

高出力レーザーを用いた磁場圧縮ターゲットの研究

米田研究室 長嶺和慶

1. 超強磁場発生

1.1. 強磁場発生の目的

数千テスラの磁場を加えることが出来ると、金属・半導体の電子のサイクロトロンエネルギーが電子遷移エネルギー（フェルミエネルギー）と同程度になり、物理現象に変化が見られる。プラズマ物理では固体密度程度でも β 値（熱エネルギー／磁場エネルギー）が1を下回る磁化プラズマを生成することが出来る。プラズマには固体密度程度の 10^{22} 個 cm^{-3} でも存在するが、その物性は固体物理とは異なる領域であり、現在も研究が進められている。そのようなプラズマに熱エネルギーと同等の磁場エネルギーを加えた場合、正に未知の物性研究領域になる。

1.2. 従来の強磁場方法

パルス磁場は、時間が制約される代わりに定常磁場に比べ少ないエネルギーで強い磁場を発生させる事ができる。現在確認されている最高磁場は、ターゲットに高強度レーザーを照射することで発生する70000Tである。しかしこれは発生時間psと短いこと、温度が数keVにも達することが問題である。

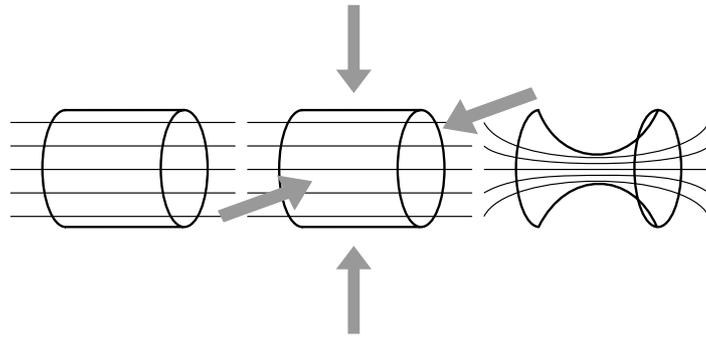
物性研究に使用出来る磁場は電磁濃縮法による622Tが最高で、電磁気力としてはこれ以上の発生は困難であるとされてきた。さらに長時間、固体状態を保つような磁場の発生のために、新しい手法での磁場発生が必要となっていた。

1.3. 本研究の超強磁場発生原理

本研究では、種磁場を円筒ターゲットに入れおき、円筒を磁場を漏らさず圧縮し半径を小さくすることで磁束密度を上げて超強磁場を発生させる方法が使われている。磁場を発生させると

$$T = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

で表されるマクスウェルの応力 T が発生する。この力が軸方向には縮むように、径方向には広がるように働く。式のとおりこの力は磁場の強度の2乗に比例するため、50Tで1GPa、100Tで4GPa、1000Tでは400GPaにまであがる。つまり超強磁場発生はこの力より大きな力で押せるかが重要であり、この力を上回る圧力で圧縮することができれば超強磁場が得られる。



本研究では、円筒を圧縮する力に高強度レーザーの照射によるアブレーション圧力を用いる方法で実験を行った。が実験の概要図である。

- 1.円筒内に種磁場を入れるため円筒の端にコイルを設置し種磁場を発生させる
- 2.円筒外部から高強度レーザーを照射し、圧縮を行う
- 3.円筒が押しつぶされ磁束密度が上がり超強磁場が発生する

本研究では、種磁場を 20T に半径を 1/10 にすることで 2000T を目指している。

2. 実験装置

2.1. 照射レーザー

金属円筒ターゲットの中に、閉じ込められる磁束は円筒の半径を r 、厚さを d とすると、磁束 Φ の円筒への侵入や円筒からの浸出はインダクタンス L と抵抗 R の人して決まる時定数 T_c に支配される。磁束 Φ は

$$\frac{1}{T_c} = \frac{R}{L} = \frac{2\rho}{\mu_0 \bar{r} d} = \left| \frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi}{dt} \right|, \quad \bar{r} = r + \frac{d}{2}$$

で表される時定数 T_c で減衰するのでこれよりも高速に圧縮する必要があるため高強度のアブレーション用のレーザーが必要である。また均一に圧縮するために照射の形状も重要である。これらの条件をクリアするため、照射に使うレーザーは、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心にある激光 XII 号を使用した。表に激光 XII 号のパラメーターを示した。

表 2.1 激光 XII 号パラメーター

ビーム数	12 ビーム
ショット数	3-4 ショット/日
波長/照射配位	0.35/0.53/1.05 μm /バンドル照射
パルス幅	0.1-4ns
エネルギー/ビーム	500/beam(0.53 μm), 200J/beam(0.35 μm)
集光径/強度	コヒーレントビーム:30 μm 、 $10^{17}\text{W}/\text{cm}^2$

2.2. ターゲット

図のようなターゲットを用意した。磁場の計測には、磁場により偏光状態が回転するファラデー回転を利用するため、中心にファイバーを設置した。

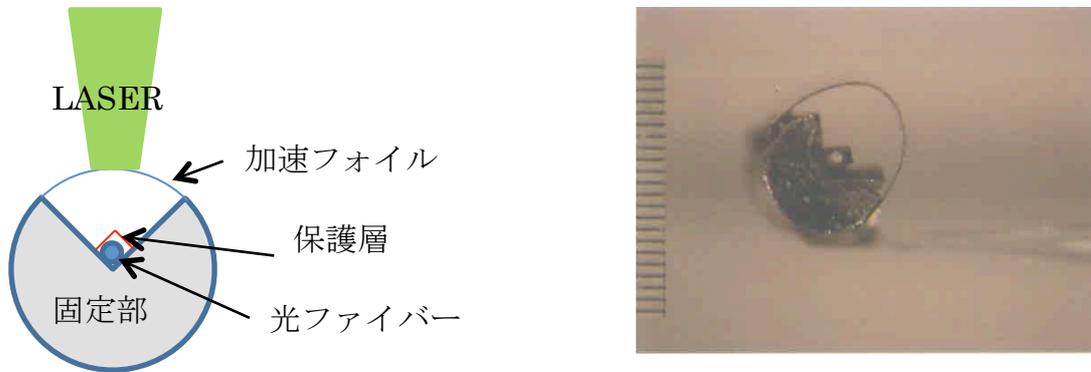


図 2.1 左 ターゲット模式図、右 実際のターゲット(1目盛り 100 μ m)

3. 超強磁場発生実験

今までの実験で、磁場計測用のファイバーが破損し磁場を計測できないということが起きることがあった。そのため、ファイバーが壊れる原因を探るため様々なショットを行った。原因は3つ考えており、その解決法として

- 衝撃波の可能性 → 衝撃波の発生原因を取り除く
- 加速フォイルの破損 → 加速フォイルの強度を上げる、照射角度の変更
- 輻射の影響 $I \propto T^4$ → Tを減らす、輻射の遮蔽

を考えた。

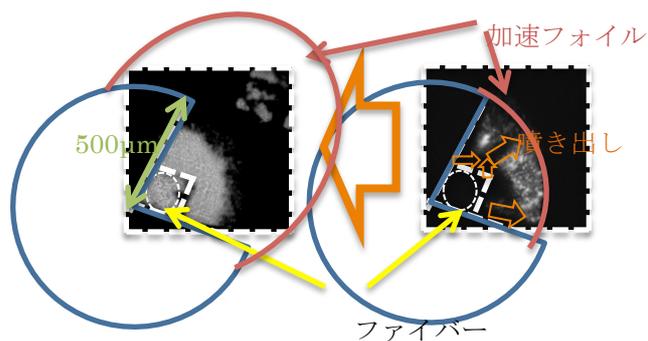


図 3.1 ショット前後のターゲットの画像(左ショット前、右ショット 1ns 後)

現在の加速フォイルは照射レーザーの強度の10倍程度まで耐えられるが、照射レーザーがコヒーレント光なのでコヒーレントスパイクが発生し、強度分布が不均一になり場所により平均強度の10倍程度になる可能性がある。そのため、加速フォイルを補強するためポリスチレ

ンフィルムを設置した。この結果、加速フォイルの強度3倍、質量4%増で加速性能を失うことなく強度を上げることができた。このターゲットで照射した時

のターゲットの 2 次元画像を図 3.1 に示す。この画像から音速の 150 倍でファイバーが壊れることから、衝撃波で破損した可能性は限りなく低い。また加速フォイルの強度から破損する可能性も限りなく低いと考えられる。次に輻射による可能性を探るために輻射強度を下げる。そのために、照射強度を 1/3 にし、輻射強度を 1 桁以上下げた。この照射のときの画像を図 3.2 に示した。

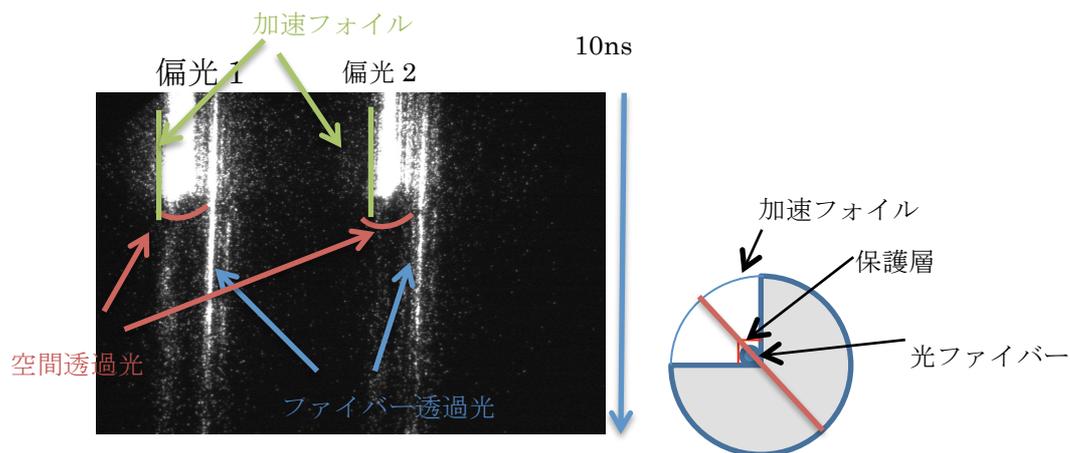


図 3.2 左 ストリークカメラ画像、右 ターゲット上の走査した位置

図 3.2 の右図の赤い部分が左図の横軸であり、縦軸を時間で撮った画像である。各偏光を写すことで、偏光を観測し磁場を計算することが出来る。この画像から、ショット後もファイバーを光が透過してきていることが分かる。

4. 結論

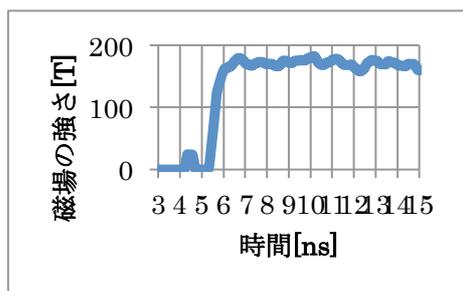


図 4.1 発生した磁場と時間の関係

今回の実験の結果、ファイバー破損の原因は輻射光によるものだと考えられる。そして、輻射を抑えるためには照射強度を落とさなければならぬが、それだと圧縮できる磁場も小さくなってしまふ。そのため、今後は照射時間を伸ばして圧縮率を高めて行きたいと思ふ。最後に透過した光で磁場を計算する 183T を発生できた。

参考文献

- [1] 大道博之: 超短パルス超高強度レーザーと物質との相互作用 日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センター
- [3] 並木智紀: 高強度レーザーを用いた磁場圧縮実験とその計測法の確立, 2012