

熱境界条件の最適化とエンジン部品への適用

Optimization of the Heat Boundary Conditions and its Application for Engine Parts

安藤剛廣 Takehiro Ando

笠原広規 Hiroki Kasahara

● (株) ワイ・イー・シー システム部

要 旨 構造解析における熱境界条件の決定作業には、解析者の知識や経験だけでなく多大な工数を必要とする。この熱伝導計算結果を実測温度に近づけるための熱境界条件最適化システムを開発し、エンジン部品に適用したところ、工数は従来の1/5程度で計算温度誤差の大幅な改善ができた。

1 はじめに

市販の構造解析ソフトが近年盛んに取り組んできたテーマの一つが形状最適化であるが、依然として計算結果に大きく影響する境界条件の決定には、構造解析者の経験と知識が要求される。

一方、熱問題における熱応力と熱変形計算の精度を上げるには、熱伝導計算の結果である温度分布が充分に妥当なものであることが前提条件となる。しかし熱伝導計算の境界条件の一つである熱伝達率は、実際の問題に適用できる参考文献が少なく、また直接測定もできないために、計算した温度が実測値と一致するように何度も修正するという厄介な作業が必要であった。

今回、計算温度が実測値に一致するような熱伝達率を自動的に求めるシステムを開発し、エンジン部品に適用したところ、良好な結果を得たのでここに紹介する。

2 実験装置および方法

計算温度が実測データに一致するような熱伝達率を求める問題は、「目的関数 $f(X)=r$ に対し、 $\|r\|$ を最小にする変数 X を決定する」という数学問題に置き換えることができ、各種の最適化手法が利用できる。ただし、変数 X は熱伝達率、目的関数 $f(X)$ は計算温度と実測値の誤差とする。

本システムでは1次の感度（傾斜）ベクトルを使用するガウスの反復法を使用した。第 k 段階目における近似解 $X^{(k)}$ が分かっているとき、第 $k+1$ 段階目の近似解 $X^{(k+1)}$ における誤差関数を $X^{(k)}$ のまわりにTaylor展開して2次以降を無視すれば、

$$\begin{aligned} f(X^{(k+1)}) &= f(X^{(k)} + s^{(k)}) \\ &= f(X^{(k)}) + A^{(k)} s^{(k)} \\ &= r^{(k+1)} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに $A_{ij}^{(k)} = \frac{\partial f_i(X^{(k)})}{\partial X_j}$ が感度である。

$r^{(k+1)}=0$ であるための修正ベクトル $s^{(k)}$ は

$$f(X^{(k)}) + A^{(k)} s^{(k)} = 0 \quad (2)$$

を満足する解であり、第 $k+1$ 段階目の近似解は

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + s^{(k)}$$

として求められる。

計算手順を図1に示す。感度係数は熱伝導計算結果から求め、修正ベクトル $s^{(k)}$ は(2)式をニュートン・ラフソン法で解いて求めた。熱伝達領域分割数を n ヶ所とし、 m 回の繰り返しで収束した場合は、 $1+m \times (n+1)$ 回の熱伝導計算が必要になる。

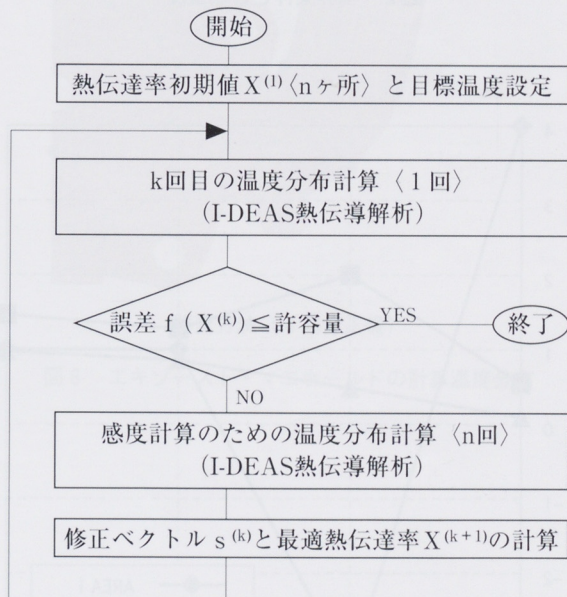


図1 計算手順

3 検証結果

図2に示す断面の構造物を仮定した熱伝導モデルに対し、図示した熱境界条件での熱伝導計算結果である温度と熱伝達率を目標値とした。

熱伝達率には適当な初期値を与え、目標値への収束状況を確認したが、その結果を図3に示す。

計算温度誤差の変化を図4に示すが、修正3回目で温度誤差1.8℃に収まった。なお、計算温度分布を図5に示す。

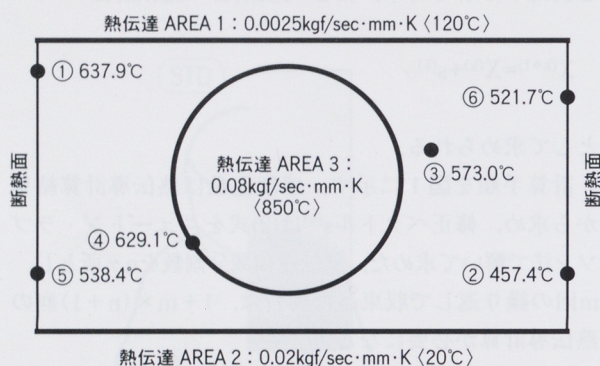


図2 境界条件と目標温度

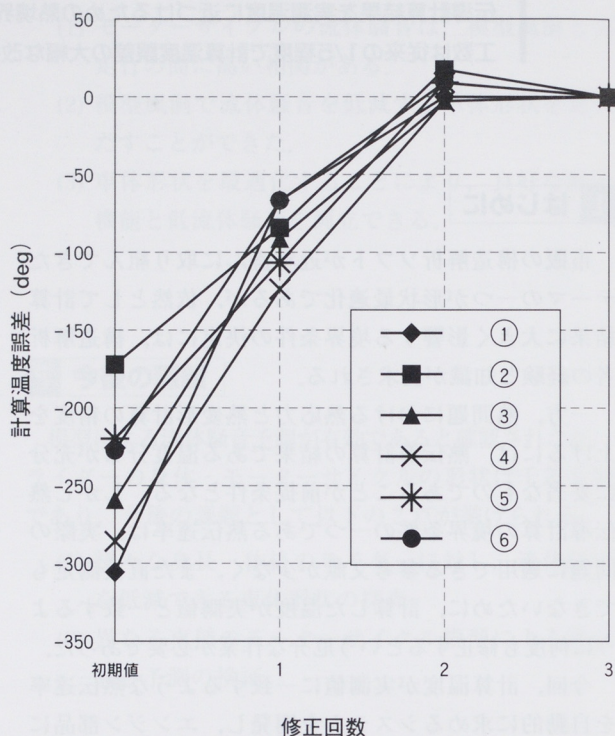


図4 計算温度誤差の変化

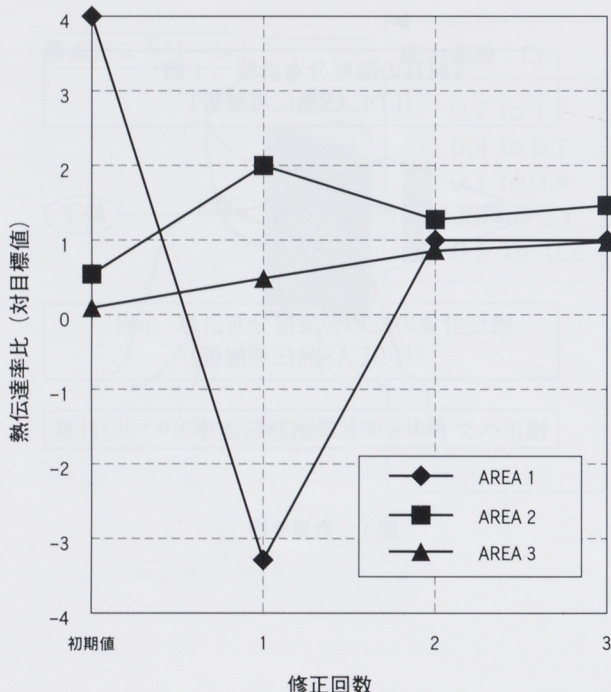
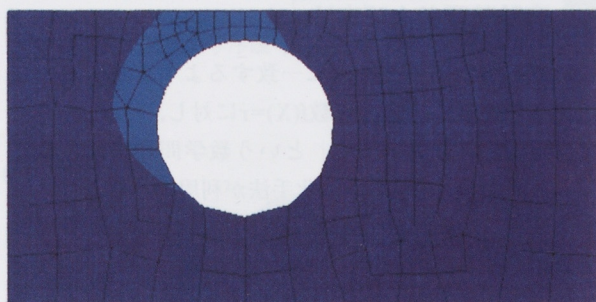
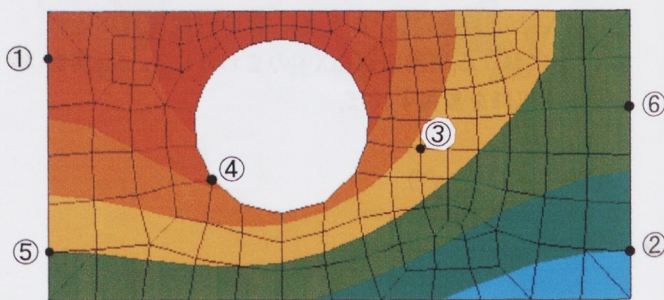


図3 熱伝達率の変化



初期の温度分布



修正3回後の温度分布

図5 計算温度分布

4 適用例

4.1 エキゾースト・マニホールド

10ヶ所の目標温度に対し、3ヶ所の熱伝達領域を最適化した結果を図6～図8に示す。最高温度約800℃に達する実測目標温度に対し、修正4回で誤差35℃以下になった。ちなみに従来の方による方法では修正10回で誤差47℃であった。

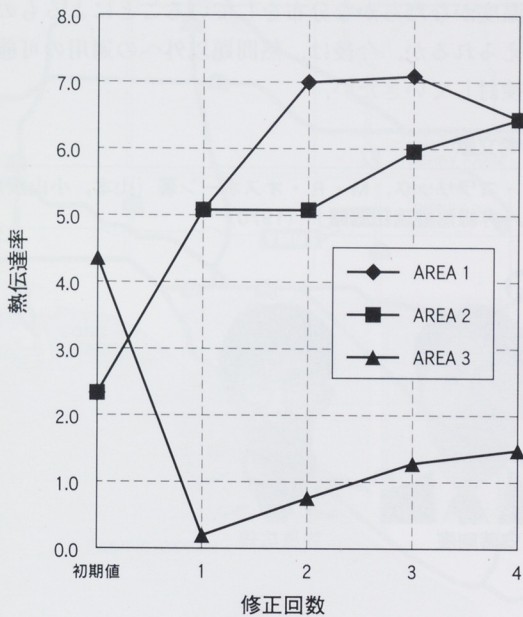


図6 熱伝達率の変化

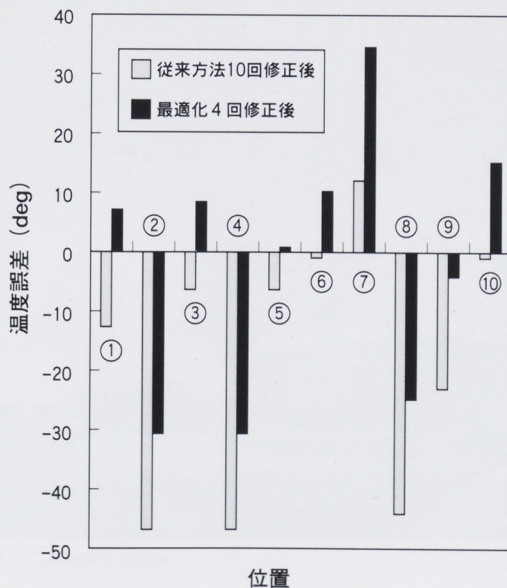
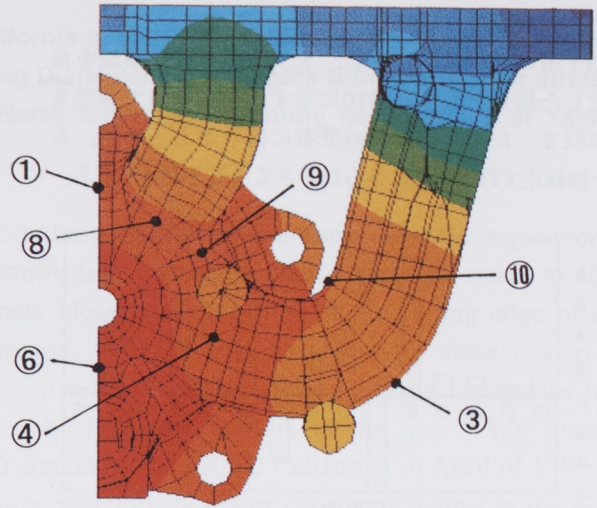
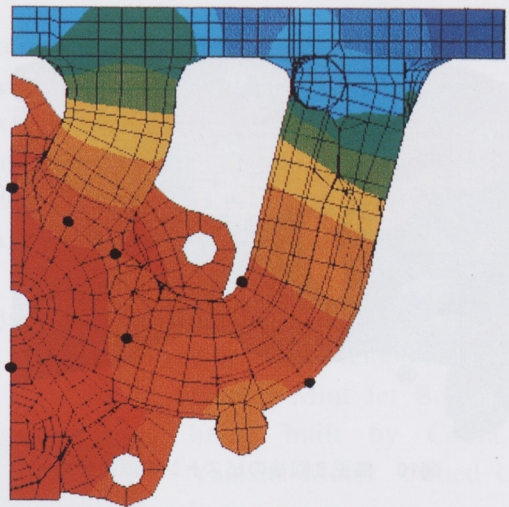


図7 計算温度の誤差



従来方法（10回修正後）



開発方法（4回修正後）

図8 エキゾースト・マニホールドの計算温度分布

4.2 ピストン

15ヶ所の目標温度に対し、7ヶ所の熱伝達領域を最適化した結果を図9と図10に示す。修正3回で誤差9℃に収まった。まだ誤差の分布に偏りがあるので、もう一回修正すれば誤差はさらに小さくなると期待できる。

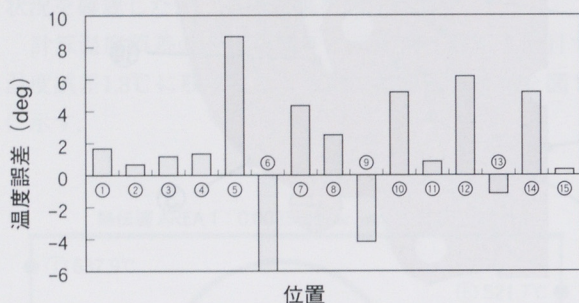


図9 計算温度誤差

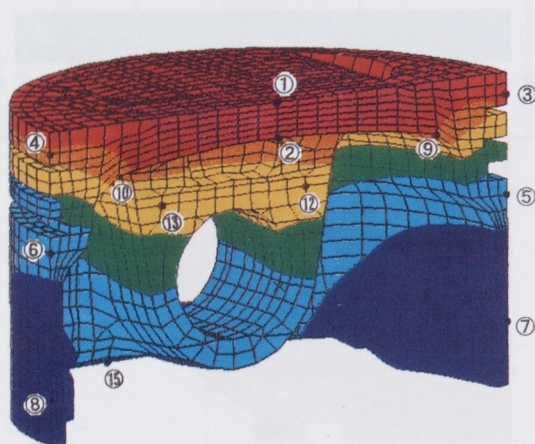


図10 修正3回後のピストンの温度分布

さらに、効率よく最適な熱伝達率に到達するためには、物理的に妥当性のある領域分割や初期値についてのノウハウがやはり必要になるが、本システムによる収束結果を分析することでこれらのノウハウ蓄積も容易となるはずである。

本システムでは、ベーシックな最適化手法を用いているが収束性に大きな問題はなく、その後の適用事例も増えているがどれも良好な結果を得ている。これは、温度がなだらかな分布をしていることによるものと考えられるが、今後は、熱問題以外への適用の可能性も検討していきたい。

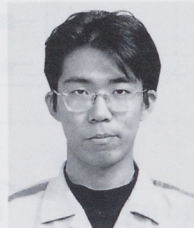
参考文献

- (1) J・コワリック, M・R・オスボーン著 (山本, 小山訳)
: 「非線形最適化問題」 (1970)

著者



安藤剛廣



笠原広規

5 今後の課題

今回開発した熱伝達率最適化システムにより、経験者が多大な工数をかけて熱境界条件を見つける作業は不要になり、特別なノウハウがない未経験者でも短時間で最適な熱伝達率に到達でき、高精度な温度分布が得られるようになった。

ただし、熱伝導計算自体は本システムとは別個に行う必要があり、操作上の煩わしさが残っているため、今後は初期値を入力するだけで最適値が求められる完全自動化システムを目指し、一層の解析効率の向上を図りたい。