

金属の固体-プラズマ遷移を用いた磁場制御の研究

米田研究室 浅井 晴貴

はじめに

プラズマとは、固体から温度の上昇とともに液体→気体と変化し、さらに温度が上がると気体の分子は乖離して原子になり、もっと温度が上がると電子が原子から離れ、正イオンと電子に電離し、この荷電粒子を含んだ、第四の相としての状態を指す。

ところで、銅や金などの特定の微細金属に超短パルスレーザーを照射することで、Warm Dense Matter 状態という固体物理学とプラズマ物理学の中間領域に遷移することが分かっている。

そのとき、銅箔ではレーザー照射部付近において表皮効果により、コンダクティビティーが低下した銅箔は表皮深さが増加し、磁場の遮蔽度が大きくなる。銅箔がプラズマ化されきったとき、磁場の染み出しが起こるかどうかを観測する。本研究においてそのような状況に適切な磁場を発生させることがとても重要である。

目的

これまでのことを踏まえ、本研究の目的は磁場を制御することである。そのためにはまず、磁場が染み出しているという状況の説明を述べる。下図のように、薄い金属箔、電流源とその周りに発生する磁場があり、金属箔はその磁場を遮蔽しているという状況があるとす。この場合、通常であれば磁場は金属箔を貫いて、その反対側に磁場が染み出したりなどはしない。

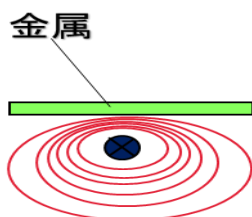


図 1 金属箔が磁場を遮蔽している概念図

しかし、金属箔に穴が開くなどすれば下図のように”磁場が染み出す”という状況が起こる。

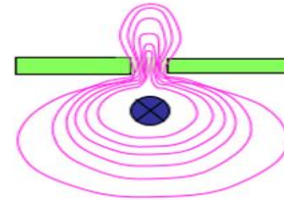


図 2 磁場の染み出しの概念図

この現象は、実際に自然現象の一つとしてたとえば、太陽フレアは同じような原理で起こる現象だと考えられている。太陽フレアの場合は染み出しが起こった後は、磁気リコネクションが起こりそのフレアは宇宙圏に放出され、時には我々の地球上に磁気フレアなどとして、ときおりあらわれる。

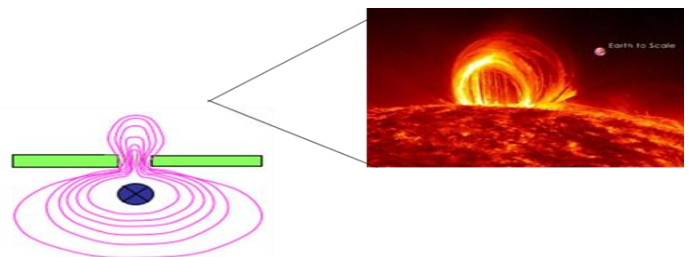


図 3 磁場の染み出しと太陽フレア

このような現象を実験室内で再現するために本研究では高強度パルスレーザーを用いることで試みるものである。

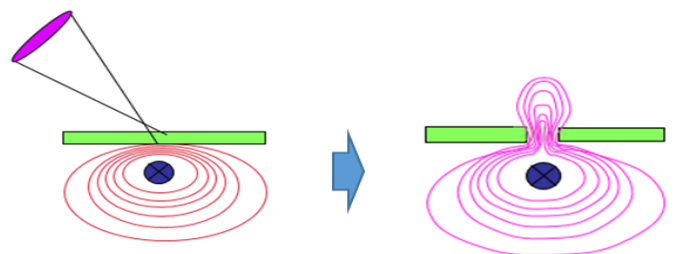


図 4 レーザーで穴をあけ、磁場の染み出しが起こる概念図

このとき、照射部分の金属箔は高温高圧になり、プラズマ化される。その最中に磁場が染み出さないように金属の固体-プラズマ遷移状態にて導電率が2~3桁低下する現象を利用する。表皮効果の式から、導電率が下がることで表皮深さが増加し、プラズマ化しきるまでの磁場の染み出しを防ぐ役割を果たすことが期待される。

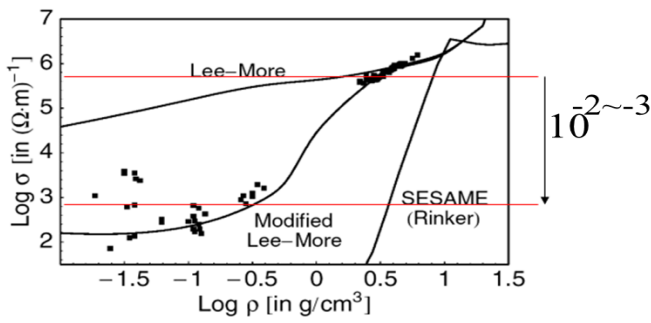


図 5 金属の固体-プラズマ遷移における銅の密度と導電率の関係

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (1)$$

ここで、 δ は電磁界が $1/e$ に減衰する距離をあらわす表皮深さとする。そして、プラズマ化した後に磁場が染み出すためにはその低下した導電率を上回る桁上げが起こりうるファクターを用いて δ を低下させる必要がある。このとき、 ω を高周波に設定すれば実現可能とされる。そのためには ω と時間 T の関係より、高速な立ち上がりの磁場を必要とすることが導かれる。そのため、数テスラ 10ns の磁場の発生を目標とする。

この研究は実験室内での天文学的シミュレーションの実現を目指すもののひとつであり、その実現は天文学的現象の再現性により、その理解を深められることが期待される。

磁場発生装置の概要

高速立ち上がり磁場発生装置の全体概要について述べる。下図のように、コンデンサ→導波路→コイルのエネルギー伝達回路を構成しており、最終的にコイルで磁場が発生する。本研究ではコンデンサの充電電圧は 15kV とする。また、スイッチ①、②はそれぞれ LTSG、平行平板空気ギャップを表しており（後述）、磁場の高速な立ち上がりのために電流を一瞬で伝送する役割を果たす。

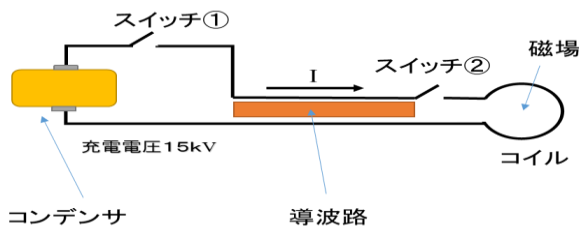


図 6 高速立ち上がり磁場のための設計

さらに、導波路とコイルのインピーダンスについて

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

$$I = \frac{V}{Z_0} \quad (3)$$

より、 C はコンデンサと導波路の静電容量、 L は全体のインダクタンス。つまり、 C はある程度大きく、 L はなるべく小さくすることで、流れる電流が大きくなり強い磁場の発生につながる。さらに、

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

より、 LC でいかに高周波にできるかの関係があり、各所の無駄なインダクタンスを減らし、装置全体のインダクタンスをなるべく小さくすることで、強く、立ち上がりの速い磁場を目指す。

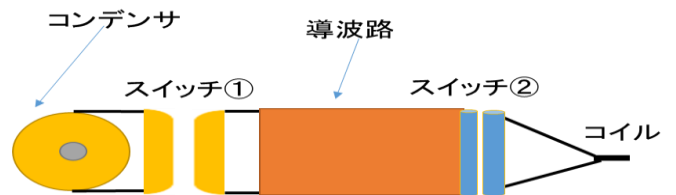


図 7 真上から見た回路概念図

電源スイッチ (LTSG)

LTSG: Laser Trigger Spark Gap とは一對の金属電極の間に絶縁体を介入して配置し、レーザー光パルスをトリガーとする簡単な構造のスイッチである。今回はスイッチの立ち上がり時間にだいたい 10ns という高速な立ち上がりが必要とされるため LTSG を採用した。スパークギャップはほかに電気スイッチがあるが、レーザー光をトリガーとして使うと 0.1ns ほどと、小さいジッタで動作する。金属電極には真鍮を用い、形状は円柱を縦に割った半月円筒型のレール対としており、これは俗にレールギャップと呼ばれ、多点でスイッチすることにより低インダクタンス化を図っている。絶縁体は空気とした。下図に原理図を示す。絶縁距離を確保し電圧を印加した半月円筒型の電極レール対の間に、レーザー光をレンズによって集光して部分的に絶縁破壊を起こすことでそれをトリガーとして電極間に絶縁破壊を起こさせ、アークプラズマにより導通、スイッチさせるというものである。

本研究では、二つのレールギャップを用いており、一つはレーザー光パルスをトリガーとするレール

ギャップで、8~20mm の電極間距離において最大15kVを用いて動作する。その先にもう一つのレールギャップを設置する。こちらは、平行平板空気ギャップスイッチを用いており、導波路-コイル間を絶縁破壊で導通させるため、真鍮の円筒を一對のものとしている。なお、電極間の距離の調整は自作の1mm厚のアルミ板を用いたスペーサーによって調整している。また、外箱はアクリルを用いて作成した。

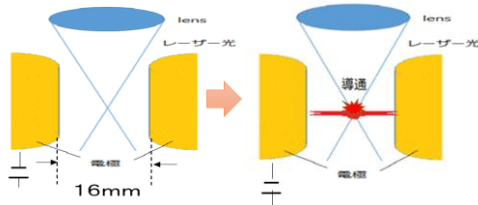


図 8 レーザートリガスパークレールギャップの原理図

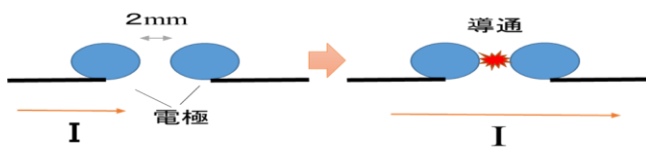


図 9 平行平板空気ギャップの概念図

導波路

スイッチからコイルへと大電流を流すための伝送路であり、この部分の設計は極めて重要である。導波路自身も装置のインピーダンスの要因の一つであり、なおかつ電源とコイルについて両方のインピーダンスの整合がとれていないといけない。インピーダンスの整合がとれていないと電流は反射してコイルまで思ったようにはたどり着かなくなる。また、今回の実験では数10kV級の高電圧を扱うので導波路自身も、それに耐えられる設計でなければならない。導波路はストリップラインの開放型で構成する。両電極を銅箔、間の絶縁誘電体にはカプトンシートを使用し、瞬間接着剤（ロックタイト495, ロックタイト420）を用いて挟み、接着する。この特性インピーダンスは以下で計算できる。

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \left[\frac{W}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{d} + 1.444 \right) \right]^{-1} \quad (5)$$

ϵ_r は電極間の誘電率、 W は導波路の幅、 d は電極間隔（厚み）である。 ϵ_r はカプトンより3.4とした。実際に制作したものは厚さ $20\mu\text{m}$ の銅箔、厚さ $25\mu\text{m}$ のカプトンシートをもちいて、電極間隔

を、瞬間接着剤の接着層も考慮し $100\mu\text{m}$ 以下を目指し作成した。また、空気中を2cmほど放電が起きることも考えられ、その際上部銅箔と下部銅箔で導通しないように2cm余分にはみだして設計してある。上部銅箔の幅はLTSGの電極部分にあわせ、下部銅箔は上部を少し超える程度とした。この銅箔で挟まれているカプトンの領域が容量を持つようになる。実際に設計したものの概要図を下に示す。

コンデンサーつでのミニチュア版の導波路では幅50mm、長さ1m、厚さ $100\mu\text{m}$ でこの時計算されるインピーダンスは $Z_0=0.404\Omega$ であった。

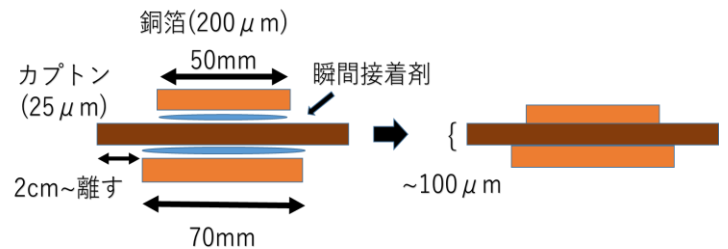


図 10 導波路の概要図

コイル

磁場を発生させるコイルの設計について記述する。コイルのインピーダンスがなるべくそれまでの、電源からコイルに届くまでのリード線を含めた装置全体のインピーダンスに整合がとれていないとコイルに届くまでに反射として損失されてしまい思ったように磁場が起らないという問題が主に発生する。そのようなコイルのインピーダンスを求めめるためにまずは、コイルのインダクタンスを求めていく。コイルのインダクタンスは次式であらわされる。

$$L_{\text{coil}} = \frac{\mu K N^2 a^2}{l} \quad (6)$$

ここで、 μ は銅の透磁率、 K は $2a/l$ に対応する長岡係数、 N は巻き数、 a はコイルの半径、 l はコイルの長さ（幅）とした。コイルの中心における磁場は、

$$B_0 = \mu_0 \frac{NI}{2a} \frac{1}{\alpha-1} \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} \quad (7)$$

で表せる。ここで、 I はコイルに流れる電流、 a はコイルの外径、 α はコイルの幅（長さ）の関係がある。インダクタンスを最小限にするため一巻

きのコイルで $\Phi 10\text{mm}$ のものを作成した。



図 11 作製した $\Phi 10\text{mm}$ の一巻きコイル

磁場発生実験

磁場発生装置全体の概略図を以下に示す。今回の研究ではコンデンサは一つのみで実験を行っている。また、コンデンサと導波路間にインダクタとして巻き数6、 $\Phi 50\text{mm}$ のコイルを設置している。

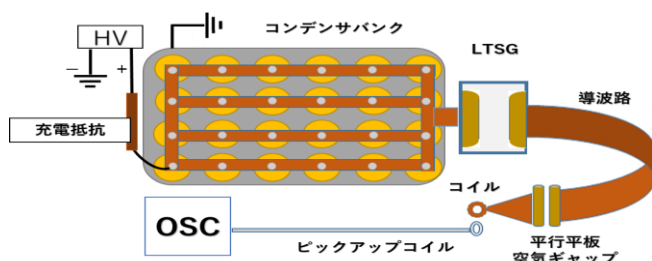


図 12 磁場発生装置概略図

実際に磁場を計測したところオシロスコープ上で以下のような減衰曲線を観測した。 $\Phi 10\text{mm}$ のものでは立ち上がり時間が40nsを実現。

$\Phi 10\text{mm}$,幅10mmのコイルのとき

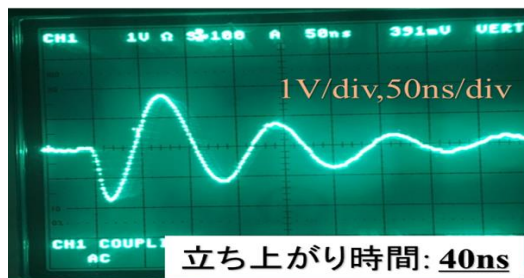


図 13 $\Phi 10\text{mm}$ 、幅 10mm のコイルでの波形

また、立ち上がりを早めるため $\Phi 3\text{mm}$ のもので磁場を計測したところ立ち上がり時間 19ns、2.7Tの磁場を発生させることができた。

$\Phi 3\text{mm}$,幅10mmのコイルのとき



図 14 $\Phi 3\text{mm}$ 、幅 10mm のコイルでの波形

結論

当初の目標である数テスラ 10ns の立ち上がり時間の磁場の発生に関して、2.7テスラ 19ns という磁場の発生を実現した。なかなか目標に近い結果を収めれたと考えられるがまだまだ回路に無駄が多く改善する余地はいくらでもあるため、今後の改良が待たれる。例えば現在コイル幅 10mm に対して、導波路の幅が 30mm となっているがここを 10mm 幅に合わせることでさらなる低インダクタンス化を図れ、より早い立ち上がり時間を実現できるのではないかとされる。また、コンデンサの数も一つから複数に増やすことで磁場の強さを大きくできると考えている。そして、現在においても最終的な目標の準備のために、銅箔をコイル先に設置し現時点では染み出しが起きないことも確認する必要がある、また、オシロスコープの測定において今回は適切な積分器を用いて波形を観測できなかったため積分器がない状態で波形を取っている。そのため、積分器を挟み磁場の算出ができるようにする。

参考文献

- [1]三浦登 強磁場の発生と応用 共立出版株式会社
- [2]米田仁紀 “Warm Dense Matter 物性”, Journal of Plasma and Fusion Research Vol. 81, Suppl. 2005
- [3]詳解 電磁気学演習 後藤恵一、山崎修一郎 共編 共立出版株式会社
- [4]有馬宏和:高出力レーザー圧縮による超強磁場発生の研究, 修士論文, 2006
- [5]長嶺和慶: 高出力レーザーを用いた磁場圧縮ターゲットの研究, 学士論文, 2012
- [6]太陽フレアの画像:

<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3093298/That-s-REAL-twisted-firestarter-Nasa-reveals-huge-coronal-loops-sun-s-surface-stunning-detail.html>