

強磁場下におけるレーザープラズマ相互作用の研究

0612096 並木智紀 米田研究室

1 概要

本論文は、数千テスラのパルス超強磁場における、プラズマのゼーマン効果を観測することを目的としたものである。本研究は磁気リコネクションと呼ばれる磁気エネルギー変換のシミュレーションができ、実験室天文学との関わりも強い。

本研究では、ターゲット中に強磁場を作る為、大阪大学の激光 XII 号によるアブレーション圧力を用いることで、数千テスラの超強磁場発生と同時にきれいな観測系を得ることができると考えた。数千テスラの磁場を物質に加えることが出来れば、サイクロトロンエネルギーが電子遷移のエネルギーと同程度になり、新たな物性研究が期待出来る。また、固体密度程度のプラズマでも、 β 値 (熱エネルギー/磁気エネルギー) が 1 を下回る高密度磁化プラズマの生成が可能となり、磁気リコネクションなどを通じた磁場エネルギーの急激な開放現象などの研究にも応用できる。

2 高磁場発生原理

数千テスラの超強磁場を発生させるには、爆縮法や電磁濃縮法のように、ターゲットに初期磁場を入れておき、磁束を漏らさずに半径を小さくして磁束密度を上げる方法が使われている。

ターゲットを圧縮するには磁場によって発生する応力 (マクスウェル応力) より外側から強い力で押す必要がある。応力は

$$T = \frac{B^2}{\mu_0} \quad (1)$$

で表すことができ、軸に平行な方向では収縮する向き、垂直な方向では外側に広げようとする向きに働く。ちなみに、この力はコイルでも同様に加わり、破壊型なのかそうでないかはこの力にコイルが耐えられるかで決まってくる。応力は磁場の 2 乗に比例するため、超強磁場では非常に強い力になる。50T では 1GPa, 100T では 4GPa, 1,000T ならば 400GPa にもなる。超強磁場発生はこの磁場で発生する磁気圧より大きい力で押せるかが問題であり、小さければ圧縮することは出来ない。爆縮法では外力は大きい、全てが壊れてしまうために観測には向かず、電磁濃縮法では一次コイルに流せる電流、コンデンサーバンクに限界があるために電磁力を劇的に上げるのは難しい。

本論文では、ターゲットを圧縮するための外力に、レーザー照射によるアブレーション圧力を使うことを提案する。図 1 はその原理図である。始めに 1) ターゲットの内部に磁場 (種磁場) を入れるため、コイルを設置する。種磁場を発生させた後、2) ターゲットの外部から高出力レーザーを照射し、アブレーション圧力で圧縮を行なう。磁束を漏らさずに圧縮出来れば磁束密度は増加し、3) 超強磁場を得ることが出来る。

3 従来の実験の課題と本実験

従来、高磁場を発生させるターゲットは、楔形の中空部、SUS 固定部、磁場遮蔽部として Al フォイルにより作られ、実験されていた (図 2, 3)。

ところが、これまでの実験により、アブレーション時の輻射によってファイバーにダメージが入り、プローブ光が通らなくなってしまう現象が起きた (図 4)。また、同時にファイバーも膨張し、空間部を閉塞してしまうという問題も起きた (図 5)。

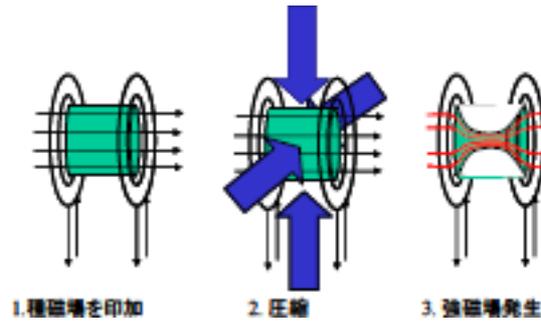


図 1: 高出力レーザーを用いた強磁場発生原理

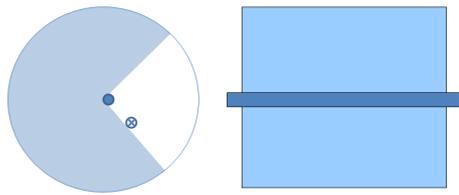


図 2: ターゲットモデル

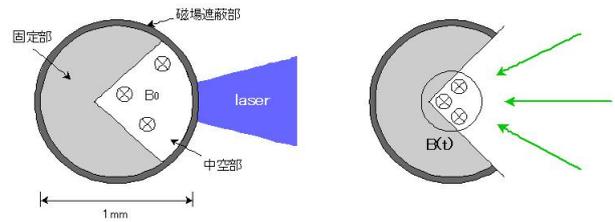


図 3: レーザーアブレーション

そこで今回、ターゲットの設計を改良し、内側に金箔の保護膜を設置することにより、ファイバーを輻射から保護し、また膨張速度も抑止することができると考え、設計した。

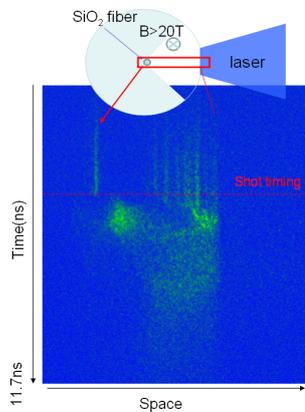


図 4: 輻射による SiO₂ への影響

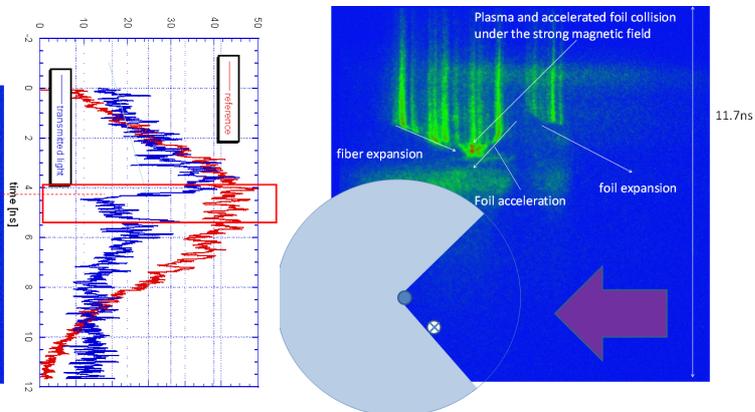


図 5: ファイバー膨張による影響

従来の実験の課題点に対する解決策としてのターゲットデザインの変更点は2つ、金箔によるファイバーの保護とファイバー径の見直しである。今回の設計は以下の通りである。

金は金箔をファイバーの上から紫外線硬化樹脂を用いて貼り付けることで保護膜とした。今回、金箔は膜厚 $1\mu\text{m}$ と $10\mu\text{m}$ のものを用意した。この時の膜厚はアブレーション時の輻射エネルギーで欠損しきらず、ファイバーを保護するのに十分な量が必要である。

金の欠損量 \dot{m} は輻射強度 I について

$$\dot{m} \propto I^{1/2} \quad (2)$$

の関係があり、 $\dot{m} = 10^6[\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}] |_{I=10^{14}[\text{W}/\text{cm}^2]}$ から算出して、膜厚 $d_{\text{Au}} > 75\text{nm}$ である。

また、プローブ光の光量を十分確保するため、今までのクラッド径 $80\mu\text{m}$ のファイバーからクラッド径 $240\mu\text{m}$ のものに変更した。このとき、ファイバー端面のクリーブ角について、観測系の装置(図6)の条件から許容誤差を見積もった。

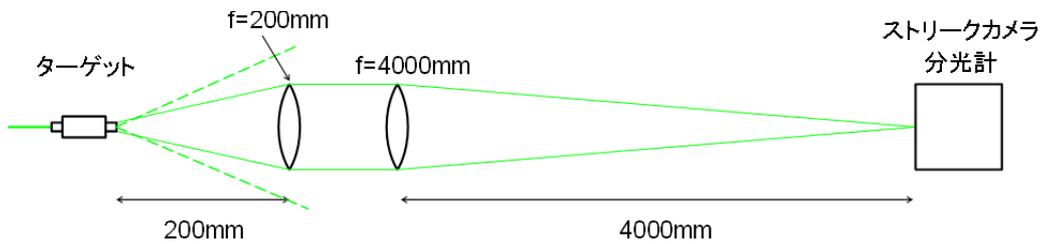


図 6: 観測系とファイバー端面精度

今回使用したファイバーはクラッド径 $240\mu\text{m}$ 、開口数 (NA)0.22 のものを使用した。また、端面からのプローブ光を $f=200\text{mm}$ 、 $\phi 50\text{mm}$ のレンズで観測している。ファイバーがプローブ光に平行に設置しているとき、

$$n \sin \theta = \sin(\theta + \theta') \quad (3)$$

$$\tan \theta' = \frac{20}{200} \quad (4)$$

から許容されるクリーブ角 θ は約 11° である。

実験

4 実験の全体像

本実験の全体像を図7に示した。

5 実験結果

ターゲットの製作にあたり、ファイバーの SUS に対する設置角、クリーブの精度等、高精度が求められた。SUS へのファイバーの接着にあたり、ファイバーの SUS に対する設置角が大きく傾いてしまうということが起こった。当初、ファイバーの接着は粘度 $300\text{mPa}\cdot\text{s}$ の紫外線硬化樹脂 (NORLAND OPTICAL ADHESIVE 81) を使用していたが、粘性の高さからファイバーが浮いてしまい、これを改善するために粘度 $25\text{mPa}\cdot\text{s}$ の樹脂 (Vitalit 6164) を使用した。

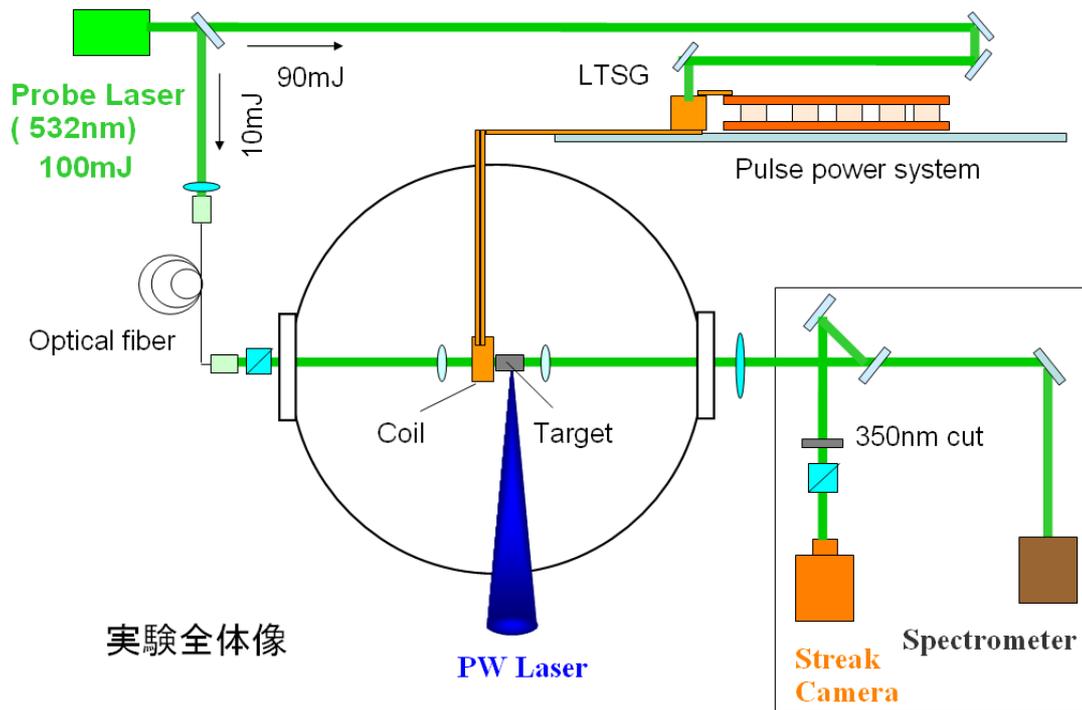
また、ファイバーの貼付けに際し、正確に設置するため、図8のような装置を組むことで改善した。この装置は両側のカメラから SUS 端面を見ることで、楔形の奥に平行に設置すること、上部のカメラで SUS に対してファイバーのはみ出し量が均等であることを確認することができる。

この時点でのターゲットを図9に示す。

本論文を執筆している時点では円筒ターゲットへのレーザー照射実験が進行中であり、実験が終了次第分析に入る。

まとめ本研究において、従来の実験により問題とされていた磁場圧縮時の輻射によるファイバーへの影響、ファイバー自身の膨張による圧縮空間の閉塞等の問題を解決するため、ターゲットの設計を変更した。変更点として、先の問題を軽減するため、金のコーティングをすることで保護できると考えた。また、プローブ光の光量を確保するため、コア径も以前の $80\mu\text{m}$ から $200\mu\text{m}$ へと変更した。このことにより、ファイバーからのプローブ光を確保することが可能となっている。

実験セットアップ



実験全体像

図 7: 実験全体像

ファイバーを SUS パルクに接着するにあたり、接着角やファイバー端面のクリーブ角に高精度が要求される。

この問題を解決するため、ターゲットの両端面、筒部の 3 方向から同時に映像を出力し、ファイバー角を調整できるシステムを組み、接着作業の補助とした。

現在、実験を進めながらターゲットの構造を少しずつ変えている。金箔のコーティングの膜厚は $1\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ の 2 種類用意したが、その膜厚の違いによるファイバーの保護の評価も検討したい。アブレーション用の Al フォイルの大きさにも変化を加え、分析しているところである。

どのような設計が強磁場発生を見やすいか、今後も検討していく必要がある。

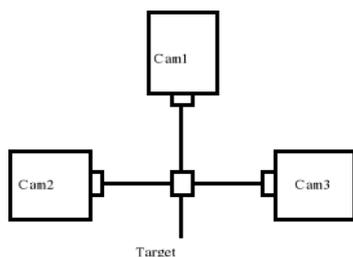


図 8: 2 軸 3 方向カメラによるターゲット監視装置

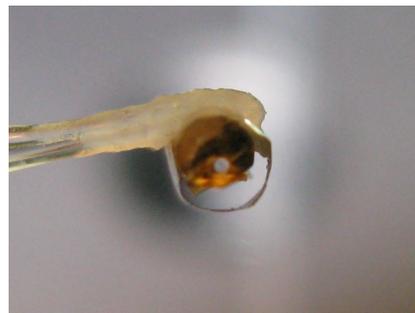


図 9: 作成したターゲット