

2023年3月31日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

鉄とマグネシウムの強固な機械接合に成功 — 輸送機器の大幅な軽量化による環境影響低減に期待 —

【発表のポイント】

- デアロイング現象^{注1}を用いて、これまで困難だった鉄-マグネシウム間の強固なアンカー効果^{注2}を伴う機械接合に成功しました。
- 鉄鋼材料とマグネシウム合金のように相分離する異種合金間の新たな接合技術として応用が期待されます。
- 自動車や鉄道、航空機など輸送機器用構造材料のマルチマテリアル化による大幅な軽量化を促進し、環境負荷の低減に貢献します。

【概要】

次世代輸送機器には、安全性の高い大量・高速輸送を低環境負荷で実現することが求められます。従来鋼板を適材適所で新材料に代替するマルチマテリアルの次世代基幹材料としてマグネシウム合金が本格的に検討され始めました。マグネシウム合金は、近年、燃焼性を克服する等、素材開発で大きな進展を遂げていますが、鋼板等の構造材料との接合技術の開発は、マグネシウムが鉄と相分離して合金化しない「自然の摂理」に阻まれ進んでいません。

東北大学大学院工学研究科大学院生の倉林康太氏と金属材料研究所の加藤秀実教授、和田武准教授は、異種金属間の混和と分離に由来して生じる脱成分（デアロイング）現象によって、相分離して強固に接合し得ない異種金属同士が、ナノ・ミクロンスケールで共連続に絡みあう特異な複合組織を自己組織化することに着目し、鉄部材とマグネシウム部材の接合面に、鉄とマグネシウムの微細な共連続複合組織を形成することで強固で理想的な機械接合を達成する“デアロイング接合技術”を確立しました。この技術は、相分離する様々な異種金属間の接合技術に広く応用が期待され、自動車、鉄道や航空機等の軽量化、低燃費化への貢献が見込まれます。

本研究成果は、2023年3月16日（英国時間）に、無機材料の構造と特性に関する専門誌 Scripta Materialia にオンライン掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

次世代自動車・鉄道・航空機等の輸送機器は、高安全性・高速・大量輸送の実現に加え、環境負荷の低減・省エネの達成も同時に求められます。このために、各部のスペックを満足する新素材を開発し、これらを適材適所的に従来の鋼板に置き換えるマルチマテリアルの概念が提唱され、大規模な国プロも進められました。代替素材として主にアルミ合金等が検討されていますが、更なる重量削減のために次世代（2030年頃～）基幹材料の一つとしてマグネシウム合金が注目されています。比重が鉄の1/4、アルミニウムの2/3であって、金属で最も軽量効果が期待できるマグネシウムは、高振動減衰率、高切削性、リサイクル時の省エネルギー性等、多くの魅力を有しています。マグネシウム合金がマルチマテリアルの次世代基幹材料に位置付けられると、マグネシウム合金と鉄鋼との強固な異種素材間接合が必要になります。

金属部材間の接合法と言えば、昔ながらのアーク溶接や固相接合などの「冶金（やきん）接合」、つまり、部材同士を突き合わせて接触部分を加熱し、原子拡散を促して合金化を施す方法が代表格であり、金属結合に基づく強固な接合が得られます。残念ながらマグネシウム合金と鉄鋼の接合は、これらの方法では極めて困難です。主成分であるマグネシウムと鉄は、相分離する（混ざらない）組合せであるため、合金化を前提にした冶金接合は原理的に達成し得ないのです。マグネシウム合金は、近年、素材自身や組織制御・加工プロセスで新たに研究開発が進んだものの、異種素材間の接合技術開発の遅れによって、その広範囲な実用化は依然として困難な状況にあります。

本研究グループのメンバーは、異種金属間の「混和」と「分離」に由来して生じる金属液体中でのデアロイニング反応^{注1}を利用した金属溶湯脱成分法(Liquid Metal Dealloying)^{注3}を世界に先駆けて発表し、これを用いて新しい共連続ナノ複合材料やナノポーラス金属の研究開発を進めてきました^[1]。この技術の大きな特徴として、本来、相分離するために組織制御が極めて困難な2つの材料同士を、ナノ・ミクロンスケールの微細で共連続的に絡まる複合組織に自己組織化できることが挙げられます。強固な化学結合を形成できない素材同士に、強固なアンカー効果をもたらす理想的な機械接合を与え得るため、鉄鋼とマグネシウム合金の接合方法の開発に最適であると発想し、研究を開始するに至りました。

今回の取り組み

本研究ではマグネシウム合金と鉄鋼の主成分である純マグネシウム(Mg)と純鉄(Fe)を用いた単純化モデルにより原理の検証を行いました。これまで研究グループでは、Fe-Ni固溶合金(Ni:ニッケル)をMg液体に浸漬してNi成分を選択的に溶出させる金属溶湯脱成分技術によって、残存Fe成分がMg液

体中において 100 nm~数 μm スケールで共連続に連結したリガメント^{注4}を形成すること、更には、これを冷却して得られる Fe と Mg の共連続複合組織^{注5}が引張強度と延性を高い次元で両立することを明らかにしています^[2]。この反応を接合に利用するためには、あらかじめ純 Fe 側の表面を Ni と合金化しておく必要があります (Ni を元々多く含む鉄鋼や超合金等の場合はそのままが良い)。この方法として、メッキ、蒸着、スプレー等が考えられますが、本研究ではあらかじめ溶製しておいた Ni 濃度 (20、40、50、60、70 モル%) の異なる Fe-Ni 合金を純 Fe 表面に 1100°C で拡散接合^{注6}した後、この表面と純 Mg を 25 MPa で突き合せて 500°C、30 分間のデアロイング接合^{注1}を施しました。Mg の融点は 650°C ですので 500°C では固体ですが、被接合部材の形状維持を考え、Mg の融点以下で、かつ、脱成分反応が進行する温度 (融点の約 83%) を選択しました^[3]。図 1 (a) は、40 モル% Ni の Fe-Ni 固溶体と Mg との反応層を示す断面の走査電子顕微鏡 (SEM) 像であり、像中の赤枠部 (b) の拡大像を図 1 (b) に示しています。また、図 1 (c) は図 1 (b) を説明する模式図です。反応層中の 1 ミクロン以下の微細な網目状の鉄 (緑部) は Fe-Ni (下の青色部) と結合しており、一方、反応層中の Mg (灰) は Mg (上の灰色部) と結合しているために、Mg と Fe-Ni が隙間なく絡まり合うことで強固なアンカー効果がもたらす理想的な機械接合が形成します (デアロイング反応最前面付近に脆性な Mg_2Ni (黄色) が形成しますが、少量であるため、接合強度に及ぼす影響は小さく留まります)。

図 2 に、20-70 モル% Ni の Fe-Ni を中間層に用いたデアロイング接合強度と破断部分 (IF: 接合界面破壊、BMF: Mg 部材中破断) をまとめて示しました。20 モル% Ni の Fe-Ni を用いた場合は、Ni が少なくデアロイング反応が十分に進行しなかったため接合界面で低応力破断した一方で、これよりも Ni 濃度の高い 60-70 モル% Ni の場合は、Fe 成分が少ないために Fe が十分に連結できなかったこと、更には、大量に形成した脆い Mg_2Ni 層に起因して大きなクラックが発生したため、低応力で界面破断しました。これらの中間濃度域にある 30-50 モル% Ni の Fe-Ni を用いた場合は、Fe と Mg の共連続複合組織が形成し、十分な接合強度が得られたため Mg 部材中で破断する強固な接合が得られることを明らかにしました。

今後の展開

本成果は、鉄鋼とマグネシウム合金はもちろん、相分離して冶金接合しない異種材料間に、相分離組織を制御する方法によって強固で理想的な機械接合を構築する方法を提案しています。自動車、鉄道や航空機などの輸送機器の軽量化、省エネルギー化に大きく貢献します。

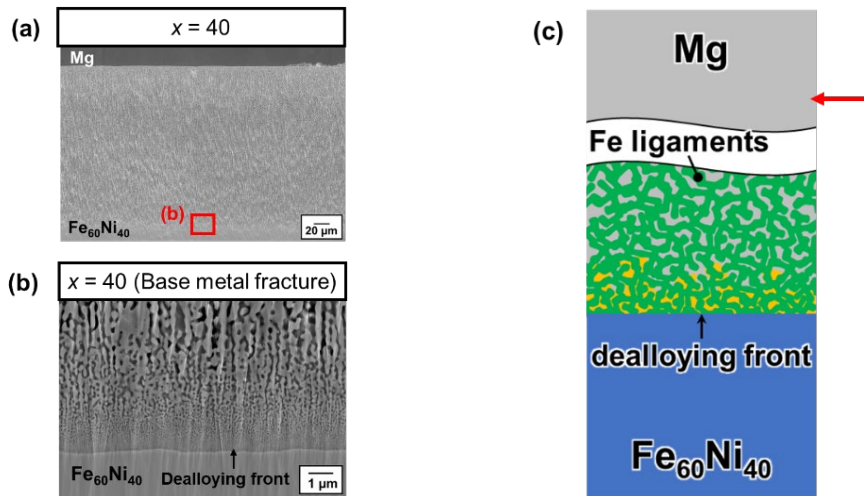


図 1(a) デアロイング接合により Mg/Fe₆₀Ni₄₀ 界面に形成した反応層の SEM 像、(b)図 1(a)中の赤枠(b)に示した反応最前線部分の高倍率 SEM 像、および、(c) Mg/Fe₆₀Ni₄₀界面に形成した反応層のミクロ組織を示した模式図（図中の赤矢印は破断発生部である Mg 部材破断を示す）。

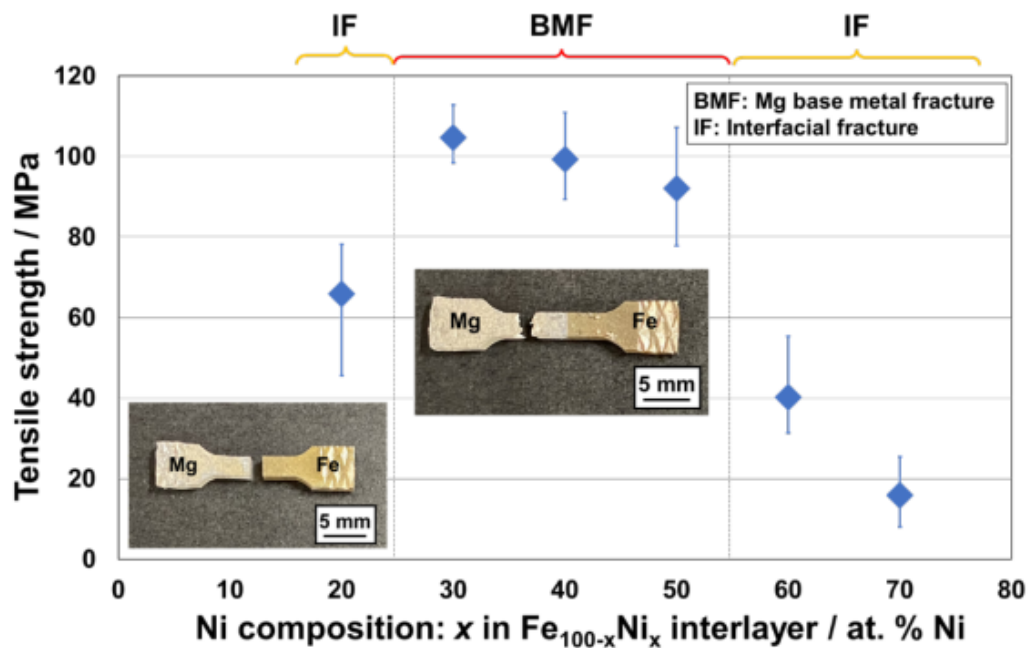


図 2 デアロイング接合で得られた Fe/Mg 継手の引張試験結果（x は Fe 部に予め拡散接合した Fe-Ni 合金の Ni モル濃度、上軸の IF および BMF は、それぞれ、接合界面破断および Mg 部材内破断を示している）。

引用文献

- [1] T. Wada, K. Yubuta, A. Inoue, H. Kato, Dealloying by metallic melt, *Materials Letters* 65(2011)1076-1078 (<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.01.054>).
- [2] Y.-B. Jeong, T. Wada, S.-H. Joo, J.-M. Park, J. Moon, H.-S. Kim, I. V. Okulov, S.-H. Park, J.-H. Lee, K.-B. Kim, H. Kato, Beyond strength-ductility trade-off: 3D interconnected heterostructured composites by liquid metal dealloying, *Composites, Part B*. 225(2021)109266 (<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109266>)
- [3] T. Wada, K. Yubuta, H. Kato, Evolution of a bicontinuous nanostructure via a solid-state interfacial dealloying reaction, *Scripta Materialia* 118(2016)33 (<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.03.008>)

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 JP21H04611、JP20K05126 の助成を受けて実施されました。

【用語説明】

注1. デアロイング

二種類以上の元素成分からなる合金固体を酸・アルカリ等の水溶液等の液体に浸漬し、特定成分のみを選択的に溶出させる反応のことをデアロイング（または脱成分）という。

注2. アンカー効果

船のアンカーが地中に埋まって船を固定するように、複数の材料による無数の微細な「アンカー」がそれぞれの材料に埋まり合って強固な接合が達成されるという効果。機械接合はアンカー効果を伴うと言われる。

注3. 金属溶湯脱成分法

デアロイング反応を行う溶出媒体として金属液体を用いる場合を、金属溶湯脱成分法と呼ぶ。2010 年に東北大学金属材料研究所加藤、和田らによって発明された。

注4. リガメント

Fe や Mg が複合組織内でそれぞれ別々に連結して構築する支柱のこと。

注5. 共連続複合組織

Fe 部分が孤立して分散することなく全て連結して三次元ネットワークを構築し、その隙間に Mg が孤立することなく同様に連結することで三次元ネットワ

一クを構築して得られる特異な複合組織のこと。Fe は Fe 同士で、Mg は Mg 同士で連結して互いに絡まっている。

注6. 拡散接合

被接合部材同士を突き合せて、融点近傍の固相温度高温域まで昇温することで、それぞれの構成成分元素を相互に拡散して得られる接合のこと。

【論文情報】

タイトル: Dissimilar Joining of Immiscible Fe-Mg using Solid Metal Dealloying

著者: Kota Kurabayashi, Takeshi Wada, Hidemi Kato*

*責任著者: 東北大学金属材料研究所 教授 加藤秀実

掲載誌: Scripta Materialia

DOI: 10.1016/j.scriptamat.2023.115404

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646223001288>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学金属材料研究所

非平衡物質工学研究部門

教授 加藤秀実 (かとう ひでみ)

TEL: 022-215-2110

E-mail: hidemi.kato.b7@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学金属材料研究所

情報企画室広報班

TEL: 022-215-2144

E-mail: press.imr@grp.tohoku.ac.jp