

S-2S Q1 についての TOSCA を用いた磁場計算

金築俊輔

2013 年 8 月 7 日

3次元静磁場解析ソフト TOSCA を用いて、Q1 電磁石について磁場計算を行った。2013 年 3 月の磁場測定の結果と比較して、電流値の高いところで、約 10% 小さい磁場強度を得た。計算の方にどれだけ改善の余地があるのかは不明。電流が低いところではよく合っているため、BH 曲線に問題がありそうだと考えている。

1 モデリング

(座標：Q1 全体の中心を原点とし、ビーム方向を Z 軸、水平、垂直方向をそれぞれ X 軸、Y 軸とした。)
(単位系：SI with mm で記述した。)

磁極、コイルのモデリングはトーキンの Q1 完成図書を基に行った。磁極の形状については、ほぼ CAD 図に忠実に記述した (図 1)。コンダクターは断面積が $22 \times 22 \text{ mm}^2$ で、トータルの電流値が合うように電流密度を調整した。電流密度はコイルの断面について一様に分布するとして計算される。端末は省略し、それらのない側を反転させる形で作成した。

また、磁極間隙の部分は、(-300, -300, -440) から (300, 300, 440) を対角線とする直方体をまず作り、そこから磁極部分をトリミングした形の空気のセルを作成した。

鉄の BH 曲線は「収束電磁石鉄心 完成図書」の材料特性表を参照し、「実測値」として表にまとめられている 6 点と、グラフから目で読み取った 20 点に原点を加えてテーブルを作成した*1。用いた値は表 1、それを図示したものが図 2 である。H=10000 A/m、B=1.86 T より大きい点は資料がないため与えていない*2。なめらかでないように見える部分もあるが、私が値を読むところになった。トーキンの測定値は他の点もあるのではないかな？

→ 資料を持っている方、カーブを改善できる方は情報提供をお願いします。

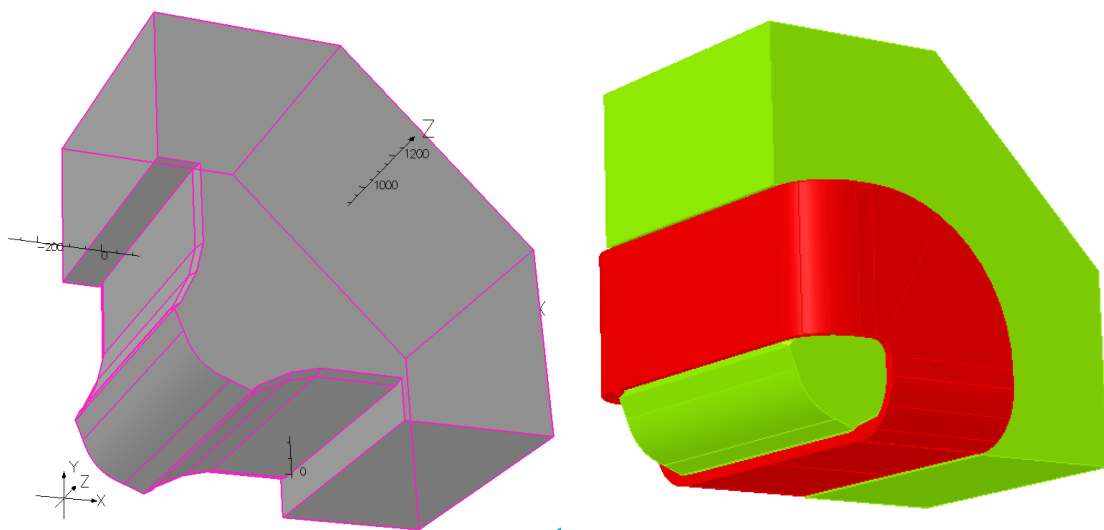


図 1 Modeller で作成した磁極の形状

*1 点と点の間は直線で補間されるようである。他の選択肢はないのだろうか？

*2 どのように外挿されるのだろうか？

磁化力:H [A/m]	磁束密度:B [T]	磁化力:H [A/m]	磁束密度:B [T]
0	0	700	1.58
28	0.1	900	1.6
34	0.22	1000	1.61
40	0.36	1200	1.62
50	0.62	2200	1.66
75	1.06	3400	1.7
90	1.2	4000	1.72
100	1.26	4800	1.74
120	1.34	6000	1.77
200	1.46	7000	1.8
260	1.5	8000	1.82
300	1.52	9000	1.84
380	1.54	10000	1.86
500	1.56		

表1 磁化特性表。トーキン資料より。四角で囲った値は資料中の「実測値」、他は目で読んだ値。

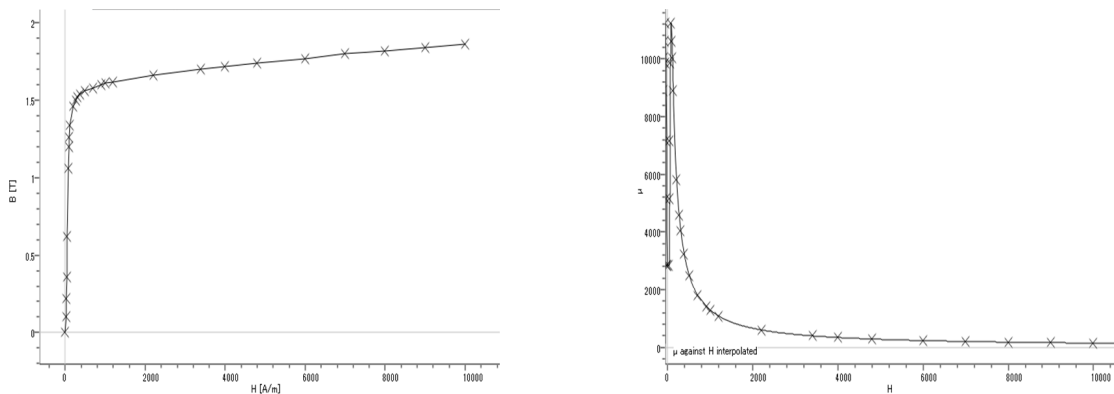


図2 作成したテーブルを与えて得られた曲線。横軸はどちらも H[A/m] で、縦軸は左が B[T]、右が μ 。

解析に関する諸条件については次の値を与えた。

Potential type 鉄芯 : Default(Total)、Gap : Default(Reduced)

Mesh (Element type) 鉄芯 : Linear、Gap : Quadratic

(Maximum Element Size) 鉄芯 : 20、Gap : 30、その他 : 50

(Maximum angle between elements) 30 deg.

バックグラウンドの scale factor (x, y, z)=(1.5, 1.5, 2.5)

対称性 XY, YZ, ZX の各平面について鏡映対称

境界条件 Farfield(X, Y, Z すべて) Tangential magnetic

対称面 XY : Tangential magnetic、YZ・ZX : Normal magnetic

Iteration Newton-Raphson update、最大回数 40、Convergence tolerance 1.0E-03

なお、使用したバージョンは Opera-3d v16 である。OperaManager、Modeller、TOSCA Analysis、Post-Processor のどのツールも、ライセンス的に許されたマシンでしか起動しない。ちなみに、新しいバージョン用いて作成したファイルを旧バージョンでそのまま読み込むことはできず、sat ファイル、cond ファイルに Export してそれらを読んで足すしかないそうです。

2 TOSCA 解析

電流値を 500 A から 2500 A まで 500A きざみで 5 パターンを計算した*3。(x, y) = (77.5, 0) の直線上での磁場強度 B を図 3 に示す。

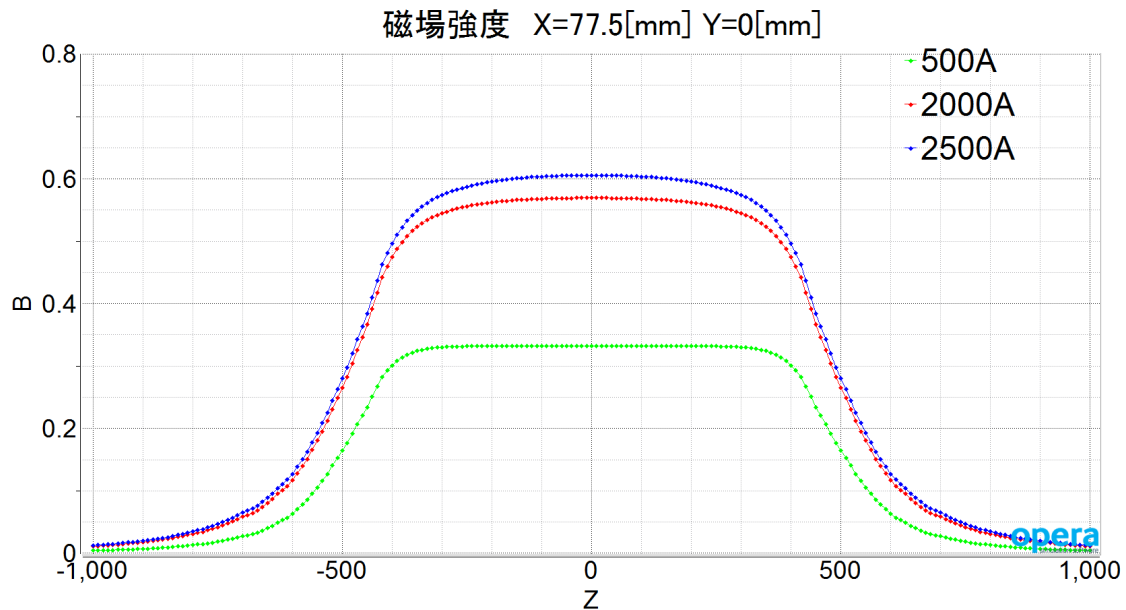


Fig6 Z方向引き抜き X = 77.5[mm] Y = 0[mm]

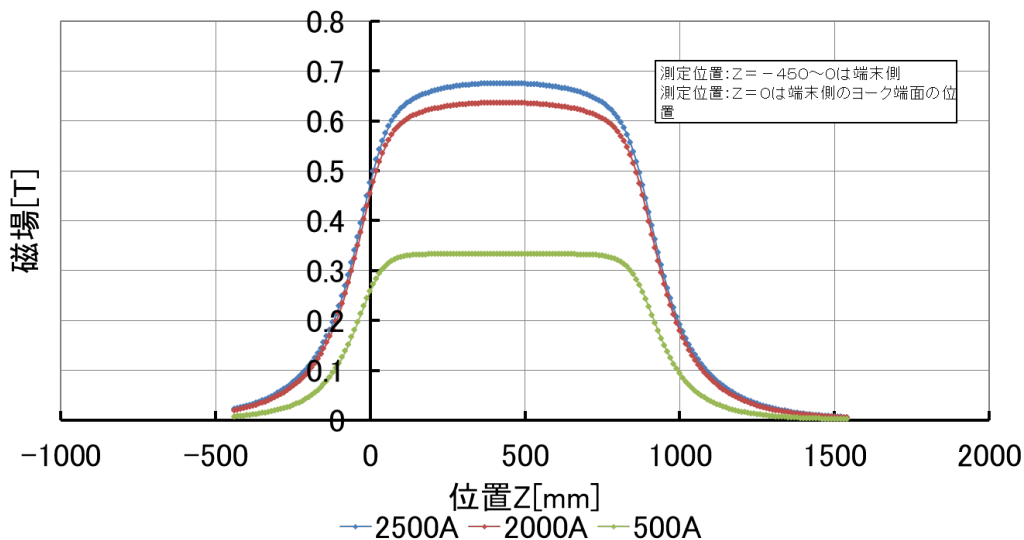


図 3 (x, y) = (77.5, 0) の直線上での磁場強度 (単位は Tesla)。上が計算結果、下がトーキンの試験成績書から引用したもの。横軸は Z 座標で -1000 mm から 1000 mm まで表示している。トーキンの図では鉄芯の一端を Z=0 としているので、440 ずれた形になっている。ここでは 500A、2000A、2500A の場合のみ表示した。

形としてははなめらかで良さそうである*4。ただ、裾野のあたりは少しうねっているように見える。磁場の大きさについては後述する。

続いて、次の図 4 は磁場強度を Y 軸に沿って見ていったものである。

*3 ひとつのプロセスあたり、およそ 3 時間かかった。MeshSize を半分程度にする、あるいは鉄芯の ElementType を Quadratic にすると、最大で 7 時間半かかった。

*4 はじめ、ElementType を Linear にし、MeshSize を小さくしてやっていたが、非常に時間がかかった上にかなりガタガタになっていた。磁極間隙の ElementType を Quadratic にして改善した。

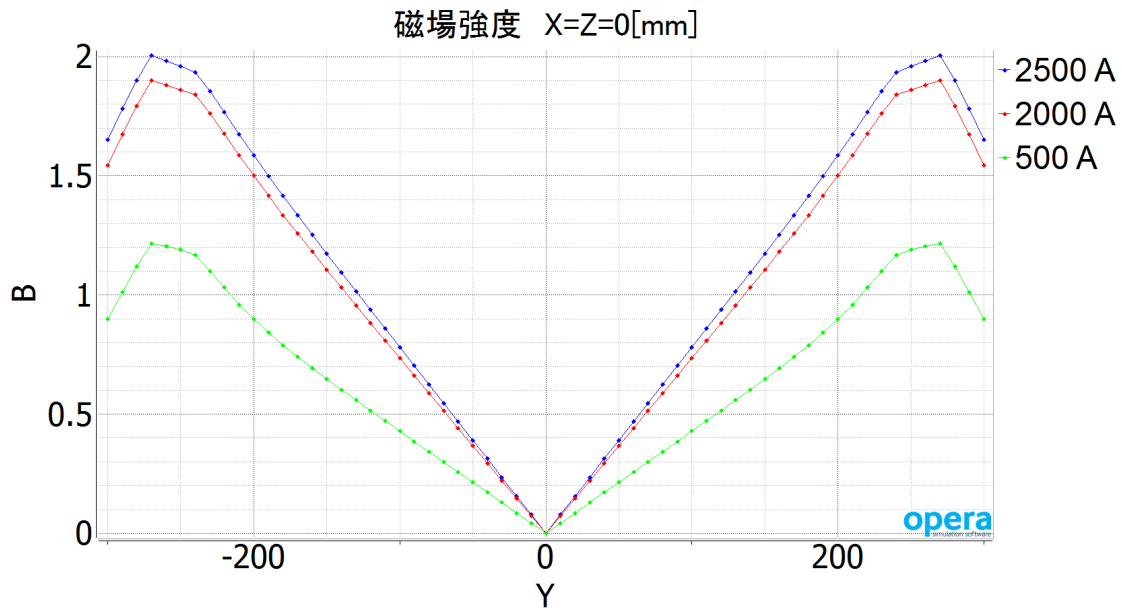


Fig5 Y方向磁場 X = 0[mm] Z = 440[mm]

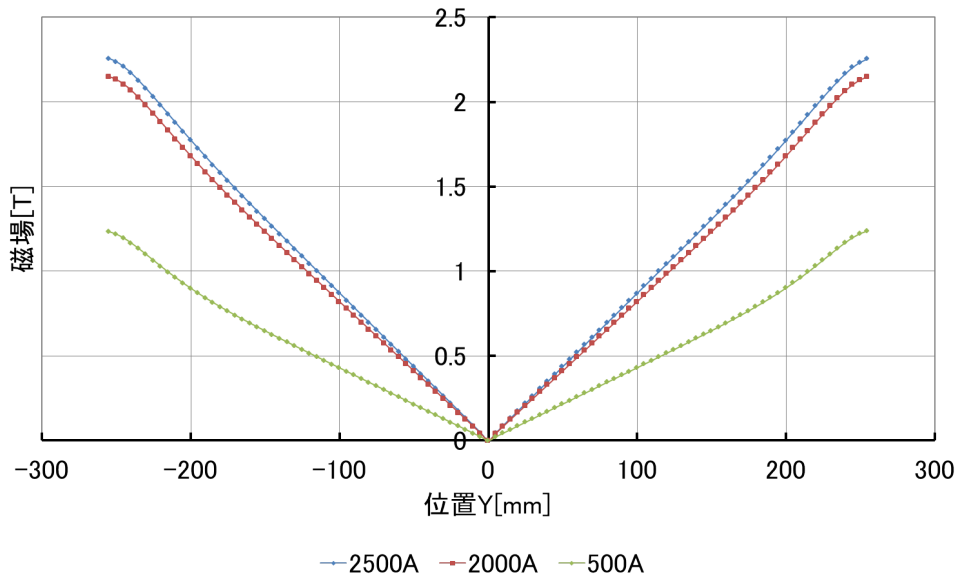


図4 (x, z) = (0, 0) での磁場強度 B [T]、横軸は Y 座標。上が計算結果、下がトーキンの試験成績書から引用したもの。

こちらも形としては概ね合っているように見える。トーキンの図が Y=255 までしかないので、それより外側の比較はできないが、線が折れる位置はだいたい同じである。なお、コイルがあるのは Y=268 のところからである。

次は供給する電流に対する磁場強度の変化のグラフを図5に示す。電流値 1000 A 以上の領域で、計算値が 10% 以上低く出てしまった。500 A のところでは合っているので、BH 曲線の特に磁場の大きい領域が現実と違って、電流値を増やしたときに間違っているということが考えられる。

図6中の赤線は、Q1の下側に架台を模したのものとして、1200 mm×100 mm×880 mm の大きさの鉄を置いて(図7)計算した結果である。電流値は 2500A とした。このグラフは、メッシュ設定などがまだあやふやだったときに作ったものなので、全体として間違った結果ではあるが、Y 方向の非対称性が見えないことは確認できる。(対称性は 8 分の 1 から 4 分の 1 にした*5)。

*5 それに従って計算時間は 15 時間になった。なのであまり気軽にはやりたくない。

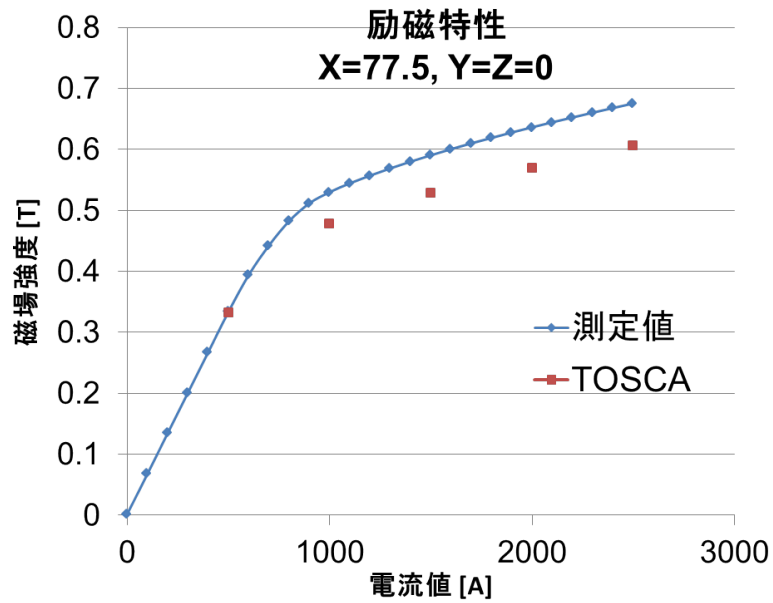


図5 $(x, y, z) = (77.5, 0, 0)$ での励磁特性のグラフ。500A のところでは計算と測定の違いは1% 以下だが、1000A 以上の4点では、10~12% ほど計算の方が低く出ている。

台の大きさはとりあえず 10 cm 厚にしたが、どの程度まで物質を増やせば磁場が歪むのか、時間があればやってみたい。

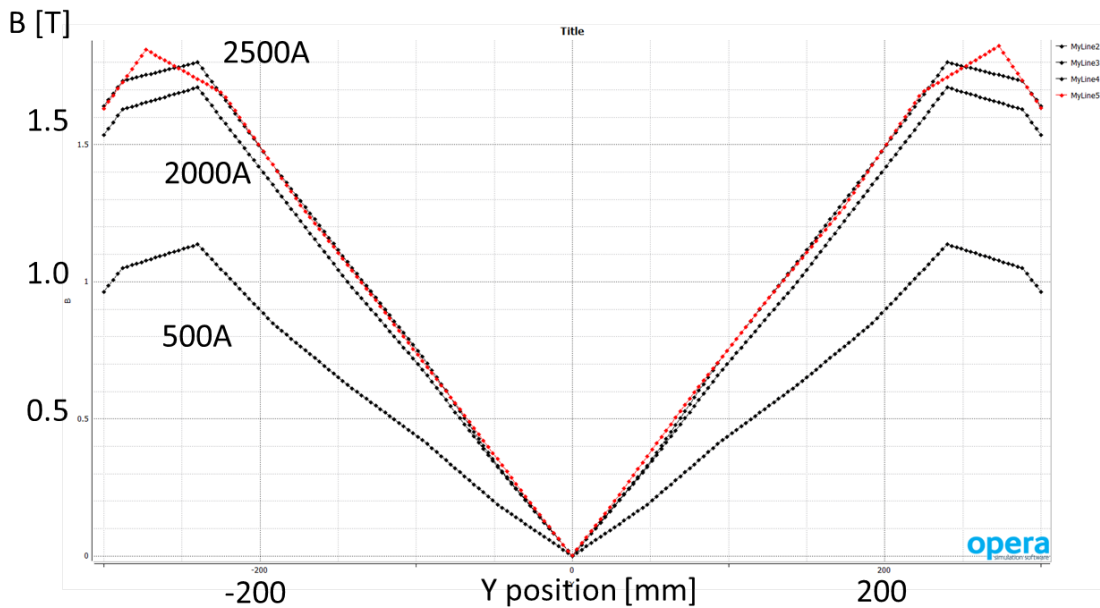


図6 $(x, z) = (0, 0)$ での磁場強度 B [T]、横軸は Y 座標。赤線が台付きの場合。

3 改善できそうな点

Iteration について。回数の上限值は十分大きくしてあり、その回数以内に収束している。収束条件を厳しくすべきか？

メッシュについて。磁極の Element Type も quadratic にするというのをやってみたが、時間がかかった割に

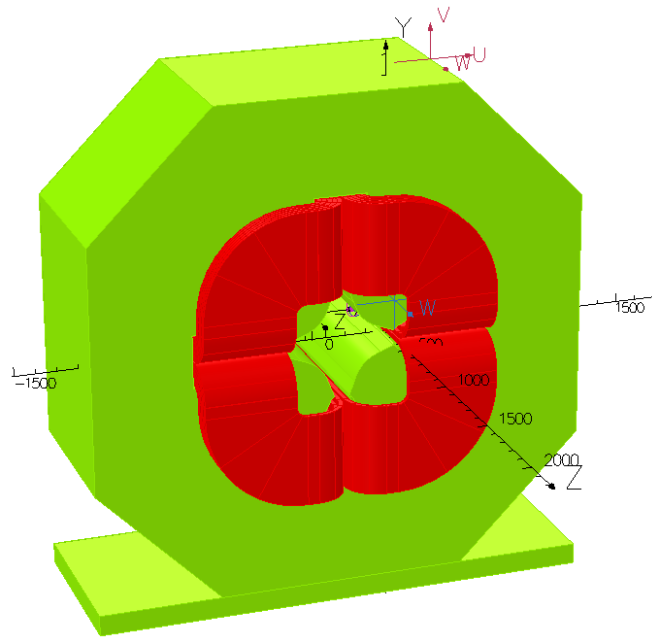


図7 このように台を付けた。台の大きさはなんとなくで作ってみた。

変化はなかった。磁極間隙の部分だけでひとまず十分と思われる。サイズはまだ小さくできると思う*6。ただ、小さくしたところで10%も値が変わるのだろうか。

BH 曲線について。トーキン資料も OperaReference も目を通したつもりだが、対策がわからないので誰か助けてください。1.86 T までの（手で与えた）領域については、もしかしたら私の値の読み方が間違ってる部分がある？

形状について。磁極の形状は少しでも違っていると結構効きそうではあるので、まさかとは思いますがチェックしてみ確かめてみる。CAD 図と現物がどの程度の誤差で一致しているかについての記述は見えない（が、気にするほどの大きな誤差はなさそう）。

その他。実はよく理解していなくてデフォルト値でそのままやっている変数がいくつかある。このレポート中に出てきた and/or 出てきてない変数について、重要なものがあれば教えてください。

何か抜けているところがありそうだと思った方、アドバイスのある方は是非お寄せください。

他にこういうことを調べるべき、というチェック項目があれば教えてください。

*6 小さくしすぎると Analysis に時間がかかるという前に MeshGenerate 中に Modeller がダウンしたので、がんばって 10mm か 15mm ではないかと思われる。