



研究ノート

# 固相接合過程の最適化を旨として

高橋 康夫\*

## Aiming at Optimum Solid State Bonding Processes

**Key words** : Optimum, Modelling, Solid State Bonding

### 1. はじめに

固相接合過程の研究をするようになって十年余りが経つが、今だに、最適化ができないでいる。接合過程を支配する要因がモニタリングできれば、適応制御によって最適化も可能だろう。しかし、何が支配要因かも分からない。無闇やたらにモニターしても、接合過程の把握さえ出来なくなる。数理計画法を利用した最適化も考えたが、実験回数が多くなるだけで、中身が分からずどうも科学的でない。実験情報を基に、接合過程の物理的モデルを構築し、それを利用して、接合過程を予測し、それから最適化をしようという方法を取ることにした。この方法では、目的がなかなか達成できないが、確実に研究が進み、現象の中身も把握できるからである。これは、私の性に合っているようである。だから、研究の進行が遅くなり、今だに最適化もできないでいる。しかし、何らかの数値シミュレーションは可能にしたつもりである。ここでは、そのほんの一部を、簡単に紹介する。

### 2. 接合の素過程は何か？

それは接合表面間での化学結合の達成である。それを達成させるための律速段階は何か。その阻害要因は何か。前者は接合面同士を密着させ

る過程であり、後者の主なものは酸化皮膜である。この二者をうまく処理できれば、一般的に化学結合は達成されるのである。このことは、実験事実から言えることである。少なくとも、金属材料に関してはそうである。固相接合は面接合に対して行われることが多い。活性でまっ平な接合表面を前もって作ることは、なかなか難しい。数十マイクロンオーダーの表面でも、イオンで活性化しようとする、面は荒れ、微少な凹凸ができてしまう。能率よく両方を満たす加工方法はない。

密着過程達成と表面皮膜の処理過程を速度論的に定量化出来れば、接合過程は予測できるはずである。だから、これらのモデル化が必要である。これは、あくまで私の思考実験であった。

### 3. 簡単なものから複雑なモデルへ

実験事実（文献）から、密着過程を担う基本的機構は主に拡散と塑性（粘塑性）変形であることが推察された。酸化皮膜の処理は色々あるが、実験事実から母材への拡散消失と塑性変形による破壊分散過程が最も重要であることが分かった。従って、これらの過程を理論的にモデル化することにした。最初に行ったモデル化は同種金属材料同士の拡散接合過程であった。私自身がそのイメージを脳裏に最も明快に描くことができたからでもある。この密着（ポイド収縮）過程は、拡散と粘塑性変形によって、(a)、(b)、(c)の順に達成されていく（図1参照）。モデルでは、これを図2のように単純化することにした<sup>1)</sup>。この後、このモデルを発展させ、ポイド間距離  $2L$  のばらつきやその時間的変化



\*Yasuo TAKAHASHI  
1951年2月19日生  
昭和56年大阪大学工学部工学研究所  
研究科博士後期修了  
現在、大阪大学溶接工学研究所  
融接機構部門、助教授、工学、  
知能接合加工学  
TEL 06-877-5111, 3638

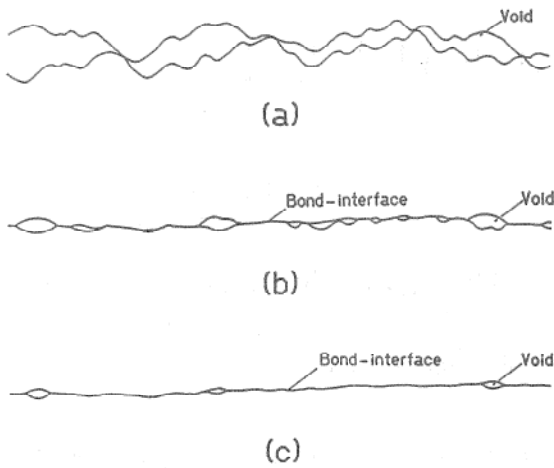


図1 固相拡散接合過程。  
(a) 接合初期, (b) 接合中期, (c) 接合後期

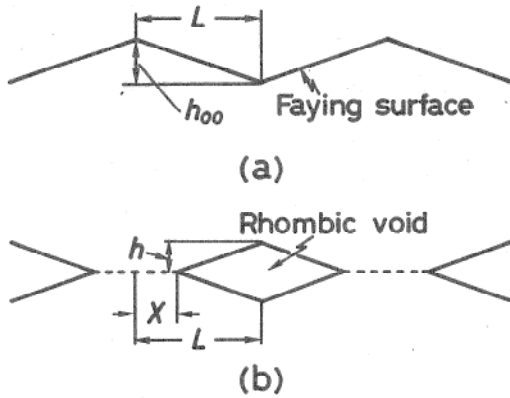


図2 固相接合のモデル,  
(a) 接合表面, (b) 接合中のモデル

をも考慮した新しいモデルに改良した。ここではじめて、密着過程の最適化アルゴリズムが可能となる<sup>2)</sup>。この一連の研究で行った拡散によるボイド収縮過程の数値計算の一例を図3に示しておく。図2(b)の矩形ボイドの右上4分の一の時間変化を表している。Sは接合率である。詳しくは文献<sup>3)</sup>を参考にいただきたい。

### 3. 熱間圧接過程のモデル化

エメリー紙等でブラッシングした表面の粗さには(図2(a)に近似するなら)  $L > 8 \mu\text{m}$ ,  $h_{00} > 2 \mu\text{m}$ の凹凸はざらに存在する。図3を見れば分かるように、拡散だけでは、接合はなかなか達成できない。接合圧力Pを高めた塑性変形利用により熱間圧接過程のモデル化がどうして

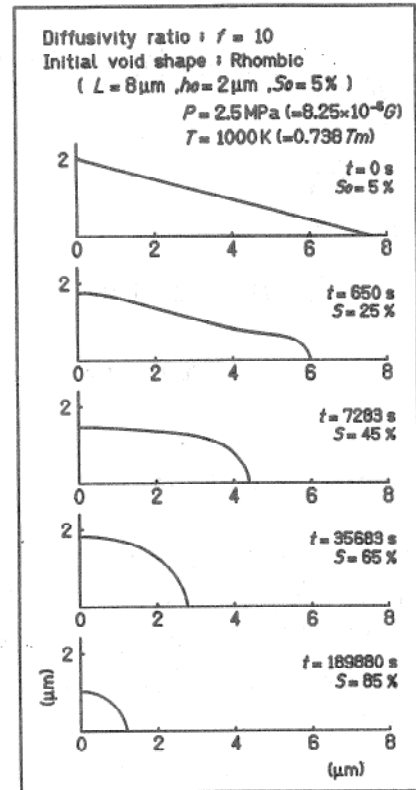


図3 拡散機構によるボイド収縮過程の数値計算結果

も必要となった。これは、一般に、外界からガス加熱するか、または、抵抗加熱により接合部位を高温状態にして、加圧するプロセスである(図4)。実験から、接合面の中央部分Oがよく延ばされたとき接合が良好であることがわかっ

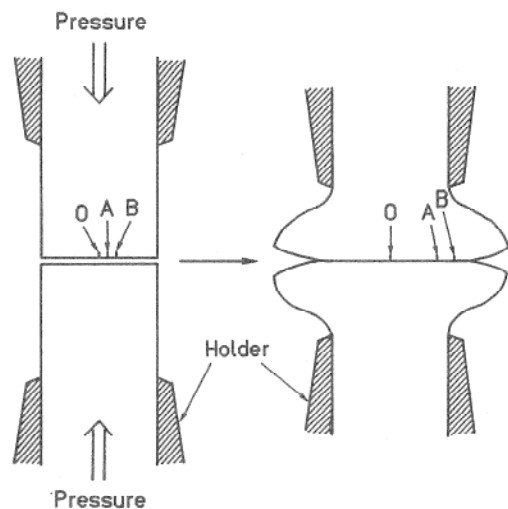


図4 熱間圧接のイメージ図

た。これが定量化出来れば、その過程の最適化に大いに役立つ。高温なので、この過程は粘塑性変形によって達成される。当然ではあるが、大変形過程を計算できる有限要素技術が必要になった。色々勉強して、どうにかそのプログラムを開発した。図5に数値計算の一例を示す。

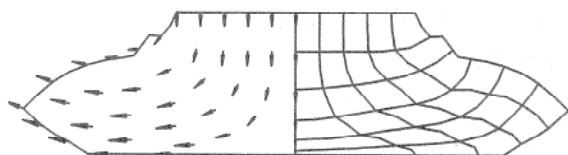


図5 熱間圧接の数値計算結果の一例

材料はHT50の鉄鋼材料なので、約900℃以下でフェライト相となり強度が低下する。接合治具の拘束位置付近で瘤ができるのはこの理由による。図の下部が接合界面に相当している。元の要素はどれも同じ大きさの2次四角形要素であるので、界面中央部がよく延びている様子が、図5からわかる。界面をどれだけ延ばせば、十分な密着が達成し、表面酸化皮膜を無害（破壊分散）に出来るかが問題である。これらのモデル化に関しては、この冬、報告したところである<sup>4) 5)</sup>。高温での接合であるから、酸化物は母材にも分解拡散する。酸化皮膜の分解・拡散という連成過程もモデル化する必要があったがこれも一応達成できた<sup>6)</sup>。

#### 4. 最適化をめざして

しかし、“目的は固相接合の最適化支援システムの構築にあり”と旗印を掲げただけに、実の所、まだまだ上で述べたことだけでは不十分である。物理的モデル化によって、接合プロセ

スの予測は可能である。しかし、最適化を考えると、物理的モデルだけでは不十分ということになる。予測に必要な材料パラメータが分かっていない場合もある。先端材料の接合では、多分そう言う状態に陥り、予測が行えなくなる。こんなことも考えて、いま、モデル規範型の逆問題推定アルゴリズムを手掛けている。このアルゴリズムができれば、数理計画法よりはるかに少ない実験回数で、固相接合プロセスの最適化が可能になると思う。制約条件等が複雑化するとモデルだけでは不十分で、知識工学（Heuristics）の効率的活用も考慮しなければならないだろう。接合加工の最適化は、複雑な非線形計画問題であるから、あらゆる面からのアプローチが必要である。そして、今まで行ってきた研究方針は、これから将来行っていく接合プロセス最適化のための私の基本哲学になっていくことと思う。

#### 参 考 文 献

- 1) 西口、高橋、溶接学会論文集, Vol. 3, No. 2 (1985) 303.
- 2) Y. Takahashi and K. Nishiguchi, *Welding in the World*, Vol. 27, No. 3/4 (1989) 100.
- 3) Y. Takahashi et al., *Acta Metall. Mater.*, Vol. 39, No. 12 (1991) 3199.
- 4) 高橋, 16回軽構造接合加工研究委員会(溶接学会)資料MP-84-92, 1992年1/23.
- 5) Y. Takahashi et al., *Trans. JWRI*, Vol. 20, No. 2 (1991) 9.
- 6) Y. Takahashi et al., *J. Mater. Sci.*, Vol. 27 (1992) 485.