

高速磁場とレーザー生成プラズマとの相互作用の研究

米田研究室 浅井 晴貴

1. はじめに

固体-プラズマ遷移領域にある Warm Dense Matter[1]では、電子の局在化などの影響で、導電率が銅の場合には2~3桁下がるのが実験的にも理論的にも示されている。[2]この導電率は大きな表皮効果厚みの変化を誘導すると考えられているが、現在までのところ、この表皮効果と実応用は、つながっていません。単純に考えれば、表皮効果が小さくなるので、金属薄膜で閉じ込めた磁場などが、外に漏れさせるためのスイッチにもなるはずである。またこのような磁場とプラズマの相互作用研究は、長年磁気核融合で行われてきたが、レーザープラズマのような高密度プラズマ内では行われていなかった。さらに、このようなプラズマと磁場の変化は、太陽のリコネクションや宇宙での無衝突衝撃波の物理にも関係してくるので、実験室で宇宙現象を模擬する実験室天文学の分野でも重要になってくると考えられる。

そこで、本研究では太陽の表面上のコロナにおいて内部のプラズマが太陽を取り囲む磁場を押し上げて発生する太陽フレアの発生機構の一つと考えられている磁力線が繋ぎ変わる現象である磁気リコネクションについての模擬実験を研究室内で行うことを目指す。ここで、磁気リコネクションとは太陽表面上のような高温高密度な状態の中、密となった反平行な磁力線どうしが繋ぎ変わる現象である。この磁気リコネクションによって磁場のエネルギーが運動、熱エネルギーに変換される。実際の太陽においては太陽フレアとして発生し、地球近くに届くと磁気嵐を発生させる。

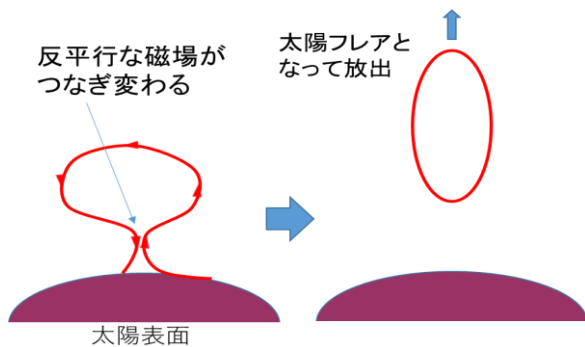


図 1 太陽表面における磁気リコネクション簡略図

この模擬実験を研究室内で行う具体的な手法としては、始めに太陽まわりの磁力線を再現するために磁場を発生させるコイルを設置し、その磁力線を密にして塞ぐような金属箔を用意する。そして、その金属箔の表面上にレーザープラズマを発生させられる程度の高強度レーザーを照射することで Warm Dense Matter (=WDM)状態を発生させる。ここで、銅について WDM 状態のような高温状態においては導電率が2~3桁ほど下がることが確認されている。これは大きな表皮効果厚みの変化を誘導すると考えられる。それは、表皮効果についての式 $\delta = \sqrt{2/\omega\mu_0\sigma}$ において、表皮深さが1桁ほど上がるということになる。そして、磁場を遮蔽する金属箔として銅を選択し、そのときの磁場を遮蔽するために十分な銅箔の厚さとしては、高強度レーザーによって吹き飛ばす銅について、高強度レーザーのパルス幅 5 ns、エネルギー 100 mJ、銅の原子密度、音速から、10 μm 程度あれば十分だと見積もられる。さらにこれと表皮効果の式から、はじめは遮蔽され WDM 状態になることで磁場が漏れ出すために必要な磁場の浸入角速度として 100 Mrad/s となる。これはおおよそ立ち上がり時間としては 10 ns ほどの超高速な立ち上がりの磁場が求められる。そして、磁束密度としてはプラズマ圧力と磁気圧の比であるプラズマ β 値が太陽における 0.7 と同程度となるような磁場が求められる。本研究では主にこの超高速な立ち上がり時間をもつ磁場発生装置の構築について記す。

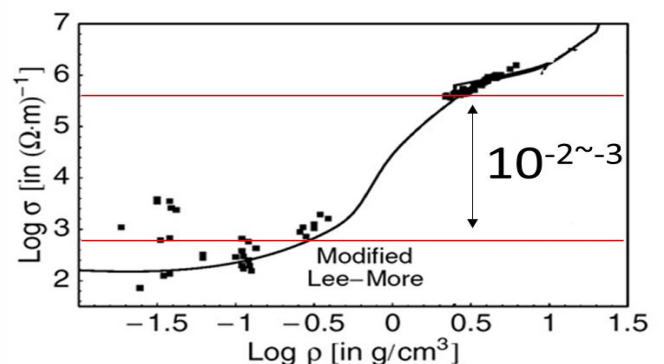


図 2 金属の固体-プラズマ遷移における銅の密度と導電率の

関係[2]

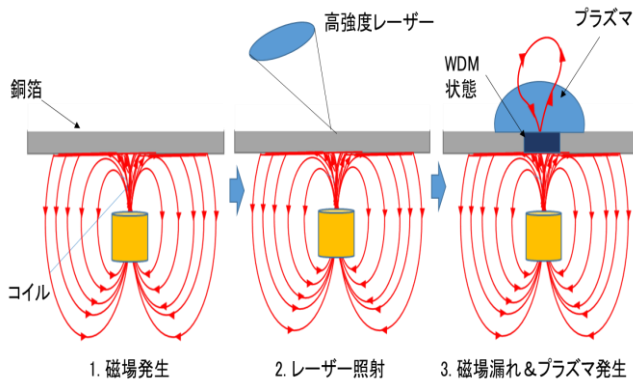


図 3 実験室内での磁気リコネクション模擬実験概念図

発生磁場中に設置するフォイルとして、その表皮深さ程度の厚みを持つ銅箔として 10 μm 、5 μm を用いた。また、レーザープラズマを誘起させるのに必要な高強度レーザーとしては、波長 1064 nm の Q スイッチパルス Nd:YAG レーザーを用いて、それを f100 mm レンズで銅箔表面に集光照射を行った。表皮深さによる磁場の減衰と、その際の銅箔への 1064nm レーザーショットによるレーザープラズマと高速磁場との相互作用の結果について記す。

2. 高速磁場発生装置の開発

高速な磁場を発生させるために高電圧と大電流を用いる必要がある、それに耐えうるスイッチや伝送路を用いる必要がある。まず、電源としては DC 電源を昇圧し最大 15kV 印加できるものを用意した。投入スイッチには Q スイッチパルスレーザー光をトリガーとして作動し、高電圧かつ大電流に耐える Laser Triggered Spark Gap を採用した。これは空気の絶縁距離によって高電圧を制御でき、さらにレーザートリガーする際は 6~7ns 程度でスイッチし、0.1 ns の低ジッタ性も兼ね備えており、のちのアブレーション用レーザーとの同期がしやすいといった特徴がある。本研究では真鍮を両電極としたものを作製した。そのトリガーレーザーとしては波長 532 nm の Q-switch Nd:YAG レーザーを f100mm のレンズで両電極間に集光し空気を絶縁破壊させることでスイッチする。また、導波路からコイルへの伝送路では、空気で絶縁距離を保ったレールギャップを採用している。これはレーザーを投入しなくてもスイッチするようにしている。スイッチとしてはこのような二段スイッチ構成を採用している。また、磁場の立ち上がりの早さは $\omega = 1/\sqrt{LC}$ で決まってくるため、低インダクタンスのコイルと導波路を作製した。パルス電源を用いるとコイルのインダクタンスと電源のキャパシタンスが共振

するため、コイルの仕様が決まってくる。磁場の浸入角周波数として 100 Mrad/s と仮定し、電源のキャパシタンスとして 2.7 nF の極性反転に強いセラミックコンデンサを用いると 1 nH 程度のコイルを作成する必要がある。実際に作製したコイルはインダクタンスをなるべく低くするために巻き数は 1 回とし、厚さ 100 μm の銅板を使用し $\phi 3$ mm、長さ 10 mm となり、そのインダクタンスは 0.835 nH を実現した。また、導波路としては、高電圧に耐える耐電圧性と、最終的に磁束密度に関わってくる大電流をコイルまで伝えるために 1 Ω 程度の低インピーダンス性が求められる。実際に製作した導波路は、厚さ 20 μm の銅箔を用いて+極側の幅を 30 mm とし GND 側の銅箔との間には厚さ 50 μm のポリイミドフィルム (カプトンシート) を誘電体として挟み、両極の銅箔とロックタイト 420 で接着したマイクロストリップライン型の長さ 50 cm のものを作製した。これは耐電圧が 19kV ほどであるため十分な耐久力を持っている。そして、この導波路の特性インピーダンス Z_0 は 1.019 Ω であり、インダクタンスは 2.995 nH と算出され、目標のインピーダンスに近い値をもつ導波路を作製できた。以上から、高速磁場発生装置のデザインとしては図 1 に示すようになった。また、コイルから発生する磁場は、セミリジッドケーブルの芯線を二回巻き、 $\phi 1$ mm として作製したピックアップコイルを用いて測定した。これは、コイルから発生した磁力線がピックアップコイルを貫くことで発生した誘導起電力をオシロスコープ上で観測することで磁場を算出できるものである。観測される波形は電源とコイルが共振するため減衰振動波形となる。ここで積分器を用いることによって、減衰振動波形の面積を計算するよりもはるかに楽に積分器の時定数 RC によって磁場を計算することが可能となる。

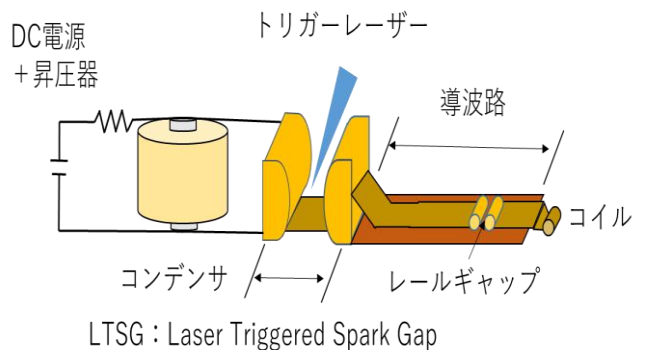


図 4 高速磁場発生装置の概念図

3. 磁場発生実験

実際の磁場測定においては、まずオシロスコープ上で得られた波形の全体を見て、減衰振動であることを

確認した後、本研究においては波形の立ち上がり時間が重要なので、時間スケールを数 ns 単位に縮めて、立ち上がり始めに注目し観測した。また、立ち上がり時間は観測された電圧値のピークについて 10~90 % の時間と定義する。実際にはじめ観測した磁場の波形を図 5 に示す。

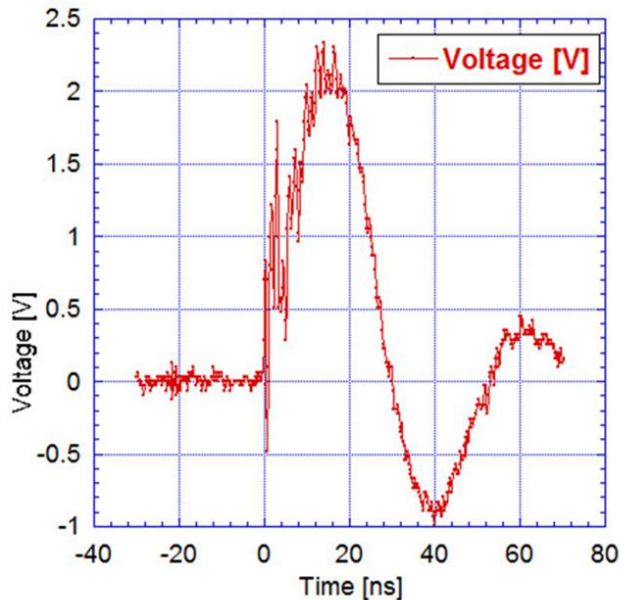


図 5 はじめ観測した磁場波形

図 5 において、全体的にノイズが確認でき、特に立ち上がり部分においては 1 V 程度の振幅をもつノイズのようなものが確認でき、このままでは使い物にならない。

そのため、ノイズ対策として観測時の測定条件として BNC ケーブルをセミリジットケーブルに変更。また、電源からくるノイズを消すことが出来るノイズカットトランスを使用。積分器の時定数の選定。導波路の改善を行った。セミリジットケーブルを絶縁体で包みさらにその上からアルミホイルで覆うことなどのノイズ対策も行った。以上の対策を行った後に観測された磁場波形を図 6 に示す。

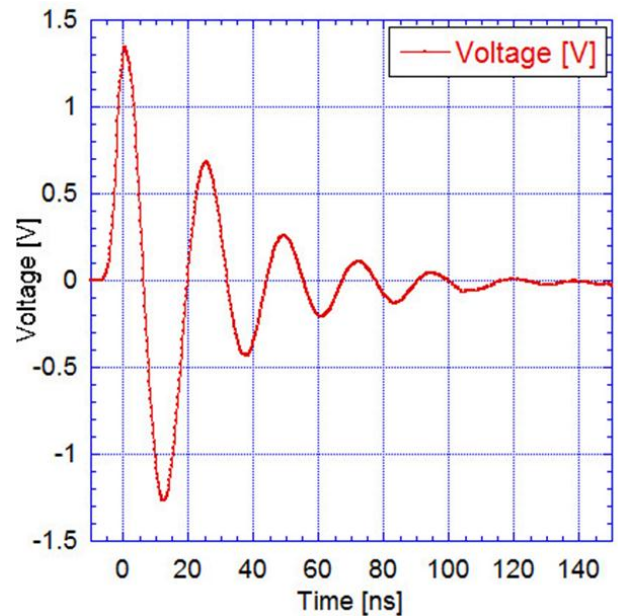


図 6 ノイズ対策後の磁場波形

全体的なノイズの削減に成功し、最も重要な立ち上がり部分におけるノイズも確認されなくなった。

4. 最短立ち上がり時間

磁場の目標立ち上がり時間としては、10 ns を掲げていたが、実験をつめていくにつれて導波路の設計が最適化できていなかったことがわかった。そのため、導波路の幅を 25mm から 30 mm に変更し、また導波路の作製手順を見直すことで目標を大きく超える立ち上がり時間として 2.38 ns の超高速な立ち上がり時間を持つ磁場を観測することが出来た。コイルとピックアップコイル中心間距離は 15 mm 程度とし測定した。その磁場波形と観測条件等をそれぞれ図 7、表 1 に示す。

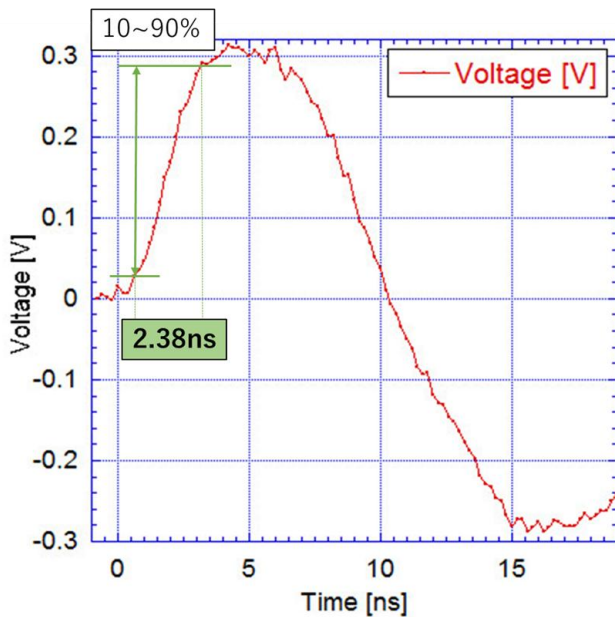


図 7 最短立ち上がり時間の磁場波形

表 1 磁場測定条件

| 磁場測定 | |
|-----------------|-----------|
| コイルとピックアップ間中心距離 | 15 mm |
| 15 mm地点での磁束密度 | 0.3947 mT |
| コイル中心での磁束密度 | 1.754 T |
| 最大電圧 | 310 mV |
| 立ち上がり時間 | 2.38 ns |

定義された立ち上がり時間の 10~90%において、立ち上がり時間が 2.38 ns を記録した。このときのコイル中心での磁束密度は 1.754 T と 1 T を超えている。これと後のレーザープラズマとの圧力と比較して β 値を見積もることができる。

5. 導波路の損傷

実験中、何度もレールギャップの真鍮電極に大電流が導通していると、電極表面に黒い煤のようなものが頭れ始める。これをそのまま放っておくとそのうち観測している波形が乱れ、最終的には導波路の電極以外の箇所でも導通し始め、導波路が壊れる。実際実験中に何度も導波路が測定中に壊れては作り直した。そのため、定期的に電極表面の黒い煤を紙やすりなどで磨き取りケアしなければならない。磨いたことによる表面の摩滅程度では導通しなくなるといったような影響

はでないので、なるべくきれいな表面を保ちながら実験を行っていく。その大電流により導波路の銅とレールギャップとの間に発生する接触抵抗によってそれらが黒こげになり損傷が起きる。その様子を図 8 に示す。

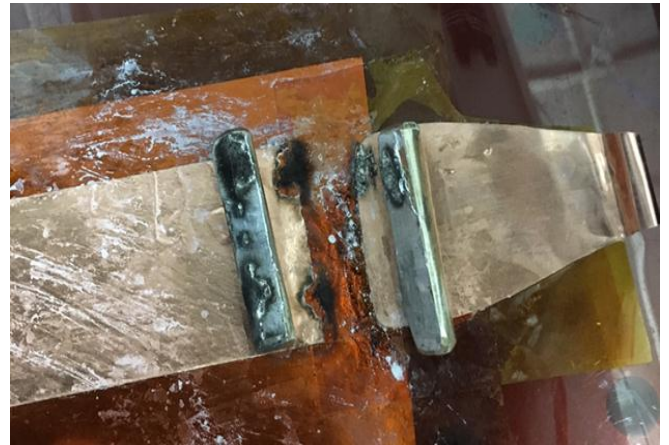


図 8 銅波路と真鍮電極の損傷

これは、真鍮電極の底面を削り、その部分にインジウムをはさむことで接触抵抗を減らそうといった試みであり図 9 のような概念図で表される。底面にインジウムを塗布した際は数十回の銅通で波形が乱れ始め、図 8 のような損傷が起きた。

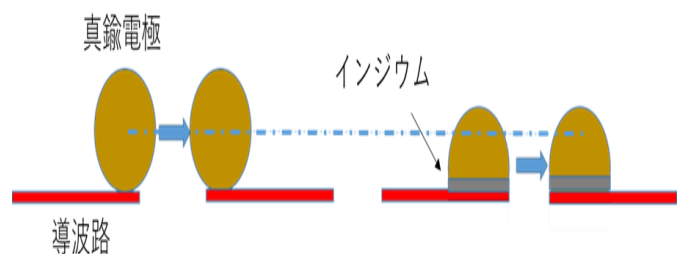


図 9 底面を削ることで低層化しインジウムを挟み低インダクタンス化を図った真鍮電極の概念図

導波路を作製する過程が当時は確立しきれなかったため、インジウムを用いるなどしたが最終的に半田をもちいることで、三桁回数の導通に耐えることができるようになった。

6. 表皮効果の測定

銅箔に $1\mu\text{m}$ のショットを行う前に、薄い銅箔によって磁場がちゃんと遮蔽されているかを確認する必要がある。観測対象の磁場は 100 Mrad/s オーダーの高周波であり、信号強度が $1/e$ に減衰する距離としての表皮深さを δ とすると、 $\delta = \sqrt{2/\omega\mu_r\mu_0\sigma}$ で表される。

立ち上がり時間による周波数から表皮深さが計算でき、それにより減衰率と実測の減衰された波形との減衰率を比較することで銅箔による遮蔽効果を確認する。厚み $5\ \mu\text{m}$ と $10\ \mu\text{m}$ の銅箔を用いて、コイルとピックアップコイルの直線間に銅箔面を垂直に配置し表皮効果による磁場の減衰を実測し比較した結果を図 10 に示し、理論値と実測との減衰率の比較を表 2 に示す。

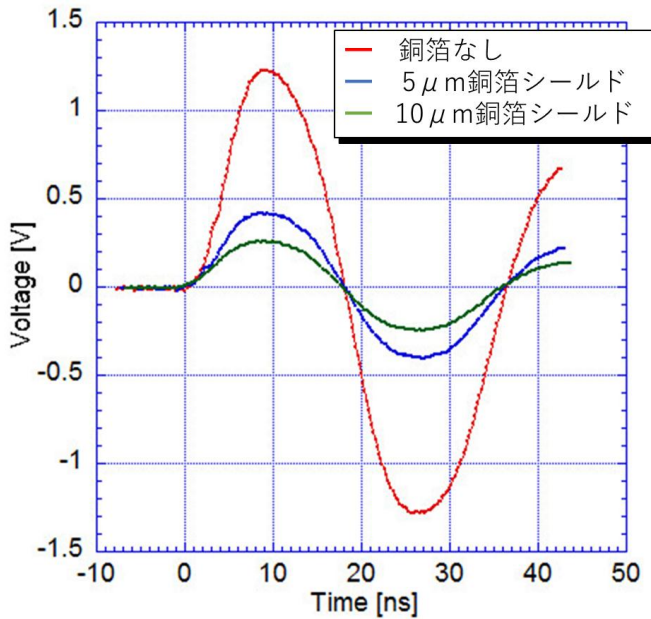


図 10 銅箔なし及び、厚さ $5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ の銅箔で磁場を遮蔽したときの減衰比較

表 2 銅箔の厚みによる減衰率の比較

| 銅箔の厚み [μm] | Vpp [mV] | 減衰率 [%] | 実測の減衰率 [%] |
|-------------------------|----------|---------|------------|
| - | 2505 | - | - |
| 5 | 826 | 65.6 | 67.0 |
| 10 | 501 | 83.2 | 80.0 |

このときの銅箔がない状態での立ち上がり時間は 4.85ns であり、表皮深さにして $4.57\ \mu\text{m}$ となる。図 10 から、遮蔽に用いる銅箔の厚みの違いにより磁場の強度の減衰率が変化していることがわかる。また表 2 からは実測の減衰率と理論の減衰率とで 95% 以上一致しており理論通りに磁場を遮蔽していることが分かる。また、銅箔の遮蔽により磁場の浸入速度については変化がないこともわかる。

7. レーザー生成プラズマと磁場の相互作用

波長 1064nm の Q スイッチパルス Nd:YAG レーザ

ー (エネルギー: 625mJ 、パルス幅: 5ns 、ビーム径: 9.5mm) を $f100\text{mm}$ レンズで厚さ $10\ \mu\text{m}$ の銅箔表面に集光照射してレーザー生成プラズマを発生させる。そして、そのスケールにあわせた高速磁場をほぼ同時に発生させることで磁場とプラズマとの相互作用が見込める。まず、銅箔表面にレーザーを集光照射しプラズマが発生するかを確認した。ショット時に銅箔表面からのプルームを目視できたため、プラズマは発生していると考えられる。磁場とレーザープラズマとの相互作用の観測において磁場の波形からパルス幅を見積もり、Delay Generator645 とフォトディテクターを用いて $1\ \mu\text{m}$ レーザーのショットのタイミングを確認及び調整した。そのときの測定結果の比較を図 11 に示す。

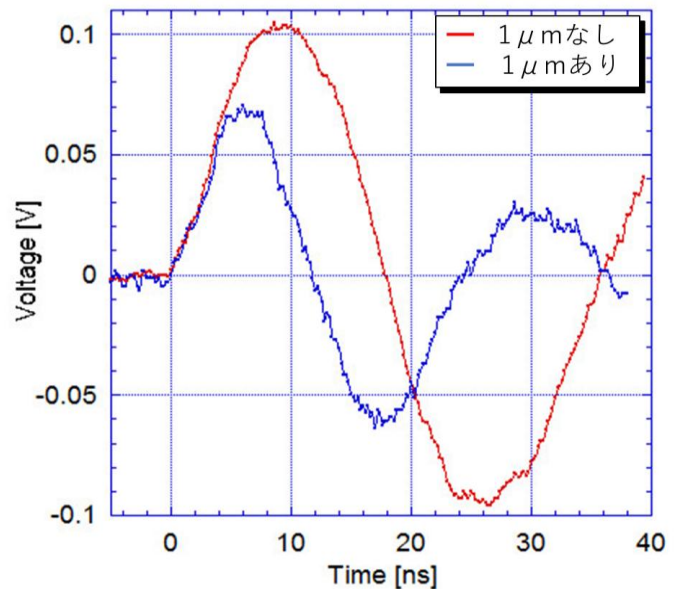


図 11 厚さ $10\ \mu\text{m}$ 銅箔に対しての $1\ \mu\text{m}$ ショット有無の比較

$1\ \mu\text{m}$ レーザーのショットなしの場合と比べて、ショットありのほうは周期の位相が変化し、立ち上がり時間が 1.5ns ほど早くなっている。一方、振幅としての電圧値は 45mV ほど低下しているという結果を得られた。

$1\ \mu\text{m}$ ショットありの青い波形の立ち上がりのピーク地点が $1\ \mu\text{m}$ ショットなしの赤い波形に比べてフラットになっている。さらに 10mV 程度のノイズのようなものが乗っており波形全体が乱れていることが分かる。

8. まとめ

当初の目標である立ち上がり時間 10ns に対し、最終的には改良を重ねた導波路を用いたところ、 $1\ \mu\text{m}$ ショットなしでの最短の立ち上がり時間は 2.38ns 、コイ

ル-ピックアップコイル中心間距離 15 mm 地点での磁束密度 0.3947 mT, コイル中心での磁束密度 1.754 T の超高速磁場発生装置を開発した。また、1064 nm パルスレーザーによる銅箔のアブレーションとの磁場の相互作用による測定波形を得ることが出来た。得られた結果の解析はもちろんのこと、発生していると思われるプラズマの観測・測定、異なる厚みの銅箔に照射した場合ではどうか、入射タイミング・角度の違い、などさまざまな条件を変えた上でのさらなる測定が必要である。しかし、大電流が導波路上に流れるため

に百回程度の導通で導波路が何度も焼き焦げて取り替えるため、一貫した 1 μ m ショットのデータが取りづらいことが現状の課題である。

参考文献

- [1] Yoneda.H “Warm Dense Matter 物性”, Journal of Plasma and Fusion Research Vol.81, Suppl.2005
- [2] M.P. Desjarlais, Volume 41, Issue 2-3, Pages 267 - 270 (2001)