

配信先：文部科学記者会・科学記者会・熊本県内報道機関・中部経済産業記者会・
自動車産業記者会・経済産業省記者会・学術記者会



【解禁時間】
令和6年7月9日(火) 15:00

令和6年7月2日

報道機関 各位

熊本大学

【プレスリリースのご案内】

マグネシウム合金に革命！

材料の原子配列を操り驚異的な強度で世界を変える
～新発見の「ミルフィーユ構造(ナノサイズの層状構造)」でさらなる高強度を実現～
画期的な超軽量金属素材により、カーボンニュートラル社会の実現に貢献

【概要】 熊本大学の先進マグネシウム国際研究センターは、「キンク強化」という新規な材料強化法で高強度が発現する「ミルフィーユ構造」という軟質層・硬質層が重なったナノ層状構造を持ち、しかも難燃性も併せ持つ高強度マグネシウム合金を開発しました。開発したマグネシウム合金は、降伏強さ 418 MPa という、従来の汎用高強度マグネシウム合金に比べて 1.7 倍以上の高い降伏強さを持っています。ロケットや航空機、ドローン、自動車などの輸送機器の構造材料への適用を進めることで、軽量化による燃費やエネルギー効率の向上ならびに温室効果ガス排出量の削減が期待でき、カーボンニュートラル社会の実現に貢献します。

記

<文部科学記者会>

日時:令和6年7月9日(火) 14時00分～15時00分

場所:文部科学記者会(文部科学省12階)

(東京都千代田区霞が関3丁目2番2号)

※オンライン(Zoom)でも参加可能です。ご希望の方は、折り返し詳細を連絡します。
なお、当日の質問はチャットで受け付けいたします。

ポイント

●実用上の革新性

- 418 MPa という汎用高強度マグネシウム合金の 1.7 倍以上の高い降伏強さを示します。
- これまでの KUMADAI 耐熱マグネシウム合金に比べて合金濃度が抑えられるため低コストが実現します。
- 低い加工率で高強度が得られるとともに難燃性を示し、応用範囲が広がります。
- 軽量化による燃費向上や製造時の地球温暖化ガス排出抑制を可能にし、カーボンニュートラル社会の実現に貢献します。

●材料学的な革新性

○「ミルフィーユ構造」という硬質層の間隔が広い疎な軟質・硬質ナノ層状構造を新たに発見し、高強度マグネシウム合金の新たなページを開きました。

○「ミルフィーユ構造」に対して「キンク強化」という熊本大学が見出した新しい材料強化法を施すことによって、加工後の降伏強さが加工前の 3.6 倍に向上し、高強度が実現します。

○「ミルフィーユ構造」は、マグネシウム合金以外の他の金属材料のみならずセラミックス材料や高分子材料へ展開することが期待できます。

開発者

先進マグネシウム国際研究センターの河村能人(かむむら よしひと)教授と井上晋一(いのうえ しんいち)助教のグループ

説明

【背景】

ロケットや航空機、ドローンあるいは自動車などの輸送機器の省エネルギー化によるカーボンニュートラル社会の実現には、軽くて強い材料の開発が重要です。実用金属で最軽量であるマグネシウム金属^{*1}が着目され、世界的に高強度マグネシウム合金の熾烈な開発競争が行われています。しかし、マグネシウム合金には、機械的強度がアルミニウム合金よりも低く、燃え易いという問題がありました。

金属材料の強化法には、固溶強化、加工強化、結晶粒微細化強化、析出強化、分散強化、複合強化があり、これらの材料強化法を組み合わせることで活用することによって、金属材料の高強度化が図られてきました。2000 年代に、熊本大学は「キンク強化^{*2}(結晶が折れ曲がることで変形が起こり難くなる強化法)」という新しい概念の材料強化法を半世紀ぶりに発見しました。しかし、このキンク強化が適用できる合金は、「長周期積層構造^{*3}」を持つ KUMADAI 耐熱マグネシウム合金^{*4}(長周期積層構造型マグネシウム合金ともいう^{*5})に限定されていました。長周期積層構造は、1 nm^{*6}程度(原子 4 個分の厚さ)の硬いクラスター配列層(Cluster Arranged Layer を略して CAL という)と 1 nm 以下の軟らかい Mg 層が周期的に積層した「密な硬質・軟質ナノ層状構造」を持っています。

「キンク強化のために硬質層(CAL)の間隔をどこまで広げられるのか」に興味を持ち、硬質層(CAL)の間隔を 10 倍以上に広げた「疎な軟質・硬質ナノ層状構造」を持つマグネシウム合金の創製を試みました。

【研究の内容】

4年間にわたって、合金の成分と製造プロセスなどを試行錯誤しながら探索した結果、硬質層(CAL)の平均間隔が 12 nm(原子 48 個分の厚さ)という「疎な硬質・軟質ナノ層状構造」が材料全体にわたって形成したマグネシウム合金の作製に成功しました(図 1)。そして、硬質層(CAL)の平均間隔が 1 nm 以下という「密な硬質・軟質ナノ層状構造」を持つ長周期積層構造で発現するキンク強化が、硬質層(CAL)の平均間隔が 12 倍以上に広くても発現することが明らかになりました(図 2, 図 3)。開発したマグネシウム合金は、KUMADAI 耐熱マグネシウム合金に比べて合金添加量が半減しているにもかかわらず、押出比 6 という低い加工率で強化されて 418 MPa^{*7}という、汎用の高強度マグネシウム合金押出材^{*8}の 1.7 倍以上の極めて高い降伏強さ^{*9}(図 4)を示しました。また、発火温度は 770°C であり、難燃性^{*10}も併せ持っています。「軟質・硬質層状構造」はミルフィーユケーキ(図 5)に因んで「ミルフィーユ構造^{*11}」と呼び、開発した合金を「ミルフィーユ型マグネシウム合金^{*12}」と命名しました。

【開発合金の特徴と特性】(図 6)

①新奇なミルフィーユ構造: 開発したミルフィーユ型マグネシウム合金の材料全体にわたって形成されているミルフィーユ構造の硬質層は、長周期積層構造と同様に、原子 14 個からなる A_6B_8 クラスター(A 原子 6 個と B 原子 8 個からなる塊)が面内配列したクラスター配列層(CAL)でできており、その厚さは原子 4 個

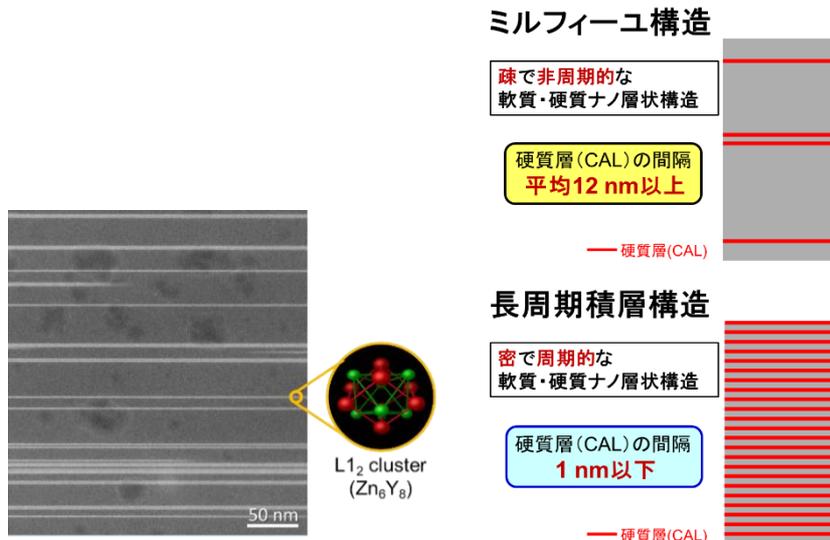


図 1 ミルフィーユ型マグネシウム合金におけるミルフィーユ構造の電子顕微鏡写真

図 2 ミルフィーユ構造と長周期積層構造との相違

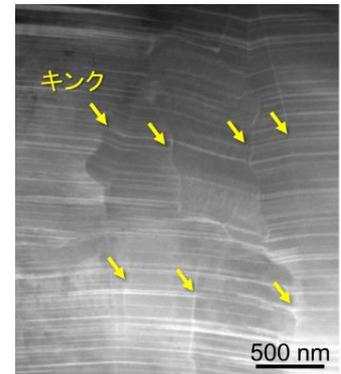


図 3 ミルフィーユ型マグネシウム合金に形成されたキンクの電子顕微鏡写真

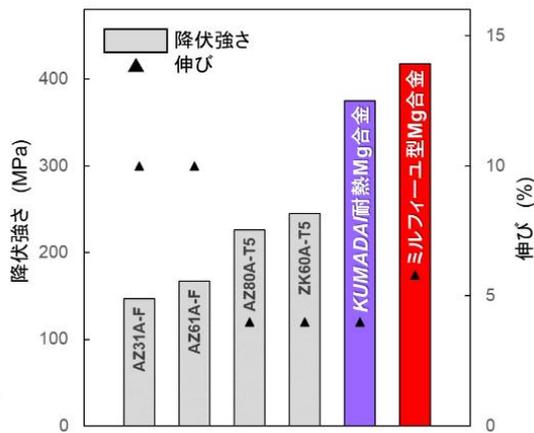


図 4 ミルフィーユ型マグネシウム合金の降伏強さと伸びの他の高強度マグネシウム合金との比較



図 5 ミルフィーユケーキ

ミルフィーユ型マグネシウム合金の特徴

- ①材料全体に「ミルフィーユ構造」という疎な軟質・硬質ナノ層状構造を持つ
硬質層 (CAL) の間隔が12 nmと広い
(KUMADA/耐熱マグネシウム合金の26%占める長周期積層構造の12倍)
- ②キンク強化により極めて高い降伏強さを持つ
降伏強さが418 MPaと極めて高い
(KUMADA/耐熱マグネシウム合金よりも43 MPa高く、汎用高強度マグネシウム合金の1.7倍以上)
- ③低い加工率でキンク強化する
押出比が5~6と低くても高強化
(KUMADA/耐熱マグネシウム合金の約半分の押出比)
- ④難燃性である
発火温度が770 °Cと高く、難燃性を示す
(汎用高強度マグネシウム合金よりも200°C以上高い)
- ⑤軽量である
合金添加量が4.6重量%と少なく、比重が1.79 g/cm³と比較的小さい
(KUMADA/耐熱マグネシウム合金よりも合金添加量が半減して3.4%軽量)

図 6 ミルフィーユ型マグネシウム合金の特徴

分の約 1 nm と非常に薄いことが明らかになりました。また、ミルフィーユ構造の硬質層 (CAL) の平均間隔が 12 nm であり、長周期積層構造の硬質層 (CAL) の間隔 (1 nm 以下) に比べて一桁以上広いことが明らかになりました (図 1, 図 2)。

②新規なキンク強化による高強度化: 硬質層 (CAL) の間隔が長周期積層構造の 12 倍と一桁以上広くても、長周期積層構造と同様にキンク強化することが明らかになりました (図 3)。KUMADAI 耐熱マグネシウム合金の押出材の降伏強さは 375 MPa であり、この合金中に 26% 含まれる長周期積層構造相のみがキンク強化しますが、ミルフィーユ構造が材料全体にわたって形成されているミルフィーユ型マグネシウム合金は材料全体がキンク強化します (図 7)。この結果、KUMADAI 耐熱マグネシウム合金に比べて、添加元素量が半減しているにもかかわらず、418 MPa という非常に高い降伏強さが発現したと考えられます。

③低加工率での高強度化: 一般的にマグネシウム合金は押出比 (押出加工の前と後の断面積比) 10 以上で押出加工することによって強度が高められています。しかし、ミルフィーユ型マグネシウム合金は押出比 5~6 という低い加工率でも極めて高い強度が得られるという特徴を持っています。

④難燃性: 開発したミルフィーユ型マグネシウム合金は発火温度向上に効果がある合金元素 (Y: イットリウム) を含んでいるために、その発火温度は 770°C と高く、難燃性も併せ持っています。

⑤軽量性: 開発したミルフィーユ型マグネシウム合金の合金添加元素量は 4.5 重量% であり、汎用の高強度マグネシウム合金や KUMADAI 耐熱マグネシウム合金よりも 2.5~4.8 割程度も少なく、軽量です。

このように、開発したミルフィーユ型マグネシウム合金は、高強度マグネシウム合金の歴史に新たなページを開くものと期待できます。

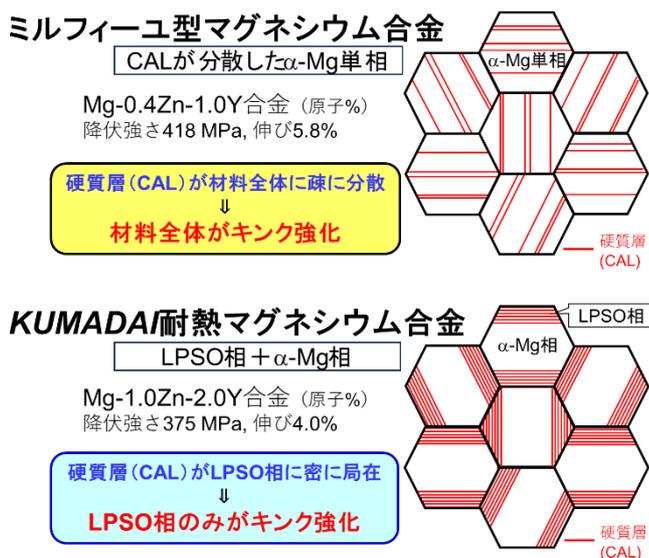


図 7 ミルフィーユ型マグネシウム合金と KUMADAI 耐熱マグネシウム合金との相違

【開発合金のインパクト】

①学術的インパクト

- ・高強度マグネシウム合金の歴史に新たなページを開きました。
- ・疎な軟質・硬質ナノ層状構造でもキンク強化することが明らかになったので、ミルフィーユ構造物質の創製研究がマグネシウム合金以外の他の金属材料のみならずセラミックス材料や高分子材料へ展開することが期待できます。
- ・熊本大学で発見した「キンク強化」の研究が、日本発の新しい学術分野として発展することに貢献します。

②社会的インパクト

- ・輸送機器の軽量化による燃費やエネルギー効率の向上が期待できます。
- ・合金添加量が少ないので、素材の低コスト化と軽量化に繋がります。

- ・難燃性を示すために、難燃性が必要な民間航空機など適用部品の幅が広がり、また応用製品の使用時や素材の製造時の安全性も高まります。
- ・汎用マグネシウム合金の溶解・鋳造時に、溶けたマグネシウム合金が空気に触れて発火することを防ぐためのカバーガスとして、地球温暖化係数が二酸化炭素の約 2 万 4 千倍と著しく高い温室効果ガスである SF₆(六フッ化硫黄)ガスが使われていますが、開発した合金は難燃性を示すので SF₆ガスを使用する必要がないため、温室効果ガスの大幅な排出削減にも繋がります。
- ・低加工率での製造が可能であるので、押出加工等による大型部材や鍛造加工による複雑形状部材の製造も可能になり、適用部品の幅が広がるばかりではなく、生産時の省エネルギー化にも繋がります。
- ・これらを通じて、カーボンニュートラル社会の実現に大きく貢献できます。

【今後の展開】

①学術研究

硬質層 (CAL) の間隔をさらに広げたミルフィーユ型マグネシウム合金を作製して、キンク強化する硬質層 (CAL) の臨界間隔を明らかにして行きます。また、硬質層 (CAL) の間隔とキンク発生頻度とキンク強化量の相関関係を解明して、キンク強化メカニズムを明らかにして行きます。さらに、理論・計算科学グループと連携して力学実験と組織観察を進めることによってキンク強化理論の確立を行い、熊本大学発の新しい学術領域の発展を図って行きます。

②応用研究

ロケットや航空機、ドローン、自動車などの輸送機器の構造部材および携帯電子情報機器の構造部材など軽量化が望まれている幅広い分野での社会実装化を目指して、大型素材製造技術と応用製品の開発を産業界と連携しながら進めていきます。特に、熊本大学発ベンチャーである(株)MG Port^{*13}と協力して社会実装化を進めていきます。

【論文・特許】

本研究成果は、既に特許出願(特開 2023-88899)を行いました。また、一部の内容(Y. Kawamura, H. Yamagata, S.I. Inoue, T. Kiguchi and K. Chattopadhyay; Kink Bands and Strengthening of Millefeuille-Structured Magnesium Alloys by Cluster Arranged Nanoplates (CANaPs): The Case of Mg-0.4Zn-1.0Y Alloy) は、材料系の国際ジャーナル「Journal of Alloys and Compounds, 939 (2023), 168607.」に掲載されました。

【用語解説】

※ 1 マグネシウム： 原子番号 12 の元素であり、原子量が 24.305 のアルカリ土類金属である。元素記号は「Mg」である。実用金属中で最軽量であり、比重は鉄の 1/4、アルミニウムの 2/3 である。海水 1 リットル中に 1.3 g 含まれており資源が豊富な金属である。環境に優しい金属でもある。マグネシウムを主成分とする合金が、マグネシウム合金である。

※ 2 キンク強化(図 3)： KUMADAI 耐熱マグネシウム合金(長周期積層構造型マグネシウム合金)の長周期積層構造で初めて発見された新規な材料強化法であり、結晶が折れ曲がることで変形が起きにくくなる結果、材料の強度が著しく向上する。折れ曲がりキンク変形と呼ばれることから、キンク強化と命名した。

※ 3 長周期積層構造(図 2)： 長周期積層構造は英語で Long Period Stacking Ordered Structure と表わされるので、LPSO 構造とも言う。熊本大学が開発した KUMADAI 耐熱マグネシウム合金(長周期積層型マグネシウム合金)において初めて発見された新奇な原子配列構造であり、添加元素の原子 14 個でできた A₆B₈ クラスタが面内に配列した厚さ 1 nm (原子 4 個分の厚さ) の硬質なクラスタ配列層 (CAL という) が、厚さが 1 nm 以下の軟質な Mg 層 (原子 1~4 個分の厚さ) と交互に積層した「密で周期的な硬質・軟質ナノ層状構造」のこと。硬質なクラスタ配列層は英語で Cluster Arranged Layer と表わされるので、CAL という。通常の結晶構造は 2 周期構造であり、それに比べて長い周期 (5~8 周期) で積層していることから長周期積層構造と呼ばれる。これまでに 4 種類の長周期積層構造が見出されており、軟質な Mg 層の厚さが Mg 原子 1 個分 (0.25 nm)、2 個分

(0.5 nm)、3 個分(0.75 nm)、4 個分(1.0 nm)と異なっている。すなわち硬質層(CAL)の間隔が 1 nm 以下である。

※4 KUMADAI マグネシウム合金 (図 7) : 熊本大学が開発した 5 種類のマグネシウム合金の総称であり、熊本大学の登録商標である。①高強度・高耐熱性・難燃性を併せ持つ KUMADAI 耐熱マグネシウム合金(長周期積層型マグネシウム合金あるいは LPSO 型マグネシウム合金とも言う。代表的な合金組成は Mg-1.0Zn-2.0Y(原子%))、②不燃性を初めて実現した高強度と不燃性を併せ持つ KUMADAI 不燃マグネシウム合金(C36 型マグネシウム合金とも言う。代表的な合金組成は Mg-10Al-5Ca(原子%))、③高熱伝導性・高強度・高耐食性・不燃性というマルチ機能を持つ KUMADAI マルチ機能マグネシウム合金(代表的な合金組成は Mg-4.5Al-2.5Ca-0.02Mn(原子%))、④高強度・高延性・生体親和性・生体吸収性を併せ持つ KUMADAI バイオメディカル用マグネシウム合金(代表的な合金組成は Mg-1.0Ca-0.5Zn-0.1Y(原子%))、そして⑤今回開発したミルフィーユ型マグネシウム合金(代表的な合金組成は Mg-0.4Zn-1.0Y(原子%))がある。

※5 長周期積層型マグネシウム合金: 熊本大学が開発した KUMADAI 耐熱マグネシウム合金(LPSO 型マグネシウム合金とも言う)のことであり、長周期積層構造相と α -Mg 相からなる 2 相合金である。铸造ままでは平凡な機械的特性しか示さないが、押出加工することによって長周期積層構造相がキンク強化して高い強度を示す。長周期積層構造のみでできた単相合金でもキンク強化するが、延性に欠けるので、実用的な合金は、26%の長周期積層構造相と 74% の α -Mg 相からなる Mg-1.0Zn-2.0Y(原子%)合金である。この合金の押出材の降伏強さは 375 MPa で伸びは 4%であり、汎用の高強度マグネシウム合金よりも約 30%強い。

※6 ナノメートル (nm) : 長さを表す単位で、1 nm は 10 億分の 1 メートル(m)で、10 オングストローム(Å)である。マグネシウム原子の直径は 0.29 nm(2.9Å)である。

※7 メガパスカル (MPa) : 圧力を表す単位で、1 kgf/cm²≒0.098 MPa である。降伏強さ 418 MPa は 1 cm 角の面積に約 4.3 トンの荷重(自動車約 3 台分)を加えても耐えられることを意味する。

※8 汎用の高強度マグネシウム合金 : 汎用の高強度マグネシウム合金である AM80A 合金はアルミニウムを 8 重量%と少量の Mn(マンガン)を添加した合金であり、汎用の高強度マグネシウム合金である ZK60A 合金は 6 重量%の亜鉛と少量の Zr(ジルコニウム)を添加した合金であり、開発したミルフィーユ型マグネシウム合金の合金元素添加量の 4.5 重量%よりも多い。AM80A 合金と ZK60A 合金の押出材は、それぞれ 226MPa と 245 MPa の降伏強さと 4%の伸びを示し、マグネシウム合金押出材としては高強度を示す合金である(Magnesium and magnesium alloy, ASM International, Materials Park, OH, 1999.から引用)。開発したミルフィーユ型マグネシウム合金押出材の降伏強さと伸びは、それぞれ 418 MPa と 5.8%であり、AM80A 合金押出材や ZK60A 合金押出材に比べて 1.7 倍以上強く、延性も優れている。

※9 降伏強さ : 永久変形(塑性変形)しない限界の強さが降伏強さであり、耐力とも言われる。降伏強さに達すると永久変形(除荷しても元に戻らなくなる)してしまうので、使用に耐える最大強さを意味する。降伏強さを超えて破断するまでの変形量が伸びであり、材料の延性示す。

※10 難燃性と不燃性 : 通常のマグネシウム合金は 550°C程度で発火し、一旦発火すると消火が困難であり、合金の製造時と使用時に危険が伴う。発火温度を 965°C(米国の連邦航空局 FAA のマグネシウム燃焼試験に用いられるオイルバーナーの最大火炎温度)以上に高めた合金を不燃性合金という。また、発火温度を铸造時の溶解温度(約 700°C)以上 965°C未満に高めた合金を難燃性合金という。最近、熊本大学は難燃性の KUMADAI 耐熱マグネシウム合金の不燃化にも成功していることから、今回開発した難燃性のミルフィーユ型マグネシウム合金も不燃化が可能であると考えられる。

※11 ミルフィーユ構造(図 1、図 2) : 軟質層と硬質層が交互に積層した構造のこと。ミルフィーユは英語で Mille Feuille と表されるので、MF 構造とも言う。広義の意味では長周期積層構造もミルフィーユ構造の一種であるが、狭義の意味では長周期積層構造以外の軟質・硬質層状構造を指す。硬いパイ生地層と柔らかいクリーム層が交互に積層したミルフィーユケーキに因んで(図4)、ミルフィーユ構造と呼ばれている。この呼び名は河村が命名し、日本の学術分野でも使用されている。

※12 ミルフィーユ型マグネシウム合金(図 7) : 材料全体がミルフィーユ構造を持つマグネシウム合金のことであり、MF 型マグネシウム合金とも言う。本研究によって、ミルフィーユ型 Mg-0.4Zn-1.0Y(原子%)合金押

出材はキンク強化によって 418 MPa という極めて高い降伏強さを示すことがわかった。この降伏強さは、KUMADAI 耐熱マグネシウム合金(長周期積層型 Mg-1.0Zn-2.0Y(原子%)合金)の押出材に比べて、添加元素量が半分以下に減少しているにもかかわらず、1 割以上(43 MPa)高い。なお、ミルフィーユ型 Mg-0.4Zn-1.0Y(原子%)合金は、原子 100 個のうち 98.6 個が Mg 原子で、残りの 1.4 個が亜鉛(Zn)とイットリウム(Y)の原子で構成されている。

※13 **(株)MG Port** : KUMADAI マグネシウム合金の社会実装化を加速するために 2021 年に設立された、熊本大学発ベンチャー企業である。<https://www.mgport.co.jp/>

【お問い合わせ先】

●研究内容に関すること

河村 能人 (カワムラ ヨシヒト)

国立大学法人 熊本大学 先進マグネシウム国際研究センター
教授/センター長

〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1

Tel:096-342-3721 Fax:096-342-3721

E-mail: rivervil@gpo.kumamoto-u.ac.jp

●プレスリリースに関すること

国立大学法人 熊本大学 総務部総務課 広報戦略室

〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1

Tel:096-342-3271 Fax:096-342-3110

E-mail: sos-koho@jimu.kumamoto-u.ac.jp

記者発表 参加申込書

マグネシウム合金に革命！

材料の原子配列を操り驚異的な強度で世界を変える

～新発見の「ミルフィーユ構造(ナノサイズの層状構造)」でさらなる高強度を実現～
画期的な超軽量金属素材により、カーボンニュートラル社会の実現に貢献

貴社名	
ご所属名	
ご出席者名	フリガナ
ご連絡先 (代表者)	TEL
参加形態	<input type="checkbox"/> 現地参加 (7/9 東京) <input type="checkbox"/> オンライン参加
備考	※ ご質問などございましたらご記入ください

※7月5日(金) 17時までにご返送いただきますようお願いいたします。

熊本大学 総務部総務課広報戦略室宛

FAX 番号：096 - 342 - 3110