

HEV用 小型・高耐電圧フィルムコンデンサ

Small Film Capacitor for Hybrid Electric Vehicles (HEV) with High Withstand Voltage

竹 岡 宏 樹
Hiroki Takeoka

要 旨

ハイブリッド自動車（HEV: Hybrid Electric Vehicle）のインバータ用フィルムコンデンサには、車両の高効率化、燃費向上を図るため、小型・軽量化が強く求められている。小型化の実現には、誘電体となるフィルムを薄くすることが最も効果的であるが、薄くなるぶん、耐電圧が低くなるという背反事項がある。筆者らは、HEV用に電極パターン技術、ヘビーエッジ技術などの蒸着技術を開発し、この課題を解決、小型・高耐電圧のフィルムコンデンサを開発した。これらの開発による効果として、2009年モデルのコンデンサにおいて2004年モデル比で約35%の軽量化を実現した。

Abstract

In order to improve mileage and efficiency of Hybrid Electric Vehicle (HEV), reduced size and lighter weight is strongly demanded for the film capacitors in inverter systems. We developed technologies such as electrode patterns and heavy edge structure, and commercialized small-size film capacitors with high withstand voltage. As a result of this development, we realized approximately 35% lighter weight in a 2009 model compared with one from 2004.

1. はじめに

近年、消費者の環境意識の高まりや、原油の高騰を背景にハイブリッド電気自動車（HEV）の需要が高まっている。

HEVは、内燃機関（エンジン）とモータにより駆動する車両であり、このモータ（ジェネレータ）をインバータで制御することにより、高効率化を達成している。

フィルムコンデンサは、低損失、高耐電圧、高許容リプル電流といった優れた電気的特性を生かし、モータ駆動用インバータの主に平滑用途に使用されている。最近ではインバータの高効率化を図るため、システム電圧の高電圧化や、インバータ自体の小型化が進められており、フィルムコンデンサに対しては、小型化、高耐電圧化が求められている。

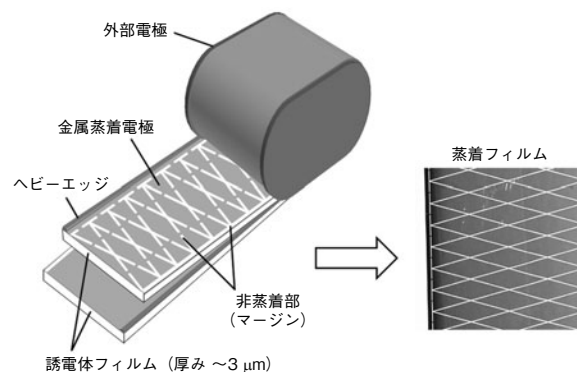
当社では、HEV用のフィルムコンデンサを業界に先駆けて開発し、2003年の2代目プリウスへの採用を果たした。その後も、順調にHEVへの搭載数を増やし、HEV市場では大きなシェアを有するに至っている。

本稿では、HEV用のフィルムコンデンサの開発技術について小型・高耐電圧化に向けた蒸着技術を中心に紹介する[1]。

2. HEV用フィルムコンデンサについて

2.1 HEV用フィルムコンデンサ素子の基本構造

基本的なフィルムコンデンサ素子の構造と蒸着フィルムの写真を、第1図に示す。フィルムコンデンサ素子は、



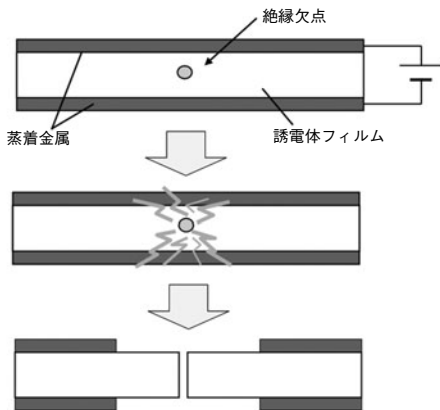
第1図 フィルムコンデンサ素子の構造 (左) と蒸着フィルム (右)
Fig. 1 Structure of film capacitor (Left) and metallized film (Right)

誘電体となる高分子フィルムに金属電極を真空蒸着で形成した蒸着フィルムを2枚1対として重ね合わせて巻回し、その端面に金属溶射（メタリコン）により外部電極を形成した構造である。HEV用途には高耐電圧、低損失 ($\tan \delta$) が求められるため、誘電体フィルム材料には、ポリプロピレン (PP: PolyPropylene) を使用している。また、金属電極材料としては、電気特性と耐蝕性、コストのバランスから、アルミニウム (Al) を使用している。このAl蒸着電極部は、多数に分割した電極がヒューズでつながった形状をしている。電極を分割している理由については、後述する。端部は外部電極との接続性を良くするために、電極を厚く蒸着したヘビーエッジとなっている。

2.2 フィルムコンデンサの高信頼性機構

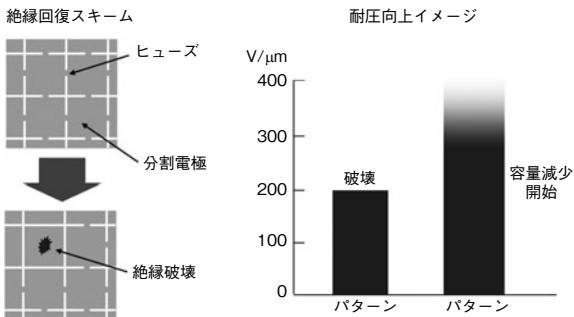
フィルムコンデンサの特長の1つに、非常に高い信頼性がある。この高い信頼性は、自己回復性と自己保安性の2重の安全機構により得られている。

第2図に、自己回復性による絶縁回復スキームを示す。誘電体となるフィルムに電圧を印加したとき、絶縁欠陥などが存在すると、その箇所が破壊しショートする。自己保安性とは、破壊点に流れ込む短絡電流で破壊点周囲部の蒸着電極を飛散させ、絶縁を確保する機構である[2]。電極が非常に薄い(20 nm程度)ことを象徴する機構である。飛散面積は、コンデンサ素子の電極面積に比べて微細であり、ほとんど容量低下には影響しない。



第2図 自己回復性による絶縁回復スキーム
Fig. 2 Schematic image of self-healing phenomena

一方、自己保安性とは、この自己回復性で絶縁回復できなかった場合に、ヒューズ機能により絶縁欠陥エリアを切り離し、絶縁を回復する機構である。第3図(左)に自己保安性による絶縁回復スキームを示す。四角に区切られた分割電極同士がヒューズ機能を果たす蒸着膜でつながっているが、絶縁破壊が起きると、ヒューズが切



第3図 自己保安性による絶縁回復スキーム(左)と耐圧向上イメージ(右)
Fig. 3 Schematic image of self-protection system (Left) and improvement of withstanding voltage (Right)

れて、短絡した箇所の分割電極を切り離し、絶縁を回復させる[3]。分割電極が切り離されるので、若干容量が減少するが、耐電圧を高く保つことができる(第3図(右))。

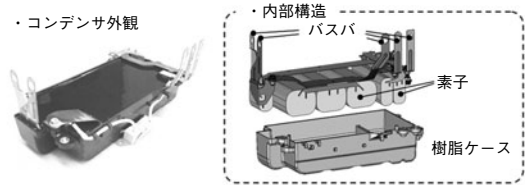
フィルムコンデンサは、この2つの絶縁回復機構により高い信頼性を確保している。

2.3 HEV用コンデンサの構造と使われ方

HEV用コンデンサの一般的な使われ方と仕様、構造を、第4図に示す。HEV用コンデンサの役割は、半導体のスイッチングノイズの平滑化とシステム電圧の安定化である。そのため、要求される静電容量は大きく、定格電圧も高い。また、電流も大きいため、自己発熱も大きい。加えて搭載位置がエンジンルーム内となると、雰囲気温度が高いため、コンデンサ素子に求められる耐熱温度は、電流による自己発熱を考慮すると100℃を超える。

続いて、コンデンサの構造について説明する。大きな静電容量を得るために、複数の素子をバスバで並列に接続している。このコンデンサを、樹脂ケースに入れ、エポキシ樹脂でポッティングし、素子を外部環境から隔離した構造としている。蒸着電極が湿度劣化しやすいために、フィルムコンデンサには、外装が必要である。

HVシステム		
コンデンサ仕様	役割	インバータ平滑用(電圧安定化)
	使用電圧	200~750 V DC
	容量	100~3000 μF
	定格電流	10~300 Arms
	最高周囲温度	80~90℃



第4図 HEV用コンデンサの仕様と構造
Fig. 4 Specification and internal structure of HEV capacitor

3. 小型・高耐電圧化技術

HEV用コンデンサに対する一番強いユーザーニーズは小型・軽量化である。コンデンサの小型・軽量化技術は、フィルムの薄手高耐電圧化(高電位傾度化)技術と外装技術に大別される。2つの技術のうちフィルムの薄手高耐電圧化が、効果的な小型化手段である。ここで、コンデンサの容量密度(C/V)は、

$$\frac{C}{V} = \frac{C}{Sd} = \frac{\epsilon}{d^2}$$

C：静電容量 V：体積 S：電極面積
d：誘電体厚さ ε：誘電率

で表され、体積はフィルム厚の2乗に反比例して小さくなるためである。例えば、フィルムの厚さが1/2になれば、体積は、1/4になる。

フィルム薄手化の相反事項は、耐電圧である。フィルムの耐電圧は、物性値であるため、薄くなるぶん低くなる。しかしながら、蒸着フィルムの耐電圧は、金属電極を形成する蒸着技術によって高めることができる。

また、蒸着技術は、電流による自己発熱、耐電流性能などフィルムコンデンサの特性を大きく左右する技術である。

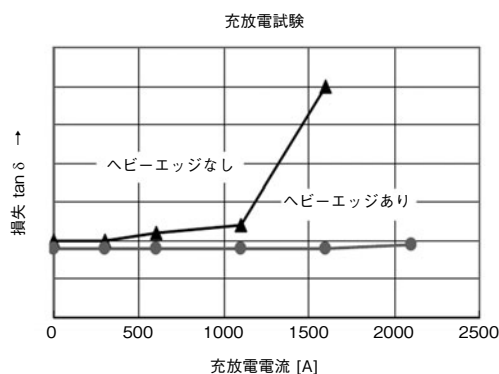
次からHEV向けに開発した蒸着技術を紹介していく。

3.1 蒸着技術開発

〔1〕ヘビーエッジ技術

蒸着フィルムの耐電圧を高めるためには、容量減少がほとんどない自己回復性により絶縁回復することが望ましい。自己回復性を優先して動作させるためには、蒸着金属電極ができるだけ小さなエネルギーで飛散するように、薄くすることが有効である。しかし、金属蒸着電極を薄くすると外部電極とのコンタクトが悪くなり、損失(tan δ)が大きくなる。

筆者らは、業界に先駆けて、コンタクト部を厚くするヘビーエッジ構造を開発し、この課題を解決した。HEV用には、メタリコン材料が亜鉛であることから、同種金属によりヘビーエッジを形成する技術を開発し、権利化している。第5図に充放電試験の結果を示す。充放電試験とは、コンデンサに所定の電圧で電荷をチャージし、それを強制的に短絡させる試験である。ヘビーエッジがない場合、大電流により蒸着フィルムと外部電極との接



第5図 ヘビーエッジの効果
Fig. 5 Effect of heavy-edge

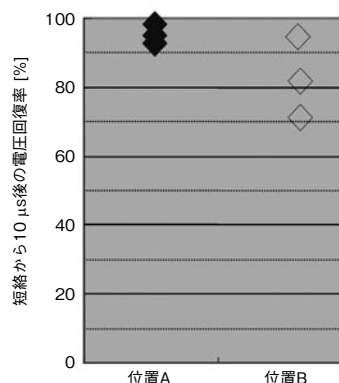
続が悪くなるため損失が大きくなる。一方、ヘビーエッジ構造では、損失の変化は認められず、蒸着フィルムと外部電極との接続が強固であることがわかる。

〔2〕ヒューズの動作性確認

蒸着フィルムの耐電圧を高めるもう1つの重要な手段は、電極パターンの設計である。分割電極の面積を小さくすれば、一度の絶縁破壊により切り離される面積=静電容量減少量は、小さくなるため、耐電圧を高くすることができる。しかしながら、面積を小さくすることは、分割電極同士をつなぐヒューズ部が多くなることであり、電流発熱が大きくなるという背反がある。

そのため、分割電極の面積は変えずに、耐電圧を高める手段としてヒューズの動作性に着目した。ヒューズの動作性を高精度にコントロールできれば、確実に適切な量の分割電極を切り離すことが可能となり、高耐電圧化につながる。

一般的な蒸着フィルムのヒューズ位置と動作性についての検討結果を、第6図に示す。第6図は、短絡が起こってから10 μs後の電圧回復率を表しており、電圧回復率が高いほどヒューズの動作性が高いと言える。図中の位置AとBは、フィルムの幅方向のロケーションが異なる。第6図より、ヒューズの位置によって、動作性が大きく異なることがわかる。位置Aのヒューズは、短絡により素早くヒューズが切れ、絶縁が回復するために電圧回復が早く、動作性は高いと言える。一方で、位置Bのヒューズは、素早く溶断しない場合があり、絶縁回復する時間にばらつきが生じ、動作性が不安定である。位置Bのヒューズは、ヘビーエッジの影響により電極の厚みムラを生じやすいことが原因と考えられる。



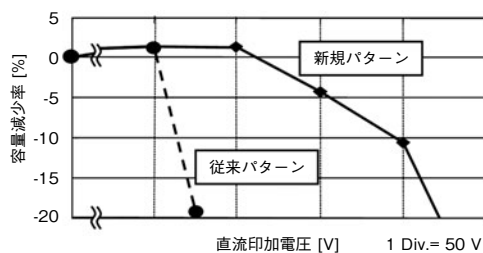
第6図 蒸着パターンとヒューズの動作性
Fig. 6 Electrode pattern and fuse activity

[3] パターン電極の改良

[2]で得られた知見を基に、動作性の高い位置にヒューズを配置した新規パターンを開発した。

高温領域では、誘電体フィルムの絶縁抵抗が低下するため、ヒューズの動作性が低下する。どれくらいの温度までヒューズが機能するかが動作性を見る指標となる。この動作性を調べるために、一定雰囲気下で電圧を一定時間おきに昇圧させる短時間耐電圧試験を実施した。

雰囲気温度を徐々に上げ、試験を行っていくうちに、スペックを超えた温度において、従来パターンでは、容量減少が急激となりヒューズ動作が不安定となった(第7図)。一方、新規パターンでは同じ温度領域でも、ヒューズが動作し、徐々に容量が減少していき、オープン故障することが確認できた。ちなみに、このときの雰囲気温度はスペックを大きく超えており、一種のイジワル試験と言える。



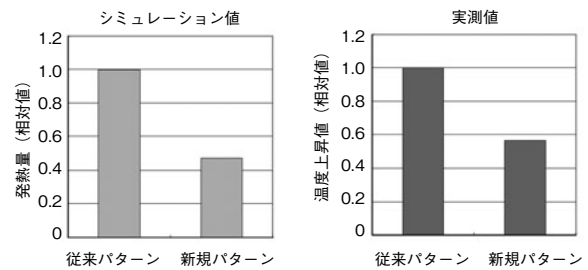
第7図 高温短時間耐電圧試験
Fig. 7 Withstanding voltage test

このように、新規パターンによりヒューズの動作性を高くし、従来以上の安全性を確保することができた。

素子を小型化していくと、熱がこもりやすくなるため、温度上昇が大きくなる。発熱量を小さくすることは、自己発熱による温度上昇を低減できるため、小型化に対して重要な技術である。フィルムコンデンサにおいて、発熱量の大きい部分は、抵抗値の高いヒューズ部分である。

そこで、筆者らは、電磁界シミュレーションを用いて電流発熱の小さいヒューズ位置を検討した。そして、新規パターンに改良を加えることにより発熱を小さくできることを見いだした。シミュレーション結果を、第8図(左)に示す。低発熱施策を盛り込んだ新規パターンでは、従来のパターンに比較し、発熱量が約半分になることがわかった。

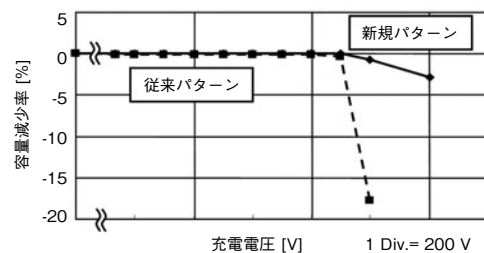
次に実際のコンデンサ素子の電流発熱試験結果を、第8図(右)に示す。第8図(右)より、新規パターンを適応した素子の温度上昇は、従来パターンの素子の約60%と大幅に小さくなっていることがわかった。このように低発熱パターンにより、発熱量を低減できること



第8図 リプル電流発熱のシミュレーション値(左)と実測値(右)
Fig. 8 Simulation result (Left) and measured value (Right) of ripple current heat generation

を確認するとともに、シミュレーションとも良い一致が得られた。

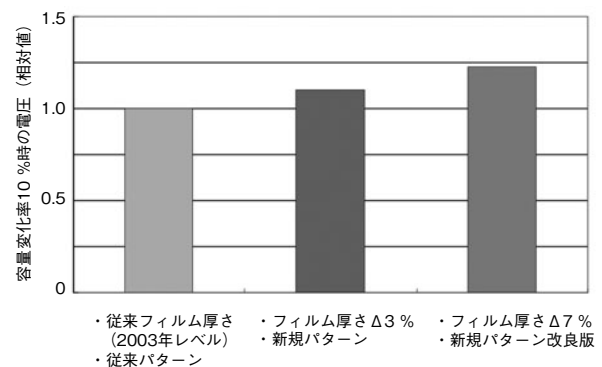
また、新規パターンでは、耐電流性能の向上も確認できた。第9図に、充放電試験の結果を示す。新規パターンでは、電流発熱が小さい、つまり耐電流性が高いため、強制短絡させたような大電流時にもヒューズが切れにくく、容量変化が小さいことがわかった。このように、新規パターンにより、耐電流性、とりわけパルス電流に対しても特性を向上させることができた。



第9図 充放電試験
Fig. 9 Charge-discharge test

3.2 薄膜化フィルムコンデンサの評価結果

第10図に、高温雰囲気における短時間耐電圧の結果を示す。値は、従来フィルム厚さ(2003年レベル)に從



第10図 高温短時間耐電圧
Fig. 10 Withstanding voltage in short time

来パターンを用いた素子の結果を基準とした相対値である。フィルムの厚さを3%薄膜化しても、新規パターンを導入することにより、その耐電圧レベルを10%向上させることができた。さらに、フィルム開発と新規パターンをベースに改良を加え、フィルムを7%薄膜化したにもかかわらず、耐電圧を20%向上させることができた。

4. 小型化効果

このような取り組みの結果として、大幅な小型化を実現した。例として、2004モデルと2009モデルのコンデンサの比較表を、第1表に示す。

第1表 小型化の効果

Table 1 Comparison of specification and weight

	2004モデル コンデンサ	2009モデル コンデンサ
コンデンサ容量	1400 μF	1200 μF
定格電圧	600 V DC	750 V DC
コンデンサ Assy 総重量	3.1 kg	1.7 kg
容量当たり重量	2.19 g/ μF	1.41 g/μF

2004モデルから2009モデルへは定格電圧が150 V高圧化しているにもかかわらず、フィルム厚みを7%薄膜化し、小型高耐電圧化を実現させた。加えて薄膜化により、内部素子数も、半減することができた。また、外装構造についても、耐湿性の高いエポキシ樹脂を開発し、使用量を削減、コンデンサの重量を低減した。これらの取り組みの結果、容量あたりで35%の軽量化を達成した。

5. まとめ

HEV用に電極パターン技術、ヘビーエッジ技術などの蒸着技術を開発し、小型で耐電圧の高いフィルムコンデンサを商品化した。この技術により、2004年レベルに比較し35%の軽量化を実現した。

インバータ用のコンデンサは、HEVだけでなく電気自動車 (EV: Electric Vehicle) や燃料電池車 (FCV: Fuel Cell Vehicle) など、電動パワートレインには欠かすことのできないデバイスである。今後もユーザーニーズに的確に対応した技術開発を行っていき、デバイスを通して、エレクトロニクスNo.1の環境革新企業を具現化していく。

参考文献

- [1] 斎藤俊晴 他, “高耐圧メタライズドフィルムコンデンサの開発動向,” 電気化学会キャパシタ技術委員会, 2004年第1回研究会予稿集.
- [2] D. G. Shaw, et al., “A changing capacitor technology - failure mechanisms and design innovations,” IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol.EI-16, no.5, pp.399-413, 1981.
- [3] A. Schnewly, et al., “Uncoupling behavior of current gates in self healing capacitors,” Material Science and Engineering B, vol.55, pp.210-220, 1998.

執筆者紹介



竹岡宏樹 Hiroki Takeoka
パナソニック エレクトロニックデバイス (株)
開発本部
Corporate Components Development Div., Panasonic
Electronic Devices Co., Ltd.