

# エレクトロニクス実装への応用を 志向したレーザー微細加工の理論解析



大村悦二\*

## Theoretical Analysis of Laser Micro-Processing Aimed at Applying to Electronics Packaging

**Key Words** : laser micro-processing, electronics packaging, thermohydrodynamics, molecular dynamics, nonlinear optics

### 1. はじめに

昨今、実用レーザーは急速に進展しつつある。たとえば、半導体レーザー励起Nd:YAGレーザーのような全固体レーザーは、従来のランプ励起型と比べ、高効率でビーム品質に優れ、メンテナンスが容易なため、実用に適している。波長変換により、赤外レーザーから高調波を発生させることができる非線形光学結晶の発達は、全固体レーザーの精密微細加工への適用を助長している。一方、パルス幅がピコ秒( $ps=10^{-12}s$ )、フェムト秒( $fs=10^{-15}s$ )オーダーのいわゆる超短パルスレーザーも、デスクトップのコンパクトなものが出現し、レーザー精密微細加工の世界を変えつつある。レーザー精密微細加工が最も期待される分野の一つがエレクトロニクス実装であろう。ここでは、著者らが行ったレーザー精密微細加工に関連した理論解析・コンピュータシミュレーションをいくつか紹介する。

### 2. 蒸発を伴う熱流体解析<sup>(1,2)</sup>

ハードディスクでは、ディスクが静止したとき磁気ヘッドと凝着するのを防ぐため、CSS(Contact Start-Stop)ゾーンと呼ばれる領域に微小な凹凸をつける。レーザーテクスチャリングはそのための技術で、パルスレーザーを1ショットずつ照射しながら

規則的に微細突起(パンプと呼ばれる)を多数作る。このときのパンプの形成メカニズムを明らかにするため、静止したアルミニウムに短パルスNd:YLFレーザーを照射したときの熔融金属の流れと表面形状の時間変化を解析した。レーザービームの強度分布はガウス型とし、その中心軸に一致して深さ方向にz軸、初期表面にr軸をもつ二次元円柱座標系をとった。自由表面では蒸発に伴う気液界面の移動と、蒸発反跳圧力およびマランゴニ力(温度勾配に起因する表面張力)を考慮した。熔融池内部では、連続の式、ナビエーストークスの式、エネルギー方程式を差分法によって解き、温度分布、熔融池流れの速度分布と圧力分布、および自由表面形状の時間変化を計算した。自由表面にはVOF法を適用し、物性値の温度依存性を考慮した。

パルスエネルギー $E_p=6.375 \mu J$ 、ビーム半径 $r_e=15 \mu m$ 、パルス幅 $\tau_p=15 ns$ 、吸収率 $\epsilon=0.3$ のときの解析結果を基にして作成した表面形状変化の模式図を図1<sup>(1)</sup>に示す。レーザー照射中、蒸発反跳力が熔融金属表面を下向きに押しえつけるように働き、熔融金属を外側に押しやる流れが生じる。レーザー照射終了後も、それまでに蒸発反跳力によって誘起された

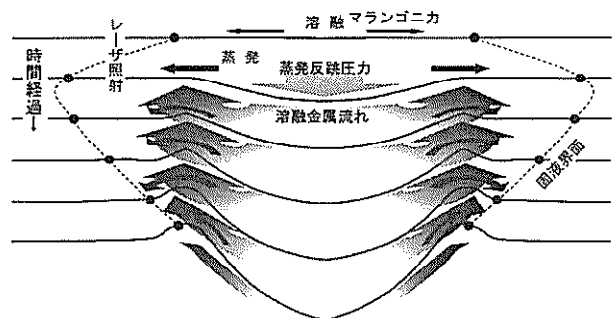


図1 レーザテクスチャリングにおける表面形状の変化



\* Etsuji OHMURA  
1952年11月生  
1981年大阪大学大学院工学研究科  
後期課程単位修得退学  
現在、大阪大学大学院工学研究科  
生産科学専攻、助教授、工学博士、  
精密工学  
TEL & FAX (06) 6879-7534  
E-Mail ohmura@mapse.eng.  
osaka-u.ac.jp

流れはそのまま維持され、中央の陥没は持続する。この時点では蒸発を伴わないため、外向きに押し出された流れは溶融池周囲に盛りりを形成する。その直径は約10 $\mu\text{m}$ である。冷却が進んで盛りりの外側が凝固するとき、盛りりの内側に働く外向きのマランゴニ力によって盛りりが促進される。約44 nsの時刻でポンプの最も高い部分が凝固し、これ以降高さの変化はない。その高さは初期表面上約35 nm、穴の深さは約145 nmである。

### 3. レーザアブレーションの分子動力学解析<sup>(3-9)</sup>

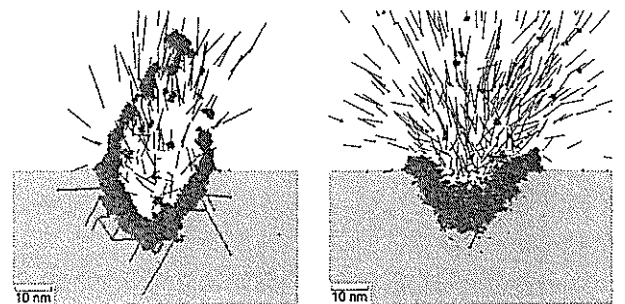
ピークパワーの高い超短パルスレーザーを照射すると、材料表面はピコ秒オーダーで溶融・蒸発する。アブレーションした粒子は上方に飛散するとともに、その一部が表面に再付着する。穴周囲には溶融層が堆積する。一方、衝撃波が材料内を伝播し、固相内にはすべり面や空孔が生成される。これらのレーザーアブレーションに関わる諸現象は、相互に関係しながら極短時間に局所領域で生じるので、一般に計測や観察が難しい。大村・福本<sup>(3)</sup>は、系の原子や分子の運動を追跡できる分子動力学法に着目し、レーザーアブレーション現象を原子レベルで系統的に明らかにすることを試みた。ピコ秒パルスレーザー照射によるアブレーション現象は、分子動力学計算と同じ時間オーダーで生じる。しかも、原子レベルで解析できることは、連続体モデルによる解析の限界、実験による観察・測定の困難さや系統的分析の不足を補う上で有用であると考えたからである。

#### 3.1 アルミニウム<sup>(5, 6)</sup>

金属は熱伝導が非常によいため、加工現象を定量的に評価するには、従来の分子動力学をそのまま適用すると問題がある。そこで、自由電子による熱伝導を補正しながら分子動力学計算を行う新しい手法を提案し、改良型分子動力学法と名づけた<sup>(4)</sup>。ここで紹介するシミュレーションではこの改良型分子動力学法を適用し、 $1.6 \times 10^5$ 個のAl原子を配置して、Nd:YAGレーザーの第四高調波を照射した。シミュレーション結果は、アニメーションによっても視覚化した。

シミュレーションの結果、フルエンス(単位面積あたりのパルスエネルギー)が一定の場合、アブレーション過程には二つの型があることがわかった。一つはパルス幅が極めて短いときに生じる爆発的なア

ブレーションであり、もう一つはパルス幅が長いときに生じる穏やかなアブレーションである。「爆発的な」、「穏やかな」という語は、アニメーションで粒子の飛散する様を見たときの印象から、それらの相違を端的に表す言葉として名づけたものである。図2<sup>(6)</sup>にそれらの典型例のスナップショットを示す。溶融領域やすべり面を明示するため、原子配列のパターンを三つに分類してグレーレベルで表示するとともに、蒸発粒子の速度ベクトルを線分で示している。図(a)が爆発的なアブレーション、図(b)が穏やかなアブレーションである。図(a)と図(b)における蒸発は、それぞれほぼ時刻3 psと9 psで開始しており、図(a)の爆発的なアブレーションがパルス終了後に生じることは注目される。図(a)ではこの爆発的なアブレーション時に比較的大きな粒子がちぎれるように飛散する。これに対して図(b)では、小さい粒子が広い角度範囲にわたって、特にパルス終了の前後に多く蒸発する。粒子の飛散速度は、いずれも高々10 km/s程度である。一方、内部では球面波状に衝撃波が弾性波速度で伝播するとともに<sup>(7)</sup>、固液界面からは固相内部に転位が移動してすべり面が生じる。



(a) 平均パワー密度: 10GW/cm<sup>2</sup>  
パルス幅: 3ps  
時刻: 9ps

(b) 平均パワー密度: 1GW/cm<sup>2</sup>  
パルス幅: 30ps  
時刻: 30ps

図2 ピコ秒パルスレーザーによるアルミニウムのアブレーションプロセスのスナップショット (パルスエネルギー: 3mJ)

#### 3.2 シリコン<sup>(8, 9)</sup>

Siのレーザーアブレーション現象を明らかにするため、StillingerとWeberにより提案された三体ポテンシャルを用い、三次元分子動力学シミュレーションを行って、以下のことを明らかにした。パルス幅がサブピコ秒のように非常に短くなると、レーザー光

の内部吸収, つまり吸収係数の影響が大きく, 熔融深さは表面構造に依存しない. パルス幅が長くなると, 格子振動による熱伝導の効果が大きくなり, 深さ方向に原子配列が層状になっているSi(111)表面の方がSi(100)表面よりも深くまで熔融する. 一方, 金属のときと同様, レーザ照射に伴い衝撃波が材料内部に伝播する. その伝播速度は弾性波速度に等しいが, Si(111)表面の方がSi(100)表面より大きい. Si(111)表面では原子配列が深さ方向に層状になっていることがここでも深く関わっている.

#### 4. 第二高調波発生におけるビームプロファイルとパルス波形の解析<sup>(10-13)</sup>

全固体レーザーによる精密微細加工では, 非線形光学結晶による波長変換が必要不可欠であるが, 変換効率は結晶の温度変化に非常に敏感であることが知られている. そこで大村・野村<sup>(11)</sup>は, まず一様強度分布レーザーによる第二高調波発生(SHG)について, 結晶によるレーザー光吸収を考慮した光電場の複素振幅方程式を導出して, 繰り返し照射時の内部発熱に伴う熱伝導とSHGの連成問題を解析した. さらに, ガウシアンビームを入射した場合のSHGと, 内部発熱に伴う熱伝導の連成問題を二次元軸対称モデルにより解析した<sup>(10)</sup>. これにより, ガウシアンビームの繰り返し照射における結晶内のパワー密度分布や出力ビームプロファイルの時間的変化を評価するとともに, 温度制御が変換効率に及ぼす効果などを定量的に解析した. さらに, 繰り返し照射時のパルス波形のひずみについても解析した<sup>(12)</sup>.

位相整合時(結晶の任意の位置 $z_1$ で発生した第二高調波が位置 $z_2$ まで伝播したとき,  $z_2$ で発生しつつある第二高調波と同位相である状態)の変換効率は, 非線形光学結晶の長さが入射パワー密度に比例して高くなる. しかし, 繰り返し照射すると, レーザ光吸収によって温度分布が生じる. その結果位相整合が乱れ, 干渉が生じて結晶内で変換効率が変動する(特に高パワー密度入射の場合顕著である). すなわち, SHG変換とその逆変換が交互に生じる. 一様強度分布レーザー入射に比べてガウシアンビーム入射の場合は, この変動が結晶内で複雑に生じるので, 出力第二高調波のビームプロファイルは, 図3<sup>(12)</sup>に例示するように, 照射時間とともに複雑に変化する. すなわち, リングモードや, シングルモードのまわ

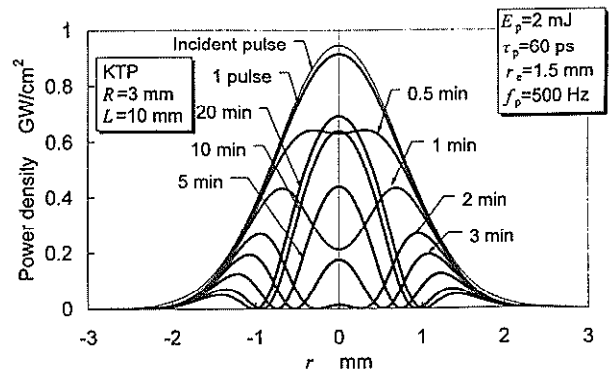


図3 出力第二高調波ビームプロファイルの時間変化の解析例

りにリングを有するプロファイルとなる. このリングは, 入射パワー密度が高いと二重になることなども明らかとなった. 精密微細加工に適用する場合は注意が必要である. このようなビームプロファイルは, 図4<sup>(13)</sup>に一例を示すように, 実験的にも確認された.

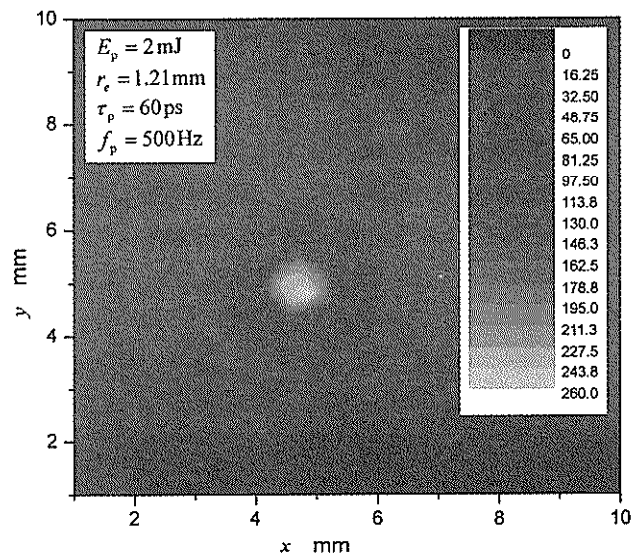


図4 KTPを用いNd:YAGレーザーを波長変換して得られた第二高調波のビームプロファイルの例(ドイツLehrstuhl für Lasertechnik, RWTH-AachenのA.Horn氏による撮影)

なお, パルス波形が時間的に一定の矩形波短パルスでは, 繰り返し照射しても出力第二高調波のパルス波形に乱れは生じない. しかし, パルス波形がガウシアンでピークパワーの高い短パルスの場合, 出力第二高調波のパルス波形は, メインパルスの前後にプリパルスとポストパルスが生成するなどの乱れ

が生じることも明らかにした。これも逆変換に起因する現象である。ピークパワーの高いパルスでは、パルス波形にも配慮が必要となる。

## 5. おわりに

携帯電話、携帯情報端末(PDA)、ノートパソコンに代表されるモバイル電子機器のますますの小型化、高密度化、高機能化に 대응するため、レーザー精密微細加工は今後さらに多用されていくであろう。レーザーは単色性、指向性、可干渉性に優れた高輝度な光であるから、その伝播を理論的に取り扱うのに適している。一方、レーザーと物質の相互作用は、微小領域で極めて短時間に生じるので計測や観察が難しく、理論的な解析も重要である。したがって、レーザー加工は、加工点近傍における物理現象のみならず、加工源であるレーザーあるいは光学系までも含めた加工システムとして捉え、計測・制御はもちろん、理論的な解析・シミュレーションも一つの柱として、高度化、知能化を図っていく必要がある。このようなスタンスから、著者らはここに紹介したような研究を行っている。今後はさらに研究の拡大と掘り下げに努めていきたい。

## 文 献

- (1) E. Ohmura, R. Murayama and I. Miyamoto, Proc. SPIE, Vol. 4088(2000)244.
- (2) 村山・大村・他3名, 溶接学会論文集, 18(2000)373.
- (3) 大村・福本, 高温学会誌, 20(1994)228.
- (4) E. Ohmura and I. Fukumoto, Int. J. JSPE, 31(1997)206.
- (5) E. Ohmura, I. Fukumoto and I. Miyamoto, Int. J. JSPE, 32(1998)248.
- (6) 大村・福本・宮本, 精密工学会誌, 67(2001)1884.
- (7) 福本・大村, 精密工学会誌, 67(2001)916.
- (8) Y. Ishizaka, I. Fukumoto, E. Ohmura and I. Miyamoto, Proc. ICALEO'98, Vol. 85, Ser. A(1998), 55.
- (9) 大村・石坂・福本・宮本, 溶接学会論文集, 19(2001)649.
- (10) K. Nomura, E. Ohmura and I. Miyamoto, Proc. ICALEO2002, Vol. 94(2002)903.
- (11) 大村・野村・宮本, 精密工学会誌, 69(2003)252.
- (12) E. Ohmura, K. Nomura and I. Miyamoto, Proc. SPIE, Vol. 5063(2003).  
(to be published)
- (13) K. Nomura, E. Ohmura, A. Horn and I. Miyamoto, Proc. SPIE, Vol. 5063(2003).  
(to be published)

