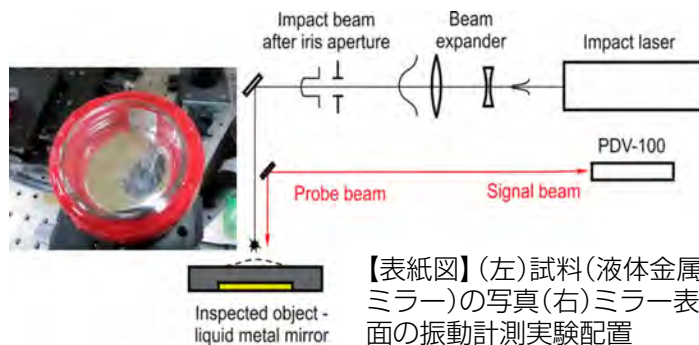


CONTENTS

- レーザー核融合への利用に向けた液体金属ミラーの物性評価：
- レーザーインパクト後の表面振動の計測
- 千葉大CEReS創立20周年記念合同シンポジウム参加報告
- 【光と蔭】山中龍彦君を偲ぶことば
- レーザーでトンネルコンクリートの健全性を高速検査
- 研究成果をプレス発表
- 主な学会等報告予定



【表紙図】(左)試料(液体金属ミラー)の写真(右)ミラー表面の振動計測実験配置

レーザー核融合への利用に向けた 液体金属ミラーの物性評価： レーザーインパクト後の表面振動の計測

レーザー計測研究チーム オレグ コチャエフ、倉橋慎理、島田義則

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 乗松孝好

◆液体金属ミラーのレーザー核融合プラントへの利用

高速点火レーザー核融合発電プラントの概念設計において、液体金属ミラー(Liquid Metal Mirror, LMM)は最終光学素子に利用できる有望な候補の一つである¹⁾。最終光学素子は核融合ターゲットと直接対向するため中性子やX線のバーストに曝されるが、液体金属ミラーを用いた場合には、液体金属の流動性によりミラー表面の平面度が保持されるため、それらの悪影響を抑制することができる。その結果LMMの寿命は、従来の金属ミラー(約3年)と比較して遥かに長いとされている(約30年)。またLMMには、排熱が容易である、埃やターゲットデブリの除去にミラー表面の洗浄を必要としない、など多くの利点がある。一方LMM利用への課題の一つに、高エネルギーのレーザーパルスを反射した際、その光学的品質が一時的に失われるという点が挙げられる。つまり、レーザー反射時に起こる液体金属の熱膨張やアブレーションによりミラー表面に不規則な動き(表面振動)が誘起されるため、振動が減衰し表面が“静かな状態”に戻るまでの間は反射ビームの波面に顕著な歪みが生じることが予測される。このため、レーザーパルスの繰返し周波数が4Hzである場合、実用のためには表面振動の減衰時間は0.25秒を越えてはならない。この課題に対し、我々はパルスレーザーとレーザードップラー振動計を組み合わせた表面振動計測技術を開発し、LMMの振動減衰時間に関する実験的な評価を行っている。本稿では、液体金属に水銀を用い、

レーザーエネルギーやミラーの厚さが表面振動に与える影響について検討した結果について述べる。

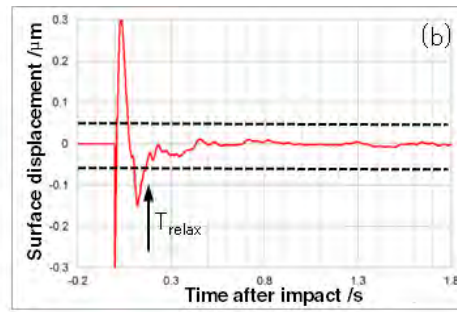
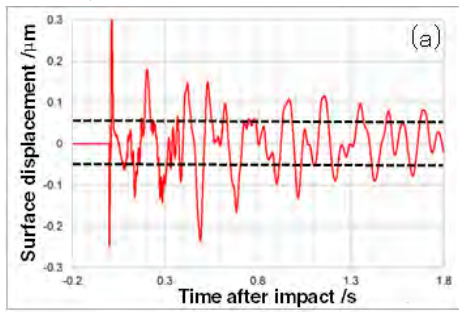
◆液体金属の表面振動計測技術

表紙図(右)に実験配置図を示す。水銀はアマルガム金メッキ基板上に展開した(表紙図(左))。この基板を用いることで、ガラス基板よりも遥かに薄い水銀層を作製できる。レーザーインパクト用の光源にはナノ秒パルスNd:YAGレーザーを用いた。レーザーの強度分布を均一化するため、出力ビームは拡大後9.5mm径のアパーチャーで中心部のみを取り出し、試料に照射した。LMM表面での照射面積は水銀表面上で0.7cm²、レーザーエネルギーは最大約70mJであり、エネルギー密度は最大で約100mJ/cm²である。表面振動の計測にはレーザードップラー振動計(PDV-100, Polytec)を用いた。プローブビームを基板の中心(インパクト領域の中心部)に集光し、反射光を検出し照射点での振動速度および変位を計測する。実験では、インパクトレーザーのエネルギー密度を30～100mJ/cm²、水銀層の厚さを0.25～3mmの間でそれぞれ変化させて計測を行った。ただし、今回の実験条件は実際のレーザー核融合発電プラントの設計とは異なっていることに留意されたい。主な違いは、(1)ミラー径が小さい、(2)インパクトレーザーをミラー面に対して垂直方向に照射した、点である。

◆レーザーインパクト後の振動減衰時間の評価

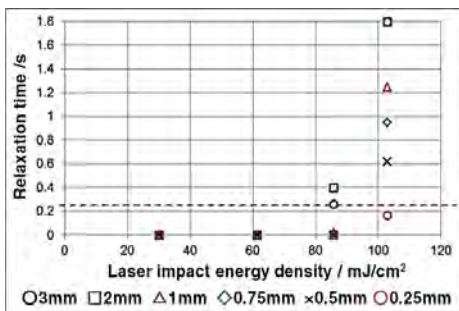
計測例として、図1にインパクトレーザー(72.4mJ(103mJ/cm²))照射後のLMM表面振動の時間発展を

次ページへつづく▶



【図1】(a)層厚3mm、(b)層厚0.25mmの水銀ミラーにおけるレーザーインパクト(103mJ/cm²)後の表面振動の経時変化。図中点線は変位の許容範囲(±0.05 μm)、矢印は振動減衰時間(T_{relax})を示す

示す。波形は表面の変位を表しており、変位の振幅が $\pm \lambda/20$ 、つまりこの場合インパクトレーザー波長(1.06 μm)の1/20(±0.05 μm)未満であれば、表面振動が十分に減衰しておりLMMとして利用可能な光学品質を示すと見なすことができる。図1(a)は水銀層の厚さ3mmの場合の計測結果であり、インパクト後1.6秒経過時にも振幅は0.05 μm(図中点線)以上であるが、水銀層の厚さが0.25mmの場合(図1(b))には、インパクト後0.2秒以内での速い振動減衰が見られる。この結果から、水銀層の厚さがLMMの振動減衰時間(T_{relax})に大きく影響することがわかる。



【図2】各層厚(3~0.25mm)での水銀ミラーの表面振動減衰時間のエネルギー密度依存性。点線は光学品質保持の境界(<0.25s、4Hz照射条件)を示す

図2に、各層厚での T_{relax} の照射エネルギー密度依存性を示す

示す。エネルギー密度<62mJ/cm²では層厚に関わらず T_{relax} は十分に短く(<< 0.25s)LMMの光学品質は保持されるが、それ以上の領域では、層厚が薄い(< 1mm)方がより高いエネルギー密度(<86mJ/cm²)でのレーザー照射(4Hz)にも対応できる(T_{relax} < 0.25s)。層厚を0.25mmとすれば、エネルギー 103mJ/cm²でのレーザー照射に対しても光学品質保持が可能である(T_{relax} = 0.17s)。この値はLMMの表面損傷しきい値(160mJ/cm²)と

比べてもさほど遜色無く、本研究によりLMMの有用性が実験的に示されたものと考えられる。

◆まとめと今後

本研究では、レーザー核融合発電プラントへの利用を念頭に、水銀を用いた液体金属ミラー(LMM)のレーザーインパクト後の表面振動の計測を行い、液体層の厚さおよび照射エネルギー密度に対する振動減衰時間(T_{relax})の変化について検討した。その結果、液体金属層の厚さが表面減衰時間に影響し、より薄い層の方が減衰時間は短く、より高いエネルギー密度での照射に対しても反射に必要な光学品質を保持することがわかった。層厚が0.25mmの場合、LMMは最大で照射エネルギー密度103mJ/cm²(4Hz)まで利用が可能である。ただし、今回の実験条件は実際の発電プラント設計とは異なる点もあるため、今後はミラーの素材やインパクトレーザーの照射角度などより設計に近い条件での評価を行う予定である。

謝辞：本研究は科学研究補助金(基盤研究(C)、課題番号25420887)の支援を受け行われた。

参考文献

1. R.W. Moir, *Fusion Engineering and Design*, vol. 51-52, 1121-1128 (2000).

REPORT

千葉大CEReS創立20周年記念 合同シンポジウム参加報告

レーザープロセス研究チーム 染川智弘

◆千葉大CEReSが創立20周年

千葉大学環境リモートセンシング研究センター(Center for Environmental Remote Sensing: CEReS)が2015年に創立20周年を迎え、12月1~2日に記念イベントとして3つのシンポジウム(第23回CEReS国際シンポジウム、第18回CEReS環境リモートセンシングシンポジウム、第3回小型衛星シンポジウム)が合同開催された。CEReSは昭和38年に設置された工学部附属「天然色光学研究施設」を発端に、平成7年から全国共同利用施設の研究センターに認定され現在

に至る。筆者は平成22年度から継続してCEReS(久世研究室)との共同利用研究を実施しており、研究成果を発表するため本会議に参加した。シンポジウムに先立ち、11月30日には記念式典が開催された。徳久剛史千葉大学学長、文部科学省研究振興局学術機関課長牛尾則文氏他多くの来賓の方々からの祝辞があり、リモートセンシング分野におけるCEReSへの期待の高さが伺われた。シンポジウムには約150名の参加があり、初日にポスター発表、基調講演等が、2日目には大気リモートセンシング、衛星リモートセンシング/RS技術、森林と植

生など8つのセッションに分かれ口頭発表が行われた。また会場には、全長2 m程度のUAV(無人航空機)が展示されており興味深かった。レーダを搭載し、自由な高度から地形や植生のモニタリングが可能とのことである。

◆地上から、上空から、衛星から地球環境をモニタ

CEReSでは大きく三つの研究指針(研究プログラム)を掲げており、その一つに先端のリモートセンシングセンサの開発がある。これに関連して、シンポジウムではUAVオンボード型合成開口レーダ(SAR)の開発に関する報告があった(CEReS ヨサファット教授ら)。彼らは送受信のマイクロ波(L-バンド)に従来の直線偏波ではなく楕円偏波を用い(CP-SAR)、プラッ

トフォームの姿勢と電離層によるファラデー回転の影響を抑制するとともに、新しい環境データの取得を考えている。また彼らはCP-SARを小型化し、UAVへ搭載することに成功している(上記のUAV展示はヨサファット教授らによるもの)。さらにはこのセンサを小型人工衛星化する計画もあり、シンポジウムでは装置開発と実証実験に関する報告もあった。レーザーを用いたものでは、LiDARによる森林構造の計測に関する報告がいくつか見られた(宇都宮大 有賀准教授ら)。地上から、または小型飛行体に搭載したレーザースキャナを用いて上空から森林をスキャンし、観測点からの距離情報を取得することにより植生状況の把握やバイオマス資源の推定等を行う。この手法では計測データ

山中千代衛



山中龍彦君を偲ぶことば

山中龍彦君は私が教授になった昭和38年大学院博士課程修了の第一号生である。彼はしばしばそれを口にして自慢していた。四条畷高校の出身で剣道を良くした素晴らしい人物で、昭和55年教授に昇進した。

何よりも特筆したいことは、彼と一緒に大阪大学レーザー核融合研究センターの礎を開拓したことである。

昭和44年私は阪大評議員を辞して名古屋大学プラズマ研究所レーザー客員部門に出向した。当時助教授であった龍彦君と他三名のチームと共に現地に乗り込んだ。ダイハツの小型車を用意し、チームの足とした思い出がある。

元々プラズマ研究所は磁場閉じ込め核融合研究の本場で「レーザーで何が出来るか」という空気であった。私たちは1GW大出力ガラスレーザー激光Ⅰ号改を持ち込んで、「核融合中性子を生成してみせる」と宣言したのである。

何しろレーザーそのものを自ら作り上げ、廻転ミラーでQスイッチをかけナノ秒パルスを生じさせねばならない。その上重水素をヘリウムで冷却して真空槽中にアイスキャンデー状のターゲットとして露出させ、ここにレーザーを照射するのである。初めての一大実験であるから苦労の山で、これを乗り越え2年がかりで、レーザー核融合の中性子検出に成功した。

高山一男副所長は初めから私たちのシンパであった。大山中とヤング山中と呼びかけて頂いた。この期におよびプラズマ研究所でもはじめて核融合反応の中性子生成で所内に一挙に祝賀の空気が出てきた。

伏見康治大先生も大変ご満足で、翌日の朝日、毎日、読売、日経の朝刊第一面にトップでレーザー核融合による中性子検出の大報道に繋がった。

この実験的研究はきわめて大切なレーザー光の高密度プラズマ中のパラメトリック異常吸収の発見につながったのである。この理論は広大の西川恭治教授の考によるものであるが、レーザープラズマを使って見事に実証された。

このあと5年間はこの異常吸収が阪大レーザー研の売り物で、ゴードン会議、レーザープラズマ相互作用ワークショップ、プラズマ核融合国際会議、米物理学会で場を圧したのであった。詳細はPhys. Review A6, 2335 (1972)に掲載され、レーザー吸収の手本となったのだ。

この業績を高く評価され、伏見康治先生は私が客員部門を去るにあたり阪大総長釜洞醇二郎先生に手紙を書かれ、「山中教授等は名大プラズマ研でレーザー核融合の研究に見事成功したから、ぜひ阪大で研究の場を作って欲しい」と申し入れて下さった。

その結果1972年大阪大学工学部レーザー工学研究施設が生まれ、それ以後とんとん拍子で研究がすすみ、1976年には大阪大学附置レーザー核融合研究センターが発足し、8部門にまで成長した。

この間激光Ⅳ号、激光MⅡ号、激光XⅡ号の建設がすすみ、CO₂レーザーも烈光Ⅷ号まで完成、さらに電子ビーム励電Ⅳ号が整備され、アメリカの国立リバモア研、ロスアラモス研、サンディア研に対抗できる日本の研究拠点が確立されたのである。

これら一連の研究発展の原点を支えたのが山中龍彦君である。勿論それ以外に緊密な研究チームが立ち上がり、人呼んで山中軍団の名を轟かせたのである。研究目標の確立、団結力、突破力はまことに見事なものであった。

時変わり 人移れど、山中龍彦君の業績は燦として輝いている。このような弟子に恵まれ本当に研究が楽しかった。山中龍彦君の冥福をお祈りし感謝の意を捧げたい。

どうか安らかにお休み下さい。ご家族の平安を心より願っています。

【名誉所長】

は点群として得られるため、実用のためには分光放射計測値との統合や衛星データの利用等、分析手法の開発がポイントとなるようである。筆者は、白色光差分吸収ライダー(DIAL)による水蒸気プロファイルの観測結果について発表を行った。広帯域な白色光を用い、従来にはない水蒸気、酸素等の高度プロファイルの同時取得を目指している。

CEReSの主要な研究の一つに衛星データの分析や高度利用化がある。このためシンポジウムにおいても、地球観測衛星Terra/Aquaに搭載されたMODIS(中分解能撮像分光放射計)による森林火災の監視、米台共同衛星FORMOSAT-3/ COSMICによる大気および電離層のGPS掩蔽観測、温室効果ガス観測技術衛星GOSAT搭載の熱赤外線センサ(TANSO-FTS)による大気中CO₂、メタン濃度の季節～年変動の分析等、さまざまな衛星データを分析した報告が多く見られた。またCEReSでは、最新の光学センサを搭載した気象衛星ひまわり8号のデータ処理やアーカイブ作成、データ配布を行っており、気象応用や地震防災等、幅広い用途に利



【写真】合同シンポジウムの記念撮影

用できるそうである。

今年度のシンポジウムでは、UAVを用いた観測例が多くみられた。今後はドローン等に搭載できる小型・省電力のレーザー光源の開発が重要になると感じた。

TOPICS

レーザーでトンネルコンクリートの健全性を高速検査 研究成果をプレス発表

去る1月8日(金)、大阪、東京両会場にて、当研究所が日本原子力研究開発機構、理化学研究所と合同参画している内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)(Laser cross No.325、2015. Aprilを参照)の研究成果をプレス発表いたしました。本研究では、外からは見えないコンクリート内部の「ひび割れ」等の欠陥をレーザーにより検出する「レーザー欠陥検出法」と呼ばれる技術を高速化、従来の50倍の速さ(25ヘルツ)での検出に初めて成功し、打音法に代わる遠隔・非接触のトンネル安全性検査技術の確立に向け大きく前進しました。発

表当日はNHKなど多くの報道機関に出席いただき、その内容がNHKで紹介(1/11)されるとともに、朝日新聞、日経新聞などにも掲載されました。



【写真】大阪会場でのプレス発表の様子(右から倉橋慎理研究員、島田義則主任研究員(レーザー総研)、長谷川登研究員、三上勝大特定課題推進員、加道雅孝研究推進室室長代理(原子力機構))

主な学会等報告予定

- | | |
|-----------------|--|
| 3月4日(金) | 第16回「レーザー学会東京支部研究会」電気学会 光・量子デバイス技術研究会:「高機能光源と産業応用への展開」(東海大学高輪キャンパス)
染川 智弘「レーザーラマン分光法を用いた変圧器の異常診断手法の開発」 |
| 3月16日(水)～18日(金) | 平成28年電気学会全国大会(東北大学)
倉橋 慎理「レーザーによるコンクリート構造物内部欠陥の高速遠隔計測技術の開発」 |
| 3月19日(土)～22日(火) | 第63回応用物理学学会春季学術講演会(東京工業大学大岡山キャンパス)
李 大治「Spatial growth rate of a Cherenkov free-electron laser with negative-index material」
ハイク コスロービアン「A model for quantitative analysis of CW regime, multi-pass amplifier system characteristics including optical losses」
染川 智弘「偏光子を用いたフェムト秒ダブルパルスLIBSの信号増強効果」
砂原 淳「レーザー照射されたスズドロップレットのマイクロ秒シミュレーション」 |
| 3月19日(土)～22日(火) | 日本物理学会第71回年次大会(東北学院大学泉キャンパス)
砂原 淳「燃料球内面照射型高速点火の数値シミュレーション」 |
| 3月24日(木)～27日(日) | 日本化学会第96春季年会(同志社大学京田辺キャンパス)
谷口 誠治「ヒト由来D-アミノ酸酸化酵素の蛍光ダイナミクス:機能阻害効果の検討」 |