

## 有限要素法と粒子法を用いたアルミニウム/鋼電磁圧接界面の数値解析

Numerical analysis of magnetic pulse welded aluminum/steel interface  
using finite element method and particle method○作田一樹<sup>1</sup>, 富塚健太<sup>1</sup>, 渡邊満洋<sup>2</sup>\* Kazuki Sakuda<sup>1</sup>, Kenta Tomitsuka<sup>1</sup>, Mitsuhiro Watanabe<sup>2</sup>

Abstract: To investigate formation mechanism of interfacial microstructure in magnetic pulse welded aluminum/steel joint, numerical analysis of high-speed oblique collision was performed. Finite element method was used for investigating the deformation and collision behavior of aluminum and steel plates. The interfacial phenomenon was analyzed by using particle method. The collision analysis indicated that aluminum flyer plate was deformed like a cantilever beam by electromagnetic force and collided with steel parent plate. The temperature analysis revealed that the melting point of base metal at high pressure was exceeded in the region similar to the region where the intermediate layer was produced in the joint.

## 1. 緒言

近年の自動車車体軽量化の技術開発では、軽量材料を適材適所に使うマルチマテリアル化が一つの方策として求められており、その達成には異種金属接合技術の確立が課題の一つである<sup>[1]</sup>。特に、軽量かつリサイクル性に優れたアルミニウムと剛性や加工性に優れた鋼の接合は車体軽量化のためのコア技術として注目されている。

電磁圧接は衝撃圧接法の一つであり、電磁力を用いて一方の金属 (Flyer plate) をもう一方の金属 (Parent plate) に高速度で傾斜衝突させることによって接合する手法である (Fig.1)<sup>[2]</sup>。電磁力は、コンデンサに充電した電気エネルギーをワンターンコイルへパルス放電することによってコイル周辺に生じた高密度な磁束と、その磁束と Flyer plate が交差することによって Flyer plate 表面に生じるうず電流によってフレミング左手の法則に従って生じる。アルミニウム板と鋼板の電磁圧接材においては、接合界面が特徴的な波状を呈し、その波状界面に沿って微細結晶粒で構成される中間層が生成されることによって強固な接合が達成されることが知られている<sup>[3]</sup>。しかし、波状接合界面形態や中間層の生成原因については未だ明らかになっていない。そこで本研究では、数値解析を用いてアルミニウムと鋼の電磁圧接過程を再現し、接合界面組織の観察結果と比較することによってその形成原因を検討した。

## 2. 実験及び解析方法

実験における供試材には、厚さが 0.4 mm の A1050 工業用純アルミニウム板 (以降, Al と記載) と厚さが 0.8 mm の SPCC 冷間圧延鋼板 (以降, Fe と記載) を用い

た。接合には電磁圧接装置 (Bmax 社製, MP12.5/25, コンデンサ容量: 40  $\mu$ F, コイル幅: 3.0 mm) を用いた。Al をコイル上面に 3.0 mm の Overlap で重ねて固定することによって Flyer plate とし, Fe は Al の上側に間隙を設けて重ねて固定することで Parent plate として用いた。コンデンサへの充電エネルギー及び Al と Fe の間隙は、それぞれ 6.5 kJ, 2.0 mm に固定して接合した。接合材の組織は、光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した。

数値解析には、Ansys mechanical APDL による有限要素法と Ansys Autodyn による衝撃解析を用いた。Ansys mechanical APDL では回路モデルを用いてコイルに流入する放電電流を計算し、その後コイル周りに発生する磁束、それによって Flyer plate 表面に発生するうず電流を解析した。これらから計算された電磁力を力学モデルに入力し, Al flyer plate の変形を再現し, Al flyer plate と Fe parent plate の衝突挙動を解析した。Ansys Autodyn では粒子法の一つである Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を用いて解析を行った。SPH 法は各粒子が持つ物理量に Kernel 関数を乗算し, 重ね合わせることでその物理量の空間分布を表現するもので, 材料モデルの状態方程式には Mie-Grüneisen 型衝撃 Hugoniot 状態方程式を適用した。また, 金属材料の構成則には Steinberg-Guinan モデルを用いた。

## 3. 結果及び考察

Fig.2 に、接合界面の SEM 像を示す。写真内の上部の比較的明るい領域が Parent plate として用いた Fe, 下部の比較的暗い領域が Flyer plate として用いた Al である。接合界面は特徴的な波状を呈し、その波状界面に

1: 日大理工・学部・精機 2: 日大理工・教員・精機

沿って中間層 (Fig.2 内, 矢印) が生成されていた。

Fig.3 に, Ansys mechanical APDL によって得られた Al flyer plate と Fe parent plate の変形及び衝突挙動を示す。Al flyer plate は電磁力によって片持ち梁のように変形して Fe parent plate に高速傾斜衝突した。また, 接合部中央における衝突速度及び衝突角度は 685 m/s 及び 12.6° であることがわかった。

Ansys mechanical APDL により得られた衝突速度と衝突角度を用いて Ansys Autodyn で Al と Fe を高速傾斜衝突させた際の界面を Fig.4 に示す。Al/Fe 界面は特徴的な波状を呈し, 接合材において観察された接合界面形状と類似した結果が得られた。Fig.5 に, Al/Fe 界面近傍の温度分布の解析結果を示す。緑色以降で表した 980 K 以上の領域は高圧下における Al の融点を超えた領域であり, 1830 K 以上を表す赤色は高圧下における Fe の融点を超えた領域である。融点を超えた領域は界面に沿って連続的に示されており, 波状界面の波頭部分には塊状に観察された。また, この融点を超えた領域の位置は接合材における中間層の生成領域の位置と良く一致していた。

#### 4. 参考文献

- [1] 藤本雄一郎, 漆山雄太: 自動車のマルチマテリアル戦略, NTS, 2017.
- [2] 相沢友勝: 金属薄板の電磁シーム溶接法, 軽金属, Vol.54, No.4, 153-158, 2004.
- [3] M. Watanabe, Y. Sano, S. Kumai: Interfacial Microstructure and Strength of Magnetic Pulse Welded A5052 Aluminum Alloy/SPCC Steel Lap Joint, Materials Transactions, Vol.64, No.2, 479-484, 2023.

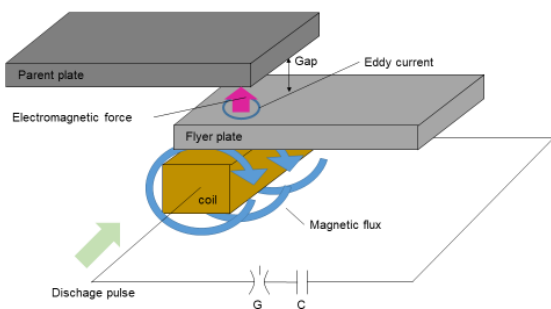


Fig.1 Principle of magnetic pulse welding.

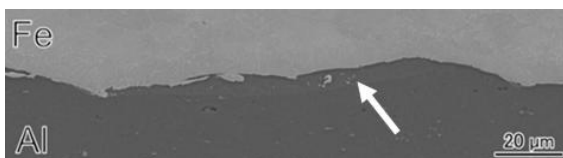
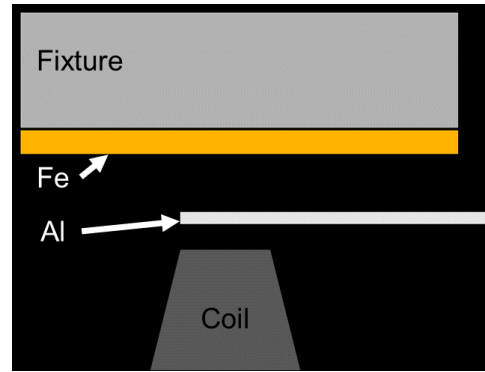
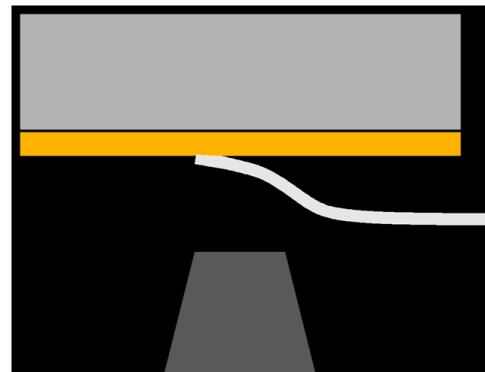


Fig.2 SEM image of welding interface.



(a)



(b)

Fig.3 Deformation and collision behavior of Al flyer plate and Fe parent plate.  
(a) Before welding. (b) Initial collision.

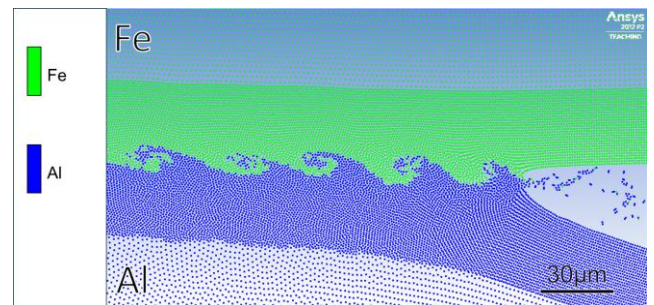


Fig.4 Al/Fe interfacial morphology produced by numerical analysis.

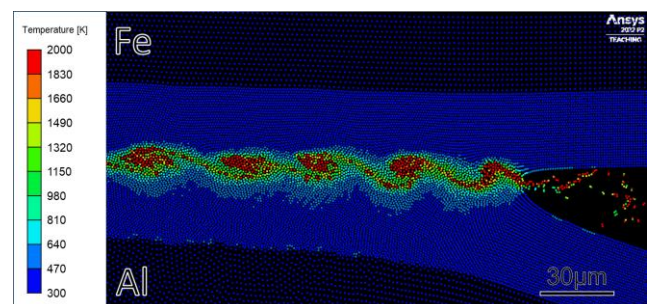


Fig.5 Temperature distribution near Al/Fe interface.