

令和 6 年 6 月 1 6 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14425

研究課題名（和文）爆発衝撃力で接合した軽量難溶接材の接合機構及び界面機構の解明

研究課題名（英文）Bonding mechanism and interfacial microstructure evolution in explosively welded hard-to-weld light materials

研究代表者

成田 麻未（Mihara-Narita, Mami）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：40886727

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では難溶接材であるマグネシウム合金とアルミニウム合金の接合に爆発圧着（爆着）法を適用し、その有効性について評価した。両合金の接合時に問題となる脆性的な金属間化合物は、界面に $1\mu\text{m}$ 以下とごく薄く形成し、その厚みはマグネシウム合金中のアルミニウム濃度によって変化した。また、爆着材に焼鈍処理を施すと、接合界面の中間層の厚みが大きくなり接合強度が低下した。焼鈍後に脆い β -Al₃Mg₂相が接合界面に形成し接合強度を低下させることが分かった。接合界面における残留応力状態は、マグネシウム合金側で引張、アルミニウム合金側で圧縮状態であり、焼鈍時間の増加に伴い残留応力は低下した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、車体重量を抜本的に軽量化する新規材料として期待されるマグネシウム合金を、軽量材料として広く用いられるアルミニウム合金と組合せ、適材適所に取り入れることを目指すものである。両合金は難溶接材であり、これを克服するために爆発圧着（爆着）法を適用した。本研究結果において、接合界面における中間層の形成を抑えた高い接合強度を持つ接合体が得られた。従来の接合手法では接合界面に形成する中間層を $1\mu\text{m}$ 以下の厚みに制御することが困難であり、爆着法の有用性を明らかにできた。また、中間層の生成機構について明らかにした点も、学術的に意義の高い研究である。

研究成果の概要（英文）：In this study, the effectiveness of the explosive welding method was evaluated for joining magnesium alloys and aluminum alloys, which are difficult-to-weld materials. The brittle intermetallic compound, which is a problem when joining the two alloys, formed very thin (less than $1\mu\text{m}$) at the interface, and its thickness depended on the aluminum concentration in the magnesium alloy. The annealing treatment after welding increased the thickness of the interlayer at the bonding interface and decreased the bond strength. It was found that brittle β -Al₃Mg₂ phase formed at the bonding interface after annealing, which reduced the bond strength. The residual stress state at the bonding interface was tensile on the magnesium alloy side and compressive on the aluminum alloy side, and the residual stress decreased with increasing annealing time.

研究分野：材料組織制御

キーワード：爆発圧着法 マグネシウム合金 アルミニウム合金 異種金属接合

1. 研究開始当初の背景

近年、飛躍的な軽量化を達成する手法として、マグネシウム合金や炭素繊維強化プラスチック (CFRP) などの新規軽量素材を適材適所に使う「マルチマテリアル化」が注目されている。マグネシウム合金は車体重量を抜本的に軽量化する新規軽量材料として期待される一方で、軽量材料であるアルミニウム合金と比較して、成形性や耐食性が低いことが課題である。そこで、マグネシウム合金と並んで高い比強度・比剛性を有するアルミニウム合金との組合せにより部材を作製し、適材適所に取り入れていくことが有効と考えられる。しかしながら、両合金は難溶接材であり、従来の接合方法では接合界面に脆性的な金属間化合物から成る中間層が形成し、それにより高い接合強度が得られないことが課題となっていた。

2. 研究の目的

上記の課題を克服するため、本研究では、マグネシウム合金とアルミニウム合金との接合に「爆発圧着 (爆着) 法」を適用した。本手法は、母材の上に一定の間隔を保持して合わせ材を配置し、その上にセットした爆薬の一旦を起爆させ、合わせ材が母材に衝突することで接合がなされる手法である (図 1)。接合速度が高速であるため接合界面に金属間化合物が形成しにくいことが大きな特徴である。爆着法は、鉄鋼やアルミニウム合金の分野では既に実用化されており、船舶用の構造部材等に利用されている。一方、マグネシウム合金とアルミニウム合金の接合に関しては、特定の汎用合金を対象として、爆着圧接後の接合界面の組織や機械的特性が報告されている程度である。

よって本研究では、マグネシウム合金とアルミニウム合金の組合せによる部材の実用化に際して必要となる界面形成メカニズムや機械的特性等の諸特性について系統的に明らかにし、健全な接合を保証するための最適接合条件を探索することを目的とした。

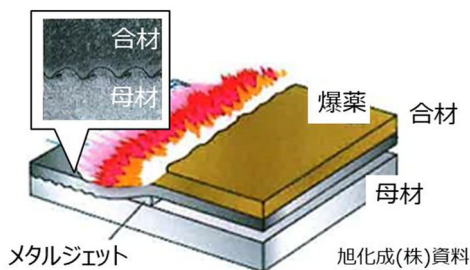


図 1 爆発圧着法の概要

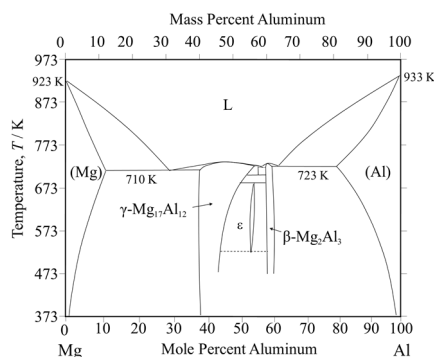


図 2 Mg-Al 二元状態図

3. 研究の方法

(1) 合金組成の影響評価

合金組成 (アルミニウム添加量) の異なるマグネシウム合金 (AZ31, AZ61, AZ80) と特定のアルミニウム合金を用いた爆着材を作製した。さらに、合金組成の異なるアルミニウム合金 (A6005C, A5052) を用いた爆着材も作製した。ここで、爆着に用いる試料のサイズは幅 130 mm × 長さ 1000 mm × 厚さ 3 mm とし、母材はマグネシウム合金、合せ材はアルミニウム合金として接合した。これらの試料について、接合界面組織 (中間層の生成状態) や接合強度等の材料特性を評価した。なお、両合金の接合において、接合界面における中間層については、状態図 (図 2) の中間領域あたりに見られる金属間化合物である γ 相および β 相が生成することが報告されている。

(2) 焼鈍処理の影響評価

爆着後には、試料内部に生じた残留応力を取り除くために焼鈍処理が必要となる。爆着材に対して焼鈍処理を施し、接合界面における中間層の生成状態や接合強度に及ぼす影響を評価した。さらに、接合界面近傍の残留応力状態について、放射光 X 線回折を用いた評価を実施した。

4. 研究成果

(1) 合金組成の影響評価

AZ31 マグネシウム合金と A6005C アルミニウム合金を爆着法により接合した結果、特徴的な波状界面が得られた (図 3)。合金組成を変えた場合においても、波高や波長に変化は見られたものの同様の波状界面が得られた。また、マグネシウム合金側においては断熱せん断帯や双晶の発生が認められた。これらは、爆着時の衝撃によって生じたものと考えられる。

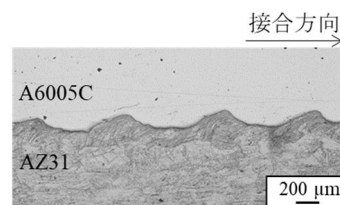


図 3 接合界面の光学顕微鏡写真

各爆着材の接合界面における走査透過型電子顕微鏡（Scanning Transmission Electron Microscope: STEM）による組織観察結果を図4に示す。いずれの試料においても、接合界面にて中間層（図中赤矢印で示す領域）が形成していた。AZ31/A6005C 爆着材（図4(a)）では、中間層の形成は断続的であり、その厚みは最も厚い箇所です約 $0.1\ \mu\text{m}$ であった。これに対し、アルミニウム合金中のマグネシウム濃度のみを高くした AZ31/A5052 爆着材では、中間層厚みは約 $2\ \mu\text{m}$ と厚くなった（図4(b)）。一方、マグネシウム合金中のアルミニウム濃度のみを高くした AZ80/A6005C 爆着材（図4(c)）では、AZ31/A6005C 爆着材（図4(a)）とは異なり中間層が一定の厚みで形成し、その厚みは約 $0.7\ \mu\text{m}$ であった。さらにアルミニウム合金中のマグネシウム濃度も高くした AZ80/A5052 爆着材（図4(d)）では、最も中間層厚みが大きく、その厚みは約 $5\ \mu\text{m}$ であった。組成分析より、いずれの試料においても中間層内部にて $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相の生成が確認できた。図5に各試料のせん断試験結果を示す。中間層の厚みが断続的であった AZ31/A6005C 爆着材においてせん断強度が最も小さく、AZ31/A5052 および AZ80/A6005C 爆着材では同程度の高いせん断強度が得られた。一方、中間層の厚みが最も大きかった AZ80/A5052 爆着材では、それら二試料と比べせん断強度が低下した。摩擦攪拌接合を用いた検討では、中間層の厚みが $1\ \mu\text{m}$ 以上となるとせん断強度が大きく低下するとされているが、爆着材のせん断強度には、中間層の厚みの他、爆着に用いる母材および合せ材の強度も大きく影響する可能性が示唆された。

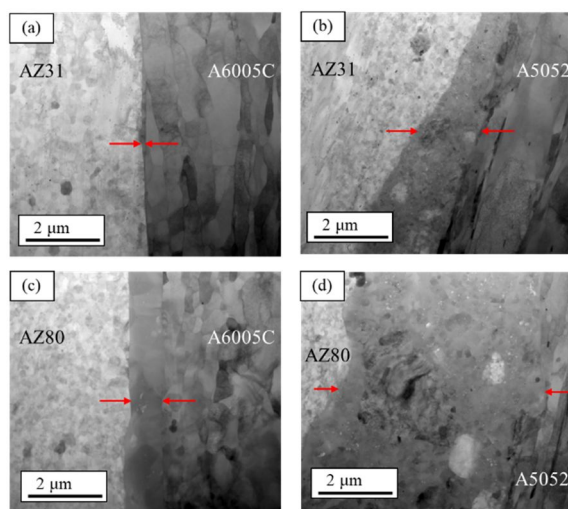


図4 爆着後の各試料における STEM 明視野像

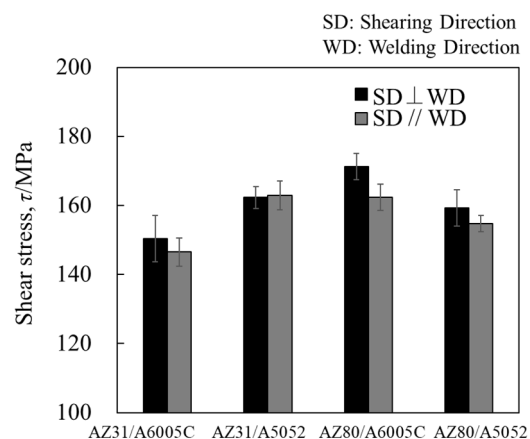


図5 爆着後の各試料におけるせん断強度

(2) 焼鈍処理の影響評価

AZ80/A6005C 爆着材に対して、373 K および 473 K にて 86.4 ks 焼鈍した後に、接合界面組織を STEM 観察した結果を図5に示す。焼鈍前の爆着材の観察結果（図6(a)）も合わせて示した。焼鈍により接合界面において中間層の厚みが $2\sim4\ \mu\text{m}$ 程度に増大した。373 K 焼鈍材（図6(b)）では中間層が部分的に厚く形成していたのに対し、473 K 焼鈍材（図6(c)）では界面において均一な厚さで形成していた。また、373 K 焼鈍材では爆着まま材と同様に中間層が一層であるのに対し、473 K 焼鈍材では二層構造となっていた。473 K 焼鈍材において、A6005C 側に新たに Al リッチの $\beta\text{-Al}_3\text{Mg}_2$ 相が形成することが確認できた。爆着と比較して接合時の入熱量の大きいレーザー溶接による接合時には、 $\beta\text{-Al}_3\text{Mg}_2$ 相及び $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相が形成することが報告されている。本研究より、爆着材の界面においてはまず $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相が形成し、焼鈍に伴って $\beta\text{-Al}_3\text{Mg}_2$ 相が形成することが明らかとなった。

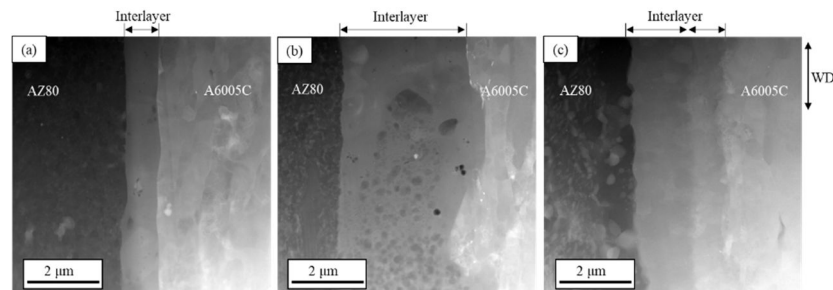


図6 AZ80/A6005C 爆着材の焼鈍前後における STEM 暗視野像

せん断試験の結果を図7に示す。爆着まま材および 373 K 焼鈍材では、せん断強度が同程度であり、せん断試験方向による異方性は見られなかった。これらに対し、473 K 焼鈍材では、いずれのせん断方向においてもせん断強度が大きく低下した。接合界面近傍の機械的性質についてより詳細に評価するため、爆着材および 473 K 焼鈍材について、ナノインデンテーション法によ

り微小硬さを測定した結果を図8に示す。中間層内部においては、爆着材では接合界面の硬さがマグネシウム合金側と同程度であったが、焼鈍後は中間層内部にて硬さが増大し、特にアルミニウム合金側において著しく増大した。よって473 K焼鈍材においては、 β - Al_3Mg_2 相にて硬さが著しく大きいために、これが破壊の起点となることでせん断強度が大きく低下したものと推定された。

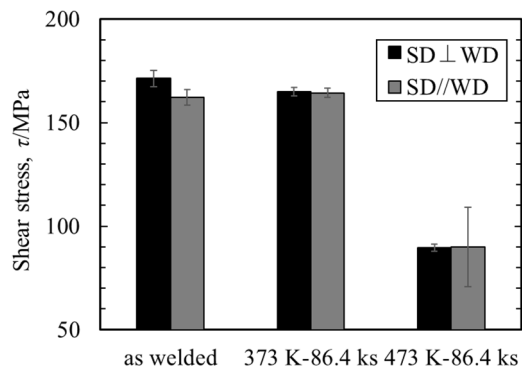


図7 AZ80/A6005C 爆着材の焼鈍前後におけるせん断強度

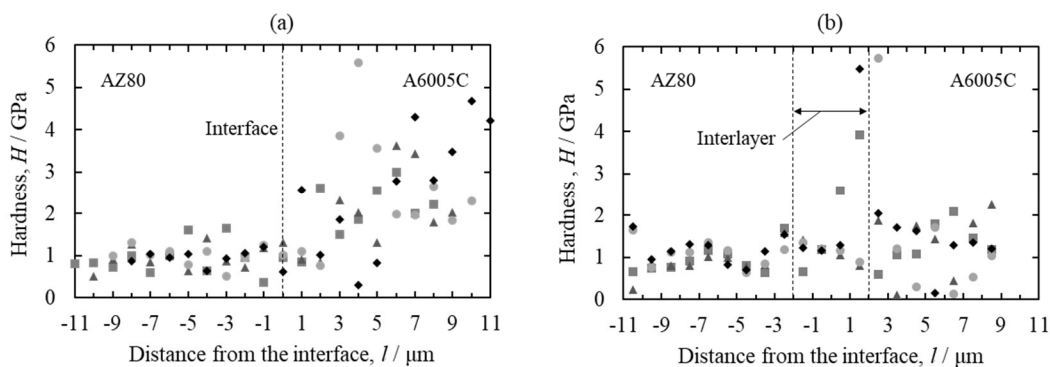


図8 AZ80/A6005C 爆着材の(a)焼鈍前および(b)焼鈍後におけるナノインデンテーション測定結果

爆着まま材、373 K および 474 K 焼鈍材について、接合界面近傍の残留応力状態を放射光 X 線を用いた $\sin^2\psi$ 法により測定した。測定応力方向は接合方向平行とし、回折面については、マグネシウム合金では(3032)面、アルミニウム合金では(511)面とし、測定時の放射光 X 線の波長は 0.135 nm、エネルギーは 9 keV とした。これにより得られた結果を図9に示す。爆着材においては、マグネシウム合金側およびアルミニウム合金側の残留応力は、それぞれ引張および圧縮の残留応力であった。線膨張係数の小さな合金(アルミニウム合金)が、線膨張係数の大きな合金(マグネシウム合金)の収縮を拘束するために、このような残留応力分布となったと考えられる。373 K および 473 K にて 1.8 ks 焼鈍した場合、マグネシウム合金側およびアルミニウム合金側の残留応力は、それぞれ圧縮および引張となり、焼鈍前の残留応力状態と逆転する傾向が得られた。焼鈍時間を 86.4 ks とすると、373 K ではマグネシウム合金およびアルミニウム合金のいずれにおいても圧縮の残留応力が認められたのに対し、473 K では、マグネシウム合金側およびアルミニウム合金側の残留応力は、それぞれ圧縮および引張のままであり、いずれも焼鈍時間に伴い応力値が小さくなった。このような焼鈍に伴う残留応力の変化に影響を及ぼす因子としては、マグネシウム合金における動的再結晶による粒界移動、アルミニウム合金における時効硬化に伴う内部応力の増加、接合界面における中間層の増加や、爆着により導入された転位密度の焼鈍による低下等が考えられる。今後は、冷却過程および焼鈍過程における接合界面の弾性不均一性に関する定量的な評価が必要である。両合金の焼鈍に伴う組織変化について詳しく評価し、解析を行っていくことが求められる。

473 K での焼鈍は、接合界面における残留応力を低減することには有効であると考えられるが、焼鈍に伴い剪断強度が大きく低下してしまうため、残留応力を低減し、かつ接合強度が高く維持されるような焼鈍条件の検討が求められる。また、373 K での焼鈍は、接合界面においていずれも圧縮の残留応力が認められたが、どこで中立しているのかについては、3 軸応力値を解析することによる更なる解析が求められる。界面においてこのような残留応力状態となった場合は、亀裂の進展が遅延し疲労強度が向上することが期待される。爆着材の疲労強度に関する評価事例は限られ、マグネシウム合金/アルミニウム合金爆着材については疲労強度を評価した例はない。マグネシウム合金/アルミニウム合金爆着材の疲労試験において、亀裂の発生および進展がどのように生じるのか評価し、焼鈍条件が疲労特性に及ぼす影響について、詳細に検討することが求められる。

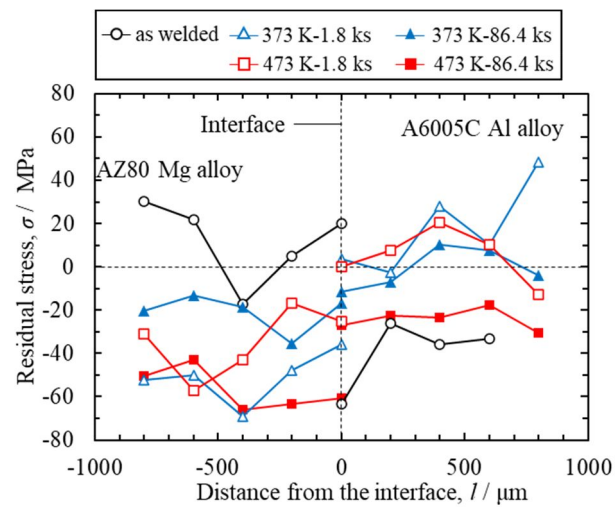


図9 AZ80/A6005C 爆着材における接合界面近傍の残留応力測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 成田 麻未、田中 宏樹、森 久史、佐藤 尚、渡辺 義見、斎藤 尚文、千野 靖正、花野 嘉紀、山田 吉徳、箕田 正	4. 巻 60
2. 論文標題 マグネシウム合金/アルミニウム合金爆着クラッド材における界面の金属組織の特徴	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 軽金属溶接	6. 最初と最後の頁 38～45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11283/jlwa.60.38.R-6	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 Asai Konosuke, Mihara-Narita Mami, Sato Hisashi, Watanabe Yoshimi, Mori Hisashi, Saito Naobumi, Nakatsugawa Isao, Chino Yasumasa	4. 巻 72
2. 論文標題 Effect of magnesium alloy compositions on the interfacial microstructure, corrosion resistance and mechanical properties of explosively welded magnesium/aluminum alloys	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Institute of Light Metals	6. 最初と最後の頁 255～264
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2464/jilm.72.255	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 Mihara-Narita Mami, Asai Konosuke, Sato Hisashi, Watanabe Yoshimi, Mori Hisashi, Saito Naobumi, Chino Yasumasa	4. 巻 31
2. 論文標題 Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of Explosively Welded Mg/Al Alloy Plates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Engineering and Performance	6. 最初と最後の頁 7039～7048
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11665-022-06843-z	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 MIHARA-NARITA Mami, ASAI Konosuke, MORI Hisashi, SAITO Naobumi, CHINO Yasumasa, SATO Hisashi, WATANABE Yoshimi	4. 巻 41
2. 論文標題 AZ80マグネシウム合金/A6005Cアルミニウム合金爆発圧着材の接合界面組織および機械的性質に及ぼす焼鈍処理の影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY	6. 最初と最後の頁 107～115
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2207/qjws.41.107	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 Mihara-Narita Mami	4. 巻 2022
2. 論文標題 Elucidation of the joining and interface mechanism of lightweight difficult-to-weld materials joined by explosive impact force	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Impact	6. 最初と最後の頁 54 ~ 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21820/23987073.2022.1.54	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 Mihara-Narita Mami, Asai Konosuke, Sato Hisashi, Watanabe Yoshimi, Mori Hisashi, Saito Naobumi, Chino Yasumasa	4. 巻 -
2. 論文標題 Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of Explosively Welded Mg/Al Alloy Plates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Engineering and Performance	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) 10.1007/s11665-022-06843-z	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 Mihara-Narita Mami	4. 巻 2022
2. 論文標題 Elucidation of the joining and interface mechanism of lightweight difficult-to-weld materials joined by explosive impact force	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Impact	6. 最初と最後の頁 54 ~ 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21820/23987073.2022.1.54	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 成田 麻未, 森久史, 佐藤尚, 渡辺義見, 斎藤尚文, 千野靖正, 花野嘉紀, 山田吉徳, 箕田正, 田中宏樹	4. 巻 60
2. 論文標題 マグネシウム合金 / アルミニウム合金爆着クラッド材における界面の金属組織の特徴	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 軽金属溶接	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 浅井康之介, 成田麻未, 佐藤尚, 渡辺義見, 森久史, 斎藤尚文, 中津川勲, 千野靖正	4. 巻 72
2. 論文標題 マグネシウム/アルミニウム合金爆発圧着材の界面組織, 耐食性および機械的性質に及ぼすマグネシウム合金組成の影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 軽金属	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13件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 成田麻未, 浅井康之介, 森久史, 千野靖正, 佐藤尚, 渡辺義見
2. 発表標題 爆発圧着法による軽金属材料の接合および特性評価
3. 学会等名 溶接学会 軽構造接合加工研究委員会 第38回委員会, オンライン.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成田麻未, 浅井康之介, 森久史, 千野靖正, 佐藤尚, 渡辺義見
2. 発表標題 合金組成を変化させたMg/Al合金爆着材の界面組織とせん断強度との関係
3. 学会等名 2022年度溶接学会秋季全国大会, くにびきメッセ.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Mihara-Narita, K. Asai, H. Mori, Y. Chino, H. Sato and Y. Watanabe
2. 発表標題 Dissimilar joining of Mg/Al light metals by explosive welding
3. 学会等名 The 75th IIW Annual Assembly and International Conference, online. (国際学会)
4. 発表年 2022年

1．発表者名 M. Mihara-Narita
2．発表標題 Effects of alloy compositions on the interfacial microstructure and mechanical properties of explosively welded Mg/Al alloy plates
3．学会等名 4th Global Summit on Future of Materials Science and Research, online. (招待講演)(国際学会)
4．発表年 2022年

1．発表者名 成田麻未, 浅井康之介, 佐藤尚, 渡辺義見, 森久史, 斎藤尚文, 中津川勲, 千野靖正
2．発表標題 マグネシウム合金/アルミニウム合金爆発圧着材における接合界面組織の形成に及ぼすマグネシウム合金組成の影響
3．学会等名 軽金属学会第140回春期大会
4．発表年 2021年

1．発表者名 成田麻未, 浅井康之介, 佐藤尚, 渡辺義見, 森久史, 斎藤尚文, 千野靖正
2．発表標題 爆発圧着法によるAZ80マグネシウム合金/A6005Cアルミニウム合金の異種金属接合
3．学会等名 2021年度溶接学会秋季全国大会
4．発表年 2021年

1．発表者名 成田麻未, 浅井康之介, 佐藤尚, 渡辺義見, 森久史, 斎藤尚文, 千野靖正
2．発表標題 AZ80マグネシウム合金/A6005Cアルミニウム合金爆発圧着材の接合界面組織及び機械的性質に及ぼす焼鈍処理の影響
3．学会等名 先進自動車製造技術における接合技術(JAAA)2021
4．発表年 2021年

1. 発表者名 浅井康之介, 成田麻未, 森久史, 斎藤尚文, 千野靖正, 佐藤尚, 渡辺義見
2. 発表標題 マグネシウム合金/アルミニウム合金爆着材の特性に対する焼鈍条件の影響
3. 学会等名 日本金属学会 秋期(第169回)講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井康之介, 成田 麻未, 森 久史, 斎藤 尚文, 千野 靖正, 佐藤尚, 渡辺義見
2. 発表標題 マグネシウム合金/アルミニウム合金爆発圧着材の接合界面組織に及ぼす焼鈍条件の影響
3. 学会等名 軽金属学会第142回春期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mami Mihara-Narita, Konosuke Asai, Hisashi Mori, Yasumasa Chino, Hisashi Sato, Yoshimi Watanabe
2. 発表標題 Dissimilar joining of Mg/Al light metals by explosive welding
3. 学会等名 IIW 2022 International Conference on Welding and Joining (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mami Mihara Narita, Konosuke Asai, , Hisashi Sato, Yoshimi Watanabe, Hisashi Mori, Naobumi Saito, Isao Nakatsugawa, Yasumasa Chino
2. 発表標題 Interfacial microstructure and mechanical property of explosively welded Mg/Al alloy plates
3. 学会等名 European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes (EUROMAT) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1．発表者名 成田麻未
2．発表標題 軽量金属材料のマルチマテリアル化技術 - 爆発圧着法による異種金属の接合
3．学会等名 令和5年度産学官協働ローカルイノベーション創出事業 マテリアル・プロセス研究会（招待講演）
4．発表年 2023年

1．発表者名 M. Mihara-Narita, H. Sato, Y. Watanabe, H. Mori, M. Bian, Y. Chino
2．発表標題 Effect of various interfacial microstructure on bonding strength of explosively welded magnesium/aluminium cladding plates
3．学会等名 International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials (Thermec 2023)（招待講演）（国際学会）
4．発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--------	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------