遺伝的アルゴリズムを用いた熱シミュレーションモデルの高精度化*

小山田 耕二^{*1}, 山田 靖治^{*2}
西尾 俊彦^{*2}, 小寺 秀俊^{*3}

Compact Modeling Approach using GA for Accurate Thermal Simulation

Koji KOYAMADA, Yasuharu YAMADA,
Toshihiko NISHIO and Hidetoshi KOTERA

In this paper, we propose a technique that uses thermal measurement results for improved accuracy in thermal simulation of electronic apparatuses. Because the modeling of the electronic components in such apparatuses has hitherto been very poor, the thermal simulation results cannot satisfy the required accuracy. To solve this problem, we first represent a component as a set of cubic blocks with equivalent thermal conductivities and contact thermal resistances, and then identify these by using the thermal measurement results for the component. We regard the identification of parameters as an optimization problem that involves minimizing the difference between the calculated and measured results. To solve the problem, we combine genetic algorithms and a thermal simulation tool. Our technique was successfully applied to the construction of an accurate thermal model, which we validated by using thermal measurement results.

Key Words: Optimum Design, Numerical Analysis, Finite Volume Method, Heat Transfer, Genetic Algorithms

1. 緒言

近年, 実装技術やプリント基板(PCB)製造技術の進歩に伴い, ノートパソコンの小型化・軽量化の動きが著しい。さらに, 電子回路を構成するCPUやLSIの高機能化により主要部品の消費電力は増加する傾向にある。その結果, ノートパソコン内部の温度は上昇し, 構成部品の寿命, 信頼性の観点で製品化は困難になってしまう。このため, ノートパソコン内部の冷却技術は, 今後の製品開発における重要技術となっている。従来, 設計開発終了後, 試作品を用いて温度測定を行ない, 熱的に問題がないことを確認するだけで十分だったが, 今日, 試作品を作成する前段階である概念設計の段階で熱対策を行う必要がある。

概念設計の段階における熱問題の検討には, 熱シミュレーションの利用が有効であるが, シミュレーシ

ョン結果が実機の実験結果と良い一致を示すことが必要である。熱シミュレーション結果の精度を向上させるには, ノートパソコンの構成部品について, 信頼性のある熱特性データが必要となる。主にCPUの部品メーカは, これまで供給する部品の熱特性のデータを提供してきたが, 多くの場合, そのデータは, 接合部分から部品ケースまでの熱抵抗かまたは接合(ジャンクション)部分から外部環境までの熱抵抗であった。この単純な熱抵抗だけでは, 精度の高い熱シミュレーションを実現することが困難である。なぜなら, 熱抵抗は, ある決まった環境下での計測結果から得られるのもであり, 実際にこれらの部品が配置される環境とは一般に全く違うものとなる。そこでBar-Cohenらは, 単一の熱抵抗をジャンクション点を中心としたスター型の熱抵抗網を用いて熱特性を表現することを提案した[3]。Rostenらは, この考え方をさらに発展させ,

- パッケージの各面に様々な熱伝達の組み合わせを適用することのできる実験手法
- パッケージ部品に対応する新しい熱抵抗網
- 境界条件に依存しない(BCI:Boundary Condi-

* 原稿受付 1998年3月17日。

^{*1} 正員, 岩手県立大学ソフトウェア情報学部(☎020 0193 岩手県岩手郡滝沢村菓子152-52)。^{*2} 日本アイ・ピー・エム(株)野州事業所(☎520 2392 滋賀県野洲郡野洲町三宅800)。^{*3} 正員, 京都大学工学部(☎606 8501 京都市左京区吉田本町)。

E-mail: koyamada@soft.iwate-pu.ac.jp

tion Independent) 熱抵抗値の同定手法を提案した [5]。

ノート PC 内部に組み込まれた状態での CPU パッケージの温度分布を計算するには、上記の熱抵抗網ベースのモデルを汎用熱流体ソフトのモデルに組み込む必要がある。計算スキームとして、有限体積法を採用する場合、多くの汎用熱流体ソフトでは、計算の対象となる空間を直交格子に分割する。さらに、熱抵抗網を用いてパッケージモデルが構築されている場合、これを直方体ブロックのモデル（コンパクトモデル）に変換する必要がでてくる。この場合次の問題が生じる。

- 熱抵抗網モデルでは、パッケージ表面を等温とみなし、そこで温度を定義していたが、有限体積法においては、格子の中心で温度を定義する。したがって、表面に厚さがきわめて小さいブロックを定義する必要がある。

- パッケージを格子表現する場合、それぞれの格子に対して、熱抵抗値から等価な熱伝導率を推定する必要がある。この推定の段階で、熱抵抗網モデルからの誤差が少なからず出てくる。

- 熱抵抗網は、パッケージモデルの表現に特化している側面があり、パッケージ以外の熱抵抗網モデルは、ほとんど提案されていない。

この問題を解決するために、我々は、電子機器用部品を複数の直方体ブロックの集合（コンパクトモデル）で定義し、そのパラメータを、実機を使った熱計測結果で同定する。この同定問題を熱シミュレーション結果と熱計測結果との差を最小化する最適化問題として考え、この問題を解くために熱流体ソフトに遺伝的アルゴリズムを組み合わせた。本論文では、コンパクトモデル開発方法について述べたあと、本手法を ThinkPad タイプのキーボードのコンパクトモデルの開発に適用する。

2. コンパクトモデルの開発

2.1 コンパクトモデルについて

本報告では、コンパクトモデルを部品のもつ形状の複雑さを何らかの方法で少なくしたモデルと定義し、特に、今回は直方体ブロックの集合体で部品形状を単純化したものとする。また、このコンパクトモデルにおいては、ブロックの等価伝導率およびブロック間の接触熱抵抗をモデルパラメータとしている（図 1 参照）。我々はこのモデルを用いて、発熱体に取り付けら

れた場合の部品の温度分布を計算する。このモデルで考慮する熱の移動は、

- 外気における熱移動
- 部品と外気との間の熱移動
- ブロック内部での熱移動

とした。ブロック内部での熱移動については、ブロックの等価伝導率を、またブロック間での熱移動については、ブロック間の接触熱抵抗を使って表現することにする。本計算では、外気における熱移動を考慮するためにソフトウエアクレイドル社製熱流体解析ソフト STREAM を利用した。

Fig. 1 Overview of a compact model

2.2 コンパクトモデル開発手法

我々は以下の手順でコンパクトモデルを求めた。

(1) モデル化対象の電子機器部品を発熱させ、または部品に発熱体を取りつけ、あらかじめ決められた点で温度計測を行う。

(2) 境界条件（発熱条件、または、環境条件）を変えて温度計測を行う。これを何回か繰り返す。

(3) 電子機器部品を複数の直方体ブロックの集合で定義する。モデルのパラメータとしてブロックの等価伝導率およびブロック間の接触熱抵抗を考える。

(4) モデルのパラメータの取りうる範囲を決める。

(5) 有効な範囲からランダムにパラメータを取り出す。

(6) 設定されたパラメータを使って熱シミュレーションを行う。その回数は、ステップ 1, 2 の温度計測時に設定した条件の数と同じ数とする。

(7) 計算された温度データを対応する部品単体の熱計測結果データと比較し、その差を求める。

(8) 求められた差から計算する適度度がある基準値以上になると終了する。そうでなければ、モデルのパラメータを変更して、6に戻る。

適応度については、後述するように、式 1 を用いて計算し、その基準値として 0.1 を選択している。パラメータの種類は、複数あり、その有効範囲の中で、有限個数だけ、総当たりで検討すると仮定しても、その検討回数は、膨大な数になる。例えば、3つのパラメータをそれぞれ有効範囲のなかからNずつ選んで検討すると仮定すると、その組み合わせは、Nの3乗となる。そこで、本研究では、組み合わせ最適化手段として有効な遺伝的アルゴリズム [1] を用いる。

2.3 遺伝的アルゴリズムの適用

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm 以下, GA) は、生物の遺伝と進化のメカニズムを工学的にモデル化したもので、各個体は、ビット配列として表現される遺伝子とその個体の適合度を用いて抽象化される。我々の問題では、この遺伝子から熱シミュレーションへの入力データが作成され、そして、個体の適合度 (Fitness) は、各境界条件ごとに計測された温度と熱シミュレーションで計算された温度の差から以下のように計算した。

$$Fitness = \frac{1}{1 + \sum_i^{b-n} \sum_j^{m-n} (T_j^m - T_j^c)^2} \quad (1)$$

ここで、 $b-n$ は境界条件の数、そして、 $m-n$ は、温度計測点の数を表す。また、 T_j^m 、 T_j^c は、第 j 点で、測定または、計算された温度値を表す。式 1 から $Fitness=1.0$ は、全ての境界条件、そして全ての計測点で測定値と計測値が一致していることを表す。

GA 以外の最適化手法は、多くの場合、パラメータの初期値を必要とする。そしてこれらの手法は、収束が初期パラメータに依存するので、初期パラメータの与え方によっては、全く異なる最適解に収束してしまう。また、温度計測点は、一般に複数となるため、我々の問題は多目的最適化と考えることができる。したがって、式 1 で表される適応度が単一のピークをもつとは考えにくい。我々は、以上の理由から最適化手法として GA を選択した。

我々の問題において、最適化の対象となるパラメータは、熱伝導率や熱伝達率といった実数空間に属するものが対象となる。致死遺伝子の発生が生じないようにパラメータの有効範囲 (p_{max} , p_{min}) の指定した。遺伝子を表現するビット列の定義する 2 進数を 0 から 1 の間に写像し、得られた数値を補間パラメータ t として利用する。この結果得られるパラメータ、 p の値は、

$$p = t \times p_{max} + (1 - t) \times p_{min}$$

となる。

GA でまず生成する初期遺伝子集団の決定では、Michalewicz の示した実数コード GA に基づく手法を採り入れた [2]。すなわち、

(1) ある一定割合の初期個体を有効範囲内でランダムに発生させる。

(2) 残りについては、個体を有効範囲の境界上に発生させる。最大、最小の境界への割り振りは、半々としている。

ここで、個体を境界に発生させるのは、このような場所で、個体の適応度が最大値をとることが少なくないと考えたからである。

我々の問題において、適応度の評価は、計算時間がもっとも必要とされるステップとなる。今回、適応度は、式 1 からわかるように温度場における計測値と計算値の差と定義しているので、1 個体の適応度を評価するために、熱シミュレーションの計算が境界条件のケース数だけ必要となる。熱シミュレーションの計算は、一般に時間のかかるものとされているが、初回以降については、前回の計算結果を初期値とすることができるので、初回ほど計算時間は必要としない。この計算によって得られた適応度に基づく親遺伝子の選択手法では、ルーレット選択とエリート保存選択を組み合わせることとした。選択された親同志の交叉では、1 点交叉法を用いた。突然変異においては、一般的には、遺伝子のある部分のビット値を強制的に反転させる。これに対し、本手法では、実数コード GA に基づき、ある確率 (突然変異率) で選ばれた個体を有効範囲の境界上に移動させることにした。

3. キーボードモデルへの適用

ノート PC の熱対策においてキーボードは、重要な役割をはたすと考えている。キーボードは、ノート PC 筐体の上面に位置し、表面積が一番大きな部品である。放熱の観点で、電子部品から排出される熱をできるだけ多くキーボードから逃そうと思うと必然的にキーボードの表面温度は高くなってしまう。ところが、キーボードは、ユーザに直接ふれる時間が一番長い部品でもある。すなわちキーボードの温度は、もっともユーザに伝わりやすい。快適性の観点でいたずらに多く放熱させるわけにもいかない。ここにバランスのとれたキーボードの熱設計の必要性を見出すことができる。しかしながら、熱シミュレーションで表現されるキーボードのモデルは多くの場合、単純な平板ブ

ロック一枚で表現されることが多かった。一方、詳細に表現しようとして、キートップ1つ1つモデル化すると、結果としての格子数は膨大なものになってしまう。そこで、われわれは、これまでに述べた方法を利用してキーボードのコンパクトモデルの開発を行うことにした。

3.1 キーボードのコンパクトモデル

キーボードは、大きく分けて2つの部分、キー部分、そしてベースプレート部分から構成されている。前者を構成している材料と後者を構成する材料では、熱伝導率が100倍以上異なっている。プレート部分については、アルミ板で作られているが、キーアクションの為の取り付けのため、長手方向に平行に、12本の溝がある。このため短手方向は、長手方向に比べ、熱の伝導は悪くなっているものとする。本研究で用いるモデルブロックは、等方的な熱伝導特性をもつため、プレート部分を2分割し、分割された2つの部分の間に接触熱抵抗を持たせて、プレート内での異方性を考慮する事にした(図2参照)。ただし、2つのプレート部分の熱伝導率には、アルミの値を用いた。また、キーボードのコンパクトモデルのパラメータおよびその有効範囲は、表1のように設定した。ここで、

Fig. 2 Compact model of a keyboard

Table 1 Available range of parameter values

parameter	minimum	maximum
Thermal conductivity(W/mK) Key	0.1	10.0
Thermal resistance(W/m ² K) Key and plate1	10.0	200.0
Key and plate2	10.0	200.0
plate1 and plate2	1000.0	6000.0

接触熱抵抗は、熱通過率を用いて表現している。

3.2 温度データ計測

ノートパソコンにおいては、各機種ごとに発熱部品の配置される場所が変わる。したがって、境界条件に依存しないコンパクトモデルを開発するために、キーボード底面のいろいろな位置(表2参照)に発熱体を

とりつけ、温度計測を行なうことにした(図3参照)。温度計測の場所として、発熱体のとりつけ場所候補の上方のキートップ上に4点設定した(図4参照)。図4は、図3を引っくり返したものとなっている。したがって、キーボードの厚み方向に場所を示すラベルの大文字と小文字が対応する。

Table 2 Thermal measurement condition

location	Case1	Case2	Case3	Case4
A	ON	OFF	OFF	OFF
B	OFF	ON	OFF	OFF
C	OFF	OFF	ON	OFF
D	OFF	OFF	OFF	ON

Approx. heater position

Fig. 3 Heater location

キーボードのコンパクトモデルを開発する場合、キーボード内部の熱経路が重要である。このため、計測実験において、キーボード外の熱経路はできるだけ単純にしておくことにした。我々は、次に示すような計測設備を用いて、キーボードの熱計測を行った。

- キーボード下面からの放熱を最小限にするためにキーボードを断熱材の上に固定する。
- 通風の影響を除去するために、キーボードを、直方体(530*440*750(mm))のカバーで覆う。
- ベースプレート上に4個所の発熱体(2.53W)を配置しいずれか1個を発熱させる。

キーボード上に設定した4点で熱伝対を用いた温度計測を実施し、表3にその計測結果を示す。

3.3 GAによるパラメータ同定

本研究において、GAのパラメータおよびその値は、表4のように設定した。ここで、 P_c と P_m は、それぞれ交叉率そして突然変異率を表す。

Fig. 4 Measurement points

location	Case1	Case2	Case3	Case4
a	40.0	27.4	30.8	27.4
b	27.3	37.7	26.8	30.5
c	30.4	27.0	38.7	27.2
d	26.9	29.9	26.6	37.7

GA parameter	Available range
bit length	10
individual number	10
P_c	0.6, 0.65, 0.7, 0.75
P_m	0.1, 0.2
maximum generation	30

GA のパラメータの組合せ（8通り）の数だけ同定計算を行ない、最大世代数を経た時点での最終適応度を表5に示す。尚、計算には、IBM RS6000-590 ワークステーションを使用し、1世代の計算には約1,300秒要した。また、図5は、Case4に対応する計算結果から可視化されたキーボード表面の等温線図である。また、図6には、赤外線映像装置により可視化されたキーボード表面の温度分布を示す (Case4)。両方の図の対応する点で表示された温度値を見ると高い精度で解析が行われたことがわかる。

P_c	P_m	0.60	0.65	0.70	0.75
0.1		0.10866	0.10588	0.11287	0.102255
0.2		0.101363	0.115396	0.115531	0.121044

表5に示された結果を見ると全ての適応度が0.1を上回っていることがわかる。適応度が0.1であることは、式1からわかるように4つの計測結果で誤差が平

Fig. 5 Calculated thermal field

Fig. 6 Measured thermal field

均摂氏 0.75° を達成した場合、すなわち、

$$\frac{1}{1 + \sum_i \sum_j^4 (T_j^m - T_j^c)^2} > 0.1 \quad (2)$$

$$\text{Ave}(|T_j^m - T_j^c|) < \sqrt{\frac{9}{16}} \quad (3)$$

となる場合に相当する。

今回の研究において、誤差は、計算結果と計測結果との差の絶対値であると定義する。それぞれの結果に対して、誤差の最大値を表してみると表6のようになり、 $P_c = 0.7$, $P_m = 0.2$ の場合がもっとも優れたパラメータを探索していることがわかる。本研究におけ

P_c	P_m	0.60	0.65	0.70	0.75
0.1		1.5703	1.7266	1.8089	1.9860
0.2		1.8328	1.5256	1.2808	1.6400

るモデルパラメータの同定問題では、キートップ上で

設定された4点において誤差を最小化したいので、多目的最適化問題として考えることができる。したがって、GAのパラメータを変えて適応度が最大となった解の候補のなかから各計測点での誤差の最大値が一番小さいものを採用するという方針をとった。

この結果を踏まえ、最終的に同定したモデルのパラメータを表7に示す。ここで、接触熱抵抗は、熱通

Table 7 Identified parameters	
parameter	identified values
Thermal conductivity(W/mK) Key	0.177382
Thermal resistance(W/m ² K) Key and plate1	13.8984
Key and plate2	119.619
plate1 and plate22	3914.02

過率を用いて表現している。

4. 結果と考察

本報告において提案した手法では、計測結果と計算結果の差の自乗和を適応度として、交叉率や突然変異率といったGAパラメータを変化させることによって解の候補を検索した。その結果得られた複数の解候補のなかから各計測点における誤差の最大値をもっとも小さくするものを最終的な解を決定し、コンパクトモデルのパラメータを同定した。この候補で十分であるかどうかについて明確な判断を下すのは難しい。

今回のケースでは、解の候補のなかで適応度が最大となるものが最終的な解となっていない。適応度がそれほど高くなく、途中で淘汰された解の候補のなかには優れたものがまざれこんでいたという可能性が存在する。そこで、ひとつのアイデアとして、各計測点における誤差の最大値をもちいて適応度を定義することが考えられる。この適応度を用いて最適化をおこなったものを表8に示す。この段階では、誤差レベ

Table 8 Calculated fitness values				
$\frac{P_c}{P_m}$	0.60	0.65	0.70	0.75
0.1	1.69795	1.69798	1.71247	1.71249
0.2	1.44436	1.52101	1.48054	1.69798

ルではほぼ互角の最適化結果を得ることができているもののチャンピオンデータの達成の観点では、本手法で用いた適応度に勝っているとは言えない。この新しい適応度では、誤差が最大となる計測点以外の計測点における誤差からの寄与を考慮できない。このためパラメータの探索空間が狭くなってしまい、それほど優秀な解を探索できないと考える。

また、GA以外の最適化手法として有名な非線形計画法の中で、Powellの方法[4]を取り上げ、GAの有効性を確認した。この方法は、基本的には1変数の最適化手法であるが、我々の問題に対応できるよう以下の手順で最適化の各ステップでは、パラメータの変更により適応度を最も大きくするものだけ変更の対象とした。

(1) パラメータの現在値で基準となる適応度を計算

(2) パラメータ毎に、

(a) パラメータ値の微小増減により適応度計算を2回行なう。

(b) 適応度をパラメータの2次関数で近似する。

(c) パラメータの有効範囲内での適応度の極大値を計算する。

(3) 全てのパラメータの中で最大値を与えるパラメータを探索する。

(4) 最大値を与えるパラメータ値を変更する。

(5) 収束していなければ、1へ戻る

GAにおける適応度計算と同じ計算量にするために30回ほどのパラメータ修正を行った結果を図7に示す。初期パラメータとして、

- 各パラメータについてその有効範囲の中央値
- GAによる最適化結果を与えるパラメータ値を用いる場合を考えた。

図7からもわかるように初期パラメータとして、中央値をとった場合は、GAで達成しているものより低い適応度の付近に収束していることがわかる。この結果から我々の問題の適応度が単一のピークをもつものでないことが明らかにされたともいえる。また、同時に最適化結果を与えるパラメータ値から始めたものについては、ほぼ横ばい状態となっていることがわかる。これは、GAが大域的な最適化解を探索したことを示していると解釈することができる。

5. 結言

本論文では、ノートPCに代表される電子機器の熱シミュレーションを高精度にする上で重要な電子機器部品用コンパクトモデルの開発方法手法を提案した。本手法を、ThinPadのキーボードのコンパクトモデル作成に適用し、モデルパラメータの同定に遺伝的アルゴリズムと熱流体ソフトの組合せが有用であることを確かめた。

Fig. 7 Fitness profile(vertical:fitness, horizontal:iterations)

謝辞 本研究にあたり、測定器の提供を快諾して頂いた日本アイビーエム野洲事業所葛野氏、終始一貫して適切なアドバイスをしていただいた東北大学大林先生、東京基礎研究所石川浩氏、および、サブルーチン形式で熱流体ソフトの提供を行なっていただいたソフトウエアクレイドル社中西氏に感謝いたします。

文献

- [1] D.E.Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, (1989), 1-25, Addison-Wesley.
- [2] Z.Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, (1994), Springer.
- [3] A.Bar-Cohen and W.Krueger, *Thermal characterisation of a PLCC-Expanded R_{jc} methodology*, IEEE Trans.Comp., Hybrids.Manufact.Technol., 15-5(1992), 691-698.
- [4] M.J.D. Powell, *An Efficient Method for Finding the Minimum Function of Several Variables without Calculating Derivatives*, Computer J., 7(1964), 155-162.
- [5] H.I.Rosten, and et. al, *Final Report to SEMITHERM XIII on the European-Funded Project DELPHI - the Development of Libraries and Physical Models for an Integrated Design Environment*, Thirteenth IEEE SEMI-THERM Symposium Proceedings, (1997), 73-91.