

# 電磁力衝撃圧着における純アルミニウム板の 高速変形ならびに衝突挙動\*

渡邊 満洋\*\*・熊井 真次\*\*\*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 59, No. 9 (2009), pp. 502-508

## High-speed deformation and collision behavior of pure aluminum plates in magnetic pulse welding\*

Mitsuhiro WATANABE\*\* and Shinji KUMAI\*\*\*

*In-situ* observation of magnetic pulse welding process using a one-turn coil was performed by using a high-speed video camera. High-speed deformation and collision behavior of the metal plates were investigated. The flyer plate traveled toward the parent plate with a high speed by the generated electromagnetic force. A collision velocity of the flyer plate to the parent plate was 250 m/s at the representative welding condition (initial gap distance between two plates: 1.0 mm, discharge energy: 2.5 kJ). It was clearly observed that a part of the flyer plate which was located along the coil bulged toward the parent plate. The collision angle between metal plate surfaces was 0° at the initial collision point, but it increased continuously during the welding. Such a characteristic high-speed oblique collision is considered to result in formation of the wavy interface and gradual changes in its wavelength and amplitude along the welding interface.

(Received June 5, 2009 Accepted June 22, 2009)

**Keywords:** magnetic pulse welding, *in-situ* observation, high-speed video camera, deformation behavior, collision behavior

### 1. 緒 言

電磁力衝撃圧着は爆発圧着に代表される衝撃圧着法の一種であり、電磁力を利用して金属板に高エネルギーを与え、もう一方の金属板に高速傾斜衝突させることにより接合を行う手法である。接合に要する時間は数マイクロ秒と極短時間であり、接合による温度上昇はほとんどない。本接合プロセスは、物理的・機械的性質の異なる異種金属の組合せにおいても外部入熱や中間材などを使用せずに接合可能であり、強固な同種・異種金属接合材を得ることができる。

これまでに著者らは、電磁力衝撃圧着を利用した様々な金属の組合せ (Al/Al, Cu/Cu, Al/Cu, Al/Ni, Al/鋼) の重ね合せ接合材について報告してきた<sup>1)~3)</sup>。電磁力衝撃圧着では、コイル長手方向に沿った Flyer plate の一部は、電磁力によって Parent plate に向かって変形し、高速度で Parent plate に衝突する。接合後の接合材をコイル長手方向と平行な方向から観察すると、変形した領域すべてが接合されているのではなく、接合はコイル長手方向と平行に 2 箇所領域で達成され、その間の領域は接合されない (Fig. 1<sup>3)</sup>)。接合界面は特徴的な波状を呈する。さらに、その波状界面の波長および振幅は接合部全体で一定の大きさではなく、変形部の外側に向かうにつれて徐々に変化することを明らかにしている (Fig. 2<sup>3)</sup>)。

波状界面形態は、爆発圧着<sup>4)~8)</sup> や water jet spot welding<sup>9),10)</sup>、ガス圧を利用した衝撃圧着<sup>11)</sup> のような他の衝撃圧着法によって作製した接合材の界面においても観察されている。

波状界面の波長および振幅の大きさにおける同様な変化は、平板状 Flyer plate と円柱状 Parent plate の爆発圧着、いわゆる semi-cylinder 法によって得られる接合界面においても観察されている<sup>12),13)</sup>。これらの報告では、波長は衝突角度の増加とともに増加するのに対し、振幅は衝突角度の増加とともにある衝突角度までは増加し、最高値に達したのちに減少することが示されている。

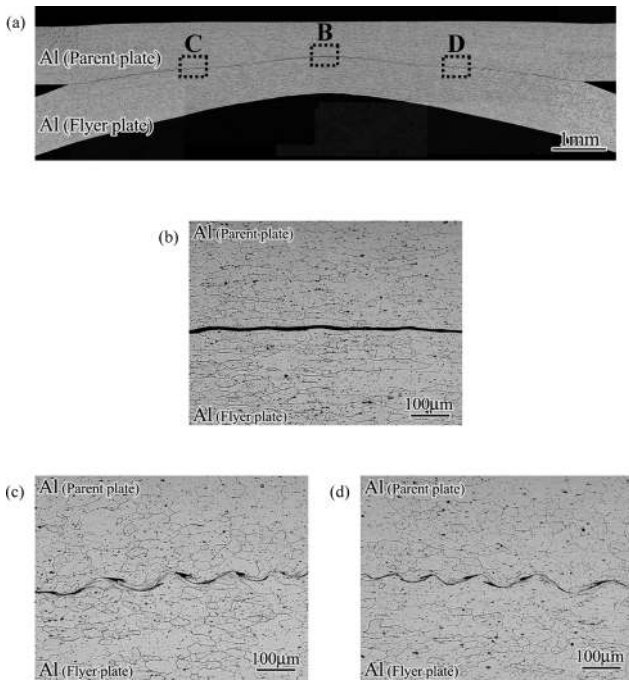
爆発圧着した接合材の継手強度ならびに界面形態は、Flyer plate の衝突速度と Flyer plate と Parent plate の衝突角度によって整理されることが知られている<sup>14)~16)</sup>。著者らは、被接合金属板の間隙長を接合に要した時間で除することによって電磁力衝撃圧着における Flyer plate の移動速度を見積もった<sup>3)</sup>。しかしながら、この速度は平均移動速度であり、正確な衝突速度とは異なる。

電磁力衝撃圧着メカニズムを理解するためには、衝突挙動を直接観察し、衝突速度や衝突角度を明らかにすることが重要であり、このような課題を達成するためには、電磁力衝撃圧着過程のその場観察が必要である。しかし、本手法による接合プロセスは数マイクロ秒間で完了するため、通常の動画

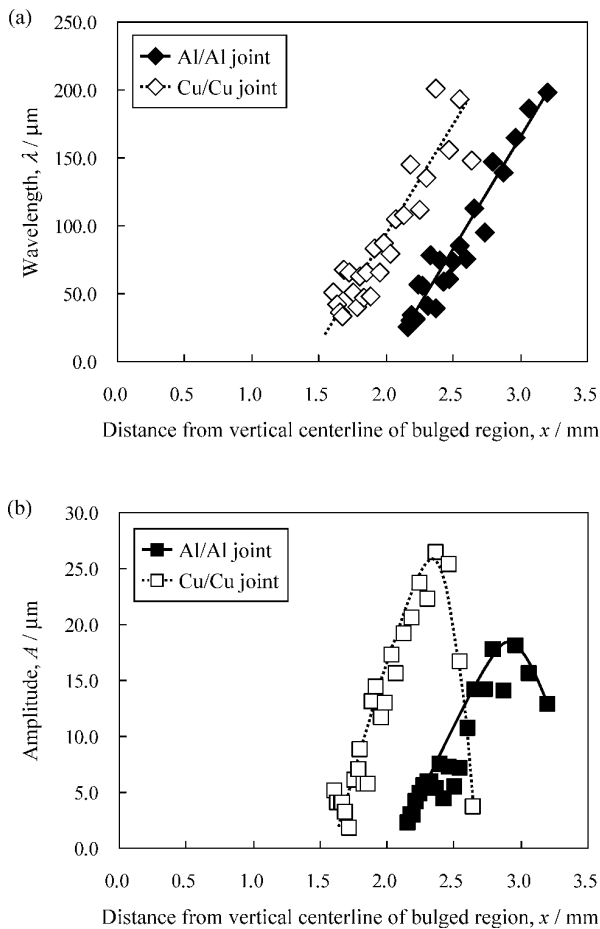
\* 本論文は Materials Transactions, Vol. 50, No. 8 (2009), pp. 2035-2042 に掲載したものである。

\*\* 東京工業大学大学院生 (〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259) [現在: 東京工業大学大学院理工学研究科 (東京都)]. Graduate student, Department of Materials Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology (4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 226-8502) [Present: Department of Metallurgy and Ceramics Science, Tokyo Institute of Technology (Meguro-ku, Tokyo)].

\*\*\* 東京工業大学大学院総合理工学研究科 (横浜市)。Department of Materials Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology (Yokohama-shi, Kanagawa).



**Fig. 1** Optical micrographs of the cross sectional view of the Al/Al lap joint<sup>3)</sup>. (a) Bulged region. (b) Central position of the bulged region. (c) Welding interface (right-hand-side). (d) Welding interface (left-hand-side).



**Fig. 2** Wavelength and amplitude of the interfacial wave formed in the Al/Al and Cu/Cu joint<sup>3)</sup>. (a) Relationship between wavelength and distance from vertical centerline of bulged region. (b) Relationship between amplitude and distance from vertical centerline of bulged region.

撮影機器では観察することができない。そこで本研究では、高速度ビデオカメラを使用し、得られた映像を基に Flyer plate の高速変形挙動や被接合金属板の衝突挙動について調査した。

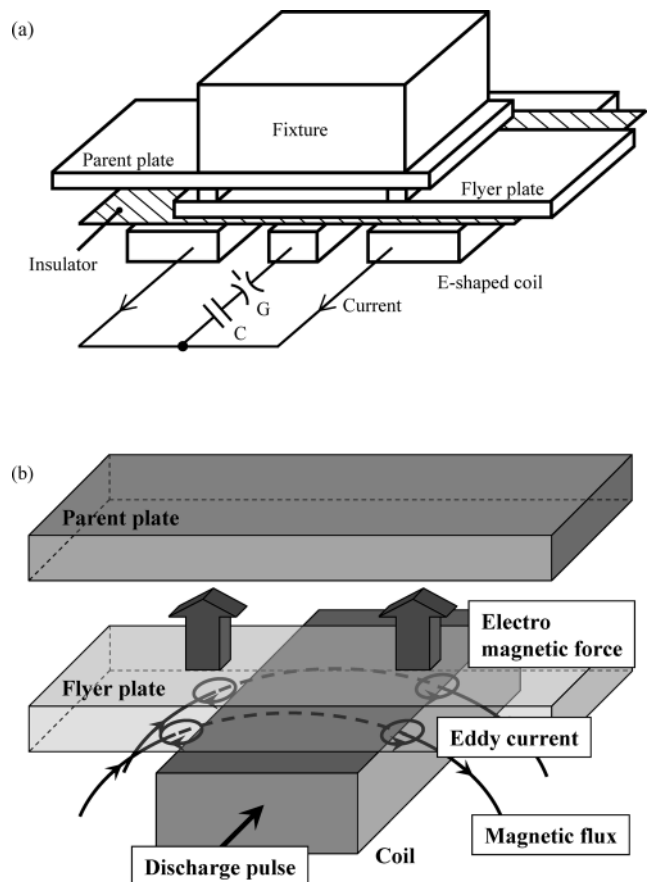
## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

電磁力衝撃圧着では、電磁力を発生させるために Flyer plate 表面にうず電流を発生させる必要があるため、Flyer plate には Al や Cu のような導電率のよい金属が適している。そこで本研究では、供試材として厚さ 1.0mm の純アルミニウム板 (1050, 99.50 mass%) を使用した。板の形状は、幅 100mm, 長さ 100mm である。

### 2.2 電磁力衝撃圧着

**Fig. 3(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 $\mu$ 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。その後、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のコイルへ流す。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



**Fig. 3** 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.

制御する。

コイル中央領域を拡大した模式図を Fig. 3(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高密度な磁束がコイルに沿って発生する。これらの磁束線が Flyer plate と交差すると、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金属板表面部にのみ流れる。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。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。

本研究では、2枚の純アルミニウム板を重ね合わせて Fig. 3 のように設置し、接合を行った。Flyer plate と Parent plate の間の間隙長は、強固な接合材を得るためにこれまで使用してきた通常の間隙長<sup>1)~3)</sup> よりも大きい 3mm とした。これは、Flyer plate の変形挙動や被接合金属板の衝突挙動を鮮明に撮影するためである。また、充電エネルギーは 2.5kJ に設定した。

### 2.3 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

前述したように、電磁力衝撃圧着は数マイクロ秒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、1  $\mu$ 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。この CCD カメラは、最高 100 万コマ/s の撮影速度で画像を記録することができ、カメラ本体はトリガー信号を受信してから 102 枚の画像を記録できるメモリを内蔵している。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。本研究において、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  $\mu$ s 後に最高発光強度に達し、その後最高発光強度の状態が約 100  $\mu$ 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、放電回路へトリガー信号を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場合、まず最初にフラッシュへトリガー信号を送った。その後、80  $\mu$ 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  $\mu$ 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信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、Fig. 4 に示す二つの方向から行った。一つは、コイルの長手方向に対して垂直な方向からである (Fig. 4(a))。この場合、フラッシュは被接合試料を挟んでカメラと反対側に設置した。したがって、この撮影方法により撮影した画像では、Flyer plate が Parent plate に近づくと、フラッシュからの光を遮るように撮影される。Flyer plate の移動速度は、この手法を用いて撮影した画像から測定した。これに対してもう一つの撮影方向は、コイルの長手方向に対して平行な方向である (Fig. 4(b))。この撮影方向により撮影した画像からは、Flyer plate の変形挙動や被接

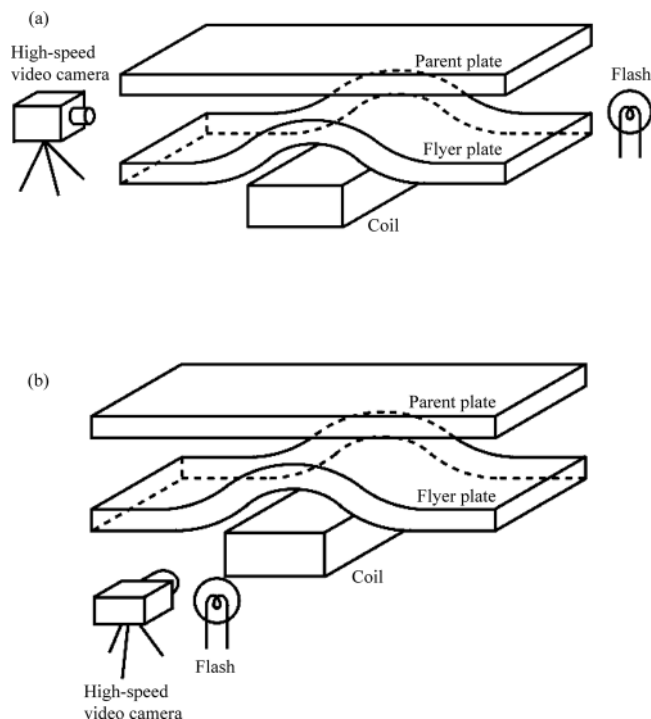


Fig. 4 Observation direction of a high-speed video camera and position of a flash. (a) Perpendicular direction to the longitudinal axis of coil. (b) Parallel direction to the longitudinal axis of coil.

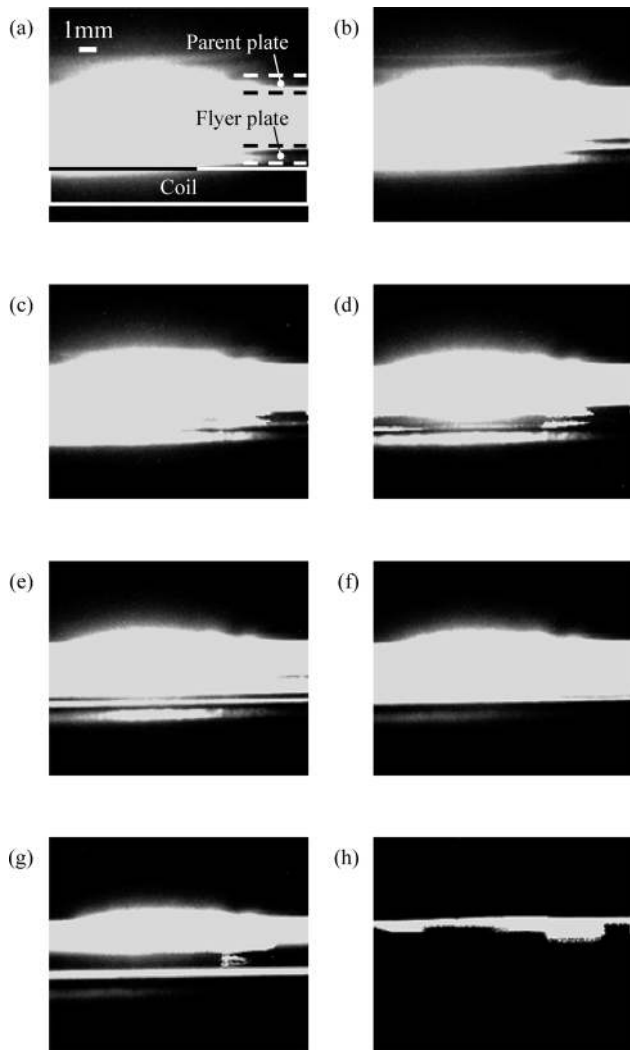
合金金属板の衝突挙動を知ることができる。

## 3. 実験結果

### 3.1 Flyer plate の移動速度の変化

Fig. 5 に、2.5kJ の充電エネルギーを放電した際の電磁力衝撃圧着過程を撮影した連続写真を示す。これらの画像は、Fig. 4(a) に示したように、コイルの長手方向に対して垂直な方向から撮影を行ったものである。放電パルスが流れる前の Flyer plate, Parent plate, コイルの位置を Fig. 5(a) 内に示す。Fig. 5(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。コイルに放電パルスが流れ始めてから 3  $\mu$ s 後まで、被接合金属板に変化は観察されなかったが、Fig. 5(b) に示すように、放電開始から 4  $\mu$ s 後に被接合金属板の間隙を照らしているフラッシュの光がわずかに遮られた。これは、コイルに沿った Flyer plate の一部が Parent plate に向かって張出して変形し始めたことを意味している。張出して変形した Flyer plate の頂点は、初期位置から約 0.6mm 上方に移動した。その後は、Fig. 5(c)~(h) に示すように、フラッシュの光が時間経過とともに徐々に遮られていった。これは、張出して変形した Flyer plate の頂点が Parent plate に徐々に近づいていることを意味している。そして、Fig. 5(h) に示すように、放電開始から 10  $\mu$ s 後には、フラッシュからの光はほとんど観察されなくなり、これによって被接合金属板の衝突が起こったことがわかった。以上の結果により、Flyer plate が 3mm 離れた位置にある Parent plate に衝突するのに必要な時間は 10  $\mu$ s であることがわかった。

Fig. 6(a) に、放電開始からの経過時間と張出して変形した Flyer plate の頂点の初期位置からの移動距離の関係を示す。Flyer plate の移動速度は移動距離の関数として Fig. 6(a) から

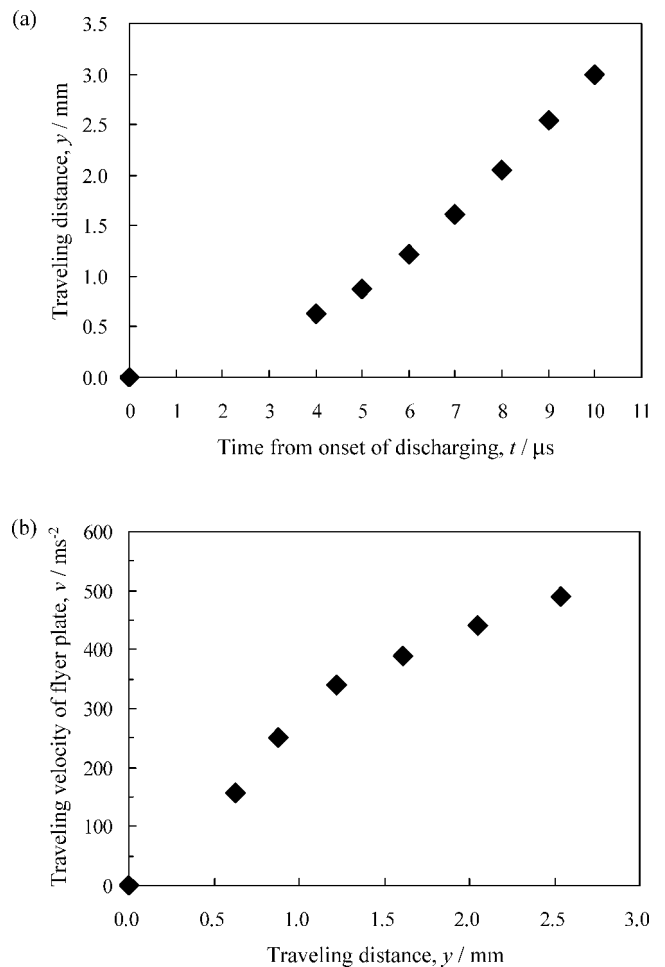


**Fig. 5** A series of high-speed photographs taken from the perpendicular direction to the longitudinal axis of coil. (a) Onset of discharging. (b) After  $4\mu\text{s}$  from onset of discharging. (c) After  $5\mu\text{s}$ . (d) After  $6\mu\text{s}$ . (e) After  $7\mu\text{s}$ . (f) After  $8\mu\text{s}$ . (g) After  $9\mu\text{s}$ . (h) After  $10\mu\text{s}$ .

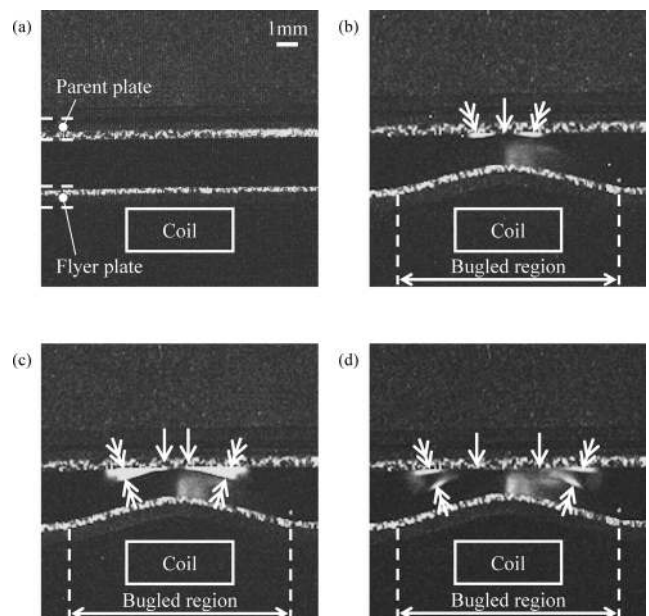
得ることができる。Fig. 6(b) に Flyer plate の移動距離と移動速度の関係を示す。Flyer plate の移動速度は、移動距離に対して放物線状に増加することがわかった。

### 3.2 Flyer plate の変形挙動ならびに Flyer plate と Parent plate の衝突挙動

**Fig. 7** は、Fig. 4(b) に示したようなコイルの長手方向に対して平行な方向から撮影をした連続写真である。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（白破線）ならびにコイル断面の位置を示す。Fig. 7(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 Fig. 5(a) と同じように、被接合金属板に変化は観察されなかった。Fig. 7(b) は、放電開始から  $10\mu\text{s}$  後の写真である。この時間は、Fig. 5(h) に示したようにフラッシュからの光が遮られた時間であり、この瞬間に張出して変形した Flyer plate の頂点が Parent plate に衝突したことがわかる。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



**Fig. 6** (a) Relationship between time from onset of discharge and traveling distance of the flyer plate. (b) Relationship between traveling distance of flyer plate and traveling velocity of the flyer plate.



**Fig. 7** 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  $1\mu\text{s}$  from the initial collision. (d) After  $2\mu\text{s}$ .

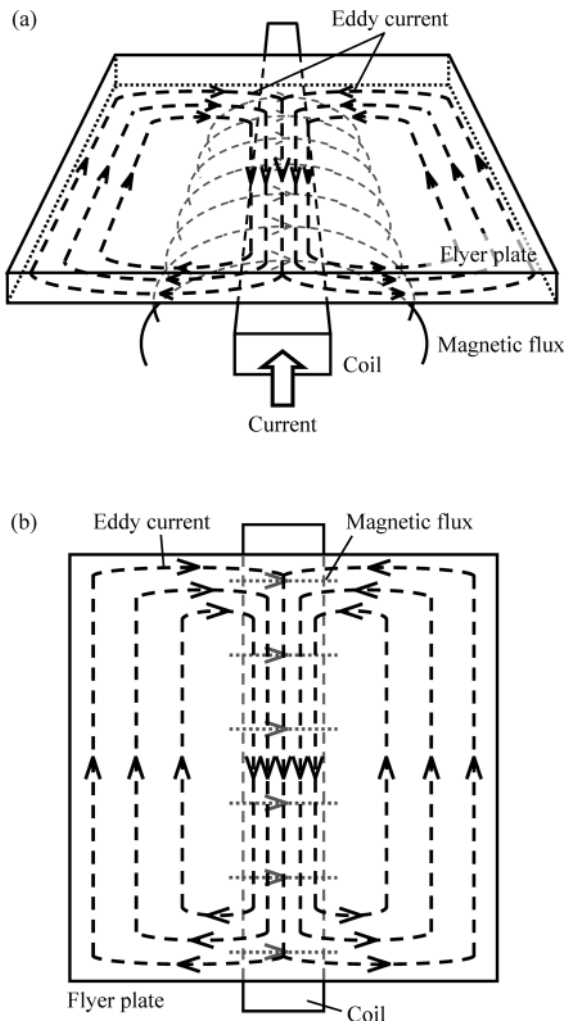


Fig. 8 Schematic illustrations for flow mechanics of the eddy current. (a) Side view. (b) Top view.

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。このとき、被接合金属板の端部においては、衝突は起こっていなかった。この理由は、磁束線と電流、そして生じる電磁力の方向を考えると理解できる。Fig. 8に、磁束線の方向とFlyer plate内を流れる電流の流れ方を示す。Flyer plateの内側においては、電流は磁束線に対して垂直な方向に流れるため、電磁力はフレミングの左手の法則に従って、磁束線ならびに電流に対して垂直な方向、すなわちParent plateに向かう方向に生じる。一方、Flyer plateの端部においては、磁束線と電流の方向が平行になっているため、電磁力は生じない。ゆえに、Flyer plateの端部は電磁力によって変形することはなく、Flyer plateの内側の変形に追従して変形する。

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、生じた電磁力が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 $0^\circ$ であると考えられる。

Fig. 7(c) および (d) は、初期衝突からそれぞれ $1\mu\text{s}$ なら

びに $2\mu\text{s}$ 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. 7(b)~(d)においてFlyer plateが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。これについては、後に考察する。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. 7(b)~(d)内の二重矢印によって示したように、衝突点から閃光の発生が観察された。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<sup>17)</sup>を示していると考えられる。Bergmann<sup>18)</sup>やOnzawa<sup>19)</sup>、Turgutle<sup>20)</sup>らは、瞬間X線写真やフレーミングカメラを用いて、爆発圧着過程に発生するメタルジェットを観察している。本研究で観察された放射物の画像は、彼らが報告しているメタルジェットの発生挙動と類似している。また、Mousavi<sup>21),22)</sup>やTanaka<sup>23)</sup>らは、様々な数値解析モデルを用いて爆発圧着過程を解析し、衝突点から発生するメタルジェットの発生をシミュレーションすることに成功している。

衝突点からメタルジェットが発生することによって、金属板表面の異物や酸化膜は除去され、その結果、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<sup>24),25)</sup>。さらにBahraniは、波状界面形態はメタルジェットの発生に起因していることを提案しており<sup>12)</sup>、本接合材においても波状界面が観察されている。

## 4. 考 察

### 4.1 Flyer plateの衝突挙動

本研究では、高速度ビデオカメラを用いて電磁力衝撃圧着過程のその場観察を行った。これらの連続写真よりコイル上に位置しているFlyer plateの一部がParent plateに向かって張出し、高速で衝突することが明らかになった。また、Fig. 6(b)に示すように、Flyer plateの移動速度は移動距離とともに加速することがわかった。この結果は、Flyer plateがParent plateに向かって移動している間、Flyer plateが絶えず電磁力によって加速され続けていることを示している。Fig. 6(b)に示した結果から、初期位置から1.0mmの位置をFlyer plateが移動する際の移動速度は、250m/sであることがわかる。通常、本手法を用いて接合を行う際に設定する被接合金属板の間隙長は約1mmであるため、よってこの速度は充電エネルギーが2.5kJの際の衝突速度に対応するものである。

我々は、Flyer plateとParent plateの初期間隙長を1.0mm、充電エネルギーを2.5kJの条件でAl/Al接合材を電磁力衝撃圧着により作製してきた<sup>1),3)</sup>。また、充電エネルギーを0.5kJから4.0kJまで変化させ、各充電エネルギーにおけるFlyer plateの衝突速度を調査した<sup>3)</sup>。このとき、放電開始から金属板の衝突までの時間 $t$ を電気信号を用いることによって測定し、衝突速度を $l/t$ によって見積もった。ここで、 $l$ は2枚の被接合金属板の間の初期間隙長である。このような手法によって見積もられた衝突速度は、充電エネルギーが2.5kJの条件において130m/sであった<sup>3)</sup>。この衝突速度は、Fig. 6(b)から得られる速度のおよそ半分の値である。この違いの原因は、電気信号を用いて見積もった速度は時間依存（位置依存）の速度ではなく、 $t=0$ から被接合金属同士の衝突までの

時間の平均速度であるからである。

電磁力衝撃圧着過程のその場観察については、比較できる報告がないため、ここでは関連したいくつかの報告について紹介する。岡川や相沢らは、電気信号を用いて厚さ 1mm の Flyer plate (Al) の平均移動速度を見積もっている<sup>26),27)</sup>。これらの報告では、初期間隙長を 0.2mm から 2.0mm ならびに充電エネルギーを 0.7kJ から 1.1kJ に変化させて試験している。彼らは、Flyer plate の衝突速度は初期間隙長が約 1mm になるまでは間隙長の増加とともに増加するが、1mm 以上の間隙長では間隙長の増加とともに減少することを示している。しかし本研究では、Flyer plate の移動速度は移動距離の増加に伴い徐々に加速した。上記したいくつかの実験結果の矛盾を理解するためには、以下に示すことについて考慮する必要がある。(i) Flyer plate の衝突速度は、張出した Flyer plate の最上部の局所的な変形速度に対応していること。(ii) 放電電流、磁束および電流の相互作用によって生じる電磁力は、放電電流が消失するまで Flyer plate を加速させ続けること。Flyer plate の変形を促している駆動力は、主に充電エネルギーによって制御していること。(iii) Flyer plate の変形挙動ならびに変形速度は、Flyer plate の厚さや力学的特性（変形抵抗）に依存されること。それゆえ Parent plate への Flyer plate の衝突速度は、充電エネルギーや被接合金属間の間隙長、Flyer plate の厚さや力学的特性のバランスによって決定されると考えられる。充電エネルギーが低いとき、Flyer plate の変形を促すために生じた電磁力は小さくなる。また、間隙長が増加すれば加工硬化が進み、Flyer plate の変形抵抗は増加する。もしこの駆動力が Flyer plate の変形抵抗に対して十分に大きくなければ、Flyer plate の移動速度は減少すると考えられる。岡川らによる報告は、この場合に対応すると考えられる<sup>26),27)</sup>。それに対し本研究で設定した充電エネルギー (2.5kJ) は、変形抵抗の増加の影響を無視できるほど十分に高い値であったと考えられる。

#### 4.2 電磁力衝撃圧着における衝突角度の影響

Fig. 1 に示したように、電磁力衝撃圧着では、接合はコイル長手方向と平行に 2 箇所領域で達成され、その間の領域は接合されない<sup>3)</sup>。その接合界面は特徴的な波状を呈し<sup>1)~3)</sup>、波状界面の波長および振幅は一定の大きさではなく、徐々に変化する (Fig. 2<sup>3)</sup>)。ここでは、2 箇所の接合部の間の領域が接合されない理由と接合界面において波状形態が変化する理由について考察する。Bahrani や Onzawa らは、爆発圧着界面の形態に及ぼす衝突角度の影響について調べるために、“semi-cylinder 法”を用いて接合を行っている。semi-cylinder 法とは、平板状の Flyer plate と半円柱状の Parent plate を爆発圧着する手法である<sup>12),13)</sup>。これらの報告は、衝突角度が 0° 付近の領域では接合されないが、衝突角度のある限られた範囲においては波状界面を伴う接合が達成されることを示している。さらに、その波状界面の波長は衝突角度の増加とともに増加するが、振幅はある衝突角度までは増加し、それ以上の角度では減少することが示されている<sup>12),13)</sup>。

爆発圧着では、接合の可否についての条件が“welding window”と称される図によって整理されている<sup>14)~16)</sup>。この図は、Flyer plate の衝突速度と被接合金属板の衝突角度によって接合可能条件を示したものである。welding window によると、ある中間的な範囲の衝突角度において接合が達成される

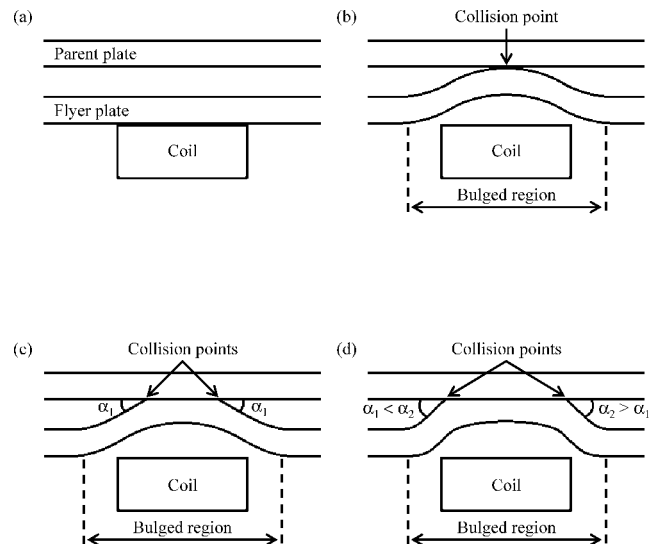


Fig. 9 Schematic diagrams of collision process between the flyer plate and the parent plate. (a) Original position of the plates. (b) Initial collision of the plates. (c) Collision of the plates with low collision angle. (d) Collision of the plates with high collision angle.

のに対し、0° 付近の低角度やある程度の高角度においては接合が達成されないことがわかる。また、衝突速度が一定の条件においては、衝突角度の増加に伴って非接合条件から接合条件へ移行することがわかる。

Fig. 7(b) に示すように、本研究における電磁力衝撃圧着のその場観察により、コイル上に位置している Flyer plate の一部が Parent plate に向かって張出すことが明らかになった。さらに、その Flyer plate の張出し幅は、Fig. 7(b) から Fig. 7(d) においてほぼ一定であった。これらの結果を踏まえると、電磁力衝撃圧着における被接合金属板の衝突挙動を Fig. 9 のように表すことができる。まず、張出して変形した Flyer plate の頂点が Parent plate に衝突する (Fig. 9(b))。このとき、板表面の間の衝突角度は理論上 0° である。Flyer plate の変形が進行すると、衝突点（実際は、線状）は板表面に沿った水平方向に移動する。しかし、Flyer plate の張出した領域以外の部分は変形せず初期位置を保っているため、張出した領域の幅は一定のままである。したがって、衝突点が張出した領域の中央部から外側へ移動することによって、衝突角度は連続的に増加する (Fig. 9(b)~(d))。その結果、傾斜衝突が支配的になる。この領域では、強固な接合が達成され、波状界面が現出する。したがって、波状界面の波長および振幅の大きさの変化は、衝突角度の変化によるものであると考えられる。このような衝突挙動は、半円柱状の Flyer plate と平板状の Parent plate における衝突と同様である。

#### 5. 結 言

本研究では、高速度ビデオカメラを使用し、Flyer plate の高速変形挙動や被接合金属板の衝突挙動を直接観察し、以下の結果を得ることができた。

(1) Flyer plate の移動速度は、移動距離の増加とともに加速した。被接合金属板の初期間隙長が 1.0mm、充電エネルギーが 2.5kJ の条件では、Flyer plate の衝突速度は 250m/s であった。

(2) コイル上に位置している Flyer plate の一部は、電磁力によって Parent plate に向かって張出すことがわかった。張出した Flyer plate の最上部は、衝突角度が  $0^\circ$  の状態で Parent plate に衝突した。これが、2 箇所平行に形成された接合部の間に非接合部が形成される原因であると考えられる。Flyer plate と Parent plate の間の衝突角度は、接合過程において徐々に増加した。このような傾斜衝突挙動が、波長・振幅が変化する波状界面を形成する原因になると考えられる。

#### 謝辞

接合実験には、東京都立産業技術高等専門学校の相沢友勝名誉教授ならびに岡川啓悟教授にご協力いただきました。また、高速度ビデオカメラ撮影には、名古屋大学の田邊靖博教授にご指導いただきました。ここに深く感謝申し上げます。最後に、本研究は日本学術振興会の科学研究費補助金（基盤研究（B）, 課題番号：19360328）によりご支援いただきました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) M. Watanabe, S. Kumai and T. Aizawa: Mater. Sci. Forum, **519-521** (2006), 1145-1150.
- 2) K. J. Lee, S. Kumai, T. Arai and T. Aizawa: Mater. Sci. Eng. A, **471** (2007), 95-101.
- 3) M. Watanabe and S. Kumai: Mater. Trans., **50** (2009), 286-292.
- 4) Y. Dor-ram, B. Z. Weiss and Y. Komem: Acta Metall., **27** (1979), 1417-1429.
- 5) E. Ganin, Y. Komem and B. Z. Weiss: Acta Metall., **34** (1986), 147-158.
- 6) R. V. Tamhankar and J. Ramesam: Mater. Sci. Eng., **13** (1974), 245-254.
- 7) M. Nishida, A. Chiba, K. Imamura, H. Minato and J. Shudo: Metall. Trans. A, **24** (1993), 735-742.
- 8) Y. Li, H. Hashimoto, E. Sukekai, Y. Zhang and Z. Zhang: J. El. M., **49** (2000), 5-16.
- 9) S. A. L. Salem and S. T. S. Al-Hassani: Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena, Marcell Dekker Inc., New York, 1986, pp. 943-959.
- 10) M. Chizari, S. T. S. Al-Hassani and L. M. Barrett: J. Mater. Proc. Tech., **198** (2008), 213-219.
- 11) 伊達秀文, 斎藤 崇, 鈴木利夫: 材料, **48** (1999), 1072-1077.
- 12) A. S. Bahrani, T. J. Black and B. Crossland: Proc. Roy. Soc. London A, **296** (1967), 123-145.
- 13) T. Onzawa and Y. Ishii: Trans. JWS, **4** (1973), 101-108.
- 14) D. Jaramillo, A. Szecket and O. T. Inal: Mater. Sci. Eng., **91** (1987), 217-222.
- 15) A. Szecket, D. J. Viguera and O. T. Inal: Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena, Marcell Dekker Inc., New York, 1986, pp. 887-903.
- 16) B. Crossland: Explosive Welding of Metals and Its Application, Clarendon, Oxford, 1982.
- 17) G. Birkhoff, D. P. MacDougall, E. M. Pugh and S. G. Taylor: J. Appl. Phys., **19** (1948), 563-582.
- 18) O. R. Bergmann, G. R. Cowan and A. H. Holtzman: Trans. Metall. AIME, **236** (1966), 646-653.
- 19) T. Onzawa and Y. Ishii: Trans. JWS, **6** (1975), 18-24.
- 20) A. Turgutlu, S. T. S. Al-Hassani and M. Akyurt: Int. J. Impact Eng., **16** (1995), 789-799.
- 21) A. A. A. Mousavi, S. J. Burley and S. T. S. Al-Hassani: Int. J. Impact Eng., **31** (2005), 719-734.
- 22) A. A. A. Mousavi and S. T. S. Al-Hassani: J. Mech. Phys. Solids, **53** (2005), 2501-2528.
- 23) K. Tanaka: Proc. 15th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter, American Institute of Physics, 2007, pp. 1301-1304.
- 24) 石井勇五郎: 溶接学会誌, **36** (1967), 1287-1300.
- 25) 外本和幸, 氏本泰弘: 塑性と加工, **43** (2002), 370-374.
- 26) 岡川啓悟, 相沢友勝: 塑性と加工, **47** (2006), 632-636.
- 27) 岡川啓悟, 相沢友勝: 塑性と加工, **48** (2007), 323-327.