デジタル画像相関法によるアルミニウムの超音波接合過程の解析*

佐々木朋裕**, 渡辺 健彦**, 後藤 拓人***, 細川 祐介***, 柳沢 敦**

Analysis for ultrasonic welding process of aluminum sheets using digital image correlation method*

by SASAKI Tomohiro**, WATANABE Takehiko**, GOTO Takuto*** HOSOKAWA Yusuke***, YANAGISAWA Atsushi**

Ultrasonic welding phenomenon of pure aluminum sheets was observed using high speed video camera. The dynamic vibration behaviors of the edges of a welding tip, and a pair of aluminum sheets (upper specimen, lower specimen) were analyzed from the captured images using digital image correlation method. The following results were obtained. The welding process was comprised of following three stages. First, the upper specimen vibrated accompanying with small slipping between the edge and the upper specimen. The upper specimen thereby moved to one side along the vibration direction (Welding process I). In the second process, the vibration amplitude of the upper specimen decreased, while the friction between the edge and the upper specimen relatively increased (Welding process II). Then, the vibration amplitudes of the upper specimen and the lower specimen increased and the welding region plastically deformed (Welding process III). Joint strength increased with the welding time. In the fracture surface observation, partially welded regions were observed in the welding time corresponding to the welding process I, and growth of the welded regions was confirmed in the welding process II. The maximum strength was obtained in the welding process III, while adhesion to the welding tip and breakage of welded joints caused by compressive plastic deformation of welding region occurred in some specimens. The edges of a welding tip penetrated to the upper specimen with friction and plastic deformation of the upper specimen during the welding processes I and II. The penetrated depth saturated in the welding process II and the tip indentation forms on the surface of upper specimen.

Key Words: Ultrasonic welding, Aluminum sheet, Digital image correlation method, Joint strength, Welding process

1. 緒 言

超音波接合法は接合部に静圧力を加えて、振動を付加することによって接合を行う手法である。接合部の温度上昇が小さく、微小な材料が短時間で接合できることから、半導体基板上の表面電極や小型燃料電池の複合電極などの微細接合技術として利用されている¹⁾。一方、高効率で大出力の超音波発生装置が普及するとともに、構造用部材への適用も行われている²⁾。

超音波接合の機構は、固相接合現象の観点から次のように考えられている^{1, 3, 4)}。接合材の接合面には微小な凹凸が存在し、接合界面ではこれらの先端が加圧力によって互いに接触している。超音波ホーンからの振動がホーン先端に取り付けられた接合チップを介して接合界面へ付加されると、接触部に摩擦やせん断変形が生じ、接合面にある吸着物や酸化皮膜が機械的に破壊、除去され、新生面が形成されることにより凝着核が生じて接合部が形成される。形成された接合部は振動付加時間とともに拡大し、接合が完了する。一方、接合中には接合チップと接合材との接触部においても接合材の変

形やすべりが生じ、継手の接合強さに影響を与える場合があるが詳細は明らかではない。従って、一対の接合材と接合チップを含めた三体の挙動を調べることが接合機構を明らかにする上で重要と考えられる。これまでに、金属材料の超音波接合過程を調べた研究では、加圧力や接合時間、接合チップ形状などを接合因子として、接合界面組織と継手の接合強さの関係を金属学的観点から調べた結果⁴⁻⁸⁾や接合界面部の材料変形を有限要素法により解析した結果^{9, 10)}、およびレーザー変位計を用いて接合材の変形量を調べた結果¹¹⁾などが報告されている。しかし、高速で振動する接合チップおよび接合材の挙動を動的に調べた例はなく、接合機構には不明な点が多い。

本研究では、接合チップおよび接合材の相対運動に着目して、工業用純アルミニウム板を用いた超音波接合実験を行い、接合中の挙動を高速ビデオカメラで撮影し、画像解析により得られたデータから接合過程を調べた。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材および接合試験片

供試材として工業用純アルミニウム A1050 の冷間圧延板を用いた。Fig. 1 (a) に示すように、厚さ 0.5 mm および 0.8 mm の板材から、圧延方向を長手方向にそれぞれ長さ 60 mm × 幅 10 mm、および長さ 60 mm × 幅 10.5 mm の短冊状の試験片を観察・撮影用に切り出した。また、継手の接合強さの測定用

*受付日 平成23年11月28日 受理日 平成24年3月28日 平成23年10月界面接合研究委員会で発表

**正 員 新潟大学大学院自然科学研究科 Member, Niigata University, Graduate School of Science and Technology

*** 新潟大学大学院 Graduate Student of Niigata University

Fig. 1 Welding specimens used for (a) high-speed camera observation and (b) tensile test.

Fig. 2 Schematic illustration of the ultrasonic welding.

Fig. 3 Specimen used for tensile test.

Fig. 4 Setup for high-speed camera observation.

には同じ幅で長さ 100 mm の接合試験片を切り出した (Fig. 1 (b)). 撮影用の試験片には端から長さ 20 mm の領域に、また、接合強さ測定用の試験片には中央の 20 mm の領域に過塩素酸 6 vol% とエタノール 80 vol% の水溶液を用いて電解研磨を施した. さらに、撮影用試験片の観察・撮影する端面は #800 のエメリー紙で研磨し、アセトン洗浄および乾燥後、およそ 1 時間以内に接合実験に供した.

2.2 超音波接合実験および接合強さの評価

接合実験には定格出力 2400 W、発振周波数 15 kHz の超音波接合機を用いた. 無負荷時の超音波ホーン先端の最大振幅は $53\mu\text{m}$ であった (peak to peak). Fig. 2 に示すように超音波ホーン先端、および下側のアンビルには $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ の接合チップが取り付けられ、接合チップ表面はピッチ 0.8 mm、高さ 0.3 mm、溝角度 90° の突起がローレット加工されている. アンビル側に幅 10.5 mm、板厚 0.8 mm の試験片 (下部試験片)、その上に幅 10 mm、板厚 0.5 mm の試験片 (上部試験片) を平行に重ねて配置した. アンビル側の接合チップと下部試験片との間のすべりの影響を小さくするために下部試験片を治具で固定した後、超音波ホーン側の接合チップから上部試験片に所定の荷重 (以下、加圧力と呼ぶ) を加えて、超音波振動を所定の時間 (以後、接合時間と呼ぶ) 付加して接合を行った. 加圧力は 588 N の一定とした.

継手の接合強さの測定は、接合用試験片 (長さ 100 mm) の中央部分を接合した後、Fig. 3 のように両端を折り曲げた U 字型引張試験片を作製して行った. 折り曲げられた両端を引張り、破断までの最大荷重を継手の接合強さとし、各接合条件につき 5 回の測定を行った.

2.3 接合部の撮影および画像相関法による解析

超音波接合中の接合部の撮影には、高速ビデオカメラを用いた. Fig. 4 に示すように高速ビデオカメラを振動方向に対して垂直に (y 方向) 配置し、上部試験片、下部試験片および接合チップの端面が同一面上になるように試験片の位置を調整した. 撮影領域は、Fig. 4 中の破線で示した長方形の領域であり、すなわち、接合部中央のローレット突起先端 (以後、エッジと呼ぶ.)、上部試験片および下部試験片の一部である. 撮影速度は 100,000 frames/s である. 撮影終了後、PC に保存された画像から画像相関法¹²⁾を用いて接合中の試験片端面とエッジの移動量を計測した.

本研究で用いた画像相関法の概略について以下に述べる. 撮影画像は 256 階調の輝度値からなる画素の集合であり、本研究の撮影条件において画素分解能はおおよそ $10\mu\text{m}/\text{pixel}$ である. まず、画素の大きさ以下の変位を求めるため、画素の線形補間¹³⁾を行った. 画素補間後の分解能はおおよそ $2\mu\text{m}/\text{pixel}$ に相当する. 次に、振動開始前の画像にサブセット領域を設定し、振動開始後の各画像内においてサブセット領域がどこに移動したかを領域内の輝度値配列の類似度を表す相関係数 R に基づいて検索し、振動前の画像との対応座

Fig. 5 Displacement analysis by digital image correlation method.

Fig. 6 Temperature measurement of a specimen during welding.

標を求めた (Fig. 5). 相関係数 R には次式で表される正規化相関係数を用いた.

$$R = \frac{\sum (f_i - \bar{f})(g_i - \bar{g})}{\sqrt{\sum (f_i - \bar{f})^2 \sum (g_i - \bar{g})^2}} \quad (1)$$

ここで, f_i および g_i はそれぞれ振動開始前後におけるサブセット内の輝度値, $\bar{f}$ および $\bar{g}$ はそれらの平均値である. 振動前に設定したサブセット領域を振動開始後の画像内で走査させながら相関係数 R を計算し, R が最大となる座標を対応座標とした. サブセット領域をそれぞれ振動開始前のエッジ, 上部試験片および下部試験片の中心部分に設定し, 振動開始から終了までのこれらの変位を算出した.

2.4 接合部の温度測定

撮影用試験片と同じ形状の試験片を用いて接合中の温度を測定した. Fig. 6 に示すように, 上部試験片の端面に直径 0.1 mm の K 型熱電対をバーカッション溶接し, 高速ビデオカメラによる撮影時と同様に, 接合チップ, 上部試験片および下部試験片の端面を描えて超音波接合を行った.

3. 実験結果および考察

3.1 継手の接合強さと接合時間の関係

はじめに, 加圧力 588 N で超音波接合した継手の接合強さと接合時間の関係を調べた結果を Fig. 7 に示す. ある時点ま

Fig. 7 Relationship between joint strength and welding time. The errors bars indicate the scatter in measured values.

Fig. 8 Fracture appearances of ultrasonically welded joint.

では接合強さは増加しており, この結果はアルミニウム合金の超音波接合について調べた以前の報告^{4,5)}と同様である. 接合強さの平均値は接合時間 50 ms 以下で約 130 N まで上昇した後, それ以上では接合時間とともにほぼ直線的に増加している. また, 接合時間の増加に伴いエラーバーで示される接合強さのばらつきが大きくなっている. Fig. 8 は破断した試験片の外観写真である. Fig. 8 (a), (b) に示すように, 接合時間が 600 ms 以下では, いずれの継手においても接合界面で破断が生じた. 接合時間が 700 ms 以上になると, 接合部が下部試験片側に残るボタン破断 (Fig. 8 (c)) となったが, 上部試験片が接合チップによって大きな塑性変形を受けて薄化することによって接合強さが低下する継手も認められた. 超音波接合では, 接合時間の経過に伴い接合部の温度が上昇する⁵⁾. このため, 接合時間が 900 ms 以上では, 試験片の塑性変形や接合チップへの凝着による損傷が大きく, 継手の作製が不可能であった.

3.2 接合中の接合チップおよび試験片の挙動

Fig. 9 は接合時間 800 ms で接合実験を行った時の撮影画像を画像相関法により解析した結果である. エッジおよび試験片の振動方向 (x 方向) の変位 u と接合時間 t_w の関係を示した. また, Fig. 10 (a) - (c) はそれぞれ, Fig. 9 の図中に破線で示される接合時間 10 ms, 300 ms および 550 ms 付近を拡大したグラフである. 後述のように接合時間が 600 ms 以上では, 接合部の塑性変形により観察面が撮影レンズの焦点から

Fig. 9 Displacements in the vibration direction during welding.

Fig. 10 Displacements in the vibration direction at welding time, t_w = (a) 10ms, (b) 300ms, and (c) 550ms.

Fig. 11 Plastic deformation of welded area. (a) shows an appearance of the specimen welded for a welding time t_w = 800ms, and (b) is the high-speed camera images at welding times of 500ms, 600ms and 700ms.

外れたために計測が不可能であった。Fig. 9では、接合時間が50ms以下において、上部試験片の変位がおよそ200 μ mまで急激に増加している。この値はエッジの振幅よりもはるかに大きく、エッジに対して上部試験片の+x方向への大きな“すべり”が生じていることを示している。接合時間10ms付近を拡大したFig. 10(a)では、上部試験片がエッジと同周期で振動しながら+x方向へと移動していることがわかる。上部試験片の大きなすべりは、接合チップが取り付けられて

いる超音波ホーンが振動方向に対して非対称な形状であるために生じていると考えられる。上部試験片の(1周期当たりの)振幅はおよそ35 μ m (peak to peak)であり、エッジの振幅の3/4程度となっている。

さらに、Fig. 9の接合時間が50msから480msまでの範囲においても、上部試験片は+x方向へ約700 μ mまで移動していることがわかる。しかし、接合時間300ms付近を拡大したFig. 10(b)を見ると、上部試験片の振幅は10 μ m程度まで

Fig. 12 Relative displacement at welding times, t_w = (a) 10ms, (b) 300ms, and (c) 550ms.

減少し、エッジの振幅との差が大きくなっている。また、治具で固定した下部試験片にもわずかな振動が生じている。接合時間が約 480 ms 以上 (Fig. 9) になると、上部試験片の振幅は再び急増傾向を示している。接合時間 550 ms 付近 (Fig. 10 (c)) では、上部試験片および下部試験片の振幅が共に 30 μm 程度まで上昇している。撮影後の接合部の外観写真および接合時間が 500 ms から 700 ms における高速ビデオカメラの撮影画像をそれぞれ Fig. 11 (a) および (b) に示す。接合後の試験片は (Fig. 11 (a)) は、図中に破線で示すように端部が大きく塑性変形し、観察面が外側に張り出している。また、高速ビデオカメラによる撮影画像では、Fig. 11 (b) のように接合時間が約 500 ms から観察面が撮影レンズの焦点からずれる様子が認められた。接合時間が 480 ms 以上で生じる上部および下部試験片の振幅の増加は、下部試験片が塑性変形し、固定治具から外れたことによると考えられる。

以上の観察結果から、本実験条件における超音波接合過程は Fig. 9 中に示すような I から III の 3 つの接合過程から成ると考えられる。まず、接合過程 I (接合時間 $t_w = 0 - 50 \text{ ms}$) では上部試験片が大きく振動しながら、+x 方向へ移動する。次に、接合過程 II ($t_w = 50 - 480 \text{ ms}$) では、振幅が減少する。最後に、接合部全体が塑性変形し、上部/下部試験片の振幅が共に増加する (接合過程 III, $t_w = 480 - 800 \text{ ms}$)。

3.3 接合チップおよび試験片の相対運動と接合領域の形成

前節で述べた接合過程 I から III における接合チップと試験片の相対運動を接合強さに関連させて考察する。Fig. 12 は画像相関法で得られた変位から、エッジ/上部試験片間の相対変位 $u_{r,EU}$ および下部試験片/上部試験片間の相対変位 $u_{r,LU}$ を求めた結果である。Fig. 10 の変位と同様に接合時間 10 ms, 300 ms および 550 ms 付近をそれぞれ Fig. 12 (a) - (c) に示した。接合過程 I の Fig. 12 (a) では、下部試験片/上部試験片間の相対振動が特に大きくなっている。

接合時間 20 ms, 50 ms および 300 ms で接合した継手の引張試験において界面破断した破面のマクロ写真を Fig. 13 (a) - (c) に示す。さらに、マクロ写真において白く見える部分を

Fig. 13 Appearance of fracture surface and SEM micrograph of the welded area.

拡大した SEM 写真を Fig. 13 (d) - (f) に示す。矢印 (d) の部分を拡大した SEM 写真 (Fig. 13 (d)) では、矢印①のようなディンプル模様がわずかに認められるが、上下の接合面の摩擦による擦過痕 (矢印②) が多くなっている。接合初期に観察される擦過痕部分では、接合時間の経過に伴い表面皮膜が除去され、部分的な接合領域が形成されることが既報⁴⁻⁶⁾において明らかにされている。すなわち、接合過程 I は、上部試験片/下部試験片間の振動、および前述したように約 200 μm の大きな変位 (すべり) で生じる摩擦によって部分的な接合領域が形成される過程であるといえる。

接合過程 II (Fig. 12 (b)) になると、エッジ/上部試験片間の振幅が増加し、上部/下部試験片間の振幅が減少している。上部/下部試験片間の振幅の減少は、接合過程 I で部分的な接合領域が形成されたことによると考えられるが、わずかな相対振動が認められる。Fig. 14 は本実験で用いた上部/下部試験片の厚さの和に相当する 1.3 mm のアルミニウム板 (A1050) 1 枚に対して、同様の加圧力および振動を与えて端

Fig. 14 Relative displacement when vibration was applied to a 1.3mm thick aluminum sheet ($t_w = 300\text{ms}$).

Fig. 16 Displacement in the direction of clamping force.

Fig. 15 Plastic deformation near the welding interface during the welding process II.

面を撮影した結果である。サブセット領域をそれぞれエッジおよび上部／下部試験片の中央に相当する位置に設定し、Fig. 12と同様に相対変位を求めた。Fig. 12(b)とFig. 14を比較すると、接合過程IIで生じている上部／下部試験片間の相対振動は接合部が存在しない場合 (Fig. 14) よりも大きいことがわかる。一方、接合時間 50 ms および 300 ms の破面を示した Fig. 13 (b) および (c) では、白く見える部分が顕著に拡大しており、矢印 (e) および (f) で示した領域の SEM 写真ではディンプル部が相対的に拡張されている (Fig. 13 (e), (f))。また、接合過程IIにおける高速ビデオカメラの撮影画像では、Fig. 15に示すように接合界面近傍が接合時間とともに塑性変形する様子が確認された。以上の結果から、接合過程IIでは、接合過程Iにおいて形成された接合領域が局所的に塑性変形し、振動方向に引き伸ばされながら拡大していると推測される。さらに、接合過程III (Fig. 11 (c)) になるとエッジ／上部試験片間の振幅は再び減少するが、上部／下部試験片間の振幅は接合過程IIにおけるそれとほぼ同じである。接合過程IIIでは接合部全体の塑性変形が生じるが、上部／下部試験片間の相対振動の大きさは接合過程IIと同程度であることがわかる。

Fig. 17 Tip indentation on surface of the upper specimen.

3.4 接合チップの上部試験片への食い込みと圧痕の形成

画像相関法により求めたエッジおよび上部、下部試験片の加圧力方向 (z 方向) の移動量 w を Fig. 16 に示す。変位 w は接合時間 400 ms 付近で飽和した後、接合過程IIIで接合部が塑性変形するため再び増加している。エッジの移動量は上部試験片の移動量よりも大きく、エッジは振動とともに上部試験片におよそ $100\mu\text{m}$ まで押し込まれていることがわかる。Fig. 17 (a) - (d) はそれぞれ、接合時間 20 ms, 50 ms, 300 ms, および 700 ms で接合した後の上部試験片側の接合チップ接触面を実体顕微鏡で観察した写真である。接合過程I (Fig. 17 (a)) では、振動方向に伸びた圧痕が認められるが、圧痕面積は接合時間とともに大きくなり、接合過程IIIの接合時間 700 ms (Fig. 17 (d)) でローレットのほぼ全体の形状が転写されている。圧痕の振動方向 (x 方向) および振動に垂直な方向 (y 方向) の幅を測定した結果を Fig. 18 に示す。x 方向の幅は接合時間 100 ms 以下でローレットのピッチにほぼ等しい $800\mu\text{m}$ に達していることから、接合過程Iで生じる上部試験片の大きなすべりが影響していると考えられる。一方、y 方向の幅は、Fig. 16 の加圧力方向の変位 w と同様の曲線を示している。前節で述べたように、接合過程IIではエッジと上部試験片との相対運動が大きくなる。接合過程Iで上部試験片にある程度の深さまで押し込まれたエッジは、接合過程II以降で、上部試験片を塑性変形させて圧痕を押し広げながらより深く押し込まれていることがわかる。

Fig. 18 Variation of width of tip indentation with welding time.

Fig. 19 Temperature change of a specimen during welding.

Fig. 20 Schematic illustration of ultrasonic welding process. The figure shows area in one knurled edge on welding tip.

3.5 接合部の温度変化

Fig. 19 に接合時間 800 ms で継手を作製した時の接合部の温度変化を示す。接合部の温度は、50 ms 以下でおよそ 150°C まで急上昇した後、振動が停止する接合時間 800 ms までほぼ直線的に上昇し、約 450°C に達している。エッジおよび上部／下部試験片の相対運動を考慮すると、接合過程 I では、上部／下部試験片間の相対振動が大きいことから、接合界面での摩擦が接合初期の温度上昇に関与していると推測される。一方、接合過程 II において相対運動は上部／下部試験片間からエッジ／上部試験片間へと移行する。また、エッジは上部試験片へと食い込みながら圧痕を拡大させる。Fig. 12 (b) に示したような上部／下部試験片間のわずかな相対振動は、エッジ／上部試験片間の相対振動に比べて遥かに小さいことから、接合過程 II では、エッジ／上部試験片の接触面間の摩擦やエッジの食い込みと振動に伴う上部試験片の塑性変形が接合部の温度上昇の主因であると考えられる。さらに、接合過程 I および II で接合部の温度が上昇した結果、接合過程 III では接合部が軟化し、加圧力による塑性変形が生じたものと推測される。

3.6 超音波接合過程

以上の実験結果から、本接合条件における超音波接合過程を図解すると Fig. 20 のようになると考えられる。(1) 接合過程 I (接合時間 0-50 ms) で、Fig. 20 (a) のように接合チップの

エッジが振動とともに上部試験片にある程度の深さまで食い込む。上部試験片は振動方向の大きなすべりを伴いながら振動し、上部試験片／下部試験片の摩擦により接合界面の温度が上昇する。(2) 接合時間がおおよそ 50 ms で、Fig. 20 (b) に示すようにエッジに対応する接合界面には新生面が生成し、部分的な接合領域が形成される。(3) 接合過程 II (接合時間 50-480 ms) では、接合領域が形成されたことにより、上部試験片の振幅が減少し、エッジ／上部試験片間の相対振動が大きくなる。接合領域は上部試験片／下部試験片間の微小な相対振動によって局所的に塑性変形しながら拡大する。また、エッジ／上部試験片の接触面間の摩擦およびエッジの食い込みによる上部試験片の塑性変形は、接合部の温度をさらに上昇させて、接合領域の拡大を助長する。(Fig. 20 (c)). (4) 接合過程 III (接合時間 480 ms 以上) では、接合過程 I および接合過程 II で接合部の温度が上昇した結果、下部試験片を含む接合部全体が加圧力により塑性変形する。(Fig. 20 (d)).

4. 結 論

本研究では、工業用 A1050 純アルミニウム板を超音波接合し、高速ビデオカメラを用いて接合中の接合チップおよび接合試験片端面の観察、撮影を行った。撮影画像から画像相関法を用いて接合チップおよび試験片端面の移動量を計測し、超音波接合過程について調べた。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 試験片の挙動から、接合過程は次の3つの過程からなると考えられる。すなわち、上部試験片が接合チップと同じ周期で振動しながら振動方向に移動する接合過程Ⅰ、上部試験片の振幅が減少し、接合チップとの摩擦が大きくなる接合過程Ⅱ、および接合部全体(上部試験片側および下部試験片)が塑性変形し、接合チップとともに振動する接合過程Ⅲから成る。
- 2) 継手の接合強さは接合時間とともに増加し、接合過程Ⅲに相当する条件で最も高くなるが、接合がさらに長時間になると接合部の塑性変形により、接合チップへの凝着や試験片の損傷が生じる場合がある。
- 3) 接合過程Ⅰで形成された部分的な接合領域は、接合過程Ⅱにおいて上部試験片／下部試験片間の微小な相対運動とともに拡大し、継手の接合強さを上昇させる。また、接合過程Ⅱでは、接合チップと上部試験片との相対運動が接合部の温度上昇の支配的要因となり、接合領域の拡大を助長する。
- 4) 接合チップは接合過程ⅠおよびⅡでは、接触部を摩擦しながら上部試験片へ食い込む。食い込み深さは、接合過程Ⅱで飽和し、上部試験片表面にはローレット形状が転写された圧痕が残る。

参 考 文 献

- 1) For example, Ultrasonic Welding, in Welding Handbook vol.2 8th edition edited by R. L. O' Brien, American Welding Society, (1991) pp784-812.
- 2) For example, E.HETRICK, et al: Ultrasonic Spot Welding – A New Tool for Aluminum Joining –, Welding Journal, Vol.84, No.2 (2005), pp26-30.
- 3) U. I. CHANG and J. FRISCH: On Optimization of Some Parameters in Ultrasonic Metal Welding, Welding Journal, Vol.53, No.1 (1974), 24S-35S.
- 4) HIRAISHI Makoto, WATANABE Takehiko: Effect of Magnesium on Ultrasonic Weldability of Al-Mg alloy, Quarterly Journal of Japan Welding Society, Vol.20 No.4 (2002), pp552-558. (in Japanese)
- 5) WATANABE Takehiko, ITOH Hajime, et al: Ultrasonic Welding of Heat Treatable Aluminum Alloy A6061 Sheet, Quarterly Journal of Japan Welding Society, Vol.26 No.2 (2008), pp117-123. (in Japanese)
- 6) WATANABE Takehiko, MIYAJIMA Daisuke and YANAGISAWA Atsushi: Effect of weld tip geometry on ultrasonic welding of A6061 aluminum alloy, Quarterly Journal of Japan Welding Society, Vol.27 No.1 (2009), pp7-12. (in Japanese)
- 7) D. Bakavos, P. B. Prangnell, Mechanisms of joint and microstructure formation in high power ultrasonic spot welding 6111 aluminium automotive sheet, Mater. Sci. Eng., Vol.A257 (2010), pp6320-6334.
- 8) R. Jahn, R. Cooper and D. Wilkosz: The Effect of Anvil Geometry and Welding Energy on Microstructures in Ultrasonic Spot Welds of AA6111-T4, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.38, No. 3, (2007), pp570-583.
- 9) Y. Takahashi and M. Inoue: Numerical Study of Wire Bonding – Analysis of Interfacial Deformation between Wire and Pad, J. Electronic Packaging, ASME, Vol.124 (2002), pp27-36.
- 10) S. Elangovan, S. Semeer, K. Prakasan: Temperature and stress distribution in ultrasonic metal welding – An FEA-based study, Mater. Proc. Technol., Vol.209 (2009), pp1143-1150.
- 11) M. Maeda, Y. Takahashi: 超音波ワイヤボンディングにおけるワイヤ材の圧下変形挙動, 第87回界面接合研究会資料, Japan Welding Society, (2011). (in Japanese).
- 12) For example, M. A. Sutton, J.-J. Orteu, H. W. Schreier: Image Correlation for Shape, Motion, and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications, Springer-Verlag, (2009).
- 13) W. H. Peters, W. F. Ranson: Digital imaging techniques in experimental stress analysis. Optical Engineering, Vol.21 (1982) pp27-31.