

多様化が進む放熱設計への熱シミュレーションの適用

澤井 由美子*・平端 清隆・横田 政夫
岡山 昭稔・澤田 雅彦・萩原 啓司

Applications of Thermal Simulation Technology to Thermal Issues — by Yumiko Sawai, Kiyotaka Hirahata, Masao Yokota, Akinori Okayama, Masahiko Sawada and Satoshi Hagihara — As electronic equipment has reduced in size and advanced in processing speed, the heat density of such equipment has increased, and therefore, thermal design has become more important to release the heat effectively. Since the early 1990s, SimDesign Techno-center, a business unit of Sumitomo Electric System Solutions Co., Ltd., has applied simulation technology to its thermal design development. Due to the rapid advancement of electric equipment, conventional thermal designs using fans, vents, and heat sinks do not always meet the temperature specification requirements. To address this challenge, thermal design requires 1) detailed modeling technology (e.g. modeling of copper trace for printed circuit boards) as well as the conventional simple modeling technology of equivalent thermal resistance, 2) adaptability to various environmental conditions (e.g. solar radiation), 3) upgraded simulation technology (e.g. transition simulation), 4) wide application to fields other than electronic equipment manufacturing, and 5) improved thermal simulation accuracy. To satisfy these requirements, we have worked on the development of various thermal design technologies and improvement of the simulation accuracy. This paper describes the latest simulation technology in thermal design along with some examples of product designs.

Keywords: simulation, thermal design, electronic equipment

1. 緒言

近年の電子機器は、高速化・小型化が進み発熱密度^{*1}が上昇したことに伴い、放熱設計の重要性がますます高まっている。

住友電工システムソリューション(株)シムデザイン・テクノセンターでは、1990年代初頭から放熱設計に熱シミュレーションを導入し活用しているが、その放熱設計の内容は大きく変わってきている。必要となる放熱技術は、従来のような筐体への対策（ファンや通気孔）や放熱器（ヒートシンク）の搭載を検討するだけでは熱的な製品仕様を満たさないことが多く、次のような一層ハイレベルな技術力が求められている。①従来から構築してきた熱的に等価な簡易モデルの作成技術とは異なり、詳細なモデリング技術力（プリント基板の銅箔パターンのモデル化技術など）②多用な条件に対応する技術力（日射の影響など）③シミュレーション手法の高度化（過渡現象^{*2}の再現など）④電子機器以外の分野への展開⑤熱シミュレーションの更なる精度向上技術力（従来の熱シミュレーションの活用方法は対策案の相対比較が重要視されていたが、近年では結果に対する絶対値の信頼性を求められることも少なくない）。

当部門では、これら要求に対応すべく多様な放熱技術の構築とシミュレーション精度向上のための取り組みを行ってきた。本稿では、放熱設計における最新シミュレーション

技術と製品設計事例を報告する。

2. シムデザイン・テクノセンターの設計の特長

当部門では電子機器の受託開発・設計を行っており、その設計プロセスにシステム設計・ASIC/FPGA設計・PCB設計・筐体／機構設計の各設計を協調して行うコンカレント設計を適用している。また各設計段階にて伝送路、EMC、

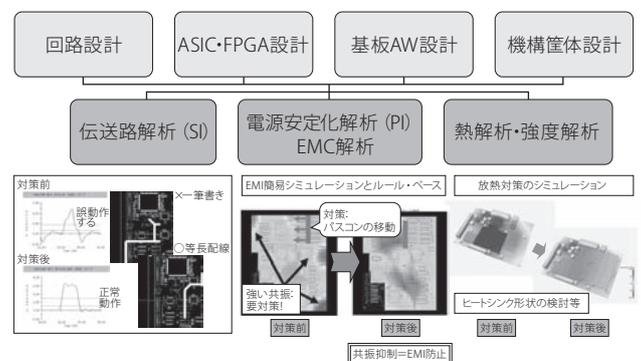


図1 シミュレーションベース設計

放熱、強度などの対策にシミュレーション技術を活用し、各対策のトレードオフを検討する「シミュレーションベース設計」を取り入れていることを特長としている(図1)。

これら各設計プロセス間の協調とシミュレーション技術の活用により、設計確度の高い製品開発を行い、設計期間の短縮、製品試作の回数削減、および設計品質向上に貢献している。本稿で述べる熱シミュレーションは、回路部品レベルからシステム全体の性能にも影響を持つ重要なファクターとして、多くの製品に適用されてきた技術である。

3. 放熱設計への取り組み

当部門の放熱設計プロセスを図2に示す。

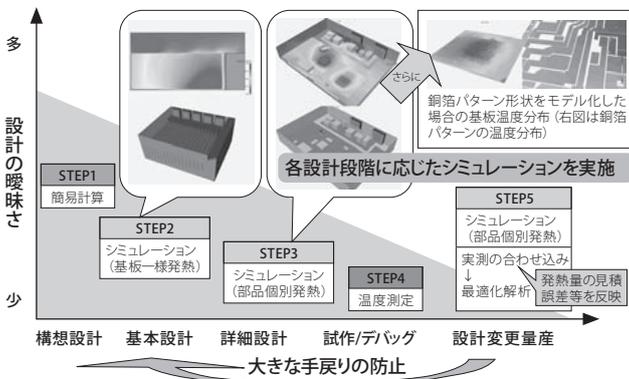


図2 放熱設計プロセス

各設計段階で要求される熱的な仕様に合わせて数種のツールを使い分けており、STEP1(設計初期の段階)では容積と総発熱量から強制空冷や自然空冷などの冷却方式を手計算にて決定する。STEP2(機器内部のプリント基板配置などの構成が決まった段階)では熱流体シミュレーションツールでプリント基板を一様な発熱体とみなしたモデルを作成し、ファンの風の流れなどにより生じるプリント基板上の温度分布を算出する。この結果から熱に弱い部品や高発熱部品の配置等の大まかなガイドラインを作成して設計にフィードバックする。STEP3(部品配置が決まった段階)では、一様な発熱体とみなしていたプリント基板に各電子部品のモデルを作成し各温度を予測する。ここで電子部品が許容温度を満たさない場合には、ヒートシンク形状、ファンの個数、および通気孔面積などの具体的な対策を検討する。また大電流が流れる設計開発品に対しては、プリント基板の銅箔パターンの層数や幅などの検討も行う。STEP4・5では、放熱設計を行った製品試作の温度測定を行い、消費電力の見積誤差等を元のシミュレーションモデルにフィードバックし補正をかけることで、製品設計に向けた最適化設計の検討を行う。このように各設計段階に合

わせた放熱設計を行うことにより製品試作後の大きな手戻りを防止している。

3-1 熱シミュレーションのフロー 前述のプロセスで熱流体シミュレーションツールを活用するSTEP2・3のフローを図3に示す。

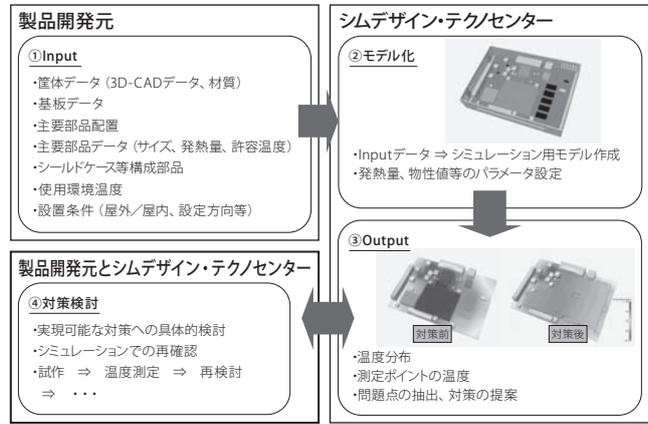


図3 放熱設計フロー

①製品開発元から3D-CADデータや部品配置などの設計データを受け取る。②設計データを元に熱シミュレーションに適したモデルに修正し、発熱量や物性値などのシミュレーションパラメータを設定する。③シミュレーション結果から温度分布や放熱経路の問題点を抽出し、通気孔やヒートシンクなどの放熱対策を考案する。④考案した放熱対策と製造とのトレードオフ(形状の製造可否・コストなど)について、製品開発元と議論を重ね最適な放熱設計を進めていく。ここで重要となるのは熱シミュレーションに適したモデルに修正することである。3D-CADデータは製造用に詳細な設計データとなっており、そのまま流用した場合には1モデルの計算に数時間~数日を要し、さらに考案した放熱構造モデルの計算も複数実施するため、設計にタイムリーに反映させるには適していない。そのため、筐体構造、プリント基板、および電子部品について、熱的に等価な簡易化モデルが必要となる。当部門では、熱流体シミュレーションツール導入以降、温度測定結果とシミュレーション結果の比較を繰り返しながら、その対策を積み重ねている。ただし簡易化技術が必ずしも最重要ではなく、設計開発品の特徴に合わせてシミュレーションモデルのレベルを工夫することも重要である。これらのシミュレーションフローは、次項で述べる実例の中で考察する。

4. 放熱設計事例

ここから、熱流体シミュレーションツールを活用した最新の放熱設計事例を報告する。

4-1 基板銅箔パターン形状を考慮した熱シミュレーション 一般的にプリント基板は多層構造となっており、各層には異なった銅箔パターンが形成されている。通常実施している熱シミュレーションに用いるプリント基板モデルは、銅箔パターンと絶縁層を合成した等価熱伝導率体として作成する。しかし当部門では銅箔パターン形状をモデル化し、プリント基板に実装されている電子部品からの熱伝導による銅箔パターンへの放熱効果を詳細に計算し、さらに銅箔パターンに流れる電流によるジュール発熱の影響も検討する技術を開発して運用している。この取り組みの背景として次の3点が挙げられる。①筐体の小型化によりヒートシンクを搭載できない場合、プリント基板の銅箔パターンが重要な放熱経路となる機器が増加②発熱源である電子部品の小型化（部品表面積の減少）により、プリント基板への熱伝導による放熱量が増加（部品表面積が小さくなると空気中への放熱量が減少）③プリント基板の銅箔パターンのジュール発熱が無視できない大電流が流れる電子機器が増加。さらに、シミュレーションツールを活用した設計は一般化しつつあり、当部門の差別化技術として、よりシミュレーション精度の高い（温度測定結果との乖離が小さい）計算結果を提供している。

そこで当部門では、表1のようにプリント基板をI～IVの4モデル用意し使い分けしており、各モデルの特徴は次のようになっている。Iはプリント基板全体を一樣な熱伝導率体とみなしたモデル（絶縁層と配線層の合成熱伝導率体）。IIは絶縁層と配線層ごとの配線率を設定したモデル。IIIは各配線層の配線密度を再現したモデル。IVは配線層の銅箔パターンの形状をモデル化しジュール発熱も考慮したモデル。設計初期の段階ではIのモデルを活用し、設計が進むにつれII→III→IVのモデルへと移行していく。Iのモデルは短時間で計算できるメリットがあるがシミュレーションの誤差要因が大きい。一方、IVのモデルはシミュレーション時間が長くなるがシミュレーション精度は他よ

り優れている。これらのモデルをシミュレーションの目的に合わせて使い分けている。

実際に銅箔パターン形状モデルの有無を比較した例を図4に示す。図中(a)が銅箔パターン形状有り、(b)が銅箔パターン形状無しの温度分布である。大電流が流れジュール発熱が無視できないプリント基板の場合、IVのモデルはより実態に近くなり、I～IIIのモデルと比較すると発熱分布が全く異なる結果が得られるためシミュレーション誤差が小さくなる。例えばIIのモデルは温度測定との誤差が±30%に対して、IVのモデルは誤差5%に抑えることができる。またこの取り組みにより最適なプリント基板構造（銅箔パターン形状や基板内の放熱構造）の検討を行い、PCB設計に反映することができる。このように、より高精度なシミュレーション結果を得られることにより、設計精度の向上が望めるものである。

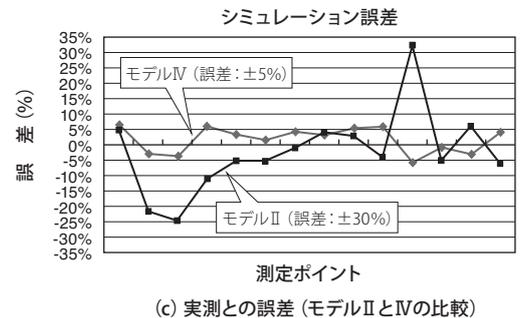
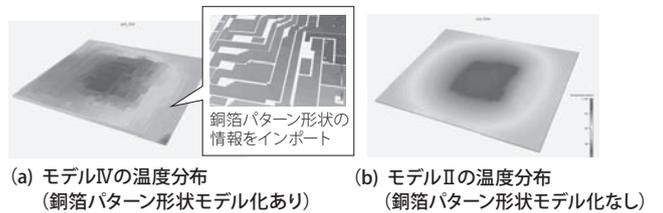


図4 銅箔パターン形状をモデル化した事例

表1 プリント基板のシミュレーションモデル

	I	II	III	IV
モデル	基板全体の一樣熱伝導率	絶縁層+各層毎の一樣熱伝導率	絶縁層+各層毎の熱伝導率分布	絶縁層+各パターン形状
イメージ				
特徴等	絶縁層と銅箔パターンの合成熱伝導率設定	銅箔パターン層の配線率○%・一樣設定	銅箔パターン層の配線密度(熱伝導率)分布設定	パターン形状をモデル化
時間	短	長		
精度	低	高		
工程	構想設計	詳細設計		

4-2 日射の影響を考慮した非定常解析^{※3} 近年、通信網の整備や太陽光発電装置の開発推進により、屋外に設置される電子機器も増加している。屋内で使用される電子機器は機器自身の発熱による温度上昇を検証することで熱的な仕様を満たすことができるが、屋外機器の場合は日射(太陽光)の影響による温度上昇も考慮に入れる必要がある。

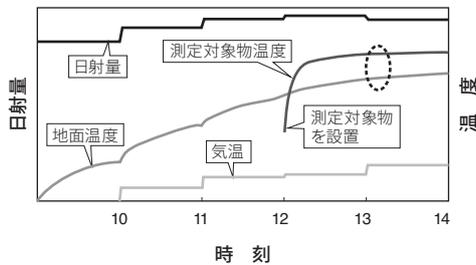
ここで報告する屋外製品は地面に1時間程度設置して使用されるものであり、日射の影響を無視できない典型的なケースである。また試作機の温度評価が日射量の少ない時期に行われたため、気温が高く日射量の多い夏季の温度上昇をシミュレーションで予測することが求められた。まず試作機を地面の上に設置した状態で温度測定を行い、シ

シミュレーション結果との比較を行った。シミュレーションツールでは、緯度・日時を設定すると日射量を自動で計算する機能があり、これを利用した。温度測定結果は、

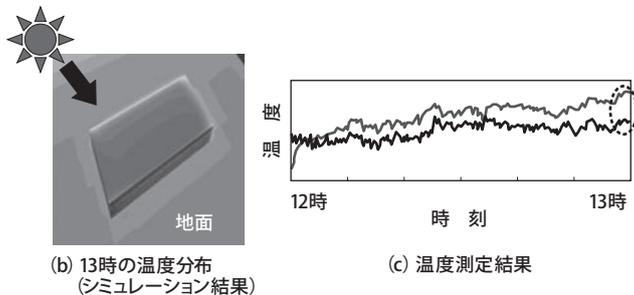
(天面側の機器表面温度) > (地面側の機器表面温度)であったが、シミュレーションは

(天面側の機器表面温度) < (地面側の機器表面温度)となり、異なる傾向となった。試作機は日射の影響を軽減する太陽吸収率^{※4}の低い塗料を塗布していたため、従来手法の定常解析を適用した場合、太陽吸収率の高い地面が高温となり、その影響を受けた機器表面も地面側が最も高温となる計算結果となった。しかし試作機は小型製品のため熱容量が小さく、1時間程度で定常状態になるのに対し、熱容量が大きい地面は定常状態に達していないのではないかと推測された。そこで従来からの定常解析手法ではなく、各時刻における非定常解析を適用することとした(図5)。

その結果、正午に設置した機器の1時間後の温度上昇値が実測結果とほぼ一致し、機器天面側と地面側の温度分布も一致した。この手法のシミュレーションモデルに夏季の気温と日射量を設定することで、年間の最大温度上昇を予測することができ、計算上、熱的な問題がないと結論付けた。実際に量産品における夏季の温度上昇試験でも問題がないことを確認し、この手法が有効であることが実証できた。このシミュレーション技術により、夏季の試験結果を待つことなく製品開発を進めることが可能となり開発工程の短縮にも貢献することができた。



(a) シミュレーション結果



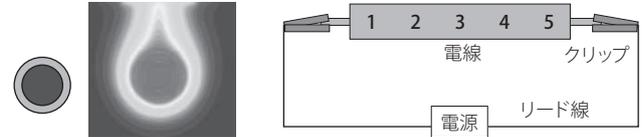
(b) 13時の温度分布 (シミュレーション結果)

(c) 温度測定結果

日射による温度上昇を非定常解析を活用して再現シミュレーション結果と温度測定結果 (a)と(c)の○部分が一致

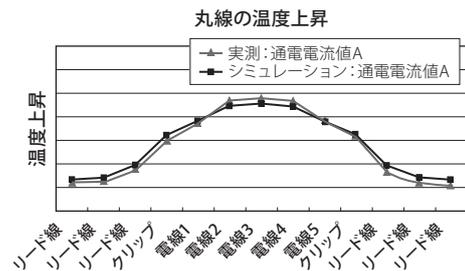
図5 日射解析(各時刻における非定常解析)の適用事例

4-3 電線の最適形状 電子機器の最新の放熱設計事例を報告してきたが、電子機器以外の放熱設計にも熱シミュレーションを適用している。図6は電線の形状や被覆材料を検討した事例である。

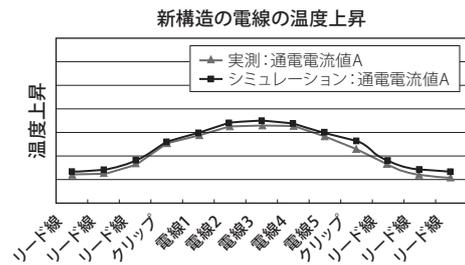


(a) 丸線の模式図と温度分布

(b) 実験環境の模式図



(c) 丸線の温度 実測結果とシミュレーション結果の比較



(d) 新構造の温度 実測結果とシミュレーション結果の比較

図6 電線形状の最適化

(a)の丸線電線と同等の導体面積を有する新構造の電線が放熱性に優れており、同電流値を通電した場合に温度上昇を軽減できることを熱シミュレーションにて確認した。評価は(b)に示す構成において、通電時の電線1~5の温度を各々比較した。(c)(d)に各々のシミュレーション結果と試作品の温度測定結果を示す。試作品の温度測定結果でも同様の結果が得られており、熱シミュレーションの有効性を実証した。また被覆の材質(熱伝導率)が温度に与える影響についても熱シミュレーションにて確認を行い、設計にフィードバックした。

4-4 製造サポート これまで述べてきた設計開発品の放熱設計以外に、製造サポートにも熱シミュレーションを活用する試みを行っている。

電子部品をプリント基板に実装する際、リフロー炉での

加熱はんだ付けが行われるが、従来の手法では、その温度プロファイルの設定は過去の経験や類似品のプロファイルに頼る場合も少なくなかった。本来は温度プロファイル決定のためにテスト用プリント基板を製作し温度上昇を確認することになるが、一度では設定を確定することができずトライ&エラーを繰り返すことになり、開発工程に影響を及ぼすことになりかねない。場合によっては、高価で貴重な電子部品が搭載されている製品ではコストがかかるためテスト用プリント基板の製作枚数が限られることもある。また近年は鉛フリーはんだが大勢を占めその融点も高くなり、部品固有のはんだ付けリフローの耐熱許容温度との差が、共晶はんだと比べて狭くなる傾向にある(表2)。

そのため、リフロー時の各電子部品の温度応答をシミュレーションにて予測する手法を開発した。この手法には次の3点のメリットがあり、品質安定に寄与することができる。①設計時点で温度プロファイルを最適化することにより、設定の段取り時間が短縮される②高価で貴重な電子部品を搭載するテスト用プリント基板の製作費を最小限にできる③リフロー内での温度応答に大きく影響する大型部品やプリント配線パターン設計の最適化が可能。

表2 はんだの融点と部品の耐熱温度

	温度 (°C)
共晶はんだ(従来使用)の融点	183
鉛フリーはんだの融点	220前後
リフロー時の部品の耐熱温度	230~260程度

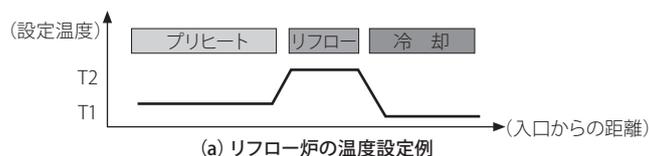
鉛フリーはんだの温度管理

- ・共晶はんだより融点が高いため、温度管理が難しい
- ・約220~230℃にコントロールが必要
- ・基板上の温度の均一化が必要

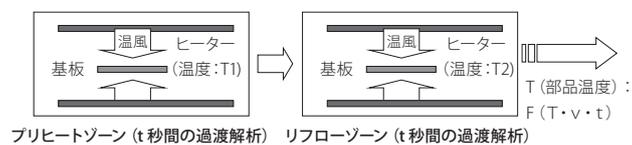
まずリフロー炉のシミュレーションモデル作成を行った。リフロー炉のモデルには非定常解析を用い、温度、ベルトコンベア速度、および時間の関数としてモデル化した(図7)。リフロー炉内部の詳細構造がメーカーから提供されないため、当初は温度測定結果とシミュレーション結果が一致していなかったが、リフロー炉モデルのパラメータを調整することで、ほぼ一致するモデルを作成することができた。

続いて、実際にリフロー炉に入れて加熱はんだ付けを行ったテスト用プリント基板のシミュレーションモデルを追加し、温度測定結果との比較を行った。テスト用プリント基板には代表的な3種類の部品が搭載されており、各部品が実測温度と一致するようにシミュレーションモデルの作成方法(形状や物性値)を検討し、ほぼ実測温度と一致する結果を得た(図8)。

実際に製造されるプリント基板の上のはんだ付けされる電子部品は、種類・個数共に複数存在するため、シミュレーションモデルは、できるだけ簡易化、且つ共通化できるよう工夫している。

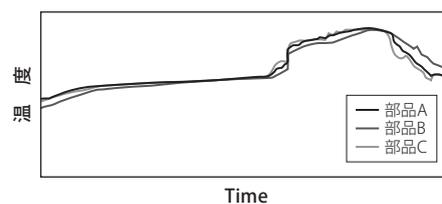


(a) リフロー炉の温度設定例

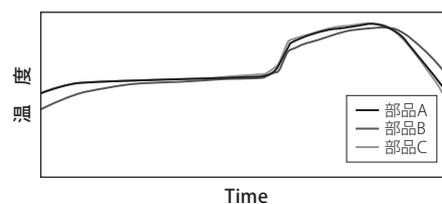


(b) リフロー炉のシミュレーションモデル模式図

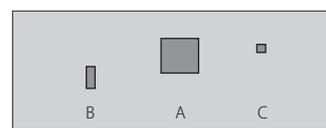
図7 リフロー炉モデルの概要



(a) 温度測定結果



(b) シミュレーション結果



(c) 部品配置

図8 リフロー炉内部品温度

現在は実験的に熱シミュレーションを活用する試みの段階であるが、実際に活用していくため、さらに部品種類・個数を増やしてシミュレーションモデルの妥当性を確認していく予定である。

5. 熱シミュレーションの費用対効果

製品開発に熱シミュレーションを適用することで、設計精度の高い製品開発を行い、設計期間の短縮、製品試作の回数削減および設計品質向上に貢献していることを述べてきたが、実際に起こり得る3つのシチュエーションについて、熱シミュレーション活用の費用対効果を算出・比較した(図9)。

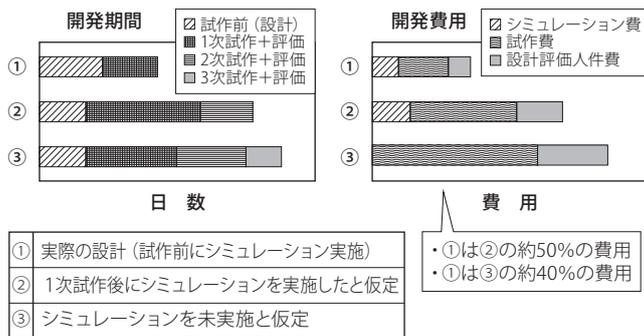


図9 シミュレーションの費用対効果

設計初期の段階から熱シミュレーションを適用した開発製品に対して次の費用を算出した。①実際の費用②仮に一次試作後に熱問題が発生し、そこから熱シミュレーションを活用する場合の予想費用③仮に熱シミュレーションを活用しなかった場合の予想費用。②③は仮定になるが、「熱シミュレーションを活用する以前の開発品の設計費用」や「熱シミュレーションを活用することで製品試作前に対策を施すことが可能となった内容」などを考慮して算出した。

①では設計初期の段階から熱シミュレーションを活用することで、1次試作前の設計期間は②③より長くなる。しかし開発工程全体で考えた場合には、製品試作費用や対策検討時間などが大幅に減り、①は②の約50%、③の40%の低コストで開発を実現したと言える。

6. 結 言

住友電気工業(株)の各グループ会社で開発された多種多様な製品への放熱設計適用事例を報告し、熱シミュレーション技術の内容と有効性を考察した。

今後重要性を増す車載機器あるいは環境ビジネスへの展開を強化していくためには、過酷な熱的環境への対応が求められる。これらの厳しい熱的仕様に対応できるように、熱シミュレーションを活用した放熱設計技術の向上と共に、熱応力解析等の新しい技術の立上げを図り、情報通信機器をはじめとする多様な製品開発にさらに貢献していきたいと考えている。

用語集

※1 発熱密度

単位体積あたりの発熱量。発熱密度＝総発熱量／装置容積。

※2 過渡現象

温度が安定した状態から、時間的に変化している現象。

※3 非定常解析

過渡現象による温度変化を求める計算手法。

※4 太陽吸収率

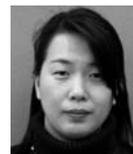
太陽からの入射エネルギーが筐体表面で吸収される割合。

参 考 文 献

- (1) 澤田、兼子 他、「GHz帯対応を含むシミュレーションベース設計とビジネス展開」、SEIテクニカルレビュー第168号(2006年3月)

執 筆 者

澤井由美子*：住友電気システムソリューション(株)
シムデザイン・テクノセンター 主査
シミュレーションを活用した熱設計業務に従事



平端 清隆：住友電気システムソリューション(株)
シムデザイン・テクノセンター 主査

横田 政夫：住友電気システムソリューション(株)
シムデザイン・テクノセンター 課長

岡山 昭稔：住友電気システムソリューション(株)
シムデザイン・テクノセンター 部長

澤田 雅彦：住友電気システムソリューション(株)
市場開発部 部長

萩原 啓司：住友電気システムソリューション(株)
シムデザイン・テクノセンター 事業部長

*主執筆者