

自動車部品の熱解析技術

Heat Transfer Analysis for Vehicle Electronic Parts

真下 啓治*
Keiji Mashimo

斉田 幸弘*
Yukihiro Saita

小泉 健*
Ken Koizumi

中里 秀樹*2
Hideki Nakazato

概要 本報では自動車部とりわけ回路基板タイプJB (Junction Block) に焦点をあて、その熱解析技術について述べる。JBにはヒューズ及びリレー類が集中配置されており、それらに接続される電気回路が形成されている。電気回路を構成するには、バスバー・電線・回路基板などを用いる。どの方法が有利になるかは仕様によって異なってくる。自動車の電子化の進展により、熱対策の重要度は増大する一方である。JB類の計算機による熱解析の技術課題としては、簡便なモデル化と必要精度の両立が重要である。これを実現すべく我々は部品のモデル化とCAD連携手法の開発に成功した。供試JBに対しては±5%程度の誤差を実現した。

1. はじめに

自動車の電子化の進展は著しいものがある。1980年から1990年までの10年で回路数は約4倍、ワイヤーハーネス長は約3倍に増加した。回路数がこれだけ増えるということは、これに伴って接続されている機器、接続部、更に回路自身からの発熱量が大きく増大する結果となる。発熱量が単純に回路数に比例して4倍になったとすると、これを放熱するには表面の熱伝達率が同じとして4倍の表面積が必要となる。実際には表面の熱伝達率は形状・寸法に依存するが、およその計算であるからそこは無視するとして4倍の表面積を稼ぐには相似形の容器なら8倍の体積が必要ということがわかる。深刻な問題であることが理解されよう。実際には各部の発熱量を抑える工夫を行ってきた結果、発熱量がそのまま4倍ということはないが、今後も自動車の電子化が進む見通しであるから熱対策の重要性が減ずることは当面ないと考えられる。

特にJBは発熱するリレー・ヒューズなどが狭い箱の中に集中配置されていることから、放熱しにくい構造となっており熱設計が特に重要な位置をしめる部品である。図1に比較的回路規模の大きいJBの外観を示す。歴史的事実から言えば、初期のころはそもそも発熱量が小さいうに、設置スペースにも余裕があったため、安全サイドで設計することができた。そのような状況なら精密な熱解析に基づく設計は省略可能である。これに対し近年は上述したような事情から解析的アプローチは必須になりつつある。また開発期間中を含むマイナーな設計変更にはすばやく対応する必要があることから、操作の簡便さと実用性を満足する程度の精度を両立させることが要求される。

本報では、これらを踏まえて開発を行ってきた熱解析技術の、これまでの成果を報告する。本開発では回路基板タイプJBを題材として、計算機による解析的アプローチを主体としている。ただし極力汎用性のある解析ツールの開発に努め、特定の構造のみに限定されず広く適用可能なものを目指してきた。その過程でわかったことは、あまりにも汎用性を求めすぎると、簡便なツールとしての良さが損なわれるというトレードオフの関係である。結局はプリプロセッサとしてほどほどに汎用的、ほどほどに限定的なものを採用するに至っている。具体的には形状特徴の限定をかけることになる。例えば、「基板上に部品が配置されたユニットが複数枚あるようなもの」という限定をかけたも、部品配置や基板の枚数の変更には容易に対応できるようなソフトであれば実用的価値があると考えている。今後必要に応じてソフト開発を行っていけば、将来的にはソフトウェアモジュール群としてより汎用性の高いものが構築できることになる。

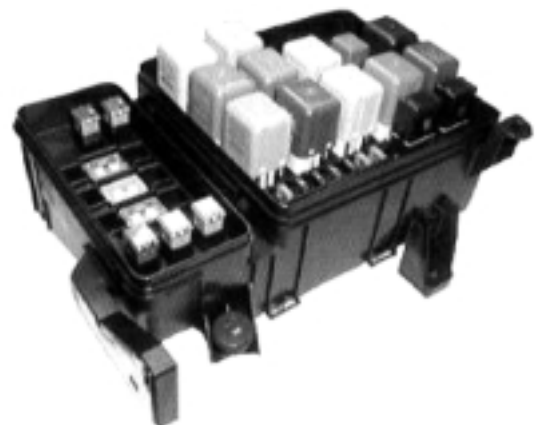


図1 JB外観例
Appearance of a junction block

* 自動車電装技術研究所

*2 自動車部品事業部LM開発プロジェクトチーム

2. 回路基板タイプJBの熱設計

回路基板タイプに限らずJBの熱設計の根幹をなすのは以下である。

- ・総発熱量と放熱能力の関係
- ・回路部のジュール熱による局所の温度上昇
- ・実装部品類の発熱による局所の温度上昇

以下回路基板タイプJBの例に即して簡単に整理しておく。

(1) 総発熱量と放熱能力の関係

総発熱量を各部の発熱量の総合計として見積もり、その値を \dot{Q} [W]とおく。平均熱通過率を $[W/m^2K]$ 、放熱に際し実効的な表面積を $A[m^2]$ とおく。また温度上昇平均値を $T[K]$ とする。

すると以下の関係式が成立する。

$$\dot{Q} = A T \quad \text{すなわち}$$

$$T = \dot{Q} / A$$

これによって計算される T が設計上許される温度上昇値を下回っていることが必要である。上回っている場合は設計の見直しが必要ということになる。

(2) 回路部のジュール熱による局所の温度上昇

図2は横軸に回路パターン電流流路断面積、縦軸に許容電流を示したものである。基本はジュール発熱と放熱のバランスがとれる温度上昇値を求めるということにある。回路基板の場合も、電線の許容電流の計算と考え方は同じであるが、基板が放熱板の役割を若干担っていることを考慮する必要がある。銅箔が非常に厚い領域ではその放熱板としての効果が大きくなる。放熱板の効果はパターン間のギャップにも依存するのでそれも計算に入れたうえで最適な銅厚を求めることができる。ただし実際の設計では材料調達のしやすさなども別途検討のうえ銅箔厚さを決定する必要がある。

(3) 実装部品類の発熱による局所の温度上昇

実装部品は通常複雑な内部構造を持ち、忠実なモデル化には手間がかかりすぎるという問題がある。しかも端子の接続形態(差込み、はんだなど)によって発熱量が変化するばかりではなく基板に熱が持ち込まれる際の熱抵抗も変わってしまうことがやっかいである。本開発ではこの問題を解決するためのアプローチを行い、モデル作成の簡単化に成功している。これについて次項でやや詳しく説明する¹⁾⁻³⁾。

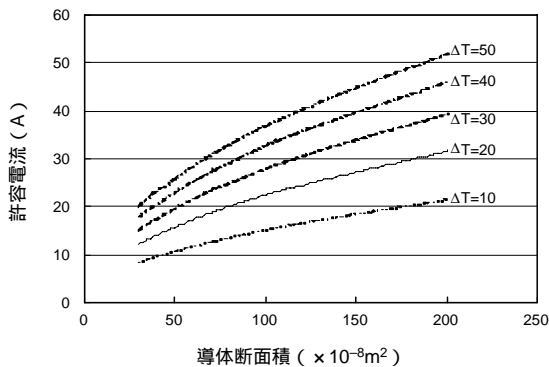


図2 導体断面と許容電流の関係
Permissible current vs. cross section of conductor

3. 実装部品のモデル化について

JBにおいてはリレーとヒューズが主な部品である。その中でもリレーは比較的複雑な内部構造をもっているため、そのまま忠実に計算機に入力しようとするとなかなか手間がかかる。仮に入力できたとしても計算機のメモリー容量などへの負担が大きすぎるといった結果を招いてしまうので、簡単なモデルに変換することが必要である。また車種によっては電子化が非常に進んだ結果、リレーの発熱がJBの発熱の主要な熱源となっている。そうなる簡単なモデルといえども精度を備えていなければ使い物にならないということになる。我々はリレーのモデル化の具体的な課題として主に次の二つをとりあげ、検討を重ねた結果、計算モデルの簡略化に成功し、その妥当性を確認した。すなわち「内部構造の簡略モデル化」と「端子接続部のモデル化」である。以下それぞれについて述べる。

(1) リレー内部構造の簡略モデル化

リレーの内部構造を無視して単に簡単な構造のモデルを形成した場合、計算精度が犠牲になってしまう。我々はリレーの内部構造を詳細に観察した結果をもとに考察と実験を行い次のような結論を得ることができた。すなわち、リレーの熱抵抗は比較的簡単な熱回路網で表現しても十分な精度を実現できる。その熱回路網とは図3に示すようなものである。ここでは熱抵抗を各成分に分けて計算し、最終的に合成抵抗を求めるという手法を採用する。ここで R_1 と R_2 は電流端子の熱伝導抵抗である。また R_5 はリレーのケースの熱伝導抵抗を表している。 R_3 はコイルからケースへ R_6 はケースから外気への放射熱伝達抵抗である。更に R_4 と R_7 は対流熱伝達抵抗を表している。合成抵抗 $R_{overall}$ は以下の式で計算できる。

$$\frac{1}{R_{overall}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} + R_5 + \frac{1}{\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7}}}$$

熱抵抗の各成分を計算するには各部の寸法、熱伝導率、放射率などが必要となる。これらの抵抗値の中で熱伝導抵抗については寸法と材料物性から確定できるのでよいが、自然対流抵抗は温度差によって抵抗率が変化してしまうし、放射抵抗は温度そのものに依存することから、若干工夫が必要となる。一般的には、各部の温度を仮定して熱抵抗を計算し、その熱抵抗の値

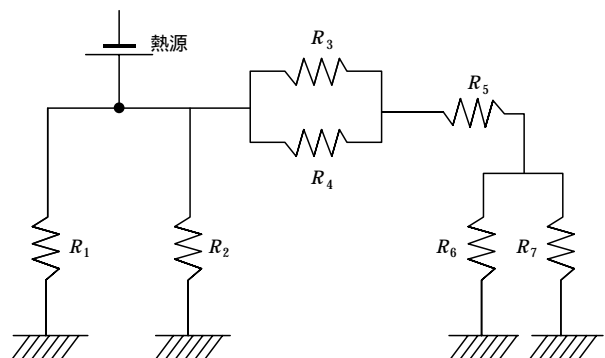


図3 熱回路網
Thermal resistance network of a typical relay

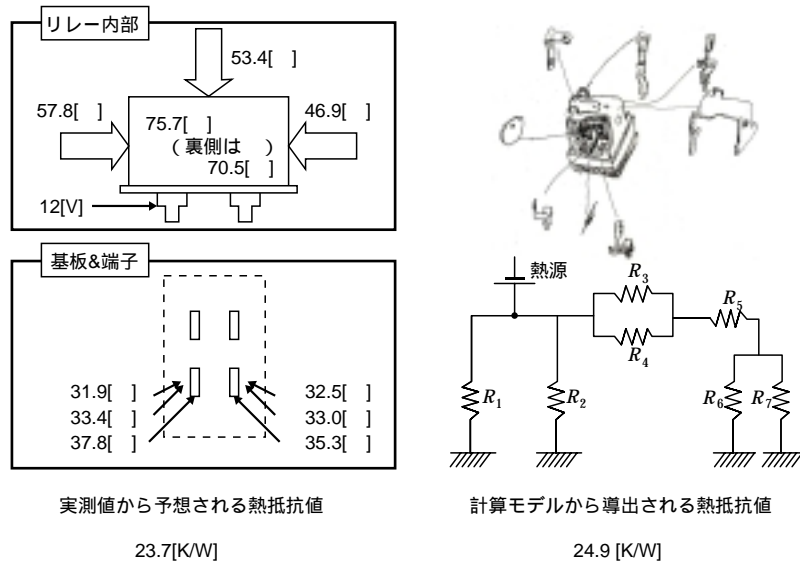


図4 実測と計算による熱抵抗値の比較
Verification of modeling

から各部の温度を求める。さらにその値を用いて熱抵抗を計算するという操作を温度の値が収束するまで繰り返すことが必要になる。しかし熱抵抗計算に必要な温度は概算値を用いても大きく精度に影響しないため、全体の熱収支から求めた概略温度分布を用いてそのまま結果を導いても問題ないことが多い。特に同種のJBで筐体(きょうたい)内雰囲気温度を測定してある場合、雰囲気温度そのものは大きく変わらないので、熱抵抗を容易に計算できることになる。

図4にリレー動作中各部温度実測に基づく熱抵抗値と、熱回路網から計算した熱抵抗値の比較を示す。10%以内の誤差におさまることがわかり、実用レベルとして十分な精度といえる。したがってモデルの妥当性が確認できたと考える。

(2) 端子接続部のモデル化

部品を基板に接続する方法はいろいろあるが、現状において一般的であるはんだ接合の場合について説明する。はんだ接合には大きく分けてスルーホールタイプと表面実装タイプがある。回路レイアウトの高密度化の観点からは表面実装タイプが望ましいが、信頼性設計などの点で難しい部分もあり、特に重量の重い部品は表面実装に対応が難しいという現状がある。種々の検討は内外で進んでおり、将来的には状況が変わると考えるが、現状使用せざるを得ないスルーホール接合をモデル化するのはやっかいである。この場合は現実に忠実なモデルを採用すると、設計変更に対応するのが非常に困難となる。その主な理由は、接続部が3次元的に他の部材(ここでは基板)と入り組んだ構造をとることである。そこで形状は表面実装タイプで熱抵抗は現実と等価な、「仮想表面実装タイプジョイント」なるものを考案し、設計変更への対応を比較的容易ならしめるモデルとして提案するものである。図5(a)にスルーホールタイプジョイントの現実に忠実なモデルを、図5(b)に仮想表面実装タイプジョイントの例を示す。

上記モデルを採用することによって形状入力容易になるとともに設計変更への対応が格段に容易になる。しかし等価な熱

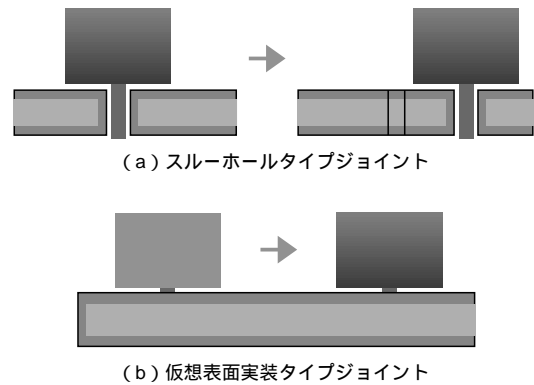


図5 接続部のモデル化
Model construction of a joint

抵抗を、異なる構造に無理やり当てはめている結果、局部的に熱流束が異常に大きい部分が出てしまう。このことは大局的な計算結果には影響を与えないものの、局所の温度分布に違いが出ることに繋がる。このことを理解して解析を行えば大きな支障はない。しかし我々は簡便なツールを最終目的としているので、次のステップで改善すべき課題ととらえている。

4. 要素自動分割プログラム

製品を製造するためには普通CADの図面を作成するわけであるから、それがそのまま熱計算などの解析に利用できれば、それに越したことはない。しかし人間には簡単に理解可能なことでも計算機にとっては意外に難しいというのがこの問題の本質である。例えば狭い隙間を持った構造や張り合わせ構造の取り扱いをどうするかを、CAD図面から計算機に自動的に判断させるのはかなり難易度が高い。現状では不可能に近い。

隙間の判定や充填、非充填の決定を人間が行い、3次元形状が計算機に理解できる点集合で与えられているという前提なら、先人の開発した手法で自動分割を行うことができる^{4), 5)}。また狭い隙間や重なり構造(箱に蓋をかぶせてあるような場合

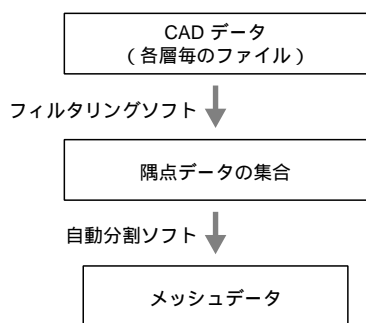


図6 CAD連携メッシュ生成フロー
Automatic mesh generation flow

など)がなければかなり複雑なCAD図面からメッシュを自動生成できる市販ソフトも最近は出回っている。しかしその前提でも全く問題がないわけではない。すなわち市販の自動分割ソフトは基本的に4面体メッシュ生成である。4面体でも有限要素法などの解析はできるが6面体メッシュに比べ多少欠点がある。少なくとも6面体のほうが接点数を少なくできるメリットを有する。またある種の解析では4面体では精度を確保できない。6面体の汎用自動分割ソフトはいくつかのグループが開発に挑戦中であり現在までのところ完成したという報告はない。我々の当面の題材は直方体が基本となって構成される形状がほとんどなので、6面体のほうがフィットしやすいはずであり、これをわざわざ4面体分割するのは合理的でない。

そこで我々は図6のフローに示されるような手順で、計算機に形状を教え込んだ後自動で要素分割を行う方法を編み出し、ある程度の成功を収めている。最初に準備するCAD図面は普通に用いられるCAD図面とはやや異なるものである。すなわち対象となる3次元のドメインを何層かに分割し、層ごとに2次元の線画を準備する。この2次元の線画の集合体をここではCADと定義する。このCADから必要最低限の隅点をフィルタリングソフトによって抽出する。更に自動分割ソフトを用いてこの隅点情報からメッシュを自動生成できることになる。このフィルタリングソフトと自動分割ソフトは我々独自の考案によるものである。フィルタリングソフトの役割としては各層の線画から頂点情報を取り出し、解析には必要でない冗長な情報をカットすることにある。また自動分割ソフトはこの取り出された頂点情報から3次元構造を再構築し、構造化メッシュという手法で6面体メッシュを自動生成する。構造化メッシュ法が使用できるのは、対象となるドメインが各座標軸に平行な線分で構築されている場合である。すなわちこの場合のように直方体ベースの構造に適する手法ということになる^{6),7)}。図7に基板JBの内部構造の一例を示す。

この方法は基板タイプJBのような題材には実際うまく適用可能であることを確認した。図8に自動メッシュ生成の例を示す。ただしこの方法が適用可能な形状にはある程度限定がかかってしまう。それは形状特徴として直方体をベースとして構成されていることが必要ということである。逆にJB類に使用される部品は、基板・リレー・ヒューズなど外形が直方体で形成されるものがほとんどなので、この手法にフィットしやすいということもできる。直方体が基本形ではない対象には、またそ

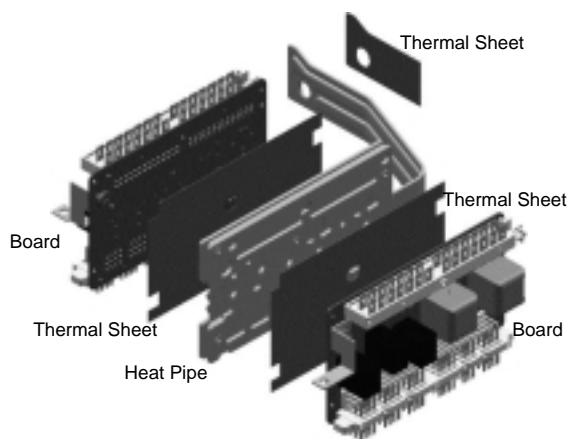


図7 基板JBの内部構造
Inner structure of a junction block

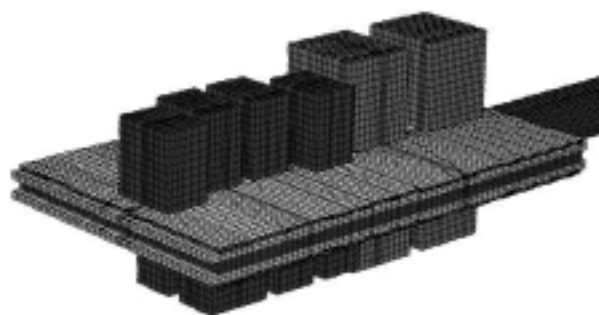


図8 自動メッシュ生成例
Mesh generation example

の形状特徴に応じた別の自動分割ソフトを用意すればよいことになる。

5. 解析結果

(1) 伝熱解析結果

実際の回路基板タイプJBをモデル化し計算を行った結果と各部の温度を実測した結果を比較してみた。図9は計算と実測それぞれについて基板上の温度分布を比較したものである。図10は横軸に実測値、縦軸に計算値をとり、基板上のいくつかの点についてプロットしたものである。いずれの図においても図中の T は温度上昇値を表し、単位はケルビン[K]である。この例では誤差として5%程度という結果を得ている。現状の温度測定精度から考えても解析の常識から考えても実用上十分な精度を、原理的に確保できたと考えている。ただし実際の応用においては1 mm程度の非常に細かい構造の温度に興味がある場合があり、それに対しては現状のモデルでは対応しきれない場合がある。主たる要因はモデルの単純化を行ったことにあるが、単純にモデルを精密化することは簡便なツールに相反するという問題を生じてしまう。次のステップにおける課題ととらえている。

(2) 解析時間

解析時間は大きくはモデル作成時間と計算時間に分けることができる。計算時間は市販のソルバーを使用する以上大きな差はない。また伝熱解析のような場合通常は計算時間よりもモデ

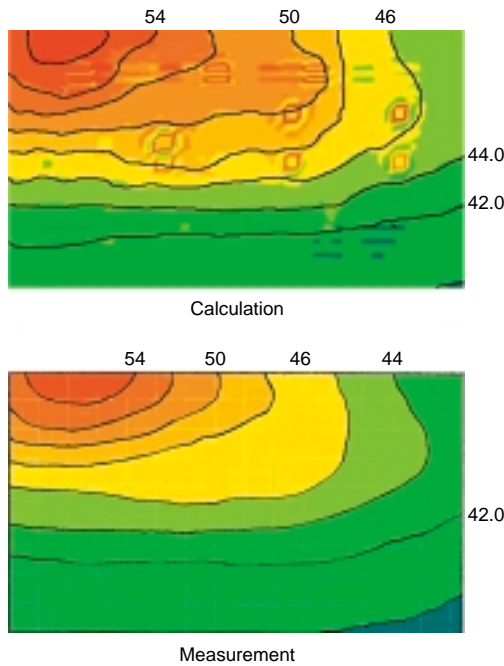


図 9 基板上の温度分布比較 (数字は T)
Comparison of temperature distribution

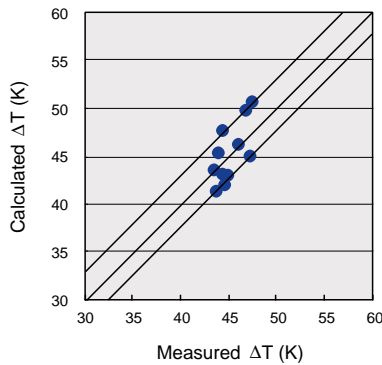


図 10 実測値と計算値の比較
Comparison of calculation and measurement

ル作成時間のほうが圧倒的に長くかかるので、これを短くするのは意味があるということになる。計算時間も実際にはメッシュの素性に依存するのであるが、ここではほぼ同じとして、典型的に 30 分程度と考えておいて差し支えない。モデル作成は従来の方法で行ったとして 3 日ほどかかったものが、本開発ソフトを活用すれば 1 日から悪くても 1.5 日程度に短縮できることを確認した。

6. 設計の最適化

従来手計算で行っていた基板レイアウトに、今回開発した解析ツールを適用し設計の最適化を試みた。手計算で設計を行うと平均的にしか解を求められないので、部品配置を変更することによる温度分布の変化まで予想することは困難である。これに対して計算機による 3 次元解析ならば温度分布の変化を予想でき、より最適な設計に近づくことができる。図 11 に一例を示す。この例では 20% ほど基板の投影面積を減少させることができた。

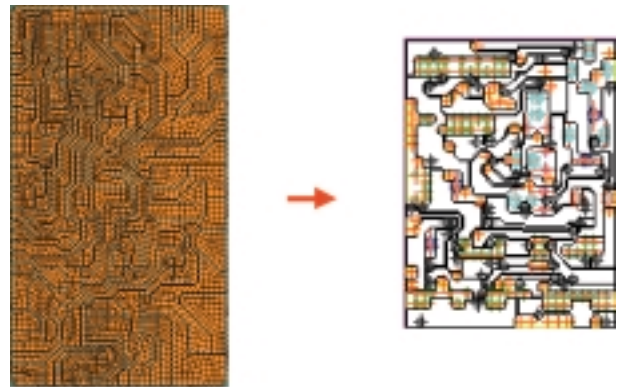


図 11 設計の最適化
Design optimization

7. おわりに

回路基板タイプ JB を題材として、新たに開発した部品のモデル化手法と、CAD 連携手法の妥当性を確認した。実際の基板設計にソフトウェアツールを適用し以下のような結果を得た。

- (1) 回路基板タイプ JB の 3 次元熱解析で基板上温度分布の誤差 5% を達成した。
- (2) 従来の半分程度の解析時間を実現できることを確認した。
- (3) 設計の最適化に適用した結果、基板部で 20% の重量減に成功した。

今後は更に簡便でかつ十分な精度を備えたソフトとしてレベル向上を図りたい。また可能な範囲で汎用性を高め、できるだけ広い範囲の部品に適用できるツールをめざす。

謝辞

本開発に惜しめない協力をいただいた岡山大学谷口研究室、富士通長野システムエンジニアリング、古河インフォメーションテクノロジーの皆さんに感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) T. Ikeya et al., Thermal Simulation of the Electrical Distribution Box, SAE 2001-01-0690, 2001.
- 2) Y. Oka et al., Investigation and Evaluation of the Wire Harness for the High Performance Components in the Vehicle, The Institute of Electronics Information and Communication Engineers, Technical Report R97-32, pp19-22, 1998.
- 3) K. Mashimo et al., New Approach of Computer Simulation for Heat Transfer in Automotive Parts, IPC2001D053, Nov. 2001, Shanghai.
- 4) T. Taniguchi, Automatic Mesh Generation Methods of Arbitrary 3D Domain, J. of Simulation Vol. 18, No.2, 1999.
- 5) T. Taniguchi and E. Fillion, Numerical Experiments for 3-dimensional Flow Analysis in a Fractured Rock with Porous Matrix, Advances in Water Resources Vol. 19, No. 2, pp 97-107, 1996.
- 6) M. de Berg et al, Computational Geometry, Springer, 2000.
- 7) A. Okabe et al., Spatial Tessellations 2nd ed., John Wiley & Sons, 1998
- 8) K. Mashimo et al., Development of the Simulation Tool for Vehicle Electronic Parts, SAE 2002-01-0569, Mar. 2002, Detroit