

# AKROSEの成形解析

研究開発部

八木澤 正史

村田 知明

## 1. はじめに

当社のオリジナル技術であるAKROSEは、冷間圧造加工によって成形した複数素材を、プレス加工によって強固に接合する技術であり、複数の異種金属素材を相互に接合することが可能である（図-1）。そのため、異種金属のそれぞれの特性（導電性、強磁性、熱伝導性など）を有効に組み合わせることができ、ニーズに応じて多様で複雑な形態の製品製造を可能としている。

## 2. 解析の背景

複数部材の接合加工では、各部材がどのように他の部材と接合されているかが重要である。特に、特性が異なる異種金属の接合では、接合界面の状態（接合形状・面積や面圧など）が完成品の特性に大きな影響を及ぼす。そのため、製品の品質を確保するためには、接合界面がどのように形成されるか、完成段階での接合界面状態がどうなっているかを知る必要がある。

しかしながら、AKROSEの接合界面は部材にくるまれた状態で内部に隠れており、非破壊で界面状態を確認することは困難である。完成品を切断（写真-1）して界面形状を確認することは可能であるが、接合界面の面圧や周辺部の応力は切断によって変化してしまう。したがって、この方法では製品状態での面圧や残留応力などを知ることはできない。このような、内部に隠れて見えない部分の状態を知る（推測する）手段の一つとして、FEM（Finite Element Method）解析がある。当社では、2013年度に塑性加工用FEM解析ソフトであるDEFORM-3D（Scientific Forming Technologies Corp.製）を導入し、成形過程の解析に利用している。

今回の解析では、AKROSEの代表例である異種金属3種接合について、その成形過程および完成状態での、界面形状・状態の解明を目指す。



図-1 AKROSEの一例（銅、銅、アルミニウムの接合）

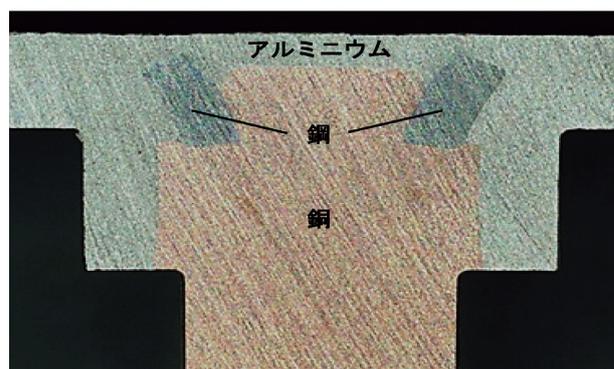


写真-1 製品断面

## 3. 解析の内容と要点

FEM解析では、現実には連続した対象物を離散化し、有限個の微小な要素からなるモデルに置き換える。また、本来は微分方程式で与えられる現象を、代数方程式の集まり（連立方程式）に置き換える。そこに、初期条件や境界条件などを与え数値解析手法によって解き、対象物の挙動を予測する。このとき、連続体を有限要素体に近似し、連続時間系の振る舞いを離散時間系に近似し、さらには複雑で未解明な部分を含む素材の特性や境界条件を単純化して与えている。そのため、これらの置換えや単純化が適切でなければ正しい結果は得られない。以下にその要点を記す。

### 3.1 解析種類と解析モデル

本解析の対象である異種金属3種接合では、軸部に純銅材C1100-Hを、リング部に低炭素鋼材SDG3を、それらを覆う頭部に純アルミニウム材A1070-Fを使用している。これらの素材が弾塑性材料であることに加

えて、完成品での残留応力（残留面圧）を知ることが目的の一つであるので、鍛造解析において通常行われる剛塑性解析（弾性変形を無視した解析）ではなく、より高度な解析である弾塑性解析を行う必要がある。

また、鍛造加工においては、塑性変形エネルギーが熱エネルギーに変換される（通常の変換率は0.9程度<sup>1)</sup>）ことによる発熱や、素材－金型間などでの摩擦による発熱がある。これらの熱は加工速度が遅い場合には速やかに金型へ逃げ、素材の温度上昇は僅かであり無視されることが多い。しかし、加工速度が速く発熱による素材の温度上昇が無視できない場合には、これらの熱が伝わる伝熱現象を含めた熱－変形連成解析が必要となる。AKROSEの成形速度は早く、さらに熱膨張係数や素材特性の異なる複数素材の組合せであることを考慮すると、温度上昇は無視できない。そこで、本解析では弾塑性変形と熱との連成解析を行った。

解析モデルは、中心軸に沿った平面で4つに分割し、分割面を対称面設定した4分割モデルとした（**図-2**）。モデルの構成は、剛体金型であるダイス（超硬）に、弾塑性体の銅軸部をセットし、弾塑性体の鋼リングを軸部先端にセットし、弾塑性体のアルミニウム頭部を被せ、頭部に剛体金型であるパンチ（超硬）が上部から接している。パンチを移動金型とし、工具動作を設定している。工具動作は、下死点にて成形工程が完了するクランク動作とした。製品の残留応力を評価するので、成形完了後にパンチを上部に逃がし、軸下部をピンで押し上げ、製品を取り出すところまで解析を行った。要素タイプは四面体とした。各モデルの要素数は**表-1**の通りである。

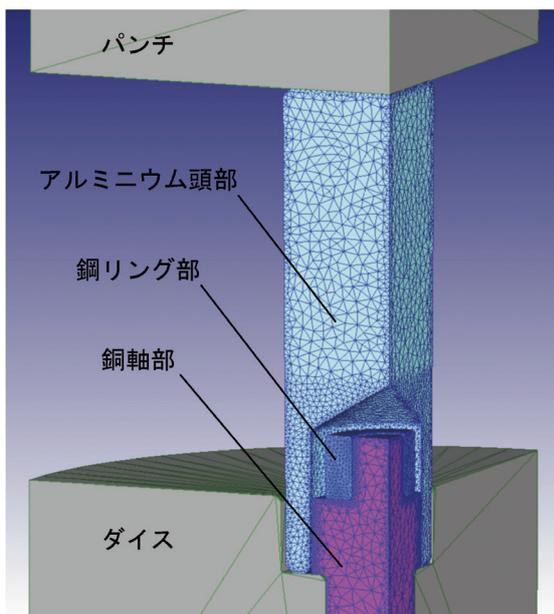


図-2 解析モデル

表-1 解析モデルの設定

モデル	銅部材	鋼部材	アルミニウム部材	パンチ, ダイス
モデルタイプ	弾塑性体	弾塑性体	弾塑性体	剛体
要素タイプ	四面体	四面体	四面体	—
初期要素数	50,007	9,287	51,961	—
終了時要素数	49,364	8,820	48,217	—

表-2 弾性関連物性値

材料	銅 C1100-H	鋼 SDG3	アルミニウム A1070-F
ヤング率 [MPa]	115,000	210,000	68,900
ポアソン比	0.33	0.3	0.33
熱膨張係数 [1/K]	1.77e-05	1.2e-05	2.2e-05

## 3.2 個別材料の特性

### 3.2.1 弾性関連の特性

弾性解析では、ヤング率、ポアソン比、熱膨張係数が必要である。これらは材料組成によって微妙に異なるが、今回の解析では**表-2**の数値を用いた。

### 3.2.2 変形抵抗特性

塑性変形解析では、ひずみと応力との関係を示す変形抵抗特性が必要である。この変形抵抗特性は、調質の違いや素材の供給形態、さらには前加工などの影響を受ける<sup>2)</sup>。そのため解析に用いるデータは、実際の加工に使用する（前加工済みの）素材を測定して決定する必要がある。そこで、当社では**写真-2**のように油圧プレス機内に設置し、試料片を押し潰す際の荷重と圧縮量を測定する、簡易的な材料特性測定装置を自作し、変形抵抗特性の決定に用いている。

また、変形抵抗特性は、材料温度や変形の速さ（ひずみ速度）によっても変化する。従って、発熱や伝熱も考慮した解析を行う際には、温度依存性やひずみ速度依存性を反映した変形抵抗特性データが必要である。

そこで、今回は常温時の測定に加え、変形抵抗を測定する金型と素材試料片を100℃および200℃に加熱して測定することにより、温度依存性を決定した。また、測定時のひずみ速度の変化を利用してひずみ速度依存性を推定した。**図-3**は、材料特性測定装置のデータから算出した変形抵抗曲線と、それを参考に決定した解析ソフト入力データ（赤線）の一例であり、軸部に用いる純銅材料（前加工後）の特性である。



写真-2 材料特性測定装置

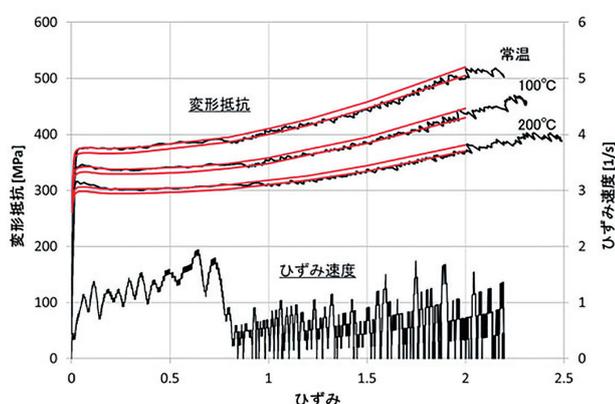


図-3 純銅材料（前加工後）の変形抵抗特性

### 3.2.3 熱関連特性（単一材料）

熱解析は、加工による発熱や、その熱が伝わる伝熱の解析である。発熱には塑性発熱と摩擦発熱がある。伝熱には①熱伝導（単一部材内）、②対流による熱伝達、③界面を通した熱伝達（複数部材間）、および④放射伝熱がある。

塑性変形では、塑性変形エネルギーに熱変換率 (< 1) を乗じたエネルギーが熱エネルギーに変換され、変形部分の温度が上昇する。温度上昇の大きさは材料の熱容量によって決まる。発熱は塑性変形する部分において局所的に起こるが、その部分の温度が局所的に上昇すると素材内に温度勾配が生じ、熱の流れが発生する。そのため熱解析では、素材内の熱の流れに関する熱伝導率も必要である。また、他の部材と接していない表面からの熱放射や、周囲の空気との対流熱伝達による熱移動も考慮しなければならず、材料の放射率や対流熱伝達率が必要である。

今回の解析では、単一素材の熱に関する物性値として、表-3の数値を用いた。周囲環境は常温の空気とし、対流熱伝達率は0.02 [kW/(mm<sup>2</sup>・K)]を用いた。

表-3 熱関連物性値

材料	銅 C1100-H	銅 SDG3	アルミニウム A1070-F
熱伝導率 [W/(m・K)]	391	51.9	230
熱容量 [MJ/(m <sup>3</sup> ・K)]	3.44	3.81	2.43
放射率	0.7	0.7	0.7

### 3.3 複数部材間の特性

異種金属の接合であるAKROSE成形では、複数部材間の界面を通した熱伝達があり、解析のためにその係数を与える必要がある。また、接触面（金型との接触面を含む）での摩擦を考慮する必要があり、摩擦係数を与えなければならない。どちらも単一部材の折れ込みによる自己接触面を含む。

#### 3.3.1 熱伝達係数

図-4（参考文献3より引用）のように複数部材の接触界面（自己接触面を含む）を通して移動する熱を扱うためには、接触界面での熱抵抗を考える必要がある。接触熱伝達率を与える必要がある。

接触熱伝達は、各部材の熱伝導率、表面硬さや表面粗さ、接触面圧、熱の流れの方向から影響を受ける<sup>3)</sup>。

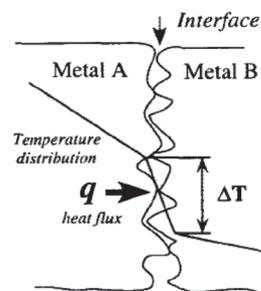


図-4 接触界面<sup>3)</sup>

同一材料の部材間（自己接触を含む）の接触熱伝達率  $h_c$  は、式(1)によって近似される<sup>3)</sup>。今回の解析では、アルミニウム素材の折れ込みによる自己接触がこれに相当する。図-5は、アルミニウム材A1070の表面粗さ  $R_a$  を変化させた場合の、接触熱伝達率と面圧の関係である。今回の解析では  $R_a=3.2\mu\text{m}$  とした。

$$h_c = 10^5 \left[ c_1 \lambda \left( \frac{p}{H_V} \right)^{\frac{2}{3}} + \frac{c_2}{Ra_t^n} \right] \quad (1)$$

- $Ra_t = Ra_1 + Ra_2$        $p$ : 面圧
  - $c_1 = 0.06 \in [0.055, 0.065]$        $\lambda$ : 熱伝導率
  - $c_2 = 0.09 \in [0.085, 0.095]$        $H_V$ : ピッカース硬度
  - $m = 0.8 \in [0.8, 0.9]$        $Ra_1$ : 部材1の表面粗さ
  - $n = 0.7 \in [0.7, 0.8]$        $Ra_2$ : 部材2の表面粗さ
- $c_1, c_2, m, n$  は定数であり式中の範囲でばらつく

また、異種材料の部材間の接触熱伝達率 $h_c$ は、式(2)によって近似される<sup>3)</sup>。今回の解析では、アルミニウムと銅、アルミニウムと鋼、アルミニウムと超硬、銅と鋼、銅と超硬の5種がこれに相当する。

$$h_c = 10^5 \left[ c_1 \lambda_1 \frac{\left(\frac{p}{HV_1}\right)^{\frac{2}{3}}}{Ra_1^m} + c_2 \lambda_2 \frac{\left(\frac{p}{HV_2}\right)^{\frac{2}{3}}}{Ra_2^m} + \frac{c_3}{Ra_1^n} \right] \quad (2)$$

$Ra_1 = Ra_1 + Ra_2$        $p$ : 面圧  
 $c_1 = 0.01 \in [0.008, 0.017]$      $\lambda_1$ : 高温側材料の熱伝導率  
 $c_2 = 0.025 \in [0.013, 0.036]$      $\lambda_2$ : 低温側材料の熱伝導率  
 $c_3 = 0.15 \in [0.1, 0.2]$        $HV_1$ : 高温側のビッカース硬度  
 $m = 1.0 \in [0.7, 1.1]$        $HV_2$ : 低温側のビッカース硬度  
 $n = 0.8$                        $Ra_1$ : 部材1の表面粗さ  
                                     $Ra_2$ : 部材2の表面粗さ

$c_1, c_2, c_3, m, n$ は定数であり式中の範囲でばらつく

接触熱伝達率は、各接触における熱の流れ方向を予測し、それに応じた計算を行い設定する必要がある。この熱の流れ方向は成形過程に変わる場合や、局部的に周囲とは方向が反転する場合もある。本解析では、各接触面について、全解析期間を通して主要となる熱の流れ方向を推測し、その方向での接触熱伝達率を算出し設定した。図-6は設定した接触熱伝達率と面圧の関係を示す曲線である。表面粗さ $Ra = 3.2 \mu m$ とした。

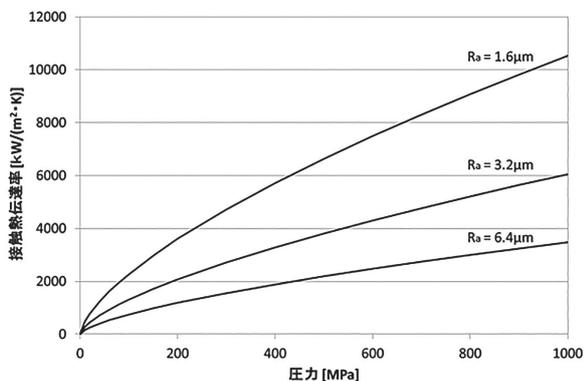


図-5 同一材料部材間の接触熱伝達率 (A1070)

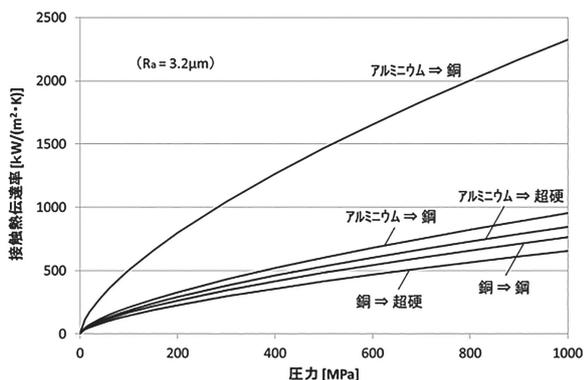


図-6 異種材料部材間の接触熱伝達率

### 3.3.2 摩擦係数

弾性変形範囲内では、界面に加わる圧力は比較的低く、摩擦はクーロン摩擦として扱える。しかし、素材が大きく塑性変形する圧造では、アモントン=クーロンの法則は成り立たない。そのため圧造を含めた鍛造では、摩擦力が素材のせん断降伏応力に比例する、というせん断摩擦モデルを用いることが多い。この時の比例係数であるせん断摩擦係数を測定(推定)する手法として、リング圧縮試験法や前方軸後方缶押出試験法が知られている<sup>4)</sup>。これらの試験法は、平面あるいは特殊形状の金型を用い、対象素材を押し潰し、その時の変形の様子から、金型と対象素材間の摩擦係数を推定するものである。ただし、金型は対象素材と比較して硬度が十分に高く、変形しないとして扱われている。それに対し、純アルミニウムと純銅のように硬度や耐力が近い(押し潰す際に双方が変形する)物質間の摩擦係数を測定(推定)する手法は知られていない。

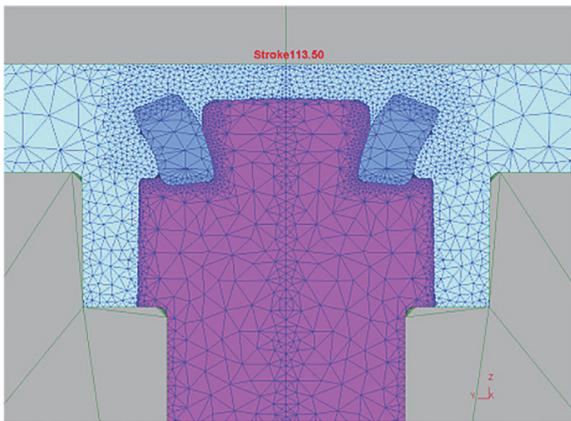
本解析では、暫定的にアルミニウム-銅間の摩擦係数を0.7、アルミニウムとその他の部材(金型を含む)間の摩擦係数を0.4、アルミニウム自己接触面の摩擦係数を1.0、その他の界面の摩擦係数を0.12として解析を行った。

## 4. 解析結果

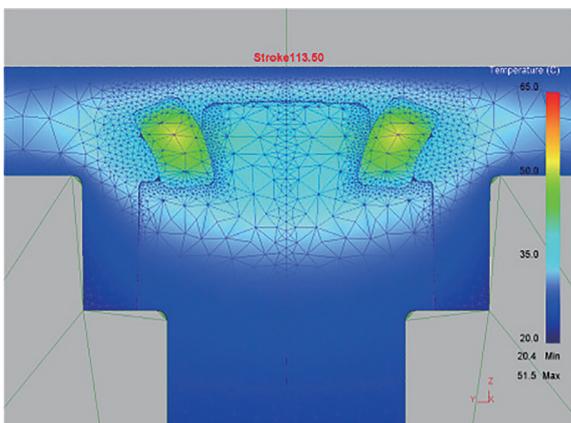
図-7(a)は、成形工程終了時点の解析結果である(ミラーコピーで2分割断面表示)。製品断面(写真-1)と形状は類似しており、接合機構の解明や定性的な評価に役立てることができる。しかし、解析結果を詳細に観察すると、①アルミニウムの回り込みが悪く空洞が残っている、②軸頭部上方のアルミニウム部がやや厚い、などの細かい差異が見られ、定量的な評価を行うには解析精度が十分でない。

図-7(b)は、成形工程終了時点の温度分布を示している。この時点では上下の金型(20℃に設定)と密着しており、そこから放熱している。内部では、工程終盤の変形により鋼リングの温度が周囲より高くなっているが、さほど高温ではない。

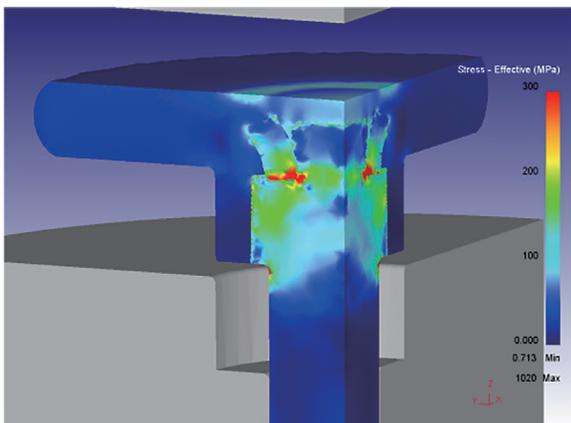
図-7(c)は、成形完了後にパンチが離れ、製品がピンで押し上げられる途中の残留応力である。既に接合部外周は拘束されていないが、内部に応力が残留しており、特に鋼リングと銅軸部の接合部近辺に強く残っていることが見て取れる。



(a) 成形状態



(b) 温度分布



(c) 残留応力分布

図-7 解析結果

## 5. 今後の課題

前述したように、解析結果と実製品の断面形状には細かい差異があり、定量的な評価を行うには解析精度が十分でない。その要因は、解析に使用したデータの精度が不足していることにある。特に大きな誤差要因となっていると考えられるのが、変形抵抗特性データと摩擦係数である。

変形抵抗特性データは、組成のバラツキや履歴の影響を考慮し、(解析対象毎に)製造に使用される実素材を用いて測定している。このとき、一定温度、一定ひずみ速度でのデータが必要であるが、ひずみ速度が大きい場合には、試料自体の発熱により温度が上昇し、測定中を通じて一定温度を保つことができない。また、各瞬間においても、試料内部の温度には分布があり、単純な補正計算では温度影響を除くことができない。

また、摩擦係数も解析結果に大きな影響を及ぼすと考えられるが、測定(推定)手段の見当たらない純アルミニウム-純銅間に限らず、信頼するに足る値を決定することはできていない。

解析精度を向上させるためには、これらの値を精度よく決定する手法の調査や考案が必要である。

## 6. おわりに

当社では2013年度に塑性加工用FEM解析ソフトDEFORM-3Dを導入し、成形過程の解明を通じ、製品の改良や製造工程の改善に役立ててきた。現状では前項に述べたような課題があり、十分な解析精度は得られていない。今後は外部研究機関などとの連携も視野に入れ、これらの課題を克服し、当社製品の品質や信頼性の向上に役立てていきたい。

### 〈参考文献〉

- 1) 日本塑性加工学会, 塑性加工シリーズ4 鍛造, コロナ社, 1995, p.71
- 2) 戸澤康寿「冷間鍛造用鋼材の実加工速度における変形抵抗と延性」塑性と加工, 30巻343号, 1989, p.1131-1135
- 3) 福岡俊道, 野村昌考, 山田章博「異材界面における接触熱抵抗の評価」日本機械学会論文集A編, 76巻763号, 2010, p.344-350
- 4) 鷲坂芳弘「冷間鍛造における摩擦特性評価法の研究」静岡大学博士論文, 2006-12, p.1-142