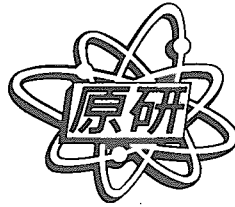


JAERI-Data/Code

2003-014



JP0350548



空心コイル電磁計算プログラム : COIL

2003 年 8 月

吉田 清・磯野 高明・杉本 誠・奥野 清

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

空心コイル電磁計算プログラム: COIL

日本原子力研究所那珂研究所 ITER 開発室
吉田 清・磯野 高明⁺・杉本 誠⁺・奥野 清⁺

(2003 年 7 月 3 日受理)

超伝導コイルを設計する場合には、検討すべき設計パラメータが多いため、磁界とインダクタンスの値を何度も繰返し計算しながら、コイル設計を収束させる必要がある。そのため、磁界とインダクタンスは簡便に計算できないと設計検討は進まない。

実際に超伝導コイルを製作・励磁すると、静的磁界やインダクタンスの測定値と計算値は非常に良く一致する。それは超伝導コイルのような鉄心を含まない空心コイルの静的磁界やインダクタンスは、数値解析で正確に求めることができるからである。それらの解析方法は 1970 年代に開発され確立した。本報告書は、その解析手法を実装した計算プログラム: COIL について説明する。さらに、実際に製作した超伝導コイルの磁界とインダクタンスの実測値と COIL の計算値の比較を示すことによって本プログラムの検証とする。

COIL は、原研で開発中のトカマク型核融合装置で使用されるコイル形状を簡便に定義し、それらのコイルから発生する磁界およびインダクタンスを容易に計算できるプログラムである。最近のコンピュータの性能向上で、複雑で多くのコイルから構成されるトカマク装置であっても磁界とインダクタンスの値は数分間で計算でき、ITER の超伝導コイルなどの設計に利用されている。

Analysis Program for Magnetic Field, Inductance of Air-core Coils: COIL

Kiyoshi YOSHIDA, Takaaki ISONO⁺, Makoto SUGIMOTO⁺ and Kiyoshi OKUNO⁺

Department of ITER Project,
Naka Fusion Research Establishment,
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 3, 2003)

In case of designing a superconducting coil, one must calculate a magnetic field and its inductance many times in order to arrange proper design parameters of a superconducting coil because there are many design parameters to evaluate. A superconducting coil cannot be designed by the optimum condition if a magnetic field and inductance cannot be computed easily.

When a superconducting coil is actually energized, measurement values of the static magnetic field and its inductance are very well agreed with calculated values. The static magnetic field and inductance of the coil that does not contain a ferromagnetic material can be precisely calculated by using the numerical integration. The analytic method were developed and established in 1970's. This paper shows the calculation program COIL that has been developed by applying this analytic method by the superconducting magnet laboratory in JAERI. The program COIL is qualified by the comparison between measured and calculated values of the magnetic field and its inductance in case of several real superconducting coils.

The program COIL is specified to analyze superconducting coils in a tokamak device. The magnetic field that is created from those coils, and self and mutual inductance can be easily computed by using the program COIL. Even for a complicated tokamak device, the magnetic field and inductance can be calculated in several minutes by using the recent the high performance personal computer. The program COIL contributes to design the superconducting coils for ITER and others.

Keywords: Magnetic Field, Inductance, Coil, ITER, Tokamak

⁺ Department of Fusion Engineering Research

目 次

1. はじめに.....	1
2. 磁界の計算方法.....	1
2.1 扇形導体の発生磁界.....	1
2.2 直線導体の発生磁界.....	2
2.3 円筒形状のコイルの発生磁界.....	3
2.4 電磁力.....	3
2.5 発散の防止.....	3
3. インダクタンスの計算方法.....	4
3.1 ソレノイドのインダクタンス.....	4
3.2 非円形コイルのインダクタンス.....	5
4. 計算精度と解析法.....	6
4.1 磁界計算における数値積分の精度.....	6
4.2 線素数とインダクタンスの精度.....	6
4.3 電磁力の計算における体積の計算法.....	7
4.4 リップル率.....	7
5. 磁界とインダクタンス計算の検証.....	9
5.1 ソレノイド.....	10
5.1.1 超伝導ソレノイド(HF24).....	10
5.1.2 実証ポロイダル・コイル(DPC).....	10
5.1.3 Gyrotron 用超伝導コイル.....	10
5.2 レーストラック型コイル.....	10
5.3 非円形コイル.....	11
5.4 トカマク用コイルの設計例.....	11
6. プログラムの使用法.....	17
6.1 コイル形状定義の方法.....	17
6.2 磁界計算点座標の自動生成.....	17
6.3 プログラムの使用法.....	17
7. まとめ.....	18
謝辞.....	19
参考文献.....	19
付録 A コマンドの解説.....	20
付録 B 例題と検証データ.....	23

Contents

1. Introduction	1
2. Calculation Method of Magnetic Field	1
2.1 Magnetic Field from Circular Arc	1
2.2 Magnetic Field from Straight Segment	2
2.3 Magnetic Field from Solenoid.....	3
2.4 Electro-magnetic Force	3
2.5 Protection of Overflow at Integration	3
3. Calculation Method of Inductance	4
3.1 Inductance of Solenoid.....	4
3.2 Inductance of Non-circular Coil.....	5
4. Accuracy and Definition.....	6
4.1 The Order of Legend-gauss Quadrature.....	6
4.2 Number of Filament for Inductance	6
4.3 Volume Calculation for Electro-magnetic Force.....	7
4.4 Ripple Ratio.....	7
5. Validation of Calculation.....	9
5.1 Solenoid.....	10
5.1.1 Superconducting Solenoid (HF24).....	10
5.1.2 Demo Poloidal Coil (DPC)	10
5.1.3 Gyrotron Superconducting Coil	10
5.2 Racetrack Coil	10
5.3 Non-circular Coil.....	11
5.4 Tokamak	11
6. Usage of Program.....	17
6.1 Input of Coil Shape and Position.....	17
6.2 Auto Generation of Calculation Points.....	17
6.3 Usage.....	17
7. Conclusion.....	18
Acknowledgment	19
References	19
Appendix A: Summary of Commands for COIL Operation	20
Appendix B: Examples and Validation Data of COIL	23

1. はじめに

超伝導コイルを設計する場合、コイルが発生する磁界やコイルの自己および相互インダクタンスは最も重要な値である。超伝導コイルを設計するステップは、超伝導導体の大きさを決めるために磁界と電流値が必要で、さらに絶縁物の厚みを決めるためにターン間電圧が必要である。コイル形状と電流値、ターン数を決めると、一義的にコイルの磁界とインダクタンスは求まり、ターン間電圧が求まる。さらに、求めた磁界、インダクタンスの値を基に、コイル形状とターン数を調整することを繰り返して、コイル設計は収束する。そのため、磁界とインダクタンスは容易に求まらなると設計検討は進まない。

実際に超伝導コイルを励磁して、静的な磁界やインダクタンスを測定すると、測定値と計算値は非常に良く一致する。測定値と計算値が一致しない場合は、計測に不具合がある場合や、コイルに短絡などの障害がある場合のみであった。それは超伝導コイルのような鉄心を含まない空心コイルの静的磁界やインダクタンスは、数値解析で正確に求めることができるからである。それらの解析方法は1970年代に開発され確立された。

本報告書は、その解析手法を実装した計算プログラム：COILについて説明する。COILは、原研で開発中のトカマク型核融合装置に特化したコイル形状を定義し、それらのコイルから発生する磁界およびインダクタンス容易に計算できる。さらに、実際に製作した超伝導コイルの磁界およびインダクタンスの実測値とCOILの計算値の比較を行った。

最近のコンピュータの性能向上で、複雑なトカマク装置であっても磁界とインダクタンスは数分で計算できるようになり、ほとんど電卓のように使える状況になった。これまでの26年の間に超伝導コイルの試作開発に使用しながら改良を繰り返してきた実用的なプログラムを公開することとした。

2. 磁界の計算方法

超伝導コイルのように、鉄心を含まない空心コイルは、強磁性体（鉄）の飽和特性に左右されないため、発生磁界は解析的に求めやすい。さらにコイルは断面が矩形断面をしていることが多いので、扇形や直線導体の組み合わせで、コイルをモデル化しやすい。そのため、磁界を求める解析手法はBiot-Savartの法則によって導かれた式を数値積分することによって求められる。磁界解析手法は参考文献[1, 2, 3, 4]に示される。いずれの手法の解も同一であるので、本プログラムは参考文献[1]の解法を採用した。

空心コイルは矩形断面扇形導体と矩形断面直線導体の組み合わせによって形成できる。円筒形状のソレノイドは扇形が閉じて円形に変わったものとしてモデル化できる。例えば、トカマク型プラズマ装置で用いられるD型コイルは、6個の扇形導体と1本の直線導体の組み合わせで形成される。コイル断面が矩形でない場合は、幾つかの矩形を組合せて断面を模擬することによって磁界を求めることができる。以下の各項に各形状の磁界解析を行う式を示す。

2.1 扇形導体の発生磁界

矩形断面をした扇形導体と計算点の幾何学的な位置関係をFig. 2-1に示す。磁界を求める計算点 $(r_0, 0, z_0)$ の座標における、扇形導体によって発生する磁界の各成分 (B_x, B_y, B_z) は式(1)で与えられる。式(1)を求めるには、 $Z_1, Z_2 / r_1, r_2$ を関数 f_{rx}, f_{ry}, f_{rz} に代入して θ_1, θ_2 間の4回の数値積分が

必要になる。

$$\begin{aligned}
 B_x(r_0, 0, z_0) &= \frac{\mu_0 J}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} f_{rx}(r, \theta, Z) d\theta \Big|_{z_1}^{z_2} \Big|_{r_1}^{r_2} \\
 B_y(r_0, 0, z_0) &= \frac{\mu_0 J}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} f_{ry}(r, \theta, Z) d\theta \Big|_{z_1}^{z_2} \Big|_{r_1}^{r_2} \\
 B_z(r_0, 0, z_0) &= -\frac{\mu_0 J}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} f_{rz}(r, \theta, Z) d\theta \Big|_{z_1}^{z_2} \Big|_{r_1}^{r_2}
 \end{aligned} \tag{1}$$

ただし、

$$\begin{aligned}
 f_{rx}(r, \theta, Z) &= A \cos \theta + r_0 \cos^2 \theta \cdot \ln(r - r_0 \cos \theta + A) \\
 f_{ry}(r, \theta, Z) &= A \sin \theta + r_0 \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \ln(r - r_0 \cos \theta + A) \\
 f_{rz}(r, \theta, Z) &= Z \cdot \left(\ln(r - r_0 \cos \theta + A) + \frac{r_0 \cos \theta}{2 \cdot |Z|} \cdot \ln \frac{A - |Z|}{A + |Z|} \right) \\
 &\quad - Z \cdot \left(\frac{r_0 \sin \theta}{|Z|} \tan^{-1} \frac{|Z|(r - r_0 \cos \theta)}{r_0 \sin \theta \cdot A} \right)
 \end{aligned}$$

$$A = \sqrt{Z^2 + r^2 + r_0^2 - 2 \cdot r \cdot r_0 \cos \theta}$$

$$Z = z_0 - z, \quad Z_1 = z_0 - z_1, \quad Z_2 = z_0 - z_2$$

- r_0 : 計算点の r 座標
- r_1 : 扇形片の内径
- r_2 : 扇形片の外径
- z_0 : 計算点の z 座標
- z_1 : 扇形片の下端
- z_2 : 扇形片の上端
- θ_1 : 扇形片の開始角度
- θ_2 : 扇形片の終了角度
- μ_0 : 真空中の透磁率
- J : コイルの電流密度

2.2 直線導体の発生磁界

矩形断面をした直線導体と計算点の幾何学的な位置関係を Fig. 2-2 に示す。直線導体は、6 座標 $(x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2)$ で定義される。磁界を求める計算点 (x_0, y_0, z_0) の座標における、直線導体によって発生する磁界は式(2)で求まる。式(2)は $X_1, X_2 / Y_1, Y_2 / Z_1, Z_2$ を関数 f_i 代入して 8 回計算するだけで求まるので、数値積分を行わないため計算は速い。

$$\begin{aligned}
 B_x(x_0, y_0, z_0) &= \frac{\mu_0 J}{4\pi} f_i(Z, Y, X) \Big|_{x_1}^{x_2} \Big|_{y_1}^{y_2} \Big|_{z_1}^{z_2} \\
 B_z(x_0, y_0, z_0) &= -\frac{\mu_0 J}{4\pi} f_i(X, Y, Z) \Big|_{x_1}^{x_2} \Big|_{y_1}^{y_2} \Big|_{z_1}^{z_2}
 \end{aligned} \tag{2}$$

ただし、

$$X = x_0 - x, X_1 = x_0 - x_1, X_2 = x_0 - x_2, Y = y_0 - y, Y_1 = y_0 - y_1, Y_2 = y_0 - y_2,$$

$$Z = z_0 - z, Z_1 = z_0 - z_1, Z_2 = z_0 - z_2,$$

関数 f_i は入力する座標が入れ変わるため、関数の入力を u, v, w に変換して以下に記す。

$$f_i(u, v, w) = v \cdot \ln\left(w + \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}\right) + w \cdot \ln\left(v + \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}\right) \\ - u \cdot \tan^{-1}\left(\frac{vw}{u \cdot \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}}\right) - u \cdot \tan^{-1}\left(\frac{v}{u}\right) - v$$

2.3 円筒形状のコイルの発生磁界

矩形断面をした円筒形のソレノイドにおいて、観測点(r_0, z_0)における磁界の B_r, B_z 成分は式(1)において積分範囲が 0 から 2π までになる。ただし、常に $B_\theta = 0$ である。式(3)は導体周方向の数値積分が必要である。

$$B_r(r_0, z_0) = \frac{\mu_0 J}{2\pi} \int_0^\pi f_{rx} \cdot d\theta \Big|_{z_1}^{z_2} \Big|_{r_1}^{r_2} \quad (3)$$

$$B_z(r_0, z_0) = -\frac{\mu_0 J}{2\pi} \int_0^\pi f_{rz} \cdot d\theta \Big|_{z_1}^{z_2} \Big|_{r_1}^{r_2}$$

2.4 電磁力

ソレノイドの電磁力は、磁界分布を反映するように断面を区分して Biot-Savart の法則から求めた磁界と電流ベクトルの外積で、式(4)で求める。また、非円形コイルなどは、コイルを 8 接点要素に分割し、各接点の電磁力を、各接点の分担する体積をかけて求める。

$$Fr = Bz \cdot s \cdot J \cdot 2\pi \cdot r$$

$$Fz = Br \cdot s \cdot J \cdot 2\pi \cdot r \quad (4)$$

ただし、

Fr, Fz :	電磁力
Br, Bz :	磁界
s :	面積
J :	電流密度 (ベクトル)
r :	半径

2.5 発散の防止

磁界計算において、磁界計算点が導体の表面になる場合は、関数 f_{rx} などの積分が発散する。本プログラムは Gauss 積分を用いており、積分で用いる計算点は発散の点に一致しないため都合が良い。多くの導体を用いる場合、数値積分で発散する場合は、磁界計算点を極めてわずか(1.0 μm)にずらすことによって発散を防止している。そのため、半径が 0.1 mm 以下のコイルを計算する場合は、精度が悪くなるので注意が必要である。

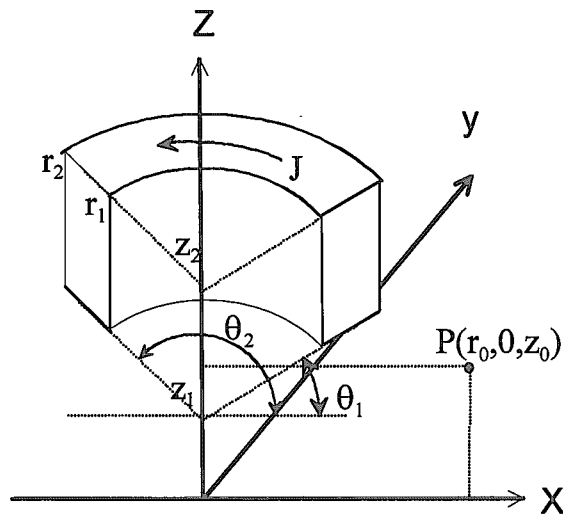


Fig. 2-1 Circular arc variables in Equation (1)

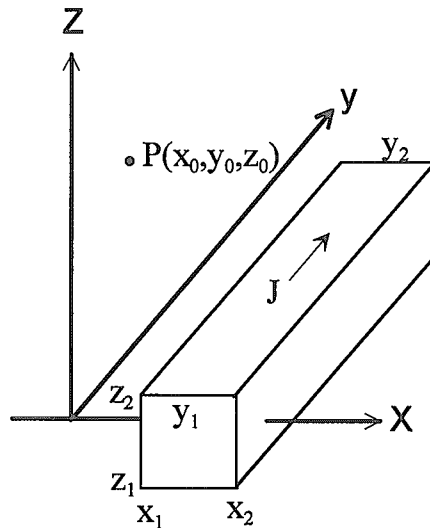


Fig. 2-2 Straight segment variables used in Equation (2)

3. インダクタンスの計算方法

3.1 ソレノイドのインダクタンス

同軸上に配置された円形コイル間の相互インダクタンス(M)は Neumann 公式により式(5)から求める[6, 7]。

$$M = \frac{2\mu_0}{k} \sqrt{r_i r_j} \left(\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K(k) - E(k) \right) \tag{5}$$

$$k^2 = \frac{4r_i r_j}{(r_i + r_j)^2 + z^2}$$

μ_0 :	透磁率
r_b, r_j :	コイルの半径
z :	コイル間の距離
K :	第一次完全楕円積分
E :	第二次完全楕円積分

矩形断面のソレノイドの自己インダクタンス (L) は式(6)で求まる[7]。

$$L = \mu_0 r \left(\ln \left(\frac{8r}{Rs} \right) - 2 \right)$$

$$\ln(Rs) = \frac{1}{2} \ln(a^2 + b^2) - \frac{b^2}{12a^2} \ln \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right) - \frac{a^2}{12b^2} \ln \left(1 + \frac{b^2}{a^2} \right) +$$

$$\frac{2b}{3a} \tan^{-1} \left(\frac{a}{b} \right) + \frac{2a}{3b} \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) - \frac{25}{12}$$
(6)

ただし、

r :	平均半径
Rs :	幾何学的平均距離
a, b :	矩形断面の各辺の長さ

3.2 非円形コイルのインダクタンス

非円形コイルのインダクタンスは、短い直線状の線素の組み合わせでコイルをモデル化する。直線状の線素間のインダクタンスは Neumann 公式より求める[8]。2本の線素を u, v ベクトルとし、線素間を w ベクトルとし (Fig. 3-1)、線素 u, v 間の相互インダクタンス (M) は式 (7) から求める。解を求めるには数値積分が必要である。

$$M_{u,v} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^v \int_0^u \frac{dudv}{r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\sum_{k=1}^3 u_k v_k}{\sqrt{a}} \int_0^1 \ln \frac{f_2(q)}{f_1(q)} dq$$

$$f_1(q) = |b + 2\sqrt{ab}|$$

$$f_2(q) = |2a + b + 2\sqrt{a(a+b+c)}|$$
(7)

$$a = \sum_{k=1}^3 u_k^2$$

$$b = \sum_{k=1}^3 (-2u_k (w_k + v_k q))$$

$$c = \sum_{k=1}^3 (w_k - v_k q)^2$$

p, q :	独立変数 $0 < p < 1, 0 < q < 1$
a, b, c :	変数
u, v, w :	ベクトル, $u = (u_x, u_y, u_z) = (u_1, u_2, u_3)$

また、矩形断面をもつ長さ l の線素の自己インダクタンス (L) は式(8)で求める。ただし、 R_s は式(8)の幾何学的平均距離である。

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{R_s} - 1 \right) \quad (8)$$

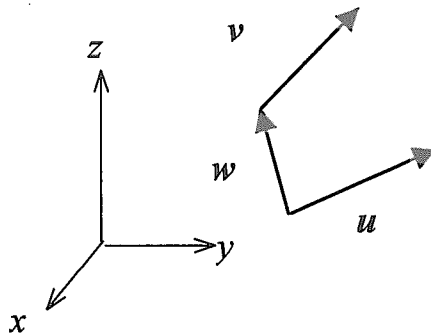


Fig. 3-1 Location of filaments for inductance calculation in non-circular coil used in Equation (7). Filament u and v are located by vector w.

4. 計算精度と解析法

4.1 磁界計算における数値積分の精度

本プログラムの磁界計算での数値積分には Gauss 積分法を用いている。そのため、積分の次数によって、計算される磁界に誤差が生ずる。計算精度を得るために次数を上げれば解析時間が比例して増加する。これらのバランスを勘案して次数を決める必要がある。内径 1.0 m のソレノイドの内側の磁界を計算し、その誤差を求めた。積分次数により、磁界計算値は Table 4-1 と Fig. 4-1 に示すように変化する。この解析結果から、実用的には計算精度が 0.5% になる 16 次積分以上を用いればよいことがわかる。

Table 4-1 Error of magnetic field calculation with orders of Gaussian quadrature

Integration Orders	Bmax (T)	R at Max. (m)	Error (mT)	Rin=1.0 (T)	Error (mT)	Error (%)
8	10.2935	0.936	+9.1	10.0884	-196.0	1.9
16	10.2856	0.983	+1.2	10.2315	-52.9	0.5
24	10.2847	0.992	+0.3	10.2602	-24.2	0.2
32	10.2844	0.995	0.0	10.2705	-13.9	0.1

4.2 線素数とインダクタンスの精度

インダクタンスを求める場合、コイル断面内の線素数が精度に影響する。環状コイルの場合は、線素数と自己インダクタンスの精度の関係は Table 4-2 と Fig. 4-2 に示すように、線素数を 100 以上にすると真値に対する誤差が 2%程度になる。ただし、Table 2 の真値は 1,600 本の計算結果場合とした。

さらに、非円形コイルのインダクタンス計算例として、ITER-FDR を計算した結果を Table 4-3 と Fig. 4-3 に示す。断面内の線素を 100 以上にすると誤差が 3%になることがわかる。ただし、Table 4-3 の場合は別プログラム[9]の結果を真値とした。

Table 4-2 Error of self-inductance in solenoid (HF24)

Configuration	Number of filaments	Inductance (H)	Error (%)
3x3	9	8.25×10^{-7}	15.43
5x5	25	7.63×10^{-7}	6.73
7x7	49	7.41×10^{-7}	3.70
10x10	100	7.28×10^{-7}	1.91
10x40	400	7.148×10^{-7}	0.01
10x80	800	7.146×10^{-7}	-0.01
20x80	1600	7.147×10^{-7}	

Table 4-3 Error of self-inductance in non-circular coil (ITER-FDR)

Configuration	Number of filaments	Inductance (H)	Error (%)
3x3	9	0.998	8.70
5x5	25	0.965	5.11
7x7	49	0.951	3.68
10x10	100	0.943	2.74
12x12	144	0.940	2.42

4.3 電磁力の計算における体積の計算法

電磁力を計算する場合は、その計算点が分担する体積が必要になる。そのため、コイルを8接点六面体の組み合わせでモデル化し、8接点の重心点を含めた9接点から12個の四面体に分割する。Fig. 4-4は六面体の中の4接点からなる四面体を示す。四面体の体積(V)は、4接点の座標(x, y, z)から式(9)で求める[10]。六面体の8接点で磁界を求めて、それぞれの接点の分担する体積を掛けた値が、各8接点の電磁力となる。

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{vmatrix} \quad (9)$$

4.4 リップル率

トカマク装置の重要なパラメータであるリップル率(δ)はブラズマ外周表面での磁界の変動で、式(10)で定義される。ただし、円周上の最大磁界を B_{\max} 、最小磁界を B_{\min} とする。

$$\delta = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} \quad (10)$$

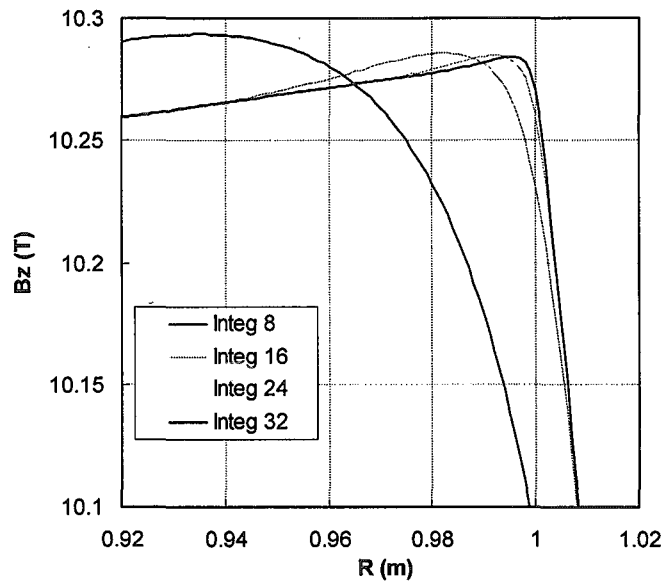


Fig. 4-1 Error of magnetic fields caused by the order of Gaussian quadrature

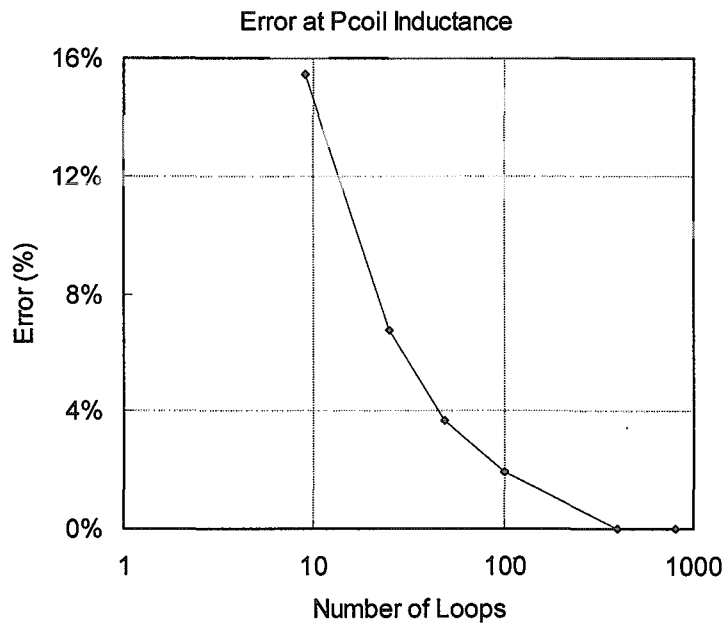


Fig. 4-2 Error of self-inductance of solenoid caused by number of filaments

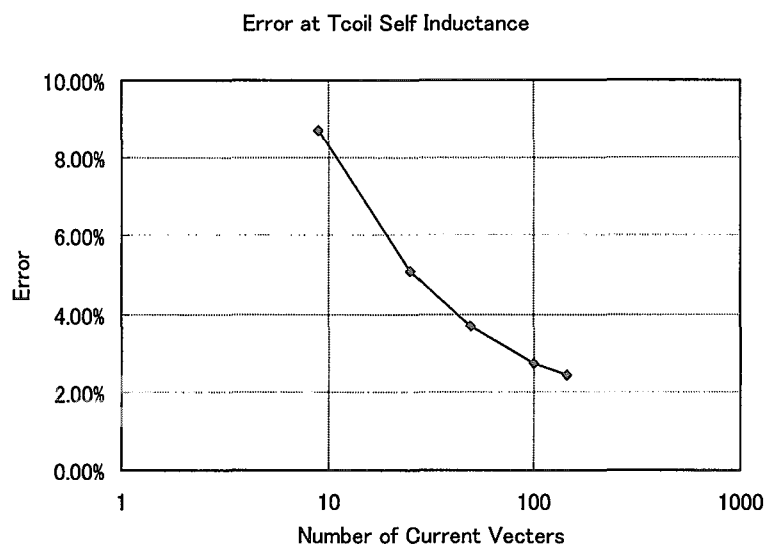


Fig. 4-3 Error of self-inductance of non-circular coil caused by number of filaments

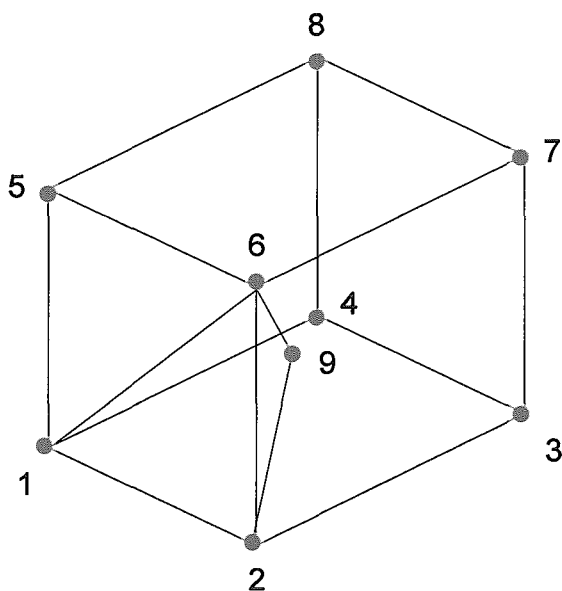


Fig. 4-4 Definition of a tetrahedron (1, 2, 6, 9) in a hexahedron (1, 2 ...8) and gravity center (9)

5. 磁界とインダクタンス計算の検証

空心コイル用電磁計算プログラム「COIL」は長く超伝導コイルの設計に使用してきたプログラムであるため、多くの実測データを有している。ここでは、実際に製作されたコイルの測定結果と計算結果を比較して、計算方法を検証する。実測例のまだ無いトカマク用のコイルについては、所外の計算プログラムで比較を行った例を以下に示す。

5.1 ソレノイド

5.1.1 超伝導ソレノイド(HF24)

実用的な円筒形をしたソレノイドの実証として原研で試用している超伝導ソレノイド HF24[11]を Fig. 5-1 のコイルに示す。完成後に核磁気共鳴素子を用いた厳密な磁界測定の結果ある。円筒形のソレノイドは導体を最適に使用するため、Fig. 5-1 に示すようにグレーディングする機会が多い。そのため、発生磁界の計算は導体設計上重要な項目である。Table 5-1 に磁界計算結果と測定結果と、Fig. 5-2 に半径方向の軸方向の磁界(B_z)分布を示す。計算結果は実用的な誤差範囲内である。

Table 5-1 Measurement and calculated vales of a solenoid: HF24

		Measured Values	Calculated Values	Error (%)
Magnetic Field	(T)	13.0	12.91	-0.72
Self Inductance	(H)	5.46	5.64	3.30

5.1.2 実証ポロイダル・コイル(DPC)

核融合炉用ポロイダル・コイルの初の実機規模の試験体である実証ポロイダル・コイル (DPC) [12]を Fig. 5-3 に示す。垂直磁界成分(B_z)の半径分布を Fig. 5-4 に示す。その磁界とインダクタンスの測定結果を Table 5-2 にまとめた。

Table 5-2 Measurement and calculated vales of two solenoids: DPC

		Measured Values	Calculated Values	Error (%)
Magnetic field by U1 single charge	(T)	4.25	4.278	0.65
Self inductance - average	(H)	24.05	23.61	-1.83
Self inductance (U1, U2)		(24.1, 24.2)		
Mutual Inductance	(H)	7.8	7.767	-0.41

5.1.3 Gyrotron 用超伝導コイル

核融合炉用の加熱装置であるジャイロトロンに所定の磁界を供給する円筒形多重コイル Gyrotron 超伝導コイル[13]の Fig. 5-5 に示す。コイル群は2対のガン領域コイルと2対の共振領域コイルと、3個の補助巻線から構成される。Fig. 5-6 に軸上の磁界分布の計算値を示す。磁界とインダクタンスの測定結果および計算値の比較を Table 5-3 に示す。このように磁界精度が高く要求される場合においても、磁界精度は1%程度あれば実用上十分である。

Table 5-3 Measurement and calculated vales of multi solenoids: Gyrotron

Location of Z-axis	Measured Value (T)	Calculated Value (T)	Error (%)
-10	0.248	0.248	0.08
0	0.252	0.254	0.71
10	0.260	0.258	-1.09
390	5.002	4.993	-0.17
400	5.010	5.001	-0.17
410	5.001	4.969	-0.63
Stored Energy (kJ)	585.1	576.8	
Inductance (H)	91.0	89.7	-1.41

5.2 レーストラック型コイル

レーストラック型コイルの例として SOR などの電子加速器で使用される Wiggler コイル[14]の例を Fig. 5-7 示す。ビームライン上の磁界の計算値を Fig. 5-8 に示す。コイル主1対と副コイル2

対から構成される。磁界計測と解析結果を Table 5-4 に示す。

Table 5-4 Measurement and calculated vales of racetrack coils: Wiggler

	Measured Value (T)	Calculated Value (T)	Error (%)
Main Coil	3.36	3.390	0.89
Auxiliary 1 Coil	-2.13	-2.148	0.85
Auxiliary 2 Coil	-2.17	-2.148	1.01

5.3 非円形コイル

非円形コイルの例として LCT コイル[15]の例を示す。Fig. 5-9 に巻線部の形状を示す。磁界計測と解析結果を Table 5-5 に示す。この程度大きさのコイルになると、磁界測定に用いるホール素子の取付け位置や方向に十分な精度がないため、測定値に多くの誤差が含まれたと考えられる。コイル用電源や保護装置は 10%程度の裕度を持っているため、インダクタンスの計算においては、実用上の要求精度は 5%である。

Table 5-5 Measurement and calculated vales of non-circular coil: LCT

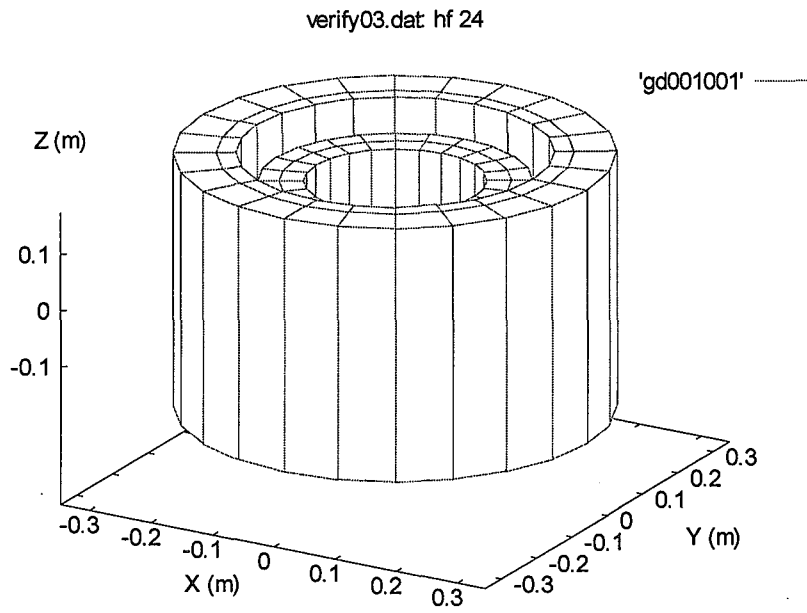
	Measured Value (T)	Calculated Value (T)	Error (%)
Inductance (H)	2.02	1.966	-2.65
Magnetic Field (T)	6.4	6.20	-3.13

5.4 トカマク用コイルの設計例

ITER-EDA の最終報告書[16]で報告した TF コイル群のインダクタンスを示す。Fig. 5-10 に示すような非円形(D) 型コイルから構成される。断面内を 25 本の線素で近似した場合の計算結果を Table 5-6 に示す。比較の対象のために EFFI[4]を基に製作された NEFFI[9]を用いた計算を示す。その結果、磁界と相互インダクタンスは 1%以下の精度で一致したが、自己インダクタンスが誤差は大きいことが示された。それは、4.2 節に示したように自己インダクタンスの計算では線素数を 100 本以上にして計算して誤差を下げる必要がある。

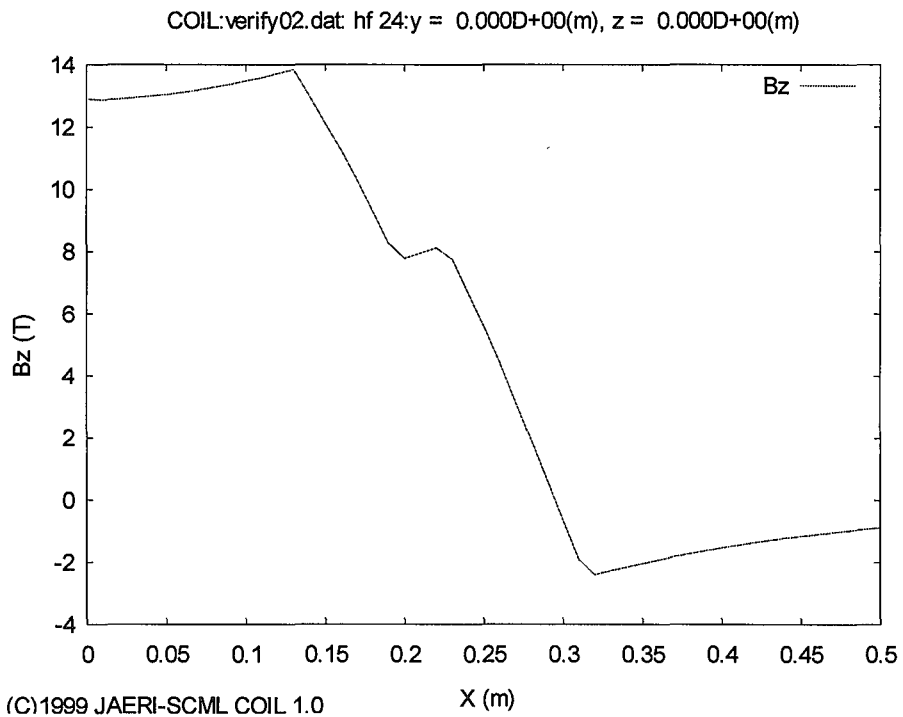
Table 5-6 Inductance calculations between two independent programs

	Value by NEFFI [12]	Value by COIL	Error (%)
Self Inductance (25)	0.91771	0.9645	5.11
Self Inductance (144)	-	0.9400	2.42
Mutual Inductance 1-2	0.3881	0.3856	-0.65
1-3	0.2047	0.2042	-0.21
1-4	0.1213	0.1214	0.05
1-5	0.0773	0.0774	0.24
1-6	0.0522	0.0524	0.39
1-7	0.0374	0.0376	0.50
1-8	0.0285	0.0287	0.60
1-9	0.0233	0.0234	0.66
1-10	0.0205	0.0206	0.71
1-11	0.0196	0.0197	0.72



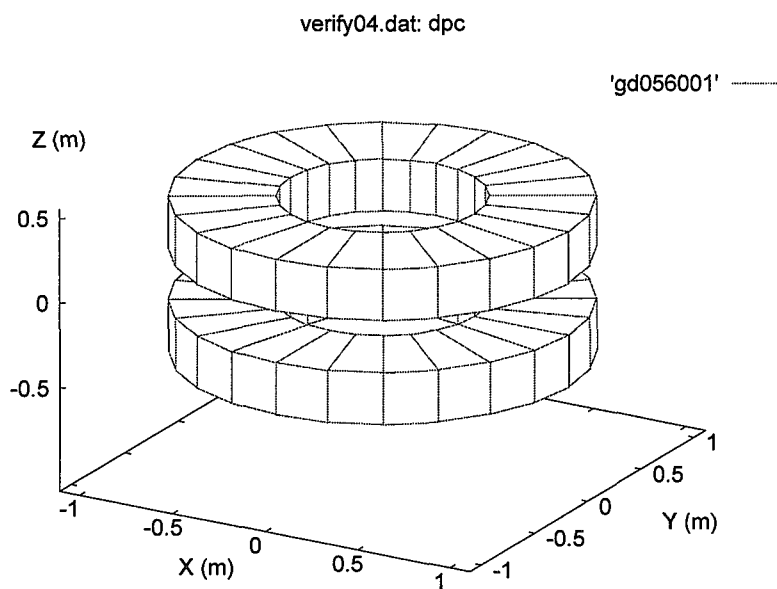
(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. 5-1 Shape of solenoid HF24



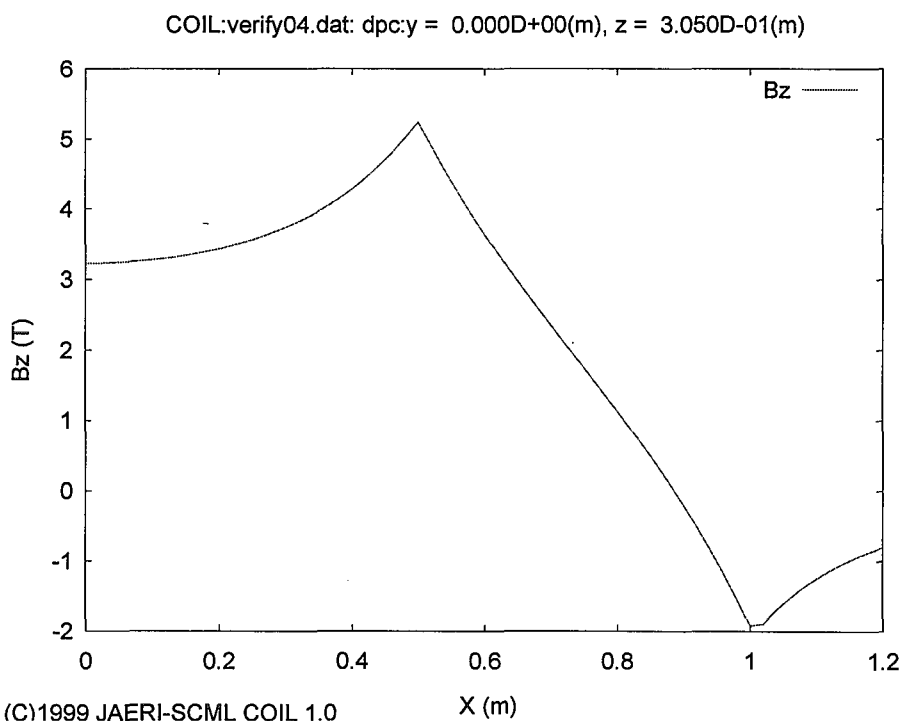
(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. 5-2 Axial magnetic field (B_z) distribution along radius from center at solenoid HF24



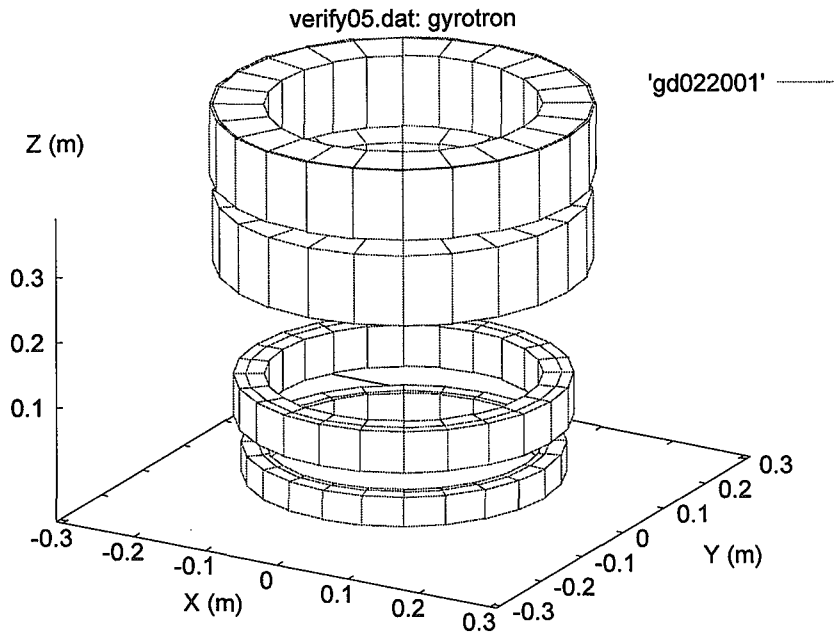
(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. 5-3 Shape of two modules in the DPC



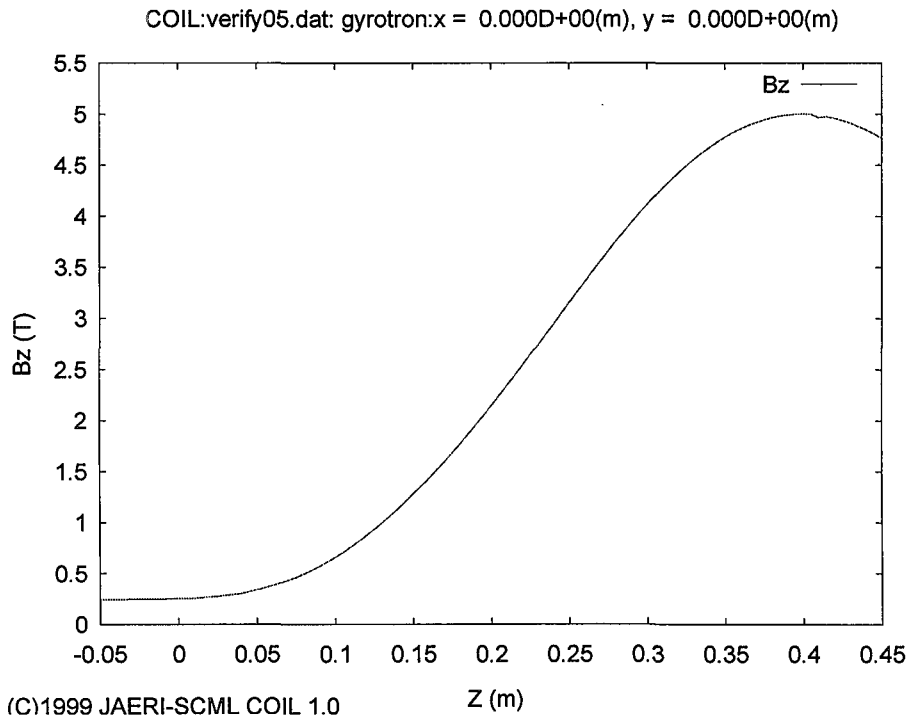
(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. 5-4 Axial magnetic field (B_z) distribution along radius from center at the DPC



(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. 5-5 Shape of combination o solenoid for Gyrotron

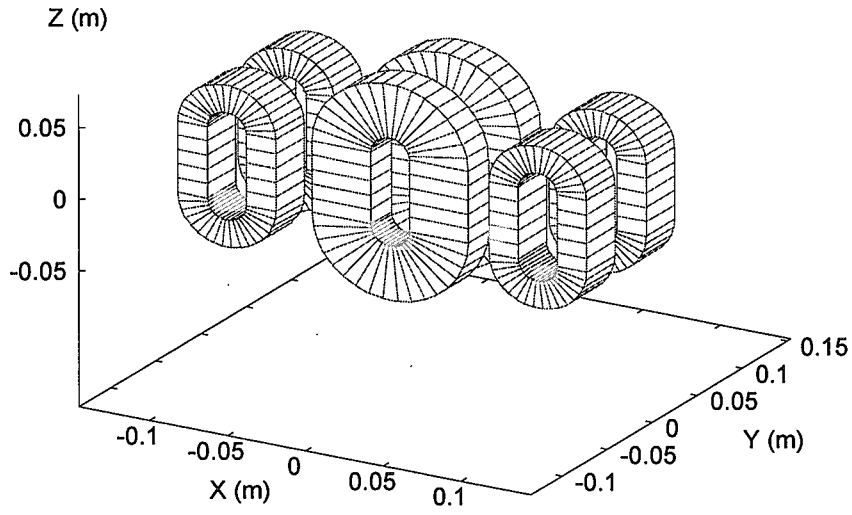


(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. 5-6 Axial magnetic field (Bz) distribution along radius from center at the Gyrotron

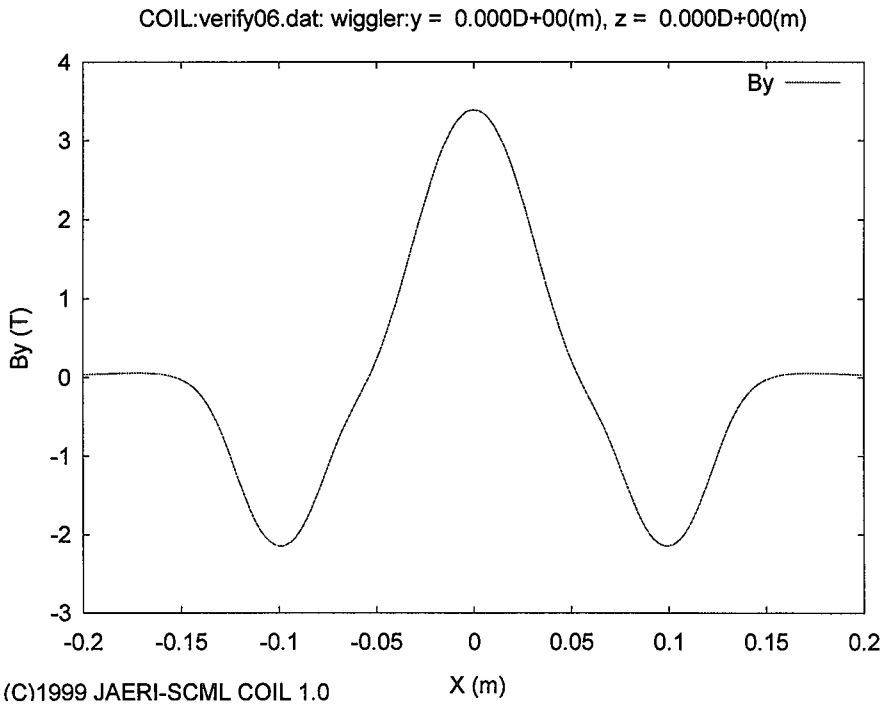
verify06.dat: wiggler

'gd002001' —



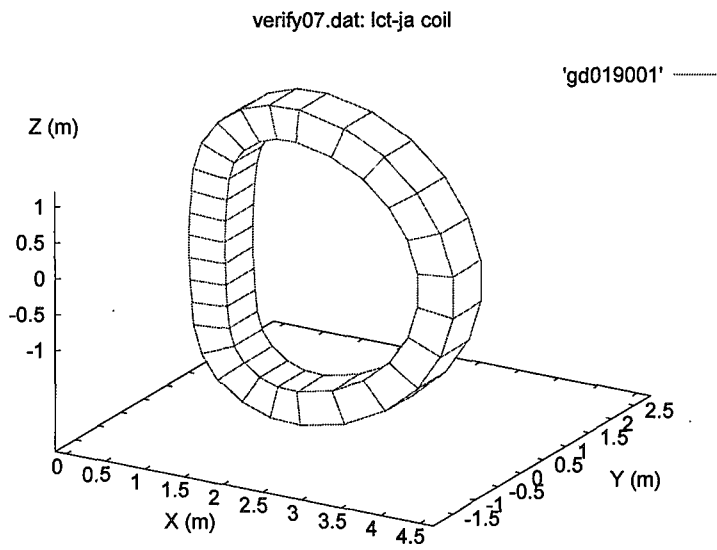
(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. 5-7 Shape of racetrack coils of Wiggler



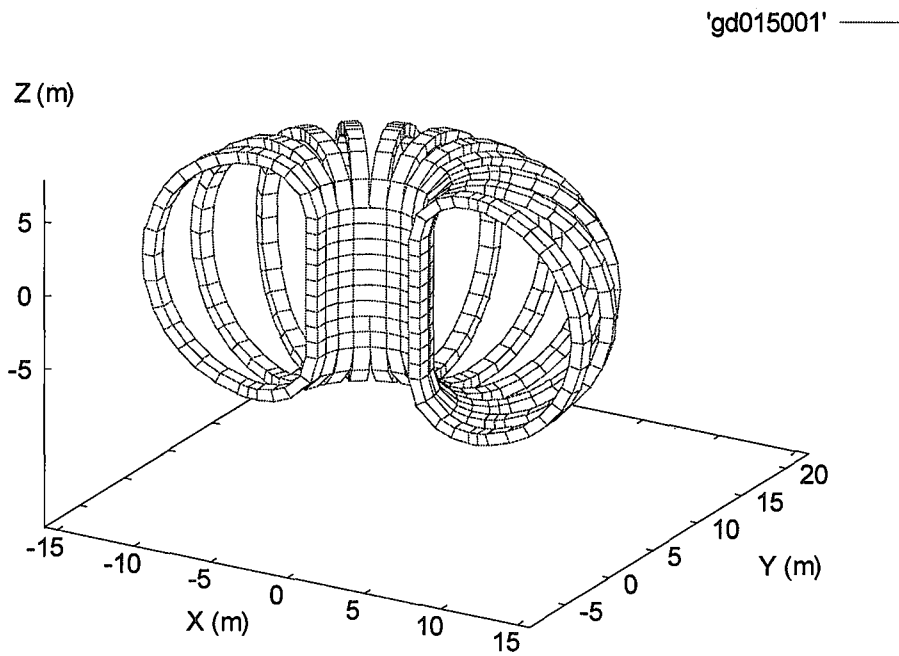
(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. 5-8 Axial magnetic field (B_y) distribution along beam line (centerline) at the Wiggler



(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. 5-9 Shape of winding pack of the Japanese LCT



(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. 5-10 A half of torus consisted by 10 toroidal field coils in the ITER tokamak

6. プログラムの使用法

6.1 コイル形状定義の方法

磁界計算においては、3次元空間に配置されたコイル形状を定義する必要がある。そのため、COILでは、トカマク装置のトロイダル・コイルを想定した Tcoil と、ポロイダル・コイルを想定した Pcoil コマンドの2個が用意されている。コイル形状の定義の方法は付録 A と付録 B に詳細に記述してある。

- (1) Tcoil: 非円形コイルは扇形導体と直線導体の組み合わせで X-Z 面に定義する。定義したコイルを平行移動 (O_x, O_y, O_z) と Z 軸周りの回転(θ)で定義する。Fig. 6-1 にそれぞれの記号の意味を示す。
- (2) Pcoil: 円筒コイルの定義と Z 軸上 (O_z) で移動を定義する。Fig. 6-2 にそれぞれの記号の意味を示す。

6.2 磁界計算点座標の自動生成

コイルの設計において、磁界の計算点を自動生成すると便利である。さらに、他のプログラムで生成された点の磁界計算も行う必要がある。計算点自動生成の方法などは付録 A と付録 B に記述してある。COIL は以下に示すような計算点を自動生成するコマンドを有する。

- (1) 直線上の磁界分布: line
- (2) 円周上の磁界: circle : トカマク装置のパラメータであるリップル率の計算ができる。
- (3) 非円形コイルの導体に沿った分布: perimeter
- (4) 平面上の磁界分布: grid
- (5) 外部から与えられる点の磁界計算
- (6) 電磁力計算のため、接点の生成と電磁力計算と外部プログラムとのデータの交換

6.3 プログラムの使用法

COIL の使用法は、UNIX, Windows などのオペレーティング・システムと、それらのバージョン(98/Me/2000/XP)に依存するため本報告書には記載しない。そのため、プログラムのインストールや、詳細な使用法はプログラムに付属するマニュアルに記載されている。

COIL は超伝導コイルの設計に長く使ってきたプログラムであるから、実用的なコマンドを多く持っている。他のプログラムで1週間かかるような計算でも、半日で解析できるように実用的である。特にトカマク型コイル・システムに適した工夫が多くなされている。実際に使用する場合には、付録 A に例題を多く示したので参考にされたい。COIL の代表的なコマンドの説明を付録 B に記す。コマンドの詳細は、プログラム改良の項目であるためプログラムに付属するマニュアルに記載されている。

しかし、コイル形状の定義などはトカマク型コイル・システムで用いているコイルに適した設計になっている分、他のコイル形状にはあまり対応していない。今後改訂時に、さらに機能を追加したい。

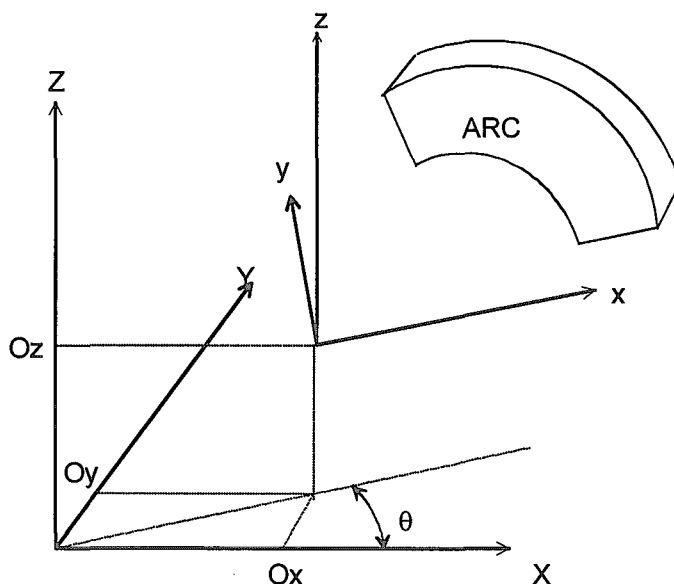


Fig. 6-1 Definition of Tcoil segment in the COIL program. Tcoil can be moved by location of Ox, Oy, Oz and angle of θ from X-axis

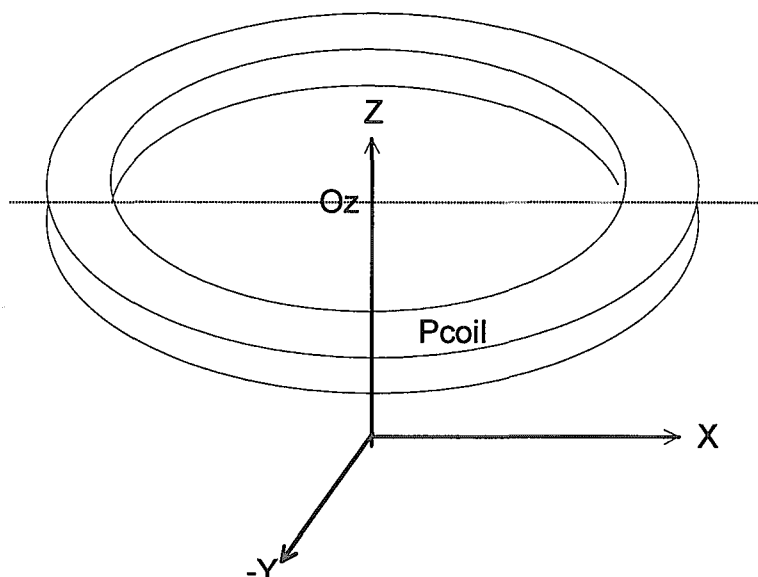


Fig. 6-2 Definition of Pcoil segment in the COIL program. Pcoil is only moved along Z-axis by distance Oz

7. まとめ

空心コイル用電磁計算プログラム「COIL」は1977年頃から開発に着手し、その後26年間に多くの改造や仕様の追加がなされてきた。本紙をまとめるにあたり、とかく散逸しやすい実際に製作されたコイルの磁界測定結果と解析結果をまとめることができた。今回、再計算し直しても、製作当時とまったく同一の解が得られた。しかも、計算機の性能向上により計算時間が大幅に短縮したため、より精度を高めた計算が容易に行えるようになった。

このように、空心コイルの電磁解析は本プログラムを用いて計算すれば工学的には十分満足の

いくものである。今後も実用的な超伝導コイルの設計解析や実験解析で利用されることを希望して、プログラムを公開することとした。

謝辞

本プログラムは、製作開始から26年も経過したものである。特に、もっとも基本的な解析を確立した島本 進氏（当時原研超電導磁石研究室長）、トカマク装置に最適化させたプログラム Field を作った西村 秀和氏（当時日立製作所からの外来研究員）、コマンド入力を確立したプログラム Force を作った大金 康夫氏（当時 KCS からの出向職員）などの協力によって進化し、その後も何度か便利なコマンドを追加しながら改訂した。最後に、本解析プログラムの製作に関係された多くの方に感謝します。

参考文献

- [1] 島本進：超電導磁石に関する研究、電気総合研究所研究報告第 722 号 (1971).
- [2] S. Shimamoto, et al., "Three Dimensional Stress Calculation of Toroidal Coil by Finite Element Method", 6th International Conference on Magnet Technology (MT-6), pp. 883-887 (1977).
- [3] S.J. Sackett, "Calculation of Electromagnetic Field and Forces in Coil System of Arbitrary Geometry", 6th Symposium on Engineering Problems of Fusion Energy, p.935 (1975).
- [4] S.J. Sackett, "A Magnetic Field Code for Handling General Current Carrying Conductor in Three Dimension", 5th International Conference on Magnet Technology (MT-5), pp. 203-209 (1975).
- [5] S.J. Sackett, "EFFI- A Code for Calculating the Electromagnetic Field, Force, and Inductance in Coil Systems of Arbitrary Geometry", UCRL-52402 (1978).
- [6] 後藤憲一、山崎修一郎：詳解電磁気学演習、共立出版 (1970).
- [7] 小林朋文：大型核融合装置の空心変流器コイルおよび垂直磁場コイル配置の最適化、JAERI-M 5859 (1974).
- [8] 私信：吉田 清：インダクタンス計算コードの整備 (1979).
- [9] 私信：嶋田 守、NEFFI の計算結果。
- [10] 日本機械学会編：機械工学便覧、p. A2-72 (1987).
- [11] M. Nishi, et al., "Development of a 240 mm Bore - 13 T Superconducting Coil for Large Scale Conductor Testing", IEEE Transactions. MAG, Vol.28, pp.597-604 (1992).
- [12] K. Okuno, et al., "The First Experiment of the 30-KA, Nb-Ti Demo Poloidal Coils (DPC-U1 and U2)", Proceedings of the 11th International Conference on Magnet Technology, pp. 812 - 817 (1990).
- [13] M. Konno, et al., "Superconducting Magnet System for High Power Gyrotron", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 3, No. 1, pp.551-554 (1993).
- [14] 今野雅行：超電導ウィグラー・コイル製作、JAERI-M 90-077 (1990).
- [15] S. Shimamoto, et al., "Domestic Test Result of the Japanese LCT Coil", IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 19, pp. 851-858 (1983).
- [16] ITER-EDA, "Technical Basis for the ITER Final Design, Cost review and Safety Analysis (FDR)" IAEA/ITER EDA/DS/16, IAEA, VIENNA (1998).

付録 A コマンドの解説

空心コイル電磁計算プログラム: COIL の利用者がコイル形状や磁界計算点等の情報を、プログラムに伝達する為に入力する命令語をコマンドと呼ぶ。以下、COIL で用いるコマンドの作法について述べる。具体的な例は付録 B に記す。

A.1 用語の定義

コマンド	プログラムへの指示を入力するために予め決められた単語である。
サブコマンド	コマンドを入力した後、複数行に渡る入力するためのものでコマンドと同じ形をしている。サブコマンドを持つコマンドを入力するとそのコマンド・モードになり (プロンプトが%から\$に変更される)、サブコマンドが入力できる。ENDサブコマンドを入力するとそのコマンド・モードが終了する。TCOIL と PCAL で用いる。
パラメータ	コマンドの後に付けて、そのコマンドで指示したいことを記述する。パラメータはキーワードと項目から成る。
キーワード	パラメータを識別するためのアルファベット群をいう。
項目	パラメータのうち利用者が必要な数字や文字列を決めて入力する部分をいう。
コメント	コマンドのどこでも、記号 ; (セミコロン) や記号# (シャープ) に続いた任意の文字は、コマンドの実行には影響ないコメントである。

記号

Tcoil	Tcoil はドーナツ上に配置された垂直に立つコイルでトロイダル磁界コイル (Toroidal Field Coil) と呼ばれる。本紙では T c o i l と省略する。
Pcoil	Pcoil は同一の軸上に配置された円輪状のコイルでポロイダル磁界コイル (Poloidal Field Coil) と呼ばれる、本紙では P coil と省略する。
Number	整数
Value	実数
Name	白文字を含まない文字列
String	白文字を含む文字列でアポストロフ(')で囲まれる。

A.2 コマンド・フォーマットの例

コマンドは最大 256 文字まで長さま入力可能である。また、入力は大文字でもすべて小文字に変換されて内部処理されるため、大文字小文字の区別はない。基本的には、コマンドとパラメータから構成される。コメントは文中どこでも ; や # で定義できるので、多めに入力するとよい。コメントは日本語も入力できる。

コマンド	パラメータ				コメント
PCOIL	Num	WIDE	Wr	Wz	; ABCD
	項目	キーワード	項目	項目	

A.3 コマンド・フォーマットの見方

パラメータ	フォーマットで記述されている順序で入力する。各パラメータ、キーワード、
の入力順序	項目間には 1 ヶ以上の空白が必要である。
英大文字	コマンド、サブコマンド、キーワードを示す。そのまま入力してもよいが、

頭から数文字で十分である。各コマンドには省略できない部分をアンダーラインで示した。大文字と小文字は同じ扱いである。	
英小文字	項目を示す。利用者が必要な数字又は文字列に置き換えて入力する。
( | )	括弧内のキーワードの中から一つ選択できる。入力は必須である。
{ | }	オプションで、{ | }の中を全部省略するか一つ選択して入力する。省略時の設定される値は説明の欄に記述される。
< >	< >は値で number, value, name などを入力する。
[]	本プログラムの元になった FORCE 用のキーワードで、当面使用はできるが将来は廃止される予定である。

A.4 単位系

本プログラムの単位系は以下の 2 種類から SET コマンドで設定する (%SET ENG)。初期値は SI 単位系である。内部処理は MKS 単位系であるので、コイル形状定義は工学単位系で、計算結果は SI 単位系で表示することも可能である。既存の FORCE コマンドを使う場合は最初に SET ENG の 1 行を追加する必要がある。

SI 単位系	通常の SI 単位系を用いる。(内部処理)
MKS	長さ m 力 N インダクタンス H 角度 度 degree 電流 A 磁界 T 電流密度 A/m ²
工学単位系	工学的に慣用として使っている単位系で、MKS のうち以下の 3 点が変更されて入出力される。ただし、内部処理は SI 単位系であるのでエラーメッセージなどは SI 単位系で出力される。
ENG	長さ mm 力 kg·f 電流密度 A/mm ²

A.5 座標系

本プログラムはトカマク装置のコイルを設計することを目的に製作されたため、本文 4 章の Fig. 4-5, Fig.4-6 に示すような座標系を用いる。

Tcoil は任意形状のコイルで円弧 (ARC) と直線 (BAR) を組み合わせて、局座標の x-z 面内に閉じたループを作る。さらに、ORIGIN キーワードで局座標を X, Y, Z 方向への移動と、Z 軸周りの回転角度 θ で、Tcoil を複数本配置したトーラスを作成する。そのため、Tcoil は円筒座標系では表現できず、コイルの横幅は toroidal 方向になり、厚みは Radial 方向になる。さらに周方向は poloidal 方向と呼ばれる。

Pcoil は円筒形状コイルで Z 軸に対称に配置され、Z 軸の位置だけの変動できる。Pcoil は通常の円筒座標系で表現できるため、コイルの高さは Z 方向で、コイルの幅は R 方向で定義する。

A.6 各コマンドの仕様

以下に COIL で使えるコマンドの概要をまとめた。各コマンドの詳細な定義は、プログラムに添付されるマニュアル (CoilHelp.htm) に記載されている。

コマンド名	機 能
CD	カレント・ディレクトリーの表示と変更
CHARGE	コイルの電流密度の再設定
CIRCLE	円周の磁界を計算、リップル率の計算、
DELETE	コイルを消去
DIR	カレント・ディレクトリー内のファイルを表示。(DOS や UNIX を起動)
EXIT	プログラムの終了。
FIELD	外部ファイルの座標の磁界を計算
FINISH	起動状態を保存してプログラムの終了
FILE	各種ファイル名の変更
LOAD	コマンド・ファイルの設定しコマンドの自動的に実行
FORCE	電磁力計算
GRID	平面上の磁界計算
HELP	CoilHelp.htm の表示
LINE	直線上の磁界計算
LIST	コイル一覧の表示
MESH	自動メッシュ生成
MUTUAL	相互インダクタンスを計算
PCOIL	Pcoil の定義
PERIMETER	Tcoil の内周の磁界を計算
PFCAL	Pcoil の最高磁界、電磁力およびインダクタンスを一括して計算
QUIT	コマンド・ファイルの自動実行を止めて、コンソールからの入力に切り替え
RECONNECT	コイル定義状態の再現
RELOT	グラフの再表示
RESET	初期状態に復帰
SAVE	コイル定義状態や計算結果 (EXCEL 形式) の保存
SET	各種オプションの表示と設定
SELF	自己インダクタンスを計算
SHAPE	コイル形状図の表示
SPOT	1 点の磁界計算
TCOIL	Tcoil の定義
TFCOPY	Tcoil の複写
TMOVE	Tcoil の移動と回転
TITLE	タイトルの定義
TYPE	File の内容表示 (内部で DOS や UNIX を起動)

付録 B 例題と検証データ

B.1 はじめに

付録 B は、空心コイル用電磁計算コード: COIL で使用するコマンドを理解するためのサンプルとして準備した。コマンドを集めたコマンド・ファイルは動作試験で用いた例題と検証データからなる。testXX.dat は動作試験に用いるため、計算速度を優先して作成されている。特にインダクタンスの計算精度は低いので、そのまま使用しないよう注意がいる。verifyXX.dat は、本文 4、5 章で使用した検証用データである。

いずれのコマンド・ファイルとデータも本体に添付されているので、COIL を実際に動作させてリスト出力ファイルやグラフィックを表示することができる。また、sample¥testrun.bat を起動するとすべてのテストが自動的に動作する。以下に入力コマンドとデータと結果の一部を示す。

章	項目	コマンド・ファイルとデータ
例題用データ		
B.2	コマンドの操作	test1.dat
B.3	ポロイダル・コイルの磁界とインダクタンス計算	test2.dat
B.4	トロイダル・コイルの磁界とインダクタンス計算	test3.dat
B.5	ポロイダル・コイルの電磁力計算	test4.dat
B.6	トロイダル・コイルの電磁力計算	test5.dat
B.7	トカマク装置の磁界計算	test6.dat
	外部ファイルからの磁界計算	test7.dat test7xyz
	外部プログラム (IDEAS) からの電磁力計算	test8.dat test8ideas
	外部プログラム (ANSYS Ver.5.3) からの電磁力計算	test9.dat test9ansys
B.8	外部プログラム (ANSYS Ver.6.0) からの電磁力計算	test10.dat test10ansys
検証用データ		
4.1	磁界計算の積分精度	verify01.dat
5.1	ソレノイドコイルの例 - HF24	verify02.dat
5.1	PF coil の線素数の関係	verify03.dat
5.1	ソレノイドコイルの例 - DPC	verify04.dat
5.1	ソレノイドコイルの例 - Gyrotron	verify05.dat
5.2	レーストラックの例 - Wiggler	verify06.dat
5.3	D 型コイル-LCT	verify07.dat
5.4	トカマク装置の解析例	verify08.dat
4.2	TF coil の線素数とインダクタンスの関係	verify09.dat
5.4	TF coil の相互インダクタンスの計算	verify10.dat

B.2 コマンドの操作

コマンドの操作の試験を行う例を test1.dat に示す。この試験で、help コマンドで CoilHelp.htm がブラウザで表示されれば、プログラムの環境設定は完了である。

```
# Test1.dat System Operation
cd
dir *.dat
type test01.dat
```

```

set
file
help c
help
! 外部ブラウザを利用して Help を表示
pcoil 1 w 0.5 5.0 r 1.25 z 0.0 m 25.0 d 4 4 13
list a
del p 1
list a
exit

```

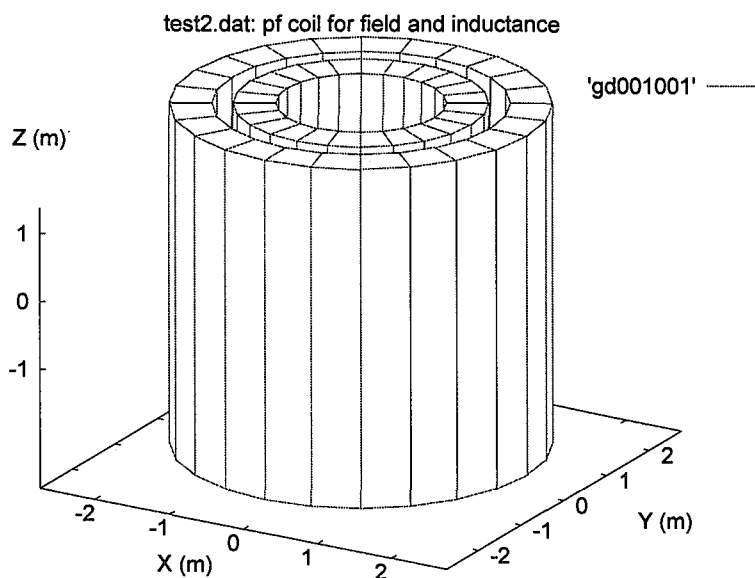
B.3 ポロイダル・コイルの磁界とインダクタンス計算

ポロイダル・コイルの磁界とインダクタンスを求める試験を行う例を test2.dat に示す。この例では、グラフ表示する外部プログラム gnuplot に正常にデータが渡されるかを確認する。

```

# test2.dat: test data for PFcoil
TITL 'Test2.dat: PF coil for FIELD and INDUCTANCE'
# Node = 192 = 4 x 4 x 12
# Elemrnt = 108 = 3 x 3 x 12
pcoil 1 w 0.5 5.0 r 1.25 z 0.0 m 25.0 d 4 4 13
pcoil 2 w 0.5 5.0 r 2.00 z 0.0 m 25.0 d 4 4 13
#quit
list a
shape a
! 外部プログラム gnuplot を利用して形状を表示
# Field calculation
spot 0 0 0
line x 0 dx 0.1 nx 41 max
line z 0 dz 0.2 nx 41 max
circ r 1.0 t 0 dt 1 nt 31 max
peri p 1 max
grid x 0 dx 0.2 nx 21 z 0 dz 0.2 nz 21 y 0
# Inductance
self p 1
self p 2
mutual p 1 2
exit

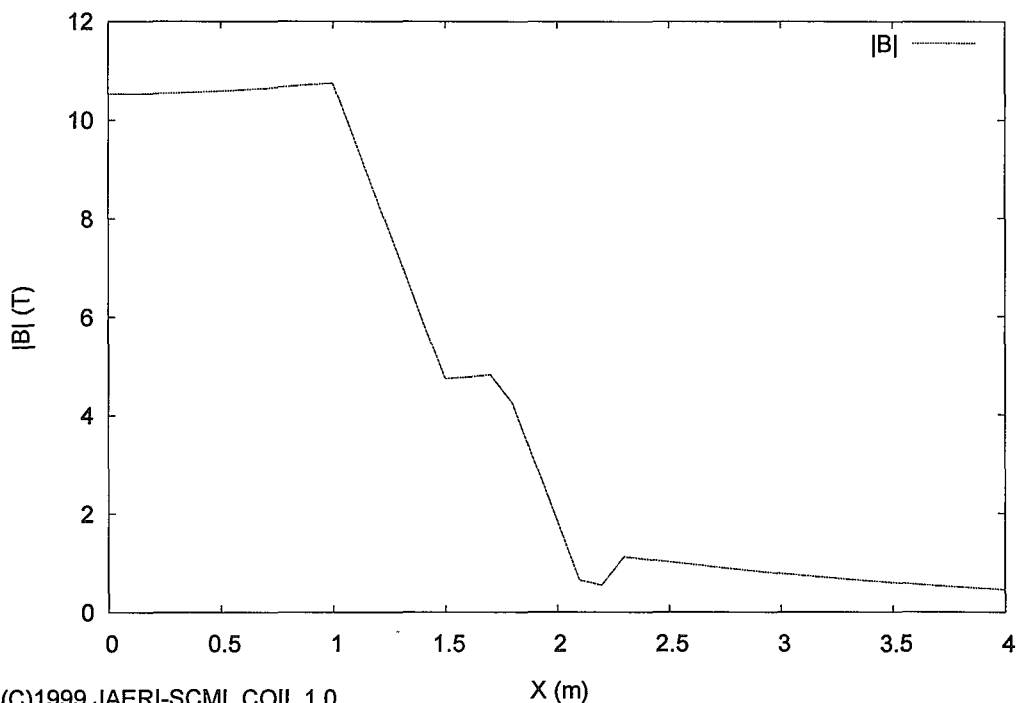
```



(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. B.3-1 Shape of solenoid: shape a

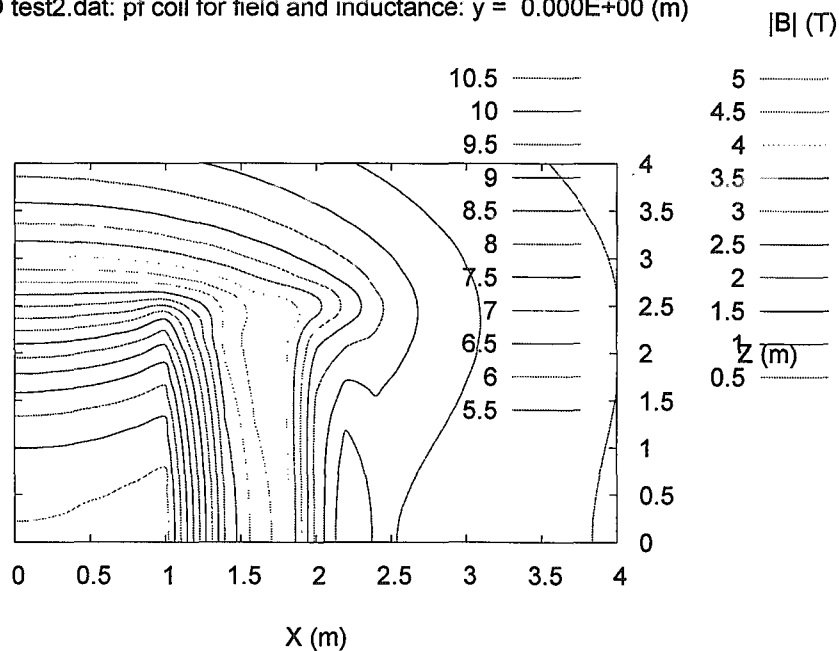
LINE test2.dat: pf coil for field and inductance: y = 0.000D+00(m), z = 0.000D+00(m)



(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. B.3-2 Magnetic field along radius: line x 0 dx 0.1 nx 41 max

GRID test2.dat: pf coil for field and inductance: y = 0.000E+00 (m)



(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. B.3-3 Contour plot of magnetic field: grid x 0 dx 0.2 nx 21 z 0 dz 0.2 nz 21 y 0

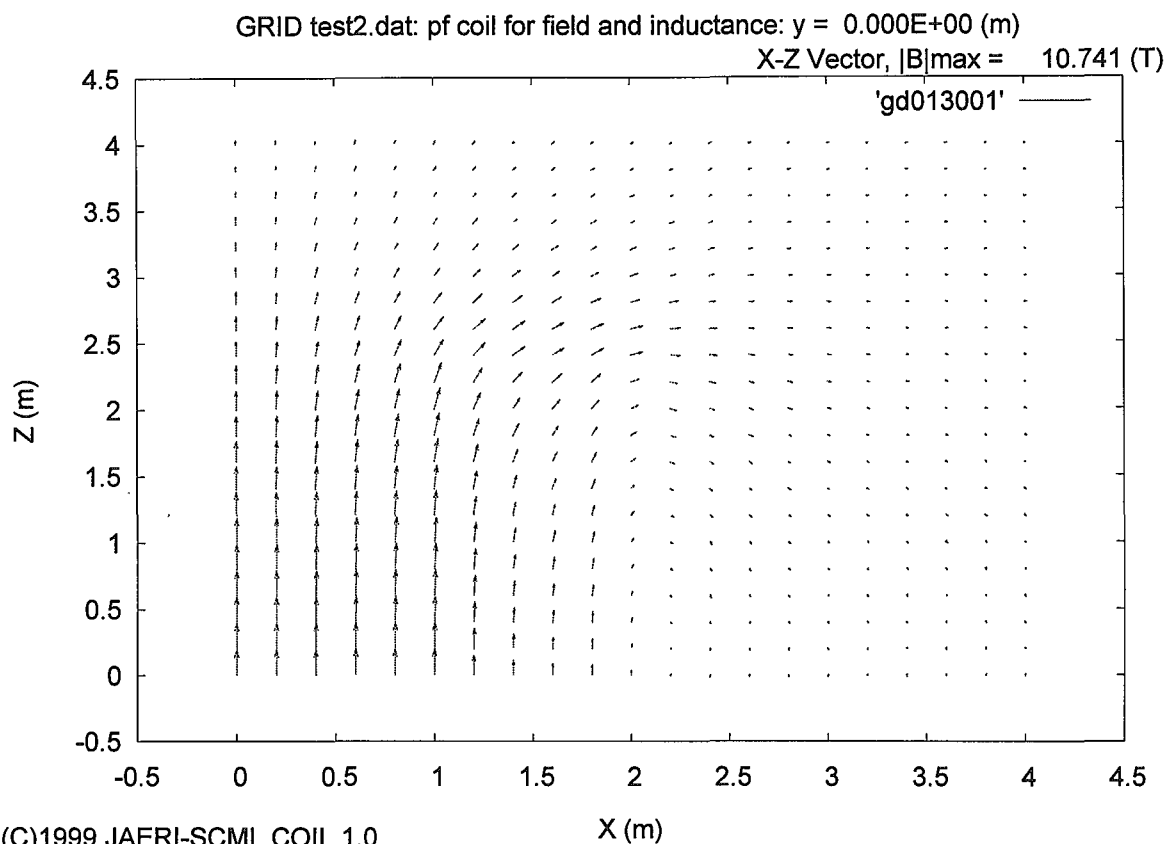


Fig. B.3-4 Flux distribution by allow: grid x 0 dx 0.2 nx 21 z 0 dz 0.2 nz 21 y 0

インダクタンスの計算結果を以下に示す。いずれの結果もターン数が 1.0 であるので実際のインダクタンスの値はターン数を掛けた値である。

Title:test2.dat: pf coil for field and inductance
 Mode : Self Date and Time :1999- 5-11 14:52: 8.18
 Poloidal Coil Shape
 Center Rc = 2.00000 , Zc = .000000 (m)
 Width dR = .500000 , dZ = 5.00000 (m)
 Terns = 1.00000 , nr = 4, nz = 4
 Self Inductance 2.331196D-06 (H)

Title:test2.dat: pf coil for field and inductance
 Mode : Mutual Date and Time :1999- 5-11 14:52: 8.18
 Poloidal Coil Shape
 Center Rc = 1.25000 , Zc = .000000 (m)
 Width dR = .500000 , dZ = 5.00000 (m)
 Terns = 1.00000 , nr = 4, nz = 4
 Poloidal Coil Shape
 Center Rc = 2.00000 , Zc = .000000 (m)
 Width dR = .500000 , dZ = 5.00000 (m)
 Terns = 1.00000 , nr = 4, nz = 4
 Z-Distance of two coils = .000 (m)
 Mutual Inductance 9.130734D-07 (H)

B.4 トロイダル・コイルの磁界とインダクタンス計算

トロイダル・コイルの磁界とインダクタンスを計算した例を test3.dat に示す。

```
# Test data for coil, 99-2-23, K. Yoshida
TITL 'Test3.dat, Only TF coil & Field & Inductance'
; ITER Magnet System 99-1-10, KY
| 省略
TCOIL 1 W 0.7722 0.5602 M 9.6 D 3 3 NT 150
ARC C 4.6376 0.00 R 5.84993 A -77.40 77.40 D 9
ARC C 5.2085 2.560 R 3.22703 A 77.40 116.50 D 4
ARC C 4.6150 3.748 R 1.89903 A 116.50 180.00 D 4
BAR S 2.716 3.748 E 2.716 -3.748 D 5
ARC C 4.6150 -3.748 R 1.89903 A 180.00 243.50 D 4
ARC C 5.2085 -2.560 R 3.22703 A 243.50 282.60 D 4
END
TFCO 17 NO 1 1 D 20.0
# field calculation
shape a
spot 6 0 0
line x 0 dx 0.2 nx 51 z 2 max
#quit
circ r 9 t 0 dt 1 nt 31 max
perimeter t 1 dp 2 dt 0.38 max
grid x 2 dx 0.2 nx 21 y 0 dy 0.2 ny 21 z 0
# Inductance
self t 1
mutual t 1 2
mutual t 1 3
mutual t 1 4
exit
```

Tcoil はループが閉じていなくても計算するが、解は性格でなくなる。そのため、ループの連続性をプログラムが検査している。

Check X-Z shape of Tcoil.

No.	Xstart	Zstart	Xend	Zend	Distance
1	5.91372	-5.70904	5.91372	5.70904	1.295934E-03
2	5.91245	5.70931	3.76861	5.44798	1.060563E-03
3	3.76766	5.44751	2.71597	3.74800	3.000004E-05
4	2.71600	3.74800	2.71600	-3.74800	3.000004E-05
5	2.71597	-3.74800	3.76766	-5.44751	1.060498E-03
6	3.76861	-5.44798	5.91245	-5.70931	1.296091E-03

インダクタンスの計算結果の出力を示す。いずれの結果もターン数が 1.0 で計算した。

```
Title: test3.dat, only tf coil & field & inductance
Mode : Self Date and Time :1999- 5-11 14:52:21.15
A Troidal Coil Geometry
```

Cross-section		Number of vectors	
Width (wx) =	.8 (m)	nx =	3
Thickness (wy) =	.6 (m)	ny =	3
Side-view	nn = 6		
Center (m)	Radius (m)	Angle (deg)	Mesh
(4.6, .0)	5.8	(-77.4, 77.4)	9
(5.2, 2.6)	3.2	(77.4, 116.5)	4
(4.6, 3.7)	1.9	(116.5, 180.0)	4
(2.7, 3.7)	.0	(2.7, -3.7)	5

(4.6, -3.7) 1.9 (180.0, 243.5) 4
 (5.2, -2.6) 3.2 (243.5, 282.6) 4
 Number of vectors nz = 30
 Maxnum node point is 270, Turns is 1.0
 Self Inductance is 1.966532E-05 (H)

Title:test3.dat, only tf coil & field & inductance
 Mode : Mutual Date and Time :1999- 5-11 14:52:21.15

A Troidal Coil Geometry

Cross-section Number of vectors
 Width (wx) = .8 (m) nx = 3
 Thickness (wy) = .6 (m) ny = 3
 Side-view nn = 6

Center (m)	Radius (m)	Angle (deg)	Mesh
(4.6, .0)	5.8 (	-77.4, 77.4)	9
(5.2, 2.6)	3.2 (	77.4, 116.5)	4
(4.6, 3.7)	1.9 (	116.5, 180.0)	4
(2.7, 3.7)	.0 (	2.7, -3.7)	5
(4.6, -3.7)	1.9 (	180.0, 243.5)	4
(5.2, -2.6)	3.2 (	243.5, 282.6)	4

 Number of vectors nz = 30

A Troidal Coil Geometry

Cross-section Number of vectors
 Width (wx) = .8 (m) nx = 3
 Thickness (wy) = .6 (m) ny = 3
 Side-view nn = 6

Center (m)	Radius (m)	Angle (deg)	Mesh
(4.6, .0)	5.8 (	-77.4, 77.4)	9
(5.2, 2.6)	3.2 (	77.4, 116.5)	4
(4.6, 3.7)	1.9 (	116.5, 180.0)	4
(2.7, 3.7)	.0 (	2.7, -3.7)	5
(4.6, -3.7)	1.9 (	180.0, 243.5)	4
(5.2, -2.6)	3.2 (	243.5, 282.6)	4

 Number of vectors nz = 30

Troidal Coil Rotation

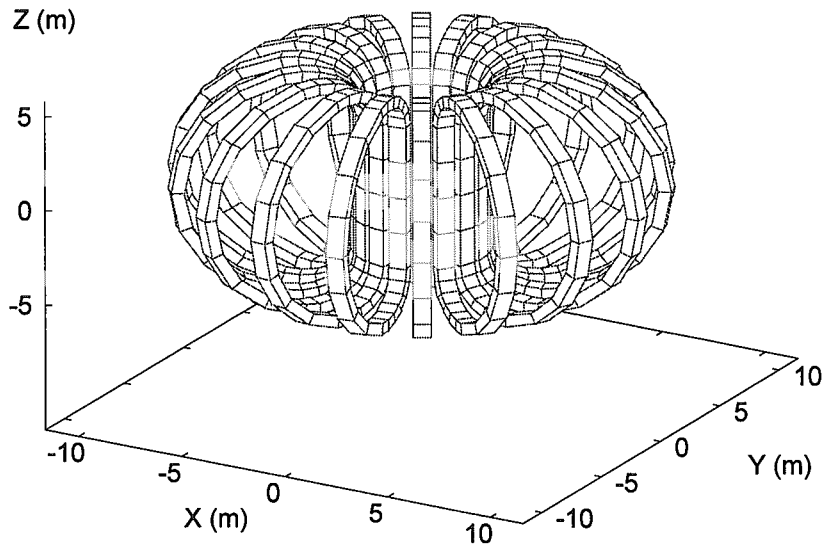
dX = .0 (m) , dY = .0 (m) , Angle= 20.00 (deg)
 Maxnum node point are 270 270, Turns are 1.0 1.0
 Mutual Inductance is 6.623968E-06 (H)

電磁力の出力の例を以下に示す。

Coil K	Max(|B|)	Max(|F|)	fx	fy	fz	|F|	Volume	Nodes
-1 p	10.4758 (57)	.137767E+08 (154)	-1.20365	-23631.9	-.121072E-07	.222420E+07	18.7417	192

test3.dat, only tf coil & field & inductance

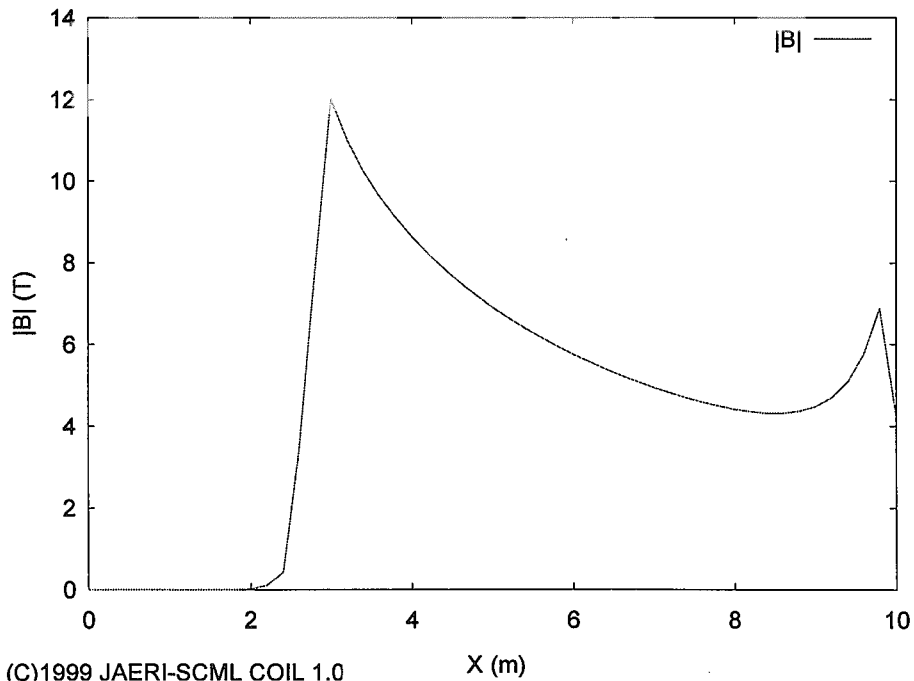
'gd005001' ———



(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. B.4-1 Shape of TF coils: shape a

COIL:test3.dat, only tf coil & field & inductance:y = 0.000D+00(m), z = 2.000D+00(m)



(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. B.4-2 Magnetic field along radius: line x 0 dx 0.2 nx 51 z 2 max

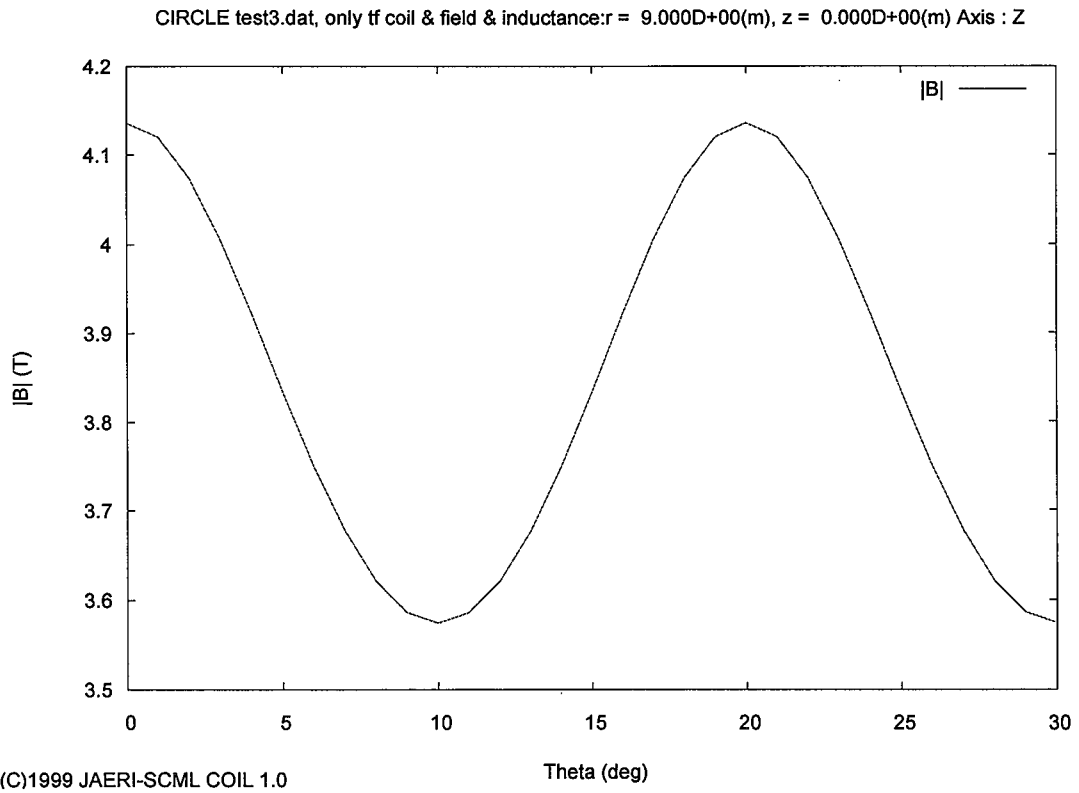


Fig. B.4-3 Ripple of magnetic field in plasma edge: circ r 9 t 0 dt 1 nt 31 max

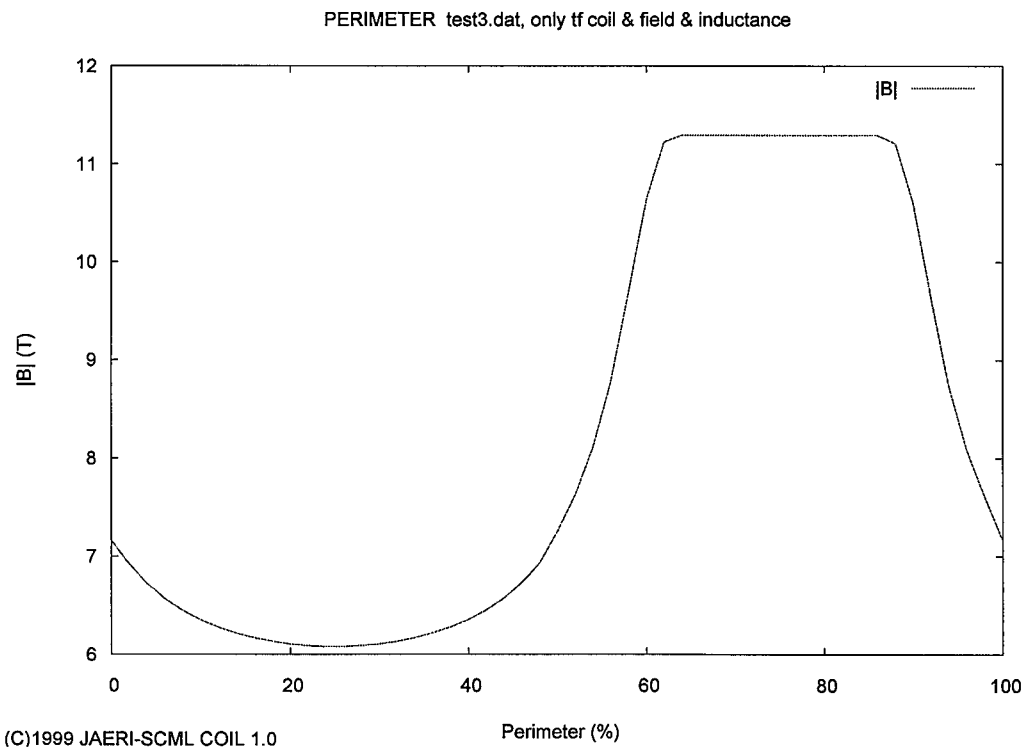


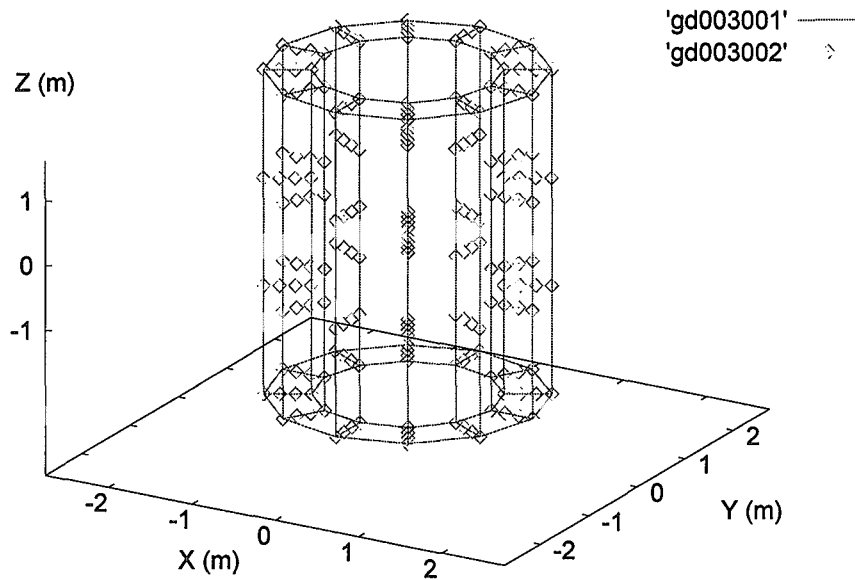
Fig. B.4-4 Field distribution along innermost turn of TF coil: perimeter t 1 dp 2 dt 0.38 max

B.5 ポロイダル・コイルの電磁力計算

ポロイダル・コイルコイルの電磁力を計算する例を test4.dat に示す。

```
# Test data for coil, 99-2-23, K. Yoshida
TITL 'Test4.dat for PF coil FORCE '
; Node = 192 = 4 x 4 x 12
; Elemrnt = 108 = 3 x 3 x 12
PCOIL 1 W 0.5 5.0 R 1.25 Z 0.0 M 25.0 D 4 4 13
PCOIL 2 W 0.5 5.0 R 2.00 Z 0.0 M 25.0 D 4 4 13
shape a
list a
mesh p 1
list n
shape p 1 node
force p 1 mesh
exit
```

COIL MESH Node Data:test4.dat for pf coil force



(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig B.5-1 Nodal point of solenoid: shape p 1 node

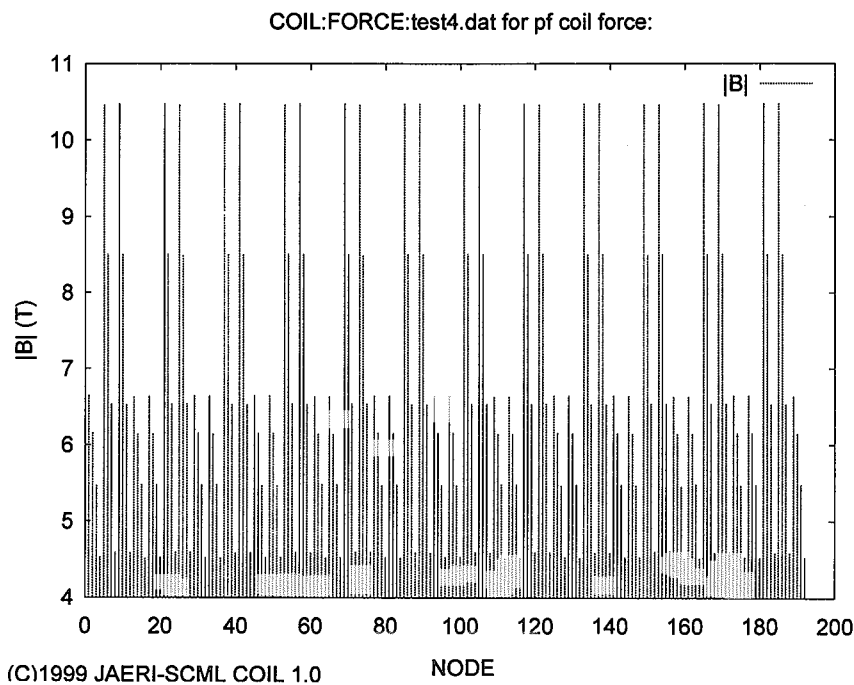


Fig. B.5-2 Magnetic field on each node

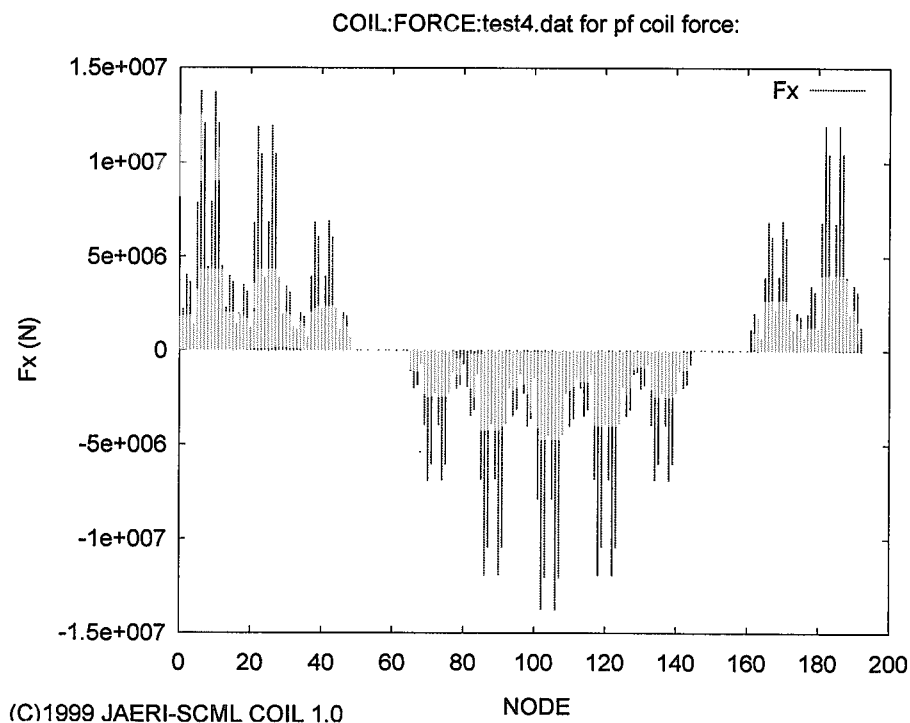


Fig. B.5-4 Force on each node: force p 1 mesh

B.6 トロイダル・コイルの電磁力計算

トロイダル・コイルの電磁力計算の例を test5.dat に示す。

```
# Test data for coil, 99-2-23, K. Yoshida
TITL 'Test5.dat, Only TF coil for FORCE '
TCOIL 1 W 0.7722 0.5602 M 9.6 D 3 3 NT 150
```

```

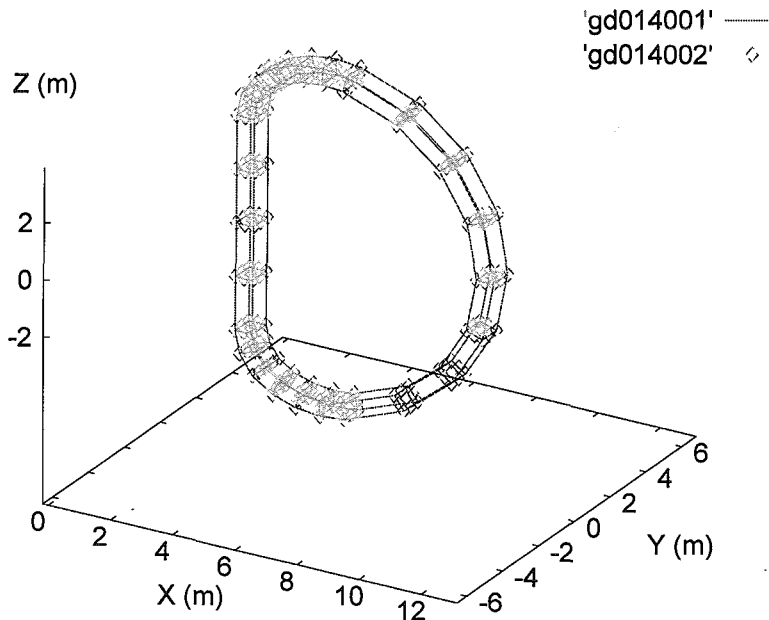
ARC C 4.6376 0.00 R 5.84993 A -77.40 77.40 D 9
ARC C 5.2085 2.560 R 3.22703 A 77.40 116.50 D 4
ARC C 4.6150 3.748 R 1.89903 A 116.50 180.00 D 4
BAR S 2.716 3.748 E 2.716 -3.748 D 5
ARC C 4.6150 -3.748 R 1.89903 A 180.00 243.50 D 4
ARC C 5.2085 -2.560 R 3.22703 A 243.50 282.60 D 4
END
TFCO 17 NO 1 1 D 20.0
shape a
list t 1
mesh t 1
list n
shape t 1 node
force t 1 mesh dist
exit
    
```

電磁力の計算結果は以下に示す test5.lst に出力される。

```

# Number of plane: 24
# Total length of center: 31.914897357248460
 1 15.8052      2 2.20220      3 2.10466      4 7.49600      5 2.10466
 6 2.20220
Plane  Leng(m)  delL(m)  |F| (N/m)  Fx (N/m)  Fy (N/m)  Fz (N/m)
 1  .000000    1.35486  .282282E+08  .615782E+07  1.94060  -.275483E+08  1.97565
 2  1.97565    1.97565  .222241E+08  .117605E+08  1.48916  -.188574E+08  1.97565
以下省略
    
```

COIL MESH Node Data:test5.dat, only tf coil for force



(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. B.6-1 Node point in TF coil: shape t 1 node

COIL:FORCE:test5.dat, only tf coil for force:

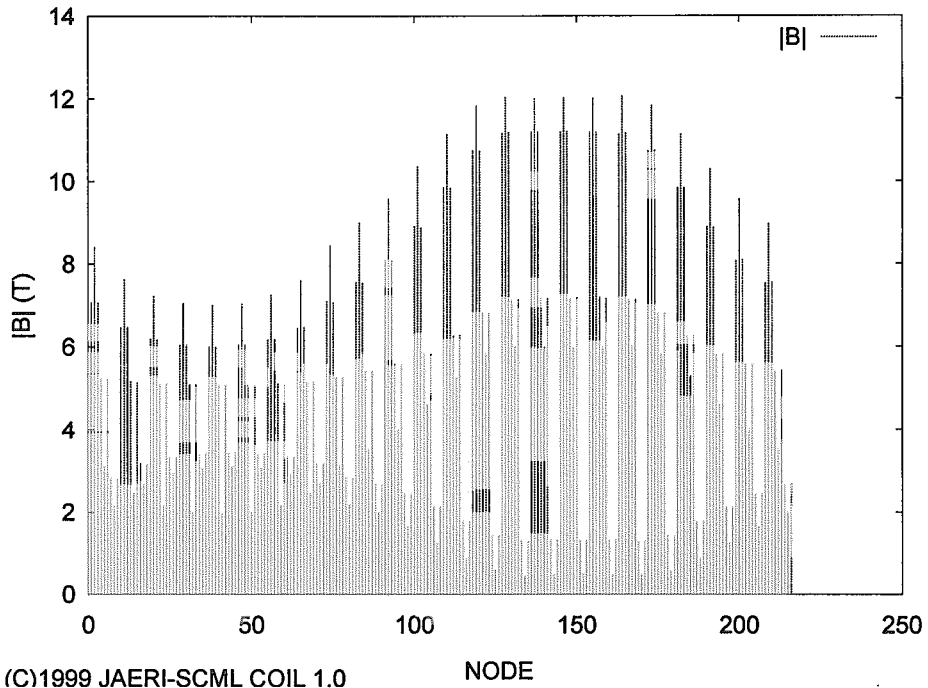


Fig. B.6-2 Magnetic field at each node: force t 1 mesh dist

COIL:FORCE:test5.dat, only tf coil for force:

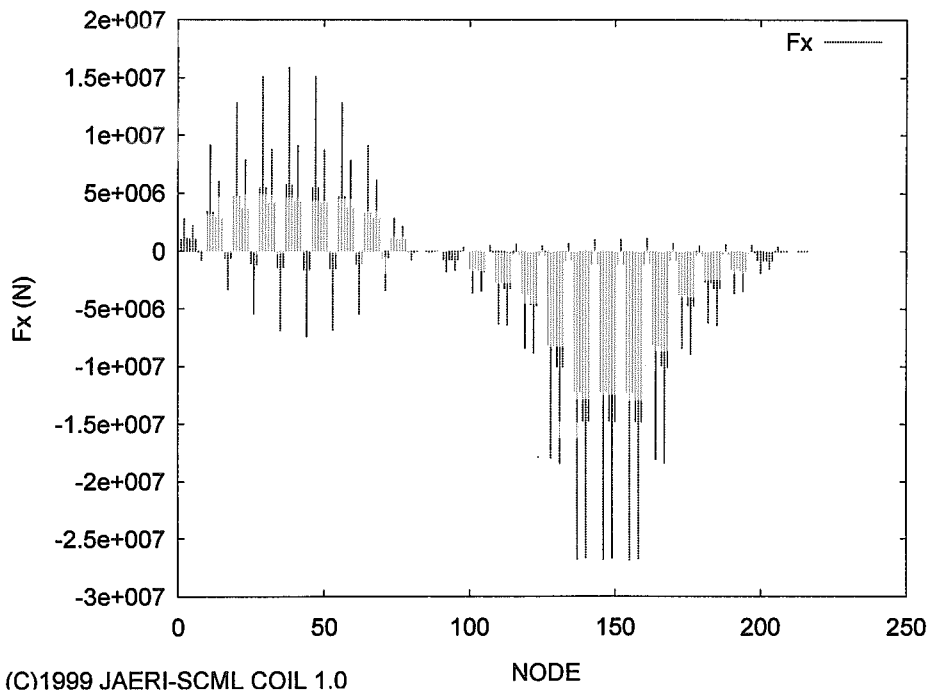


Fig. B.6-3 Force at each node

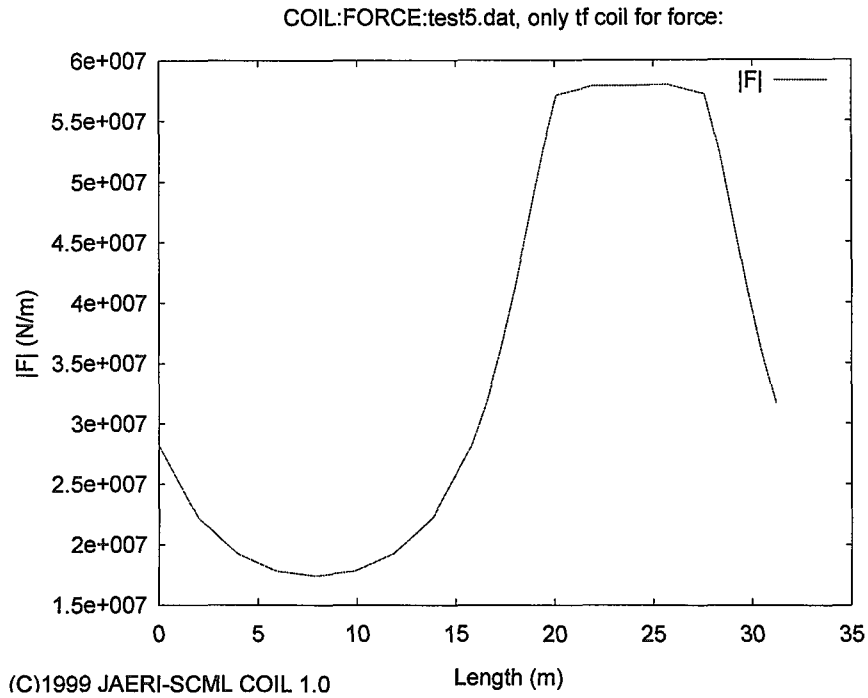


Fig. B.6-4 Magnetic load along coil perimeter

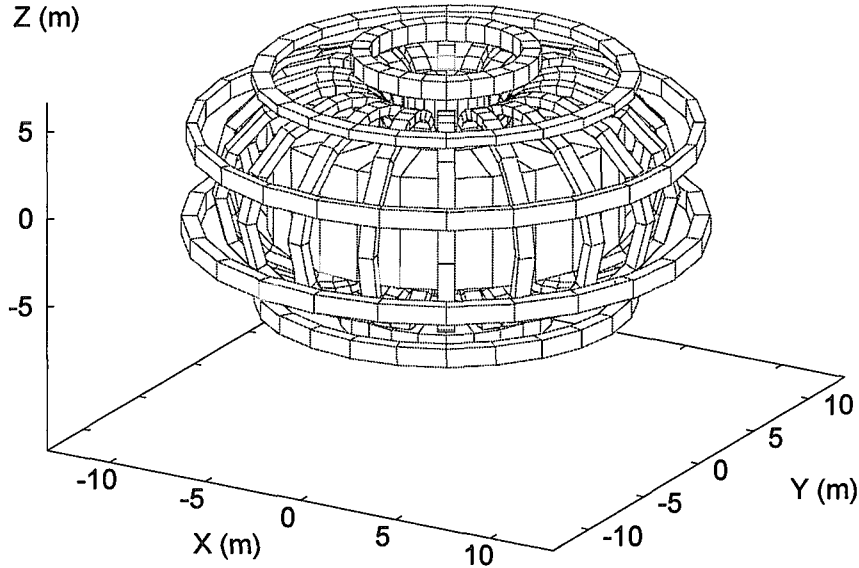
B.7 トカマク装置の磁界計算

ITER のコイルシステム計算例。

```
# Test data for coil, 99-2-23, K. Yoshida
TITL 'Test6.dat, Tokamak System with Tcoil & Pcoil'
TITL 'Test6.dat, Tcoil, Pcoil and PFCAL mode'
tcoil 1 w 0.7722 0.5602 m 9.6 d 3 3 nt 150
arc c 4.6376 0.00 r 5.8499 a -77.40 77.40 d 7
arc c 5.2085 2.560 r 3.2270 a 77.40 116.50 d 4
arc c 4.6150 3.748 r 1.8990 a 116.50 180.00 d 4
bar s 2.716 3.748 e 2.716 -3.748 d 6
! 省略
pcoil 12 w 1.461 1.056 r 4.244 z -7.120 m 12.020 d 4 4 13 nt 380 # pf6
pcoil 13 w 3.82 6.340 r 6.250 z 0.522 m 13.30 d 4 4 13 nt 1 # Plasma
shape a
set nocrt
set nolist
pfcal s 1 bmax
pfcal s 8 forc
pfcal ind bmax forc
IM 19.700 20.570 20.570 20.570 20.570 19.700 9.883 0.412 -0.480 0.350 0.658 8.427
0.0
SOB 1.265 -7.935 -20.140 -20.140 -7.697 1.934 4.890 -3.345 -3.987 -6.317 -4.266
13.640 13.3
EOB 2.775 -21.800 -21.800 -21.800 -21.800 2.531 2.180 -3.479 -4.127 -6.318 -4.757
12.020 13.3
end
exit
```

test6.dat, tcoil, pcoil and pfcsl mode

'gd017001' _____



(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. B.7-1 Magnet system for ITER: shape a

計算結果は以下のように出力される。さらに、test6.001.csv が出力されているので MS-EXCEL で確認できる。

IM	19.700	20.570	20.570	20.570	20.570	19.700	9.883	0.412	0.480	0.350	0.658
	8.427	0.0									
Pcoil No. 1, Max Br, Bz, |B| (T) :		.590202			12.9825			12.9959			
Pcoil No. 2, Max Br, Bz, |B| (T) :		.114411			13.3476			13.3481			
Pcoil No. 3, Max Br, Bz, |B| (T) :		.171960E-01			13.4786			13.4786			
Pcoil No. 4, Max Br, Bz, |B| (T) :		-.241616E-01			13.4699			13.4699			
| 省略											
Pcoil No. 10, Total Fr, Fz, |F| (N) :		-870627.			548028.			.102875E+07			
Pcoil No. 11, Total Fr, Fz, |F| (N) :		-.190604E+07			.349247E+07			.397874E+07			
Pcoil No. 12, Total Fr, Fz, |F| (N) :		.193590E+09			.100887E+09			.218301E+09			
Pcoil No. 13, Total Fr, Fz, |F| (N) :		.000000			.000000			.000000			

B.8 外部ファイルからデータの磁界計算

外部ファイルから入力された計算点について、磁界を計算する。

```
# Test data for coil, 99-3-1, K. Yoshida
TITL 'Test7.dat, Only TF coil & Field & EXCEL out '
TCOIL 1 W 0.7722 0.5602 M 9.6 D 3 3
ARC C 4.6376 0.00 R 5.84993 A -77.40 77.40 D 9
ARC C 5.2085 2.560 R 3.22703 A 77.40 116.50 D 4
ARC C 4.6150 3.748 R 1.89903 A 116.50 180.00 D 4
BAR S 2.716 3.748 E 2.716 -3.748 D 5
ARC C 4.6150 -3.748 R 1.89903 A 180.00 243.50 D 4
ARC C 5.2085 -2.560 R 3.22703 A 243.50 282.60 D 4
```

```

END
TFCO 17 NO 1 1 D 20.0
field test7xyz
save excel
exit

```

外部ファイル test7xyz を以下に示す。

```

0 0 0
1 1 1
2 2 2
3 3 3
4 4 4
5 5 5
6 6 6
7 7 7
8 8 8
9 9 9
10 10 10

```

以下が MS-EXCEL 形式の出力である。

```

" COIL FIELD:test7.dat, only tf coil & field & excel out"
X (m), Y (m), Z (m), Bx (T), By(T), Bz (T), |B| (T)
.000000 , .000000 , .000000 , -.923168E-08, -.523555E-07, .000000 , .531631E-07,
1.00000 , 1.00000 , 1.00000 , -.115211E-03, .203654E-03, .205893E-08, .233984E-03,
2.00000 , 2.00000 , 2.00000 , 6.61329 , -5.17845 , -.571422E-06, 8.39953 ,
| 省略
9.00000 , 9.00000 , 9.00000 , -.148470E-04, -.112581E-04, -.434657E-04, .472911E-04,
10.0000 , 10.0000 , 10.0000 , -.473024E-05, .173980E-05, -.507850E-05, .715495E-05,

```

B.9 外部プログラム(ANSYS)からの電磁力計算

外部プログラムとしてよく利用する汎用応力解析プログラム ANSYS とのデータのやり取りを以下の例でしめす。まず、ANSYS でコイルの接点と要素を作成して ASCII 形式でエクスポートする。そのファイルをコイルは読み込んで、電磁力を計算する。ただし、コイルの定義は COIL 側である必要がある。

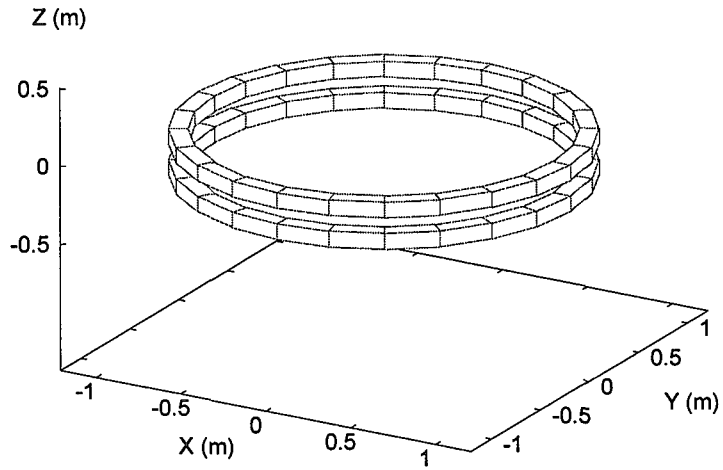
```

# Test data for COIL
# 1999-5-11 K. Yoshida
# 2002/9/26 Update for Version 6.0
TITL 'Test9.dat: force calculation from external file for ANSYS '
set eng
pcoil 1 r 1.05e+03 z 0.0 w 1.00e+02 1.00e+02 m 1.0
pcoil 2 r 1.05e+03 z -200.0 w 1.00e+02 1.00e+02 m 1.0
shape a
file force test9ansys
# set debug
force an6
exit
# end

```

test9.dat: force calculation from external file for ansys

'gd042001' ———



(C)1999 JAERI-SCML COIL 1.0

Fig. B.8-1 Shape of test data: shpe a

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電気容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射量	ルクス	lx	lm/m ²
放射線量当量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バー	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局, 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))
動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

空心コイル電磁計算プログラム...COIL

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています