

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25年 5月 28日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360308

研究課題名（和文）

衝撃エネルギー下でのマグネシウム合金の変形挙動の解明と高歪速度加工の可能性探求

研究課題名（英文）

Investigation on the Impulsive dynamic deformation of magnesium alloys and the application for high-strain-rate forming

研究代表者

外本 和幸（HOKAMOTO KAZUYUKI）

熊本大学・衝撃・極限環境研究センター・教授

研究者番号：70199462

研究成果の概要（和文）：本研究では、衝撃エネルギーを利用したマグネシウム合金の高速変形挙動の解明と同材の高歪速度加工の可能性のうち特に爆発圧着の可能性探求を試みた。前者では、火薬衝撃銃に近接して高速度ビデオカメラを設置して高速飛翔するマグネシウム合金の型成形過程の近接撮影に成功するとともに、AUTODYN による数値シミュレーションを行った。後者の爆発圧着に関しては、Al, Ti 等と AZ31 マグネシウム合金の接合実験を中心に研究を実施し、特に接合時の運動エネルギー損失量を低減することにより接合性を改善することに一定の成果を挙げることができた。

研究成果の概要（英文）：The present investigation intended to clarify the high-strain-rate deformation of magnesium alloy under intense dynamic loading and to find out the possibility of materials processing mainly on explosive welding. At first, high-velocity die forming experiments were performed using a powder gun equipped with a high-speed video camera, and the measured result was compared with numerical simulation using AUTODYN code. Also, explosive welding experiments were performed for Al, Ti and others with AZ31 magnesium alloy, and the experimental results suggest that the decrease in the kinetic energy loss by collision should be taken into account as to improve the bonding property.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	10,500,000	3,150,000	13,650,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2012年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：材料工学

科研費の分科・細目：材料加工・処理

キーワード：マグネシウム、衝撃エネルギー、爆発加工、高歪速度、変形挙動、材料加工

1. 研究開始当初の背景

超軽量素材としてマグネシウム合金の工業的利用が大きく期待される状況であるものの、常温での加工性や反応性の問題から、

各種材料加工の実施には多くの制約が存在する。特にマグネシウムに関しては、高速変形挙動はあまり知られていない。我々が扱っている爆薬等による数百 m/s 程度の速度での

加工は、概ね断熱的な現象と考えられ、変形発熱による延性の改善が十分に期待し得るが、マグネシウムに対する具体的な検証はほとんど行われていない。また、接合加工も異材接合体を得るのに必要な技術であり、高速接合法としてすでに実用化されている爆発圧着技術利用の可能性を探ることも工業的に重要である。しかしながらマグネシウムは高速変形でせん断帯を形成したり熔融・反応を生じやすいため、良好な接合を達成するためには従来の手法を大きく改良することが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、爆薬等を利用した高速加工技術に関して、特に常温での加工性に乏しいマグネシウム合金の挙動について明らかにすることを旨とする。ここではまず高速度状態下でのマグネシウム合金の変形挙動を、光学計測実験と数値シミュレーションに基づいて明らかにすることを実施する。また、材料加工技術に関する応用の可能性について、特に工業的に重要視されている爆発圧着の実用化を可能にするための条件改善の手法を明らかにすることを旨とする。

3. 研究の方法

マグネシウム合金としては汎用合金で多く利用されている AZ31 を用いることにした。具体的な実験方法は、高速変形挙動を明らかにすることを旨とする型成形試験と、爆発圧着実験に分けて以下に記述する。

(1) マグネシウム合金の高速型成形試験

マグネシウム合金を高速度で型に衝突させることで生じる変形挙動を観察するため、1 段式火薬衝撃銃を使用した。図 1 に使用した火薬衝撃銃装置の模式図を示す。

実験では、飛翔体を効率よくかつ安定な速度に加速させるために金属製ダイヤフラムを発射管の火薬室側に設置し、先端に円板状のマグネシウム合金（厚さ 12mm もしくは 30mm）を取り付けた超高分子量ポリエチレン製のサボをセットする。その後、所定の量に調整した火薬を火薬室内に装填し、型を配置した試料室と発射管内部を真空状態にして火薬に点火する。飛翔体は火薬の爆発によって発生するガスの作用で高速度に加速され、試料室内の型に衝突する。ここで飛翔体の速度は、加速される材料と使用する火薬の質量比を変化させることで調整した。

試料室の両側には、直径 590mm、厚さ 30mm のポリカーボネート板に保護用の透明アクリル板を取り付け、高速度ビデオカメラを用いて近接撮影を行った。撮影方法は、図 2 のようにビデオカメラに対向する位置にフラッシュライトを設置して影写真を撮影するシャドウグラフ法を採用した。型には深

さ 5mm で幅の異なる台形状（傾斜角 14.5°）の合金工具鋼 DC53(SKD11 相当材) を使用し、型表面には潤滑剤を塗布した。

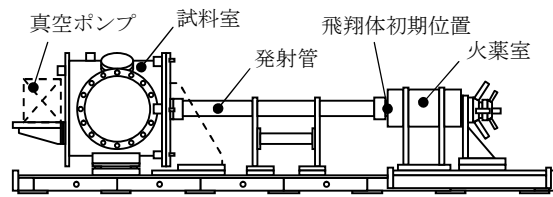


図 1 火薬衝撃銃装置の模式図

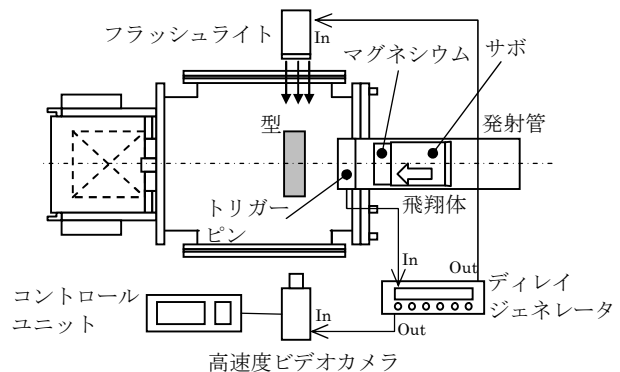


図 2 型成形観察実験方法の模式図

計測実験と同時に、衝突時の型成形挙動の詳細を ANSYS AUTODYN-3D を用いて数値解析した。著しく変形すると思われるマグネシウム合金円板の前方部（厚さ 12mm）はメッシュレスの SPH 法でモデル化を行い、型とマグネシウム合金円板後方部及びサボは Lagrange 法でモデル化を行った。使用したサボ（超高分子量ポリエチレン）の状態方程式には、Mie-Gruneisen 型 Shock 状態方程式を、マグネシウム合金 (AZ31) と型材 (DS53) には材料強度構成式として Johnson-Cook モデルを考慮した Puff 状態方程式を適用した。ここで AZ31 の Johnson-Cook パラメータは既報の論文 (I. Ulacia et al., J. Mater. Process. Technol., 211 (2011), 830-839) のデータを用い、DS53 については硬鋼のデータに対して降伏応力値等を DS53 のそれに合うように修正した値を採用した。

(2) マグネシウム合金の爆発圧着実験

マグネシウム合金の爆発圧着は通常法では極めて困難であり、マグネシウムにせん断帯が生じたりエネルギー過剰によって接合境界面に熔融層や反応層を形成する傾向が極めて強かった。そこで本研究では、図 3 に示すような、独自に開発した水中衝撃波を利用する爆発圧着装置を利用して一連の実験を実施した。使用爆薬はカヤク・ジャパン(株)製の SEP 爆薬（5mm 厚、爆速約 7km/s、密度約 1300kg/m³）を使用して、60mm の長さ

で接合実験を実施した。一般に爆発圧着においては水平方向の衝突点移動速度を材料の弾性波速度以下にしなければならないため、SEP爆薬を用いる場合には爆薬を傾斜させなければならない。この方法によると、水平(x)方向に接合条件が変化するため、一度の実験で条件を変化させた実験が可能となる。以下で示す写真は、中心部(x=30mm)付近のデータを示している。

ここで用いた金属板の板厚は0.5~1mm、板と試料の間隙(SOD)は0.2~0.5mmの間で変化させた。また爆薬の初期傾斜角 α は20°~30°の条件で実験を行った。爆薬と試料中心間の最短距離Dは15~60mmの範囲で変化させた。

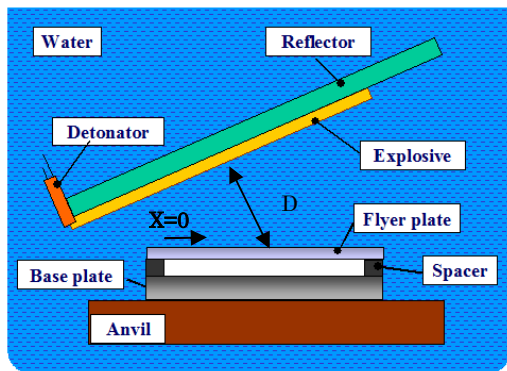


図3 水中衝撃波を利用する爆発圧着法の模式図

4. 研究成果

(1) マグネシウム合金の高速型成形試験

本研究では、マグネシウム合金(AZ31)の衝突速度を高速度(計測値820m/s)、中速度(307m/s)、低速度(87m/s)の3つの速度領域で型成形実験を行った。

820m/sの高速度で衝突した場合、マグネシウム合金が型に流入して成形が可能であることが示されたが、型内に押し込まれなかった材料部分は、周囲からの拘束がないために飛散してしまう状況が生じた。

中速度(307m/s)の衝突では、図4(a)に示すように、マグネシウム合金は概ね良好な状態で回収されたが、外周部の一部が飛散する状況であった。

低速度(87m/s)の衝突では、エネルギー不足であり、図4(b)に示すようにマグネシウム合金の成形量は深さ1~2mm程度であった。

高速度で成形されたマグネシウム合金の断面組織を光学顕微鏡で観察すると、図5に示すように、型形状に沿って極めて激しい塑性流動を生じながら溝の内部に材料が流入している一方で、せん断帯や亀裂等は生じていなかった。

回収実験と並行して高速度ビデオカメラを用いて型側面からの近接撮影を行い、高速

度及び中速度の変形挙動を撮影することに成功した。低速度の場合の変形挙動の撮影は、撮影時間(0.1ms)に対してトリガーピンと型の間隔の関係で誤差が生じやすく、撮影は困難であった。図6に高速度衝突の場合の連続撮影結果の一部をピックアップして示すが、型内部への材料の流入状況を連続撮影することができた。



(a)307m/s (b)87m/s

図4 回収したマグネシウム合金の外観写真(中・低速の場合の結果)

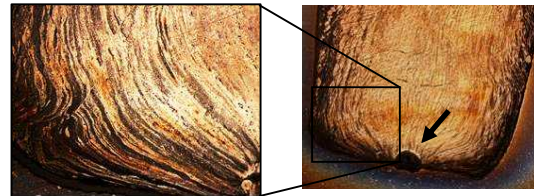
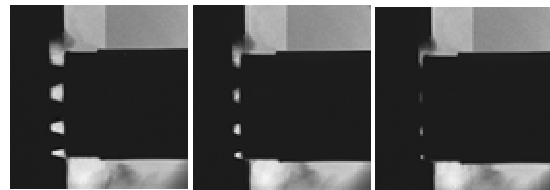


図5 深さ5mm、幅3mmの溝の形状に沿って成形したマグネシウム合金の顕微鏡組織写真(衝突速度820m/s)



(a)t=0μs(衝突) (b)t=2μs (c)t=4μs
図6 光学観察結果(衝突速度820m/s)

一方、AUTODYNを用いた数値解析の結果は次の通りであった。

中速度衝突におけるマグネシウム合金の変形は、図7に示すように先端は比較的平面状態を保ったまま、ほぼ同じ速度で型内部に流入していた。この結果は光学計測結果と概ね一致した。

高速度衝突の場合の解析結果は、図8に示すように、壁面に沿って進行する材料の流入速度が中心部よりも速くなっていた。光学計測(図6)では材料の流入速度に顕著な差は認められなかったもの、図5右側の写真の矢印で示すように型先端中央部には球状の空洞部が見られた。この空洞は型へ流入する材料の型近傍での先行によって、最後にこの部分が両型側壁から流れ込み、対向衝突して

生じたことによるものと思われ、解析結果を支持する結果であると思われた。画素数の関係からこれ以上定量的な議論は難しいものの、本解析では壁面との摩擦を無視していることから、実際には摩擦抵抗があるために壁面付近での材料の先行は実際にはかなり抑制されているのかもしれない。

今後、摩擦条件を考慮に入れた解析を実施するとともに計測実験を多くの実験条件で実施することを通じて、高速変形における型中への材料の流入状況に関する議論が深められると考えている。

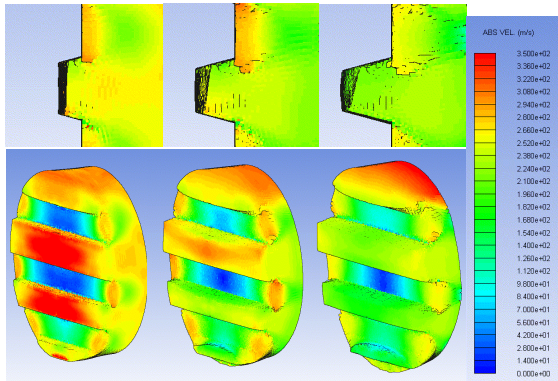


図7 マグネシウム合金の高速変形に関する数値解析例 上：3mm幅の溝への流入速度分布、下：全体等角図（速度分布図）（衝突速度 307m/s）

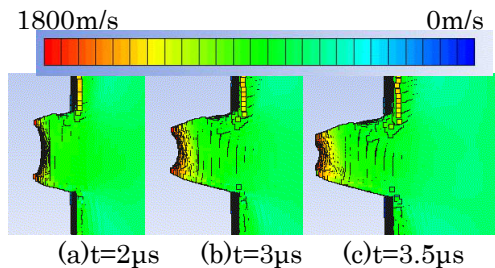


図8 型への流入速度分布（衝突速度 820m/s）

図9に成形材料の応力状態を示すが、型の底面と衝突した材料先端部の平面領域は強い圧縮作用（正值）が生じているが、側壁面近傍では弱い引張作用が発生している領域も一部認められた。このような応力状態の作用によって、欠陥を生じることなく型内への成形が良好になされたものと思われる。

研究者らは以前、AZ31の円筒内部に詰められた爆薬による拡管では材料の延性増加が認められないことを確認していたが、本研究では作用応力状態が異なることに基づいて型成形の場合には成形性が改善されると考えられた。

本研究はマグネシウム合金の高速型成形

に関する世界的に見ても数少ない研究成果として位置づけてよいと思われる。

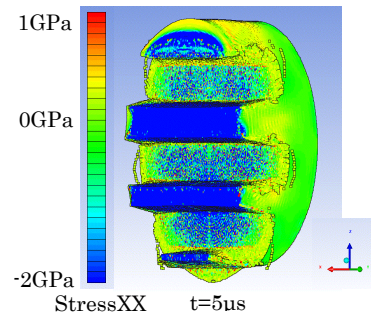


図9 成形中に作用する応力分布（衝突速度 820m/s：x軸方向に飛翔）

(2) マグネシウム合金の爆発圧着実験

図3に示す装置を用いて、0.5mm厚さのA5052アルミニウム合金をAZ31マグネシウム合金に接合したときの接合界面組織を、図10 ($\alpha=30^\circ, D=60\text{mm}, \text{SOD}=0.2\text{mm}$)と図11 ($\alpha=30^\circ, D=25\text{mm}, \text{SOD}=0.2\text{mm}$)にそれぞれ示す。図10の条件は、作用圧力が低く、衝突条件が小さいエネルギー状態で接合されるので比較的小さな波状組織を形成して接合されるのに比べて、図11では高エネルギー条件下での接合であり大きな波状組織が観察されるとともに波の渦巻き部近傍には硬脆な化合物を含む熔融池がわずかに観察された。

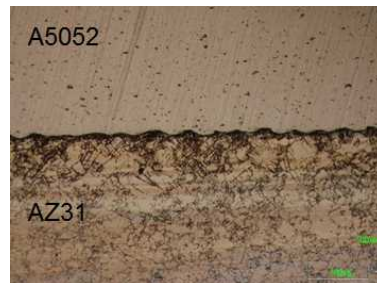


図10 アルミニウム合金とマグネシウム合金の接合界面組織（ $\alpha=30^\circ, D=60\text{mm}, \text{SOD}=0.2\text{mm}$ ）



図11 アルミニウム合金とマグネシウム合金の接合界面組織（ $\alpha=30^\circ, D=25\text{mm}, \text{SOD}=0.2\text{mm}$ ）

図 12 はこの材料組合せに対して実施した一連の実験について、接合可能条件を議論するのによく用いられる水平方向衝突点移動速度 V_c と衝突角 β の関係を示す。計算は型成形試験の場合と同様に AUTODYN-3D を使用した。ここで図 10、図 11 の解析結果はそれぞれ薄い水色の三角と薄緑の四角で示されており、一連のプロットは水平方向にいくつか分けて計算を行った結果になっている。緑のラインが接合の下限のラインを示しているが、図 10 は接合可能な下限付近での接合になっており、図 11 の条件はエネルギーとしては十分に接合可能な条件となっていることがわかる。図 10 の条件は接合の一部がこの下限をやや横切るが、実験結果は比較的良好な接合体が得られる状況であった。

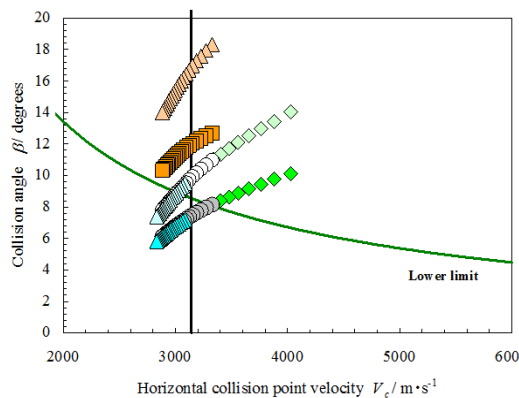


図 12 各実験の接合条件と接合可能領域

図 13 に 1mm 厚さの Ti(TP270)板を $\alpha=20^\circ$, $D=25\text{mm}$, $SOD=0.5\text{mm}$ の条件で AZ31 板上に接合した結果を示す。Ti は反応性が高く、水中衝撃波を用いた場合にも容易に熔融層を形成するのでさらに接合性を改善する工夫が必要であった。そこで本研究では、0.5mm 厚さの Ti 板と厚い AZ31 板の間に AZ31 の薄板(0.5mm 厚)を挿入して、Ti が AZ31 に衝突する際の運動エネルギー損失を低減する実験を実施した($\alpha=30^\circ$, $D=45\text{mm}$, $SOD=0.2\text{mm}$)結果 (Ti/AZ31 境界)を図 14 に示す。接合境界は平滑ではあるものの、熔融層は認められず剥離も生じていない状況から、良好な接合状態が得られていると判断された。



図 13 Ti/AZ31 接合体の断面組織

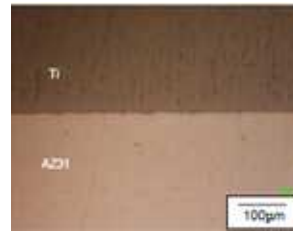


図 14 AZ31 中間材薄板を利用した接合体の断面組織

図 14 の実験よりやや圧力を高めた場合の実験結果を図 15($\alpha=20^\circ$, $D=15\text{mm}$, $SOD=0.2\text{mm}$)に示す。この場合、Ti/AZ31 境界の接合は良好であるものの、マグネシウム合金に引張り波による破断やせん断破壊が認められた。このことは、使用したマグネシウム合金が圧延硬化材であり、常温で延性に欠ける問題によって生じていると思われる。このことを回避することを目的として、AZ31(焼なまし材)を用いた接合実験結果を図 15 に示すが、変形域の厚さ広がるためか、熔融層を形成しやすい状況が生じていた。この層の硬さは、Ti と Mg が化合物を形成しないために両者の中間の値を取り、材料の脆化には影響をあまり生じない状況であった。

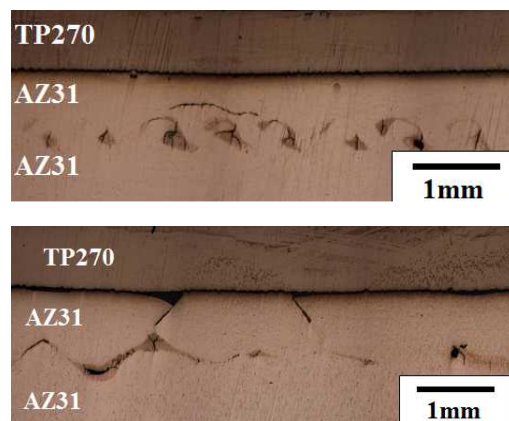


図 14 Ti/AZ31/AZ31 接合体中の AZ31 に生じた亀裂



図 15 AZ31(焼なまし材; 0.3mm 厚)を中間材に用いた場合の実験結果 (Ti; 0.5mm 厚、 $\alpha=20^\circ$, $D=45\text{mm}$, $SOD=0.2\text{mm}$)

0.5mm 厚さのステンレス鋼(SUS304)を AZ31 に接合する実験も試みたが、図 16 に示すように平滑な界面で接合され、一定厚さで溶融層を形成する状況で、接合はかなり難しい状況であることが知られた。境界層に生じる溶融層の組成解析(EDX)によると、Mg を 65mass% (92at%)程度含む組織であった。このことから、爆発圧着過程においては、Mg が主に変形しながら金属ジェットを形成し両者が接合されていると推察された。

現状としてはマグネシウム合金の爆発圧着自体は極めて難しく、本研究では新しい方法を用いて接合状況を大幅に改善することに成功しており、他の追随を許さないオリジナリティーの高い成果である。今後、各種の難接合材の接合に対して本方法が応用されることを期待している。

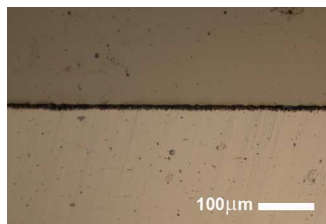


図 16 SUS304/AZ31 接合体の断面組織 ($\alpha=20^\circ, D=45\text{mm}, \text{SOD}=0.2\text{mm}$)

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 1 件)

- ① P. Manikandan, J. Lee, K. Mizumachi, A. Mori, K. Hokamoto, Transition joint of aluminum and magnesium alloy made by underwater explosive welding technique, Materials Science Forum, 査読有, 706-709, 2012, pp.757-762.

[学会発表] (計 9 件)

- ① M. Ahasan Habib, L. Ruan, R. Kimura, P. Manikandan, K. Hokamoto, Cladding of titanium and magnesium alloy by explosive welding using underwater shock wave, International Symposium on Explosion, Shock Wave and High-energy Reaction Phenomena 2013, 2013.3.28, 沖縄高専 (名護市)
- ② A. Mori, H. Keno, T. Yoshimura, K. Hokamoto, Dynamic deformation of magnesium alloy by using a powder gun, International Symposium on Explosion, Shock Wave and High-energy Reaction Phenomena 2013, 2013.3.28, 沖縄高専 (名護市)

- ③ M. Ahasan Habib 木村竜士, P. Manikandan, 外本和幸, 中間財を利用したチタンおよびマグネシウム合金の爆発圧着法に関する研究, 第 63 回塑性加工連合後援会, 2012.11.5, 北九州国際会議場・西日本総合展示場 (北九州市)
- ④ 木村竜士, 前原弘典, M. Ahasan Habib, Ruquman Bin Ali, P. Manikandan, 外本和幸, 水中衝撃波を利用した Mg 合金の爆発圧着におけるエネルギー制御の試み, 火薬学会 2012 年度春季研究発表会, 2012.5.24, 慶應義塾大学 (横浜市)
- ⑤ K. Hokamoto, Underwater Shock Wave for Explosive Welding and other Application, International Workshop on Intense Loading and Its Effect, 2011.12.13, 北京理工大学 (北京市) (招待講演)
- ⑥ K. Hokamoto, P. Manikandan, Underwater explosive welding of magnesium and other materials, 6th Pan Yellow Sea Rim International Symposium on Magnesium Alloy, 2011.11.23, 世宗ホテル (ソウル市) (招待講演)
- ⑦ イ ジュンオ, P. Manikandan, 水町光太郎, 森昭寿, 外本和幸, 水中衝撃波を用いた SUS304/AZ31 の爆発圧着, 2011.5.29, 早稲田大学 (東京都)
- ⑧ P. Manikandan, K. Hokamoto, Explosive welding of magnesium alloy plate and stainless steel plate using underwater shock wave, 5th Yellow Sea Rim Workshop on Explosion, Combustion and other Energetic Phenomena, 2011.3.11, 沖縄高専 (名護市)
- ⑨ P. Manikandan, 水町光太郎, 森昭寿, 外本和幸, 水中衝撃波を利用した Al 薄板と Mg 板の爆発圧着, 第 61 回塑性加工連合講演会, 2010.10.16, 山形大学工学部 (米沢市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

外本 和幸 (HOKAMOTO KAZUYUKI)
熊本大学・衝撃・極限環境研究センター・教授
研究者番号：70199462

(2) 研究分担者

森 昭寿 (MORI AKIHISA)
崇城大学・工学部・准教授
研究者番号：60433017