

貴金属素材及び宝石のYAGレーザー加工技術に関する研究

中山 信一・Michael Luhn*

Study on YAG Laser Processing of Noble Metals and Gems

Shin-ichi NAKAYAMA and Michael LUHN*

要 約

YAGレーザー光の数々の特長を利用して、貴金属等の高反射率素材及び宝石等の脆性材料について適用実験を行った。貴金属素材への彫刻及び切断は、素材によって多少の加工性の違いはあるものの、ほとんど問題なく加工できることが確認できた。また、その時の加工ロス量は、0.2~0.4%と極めて微量であることも分かった。さらに、各種宝石についても彫刻実験を行い、ブラックオニックス、ヘマタイト、クリソプレースは特にレーザー加工に適応することが分かり、今後の新しい加工法として期待できる。

1. はじめに

レーザー光は、素材加工、計測、医療等の幅広い分野で有効に利用されている。素材加工の分野では、金属加工はもとより、エレクトロニクス、生体に至るまで多方面に応用されている。特にYAG (Yttrium Aluminum Garnet) レーザは、CO₂レーザー(10.6 μ m)に比べて1.06 μ mと波長が短いため、反射率が低く吸収率が高いことから、エネルギーの有効利用が図られる。また、YAGの結晶は硬度が高く、化学的にも安定している等多くの特徴を持っているため、固体レーザーの母体材料として主流となっている。さらにYAGレーザーは、メンテナンスが容易でランニングコストも低いので、非常に使い易いレーザーである。

そこでプラチナ、金、銀等の高反射率貴金属素材及び宝石等の脆性素材を対象にYAGレーザー加工の適用実験を行った。一般的に、彫刻、マーキング及び絵柄等の切り抜き加工には、特殊工具を用いて手加工により行われてきた。このため、正確な彫刻や切断が困難であり、さらに加工時間や熟練者不足も相まって、この分野の技術力向上が望まれている。今回、レーザー加工では先進国であるドイツ連邦共和国において、YAGレーザー加工装置を利用した貴金属や宝石への加工実験を行う機会が得られたので、この結果について報告する。

2. 実験装置

図1は、今回の実験に使用したレーザー加工装置である。

YAGレーザー加工装置は、AutoCAD3を利用してデータ入

力し、このデータをもとに加工するシステムである。今回作成した主なデータファイルのうち、PLTはSmallレーザー、DWGはBigレーザー用である。なお、レーザー加工装置自体に素材の形状や大きさに合わせて、倍率を自由に設定できるソフトウェアが組み込まれている。



図1 YAGレーザー加工装置 (Small)

表1 YAGレーザーの諸特性

項 目	連 続		パルス
	連続波	パルス波	高速繰返し
励起ランプ	アークランプ	アークランプ	フラッシュランプ
Qスイッチ	なし	Acoust-Optic	フラッシュランプ
パルス幅	—	0.01~0.1ms	~0.15ms
パルス繰返し数	—	1~10K Hz以下	100Pulse/s
ピーク出力値	—	1KW	600W
平均出力値	90W	9W	90W
X, Yテーブル移動範囲 (mm)	100×100	100×100	100×100

*FEE FORSCHUNGSINSTITUT FOU MINERALISCHE UND METALLISCHE WERKSTOFFE EDELSTEINE/EDELMETALLE GMBH

表1は、今回使用したYAGレーザ加工装置の諸特性を示す。なお、使用した二台 (Small,Big) のレーザ加工装置のうち、太線で囲んだ部分はSmallレーザの特性を示す。

3. 実験条件

表2は、実験条件を示す。まず、主に装身具製品に多く用いられている貴金属素材を対象に、加工実験を行った。

表3は、使用した貴金属素材等の特性を示す。

表2 実験条件

使用した光	QスイッチYAGレーザ (1.064)
照射エネルギー	E=0.15J
パルス幅	$\tau = 0.01\text{ms} \sim 0.10\text{ms}$
焦点はずし量	$\pm 2\text{mm}$
レンズ焦点距離	f=40mm, f=90mm
スポット径	14~20 μm

表3 使用した素材の特性

素材	成分	μmRa
Au (K18)	Au75%,Ag12.5%,Cu12.5%	0.05
Au (K14)	Au59%,Ag34%,Cu7%	0.06
Ag (925)	Ag92.5%,Cu7.5%	0.10
Pt (900)	Pt90%,Pd10%	0.05
黄銅		0.05

4. 実験方法及び結果

(1) 素材による焦点誤差

Panasonic Model WV-1500FのTVカメラとModel WV-5340のVideo Monitorで試料表面を観察し、焦点を合わせる。焦点は、Z軸のパルスモーターで0.01mmの精度で調整できる。しかし、試料の反射率の違い等から誤差を生ずる。そこで、素材による焦点合わせ誤差を求める目的で次の実験を行った。

最初、焦点が合ったと思われる位置でZ軸のカウンターをリセットし、次に再度焦点合わせを行い、リセットした値との差を求めた。表4は著者の一人がこの操作を20回繰り返し求めたものである。一般的に、黄金色のAu (K18)及び黄銅は、試料に対して下側で焦点を合わせ傾向がある。一方、銀色のAg925及びPt900は反対に試料の上側で合わせる傾向にあり、中でもAg925は、焦点合わせ誤差の標準偏差が0.175mmと最も大きい値を示している。続いてAu

(K18) >黄銅>Pt900の順である。

(2) 焦点と加工範囲

さらに、各貴金属素材の加工で、Z方向に対しての加工開始位置と加工範囲がどの程度かを正確に求めるため、図2のような実験を行った。

表4 素材による焦点誤差 (Down+,Up-)

素材名	焦点誤差平均 (mm)	標準偏差 (σ)
Au (K18)	+0.115	0.1685
Ag925	-0.026	0.1751
Pt900	-0.113	0.1301
黄銅	+0.120	0.1376

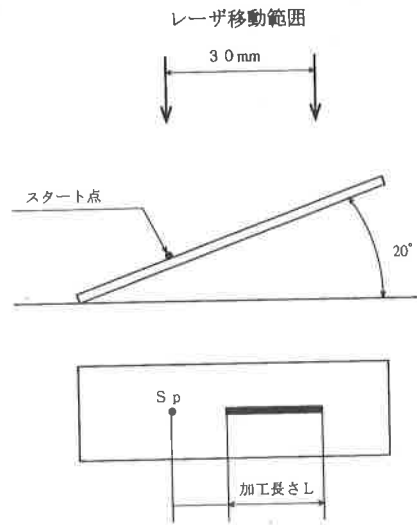


図2 焦点はずし量による加工長さ

素材名	加工長さ (L)	Z換算値
Au (K18)	(7) 6.7mm	2.29mm
	(7) 5.8mm	1.98mm
Pt900	(10.4) 5.7mm	1.94mm
Ag925		

() 内は、Spから加工開始点までの距離

図3 焦点はずし量による加工長さ

正確に20度傾けたチルチングテーブルに貴金属試料をセットし、パルス繰り返し周波数2KHz、電流DC-25A、加工

速度12mm/sの条件により、0.01mmのピッチで、幅1mmを加工した。この試料について、レーザー光のスタート点を起点に、加工開始点及び終了点を測定した。さらに、この値からZ方向の追従長さを求めた結果を図3に示す。

この表から、Au (K18) は2.3mm, Pt900が2.0mm, Ag925は1.9mmの範囲で加工でき、Au (K18) とAg925とのZ方向の最大差は、0.35mmであった。また、Ag925はAu (K18) 及びPt900と比較すると、約3.4mm上方から1.9mmの範囲で加工されていることが分かる。

(3) 加工条件による彫刻面の違い

レーザーで、貴金属素材を彫刻する場合の適正条件を把握するために、次の加工実験を行った。素材、パルス繰り返し周波数、DC電流の3つの因子について、素材はAu (K18)、Ag925、Pt900、黄銅の4水準、周波数は、1KHzから10KHzまで10水準、DC電流は21Aから25Aまでの、5水準の組み合わせについて行った。

図4は実験条件及び方法を示す。このうち、一条件は長さ方向を5mmとし、幅1mmを0.01mmピッチでレーザーを走査して加工した。

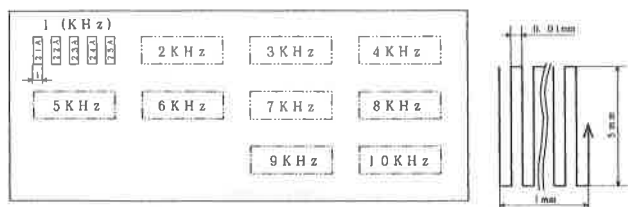


図4 彫刻条件及び加工配置

この結果、Au (K18) の場合周波数が1KHzの条件での表面状態を観察したところ、DC-23Aを以上を境に表面の起伏がレーザーの走査方向に対し、平行から直角方向へと変化している。図5は、Au (K18) を1KHz, DC-25Aの条件で加工し、表面を走査電子顕微鏡で撮影したものである。この部分は、全ての条件の中で表面あらかさが最も大きい値を示したところで、うねりが周期的に現れている。また、当初レーザー彫刻した部分は凹形状になると考えていたが、逆に凸形状になる現象が現れている。これは、すべての貴金属と黄銅に共通した現象であった。

次に、周波数を5KHzに上昇したところ、DC-21AからDC-23Aまではパワー不足で加工できなかった。図6は、5KHz, DC-25Aの条件で加工したもので、1KHzの条件時と異なり、レーザーの走査方向に関わらず起伏が一様に現れている。

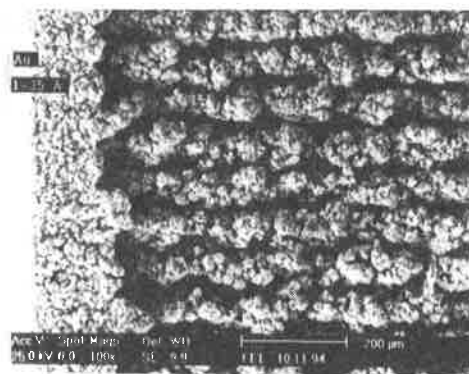


図5 1KHz,DC-25A Au (K18), ×100

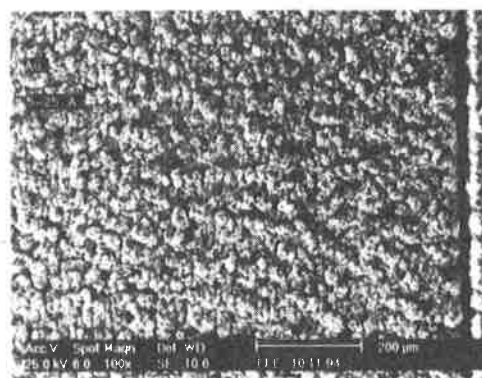


図6 5KHz, DC-25A Au (K18), ×100

一方、Ag925は1KHz, DC-22Aの条件では起伏がレーザーの走査方向とほぼ同方向に現れているが、DC-23A以上になると直角方向に変化している。それもDC-25Aになると、谷の部分と山の部分が明瞭となっている。周波数が5KHzの場合は、DC-24A及びDC-25Aの時に加工できたが、表面の加工状態にはほとんど差異は認められなかった。Ag925を、周波数が1KHzから10KHzでDC電流が21, 22及び23Aの条件で加工したところ、加工表面が白色に見える現象が現れた。図7は、この部分の拡大写真で表面に無数の底付き穴があいていることが分かった。図8はさらに拡大して撮影したもので、この穴の平均直径が15µm程度であることが判明した。

Pt900は1KHz, DC-21Aの条件では、ごく浅い表面が溶け、再度凝固したように見える。さらに22A以上に電流値が上昇すると、起伏方向はレーザーの走査方向と直角に変わっている。1KHz, DC-25Aでは、溶出した突起表面に無数の小さな底付き穴が確認できる。この条件では、最も起伏が激しく現れている。また、Au (K18) 及びAg925では加工できなかった5KHz, DC-21AからDC-23Aでも加工されている。この周波数でDC-21A及びDC-22Aの場合は、加工表面が溶接のビード面状に規則的に加工されている。しかし、この条件において、図9のように所々波形の乱れた部分が観察されたため、その拡大写真を図10に示す。直径約

5 μ m程の異物らしきものを巻き込んだ様にも見える。DC-23Aでは、今までの表面状態とは全く違い、凹凸が大きくなっている。肉眼では黒色に見え、周囲とのコントラストが明瞭に現れている。

図11は、上記の条件で加工した表面状態を、非接触式表面形状測定機で測定した結果である。周波数が1KHzの場合は、電流値がDC-21AからDC-25Aに上昇するに従い、全ての素材について表面あらさの値が増加傾向を示している。中でもAu (K18) が最も増加率が高く、Pt900は最も低い値を示している。この傾向は、1KHzの条件で最も顕著に表れ、表面あらさも最大値を示している。一方、図12のように周波数が2から3KHzの場合は、DC-21AからDC

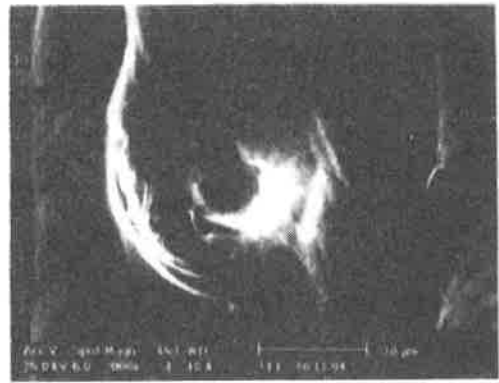


図10 5KHz, DC-21A (Pt900), $\times 1000$

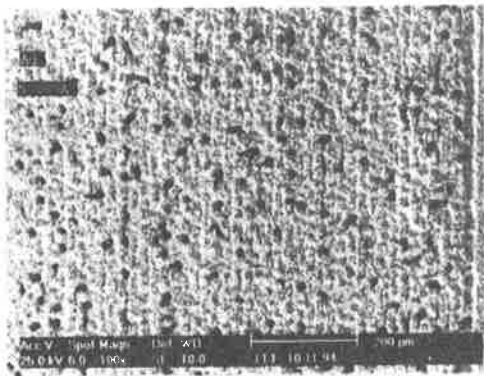


図7 5KHz, DC-23A (Ag925), $\times 100$

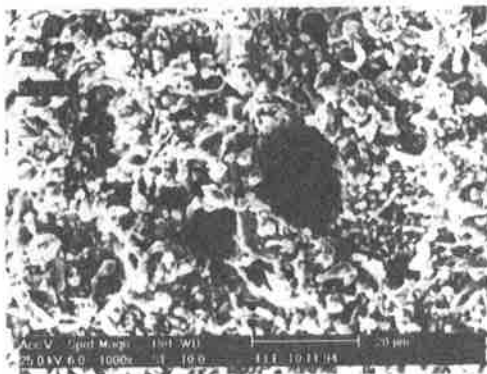


図8 5KHz, DC-23A (Ag925), $\times 1000$

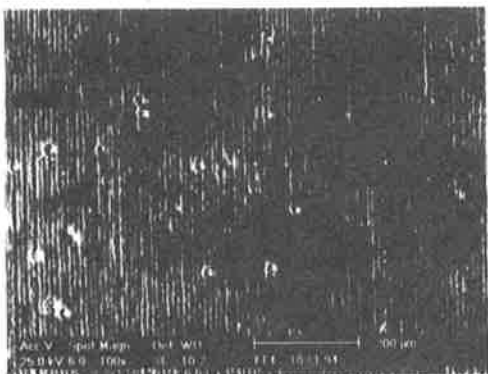


図9 5KHz, DC-22A (Pt900), $\times 100$

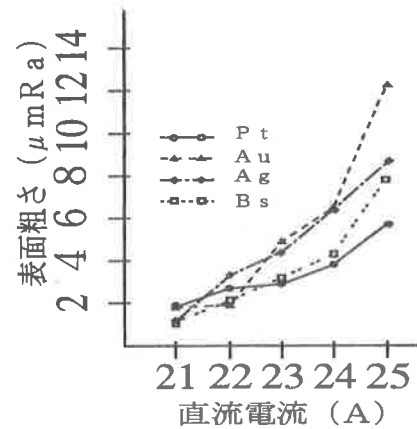


図11 加工条件による表面あらさ (1KHz)

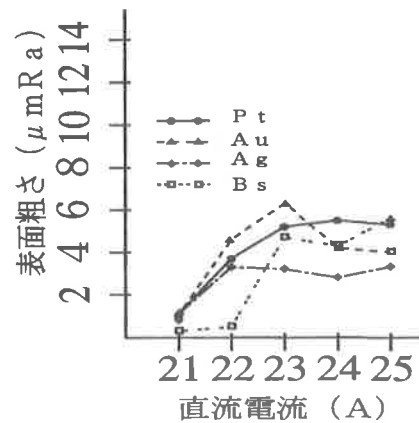


図12 加工条件による表面あらさ (3KHz)

-23Aまで表面あらさの値が増加しているが、それ以上の電流値では表面あらさの値は、ほとんど変化していない。これは4KHz以上10KHzまでは、ほぼ同じ傾向を示した。

図13は、パルス繰り返し周波数と表面あらさとの関係を表したものである。表面あらさは、周波数が上昇するとともに減少していることから、周波数を制御することにより表面あらさを任意に定めることが可能である。

(4) 穴明け切断条件と加工表面

レーザーによる貴金属素材の適正な切断条件を把握するため、次の加工実験を行った。素材、周波数、DC電流の3つ

表5は、Au (K18) 及びAg925の厚さ0.1mmの素材を用い、周波数と直流電流に対する穴の貫通率を表したものである。

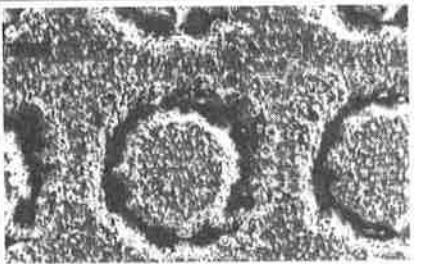
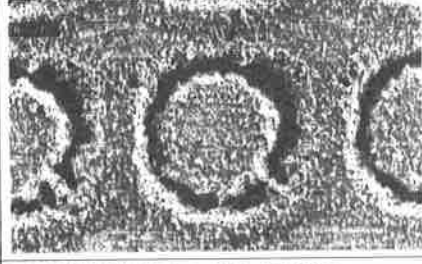

Au (K18) 2KHzDC-25A	
Ag925 2KHzDC-25A	
Pt900 2KHzDC-25A	

図18 貴金属の加工表面

この表よりAu (K18), Ag925素材ともに周波数が低く電流値が高いほど、穴の貫通率が高くなっている。全体的には、Au(K18)に比べAg925は貫通率のばらつきが大きい。図18は、Au (K18,厚さ0.5mm), Ag925 (厚さ0.5mm) 及びPt900について、2KHz,DC-25Aの条件で加工した結果である。

各素材ともに貫通までには至らないが、相当深くまで加工されていることが分かる。さらにPt900は、Au (K18) やAg925に比べて熔融素材自体の粘性の影響が加工表面に現れている。

さらに、Au (K14) の素材についても同様の加工実験を行ったところ、Au (K18) の素材とほぼ同様な結果であった。

(5) 微小穴あけ

貴金属製品に小さな穴をあけて空気孔とすることがある。ここでは、YAGレーザでどの程度小径の穴あけが可能か試みた。

実験条件は、1KHzから10KHzまで1KHz毎に周波数を変化させるとともに、電流値をDC-15AからDC-25Aまで瞬間的に上昇して、微小の穴を明けた。

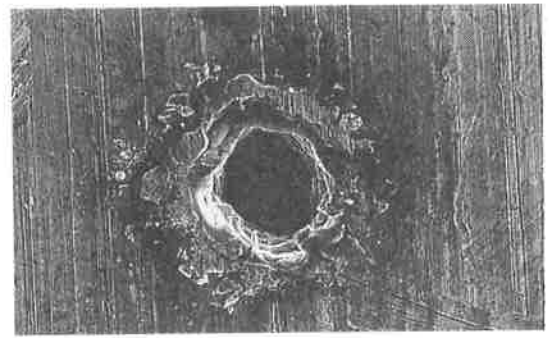


図19 微小穴Au (K18)

図19は、厚さ0.1mmのAu (K18) 素材に周波数が6KHzの条件で穴加工したもので、直径は約15μmであった。

(6) 貴金属素材への彫刻及び切断

図20は、山梨県のマークをCAD入力してプリントアウトした図案と、このデータをもとにAu (K18) 素材を使用した試作品である。

この加工は、内側の彫刻と外枠を切断する2つのプログラムから成っている。内側の格子状のピッチは、原寸時(12×12mm)で0.1mmに設定してある。

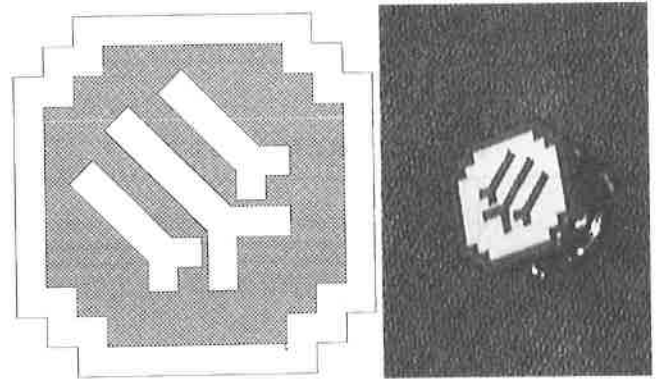
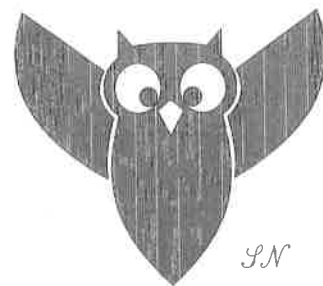


図20 山梨県のマークと試作品



Idar-Oberstein

図21 試作した図案



図22 センターの文字図案

原寸での加工時間は、厚さ0.5mmのAu (K18) 素材で内側の彫刻に約2分、外枠切断に約8分程度要した。その他、Ag925、Pt900及び黄銅素材について同様の加工実験を行った結果、彫刻時間にはほとんど差異は見られなかった。しかし、切断工程ではAg925が最も時間を要した。

図21は、当地の宝石店で多く見かけるふくろうの彫刻に因み、デザインしたものである。原図は羽根の長さが約23mm、格子の間隔は0.1mmである。格子をテーブル移動軸に対して平行に設定したため、テーブル移動が滑らかであった。

図22は、山梨県工業技術センターの文字をイメージスキャナから取り込み、輪郭線をベクターデータとしてプリントアウトしたものである。原図の文字長さは全長で約50mm、これを縮小して加工したところ、肉眼で文字が認識できる一文字の限度は、0.7×0.7mm程度であった。

貴金属素材の加工で重要視される項目に減り量がある。表6は、山梨県のマークを一素材につき3個加工して、彫刻と切断時の減り量の比率を求めたものである。この試料は、格子状に相当数の刻みが入っているため、普通に彫刻したものに比べ、減り量は多少多めと考えられる。しかし、レーザー加工による減り量は、従来の彫刻及び切断法と比べ極微量であることが分かる。

表6 レーザ加工における減り量

素材名	彫刻+切断(%)	切断時(mg/mm ²)
Au (K18)	0.220	0.45
Ag925	0.391	0.24
Pt900	0.272	0.44

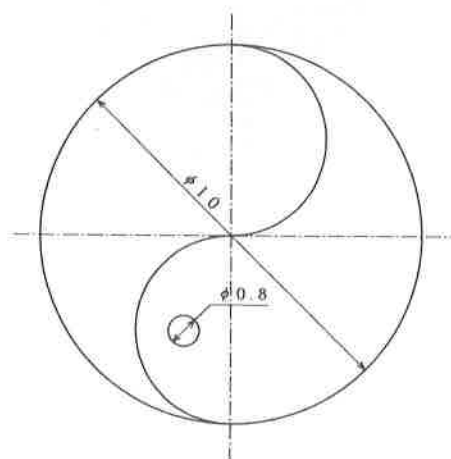


図23 切断実験の図案

さらに図23のような試料を、同一素材につき3個切断して、切断時の一面積当たりの減り量を求め、この結果を表6の切断時の項に示す。

この表からAu (K18) 及びPt900は、ほぼ同程度の減り量であるが、Ag925はこれと比較して約50%であった。

(7) 宝石への彫刻

レーザー光が宝石の加工にどの程度適用できるのか、種々の宝石について加工実験を行った。表7に、この加工結果を示す。

この表から、特にブラックオニックス、ヘマタイト、及びクリソプレースは、細部に至るまで彫刻でき、宝石へのレーザー加工の適応が可能であることが判明した。

図24は、ヘマタイトへの彫刻例を示し、加工時間は約1分であった。

表7 宝石へのレーザー加工結果

不適 × ← → ◎ 最適

宝石名		評価	宝石名		評価
水晶	ロッククリスタル	×	タイガーアイ		○
	アメジスト	△	ロードクロサイト		○
	ローズクォーツ	△	めのう	クリソプレース	◎
ラピスラジェリ	△	アゲート		×	
ヘマタイト	◎		B.オニックス	◎	

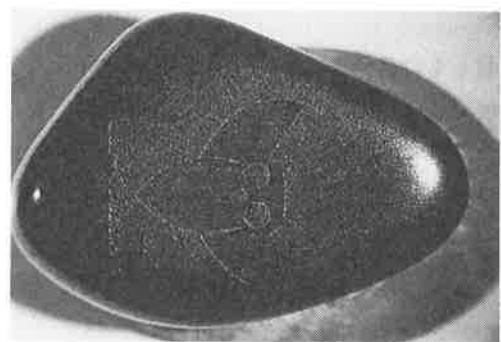


図24 宝石への加工

(8) ダイヤモンドの切断と穴あけ

YAGレーザー光を使用してダイヤモンドの切断と、穴あけの実験を行った。

まず、治具にデンタル硬化剤でダイヤモンドを固定し、加工速度8mm/s、周波数3KHz、DC-24~25Aの条件で切

断した。図25は、その切断例である。この4例の平均ロス量は、2.95%であった。

次に、ダイヤモンドに直径約1mmの段付きの穴あけを試みた。小型モーターでダイヤモンドを回転しながらレーザー

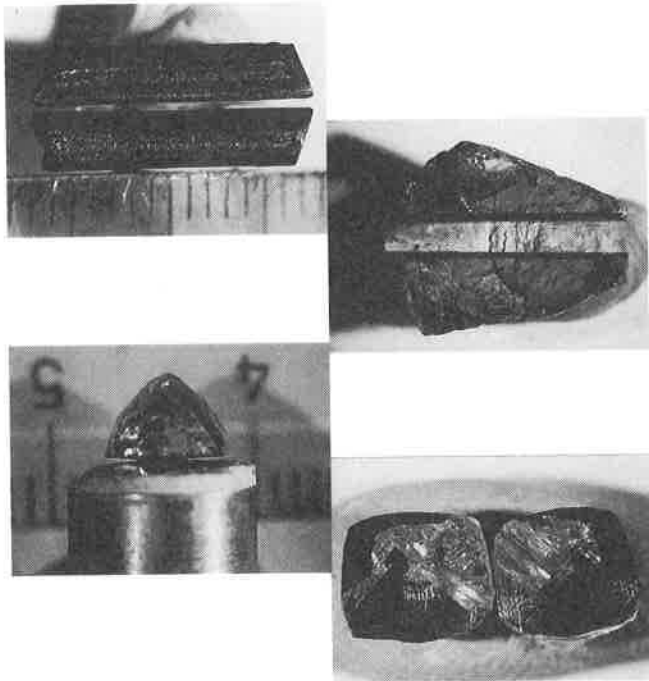


図25 ダイヤモンドの切断例

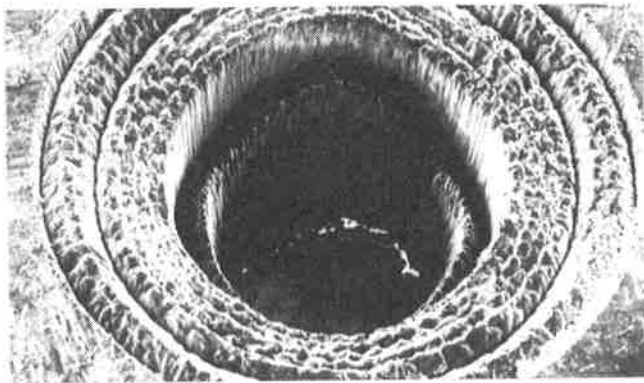


図26 ダイヤモンドへの穴あけ

表8 ダイヤモンドの加工深さと幅の関係

加工深さ加工幅		加工深さ加工幅	
2.5mm	10 (×0.02mm)	9.0mm	32 (×0.02mm)
3.0mm	12 "	10.0mm	34 "
3.5mm	13 "	11.0mm	40 "
4.0mm	14 "	12.0mm	42 "
5.0mm	18 "	13.0mm	46 "
6.0mm	22 "	14.0mm	50 "
7.0mm	22 "	15.0mm	52 "
8.0mm	26 "	16.0mm	58 "

装置の一軸を往復運動させ、段付き穴を貫通させた。この電子顕微鏡写真を図26に示す。

ダイヤモンドやその他の宝石の切断は、切断深さにより切断幅を変えなければならない。そのテーブル例を表8に示す。

(9) 象牙の彫刻

象牙は印鑑等に用いられているが、この加工にレーザー光を利用して試みた。この場合のレーザー加工装置は排気装置が装備されているBigレーザを使用して、周波数9KHz, DC-14.4A, 加工速度8.5mm/sの条件で山梨県のマークを彫刻した。サイズは25×25mmで、加工時間は約2分であった。この条件での彫り込み深さは約3mmで、幾分深すぎの感がしたが、加工条件次第で深さを調整できることを確認した。

5. おわりに

以上、YAGレーザを使用して種々の素材について適用実験を行ったが、得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) YAGレーザの波長は1.064 μmと短いため、反射率が低下して吸収率が増加することにより、貴金属等の高反射材料においても加工可能であることを確認した。
- (2) 一般的にレーザー光の焦点合わせ誤差は、Pt900 < Au (K18) < Ag925の順に大きい。また、加工可能な焦点範囲は、K18 > Pt900 > Ag925の順である。
- (3) 貴金属加工は、パルス繰り返し周波数を下げDC電流を上昇させると、加工幅、加工深さともに増加する。
- (4) 貴金属素材へ細かい格子状の彫刻加工を行うと、加工した部分が盛り上がり凸状の表面状態になる。
- (5) パルス繰り返し周波数と表面あらさとの関係は周波数が増加すると表面あらさが減少する。
- (6) 貴金属素材の彫刻及び切断時の減り量は、極めて微量である。
- (7) 周波数を一定とし、DC電流を15から25Aに急上昇することにより、0.1mm厚のAg板に、微小の穴をあけることができる。
- (8) 宝石へのレーザによる彫刻加工では、ヘマタイト、クリソプレース、ブラックオニキスが特に適応する。
- (9) ダイヤモンドへは任意の径の穴明けが可能であるほか、切断加工時の平均ロス量は約3%と少ない。
- (10) 象牙の加工は容易であるが、加工時に発生するガスのため排気装置が必須となる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、実験にご指導を頂いたドイツ

連邦共和国ラインラント・ファルツ州イーダー・オーバー
シュタイン, FEEのDr.Lotar Ackermann, KlausSchoder及び
FEEの皆様に深く感謝します.

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) 藤巻誠ほか：山梨県工業技術センター研報 (1987) P48