

# 植込み接合（植込鍛接）法における サーボプレスモーション制御の効果と接合メカニズムの解明

大阪大学大学院 基礎工学研究科 機能創成専攻  
助教 松本 良  
(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007010)

キーワード：サーボプレス，塑性流動接合，アルミニウム合金

## 1. 研究の目的と背景

一般に鍛造品にはピン等の棒材を取り付けることが多い。鍛造品に棒材を取り付ける場合、穴あけ、ねじ切りなど複数の工程が必要となり、特に複数の棒材を取り付ける場合には製造工程が複雑、精度の維持が困難となり、製造コストが高騰する。筆者らは熱間鍛造直後の鍛造品に室温の棒材をプレスで押し込むことで熱間鍛造品を塑性変形させ、鍛造品と棒材を塑性結合させる「植込み接合（植込鍛接）法」を提案し、これまでに鋼材同士の接合<sup>1)</sup>、鋼材-アルミニウム材の異種金属接合<sup>2)</sup>を対象にして、植込み接合法による接合条件、接合強度について調べ、その有効性を示した。

一方、AC サーボプレスの活用がさまざまな塑性加工で試みられている<sup>3)</sup>。AC サーボプレスではサーボモータの制御によりスライドの位置や速度の制御が可能のため、スライドを上下運動させたかえりなしせん断加工<sup>4)</sup>、下死点制御による高張力鋼板のスプリングバック制御<sup>5)</sup>等の研究開発が進められている。

本研究では、アルミニウム棒材と板材の植込み接合において、AC サーボプレスを用いて棒材の植込み直後に棒材を植込み方向に振動させる振動付加植込み接合法を提案し、棒材-板材の接合強度の向上を図る。植込み振動付加条件と接合強度の関係を調べ、接合機構について考察する。

## 2. 植込み接合実験

### 2.1 植込み接合法

植込み接合法は Fig. 1 に示すようにプレス等を用いて室温の棒材を高温の板材（鍛造直後の部材を想定）に押し込んだ後、板材を空冷して棒材を固定する塑性結合法である。板材の塑性変形により生じる棒材-板材間の新生面の凝着・焼付きと接合面の残留応力により接合面に生じる締付け力を利用して、棒材-板材を接合する。

本試験では油圧多軸サーボプレスに金型を取付け、試験片、工具ともに室温で、速度  $5.0\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  でリング状試験片を圧縮した。

### 2.2 試験片材料および寸法

植込み接合の実験に用いた金型図を Fig. 2 に示す。棒材、板材には A6061-T6 アルミニウム合金（室温での耐

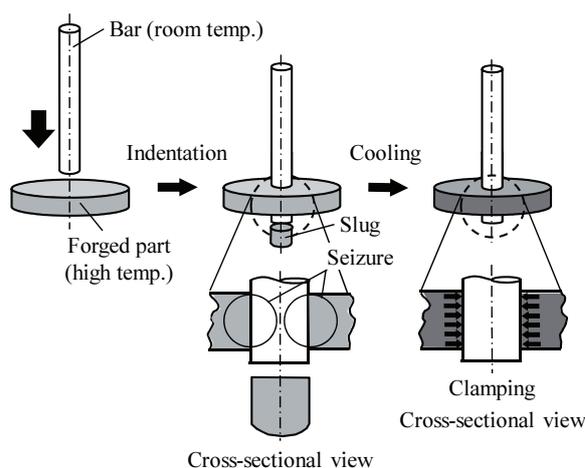


Fig. 1 Developed plastic joining method for fixing a bar with a forged plate, "indentation joining".

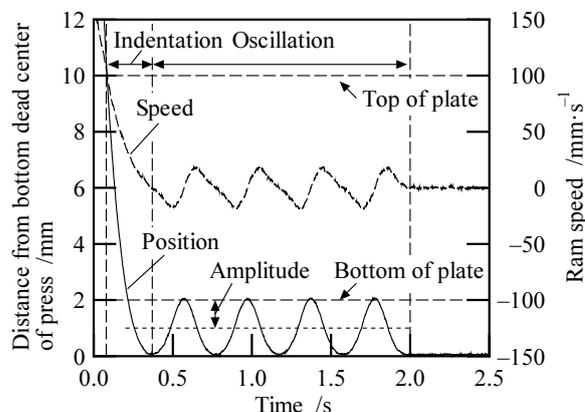


Fig. 2 Tools arrangement for indentation joining with bar oscillation on servo-controlled press.

力  $\sigma_{0.2} = 275\text{MPa}$ ) を用いた。棒材の植込み部は直径  $D_B = \phi 8.0\text{mm}$ （ダイ-棒材間の片側クリアランス： $0.2\text{mm}$ ）、表面粗さ  $1.0\mu\text{m}Ra$  に旋削加工した。一方、板材は直径  $\phi 48\text{mm} \times$  厚さ  $t_p = 8.0 \sim 12.0\text{mm}$  ( $t_p/D_B = 1.0 \sim 1.5$ ) とし、棒材植込み部には直径  $\phi 7.0\text{mm}$  の予備穴を設けた。

実験では板材を電気炉内で  $230 \sim 575^\circ\text{C}$  に加熱し、ダイに挿入後、ダイ内に固定した。一方、棒材は室温のままホルダー内に固定し、板材温度  $T_p = 200 \sim 500^\circ\text{C}$  の板材に植込み深さ ( $t_p + 2.0\text{mm}$ ) として無潤滑で植込んだ。植

込み接合中の荷重からみかけの植込み圧力  $P_I$  を、

$$P_I = \text{植込み荷重} / \text{棒材断面積} \quad (1)$$

と求めた。一方、棒材-板材の接合強度は植込まれた棒材の引抜き試験により評価した。引抜き試験は材料試験機を用いて引抜き速度  $5.0\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  として室温で行い、引抜きせん断応力  $P_D$  を、

$$P_D = \text{引抜き最大荷重} / \text{棒材のみかけの植込み部接触表面積} \quad (2)$$

と求めた。

### 2.3 プレスライドモーション

棒材の板材への植込みには、リンク式 AC サーボプレス (コマツ産機(株): H1F45, 最大加圧能力: 450kN) を使用した。植込み初期速度を約  $100\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  と設定し、プレスライドは Fig. 3 に示すように下死点まで下降後、周波数約 2.0Hz, 振幅 0.2~2.0mm で棒材を振動させた。振動回数は使用したプレス機の仕様上、最大 4 回までとした。

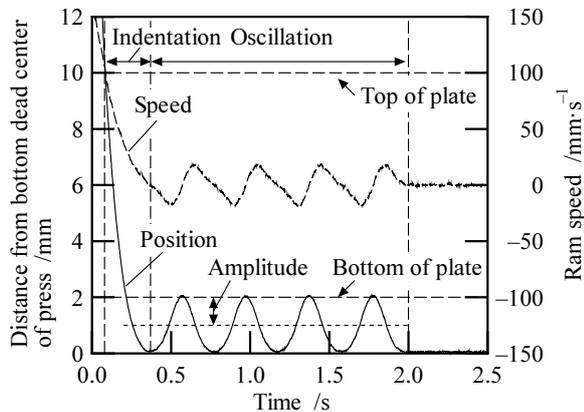


Fig. 3 Changes of ram position and ram speed in indentation joining with bar oscillation on servo-controlled press.

## 3. 研究成果

### 3.1 振動付加なしの場合の植込み温度と植込み可否

Fig. 4 に振動付加なしの植込み接合によって接合された棒材-板材の外観写真を示す。  $t_p/D_B = 1.0$  の場合、  $T_p = 200^\circ\text{C}$  以下では棒材が大きく塑性変形 (座屈) し、所定の植込み深さまで棒材を植込むことはできなかった。ただし、本接合法では、約 2mm ( $t_p/D_B = 0.25$ ) 以上、棒材

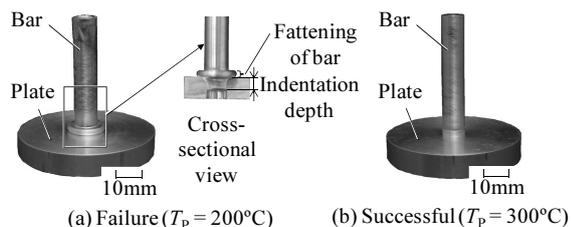


Fig. 4 Photographs of bar and plate after indentation joining (Plate thickness/bar diameter  $t_p/D_B = 1.0$ ,  $T_p$ : plate temperature in indentation joining).

を板材へ植込むことができた場合、棒材は板材に接合可能であった。 Fig. 5 に棒材植込み時の板材温度、板厚と植込み最大圧力、植込み可否の関係をまとめたものを示す。振動付加なしの植込み接合では、  $t_p/D_B = 1.0$  は  $T_p = 300^\circ\text{C}$  以上、  $t_p/D_B = 1.25$  は  $T_p = 500^\circ\text{C}$  で棒材に塑性変形を生じさせることなく、板材への植込み接合が可能であった。一方、  $t_p/D_B = 1.5$  では  $T_p = 500^\circ\text{C}$  においても板材への植込みが困難であった。

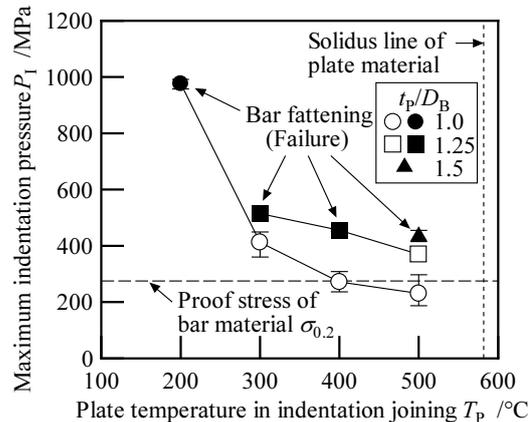


Fig. 5 Relation between plate temperature and indentation pressure ( $\sigma_{0.2} = 275\text{MPa}$ ).

### 3.2 振幅および振動回数の効果

Fig. 6 に振動付加植込み接合における振幅と棒材-板材の接合強度の関係を示す。振動回数 4 回までの範囲では振動回数による接合強度の変化はほとんどみられなかった。振幅 0.2mm で  $P_D = 75\sim 80\text{MPa}$  となり、振動付加なしの場合の約 1.5 倍の接合強度が得られた。一方、振幅 1.0mm 以上では、接合強度は振動なしの場合に比べて若干低下した。

次に棒材植込み部の板材上面のだれ長さを Fig. 7 に示す。振動回数 1 回ではだれ長さのばらつきが大きい、振動回数 1, 4 回ともに振幅が大きいほどだれ長さは短くなる傾向が得られた。これは振動付加中にだれが短くな

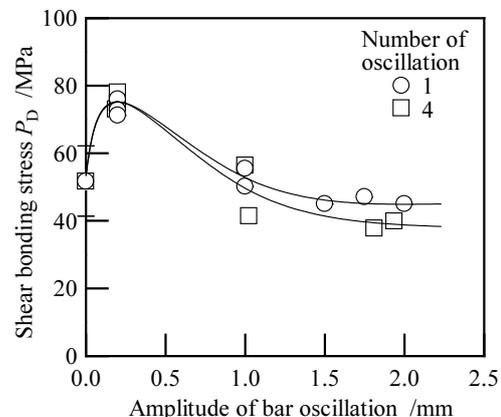
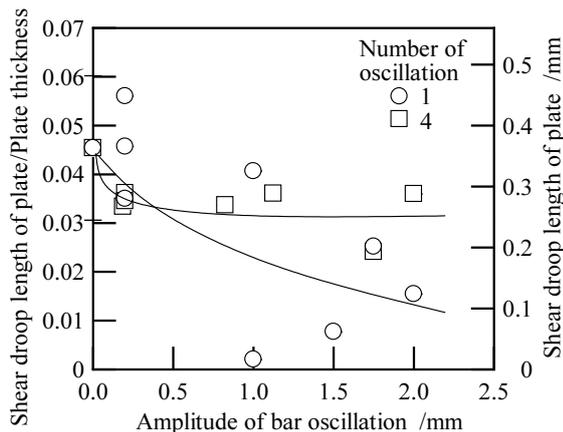


Fig. 6 Relation between shear bonding stress of indented bar-plate and amplitude of bar oscillation ( $t_p/D_B = 1.0$ ,  $T_p = 500^\circ\text{C}$ ).

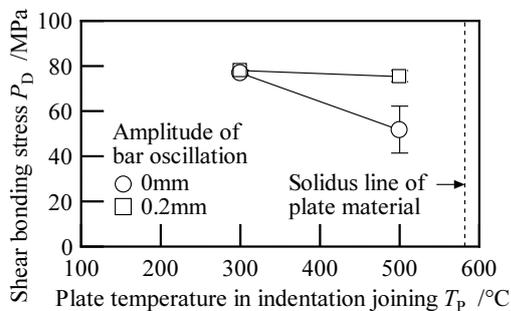


**Fig. 7** Relation between shear droop length of plate at upper corner of indentation and amplitude of bar oscillation ( $t_p/D_B = 1.0$ ,  $T_p = 500^\circ\text{C}$ ).

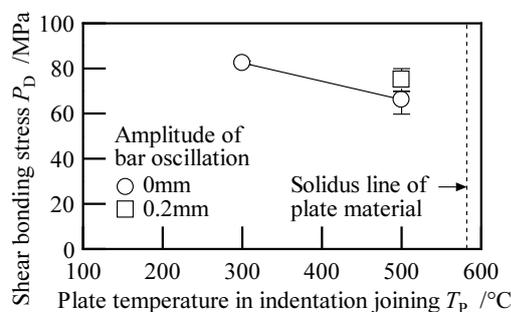
る方向（板材底面から上面方向）へ棒材が動くためと考えられる。しかしながら、いずれの条件においてもだれ長さは  $0.5\text{mm}$  以下と短く、だれ長さの長短による棒材-板材の接合面積の変化は小さく、だれ長さが接合強度に及ぼす影響は非常に小さいと考えられる。

### 3.3 植込み温度と接合強度の関係

**Fig. 8** に棒材植込み時の板材温度と棒材-板材の接合強度の関係を示す。ただし、棒材の植込み途中で棒材が塑性変形し、所定の植込み深さまで植込むことができなかった場合については、植込まれた深さから棒材-板材の接触表面積を求め、 $P_D$  を算出した。 $t_p/D_B = 1.25$ ,  $T_p =$



(a)  $t_p/D_B = 1.0$



(b)  $t_p/D_B = 1.25$

**Fig. 8** Relation between shear bonding stress of indented bar-plate and plate temperature (Number of oscillation: four times).

$300^\circ\text{C}$  では、棒材の塑性変形により十分な植込み深さが得られなかったため、振動を付加することができなかった。振動付加なしの場合、 $t_p/D_B = 1.0, 1.25$  いずれにおいても植込み温度が高いほど接合強度は低下した。一方、振幅  $0.2\text{mm}$  の振動を付加した場合、 $t_p/D_B = 1.0$ ,  $T_p = 300^\circ\text{C}$  での接合強度は振動付加なしの接合強度と同程度であったが、 $t_p/D_B = 1.0$ ,  $T_p = 500^\circ\text{C}$  では  $T_p = 300^\circ\text{C}$  での接合強度と同程度まで上昇した。また  $t_p/D_B = 1.25$ ,  $T_p = 500^\circ\text{C}$  の場合も振動付加により接合強度は向上した。

以上より、A6061 合金同士の植込み接合では植込み温度が高いほど棒材の塑性変形を生じさせることなく植込み可能となる板厚の範囲は広がるが、棒材-板材間の接合強度は低下する。しかしながら、振幅約  $0.2\text{mm}$  の振動を付加することで高温植込みにおける接合強度の低下を防ぐことが可能である。

## 4. 植込み接合実験

### 4.1 切込み付き板材の接合強度

植込み接合における棒材-板材間の接合力は凝着・焼付きおよび板材の塑性変形による残留応力から生じる接合面の締付け力が主と考えられる。また振動付加により棒材-板材の接合面近傍の板材にはさらなる塑性変形が加えられるものと推測される。そこで植込み接合後の板材に **Fig. 9** に示すような切込みを入れて締付け力を解放した後、棒材の引抜き試験を行った。つまり、棒材一切込み付き板材の接合力は凝着・焼付きのみと考える。

**Fig. 10** に棒材一切込み付き板材の引抜き試験で得られた引抜きせん断応力の結果を示す。振動付加なしの場合および振幅  $1.0\sim 2.0\text{mm}$  の場合、板材切込みによるせん断応力の低下はほとんどみられず、棒材-板材は凝着・焼付きのみで接合されていることが分かる。また振幅  $1.0\sim 2.0\text{mm}$  の場合、板材切込みの有無によらず、振動付加なしの場合と比較してせん断応力は若干低下した。これは振幅を大きくすることで凝着の一部が振動中に剥がれ、棒材-板材間の凝着・焼付きの度合いが低下するものと推察される。

振幅  $0.2\text{mm}$  の場合、切込みなし板材では振動付加なしの場合と比較して、3.2 節で述べた通り、 $P_D$  が  $25\sim 30\text{MPa}$  向上した。一方、棒材一切込み付き板材のせん断応力は振動付加なしの場合と比較して、わずかに低下するのみであり、板材に切込みを設けない場合と比較して、切込みを設けた場合のせん断応力は約  $30\text{MPa}$  低下した。つまり、振幅  $0.2\text{mm}$  の場合の棒材-板材間の接合力向上は凝着・焼付きによるものではなく、振動付加により板材に残留応力が生じ、 $P_D$  が約  $25\sim 30\text{MPa}$  向上したものと考えられる。

**Fig. 11** に棒材植込み時の板材温度と棒材一切込み付き板材の引抜き試験で得られたせん断応力の関係を示す。棒材一切込み付き板材のせん断応力は振動付加なしの場合 (**Fig. 11** 中の●)、植込み温度による変化は小さく、

$P_D = \text{約 } 60\text{MPa}$ であった。つまり、振動付加なしの場合は植込み温度によらず、凝着・焼付きによる接合強度は  $P_D = \text{約 } 60\text{MPa}$  であり、 $T_p = 300^\circ\text{C}$  では板材の残留応力による締付け力により、 $P_D$  が約  $20\text{MPa}$  向上したものと考えられる。一方、 $T_p = 300^\circ\text{C}$  で振幅  $0.2\text{mm}$  の場合、棒材一切込み付き板材のせん断応力 (Fig. 11 中の■) は  $P_D = \text{約 } 40\text{MPa}$  と振動付加なしの場合と比較して、 $P_D$  が約  $20\text{MPa}$  低下した。しかしながら、 $T_p = 300^\circ\text{C}$  では振動付加によらず、棒材-板材のせん断応力は  $P_D = \text{約 } 80\text{MPa}$  であることから、振動付加により凝着・焼付きの度合いは低下したが、板材の残留応力による締付け力は増加したものと考えられる。

以上の結果より、A6061 合金同士の振動付加植込み接合では、凝着・焼付きによる接合力と板材の残留応力に

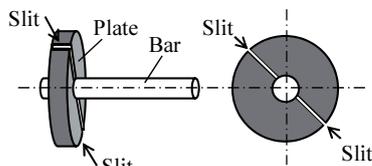


Fig. 9 Slits of plate after indentation joining.

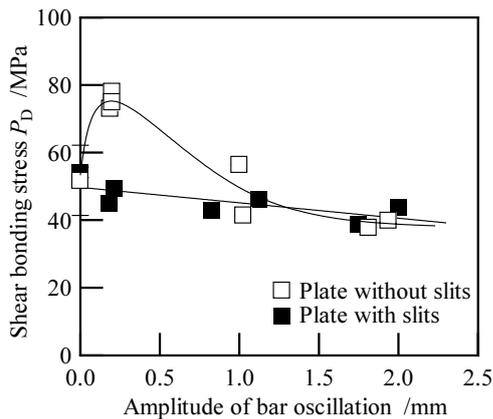


Fig. 10 Shear bonding stress of indented bar into plate with/without slits ( $t_p/D_B = 1.0$ ,  $T_p = 500^\circ\text{C}$ , number of oscillation: four times).

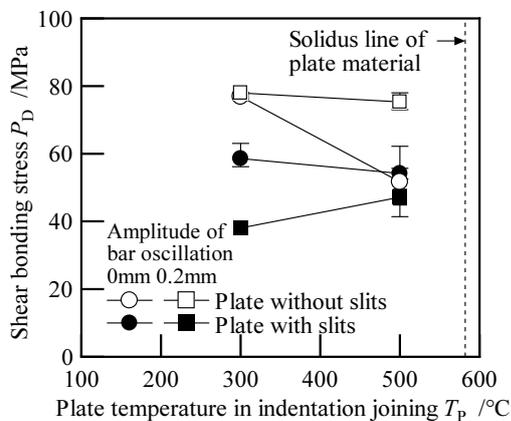
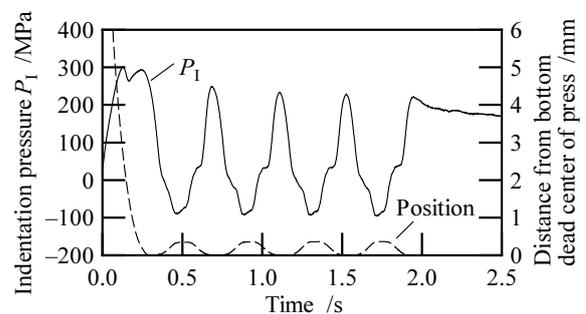


Fig. 11 Influence of indentation temperature on shear bonding stress of indented bar into plate with/without slits ( $t_p/D_B = 1.0$ , number of oscillation: four times).

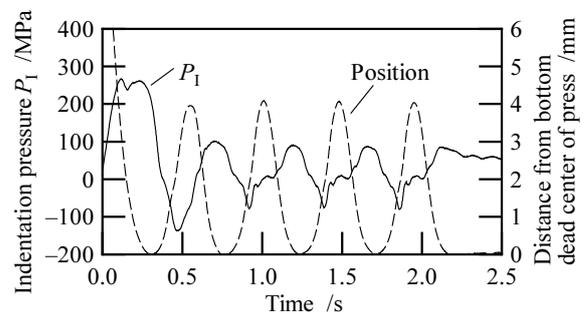
よる締付け力が植込み温度、振幅により変化することが分かる。

#### 4.2 振動付加中の植込み圧力の変化

Fig. 12 に振動付加植込み接合中の植込み圧力の変化を示す。ただし、 $P_1$  は棒材を植込み方向に対して圧縮する方向を正方向とした。振動付加中の  $P_1$  は振幅  $2.0\text{mm}$  の場合より振幅  $0.2\text{mm}$  の場合の方が大きいことが分かる。振幅  $2.0\text{mm}$  の場合では 1 回目のスライド上昇途中 (0.45 秒付近) で棒材引張り方向の  $P_1$  が最大となり、その後、スライド上昇終了 (0.55 秒付近) までの間に引張り方向の  $P_1$  は急低下した。スライド上昇途中に棒材-板材間の凝着・焼付きの度合いが低下したものと推察され、これは 4.1 節で述べたように振幅が大きい場合で接合強度が低下した結果とも一致する。



(a) Amplitude of bar oscillation: 0.2mm



(b) Amplitude of bar oscillation: 2.0mm

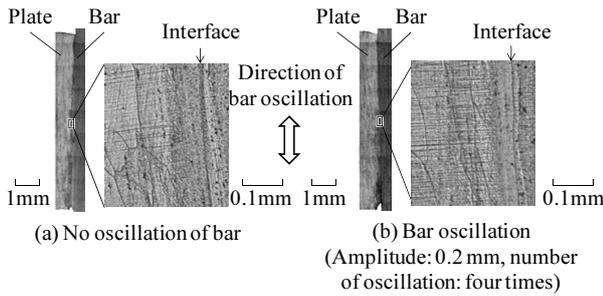
Fig. 12 Indentation pressure during bar oscillation ( $t_p/D_B = 1.0$ ,  $T_p = 500^\circ\text{C}$ , number of oscillation: four times).

#### 4.3 棒材-板材接合面の断面写真

Fig. 13 に植込み接合後の棒材-板材接合面の断面写真を示す。振動付加の有無によらず接合面で隙間はみられず、また植込み方向に板材の結晶粒が変形しており、棒材の植込み中に塑性変形を受けたことが分かる。しかしながら、振動付加による接合面近傍の明確な変化は顕微鏡写真からは確認できなかった。

#### 4.4 棒材-板材接合面近傍の温度、ひずみ分布

植込み接合中の棒材-板材接合面近傍の温度分布、ひずみ分布を有限要素解析により調べた。有限要素解析では二次元軸対称として、棒材・板材の寸法、温度等は実験条件と同一とした。ただし、プレススライドの速度変化は正確に表現することが困難であったため、棒材の植

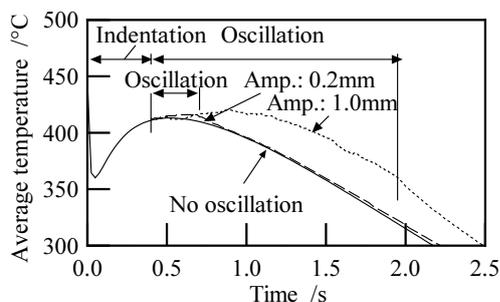


**Fig. 13** Cross-sectional views of interface of indented bar-plate ( $t_p/D_B = 1.0$ ,  $T_p = 500^\circ\text{C}$ ).

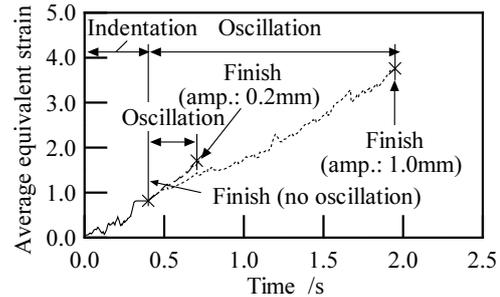
込み中は  $25\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、振動中は  $10\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  とした。A6061 合金の変形抵抗は端面拘束圧縮試験により測定し、棒材・板材と金型、大気間の熱伝達率は熱電対による温度測定結果と有限要素解析による温度計算結果が同じになるように設定した。

**Fig. 14** に板材初期温度  $T_p = 500^\circ\text{C}$  の場合の棒材-板材接合面近傍の温度変化を示す。ただし、温度は接合面を中心として半径方向  $1.0\text{mm}$  区間での平均温度である。室温の棒材の植込み開始直後に接合面の温度は一旦下がり、塑性発熱と板材からの熱伝導により温度は上昇し、その後、振動付加なしの場合、金型、大気への熱伝達により温度は低下した。一方、振動付加の場合、振動付加中の棒材-板材間の摩擦発熱と金型、大気への熱伝達による冷却のバランスにより振動付加中の接合面温度は若干上昇する程度に留まり、振動付加による接合面の最高温度に大きな変化はみられなかった。板材温度が高いほど接合強度が低下したにもかかわらず、振動付加により接合強度が向上したことからも振動付加による接合面の温度変化が接合強度へ及ぼす影響は小さいと考えられる。

次に棒材-板材接合面近傍の板材に生じる相当ひずみの平均値を **Fig. 15** に示す。振動付加により、ひずみが蓄積され、振動付加なしの場合と比較して、大きなひずみが板材へ付与されることが分かる。ただし、本有限要素解析では 4.2 節で述べた棒材-板材間の凝着・焼付きの度合いの変化は表現できず、一定摩擦としたため、ひずみは振動総距離に比例して増加したが、実際はある程度までの上昇に留まるものと推測される。



**Fig. 14** Average temperature of bar-plate interface during indentation joining ( $t_p/D_B = 1.0$ ,  $T_p = 500^\circ\text{C}$ , number of oscillation: four times).



**Fig. 15** Average equivalent strain of plate around bar-plate interface during indentation joining ( $t_p/D_B = 1.0$ ,  $T_p = 500^\circ\text{C}$ , number of oscillation: four times).

#### 4. 結び

本研究では、アルミニウム棒材と板材の植込み接合において、サーボプレスを用いて棒材の植込み直後に棒材を植込み方向に振動させる振動付加植込み接合を提案した。棒材の植込み振動条件と接合強度の関係を調べ、接合強度の向上について考察した。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) 振動付加により、植込み温度  $500^\circ\text{C}$ 、振幅  $0.2\text{mm}$  の条件において、振動付加なしの場合の約  $1.5$  倍の接合強度が得られた。
- 2) 振動付加により、棒材-板材接合面の凝着・焼付きの度合いは振動付加なしの場合と同程度あるいは低下したが、板材の残留応力による締付け力は増加した。
- 3) 板材温度が高いほど植込み圧力を低減でき、分厚い板材への植込み接合が可能となるが、振動付加なしの場合、板材温度が高いほど接合強度は低下した。しかしながら、振動を付加することにより高温板材への植込みにおける接合強度の低下を抑制できた。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり研究助成いただいた(財)天田金属加工技術振興財団に深く感謝の意を表します。また金型作成にご協力下さいました(株)ニチダイに厚く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 花見眞司, 松本 良, 小坂田宏造, 吉村豹治: 塑性と加工, **49**-567(2008), 316-320.
- 2) 松本 良, 花見眞司, 小坂田宏造, 吉村豹治: 塑性と加工, **50**-581(2009), 550-554.
- 3) 安藤弘行: プレス技術, **44**-1(2006), 38-42.
- 4) 古閑伸裕, 久保雅亮, Junlapen, K.: 塑性と加工, **48**-558(2007), 645-649.
- 5) Mori, K., Akita, K. & Abe, Y.: Int. J. Mach. Tools Manuf., **47**-2(2007), 321-325.