

クラウドと融合した統合開発環境でのマルチフィジックス解析技術

Multiphysics Analysis Technology in Cloud-based Integrated Development System

● 石川重雄 ● 登坂正喜 ● 久保田哲行

あらまし

マルチフィジックス解析とは、異なる支配方程式で表される複数の物理現象をシミュレーションによって解くものである。近年の電子機器の実装設計では、高密度化、大容量化の要求が増している。そのため、発熱による温度上昇が電気特性や機械的特性に与える影響が無視できなくなっており、分野ごとにシミュレーションを実施し、設計改善内容をすり合わせる従来の設計手法では手戻りが多く、開発効率が上がらないという問題が出てきた。富士通は、このような電気・熱・構造などの複合的な問題を解決するため、独自のマルチフィジックス解析環境を構築した。このマルチフィジックス解析環境をクラウド上に構築した設計開発環境である統合開発プラットフォームと融合させることで、電気設計者と構造設計者の情報共有、大規模問題への対応を実現している。

本稿では、電源解析、熱流体解析、および構造解析を組み合わせ統合的に解くマルチフィジックス解析環境の特長と、小型電子機器設計への適用事例について説明する。

Abstract

Multiphysics analysis simultaneously handles multiple physical phenomena, each expressed by different dominant equations, by means of simulations. In recent years, there has been growing demand for the assembly design of electronic devices to allow for increased density and capacity, and this trend has given rise to a problem that the generated heat affects their electric and mechanical properties. In the conventional designing style, simulations are conducted separately for different development aspects, before the improvements made to the design are unified. However, this has become inefficient as it is likely to result in having to repeat the designing processes. Aiming to address this problem that has electric, thermal, structural, and other aspects, Fujitsu has developed its unique design environment for multiphysics analysis. This analytical environment has been combined with an integrated development platform, which is a design environment built onto the cloud. It makes it easier to share data between electric and structural designers, enabling them to address the large-scale model analyses. In this paper, we explain the multiphysics analytical environment in terms of its features to facilitate an integral solution by combining power integrity, thermal-fluid and structural analyses. We also present examples of applying it to the design of small electronic devices.

まえがき

富士通では、2007年からテクニカルコンピューティングを活用した統合開発プラットフォームFTCP（Flexible Technical Computing Platform）を提唱し、電気設計と構造設計の開発プラットフォームを統合してきた。⁽¹⁾ 現在、回路CAD、実装CAD、構造CAD、およびそれらと連動する様々な設計ルールチェック機能や各種ライブラリの使用によって、電気設計者と構造設計者の情報共有による開発の効率化を実現している。分野ごとに最適な設計改善案を抽出してから最終的な設計改善内容をすり合わせる従来手法では開発分野間でのトレードオフが起こりやすかった。FTCPが、開発分野間の情報共有を支援することで、性能や品質の達成に向け、このトレードオフでどれを重視すべきか、開発分野横断で検討・判断できるようになった。更に、装置設計の不具合箇所をより正確に把握するために、電気、熱流体、構造など様々なシミュレーションソフトをFTCPに導入している。

しかし、分野ごとにシミュレーションを実施し、設計改善内容をすり合わせる手法では、手戻りが多く効率が上がらないという問題があった。そこで、各分野の問題を複合的に取り扱うことで効率的に解決するマルチフィジックス解析の実用化に取り組んでいる。従来のシミュレーションでは、商用ソフトに頼る部分が多かったが、CADや内製ツールとのデータ連携だけでなく、従来不可能であった大規模問題への対応を目指してきた。

また、マルチフィジックス解析環境をFTCPに組み込み、エンジニアリングクラウド環境で提供することで利便性を高めている。エンジニアリングクラウドは、高速画像圧縮・転送技術RVEC（レベック：Remote Virtual Environment Computing）によりクラウド基盤で3D-CADなどを快適に操作できる環境を実現する。RVECは仮想デスクトップ環境において、動画や高精細な画像を扱う際のデータ転送量を従来の約10分の1に削減することで、クライアント端末利用者の操作応答性能を向上している。⁽²⁾

大規模解析の場合、従来のクライアント/サーバ環境では、解析結果ファイルが保存されるファイ

ルサーバと設計者の端末とのデータ転送に時間がかかることが問題である。エンジニアリングクラウド環境では、解析結果を格納するファイルサーバの近くに高性能エンジニアリングワークステーションを設置し、設計者の端末からの接続により解析結果の可視化処理を実施することで、大規模データの転送時間を大幅に短縮している。このように、富士通ではクラウドと融合したFTCPでマルチフィジックス解析技術を提供することで、電気設計者と構造設計者の情報共有、大規模問題への対応を実現している。

本稿では、クラウドと融合した統合開発環境であるFTCPに、新たに追加したマルチフィジックス解析技術の特長とその事例について述べる。

連成計算の流れ

マルチフィジックス解析とは、異なる支配方程式で表される複数の物理現象をシミュレーションによって統合的に解くものである。富士通は、電源解析、熱流体解析、および構造解析を連成させ統合的に解くマルチフィジックス解析環境を構築した。電気・熱流体・構造連成計算の流れを説明する（図-1）。

実装CADから電源解析プログラムにプリント基板（Printed Circuit Board：PCB）の材料情報や配線情報を入力することにより、PCB配線における電流分布を計算する。電源解析にはノイズ対策設計システムFUJITSU Manufacturing

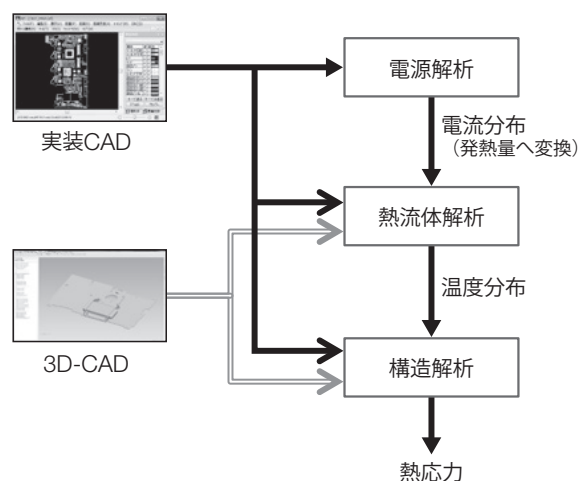


図-1 電気・熱流体・構造連成計算の流れ

Industry Solution FTCP SignalAdviserに搭載されたFTCP SignalAdviser-PIを用いる。FTCP SignalAdviser-PIは、PCB上のLSI動作に起因する消費電流変動が引き起こす電源ノイズを短期間でシミュレーションすることができる。

PCBのシミュレーションモデルは、電源およびグランドパターン部分をR (Resistance), L (Inductance), C (Capacitance) の等価回路に置き換えて、網目状に接続したRLCメッシュモデルで表現するPEEC (Partial Element Equivalent Circuit) 法(図-2)を使用している。このPCBモデルに電源供給部品、コンデンサー、ノイズ源となるLSIの等価回路を接合することでシミュレーションモデルを構成している。このようにして構成されたモデルを回路シミュレーターで解析することにより、電源インピーダンス、電圧ドロップ量、電流分布を算出している。

本手法によるシミュレーションでは、PCBの電源、およびグランドパターンの各部分のRLCメッシュモデル化における近似手法が解析精度に影響を及ぼす。これによって、モデルのメッシュが細かいほど精度は上がるが、解析時間は増大する。これまで、メッシュ数の削減手法や回路シミュレーターの改良などを重ね、20層を超える大規模PCBにおいても1時間程度で解析できる環境を実現している。⁽³⁾

電源解析によって得られた電流分布は発熱量に変換され、熱解析条件として用いられる。熱解析には、オープンソースソフトウェアコードである「OpenFOAM」を用いて開発した「FS-Solver熱流体」を用いる。OpenFOAMは仏ESI GroupのOpenCFD社が商標登録を持ち、GPLライセンスと

して提供される物理場の演算コード群である。

電子機器では部品点数が多く、CADモデルをそのままメッシュ分割すると計算モデルの規模が大きくなるという問題がある。そのため、事前に形状の簡略化や簡易形状への再作成など、解析モデリングのためのCAD形状修正作業が必要になる。計算結果に影響を与えずにCAD形状を修正するためには、熱流体シミュレーションに関する専門知識と経験が必要である。更に、この作業には多くの時間を要するため、一般の設計者が熱流体シミュレーションに取り組む上で大きな障壁となってきた。

一方、FS-Solver熱流体では、OpenFOAMの並列計算スケーラビリティと独自の計算アルゴリズムの改良により、CADモデルをそのままメッシュモデル化した大規模モデルを短時間で計算できる。そのため、CAD形状修正作業の必要がなく、熱流体シミュレーションの専門知識のない一般の設計者でも、熱流体シミュレーションを製品開発に適用できる。

これらの熱解析によって得られたPCBの温度分布を基に、構造計算によって配線パターンの熱応力を計算する。構造計算には、東京大学大学院新領域創成科学研究科の奥田教授を中心に開発された大規模並列有限要素法構造解析プログラム「FrontISTR」をベースとして、富士通が独自に改良した「FS-Solver構造」を用いる。

FS-Solver構造は、解析モデルで定義された構造物が接触する可能性がある部分を自動で検知する自動接触計算機能を有している。このため、多くの部品が搭載された複雑な形状の構造モデルであっても、接触条件設定のミスなく接触計算を行

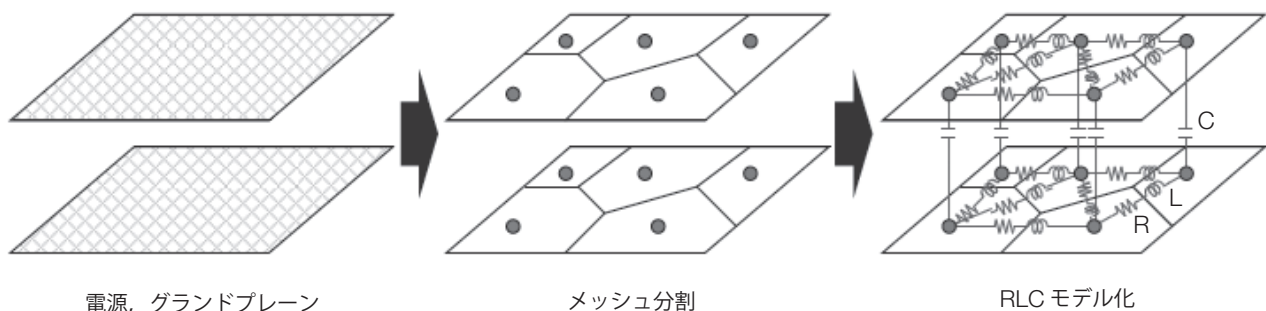


図-2 PEEC法

うことができる。また、独自の接触計算手法により、従来困難であった反復法による接触計算の収束性を向上させている。更に、マルチノード並列計算時のCPUコア間の通信量を削減することで、大規模接触計算時の並列スケーラビリティの向上を実現している。

このように、FS-Solverは並列計算スケーラビリティに優れ、大規模モデルによるマクロな現象からミクロな現象まで一括で計算できる特長がある(図-3)。

解析データカップリング技術

前章で述べたマルチフィジックス解析を実現するためには、FTCP SignalAdviser-PI, FS-Solver 熱流体, FS-Solver構造のそれぞれのソフトウェアで得られた計算結果を下流工程のソフトウェアに受け渡す必要がある。電流解析, 熱流体解析, 構造解析のいずれも, 物体および空間をメッシュで表現し, それに基づきシミュレーションを行っているが, それぞれの解析に適したメッシュ構造を用いる必要がある。さもなければ, 十分な計算精度を保証できないため, それぞれのソフトウェアからは異なったメッシュ構造に基づいたデータが出力される。

電源解析, 熱流体解析, および構造解析で用いられるメッシュ構造の典型例を図-4に示す。電源

解析ではボロノイ格子, 熱流体解析では構造格子(6面体), 構造解析では非構造格子(4面体)と呼ばれる格子構造が使われている。そのため, データの受け渡しを行う際には, メッシュ構造の相違を考慮する必要がある。本技術では, メッシュ構造の異なる解析の間でデータをマッピングするために, 線形補間を基本とする方法を採用した。この方法では, それぞれのメッシュの中心座標を導出し, 中心座標のずれ幅に基づき, データのマッピングを行っている。

基板配線の断線リスク検証事例

近年, LSIの微細化や低電圧化が進むことにより, 大幅に消費電力が低減している。その反面, 電源電圧の低下に伴い供給電流が増加するため, 微小な抵抗変化が動作不良につながる電圧低下を引き起こす。更に, 電流密度が高い部分では電圧低下のみならず, 発熱に起因した熱膨張によるPCB配線の断線や焼損などの問題を引き起こす危険性が增大している。富士通のスマートフォンやスーパーコンピュータにおいても, 電力あたりの実行性能を向上させるため, 低電圧化が図られている。そのような低電圧PCBの設計リスクを開発初期段階で検証し, 製品品質を確保することが重要な開発課題となっている。

本章では, 連成解析を小型電子機器設計に適用

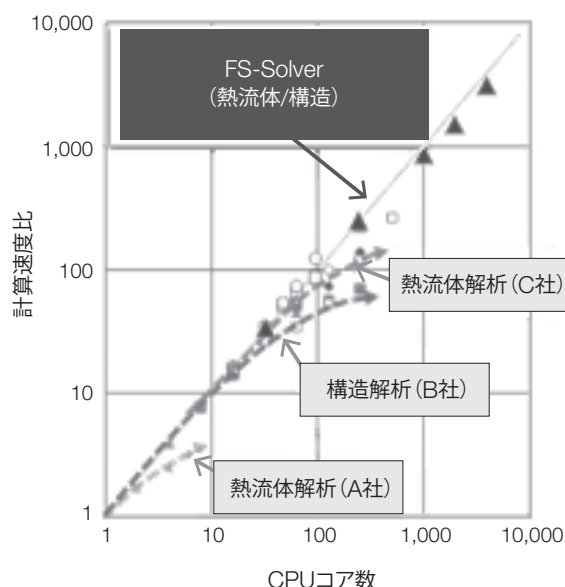


図-3 計算スケーラビリティの比較

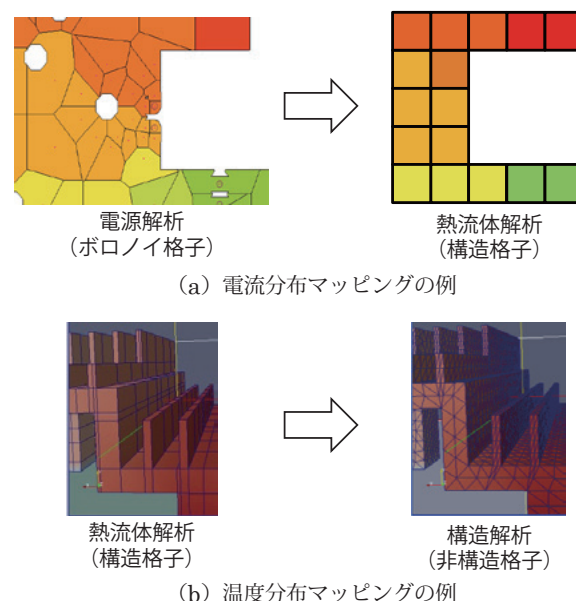


図-4 連成解析におけるデータカップリング例

した事例を紹介する。上述のようにスマートフォンなどのモバイル端末は、性能の急速な向上に伴い電子部品の消費電力が大幅に増加している。それに伴ってPCBの配線を導通する電流も増加し、それに起因する発熱も無視できないレベルになってきている。配線に電流が導通すると、配線の形状に応じて電流が集中し、高熱になる場合がある。そのため、PCBにおいて温度上昇による熱応力を正確に予測する必要があるが、これには正確な電流密度分布を用いることが必須となる。そこで、前章で述べた電気・熱流体・構造連成解析技術をスマートフォンのPCBに適用し、配線に電流が導通した場合の上昇温度に基づく熱応力を導出した。

シミュレーションの対象は、携帯電子機器向けの12層からなる基板で、寸法は約60 mm×60 mmである。また、この事例では配線の発熱による熱膨張と応力の増加が懸念されていたため、比較のため配線幅が細い場合と広い場合の2ケースの解析

を行った。

まず、FTCP SignalAdviser-PIを用いて、PCBの配線に流れる電流の密度を導出した。電流密度の計算では、電子部品が接続されるPCB上のパッドを電流源に設定し、そこから電流を入力している。その結果を図-5 (a) に示す。この図では、配線に導通する電流密度が表示されている。配線幅が細い場合と広い場合を比較すると、広い場合の方が色が濃く電流密度が約半分になっている。このような電流密度の相違による温度および応力への影響を明確にするために、連成解析を実施する必要がある。上記の電源解析で得られた電流密度分布から発熱量を算出して、熱流体解析を実施した。計算条件は下記のとおりである。

- ・自然対流+^{ふくしゃ}輻射を考慮
- ・メッシュ数：約2,000万
- ・使用計算機：FUJITSU Server PRIMERGY RX200 S7

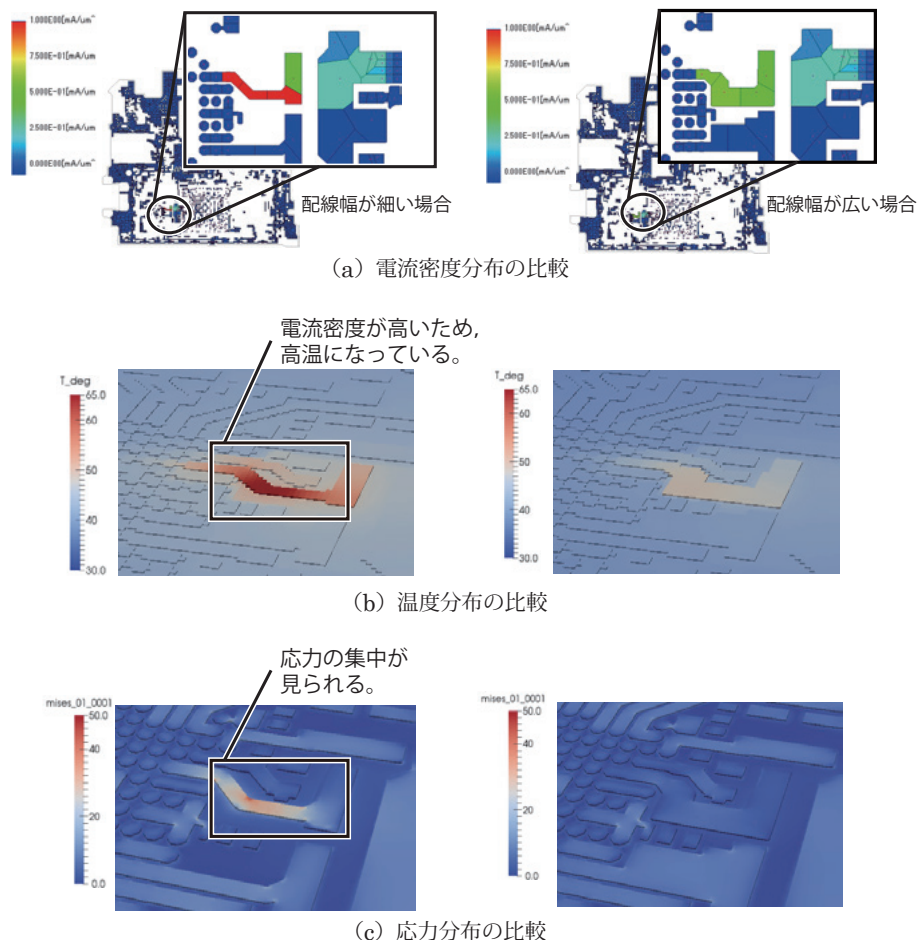


図-5 小型携帯電子機器向け基板の計算例

- ・ CPU : Intel Xeon CPU E5-2660 (2.20 GHz)
- ・ 計算時間 : 約5時間 (48CPUコア並列)

図-5 (b) は、電流が集中していた配線の温度分布を示している。電流が集中している箇所では色が濃く温度が高くなっている。一方、そのほかの部分では温度の上昇は少ない。また、配線幅が広い方が細い場合と比較して、温度は30℃程度低減されている。

このように、周囲と比較して極端に温度が高い部分では熱膨張によって配線が変形し、その熱応力による断線のリスクが高まる。そのため、上記の方法で得られた温度分布を用いて構造解析（ここでは熱応力解析）を実施した。該当箇所の応力分布を図-5 (c) に示す。温度が上昇している箇所では応力も増加している。特に、配線幅が細い場合に、配線の屈曲部で応力の集中が見られ、そこからの断線が懸念される。それと比較して配線幅が広い場合には、応力の集中が見られなくなっている。このように、配線を広くすることで応力の集中を低減できることを連成解析によって示すことができた。

以上、電気・熱流体・構造を組み合わせた連成解析を用いた小型携帯電子機器の電流密度分布、温度分布、応力分布の導出例を示した。このような結果に基づきPCBの配線設計を改善することで、PCBの信頼性向上につなげることが可能となる。

今後の取り組み

現在、富士通独自のマルチフィジックス解析環境では、最初のステップとして定常状態のシミュレーションに対応した。しかし、マルチコアCPUの電源制御のような、負荷変動の大きなモジュールにおける電流値の時刻歴変化が構造物の熱応力に与える影響を評価する場合には対応できていない。今後、このような用途にも対応できるよう、非定常計算機能の追加を予定している。

また、異なる分野の解析データ連携はファイル連携によって実現しているが、各分野の計算結果が相互に影響するような非定常解析においては、このデータ連携がボトルネックになる。そこで、メモリ共有によるデータ連携を実現するとともに、FS-Solverの並列計算スケーラビリティを活かした大規模モデルに対応できる非定常マルチフィジッ

クス解析技術の開発を当面の目標としている。

む す び

本稿では、エンジニアリングクラウドで提供される統合開発プラットフォームFTCPの概要と、新たに追加したマルチフィジックス解析環境について説明した。また、本環境を小型電子機器向けの多層プリント基板へ適用した事例を示した。FTCPは、電気設計者と構造設計者との連携を強化し、お互いの開発分野間に発生するトレードオフへの効率的な対応と、マルチフィジックス解析技術による手戻りのない製品開発実現を支援する。マルチフィジックス解析における課題は、現在の定常計算機能から非定常計算機能まで機能拡張することにより、現象の時刻歴変化を詳細に評価するような場合にも対応可能とすることである。

今後も富士通では、FTCPのマルチフィジックス解析技術を高度化することにより、開発効率化と製品品質の向上を図っていく。

参考文献

- (1) 齋藤精一ほか：エンジニアリングクラウド開発環境。FUJITSU, Vol.62, No.3, p.288-296 (2011).
<http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol62-3/paper06.pdf>
- (2) 松井一樹ほか：仮想デスクトップ環境での高速表示技術：RVEC（レベック）。FUJITSU, Vol.63, No.1, p.75-80 (2012).
<http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol63-1/paper12.pdf>
- (3) 佐藤敏郎ほか：大規模プリント基板の電源ノイズ解析。FUJITSU, Vol.58, No.5, p.443-449 (2007).
<http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol58-5/paper09.pdf>

著者紹介



石川重雄 (いしかわ しげお)

富士通アドバンステクノロジー(株)
構造技術統括部
ICT開発を支えるシミュレーション技術開発、製品設計適用、およびシミュレーション環境構築に従事。



登坂正喜（とさか まさき）

富士通アドバンステクノロジー（株）
複合回路技術統括部
電気シミュレーション技術の開発，製品設計適用に従事。



久保田哲行（くぼた てつゆき）

富士通アドバンステクノロジー（株）
構造技術統括部
ICT開発を支えるシミュレーション技術開発，製品設計適用，およびシミュレーション環境構築に従事。