

機能マルチモーダル制御による高強度と高延性を兼ね備える軽合金展伸材設計

山崎 倫昭^{*1} 萩原 幸司^{**} 松本 龍介^{***}
眞山 剛^{*2} ハルヨ ステファヌス^{****}

1. はじめに

肥大化する消費社会を持続的に支え得る軽量構造用材料として、無機材料や高分子材料と比較して、高い耐熱性、熱伝導性を有し、強度と延性のバランスの良い軽金属材料は魅力であり、なかでも構造用金属材料として最軽量であるマグネシウム(Mg)合金の注目度が増している⁽¹⁾。この流れは海外で特に顕著であり、環境問題に敏感な欧州、北米、Mg地金の生産を一手に担う中国等は、Mgを輸送機器の軽量化に資する戦略材料と位置づけて産学官での研究開発を精力的に進めている。しかしながら、Mg金属は変形に自由度を与える迂回系が少なく延性・加工性に乏しい点が解決すべき大きな課題として残っている。輸送機器の構造部材としてのMg合金の利用拡大を目指すためには、素材開発側から輸送機器メーカー、すなわち素材ユーザーへの高強度かつ延性に富む展伸材の提供が急務と言える。このような状況下、既存の商用合金組成に捕らわれることなく新規な合金組成の開発が進められてきた結果、優れた耐熱性と高い降伏強度を兼ね備える長周期積層構造(Long-Period Stacking Ordered Structure; LPSO)型マグネシウム合金がKawamuraらによって見出された⁽²⁾。このLPSO型Mg合金は、急速凝固粉末冶金法により作製されたMg₉₇Zn₁Y₂合金によって初めてその優れた機械的性質とLPSO相を有するという組織の特徴⁽³⁾との関連が指摘されたが、現在は、急速凝固法に限らず鋳造法で作

製された多くのMg-Zn-RE(RE:希土類元素)合金においても展伸材として優れた機械的特性を有することが明らかとなっている⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾。Mg-Zn-希土類(RE)合金に形成するLPSO相には、10H, 18R, 14H, 24Rといった様々なポリタイプが存在し、最密原子層の積層周期に応じて菱面体晶系(R)と六方晶系(H)が交互に現れるが、いずれのポリタイプにおいても最密原子面に形成された積層欠陥を挟んだ四原子層にL1₂型Zn₆RE₈クラスタが配列するという積層変調と濃度変調が同期した珍しい構造をもつ⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。図1に18R構造を有するMg-Zn-Y系LPSO相の電子顕微鏡像を示す。なお、18R-

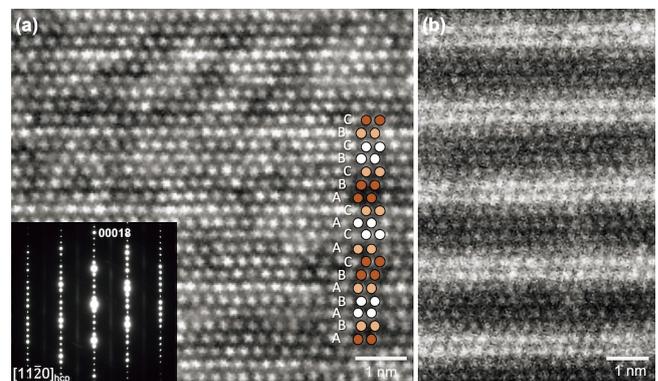


図1 Mg-Zn-希土類(RE)合金に形成する18R型LPSO相の電子顕微鏡像。(a) HR-TEM像、(b) HAADF-STEM像。(オンラインカラー)

* 熊本大学先進マグネシウム国際研究センター；1)教授 2)准教授(〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)

** 名古屋工業大学大学院工学研究科；教授

*** 京都先端科学大学工学部；准教授

**** 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター 中性子利用セクション；研究主幹

Developing Structural Lightweight Metallic Materials with High Strength and Large Ductility Based on Multimodal Microstructure Design Concept; Michiaki Yamasaki*, Koji Hagihara**, Ryosuke Matsumoto***, Tsuyoshi Mayama* and Stefanus Harjo**** (*Magnesium Research Center, Kumamoto University, Kumamoto. **Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya. ***Faculty of Engineering, Kyoto University of Advanced Science, Kyoto. ****Neutron Science Section, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency, Ibaraki)

Keywords: structural lightweight metallic materials, magnesium alloy, strength, ductility, strain hardening, fracture toughness, multimodal microstructure, long-period stacking ordered structure

2023年10月13日受理[doi:10.2320/materia.63.9]

LPSO 相は菱面体晶の結晶対称性を示すが、菱面体晶は単位格子を三倍にとることにより六方晶としてみなすこともできる⁽¹²⁾。そこで本稿では18R-LPSO 相の結晶構造を六方晶系の表記で示す。このLPSO 相内に形成されたクラスタ配列層は、LPSO 相の迂り系を底面 $\langle a \rangle$ 迂りと、673 K 以上と比較的高い温度域での柱面 $\langle a \rangle$ 迂りのみに制限する⁽¹²⁾⁽¹³⁾。図2にhcp-MgとLPSO-Mgの迂り系の比較を示す。また、Mg金属によく見られる双晶変形が起きず、代わりに底面転位の活動によるキック変形が生じることも知られており、このキック変形に付随して生じる強化現象を利用した材料設計も提案されている⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁸⁾。

LPSO 相はそれ自身が合金の強化相になるだけでなく、 α Mg/LPSO 二相合金に塑性加工を施した際の α Mg母相の集合組織形成に大きな影響を与えることがわかっている。例えば、 $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2(\text{at}\%)$ 合金押出材は、LPSO相粒が繊維状

に分散するだけでなく、 α Mg母相が微細再結晶粒と強い集合組織を有する粗大加工粒にバイモーダル化することで、二相三領域からなるマルチモーダル微細組織が形成され、強度と延性という相反する特性が同時に発現することがわかってきた⁽⁸⁾。しかしながら、このマルチモーダル構造が複数の力学特性を同時に発現する機構についてはわからないことが多い。荷重負荷時における各領域の協調的応答の正体を解明すること、そして機械的特性に影響を与えるマルチモーダル組織における組織因子を解明することは、不均一組織を有する材料の変形機構に関する学理構築と力学特性創発を目指した材料創製の両面で極めて重要である。そこで本稿では、最初にMg-Zn-RE合金展伸材におけるマルチモーダル組織制御とはどのようなものかについて述べたのちに、JST-CREST「ナノ力学」の採択課題である「機能マルチモーダル制御の材料科学と材料創製」での取り組みについてその成果とともに紹介したい。

2. 強度と延性を両立させるマルチモーダル組織制御

α Mg/LPSO 二相合金に押出加工を施すと、 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 繊維状集合組織を有するLPSO相加工粒領域と α Mg相加工粒領域、そしてランダム配向した α Mg相再結晶粒領域からなるマルチモーダル微細組織を形成し、前二者が強度を、後者が延性を担うことで高強度と優れた延性が両立する⁽⁸⁾。この組織制御と機械的特性の関係について、代表的な α Mg/LPSO二相合金である $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$ 合金を例に挙げて紹介したい。

$\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$ 合金はLPSO相が鋳造時に第二相として晶出する。図3に様々な冷却速度で鋳造した $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$ 合金とその押出材の光学顕微鏡像を示す。冷却速度の減少に伴い二次デンドライトアーム間隔(Secondary Dendrite Arm Spacing; SDAS)は $\sim 88 \mu\text{m}$, $\sim 68 \mu\text{m}$, $\sim 25 \mu\text{m}$, $\sim 15 \mu\text{m}$ と減少していき、それに伴い押出材の組織も微細化されていく。図4に鋳造時のSDASが $88 \mu\text{m}$ と $15 \mu\text{m}$ であった押出材の α Mg相領域から得られた結晶方位マップと逆極点図を示す。 α Mg相は $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ が押出方向と平行となる繊維状集合組織を有する加工粒とランダム配向した再結晶粒にバイモーダル化していることがわかる。SDASが小さくなると再結晶粒の体積分率が増大し、逆に加工粒の体積分率が減少する。また、LPSO相加工粒は微細分散する傾向を示す。押出材の引張特性と再結晶粒の体積分率との関係、そして引張特性とLPSO相分散度との関係を調べてみると、図5に示す通り、再結晶粒の体積分率が増大するにつれて押出材の引張耐力と伸びが同時に増大する傾向を示した。一般的には、強度と延性はトレードオフの関係にあることが知られているが⁽¹⁹⁾、本合金においてはランダム配向した α Mg相再結晶粒の体積分率増大が延性向上を担い、LPSO相加工粒の分散度の向上が α Mg相加工粒の体積分率減少を補ってなお、強度発現に寄与したと考えられる。

立方晶系金属においても結晶組織のバイモーダル化を扱った研究が多く見られる。Wangらは純銅に90%程度の冷間圧

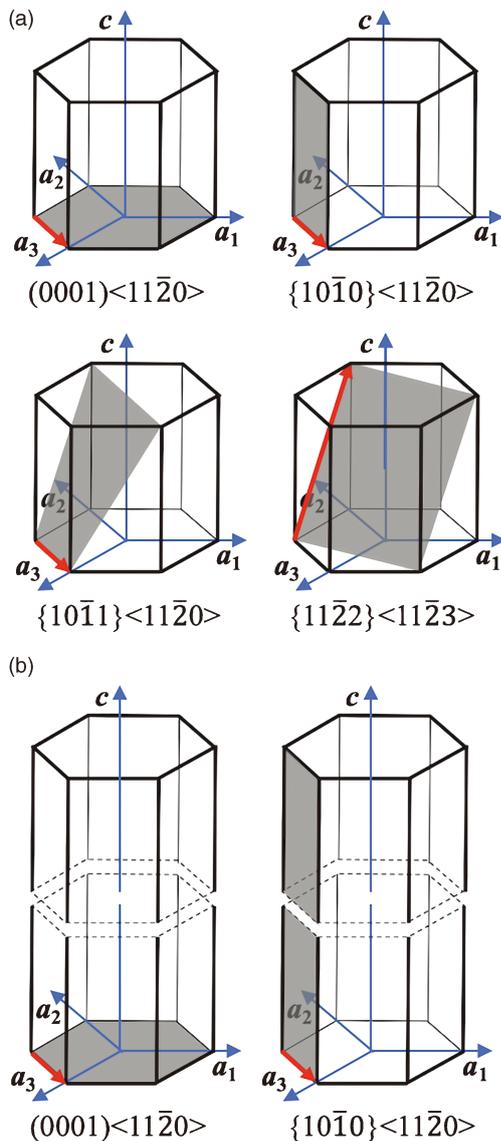


図2 (a) hcp-Mgで観察される迂り系と(b) 18Rおよび14H-LPSO-Mgで観察される迂り系。(オンラインカラー)

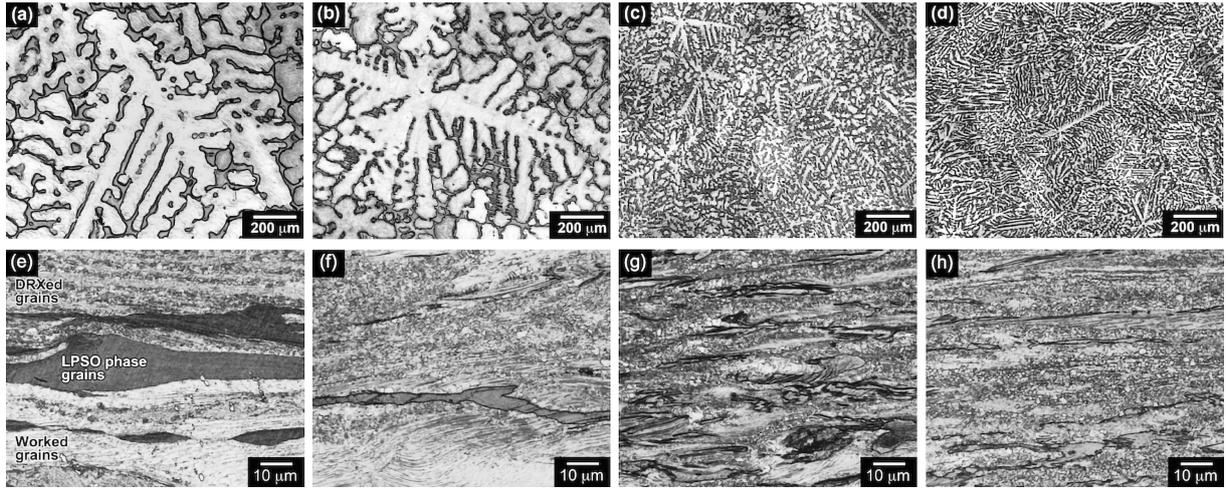


図3 様々な冷却速度で鋳造した $Mg_{97}Zn_1Y_2$ 合金とその押出材縦断面の光学顕微鏡像. (a, e) 0.06 K/s, (b, f) 0.18 K/s, (c, g) 5.7 K/s, (d, h) 9.6 K/s⁽⁸⁾.

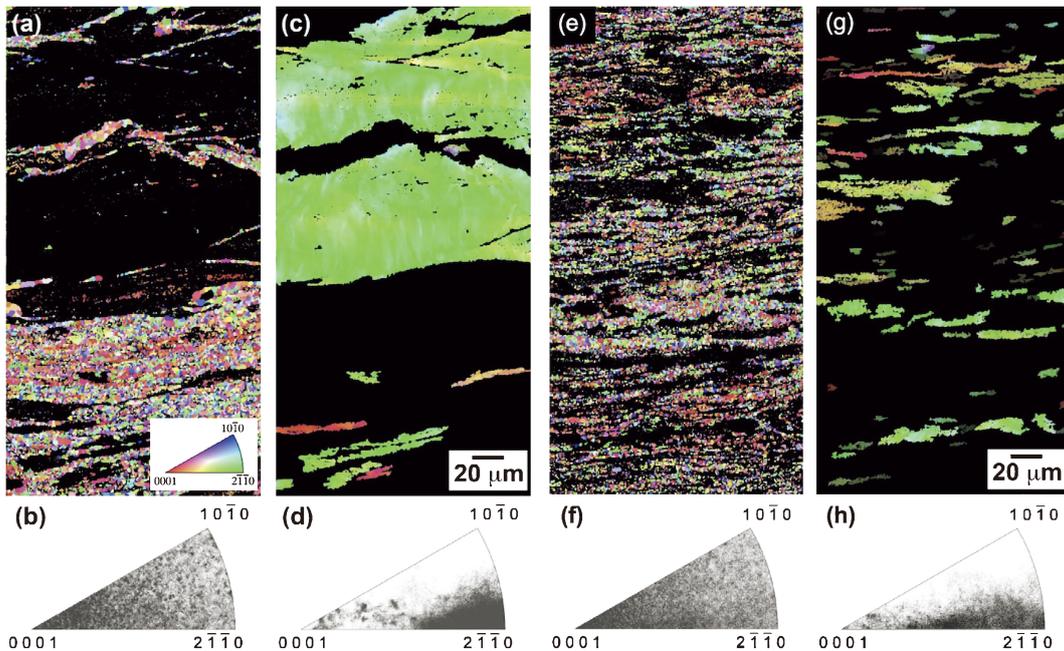


図4 $Mg_{97}Zn_1Y_2$ 合金押出材縦断面の結晶方位マップと逆極点図. (a-d) 冷却速度0.06 K/s 徐冷鋳造押出材, (e-h) 9.6 K/s 鋳造押出材⁽⁸⁾. (オンラインカラー)

延加工を施した後に、所定の熱処理を施すことで平均結晶粒径300 nmの母相微細組織中に二次再結晶粒を分散させることで、強度を母相微細粒に、延性を二次再結晶粒に担わせることに成功している⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。一方、非立方晶系金属である α Mg/LPSO二相合金においては、繊維状集合組織を有する粗大粒が強度を担い、ランダム配向した母相微細粒が延性を担っていると考えられており、微細粒の働きが立方晶系金属と異なっている。hcp構造を有するMg金属において延性を向上させるためには、容易 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 系である底面 $\langle a \rangle$ 系以外の $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 系、所謂、非底面 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 系の活動を活性化させる必要がある。Koikeらは結晶粒界に生じるcompatibility stressによって非底面 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 系の活動が活性化すること、その粒界の影響が結晶

粒全体に及ぼす臨界粒径よりも微細化することが室温延性発現に有効であることを示している⁽²²⁾。 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 系の少ないhcp-Mgにおいて結晶粒の微細化は粒界強化による高強度化とともに延性向上にも有効である。 α Mg/LPSO二相合金押出材の再結晶粒径は0.8~4 μ mと比較的微細であることとランダム配向していることから、強度よりも延性を担う重要な組織となったと考えられる。

3. マルチモーダル組織形成におけるLPSO相の役割

LPSO相は強化相としての役割のみならず、押出過程におけるマルチモーダル組織形成にも大きな役割を果たすことが

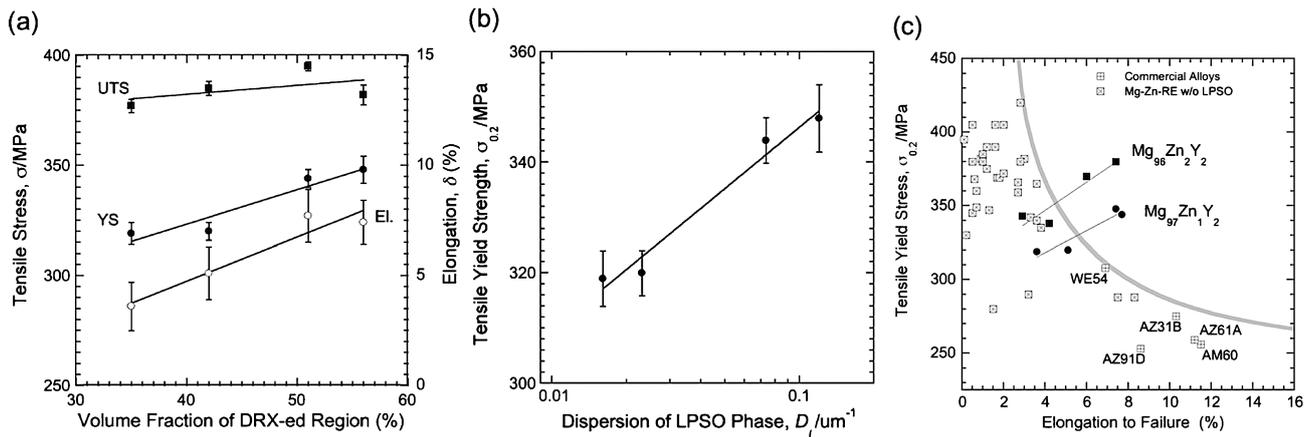


図5 Mg₉₇Zn₁Y₂合金押出材の力学特性。(a)引張強度および延性と再結晶粒領域の体積分率の関係、(b)引張耐力とLPSO相分散度の関係、(c)様々なMg合金押出材の機械的特性⁽⁸⁾。

知られている⁽²³⁾⁽²⁴⁾。LPSO相が比較的粗大に存在する場合は、Particle Stimulated Nucleation (PSN)による隣接 α Mg粒領域での動的再結晶が促進される一方、極めて薄い板状にLPSO相が α Mg母相中に整合性を持って析出した場合、積層欠陥部の溶質濃化層が c 成分をもつ非底面 $\bar{1}$ りを抑制することから、塑性加工時の格子回転の限定が生じ、繊維状集合組織形成を促す結果となる⁽²⁵⁾。

ここでLPSO相が熱処理によって析出するMg-Zn-Gd合金⁽⁴⁾⁽²⁶⁾を例にとって、LPSO相の形態が組織形成に及ぼす影響について述べたい。図6にMg₉₇Zn₁Gd₂合金のTTT線図⁽²⁶⁾と、鑄造試料および様々な熱処理を施した試料のSEM像を示す。鑄造凝固のままの組織中にはLPSO相は観察されず α Mg母相とMg₃Gd相の二相組織を呈するが、溶体化処理を経て573 Kから773 Kの温度域において熱処理を施すことで14H-LPSO相が形成される。LPSO相の形態は熱処理温度により大きく異なり、低温で熱処理した場合は α Mg母相の底面に極めて薄くかつ広く板状のLPSO相が α Mg母相から析出するが、高温で熱処理した場合は α Mg母相の c 軸方向に厚く成長したブロック状LPSO相が α MgとMg₃Gdの包析反応によって形成される⁽²⁷⁾。LPSO相晶出型のMg-Zn-Y系合金では、鑄造時の冷却速度によりLPSO相形状が決まっていたが、LPSO相析出型のMg-Zn-Gd系合金では、押出前の熱処理によってLPSO相の存在形態を制御でき、結果として押出材におけるマルチモーダル組織の構成領域の体積分率もまた自在に制御することが可能となる。図7に押出前熱処理温度とマルチモーダル組織の各構成領域の体積分率変化を示す。微細な板状LPSO相の析出量が多い組織を持つ合金は、押出加工時の α Mg母相における再結晶が抑制されるとともにLPSO相による錐面 $\langle c+a \rangle$ $\bar{1}$ りおよび双晶の発生が抑制され、底面 $\langle a \rangle$ $\bar{1}$ りと柱面 $\langle a \rangle$ $\bar{1}$ りにのみ限定される。このことから、図8に示すように、格子回転の限定によって押出方向に $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ が揃うLPSO相誘起集合組織を形成するため、 α Mg加工粒の体積分率が上昇する⁽²³⁾⁽²⁵⁾。一方、ブロック状LPSO相の析出量が多い組織を

持つ合金は、LPSO相粒によるPSNが生じ、結果として α Mg再結晶粒の体積分率が大きくなる。微細な板状LPSO相は、L1₂型Zn₆RE₈クラスタが面内配列している溶質濃化層(Cluster-Arranged Layer; CAL)を有すること、これらCALの積層方向への周期がランダムであるという特徴からクラスタ配列ナノプレート(Cluster-Arranged Nanoplate; CANaP)という呼称が提案されており⁽²⁸⁾、更にはMg-Zn-Y希薄合金において押出加工中に動的再結晶を促進させるための臨界CANaP厚さと間隔、逆にキック変形した加工粒を残存させるためのそれら条件が明らかになるなど、マルチモーダル組織制御をする上での重要な知見の蓄積が進んでいる⁽²⁹⁾。

4. 機能マルチモーダル制御の材料科学と材料創製

2020年11月よりJST-CREST「ナノ力学」の第二期公募において著者らの研究課題「機能マルチモーダル制御の材料科学と材料創製」を採択していただいた⁽³⁰⁾。強度と延性の両立のみならず、強靱性発現に繋がるマルチモーダル組織制御を深化させ、「降伏後も発揮される強度」と「加工硬化を伴う延性」の機能マルチモーダル化による共存・両立による強靱化という新規概念に基づいた意図的な不均一組織の作り込み、すなわち組織マルチモーダル化という新規方法論による材料創製を目指している。先に紹介した α Mg/LPSO複相Mg₉₇Zn₁Y₂合金のみならず、 α Mg擬単相合金(Mg_{99.2}Zn_{0.2}Y_{0.6}希薄合金)、 α Mg単相合金(AZ31合金)という塑性異方性の異なるモデル合金をチーム共通の研究対象として、マルチモーダル組織を構成する各領域の単体力学特性の支配因子・作用機構に関する理解を離散的解析(松本グループ)によって深め、各領域における変形モードの集団的相互作用が重畳するマルチモーダル組織の力学特性発現機構を連続体的解析(萩原グループ)により統合的に理解することを目指すとともに、不均一系における変形機構の基礎的知見を持って、広くhcp金属材料に適用可能な「強靱化に有効な機能マルチ

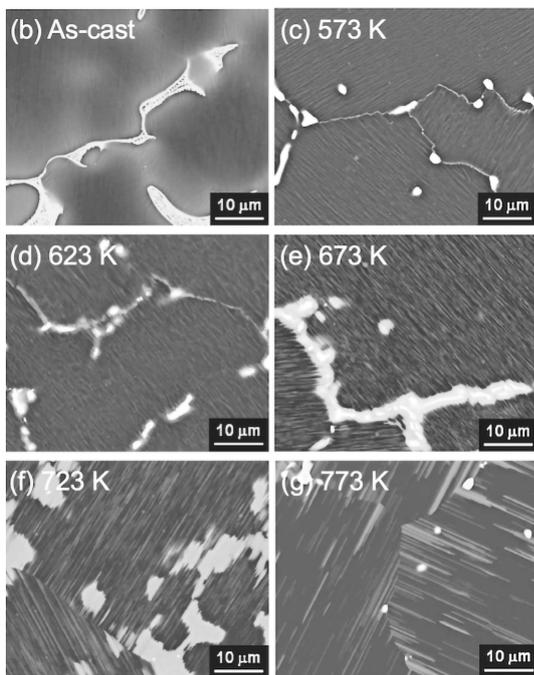
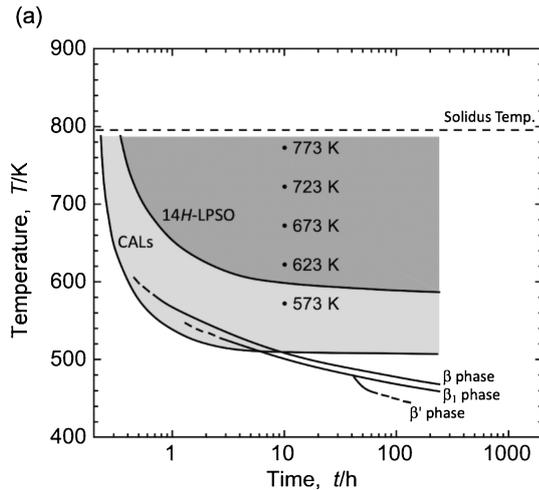


図6 $Mg_{97}Zn_1Gd_2$ 合金の(a) TTT線図と、(b-g) 鑄造材および熱処理材のSEM像：(b) 鑄造材，(c) 573 K 10時間熱処理材，(d) 623 K 10時間，(e) 673 K 10時間，(f) 723 K 10時間，(g) 773 K 10時間⁽²⁶⁾。

「マルチモーダル制御のための学理」を構築し、材料創製(山崎グループ)への応用展開を目指している。現在までに得られた成果の一部を紹介したい。

(1) Anisotropic Mechanical Property-Induced Ductilization (AMID)の発現

マルチモーダル組織が変形する際の各結晶粒レベルでの結晶方位、粒形態に応じた活動変形機構変化を中性子線回折により得られる格子ひずみ発達評価により調査することで、各領域が担う変形・荷重について定量的に評価が可能となる⁽³¹⁾⁽³²⁾。図9に $\alpha Mg/LPSO$ 複相 $Mg_{97}Zn_1Y_2$ 合金の鑄造まま材と二種類の押出材(押出比 $R5$, $R12.5$)の組織と引張応力-ひずみ曲線、中性子線回折によって得られた各結晶面

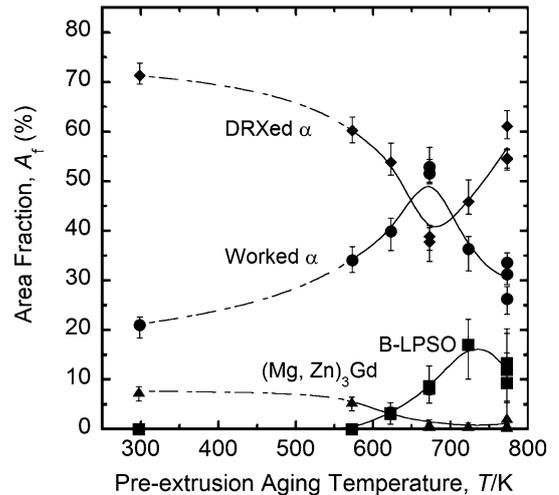


図7 押出前熱処理温度が $Mg_{97}Zn_1Gd_2$ 合金のマルチモーダル組織形成に及ぼす影響⁽²³⁾。

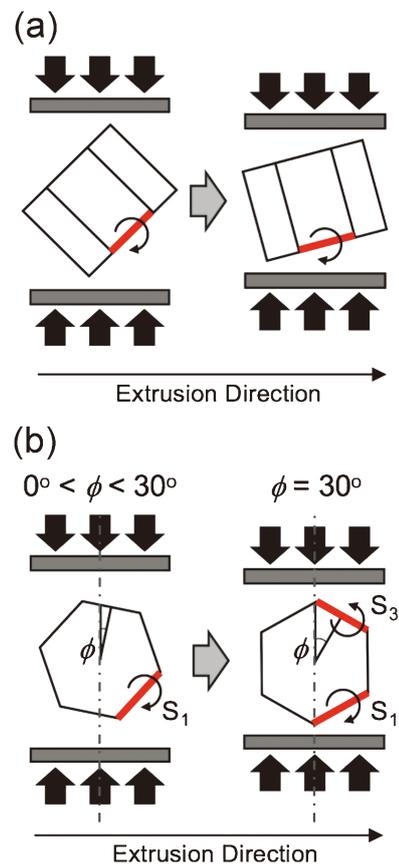


図8 押出加工時の底面 $\langle a \rangle$ 向きと柱面 $\langle a \rangle$ 向きによる格子回転と集合組織形成⁽²⁵⁾。(オンラインカラー)

の格子ひずみと応力の関係を示す⁽³³⁾。 αMg 相が加工粒と再結晶粒にバイモーダル化している $R5$ 押出材が高い降伏強度を示し、 αMg 相が全面再結晶した $R12.5$ 押出材は降伏強度が若干低いものの大きな延性を示した。引張その場中性子線回折実験の結果からは、再結晶粒における底面 $\langle a \rangle$ 向きによって微視的降伏が生じること、加工粒における柱面 $\langle a \rangle$ 向き

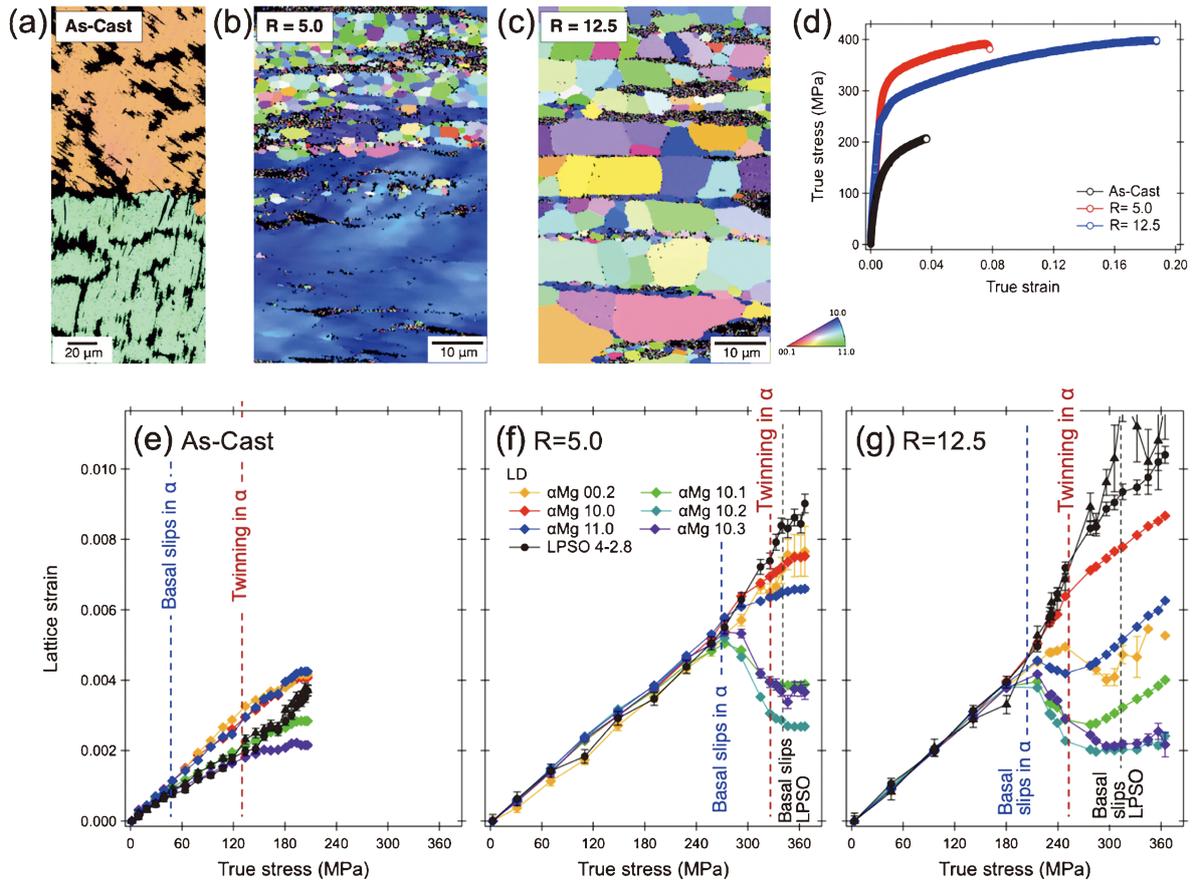


図9 $\alpha\text{Mg}/\text{LPSO}$ 複相 $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$ 合金の铸造まま材と二種類の押出材縦断面(押出比 $R5$, $R12.5$)の(a-c)結晶方位マップと、(d)引張応力-ひずみ曲線、(e-g)中性子線回折によって得られた各結晶面の格子ひずみと応力の関係⁽³³⁾。(オンラインカラー)

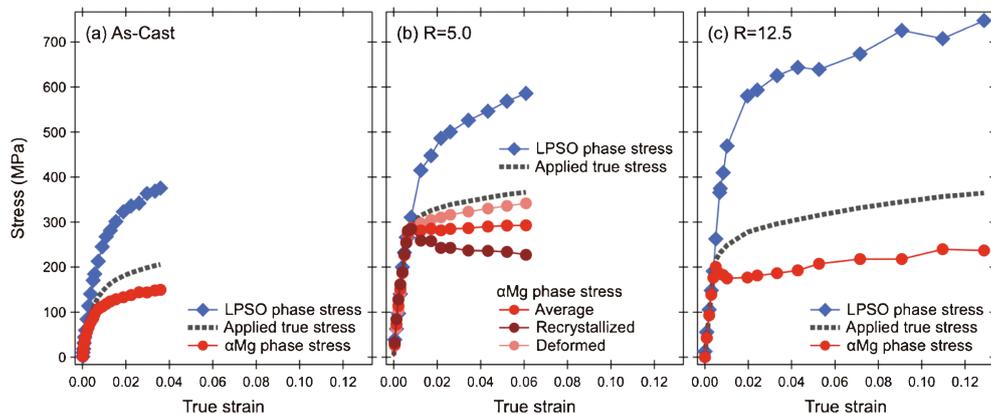


図10 $\alpha\text{Mg}/\text{LPSO}$ 複相 $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$ 合金の铸造まま材と押出材の引張変形中の印加応力に対する相応力と粒応力の変化⁽³³⁾。(オンラインカラー)

および双晶変形により巨視的降伏が起こることが示唆された。図10には $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$ 合金の铸造まま材と押出材の引張変形中の印加応力に対する相応力の変化を示す。 αMg 相が加工粒と再結晶粒にバイモーダル化している $R5$ 押出材については粒応力についても評価した。図中に Deformed と記された加工粒の応力が再結晶粒のそれと比べ極めて大きいことがわかる。図11には各領域の応力をそれぞれの体積分率で重み付けして評価した合金強度への寄与を示す。このような結

晶方位差による結晶粒間応力差が生じる現象は、 composite-like load sharing⁽³⁴⁾とも呼ばれるが、 hcp 構造に由来し強い塑性異方性を持つ Mg 合金に「粒応力」という概念を持ち込むことにより、同じ αMg 相であっても底面迂りが活動する再結晶粒と活動が抑制される加工粒にバイモーダル化することで、それぞれが軟質相、硬質相として振る舞う複合材料的挙動を示すことが明確になった。

本研究では、LPSO 相に頼らない合金設計、すなわち加工

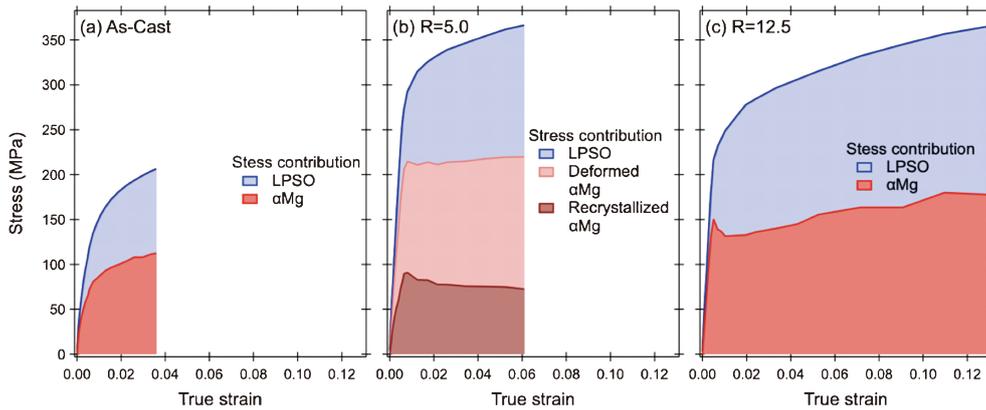


図11 α Mg/LPSO 複相 $Mg_{97}Zn_1Y_2$ 合金の鋳造まま材と押出材における各領域の応力をそれぞれの体積分率で重み付けして評価した合金強度への寄与⁽³³⁾。(オンラインカラー)

粒と再結晶粒を適切な形状・配置にて整列させた「マルチモーダル組織制御」による力学特性向上を目指していることから、 α Mg 単相合金へのマルチモーダル組織制御技術の適用も試みているが、単純なバイモーダル組織制御だけでは加工硬化を伴う延性の改善という点においては不十分であることもわかってきた。図12には、 α Mg/LPSO 複相合金、 α Mg 擬単相合金、 α Mg 単相合金を同一押出条件で加工した押出材の引張応力-ひずみ曲線と加工硬化率を示す。単相合金に比べ、LPSO 相を有する複相合金の加工硬化率が高いことがわかる。 α Mg/LPSO 複相合金においては、底面じりのみが活動する LPSO 相のシュミット因子を配向制御によってゼロに近づけることで合金としての加工硬化率が大きく上昇する。これは引張試験により測定・算出される LPSO 相の加工硬化率 Δh_σ が粗い近似として、

$$\Delta h_\sigma = \Delta h_t / SF^2 \quad (1)$$

の関係に支配されるからである。ここで、 Δh_t はせん断応力で規定される転位運動機構に由来する本質的な加工硬化率、SF は底面じりのシュミット因子である。言い換えると、引張延性をほとんど示さない LPSO 相であるが、その周りに軟質な α Mg 相を配置することで破壊を抑制した条件下においては、LPSO 相それ自体の塑性異方性と集合組織形成が加工硬化率の大幅な増大をもたらす。結果として塑性不安定性発生の Considère の条件 $d\sigma/d\varepsilon < \sigma$ に従って、 α Mg/LPSO 複相合金押出材としての均一伸びを増大させることになる。従来の Mg 合金の力学特性制御に関する研究の多くは、最も容易な活動系である底面じりの活動を抑制し、力学特性を等方的にすることを念頭に行われてきたが⁽³⁵⁾⁻⁽³⁷⁾、この結果を基に萩原は、従来の材料研究とは全く逆の発想、すなわち等方性を旨とするのではなく強化相の塑性異方性を極限まで強調することで合金としての延性を産み出すという“力学異方性誘起延性、Anisotropic Mechanical Property-Induced Ductilization (AMID)”機構を考案するに至っている⁽³⁸⁾。

(2) 粒界面におけるじり伝播の力学モデルの構築

連続体的解析グループによる引張・圧縮その場中性子線回

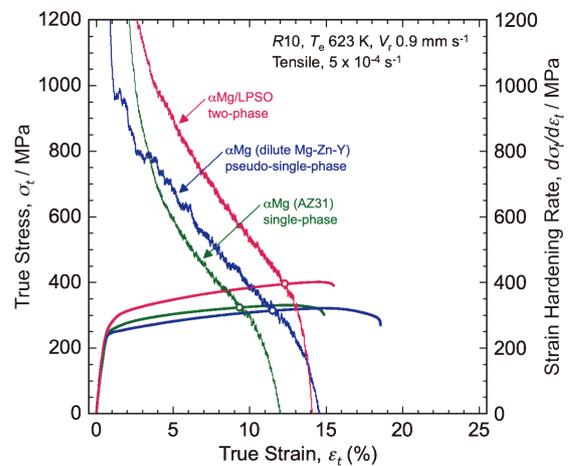


図12 α Mg/LPSO 複相 $Mg_{97}Zn_1Y_2$ 合金、 α Mg 擬単相 $Mg_{99.2}Zn_{0.2}Y_{0.6}$ 合金、 α Mg 単相 AZ31B 合金を同一押出条件で加工した押出材の引張応力-ひずみ曲線と加工硬化率。(オンラインカラー)

折実験や SEM-EBSD 観察の結果を統合して議論することにより、 α Mg/LPSO 複相合金押出材の変形過程の移り変わりが明らかになりつつあり、1) 応力-ひずみ曲線における降伏(巨視的降伏)が現れる前に再結晶粒における底面転位の活動によるマイクロ降伏を生じていること、2) 巨視的降伏においては特に加工粒において柱面転位が活動開始する、という具体的なシナリオをチーム内で共有することで、離散的解析グループにおける分子動力学シミュレーションによって各領域間の界面とパイルアップ転位列との相互作用を評価する研究を展開している⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾。また、連続転位論と破壊力学に基づく理論モデルによって、じり伝播のメカニクスについて検討を行っている。具体的には、粒界を跨いで片方に底面、反対側に柱面を、粒界に対して垂直に配置し、両側で $\langle a \rangle$ 軸方向が粒界に対して垂直かつ、底面と柱面を並行に配置することで、再結晶粒/加工粒間の粒界を単純化した解析モデルを作成した。最初に、単一の転位と上記粒界との相互作用を解析し、粒界転位の役割や貫通挙動に関する基礎的な知見を獲得した(図13)。引き続き、解析モデルを大規模化

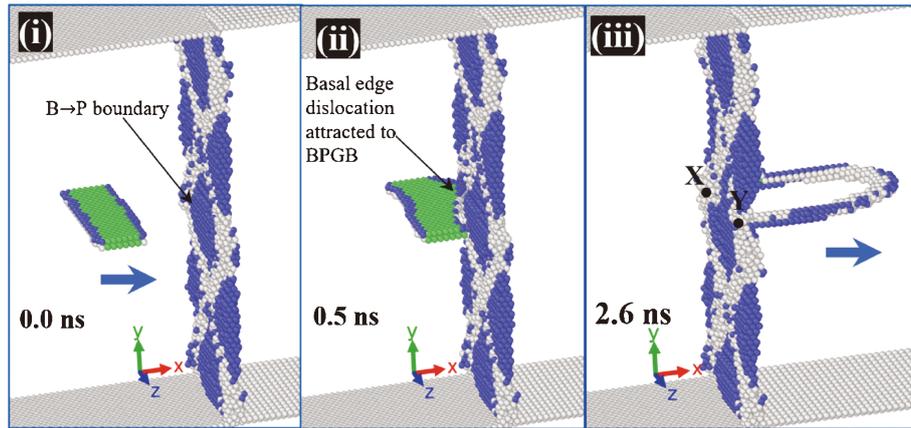


図13 底面 $\langle a \rangle$ 転位から柱面 $\langle a \rangle$ 転位への遷移時の粒界転位によるピンニング⁽³⁹⁾. (オンラインカラー)

し、底面側にモードII型の変位拘束の境界条件を与えることで切り欠き底から刃状転位を次々と射出させることとした。結果、切り欠き底から射出された転位によって、粒界に向かって20個程度の転位のパイルアップが形成され、その後、転位が粒界を貫通した。この際、初期は一つ一つの転位が個別に貫通するが、その後、複数の転位による集団的な貫通と、一時的な貫通停止を繰り返す間欠的な挙動に変化することを明らかにした。迂り伝播挙動の遷移によって大きな応力変動や、隣接粒への多量の転位流入が生じることから、より大域的な転位の集団挙動のトリガーとなり得ることが考えられる。次に、パイルアップ転位がモードIIき裂として等価と考えられることに着目し、貫通の駆動力(エネルギー解放率)と、進展抵抗(貫通前後のエネルギー差)を評価したところ、粒界に形成されるステップ部のエネルギーとステップ幅の関係から、上記の貫通挙動の遷移が再現されることがわかった。本研究で対象としている二相三領域からなるマルチモーダル組織は、ここで紹介した再結晶粒(底面)/加工粒(柱面)の粒界に加えて、再結晶粒/LPSO相、加工粒/LPSO相等の粒界での迂り伝播が順次起動することで、高い延性と強度が得られていると考えられる。

5. おわりに

本稿では $\alpha\text{Mg}/\text{LPSO}$ 複相Mg-Zn-Y合金押出材を中心に、結晶塑性異方性を利用したMg合金のマルチモーダル組織制御とその機械的特性の向上についての研究例を紹介した。極めて強い結晶塑性異方性を有するLPSO相は強化相として働くだけでなく、AMID機構を通じて加工硬化を伴う延性の発現にも重要な役割を果たしていることが明らかになりつつある。実験による不均一組織の変形メカニズム解明という帰納的アプローチを経て、AMID機構の提案や迂り伝播の力学モデルの構築といった演繹的アプローチに繋がるメカニクス構築への展開が今まさに試みられている。今後、Mg合金以外においてもAMID機構が発現する新規構造材料が見出され、構造材料研究に新たな視点をもたらされるこ

とを期待している。

本研究は、JST・CREST「ナノ力学」(JPMJCR2094)、文科省・科研費補助金(20686050, 25289251, 17H03431, 18H05476, 18H05479, 22H01364)、及びJ-PARC・MLF実験課題(2019P0600, 2019I0019, 2021P0040, 2021I0019)の支援を受けて行われました。記して心より感謝申し上げます。

文 献

- (1) J. Song, J. She, D. Chen and F. Pan: J. Magnes. Alloy., **8** (2020), 1-41.
- (2) Y. Kawamura, K. Hayashi, A. Inoue and T. Masumoto: Mater. Trans., **42**(2001), 1172-1176.
- (3) E. Abe, Y. Kawamura, K. Hayashi and A. Inoue: Acta Mater., **50**(2002), 3845-3857.
- (4) M. Yamasaki, T. Anan, S. Yoshimoto and Y. Kawamura: Scr. Mater., **53**(2005), 799-803.
- (5) S. Yoshimoto, M. Yamasaki and Y. Kawamura: Mater. Trans., **47**(2006), 959-965.
- (6) Y. Kawamura and M. Yamasaki: Mater. Trans., **48**(2007), 2986-2992.
- (7) K. Hagihara, A. Kinoshita, Y. Sugino, M. Yamasaki, Y. Kawamura, H. Yasuda and Y. Umakoshi: Acta Mater., **58** (2010), 6282-6293.
- (8) M. Yamasaki, K. Hashimoto, K. Hagihara and Y. Kawamura: Acta Mater., **59**(2011), 3646-3658.
- (9) E. Abe, A. Ono, T. Itoi, M. Yamasaki and Y. Kawamura: Philo. Mag. Lett., **91**(2011), 690-696.
- (10) H. Yokobayashi, K. Kishida, H. Inui, M. Yamasaki and Y. Kawamura: Acta Mater., **59**(2011), 7287-7299.
- (11) D. Egusa and E. Abe: Acta Mater., **60**(2012), 166-178.
- (12) K. Hagihara, A. Kinoshita, Y. Sugino, M. Yamasaki, Y. Kawamura, H.Y. Yasuda and Y. Umakoshi: Intermetallics, **18** (2010), 1079-1085.
- (13) K. Hagihara, Y. Sugino, Y. Fukusumi, Y. Umakoshi and T. Nakano: Mater. Trans., **52**(2011), 1096-1103.
- (14) 河村能人: までりあ, **54**(2015), 44-49.
- (15) K. Hagihara, Z. Li, M. Yamasaki, Y. Kawamura and T. Nakano: Acta Mater., **163**(2019), 226-239.
- (16) K. Hagihara, M. Yamasaki, Y. Kawamura and T. Nakano: Mater. Sci. Eng. A, **763**(2019), 138163.
- (17) K. Hagihara, R. Ueyama, M. Yamasaki, Y. Kawamura and T.

