

板鍛造による異種金属積層板作製プロセスの開発

名古屋大学大学院 工学研究科

助教 石黒太浩

(平成 24 年度奨励研究助成 AF-2011033)

キーワード：接合プロセス，軽量化，異種金属

1. 研究の目的と背景

環境問題への取り組みとして，自動車を始めとした輸送機器の車体軽量化が急務である．鋼部材を軽金属材料に置換することで軽量化の実現が図られているが，コスト面，強度面においてのリスクも無視できないため鋼製品の使用率は依然として高いままである．そこで異種金属を接合し一つの部品の中で材料特性に傾斜を持たせ，強度が必要な部分には鋼を，そうでない部分にはアルミなどの軽金属材料を用い，材料選択を適材適所行うことで軽量化と強度維持を同時に実現しようとする動きが活発化しつつある¹⁻³⁾．異種金属の接合技術として溶接などの原子的結合と，リベットなどを用いた機械的結合があるが，Al と鋼の場合一般的に溶接が困難である．その理由として接合部に生じる金属間化合物が脆いために，溶接部で割れが生じてしまうことが挙げられる⁴⁾．またリベットなどを用いた助材結合方式の場合，目的寸法に応じて助材形状の最適化が必要であったり，助材挿入用の下穴が必要であるため，被加工材質および目的形状に応じた予備工程が必要である．効率よく積層板を供給するためには，簡易かつ強固な接合強度が得られるプロセスが望まれている．そこで本研究では塑性加工を利用した異種金属，特にアルミと鋼を機械的に結合させた積層板材の作製プロセス開発を行った．検討したプロセスの概略を図 1 に示す．第一工程として，重ねた 2 枚の帯板に絞り加工を施し接合部の予加工を行う．次の第二工程では予加工部に助材を設置し，絞りとは逆方向に圧縮を行い，その時の材料の座屈を利用して積層鋼板の接合部を形成する．

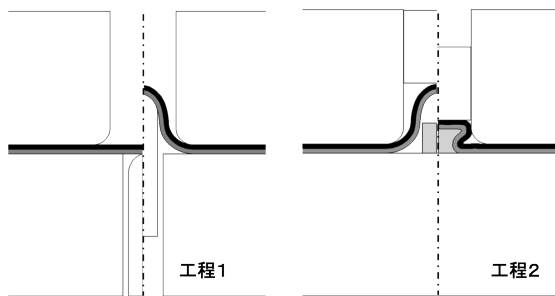


図 1 接合プロセスの概略図

このプロセスではリベットの様な特殊な形状の助材を使用せず素板および単純形状助材の塑性変形だけで結合させるため，素材板厚に応じたリベット形状の最適化も必要としない．また溶接や摩擦攪拌接合のように熱を必要としないため入熱による材質の変化を回避することができるため効率の良い接合が期待できる．本研究では提案したプロセスにおいて工具形状を検討し，より強固な接合が得られると考えられる条件を解析的に決定した．

2. 研究概要

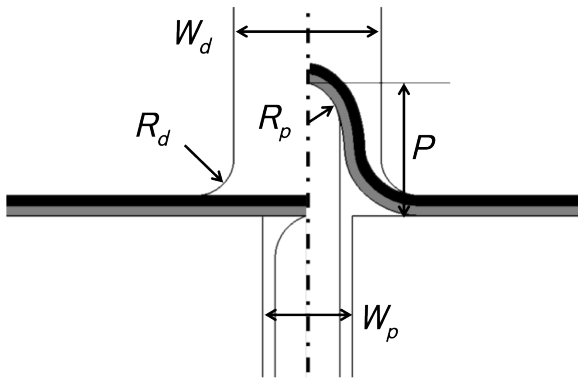
本研究で検討したプロセスでは，決定すべき金型形状因子は数多く存在する．また金型形状以外にも決めるべき加工条件は種々考えられ，それらの条件を個別に調整するのは非効率である．そこで本研究では実験計画法⁵⁾に基づき工程設計の効率化を図った．本章ではその手順について述べる．

2.1 工具形状と直行表への割付け

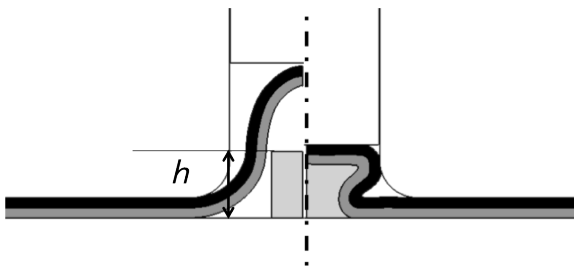
本研究ではまず，図 2 で示される工具の形状因子について検討した．また，加工条件として潤滑条件，上下の材質，助材形状も検討項目とした．それらの制御因子に関して表 1 に示すような水準を設定し L_{18} 直行表⁵⁾に基づいて 18 個の解析条件を決定した．直行表に割付けた解析条件を表 2 に示す．表 2 を見ると制御因子 A 以外の形状因子の水準が 3 回ずつ解析条件に組み込まれていることが分かる．実験計画法によれば，このような直行表による割付けを行った場合，全ての組合せを確認すること無く，各因子の相互関係や最適解の決定が可能である．

2.2 SN 比と最適形状の決定

出力した結果に応じて各解析条件における SN 比を算出し，形状因子の水準に関する SN 比を平均したものを求める．検討したプロセスにおいて成形が完了した後，上材と下材の幅方向接触長さが大きいほど接合は強固にできると考えられるため，本研究では評価因子として図 3 で定義した接合部長さ L を出力結果として取り扱った．この場合は望大特性であるため，各条件における SN 比 η は(1)式で求めることができる．



(a) 工程 1 における工具形状因子



(b) 工程 2 における工具形状因子

図 2 各工程における工具の形状因子

表 1 工具の形状因子 (制御因子)

制御因子		水準 1	水準 2	水準 3
A	上材質	S10C	A6061	
B	パンチ幅 Wp	6	10	14
C	ダイス幅 Wd	20	23	26
D	ダイス肩半径 Rd	3	6	9
E	パンチ肩半径 Rp	3	5	7
F	押込み高さ P	15	18	21
G	摩擦係数 μ	0.05	0.1	0.2
H	助材高さ h	P×1/2	P×3/5	P×7/10

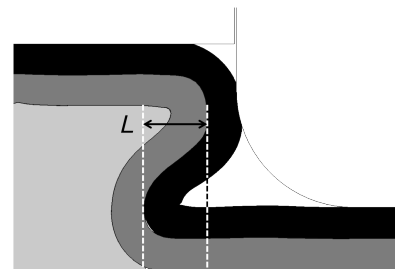


図 3 結合の評価パラメーター

表 2 L18 直行表に基づいた解析条件の割付け (制御因子の列は表 1 における水準を意味する)

解析条件	制御因子A	制御因子B	制御因子C	制御因子D	制御因子E	制御因子F	制御因子G	制御因子H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

$$\eta = 10 \cdot \log \frac{1}{L^2} \quad (1)$$

制御因子の各水準における平均 SN 比を算出し、その値が最も大きくなるような組合せが最適な工具形状といえる。品質工学において直行表と SN 比を用いた工程設計を

行う場合、本来ならば誤差因子も考えなくてはならず、(1)式には誤差分散の項が含まれるのが一般的であり、本研究における誤差因子は、試験片の切り出し方向や素材形状のばらつきなどが考えられる。しかし今回の解析的な検討でそれらの誤差因子を表現するのは困難であるため、本研究では誤差因子を一切排除した条件で行った。

3. 解析条件

工具形状に関する解析条件の決定方法は2章で述べた通りである。ここではその他の解析条件について詳細を述べる。シミュレーションソフトにはDEFORM-2Dを用い、平面ひずみとした。素板は上下材ともに板厚 1.6mm、幅 150mm であり工具-上材、工具-下材および上材-下材間の摩擦係数は表 1 に従って設定した。材料の組合せとして鋼には S10C を、アルミには A6061 を想定し、変形抵抗は DEFORM のデータベースを参照した。助材は A1070 相当の材料定数を用い、金型は全て剛体、被加工材は全て剛塑性体とした。第二工程では帯板の両端を拘束し、幅方向へ材料が滑らないようにした。被加工材の奥行き方向は 50mm を想定し、第二工程の荷重が 300kN に到達した時点で解析を終了し、図 3 で示した L から SN 比を算出した。助材の高さは表 1 で示した通りであるが、幅は第一工程のパンチ幅 W_p と同じ値で設定した。

4. 結果および考察

4.1 平均 SN 比の算出

表 2 で示された全ての解析条件について SN 比を算出した結果を図 4 に示す。SN 比が大きいほど接合部長さ L が大きいことを意味し、強固な締結ができていると考えられる。次に各因子における水準ごとの平均値を算出した結果を図 5 に示す。この図の見方について、例えば制御因子 B (パンチ幅) の水準 1 (6mm) の場合、解析条件の 1~3 および 10~12 に割付けられているので、その全ての条件の SN 比を平均したものが制御因子 B の水準 1 における平均 SN 比となる。まず図 5 (a) を見ると、ダイス肩半径および助材高さは水準が大きいほど、すなわち制御因子の値が大きいほど小さな SN 比を示している。(1) 式は望大特性であり SN 比が大きいほど最適形状に近いと考えられるため、これらの因子は水準 1 が適しているといえる。次に図 5 (b) を見ると水準が大きいほど SN 比は大きくなる。押し込み高さの SN 比は水準 2 から 3 にかけてわずかに減少しているものの数値としては小さいため、これらの制御因子は値が大きいほど望ましいと考えられる。図 5 (c) においてダイス幅の SN 比をみると水準 2 が最も高く、単調増加もしくは単調減少の傾向を示していない。

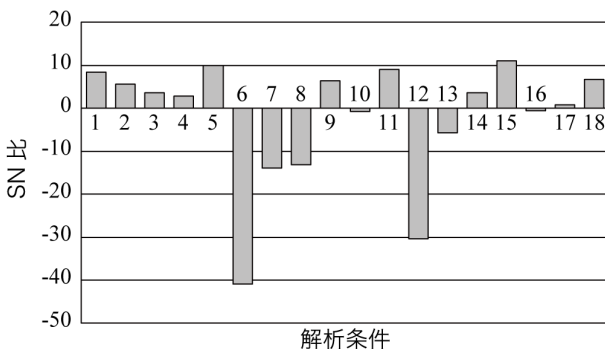


図 4 解析条件ごとの SN 比算出結果

これは図 5 (d) の摩擦係数の結果においても同様のことがみられる。これらの制御因子については交互作用があると考えられ、他の因子の設定値に応じて適した値が変わりうることを示している。パンチ幅の結果についてはわずかに谷型の傾向を示しているものの、SN 比に大きな違いは無いため影響は小さいと考えられる。以上より全ての制御因子について SN 比が最も大きかった水準を組み合わせた条件を最適形状と仮定し、接合部長さの評価と変形過程を検討した。

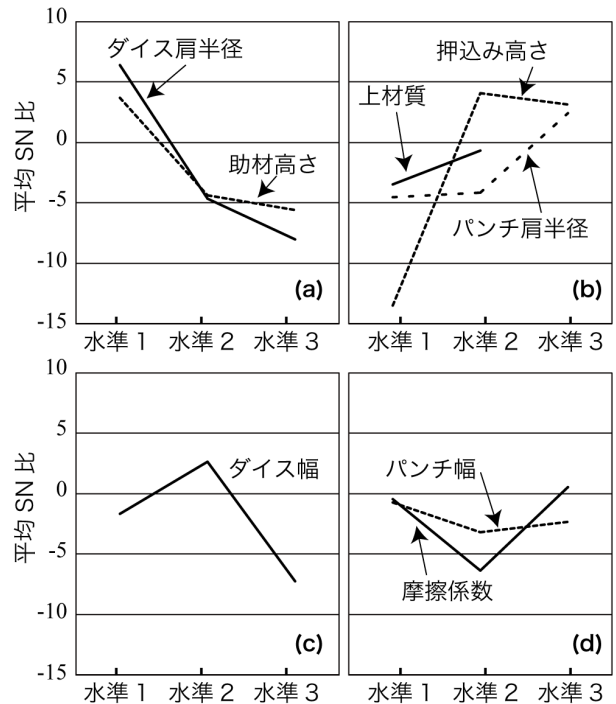


図 5 各制御因子における平均 SN 比

4.2 最適形状の検証解析

図 5 において平均 SN 比が最も大きくなる組合せで解析を行った結果を図 6 に示す。この結果では接合部長さ $L=5.84\text{mm}$ (SN 比=15.3) となり、図 4 で示したいずれの条件よりも大きな値を得ることができた。そのため、本研究で行ったように、実験計画法に基づいた金型形状の設計は有効であることを示唆していると考えられる。

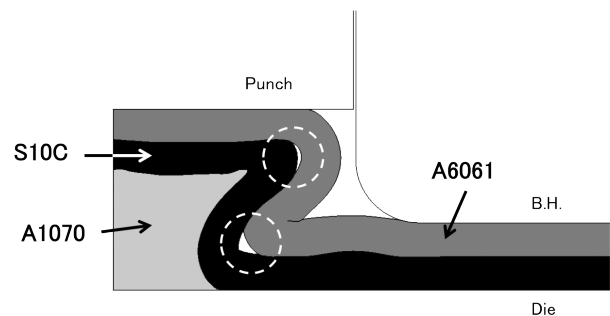
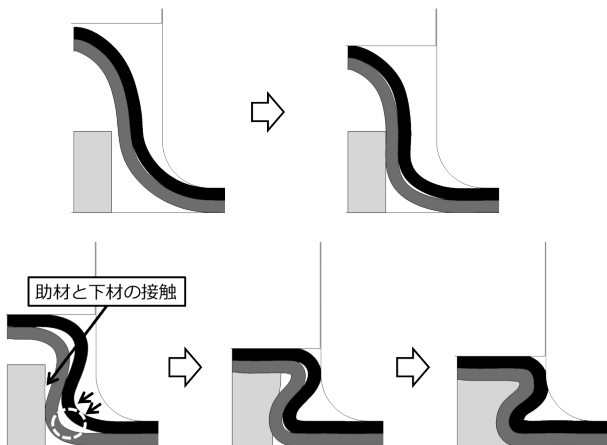
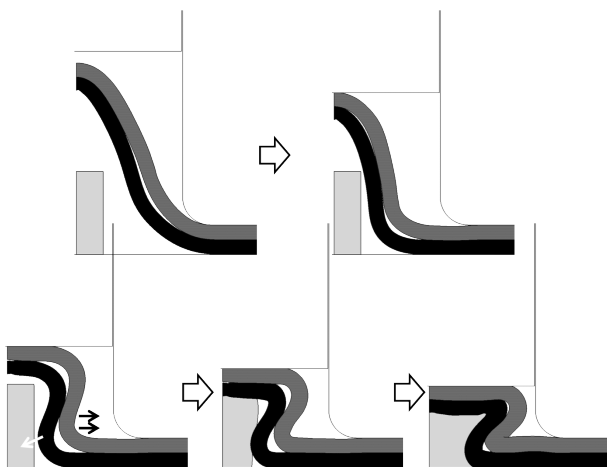


図 6 最適形状での最終結合部形状

しかしながら図6中で示したように結合部に空隙が残る結果となってしまった。この原因について考察するために第二工程中の被加工材の変形について条件5の結果と比較を行った。第二工程における各条件での変形の様子を図7に示す。本プロセスにおいて結合部は次のように形成される。まずパンチの降下にともなって、第一工程で絞り加工された材料が圧縮され、板が立ち上がったような形状になる。そのまま圧縮が進むと材料は座屈し始め折り重なった形状になる。その後、助材のA1070が据え込まれるとともに下材の内部に充填し、下材の変形を抑制することで最終的に結合部の成形が完了する。空隙が生じなかった条件5の過程をみると、座屈が生じ始めた時に下材と助材がすでに接触しており、下材の内側への流入を抑制していることが分かる。そのため、図中の円囲みで示した部分が閉じる前に上材が流入することができるため空隙が生じることなく成形が行えたと考えられる。一方Lが最も大きくなるように決定した場合、座屈が生じた時に下材と助材が接触しておらず、下材が内側へ流入してしまい、下材の折れ込みによって上材が外側へ押出される状況になっていた。



(a) 解析条件5の結果



(b) 最適形状での解析結果

図7 第二工程における結合部成形過程

そのため、助材が据え込まれて下材内部に充填しても、空隙が残ったままになってしまうことが分かった。今回の解析では助材の幅についての検討は行っていないが、今後は制御因子として追加し、空隙が生じずなおかつSN比が高くなるような加工条件を検討することが必要である。またここまでの研究では、接合の評価に接触部長さを用いているが、本来ならば接合強度で評価を行うのが妥当である。解析的に工具形状を決定した後に、金型を作製し実験的な調査、および接合強度の評価によるプロセス設計を行う予定である。

5. まとめ

鋼とアルミニウム合金の機械的な接合を行うプロセスを確立することを目的として、工具形状の最適化を解析的に検討した。種々あるパラメーターの組合せを効率よく組合せるために実験計画法に基づいた直行表の割付を行い、結果の評価にはSN比を用いた。接合部における両材の幅方向接触長さを評価因子とした場合、SN比が最も大きくなるような組合せで成形を行うと、結合部の接触幅も長くなるため、本研究で行った実験計画法による工程設計の有用性が確認された。一方で、最適形状で成形した場合、接合部長さは大きくなるものの空隙が残る結果となってしまった。これは助材の幅を制御因子として検討していないためであると考えられる。今後は助材長さを制御因子として加え、空隙が残らずなおかつ接合部が長くなる加工条件を探る予定である。また実験により接合強度の評価も行っていく予定である。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団平成24年度奨励研究助成(AF-2011033)の支援により遂行された。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) T. Ishikawa, Y. Yoshida, N. Yukawa, M. Kamiyama, H. Ogitani, T. Suganuma: Steel research International, 81-9 (2010), 322-325.
- 2) T. Matsubara, K. Yasui, Y. Yoshida, Z. G. Wang, T. Ishikawa, T. Suganuma: Materials Research Innovations, 15 (2011), 443.
- 3) 安部洋平・加藤亨・森謙一郎: 塑性と加工, 52-603 (2011), 419-423.
- 4) 及川初彦・斉藤亨・吉村尚・永瀬隆夫: 鉄と鋼, 83-10 (1997), 629-634.
- 5) 矢野宏: 加工品質工学, (1994), 工業調査会