

S602 CIP 法によるレーザーアブレーション過程のシミュレーション

Simulation of Laser Ablation Process by CIP Method

矢部孝

東工大 機械物理

Takashi Yabe

Tokyo Institute of Technology

ナノ秒からミリ秒までの、レーザー加工のシミュレーションに関しては、色々なところで解説を書いてきた。ここでは、この計算コードが果たしてフェムト秒レーザーでも使えるかどうかを調べた結果のみを示す。

まずは、フォッカー・プランク方程式を CIP 法で解くことによって、フェムト秒レーザーの吸収過程を調べた。図 1(下)は、固体の表面にレーザーを照射した後での電子の熱流と温度である。これを、縦軸を熱流、横軸を温度勾配として、図 1(上)にまとめた。固体側では、熱流と温度の関係は比例しており、実線の古典理論(フーリエ則、Spitzer-Harm 理論)に一致している。一方、真空側では、熱流は温度勾配によらない、自由流となっている。驚くべきことに、ほとんどパルス幅と同程度の時間で古典的な熱伝導が実現している。この時点では、流体(イオン)は全く動いていない。

従って、穴が形成されるのはこれよりもはるか後の段階である。しかも、このシミュレーションの示すとおり、この後の過程は古典的な熱伝導理論で十分である。

実際に、この古典的な流体シミュレーションが実験を再現することができるかどうかを調べてみよう。その前に、実験をよく吟味する必要がある。図 2(左)は実験データであるが、レーザーの集光径がわからないので、ドイツのグループは、照射痕から集光径を見積もって Fluence を求めた。

図 2(右)はレーザーの集光径と照射痕との関係をシミュレーションから求めたものである。フェムト秒レーザーといえども、倍以上ものずれが生じている。従って、実験を「解釈」するとき、これをちゃんと議論しなければ意味がない。

シミュレーションでこのようにして求めた照射痕を用いて、Fluence を補正した(実験と同様に)結果が図 2(左)のである。一方、本当の集光径から見積もった Fluence でデータを整理するとシミュレーション結果は、図の破線のように大きくずれる。ドイツのグループは、穴の深さの Fluence 依存性を議論し、熱伝導になる前の色々な物理過程を提案しているが、実際には、Fluence の見積もりが違っていただけの話である。

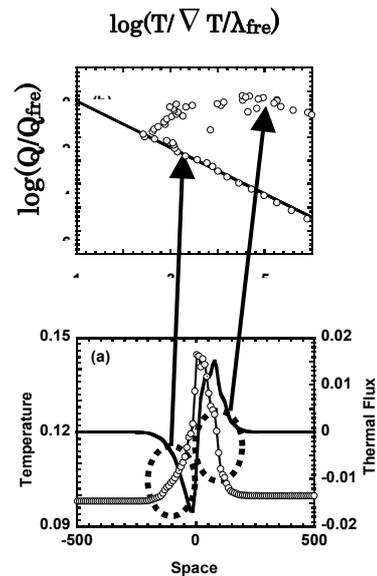


図 1 フォッカープランクコードにより、フェムト秒レーザー照射後の電子の挙動をシミュレーションした。(下)温度と熱流空間分布(上)縦軸は熱流で横軸は温度の空間スケール。極めて短い時間で、固体側の熱流は古典的な熱伝導(実線)に近づく。

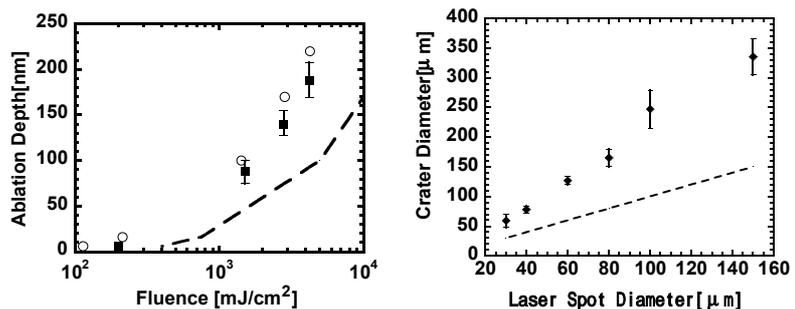


図 2 (左)流体シミュレーションを用いて、レーザー強度とアブレーション深さを比較。白丸がシミュレーションで実験は黒四角。実験は、照射痕から Fluence を見積もったが、シミュレーションもこれと同様にした。これとは別に、レーザー集光径で Fluence を出すと、破線のようになる。フェムト秒といえども、集光径と照射痕が大きく異なることを指摘した。(右)レーザー集光径に対する照射痕。シミュレーション(記号)は、照射痕がかなり大きくなることを示している。破線は、照射痕と集光径が一致する線。