

# 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

(独)宇宙研究開発機構 安部隆士

(独)宇宙研究開発機構 山田和彦

早稲田大・工 新倉脩平

早稲田大・工 服部盛正

東北大・工 永井大樹

東北大・金属材料研究所 淡路 智

T. Abe<sup>1</sup>, K. Yamada<sup>1</sup>, S. Niikura<sup>2</sup>, M. Hattori<sup>2</sup>, T. Nagai<sup>3</sup>, S. Awaji<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Japan Space Exploration Agency

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Waseda University

<sup>3</sup> Faculty of Engineering, Tohoku University

<sup>4</sup> 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、冷却を保持しつづ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 1000cm<sup>3</sup> 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、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、固体窒素と内部容器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。

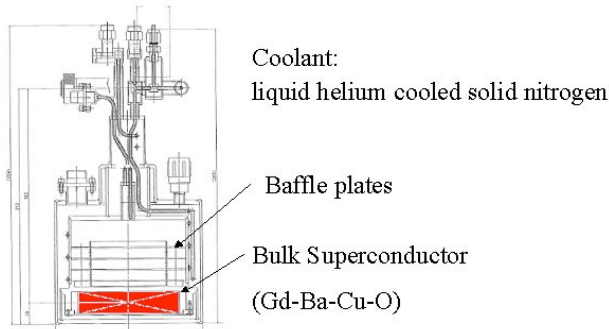


図 2 クライオスタット

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 mm φ、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。内容物の直径は約 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。固化した窒素と内部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。

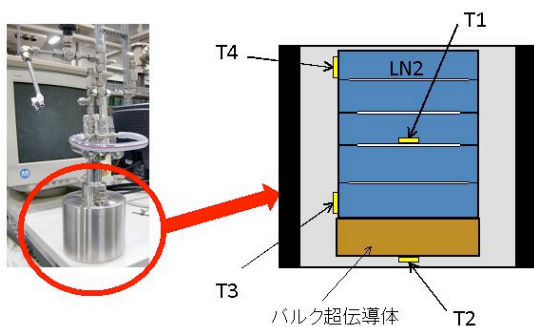


図 3 クライオスタットの外観と内部の温度センサー

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、内容物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 220mm φ、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、超伝導電磁石とその中に設置された本磁場発生装置を示す。

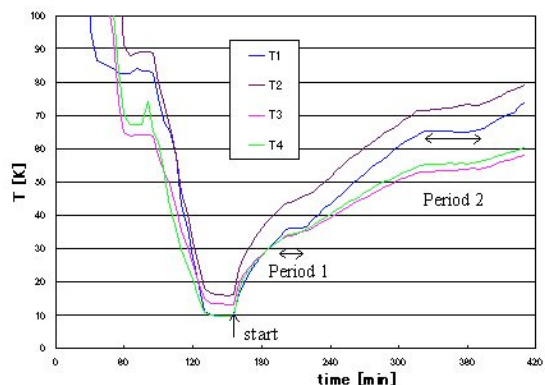


図 5 温度の回復履歴

実験の手順としては、超伝導電磁石に電流を供給して、所定の一様磁場を発生させた上で、本磁場発生装置を冷却し、十分冷却して後に、超伝導電磁石の供給電流をゼロにする。超伝導電磁石で発生する磁場は、あくまで擬似的な一様磁場であるため、磁場分布が生じている。このため、本磁場発生装置を設置する場所は、内部バルク超伝導材が一様磁場に曝されるようにして、超伝導電磁石への供給電流を減じた場合に生じる干渉を避ける必要がある。図4の右図は、超伝導磁石のボア内部であり、奥には本磁場発生装置を乗せるためのスタンドが見える。左図は、超伝導磁石とボア内に

装着する直前の本磁場発生装置を示す。磁場発生装置の周りには、ボア内で磁場発生装置を中心にセットするためのスペーサが装着されている。

本磁場発生装置の冷却は、まず、液体窒素を注入し、十分に注入されたことを確認した後に、液体ヘリウムを注入する。液体窒素温度まで冷却して平衡状態に達したのち、液体ヘリウムで冷却するが、液体ヘリウムの注入の前には、窒素の吸排気ポートを閉じる必要がある。液体ヘリウムによる冷却に伴い液体窒素の飽和蒸気圧が低下するため、外気圧に対して負圧になるためである。冷却過程は、内部に設けられた温度センサーによりモニターする。

### 3-2. 冷却および温度回復過程

図5は、典型的な冷却過程をプロットしたものである。まず、液体窒素温度付近で平衡した状態が見られる。液体ヘリウムの注入とともに、温度が下がりはじめ、ほぼ、20K 付近に達したところで、液体ヘリウムの注入を停止し、液体ヘリウムの入出力ポートを閉じた。閉じた後は、外部からの熱入力に伴って、徐々に内部の温度が上がっている。温度の上昇は、バルク超伝導体の温度がもっとも速やかであり、それに追従して固体窒素の温度が上昇している。固体窒素の温度の上昇では、2 回ほど、ほぼ平衡な状態が見られる。1 回目は 35.6K において見られ、固体-固体の相変化 ( $\alpha - \beta$  遷移) に伴うものである。2 回目は、63K において見られ、固体-液体の相変化に伴うものである。

冷却過程については、複数回の試行のいずれにおいても大差がないが、液体ヘリウム注・排気ポートを閉じた後の温度上昇過程は、ばらつきが見られる。緩やかな場合には、T2の温度が75Kにまで達するまでの所要時間は約210分であるが、短い場合には75分程度の場合も見られる。その後の調査により、短い場合はクライオスタットの内・外容器間の真空の悪化が見られており、そのため、外部からの熱入力が多くなったためと考えられる。設計においては、温度の回復時間は180分としていたので、内・外容器間の真空が正常な場合には、設計通りの性能を有していると判断される。

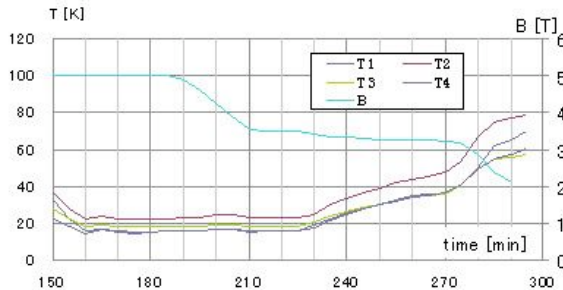


図 6 着磁過程と温度履歴

### 3-3. 着磁過程および着磁性能

着磁性能の指標として、クライオスタット底部にホールセンサーを取り付け、そこでの磁場強度をモニターして

いる。一例を図6に示す。この例では、外磁場を 5T とした場合であり、外磁場を消磁するタイミングで減少を始めている。消磁は、約30分でほぼ直線的に行なわれるが、磁場モニターの値は 3.5T 付近で直線的な減磁からずれてほぼ一定の値を示す。その後も外磁場は減少するものの、モニターの値は、それとは無関係にほぼ一定の値を示し、外部磁場消滅後の変わらない。従って、その時のモニター値は、バルク超伝導体の着磁強度となる。ここまでの間は、液体ヘリウムによる冷却を続けているが、冷却の終了とともに、温度の上昇が見られ、それに伴い、着磁磁場強度も緩やかに減少することになる。

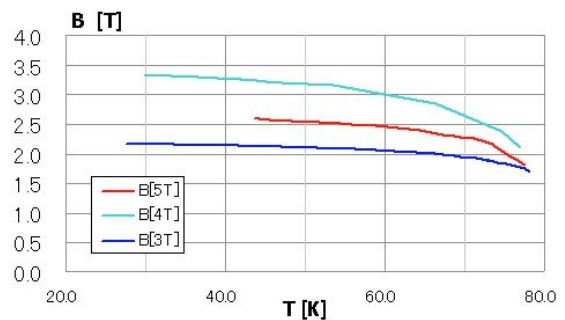


図 7 着磁後の温度上昇に伴う磁場強度の履歴

さまざまな外部磁場の条件で着磁を行い、その際の温度上昇に伴う着磁強度の変化を示したものが、図7である。5,4,3T の外部磁場における着磁において、実際の着磁強度は、着磁した磁場の強さに依存しているが、特に 70K 付近より高い温度領域では、着磁強度の低下が目立つことになる。

#### 磁場分布(垂直方向)

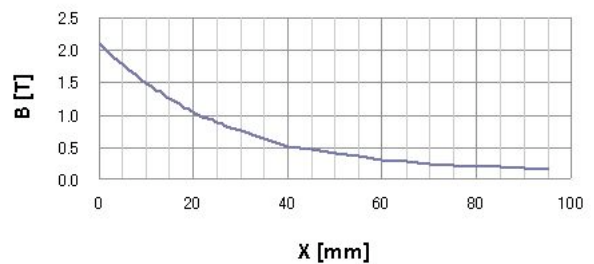


図 8 磁場分布(ディスク中央から垂直方向への分布)

着磁したバルク超伝導体周りの磁場の分布を図8に示す。また、図9は、水平方向の磁場分布(バルク体表面に対して垂直方向成分)を示す。表面から離れるに従って休息に磁場強度は減少し、表面から 50mm 付近(飛行体の表面付近)では、25%程度となる。従って、5 T に着磁した場合には、1 T 程度となるため、当初の設計要求を満たしていることがわかる。



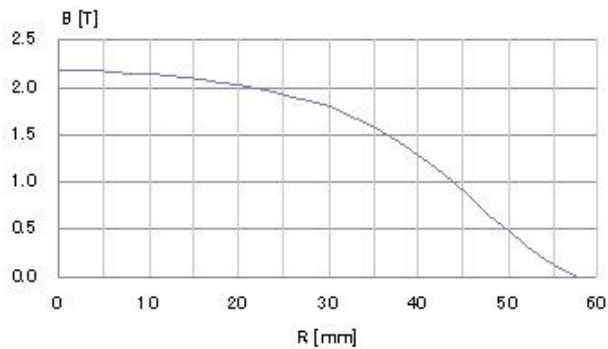


図 9 磁場垂直成分の水平方向分布

#### 4. 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った。

#### 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 Hiroataka, 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.