

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01756

研究課題名(和文) マグネシウム合金におけるバークハード性発現の原理解明と高強度高成形性合金の開発

研究課題名(英文) Development of strong and formable magnesium sheet alloy based on the clarification of the origin of bake-hardenability

研究代表者

佐々木 泰祐 (SASAKI, Taisuke)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・主幹研究員

研究者番号：30615993

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：最軽量の実用金属として知られるマグネシウム(Mg)合金を輸送機器の構造材料として利用できると大きな軽量化効果が期待できる。本研究では、軽金属材料として広く使われるアルミニウム合金に匹敵する室温成形性と強度を発現するMg合金の開発に向けた研究を行った。主な成果として、成形加工後、短時間の熱処理で大きく強度が向上するバークハード(BH)型Mg合金を世界に先がけて開発し、BH性発現の起源が溶質元素の転位芯偏析による転位の不動化と溶質クラスターの形成にあることを明らかにした。また、溶質元素の転位の固着力に及ぼす影響を解明し、Mg合金の中でも最高クラスの強度と成形性のバランスを有する合金の開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、強化手法として従来の商用マグネシウム合金には用いられてこなかった溶質クラスターや転位芯への溶質元素偏析を用いることで、既存のマグネシウム合金を凌駕し、アルミニウム合金に並ぶ室温成形性と強度を兼ね備えた新規なマグネシウム合金の開発に成功した。今後、電気自動車の急速な普及が予測されるが、駆動モーターなどの搭載に伴い重量が増加するため、エネルギー効率向上や航続距離の長距離化には車体軽量化が必要不可欠である。本研究において得た成果をさらに発展させて、力学特性のみならず、耐食性、生産性に優れたマグネシウム合金を開発することができれば、車体軽量化に貢献できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Lightweight magnesium (Mg) alloys are expected to have a great weight saving effect if they are used as structural materials for transportation vehicles. The purpose of this work is to develop novel Mg alloys, which exhibit comparable room temperature formability and strength with aluminum alloys. The main research outcome is the development of a bake-hardenable (BH) Mg alloy, in which the strength is substantially increased by a short time aging after press forming. The bake-hardenability is attributed to the dislocation locking by the formation of Cottrell atmosphere and the precipitation hardening effect due to the formation of solute clusters. Based on the clarification of the pinning force of dislocation by solute elements and design strategy to maximize the bake-hardenability and the formability, we succeeded in developing an alloy with the best balance of strength and formability among Mg alloys.

研究分野：微細組織解析

キーワード：マグネシウム合金 時効硬化 成形性 バークハード性 微細組織 塑性加工

### 1. 研究開始当初の背景

モータや電池の搭載により車重が増加する電気自動車時代に車体軽量化は喫緊の課題であり、最軽量の実用金属として知られるマグネシウム合金を車体パネルなどとして使えれば、車体軽量化に極めて有効である。しかし、板材や棒材などの展伸マグネシウム合金には、現在のところ、自動車や鉄道などの輸送機器の車体の材料としての用途が皆無である。その原因の一つに、室温での成形加工が困難であるため、製造コストが現行の構造材料である鉄鋼材料やアルミニウム合金に比べて格段に高いことがあげられる。このような背景から、マグネシウム合金の室温成形性を向上させるための研究が進み、優れた室温成形性を発現するマグネシウム合金が開発されるに至った(図1)。しかし、強度と成形性の間にはトレードオフの関係があることから、成形性の向上に伴い強度は低下し、優れた成形性と高い強度の両者を発現させることが難しかった。

この問題を解決するため、我々は既存の商用展伸マグネシウム合金では強化機構としては使われていなかった時効析出を用いて強化可能な展伸マグネシウム合金の開発に取り組んできた。その結果、図2に示すように、圧延後の溶体化処理により軟化させた状態で、アルミニウム合金に匹敵する優れた室温成形性を発現し、溶体化処理材を時効処理することで、Al合金に匹敵する200MPa程度の高い強度を示す、Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn-0.8Zn (AXMZ1000)合金の開発に成功し(図1)、時効硬化型合金がマグネシウム合金の強度-成形性のトレードオフ関係を打破する上で有効であることを示した。

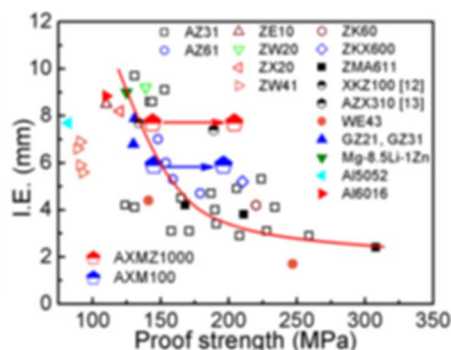


図1: マグネシウム合金の強度 - 成形性のバランス[1]

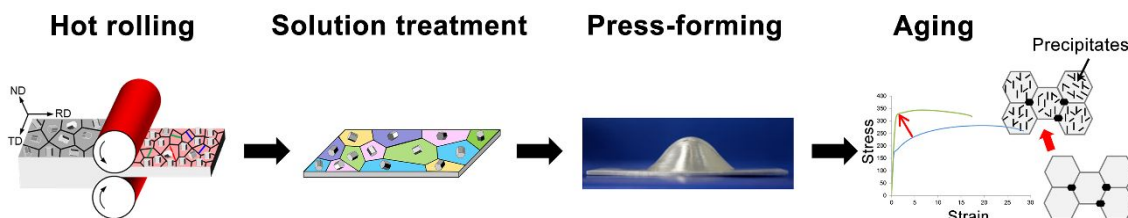


図2: 熱処理型マグネシウム合金の概念図[2]

自動車の車体外板の製造工程では、板材を成形加工した後に塗装し、その後塗装を乾燥させるため、170°Cで20分程度の塗装焼付処理(バークハード処理)と呼ばれる時効処理を行い、現在、自動車車体パネル材料として用いられているAl-Mg-Si(6000系)アルミニウム合金やBH鋼では、この塗装焼付処理中に強度を向上させている。本研究では、この焼付塗装時に成形加工した材料の強度が上がる現象をバークハード性(bake-hardenability, BH)と呼ぶ。現在、商用のマグネシウム合金ではBH性を発現するマグネシウム合金の報告例がないが、我々が開発を進める熱処理型マグネシウム合金を進展させて、優れた成形性を発現し、バークハード処理により高い強度が得られる展伸マグネシウム合金を開発することができれば、大きなインパクトを与えられると考え、BH型展伸マグネシウム合金開発の着想に至った。

### 2. 研究の目的

本研究では、BH性を示す展伸マグネシウム合金の開発に取り組む。開発の過程で、走査型電子顕微鏡(SEM)、透過型電子顕微鏡(TEM)、3次元アトムプローブ(3DAP)を用いた解析を進め、マグネシウム合金におけるBH性の発現メカニズムを明らかにして、自動車材料として用いられる6000系Al合金並みの強度と成形性を有する超軽量Mg合金圧延材を開発する。

### 3. 研究の方法

下記の通り、試料作製、力学特性評価、および微細組織の解析を行った。

**試料作製:** 所望の組成を有する合金を高周波誘導溶解炉にて作製し、これを均質化処理後、熱間圧延を行った。圧延材に対して、溶体化処理、および時効処理を行った。

**力学特性評価:** 溶体化処理材の室温成形性は、エリクセン試験を用いて行った。溶体化処理材、時効処理材の強度やBH性の評価は引張試験を用いて行った。特に、BH性の評価は、溶体化処理材に2%の予ひずみを導入し、その後、170°Cで20分の時効処理を行い、再び引張試験に供し、予ひずみ導入後の時効処理材の0.2%耐力と、2%の予ひずみ導入時の負荷応力との差をBH性と定義した。

**微細組織解析:** 微細組織解析は、X線回折、SEM-EBSD、TEM、3DAPを用いて行った。X線回折、およびSEM観察については、機械研磨により表面を鏡面に仕上げた試料を用い、TEM試料

は、電解研磨とイオン研磨により作製した試料を用いて観察を行った。3DAP 分析については、所望の結晶方位が分析方向に平行となるよう、まず EBSD を用いて試料表面の結晶方位を同定し、その後、所望の領域より FIB/SEM を用いて針状試料を作製した。

#### 4. 研究成果

##### (1) Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn-0.8Zn 合金の BH 性の評価

我々が開発した AXMZ1000 合金、および比較材として商用合金と同一の組成を有する Mg-3Al-1Zn (AZ31)合金を作製して BH 性を評価し、AXMZ1000 合金が BH 性を有することを見出した。

図 3 (a)に示すように、AZ31 合金では、2%の予ひずみを導入する際の負荷応力に比べて、2%の予ひずみを導入後に 170°Cで 20 分の時効処理を行った試料の 0.2%耐力が低下する。一方、AXMZ1000 合金では、図 3 (b)に示すように、2%の予ひずみを導入後に 170°Cで 20 分の時効処理を行った試料の 0.2%耐力は、2%の予ひずみを導入する際の負荷応力に比べて約 40 MPa 程度上昇し、AXMZ1000 合金が BH 性を示す合金であることを明らかにした。

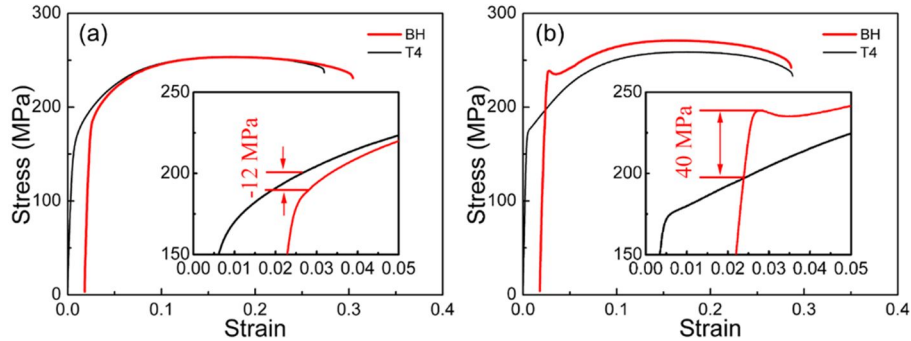


図 3: (a)AZ31 合金と(b)AXMZ1000 合金の引張応力 - ひずみ曲線。溶体化処理材、BH 処理材 (2%予ひずみ導入後 170 °Cで 20 分時効した試料)の応力-ひずみ曲線を各々黒、赤で示す [3]

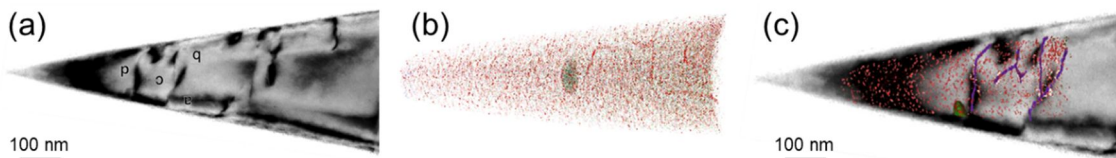


図 4: BH 処理材より得た(a)3DAP 解析試料の明視野 TEM 像、(b)3D アトムマップ、(c) 3D アトムマップと明視野像を重ね合わせた図[3]

そこで、TEM/3DAP 同一視野解析を用いて BH 性発現の起源について検討を行った。2%の予ひずみを導入後に 170°Cで 20 分の時効処理を行った試料から作製した 3DAP 試料の明視野 TEM 像(図 4(a))中の a)~d) で示すように、予ひずみ導入に伴い活動したと考えられる転位が 3DAP 試料の先端近傍に観察される。この領域より 3DAP を用いて取得した 3D 元素マップ(図 4(b))より、転位芯近傍には Ca, Al, Zn の溶質元素が偏析し、母相にはそれらの合金元素が高密度の溶質クラスターが形成していることが理解できる。このような結果から、AXMZ1000 合金における、BH 性は、溶質元素の転位芯への偏析による転位の不動化と、溶質クラスターの形成によることを明らかにすることができた。

##### (2) BH 型マグネシウム合金の開発指針の提案

次に、Zn 添加量の異なる時効硬化型 Mg-xZn-0.3Ca- 0.3Zr (ZKX<sub>x</sub>00, x=1, 2, 3, 4, 5, 6) (wt.%)合金圧延材を作製して BH 量を評価し、BH 性を発現する合金の開発方針について検討を行った。本研究において用いた Mg-Zn-Ca 系合金は、6wt.%の Zn を含む ZKX600 合金は商用合金の組成に近いもので、時効処理によって MgZn<sub>2</sub>(β<sub>1</sub>')相が析出し、Zn 添加量の低減により、強化相は Guinier Preston (G.P.)ゾーンに変化し時効のキネティクスが加速する。そのため、BH 性を発現させるための合金設計を行う上で最適な合金系といえる。

これらの合金に対して BH 性を評価したところ、図 5 に示すように、Zn 添加量が 2%以上では、Zn 添加量の増加に伴って BH 量が低下する傾向にあることが分かった。そこで、TEM と 3 次元アトムプローブを用いて BH 処理を施した ZKX200 合金と ZKX600 合金の微細組織を比較したところ、図 6 (a)に示すように、ZKX200 合金では、2%ひずみを導入した際に活動したと思われる転位に溶質元素の Ca と Zn が偏析し、母相に Ca と Zn よりなる溶質クラスターが形成していることが明らかになった。一方、ZKX600 合金

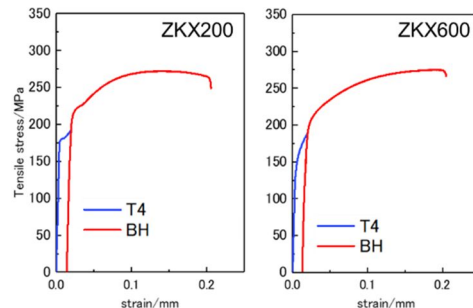


図 5: ZKX200 および ZKX600 合金の引張応力 - ひずみ曲線

では、ひずみ導入時に活動した転位には明確な溶質元素の偏析は見られず、母相に Zn が濃化したクラスタの形成がみられたことから、大きな BH 性は溶質元素の転位芯への偏析と溶質クラスタの形成によりもたらされることが明らかになった(図 6(b))。

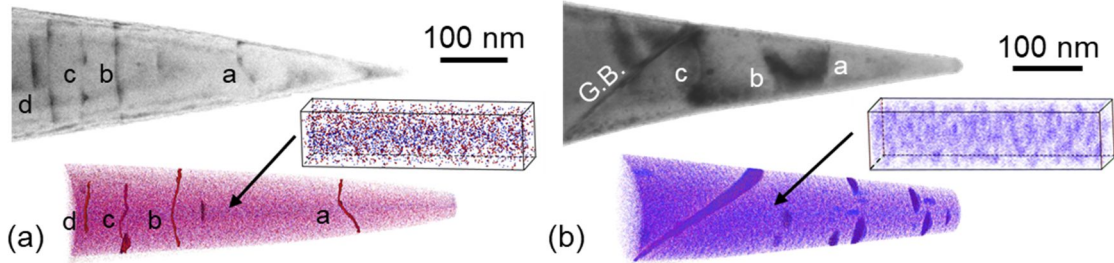


図 6: (a)ZKX200 合金、(b)ZKX600 合金 BH 処理材より作製した 3DAP 解析試料の明視野 TEM 像、3D アトムマップ、母相ないに溶質クラスタが形成していることを示す 3D アトムマップ

加えて、これらの試料の溶体化処理材の室温成形性をエリクセン試験により評価したところ、図 7 に示すように、Zn 添加量の増加とともにエリクセン値が低下する。これは、Zn 添加量の少ない希薄合金では、マグネシウム母相の(0002)面(底面)の集積度が低く、底面が TD 方向に配向した TD-sprig texture が形成されるのに対して、Zn 添加量が増加すると、底面が板厚方向に強く配向し、板厚方向の変形が極めて難しい底面集合組織が形成することが原因である。

以上の結果から、優れた室温成形性を示し、かつ大きな BH 性を発現するマグネシウム合金を開発するには、G.P.ゾーンが強化相として析出し、急速に時効硬化する Mg-Ca-X 系の希薄合金が理想的であることが明らかとなった。これは、我々が当初開発した Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn-0.8Zn (AXMZ1000) 合金は、Zn の微量添加により優れた室温成形性を発現するといった知見に一致する。

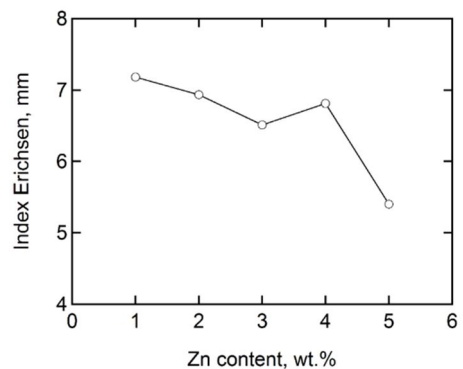


図 7: ZKXx00 合金における Zn 添加量とエリクセン値の関係

### (3) 転位芯への溶質元素の偏析シミュレーション

フェーズフィールドシミュレーションにより、AXMZ1000 合金における転位芯への溶質元素の偏析とそれによる転位の不動化を解析した。フェーズフィールドモデルでは、CALPHAD 法に基づく化学的エネルギー、勾配エネルギー、マイクロメカニクスに基づく弾性ひずみエネルギーを考慮し、Cahn-Hilliard 非線形拡散方程式を解いて全エネルギーの緩和過程を解析することで、母相中の刃状転位に溶質元素が偏析する様子をシミュレートした。時効処理前に  $Al_3Mn_5$  が析出していることを考慮し、母相組成は Mg-0.8Al-0.5Ca-0.8Zn (wt.%) (Mg-0.7Al-0.3Ca-0.3Zn (at.%) )とした。図 8(a)-(c) に示すように、170°C の時効処理において、転位芯近傍にまず Ca が偏析し、その後、Zn, Al の順に偏析する。Zn, Al は余剰原子半面側に、Ca は余剰原子半面と反対側にそれぞれ偏析する。また、図 8(d) に示すように、転位芯への溶質元素の偏析に伴い、せん断応力場が変化する。転位のすべり方向の最大せん断応力を転位の固着力と定義すると、転位芯への溶質元素の偏析量が増加するとともに転位の固着力が増加していることがわかる(図 9)。なお、転位位置の変化と弾性ひずみエネルギー変化の関係を解析することで、ここで定義した転位の固着力が転位の移動に必要な力と関連することを確認している。

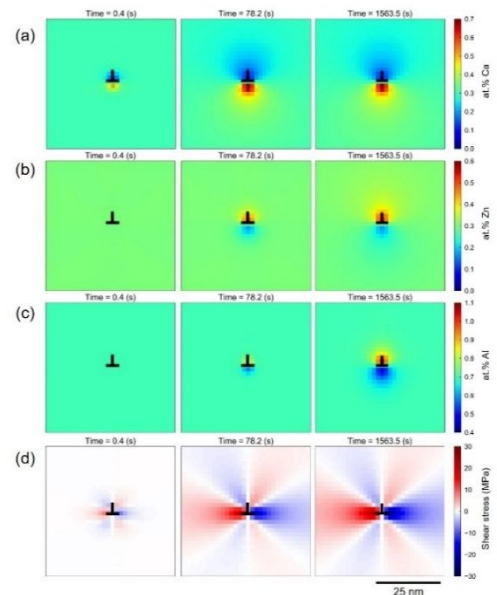


図 8: 170°C の時効処理における転位芯への溶質元素の偏析シミュレーション

転位の固着力の時効処理温度および時間依存性を解析すると、時効処理条件 (170°C、20 分) が多少変化しても、転位の固着力は大きく変化しないことが明らかとなった(図 10: 170°C で 20 分の時効処理を施した場合の転位の固着力を 100% とした場合の等高線を図中に示してある)。さらに、170°C で 20 分の時効処理条件で、Mg-Al-Ca-Zn 系について各溶質元素の組成を 0.3-0.7at.% の範囲で系統的に変化させたシミュレーションを実施した結果、Ca, Zn, Al の順に転位の

固着力に及ぼす影響が大きいことが明らかとなった。

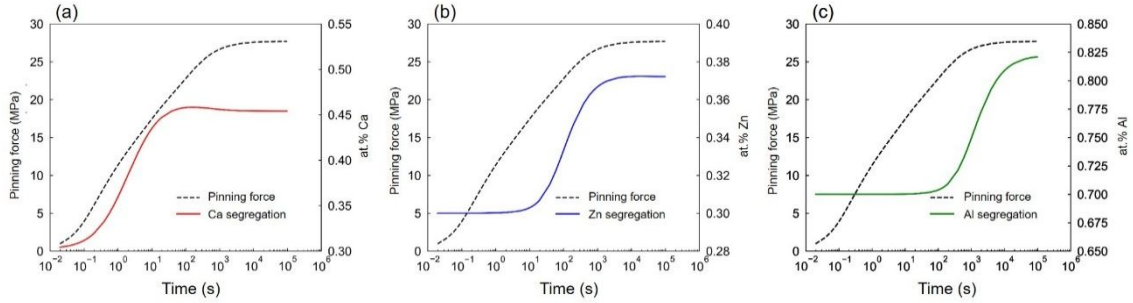


図 9: 170°Cの時効処理における転位芯への溶質元素の偏析量と転位の固着力の変化

#### (4) BH 型マグネシウム合金の開発指針の提案

最後に、上記の知見をもとに、優れた室温成形性と高い強度を発現する BH 型マグネシウム合金の開発に取り組んだ。これまでの知見から、G.P.ゾーンが強化相として析出し、急速に時効硬化する合金が優れた室温成形性を示し、かつ大きな BH 性を示す合金として有望であることが分かった。そこで、Zn の添加量を系統的に変化させた Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn 合金圧延材を作製し、バークハード性や室温成形性の評価を行った。その結果、Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn (AXM100) 合金に 1.6 wt.% の Zn を添加することで、優れた室温成形性と大きな BH 性が得られることが明らかになった。開発した Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn-1.6Zn (AXMZ1002)合金は、溶体化処理材のエリクセン値は

8.2 mm と、極めて高い室温成形性を示し、溶体化処理後、2%の引張ひずみの導入と 170°Cで 20 分の時効処理よりなる BH 処理を施すことで、0.2%耐力は 170MPa から 235MPa まで増加した。この特性は、当初目標とした特性である室温におけるエリクセン値が 8.5 mm、0.2%耐力 250MPa をほぼ満足する特性であり、図 11(b)に示す通り、マグネシウム合金の中でも最高クラスの強度と成形性のバランスを有する。

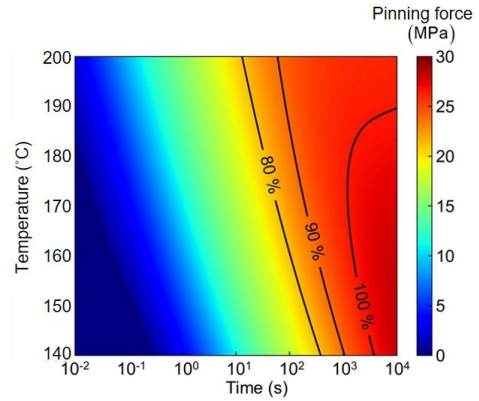


図 10: 転位の固着力の時効処理温度および組成依存性

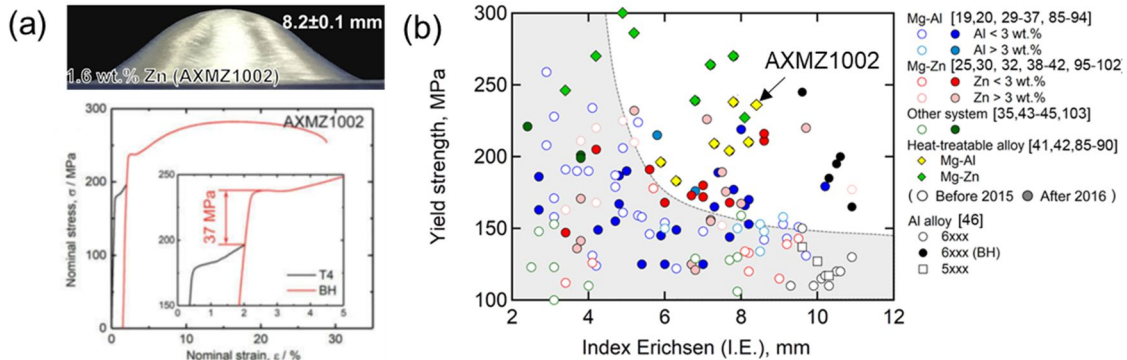


図 11: (a) Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn-1.6Zn (AXMZ1002)合金溶体化処理材のエリクセン試験後の試料外観および BH 性を評価した引張応力 - ひずみ曲線、(b)開発材、およびその他のマグネシウム合金、およびアルミニウム合金の強度と成形性の比較 [2, 4]

以上の通り、本研究では、世界に先がけて BH 性を発現するマグネシウム合金板材の開発に成功し、3DAP と TEM による詳細な微細組織解析から、BH 性の発現の起源が溶質元素の転位芯偏析による転位の不動化と溶質クラスタの形成にあることを明らかにした。そして、実験とフェーズフィールドシミュレーションを用いて BH 量を最大化するための合金設計指針を導出し、溶質元素の転位の固着力に及ぼす影響を明らかにし、得られた知見をもとに、当初目標とした特性をほぼ満足する特性を発現する合金を開発することができた。

#### 参考文献

- [1] M.Z. Bian et al., Scripta Materialia, 138 (2017) 151-155.
- [2] T.T. Sasaki et al., JOM, 73 (2021) 1471-1483
- [3] M.Z. Bian et al., Acta Materialia, 730 (2018) 147-154
- [4] Z.H. Li et al., Journal of Alloys and Compounds, 847 (2020) 156347

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Li Z. H., Sasaki T. T., Shiroyama T., Miura A., Uchida K., Hono K.	4. 巻 8
2. 論文標題 Simultaneous achievement of high thermal conductivity, high strength and formability in Mg-Zn-Ca-Zr sheet alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Research Letters	6. 最初と最後の頁 335 ~ 340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21663831.2020.1759718	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Li Z.H., Sasaki T.T., Bian M.Z., Nakata T., Yoshida Y., Kawabe N., Kamado S., Hono K.	4. 巻 847
2. 論文標題 Role of Zn on the room temperature formability and strength in Mg-Al-Ca-Mn sheet alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 156347 ~ 156347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2020.156347	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Li Z. H., Sasaki T. T., Bian M. Z., Nakata T., Yoshida Y., Kawabe N., Kamado S., Hono K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of Zn Additions on the Room Temperature Formability and Strength in Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn Alloy Sheets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Magnesium Technology 2020	6. 最初と最後の頁 105 ~ 111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-36647-6_18	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakata T., Li Z.H., Sasaki T.T., Hono K., Kamado S.	4. 巻 804
2. 論文標題 Room-temperature stretch formability, tensile properties, and microstructures of precipitation hardenable Mg-6Zn-0.2Ca (mass%) alloy sheets micro-alloyed with Ce or Y	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering: A	6. 最初と最後の頁 140563 ~ 140563
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.msea.2020.140563	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sasaki T. T., Bian M.-Z., Li Z. H., Hono K.	4. 巻 73
2. 論文標題 Toward Development of Strong and Formable Magnesium Alloy Sheets with Bake-Hardenability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JOM	6. 最初と最後の頁 1471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11837-021-04613-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Z.H. Li, T.T. Sasaki, T. Shiroyama, A. Miura, K. Uchida, K. Hono	4. 巻 -
2. 論文標題 Simultaneous achievement of high thermal conductivity, high strength and formability in Mg-Zn-Ca-Zr sheet alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Zheng Ruixiao, Bhattacharjee Tilak, Gao Si, Gong Wu, Shibata Akinobu, Sasaki Taisuke, Hono Kazuhiro, Tsuji Nobuhiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Change of Deformation Mechanisms Leading to High Strength and Large Ductility in Mg-Zn-Zr-Ca Alloy with Fully Recrystallized Ultrafine Grained Microstructures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 11702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-48271-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Li Z. H., Sasaki T. T., Bian M. Z., Nakata T., Yoshida Y., Kawabe N., Kamado S., Hono K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of Zn Additions on the Room Temperature Formability and Strength in Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn Alloy Sheets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Magnesium Technology 2020	6. 最初と最後の頁 105 ~ 111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-36647-6_18	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Nakata, C. Xu, Y. Uehara, T.T. Sasaki, S. Kamado	4. 巻 782
2. 論文標題 Origin of texture weakening in a rolled ZEX4101 alloy sheet and its effect on room temperature formability and tensile property	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 304 ~ 314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2018.12.194	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M.-Z. Bian, T.T. Sasaki, T. Nakata, Y. Yoshida, N. Kawabe, S. Kamado, K. Hono	4. 巻 158
2. 論文標題 Bake-hardenable Mg-Al-Zn-Mn-Ca sheet alloy processed by twin-roll casting	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 278 ~ 288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2018.07.057	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M.-Z. Bian, T.T. Sasaki, T. Nakata, S. Kamado, K. Hono	4. 巻 730
2. 論文標題 Effects of rolling conditions on the microstructure and mechanical properties in a Mg-Al-Ca-Mn-Zn alloy sheet	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering A	6. 最初と最後の頁 147 ~ 154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.msea.2018.05.065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 .J. Bhattacharyya, T.T. Sasaki, T. Nakata, K. Hono, S. Kamado, and S.R. Agnew	4. 巻 171
2. 論文標題 Determining the strength of GP zones both parallel and perpendicular to the zone	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 231 ~ 239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2019.04.035	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する



1. 著者名 佐々木泰祐、宝野和博	4. 巻 69
2. 論文標題 時効析出を用いたマグネシウム展伸合金の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 軽金属	6. 最初と最後の頁 217 ~ 222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計27件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Zehao Li, Taisuke Sasaki, Kazuhiro Hono, Ming-zhe Bian, Taiki Nakata, Shigeharu Kamado, Yu Yoshida, Nozomu Kawabe
2. 発表標題 Effects of Zn additions on the room temperature formability and strength in Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn alloy sheets
3. 学会等名 TMS 2020 Annual Meeting&Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zehao Li, Taisuke Sasaki, Asuka Miura, Ken-ichi Uchida, Taisuke Shiroyama, Kazuhiro Hono
2. 発表標題 Atomic-scale investigation for microstructure-conductivity correlation in a thermal conductive Mg-Zn-Ca-Zr sheet alloy
3. 学会等名 日本金属学会第春期(166回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木泰祐、ビャンミンジェ、リーゼハオ、宝野和博
2. 発表標題 高強度高成形性マグネシウム合金板材の開発
3. 学会等名 日本金属学会第春期(166回)講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 リーゼ八オ、佐々木泰祐、ビャンミンジェ、中田大貴、吉田雄、河部望、鎌土重晴、宝野和博
2. 発表標題 Mg-Al-Ca合金圧延材の特性と組織に及ぼすZn添加の影響
3. 学会等名 軽金属学会 第138回春期大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zehao Li, Taisuke Sasaki, Du Chen, Kang Wang, Bi-Cheng Zhou, Kazuhiro Hono
2. 発表標題 Precipitation sequence in a Mg-0.3Ca-0.6Zn alloy
3. 学会等名 日本金属学会 秋期(第167回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木泰祐、ビャンミンジェ、リーゼ八オ、中田大貴、鎌土重晴、宝野和博
2. 発表標題 高強度高成形性マグネシウム合金板材の開発
3. 学会等名 MRM フォーラム2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jhe-Yu Lin, Taisuke Sasaki, Nozomu Adachi, Yoshikazu Todaka, Kazuhiro Hono
2. 発表標題 Effect of grain size on the age-hardening behavior in Mg-Zn-Ca-Zr alloy
3. 学会等名 日本金属学会 秋期(第167回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taisuke Sasaki, Zehao Li, Kazuhiro Hono
2. 発表標題 Achieving excellent room temperature formability and high strength in wrought magnesium alloy sheets
3. 学会等名 TMS2021 150th Annual Meeting & Exhibition (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Li Zehao, Taisuke Sasaki, Si Gao, Nobuhiro Tsuji, Kazuhiro Hono
2. 発表標題 Role of Zn on the yielding behavior in Mg-Al-Ca based dilute alloys
3. 学会等名 日本金属学会2021年春期(第168回)講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木泰祐、パンミンジェ、リーゼハオ、宝野和博
2. 発表標題 高強度高成形性マグネシウム合金板材の開発
3. 学会等名 日本金属学会2021年春期(第168回)講演会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zehao Li, Taisuke Sasaki, Kazuhiro Hono, Ming-zhe Bian, Taiki Nakata, Shigeharu Kamado, Yu Yoshida, Nozomu Kawabe
2. 発表標題 Achieving excellent room temperature formability by tailoring texture in a novel bake-hardenable magnesium alloy sheet
3. 学会等名 International Conference on Textures of Materials (ICOTOM19)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森祥吉、塚田祐貴、小山敏幸
2. 発表標題 Mg合金の転位偏析に対するフェーズフィールド解析
3. 学会等名 日本金属学会第167回講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木泰祐
2. 発表標題 軽金属材料の3DAP解析と合金開発への展開
3. 学会等名 日本学術振興会材料の微細組織と機能性第133委員会 第244回研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Li Zehao、佐々木泰祐、ピャンミンジェ、中田大貴、鎌土重晴、吉田雄、河部望、宝野和博
2. 発表標題 Effects of Zn additions on the room temperature formability and strength in Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn alloy sheets
3. 学会等名 日本金属学会第165回講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Z.H. Li, T.T. Sasaki, M.-Z. Bian, T. Nakata, Y. Yoshida, S. Kamado, K. Hono
2. 発表標題 Effects of Zn additions on the room temperature formability and strength in Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn alloy sheets
3. 学会等名 TMS 2020 Annual meeting and exhibition (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木泰祐
2. 発表標題 高強度高成形性マグネシウム合金板材の開発
3. 学会等名 日本金属学会第166回講演大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Li Zehao、佐々木泰祐、三浦飛鳥、城山泰祐、内田健一、宝野和博
2. 発表標題 Atomic-scale investigation for microstructure-conductivity correlation in a thermal conductive Mg-Zn-Ca-Zr sheet alloy
3. 学会等名 日本金属学会第166回講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森祥吉、塚田祐貴、小山敏幸
2. 発表標題 Mg合金における溶質元素の転位偏析シミュレーション
3. 学会等名 日本金属学会第165回講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M.-Z. Bian, T.T. Sasaki, T. Nakata, S. Kamado, K. Hono
2. 発表標題 Microstructural evolution and mechanical properties of a bake-hardenable Mg-Zn-Ca-Zr sheet alloy Microstructural evolution and mechanical properties of a bake-hardenable Mg-Zn-Ca-Zr sheet alloy
3. 学会等名 日本金属学会第163回講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉光悠之、佐々木泰祐、BIAN Ming-Zhe、中田大貴、大久保忠勝、鎌土重晴、宝野和博
2. 発表標題 Mg-Zn-Ca-Zr合金の焼付硬化性に及ぼすZn添加量の影響
3. 学会等名 日本金属学会第163回講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M.-Z. Bian, T.T. Sasaki, T. Nakata, Y. Yoshida, N. Kawabe, S. Kamado, K. Hono
2. 発表標題 Twin-roll cast bake-hardenable AXMZ1000 sheet alloy Twin-roll cast bake-hardenable AXMZ1000 sheet alloy
3. 学会等名 The 11th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Bhattacharyya, T.T. Sasaki, T. Nakata, S. Kamado, K. Hono
2. 発表標題 First-ever assessment of GP zone strength parallel and perpendicular to the zone First-ever assessment of GP zone strength parallel and perpendicular to the zone
3. 学会等名 The 11th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.T. Sasaki, M.-Z. Bian, Y. Yoshimitsu, T. Nakata, T. Ohkubo, S. Kamado, K. Hono
2. 発表標題 Development of heat-treatable Mg-Zn-Ca sheet alloy with high strength and excellent room temperature formability Development of heat-treatable Mg-Zn-Ca sheet alloy with high strength and excellent room temperature formability
3. 学会等名 The 11th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉光悠之、佐々木泰祐、中田大貴、鎌土重晴、大久保忠勝、宝野和博
2. 発表標題 Zn 添加量の最適化による高強度高成形性ベークハード型 Mg-Zn-Ca-Zr 合金の開発 Zn 添加量の最適化による高強度高成形性ベークハード型 Mg-Zn-Ca-Zr 合金の開発
3. 学会等名 軽金属学会第134回春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Bian Ming-Zhe、佐々木泰祐、中田大貴、吉田雄、河部望、鎌土重晴、宝野和博
2. 発表標題 焼付硬化性Mg-1.3Al-0.8Zn-0.7Mn-0.5Ca合金板材の開発
3. 学会等名 軽金属学会第134回春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M.-Z. Bian, T.T. Sasaki, T. Nakata, S. Kamado, K. Hono
2. 発表標題 APT/TEM analyses of solute segregations along dislocations and solute clustering in bake-hardenable magnesium alloy
3. 学会等名 Atom Probe Tomography and Microscopy 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木泰祐、大久保忠勝、宝野和博
2. 発表標題 Helios G4 UX を用いたTEM・3DAP解析用試料の作製とTitan200、3DAPを用いた原子レベル微細組織解析
3. 学会等名 サーモフィッシャーサイエンティフィックマテリアルサイエンスセミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

## 〔図書〕 計1件

1. 著者名 河村能人、千野靖正	4. 発行年 2020年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 338
3. 書名 マグネシウム合金の最先端技術と応用展開	

## 〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 マグネシウム合金時効処理材及びその製造方法、並びにそれを使用したOA機器、輸送機器及びその部品	発明者 リーゼ八才、佐々木泰祐、宝野和博、城山泰祐	権利者 物質・材料研究機構/エルジーエレクトロニクス
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-219147	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

## 〔取得〕 計0件

## 〔その他〕

秘密はこの粒！ 誕生 室温プレス可能なマグネシウム合金 (You tube 動画) <a href="https://www.youtube.com/watch?v=1KTn7XqSI10&amp;t=3s">https://www.youtube.com/watch?v=1KTn7XqSI10&amp;t=3s</a>
--

## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	塚田 祐貴 (TSUKADA Yuhki)  (00620733)	名古屋大学・工学研究科・准教授  (13901)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	宝野 和博 (HONO Kazuhiro)		



6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	リー ゼハオ  (LI Zehao)		
研究協力者	ビャン ミンジェ  (BIAN Ming-Zhe)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
	米国	University of Virginia	Johns Hopkins University	University of Tennessee
ドイツ	Helmholtz Zentrum Geestacht			