

小型人工衛星用磁気トルカの設計と試作
Magnetic Torquer for Micro/Nano Satellite

上島 広史* 石村 康生*** 飛田 敬規** 上田 亮**
廣田 尚久† 佐鳥 新**
Hirofumi Ueshima, Kosei Ishimura, Takanori Tobita, Ryou Ueda
Takahisa Hirota and Shin Satori

Abstract

Now in Hokkaido, we are developing the small satellite; it was named “Hokkaido Satellite”. Hokkaido Institute of Technology, Hokkaido University and many Hokkaido companies are participating in this project. Mainly Hokkaido Satellite mission is remote sensing for agriculture. And for the mission, Hokkaido Satellite has a Hyper-Spectral sensor, it is the first domestic product made in Hokkaido. Therefore, Hokkaido Satellite needs high attitude control accuracy and attitude determination and control system (ADCS) is one of the important systems in this project. ADCS consists of attitude sensors (Sun sensor, Earth sensor, Magnetometer and Rate gyro) and actuators (Momentum wheel, Electric propulsion and Magnetic Torquer).

In this study, we design Magnetic Torquer (MTQ) and test it. The requirements of MTQ design is; it can generate $6[\text{Am}^2]$ of dipole moment, it works in low power consumption $0.3[\text{W}]$ or less with 3 torque rods and its weight doesn't exceed $450[\text{g}]$.

1. はじめに

2004 年現在、北海道工業大学を中心として、北海道大学、その他道内企業とともに北海道内で“北海道衛星”と呼ばれる小型人工衛星 (50×50×60cm) の開発を行っている。北海道衛星は、国内での開発は初となる特殊光学センサを搭載してのリモートセンシングを目的としており、2007 年度での打ち上げを目指している。光学センサによる観測がメインミッションであるため、姿勢制御系の設計が衛星開発、また打ち上げ後の運用において重要な部分を占める。姿勢制御系は太陽センサなどのセンサおよび、磁気トルカなどのアクチュエータで構成される。また、北海道衛星製作の第一段階として、CubeSat を設計・製作する。CubeSat とは、一辺が 10[cm] の立方体状の超小型衛星を学生主導で製作する、国際的プロジェクトである。今回設計する CubeSat は、磁気トルカによるデスピン、またはアンローディングを行い、姿勢制御に関する基礎的技術の獲得、北海

道衛星用磁気トルカの、実際の軌道上での運用シミュレーションを得ることを目的としている。

本研究では、磁気トルカの設計、理論解析、CubeSat 用磁気トルカの試作を目的としている。北海道衛星用磁気トルカの設計要求値を表 1 に、CubeSat 用磁気トルカの設計目標値を表 2 に示す。

表 1. 設計目標 (北海道衛星)

発生磁気モーメント $[\text{Am}^2]$	6 (1 軸あたり)
消費電力 $[\text{W}]$	0.3 (3 軸合計)
システムの重量 $[\text{g}]$	450 (1 軸あたり)

表 2. 設計目標 (CubeSat)

発生磁気モーメント $[\text{Am}^2]$	0.15 (1 軸あたり)
消費電力 $[\text{W}]$	0.3 (3 軸合計)
システムの重量 $[\text{g}]$	20 (1 軸あたり)

2. 原理¹⁾

磁気トルカの構造は、高透磁率材料にコイルを

* 北海道工業大学大学院応用電子工学専攻
** 北海道工業大学電気電子工学科
*** 北海道大学大学院複合情報学専攻

† 宇宙空間産業研究会

装着する、単純な有芯ソレノイドである。コイルに電流を流し、それによって発生した磁場と、地球磁場との干渉による磁気トルクを利用し、衛星の姿勢制御、モーメントホイール・リアクションホイール等の蓄積角運動量のアンローディングを行う。磁気トルカが発生する磁気モーメントを $M[\text{Am}^2]$ 、地球の磁束密度を $B_0[\text{T}]$ とすると、磁気トルカに働くトルクは次の式で表される。

$$T = M \times B_0 [\text{Nm}] \quad (1)$$

また、衛星が投入された高度において、地球が持つ磁束密度が既知であるとする、外乱の大きさを見積もることで、必要となる磁気モーメントを求めることができる。北海道衛星の軌道は、高度 567[km] の極軌道であり、磁束密度は平均値で $250[\mu\text{T}]$ である。軌道周回中に衛星に加えられる外乱の要因として、重力傾斜トルク、太陽輻射圧トルク、大気抵抗などがあるが、高度 567[km] での主要外乱トルクは地磁気によるものであり、約 $1.2 \times 10^{-5}[\text{Nm}]$ と見積もられる⁴⁾。これより、制御のために必要となる磁気モーメントを最大 $6[\text{Am}^2]$ とした。

また、磁気トルカが発生する磁気モーメントは次の式で与えられる。

$$M = B \cdot \frac{m}{\rho} \cdot \frac{1}{\mu_0} [\text{Am}^2] \quad (2)$$

$B[\text{T}]$: コイルの作る磁束

$m[\text{kg}]$: コアの質量

$\rho[\text{kg/m}^3]$: コアの密度

μ_{eff} : コアの実効比透磁率

$\mu_0[\text{H/m}]$: 真空の透磁率

また、式(2)は、 m/ρ がコアの体積をあらわすため、コアの体積を V であらわすこととすると、次のように書き換えることができる。

$$M = B \cdot V \cdot \frac{1}{\mu_0} [\text{Am}^2] \quad (2')$$

3. 磁気トルカの設計

原理に述べた関係諸式を使用して、実際に要求値からの設計を行う。磁気トルカは次の図1のようなシステム構成である。出力の制御は、PWM（パルス幅変調）により行なう。

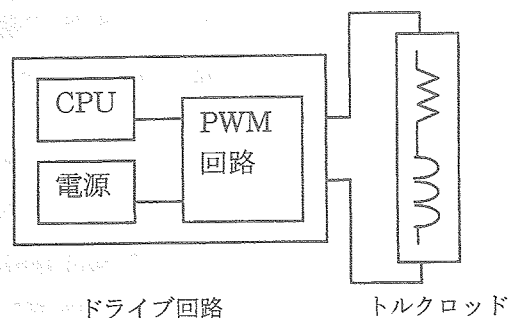


図1. 磁気トルカシステム構成

式(2)において、磁束密度 B は、磁気トルカが十分な長さを持ったコイルであることから、次のように表すことができる。

$$B = \mu_0 \mu_{\text{eff}} \cdot n \cdot I \cdot L_{\text{core}}^{-1} [\text{T}] \quad (3)$$

n : コイルの巻き数

$I[\text{A}]$: 磁場の発生に必要な電流

$L_{\text{core}}[\text{m}]$: コアの長さ

ここで、 n/L_{core} は、単位長さ当たりの巻き数である。コイルを一樣にコアに巻きつけていくとすると、巻き数 n は次の式で表される。

$$n = \frac{L_{\text{core}}}{D_{\text{coil}}} \quad (4)$$

$D_{\text{coil}}[\text{m}]$: コイルに使用するワイヤの径

また、実効比透磁率 μ_{eff} は、コアの形状に依存する磁気的特性量である。実効比透磁率の変化には、コアの長さとの比、すなわち L/D が重要であり、 L/D を p 、コアの初期比透磁率を μ_a とすると、実効比透磁率は次の式で与えられる。

$$\mu_{\text{eff}} = \left(\frac{1}{\mu_a} + \frac{\ln(p)-1}{p^2} \right)^{-1} \quad (5)$$

すなわち、式(2)、式(3)で示したように、磁気トルカが発生する磁気モーメントの大きさは、コアの実効比透磁率に比例するため、コアの形状は、太く短いより、細く長い方が性能を上げるためには有利であることがわかる。図2は、 L/D 比の変化による、実効比透磁率の推移を表したグラフである。実効比透磁率の変化は、コアの径、長さではなく、常にそれらの比に依存する¹⁰⁾。 L 、 D は以下 L_{core} 、 D_{core} と表記する。

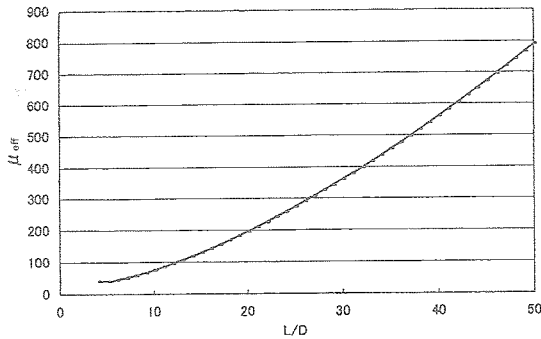


図 2. L/D の変化による実効比透磁率の変化

設計値として、コアの径を固定し、コアの長さを設計自由度として、式(4)の関係を利用し、式(3)および式(2)' を変形すると、磁気トルカの発生する磁気モーメントは、コアの長さの関数として解くことができる。すなわち、式(2)'、(3)、(4)をまとめ、磁気モーメントについて、次の式を得る。

$$M = \mu_{\text{eff}} \cdot \frac{L_{\text{core}}}{D_{\text{coil}}} \cdot I \cdot V \text{ [Am}^2\text{]} \quad (6)$$

ここで、コアの断面積を $S[\text{m}^2]$ とすると、コアの体積は $V = S \cdot L_{\text{core}}$ で表すことができ、式(5)の関係を考慮し、式(6)は次のようになる。

$$M = \mu_{\text{eff}} \cdot n \cdot I \cdot S \text{ [Am}^2\text{]} \quad (7)$$

式(7)の右辺は、電流以外は形状に関する項であるため、コアの寸法と、要求磁気モーメントを決定することができれば、磁気モーメント発生に必要な電流を見積もることができる。即ち、式(7)を電流についてまとめて、次の式を得る。

$$I = \frac{M}{n \cdot \mu_{\text{eff}} \cdot S} \text{ [A]} \quad (8)$$

また、コアの径、コイルの巻き数とコアの長さを知ることができれば、コイルに使用しているワイヤの長さを求めることができ、同時にコイルの抵抗を求めることができる。ワイヤの長さ L_{coil} 、コイルの抵抗 R は、それぞれ式(9)及び式(10)で求められる。

$$L_{\text{coil}} \approx \pi \cdot D_{\text{core}} \cdot \frac{L_{\text{core}}}{D_{\text{coil}}} \text{ [m]} \quad (9)$$

$$R = \sigma \cdot \frac{L_{\text{coil}}}{A_{\text{coil}}} \text{ [\Omega]} \quad (10)$$

D_{core} : コアの径[m]
 σ : ワイヤの抵抗率[Ω/m]
 A_{coil} : ワイヤの断面積[m^2]

ここで、北海道衛星のサイズを考慮し、磁気トルカの長さを $0.2[\text{m}]$ 、 L/D 比を大きく取るためにコアの径を $0.01[\text{m}]$ と仮定して、設計を進める。設計仕様を表 1 に示す。

表 3. 磁気トルカ設計仕様

コア長[m]	0.2
コア径[m]	0.01
ワイヤ径[mm]	0.3
ワイヤ材質	銅
コア材質	45 パーマロイ

よって、表 1 の値を式(5)に代入しコイルの巻き数、式(8)から電流、式(9)、(10)からコイルの抵抗をそれぞれ求め、次の値を得る。

$$\begin{aligned} n &= 667 \\ I &= 583.0 \text{ [mA]} \\ R &= 5.55 \text{ [\Omega]} \end{aligned}$$

抵抗は、衛星内の温度を 40°C と仮定し、銅の温度係数を考慮し求めた。また、電流および抵抗から、トルクロッド部分の消費電力 P を見積もると、

$$P = I^2 R = 1.886 \text{ [W]} \quad (11)$$

パーマロイとは、Fe - Ni 合金であり、高い初期比透磁率を持ち、残留磁気、保持力が小さい強磁性材料である。45 は Ni の割合をあらわす。45 パーマロイの初期比透磁率は約 10,000 であり、初期比透磁率の高さでは 78 パーマロイ (150,000) に劣るが、飽和磁束密度が約 $2.2[\text{T}]$ と大きいために (78 パーマロイでは $0.8[\text{T}]$)、磁気飽和が起きにくく、広いレンジで出力の直線性を保つことができるため、磁気トルカのコアとして適している。

磁気トルカは単純なコイルであるため、PWM のような周波数制御を行なう場合、高周波特性を知るために、インダクタンスを規定する必要がある。磁気トルカのインダクタンス L は、式(10)で与えられる^[4]。

$$L = \mu_0 \mu_{\text{eff}} \cdot n^2 \cdot S \cdot L_{\text{core}}^{-1} \text{ [H]} \quad (12)$$

数値を代入しインダクタンスを求めると、

$$L = 6.06 \times 10^{-4} \text{ [H]}$$

この値を基に、周波数増加によるインピーダンス

ス変化の影響を、等価回路のシミュレーションによって見積もる。等価回路を図3に示す。等価回路は、抵抗分とインダクタンス分によって構成され、入力される信号の周波数を1[Hz]から10,000[Hz]まで変化させ、電流に影響が出ないPWM周期の範囲を求めた。結果を図4に示す。

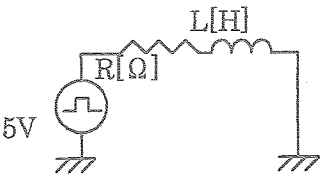


図3. 磁気トルカ等価回路

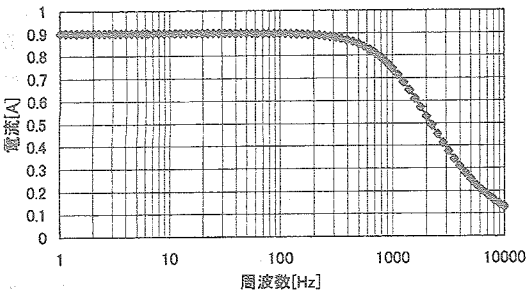


図4. 周波数による電流変化

結果から、200[Hz]付近を境に急激に減衰し始めるため、PWM 周波数をおよそ200[Hz]以下に設定することで、インピーダンス増加の影響を免れることができる。なお解析では電流値に制限を設けていないため、図中の電流値には、単純にオームの法則による値が示されている。

衛星が自身の姿勢情報を得るために、北海道衛星では、磁気センサを使用する。その際、磁気トルカによる、センサへの干渉が問題となる。そのため、コイルの時定数と、磁気トルカの出力がセンサの閾値を下回る距離（保安距離）を知ることが必要となる。保安距離の見積もりについては、次の磁場解析の章で行う。

コイルが持つ時定数は次の式で定義される。

$$\tau = \frac{L}{R} \text{ [s]} \tag{13}$$

抵抗、インダクタンスの値を代入して、次の値を得る。

$$\tau = 109 \text{ [}\mu\text{s]}$$

よって、磁気トルカへの電流の供給を絶ってから、最低109[μs]程度は、磁気センサを使用することができない。

4. 磁気トルカ周辺の磁場解析

有限要素解析シミュレーションを使用し、磁場の解析を行った。解析は簡単のため、下図の様な1/4モデルを使用した。

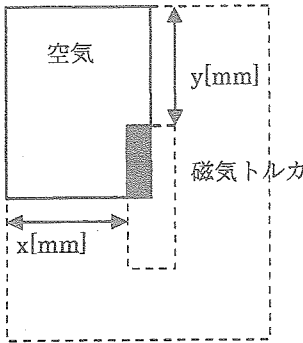


図5. 解析モデル

解析条件を以下の表にまとめる。縦方向に1/2のモデルであるため、電流密度は半分の値とする。

表4. 解析条件

N・I[AT]	388.861
通電面断面積[m ²]	6.0×10 ⁻⁵
電流密度[AT/m ²]	77,816.67
比透磁率	10,000

ここで、N・I[Ampere Turn]は電流と巻き数の積である。電流密度は、通電面断面積当たりでの、N・Iである。解析結果を図6、図7に示す。

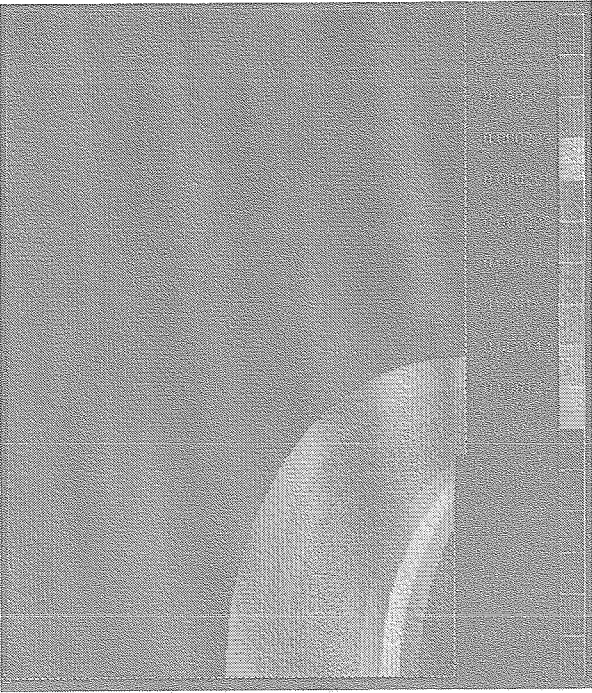


図6. 北海道衛星用磁気トルカの磁場[A/m]

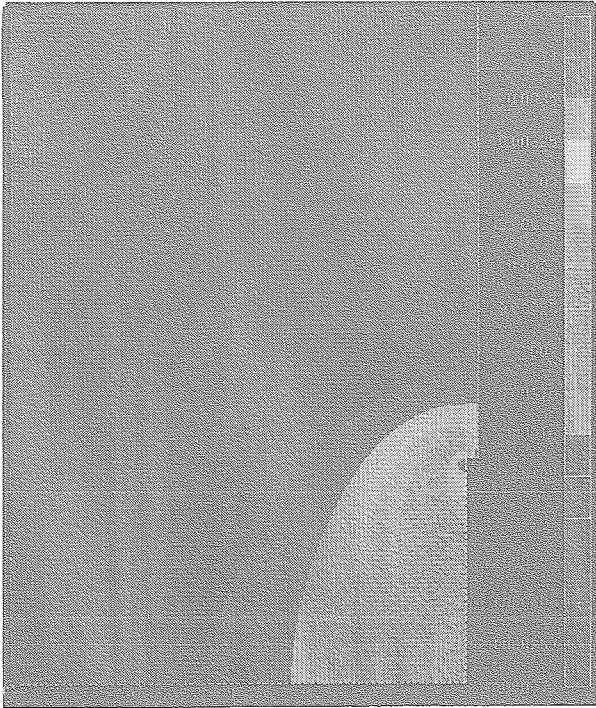


図 7. 北海道衛星用磁気トルカの磁束密度[T]

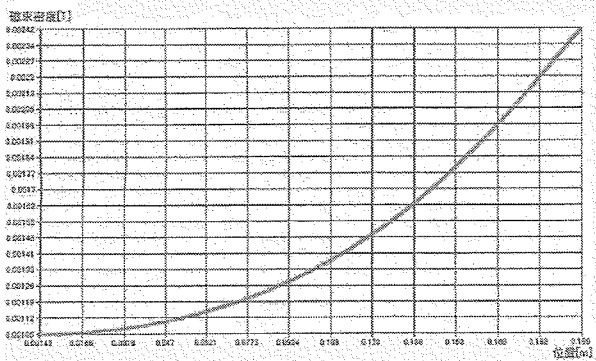


図 8. 磁気トルカ周辺の磁束密度と距離

北海道衛星で使用するセンサの観測下限値は、400[nT]である。この値を基に、磁束密度 - 距離のグラフを作成し、垂直方向の保安距離を見積もる。グラフを図 8 に示す。

グラフから、磁気トルカから 20[cm]程度はなれた空間でも 1000[nT]以上の磁束密度に曝されてしまうため、磁気トルカ動作時には、磁気センサを作動させることが不可能であるとの結論を得た。

5. CubeSat 用磁気トルカの設計

北海道衛星用磁気トルカの設計方法を適用し、CubeSat 用磁気トルカの緒元を見積もる。CubeSat は一辺が 10[cm]と、北海道衛星に比べて非常に小型であるため、表 2 に示したように、必要磁気モーメントは 0.15[Am²]である。コア部分の大きさは、φ3

×50[mm]として、設計を進める。表 5 に設計仕様を示す。

表 5. 磁気トルカ設計仕様

コア長[m]	0.05
コア径[m]	0.003
ワイヤ径[mm]	0.3
ワイヤ材質	銅
コア材質	45 パーマロイ

CubeSat 用は、極小型であるため、巻き数および抵抗を稼ぐために、コイルは 2 段巻きとする。この点を考慮し、式(8)、(9)、(10)を使用して巻き数、ワイヤ長、電流、抵抗をそれぞれ求める。

$$n = 317$$

$$L_{coil} = 2.987 [m]$$

$$I = 444.0 [mA]$$

$$R = 0.667 [\Omega]$$

式(11)から、消費電力は次の値を得る。

$$P = 131.3 [mW]$$

式(12)から、インダクタンスは次の値を得る。

$$L = 2.70 \times 10^{-9} [H]$$

また、式(13)より時定数は、 $\tau = 4 [ns]$ となる。

図 9 に試作した CubeSat 用磁気トルカを示す。図上から、ケース、コイル、コアである。

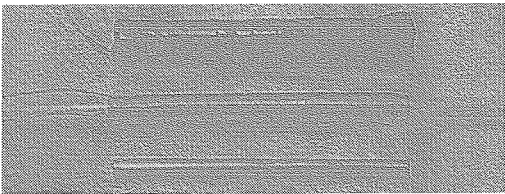


図 9. CubeSat 用試作磁気トルカ

次に、等価回路を使用し、使用可能な PWM 周波数の範囲を求める。試作したトルカでは、接触抵抗などのため、抵抗値は 1.7[Ω]であった。解析には、この値を使用した。結果を図 9 に示す。

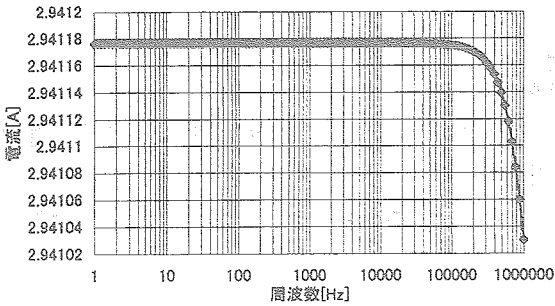


図 10. 周波数による電流変化

結果より、北海道衛星用よりも高い、約 100[kHz] 辺りから電流の減衰が大きくなる傾向が明らかとなった。よって、インピーダンスの変化の影響は、現実にはほぼないものと考えられる。

北海道衛星用の場合と同様に、磁場解析を行い、保安距離の見積もりを行う。解析条件を表 6 に、結果を図 1 1、1 2 に示す。

表 6．磁場解析条件

N・I [AT]	140.748
通電面断面積 [m ²]	3×10 ⁻⁵
電流密度[AT/m ²]	4,691,600
コア比透磁率	150.87

北海道衛星と同じ磁気センサを使用すると、保安距離は 10[cm] を大きく超えてしまうため(図 1 0)、やはり磁気トルカとの併用は避けるべきである。

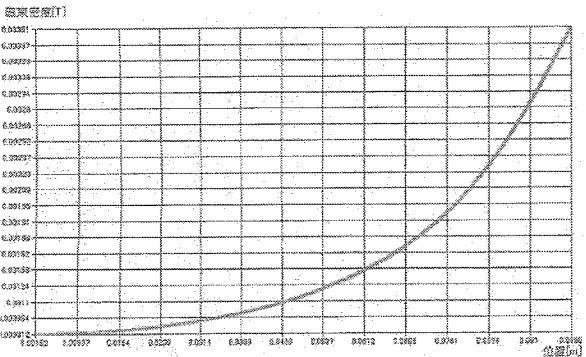


図 1 0．磁気トルカ周辺の磁束密度と距離

6．結論

今回の研究で、北海道衛星および CubeSat 用磁気トルカについてパラメータ依存性を調べ、表 7 の設計仕様を得ることができた。消費電力が設計目標を大きく上回ったため、今後さらに検討を進める必要がある。

表 7．設計仕様値

	北海道衛星	CubeSat
コイル巻き数	667	317
入力電流[mA]	583	444
抵抗[Ω]	5.55	0.667
消費電力[W]	1.886	0.132
インダクタンス[H]	6.06×10 ⁻⁴	2.70×10 ⁻⁹
時定数[s]	109×10 ⁻⁶	4×10 ⁻⁹
トルクロッド重量[g]	143	5.57

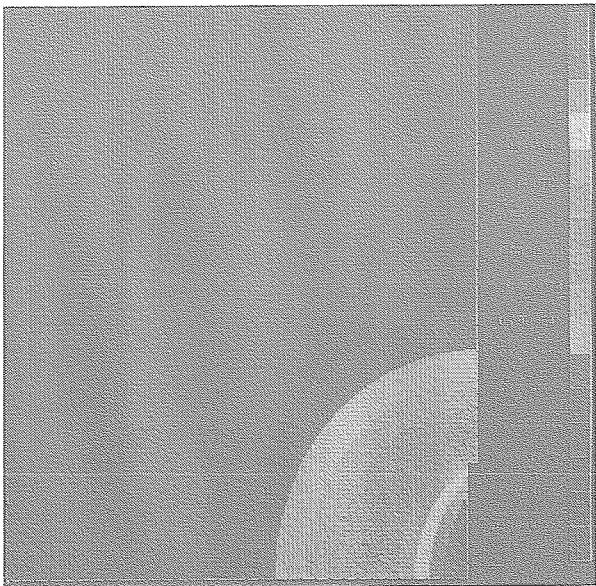


図 1 1．CubeSat 用磁気トルカの磁場[A/m]

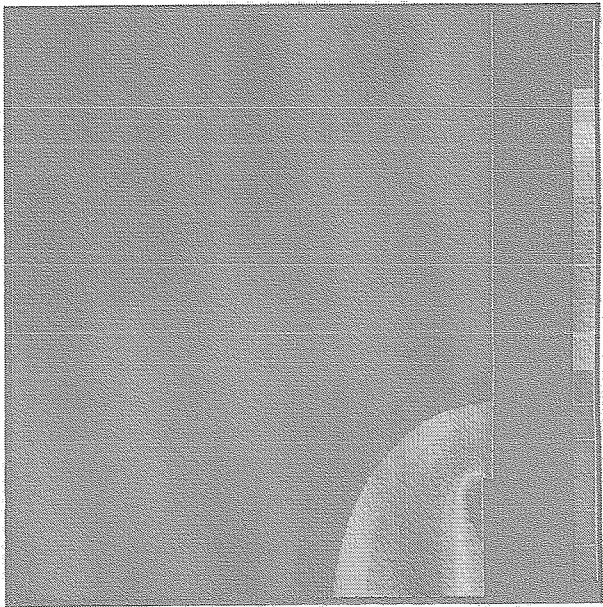


図 1 2．CubeSat 用磁気トルカの磁束密度[T]

参考文献

[1] 古濱洋治等、「NASDA 技術ハンドブック 人工衛星姿勢制御系コンポーネント解説書」、宇宙開発事業団、2003、3.3-1 - 3.3-8

[2] 「北海道衛星設計資料」、2004

[3] 伊藤康正、「姿勢制御系設計資料」、2003

[4] 阿部龍蔵、「電磁気学入門」サイエンス社、1998、148-149