

高速変形でも壊れにくいマグネシウム合金の開発

～市販アルミニウム合金に匹敵する変形能を実現 自動車などの軽量化貢献に期待～

配布日時：平成30年1月24日14時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構（NIMS）

概要

1. NIMSは、高速で圧縮しても壊れずに変形できるマグネシウム合金の開発に成功しました。市販のアルミニウム合金に匹敵する変形能を持ちつつ、アルミニウム合金より軽量であるため、自動車をはじめとする多様な部材の軽量化に貢献することが期待されます。

2. マグネシウムは、実用金属材料の中で最も軽く、自動車や鉄道車両などを軽量化できる金属材料として注目されています。室温で大きな力を加えると、瞬時に壊れてしまう欠点がありましたが、研究チームは昨年、マグネシウムに微量のマンガンを添加することで、力を加えても急には壊れず、樽状に変形できるマグネシウム合金の開発に成功しています^[1]。ただし、この性質は、力を加える速度が遅い場合のみに限られ、落下や衝突など高速で力が加わった場合にも壊れない性能が求められていました。

3. 今回、研究チームは、マンガンに代えて、極微量のビスマスを追加したマグネシウム合金を作成しました。この開発材を、室温で、一般的な評価速度よりも100倍程度速い速度で圧縮したところ、急には壊れず、樽状に変形できることが分かりました（下図）。破壊に対する吸収エネルギーは、市販のマグネシウム合金に比べて5倍以上優れており、市販のアルミニウム合金に匹敵します。開発材の内部を詳細に観察したところ、添加したビスマスがマグネシウムの結晶粒の間に存在しませんでした。マンガンを添加した場合、粒界に微量にマンガンが存在していましたが、それに比べて結晶粒が互いに滑りあう粒界すべりが、更に促進されたと考えられます。

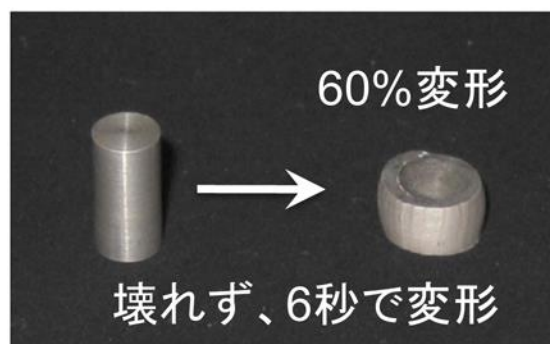


図1：室温で圧縮し、樽状に変形した開発材。試験速度は0.8mm/s。

4. 軽量のマグネシウム合金が、室温でも高速で壊れることなく変形できるようになったことから、自動車や車いす、鉄道車輛の座席、自転車のフレームなど、用途の拡大が期待されます。また、プレス加工に代表される二次加工に関しても、加工温度の低温化（省エネルギー化）や、加工装置にかかるコスト低減などへの効果も期待できます。様々な部位や分野で使用できるように、今後は、素材のスケールアップ化と、さらなる高強度化と高速度変形化の両立を目指します。

5. 本研究は、国立研究開発法人物質・材料研究機構 構造材料研究拠点の染川英俊グループリーダーらによって行われました。本研究成果は、Scientific Reports 誌にて2018年1月12日に掲載されました。

研究の背景

昨今の地球温暖化対策として、自動車や鉄道車輛など輸送機器の車体、部材を軽量化し、燃費を向上して二酸化炭素排出量を低減することが、世界的規模で要求されています。現在、これら輸送機器に使用されている金属材料の大部分は、鉄鋼材料やアルミニウム合金、チタン合金です。一方で、マグネシウムの密度は1.74で、アルミニウムの密度(=2.70)と比較して2/3、チタン(=4.51)の2/5、鉄(=7.87)の2/7以下と、実用金属材料の中で最軽量です。そのため、既存の部材をマグネシウムおよびマグネシウム合金に代替することで、得られる軽量化の効果は非常に大きいことが分かります。しかし、現時点では、マグネシウムやマグネシウム合金を様々な部材に適応するためには問題があります。例えば、大きな力を加えた時に、急に壊れる(=脆い)ことや、任意の形状に加工しにくいこと、などが挙げられます。

従来の取組と前回開発合金^[1]との違い

マグネシウムおよびマグネシウム合金の加工のしにくさや脆さを改善する昨今の取組として、希土類元素添加などの合金化や、押出や圧延などの加工方法を制御する手法が盛んですが、現時点では、抜本的な問題の解決には至っていません。本研究チームは、金属材料の従来の変形メカニズム^[3]とは異なり、粒界すべり^[2]に着目し、活用していることに、独創性と新規性があります。通常、粒界すべりは、金属材料を加工しやすい水飴のような「超塑性」を引き起こします。ただし、温度を高温にする必要があります。前回の合金開発時^[1]に、本研究チームは、適切な添加元素を選択し、添加した元素が結晶粒界^[4]に凝集(=偏析^[4]と言います)する特性を活用し、『室温』でも粒界すべりが起こりやすい状態を作ること成功しています。しかし、前回の開発合金は、速度が遅い場合にのみ、これらの現象を観察することができず、落下や衝突などを想定した変形速度が速い部材には使いづらいなどの問題が残っていました。

また、原子が観察できるくらいのミクロレベルな視点では、粒界偏析^[4]は、結晶粒界に異物、すなわち添加した元素が存在することになり、マグネシウムの立場からは好ましくありません。「室温」粒界すべりを、より一層活性化させ、高速度でも可能にするためには、粒界偏析を活用しないことが、一つの解決策と考えられます。それには、合金化するのではなく、純マグネシウムを使用することが良いと想像できます。しかし、合金化しない/していない金属材料は、安心安全の根幹である素材の強度(=つよさ)を担保することができません。多様な部材への使用や適応を考えると、合金化は必須で、粒界偏析を起こさないマンガンに代わる添加元素の探索が重要であると言えます。

研究内容と成果

本研究では、マグネシウムに極微量(0.3at.%:原子1000個のうち3個)のビスマスを追加したマグネシウム合金鑄造材を準備しました。その後、鑄造材を100℃程度に加熱して押出加工を行い、結晶粒^[4]のサイズを5μm以下にしました(図2(a))。開発材の詳細な微細組織観察から、添加したビスマスは、結晶粒に存在しているだけでなく、白破線で示すようにマグネシウムと結合して粒子を形成しています(図2(b))。しかし、前回の開発合金(Mg-Mn合金)^[1]と異なり、結晶粒界^[4]にビスマスが偏析^[4]していません。また、図2(c)からも、結晶粒界には異物がなく、シャープな結晶粒界であることも分かります。

開発材から、機械加工によって高さ8mm、直径4mmからなる円柱形試験片を作製し、室温で圧縮試験を実施しました。開発材との比較を行うために、市販のマグネシウム合金押出材(Mg-3Al-1Zn:既存材)、前回開発マグネシウム合金押出材(Mg-Mn合金:比較材)、市販のアルミニウム合金押出材(Al-Mg系合金(A5083)とAl-Mg-Si系合金(A6062):比較材)も使用しました。試験速度は、一般的な評価速度である0.008mm/sと、それに対して100倍速い0.8mm/sとしました。以下、準静的速度、高速度と記します。図3には、圧縮試験によって得られた、試験片に加えた力vs.試験片の変形量を表した曲線(=応力vs.ひずみ曲線)を示しています。また、高速度試験後の典型的な外観写真も併記しています。既存材の場合、試験速度に関係なく、試験開始とともに応力が急激に上昇し、破壊に至っています。試験後の外観写真から、試験片が45度方向に分断されており、非常に脆いことが分かります。一方、開発材では、試験速度を変化(高速化)させても、曲線の様相は同じで、急激な応力の変化が起こっていません。60%の圧縮変形(=ひずみ)を付与しても、ほぼ一定の応力で変形が推移しています。外観写真より、試験片は、き裂やクラックなどなく、樽形状を呈していることから、本開発材は、壊れにくく、変形しやすいことが確認できます。図3には、比較のために、前回の開発合金材であるMg-Mn合金の結果も併記しています。準静的試験速度時のMg-Mn合金は、本開発材と同様の様相を示しています(図3(a))。しかし、高速度試験では、

45%まで変形させると、応力の低下が起こり、試験片は壊れます(図3(b))。高速度時の変形能に関して、本開発材の優位性を確認することができます。

図3に示す応力 vs. ひずみ曲線に囲まれた面積が、破壊に対する吸収エネルギーに相当します。各面積を計算すると、本開発材の高速度時の吸収エネルギー特性は、既存材と比較して5.6倍以上優れていることが分かりました。また、開発材の吸収エネルギー特性は、市販のアルミニウム合金に匹敵することも分かりました。**試験速度に関係なく、変形しやすく、破壊に対して優れた吸収エネルギー特性をもつマグネシウム合金は、今まで確認されておらず、世界で初めての報告です。**

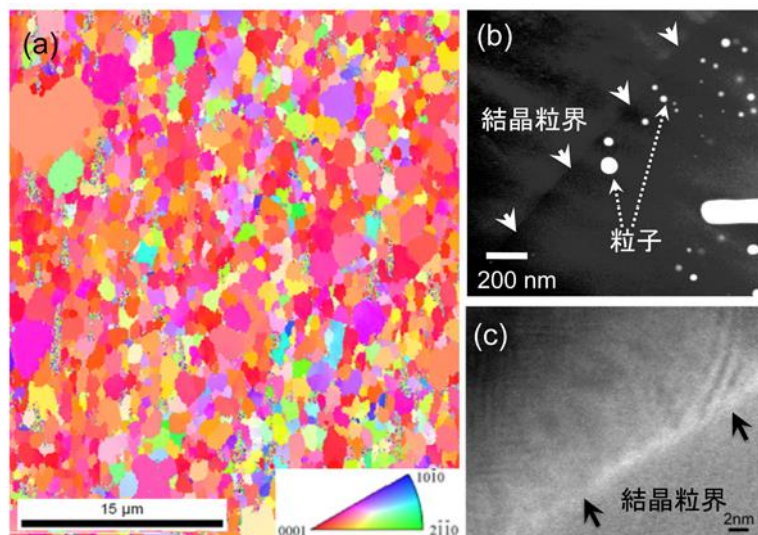


図2:開発材の微細組織観察例
(a) EBSD 観察によって得られたマグネシウムの結晶粒サイズと結晶方位(同じコントラストからなる集合体为一个の結晶粒)
(b)Z コントラスト像で、ビスマス元素が存在する箇所は、白色のコントラスト
(c)高分解能 TEM 観察によって得られた粒界近傍の組織

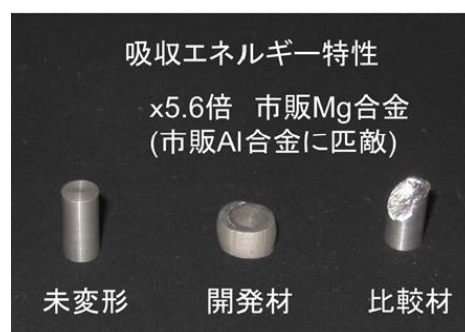
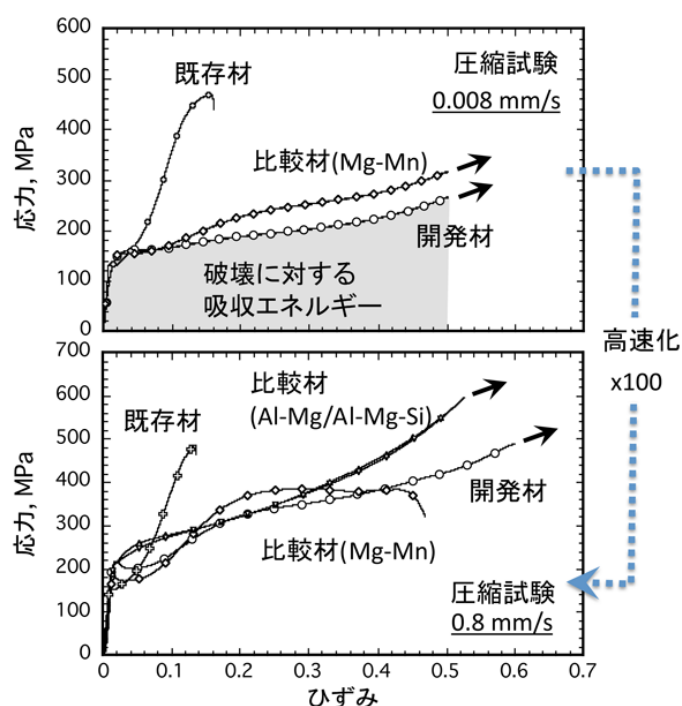


図3:室温圧縮試験によって得られた応力 vs. ひずみ曲線
左上:準静的速度-0.008mm/s
左下:高速度-0.8mm/s
右上:高速試験後の外観写真
なお、応力 vs. ひずみ曲線によって囲まれた面積(グレー部)は、破壊に対する吸収エネルギーに相当

本開発材は、ビスマスが結晶粒界^[4]に偏析^[4]しませんが、その理由について検討しました。マグネシウムに溶ける(=固溶と言います)元素を対象に、第一原理計算によって得られた粒界偏析のしやすさ/しにくさの結果を図4に示します。図の負値を示す元素は、粒界偏析が起こりやすく、正値を示す元素は、粒界偏析が起こりにくいことを意味しています。マグネシウムに固溶する元素は、ビスマスに限らず、負値を示し、粒界偏析が起こりやすい元素であることが分かりました。しかし、ビスマスは、図2(b)の観察結果と異なります。押出や圧延加工時の温度 vs. 添加元素が固溶できる量の関係を、図5に、模式的に示します。添加元素によって、曲線の傾きなどは変化しますが、水に対する食塩や砂糖と同じように、温度上

昇にともなって固溶できる量は増加します。加工温度において、元素の添加量が固溶量以上である場合（図5(b)）、添加した元素は過飽和状態になり、粒子を形成します。他方、添加量が固溶量以下であると（図5(a)）、添加した元素は、固溶した状態を示します。しかし、図4に示す計算結果で、負値をとる元素を添加した場合、原子レベルでは、結晶粒界に偏析する傾向にあります。これは、前回の開発合金である Mg-Mn 合金^[1]に該当します。本開発材の場合、開発合金の押出温度が 100℃程度で、ビスマスの添加量が、固溶量以上であることを特徴とします。そのため、粒界偏析が起こる前に、ビスマスは、マグネシウムと結合し、粒子を形成してしまいます。以上のことから、粒界偏析が本開発材から確認できない要因は、加工温度と固溶量の関係にあります。

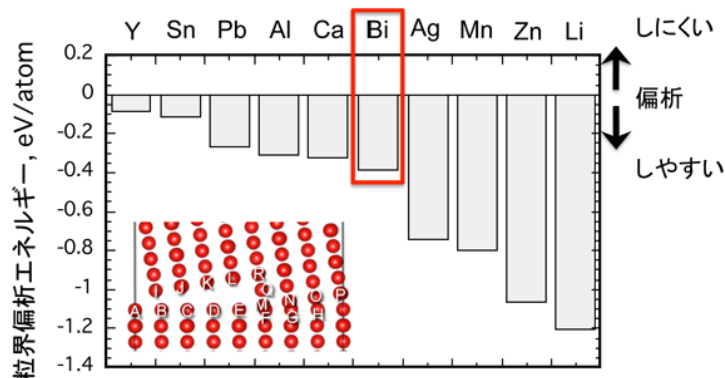


図4：マグネシウムに固溶する元素を対象に、第一原理計算によって得られた粒界偏析のしやすさ/しにくさの結果
縦軸の正・負値：粒界偏析が起こりにくい/起こりやすいを意味
図内左下は、第一原理計算に用いた結晶粒界のモデル

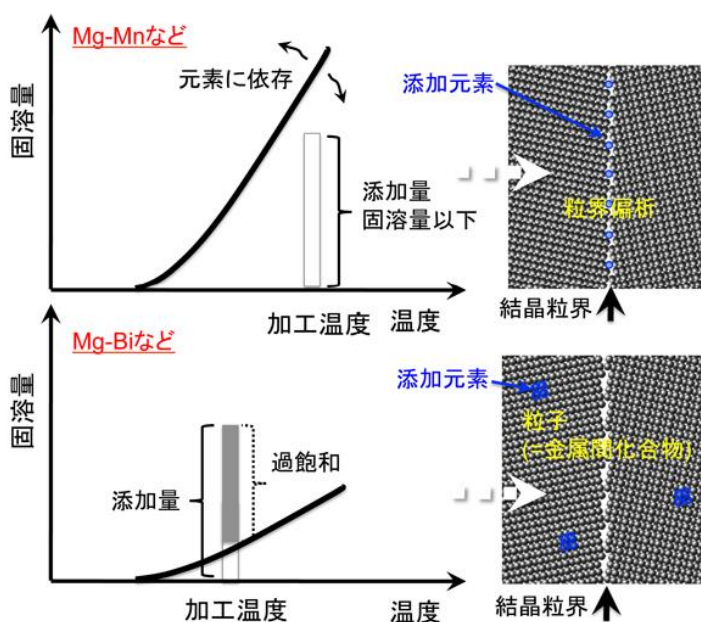


図5：素材一次加工時の温度 vs. 添加元素が固溶できる量の関係

上段：添加量が固溶量以下の場合（前回開発合金などに相当）
下段：添加量が固溶量以上の場合（本開発合金などに相当）

今後の展開

本開発材の最大の特徴は、次の三点です。

- ・変形速度に関係なく、大きな力を付与しても、瞬時に壊れず、樽状に変形する
- ・市販のアルミニウム合金に匹敵する吸収エネルギー特性がある
- ・安価な元素（ビスマス）を微量に添加すること

希土類の様な高価な元素を添加するのではなく、安価な元素を微量に添加するため、素材価格の高騰を抑制することができます。また、高速変形であっても、壊れにくいことから、落下や衝突などを想定した部材に対しても、安心安全を確保したマグネシウム合金材の提供が期待できます。また、プレス加工に代表される二次加工に関する改善が考えられます。アルミニウム合金では、室温で複雑な形状に加工を行います。しかし、マグネシウムの場合は、100℃以上に加熱する必要があるため、エネルギー消費や装置寿命・劣化の問題があります。本成果の活用により、プレス加工をはじめとする二次加工温度の低温化（省エネルギー）

一化) や装置にかかるコスト低減などへの効果も期待できます。

一方、安心安全を追求するためには、破壊に対する吸収エネルギー特性の更なる向上は必要不可欠です。そのためには、図3の面積部分の拡大が重要で、特に、試験片を変形させるために必要な力(=図3の縦軸の値)を大きくすることが効果的です。マグネシウムに対する添加元素の役割や機能を理解しながら、添加元素の探索や、加工熱処理条件を見直し、結晶粒のサイズや結晶粒界の構造など内部組織の最適化は、引き続き検討しなければいけない必須課題です。また、本開発材の形状は、長さが1000mm以上ですが、直径が10mm以下です。多様な部材への展開を考えると、素材のスケールアップ化も今後解決しなければいけない課題です。

掲載論文

題目: Excellent room temperature deformability in high strain rate regimes of magnesium alloy

著者: H. Somekawa, A. Singh, R. Sahara and T. Inoue

雑誌: Scientific Reports

掲載日時: 2018年1月12日オンライン掲載

用語解説

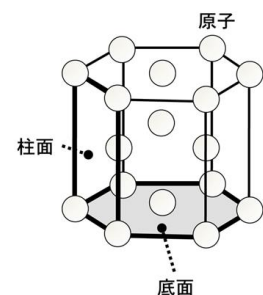
[1] 前回の開発合金

<http://www.nims.go.jp/news/press/2017/05/201705261.html>

金属材料には様々な元素を添加しますが、押出加工をはじめとする加工熱処理時に、添加した元素が結晶粒界に偏析し、強さや硬さなどの機械的特性に影響を及ぼすことが多いです。マグネシウム合金も他の金属材料と同様に、粒界偏析が起こることは既に報告されていますが、機械的特性や、変形メカニズムに対する効果に関しては全く不明でした。研究チームは、マンガンやアルミニウムなど、マグネシウムに溶けることができる元素の効果を系統的に調査しました。その結果、殆どの元素は、粒界すべりを抑制する働きを示しましたが、マンガンが粒界偏析した場合のみ、『室温』粒界すべりを促進することを究明しました。

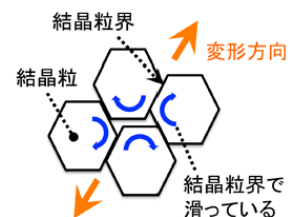
[2] 金属材料の従来の変形メカニズム

通常、室温でアルミニウム合金や鉄鋼材料などの金属材料に力を加えた場合、結晶粒の内部で転位と呼ばれる変形が起こります。この転位は、原子が稠密に配列する方向に変形しやすいですが、六方晶格子(右図)からなるマグネシウムやマグネシウム合金は、底面の原子配列が稠密で、それ以外の面は希薄です。そのため、転位だけで変形を担うことができず、双晶と呼ばれる格子の回転が起こります。



[3] 粒界すべり

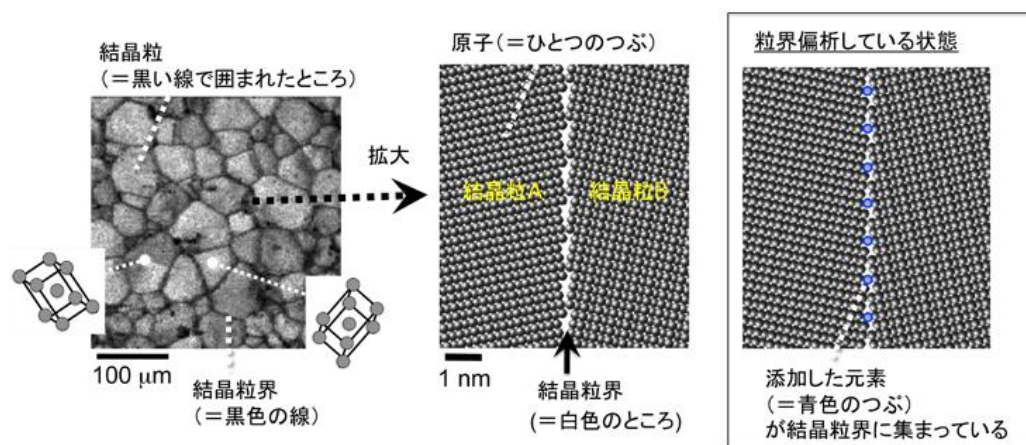
結晶粒が互いに滑りあうこと。各々金属材料には融点がありますが、通常、その半分以上の温度に加熱すると観察しやすくなります。また、粒界すべりが起こることによって、金属材料は、ゴムや水飴のように変形すること(=超塑性)ができます。粒界すべりは、結晶粒界の割合が大きい、言い換えると、結晶粒サイズが微細であるほど、起こりやすいです。



通常、融点の半分以上でおこる

[4] 結晶粒、結晶粒界、粒界偏析

金属の原子が規則正しく並んだ小さな塊を「結晶粒」とよび、結晶粒と結晶粒の間にできた隙間が、「結晶粒界」といいます。また、この隙間に、他の元素が入り込んでいることを「粒界偏析」といいます。



本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 基盤技術分野 軽金属材料創製グループ
グループリーダー 染川英俊 (そめかわ ひでとし)

E-mail: SOMEKAWA.Hidetoshi@nims.go.jp

TEL: 029-859-2473 URL: http://samurai.nims.go.jp/SOMEKAWA_Hidetoshi-j.html

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp