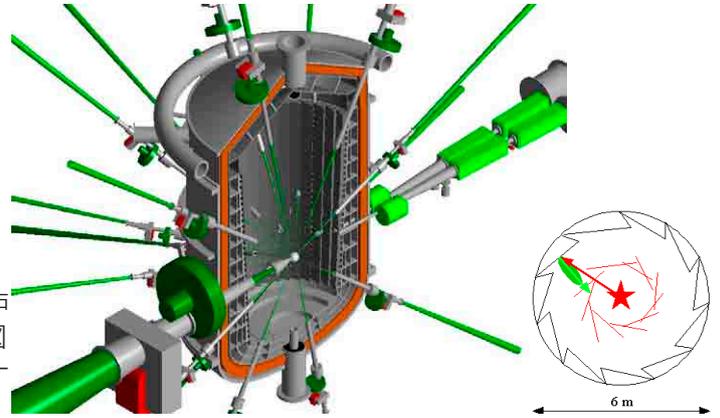


CONTENTS

- レーザー核融合炉液体壁チェンバー内のアブレーション生成ブルームのシミュレーション
- フェムト秒レーザーを用いた微細加工技術
- 【光と蔭】国際環境とレーザー核融合
- LPM2010国際会議報告
- 主な学会等報告予定

【口絵】(左)高速点火レーザー核融合炉 KOYO-fast の液体壁チェンバーの概念図
(右)KOYO-fastの液体壁チェンバー第一壁のタイル構造の概念図



レーザー核融合炉液体壁チェンバー内のアブレーション生成ブルームのシミュレーション

理論・シミュレーションチーム 古河裕之
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 乗松孝好

■レーザー核融合炉液体壁チェンバーにおける研究課題

レーザー核融合炉発電プラント設計の主要な課題の一つとして、チェンバー内に滞在する金属蒸気の排気、が挙げられる。高速点火レーザー核融合炉発電プラント「KOYO-fast」においては、厚さ3 mmから5 mmの液体リチウム鉛が第一壁に沿って滝状に流下する構造、「液体壁」を形成して第一壁を保護している。1ショット当たり発生する核融合エネルギーは200MJ、燃料球とチェンバー第一壁の最短距離は3mとなっている。このような条件下では、液体壁は液体から中性気体、部分電離プラズマへと相変化を伴いながらアブレーションする。アブレーションにより生成されたブルーム(気体、液体、固体などの塊)中では、微細なクラスターの生成や気体から液体への相変化を生ずることが予想される。これらの複合複雑現象を解析するため、著者らはアブレーションにより生成されたブルームの凝縮 についても取り扱い可能な統合シミュレーションコードDECORE (DEsign COde for REactor)を開発した。DECOREを用いて長時間のシミュレーションを行い、ブルームが炉チェンバーの中心付近に到達した際の、ブルームのプロファイル、ブルーム中のクラスター粒子の直径分布とクラスターの数密度分布等を求めた。

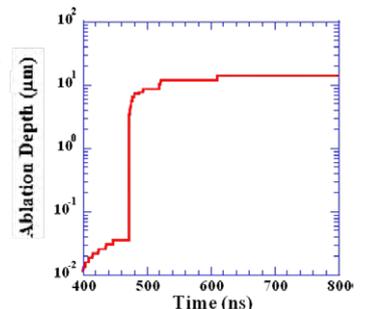
■シミュレーション結果

図1は、KOYO-fastの液体壁のアブレーションのシミュレーションにより得られた液体壁のアブレーション厚さの時間発展である。アブレーション厚さの時間発展が階段状になっているのは、液体金属の剥がれ現象を表している。荷電粒子のエネルギー付与の特徴は、入射表面からほぼ一定のエネルギーを物質(=プラズマ含む)に付与しながら、物質中を運動し、その飛呈に相当する距離のところで最も多くのエネルギーを付与し、それより奥にはエネルギーを(殆ど)付与し

ないことである。そのため、物質の表面よりも内部の温度の方が高くなり、内部から剥がれるという現象が起こり得る。

本研究では、物理的に長い時間のシミュレーションを行い、ブルームがチェンバー中心付近まで到達した際の、ブルームの状態を評価した。口絵右に示したように、KOYO-fastでは第一壁から飛散したブルームがチェンバー中心部に集中しないように、第一壁をタイル構造にしている。一枚のタイルの幅は90cm程度あるので、本研究ではブルームの飛散を1次元的であると仮定した。図2は、ブルームの長さが3 m程度になった際の、数密度、及び速度のプロファイルである。バルクの液体部分は、表記から除いている。ブルームの数密度は、指数関数的で約7桁程度の分布である。ブルームの先端近傍では、速度は40 km/s 程度になっている。分布は、ほぼ線形である。温度は十分に冷却されていて、全領域でほぼ823.15 K程度であった。

図3は、ブルームの長さが3 m程度になった際の、ブルーム中のクラスターの半径と凝縮率の空間分布である。図からわかるように、クラスターの直径は、5 nmから25nm程度である。直径としては、12nmから20nm程度の所に、比較的多く集中している。凝縮率は $x < 0.5$ m以下の殆どの領域で1程度になっている。図



【図1】KOYO-fastの液体壁のアブレーションのシミュレーションにより得られた液体壁のアブレーション厚さの時間発展

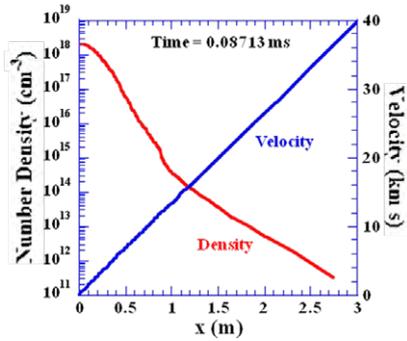
次ページへつづく▶

レーザー核融合炉液体壁チャンバー内のアブレーション生成ブルームのシミュレーション

の外の領域では、凝縮率は0であった。

■今後の課題

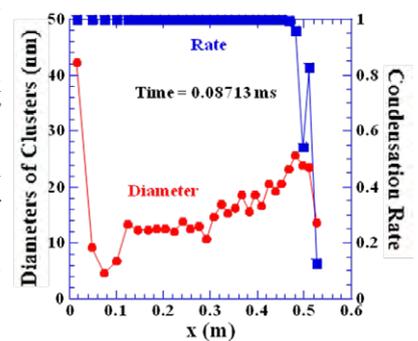
炉チャンバー内では、アブレーションにより生成されたブルームが飛散し、一部は対向壁に衝突し再付着する。一部はブルーム同士で衝突し、エアロゾルとなりチャンバー内に長時間漂い、チャンバー内の真空度の回復に



【図2】ブルームの長さ3 m程度になった際の、数密度、及び速度のプロファイル

大きな妨げとなる可能性がある。

図2及び図3で表わされるようなブルーム同士がチャンバー内で衝突した際に、衝突部にエアロゾルが形成されるのか、どのくらいの割合で対向壁に再付着するのか、等の詳細な評価が今後の課題である。



【図3】ブルームの長さ3 m程度になった際の、ブルーム中のクラスタの半径と凝縮率の空間分布

TOPICS

フェムト秒レーザーを用いた微細加工技術

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター ターゲット材料科学グループ 技術員 永田みず穂



【写真】プラスチック中空球への穴あけ加工に使用している、レーザー総研所有のフェムト秒レーザー

■はじめに

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターでは、レーザー核融合の高速点火実証実験をはじめとした、種々のレーザーを使用した実験が行われており、筆者の所属グループでは、それらの実験に使用されるレーザー照射ターゲットの製作を行っている。レーザー核融合の高速点火実証実験に用いられる代表的なレーザー照射ターゲットの一つに、直径500 μm 、厚み10 μm のプラスチック中空球に追加熱レーザー導入用の金属製円錐を取り付けたものがある。(図1)このターゲットを製作するためには、プラスチック中空球に、金属製円錐を取り付けるための穴を μm オーダーの精度で開ける必要がある。(図2)このような微細加工を行うために、当グループでは、レーザー総研所有のフェムト秒レーザー、Spectra-Physics社のHurricaneを使用している。

■フェムト秒レーザーによるプラスチック中空球への円切り加工最適条件

レーザー波長800nm、パルス幅100fs、繰り返し周波数1kHz、平均レーザーパワー0.2mWという条件のフェムト

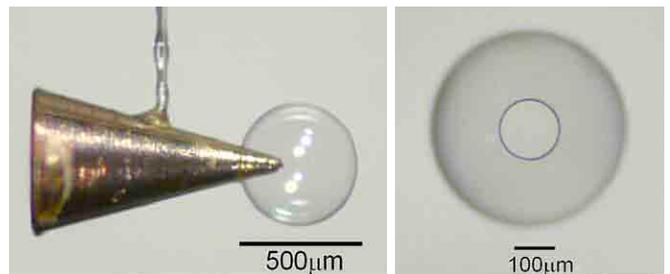
秒レーザーを使用することによって、設計通りの加工径が得られている。加工線幅を加味した加工精度は $\sim 10 \mu\text{m}$ である。

■加工痕・デブリ量・貫通に必要な加工回数の、平均レーザーパワー依存性

図3は、厚さ10 μm のプラスチック膜に、平均レーザーパワーを変えて照射し、加工痕やデブリの変化を観察したものである。平均レーザーパワーが上がるにつれて加工線幅は太くなり、デブリが大型化していく。また、厚さ10 μm のプラスチック膜の貫通に必要な円切り加工回数は、0.11mWまでは二回の加工で貫通し、0.19mW以上は一回の加工で貫通する。0.26mWになると、大型のデブリが目立ち始めるため、実際のターゲット用の加工には、一回の加工で貫通し、比較的デブリ量が少ない、0.19mWを採用した。

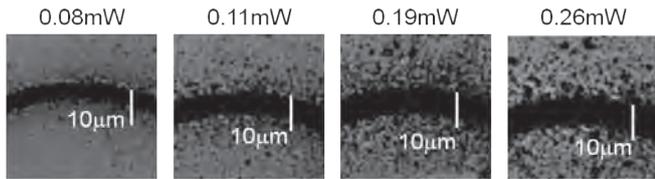
■プラスチック中空球への加工痕の詳細

図4は、フェムト秒レーザーによる円切り加工後のプラスチック中空球を観察したものである。レーザーの条件は、平均レーザーパワー0.2mW、照射フルエンス0.25 J/cm²、加工ステージ移動速度3 mm / secである。a)は加工



【図1(左)】高速点火実証実験に用いられる、レーザーガイド用コーン付き重水素化ポリスチレン中空球ターゲット

【図2(右)】フェムト秒レーザーで、直径150 μm の円切り加工を施したプラスチック中空球

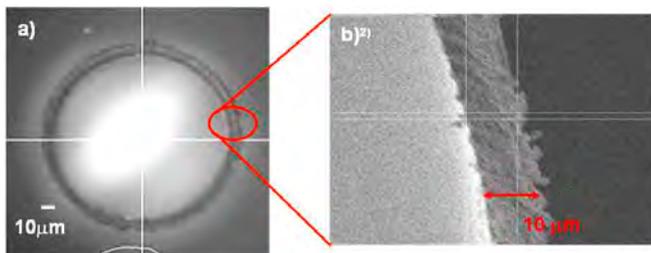


1) T. Fujimura et al., presented at IFSA2009 in San Francisco USA.

【図3】厚さ10 μm のプラスチック膜へのフェムト秒レーザー加工の、平均レーザーパワー依存性。パワーが上がるにつれて加工線幅が太く、デブリが大型化

後に蓋が中空球本体と繋がった状態での実体顕微鏡写真、b)は、本体から除去した蓋の断面の電子顕微鏡写真である。いずれの写真でも、レーザー照射側にめくれあがりが発生していることが分かる。

なお、フェムト秒レーザーによる円切り加工時に、全周にわたって円切り加工を施すと、切り取った蓋部分が中空球



2) T. Fujimura et al., presented at IFSA2009 in San Francisco USA.

【図4】プラスチック中空球へのフェムト秒レーザー加工痕の詳細。a) 直径140 μm の円切り加工後の様子、b) 円切り加工後に除去した蓋部分の断面の電子顕微鏡写真。レーザー照射側に向かってめくれあがりが発生

内部に落ち込んでしまい、除去が困難になるため、円切り加工プログラムの中で、2～3ステップのみシャッターを閉じるプログラムを組んでおき、円切り加工を行う。その後、真空ピンセットで蓋部分を吸引除去する。

■ターゲットの組立

図5は、コーン付きプラスチック中空球ターゲットの組立概略図である。フェムト秒レーザーでプラスチック中空球に円切り加工を施し、蓋部分を吸引除去したあと、できた穴に金属製円錐を差し込んで設計通りの位置に合わせて接着し、ターゲットの完成となる。

■まとめと今後の展開

ターゲットの微細加工にフェムト秒レーザーを用いる以前は、医療用メスなどを用いて手作業でプラスチック中空球への加工を行っていたため、歩留まりが悪く、一日に加工できる個数も～2個程度であったが、フェムト秒レーザーを用いることによって、加工再現性が向上し、均一の品質を持つターゲット部品の大量加工(～20個/日)が可能になった。また、ターゲット設計の自由度も向上した。

この、フェムト秒レーザーを用いた新たな加工技術などを元に、既存のターゲット製作のみならず、ターゲット製作側からも新たなターゲットや実験の提案をしていきたい。



【図5】レーザーガイド用コーン付きプラスチック中空球ターゲットの加工・組み立て方法

山中千代衛



国際環境とレーザー核融合

わが国のおかれた国際的な立位置の正確な認識は時代を越えてきわめて重要な課題である。戦後65年を経て冷戦時代が終り2000年代に入って米国の世界における支配力が次第に低下するとともに中国の興隆は恐るべき

ものがある。それにしても昭和の時代わが国は全く国際環境の進展に無知であらゆる政局で失敗を重ねてきたことを痛切に反省しなければならない。

100年以上昔の日清、日露戦争の事情は措くとして昭和16年(1941)の日米開戦に関して言えば、当時の日本には全く世界状況の大局的判断において決定的な欠陥があり、情報の入手分析に欠け、まさに滑稽なまでの誤謬を冒している。12月8日の真珠湾攻撃の日が、実は独のヒットラーによるモスクワ攻撃中止の日であった。それ以降独・伊のヨーロッパ戦争における後退が始まり、当時の日本の為政者が夢みていたドイツによる英国侵攻やロシア壊滅は画餅に帰し、対米英開戦の目論見は当初から破れてしまっていたのである。もうしばらく開戦を回避し抑制していたら天下の情勢は全く違ったものになっていた筈である。時代の流れに鈍感もいい処であった。

情報の入手、分析は何よりも有力な政策決定の手段となる。当時米国は日本の外交暗号をすべて解読に成功していたのにわが国はこれに全く無知であった。戦争中の日本海軍の暗号も同様で、米国にすべての作戦に関する手の内を予め読まれた上で戦争をつづけていた。山本五十六連合艦隊司令長官のラバウル前線視察も情報漏洩の実例で、長官搭乗の陸攻機は待ち伏せしていた米戦闘機P38により撃墜された。これで戦に勝つなどまさに痴人の夢である。

世界の状況の把握と的確な判断こそいつの世においても成功の第一要件である。わが国の未来は科学技術の発展に懸かっている。レーザー核融合開発の国際状況を展望すると米国のNIFは核融合点火を目前にしており、仏のMJLがそれに続いている。欧州ではHiPER計画が提案されレーザー核融合炉実現を企図している。中国でも神光計画が着々と進みつつある。

昭和の時代世界をリードしたわが日本のレーザー核融合研究は20年になんなんとする国の退潮の中で孤軍奮闘の状態にある。新エネルギー開発を必須とするわが国はレーザー核融合開発の国際状況に盲目で

【研究名誉所長】

LPM2010国際会議報告

主席研究員 藤田雅之



【写真】LASYSで展示されていた "Cars made by Laser"

◆LPM '10開催される

去る6月7～10日、独シュツットガルトで、レーザー加工関連の国際会議であるLPM2010 (11th Int. Symposium on Laser Precision Microfabrication)が開催された。会場となった国際会議場はシュツットガルト空港に隣接したシュツットガルトメッセ内にあり、市内へもS-Bahnで30分程度と便利なロケーションであった。LPM国際会議は、毎年、日本国内と海外とで交互に開催されているが、今回は特にシュツットガルトレーザ会議SLT10、および展示会LASYS(Int. Trade Fair for System Solution in Laser Material Processing)と同時期に開催された。参加者は200名程度(EU109、北米16、アジア47(うち日本35))で、152件の口頭発表(招待講演19件、一般講演133件)、54件のポスター発表、合計206件の発表があった。うち、フェムト秒レーザー加工関連の発表は、口頭31件、ポスター10件であった。

◆シュツットガルトと言えば自動車、ドイツと言えばレーザー加工

シュツットガルトにはボルシェ博物館やメルセデス・ベンツ博物館があり、車好きにはたまらない街である。南西15km郊外のジンドルフィンゲン(Sindelfingen)にはダイムラーの工場、北15kmのシュヴィーバーディンゲン(Schwieberdingen)には自動車部品メーカー Boschの研究開発センター、北西10kmのディツィンゲン(Ditzingen)にはレーザー加工機メーカー TRUMPFの本社がある。会議冒頭のプレナリーセッションではBosch社からレーザー加工を用いた部品製造の講演があり、展示会LASYS内には "Cars made by Laser" と称したコーナーが設けられていた。

◆ピコ秒レーザー加工へのシフト

プレナリーセッションのBOSCH社からの講演では、セラミック部品の加工にパルス幅5 ps、繰り返し200kHz、平均パワー50Wのレーザーを用いているとの報告があった。ナノ秒レーザーではクラックが発生するが、ピコ秒レーザーではクラックの発生が見られないとのことである。また、会議中に得た情報では、CFRP(炭素繊維強化プラスチック)の加工用にパルス幅5 ps、平均パワー1 kWのレーザー開発を独が計画中とのことである。自動車産業向けにこれから一桁ピコ秒の高平均出力レーザーが開発されていくようである。ピコ秒レーザーの高平均出力化にはパルスの繰り返し周波数を上げる必要があるが、繰り返し周波数を上げすぎると熱加工が支配的になるため、上限があるはずである。繰り返し周波数とパルスエネルギーをどのように分配して平均出力1 kWを目指すのか興味深いところで

ある。個人的には、物理的に単一ビームで1 kWを実現することは非現実的であり、複数ビームで達成すべきであると考えている。独がどのような戦略でレーザー開発を行っていくのか? レーザー加工の物理とレーザー発振器・増幅器の物理をどこまで擦り合わせて目標を達成していくのか気になるところである。

◆欧州勢がナノ周期構造に着目した研究を開始

これまで主に国内で注目を集めていたナノ周期構造形成に関する研究がヨーロッパの研究機関からも報告されるようになってきた。オランダの研究機関からは2種類の空間周波数成分が形成され、ショット数を増す毎に周期が異なる構造が形成され、約10回以上のスキャンで構造が安定してくることが報告されていた。ドイツのRWTHからもショット数を増す毎に大きな構造が形成され成長していく結果が報告されていた。また、同研究機関からは透明材料である熔融石英を試料として用いて、反射率・透過率の時間変化から屈折率すなわち誘電率の時間変化を推測し、誘電率の実部が負になることから表面プラズモンの存在が確認されたとの報告があった。

ここにきて急に報告が増えている印象を受ける。国内では、低摩擦効果に代表される様々な実用的応用事例が報告されている。RWTHは応用研究に重点を置いており、ナノ周期構造の成長過程の基礎研究成果をわざわざ報告してくるということは、その裏で発表できない実用的応用研究を進めてきたのではないかと感じた。ナノ周期構造の研究をドライブしている出口イメージは何なのか気になるところである。

◆太陽電池にもフェムト秒レーザー加工

仏CNRSからは化合物半導体太陽電池のフェムト秒レーザー加工の報告があった。CNRSのLP3(Laser Plasma and Photonic Processing Lab.)は予算規模5.99Mユーロの欧州プロジェクトSOLASYS(Next Generation Solar Cell and Module Laser Processing System)に参加しており、可視/紫外のナノ秒レーザーやサブピコ秒レーザーを用いた化合物太陽電池のレーザー加工を研究している。ナノ秒レーザーを用いた加工では回路の短絡が生じる結果やMo、CdS/CIS、ZnOの加工しきい値がそれぞれ0.11、0.07、0.5J/cm²であることなどが報告されていた。

主な学会等報告予定

10月29日(金)	日本テクノセンターセミナー(東京都新宿・日本テクノセンター) 藤田 雅之「レーザー加工の基礎と応用」
10月29日(金)	材料学会・第10回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム(京都教育文化センター) 島田 義則「レーザー超音波を用いたクラック深さ計測実験」