

レーザー生成フレア研究のためのパルス高磁場装置の開発 電子工学科 米田研究室 有馬宏和(0112005)

1. はじめに

本研究は超短パルスレーザーを用いた太陽フレアの模擬実験を行なうために必要な、高繰り返し可能であるパルス高磁場を発生させる装置の開発についてである。

太陽フレアとは太陽表面上の黒点の回りで急激に明るく輝きだす所が発生する現象で、これは太陽表面での温度五千六百度をはるかに上回る数百万度の高エネルギーを有している。現在ではコロナに貯えられた磁場エネルギーが短時間に放出される磁気リコネクション現象が起こっているのではないかと考えられているが、未だはっきりとした答えは出ていない。本研究の先にある模擬実験が出来れば、この現象を実証することが可能となる。

具体的には図1のように、磁場が発生している所に遮蔽物を置き、超短パルスレーザーを用いて穴を開けてそこから漏れ出す磁場を観測する。この時必要な条件は高磁場エネルギーで、遮蔽物を通らない程度の表皮の深さ d のパルス磁場である。今回の目標は微小体積 $V = 1\text{mm}^3$ という限定した領域で、磁束密度 $B > 10\text{T}$ 、パルスの立ち上がり時間 $< 2\text{ns}$ に設定した。10Tは $\frac{熱エネルギー}{磁場エネルギー}$ を議論できるだけの磁場エネルギーを有していて、2nsは仮に銅板で遮蔽する場合、 $d = 5\mu\text{m}$ となり薄膜で充分ということになる。微小体積にした理由は、少ない電源側のエネルギーで実現可能なために高繰り返しで測定できる利点があるからである。繰り返し周波数 $f > 20\text{Hz}$ を目標とした。

以上の条件を満たす装置を開発出来れば、真空中での実験も可能となり、高精度のデータが得られると考えられる。

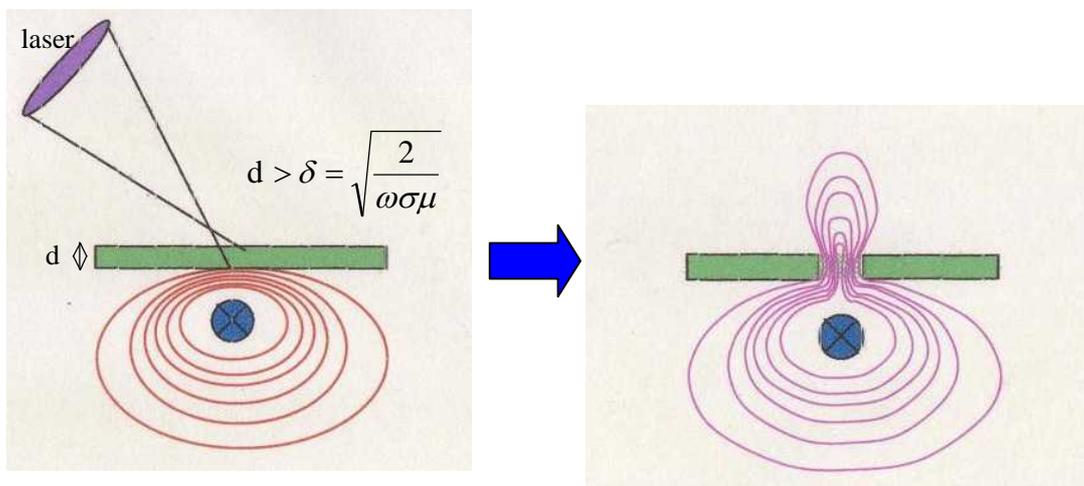


図1 太陽フレアの模擬実験

2. パルス高磁場発生装置の作製

微小領域に電流を流す場合,そこは低インピーダンスであるから電源側もそうでないと十分に流すことが出来ない.それと速い立ち上がりのパルスを発生させるには速いスイッチング電源が必要である.この2つの条件を満たし,かつ素子の特性以外のパラメータに左右されない利点から今回 IGBT モジュールを用いた.(表 1)

表 1 IGBT モジュールのデータ (三菱半導体制 CM600HU-24)

定格電圧	1200V
定格電流	600A
立ち上がり時間	300ns

IGBT モジュールを用いた回路図を図 2 に示す.図の上にある変圧器とコンデンサ $C=50\mu\text{F}$ で直流電源を作製し,この電源でコンデンサ $C=1\mu\text{F}$ に充電して,IGBT モジュールでスイッチングを行ない,コイルに電流を流す.

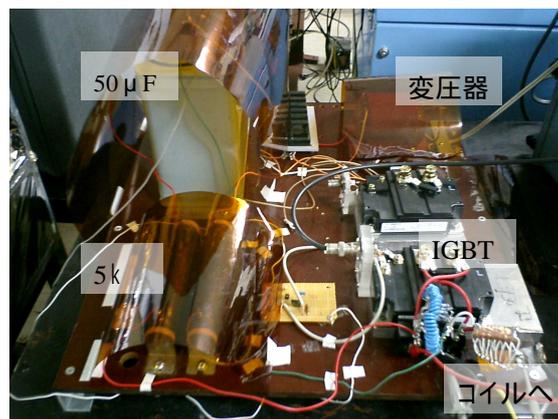
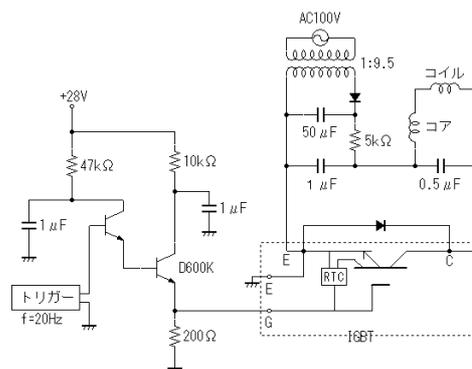


図 2 回路図 (右はその写真)

しかし計算上 IGBT モジュールだけで 2 のインピーダンスは存在するため,充分に低いとは言えない.そのため更に低インピーダンスに変換する必要がある.そこで図 3 のようなインピーダンス変換回路を考えた.これはトロイダル・コアを用いて一次側を直列,二次側を並列に巻くことで二次側のインピーダンスを低下させて電流をコアの数だけ倍増させる回路である.

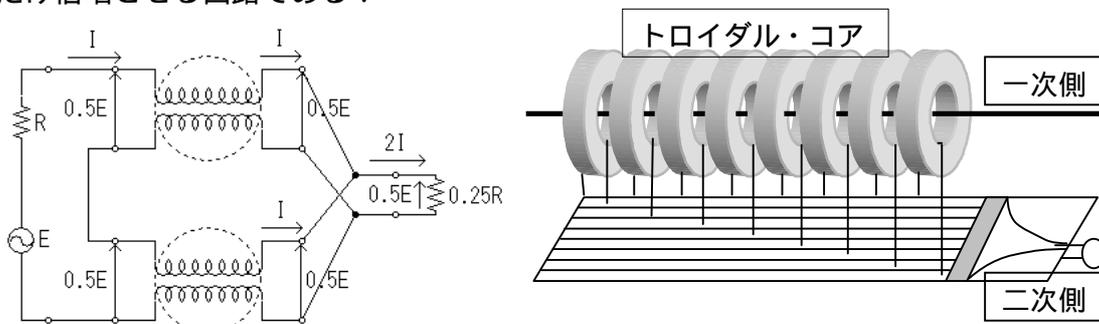


図 3 インピーダンス変換回路 (回路図はコアを 2 個用いた時)

だが、この回路では結果的に電流を増加させることは出来なかった(図 4) . 原因はトロイダル・コアが磁気飽和を起こし二次側にエネルギーが伝わらなかったことや、配線上回路全体のインピーダンスを下げられなかったこと等が考えられる .これより直接コイルを繋がないといけないことがわかった .

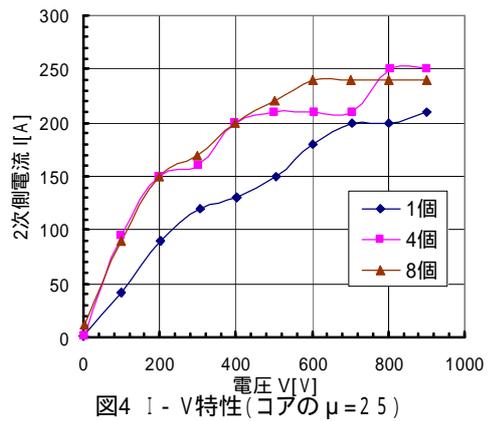


図4 I - V特性(コアの $\mu=2.5$)

ここで次に図 5 のような装置を考えた(表 2) .この装置は全体のインピーダンスを抑えるために同軸線路で作製しただけでなく、その中に高透磁率の材質(日立製磁気材料ファインメット)でコアを作るように巻いて磁気スイッチング、磁気圧縮パルスが動作するように設計した .そして圧縮されたパルスが微小領域に流れるよう先端を尖らせて空間的圧縮をしているのも特徴である .写真の左に付いているのはコンデンサで、IGBT モジュールの立ち上がり時間に左右されないよう再充電して応答を速くしている .以上のような特徴を持つ装置を用いると瞬間的に IGBT モジュールの定格電流よりはるかに大きい数 kA の電流が流れた .

あとコイルだが、今回は直径 1.6mm のガラス管にコイルを巻いて作製した . 低インピーダンス化のためにコイルの線幅は小さくしたいのだが、線幅 0.1 ~ 0.2mm では大電流によって線が焼けてしまった .これは微小領域にも限界があり、ある程度の線幅を持った線を使わなければいけないことがわかった .よって長時間の実験に充分耐えられるよう線幅 0.6mm の線を用いた .

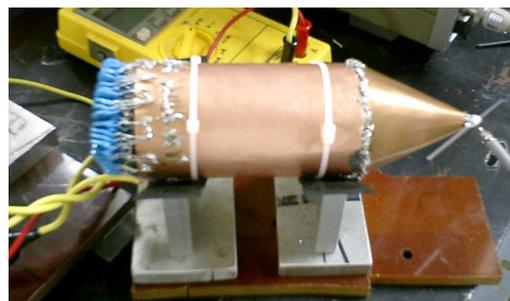
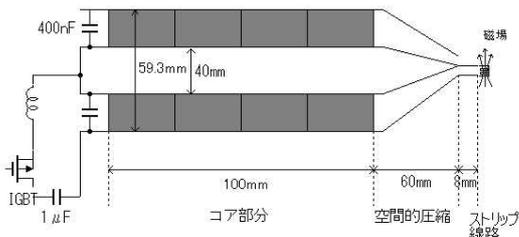
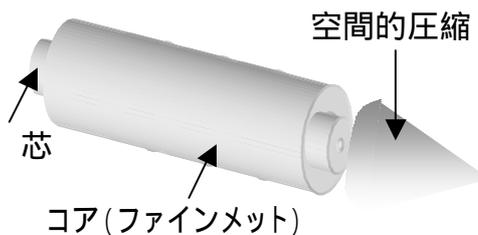


図 5 装置の回路図(右はその写真、右下は中の略図)

表 2 コアの詳細

内径	40mm
外径	59.3mm
長さ	100mm

装置の材質 芯 : アルミ , 外側 : 銅板



3. 結果

図5の装置の先端に付けたコイルから発生した磁場を、図6のようにサーチコイルを中に入れてその誘導起電力と時間の積から計算した。

$$-\frac{d\phi}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} \cong V_e$$

$$B = \frac{\phi}{S} = \frac{V_e \cdot t}{S}$$

コイルのインダクタンスと発生した磁束密度の関係を図7に示す。これよりインダクタンスが16~20nHで最も磁束密度が大きいことがわかる。これは線幅0.6mmでは5回巻いたときである。

ここで、磁気パルス圧縮が図7の時より高圧で起こるようにコアの体積を451cm³から602cm³に1.33倍増加して再び測定したところ、コイルが5回巻きでB=5.57T、=50nsのパルス磁場を発生させることが出来た。

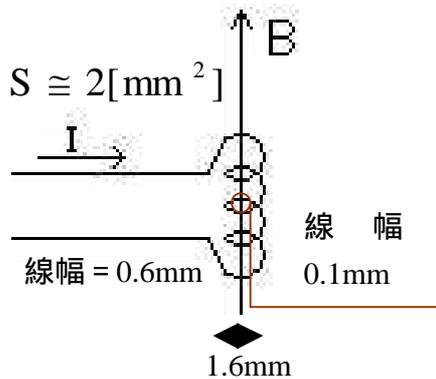


図6 磁場の測定図

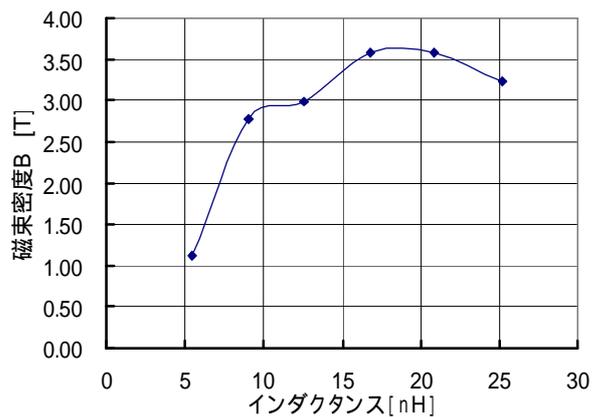


図7 B-L特性

4. 考察

現時点では高繰り返し可能な点はクリアしているが、目標であるB > 10T、< 2nsは到達出来なかった。今後はコンデンサの容量を増やすことや、磁気パルス圧縮を多段で行なう等の改良を行なって目標の数値を達成したいと思う。同じ装置を作製して複数同時に動作させれば理論上装置の個数倍の磁場を発生させることが出来るため、一つだけで10Tまで発生させれば2つで20Tを越えてしまう。高磁場であればあるほど良い実験データが得られるので一つの装置の能力を上げることは重要であり、早く目標に到達したいと思う。