



今年の冬は日本列島が過去最強クラスの寒気に見舞われ、日本海側では連日雪が降り続いています。皆様いかがお過ごしでしょうか。日本海の向こう側の韓国でも、例年にない寒波が到来しているようで、冬季オリンピックの開催都市である平昌では零下 20℃（体感温度：零下 30℃）となった日もあるようです。寒さを忘れるくらい盛り上がるとよいですね。

皆様からのご質問や業界での話題、オートモーティブワールド 2018 の出展報告記事をまとめた EMSolution Topics No.40 をお送りいたします。なお、記事に関するご要望やご意見などお寄せいただければ幸いです。

■ 気になる話題： 要素形状による収束特性と計算精度への影響

貝森 弘行

◆概要

近年の計算機環境の進歩により、電磁界解析もより詳細な形状をモデル化した大規模な解析が行われています。一般的に有限要素法はメッシュが細かければ細かいほど真値に近づくと言われていることもあり、表皮厚さを考慮した大規模解析を行い、損失の見積が行われるようになっていきます。しかしながら、解析熟練者の方はご承知だと思いますが、特に渦電流解析では要素の形状が計算結果に与える影響が与えることがあります。およそ 10 年前に電磁界数値解析に関するセミナーで上記項目についてまとめて報告しておりますが、今回はそれより抜粋して説明いたします。

◆要素タイプ

有限要素解析は有限要素と呼ばれるメッシュで形状と材料特性を模擬する数値解析手法で、要素には幾つかのタイプがあります。三次元解析でおそらくもっとも使用されているのは四面体だと思われます。他には六面体や三角柱要素が多く使用されると思われます。また六面体と四面体を接合するピラミッド要素も使用されることがあるかと思えます。これらを図 1 にまとめます。

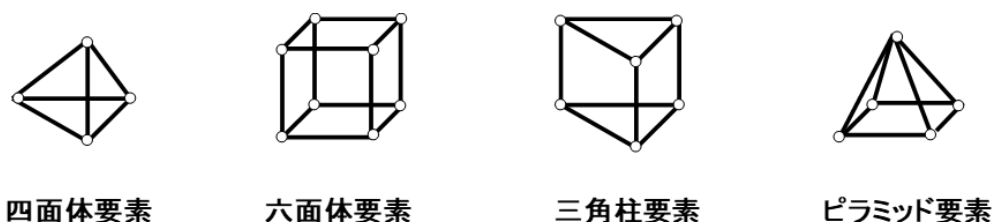


図 1 三次元有限要素のタイプ

◆Box Shield モデルを用いた静磁場、渦電流解析による要素タイプの比較

図 2 に示す電気学会ペンチマークモデルである Box Shield モデルを用いて幾つかの要素タイプを用いて比較計算した結果を例に説明します。図 3 に静磁場解析による Z 軸上の Bz 分布を示します。六面体「Hexa」、四面体「Tetra」、Box Shield を六面体で空気を四面体で作成し、六面体と四面体の結合機能により接合している「Hexa-Tetra」共に良い一致を示しています。これより、静磁場解析では要素形状によらず同じ結果が出ることが確認できます。

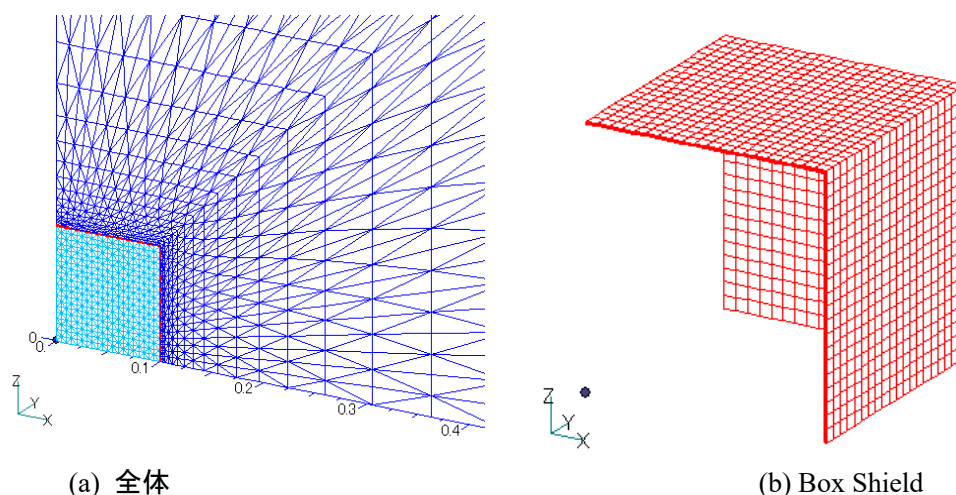


図2 電気学会 Box Shield モデル
(Box Shield 上下に励磁コイルあり, Box Shield は板厚 10 分割, アスペクト比 50)

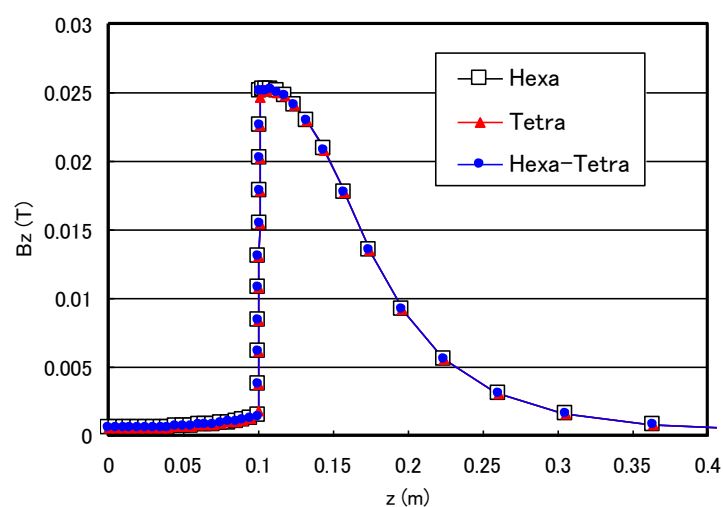


図3 静磁場解析 Z 軸上の B_z 分布

次に、励磁コイルに 2kAT, 50Hz を印加した渦電流解析結果を示します。図 4 に図 3 と同じ Z 軸上の B_z 分布、図 5 に Box Shield のジュール発熱分布を示します。四面体「Tetra」は他の要素タイプと大きく異なり、ジュール発熱は過大評価されていることがわかります。四面体を節点二次要素辺一次要素とした「Tetra 2nd.」では六面体「Hexa」や六面体と四面体の結合「Hexa-Tetra」と良い一致を示していることも確認でき、扁平な四面体を使用する場合は節点二次辺一次要素にした方が計算精度が出ることも確認できます。

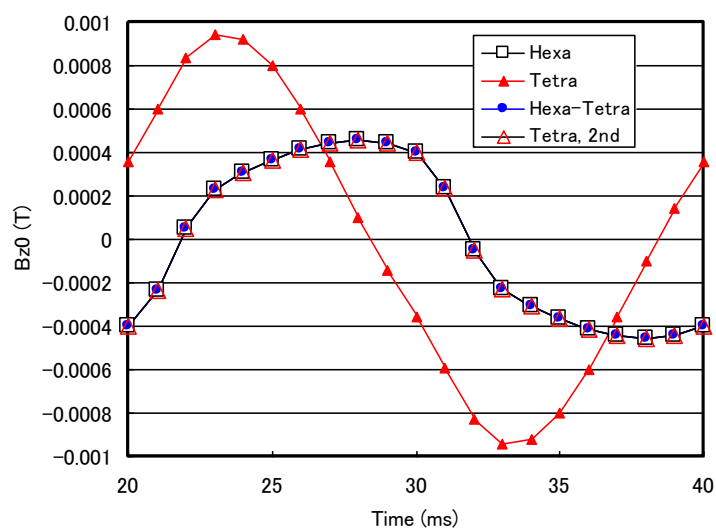


図4 渦電流解析 Z 軸上の B_z 分布

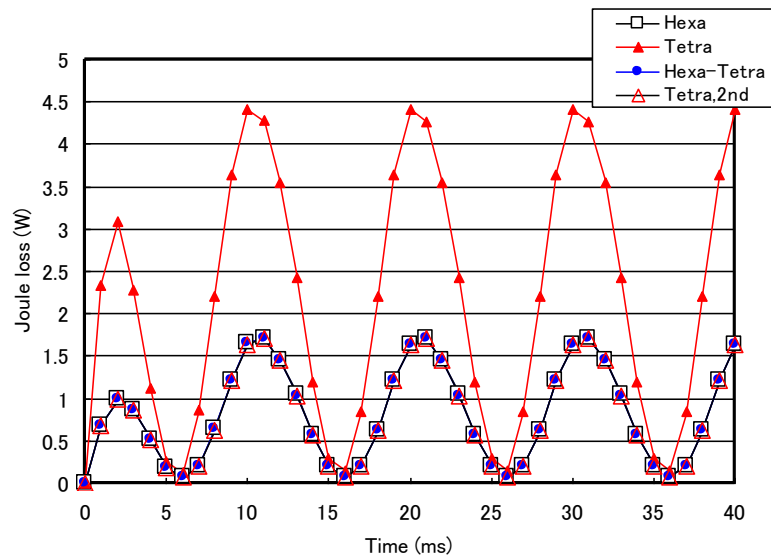


図 5 渦電流解析 Box Shield のジュール発熱

◆直方体導体を用いた渦電流解析による要素タイプの比較

図 6 に示す直方体導体モデルを用いて、要素タイプと節点次数、要素次数によるジュール発熱を比較します。非磁性導体に Z 方向に 1T の一様磁場が 10Hz で印加されています。図 7 に最小メッシュサイズ h に対する表皮厚さ $d=22.5\text{mm}$ としたジュール発熱を示します。図中の数字は「節点次数：辺次数」を表し、例えば「Tetra21」は四面体節点二次辺一次を表します。図中赤点線は表皮厚さを三分割していることを示しており、一般的に言われている表皮厚さを最低三分割すれば精度が確保できると言われている分割数です。これより、六面体ではほぼ同じような値で分割数が増えるほど（図中左側に行くほど）同じ値に収斂していくことが確認でき、六面体節点二次辺二次の二次要素が少ない分割数でも最も精度が出ています。四面体一次要素「Tetra11」や三角柱一次要素「Prism11」、ピラミッド一次要素「Pyramid11」では二次関数のように分割数により大きく値が変わり、表皮厚さに対して 10 分割以上しないと六面体の値に収斂していかないように見えます。節点二次要素とすれば六面体とほぼ同じ傾向となっていることも確認できます。図中にはありませんが、四面体節点二次辺二次の二次要素は四面体節点二次辺一次要素よりも六面体要素に近い結果が得られることを確認しています。

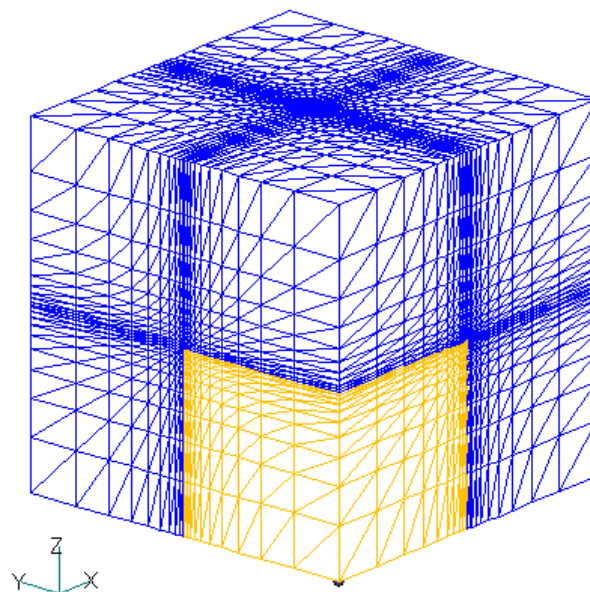


図 6 直方体導体モデル

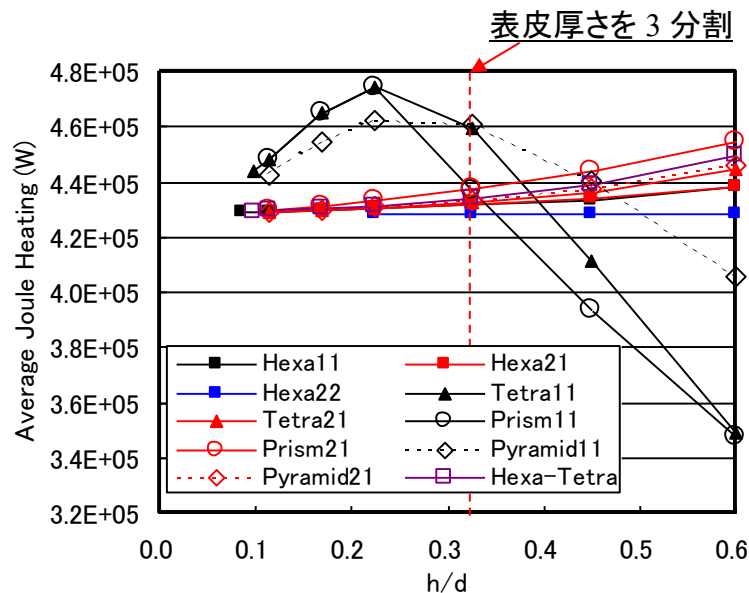


図7 直方体導体モデル 要素タイプによるジュール発熱の比較

そこで、要素タイプにより渦電流密度分布がどのようなになっているのかを確認してみます。図8に六面体要素モデル、三角柱要素モデル、四面体要素モデルの渦電流密度分布を示します。これより、六面体要素モデルは渦電流分布が連続的で滑らかなのに対し、三角柱要素モデルや四面体要素モデルでは渦電流分布がガタガタしていることが確認できます。このガタガタした分布がジュール発熱が課題に出てしまう要因だと思われます。

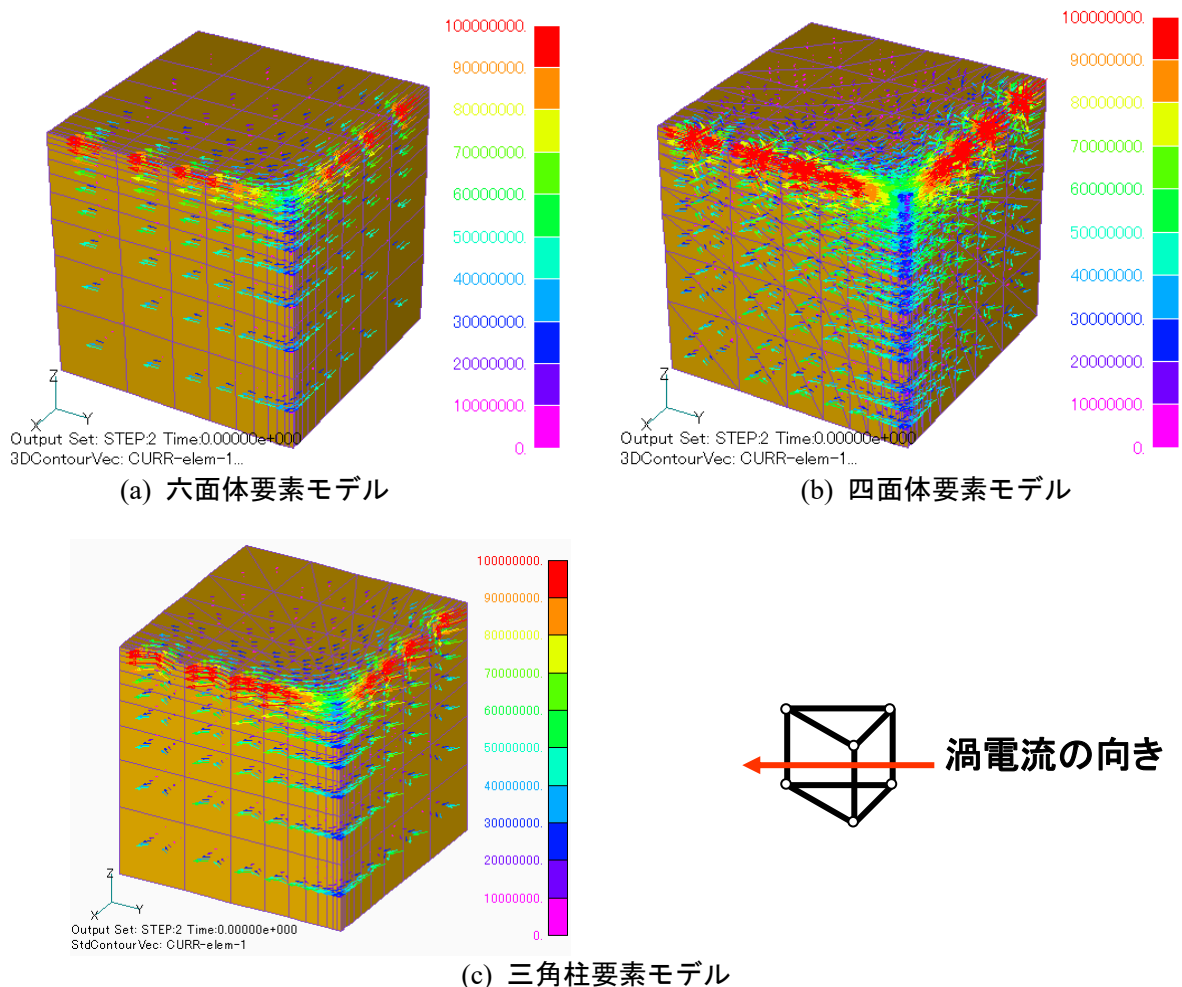


図8 要素タイプによる渦電流密度分布の比較

三角柱要素を用いて三角形表面が渦電流の方向に対して与える影響を検討してみます。図9に図8(c)と同じ要素数ですが片面のみ渦電流の向きが三角形断面と垂直の場合の渦電流密度分布を示します。これより、三角形断面が渦電流の向きと並行である右片面では渦電流分布は六面体要素モデル同様連続的で滑らかになっていることが確認できます。ジュール発熱も図8(c)よりも六面体要素モデルに近い値になっていることを確認しています。

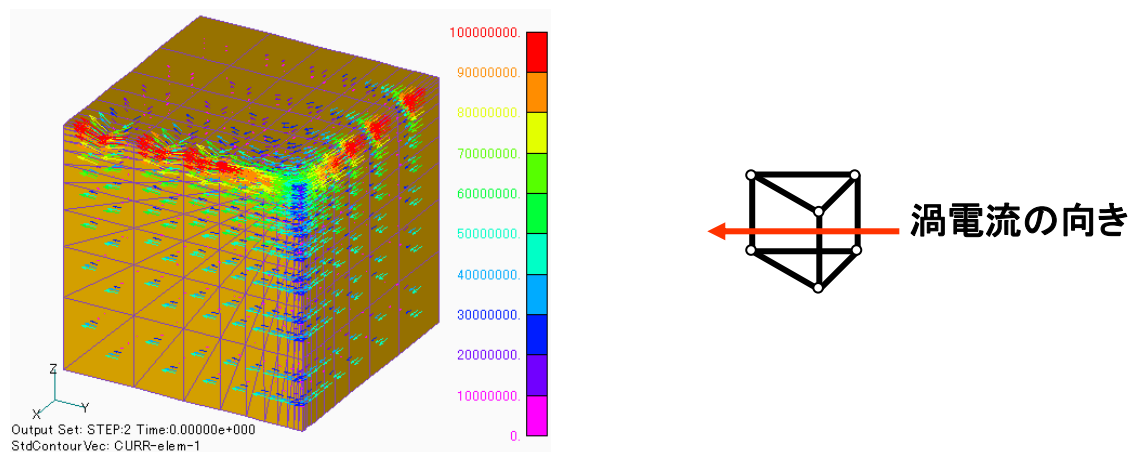


図9 三角柱要素モデル2

ここまで、扁平な四面体では渦電流解析の計算精度が落ちると説明してきましたが、比較していた六面体要素は直方体形状となっていました。そこで図10に示す断面が平行四辺形や台形状とした歪んだ六面体では計算精度は保たれるのかを検討してみます。一見渦電流密度分布は連続的で滑らかなように見えますが、拡大すると歪みの大きい角部でやや不連続な分布となっていることが確認できます。計算精度もわずかに落ちています。このため、六面体要素で作成するのであればできるだけ直方体で作成した方が計算精度が保たれると言えます。しかしながら角部もすべて直方体で作成すると要素数が増大してしまうため、領域を限定的に歪んだ六面体や三角柱、四面体を使用するのが適当だと思われます。

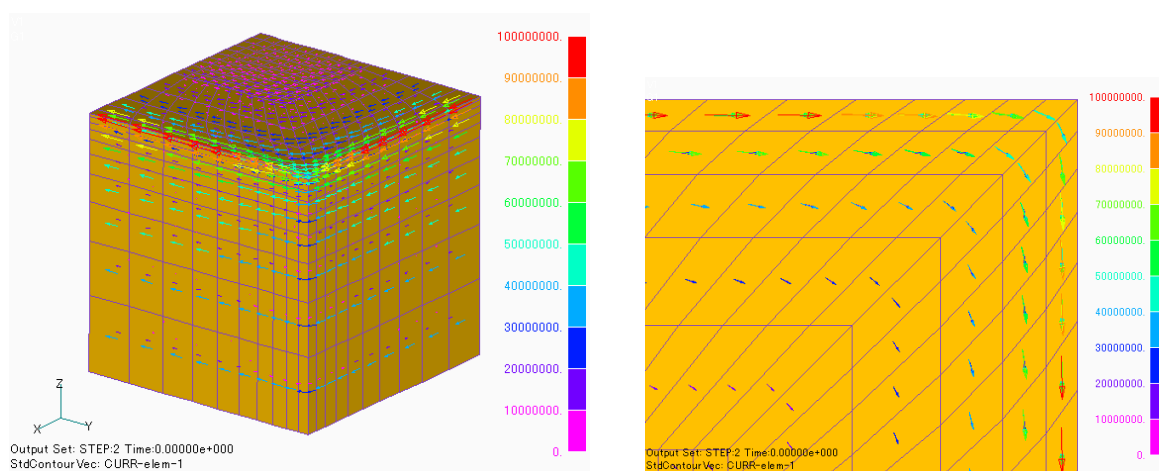


図10 六面体モデル（歪んだ場合）

渦電流解析と要素タイプについて紹介しました。PM モータでは永久磁石の渦電流損は特にキャリア高調波では大きくなるとの報告もあること、大形回転機やEV 用主機モータではステータコイルに平角導体が使用されていることから、磁界解析を用いて効率を精度よく算出するには要素タイプと導体のメッシュ作成は気にすべき項目だと思われます。メッシュ作成時の参考になれば幸いです。

■ オートモーティブワールド2018 出展報告

弊社は東京ビッグサイトで開催されたオートモーティブワールド2018（1月17日～19日）に出展しましたので、その概要について報告します。

今回の展示コンセプトは、「先進の電磁界解析技術で車載モータシステムとパワーエレクトロニクスの進化に貢献します」です。特に自動車関連の設計・開発に関わる方を対象に、弊社の最新技術を紹介させていただきました。

弊社の場合、技術サービスとソフトウェア製品が対象となるので、展示ブースもパネル4枚とディスプレイ1台のみで、あとは技術資料だけと至って地味な作りでした。それでもモータシステムや非接触給電などに係る多くの方が弊社ブースを訪れ、熱心に話を聞いていただきました。（写真1）

展示の目玉は、「新しい渦電流等価回路法（以下、CLN（Cauer Ladder Network）法）」と「1Dシミュレーションのための高精度モータモデル」の2点でした。以下、簡単に概要を紹介します。

◆CLN法

CLN法は、弊社・亀有の発明した手法で、今回は、非接触給電システムの渦電流解析におけるリッツ線のコイル均質化による解析をテーマに解析事例とその応用についてご紹介しました。

図1にCLN法のワイヤレス接触給電システムへの適用のフロー図を示します。本図は、現在弊社が目標としているCLN法の活用方法を示したもので、「CLN法によるコイル均質化」と「CLN法によるコイルの等価回路の構築」のアイデアを含んでいます。

非接触給電システムでは、コイルにおける表皮効果や近接効果によるコイルのAC抵抗の増大を抑えるためにリッツ線が用いられますが、リッツ線のAC抵抗を試作する前に評価することが難しく、課題とされています。

リッツ線を含む体系をそのまま有限要素解析するのは、リッツ線の素線数がしばしば数千から数万本にもなり、メッシュ数が膨大となります。システム全体も含めた解析モデルを作成するのは非現実的と言えます。そこでCLN法によるリッツ線のユニットセル解析により複素透磁率を求め、それを用いて全体系を解析する手法を試みました。今回は、 6×6 の2段撚りのリッツ線を対象に、25ターンのコイルにおけるAC抵抗を評価した事例を紹介しましたが、最終的には、より複雑な体系（例えば、 $6 \times 6 \times 20$ の3段撚りのリッツ線）を解析することを目標に開発を進めています。CLN法については、これからいろいろな活用事例をご紹介してゆけるものと考えていますので、ご期待ください。



写真1 SSIL 展示ブース

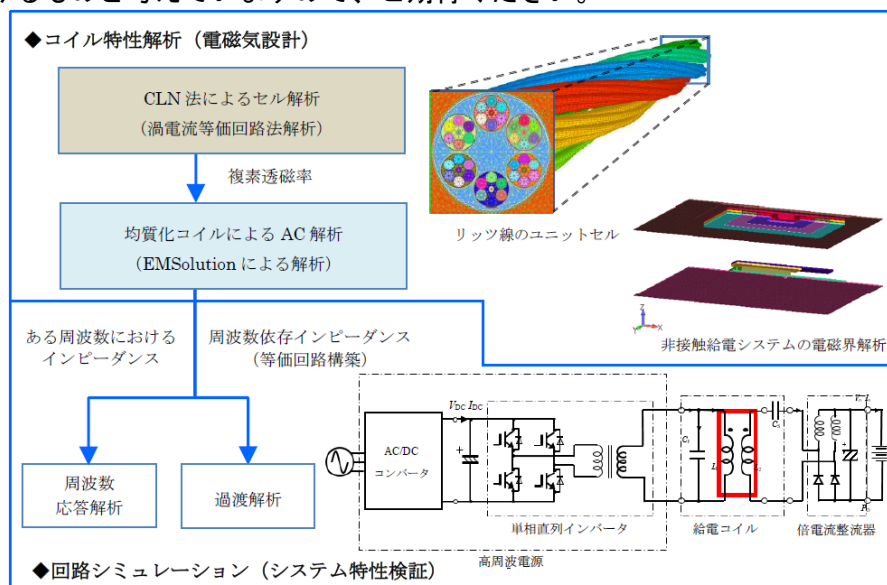


図1 CLN法を用いたワイヤレス接触給電システム*の解析の流れ

*株式会社ウィティ殿ご提供

以下に図 1 における解析ステップを示します。

・ステップ1 CLN 法によるユニットセル解析

最初に、CLN 法により素線配置の周期性を考慮したユニットセルに対する解析を行い、ユニットセルの特性として複素透磁率を求めます。例えば、3 段燃りのリッツ線ですと、ユニットセル解析においても 1 千万要素を超えるモデルが必要となりえますが、CLN 法により計算量を著しく低減できることが特徴です。

・ステップ2 均質化コイルを用いた電磁界解析

ステップ 1 で得られた複素透磁率を用いて、多数の素線から構成されるコイルを、複素透磁率を持つバルク領域として扱います。これにより、リッツ線構造をバルクコイルとして扱うことができるため、メッシュ数を著しく削減できます。EMSolution による従来の AC 解析により、ワイヤレス給電システム構造を含めた周波数毎のコイルのインピーダンスを得ることができます。

・ステップ3 回路シミュレーションによるシステム特性評価

システム特性を確認するには、コイルと給電側、受電側の回路を含む電気回路シミュレーションが必要です。動作周波数での解析によりシステムの基本特性を確認できますが、高調波の影響を見るには、ステップ 2 で得た周波数毎のインピーダンスから等価回路を構築し過渡解析を行うことも可能です。回路シミュレーションは、LTspice などの汎用の電気回路シミュレータを想定しています。

◆1D シミュレーションのための高精度モータモデル

「1D シミュレーションのための高精度モータモデル」のコンセプトは、図 2 に示すものです。

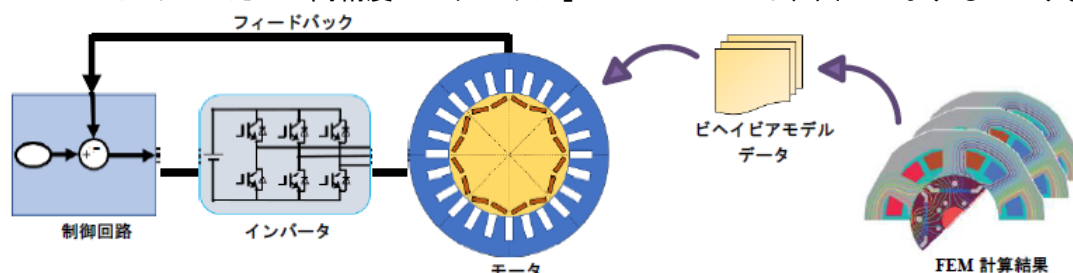


図 2 1D シミュレーションのための高精度モータモデル

モデルベース開発 (MBD) では、開発の初期段階から、対象機器の数学モデルを用いることで、制御設計、プログラム開発、HILS による検証という手順で設計を進めてゆきます。このため、モータの制御設計では、対象モータの実機が組みあがる前段階からモータ特性を模擬するモデルが必要となり、モータモデルが高精度であれば設計変更のない制御設計ができます。そのためのモータービヘイビアモデルは、有限要素法による電磁界解析から作成するモデルで、前記の MBD における 1D シミュレーションのための高精度モデルとして活用していただけるものです。特徴は下記の通りです。

・高精度な非線形モータモデル

- ◇ 鎖交磁束ベースのビヘイビアモデルですので、非線形インダクタンスベースでは表現のできない磁気飽和や dq 軸干渉、スロット高調波を精度よく再現することができます。
- ◇ 高速回転時の過変調、弱め磁束制御でも高精度に模擬できます。

・汎用シミュレータとの連携

- ◇ MATLAB/Simulink 等の制御回路シミュレータのモータ素子、あるいは制御回路内の非線形素子として高速解析を行うことができます。

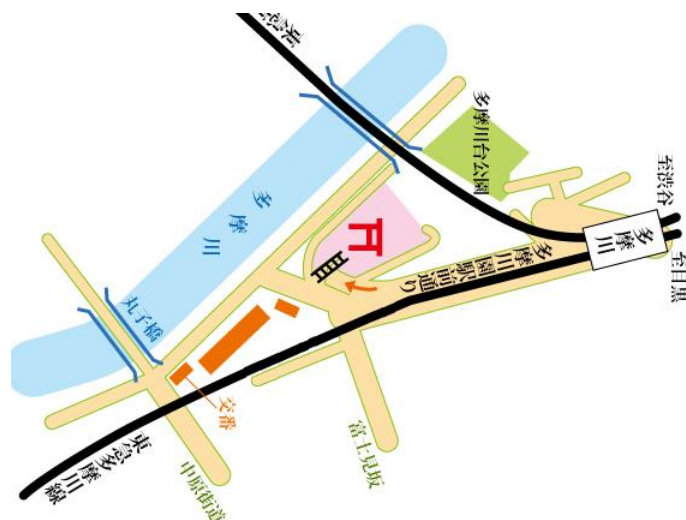
今回の展示会はオートモーティブワールドの他に、ネプコンジャパン、ロボティクス、スマート工場 EXPO、ウェアラブル EXPO などの展示会が同時開催ということで、広い東京ビックサイトをすべて利用した一大イベントでした。来場者数は、オートモーティブワールドで約 4 万人、会場全体では 12 万人近くになり、1 月にもかかわらず熱気のため室温も上がり、セーターも必要ないほどでした。

また近くのブースでは美人のコンパニオン嬢が勢ぞろいするなど、普段の弊社の職場にはない華やかな雰囲気を楽しみことができました。

最後になりましたが、当日、弊社ブースを訪問してくださった皆様にお礼を申し上げます。ありがとうございました。

■ ちょっと一息：EMSolution の故郷（多摩川浅間神社） その34

少し遅めの報告ですが、今年の新年は正月2日に玉川浅間神社に初詣に行ってきました。当社最寄りの祐天寺駅から東横線で横浜方向に5駅目、多摩川駅で下車して直ぐの場所にあります。東横線は、この駅を出ると短い切り通しを通過し多摩川にかかる鉄橋を渡り神奈川県に入るのですが、多摩川浅間神社は、この切り通しの南側にある小高い丘の上にあります。



玉川浅間神社 アクセス

多摩川浅間神社の創建は今から約800年前。源頼朝が東征した時、心配し夫の後を追った妻政子のわらじの傷が酷くなり多摩川に治療のために逗留した時、近くにある亀甲山に登って見ると富士山が鮮やかに見えたことから、富士吉田にある自分の守り神である浅間神社に夫の武運を願い、この場所に正観世音堂を立てさせた事がこの神社の始まりと言われて居ます。調べると、正観世音は仏教の信仰対象なのですが、神仏混淆というものすごい事を発明して日本の事だから、これが神社になっても不思議では無いのでしょうか。

浅間神社と呼ばれる神社は多数ありますが、全て富士山信仰の神社。今はセンゲン神社と発音される事が多いのですが、昔はアサマ神社と呼ばれて居ました。アサマの由来は諸説ありますが、アイヌ語で煙の事をAsapとよび、これが噴煙をあげる火山を指すようになり、漢字の浅間をあてたと何かで読んだ記憶があります。浅間山は噴煙をあげる活火山、富士山も奈良時代から江戸時代まで噴煙をあげる事が多くあり、富士山の頂上近く、麓近くに浅間神社が作られ、さらには富士山を遠望できる場所にも浅間神社が多く建立されたと言う説です。アサマという大和言葉の発音よりセンゲンという漢語的な発音が格好良いと思う人が増えたのだろうと私は勝手に想像しています。

多摩川浅間神社は高さだけで言えば以前に紹介した品川神社と同じ位の高さで、入り口から山頂の半分位の高さまでは急坂で登り、ここに社務所や展望台のようなものがあります。ここから上は階段で登ると本殿があります。



本殿と参拝客



お焚き上げ

小さいけれど、立派な本殿です。正月2日の昼過ぎに訪れたのですが、ソコソコの参拝客がいました。また、本殿から少し降りたところでは「お焚き上げ」の火が燃えていました。傍の展望台に行くと、丹沢山塊の向こう側に富士山がクッキリ。写真ではやや見辛いのですが電車の先頭より先の上の方に富士山が見えます。



北条政子が思わず手を合わせたという富士山の絶景。
(その後江戸中期に宝永噴火があったので、山容は少し変わりましたが、)

初詣の後は、ニヶ領用水に沿って武蔵小杉から溝の口まで散歩。ニヶ領用水は関ヶ原の合戦の頃に掘削が始まった多摩川を水源とする 30km を超える農業用水で、JR 南武線と多摩川の間に位置します。近隣の農業を支えた用水ですが、今回歩いてみると中小の製造業が周辺に軒を並べていました。ニヶ領用水も工業用水に利用されているとの事です。面白い事に、宅地化が最初に進んだ溝の口周辺には工場では無く、イチゴや梨等の農地が多く残っていました。この用水、最近は散策路としても整備が進み、今回も桜の花やガマの穂等を見る事ができただけでなく、早めの鶯を見る事もできました。



桜



桜の花

EMSolution Topics No.40

編集・発行: 〒153-0065 東京都目黒区中町 2-21-7
サイエンス ソリューションズ株式会社

お問い合わせは、下記までお願いいたします。

EMSolution 事務局

E-mail: emsdesk@ssil.co.jp TEL: 03-3711-8900 FAX: 03-3711-8910