密着完了時間予測アルゴリズム*

—固相拡散接合予測支援システムに関する研究 (第2報)—

高橋 康夫**, 峯本 展夫***, 井上 勝敬**, 西口 公之****

Prediction Algorithm for The Time Required to Complete The Interfacial Adhering Process*

—Support System for Prediction of Solid State Diffusion Bonding (Part 2)—

by Yasuo Takahashi**, Nobuo Minemoto***, Katsunori Inoue** and Kimiyuki Nishiguchi****

The algorithm for predicting the intimate contact process in the solid state diffusion bonding has been developed. The numerical model proposed in our previous study (Part 1) was updated to predict the void shrinkage process in the final stage of bonding.

The influence of dispersion of void spacing on the contacting process was examined based on the calculated results. The plural measurements of surface profiles was performed to estimate the variation of the bonding process. The distribution of void spacing estimated by the overlap method was also examined. It was useful to take into account the largest void spacing and the largest void volume for the prediction of the final stage. The algorithm was verified experimentally. It was indicated that the algorithm predicts the time taken to attain the full contact.

Key Words: Solid state diffusion bonding, Intimate contact process, Modelling, Numerical calculation, Algorithm, Processing system, Bonding time

1. 緒 言

大気中の接合表面には、一般に、母相とは異なる表面皮膜と表面凹凸が存在する。したがって、金属の固相接合過程は、通常、二つの段階（ステップ）から成る。まず、表面同士の密着が生じ（第一ステップ）、次に、密着が起こった部位（領域）で原子間の結合（化学結合）が達成される（第二ステップ）。酸化皮膜等の表面皮膜が強固な場合、第二ステップの化学結合は妨げられる。このような場合、酸化皮膜の破壊分散挙動^{1,2)}や拡散消失過程³⁾が律速すると考えられる。表面皮膜が無視できるに十分な環境、例えば、皮膜が不安定になるに十分な高真空・高温状態にすれば、第一ステップが律速するようになる。その場合でも、金属によっては、酸化皮膜（酸素）が接合界面に幾分残留し続ける場合^{4,5)}があるが、密着過程を損ねるほどの影響はしないと考えられる。したがって、(金属の)固相拡散接合過程の有利な条件とは、多くの場合、表面皮膜が不安定になり、第一ステップが律速するときと言える。

著者らは、第一ステップが律速する条件を仮定し、密着過程律速型の同種金属材料の固相拡散接合過程のモデル化を行い、接合過程予測システム（アルゴリズム）を構築してきた^{6,7)}。しかし、密着過程終期の予測、すなわち、残留ボイドの消失時間を正確に予測できるまでには至っていない。

そこで、本研究では、密着過程終期の予測アルゴリズムを試作することを目的とする。密着過程終期を予測できる

アルゴリズムは、固相拡散接合の予測支援システムおよび最適化支援システムを構築する上で必須であるからである。

前報⁷⁾で示唆したように、密着過程は表面凹凸形状のばらつきに大きく影響される。そのばらつきは、計算モデルの幾何学パラメータである平均半空隙間隔 L_m のばらつきとして出力され、これが、密着過程推定結果へ影響すると考えられる。したがって、本研究では、まず、その影響について検討する。

2. 密着過程ばらつきに関する検討

2.1 表面凹凸形状の複数回計測を基にした平均空隙間隔のばらつき

Fig. 1 に、接合表面のモデル化(a)と接合中の空隙のモデル化(b)を示す。図中に記した幾何学的パラメータ L_{00} , h_{00} , L_m の初期値の求め方は、前報⁷⁾で詳述したように、まず、接合表面の凹凸形状を触診式表面粗さ計で計測し¹⁾、オーラップ法により推定した。特に、平均半空隙間隔 L_m は、各密着率 $S (=X/L_m)$ における半空隙間隔 L の分布推定結果から、その平均値として求めた。数値計算は、密着率 S に伴う L_m の変化 (SL 曲線) を考慮に入れ、基本的な密着機構に基づき密着過程を算出した。

前報⁷⁾では、 L_m は、一回の計測結果から得られた値を採用していた。一回の全計測長さ l は、4 mm 程度あったが、この程度の計測一回では、凹凸形状のばらつきを網羅しているとは考えられない。計測を複数回繰り返すと、 L_m は、ばらつきを呈すと考えられる。そのばらつきは、計測回数 n_i によって変動するし、計測部位を変えても変化するのである。したがって、試行回数の推定結果への影響を、まず

*原稿受付 平成8年1月24日 The 5th International Symposium of JWS (1990) にて一部発表、平成8年5月第42回界面接合研究委員会で発表

**正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Osaka University, Joining and Welding Research Institute
*** 大阪大学工学部学生(現: 安田信託銀行(株)) Student of Osaka University

****正 員 阿南工業高等専門学校 Member, The Anan College of Technology

¹⁾Fig. 1 に示すように、モデルが二次元的であることを考慮に入れ、表面凹凸形状計測の際は、エメリー研磨の傷に直角な方向に粗さ計のダイヤモンド針を移動させて表面凹凸形状の計測を行った。また、接合実験の際、エメリー傷同士がほぼ平行をなすように試料を合わせ接合させた。したがって、空隙は、長細い円筒状になった (Fig. 12 参照)。

Fig. 1 Schematic illustration for modelling the interfacial contacting (void shrinkage) process in solid state diffusion bonding. (a) for surface profile and (b) for bond-interface.

Fig. 3 Difference between S - L_m curves.

検討する必要がある。

Fig. 2 は、 L_m のばらつきに起因した接合過程のばらつきを推定するアルゴリズムである。すなわち、ある試行回数 n_t を与え、表面形状計測を実行し、 n_t 個の SL 曲線を求め、その各々に対して密着接合過程を計算した結果から接合過程のばらつきを推定するのである。ステップ①で接合試料表面を旋盤とエメリー研磨によって用意する。②で n_t を設定する。③で一对の試料表面形状(粗さ)を計測する。当然、計測するごとに接合表面の別の部位で計測する。④

Fig. 2 The algorithm for examining the influence of the variance in surface profiles on the bonding process. Plural measurements of bonding surface profiles are taken into account.

で表面形状の特徴を知るために周波数解析 (FFT) を行い、⑤で前報で記したオーバーラップ法を実行する。⑥、⑦、⑧で、必要な幾何学パラメータの値および各 S ($S=0\sim 85\%$ までは、 5% おき、 $S \geq 88\%$ では、 1% おき)に対する L の分布状況を推定する。⑨において SL 曲線を出力する。⑩、⑪で材料定数と接合条件 (圧力 P , 温度 T) を与え、⑫で密着過程の数値計算を行う。ステップ③から⑫を n_t 回繰り返す。⑬で、接合過程のばらつきを推定する。

なお、本研究で使用した接合材料は、前報⁷⁾で使用した無酸素銅と同じものであり、試料の接合面は、旋盤加工後、#400番のエメリー紙で水研磨し、その後、1173 K, 1.8 ks の真空焼鈍を施したものをを用いた。

Fig. 3 は同一試料 (一組) において計測場所を変え、接合

Fig. 4 Variation of mean half void spacing L_m . (a) for initial stage ($S \leq 5\%$) and (b) for final stage ($S \geq 95\%$).

表面形状を計測した結果から得られた SL 曲線の違いを表している^{††}。この図は $n_t=2$ に相当する。 n_t が増すとその分だけ得られる SL 曲線の数が増すことになる。密着率 $S=20 \sim 80\%$ では L_m のばらつきは、 L_m 値の 1 割から大きくても 1.6 割程度であるが、接合初期 ($S=0 \sim 5\%$) と接合終期 ($S=95 \sim 100\%$) では、 L_m のばらつきは大きくなり、特に接合終期では、 L_m 値の 4 割以上に達することがある。

Fig. 4 は $n_t=5$ に対する L_m のばらつきを示したもので、ばらつきの大きい接合初期(a)と終期(b)に関して示している。前報⁷⁾で示唆したように、接合初期の L_m のばらつきは、密着過程の進行にほとんど影響を与えない。全密着過程の時間的割合を考慮すると、接合後期における空隙間隔のばらつきが重要となる。 L_m のばらつきも、接合初期より、終期の方が大きくなることから、Fig. 4 から示唆される。したがって、残留ボイド消失を検討する上でも終期の L 分布の取り扱いが肝要であると考えられる。

2.2 平均空隙間隔のばらつきから推定した密着過程のばらつき

Fig. 5 は、Fig. 3 に示した二つの SL 曲線に基づいて計算した密着進行過程を表している。密着完了に要する時間の 6 割以上が $S=80\%$ から $S=100\%$ に達するための期間である。このことから、空隙間隔のばらつきの影響は主に $S > 80\%$ 以上で顕著になることが理解できる。密着進行のばらつきは、図に示すように、同一密着率 S における接合時間の違い (差) として表すことができる。この差は、密着率が増加すれば大きくなる傾向があるが、後に示すように、必ずしも $S=100\%$ に最大になるとは限らない。

Fig. 5 Variation of bonding process estimated by the numerical model. Variation is expressed as the difference between the bonding time at the same S .

ばらつきの値として、時間差を無次元化した値 A_i を次のように導入する。

$$A_i = (t_i - t_m) / t_m, \quad (1)$$

ただし、 i は n_t 以下の自然数で、Fig. 2 の各試行に対応している。 t_i は試行 i に対するある密着率 S を達成するに要する接合時間であり、 t_m は、その平均値で、

$$t_m = \sum_{i=1}^{n_t} t_i / n_t \quad (2)$$

と表される。接合過程のばらつきは、以下のような無次元量 B_i によって定義する。

$$B_i = \max(A_i) - \min(A_i) \quad (3)$$

ただし、 $\max(A_i)$ と $\min(A_i)$ は、 A_i の最大、最小をそれぞれ表す。また、ばらつきの存在範囲 $[\max(A_i) \sim \min(A_i)]$ をエラーバーで表し、上端を $\max(A_i)$ 、下端を $\min(A_i)$ で与えた。Fig. 6 は、このような定義に従って描いた密着完了

^{††}同一種類のエメリー紙#400を使用して、水研磨を実施したが、エメリー紙の使用状況、水量、加圧力が異なるため、前報と L_m の値が異なっている。

Fig. 6 Dispersion B_t with respect to the bonding time estimated by the numerical model. The change in B_t with the number of trial n_t is shown.

(a)

(b)

Fig. 7 Dispersion B_t depending the bonding conditions (P , T). The number of trial is 5. (a) the change in B_t with the bonding temperature T and (b) with the bonding pressure P .

($S=100\%$)に対するばらつきである。横軸に、試行回数 n_t をとって、その影響を表している。試行は、Fig. 2 のフローチャートに従って実行した。すなわち、 n_t を増やす場合、それまで行った試行結果にデータを加える方法を採用せず、独立に実行した。そのため、試行回数とともに B_t は順次増大せず変動する結果を示している。 B_t の値は、 $n_t > 3$ に達すると、0.38前後で変動するのみで、0.4を越えて、著しく大きくなることはなかった。また、 B_t の存在範囲 (range) も、 $n_t > 3$ で大きな変動は呈さなかった。したがって、密着過程に対する L_m のばらつきの効果は、試行回数を $n_t=5$ 程度に設定すれば十分検討でき得ると判断される。

接合時間は接合条件 (P , T) によって大きく異なることは広く知られている。Fig. 7 は、ばらつき B_t に与える接合温度(a)と接合圧力(b)の効果を表したものであり、試行回数は $n_t=5$ とした場合である。ばらつき B_t は接合温度 T と接合圧力 P が低いほど大きくなる。これは、温度、圧力による接合機構の寄与の変遷に起因していると考えられる。接合機構の領域図⁸⁾によると、低温・低加圧側で拡散機構が優勢となる。また、前報⁷⁾に記したように、空隙間隔のばらつきに密着速度が影響される機構は拡散機構であることが理解できる。したがって、低温・低加圧側で B_t が大きくなるのは、拡散機構が優勢となったからと考えられる (Fig. 7 (a)は拡散機構で一応説明可能)。

一方、密着率 S に対しては、 S が高いほど、 B_t が大きいとは一概に言えない。密着終期でしかも接合圧力が低い領域 (Fig. 7 (b)で $P < 10$ MPa) では、拡散機構が大きく関与していることが推察されるが、 $S=90\%$ のグラフが $S=100\%$ のグラフより大きく上側に位置している。この逆転現象は、接合機構の寄与だけで説明できるものでもない。他に影響すると考えられる因子として、表面凹凸計測による幾何学的モデルパラメータ (L , h 等) の違いが挙げられる。この詳しい検討は行っていないが、接合終期で S の増加に対して L_m の値が著しく減少するという事実はないので、上記の逆転現象は空隙間隔以外の変化にも影響されていると考えられる。前報⁷⁾の式(4)を再度示すと、

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{diff}} = \frac{3 \sin \alpha \cdot \Omega}{kT(2\alpha - \sin 2\alpha)rX^2} \left(\frac{P}{S} + \frac{\gamma_s}{r}\right) \times \left(\delta_b D_b + \frac{2L}{\pi} D_v\right) \quad (4)$$

となる。ただし、 Ω は原子体積、 γ_s は表面エネルギー、 π は円周率、 δ_b は接合界面拡散幅、 k はボルツマン定数、 r はレンズ状ボイドの曲率半径⁷⁾、 2α は空隙のチップ点での両面角⁷⁾、 D_b と D_v はそれぞれ界面自己拡散係数と体積自己拡散係数である。接合圧力が低く、かつ接合完了直前では、 (P/S) の項より (γ_s/r) の項の方が著しく大きくなることは容易に理解できるであろう。空隙収縮が、この $r[(\gamma_s/r)]$ の項と分母にある r の項に支配され、空隙収縮速度が著しく大きくなり、接合完了直前でばらつきが小さくなったと考えられる。簡単に言うと、空隙が非常に小さくなると、表面エネルギーを低下しようとして自ら空隙が消失していくからと考えられる¹⁾。

¹⁾接合初期から r の項を顕現させるとばらつきは小さくなると考えられるが、そのためには、長周期成分のない緻密な表面凹凸を作ればよい。しかし、大面積にわたって超平滑 (微小凹凸) 面を形成することは精度上困難であり、長周期成分が出現してしまう。

Fig. 7 から示唆されるように、密着過程のばらつきを小さくするには、接合温度を上げ、接合圧力を高くすればよい。しかし、母相の変形が大きくなり、精密性を特長とする拡散接合にそぐわなくなる。

以上までで、表面凹凸形状の計測にともなう L_m の違いによって、密着過程の推定結果が左右されることが分かった。確かに、密着率 S が大きくなると、ばらつき B_t は 0.3 を上回り、無視できなくなる場合が出現する。

3. 残留ボイド消失時間推定アルゴリズムの試作

Fig. 8 に、密着終期 ($S > 90\%$) における密着進行過程を示す。試行回数は 5 回であり、密着完了時間 t_f が最も遅い推定結果と最も速い推定結果を実線で示している。また、エラーバーのついた白丸は、推定を実行した試料を使用して行った接合実験結果で、 $t = 12$ ks まで時間をかけて接合した結果である。実験結果の密着率の平均値はほぼ 100% に達しているが、破面¹²を走査電子顕微鏡 (SEM) で観察すると、残留ボイドが所々に見られ、厳密には、完全密着しているとは言えない。計算結果では、 $t_f = 8.3$ ks で密着が達成されると予測されているにもかかわらず、残留ボイドはかなり残存することが示されている。この差 (12 ks と 8.3 ks の差) は、 L_m のばらつきだけでは決して説明することができない。

Fig. 9 に、オーバーラップ法によって推定した空隙間隔 L の分布を示す。分布形態は、次の三種のタイプに大別される。すなわち、分布がほぼ単峰で狭くその平均値 L_m が分布のピーク近傍に位置する (a) 図のタイプ A、単峰的分布が崩れていき、ばらつきが大きくなる (b) 図のタイプ B、そして、ばらつきが著しくなり、正規的分布を全く呈すことのない (c) 図のタイプ C。特に、タイプ C は平均値 L_m を代表パラメータにする意味がないと考えられる。タイプ A は、 $S = 25 \sim 85\%$ でよく見られ、タイプ B は主に $S = 85 \sim 90\%$ 前後で見られる¹¹⁾。タイプ C は密着初期と終期のみで見られる。密着終期に見られるタイプ C の分布において、その最大値 L_{max} は、その平均値 L_m に比べると 4 倍以上にも達し、かつ、その度数 (頻度) f_r は同程度である。

前にも述べたように、密着終期の推定結果と実験結果の

Fig. 8 The bonding curves estimated with L_m and an experimental result.

(a)

(b)

(c)

Fig. 9 Distribution of half void spacing L estimated by the overlap method. (a) for Type A, (b) for Type B and (c) for Type C.

¹¹⁾ $S = 25 \sim 85\%$ においても、単峰でない分布が見られることがあるが、全体の分布形状 (プロファイル) からタイプ B というよりタイプ A に近いと判断した。タイプ A の L_m の値は、その分布プロファイルの度数最大値より通常大きかった。タイプ B は、長く続くことはなく、 S が少し増加すると (2 ~ 5%), すぐにタイプ C が出現した。なお、本研究では、タイプ A と B との厳密な区別は行っていない。

¹²⁾ 前報²⁾ に記したように、接合界面で破断できるように、片方の接合面を旋盤で縁取りし、接合後、曲げ試験を行い破壊した。

差には、拡散機構の密着速度の違いが主因と考えられる^{1*}。式(4)から、その密着速度は空隙間隔によって大きく左右される^{1*}。タイプCでは平均値 L_m で密着速度が支配されているとは考えにくい。

残留ボイドの完全消失を推定するには、計測された L の最大値を計算モデルの代表パラメータに採択する方が妥当であると考えられる。本研究では、タイプCの分布が見られた密着率 S^* 以降の密着率 ($S \geq S^*$) に対して、 L_m の代わりに、その最大値 L_{max} を代用することにした⁵。

実際の所、密着終期の推定結果と実験結果の差は、最大値 L_{max} を採用しただけでは、埋め合わせることはできなかった。他に考えられる原因として、空隙体積の違いとその形状が考えられる^{2*}。密着終期には、空隙の長手方向に切れ目が生じるようになる^{2*}。しかし、この挙動は、拡散過程を二次元から三次元化させるのであるから、密着速度を高めることはあっても遅くさせることはない。とすると、密着終期の空隙体積を密着計算では低く見積もってしまっていた可能性がある。接合終期のボイド体積を実際に計測するのは容易ではないので、以下のような検討を行った。

オーバーラップ法では、各密着率に対して、空隙体積(単位長さ当たりの体積)も推定することができる。この推定された体積と実際のボイド体積との合致性の実証はかなり困難であったため成功できなかったが、密着過程に伴う分布変化およびその平均値 V_m の推移をある程度見積もっていると考えられる。そう考えると、傾向だけでも、その推移は計算モデルによる V_m の推移とほぼ合致しなければならない。

Fig. 10 に、密着過程にともなう V_m の推移に関して、オ

Fig. 10 Change in the mean void volume V_m with S . The void volume estimated by the overlap method is compared with that of the numerical model. (a) for surface profile finished by #400 emery paper and (b) for the surface profile like the inset in (b) ($a=5 \mu\text{m}$).

オーバーラップ法による推定結果(実線)と予測計算によるその減少過程(点線)とを比較している。(a)は#400番エメリー紙に対する変遷結果であり、(b)は図中に示した表面凹凸に対する結果である。密着開始時の塑性密着量のために、点線と実線は幾分一致しないが、 $S=0 \sim 90\%$ までは、よく似た推移をたどる。しかし、 $S > 90\%$ で、下側にあった実線が点線の上側に移動するようになる。Fig. 10(a)では、それほど顕著ではないが2倍以上大きくなるのである(実線は、終期で一度増加する)。Fig. 10(b)に示すように、もし、接合表面に非常に大きくさび状の溝(凹)があると、密着終期には、密着過程の計算で予測される空隙体積よりはるかに大きい空隙が残留してしまうのである。したがって、終期では、空隙体積すなわち空隙の代表高さ h を大きくするように修正する必要がある。

そこで、本研究では、タイプCが観測された密着率 S^* における空隙体積分布から最大体積 V_{max} に相当する h_{max} ($= V_{max}/\{2L_{max}(1-S)\}$) を空隙高さに採用した⁵。この h を採用するのは、タイプCが初めて出現する密着率 S^* においてのみであり、その変更は一回限りとした。それ以降($S > S^*$)の h の変化は $S < S^*$ における数値計算と同様に算出した。以上の前提条件を設けて密着過程の予測アルゴリ

^{1*}密着完了時間の予測に対しては、密着初期のばらつきはほぼ無視できる。すなわち、完全密着時間の推定に対しては、密着終期のばらつきに着目しなければならない。

^{2*}式(4)の分母には X^2 の項が含まれる (X は Fig. 1 参照)。 $X^2 = S^2 \cdot L^2$ であるので、界面拡散機構による密着速度は、 L^2 に、体積拡散機構は L に反比例して減少することがわかる。

³判定基準は分布形態のタイプBからCへの変化を人間が判断し、トップダウン的に計算機に教師する方法を採用した。 L_{max} の度数値(相対頻度 f_r) が、 L_m (又はその近傍)の度数値の約7割以上に達したとき、タイプCが優勢になったと判断した。この方法で S^* を定めると、多くの場合、 $S^* = 88 \sim 96\%$ の範囲に入った。これ以降 ($S > S^*$) で、最大値 (L_{max} , h_{max}) を採用すると、ほぼ、完全密着時間が予測できることが経験でわかってきたからである。実際には、 L の代表値は、 L_m から次第に L_{max} へと変化していくと考えられるが、タイプBに対しては、まだ平均値が意味があると仮定し、さらに、脚注^{1*}で記したように、タイプBの出現期間が短かったため、本研究では、 L_m から L_{max} に一段階で変化させる手法を採用した。密着確保という観点から考えると、タイプBが出現したら L_{max} を採用すべきであるが、タイプAとBの客観的区別の困難性から行っていない。

^{4*}考えられる原因は材料定数の変化等色々あるが、密着終期で突然推定結果が実験結果と合致しなくなることを考慮すると、空隙の形態変化が最も大きいと考えた。すなわち、体積の小さい空隙から消失していき、接合終期ほど全分布の中で大きな空隙が残存するようになったと考えた。

^{5*}実際の空隙の幅 w や高さ h にもばらつきがあるので、これらが小さい(体積の小さい)空隙や小さい箇所から、空隙消失が起こり、空隙に切れ目が生じると考えられる。密着終期では、 $L \gg w$ であるので、 w のばらつきは L のばらつきに影響を与えない。同じ S に関して、 w は密着速度にほとんど影響を与えないのである。空隙が大きいとは、計算モデルでは $2hw$ が大きいことを意味しているが、本研究では、 h が大きいということで処理をした。

ズムを試作した (Fig. 11 参照).

4. 予測アルゴリズムの妥当性

4.1 推定手順と接合実験

試行回数を $n_t=5$ とし, Fig. 11 に示したアルゴリズムに従い, 密着過程終期の予測を実行した.

まず, エメリー紙による水研磨条件を変えて, 数組の接合表面形状を有する試料 (無酸素銅) を作製した. 接合前に, 1173 K, 1.8 ks の真空焼鈍を行い, 接合開始前に表面凹凸形状を計測し, オーバーラップ法による空隙に関する幾何学的パラメータの推移を推定した. 予測計算を実行した後, 接合実験を実施した. 接合実験方法は他で記述した要領でおこなった^{6,8)}. ただし, 実験の接合 (終了) 時間 t_b を, 予測された密着完了時間 t_f に一致させて実験すると, 密着度合いを評価できないので, 密着終期 ($S>90\%$) に対応する接合時間 ($t_b<t_f$) を設定して接合実験を実施した. 接合後, 接合界面の破面観察を SEM 観察し, 予測アルゴリズムの妥当性を検討した. なお, 破面作製方法は脚注²⁾と前報⁷⁾を参照のこと.

4.2 計算結果と実験結果の比較

Fig. 12 に, $S=90\sim 100\%$ に対する計算結果と実験結果の比較を示す. エラーバーを有する黒丸, 黒四角, 黒三角印が実験結果であり, 各々の実験結果に対応するカーブ (点線, 一点鎖線, 実線) が計算結果である. 各実験後の接合界面 (破面) の SEM 写真も示している. 密着終期になるほど, ボイド (黒い部分) が長手方向で切れ, 小さくなっていく様子が理解できる.

Fig. 12 の計算結果に関しては, 試行回数 $n_t=5$ のうち, 完了時間 t_f の最小と最大を示したものを描き, 密着過程の

Fig. 11 Prediction algorithm developed in the present study. This is updated to predict the bonding process in the final stage of $S>90\%$.

Fig. 12 Verification of the prediction algorithm in the final stage of bonding. The number of trial $n_t=5$.

Fig. 13 Verification for applying the algorithm to estimate the time required for all voids to vanish. The number of trial $n_t=5$.

ばらつきを評価できるように配慮している。実験のエラーバーが、計算のばらつき範囲を越えて存在しているが、Fig. 8に見られるような、大きなずれ方は呈しておらず、予測アルゴリズムはかなり改善されたと言える。

Fig. 13に、 $t_B = t_f$ とした場合の計算結果と実験結果の比較を示す。SEM観察の結果、接合破面全域で、完全密着が達成していることがわかった。したがって、本研究で開発してきたアルゴリズムは密着過程終期とその完了時刻 t_f をほぼ予測できるよう改良されていると言えよう。しかし、実際の所、 $t_B = t_f$ で多く実験を重ねると、残留ポイドが観察される場合がたまに生じる。これは、試行回数5回で計測しきれなかった空隙体積 V_{max} と空隙間距離 L_{max} が接合表面に存在したからと考えられる。試行回数 n_t を大きくすれば解決されることではあるが、どのような確率で空隙が残留するかを検討するには、危険率等の確率統計的考察が必要となる。次報では、本研究でおこなった結果も併せ、接合過程のばらつき度合いを確率統計的手法を取り入れて検討する⁹⁾。

5. 結 論

固相拡散接合の最適化を支援する密着過程の予測システムを構築することを目的として、密着完了時間を推定できる予測アルゴリズムの試作とその妥当性を検討してきた。完全なアルゴリズムを構築するには至っていないが、固相接合の密着過程終期を予測できる見通しが得られた。した

がって、本研究で試作したアルゴリズムは、最適条件を決定するための支援システム構築の構成要素になると考えられる。

以下に本研究で得られた主な成果を列挙する。

(1) 接合表面凹凸のばらつきに起因して密着過程はばらつきを呈することが定量的に理解できた。そのばらつきは、低温、低加圧ほど大きくなり、また、接合終期で顕著になる。

(2) 密着過程終期は、空隙間隔の平均値 L_m の密着率 S に伴う変化を考慮しただけでは予測できない。 L_m を用いた予測結果(空隙消失時刻)を越えて、空隙は残存する。

(3) オーバーラップ法によると、空隙間隔の分布は3つに大別され、ばらつきのひどいタイプCが出現する密着終期では L_m によって密着速度が支配されていない(L_m の変動だけでは説明できない)ことが示唆された。

(4) タイプCの L 分布が出現する密着率 S^* 以降の終期において、最大値 L_{max} を採用し、かつ、 $S=S^*$ において、推定された空隙体積の最大値 V_{max} に相当する空隙高さ h_{max} に変更するという手法を提案し、密着終期の予測アルゴリズムを試作した。また、実験結果によって、そのアルゴリズムの妥当性を実証した。

参 考 文 献

- 1) 池内建二, 小谷啓子, 松田福久: Al-Mg-Si系6063合金の拡散接合界面における酸化物の挙動, 本会論文集, 14-1(1996) pp. 122-128.
- 2) 小谷啓子: 透過電子顕微鏡観察によるアルミニウム合金の拡散機構に関する基礎的研究, 博士論文(1995)12月, 大阪大学.
- 3) Y. Takahashi, T. Nakamura and K. Nishiguchi: Dissolution Process of Surface Oxide Film during Diffusion Bonding of Metals. J. Mater. Sci. 27 (1992) pp. 485-498.
- 4) 大橋修, 田沼欣司, 吉原一紘: 拡散溶接部の表面皮膜のオージェ解析, 本会論文集, 3-3 (1985) pp. 152-158.
- 5) 同著者: 拡散溶接部の空隙表面における酸化皮膜の挙動, 同書, 3-3 (1985) pp. 477-483.
- 6) 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, 本会論文集, 3-2 (1985) pp. 303-315.
- 7) 高橋康夫ら: 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, 本会論文集, 14-4 (1996) pp. 666-673.
- 8) 西口公之, 高橋康夫, 小口力: 接合機構領域図による固相接合過程の検討, 本会論文集, 4-2 (1986) pp. 311-316.
- 9) 高橋康夫ら: 確率統計論的解析を適用した接合過程ばらつき推定アルゴリズム, 14-4 (1996) pp. 682-688.