口頭発表)

2026 年 5 月 15 日～17 日, 富山国際会議場

46. ○西田政弘, 山田素子, 渡辺義見:

積層造形 Al-10%Si-0.4%Mg 合金ジャイロイド構造体への超高速衝突破壊挙動に及ぼすセルサイズの影響,

軽金属学会第 150 回春期大会 (口頭発表)

2026 年 5 月 15 日～17 日, 富山国際会議場

Ⅱ． 研究の成果

パウダー式指向性エネルギー堆積法により造形した Al-10mass%Si-0.4mass%Mg 合金の造形性と組織 に及ぼす TiC ヘテロ凝固核粒子添加の効果

渡辺 義見

名古屋工業大学 大学院工学研究科 工学専攻材料機能分野

1. 緒 言

金属系付加製造(AM)技術は、粉末床溶融結合(PBF)法、指向性エネルギー堆積(DED)法、およびそれ以外の焼結を必要とする製造法に大別できる。金属の溶融を伴う PBF 法や DED 法における AM では、基本的に積層方向への温度勾配が大きく、その方向への凝固界面の移動が支配的となり、それを反映した結晶配向が生じ易いことが知られている。以前の研究で、ヘテロ凝固核粒子の添加により積層造形体の組織微細化と凝固の均一化に伴う造形性向上が同時達成できることを見出した[1]。この技術が、積層造形にて使用されている代表的なアルミニウム合金である Al-10mass%Si-0.4mass%Mg 合金(以下、Al-10Si-0.4Mg 合金と略記)に適用できるかについて、本研究では調査した。この目的に為、粉末を素材とした DED 法により造形を行った。粉末を使用する方式の 3D プリンティングでは、比較的容易に素材を変更した研究が可能である。また、DED 方式では、粉末床を形成させる必要がないため、造形に要する粉末量を抑えることが出来る。本稿では、まず、ヘテロ凝固核粒子の探索手法について詳細に述べる。次に探索したヘテロ凝固核粒子を添加し、DED 法により Al-10Si-0.4Mg 合金を造形した結果について述べる。

2. ヘテロ凝固核粒子の探索

ヘテロ凝固核は、Al-10Si-0.4Mg 合金の初晶に対して作用するので、Al-10%Si-0.4%Mg 合金の凝固過程を調査し、初晶の濃度と凝固温度を調査した。統合型熱力学計算ソフトウェア Thermo-Calc を用い、Al-Si-Mg 合金の三元系平衡状態図を 600℃から 590℃の温度範囲で、1℃ずつ描いた。その結果、Al-10Si-0.4Mg 合金の凝固開始温度が 594℃であることが分かった。Al-Mg-Si 三元系平衡状態図の 594℃におけるアルミニウムリッチ側の等温状態図を Fig. 1 に示す。この図より、Al-10Si-0.4Mg 合金の初晶は Al-1.16mass%Si-0.08mass%Mg (以下 Al-1.16Si-0.08Mg と表記)であることがわかる。次に、Al-1.16%Si-0.08%Mg 合金の正確な格子定数を推定した。種々の元素が固溶したアルミニウム合金の格子定数変化が報告されており、文献[2]を元

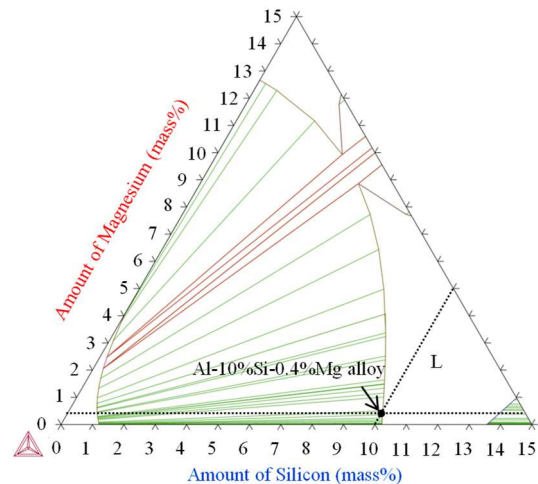


Fig. 1 Calculated isothermal phase diagram of the Al-Si-Mg ternary system at 594°C (Al-rich side).

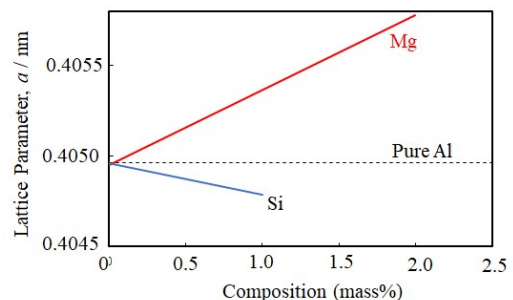


Fig. 2 Lattice parameters of Al-Si and Al-Mg alloys.

に描いたケイ素およびマグネシウムが固溶した際の格子定数変化を Fig. 2 に示す。この図から、アルミニウムにケイ素およびマグネシウムが固溶すると、1mass%あたり格子定数がそれぞれ約 0.0437%収縮および約 0.0995%膨張することが分かる。これより、Al-1.16%Si-0.08%Mg合金の格子定数は室温で 0.40479nm であると推定した。この値は純アルミニウムの 99.96%であり、Al-10Si-0.4Mg の初晶 Al-1.16%Si-0.08%Mg の格子定数は純アルミニウムの格子定数にほぼ等しいことが見いだされた。

ヘテロ凝固核粒子の選定に関しては、融点と格子マッチングの 2 項目に関して検討する必要がある。ヘテロ凝固核粒子がメルトプール中でも固相で存在する必要性から、造形する金属（凝固相）の凝固温度より融点が高い物質であることが必要条件である。また、凝固相とぬれ性が高いことも求められる。後者が実現されるためには、凝固相との格子マッチングが良い必要があり、結晶構造と格子定数から幾何学的に評価することができる。種々の評価法が提案されているが、我々はパラメータ M [3]を採用している。これは、ヘテロ凝固核相と凝固相との異相界面に生じるミスフィットひずみによる弾性ひずみエネルギーに近似的に比例し、以下の式で算出できる [3]。

$$M = \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + (2/3) \varepsilon_x \varepsilon_y \quad (1)$$

ここで、 ε_x および ε_y は主軸ひずみである。この主軸ひずみを算出する際、凝固相に生じるひずみの大小を評価する必要がある。凝固工学でしばしば使用されている不整合度(格子定数から求める一方向のひずみ)や平面不整合度(3 方向の不整合度の平均)を計算する際、凝固相を分母にとるのが通例である。そこで、我々は凝固相の格子定数を分母にとって算出している。立方晶の場合、この様にして定義した M 値と不整合度 δ との間には、 $M=8/3 \times \delta^2 \times 10^{-4}$ なる関係がある [4]。

従来の格子マッチングの評価は、室温での格子定数の値を使用し、これを元にヘテロ凝固核の選定が行われてきた。セラミックスや金属間化合物などが融点の関係からヘテロ凝固核の候補となるが、これらは多くの場合、凝固相に比べて熱膨張係数が小さい。したがって、室温での格子マッチングでは正しい評価ができない。そこで、融点における格子マッチングを評価する。TiC および Al-1.16Si-0.08Mg 合金の格子定数の温度依存性を Fig. 3(a)に示す。ただし、Al-1.16Si-0.08Mg の熱膨張に関するデータが見出されなかったため、純 Al の熱膨張を元に計算した。これらの格子定数を元に、

$$(001)_{\text{TiC}} // (001)_{\text{Al-1.16\%Si-0.08\%Mg}}, [100]_{\text{TiC}} // [100]_{\text{Al-1.16\%Si-0.08\%Mg}} \quad (2)$$

の方位関係で M 値を計算したものが Fig. 3(b)である。 M 値が小さい程、高い格子マッチングを示すので、室温に比べて融点では格子マッチングが高まることがわかる。

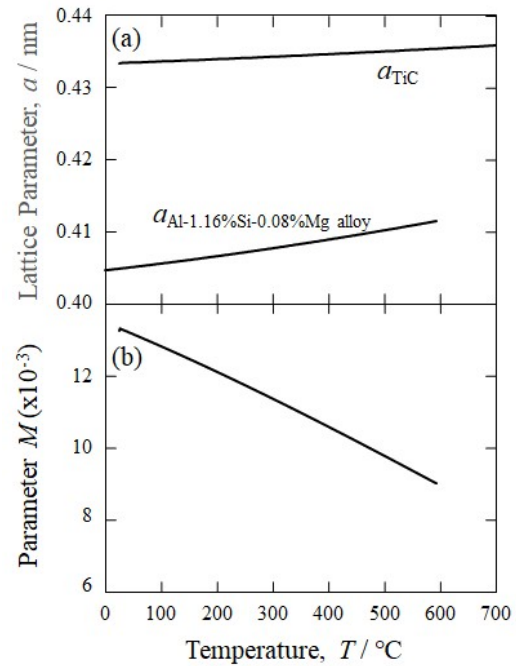


Fig. 3 Temperature dependence of (a) lattice parameters of TiC and Al-1.16Si-0.08Mg alloy, and (b) M value between TiC and Al-1.16Si-0.08Mg.

3. 実験方法

平均粒径約 $80\ \mu\text{m}$ の Al-10Si-0.4Mg 合金粉末 (東洋アルミニウム製) に対し、粒径 $2\text{--}5\ \mu\text{m}$ の TiC 粉末 (高純度化学研究所製) をヘテロ凝固核として機械混合した混合粉末と、比較材として Al-10Si-0.4Mg のみの粉末の2種類を供試材とした。これらの粉末を

LAMDA200 (ニデックマシンツール株式会社製) にて積層造形に供した。組織観察用試料として $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm} \times 5$ 層のブロック造形体を作製した。このとき、レーザーパワーを 500, 1000 および 2000 W, 走査速度を 1000, 1500 および 2000 mm/min と変化させ、計 9 つの造形条件で造形体を作製した。造形体の内部の欠陥を評価するため、X 線コンピュータ断層撮影法 (X-ray Computed

Tomography) (島津製作所製, inspeXio SMX-225CT) を用いて欠陥解析を行った。

各造形体に対し、電子線後方散乱回折法 (Electron backscatter diffraction, EBSD) にて結晶粒組織を観察した。さらに、観察面に対してマイクロビッカース硬さ試験を実施した。硬さ試験は加重 HV0.1, 加圧時間 15 s で、5 点測定し、その平均値を用いた。

4. 実験結果

X 線 CT により造形体の欠陥を評価した結果を Fig. 4 に示す。図中、 $\times$ で示した条件では未添加粉末を用いては造形体を得ることが出来なかったものの、TiC ヘテロ凝固核粒子の添加により造形が可能となり、造形性が向上していることが確認できる。さらに、カラーコードからも分かるように、欠陥体積も減少している。

次に材料組織を EBSD により評価した。評価にあたっては、Spherical Index 法を採用した。同手法は、EBSD によって測定したパターンとシミュレーションによって作成したパターンを比較し、マッチする領域を探す手法であり、高い角度分解能により、微細組織の観察が可能となる。結果を Fig. 5 に示す。全ての条件にて組織の微細化が認められた。

この現象を定量的に議論する目的で、各試料の結晶粒径とアスペクト比を算出した。結果を Fig. 6 に示す。この結果から、欠陥の多いレーザーパワー 500 W の条件で造形した試料で

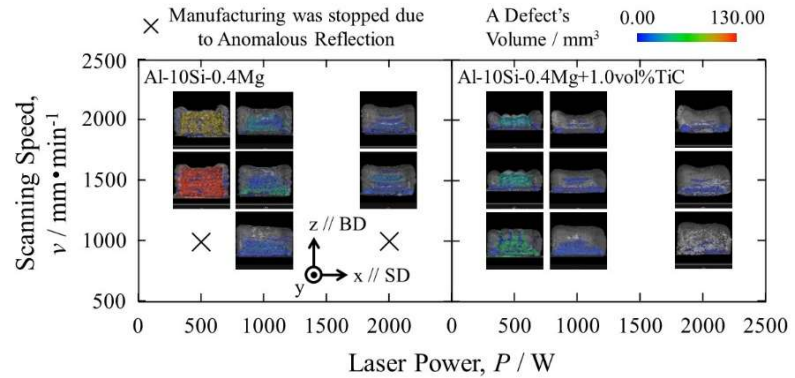


Fig. 4 Results of X-CT measurements of the Al-10Si-0.4Mg and Al-10Si-0.4Mg + 1.0vol%TiC samples Each color represents a different pore volume (the largest pores are red and the smallest pores are blue).

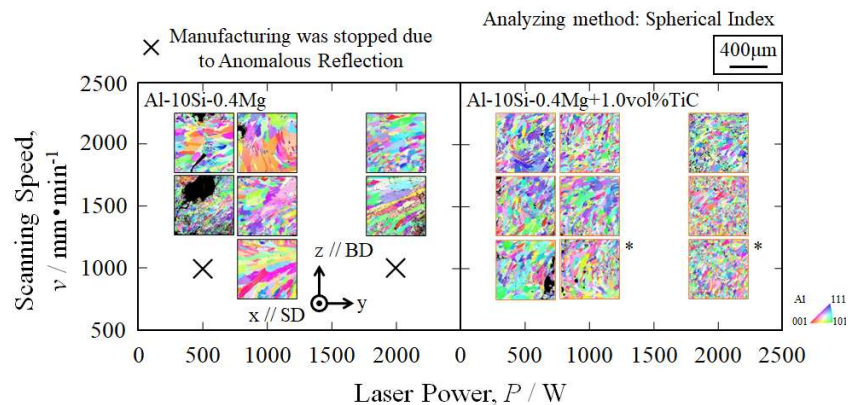


Fig. 5 Results of EBSD measurements of the Al-10Si-0.4Mg and Al-10Si-0.4Mg + 1.0vol%TiC samples.

は、TiC 添加による変化が確認されなかった。これに対し、レーザーパワー 1000W あるいは 2000W で造形した試料では、結晶粒径の微細化が確認された。加えて、アスペクト比の値が TiC 添加により小さくなっており、TiC の添加により等軸微細化する傾向にあることが確認された。

次に機械的特性をビッカース硬さにより評価した。結果を Fig. 7 に示す。全ての条件にて TiC ヘテロ凝固核粒子の添加により硬さの向上が認められた。ここには示さないが、引張り試験を実施したところ、破断伸びが大幅に改善された。この様に、欠陥発生抑制や組織の微細化に伴い、機械的性質も改善することが見出された。

4. 結 言

本研究では、積層造形用として広く用いられている Al-10Si-0.4Mg 合金を対象とし、ヘテロ凝固核粒子の添加が積層造形に与える影響について調査した。同合金の初晶は Al-1.16Si-0.08Mg であり、凝固温度での格子マッチングを評価したところ、TiC がヘテロ凝固核粒子として有効であることが見出された。この系を用い、少量の粉末で実験が可能な DED 法により造形実験を実施し、TiC ヘテロ凝固核粒子の添加に伴い、造形性の向上、結晶粒の微細化と等軸晶化および機械的性質の改善が認められた。

謝辞 本研究課題は、2023 年度に採択された公益財団法人軽金属奨学会の統合的先端研究の助成により行われました。多大なるご支援に心より感謝を申し上げます。また、本研究に協力頂いた名古屋工業大学大学院生の鮫嶋美空さんに謝意を表する。

参考文献

- [1] Y. Watanabe, M. Sato, T. Chiba, H. Sato, N. Sato and S. Nakano: *Met. Mater. Trans. A*, **51** (2020), 1345-1352.
- [2] 日本金属学会編: 金属データブック, 丸善出版, (2004), 43.
- [3] 加藤雅治: 鉄と鋼, **78** (1992), 209-214.
- [4] Y. Watanabe, M. Mihara-Narita and H. Sato: *Mater. Trans.*, **64** (2023), 1083-1097.

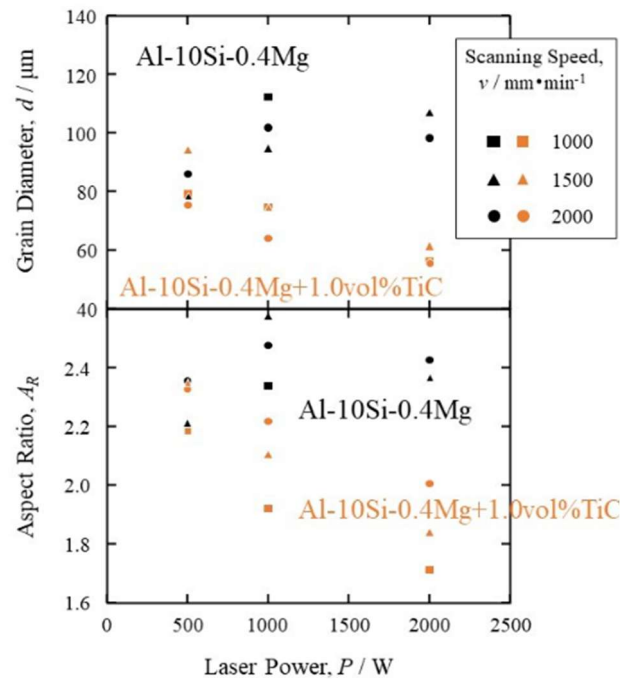


Fig. 6 Grain diameter and aspect ratio of the Al-10Si-0.4Mg and Al-10Si-0.4Mg + 1.0vol%TiC samples.

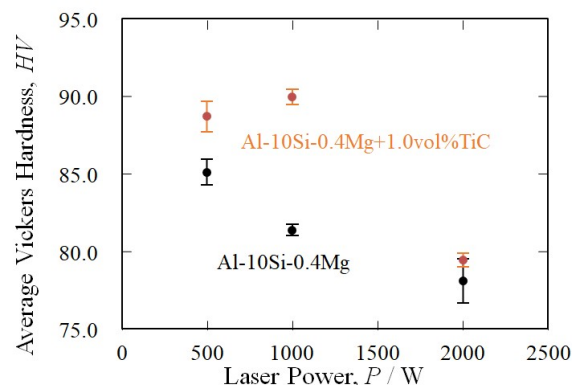


Fig. 7 Hardness of the Al-10Si-0.4Mg and Al-10Si-0.4Mg + 1.0vol%TiC samples.

単結晶 Al_3Ti ヘテロ凝固核を用いた PBF-LB によるアルミニウムの造形と鋳造実験

渡辺 義見¹⁾, 大久保 智²⁾

1) 名古屋工業大学 大学院工学研究科 工学専攻材料機能分野

2) 東京都立産業技術研究センター

1. 緒 言

アルミニウムへの Ti 添加によって核生成数が著しく増加し、結晶粒が微細になることは古くから知られ、工業的に広く利用されている。しかし、Ti ならびに Ti+B による結晶粒微細化についてはいまだ完全には統一された機構がなく、 Al_3Ti 粒子のヘテロ凝固核説、TiC 粒子のヘテロ凝固核説、 TiB_2 粒子のヘテロ凝固核説、 $\alpha\text{-Al}$ 初晶の増殖説などが提案されている¹⁾。なかでも、 Al_3Ti はアルミニウムとの格子マッチングが良い²⁾ことから、アルミニウムの凝固において有効な核として作用するとされている。Fig. 1(a) および (b) にそれぞれ Al_3Ti およびアルミニウムの結晶構造および格子定数を示す。Fig. 1(a) に示すように Al_3Ti は対称性の悪い D_{022} 構造を有し、 c 軸方向に 12% ほど伸長した格子となっている。したがって、fcc 構造を有する Fig. 1(b) に示したアルミニウムとの間の格子マッチングは、両者間の結晶学的方位関係によって大きく異なり、 Al_3Ti のヘテロ凝固核としての性能は面毎に大きく異なることが予想されている。そこで本研究では、 Al_3Ti 単結晶をヘテロ凝固核としたアルミニウムの凝固実験を実施し、いかなる結晶学的方位関係があらわれるかについて検討した。

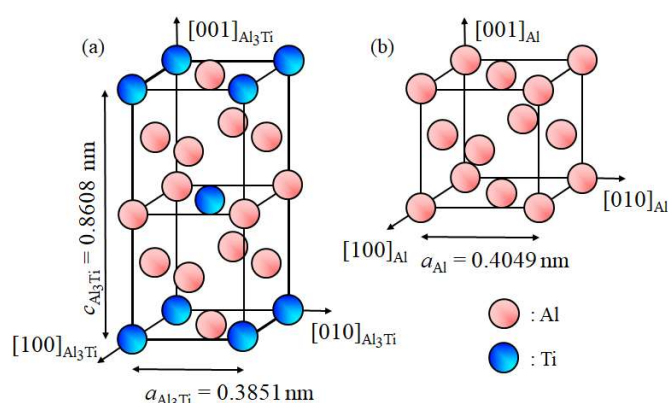


Fig. 1 Illustrations of the crystal structures of (a) Al_3Ti with D_{022} structure and (b) aluminum with fcc structure.

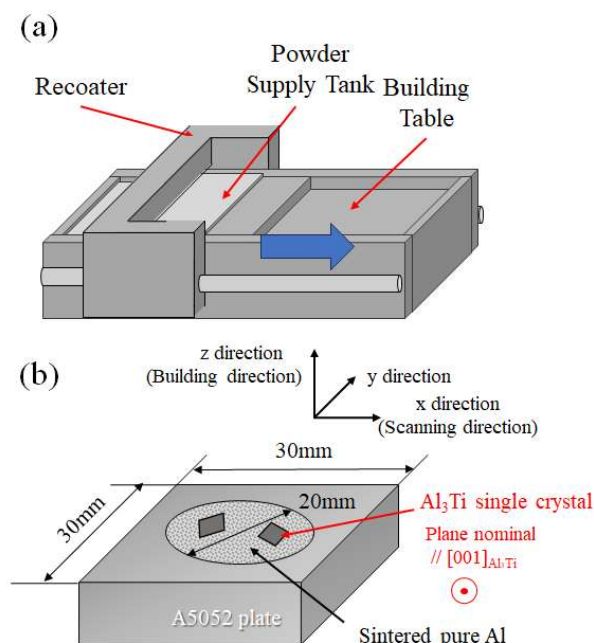


Fig. 2 Schematic illustrations of (a) in-house laser-based powder bed fusion (PBF-LB) apparatus and (b) base plate.

2. 実験方法

フラックス法³⁾を用いて Al_3Ti 単結晶を作製し、その単結晶 Al_3Ti 上に純アルミニウムの溶湯を注湯し、鋳造試料を作製した。また、 Al_3Ti 単結晶を純アルミニウムと共に焼結し、それぞれ Fig. 2(a) および (b) に模式図を示す PBF-LB 装置およびベースプレートを用いて造形実験を実施した。

3. 結果と考察

鋳造材断面の界面付近を EBSD により解析した結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a), (b)および(c)は、それぞれフェーズマップ、z 方向（垂直方向）および x 方向に沿って解析した IPF マップである。下図の視野は上図の視野に隣接している。Fig. 3(a)のフェーズマップより、アルミニウム相と D0₂₂ 構造を持つ Al₃Ti 相の 2 つの相が存在することがわかる。Fig. 3(b)および(c)の視野内に 3 つのアルミニウム結晶粒が観察される。これらの 3 つの結晶粒を、それぞれ結晶粒 1、結晶粒 2 および結晶粒 3 と定義した。

Fig. 4(a)~(d)は、それぞれ結晶粒 1、結晶粒 2、結晶粒 3 および Al₃Ti の極点図を示す。これらの図から、Al₃Ti と各結晶粒間の結晶学的方位関係を評価したところ、それぞれ以下となった。

$$(001)_{\text{Al}_3\text{Ti}} // (001)_{\text{Al}}, [110]_{\text{Al}_3\text{Ti}} // [110]_{\text{Al}} \quad (1)$$

$$(001)_{\text{Al}_3\text{Ti}} // (110)_{\text{Al}}, [-110]_{\text{Al}_3\text{Ti}} // [-110]_{\text{Al}} \quad (2)$$

$$(001)_{\text{Al}_3\text{Ti}} // (111)_{\text{Al}}, [-110]_{\text{Al}_3\text{Ti}} // [-110]_{\text{Al}} \quad (3)$$

これらの結晶学的方位関係における凝固温度における格子マッチングを、弾性ひずみエネルギーに近似的に比例する値である M 値⁴⁾を用いて評価したところ、それぞれ 6.42×10^{-3} 、 2.20×10^{-3} および 8.81×10^{-3} となり、格子マッチングが高い結晶粒が形成したことが見いだされた。なお、中では結晶粒 3 の M 値が高く、結晶粒 3 の結晶粒が他の結晶粒と比べて小さいことと矛盾しない。また、結晶粒 1 と結晶粒 2 とを比較した場合、 M 値が高い結晶粒 1 の専有面積が大きくなっているものの、これは結晶粒 1 が fcc の優先成長方向である [001] 方向に凝固が進行したためである。

Fig. 5(a)は、PBF-LB 法を用い、レーザ出力 80W の条件にて単層造形した試料の断面 SEM

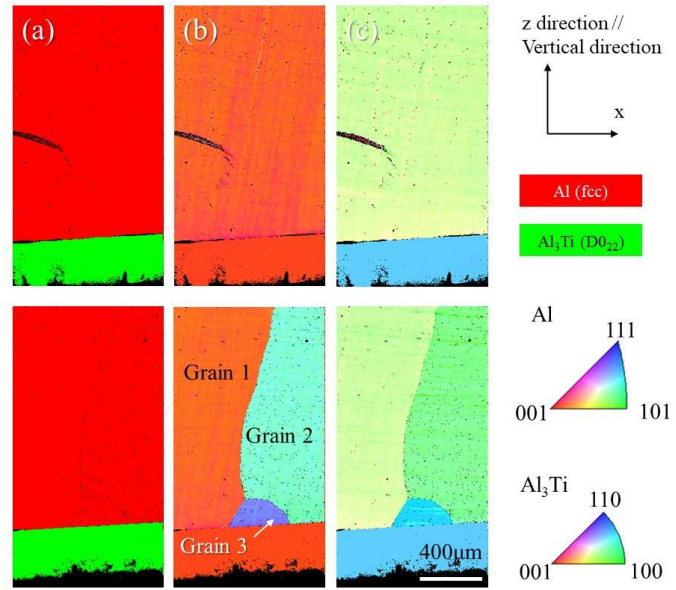


Fig. 3 (a) Phase map and IPF maps analyzed along (b) z direction (vertical direction) and (c) x direction of cast sample fabricated with Al₃Ti single crystal.

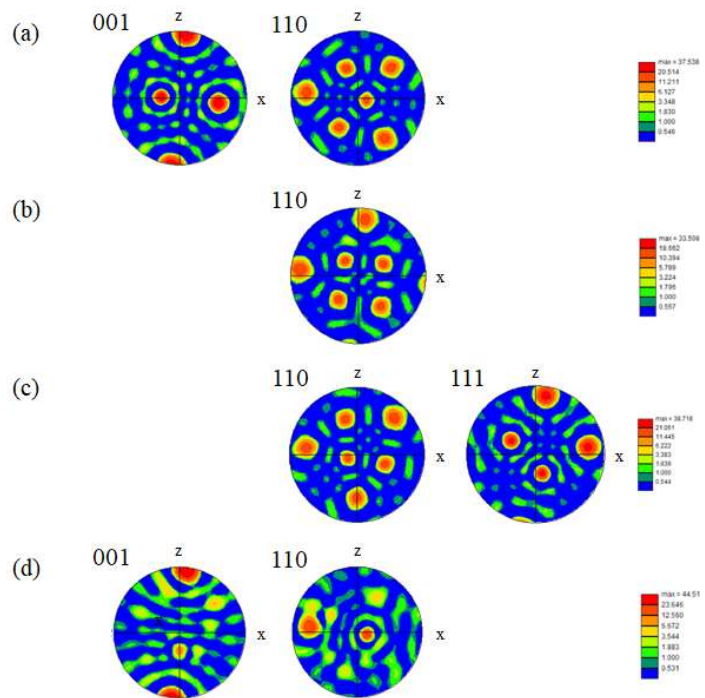


Fig. 4 (a) (001) and (110) pole figures of Grain 1, (b) (110) pole figure of Grain 2, (c) (110) and (111) pole figures of Grain 3, and (d) (001) and (110) pole figures of Al₃Ti.

像を示している。Al/Al₃Ti 界面付近に欠陥は観察されなかった。EDS 分析を行ったところ、ベースプレートである分析点 2 は化学量論的組成を Al₃Ti であり、造形体である分析点 1 には Ti は検出されず、純 Al であることが見いだされた。この様に、80W という低出力のレーザ出力条件下では、反応を起こさず、Al₃Ti 単結晶を基板として Al が造形できた。これに対し、ここには結果を示していないが、レーザ出力 120W の条件で単層造形した試料では、明確な Al/Al₃Ti 界面は観察されなかった。また、造形体の組成は EDS 分析により Al-17.4mol%Ti であることが見いだされた。このように、造形部品には Ti が検出され、比較的強いレーザ照射条件で造形を行うと、Al₃Ti 単結晶と造形した Al とは反応してしまうことが見いだされた。

そこで、このサンプルについて EBSD を用いて結晶方位解析を行った。Al₃Ti 単結晶と反応することなく Al₃Ti 単結晶上に Al を造形できるレーザ出力 80W の条件で単層造形した試料について EBSD 分析を行った。その結果を Fig. 5(b)~(d) に示す。Fig. 5(b), (c) および (d) は、それぞれフェーズマップ、z 方向および x 方向に解析した IPF マップを示す。図 5(b) に示すフェーズマップにより、D0₂₂ 構造を保った Al₃Ti 上に、反応することなく Al が造形できていることを示している。Fig. 5(c) および (d) に示す IPF マップより、Al₃Ti の単結晶状態が維持されていること、および Al/Al₃Ti 界面付近の広い領域で Al が特定の結晶方位を示していることを示している。

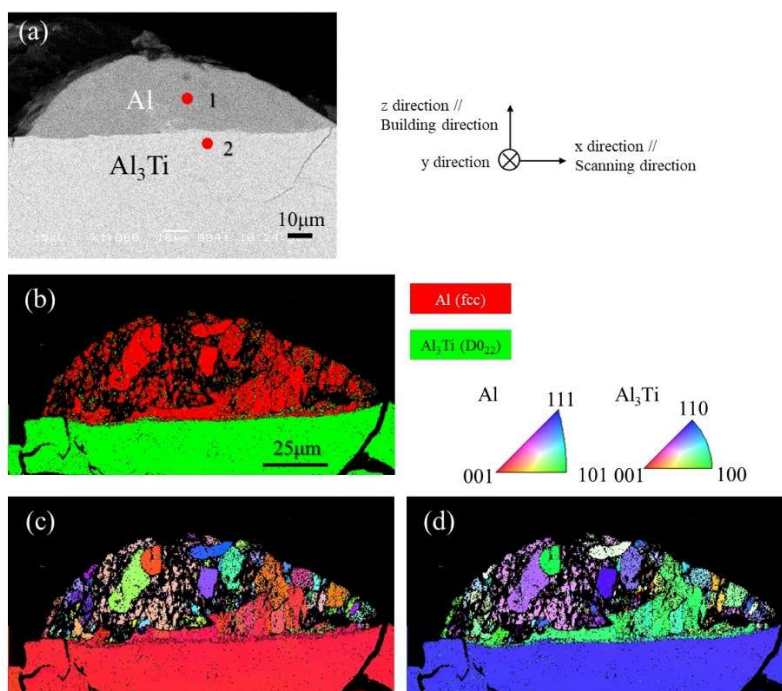


Fig. 5 (a) SEM image, (b) phase map, IPF maps analyzed in (c) z direction and (d) x direction of the single-layer sample manufactured under 80 W.

Al₃Ti と Al の間の結晶学的方位関係を、それぞれ Fig. 6(a) および (b) に示す Al と Al₃Ti の極点図を用いて解析した。両相の (001) 極点図と z 方向で解析した IPF マップから、(001)_{Al₃Ti} // (001)_{Al} の関係が見出される。また、Al₃Ti と Al の (110) 極点図と x 方向で解析した IPF マップから、[110]_{Al₃Ti} // [110]_{Al} の関係が見出される。これらの関係から、Al₃Ti と Al の結晶方位関係は以下のように決定された。

$$(001)_{\text{Al}_3\text{Ti}} // (001)_{\text{Al}}, \quad [110]_{\text{Al}_3\text{Ti}} // [110]_{\text{Al}} \quad (4)$$

Al/Al₃Ti 界面近傍の広い範囲で観察されたこの結晶方位関係は、Al₃Ti 単結晶が Al の凝固時にヘテロ凝固核サイトとして機能した結果であると考えられる。その後、Al₃Ti 単結晶の(001)面上に Al のエピタキシャル成長が起こった。この結晶学的方位関係における M 値は 6.42×10^{-3} であり、比較的良好な格子マッチングを示している。しかしながら、Al/Al₃Ti 界面付近で観察された Al の結晶学的方位関係は、試料上部にはほとんど引き継がれておらず、試料上部の結晶はランダムな結晶方位を示していた。これは、この試料が比較的低いレーザ出力の条件で造形した高さ $20 \mu\text{m}$ の単層造形体であり、試料上部が界面で形成された結晶方位を引き継ぐ前に表面から凝固したためと考えられる。

4. 結 言

単結晶 Al₃Ti ヘテロ凝固核への純アルミニウム溶湯の注湯実験において、(001)_{Al₃Ti} を下地としたアルミニウムのエピタキシャル成長が発生した。その際、fcc の優先成長方向と一致した結晶方位および (001)_{Al₃Ti} と格子マッチングがよい結晶学的方位関係を有したアルミニウムが優先的に形成した。このように、鋳造アルミニウムの微細構造は、単結晶 Al₃Ti ヘテロ凝固核を用いることで実現できる。これに対し、PBF-LB の造形においては、アルミニウムのエピタキシャル成長に伴う組織制御は可能であるが、現在のところ、限定的にしか実現できていない。

謝辞 本研究課題は、2023 年度に採択された公益財団法人軽金属奨学会の統合的先端研究の助成により行われました。多大なるご支援に心より感謝を申し上げます。なお、本研究の一部は公益財団法人スズキ財団 2022 年度 科学技術研究助成の援助も受けています。併せて謝意を表します。

参考文献

- 1) A. Kamio: *J. Japan Inst. Light Metals*, **31** (1981), 136 -147. <https://doi.org/10.2464/jilm.31.136>
- 2) Y. Watanabe, M. Mihara-Narita and H. Sato: *Mater. Trans.*, **64** (2023), 1083-1097. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-L2022026>
- 3) D.E. Bugaris and H.-C. zur Loye: *Angew. Chem. Int. Ed.*, **51** (2012), 3780-3811. <https://doi.org/10.1002/anie.201102676>
- 4) M. Kato, M. Wada, A. Sato and T. Mori: *Acta Met.*, **37** (1989), 749-756. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(89\)90001-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(89)90001-1)

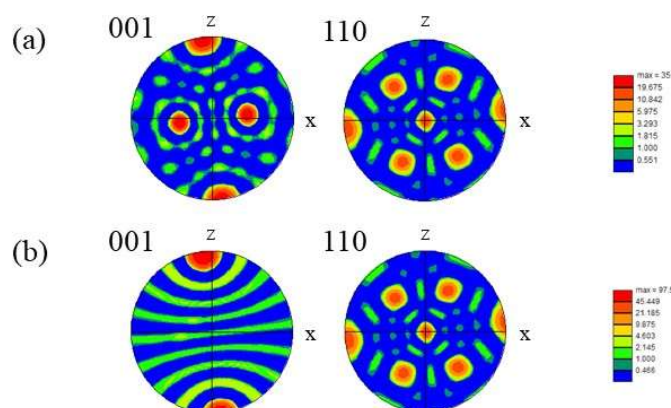


Fig. 6 The pole figures of (a) Al and (b) Al₃Ti of the single-layer sample manufactured under 80 W.

ワイヤー式指向性エネルギー堆積法により造形した A7003 アルミニウム合金の機械的特性に及ぼすヘテロ凝固核粒子添加の効果

渡辺 義見

名古屋工業大学 大学院工学研究科 工学専攻材料機能分野

1. 緒 言

素材をワイヤー形状としたワイヤー式 DED 方式は、高価な金属粉末を使用する PBF 方式やパウダー式 DED 方式と比較し、材料費を抑えることができ、造形速度が大きく、大型部材造形向きである。しかし、金属粉末を使用する方式の 3D プリンティングでは、比較的容易に素材を変更した研究が可能であるのに対し、ワイヤー式 DED 方式では、一定量のワイヤーを製造しなければならない。ところで、Watanabe らは、PBF 方式の 3D プリンティングにおいて、ヘテロ凝固核粒子の添加により積層造形体の組織微細化と凝固の均一化に伴う造形性向上が同時達成できることを見出している[1]。この技術をワイヤー式 DED 方式に適用できるかについて A7003 アルミニウム合金を用いて調査し、造形性の向上が達成できることを見出している[2]。本研究では、造形した試料の組織を詳細に調査すると同時に、ワイヤー式指向性エネルギー堆積法により造形した A7003 アルミニウム合金の機械的特性に及ぼすヘテロ凝固核粒子添加の効果について調査した。

2. 実験方法

ヘテロ凝固核粒子 (Al_3Ti および TiB_2) を添加した $\phi 1.2\text{ mm}$ の A7003 アルミニウム合金ワイヤーおよび無添加ワイヤーを用い、三菱電機製のワイヤー式 DED 装置[3]を用いて長さ 70mm、幅 3mm および高さ 50mm の壁状試料の造形実験を行った。レーザー出力は 2000 W、走査速度は 300 mm/min、ワイヤー送給速度は 833-1000 m^3/min とフィードバック制御により制御した。得られた造形体をワイヤー放電加工により切り出し、引張試験片を作製した。

Fig. 1 は、造形体を X-Z 面から見たときの引張試験片の切り出し位置を示したものである。図中の V1, V2 および V3 がベースプレートに対して垂直方向、H1, H2 および H3 が平行方向に切り出した試験片である。これら試験片を用いて、クロスヘッド速度を 5 mm/min と設定し引張試験を行った。その後、試験から得た応力-ひずみ曲線より引張強さおよび 0.2 %耐力を、試験前後における試験片の標線距離より伸びを計算した。

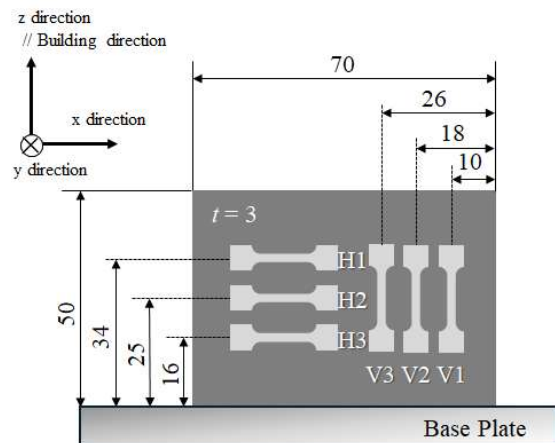


Fig. 1 Cutting position and size of tensile specimens. V1, V2 and V3 specimens are vertical to the base plate, whereas that of H1, H2 and H3 specimens are

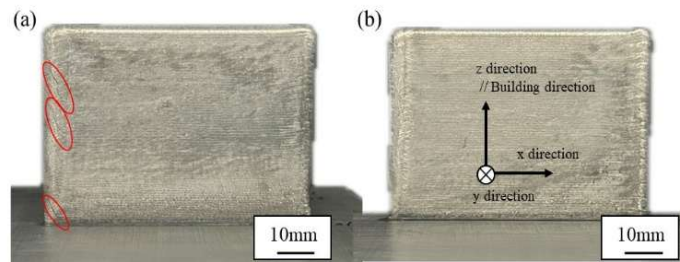


Fig. 2 Photographs of wall-shaped (a) uninoculated and (b) inoculated samples.

3. 結果

造形体の外観写真を Fig. 2 に示す。ヘテロ凝固核を添加していない A7003 アルミニウム合金造形体には、Fig. 2 (a) に赤い楕円で示す様なクラックが発生した。これに対し、ヘテロ凝固核を添加した造形体には、Fig. 2 (b) に示す様にクラックが生じなかった。

ベースプレートに対して垂直方向および平行方向に変形を加えた試験片に対する応力-ひずみ曲線を、それぞれ Fig. 3 (a) および (b) に示す。またこれらの応力-ひずみ曲線から得た引張強さ、0.2%耐力および引張試験前後の標線距離より計算した試験片の伸びを、それぞれ Fig. 4 (a), (b) および (c) に示す。Fig. 4 (a) および (b) より、ヘテロ凝固核を添加した試料全てにおいて、添加していない試料と比較して大きな引張強さ、および 0.2 % 耐力を示すことが分かった。また伸びに関しては、Fig. 4 (c) に示すように垂直方向に変形を加えた V1, V2 および V3 試料においては、ヘテロ凝固核添加による顕著な効果は認められなかった。しかし、平行方向に変形を加えた H1, H2 および H3 試料については、無添加材では試料切り出し位置による依存性が強く見出されたものの、添加材においては試料位置による差が見られず、垂直方向に変形を加えた試料と同等の大きな伸びが観察された。このように、ヘテロ凝固核粒子の添加により、機械的特性の異方性、位置依存性が解消され、強度のばらつきも低減できることを見出した。

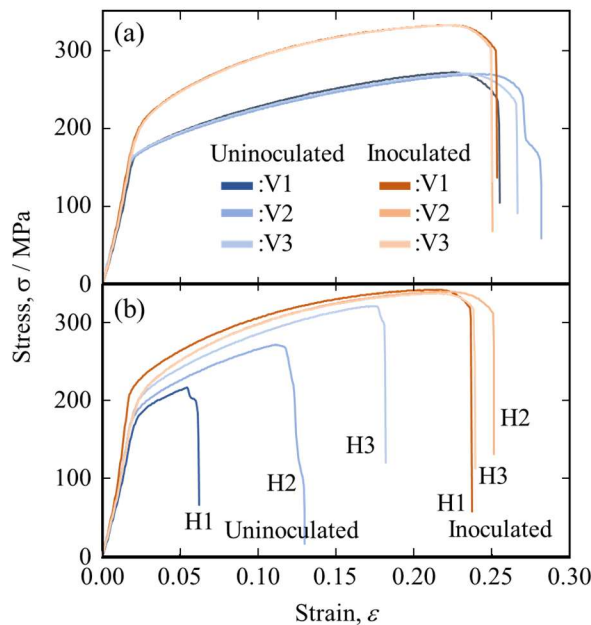


Fig. 3 Stress-Strain curves of the (a) vertical and (b) horizontal specimens. Cross head speed is fixed to be 5 mm/min.

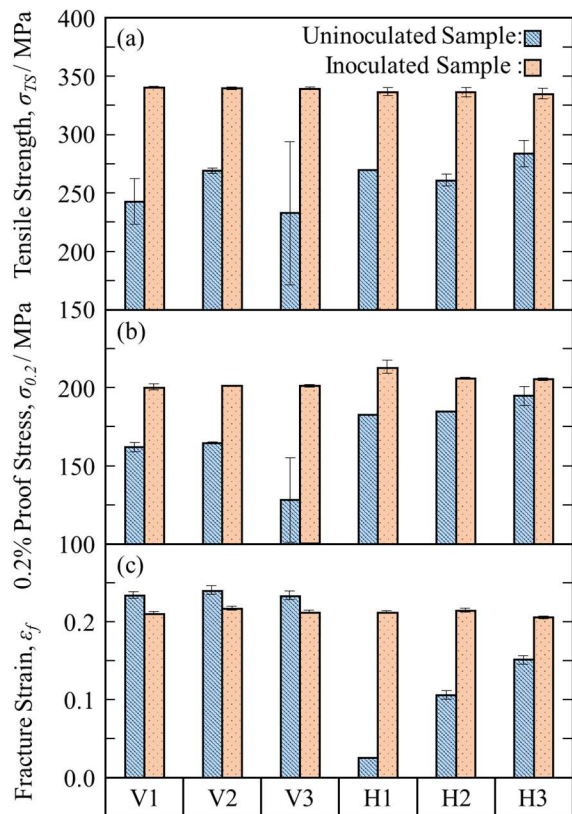


Fig. 4 (a) Tensile strength, (b) 0.2 % proof stress and (c) elongation of the tensile samples.

そこで、ヘテロ凝固核粒子を添加した造形体を用い、ひずみ速度急変試験を実施した。初期ひずみ速度は $\dot{\epsilon}=1 \times 10^{-4}$ /s であり、変形中に $\dot{\epsilon}=1 \times 10^{-3}$ /s と $\dot{\epsilon}=1 \times 10^{-4}$ /s とに交互に急変させた。この際、デジタル画像相関法にてひずみを算出した。なお、デジタル画像相関法で用い

る写真の撮影間隔は 5.0 Hz とした。結果を引張試験片の模式図とともに Fig. 5 に示す。ひずみ速度急変に伴う応力ひずみ曲線の変化は小さく、このひずみ速度範囲内におけるひずみ速度感受性が小さいことが分かった。

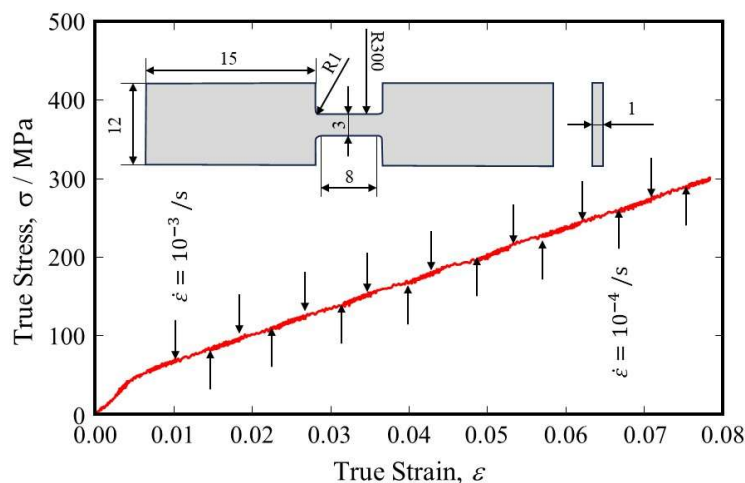


Fig. 5 Strain rate cycling stress-strain curve of inoculated sample.

4. 結 言

ヘテロ凝固核粒子が添加された A7003 アルミニウム合金ワイヤーおよび無添加ワイヤーにより製造した壁形状の造形体を用い、引張試験を行った。ヘテロ凝固核粒子の添加は、引張強さ、0.2 %耐力および伸びの向上のみならず、変形方向による異方性や試料切り出し位置依存性の低減に有効であることを見出した。

謝辞 本研究課題は、2023 年度に採択された公益財団法人軽金属奨学会の統合的先端研究の助成により行われました。多大なるご支援に心より感謝を申し上げます。また、研究実施にあたり、株式会社 UACJ、ヤマハ発動機株式会社および三菱電機株式会社のご協力を得ました。なお、本研究の一部は天田財団の援助も受けています。併せて謝意を表します。

参考文献

- [1] Y. Watanabe, M. Sato, T. Chiba, H. Sato, N. Sato and S. Nakano, *Met. Mater. Trans. A*, **51** (2020), 1345-1352.
- [2] 渡辺義見, 東郷岳大, 山田素子, 成田麻未, 佐藤尚, 田中宏樹, 鈴木貴晴, 栗田洋敬, 森田大嗣, 軽金属学会 2024 年春期大会
- [3] 橋本隆, 軽金属, **72** (2022), 613-617.