# 銀の固相拡散接合における数値的検討

横尾 友洋\*

朝倉 義裕\*\*

# Numerical Analysis of Solid State Diffusion Bonding of Silver

Tomohiro YOKOO

Yoshihiro ASAKURA

#### ABSTRACT

In the present study, the numerical analysis of solid state diffusion bonding of silver and copper were carried out. The condition of temperatures and the bonding pressures of the numerical analysis were changed. The bonding time and bonding mechanisms of the silver was compared with the copper. The bonding time was decreased when bonding condition was high temperature. Because bonding condition was high temperature, the contribution ratio of creep deformation mechanism was increased. The bonding time of silver was shorter than copper, because the bonding speed of silver by the diffusion mechanism than the copper. The results of numerical analysis were agreed with the experimental results.

Keywords: Solid State Diffusion Bonding, Numerical Calculation, Silver, Copper, P-S diagram

## 1. 緒論

固相拡散接合は、融点以下の温度で接合を行う技術 である.変形が少なく精密接合が可能であることや、 溶融接合では接合が困難な材料や異種金属材料の接合 が可能であるなどの利点がある.これまでには、チタ ンや銅などでの研究例があり、接合機構のモデルを用 いて接合予測などが行われてきたが、銀に関する研究 はあまり行われていない.そこで、本研究では高橋ら のモデル<sup>1)</sup>を用いて銀の固相拡散接合のシミュレーシ ョンを行い、接合温度や接合圧力の違いによる接合時 間や接合機構への影響について検討を行った.

## 2. 固相拡散接合の原理および接合機構

## 2.1. 固相拡散接合の原理

固相拡散接合は材料表面同士の密着が生じることで、 その部分で原子間の結合が達成されて接合が進行する. 表面の酸化皮膜が強固な場合、化学結合は妨げられる が、皮膜が不安定となるに十分な高真空・高温状態で あれば接合は進行する<sup>2)</sup>.本研究では、表面の皮膜が 不安定となる場合を仮定し、次に述べる3つの接合機

\*専攻科 機械システム工学専攻 \*\*機械工学科 准教授 構が働く場合の固相接合過程のシミュレーションを行 った.

## 2.2. 接合機構

## 2.2.1. 塑性変形機構

材料表面は,原子レベルで完全に平滑であることは 非現実的であり,凹凸を有する表面を考える必要があ る<sup>2)</sup>.高橋らのモデルでは Fig.1のように一様な表面 凹凸を有する二次元モデルを仮定している.





**Fig.2** 接合界面モデル

ここで、h<sub>00</sub>は初期凹凸高さ、2L<sub>00</sub>は初期空隙間距離で ある. 塑性変形機構は、転位のすべりを必要とする変 形機構である. 初期密着は Fig. 1 に示す接合表面の峰 と峰同士が接触し、Fig. 2(b)のように潰れることによ って達成される. すなわち、初期密着は塑性変形機構 によって達成される.

初期密着率 So は

$$S_0 = \frac{P}{(1+\beta_0)\sigma_Y}$$
(1)

で与えられる.この塑性変形以降(t>0)は、クリープ変 形機構,拡散機構が共に働き接合が進行すると仮定す る.

#### 2.2.2. クリープ変形機構

クリープ変形機構は,塑性変形機構と同じく転位の すべりを必要とする変形機構であり,特に高温下で重 要な機構である.

クリープ変形機構の速度式は、S≦50%で

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{creep1}} = \frac{A \cdot S \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^{n+1}}{\left(1 - S^{\frac{2}{n}}\right)^{n}} \left\{\frac{2P}{nG}\left(\frac{1-S}{S}\right)\right\}^{n}$$
(2)

S>50%で

$$\begin{pmatrix} \frac{dS}{dt} \end{pmatrix}_{creep2} = \frac{A \cdot (1-S) \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^{n+1}}{\left\{1 - (1-S)^{\frac{2}{n}}\right\}^{n}} \begin{pmatrix} \frac{2P}{nG} \end{pmatrix}^{n}$$
(3)  

$$P : 接合圧力[MPa] \\ n : 応力指数[-] \\ G : 剛性率[N/m2] \\ A : クリープ定数(温度に依存)[-] \\ とモデル化されている.$$

## 2.2.3. 拡散機構



Fig. 3 接合界面モデル(拡散機構)

拡散機構は転位のすべりを必要としない機構である. 拡散機構における接合界面モデルを Fig. 3に示す. Fig. 3に示す接合界面モデルはレンズ状であり, Fig. 2(b) の界面モデルと異なるが,両モデルの空隙断面積が等 しくなるように曲率を設定している.

拡散機構の速度式は

$$\begin{pmatrix} \frac{dS}{dt} \\ \frac{diff}{dt} \end{pmatrix}_{diff} = \frac{3\sin\alpha \cdot \Omega \cdot \omega_{j}}{kT(2\alpha - \sin2\alpha)rX^{2}} \\ \times \left(\frac{P}{S} + \frac{\gamma_{s}}{r}\right) \left(\delta_{b}D_{b} + \frac{2L}{\pi}D_{v}\right)$$
(4)

である.

## 3. 固相拡散接合シミュレーション

#### 3.1. シミュレーション条件

固相拡散接合シミュレーションは高橋らのモデルを 用いて,銀・銅をそれぞれ接合温度 800~1000[K],接 合圧力5~30[MPa]の間でシミュレーションを行った. 接合温度は 100[K]ごと,接合圧力は 1[MPa]ごとにシ ミュレーションを行った. 接合面の初期条件は, Loo=10[ $\mu$  m],表面凹凸の初期高さ hoo=1.0[ $\mu$  m]とし た.式(4)の補正係数 $\omega_j$ は純銅では常に 1.0,純銀は温 度に依存し 0.1~0.25 の範囲である<sup>1)</sup>. そこで,今回 のシミュレーションでは,銅は $\omega_j$ =1.0,銀は $\omega_j$ =0.2 として計算を行った.

#### 3.2. シミュレーション結果及び考察

#### 3.2.1. P-S 領域図(等時間線)

P-S 領域図(等時間線)とは,縦軸に接合率 S[%],横軸に接合圧力 P[MPa]をとったもので,グラフ中の曲線は接合経過時間を示している.例えば,Fig.4 では接合圧力が 15[MPa]で 300[s]接合を行った場合は,接合率が約 60[%]になることを示している.

銀と銅をそれぞれ接合温度が 1000[K], 接合圧力が 5~30[MPa]の間でシミュレーションを行った結果を Fig. 4 と Fig. 5 に示す. 接合温度が 1000[K]の場合, 接合圧力が 5~30[MPa]の間では, 銅よりも銀のほうが 早く接合が進行することがグラフから読み取れる.



Fig. 4 1000[K]のときの銀の P-S 領域図(等時間線)



Fig. 5 1000[K]のときの銅の P-S 領域図(等時間線)

次に, 接合温度が 800[K]で接合圧力が 5~30[MPa] の間でシミュレーションを行った結果を Fig. 6 と Fig. 7 に示す.



Fig. 6 800[K]のときの銀の P-S 領域図(等時間線)



Fig. 7 800[K]のときの銅の P-S 領域図(等時間線)

グラフから 800[K]の場合も銀のほうが銅と比較し て全体的に接合が早く進行することが分かった. 温度 が 800~1000[K],接合圧力が 5~30[MPa]という条件 では,銀のほうが早く接合が進行することが分かった. また, 接合温度が 800~1000[K]という条件下では, 接 合圧力を高くすることによって, 銀と銅のどちらも接 合の進行が早くなるということがいえる.

#### 3.2.2. P-S 領域図(等比率線)

P-S 領域図(等比率線)とは,縦軸に接合率 S[%],横軸に接合圧力 P[MPa]をとったもので,グラフ中の線はクリープ変形機構と拡散機構の寄与率を示している。 例えば,Fig. 8 で接合圧力が 15[MPa]で接合率が約 60%の時はクリープ変形機構が約 70[%],拡散機構が約 30[%]の割合で接合が進行していることを示してい る.銀と銅をそれぞれ接合温度 1000[K],接合圧力 5~30[MPa]の間でシミュレーションを行った結果を Fig. 8 と Fig. 9 に示す.



Fig. 8 1000[K]のときの銀の P-S 領域図(等比率線)



Fig. 9 1000[K]のときの銅の P-S 領域図(等比率線)

接合温度が 1000[K]の場合は,同じ接合圧力であれ ば銅のほうがよりクリープ変形機構の寄与率が大きく なることがグラフから読み取れる.また,銀も銅も接 合圧力が高くなるとクリープ変形機構の寄与率が大き くなることが分かる.

次に, 接合温度が 800[K]の場合の銀, 銅それぞれの P-S 領域図を Fig. 10 と Fig. 11 に示す.



Fig. 10 800[K]のときの銀の P-S 領域図(等比率線)



Fig. 11 800[K]のときの銅の P-S 領域図(等比率線)

接合温度が 800[K]の場合も銅のほうがクリープ変 形機構の寄与率が大きく,特に銀は接合圧力が 5~ 30[MPa]の範囲ではクリープ変形機構の寄与率が 90[%]になることはない.しかし,Fig.6,Fig.7を比 較すると,銀の方が接合の進行が早い.これは,銅と 比べ,銀は拡散による接合速度が速いためと考えられ る.また,この接合温度でも接合圧力が高くなるとク リープ変形機構の寄与率が大きくなるという傾向があ る.

接合温度が 800~1000[K]の間では, 銀と比較して銅 の方がクリープ変形機構の寄与率がより大きい.また 銀と銅のどちらも, クリープ変形機構の寄与率は接合 温度が高くなるか, 接合圧力が高くなると大きくなる という傾向がみられた.

## 4. 固相拡散接合実験

## 4.1. 実験装置概要

Fig. 12 に実験装置全体の構造を示す. Fig. 13 は試料加熱部の構造を示したものである. 試料をヒーターで加熱し, 圧力をかけることで接合を行う.



Fig. 12 実験装置の構造



Fig. 13 実験装置の試料加熱部の構造

## 4.2. 実験方法

実験方法を Fig. 14 に示す. また,実験は以下の手順で行った.



- 真空ポンプ,拡散ポンプを用いて炉内を高真空 (1.33×10<sup>-3</sup>~1.33×10<sup>-4</sup>[Pa])にする
- 2) ヒーターのスイッチを入れ、炉内の温度を上げる
- 3) 目的の温度に達してから、数十分経過後に荷重を かける
- 目標の時間が経過したら、荷重を取り除いて冷却 する
- 5) 接合部で分割して, SEM(Scanning Electron Microscope)で断面画像を撮影する

#### 4.3. 実験条件および実験結果

実験条件を Table 1 に示す. 試料は,純度 99.99[%] の銀を旋盤加工し,シミュレーション時の接合表面モ デルの  $h_{00}$ =1.0[ $\mu$  m]を再現するために,端面を 400 番 のエメリー紙で研磨したものを実験試料とした. 接合 前に炉内で 30 分焼きなましを行い加工硬化の影響を 緩和した.

Table 1 美駛枀件			
	接合温度	接合圧力	接合時間
	[K]	[MPa]	[s]
実験 1	1000	20	3600
実験 2	800	25	1200

Table 1 実験条件

**Fig. 15**および **Fig. 16**は実験後の試料破断面を **SEM** により撮影した写真である.



Fig. 15 接合後の試料断面(実験1)



Fig. 16 接合後の試料断面(実験 2)

Fig. 15 は破断面全体にディンプルと呼ばれる凹凸 が多数存在している.一方, Fig. 16 は破断面全体にデ ィンプルは存在していない.ディンプルは接合部分が 破断してできた部分であるので,実験 1 の試料はほぼ 完全に接合されているのに対して,実験 2 の試料は完 全には接合されていないことが分かる.そこで,実験 2 の試料の画像を 2 値化した上で,ディンプルである と考えられる白い部分の割合を画像処理によって計算 を行った結果,およそ 26[%]程度であるということが 分かった.

#### 4.4. 実験結果とシミュレーション結果の比較

実験1の条件でシミュレーションを行うと,接合率は100[%]となり,実験結果も接合率はおよそ100[%] となることから,シミュレーション結果と実験結果はおよそ一致することが分かる.

また,実験2の条件でシミュレーションを行うと, 接合率は40[%]であり,実験結果は26[%]であった. シミュレーション結果と実験結果には多少のずれが生 じているが,およそ一致しているといえる.

このことから, 接合温度が 1000[K]と 800[K]でのシ ミュレーションでは, ほぼ妥当な結果を得られている と考えられる.

## 5. 結論

本研究では銀および銅の固相拡散接合のシミュレー ションを行い、比較を行った.その結果、接合温度が 1000[K]では銅と比較して、銀の方が早く接合が完了 することが分かった.また 1000[K]では、銀のほうが クリープ変形機構の寄与率が大きく、一般的にクリー プ変形機構と拡散機構を比べるとクリープ変形機構の 方が接合の進行が早いことからも,銀のほうが早く接 合が完了することは正しいと考えられる.

温度が 800[K]の場合は, 銅の方がクリープ変形機構 の寄与率が大きいが, 銀の方が拡散機構による接合の 進行が早いため, 銀のほうが早く接合が完了すること が分かった.

固相拡散接合実験を行った結果, 接合温度 1000[K], 接合圧力 20[MPa], 接合時間 3600[s]という条件では, シミュレーション結果と実験結果はおよそ一致した. また, 接合温度 800[K], 接合圧力 25[MPa], 接合時間 1200[s]という条件ではシミュレーション結果と実験 結果に多少のずれが生じているものの, 妥当な結果を 得られたことを確認した.

#### 参考文献

- (1) 高橋康夫,青野真也,上谷力,井上勝敬,西口公 之,接合中の空隙間隔分布推定手法と密着過程予 測モデルの試作-固相拡散接合予測支援システム に関する研究(第1報)-,溶接学会論文集,第 14巻 第4号, pp.666-673, 1996
- (2) 高橋康夫,常國博史,佐名川佳治,井上勝敬,西 口公之,確率統計論的解析を適用した接合過程ば らつき推測アルゴリズム-固相拡散接合予測支援 システムに関する研究(第3報)-,溶接学会論文 集,第14巻 第4号,pp.682-688,1996
- (3)朝倉義裕,前田将克,高橋康夫,池田聖,高橋邦 夫,大谷忠幸,接合機構領域図に基づく固相圧接 過程の検討,第11回エレクトロニクスにおけるマ イクロ接合・実装技術シンポジウム論文集,Vol.15, pp.417-420,2005
- (4) 西口公之,高橋康夫,基本的な接合機構に基づく 固相接合過程の定量的検討(第1報),溶接学会論 文集,第3巻第2号,pp.303-309,1985
- M.F.Ashby, A First Report on Deformation-Mechanism Maps, Acta Metall., Vol.20, Issue7, pp.887-897, 1972
- (6) 深谷保博,東保男,肥後寿泰,浜岡正義,末田穣, 小林敏郎,小川真,篠崎賢二,超精密加工された 銅板の拡散接合一銅の拡散接合に関する研究(第 1報)一,溶接学会論文集,第15巻 第3号, pp.467-475,1997
- (7) 深谷保博,生田明彦,岩西耕平,高橋康夫,山根 八州男,東保男,小林敏郎,超精密加工銅板に対 する接合予測計算による接合率と接合強度との相 関性―銅の拡散接合に関する研究(第2報)―, 溶接学会論文集,第20巻 第2号,pp.207-212, 2002