

富士電機のシミュレーション技術とコンピュータデザインの現状と展望

特集

Fuji Electric's Simulation Technology and the Present Status and Future Outlook of Computer Design

中山 和哉 Kazuya Nakayama

山本 勉 Tsutomu Yamamoto

近年の経済環境の変化に伴い機器・システムに対しては、従来以上の信頼性を確保しつつ小型化、低価格化、高性能化、高機能化への迅速な対応が求められている。富士電機では、さまざまな製品分野においてこれらの要望に応えるため、モデリング手法や物性値の同定など独自の工夫により、高度化・高精度化を図ったシミュレーション技術を製品開発やシステム解析に積極的に適用している。また、三次元CADで作成した設計データなどを有効利用して、設計・製造プロセスや評価試験などの高度化や改善による高品質化に向けた取組みを進めている。

With the changing economic environment of recent years, the capability to ensure higher reliability of devices and systems and a rapid response to support miniaturization, lower prices, higher performance and greater functionality are sought. Responding to such requests in various product sectors, Fuji Electric is actively applying high-speed high-precision simulation technology, based on proprietary modeling techniques and methods for identifying physical properties, to product development and system analysis. Fuji Electric is also promoting the effective utilization of design data generated by a three-dimensional CAD system to realize higher quality by advancing and improving design and manufacturing processes and evaluation testing.

1 まえがき

近年の経済環境の変化に伴い、従来以上の信頼性を確保しつつ、小型化、低価格化、高性能化、高機能化などのニーズに迅速に対応することが機器・システムに求められている。シミュレーション技術は、流体、熱、構造、電磁界、制御など各分野で利用され上記ニーズに応えている。また、複数分野にまたがる連成解析やCAD（Computer Aided Design）との連携機能の強化、分析・測定技術の進展などによって、より高度で複雑な現象の再現、計算精度の向上、解析時間短縮など技術向上が進んでいる。これまでの部品レベルの解析から、装置またはシステム全体へ

と製品開発への適用範囲も広がりつつある。

富士電機では、研究・製品開発やシステム解析だけでなく、製品設計や製造プロセス改善にも積極的にシミュレーション技術を適用してきた。本特集号では、富士電機におけるシミュレーション技術の最新の適用事例と、それに関連した設計、製造技術の事例を紹介する。なお、本稿ではシミュレーション技術の動向と富士電機の取組みについて述べる。

2 シミュレーション技術の動向^{(1), (2)}

最近のシミュレーション技術の動向として、①複雑現象

表1 富士電機における計算機環境の進化に伴うシミュレーション領域の拡大







	～1980年代	1990年代	2000年～現在
技術計算機	大型汎用コンピュータ/スーパーコンピュータ		HPCサーバ PC(並列計算)
構造解析	静的応力 固有値 熱応力 振動応答	塑性変形 接触 亀裂進展 クリープ	衝撃・破壊 粘弾性・粘塑性 マルチスケール
熱流体解析	熱伝導 単相流	対流熱伝達 放射伝熱	自由表面・混相流 沸騰・凝縮 粒子挙動 流体騒音
電磁界解析	静電場 静磁場	過渡応答 誘導加熱	電磁波 EMC
その他		溶接 プレス加工 樹脂流動	半導体デバイス ダイカスト 分子動力学 デバイス製膜
適用製品例	 重電機器  クリーンルーム	 受配電機器  半導体	 パワーエレクトロニクス機器  太陽電池

表2 富士電機におけるシミュレーションによる設計プロセスの変遷（熱流体解析の例）

	黎明（れいめい）期 （1980年代）	発展期 （1990年代）	現在
解析の種類	二次元・層流・定常	三次元・乱流	三次元・乱流・非定常
解析規模 （要素数）	～数千	～数百万	～数千万
解析プログラム	自社コード	汎用コード	汎用コード+ 独自機能 （ツール化含）
主な利用者	数値解析部門 （専任者）	開発部門 （専任者・ 開発者）	設計部門 （専任者・開発者・ 設計者）
解析の主な用途	設計検討 （プラント設備など）	製品開発 （量産品）	開発期間短縮 限界設計

への適用範囲拡大、②対象の大規模・詳細化、③専任者から設計者への利用の大衆化、などを挙げることができる。

最近のコンピュータの能力（計算速度、メモリ容量）は著しく向上している。かつては大型計算機を必要としていた実製品レベルの複雑構造や、より現実に近い物理モデルを利用したシミュレーションが、現在はパーソナルコンピュータでも容易にできるようになった。表1に示すように、富士電機においても計算機環境の進化に応じてシミュレーション領域の適用範囲の拡大を図っている。このように、シミュレーション領域の広がりや単体解析から複合解析（連成解析）への拡張などにより、シミュレーションの利用目的は設計製品の部分最適から全体最適へ、機能・性能の実現目的から製造コストなど考慮した統合設計へ進化したつつある。

また、これまで主に解析専任者が行ってきたシミュレーションによる検討も、現在は設計部門における製品開発や設計への活用が一般化しており、表2に示すように富士電機においてもシミュレーションを利用した設計プロセスの革新が進められている。さらには、三次元CADの活用も進められている。そのメリットの一つとしてシミュレーションとの連携があり、従来、シミュレーション活用のネックとなっていたメッシュ作成などのモデル作成工数が大幅に削減できるようになっている。その結果として、設計上流段階にて性能評価、最適構造検討を行い、試作レス化を図る取組みも進められている。

③ 富士電機における取組み

富士電機は、インバータや電動機、サーボシステムなどのパワーエレクトロニクス（パワエレ）・ドライブシステム機器、パワー半導体や磁気ディスク媒体などの電子デバイス製品、さらには発電プラント設備、受配電・制御機器、自動販売機など、幅広い製品群を取り扱っている。製品の高機能・高性能化による付加価値向上、さらには高信頼性や低価格化の要求に応えるための手段の一つとしてシミュレーション技術を積極的に適用している。

富士電機におけるシミュレーション技術は、汎用大型コ

ンピュータを利用した重電機器の構造解析や熱解析に端を発し、その後流体解析や電力系統解析、電磁界解析、機構解析など幅広い分野に適用してきた。例えば、電気機器の小型化に伴う温度上昇増加のように、製品の限界設計、最適設計の実現には複数の物理現象のトレードオフを考慮の必要がある。従来のシミュレーションではある仮定に基づき簡略化した物理モデルでの現象再現を行ってきた。現在は、電磁力や発熱や化学反応など複数の物理現象を連成させ、より現実に近い条件で精度の高い検討が行えるようになってきている。

表3に、富士電機の代表製品ごとの主な設計要素、ならびにそれぞれに対応するシミュレーション技術の適用事例および最近の取組みを示す。次に、主要分野の最近のトピックスを述べる。

3.1 ドライブシステム分野

産業用機械やインフラ設備に用いる電動機では、近年、省エネルギー（省エネ）化を目的とした永久磁石形同期電動機（PM モータ）の適用が進められている。PM モータの設計で重要な永久磁石の非可逆減磁や渦電流損の発生、コギングトルクなどの課題に対しては、熱や電磁界の解析技術を利用した設計プラットフォームを構築し、短期間での設計の最適化を実現している。

従来、設計段階での予測が困難であった電磁ノイズの問題に対しても、基盤技術のシミュレーション技術の整備を進めている。パワエレ機器において、半導体素子のスイッチングにより伝導ノイズと放射ノイズが発生する。回路シミュレーションを利用した伝導ノイズの予測はすでに実用段階に到達しており、インバータやUPS（Uninterrupted Power System：無停電電源装置）の設計に活用している。現在は、より高い周波数帯域を対象とした放射ノイズに対しても、設計技術の確立を進めている。今後も、さらに高い精度で放射ノイズを予測できる技術を開発し、製品の高信頼性化に役立てる予定である。

3.2 電子デバイス分野

IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュールや磁気記録媒体に代表される電子デバイス製品における性能や信頼性を向上させるためには、さまざまなデータを定量的に把握する必要がある。このデータとは、測定が困難な微小領域で起こる瞬間的な温度上昇や電流変化、さらには実使用条件における製品の変形や、長期的な材料劣化特性などである。これらのデータをシミュレーションなどにより定量化して技術開発や設計に生かすことにより、これまで以上に過酷な使用条件や長期的な信頼性を確保した製品を創出できるようになる。

ハイブリッド車などへの用途拡大が進んでいるIGBTモジュールでは、デバイス実装の高密度化に伴う放熱性向上が課題となる。現在は、動作時のモジュール変形や温度上昇をシミュレーションにて定量化することで、熱的な限界設計と最適設計を行っている。近年、適用を進めている鉛

表3 富士電機の代表製品の主な設計要素とシミュレーション技術の適用事例

分野	代表的製品	主な設計要素		シミュレーション技術の適用事例	最近の取組み	
ドライブシステム	インバータ 無停電電源装置 サーボシステム	回路	電力変換回路、制御回路、電気・電磁気回路、フィルタ、熱冷却、絶縁	回路解析、信号遅延解析、電流分布解析、モータ電磁界解析、電界強度解析、EMC解析	⇒機器の環境規制対応・小型・高信頼性化 ◆EMCフロントローディング設計技術 ⇒機械特性考慮による制御系のロバスト性能向上 ◆モータドライブの制御系解析技術	
		制御	シーケンス、アルゴリズム、機械系とのマッチング(サーボ)、ソフトウェア実装	状態遷移解析、制御系過渡現象・安定解析、電気-機械-制御連成解析、制振制御解析		
	サーボモータ 同期電動機	構造	筐体(きょうたい)・配線・ブスバー構造、部品レイアウト・パッケージング	筐体強度解析、車両振動解析、素子温度解析	⇒永久磁石形同期電動機の性能予測による小型高性能化 ◆永久磁石形同期電動機のシミュレーション技術	
		電気	鉄心・磁石材料、電磁気構造、巻線仕様、絶縁、回路・制御とのマッチング	モータ電磁界解析、電界強度解析、回路解析		
電子デバイス	IGBTモジュール	デバイス	デバイス構造	デバイス解析(キャリア移動、電界、漏れ電流)	⇒IGBT適用製品の高精度設計化 ◆IGBTデバイスの電気特性解析技術 ⇒顧客環境を考慮したIGBTモジュールの熱設計 ◆パッケージシミュレーション技術	
	イグナイタ	パッケージ	パッケージ構造	温度解析、熱応力・変形解析、電流・電磁界解析		
	磁気記録媒体	基板	材料・加工・表面処理(硬度、剛性、うねり、粗さ)	構造解析	⇒新しい高密度記録方式への対応 ◆熱アシスト磁気記録媒体のシミュレーション技術	
		記録膜	層構成、記録層、下地軟磁性層、ヒートシンク層	記録層温度解析、記録再生解析、ヘッド磁界解析		
		HDI	保護膜・潤滑膜	ヘッド浮上解析		
サーボ	サーボパターン	サーボ信号解析				
発電プラント	タービン 発電機	構造	ブレード・ロータ構造、回転子・固定子構造、ケーシング構造	強度・振動解析、電磁界解析	⇒ものづくり技術のIT化による品質・信頼性向上 ◆蒸気タービンの設計・加工・組立シミュレーション技術	
		熱・流体	動翼・静翼構造、回転子・固定子冷却構造、プラント配管系統・構造	翼列流れ解析、コイル冷却解析、水・蒸気二相流解析	⇒タービン発電機の冷却性能向上 ◆発電機全体を対象とした大規模熱流体解析技術	
	電気	電気制御・回路、電力システム	電気システム系統解析			
受配電・制御機器 コンポーネント	ブレーカ	機構部	接点開閉機構、電流検知機構・構造	機構動作解析、電磁-運動連成解析、電磁-熱連成解析、電流伝熱解析、高速ひずみ強度解析、流動解析	⇒電動機保護の信頼性向上 ◆サーマルリレーの熱変形解析技術 ⇒樹脂成形部品の高品質化 ◆樹脂流動解析技術	
	サーマルリレー	遮断部	アーク磁気駆動機構、ガス流制御、樹脂溶接制御、電磁反発運動制御	アーク挙動解析、ガス流解析技術、回路解析		
		回路	漏電検知回路	電磁気・回路・EMC解析		
流通システム	自動販売機	機構部	商品・カップハンドリング、液体・粉体ハンドリング、構造・機構(筐体、機構、部品)	収納・搬送・落下挙動解析、飲料攪拌(かくはん)・温度解析、応力・衝撃解析、機構動作解析、ファン騒音解析	⇒自動販売機の商品販売動作の信頼性向上 ◆商品販売機構の動作解析技術	
		加熱冷却部	冷凍サイクル(冷却、ヒートポンプ加熱)、断熱構造、気流制御	冷凍サイクル解析、庫内温度・気流解析	⇒自動販売機の運転状態予測による制御技術向上 ◆庫内商品の温度解析技術	
	フード機器	制御部	冷却・加熱制御、販売制御、通信制御、電気・電子回路	回路解析		
		通貨機器	鑑別部	センサ(磁気、光)、パターンマッチング	磁気センサの検知特性解析	
			機構部	紙幣・硬貨ハンドリング、構造(筐体、機構、部品)	搬送・収納挙動解析、応力解析、機構動作解析	⇒金銭機器紙幣搬送動作の品質・信頼性向上 ◆金銭機器の機構-制御連携解析技術
制御部	搬送制御、通信制御、電気・電子回路	回路解析				

フリーはんだでは、接合部のはんだの塑性変形構造の再現やマイクロ組織レベルでの疲労特性の把握を行うことで、接合部の寿命予測の高精度化を実現している。

磁気ディスク媒体の高記録密度化に向けて開発が進めて

いる熱アシスト記録媒体では、記録密度や記録条件に応じた効率的な材料開発を行うために熱解析や磁場解析による現象の可視化を行い、数十ナノメートルオーダの領域の温度分布や磁化状態の検討を通じて媒体構成の最適化に取り

組んでいる。今後も、さらなる微小領域の温度特性や磁気特性を予測する技術を構築し、磁気記録媒体の高記録密度化に役立つ予定である。

3.3 発電プラント分野

火力・地熱発電や原子力関連機器などの発電プラント設備は、電力の安定供給への要求などから特に高い信頼性が必要である。その製品規模ゆえに試作試験をベースとした開発には多大なコストと時間を要する。これを解決するために、構造、熱流体、電磁界などのシミュレーション技術が設計検討に不可欠になっている。

プラント設備は一般に数多くの部品から構成され、構造も複雑であるため並列計算機を用いた大規模三次元シミュレーションの適用も進めている。空気冷却タービン発電機においても数千万要素の熱流体解析を行うことで、発電機内部の冷却風分布や温度分布の把握を行い製品の冷却性能の向上に取り組んでいる。今後、この技術を応用することで、タービン発電機のさらなるコンパクト化や高効率化に役立つ予定である。

3.4 流通システム分野

地球温暖化防止の観点から、自動販売機には近年、省エネルギー（省エネ）化が強く要求されている。商品温度安定化に要する電力消費量を低減するため、冷却・加熱時の商品収納庫内部の気流や熱移動のシミュレーションを実施し、多種多様な機種を対象として設計段階での商品温度の推定と構造の最適化を行っている。

自動販売機の販売機構や、自動つり銭機などの通貨機器では、商品や紙幣の搬送機構を筐体（きょうたい）内にコンパクトに収納することが要求される。限界設計による小型化と機構動作の信頼性を両立するため、製品設計においては、搬送対象物の動作を含む機構・制御のシミュレーション技術を活用している。

今後、これらの技術の応用範囲を拡大し、製品のさらなる省エネ化やコンパクト化、高信頼性化に役立つ予定である。

3.5 製造・加工プロセスへの応用

三次元 CAD の普及と CAD と解析ソフトウェアの連携強化により、構造解析を中心とした設計レベルでの性能検証が一般化しつつある。富士電機では、さらにシミュレーション技術を利用した製造条件の最適化と製品信頼性の向上への取り組みを進めている。

受配電機器の樹脂筐体や電動機の鋳物フレームでは、充填不良や反りを低減するために金型形状やゲート位置の適正化が必要である。金型や射出条件における問題点の特定や対応は、従来、勘と経験に頼るものであった。現在は、成形・鋳造シミュレーションを適用し金型形状や射出条件の影響を定量化することで、量産時の製品品質の安定化を実現している。

蒸気タービンの設計においては、強度計算や熱力計算を

行う設計プログラムの計算結果に基づき、複雑な曲面から構成されるタービン翼やケーシングの三次元 CAD データと NC 加工プログラムを自動生成するシステムを構築し、設計の効率化を図っている。三次元測定器を用いて荒加工段階での素材形状をデジタルデータにすることで、その後の NC 加工における加工パスの最適化も行っている。

今後、ほかの製造・加工プロセスに対してもシミュレーションやデジタルデータの活用によって技能の見える化による技術伝承を行い、製品の品質と信頼性をより高いレベルで維持・向上を図っていく。

4 今度の展望

富士電機における今後の主な取組みとして、シミュレーション技術適用範囲のいっそうの拡大と、設計・製造部門での利用の促進（設計者全体への普及）が挙げられる。前者については、金属溶接部などで発生する材料の亀裂進展や樹脂やゴムに代表される高分子材料のクリープや剥離（はくり）、さらにはモータの渦電流などマイクロな現象と、それが製品全体へ及ぼす影響を同時に評価するマルチスケール解析への取組みも開始している。同時に、プラズマ・化学反応などを利用した製造プロセスや、衝突、騒音など従来は事前検討が困難であった複雑な物理現象に関しても、シミュレーション技術の実用化を進めている。これらにより、設計プロセスの大幅な変革が図られるものと考えられる。

また、利用の促進については、線形構造解析や熱伝導解析など実用レベルのシミュレーション技術が確立した領域を中心に、製品固有のノウハウの蓄積と手順の標準化（プラットフォーム化、ツール化など）や設計者に対するシミュレーション技術の教育・普及を推し進めることで、さらなる設計の高精度化、効率化を目指している。

5 あとがき

富士電機では今後とも、シミュレーション技術を個々の製品・システム開発だけでなく、研究開発や製造プロセスにもさらに展開し、お客さまの期待に応える製品を提供し、社会に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 北出雄二郎. 富士電機のシミュレーション技術への取組み. 富士時報. 2003, vol.76, no.4, p.205-206.
- (2) 瀬谷彰利ほか. 富士電機の解析・評価技術への取組み. 富士時報. 2007, vol.80, no.3, p.172-174.



中山 和哉

生産技術，材料技術，解析技術の研究開発に従事。
現在，富士電機アドバンステクノロジー株式会社
生産技術センター生産技術研究所長。日本機械
学会会員。



山本 勉

熱流体解析技術の開発，装置の冷却設計に従事。
現在，富士電機アドバンステクノロジー株式会
社生産技術センター生産技術研究所 CAE グルー
プマネージャー。日本機械学会会員，日本伝熱学
会会員。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。