

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561020

研究課題名(和文)アラゴスポットによる飛行中燃料球の位置計測とレーザー照射模擬システムの開発

研究課題名(英文)Development of Position Measurement Unit and Laser Illumination System for IFE Target

研究代表者

辻 龍介(Tsuji, Ryusuke)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：40188537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー核融合炉の中心へ入射された燃料球にレーザーを正確に照射するために、以下の主要要素技術の開発を行った。(1)アラゴスポットを利用して、入射経路および核融合炉中を飛行している燃料球の位置を1 μ mの精度で計測する技術(2)炉中心での到達地点を1 μ mの精度で実時間(数ミリ秒以内)に計算するための画像処理を行う技術(3)位置計測モジュールの設置誤差を含んだ燃料球の位置データから正確な軌道計算を行う技術(4)炉中心でのレーザーの焦点位置をモニターする技術。

また、これらの要素技術を組み合わせて、必要とされるシステムの設計を行い、システムの一部のテストを行った。

研究成果の概要(英文)：In conventional direct drive laser fusion, a flying IFE target must be shot by the driver laser beam at the center of the reaction chamber. We developed the principal technology for exact laser shot listing below: (1) Target position measurement technology with an accuracy of 1 micron, (2) Data compression technology of Arago spot images for real-time processing, (3) Target trajectory calculation technology from the data with setting error of the position measurement unit, (4) Laser focus position measurement technology in the reactor.

Subsystem based on the technology mentioned above were designed and tested.

研究分野：核融合

キーワード：核融合 燃料球 位置計測

1. 研究開始当初の背景

石油・石炭や原子力に代わる将来の新エネルギー源として、温室効果ガスや放射性廃棄物の発生量が少ない核融合発電が有力視されている。強力なレーザーを用いたレーザー核融合を実現するには、核融合炉の中心へ入射された燃料球にレーザーを正確に照射する必要がある。しかし、レーザー核融合の研究の中心は爆縮物理の解明が主流で、高速で入射される燃料球に正確なレーザー照射を行う技術の検討は行われておらず、技術開発が必要であった。

2. 研究の目的

核融合炉の中心へ入射された燃料球にレーザーを正確に照射するためには、以下の課題を解決する必要がある。核融合炉壁に開けた観測窓の後方の遠距離(10m)から炉中を飛行している燃料球の位置を1 μ mの精度で計測する事、炉中心での到達地点を1 μ mの精度で数ミリ秒以内に予測する事、実時間でレーザーの焦点を到達地点に一致させる事、タイミングを合わせてレーザーを照射する事である。上記の課題を実現するため、必要な要素技術の開発を行い、実験室レベルで原理実証を行う事を目的とする。

3. 研究の方法

実際の核融合燃料を詰めた燃料球を使用して実験する事は出来ないので、同じ形状、直径のボールベアリング用鋼球を模擬燃料球とみなして実験を行う。

燃料球の位置計測手法としては、図1に示すようなアラゴスポットと呼ばれる輝点(球にレーザーを照射すると球影の中心に小さな輝点が生じる現象)の画像データから位置を求める事が出来る事を示す。

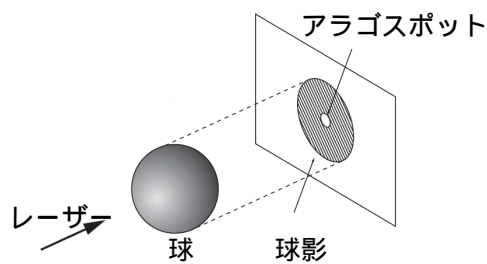


図1 アラゴスポット

入射経路に沿って置かれた位置計測モジュールの燃料球の位置データから、燃料球の軌道を計算し、燃料球が核融合炉の中心に到達する時刻と位置を計算するプログラムを開発する。

炉の中心でレーザーの焦点の位置をモニターする為に、核融合炉の窓に鋼球を置き、そのアラゴスポットを観測する事でレーザーの焦点を求める事が出来る事を示す。

各個別モジュールを組み合わせたシステム的设计作業を行い、システムを構築する。

以上の方法で研究(技術開発)を行う。

4. 研究成果

(1)燃料球の位置計測

図2のように直交する2方向から燃料球にレーザーを照射し、2個のアラゴスポットの位置を計測する事で、燃料球の位置(X,Y,Z)が計測できる事を示した。

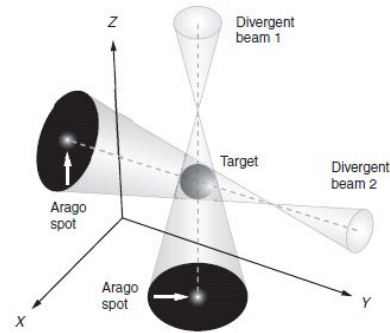


図2 位置計測の原理

He-Ne レーザー、赤色および緑色半導体レーザーを用いて、使用するレーザーの波長によらず燃料球にアラゴスポットができる事を示した。

地下トンネルを利用して、He-Ne レーザーによる燃料球のアラゴスポットを50m離れた場所から観測できる事を示した(図3)。アラゴスポットの大きさは、観測距離および、レーザー波長に比例し、燃料球の直径に反比例する事を確かめた。また、遠距離観測では空気の揺らぎの影響がある事が示されたが、実際の核融合炉内の気圧は1/100気圧以下なので、この影響は無視できる。

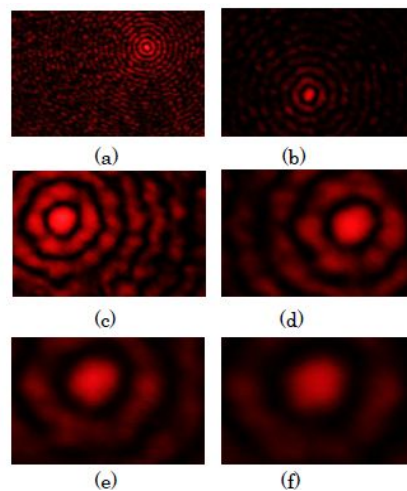


図3 アラゴスポット(a) 5m, (b) 10m, (c) 20m, (d) 30m, (e) 40m, (f) 50m.

凸レンズでレーザーを一旦収束させ、それを発散ビームとして使う事で、遠方(10m)からでも球の位置計測を誤差1 μ 以内で行える事を示した。また、観測場所までの距離に

かかわらず誤差が一定になる事を示し、その理論的根拠を明らかにした。

半導体レーザー、窒素レーザーなどを用いて、レーザーをパルス発振させる事でアラゴスポットの画像データの時刻Tが計測できる事を示した。

以上より、直交する発散ビームのパルスレーザー（パルス幅 10ns 以内）を 100m/s で飛行する燃料球に照射し、そのアラゴスポットを観測する事で、飛行中の燃料球の入射経路内、および核融合炉内の位置を精度 1μ以内で計測できる技術を開発した。

(2)実時間処理の為のデータ削減

通常の CCD カメラ（又は CMOS カメラ）は $1000 \times 1000 = 10^6$ 画素もあり、要求されるミリ秒でのデータ取得と軌道計算は不可能である。したがって、位置計測の精度を落さずにデータ削減を行うために、2次元のアラゴスポット像を図4に示すようにシリンダリカルレンズで1次元に圧縮し、データ削減を行い1次元 CCD 素子（1024 画素）でデータを取得した。

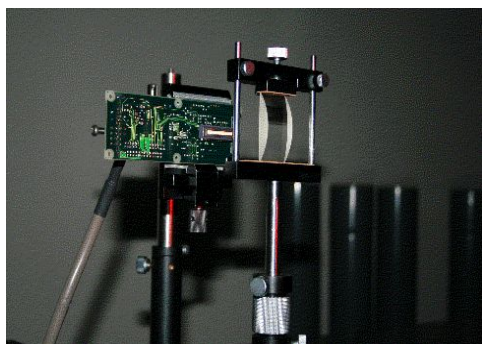


図4 シリンダリカルレンズと1次元 CCD

アラゴスポットの光強度分布は2次元ガウス分布 $\exp(-x^2-y^2)$ で近似的に表される。シリンダリカルレンズで集光した場合は1次元ガウス分布 $\exp(-x^2)$ になり、強度が最大になる x 座標は $x=0$ で不変である。データ量は 1/1000 になるが、位置計測精度は 1μ以内が保たれている事を示した。

以上より、1μの位置計測精度を保ったまた、実時間処理が可能なデータ削減が行える事を示した。

(3)ドライバ用レーザーの焦点の位置計測

核融合炉内で燃料球に正確にレーザーを照射するためには、レーザーの焦点のモニター技術が必要となる。アラゴスポットを利用して焦点をモニターする技術を開発した。

「レーザーの焦点」、「球の中心」、「アラゴスポットの中心」は一直線上に並ぶ性質があるので、核融合炉の窓に球を固定した場合、レーザーの焦点が移動する事は、アラゴスポットの中心が移動する事(図5参照)になる。

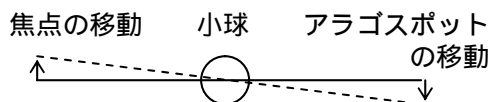


図5 焦点の移動とアラゴスポットの移動

以上の原理から、レーザーの焦点位置の移動が計測出来るかを確かめる実験を行った。

レーザーを凸レンズで収束させ、途中に回転鏡を挟み、鏡の角度を変化させ焦点の位置を移動させた。遠方に鋼球を置き、鋼球のアラゴスポットの移動をさらに遠方で計測し、回転角度（焦点の移動距離）とアラゴスポットの移動距離が図6のように比例関係にある事を確かめた。

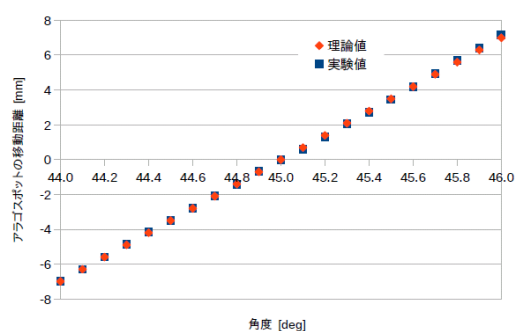


図6 回転角度とアラゴスポット移動距離

以上より、核融合炉内のドライバーレーザーの焦点位置を炉外に置いた鋼球のアラゴスポットでモニターできる事を示した。

(4)燃料球の軌道計算手法の開発

位置計測モジュールをターゲットの飛行経路に沿って複数個設置すれば、飛行中のターゲットの位置が計測され、これより軌道計算を行う事も可能となる。しかし、モジュールの設置誤差を 1μ以内にする事は困難である。設置誤差がある場合の軌道計算手法を2種（AとB）開発した。

Aは、残留ガスの影響を受けない比較的重い燃料球を入射させ、計測データと放物線軌道を比較する事でモジュールの設置誤差を求め、それを補正する事で本番の燃料球の軌道計算を行う方法である。

Bは、テストで数十個の燃料球を入射し、計測データから軌道計算の誤差が一番小さい計算式を、パラメータ推定の最適化問題として求め、これを使って軌道計算を行う方法である。いずれも、模擬データを使って、軌道計算の誤差が 1μ以内にできる事を示した。

(5)位置計測モジュールの設計

位置計測モジュールの設計と、それを利用した軌道計算システムの概念設計を行った。図7は位置計測モジュールの概略図である。

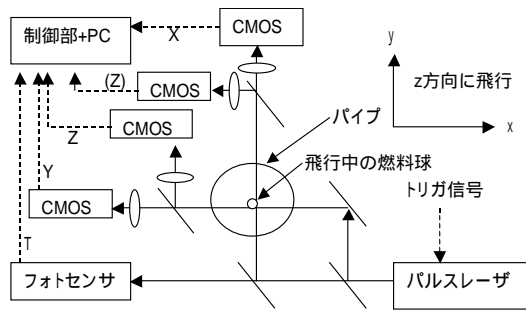


図7 位置計測モジュールの概略図

燃料球はz方向（紙面垂直方向）に運動しているとする。燃料球が位置計測モジュール内に来た時、センサーによりトリガー信号がパルスレーザーに送られる。パルスレーザー光が発生し、レーザーはハーフミラーで2つに分割され、ミラーで反射され飛行中の燃料球を2方向から照射する。結果として生じるアラゴスポット像をハーフミラーで分割し、シリンドリカルレンズで1次元アラゴスポット像に変換し、それを1次元CMOS素子で計測し、燃料球の位置データ(X,Y,Z)を計測する。一方レーザーパルスの一部はフォトセンサで検出され、レーザー照射時刻Tを計測する。これらのデータ(X,Y,Z,T)は制御用PCに送られ、そこで軌道計算が行われる。核融合炉中心での到達位置と到達時刻が得られ、その結果に基づいてドライバーレーザーの照射位置と時刻の制御が行われる。

(6) 位置計測・軌道計算システムの製作

図7で示した各モジュールの製作を一部行い、製作されたモジュールを組合せてシステムの製作を行い、機能テストを行った。

機能テストにより、Arduinoではクロック数が遅く制御用CPUとしては能力が不十分である事が分かり、ラズベリーパイ、FPGAを制御用CPUとして使用する事を念頭に設計変更を行った。

総合して、核融合炉の中心へ入射された燃料球にレーザーを精確に照射するための必要な要素技術の開発はすべて終了した。各モジュールの設計は終了し、一部のモジュールの製作は終了した。製作したモジュールを組み合わせて機能テストを行い、改良が必要な点が明確になった。

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)

[学会発表](計8件)

辻龍介「飛行中のレーザー核融合燃料ターゲットの位置計測モジュール開発」、レーザー研シンポジウム2013、2013年5月9日、大阪大学レーザーエネルギー学研究センタ

ー(大阪府、吹田市)

R.Tsujii, T.Endo, H.Yoshida, T.Norimatsu, "Development of Position Measurement Units for IFE Target", IFSA2013 Nara, 12, Sep. 2013, Nara Prefectural New Public Hall, (Nara, Nara City) Japan

R. Tsujii, "Trajectory Calculation of Injected IFE Target in Gas Environment" IAEA-TM on Physics and Technology of IFE Targets and Chambers, 12, Sep. 2013, Nara Prefectural New Public Hall, (Nara, Nara City)

辻龍介「飛行中のレーザー核融合燃料ターゲットの位置計測モジュール開発」、レーザー学会第456回研究会「大エネルギー高出力レーザーを利用した科学研究」核融合科学研究所・双方向型共同研究合同研究会、2014年1月8日、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター(大阪府、吹田市)

辻龍介「飛行中のレーザー核融合燃料ターゲットの位置計測モジュール開発」、レーザー研シンポジウム2014、2014年4月16日、大阪大学銀杏会館(大阪府、吹田市)

相田悠介、辻龍介「レーザー核融合におけるレーザー照射位置の計測法の検討」、電気学会東京支部茨城支所研究発表会、2014年11月22日、日立シビックセンター(茨城県、日立市)

辻龍介、「レーザー核融合における燃料ターゲットのインジェクションおよびトラッキングの技術開発」、双方向型共同研究会形式シンポジウム「レーザー核融合炉心プラズマと炉工の総合的理解」2015年3月11日、核融合科学研究所(岐阜県、土岐市)

辻龍介「飛行中のレーザー核融合燃料ターゲットの位置計測モジュール開発」、レーザー研シンポジウム2015、2015年4月8日、大阪大学銀杏会館(大阪府、吹田市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻龍介 (Tsujii Ryusuke)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号 40188537