

高い衝撃吸収力を持つマグネシウム合金の開発

～蛇腹状に変形可能となり実現 軽量で加工がしやすく自動車などへの応用に期待～

配布日時：平成29年5月26日14時
国立研究開発法人 物質・材料研究機構

1. 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は、室温で、鍵盤アコーディオンのような蛇腹状に変形可能なマグネシウム合金の開発に成功しました。軽量かつ安全性の高い金属材料として、自動車などの軽量化に貢献することが期待されます。

2. マグネシウムやマグネシウム合金は、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するための材料として注目されています。しかし、室温では、大きな力（ちから）を加えてもわずかに塑性変形するだけで、瞬時に壊れてしまいます。そのため、安全上、自動車などの部材としては使いづらいうことや、複雑な形状に加工できない、などの問題がありました。

3. 今回、研究チームは、極微量のマンガンを添加したマグネシウム合金を開発し、200℃程度で「とろてん」のように材料を押し出して加工しました。この開発材を使って、室温で大きな力を加えた際の変化を、市販のマグネシウム合金と比較したところ、市販材は斜めにき裂が入り、いきなり壊れてしまいますが、開発材は急には壊れず、蛇腹状（および樽状）に変形できることが分かりました（下図および図4）。この結果は、力を加えても、クッションのようにエネルギーを吸収することで破壊が起こりにくいことを示唆しています。実際に、開発材の破壊に対する吸収エネルギーを調べたところ、既存材に比べて3倍以上優れていました。これらの現象は、押出加工によって小さくなった結晶粒の間にマンガンが集まって、結晶粒が互いに滑りあう粒界すべり^[1]が促進されて起こることが分かりました。

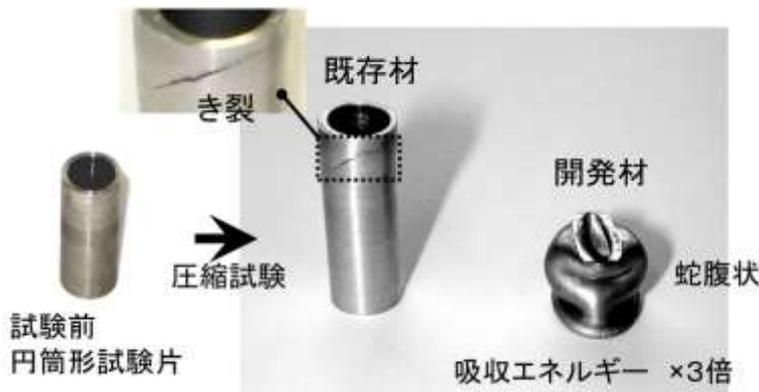


図1：円筒形試験片を用いた場合の圧縮試験後の外観写真

既存材は、上部でき裂を形成していますが、開発材は、蛇腹状に変形できることがわかります。

4. 色々な方向から力を加えても、瞬時に破壊に至らず、変形しやすくなることから、自動車や車いす、鉄道車輛の座席、自転車のフレームなどの軽量化が期待できます。今後この成果をもとに、安心・安全を確保するための衝撃吸収マグネシウム合金や、室温で複雑な形状に加工できるマグネシウム合金としての応用を目指していきます。

5. 本研究成果は、日本金属学会欧文誌「Materials Transaction」のオンラインで早期公開（2017年5月26日0時）され、2017年6月25日発行号（Vol. 58, Issue 7）にて掲載されます。

研究の背景

昨今の地球温暖化対策として、自動車や鉄道車両をはじめとする車体、部材軽量化による二酸化酸素排出量の低減が、世界的規模で要求されています。現在、身の回りで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、既存や新規部材をマグネシウムおよびマグネシウム合金に代替、適応することで、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。

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)のマンガンを添加したマグネシウム合金鋳造材を準備しました。その後、鋳造材を200°C程度に加熱して押出加工を行い、結晶粒^[2]のサイズを5 μm 以下にしました(図2(a))。また、開発材の詳細な微細組織観察から(図2(b))、マンガンは結晶粒^[2]に存在しているだけでなく、結晶粒界に凝集(=偏析^[2]といいます)していることを確認しています。なお、本研究が上手くいくには、結晶粒^[2]のサイズが小さくて(望ましくは10 μm 以下)、マンガンが結晶粒界^[2]に偏析^[2]していることが非常に重要です。結晶粒サイズが微細であるほど良いという理由は、単位体積あたりの結晶粒界^[2]の割合が大きくなり、粒界偏析^[2]の効果がより顕著に現れるためです。

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と、厚さ0.7mm、外径6.0mm、高さ20mmからなる円筒形試験片をそれぞれ採取、作製し、室温で圧縮試験を実施しました。開発材との比較をおこなうために、市販のマグネシウム合金押出材(Mg-3Al-1Zn:既存材)を用いて、円柱形、円筒形試験片をそれぞれ作製し、同じ試験を行いました。なお、円筒に代表される中心部がくり抜かれた中空試験片を用いた試験では、変形できる箇所、すなわち自由表面が、試験片のまわりだけでなく内側に存在するため、破壊が起こりやすく、変形のしやすさを厳格に評価することができます。図3には、円柱形試験片を用いて圧縮試験によって得られた、試験片に加えた力 vs. 試験片がひずむ量を表した曲線(=応力 vs. ひずみ曲線)を示しています。対応する試験後の外観写真は、図4下段です。図3より、既存材の場合、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、ひびなどが入ると一瞬で破壊していることが分かります。一方で、開発材では、50%の変形(=ひずみ)を付与しても急激な応力の変化が起こらず、一定の応力で変形が推移しています。また、外観写真の試験片は、樽型状を呈していることから、壊れずに、変形しやすいことが確認できます。

円筒形試験片を用いた試験でも、既存材と開発材の様相は大きく異なります。図1および図4上段の外観写真より、既存材では、試験片の上部付近にき裂が存在し、破壊の痕跡が確認できます。一方、開発材の場合、試験片は、急に壊れず蛇腹状に変形していることから、破壊に対する吸収エネルギー特性に優れていることが分かります。一般的に、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、開発材の吸収エネルギー特性は、既存材と比較して3倍以上を示しています。これは、蛇腹状への変形が可能になることで、応力一定となる領域が広がるためです。これらの変形のしやすさは、既存マグネシウム合金に関して今まで達成されておらず、世界で初めての報告です。

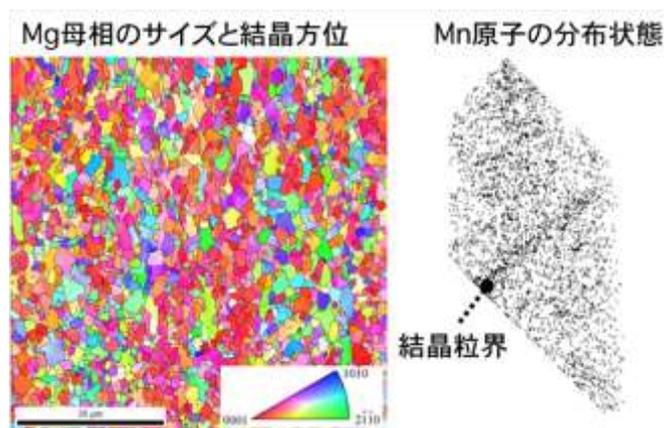


図2: 開発材の微細組織観察例
左側 EBSD 観察によって得られたマグネシウムの結晶粒サイズと結晶方位(同じコントラストからなる集合体が一つの結晶粒)
右側 三次元アトムプローブ法による観察例(マンガン原子の分布状態を示し、凝集しているところが結晶粒界で粒界偏析していることが分かります)

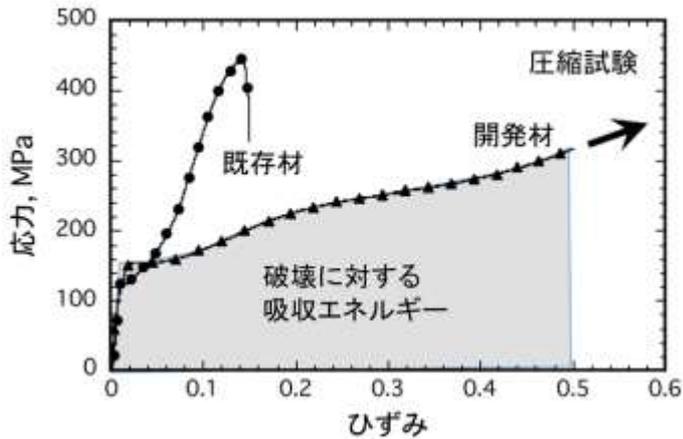


図 3：円柱形試験片を用いて圧縮試験によって得られた、試験片に加えた力 vs. 試験片がひずむ量を表した曲線 (=応力 vs. ひずみ曲線)

応力 vs. ひずみ曲線によって囲まれた面積 (色つきの領域) が破壊に対する吸収エネルギーに対応し、開発材の面積は、既存材よりも広いことがわかります。なお、今回の試験は、使用装置の安全構造上、ひずみが50%に到達した時に停止させています。

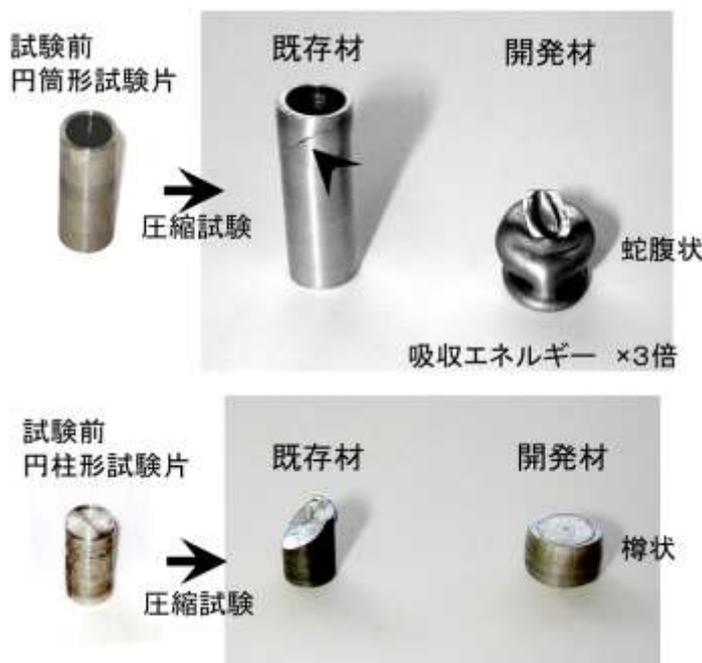


図 4：圧縮試験後の外観写真
上段 円筒形試験片を用いた場合
下段 円柱形試験片を用いた場合

開発材は、蛇腹状または樽状に変形できることがわかります。既存材の矢印は、き裂を示しています。

マグネシウムや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、加工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^[1]を利用した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。ところが、本研究のように、添加元素 (今回はマンガン) の結晶粒界への偏析^[2]を活用すると、室温域で粒界すべりが起こりやすい状態を作ることになりました。

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、一部の元素が結晶粒界に偏析^[2]し、強さや硬さ、しなやかさなどの機械的特性に影響を及ぼすことが多いです。例えば、鉄鋼材料では、リンや硫黄の粒界偏析^[2]は、脆さの原因となるため、リンや硫黄の濃度を低減し、粒界偏析^[2]が起こらないようにしています。マグネシウム合金も他の金属材料と同様に、粒界偏析^[2]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。本研究チームは、二元系マグネシウム合金^[5]を研究対象とし、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、ほとんどの元素は、粒界すべり^[1]を抑制する働きを示しましたが、マンガンが粒界に偏析^[2]した場合のみ、室温粒界すべり^[1]を促進し、今回

の特性が得られることを究明しました。

今後の展開

本開発材の最大の特徴は、大きな力を付与しても、瞬時に壊れず、蛇腹状（または樽状）に変形することです。現在、自動車等で使用されている鉄鋼材料（高強度鋼）では、成形性の向上とともに、衝突時の吸収エネルギーを高めるため、蛇腹状に変形する素材や構造がトレンドとされています。破壊に対する吸収エネルギー特性に優れていることから、自動車に限らず、安心・安全を確保したマグネシウム合金部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^[4]に関する改善が考えられます。通常、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 度以上に加熱する必要があり、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、本研究では、試験速度が比較的ゆっくりした速度条件（初期速度： 10^{-3} ~ 10^{-4} mm/s）でした。自動車やバイクをはじめとする移動用部材に使用し、衝突や追突時の安全性を想定した場合や、プレス加工などを用いて複雑な形状への二次加工^[4]を想定した場合、試験速度が高速な条件でも同様の現象の発現が不可欠です。また、衝突時の吸収エネルギー特性を更に向上させるためには、図3の面積部分の拡大が必須です。とりわけ、試験片を変形させるのに必要な力（=図3の縦軸の値）を大きくすることが効果的です。本研究では、二元系^[5]マグネシウム合金を用いた成果ですが、三元系^[5]や四元系^[5]を対象とした添加元素の探索や、結晶粒^[2]のサイズや粒界偏析^[1]の割合など内部組織の最適化が今後の課題と考えられます。

掲載論文

題目：Development of isotropic and accordion-like deformable magnesium alloys

著者：H. Somekawa, A. Singh and T. Inoue

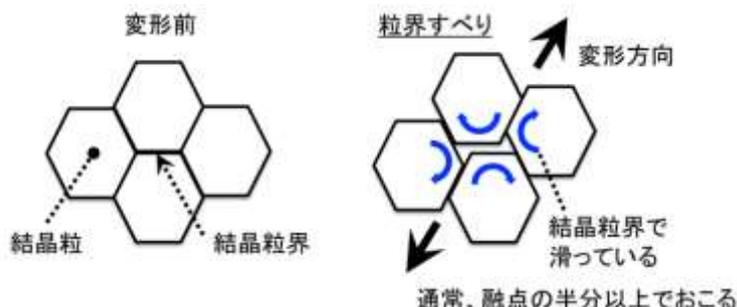
雑誌：Materials Transaction

掲載日時：2017年6月25日発刊（早期公開：2017年5月26日）

用語解説

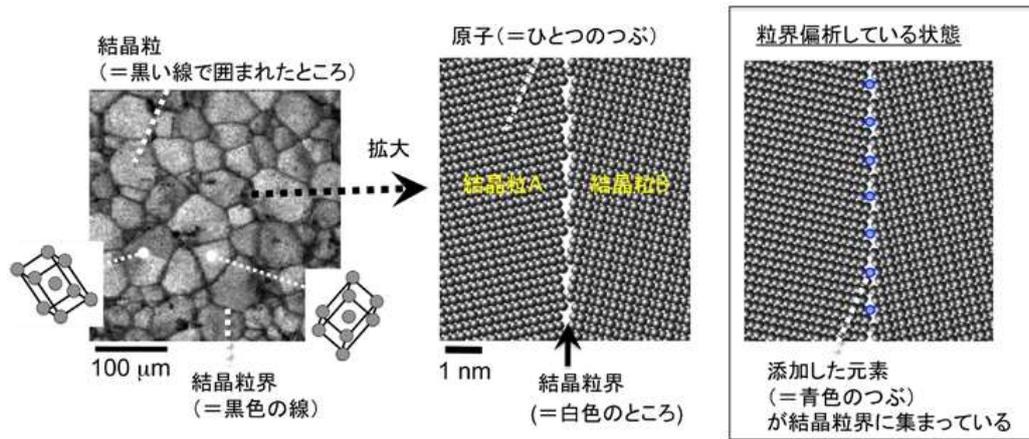
[1] 粒界すべり

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。



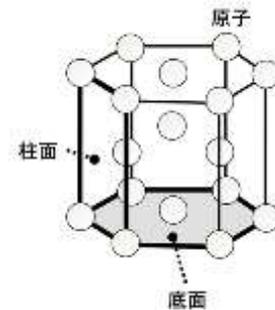
[2] 結晶粒、結晶粒界、粒界偏析

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。



[3] 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。



[4] 二次加工

鋳造や押出加工などによって素材を創製する加工のことを一次加工といい、一次加工によって創製した素材をプレスなどによって部材にかえる加工のことを二次加工と呼びます。

[5] 二元系、三元系、四元系

マグネシウム合金を例にして、マグネシウムに一種類の元素を添加した合金を二元系 (Mg-X)、二種類の元素を添加した合金を三元系 (Mg-X-Y)、三種類の場合を四元系 (Mg-X-Y-Z) といいます。なお、X, Y, Z は添加した元素で、今回の場合であれば、Mg-Mn となります。

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

(不在時の担当)

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 塑性加工プロセスグループ
グループリーダー 井上忠信 (いのうえ ただのぶ)

TEL: 029-859-2148

(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

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

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