



J. Yanagimoto



S. Sugiyama

## 材料分流を用いた異材接合による複合材料製造と 3次元構造体の迅速造形

柳本 潤\* 杉山澄雄\*\*

### 1. 緒言

金属材料複合化の一つの手段としてクラッド法がある。従来のクラッド材の製造技術には、厚板や広幅の材料に適さないこと、部材の金属学的性質への高い依存性があること、膨張係数の差が大きい異種材料を接合した場合には反りが発生すること、爆着接合の場合には高エネルギーを必要とすること、また、脆性材料・塑性変形能差が大きい異種材料の接合が困難であること、などの問題点が指摘できる<sup>1)</sup>。これらの問題点を克服できる接合方法として、機械的接合法によるクラッド材の製法が提案されている<sup>2)</sup>。この手法では、接合部分の幾何学的形状に対応して発生する局所塑性変形・材料分流を利用し、両材料の降伏応力比を適切に制御することによって、両材料を健全に接合し、接合強度を向上させている。クラッド板製造のための2種類の素材は、接合溝部を有する硬質材と塑性流動部を有する軟質材から成る。硬質材の接合部に十分な接合強度を発生させるために必要な塑性流動をもたらすための、最適な接合界面幾何学的形状が筆者らによってすでに提案されている<sup>2)</sup>。

本研究においては、プレスによる断続的な接合に加え、圧延による連続的に接合を行う場合をも想定して、接合部の寸法を既報<sup>2)</sup>より小さくし、かつ複数の接合部を持つ接合体について、以下の調査・検討を行った。

- 1) プレス接合実験による強度と接合部形状についての調査<sup>3)</sup>
- 2) 圧延接合実験による強度と接合部形状について調査<sup>3)</sup>
- 3) 硬質材と軟質材の接合部が1mm以下である微小な接合部について、接合を行った場合について最適な形状の提案<sup>4)</sup>

さらに、この接合を局所加熱による軟化を利用しつつ同一材の接合に拡張し、3次元立体の迅速造形を試みた。ここでは、分流通接合によるクラッド材の製法を同種金属接合に応用することによる、ラピッドプロトタイプング技術を新たに提案する。同種金属での分流通接合を可能とするために、塑性流動部を加熱し変形抵抗を下げる必要があるため、適切な接合を実現するための加熱条件および最適な塑性変形部形状について検討する。また、実際に3次元立体形状を造形し、さらに複雑な形状の製品を迅速造形することの可能性を、シミュレーションにより検証した結果を示す。

### 2. 実験方法

#### 2.1 試験片素材

接合する2つの部材に異なる材料を用いる場合では、硬質材は炭素鋼 S45C、軟質材は常温で良好な塑性流動が期待できるアルミニウム系材料を用いた。軟質材材質の影響を調べるため、純アルミニウム系材料の A1050P、アルミニウム合金系の A5052P の2種類について検討した。表1に硬軟質

材の材料定数を示す。引張強度の大きさは、S45C > A5052P > A1050P の順となる。

3次元構造体の迅速造形には同一材料の接合を行うことになるが、S45C を利用している。この場合、接合する2つの部材の間に硬軟の差すなわち変形抵抗差を発生させねばならない。そのためには、接合部材を加熱炉、通電加熱、などで加熱する必要があるが、ここではガスにて加熱する方法を用いた。S45C の温度と変形抵抗の関係を図1に示す。図から、S45C では、

- 1) 800℃と900℃で約2倍の変形抵抗差が生じること、
  - 2) 約900℃でアルミ合金 A5052 の変形抵抗と同程度となること、
- がわかる。

表1 材料定数

	Tensile strength $\sigma_e$ [kg/mm <sup>2</sup> ]	Elongation El [%]
A1050P	6.63	22
A5052P	17.9	22
S45C	62.2	20

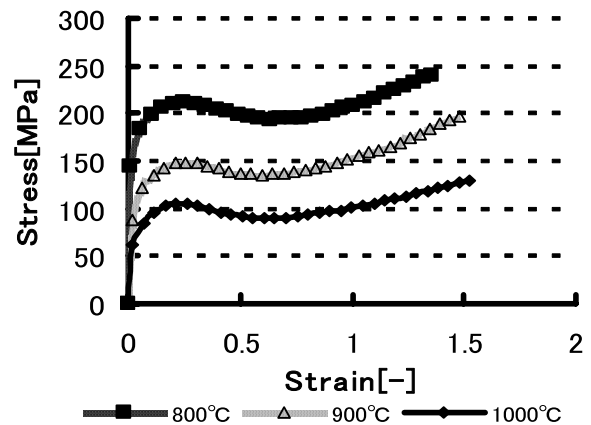


図1 S45C の温度と変形抵抗との関係

#### 2.2 試験片寸法形状

プレスによる接合実験では、接合界面の幾何学的形状について、軟質材流動部および硬質材接合溝角度に注目し、最適化を試みる。図2に試験片形状を示す。単位はmm、奥行きは20mmである。接合強度が大きく、良好な接合状態となる最適化された試験片として、硬質材接合溝角度 $\theta$ が30°と90°のものを用いる。なお、軟質材の塑性流動部には切欠きが設けてある。また、接合部が複数並んだものについても実験を行った。圧延による接合実験では、圧延に適した形状とするため、プレスではほぼ立方体であった接合試験片形状を、幅は20mmと一定のまま、長さを80mmと長くした。

接合部が1mm以下の微小接合の場合については、ワイヤー

の線径がφ 0.1mmの放電加工によって作ることのできる最小寸法のものを目指しつつ、接合部流入深さが0.2mm程度のものを作製し、実験に利用した。微小接合実験用素材のうち、接合箇所が1つのものの試験片寸法形状を図3および図4に示す。また、微小接合については、接合部の形状は同一とし、接合箇所が2,5,10のものについても実験を行った。それぞれ、流入部深さは約400μmとなっている。

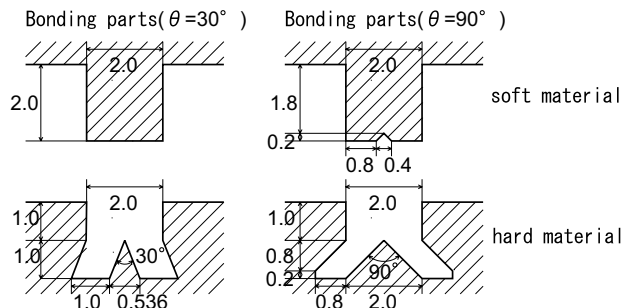


図2 プレスによる試験片寸法形状(接合部)

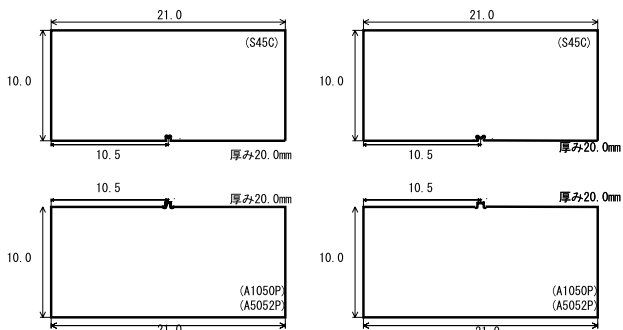


図3 微小接合試験片寸法形状

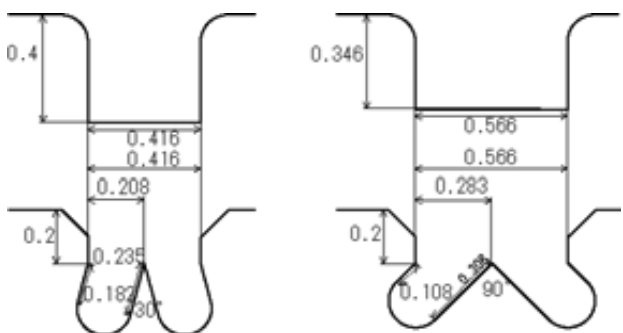


図4 微小接合試験片接合部寸法形状

### 2.3 プレスによる接合方法とその過程

硬質材と軟質材の側面および底面を治具(S50C)により固定し上面をパンチにより加圧する。圧力が増えるにつれ、軟質材は硬質材接合溝部により塑性流動を起こし、硬質材接合溝部に流れ込む。圧延実験においては、同様の接合実験を圧延機により行った。

### 2.4 接合強度測定のための引張試験

接合強度を調べるため接合強度引張試験を行う。引張試験片は、接合済みの試験片を2mm厚にスライスしたものを扱い、2mm四方の接合平面についての接合強度を調べる。

## 3 プレスによる接合試験結果と考察

### 3.1 接合状態

図5により、接合部を複数連続に並べても接合状態に影響はないことが確認された。また、切欠きがあるにも関わらず接合溝角度の大きいものよりも、小さいもののほうが良好な接合状態を実現していることがわかった。さらに、図6の軟質材の材質の違いによる比較から、引張強度の小さいA1050Pの方がA5052Pより深い位置までの流入が確認され、良好な接合状態を生むことがわかる。

### 3.2 接合強度引張試験

接合強度引張試験結果を図7に示す。接合強度を式(1)により無次元化することにより得た接合効率 $e$ と接合部数の関係を示している。

$$e = \frac{L}{\sigma_e \cdot w \cdot t} \quad (1)$$

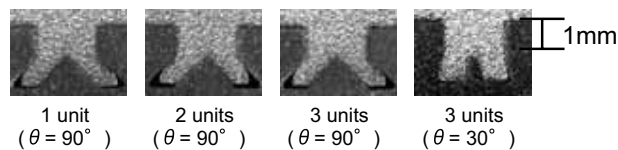


図5 荷重負荷後の接合状態(A5052P, S45C)

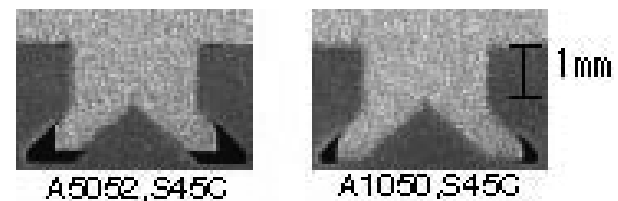


図6 荷重負荷後の接合状態(接合部数1, θ=90°)

ただし、[mm]は接合部幅、[mm]は接合部厚みである。接合強度引張試験後、軟質材だけが顕著な変形が確認でき、試験片の軟質材塑性流動部入口付近にはすべり線場状のくびれを生じた。特に軟質材A5052P(θ=90°)については、その付近での変形が激しく、破断に至るものもあった。接合強度は接合溝角度、接合部数、軟質材引張強度の大きさに応じて増加している。これは、接合溝角度が等しい場合、接合強度は軟質材引張強度の大きさに応じて大きくなる2)というこれまでの知見とも一致している。

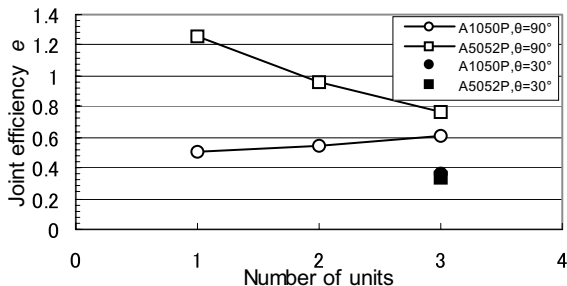


図7 プレス接合実験による接合強度

## 4 圧延による接合試験結果と考察

### 4.1 接合状態

1パスの圧延後、2パスの圧延をリバース方向から行った。この結果、硬質材接合溝角度が小さいものについては、軟質材の溝への流入による健全な接合を達成した。一方、接

合溝角度が大きいものについては、図8に示すとおり、圧延による押込みがなされても押込みと垂直方向の流入がおきにくいことが確認された。また、接合部を複数連続に並べても接合状態に影響はないこと、接合溝角度の大きいものよりも小さいもののほうが良好な接合状態を実現していること、引張強度の小さい軟質材 A1050P の方がより深い位置までの流入を得ることが分かった。

以上はプレスによる接合と類似の結果である。一方で、高さ方向の変位量に注目すると、均一な接合結果が得られにくく、圧延終了部の末端からは接合部数、板厚の薄さに応じた軟質材の流出が見られる。

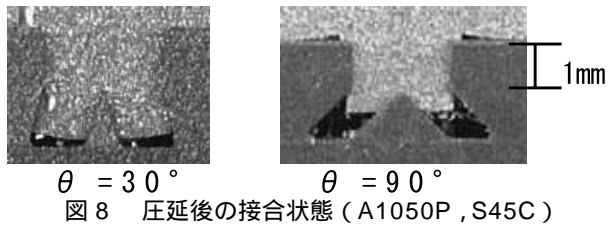


図8 圧延後の接合状態 (A1050P, S45C)

#### 4.2 接合強度測定のための引張試験結果

圧延後の接合材の中央部付近から2mm厚の試験片を切り出し、接合強度引張試験を行った。結果を図9に示す。プレス接合の際と同様、接合部数や供試材の引張強度に応じ接合強度は増加することが確認された。また、接合溝角度90度、軟質材 A5052P のものについては、プレス接合の約50～60%の接合強度となり、それ以外については約90%の接合強度が得られることが分かる。

#### 4.3 厚さ比の影響

軟質材の板厚を薄くし、4mm, 2mm, 1mmとした場合の圧延接合実験を行った。図10より明らかな通り、板厚の小さい方がより軟質材が溝部に流入していることが分かる。一方で、軟質材と硬質材の接合後に軽微な反りが発生した。

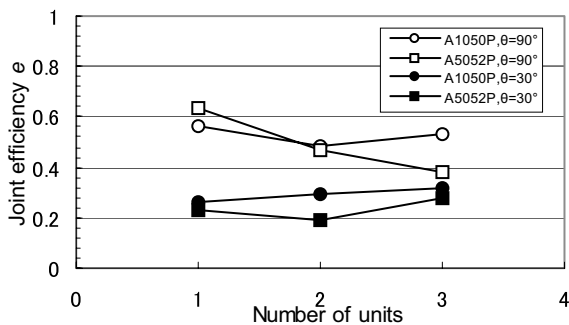


図9 圧延接合実験による接合強度

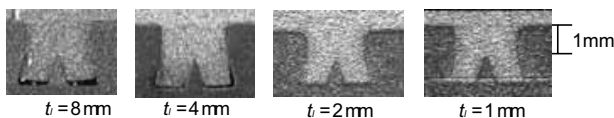


図10 軟質材を薄肉化した場合の圧延後接合状態 (A1050P, S45C)

### 5 プレスによる微小接合試験結果と考察

#### 5.1 接合状態の主な特徴

図3および図4に示した微小接合試験片によるプレス接

合実験結果を以下に示す。図11に示すとおり、従来の結果と同じく軟質材の溝部への流入による分流接合が確認された。なお、接合溝部底面に共通して半円状の隙間が確認されるが、これは放電加工に利用したワイヤー径による空間であって、軟質材の流入が期待される部分には相当しない。

接合溝部角度が30度の場合のものの方が、90度のもよりもより深部までの流入が確認された。接合溝部角度が90度のものについては、流入が完了していることが確認されるが、押込み方向と垂直な横方向への変位がほとんど起きていないことが確認された。これは、微小接合試験片では軟質材に切り欠きを付与することが困難であることに関係しているものと考えられる。

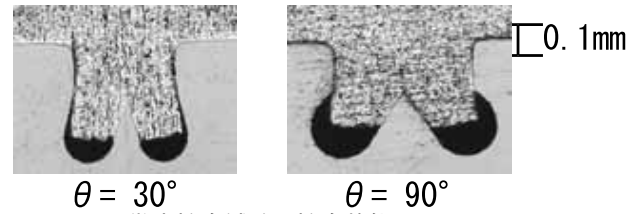


図11 微小接合試験の接合状態 (A5052P, S45C)

#### 5.2 接合強度計測のための引張試験

プレスによる微小接合により得られた接合材の中央部付近から2mm厚の引張試験片材を切り出し、接合強度引張試験を行った。この結果を図12と図13に示す。

図12は、接合部数と引張荷重Lの関係を示している。引張荷重Lは、接合部数に応じて大きくなる。また、接合部数が等しい場合には、引張荷重Lは軟質材引張強度の大きさに応じて大きくなる。さらに、軟質材の引張強度の小さいものについては、流入角度が大きいものはより大きな接合強度を実現していることも分かる。以上よ

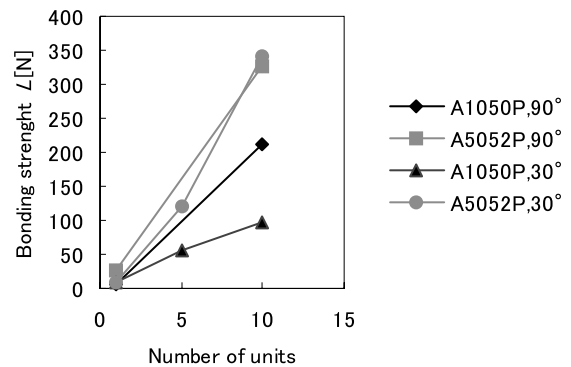


図12 微小接合実験による接合強度引張試験結果

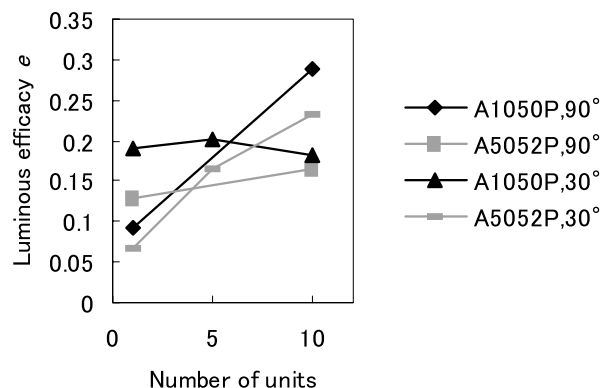


図13 微小接合実験による接合強度引張試験結果

り、従来のプレス接合の際と同様、接合部数や供試材の引張強度に応じて接合強度は増加することが確認された。

接合強度を式 (1) により無次元化することにより、接合効率  $e$  を求めた。接合部数と接合効率  $e$  の関係を図 13 に示す。このグラフにより、接合部数を増やすと、接合効率はほぼ一定となり、一部では増加の傾向を示しているものもあるということが分かる。また、流入角度が大きいものの方が高い接合効率を得るとは言えず、かなり小さい接合効率となっているものもあり、ばらつきが大きくなっていることがわかる。同様に、軟質材の引張強度についても、大きい A5052P のほうが接合効率が高いとは言えず、むしろ接合効率が A1050P の場合よりも小さくなっているものも多く、実験データに一定の傾向を見出すのは難しい。これは、分流の範囲が非常に小さく、接合に必要な塑性流動が発生する範囲が結晶粒径のオーダーにまでなっているため、結晶粒形の影響を強く受け、ばらつきが大きくなっておりと推察できる。

## 6 3次元構造体の迅速造形 5)

### 6.1 素材

ここまでの結果では、Al と Steel 等異なる材料の変形抵抗差を利用して分流接合を実現してきた。この節では、3次元構造体の造形を行うが、そのためには同じ素材どうしの分流接合を実現する必要がある。以下の実験の素材として炭素鋼 S45C を用いる。高温での圧縮試験による S45C の変形抵抗変化は図 1 に示したとおりであり、Al 系材料の変形抵抗値まで塑性流動部を軟化させるには、S45C を 700℃程度まで加熱する必要がある。

### 6.2 試験片寸法形状

接合の基本となる形状としては、図 14 に示すものを用いた。3次元的に組み上げるために、接合部が凸部凹部それぞれ 2 条ずつ設けてある。凸部には、切欠き溝を入れたものとノッチをつけたものの 2 種を用い実験を行ったが、両者の比較の結果、十分な分流可能である切欠き溝入りのものを採用して本実験を行った。

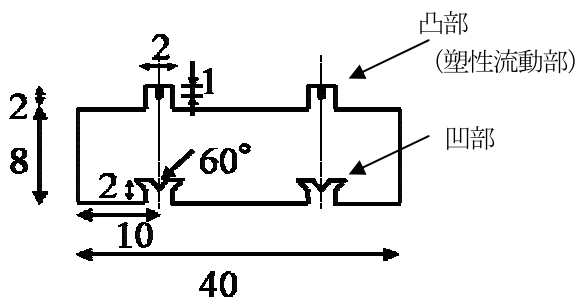


図 14 接合部の断面形状寸法 (単位 mm)

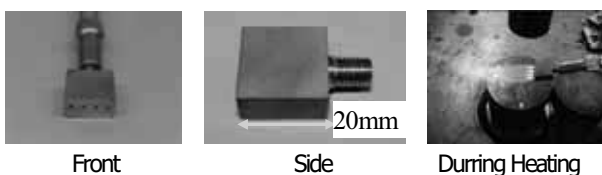


図 15 LP ガスバーナー

### 6.3 接合方法とその過程

凸部側ブロックを設置し凹部側ブロックを治具 (SUS304) により固定し、凸部を加熱後、プレスにより加圧することで接合を行う。凸部は凹部側ブロック接合突起部により塑性流動を起こし、凹部側ブロック接合溝部に流れ込む。また材料凸部に奥行きがあるため、凸部を局部加熱するために LP ガス酸素バーナーのトーチを作成した (図 15)。火炎最高温度は 3000℃である。

接合実験の様子を図 16 に示す。プレスに治具を取り付け、接合材料を位置決めして設置し、ガスバーナーにより塑性流動させる凸部を局部加熱後、直ちに加圧し接合する。凸部の加熱温度は図 1 の結果を参照し、700℃程度を目標とした。2 条同時加熱時のトーチには温度上昇によるトーチの溶解を防ぐためにカバーを付けた。

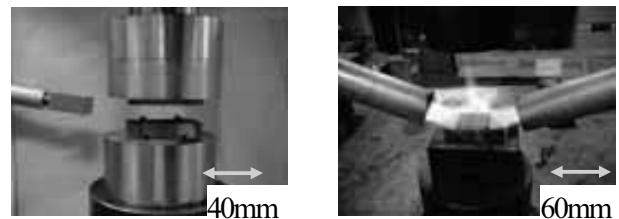


図 16 実験の様子

### 6.4 接合状態の主な特徴

凸部側材料を加熱後、接合実験を行った結果、流入による接合が確認された。視覚化しやすいよう 10 倍スケールの材料で接合実験を行った結果を図 17 に示す。

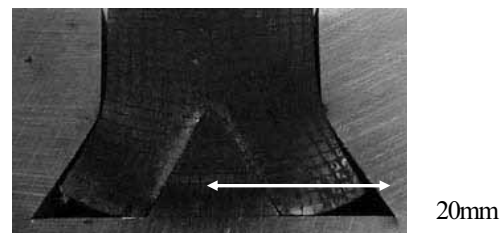


図 17 分流接合時の材料流れ (S45C)

### 6.5 接合材料寸法形状の最適化

分流が十分に行われるための溝部形状を最適化した。接合が奥まで進むほど接合強度が上がるのが従来の実験によって明らかになっている 3)。材料凸部形状に図 18 のように切欠き溝を入れ、120° 面取りを施すことで最適化した。その結果、図 19 に示すとおり、隙間ない接合が可能となった。

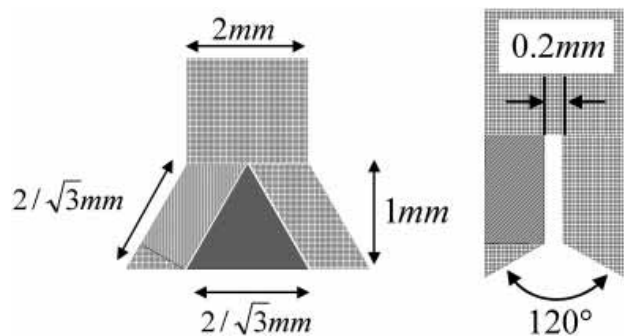


図 18 最適化された溝部形状



図 19 最適化された溝部形状による接合試験結果

### 6.5 プレス実験中の温度変化測定

分流側材料の変形抵抗を下げ、温度差利用の接合実験を行うため、加熱による分流部分の温度変化と接合後までの温度変化を熱電対により測定した。熱電対の深さは、凸部上端から 1 mm, 2 mm の位置とした。結果を図 20 に示す。

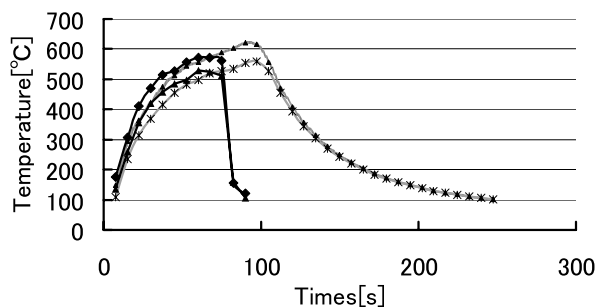


図 20 加熱 - 接合時の温度履歴

### 6.6 3次元立体形状の迅速造形結果と金型に適用した場合の 3D シミュレーション

用いたブロック形状は図 21 の 4 種類である。この 4 種類を組み合わせることで、一般的な金型の造形などに应用可能であるので、以下これらを「基本ブロック」と呼ぶことにする。

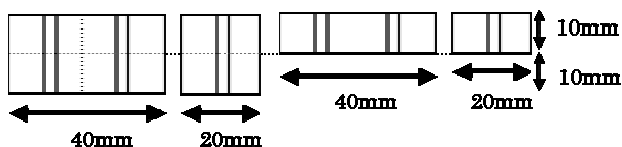


図 21 3次元構造体を構成するための 4 種類の基本ブロックの寸法と形状

3次元立体形状を造形する際に、層間強度を上げるためには各々のブロックが互い違いな位置関係になるように積層する必要がある。図 22 では各基本ブロックを種類ごとに色分けして表示している。実際に造形した結果を図 23 に示す。ここではブロック数 28 個、接合回数 33 回で 3次元構造体を作製した。

より精密な 3次元構造の作成には、図 24 に示すように、図 21 の 4 種類の基本ブロックを利用し、ブロック数を増加させると共に、個々のブロックの寸法を微細化していくことで対応できる。微小接合については 5 章にて述べた通り可能であるので、すなわち本手法は、複雑な 3次元立体形状造形や金型の製造に応用できる。図 24 ではブロック 8185 個を利用している。基本ブロックの種類は色別に表示してある。既に述べたとおり、0.2 mm 四方のブロック接合部サイズで

の軟質材硬質材 (Al - 鋼) プレス接合実験に成功している。本実験をこのサイズの接合部に応用することで、様々なサイズの 3次元立体形状造形に適用できる可能性がある。

またこの手法によれば、異なる材料を金型内の望みの位置に配置することが原理的に可能であるため、機械的特性を部分的に自由かつ柔軟に変更した金型の造形に適用できる。

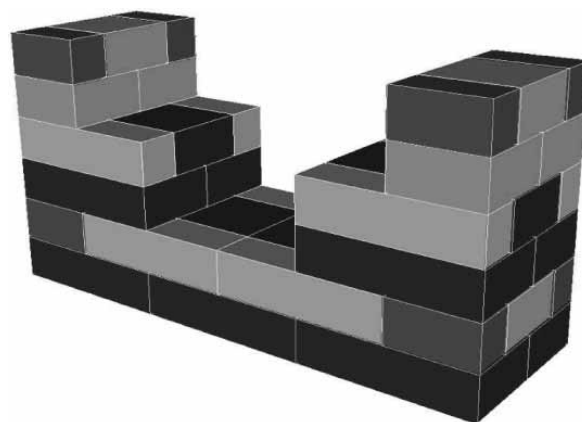


図 22 3次元立体構造の積層方法

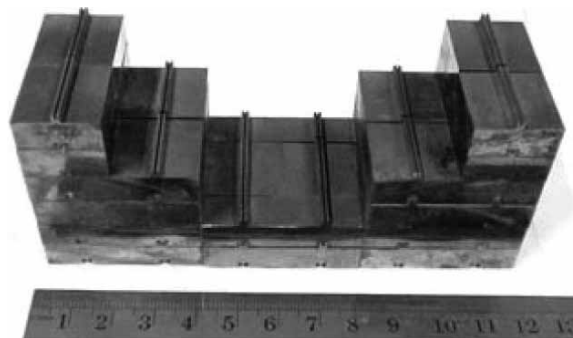


図 23 3次元立体構造のメタルブロック分流接合による積層造形結果

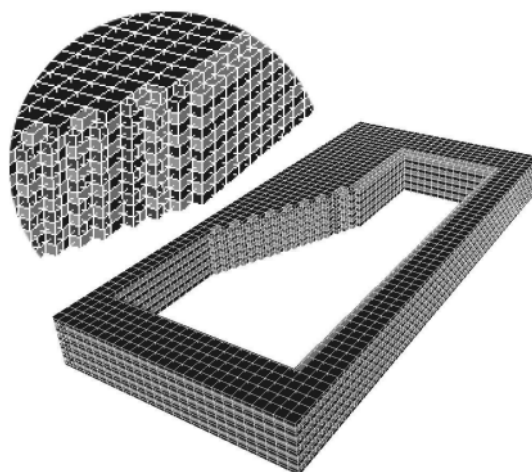


図 24 金型形状の造形例

## 7 結言

材料分流を伴う異材接合に関する研究を行った。本研究では、連続的な接合を行う場合、また 3次元立体構造体を迅速に造形することを想定し、接合部の寸法をこれまでより小さくし、かつ複数の接合部を持つものについて、(1) プレスによる接合、(2) 圧延による接合、(3) 接合部が 1mm

以下の微小接合，(4) 同一材種による接合，について検討した。

その結果，接合効率は接合溝角度  $30^\circ$ ， $90^\circ$  とも 0.2 前後だったこと，接合部寸法を極小レベル ( $400 \mu\text{m}$  程度) までスケールダウンした状態でも接合が可能なこと，同一材種であつても異なる温度による変形抵抗差によって接合が可能なことなどが判明した。

さらに局所加熱によって材料分流を利用した同種材料接合が可能であることを示した。3次元立体形状を造形し，さらにシミュレートすることで，本造形法の汎用性，金属金型のラピッドプロトタイピングへの適用可能性を確認した。

#### 謝辞

財団法人天田金属加工機械技術振興財団より交付番号 AF-2002004 にて助成金の交付によるご協力を頂きましたこ

とに感謝致します。

本研究において，多大な協力を頂きました東京大学生産技術研究所試作工場の谷田貝悦男氏に 感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 石尾雅昭：塑性と加工，32-360(1991)，27.
- 2) 柳本 潤・鈴木茂久・杉山澄雄：平 14 春塑加講論 (2002)，319-320.
- 3) 柳本 潤・堅田真人・杉山澄雄：平 15 春塑加講論 (2003)，19-20.
- 4) 柳本 潤・堅田真人・杉山澄雄：平 15 春塑加講論 (2003)，21-22.
- 5) 柳本 潤・角田夏樹：平 18 春塑加講論 (2006)，235-236.