

車載用メタルコア基板 J/B の開発

Development of Metal Core Printed Wiring Board J/B for a Vehicle

向井重太郎* Jyutaro Mukai	田中光男* Mitsuo Tanaka	角田博和* Hirokazu Kakuta	原 敏孝*2 Toshitaka Hara	川 寄 伸 一*2 Shin'ichi Kawasaki
本間久雄*2 Hisao Honma	森山和幸*2 Kazuyuki Moriyama	中里秀樹*2 Hideki Nakazato	武脇広和*2 Hirokazu Takewaki	真下啓治*3 Keiji Mashimo

概要 2002年8月にマイナーチェンジされたトヨタランドクルーザは、トヨタでもレクサスブランドと位置付けされており、マイナーチェンジでありながら、大幅な装備仕様アップがされた。

必然的に電装部品の増加と居住性との板ばさみになり、ジャンクションブロック（以下J/B）の搭載スペース要件はますます厳しくなった。本開発では、これらを解決するため、部品の高密度化を実現させ、従来と同等スペースに搭載した『車載用メタルコア基板J/B』について報告する。

本開発は、今後、更に厳しくなる搭載要件に対しての1つの解決手段となる。

1. はじめに

近年、自動車の機能は利便性の向上等からますます増加する傾向にあり、これを裏で支えるワイヤーハーネス、電装部品も増加する一方である。

反面、ユーザーからは広い室内空間（ゆとりある居住性）が求められており、電装部品の搭載スペースを確保するのはますます難しくなっている。このため部品の小型化は言うまでもなく、これまで室内に搭載されていた部品までも一部をエンジンルームへ移動する傾向にあり、搭載環境条件を考え電装部品の低発熱化若しくは耐熱性能の向上が必要となっている。また、カーメカからは、燃費向上のための軽量化、開発投資額の削減、開発期間の短縮も強く要求されている。

以上の背景から、我々はこれまでのJ/B形態、すなわちバスバーJ/Bや布線J/Bとは別の形態を模索し、一つの解としてメタルコア基板J/Bを開発したので、以下報告する。

なお、今回報告する自動車用J/Bの将来の技術動向として、高機能化、小型・軽量化を狙いとし、現在使用されているメカリレーを半導体に置き換える傾向があり、この点においても基板化は有利であると考えている。

これまでエンジンルームに基板を搭載した例はあるが、これらは室内と同じ環境を無理に作り出して搭載しており、本J/Bのように直接エンジンルーム環境下に搭載し、しかも大電流を扱った例は他に無い。

2. メタルコア基板 J/B の開発

2.1 背景

自動車の電気回路を簡素化するために、一般的にJ/Bが使用されている。このJ/Bは、これまでは自動車のフルモデルチェンジ車の時期に、ボディ形状変更や装備仕様アップに対応するために新設されてきた。一方マイナーチェンジ車では、ボディ形状とJ/B変更無しで、短期間に小幅な装備仕様アップが図られていた。

しかし、今回開発した製品を搭載するトヨタランドクルーザは、マイナーチェンジ車でありながらユーザーニーズやライバル車輛の動向を踏まえ、大幅な装備アップを行うこととなり、客先であるトヨタ殿から、次の開発の狙いが示された。

- 1) 世界トップの信頼性
- 2) 大規模エレクトロニクスを支える機能性、拡張性の向上
- 3) 大規模エレクトロニクス対応と作りやすさの両立

本開発は、カーメカのニーズにこたえるべく、他社との差別化技術として開発を進めてきた『小型、軽量、開発期間の短縮』に効果のある『メタルコア基板J/B』の商品化を前倒しして進めたものである。

2.2 J/B 要求仕様

表1 現行と要求仕様の比較
Comparison between existing and required specifications

項目	現行仕様	要求仕様	仕様差
回路数	153	206	+ 53
ヒューズ本数	27	32	+ 5
リレー本数	14	21	+ 7
搭載面積 (mm)	L160 × W250	L160 × W250	± 0

* 自動車部品事業部 電装部品技術部

*2 自動車部品事業部 LM開発プロジェクトチーム

*3 自動車電装技術研究所

2.3 J/B 開発目標

客先からは 2.2 項の要求のほか、軽量化、開発費用削減、開発期間短縮の要求もあり、下記の具体的目標を立てて開発を進めた。

- 1) サイズ・・・現行同等
- 2) 質量・・・ 30% (従来工法バスバー J/B 比)
- 3) 生産性向上
- 4) 品質向上
- 5) 金型投資額削減・・・ 50% (従来工法：バスバー J/B 比)
- 6) 開発期間短縮・・・回路部 3ヶ月 (従来工法：バスバー J/B 比)

2.4 メタルコア基板 J/B の構造

図 1 にメタルコア基板 J/B のアッパーカバー、ロアーカバーを除く分解斜視図を示す。

本開発品は、上下のカバー、ケース、ベースブロックと開発

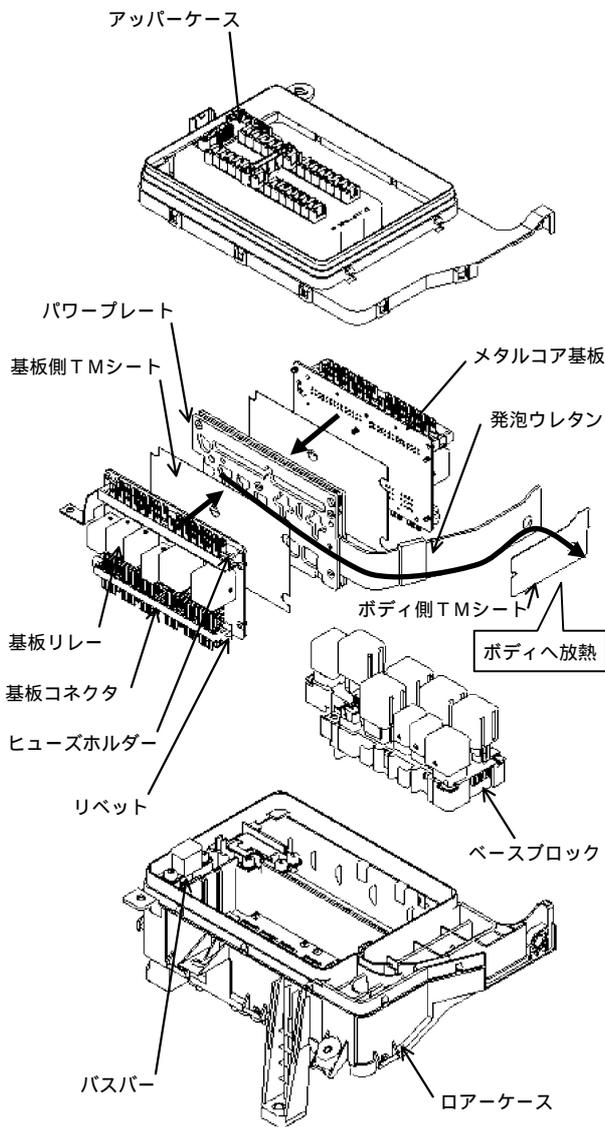


図 1 開発品の分解斜視図
Squint chart where metal core printed wiring board J/B was decomposed

主要部分であるパワープレート基板 ASSY 部品から構成されている。パワープレート基板 ASSY は、パワープレートの両面に TM シートを介して、基板リレー等を実装したメタルコア基板を組み付けたものである。メタルコア基板は、基板リレー等の電気部品の発熱を均熱化し、TM シートは、損失少なくパワープレートに熱を伝えると共に絶縁も行う。パワープレートは、伝熱された熱を瞬時に放熱側に輸送し、TM シートを介してボディへ放熱する構造である。

次項からは、開発品の主要部分であるメタルコア基板、TM シート、パワープレート、熱シミュレーションについて報告する。

3. メタルコア基板

3.1 メタルコア基板とは

メタルコア基板とは、基板の中間層に金属芯を配置した基板のことで、一般的な特徴としては均熱性、機械強度 UP、シールド性等が挙げられ、中でも代表的な特徴は均熱性である。

メタルコア基板の構造の概略を図 2 に示す。

一般的なガラスエポキシ材を基材としたプリント配線板（以下、ガラエポ基板）では、回路パターン間が絶縁層により電気的・熱的に絶縁され、基板上に搭載された部品及び回路パターンの通電による自己発熱がその回路パターンに集中するために温度上昇しやすく、また、個々の熱が分散されているため、熱を集約して一括で放熱する構造が取り難かった。一方、メタルコア基板は部品や配線パターンの熱をメタルコアに集約することにより、その熱を一括して放熱する構造が取り易い。

ガラエポ基板とメタルコア基板の温度性能を比較した例を図 3、図 4 に示す。メタルコア基板はガラエポ基板より同じ通電電流であれば温度上昇を低く抑えることができるし、基板上の局所的な温度上昇も抑制できる。これは発熱部位で発生した熱を熱伝導性の良いメタルコアを介して基板全体に分散・均熱化し、基板表面全体を使って大気へ熱伝達できることによる。メタルコア基板の主な用途としては、CPU やパワートランジスタ等の発熱量の大きな部品の温度上昇抑制を目的に使用されている。

このような均熱化作用のある基板としては、他にメタルベース基板がある。メタルベース基板は積層した配線パターンを絶縁層を介して金属板に貼り付けた構造であるが、片面実装で表面実装部品の搭載しかできないという制約がある。それに対してメタルコア基板は、金属芯の両面で配線し、両面をスルーホールにて接続する構造であるため、基板両面に部品を搭載でき、リード部品を半田接合することも可能であり、設計の自由度が大きい。

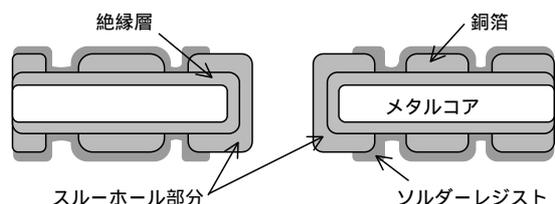


図 2 メタルコア基板の構造
Schematic drawing of metal core printed wiring board

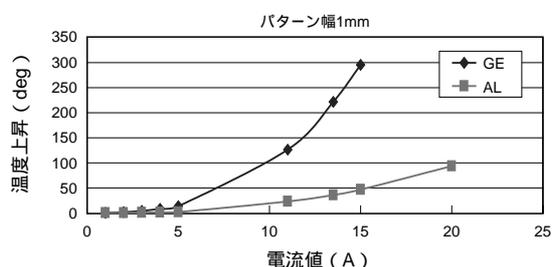


図3 通電電流と温度上昇
Correlation between electric current and temperature increase

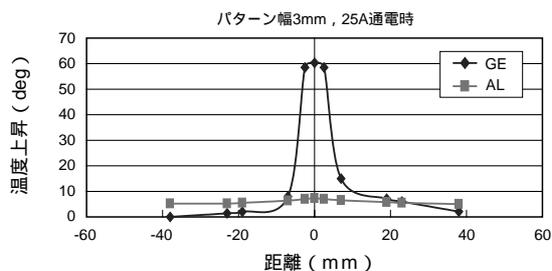


図4 発熱パターンと距離の関係
Correlation between heat generated pattern and distance

3.2 自動車用配線体への応用

本 J/B の開発では、搭載スペースが限定されているため、その分、J/B への部品の搭載を高密度化させなければならず、必然的に、

- ・配線パターンの狭幅化とそれによる小型化
- ・集熱 外部への放熱

等の条件が必要となる。上記を実現するため、メタルコア基板の特徴である、均熱化に着目し、自動車用配線体としてメタルコア基板を採用した。メタルコアの材料としては、重量の観点から比重が銅の約3分の1であるアルミニウムを選定した。

従来の配線体としては、バスバーと絶縁板の積層による回路構成が挙げられるが、問題となってくるのは、個々の配線パターンの温度上昇抑制と耐過電流性能を成立させるために配線パターンが大型になってしまう点である。特に耐過電流性能としては、小電流回路であっても上流ヒューズの容量により回路パターン幅が規制されるため、回路パターンを狭幅化することが出来なかった。配線体の大型化は質量増につながり、特に比重の重い銅合金を導体として使用しているために顧客ニーズである軽量化が問題となっていた。

また、配線体あるいは搭載部品からの熱を外部へ放熱する場合、各部位から発生する熱を1ヵ所へ集約することが非常に難しく、個別に対応する必要があった。

メタルコア基板では、配線パターンとメタルコアが熱的に接続されるので（電気的には絶縁層により絶縁されている）、下記理由によりパターン幅を最小限に配線でき、J/B を小型化することが可能となった。

- ・熱が分散均熱化されてパターン単体の局所的な温度上昇を抑制
- ・過電流による熱衝撃に対してもメタルコアの熱容量で吸収・緩和

ただし、基板内の温度格差は低く抑えられるものの、各パターンの発熱による影響を相互に受けること、配線の高密度化により熱が集約することで、基板全体として温度が上昇するため、放熱対策が必要となった。そこで、メタルコアの熱を集約・伝導する機能を利用して、基板にパワープレートを取り付け、そのパワープレートを外部の放熱板に接続することにより、発生した熱を外部へ放出して全体の温度を下げる構造とした。

上記小型化により、放熱部品を含めた自動車用配線体の質量を、従来工法のバスバー J/B の構造比に対し 37% の軽量化をすることが出来た。

4. TMシート（熱伝導性絶縁シート）

4.1 TMシートとは

TMシートとは熱伝導性絶縁シートのことであり、高熱伝導性コンパウンドを配合したアクリル系ゴムシートである。本 J/B の放熱部品として必要なアイテムであるが、エンジンルーム環境は非常に厳しくゴムシートを激しく劣化させる。しかし、TMシート内の配合剤とその割合を検討することで満足できる特性のシートを開発することに成功した。

本シートの主な特徴を以下に示す。

(1) 優れた熱特性

高熱伝導性コンパウンドを使用しているため、熱伝導率が高い。さらには金属を接続する場合、図5(a)に示すように金属面にはミクロの凹凸があり真の接触面積は小さい。TMシートには十分な軟らかさがあるため図5(b)のように凹凸を吸収し、隙間を埋めることで熱抵抗を低く抑えることが出来る。

(2) 優れた電気特性

シートには電気絶縁物を配合しており、熱性能を損なわずに耐電圧性能や電気絶縁性能も高められている。

(3) 抜群の作業性、密着性

シートに粘着力が有り、保護フィルムを剥がして貼り付けるだけで製品に容易に固定できる。

(4) シロキサンプリー

TMシートはアクリル系のシートであり、低分子シキロサン発生心配が無い。(従来の熱伝導シートとしては、主にシリコン系の材料を使用しており、温度が上昇すると内部の低分子シキロサンが揮発する。この揮発した低分子シキロサンが、リレーやスイッチの接点部に付着して電気絶縁物となり、接点不良を起こすことが問題視されている。)

4.2 基板側TMシート

図1で紹介したように、基板の発熱をパワープレートへ伝えて放熱を行う。そのため、この間の熱抵抗を小さくする必要があるが、一般的に熱抵抗を小さくすると電気抵抗も同時に小さくなってしまい、2部材間の耐電圧性能や電気絶縁性能を確保



(a)金属面同士での接続 (b) T Mシートを使用しての接続

図5 TMシート使用イメージ
TM-sheet application image

することが難しくなる。基板の配線とパワープレートとが電氣的に接続されると、自動車制御が誤動作してしまう等の不具合が発生する。そこで、基板とパワープレート間は電氣的に絶縁して熱的に接続させるといった、一般的には矛盾する要求を満たす必要がある。

我々は4.1項で述べたように、電気特性を満たしながら低い熱抵抗を得ることに成功し、基板とパワープレートとの間に適用した。

4.3 ボディ側TMシート

パワープレートから先の放熱は、ボディに接続しボディを放熱板として利用する。しかし、アルミニウム（パワープレート）と軟鋼（ボディ）が直接繋がると異種金属接触腐食を起こし、電位が卑であるパワープレートに貫通穴が開き機能しなくなる可能性がある。更に、熱性能の面から考えても、TMシートを使用する効果は大きい。

ただし、基板側とは異なりこの部位はJ/Bの外面に位置するため、出荷時にはTMシートが外部にさらされていることになる。このため、TMシートが両面粘着であるとゴミが付着したり、あるいは、逆に周囲にシートがくっついてしまうといったことが懸念される。そこで、ボディ側TMシートは片面粘着とし、パワープレートに貼り付ける構造とした。この片面粘着であること以外は、前項で説明した基板側TMシートと同様の特徴を備えている。

5. パワープレート®

5.1 パワープレートとは

基板実装部品上で発生した熱をJ/B外へ輸送するためのデバイスとして、パワープレートを採用している。

これは、中空のアルミプレート内部に作動液と呼ばれる蒸発性冷媒を封入し、その作動液の蒸発・凝縮によって通常型ヒートパイプ同様に非常に効率良く熱輸送を行うことのできる放熱素子である。

5.2 構造

開発したパワープレートの分解斜視図を図6に示す。

パワープレートは、板厚方向に4枚重ね合わせたアルミプレス板によって構成され、これらは、ブレージングによって一体化されている。

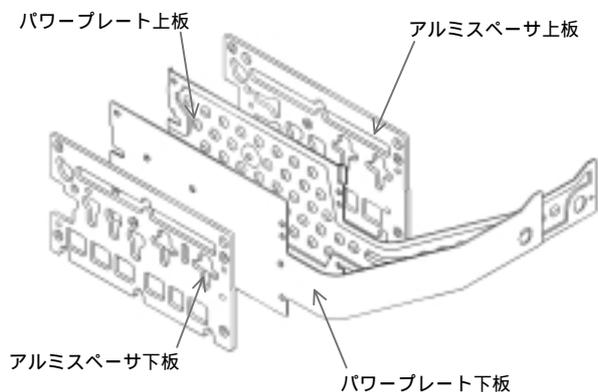


図6 パワープレート分解斜視図
Squint chart where power plate was decomposed

一方、内部空間は高真空に減圧された状態で作動液が注入された後、溶接により液注入口が封止されている。よって、長手方向にも作動液の還流によって効率の良い熱輸送が可能となっている。

パワープレートの受熱部は、基板上のリード部品の端子との干渉を防ぐために空間部を設け、それ以外は基板と略同寸法とすることで、基板内で均等化された熱を効率的に受けられる構造となっている。更に、放熱部は自動車のボディに密着する形状とし、熱を直接ボディへ逃がすことでJ/B内部の温度上昇を抑える役目を果たしている。

5.3 作動液の選定

アルミニウム製パワープレートの作動液として、当社従来品では代替フロンR123を使用していたが、これは地球温暖化の一因となる物質である。そこで、今回のパワープレートでは環境面への配慮をし、地球温暖化の恐れが無く、かつ蒸発性冷媒として十分な性能の得られるシクロペンタンを作動液として採用した。

5.4 機械的強度¹⁾

本J/Bは、自動車のエンジンルームに搭載されるため、真夏の炎天下等の悪条件下では、メタルコア基板の表面温度は部分的に最高温度140℃に達する場合がある。

これに対し、作動液であるシクロペンタンの沸点は49℃であり、140℃環境下では蒸気圧が969 kPaまで上昇するため、パワープレートとしてこの内圧に対する十分な強度を持った構造が必要である。

強度検討に際しては、計算モデルとして図7のような等分布荷重を受ける周辺固定円盤を考える。

このモデルで内圧 p が均等に作用すると、円盤のたわみ w は中央部で最大となり、

$$w(\max) = pa^4 / 64d$$

また、引張り応力 σ も円盤中央部で最大となり、

$$\sigma(\max) = 3a^2p / (4h^2)$$

板厚 $h = 1$ mmとすると、 $a = 8$ mmの範囲では $w = 0.0096$ mm程度で、応力的には無視できる値である。

よって、円盤に掛かる力はパワープレート内圧による引張り応力 σ のみを考慮すればよく、アルミニウム（A3003）の140℃環境下での耐力34.8 N/mm²より、 $a = 7.0$ mmの値が得られる。

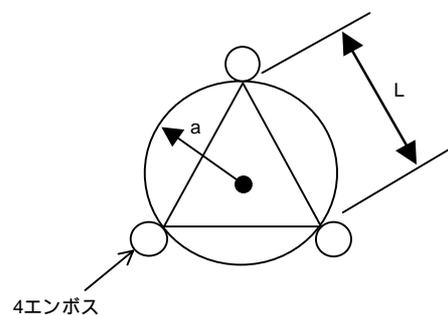


図7 強度計算モデル
Strength calculation model

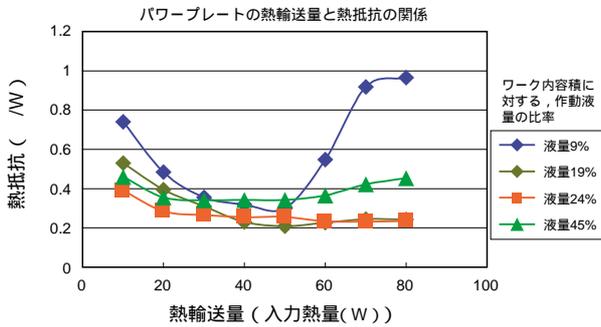


図8 作動液量と熱輸送量
Correlation between working fluid rate and heat-transfer rate

実際のパワープレートでは、板厚方向に更に 3 mm 厚のスペーサが一体口ウ付けされ、また周囲にリブを適宜配置することで、上記計算値よりも余裕ある強度を得ている。リブによる熱性能への影響を極力抑えるために、リブの間隔は計算上の最大値 ($a = 7.0 \text{ mm}$) としたが、この寸法で実的には 160 環境下でも使用可能であることを確認済みである。

5.5 熱特性

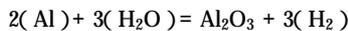
熱特性に関する重要項目として、パワープレートの熱抵抗と最大熱輸送量が挙げられる。図8にその関係を示す。

今回の J/B では、基板実装部品での発熱量がおよそ 20 W である。これに対し、パワープレートの蒸気流路断面積を可能な限り大きく確保したうえで、更に作動液量の最適化を行った結果、熱輸送量 80 W 以上 (水平設置時) の値を得た。実際の熱輸送量である 20 W 付近では、熱抵抗は若干上昇するものの、それでも熱抵抗 0.4 /W と十分に低い値であり、メタルコア基板 J/B の放熱素子としては十分な能力を有しているといえる。

5.6 長期信頼性

パワープレートの長期信頼性を考慮するうえで問題となるのが、パワープレート内部での水素ガスの発生、及びプレートの微小欠陥から空気の侵入が挙げられる。これらの水素ガスや空気は、作動液の蒸発・凝縮による熱輸送に対し、非凝縮性のガスとして熱輸送を阻害し、結果的にパワープレート熱特性劣化の原因となる。

パワープレート内部の水素ガスは、主にパワープレート内壁に付着している分子レベルの水分が熱により、アルミニウムと化学反応を起こすことで生じる。



これについては、製造時、パワープレートのブレイジング工程における高温加工で内部の水分を完全に蒸発させ、更に、注液封止加工の直前まで真空乾燥炉に保管することで、パワープレート内壁表面の完全な乾燥状態を保証している。

また、空気の侵入は、パワープレート封止時の溶接部に微小な欠陥がある場合に、パワープレート内外の圧力差でその欠陥部からリークし発生する。一般的に、アルミニウムの溶接は欠陥が生じやすく、単なるプロセス管理による無欠陥保証は困難であるため、パワープレート全数のリーク検査を行っている。

検査装置の概要は、真空中におけるパワープレートからの作

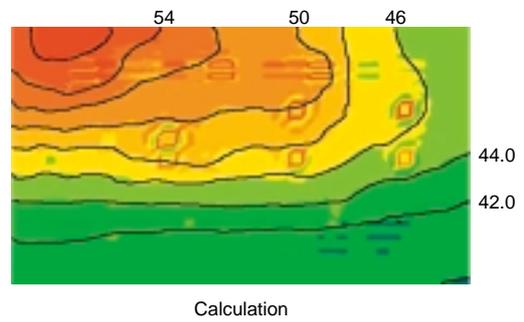


図9 温度分布
Temperature distribution

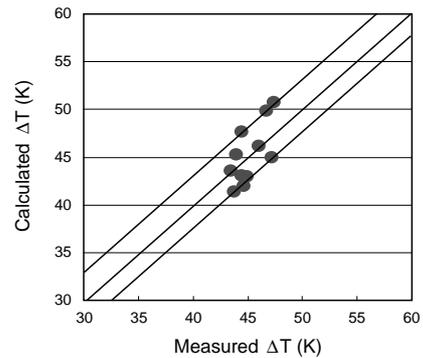


図10 計算値と実測値比較
Comparison of calculation and measurement

動液リーク量を測定し、これを常温常圧における空気の侵入量に換算することで、最低 10 年間の熱特性保証の合否判断を行っている。

6. 熱シミュレーション²⁾

6.1 概要

近年は発熱体の集中がますます高まり、構造設計の段階から放熱を検討する必要がある。そのため、熱解析シミュレーションの需要が日々大きくなっている。

構造設計時に要求される熱解析シミュレーションには、設計変更素早く対応できることと、目的を満足する程度の計算精度が必要とされる。本メタルコア基板 J/B において、熱解析シミュレーションを行い、その作業性と精度について確認した。

6.2 解析結果

図9に本熱解析シミュレーションによる基板表面温度分布を示す。また、図10には温度上昇試験の実測値とそのポイントでのシミュレーションによる計算値との比較グラフを示す。

図9の結果が設計段階で得られれば、基板内で高温になりそうな部位が予測でき、あらかじめ対策が施せる。実際の温度上昇試験と比較しても差は 3 程度であり、十分な実用精度であると考えられる。

7. メタルコア基板 J/B の効果

7.1 開発品の特徴

メタルコア基板 J/B の全体特徴は以下のとおりである。

- 1) メタルコア基板のコア材をアルミニウムとすることで、

軽量化を向上させた。

- 2) ヒューズホルダーは、ミニヒューズ挿入部の開口部から入水した水分を排水する傾斜を設け、リーク防止性能を向上させた。
- 3) 基板パターンの配策容易性を利用し、ヒューズ配列をIG-ON, OFF時にプラス、マイナス電位が隣り合わないよう配置し、水によるリーク防止性能を向上させた。
- 4) パワープレートと実装基板の締結を取外し可能なリベットとし、パワープレート(アルミニウム材)のリサイクル性を向上させた。
- 5) ベースブロックは、ロアーケースから脱着可能なスライド取付け構造とし、部品組付性、サービス性能を向上させた。
- 6) 基板リレーは、プラグインリレーの端子のみを変更することで開発期間、開発費用の低減を図った。
- 7) 現行品と同サイズを実現することで、現行品のロアーカバーを流用し開発費用の削減を図った。

7.2 開発品の性能

熱性能は、メタルコア基板で均熱化させ、基板の熱をTMシート、パワープレートで効率よくボディに放熱することで確保した。

一方、水に対するリーク性能は、散水試験において基準値の1/100以下のリーク電流値に抑えることで、リークによる半田析出、パターンの欠損を最小限に抑え長期信頼性を確保した。

7.3 開発品の効果検証

表2 開発目標に対する効果
Effect of metal core printed wiring board J/B

項目	従来品 ¹	開発品	効果
サイズ	L160×W250 + L50×W150	L160×W250	L50×W150 (19%)
質量 ²	100%	63%	37%
コネクタ 結合数	12ヶ	4ヶ	8(5) (67%)
自動化率	70%	90%	+20%
金型投資額 ²	100%	46%	54%
開発期間	6ヶ月	2.5ヶ月	3.5ヶ月

¹: 従来品は開発品のJ/B仕様をバスバー方式で製作した場合を想定。

²: 従来品に対する比率で表現。

8. おわりに

今回の開発で新たに採用した、メタルコア基板やパワープレート、TMシート等の新規部品は、既に民生用として製品化されているが、自動車用、特にエンジンルーム環境下の厳しい条件に耐えうるものは無く、多くの問題が噴出した。これらの問題を解決するため、関係者の英知を結集し、改善改良を加えることで何とかメタルコア基板J/Bを世の中に送り出すことができたことは至上の喜びである。

今後は、本開発で残された課題、鉛フリー化への対応、更なる小型&軽量化、低コスト化、熱解析技術の向上について検討を進め、これを解決することで、更に他社との差別化技術の確立を図りたい。

最後に今回の開発に当たり、御協力頂いたトヨタ自動車株式会社殿、アラコ株式会社殿、当社各研究所の方々には深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 中原一郎; 材料力学, 下巻 133-141
- 2) 真下啓治, 齊田幸弘, 小泉健, 中里秀樹; 自動車部品の熱解析技術, 古河電工時報, 古河電気工業株式会社, No.110 (2002), 68-72