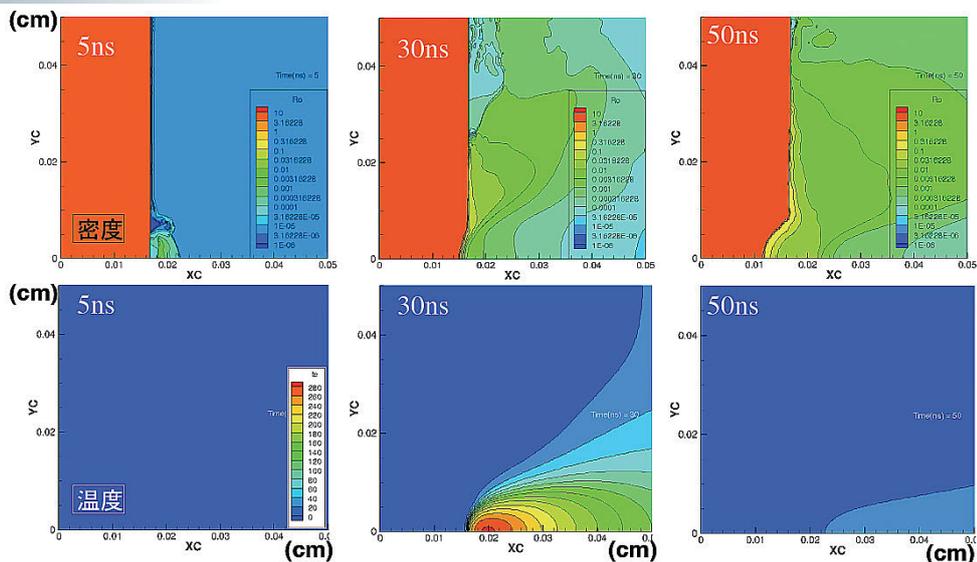


CONTENTS

- パルスレーザー加工のシミュレーション
～波長依存性～
- Optics and Photonics International
Congress (OPIC 2017) 会議報告
- 染川智弘副主任研究員がリモートセンシング
シンポジウムにて部会奨励賞を受賞
- 主な学会等報告予定



【表紙図】密度・温度の時間発展(30nsがパルスのピーク)

パルスレーザー加工のシミュレーション ～波長依存性～

主席研究員 藤田雅之
副主任研究員 砂原 淳

◆レーザー核融合とレーザー加工

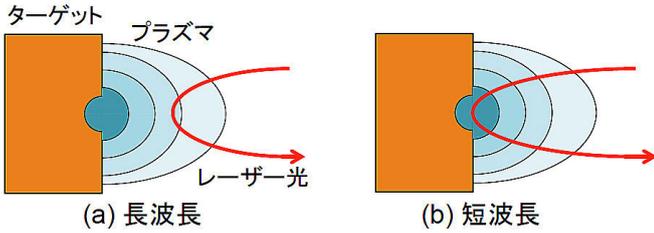
レーザー核融合の研究においては、数値計算(シミュレーション)によりレーザーがどのようにプラズマに吸収され、流体としてのプラズマがどのように振る舞うのか、すなわちレーザーとプラズマの相互作用が解析されてきた。核融合ドライバーとして用いられる主力のレーザーはナノ秒のパルスレーザーであり、産業界では微細加工用にナノ秒レーザーが用いられている。そこで、定性的な評価ではあるが、核融合やレーザープラズマの解析のために開発されたシミュレーションコードを用いてレーザー加工の波長依存性に関して調べてみることにした。

◆レーザー加工のシミュレーション

物質にレーザー光が照射され温度が上がっていく

と、固体→液体→気体→プラズマへと状態が変化していく。プラズマが発生すると、レーザー光はプラズマ中の電子にそのエネルギーが吸収され、プラズマの温度が上がり、電子の熱伝導(または、輻射)によってエネルギーが固体へと運ばれる。

表紙図にシミュレーション結果の一例を示す。波長 $1\mu\text{m}$ 、パルス幅15 nsのレーザーをピーク強度 $3\times 10^{12}\text{ W/cm}^2$ で固体ターゲットに照射した際のプラズマの密度・温度分布を示す。レーザーは右から左へ照射されており、オレンジ色の部分が固体密度である。レーザー照射後、5 ns、30 ns(レーザーピーク)、50 nsと時間が経過すると共に、プラズマが右へ向かって広がり、固体表面から左へ穴が開いていく様子が見てとれる。



【図1】波長による吸収領域の違い

◆プラズマによるレーザー光の吸収と臨界密度

レーザー照射により固体表面で発生したプラズマは膨張し、指数関数的な電子密度分布が形成される。レーザー光は低密度側からプラズマに入射し、高密度領域へ向かってプラズマ中を伝搬しながら吸収される。しかし、レーザー光は固体表面にまでは到達することはできず、臨界密度と呼ばれる電子密度のプラズマ領域で反射される。この臨界密度はレーザー波長の二乗に逆比例する。例えば、波長 $10.6\mu\text{m}$ の CO_2 レーザーの臨界密度は 10^{19}cm^{-3} であるが、波長 $1.06\mu\text{m}$ のYAGレーザーでは 10^{21}cm^{-3} 、波長 $0.25\mu\text{m}$ では $1.8\times 10^{22}\text{cm}^{-3}$ となる。図1に波長によって吸収領域が異なる様子を示す。波長が短いほど高密度領域、すなわち固体表面に近いところでレーザー光が吸収される。

◆レーザー加工の波長依存性

レーザー加工の波長依存性を調べるために、異なる波長で同じ試料を同じレーザー照射強度で照射した際のシミュレーションを行った。図2に厚さ $10\mu\text{m}$ のCHターゲットへ、KrFレーザー(波長 $0.25\mu\text{m}$)、YAGレーザー(波長 $1.06\mu\text{m}$)、 CO_2 レーザー(波長 $10.6\mu\text{m}$)を集光強度 10^{10}W/cm^2 で照射した際に発生するプラズマ電子密度 n_e (cm^{-3})、電子温度 T_e (eV)、レーザー吸収 S_L (W/cm^3)の時間発展の比較を示す。また、図中に矢印または赤線で臨界密度の位置を示す。レーザーの集光径は $10\mu\text{m}$ (ガウシアン分布)、パルス幅は5 ns(フラットトップ)である。

◆波長によって異なる現象

KrFレーザーの場合は、臨界密度が固体密度に近く、固体表面あるいは穴の底に近いところでレーザー光が吸収され、5 ns後には厚さ $10\mu\text{m}$ のターゲットを貫通し、プラズマは穴から吹き出すように膨張している。

YAGレーザーの場合は、KrFレーザーの場合よりも臨界密度が低く、臨界密度プラズマはターゲットの初期表面位置近くに存在している。そこでレーザー光が吸収され、プラズマは半球状に外へ向かって膨張して

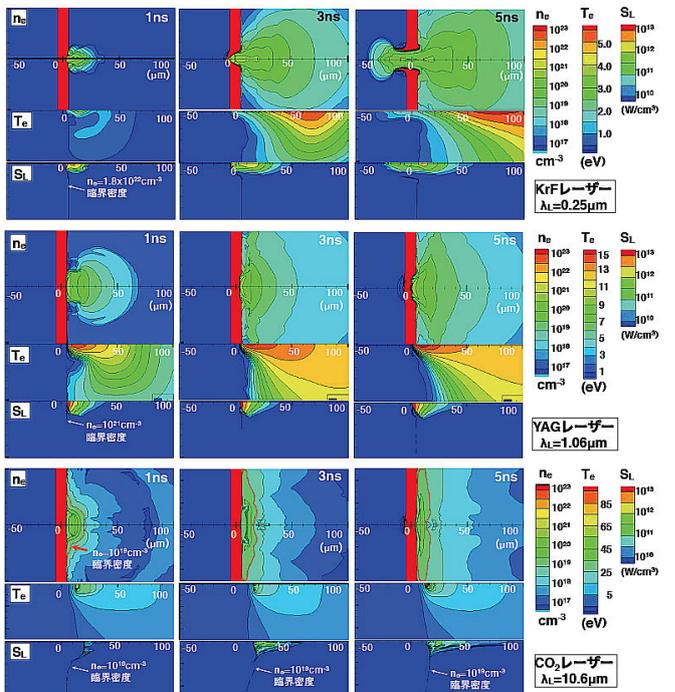
いる。

CO_2 レーザーの場合は、臨界密度がさらに低くなり、臨界密度プラズマはターゲット表面より $10\sim 20\mu\text{m}$ 外側にある。波長が長くなるにつれ、臨界密度プラズマはターゲットから遠ざかり、電子による熱エネルギー輸送は横方向(あるいは半径方向)に広がる。 CO_2 レーザーの場合は初期の集光スポットよりも広い領域からプラズマが平面状に膨張している。

また、レーザー吸収分布の波長依存性を見ると、長波長ほど固体表面から離れたところでレーザー吸収が起きていることが明瞭に示されている。

◆波長依存性の可視化

レーザー核融合やレーザープラズマの解析のために開発されたシミュレーションコードを用いてレーザー加工の波長依存性に関して調べた結果を紹介した。波長の違いは臨界密度の違いになり、レーザー光が吸収される領域が長波長ほどターゲットから離れていく。それに合わせて、長波長ほど横方向の電子の熱エネルギー輸送が増えていくことが可視化されたといえる。本報告がレーザー加工現象の理解の一助になれば幸いである。



【図2】厚さ $10\mu\text{m}$ のCHターゲットへ、上段：KrFレーザー、中段：YAGレーザー、下段： CO_2 レーザーを照射した際に発生するプラズマ電子密度 n_e (cm^{-3})、電子温度 T_e (eV)、レーザー吸収 S_L (W/cm^3)の時間発展の比較

Optics and Photonics International Congress (OPIC 2017) 会議報告

レーザープロセス研究チーム ハイク コスロービアン

◆OPIC 2017が横浜にて開催

2017年4月18～21日、パシフィコ横浜にてOptics and Photonics International Congress (OPIC 2017)が開催された。本会議は、光・レーザー技術を基盤とする最先端の研究・開発を国際的に集結し、未来社会への指針を得ることを目的に、2012年から毎年開催されている。今回は、12の国際専門会議およびプレナリー&ジョイントセッションにより構成され、期間中は国内外から1000人以上の研究者が集結した。筆者は主にALPS'17 (The 6th Advanced Lasers and Photon Sources, 第6回先進レーザーと光源に関する国際会議)に参加した。ALPSでは19件の招待講演と100件以上の研究発表が行われ、筆者は光損失を含む多重パス増幅器におけるCW出力特性の定量分析に関する最近の成果を発表した。本稿では、高ピークパワーおよび高平均パワーレーザーの開発に関する研究報告についてまとめる。

◆極低温冷却ペタワットレーザー

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf研究所(HZDR)(独)のAlbach博士から、同所で構築中の極低温PENELOPE (Petawatt Energy-Efficient Laser for Optical Plasma Experiments)レーザーの開発状況に関する報告があった。発表では、最終増幅の前段までの結果および最終増幅ステージの開発状況、将来的なフロントエンドの計画などが報告された。現在10J級のパルスエネルギーが実証されており、またこのプロジェクトの目標値(150fs、150J、1Hz、全バンド幅20nm)に到達するために必要な小信号利得について実験によるクロスチェックを行ったとのことである。

◆産業用高出力レーザーの開発

浜松ホトニクス(株)から、高出力レーザー開発に関する2件の報告があった。1件目は新開発の高利得ダイオード励起低温Yb:YAGセラミックスレーザー増幅器に関するものである。彼ら独自のシステム設計により、シングルパスで従来の20倍の小信号利得が得られている。その結果、ダブルパス増幅により効率43.3%、パルス幅10nsでエネルギー64Jが実証された。最終的な

ハードルである繰り返し動作(約0.05Hz)の課題は残されたものの、レーザーピーニングや材料成形など、このレーザーの産業応用例も報告された。2件目はファイバーレーザーに関するものであった。彼らはファイバーのコアを広げることにより誘導ラマン散乱効果の抑制に成功し、20m長の伝送ファイバーを備えた出力3kWのシングルモードファイバーレーザーを開発した。このようなレーザーシステムは、特に溶接等の用途に必要とされている。

◆高出力固体レーザーにおける熱効果の制御

漢陽大学(韓)のNho博士から、端面励起固体レーザーにおける熱効果を低減する新手法に関する報告があった。彼らはガウス型、トップハット型、リング型の分布を持つビームの励起によるレーザー媒質中の温度分布計算をそれぞれ行い、リング型のビームにおいて発熱の影響が大幅に低減されることを明らかにした。またこの技術をMOPAシステムに適用した結果、レーザーの輝度が大幅に改善されたとのことである。熱効果の制御手法に関して、電気通信大学の植田憲一特任教授、名誉教授はHeat Capacitive Active Mirrorと呼ばれる熱レンズ効果フリーの高出力固体レーザーに関する新しい概念を提示し、直径10mm、厚さ0.25～5mmのアクティブミラー(≒ディスクレーザー)について、励起領域5mm径での温度プロファイルおよび熱誘起位相シフトの計算を行った。その結果、底部の



【写真】会議場にて(左)A. Bayramian博士(ローレンスリバモア国立研究所(米))、(右)筆者

冷却領域が励起領域よりも小さい場合、加熱/冷却体積のミスマッチにより側方への熱流に対する熱障壁を誘発することが明らかとなり、この現象を利用して最適な冷却・熱遮蔽および側面温度制御を行うと、アクティブミラーの熱レンズ効果を従来の1/1000以下にまで低減できる可能性があることを示した。この概念が現実化されれば、熱影響のない高出力固体レーザー開発の大きなマイルストーンになると考えられる。

◆EUV生成のための高出力ピコ秒レーザーの開発

HiLASEセンター(チェコ)のM.Smrz博士は、効率的なEUV(極端紫外線)生成のために開発された"Perla"と呼ばれるkWクラスのピコ秒レーザーについて報告

した。彼らはコンパクトな薄型ディスクYb:YAG再生増幅器を基本とするピコ秒パルスレーザーシステムを構築し、出力0.5kWを実証するとともに、1030nm、100kHzでの長期安定動作を達成した。レーザープラズマ生成方式(LPP)のEUV光源では、生成効率を高めるためプレパルスに近赤外領域の高出力ピコ秒レーザーを用いることが必要であり、Perlaはプレパルスへの応用に理想的なレーザーである、とのことであった。

◆次回の開催予定

今回のOPICは来年4月24~27日、会場は今回と同様パシフィコ横浜での開催が予定されている。

TOPICS

染川智弘副主任研究員がリモートセンシングシンポジウムにて部会奨励賞を受賞

去る3月8日、千葉大学で開催された第42回リモートセンシングシンポジウム(主催:公益社団法人計測自動制御学会 計測部門 リモートセンシング部会)において、レーザープロセス研究チーム染川智弘副主任研究員の研究発表「コヒーレント白色光を用いた長光路差分吸収分光法による大気中CO₂の計測」が部会奨励賞を受賞しました。このシンポジウムは、リモートセンシング(観測対象を電波や光を使って遠隔から観測する技術)の最先端技術やその利用に関する情報交換や人的交流を推進することを目的に、ほぼ年に1度のペースで開催されています。2015年度からは若手育成にも重点を置き、40歳未満の若手研究者の講演の中から特に優秀な2件を選定し、部門奨励賞を授与しています。今回、染川副主任研究員がその一人に選ばれました。染川研究員は、レーザーライダーや、ラマン分

光、LIBSなど、レーザーを用いたさまざまな遠隔計測手法の開発に成功しており、リモートセンシングにおける若手研究の先頭を走る活躍を見せています。今後の同研究員のさらなる活躍にご期待いただきたいと思います。



【写真】表彰時の様子、(左)染川副主任研究員 (右)椎名准教授(千葉大院)

主な学会報告

- 8月21日(月)~25日(金) The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24)(京王プラザホテル)
染川 智弘「Analysis of Taketomi Submarine Hot Spring Seawater for Laser Remote Sensing in Water」
- 8月31日(木)~9月1日(金) 第35回レーザーセンシングシンポジウム(情報通信機構:小金井市)
染川 智弘「海上メタンガスラマンライダーの開発」
- 9月5日(火)~8日(金) 第78回応用物理学会秋季学術講演会(福岡国際会議場)
ハイク コスロービアン「コーナーキューブレトロリフレクター共振器のレーザー特性」
李 大治 「Radiation modes in a grating structure with dielectric substrate」
染川 智弘「フェムト秒ダブルパルスLIBSによる信号増強効果のフルーエンス依存性」