技術ノート

レーザー核融合高速点火実証実験用クライオターゲットの開発 —燃料充填状況の可視化技術—

藤村 猛^{*1,†}, 中井 光男^{*1}, 岩本 晃史^{*2}, 乗松 孝好^{*1}, 長井 圭治^{*1},
本間 啓史^{*1}, ヤン ハン^{*1}, 坂上 仁志^{*2}, 三間 罔興^{*1}

Development of a Cryogenic Target for the “Fast Ignition Realization Experiment” -Technique for measuring the fuel layer using an interferometer-

Takeshi FUJIMURA^{*1,†}, Mitsuo NAKAI^{*1}, Akifumi IWAMOTO^{*2}, Takayoshi NORIMATSU^{*1}, Keiji NAGAI^{*1},
Hirofumi HOMMA^{*1}, Han YANG^{*1}, Hitoshi SAKAGAMI^{*2} and Kunioki MIMA^{*1}.

Synopsis: Measurement techniques have been developed to characterize form shell targets for the Fast Ignition Realization Experiment (FIREX) project. Interferometry has been adopted to determine the volume of hydrogen fuel in the form shell. A preliminary experiment has been conducted to evaluate the applicability of interferometry. The paper describes the measurement techniques and discusses its accuracies.

Keywords: cryogenic target, interferometer, FIREX, fast ignition, laser fusion

1. はじめに

核融合を地上で実現する方法の一つとしてレーザーにより燃料を圧縮させるレーザー核融合が世界中で研究されている¹⁾。なかでも 2010 年には米国の The National Ignition Facility (NIF)で、人類初となるレーザー核融合の点火実験が行われようとしている²⁾。また仏国では Laser Mega Joule (LMJ) という装置が建設中であり、NIF とほぼ同様の大型レーザー装置を開発し 2012 年には核融合実験に取り組む計画である³⁾。

レーザー核融合には何種類かの方法が提唱されており、NIF や LMJ は中心点火^{2,3)}方式での核融合における点火を目指している。一方大阪大学レーザーエネルギー学研究センターでは、レーザー核融合の方式の中でも、低いレーザーエネルギーで点火することができる高速点火方式^{4,5)}の研究が進められている。高速点火方式においては爆縮用と加熱

用の 2 種類のレーザーが必要であり、爆縮用レーザーを用いて燃料を圧縮して生じた高密度プラズマに加熱用レーザーを照射することで高温部分を作り出し点火燃焼させる。現在、当センターでは高速点火実証実験:Fast Ignition Realization Experiment (FIREX) 計画⁶⁾が進められており、燃料のイオン温度が 5 keV を超えることを目指した当計画の第一段階にあたる FIREX-I が実施されている。

FIREX-I においては Fig.1 に示す仕様の燃料ターゲットが求められている⁷⁾。ターゲット開発のために大阪大学レーザーエネルギー学研究センターと核融合科学研究所が双方向型共同研究を行っている。このターゲットは燃料を均一に充填させるためのスポンジ状のフォーム素材の中空球、加熱用レーザーエネルギーを高密度プラズマ中心まで輸送するためのコーン及び、燃料を中空球内部まで導入するための燃料導入管からなっている。フォーム素材の外皮として燃料が蒸発しないための緻密な蒸発防止膜をコーティングしている。このターゲットを冷却し、液体燃料を燃料導入管からフォーム層に毛細管現象により浸透させる。さらに温度を下げることで燃料を固化させ、ターゲットが完成する。ここで、燃料充填の際に燃料がフォーム層の容積に対して過剰であれば球対称なターゲットがえられず、不足であればフォーム層内に気泡が残るなど非一様なターゲットになり、十分に燃料を圧縮できない。また加熱用レーザーは燃料が最大圧縮されたときに照射する必要があり、その最大

Received January 7, 2008

^{*1} 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-6
Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamadaoka,
Suita, Osaka 565-0871, Japan

^{*2} 核融合科学研究所
〒113-0033 岐阜県土岐市下石町 322-6
National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi, Toki,
Gifu 113-0033, Japan

[†] E-mail: t-fujimura@ile.osaka-u.ac.jp

Fig.1 Schematic view of the cryogenic target used in FIREX-I.

精度と追加熱レーザー照射のタイミングとの関係については詳細な解析は未だなされていないが簡単な評価によると誤差 2% の範囲で充填率を制御する必要があるといわれている。しかし液体燃料はサブミクロンの微細な構造のフォーム層に均一に浸透していくことから、顕微鏡等で直接観察し、燃料の充填量を判断するのは困難である。そこで、著者らはフォーム層に燃料が充填されると充填量に対応してフォーム層内の屈折率が変化することに着目し、透過光を用いた干渉計測法の原理を用いて、この屈折率の変化を測定することとした。現在、この干渉計測を用いて液体燃料充填の状況を可視化し、燃料の充填量を評価する方法を開発している。

2. 測定原理

ターゲットの中を通る光の経路を Fig.2 に示す。線は左側から水平にターゲットに照射された光であり、 n_i ($i=0,1,2,3$) はそれぞれの屈折率を示している。ターゲットを透過した光と、透過していない光(参照光)を重ね合わせることで干渉が起こり、透過した光と参照光の光路差が用いた光源の波長の整数倍であれば、明線が観測できる。ターゲットに入射した光はそれぞれの境界面で屈折し、反対側へ透過する。ここでフォーム層に燃料

Fig.2 The optical paths through a two-layer shell.

が充填されることによって Fig.2 中の n_2 が変化するが、この変化が屈折角を変化させ、D 以降の座標も変化させる。よって屈折率と幾何学的な長さとの積である光路長は燃料充填の前後で変化するため、干渉縞の現れる位置及び間隔が変化する。それらを測定することで燃料の充填量を測ることができる。

ターゲットに入射した光の軌跡は次のように計算することができる。ここで入射光の角度は水平面に対して平行であるとする、Fig.2 における角度 α は以下の式で与えられる。

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{y_b}{R}\right) \quad (1)$$

スネルの法則により角 α と角 β の関係は以下の式で与えられる。

$$n_0 \sin \alpha = n_1 \sin \beta \quad (2)$$

C の x 座標は以下の計算式を解くことで得られる。

$$[-\tan(\alpha - \beta)(x_c - x_b) + y_b]^2 + x_c^2 = (R - b)^2 \quad (3)$$

式(1)から(3)の計算を繰り返すことで D,E,F,G 及び H の座標を求めることができる。座標 I については G と H の座標を用いることで

$$y_i = \frac{x_h y_g - x_g y_h}{x_h - x_g} \quad (4)$$

と求めることができる。焦点を原点としたとき結像レンズ系でカメラまで像転送した場合には、透過光と参照光の干渉は原点を通る垂直な平面上での仮想的な位相分布を表す。つまり、ある高さ A を通り、水平にターゲットに入射した光が参照光と干渉し、明線が生じる場合に、干渉縞を撮影すると当該明線は中心から y_i だけ離れた位置に見られる。光路長はそれぞれの座標を用いて以下の式で表される。

$$L = n_0(AB + GH) + n_1(BC + FG) + n_2(CD + EF) + n_3DE - n_o HI \quad (5)$$

ここで I に明線が観測できた場合には、A と異なる点 A' を通り水平な光が透過してきたとき(このときの計測面の座標を I' とする)、この光路長を L' とすると、光路長の差 ΔL は、

$$\Delta L = L' - L = k\lambda \quad (6)$$

ここで k が整数であった場合には I' の位置に明線が見え k が整数 + 0.5 であった場合には I' の位置に暗線が見える。実験結果から明線と暗線の位置を採取し、この光路長の差との関係を求めることで屈折率 n_2 、すなわち充填率を求めることができる。

3. 実験

3.1 冷却装置

燃料を充填させるための冷却装置は 4.2K GM 型冷凍機(住友重機械工業製)を備えている⁸⁾(Fig.3)。冷凍機とターゲット容器内の熱シールド兼熱交換器を Flexible Thermal Conductive

Fig.3 Schematic view of the test apparatus.

Link (FTCL) でつなぎ、ヘリウムガスを熱交換媒体としてターゲットを冷却した。冷却後のターゲット容器内に設けた熱シールドの最低到達温度は 7.1 K であった。冷凍機は 1 Hz 程度の振動をしており、この振動が直接ターゲットに伝わってしまうと計測の際に静止画像を撮影できなくなるため、高精度の光学計測には問題となる。そのため Support 1 では冷凍機を、Support 2 ではチャンバーをそれぞれ分離して支持するようになっている。レーザー変位計 (KEYENCE 製) を用いて計測した結果、ターゲット容器の内壁は 1–4 μm 程度の振動まで抑えられ、冷凍機の停止状態と同程度まで軽減された。光学観察は実体顕微鏡と、後述する干渉計測装置を用いて行った。ガラス窓を通した外部からの輻射による熱進入を防ぐためにガラス窓表面には波長が 700 nm 以上の赤外線及び 400 nm 以下の紫外線を遮断するためのコーティングが施されている。

3.2 干渉計測装置

干渉計測装置の概略図を Fig.4 に示す。計測に用いた光源は HeNe レーザー (MELLES GRIOT, 05-LHP-15) を用いた。このレーザー光は波長が 632 nm、直線偏光で、偏光比が

Fig.4 Experimental set-up for the interferometer.

500:1、強度が 5 mW である。光源からでた光は ND フィルターによって光量が下げられ、エキスパンダーで光線の直径が 2 cm まで拡大され、最終的に $4.0 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^2$ まで減光された。ターゲットを透過した光は結像レンズ系によって CCD カメラまで像転送される。結像レンズ系によって像転送される像は 0.8 倍に縮小された像となる。結像レンズ系を通った光線はビームスプリッターによって分割され、それぞれがミラーにより反射したあと、もう一つのビームスプリッターにより重ね合わせられる。片方の光線の光軸を平行移動させ、一方の光線のうちターゲットを透過した光と、もう一方の光線のうちターゲットを透過していない光を干渉させた。この干渉縞を CCD カメラ (DS-Fil-L2, Nikon) で撮影した。このとき背景光を遮断するために 632 nm を中心とするバンド幅 10 nm の干渉フィルターを CCD カメラの直前に挟んだ。

3.3 ターゲット

使用したターゲットは、直径が 800 μm 、厚みが 63 μm のレゾルシノール/ホルマリン重合物の中空球 (RF フォーム球) に金コーンと燃料導入管を付し、フォーム球上に蒸発防止膜としてパラキシリレンを 5.3 μm 蒸着した構造である (Fig.5)。RF フォーム球の 632 nm の光線の吸収率は低い⁹⁾ため透過による計測ができると共に吸収熱による昇温も抑えることができる。RF フォーム球は General Atomics 社より提供を受けた。また核融合実験に用いられる重水素、三重水素ではなく、水素を模擬燃料として使用した。

3.4 実験手順

燃料を充填するために、まず水素の圧力を 8.5 kPa に固定し、ターゲットの入っているチャンバー内部の熱シールドの温度を 14 K にした。またターゲット以外での液化を抑えるためにチャンバー内部の水素の通る配管の最低温度を 14.5 K に制御した。この時点では水素の液化は見られなかった。まずは、この時の干渉縞の写真を撮影した。その後、温度を下げ、熱シールドの温度が 12.5 K になったときに液化が始まった。この温度は水素の三重点よりも低いが、蒸発防止膜が絶縁物であり、フォーム球の内部の温度が周囲より高いために、温度測定を行っている熱シールドとターゲットには温度差があると考えられる。実体顕微鏡を用いて水素が液化する様子を確認した。液化が進みフォーム内に液が完全に浸透した後、過剰分が

Fig.5 RF foam shell target.

コーン付近に現れた。この過剰分を実体顕微鏡で確認しながら温度と圧力を調整し、過剰分が観察できなくなるまで少なくなった時点をフォーム層内に 100% 充填したと判断し、干渉縞の写真を撮影した。

4. 実験結果と評価

水素充填前の干渉縞の写真を Fig.6(a) に、充填後の干渉縞の写真を Fig.6(b) に示す。充填前より充填後の方が干渉縞の間隔が狭くなっていることがわかる。干渉像において、直角三角形の頂点をターゲット球の外縁上にとり、このような直角三角形を複数個干渉像の上に描き、直角の対辺同士の交点の平均を中心とした。この交点の分布は、ターゲットの真球性に依存し、本実験で用いたターゲットにおいては直径 3 μm の円に収まるものであった。それぞれの干渉縞を解析するため、画像解析ソフト Image-J (National Institute of Health, USA) を用いて横幅 7 μm の明るさを中心から垂直下方向にターゲットの外縁まで強度プロファイルを求めた。その結果を干渉縞写真の右側に示す。この強度プロファイルからも縞の周期は充填後のほうが充填前よりも短いことが明らかである。周期的な明暗の中で最も明るい点と最も暗い点がそれぞれ明線、暗線の位置である

Fig.6 An interference image of an empty target. (a) An interference image of a target containing liquid H_2 . (b) The gray values of the pictures are measured and shown on right side.

とした。充填前の結果を用いて空の RF フォーム層の屈折率を評価した(Fig.7)。ターゲットの中心を通った光がどの程度位相変化しているのか調べることはターゲットの厚みによる影響を直接受けることから、困難であるため、Fig.6(a)の右側に示す強度プロファイルにおいて、中心から 82 μm にある最も内側の暗線を基準にした。式(6)における L を当該暗線が映し出される光路長であるとし、 ΔL を Fig.7 の縦軸にとった。Fig.2 で示した y_i を横軸にとった。Fig.7 において、実験結果は周期的に現れる明るい点と暗い点の中心からの位置を表し、明線から暗線までの間隔は HeNe レーザーの波長の半分である 316 nm としてプロットした。次にこの実験結果の ΔL から空の RF フォーム層の屈折率を評価するため、 n_2 を変化させて ΔL を計算した。このときターゲットを真球かつ厚みが均一である仮定した。光路長の差は式(1)から(5)を用いて計算し、ターゲットの外側の He の屈折率 n_0 を 1.000、蒸発防止膜の屈折率 n_1 を 1.661¹⁰⁾、ターゲット内部の気体水素の屈折率 n_3 を 1.000 として計算した。実験値との比較のためその結果を Fig.7 上にプロットした。実験結果は n_2 が 1.068 から 1.088 までの計算結果の間に含まれることがわかる。一方、空のフォーム層の屈折率 n_2 について Lorentz-Lorenz の式¹¹⁾から計算すると 1.068 である。ここでこの

Fig.7 Graph of the different refractive indexes of the empty RF foam.

Fig.8 The calculation results of the liquid H_2 filling rate in the RF foam. The numbers in the parenthesis means refractive indexes.

式による計算は原子屈折量の和をもって分子屈折量を近似している。この近似は単原子分子であれば実測値とよく一致するが有機物の場合、特に不飽和原子対を含む場合には差が大きくなる傾向がある¹²⁾。RF フォームは有機物かつ不飽和原子対を含む⁷⁾ため実験から求めた屈折率のほうが正しいと考えられる。よって RF フォーム層の屈折率は実験的に求めた値の中間値である 1.078 を用いることにする。

次に充填後の強度プロファイル(Fig.6(b))を基に充填率を求めた。また RF フォーム層の屈折率を調べた場合と同様に中心から 50 μm にある最初の明線を基準にした。写真から縞として視認できるのは内側から 3 つ目の暗線までであるため Fig.6(b)中の丸印をつけた点までをデータとして採用した。充填率の計算は上述のフォーム層の屈折率を求める場合と同様の計算式とターゲットのモデルを用いた。15 K の液体水素の屈折率は 1.138 である¹³⁾ことから、体積複合則により計算すると、100%充填された RF フォーム層の屈折率は 1.198 となる。また充填された RF フォーム層内の充填率が 5%増加すると屈折率は 0.006 増加する。実験結果と屈折率から評価した充填率を Fig.8 に示す。実験結果のプロットは充填率が 90%から 103%の間に含まれていることがわかる。以上のように、2%の精度は達成できなかったが、この評価方法を用いて 13%の精度で充填率を評価することができた。

本実験により撮影した干渉像の画像解析結果では、明線のピークが鋭く出ていない。これは明線付近の光量が飽和してしまったこと及び画像からのデータが少ない、つまり分解能が低いことが原因であると考えられる。また撮影した干渉像では干渉リングが偏心しているため、精度の高い評価ができていない可能性がある。今後、精度の高い撮影ができるように撮影技術の熟練度を上げると共に高分解能の CCD カメラを使用し、最適な干渉像の撮影をすることで、より充填率評価の精度を上げることができ、目標の精度 2%を達成できるものと考えられる。

5. まとめ

干渉計測法による可視化技術を用いた RF フォームターゲットの燃料充填率評価手法の開発を行っている。現状の装置と技術で 13%の精度で充填率を評価することができた。今後、解析に最適な干渉像を撮影する装置や技術を確立することによって、RF フォーム層内に充填された液体燃料の充填率を目標精度の 2%で評価が可能になると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 核融合科学研究所:「未来をつくるエネルギー」(2001) 13-7
- 2) I. Moses, G.H. Miller and R.L. Kauffman: "The ICF status and plans in the United States," *Inertial Fusion Sciences and Applications* (2005) 9-16
- 3) B. Bigot: "Inertial fusion science in Europe," *Inertial Fusion Sciences and Applications* (2005) 3-8
- 4) T. Yamanaka Institute of Laser Engineering Internal Report Osaka University (1983) 5-6
- 5) R. Kodama, et al.: "Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition," *Nature* **412** (2001) 798-802
- 6) H. Azechi and the FIREX project: "Present status of the FIREX programme for the demonstration of ignition and burn," *Plasma Phys. Control. Fusion* **48** (2006) B267-275
- 7) K. Nagai, et al.: "Foam materials for cryogenic targets of fast ignition realization experiment (FIREX)," *Nucl. Fusion* **45** (2005) 1277-1283
- 8) A. Iwamoto, et al.: "Cool-down performance of the apparatus for the cryogenic target of the FIREX project," *Fusion Engineering and Design* **81** (2006) 1647-1652
- 9) T. Fujimura, et al.: "Laser machining RF foam by second harmonics of Nd:YAG Laser," *Fusion Sci. and Technol.* **51** (2007) 677-681
- 10) 日本パリレン株式会社ホームページ
<http://www.parylene.co.jp/about%20parylene-2.htm>
- 11) ボルン・ウォルフ:「光学の原理 I」(草川・横田訳), 東海大学出版 (1974) 126
- 12) ボルン・ウォルフ:「光学の原理 I」(草川・横田訳), 東海大学出版 (1974) 129
- 13) H.M. Roder, et al.: "Survey of the properties of the Hydrogen isotopes below their critical temperatures," U.S. Department of commerce (1973) 60

藤 村 猛

昭和 58 年 7 月 27 日生。平成 16 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。現在、平成 16 年から同大学院工学研究科博士前期課程(環境・エネルギー工学専攻)に在籍中。同博士後期課程へ進学予定。主にレーザー核融合に用いられるクライオターゲットの開発に従事。低温工学協会、日本原子力学会、プラズマ・核融合学会会員。