

実験室天文学実験のための低気圧ガス中強磁場発生法の開発

米田研究室 小沼杏奈

1. 序論

実験室天文学実験がある。これは、レーザーで生成された高温プラズマのもつ高フラックス流体特性を利用して天体での爆発現象を模擬しようとしたり、磁気リコネクションなどの磁場が関与した現象を実験室内で再現し、観測に限られていた天文学を実験できる学問にしようという研究である。

本研究では、この中で、強磁場と高速流の流れが生む衝撃波実験について着目している。天体での爆発現象では、磁場により衝撃波面での電子の運動が妨げられ、新たな粒子加速が起きると考えられている。これは、超高エネルギー宇宙線の1つの起源とも言われているが[1]、観測はもとより実験での再現は困難な状況にある。これは気体の平均自由行程と磁場強度から決まるラーモア半径のバランスをうまく選び、十分に加速現象が成長できるように長時間安定に構造が作られ、なおかつ十分な高速のプラズマ流が必要となってくるためである。特に、外部磁場を印加しようとした場合、数 Torr レベルの背景ガスが必要になるが、このような低圧下での大電力実験では、よく知られているパッシュェンの法則にしたがってガス中放電が容易に起きてしまい、磁場発生そのものが困難となっている。したがって、低気圧ガス中での新たな強磁場発生が可能になれば、これまでより幅の広いパラメータ範囲での強磁場下のレーザー実験が可能になり、これまで以上に広範囲の流体-背景ガス状態での実験が可能になる。そこで、本研究では、最も放電が厳しい数 Torr で 10Tesla 級の磁場を短時間で生成させる手法の開発を行った。

2. 実験システム

本研究では、低気圧ガス中でのパルス強磁場発生を行うために、コイル先端部まで高真空による絶縁条件が成り立ち、差動排気により大気-真空、高真空-背景ガスの条件を得られる装置の開発に取り組んだ。図1に示されているように具体的には、初期電気エネルギー貯蔵のコンデンサ部からレーザートリガースイッチを通し 20kV, 20kA の電流を駆動させ、高絶縁破壊強度を持つカプトンの裏表で $1\ \Omega$ の導波路を作り約 4m 先のコイルまで導電させる。この導波路では、絶縁体であるカプトンを多層にした場合のカプトン-カプトン間、電極-カプトン間で僅かな気泡が存在するだけでもショットするごとに絶縁破壊強度が低下することが観測されたため、単層で絶縁破壊電界の安全係数が 2 程度のものを採用した。

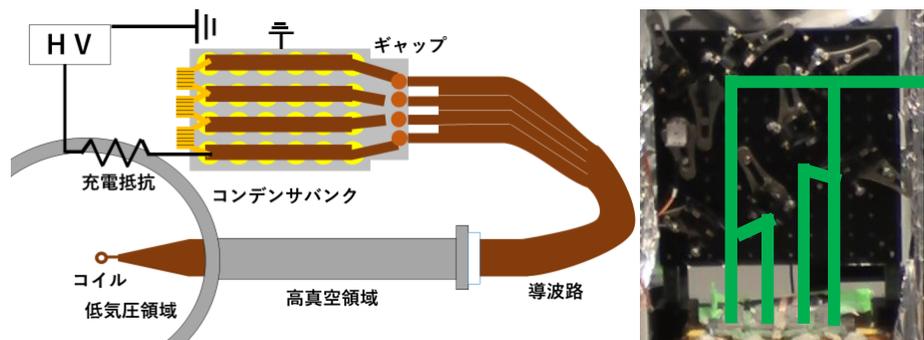


図1 実験システムの概要図(左)と LTSG の写真(右)

3. 実験

3.1 絶縁破壊対策

電極間の放電対策として、300kV/mm もの高い絶縁破壊電圧を持つカプトンを使用している。このカプトンの絶縁破壊は修復出来ない損傷であるため最大限避ける工夫が必要だが、中でも気泡が入る可能性は極力下げなければならない。空気の絶縁破壊電圧は1kV/mm であるため、気泡があれば必ず絶縁破壊が起きるためである。

この気泡の影響を考慮するにあたり、表1の接着剤毎の絶縁破壊電圧の測定を参照した。カプトンは厚み50 μm のものを用い、重ねて100 μm にしたものも作ることで厚みの違うミニチュアを作製した。この結果をみると、接着剤によっては公称電圧を下回るものがあることがあり、その上、カプトンを重ねることで電極-カプトンといった界面の多い設計の方がこの傾向にあることが分かった。したがって、気泡による導通を避けるためには、気泡の入る可能性が少なく出来る設計が有効であるとした。

表1 接着剤毎のカプトン厚み別絶縁破壊電圧の測定

接着剤	粘性	硬化時間	カプトンの厚み50 μm における絶縁破壊電圧 (公称電圧：19kV)	カプトンの厚み100 μm における絶縁破壊電圧 (公称電圧：35kV)
A	強	24 時間	25	20
B	強	20 分	20	30 以上
C	弱	数分	19	30 以上
D	弱	数分	20	27
E	強	24 時間	6	26

3.2 導波路の低インダクタンス化

先端にあるコイルまで20kA もの大電流を導通するためには、導波路は低インダクタンスであり、かつ耐久性があることが求められる。耐久性については、コンデンサバンクの容量を約2倍にした上で千回試験をしても壊れないことで確かめた。

導波路の持つインダクタンスは設計である程度決められるが、製作の段階で想定外のイ

インダクタンスを持ってしまう。この浮遊インダクタンスを軽減するために、長さの異なる導波路のインダクタンスの測定・評価を行った。まず1mのミニチュアを作り測定波形の周期からインダクタンスを計算し、同じコイルを用いて4mの導波路でも測定を行いそのインダクタンスを1mのものと比較した。比較の結果が近くなることで浮遊インダクタンスの軽減を評価した。その結果が図2であり、最終的に4m導波路の持つインダクタンスは約530nHである。

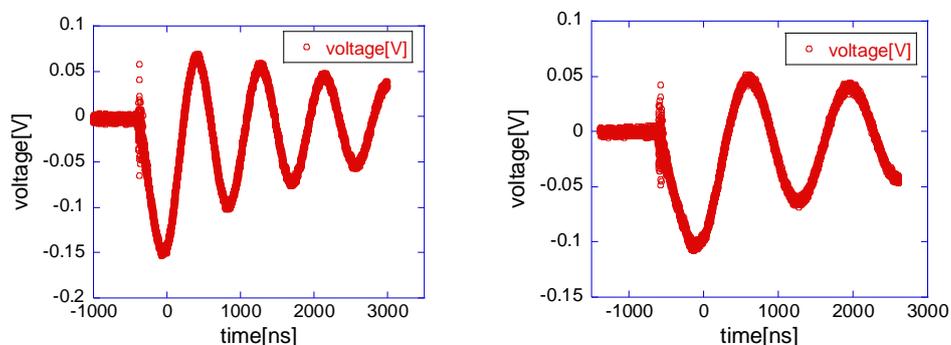


図2 1m導波路における測定波形(左)と4m導波路における測定波形(右)

3.3 低気圧ガス中における絶縁

ガス中の放電を避けるためには、ガスとコイル及び電極は完全に絶縁されていなくてはならない。その方法として、キャストイングと先端部まで高真空保持する方法を考えた。

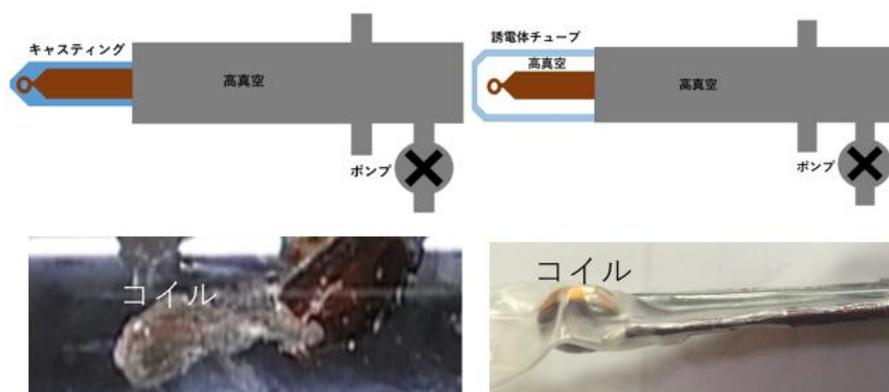


図3 キャスティングの概要図と実物(左上・下) 高真空保持の概要図と実物(右上・下)

初めにキャストイングで観測を進めていったところ、大気中では磁場の検出が出来たがガス中では僅かな隙間から放電が起きてしまった。更に、この方法ではコイルの代替や位置の微調整が困難であることから、高真空化への移行を決めた。誘電体の収縮チューブを用いてガスとの絶縁を図ったところ、 10^{-6} Torrの高真空が実現できたが、実際にショットを行ったところチューブ内で放電が起き、真空度の急上昇がみられた。これはチューブ内にガスが残っているためであり、インジゲータが示す値と先端部の真空度は一致していな

いと言える。大気圧下では共鳴振動がサイン波として観測出来ていたが、放電が起きるとクローバー波形になってしまっており、測定に影響をきたしてしまうことがわかる。

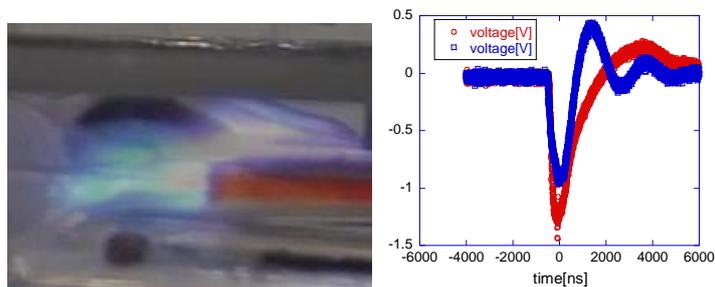


図4 チューブ内での放電の様子(左)と大気圧下(青)及び放電が起きた場合(赤)の測定波形(右)

この問題を解決し先端部まで高真空化するため、次のような手法を取り入れた。差動排気している各領域を同程度の真空度にした後、一度高真空側をリークしてから再び高真空化するのである。リークすることでチューブが膨らみ、排気しやすくすることが狙いである。

この結果が左図である。真空度の時間推移を見てみると、ただ真空を引き続けた場合(青線)よりも、一度リークした方(橙線)が早く高真空になっていることがわかる。したがって、この手法によりより早い高真空化を可能にした。

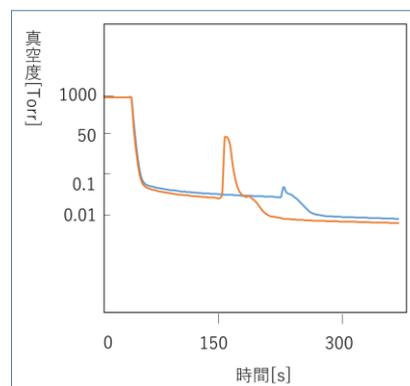


図5 真空度の推移

4. 結果

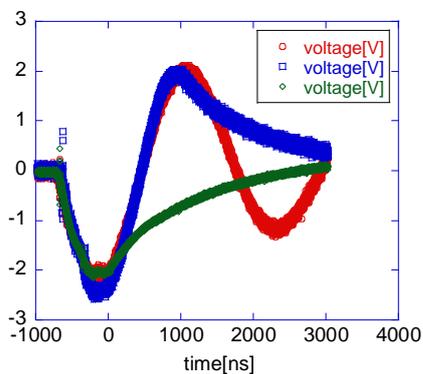


図6 ガス中での測定波形

チューブ内を高真空化した後、2Torr の低気圧下にて 20kV を印加し測定を行った。各曲線は真空を引き始めてからの時間の違いを表しており、緑が数十分、青が 2 時間、赤が 3 時間である。3 時間もあれば実験可能な真空度に到達することがわかった。

この方法で、これまで導波路部分で絶縁破壊が起き、コイル部までの給電が困難であった問題を解決し、2Torr という低気圧ガス中に 4.9Tesla の強磁場発生に成功した。

- [1] 星野真弘 相対論的粒子加速と宇宙線の起源, Journal of Plasma and Fusion Research. Vol.78, no.7 (2002), 668-677
- [2] 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
- [3] 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