Japan Society for Simulation Technology

【論 24-15】

論 文

熱伝導法則を応用した応答曲面法の評価関数への適用による熱設計パラメータ最適化に関する研究†

中 西 徹*・岡 本 圭 司**・小 寺 秀 俊**・小山田 耕 二**

ABSTRACT For the thermal management of the electric products, the compact modeling method is commonly applied to the numerical analysis with the simplification of the each component used in the products, on the view point of the best thermal design. In the generation of the compact modeling, the method that the model parameters are optimized toward to the fitness between the temperature value of numerical analysis result and the actual hardware testing data, is conventionally used, with some monitored points which are given in advance. However, it was found that this conventional method with the quadratic polynomial caused the important problem on the view point of the analysis quality if the Response Surface Method is used of the parameter optimization.

Therefore in this research to resolve this problem, we suggest the method that the response surfaces, which are based on the heat conduction law, are composed for each monitored location, and the fitness function is given with these surfaces. This method is applied into some compact modeling and the benefit is verified. The meanwhile of the temperature difference between the numerical analysis result and the solution field is decreased half, and the divergence makes one-tenth decrease.

1. 緒言

携帯電話やノートブックコンピューター，PDA (Personal Device Assistant)，DVC(Digital Video Camera)，DSC(Digital Still Camera)などの電子機器は，実装技術やプリント基板の製造技術の進歩に伴って，小型化・省スペース化が進んでいる．一方で，電子回路を構成するCPUやLSIなどの高性能化により，その消費電力はますます大きくなってきている．つまり，電子部品の発熱密度は増大し，その正常動作や寿命の信頼性を保証することが大きな技術的課題となってきている．そこで，発熱に対する制御方法として，強制冷却ファンなど冷却用機器が使用されている．流体による熱移動まで考慮すると，筐体内部の伝熱現象が複雑化してしまうことから，今日では，設計の初期段階からCFD(Computational Fluid Dynamics)ソフトウェアを用いた熱解析が併用して行なわれている．

CFDソフトウェアは，ナビエ・ストークス方程式を扱っているため，解析時間に多くの時間を要する．一般に形状モデルの作成には厳密さが要求されるが，CADデータをそのまま形状モデルとして適用すると，実用的な計算時間で解析を行なうことは多くの場合不可能に近い．そこで，コンピュータリソースに見合った規模で形状モデルを単純化する必要がある．しかし，形状モデルを単純化するには解析精度低下のリスクがあり，このマネージが極めて重要になる．そこで，この単純化，コンパクトモデル構築のために，複数の形状及び材料からなる領域をひとつのブロックとしてコンパクトな形状モデルを作った際に，そのモデルに与える消費電力や発熱量などの入力値や，材料などの熱伝導率といった熱特性データを最適に設定する必要がある．

小山田らは，部品のもつ形状の複雑さを除くため，電子部品を複数の直方体ブロック(コンパクトモデル)で表現した．さらに，信頼性のある熱特性データを取得するため，実機による計測結果とシミュレーションによる解析結果との差を最小化するモデルパラメータの最適化を行なった．最適化手法としては，遺伝的ア

Research of Revised Thermal Design Parameter Optimization with Response Surface Method Application for Fitness Function. By *Tohru Nakanishi* (IBM Japan Ltd. Yasu), *Keishi Okamoto*, *Hidetoshi Kotera* and *Koji Koyamada* (Faculty of Engineering, Kyoto University).

* 日本アイ・ビー・エム(株)野洲事業所

** 京都大学大学院工学研究科

† 2004年5月24日受付 2005年3月24日再受付

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

ルゴリズム[1]や応答曲面法が用いられた[2~4].

遺伝的アルゴリズムを用いた場合，非線形に強く大域的な探索を可能とするが，多くの探索点が必要であり，解析回数が多くなることが問題であった．また応答曲面法を用いた場合，遺伝的アルゴリズムに比べて少ない探索点で済み解析回数を減らすことはできるが，遺伝的アルゴリズムに比べ解析精度が劣ることが判明した．

この原因を調べるため，応答曲面で近似する評価関数の形状を詳しく調べた．この評価関数は，実機による計測温度とシミュレーションによる計算温度との差から構成されている．観測の結果，評価関数の形状が，急峻で単峰であることがわかった．このような評価関数を近似するために，通常の応答曲面法で使用する二次多項式を利用することは不適切である．

そこでこの問題を解決するために，本研究では，評価関数を構成する温度データそのものに応答曲面法を適用し，熱回路網法[5]を応用した熱伝導法則に基づく近似式で温度分布を近似するという手法を提案する．さらに，コンパクトモデル作成に本手法を適用し，パラメータ最適化におけるその有効性を調べた．

2. 熱設計向けコンパクトモデルの開発

2.1 コンパクトモデルの作成

応答曲面法を用いた従来のコンパクトモデル作成では，モデル対象である電子部品を発熱させ，あらかじめ決められた点(参照点)で温度測定をおこなう．そして，このとき計測された温度を参照点とし，数値解析シミュレーションによる計算温度との差が一致するようにパラメータの最適化を行なう．パラメータ最適化の評価には，参照温度と計算温度の差から構成される以下の式を用いる．

$$\text{評価関数} = \frac{1}{1 + \sum_{p} \left(T_{ref\_p} - T_{cal\_p}\right)^2} \qquad (1)$$

ここで，T_{ref_p}, T_{cal_p} は，それぞれ参照点 P における参照温度と計算温度を表す．

この関数は，すべての参照点での参照温度と計算温度との差が0になれば1になり，温度差が無限大になれば0になる関数である．

応答曲面法を用いたパラメータ最適化では，この評価関数の分布を少ない探索点で近似する．そして，その結果から得られる応答曲面を用いて，最も高い評価関数値を示すパラメータの組み合わせを探索する．

2.2 応答曲面法

応答曲面法は，古くからプロセスエンジニアリング分野の最適化に用いられてきており，数理統計学の考えを取り入れた近似手法である．

応答曲面の近似式には，一般に二次多項式が用いられる．

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i + \sum_{i=1, j \le i}^{n} \beta_{ij} x_i x_j \qquad (2)$$

ここで，n は設計変数の数である．2変数でその変数を W_1, W_2 とした場合，次式になる．

$$y = \beta_0 + \beta_1 W_1 + \beta_2 W_2 + \beta_3 W_1^2 + \beta_4 W_2^2 + \beta_5 W_1 W_2 \qquad (3)$$

係数 β_i ($i = 0, 1, \ldots, 5$)は，通常の最小二乗法を用いて求めるが，式(3)を線形の近似式に変換することによって，常に線形モデルに帰着して考えることができる．$x_1 = W_1$, $x_2 = W_2$, $x_3 = W_1^2$, $x_4 = W_1^2$, $x_5 = W_1 W_2$ と置き換えると，式(4)のようになる．

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 \qquad (4)$$

線形化の結果，変数の数が $n = 2$ から $P = 5$ に増加することになる．一般的に $P = n + n \times (n+1)/2$ の関係がある．

$$Y = X\beta + \varepsilon \qquad (5)$$

ただし，

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & x_{k1} & x_{k2} & \cdots & x_{kp} \end{pmatrix}$$

$$\beta = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{pmatrix} \quad \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{pmatrix}$$

ここで，Y は応答の列ベクトル(大きさ k)である．X は k 個の設計点における p 個の設計変数の集合である．β は近似式の係数のベクトルである．

最小2乗法により，係数 β の不偏推定量 β_b は次式で得られる．

$$\beta_b = (X^T X)^{-1} X^T y \qquad (6)$$

β_b の分散共分散行列は次式で与えられる．

$$V(\beta) = \sigma^2 (X^T X)^{-1} \qquad (7)$$

ここで σ^2 は，応答 y の誤差分散であり，その最尤推定値は次式で得られる．

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{SS_E}{n - k - 1} \qquad (8)$$

ただし，SS_E は残差の二乗和であり，次式であらわされ

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

る．

$$SS_E = y^T y - \beta_b^T X^T y \tag{9}$$

近似式のあてはまり具合を評価するための指標として，決定係数 R^2（Coefficient of multiple determination）がある．決定係数 R^2 は次式で定義される．

$$R^2 = \frac{SS_R}{S_{yy}} = 1 - \frac{SS_E}{S_{yy}} \tag{10}$$

ここで，S_{yy} は応答 y の平均値まわりの変動で，次式で定義される．

$$S_{yy} = y^T y - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)^2}{n} \tag{11}$$

また，SS_R は次式で定義される．

$$SS_R = \beta_b^T X^T y - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)^2}{n} \tag{12}$$

例えば，近似式が完全に応答に一致すれば，式(11)の S_{yy} と式(12)の SS_R は完全に一致することになる．式(10)より $S_{yy} = SS_R + SS_E$ の関係から，残差が大きくなるにしたがって，決定係数は1より小さくなる．ただし，決定係数 R^2 は変数の数を増やせば，値が大きくなるため，一般に変数の数 p と応答の数 k を考慮し補正した自由度調整済み決定係数 R^2_{ad} が，単位自由度あたりの残差を比較するのに用いられる．

$$R^2_{ad} = 1 - \frac{SS_R/(k-p-1)}{S_{yy}/(k-1)} \tag{13}$$

近似式の各係数は t 検定でその有意性を判定する．この t 検定により近似式への寄与率が低い係数は削除され，再び係数の推定を計算し，自由度調整済み決定係数の高い近似式へと更新する．i 番目の係数の t 値は，次式で表される．

$$t_0 = \frac{\beta_{bj}}{\sqrt{\hat{\sigma} C_{jj}}} \tag{14}$$

ここで，C_{jj} は式(7)の正方行列 $(X^TX)^{-1}$ の jj 成分である．

近似式の近似度を最大化するためには，設計点の選択が重要となる．β の分散共分散行列は，$V(\beta) = \sigma^2 (X^TX)^{-1}$ と与えられていることから，近似式の各係数の推定分散を小さくするには，σ^2 と $(X^TX)^{-1}$ の対角成分を小さくすれば良いことがわかる．この $(X^TX)^{-1}$ を最小化する設計点の選択に実験計画法の考えを利用する．実験計画法とは，もともと実験の実行に予想外の因子の影響をさけるための計画であるが，本研究においては，シミュレーションの実行前に，より良い近似を得るためのより良い応答値を集めるための手法として利用する．実験計画には，直交計画，中心複合計画などがある．今回は，拘束条件などの影響を受けない計算機を利用した実験計画であるD-最適基準を用いる．

D-最適基準は y への β の誤差の影響を最小化する．モーメントマトリックス M の行列式は次式で定義する．

$$M = (X^T X)/p \tag{15}$$

D-最適基準では，このモーメントマトリックス M の行列式を最大化する設計点を選択する．またD-最適基準の判定では，次式で定義されるD有効性(D_{eff})が用いられる．

$$D_{eff} = \left(Det\left[X^T X\right]\right)^{1/p} / k \tag{16}$$

ここで，p は先に述べた変数の数である．全ての変数が−1から1までの間に正規化されていれば，D_{eff} の最大値は1となる．このように実験に用いる設計点集合の優劣は D_{eff} の値で比較できる．

3. 熱伝導法則に基づく応答曲面近似式の提案

3.1 熱回路網法を用いた近似式の作成

応答曲面法を用いた従来のパラメータ最適化手法では，評価関数を二次多項式の応答曲面で近似し，応答曲面上の最大値を評価関数の最大値の近似解とした．しかしながら，**図1**で示したように，評価関数の解空間を調査した結果，急峻な単峰形状をしており，二次多項式の応答曲面の利用は，精度上問題がある．電子機器の温度分布の滑らかさに関しては，常にそれが保証されるわけではないが，一般的に熱伝導率を連続的に変化させていけば滑らかさは保持されると考える．

そこでこの問題を解決するため，**図2**で示すように，

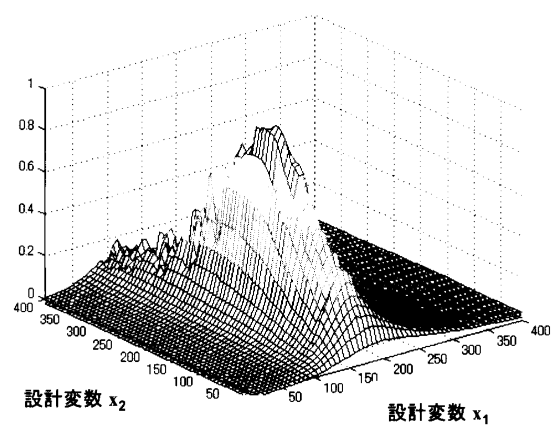

図1　評価関数の解空間

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

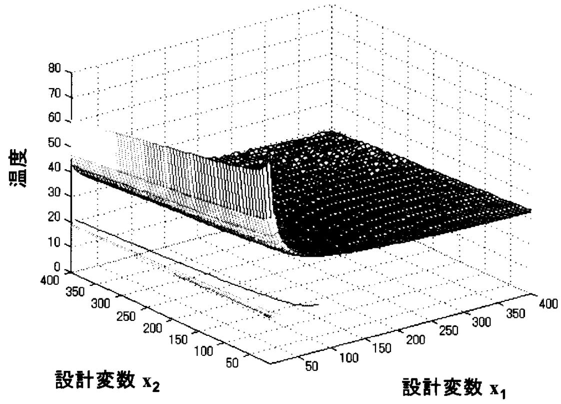

図2　温度分布の解空間

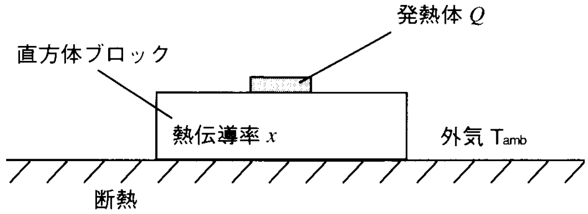

図3　コンパクトモデル

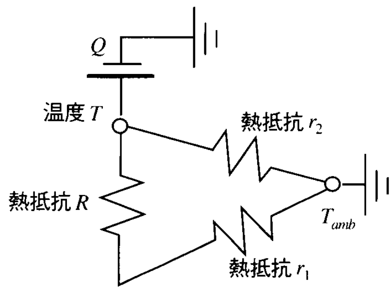

図4　熱抵抗網モデル

温度分布は，設計変数の変化に対して単調に変化していることから，参照点ごとに熱伝導法則に基づいた応答曲面で温度分布を近似し，その結果を使って評価関数を表現する手法を提案する．これにより，参照点選択の場所(座標)や量による誤差を減少させることが可能となる．

本研究では，近似関数を構築するにあたり，熱伝導法則をベースとした熱回路網法を利用する．熱回路網法は,伝熱経路を電気回路モデルに置き換えて表現し,温度を求める手法である．この手法を用いて，最低限の伝熱経路だけを表現し，得られた熱抵抗網モデルから熱伝導率と温度の関係式を求める．さらに，関係式を変数変換によって線形化し，近似式の作成に応用する．以下に簡単なコンパクトモデルを例にとって，その作成方法を説明する．

コンパクトモデルの例を**図3**に示す．最適化対象である熱伝導率 x(W/m･K)の直方体ブロックがあり，その上に発熱体 Q(W)がある．ブロックの下は断熱であり,周りは環境温度 T_{amb}(°C)の外気が存在する．Q, T_{amb} は既知とする．

これを熱抵抗網モデルに置き換えると,**図4**になる．

ここで, T は参照点での温度(°C), R は直方体ブロックの熱抵抗(K/W)である．また r_1, r_2 はそれぞれ R に対して直列，並列の関係にある熱抵抗(K/W)であり，最適化の対象以外の熱抵抗を表現している．

一般に，熱抵抗と熱伝導率の関係は，次式で示される．

$$\text{熱抵抗} = \frac{L}{S \times \text{熱伝導率}} \tag{17}$$

ここで，L, S は，それぞれ接点間の距離(m)，伝熱断面積(m²)である．

図4のように熱抵抗と温度との関係を熱回路網法で表現できれば，各節点ごとに連立方程式を立てることができる．キルヒホッフの定理を利用すると，次式が得られる．

$$Q = (T - T_{amb}) \times \left(\frac{1}{R + r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \tag{18}$$

熱抵抗 R の熱伝導率を(W/m･K)とし，式(17)を，式(18)に代入して整理すると，

$$T = \left(\frac{\frac{Lr_2}{S(r_1 + r_2)} \left(1 - \frac{r_1}{r_1 + r_2} \right)}{\left(x + \frac{L}{S(r_1 + r_2)} \right)} + \frac{r_1 r_2}{(r_1 r_2)} \right) Q + T_{amb} \tag{19}$$

となる．ここで，

$$\alpha = \frac{L}{S(r_1 + r_2)} \tag{20}$$

と置く．熱伝導率 x に対する温度 T の関数は，$(x+\alpha)^{-1}$ によって構成されていることがわかる．

本研究では，この $(x+\alpha)^{-1}$ を線形化することによって，近似式を作成する．例えば，設計変数が2変数の場合，次式のようになる．

$$\begin{aligned} T = \beta_0 + \beta_1 (x_1 + \alpha_1)^{-1} + \beta_2 (x_2 + \alpha_2)^{-1} + \beta_3 (x_1 + \alpha_1)^{-2} \\ + \beta_4 (x_2 + \alpha_2)^{-2} + \beta_5 (x_1 + \alpha_1)^{-1} (x_2 + \alpha_2)^{-1} \end{aligned} \tag{21}$$

3.2 評価関数の構築手法

前節で構築した近似式を用いて，各参照点での設計点から得た温度データより温度分布を応答曲面で近似する．さらに，得られた応答曲面を表す近似式を使っ

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

て評価関数を構築する．これにより，評価関数を設計変数の関数として表現することができる．評価関数の構築の流れを**図5**に示す．

次章において，これまで述べた評価関数構築手法の有効性を検証するため，予め決めておいた設計変数を探し出せるかどうかのテストをおこなう．予め設定する設計変数を(x_1', x_2')とし，これらを使った熱解析により得られる各参照点での温度値をそれぞれ参照温度として，T_{ref_1}, T_{ref_2}, T_{ref_3}とする．また，設計点より得られた温度データから各参照点における温度値が応答曲面の近似式によって次式のような関数式fで近似される．

$$T_{cal\_1} = f_1(x_1, x_2) \tag{22}$$

$$T_{cal\_2} = f_2(x_1, x_2) \tag{23}$$

$$T_{cal\_3} = f_3(x_1, x_2) \tag{24}$$

これらの関数式を評価関数に代入すると，

評価関数

$$= \frac{1}{1+(T_{ref\_1}-f_1(x_1,x_2))^2+(T_{ref\_2}-f_2(x_1,x_2))^2+(T_{ref\_3}-f_3(x_1,x_2))^2} \tag{25}$$

となる．

評価関数が設計変数(x_1', x_2')の関数として陽的に表現できるので，評価関数の最大値を与える設計変数(x_1, x_2)を解析的に計算することができる．

4. コンパクトモデル作成への適用

4.1 コンパクトモデルの作成

前章では，熱伝導法則に基づく応答曲面近似式を提案した．本章では，提案する近似式と二次多項式とをそれぞれコンパクトモデル作成に適用し，本研究で提案した近似式の有効性を確認する．

コンパクトモデルの作成にあたって，本来では実機による計測結果から参照温度の設定をおこなうが，本研究では，近似の有効性を検証するという目的のため，解として先に参照温度を設定する．

図6に，本研究で対象とする実機を示す．ノートパソコンの心臓部であるCPUを取り上げ，その発熱体であるCPUから，上下の熱伝導パスによって熱が伝わる．参照点は，上下の筐体部分とCPU部分とし，おのおのの点で測定された温度が参照温度となる．一方，数値解析シミュレーションにおいては，図6のコンパクトモデルとして，**図7**を作成した．対応する参照点

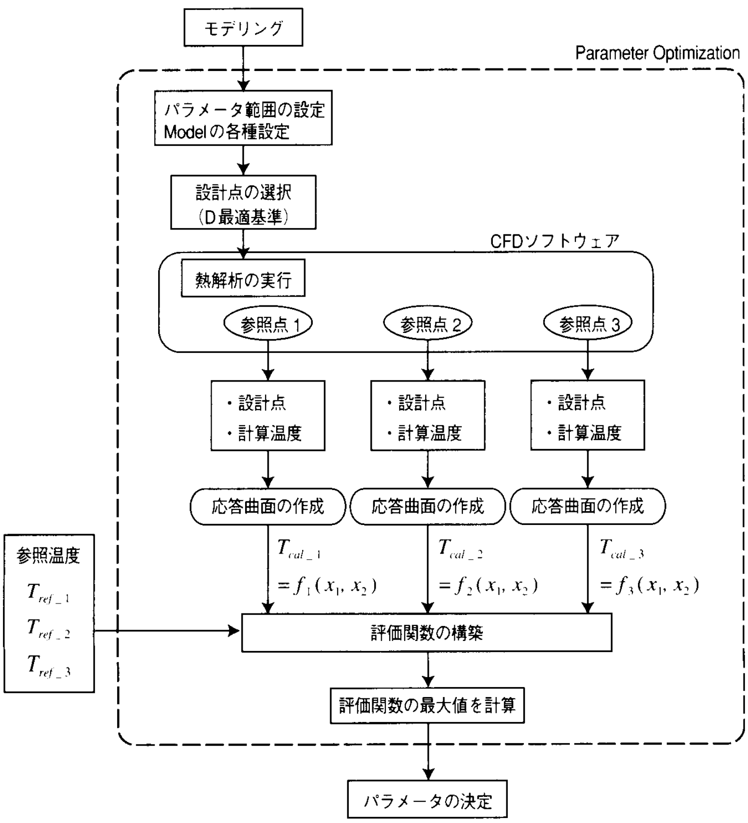

図5　評価関数の構築の流れ

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

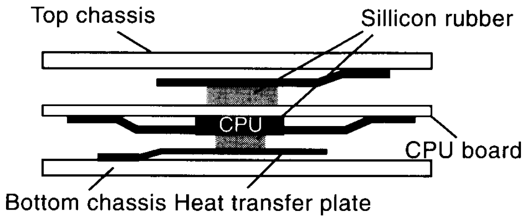

図6 実機

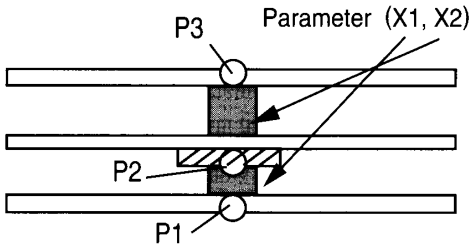

図7 コンパクトモデル

は，P1, P2, P3で示した場所になる．発熱体の下および上にある熱伝導体のパラメータである熱伝導率をそれぞれ x_1, x_2 とする．そして，熱伝導率を設計範囲内で変化させる．P1, P2, P3での参照温度は，設計変数 $x_1' = 100$(W/m·K)，$x_2' = 100$(W/m·K)としたときの温度結果を採用した．つまり，これが解である．この解に提案する手法がいかに近づけるかを調査する．

4.2 近似式の作成

今回扱うコンパクトモデルのパラメータ最適化に対して，提案する近似式における主要な項である α を決定する．

表1に示すように，熱伝導率である設計変数 x_1 に対する α_1 の値，および，設計変数 x_2 に対する α_2 の値を，任意に $\alpha_1 = 12.4$(W/m·K)と $\alpha_2 = 44.1$(W/m·K)と計算した．

以上から求められた応答局面近似式を次式で示す．

$$\begin{aligned} T = \beta_0 &+ \beta_1(x_1 + 12.4)^{-1} + \beta_2(x_2 + 44.1)^{-1} \\ &+ \beta_3(x_1 + 12.4)^{-2} + \beta_4(x_2 + 44.1)^{-2} \\ &+ \beta_5(x_1 + 12.4)^{-1}(x_2 + 44.1)^{-1} \end{aligned} \tag{26}$$

4.3 二次多項式型と提案型の比較

提案する近似式の有効性を確認するため，二次多項式と比較する．二次多項式で構成される近似式を二次多項式型とし，本研究で提案した近似式を提案型とする．

パラメータ範囲を設定する．今回，設計変数 x_1, x_2 とも電子機器で一般に用いられる材料を考慮し，10～400(W/m·K)とする．設計点の数は11個と設定し，設

表1 デザインパラメータ x_1, x_2

	設計変数 x_1	設計変数 x_2
L [m]	0.002	0.003
S [m^2]	0.0004	0.0004
r_1 [K/W]	0.2	1.3
r_2 [K/W]	4	0.4
A	12.4	44.1

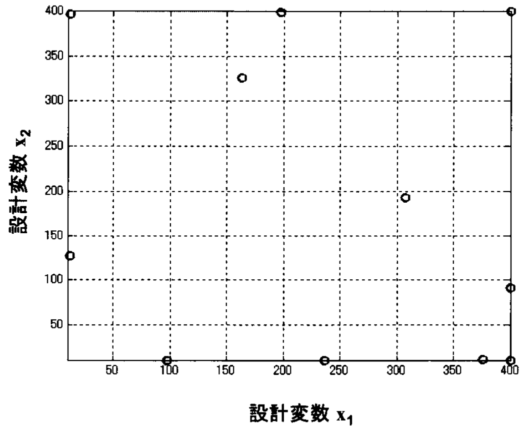

図8 二次多項式型の設計点

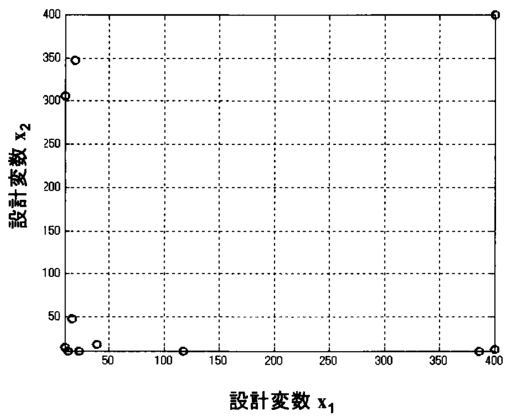

図9 提案型の設計点

計点の選択基準には，D-最適基準を用いた．**図8**に二次多項式で用いた設計点の位置を，**図9**に提案型で用いた設計点の位置を示す．提案型である図9の設計点は，線形化後の設計範囲 $0.04464 \le (x_1 + 12.4)^{-1} \le 0.00242$ および，$0.01848 \le (x_2 + 44.1)^{-1} \le 0.00225$ で実験計画をおこない，その結果を再び線形化前の範囲に戻したものである．したがって，二次多項式型と提案型とで選択する設計点の位置が異なっている．提案型の選択では，x_1 軸，x_2 軸付近に重きが置かれていることがわかる．選択された設計点が示す設計変数を熱解

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

析の入力値とし，設計点の数だけ熱解析を実行した(11回実行)．そして，各参照点において応答値である温度データを得たあと，それらの温度データから設計空間全体の温度分布を推定する．

3つの参照点の中で最もその比較がわかりやすかった参照点P3において，二次多項式型の応答曲面を**図10**，提案型の応答曲面を**図11**に示す．また，近似の程度を確認するため，設計空間を63×63に分割し，それぞれ格子座標が示す温度値をプロットした解空間を**図12**に示す．

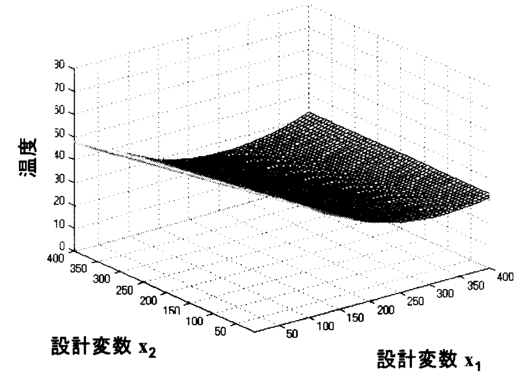

図10　二次多項式型(参照点P3)での応答曲面

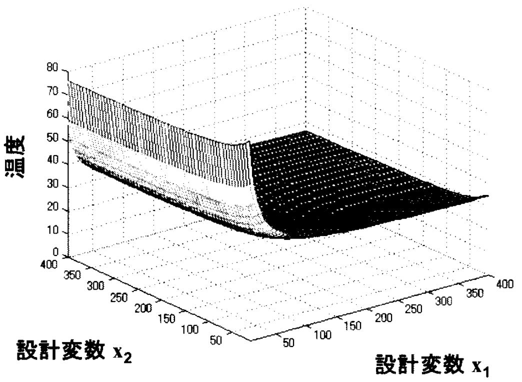

図11　提案型(参照点P3)での応答曲面

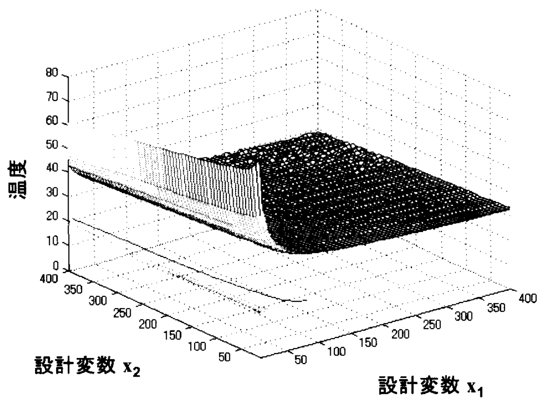

図12　解空間(参照点P3)

さらに，63×63の設計座標点それぞれにおいて，解空間から得られた温度値と二次多項式型で得られた温度値との差の絶対値を**図13**に示す．解空間から得られた温度値と提案型で得られた温度値との差の絶対値を**図14**に示す．また，二次多項式型と提案型において，各座標点での温度差の平均と分散を計算した結果を**表2**に示す．

参照点P3では，二次多項式型より提案型のほうが設計空間全体でよい近似を得ていることがわかる．

さらに，他の参照点P1，P2での温度差の平均と分散をそれぞれ**表3**，**表4**に示す．

参照点P1では，二次多項式型のほうがよい近似を得たが，他の参照点では提案型のほうがよい近似を得たことを確認した．熱伝導法則を考慮した近似式は，設

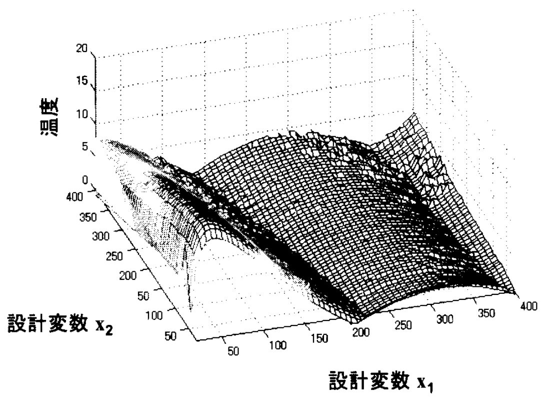

図13　二次多項式型(参照点P3)での解空間との温度差

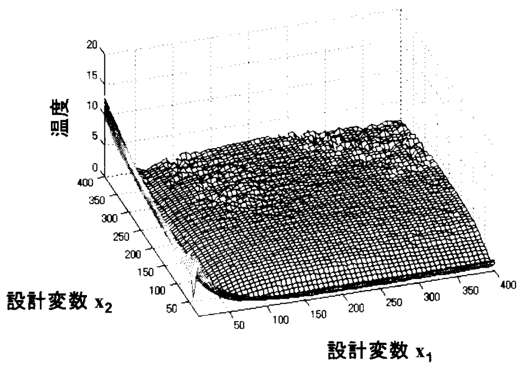

図14　提案型(参照点P3)での解空間との温度差

表2　参照点P3における比較

	二次方程式型	提案型
平　均	2.2761	-1.3999
分　散	34.1011	8.5999

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

表3　参照点P1における比較

	二次方程式型	提案型
平　均	0.0956	0.1153
分　散	0.0499	2.4744

表4　参照点P2における比較

	二次方程式型	提案型
平　均	2.0156	0.3934
分　散	47.4883	9.8279

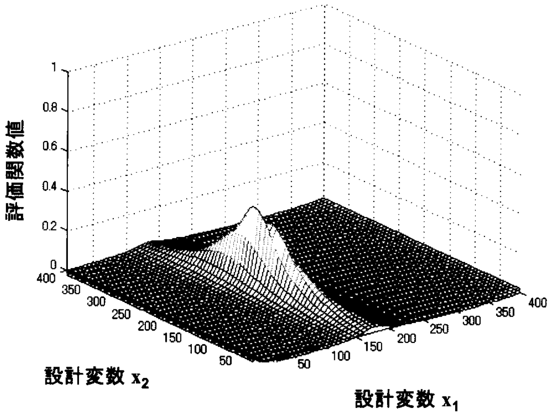

図15　二次多項式型での評価関数

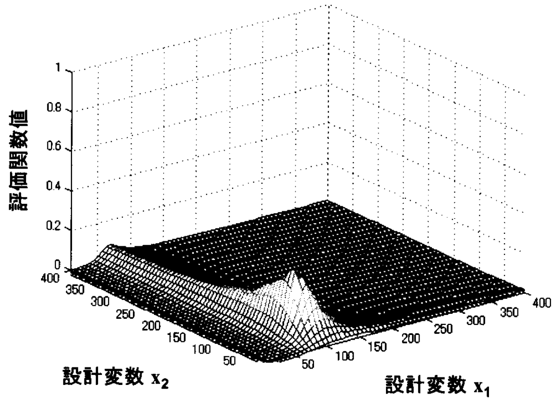

図16　提案型での評価関数

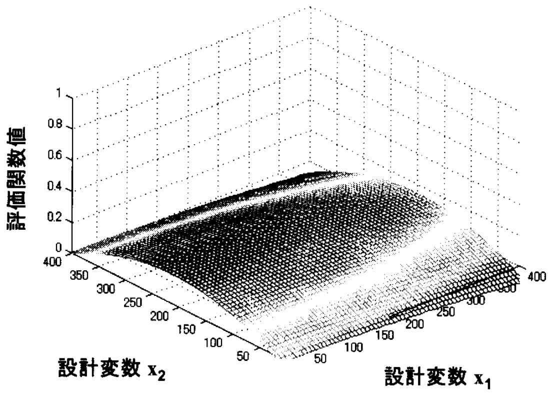

図17　従来手法での評価関数

計空間全体の温度分布を近似するのに有効であると考える．

4.4　パラメータの最適化

各参照点で計算された応答曲面を評価関数に代入し，評価関数を構築する．二次多項式型と提案型から求められる評価関数の結果をそれぞれ**図15**，**図16**に示す．また，各参照点において，熱伝導法則を用いた応答局面を応用しない従来の手法によって評価関数を近似した結果を**図17**に示す．さらに，設計空間を63×63に分割し，それぞれ格子座標が示す評価関数をプロットした解空間が図1である．

決定する最適なパラメータは，構築された評価関数の最大値が示す設計変数である．それぞれの評価関数において，最大値が示す設計変数を求める．その結果を**表5**に示す．なお，解空間での設計変数は，参照温度を計算したときの設計変数 $x_1' = 100$(W/m·K)，$x_2' = 100$(W/m·K)である．また最適化手法の結果を比較するため，解となる座標点と決定された座標点との距離を計算して，表5に示す．

表5から，温度分布を応答曲面で近似し，その結果から評価関数を構築する手法は，評価関数を応答曲面で近似する従来の手法と比較して，有効であることを確認した．さらに，温度分布の近似に本研究で提案する近似式の利用が，パラメータの最適化に有効であることを確認した．

表5　各手法のパラメータ最適化精度比較

	設計変数 x_1	設計変数 x_2	解との距離
二次方程式型	169.20	206.90	113.30
提案型	84.63	53.92	48.57
従来手法	10.00	201.60	135.70
解	100.00	100.00	0.00

5.　結　言

応答曲面法を用いて温度分布を効率的かつ精度良く近似するため，熱回路網法を利用した，熱伝導法則に基づく応答曲面の近似式を提案した．さらに，温度分布を近似した応答曲面から評価関数を構築し，パラメータの最適化をおこなった．本研究では，温度分布

NII-Electronic Library Service

Japan Society for Simulation Technology

の近似において提案型近似式の方が，一般に用いられる二次多項式と比較してよい近似を得たことを確認した．また，提案したパラメータ最適化手法は，評価関数を応答曲面で近似する従来の手法に比べ，有効であることを確認した．

今回，適用したコンパクトモデルでは，提案型近似式を構成する α 値が，簡単に求められる単純なもので評価を行った．今後，α 値の信頼性を検証するため，α の変化に対して応答曲面の近似度がどれほど変化するか確認したいと考える．さらに，コンパクトモデルがより複雑になった場合，熱回路網法を用いてどのように近似式を構築するかが今後の課題となる．

参考文献

1) 小山田 耕二，西尾 俊彦，山田靖治，小寺 秀俊：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，日本機械学会論文集B，**65**-632，1370/1376（1999）
2) Raymond H. Myers, Douglas C. Montgometry : Response Surface Methodology , John Wiley & Sons. Inc（1995）
3) 轟 章：応答曲面法，日本機械学会，No.99-73講習会教材，11/23（1999）
4) 小山田 耕二，葛野 正典，西尾 俊彦：熱設計用コンパクトモデル計算における応答曲面法の利用，日本機械学会，No.00-27 第4回最適化シンポジウム講演論文集，187/192（2002）
5) 国峰 直樹：エレクトロニクスのための熱設計完全入門，日刊工業新聞社（1998）

NII-Electronic Library Service