

バルク超伝導体を利用した小型磁場発生装置の開発

Development of Compact Magnetic Generator based on Bulk superconductor

安部隆士¹, 山田和彦¹, 新倉脩平², 服部盛正², 淡路 智³,
¹宇宙航空研究開発機構・宇宙研, ²早大・理工, ²東北大, 金材研
T. Abe¹, K. Yamada¹, S. Niikura², M. Hattori², S. Awaji³
¹ Japan Space Exploration Agency
² Faculty of Engineering, Waseda University
³ Institute of Material Research, Tohoku University

1. はじめに

宇宙空間から地上へ到達する宇宙機は、大気層を高速で飛行するため、宇宙機自身が形成する強い衝撃波背後に生じる高温大気に耐えるように設計されることが必要である。このため、通常の宇宙機の外壁は耐熱構造とされる。この耐熱構造は、一度破損すると宇宙機そのものの破損に直結するため、高い安全率で設計されることになり、重量的にも宇宙機の大きな部分を占めることになる。従って、この軽量化は宇宙機の設計にとって重要である。この軽量化のためには、高温大気から宇宙機表面に加わる加熱を低減することが有効であるが、それを実現する工夫の一つとして、宇宙機に磁場発生源を置くことにより宇宙機の周りに磁場を形成して、高温大気と磁場を干渉させることが考えられている。この工夫については様々な研究が行われており、地上での実験装置での検証や、数値解析を用いた検証が進められている[1][2]。ただし、宇宙機が飛行中に曝される飛行環境の観点からは、検証において実現できる環境には限度があり、飛行実験においての検証が欠かせないのが現状である。

この飛行実験[3]においては、小型の飛行体を用い、観測ロケットによる弾道飛行を利用することが可能である。そのためには、小型の飛行体に搭載可能な強力な磁場発生装置の開発が不可欠である。また、必要な磁場強度が数テスラであることを考慮すると、高温超伝導材料を用いる必要がある。さらに、全体の装置を小型化する必要があることを考えると、電源などを用意することは困難であり、従って、バルク超伝導体を利用することが考えられる。バルク超伝導体を使った磁場発生装置では、着磁した後は、冷却を保つ限り磁場を保持することが可能である。従って、電源等は不要であるが、冷却を保持し続けることが必要である。

この研究では、このような背景のもとで想定される小型の磁場発生装置を開発し、その性能実証を行った。

2. 小型磁場発生装置の構成

飛行実験に用いられる飛行体は図1に示すものである。直径 40cm の鍋型の鈍頭形状で、全体重量は約 18kg を想定する。この内部には、磁場発生装置以外に飛行に必要な機器を搭載する必要がある。このような条件の

もと、磁場発生装置としては、約 1000cm³ の体積で、5k



図 1 大気再突入飛行体

g程度に収める必要がある。また、飛行実験に用いられる観測ロケットの準備に必要な時間、及び発射後の飛行時間を勘案して、約 3 時間程度アクセスが不能となるため、少なくともその間、磁場強度を保つ必要がある。従って、磁場装置に求められる磁場保持時間は 3 時間として設計する。また、必要となる磁場強度としては、飛行体の淀み点(鈍頭飛行体の先端部)で約 1T である。飛行体先端部と磁場発生装置の距離を勘案するとバルク材表面では 5T 程度の着磁が求められる。この条件から、バルク材として Gd-Ba-Cu-O 系のものを考えると、バルク材の冷却は約 60K 程度が限度であると想定される。即ち、60K 以下の適当な温度までに冷却して着磁した後に放置したとすると、温度上昇して 60K に達するまでの間が、磁場保持時間の必要条件を見たすことになる。そのため、ここでは磁場保持時間の間に生じる温度上昇を勘案して 20K 程度まで冷却することを想定する。これを可能とする冷媒として、ここでは固体窒素を選定した。従って、クライオスタットとしては、まず、液体窒素を注入した後、これをさらに冷却することになるが、この目的の冷媒として、ここでは液体ヘリウムを使用することにする。バルク超伝導材は液体窒素を充填する内部容器に熱的接触を保って設置され、液体窒素で内部容器が冷やされることで冷却されるが、液体窒素が固化した後は、固体窒素と内容物の内面との間に隙間ができることで、熱接触が十分とならないことが懸念されるため、十分な熱的接触を保つ工夫が必要がある。

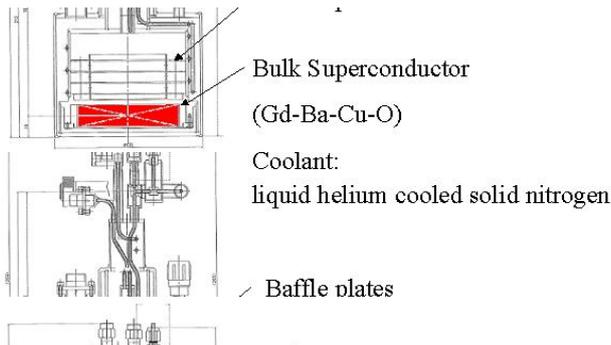


図 2 クライオスタット

以上のような制約条件のもとで設計されたクライオスタットを図2に示す。バルク超伝導材は、直径95 mmφ、厚み 50mm の円盤状であり、クライオスタット内部容器の底部に外付けされている。内部容器には、液体窒素（後に固化）が詰められることになる。内部容器の外側は液体ヘリウムを通すためのパイプが螺旋状の取り付けられている。ここに液体ヘリウムを外部から流しこむことにより、内部容器を冷却し、そこに充填された液体窒素を固化させるものである。内容器の直径は約 90mm、高さは約 50mm で、液体窒素を約 400gだけ充填することが可能である。固化した窒素と内容器の内面との熱接触を良くするため、内部容器の中には、金属ファイバーフォームを入れてある。固体窒素を機械的に支える構造も内部容器に仕込まれている。外容器の直径 105mm 高さは 263mmである。外容器の上部面には、液体窒素や、液体ヘリウムを充填、排出するためのポートが設けられている。

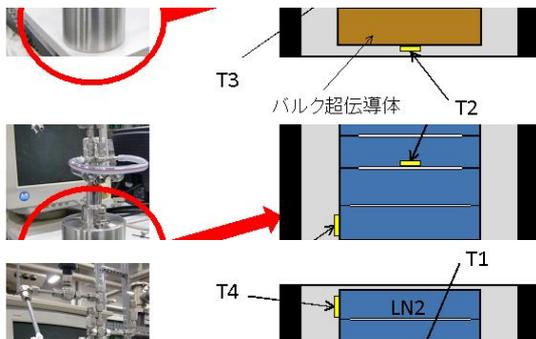


図 3 クライオスタットの外観と内部の温度センサー

各部の冷却温度をモニターするため、T1～T4 まで 4 つのセンサーが設けられている。T1 は、内部容器内の構造体にセットされ、T4 は、バルク超伝導体の外面にセットされている。T3、T4 は、内容器の外表面にセットされている。開発された磁場発生装置の外観及び温度センサーの位置を図3に示す。

3. 試験の手順とその結果

3-1. 試験手順



図 4 着磁装置と挿入直前のクライオスタット

本磁場発生装置の着磁するためには、本装置を一様外部磁場内に置き、冷却を行ない、十分冷却を行なった後に、一様外部磁場を消磁させる必要がある。一様外部磁場の発生装置として、東北大学強磁場センターの 6T220-CSM を用いた。この超伝導電磁石は、口径 220mmφ、高さ約 800mm の領域に擬似一様磁場を発生させることが可能である。図4は、超伝導電磁石とそこに設置された本磁場発生装置を示す。

本年度の実験では、昨年度おこなった実験を踏まえ、冷却手順を改良し、スムーズに所定温度に到達する工夫を行った。それでも、総冷却時間は2時間程度である。また、クライオスタットの性能を維持するため、2重容器間の真空度を確認しつつ実験を行っている。したがって、本年度の試験は、昨年度の試験を管理された手順で行い、クライオスタットの着磁性能の確実な把握を目指したものである。

結果は、昨年度得られていた着磁性能を再度確認すると同時に、再現性についても、合わせて確認をすることができている。

4. JAXA大型衝撃風洞での空力実験



図 5 風洞試験用模型

先に述べた手順に従って着磁されたクライオスタットは、図5に示すような風洞試験用模型にセットし、模型周りの高エンタルピー流れについての風洞試験を行った。

この風洞試験は、模型周りに生じる高温弱電離プラズマ流と着磁されたクライオスタットにより模型周りに生じる磁場との干渉効果を把握するためのものである。図6に実験より得られた流れ場の可視化写真を示す。流れ場への磁場の影響については、現在精査中である。

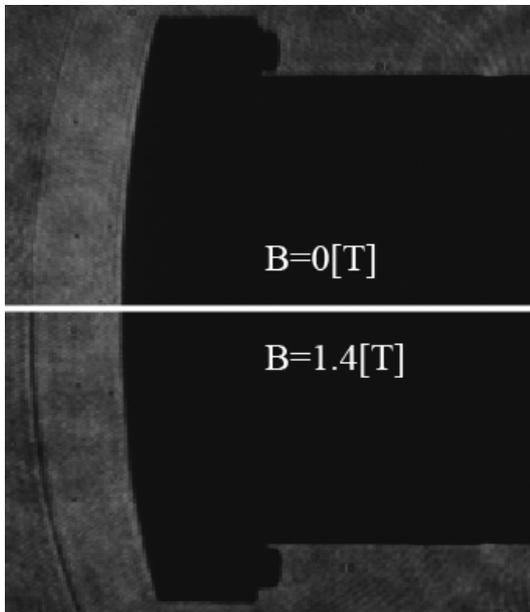


図 6 模型周りの流れの可視化写真

5. 結論

飛行実験に用いるため開発された小型磁場発生装置の性能を把握を行なった。把握された性能は、ほぼ、設計基準を満たすものであり、性能の再現性についても確認された。さらに、小型磁場発生装置を風洞試験用模型に組み入れた状態で風洞試験を行い、高エンタルピー流れへの磁場干渉効果についても検証を行うことが出来た。

参考文献

- [1] Yuji Takizawa, Atsushi Matsuda, Shunichi Sato, Takashi Abe, and Detlev Konigorski, "Experimental investigation of the electromagnetic effect on a shock layer around a blunt body in a weakly ionized flow," *Phys. Fluids* 18, 117105 (2006)
- [2] OTSU Hirotaka, KONIGORSKI Detlev, ABE Takashi, "Influence of Hall Effect on Electrodynamic Heat Shield System for Reentry Vehicles," *AIAA journal*, 2010, vol. 48, no10, pp. 2177-2186.
- [3] Takashi Abe, "Feasibility study of flight experiment for electrodynamic heatshield technology," *Acta Astronautica* Vol. 66, Issues 5-6, 2010, Pages 929-936.
- [4] 安部、他、“バルク超伝導体を利用した小型磁場発生装置の開発” 東北大学金属材料研究所 強磁場超伝導材研究センター H22年度共同研究報告、2010.