

# 超音波接合プロセスの接合挙動を予測する 熱-構造-音響連成解析技術

Thermomechanical-Acoustic Coupled Analysis Technology to Predict Bonding Behavior in Ultrasonic Bonding Process

## 設計段階で超音波接合プロセスを適正化し、開発リードタイムを短縮可能にする接合挙動予測技術を開発

カーボンニュートラルの実現に貢献するパワー半導体や二次電池では、アルミニウム (Al) などの金属板の接合に超音波接合が多用されます。しかし、超音波振動と接合荷重を同時に加えて接合するため、接合状態の予測が難しく、接合ツールや接合プロセスの選定に試行錯誤が繰り返されています。

そこで東芝は、試作せずに接合状態を予測し、設計段階でツール形状やプロセス条件を適正化することを目指し、音響解析を活用した熱-構造-音響連成解析技術を開発しました。2枚のAl板を積層する構造をモチーフに、超音波接合中の変形形状・温度分布・接合率を予測し、実現象を良好に再現することが確認できました。

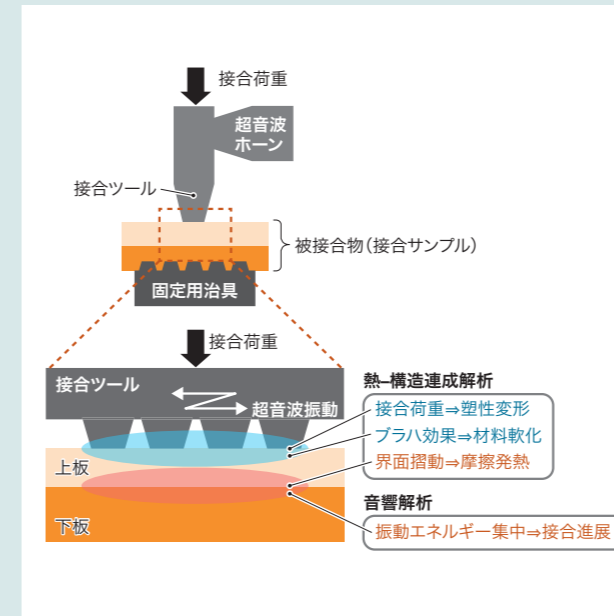


図1. 超音波接合プロセスの概要

超音波接合では、接合サンプル(上板・下板)で、塑性変形や材料軟化、摩擦発熱、及び振動の伝搬といった現象が生じ、接合が進展します。

定した実際の相対速度と、解析で得た接触圧力から発熱量を計算して界面に入力するプログラムを作成し、解析に適用します。材料物性値は温度依存性を考慮し、ブラハ効果による降伏応力の低下も温度に基づきモデル化します。

次に、取得した変形形状を用いた音響解析により、接合進展を予測します。音響解析では、接合ツールの接触面の法線方向に、振動周波数と振幅から計算される加速度を印加し、接合界面には界面インピーダンスを定義します。接合ツールから加速度を印加すると、接合界面に音響エネルギーが集中し、この集中箇所では接合が進展しやすくなるため、音響エネルギーの集中度合いに応じて界面インピーダンスの値を小さくすることで、接合界面で振動波が反射しやすい未接合の状態から、振動波が透過しやすい接合後の状態までを再現させるようにモデル化します。

### 連成解析による予測の妥当性検証

接合ツールの突起角度を60°と90°、接合ツールの沈み込み量を50 μmと100 μmとして、実際に解析と接合を実施し、接合率を比較しました。突起角度60°の接合ツールの場合、接合開始から200 msで沈み込み量が約100 μmに達し、温度も約70 °Cに上昇する傾向があり、熱-構造連成解析でもこの傾向が再現できることを確認しました。また、音響解析では、図2に示すように、接合ツール突起部の直下に音響エネルギーが集中し、同じ箇所では接合率が高

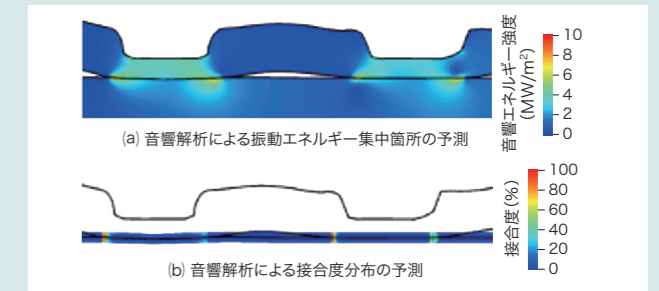


図2. 音響解析による振動エネルギーの予測と接合度の予測

音響エネルギー強度の解析結果から振動エネルギーが高いと予測される箇所では、接合率が高くなる予測が得られます。

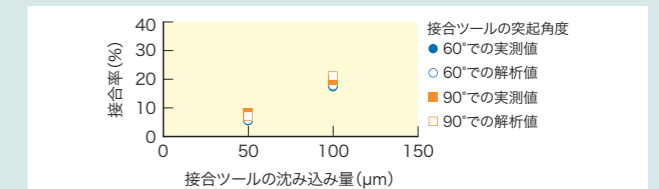


図3. 熱-構造-音響連成解析による接合率の解析値と実測値の比較

連成解析で得られた接合率から界面全体の接合率を算出した解析値は、実測値を良好に再現することを確認しました。

くなる分布が得られるとの予測を確認しました。熱-構造-音響連成解析による接合率の解析値を、実測値と比較した結果を図3に示します。全ての接合条件で、接合率の解析値は実測値を良好に再現し、沈み込み量を増加させると接合率を向上させられることも確認しました。これらの結果から、構築した熱-構造-音響連成解析技術による予測の妥当性を確認できました。

### 今後の展望

超音波接合プロセスにおける接合率を予測することで、試作レスで接合ツール形状を適正化する熱-構造-音響連成解析技術を開発し、実現象との比較により予測の妥当性を確認できました。

今後は、二次電池用の多積層箔(はく)構造の接合や、パワーモジュール用のCu電極の接合など、他の構造にも解析技術を展開していきます。

### 文献

- 伊藤宣司, ほか. 結晶構造解析を用いたAl-AI超音波接合の条件適正化. エレクトロニクス実装学会誌. 2022, 25, 3, p.232-239.
- Wang, C. J. et al. Acoustic softening and stress superposition in ultrasonic vibration assisted uniaxial tension of copper foil: Experiments and modeling. Materials & Design. 2016, 112, 15, p.246-253.

### 久保 悠

総合研究所 生産技術センター 実装プロセス技術研究部

### 背景

カーボンニュートラルの実現に貢献する省エネのキーデバイスであるパワー半導体や、EV(電気自動車)などに搭載されるリチウムイオン二次電池では、Alや銅(Cu)の金属板を接合するために、超音波接合が多用されます。超音波接合は、接合メカニズムが複雑なため、接合状態の把握と予測技術の開発がプロセス適正化の課題となっています。

東芝は、これまでに、超音波接合部の結晶組織分析により接合進展状況(接合状態)を把握する技術を開発し、接合ツール形状や接合プロセスの適正化に展開してきました<sup>(1)</sup>。しかし、もう一方の課題である予測技術はないため、接合設計が変更となる度に試作と評価を繰り返して、ツール形状やプロセスを適正化する必要がありました。

接合挙動の予測については、一般的に、シミュレーション技術を活用した取り組みが進められています。ただし、超音波接合では、プロセス中に生じる被接合物の変形や熱に加え、音響的要素も取り入れる必要があるため、現象が複雑で、予測技術は確立されていません。

そこで当社は、今回、試作レスで接合度(微視的な領域における接合の進展度合い)を予測し、接合状態の良否判断が可能、熱-構造-音響連成解析技術を開発しました。導入段階では、接合現象の把握や解析モデルの作成が比較的容易な2枚のAl板を積層する構造をモチーフに、

技術を構築しました。接合サンプルの断面観察から得た接合率(接合対象箇所全体の長さに対する接合が形成された界面の長さの比)の実測値と解析値を比較し、連成解析による予測の妥当性を検証しました。

### 熱-構造-音響連成解析モデルの作成

図1に、超音波接合プロセスの概要を示します。接合は、超音波ホーンから超音波振動と接合荷重を、接合ツールを介して接合サンプルであるAl板に印加することで、上板と下板の界面で進展します。このとき接合サンプルでは、接合荷重による塑性変形、部材の振動に伴う材料の軟化現象(ブラハ効果<sup>(2)</sup>)、及び上板と下板の界面摺動(しゅうどう)による摩擦発熱、が生じます。また、接合界面に振動エネルギーが集中することで、接合が進展します。

解析モデルの作成では、まず、塑性変形・ブラハ効果・摩擦発熱を考慮した熱-構造の連成解析により、接合中の変形形状・温度分布を予測します。接合ツールが上板表面に接触し、超音波振動の印加を開始するところから解析を実施するため、印加する接合荷重による上板の変形形状を取得し、初期形状とします。摩擦による発熱量の計算は、上板と下板を摺動させ、摩擦係数・相対速度・接触圧力から解析ソルバー内で自動計算するのが一般的ですが、解析時間が膨大になる問題があります。そこで、上板と下板を摺動させて発熱量を求める代わりに、高速度カメラで測