

宝石及び貴金属素材のYAGレーザー加工技術の向上

—異種貴金属材料の接合技術の確立—

中山 信一・佐野 照雄・宮川 和博

Study on YAG Laser Machining of Gems and Noble Metals

—The establishment of the weld technology of the different kind Noble Metals—

Shin-ichi NAKAYAMA, Teruo SANO and Kazuhiro MIYAGAWA

要 約

YAGレーザー光の数々の特長を利用して、平成8年度から貴金属装身具製品に多く用いられている金、銀、プラチナ及び宝石等を対象に加工実験を行っている。今回は、レーザーによる適正な接合条件の把握を目的に金(Au750)、銀(Ag925)、プラチナ(Pt900)及びホワイトゴールド(Au750WG)素材を用いて、同種貴金属および素材色のコントラストが鮮明な異種貴金属素材を対象に接合実験を行った。レーザーの励起ランプ電圧は400V、パルス幅は冷却時間1000 μ s、照射時間2000 μ sのパルス制御のもとに、接合速度による溶接性について検討した。この結果、プラチナと金の接合では、50mm/minの接合速度を境に最大点応力は低下傾向にある。一方、金とホワイトゴールドでは、25mm/minを境に最大点応力が低下し、この傾向は接合速度が低速になるほど顕著である。また、接合部周辺の硬度分布は、プラチナと金の接合においては、接合部は母材硬度と比較して2～3倍硬度が上昇したが、金とホワイトゴールドでは、殆ど変化が認められない。さらに、接合部の蛍光X線分析装置による定性分析では、融点と比重の高いプラチナは溶融池の中心付近に集まり、低い銅は溶融池周辺とビード表面等比較的広い範囲に分散する。

1. 緒 言

本県の代表的地場産業製品である貴金属装身具は、比較的小物が多く、しかも複雑な形状で構成されているため、熟練者による多品種少量生産を余儀なくされている。

一方、機械設備は旧態依然としたものが多く、新規設備や高度技術の導入が遅れている。このため、製品を開発する上でも従来と同様な発想から抜けきれず、消費者ニーズを掴みきれずにいる傾向にあり、惹いては生産性の低下へと現れてきている。また、貴金属装身具製品は、金・銀・プラチナ等に素材が限られているため、自ずとデザインにも行き詰まり感が否めない。そこで、製品に何らかの加飾を施すデザイン展開が図られてはいるが、従来の手作業による部品接合や特殊工具による加飾加工では、微細形状のデザイン表現が困難な場合が多い。

本研究は、レーザーを用いて、金・銀・プラチナ等の貴金属素材を組み合わせた、微細な加工を施した商品開発を目的としている。現在、異種貴金属素材及び微細部分の接合には、熟練作業者が長時間をかけ手作業で行っているが、特に融点の極端に違う貴金属の接合は接合不良、ろう目およびフラックスによる汚れ等、多くの問題点を抱えている。

そこで、今年度はこの作業をレーザーに置き換え、従来の

ろう付けから溶接による接合を目的としている。

本研究では金、銀、プラチナ及びホワイトゴールド等の貴金属素材を用い、この中から同種の接合の他、素材色のコントラストの違いが鮮明な異種貴金属素材を対象に、微細部の適正な接合条件を確立し、YAGレーザーによる接合の高度化、信頼性の向上及び加工データベースを構築することを目的として検討した。

レーザーによる溶接(接合)加工では、金属材料の溶融が開始するまでに投入するレーザーエネルギーの大小が、加工品質や加工性能に大きく影響する。特に溶融池が小さいほど

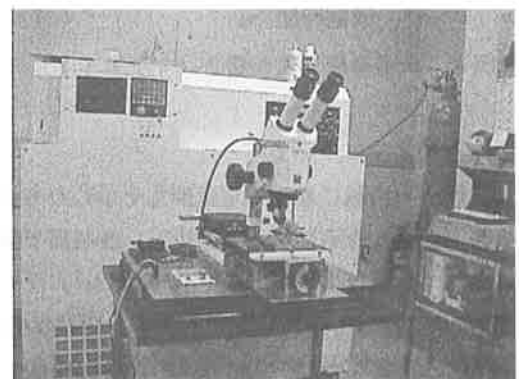


図1 レーザ加工装置

加工品質が良好となる微小スポット溶接や薄板の突き合わせ溶接ではできるだけ小さなエネルギーでの加工が好ましい。異種貴金属素材の接合においては、接合するそれぞれの貴金属の融点が大きく異なる場合が生じる。このため、YAGレーザー光を貴金属母材のどの部分に、どの方向から、どのくらいのエネルギーで照射し、接合速度はどの程度で移動すれば適正な接合が可能かに重点をおき検討した。

2. 実験装置および実験方法

2-1 YAGレーザー加工装置

図1は、実験に用いた溶接用パルスYAGレーザー装置で、その仕様は次のとおりである。

(1) 溶接用パルスYAGレーザー

溶接用パルスYAGレーザー (ModelQLSP-202APSL社製)

発振波長： 1064nm

発振横モード：マルチモード

平均出力：50Jmax以上 (10ms)

パルス幅：1回のスタート信号で1~10のパルス数を選択

OFF TIME：PULSE1~PULSE10で冷却時間の設定

繰り返し周波数：1~200PPS (電圧パルス幅)

分岐数：4分岐 (光ファイバー4分岐)

分岐バランス：±2%以下

光ファイバー：φ0.6SI型SUS管付き5m

ガイド光：HeNeレーザー2mW直線偏光

安定度：±3%

消費電力：220VAC±10%, 50/60Hz, 30A

2-2 レーザ制御と接合条件

YAGレーザー光を用いた異種貴金属素材の接合条件は、次の要因及び因子で行った。

(1) 被加工素材

金 (Au750,Ag50,Cu50), プラチナ (Pt900,Pd100), ホワイトゴールド (Au750,Pd170,Ag80), 銀 (Ag925,Cu75)

(2) 励起ランプ電圧

350~450V

(3) パルス幅

照射時間 (Ton) ; 2000 μ s

冷却時間 (Toff) ; 1000 μ s

(4) ENG ; UPPER, LOWERエネルギーモニターで確認

2-3 接合方法

レーザー光及びヘリウムネオンのガイド光は、固定集光光学系から90度折り返しミラー、ファイバーオプティックカプラ、光ファイバ光学系、出射レンズユニット (焦点距離

60mm) へと導き、ガイド光を顕微鏡で観察しながら加工位置を設定した。

一般的に、YAGレーザーによる溶接を宝飾品に応用する場合の溶接法は、図2のとおり突き合わせ溶接、重ね溶接、スミ肉溶接、へり溶接の4種類に分類される。

この中で、コンビの宝飾品を製作する場合、前加工が容易な突き合わせ溶接による方法が一般的に採られる。本研究では、主にこの突き合わせ溶接法を用いて実験を行った。しかし、特にこの突き合わせ溶接法は、開先精度が溶接性能に大きな影響を及ぼす。

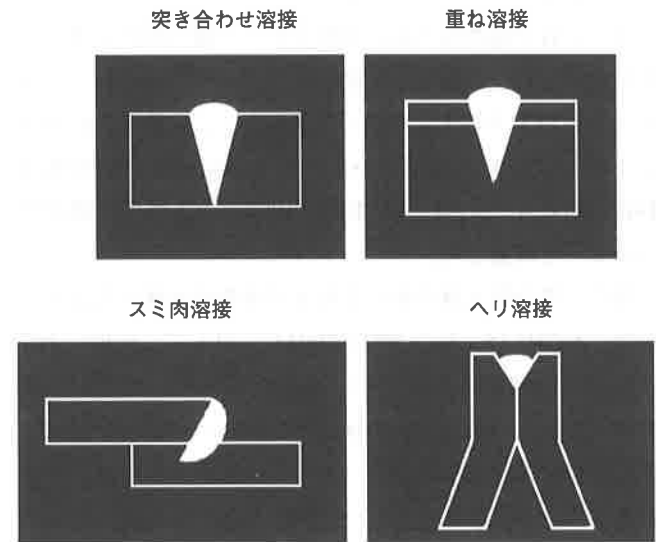


図2 溶接法の種類

実験に用いた貴金属素材は、0.3mmの板厚に圧延後、焼鈍した試料を約28×20mmに切断して用いた。素材の接合面は、#1500のエメリーペーパーで両端面に隙間が生じないように、平らに研磨加工を行った。

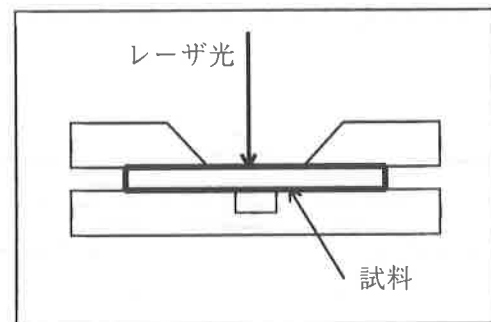


図3 レーザ接合用取付け治具

次に、2枚の板状試料を確実に固定するため、図3に示すレーザー加工用試料取り付け治具を製作して用いた。

また、移動テーブルのアクチュエータとして超音波モー

タを使用したため、移動速度を任意に変動でき、真直度精度の高い一軸駆動テーブルが製作できた。

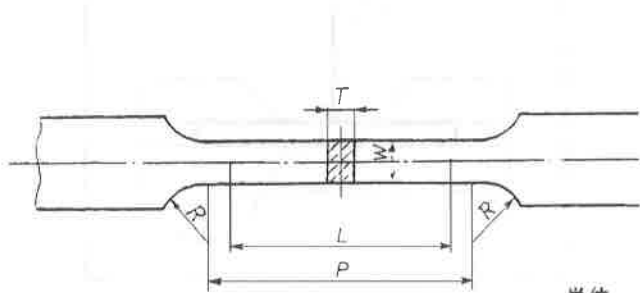
この一軸駆動テーブルは、リード1mmの送りねじを使用し、移動速度は最高85.7mm/minまで自由に設定可能である。実験で用いた移動速度は比較的低速である8.8, 10.7, 25.0, 50.0, 66.7mm/minの6因子による領域で行った。これは、試料の板厚が薄く、しかも試料の溶接長が短い等のほかに、精密な溶接が必要とされることから選択したものである。

そのテーブル上に試料をセットした加工治具を載せ、上方から顕微鏡によりHe-Neレーザのガイド光を観察しながら加工位置合わせと平行出しを行った。

次に、貴金属素材への概略的なレーザ接合条件を把握する目的で、銀(Ag925)素材を用いてレーザの励起ランプ電圧及びパルス幅をシフトして求めた。この結果、励起ランプ電圧は350~450V、パルス幅を決定する照射時間はTon; 2000 μ s、冷却時間はToff; 1000 μ sの条件で、接合できることを確認した。

次に、貴金属素材の中でも金とプラチナ素材を接合する場合、Au750(5:5)の融点は904 $^{\circ}$ Cに対して、Pt900(Pd)の融点は1755 $^{\circ}$ Cと乖離しているため、当初レーザ照射位置を融点の高い母材方向に0.3mm程度シフトして接合したが、理想的な結果は得られなかった。このため、両金属を突き合わせた中心部を狙ってレーザ照射を行っところ、満足のいく結果が得られた。

このように、レーザによる加工では、照射位置及び照射エネルギー等を自由に精度よく制御できる特長を有する。このため、接合性能に影響すると思われる素材の溶融から凝固までの過程を如何に制御するかが重要となる。そこで、前記のとおりレーザの励起ランプ電圧を350~450Vの中間値である400V及びパルス幅を一定として、合焦点における照射角度を水平軸から60度傾斜し後退法で、接合速度による適正な溶接性能を見出すための実験を行った。



W; 3mm L; 3.79mm P; 5mm R; 15mm T; 0.3mm

図4 引張り試験片の形状

なお、接合実験を行った試料や貴金属素材そのものの引

張り強度試験は、試験片を図4の形状に加工し、オリエンテック製UCT-30Tの材料強度試験機を用い、最大点加重(N)及び最大点応力(MPa)を求めた。

また、接合部断面における溶接部とその周辺との硬度分布を求めるため、微小硬度計(明石製MVK)を用い、試験加重0.02N、測定ピッチ100 μ mで硬度測定を行った。さらに、異種貴金属が溶接により、それぞれどのような状態で混ざり合い、凝固するのかわ確認するため、接合部断面を蛍光X線分析装置EDAX,JAPAN製EAGLE μ -Probeを用い、ライン分析とマッピング分析を行った。

3. 実験結果及び考察

3-1 同種貴金属の接合

異種貴金属の接合試験の前に、基礎的なデータを得る目的で同種貴金属の接合実験を行い、その試料の試験結果と異種貴金属接合試料とを比較し、評価の対象とした。

図5は、同種の金素材(Au750)についてレーザの励起ランプ電圧400V、接合速度を50mm/min、パルストレーンは冷却時間(Toff)1000 μ s、照射時間(Ton)2000 μ sの条件で接合したものであり、図中の左図は接合部の表ビード形状を、右図は裏ビードの形状を表す。

図から、接合試験した4種類の貴金属素材の中で最もビード幅が狭く加工されたが、引っ張り強度の最大点応力は409.69MPaであった。なお、この素材において溶接を行わない素材単体の引っ張り強度の最大点応力は923.51MPaであり、溶接により約二分の一以下に強度が低下した。しかし、宝飾品用として用いる場合は、この程度の強度で充分である。

図6は、上記と同一条件において接合速度のみを75mm/minにて銀素材(Ag925)を溶接したものである。

接合部のビード形状で、表ビード幅は4種類の貴金属素材の中では平均的であるが、ビード形状に乱れが現れている。この試料は、数本の引っ張り強度用試験片でテストしたところ、僅かな引張り力を加えただけで全て破断してしまい、強度データが得られていない。なお、溶接を行わない素材単体の引っ張り強度の最大点応力は、305.1MPaであった。

図7は、プラチナ素材(Pt900)を上記と同一条件において、接合速度を54.5mm/minで溶接したものである。

同種のプラチナ素材(Pt900)のビード形状において、ビード幅、ビード形状ともに均一で殆ど乱れない。また裏ビードも鮮明に現れている。この試料における引っ張り強度の最大点応力は、123.69MPaであった。なお、溶接を行わないこの素材単体の引っ張り強度の最大点応力は213.55MPaであり、溶接により、約40%の強度低下が生じ

た。

図8は、ホワイトゴールド素材 (Au750WG) を上記と同一条件において、接合速度を66.7mm/minで溶接したものである。

同種のホワイトゴールド素材 (Au750WG) の接合状態において、ビード幅は4種類の中で最も広い。しかし、ビード形状はやや乱れている程度である。この試料における引っ張り強度の最大点応力は、146.29MPaであった。なお、溶接を行わないこの素材単体の引っ張り強度の最大点応力は416.50MPaであり、溶接により約3分の1の強度低下が生じた。

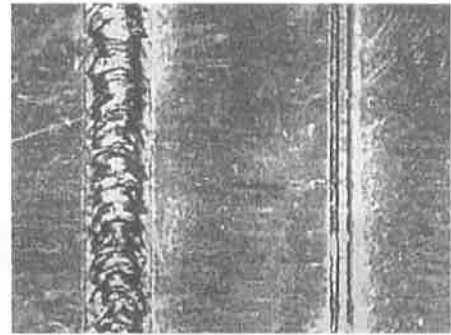


図8 ホワイトゴールド (Au750WG)同種素材の溶接
接合速度75mm/min Mag.50

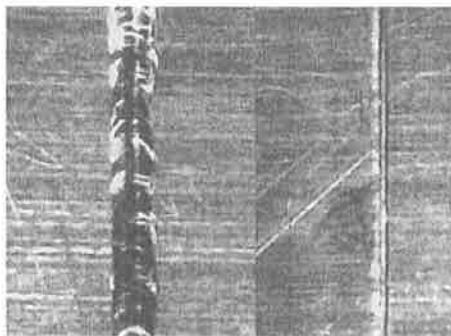


図5 金 (Au750) 同種素材の溶接
接合速度, 50mm/min Mag.50



図6 銀 (Ag925) 同種素材の溶接
接合速度, 75mm/min Mag.50

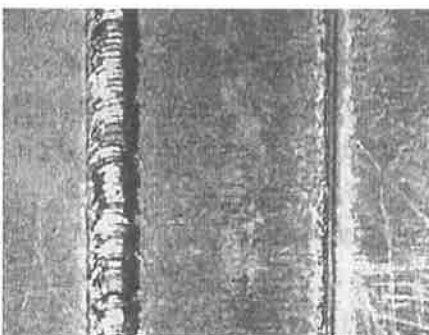


図7 プラチナ (Pt900) 同種素材の溶接
接合速度75mm/min Mag.50

3-1 異種貴金属の接合

3-1-1 接合速度と最大点応力

異種貴金属素材の接合実験では、4種類の貴金属素材を用いたが、近い色彩の異種貴金属素材の組み合わせで接合しても、付加価値の高い商品開発は望めない。そこで、ここでは素材色にコントラストの認められる異種貴金属素材を対象に接合実験を行った。

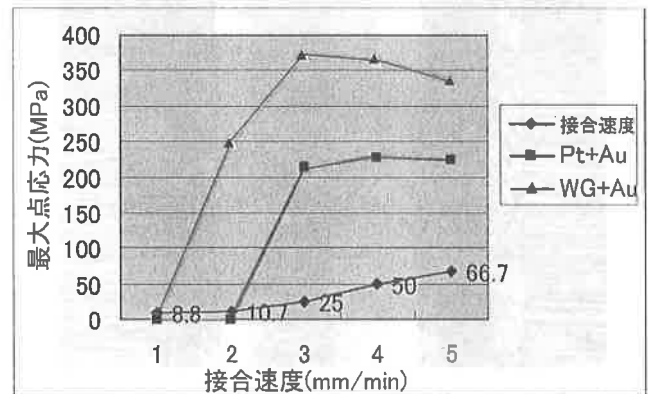


図9 異種貴金属の接合速度と最大点応力

図9は、ホワイトゴールド (Au750WG) + 金 (Au750) 素材及びプラチナ (Pt900) + 金 (Au750) 素材を8.82~66.7mm/minの接合速度において接合した試料を、引っ張り試験片用に加工し、最大点加重から最大点応力を求めたものである。

図から、ホワイトゴールド (Au750WG) と金 (Au750) 素材との接合において、接合速度が8.8mm/minと比較的低速では、殆ど最大点応力が得られていない。しかし、10.7mm/min以上の接合速度では、最大約371.7MPaの最大点応力が得られ、25mm/minを境に幾分低下傾向を示すものの、高い値を維持している。

一方、プラチナ (Pt900) と金 (Au750) 素材との接合において、8.8及び10.7mm/minと接合速度が比較的低速での接合では、殆ど最大点応力が得られていない。しかし、

接合速度が25mm/min以上では200MPaを越え、50mm/minに至っては約228.3MPaの最大点応力が得られ、この接合速度を境に幾分低下傾向を示しているが、高い水準を維持している。

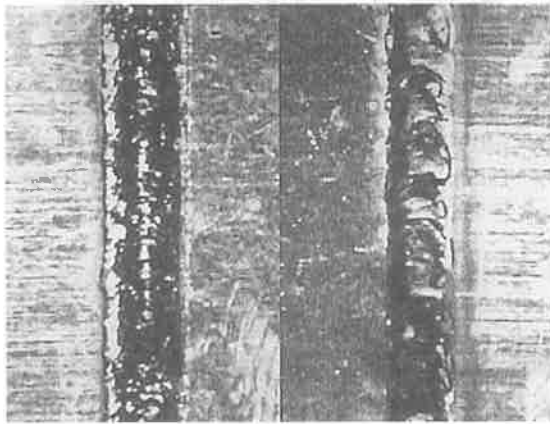


図10 ホワイトゴールド (Au750WG) と金 (Au750) 素材のビード形状接合速度 8.8mm/min

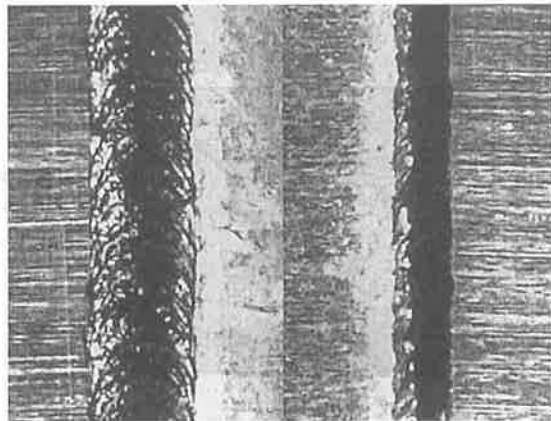


図11 プラチナ (Pt900) と金 (Au750) 素材のビード形状接合速度85.7mm/min

図10は、ホワイトゴールド (Au750WG) と金 (Au750) 素材とを8.8mm/minの接合速度において接合した試料のマクロ観察結果である。低速で接合したことから、ビードの各所にブローホールが観察できた。これは接合速度が低いことから、単位面積当たりのレーザーのエネルギー量が増加したことが原因として考えられる。

図11は、プラチナ (Pt900) + 金 (Au750) 素材を85.7mm/minの接合速度において溶接した試料のビード形状である。接合速度因子の中で最も高い速度で接合したもので、表裏のビードとも殆ど乱れもなく、良好な接合状態である。

3-1-2 接合部の硬度分布

図12は、ホワイトゴールド (Au750WG) + 金 (Au750) 及びプラチナ (Pt900) + ホワイトゴールド (Au750WG) の接合部断面における硬度分布を示したものである。

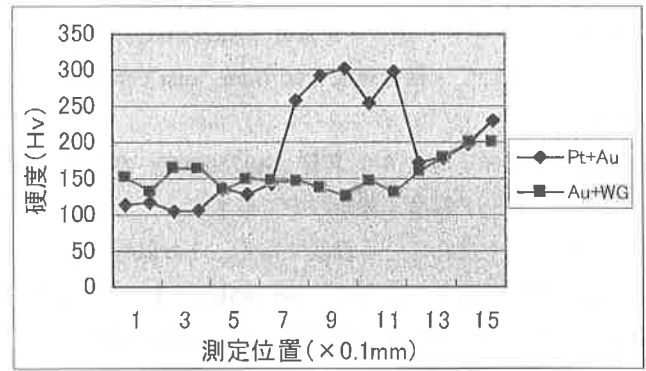


図12 異種貴金属接合部の硬度分布

図から、ホワイトゴールド (Au750WG) と金 (Au750) における接合部の硬度は、約Hv150でほぼホワイトゴールド (Au750WG) の母材と変わらない。金 (Au750) 母材に近い接合部で若干の硬度上昇が見られるが、接合部から離れるとほぼ金母材の硬度で推移している。なお、この試料は最大点応力が最も高い25mm/minの速度で接合した試料断面の硬度分布である。

一方、プラチナ (Pt900) と金 (Au750) 素材の接合では、最も高い最大点応力は50mm/minの速度で接合したもので、図はこの試料断面の硬度分布である。プラチナの母材硬度はHv120程度であるが、接合部の約0.6mm区間は急激に硬度が上昇し、最高でHv300の値を示している。その後、ホワイトゴールドの母材硬度Hv200程度の値を示した。この原因として、溶接により合金化した金属が、金属間化合物等を生成し、硬度が上昇したことが考えられる。

3-1-3 接合部における金属成分の分布

異種貴金属を接合した場合、双方の貴金属成分がどのような状態で混じり合い、溶接されているのかを検討するため蛍光X線分析装置により、溶接部断面をマッピングによる定性分析を行った。

図13は、ホワイトゴールド (Au750WG) と金 (Au750) 素材の接合部断面におけるマッピング定性分析結果である。

ホワイトゴールド (Au750WG) と金 (Au750) 素材を構成する金属成分のなかで、双方と異なる成分としてCuとPdがある。図は、マッピング分析により分布が顕著に現れたCu成分の分析結果である。

金 (Au750) 母材内のCu成分は、レーザーによる熔融池中心では非常に少なく、その境界近傍では多い。また、熱影響部ではCu成分は減少し疎らとなっている。一方、レーザーによる熔融池中心は、主としてPd成分に置き換わっている。

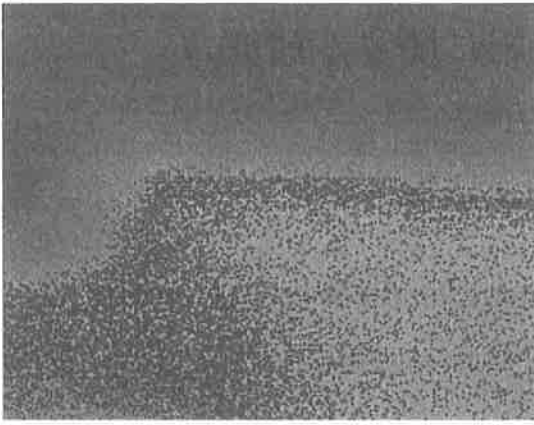


図13 ホワイトゴールドと金素材の接合部におけるマッピング定性分析 (Cu成分)

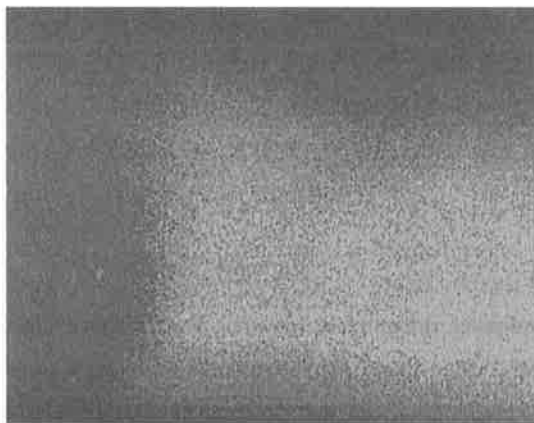


図14 プラチナと金素材の接合部におけるマッピング定性分析 (左Au,右Pt成分)

図14は、プラチナ (Pt900) と金 (Au750) 素材の接合部断面におけるマッピングによる定性分析結果である。

プラチナ (Pt900) と金 (Au750) 素材を構成する合金成分は、双方全て異なる成分であるが、マッピングによる定性分析で最も顕著に現れたのはPtとAuであった。

接合部近傍ではPtとAuが約100 μ mの範囲で混ざり合っている。また、接合部から約280 μ m離れた表ビード部の表面近くには、Au成分の集中している箇所が現れている。AuとPt成分を比べた場合、Auは遙かに融点と比重が低いことから、溶融から凝固までの時間が長く、母材から離れた位置にまで運ばれやすいことが原因として考えられる。

4. 結 論

YAGレーザにより金 (Au750)、銀 (Au925)、プラチナ (Pt900) 及びホワイトゴールド (Au750WG) 素材を用いて、異種貴金属素材の接合実験を行った結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 異種貴金属の接合では、レーザの励起ランプ電圧は350~450Vの範囲で、冷却時間 (Toff1000 μ s)、照

射時間 (2000 μ s) の加工条件で、貴金属素材の接合が可能である。

- (2) 同種貴金属の接合後の最大点応力は、金 (Au750) > ホワイトゴールド (Au750WG) > プラチナ (Pt900) の順に接合強度が高く、溶接を行わない母材との比較では、プラチナ (Pt900) > 金 (Au750) > ホワイトゴールド (Au750WG) の順で接合による影響で低下する。
- (3) ホワイトゴールド (Au750WG) と金 (Au750) 素材との接合では、接合速度が低速では殆ど最大点応力が得られないが、10.7mm/min以上では、最大371.7MPaの最大点応力が得られる。
- (4) プラチナ (Pt900) と金 (Au750) 素材との接合でも、低速では殆ど最大点応力が得られていないが、25mm/min以上では200MPaを越え、50mm/minでは約228.3MPaの最大点応力が得られる。
- (5) ホワイトゴールド (Au750WG) とプラチナ (Pt900) との接合断面の硬度分布で、接合部の影響はプラチナ (Pt900) 母材の約3倍程度硬度が増加し、ホワイトゴールド (Au750WG) と比較しても約2倍の値となる。
- (6) ホワイトゴールド (Au750WG) と金 (Au750) 素材との接合断面の硬度分布は変化が無く、ホワイトゴールド (Au750WG) 母材とはほぼ同じで、金 (Au750) 素材近傍で幾分硬度上昇が見られる程度である。
- (7) 異種貴金属の接合部のマッピング分析で、融点と比重の高いプラチナは溶融池の中心近くに多く、低い銅は溶融池周辺とビード表面等比較的広い範囲に分散する。

参考文献

- 1) 平野英樹：“最新レーザ加工技術総覧” テック出版 (1994)
- 2) 中山ほか：山梨県工業技術センター研報 (1995) p22
- 3) 中山ほか：山梨県工業技術センター研報 (1997) p59
- 4) 中山ほか：山梨県工業技術センター研報 (1998) p78
- 5) 中山ほか：山梨県工業技術センター研報 (1999) p66
- 6) P S L取扱説明書, カタログ
- 7) 松田福久：“接合溶接技術Q&A1000” 産業技術センター (1999)