

弱電離プラズマ流制御技術の実証に向けた強磁場源の開発と運用について

○永田靖典（岡山大学），山田宗平（早稲田大学），山田和彦，安部隆士（JAXA/ISAS）

Development and Operation of Strong Magnetic Source to Demonstrate Electrodynamic Flow Control Technology

by

Yasunori Nagata (Okayama University), Shuhei Yamada (Waseda University),
Kazuhiko Yamada and Takashi Abe (JAXA/ISAS)

ABSTRACT

In the electrodynamic flow control, a weakly-ionized plasma flow behind the strong shock wave could be controlled by the applied magnetic field around a reentry vehicle. It could be an innovative technology for reentry vehicle design because it will realize an aerodynamic control device without moving part. To demonstrate this technology on the flight condition, a light-weight, compact, and strong magnetic field source must be required, which must be able to be magnetized tesla order. We have developed a prototype magnetic field source which contains a superconducting bulk magnet cooled by solid nitrogen and it was applied to some experiments including HIEST wind tunnel test. However, the prototype model has some problems for the magnetizing and cooling processes, which has significant impact on the flight operation. Therefore, the next model is planned to improve and ease the operation by using a Stirling refrigerator instead of liquid refrigerant.

1 はじめに

次世代の大気突入システムとして、電磁力を利用した流体制御技術を熱防御システムに応用する、磁気シールドが提案されている¹⁾。これは極めて高速で飛行する大気突入機の前方に生じる強い衝撃波によって誘起された、高温、弱電離プラズマ化した気流に対して磁場を印加することで、磁場中を流れるプラズマに電磁力が作用する現象を利用したものである。その概念図は Fig. 1 のように示される。これまで大気突入機の設計としては、耐熱材やアブレータ等を用いて空力加熱に受動的に耐えるのみであったのに対し、この技術を利用することで、積極的に流れ場の変化を誘起し、その恩恵を受ける多様な設計が可能となる。また、遠隔力として作用する電磁力を流体制御に利用することで、機械的構造を伴わずに流れ場を変化させることが可能となる。このことは空力舵面の使用を想定した場合に比べて、その耐熱設計という困難な

課題を回避することにつながる。プラズマ流に作用する電磁力は反作用により機体側にも作用するため、これにより機械的構造を伴わない空力デバイスとしても利用できる。このように磁気シールド技術は大気突入システムの設計に多大なインパクトを与える可能性を持つ革新的技術であるといえる。

弱電離プラズマ流制御については、アーク加熱風洞^{2,3)}や膨張波管⁴⁾を用いた地上実験において、衝撃層拡大、抗力増大の効果が確認されている。一方、数値解析においてもこれらの効果が現れることが予測されている^{5,6)}。しかし、地上実験において実際の大気突入時の飛行環境を完全に模擬することはできず、フライト試験において磁気シールド効果を検証することが必要となっており、これまでにフライト実証試験の提案を行っている^{7,8)}。この提案では2段式観測ロケット SS-520 が用いられ、第2段モータを加速用に用いることで、実験機を高速で大気突入させることを想定している。ロケット側のシステムとしては、第2段モータ点火前に加速方向を決めるための姿勢制御が必要となるが、技術的には十分可能なレベルであると考えている。一方、実験機側についても、はやぶさカプセルを参考に開発することは可能であると考えている。ただし、実験機に搭載する強磁場源については、磁気シールド効果を実証する上で不可欠の要素であるが、その設計や運用の方針については未知数である。よって、実証試験に臨むにあたっては強磁場源の取り扱い方を十分に検討し、設計やフライトオペレーションに反映させる必要がある。

これまでにフライト実験機への搭載を目指し、バルク超伝導磁石を用いた小型の強磁場発生装置の試作⁹⁾を行っているが、その

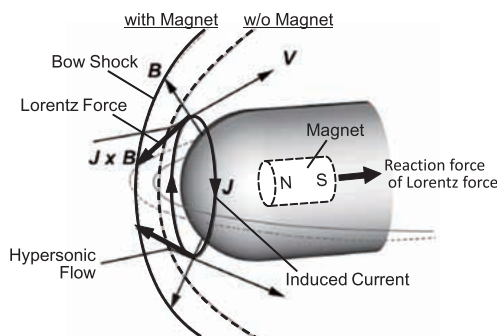


Fig. 1 Schematic view of the electrodynamic flow control.

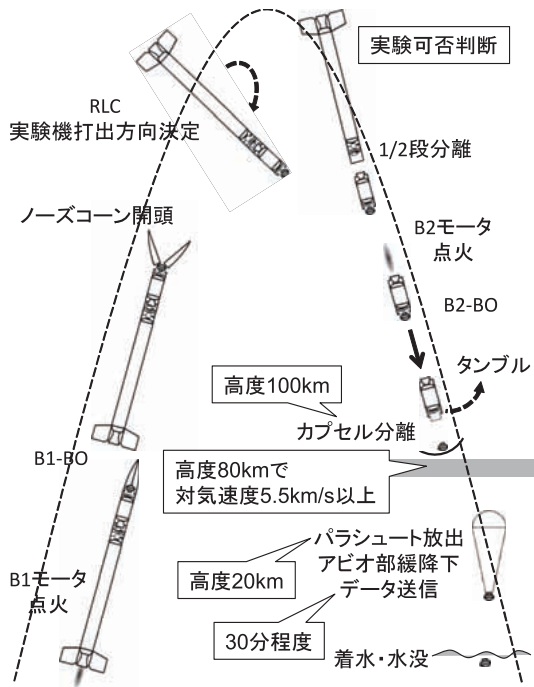


Fig. 2 Flight sequence for high flight velocity test using a sounding rocket.

着磁や風洞実験への適用を通して運用上の課題が判明している。本稿では、弱電離プラズマ流制御技術のフライト実証試験において必要となる強磁場源の開発およびその運用について、これまでに得られた知見や、課題、改善策について述べる。

2 実験機と強磁場発生装置

提案しているフライト実証試験では実験機形状として、小惑星探査機はやぶさ (MUSES-C) で使用された大気圏再突入カプセル (はやぶさカプセル) と同一形状 (鈍頭半径 0.2 [m]+45 [deg.] 円錐, 直径 0.4 [m]) を採用しており^{7,8)}、これは 2010 年 6 月に大気圏再突入が行われ、すでにフライト実績を有しているものである。本フライト実証試験では、実験機の開発コストを抑えるために開発要素を減らし、機体形状としてはすでに実証されているはやぶさカプセルを採用した。また、このカプセルは直径が 400 [mm] であり、観測ロケット SS-520 (直径 520 [mm]) に搭載可能なサイズである。観測ロケットを用いたフライト実証試験では、第 1 段モータにより高高度まで打ち上げられた後、姿勢制御により加速方向を決め、第 2 段モータにより所定の飛行速度まで加速させることで、実験機を高速飛翔させ、大気突入飛行環境を達成させることを計画している。Figure 2 は、その飛行シーケンスを示している。

実験機には、弱電離プラズマ流を制御するための強磁場源に加え、データを取得するための通信装置やコントローラといった電子機器を搭載する必要がある。また、減速装置としてパラシュートやそれを放出するための機構等を搭載する必要もある。実験機内部には限られたスペースしかなく、強磁場源としては可能な限

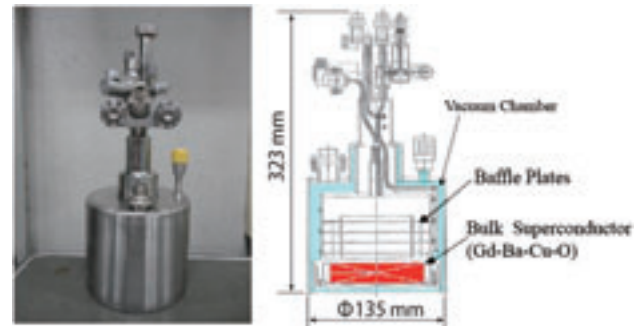


Fig. 3 Compact strong magnetic field source containing a superconducting bulk magnet.

り軽量かつ小型であることが求められる。さらに、流れ制御の効果をj得るためには数テスラにも及ぶ強力な磁場を機体周りに印加する必要がある。このような強力な磁場はネオジム磁石などの永久磁石ではj得ることができず、超伝導材を使用することが必要となる。コイル状の超伝導体に電流を流すことで、強力な磁場を安定して生成することができるが、そのためには超伝導体を少なくとも液体窒素レベルの低温に維持する必要があり、電流を流すための電源も搭載する必要が出てくる。はやぶさカプセルの搭載スペースにこれらを搭載することは困難であり、より小型の強磁場源としてバルク超伝導磁石を用いることとした。

超伝導材を磁石として用いる方法としてバルク超伝導磁石がある。これは一旦着磁させると、低温に保ち、超伝導状態を維持させておけば、磁場が保持され続け、磁場源として利用することができるものである。冷媒としては通常、液体窒素や液体ヘリウムが使用されるが、限られたスペースしかない実験機内部には多量に搭載することができないため、固体窒素を用いてその熱容量によって低温状態を維持することを考えている。液体窒素を固化させることで相変化に伴う潜熱を利用でき、これにより磁場源単体で長時間低温を維持することが可能となる。実際の観測ロケット実験では、飛行時間は数十分間程度であり、打ち上げ前の地上でのオペレーションを考慮しても 3 時間程度、磁場を保持することができればよい。ただし、着磁してから打上直前までの期間、冷却し続けることが前提となる。

以上を踏まえて、試作した強磁場発生装置を Fig. 3 に示す。これはバルク超伝導磁石を内包したクライオスタットとなっており、超伝導材としては Gd-Ba-Cu-O 系材料が使用されている。クライオスタットはバルク超伝導磁石と接する内槽と真空断熱層となる外槽とから成っており、内槽には液体窒素が充填され、その後内槽外周に液体ヘリウムを流すことによって固化される。これにより、バルク超伝導磁石は液体ヘリウムレベルの低温まで冷却される。着磁後の冷却には液体ヘリウムが使用され、固体窒素を維持することになる。

強磁場発生装置に対して着磁を行ったときの磁場分布が計測さ

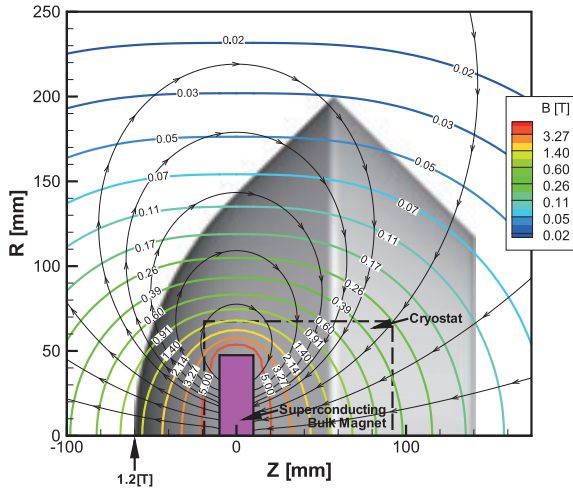


Fig. 4 Estimated magnetic field distribution around the superconducting bulk magnet.

られているが、この計測結果に合うように、実験機搭載時の磁場分布を遺伝的アルゴリズムを用いて予測した結果を Fig. 4 に示す¹⁰⁾。ここでは、バルク超伝導磁石の中心をよどみ点から 60 [mm] の位置に配置したと想定し、クライオスタットについては配管等を考慮せず、カプセル内に搭載できたものとしている。なお、磁場強度はよどみ点において 1.2 [T] と仮定している。実際に印加される磁場分布には、機体を構成する部材の透磁率が影響するが、ここでは考慮していない。よどみ点において 1.2 [T] の磁場を印加させるには、クライオスタット表面において 5 [T] 程度までバルク超伝導磁石に着磁させる必要がある。また、クライオスタット側方で 0.5 [T] 程度の強い磁場が生じており、実験機内部の機器はネオジム磁石の磁場強度と同等程度の強い磁場を受ける可能性があることがわかる。よって、実験機内部の機器には磁場の影響を受けない機器を使用する、もしくは磁気回路を構成し、磁場分布をうまく変化させるなどの対策が必要である。一方、実験機外部については、機体の肩付近で数 10 [mT] 程度と小さい値となっており、大きな影響はないと思われる。ただし、マルマンバンドなどの分離機構に対する磁場の影響については検討すべきであると考えられる。なお、機体を組み上げる際には、機体破損のリスクを避けるために、使用する工具やボルト類は非磁性のものが望ましいと考えられる。

3 着磁方法

バルク超伝導磁石では、外部から磁場を印加し、着磁させることで磁場発生源として機能することになる。そのため、バルク超伝導磁石を使用する上で着磁は重要な要素となる。バルク超伝導磁石の着磁方法にはいくつか考案されているが、試作した強磁場発生装置について以下の 2 つの方法を用いて実際に着磁を行った。

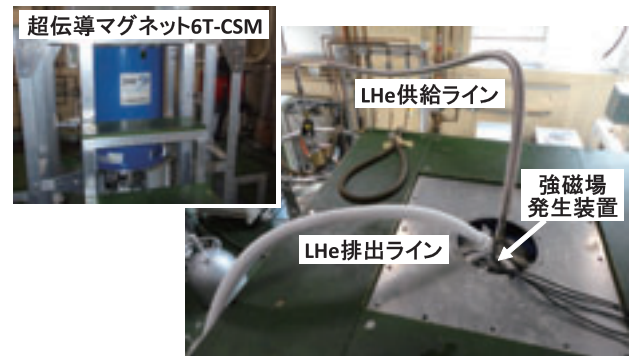


Fig. 5 Magnetization of the compact strong magnetic field source using the superconducting magnet 6T-CSM.

3.1 磁場中冷却法

磁場中冷却法は、常伝導状態のバルク超伝導体に対して外部磁場を印加し、その状態のまま冷却を行い、超伝導状態にすることで、バルク超伝導体に磁場がピン止めされ、着磁される方法である。これにより外部磁場を取り除いた後も、バルク超伝導体には磁場が捕捉された状態となる。この方法では強力な磁場を定常的に発生させることが可能な大掛かりな装置が必要となる。

これまでに東北大学強磁場超伝導材料研究センターの無冷媒型超伝導マグネット 6T-CSM を使用して、この磁場中冷却法による着磁を、試作した強磁場発生装置に対して実施している。Figure 5 はそのときの作業の様子である。超伝導マグネットでは供給する電流の大きさを徐々に変えていく運用がなされるが、バルク超伝導体に着磁後、マグネット側の磁場を取り除いていく途中では、バルク超伝導体とマグネットの間で強力な磁力が作用することになる。よって、強磁場発生装置の破損を防ぐために、バルク超伝導体はマグネットコイルの中心に配置しておく必要がある。液体窒素や液体ヘリウムの注液のための配管等もそれを考慮しておく必要がある。磁場中冷却法の結果として、強磁場発生装置表面で 2.2 [T] を着磁し、冷却停止 4 時間後においても 1.8 [T] 程度の磁場を保持できていることが確認されている⁹⁾が、より強い磁場を着磁させた場合には保持時間が短くなってしまったため、今後改善させていく必要がある。

3.2 パルス着磁法

パルス着磁法は、予め冷却され超伝導状態となったバルク超伝導体に対して外部磁場をパルス的に印加することで、バルク超伝導体に磁場を捕捉させる方法である。磁場発生コイルに短時間のみ大電流を流すため発熱が少なく、コイルおよび装置全体を小型にすることが可能となる。これにより、磁場中冷却法の場合に必要な大型装置に依存せず、運用の簡素化を図ることができると期待される。

強磁場発生装置はステンレス製のクライオスタットとなっており、このクライオスタット越しにバルク超伝導体に対して着磁を

施すことになるが、外壁が存在することでパルス的に発生させた外部磁場がステンレスの持つ反磁性のために内部まで到達せず、着磁ができない可能性がある。そこで、パルス着磁装置を試作し、強磁場発生装置の着磁特性について検討を行った。Figure 6 は試作したパルス着磁装置を示しており、主に高電圧電源と、コンデンサバンク、磁場発生用コイルで構成されている¹¹⁾。空芯時に発生する磁場強度は、コンデンサバンクの充電電圧に比例し、コイル中心で 271 [mT/kV] で、パルス幅は約 10 [msec] である。このパルス着磁装置を用いて実際に強磁場発生装置に着磁を行った。計測は、クライオスタット表面の 3 カ所にホール素子 (F.W. Bell 社製 BH-200) を貼り付け、パルス発生時およびパルス発生後の磁場強度を取得した。Figures 7,8 は、パルス発生時の磁場強度のピーク値、パルス発生後の残留磁場強度をそれぞれ示している。パルス発生時の磁場強度については空芯時に比べ小さい値を示しており、バルク超伝導体の中心よりも端の方が磁場強度が大きくなっている。これは、超伝導状態のバルク超伝導体に対して外部磁場を印加しているために起こる、マイスナー効果による影響であると考えられる。これに対して、残留磁場強度 (着磁された磁場強度) は充電電圧によって変化しており、値としては 10 [mT] 以下、複数回パルスを発生させた場合には 10 [mT] 程度であり、わずかではあるがバルク超伝導体に着磁できていることが確認された。Figure 9 は、着磁後のクライオスタット周りの磁場の空間分布を示しており、クライオスタット表面に平行な平面について距離 z を変えて計測を行った。計測は、平面に垂直方向の磁場強度について行った。これより、クライオスタット近傍ではバルク超伝導磁石の端付近で磁場が強くなっているが、クライオスタットから離れると中心付近で最大値を取るようになっていく。このため、実験機に搭載した際には、よどみ点付近で磁場強度が最大になると考えられる。なお、この着磁試験を行うに際して、パルス発生時には強磁場発生装置に力が作用するため、その固定には留意する必要があった。これは磁場中冷却法とは異なる点として挙げられる特徴である。今後、テスラオーダのパルス磁場を発生させた時の着磁特性について調べ、最終的に必要な着磁を行うことのできる装置のスペックを検討していく。

4 地上実験での運用

磁気シールド効果を地上で再現できる実験装置として、JAXA 角田宇宙センターの高温衝撃風洞 (HIEST) がある。HIEST は 2 段隔膜衝撃風洞であり、ノズル出口径 800 [mm] の円錐ノズルを用いて気流を加速させている。この HIEST を用いて 2011 年 12 月に、試作した強磁場発生装置を用いて、よどみ点での磁場強度が 1.4 [T] の状態での試験が実施されている。Figure 10 はそのときの試験の様子を示している。取得したシュリーレン画像からは、磁気シールド効果による衝撃層拡大効果を明確に確認することはできなかったが、強磁場発生装置の運用における問題点について

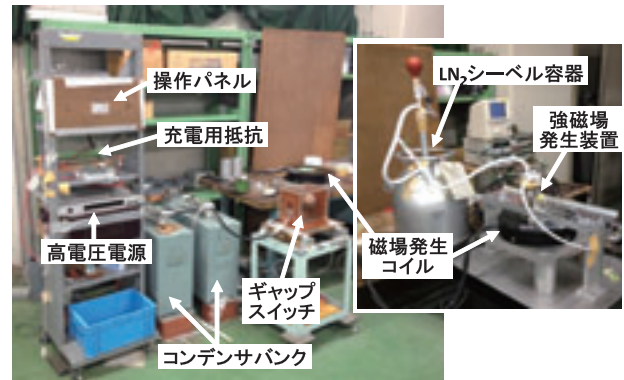


Fig. 6 Prototype pulse magnetizer.

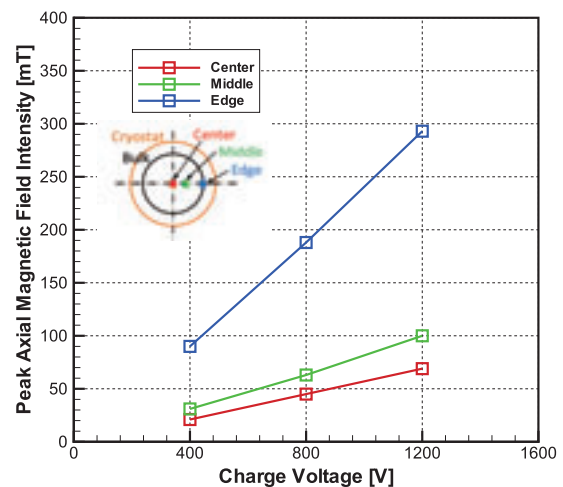


Fig. 7 Peak magnetic field intensity generated by the pulse magnetizer.

明らかになっている。

本試験自体は JAXA 角田宇宙センターで実施されたが、着磁は東北大学の 6T-CSM で行われており、この間の輸送が必要であった。輸送には車を用いて約 1 時間かかり、この間、磁場を保持した強磁場発生装置を冷却するために冷媒を流し続けた。冷却は試験実施直前まで行われたが、運用上の手間が非常に大きいことがわかった。また、液体ヘリウムによる冷却を途中で中断し、その後再開しようとしても、液体ヘリウム供給ラインが十分冷えるまでに固体窒素に熱が流入してしまい、温度が上昇してしまうことがわかった。そのため、何らかの原因で冷却を中断してしまうと消磁させざる終えず、着磁からやり直すことになる。このことは試験場所と着磁場所が離れている場合に、よりクリティカルな問題となる。これらの問題に対し、冷媒を使わないメカニカル・クーラの使用や可搬型のパルス着磁装置による現地での着磁を検討している。メカニカル・クーラの場合、ヒート・スイッチを介することで、冷却ヘッドが十分冷却されてからヒート・スイッチをつなぐことで、冷却失敗のリスクの少ない冷却の再開が可能になると考えられる。また、ヒート・スイッチによって、外部に設置さ

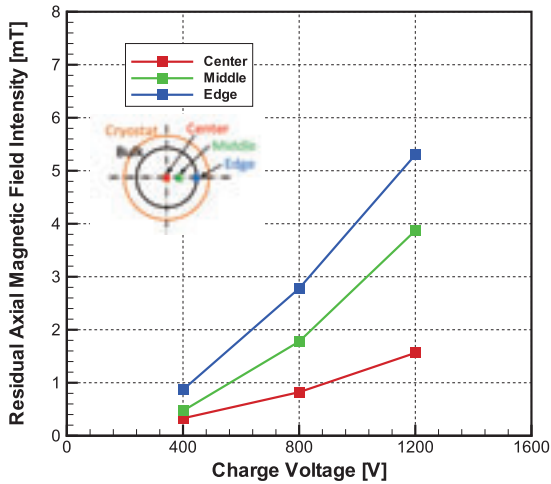


Fig. 8 Magnetic field intensity magnetized by the pulse magnetizer.

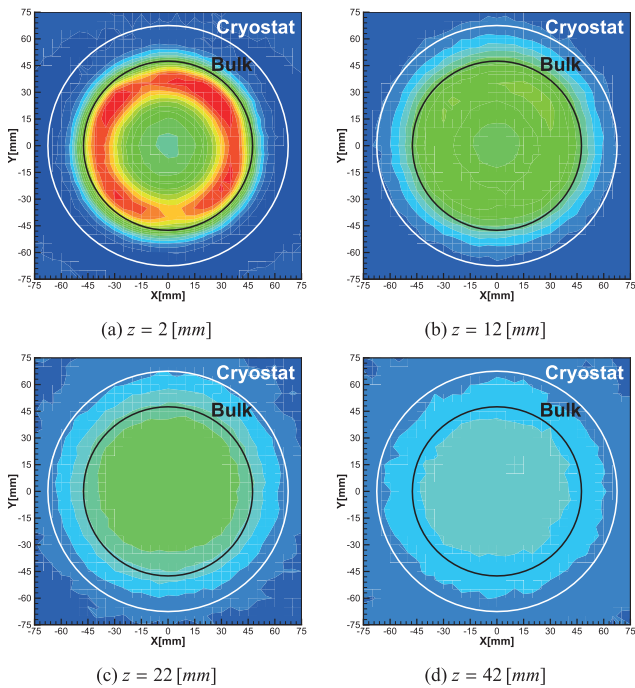


Fig. 9 Magnetic field intensity distributions on the plane normal to the axis of the strong magnetic field source.

れたメカニカル・クーラと内槽とを熱的に切り離すことで、断熱性能を確保することが可能となる。

5 フライトオペレーション

フライト実験を行う上では、打上に際してのオペレーションの流れについても十分に検討しておく必要がある。観測ロケット実験では打上までの作業として、実験機組立、頭胴部組立、ロケットモータとの結合、ランチャ上への設置があり、更に打上直前においても、ランチャの射点への移動、射角設定、各部動作チェックが行われる。打上当日の作業については、事前のリハーサルも実施される。さらには、天候等によって打上が中止になった際の

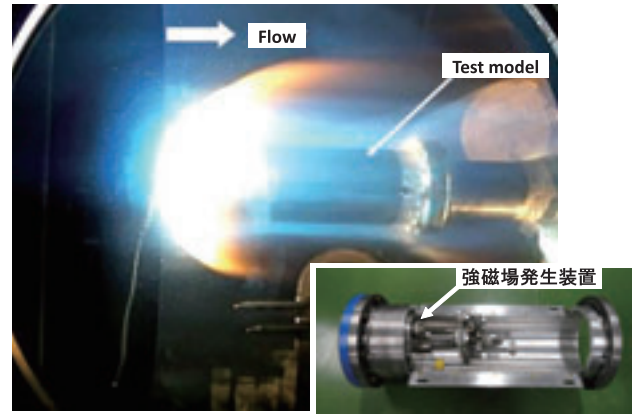


Fig. 10 Wind tunnel test using the compact strong magnetic field source at HIEST.

逆手順についても検討しておく必要がある。

バルク超伝導磁石を用いるため、実験機の組み立ては、着磁された状態の強磁場発生装置を用いて射場で行う必要がある。着磁も射場もしくはその近辺で行うことになる。着磁された状態は打上まで保持する必要がある。常に冷却しておくことになる。仮に消磁してしまうと、再び着磁の作業まで戻らなければならなくなる。実験機や頭胴部の組み立ての際には、強磁場発生装置の近くでは非磁性の工具を使用するなど、強力な磁石の吸引力による事故を未然に防ぐ方策が必要となる。頭胴部にフェアリングが組み付けられた後は、外部への磁場の影響は小さいと考えられ、通常通りの作業となるが、強磁場発生装置の冷却は継続されており、このための配線や配管の影響については考慮しておく必要がある。作業によっては配線や配管が干渉することも考えられるため、これらを外して冷却を停止した状態で行うことも必要となる。ランチャ上への設置後は、冷却を行いつつ、磁場や温度をモニタリングし、打上当日まで保管される。打上当日においては、ランチャを射点に移動後、射角を設定する直前で冷却を停止し、封じりの作業を行う。その後は固体窒素の熱容量で低温状態を維持することになり、維持すべき必要な時間は、動作チェックに要する時間など2~3時間程度と考えられる。なお、打上当日と同じ作業を行うリハーサルでは、消磁のリスクを減らすために、冷却は停止せずに行うことが望ましい。また、封じり後の逆手順においても、速やかに冷却を再開して、消磁しないようにする必要がある。

このように、バルク超伝導磁石を使用する上では、冷却がオペレーションに最も大きく影響し、それを行いつつ各種作業の実施や保管をする必要があるため、冷却を確実にできる仕組みを確立しておく必要があるといえる。このことは強磁場発生装置だけでなく、実験機や、観測ロケットの頭胴部、周辺環境を含めた実験システム全体として考慮すべき課題である。

6 まとめ

大気突入機の革新的技術と目される弱電離プラズマ流制御に関し、フライト実証試験において必要となる強磁場源の開発とその運用について検討を行った。観測ロケットによるフライト実験機の制約を満足しうる小型・軽量の強磁場発生装置として、バルク超伝導磁石と固体窒素による低温維持を利用した試作品を用いて各種試験を実施してきた。実際の磁場分布の計測結果をもとに、フライト実験機内部の磁場強度を予測し、強磁場を考慮した設計や機器開発が必要となることを示した。HIEST 試験を通して、この強磁場発生装置ではバルク超伝導磁石への着磁と冷却の作業がオペレーションにおいて重要となることがわかった。着磁に関しては2種類の方法をそれぞれ実施し、磁場中冷却法だけでなく、パルス着磁法でも着磁させることができることが示された。一方、着磁後の取り扱いに関し、フライトオペレーションにおいて冷却作業が与える影響を検討し、強磁場発生装置に求められる要求について述べた。

今後は、フライト実証試験に適用可能な強磁場発生装置の仕様について検討し、装置の改善を図っていく。

参考文献

- 1) R. W. Ziemer and W. B. Bush, "Magnetic Field Effects on Bow Shock Stand-off Distance," *Physical Review Letters*, Vol. 1, No. 2, 1958, pp. 58–59.
- 2) M. Kawamura, H. Katsurayama, H. Otsu, K. Yamada, and T. Abe, "Magnetic-Field Configuration Effect on Aerodynamic Heating of a Magnetized Body," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 49, No. 2, 2012, pp. 207–211.
- 3) M. Kawamura, Y. Nagata, H. Katsurayama, H. Otsu, K. Yamada, and T. Abe, "Magnetoaerodynamic Force on a Magnetized Body in a Partially Ionized Flow," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 50, No. 2, 2013, pp. 347–351.
- 4) M. Hattori, H. Makino, Y. Takahashi, Y. Nagata, K. Yamada, A. Tezuka, and T. Abe, "Validation of the scale effect for the electrodynamic interaction of a magnetized body in a weakly-ionized flow," *AIAA Paper 2012-2738*, 2012.
- 5) J. Poggie and D. V. Gaitonde, "Magnetic control of flow past a blunt body: Numerical validation and exploration," *Physics of Fluids*, Vol. 14, No. 5, 2002, pp. 1720-1731.
- 6) H. Otsu, D. Konigorski, and T. Abe, "Influence of Hall Effect on Electrodynamics Heat Shield System for Reentry Vehicles," *AIAA Journal*, Vol. 48 No. 10, 2010, pp. 2177-2186.
- 7) 永田靖典, 山田和彦, 安部隆士, 高橋裕介, 「観測ロケットによる磁気シールド飛行実証実験に向けた検討」, 第56回宇宙科学技術連合講演会, 2012.
- 8) 永田靖典, 山田和彦, 安部隆士, 「磁気シールド効果のフライト実証に向けた検討」, 平成25年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2013.
- 9) 新倉脩平, 服部盛正, 手塚亜聖, 安部隆士, 「磁気熱防御システム飛行実験に用いる超伝導マグネットの開発」, 平成23年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2011.
- 10) 永田靖典, 山田和彦, 安部隆士, 「印加磁場効果による極超音速空力特性への影響に関する数値解析」, 平成25年度衝撃波シンポジウム, 2014.
- 11) 山田宗平, 「電磁シールド効果の検証に向けたバルク超伝導体の着磁特性に関する実験的研究」, 早稲田大学修士論文, 2014.