

環境対応車向けパワーモジュールの実装技術

～大型モールド樹脂の封止技術～

トヨタ自動車株式会社 エレクトロニクス生技部 電子ユニット計画室 主幹 門口 卓矢

要 旨 パワーモジュールは、ハイブリッド車や電気自動車といった環境対応車向けパワーコントロールユニット(PCU)の主要な構成部品である。本稿ではトヨタ自動車の環境対応車への取り組みを示すと共に、パワーモジュールの実装構造の変遷、大型モールド樹脂の封止技術について紹介する（本稿は、2017 年 5 月 12 日に開催された弊社主催「半導体分析セミナー 2017」での、特別講演を基に構成したものです）。

1. トヨタの環境対応車への取り組み

自動車業界が直面する課題に、CO₂ 排出量や大気汚染の増加、石油資源の枯渇といった環境・エネルギー問題が挙げられる。この問題に対応するため、自動車メーカーは、既存の内燃機関の効率向上の他に、ハイブリッド自動車(HV)、プラグインハイブリッド自動車(PHV)、電気自動車(EV)、燃料電池自動車(FCV)などの環境対応車の開発に取り組んでいる。これらの環境対応車は、電気を有効活用することでエネルギーの利用効率を従来以上に高めることができる。そして、CO₂ 排出量を低減するとともに、将来に向けて再生可能な電気や水素などの石油代替エネルギーへの転換を目指している。トヨタは、持続可能な社会に貢献するための取り組みとして「環境チャレンジ 2050」を発表した。HV 技術を核に、電動系環境対応車の技術開発を推進し、2050 年の新車ベースの CO₂ 排出量を 2010 年比で 90%削減を目標とする。

Fig. 1 に示すように、エンジンとモータで駆動する HV 技術は EV、PHV、FCV のコア技術であると考えている。HV で開発したシステムやユニット技術は、すべての電動系環境対応車に展開することができる。たとえば、EV では HV のエンジンをおろし、充電器、

高容量バッテリーを積み増す。FCV では HV のエンジン、ガソリタンクを燃料電池、水素タンクに積み変えることで対応できる。

2015 年 11 月に 4 代目プリウスを発売し、燃費は 40.8 km/L (JC08 モード)を実現した。燃費向上の寄与度において、パワートレインが約 60%を占めた。エンジン、トランスアクスル、モーター、パワーコントロールユニット(Power Control Unit：以下 PCU)のハードの改良、および各ユニットを最大限に活かす制御開発によって燃費向上を図った。本稿では、PCU の基幹部品であるパワーモジュールについて紹介する。

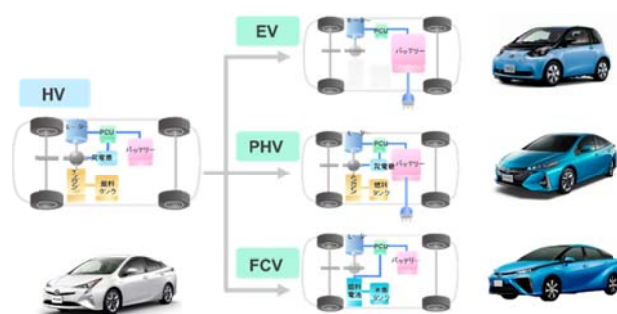


Fig. 1 Development of HV technology for environmentally-friendly vehicles.

2. パワーモジュール構造の変遷

2.1 PCU 構成

Fig. 2 に、PCU 構成を示す。PCU は、バッテリー電圧の昇圧、およびモーター、発電機の直流から交流の電力変換を担う。環境対応車向け PCU は、電力の低損失化だけでなく、ラゲッジスペースやユーティリティ確保のために、さらなる小型化が求められている。今回のパワーモジュールに、両面冷却型「パワーカード」を採用した。また、高圧系、低圧系配線の接続構造を見直し、旧世代比 33% の小型化を実現した。その結果、Fig. 3 に示すように、PCU をトランスアクスル直上に搭載でき、スペースを確保することができた。その空いたスペースに、ガソリンエンジン車同様に補機バッテリーを搭載できるようになった。また、パワー半導体を新開発し、定常損失-スイッチング損失トレードオフの 16% 改善などにより、PCU の全体損失を旧世代比 20% 低減した。

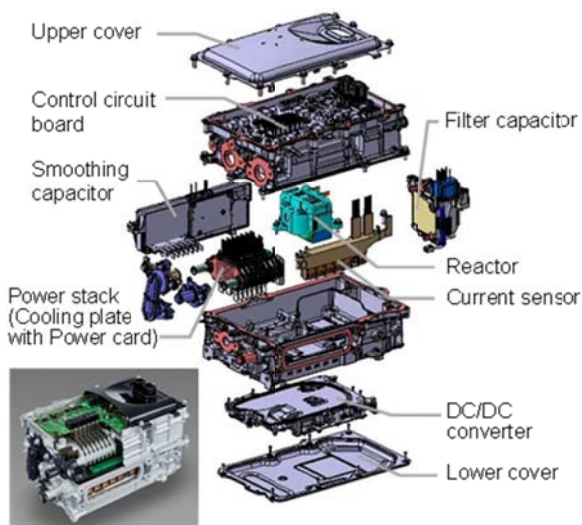


Fig. 2 PCU components mounted in 4th Prius.

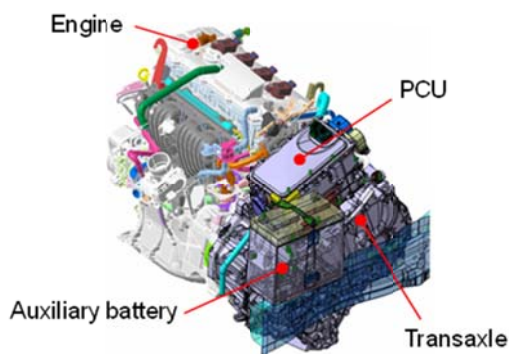


Fig. 3 PCU layout in Engine room.

2.2 PCU 回路

Fig. 4 に、PCU 回路構成を示しており、バッテリー、および発電用と駆動用の二つのモーターと接続されている。PCU の機能は、大きく 2 つある。1 つは、バッテリー電圧をリアクトルとパワーモジュールを使って昇圧する。もう 1 つは、三相交流モーターを駆動させるため、パワーモジュールの半導体をスイッチングさせて直流から交流に電力変換する。Fig. 4 中の黄色いエリアは、パワーモジュールの回路図を示す。IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)と Diode の逆並列ペアを上下直列に接続している。今回開発した「パワーカード」は、上下アーム回路を 1 パッケージ化した 2in1 構造である。これにより、従来の 1in1 構造の技術を活用でき、同等の出力性能を実現した場合と比較して、パワースタック部の体格を 22% 小型化した。また、PHV や高出力モーターを搭載した車両においても、パワーカード枚数を増やすことで、迅速に車種展開することができる。

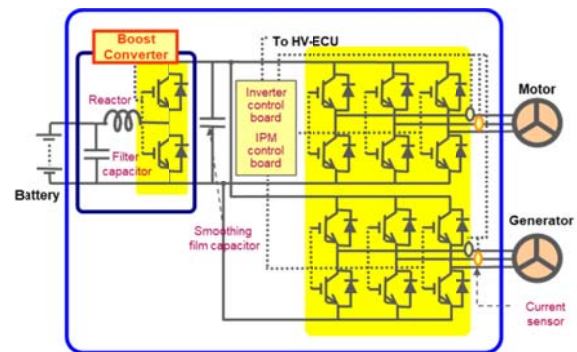


Fig. 4 PCU circuit.

2.3 パワーモジュール構造

Fig. 5 に、歴代プリウスに搭載されたパワーモジュール構造を示す。第 2 世代のパワーモジュール構造は、AlN 基板と Al 電極をロウ付けした DBA(Direct Brazed Aluminum)にパワー半導体をはんだ付けしている。その DBA を CuMo ヒートシンクにはんだ付けし、グリスを介して Al 冷却器に放熱している。半導体表面は、Al ワイヤにより導通している。

第 3 世代の構造は、DBA と冷却器の間にパンチングメタルを介してロウ付けしている。このパンチングメタルは、冷却器から DBA に加わる応力を緩和している。また、グリスを介さないため「直冷構造」と呼んでおり、熱抵抗は第 2 世代比で約 30% 向上している。半導体表面は、Al リボンにより導通しており、第 2 世

代に比べ、打点数を低減している。

第4世代の構造は、パワー半導体の表裏面にCuヒートシンクをはんだ付けしている。そのため、両面のヒートシンクから冷却することができる。パワーモジュール動作時、半導体素子とヒートシンクの線膨張係数差により、各材料間に熱応力が発生するが、モールド樹脂の線膨張係数を適切な範囲にすることにより、各はんだ接合部の歪振幅を制御することができる。このように、世代毎に低熱抵抗化が進み、パワーモジュールの小型化が進化している。

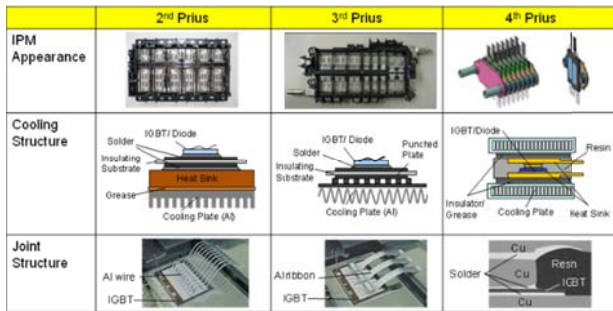


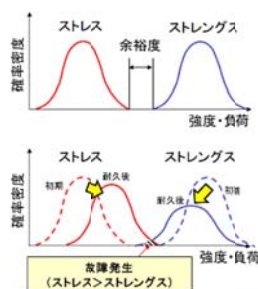
Fig. 5 Comparison of power modules mounted in Prius.

3. 大型モールドの封止技術

3.1 安全性・信頼性設計の考え方

製品設計する上で、最も重要なことは安全設計である。万が一、故障が発生したとしてもお客様の安全を確保する思想である。次に、信頼性設計であり、第一寿命部位を定義する。その際、安全設計を考慮した部位を選定する必要がある。また、劣化モードとメカニズムを掌握し、同時に加速試験、および加速係数を測定する。そして、信頼性試験を実施し、統計的に推定、検定を行い判定する。その次に、初期品質設計である。部品、材料、工程バラツキを考慮したストレス（応力）、

1. 安全設計 (ISO26262)
 - ・万が一、故障が発生しても、お客様の安全を確保できる製品設計
2. 信頼性設計
 - ・第一寿命部位の設計
 - ⇒安全設計を考慮した部位を選定
 - ・劣化モードとメカニズムの掌握
 - ・加速試験、および加速係数の測定
 - ・統計的推定と検定
3. 初期品質の確保
 - ・部品/材料/工程バラツキを考慮したストレス/ストレングス設計
 - ・耐久劣化を考慮した安全余裕度の確保



耐久後においても、ストレス<ストレングスを維持できる初期品質を確保

Fig. 6 Concept of safety and reliability design.

ストレングス（強度）設計が必要となる。たとえば、Fig. 6 に示すように、ストレス×ストレングスの余裕度が不足すると、耐久後のストレス増加、あるいはストレングス低下により故障が発生する。このように、耐久後のストレス、ストレングスの変動量を掌握し、ストレス < ストレングスの関係を維持できる初期品質設計が重要となる。

3.2 パワーモジュール劣化モード

Fig. 7 に、パワーモジュール外観、断面構造を示す。パワーモジュールを評価するにあたり、劣化モードに応じた加速試験を選択する必要がある。構造部位ごとに劣化モード例を挙げると、一つ目が“内部接続部”であり、はんだやAlワイヤの接合部である。二つ目は“外部接続部”である。たとえば、信号端子のプリント基板接続、およびパワー端子のバスバー溶接により、それぞれ拘束条件が異なり端子にストレスが加わる。三つ目が本稿で取り上げる“モールド樹脂封止”に関するものであり、さらに3つの劣化モードが挙げられる。

一つ目は、樹脂封止による応力や樹脂中のイオン性不純物による半導体素子耐圧の低下、特性変動である。二つ目は、樹脂絶縁劣化による端子間短絡である。体積抵抗率や絶縁破壊電圧、トラッキング指数(CTI)といった樹脂の物性値が、端子間短絡に影響する因子となる。三つ目は、樹脂剥離やクラックによる保護機能の低下である。たとえば、樹脂とヒートシンクの接着界面が剥がれると、外から不純物イオンが侵入し、半導体デバイスに影響を及ぼす。本稿では、樹脂密着性を確保する上で必要となる樹脂界面に加わる応力について説明する。

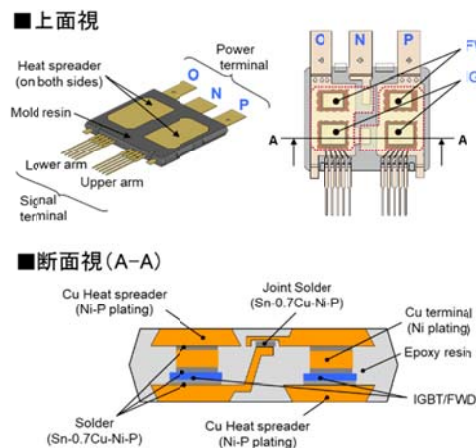


Fig. 7 Schematic of 2in1 power module structure.

3.3 樹脂内部応力の把握

応力を可視化することは難しく、特にパッケージ内部にかかる応力を直接把握する手法は限られているが、せん断歪み γ を測定することにより、Eq. (1), (2)を用いて、せん断応力 τ を計算することができる。

$$\tau = G \times \gamma \quad \text{Eq. (1)}$$

$$G = E / 2(1+\nu) \quad \text{Eq. (2)}$$

τ : せん断応力, G : 横弾性係数, γ : せん断歪み, E : ヤング率, ν : ポアソン比 である。

Fig. 8 に示すように、光ファイバー歪ゲージ、熱電対を使用して、モールド樹脂成形中のせん断歪、温度を測定した。Fig. 9 は、モールド成形、およびアフターキュアにおける温度、およびせん断歪結果を示す。

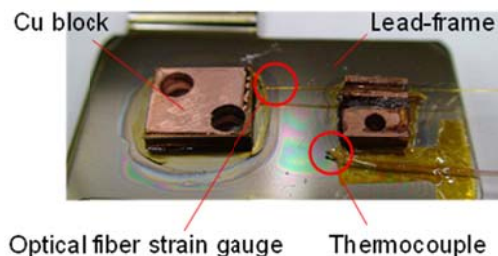


Fig. 8 Measurement method of shear strain and temperature in molding process.

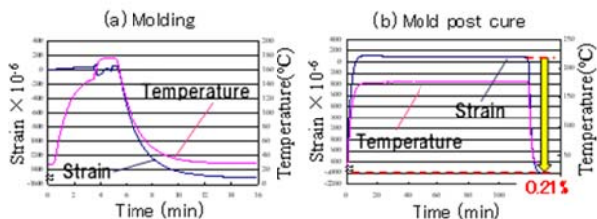


Fig. 9 Shear strain and temperature. (a) Molding, (b) Mold post cure.

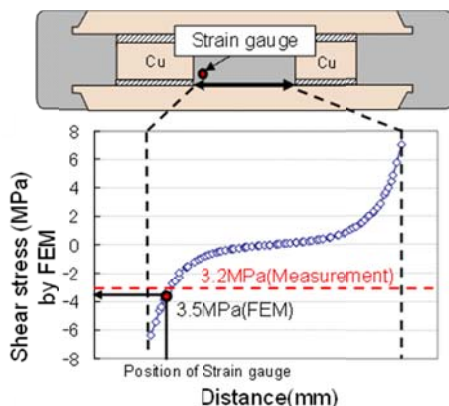


Fig. 10 Analysis of shear stress on mold resin of power module by FEM.

アフターキュア温度を基準としたとき、常温時にかかるせん断歪は0.21%であった。Eq. (1), (2)より、せん断応力は3.2 MPa と見積もることができる。Fig. 10 に、今回の実験構造のせん断応力のFEM解析結果を示す。歪ゲージが位置する部位のせん断応力は3.5 MPa であり、今回実測と計算による値に対して、+10%以内の誤差であることを確認した。

3.4 構造による樹脂界面の応力変化

パワーカードは、樹脂成形時に上下の Cu ヒートシンクに樹脂が挟まれた状態で、樹脂は硬化収縮、および熱収縮する。そのため、素子間の樹脂界面には大きな引張応力が加わり、樹脂剥離が発生しやすい。素子間の樹脂界面にかかる応力を低減するには、以下のような手段が挙げられる。

(a) 樹脂の熱収縮率低減

(b) 構造、材料変更による応力緩和

(a)の樹脂の熱収縮率低減の手段として、高 T_g (ガラス転移点) の樹脂材が挙げられる。モールド成形温度以上の T_g にすることで、常温戻しの過程で熱収縮率を下げる効果がある。(b)の構造、材料変更による応力緩和の手段として、両端固定支点はりの計算式より、ヒートシンクの低弾性材化、薄板化、および固定距離(素子間距離)の延長などが挙げられる。ヒートシンク of 材料変更や薄板化は熱抵抗への影響が大きいため、素子間距離の延長を検討した。

Fig. 11 に、素子間 4 mm、および 6 mm におけるモールド樹脂成形後から常温戻し過程を模擬した FEM 解析結果を示す。素子間距離が大きくなると、樹脂界面にかかる引張応力は 10 MPa から 4.7 MPa と小さくなった。ヒートシンクが変形しやすくなり、樹脂密着界面の応力を緩和している。

Fig. 12 に、素子間距離における樹脂界面の引張応力を示す。樹脂界面への引張応力は、モールド成形、あるいはポストキュアから常温戻し過程で発生する。そのため、成形、アフターキュア温度(180 °C 相当)の密着強度で設計成立させる必要がある。素子間 4 mm において、密着強度の余裕度は不足していたが、素子間を 6 mm に広げることで引張応力は 50%以上低減した。その結果、密着強度のバラツキ下限値に対しても、十分な余裕度を確保することができた。

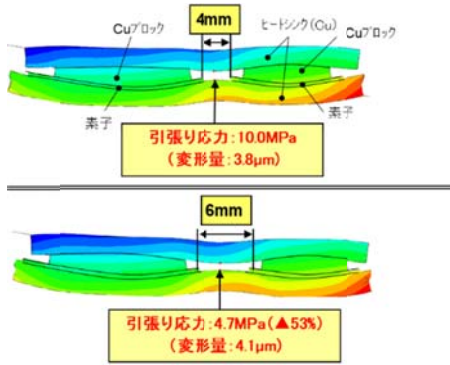


Fig. 11 Analysis of tensile stress on resin/heat sink interface between IGBT and diode by FEM.

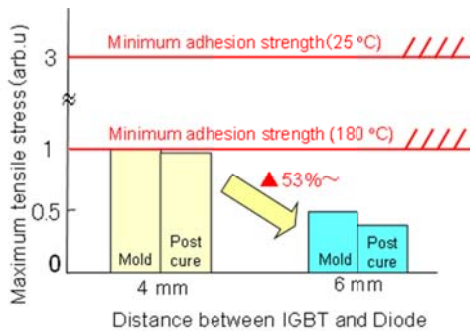


Fig. 12 Comparison of tensile stress by distance between IGBT and diode in molding process.

3.5 樹脂界面応力見積り時の注意点

Fig. 13 に、モールド樹脂の成形収縮のイメージを示す。成形温度を基準温度とし、樹脂注入後常温に戻す過程の応力見積り方法について説明する。最初に、成形温度を 175 °C で応力フリーと定義する。樹脂は金型に充填されている間に硬化収縮が始まる。また、常温に戻す過程で、線膨張係数(α_1 , α_2)により熱収縮する。その後、180 °C でアフターキュアをすると、さらに α_1 , α_2 を経て、硬化収縮する。アフターキュアにより T_g は上昇する。 T_g が、アフターキュア温度以上になった場合は、常温戻しの過程で α_2 の影響は受けず α_1 分のみ熱収縮する。そのため、アフターキュア後の収縮率は、成形後に比べて小さくなる。

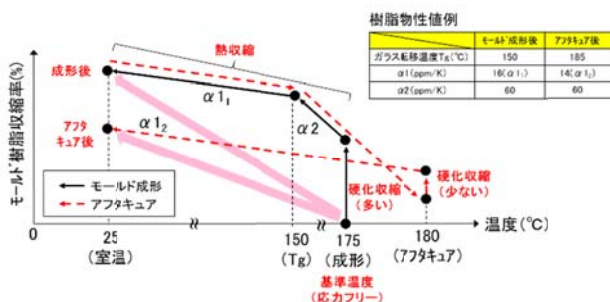


Fig. 13 Molding shrinkage of epoxy resin.

Fig. 14 に、熱硬化性プラスチック一般試験方法 (JIS K6911) と使用上の注意点を示す。簡略化した立方体モデルで説明する。常温時の金型寸法を a 、アフターキュア後の樹脂寸法を c としたとき、JIS 規格の成型収縮率は、 $(a-c)/a$ と定義される。成形温度基準で樹脂収縮率を定義する場合、成形温度における金型膨張分の樹脂体積が見込まれていない。また、JIS 規格の成型収縮率は、樹脂反応による硬化収縮分と線膨張係数による熱収縮分の合算値となっているため、目的に応じて分ける必要がある。

Fig. 15 に、成形温度基準での樹脂収縮率を補正する計算例を示す。成形温度基準に収縮率を補正するために、金型の膨張分を加える必要がある。金型の α を 12 ppm/K としたとき、温度差(ΔT)を乗じて金型膨張分を JIS 測定値に加算する。熱収縮分と硬化収縮分に分ける必要がある場合、熱収縮分は、樹脂の T_g 、および線膨張係数(α_1 , α_2)を用いて図中の計算手順で見積もることができる。全体収縮率 (JIS 測定値と金型膨張分の補正值の合計) から熱収縮分を差し引いた値が、硬化収縮分となる。

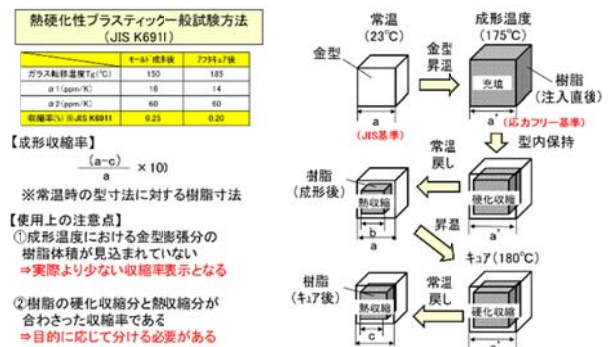


Fig. 14 Attention points on molding shrinkage ratio.

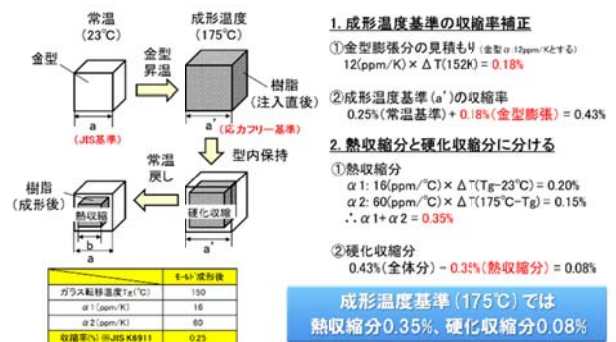


Fig. 15 Reference correction at molding temperature of resin shrinkage rate.

JIS 規格の常温基準(23 °C)での収縮率は 0.25%であったが、成形温度基準(175 °C)では 0.43% (うち硬化収縮分 0.08%, 熱収縮分 0.35%) となる。

3.6 樹脂収縮率の線膨張係数換算

熱応力 CAE を使って、硬化収縮分のみ応力計算したい場合、樹脂収縮率を線膨張係数へ換算する事例を Fig. 16 で紹介する。成形温度 175 °C のとき、応力フリーの開始温度を 175.01 °C とする。硬化収縮分 0.08%を温度差 0.01 °C で除した値を線膨張係数(80000 ppm/K)に置き換える。この際、応力フリー温度を 175 °C よりも、高い値に設定すると、他の部材 (たとえば、銅) の収縮の影響を受けやすくなるため注意が必要である。また、常温に戻す場合の応力解析も同様に、全収縮率 0.43%を温度差 150 °C で除した値を線膨張係数(28.7 ppm/K)に置き換えて計算する。

このように、樹脂収縮率を線膨張係数に置き換えることで、簡便に応力解析ができる。Fig. 10 のせん断応力の CAE 結果は、これらの樹脂収縮率を線膨張係数に補正したものである。

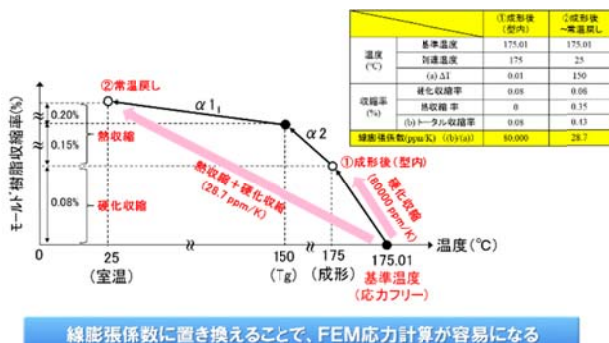


Fig. 16 Conversion of resin shrinkage to thermal linear expansion coefficient.

3.7 3D TIMON~Reactive Mold~の活用事例

Fig. 17 に示すように、モールド流動解析ソフト 3D TIMON (東レエンジニアリング (株)) は、樹脂成形時の様々な動的な挙動を可視化し、解析することができる。その活用の一例として、ウェルド会合角、最大主応力と体積収縮率の解析事例を紹介する。

Fig. 18 左側は、樹脂流動解析の結果を示す。スケールバーは時間を示す。実際は、動画で表示することができる。このように、樹脂の充填経路を可視化することができるため、樹脂のゲート位置を設計する際、有効なツールとなる。Fig. 18 右側に、樹脂が合流する部

位の角度、すなわちウェルド会合角を示す。ウェルド部は空気を巻き込みやすく、樹脂ボイドが発生しやすい。実機でのショートショットにより、樹脂合流部を確認したところ、流動解析の合流部とよく一致した。このように、ゲート位置を適切な位置に設計することで、ウェルド部を制御し、エアーベント周辺に近づけることができる。

樹脂材データ測定(INPUT)

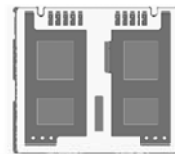
1. 硬化反応(発熱量)
2. 硬化反応熱(KAMAL式)
3. 硬化前後物性(密度、比熱)
4. PVT特性(成形圧vs密度)
5. 粘度
6. 弾性率、ポアソン比
7. 線膨張係数
8. 熱伝導率

樹脂流動解析(OUTPUT)

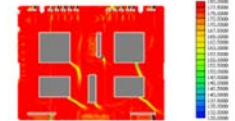
1. ウェルド会合角
2. 樹脂温度分布
3. 硬化反応分布
4. 粘度分布
5. 体積収縮率
6. 収縮歪、型内収縮歪
7. せん断応力
8. 固化率
9. 最大主応力(引張)
10. ミーゼス応力
11. 反り

Fig. 17 Input and output of 3D TIMON ~Reactive mold~.

流動解析(時間)



ウェルド会合角



流動経路確認(超音波探傷画像)

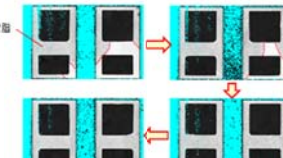
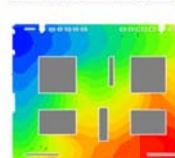


Fig. 18 Time distribution and weld angle in molding flow by 3D TIMON.

Fig. 19 は、最大主応力と体積収縮率の解析事例である。こちら、動画で表示することができる。最大主応力の赤色表示が 30 MPa 程度、緑から青色表示が 5~10 MPa 程度であるため、Fig. 11 で示した数値と良く一致していた。また、体積収縮率についても面内分布として表示することができ、他のソルバーとの連成解析も可能である。

今後の流動解析ソフトへの期待は、成形、およびアフターキュア時の応力分布のさらなる精度向上である。また、設計者が使い慣れた応力解析専用ソルバーと簡便に連成解析できると、過去の知見を活用することもできる。ただし、ユーザ側においては、金型内で起きている挙動を実機検証する技術が求められる。

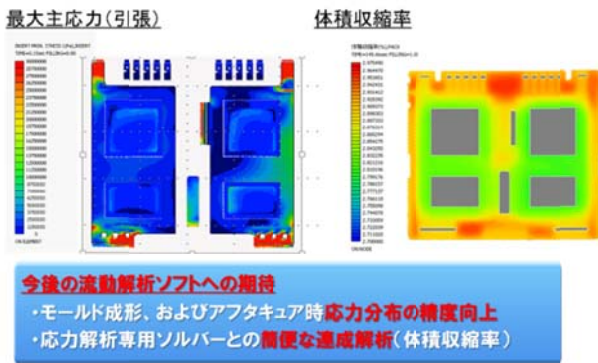


Fig. 19 Maximum principal stress and volume shrinkage ratio by 3D TIMON.

4. まとめ

パワーエレクトロニクス技術は、環境対応車に共通のキーテクノロジーである。その中でも、主要部品であるパワーモジュールは、低損失、小型、低コスト化が求められている。

モールド樹脂封止は、Cu 放熱板実装の信頼性を確保する上で必須の技術であり、モールド内部で起こっている事象を可視化することが重要である。CAE にて、成形、アフターキュア過程の動的（過渡的）な応力分布を把握できると、設計力の向上につながり、試作・評価工数を大幅に削減できる。

次世代環境対応車の性能向上を加速させるには、デバイス性能を最大限に引き出す「実装技術」がキーテクノロジーであり、今後も高信頼性を確保した魅力ある製品開発を進めていく。

- ◆ パワーエレクトロニクス技術が環境車に共通のキーテクノロジーであり、その主要部品であるパワーモジュールの低損失／小型／低コスト化が求められている。
- ◆ モールド封止は、Cu放熱板実装の信頼性を確保する上で必須技術。
- ◆ モールド内部で起こっている事象を可視化することが重要。
- ◆ CAEにて、成形・アフタキュア過程の応力分布を把握できると、設計力向上にもつながり、試作・評価工数を大幅に削減できる。

次世代環境車の性能向上を加速させるためには、デバイス性能を最大限に引き出す「実装技術」がキーテクノロジー！

Fig. 20 Summary.

5. 謝辞

第4世代 PCU は、株式会社デンソーとの共同開発の成果である。この場をお借りして感謝の意を表します。

門口 卓矢（かどぐち たくや）

トヨタ自動車株式会社

パワートレーンカンパニー

エレクトロニクス生技部 電子ユニット計画室

主幹