グリーン・エレクトロニクス No.14
Green Electronics Series

省エネのための
キー・テクノロジ

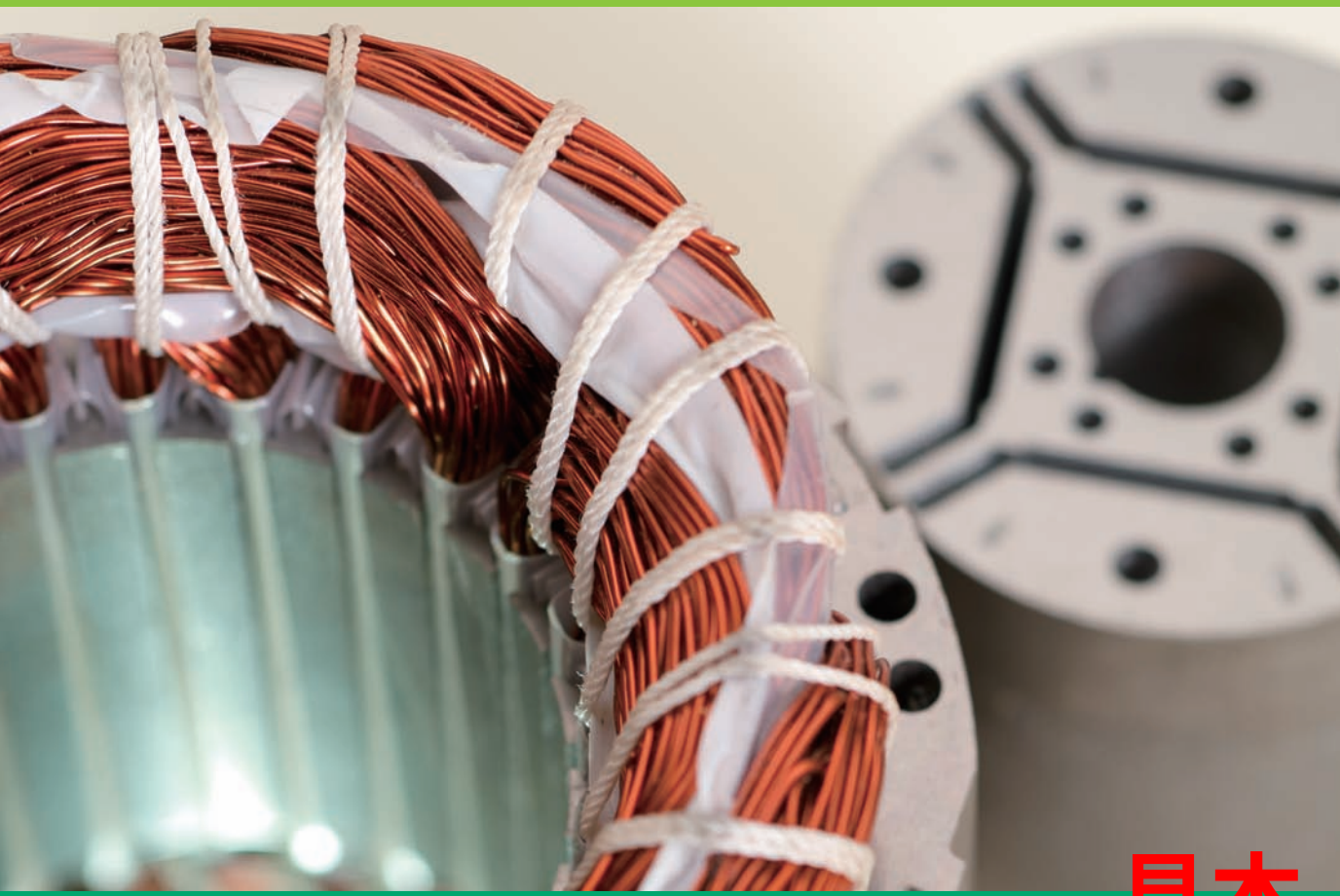
無駄なく静かに回す技術をパソコンで学ぶ

ベクトル制御による高効率モータ駆動法

[シミュレータCD付き]

■付属CD-ROM：モータ制御シミュレータPSIMデモ版（250ページ解説PDF付き，Windows用）
●3 kW臨界モード・インターリーブ方式PFCモジュールの設計と動作原理

CD-ROM付属

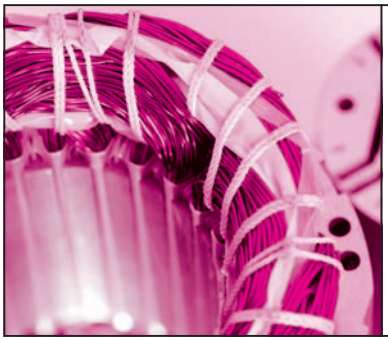


CQ出版社

見本

CQ出版社

第1章



目的を定めてモデルを十分に理解しておくことが重要

モータのシミュレーション技術

赤津 観
Kan Akatsu

現在のモータ・インバータの設計において，シミュレーションは不可欠なものとなっています．計算機技術が圧倒的に進化した今日において，一昔前に1日かかっていた計算がわずか数秒でできるようになっており，その有用性はますます増しています．

もはや，シミュレーションを行わないでインバータの回路設計や制御設計およびモータ設計を行うことはない，と言っても過言ではないでしょう．

シミュレーションの種類

一言でシミュレーションと言っても多種多様な方法，技術，ツールが混在しています．例えば，Excelで計算式を作ってグラフを描くこともシミュレーションですし，大規模有限要素解析を用いて車の衝突状態を模擬することもシミュレーションです．この二つを同じ土俵に上げるのはけしからん，とおっしゃる方もいらっしゃるかもしれませんが，これらに共通な事項があります．それは，

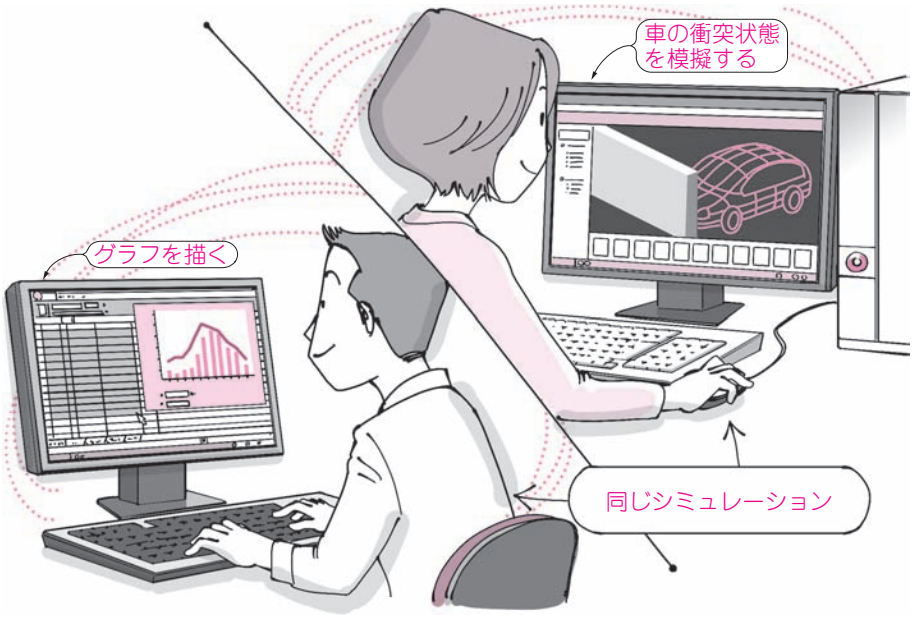
計算は自分で作成した，または用意されているモデルに基づいて行われる

ということです．

Excelで作った計算式もシミュレーション・モデルですし，有限要素モデルもシミュレーション・モデルです．つまり，計算機は入力に対してモデルに基づいて計算を行って，その結果を出力するだけです．したがって，モデルが物理的に正しくなければ，当然結果も正しいものは得られません．ここでモデルが「物理的に正しくなければ」という言葉と，モデルが「正確でなければ」という言葉は異なることに注意してください．

というのも，大きく分けてシミュレーションには以下の二つの役割があるからです．

(1) 実機状態を完全に模擬したバーチャル実験



Excelで計算式を作ってグラフを描くことも，大規模有限要素解析を用いて車の衝突状態を模擬することもシミュレーション

見本

(2) 理論検証または物理現象把握を目的とした簡易実験

(1)は，実機を完全に再現または模擬することが要求されるシミュレーションで，そのモデルおよび周辺まで事細かな設定が要求されます．目指すところは完全バーチャル実験で，試作レスでのものつくりが最終目標となっています．

(2)は，例えば新しい制御方式を考えた場合に，その方法が正しいかどうかを検証してみるなど，モデルの精度はそれほど必要にならない場合のシミュレーションです．この場合は，モデルが物理的に正しいものであれば，その目的は達成できます．

したがって，シミュレーションを行う際に，その目的をしっかりと定めておくことが重要です．定量的な評価を重視するのか，それとも定性的な評価を行うのかによってシミュレーションの方法や規模，必要なデータも異なってきます．

ただし，昨今の計算機技術の進歩によって，(1)と(2)の境界も次第になくなってきていることも事実です．つまり，簡易実験レベルでも計算が速いので，そこそこ実機状態を模擬できるようになってきました．

こうなってくると使っている側もそのシミュレータが「正確なもの」と誤解しがちです．よくある笑い話ですが，「このシミュレーション結果は妥当なのか？」という問いに対して「○○というソフトウェアで計算した結果なので妥当です」という回答や，「どうしてこのような結果が得られたのか？」という問いに対して「○○で計算したらこうなりました」という回答を平気でする人が増えてきました(聞いた人は物理現象の説明を求めています)．

つまり，シミュレーションの中で何が起こっているのか(どういった計算を行っているのか)をまったく理解せずに，あたかも魔法のツール，魔法の箱のように扱ってしまう事例をよく耳にします．繰り返しになりますが，シミュレーションは魔法のツールではなく，あくまでモデルに基づいて計算を行うだけです．

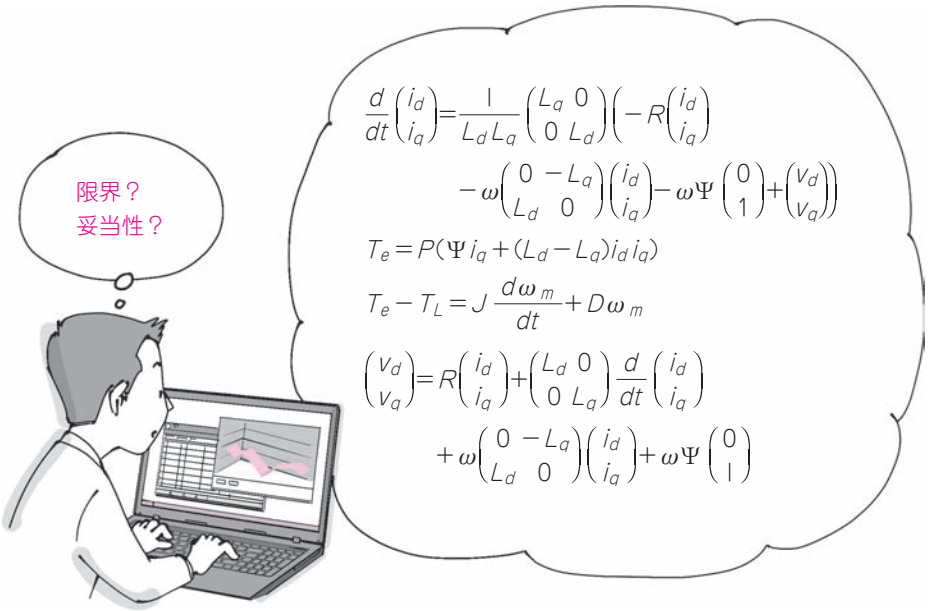
したがって，重要なのはシミュレーションの中でどういった計算を行っているかを把握して，その限界や妥当性を自分の中で整理しておくことです．これはシミュレーション・モデルを十分に理解することに他なりません．

モータ・モデルとシミュレーション

それでは，今回具体的にとりあげるモータについて，そのモデルやシミュレーション方法の変遷について歴史を少し振り返ってみましょう．

実は，モータ・モデルの根幹は20年前も現在も1次の微分方程式(電圧方程式)で変わっていません．これは，モータの原理原則はマクロ的にすでに完成されていることを意味しています(ここでいうマクロとは電圧，電流のレベルを意味します．電子やスピンというミクロの状態ではまだ完全に模擬できていません)．

20年前は1次の微分方程式をC言語(もっと前はFORTLAN)でプログラミングして，ルンゲ-クッタ法などの演算誤差の少ない方法を検討してワークステーションを用いて解いていました．計算刻み(タイム・ステップ)も，例えば1 msの時定数に対して1000点



シミュレーションでの計算法を把握して，その限界や妥当性を自分の中で整理しておくこと

見本

計算すると設定して，1 μsの刻みがやっとで，1 secの計算などは1日かかってしまっていました．

ですので，モータの入力電圧も正弦波を入力することが普通で，インバータのパルスを入力するということはあまり行われず，インバータのデッド・タイムを考慮したシミュレーションなどは相当大変な時代でした．

モータ・モデルに用いるパラメータも定数として扱っており，飽和はもちろん空間高調波も無視したシミュレーションが行われていました．この頃は，どうやって計算時間を短縮するか，アルゴリズムを簡略化するか，メモリを節約するか，ということに注力していた時代です．なお，ベクトル制御も基本波ベースの制御なので，この時代には完成，実用化されています．

15年くらい前からソフトウェア・ベンダがモータ・モデルを一つのブロックとして用意しだしました．今回用いるPSIMのモータ・モデル(**図1**)も，確かこの時代に出てきたと記憶しています．

記述するのが面倒なモータ・モデルや座標変換がブロック化されたことに伴って，プログラムの知識がない人でもそれぞれのブロックを接続するだけでシミュレーションができるようになりました．また，モータ・モデルで用いるパラメータ(インダクタンス)も飽和を考慮して電流依存性をもたせたり，テーブル化して計算ごとにパラメータを読み込むような工夫がされるようになりました．

さらに，モータの解析技術として有限要素法を用いた電磁界解析が一般的になってきたのもこの時代です．**図2**に示すように，モータの形状を有限のメッシュ(要素)に分割し，各要素でマックスウェルの方程式を材料の非線形性を考慮して解いて磁束密度を求めることで，空間高調波の把握が容易になり，インダクタンスや磁石磁束の高調波やトルク・リプルなどが解析できるようになりました．

そうなると，電磁界解析結果を用いてモータ・モデルを構築したくなります．PSIMなどの回路シミュレータと電磁界解析ソフトウェアを連携させて，モータ・モデルとして電磁界解析を用いるようになったのが10年くらい前です(**図3**)．

入力電圧もインバータの出力電圧を模擬したパルスが入力され，1ステップごとに電磁界解析を行う直接連携解析が開発されました．

しかしながら，電磁界解析の計算時間が著しく長いため，1日に何回もシミュレーションを実施することは難しい状態でした．リスタート機能を設定して，1

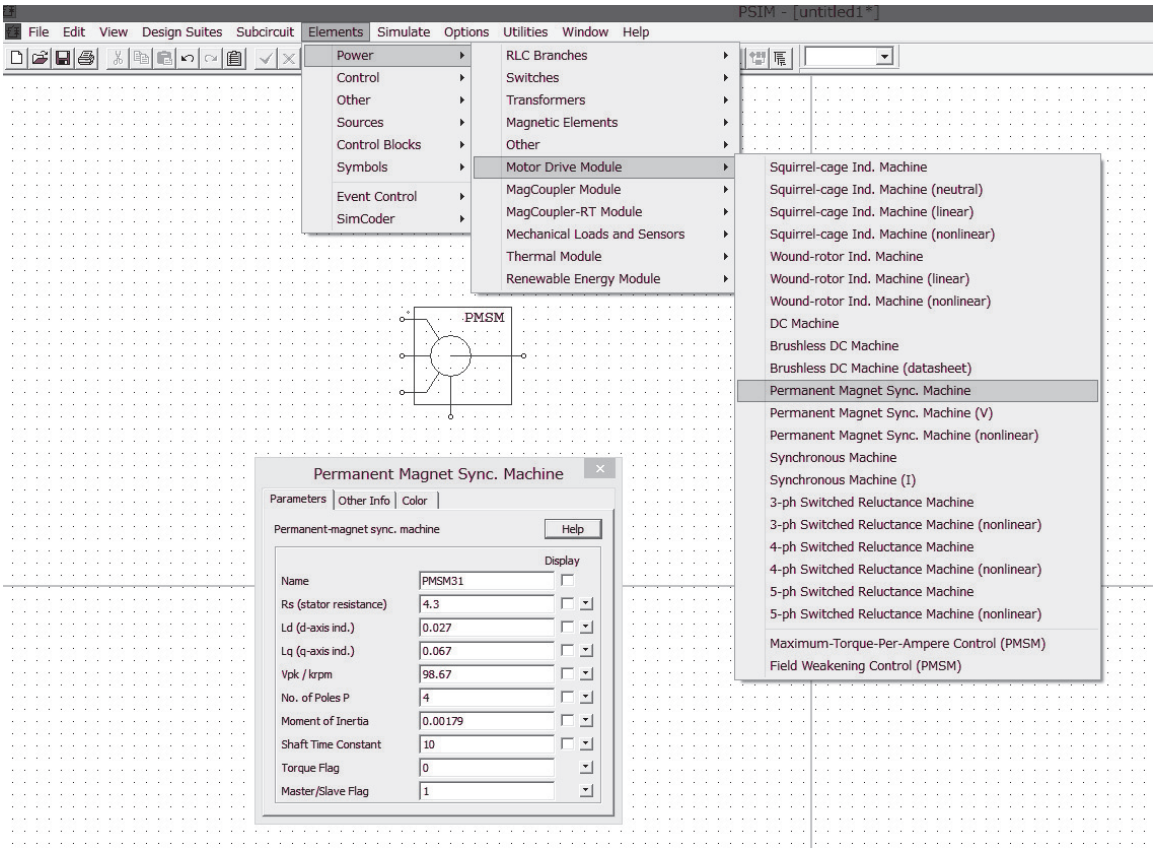


図1　PSIMのモータ・モデル

見本

度シミュレーションを止めて計算結果を確認し，また再度スタートさせる…というような努力をしていた覚えがあります．また，計算結果も膨大なため，必要な情報を取り出すことも困難でした．

この計算時間の問題を解決するために，あらかじめ必要なデータを電磁界解析で取得して，テーブル化してモデル（ビヘイビア・モデルと言います）を作成し，回路シミュレータでそのモデルを動かす簡易連携解析が7～8年前から使われ始めました（**図4**）．制御や回路シミュレーションに最低限必要な空間高調波や磁気飽和現象だけをモデリングしているので，マクロなレベルでは先の直接連携解析と同等な結果を得ることができ，一度モデルを作成してしまえばシミュレーション自体は時間がかからないため，この手法は現在の主流となっています．

このように，現在設定できるモータ・モデルは，設定次第で実機とほとんど変わらないモータ・モデルと

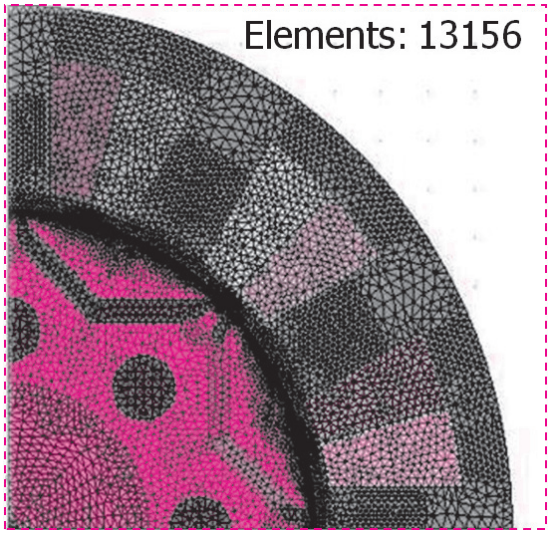


図2　モータの形状を有限のメッシュに分割

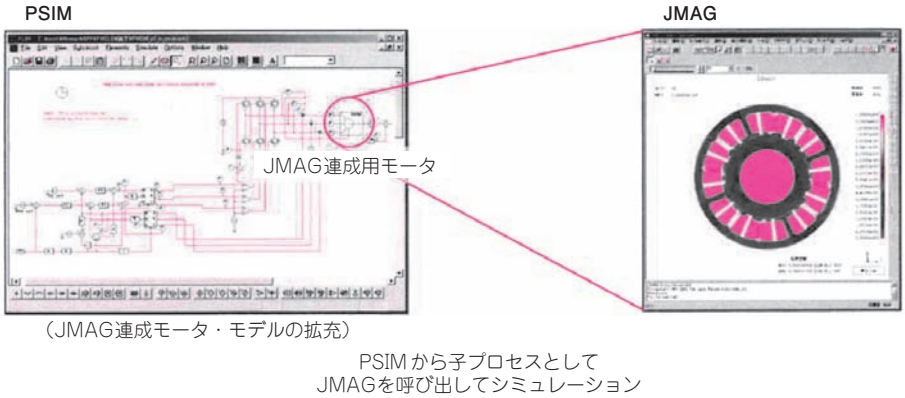


図3　PSIMとJMAGとの連成解析（Type C）

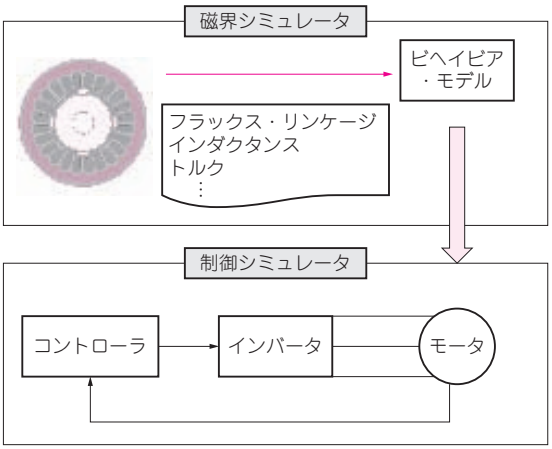


図4　簡易連携解析

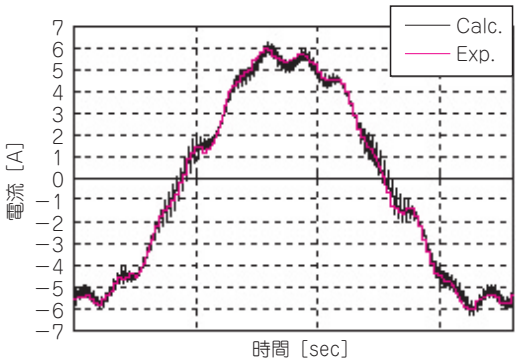


図5　実機の電流波形と連携解析で求めた電流波形

見本

表1　PSIMで用意されている一番基本的なモータ・モデルと実機との差異

パラメータ	PSIM	実機
磁石磁束	正弦波で分布，かつ大きさは一定	高調波を含む，温度依存性がある
誘起電圧	正弦波	歪んでいる(高調波)
インダクタンス(直流分)	一定	電流依存性があり飽和する
インダクタンス(交流分)	2θ で変動する	2θ で変動し，さらに高次の成分を含む
漏れインダクタンス	無視	コイル・エンドなど3次元方向が顕著
トルク	平均値	コギング・トルク，空間高調波のリプル
抵抗	一定値	温度依存性，周波数依存性がある
機械摩擦係数	一定値	温度依存性があり回転数で異なる
鉄損	無視	入出力パワーに影響を及ぼす

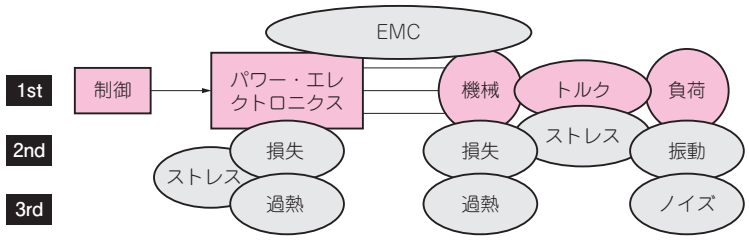


図6　支配方程式が異なるレベルでの連成を行う

することが可能です．参考までに，**図5**に実機の電流波形と連携解析で求めた電流波形を示します．ほとんど両者は重なっていて，高調波を含めて一致していることがわかります．

ここで「設定次第」と記したのは，たとえ電磁界解析を用いたとしても，その材料設定やメッシュの精度によって，結果が大きく異なるからです．したがって，いつの時代でもモデリングの問題というのは重要で，何が考慮できていて何が不足しているのか，ということを知っていく必要があります．

PSIMで用意されている一番基本的なモータ・モデルと実機との差異を簡単に**表1**に記しておきます．

これだけ差異があると，果たして基本モデルでのシミュレーションは意味があるのか，といった疑問も出てきますが，冒頭で述べた理論検討やモータの原理原則，物理現象の把握をするうえでは十分です．精度うんぬんを語る前にモータの原理原則をシミュレーションを通して把握することが重要ですし，完成されているベクトル制御のシミュレーションは基本波レベルで十分に可能ですし有用です．

また，原理原則を理解していると実機実験でも異常状態をすぐに検知することができます．「理論的にありえない」といった結果をいかに早く判断できるか，が製品開発のスピード化につながります．

シミュレーション技術の課題

最後に現在のシミュレーション技術の課題について触れておきましょう．現在の課題は“concurrent engineering”，日本語では「複合領域工学」とでも言いましょうか，先の連携解析を支配方程式が異なるレベルでの連成を行うことです．簡単にいうと熱力学と電磁気学との連成，および振動，音と電磁気学との連成です(**図6**)．

表1に示したように，実機のパラメータの多くが温度依存性があることに対し，シミュレーションでは温度を一定として扱っています．モータのトルク密度は限られた体積にどれだけ電流を流せるかで決まります．つまり，どれだけモータを冷却できるか，でトルク密度が決まります．

一方，モータは銅損，鉄損により発熱します．つまり，発生損失からモータの温度上昇を計算して，その温度によってモータ・パラメータを変化させる連成が必要です．

さらに，モータの発生する電磁音や振動をいかに低減させるかも重要な課題です．ステータとロータの吸引力により振動が発生し，その振動が空気を伝わって音を発生させるのですが，電磁気的に得られた吸引力から音，振動を求める連成が必要です．

もちろん，その後は制御やモータ設計を駆使して損失を低減させたり，振動を低減させたりする技術が必要となってきます．また，遠心力や電磁鋼板の打ち抜きや焼嵌め時にかかる応力も考慮が必要となります．

これらの技術は今まさに開発の真っただ中にあり，10年後には完全にモデリングできるようになっているかと思います．

しかしながら，考慮しなければならないことはまだまだたくさんあり，いつの時代でもそのモデルの限界を知っておくことは，シミュレーションを行ううえで重要です．

見本

ISBN978-4-7898-4844-2

C3055 ¥2600E

CQ出版社

定価：本体2,600円（税別）

9784789848442

1923055026001

グリーン・エレクトロニクス

Green Electronics Series

このPDFは，CQ出版社発売の「グリーン・エレクトロニクス No.14」の一部見本です．

内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧下さい．
内容　http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/48/48441.htm
購入方法　http://www.cqpub.co.jp/order.htm

見本