複合振動を用いた超音波溶接*

Ultrasonic Complex Vibration Welding

辻野次郎丸**

Jiromaru TSUJINO

Key words

ultrasonic complex vibration welding, two-dimensional vibration stress, welding of same and different metal materials, configurations of complex vibration system, welding characteristics of complex vibration, welding of aluminum and copper electrode foils and terminals

1. はじめに

超音波エネルギーは、同種および異種類の金属やプラスチック材料の超音波溶接、切削加工、塑性加工等の種々の分野で応用され実用化されているが、いずれもクリーンで省エネルギーである特長がある。超音波溶接は溶接領域が極めて狭い特長があり、このため通常の溶融溶接では不可能または困難な同種および溶融温度の異なる異種金属材料等の溶接が可能である。また、溶接部の特別な表面処理が不要であり、短い時間ではんだ・銀ロウ等が不要な直接溶接が可能である。また、特に溶接部の機械的・電気的特性が優れている特長がある。

通常の直線振動を用いた超音波溶接では、溶接試料の振動により溶接に難易が生じ、特に上部試料が1/4波長の奇数倍の縦振動をする場合には溶接部が振動の節部になり十分な溶接がほとんど不可能である¹⁾²⁾。また、溶接試料の片側からの振動印加では、溶接試料を振動させる駆動力に限界があり、溶接性能が限られる。

また、板厚の大きな溶接試料には、溶接試料の上下から振動方向が直交した振動を印加する上下駆動式超音波溶接装置が有用であり、板厚10mmのアルミニウム板等の溶接が可能である。また、溶接試料の端面どうしの溶接を可能にするために、多数の超音波振動子を集積した大容量の19kHzまたは15kHzの振動源および100kW静電誘導型サイリスタ電力増幅器を用いた突き合わせ超音波装置を構成し、板厚10mm程度のアルミニウム、アルミニウム合金、銅、鉄鋼、ステンレス鋼板等を溶接試料として同種および異種金属材料の突き合わせ超音波溶接を実現している³⁾⁴⁾。

さらに方向性のない、一様で大強度の溶接を実現するために、試料に一方向から2次元の振動応力を印加する溶接

チップ振動軌跡が円形から楕円の、各種の超音波複合振動溶接を提案し、有効性を示してきている⁵⁾。

種々の超音波加工において、従来の直線振動を用いた超音波応用と比べて加工部に2次元、3次元の振動速度、変位または振動応力を印加する複合振動を用いることにより、より効果的な加工が実現できることが明らかになっている。

複合振動を用いた超音波溶接では必要な振動速度、溶接部静圧力、溶接時間が減少するため溶接試料の振動疲労による強度低下が減少し、また、2次元の振動により溶接の方向性がなくなり、溶接位置に無関係に、より一様で大きな溶接強度が得られ、安定な溶接が実現可能となる。さらに金属板の多点溶接、連続点溶接さらに連続シーム溶接等が可能となる^{5)~14)}。また、安定な溶接強度が得られる振動速度等の溶接条件の範囲が広く、試料の損傷が少なく方向性がない安定な溶接が実現できる顕著な特長がある。

超音波複合振動はプラスチック溶接³⁾、振動切削、各種の超音波加工、超音波モータ等にも適用可能であり、2次元さらには3次元の振動が有効であることが分かっている。

超音波複合振動系には種々の構成があるが、ここでは(1)縦振動源で駆動する斜めスリット部で縦振動-ねじり振動変換を行う斜めスリット複合振動変換器および(2)多数の超音波振動子を集積した複合振動系の構成および振動特性、振動軌跡の例について述べる。また、従来の直線振動および複合振動を用いたアルミニウム、銅板等の溶接特性の例を示す¹⁰⁾。

超音波溶接の溶接部には、通常の溶融溶接のような溶融組織(ナゲット)は見当たらないが、X線回折により再結晶組織が存在することが分かっている。また、溶接部の温度はアルミニウム、銅等の場合に400℃近くの温度上昇があることが分かっている⁴⁾。溶接部断面を走査型電子顕微鏡(SEM)、透過型電子顕微鏡(TEM)等で調べた結果、異種金属間の溶接部には介在物、酸化組織、金属間化合物、拡散溶接組織および特別な溶接組織は見当たらず、

*原稿受付 平成28年2月21日

**神奈川大学名誉教授(横浜市神奈川区六角橋3-27-1)、(株)アサヒ・イー・エム・エス取締役会長(横浜市港北区新横浜2-3-4)

図1 重ね合わせ超音波溶接の配置図

V_0 : 溶接チップ振動速度
 V_1 : 上部および下部溶接試料間の相対振動速度
 Z_u, Z_l : 上部および下部溶接試料の音響インピーダンス
 Z_1, Z_2, Z_3 : 境界面 1, 2, 3 の音響インピーダンス (摩擦)
 Z_A, Z_s : 作業台 (anvil) および支持装置の音響インピーダンス

図2 超音波溶接部の電気的等価回路

十分な溶接条件では溶接部で異種金属が直接原子間で接合されていることが明らかになっている¹⁰⁾。

2. 超音波重ね合わせ溶接の溶接方法、等価回路および溶接特性

図1は超音波溶接の溶接方法の基本的な構成である。上部および下部溶接試料を作業台（アンビル）上で重ね合わせ、溶接チップを介して静圧力を局部的に印加した状態で、溶接チップを溶接面に平行な方向に振動させ、溶接面に相対振動速度を与えて溶接を行う。金属試料の場合には、溶接面に垂直な振動は溶接に直接寄与しないことが分かっている。溶接面に垂直で静加圧力の印加方向と同一方向の振動は、静圧力の制御に有効であり使い方次第で溶接に有効に適用可能である。

図2は超音波溶接部の溶接試料の厚さ方向の振動減衰を無視した電気的等価回路である。溶接面に十分な相対振動速度 V_1 を与えるためには、溶接面と並列になっている溶接チップと上部試料の接触駆動面 Z_1 、下部溶接試料とアンビルの接触面のインピーダンス Z_3 が十分に大きい（滑りが少ない）必要がある。また、上部溶接試料のインピーダンス Z_u が大きな場合（長さが縦振動の $1/4$ 波長の奇数倍のとき $\rightarrow \infty$ ）には、溶接部の相対振動速度が確保できず溶接不可能である。また、下部溶接部およびアンビルのインピーダンスが小さな場合には、溶接が不安定になる。

板厚が薄い場合には溶接困難な幅が小であるが、板厚が大きな場合には縦振動の $1/4$ 波長の奇数倍で溶接不可能になる。下部溶接試料長さ、位置が変化した場合にも溶接強度は変化する。このため、通常の直線振動では、厚板の多点溶接またはシーム溶接は極めて困難であるが、溶接試料の

図3 19.5 kHz の半波長縦振動および1 波長ねじり振動モードを用いた斜めスリット複合振動変換器を用いた複合振動溶接装置。交換可能な半波長長さ複合曲げ振動溶接チップを駆動している。

振動が小になる厚さ 0.1 mm 以下の薄板または箔では可能である。また、シーム溶接部の近傍でのさらなる溶接は極めて困難である。

3. 各種の超音波複合振動溶接装置の構成

3.1 半波長縦振動モードの斜めスリット複合振動変換器を用いた複合振動溶接装置

図3に斜めスリットを用いた複合振動変換器先端部に溶接チップ設置部が4箇所ある、周波数 19.5 kHz、2 kW の超音波複合振動溶接装置を示す。この溶接装置は、縦振動源で縦軸方向に駆動する複合振動溶接チップを有する超音波複合振動源、駆動用周波数自動追尾および振幅制御回路および電力増幅器からなる駆動装置、サーボモータ駆動の静加圧力印加装置、制御装置等から構成されている。

複合振動変換器は、縦振動モードおよび斜めスリット部で変換されたねじり振動モードで同時に振動するように、有限要素法および斜めスリット部の音響インピーダンスの測定結果を用いて等価伝送線路法により設計しており、斜めスリット部（スリット 12 本）を 1 箇所または 2 箇所に設置している。縦振動およびねじり振動の共振周波数が近接して、位相差が 90° 近くの場合に円形から楕円の振動軌跡が得られる。

駆動用振動系には、高感度で直線性に優れた環状電磁形の振動速度検出器を設置し、溶接時の振動速度を計測している。この出力は振動帰還制御に有用である。

半波長縦振動モードの複合振動変換器の先端部に溶接部の自由度を増加させるため、半波長長さの曲げ複合振動溶接チップを設置している。図4は、伝送特性が同一のレーザードップラー振動計 2 台を用いて測定した無負荷および溶接時の溶接チップの振動軌跡で、ほぼ円形の振動軌跡が得られている。

複合振動系は複合振動変換器部、振動速度変成用の段付きコニカルホーン、直径 50 mm の超音波 BLT 縦振動子から構成されている。複合振動系は、コニカルホーンのノ

図4 金属板試料溶接時の溶接チップ振動軌跡の例

図5 幅 20 mm の複合振動溶接チップを設置した 19.5 kHz 斜めスリット複合振動変換器を用いた複合振動溶接装置。

ード部で縦およびねじり振動 1/4 波長の支持装置で固定している。

図5は多数のアルミニウム、銅電極箔および端子部を溶接するために、19.5 kHz の斜めスリット複合振動変換器の先端部に幅 20 mm の複合振動溶接チップをねじ接合で設置した複合振動溶接装置である。溶接チップ面で円形から楕円振動軌跡が得られている。

3.2 細く長い複合曲げ振動溶接チップを用いた複合振動溶接装置¹³⁾¹⁴⁾

リチウムイオン・バッテリー、コンデンサ等の電子部品の電極と部品容器内の底部の溶接には現在、細長い電極を用いた電気抵抗溶接またはレーザ溶接が用いられており、スパーク等により金属粒子が飛散し不良の原因となるため、極めて不十分な溶接しか行えない現状にある。このためにタングステン、超硬合金を用いた直径 2 mm および 3 mm、長さ 70 から 100 mm 程度の円形から楕円軌跡で振動する複合曲げ振動溶接チップを用いた 19.5 および 27 kHz の斜めスリット複合振動変換器を用いた超音波複合振動溶接装置を開発した。これにより、厚さ 0.2 mm、幅 3 mm 程度の複数のニッケルクラッド銅電極、銅電極端子等の容器内底部での溶接が可能になっている。

図6は斜めスリット複合振動変換器の先端部に超硬合金製の複合曲げ振動溶接チップを設置した 19.5 kHz および 27 kHz の複合振動溶接装置である。

図7は直径 3.0 mm 長さ 80 mm の超硬合金製の複合曲げ振動溶接チップの縦振動方向および直交した方向の曲げ

図6 直径 2 mm および 3 mm の超硬合金複合曲げ振動溶接チップを用いた 19.5 kHz および 27 kHz の超音波複合振動溶接装置

図7 27 kHz の直径 3.0 mm 長さ 80 mm の超硬合金複合曲げ振動溶接チップの曲げ振動分布

振動分布のレーザードップラー振動系による測定結果である。使用した超硬合金の縦振動音速は 6,409 m/s (実測値) である。ノード数 5 で楕円軌跡で振動していることが分かる。

3.3 多数の超音波振動子を集積した複合振動系

複合振動源としては斜めスリット複合振動変換器を用いる以外に、(1) 曲げ振動系の振動ループ部を直交した縦振動系 2 組、または (2) 対称に配置した縦振動系 2 組を位相差 90° で駆動する、(3) 径方向の共振円盤の周囲に駆動用縦振動子を多数配置して、縦振動系の数に応じた位相差で駆動し、円盤中央に設置した曲げ複合振動ホーンを駆動する、また、(4) 3 組から 8 組の駆動用縦振動子を曲げ振動円盤に設置して集積し、曲げ振動円盤中央に設置した曲げ複合振動ホーンを駆動する大容量の複合振動源等の構成がある。

図8は周波数 27 kHz のボルト締めランジュバン型 PZT 縦振動子 (BLT) 6 本を曲げ振動円盤により集積した複合振動系の構成および複合曲げ振動溶接チップ部のほぼ円形

図 8 27 kHz の超音波 BLT 縦振動子を 6 本集積した超音波複合振動系の構成および複合曲げ振動溶接チップ振動軌跡。

の振動軌跡である。節円が 2、節線が 1 の (2, 1) 曲げ振動モード円盤の 2 つの節円間の振動ループ部に対称に各振動系を設置して集積し、円盤中央ノード部に設置した複合曲げ振動カテナイダルホーン基部を曲げ振動ノード部の傾斜で駆動する。

この複合振動源は、曲げ振動円盤の外側の節円部に共振曲げ振動棒を設置し、複合振動源支持用フランジに連結して支持している。円形振動軌跡の直径方向の振動振幅は、振動系の駆動電圧 10 Vrms で約 $6 \mu\text{m}_{p-o}$ (peak-to-zero value) が得られている。

4. 直線振動および複合振動の溶接特性

4.1 20 kHz の直線振動を用いた超音波溶接装置の溶接特性

20 kHz の直線振動を用いた超音波溶接装置により、板厚 1.0 mm のアルミニウム板試料 2 枚を重ね合わせ静加圧力 1.0、1.5 および 2.0 kN 一定で溶接チップ振動振幅を変化させて溶接強度（引張強度）を測定した結果を図 9 に示す。溶接時間は 4.0 s 一定である。図中の測定点の ↓ 印は、強度試験の際に下部試料が溶接部周辺で破断したことを示している。

振動振幅が増加するにしたがい溶接強度が増加し、試料の母材強度に近い最大溶接強度に達するが、振動振幅が過大になると振動疲労により強度が低下する。静加圧力 1.0 kN では振動振幅 $10 \mu\text{m}_{p-o}$ に近づくと最大溶接強度 1.5 kN 近くに達するが、 $11.5 \mu\text{m}_{p-o}$ 以上では振動疲労により強度試験の際に溶接部周辺で破断し強度が急激に低下する。静加圧力が大になると最大強度に達する振動振幅が静加圧力 2.0 kN で $8 \mu\text{m}_{p-o}$ 程度に小になるが、振動疲労により強度が低下する振動振幅も $9 \mu\text{m}_{p-o}$ 程度に小になり、最大溶接強度が得られる振動振幅の範囲が狭くなり、安定な溶接が可能な範囲が限定される。静加圧力の大小にかかわらず、

図 9 20 kHz の直線振動を用いた超音波溶接装置の板厚 1.0 mm のアルミニウム板試料の溶接特性

図 10 40 kHz の複合振動を用いた板厚 0.3 mm および 1.0 mm のアルミニウム板の溶接特性

最大溶接強度で安定に溶接が可能になる溶接条件の範囲はあまり広くなく、大溶接強度での安定な溶接は困難である。

4.2 40 kHz の複合振動を用いたアルミニウム板の溶接特性

40 kHz の円形振動軌跡の超音波複合振動溶接装置を用いてアルミニウム板の溶接特性について検討した。

振動振幅（円形軌跡の半径）を 0 から $2.0 \mu\text{m}_{p-o}$ まで変化させて、板厚 0.3 mm および 1.0 mm のアルミニウム板を重ね合わせて点溶接を行って溶接強度（引張強度）を測定した結果を図 10 に示す。静圧力 25 MPa、溶接時間 10 s 一定で、溶接部には Li-grease を挿入している¹⁰⁾。振動振幅 $1.0 \mu\text{m}_{p-o}$ 以上の場合アルミニウム板試料は溶接強度の測定時に溶接部が剥離せず、溶接部周辺で破断して母材強度にほぼ等しい溶接強度が得られており、振動振幅 $2.0 \mu\text{m}_{p-o}$ までほぼ一定の強度が得られている。

必要振動振幅は直線振動の場合には $10 \mu\text{m}_{p-o}$ 程度であるのに比較して、複合振動により必要振動振幅が激減し、さ

図 11 27 kHz の超音波複合振動溶接装置（円形振動軌跡）によりアルミニウム-銅板の溶接特性

図 12 27 kHz 直径 0.3 mm 長さ 80 mm の超硬合金製の複合曲げ振動溶接チップによる板厚 0.16 mm のニッケルクラッド銅端子の溶接条件

らに振動振幅が増加した場合の試料の振動疲労による溶接強度の低下が小なため安定な溶接範囲が広いことが分かる。

4.3 27 kHz の複合振動を用いたアルミニウム-銅板の溶接特性

27 kHz の超音波複合振動溶接装置（円形振動軌跡）によりアルミニウム-銅板の溶接特性について検討した。図 11 は振動振幅を変化させて、板厚 1.0 mm のアルミニウムおよび銅板試料の点溶接を行って溶接強度を調べた結果である。静加圧力 2.18 kN、溶接時間 2.5 s 一定である。

振動振幅が増加するにしたがって溶接強度が増加し、振動振幅が $1.4 \mu\text{m}_{p-p}$ から $2.05 \mu\text{m}_{p-p}$ の間で母材強度に近い溶接強度が得られている。振動振幅 $1.4 \mu\text{m}_{p-p}$ 以上で、溶接強度測定時に溶接部から離れた部分で試料が破断しており、振動振幅 $2.1 \mu\text{m}_{p-p}$ 以上で振動疲労により溶接部周辺で破断し、強度が低下している。

静加圧力はやや高めに設定してあるが、複合振動により必要振動振幅が直線振動の場合の $10 \mu\text{m}_{p-p}$ 程度と比較して小になり、また、試料の振動疲労による損傷が小なために

図 13 幅 20 mm の 19.5 kHz 複合振動溶接チップによる積層したアルミニウム電極箔およびニッケル銅端子の溶接状態

図 14 幅 10 mm の 19.5 kHz 複合振動溶接チップによる積層した銅電極箔およびニッケル銅端子の溶接状態

図 15 27 kHz 直径 3.0 mm 長さ 80 mm の超硬合金製の複合曲げ振動溶接チップによる板厚 0.16 mm、幅 3.0 mm のニッケルクラッド銅端子 2 枚のニッケルメッキした容器底部への溶接状態

安定して大きな溶接強度が得られ、使用できる溶接条件の範囲が広がる。

4.4 27 kHz の複合振動を用いたニッケルクラッド銅端子の溶接特性

図 12 は 27 kHz の直径 3.0 mm 長さ 80 mm 溶接チップ部直径 2.5 mm の超硬合金製の複合曲げ振動溶接チップを用いて、板厚 0.16 mm 幅 3.0 mm のニッケルクラッド銅端子 2 枚を重ね合わせて溶接時間を変化させて溶接した場合の溶接特性である。振動振幅 5 mm 静加圧力 140 N 一定である。溶接時間 0.5 s から 0.9 s の範囲で強度試験の際に溶接試料が溶接部周辺で破断しており、ほぼ 150 N の溶接強度が得られている。溶接時間が 1.0 s まで長くなると振動疲労により溶接強度が低下している¹³⁾¹⁴⁾。

5. 超音波複合振動溶接の溶接状態¹³⁾¹⁴⁾

図 13 は幅 20 mm の 19.5 kHz 複合振動溶接チップによる厚さ 0.02 mm の積層したアルミニウム電極箔およびニッケル銅端子の溶接状態を示す。多数の電極箔の溶接を行う場合には、溶接前に大静加圧力で箔間の空気層、変形を除去し溶接部分を密着させる必要がある。

図 14 は幅 10 mm の 19.5 kHz 複合振動溶接チップによる厚さ 0.02 mm の積層した銅電極箔およびニッケル銅端

子の溶接状態を示す。いずれの場合も、複合振動の使用により溶接部の変形の少ない溶接部周辺の大きな変形がなく振動による箔の破断がない完全な溶接が行われている。

図 15 は 27 kHz 直径 0.3 mm 長さ 80 mm の超硬合金製の複合曲げ振動溶接チップによる板厚 0.16 mm のニッケルクラッド銅端子 2 枚をニッケルメッキした容器底部に溶接した状態である。右側の試料の方が溶接条件が高く、溶接チップによる変形がやや大になっている。いずれの場合も、端子の母材強度にほぼ近い溶接強度での安定な溶接が実現されている。

6. お わ り に

超音波溶接の特性、各種の複合振動系、超音波複合振動溶接装置の構成、振動軌跡、振動特性、溶接状態等について述べた。

複合振動を用いた超音波溶接では必要な振動速度、溶接部静圧力、溶接時間を減少させることが可能で、試料の損傷の少ない安定な溶接が実現できる。また、溶接の方向性がなくなり、より大きな溶接強度が得られ一様で安定な溶接が実現されている。さらに複合振動を用いることにより多点、連続点溶接、連続シーム溶接が可能である。

複合振動は、金属の超音波溶接のみでなくプラスチック溶接、振動切削、各種の超音波加工、超音波モータ等にも有効に適用可能であり、2次元さらには3次元の振動が有効であることが分かっているが、用途によって最適な超音波振動装置の開発が必要である。

さらに小型・高周波数の 27 kHz、40 kHz から 160 kHz 以上の 1 MHz までの画期的な性能を有する強力超音波用のさまざまな複合振動装置も開発しており、さらにさまざまな新しい用途を開拓し実用化を図っていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 辻野次郎丸, 森栄司, 実吉純一: 超音波溶接に関する研究 (1) —溶接片の形状効果について—, 溶接学会誌, **47**, 11 (1978) 760.
- 2) 辻野次郎丸, 森栄司, 実吉純一: 超音波溶接に関する研究 (2) —溶接片の振動分布の測定—, 溶接学会誌, **48**, 1 (1979) 27.
- 3) 辻野次郎丸: 金属および高分子材料の超音波溶接について, 電子情報通信学会論文誌 A, 超音波パワエレクトロニクス特集号,

J80-A, 10 (1997) 1597.

- 4) 辻野次郎丸: 突き合わせ超音波溶接の温度上昇と溶接部諸特性について, 電子情報通信学会論文誌 A, 超音波パワエレクトロニクス特集号, **J80-A**, 10 (1997) 1757.
- 5) 辻野次郎丸, 唐津良平, 田中俊, 小田切仁志, 上岡哲宜: 斜めスリット振動変換器を用いた超音波複合振動溶接装置の振動特性について, 電子情報通信学会・日本音響学会超音波研究会技術研究報告, US2006-**113** (2007) 13
- 6) J. Tsujino: Welding characteristics of aluminum, copper, nickel and aluminum alloy with alumina coating using ultrasonic complex vibration welding equipments, Proc. 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, (2009) 1211.
- 7) 辻野次郎丸, 上岡哲宜, 杉本榮一: 超音波複合振動を用いた平編銅線の溶接—平編み線の端子部の直接加工—, 電子情報通信学会・日本音響学会超音波研究会技術研究報告, US2009-**84** (2009) 25.
- 8) J. Tsujino: Welding characteristics and structures of same and different metal specimens using ultrasonic complex vibration welding equipments, Proc. 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010, (2010) 23.
- 9) J. Tsujino and E. Sugimoto: Welding characteristics of bimetal, braid wire and aluminum and copper foils using 20 kHz ultrasonic complex vibration welding equipments, Proc. 2010 IEEE International Ultrasonics Symposium, (2010) 1420.
- 10) J. Tsujino: Ultrasonic welding using complex vibration and high frequency vibration—Various sources and frequency characteristics of ultrasonic welding— (invited paper), Proc. 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium, (2011) 1910.
- 12) 辻野次郎丸: 超音波複合振動金属溶接技術—方向性のない一様で大強度の安定な超音波溶接が実現可能である—, 塑性と加工, 日本塑性加工学会誌, **53**, 618 (2012) 16.
- 13) 辻野次郎丸: 細く長い複合曲げ振動溶接チップを用いた電子部品・デバイスの超音波溶接—狭く深い溶接部の超音波複合振動溶接について—, 電子情報通信学会・日本音響学会超音波研究会技術研究報告, US2014-**70** (2014) 29.
- 14) 辻野次郎丸: 細く長い複合曲げ振動溶接チップ, 複合振動検出器および静加圧力制御を用いた超音波複合振動溶接について, 電子情報通信学会・日本音響学会超音波研究会技術研究報告, US2015-**78** (2015) 23.

辻野次郎丸

東京工業大学大学院博士課程修了, 工学博士, 神奈川大学名誉教授, アサヒ・イーエム・エス取締役会長。数 mW~200 kW, 15 kHz~1 MHz の複数の振動系, 複合振動を用いた各種の強力超音波応用に関する研究に従事。