

三次元有限要素法解析によるLiteBIRD衛星に搭載する 超電導磁気軸受の損失特性評価

学生証番号 47176082 氏名 廣田 幸真
 (指導教員 大崎 博之 教授)

Key Words : LiteBIRD, Superconducting Magnetic Bearing, Bulk superconductor, FEM, AC Loss

1. 研究背景と目的

LiteBIRDは、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏光を観測し、宇宙の誕生を説明する「インフレーション仮説」の実証を目的とする人工衛星計画である。JAXAなどの機関が連携し2025年頃に打ち上げが予定されている。LiteBIRDにはCMBを観測するシステムを構成する機器の一つとして偏光変調器が搭載され、直径400mmの光学素子(半波長板)を、4 Kの極低温下で連続回転させて使用する。このとき、低温環境は冷凍機を使用することで実現させるが、冷凍機的能力に限りのある人工衛星上では、回転損失などによる発熱を低減することが重要な課題となる。そこで、バルク超電導体のピン止め効果を用いた、超電導磁気軸受 (SMB) を採用することが検討されている。本研究の目的は、永久磁石リングが発生する磁場の周方向分布が原因となって生じるバルク超電導体での損失の特性を、有限要素法 (FEM) 解析によって評価することである。

2. 超電導磁気軸受の構造と回転損失

図1に超電導磁気軸受 (SMB) の構造を示す。CMB観測のための半波長板は、永久磁石リングと鉄ヨークで構成される超電導磁気軸受回転部の内側に組み込まれる。半波長板が組み込まれた回転部は、バルク超電導体のピン止め効果によって、指定のギャップを保って安定浮上する

このとき、永久磁石リングは、平行着磁された永久磁石を分割して配置することになるため、永久磁石の継ぎ目に隙間ができることになる。このため、永久磁石リングの発生する磁界分布は不均一である。前述のとおり、永久磁石リングとその中に埋め込まれた半波長板は連続回転させるため、周方向に一樣でない磁界が回転することになる。これが、バルク超電導体に交流損失を、また周りの金属部品に渦電流損失を発生させる。

3. 磁界変動の解析

先行研究によって提案された図1のような鉄ヨークが配置された構造において、制作による組み立て誤差が生じることで周方向の磁界変動にどの

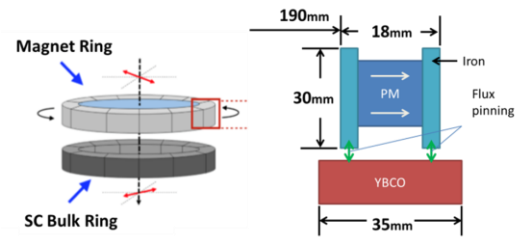


図1 SMBの構造

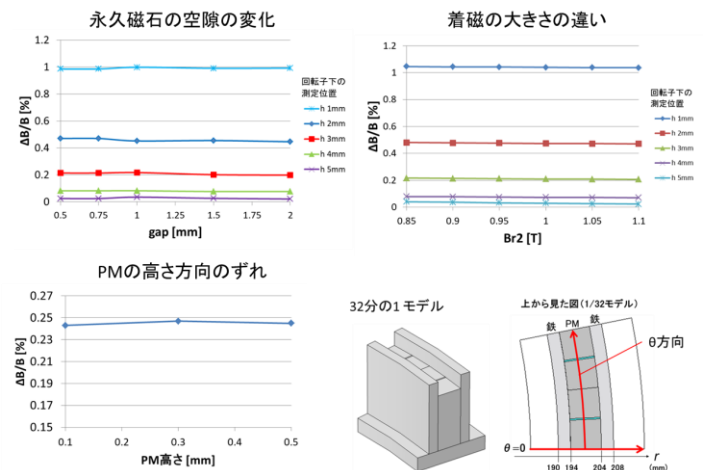


図2 磁界変動の解析

程度影響するかを調べる。検証する項目は3つである：①永久磁石の空隙の変化、②永久磁石の着磁の大きさの違い、③高さ方向の永久磁石の位置ずれ。そのモデルと各組み立て誤差を設けたときに磁界変動率の変化を見た結果を図2に示す。これを見れば、磁界変動率はモデルで変化がないことが分かる。組み立て誤差が、磁界変動率には影響を与えないことが示された。

4. 回転損失

4.1 回転損失の近似的な評価の流れ

バルク超電導体の回転損失を、導体の解析を用いて近似的に見積もる。その流れを以下に示す。

- ① バルク超電導体の代わりに、導電率が一樣な導体を用いて解析を行う。導体の導電率は、 10^4

～ 10^{13} S/mの範囲で変化させる。これにより、導体内の電界分布と、損失と導電率関係が得られる。また、電界分布は、磁束密度分布のみで決まるため、この解析で得られた電界分布は、バルク超電導体を置いた電界分布に等しい。

- ② n値モデルによると、バルク超電導体の導電率(σ)は各点によって電界 E の関数になる。

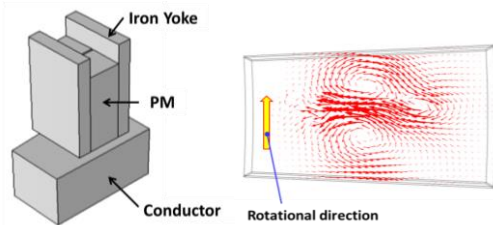
$$\sigma_{sc} = \frac{J_c}{E} \left(\frac{E}{E_c} \right)^{\frac{1}{n}}$$

よって、①で得られた電界分布から、バルク超電導体の導電率の分布が得られる。

- ③ ①で得られた導電率と損失の関係と、②で得られた超電導体内における導電率の分布から、超電導体内における損失を見積もることができる。

4.2 導体を用いた解析

超電導体の代わりに導体を用いた解析を行った。図3にそのモデルを示す。図3で右上は渦電流分布の図である。導電率を $10^4 \sim 10^{13}$ S/mで変化させたときの損失の変化を、図4に示す。導電率が低い領域では、導電率の増加により多くの電流が流れ、損失も増加する。導電率が高い領域では、電流による磁界遮蔽効果が大きくなり、磁界が侵入しにくくなるため損失が下がっている。



	Air	Yoke	PM	Conductor
μ/μ_0	1	4000	1.05	1
σ [S/m]	0	1.12×10^7	1.25×10^6	$10^4 \sim 10^{13}$

図3 導体を用いた解析モデル

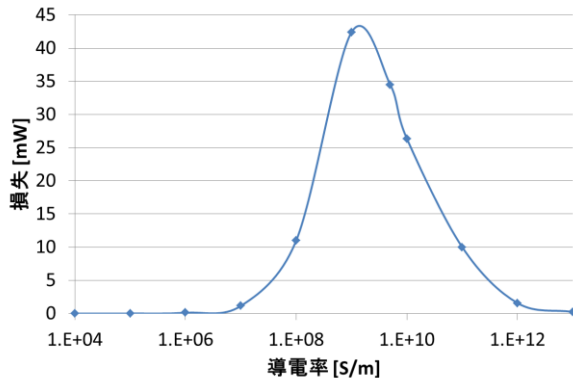


図4 導電率を変えたときの損失の変化

4.2 回転損失の近似的な評価

4.2の導体を用いた解析で得られた電界分布を図5に示す。このとき、バルク超電導体に印加される電界の最大値は 10^{-4} V/mである。この値からn値モデルを用いて、バルク超電導体内の導電率の最小値が計算できる。その様子を図6に示す。この結果、導電率の最小値は、 10^{12} S/mとなった。ここで、図4の導電率 10^{12} S/m付近に着目してみると、損失は減少傾向にある。よって損失は 10^{12} S/mに対応する値より大きい値にはならず、このときの損失がバルク超電導体の損失の最大値であるといえる。この値は、2.2 mWであり、要求値を満たしている。

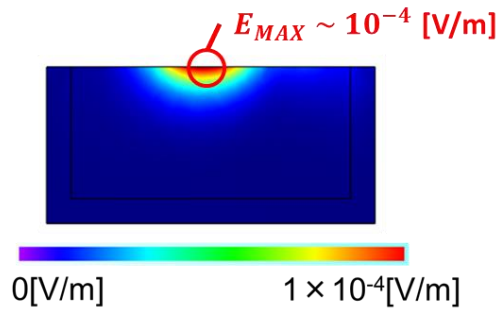


図5 電界分布

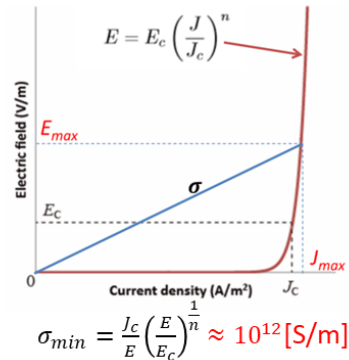


図6 n値モデルと導電率の見積もり

5. まとめと今後の課題

LiteBIRDの偏光変調器における超電導磁気軸受(SMB)を対象として、磁界分布の変動に起因する回転損失について研究を行った。まず、制作の際に生じると考えられる組み立て誤差が、磁界変動にどれほど影響するかを解析によって確かめた。この結果は、組み立て誤差は磁界変動に影響しないような構造となっていることを示した。

つぎに、超電導体の代わりに導体を用いた解析とn値モデルによる超電導体のモデル化からバルク超電導体における損失の上限を見積もり、2.2mWという値を得た。

今後の課題としては、超電導体まで含めたモデルの解析手法を確立し、より正確な損失の値を算出できるようにすることがあげられる。