

PCR 加工による異種材質円管の重ね圧接*

森 敏彦^{*1}, 広田 健治^{*1}
千田 進幸^{*1}, 足立 貴司^{*2}

Pressure Welding of Dissimilar Metal Tubes by PCR

Toshihiko MORI^{*3}, Kenji HIROTA,
Shinkoh SENDA and Takashi ADACHI^{*3} Department of Mechanical Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603 Japan

A new process for tube ironing, the "Planetary Conical Rolling" (PCR) process, is proposed. A number of rollers rotate around the cone while revolving around their respective axis, preventing sliding friction which is the main cause of galling and breakage in the conventional ironing process. Additionally, a large deformation and a high pressure can be applied locally to the material under each roller because this process is an incremental process and the axis support cone is highly rigid. Taking advantage of these features to produce a hybrid tube, lap pressure welding by PCR process between aluminum alloy (A 5052) and pure copper (C 1100) was discussed in this paper. From the measurements of bonding strength, it was found that the relative strength of outer tube against inner tube mainly affected the bonding strength. That is, high bonding strength was obtained when the relative hard tube was set on the inner side. Distribution of normal bonding strength in the axial direction was measured, which coincided with that of radial compressive strain in the outer tube. This is explained by the difference of plastic zone in both tubes depending on the material combinations. Conclusively, in order to pressure-weld the dissimilar tubes by PCR process, it is necessary to give enough thickness reduction to the outer tube which is difficult to be deformed.

Key Words: Plastic Forming, Friction, Formability, Bearing, Planetary Conical Rolling, Pressure Welding, Tube

1. 緒 言

既報において、塑性加工のみによって高機能円管を作成しうる“プラネタリ・コニカル・ローリング”(PCR加工)を開発し、報告してきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。また、本加工法によれば焼付きや破断を生じることなく高い壁厚減少を実現でき、管外表面の性状も通常のしごき加工より良好となるなど、数々の優れた性能を実証している。その要因として「逐次的に高い面圧、大きな変形を加えることができる」ことがあげられる。この特徴を利用した新たな可能性として、前報ではアルミニウム合金管(A 5052-H 14)の重ね圧接が可能なることを報告した⁽⁴⁾。本報ではその結果をふまえ、対象を異種材質円管に拡張する。異種材を必要箇所配して部品を高機能化することは、丸棒において軸方向の摩擦圧接により実用化されている。しかし、これをパイプに適用しようとするに十分な接触面積と接触圧を得るために形状や寸法に制約が課せられる。一方、PCR加工

による重ね圧接は半径方向の圧接であり、それらは重なり長さや壁厚減少率により任意に調節でき、異種材質間でも組合せによっては圧接可能であると推察される。

本報では軽量高強度で耐食性に優れるアルミニウム合金と導電性、熱伝導性に優れる純銅を取上げ重ね圧接を試みた。その結果、内管材と外管材の組合せにより接合強度が大きく変化することがわかり、その機構について界面観察、ひずみ測定、および接合強度分布測定から明らかにした。

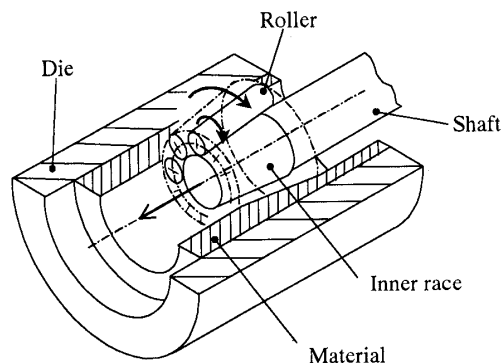


Fig. 1 Outline of Planetary Conical Rolling (termed PCR)

* 原稿受付 2000年6月14日。

^{*1} 正員、名古屋大学 (☎ 464-8603 名古屋市千種区不老町)。

^{*2} (株)シマノ (☎ 590-8577 堺市老松町3-77)(元:名古屋大学大学院)。

E-mail: mori@mech.nagoya-u.ac.jp

2. 加工原理および実験装置

2.1 加工原理 図1にPCRの加工原理を示す。本加工は回転するダイスに加工素材を納め、その中にバックアップレースで支持された多数のテーパローラを挿入することで達成される。ローラユニットの最外包絡円径は管内径よりも大きいため、管壁は各ローラにより逐次的に圧下されながら減肉されていく。ダイスから相対的に見れば、テーパ状の管内面をローラが螺旋状に遊星圧延していると見なすことができ、圧延による圧接と同様の原理で接合が達せられる。

2.2 実験装置および工具 実験装置は前報⁽⁴⁾と同一のものを用いた。テーパローラ工具はNTN製の円すいころ軸受(ローラ個数14, ローラ角 12.5° 最外包絡円径 64.6 mm)を使用した。ダイスは内径 69.0 mm の円筒で縦半割構造となっている。加工機械にははん用旋盤を用い、主軸のチャックにダイスを、芯押し台にテーパローラ工具を固定した。芯押し台はモータで駆動され送り速度は任意に調節できるようになっている。

テーパローラ工具のホルダ部にはひずみゲージが貼付され、軸方向送り力 P と円周方向接線力 T が測定できる。これらは滑り抵抗変位計によるローラストロークとともにX-Yレコーダに取込まれて荷重ストローク線図が得られる。

3. 実験条件および方法

3.1 加工素材 試験用素材として、高強度の固溶強化アルミニウム合金A5052-H14および工業用純銅のタフピッチ銅C1100を使用した。いずれも押し出し円管材であり機械的性質は表1のとおりである。銅の引張強さはアルミニウム合金の約1.4倍であり低炭素鋼と同等の強度をもつ。また、延性の尺度となる

Table 1 Tensile properties of material used

	$\sigma_B(\text{MPa})$	$\delta_U(\%)$	n	HV
A5052-H14	251	5.2	0.09	114
C1100	352	0.8	0.01	150

σ_B : Tensile strength δ_U : Uniform elongation
n: Strain hardening coefficient HV: Vickers hardness

Table 2 Combinations of tube materials

	Inner tube	Outer tube
Combination 1	A5052-H14	A5052-H14
Combination 2	C1100	A5052-H14
Combination 3	A5052-H14	C1100

n 値は両者とも小さい。表2に内管材と外管材の組合せ条件を示す。比較のため同種材の条件も用意した。

3.2 ダイス回転数, ローラ送り速度 ダイス回転数は 350 rpm , ローラ送り速度は 0.21 mm/rev で一定として実験を行った。

3.3 素管, 製品寸法および壁厚減少率 素管形状寸法を図2に示す。接合部において内側となる素管を内管, 外側となる素管を外管と呼んで区別する。外管外径は製品外径の 69 mm (ダイス内径)に一致させ加工前にダイス内に納める際のはめ合せは外管と内管が半径で 0.05 mm 程度のすきまばめとなるように寸法設定する。製品板厚はダイスとローラのすきまに一致し, $t=2.2\text{ mm}$ となる。接合部全体の壁厚減少率 R は, 内管と外管の加工前後の板厚をそれぞれ t_{i0}, t_{o0} および t_i, t_o とすると式(1)により与えられる。

$$R = \frac{(t_{i0} + t_{o0}) - (t_i + t_o)}{t_{i0} + t_{o0}} = 1 - \frac{2.2}{t_{i0} + t_{o0}} \dots (1)$$

本実験の素管寸法は既報⁽⁴⁾のアルミニウム合金同士の重ね圧接で十分な接合強度が得られた条件である壁厚減少率 $R=0.45$, 接合部寸法 $l'=5\text{ mm}$, $l=12\text{ mm}$ のひととおりを採用した。また, 各素管の初期板厚 t_{i0}, t_{o0} については, 内管側の変形が大きいことを考慮し, 外管が変形しないと仮定したときに加工後の外管板厚と内管板厚が等しくなるように $t_{i0}=2.9\text{ mm}$, $t_{o0}=1.1\text{ mm}$ と設定した。

3.4 接合強度の評価 圧接した円管から図3(a)のように円周方向に幅 10 mm の短冊状試片を切出し, 以下の2とおりの接合強度試験を行った。試片Aの軸方向引張により接合せん断強度 τ_{bond} を測定した。既報では接合はく離面の観察および変形機構より見かけの接合部における接合強度分布を推測したが, この部分を具体的に求めるのを本報の一つの目的とした。そのために, 試片Aをさらに軸方向に 1.2 mm の幅で小割りにした試片Bにより板厚方向(半径方向)の接合垂直強度 σ_{bond} を測定した。後者については新たに図3(b)の専用ジグを製作したことで実現され, これにより軸方向の接合強度分布を得ることが

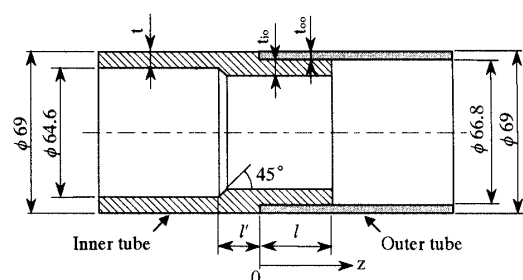
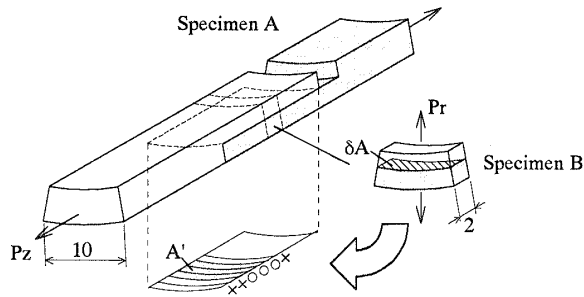


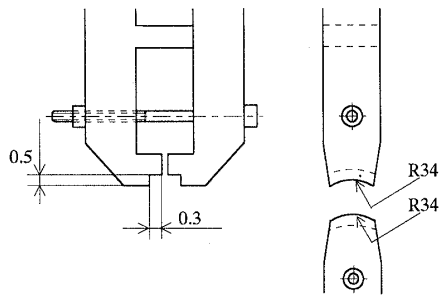
Fig. 2 Dimension of raw tube

できる。同時に、見かけの接合領域中で真実接合箇所が特定されるため、接合せん断強度に関しても最大せん断力 Pz を真の接触面積 A' [図3(a)] で除すことでより正確な値が得られる。本論文で用いる接合強度の定義を以下に示す。

$$\sigma_{bond} = Pr/\delta A \quad \dots\dots\dots(2)$$



(a) Definition of specimen and test method



(b) Jig for measuring shear bonding strength

Fig. 3 Evaluation of bonding strength

$$\tau_{bond} = Pz/A' \quad \dots\dots\dots(3)$$

$\left(\begin{array}{l} Pr : \text{試片 B の最大垂直力, } \delta A = 10 \times 1.2 \text{ mm} \\ A' = 10 \text{ mm} \times \text{真実接触長さ} \end{array} \right)$

4. 実験結果および考察

4.1 接合部の観察 表2に示した3種類の組合せ条件で圧接した試料に対して、接合界面およびせん断試験後のはく離面の観察を行った。

4.1.1 接合界面の観察 図4に接合界面縦断面における走査電子顕微鏡写真を示す。図4(a)は同種材の場合である。接合域の境界を撮影しているが、接合部分では界面が消えており十分な圧接がなされていると推測できる。一方、異種材の場合は界面が色の違いで判別できるが、図4(b)で界面部分にすきまはなく、外管のアルミニウム合金に内管の銅が十分に噛み込んでいると考えられる。これに対して、図4(c)では界面に若干のすきまが見られ、両材料の噛み込みが不十分である。

4.1.2 はく離面の観察 図5にせん断試験後のはく離面の外観を示す。同種材の条件1では、既報で指摘したように行程に伴う変形の推移から五つの領域が識別できる⁽⁴⁾。この分類を参考に、異種材圧接時のはく離面を「」付きの記号で領域分けした。それぞれの特徴を以下に示す。

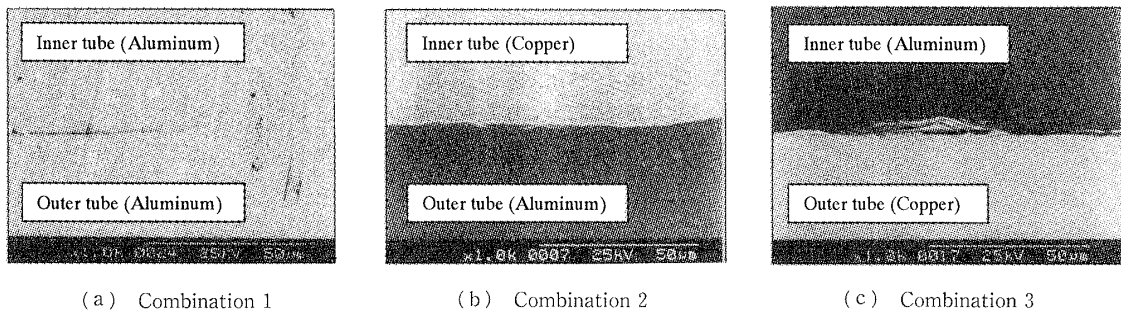


Fig. 4 Scanning electron micrographs of welded interface

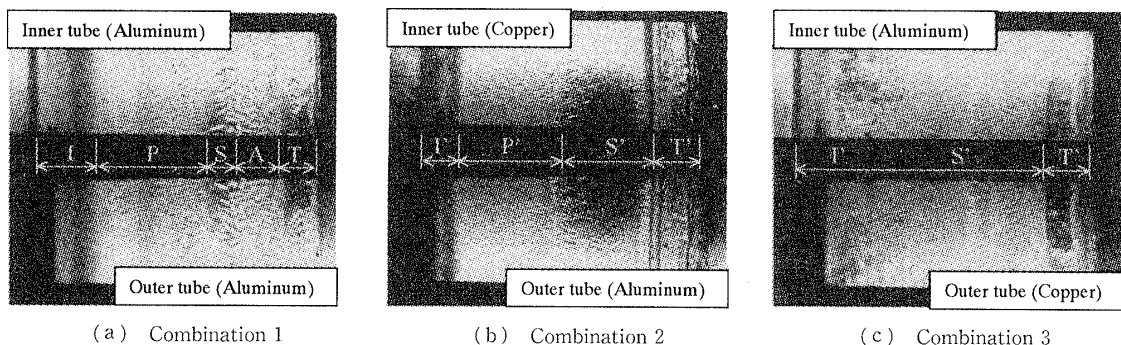


Fig. 5 Characteristic regions of welding surface after shear bonding test

I' 領域：表面荒れ、相手材の移着は見られない。

P' 領域：光輝な表面荒れ、銅へアルミニウム合金が附着して構成された面。

S' 領域：平滑なアルミニウム合金の光輝面。ただし、条件1の S 領域に比べると光沢は鈍い。

T' 領域：表面肌荒れ、一部に相手材の移着が見られる。

異種材間での圧接の場合、銅にアルミニウム合金が附着したはく離面となっており、接合界面ではなく強度的に弱いアルミニウム合金側で分離が起きていることがわかる。また、銅を内管に用いた条件2では、十分な接合が達せられ、各領域の区分も明りょうであった。一方、逆の組合せとなる条件3では、ほとんど接合が達せられず、銅へのアルミニウム合金の附着もまばらで領域の識別が困難であった。この結果は、図4で示したように、条件2より条件3のほうが銅のアルミニウム合金へのかみ込みが浅いという観察結果と一致する。

4.2 接合強度 3.4節で述べた評価法により各組合せ条件での接合強度の測定ならびに考察を行った。

4.2.1 接合強度分布の推測 図5における I' 領域および T' 領域には、相手材の移着があまり見られず、十分な接合がなされているのは中央部の P' 領域であると推察される。これを行程中の変形により考察する。内管段部の傾斜はローラの接触角よりも大きいため、行程初期では図6(a)のように軸方向の変形が起こる。このため両管には半径方向の圧縮力はほとんど作用しない。その後、内管内面がローラ工具面に一致すると、図6(b)のようにローラ直下の領域は周辺

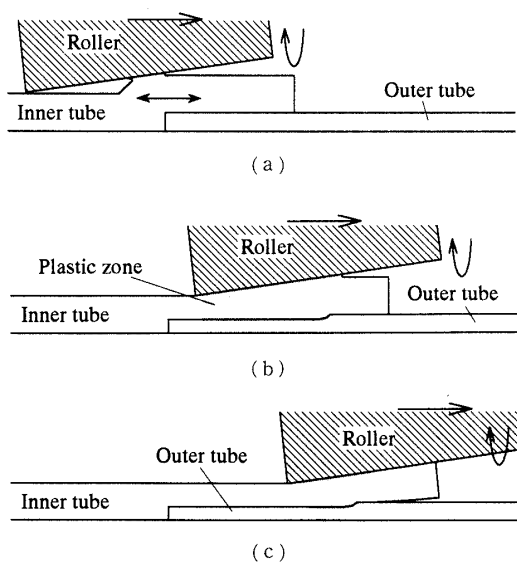
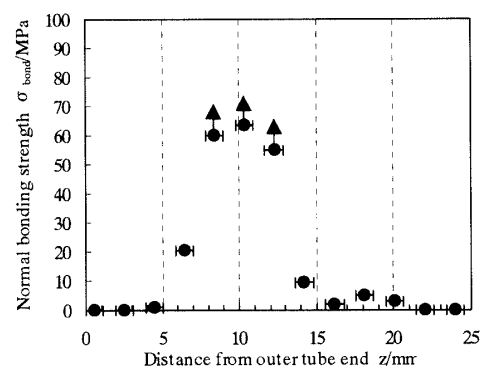


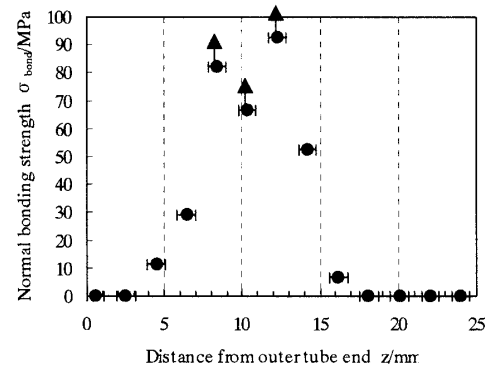
Fig. 6 Sequence of pressure welding process by PCR

の材料による拘束を受け、半径方向に大きな圧縮変形が生じる。これにより両管の接合界面には新生面が現れ十分なかみ込みが起こる。しかし、行程終期になると図6(c)のように内管端部に変形が抜けてしまい、接合界面の面圧は低下する。このような変形過程と前述のはく離面観察との対応から、接合強度は接触領域両端で小さく中央部で最大値をとるような分布になると推察される。

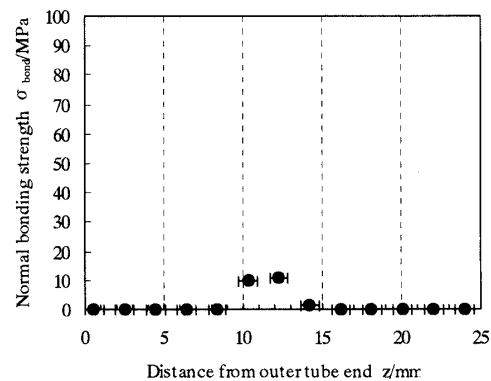
4.2.2 接合垂直強度 (σ_{bond}) 接合位置に対する垂直接合強度分布を図7に示す。横バーは図3の試片Bの軸方向長さを表し、各バーの間は試片作成において切出し分だけ欠ける。また、図7中の上向き矢印は



(a) Combination 1



(b) Combination 2



(c) Combination 3

Fig. 7 Longitudinal distribution of normal bonding strength

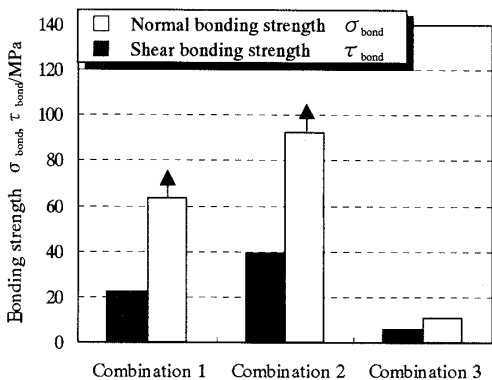


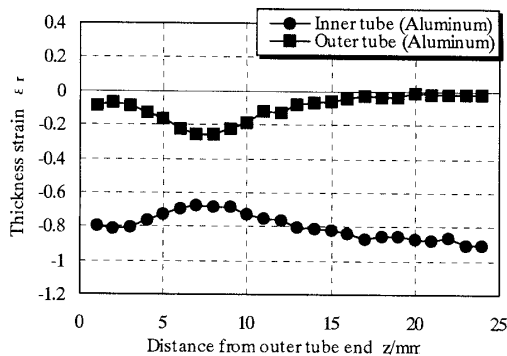
Fig. 8 Comparison of bonding strength

ジグのつかみ部で試片が滑り、それ以上の強度測定ができなかったことを意味する。各グラフより銅を内管とした条件3以外は十分な接合がなされていることがわかる。また、推測どおりの強度分布をしていた。すなわち、接触面全域で接合しているのではなく、接合開始位置から5~15 mmの区間でのみ接合している。この区間は図5におけるP領域またはP'領域に相当し、この領域が真の接合部であると考えられる。

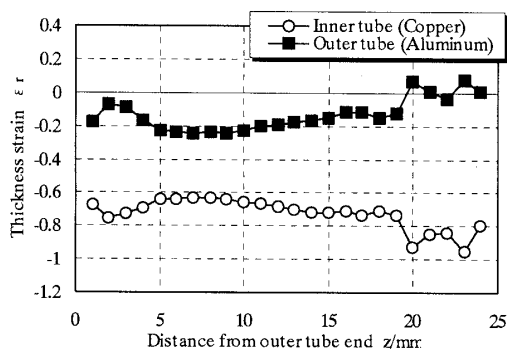
4・2・3 接合せん断強度 (τ_{bond}) 図7より接合箇所面積 A' を算出し、式(3)から接合せん断強度を求めた。図8にその結果を示すが、条件3、条件1、条件2の順に大きくなっている。併記した垂直強度については、条件1と2は下限値であり真の強度の大小はわからないが、条件3が最も弱いことは一致している。接合強度試験による分離はいずれもアルミニウム合金の破断によるものであるが、同種材の条件1に比べ銅と圧接した条件2のほうが界面での両材料のかみ込みが強く、それが接合強度の差として現れたと考えられる。一般にせん断抵抗は引張強さの0.5~0.8倍となる。しかし、この結果では τ_{bond} は σ_{bond} の0.5倍以下とかなり小さい。これは試験自身の影響、すなわち、試験荷重の作用線のずれから曲げモーメントが生じ、それにより管の端から徐々にはく離が起きるような変形が生じているためと推察される。

4・3 異種材の重ね圧接機構 上記の結果より本法では内管材と外管材の組合せにより接合強度が大きく変化する。その機構について以下に考察を行う。

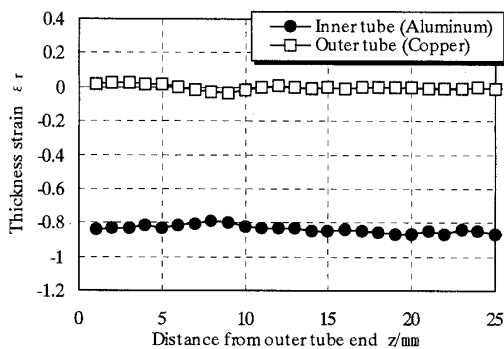
4・3・1 板厚ひずみ分布 接合体を軸方向に切り出し、接合部の内外管の板厚ひずみ分布を測定した。各条件での結果を図9に示す。これらの中で特に顕著な特徴として認められるのは、 \square 、 \blacksquare マークで表示した外管の板厚ひずみ分布である。条件1および条件2では外管に接合開始位置から5~20 mmの位置で0.2程度の圧縮板厚ひずみが生じており、これは図7にお



(a) Combination 1



(b) Combination 2



(c) Combination 3

Fig. 9 Longitudinal distribution of thickness strain

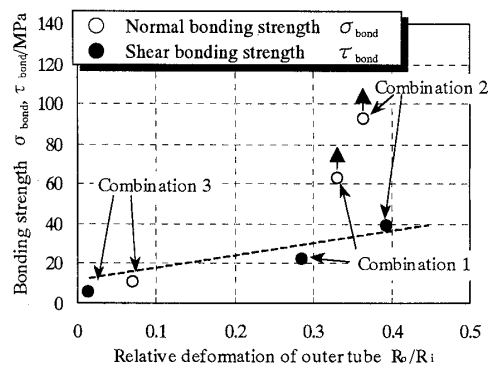


Fig. 10 Relation between relative deformation of outer tube and bonding strength

ける真実接合領域と一致する。また、接合がほとんどなされていない条件3では外管の板厚ひずみもほとんど生じていない。このように、外管側の変形量が接合強度に関連していると考えられる。すなわち、外管に大きな圧縮ひずみがかかった部分で強く接合し、逆に外管がほとんど変形しない部分では接合していないと考えられる。そこで、外管の変形尺度として外管の壁厚減少率 (R_o) と内管の壁厚減少率 (R_i) の比 (R_o/R_i) を横軸にとって接合強度と比較してみた。結果を図10に示す。接合垂直強さについては最大強さが得られた位置での減少率、接合せん断強さについては接合域での平均の減少率をとっている。圧接のためには金属表面の酸化膜の破断と新生面の出現が必要であり、理想的には内管と外管の界面が均等に变形することが望ましい。しかし、このグラフからわかるように、本加工法では内管側が変形しやすい。このため変形しにくい外管側の変形が大きいほど新生面の接触が増え、それに比例して接合強度が向上したと考えられる。一方で、内管と外管の組合せを考えることで接合強度が大きく変化している。これは本加工法による異種材圧接における特徴の一つであり、圧接機構に対する新たな視点を与えるものである。

4.3.2 圧接段階での変形状態 従来の圧接法では、圧接対偶全体に変形が加わるため、材料の重ね方によらず相対的に弱い材料が変形する。これに対し本加工法では、逐次圧下を累積させて大きな壁厚減少を得ている。ローラ直下の材料は軸方向へ流動しようとするが、周囲の材料による拘束が抵抗となり非常に高い面圧が作用する。このため、板厚方向への塑性域の広がりが大きく、接合界面まで十分な塑性変形を与えることが可能となり圧接が達せられる。また、板厚方向への変形の伝ばを考えると、逐次加工である本加工法ではローラの接する内管側の変形が大きくなる。外管側の変形は異種材の場合、介在する内管材質により左右され、それは内管側の変形域の広がりと両材料の強度比との兼ね合いで変化する。そのようすを図11に模式的に示す。

アルミニウム合金同士の条件1では、内管と外管の塑性域は連続している。また、逐次圧下量 δ は一定なので、ローラ前端に向かうほど塑性域の外管側への広がりが減少していく。内管に銅を用いた条件2では銅の方が降伏応力が大きいため、加工を進めるには条件1よりも大きな加工力が必要となる。このため、外管に伝わる力も大きくなり、外管の塑性域は条件1よりも大きくなる。一方、条件3では、内管はアルミニウム合金なので条件1とほぼ同じ加工力で加工が進み、

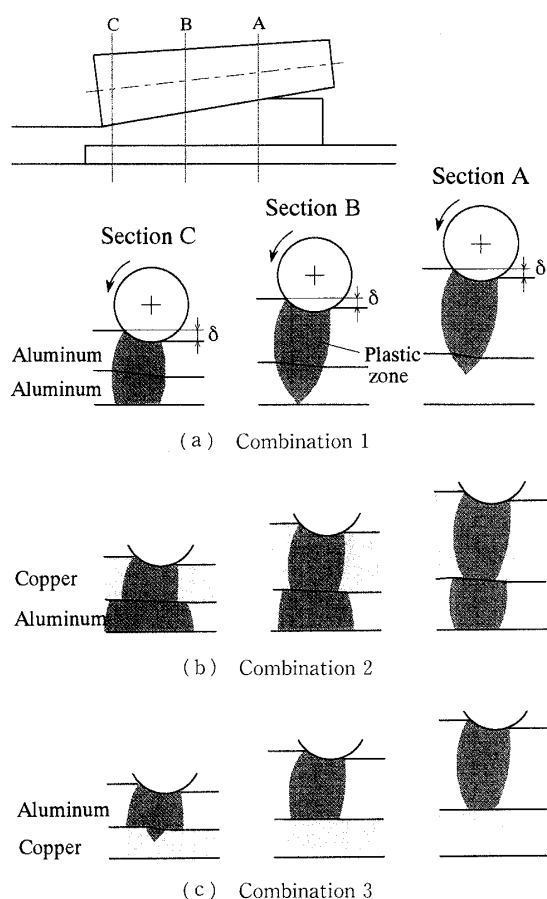


Fig. 11 Plastic zone in circumferential section

外管に伝わる力も条件1とほぼ同じである。しかし、外管の銅はアルミニウム合金より硬質のため条件1ほど外管は変形しない。このため外管の変形は、条件2、条件1、条件3の順に大きくなると考えられ、図10のプロット順と一致する。

このように本加工法では、管内表面側の変形が大きいという特徴を生かし内管側に高強度材を配することで、他の圧接法よりも効果的に異種材の圧接が達成できると考えられる。

5. 結 言

PCR 加工による異種材質円管(アルミニウム合金と純銅)の半径方向重ね圧接を試み、以下の結論を得た。

(1) 接合強度試験によるはく離面はいずれも銅にアルミニウム合金が付着しており、相対的に弱いアルミニウム合金の強度により接合強度が決定づけられる。

(2) 接合垂直強度分布は外管側の板厚ひずみ分布と相関があり、外管側に0.2程度の圧縮ひずみが生じている箇所では接合が達せられている。

(3) 逐次加工のため内管側の変形が大きくなるという本加工法特有の性質を利用することで、内管材と

外管材の組合せによって接合強度を大きく変化させることが可能である。

文 献

(1) 森敏彦・斉藤雄二, プラネタリ・コニカル・ローリング(PCR)の加工機構, 機論, **61**-589, C(1995), 3734-3741.

(2) 森敏彦・斉藤雄二・中島邦彦, PCR 加工における拡管の影響, 機論, **62**-601, C(1996), 3676-3683.
(3) 森敏彦・中島邦彦, PCR 加工におけるねじ山形成, 機論, **63**-612, C(1997), 2892-2898.
(4) 森敏彦, PCR 加工による円管の重ね圧接, 機論, **64**-625, C(1998), 3630-3636.