

自動車分野におけるパワーエレクトロニクス製品の課題と分析・評価技術

株式会社デンソー 半導体実装開発部 第1PF 開発室 担当課長 石川 岳史

要旨 半導体デバイスが自動車に搭載されるようになり、自動車特有の厳しい環境（温度、振動、ガソリン蒸気の暴露など）により家電では問題にならなかった課題が顕在化してきた。それら課題の解決に重要となるミクロな分析技術と理論解析技術（CAE）の事例を紹介する（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. はじめに

「自動車分野におけるパワーエレクトロニクス製品の課題と分析・評価技術」と題して、パワーエレクトロニクス製品の課題とその製品を開発するために活用している分析・評価技術について、当社 半導体実装開発部で研究開発を行い、社外発表したものを中心にいくつかトピックス的に報告する。

2. パワーエレクトロニクス製品とその課題

パワーエレクトロニクスの話に入る前に、車載エレクトロニクスを概観する（図1）。車載エレクトロニクスの構成はインプットとしてのセンサ、情報処理・計算するECU（Electronic Control Unit）、出力としてのアクチュエータから成っている。パワーデバイスは主としてアクチュエータを動かすために使われている。本日はパワーエレクトロニクスに着目して報告する。

図2は、当社の車載パワーエレクトロニクス製品群を電流で層別したもので、パワーエレクトロニクス製品とアクチュエータを並べて示している。これを製品の構造で分類したものが図3である。

車載エレクトロニクスの基本構成と半導体デバイス

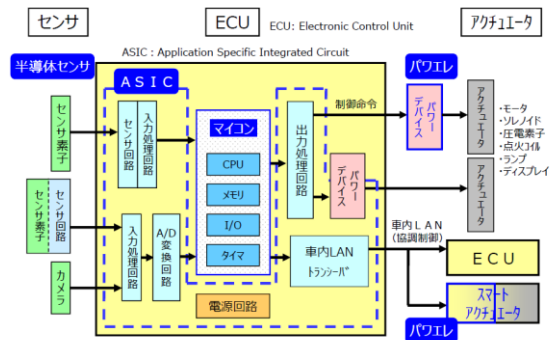


図1 車載エレクトロニクスの基本構成と半導体デバイス

車載パワーエレクトロニクス製品

	出力	製品群	アクチュエータ
大電流	10kW <	パワーカート	パワーコントロールユニット
中電流	<10kW	モータコントローラ用 パワーモジュール 燃料ポンプコントローラ	オルタネータ 電動 パワステモータ
小電流 高機能	<100W	オルタネータ向け レギュレータ イグナイタ トランスミッション コントローラ パワーウィンドコントローラ	ステイックコイル トランス ミッション パワーウィンドモータ

パワー-MOSFETの採用加速, 搭載性要求から小型・モジュール化が進む

図2 車載パワーエレクトロニクス製品

車載パワーエレクトロニクス製品

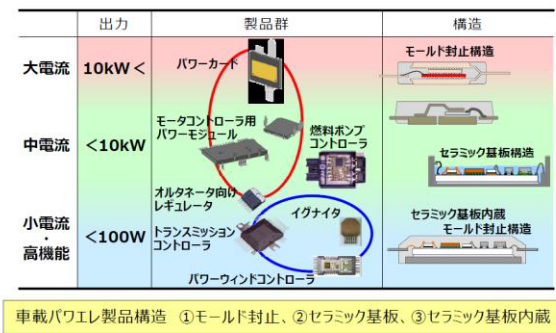


図3 車載パワーエレクトロニクス製品

製品構造は大きく3つに分類され、半導体デバイスやチップコンデンサなどをリードフレーム上に実装してモールド封止する①モールド封止構造。製品規模が大きい場合には、セラミック基板に部品を実装する②セラミック基板構造。これら二つの合体版である③セラミック基板内蔵モールド封止構造がある。

車載パワーエレクトロニクスの話に入る前に、身の周りのパワーエレクトロニクスを概観してみる(図4)。家庭では、冷蔵庫や洗濯機、エアコンなど省エネを意識した多くの家電製品があり、こういった製品にパワーエレクトロニクスが使われている。次に、社会に目を向けると、エレベータや産業機器、鉄道などにもパワーエレクトロニクスが使われている。

このようにパワーエレクトロニクスはあらゆるシステムや製品に組み込まれているが、前面に出ることなく、システム、製品を陰で支える「黒子」的な存在である。

身の周りのパワーエレクトロニクスを電力で整理すると、上は300kWから下は数十Wの幅広い領域で使われている。これに車載パワーエレクトロニクスを並べてみると、一般的な社会インフラ級から家電で使われているようなところまで、幅広いパワーエレクトロニクスが一台の自動車の中に入っていることがわかる(図5)。パワーエレクトロニクスの搭載場所を考えると、鉄道用インバータでは床下の空間が利用され、エアコンであれば室外機として屋外に設置される。一方、自動車用では大半がエンジンルームに搭載されるという現実がある。こういった限られたスペースに入れる必要性から、小型化や機電一体という要求が出され、そのようなニーズに合致する製品を開発している。

身の周りのパワーエレクトロニクス



図4 身の周りのパワーエレクトロニクス

車載パワエレ製品との比較

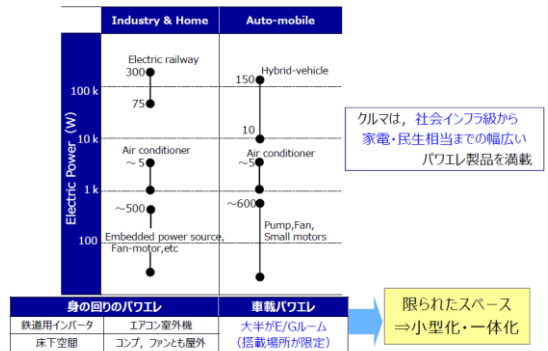


図5 車載パワエレ製品との比較

図6は、車載パワーエレクトロニクスが置かれる環境がどのようなものかを示している。温度、湿度、水、振動など種々ある。具体的に温度についてまとめたものが図6の下表である。見て分かるように、100℃以上になっているところがほとんどで、厳しい環境の中に車載パワーエレクトロニクスが置かれていることがわかる。

車載パワエレ製品の搭載環境



図6 車載パワエレ製品の搭載環境

では、車載環境がどのように製品にとって厳しいのかをポンチ絵で説明する(図7)。製品に加わるストレスの分布と製品ストレングスのそれとが離れた状態であれば、不具合は発生せず問題はないが、温度が高くなると一般的にストレスは上昇し、ストレングスは低下する。そのため、分布の山に重なりができ、この部分が不具合が発生する領域となる。ストレスについて、例えば2種類の熱膨張係数が違う素材の接合界面では熱膨張係数差によって応力が発生する。温度が上がればその界面に発生する応力は増大する。一方、ストレングスは、樹脂材料の場合、温度が高くなればなるほど強度が低下する。また、耐久に関しても、高温放置の場合、時間経過とともに材料強度は低下していくが、温度が高くなれば強度低下の速度が速くなる。例えば、100℃に比べて、150℃の方が強度劣化が速い。材料強度の劣化について10℃2倍則とか3倍則など言われているが、搭載環境の温度が高いということはそれだけで製品にとって厳しいということである。このように、ストレス、ストレングス共に悪化して信頼性が大幅に低下するのが車載環境の厳しいところである。

車載環境の厳しさの影響(温度の場合)

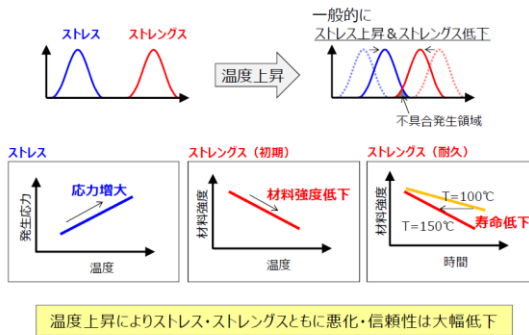


図7 車載環境の厳しさの影響(温度の場合)

そのような車載パワエレ製品の劣化現象を、われわれはどう捉えているかを示したのが図8である。先述の温度ばかりではなく、湿度、雰囲気、酸、アルカリなどの要因に対してそれぞれの部位で、例えば、接合界面の剥離、材料のクリープ破壊、マイグレーションといった様々な物理・化学現象が起こり、最終的に製品の故障に至る。

われわれは、車載という厳しい環境下で使われることを想定し、どう劣化するかを考え、その対策を講じた開発/設計をする必要がある。そのためには、この劣化現象を可視化することが重要であるという考えか

ら、分析技術やシミュレーション技術を培ってきた。

車載パワエレ製品における劣化現象



図8 車載パワエレ製品における劣化現象

3. 製品開発のための分析・評価技術

3.1 実装分野における可視化ニーズ

実装分野における可視化ニーズを概観したのが図9である。材料単体の場合(例えばA材)では、表面もしくはバルクの観察が考えられる。また、複合材料(例えばA材、B材の2材料で構成)の場合には、その界面の観察が必要である。内部の観察においては、非破壊、破壊のどちらを選択するか、さらには、静的な状態を観察するのか、動的な変化の観察が必要なのか、いろいろな要望、要求がある。そのような観点で実現象に対して、分析・評価技術やCAE技術を活用して可視化に取り組んでいる。

実装分野における可視化ニーズ

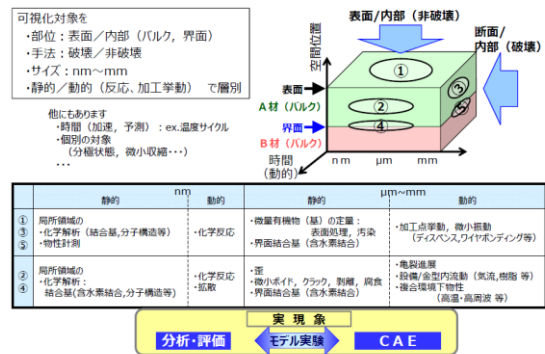


図9 実装分野における可視化ニーズ

3.2 当社における実装CAEの全体像

当社の実装CAEに関する全体像を図10に示した。スケールで、nmオーダーからcm、mオーダーのCAEを使い分けている。特に最近では、より原理に迫る必要

性から、分子レベルの CAE に力を入れている。このような取り組みによってメカニズムに迫ることができるようになってきた。今までは推定原因から対策して結果が良ければ対策完了という結果系の対応で、後々問題が起こる場合があったが、原因を分析、可視化し、メカニズムを考え、材料や構造の開発、加工方法の検討などにつなげていこうとしている。

当社における実装CAEの全体像

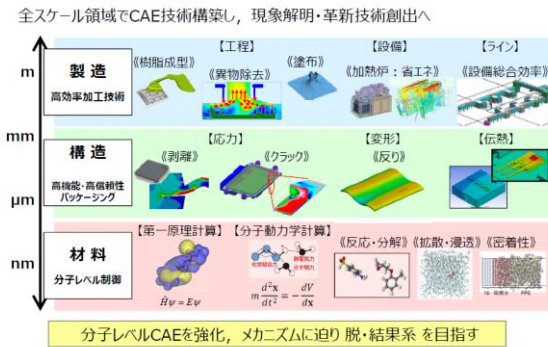


図 10 当社における実装 CAE の全体像

3.3 分析・CAE による可視化事例

以下に可視化の事例を 5 つ紹介する (図 11)。

可視化事例紹介 (分析・CAE)

		nm		μm~mm	
		静的	動的	静的	動的
破壊	内部	① セラミック基板の高温マイグレーション <small>無機</small>		② Cuワイヤボンディングの不具合 <small>金属</small>	
	表面	③ 接着挙動解析 <small>有機</small>			
非破壊	内部	④ 化学物質雰囲気におけるパッケージ不具合 <small>有機</small>			⑤ 絶縁樹脂の劣化解析 <small>有機</small>

図 11 可視化事例紹介 (分析・CAE)

3.3.1 セラミック基板の高温マイグレーション

最初にセラミック基板の高温マイグレーションの事例を示す (図 12)。これはマイクロエレクトロニクスシンポジウム MES2013 にて報告した内容である。これはセラミック基板構造の製品で、セラミック基板上にペースト状の銀導体を印刷・焼成し、電極材料としている。

図のようなパターンで電極を形成し、電極間に電圧印加し、150℃での高温バイアス試験を実施したところ、数十時間で短絡が発生した。短絡箇所を透過光で拡大観察し、写真に示すような枝状のデンドライトが発生

し、マイグレーションによる短絡であることが判明した。マイグレーションのメカニズムを水がある場合について説明すると、両電極が水と接触している時に、陽極の金属銀が水と反応し、銀イオンとなり、水に溶解する。銀イオンは電極間の電界により陰極側まで移動し、陰極での電極反応で、銀イオンは金属銀として析出し、これが順次起こり、枝状に伸びる。150℃という液体の水が存在しない状態での試験にもかかわらず、デンドライトが発生しているということで、発生メカニズムが当初不明であった。

セラミック基板の高温マイグレーション

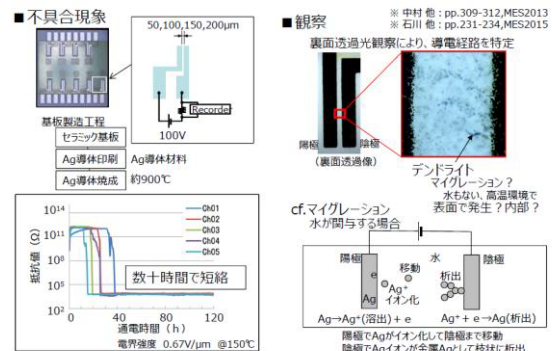


図 12 セラミック基板の高温マイグレーション

そこで、メカニズム解明のためにより詳細なマイクロ解析を実施した (図 13)。デンドライト部分を断面 SEM 観察すると、アルミナの粒界に、焼結を助けるために用いたガラスの層ができ、その内部で銀が線状になっていることが分かった。

マイクロ解析によるメカニズム推定

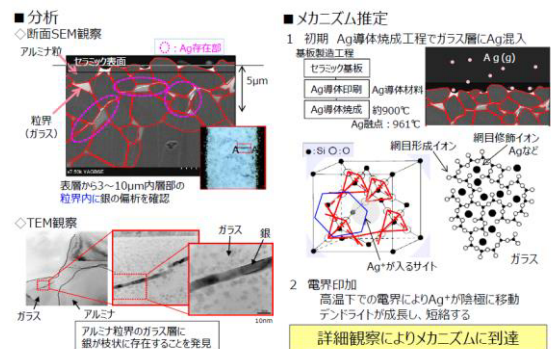


図 13 ミクロ解析によるメカニズム推定

さらに TEM で拡大観察した結果、ガラスの中に銀が約 10nm の幅で枝状になっていることが判明した。これらの結果から、ガラス中を銀イオンが移動したと考えられるが、陽極でイオン化した銀が陰極までガラ

ス中を数十時間で移動できるとは考えにくい。そこで、銀導体の焼成工程でガラスに銀が入り込んだのではないかと考えた。銀導体の焼成温度が 900℃という銀の融点に近いことから、焼成時にガス状になった銀がガラスに入っていたと考えている。ガラスというのは、非常に大きな空隙があって、この部分に銀イオンが入ることができる。具体的には、図に示すような網目修飾イオンというサイトがあって、ここに銀がイオンとして入っていると考えている。電界を印加することによって、網目修飾イオンサイトに入っていた銀イオンが陰極に移動し、金属銀として析出してデンドライトに成長し、短絡したと考えている。

3.3.2 Cu ワイヤボンディングの不具合

次の事例は高放熱パッケージで発生した不具合についてである (図 14)。発熱が大きい製品向けに放熱用のダイパッドが露出したエクスポートタイプのパッケージ製品を当社で生産している。この製品の開発に当たって、ボンディングワイヤを一般的な金から、低コストと大電流への対応のため、銅ワイヤへの切り替えを検討した。民生ではすでに銅ワイヤを使った事例は幾つかあるが、車特有の条件によって、そもそも内在していた因子が顕在化し、不具合が発生したという事例を2つ紹介する。部位としては、ワイヤボンディングの電極部と合金部での不具合になる。

Cuワイヤボンディングの不具合事例

■ Cuワイヤボンディング 耐環境事例



図 14 Cu ワイヤボンディングの不具合事例

この2つの事例もマイクロエレクトロニクスシンポジウム (MES) で昨年報告した事例である (図 15)。電極部については、熱応力による故障事例で、中心部に比べて周辺に行けば行くほど応力が高くなる。チップのエッジからの距離を取り、クラック比を見たグラフからチップの角に近いほど壊れやすくなるという現象であることがわかる。金に比べて銅が硬い金属であ

るため、電極に応力がかかってクラックが発生したと考えている。

また、ワイヤ材の銅と電極に使われているアルミニウムは拡散により合金をつくる。銅とアルミニウムとの合金はいくつかあるが、Cu₉Al₄ という非常に腐食しやすい合金層になっている。この腐食の原因はエポキシ中の密着付与剤に入っている硫黄化合物である。175℃で 500 時間の劣化試験を行ったところ、合金部分が硫化により腐食してオープンに至った。こういったものの詳細を観察することで破壊の兆候をつかみ、製品化へとつなぐことができた。

Cuワイヤボンディングの不具合事例

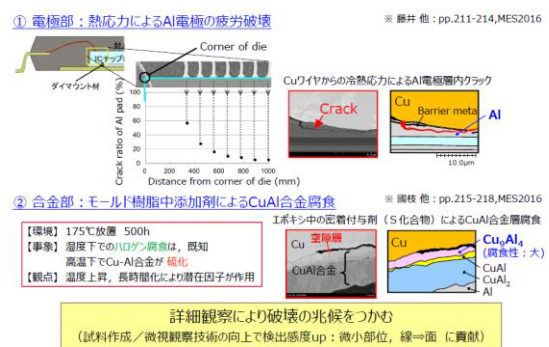


図 15 不具合事例詳細

3.3.3 接着挙動解析

接着のプロセスは、接着剤が被着体に対して濡れるという現象と反応・硬化という2つの現象から成る。そのため、①濡れという現象の把握と②熱など何らかのエネルギーで接着剤が反応・硬化する現象の把握が必要で、こうした一連の接着挙動を、シミュレーションや分析から把握する試みを図 16 に示した。

接着挙動解析

接着の素過程における接着界面の挙動を解析

素過程	0.1~1nm	1~100nm	μm
濡れ	例) 分子間の相互作用 接着剤分子 金属	例) ナノ凹凸への充填	例) μm凹凸への充填
反応・硬化	例) 硫化素反応	例) 架橋反応	例) アンカー周辺部の応力分布

実験による試行 (帰納的) ⇒ 原理に根ざした設計 (演繹的)

図 16 接着挙動解析

このような取り組みにより実験による試行といった帰納的方法から、原理に根ざした設計という演繹的

法への転換を図ることができると考えている。

具体的な事例を紹介する。図 17 は、nm オーダの溝に対して、エポキシ樹脂の分子量の高低による充填性をシミュレーションで確認した結果である。この結果から、分子量が低い場合は十分充填できるが、分子量が高くなると溝に入っていかず、無理に押し込もうとすると、金属の方が負けて変形してしまう。

エポキシ樹脂の分子量が高くなると充填不良が発生することが、シミュレーションからも分かるようになった事例である。

計算事例：粗化处理した表面への樹脂充填性

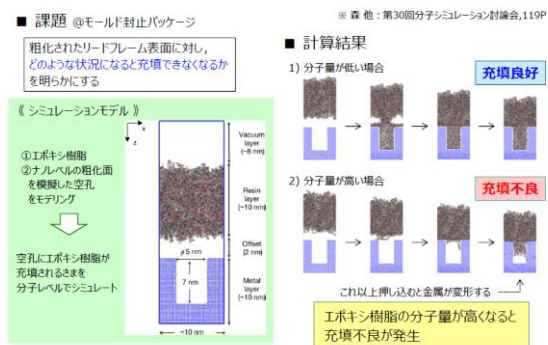


図 17 樹脂充填性の計算事例

3.3.4 化学物質雰囲気におけるパッケージ不具合

次は、化学物質雰囲気によるパッケージの不具合事例である（図 18）。先ほどモールドパッケージ中の硫黄成分が腐食を起こすという話をしたが、周りの環境中の化学物質が影響して不具合が発生するということが、最近顕著になりつつある。例えば、燃料ではアルコールが混ざった粗悪な材料が使われたり、排気ガスを再利用して燃費を向上させようという際に、NO_x や SO_x などにさらされるということを考慮する必要性が出てきている。このような化学物質に対してどのような対策を採るべきなのかを、シミュレーションと分析等からアプローチした事例を紹介する。

化学物質は、樹脂中に拡散・浸透して樹脂を膨潤・分解する。接合界面では剥離、クラックが発生し、最終的には金属の電極部分の腐食、断線といった不具合に至る。こうした不具合の抜本的な解決に向けて、メカニズムの解明に取り組んでいる。

図 19 は、樹脂の吸水能に対する自由エネルギーを計算した事例である。化学物質（この場合は水）が樹脂に浸透する（パラメータ：拡散係数）、浸透した水が溶解・膨潤する（パラメータ：自由エネルギー）、そして、

反応・分解する（パラメータ：反応の活性化エネルギー）という素過程に分けて考える必要がある。事例では、添加剤の量によって自由エネルギーがどう変化したのかを、分子動力学で計算した結果を示す。

化学物質雰囲気におけるパッケージ不具合

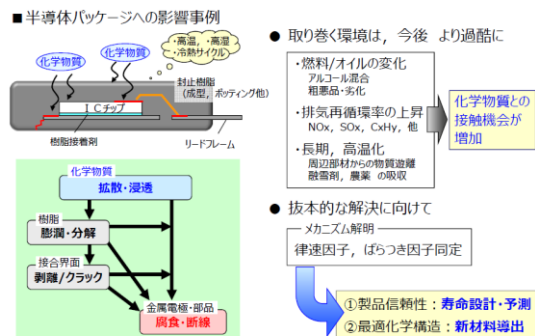


図 18 化学物質雰囲気におけるパッケージ不具合

計算事例：樹脂の吸水能に対する自由エネルギー計算

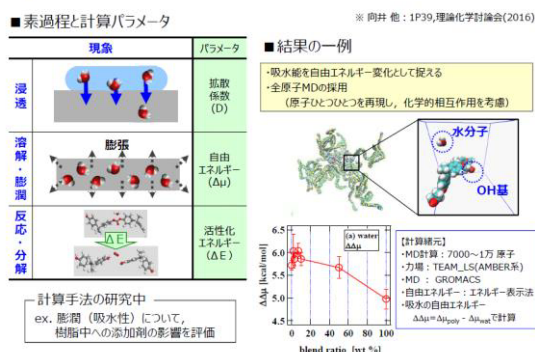


図 19 樹脂の吸水能に対する計算事例

次の事例は、エポキシ樹脂の膨潤に関する事例で、樹脂の吸水現象では水単体に比べ、混合エンジンオイルの方が膨潤しやすいという実験結果がある（図 20）。そのメカニズム解明のために樹脂高分子鎖への媒体の入り込みやすさを2つの観点で分析した（東レリサーチセンター様と共同研究）。樹脂高分子鎖が図のようなモデルの時に、隙間に媒体である水分子が入るというメカニズムを想定し、水分子の大きさを FT-IR で、樹脂の自由体積の大きさを陽電子消滅法で調査した。

FT-IR の分析結果から、水単体は多量体として存在し、エンジンオイル中の水は多量体だけでなく、単量体、二量体として存在しているものがあることが分かった。

また、陽電子消滅法の結果から、エポキシ樹脂中には水の単量体から二量体程度の大きさに広がる空隙が

あるということが分かった。

これらの分析結果は、多量体である水単体より、単量体や二量体が存在する混合エンジンオイル中の方が、エポキシ樹脂に吸水されやすいという実験結果をよく説明できていると考えている。

分析事例：樹脂への拡散、膨潤解析

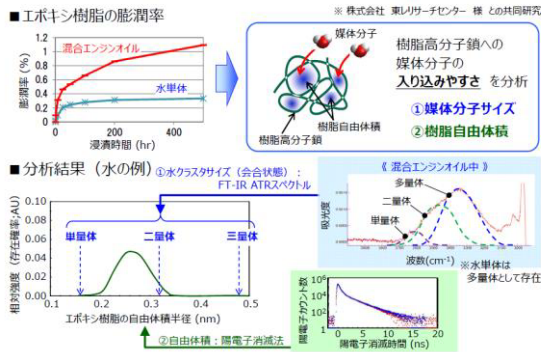


図 20 樹脂への拡散、膨潤分析事例

3.3.5 絶縁樹脂の劣化解析

最後に、絶縁樹脂材料の劣化解析事例を示す(図 21)。パワーデバイスでは、高熱伝導の絶縁フィラーを含有した樹脂材料を用いることで、絶縁特性と高放熱性に対応している。従来材料の絶縁破壊試験において、絶縁低下が速く、対策が求められていた。絶縁性の劣化は、フィラーを含有した樹脂材料の両側から電界をかけると内部電荷が移動して電極界面で局部電界が発生し、さらにその局部電界が上昇すると絶縁破壊が起こるというメカニズムで進行する。

そこで、樹脂の内部電荷分布を可視化できるシステムを開発し解析を行ったところ、絶縁寿命の短い従来材料では局部的に電荷が蓄積していることが分かった。局部的な電荷を蓄積しない材料を開発することで、絶縁特性の長寿命な材料を開発することができた。

絶縁樹脂の劣化解析

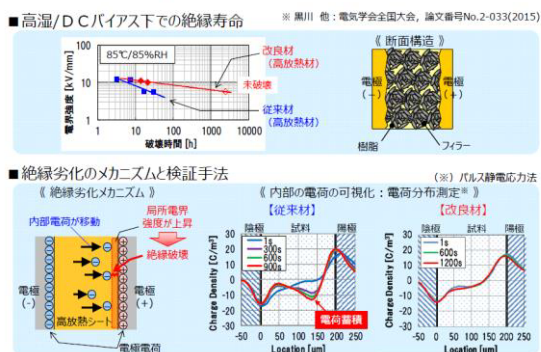


図 21 絶縁樹脂の劣化解析

4. まとめ

厳しい車載環境により民生では問題にならない課題が顕在化してきている。新技術の創出（課題解決）のためには、原因系からのアプローチが必須であると考えている。そのためには分析や CAE 技術の活用によって見えないものを可視化することで、掘り下げが進むと考えている。このようなことから、分析・CAE 技術と材料・加工・構造、といった実装技術とを協調させて優れた車載半導体デバイスを生み出して、社会に貢献していきたいと考えている。

まとめ

- ◆ 厳しい車載環境により民生では問題とならない課題が顕在化してきている
- ◆ 新技術の創出（課題解決）には 原因系からのアプローチが必須であり、分析・CAEにより見えないものを可視化することで掘り下げが進む と考えます
- ◆ 皆様とともに 分析・CAE技術と実装技術（材料・加工・構造）を合目的に協調・融合させることで、優れた車載半導体デバイスを生み出し、社会に届けてゆきます

図 22 まとめ

石川 岳史 (いしかわ たけし)

株式会社デンソー

半導体実装開発部 第 1PF 開発室

担当課長