

永久磁石モデル

1 はじめに

3次元静磁界解析ソフトウェア AMPERES V6.3 を用いて、永久磁石まわりの磁場計算を行う。AMPERES は境界要素法 (BEM) ソルバーと直感的なグラフィカルユーザーインターフェイス (GUI) が組み合わさって、使いやすく精度の良いプログラムになっている。BEM ソルバーは従来の有限要素法ソルバーに比べて、空間メッシュが不用、開領域に対する人工的な境界が不用など、いくつかの優れた特長がある。ここでは、永久磁石まわりの磁場を計算するための、モデル形状の作成、物理特性の設定、解析と結果の表示について説明している。

2 永久磁石のモデル化と解析

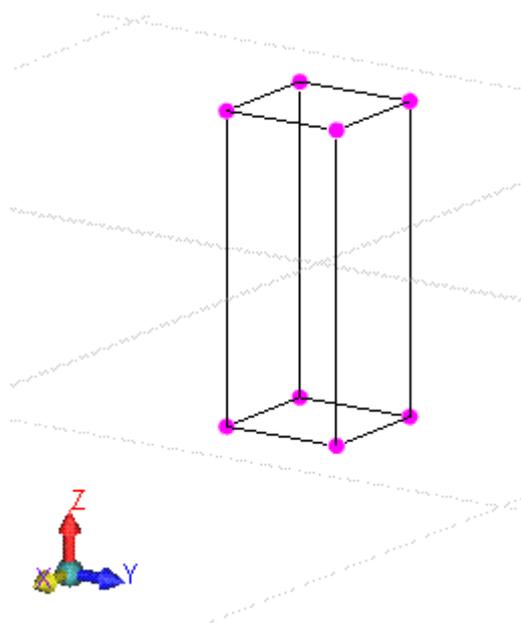
ひとつの永久磁石を用いて、そのまわりの磁場を計算する手順を説明する。

使用する永久磁石

永久磁石は直方体で、その大きさは一辺 4 mm の正方形断面で長さ 10 mm とする。

磁石材料はプログラム内蔵の Neodymium 45 MGOe Sintered で、その磁石特性は残留磁束密度 $B_r = 1.35$ [T]、保磁力 $H_c = 1.02655e6$ [A/m] とする。

モデル化を始める前に、寸法単位をデフォルトの m から mm に変更する。また、表示範囲を各方向 1000 から 100 に変更する。



(1) モデル形状

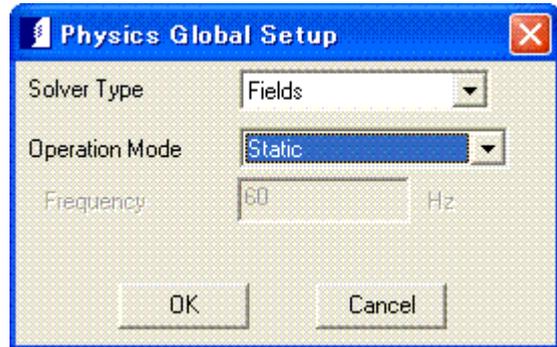
プログラムに内蔵されている形状モデラーを使用して、モデル形状を作成する。

ポイント数	8
セグメント数	12
サーフェス数	6
ボリューム数	1

ここで、ポイントは空間上の座標を持つ点。セグメントはポイントから構成される直線又は曲線。サーフェスはセグメントで構成される面、ボリュームはサーフェスから構成される立体とする。

(2) 物理グローバル設定

Physics > Physics Global Settings を選択する。デフォルトでは、ソルバータイプは Fields、オペレーションモードは Static に設定されている。

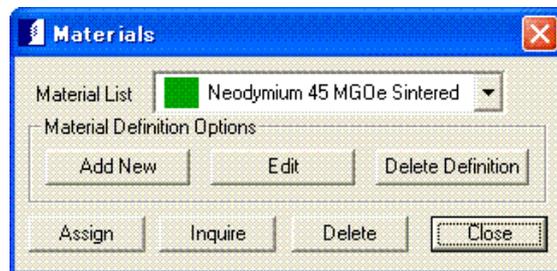


物理グローバル設定

(3) 使用材料の設定

Material Table から使用する材料を選び、Assign ボタンをクリックして、その材料を設定するボリュームを選択する。

これにより、既存の材料モデル Neodymium 45 MGOe Sintered が、磁石のボリュームに設定される。



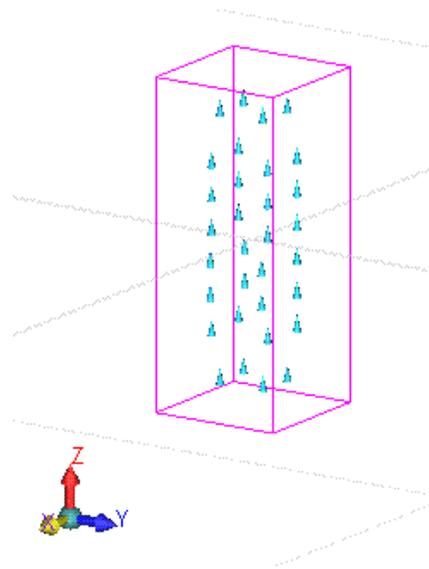
材料設定

(注) 磁石特性は第2象限の B-H 曲線で定義する。(-Hc, 0) と (0, Br) の2点である。新しい材料を定義するときは、Add New ボタンをクリックして、材料名及びその色を指定する。さらに、比透磁率などを定義する。

(4) 磁石の磁化方向の設定

磁石は磁化特性と共に、磁化方向を指定する必要がある。

Physics > Permanent Magnet > Magnetization Direction を選択し、磁化方向を Z 方向として、0, 0, 1 と入力する。



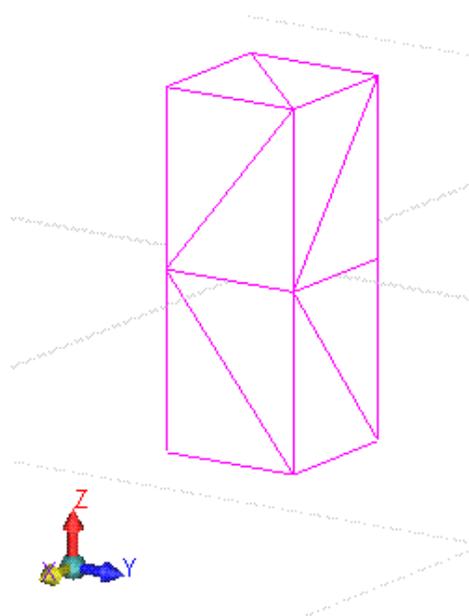
磁化方向の表示

(5) メッシュ分割

BEM ソルバーは磁石表面に、2D 要素を必要とする。磁石内部、及び空間の 3D メッシュ分割は不用である。

メッシュを作成するには、Solution > 2D Triangular Elements > Automatic All を選択する。作成するおおよその要素数を聞いてくるので1と入力すると、必要とする最低限の要素数のメッシュを作成する。

右図のように、24 個の 2D 要素（3 角形）が作成される。



2D 要素（3 角形要素）

（注）解の精度に及ぼすメッシュの影響
要素数を変えて、点(5, 1, 10)の磁束密度を計算する。これにより、24 個の 2D 要素でも精度は十分であることがわかる。

2D 要素数	Bx [T]	By [T]	Bz [T]	Bm [T]
24	1.9917460E-02	3.9595655E-03	1.7445667E-02	2.6771901E-02
36	1.9916412E-02	3.9570771E-03	1.7445815E-02	2.6770849E-02
112	1.9915172E-02	3.9572254E-03	1.7445771E-02	2.6769920E-02
320	1.9914306E-02	3.9574367E-03	1.7445905E-02	2.6769395E-02

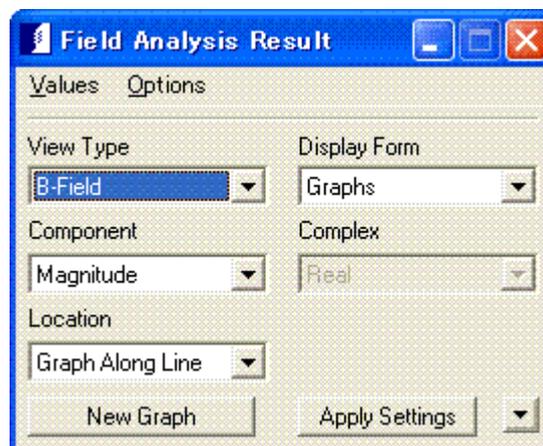
(6) 求解

Solution > Solve を選択すると、求解がスタートする。終了すると、結果表示のダイアログが自動的に表示される。

(7) 結果表示

Analysis > Field Results を選択すると、右図のようなダイアログが表示される。各種の変数を、様々な形式で表示できる。

任意点の磁束密度を表示するには、右図のように View Type を B Field にして、メニューの Values > Values At Point を選択する。点の座標を入力すると、その点の磁束密度が表示される。



フィールド解析結果ダイアログ

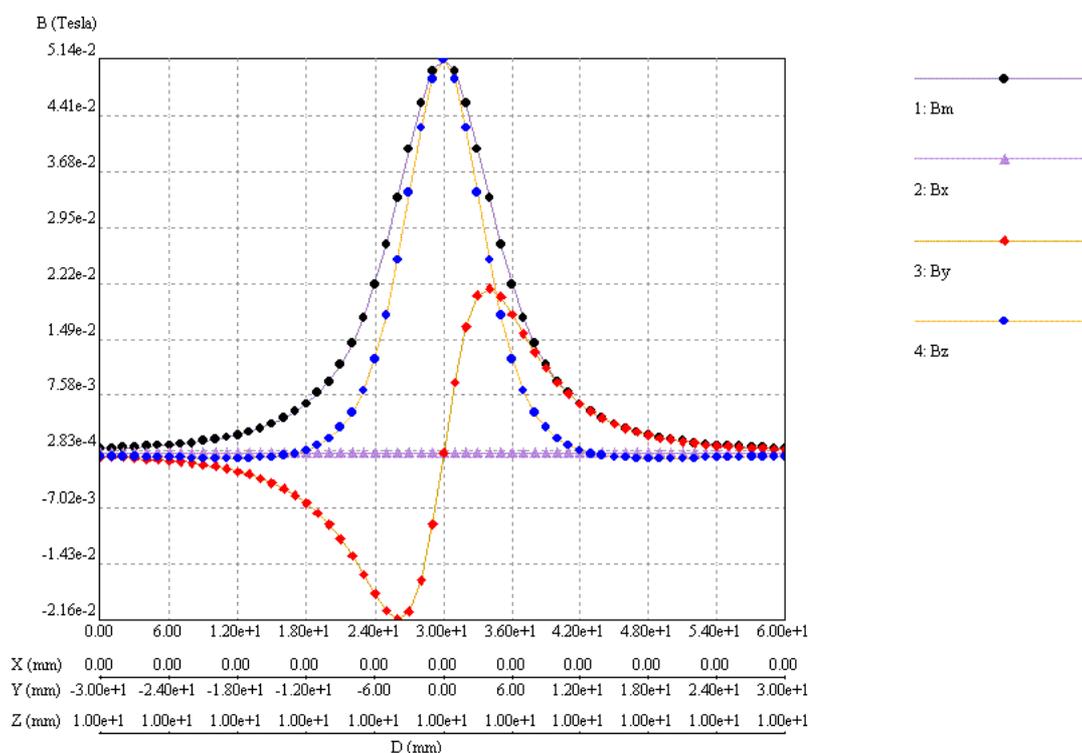
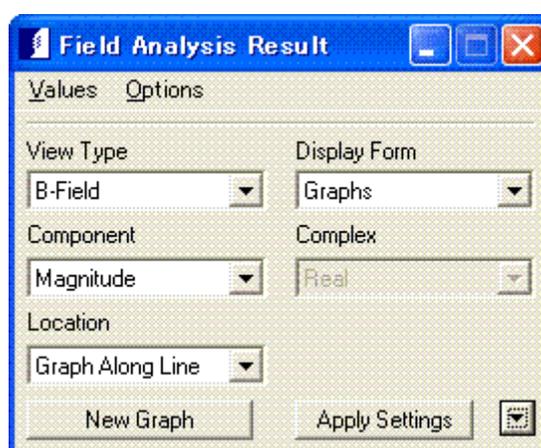
各点の磁束密度

x	y	z	Bx [T]	By [T]	Bz [T]	Bm [T]
0	0	10	-8.694E-11	-1.526E-10	5.139E-02	5.139E-02
0	0	6	-1.880E-10	-1.045E-09	3.775E-01	3.775E-01
0	0	5.1	1.799E-10	-2.082E-10	6.134E-01	6.134E-01
0	0	-5.1	-7.470E-10	-6.231E-09	6.134E-01	6.134E-01
0	0	-10	-2.248E-10	-1.918E-09	5.139E-02	5.139E-02
0	20	10	2.998E-08	1.730E-03	-6.577E-04	1.851E-03

グラフ図

Display Form を Graphs、Component を Magnitude (表示は Bm) 及び Location を Graph Along Line にセットする。

New Graph ボタンをクリックすると、表示するラインを聞いてくるので、(0, -30, 10) と (0, 30, 10) を入力する。グラフが表示されると、さらに Component を X Component に変更し、今度は Apply Settings を選択する。Bx はグラフに重ね書きされる。



グラフ図 (1 Bm, 2 Bx, 3 By, 4 Bz)

コンター図

Display Form を Contours、Component を Magnitude (表示は Bm)、Grid Density を Fine Density 及び Selection を On Plane にセットする。

New Plot ボタンをクリックすると、表示する面を聞いてくる。3点で表示する平面を定義する。ここで、

10, 10, 10

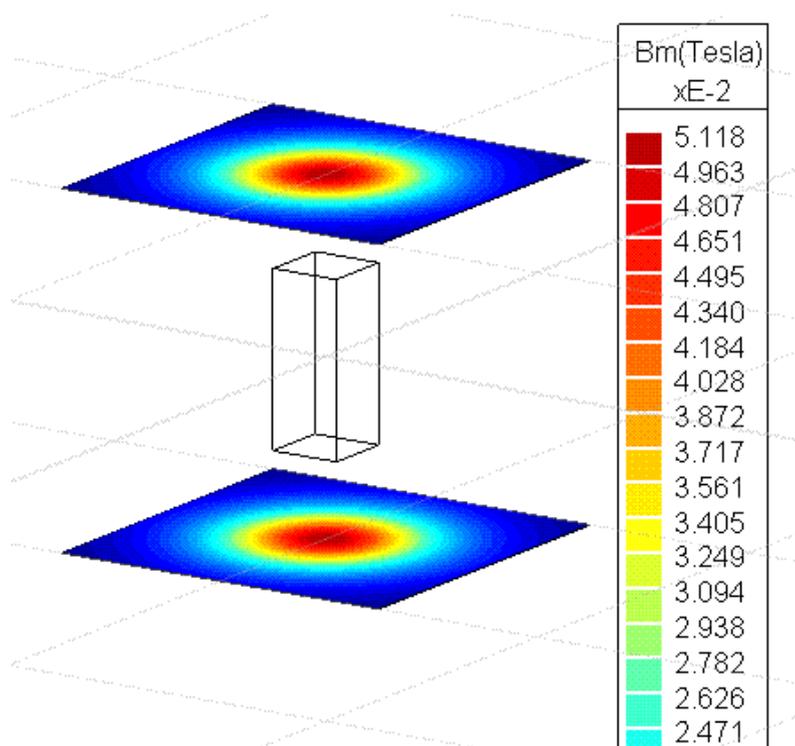
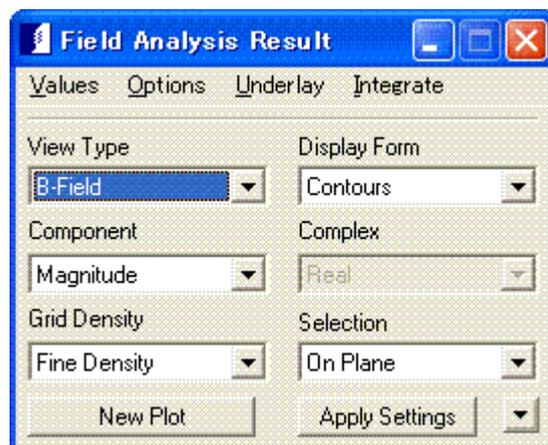
10, -10, 10

-10, -10, 10

を入力すると、コンター図が表示される。

Options > Put Scale を選択すると、任意位置にスケールを置くことができる。また、Options > Solid をチェックすると、コンター図の塗りつぶし表示ができる。

同様に New Plot ボタンをクリックし、今度は下部の表示面 (Z=-10) を指定する。

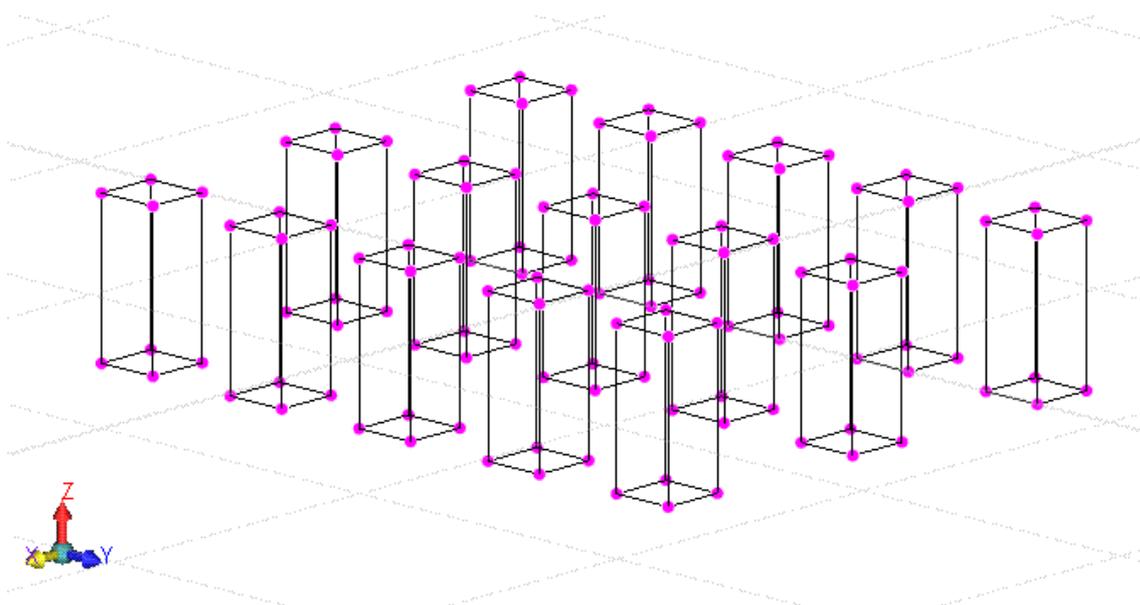


コンター図 (Bm)

3 磁石群による空間の磁束分布

前節ではひとつの永久磁石による磁束分布を考えたが、この節では磁石群による空間の磁束分布を計算する。

磁石群は X 方向に 3 列、Y 方向に 5 列の合計 15 個の磁石からなるモデルを考える。AMPERES には CAD と同じような形状モデラーが入っているので、ひとつの磁石ボリュームを繰り返しコピーして、全体モデルを作成することができる。



モデル形状

(ポイント 120 , セグメント 180 , サーフェス 90 , ボリューム 15)

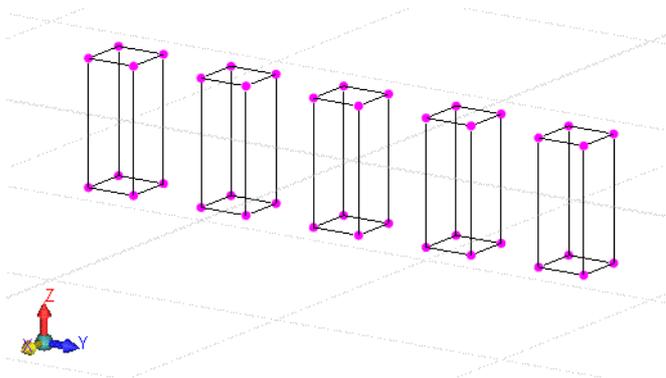
(1) モデル形状の作成方法

前節のひとつの永久磁石モデルからスタートする。形状オブジェクトのコピーをすると、形状以外にも物理特性 (磁石特性、磁化方向) など保持される。

形状コピーを開始する前に、ツールバーにある形状コピースイッチを Copy On にし、繰り返しコピーのために Repeat Operation ボタンをクリックする。

形状の並進移動ボタン Displace Geometry をクリックして、移動させるボリュームオブジェクトを選択する。移動のために基準点(0, 0, 0)とその移動先(0, 10, 0)を入力し、さらに繰り返し数 2 を入力する。これにより、+Y 方向に 2 個のボリュームが作成される。同様に -Y 方向にも形状コピーする。今度は基準点(0, 0, 0)とその移動先(0, -10, 0)となる。これにより -Y 方向にも 2 個のボリュームが作成される。

以上により、Y 方向に 5 個の磁石ボリュームが作成される。



磁石の間隔は 6 mm になる。

Y 方向にコピーした磁石

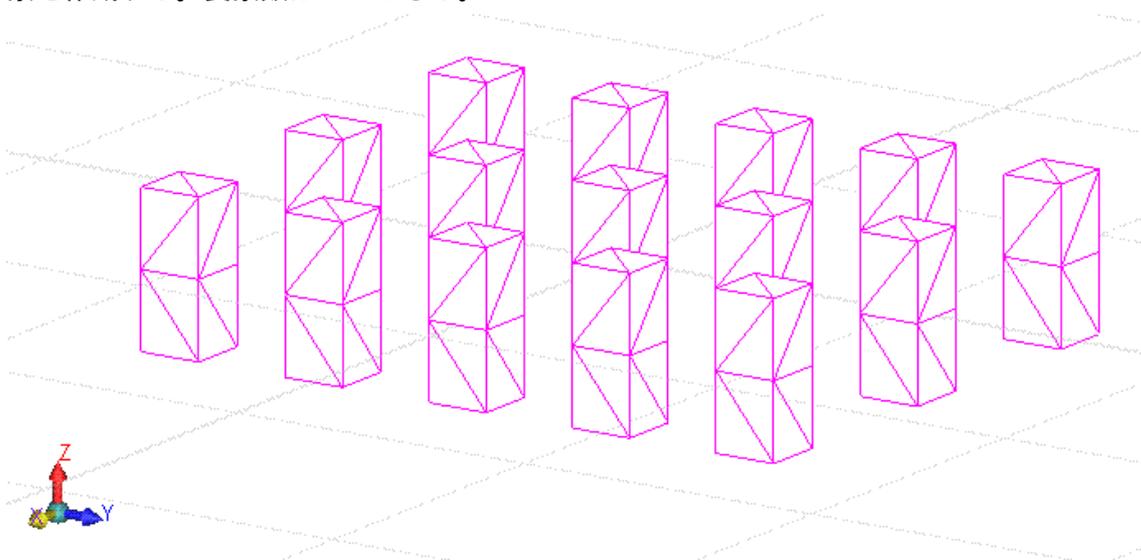
次に +X, -Y 方向に形状コピーする。今回は繰り返しコピーをしないので、Repeat Operation ボタンを再度クリックしてオフにする。これにより、繰り返し数の入力はなくなる。

並進移動ボタンをクリックして、Y 方向に並んだ 5 個の磁石ボリュームを選択する。移動のために基準点 (0, 0, 0) とその移動先 (15, 0, 0) を入力する。+X 方向に 5 個のボリュームが作成される。同様に今度は基準点 (0, 0, 0) とその移動先 (-15, 0, 0) を入力する。-X 方向にも 5 個のボリュームが作成されて、全体形状が完成する。

作成されたボリュームは、磁石特性、磁化方向もコピーされているので、メッシュ分割すれば求解することができる。

(2) メッシュ分割

BEM ソルバーは磁石表面に 2D 要素を必要とする。Solution > 2D Triangular Elements > Automatic All を選択し、おおよその要素数 1 を入力する。AMPERES は最低限必要な 2D 要素を作成する。要素数は 300 となる。



2D 要素 (3 角形要素)

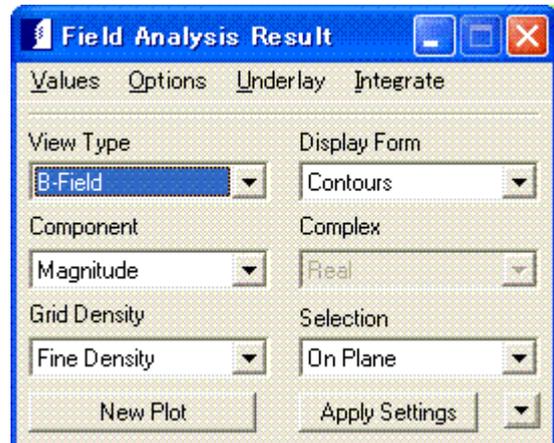
(3) 求解

Solution > Solve を選択すると、求解がスタートする。終了すると、結果表示のダイアログが自動的に表示される。

(7) 結果表示

Analysis > Field Results を選択すると、右図のようなダイアログが表示される。各種の変数を、様々な形式で表示できる。

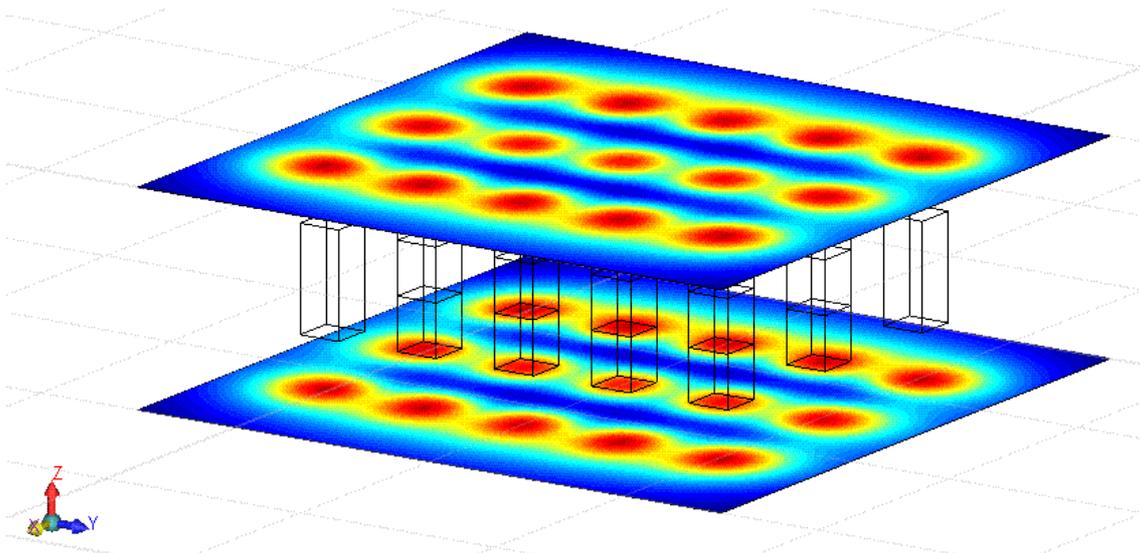
磁束密度のコンター図を表示するには右図のように、View Type を B-Field、Display Form を Contour、Component を Magnitude (表示では B_m)、Grid Density を Fine、及び Selection を On Plane とする。



New Plot ボタンをクリックすると、表示する面を聞いてくる。3点で表示する平面を定義する。25, 30, 10 <Enter> 25, -30, 10 <Enter> -25, -30, 10 <Enter> を入力すると、コンター図が表示される。

Options > Solid をチェックすると、コンター図の塗りつぶし表示ができる。

同様に New Plot ボタンをクリックし、今度は下部の表示面 ($Z = -10$) を指定する。



コンター表示 (B_m)