

S-2S Q1 についての TOSCA を用いた磁場計算 2

金築俊輔

2013年8月21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。前回のレポートからの大きな改善点は BH 曲線で、SKS の磁場計算で用いられた資料を参考に計算を行ったところ、2500A の場合でも計算結果と測定値との差は 0.01 T まで近づいた。

0 前回のレポートで挙げた/扱っていない問題のまとめ

前回のレポートでは、大きく分けて次の3つの問題があった。今回はこれらの課題に取り組んだ。

BH 曲線

データ点を途中 (1.86 T) までしか与えていなかった。その結果、電流値を 1000A より大きくした場合に、計算される磁場強度が測定値よりも 1 割小さく出た。

グラフの形

計算と測定を同じグラフに載せておらず、ちゃんと比較していない。上下の非対称性についても数字は見えない。また、B-y 座標で見たときに、計算結果の方が、よりはっきりと“折れて”いるように見えていた。

その他の条件の与え方

メッシュのサイズや Element Type をどこまで攻めるべきか確かめたい。

1 モデリング

モデリングでは、1. 磁極、コイルの形状、2. セルのメッシュなどの情報、3. 鉄の BH 曲線、などを与える。今回は 1 については変更する余地がなく、そのままにした。大きい変更は 3 の BH 曲線で高橋さんの Excel ファイルを元に数パターントライした。また、2 についてもどの要素が重要であるか調べた。

1.1 前回と同じ部分

(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。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。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。

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

1.2 セル形状の変更

磁極間隙の部分について、前回は『(-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。』として、実験室の「Air」とは別に、磁極間隙のスペースに「Gap」セルを作ってそのメッシュを細かくし、Element Type を Quadratic にしていた。

これではセルと Air の境界の周辺で結果が乱れる ($Z = \pm 440$ のあたりで形が歪む) ことがわかったので (後述)、この Gap セルの大きさを (-500, -500, -1000) から (500, 500, 1000) を対角線とする直方体から磁極部分をトリミングしたものに変更した。

1.3 BH 曲線の修正

鉄の BH 曲線について、「収束電磁石鉄心 完成図書」の材料特性表を参照するとともに、 $H=10000$ A/m、 $B=1.86$ T より大きい領域についても別資料を参考にテーブルに追加して、新たな bh ファイルを作成し、それを用いて計算した。別資料：高橋さん資料にある、“NewBH” (黄色：SKS で使った鉄の実測値 (5 点、 $H=80, 240, 2000, 10000, 30000$) + 推測値?)、と “Toshiba” (東芝が作成したテーブル) の 2 種類を試した。(あまり差はなかったので結果もわずかな差だった)

2 解析結果

さまざまな条件で計算を行い、測定値に近い結果を得た。2500A の場合には、 $(x, y, z)=(77.5, 0, 0)$ での B の値として、測定：0.6755 T に対して、計算：0.6755 T という値だった。500A の場合には測定値をほぼ再現した。

2.1 現在のベスト

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 (図 1)。

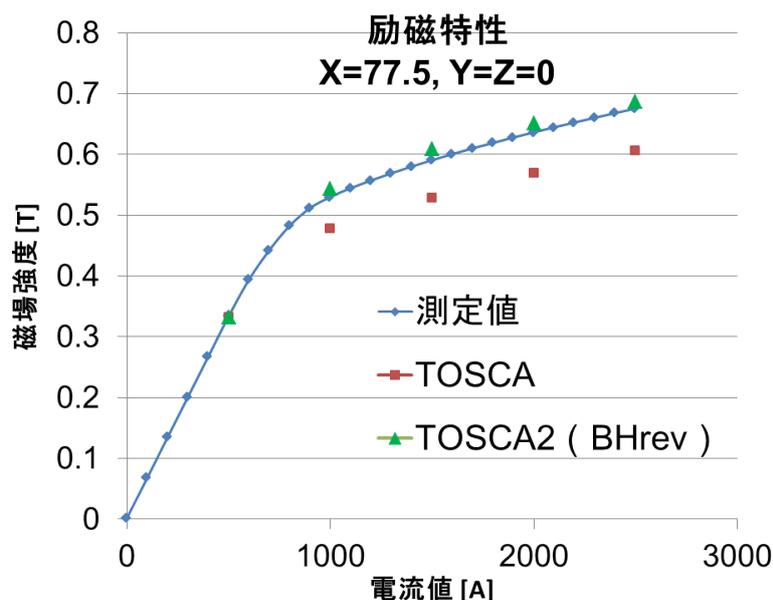


図 1 $(x, y, z) = (77.5, 0, 0)$ での 磁場強度。“TOSCA” が前回のもの、“TOSCA2” が今回のバージョン。BH 曲線を新しくしたことで測定値に近づいた。

1000A ~ 2500A までの点で測定値に近づいたが、今度は数% 大きい値になった。強磁場の領域で微妙にまだ BH 曲線が Q1 の鉄とずれていると考えられる。

500A と 2500A の場合についての、計算結果と測定値との比較を図 2 に示す。上で述べたとおり、2500A の場合には磁場の大きさに違いが出ているものの、全体的な形としてはきれいに見える。BH 曲線を修正して、全体的に少しずつ小さくなれば、測定値に合いそうである。500A の場合には、すべての領域で両者が非常によく一致している。

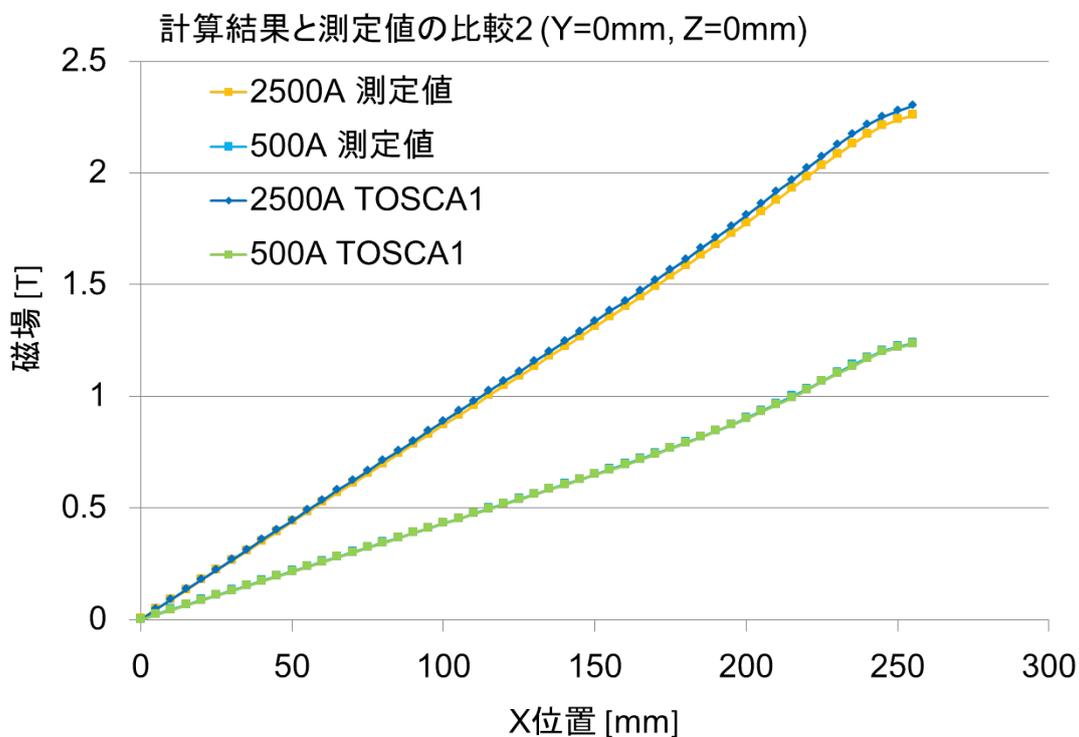
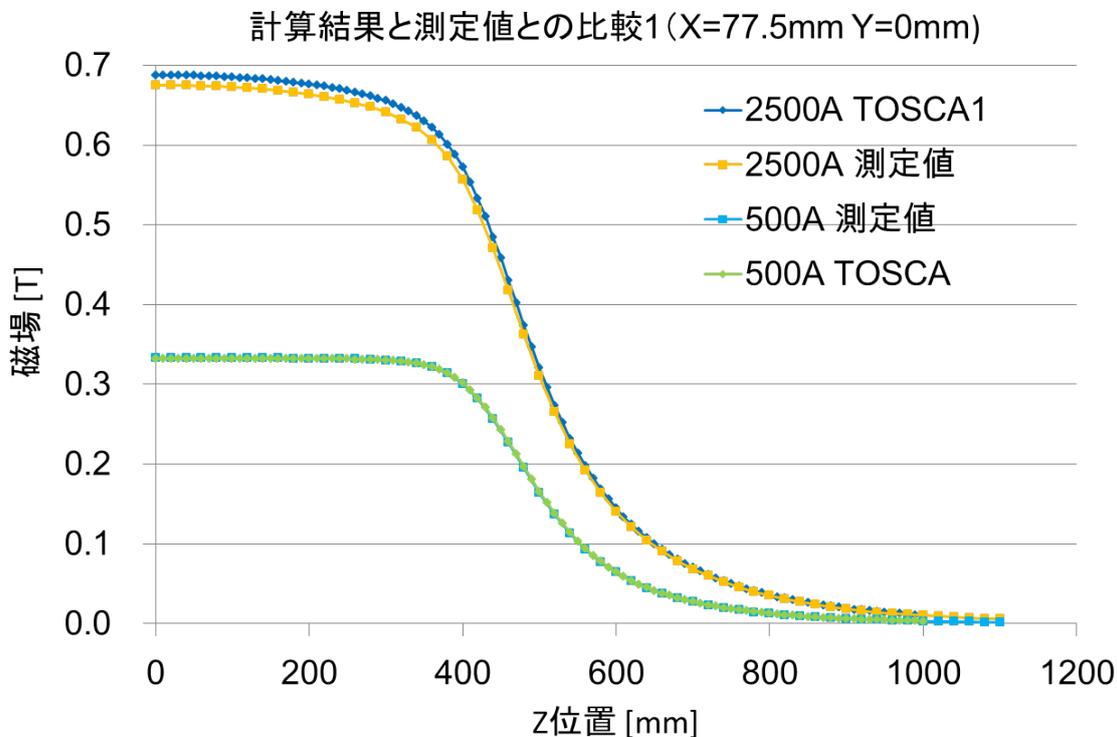


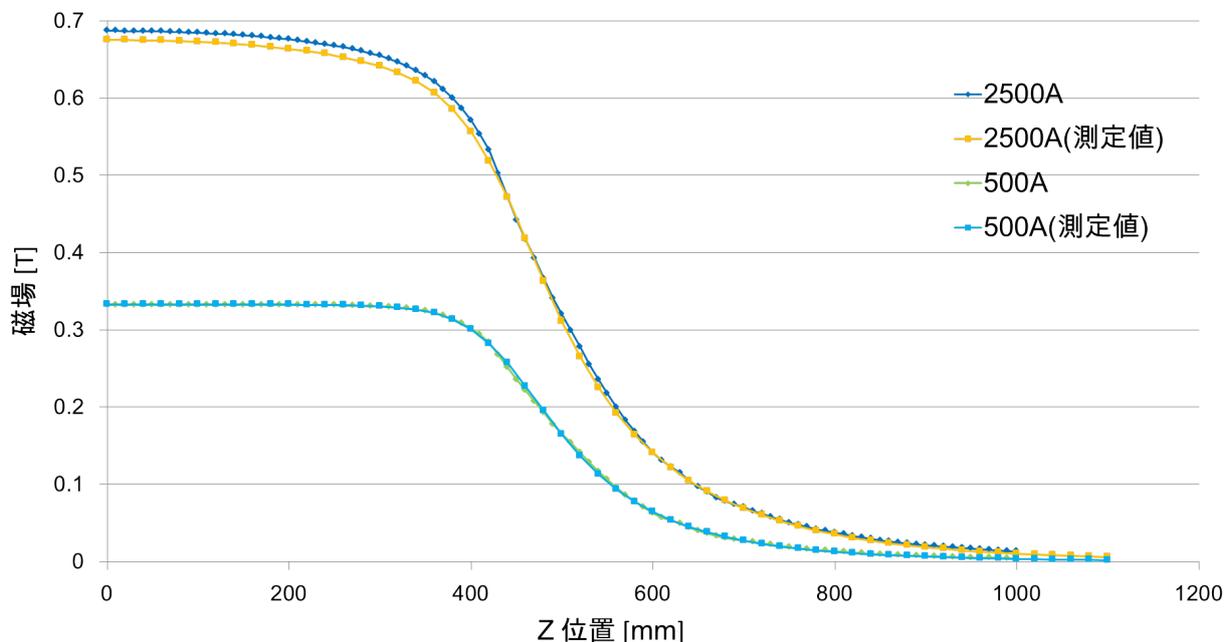
図 2 計算結果と測定値との比較。上は Z 位置、下は X 位置を横軸にとって、磁場強度を表示した。2500A の場合には、計算結果の方が全体的に少し大きい値になっていることがわかる。500A の場合には、2 つが重なってほぼ 1 本の線になっている。

2.2 この結果に至るまで

メッシュの条件を変えてどうなるか、という問題について行ったことを一応記録しておきたい。

前節の結果を得る前に、BH 曲線のみ修正して、他の条件を元のままで計算した場合、次の図のような結果を得た。BH 曲線の修正だけでは微妙に問題点（キャプション参照）が残っていた。これらへの対処として諸条件を変えて

TOSCA 計算 & 測定磁場 2 (X = 77.5 mm, Y = 0 mm)



TOSCA 計算 & 測定磁場2 (X = 0 mm, Z = 0 mm)

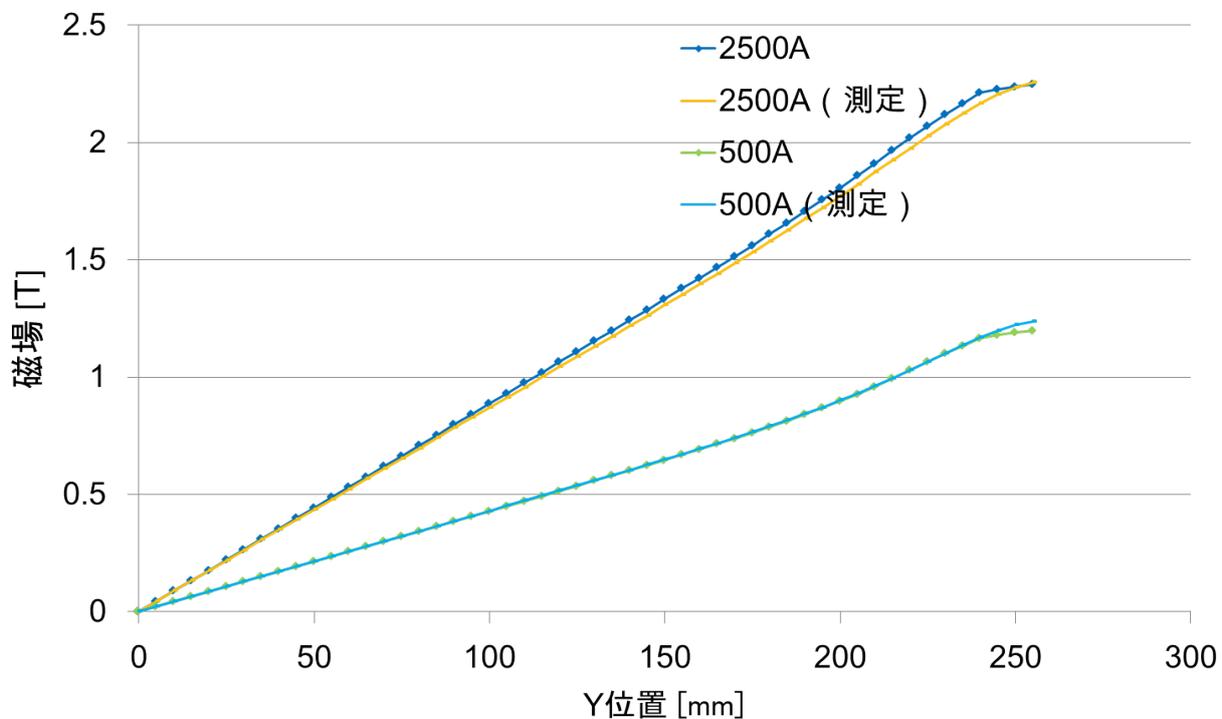


図3 BH 曲線を修正しただけの結果。上図：よく見ると $z=440$ mm のあたりで、電流値によらず計算結果の方が少しへこんでいるのがわかる。下図：計算結果の方では、 $y=240$ mm のあたりで折れて低い方へいっている。

みた。

いま扱っているモデルには3つのセルがあり、Gap、Pole、Airと呼んでいる。これらについて、1. メッシュのサイズ、2. Element Type (ET)、*1 3. Gapのセルの大きさ、の3つを変えながら、結果にどう影響するのか調べた。用いた条件の組み合わせは次の通りである。

Name	Gap	Pole	Air	その他の条件
Default	30	20	50	PoleのETがlinear、Gapセルはz=440まで
Gap	15	20	50	
Pole	30	10	50	
Air	30	20	30	
Quad	30	20	50	PoleのElementTypeがQuadratic
Gap Thick	30	20	50	Gapセルを大きくした
finest	10	10	50	その他の条件がQuad &&Thick

Gapセルを大きくしたというのは、元の(±300, ±300, ±440)というのを、(±500, ±500, ±600)にしたことを言う。これらの7通りと測定値をまとめてグラフにした(次ページの図4)。グラフ中では、名前をDefault→2500A、Quad→pole quad、Gap Thick→gap wide、としている。この絵では見づらいが、finestとGap Thickがきれいな形をしていて、他はz=440周辺でおかしくなっている。Airはその中間くらいの良さ(?)である。

この結果から結論したのは、このような絵で確認する程度では、

- メッシュサイズを(30, 20, 50)より小さくしても結果に影響しない。
- PoleのElement Typeを変えても結果に影響しない
- 余計なセルの境界を作ると悪い影響が出る

という3点である。そのため、いまのところは、Defaultのメッシュサイズのまま、Gapセルを大きくして計算を進めることにした。*2 なお、Gapセルを大きくすると、Y方向に見たときに見えていた“折れ”も解消された。折れの位置とGapの境界は50mm離れているのだが、そもそもどうしてこうなったのかはわからない。

2.3 磁場の上下の非対称性について

電磁石の下に架台があったとき、磁場が上下非対称になるのでは、という懸念があった。磁場測定の結果、目立って非対称にはなっていなかった。TOSCAでも下に余計な鉄を置いて計算して、同じような結果になるか確認するとともに、どこまでモノがあっても良いのかを知っておくことができるのではないかと思ったので、それにトライした。前は厚さ10cmのものを作って計算したが、今回は25cm、40cm、55cmまで試してみた。

55cm厚の場合のみ測定値と比べた(図5)。計算と測定はそもそも値の大きさが異なっているが、上下の差も、計算結果の方が大きく出ている。ただ、その上下差は測定:0.003Tと計算:0.007Tで、ほぼ同じである。しかも、鉄の台を置かずに、対称性を減らしてTOSCA計算をしたところ、上下で0.005Tの違いが出た。この結果を見て少しアホらしくなってしまったのでこれ以上厚いパターンはやらなかったが、実際架台はどのようなものになるのだろう。

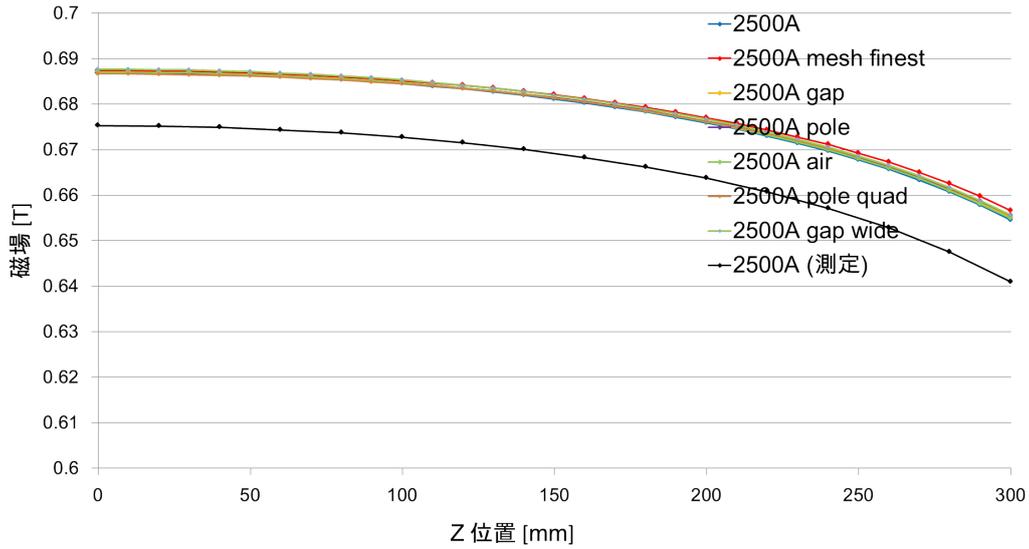
2.4 まとめ

BH曲線とその他の条件を修正して、TOSCAで測定値をほぼ再現した。数%を合わせるにはより精密にBH曲線を調整する必要がある。あるいは、Q1の鉄(それに似た傾向の鉄)の実測値がもっと強い磁場のところであれば助かるかもしれない。ここを何とかできれば、500Aで良く一致した結果が得られているので、2500Aでもうまく行くのではないかと考えている。

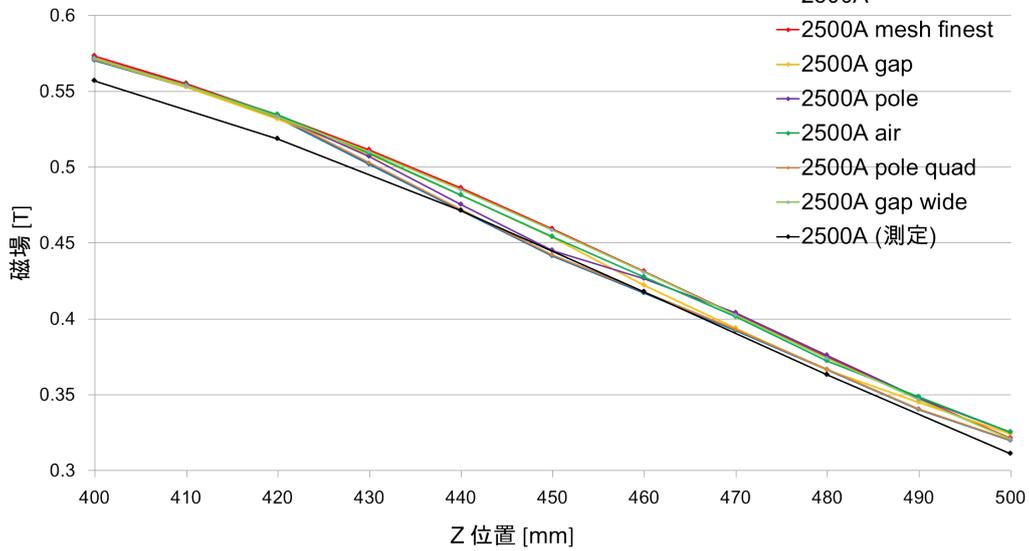
*1 偉そうに書いているが、これは何なのか? Referenceにはメッシュの形であるかのように見えるが、メッシュ内の補間の仕方などというようなことを言っている資料もあり、どういうことなのか理解していない。

*2 もっとも厳しい条件を与えた場合に、解析にかかった時間は17時間40分だった。特にエラーも何も出なかった。とらえようによってはまだ余裕がある(?)ということになるかも。

TOSCA 磁場計算4 (X = 77.5 mm, Y = 0 mm)



TOSCA 磁場計算5 (X = 77.5 mm, Y = 0 mm)



TOSCA 磁場計算6 (X = 77.5 mm, Y = 0 mm)

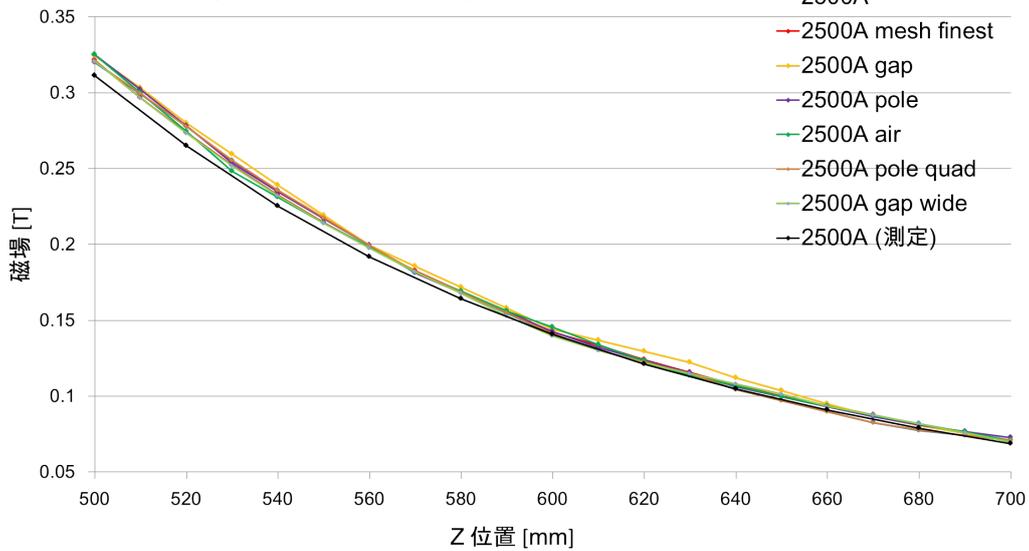


図4 メッシュの条件を変えた調べた結果。Z=440mm 周辺で明らかに形が崩れているものがある。Z=0mm に近いところではどれもほぼ同じだが、裾野の部分ではばらつきが見られる。

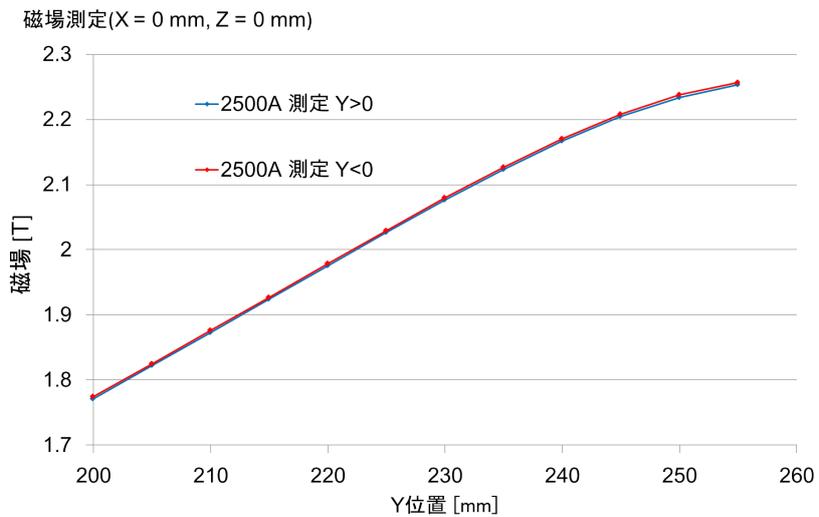
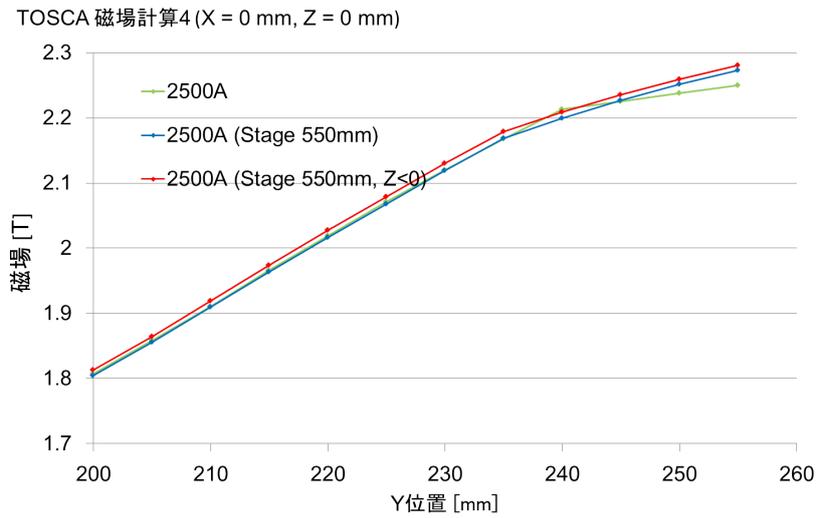


図5 架台がある場合の磁場分布。上が厚さ 55 cm の鉄を置いた場合、下は測定値。比較のため、Y が負の領域を折り返して表示している。上の図で 2500A とあるのは “Default” の結果で、Gap セルの大きさを変える前後での違いがわかる。