

# 宝石及び貴金属素材のYAGレーザ加工技術の向上

## —レーザによる石留め法の開発—

中山 信一・佐野 照雄・宮川 和博

### Study on YAG Laser Machining of Gems and Noble Metals

#### — Development of Gems Setting Process Using YAG Laser —

Shin-ichi NAKAYAMA, Teruo SANO and Kazuhiro MIYAGAWA

#### 要 約

YAGレーザ光の数々の特長を利用して、平成8年度<sup>1)</sup>から貴金属装身具製品に多く用いられている金・銀・プラチナ等を対象に加工実験を行っている。今回は、レーザによる適正な石留め条件の把握を目的に金(Au750)及びプラチナ(Pt900)素材を用いて、レーザの励起ランプ電圧を250~400V、パルス幅は各種パルスレーン制御により実験を行った。また、合焦点における照射角度は、垂直から130度まで傾斜し、ナゲットの形成状態を検討した。レーザの励起ランプ電圧が350V以上では、熱による宝石へのダメージが多く発生することが確認された。また、YAGレーザ光は、宝石側からパルスレーン制御により照射することで、冷却時間がパルス間隔により制御でき、適正なナゲットを形成させるうえで、有効な方法であることがわかった。したがって、レーザ光を利用した加工における、加熱、吸収、溶解、蒸発、冷却、凝固の過程で、凝固するときの溶融波面の振動を制御して表面の荒れの少ない、良好なナゲットを形成する加工条件を確立することにより、レーザを用いた装身具石留め方法の可能性を見いだした。

#### 1. 緒 言

山梨県の代表的地場産業製品である貴金属装身具は、比較的小物で、しかも複雑な形状で構成されている。また、これらは、多品種少量製品が多いことから、業態は工程毎に細分化された多くの小規模企業から成り立ち、また主要製造工程は熟練者による手作業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、製品を製作する上で前工程の精度が最終仕上げ工程までも影響し、強いで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ため、製品に何らかの加飾を施して、デザインの展開が図られることが多い。しかし、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、微細な形状のデザインを表現することが困難であるので、レーザを用いて、金・銀・プラチナ等の貴金属素材に微細な加工を施した商品開発が必要となる。前報<sup>2)</sup>は、イメージスキャナより入力したデザイン画を各種貴金属素材及び宝石に適した加工データに変換するとともに、3次元CAD/CAMシステムを利用した、CWQスイッチ付YAG(Yttrium Aluminum Garnet)レーザ加工装置による立体形状への微細加工の向

上について検討した。本報は、これまで工具を使って手作業で行っていた装身具石留め作業を、YAGレーザで行うことを目的としている。特に、メレーダイヤモンド等の石留めには、熟練作業者が長時間をかけ手作業で行っているが、この作業をレーザに置き換え、省力化を図ることを検討した。



図1 YAGレーザ加工装置

メレーダイヤモンドの石留めでは、YAGレーザ光を貴金属のどの部分に、どの方向から、どのくらいのエネルギーで照射すれば適正なナゲットが形成されるかに重点をおいた。

## 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 (Model QLSP-202A PSL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 : φ0.6 SI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 レーザ制御と加工条件

YAGレーザー光を用いた石留め加工実験は、次の条件により行った。

(1)被加工素材 金 (Au750), プラチナ (Pt900)

(2)励起ランプ電圧 280,300,320,340V

(3)パルス幅 0.07ms~10ms 0.001msステップ  
パルス No 1~10 Ton 1~Ton10まで

(4)OFF Time (冷却時間) 0.05~100ms 0.001msステップ

(5)ENG UPPER, LOWER エネルギーモニターで確認

### 2-3 加工方法

加工位置の設定は、レーザー光及びヘリウムネオンのガイド光を、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、顕微鏡で観察しながら行った。一般的に、ラウンドブリリアントカットされたメレーダイヤモンドを貴金属素材に石留めする方法として、彫り留、爪留めなどがある。

小さい宝石を用いた彫り留め (図2) は、宝石を大きく、すっきり見せるために多く用いられている方法であることから、今回の目標とする石留め法である。

本研究で用いたメレーダイヤモンドは、1/50と1/100カラットで、ガードル平均直径はそれぞれ、1.3及び1.0mmである。このため、1/50カラットのメレーダイヤモンドは、下穴直径を1.0mm、1/100カラットは0.8mmで明けた。次に、メレーダイヤモンドのガードル直径に合わせて段付きの石座を明けた。

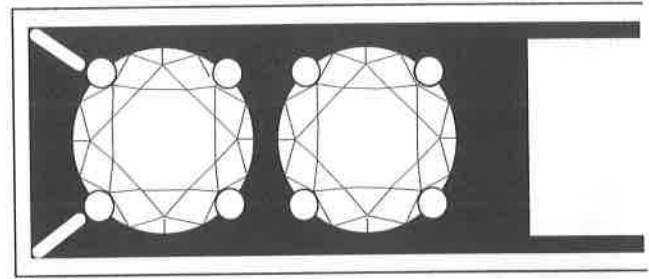


図2 カス入り彫り留め

宝石を石座にセットしレーザー照射をしたところ、励起ランプ電圧が400V以上では、レーザー光が直接当たった瞬間に宝石は、変色或いは破壊されるものが多数発生した。

金、プラチナ素材へのレーザーによる石留めでは、素材の溶融から凝固までの過程が重要である。そこで、レーザーの励起ランプ電圧を280~340V、パルス幅を各種パルストレーン制御とし、合焦点における照射角度を垂直から130度まで10度間隔で照射して、適正な石留め条件を見出すための実験を行った。

図3に、パルストレーン制御方法を示す。Tonでレーザー光を一定時間照射することで加工され、Toffが冷却時間となる。

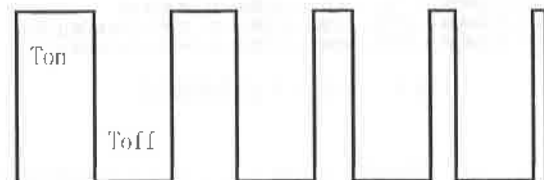


図3 パルストレーン制御

レーザー光の適正照射角度の決定は、ブリリアントカットされたダイヤモンドのガードルからクラウンまでの標準角度が約34度であるため、垂直軸とクラウンの標準角度のほぼ中間軸が水平軸から60度傾斜した角度となり、この方向を適正な照射角度とした。なお、傾斜角が小さい場合は、ダイヤモンドにレーザー光が当たる確率が増すことから、ダイヤモンドを深く沈めてセットしなくてはならない。逆に垂直に近づく方向に傾斜した場合、素材に対する光の反射率が増加し熱量が減少することから、ナゲットの形成が困難となる。さらに、垂直を越え120度方向から照射し、溶けた貴金属素材をレーザー光のエネルギーで押し出し、ナゲットを形成することを試みたが、照射した部分の貴金属表面が僅かに盛り上がる程度で、宝石を留めるところまでには至らなかった。このため、レーザーによる石留めに必要な良好なナゲット形成の適正条件を把握するため、プラチナ (Pt900) 及び金 (Au750) の厚さ0.3mmの板材を用い、同一

条件で3箇所にてレーザー光を照射した。図4は、金素材にレーザー光を照射し、ナゲットを形成した例である。

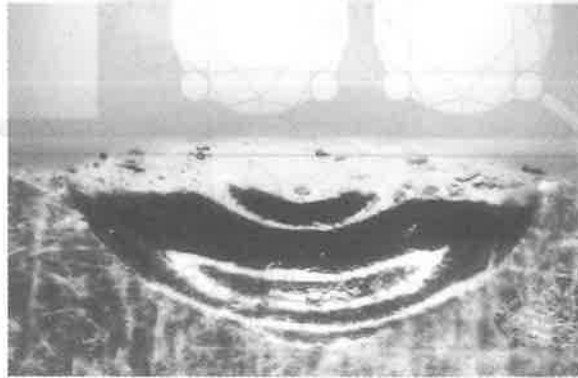


図4 レーザ照射によるナゲットの形成

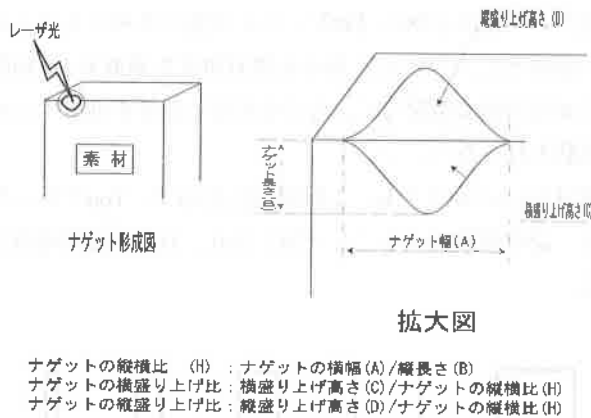


図5 ナゲット形成概略図

図5は、レーザー照射して形成したナゲットの概略図である。ナゲット幅(A)、ナゲット長さ(B)、縦盛り上げ高さ(D)及び横盛り上げ高さ(C)を測定顕微鏡(TUM200)で計測し、3箇所の平均値を求めた。測定した平均値から、照射エネルギーに対する縦横の盛り上げ比を求めるために、ナゲットの幅(A)/長さ(B)を求め、ナゲットの縦横比(H)とした。さらに、ナゲットの縦横比(H)と横盛り上げ高さ(C)及び縦盛り上げ高さ(D)との比を求めた。以下に、これらナゲットの形状を表す各比の定義を示す。

ナゲット幅(A)/ナゲット長さ(B): ナゲットの縦横比(H)  
 横盛り上げ高さ(C)/ナゲットの縦横比(H): 横盛り上げ比  
 縦盛り上げ高さ(D)/ナゲットの縦横比(H): 縦盛り上げ比

### 3. 実験結果及び考察

#### 3-1 励起ランプ電圧による盛り上げ比

図6は、金素材、図7はプラチナ素材における、励起ランプ電圧の違いによる、ナゲットの盛り上げ比を示す。この場合、パルスレーン冷却時間  $T_{off}10000\mu s$ 、照射時間  $T_{on}1000\mu s$  の条件で行った。なお、照射角度は、全

て水平面から60度傾斜して行なった。

図6の金素材では、励起ランプ電圧を増加しても、縦盛り上げ比(D/H)は僅かに上昇する程度で、殆ど変化が見られない。一方、横盛り上げ比は、励起ランプ電圧が上昇するに伴い急激に増加し、280Vに比べ340Vでは約4倍の値を示した。

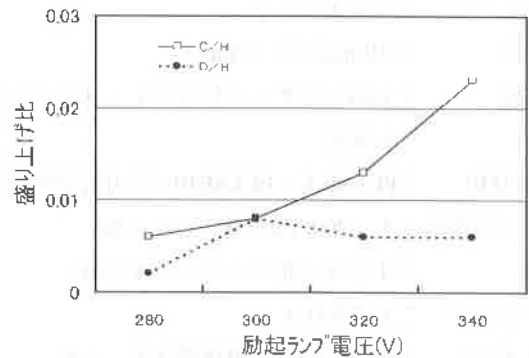


図6 励起ランプ電圧による盛り上げ比 (Au750)

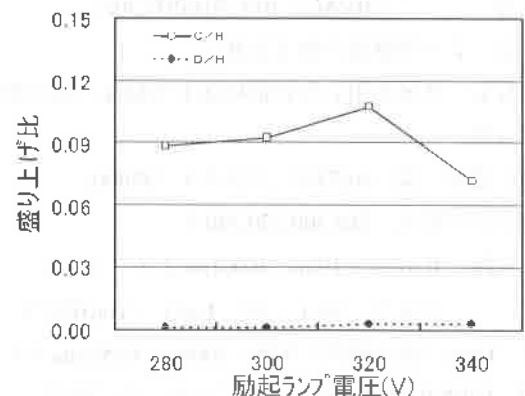


図7 励起ランプ電圧による盛り上げ比 (Pt900)

図7に示したプラチナ素材では、図6と同様のパルスレーンにおいて、縦盛り上げ比は、励起ランプ電圧の上昇にもかかわらず殆ど変化がない。横盛り上げ比は、金素材に比べ高い値を示しているものの、励起ランプ電圧との関係では目立った変化が見られない。

図8、図9は、それぞれ金素材、プラチナ素材に対しパルスレーン制御 ( $T_{off}10000\mu s, T_{off}1000, 800, 500, 200, 100\mu s$ ) とパルス電圧を変化させたときの縦盛り上げ比と横盛り上げ比を示したものである。

レーザーによる石留では、縦盛り上げ高さに比べ横盛り上げ高さが最も重要となる。

図8に示した金素材の横盛り上げ比は、励起ランプ電圧の増加に伴い、ほぼ比例して増加している。しかし、縦盛り上げ比は励起ランプ電圧の増加にも関わらず僅な上昇に留まっており、励起ランプ電圧が340Vでは、逆に僅かに減

少している。

一方、図9に示したプラチナ素材の横盛り上げ比は、280V~320Vまでは、0.048で上昇率はほぼ横這いであるが、励起ランプ電圧が340Vでは、盛り上げ比が0.06とやや上昇している。しかし、縦盛り上げ比は、印加電圧の上昇に伴い、極僅かの増加が認められる程度である。

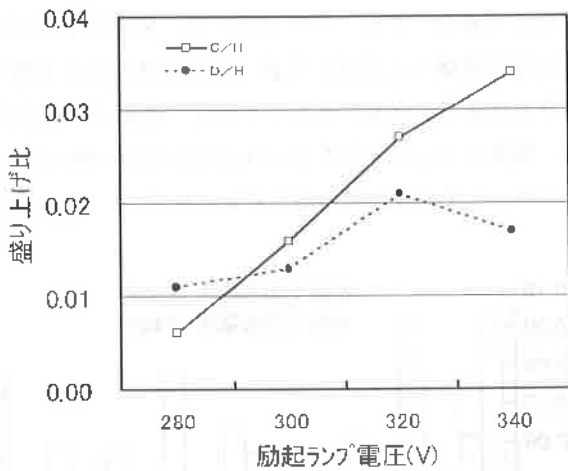


図8 励起ランプ電圧による盛り上げ比 (Au750)

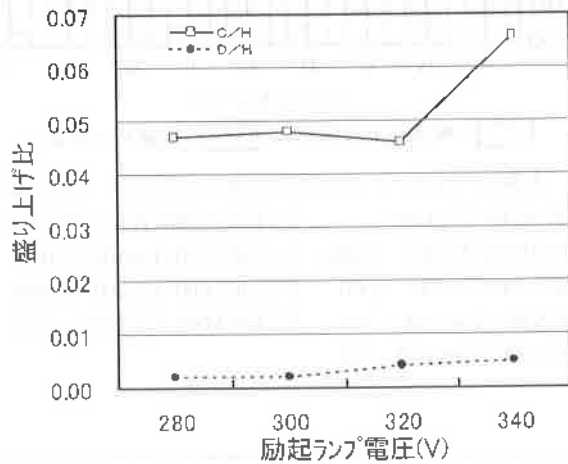


図9 励起ランプ電圧による盛り上げ量 (Pt900)

図8、図9から金素材、プラチナ素材とも、励起ランプ電圧の増加に伴い、縦盛り上げ比、横盛り上げ比はともに増加傾向を示す。特に、縦盛り上げ比に比べて横盛り上げ比は高い値を示し、励起ランプ電圧が高くなるほど、上昇率の差は大きくなり、パルスレーン制御の効果が表れている。

### 3-2 冷却時間による盛り上げ比

図10及び図11は、金及びプラチナ素材に対して、励起ランプ電圧を280,300,320,340Vとし、パルスレーン制御の冷却時間 (Toff) を変化させたときの盛り上げ比を示す。

なお、加工時間は全てTon100,200,500,800,1000のパルスレーン制御で行った。

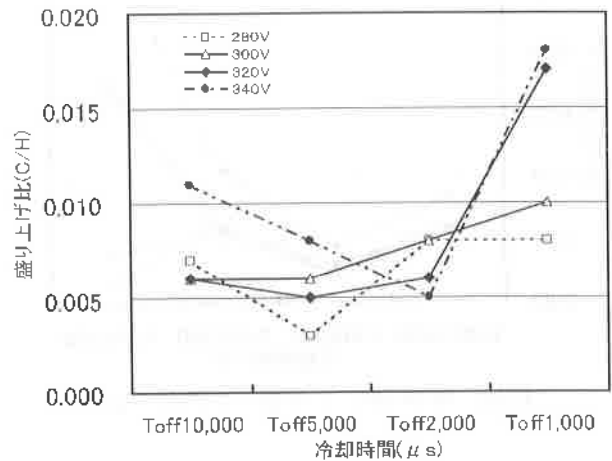


図10 冷却時間による横盛り上げ比 (Au750)

図10において、励起ランプ電圧の変化にかかわらず、パルスレーンの冷却時間がToff5000μs及びToff2000μsの条件で、盛り上げ比が減少する傾向にある。Toff10000μs及びToff1000μsのように、冷却時間が長い場合と極端に短い場合に盛り上げ比が高く、熱エネルギーによる溶解と凝固を繰り返すタイミングが微妙に影響し、盛り上げ量を決定していることが原因と考えられる。

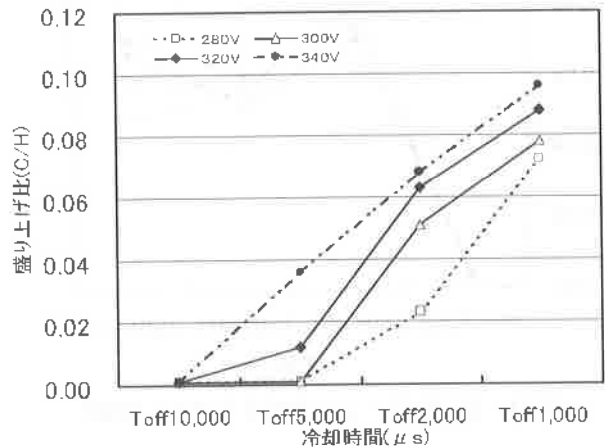


図11 冷却時間による横盛り上げ比 (Pt900)

また、図11のプラチナ素材に対する横盛り上げ比は、金素材のそれと異なり、全ての励起ランプ電圧において、冷却時間が10000から1000μsと短くなるに伴い、横盛り上げ比は大きくなる傾向を示した。

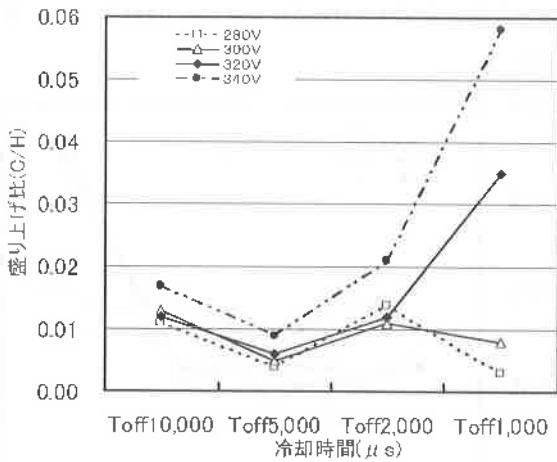


図12 冷却時間による盛り上げ比 (Au750)

図12は、金素材、図13はプラチナ素材において、励起ランプ電圧を280,300,320,340Vとし、冷却時間をToff10000, 5000,2000,1000と順次短くした場合の、横盛り上げ比の変化を示す。なお、加工時間は、Ton100,200,500,800,1000のパルス制御で行った。図が示すとおり、金素材では、励起ランプ電圧が320及び340Vと高い場合には、冷却時間が5000 $\mu$ sを境に上昇している。

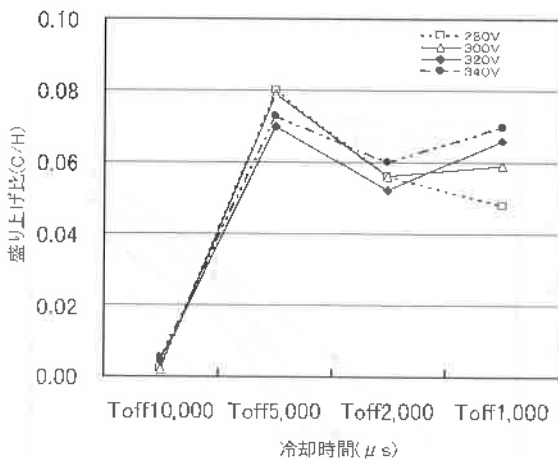


図13 冷却時間による横盛り上げ比 (Pt900)

また、図13のプラチナ素材の場合では、励起ランプ電圧に関わらず、パルス制御の冷却時間が10000 $\mu$ sと長いときは、盛り上げ比が殆ど0に近く、5000 $\mu$ sで最も高い値を示している。さらに、冷却時間を2000, 1000 $\mu$ sと短くすると、盛り上げ比は、やや低下する。以上の結果から、金素材は、パルス制御で加工時間を徐々に短くし、励起ランプ電圧を340V、冷却時間は1000 $\mu$ sの条件において横盛り上げ比が最も大きい値を示す。一方、プラチナ素材は、パルス制御で加工時間を徐々に長くし、励起ランプ電圧を340V、冷却時間は1000 $\mu$ sの条件において横盛り上げ比が最も大きい値を示す。このこと

は、金とプラチナ素材では溶融・凝固速度、熱伝導度及び溶融時の粘性等が異なることから、パルス制御による盛り上げ形態に違いが生じたためと推察できる。

### 3-3 各種パルス制御の違いによる盛り上げ高さ

図14は、金素材に対し、種々のパルス制御と盛り上げ高さとの関係を示す。

図のなかで、左側のグラフは励起ランプ電圧が最も低い280V、右側は励起ランプ電圧が最も高い340Vの時の盛り上げ高さである。また、塗りつぶしは、縦盛り上げ高さ、白抜きは横盛り上げ高さを表す。レーザーによる石留で、横盛り上げ高さが重要であることから、縦盛り上げ高さに比べ、横盛り上げ高さが大きいほど効率の良い熱エネルギーで、ナゲットを形成していると考えられる。

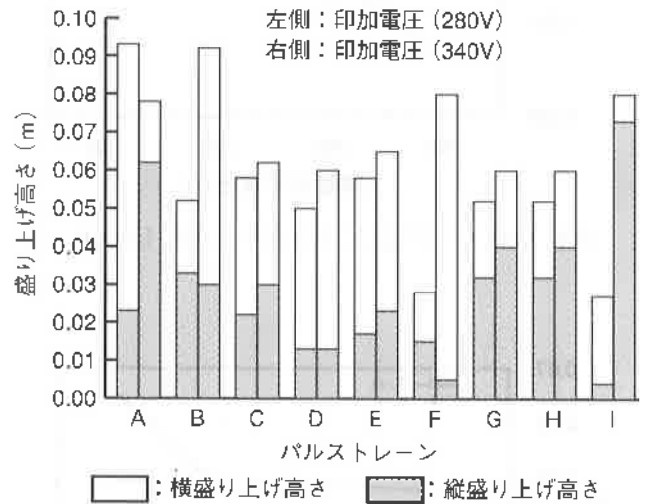


図14 各種パルス制御による盛り上げ高さ (Au750)

- A: Toff10,000・Ton1,000
- B: Toff10,000・Ton1,000~100
- C: Toff10,000・Ton100~1,000
- D: Toff5,000・Ton100~1,000
- E: Toff2,000・Ton100~1,000
- F: Toff1,000・Ton100~1,000
- G: Toff5,000・Ton1,000~100
- H: Toff2,000・Ton1,000~100
- I: Toff1,000・Ton1,000~100

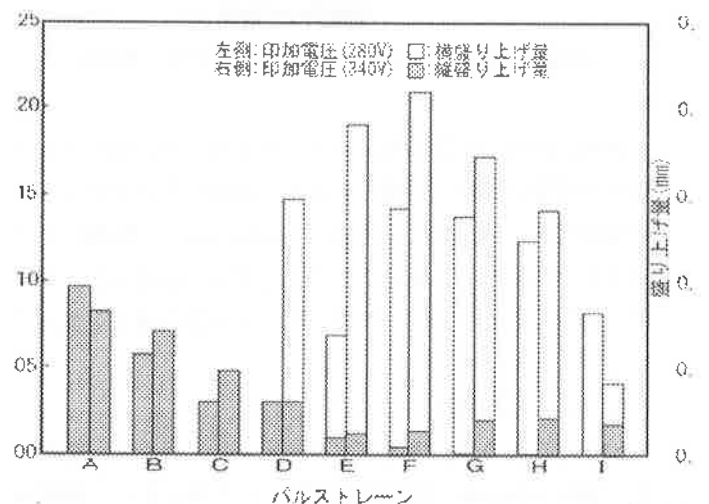


図15 各種パルス制御による盛り上げ高さ (Pt900)

このことから、Fは全体的に盛り上げ高さが高く、しかも横盛り上げ高さの割に縦盛り上げ高さが低いため、石留めに適した条件と言える。

図15は、金素材と同一の条件で実験を行ったときの、プラチナ素材に対する、パルスレーンの違いによる盛り上げ高さを示す。

図が示すとおり、A～Cのパルスレーン条件では、励起ランプ電圧の高低に関わらず、盛り上がりは僅かで殆ど縦盛り上げ高さが現れている。しかし、D～Iでは、縦盛り上げ高さに比べ、横盛り上げ高さが遙かに高い値を示している。また、金素材と同様、パルスレーンFは、総体的に盛り上げ高さが高く、しかも、縦盛り上げ高さに比べ横盛り上げ高さが最も大きい値を示すことから、レーザによる石留めに適した条件といえる。

#### 3-4 メレーダイヤモンドの石留め

これまで、金及びプラチナ素材を対象に、各種パルスレーン制御による、適正なナゲット生成条件の把握を目的に実験を行ってきた。そこで実験からの適正条件に基づき、メレーダイヤモンドを使用し貴金属への石留めを試みた。なお、顕微鏡と一体化した出射レンズユニットからのガイド光は、ナゲットを形成したい場所に位置決めし、レーザ光を水平軸を基準に60度傾斜した方向から、ダイヤモンドを囲むよう4箇所から照射した。

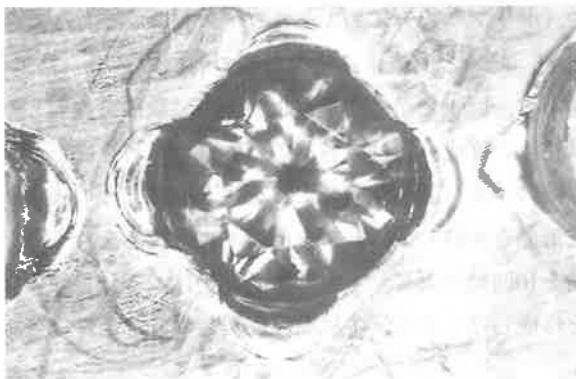


図16 メレーダイヤモンドの石留め (Au750) ×50



図17 メレーダイヤモンドの石留め (Pt900) ×50

図16は、1/50カラットのメレーダイヤモンドを金素材に石留めしたものである。

図17は、金素材と同様のパルスレーンで、励起ランプ電圧を280Vでプラチナ素材に石留めしたものである。

## 4. 結論

YAGレーザを用いて、金、プラチナ素材に対する、石留法を検討した結果、次のことが明らかとなった。

- (1)レーザの励起ランプ電圧が350V以上では、熱によるダイヤモンドへのダメージが多く発生する。
- (2)金 (Au750)、プラチナ (Pt900) 素材では、励起ランプ電圧の上昇に伴い盛り上げ比が上昇する。特に石留めで重要な横盛り上げ比は、縦盛り上げ比に比べて数倍高い値を示す。
- (3)金 (Au750)、プラチナ (Pt900) 素材ともにパルスレーン制御の冷却時間による盛り上げ比は、冷却時間を徐々に長くしても短くしても、横盛り上げ比は減少するが、縦盛り上げ比は上昇する。
- (4)金 (Au750) 素材は、冷却時間が $\text{Toff}1000\mu\text{S}$ で照射時間を徐々に短くすると、横盛り上げ比が最も高い値を示す。プラチナ (Pt900) 素材は、冷却時間が $\text{Toff}5000\mu\text{S}$ で照射時間を徐々に長くすると、横盛り上げ比が最も高い値を示す。
- (5)金 (Au750) 素材の横盛り上げ量の最大値は、冷却時間 ( $\text{Toff}1000\mu\text{S}$ ) で照射時間を徐々に短くすると、横盛り上げ量が最も高い値を示す。プラチナ (Pt900) 素材は、冷却時間 ( $\text{Toff}1000\mu\text{S}$ ) で徐々に照射時間を長くすると、横盛り上げ量が最も高い値を示す。

#### 参考文献

- 1) 中山 ほか：山梨県工業技術センター研報 (1997) p59
- 2) 中山 ほか：山梨県工業技術センター研報 (1998) p78
- 3) 中山 ほか：山梨県工業技術センター研報 (1995) p22
- 4) P S L取扱説明書, カタログ
- 5) 平野英樹：“最新レーザ加工技術総覧”テック出版 (1994)