

ガラス・セラミックスのレーザ精密微細加工

大阪大学

宮本 勇

Precision Laser Processing Glass of Ceramics

Isamu MIYAMOTO

Osaka University

1. はじめに

レーザビームは時間・空間の制御が容易であり、ガラス・セラミックスの精密・微細加工への応用が期待される。その加工プロセスも光化学反応から熱加工までバリエーションに富んだ加工原理を利用できる。ガラス・セラミックスは極めて脆いため、短波長・短パルスレーザが適しているが、この領域のレーザ技術は近年急速に進展している。しかし、そのアブレーション加工プロセスの解析は十分とは言えず、不明瞭な部分も多い。本稿は熱プロセスによるガラス・セラミックスのレーザアブレーションについて概説する。

2. レーザ加工面の性状

セラミックスを加熱すると熔融金属とガスに分解するが、更に高温になると分解金属は蒸発、イオン化する。Fig. 1にCW-CO₂レーザとKrFエキシマレーザでSi₃N₄セラミックを照射したとき、単位体積の除去に要するエネルギーを示す¹⁾。前者では除去エネルギーは約

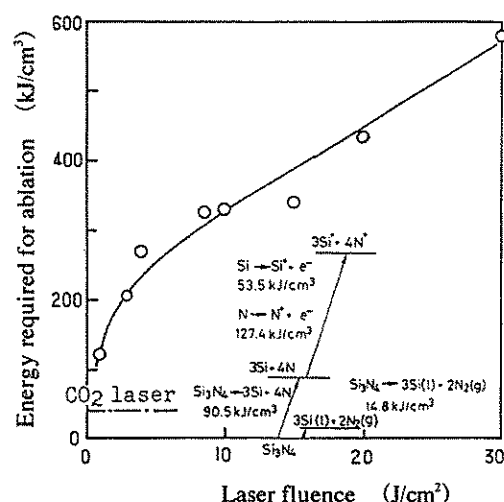


Fig. 1 Laser energy used for removing unit volume of Si₃N₄ ceramics plotted against laser fluence.

50 kJ/cm³と比較的小さく、熔融状態のSiは分解生成するN₂ガスによって機械的に除去される (Fig. 2)。熔融Siは数ミクロンの溶滴となってターゲット面に付着・残留して加工面の精度を低下させ、その保有熱のためクラックを生じる。ただし、加工能率は極めて高いので、面精度があまり重要でないスクライビングや単純な穴明け加工などに有効である。後者では100 kJ/cm³以上の大きいエネルギーが消費さ

〒565 吹田市山田丘 2-1
TEL 06-879-7533
FAX 06-879-7534
E-mail : miyamoto@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

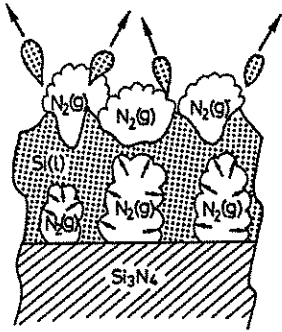


Fig. 2 Removal process of Si_3N_4 ceramics by CW- CO_2 laser ablation.

れるが、Siは蒸発して基板にほとんど残留しないので高い面精度が得られる。ただし、蒸発潜熱やイオン化に大きなエネルギーが費やされるため、加工能率は低い。

エキシマレーザ加工でもセラミック表面には数十ナノメートルの薄い金属層（または金属リッチな層）が残留する。この薄い金属層は基板セラミックスと強固に密着しており、これを介して金属とセラミックを拡散接合することができる。Fig. 3は Si_3N_4 とCuの接合例で、300～400℃の低温で100～200 Mpaの強固な継手を得られている²⁾。

ハードディスクヘッドの空気溝をYAGレーザ加工した応用例では、レーザ照射されたセラミックス基板は薄い金属層で表面が覆われており、研削加工で問題となる表面粒子の離脱を防止することができる³⁾。

一般に、レーザビームの吸収係数が大きい材料ほど良好な加工面品質が得られるが、薄い表面層へのレーザエネルギーの集中によって表面層が瞬時に分解・除去されるためである。ガラス・セラミックスの多くは紫外域での吸収係数が大きいので、エキシマレーザは面加工に適している。BK-7ガラスのように紫外波長域での吸収係数が大きい材料はエキシマレーザ加工によってナノメートルオーダーの精密面加工が可能である。しかし、熔融石英ガラスのように紫外波長域でも吸収係数が小さい材料は、ArFエキ

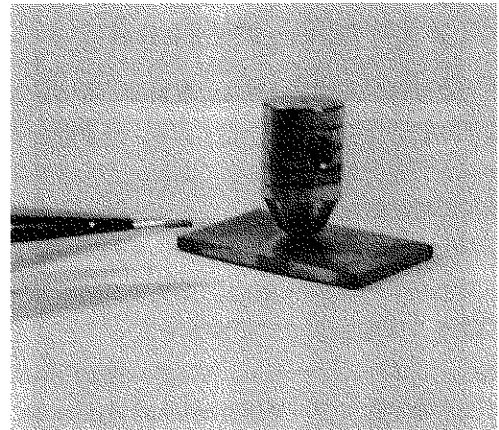


Fig. 3 Diffusion bonding of Cu rod to Si_3N_4 ceramics ablated by KrF excimer laser.

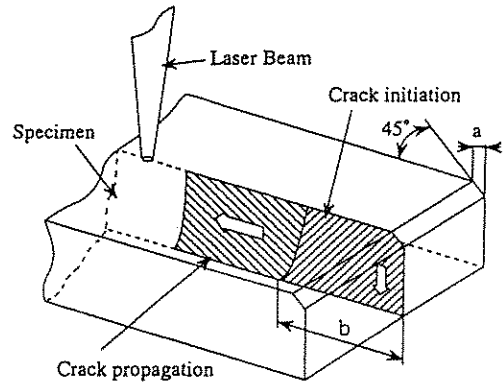


Fig. 4 Schematic illustration of crack initiation and propagation in laser-induced glass cacking.

シマレーザでも加工は困難である。この材料のレーザ加工には特別な工夫が必要で、真空紫外光の予備照射によって吸収係数を増大させると加工品質を改善することができる⁴⁾。

ガラスの脆い性質を利用したレーザ切断法⁵⁾も注目される (Fig. 4)。レーザ切断法はビーム照射部の周辺に生じる引張り応力を利用して割れの方を誘導するもので、任意形状の精密切断ができる。レーザ切断法の特長は、小さなビームエネルギーで全く熱影響がない切断が出来ることである。

3. プラズマとレーザーの相互作用

アブレーションプロセスの解析は、計測による実験的アプローチが中心である。計算機シミュレーションも行われているが、ほとんどが連続体の熱流体解析である。この手法はマクロ的な表面性状を取扱いには適しているが、ナノメートルオーダーのミクロ的な表面性状が問題となる精密・微細加工では正確さを欠くことになる。レーザーアブレーションのミクロ現象の解析には、分子動力学 (MD: molecular dynamics) を用いるシミュレーション^(6,7)が有効である。

Fig. 5 は Si のアブレーション加工 (パルス幅 6 ps) の計算例であるが、蒸発に際しては原子以外にクラスターが形成され、パルス終了後も約 40 ps にわたって蒸発が持続している。また、レーザーパルスの初期には熱膨張によってレーザー照射部が過渡的に盛り上がるが、その後は高温部の離脱により応力解除されて平面に戻っている。レーザービームがガウス状の滑らかなプロファイルであっても、加工表面には不規則

な凹凸が形成されることもわかる。これ以外に材料中を伝播する熱衝撃波の伝播、転位の発生・消滅、アブレーション粒子の速度分布なども MD 解析によって計算できる。今後セラミックスなどの材料への MD 解析の適用が期待される。ただし、コンピュータ能力によって取扱える原子数と加工時間が制限される。

Fig. 6 は KrF エキシマレーザーによる Si_3N_4 セラミックスの 1 パルス当たりの加工深さを示す。加工の閾値 (約 4 J/cm^2) 以上では、加工深さはフルエンスと共に増大するが、高フルエンス域では次第に飽和している⁽⁸⁾。加工深さが飽和するのは、以下に述べるようにレーザー誘起プラズマ中を通過するレーザービームが逆制動輻射による吸収で減衰するためである。

アブレーション加工では短時間に大量の材料が気化するためターゲット面付近は 100 気圧以上の高圧を発生する。また、 $10 \sim 20 \text{ J/cm}^2$ の高フルエンスではプラズマは $T=15,000 \sim 20,000 \text{ K}$ の高温で $\text{Ne}=10^{19}/\text{cm}^3$ オーダーの高電子密度となり、 $5 \sim 10 \text{ km/s}$ の高速で伝播

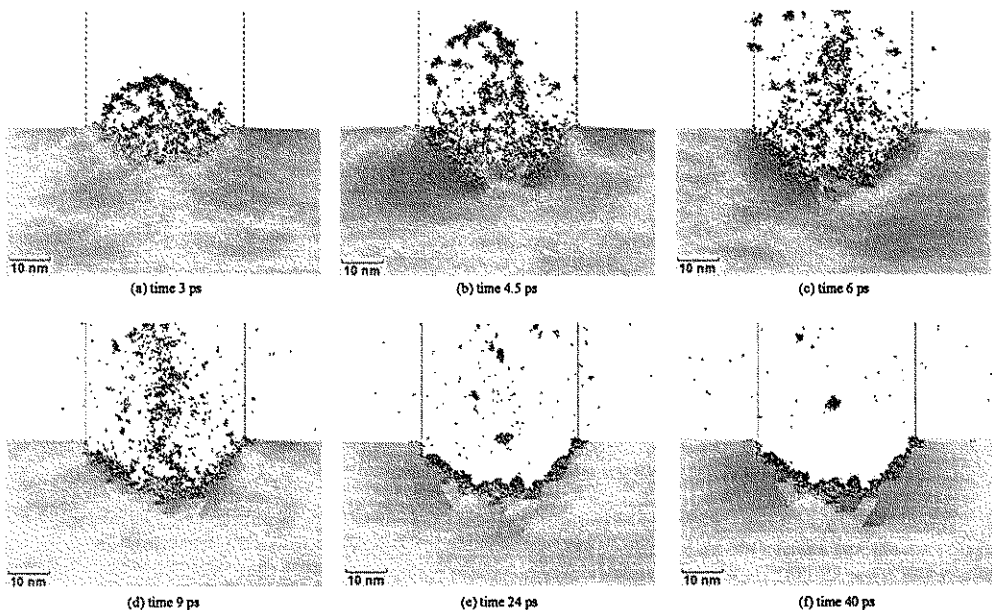


Fig. 5 Laser ablation process of silicon calculated by molecular dynamics at laser power density of 5 GW/cm^2 with pulse length of 6 ps.

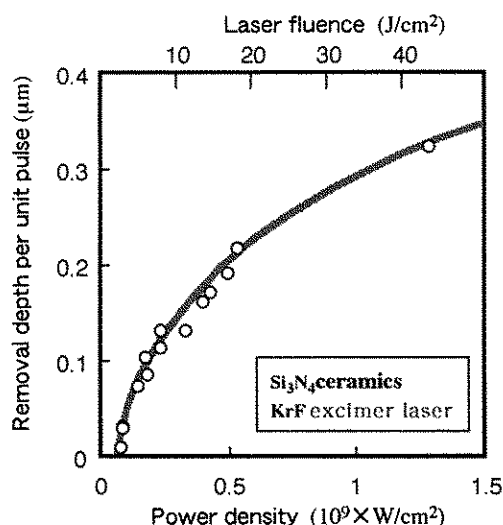


Fig. 6 Depth of removal per unit pulse plotted against laser power density in KrF excimer laser ablation of Si_3N_4 ceramics.

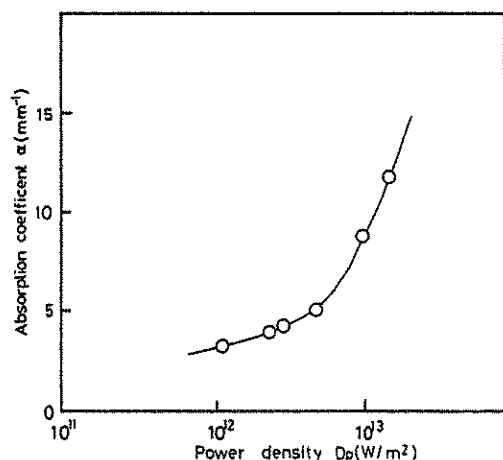


Fig. 7 Effect of laser power density on absorption coefficient of laser-induced plasma.

する⁹⁾。このようなプラズマ中を通過するレーザービームは逆制動輻射による吸収のため、ワークに到達するビーム強度は減衰する。Fig. 7にレーザー強度とプラズマの吸収係数の関係を示すが、 10^{13} W/cm^2 では 10 mm^{-1} もの大きな吸収係数となる。

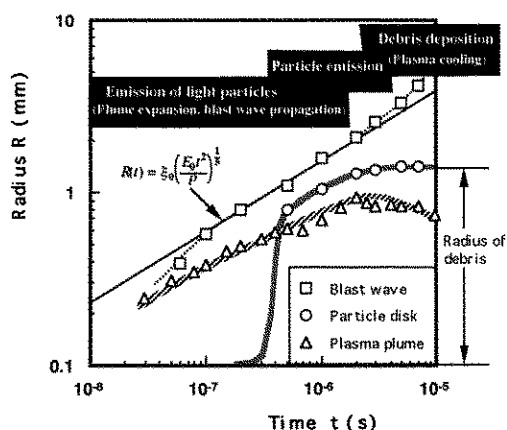


Fig. 8 Change in radii of blast wave, plasma plume and fine particles in laser ablation.

4. デブリーの付着

アブレーション加工ではデブリーと呼ばれる微粒子が再付着して加工部周辺を汚染するが、その主成分は、セラミックでは金属粒子¹⁰⁾、ポリマーではカーボン¹¹⁾である。

アブレーションしてから付着するまでの状況の高速度撮影によると¹²⁾、デブリー付着までの時間経過は Fig. 8 のようになる。レーザ照射により原子または分子状の軽い粒子が放出され、高温のプラズマとなってプラスト波¹³⁾を駆動しながら拡大する。数百ナノ秒経過して大きな粒子 (5~10 nm) が数放出が始まり、ターゲットに沿って半径方向に広がる。5~10 μs に粒子放出が完了すると、プラズマの冷却により負圧を生じ、周囲のガスが引き込まれる (Fig. 9)。この負圧の発生位置がターゲット面に接近していると、上および横からガスが流入し、最終的にはターゲットに向かうガス流が駆動され、微粒子はターゲットに引き寄せられる。ターゲットに到達した微粒子は再付着してデブリーとなるが、一部はバウンドして再び舞い上がるが。

Fig. 10 は Ar 雰囲気中で Si_3N_4 セラミックスをアブレーション加工したときのガス圧力とデブリー付着率の関係を示す¹⁰⁾。ワークに引

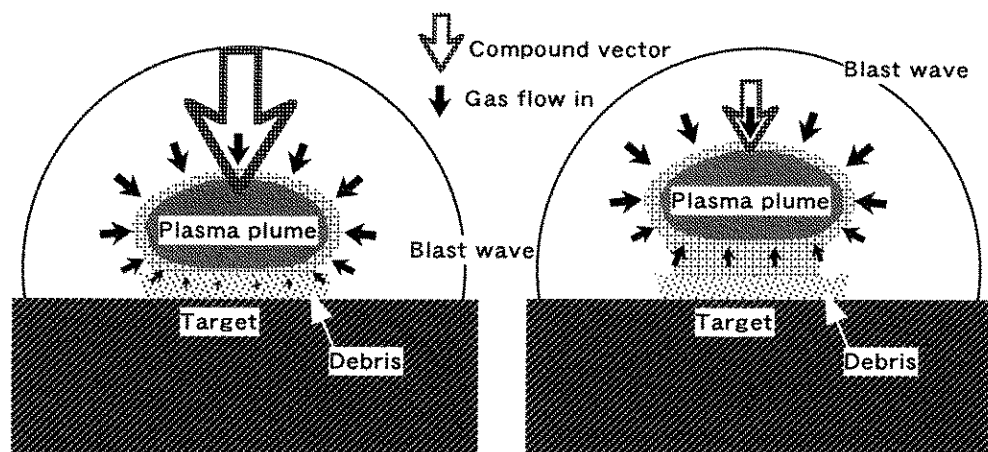
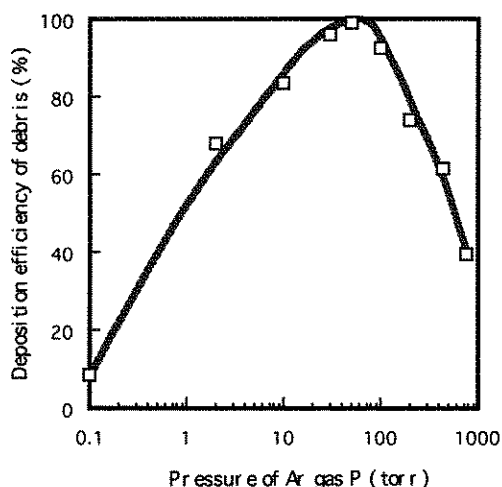


Fig. 9 Gas flow driven by cooling of hot plasma.

Fig. 10 Deposition efficiency of debris in laser ablation of Si_3N_4 ceramics in Ar atmosphere.

寄せられた粒子のほとんどバウンドせず、全て基板に付着する圧力条件があることがわかる。雰囲気ガス圧力がこれより低いと、プラズマの発生位置がワークから遠ざかり、ワークに向かう駆動力が低減するために付着量は減少する。真空中またはHeなどの軽いガス雰囲気中でも、デブリー付着量は低減する。デブリーの付着する領域はプラスト波の広がる半径に依存

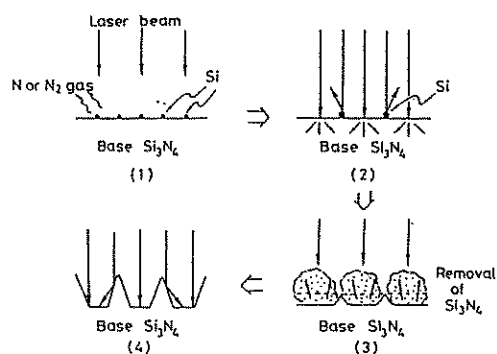


Fig. 11 Formation process of cones at laser-irradiated surface.

し、 $(E/P)^{1/3}$ に比例^{(12),(14)}する (E =レーザーエネルギー、 P =雰囲気ガス圧力)。逆にこれより雰囲気ガス圧が高いと駆動力が過大になり、粒子はバウンドして付着率が低下する。

閾値に近い $4\sim 5 \text{ J/cm}^2$ のフルエンスで加工すると、円錐状の突起が形成されて加工面は均一にはならない。突起の形成による不均一加工は Fig. 11 に示すようにデブリー付着が原因である。すなわち、デブリー粒子が付着すると、ターゲットでの影の部分に小さな円錐状の突起が形成される¹⁾。円錐の傾斜部分では平面部に比べてフルエンスが低いので、パルス数が増大

すると突起が次第に成長する。デブリー粒子を除去しうる高フルエンスの条件や、デブリー付着のない真空中では、円錐状突起は形成されない。

上述のようにガス圧を適当な値に選ぶと、分解蒸発した粒子をほとんど全て再付着できることは実に興味深い。このことは、超微粒子の創成に応用できる可能性がある。また、付着デブリーが正荷電を帯びる性質があるが、ポリマー加工ではこれを利用して金属の無電界メッキに利用する試みがなされている¹⁵⁾。

レーザによるガラス・セラミックスの精密微細加工に対する関心は高いが、実用化例は現状では少ない。レーザによる精密微細加工の将来市場の大きさはまだ不明確である。著者の主宰するレーザ熱加工研究会の分科会では加工プロセス、レーザ加工機などの開発すべき将来技術を1996年から3年計画で検討している。いずれかの機会に成果を発表したい。

参考文献

- 1) I. Miyamoto and H. Maruo, *Laser Assisted Processing II*, SPIE Vol. 1279, 66 (1990)
- 2) 大家, 矢野, 米田, 勝村, 第35回レーザ熱加工研究会論文集, 153 (1995)
- 3) 紺野, 第30回レーザ熱加工研究会論文集, 221 (1993)
- 4) 杉岡ら, レーザ研究, Vol. 25, No. 4, 283 (1997)
- 5) 黒部, 第30回レーザ熱加工研究会論文集, 33 (1993)
- 6) 大村, 宮本, 第41回レーザ熱加工研究会論文集, 107 (1997)
- 7) 大村, 福本, 宮本, 精密工学会誌, Vol. 63 (1997) (to be published)
- 8) H. Maruo, I. Miyamoto and T. Ooie, *Proc. Int. Conf. on Laser Advanced Materials Processing*, 293 (1992)
- 9) T. Ooie, I. Miyamoto and H. Maruo, *Proc. ICALEO95*, LIA Vol. 80, 441 (1995)
- 10) I. Miyamoto, A. Maeda and H. Maruo, *Proc. ICALEO92*, LIA Vol. 75, 480, (1992)
- 11) D. L. Singleton et al, *J. Appl. Phys.*, Vol. 67, No. 7, 3324 (1989)
- 12) I. Miyamoto et al, *Proc. ICALEO94*, LIA Vol. 79, 240, (1994)
- 13) P. E. Dyer and J. Shidu, *J. Appl. Phys.* Vol. 64, No. 9, 4657 (1988)
- 14) S. Kuepper and J. Brannon, *Appl. Phys. Letts*, Vol. 60, No. 13, 1633 (1992)
- 15) 矢部, 新納, 第28回レーザ熱加工研究会論文集, 85 (1992)