

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05028

研究課題名(和文) 実験ならびに数値解析による異種金属電磁圧接界面形成機構の解明と接合条件の確立

研究課題名(英文) Experimental and numerical analyses for elucidation of formation mechanism of magnetic pulse welded dissimilar metal joint interface and establishment of optimum welding conditions

研究代表者

熊井 真次 (Kumai, Shinji)

東京工業大学・物質理工学院・教授

研究者番号：00178055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：電磁圧接の接合条件、異種金属の接合界面形態、接合強度の相互関係について、実験的手法ならびに衝撃解析と熱解析をリンクさせた数値解析手法によって調査した。衝突点における両金属成分の分布(混合)挙動、衝撃圧接界面における圧力上昇と温度上昇、その後の熱拡散による冷却(温度低下)挙動をシミュレーションし、これを実際に得られた衝撃圧接界面組織と突き合わせ、異種金属電磁圧接界面に特有な組織の形成機構を明らかにした。数値解析で得られた接合界面近傍の物質移動、温度変化に基づいて再現された最終的な接合界面は、実験で得られた接合界面と定量的によく一致していた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

異種金属接合は製品のマルチマテリアル化に欠かせないが、通常の熔融接合法や固相接合法は熱影響による組織変化や特性劣化が大きいため、異種金属接合には適用できない。電磁圧接は電磁力により異種金属を高速で傾斜衝突させ、固相状態で瞬間的に接合させる手法であり、どのような金属でも極めて強固に接合できる。本研究では、数μ秒間という極めて短時間に起こる金メタルジェットの放出と波状界面形成、局所的圧力・温度上昇とその後の急速冷却過程を数値解析して再現した接合界面が、実際の接合界面と極めてよく一致することを示したものであり、接合界面形成メカニズムの解明という学術的意義、最適接合条件の確立という社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：Mutual relationship among welding conditions, joint interface morphologies of dissimilar metals and their joint strength was investigated by using both experimental and numerical analyses. The numerical analysis combining an impact analysis and a thermal analysis was effective to reproduce the material distribution (mixing behavior of two metals) at the collision point, abrupt and sharp increase in pressure and temperature at the joint interface, and a rapid cooling behavior at the joint interface due to the thermal diffusion after the collision. The reproduced joint interface morphology by the simulation showed a good quantitative agreement with that of the experimentally obtained dissimilar metal joint interface. These results indicate that the approach used in the present study was useful to reveal the formation mechanism of the magnetic pulse welded interface and establish the optimum welding condition for producing strong and reliable dissimilar metal joints.

研究分野：接合、鋳造、組織制御、力学的性質、疲労、破壊、軽金属

キーワード：接合・溶接 構造・機能材料 異種金属接合 数値解析 衝撃圧接 接合機構 接合条件

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

異種金属接合は製品のマルチコンポーネント化・マルチマテリアル化に欠かすことのできない重要な課題である。しかし、異種金属接合においては、通常の溶融接合や固相接合は熱影響による組織変化が大きいため適用できない場合が多い。そのため、異種金属同士を超高速で衝突させ、瞬間的に接合する衝撃圧接が注目を集めている。代表的な衝撃圧接には、爆薬の爆轟を駆動力とする爆発圧接と電磁力を駆動力とする電磁圧接がある。

金属同士をある衝突速度、衝突角度の条件で高速傾斜衝突させると、衝突点からメタルジェットが放出され、金属表面の酸化皮膜や汚れが除去されて活性化清浄面が出現する。衝突点の高圧力下では固体金属があたかも流体(気体や液体)のように振舞い、衝突点後方の接合面には特徴的な波状界面が生成する。清浄な金属表面同士が瞬間的に高圧で押付けられることにより、同種金属はもちろんのこと異種金属間においても金属的結合が達成される。接合は数~数十 μs オーダーという極短時間で完了し、また、接合材の温度変化や組織変化は接合界面とそのごく近傍に限られ、母材の組織や特性はほとんど変化しない。

従来の研究において、爆発圧接により高エネルギーで衝撃圧接した異種金属接合界面の実験的解析を行い、接合界面に生成する層状あるいは島状の中間層内部には、非平衡な金属間化合物相のみならず局所的な溶融を示唆する微細な凝固組織やポイド等の凝固欠陥が観察されること等を明らかにしてきた。しかし、衝撃圧接界面における変形挙動や熱履歴(温度変化)を実験的に観察することは不可能であるため、どのように波状界面が生成するのか、なぜ接合界面のその位置に非平衡相が形成するのか、なぜ接合界面のその位置に局部溶融が見られるのか等、衝撃圧接界面に特有な組織の形成機構については、未だ多くの疑問が解明されていない。特に電磁圧接においては、爆発圧接とは異なり、衝突速度、衝突角度、衝突エネルギー等の接合条件が時々刻々と変化するため、電磁圧接した異種金属接合界面組織形態や中間層の大きさや分布と接合条件との関係について、定量的に明らかにした研究はほとんどない。

よって、爆着圧接、電磁圧接等の衝撃圧接のメカニズムを解明し、強固で信頼性に富む異種金属衝撃圧接を実現するためには、これら未知の学術的課題に取り組む必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、電磁圧接の接合条件と異種金属の接合界面形態、接合強度との関係について実験的手法を用いて調査するとともに、数値解析的手法を導入し、衝撃解析手法と熱解析手法をリンクさせることによって、衝突点における両金属成分の分布(混合)挙動、衝撃圧接界面における圧力上昇と温度上昇、その後の熱拡散による冷却(温度低下)挙動をシミュレーションし、これを実際に得られた衝撃圧接界面組織と突き合わせることで、異種金属電磁圧接界面に特有な組織の形成機構を明らかにすることを目的としている。

さらに数値解析で得られた、極短時間の内に起こる接合界面近傍の物質移動、温度変化に基づき最終的な接合界面形態を予測し、これを実際に得られた接合界面と比較・検討することによって、接合界面形成機構を解明し、最適接合条件を確立することを目的としている。

3. 研究の方法

まず、実験的手法である、電磁パルスを用いた異種金属電磁圧接について述べる。電磁圧接装置のワンターンコイル上に、間隙を設けてFlyer plate (Al または Cu) と Parent plate (Cu、Ni、Fe) を平行に設置した。放電回路を用い、種々の放電エネルギー条件でコイルに大電流を流し、電磁力を発生させてFlyer plate と Parent plate を傾斜衝突させ、異種金属電磁圧接材を作製した。得られた接合材について組織観察ならびに引張せん断試験を実施し、接合界面組織と

接合強度との関係について調査した。

次に、電磁圧接過程を数値解析する手法を述べる。図 1 に示すように、まず電磁圧接装置を電気回路で模擬し、Emag-Mechanical 連成解析法を用いた Model 1 によって、時々刻々と変化するコイルに流れる放電電流、発生する磁場、電磁力を算出し、この電磁力によって引き起こされる Flyer plate の変形を求めた。これを相互に繰り返すことにより、Flyer plate が Parent plate へ傾斜衝突する過程を再現し、衝突速度 V と衝突角度 θ を算出した。次に得られた V と θ を初期条件として、粒子法的一种である SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics 法) を用いた Model 2 によってメタルジェットの放出、波状界面の形成過程、接合界面での圧力ならびに温度変化を再現した。さらに Model 2 の解析結果を初期条件として、OpenFOAM を用いた Model 3 によって接合界面での温度変化、すなわち冷却過程を数値解析し、局所融解領域ならびに中間層の生成過程を再現した。

最後に、数値解析によって再現された接合界面を実際に電磁圧接で得られた接合界面と比較し、両者が定量的に一致するかどうか調査した。異種金属電磁圧接界面の形成機構について考察を行うとともに、衝突速度、衝突角度、衝突エネルギーを軸とする Welding window について検討を行った。さらに Flyer plate と Parent plate の厚さや強度ならびに初期表面状態が接合界面形態に及ぼす影響について実験、数値解析の両手法を用いて調査し、強靱で信頼性に富む異種金属電磁圧接材を得るための最適条件について検討を行った。

4. 研究成果

Cu/Ni、Al/Cu、Al/Ni を対象として V および θ を系統的に変化させて電磁圧接を行い、併せて数値解析によってこれら電磁圧接材の波状界面形成過程を再現し、両金属の密度差、 V 、 θ が波状界面形態に及ぼす影響について明らかにした。さらに従来使用していた SPH 法による数値解析モデルを改良し、SPH 粒子の色を金属板表面からの距離に従って系統的に変化させることによって、表面からどの程度の深さの領域からメタルジェットが放出されているのか、接合中に衝突面近傍の各金属がどこからどこへ、どのように動いていくのかをより明瞭に可視化できるモデルを開発した。これにより、図 2 に示すように、Cu/Ni、Al/Cu、Al/Ni 等の電磁圧接材の波状界面形成過程を、既往の研究に比べはるかに詳細に再現することができた。

実用的な観点から最も注目されている Al/Fe 接合についても実験ならびに数値改正を実施した。Flyer plate に A1050 アルミニウム板 (Al)、Parent plate に低炭素鋼板 SPCC (Fe) を使用し、異なった放電エネルギーや板の設置間隔で電磁圧接することにより様々な V と θ の条件下で Al/Fe 接合材を作製し、接合強度と界面組織について調べた。SEM/BEI による接合界面観察の結果、母材破断するような強固な接合材の接合界面にはトリガー状の波状模様に加え中間層が形成されていること、中間層の量や形態は接合方向に沿って変化し、これらは溶融した形跡の有無や中間層内の Al と Fe の構成比 (at%) 等によって大きく 4 種類のタイプに分類できることを明らかにした。この中で、接合界面に沿って、波の前方に Al と Fe の構成比 (at%) がほぼ 5:5 で、溶融した痕跡が見られる中間層、後方に Al と Fe の構成比がほぼ 85:15 で、溶融した痕跡が見られない中間層が分布した波状界面が、最も広範囲に観察された。

数値解析の結果、衝突点から Al を主成分とするメタルジェットが放出され、これが衝突点前方の Fe 表面に衝突するとともに衝突点後方に巻き込まれることによってトリガー状の波状界面が形成することが明らかとなった。接合界面近傍、特に波の頭頂部においては Al と Fe の粒子数の比はほぼ 1:1 になっており、さらに Al と Fe の融点を超える急激な温度上昇が起こっていることから、このような領域は局所溶融している可能性があることがわかった。一方、接合界面から 100 μm 離れた領域ではほとんど温度上昇が起こっていないため、この大きな温度勾配により

加熱が促進され、その結果局所溶融領域は $10^8 \sim 10^9 \text{K/s}$ オーダーの冷却速度で急冷されることが明らかとなった。よって、Al/Fe 電磁圧接界面の中間層はこのような特異な条件下で生成すると考えられる。数値解析で再現された波状界面形態、中間層の生成位置、Al と Fe の構成比は、実験結果と良い一致を示しており、これは本数値解析手法が、Al/Fe 電磁圧接材の接合界面形成過程の解明に極めて有効であることを示している。

また、一定の V の下、異なった β で電磁圧接を可能とする治具を考案し、これを用いて種々の条件で接合材を作製した。並行して SPH 法を用いた数値解析を実施し、メタルジェットの放出量や成分、波状界面の寸法変化、接合界面の温度上昇が V と β によってどのように変化するか調査した。その結果、実験と数値解析の両方の手法により β が増加するほど局所溶融領域が減少し、よって接合界面に生成する中間層の量が減少することが明らかとなった。本研究で得られた実験結果、数値解析結果ならびにメタルジェットの放出条件や波状界面形成のための限界条件に関する理論計算結果を基に、良好な Al/Fe 電磁圧接材が得られる条件を表す Weldability window を作成した。

金属間の密度差、 V 、 β に加え、Flyer plate の運動エネルギー変化が波状界面形態に及ぼす影響、Parent plate の板厚変化が波状界面形態に及ぼす影響、Parent plate の変形抵抗が波状界面形態に及ぼす影響、Parent plate の表面粗さが波状界面形態に及ぼす影響等、異種金属電磁圧接材の波状界面形態に大きな影響を及ぼすと考えられる因子の影響についても調査を行った。その結果、Flyer plate の板厚を変えて Flyer plate の運動エネルギーを増加させると形成する波が大きくなること、Parent plate の厚さが薄い場合には衝突時に Parent plate が大きく変形すると、衝突エネルギーが費やされ、波が小さくなることが明らかになった。さらに Parent plate の変形抵抗が大きいと衝突点後方へのメタルジェットの入り込みが小さくなり、形成される波が小さくなること、表面粗さを変化させた Parent plate に対し電磁圧接を行うと、板表面の荒れ、すなわち突起によってメタルジェットの放出方向が変化することによって大きな波が形成すること等、多くの新たな知見を得ることができた。

以上述べたように、電磁圧接材の波状界面形態は、従来から知られている金属間の密度差や衝突時の衝突速度 V および衝突角度 β だけではなく、その他のメタルジェットの放出挙動を変化させる要因となる因子によって決まることがわかった。本研究で得られた知見は、電磁圧接により、強固で信頼性に富む異種金属接合材を作製するための指導原理となる重要な指針を与えるものであると考えられる。

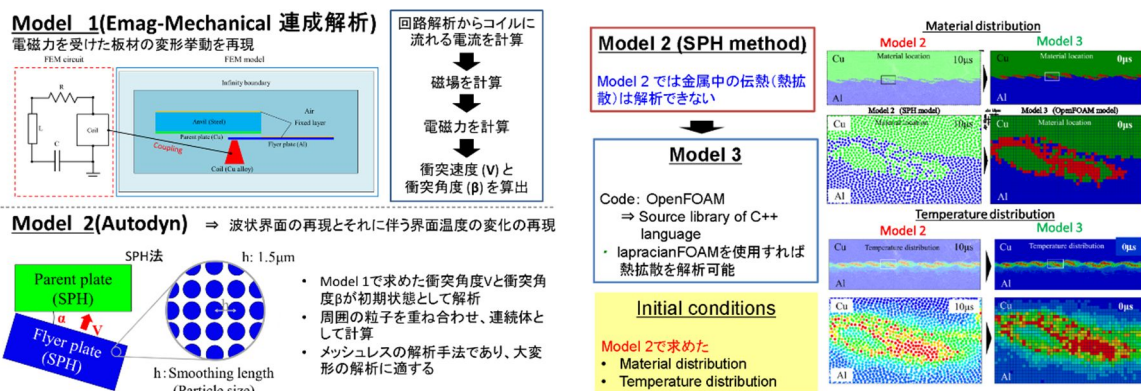


図1 電磁圧接過程を数値解析する手法

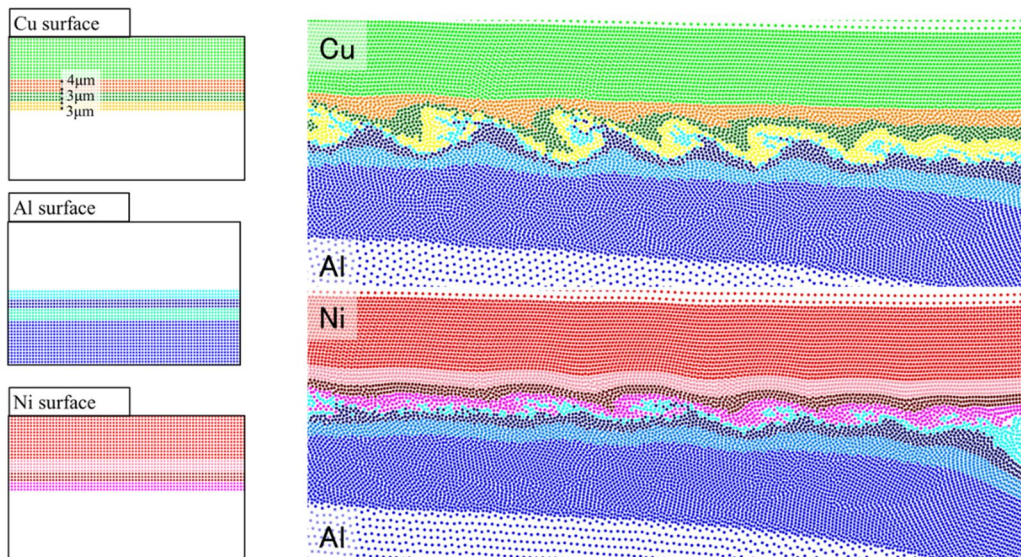


図2 SPH粒子の色を変化させて再現したAl/Cu、Al/Ni電磁圧接材の波状界面形成過程

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Takashi Kambe, Yasutaka Kedo, Shinji Muraishi, Shinji Kumai	4. 巻 61
2. 論文標題 Experimental and numerical Analyses of Magnetic Pulse Forming of A1050 Aluminum Sheet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 346-354
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/materials.L-M2019862	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 該当する
1. 著者名 木村慎吾、村石信二、熊井真次	4. 巻 60
2. 論文標題 A1050/C1020電磁圧接材の波状界面形態に及ぼすFlyer plateの板厚の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 軽金属溶接	6. 最初と最後の頁 65-72
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 Jiedi Li, Shinji Muraishi, Shinji Kumai	4. 巻 62
2. 論文標題 Experimental and Numerical Analyses of Cooling and Intermediate Layer Formation Process at the Magnetic Pulse Welded Al/Fe Joint Interface	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 1376-1385
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/matertrans.L-M2021839	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 該当する
1. 著者名 Jiedi Li, Shinji Muraishi, Shinji Kumai	4. 巻 62
2. 論文標題 Experimental and Numerical Analyses of Wavy Interface Formation and Local Melting Phenomena at the Magnetic Pulse Welded Al/Fe Joint Interface	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 1184-1193
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/matertrans.L-M2021828	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 該当する

1. 著者名 神戸貴史、村石信二、熊井真次	4. 巻 71
2. 論文標題 電磁成型したA1050アルミニウム板の電磁成型挙動と高速変形組織	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 軽金属	6. 最初と最後の頁 51-59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2464/jilm.71.51	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 Shingo Kimura, Shinji Muraishi, Shinji Kumai	4. 巻 -
2. 論文標題 Similarity and dissimilarity of joint interface morphology in magnetic pulse welded Al/Cu and Al/Ni plates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MATEC Web Conferences	6. 最初と最後の頁 326-326
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/mateconf/202032608004	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 該当する

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 木村慎吾、村石信二、熊井真次
2. 発表標題 A1050/A1050電磁圧接材の波状界面の形態に及ぼすParent plateの変形の影響
3. 学会等名 軽金属学会第138回春期大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 李 杰迪、村石信二、熊井真次
2. 発表標題 電磁圧接によるAl/Fe接合界面形態と接合強度の関係
3. 学会等名 軽金属学会第138回春期講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shingo Kimura, Shinji Muraishi, Shinji Kumai
2. 発表標題 Similarity and dissimilarity of joint interface morphology in magnetic pulse welded Al/Cu and Al/Ni plates
3. 学会等名 The 17th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA17) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須田一輝、神戸貴史、李 杰迪、木村慎吾、熊井真次
2. 発表標題 電磁圧接したSPCC/5052アルミニウム合金板の接合界面組織と接合強度
3. 学会等名 軽金属学会第139回秋期講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shingo Kimura, Shinji Muraishi, Shinji Kumai
2. 発表標題 Numerical Analysis of Wavy Interface Formation in MPWed Al/Cu Joint
3. 学会等名 2020 Dalian University of Technology-Tokyo Institute of Technology Joint Workshop on Advanced Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Kambe, Shinji Muraishi, Shinji Kumai
2. 発表標題 Experimental and Numerical Analysis of MPW and MPF of Al Sheet
3. 学会等名 The 14th International Aluminium Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiedi Li, Shinji Muraishi, Shinji Kumai
2. 発表標題 Influence of Kinetic Parameters on Interfacial Morphology of Al/Fe Magnetic Pulse Welded Joint
3. 学会等名 The 14th International Aluminium Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Kimara, Shinji Muraishi, Shinji Kumai
2. 発表標題 Numerical Analysis of Wavy Interface Formation in MPWed Al/Cu Joint
3. 学会等名 The 14th International Aluminium Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Maya Okihara, Shinji Muraishi, Shinji Kumai
2. 発表標題 Welding Interface of MPWed Aluminum Plates with Different Hardness
3. 学会等名 The 14th International Aluminium Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村慎吾、村石信二、熊井真次
2. 発表標題 Al/CuおよびAl/Niの電磁圧接界面における類似点と相違点
3. 学会等名 軽金属学会 第137回秋期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沖原麻耶、村石信二、熊井真次
2. 発表標題 調質の異なる1050アルミニウム板の電磁圧接界面
3. 学会等名 軽金属学会 第137回秋期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神戸貴史、村石信二、熊井真次
2. 発表標題 電磁成形および電磁圧接したアルミニウム板の組織変化と熱履歴の数値解析
3. 学会等名 軽金属溶接協会 年次講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神戸貴史、村石信二、熊井真次
2. 発表標題 電磁成形したアルミニウム板の最表面に形成される高速変形組織と変形挙動の数値解析
3. 学会等名 軽金属学会 第136回春期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 李 傑迪、村石信二、熊井真次
2. 発表標題 運動量パラメーターがAl-Fe電磁圧接界面に生成する中間層と温度履歴に及ぼす影響
3. 学会等名 軽金属学会 第136回春期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村慎吾、村石信二、熊井真次
2. 発表標題 Al-Cu電磁圧接界面形態に及ぼす衝突角度の影響
3. 学会等名 軽金属学会 第136回春期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村慎吾、村石信二、熊井真次
2. 発表標題 Al/CuおよびAl/Niの電磁圧接界面形態に及ぼすParent plateの硬さの影響
3. 学会等名 軽金属溶接協会2021年度年次講演大会研究成果発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寒川卓哉、木村慎吾、村石信二、熊井真次
2. 発表標題 A1070外管/A1070内管電磁圧接波状界面形態に及ぼす内管の変形の影響
3. 学会等名 軽金属溶接協会2021年度年次講演大会研究成果発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村慎吾、村石信二、熊井真次
2. 発表標題 同種・異種金属の電磁圧接界面
3. 学会等名 軽金属学会第141回秋期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寒川卓哉、木村慎吾、村石信二、熊井真次
2. 発表標題 A1070/A1070電磁圧接材の波状界面の形態に及ぼすターゲットチューブの変形の影響
3. 学会等名 軽金属学会第141回秋期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shingo Kimura, Shinji Muraishi, Shinji kumai
2. 発表標題 Numerical analysis of wavy interface formation process of Al/Cu and Cu/Ni joints fabricated by magnetic pulse welding
3. 学会等名 International Conference on High Speed Forming 2021(ICHSF21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村慎吾、村石信二、熊井真次
2. 発表標題 Al/Cu電磁圧接界面に形成される中間層の形成過程
3. 学会等名 軽金属学会第140回春期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村慎吾、村石信二、熊井真次
2. 発表標題 Al/Cu電磁圧接界面に及ぼすFlyer plateの板厚の影響
3. 学会等名 軽金属学会第139回秋期講演大会
4. 発表年 2020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
---------	---------