

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：12608
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21360357
 研究課題名（和文） 超高速傾斜衝突時に発生するメタルジェットの解析による異種金属衝撃
 圧着機構の解明
 研究課題名（英文） Analysis of Metal Jet Emission at High-Speed Oblique Collision
 Interface and Impact Welding Mechanism of Dissimilar Metal Joints
 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（和文）：異種金属が超高速傾斜衝突する際のメタルジェット発生ならびに接合界面形成について調査した。粒子法（SPH）を用いて種々の板厚、衝突速度、衝突角度について超高速傾斜衝突の数値解析を行い、メタルジェットの放出ならびに波状接合界面の形成を再現することに成功した。また、メタルジェットの成分は衝突する両板の密度差の程度に依存することを明らかにした。実際に電磁力衝撃圧着法（MPW）を用いて種々の異種金属接合材を作製し比較したところ、実験結果は数値解析結果とよく一致していた。

研究成果の概要（英文）：Metal jet emission and weld interface formation in impact welding were investigated for dissimilar metal lap joints. Numerical simulation of oblique collision between metal plates was performed using smoothed particle hydrodynamics (SPH) method for various plate thicknesses, collision velocities, and collision angles. Metal jet emission and formation of the characteristic wavy weld interface in impact welding were reproduced successfully. The composition of the metal jet was governed by the degree of relative density difference between two metals. Several types of lap joints were fabricated by magnetic pulse welding (MPW). Experimental results were in good agreement with the simulation results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2010年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2011年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	13,300,000	3,990,000	17,290,000

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、異種金属接合、メタルジェット、接合界面

1. 研究開始当初の背景

衝撃圧着法は固相接合法の一種であり、数マイクロ秒という極短時間で、様々な同種および異種金属接合に適用可能である。金属板が数百メートル毎秒という高速で傾斜衝突すると表面層がメタルジェットとして放出

される。メタルジェットの放出によって金属板表面には清浄面が現れ、衝突時の圧力により互いに押し付けられて、両板の原子同士が金属結合し接合する。一般に衝撃圧着材の接合界面は波状を呈する。

さて、シミュレーションを用いると、衝突

速度、衝突角度、接合材の組合せおよび接合材形状等の接合パラメータを容易に変化させることができる。衝撃圧着法のシミュレーションには Lagrange ソルバーや Euler ソルバーがよく用いられる。しかしながら、これらのソルバーで、波状界面の形成やメタルジェットの放出を再現することは難しい。これは、衝突点付近では計算メッシュが激しく変形してしまうことや、界面形態の変化を詳細に再現しようとする、極めて小さなメッシュサイズが必要となることなどが理由である。このようなことから、最近衝撃解析の分野ではメッシュレス法が注目されている。

2. 研究の目的

本研究では、メッシュレス法の一つである SPH 法を用いて衝撃圧着時の金属板の変形挙動のシミュレーションを行い、メタルジェットの放出挙動や界面形態について調査する。さらに、電磁力衝撃圧着法を用いて数種類の接合材を作製し、放出されたメタルジェットを実際に採取して、接合界面形態ならびにメタルジェットの成分を解析結果と比較検討し、異種金属の衝撃圧着機構を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 数値解析モデル

解析には、SPH 法 (smoothed particle hydrodynamics) を用いた。SPH 法では、粒子を物理量の補完点として定義する。それぞれの粒子は解析過程で変形することなく移動する。粒子の直径を平滑化長さ R として定義し、ある粒子の次の計算サイクルの物理量は、 $2R$ を半径とする円内に存在する他の粒子の物理量を参考にして算出する。

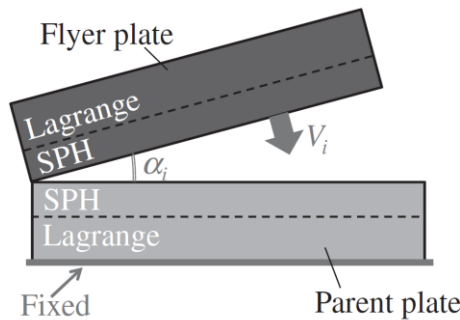


Fig. 1 Schematic illustration of analytic model.

シミュレーションは衝撃解析コード AUTODYN を用いて行った。Fig. 1 に傾斜法を模擬した解析モデルの模式図を示す。Flyer plate を parent plate に対して α_i 傾け、flyer plate 全体に初期速度 V_i を与えた。Parent plate の底部は固定した。

状態方程式には、ミーグルナイゼン型衝突ユゴニオを、構成則には Steinberg Guinan を用いた。各材料の材料パラメータは AUTODYN に付属されている材料ライブラリ、および Steinberg らによって報告された値を用いた。

(2) 解析条件

解析は Table 1 に示すように大きく分けて二つの条件で行った。一つ目の条件では、接合材の厚さを 1.0 mm に固定し、衝突角度および衝突速度を変化させた。ただし、Cu/Al および Ni/Al 接合に関しては異なった厚さの flyer plate を用いた。二つ目の条件では、衝突角度を一定にして、接合材の厚さの影響を調査した。SPH ソルバーの厚さは 100-300 μm とした。平滑化長さは定義できる粒子数の制限から、接合材のサイズによって変化させた。また、両板の相対位置の影響についても調査するため、flyer plate と parent plate を入れ替えた解析も併せて行った。

(3) 電磁力衝撃圧着

電磁力衝撃圧着法では、flyer plate を

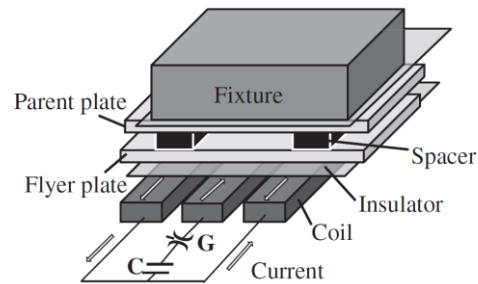


Fig. 2 General outline of magnetic pulse welding.

parent plate に衝突させて接合を行う。Fig.2 に本研究で用いた装置の放電回路の模式図を示す。研究代表者は、これまでに高速度カメラを用いて電磁力衝撃圧着時の接合材の衝突挙動について調査し、Flyer plate の中心領域が円弧状に変形して parent plate に衝突することやメタルジェットの放出挙動について報告している。

Table 1 Analytic conditions for oblique collision.

[1] Under various collision angle and collision velocity		[2] Under various plate thickness
Combination and plate thickness	Al/Al, Al/Cu, Al/Ni, Al/Mg, Cu/Ni 1 mm (Ni, Cu flyer plate: 0.3 mm)	1 mm Al/1 mm Cu, 1 mm Al/0.3 mm Cu 2 mm Al/0.3 mm Cu, 1 mm Al/1.5 mm Cu
Initial angle, α_i	5°, 10°, 15°, 20°, 25°	15°
Initial velocity, v_i	150, 250, 400 m/s	150, 250, 500, 750, 1000 m/s
Plate width	Flyer: 5 mm, Parent: 6 mm	10 mm
Smoothed length, h	10 μm	20 μm

(4) 供試材および接合条件

供試材には、純アルミニウム(Al)、純銅(Cu)、純マグネシウム(Mg)を用いた。Al(flyer plate)/Al(parent plate), Al/Cu, Cu/Al, Al/Mg, Mg/Al 接合材を作製した。Flyer plate と parent plate の間隙は 2.0 mm、接合エネルギーは 2.5kJ である。また、接合過程で発生するメタルジェットを採取するために、スペーサーの間にガラス板を挿入した。

(5) 接合界面組織観察

接合材をシーム方向に対して垂直な方向に切り出し、断面を研磨した。光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡を用いて接合界面のマイクロ組織観察を行った。

(6) メタルジェットの成分分析

Al/Cu および Cu/Al 電磁力衝撃圧着過程で発生したメタルジェットを採取し、XRD 法を用いてその化学成分を分析した。

4. 研究成果

(1) 界面形態

Fig.3 (a)に Al/Mg 電磁力衝撃圧着材の接合界面の光学顕微鏡写真を示す。Fig.3 (b)は(a)中の領域 B を拡大した反射電子像である。接合界面は衝撃圧着特有の波状界面を呈していた。形成された波の波長と振幅は接合方向に沿って連続的に変化していた。このような

変化が生じるのは、本研究で用いた電磁力衝撃圧着法では接合過程で衝突角度と衝突速度が連続的に変化するからである。

Fig.4 にシミュレーションで得られた界面形態を示す。衝突条件によって3つの異なる界面形態が得られた。それぞれ、直線状、波状、渦状である。衝突角度が一定の場合には、衝突速度が増すにつれ、界面形態は直線状から波状、さらに渦状と変化した。Fig.5 に Al/Cu および Cu/Al 電磁力衝撃圧着材で観察された接合界面の反射電子像を示す。シミュレーションによって得られた3種類の界面形態と同様な形態が実際に観察された。

Fig.6 は、典型的な welding window を模式的に示したものである。縦軸は衝突速度、横軸は衝突角度で、接合可能領域と界面形態が示されている。Welding window の形状はほとんどの同種および異種接合においてほぼ同じである。Fig.6 中の破線(a)で示すように、衝突角度が一定の場合、衝突速度の増加に伴い、界面形態は直線状から波状に変化する。なお渦状の界面形態は波状がより乱れたものと考えられる。これに対応する解析結果が Fig.4 である。Welding window の接合可能領域の外側の条件の場合には、シミュレーションによる界面形態は直線状を呈すると考えられるため、本解析結果は welding window と一致している。

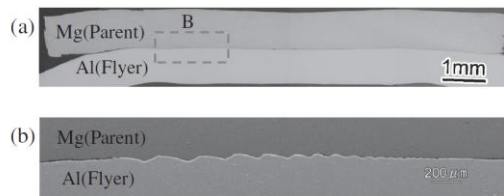


Fig. 3 Cross section of the Al/Mg lap joint. (a) Optical micrograph of bulging region. (b) Backscattered electron image of the weld interface.

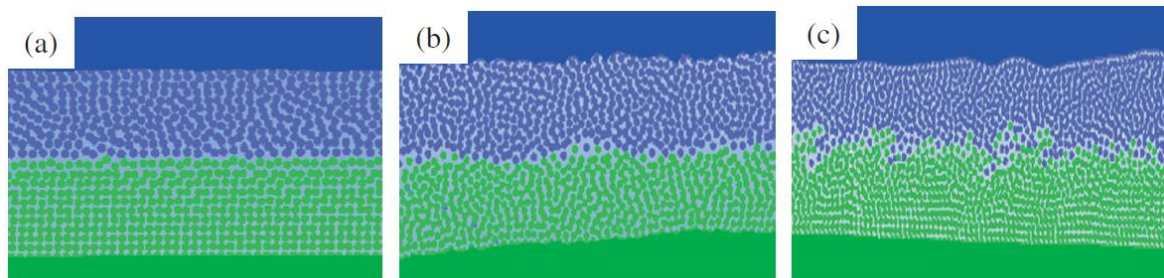


Fig. 4 Variations of weld interface morphology. (a) Straight (b) Wavy (c) Vortical.



Fig. 5 Backscattered electron images of weld interface in Al/Cu and Cu/Al lap joint. (a) Straight (b) Wavy (c) Vortical.

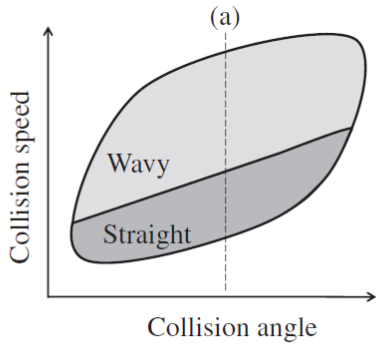


Fig. 6 Schematic illustration of typical welding window.

このように、SPH法を用いたシミュレーションは衝撃圧着時の界面形態やそれに及ぼす衝突速度および衝突角度の影響の調査に適用可能である。しかしSPH粒子は剛体球ではないので、互いに重なり合うこともある。したがって、今回の解析条件では、接合界面の波の波長や振幅を定量的に評価することは困難であると考えられる。

(2) メタルジェットの成分

SPH法を用いて衝撃圧着時のメタルジェットの放出を再現することができた。Fig.7にAl/Alの解析結果を示す。初期角度は15°、初期速度は400 m/sである。Flyer plateがparent plateに衝突し、衝突点からメタルジェットが放出されていることが確認できる。メタルジェットの速度は1000-2000 m/sであった。また、初期速度が大きくなると、放出されるメタルジェットの量も増加していた。

Al/CuおよびCu/Al衝撃圧着時の接合材の厚さの影響を調査した。Fig.8(a)-(f)に様々な板厚におけるメタルジェット放出のシミュレーション結果を示す。初期角度は15°、初期速度は500 m/sである。Flyer plateの板厚が厚くなると、衝突の運動エネルギーは増加

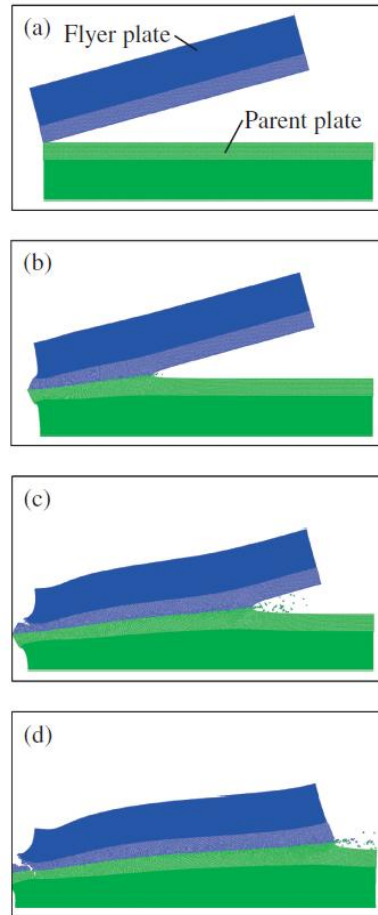


Fig. 7 Simulation results of metal jet emission. Al/Al lap joint, initial velocity is 400m/s and initial angle is 15°. (a) 0 μ s (b) 1.0 μ s (c) 2.0 μ s (d) 3.0 μ s.

するが、メタルジェットはすべての条件において、Alで構成され、メタルジェットの成分は変化していないことがわかる。したがって、メタルジェットの成分は接合材の板厚や位置には依存せず、接合材の材料の物性値によって決定されることが考えることができる。

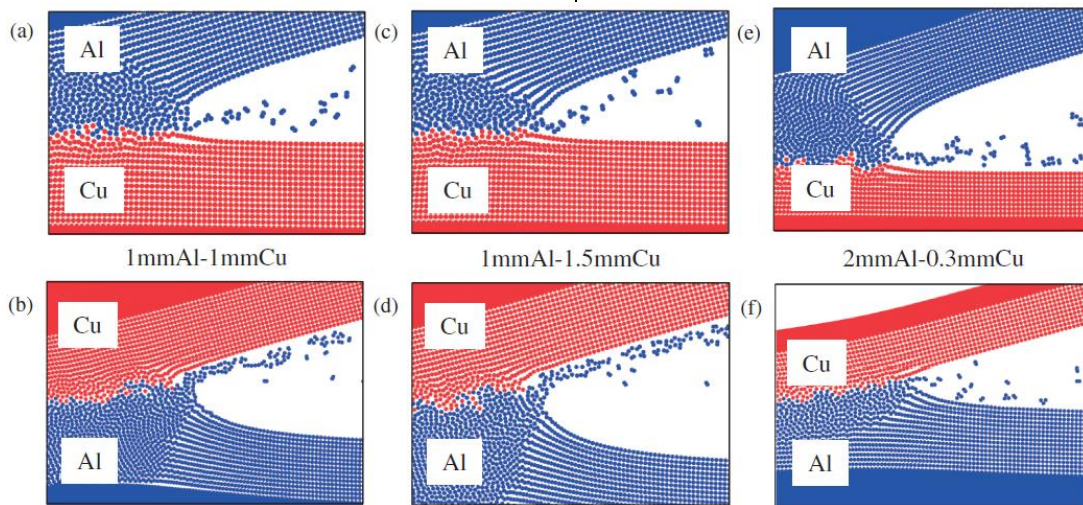


Fig. 8 Simulation results of metal jet emission for various plate thicknesses. Initial angle and initial velocity were fixed 15° and 500 m/s respectively. (a) 1 mmAl/1 mmCu (b) 1 mmCu/1 mmAl (c) 1 mmAl/1.5 mmCu (d) 1.5 mmCu/1 mmAl (e) 2 mmAl/0.3 mmCu (f) 0.3 mmCu/2 mmAl.

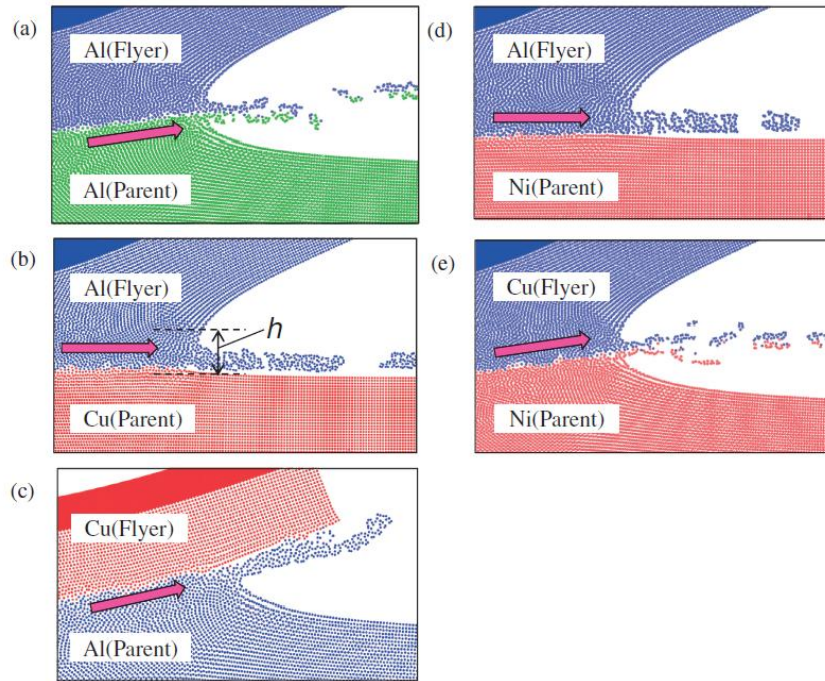


Fig. 9 Simulation results of metal jet emission and hump formation at the collision point. Initial angle was 25° and initial velocity was 400 m/s. (a) Al/Al (b) Al/Cu (c) Cu/Al (d) Al/Ni (e) Cu/Ni. The movement directions of collision points are also shown.

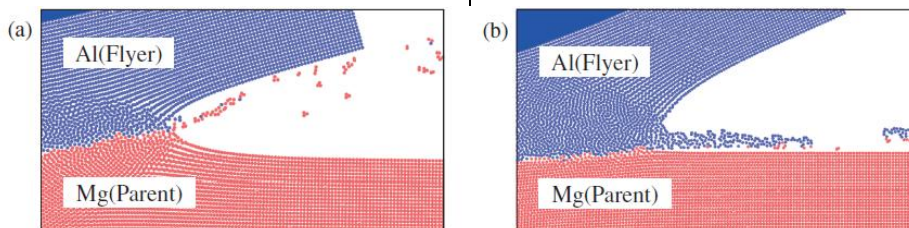


Fig. 10 Simulation results of metal jet emission of Al/Mg lap joints. Initial velocity is fixed 400 m/s (a) Initial angle is 15° (b) Initial angle is 25° .

Fig.9 (a)-(e)に Al/Al、Al/Cu、Cu/Al、Al/Ni、Cu/Ni の衝突点付近のシミュレーション結果を示す。初期角度は 25° 、初期速度は 400 m/s である。Table 2 にシミュレーションで用いた各材料の物性値を示す。メタルジェットの内容は、剛性率や融点ではなく、接合材の密度差によって分類可能であった。Al/Cu や Al/Ni など接合に用いた両板の密度差が大きい場合には、メタルジェットの内容は主に低密度の材料であった。一方で、Al/Al など同種接合の場合は当然であるが、Cu/Ni のように板間の密度差が殆ど無い場合には、メタルジェットは両板の成分で構成されていた。

Fig.10 (a)-(b)に Al/Mg 時の衝突点付近のシミュレーション結果を示す。初期速度は 400 m/s、初期角度はそれぞれ 15° 、 25° である。Al/Mg および Mg/Al の場合には、メタルジェットとして放出される成分は衝突条件によって変化していた。

Fig.11 は Al/Cu および Cu/Al 電磁力衝撃圧着において実際に採取されたメタルジェットの X 線回折パターンである。コレクタとして用いたガラス板の X 線回折パターンも併せて示している。これより Al および Cu の相対

Table 2 Physical parameters for materials.

	Density, $\rho/\text{g cm}^{-3}$	Shear modulus G/GPa [8]	Melting Temperature $T_m/^\circ\text{C}$
Al	2.69	27.1	660
Mg	1.78	16.5	650
Cu	8.96	47.7	1085
Ni	8.90	85.5	1455

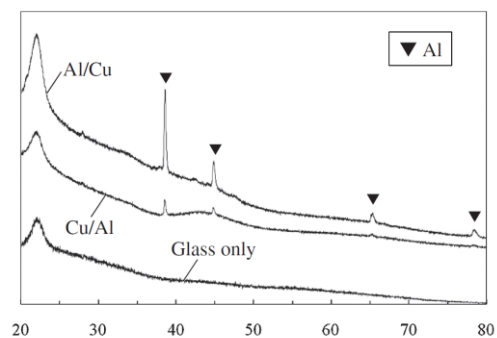


Fig. 11 X-ray diffraction patterns of collected metal jet emitted during magnetic pulse welding.

位置にかかわらず、メタルジェットは主に Al で構成されていることがわかる。この実験結果はシミュレーションによる解析結果とよい一致を示している。

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 6 件)

- ① 柿崎正悟、渡邊満洋、熊井真次、衝撃圧着時のメタルジェット放出および接合界面形態に関する数値解析ならびに実験的検討、軽金属、査読有、61、(2011)、328-333.
- ② Shougo Kakizaki, Mitsuhiro Watanabe and Shinji Kumai, Simulation and Experimental Analysis of Metal Jet Emission and Weld Interface Morphology in Impact Welding, Materials Transactions, 査読有、52、(2011)、953-959.
- ③ Shinji Kumai, Mitsuhiro Watanabe and Keyan Feng, Microstructure and joint strength of similar- and dissimilar lap joints fabricated by several advanced solid-state welding methods, Materials Science Forum, 査読有、654-656、(2010)、596-601.
- ④ Mitsuhiro Watanabe and Shinji Kumai, Interfacial Morphology of Magnetic Pulse Welded Aluminum/Aluminum and Copper/Copper Lap Joints, Materials Transactions, 査読有、50 (2009)、286-292.
- ⑤ Mitsuhiro Watanabe, Shinji Kumai, Go Hagimoto, Qingsheng Zhang and Koji Nakayama, Interfacial Microstructure of Aluminum/Metallic Glass Lap Joints Fabricated by Magnetic Pulse Welding, Materials Transactions, 査読有、50 (2009)、1279-1285.
- ⑥ 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、査読有、59 (2009)、140-147.

[学会発表] (計 8 件)

- ① 柿崎正悟、澤裕也、熊井真次、アルミニウム板の高速衝突時のメタルジェット放出および界面形態に及ぼす衝突条件の影響、軽金属学会 第 121 回秋期大会、2010. 11.12-13、早稲田大学、東京
- ② 柿崎正悟、澤裕也、熊井真次、衝撃圧着時のメタルジェット放出および波状界面形態に及ぼす接合材の密度差の影響、日本金属学会 第 149 回秋期大会、2010. 11.7-9、沖縄コンベンションセンター、那覇
- ③ 澤裕也、柿崎正悟、熊井真次、衝撃圧着時に形成される波状界面形態に及ぼす接合材板厚の影響、日本金属学会 第 149

回秋期大会、2010. 11.7-9、沖縄コンベンションセンター、那覇

- ④ Shougo Kakizaki, Mitsuhiro Watanabe and Shinji Kumai, Metal Jet Emission and Wavy Interface Formation in High-Speed Impact Welding, The 12th International Conference on Aluminium Alloys (ICAA12), 2010. 9.5-9, Yokohama, Japan
- ⑤ Shinji Kumai, Microstructure and joint strength of similar- and dissimilar lap joints fabricated by several advanced solid-state welding methods, The 7th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM7), 2010. 8. 2-6. Cairns, Australia,
- ⑥ 柿崎正悟、渡邊満洋、熊井真次、アルミニウム板の高速衝撃圧着時のメタルジェットの放出挙動、軽金属学会 第 118 回春期講演大会、2010.5.22-23、関西大学、大阪
- ⑦ Shinji Kumai, Similar and Dissimilar Metal Joining using Magnetic Pulse Welding, The 18th International Symposium on Processing and Fabrication of Advanced Materials, (招待講演)、2009. 12. 14-17, Sendai, Japan.
- ⑧ Mitsuhiro Watanabe, Go Hagimoto and Shinji Kumai, Microstructure of Magnetic Pulse Welded Metal/Metallic Glass Interface, The 18th International Symposium on Processing and Fabrication of Advanced Materials, 2009. 12. 14-17, Sendai, Japan.

[その他]
ホームページ等

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

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：