特集

数値計算法の新たな展開 —マルチフェーズ輸送現象の高精度予測手法—

CIP法によるレーザー加工のシミュレーション*

矢部 孝**

Simulation of Laser Material Processing by CIP Method*

by YABE Takashi **

キーワード レーザー加工, シミュレーション, CIP, ガラス加工, 水中加工, フェムト秒レーザー

1. 緒言

固体にレーザーを照射して何らかのプロセスを行うという分野は次第にその領域を広げてきている。レーザー加工や溶接はその最初の例であるが、その他、表面改質、質量分析、薄膜形成など数えきれないほどである。しかし、その動的な機構がどれほどまでわかっているかという点と心許ないのが現状である。確かに、今までは実験による試行錯誤で済んでいたもので、何も細かな機構など分からなくても実用には十分であったろう。しかし、技術の最先端では、レーザーの出力、波形などが実験的な試行錯誤で簡単に決まるようなものではなくなりつつある。

こうした問題を解決するためには、数値計算によるシミュレーションと実験の詳細な検討が必要とされるが、残念ながらこのプロセスを計算する計算法が今までなかったのが最大の問題であった。では、今はどうだろうか。完全に Yes とは言えないが、それに近いシミュレーションが現れてきている。ここでは、こうしたシミュレーションの問題点を述べるとともに、最近の発展およびその成果について概観してゆきたい。ここで、述べるシミュレーションはパソコン上でも動くもので、このような最先端のシミュレーション技術が、最早スーパーコンピュータを保有するような超大企業の独占ではなくなっている点は希望がもてる。

我々はここ10年の間、固体・液体・気体を同時に解くシミュレーション法を開発してきた¹⁾。この方法は CIP (Cubic-Interpolated Pseudoparticle/Propagation) 法と呼ばれ、乱流、気泡流、多孔流、MHD 発電、生体、衝撃波工学、機械工学全般、電力、燃焼・爆発、化学反応、

結晶化、粘弾性流体、宇宙カプセル、航空、船舶、自動車、半導体、レーザー加工・溶接、原子力安全、天文、地球惑星、プラズマ、希薄流体、微粒化 (Atomization)、インクジェット、塗装などですでに使われて来ている。ここでは、ナノ秒とフェムト秒レーザー加工に関する話題のみを取り上げよう。

2. ナノ秒レーザーによる加工

2.1 硝子加工

硝子は通常の YAG レーザーでは最も加工しにくい物質である。弱い光では透過し、強度を上げてゆくと今度は背面から穴があき、クラックが入ったりする (図 1 参照)。

この原因は、端面での光の反射などが重要な要因である。これを防ぐために、我々は前面に半透明のテープを貼ることを提案した²⁾。この理由は、CIP 法によるシミュレーションで明らかとなっている。図 2 のように、半透明のテープを透過した弱いレーザーは、硝子を蒸発させるが、テープのために飛散が妨げられる。テープなしでは飛散によって急激な温度低下が生じ、これによるクラ

図 1 (a) 背面でのクラック直径の入射レーザーエネルギー依存性。(b) 85 mJ/pulse で繰り返し照射された硝子内のクラックの成長の様子。(c) 260 mJ/pulse で照射されたときのフィラメント状の損傷。

*原稿受付 平成18年 1月20日

** 東京工業大学 Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

図2 (上) テープなし, (下) テープあり. 後者では, 表面の温度低下がほとんどない.

図3 (a) 段差をつけた加工や, (b) アスペクト比の大きな硝子加工が容易にできる.

ックが発生する. その意味で, テープの一つの効果は, このような温度低下を妨げ, ゆっくりとした温度低下を実現することにある. しかし, このテープは数回照射すると穴が貫通する. するとこのテープの効果はなくなるはずであるが, その後の数万回の照射では一切クラックが生じない. これは, 最初の数発で出来たクレーターがレーザー光の反射と屈折をうまく調整して, クラックの生じない配置を自動的に実現するためである. この方式で, 我々は, YAGの基本波でかつ大気中で図3のようなアスペクト比の高い穴あけを実現することができた.

2.2 水中でのレーザー加工

水中での加工も, シミュレーションにとっては面白い例題である. 我々は, 水中でのプラズマの生成をモデル化することによって, レーザーの水での吸収を計算し, 高強度でこの効果が大きいことを示した³⁾ (図4).

図4 (上) 水中と空気中での加工実験 (破線 (水中) と実線 (空気中) がシミュレーション). (下) 水中での吸収を計算した場合のシミュレーション (実線).

3. フェムト秒レーザーによる加工

フェムト秒レーザーの加工については, 単なる流体だけではすまされなくなる. レーザーの吸収過程そのものも検討する必要がある. CIP 法はこのような過程にも使用できる. 我々は, CIP 法を Fokker-Planck 方程式に適用し, この吸収過程を追跡した. その結果, 図5のように熱流 Q はフェムト秒レーザーのパルスの時間程度で, 固体中ではすでに古典的な熱伝導が成立していることを明らかにした. 一方, 真空中では, 温度勾配に関係のない自由流領域が実現している.

このことにより, フェムト秒レーザーといえども, ナノ秒レーザーと同様の流体力学的な計算で十分記述できることがわかったので, 前節同様の計算をフェムト秒実験に適用した. 通常は, 非流体的な現象で実験結果を説明しようとしているが, 実は, そのときのフルエンスの解釈に間違いがある. フルエンスを計算するときに, 損傷を受けた領域の半径を用いているが, これは, 実際のレーザーの半径とはかなり異なる. シミュレーションによって, 高フルエンス領域では, フルエンスに4倍もの違いが生じる.

図5 (左) レーザー吸収後の熱流と温度勾配の関係。(右) 加工深さ。○がシミュレーション。破線は、実験の論文で使用された間違ったフルエンスでプロットしたシミュレーション。

参考文献

- 1) CIP法のレビューは Yabe, T., Xiao, F. and Utsumi, T.: Constrained Interpolation Profile Method for Multiphase Analysis., J. Comput. Phys. 169, (2001) 556.
- 2) Baasandash, C., Yabe, T., Maehara, J., Yamaguchi, M. and Wakatsuki, H.: Crack-Free High-Aspect-Ratio Drilling of Glasses by 1 μ m Yttrium Aluminum Garnet Laser and Translucent Adhesive Tape, Jpn. J. Appl. Phys. 43-2A (2004) L133.
- 3) Maehara, J., Yamada, Y., Kumagai, H., Midorikawa, K. and Yabe, T.: Comparison of Simulation of and Experiments on Femtosecond Laser Ablation of Nickel in Gaseous and Water Environments, Jpn. J. Appl. Phys. 43-1 (2004) 172.
- 4) Kondoh, Y., Yabe, T., Maehara, J., Nakamura, T. and Ogata, Y.: Microscopic and Macroscopic Simulation for Femtosecond-Laser-Matter Interaction by Cubic Interpolated Propagation Method, Phys. Rev. E. 68, (2003), 066408-1.