

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420887

研究課題名(和文) 高速点火レーザー核融合炉用液体金属ミラーの損傷閾値とダンピングの評価

研究課題名(英文) Damage threshold and dumping of liquid metal mirror for laser fusion power plant based on fast ignition

研究代表者

乗松 孝好 (Norimatsu, Takayoshi)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号：50135753

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：将来のレーザー核融合発電炉では反射型のミラーを2か月に1回程度、レーザーの運転を数分間停止して遠隔操作で定期的に変換することで運用されることが考えられています。高速点火ビームは複数のビームを束ねて用いるため、短時間での交換は難しくなります。液体金属ミラーレーザーによる損傷が発生しても自然に回復し、中性子で基盤が変形しても平面を維持することができます。

水銀を用いた模擬実験でレーザー照射時の液面の振動を測定し、損傷閾値の2/3程度のエネルギー密度で照射しても100ms程度で振動が減衰することが分かりました。これは将来の炉の4Hz運転が可能であることを意味しています。

研究成果の概要(英文)：In a future laser fusion reactor, the final optics made with multi-coated mirror will be used. To avoid degradation by neutrons, the final optics will be replaced during short halt of laser operation. Since bundled beam will be used for the ignition beam, it is hard to exchange mirrors in a short time. Use of liquid mirror allows automatic recovery of damaged surface and stabilizes deformation of base materials.

We experimentally simulate vibration of surface during laser irradiation using Hg. Results indicated that the surface vibration dumps in 100ms after laser irradiation with the fluence of 2/3 of the damage limit. This result shows the liquid metal mirror can be used in future laser fusion power plants.

研究分野：レーザー核融合学

キーワード：液体金属ミラー レーザー核融合 最終光学系 表面張力波

1. 研究開始当初の背景

将来のレーザー核融合発電所では最終光学系は 14MeV のエネルギーを持つ中性子に直接さらされ、従来の透過型の光学素子は吸収が増加し数分で使えなくなる。多層膜コートミラーは裏面から冷却できること、表面の数ミクロンで反射率が決まることから吸収の影響が少なく、2ヶ月程度は使用可能と考えられている。爆縮ビーム用の最終光学系はレーザーの運転を数分間だけ止め遠隔操作で交換するシステムを設計可能であるが、点火ビームは複数のビームが1箇所束ねられているので場所が十分確保できず遠隔交換システムが設計しにくい。

斜入射金属ミラーは有力な候補であるが、中性子によるスエリングやアニーリング効果で変形することが予想される。このとき、表面がある程度の厚さをもった液体金属で覆われていると変形を吸収でき、表面を平らなまま維持できる可能性がある。

液体金属ミラーの研究はすでに存在する。ただその目的は厚さ数ミクロンの液体金属で覆い、ダメージを自動修復するのが目的であった。基盤の変形を吸収するというコンセプトはなかった。

液体金属をミラーとして用いた場合、たとえレーザーのフルエンスが損傷閾値以下であってもレーザーエネルギーの一部は吸収され、表面から蒸気が発生し、その反作用で振動すると思われる。一般にミラーの表面精度は $1/10\lambda$ (λ はレーザーの波長) で用いられている。商用炉 KOYO-F では4基のモジュラー炉が用いられることから1基あたりは 4 Hz で繰り返されることになる。本報告書では振動が 250ms 以下で収まるかにポイントを置く。

2. 研究の目的

本研究の目的はレーザー照射時の液面振動が 250ms 以内に $1/10\lambda$ に減衰する条件を

見出し、液体金属ミラーを用いた炉システムの概念設計が可能かどうかを判断するデータを取ることを目的とする。

最終的には寿命という観点での評価が必要なのはいうまでもないが、現時点ではスエリングやアニーリングの率が材料、使用条件により大きく異なり、議論するだけの十分なデータがそろっていないことがわかったので省略する。

3. 研究の方法

図1に液体金属ミラーの振動を測定する実験装置の概要を示す。実用炉では液体 LiPb を用いるが、ここでは水銀を用いて実験を行った。液体金属は表面張力が強く、厚さ 3mm 以下の薄い液体層を親和性の低いガラス等の材料の上で作ることは困難なので、水銀と親和性のある Au を沈め、薄い膜を製作した。液面に振動を与えるレーザー（これよりインパクトレーザー）は Q-switched Nd:YAG でパルス幅は 8ns である。一様な照射を行うためにアパーチャを介して直径約 9.5mm の領域を照射した。インパクトレーザーは 70mJ/パルスで、液面表面のフルエンスは $100\text{mJ}/\text{cm}^2$ を中心に変化させた。液面の振動はドプラ速度計 model PDV-100 laser vibration meter (Polytec, Germany) が用いられた。プローブビームの液面での直径は 0.1mm である。本装置で 22kHz まではよい精度で測定可能である。実験1ではインパクトレーザー照射中心部を測定し、レーザー照射時の表面の振動速度から振幅と減衰時間を算出する。実験1ではレーザーのフルエンスを 103, 86, 62, and 30 mJ/cm^2 と変化させ、液面の深さは 3, 2, 1, 0.75, 0.5, 0.25 mm と変化させて測定した。

伝播速度を測定する実験2ではインパクトレーザーは直径 1mm 程度に集光され、液面にプラズマが形成される。インパクト

レーザーより $16 \pm 0.5 \text{ mm}$ 離れた所で表面の動きを観測した。実験はすべて大気中で行われたが、大気の影響は液面の動きにほとんど影響を与えないことが数値シミュレーションで確認されている。

本実験に先駆け、液体 LiPb の損傷閾値を求める実験を行っている。液体であるため、ダメージが表面に残らない。そのため、反射率を測定しながらレーザーフルエンスを徐々にあげ、反射率に変曲点が現れたところをプラズマが生成し始めたと判断した。その結果では 160 mJ/cm^2 であり、金属ミラーとして妥当な値であった。

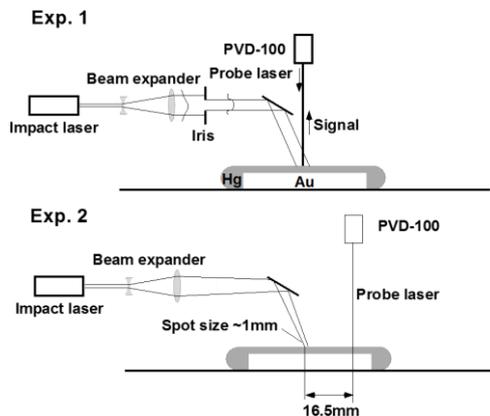


図 1 実験装置

4. 研究成果

4. 1 緩和時間

実験 1 の結果の代表的な波形を図 2 に示した。振動は 10 ms 以下に見られる極めて速い成分と、それ以降の遅い成分に分けられる。早い成分は測定器の感度が 22 kHz から低下し始めるので、参考程度にとどめる。さらに遅い成分は 2 つの要素が考えられる。ひとつは 18 Hz の基本周波数を持つ実験系固有のバックグラウンド振動、もうひとつは波長 2 cm の波で、これはレーザー照射位置の直径が 1 cm であることに起因する。水銀を入れているシャーレの直径が 4.5 cm であるので、重力波の場合、速度は 15 cm/s であり、反射は 0.6 s 後に現れる。なお、BG の 18 Hz の振動は最も浅い 0.25 mm の実験では観測されなかった。

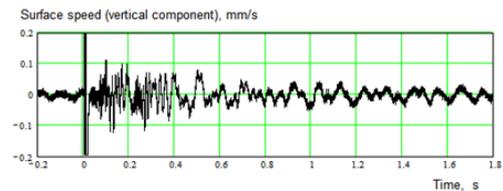


図 2. 水銀の深さが 3 mm 、インパクトレーザーのフルエンスが 103 mJ/cm^2 のときの表面振動速度。緩和時間 $T_{\text{relax}} > 1.8 \text{ s}$

記録された振動を理解するためには波の伝播パスと、その速度がわかっているなければならない。数値シミュレーションによればインパクトレーザーによるアブレーション圧はレーザーエネルギーの吸収率を 10% と仮定して 0.1 GPa 10 ns であった。水銀中での音速は 1450 m/s であるの、音波の底面からの反射は、 $8 \mu\text{s}$ 以内に現れる。自由表面での反射はほとんど起こらないので多重反射は考慮する必要はない。したがって、レーザー照射直後の振動は底面からの反射ではなく、レーザー照射領域境界に発生した段差が短波長の表面波として伝播してきた可能性が高い。実際、先行研究による表面派の伝播速度は、波長に大きく依存し、

$$v = \sqrt{\{(g \lambda / 2 \pi) + (2 \pi \gamma / \rho \lambda)\} \tanh(2 \pi h / \lambda)}$$

で与えられる。ここで、 g , γ , ρ , h は重力加速度、表面張力、密度、液面の深さである。

図 3 はインパクトレーザーのフルエンスが 103 mJ/cm^2 のときに深さ 0.5 mm の水銀表面に観測された波形である。最初のピークは振り切れていて、信頼性に欠くので無視する。この場合、遅い部分に 2 つの波が存在することがわかる。ひとつは $t = 0$ から 30 ms にかけて振動数を下げながら観測されたもので、もうひとつは時間とともに振幅は増大するが、周波数は逆に遅くなる成分である。時間とともに

に周波数が下がることは、これらの波が表面張力波であることを示している。最初の波はレーザー照射部の端から発生したもののと思われる。(図3の Path 2), 第二の波はミラーの端からの反射と思われる(Path 3)。実際のミラーを設計する場合、端面からの反射を抑えることが重要であることを示している。

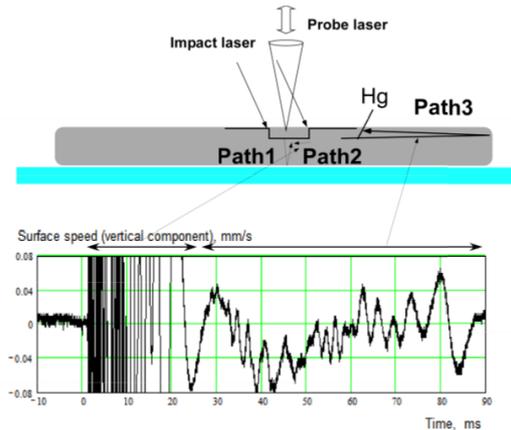


図. 3 実験結果の解析。深さが 3mm の場合、5~25ms の成分と、25ms 以降の 2 成分が存在する。

表 I すべての実験結果。0.17s 以下は液体金属ミラーの使用可能範囲である。

Fluence, mJ/cm ²	Liquid mirror thickness, mm					
	3	2	1	0.75	0.5	0.25
103	>1.8	>1.8	1.25	0.95	0.62	0.17
86	0.26	0.4	0.02	0.02	0	0
62	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0

4.2 表面張力波の距離による減衰

先の説に述べたように波の伝播を抑えることが重要である。図4に実験2の結果を示す。これは集光した場所から 16.5mm 離れた場所での液面の振動を、深さを変えて測定したものである。横軸は時間の経過であり、レーザーは $t = 1.2$ ms に照射されている。青い線は水銀の深さが 3mm であり、赤い線は深さが 0.25mm のときである。表面張力波は観測点に $t = 14$ ms のときに短波長成分が先に到達し、次第に周波数を下げる。 $t = 60$ ms,以降、再び振幅が増え始めるが、これはミラー短面

からの反射である。最初の成分の速度と振幅は 130 cm/s と 0.3 mm と計算できる。式1によれば、波長 0.3mm の波の伝播速度は 87 cm/s でおおむね合っている。時刻 $t = 14$ ms 付近での振幅は周期を正確に求めるには小さすぎる。最初の激しい振動の後($t = 38$ から 49 ms 付近)、周期は 11 ms 程度である。これは速度にして 28 cm/s、波長にして 0.3 cm となる。この結果は式(1)から計算した波長 0.3cm の波に対する速度 28.1 cm/s とよく一致する。

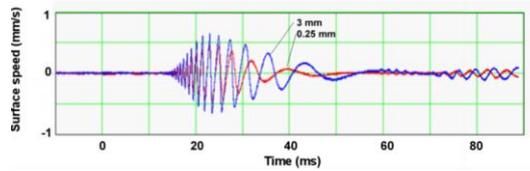


図. 4 表面張力波の震源より 16.5mm の場所における液面振動速度

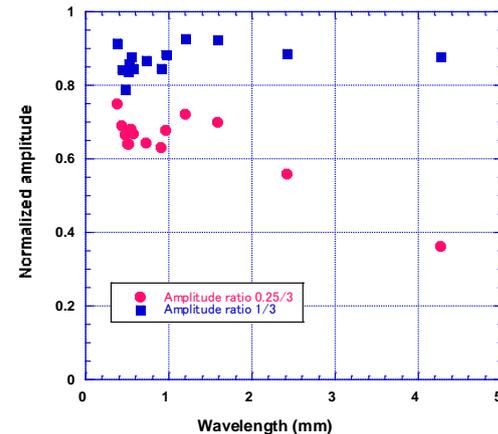


図 5 観測点で各波長に対する振幅を深さ 3mm のときの振幅で正規化した波長と振幅の関係

図5は観測点における表面波波長成分における振幅を深さ 3mm のときの振幅で正規化したものである。深さが 1mm のとき、ほとんど波長による減衰の差異は認められないが、深さが 0.25mm のときは波長が長いほど減衰が大きいことがわかる。短波長成分に対する平均の減衰率は 0.7/cm である。この結果は照射フルーエンスが 100mJ/cm² のとき、ミラー端部における反射率が 1 で、そこからの反射波を 0.05mm 以下 (2ω レーザーの $1/10\lambda$) 10cm 必要であることを意味している。

実際のレーザーでは断面における強度が一樣であるとは考えにくい。強度が一樣でなければ表面波の発生原因となり、同心円状に伝播する。20 and 50 cm/s の伝播速度をもつ波の振幅が $1/10\lambda$ にまで小さくなるには 5cm 伝播することになり、100 to 250 ms の間にはミラーとして容認できる状態になる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

RELAXATION OF SURFACE TENSION WAVES ON A LIQUID METAL MIRROR FOR A FAST-IGNITION LASER FUSION PLANT

Takayoshi Norimatsu, Oleg Kotyaev, Yoshinori Shimada, Shinri Kurahashi, Shinji Motokoshi, Katsuhiko Mikami, Kei Sasaki, Takahisa Jitsuno, Kohei Yamanoi, Hiroyuki Furukawa and Tomoaki Kunugi
Fusion Science and Technology, in printing

[学会発表] (計 3 件)

Laser Fusion Experimental Reactor LIFT Based on Fast Ignition and the Issue

Takayoshi Norimatsu

Presented at IAEA Technical Meeting on Physics and Technologies of IFE Targets and Chambers

18-20 March 2015, Vienna, Austria

Shallow liquid metal mirror for ignition beam of laser fusion power plant

Takayoshi Norimatsu

Presented at American Nuclear Society, Nov. 9 to 13, 2014, Anaheim, CA. USA.

Fundamental study of wave propagation on liquid surface related to IFE mirror

Yuji Moriyama

Presented at American Nuclear Society,

Nov. 9 to 13, 2014, Anaheim, CA. USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

乗松孝好 (NORIMATSU Takayoshi)
大阪大学大学院レーザーエネルギー額研究センター・教授
研究者番号: 50135753

(2) 研究分担者

実野孝久 (JITSUNO Takahisa)
大阪大学・レーザーエネルギー額研究センター・教授
研究者番号: 30162811

功刀資彰 (KUNUGI Tomoaki)

京都大学・原子核工学専攻・教授
研究者番号: 40301832

島田義則 (SHIMADA Yoshinori)

財団法人レーザー技術総合研究所・研究員
研究者番号: 80250091

本越伸二 (MOTOJKOSH Shinji)

財団法人レーザー技術総合研究所・研究員
研究者番号: 20270580

古河裕之 (FURUKAWA Hiroyuki)

財団法人レーザー技術総合研究所・研究員
研究者番号: 70222271