

## CONTENTS

- 次世代軽量化材料CFRPを超短パルスレーザーで加工
- ロケットエンジンレーザー着火におけるレーザーアブレーションの理論的研究
- 【光と蔭】The Laser at 50
- ILT2010 平成21年度研究成果報告会プログラム
- 主な学会等報告予定



【表紙図】炭素繊維をクロスに織り込んだ積層CFRPをパルス幅200psのレーザーでくり抜き加工した結果

## 次世代軽量化材料CFRPを超短パルスレーザーで加工

主席研究員 藤田雅之

### ◆1年間のNEDO事前研究を4機関共同で

NEDO省エネルギー技術開発部からの委託事業として「革新的材料(CFRP)加工技術の事前研究」を、平成21年度の単年度プロジェクトとして(財)製造科学技術センター、大阪大学接合科学研究所、産業技術総合研究所と連携して進めた。本研究はNEDOの「省エネルギー革新技术開発事業」で採択された課題の一つであり、CFRP\*のレーザー加工実験を行うとともに、関連企業を委員とする調査委員会も設けられ、CFRPのシーズやニーズ、将来性に関する議論が行われた。

\*CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic: 炭素繊維強化プラスチック)

### ◆CFRPとは

炭素繊維は直径数 $\mu\text{m}$ 程度のグラファイトでできた繊維状材料であり、軽量、高強度、錆びない、耐薬品性が高い、高導電性等の特徴を持つ。CFRPはこのような炭素繊維に樹脂(プラスチック)を含浸させ固めた複合材料である。樹脂の中に炭素繊維を入れる形態(連続繊維、短繊維、織物等)、方向、割合、積層配置等を変えることで材料全体の強度や弾性率などの特性を制御することができる。目的に応じた構造がより軽量、効率的に実現できる次世代エンジニアリング材料と言われている。

### ◆CFRPの幅広い応用分野

身近なCFRPの用途としては、軽量性や弾性を利用した釣り竿やゴルフクラブのシャフト、テニスラケット等が挙げられる。一方で、軽量性や高強度性を利用して、航空機・船舶・自動車の構造材への普及が進んでいる。最新鋭の航空機では1機あたり35トンのCFRP材料(機体重量の50%以上)が使われており、従来のアルミ合金を主体とした機体に対して20%以上の燃費向上を達成している。自動車ボディへの普及は高級車やスポーツカーに限定されているが、一部量産車でボンネット、リアスポイラー、プロペラシャフトなどにCFRPが採用されている。また、遠心分離器ローターやウラン濃縮回転胴にも応用されている。今後、X線CT等の医療機器、電子機器、土木建築資材、圧力容器等への普及が期待されている。

### ◆CFRP普及への課題

軽量化による輸送機器の燃費向上に高い性能を発揮する

CFRPであるが、普及のための最大の課題はコスト低減である。現状では、樹脂の硬化時間や金型を含めた成形費用はもちろん、設備投資も高価になる。また、成形後の切断、トリミング、穴開けなどの後加工についても、自動車や航空機部品の要求性能に見合うような精度で行う必要がある。特に、積層CFRPの場合は加工によって層間剥離を引き起こしてしまうと、著しい強度の低下につながる。これら後加工技術の開発は急務であり、レーザーを用いた加工が高速度、低コスト、高品質で実用化されればCFRPの適用対象が大幅に広がると期待されている。

### ◆様々なレーザーで多種類のCFRPを切断

このような背景から冒頭に紹介したNEDOプロジェクトにおいては、レーザー総研、阪大接合研、産総研がそれぞれ得意とするレーザーを用いて、国内メーカーから供給された12種類のCFRP材料の加工実験を行った。レーザー総研は超短パルスレーザー、阪大接合研はkW級CWレーザー、産総研はナノ秒紫外レーザーを用いてCFRPの切断を行い、互いに結果を比較した。また、切断以外に阪大接合研はCFRPとステンレス鋼のレーザー接合を、産総研は機械加工やウォータージェットを用いた加工との比較を、レーザー総研は外注で2kW-CWファイバーレーザーによる加工との比較も行った。

### ◆パルス幅依存性と波長依存性

超短パルスレーザー担当のレーザー総研では、パルス幅100fs~200ns、波長400nm~1064nmの範囲で供給されたCFRPをレーザー切断した。4種類以上のレーザーで12種類のCFRPを加工したデータを全て紹介することは困難であるので、ここでは特に加工が困難とされる炭素繊維をクロスに織り込んで積層成形されたCFRPに対して得られたパルス幅依存性と波長依存性について簡単に記述する。パルス幅依存性に関しては、(1)パルス幅が短いほど、シャープな加工が可能となる、(2)パルス幅が長いほど、加工レートが炭素繊維方向に依存しやすい。(炭素繊維に垂直方向の加工レートが小さい)、(3)数10ns以上のパルス幅で照射すると、炭素繊維の熱伝導の影響で樹脂部に熱影響が顕著に現れる、ことが明らかとなった。また、熱影響に関しては波長よりもパルス

次ページへつづく▶

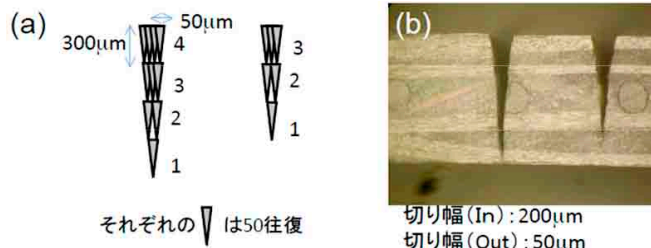
幅が大きく影響し、加工レートに関しては波長による違い(光吸収率の違い)が支配的であることが分かった。

◆厚物はV字カット

超短パルスレーザーで熱影響の少ない加工が可能であることが確認されたが、パルスエネルギーが小さいために厚物のCFRPを切断するためには照射時間を増やさなければならず、周囲への熱影響を完全に払拭することはできない。また、幅50μmで厚さ2mmのCFRPを切断しようとすると、レーザー光が溝の奥までうまく入らずに貫通加工が難しかった。そこで、レーザーの照射位置をずらしながら加工溝の間口を広げて三次元的にV字カットする手法を適用し、短時間で貫通加工を達成した。図1に加工サンプルの断面を示す。同一箇所50往復で溝を掘り、照射位置を10回移動させて加工を行った。照射位置を固定した場合は、800往復させても貫通加工は困難であった。

◆複合材料CFRPをレーザーで加工する難しさ

CFRPをレーザー加工する難しさは、CFRPを構成する炭素繊維と樹脂の熱的特性の大きな差である。フェムト秒レーザー加工と言えども、基本的に除去される部分は熱による加工である。炭素繊維が蒸発する温度が3300℃に比べて樹脂が分解する温度は約400℃前後である。炭素繊維を蒸発させるのに必要なエネルギーは樹脂の数10倍、炭素繊維の熱伝導率は樹脂の数100倍とどれをとっても桁違いなのである。樹脂に加工条件を合わせれば炭素繊維は加工できない。また、炭素繊維に加工条件を合わせれば樹脂には熱影響が生じる。いかに上手くレーザーを時間・空間的に制御して加工するかが



【図1】フェムト秒レーザーパルスをV字状に照射位置を移動させながら試料を切断した加工結果。(a)照射位置の移動方法、小さな▼は同一箇所でもレーザーを掃引して形成した溝を示す。(b)加工サンプルの断面。

ポイントとなる。

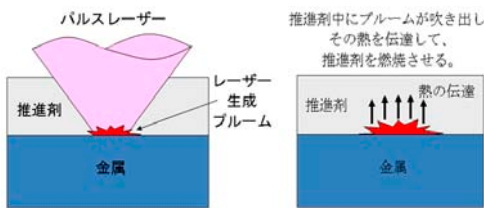
◆これからのレーザー加工研究の方向性

これまでは、鉄、銅、あるいはステンレス鋼などの比較的単一の材料を対象としたレーザー加工の研究が行われてきた。一方で、産業界では様々な成分を合わせ込んだ新世代材料が開発されてきている。今後、レーザー加工の実用化を促進する観点からは、物性の異なる成分を複合したCFRPのような材料や、異なる性質の材料を積層したもの、異種材料を混ぜ合わせた合金等に対するレーザー加工技術の最適化が重要になってくるものと思われる。

本研究はNEDO「省エネルギー革新技術開発事業」の一環として実施したものであり、関係者各位に感謝致します。

TOPICS

ロケットエンジンレーザー着火におけるレーザーアブレーションの理論的研究



レーザーアブレーションによるロケットエンジン着火のメカニズム

理論・シミュレーションチーム  
光産業創成大学院大学  
宇宙航空研究開発機構

古河裕之  
藤田和久  
森谷信一

■はじめに

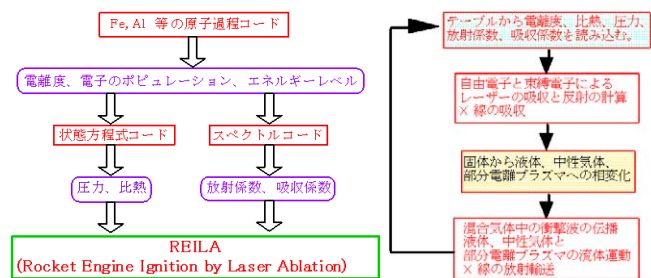
(財)レーザー技術総合研究所では、宇宙航空研究開発機構からの依頼を受け、光産業創成大学院大学と共同で、レーザーアブレーションによるロケットエンジン着火について、レーザーアブレーションの理論的研究を行っている。開発中の技術は、酸素/水素混合ガスを推進剤とする姿勢制御エンジンにおいて、金属ターゲット表面にパルスレーザーを照射し、金属表面を高温にし蒸発(アブレーション)させて、金属の高温蒸気(ブルーム)を発生させる。その熱を酸素/水素混合ガスに伝達して着火させ、ロケットエンジンの推進に用いる技術である。本技術の最適化のためには、アブレーションの発生や噴き出したブルームの挙動、及び酸素/水素混合ガスの熱エネルギーの吸収などを詳細に理解した上で、照射するレーザーのパラメーターを決定する必要がある。

本研究において、連続体・流体力学的アプローチを基本とし、相変化の効果を取り入れたレーザーアブレーション統合シミュレーションコードを開発した。

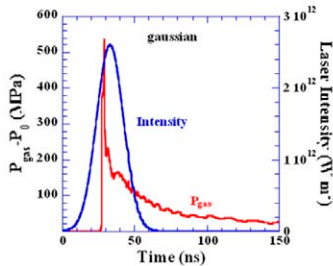
■開発したシミュレーションコードの概要

図1は、開発した統合シミュレーションコードのフロー

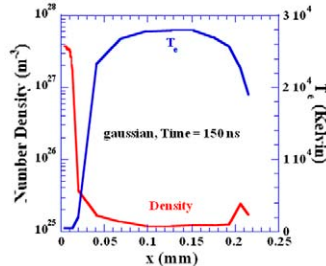
チャートである。まず原子モデルコードを用いて、エネルギー準位、ポピュレーション、電離度などのデータを様々な温度密度範囲で求める。そのデータを状態方程式コードに入力し、圧力、比熱等を求める。エネルギー準位、ポピュレーション、電離度などのデータをスペクトルコードに入力し、X線の放射係数、吸収係数等を求める。圧力、比熱、X線の放射係数、吸収係数等のデータをテーブル化し、Rocket Engine Ignition by Laser Ablation (REILA)に入力し、固体金属の温度上昇、相変化、流体運動、放射輸送、混合ガスへの熱伝達、混



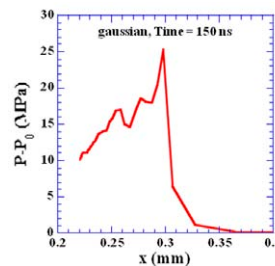
【図1】開発した統合シミュレーションコードのフローチャート



【図2】酸素／水素混合ガス中に生じる衝撃波中の圧力の最大値の時間発展



【図3】Time = 150 ns におけるブルーム中の粒子数密度、電子温度分布



【図4】Time = 150 ns における混合気体中の圧力の空間分布

電子温度分布である。x=0.22 mm より右側には混合ガスが存在している。噴き出したブルームが混合ガスによって閉じ込められている様子が分かる。

図4は、Time = 150 ns における混合気体中の圧力の空間分布である。衝撃波が混合ガス中を伝播している様子が良く表わされている。

### まとめ

本研究において、連続体・流体力学的アプローチを基本とし、相変化の効果を取り入れたレーザーアブレーション統合シミュレーションコードを開発した。

レーザーアブレーションにより生成されたブルーム中の粒子数密度、電子温度分布を評価した。噴き出したブルームが混合ガスによって閉じ込められている様子が分かった。

酸素／水素混合ガス中に生じる衝撃波中の圧力の最大値の時間発展、及び混合気体中の圧力の空間分布を評価した。衝撃波が混合ガス中を伝播している様子が良く表わされた。

合ガス中の衝撃波の伝播等の計算を行う。

### シミュレーション結果

図2は、波形gaussian、波長1064 nm、ピーク強度 $2.6 \times 10^{12}$  W/m<sup>2</sup>、パルス幅22nsのレーザーを鉄に照射した場合の、酸素／水素混合ガス中に生じる衝撃波中の圧力の最大値の時間発展である。混合比は2、初期の混合ガスの圧力は2MPaとした。最大で数100MPaの圧力が生じている。

図3は、Time = 150 ns におけるブルーム中の粒子数密度、



山中千代衛

……160

## The Laser at 50

今年、レーザー発明50周年にあたりまさに新光科学技術のGolden anniversary年である。1960年ルビーレーザーが初めてコヒーレントな光を発振した。爾来半世紀たつてレーザーはいろいろな方向に発展し、大

はフットボール場3個大の規模から小は原子層数層の寸法に至り、波長はX線領域から遠赤外域にまでわたっている。レーザー50年の成長を俯瞰してみよう。

**最長波長レーザー：**テラヘルツ光はフェムト秒レーザーを使うと容易にピコ秒のパルスとして発生出来る。大阪大学レーザーエネルギー学研究所でもテラヘルツ研究部門がこの分野をリードしている。MITではラダー状の量子井戸を半導体に刻んで電子を希望するエネルギーレベルに閉じこめ、これを隣接する井戸に導入して光子を発生させ、この過程を反復し磁界による電子制御の下、0.68Hz、440μm波を得ている。用途にはバイオ化学や物質探知など諸々の計測応用がある。

**最短波長レーザー：**スタンフォード大の3kmに及ぶLinacで短パルスの電子を加速し、アンジュレーターに導入して電子の振動からX線波長0.15nm、パルス幅100f秒を得ているが、わが国でもSpring-8サイトの理研で同様のLinacにより8GeVの電子ビームから波長0.06nm以上のX線を発生する計画が進んでいる。蛋白質などの構造解析の決め手になる。

**最短パルスレーザー：**atto秒の実現は原子内の電子の運動を観測可能にするもので、わが国でも各所でその追求が行われている。ドイツのMPQミュンヘンではフェムト秒レーザーをネオンガス中に照射し、非線形効果により可視からX線にわたる光子を発生させコヒーレントビームとの結合により数10atto秒パルスを得ている。レーザー研究の新天地の一つである。

**最高エネルギーレーザー：**周知のように米国リバモアではNIFにより1MJのレーザーを実現している。192ビーム構成でDT核融合反応の点火を目指している。仏と中国がこれに追随している。大阪大学レーザーエネルギー学研究所は長年この研究をリードしてきたがスケールでは今や埒外に追いやられそうである。

**最大パワーレーザー：**パワーレーザーとしてテキサス大学の1.1PWレーザーがある。これはMourouの技法によってレーザーパルスを1000倍伸張し186Jまで増幅後、再圧縮して167f秒パルスにするものである。大阪大学レーザーエネルギー学研究所のLFEXレーザーは3kJ、700f秒で4PWのシステムを実現している。これはレーザー核融合のみならずプラズマの研究、白色矮星などに見られる高密度物質を研究することができる世界最大のパワーレーザーだ。

レーザーで代表される科学技術の最前線はまさに日進月歩であって、これは国力のバロメーターでもある。近頃のわが国の政策はこのような状況に全く無頓着で、むしろ人びとの意欲を萎えさせることに努力しているかに見える。世界大競争時代を生き抜くため科学技術を鼓舞するようなリーダーの登場が望まれる。

【研究名誉所長】

# ILT2010 平成21年度研究成果報告会プログラム

## 大阪会場

日時／平成21年7月6日(火)10:00～  
 場所／千里ライフサイエンスセンター5階 サイエンスホール  
 大阪府豊中市新千里東町1-4-2 TEL 06-6873-2010  
<http://www.senrilc.co.jp/access/access.html>

### ◆プログラム

10:00～ 挨拶 所長 井澤靖和  
 10:10～ 特別講演「新しい光・電磁波材料メタマテリアルの現状」  
 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター教授 萩行正憲氏  
 10:55～ 当研究所の研究概要 所長 井澤靖和  
 11:10～ 低炭素社会の実現へ向けて 軽量素材CFRPの  
 パルスレーザー加工 主席研究員 藤田雅之  
 11:35～ 新しいレーザー増幅方式！ジグザグアクティブ  
 ミラーレーザー 研究員 古瀬裕章  
 12:00～ (休憩)  
 13:00～ レーザーコンプトン $\gamma$ 線による核変換  
 主席研究員 今崎一夫  
 13:25～ レーザーピーニングのシミュレーション  
 一相変化、及び応力解析 副主任研究員 古河裕之  
 13:50～ 量産機開発目前！効率をもっとあげられる！  
 放射流体シミュレーションによる極端紫外(EUV)光源開発  
 研究員 砂原 淳  
 14:15～ 損傷試験の標準化へ！光学素子の損傷閾値  
 データベース化試験 主任研究員 本越伸二  
 14:40～ 太陽光励起レーザーと今後の展開 副所長 中塚正大  
 15:05～ ポスター発表  
 15:45～ レーザーによる金属ナノ粒子生成と  
 エネルギー生産技術への応用 研究員 谷口誠治  
 16:10～ テラヘルツ放射源開発研究 研究員 李 大治  
 16:35～ コンクリート欠陥の発見はおまかせ！レーザー超音波  
 リモートセンシング 主任研究員 島田義則  
 17:00～ 技術相談

## 東京会場

日時／平成22年7月13日(火)13:00～17:00  
 場所／東京国際フォーラム G502会議室  
 東京都千代田区丸の内3-5-1 TEL 03-5221-9000  
<http://www.t-i-forum.co.jp/function/map/>

### ◆プログラム

13:00～ 挨拶 所長 井澤靖和  
 13:10～ 泰山賞贈呈式 名誉所長 山中千代衛  
 ◇レーザー功績賞  
 レーザー科学の振興・発展に対する永年にわたる貢献  
 宅間 宏氏  
 ◇レーザー進歩賞  
 高出力アト秒レーザーの発展と応用 緑川克美氏  
 14:00～ 当研究所の研究概要 所長 井澤靖和  
 14:15～ 低炭素社会の実現へ向けて 軽量素材CFRPの  
 パルスレーザー加工 主席研究員 藤田雅之  
 14:40～ コンクリート欠陥の発見はおまかせ！レーザー超音波  
 リモートセンシング 主任研究員 島田義則  
 15:05～ 新しいレーザー増幅方式！ジグザグアクティブ  
 ミラーレーザー 研究員 古瀬裕章  
 15:30～ (休憩)  
 15:45～ レーザーコンプトン $\gamma$ 線による雪崩核変換  
 主席研究員 今崎一夫  
 16:10～ 量産機開発目前！効率をもっとあげられる！  
 放射流体シミュレーションによる極端紫外(EUV)光源開発  
 研究員 砂原 淳  
 16:35～ レーザー損傷試験の標準化へ！光学素子の損傷閾値  
 データベース化試験 主任研究員 本越伸二  
 17:00 終了

### ■ポスター発表(大阪)

- ・テラヘルツ光源研究開発 (李大治)
- ・白色光ライダーの開発 (染川智弘)
- ・レーザーピーニングのシミュレーション  
一相変化、及び応力解析 (古河裕之)
- ・放射流体シミュレーションによる極端紫外(EUV)光源開発(砂原淳)
- ・p-ヒドロキシフェニルアセテート(HPA)水酸化酵素の  
光励起ダイナミクス (谷口誠治)
- ・ピラノース-2 オキシダーゼとそのミュータントの超高速蛍光  
ダイナミクスグルコースおよびアセテート存在下での光反応  
(ハイク コスローピアン)
- ・低炭素社会の実現へ向けて軽量素材CFRPのパルスレーザー加工  
(藤田雅之)
- ・レーザーコンプトンガンマ線による核変換 (今崎一夫)
- ・レーザーリモートセンシング装置を用いたコンクリート欠陥検出  
(島田義則)
- ・レーザーを用いた碍子塩分計測基礎実験 (島田義則)
- ・レーザー損傷試験の標準化へ～H21年度データベース化試験報告～  
(本越伸二)
- ・多種加工用フレキシブル超短パルスファイバー発振器の開発  
(古瀬裕章)

<定員> 大阪会場80名、東京会場70名(定員になり次第締め切らせて頂きます)

<参加料> 無料

<資料代> 非賛助会員3,000円(賛助会員、理事会社等無料)

<参加申込> 必要事項(会社名・機関名、所属・役職、お名前・ご連絡先・参加開催場所(大阪・東京)等)をご記入のうえ、FAX  
 またはE-mailでお申込下さい。なお、参加証は発行いたしません。

<申込先> 財団法人レーザー技術総合研究所 総務部(担当:幸脇(コウキ)、諸白(モロハク))

〒550-0004 大阪市西区靱本町1丁目8番4号 TEL 06-6443-6311 FAX 06-6443-6313 E-mail ilt-seika@ilt.or.jp

## 主な学会等報告予定

7月5日(月)～9日(金) 25th International Laser Radar Conference(Sankt-Peterburg, Russia)  
 染川 智弘「Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) Measurements of Atmospheric  
 CO2 Using a Coherent White Light Continuum」

8月23日(月)～27日(金) 32nd International Free Electron Laser Conference(Malmö, Sweden)  
 李 大治「Super-radiant Smith-Purcell emission with two-section grating」

Laser Cross No.267 2010, Jun.

<http://www.ilt.or.jp>

発行/財団法人レーザー技術総合研究所 編集者代表/島田義則 〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4 大阪科学技術センタービル4F TEL(06)6443-6311 FAX(06)6443-6313

掲載記事の内容に関するお問い合わせは、編集者代表・島田義則までお願いいたします。  
 (TEL:06-6879-8737, FAX:06-6878-1568, Email:shimada@ile.osaka-u.ac.jp)