

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19360328
 研究課題名（和文） 電磁力衝撃利用メカニカルメタラジーによる高機能組織構造体の創製
 研究課題名（英文） Fabrication of high-performance functional structure
 by mechanical-metallurgy using magnetic pulse welding
 研究代表者
 熊井 真次（KUMAI SHINJI）
 東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授
 研究者番号：00178055

研究成果の概要：

電磁力衝撃圧着における接合プロセスのその場観察ならびに接合界面形態と衝突パラメータの相関について調査した。接合プロセスのその場観察によって、接合が達成される領域では傾斜衝突が行われており、その衝突角度は接合部の外側へ向かう程に増加することが明らかになった。接合界面は特徴的な波状を呈し、その波状形態の波長・振幅は衝突角度ならびに衝突速度に伴い変化した。多層接合界面においても、接合界面に形成される波状形態は上記の衝突パラメータで整理できることが明らかになった。これらの知見は、電磁力衝撃圧着を利用した多層接合により高機能界面を有するバルク構造材料を得るための指針となるものである。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2008年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：接合・溶接，構造・機能材料

1. 研究開始当初の背景

電磁力衝撃圧着は、金属板を高速衝突させることによって接合を行う固相接合法である。本手法によって形成される接合界面近傍には、アモルファス相や微細結晶粒組織が生成され、母材よりも高強度化される。そこで、本手法を用いて多層接合を行うことによって、アモルファス相や微細結晶粒組織を多層に積層したバルク材料を作製することが可能であると考えられ、これは従来の手法では作製不可能であった機能性構造材となると

考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、機能と構造を同時に実現するバルク材を得るための究極のメカニカルアロイングを志向し、電磁力を利用した高機能構造の実現を図る。力学的エネルギー源として電磁力を利用し、同種金属ならびに異種金属シートを衝撃圧着することにより、アモルファス、超微細粒あるいはそれらがナノスケールで複相化した界面構造を実現し、さらに、

それらの積層によりバルク化，構造化を図り，通常の手法では製造できない高機能表面・界面構造で構成される機能性構造材を得るための基礎を確立する。

3. 研究の方法

(1) 電磁力衝撃圧着法

Fig. 1 (a)に本接合法で用いる放電回路の模式図を示す。放電回路はコンデンサ C (容量 $400\mu\text{F}$)，放電ギャップスイッチ G および平板状 E 字型ワンターンコイルから構成されている。このコイルの上に，間隙を設けて重ね合わせた 2 枚の金属板を設置し，固定する。このとき，コイル側に位置する金属板を Flyer plate，固定具側に位置する金属板を Parent plate と称する。コンデンサを充電し，放電ギャップスイッチを閉じることによって大電流の放電パルスがコイルへ流す。このとき，コンデンサに充電した電気エネルギーを充電エネルギーと称し，接合条件は主にこの充電エネルギーによって制御する。

コイル中央領域を拡大した模式図を Fig. 1 (b)に示す。コイルに大電流の放電パルスが流れることにより，右ねじの法則に従ってコイルに沿って高密度な磁束が発生する。この磁束線が Flyer plate に交差すると，レンツの法則に従って Flyer plate のコイル側表面にはうず電流が発生する。コイルに流れるパルス電流は高周波数であるため，うず電流は表皮効果によって主に金属板表面部のみ発生する。このうず電流と磁束の作用により，フレミングの左手の法則に従って電磁力が上向き，すなわち Parent plate の方向へ発生する。

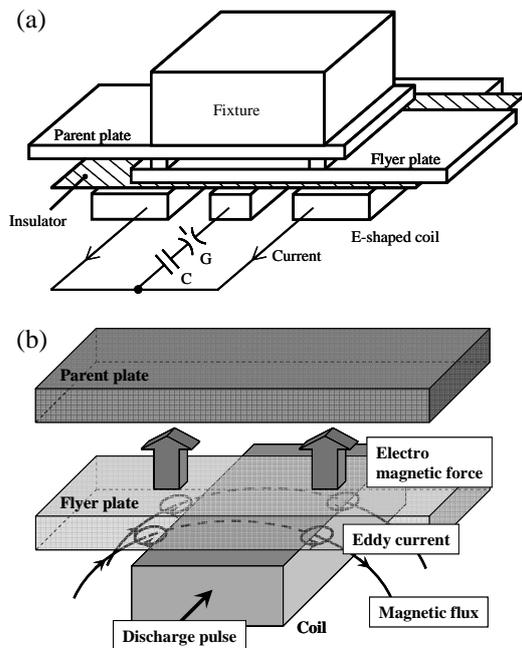


Fig. 1 Schematic illustrations of welding process of magnetic pulse welding.

(a) Set-up of the lapped plates over the E-shaped one-turn coil. (b) Principle of the magnetic pulse welding.

この発生した電磁力によって Flyer plate は Parent plate に向かって高速度で移動し，衝撃圧着される。

(2) 供試材

2 枚の接合の際には，厚さ 1.0mm の 1050 純アルミニウム板(以下，Al と表記)と厚さ 1.2mm の無酸素銅板(以下，Cu と表記)を使用した。また，多層接合の際には，厚さ 0.5mm の 1050 純アルミニウム板を使用した。それぞれの板の形状は，幅 100mm，長さ 100mm である。接合前に，粗大結晶粒を得る目的で焼鈍処理を行った。焼鈍条件は，Al に対しては 813K を 2h，Cu に対しては 873K を 2h である。板表面を耐水研磨紙で研磨後，アセトンにより洗浄し，十分に乾燥させた。

(3) 接合条件

2 枚の金属板の接合の際には，同種の金属板を重ね合わせて Fig. 1 のように設置し，Al/Al および Cu/Cu 接合材を作製した。Flyer plate と Parent plate の間隙長は 0.8mm とした。充電エネルギーは，1.5kJ から 4.0kJ までを 0.5kJ 刻みで変化させた。

多層接合の際には，Fig. 1 の 2 枚の金属板に置き換え，5 枚の Al 板を板同士の間隙長を 0.5mm としして設置し (Fig. 2)，5 枚の Al 板を高速衝突させることによって一挙に接合した。充電エネルギーは，4.0kJ とした。

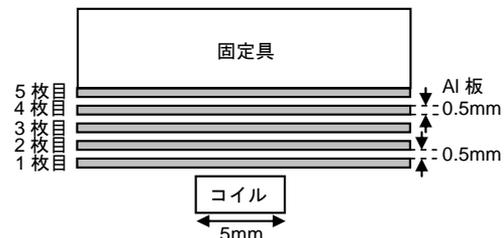


Fig. 2 Set-up of multi-layered Al plates.

(4) 高速度ビデオカメラを用いた電磁力衝撃圧着過程のその場観察

電磁力衝撃圧着は数マイクロ秒間の間に接合プロセスが完了する。そこで，Flyer plate の変形挙動を鮮明に撮影するために $1\mu\text{s}$ 間隔の撮影コマ間隔が可能な高速度ビデオカメラを用いた。高速度ビデオカメラによる撮影において，明瞭な画像を得るためには高輝度な照明が必要である。本研究では，照明にはショートアーク・パワーフラッシュを用いた。このフラッシュは，トリガー信号を受信してから約 $60\mu\text{s}$ 後に最高発光強度に達し，その後最高発光強度の状態は約 $100\mu\text{s}$ の間維持される。さらに，極短時間の金属板の挙動を撮影するためには，トリガー信号を送信するタイミングを綿密に設定する必要がある。そこで本研究では，遅延パルス発生器を用いて，高速度ビデオカメラやフラッシュ，放電回路

へのトリガー信号の送信するタイミングを制御した。フラッシュが最高発光強度に達するまでの時間が最も長い為、まず初めにフラッシュへトリガー信号を送った。その後、80 μ s後に高速度ビデオカメラへトリガー信号を送り、撮影を開始した。そして最後に、高速度ビデオカメラへのトリガー信号から25 μ s後に放電回路へトリガー信号を送り、放電を開始した。このようにトリガー信号送風のタイミングを制御し、高速度ビデオカメラによる撮影を行った。

高速度ビデオカメラによる撮影は、コイルの長手方向に対して平行な方向から行った。この方向から撮影した画像からは、Flyer plateの変形挙動や被接合金属板の衝突挙動を知ることができる。

(5) Flyer plateの移動速度の算出方法

Flyer plateの平均移動速度は、電流波形と衝突信号を観測し、衝突するまでに要した時間を算出し、金属板の間隙長をこれで除することにより算出した。

(6) 組織観察

組織観察用試料は、接合界面を含む小片を接合シーム方向に対して垂直な方向に切出し、断面を鏡面研磨後、光学顕微鏡を用いて観察した。接合界面の形態や結晶粒の形状を調べるため、鏡面研磨の後に腐食を施した。腐食は、Al/Al接合材に対してはHF:H₂O=1:50(容積比)溶液、Cu/Cu接合材に対してはH₂O₂:NH₃:H₂O=1:50:50溶液を使用し、いずれの場合も室温で行った。

4. 研究成果

(1) Flyer plateの変形挙動ならびにFlyer plateとParent plateの衝突挙動

Fig. 3は、コイルの長手方向に対して平行な方向から撮影をした代表的な連続写真である。写真上方にはParent plateの端部が観察されており、下方にはFlyer plateの端部が観察されている。図中に、被接合金属板の厚さ(白点線)ならびにコイル断面の位置を示す。Fig. 3(a)は、コイルに放電パルスが流れ始めた瞬間のFlyer plateとParent plateの様子である。この際には、被接合金属板に変化は観察されなかった。Fig. 3(b)は、放電開始から10 μ s後の写真である。この写真によって、コイル上に位置しているFlyer plateの中央部がParent plateに衝突していることがわかった。これにより、コイル中央部に対応する領域において初めに衝突が起こることがわかった。

高速度ビデオカメラ観察によって、Flyer plateの一部がParent plateに向かって張出して変形することが明らかになった。その張出す場所はコイルの位置と一致し、幅は約10mmであった。これは、生じた電磁力はコ

イルの位置に一致するFlyer plateの限られた領域を放射状に変形させることを示している。放射状に変形したFlyer plateの最上部は、矢印で示したようにParent plateに衝突した。初期衝突点は、コイルの中央部に対応する位置であった。この際の衝突角度は理論的に0°であると考えられる。

Fig. 3(c)および(d)は、初期衝突からそれぞれ1 μ sならびに2 μ s後の画像である。矢印で示したように、衝突点は変形部の両外側に広がっていた。しかし、Fig. 3(b)~(d)においてFlyer plateの変形した幅はほぼ一定であった。これは、Flyer plateとParent plateの間の衝突角度が連続的に増加していることを意味する。これらの結果により、高速度ビデオカメラを用いて得られた連続画像によって、数マイクロ秒間に起こった金属板の衝突挙動を明らかにすることができた。

さらに本観察によって、Fig. 3(b)~(d)内の二重矢印によって示したように、衝突点から発生する閃光が観察された。これらの閃光は、金属板の高速傾斜衝突の際に発生するメタルジェットが発生を示していると考えられる。衝突点からメタルジェットが発生することによって、金属板表面に堆積したごみや酸化膜を除去することができ、その結果として清浄表面が現出し、容易に接合することが可能になると考えられる。

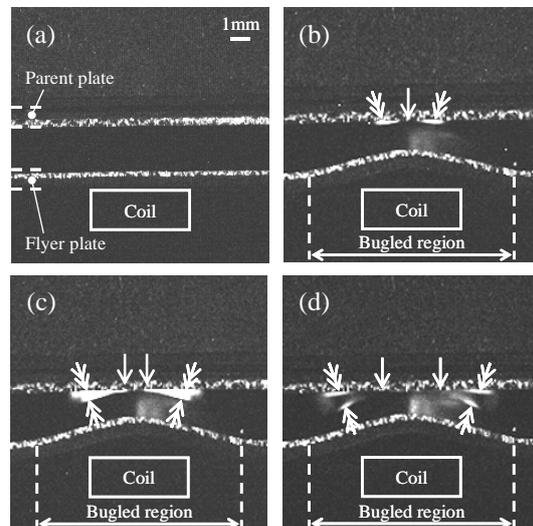


Fig. 3 A series of high-speed photographs taken from the parallel direction to the longitudinal axis of coil. (a) Onset of discharging. (b) Initial collision between the flyer plate and parent plate. (c) After 1 μ s from the initial collision. (d) After 2 μ s.

(2) 接合材のマクロ的様相および接合界面形態

Fig. 4(a)は、変形領域を接合シーム方向に対して垂直に切出した断面の光学顕微鏡組織である。写真上方がParent plateであり、下

方が Flyer plate である。Flyer plate の変形した領域の幅は約 5mm であり、コイルの幅とほぼ一致した。Fig. 4 (b), (c), (d)に、(a)内の B, C, D で示した領域の拡大光学顕微鏡組織を示す。Fig. 4 (b)に示すように、変形した領域全体にわたって接合されているのではなく、中央部は接合されておらず（以下、非接合部と表記）、コイル両縁部に対応する 2 箇所の領域で接合されていた。これらの接合部は、コイルの長手方向に沿って平行に連続していた。Fig. 4 (c), (d)に示すように、接合界面は爆発圧着界面と類似した波状形態を示した。非接合部における界面近傍の結晶粒は、接合前の結晶粒と同じ形態を示していた。一方、接合界面近傍の結晶粒は、界面に形成された波状形態に沿って変形していた。また、左右の接合界面に形成された波状形態は、非接合部中央を境界にほぼ鏡面对称の形態を示していた。これらの特徴は、Cu/Cu 接合材においても同様であった。

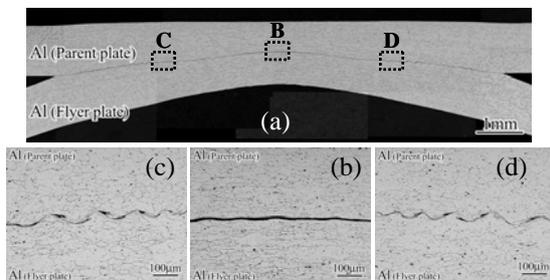


Fig. 4 Optical micrographs of the cross sectional view of the Al/Al lap joint. (a) Bulged region. (b) Central position of the bulged region. (c) Welding interface (right-hand-side). (d) Welding interface (left-hand-side).

(3) 波状界面形態の変化

Fig. 5 (a), (b)は Al/Al 接合材および Cu/Cu 接合材の右側接合部全体の光学顕微鏡組織である。写真左側が非接合部側である。波状界面の波長および振幅は一定の大きさではなく、連続的に変化していることがわかる。Fig. 6 に波状界面の波長および振幅と非接合部中央からの距離の関係を示す。波長は変形領域の外側に向かって増加していた (Fig. 6 (a))。一方、振幅は変形領域の外側に向かって一度増加するが、ある位置において最高値に達したのちに減少した (Fig. 6 (b))。また、Al/Al 接合材と Cu/Cu 接合材では、波状界面の波長および振幅はほぼ同じ大きさであった。

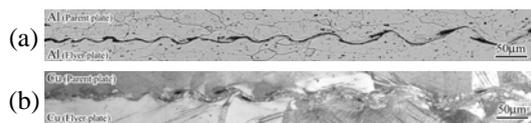


Fig. 5 Optical micrographs of the welding interface (right-hand-side). (a) Al/Al joint. (b) Cu/Cu joint.

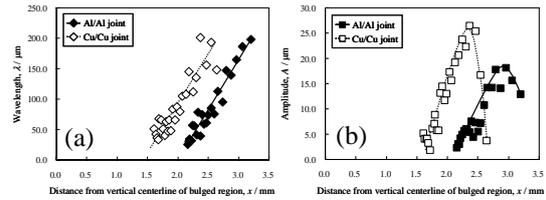


Fig. 6 Wavelength and amplitude of the interfacial wave formed in the Al/Al and Cu/Cu joints welded at discharge energy of 4.0 kJ. (a) Relationship between wavelength and distance from vertical centerline of bulged region. (b) Relationship between amplitude and distance from vertical centerline of bulged region.

(4) 波状界面の波長および振幅の充電エネルギー依存性

Fig. 6 に示したように、波状界面の波長および振幅は一定の大きさではなく、連続的に変化していた。これは、充電エネルギーの大きさに依存せず、全ての接合材において共通な特徴であった。そこで本研究では、波状界面の波長および振幅の充電エネルギー依存性を調査するために、各充電エネルギーにおいて形成された波状界面の最大波長および最大振幅を用いて評価した。Fig. 7 に最大波長および最大振幅と充電エネルギーの関係を示す。最大波長・最大振幅共に、充電エネルギーの増加に伴い増加することが明らかになった。

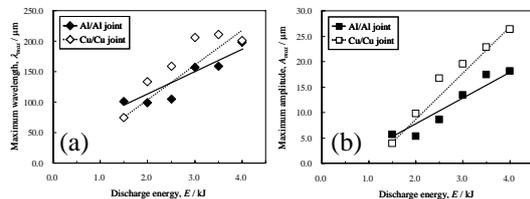


Fig. 7 Relationship between discharge energy and maximum wavelength (a) and maximum amplitude (b).

(5) Al 板多層接合材の接合界面形態

Fig. 8 は、高速度ビデオカメラにより撮影した多層 Al 板の衝突過程の連続写真である。Fig. 8 (a)は、電流をコイルに流す前の状態である。ここでは、コイルに最も近い板を 1 枚目と呼び、固定具側へ向かうほど 2 枚目、3 枚目、4 枚目、5 枚目と呼ぶ。コイルに放電電流を流すと、Fig. 8 (b)のように 1 枚目の板のコイル幅部分が電磁力によって 2 枚目の板に向かって変形し、衝突した。その後、3 枚目、4 枚目、5 枚目とコイル側から順番に変形・衝突を繰り返し、互いに圧着された (Fig. 8 (c) ~ (f))。

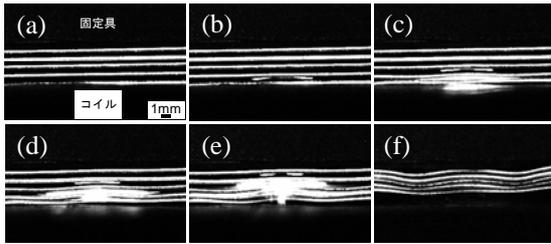


Fig. 8 High-speed images of welding process of multi-layered Al plate welding.

Fig. 9 (a)は、変形領域を接合シーム方向に対して垂直に切出した断面の光学顕微鏡組織である。写真下方がコイル側であり、上方が固定具側である。5枚のAl板の各板間の界面を詳細に観察すると、変形した約5mmの幅はコイルの幅とほぼ一致し、その中央部には接合されていない領域が存在し、その両端部に接合部が存在していた (Fig. 9 (a))。これは、2枚の接合材で報告されてきた結果と同様である。中央部の接合されていない領域の幅は、コイル側から固定具側に向かうに連れて広がった。接合部の各接合界面は波状を呈しており (Fig. 9 (b)~(e))、ここでは各板間の接合界面をコイル側から界面B、界面C、界面D、界面Eと呼ぶ、従来の2枚の接合材の報告と同様、各接合界面の波状模様の波長および振幅は一定の大きさではなかった (Fig. 10)。各接合界面の波状模様の最大波長ならびに最大振幅を比較すると、界面Bで最も大きく、コイルから離れるにしたがって波長・振幅共に小さくなっていった。

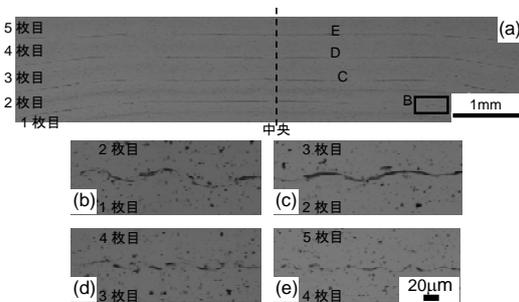


Fig. 9 Optical micrographs of cross section of bulged region (a). Welding interface between 1st plate and 2nd plate (b), between 2nd plate and 3rd plate (c), between 3rd plate and 4th plate (d), and between 4th plate and 5th plate (e).

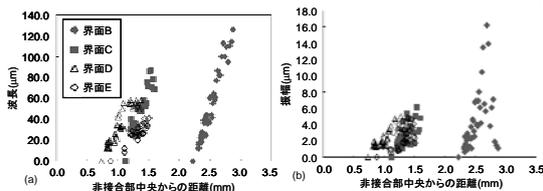


Fig. 10 Wavelength and amplitude of the each interfacial wave formed in the multi-layered Al joint.

上記のような接合界面形態の変化の理由を考えるため、まず衝突条件の一種であるAl板の移動速度を調査した。Fig. 11に、各板間のAl板の平均移動速度と移動距離の関係を示す。衝突が繰り返されることによって、Al板の平均移動速度は減速していた。実際の衝突速度は平均移動速度よりも速くなるが、平均移動速度が速くなるほど衝突速度も速くなると考えることができる。衝突速度が増加するほど界面に発生する衝突圧力も増加するため波状模様の波長ならびに振幅も大きくなると考えられる。したがって、衝突速度の減速が波状模様の形態変化に影響を及ぼしたと考えられる。

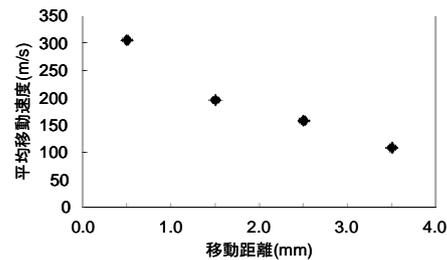


Fig. 11 Relationship between traveling distance and average traveling velocity of flyer plate.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

① Mitsuhiro Watanabe and Shinji Kumai, Interfacial Morphology of Magnetic Pulse Welded Aluminum/Aluminum and Copper/Copper Lap Joints, Materials Transactions, 50, 286-292, 2009, 査読有

② 渡邊満洋, 熊井真次, 電磁力衝撃圧着したAl/AlおよびCu/Cu重ね合せ接合材の接合界面形態, 軽金属, 59, 140-147, 2009, 査読有.

③ Shinji Kumai, Kwang-Jin Lee and Mitsuhiro Watanabe, Characteristic Interfacial Microstructure of Aluminum Alloy / Steel Lap Joints Fabricated by Several Advanced Welding Methods, Aluminium Alloys, 21945-1951, 2008, 査読有.

④ Mitsuhiro Watanabe, Shinji Kumai, Keigo Okagawa and Tomokatsu Aizawa, *In-situ* Observation of Magnetic Pulse Welding Process for Similar and Dissimilar

Lap Joints Using a High-Speed Video Camera, Aluminium Alloys, 2, 1992-1997, 2008, 査読有.

⑤ Kwang-Jin Lee, Shinji Kumai, Takashi Arai and Tomokatsu Aizawa, Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy lap joint fabricated by magnetic pressure seam welding, Materials Science and Engineering A, 471, 95-101, 2007, 査読有.

[学会発表] (計 11 件)

① 熊井真次, 渡邊満洋, 荒木愛美, 岡川啓悟, 相沢友勝, 電磁力衝撃圧着を利用したアルミニウム板多層接合と接合界面解析, 日本金属学会 第144回春期大会, 2009. 3. 29, 大岡山.

② 荒木愛美, 熊井真次, 渡邊満洋, 相沢友勝, 岡川啓悟, 電磁力衝撃圧着した純アルミニウム板多層接合材の接合界面形態, 軽金属学会 第115回秋期大会, 2008. 11. 15, 新宿.

③ Mitsuhiro Watanabe, Shinji Kumai, Keigo Okagawa and Tomokatsu Aizawa, *In-situ* Observation of Magnetic Pulse Welding Process for Similar and Dissimilar Lap Joints Using a High-Speed Video Camera, The 11th International Conference on Aluminium Alloys (ICAA11), 2008. 9. 23, Aachen, Germany.

④ Shinji Kumai, Kwang-Jin Lee and Mitsuhiro Watanabe, Characteristic Interfacial Microstructure of Aluminum Alloy / Steel Lap Joints Fabricated by Several Advanced Welding Methods, The 11th International Conference on Aluminium Alloys (ICAA11), 2008. 9. 23, Aachen, Germany.

⑤ 渡邊満洋, 熊井真次, 岡川啓悟, 相沢友勝, 高速度ビデオカメラによるAl板材の電磁力衝撃圧着の直接観察, 軽金属学会 第144回春期大会, 2008. 5. 11, 松山.

⑥ 熊井真次, 李光鎮, 渡邊満洋, 種々の先端的手法によるアルミニウム合金 / 鋼異材重ね合せ接合, 軽金属学会 第114回春期大会, 2008. 5. 11, 松山.

⑦ 渡邊満洋, 熊井真次, 電磁力衝撃圧着した Al/Al および Cu/Cu 同種接合材の接合界面形態と微細組織, 溶接学会 平成 20 年度春季大会, 2008. 4. 8, 大阪.

⑧ 渡邊満洋, 熊井真次, 岡川啓悟, 相沢友勝, 超高速動画撮影による電磁力衝撃圧着過程のその場観察, 溶接学会 平成20年度春季大会, 2008. 4. 8, 大阪.

⑨ Shuhei Kajiyama, Mitsuhiro Watanabe, Shinji Kumai, Tomokatsu Aizawa, Interfacial microstructure of Al/Cu lap joints welded by magnetic pressure seam welding, The Sixth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM6), 2007. 11. 7, Jeju Island, Korea.

⑩ Mitsuhiro Watanabe, Kentaro Ishiuchi, Shinji Kumai, Nobuhiro Ishikawa, Kazuo Furuya, Tomokatsu Aizawa, INTERFACIAL MICROSTRUCTURE OF THE IMPACT WELDED Cu-Ni and Cu-Fe LAP JOINTS, The Sixth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM6), 2007. 11. 7 Jeju Island, Korea.

⑪ 渡邊満洋, 熊井真次, 石内健太郎, 梶山修平, 相沢友勝, 電磁力衝撃圧着した Al/Fe および Al/Ni 接合界面の中間層, 軽金属学会 第 112 回春期大会, 2007. 5. 12, 富山.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊井 真次 (KUMAI SHINJI)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号: 00178055

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし