

S-2S Q1 についての TOSCA を用いた磁場計算 3

金築俊輔

2013 年 9 月 6 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、SKS の磁場計算で用いられた BH 曲線を参考にして計算を行い、測定値との差を数 % まで近づけたが、今回、さらに検討を行い、励磁曲線、磁場分布の両方で、測定値との差を 1% 以下 (0.001T 程度) に収まるようになった。

1 BH 曲線の調整

1.1 状況のおさらい

今回 Q1 に使われた鉄に関するデータは、トーキンの収束電磁石完成図書に収録されている。これは西日本製鉄の測定・作成した材料特性資料である。その中の磁化特性に関する情報は、磁束密度で 1.86 T までしかなく、また、実測値とされているものは 1.72 T までの 6 点である。それ以外の部分の曲線がどのように描かれたものであるかは不明である。

このデータのみで計算を行った場合、(電流量が大きいときには) 3T 程度の磁場が発生する場所があるため、正しい結果を得ることができない。

Q1 電磁石としての磁場測定については位置 $(x, y, z) = (77.5, 0, 0)$ での励磁特性 (B_y) が、0~2500 A まで 100 A ごとにとられているのと、500 A, 2000A, 2500A の 3 つの電流値について、Z 方向 ($x = 77.5, y = 0$)、X 方向 ($y = z = 0$)、Y 方向 ($x = z = 0$) の磁場分布がある。^{*1}

今回、TOSCA で計算する際に用いる BH 曲線を、これらの測定結果を再現するように、完成図書中の磁化特性と、SKS に関する BH 曲線を参考にしながら、手で調整し、“本当の” Q1 の鉄の BH 曲線を作成した。

1.2 方法

理論的・経験的にもっとまともなやり方があるのかもしれないが、今回は半ば“やみくも” & “力技” で進めた。

BH 曲線を適当に与える → さまざまな電流値で計算をする → 磁場分布を調べて測定値と比較する、を繰り返した。

曲線のどのあたりを上下させるべきかは、励磁特性や Z 方向の磁場強度分布を見て、およその見当をつけた。具体的には、計算結果から磁場マップを表示して、どの程度の大きさの B が発生しているか、最大値はどのくらいかをいろいろな電流で調べることで、どのあたりの B の値を変えればどの電流値の結果が変わるかを予想したり^{*2}、Z 方向の分布をみて、裾野での磁場が大きく、だらっと漏れだしているが見れば、全体的 (特に中間のあたり) に少し上げてやる、という要領で調整した。

これに関して見識のある方がいらっしゃったら今からでも構わないのでご教授ください。

^{*1} 1/8 の領域を細かく測定したデータがあるのを忘れていました。トーキンからもらった結果と仁さんから送ってもらったものを同じと勘違いしていました。ちょっと面倒なので今回のレポートにはそれらとの比較は入っていません。

^{*2} たとえば、1000A の場合だけ磁場が低く出るので強くしたいと思えば、与える BH のうち 2T 付近の点を上げて (H は固定で B の値を変える) やれば良い、など。

2 結果

2.1 BH 曲線

最終的に用いた BH 曲線は図 1、表 1 の通りである。SKS 資料と今回調整したものの 2 種類をまとめた。図の緑の枠で囲った部分が主に注意して調整した範囲になっている。

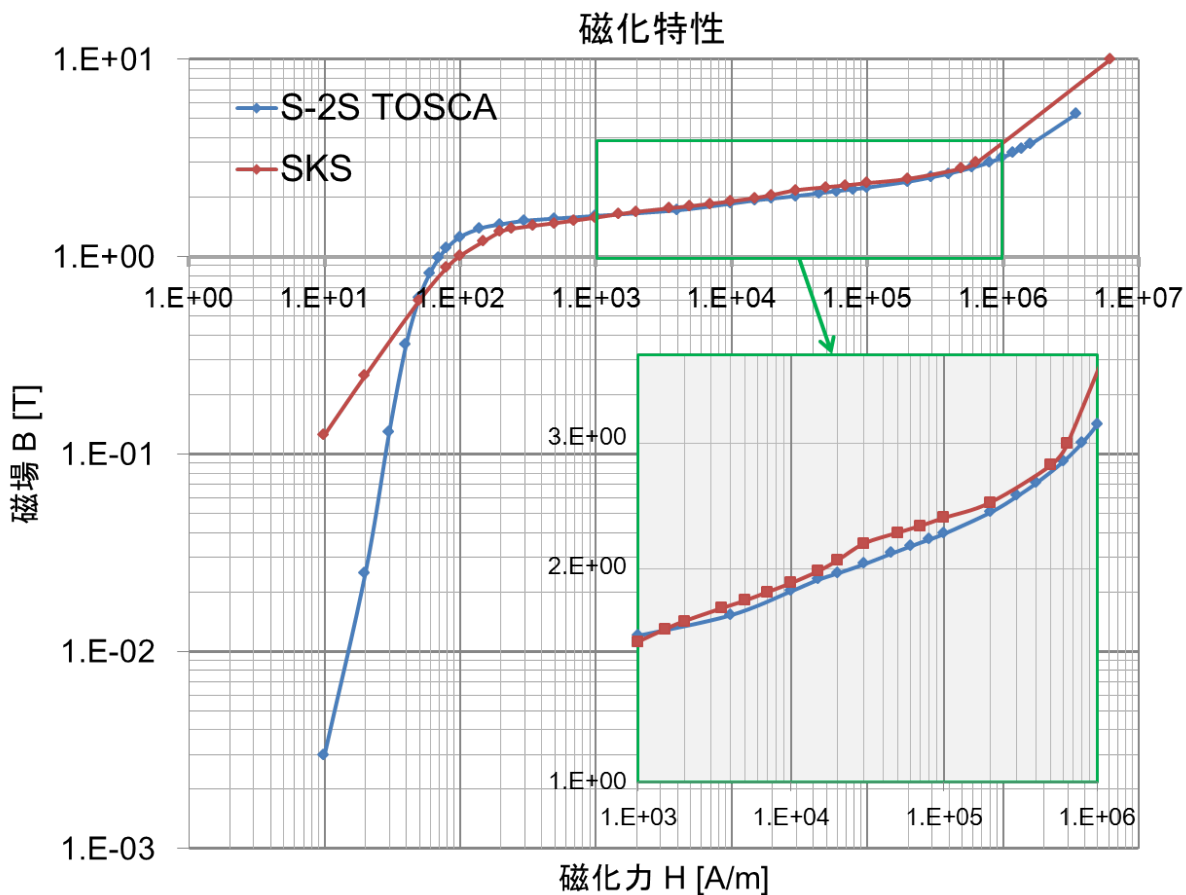


図 1 SKS の磁場計算に用いた BH 曲線と、今回 Q1 の計算に用いたもの。SKS の方はこれよりさらに上に 1 点あったが省略した。

H [A/m]	B [T]	H [A/m]	B [T]	H [A/m]	B [T]	H [A/m]	B [T]
0	0	100	1.26	20000	1.97	600000	2.83
10	0.003	140	1.39	30000	2.03	800000	3.008
20	0.025	200	1.46	45000	2.1	1000000	3.19
30	0.13	300	1.52	60000	2.15	1200000	3.37
40	0.36	500	1.56	80000	2.2	1400000	3.55
50	0.62	1000	1.61	100000	2.24	1600000	3.72
60	0.83	4000	1.72	200000	2.4	3500000	5.3
70	0.99	10000	1.86	300000	2.53		
80	1.11	15000	1.93	400000	2.64		

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、10000 A/m までの点は資料中のグラフを目で読んだ値、それより大きいところは自分の手で与えた。

2.2 磁場分布

図2で励磁曲線、図3でZ方向の磁場分布の比較をしている。きれいに一致した。

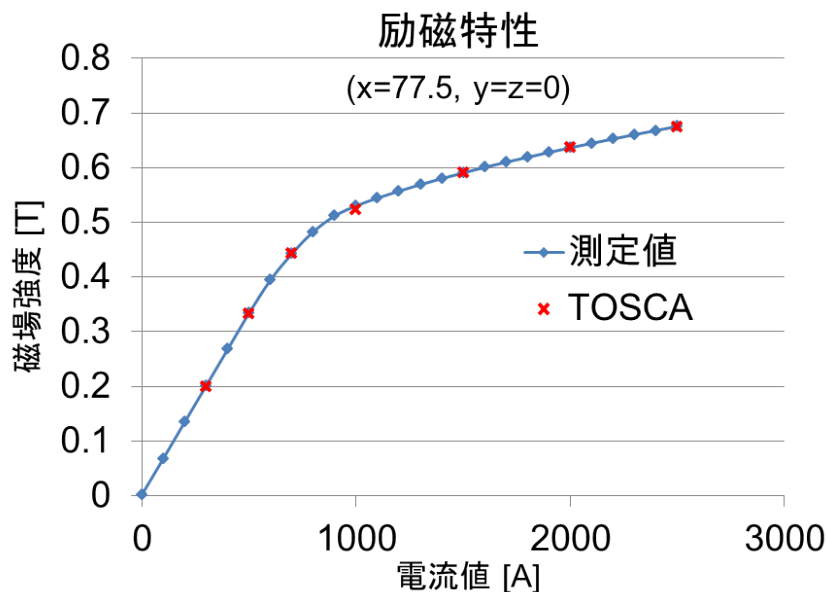


図2 Q1の励磁特性についての測定値と計算の比較。1000 Aの値がわずかにずれて見える。計算結果の方が0.006 T低い。

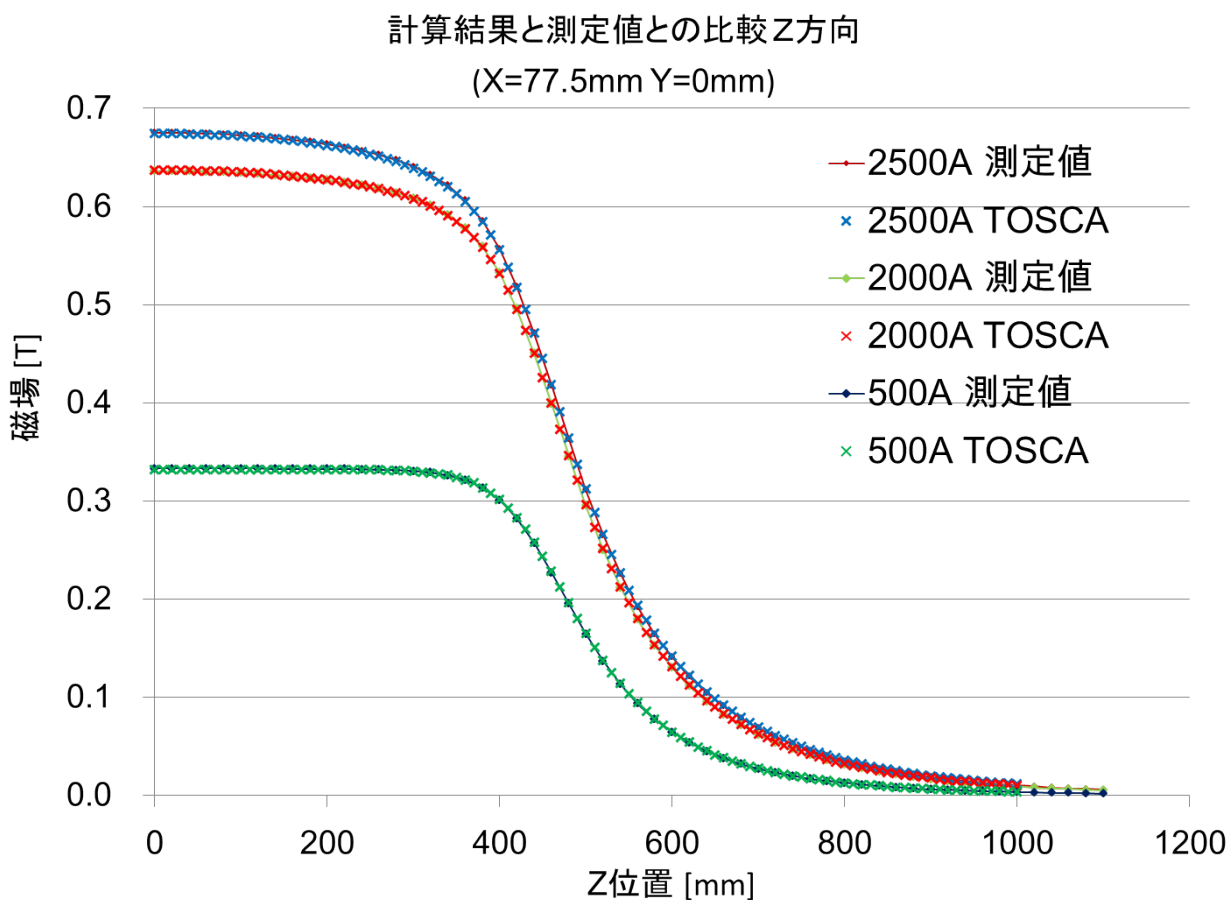


図3 Z方向の磁場分布の測定値と計算結果の比較。3パターンすべてでよく一致している。

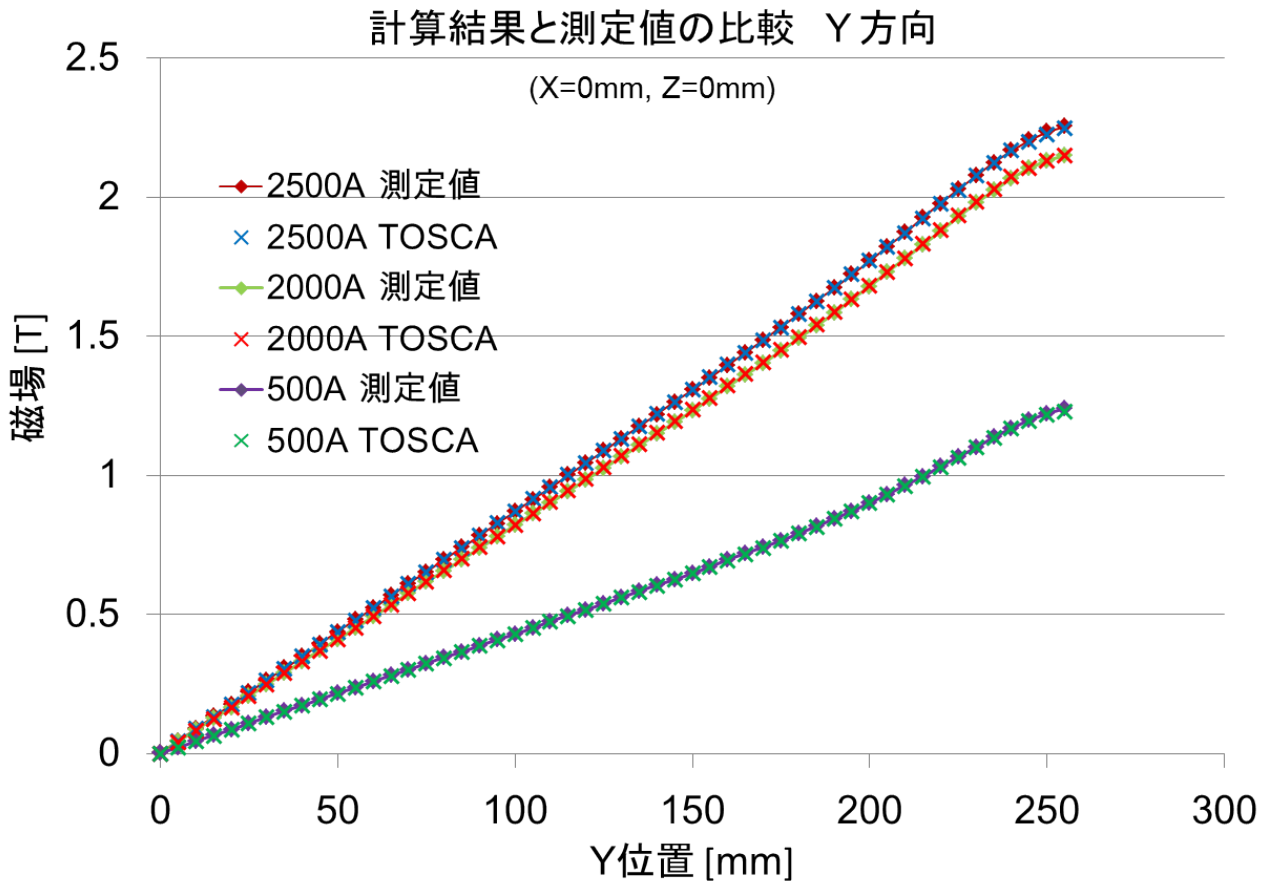


図4 Y方向の磁場分布の測定値と計算結果の比較。3パターンすべてでよく一致している。

3 まとめ

今回、1.8 T以上の領域のBHプロットを手で与えることで、TOSCA計算によって測定磁場を再現することができた。実際のQ1に計算で出せないような特異な性質がなく、モデリングにも不備がなかったということの結果だと考えられる。

3.1 今後について

Q2, D1と並べた場合にどうなるかわからないが、本実験の解析時にはTOSCA計算磁場マップを用いることができる可能性がある。Q2, D1も含めた場合の計算はやっていないが、今後やってみたい。ちなみに、Q1の隣に、 $\sqrt[3]{1/3}$ でスケールしたQ1鉄心のコピー(Q2の重量はQ1の約1/3なので)を、間隔が40 cmになるように配置して計算することは既にトライした。Z方向への磁場の漏れ出しが少なくなるような形になる。

D1の設計図面をトーキンからもらい、それも合わせて絵を作ってみた(作ってみただけ・・・図5)。Q2の図面もあれば、3台並べた計算が可能かどうかやってみたい。

前節の結果で、計算と測定が一致しているとしたが、これよりもっと近づけるべき、あるいは他の位置でも比較して検討すべき、ということであれば、もう少し詰めて調整できそうである。

3.2 疑問点など

- 今回測定結果との比較をしたが、測定誤差がどれくらいなのか、その他測定条件など、把握してる方いたら情報提供お願いします。(今のだとあまり比較した気にならない)
- TOSCAの方の結果に誤差棒をつけるとしたらどうなるのか。

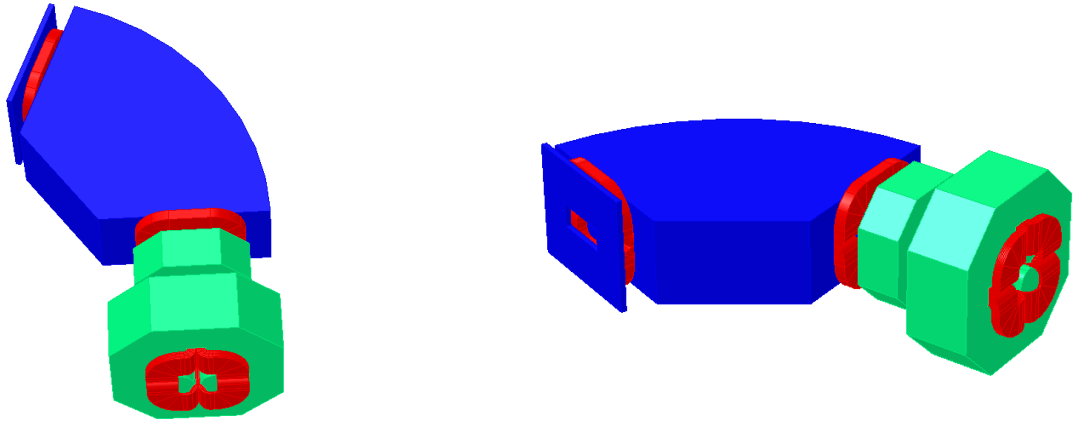


図5 S-2S の3台の電磁石を Opera 上で並べた図。実は Q2 のコイルを描いていないので、それが見えなくて良いアングルにしてある。

- 今回調整した感覚で言うと、トーキンからもらった磁化特性も、微妙にずれているように感じる。与えられた6点ではちゃんと補間できていないのかもしれないが、グラフを多少無視した方が良いのかもしれない。Operaの中で、BH 曲線 (μ H 曲線) がどのように描かれる (補間される) のか理解できないので、ご存知の方教えてください。
- BH 曲線をいじるだけでも結構な時間と労力をかけてしまったが、「正しい磁場計算結果を得る」以外に何かご利益はないものか・・・。

その他不明な点、今後この関係でやるべきことなど、コメントあればお願いします。