



ISSN 1349-1113
JAXA-RR-05-003

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

スペースプラズマチェンバーの磁場制御システムの構築

下山 学・小林紘子・岡部選司・小山孝一郎

2005年 10月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

スペースプラズマチェンバーの磁場制御システムの構築

下山 学¹・小林 絃子²・岡部 選司³・小山 孝一郎³

A system to control magnetic field in the Space Plasma Simulation Chamber

Manabu SHIMOYAMA¹, Hiroko KOBAYASHI², Yoriiji OKABE³, Koh-ichiro OYAMA³

Abstract : Computer program to set magnetic field in the Space Plasma Simulation Chamber at any value and at any direction has been developed. By using three pairs of Helmholtz coils which are installed outside of the Space Plasma Simulation Chamber, magnetic field is controlled with the uncertainty of 1000 nT in the magnitude range of 60000 nT, in the volume of 1m³. The maximum controlable change rate of the magnetic field is 10 Hz. The system which has been developed enables us to simulate the flight situation in the sounding rocket as well as satellite to study the behavior of photoemission from the satellite with the help of solar EUV and to study the basic phenomena associated with plasma probe.

Keywords: 磁場制御, スペースプラズマチェンバー, ヘルムホルツコイル

概 要

宇宙空間における磁場環境の模擬を目的として、スペースプラズマチェンバー内の磁場制御システムの構築を行い、その制御精度を検証した。磁場の生成にはスペースチェンバー周囲に設置された3軸のヘルムホルツコイルを用いており、任意の方向に、大きさ0～60000 nT程度の磁場を生成可能である。生成される磁場の精度は、スペースチェンバー中心1 m³において誤差±1000 nT程度となっている。また、磁場の制御速度は最大約10 Hzである。本システムにより、観測ロケットや衛星の飛翔環境を再現し、飛翔体から放出される光電子の振る舞いの研究やプラズマプローブなどの測定器の較正試験などを行うことが可能となる。

¹ 東京大学

² 東京理科大学

³ 宇宙航空研究開発機構

1. はじめに

1.1. 宇宙環境のシミュレーション

宇宙の利用や研究が盛んに行われるようになった昨今、宇宙環境を模擬可能なスペースチェンバーの果たす役割はますます大きなものとなってきている。例えば、飛翔体搭載用観測機器の較正実験や、宇宙空間で生じる物理過程を模擬するための室内シミュレーション実験などが主な利用目的として挙げられる。このような宇宙環境の模擬には、宇宙プラズマ環境、惑星大気環境、太陽輻射環境、飛翔体環境、磁場環境など、複数の環境の模擬が必要とされることが多いが、この要求を満たすことの出来る設備は全国でも数少ない。

そこで本研究では、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部に設置されている大型スペースプラズマチェンバー内部の磁場制御システムの構築を行った。このスペースチェンバーには既に、宇宙プラズマ環境模擬のためのプラズマ発生装置、惑星大気環境模擬のためのガス導入系、太陽輻射環境模擬のための真空紫外線（VUV）発生装置などが備えられているため、磁場環境の構築により、さらに幅広い宇宙環境の模擬が可能となる。

1.2. スペースプラズマチェンバー

スペースプラズマチェンバーは直径2.5 m、全長5 mの円筒型真空槽で、非磁性ステンレス鋼で製作されており、ロータリーポンプ、ターボポンプ、クライオポンプを用いることで 10^{-6} Pa程度の超高真空状態を達成することが可能となっている。スペースチェンバーには後方拡散型プラズマ発生装置が取り付けられており、 10^{-2} Pa程度の背景圧力で $10^3 \sim 10^5$ els/ccの電子密度、約300～2000 Kの電子温度を持つ電離圏プラズマを生成可能である。また、真空紫外線発生装置により太陽輻射環境を再現することが出来る。さらにスペースチェンバー内部に設置された3軸可動ステージにより、ステージに取り付けられた機器を真空中において任意の場所へ移動させることも可能となっている。図1にスペースチェンバーの概観図を、図2に模式図を示した。



図1 スペースプラズマチェンバー概観図

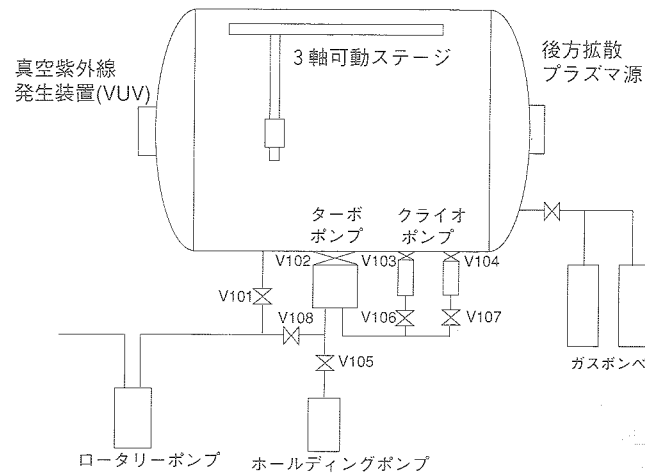


図2 スペースプラズマチェンバー模式図

2. 磁場制御システムの概要

2.1. 構成

スペースチェンバー内部の磁場制御は、周囲に設置された3軸のヘルムホルツコイルに電流を流すことにより行われる。本システムの制御は全てコンピューターで行われており、磁場ベクトルの値がコンピューターにセットされると磁場の生成に必要なヘルムホルツコイル電流値が計算され、GPIBを通してヘルムホルツコイル電源が制御される。制御速度は最大で約10 Hzである。また、磁力計からの出力はAD変換後にコンピューターに取り込まれる。磁場制御システムの構成を図3に示した。各機器の詳細については、次節以降で述べる。

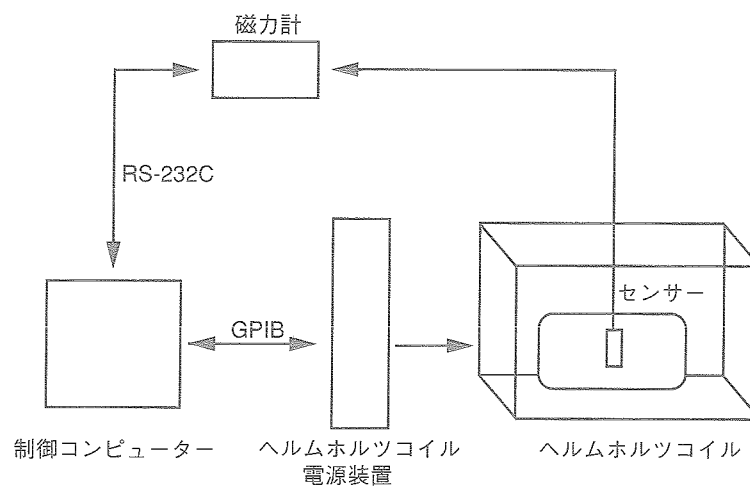


図3 磁場制御システムの構成

2.2. ヘルムホルツコイル

スペースチェンバーの周囲にはX軸方向に1組、Y軸方向に1組、Z軸方向に2組のアルミニウム製ヘルムホルツコイルが設置されており、スペースチェンバー内部の広い空間で均一な磁場を生成させることが出来るようになっている。図4にその模式図および座標軸の定義を示す。この座標軸を基準にとると、地球磁場のX、Y、Z成分はそれぞれ、 -30000 、 -13000 、 -21000 nT程度である。表1にヘルムホルツコイルの詳細な仕様を示す。

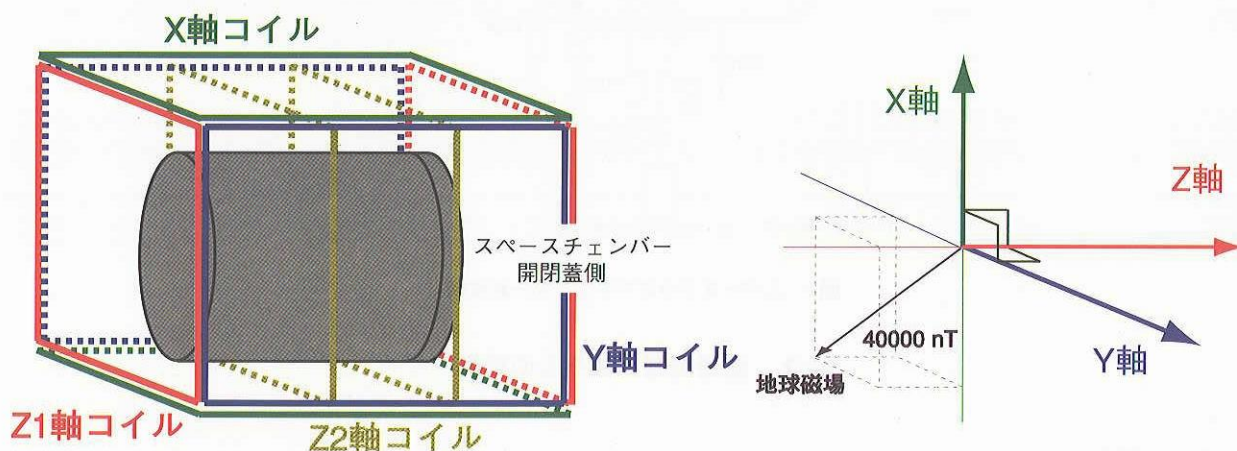


図4 ヘルムホルツコイルの模式図および座標軸の定義

表1 ヘルムホルツコイルの仕様

項目	X 軸	Y 軸	Z1 軸	Z2 軸
個数	2	2	2	2
巻数	5(×2)	5(×2)	8(×2)	3(×2)
1辺の長さ [mm]	5500	5740	5825	5620
間隔 [mm]	2995	3125	5855	1446
直流抵抗 [mΩ] (20℃)	23 (×2)	24 (×2)	39 (×2)	14 (×2)

本ヘルムホルツコイルが作り出すことの出来る磁場の均一度を見積もるために、数値シミュレーションを行った。図5はその一例で、スペースチェンバー中心にゼロ磁場を生成させた場合の磁場の空間分布である。図は上段から、スペースチェンバー中心を通るYX平面、YZ平面、XZ平面で、左列から磁場のX成分、Y成分、Z成分を表している。また原点はスペースチェンバー中心で、赤枠で囲まれた領域がスペースチェンバー内部に、黒枠で囲まれた領域はスペースチェンバー中心 1 m^3 に対応している。これによると、磁場の均一度は、スペースチェンバー内のほぼすべての領域で 5000 nT 程度、また中心の 1 m^3 では 2000 nT 程度であり、それぞれ地球磁場の 12% 、 5% 程度に相当することが分かる。

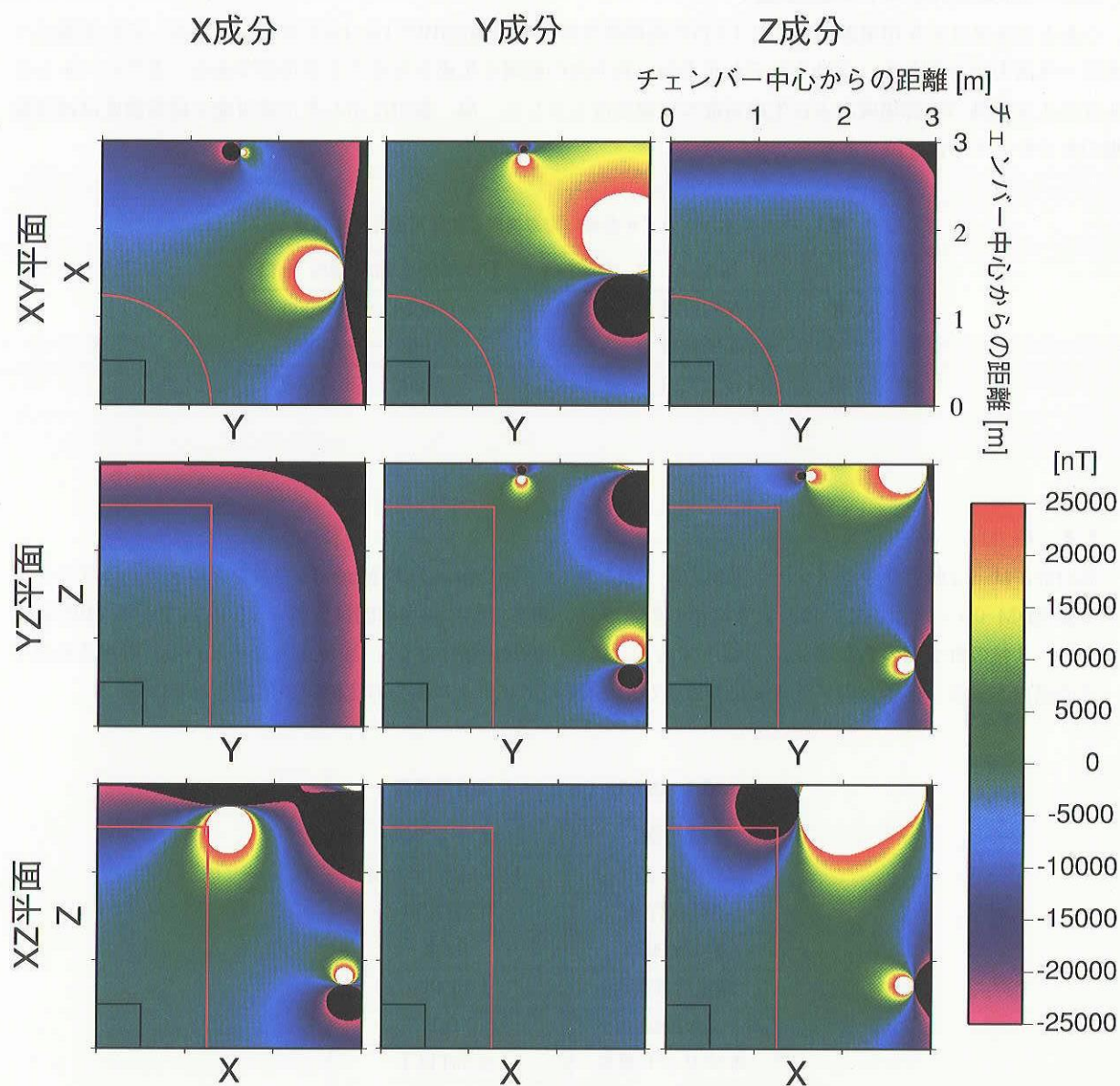


図5 ヘルムホルツコイルにより生成される磁場の空間分布 (数値シミュレーション)。スペースチェンバー中心にゼロ磁場を生成させた場合。上段からスペースチェンバー中心を通るYX面, YZ面, XZ面を表しており、各段とも左から磁場のX, Y, Z成分を表している。また、図中の赤枠はスペースチェンバー内部に、黒枠は中心1 m³に対応している。

2.3. ヘルムホルツコイル電源装置

ヘルムホルツコイル用電源には、計 12 台の高砂製作所製電源装置BWS18-15を使用している。この電源はバイポーラ出力であるため、各軸それぞれ正方向、負方向の磁場を生成させることが可能である。表 2 にヘルムホルツコイル各軸の電源構成および生成可能な磁場強度を示した。尚、表中に示した生成可能な磁場強度は地球磁場のオフセットを含む値である。

表2 ヘルムホルツコイル各軸の電源構成と生成可能な磁場強度

	構成	電流[A]	生成可能な磁場強度 [nT]
X 軸	5台並列接続	± 70	−134000 ~ +74000
Y 軸	4台並列接続	±55	−91000 ~ +65000
Z 軸	3台並列接続	±45	−128000 ~ +86000

2.4. 磁力計

磁力計には、3 軸フラックスゲート型磁力計（センサー：Bartington社製 Mag-03，コントローラー：テラテクニカ製 ADM-03）を用いている。表 3 に示したように、測定可能な磁場範囲は各軸 −70000 nT ~ +70000 nT であり、3 軸の直交度の誤差は 0.5° 以下である。また、絶対値精度は 0.5 % 以上となっている。計測されたデータの出力方式は、各軸毎のアナログ出力および約 2 Hz のデジタル出力の 2 種類が用意されている。

表3 磁力計（センサー）の仕様詳細

成分数	3チャンネル
大きさ	32×32×157mm
3軸直行度	0.5度以内
絶対値精度	0.5 %
測定可能範囲	±70000nT
分解能	1nT
オフセット誤差	±5nT以下
直線性誤差	0.0015%

3. 磁場制御システムの構築と検証

3.1. 日常的な磁場変動

磁場制御システムを構築する準備として、スペースチェンバー付近の日常的な磁場変動について調べた。図 6 はある時期の 10 日間にわたるスペースチェンバー付近の磁場変動である。1 時間程度以下の短周期変動は、Y 方向、Z 方向に比べ X 方向で大きく 40 nT 程度である。また長時間継続する変動成分は最大で 600 nT 程度であり、土曜日、日曜日及び夜間は比較的小さいことから、この変動をもたらす主要な要因はスペースチェンバー周辺の実験装置の動作であると推測される。

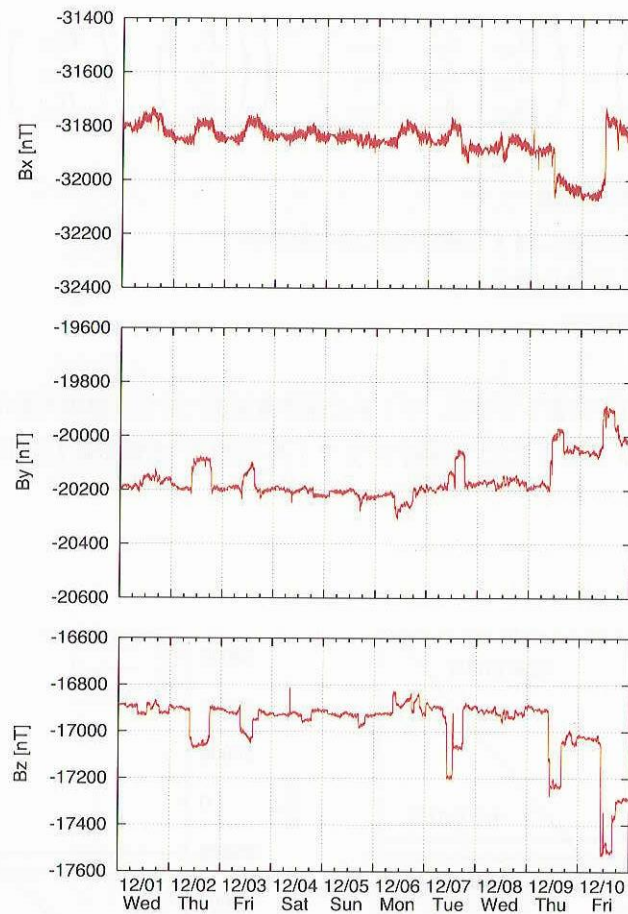


図6 日常的な磁場変動

3. 2. ヘルムホルツコイルの電流値と生成される磁場の関係

スペースチェンバー内部にある指定した大きさの磁場を生成させるためには、その磁場の生成に必要なヘルムホルツコイルの電流値を算出する必要がある。まずこの準備として、ヘルムホルツコイルの電流値とスペースチェンバー中心に生成される磁場の関係について調べた。図7～図9はそれぞれ、X軸、Y軸、Z軸コイルに流した電流値とスペースチェンバー中心に生成された磁場の関係を表している。図中の赤線、緑線、青線は磁場のX成分、Y成分、Z成分に対応している。またグラフ中に記入された数字は、各線への最小2乗フィッティングにより算出された電流値に対する磁場の変化率である。この結果から、コイル電流値の変化に伴い、すべての磁場成分がほぼ線形に変化していること、電流を流したコイルの軸方向以外の磁場成分も変化していることが確認できる。後者の変化の原因としては、コイルと磁力計の軸の不一致、コイル形状の歪み、磁力計の3軸の非直交性などが考えられる。

上で得られた関係を用いると、ヘルムホルツコイル電流値と生成される磁場の関係は次式のように表すことが出来る。

$$\begin{pmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{xx} & A_{yx} & A_{zx} \\ A_{xy} & A_{yy} & A_{zy} \\ A_{xz} & A_{yz} & A_{zz} \end{pmatrix}^{-1} \left(\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} B_{gx} \\ B_{gy} \\ B_{gz} \end{pmatrix} \right) \quad (1)$$

- I_i : i 軸コイルの電流値
 A_{ij} : i 軸コイルの電流に対する磁場の j 成分の変化率
 B_i : 生成させる磁場の i 成分
 B_{gi} : 地球磁場の i 成分

ただし i, j は x, y, z のいずれかを表している. コイルに流す電流値に対する磁場の変化率 A_{ij} と地球磁場 B_{gi} は先の測定で求められているため, 生成させたい磁場 B_i からコイルに流すべき電流値 I_i を求めることが出来る. 表 4 および表 5 に A_{ij}, B_{gi} を示した.

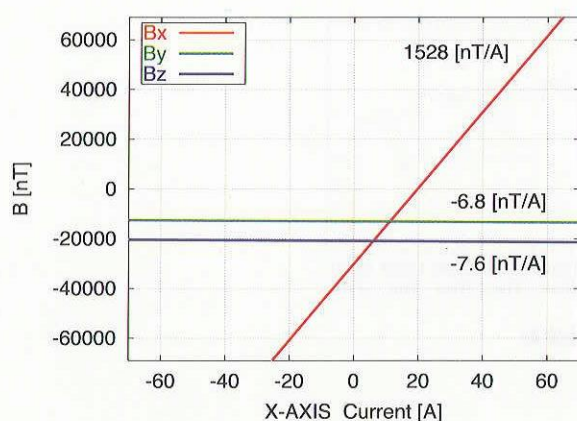


図7 X軸コイルの電流値とスペースチェンバー中心に生成される磁場の関係

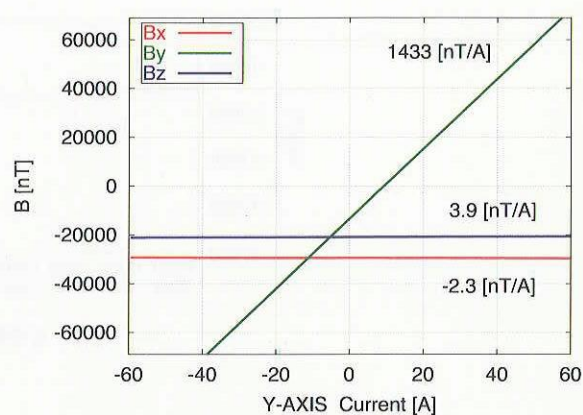


図8 Y軸コイルの電流値とスペースチェンバー中心に生成される磁場の関係

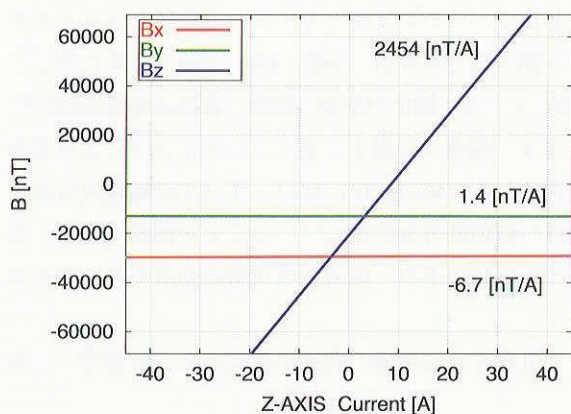


図9 Z軸コイルの電流値とスペースチェンバー中心に生成される磁場の関係

表4 コイル電流値に対する磁場の変化率 A_{ij}

A_{ij} [nT/A]	$j=x$	$j=y$	$j=z$
$i=x$	1528	-6.8	-7.6
$i=y$	-2.3	1433	3.9
$i=z$	-6.7	1.4	2454

表5 地球磁場 B_{gi}

B_x [nT]	B_y [nT]	B_z [nT]
-29598	-13042	-20693

3.3. 磁場生成精度の検証

前節で述べた電流値決定方法を用いて磁場を生成し、設定した磁場ベクトル $B_e=(B_{ex}, B_{ey}, B_{ez})$ と実際に生成された磁場ベクトル $B_m=(B_{mx}, B_{my}, B_{mz})$ の比較を行うことで、磁場生成精度の検証を行った。生成精度の評価に用いた指標は、設定した磁場ベクトルと生成された磁場ベクトルの大きさの差 ($\Delta B=|B_m|-|B_e|$) およびなす角 ($\Delta\theta=\cos^{-1}(B_e \cdot B_m/(|B_m||B_e|))$) の2つである。ここでは、検証結果の代表例として表6に示した4例について示す。

表6 生成精度の検証を行った磁場の方向及び大きさ

ケース	磁場の方向ベクトル	磁場の大きさ $|B_e|$ [nT]
A	(1, 0, 0)	0~70000
B	(0, 1, 0)	0~70000
C	(0, 0, 1)	0~70000
D	(1, 1, 1)	0~70000

まず磁場生成精度の第一の指標である大きさの誤差 ΔB について、図10～図13に示した。左軸は大きさの誤差 ΔB 、右軸は設定した磁場の大きさに対する大きさの誤差の比率を表している。また横軸は磁場ベクトルの大きさ B_e で、磁場ベクトルが方向ベクトルに対し逆方向を向いている場合にはマイナスをつけて表示してある。各グラフの上部の数値は、設定した磁場の方向ベクトルである。これによると、大きさの誤差は磁場の方向にかかわらず最大で400 nT程度であり、相対誤差で見ると10000 nT以上の大きさの磁場を生成させた場合には誤差2%以下となっていることが分かる。 $B_e=0$ nT付近に見られる大きさの誤差 ΔB の急峻なピークは、ゼロ磁場 ($B_e=0$ nT) を設定した場合でも、生成される磁場の大きさ $|B_m|$ は磁場生成精度以下にはならずにある有限の値を持つことに起因している。このピークの高さはゼロ磁場の生成精度に対応し、約400 nTである。

次に後者の角度の誤差 $\Delta\theta$ を図14～図17に示した。横軸は図10～図13と同様、磁場の大きさである。これによると、角度の誤差は10000 nT程度の大きさの磁場を生成させた場合2°程度であり、磁場の大きさが大きくなるにつれて誤差は小さくなる傾向にあることが分かる。

3.4. 3次元空間分布

前節までは、主にスペースチェンバーの中心に生成される磁場について考察を行ってきたが、実際に磁場制御システムを使用する場合には、ある程度の広範囲において均一な磁場が必要とされることが多い。そこで本節では、スペースチェンバー内の磁場の3次元空間分布について述べる。

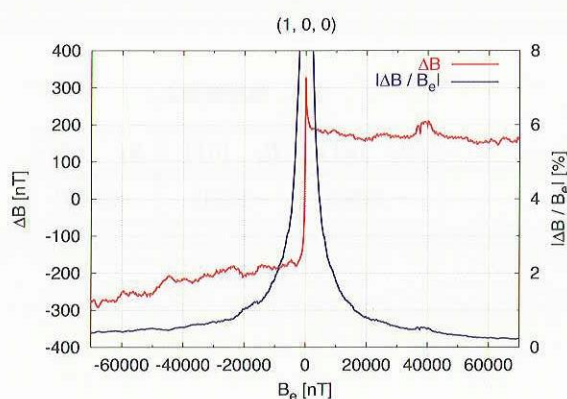


図10 磁場生成精度（大きさの誤差）：ケースA

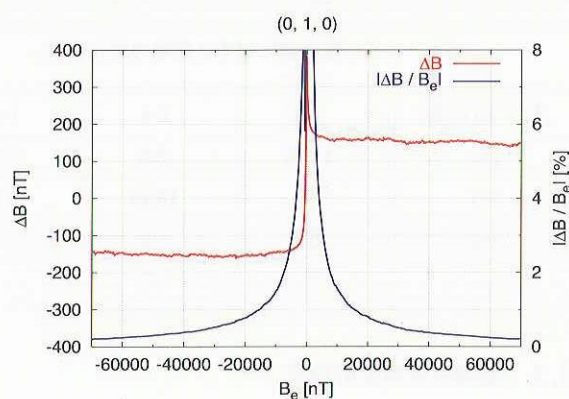


図11 磁場生成精度（大きさの誤差）：ケースB

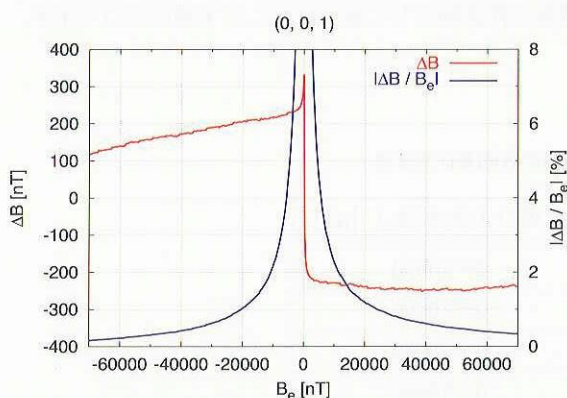


図12 磁場生成精度（大きさの誤差）：ケースC

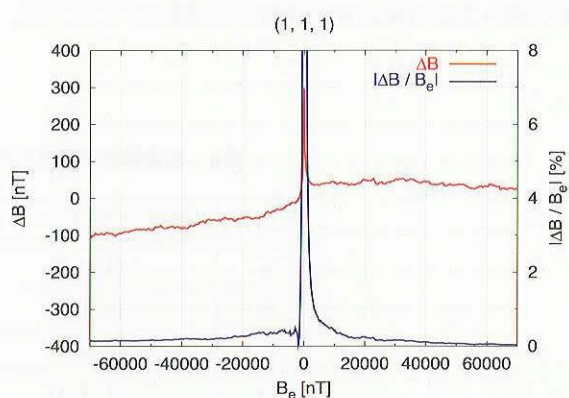


図13 磁場生成精度（大きさの誤差）：ケースD

3次元空間分布測定は、スペースチェンバー内にアルミ製架台（図18）を設置し、架台上で磁力計を移動させて行った。測定の模式図を図19に示す。測定点は、スペースチェンバー中心を基準として、X軸方向に±0, ±10, ±30, ±50 cm, Y軸方向に±0, ±20, ±40, ±60 cm, Z軸方向に±0, ±20, ±40, ±60, ±80, ±100 cmの格子点である。図20にヘルムホルツコイル電流がゼロの場合、図21にゼロ磁場を生成させた場合、図22に磁場の3成分をすべて+60000 nTに設定した場合の空間分布を示す。上段、中段、下段はそれぞれスペースチェンバー中心を通るYZ断面、ZX断面、YX断面であり、各段とも左から磁場のX, Y, Z成分を表している。また図中の四角形はスペースチェンバー中心1 m³の範囲に対応している。尚、灰色のプロットはデータ欠損である。図20から分かるように、スペースチェンバー及びその周辺機器が作り出す磁場の分布に関しては、YZ断面の+Y方向かつ-Z方向における磁場のY成分、及びZX断面の-Z方向かつ-X方向における磁場のZ成分の不均一が顕著である。この不均一を作り出す原因は特定されていないが、共にスペースチェンバーの地下に存在していると考えられ、スペースチェンバー中心に近づくにつれて影響は小さくなっている。スペースチェンバー中心1 m³における磁場の均一度は、ヘルムホルツコイルの電流がゼロの場合には1000 nT程度、ゼロ磁場を生成させた場合には500 nT程度、磁場の各成分すべて+60000 nTの磁場を生成させた場合には1000 nT程度であることが見てとれる。

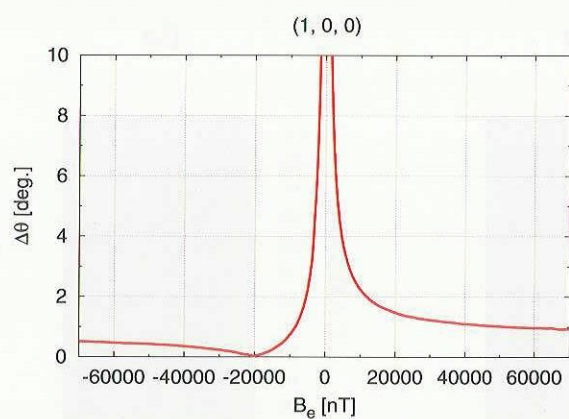


図14 磁場生成精度（角度の誤差）：ケースA

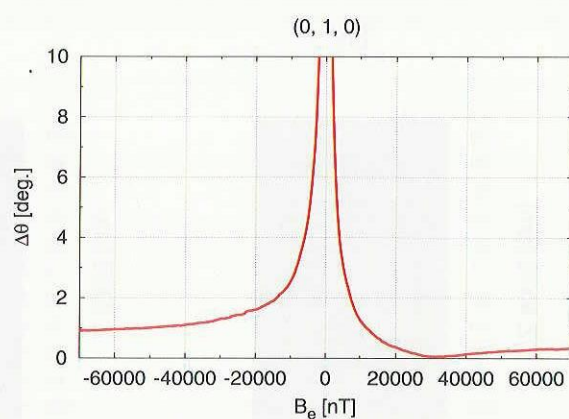


図15 磁場生成精度（角度の誤差）：ケースB

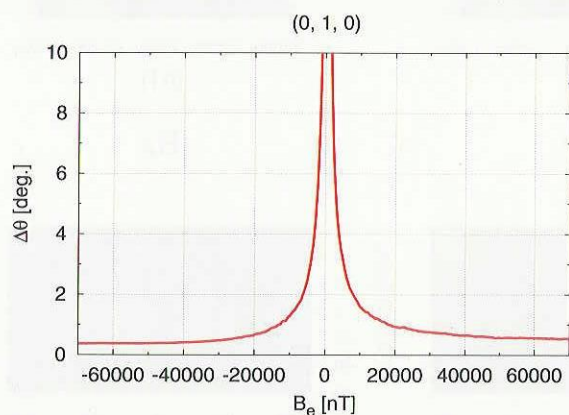


図16 磁場生成精度（角度の誤差）：ケースC

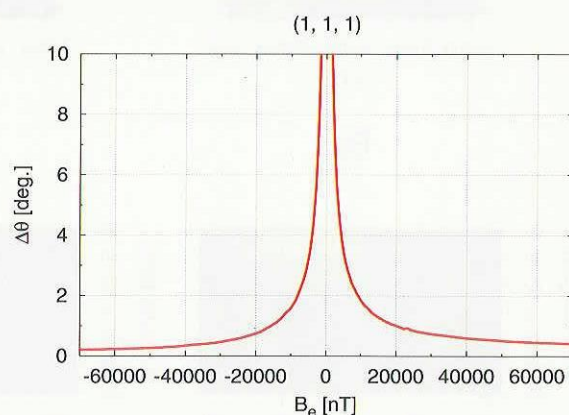


図17 磁場生成精度（角度の誤差）：ケースD

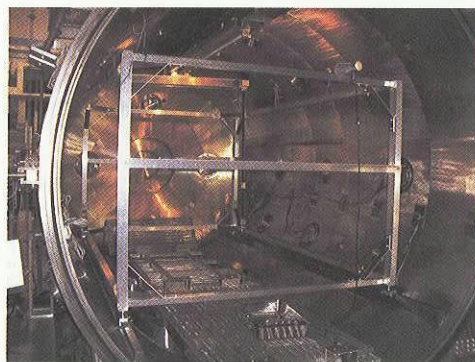
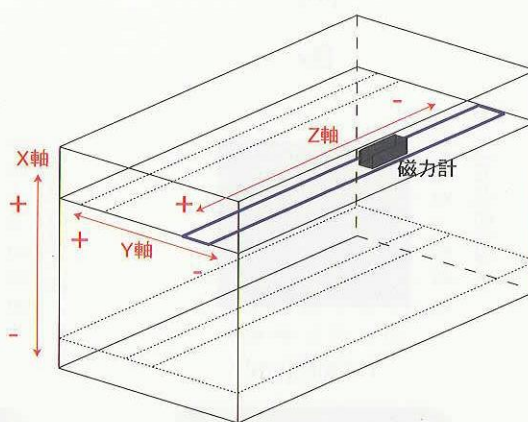
図18 スペースチェンバー内に設置された
磁場の3次元空間分布測定用架台

図19 磁場の3次元空間分布測定の模式図

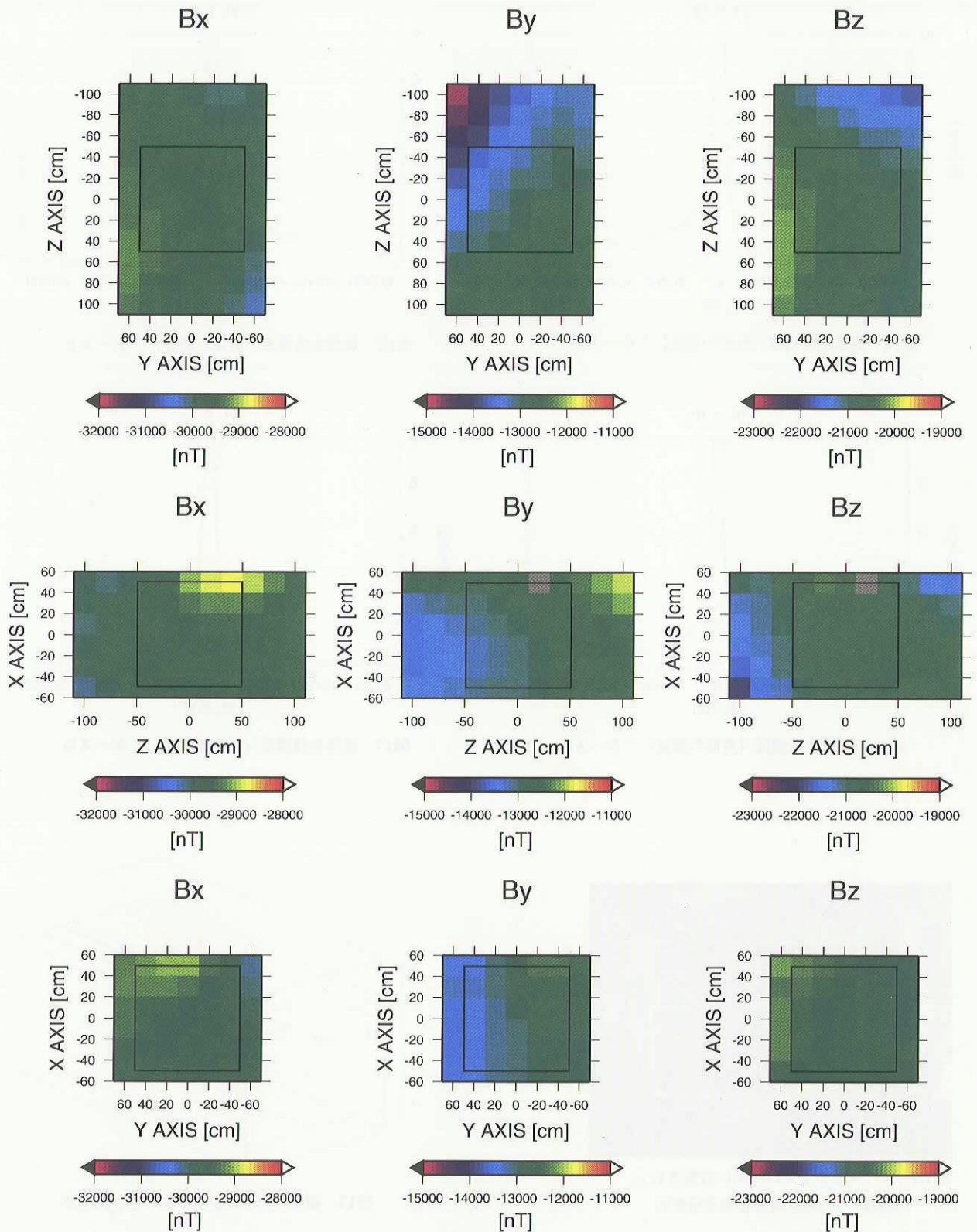


図20 測定された磁場の空間分布。ヘルムホルツコイル電流値 $I = (0, 0, 0)$ A の場合。上段、中段、下段はそれぞれスペースチェンバー中心を通るYZ断面、ZX断面、YX断面であり、各段とも左から磁場のX, Y, Z成分を表している。また図中の黒枠はスペースチェンバー中心 1m^3 の領域に対応している。

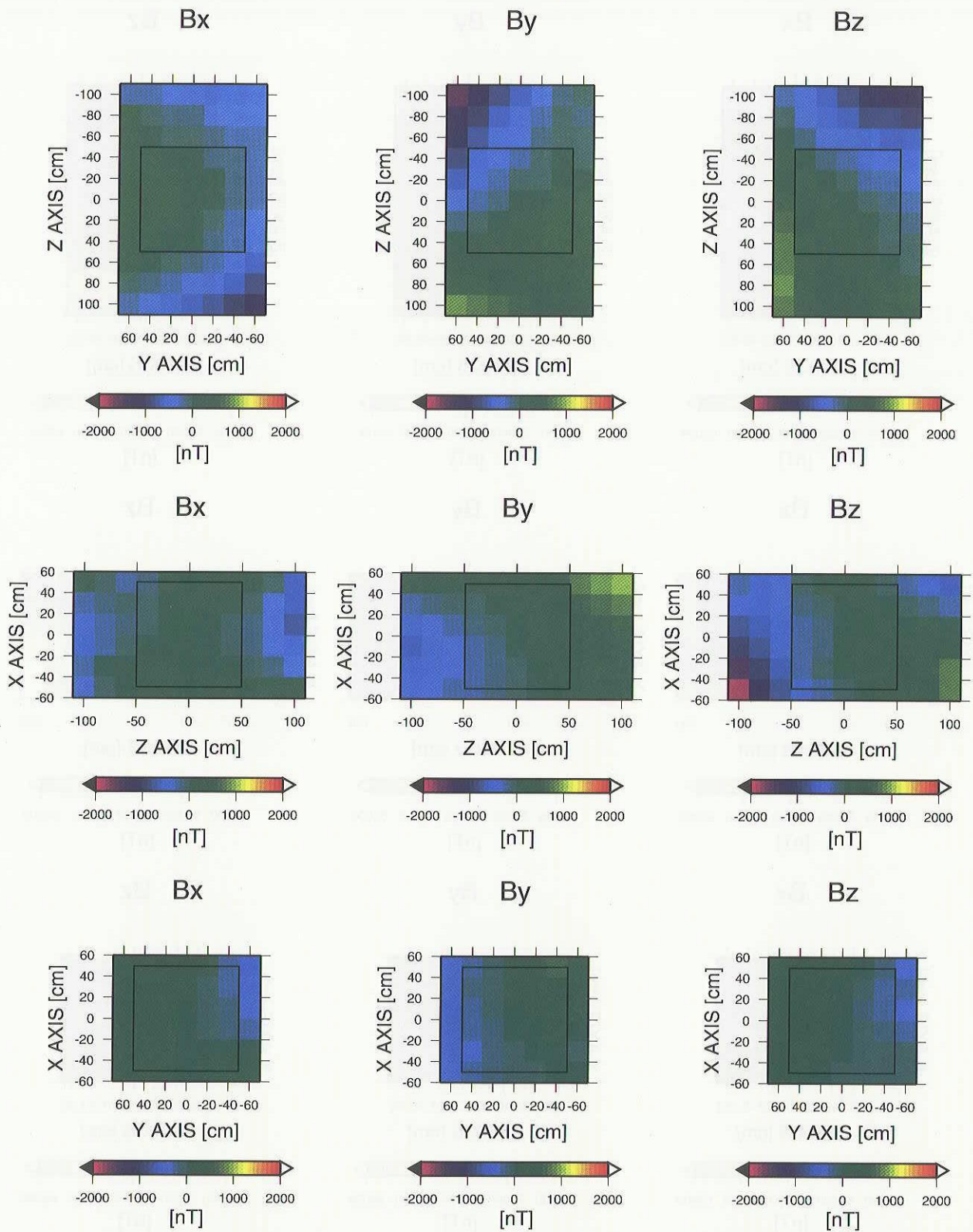


図21 測定された磁場の空間分布. $B_e=(0, 0, 0)$ nT の場合. この時, ヘルムホルツコイル電流値 $I=(19.4, 9.2, 8.5)$ A. 表示形式は 図 20 に同じ.

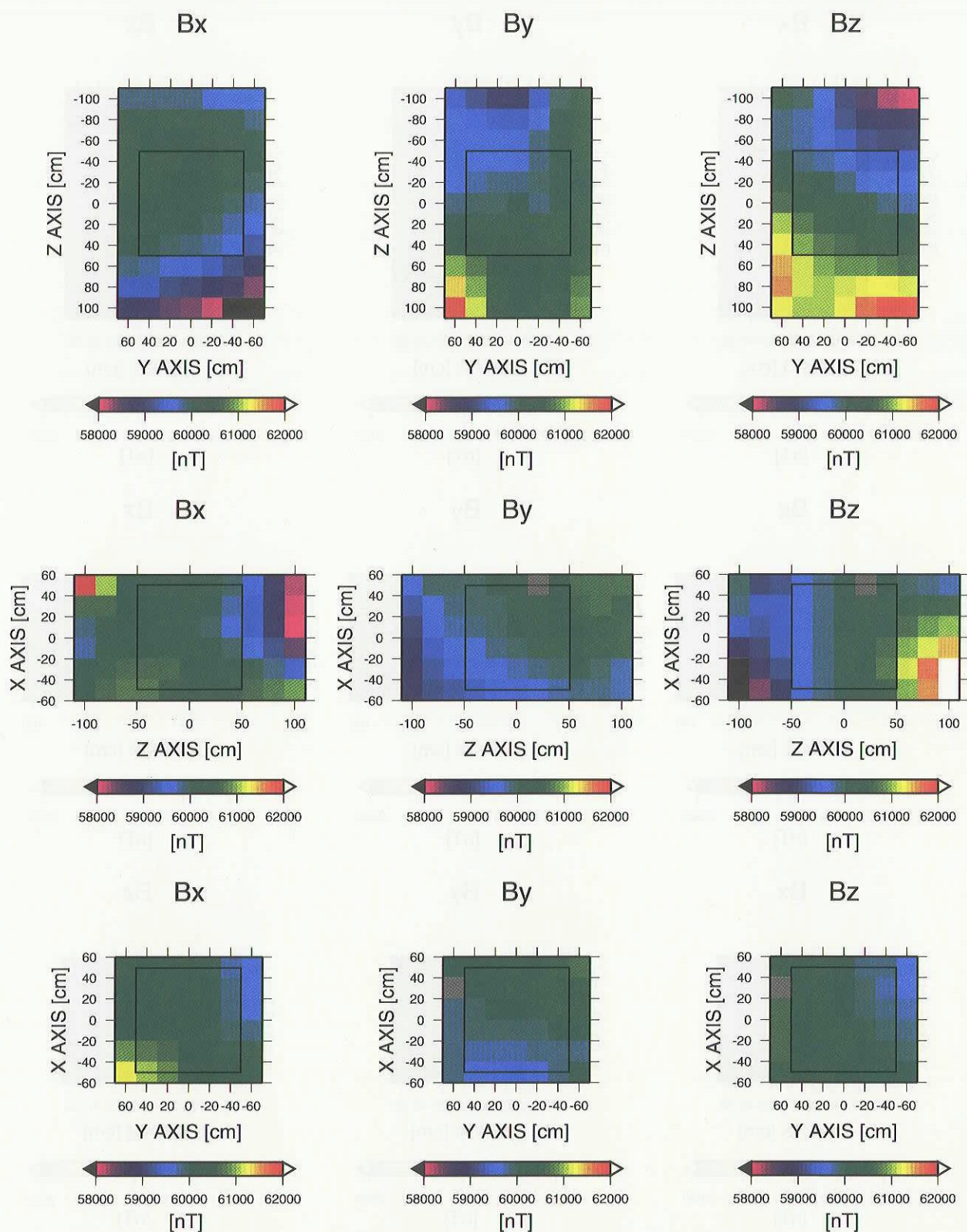


図22 測定された磁場の空間分布。 $B_e = (+60000, +60000, +60000)$ nT の場合。この時、ヘルムホルツコイル電流値 $I = (58.7, 51.2, 33.0)$ A。表示形式は図 20 に同じ。

3.5. スペースチェンバー付属機器が磁場制御に与える影響

本節では、スペースチェンバーの稼働中に使用するとと思われる機器の磁場制御に対する影響について考察する。ここで取り上げる機器は、真空排気装置、後方拡散プラズマ源、3軸可動ステージの3つである。

3.5.1. 真空排気装置

図23に、真空排気装置始動時のスペースチェンバー中心における磁場変化を示した。横軸は測定開始からの時間であり、縦軸は測定開始時を基準とした磁場各成分の変化である。また、グラフ上部の矢印および数字は、ポンプおよびバルブの動作時刻を示している。各時刻に動作した機器については表7に示した。尚、表中のVはバルブを意味している。真空排気装置の作動に伴う変動では、クライオポンプ作動時（4530 sec）の変動が最も大きく、磁場のZ成分が+60 nT程度変化していることが見てとれる。しかしながら、この変動は3.1節で示した日常的な磁場変動に比べ十分小さいため、真空排気装置が磁場制御に与える影響は無視することが出来る。

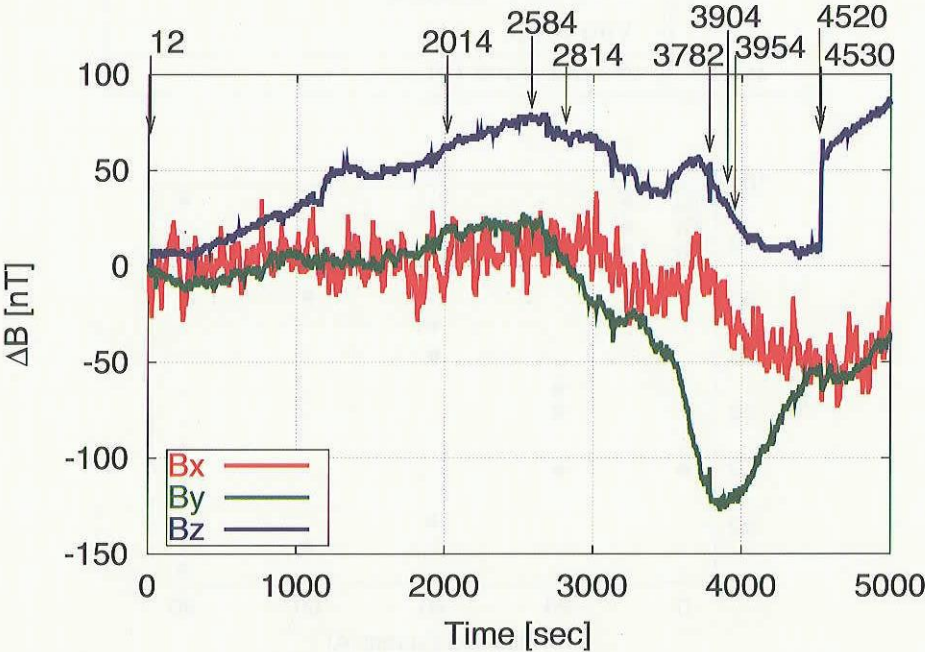


図23 真空排気装置始動時の磁場変化

3.5.2. 後方拡散プラズマ源

スペースチェンバーには宇宙プラズマ環境を模擬するための後方拡散プラズマ源が取り付けられており、プラズマ生成時にはフィラメントに60 A程度の大電流が流れる。図24は、フィラメントの電流値とスペースチェンバー内の磁場変化の関係を示している。磁場の測定は、スペースチェンバー中心からプラズマ源方向に1 m（プラズマ源から1.5 m）の位置で行った。また、磁場の変動はフィラメントの電流値がゼロの場合を基準としている。このグラフから、プラズマ源フィラメントに60 A程度の電流を流した場合には最大で70 nT程度の磁場変動が確認できるが、これは日常的な磁場変動に比べ十分小さい。

表7 真空排気装置の動作時刻

時間 (sec)	真空排気装置の動作
12	ロータリーポンプ, ホールディングポンプ ON V101, V105, V106, V107 OPEN
2014	ホールディングポンプ OFF V101, V105 CLOSE V108 OPEN
2584	ターボポンプ 加速開始
2814	V107 CLOSE
3782	V106 CLOSE
3904	V101 OPEN
3954	V101 CLOSE
4520	ターボポンプ NORMAL V102 OPEN
4530	クライオポンプ ON

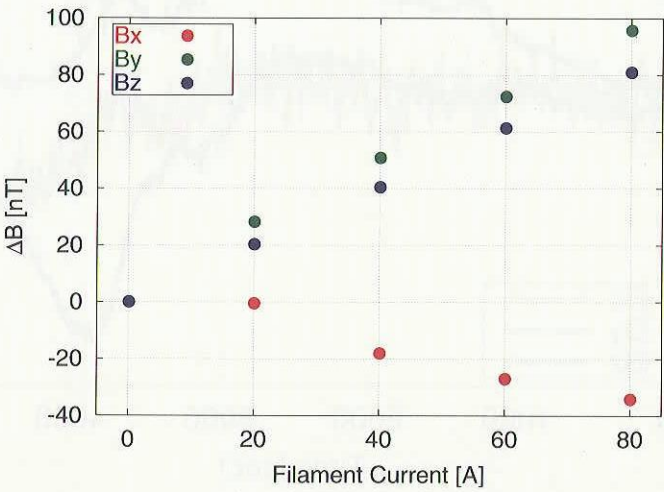


図24 後方拡散プラズマ源のフィラメント電流とスペースチェンバー内の磁場変化の関係。磁場の変化は、フィラメント電流がゼロの場合を基準としている。また測定値は、スペースチェンバー中心からプラズマ源方向に 1 m, プラズマ源からは 1.5 m 場所における値である。

3.5.3. 3軸可動ステージ

3軸可動ステージはステージに取り付けられた機器を真空中で任意の位置に移動させるための装置である。ここでは、3軸可動ステージが作り出す磁場の大きさについて考察する。図25は可動ステージからの距離の変化に伴う磁場の変動を表している。縦軸は磁場変動であり、ステージと磁力計が最も離れた60 cmの場合を基準としてある。測定は、磁力計をスペースチェンバー中心に固定し、可動ステージを-Y方向からスペースチェンバー中心に向けて移動させながら行った。この結果、3軸可動ステージの磁場に対する影響は、ステージからの距離が20 cmの場所においても40 nT程度であり、非常に小さいことが確認された。

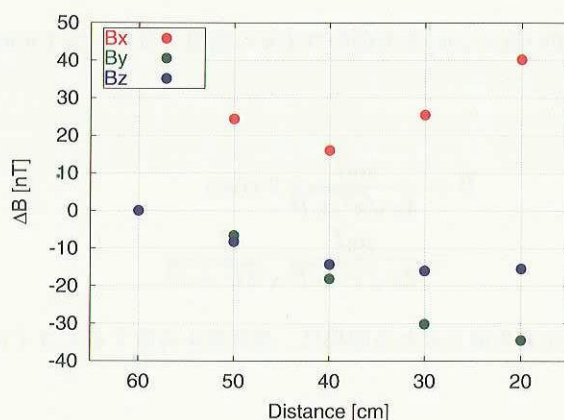


図25 3軸可動ステージからの距離の変化に伴う磁場の変動。磁場変動は可動ステージからの距離が60 cmの場所における測定値を基準としている。

4. まとめ

ヘルムホルツコイルを用いたスペースチェンバー内部の磁場制御システムの構築を行った。生成可能な磁場の方向は任意で、大きさは最大で60000 nT程度である。スペースチェンバー中心に生成される磁場の大きさの精度は、誤差400 nT以下、方向の決定精度は生成する磁場の大きさにより変化するが、例えば10000 nT程度の大きさの磁場を生成させた場合は誤差2°である。この方向決定精度の誤差は、磁場の大きさの増大に伴い小さくなる。また、生成される磁場の均一度は、スペースチェンバー中心の1 m³において±1000 nT以下となっている。さらに実際に磁場制御システムと同時に使用する可能性のある、真空排気装置、後方拡散プラズマ源、3軸可動ステージの3つの機器が作り出す磁場変動について調べ、磁場制御の精度に大きな影響は及ぼさないことを確認した。

本研究で構築した磁場制御システムが、観測ロケットや衛星の飛行環境のシミュレーション、飛行体搭載観測機器の開発及び校正試験など、様々な用途で利用されることが期待される。

付録A. ヘルムホルツコイルの原理

同じ形のコイルを二つ，中心軸を共通にして平行に並べ，それぞれのコイルに等しい電流を同じ向きに流したものをヘルムホルツコイルという．このコイルの特徴は，通常のコイルに比べより広い範囲において均一な磁場を生成させることが出来るという点である．

まず，有限の直線電流ABが点Pに作る磁束密度の大きさBは， α_1 ， α_2 ， r を図26のように定義すると

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \quad (2)$$

となる．これを図27に示した一辺の長さ $2l$ の正方形のコイルに適用すると，コイルの一辺が点Qに作る磁束密度の大きさは

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi \sqrt{z^2 + l^2}} 2 \cos \alpha \quad (3)$$

$$= \frac{\mu_0 I}{2\pi \sqrt{z^2 + l^2}} \frac{l}{\sqrt{2l^2 + z^2}} \quad (4)$$

となる．正方形のコイルの4辺により生成せられる磁場は，対称性を考慮するとコイルの中心軸方向成分のみを持ち，その大きさ B' は

$$B' = \frac{2\mu_0 I l}{\pi \sqrt{z^2 + l^2} \sqrt{2l^2 + z^2}} \cdot \cos \beta \quad (5)$$

$$= \frac{2\mu_0 I l^2}{\pi (z^2 + l^2) \sqrt{2l^2 + z^2}} \quad (6)$$

となる．

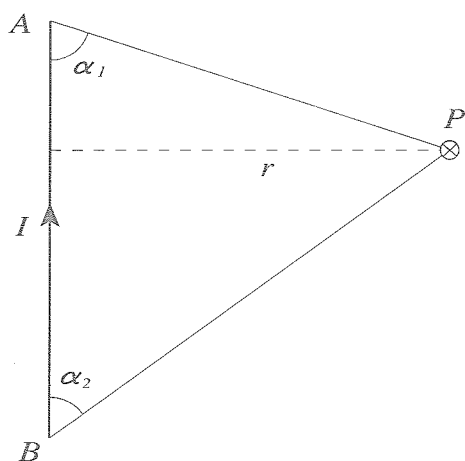


図26 有限の直線電流が作る磁束密度

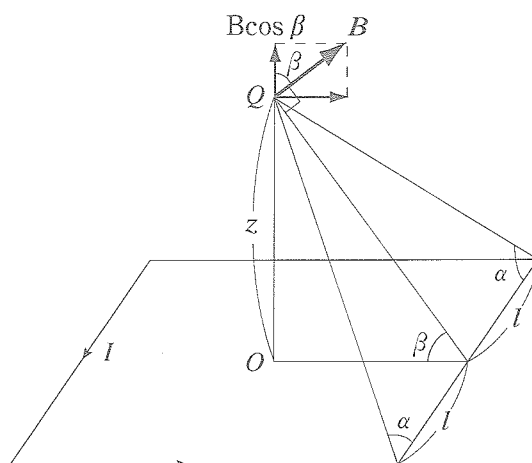


図27 正方形のコイルに電流を流した時の中心軸上にできる磁束密度

ここでN巻きのコイル2個を中心軸を共通にして間隔 $2b$ で対置し、両回路とも同じ向きに大きさ I の電流を流した時、コイルの中心軸上の中点Oに生じる磁束密度を求める。コイルの中心軸上の中点Oからの距離 x の点Rでの磁束密度の大きさ B'' は、式(6)を用いると

$$B'' = \frac{2\mu_0 I l^2 N}{\pi \left((b+x)^2 + l^2 \right) \sqrt{2l^2 + (b+x)^2}} + \frac{2\mu_0 I l^2 N}{\pi \left((b-x)^2 + l^2 \right) \sqrt{2l^2 + (b-x)^2}} \quad (7)$$

となる。これを $x=0$ でテイラー展開すると、 x に対する変化はすべて x の2次以上の項となるため、コイルの中点Oの近傍では次式に示す一様な磁場 B'' が生成される。

$$B'' \approx \frac{4\mu_0 I l^2 N}{\pi (b^2 + l^2) \sqrt{2l^2 + b^2}} \quad (8)$$

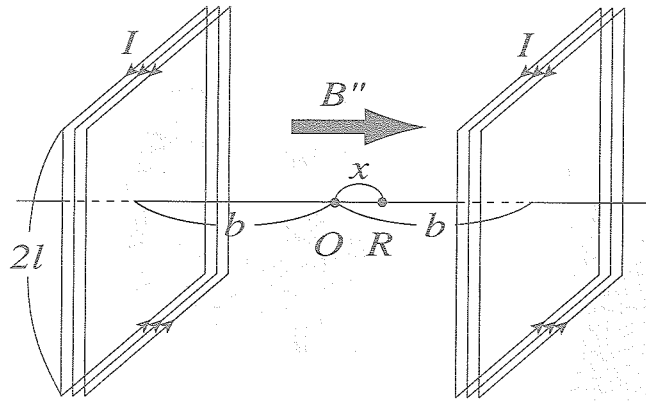


図28 2つのコイルにより作られる磁束密度

付録B. 磁場制御システム取り扱い説明書

B.1. システム概要

B.1.1. 特徴

本磁場制御システムは、スペースチェンバー周囲に設置された3軸のヘルムホルツコイルを用いてスペースチェンバー内部の磁場を制御するものである。制御はすべてコンピューターを用いて行われており、磁場を生成させる場合には生成させたい磁場ベクトルの3成分をコンピューターに入力するだけでよい。生成可能な磁場の方向は任意であり、大きさは最大で60000 nT程度となっている。

B.1.2. 構成

本システムは、磁場生成部（ヘルムホルツコイル・ヘルムホルツコイル電源・コンピューター）及び磁場計測部（磁力計・コンピューター）からなる（図29）。磁場の生成は、i)コンピューターにセットされた磁場ベクトルの値からヘルムホルツコイルの各軸に流すべき電流値が計算され、ii) GPIBを介してヘルムホルツコイル電源の出力が制御されることにより行われる。また磁力計からの出力は、AD変換後、RS-232Cポートを通してコンピューターに取り込まれる。

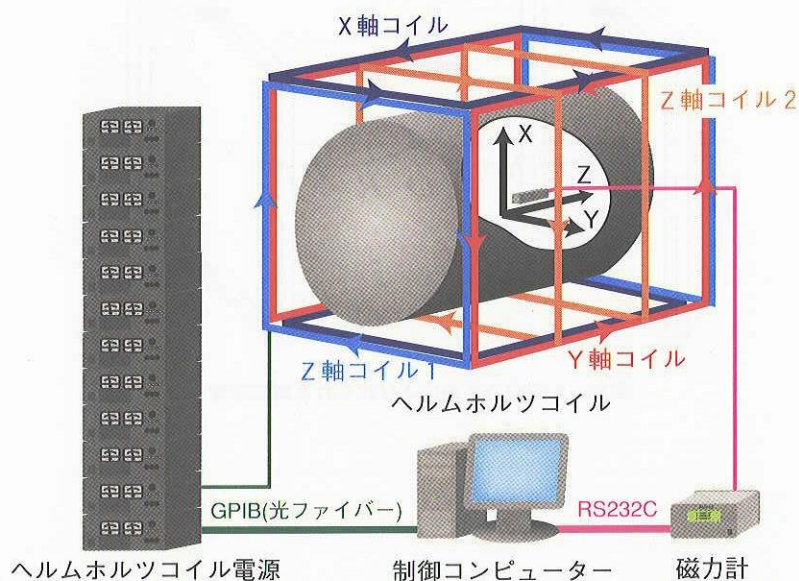


図29 磁場制御システム構成

B.1.3. 座標軸

図30に磁場制御システムで用いる座標軸の定義を示す。本説明書では断りなき場合、すべてこの座標定義を用いる。

B.1.4. 総合性能

磁場制御システムの総合性能を表8に示す。

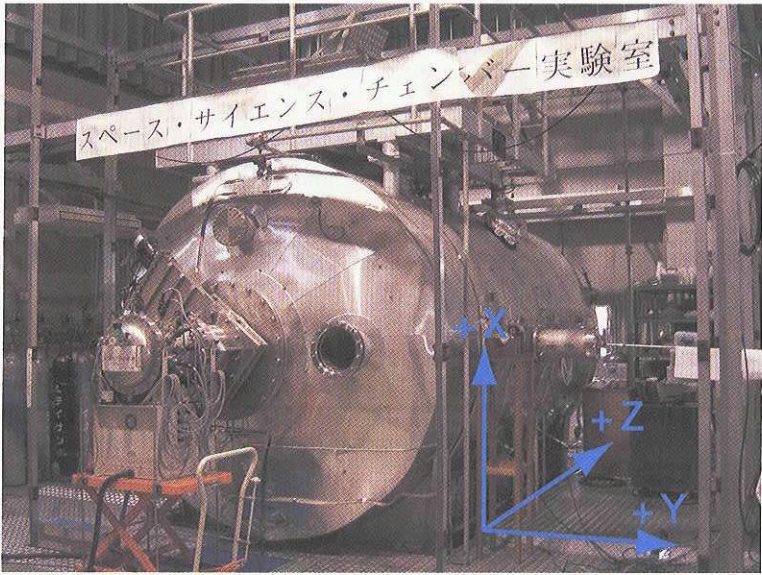


図30 磁場制御システムに用いる座標軸の定義

表8 磁場制御システムの総合性能

生成可能磁場範囲 X 軸	-134000 ～ +74000 nT
生成可能磁場範囲 Y 軸	-91000 ～ +65000 nT
生成可能磁場範囲 Z 軸	-128000 ～ +86000 nT
制御確度	±1000 nT 以内
磁場方向決定精度 *1	2° 以内
空間均一度 *2	1000 nT 以下
磁場生成更新周波数	約 10 Hz

B. 1. 5. 各機器の仕様詳細

表9 制御コンピューター

コンピューター	.....	DELL Dimenstion 4600 C
GPIBボード	.....	National Instruments PCI-GPIB
制御ソフト	.....	National Instruments LabVIEW 6.0 i

*1 50000 nT 程度の大きさの磁場を生成した場合の値

*2 スペースチェンバー中心1m³における値

表10 ヘルムホルツコイル

	X 軸	Y 軸	Z1 軸	Z2 軸
個数	2ケ	2ケ	2ケ	2ケ
方形コイル一辺の長さ	5500mm	5740mm	5870mm	5620mm
方形コイル2ケの間隔	2995mm	3125mm	5855mm	1446mm
巻き数	5×2ケ	5×2ケ	8×2ケ	3×2ケ
直流抵抗(@ 20℃)	23mΩ×2ケ	24mΩ×2ケ	39mΩ×2ケ	14mΩ×2ケ

表11 ヘルムホルツコイル用電源装置

電源型式	.....	高砂製作所製 バイポーラ電源BWS18-15
GPIBプログラマー型式	.....	高砂製作所製 AP-1628 T
最大出力電圧（1台あたり）	.....	± 18 V
最大出力電流（1台あたり）	.....	± 15 A
電源台数	.....	5 台（X軸） 4 台（Y軸） 3 台（Z軸）
最大出力電流	.....	± 75 A（X軸） ± 60 A（Y軸） ± 45 A（Z軸）

表12 3 軸フラックスゲート型磁力計

磁力計センサー部	.....	Bartington社製Mag-03（真空環境対応）
磁力計コントローラー部	.....	テラテクニカ社製 ADM-03
測定原理	.....	3 軸フラックスゲート型
3 軸直交度誤差	.....	0.5° 以内
測定レンジ	.....	± 70000 nT
分解能	.....	1 nT
ノイズ	.....	1 nT _{p-p}
絶対値精度	.....	± 0.5 %
デジタル出力(RS-232C)	.....	最大 2 Hz

B. 2. システムの立ち上げ／シャットダウン

B. 2. 1. 各機器の配置図

磁場制御システムで使用する各機器の配置を図 31 に示す。

B. 2. 2. システムの立ち上げ

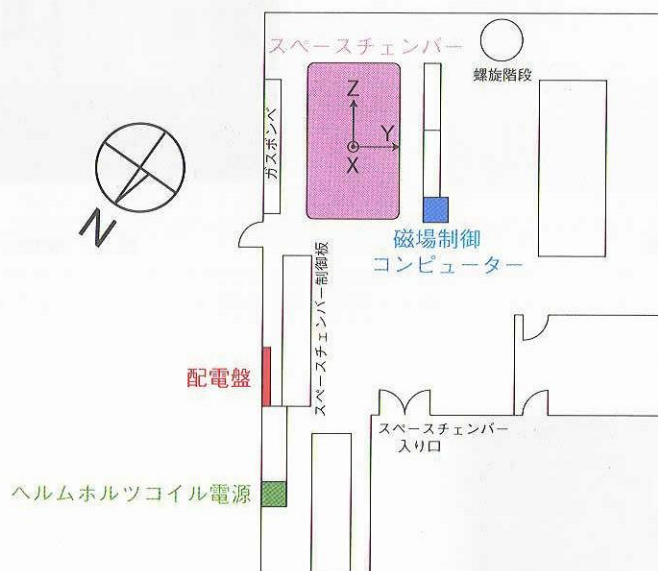


図31 磁場制御システム各機器の配置

1. スペースチャンバー操作盤裏の配電盤の「ヘルムホルツコイル電源」をオンにする (図 32)。
2. 配電盤の「ヘルムホルツコイル電源」のオンに伴い、 GPIBプログラマーの電源がオンになったことを確認する。 GPIBプログラマーはヘルムホルツコイル電源の最下部に取り付けられており、 オンの状態では緑色のLEDが点灯する (図 33)。通常は常にオン状態であるが、もしオフの場合には左右2つスイッチをオンにする。
3. ヘルムホルツコイル電源 12 台の電源を上から順番にオンにする (図 34)。
4. 磁場制御コンピューターの電源を入れる (図 35)。
5. 磁場のモニターを行う場合には、磁力計のセンサー部 (図 36) を磁場計測を行う場所に設置し、磁力計コントローラーの電源を入れる (図 37)。この際、磁力計はヘルムホルツコイルと軸の向きが一致するように設置する。ヘルムホルツコイルの軸の向きは図 30 参照。

B. 2. 3. システムのシャットダウン

1. ヘルムホルツコイル電源の出力電流がゼロになっていることを、ヘルムホルツコイル電源の前面表示パネルで確認する。もし電流が流れている場合には出力電流をゼロにする (B. 3. 4 節参照)。
2. ヘルムホルツコイル電源を下から順 (図 34) にオフにする。 GPIBプログラマーはオフにする必要はない。
3. 配電盤のブレーカー「ヘルムホルツコイル電源」をオフにする。この際、他のブレーカーをオフにすることが無いよう十分注意する。
4. 磁場制御コンピューターをシャットダウンする。
5. 磁力計の電源をオフにする。



図32 配電盤

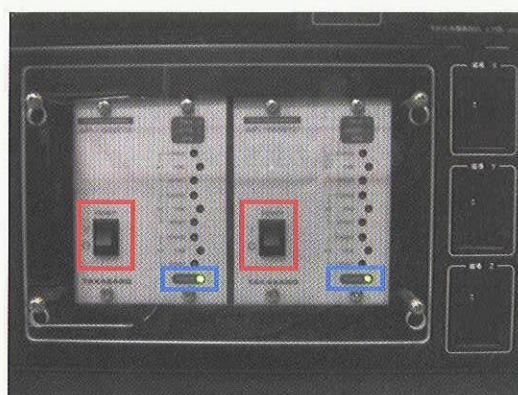


図33 GPIBプログラマー

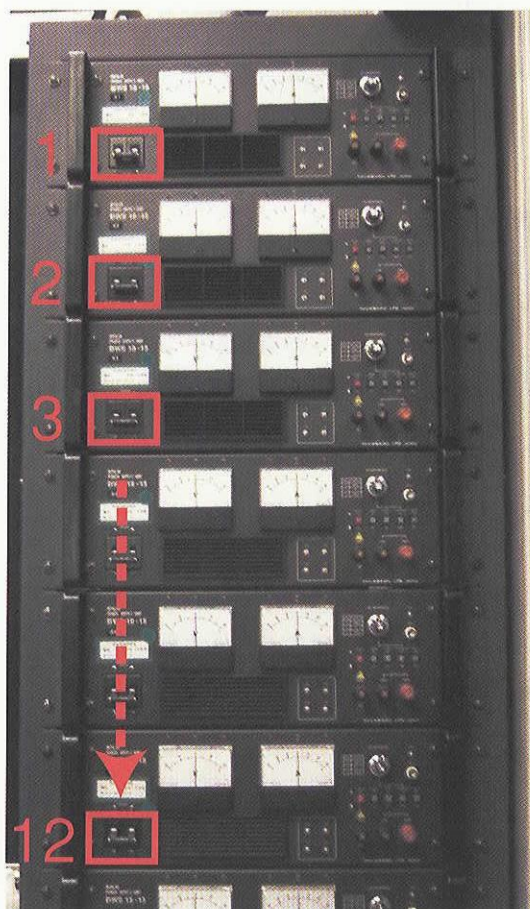


図34 ヘルムホルツコイル電源



図35 制御コンピューター

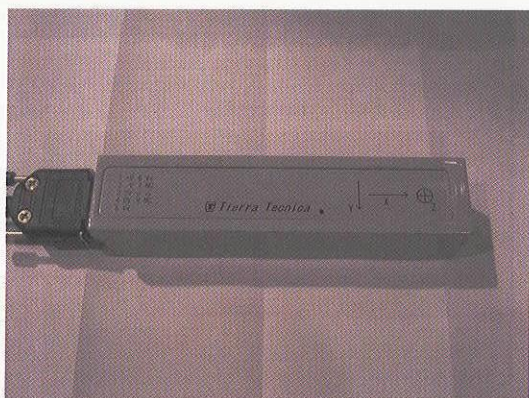


図36 磁力計（センサー部）



図37 磁力計（コントローラー部）と磁場データ取得スイッチ

B. 3. 磁場制御ソフトウェアの使用法

B. 3. 1. 概要

磁場制御システムでは、主に以下の3つのソフトウェアを使用する。

磁場データ取得 磁力計からの磁場データ出力をコンピューターに取り込み、ファイルに出力する。

磁場生成 生成させる磁場ベクトルの3成分を指定し磁場を生成させる。

電流値設定 ヘルムホルツコイルに指定した電流を流す。

B. 3. 2. 磁場データ取得

磁力計から出力される磁場データをコンピューターに取り込み、ファイル出力するためのソフトウェアで、i)一定時間間隔（2 Hz）でデータを自動的に取得する「自動取得」と、ii)磁場データ取得スイッチを押したタイミングでデータを取得する「手動取得」の2種類が存在する。

i)自動取得

1. デスクトップの「get_mgf_auto.vi^{*1}」を実行。
2. 磁場データをグラフ表示する時間幅を10～3600秒の間で設定（図38）。デフォルトでは60秒に設定されている。
3. 実行ボタン（白矢印：図38）をクリックし、磁場データの出力ファイル名を入力すると、2 Hzでデータ取得開始。
4. STOPボタン（図39）でデータ取得終了。ファイル出力フォーマットは"YY MM DD hh mm ss.s Bx[nT] By[nT] Bz[nT]"である。

^{*1} オリジナルファイルは C:/Program Files/Magnetic Field Controller/get_mgf/get_mgf_auto.vi

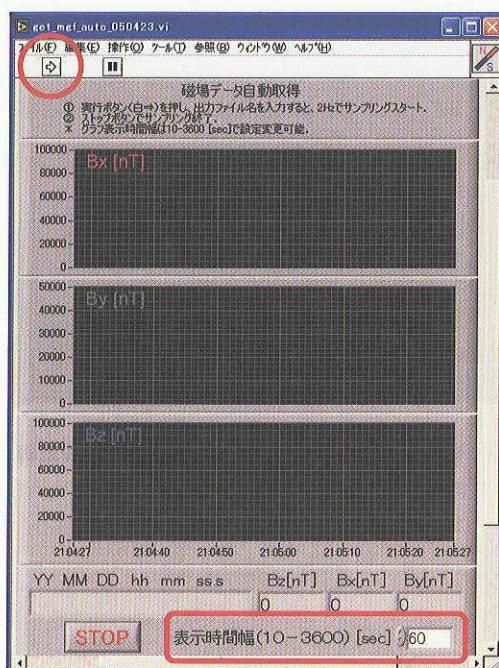


図38 磁場データ自動取得（データ取得前）



図39 磁場データ自動取得（データ取得中）

ii) 手動取得

1. デスクトップの「get_mgf_manual.vi^{*2}」を実行。
2. 磁場データをグラフ表示するポイント数を指定する（図40）。デフォルトでは100ポイントに設定されている。
3. 左上の実行ボタン（白矢印：図40）をクリックし、出力データファイル名を入力すると磁場データ取得準備完了。
4. 磁力計のデータ取得スイッチ（図37）を押す度に、データ取得及びデータファイル出力が行われる。
5. 「STOP」ボタン（図41）をクリック後、もう一度データ取得スイッチを押すと終了。ファイル出力フォーマットは「YY MM DD hh mm ss.s Bx[nT] By[nT] Bz[nT]」である。

B.3.3. 磁場生成

生成させる磁場ベクトルをX、Y、Zの3成分で指定し磁場を生成させるための「磁場生成」ソフトウェアの使用方法について説明する。ヘルムホルツコイルに流すべき電流値の算出は、事前に行ったキャリブレーションファイルを用いて自動的に行われるが、高精度の磁場制御を必要とする場合や外的要因によりスペースチェンバ一付近の磁場が大きく変化したと考えられる場合には、新たに磁場制御システムのキャリブレーションを行う必要がある（B.4.節）。通常の使用においては、再キャリブレーションの必要はない。

1. デスクトップの「gen_mgf1.vi^{*3}」を実行。
2. 事前に磁場制御のキャリブレーションを行った場合には、「磁場—電流変換パラメータ」にキャリブレーションで作成したファイル（*****.cal）を指定する（図42）。通常はデフォルト(default.cal)を使用し、変更の必要はない。
3. 生成させる磁場のX、Y、Z各成分をnT単位で入力（図42）。座標軸の定義に関しては図30、生成可能な磁場範囲に関しては表8参照。

^{*2} オリジナルファイルはC:/Program Files/Magnetic Field Controller/get_mgf/get_mgf_manual.vi

^{*3} オリジナルファイルはC:/Program Files/Magnetic Field Controller/get_mgf/get_mgf.vi

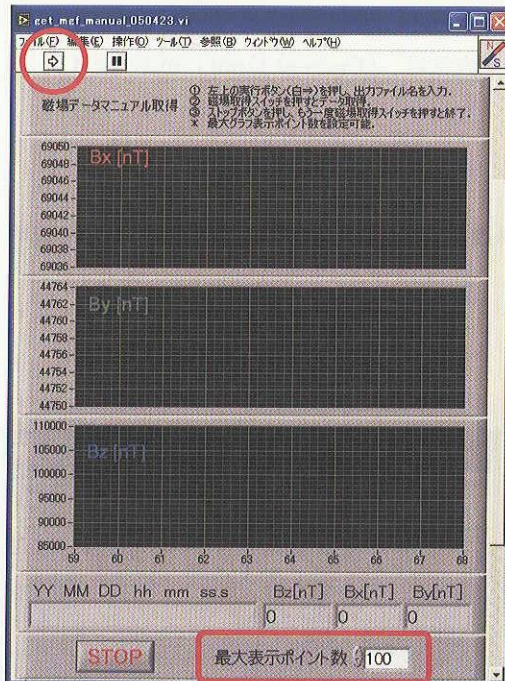


図40 磁力計データ手動取得（データ取得前）

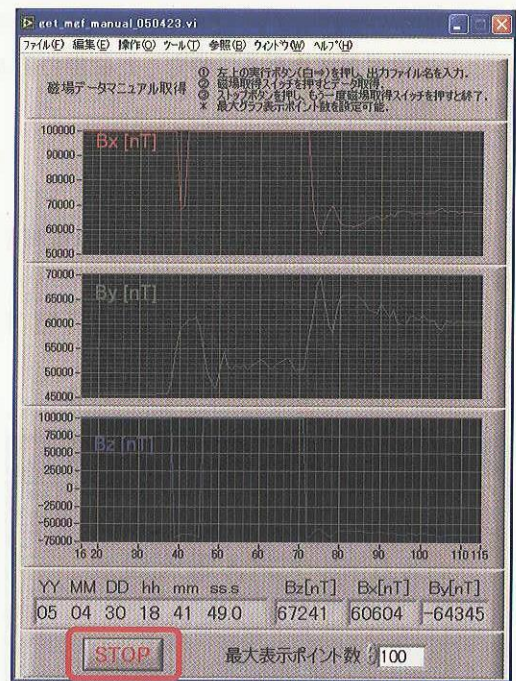


図41 磁力計データ手動取得（データ取得中）

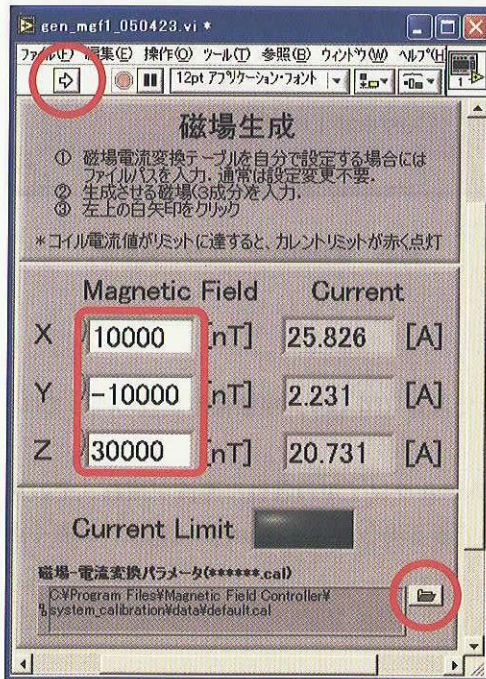


図42 磁場生成

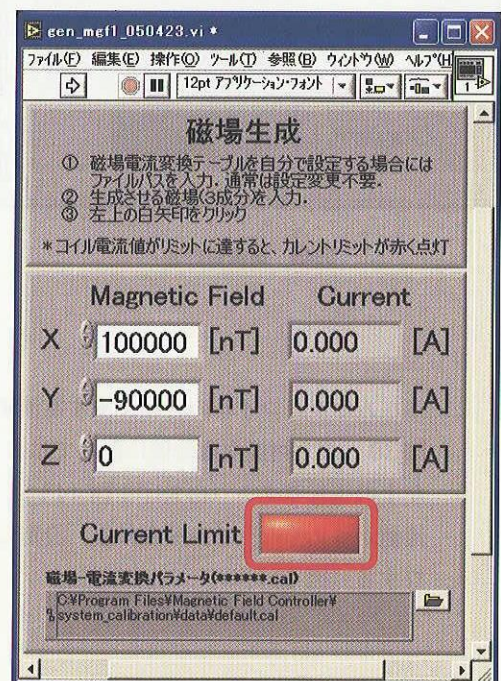


図43 磁場生成（エラー発生時）

4. 左上の実行ボタン（白矢印：図 42）をクリックすると、ヘルムホルツコイルの各軸に電流が流れ、その電流値が表示される。設定した磁場の値が制御範囲外である場合には、「Current Limit」が赤く点灯する（図 43）。

B. 3. 4. 電流値設定

ヘルムホルツコイルの各軸に指定した電流を流すための「電流値設定」ソフトウェアの使用方法について説明する。

1. デスクトップの「set_current1.vi^{*4}」を実行。

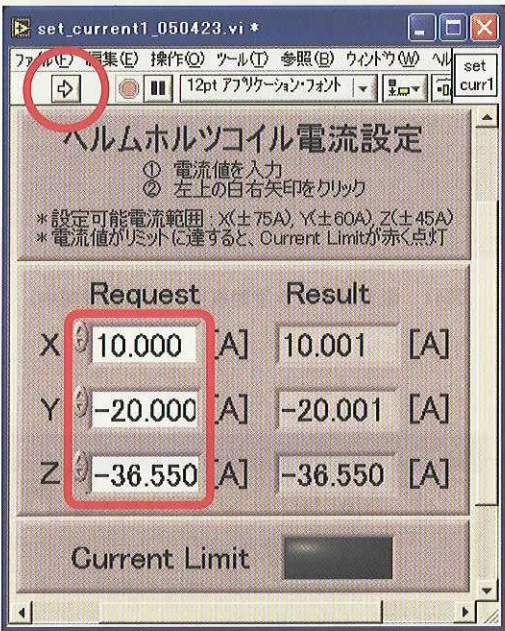


図44 電流値設定



図45 電流値設定（エラー発生時）

2. ヘルムホルツコイルの各軸に流す電流値を「Request」にA単位で入力（図 44）。座標軸の定義に関しては図 30，設定可能な電流値に関しては表 11 を参照。
3. 左上の実行ボタン（白矢印：図 44）をクリックすると、ヘルムホルツコイルの各軸に電流が流れ、その電流値が「Result」に表示される。設定した電流値が制御範囲外である場合には、「Current Limit」が赤く点灯する（図 45）。

^{*4} オリジナルファイルはC:/Program Files/Magnetic Field Controller/set_current/set_current1.vi

B. 4. 磁場制御システムのキャリブレーション

設定された磁場ベクトルの値から、ヘルムホルツコイルに流す電流値を算出する際には、事前に取得された「磁場－電流変換パラメータ」を使用するが、この「磁場－電流変換パラメータ」は様々な要因により変化する可能性がある。本節では磁場制御システムの再キャリブレーションを行い、「磁場－電流変換パラメータ」ファイルを作成する方法について説明する。このキャリブレーションは、高精度の磁場制御を必要とする場合や外的要因によりスペースチェンバー付近の磁場が大きく変化したと考えられる場合に、特に有効である。

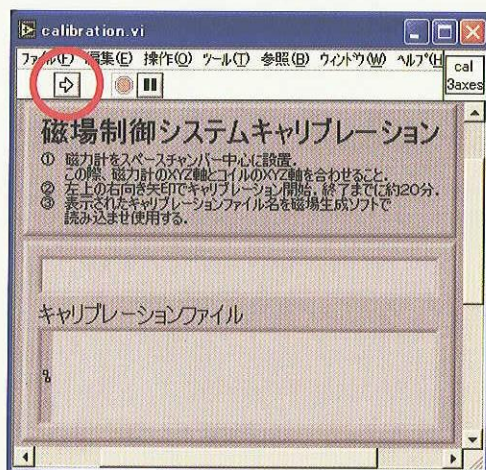


図46 キャリブレーション

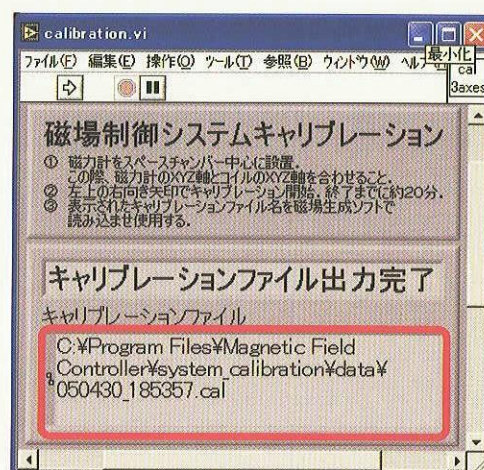


図47 キャリブレーション（終了時）

1. 磁力計をスペースチェンバー中心に設置する。この時の磁力計の軸が磁場制御の基準軸となるため、磁計のX, Y, Z軸とコイルのX, Y, Z軸の向きを合わせる必要がある。
2. デスクトップの「calibraion.vi^{*5}」を実行。
3. 左上の実行ボタン（白矢印：図46）をクリックし、キャリブレーション開始。終了まで約20分かかる。
4. キャリブレーションファイルにファイル名が表示されたらキャリブレーション終了（図47）。このファイル名は磁場生成時に必要となるので記録しておく。デフォルトでは以下の形式で保存される。

C:/Program Files/Magnetic Field Controller/system_calibraion/data/YYMMDD_HHMMSS.cal

^{*5} オリジナルファイルはC:/Program Files/Magnetic Field Controller/system_calibration/system_calibration.vi



宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-05-003

発行 平成 17 年 10 月 31 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL:<http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株)フジブランド

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

© 2005 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写、転載、電子媒体に加工すること禁じます。



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency