

レーザーによる微細加工技術の向上に関する研究

—宝石への微細な彫刻加工—

中山 信一・佐野 照雄・宮川 和博

Research on the Improvement of Detail Machining by the Laser

—Detail Sculpture Processing to the Gems—

Shin-ichi NAKAYAMA, Teruo SANO and Kazuhiro MIYAGAWA

要 約

本年度は、CWQスイッチYAGレーザー及びエキシマレーザー装置により、特に高硬度宝石に対し適正な加工条件を把握することと、微細な加工技術の向上を図る目的で加工実験を行った。

CWQスイッチYAGレーザー装置を用いた実験では、従来の加工方法及びマスクパターニング法を取り入れた加工方法について検討を行った。その結果、マスクパターニング法はダイヤモンドより硬度が低く、しかもレーザー光を透過してしまう宝石に有効であり、この方法によるデータの変換からレーザー照射まで問題なく加工できることを確認した。宝石の各種カット方法は、可視光が乱反射して輝きを増すようカットされているが、レーザー光を直接ラウンドブリリアント・カットまたは、バゲット・カット等に加工された宝石に照射した場合、クラウン部のテーブル平面から入射した光はパピリオン部で反射し、対称のテーブル平面に戻り出口部分で宝石を破壊する原因となることが多い。このようなことから、光を透過する宝石の加工においては、レーザーの加工位置、加工条件のほか、宝石の保持方法、保持材および冷却方法の選定が最も重要となる。なお、この場合のレーザーの適正加工条件として、出力は3～3.4KW、CWQスイッチの発振周波数としては3～6KHzであった。

さらに、ダイヤモンド等の高硬度宝石にエキシマレーザーを用いてマスクパターニング法による加工を施したところ、一定の条件の下では微細加工が可能であることを確認した。

1. 緒 言

本県の代表的な地場産業製品である貴金属装身具は、比較的の小物が多く、しかも複雑な形状で構成されていることから、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、機械設備はコンピュータ制御による加工機も導入されつつあるが、一般的に旧態依然としたものが多く、新規設備や高度技術の導入に遅れが目立つ。また、製品を開発する上では、新素材や新技術開発に努力している企業も増加してきたが、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、強いては生産性の低下へと繋がってきている。また、貴金属装身具製品は、金・銀・プラチナ等の素材に限られ、最近では白系統貴金属が好まれていることと相まって、自ずとデザインにも行き詰まり感が否めない。そこで、白系統の貴金属に良く合うダイヤモンドや色付きの比較的の小さい宝石が製品に採り入れられている。また、宝石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加工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。

これまで、YAGレーザー装置における微細加工、接合等による基礎的な検討結果から、各種の貴金属・宝石に対する加工は、特定の条件下でこれらに損傷することなく可能であることを確認した。そこで、これらの結果を踏まえて、12年度は新たに導入されるエキシマレーザーを含めるなかで、宝石に対する微細な加工技術の向上を図ることを目的とした。

本研究では、YAGレーザーによる加工において、特に硬度が高く通常の加工方法では困難と言われているダイヤモンド及びコランダム系で代表されるルビー等の宝石を対象とした。

特にYAGレーザー及びエキシマレーザーによる微細加工技術の高度化、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、宝石加工における保持法、冷却法および適正な加工条件の把握について検討を行った。

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、今回の実験に用いたCWQスイッチYAGレーザー

装置の加工部の外観で表1は、この機能特性を示す。

また、レーザ加工装置の制御用コンピュータには素材の形状や大きさに合わせて、倍率調整・座標回転・ミラーイメージ機能等を含むソフトウェアが組み込まれている。



図1 YAGレーザ加工装置

表2は、切断・マーキング用CWQスイッチYAGレーザ (Model 8100MQ) の仕様を示す。

さらに、今回新たに二分岐ファイバー付きYAGレーザ加工装置用として、コンピュータ制御による直行型X・Yテーブルを試作し、一部の宝石の穴明け実験に用いた。なお、テーブルの移動範囲はX・Yそれぞれ600,200mmで繰り返し精度は±0.02mmであり、Z軸に取り付けた出射レンズユニット（焦点距離60mm）へと導き、コンピュータ制御により加工を行う装置である。

表1 YAGレーザ加工装置の機能特性

(1) CWQスイッチYAGレーザ LEELASERモデル8100MQ (マーキング・切断用)
(2) スキャニングモジュール General Scanning INC. モデル QLSP-202
(3) X・Y・Z・θ オートステージ 移動範囲 : X;100, Y;200, Z;100mm, θ ;360度
(4) 3次元CAD/CAMソフト
(5) スキャナー用CAD・CAMソフト Vector Layouto コムネット(株)

表2 YAGレーザ (Model 8100MQ) の仕様

発振波長	: 1064nm
発振モード	: マルチモード
平均出力	: 70W (繰り返し10KHz時)
ピーク出力	: 130KW以上
繰り返し周波数	: 0~50KHz
スポット径	: 15~20μm
ガイド光	: HeNeレーザ2mw 直線偏光
安定度	: ±3%
消費電力	: 220VAC±10% 50/60Hz,30A

表3 エキシマレーザ加工機 (LPX220i-Ak) の仕様

KrFガスレーザ	
発振波長	: 248nm
最大パルスエネルギー	: 450mJ
最大出力	: 80W
最大加工物寸法	: 200×200×100mm
加工の方法	: マスクイメージング法
加工精度	: 最小2μm
縮小光学系倍率	: 1/30 (30×lens) 微細加工用

表3は、エキシマレーザ加工機の仕様を示し、加工実験としては一般的なマスクイメージング法を用いた。

2-2 レーザ制御と加工条件

CWQスイッチYAGレーザ光を用いた各種宝石の微細加工条件は、次の要因及び因子で行った。

- (1) 被加工素材
 - ダイヤモンド (ラウンド・ブリリアント, バゲット, ペア・シェイプト・ブリリアント・カット), ルビー・サファイヤ (ファセット・カット), キュービック・ジルコニア (ラウンド・ブリリアント・カット)
- (2) 励起ランプ電力
 - 2.8~3.5KW
- (3) Qスイッチパルス周波数
 - 2~6 KHz

一方、エキシマレーザ光を用いた各種宝石の微細加工条件は、次の要因及び因子で実験を行った。

- (1) エネルギー密度
 - 2.1, 5.3, 8.1, 10.2J/cm²

(2) パルス周波数

20KHz

(3) ショット数

100~10000回

(4) 焦点位置

-0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1mm

2-3 加工方法

本研究ではダイヤモンド、ルビー、サファイヤ、キュービックジルコニア等の高硬度の宝石類に対して、テーブルをNC制御により駆動し、テーブル上にセットした宝石類へYAGレーザー光を照射し加工実験を行った。

レーザーによる微細加工では、宝石材料の加工が終了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。当然のことではあるが、最小のレーザーエネルギーで最も効率的な加工ができることが理想であり、宝石へのダメージも最小となる。さらに、被加工物としての小さい宝石を如何に早く確実に固定し、また加工時の冷却方法はどの方法が簡便で最も効果があるかが重要なこととなる。

本装置のYAGレーザー光及びヘリウムネオンのガイド光は、90度折り返しミラーによりガルバノスキャナまたは固定集光光学系へと導かれる。

宝石の加工において、宝石の保持方法と冷却方法が重要な要素となる。当初、半水石膏を用いて固定していたが、硬化するまでに時間を要し、また煩雑なことから図2のような宝石固定用ジグを製作し、サブタンクに水を満たし冷却を行いながら加工実験を行った。また、NC制御によるX・Y・Zテーブルの駆動は、円弧やソーイングプログラムを作成し、加工実験に用いた。

なお、レーザー加工用のビームは、ある角度で焦点が絞られていることから、宝石の切断実験においてはXまたはY方向をソーイングするのみでは、宝石の厚さ方向が増すに従い光が届きにくくなり、加工効率が極端に低下してくる。このため、加工当初からある幅を持たせて加工する必要がある。宝石の切断において、加工厚さと加工幅の関係を現在使用しているレーザー加工装置のエキスパンダからのビーム径、レンズ径、および焦点距離から求め、実験に用いた。

一方、微細な彫刻等の加工においては、CWQスイッチ制御のガルバノスキャナ光学系を用い、マーキング用ソフトウェアで設定した任意の文字や図形をワーク上にマーキング加工を行った。なお、本研究でのマーキング実験は、マスクパターンを用いて行った。

いずれの光学系においても、He-Neレーザーのガイド光を基準にワークの加工位置を設定した。

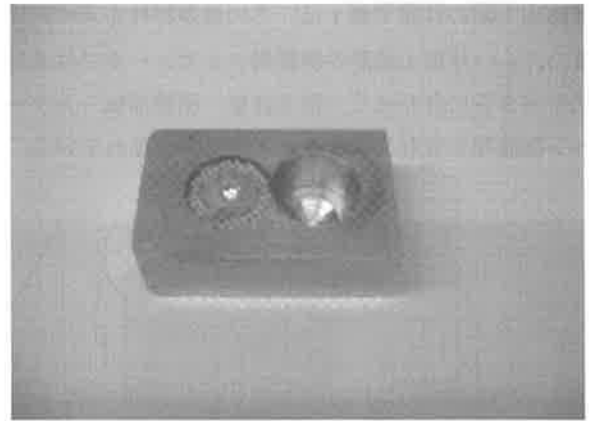


図2 宝石取付用用ジグ

YAGレーザーによる加工実験で用いた宝石は、特に硬度が高く通常の加工方法では困難と言われているダイヤモンド及びコランダム系で代表されるルビー等の宝石と比較的安価なキュービックジルコニアを対象に検討を行った。

また、今回は新たに導入したエキシマレーザーでは、マスクパターンニング法を宝石へ応用し、加工条件について検討を行った。

3. 実験結果及び考察

3-1 宝石の切断

レーザー光による宝石の切断で最も効果が現れるのは、宝石の中でも最も高度が高いダイヤモンドである。ダイヤモンドに限らず、レーザー光で切断できる宝石にあっては、レーザービーム径が他の加工方法に比べ極端に小さいため、加工時に生じる熱影響部と加工ロス量を最小限に抑えることができる。

しかし、図2のように宝石を切断する場合において、レーザービームがある角度で焦点を結んでいることから、XまたはY方向をソーイングするのみでは、宝石の厚さ方向に従い光が届きにくくなり、加工効率が極端に低下する。このため、最初からある幅を持たせて加工する必要がある。

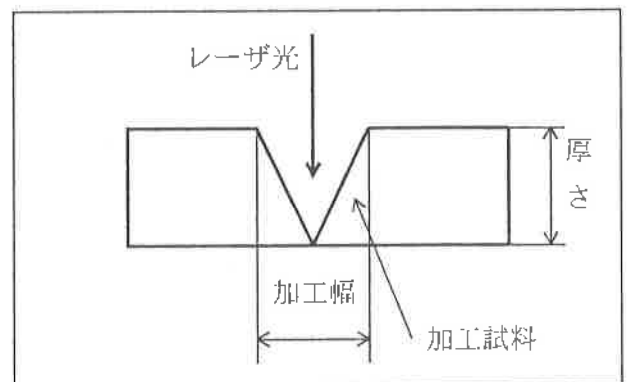


図3 切断加工形状

図3は、宝石の切断において加工厚さと加工幅の関係を、現在使用しているレーザー加工装置のエキスパンダからのビーム径、レンズ径および焦点距離から求めた結果である。

この条件に基づき、4例のダイヤモンド切断を行い加工前と加工後の重量差を比較し、これをロス量として平均ロス量を求めた結果、2.95%であった。

なお、この加工条件はテーブル移動速度 8 mm/Sec, Qスイッチ周波数 3 KHz, 出力3.2~3.4KWで行ったものである。

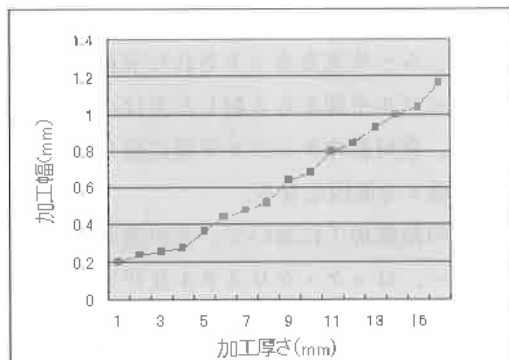


図4 切断厚さと加工幅

3-2 宝石への穴明け

ダイヤモンド等の天然宝石には、内包物や重大なインクルージョン等の原因により価値が極端に低下する場合がある。内包物は、レーザドリリングや故意にマイクロクラックを生じさせ除去する方法が採られている。

ここでは、内包物の除去とともにレーザドリリングで貫通した穴を明け、その穴に直接金具を通した製品および宝石のガードル部に半円や溝を加工してミステリーセッティングに応用する等の目的で加工実験を行った。

宝石に用いる各種カット方法は、可視光が乱反射して輝きを増すように加工されているが、レーザ光を直接ラウンドブリリアント・カット、バゲット・カット等にカットされた宝石に照射した場合、クラウン部のテーブル平面から入射した光はパピリオン部で反射し、点対称のテーブル平面に戻り出口部分で宝石を破壊する原因となることが多く確認できた。

図5及び図6は、レーザによりダイヤモンドに直径0.6mmと直径0.2mmの穴明けを行ったものである。

このようなことから、ダイヤモンドの加工においては、レーザの加工条件のほか、宝石の保持方法、保持材および冷却方法の選定が最も重要となる。なお、この場合のレーザの適正出力として3~3.4KW, Qスイッチ発振周波数としては3~6 KHzであり、加工速度は5から50mm/Secで行った。

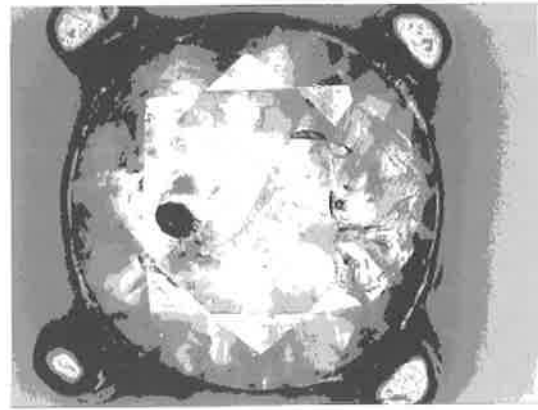


図5 レーザによる穴明け直径0.6mm (Diamond)
(出力; 3.1KW, QSW; 5 KHz)

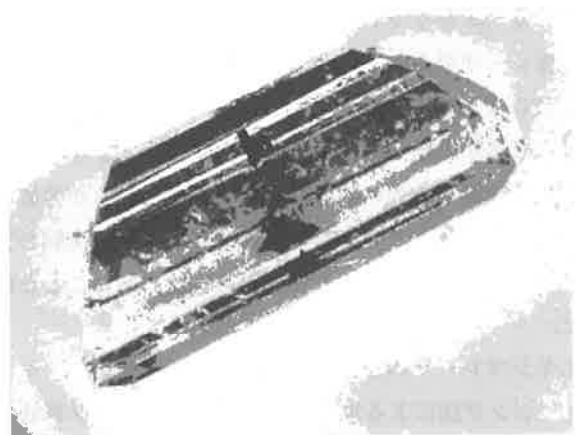


図6 レーザによる穴明け直径0.2mm (Diamond)
(出力; 3.2KW, QSW; 5 KHz)

3-3 宝石への微細加工

YAGレーザ装置を用いた各種宝石の微細加工としてこれまでレーザ光を直接宝石に照射して加工する方法について検討を行った。

ここでは、レーザ光を使用して間接的に宝石加工を行うマスクパターニング法を取り入れた加工方法について検討を行った。

一般的に使用されている宝石の中にヘマタイト、クリソプレーズ及びブラックオニキスのように、レーザ光を直接宝石に照射して細部まで加工できるものと、光が透過してしまい加工が困難なルビー、ロック・クリスタル及びアゲート等に別れ、これら光が透過してしまいダイヤモンド以下の硬度を有する宝石は、レーザ光を使ったマスクパターニング法が適している。

図7は、ダイヤモンドに次いで硬度の高いルビーを対象として、マスクパターニング法により加工したものである。データの取り込み及び変換からレーザ照射まで問題なく、微細な加工ができることを確認した。

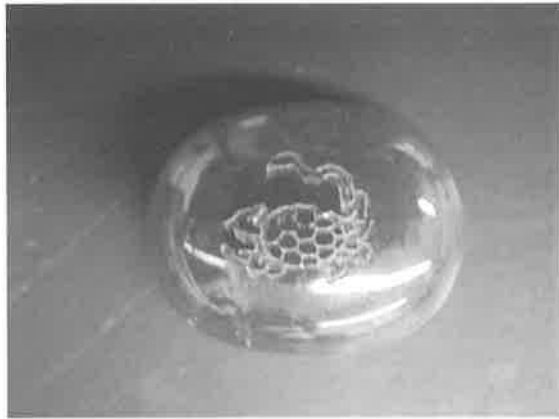


図7 マスクパターンによる加工例 (Ruby)
(出力; 3.0KW, QSW; 6 KHz)

3-4 エキシマレーザによる微細加工

気体レーザであるエキシマレーザでは、マスクイメージング法による加工が一般的である。YAGレーザと比較して装置自体が高価である上に、加工にはマスクを必要とするため、宝飾製品への応用は、まだ先ではあるが装置の導入を機会にダイヤモンド等の高硬度宝石に照射実験を行ったところ、一定の条件の下では加工可能であることを確認した。

エキシマレーザのKrFガスを使用しての実験で、マスクイメージング法による加工では、使用したマスク形状は□1mmで10倍レンズで□0.1mmに縮小し、加工を行った。

図7は、ダイヤモンドのテーブル面に、周波数20Hz エネルギー密度: 10.2 J/cm² ショット数: 1000回の条件のもとで加工したものである。

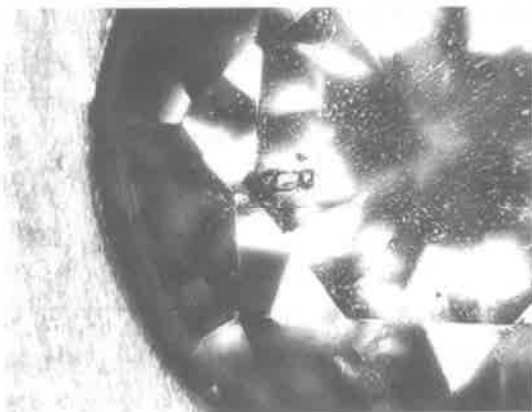


図7 エキシマレーザによる加工
□0.1mm (Diamond)

このように、エキシマレーザにおいても高硬度宝石に自由なデザイン表現が可能のため、今後付加価値の高い微細なデザインや文字等の表現には有効となる。

4. 結 論

YAGレーザ及びエキシマレーザ装置を用いて宝石類に微細な加工実験を行った結果、次のことが明らかとなった。

- (1) YAGレーザによる宝石加工において、宝石の保持と冷却方法が確立できた。
- (2) 宝石の切断方法において、レーザ光学系のエキスパンダからのビーム径、レンズ径および焦点距離から、加工厚さに対する加工幅を求めた。この条件で加工した結果、平均加工ロス量は2.95%であった。
- (3) 宝石への穴明けにおいて、宝石に用いる各種カット方法は、可視光が乱反射して輝くように加工されているが、レーザ光をカットされた宝石に照射した場合、テーブル平面から入射した光はパピリオン部で反射し、対称のテーブル平面に戻り出口部分で宝石を破壊する原因となる。
- (4) 宝石への微細加工において、光が透過し加工が困難なルビー、ロック・クリスタル及びアゲート等の宝石は、レーザ光を使ったマスクパターンニング法が適している。
- (5) エキシマレーザによるダイヤモンドの加工は、マスクパターンニング法において可能であり、その加工条件としては焦点距離0.7mm、エネルギー密度10.2J、パルス周波数1000回以上で加工可能である。

参考文献

- 1) 平野英樹: "最新レーザ加工技術総覧" 技術出版 (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) 中山ほか: 山梨県工業技術センター研報 (2000) p92
- 7) LEELASER取扱説明書, カタログ