

各種金属材料の圧接条件に関する研究\*  
(面圧, 表面積拡大比および温度の影響)中村 保<sup>\*1</sup>, 近藤 一義<sup>\*1</sup>  
笹原 裕志<sup>\*2</sup>, 中村 和也<sup>\*3</sup>Research on Pressure Welding Conditions of Various Work Metals  
(Effects of Contact Pressure, Surface Expansion Ratio and Temperature)Tamotsu NAKAMURA, Kazuyoshi KONDO,  
Hiroshi SASAHARA, and Kazuya NAKAMURA

Pressure welding tests have been carried out by means of welding the ends of cylindrical specimens of aluminium, copper, mild steel, nickel and stainless steel. The critical conditions for obtaining the bond strength equivalent to the parent strength have been examined with various contact pressure  $p$ , surface expansion ratio  $X$  and temperature  $T$ . Consequently, the critical surface expansion ratio  $X_s$  could be reduced with increasing temperature in all the workmetals, and the complete bond strength could be obtained by a relatively small reduction in height of  $Re=10\sim 20\%$  within the range of hot working temperature.

**Key Words:** Forming, Pressure Welding, Work Metals, Contact Pressure, Surface Expansion Ratio, Temperature

## 1. 緒 言

塑性加工法と圧接を組み合わせることができれば、複雑な形状の製品が製造できる可能性が生まれる。このような立場から、圧接の適用可能な条件範囲を定量的に把握することを試みている。既報<sup>(1)(2)</sup>では、常温圧接法に優れた工業用純アルミニウム材料を用いて、一体材と同程度の接合強度を得るための圧接限界条件の確立を試みた。その結果、面圧、表面積拡大比および温度に関する定量的な圧接限界条件式を示すことが可能になった。さらに、再結晶温度程度では比較的低温で、しかもわずかな表面積拡大で完全な接合強度が得られ、温熱間加工領域では、圧接過程を組み合わせる場合の適用可能な条件範囲がかなり広いことが明らかになった。

ところで、金属の常温圧接性はその種類により大きく異なることが知られている<sup>(3)</sup>が、拡散接合においては、ほとんどの金属がその融点(絶対温度  $T_m$  K)の約半分の温度 ( $T_m/2$ ) 以上で容易に接合可能になること

が報告されている<sup>(4)</sup>。しかし、常温からこの温度までの範囲で各種金属材料の圧接限界条件がどのように変化するかについては、ほとんど明らかにされていない。

本報では、既報<sup>(1)(2)</sup>のアルミニウム材料に加え、銅、軟鋼、ニッケルおよびステンレス鋼の各材料を用いて、常温から  $T_m/2$  以上までの各温度で、完全な接合強度を得るための圧接限界条件を調べた。その結果、いずれの材料でも、温度上昇に伴い圧接可能な条件範囲が顕著に拡張することが明らかになり、特に温熱間加工に圧接過程を組み合わせることの可能性が示唆されたので、ここに報告する。

## 2. 圧接試験法

2.1 拘束圧縮形圧接試験 図1(a)は、コンテナ内で試験片を拘束圧縮して圧接する試験法であり、 $600^\circ\text{C}$ 以下の温度範囲で工具全体を加熱炉中にセットして行った。圧接試験片は変形部(直径  $a=4\sim 8\text{mm}$ )テーパ部(半角  $\theta=30^\circ$ )および案内部(直径  $=10\text{mm}$ )からなり、コンテナ内で2個の試験片を突合せ圧接する方法である。テーパ部の変形拘束のため、たる形変形を生じ、この不均一のため表面積拡大比  $X=A/A_0$  ( $A_0, A$  は変形前後の面積)は図2に一例を示すよう

\* 昭和62年10月31日 山梨地方講演会において講演、原稿受付 昭和62年3月24日。

<sup>\*1</sup> 正員、静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北3-5-1)。

<sup>\*2</sup> ソニー(株) (〒243 厚木市旭町4-13-1)。

<sup>\*3</sup> 学生員、静岡大学大学院。

に、中心に向かうほど大きな値となる。試験片がコンテナ内に充滿すると塑性変形は停止し、表面積拡大比  $X$  の分布が定まる。この  $X$  の分布は、コンテナ内径 10 mm で一定であるため、試験片の変形部の初期直径  $a=4\sim 8$  mm によって変更できる。本試験法では  $X=2\sim 11$  程度の範囲で変更した。一方、面圧  $\bar{p}$  は、既報<sup>(1)</sup>において、充滿面圧以上ではほぼ一様な分布になることが確認されている。本試験では、 $\bar{p}=300\sim 2000$  MPa 程度の範囲で変更した。また、試験温度は、工具全体を加熱する炉の温度設定により調節したが、既報<sup>(2)</sup>と同様に試験片接合面が所定の温度に達したことを確認したのち圧接加工を行った。本法では、銅および軟鋼材料について常温から 600°C までの各温度で試験した。

**2.2 自由据込みによる圧接試験** 700°C 以上の高温では、型工具の軟化が顕著になるため、工具全体を加熱する方法が使えない。そこで、図 1 (b) に示すように、試験片のみを圧接温度より約 100°C 程度高い温度に加熱し、炉から取り出した直後 (約 10~20 秒以

内) に自由据込みして圧接する方法を採用した。この際、できるだけ試験片の温度低下を防止するため、自由据込みは恒温炉 (300°C) 内で行った。また、接合面の酸化を防ぐため、図のように、幅 25mm、厚さ 0.02mm のステンレスはくを堅く巻きつけたまま、加熱および圧接加工を行った。本法でも表面積拡大比  $X$  は、図 2 と類似の分布を示すが、圧下率  $R_e$  を 10~50% の範囲で変更することにより、 $X$  を 1~8 程度の範囲で変更できた。自由据込みのため、面圧  $\bar{p}$  は独立に変更できないが、本実験では、軟鋼材料で平均面圧  $\bar{p}=100\sim 130$  MPa、ニッケルで  $\bar{p}=75\sim 375$  MPa、ステンレス鋼で  $\bar{p}=100\sim 360$  MPa 程度であった。また、接合面温度はあらかじめ所定温度に達する条件を求めて試験したが、本実験では 500~1050°C の各温度で行った。

**2.3 実験条件** 上述の両圧接試験法において、接合面は試験直前に無潤滑切削によって仕上げた<sup>(2)</sup>。加圧速度は拘束圧縮で約 0.05 mm/s、自由据込みでは約 1 mm/s であるが、圧縮後約 10 秒間面圧を保持した。加圧開始から終了までの時間は、拘束圧縮で約 3 分以内、自由据込みでは約 10 秒以内であった。

圧接試験用素材は、既報で用いた工業用純アルミニウム A1050BD、およびタフピッチ銅 C1100BD、冷間鍛造用低炭素鋼 SWCH-10K、高純度ニッケル、ステンレス鋼 SUS305 相当の 5 種類である。表 1 にそれらの真応力-対数ひずみ関係を示す。

**2.4 接合強度の評価方法** 図 2 に示したように、表面積拡大比  $X$  は半径位置  $r$  によって異なるため、接合強度はその対応する位置で測定する必要がある。図 3 (b) に示すように、自由据込み形圧接試験では、既報<sup>(1)</sup>と同様に、各半径位置から引張小試験片を切り出して、その引張強さ  $S_T$  を測定した。一方、拘束圧縮形圧接試験では、試験片の直径が 10 mm と小さいため、図 3 (a) に示すように、接合部を所定の直径  $d$  まで旋削した引張試験片について、その引張強さ  $S_T$  を

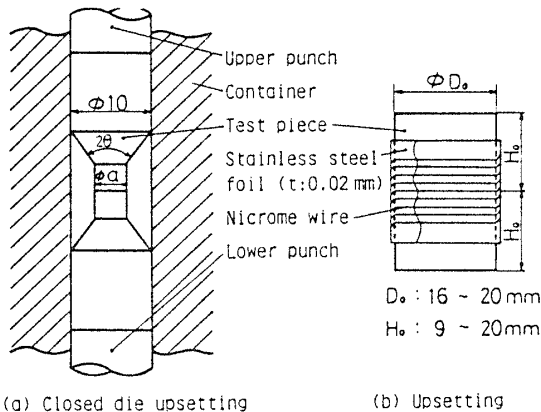


図 1 圧接試験法

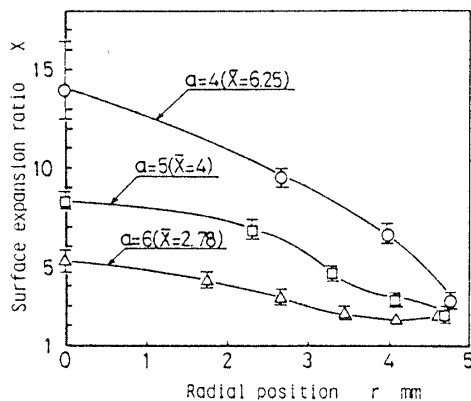


図 2 拘束圧縮における表面積拡大比の分布の一例 (銅材料、常温)

表 1 圧接試験用素材の真応力-対数ひずみ関係

Materials	Temperature	F, MPa	n-Value
Commercially pure aluminium A 1050	room	125	0.29
	200°C	71	0.22
	300°C	47	0.17
	400°C	3.3	0.05
Tough pitch copper C 1100	room	372	0.29
	200°C	302	0.30
	400°C	138	0.08
Mild steel SWCH 10 K	room	646	0.21
	400°C	631	0.14
	500°C	603	0.19
High pure nickel	room	661	0.43
Stainless steel SUS 305	room	1413	0.65

True stress-strain relation :  $\sigma = F \varepsilon^n$

測定した。また、継手効率  $\eta$  すなわち一体材の強度に対する接合材の強度の割合を求めるため、圧接試験と同一の条件で加工した一体材についても、図 3 (a), (b) と同様の試験片について引張強さ  $S_{T0}$  を測定した。継手効率は、 $\eta = (S_T/S_{T0}) \times 100\%$  と定義した。

以上の引張強さの測定は、同一条件で必ず 3 回以上行い、その再現性が確認できる範囲内での継手効率  $\eta$  の平均値を検討の対象とした。また、一体材と同程度の完全な接合強度が達成されたかどうかの評価については、既報<sup>(1)</sup>と同様に、一体材の引張強さ  $S_{T0}$  にバラツキが存在するため、10% 程度の許容範囲を設け、 $\eta \geq 90\%$  の場合に完全な接合強度が達成されたものと評価することにした。

**2.5 圧接限界条件の再現性** 圧接試験法による圧接限界条件の評価がほぼ一致することを確認するため、図 4 に、アルミニウム材料を用いて得られた既報<sup>(1)</sup>の結果と、本実験の拘束圧縮形圧接試験の結果を比較して示す。丸印の中の黒塗り部分の割合によって継手効率  $\eta$  の範囲を示すが、●印は  $\eta \geq 90\%$ 、すなわち完全な接合強度が達成される場合を示し、実線はこの場合の圧接限界線を表す。破線で示した既報<sup>(1)</sup>の圧

接限界線に比べ、拘束圧縮の場合の圧接限界線はやや左側に移動するようである。これは図 3 (a) の引張試験片では、継手効率  $\eta$  が高い中心部も含まれるので、接合強度が多少高く評価されるためと考えられる。この点を考慮すれば、両者の圧接限界線はほぼ一致するものと考えられる。

### 3. 各種金属材料の圧接限界条件

**3.1 接合面の酸化防止の効果** 高温での圧接試験では、接合面の酸化をどの程度に抑えられるかによって、接合強度が左右されると考えられる。本実験では、真空中での圧接試験が困難であるため、試験片に数% 程度の塑性変形が生ずる程度の面圧を負荷したまま加熱することにより、酸化の防止を図った。図 5 は、銅材料の拘束圧縮形圧接試験における加熱中の保持面圧の影響を示したものである。(a) に示されるように、保持面圧の増加に伴い継手効率  $\eta$  は顕著に高まり、約 250 MPa で  $\eta \geq 90\%$  に達する。(b) は保持面圧  $p_0 = 0$  と 350 MPa の場合の圧接限界条件を比較したもので、保持面圧を加えることにより、完全な接合強度を得るための限界表面積拡大比  $X_s$  は約 4 から 2 まで顕著に

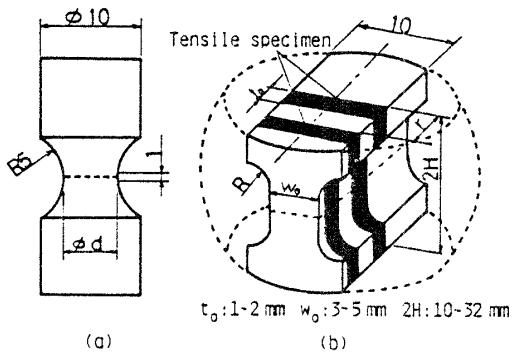
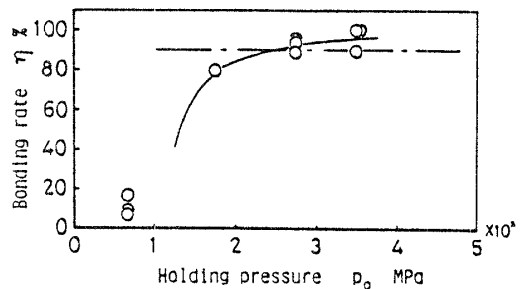


図 3 接合強度評価のための引張試験片形状



(a) Effect of holding pressure on bonding rate

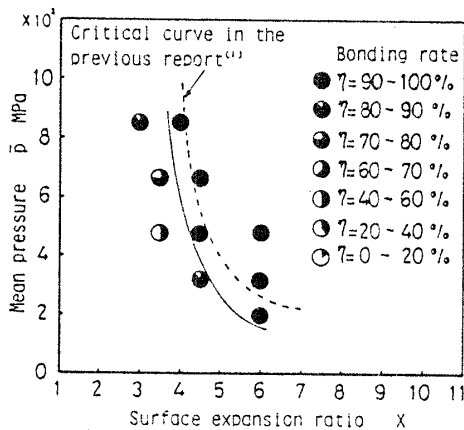


図 4 圧接試験法による圧接限界線の比較 (アルミニウム)

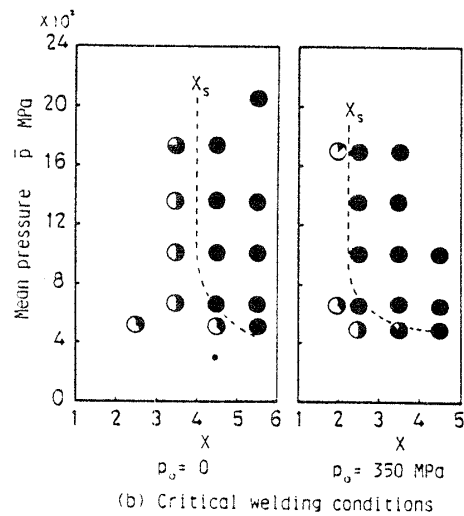


図 5 拘束圧縮形圧接試験における酸化防止の効果 (銅)

改善されることがわかる。

自由掘込みの場合は、面圧保持のままの加熱ができないため、図1(b)のようにステンレスはくを巻きつけたのち、常温で1~2%程度圧下して接合面を密着して炉内加熱を行った。図6は軟鋼材料のこのような酸化防止法による効果を示したもので、700および800°Cでは、予変形を与えることにより限界表面積拡大比 $X_s$ は約4.5~3.5から約1.5程度まで顕著に改善されることがわかる。

以後の実験結果は、いずれも以上の酸化防止策を施して得られたものである。

**3.2 アルミニウム材料の圧接限界条件<sup>(1)(2)</sup>** 既報<sup>(1)(2)</sup>において得られたアルミニウム材料の各温度における圧接限界線を図7に再掲する。温度上昇に伴って、表面積拡大比 $X$ および面圧 $\bar{p}$ の低い側に移動し、圧接可能な条件範囲が顕著に改善されることが示された。とくに、300および400°Cでは面圧 $\bar{p} \approx 98 \sim 784 \text{MPa}$ の範囲で限界表面積拡大比 $X_s = 2.5$ および1.2まで低下し、この材料の熱間加工温度範囲 $T_s = 300 \sim 400^\circ\text{C}$ では、わずかな表面積拡大が生ずれば、ほとんど完全な接合強度が得られることがわかる。

**3.3 銅材料の圧接限界条件** 図8に拘束圧縮形圧接試験によって得られた圧接限界線を示す。図7のアルミニウム材料の場合と常温における圧接限界線を、材料の変形抵抗の差異による面圧範囲を考慮して比較すると、低面圧の範囲においてアルミニウムでは $X_s = 7$ 、銅では $X_s = 10$ となり、従来の研究で報告されているように<sup>(3)</sup>、板の重ね合せ圧接における残厚比等による圧接性の評価と一致している。しかし、高面圧の範囲では、アルミニウムおよび銅ともに $X_s = 4 \sim 5$ 程度まで低下し、両者の圧接限界表面積拡大比がほぼ一致することがわかる。

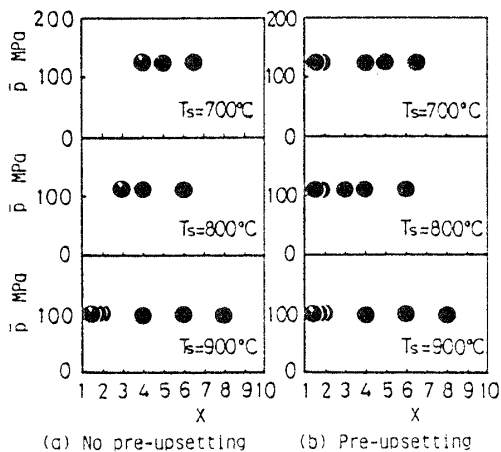


図6 自由掘込み形圧接試験における酸化防止の効果(軟鋼)

温度200および400°Cにおける圧接限界線は、アルミニウム材料の場合とほとんど同じ傾向を示し、面圧に関係なくほぼ一定となる限界表面積拡大比 $X_s$ は、200°Cで $X_s = 3$ 、400°Cでは $X_s = 1.25$ となり、温度上昇とともに圧接性が顕著に改善されることがわかる。したがって、銅材料では、熱間加工温度範囲 $T_s = 700 \sim 800^\circ\text{C}$ よりかなり低い温度でも、わずかな表面積拡大で完全な接合強度が得られることがわかる。

**3.4 軟鋼材料の圧接限界条件** 常温から600°Cまでの圧接試験は拘束圧縮法によって行った。常温では、表面積拡大比 $X = 13$ 、面圧 $\bar{p} = 2500 \text{MPa}$ という厳しい条件においても接合は全く生じなかった。従来から知られているように<sup>(3)</sup>、軟鋼材料の常温圧接は極めて困難であることが確認された。

図9は、500°C以上の温度において得られた圧接限界線を示している。500および600°Cの結果は拘束圧縮形圧接試験によって得られたものであるが、完全な接合強度を得るためには600°Cでは、 $\bar{p} = 800 \text{MPa}$ 以上の面圧で $X = 7$ 以上の表面積拡大比が必要になる

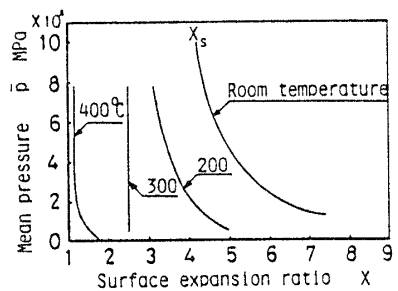


図7 アルミニウム材料の各温度における圧接限界線<sup>(2)</sup>

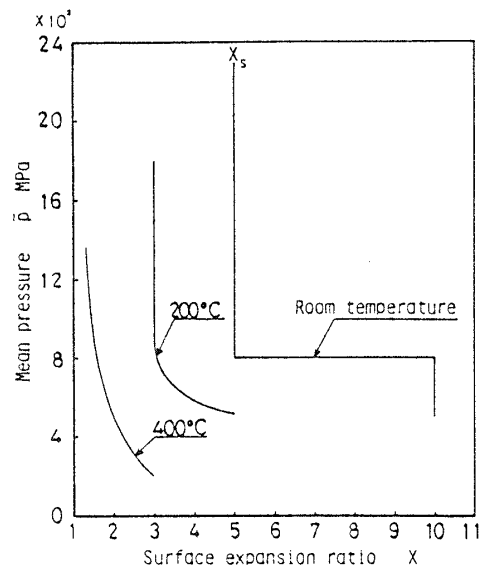


図8 銅材料の各温度における圧接限界線

ことがわかる。700~900°Cの結果は、自由据込み形圧接試験によって得られたものであるが、平均面圧 $\bar{p}$ ≒100 MPa程度で、限界表面積拡大比 $X_s$ は $X_s$ ≒1.5~1.3まで極めて顕著に低下している。したがって、接合面の酸化を十分に防止すれば、軟鋼材料の温間加工領域 $T_s$ ≒700~800°Cでも、比較的容易に圧接過程を組合わせることが可能になるものと考えられる。

**3.5 ニッケル材料の圧接限界条件** 図10(a)に自由据込み形圧接試験によって得られた圧接限界条件を示す。温度 $T_s$ ≒500°C以上で、平均面圧 $\bar{p}$ は約350から100 MPa程度まで低下するが、温度の上昇に伴って、限界表面積拡大比 $X_s$ は顕著に改善されることが示される。すなわち、試験温度500°Cでは、平均面圧 $\bar{p}$ ≒375 MPa程度で、限界表面積拡大比 $X_s$ ≒3であったものが、600、700°Cでは $\bar{p}$ ≒200 MPa程度で $X_s$ ≒1.4となり、特に800°C以上では、 $\bar{p}$ ≒100 MPa程度で $X_s$ ≒1.2まで低下することがわかる。したがって、ニッケル材料の場合にも、熱間加工領域 $T_s$ ≒700~800°Cでは、わずかな塑性変形によりほぼ完全な接合が達成されることになる。

**3.6 ステンレス鋼材料の圧接限界条件** 図

10(b)に自由据込み形圧接試験において得られた圧接限界条件を示す。800°Cでは、 $\bar{p}$ ≒350 MPa、 $X_s$ ≒5.5においても完全な接合強度は達成されなかったが、900°Cでは、 $\bar{p}$ ≒320 MPa、 $X_s$ ≒3で、1050°Cでは、 $\bar{p}$ ≒120 MPa、 $X_s$ ≒1.5でほぼ完全な接合強度が達成されることがわかる。このように、ステンレス鋼材料では軟鋼材料に比較して圧接の条件がかなり厳しいが、熱間加工温度範囲では比較的少ない塑性変形を与えることにより、完全な接合強度が得られることがわかる。

#### 4. 限界表面積拡大比に及ぼす温度の影響

図7、8および9において、面圧増加に伴い限界表面積拡大比が減少するが、ある面圧以上ではほぼ一定値 $X_s$ に漸近する傾向にある。これは、近藤ら<sup>(5)</sup>が指摘したように、面圧増加に伴い接合同士のなじみを増加させる効果が現れるためと考えられる。

図7~10の圧接限界条件において、面圧に関係なく一定となる限界表面積拡大比 $X_s$ を、絶対温度で表した試験温度と融点の比 $T/T_m$ に対して示すと図11のようになる。この図より、各材料とも温度上昇に伴い限界表面積拡大比 $X_s$ は顕著に減少し、ある温度比 $T/T_m$ で、 $X_s$ ≒1に近接している。これらの温度比は、銅、ニッケルでは $T/T_m$ ≒0.5と最も小さく、軟鋼でも $T/T_m$ ≒0.55となっている。常温圧接が最も容易であるにもかかわらずアルミニウム材料では $T/T_m$ ≒0.7とかなり高くなっている。さらに、ステンレス鋼材料では $T/T_m$ ≒0.8以上となり、温度上昇による圧接性改善の効果が得られにくいことがわかる。

橋本ら<sup>(4)</sup>は、各種金属材料の拡散接合において、図12のような結果を示している。図における接合容易な下限温度 $T_L$ は塑性変形がほとんど生じない程度の面圧で、比較的短時間に接合可能な温度という定義であるが、いずれの金属でも拡散接合可能な下限温度 $T_L$ が $T_L$ ≒0.37~0.6 $T_m$ となっている。また、この温度は各金属材料の再結晶温度とほぼ一致することを示している。図11において、ほとんど表面積拡大なしで完全な接合強度が達成される試験温度比 $T/T_m$ は、図12の拡散接合可能な下限温度 $T_L$ よりやや高めとなっているが、銅が最も低く、ニッケル、軟鋼、アルミニウム、ステンレス鋼材料の順に高くなる点は比較的よく一致している。

拡散接合が比較的長時間の加圧を必要とするのに対し、本実験では比較的短時間すなわち約10~20秒程度の加圧でほぼ完全な接合強度に達するという点で異なるが、本実験の場合にも $T/T_m$ ≒0.5~0.8の再結晶

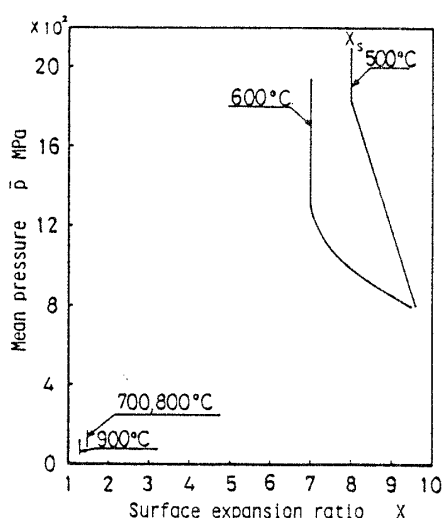


図9 軟鋼材料の各温度における圧接限界線

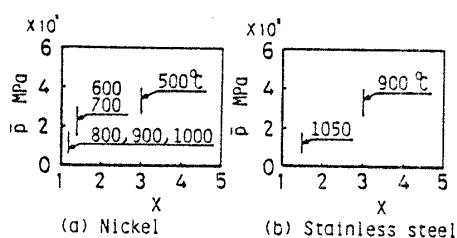


図10 ニッケルおよびステンレス鋼材料の各温度における圧接限界線

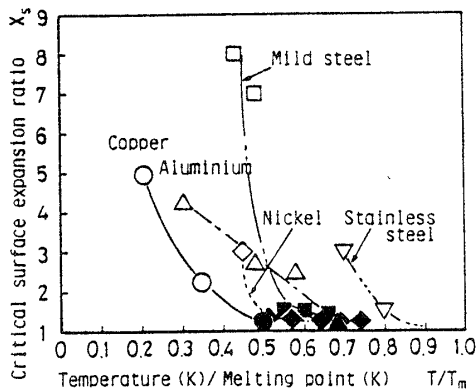


図 11 完全な接合強度を得るための温度と表面積拡大比の関係

温度以上では、拡散接合が支配的な接合過程となっていると考えられる。

一方、常温圧接は酸化膜などの表面被膜の破壊に伴う新生面同士の圧着によるといわれている<sup>(3)(6)</sup>。しかし、既述のように軟鋼材料では表面積拡大比  $X_s=13$ 、面圧  $\bar{p}=2500$  MPa でも全く接合が生じないことを考慮すると、常温の接合においても新生面同士の単純な圧着過程だけでなく、圧着後の原子間結合を生じさせるためには、原子の活性化のためにある程度以上のエネルギーが必要になるものと考えられる。

図 11 において、温度上昇に伴い限界表面積拡大比  $X_s$  が顕著に減少する過程では、新生面の出現が少なくても温度上昇に伴う原子の活性化が高まり、いわゆる拡散接合的な過程が促進されるものと考えられる。アルミニウム材料の  $200^\circ\text{C}$  における圧接加工について、完全な接合強度が得られる場合の接合面近傍の硬さの変化を調査した結果では、圧接加工終了時間（約 20 秒）以内で硬さの低下が完了することを確認している。今後、さらに詳細な検討が必要であるが、 $T/T_m=0.5$  以下の温度でも、塑性変形量に応じて再結晶が生じる程度の原子の拡散が生じ、これが固相接合過程に支配的な影響を及ぼしていると考えられる。

## 5. 結 言

拘束圧縮形および自由据込み形圧接試験により、各種金属材料の完全な接合強度を得るための圧接限界条件すなわち、面圧、表面積拡大比および温度の影響を調べた結果、次のような結論が得られた。

(1) 高温における圧接加工では、接合面に予め面圧負荷をして加熱し、酸化を防止することにより、完

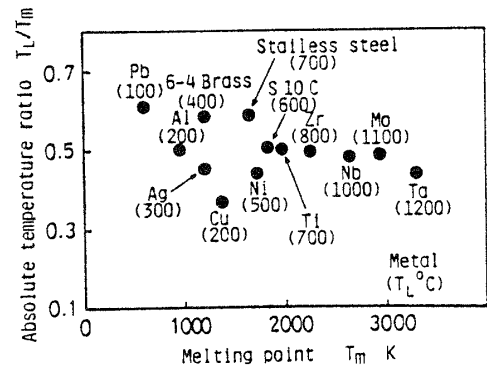


図 12 各種金属材料の固相接合容易な下限温度 (橋本ら<sup>(4)</sup>)

全な接合強度を得るための限界表面積拡大比  $X_s$  をかなり低下させることができる。

(2) 銅材料の圧接限界条件は、アルミニウム材料とほぼ同様の傾向を示し、 $400^\circ\text{C}$  では限界表面積拡大比  $X_s$  は 1.25 程度となる。常温圧接が困難な軟鋼材料でも、 $700^\circ\text{C}$  では  $X_s=1.5$ 、ニッケルでは  $600^\circ\text{C}$  で  $X_s=1.4$ 、ステンレス鋼では  $1050^\circ\text{C}$  で  $X_s=1.5$  となる。

(3) いずれの材料でも、温度  $T$  の上昇に伴い限界表面積拡大比  $X_s$  は顕著に減少し、 $X_s=1$  に近接する。 $X_s=1$  となる温度比  $T/T_m$  ( $T_m$  は融点) は、銅とニッケルで 0.5、軟鋼で 0.55 となるが、アルミニウムでは 0.7、ステンレス鋼では 0.8 以上と高くなる。これらの温度は拡散接合可能な温度比  $T_l/T_m$  の順序とほぼ同じであり、温度上昇に伴い、拡散接合的な接合過程が支配的になることが示された。

以上のように、いずれの材料でも熱間加工温度近傍では、比較的小さな塑性変形があれば、短時間の加圧でほぼ完全な接合強度が得られ、加工法の適切な選択ができれば、圧接過程を温熱間塑性加工法とうまく組み合わせる可能性があることが示唆された。

本研究にあたり、静岡大学・藤村全成教授に貴重なご意見をいただいた。また、神戸製鋼所および大同特殊鋼より金属素材を提供していただいた。記して謝意を表す。

## 文 献

- (1) 中村・ほか 2 名, 機論, 50-451, C (昭 59), 571.
- (2) 中村・ほか 3 名, 機論, 50-454, C (昭 59), 1089.
- (3) 齊藤・山路, 溶接学会誌, 30-1 (昭 36), 3.
- (4) 橋本・田沼, 溶接学会誌, 41-1 (昭 47), 19.
- (5) 近藤・牧戸, 昭和 53 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (昭 53-5), 289.
- (6) Bay, N., Trans. ASME, Ser. B, 101 (1979), 121.

## 討 論

〔質問〕 中村 雅 勇〔豊橋技術科学大学〕

温度の影響を拡散と考えることには同感であるが、以下のことに問題を感じる。

(1) 試験片の加熱温度が圧接温度より 100°C 程度高いこと、圧接後の冷却条件が規定されていないことなどによる拡散の影響が加わると考えられる。

また、図 6 (b) には昇温中の拡散の効果が加わっていると考えられる。

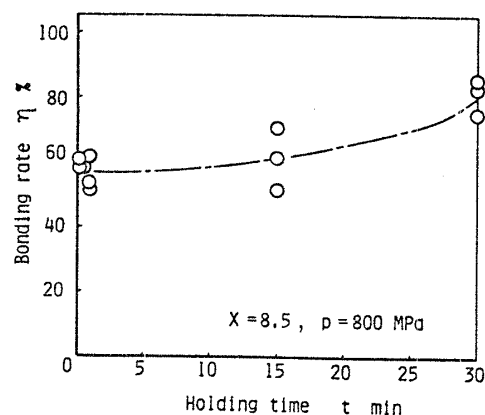
(2) 実験の温度条件での接合が拡散かどうかの判定には加熱・加圧の保持時間を大幅に変化させて接合強度を調べる必要があると思う。

(3) 拡散であれば、再結晶温度が重要なので図 11 は融点  $T_m$  ではなく、再結晶温度で整理したほうがよいと思う。また再結晶温度は塑性変形量の影響を受けるので、圧接時の変形の表現には表面積拡大比  $X$  ではなく、圧縮ひずみ(特に、新生面率に一致する公称ひずみ)で整理したほうがよいのではないかと思う。

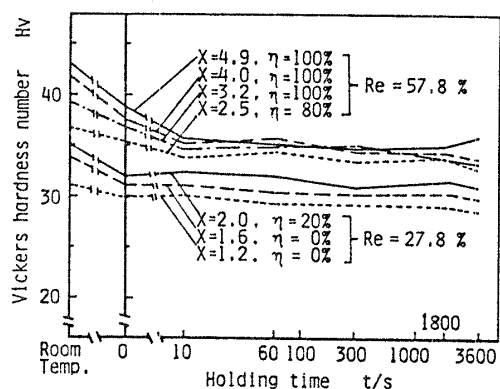
〔回答〕 (1) 自由据込みでは、予備据込みの有無にかかわらず、圧接温度より 100°C 高い条件に加熱しただけでは、接合は、まったく生じてないことを確認している。また、加熱後の圧縮、加圧保持時間は約 15 s 程度であり、その直後に空冷される。圧接は、主として圧縮、加圧保持時間内でほぼ終了し、空冷中は、急冷されるため拡散接合の促進は、比較的少ないものと考えられる。

(2) 付図 1 に示すように、加圧保持時間を 30 min まで延長したときの継手効率、 $\eta=59\%$  から 80% まで改善されるが、その上昇量は約 20% で、加圧保持時間 10 s 以内に大部分の接合が達成されている。したがって、加熱圧接中の接合は、塑性変形に伴う動的拡散などにより比較的短時間の間に生じていると推測される。

(3) ご指摘のように、再結晶温度で整理することが望ましいと考えるが、変形量によってその再結晶温度が大きく変化し、再結晶温度の同定がかなり困難であるため、便宜的に融点に対する絶対温度比として整理した。また、再結晶温度に対する塑性変形量の影響を、公称ひずみあるいは真ひずみのどちらで表すのが



付図 1 低炭素鋼 SWRCH-10 K 材料 600°C における面圧保持時間と継手効率の関係



付図 2 アルミニウム材料 200°C での据込みにおける加熱・加圧保持時間に伴う硬さの変化

良いかについては疑問が残る。本論文では常温から再結晶温度までの接合条件を表す尺度の一つとして表面積拡大比を用いた。

なお、付図 2 は、アルミニウム材料 200°C での据込みにおいて、加熱、加圧保持時間に伴う硬さの変化を調べたものである。本文中に指摘したように、圧接加工終了時間約 20 s 以内で硬さの低下が完了し、再結晶あるいは回復が生じていることが示されている。すなわち、この時間内で硬さの低下が生ずる程度の転位の移動、あるいは原子の拡散が生じ、これが接合に寄与しているものと考えられる。