

CIP法によるレーザ加工の数値計算 Numerical simulation of laser processing by CIP method

前原 純, 東京工業大学大学院創造エネルギー専攻, 東京都目黒区大岡山 2-12-1, E-mail: 99m3633@es.titech.ac.jp
Chojil Baasandash, 東京工業大学大学院機械工学専攻, 東京都目黒区大岡山 2-12-1, E-mail: basanda@stu.mech.titech.ac.jp
中川順達, 東京工業大学機械物理工学専攻, 東京都目黒区大岡山 2-12-1, E-mail: nakagawa@mech.titech.ac.jp
矢部 孝, 東京工業大学機械物理工学専攻, 東京都目黒区大岡山 2-12-1, E-mail: yabe@mech.titech.ac.jp
Jun MAEHARA, Dept. of Energy Science, Tokyo Inst. Tech., 2-12-1 O-okayama, Tokyo 152-8550
Chojil Baasandash Dept. of Mechanical Engineering, Tokyo Inst. Tech., 2-12-1 O-okayama, Tokyo 152-8550
Masamitsu NAKAGAWA Dept. Mechanical Sciences and Engineering Tokyo Inst. of Tech., 2-12-1 O-okayama, Tokyo 152-8550
Takashi YABE, Dept. Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Inst. of Tech., 2-12-1 O-okayama, Tokyo 152-8550

<Abstract> Laser processing is useful processing method but its precise control is not necessarily easy. For instance, irradiation site spreads over wider range than focal spot size. Moreover, laser-plasma interaction is yet unknown clearly and hence variety of physical phenomenon is needed to be elucidated. We calculated this processing phenomenon with CIP-CUP (Cubic Interpolated Pseudoparticle Combined Unified Procedure) method and compared with experimental result.

1. 緒言

レーザ加工はレーザ応用の大きな分野の一つである。他の加工方法では不可能な高融点、高強度材料にも容易に加工でき、また機械的な力を加えないで加工できるので、加工物が変形しやすい場合にも有効である。しかし、この加工方法にも問題点があり、穴あけの場合、穴の深さや穴の径の大きさは一度レーザエネルギーが加工物に照射されると後はエネルギー粒子と材料との間ですべてが決定されてしまうため制御できない。そのため試行錯誤実験を行い加工条件を決定する必要がある。その他にも、レーザのスポット半径以上の広範囲に渡りターゲットの表面が損傷される。

ターゲット表面に生成される穴は、レーザ照射時間内に生成されるわけではない。もしそうだとすると、数 ns で数十 μm の穴が形成されたことになり、これは金属中の音速よりも速い速度で穴が掘れていくことになり、考えにくい。やはり、照射後も穴が掘れていくと考える方が自然であり、表面に残っている熱、またはレーザ照射により生成されたプラズマの熱や圧力の影響もあって穴が形成されると考えられる。

本研究では穴の形成過程を CIP 法、C-CUP 法を用いて数値計算を行い明らかにする。

2. 主な使用記号

I	: レーザ強度
W	: エネルギー
r_0	: レーザ照射半径
	: パルス幅
T	: 温度
	: 波長
m_e	: 電子質量
N_e	: 電子密度
	: 吸収係数
I_{Al}	: アルミニウムの吸収長
I_{pla}	: プラズマの吸収長

3. 計算手法

3.1 基礎方程式

本研究ではレーザ照射時のターゲット上での現象のシミュレーションを行うが、これは流体の方程式を数値的に解くことで実現する。

まず、一番単純な非粘性流体の方程式は密度、運動量、エネルギーの保存則から次のように表せる。

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{f} = \mathbf{G} \quad (3.1)$$

ここで、

$$\mathbf{f} = (\rho, \mathbf{u}, p) \quad (3.2)$$

$$\mathbf{G} = \left(-\rho \nabla \cdot \mathbf{u}, -\frac{\nabla p}{\rho}, -\rho C_s^2 \nabla \cdot \mathbf{u} \right) \quad (3.3)$$

これらの方程式を本研究では CIP (Cubic-Interpolated pseudoparticle) 法を用いて解く。

3.2 CIP 法

CIP 法⁽¹⁾とは一般の双曲型方程式を統一的に解くことができるアルゴリズムである。この手法の大きな長所は、移流項とその他の項(非移流項)を分離して解くということである。これにより、CIP 法を用いて流体コードを構築すると、圧縮性流体と非圧縮性流体を同時に解くことも可能となる。さらに、簡潔で数値拡散も少ないことも挙げられる。

3.3 C-CUP 法

流体は大きく2種類に分けることができる。すなわち、圧縮性流体と非圧縮性流体である。この圧縮性と非圧縮性の区別を決めるのが音速である。

数値計算の面から見ると、たとえば非圧縮性流体では音速が非常に速いことが問題となる。つまり、音速で決まる時間ステップを用いると、実際に計算したい流速の時間スケールでの現象を捉えるためには非常に多くの計算時間を必要とし、事実上不可能となってしまうのである。また、ほとんどの場合、圧縮性流体では基礎方程式を保存形に書き直して計算するが、非圧縮性流体では非保存形であることも大きな違いである。以上のような理由から、圧縮性流体と非圧縮性流体を同時に解くことは難しい。しかし、これを可能にしたのが C-CUP (CIP-Combined, Unified Procedure) 法⁽²⁾である。C-CUP 法では固体、液体、気体を同時に解くことが可能である。本研究においては、固体、液体、気体が混在しているために C-CUP 法が非常に有効である。本研究では極端な密度差を持つ物質同士の現象を取り扱うが、C-CUP 法のこのよう

な特性が多いに有効である。

4. 計算条件

アルミニウム表面におけるレーザーの吸収を熱の吸収として、2次元軸対称によるシミュレーションを行った。計算方法はCIP法、C-CUP法を用い、不均一固定直行格子を用いた。

4.1 レーザーの特性

Fig.1 にレーザー強度の半径方向の分布を示す。レーザー強度は以下の式で表されるガウス分布とし、照射半径 r_0 の位置で $1/e$ の強度となる。

$$I = I_0 \times \exp\left\{-\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right\} \quad (\text{W/cm}^2) \quad (4.1)$$

ここで、 I_0 はレーザー強度の最大値を表す。

Fig.2 にレーザー強度の時間分布を示す。レーザー強度は以下の式で表されるガウス分布とし、 I_0 の $1/e$ 以下の部分がパルス幅の τ となるように与えた。

$$I = I_0 \times \exp\left\{-\left(\frac{t-T}{\tau/2}\right)^2\right\} \quad (\text{W/cm}^2) \quad (4.2)$$

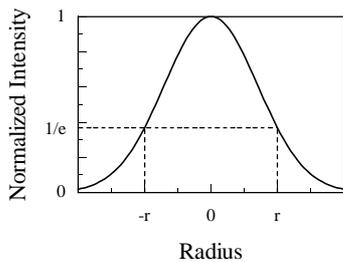


Fig.1 Laser Intensity Profile(space)

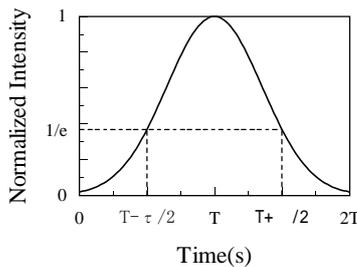


Fig.2 Laser Intensity Profile(time)

4.2 アルミニウム

レーザーをアルミニウムに照射すると、レーザーエネルギーはジュール熱としてアルミニウムに吸収される。このときのアルミニウム表面における吸収係数 η は次のように表せる。

$$\eta = 4\pi \sqrt{\frac{\sigma}{c\lambda}} \quad (4.3)$$

ここで σ は電気伝導度であり、 c は光速を表している。

吸収長 l_{Al} は、吸収係数の逆数として与えられるため、以

下のように求まる。

$$l_{Al} = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{c\lambda}{\sigma}} \quad (4.4)$$

4.3 プラズマ

アブレーションの過程において、空気が電離した高温のプラズマが発生する。このメカニズムは以下のように発展する。

レーザー光の照射を受けた気体の分子または原子は、同時に数個の光子を吸収することによって多光子電離を行い、初期電子を供給する。多光子電離によって生じた初期電子は、周囲の中性粒子またはイオンと衝突し、逆制動輻射過程による輻射エネルギーの吸収を行う。

高出力レーザー光を固体ターゲットに照射すると、固体表面で急速に昇華、電離が起こり、固体密度 10^{22}cm^{-3} にほぼ相当する、低温ではあるが超高密度のプラズマが生ずる。

この後はレーザーとプラズマの相互作用でレーザーエネルギーは主にプラズマに逆制動輻射などによって吸収され、プラズマの温度が上昇する。これに伴って吸収エネルギーの一部はプラズマから溶融状態の表面に伝えられて、いっそう気化が促進されプラズマの密度が高くなる。

局所的に高温高密度化して入射レーザー光の遮断密度を越えると、十分に吸収されないままレーザー光は反射される。

プラズマ中の荷電粒子は絶え間なく熱的運動を行っているが、運動の結果、正負の電荷電離が生ずると、クーロン力が働き、元の状態に戻ろうとする。戻る粒子は衝突をしない限り行き過ぎるので、再び復元力が働き、結局は振り子のようになり単振動を行う。このような荷電粒子群の周期的な振動をプラズマ振動と呼び、その振動数をプラズマ周波数と呼ぶ。

電磁波をプラズマにあてると電磁波の周波数 ω が $\omega > \omega_p$ の場合、電磁波はプラズマ中を伝播するが、 $\omega < \omega_p$ の場合、電磁波は遮断または反射される。これは電磁波の電界変化に対して、より早い電子群が追従して、結果的には電界を遮断してしまうからである。電磁波がプラズマを通過できない状態をカットオフ (Cut off) と称し、その時の周波数を遮断周波数と呼ぶ。カットオフは $\omega = \omega_p$ の状態で起こるので、遮断周波数はプラズマの周波数に等しい。逆にある一定の波長の電磁波を反射するプラズマの密度の最小値を遮断密度 (Cut off density) と呼ぶ。

このプラズマの角周波数は、

$$\omega_p = \frac{4\pi N_e e^2}{m_e} \quad (4.5)$$

となり、波長 λ に対する遮断密度 N_{ec} は

$$N_{ec} = \frac{1.11 \times 10^{13}}{\lambda^2} \quad (4.6)$$

となる。実験、計算で用いている $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ の YAG レーザーでは $N_{ec} = 1021\text{cm}^{-3}$ となる。

プラズマに対しては逆制動輻射により熱が吸収されるとして、吸収長 l_{pla} を次のように与えた。

$$l_{pla} \approx 2 \times 10^{41} \left\{ \frac{(T \times 10^3)^{3/2}}{\lambda^2 N^2} \right\} \quad (\text{cm}) \quad (4.7)$$

アルミニウムのイオン価数は、温度に依存して与えた⁽³⁾。

5. 計算結果と考察

本研究では、アルミニウムに単パルスレーザーを照射しプラズマの効果を入れたときと入れないときとを計算し、実験と比較した。

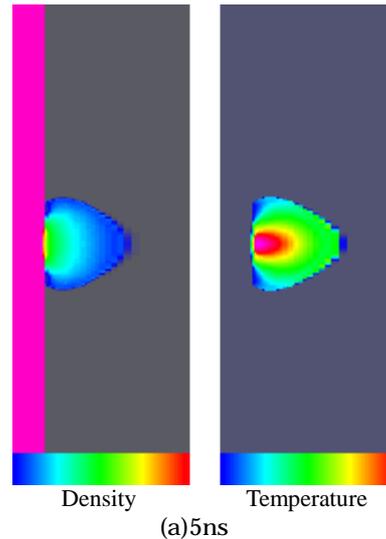
5.1 プラズマの効果がある場合

単純なターゲットにシングルパルスレーザーを照射することにより、アルミニウム表面での現象の解明と、発生するプラズマの挙動の解明を目的とした。

この計算において、レーザーの波長は $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 、レーザーエネルギーは $W = 650 \text{mJ}$ 、パルス幅は $\tau = 5 \text{ns}$ 、照射半径 $r = 50 \mu\text{m}$ とし、レーザー強度のピークは 4ns になるようにし、計算を行った。

Fig.3 は密度分布と温度分布の変化を表したものである。(a),(b),(c)はそれぞれレーザー照射時から 5ns 後、10ns 後、15ns 後の分布を表している。

アルミニウム表面から少し離れた部分において温度が高くなっていることが確認できる。これは吹き出したプラズマ部分でレーザーが吸収され温度が高くなっていることによると考えられる。発生したプラズマによりレーザーは遮断されアルミニウム表面ではほとんど吸収されなくなり、主にプラズマで吸収されるようになる。その後、プラズマはさらに膨張し、プラズマからの熱伝導でアルミニウムが溶けることも確認できる。



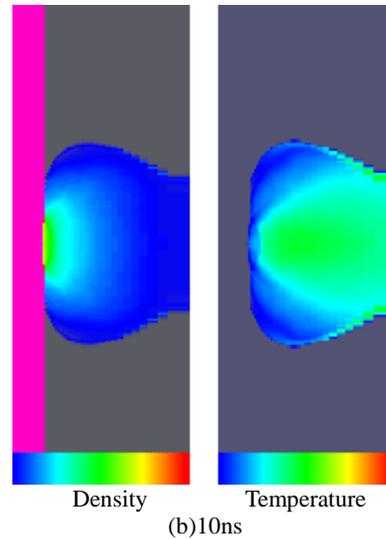
(a)5ns

5.2 プラズマの影響が無い場合

プラズマの影響を考えるため、プラズマによるレーザーエネルギーの吸収の効果を無くして計算を行った。レーザーの波長、パルス幅、照射半径はプラズマの効果がある場合と同じである。

Fig.4 は密度分布と温度分布の変化を表したものである。(a),(b),(c)はそれぞれレーザー照射時間から 5ns 後、10ns 後、15ns 後の分布を表している。

プラズマによるレーザーの吸収が無くアルミニウム表面で吸収するため、表面付近で温度が高くなっている。プラズマの効果があるときとは違い、レーザー照射によるアブレーションや温度分布は表面に対して垂直に進んでいき広がりは無いことがわかる。



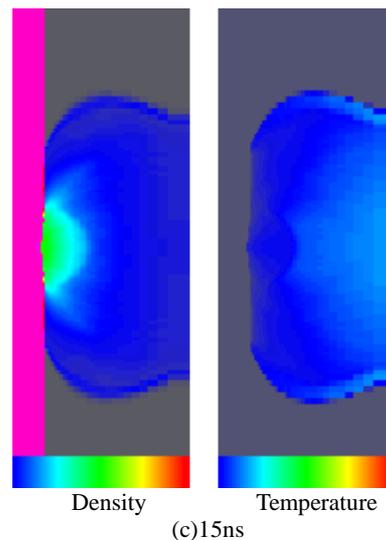
(b)10ns

5.3 プラズマがある場合とない場合との比較

5ns での温度分布を比較すると、プラズマがある時では、最高点で約 85eV であるのに対して、プラズマがないときでは、最高点で約 6eV ほどしかない。これは、同じエネルギーのレーザーをプラズマがある時では、金属よりは小さい密度のプラズマが吸収するのに対して、プラズマがないときでは、大きい密度の金属が吸収するため、温度差が生じると考えられる。

6 実験と計算結果の比較

Fig.5 は実験結果と計算結果を表したものである。(a),(b),(c)はそれぞれ実験結果、計算結果のプラズマがある時、ない時を表している。計算結果は 200ns の図である。Table.1 は形成された穴の形状を表している。実験結果では広範囲に渡って照射跡が残っていることがわかる。これは計算結果から分かるように、プラズマの影響で、温度が広がる過程でこのようになったと考えられる。



(c)15ns

Fig.3 Density and Temperature

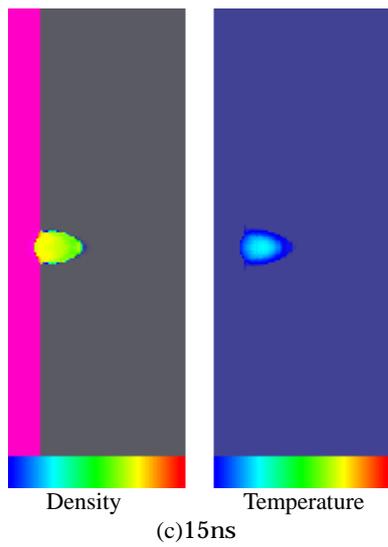
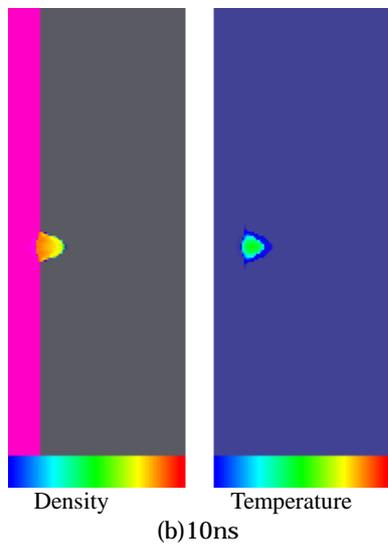
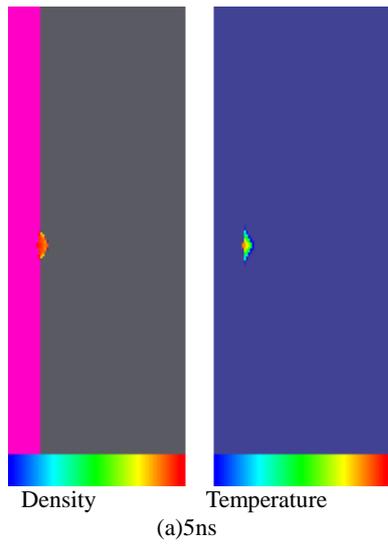


Fig.4 Density and Temperature

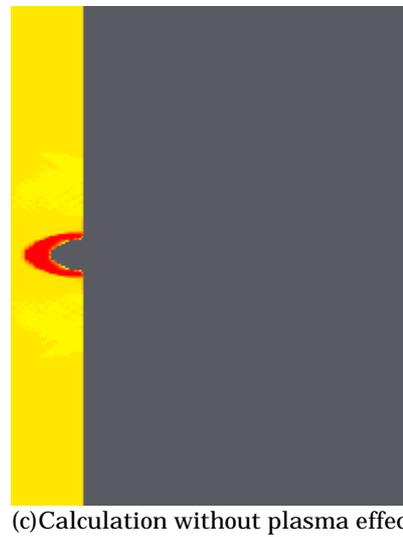
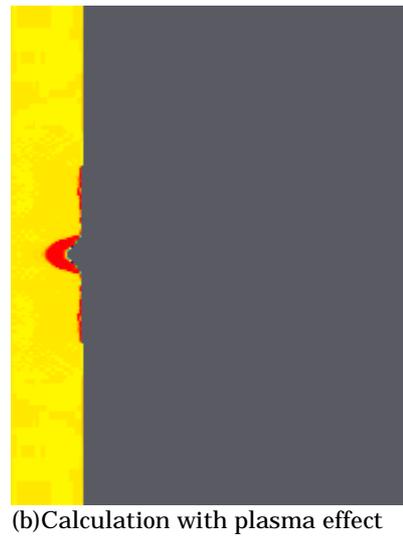
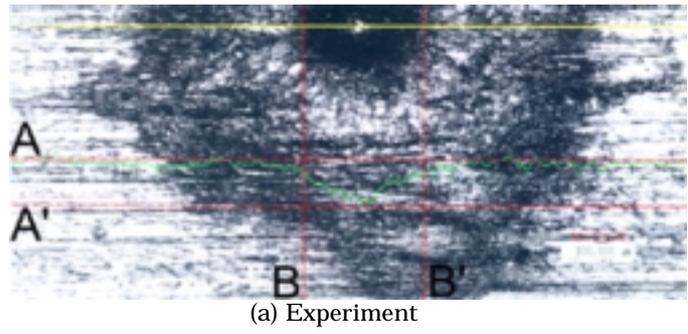


Fig.5

(a) Green line displays vertical structure along the yellow line

AA'=42 μ m BB'=250 μ m

Table.1

	(a)	(b)	(c)
Depth of hole	42 μ m	47 μ m	90 μ m
Diameter of hole	250 μ m	260 μ m	230 μ m

7 . 結言

CIP 法を用いて、レーザー照射の数値計算を行った結果次のような結論が得られた。

- ・レーザー照射時間中だけでなく照射後、時間をかけて穴は形成されていく。
- ・レーザー照射により広範囲に渡って照射跡が残るのは、プラズマの拡散の影響である。

参考文献

- (1) T. Yabe, T. Aoki, "A universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation .One-dimensional solver", *Comp .Phys. Comm.* **66** (1991) pp. 219
- (2) T.Yabe and P.Y.Wang, "Unified Numerical Procedure for Compressible and Incompressible Fluid.",*J.Phys.Soc.Jpn.*, **60**(1991),2105-2108
- (3) M.Itoh, T.Yabe, "Collisional-radiative and average-ion hybrid models for atomic processes in high-Z plasmas", *Physical Review A.* **35**(1987) pp. 233