純 Ti/純 Al 摩擦圧接継手境界部の応力・ひずみ、音速 および硬さ分布に関する検討*

富士 明良**, 粉川 博之***, 金 裕哲****

A Study of Stress-strain, Acoustic Wavevelocity and Hardness Distributions Across Joint Interface of Pure Ti/Pure Al Friction Weld Joint*

by Akiyoshi FUJI**, Hiroyuki KOKAWA*** and You-Chul KIM****

In order to clarify the stress/strain distribution across the joint interface of friction weld between pure titanium (Ti)/pure aluminium (Al), the characteristics of the joint interface have been investigated in view of ultrasonic leaky surface acoustic (Rayleigh) wave velocity (V_R) and hardness distributions across it. Especially, one of the first efforts is focused on whether a mechanical scanning acoustic microscope (SAM) can be utilized to measure the V_R distribution across the interface or not. The effect of tensile/compressive strains on V_R of Ti and Al substrates, the relation of crystal direction versus V_R for single crystal pure Al substrate, and V_R distribution across as-welded and post-weld heat-treated Ti/Al friction joints have been investigated by using a SAM.

As for Ti and Al substrates, all direction (isotropic) V_R (AV_R) decreased when the applied tensile strain increased in elastic deformation region, however, they increased as increasing applied strain in plastic one. Compressive strain slightly affected the change of AV_R versus in both elastic and plastic deformation regions. Uni direction (anisotropic) V_R (UV_R) increased as increasing tensile and compressive strains for Ti substrate. While UV_R of Al substrate decreased with increasing of tensile strain, it increased for compressive strain. There was clear relation between UV_R and crystal direction of single crystal pure Al substrate, and the highest UV_R was obtained at the direction parallel to the most close-packed crystal direction of fcc metal ([101]).

In case of as-welded Ti/Al friction joint, the scatter of AV_R distribution was relatively high overall the measured region, and AV_R of Al substrates adjacent to the joint interface was relatively high. It was thought that this high AV_R was resulted from high plastic strain generated during friction weld operation. The scatter of AV_R distribution was reduced and the high AV_R was not observed when the joint was post-weld heat-treated. While axial direction UV_R of Al substrate adjacent to the joint interface was extremely high in as-welded condition, that of radial direction was not high. Those of Ti side were not high in as-welded joint. The V_R distributions were relatively similar characteristics to hardness and calculated stress/strain distributions.

Key Words: friction welding, aluminium, titanium, stress, strain, Rayleigh wave, scanning acoustic microscope, acoustic wave velocity, sound velocity

1. 緒 言

異種材料の接合継手（異材継手）は、各種産業機器の部材に数多く用いられており、現代工業において必要不可欠なものとなっている。著者らは過去溶融溶接法では異種金属材料との接合が困難であるチタニウム (Ti) 系材料に着目し、固相接合法である摩擦圧接法を用いて SUS304L ステンレス鋼あるいはアルミニウム (Al) 合金との接合を行い、継手の評価を行ってきた¹⁻⁵⁾。さらに、異材継手の機械

的特性を左右する重要な因子の一つである接合部近傍に生じる応力・塑性ひずみに関連した報告を行っている^{6,7)}。この応力・ひずみの非破壊的な評価法として X 線応力測定法があるが、接合界面をはさむ微小な領域の測定を行なうことは実用上困難となっている。ところで、溶接継手の主要な非破壊検査法の一つに超音波を用いた検査法があるが、この中で超音波顕微鏡 (acoustic microscope) を用いる方法はここ 10 数年着目されている技術である。すなわち、音波は伝播する媒質の硬さおよび密度等の物性値並びに応力・ひずみ状態によって伝播速度が変化する特性を有しているため⁸⁾、超音波の表面弾性波を測定することにより接合境界部における応力・ひずみを推定できる可能性を有する。とくに、10 μm 程度の高分解能で材料表面下の観察が可能である機械走査型超音波顕微鏡 (scanning acoustic microscope; 以下, SAM という) が注目されている⁹⁻¹¹⁾。SAM は弾性率の分析モードを備えており、受信信号電圧

*原稿受付 平成11年11月15日 平成9年度秋季全国大会で発表

**正 員 北見工業大学 Member, Kitami Institute of Technology

***正 員 東北大学 Member, Tohoku University

****正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

曲線 (V(z) 曲線) 法を用いることにより、試料表層を伝播する弾性表面波の伝播速度 (以下、音速という) を測定できる。現在まで、SAM を用いた材料の加工変質層の厚さ測定^{12,13)}、材料中の応力・ひずみの推定や塑性変形域検出¹⁴⁻¹⁶⁾、材料の弾性定数の測定¹⁷⁾、材料劣化の評価¹⁸⁾、Al 合金の溶接凝固組織の検討¹⁹⁾、高分子材料の材料評価や欠陥の検出²⁰⁻²³⁾、超音波の伝ば特性に及ぼす周波数の依存性の検討²⁴⁾ 等が行われている。ところで、異材継手の強度に大きな影響を与える境界部に生じる残留応力・ひずみを SAM により求めた音速分布から解析や推定を行った研究は少なく、金属/セラミックスの接合界面におけるセラミックス側の音速分布から推定した残留応力などについては報告されているものの^{25,26)}、異種金属境界部の応力・ひずみに関する報告はほとんど見当たらない。

本研究では、異種金属として Ti と Al を取り上げ、摩擦継手の圧接面を横切る数 mm の微小領域における全方位および方向性を有する音速分布を SAM を用いて測定し、音速の変化から応力・ひずみの推定が可能かどうか明らかにすることを目的としている。本報告では、その基礎データとして、Ti および Al 母材の引張および圧縮ひずみと音速との関係、並びに Al 単結晶の結晶方位と音速の関係を求めた。また、接合したまま並びに後熱処理を施した Ti/Al 摩擦圧接継手の圧接面をはさむ微小領域の音速と硬さを測定し、有限要素法による熱弾塑性解析で求めた残留応力・ひずみとの関係について比較検討を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材料および音速測定用試験片

本研究で使用した材料は、外径16 mm の市販の工業用純 Ti (JIS TB-35H) および工業用純 Al (JIS A1100) である。純 Ti の0.2%耐力は360 MPa、引張強さは460 MPa、伸びは31%、純 Al のそれらは44 MPa、86 MPa、47%である。

Al および Ti 母材の音速測定用試験片は以下の方法で作製した。引張試験片は、Fig. 1 (a) に示すように平行部の幅 5 mm、厚さ 2 mm、長さ約 25 mm に加工し、観察面をエメリー紙による #1500 まで研磨を行った後、ダイヤモンドペーストを用いてバフ研磨を行った。圧縮試験片は Fig. 1 (b) に示すように直径 12 mm、長さ 72 mm の円柱状であり、音速測定部として幅約 7 mm × 長さ約 32 mm の平面をフライス盤を用いて加工した。その後、引張試験片と同様に観察面の研磨を行った。材料の製造時、並びに試験片加工時に生じる応力・ひずみを除去するため、Ti は 873 K-3.6 ks、Al は 623 K-3.6 ks の熱処理を真空炉中で施し、ひずみを極力除去した状態で実験に供した。引張試験片は反対の平面に、圧縮試験片は反対の曲面にひずみゲージを貼り付けて負荷ひずみを求めた。両母材とも、引張および圧縮ひずみ

Fig. 1 Dimension and configuration of tensile and compressive test specimens for AV_R and UV_R measurement of (a) tensile and (b) compressive tests.

Fig. 2 Crystal direction of single crystal pure Al.

は 5 % まで負荷し、音速を測定した。

結晶方位と音速の関係を求めるために使用した Al 単結晶は、ブリッジマン法による結晶成長装置を用い、99.996 mass% の Al 素材を Ar 雰囲気中で凝固成長させて作製した。試料サイズは長さ 15 mm、幅 10 mm、厚さ 5 mm である。凝固後、試験片表面をエメリー紙とバフ研磨後、20% 過塩素酸 + 80% エチリアルコール溶液中で電圧 60 V で電解研磨を行った。試料の結晶方位を Fig. 2 に示す。

2.2 Ti/Al 摩擦圧接継手の作製方法

Alの変形がTiに比較して大きいので、Tiについては旋盤を用いて接合部の外径を12 mm, Alについては16 mmのままとして、接合端面をバフ研磨して仕上げた。材料の製造過程、並びに旋盤加工に起因した応力・ひずみの存在が考えられたため、接合に先立ちTiは873 K-3.6 k, Alは623 K-3.6 ksの熱処理を真空炉中で施した状態で接合を行った。接合にはプレーキ式摩擦圧接機を用いた。圧接条件は、過去の研究で接合後の継手引張試験において、Al母材で破断する(圧接面破断を生じない)継手を得ることができる回転数 25 s^{-1} 、摩擦圧力50 MPa、摩擦時間2 s、アプセット圧力50 MPa、アプセット時間6 sを用いた。継手境界部の音速および硬さ測定用試験片は以下の方法で作製した。旋盤を用いて継手を外径12 mmに旋削後、圧接面をはさんで全長20 mmに切断した。さらに中心軸を含む断面で切断し、観察面をダイヤモンドペーストを用いてバフ研磨した。接合したままの状態(AW)に加え、Alの再結晶温度に近い573 K-3.6 ks, Tiの再結晶温度およびAlの融点に近くかつAlの力学的強度が0に近いと考えられる873 K-3.6 ksの2種類の後熱処理を行った。以下、これらの継手をそれぞれ573 K継手、および873 K継手とよぶ。なお、試験片を軸方向に平行に切断することで、継手の周方向の残留応力と弾性ひずみは完全に、また半径方向および軸方向のそれらは一部開放されるものと推定される。しかし、各方向の塑性ひずみは残存するものと推定されるので、本研究ではこれらの状態において音速並びに硬さを測定し、応力・ひずみ分布の検討を行った。

2.3 音速測定方法

本研究では、日立建機株式会社製機械走査式反射型超音波顕微鏡 HSAM200を使用した。装置の構成をFig. 3に示す。使用した音響レンズの周波数は200 MHzであるが、TiおよびAlの音速は後述するようによろそ3000 m/sであるので、波長は約 $15\text{ }\mu\text{m}$ となる。また、深さ方向の分解能(深度分解能)を ΔL 、表面に沿う方向の分解能(方位分解能)を Δr とすると、それぞれ(1)および(2)式で求まる¹⁰⁾。

$$\Delta L = 2 \times \lambda \times F^2 \quad (1)$$

$$\Delta r = \lambda \times F \quad (2)$$

これより、 ΔL は $15\text{ }\mu\text{m}$ 、 Δr は約 $11\text{ }\mu\text{m}$ となり、いずれも波長に近い値となる。ところで、金属材料を加工した場合には通常数 μm の変質層(加工層)が生じるとされているが¹³⁾、本報告における試料表面は、最終的にはダイヤモンドペーストを用いてバフ研磨を行なっているので、音速測定への変質層の影響はほとんど無視できるものと考えられる。

測定位置は、Fig. 4に示すように軸心部、軸心部より3 mm外周部に向かった位置(1/2 R部)、および外表面から0.5 mm軸心に入った位置(外周部)の3カ所とした。この

Fig. 3 Schematic diagram of SAM used for experiment.

Fig. 4 Measured location for V_R and hardness test.

3カ所において、圧接面より両母材側にそれぞれ2 mm、つまり約4 mmの範囲を80分割し、音響レンズを振動させることで幅 $50\text{ }\mu\text{m}$ の範囲の平均の音速を求めた。データは示していないが、本研究におけるTiおよびAlの結晶粒は直径約 $15\text{ }\mu\text{m}$ 程度であるので、測定に当たっては複数個の結晶粒の音速が求められることになる。測定時、音響レンズと材料の間のカップラントには水を用いた。また、音速測定は室温293~303 Kで行い、測定後温度補正を行った。

SAMでは通常、点集束型レンズで超音波の弾性表面波の音速測定を行い、これが全方位音速(以下、 AV_R という)となる。しかし、点集束型レンズでは、音響レンズの形状が中心軸に対して回転対称であるので、360度の全方向に伝播する表面波の平均的な音速しか求められず、材料の音響異方性の計測はできない。しかし、音響レンズの表面にスリットを装着することにより、焦点面上に方向性を持った超音波ビームが形成され、単一方向に伝播する弾性表面波の測定が可能となる。さらに、このレンズを回転させることにより試料の音響異方性が求められると同時に、応力の方向性を推定できる可能性を有する。そこで本研究では、

Fig. 5 Dimension and configuration of slit to measure UV_R .

Fig. 5 に示すようなスリットを装着した音響レンズを用い、Ti および Al 母材に引張および圧縮応力を負荷し、方向性を有する音速 (UV_R) の変化を求めた。また、Ti/Al 継手については圧接面を横切る位置で UV_R を求め、応力・ひずみの方向性を解明した。なお、Fig. 5 に示すように、スリットの間隔は 0.15 mm、長さ 0.5 mm、半開口角は理論値と良く一致する 18 度とした²⁰⁾。

純 Al 単結晶試験片の結晶方位と音速の関係を求めるために、Fig. 2 に示した試料の中央部において試料を回転させて音速測定を行った。

ところで、同一材料であっても音速は種々の因子によって影響を受けるので、本研究では音速の絶対値ではなく、Ti および Al 母材原質部あるいは引張および圧縮試験については負荷ひずみ 0 % の音速 (VR_0) を基準とし、それらの値と各音速との差から変化の割合 VR_d を (3) 式によって求め、考察を行った。

$$VR_d = \{(\text{測定値} - VR_0) / VR_0\} \times 100 [\%] \quad (3)$$

2.4 Ti/Al 継手接合界面を横切る硬さの測定

硬さ測定にはピッカース微小硬さ計を用いた。測定位置は Fig. 4 に示す軸心部、1/2 R 部および外周部の 3 カ所とし、圧接面より両母材にそれぞれ 2 mm の位置までの範囲の測定を行った。測定荷重は Ti 側は 9.81 N (1 kgf)、Al 側は 0.49 N (50 gf) とした。

3. 実験結果

3.1 Ti および Al 母材の音速に及ぼす引張および圧縮ひずみの影響

Al 母材並びに Ti 母材に引張応力を負荷し、ひずみと全方位音速 (AV_R) との関係を求めた結果を Fig. 6 (a) に示す。ひずみ 0 % (無負荷) における Ti の AV_R は約 2970 m/s、Al のそれは約 3040 m/s であった。負荷ひずみが約 0.2 % に達するまで、すなわちほぼ弾性領域と考えられる範囲では、両材料の AV_R はひずみに比較して低下し、その値は最大約 -0.6 % (-18 m/s) になっている。その後約 2 % ひずみ

Fig. 6 Relation between applied strain and deviation of AV_R of Ti and Al substrates of (a) tensile and (b) compressive strain.

までは AV_R は増加に転じている。さらにひずみが増加すると、Ti の AV_R は約 0.6% (18 m/s) まで上昇しているが、一方、Al では急激に低下し、最小値は約 -1.8% (-55 m/s) になっている。圧縮の負荷ひずみと AV_R との関係を求めた結果を Fig. 6 (b) に示す。約 3% ひずみまでは、Ti の AV_R の変化は最大約 +0.6% (+18 m/s) であり、一方、Al のそれは約 +0.2~+0.3% (+6~+9 m/s) である。つまり、両材料ともひずみの増加に対する音速の大きな変化は認められない。Ti および Al とも、負荷ひずみが約 3% を超えると AV_R の変化は大きくなっている。ところで、多結晶金属材料の SAM による音速のばらつきは、とくに結晶系の複雑な Ti では ± 20 m/s (1.5%) 程度の音速のばらつき

があるとの一般的な意見もある。このことから、Fig. 6 (a) を始めたとした結果の測定精度が問題となるが、ひずみの増加に対する音速の変化の傾向は、ある程度信頼度の高いものと考えられる。

Ti 母材に引張応力を負荷し、スリットを有する音響レンズを用いて求めた負荷方向 (軸方向) に伝播する音速 (UV_{Ra}) 並びに負荷に垂直な方向の音速 (UV_{Rn}) を測定した結果を Fig. 7 (a) に示す。 AV_R と異なり、ひずみの増加とともに両方向の音速とも増加している。引張ひずみが約 0.1% まで増加すると UV_{Ra} は約 0.8% (24 m/s) 増加し、その後音速は低下して約 0.3~0.5% (9~15 m/s) 前後で推移している。一方、 UV_{Rn} はひずみ約 0.1% まで UV_{Ra} と

Fig. 7 Relation between applied strain and deviation of UV_R of Ti substrate of (a) tensile and (b) compressive strain.

Fig. 8 Relation between applied strain and deviation of UV_R of Al substrate of (a) tensile and (b) compressive strain.

ほぼ同じ変化を示している。ひずみが約 1% まではほぼ一定値を示すが (約 0.8%), 約 1% 以上で音速は急激に増加し、その値は約 2% (+60 m/s) 近くまで上昇している。圧縮応力を負荷したときの結果を Fig. 7 (b) に示すが、実験の範囲において UV_{Ra} よりも UV_{Rn} の方がおよそ約 0.5~4% (15~20 m/s) 大きい。約 2% ひずみまではひずみの増加とともに両音速は増加し、 UV_{Ra} は約 +1.5% (+45 m/s)、 UV_{Rn} は約 +3.2% (+95 m/s) になっている。ひずみが 2% 以上になると、 UV_{Ra} の増加は少ないものの、 UV_{Rn} は急激に増加し最大約 +7% (+210 m/s) に達している。

Al 母材に引張応力を負荷し、 UV_{Ra} と UV_{Rn} を測定した結果を Fig. 8 (a) に示す。引張の場合、ひずみが約 1% まではひずみの増加に比例して両音速ともほぼ同じ値で低下し、約 1% ひずみで約 0.8~1% (24~30 m/s) の低下となっている。その後 UV_{Ra} はさらに低下し、ひずみが約 4% を超えると急激に増加している。 UV_{Rn} はひずみが 2% を超えると急激に増加し、約 3% 以上で 0% ひずみ時の音速を超えている。一方、圧縮応力を負荷したときの結果を Fig. 8 (b) に示す。圧縮の場合、ひずみの増加とともに音速は増加しているが、Ti と同様 UV_{Rn} の方が UV_{Ra} に比較して増加は大きい。約 0.1% ひずみまでは UV_{Ra} および UV_{Rn} とも増加は少ないが、その後両音速は急激に増加し、5% ひずみにおいて UV_{Ra} は約 5.4% (165 m/s)、 UV_{Rn} は約 7.7% (230 m/s) 増加している。

3.2 Al 単結晶の音速測定結果

単結晶 Al を用いて UV_R を測定した結果を Fig. 9 に示す。図は横軸に試験片角度を示し、図中に結晶方位を既述している。縦軸には測定した音速 UV_R から AV_R (3040 m/s)

Fig. 9 Result of crystal direction versus UV_R of single crystal pure Al.

s) を引いた値を AV_R で除し、その値を百分率で表示している。音速は最も低い [011] 方向の約 2990 m/s (-1.6%) から、最も高い [101] に近い方向の約 3060 m/s (+0.7%) まで変化している。つまり、fcc 構造の最密方向である [101] に平行に近い位置の音速が一番大きく、それに直角方向の音速は低いことが分かる。

3.3 Ti/Al 摩擦圧接継手圧接面を横切る音速分布

AW 継手の軸心、1/2 R 部および外周部において、圧接面をはさむ 4 mm の範囲の AV_R の変化を Fig. 10 (a) に示す。両母材とも音速分布は比較的バラツキが大きい。圧接面に隣接する Al 側で音速は軸心部で最高約 20% (600 m/s) 上昇しているが、これを除くと Ti および Al 側とも -3~+4% (-90~+120 m/s) の範囲で変動している。また、Ti 側では、外周部の AV_R が 1/2 R 部および軸心部に比較して若干高い値を示しているが、圧接面に隣接する位置の AV_R の上昇はほとんど見られない。573 K および 873 K 継手のそれらを Fig. 10 (b) および (c) にそれぞれ示す。573 K 継手においては、Ti および Al 母材とも AW 継手に比較して音速のバラツキは減少し、圧接面に隣接する Al 側の音速の増加もほとんど認められない。873 K 継手においては、両母材ともに音速のバラツキはさらに小さいなり、位置による大きな差異も認められない。また、圧接面に隣接する位置においても音速の急激な上昇は見られない。

AW 継手の軸心部、1/2 R および外周部において、軸方向に伝播する音速 (UV_{Ra}) の測定結果を Fig. 11 (a) に示す。Ti 側では音速分布は比較的バラツキがあるものの、圧接面近傍における急激な変化は認められない。一方、Al 側の UV_{Ra} のバラツキは比較的小さい。しかし、半径方向各位置において母材原質部から圧接面に向かうにつれて UV_{Ra} は低下しており、圧接面から 0.25 mm の位置で約 -3~-5% (-90~-150 m/s) になっている。しかし、圧接面にさらに近づいた位置では UV_{Ra} は急激に増加し、その値は約 +9~+22% (-280~-670 m/s) に達している。

AW 継手の各位置の半径方向に伝播する音速 (UV_{Rr}) を Fig. 11 (b) に示す。両母材とも音速のバラツキは比較的大きいものの、圧接面近傍における急激な音速の増加は認められない。Ti 側の UV_{Rr} は原質部より高く、約 0~+5% (0~+150 m/s) の範囲で変化している。一方、Al 側の UV_{Rr} はどの位置においても母材原質部より低い値を示し、圧接面に向かうにつれて UV_{Rr} は若干低下している。

3.4 Ti/Al 摩擦圧接継手境界を横切る硬さ分布

AW 継手の軸心、1/2 R 部および外周部において、圧接面をはさむ 4 mm の範囲の硬さ分布を Fig. 12 (a) に示し、573 K および 873 K 継手のそれらを Fig. 12 (b) および (c) にそれぞれ示す。Ti 原質部の硬さは HV 約 150、Al のそれは HV 約 35 であった。AW 継手において、圧接面から 1 mm 離れた Ti 側の硬さは、原質部のそれより高い HV 約 155~190

Fig. 10 AV_R distributions across interface of Ti/Al friction joint of (a) as welded, (b) 573 K-3.6 ks and (c) 873 K-3.6 ks heat-treated joints.

Fig. 11 UV_R distributions across interface of as-welded Ti/Al joint of (a) axial and (b) radial direction.

Fig. 12 Hardness distributions across Ti/Al joint interface of (a) as welded, (b) 573 K-3.6 ks and (c) 873 K-3.6 ks heat-treated joints.

を示している。一方、圧接面に隣接する Al 側でも HV 約30 高い HV70 前後まで上昇している。573 K 継手の Ti 側の硬さは母材原質部に近く、Al 側では圧接面から0.15 mm までの範囲で HV 約10~15の上昇が認められるものの、その値は AW 継手の硬さの上昇よりも小さい。873 K 継手の圧接面では Ti および Al 母材とも硬さのバラツキは小さくなっている。しかし、圧接面に隣接する Al 側約0.2 mm の範囲の硬さは HV20 程度の上昇が認められる。

4. 考 察

4.1 Ti, Al 母材並びに Al 単結晶の音速

横波および表面波の理論音速は、それぞれ(4)および(5)式

で求まる^{26,27)}。

$$\text{横波の音速} = \{E/[\rho \times 2 \times (1 + \nu)]\}^{1/2} \quad (4)$$

$$\text{表面波の音速} = 0.9 \times \text{横波の音速} \quad (5)$$

ここに、E：縦弾性係数、 ρ ：密度、 ν ：ポアソン比である。今、Ti の E：106 GPa、 ρ ： $4.51 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 ν ：0.34²⁹⁾、Al のそれらを 70 GPa、 $2.70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、0.33 とすると³⁰⁾、Ti の横波は約2990 m/s、表面波は約2690 m/s、Al はそれぞれ約3150 m/s および約2840 m/s となる。本実験では負荷ひずみ 0 % の時の音速、つまり母材の音速は Ti が2970 m/s、Al が3040 m/s であり、いずれも横波に近い音速が得られている。

材料に応力（ひずみ）が負荷された場合の音速の変化については詳細な報告はなされていないものの、一般に引張応力/ひずみが増加するにつれて音速は低下するといわれ

ている²⁵⁾。とくに、音響学的に均質等方である高分子材料のポリメチルメタアクリレート (PMMA) においては、引張応力が存在する領域では応力の増加に伴い音速は低下し、圧縮応力が存在する領域では音速が上昇すると報告されている¹⁵⁾。また、Fe-3%Siを用いた音速測定では、引張りひずみが負荷された場合、音速が低下した例が示されている³¹⁾。音速の変化には、材料の弾性率や組織の変化等いくつかの因子が影響を及ぼすが、本実験の範囲では、ひずみの増加に伴う音速の変化を、弾性域と思われる負荷ひずみ約0.2%までの範囲で比較すると、 AV_R の場合、音速はAl母材の引張においては低下し、圧縮においては変化は少なかった。また、Al母材と同様に、Ti母材の引張においても AV_R は低下し、圧縮においては変化は少なかった。 UV_R は、Al母材の引張においては低下し、圧縮においては上昇したが、一方、Ti母材の引張および圧縮においては上昇した。また、 UV_{Ra} と UV_{Rn} の差は、Tiの方がAlに比較して大きかった。つまり、Alは圧縮応力を負荷した AV_R を除いては、負荷ひずみと音速との間に一部相関がみられた。しかし、Tiは引張応力を負荷した AV_R についてのみ良い相関が見られ、弾性領域における AV_R の変化はAlよりも大きかった。とくに圧縮応力を負荷した場合、Alと異なる傾向を示している。 UV_{Ra} と UV_{Rn} の差が両材料で異なる理由は、Tiの音響異方性がAlに比較して大きいことに起因し、これは結晶構造に原因しているものと推定される。すなわち、方向性を有する音速の場合には、両材料で結果が異なっており、今後各種材料におけるデータ収集が必要になるものと思われる。

ところで、SAMを用いて音速を求める場合、測定値は材料の音響インピーダンス(Z_A)に依存し、また Z_A は[音速×密度]で求められる¹¹⁾。TiおよびAl、比較材として鋼、本実験でカップラントとして使用した水の Z_A を求めると、Ti: 13.4×10^6 , Al: 8.2×10^6 , 鋼: 39.5×10^6 , 水: 1.5×10^6 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]となる。つまり、鋼の Z_A はTiおよびAlに比較してかなり大きく、さらに水と鋼の間では大きな差がある。つまり、音響レンズから出る超音波のうち、表面波として材料中に入る割合が少なくなり、鋼と水のような組合せにおいては比較的測定が難しくなるものと考えられる¹¹⁾。とくに、ステンレス鋼は、内部微視組織による散乱が大きいため、音速測定は難しいとされている。過去の研究では、部分安定化 ZrO_2 セラミックス (PSZ) とNiとの接合界面の音速が測定されているが²⁵⁾、この場合、PSZの Z_A は約 19.5×10^6 , Niのそれは 26.3×10^6 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]となり、両材料の Z_A の差は比較的小さい。

純Alの結晶方位と音速については、fccの最密方向に近い方向で最も高い音速が得られた。一般的には結晶方位と音速との間には方向によってピーク値が認められるともいわれている。しかし、音速は種々の因子によって影響を受けるため、数100 μm 程度のAl, Ni, Cuの音速の理論値を弾性定数から解き、測定結果と併せて結晶方位と音速の関

係を定めた報告はあるものの³²⁾、本研究で用いたような比較的大きい単結晶の音速を測定した例は少ない。本研究の範囲では、結晶方位の変化による音速の変化は最大約2.3% (70 m/s)程度あったが、実際の材料はほとんどが多結晶体であるので、方向性の影響は小さくなるものと推定される。

4.2 Ti/Al継手の音速と硬さ分布

軸心部、1/2 R部および外周部の各位置の圧接面に隣接する位置において、Al側の方がTi側より音速の変化は大きいことから、Al側には大きな塑性ひずみが生じているこ

Fig. 13 Distributions of calculated axial direction residual stress and plastic strain at distance of 0.6 and 6.495 mm from axial center line of as welded pure Ti/pure Al joint of (a) residual stress and (b) plastic strain³⁰⁾.

とが推定される。異材継手の強度には接合界面に垂直な方向の残留応力・ひずみが大きな影響を及ぼすので、以下この方向について考察を行なう。Fig. 13 (a)は、有限要素法を用いて熱弾塑性解析を行ない、Ti/Al 摩擦圧接 AW 継手の圧接面を横切る位置での軸方向の残留応力を著者らが求めた結果の一部である³³⁾。Fig. 13 (b)は同じく塑性ひずみを計算した結果の一部である。2.2で述べたように本研究で用いた試料では、残留応力については計算値よりも低い値になるものと考えられるが、軸心部においては圧接面をはさんで Ti 側および Al 側とも引張応力になっている。外周部では圧接面をはさんで高い引張応力になり、Al 側では圧接面から約 0.2 mm 離れたところから圧縮に、Ti 側は引張応力になっている。一方軸心部の塑性ひずみは、圧接面に隣接する Al 側で約 0.7% の圧縮の塑性ひずみが生じており、0.7 mm 離れるとほとんど 0 になっている。Ti 側の塑性ひずみはほとんどない。外周部では両材料とも圧接面をはさんだ約 0.15 mm の範囲において約 1.5% の高い引張の塑性ひずみが生じている。しかし、Al 側のひずみは急激に低下し、約 0.1 mm の位置で圧縮ひずみになっている。つまり、外周部および軸心部とも、圧接面に隣接する Al 側のこれらの大きい塑性ひずみが音速を大きく増加させ、母材原質部よりも硬さが上昇した原因になったものと推定される。ところで、筆者らは Ti/Ti 摩擦圧接継手境界部を横切る音速、硬さ、ひずみ分布について検討を行い、すでに報告している³⁴⁾。この中で、同様材の圧接継手においては、圧接面近傍に塑性ひずみはほとんど発生しないので、音速および硬さの上昇が小さいことを明らかにした。このことを考え合わせると、異種材料の摩擦圧接継手の圧接面近傍では、上述したように大きな塑性ひずみが発生していることが裏付けられる。

573 K 継手においては音速の変動が少なく、また圧接面に隣接する両母材の音速の急激な変化も認められない。これは、Al の再結晶温度に近い 573 K で熱処理を施したため、主として Al 側のひずみの一部が解放され、それにつれて Ti 側のひずみも若干解放されたためと考えられる。その結果、圧接面の硬さは HV180 程度であり上昇はほとんどない。

873 K 継手においては音速のバラツキがさらに小さくなっている。これは Ti の再結晶温度に近い 873 K で熱処理を施したため、ひずみが大きく解放されたためと考えられる。軸心部の圧接面から 0.05 mm 離れた Ti 側の音速は約 4% (120 m/s) 低下している。圧接面から 0.05 mm 離れた Al 側においては軸心部、1/2 R および外周部で音速が約 6~12% (180 m/s~370 m/s) 高い値が得られている。これは Al の融点に近い温度で熱処理を施したため、生じていた塑性ひずみはほぼ解放されたものの、その後の冷却時に両材料の線膨張係数と弾性率の差に起因して応力・ひずみが再び生じたためと思われる。また、圧接面における硬さは再び HV200 付近まで上昇していることもこれに起因し

ているものと考えられる。

本実験では、音速、硬さとひずみの間には、一部にある程度の相関が認められた。しかし、SAM による音速の測定には、試料表面の粗さの増加とともに音速が低下するが、ダイヤモンドペーストを用いたバフ研磨を行うことで測定の高い再現性を示すと言われている¹⁷⁾。つまり、試料表面の性状が音速測定に影響を及ぼすことから、異材継手の境界部の音速と応力・ひずみとの関係を定量的に求めることは、まだまだ難しい課題があるものと考えられる。過去の音速の理論計算と実験に関する研究においても、表面処理方法、つまり表面性状の既述が少ない場合が多い。最近、SAM による表面波の高精密測定法が提案されており³⁵⁾、今後、表面状態より高い精度での測定が必要であるものと思われる。

5. 結 言

本研究では、純 Ti/純 Al 異種材料摩擦圧接継手境界部の応力・ひずみを、超音波顕微鏡で測定した表面波音速から推定するための基礎的検討を行った。その中で、工業用純チタン (Ti) と純アルミニウム (Al) の音速に及ぼす引張および圧縮応力 (ひずみ) の影響を求め、さらに純 Al 単結晶の結晶方位と音速との関係を求めた。さらに、接合したまま (AW)、573 K-3.6 ks および 873 K-3.6 ks の後熱処理を施した Ti/Al 摩擦圧接継手境界部の音速分布並びに硬さ測定を行い、残留応力・ひずみとの関係について考察を行った。以下に得られた知見を要約する。

(1) 弾性領域では Ti および Al 母材とも、引張負荷ひずみの増加とともに音速は比較的良い相関を有しながら低下したが、圧縮負荷ではひずみ量約 3% まで音速変化はほとんど現れなかった。Ti 母材では、引張および圧縮方向およびこれに垂直な方向の音速は、ひずみの増加によっていずれも上昇した。一方、Al 母材では引張方向および垂直方向ともひずみの増加とともに音速は低下し、圧縮の場合はいずれの方向も上昇した。

(2) 純 Al 単結晶の音速は、[011]に近い方向で最も遅く、fcc 構造の最密方向の [101]に近い方向が最も速かった。

(3) AW 継手の全方位の音速分布は比較的バラツキが多く認められた。圧接面に隣接する Al 側で約 10% の音速の上昇が見られたものの、Ti 側では上昇はほとんど認められなかった。継手に後熱処理を施すことにより、音速分布のバラツキは低下し、圧接面に隣接する位置での音速の上昇は現れなかった。

(4) AW 継手の軸方向及び半径方向に伝わる音速分布は比較的バラツキが多かった。さらに、圧接面に隣接する Al 側において軸方向の音速は約 20% 上昇したが、これは接合時に発生した塑性ひずみに起因しているものと考えられた。

(5) AW 継手の圧接面に隣接する領域では Ti および

Al母材とも、接合時の塑性ひずみに起因して硬さが上昇した。しかし、後熱処理によりこの硬さの上昇はほとんどなくなった。

謝 辞

本研究の一部は、文部省の科学研究費補助金(C08650083)の交付を受けて実施されたものである。研究に対しましては、北見工業大学機械システム工学教授小林道明博士、並びに東北大学大学院工学研究科材料プロセス工学専攻助教授三原毅博士に有益なご助言を頂きました。また、実験遂行におきましては、北見工業大学機械システム工学科技官遠国秀昭、大森誠一、阿部清、山田忠永の各氏にご尽力を頂きました。各位にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) A. Fuji, T.H. North and K. Ameyama: Improving tensile strength and bend ductility of titanium/AISI 304L stainless steel friction welds, 8-3 (1992), 219-235.
- 2) 富士, 飴山, 他: 工業用純Ti/純Alの摩擦圧接継手の特性におよぼす後熱処理の影響, 本誌論文集, 12-1 (1994), 101-107.
- 3) A. Fuji, T.H. North, M. Kimura and K. Ameyama: Effect of friction welding conditions of characteristics of pure titanium/A5083 aluminum alloy joint, Material Science Research International, 1-3 (1995), 188-197.
- 4) A. Fuji, K. Ameyama and T.H. North: Influence of silicon in aluminium on the mechanical properties of titanium/aluminium friction joint, J. of Materials Science, 30 (1995), 5185-5191.
- 5) A. Fuji, K. Ameyama and T.H. North: Improved mechanical properties in dissimilar Ti/AISI 304L joints, Journal of Materials Science, 31 (1996), 819-827.
- 6) Y.C. Kim, A. Fuji and T.H. North: Residual stress and plastic strain in AISI 304L stainless steel/titanium friction welds, Materials Science and Technology, 11-4 (1995), 383-388.
- 7) 金, 朴, 富士, 伊藤: Cu/Al摩擦圧接継手の残留応力・塑性ひずみ, 日本機械学会M&M'98材料力学部門講演会, 1998-11.
- 8) 戸田: 材料中の音速の測定, 本誌, 62-6 (1993), 21-26.
- 9) 仙波: 超音波顕微鏡の工業計測への応用, バウンダリー, 4月(1986), 17-20.
- 10) 石川: 超音波顕微鏡とその応用, 熱処理, 26-6(1986), 435-442.
- 11) 山中: 超音波顕微鏡とその材料評価への応用, 材料, 35-399 (1986), 1341-1351.
- 12) 石川: 超音波顕微鏡による加工変質層の厚さの計測, 精密工学会誌, 55-8 (1989), 16-19.
- 13) 石川, 神田, 他: 超音波顕微鏡によるセラミックス加工表面の評価, 非破壊検査, 昭和61年秋季大会論文 (1986), 630-631.
- 14) 木土, 瀬尾, 他: 超音波顕微鏡による弾性表面波速度測定結果に及ぼす残留応力及び表面粗さの影響, 日本機械学会講演論文集, 974-2 (1997), 137-138.
- 15) 島田, 渡辺, 小幡, 三原: LINE-FOCUS-BEAMを用いた超音波顕微鏡による応力測定 (均一応力場の場合), 非破壊検査, 36-8 (1987), 540-545.
- 16) 轟, 他: 超音波による塑性変形域の画像検出法の検討, 日本機械学会論文雄 (A編), 60-570 (1994), 204-210.
- 17) 三原, 佐藤, 他: 線収束型超音波顕微鏡によるジルコニア/ステンレス鋼系傾斜機能材料の弾性定数の測定, 日本金属学会誌, 59-3 (1995), 325-330.
- 18) 久保, 古村, 他: 超音波顕微鏡によるガスタービン動翼コーティング劣化の非破壊評価, 日本機械学会第73期全国大会講演論文集, 931-71 (1995), 334-335.
- 19) 加藤, 西尾, 山口, 他: SAM及びTEMによるアルミニウム合金の溶接金属中に形成される羽毛状晶の検討, 本誌論文集, 14-4 (1996), 698-702.
- 20) 石川: 超音波顕微鏡による材料評価, 金属, 67-10 (1997), 823-830.
- 21) 西村, 他: 高分子材料の微小領域の性能評価に関する研究(第1報), 日本機械学会論文集 (A編), 63-606 (1997), 135-139.
- 22) 同 (第2報), 63-611 (1997), 115-120.
- 23) 菅沼, 来川他: 超音波顕微鏡によるセラミックス中の圧子損傷の観察と評価, 愛知県工業技術センター報告, 29 (1993), 1-8.
- 24) 小林, 栗津, 他: 音弾性効果と組織音響効果の周波数依存性, 日本機械学会論文集 (A編), 65-636 (1999), 1747-1755.
- 25) 成田, 超音波顕微鏡による接合界面近傍の残留応力測定の可能性, 日本金属学会会報, 29-11 (1990), 918-923.
- 26) 石川, 成田, 他: 超音波顕微鏡によるセラミックス・金属接合部の評価 (未発表).
- 27) 実吉, 他・編集: 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, (1966), 1324-1329.
- 28) 中村, 吉久, 深井: わかる音響学, 日新出版, (1985).
- 29) 高橋編集: 非鉄金属材料選択のポイント, 日本規格協会(1992), 237.
- 30) 鈞軽金属協会: アルミニウムハンドブック(第5版)(1994), 25.
- 31) 石川, 神田, 片倉, 他: 超音波顕微鏡による結晶粒内の歪観察, 非破壊検査, Vol. 33, No. 9, P. 730-731.
- 32) M.G. Somekh, G.A.D. Briggs and C. Ilett: The effect of elastic anisotropy on contrast in the scanning acoustic microscope, Philosophical Magazine A, 49, 2 (1984), 179-204.
- 33) 金, 朴, 富士, 他: チタンとアルミニウムの摩擦圧接で生じる残留応力・塑性ひずみ, 高温学会誌, 21-5 (1995), 202-208.
- 34) 富士, 金, 他: 工業用純Ti摩擦圧接継手境界部の硬さ特性と超音波伝搬特性に関する研究, 高温学会誌, 1-6(1995), 320-326.
- 35) 岡出, 河合, 他: 超音波顕微鏡による表面波の高精度測定, 日本機械学会第73期全国大会講演論文集, 931-71(1995), 539-540.