

熱シミュレーションの応用事例

Application Examples of Simulation Technology for Designing Thermal Products

島田 守*
Mamoru Shimada

概要 数値シミュレーションは研究開発で欠かすことのできないツールとなっている。従来は単に実験を肩代わりする道具という見られ方も多かったが、時には実験から直接得ることが難しい情報をもたらしてくれる場合もある。ソフトウェアとハードウェアの進歩によって、最近は大規模な計算も手軽に行えるようになってきた。

当社でも様々な分野で数値シミュレーションを利用している。特に熱・流体シミュレーションは、放熱用デバイスや各種モジュールの開発から機器・きょう体の設計に至るまで、利用範囲が非常に広い。そこで今回は、各種製品での熱・流体シミュレーション応用事例を紹介する。

1. はじめに

数値シミュレーションは、学術研究、気象予測や建築構造設計をはじめとして、金融や軍事から地域開発に至るまで、あらゆる分野で利用されている。シミュレーションの利用は専門的な分野にとどまらず、CAE (computer aided engineering) という言葉があるように、製造業における製品開発にとってもなくてはならない身近な「設計ツール」となっている。その背景には、計算機の高速化とソフトウェアの進歩がある。

設計ツールとしてのシミュレーションソフトウェアは数十年前から存在し、従来からそれなりに利用はされてきた。ただし、以前のシミュレーションソフトウェアは、動作させるのにスーパーコンピュータやワークステーションが必要であった。更に、扱える対象が比較的小規模なモデルに限定されており、操作には熟練した専任者が必要だったため、必ずしも生産性の高いツールとは言えなかった。ところが、ここ数年でパーソナルコンピュータ(PC)の演算能力が著しく高速化して、かつての大型計算機並みの性能を獲得するとともに、価格も劇的に低下してきたため、PCを利用してシミュレーションを行う場合が多くなってきた。またPCの演算能力が上がったことに伴って、ソフトウェアもGUIによる操作性が格段に進歩し、機能面の充実や計算効率の向上も著しい。

このような計算機とソフトウェアの急速な進歩によって、数値シミュレーションは専任者にしか使えない「やかかいモノ」から、一般の研究者や技術者でも手軽に行える「便利な道具」へと変わってきた。もう一つの大きな変化は、大規模モデルのシミュレーションが低コストでかつ手軽に行えるようになってきたことである。かつては、計算機のハードウェア的な制約や、

演算時間かかりすぎるなどの問題があったため、複雑な形状の大規模モデルをそのままの形でシミュレーションにかけることができず、モデルの単純化など手間のかかる工夫を行う必要があった。ところが現在では計算機の性能が上がっているため、CADの図面さえあれば、ほとんど手を加えずにそのまま数値シミュレーションにかけることが可能になった。最後に、ソフトウェアを利用した可視化による表現力が、以前は考えられなかったほど豊かになっていることも注目される。そのため単なる実験の代替手段という枠にとどまらず、説得力を持ったプレゼンテーションを行うための有力な道具にもなっている。

2. シミュレーションについて

シミュレーションを利用するメリットとして一般に広く知られているのは、次の2点であろう。

(1) 実験や試作の回数を減らすことで、開発コストを削減する。

(2) 実験では確認が困難な内容を、推定することができる。

このため、モデルチェンジが早くライフサイクルの短い製品を短時間で開発しなければならない場合や、測定対象が小さすぎたり測定にコストがかかりすぎたりして実験が困難な場合などには、シミュレーションの利用は特に有効である。ただし、シミュレーションが進歩したからといっても、完全に試作や実験を無くすことは難しい。数値計算技術の進歩によって精度は向上してきているが、分野によっては精度がまだまだ不十分なものもある。またシミュレーションではある程度人間の考察に基づいたモデル化が必要であり、特に計算に必要なパラメータは人間の判断に基づいて入力される必要があるため、人間的な判断に起因する誤差が生じる場合もある。時には、モデル化によって切り捨ててしまった要素が実際の製品で思わぬ作用を及ぼし、シミュレーションと大きく異なる結果になることもある。

* 研究開発本部 環境・エネルギー研究所

そのため絶えず実測と計算結果とを突き合わせ、精度の確認を行ってゆく必要がある。

ところで、シミュレーション利点として、先に挙げた2点のほかに、次のようなものも考えられる。

- (3) 設計変更を行った場合にも、シミュレーションならば短時間でモデル変更と計算が行えるため、何度も設計の見直しを行って設計の完成度を高めることができる。
- (4) 従来は検討に要する時間的な制約から敬遠されがちだった革新的な設計を検討のそ上に載せることができる。
- (5) 実験では限られた測定点でのデータしか得られないが、シミュレーションでは一度の計算で全計算領域の物理量が一度に計算されるため、得られる情報が豊富で任意の地点でのデータを取得することができる。このためシミュレーション結果を設計にフィードバックすることで、新しいアイデアを導き出すことができる。

ここに示すようなシミュレーションの特徴を正確に認識すれば、開発ツールとしてのシミュレーションの利点を最大限に高めることができるのではないかと考えられる。

当社でも数値シミュレーションを積極的に利用しており、高度な解析を行うための専門の部門を設けているほか、開発現場や設計現場でも製品開発に密着した形で広く活用している。またシミュレーションの利用領域をみても、熱・流体解析はもちろん、構造設計、電磁場解析、音響・振動解析、光学設計、化学反応プロセス解析、分子材料設計など多岐にわたっている。これらの中から今回は、広い意味で熱に関連した製品を選んで、開発に密着した形でシミュレーションを活用した事例を紹介する。

3. 当社の熱関連製品

一口に熱に関連した製品と言っても、例えば発電装置のように積極的に熱を利用したりコントロールしたりする製品から、やむなく発生してしまう熱と折り合いをつけてゆかなければならない製品まで、様々なタイプがある。一般的には、後者のように望まれずに発生する熱を何とか処理してゆかなければならない場合の方が、はるかに多いと考えられる。当社ではこのようなニーズに対応した製品として、ヒートパイプやヒートシンクなどの多様な放熱デバイスを開発している¹⁾。写真1に各種ヒートパイプの例を示す。また写真2にはヒートパイプを使ったヒートシンクの例を示す。



写真1 マイクロヒートパイプの例
Photograph of micro heat pipe products.

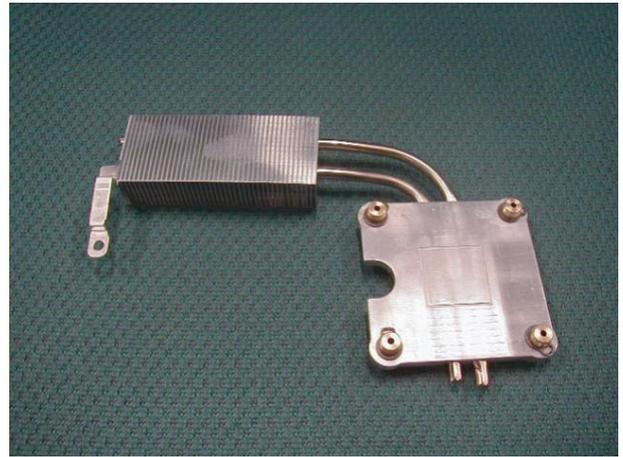


写真2 ヒートシンクの例
Photograph of heat pipe-based heatsinks (HP-HS).

次に、ヒートパイプやペルチェ素子などの冷却部品やヒータなどの加熱部品が組み込まれてモジュール化された製品として、例えば温度調節型光モジュールやきょう体冷却装置などがある。またリフロー炉のように熱を積極的に利用している製品もある。

最後に、やむを得ず発生する熱に対処する必要がある製品の例としては、高発熱量のデバイスやモジュールを実装した通信用機器・きょう体や光伝送装置などが挙げられる。

放熱デバイスは、所定の熱性能を得るために詳細な熱設計を行って開発されている製品である。それだけでなく小型化や高発熱化が進むモジュール化部品や機器・きょう体でも、最近では熱設計が不可欠になりつつある。そのため開発課程で熱・流体シミュレーションを利用した十分な設計検討を行っている。

表1には先に述べた製品分類ごとに、どのような目的で熱設計を行っているかをまとめた。これを見ると、不要な熱を効率よく排出して温度をコントロールすることは、あらゆる製品に共通する普遍的な課題であるが、製品の種類により異なってくる開発課題もある。また、シミュレーションに要求される精度も製品の種類によって異なる。本稿では、熱シミュレーションの活用事例として、放熱デバイスの中からデスクトップ型PC用ヒートシンクと光アンプ用ヒートシンクを、モジュール化部品の中から半導体レーザーモジュールを、そして機器・装置の例として光伝送装置を、それぞれ取り上げて紹介する。

表1 製品の種類ごとにみた熱に関連した課題
Problems related to thermal management in various products.

製品分類	熱に関する課題
放熱デバイス	熱抵抗低減, 小型化, 薄型化, 静音化
モジュール化部品	低消費電力化, 温度安定化, 小型化, 高出力化, 動作温度拡大
機器・きょう体	低消費電力化, 小型化, 静音化, ヒートスポット解消

4. 放熱デバイス開発における熱シミュレーション活用事例

当社で商品化している放熱用部品は、ヒートパイプ、パワープレート、ベーパーチャンバ、クリンプ フィン[®]、伝熱シート、放熱用塗装アルミシート、メタルコア基板など多岐にわたっている。この中でも最も代表的な製品が、ヒートパイプである。ヒートパイプは相変化型熱輸送デバイスであり、優れた均熱特性と高い信頼性によってパワー半導体の冷却から小型電子機器の放熱まで、幅広い分野で使用されている。特にノート型PCは小型化とCPUの高発熱化が同時に進行したため、モバイル用途の製品を中心にヒートパイプの採用が急増した²⁾。今後はデスクトップ型PCでの採用が増加するものと予測されている³⁾。なお、ヒートパイプは基本的には均熱化デバイスであるため、一般的には放熱フィンと一体化されたヒートパイプ-ヒートシンクという形で使用される。

写真3は、デスクトップ型PCのCPU冷却用クリンプ フィンヒートシンクの例である。デスクトップ型PCではノート型PCに比べて、電源容量や放熱スペースの制約が比較的少ないため、CPUの高発熱化がノート型PCを上回るペースで進んでいる。従来はCPU用ヒートシンクとして、アルミ押し出しヒートシンクやはんだ接合型ヒートシンクが使用されていた。ところが発熱量が100W近くに達した現在では、従来型ヒートシンクでは熱抵抗の要求仕様を満たすのが困難になりつつある。高発熱化に対応するために当社が新たに開発したクリンプ フィンが、フィンベースとフィンとをカシメ接合したクリンプヒートシンクであり、従来のヒートシンクでは困難だった小さな熱抵抗を実現している。

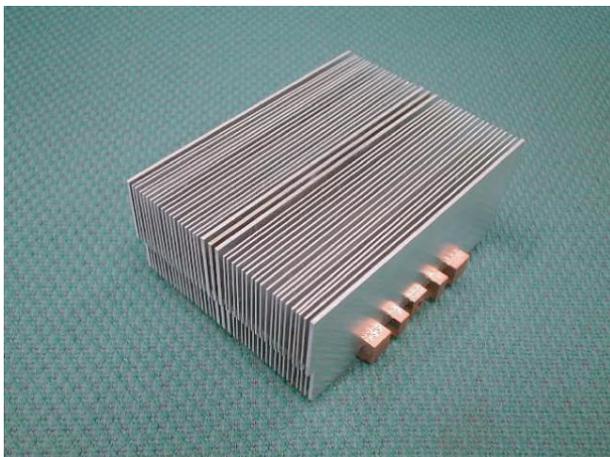


写真3 デスクトップ型PC用クリンプ フィンヒートシンク
Photograph of a heatsink with Crimped fin for desktop PC.

図1にデスクトップ型PC用クリンプヒートシンクの温度分布例を示す。クリンプ フィンヒートシンクの特徴は、押し出しヒートシンクでは難しい薄型フィンや、高密度のフィン配置を容易に実現できるところにある。また、ベースやフィンの形状や材質を自由に設計できることも特徴の一つである。そこで今回の検討では、ベース形状を工夫することで軽量化と放熱特性を両立させることを目指し、最適なベース設計を見出すためのシミュレーションによる検討も行った。

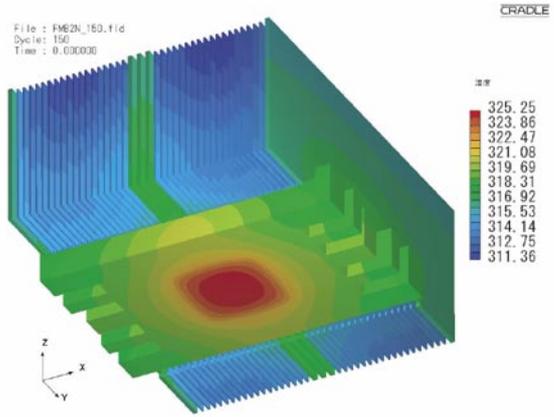


図1 シミュレーションにより求めたクリンプ フィンヒートシンクの温度分布
Calculated temperature contour for a heatsink with Crimped fin for desktop PC.

図2にフィン間の風の流れとフィン温度の分布図を示す。ベース幅が大きすぎるとファンからの風がベースに遮られて外側へと逃げてしまい、フィン間を十分に風が流れず、熱抵抗が大きくなると考えられる。他方でベース幅が小さすぎると、熱源からの熱が十分にフィン先端まで伝わらずフィン効率が低下して、放熱特性が悪化すると考えられる。ベース幅を適切に設定することで、ファンからの風がベースに邪魔されずにフィン間を吹き抜けながら、フィン先端まで十分に熱が伝わるような設計が実現できた。

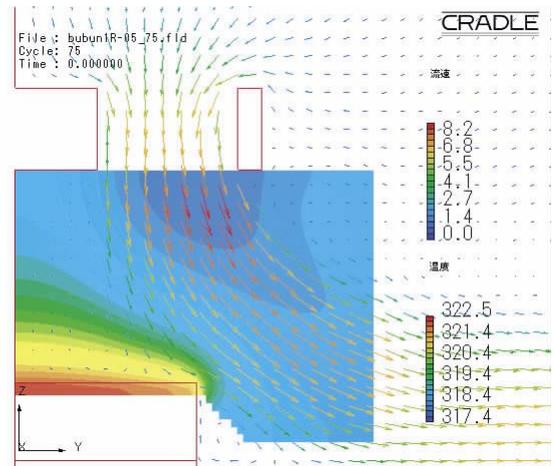


図2 クリンプ フィンヒートシンクでの風の流れとフィン温度分布
Calculated airflow and temperature contour on a Crimped fin.

写真4は、光増幅装置用ヒートパイプ-ヒートシンクの例である。また**図3**は励起光源用のデバイスを搭載して駆動させた場合のヒートシンク温度分布の例である。このようにヒートパイプを利用することで、従来以上にヒートシンクを薄型化しながら、高発熱量の素子に対応することが可能になる⁴⁾。



写真4 ヒートパイプ-ヒートシンクの一例
Photograph of an HP-HS for fiber Raman amplifiers.

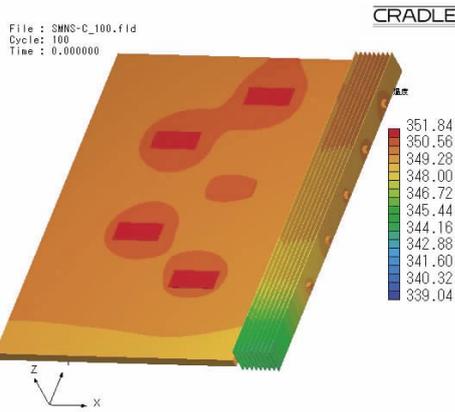


図3 シミュレーションにより求めたヒートパイプ-ヒートシンクの温度分布
Simulated temperature contour for an HP-HS for fiber Raman amplifier.

5. モジュール化製品開発における熱シミュレーション活用事例

熱シミュレーションは、放熱デバイスそのものの開発だけでなく、放熱デバイスを組み込んだモジュール化製品の設計を行う際にも有効である。ここでは光ファイバ通信システム用デバイスの一種で、WDM（波長多重伝送）システムで使用される半導体レーザーモジュールの設計に熱シミュレーションを利用した例を紹介する。

WDMシステムとは、単一の光ファイバ中に異なる波長の光を同時に伝送させることで高速通信を実現する手法であり、現在では幹線を中心とする長距離伝送路で一般的に用いられる手法である。隣接する波長の信号同士で干渉が生じないように、使用される搬送光には厳しい波長安定性が求められる。ところが光源として使用される半導体レーザーには波長の温度依存性があるため、モジュール内にTEC（thermo electric cooler：熱電冷却素子）を組み込んで温度制御を行っている。

図4に、半導体レーザーモジュールの断面構造例を示す。このようにLD素子はサーミスタとともにTEC上に搭載され、温度コントロールされている。また場合によってはLD素子の発光波長をモニタする部品が搭載されることもある。

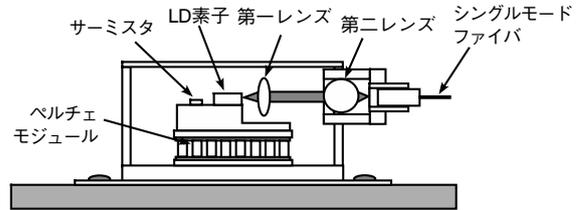


図4 半導体レーザーモジュールの断面模式図
Schematic cross-sectional view of a laser diode module (LDM).

図5はあるモジュールについて、消費電力の環境温度依存性を求めたものである。消費電力が環境温度に大きく依存するのは、環境温度が高くなるとTECへの負担が大きくなり、TECの消費電力が急激に増加するためである。また環境温度が所定の温度を超えると、LDの温度をコントロールできなくなる。

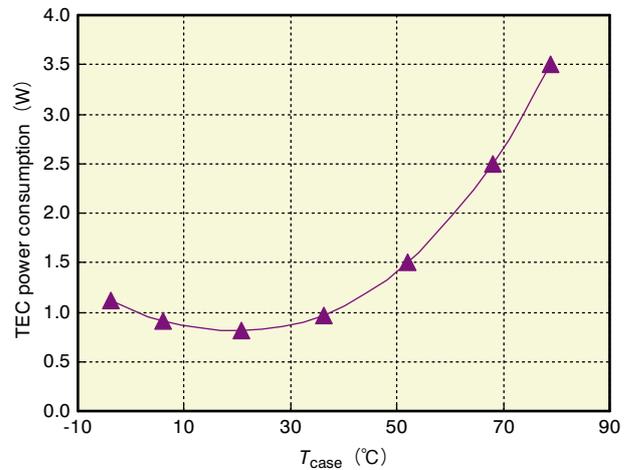


図5 シミュレーションによって求めたTEC消費電力のLDMケース温度依存性
Calculated LDM case temperature dependence of TEC power consumption.

次に、図6はモジュール内の組み込まれたある素子温度の環境温度依存性を求めたものである。温度コントロールされているにもかかわらず部品温度が環境温度に依存するのは、温度を測定しているサーミスタと他の部品との間に温度差があるからである。サーミスタ自身は常に一定の温度に固定されているが、他の部品は現実には周囲温度の影響を受けてしまうのである。このような小型モジュール内部の部品温度を実験的に測定することは、現実的には極めて難しい。それに対して熱シミュレーションを利用すれば、モジュール中の各部分の温度を容易に計算することができる。また設計を変更した場合に各部の温度がどのように変化するかを、短時間かつ低コストで検討することができる。

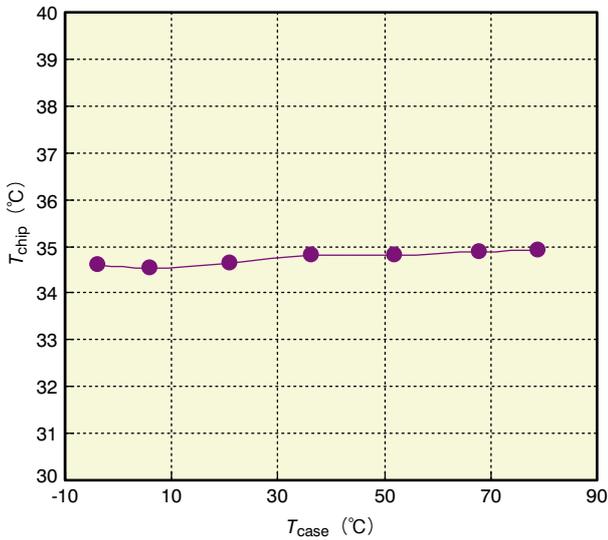


図6 シミュレーションによって求めた素子温度のケース温度依存性
Calculated relationship between chip temperature and case temperature.

6. 機器設計での熱シミュレーション活用事例

当社ではルータや光伝送装置など、各種の通信用機器も製品化している。これらの機器はモデルチェンジが行われるたびに小型化と高性能化が進んでいるため、発熱量の大きな素子を詰め込んで高密度実装しなければならず、熱対策はますます困難になりつつある。

図7はある機器きょう体内部の流速分布の例である。このように、複雑な形状をした電子基板やヒートシンクなどが複雑に配置された機器内部の風の分布を正確に実測するのは不可能に近いが、シミュレーションを行えば機器内部の風の流れを一目瞭然に把握できるようになる。

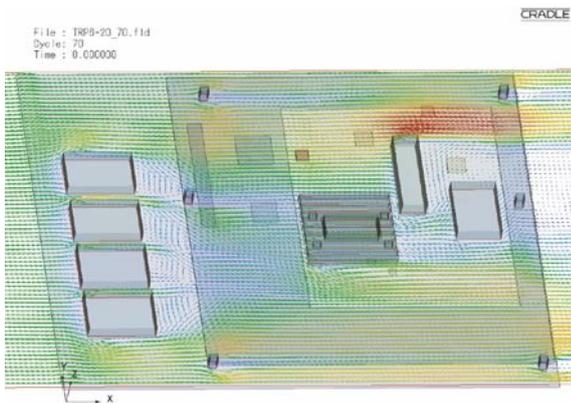


図7 シミュレーションによって求めた流速分布
Calculated airflow in an optical communication unit.

機器内部の風の流れがつかめれば、高温になる素子を空気の流れの良い場所に配置したり、使用するファンやフィンを適切に選定したり、空気の流れを制御する整流板を設けたり、などという対策をとることができる。もしも実物で実験して素子配置を検討しようとする、回路基板をわざわざ作成しなければならず多大な時間とコストがかかる。これがシミュレーションならば、素子配置などの変更はごく簡単なモデル修正で済むた

め、短時間で多くの種類のレイアウトを試みることができる。

7. おわりに

当社でも製品開発に当たって数値シミュレーションを幅広く利用しており、もはやシミュレーションは実験と並んで欠くことのできない手法になっている。今回は特に熱という切り口から、様々な製品開発で熱・流体シミュレーションを活用している事例を紹介した。

シミュレーションを用いる利点については、幅広く理解が進んできているが、更に異なる部門間での情報交換や技術交流を行い、今後ますます重要となる開発現場でのシミュレーション課題に対処していきたい。

参考文献

- 1) 鈴木雄一, ほか: 古河電工時報, No.106, (2000), 1.
- 2) 大海勝, ほか: 古河電工時報, No.108, (2001), 11.
- 3) T. Shimura et al.: Proc. 13th IHPC, 2 (2004), 244.
- 4) 島田守, ほか: ヒートパイプ技術, 20 (2001), 17.