

パワーモジュール絶縁基板の絶縁破壊
に影響を及ぼす諸因子に関する研究

山梨大学大学院
医工農学総合教育部
博士課程学位論文

2022年9月

堀 元人

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	6
1.3	本論文の構成	7
第2章	本研究に関連する基礎事項とこれまでの研究	9
2.1	まえがき	9
2.2	絶縁破壊メカニズムと試験方法	10
2.2.1	固体の絶縁破壊機構	10
2.2.2	絶縁試験方法	13
2.3	パワーモジュールの絶縁設計技術と高耐圧化の課題	16
2.3.1	パワーモジュール内部構造	16
2.3.2	パワーモジュール高耐圧化への課題	18
2.4	絶縁基板の種類、製造方法	21
2.5	本研究に関連する絶縁基板、放電技術等の研究・開発事例	23
2.5.1	絶縁基板の特性向上	23
2.5.2	絶縁液体中の電荷の移動による電界緩和	25
2.6	まとめ	28
第3章	絶縁基板の絶縁破壊に影響を及ぼす封止材の影響調査	30
3.1	緒言	30
3.2	実験方法	31
3.2.1	絶縁基板のサンプル構成	31
3.2.2	実験構成	31
3.3	実験結果および考察	33
3.3.1	絶縁破壊電圧試験結果	33
3.3.2	絶縁破壊箇所観察結果	34
3.3.3	シリコーンゲルとエポキシ樹脂で破壊形態が異なる理由に ついての考察	35

3.3.4	電界解析結果	36
3.3.5	部分放電試験結果	41
3.4	結言	44
第4章	絶縁基板の絶縁破壊に影響を及ぼす絶縁材料の影響調査	45
4.1	緒言	45
4.2	実験方法	46
4.2.1	絶縁基板のサンプル構成	46
4.2.2	実験構成	46
4.3	実験結果	47
4.4	解析方法	49
4.5	解析結果	51
4.6	セラミックの表面観察結果	54
4.7	結言	55
第5章	絶縁基板の絶縁破壊に影響を及ぼす三重点電界強度の影響調査	56
5.1	緒言	56
5.2	解析方法	57
5.2.1	試験サンプル構成	57
5.2.2	解析モデルおよび解析方法	57
5.3	解析結果	60
5.4	実験方法	65
5.5	実験結果および考察	65
5.5.1	実験結果	65
5.5.2	銅箔角部と銅箔端部で差が見られなかったことについて の考察	68
5.6	結言	70
第6章	絶縁基板の絶縁破壊に影響を及ぼすセラミック内部応力の影響調査	72
6.1	緒言	72
6.2	実験方法	73
6.2.1	試験サンプル構成	73

6.2.2	実験構成	73
6.3	実験結果	74
6.4	電界解析方法	76
6.5	電界解析結果および考察	78
6.6	熱応力解析方法	81
6.7	熱応力解析結果および考察	83
6.8	結言	89
第7章 本研究論文のまとめと今後の課題		90
研究業績		93
謝辞		96

第1章 序論

1.1 本研究の背景

世界の平均気温は年々上昇しており、最新のデータでは、100年あたり0.85°Cの割合で上昇している(図1-1)。その主要因とされている二酸化炭素も増加の一途をたどっており(図1-2)、脱炭素化への要求が高まっている。図1-3は、IEA(International Energy Agency)の資料による、2020年での各分野における世界のCO₂排出量である。発電等のエネルギー分野の排出量が全体の約42%といちばん大きく、工場等の製造業・建物分野19%と自動車等の運輸分野25%と合わせると、全体の86%を占める。いかにこの分野において脱炭素化を進めていくかが大きな課題となっている。

CO₂は、電気エネルギー、熱エネルギー、動力等を得るために、主に化石燃料(石油、石炭、天然ガス等)の人為的な燃焼を行うことで発生する。従って、温室効果ガス排出を削減するためには、化石燃料の燃焼に依らない再生可能エネルギー等へのエネルギー生成方法の転換や、社会全体のエネルギー消費(伝送や変換における損失も含む)を低減する効率化が有効となる。内閣府のエネルギー・環境イノベーション戦略(NESTI2050)では、これに資する革新技術として、省エネルギー、蓄エネルギー、創エネルギー、CO₂固定化・有効利用、さらに、コア技術として、次世代パワーエレクトロニクス、革新的センサ、多目的超電導を挙げている[4]。パワーエレクトロニクスは、パワー半導体と電子部品等の組合せから成り、電気を使うすべての機器に対して、必要とする電圧、電流、交流の周波数等の電源を供給して機器の安定使用を保証するために不可欠のものである。その役割は、電力供給(発電、送電、蓄電)から電力を消費する産業、運輸、建物等のすべての分野において、電気・電子機器の電力消費の効率化や電力損失の低減に寄与することであり、電気エネルギーによって稼働している現代社会全体に効果が及んでいる。

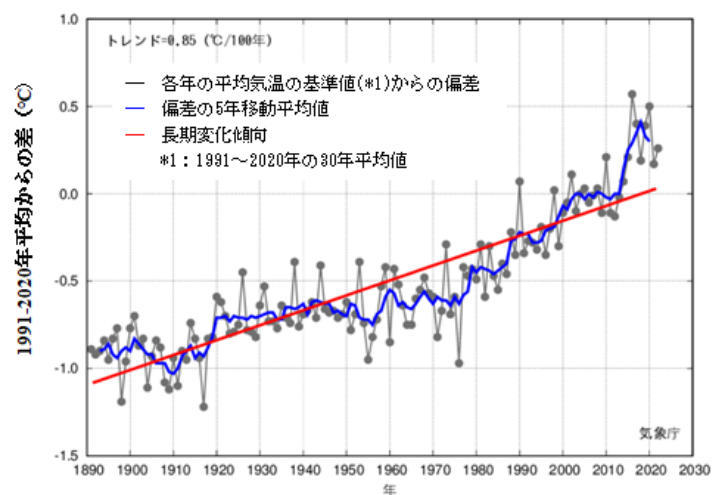


Fig. 1-1 Average temperature of the world. (1890-2020) [1].

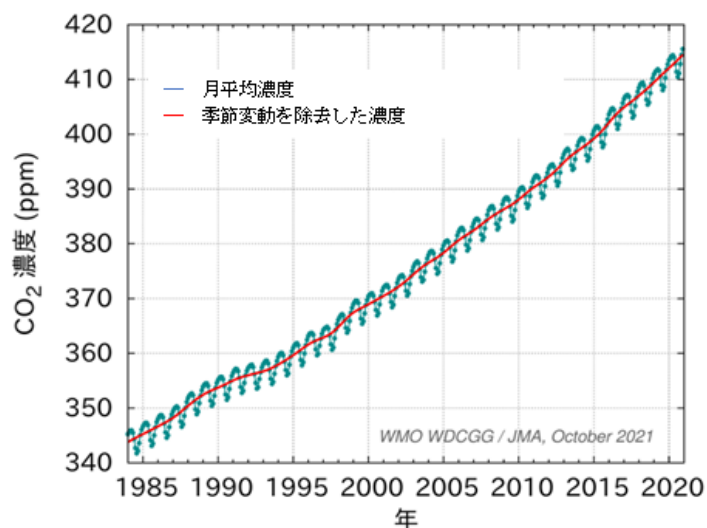


Fig. 1-2 Changes in CO₂ concentration of the world [2].

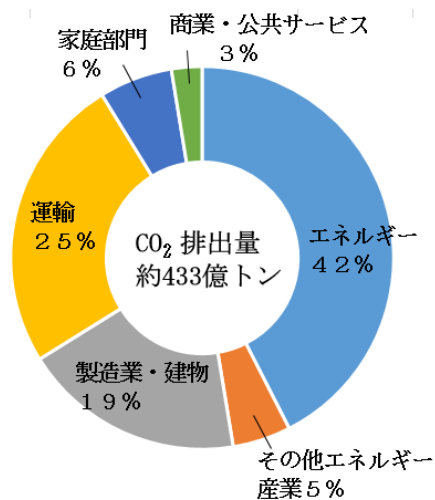


Fig. 1-3 CO₂ emissions at each field in the world [3].

パワーエレクトロニクスにおいて、重要な役割を担っているのがパワー半導体である。パワー半導体は、電流、電圧、周波数等を制御するスイッチング素子であり、小容量の分野では、スマートフォンやパソコン、テレビやエアコン、冷蔵庫など、中容量分野では、EV/HEV、産業用ロボット、汎用インバータ、UPS など、大容量の分野では、電車、太陽光発電、風力発電などの電力制御に幅広く使用されている（図 1-4 参照）。

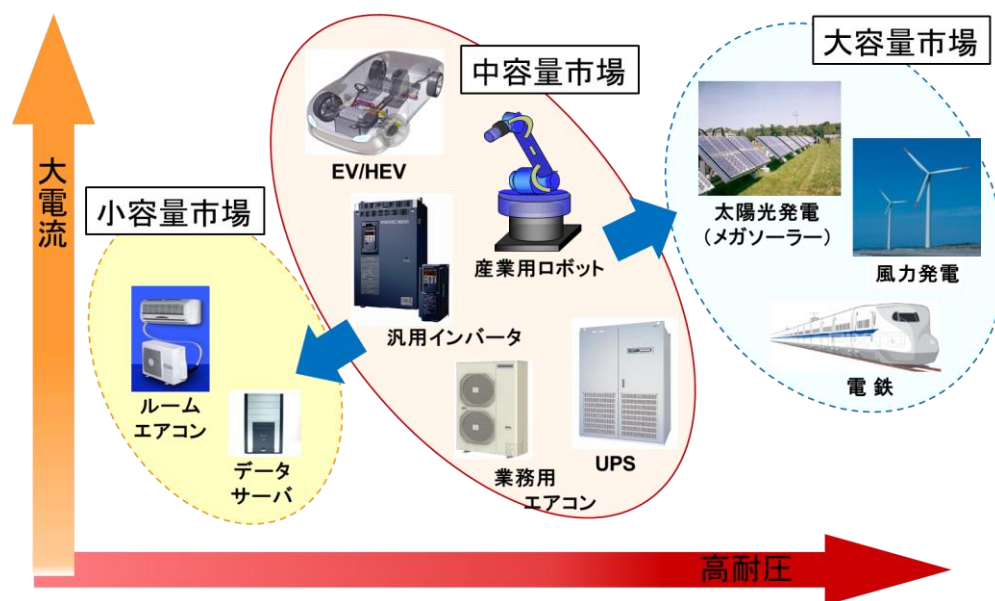


Fig. 1-4 Application of power semiconductor [5].

パワー半導体デバイスでは、通電時の定常損失とスイッチング損失を下げるために、表面構造や厚さの最適化が行われて来ている。その結果、チップサイズは 10 年前と比較し 1/2 以下にまで小さくなっている[5]。しかし、これまで主流であった Si (シリコン) を使用したパワーデバイスは、理論限界に近づいている。そこで、次世代材料である SiC(炭化ケイ素)や GaN(窒化ガリウム)、Ga₂O₃(酸化ガリウム)といった WBG (ワイドバンドギャップ) 半導体材料を使用した WBG デバイスの開発が進められている。

表 1-1 に、Si、SiC、GaN および Ga₂O₃ の WBG デバイスの材料特性を示す。WBG デバイスは、Si に比べ最大電界強度が一桁高いため高耐圧用途に向いており、デバイス構造的にベース層を薄くでき、高速スイッチングが可能なユニポーラデバイスの MOSFET やショットキダイオードの実現が可能である。その結果、損失が低減する。また、バンドギャップが約 3 倍と広いため、高温で動作可能という長所も持ち合わせている。特に SiC は、熱伝導率が高いという特長ももつ。これらの特長から、WBG デバイスには高耐圧、低損失、高温

動作、高周波数対応が期待されているが、そのためには、それぞれの WBG デバイスに適したパッケージ構造が必要となってくる。

Table 1-1 Characteristics of semiconductor materials [5].

項目	Si	4H-SiC	GaN	β -Ga ₂ O ₃
バンドギャップ (eV)	1.12	3.26	3.39	4.8~4.9
電子移動度 (cm ² /Vs)	1,500	1,000	900	300 (推定)
正孔移動度 (cm ² /Vs)	500	120	150	-
チャネル移動度 (cm ² /Vs)	500	140	1,500	-
最大電界強度 (MV/cm)	0.3	3.0	3.3	8 (推定)
熱伝導率 (W/cm ² ·K)	1.5	4.9	2.0	0.23
比誘電率 (-)	11.8	9.7	9.0	10

図 1-5 に、現在のパワーデバイスが搭載されているパッケージ構造を示す。横軸に定格電圧、縦軸に定格電流を示す。パッケージ構造は、使用される定格電流・電圧によって形状が異なり、大きく分けてディスクリットタイプとモジュールタイプに分かれる。ディスクリットタイプは、主に低電流・低電圧の TV やエアコンのような家電製品に使用される。一方、モジュールタイプは中容量から大容量にわたり、幅広く使用されている。図 1-6 に、内部構成の違いを示す。ディスクリットタイプは、リードフレーム上にパワーデバイスをはんだ等の接合材で貼り付け、アルミニウムワイヤ（以降、アルミワイヤと呼ぶ）にて配線し、全体をエポキシ樹脂等で封止した構造である。モジュールタイプは、詳細は第 2 章にて説明するが、内部絶縁を保護する絶縁基板上に、パワーデバイスをはんだ等の接合材で貼り付け、アルミワイヤにて配線し、端子を内包する樹脂ケースと放熱用銅ベースで全体を覆い、封止材を封入した構造である。ヒートシンクにサーマルグリス等を介し放熱するタイプと、ヒートシンクにはんだ付けするタイプに分かれる。それぞれ、パワーデバイスの特性を活かし、適用製品で使い易い構造となっている。

WBG デバイスの特長を最大限に活かせるようにするためには、パッケージ技術の向上が必要である。例えば、高耐圧特性を活かし、従来適用されて来なかった 10kV を超える製品分野に適用するためには、パッケージ部材の絶縁特性を向上させたり、端子間のトラッキングを抑制する構成の工夫が必要である。また、低損失化に寄与できるように高速スイッチング特性を活かすためには、サージ電圧を抑制するための配線インダクタンスの低減が必要であり、高温動作の特性を活かすためには、パッケージ部材の耐熱性向上が必要である。

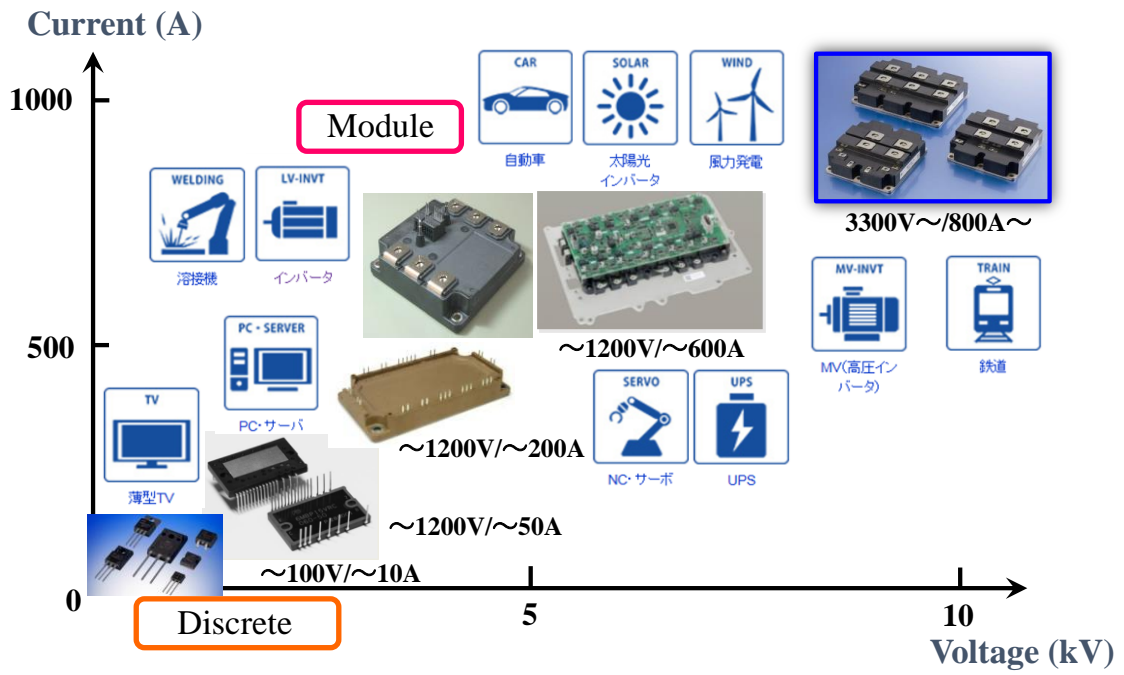


Fig. 1-5 Package structure of each lineup [6].

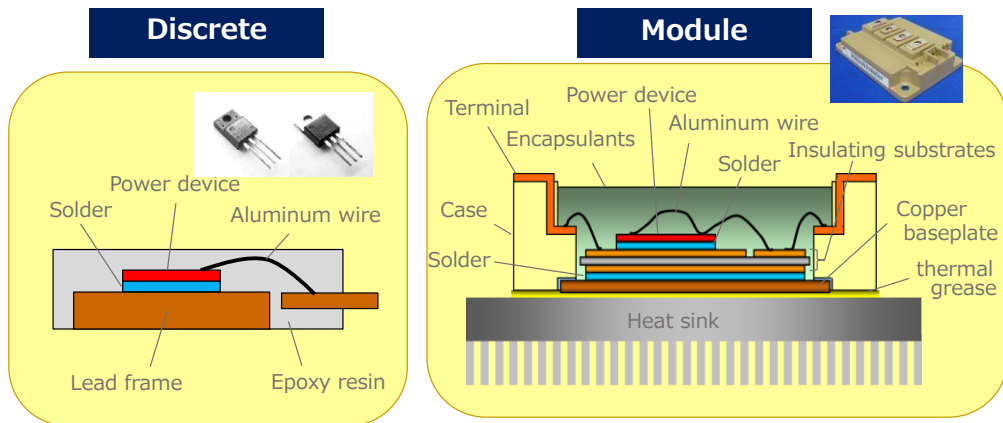


Fig. 1-6 Package structure of discrete type and module type [6].

1.2 本研究の目的

WBG デバイスの特長を最大限活かせるようにするためには、パワーデバイスを搭載するパッケージ技術の向上が必要である。そこで本研究では、WBG デバイスの特長の1つである高耐圧特性に着目し、定格 600V 以上で一般的に使用されているパワーモジュールにおける、パッケージの高耐圧化に結びつく要素技術の研究を行った。

従来のパワー半導体、特に中・大容量帯のパワーモジュールの高耐圧化では、主要な絶縁部品である絶縁基板（回路パターン、絶縁層、放熱板からなる部品）に対し、絶縁層のバルク破壊を抑制するために絶縁層を厚くしたり、絶縁層外縁部の沿面破壊を抑制するために沿面距離を延ばすといった、一般的な対応を行ってきた。その結果、パッケージが大型化しコストアップする課題が生じている。そこで本研究では、絶縁破壊に影響を与える諸因子を明らかにし、それをコントロールし最適化することを目指し、従来の研究で実施されていない以下の項目について検討を行う。

- (1) 絶縁基板の絶縁破壊の種類としては、絶縁材料自体のバルク破壊と、絶縁材料表面で生じる沿面破壊の2種類があり、沿面破壊に対してはパッケージ封止材の影響が大きいと考えられている。そこで、代表的な封止材であるシリコーンゲルとエポキシ樹脂をパラメータとした絶縁破壊電圧試験を行い、封止材が絶縁破壊の種類に及ぼす影響について明らかにする。
- (2) 熱伝導率が高く放熱性に優れ、かつ絶縁破壊電圧も高く高耐圧用の絶縁基板として期待されている、窒化ケイ素基板と窒化アルミニウム基板（以降、窒化アルミ基板と呼ぶ）に対し、同一形状の絶縁基板サンプルを用いた絶縁破壊電圧試験を行い、また比誘電率の違いによる電界解析、SEM による材料表面観察を行い比較することで、それぞれの材料と絶縁特性の関係を考察する。
- (3) 電界強度が極大値となり、絶縁基板の絶縁破壊電圧に大きな影響を与えられれている、銅箔、絶縁層、封止材からなる三重点に対し、その位置と電界強度の大きさをパラメータとした絶縁破壊電圧試験と、それに対応した電界解析を行い、絶縁破壊箇所と電界強度、絶縁破壊電圧の関係について明らかにする。

(4) 封止材により封止されたパッケージ形態を想定した絶縁基板に対し、温度をパラメータとした絶縁破壊電圧試験を行い、温度による絶縁破壊箇所の違い（三重点との関係）と絶縁基板内部応力の関係、および破壊に至るまでのメカニズムについて明らかにする。

1.3 本論文の構成

本研究論文は、全7章で構成されており、各章の内容は以下の通りである。

第1章 序論

第1章では、本研究の背景、目的、研究内容の概略について説明する。

第2章 本研究に関連する基礎事項とこれまでの研究

第2章では、本研究内容に関連する基礎事項と、パワーモジュールの絶縁設計技術および高耐圧化への課題、パワーモジュールの主要な絶縁部品である絶縁基板の種類・製造方法、および本研究に関連する従来研究事例について説明する。

第3章 絶縁基板の絶縁破壊に影響を及ぼす封止材の影響調査

第3章では、パワーモジュールの代表的な封止材である、シリコンゲルとエポキシ樹脂をパラメータとした絶縁破壊電圧試験結果について述べる。また、その結果に対しての理由について考察する。

第4章 絶縁基板の絶縁破壊に影響を及ぼす絶縁材料の影響調査

第4章では、パワーモジュールの高耐圧用絶縁基板として期待されている、窒化ケイ素基板と窒化アルミ基板の、絶縁破壊電圧試験結果とその理由について述べる。

第5章 絶縁基板の絶縁破壊に影響を及ぼす三重点電界強度の影響調査

第5章では、パワーモジュール絶縁基板の絶縁破壊に大きな影響を与えられれている、銅箔、絶縁層、封止材からなる三重点の電界強度に対する、シミュレーションと実験結果について述べる。絶縁層に対する表裏銅箔の位置を変えた場合の電界解析を行い、三重点を含めた電界強度分布を求め、その後、実験により絶縁破壊電圧および絶縁破壊箇所を調査し、各々の相関について述べる。

第6章 絶縁基板の絶縁破壊に影響を及ぼすセラミック内部応力の影響調査

第6章では、封止材により封止されたパワーモジュールのパッケージ形態を想定した絶縁基板に対し、温度をパラメータとした絶縁破壊電圧試験を行い、温度による破壊箇所の違い（三重点との関係）と絶縁基板内部応力の関係、および破壊に至るまでのメカニズムについて述べる。

第7章 本研究論文の総括

第7章では、本研究における成果を要約し、今後の課題について言及する。

参考文献

- [1] 気象庁，“気候変動監視レポート 2021”，2021.
- [2] 気象庁，“二酸化炭素濃度の経年変化グラフ”，2021.
- [3] IEA CO2 Emission from Fuel Combustion 2020 Highlights, 2020.
- [4] 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構，“技術戦略研究センターレポート TSC Foresight”，Vol.103, 2021.
- [5] 高橋良和, 両角 朗, 西村芳孝, “パワーエレクトロニクスを支えるパワー半導体モジュール技術の最新動向”，第26回マイクロエレクトロニクスシンポジウム, 2016.
- [6] 両角朗, “自動車用に向けたパワー半導体におけるパッケージ技術”，サイエンス&テクノロジー(株) 技術セミナー, 2018.

第2章 本研究に関連する基礎事項とこれまでの研究

2.1 まえがき

パワーモジュールは、電流、電圧、周波数等を制御するスイッチング素子であり、扱う電流・電圧が高いため、絶縁は重要な設計項目の1つである。中でも、中・大容量帯のパワーモジュールの主要な絶縁部品である絶縁基板は、パワーモジュール独自の部品であり、絶縁性能の他にも、放熱性能や信頼性が要求される主要部品である。

そこで本章では、本研究に関連する基礎事項と、パワーモジュールの絶縁設計技術および高耐圧化への課題、絶縁基板の種類・製造方法、および従来研究で報告されている絶縁基板の熱伝導率向上技術、電荷の移動による電界緩和技術等の研究・開発事例について述べる。

2.2 絶縁破壊メカニズムと試験方法 [1]

2.2.1 固体の絶縁破壊機構

固体の絶縁破壊メカニズムとしては、図 2-1 に示す各種のメカニズムが提唱されており、大別すると、短時間破壊と長時間破壊とになる。それぞれの絶縁破壊機構について説明する。

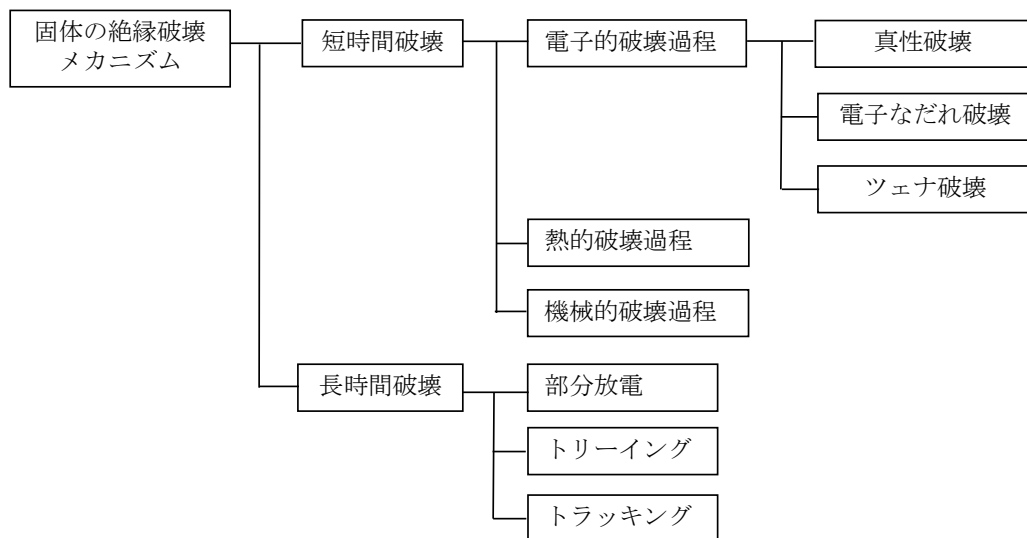


Fig. 2-1 Mechanism of dielectric breakdown [1].

(1) 電子的破壊過程

(a) 真性破壊

固体誘電体内には、わずかであるが伝導電子が存在する。この伝導電子が電界から得るエネルギーと、格子原子に与えるエネルギーの平衡が崩れるときの破壊を、真性破壊という。そのときの電界を破壊電界という。破壊電界は、試料の厚さや電極材質、電圧波形に依存しない、物質固有の定数と考えられている。

(b) 電子なだれ破壊

伝導帯にある電子が印加電界によって加速され、これが価電子帯の電子と衝突したとき、これを電離する十分なエネルギーを持てば衝突電離が生じる。このようなことが、次々と電界下で陰極より陽極に向かって進展し、電子数が増加し、なだれに成長したと

きに、格子構造が破壊され固体破壊に至るという理論。

(c) ツェナ破壊

高電界下のトンネル効果 (tunnel effect) により、伝導帯の電子が急増し、その電子電流による発熱が臨界温度を超えたときに破壊するとする理論。伝導帯と価電子帯との間のバンドギャップが狭く、薄い試料に対するモデルとして提案された。例えば、Ge の p-n 接合の逆バイアス時などにおける絶縁破壊が対象となる。厚さ 1,000Å を境として、これ以上ではなだれ破壊、これ以下ではツェナ破壊となることが判っている。破壊電界強度は 10MV/cm のオーダーである。

(2) 熱的破壊過程

固体絶縁物に電界を印加するとジュール熱が発生し、この熱は固体の温度上昇と周囲への拡散によって失われる。その平衡状態が崩れることによる破壊をいう。

(3) 機械的破壊過程

電圧印加に伴う電極間圧力 (マクスウェル応力) の発生によって、誘電体が押しつぶされ、ある程度以上になると平衡点がなくなり機械的に破壊される現象。

(4) 部分放電

次に、長時間破壊過程について述べる。固体絶縁物が、長時間の電圧印加により破壊することがある。その要因として、部分放電、トリッキング、トラッキングの三つが考えられている。

まず、部分放電による長時間絶縁破壊について説明する。部分放電は、主に固体誘電体の内部または表面で、気体あるいは液体の媒質が、そこの電界によって局部破壊する現象で、直ちに全路破壊に進展することはないが、連続的に発生すると固体が侵食穿孔され貫通破壊となる。例えば絶縁構成においては、封止材料との接合界面が存在するが、このような界面では、接合時空気層が介在したり、あるいは接合後の熱履歴などで剥離が生じやすく、この界面で放電が起きる可能性がある。

一例として、絶縁物内にボイドが存在する場合における、放電開始電圧について説明する。絶縁物内に厚さ d の空気の平行ボイドがあり、絶縁物の厚さを D 、比誘電率を ϵ 、ボイドの放電電圧を v_s とすれば、これら絶縁物系の外部から測定した放電開始電圧 V_s は、(2-1)式となる。

$$V_s = \frac{v_s}{d} \left(d + \frac{D}{\epsilon} \right) \quad \dots (2-1)$$

ここに D/ϵ は空気 ($\epsilon = 1$) に換算した絶縁物の等価厚さである。

ボイドの大きさと放電開始電圧は図 2-2 のような関係をもち、この曲線をパッシェン曲線という。ここに、 D : 絶縁物の厚さ、 ϵ : 絶縁物の比誘電率、 D/ϵ : 空気 ($\epsilon = 1$) に換算した絶縁物の等価厚さである。 D/ϵ が小さいほど、放電開始電圧が小さくなる。

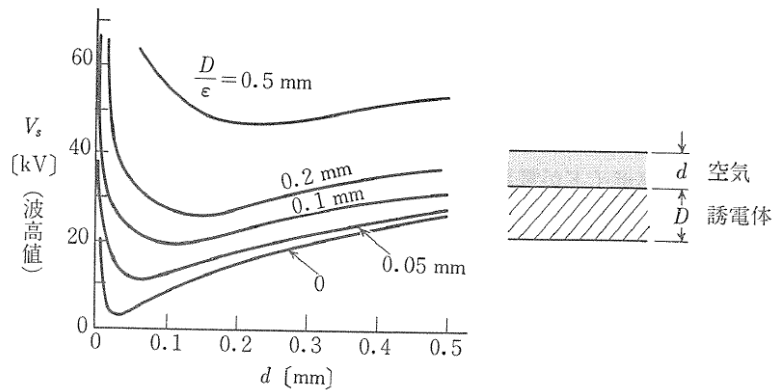


Fig. 2-2 Example of paschen curve [1].

(5) トリーイング

固体絶縁物中に電極上の突起などのような局所的な高電界部分が存在すると、細い管からなる樹枝状の放電路（トリー：tree）が発生し、これが電極間を橋絡すると全路破壊を起こす。樹枝状の放電路をトリーイング（treeing）という。厚肉の試料中で電極上の針状突起、導電性繊維、水分などが存在するときに起こりやすい。トリーは材料の真性破壊電圧よりもはるかに低い電圧で出現し、完全破壊をもたらす。図 2-3 に、沿面放電が固体中に侵入して、対電極側に進展した事例を示す。

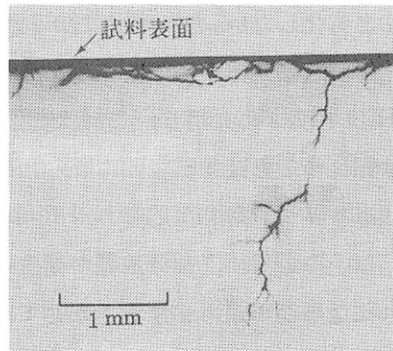


Fig. 2-3 Case of treeing invading a solid [1].

(6) トラッキング

絶縁物表面に沿面方向の電界が存在するところに、塩分、塵埃、湿分などが付着すると徐々に導電性通路（トラック：track）が形成され、これがもとで低い電圧で沿面破壊を引き起こすことがある。このように、絶縁物表面にトラックができる現象をトラッキング（tracking）という。有機絶縁物の表面に、アーク放電の熱による炭化や、アーク放電による導電性生成物（電極金属の蒸着など）によって低抵抗の導電路が形成される現象をアークトラッキングと称している。アーク放電の熱による炭化に関しては、炭素含有量の多い材料はこの現象が起きやすいが、アミノ樹脂、ポリアミド樹脂のように炭素主鎖の途中に N、O 等が結合している材料は炭化しにくく、一般に耐アーク性がよい。

2.2.2 絶縁試験方法

(1) 絶縁破壊電圧試験

図 2-4 に、実験構成の概略図を示す。試験方法は、試料を図で示したような電極ではさんで電圧を印加し、絶縁破壊が生じるまで電圧を上げていく。試料の周囲環境は、実験目的によって異なる。例えば、空気中に置かれた試料の絶縁破壊特性を確認したい場合は、図のような構成にて電圧を上げていくと、空気の絶縁破壊電圧が低いため、板状試料の周囲の空気がまず局部的に破壊して沿面放電が生じる。更に電圧を上げていくと、図中 A のような経路を通して沿面放電が発達し、両電極間が火花放電で短絡され、これ以上電圧をあげることができない。そこで、板状試料そのものの絶縁破壊電圧を確認したい場合は、絶縁油等の絶縁性液体に、試料および電極部を浸漬させるような実験構成とし、電圧を上げていく。その結果、図中の B 又は C の経路を通して絶縁破壊が生じる。規格では、図 2-5 のような電極形状も推奨されている。

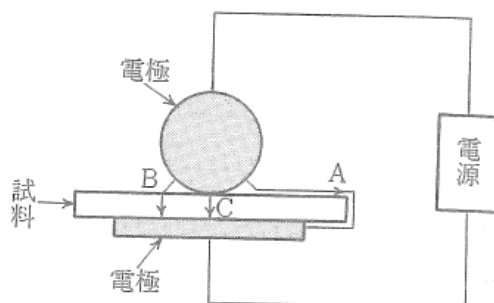


Fig. 2-4 Schematic diagram of experiment setup [1].

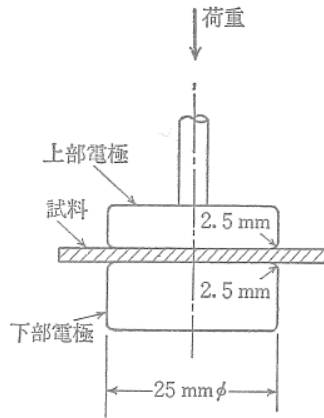


Fig. 2-5 Example of electrode shape [1].

(2) 部分放電試験

図 2-6 に、部分放電試験を行うための等価回路を示す。ここで、 C_a はボイドと並列に入る絶縁物の静電容量、 C_b は同じく直列に入る静電容量、 C_g はボイドの静電容量である。供試体の電極間に電圧 V_s が印加されると、ボイドに加わる v_s は C_b と C_g とで分圧され、(2-2)式で表される。

$$v_s = \frac{V_s \cdot C_b}{C_b + C_g} \quad \dots \dots \dots (2-2)$$

そして、放電の大きさを表す放電電荷量 Q は、 $C_a \gg C_b$ 、 $C_a \gg C_g$ の条件において、(2-3)式となる。

$$Q = \frac{v_s \cdot C_b \cdot C_a}{C_b + C_a} \approx v_s \cdot C_b \quad \dots \dots \dots (2-3)$$

一方、部分放電が生じたとき、 C_a の両端に発生する電圧変化 ΔV は、 v_s が C_b と C_a で分圧された C_a の両端の電圧となり(2-4)式で示される。

$$\Delta V = \frac{C_b \cdot v_s}{C_b + C_a} \approx \frac{C_b \cdot v_s}{C_a} \quad \dots \dots \dots (2-4)$$

(2-3)と(2-4)より、

$$\Delta V = \frac{Q}{C_a} \quad \dots \dots \dots (2-5)$$

ここで、 C_g 、 C_b は実測することが困難なため真の電荷量はわからないが、 C_a の電圧変化 ΔV と C_a は実測できるので、これらから見かけの放電電荷量 Q を測定し部分放電を評価する。

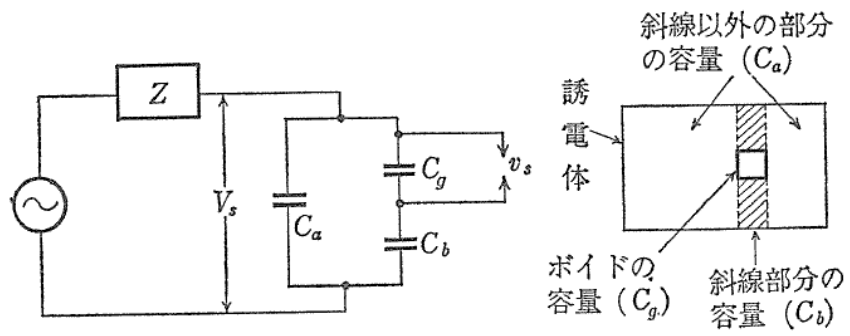


Fig. 2-6 Equivalent circuit of void discharge [1].

2.3 パワーモジュールの絶縁設計技術と高耐圧化の課題

2.3.1 パワーモジュール内部構造

図 2-7 に、一般的なパワーモジュールの基本構造を示す。絶縁基板は、セラミックや樹脂などの絶縁層に、銅やアルミニウムからなる回路パターンを表側に貼り付け、放熱用の金属板（銅など）を裏側に貼り付けたものである。詳細は後述するが、セラミックの種類としては、アルミナ、窒化アルミ、窒化ケイ素等があり、樹脂の種類としては、エポキシ、液晶ポリマー等がある。必要とされる定格電圧や放熱性により使い分けられている。絶縁基板の表側の回路パターン上には SiC や Si 等のパワーデバイスが搭載され、アルミワイヤにて配線されており、電気回路が構成されている。電気回路の例を表 2-1 に示す。適用される電気回路（2in1, 6in1 等）や定格電流に応じ、パワーデバイスの搭載数が異なり、パッケージ形状や大きさが異なる。パワーデバイスの接合材としては一般的にはんだが用いられているが、高熱伝導・高融点材料として銀や銅の焼結材が用いられることもある。また、大電流化を図るために、アルミワイヤの代わりに銅製のリードフレームが用いられることもある。絶縁基板は、放熱用銅ベースにはんだにて接合され、樹脂ケースで囲われた空間はシリコーンゲルやエポキシ樹脂等の封止材にて封止される。また、EV（Electric Vehicle）や HEV（Hybrid Electric Vehicle）に使用されているパワーモジュールでは、冷却フィンや冷却器一体のものもある。

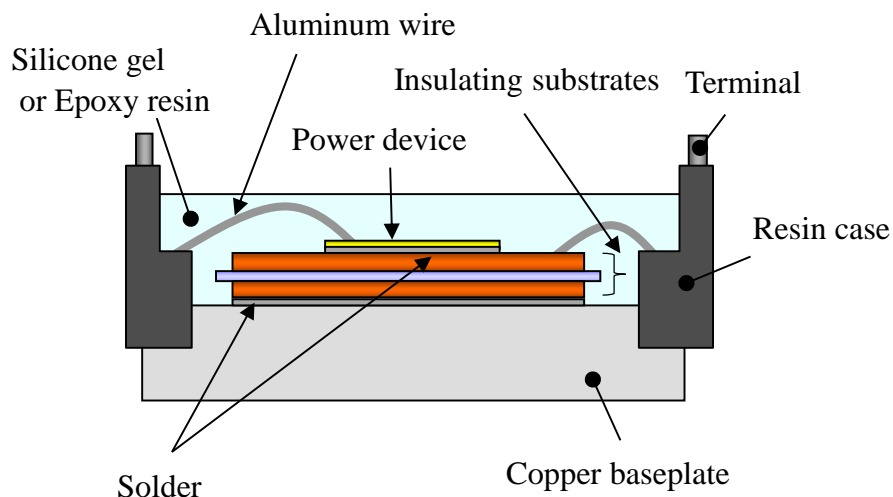

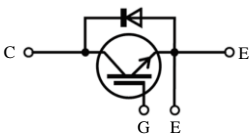

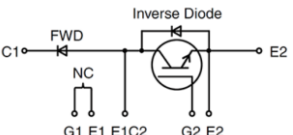

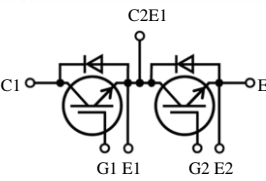

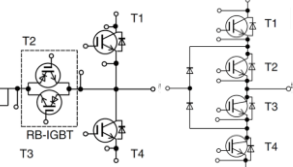

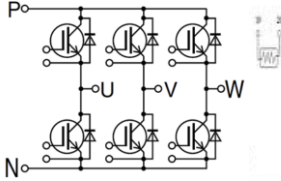

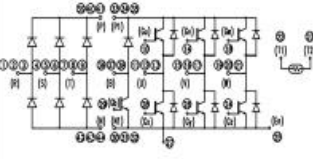


Fig. 2-7 Basic structure of power module [2].

Table 2-1 Circuit configuration example of IGBT module [3].

名称	IGBTモジュールの例		特徴
	外観	等価回路	
1in1			パッケージの中にIGBTとFWDを各1個内蔵した製品。電流定格の大きな領域の製品で、並列接続することで更に大容量の装置に適用することも多い。
chopper			パッケージの中にIGBTとFWDを各1個直列接続し内蔵した製品。PWMインバータのブレーキ用途、2in1等と組み合わせてタイプ3レベル回路を構成できる。
2in1			パッケージの中にIGBTとFWDを各2個内蔵した製品。3台一組でPWMインバータを構成するのが一般的。又電流定格の大きいモジュールを並列接続して使用することも多い。
4in1			パッケージの中にIGBTとFWDをT型またはI型に配置し構成した製品。太陽光インバータ等に使うのが一般的。又モジュールを並列接続して使用することも多い。
6in1			パッケージの中にIGBTとFWDを各6個内蔵した製品。温度検出用にNTCサーミスタを内蔵したタイプも系列化。本モジュール1台でPWMインバータを構成するのが一般的。
PIM			PIMとはパッケージの中にコンバータ、インバータ、ブレーキの3機能を内蔵した製品。温度検出用にNTCサーミスタを内蔵したタイプも系列化。

2.3.2 パワーモジュール高耐圧化への課題

パワーモジュールにおける絶縁構成について説明する。パワーモジュールには高い電圧がかかり大電流が流れる。そこで、電気回路を構成している、絶縁基板の表側回路パターン、パワーデバイス、アルミワイヤ、端子と、GND側につながっている樹脂ケース、放熱用銅ベースとの間で、絶縁を保つ必要がある。絶縁機能としては、放熱用銅ベースと絶縁基板の表側回路パターンの間は、絶縁基板の絶縁層が絶縁を保護しており、端子は樹脂ケースが、パワーデバイスやアルミワイヤ含めた電気回路を構成しているパワーモジュール内部空間は、封止材が絶縁を保護している。

次に、パワーモジュール内部の絶縁破壊箇所と高耐圧化への対応について、図2-8を用い説明する。絶縁破壊現象としては、絶縁基板表側回路のパターン間の沿面破壊、絶縁基板絶縁層のバルク破壊または絶縁層外縁部の沿面破壊がある。そこで、パワーモジュールの高耐圧化を図るためには、絶縁基板表側回路のパターン間距離を拡げる、絶縁層を厚くする、絶縁層外縁部の沿面距離を延ばす等の対応が必要である。但し、そのことによる課題もあるため、次に説明する。

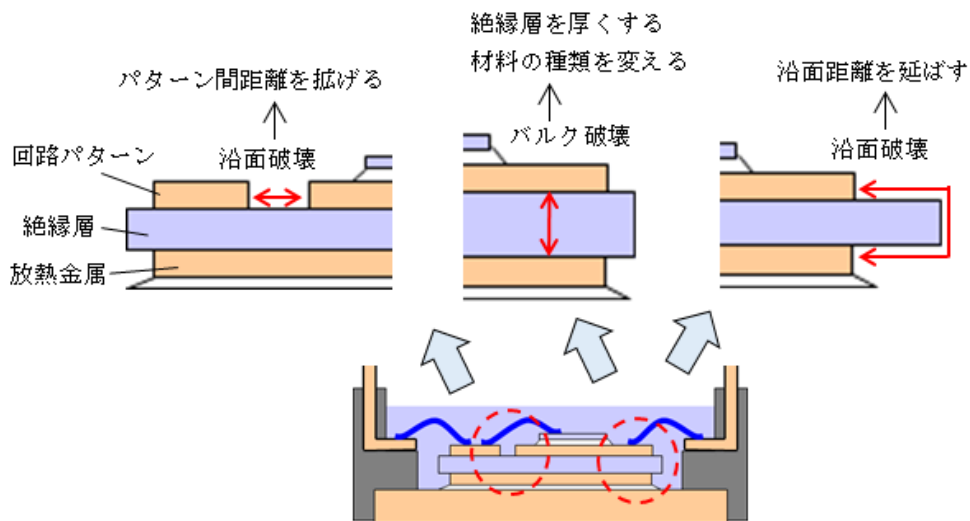


Fig. 2-8 Dielectric breakdown points of power module.

絶縁基板に求められる特性としては、絶縁破壊電圧以外に放熱性があり、パワーデバイスからの熱を放熱用銅ベースにスムーズに伝達できるよう、熱抵抗の低い絶縁基板が望まれている。図2-9は、一般的なIGBTモジュールの縦方向（部品積層方向）の温度上昇グラフである。このグラフから、温度上昇が大きい部分は、絶縁基板の絶縁層であるセラミックと、放熱用銅ベースからの熱を冷却器に伝えるサーマルグリスであることが分かる。(2-6)式に、絶縁基板の絶縁層における熱抵抗 R_{th} と、厚さ t 、熱伝導率 λ 、伝熱面積 A の関係式を記す。

$$R_{th} = \frac{t}{\lambda A} \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

絶縁層の熱抵抗 R_{th} を低くするためには、熱伝導率 λ の高い絶縁層を用い、板厚 t をなるべく薄くすることが必要である。また、熱抵抗 R_{th} の逆数(2-7)式を、熱コンダクタンスといい、放熱のしやすさを表す。

$$U = \frac{1}{R_{th}} \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

一方、前述したように、パワーモジュールの高耐圧化を図るためには絶縁層を厚くすることが必要であり、両者はトレードオフの関係となる。そこで、如何に絶縁層の板厚を厚くせず、絶縁性能を向上させるかが課題となる。

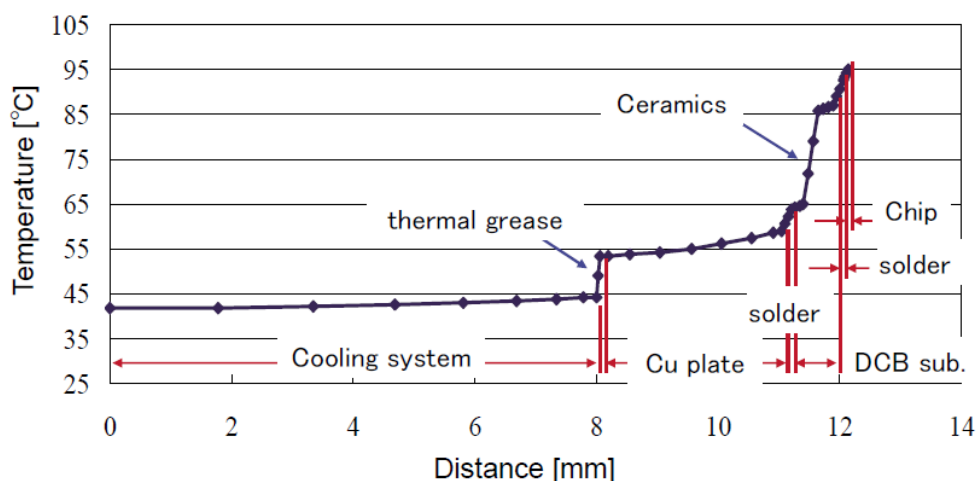


Fig. 2-9 Graph of temperature at conventional module [4].

次に、絶縁層の厚さと絶縁破壊強度の関係について説明する。ミクロンオーダー以下の薄膜領域を除くと、絶縁破壊電圧 V は絶縁層の厚さ t とともに上昇し、実験式である(2-8)式に従う。

$$\left. \begin{aligned} V &= At^n \quad (n=0.3\sim 1.0) \\ E &= \frac{V}{t} = At^{n-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-8)$$

ここで、 A ：定数、 n ：材質、電圧波形、厚さにより決まる定数（0.3～1.0の範囲）、 E ：絶縁破壊強度である。絶縁層の厚さ t がミクロンオーダー以下の薄膜領域になると、図 2-10 のように、厚さの減少とともに絶縁破壊強度が急に上昇し始める。図 2-10 はマイカの事例である。

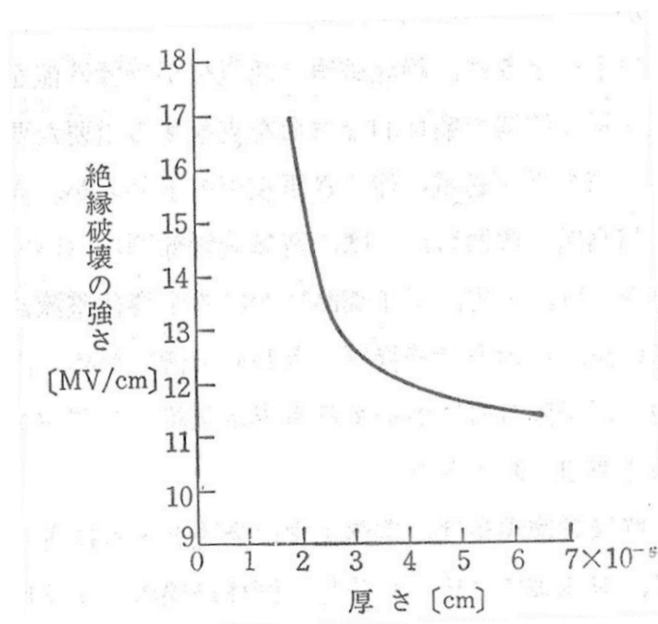


Fig. 2-10 Effect of thickness (ex. mica) [1].

(2-7)式と(2-8)式を用い、絶縁層の厚さと熱コンダクタンス、絶縁破壊電圧の関係を計算しイメージ図にしたものが、図 2-11 である。横軸は、絶縁層の厚さで、0.2～1.2 mm の範囲とした。縦軸は、熱コンダクタンスと絶縁破壊電圧で、最大値を 100% とし表示している。熱コンダクタンスと絶縁破壊電圧はトレードオフの関係となり、熱コンダクタンスは、絶縁層が厚くなるほど低下し放熱性が悪化するが、逆に絶縁破壊電圧は、絶縁層が厚くなるほど増加し絶縁耐圧特性が向上することが分かる。

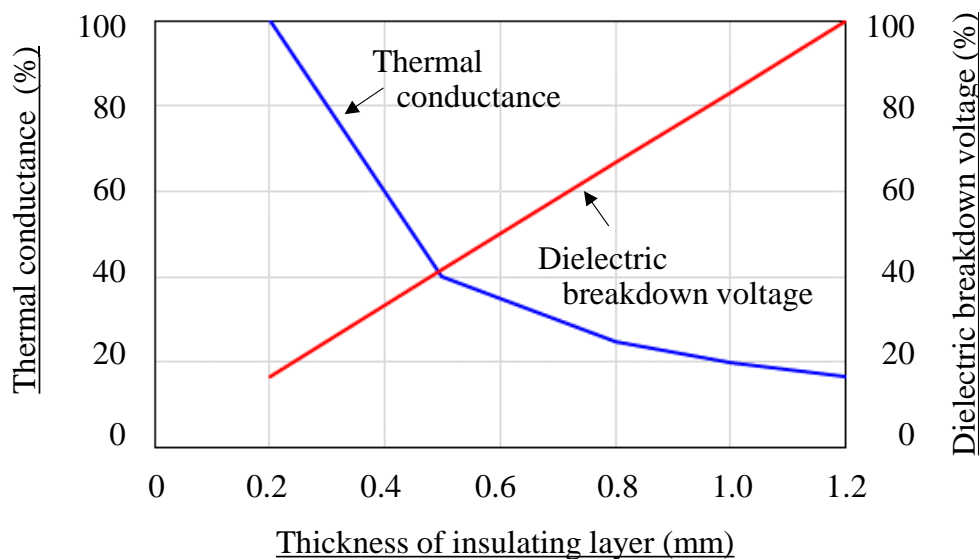


Fig. 2-11 Relationship between thermal conductance and dielectric breakdown voltage.

2.4 絶縁基板の種類、製造方法

パワーモジュールに使用されている絶縁基板の種類について説明する。絶縁層の材料や製造方法等、幾つかの項目により分類される。

絶縁層の材料は、セラミックと樹脂に大別され、セラミックとしてはアルミナ、窒化ケイ素、窒化アルミ等が使用され、樹脂としてはエポキシ、液晶ポリマー等が使用されている。一例として、図 2-1 2 に窒化ケイ素基板の写真を示す[5]。セラミックはもともと広く使用され、樹脂と比較し高い熱伝導率 ($20\sim 200\text{ W/m}\cdot\text{K}$) をもち、放熱性が高いというメリットがある。板厚は $0.25\sim 1.0\text{ mm}$ 程度である。絶縁層の表裏に銅箔 (板厚 $0.2\sim 0.6\text{ mm}$) が接合され、絶縁基板を構成している。銅箔の代わりに、アルミニウムを使用しているものもある。

セラミックと銅箔の接合には、接合材を用いずに、セラミックと銅箔を直接反応により接合する直接接合法 (Direct Bonding) と、チタンやジルコニウムなどの活性金属を添加したろう材を用いる活性金属接合法 (Active Metal Bonding) とが主に使用されている。直接接合法は、主にアルミナ等の氧化物系セラミックに用いられ、約 $1,030\sim 1,070^\circ\text{C}$ の温度で接合される。一方、活性金属接合法は、窒化アルミ等の窒化物系セラミックに用いられ、接合温度は約 $700\sim 800^\circ\text{C}$ である[6]。直接接合法を用いた DCB 基板は、セラミックの絶縁

基板として最も幅広く使用されている。また、活性金属接合法を用いた AMB 基板は、回路パターンの板厚を厚くすることが可能であり、パワーモジュール大電流化の流れで需要が伸びてきている。図 2-1 3 に、構成イメージを示す。

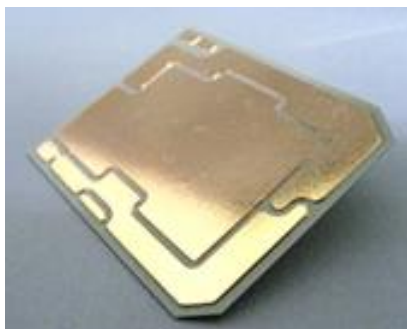


Fig. 2-12 Si_3N_4 substrate [5].

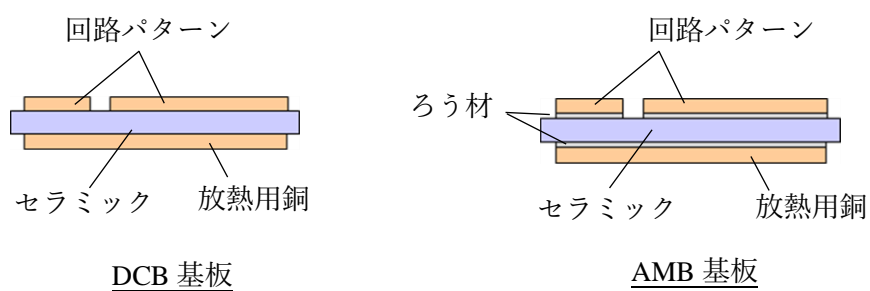


Fig. 2-13 Schematic diagram of insulating substrates.

2.5 本研究に関連する絶縁基板、放電技術等の研究・開発事例

2.5.1 絶縁基板の特性向上

(1) 窒化ケイ素基板の熱伝導率向上事例 [7]

絶縁体である窒化ケイ素の熱伝導は、格子振動によって生じる。このため、フォノンの散乱因子である結晶内部の欠陥は、熱伝導率を大きく支配する。特に、窒化ケイ素結晶への酸素の固溶は、(2-9)式に示すように結晶格子の Si 位置に空孔を生じさせ、熱伝導率を低下させる。



ここで、 O_{N} は窒素サイトへの酸素の置換固溶を、 V_{Si} はケイ素サイトの空孔を意味する。このため、窒化ケイ素の高熱伝導化には（窒化アルミも同様）、結晶に固溶する酸素を低減させることが極めて重要である。図 2-14 は、 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 原料粉末に 2mol% Yb_2O_3 -5mol%MgO を焼結助剤として添加し、1900°C、0.9MPa の窒素中で焼成を行った場合の焼成時間と固溶酸素量、熱伝導率の関係を示したものである。焼成時間が長くなるにつれ、固溶酸素量は減少し熱伝導率が向上する。但し、窒化アルミ並みの熱伝導率 120 W/m・K を達成するためには、50 時間近くに及ぶ焼成時間が必要となり量産性に課題がある。

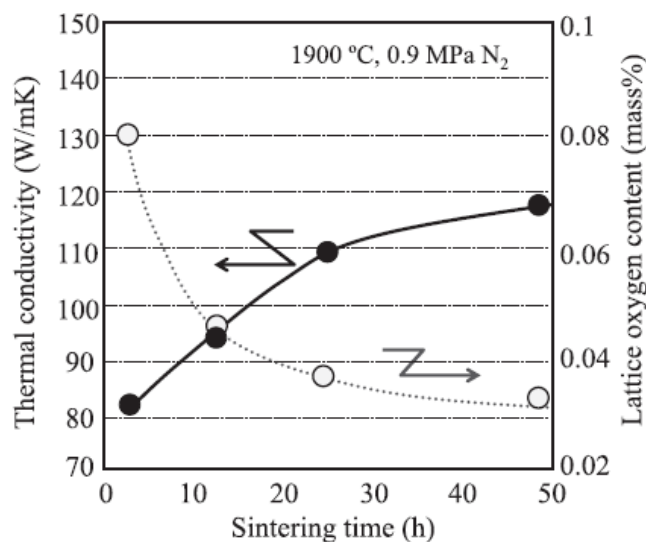


Fig. 2-14 Relationship between sintering time of Si_3N_4 , amount of oxygen content, and thermal conductivity [7].

窒化ケイ素焼結体の製造方法の一つとして、焼結助剤を添加したシリコン粉末形成体を窒素中で加熱し Si_3N_4 へ転化させた後、ポスト焼結を行ういわゆる反応焼結・ポスト焼結法が知られている（図 2-15 参照）。本手法は、原料粉末を大気に晒すことなく窒化反応とその後のポスト焼結を行うことができ、プロセス中で混入する不純物酸素量を大きく低減させることが可能と考えられている。また、反応焼結においては、図 2-15 に示すように比較的粒子は微細化され、微細質的な Si_3N_4 粒子より構成される高密度の窒化体が得られる。このような視点から、ポスト反応焼結手法は不純物酸素量を高度に制御し窒化ケイ素の熱伝導率を向上させる手法として有効なプロセスと期待される。

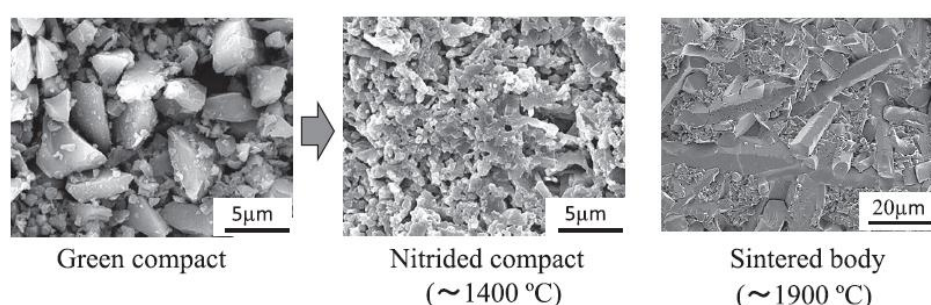


Fig. 2-15 Fabrication process for sintered reaction-bonded silicon nitride [7].

(2) 窒化ケイ素基板の接合方式の違いによる信頼性特性比較事例 [8]

絶縁層に窒化ケイ素を用い、セラミックと銅箔の接合を、接合材を用いない直接接合法にした場合と、活性金属を添加したろう材を用いる活性金属接合法にした場合とで、電氣的・熱的特性比較した（表 2-2）。活性金属接合法は直接接合法と比較し、信頼性（耐ヒートサイクル）が約 2 倍と優れるため、大電流と高信頼性が要求される銅箔 0.8 mm が実現できる。図 2-16 に、活性金属接合法を使用した Si_3N_4 基板のヒートサイクル前後の超音波観察画像を示す。

Table 2-2 Comparison between Si_3N_4 DBC and Si_3N_4 AMB substrates [8].

Process Technology	Direct Bond Copper (DBC)	Active Metal Brazing (AMB)
Reliability	2,300 cycles [-55/150°C]	6,400 cycles [-55/150°C]
Material combination (Cu/ Si_3N_4 /Cu)	Cu: 0.2 – 0.4mm Ceramic: 0.25mm / 0.32mm	Cu: 0.3 – 0.8 mm Ceramic: 0.25 mm / 0.32 mm
Partial discharge free	< 10pC @ 5kV	< 10pC @ 5kV
Isolation voltage	> 20 kV/mm	> 20 kV/mm
Thermal resistance	0.2 K/W (0.3 mm/0.32 mm/0.3 mm)	0.2 K/W (0.3 mm/0.32 mm/0.3 mm)
Design rules	Standard DBC Design Rules: min. spacing: 0.5 mm @ 0.3 mm Cu	AMB Design Rules: min. spacing 1 mm @ 0.5 mm Cu
Ampacity	+ (due up to 0.3 mm Cu @ 0.32 mm ceramic)	+++ (due up to 0.8 mm Cu @ 0.32mm ceramic)
Cost		+ 20%



(a) Before heat cycle test. (b) After 6,400 cycle.

Fig. 2-16 Ultrasound images of Si_3N_4 AMB substrates [8].

2.5.2 絶縁液体中の電荷の移動による電界緩和

(1) 電界印加時の油中電界・電荷挙動事例 [9]

流動帯電現象は、絶縁物表面上における、絶縁油の流動により発生する油中電荷の移動・分離・緩和により生じると考えられているが、いまだ不明な点が多い。以下は、油ギャップ中の電極間隔における、電界分布の変歪現象の検討事例である。図 2-17 は、図 2-18 の装置構成において、印加電圧 13.5 kV 時における各部の油中電荷の時間変化を示したものである。横軸が経過時間、縦軸が電荷密度である。印加直後、両電極端部へ徐々に電荷が蓄積していき、ピーク時においては、電極端部には 2,500 pC/ml 程度の電荷が生じ、時間経過とともに消滅していく様子が観察された。

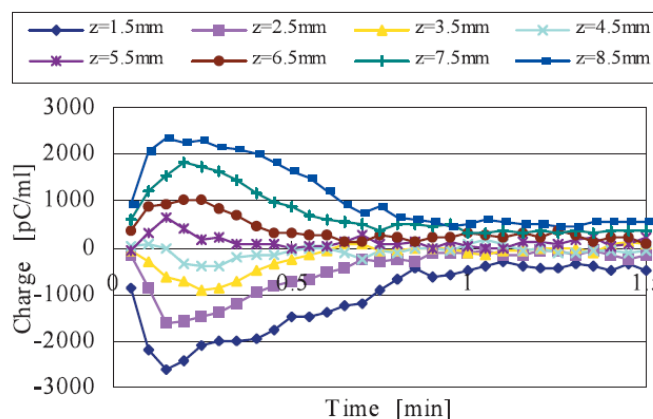


Fig. 2-17 Time dependence of charge distribution [9].

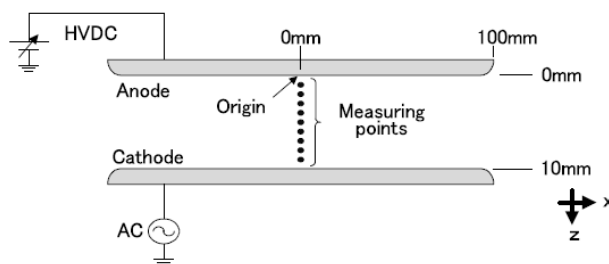


Fig. 2-18 Measurement point of electric field [9].

(2) 電界印加時の油中電界・電荷挙動事例 [10]

電圧の極性反転に対する電界の挙動とフラッシュオーバー特性を調べるため、図 2-19 のようなサンプル構造を用い実験を行った。図 2-20 にその結果を示す。横軸が負極性の直流電圧 V_{DC} 、縦軸が正極性の直流電圧 V_{DC}' である。横軸の V_{DC} が大きいほど、試料内の空間電荷の影響が大きくなり、反転後には、 V_{DC}' が低い条件でも沿面フラッシュオーバー又は部分放電が生じる結果となった。この結果より、直流電圧の極性を反転させた場合、反転前の電圧が高いほど、反転後の電圧が低くても、油中放電もしくは沿面フラッシュオーバーが生じる。これは、電流の場になっている直流電界は、静電での電界と界面電荷による電界の和であって、極性反転すると、前者は直ちに反転後の電圧になるが、後者は引き続き同じ値を保つため、両電界が重畳して高電界が発生するためと考えられる。

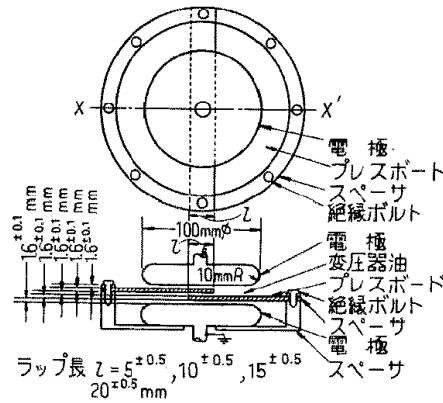


Fig. 2-19 Sample configuration [10].

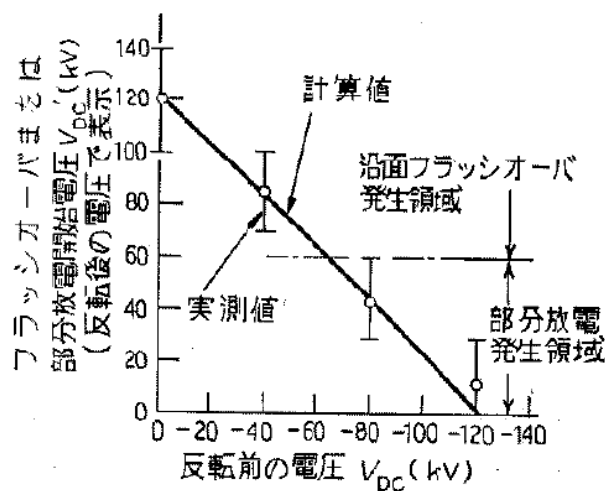


Fig. 2-20 Characteristics of surface flashover under polarity reversal of DC voltage [10].

(3) 電界印加時の液体誘電体流動事例 [11]

液体誘電体内部で発生した電気力によって、液体を流動させる電気流体力学 (Electro Hydro Dynamic) が様々な分野で利用されている。液体誘電体に電界 E を印加すると、(2-10) 式で表される電気力 F が働き、液体の流れ場が形成される。

$$F = qE - \frac{E^2}{2} \text{grad } \varepsilon + \text{grad } \left\{ \frac{E^2}{2} \rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right) T \right\} \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

ここで、q : 電荷密度、 ε : 液体の誘電率、 ρ : 液体の密度、T : 温度である。(2-10) 式の右辺 3 項は、電気泳動力、誘電泳動力、及び電気歪力に相当し、いずれも力密度を表す。図 2-21 は、液体ジェットの様相のシュレーリン写真である (印加電圧 16 kV)。液内噴流となって、円錐筒電極先端部のガラス管出口から勢いよく噴射している。

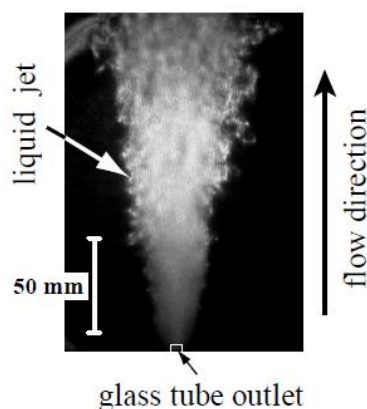


Fig. 2-21 Schlieren photograph of typical flow pattern [11].

2.6 まとめ

第2章では、本研究に関連する基礎事項と、パワーモジュールの絶縁設計技術および高耐圧化への課題、絶縁基板の種類・製造方法、および従来研究で報告されている絶縁基板の熱伝導率向上技術、電荷の移動による電界緩和技術等の研究・開発事例について述べた。

パワーモジュール内部の高耐圧化を行うためには、絶縁基板の絶縁層を厚く必要があるが、逆に放熱性が低下するという課題が生じる。放熱性は、パッケージの大きさ・コストに直接影響を及ぼす、絶縁特性とならぶ主要な設計項目であり、設計的な優先順位は高い。

絶縁基板の種類としては、絶縁層の材料や製造方法等、幾つかの項目により分類されるが、絶縁層の材料は、セラミックと樹脂に大別され、セラミックとしてはアルミナ、窒化ケイ素、窒化アルミ等が使用され、樹脂としてはエポキシ、液晶ポリマー等が使用されている。セラミックと銅箔の接合には、接合材を用いずに、セラミックと銅箔を直接反応により接合する直接接合法 (Direct Bonding) と、チタンやジルコニウムなどの活性金属を添加したろう材を用いる活性金属接合法 (Active Metal Bonding) とが主に使用されている。

絶縁基板の熱伝導率向上に関しては、窒化ケイ素基板にて、焼成時間を長くして固溶酸素量を減少させ、熱伝導率を向上させる方法があるが、焼成時間が 50 時間近くにおよび量産性に課題があり、実現までには時間がかかる。

また、本研究の第5章に関係する、絶縁油のような絶縁性液体中においては、油中電荷の移動による、電界の増加・緩和が生じることがある。

参考文献

- [1] 電気学会, “誘電体現象論”, 2007.
- [2] M. Hori, Y. Hinata, K. Taniguchi, Y. Ikeda, and T. Yamazaki : “Enhanced Breakdown Voltage and Low Inductance of All-SiC Module”, Proceedings of the 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs 2018, 2018.
- [3] 富士電機, “IGBT モジュールアプリケーションマニュアル”, 2020 Rev. f .
- [4] 池田良成, 西村芳孝, 望月英司, 高橋良和, “パワーモジュールにおけるパッケージ技術の現状と展望”, スマートプロセス学会誌, Vol.4, No.1, 2015.

- [5] 両角朗, “自動車用に向けたパワー半導体におけるパッケージ技術”, サイエンス&テクノロジー(株) 技術セミナー, 2018.
- [6] 両角朗, 丸山力宏, 山田克己, “パワーモジュールパッケージ技術”, 富士時報, Vol.71, No.2, 1998.
- [7] 平尾喜代司, 周遊, 宮崎広行, 日向秀樹 : “組織制御による窒化ケイ素の高熱伝導化と放熱基板への展開”, 粉体および粉末冶金, 第 64 巻, 第 8 号, 2017.
- [8] M. Goetz, N. Kuhn, B. Lehmeier, A. Meyer, and U. Voeller : “Comparison of Silicon Nitride DBC and AMB Substrates for different applications in power electronics”, Proceedings of PCIM Europe 2013, 2013.
- [9] 向當政典, 岡部成光: “Kerr 効果を用いた電界測定装置による油ギャップ中の多点電界計測”, 電学論 B, Vol.126, No.3, 2006.
- [10] 高橋英希, 堤泰行, 尾形文夫, 奥山賢一: “油浸絶縁物の直流沿面フラッシュオーバー特性”, 電学論 A, Vol.98, No.8, 1978.
- [11] 花岡良一, 細谷直輝, 高橋尉治朗, 高田新三: “EHD 液体ジェット発生用の実用的 電極系と液体ポンピング特性”, 電気学会誌, Vol.127, No.12, 2007.

第3章 絶縁基板の絶縁破壊に影響を及ぼす封止材の影響調査

3.1 緒言

パワーモジュールの代表的な封止材としては、シリコーンゲルとエポキシ樹脂がある。シリコーンゲルは、耐熱性・耐寒性に優れ、電気絶縁性に優れ、腐食性が無く、無色透明、安全・衛生面に優れるというシリコーン特有の性質と、粘着性・密着性に優れシール性・耐湿性を有し、低弾性率で熱膨張などによる応力を緩和するという低架橋密度（鎖状高分子の相互間を化学的に結合させた網目構造の密度が低い）から生じる特性を併せ持つ素材であり、古くから様々な電気製品の封止材として使用されている。産業用の IGBT モジュールにはシリコーンゲルが主に使用されている。

一方、エポキシ樹脂は、末端に反応性のエポキシ基をもつ熱硬化型の合成樹脂で、各種変性剤（充填材、可撓性付与剤、希釈剤など）により特性の調整ができ、寸法安定性に優れ、密着力・機械的強度が高く、電気絶縁性に優れ、耐薬品性・耐水性・耐湿性に優れるという特徴をもつ。成形材料、塗料、接着剤等、様々な用途に使用されている。自動車・電装分野向けの IGBT モジュールや SiC モジュール等、高い耐熱性が要求される場合には、エポキシ樹脂の採用が検討されている。

封止材は、絶縁基板の絶縁層外縁部で生じる沿面破壊に対する影響が大きいと考えられている。そこで、封止材をパラメータとした絶縁破壊電圧試験を行い、絶縁破壊電圧、破壊箇所について比較を行った。

3.2 実験方法

3.2.1 絶縁基板のサンプル構成

図 3-1 に、本実験にて使用した、絶縁基板のサンプル構成を示す。絶縁層には厚さ 0.635 mm の窒化ケイ素（以降、 Si_3N_4 と呼ぶ）を用い、その表裏に、厚さ 0.02 mm のろう材を介し、厚さ 0.3 mm の銅箔を配置する構成とした。簡略化のため、銅箔は表裏ともベタパターンとした。平面寸法は、 Si_3N_4 を 19.3×10.0 mm、表裏の銅箔を 17.3×8.0 mm とし、表裏の銅箔と絶縁層端部との間の距離（外縁部長さ）を 1.0 mm とした。

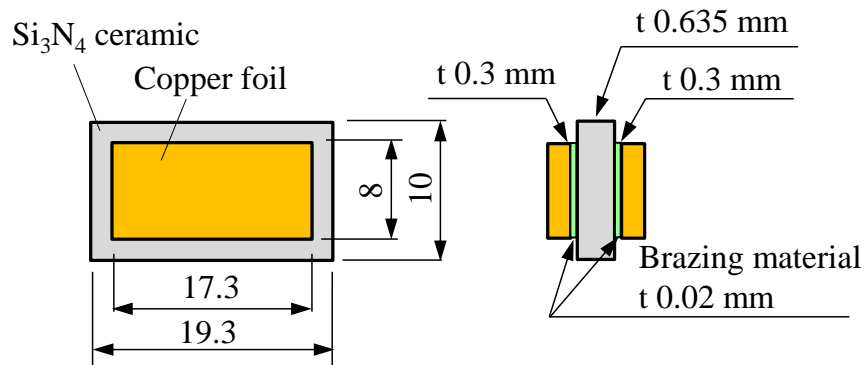
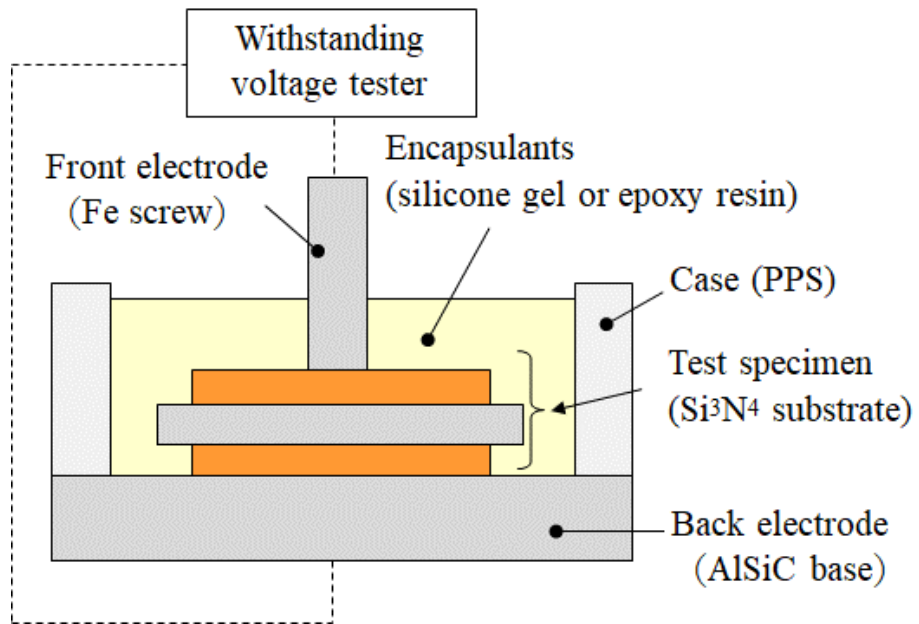


Fig. 3-1 Schematic diagram of test specimen.

3.2.2 実験構成

図 3-2 に、実験構成の概略図を示す。試験片を、PPS ケースと AISiC ベースで囲んだ空間に配置し、表側電極を絶縁基板の表銅箔にはんだ（図では省略）にて接続し、AISiC ベースを裏側電極とし、絶縁基板の裏銅箔とはんだ（図では省略）にて接続し、内部をシリコーンゲル又はエポキシ樹脂にて封止した。表側電極と裏側電極との間には、絶縁破壊電圧試験器にて交流電圧(60Hz)を印加する構成とした。また昇圧速度は 0.1kV/sec とし、絶縁破壊するまで電圧を上げていった。試験は常温にて行い、サンプル数は 3～5 個、絶縁破壊の判定値であるカットオフ電流は 5 mA とした。



Silicone gel.



Epoxy resin.

Fig. 3-2 Schematic diagram of experimental setup.

3.3 実験結果および考察

3.3.1 絶縁破壊電圧試験結果

図 3-3 に、封止材をシリコーンゲル又はエポキシ樹脂とした場合の絶縁破壊電圧試験結果を示す。グラフはワイブルプロットとし、横軸に絶縁破壊電圧、縦軸に累積破壊率とした。累積破壊率が 1% の時、絶縁破壊電圧は、シリコーンゲルの 8.8kV に対してエポキシ樹脂は 16.3kV であり、エポキシ樹脂の方が約 1.9 倍、絶縁破壊電圧が高い結果となった。

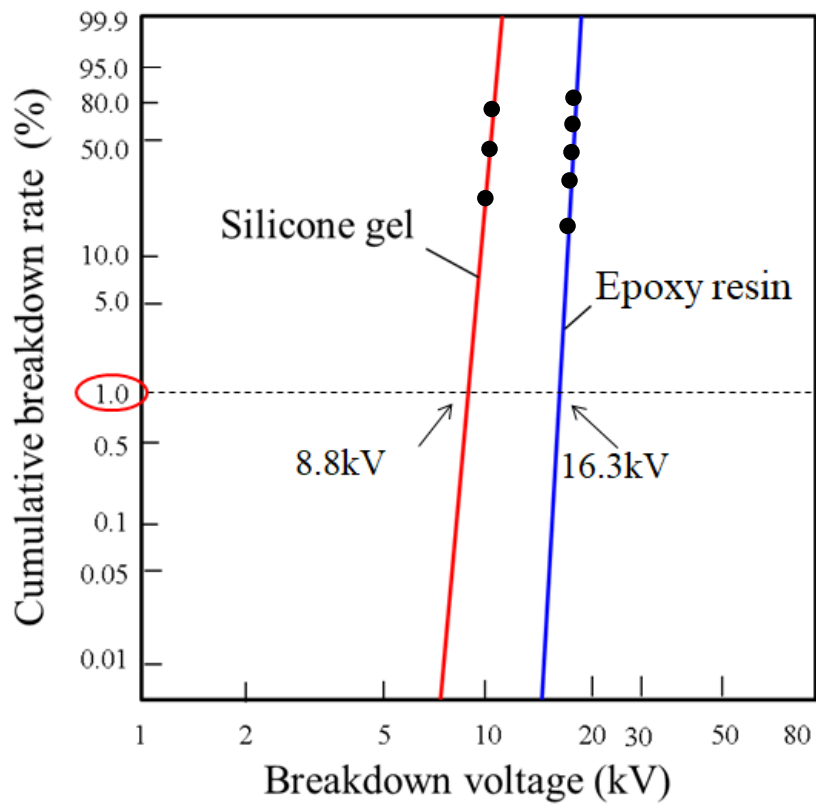


Fig. 3-3 Results of dielectric breakdown voltage test.

3.3.2 絶縁破壊箇所観察結果

図 3-4 に、絶縁破壊電圧試験後の絶縁破壊箇所を示す。(a)が封止材をシリコーンゲルにした条件の破壊後の写真、(b)がエポキシ樹脂にした条件の写真である。シリコーンゲルは透明であるため、上面から見た状態で、このように破壊痕（導電路、トリー）が黒く見えており、絶縁基板の表銅箔からセラミックの外縁部を経由し裏側電極に至る、沿面破壊していることが判る。一方、エポキシ樹脂は透明ではなく破壊箇所が見えないため、(b)に示すように裏側からセラミックが見えるまで削っていき観察を行った。写真は研磨後の写真である。破壊は、表銅箔の境界に近い位置でのセラミックの貫通破壊であり、シリコーンゲルと破壊形態が異なる結果となった。

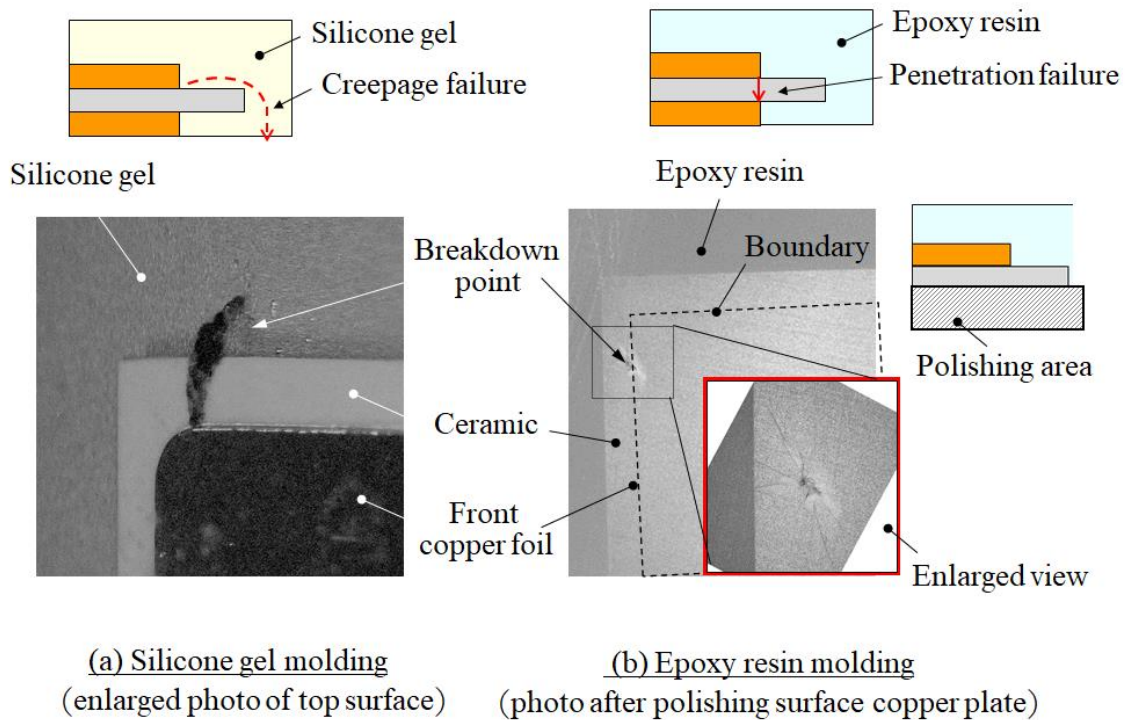


Fig. 3-4 Breakdown points after dielectric breakdown voltage test.

3.3.3 シリコーンゲルとエポキシ樹脂で破壊形態が異なる理由についての考察

同じ絶縁基板にも関わらず、封止材をエポキシ樹脂に変えただけで、絶縁破壊電圧はシリコーンゲルより約1.9倍高い結果となり、この理由は絶縁破壊形態の違いであることが前節より分かった。封止材がシリコーンゲルの場合、絶縁基板の外縁部（セラミックの部分）で沿面破壊しているため、シリコーンゲルとセラミックの界面には、部分放電を生じるような微小な未接合部・剥離部が存在すると想定される。図3-5にイメージ図を示す。(a)が電圧印加前、(b)が電圧印加後である。セラミックとシリコーンゲルとの界面で部分放電が生じ、その結果、界面に沿って徐々に導電路が形成され（トリイニング）、最終的に沿面破壊に至ったと考えられる。一方、封止材がエポキシ樹脂の場合は沿面破壊を生じていないため、エポキシ樹脂とセラミックの界面には、部分放電を生じるような微小な未接合部・剥離部が存在しないと想定される。その結果、絶縁層であるセラミック自体がバルク破壊するまで絶縁破壊電圧を上げることができたと考えられる。

推定した破壊メカニズムを検証するために、絶縁基板の外縁部（セラミック部）に意図的に未接合部・剥離部をモデル化した電界解析と、絶縁破壊電圧試験と同様の実験構成による部分放電試験を行った。

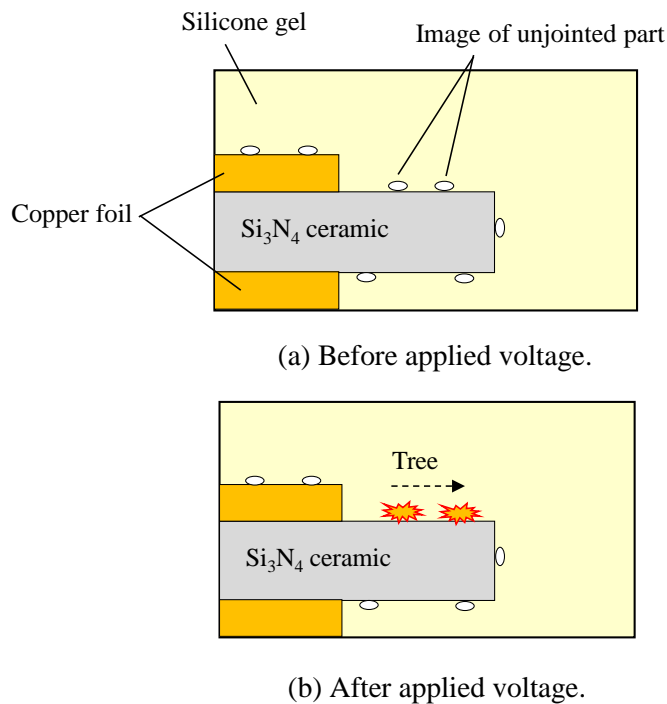


Fig. 3-5 Image of creepage failure.

3.3.4 電界解析結果

(1) 解析モデルおよび解析方法

絶縁基板の外縁部（セラミック部）に、未接合・剥離が存在した場合の電界強度分布を求めるため、電界解析を行った。厚さ 0.02 mm のろう材部を微細にメッシュ分割する必要があったため、メッシュ分割の制約から 2 次元解析を採用し、解析ソフトは ANSYS 社の電磁界解析ソフト Maxwell 2D (ver. 2021 R2)を用いた。

図 3-6 に、解析モデルを示す。簡略化のため、 Si_3N_4 基板をシリコーンゲル中に置いたモデルとし、 Si_3N_4 基板は実験と同様、厚さ 0.635 mm の Si_3N_4 の表裏に、厚さ 0.02 mm のろう材を介し、厚さ 0.3 mm の銅箔を配置する構成とした。絶縁基板外縁部（セラミック部）の未接合・剥離部のモデルは、0.01 mm 角の空気層を外縁部（セラミック部）上に配置した。電圧条件は、後述する部分放電試験にて、封止材がシリコーンゲルの場合、7.0 kV から放電開始したため、表銅箔に 7.0 kV 印加、裏銅箔に 0 kV 印加の条件とした。また、電圧印加部である表銅箔からの、未接合・剥離部的位置による影響を調べるため、図 3-7 のように、表銅箔からの距離をパラメータとした。図 3-8 に、メッシュモデルを示す。メッシュ条件は、未接合・剥離部を微細に (0.001 mm) に分割し、 Si_3N_4 部を 0.01 mm、他を 0.05 mm で分割した。表 3-1 に、使用した物性値（常温）を示す。

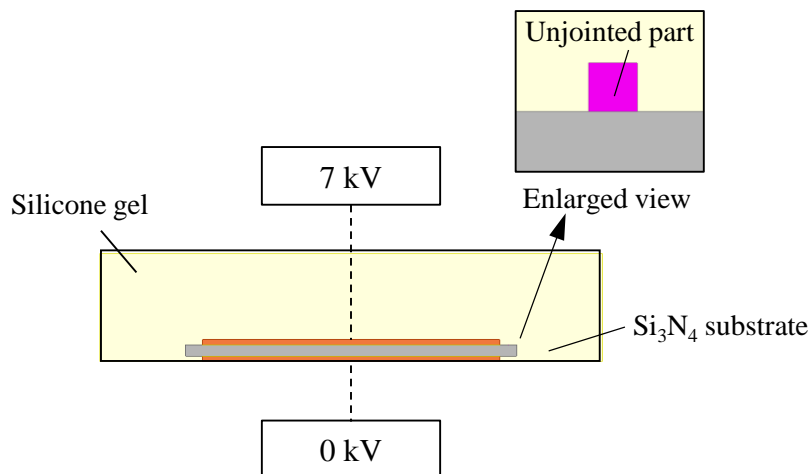


Fig. 3-6 Analysis model for electric field analysis.

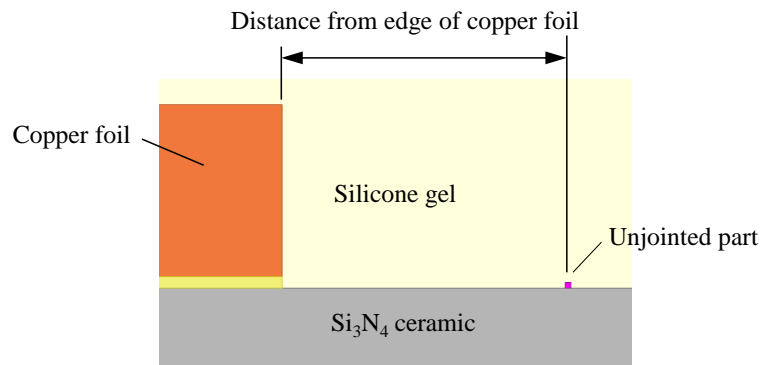


Fig. 3-7 Analysis parameter.

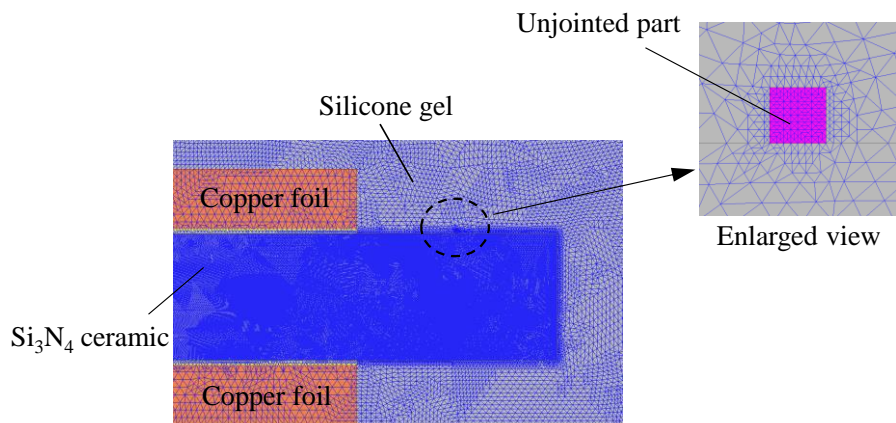


Fig. 3-8 Mesh model for electric field analysis.

Table 3-1 Properties of electric field analysis.

	Relative Permittivity [-]	Bulk Conductivity [S/m]
Copper foil	—	58×10^6
Si ₃ N ₄ ceramic	8.1	0
Brazing material	—	61×10^6
Unjointed part	1.0	0
Silicone gel	2.75	0

(2) 解析結果

図 3-9 に、未接合・剥離部の位置を表銅箔から 0.2 mm にした条件における、電界強度のコンター図を示す。表示は、電界強度 30 kV/mm を 100% とし表示している。電界強度は、 Si_3N_4 内部で高くなり、銅箔と Si_3N_4 、シリコーンゲルの交わる Si_3N_4 基板表裏の三重点で極大となる。この三重点近傍の電界強度の詳細については、第 5 章と第 6 章にて考察する。図 3-10 は、図 3-9 のコンター図から未接合・剥離部周辺を拡大したコンター図である。電界強度は、未接合・剥離部にて局部的に増加する傾向がみられる。

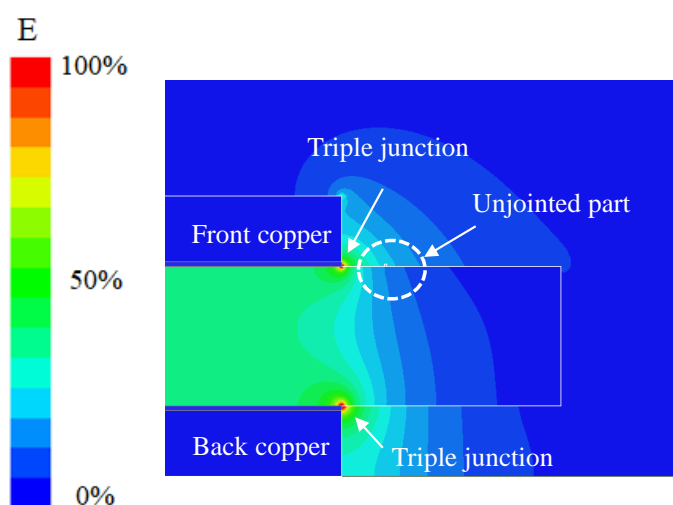


Fig. 3-9 Contour diagram of electric field strength.

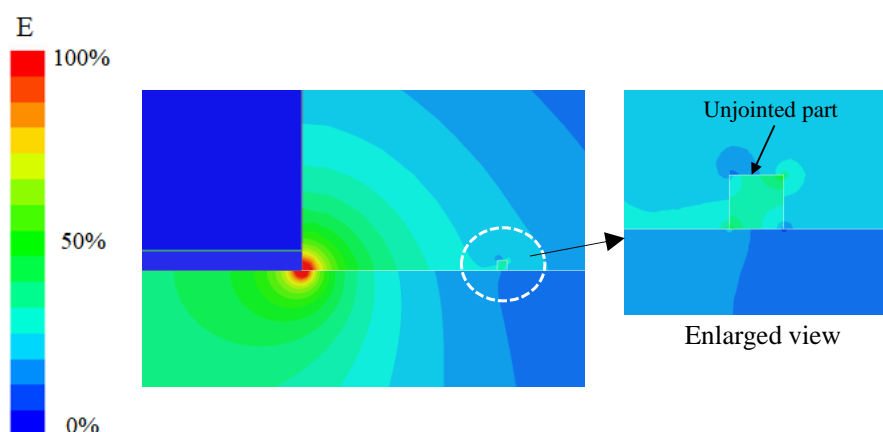
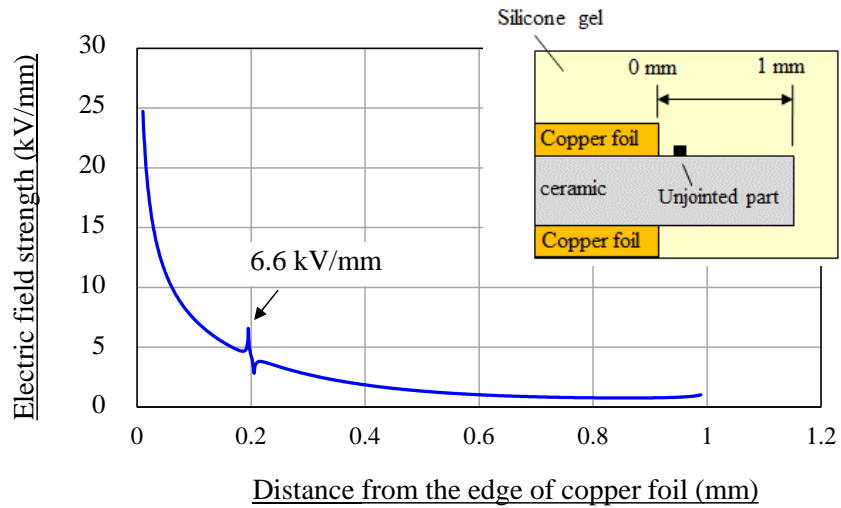


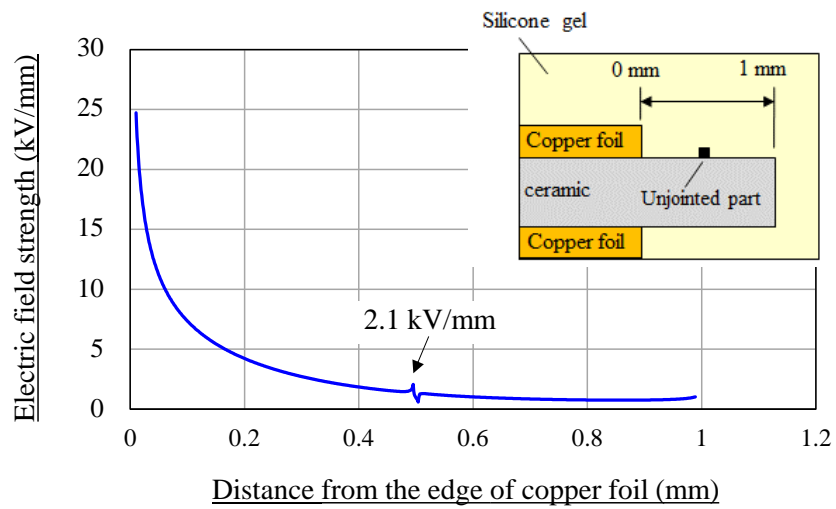
Fig. 3-10 Contour diagram at unjointed part.

図3-11に、電界強度の詳細を示す。(a)が未接合・剥離部の位置を表銅箔から0.2mmにした条件の結果、(b)が0.5mmにした条件の結果、(c)が0.8mmにした条件の結果である。絶縁基板外縁部(セラミック部)とシリコンゲルとの界面上の電界強度分布としている。横軸を表銅箔からの距離、縦軸を電界強度としている。電界強度は、三重点で極大値を示し、表銅箔から離れるほど低下していく傾向となるが、未接合・剥離部にて、局部的に増減する。この理由は、シリコンゲル中に、比誘電率の異なる未接合・剥離部の空気層が存在するようになったためである。空気層と Si_3N_4 、シリコンゲルの交わる新たな三重点も生じている。この結果、例えば、未接合・剥離部の位置を表銅箔から0.2mmにした条件の場合、未接合・剥離部の空気層で、6.6 kV/mmの大きな電界強度が生じる結果となった。空気の絶縁破壊電界強度は3.0 kV/mmと考えられることから、この電界強度は部分放電が十分生じ得るレベルである。電界強度は、未接合・剥離部の位置を0.5mm、0.8mmと離していくほど、周囲の電界強度が下がるため低減していく傾向となる。図3-12に、横軸を未接合・剥離部の位置、縦軸を空気層での電界強度としたグラフを示す。空気の絶縁破壊電界強度を3.0 kV/mmとすると、シリコンゲルの未接合・剥離部が表銅箔から0.44mmまでの範囲に存在すると、部分放電が生じる恐れがあると考えられる。

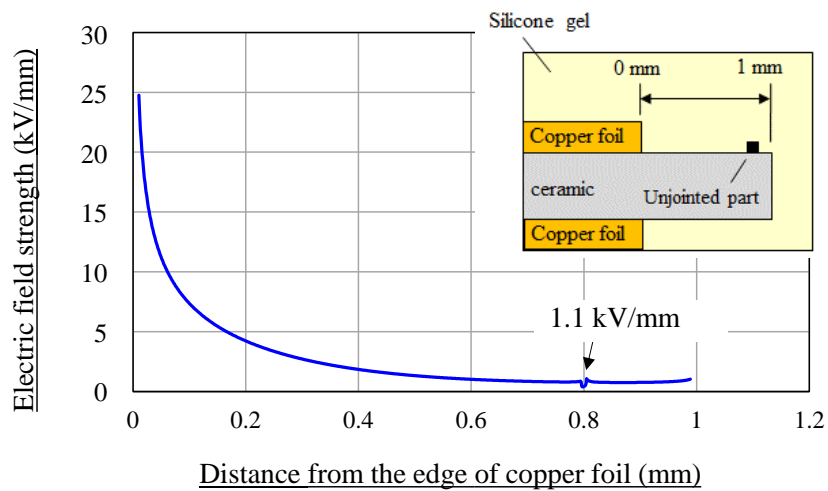
本解析結果より、シリコンゲルと絶縁基板外縁部(セラミック部)との間に微小な未接合・剥離部が存在することで、部分放電が生じる恐れがあることが、解析上検証できた。本解析では、未接合・剥離部を絶縁基板外縁部(セラミック部)上の界面に配置したが、界面から離れた位置でも微小な空気層が存在すれば、同様であると考えられる。



(a) Case of position 0.2 mm.



(b) Case of position 0.5 mm.



(c) Case of position 0.8 mm.

Fig. 3-11 Electric field strength distribution on interface of ceramic.

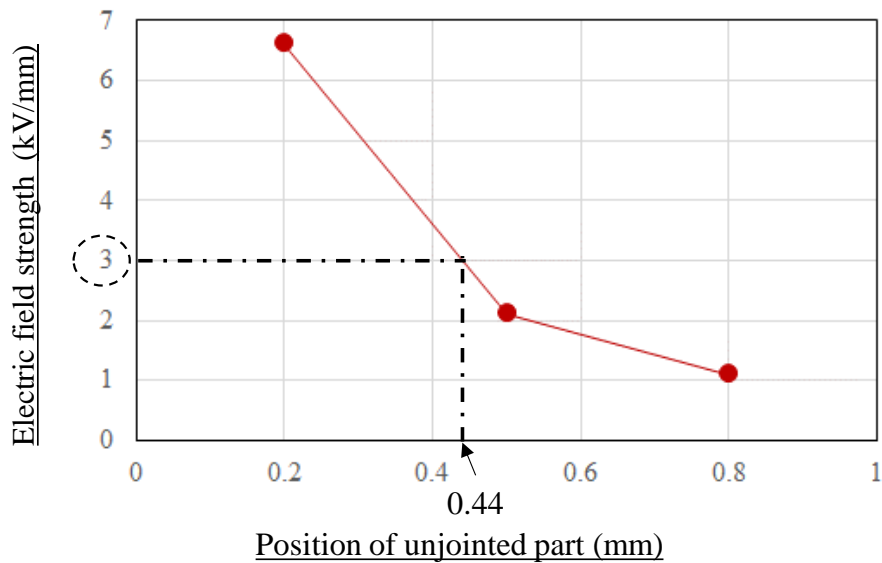


Fig. 3-12 Electric field strength for position of unjointed part.

3.3.5 部分放電試験結果

(1) サンプル構成および実験構成

第2章で述べたが、絶縁物中にボイドが存在すると、部分放電が生じることがある。そこで、シリコーンゲル封止条件における、ボイド（未接合部・剥離部含む）の存在を間接的に調査するため、部分放電試験を行った。サンプル構成および実験構成は、3.2.1および3.2.2と同様とした。

(2) 実験結果

実験結果を図3-13に示す。(a)がシリコーンゲル封止条件の部分放電結果、(b)がエポキシ樹脂封止条件の部分放電結果である。グラフの横軸が印加電圧、縦軸が部分放電による電圧変動から推定した放電電荷量である。シリコーンゲル封止条件の場合、印加電圧を上げていくと、約7.0 kVにて部分放電が発生し始め、その後約4.0 kVにて消滅した。部分放電の開始電圧をPDIV (Partial Discharge Inception Voltage)、降圧時に電荷量がゼロになる消滅電圧をPDEV (Partial Discharge Extinction Voltage) という。印加電圧が約7.0 kVにて放電発生していることから、サンプル中にボイド（未接合部・剥離部含む）が存在しているものと考えられる。そこで、前章の電界解析時のように、絶縁基

板外縁部（セラミック部）とシリコーンゲルの界面に、あたかも微小な未接合部・剥離部が存在するような状態になっていると仮定し、第2章における部分放電開始電圧の理論式(2-1)を用い、未接合部・剥離部をボイドに置き換えた場合の、ボイド厚さ相当を以下に計算した。

下記の(2-1)式をボイド厚さ d で整理すると、(3-1)式となる。

$$V_s = \frac{v_s}{d} \left(d + \frac{D}{\varepsilon} \right) \quad \dots (2-1)$$

$$d = \frac{\frac{D}{\varepsilon}}{\left(\frac{V_s}{v_s} \right) - 1} \quad \dots (3-1)$$

ここで、 D ：絶縁物の厚さ、 ε ：絶縁物の比誘電率、 V_s ：部分放電開始電圧、 v_s ：ボイドの放電電圧である。解析結果より、未接合・剥離部が銅箔から 0.44 mm までの範囲に存在すると部分放電が生じる恐れがあることから、 $D=0.44$ mm と仮定し、実験条件より、 $\varepsilon=2.75$ 、 $V_s=7.0$ kV、 $v_s=3.0$ kV と仮定すると(3-2)式となり、ボイド厚さ相当で 0.12 mm (120 μ m) となる。

$$d = 0.12 \quad \dots (3-2)$$

一方、エポキシ樹脂の場合、印加電圧が 10 kV まで部分放電は発生しなかった。この実験結果より、エポキシ樹脂は部分放電を生じるような未接合部・剥離部が少ないと考えられる。これらの結果より、エポキシ樹脂はシリコーンゲルより、絶縁基板の銅箔およびセラミックとの密着状態が良好であり、部分放電を生じるようなボイドや剥離等の未接合部が少ないと考えられる。言い換えれば、エポキシ樹脂封止は、沿面破壊を抑制し、セラミック等の絶縁層の絶縁性能を限界まで引き出す封止材であることが明らかとなった。

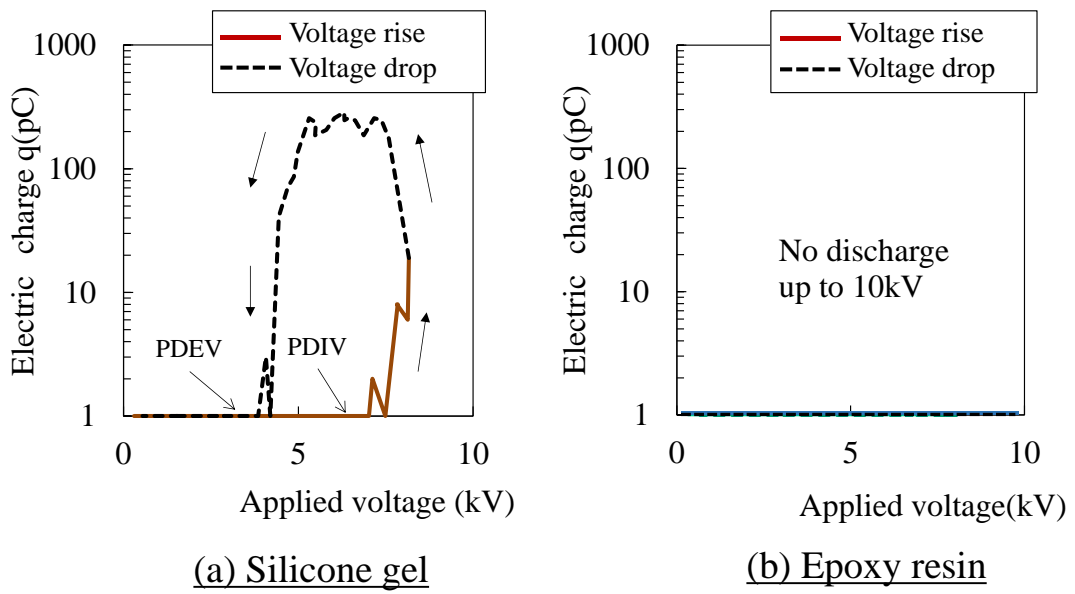


Fig. 3-13 Results of partial discharge test.

3.4 結言

第3章では、パワーモジュールの代表的な封止材である、シリコーンゲルとエポキシ樹脂の絶縁破壊電圧試験結果について述べた。絶縁破壊電圧は、エポキシ樹脂封止の方がシリコーンゲル封止より、約1.9倍高いことが確認できた。この理由は、エポキシ樹脂封止の場合はセラミックの貫通破壊であったのに対し、シリコーンゲル封止の場合は絶縁基板の外縁部（セラミックの部分）での沿面破壊であり、破壊形態が異なるためである。エポキシ樹脂封止の場合は、部分放電試験において10kVまで放電を生じることが無かったことから、部分放電を生じるようなボイドや剥離等の未接合部が少ないと考えられる。一方、シリコーンゲル封止の場合は、部分放電試験において約7kVにて放電が発生し始めたことから、サンプル中にボイド（未接合部・剥離部含む）が存在し、沿面破壊しやすいことが分かった。このことにより、エポキシ樹脂封止は、絶縁基板の外縁部（セラミック部）での沿面破壊を抑制し、絶縁層であるセラミック自体がバルク破壊するまで絶縁破壊電圧を上げることができ、絶縁層の絶縁性能を限界まで引き出す封止材であることが明らかとなった。

第4章 絶縁基板の絶縁破壊に影響を及ぼす絶縁材料の影響調査

4.1 緒言

パワーモジュールの絶縁基板として、絶縁層をセラミックとしたタイプが、現在最も広く使用されており、中でも窒化ケイ素（以降、 Si_3N_4 と呼ぶ）と窒化アルミ（以降、 AlN と呼ぶ）は、高耐圧用途として期待されている。

Si_3N_4 は、熱伝導率が AlN の約半分であり放熱性で劣るが、機械的特性の破壊靱性が高く耐環境性（特に温度変化に対する信頼性）に優れるため、信頼性を重視する自動車・電装分野向け中心に需要が伸びている。通常の絶縁基板としてだけでなく、ヒートシンクやベース板一体型の基板としても使用され始めている。

一方、 AlN は、熱伝導率が高く放熱性に優れ、絶縁破壊電界強度も高いことから、従来から産業分野や電鉄車両分野などの高耐圧アプリケーションで使用されている。また Si_3N_4 と同様、ヒートシンクやベース板一体型の基板としても使用され始めている。

Si_3N_4 と AlN の電気的・熱的・機械的特性についての比較は、絶縁層のみ（通常、白板）でのデータはあるが、絶縁基板構造での比較データはあまり無い。過去に発表されている研究事例としては、セラミックの焼結助剤や焼成時間をパラメータとし熱伝導率を向上させた報告[1]や、銅やアルミニウムからなる回路パターンとの接合条件をパラメータとし、耐ヒートサイクル性を向上させた報告[2]等は数多くあるが、絶縁破壊電圧に関連したものは少ない。そこで、絶縁層として、 Si_3N_4 と AlN をパラメータとした同一形状の絶縁基板サンプルを用いた絶縁破壊電圧試験を行い比較を行った。封止材は、絶縁層による絶縁破壊電圧の違いが明確になるように、沿面破壊の抑制効果の高いエポキシ樹脂を用いた。

4.2 実験方法

4.2.1 絶縁基板のサンプル構成

図4-1に、本実験にて使用した、絶縁基板のサンプル構成を示す。絶縁層は、厚さ1.0 mmの Si_3N_4 および AlN を用い、その表裏に、厚さ0.02 mmのろう材を介し、厚さ0.3 mmの銅箔を配置する構成とした。平面寸法は、絶縁層を24×24 mm、表裏の銅箔を21×21 mmとし、表裏の銅箔端部と絶縁層端部との間の距離（外縁部長さ）を1.5 mmとした。

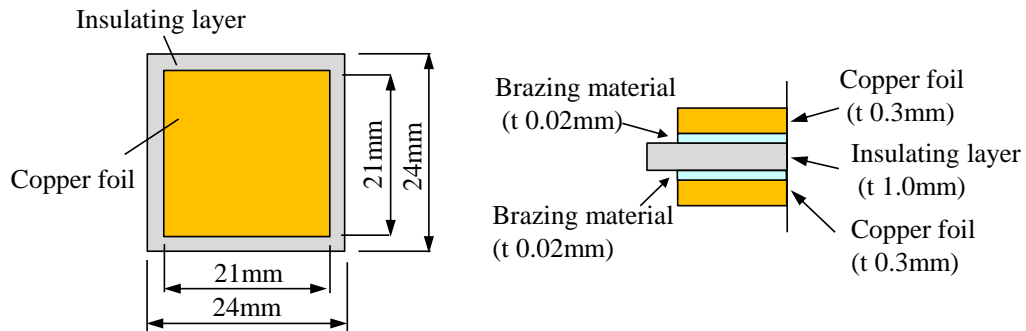


Fig. 4-1 Schematic diagram of test specimen.

4.2.2 実験構成

図4-2に、実験構成の概略図を示す。絶縁基板におけるセラミックバルク材の絶縁破壊電圧を測定するために、絶縁基板をエポキシ樹脂にて円筒状に封止し絶縁性液体中に浸漬させ、絶縁破壊電圧試験器にて、表側の銅箔と裏側の銅箔に交流電圧（50 Hz）を印加する構成とした。絶縁基板をエポキシ樹脂にて封止することで、絶縁基板外縁部での沿面破壊を抑制している。絶縁性液体の温度は30°Cとし、昇圧速度0.33 kV/secにて絶縁破壊するまで電圧を上げていった。絶縁性液体としては、シリコンオイル（信越シリコン製、KF96-100CS）を用いた。サンプル数は、各5個とし、絶縁破壊の判定値であるカットオフ電流は5 mAとした。

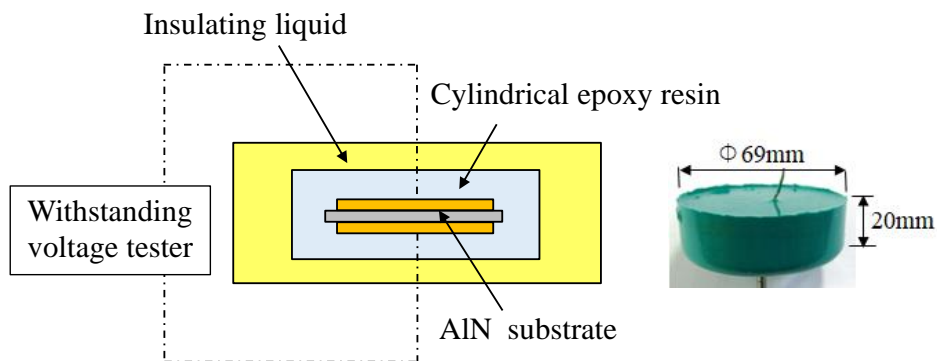


Fig. 4-2 Schematic diagram of experimental setup.

4.3 実験結果

図 4-3 に、 Si_3N_4 基板および AlN 基板を用いた場合の、絶縁破壊電圧試験結果を示す。 Si_3N_4 基板を用いた場合の絶縁破壊電圧は、実測値で 21.7~25.8 kV、平均値で 22.8 kV (サンプル数 : 5 個) であり、AlN 基板を用いた場合の絶縁破壊電圧は、実測値で 25.6~34.2 kV、平均値で 30.9 kV (サンプル数 : 5 個) である。測定結果のばらつきは大きい、AlN 基板の方が、平均値で 36% 絶縁破壊電圧が高い結果となった。

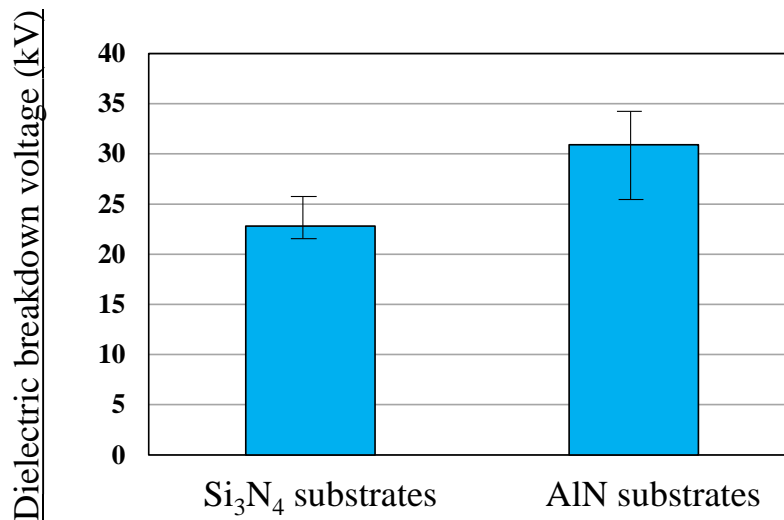


Fig. 4-3 Results of dielectric breakdown voltage test.

図 4-4 と図 4-5 に、各絶縁基板の絶縁破壊箇所の観察結果 (断面写真) を示す。円筒状のエポキシ樹脂を四角に削り、絶縁基板と平行に上面からエポキシ樹脂と銅箔を削り、セラミックの黒くなった破壊痕が見えるまで削っていった。図において、白い部分がセラミック、水色の部分が封止しているエポキシ樹脂である。図 4-4 が Si_3N_4 基板試験後の代表写真であり、図 4-5 が AlN 基板試験後の代表写真である。それぞれ全体図と破壊痕周辺の拡大図を示した。どちらの絶縁基板も、破壊箇所はセラミック端部から 1.5 mm 内寄り、銅箔端部とほぼ一致する位置であった。また破壊の種類は、全てセラミックの貫通破壊であった。

次に、 Si_3N_4 基板と AlN 基板で、絶縁破壊電圧に差が生じた理由を明らかにするため、比誘電率の違いによる電界解析と、SEM ((Scanning Electron Microscope)) によるセラミックの表面観察を行った。

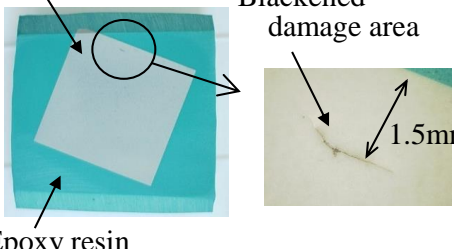
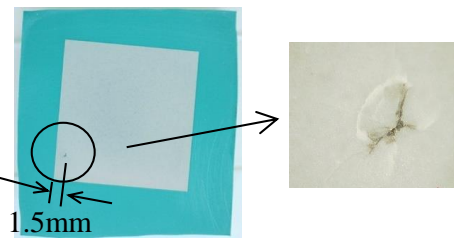
N o	Photographs of dielectric breakdown test
1	 <p>Si₃N₄ ceramic</p> <p>Blackened damage area</p> <p>Epoxy resin</p> <p>1.5mm</p>
2	 <p>1.5mm</p>

Fig. 4-4 Photographs of Si₃N₄ substrates.

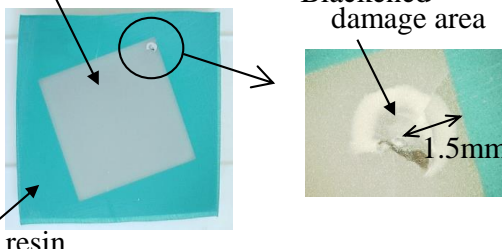
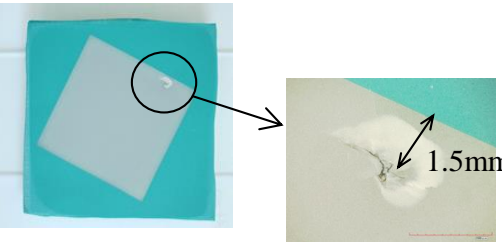
N o	Photographs of dielectric breakdown test
1	 <p>AlN ceramic</p> <p>Blackened damage area</p> <p>Epoxy resin</p> <p>1.5mm</p>
2	 <p>1.5mm</p>

Fig. 4-5 Photographs of AlN substrates.

4.4 解析方法

前節の実験結果にて絶縁破壊電圧に差が生じたが、 Si_3N_4 と AlN の電気的特性の違いとして、比誘電率がある (Si_3N_4 基板 : 9.0、 AlN : 8.8)。そこで、実験結果の差が、絶縁層の比誘電率の違いによる電界強度分布の違いによるものかを調査するため、電界解析を行った。第3章と同じく、解析ソフトは ANSYS 社の電磁界解析ソフト Maxwell 2D (ver. 2021 R2) を用いた。

図4-6に、解析の2次元モデルを示す。絶縁基板は、前述した実験と同様、厚さ 1.0 mm の絶縁層の表裏に、厚さ 0.02 mm のろう材を介し、厚さ 0.3 mm の銅箔を配置する構成とし、エポキシ樹脂にて封止したモデルとした。絶縁層の比誘電率は、 Si_3N_4 が 9.0、 AlN が 8.8 であるが、比誘電率の違いによる影響を明確化するために、1.0~11.0 の範囲とした。電圧条件は、 AlN の絶縁破壊電圧平均値 30.9 kV を用い、表側の銅箔と裏側の銅箔の間に設定した。図4-7にメッシュモデルを、表4-1に使用した物性値 (常温) を示す。

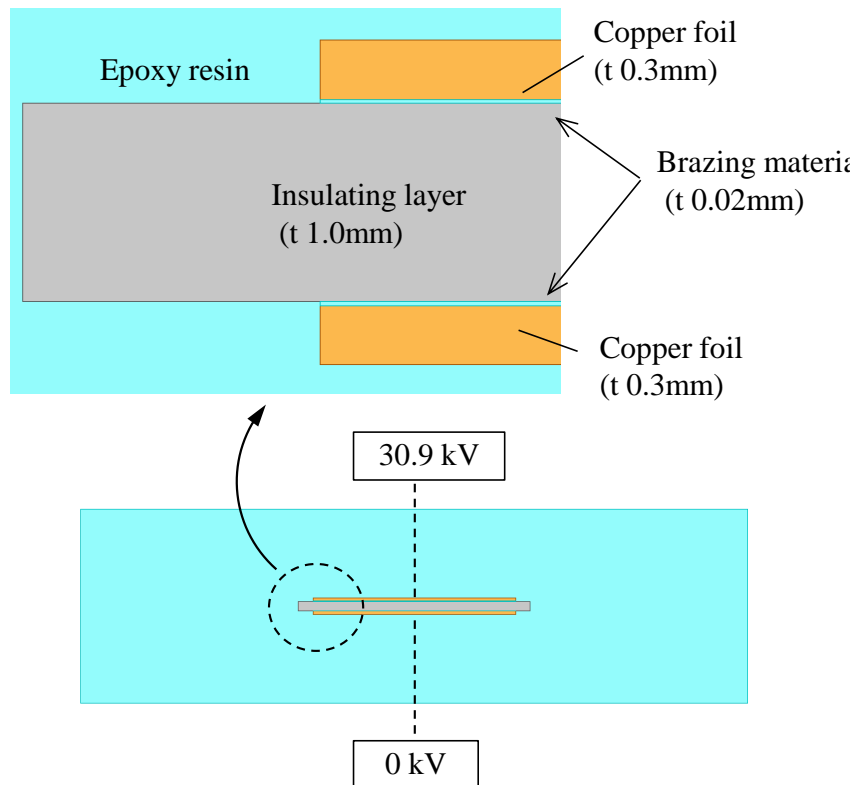


Fig. 4-6 Analysis model for electric field analysis.

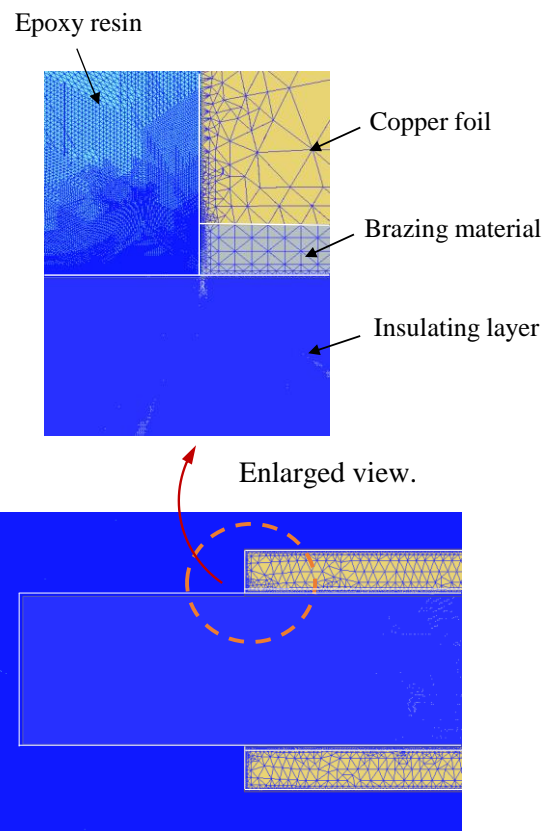


Fig. 4-7 Mesh model for electric field analysis.

Table 4-1 Properties of electric field analysis.

	Relative Permittivity [-]	Bulk Conductivity [S/m]
Cu	—	58×10^6
Insulating layer	Si ₃ N ₄ : 9.0 AlN : 8.8	0
Brazing material	—	61×10^6
Epoxy resin	3.6	0

4.5 解析結果

図4-8に、絶縁層の比誘電率をパラメータとした、電界強度のコンター図を示す。縦軸は、絶縁層の比誘電率を11.0とした場合の、最大電界強度94.7 kV/mmを100%とし表示している。電界強度は、絶縁層の比誘電率によらず、電極である表裏の銅箔に挟まれた絶縁層内部で高くなり、銅箔と絶縁層、エポキシ樹脂の交わる絶縁層表裏の三重点で極大となる。結果的に、 Si_3N_4 と AlN では比誘電率の違いがほとんど無いため、三重点の電界強度に大きな差は見られなかった(0.7 kVの差)。但し、比誘電率をある程度の範囲で変えることで、三重点の電界強度に差が生じたため、以下、考察を行った。

図4-8において、比誘電率を変えても、絶縁層内部の電界強度分布はほぼ同じであるが、三重点の最大電界強度は異なっている。図4-9にその結果をまとめた。横軸が絶縁層の比誘電率、縦軸が三重点の最大電界強度である。比誘電率が高くなるほど、三重点の最大電界強度も増加する傾向となった。この理由を、図4-10の等電位線図を用い説明する。(a)が比誘電率1.0の場合、(b)が比誘電率11.0の場合である。違いがよく分かるように、極端な例にて説明する。比誘電率が低い場合、絶縁層内部の分極は少なく、その結果、正電位の表銅箔とGND電位の裏銅箔の等電位線は絶縁層内部に寄り、銅箔近傍の等電位線は疎になる。逆に、比誘電率が高い場合、絶縁層内部の分極が多くなり、その結果、内部の電位が相殺され表銅箔と裏銅箔の等電位線が絶縁層外部に寄り、銅箔近傍の等電位線は密になる。銅箔近傍の等電位線が密になることで、銅箔端部の三重点における等電位線はより密になるため、比誘電率が高いほど最大電界強度が増加する結果となることが分かった。

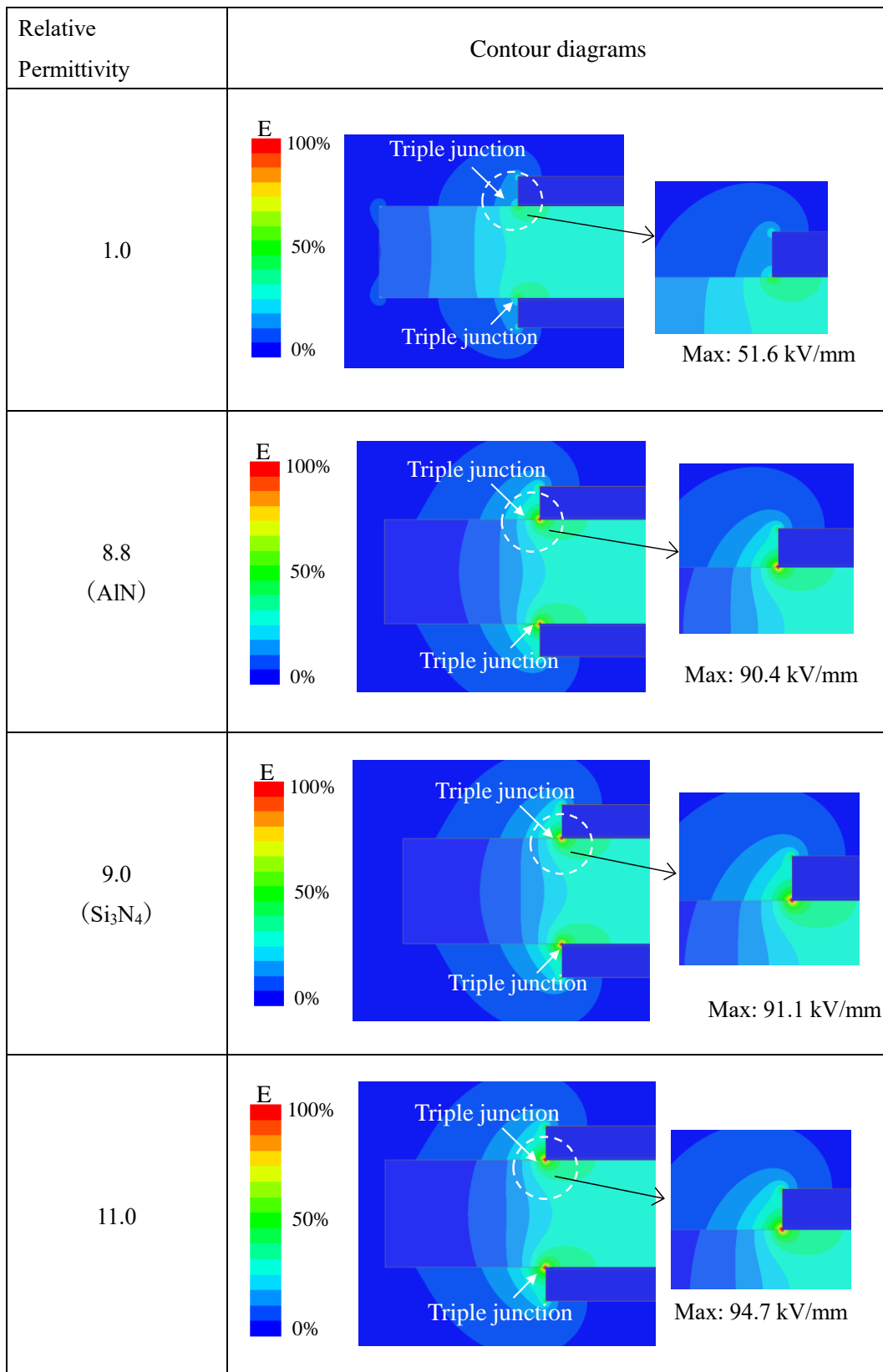


Fig. 4-8 Contour diagrams of electric field strength.

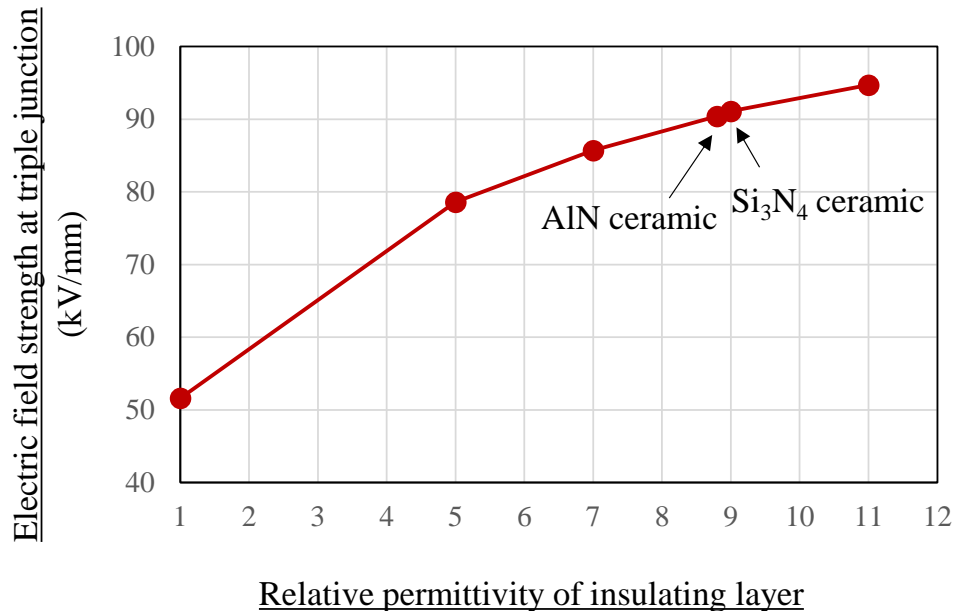


Fig. 4-9 Relationship between electric field strength at triple junction and relative permittivity of ceramic.

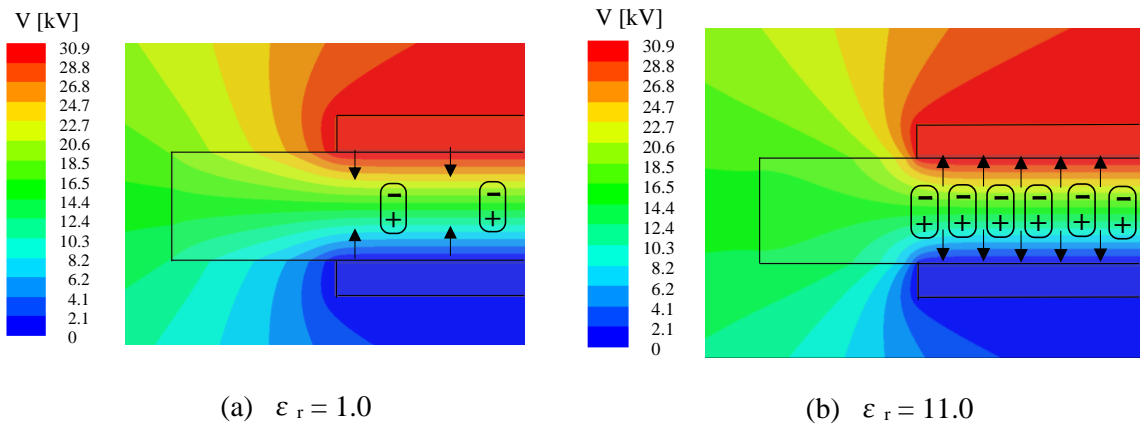
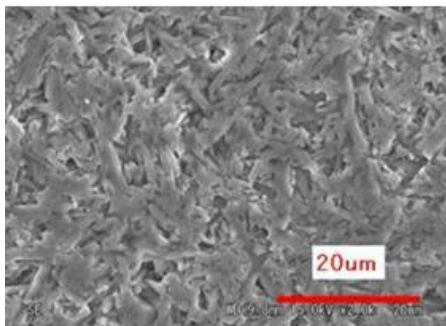


Fig. 4-10 Equipotential diagram of electric field strength analysis.

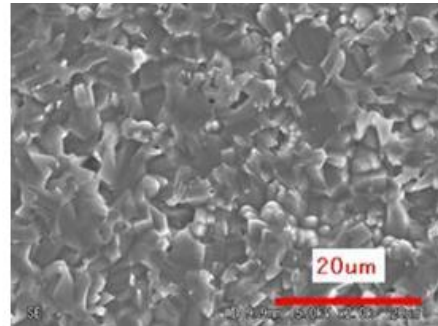
4.6 セラミックの表面観察結果

前節の電界解析結果より、 Si_3N_4 基板と AlN 基板で、比誘電率の差による最大電界強度への影響がほとんど見られなかったことから、SEM による結晶状態の観察を行った。

図 4-11 に、各セラミック表面の SEM 観察結果を示す。(a)が Si_3N_4 の代表写真、(b)が AlN の代表写真である。観察条件は、電子線の加速電圧：10kV、真空度：高真空($10^{-5}\sim 10^{-1}\text{Pa}$)、前処理：Os 蒸着としている。 Si_3N_4 は、繊維状の葉のような結晶形状をしており、結晶の粒径は $10\mu\text{m}$ 程度である。結晶のアスペクト比が高いため、重なり合った部分に隙間が多くみられる。一方、 AlN は、丸みを帯びた葉のような結晶形状をしており、結晶の粒径は Si_3N_4 と同じく $10\mu\text{m}$ 程度である。結晶どうしがうまく重なり合っ、それほど隙間は見られない。両者を比較すると、結晶の粒径はほとんど同じであるが、 AlN の方が結晶形状が球形に近く、結晶状態が緻密であることが分かる。この結晶状態の緻密さの違いにより、絶縁破壊電圧に差が出たと考えられる。



(a) Si_3N_4 ceramic



(b) AlN ceramic

Fig. 4-11 SEM images of the insulating layer surface.

4.7 結言

第4章では、パワーモジュールの高耐圧用絶縁基板として期待されている、 Si_3N_4 基板と AlN 基板の絶縁破壊電圧試験結果について述べた。沿面破壊を抑制し、セラミック自体の絶縁特性を比較するため、エポキシ樹脂にて封止した構成にて実験を行い、絶縁破壊電圧は、平均値で 36% AlN 基板の方が高いことが確認できた。 Si_3N_4 基板と AlN 基板では、比誘電率も異なる (Si_3N_4 : 9.0、 AlN : 8.8) が、この程度の違いでは三重点の最大電界強度にほとんど差が無いことから、絶縁破壊電圧が AlN 基板の方が高い理由は、セラミックの結晶状態の違いにあると考えられる。粒径はほとんど同じであるが、結晶形状が、 Si_3N_4 は繊維状の葉のような結晶形状をしており、重なり合った部分に隙間が多く見られるのに対し、 AlN は丸みを帯びた葉のような形状をしており、結晶どうしがうまく重なり合っただけで隙間が見られない。この結晶状態の緻密さの違いが、絶縁破壊電圧の差になったと考えられる。

参考文献

- [1] 平尾喜代司, 周遊, 宮崎広行, 日向秀樹 : “組織制御による窒化ケイ素の高熱伝導化と放熱基板への展開”, 粉体および粉末冶金, 第 64 巻, 第 8 号, 2017.
- [2] Manfred Goetz, Nico Kuhn : “Comparison of Silicon Nitride DBC and AMB Substrates for different applications in power electronics”, Proceedings of PCIM Europe 2013, 2013.

第5章 絶縁基板の絶縁破壊に影響を及ぼす三重点電界強度の影響調査

5.1 緒言

パワーモジュール絶縁基板の絶縁破壊に大きな影響を与える因子として、銅箔、絶縁層、封止材からなる三重点の電界強度が知られているが、実際の絶縁破壊箇所や絶縁破壊電圧との相関についての報告事例はほとんど見られない。また、第6章にて述べるが、実際のパワーモジュールの絶縁試験においても、破壊箇所が必ずしも三重点になるとは限らない。そこで、絶縁基板の絶縁層に対する表裏銅箔の位置を変え、意図的に三重点の位置と電界強度の大きさを変えた絶縁破壊電圧試験を行い、絶縁破壊電圧および絶縁破壊箇所を調査し、それに対応した電界解析により電界強度分布を求め、絶縁破壊電圧および絶縁破壊箇所と電界強度分布との関係について明らかにした。封止材としては、第3章にて、部分放電の抑制効果が高いことが明らかとなったエポキシ樹脂を採用し、絶縁基板としては、第4章において絶縁破壊電圧が高い結果となった AlN 基板を採用した。

5.2 解析方法

5.2.1 試験サンプル構成

図 5-1 に、本解析および実験にて使用した、絶縁基板を模擬した試験サンプル構成を示す。(a)は平面図、(b)は断面図である。絶縁層には AlN を用い、その表裏に銅箔を配置する構成とした。各材料の厚さは 1.0 mm とし、平面寸法は、AlN を 24×24 mm、銅箔を 13×13 mm とし、銅箔の位置を自由に変えられるように、通常の活性金属接合法を用いた絶縁基板のような、ろう材等の接合材を使用しない構成とした。

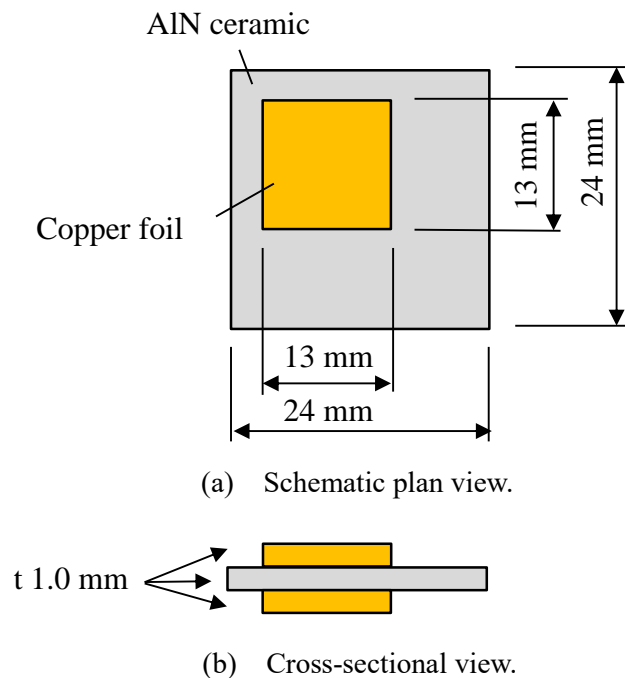


Fig. 5-1 Schematic diagram of test specimen.

5.2.2 解析モデルおよび解析方法

図 5-2 に、解析モデルを示す。解析は、第 3 章、第 4 章では 2 次元解析としたが、本章では 3 次元形状の実験結果と比較するため 3 次元解析とした。解析モデルは、後述する試験と同様、AlN の表裏に銅箔を配置したサンプルの周囲を、絶縁性液体であるフッ素系不活性液体 (3M 製、フロリナート) で覆ったモデルとした。図 5-2 の、(a)が鳥瞰図、(b)が断面図である。また電圧条件は、後述する試験にて、絶縁破壊電圧が 20 kV 前後であったため、表銅箔に 20 kV 印加、裏銅箔に 0 kV 印加の条件とした。図 5-3 と図 5-4 に、メッシュモ

デルを示す。図 5-3 はメッシュ断面図、図 5-4 は全体のメッシュモデルである。メッシュ条件は、AlN 部を微細 (0.2 mm) に分割し、銅箔と絶縁性液体を比較的粗く (1.0 mm 以上) 分割した。表 5-1 に、使用した物性値を示す。試験を常温で行ったため、常温の物性値を用いた。解析は、表銅箔と裏銅箔の相対位置 d (X, Y 方向) をパラメータとし、裏銅箔の位置を AlN 端部から X 方向、Y 方向ともに 3 mm の位置で固定し、表銅箔と裏銅箔の相対位置 $d=0\sim 3$ mm (X 方向と Y 方向を同じ量) となるように表銅箔の位置をずらしていき (図 5-5 参照)、各条件での電界強度分布を求めた。解析ソフトは ANSYS 社の電磁界解析ソフト Maxwell 3D (ver. 2021 R2) を用いた。

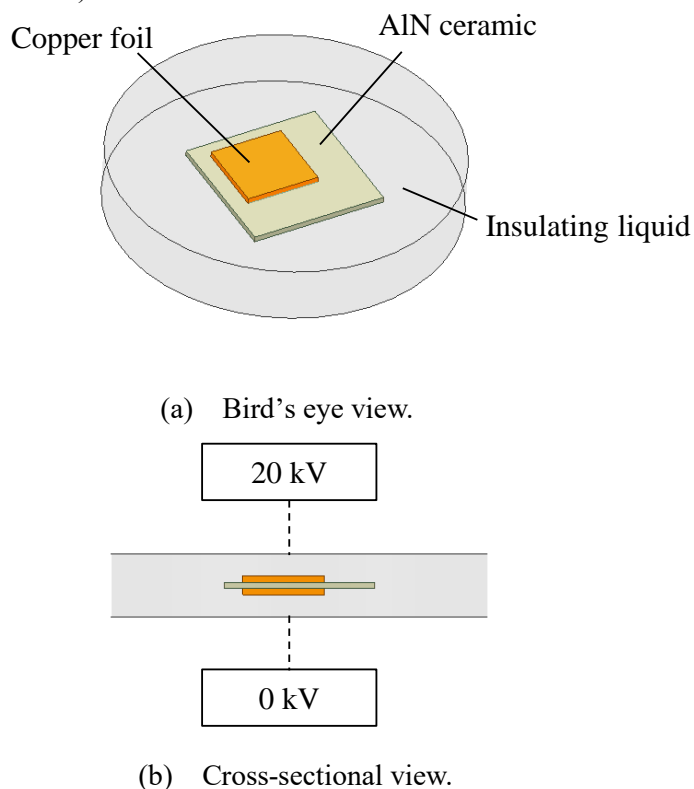


Fig. 5-2 Analysis model for electric field analysis.

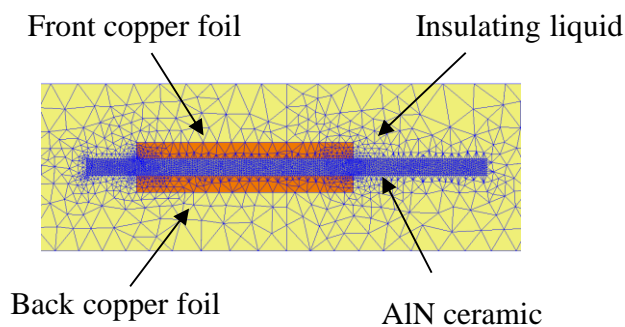


Fig. 5-3 Cross-sectional view of mesh model.

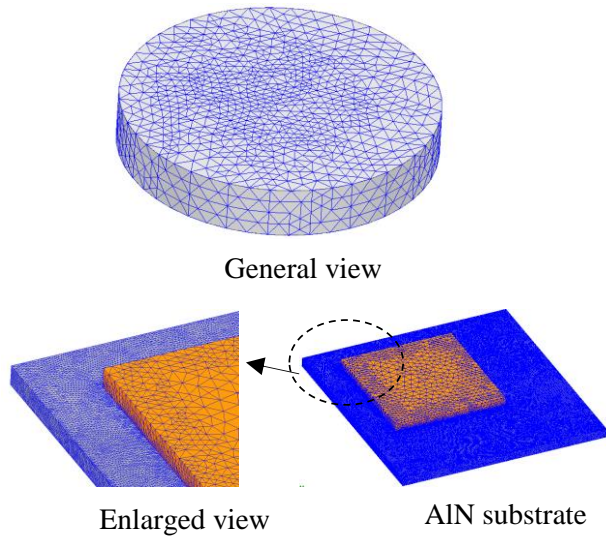


Fig. 5-4 Mesh model of overall view.

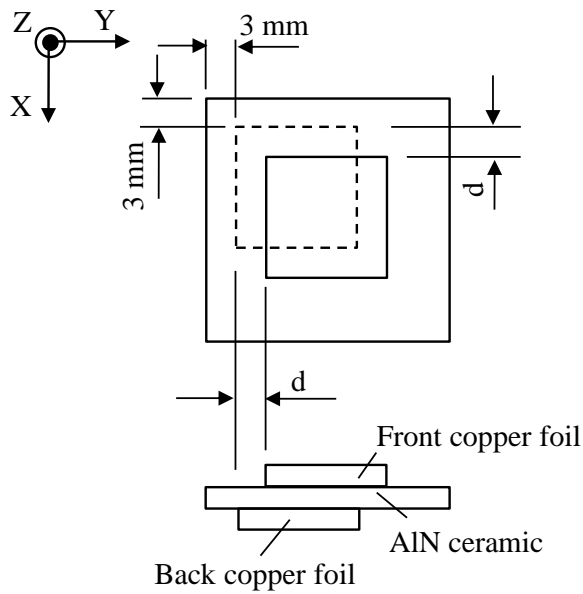


Fig. 5-5 Analysis conditions.

Table 5-1 Properties of electric field analysis.

	Relative Permittivity [-]	Bulk Conductivity [S/m]
Copper foil	—	58×10^6
AlN ceramic	8.8	0
Insulating liquid	1.9	0

5.3 解析結果

図5-6に、表銅箔と裏銅箔の相対位置が $d=1\text{ mm}$ の条件における、電界強度のコンター図（側断面表示）を示す。表示は、電界強度 60 kV/mm を 100% とし表示している。電界強度は、電圧が設定された表銅箔と裏銅箔に挟まれた AlN 内部で高くなるが、特に、銅箔と AlN、絶縁性液体の交わる AlN 基板表裏の三重点にて極大となる。図5-6において、三重点は2箇所存在するが、表銅箔側の三重点において最大となる。この理由について、図5-7の等電位線図を用い説明する。図5-7は、図5-6と同様、表銅箔と裏銅箔の相対位置が $d=1\text{ mm}$ の条件における等電位線図である。AlN を挟んで表銅箔が裏銅箔に対し中心方向にずれているため、裏銅箔からの等電位線は、一部 AlN 側に回り込む。その結果、表銅箔からの等電位線が中心方向に押し付けられる状態となり、この部分の等電位線が密集し、その屈曲点となっている表銅箔側三重点の電界強度が高くなる。過去の研究事例[1][2]では、この裏銅箔のような位置関係の電極を背後電極と呼んでいる。背後電極の存在により、反対側の電極の三重点で放電が生じやすくなることは良く知られていたが、本解析結果より、この理由は、背後電極があることで三重点の電界強度がより増加するためであることが明らかとなった。

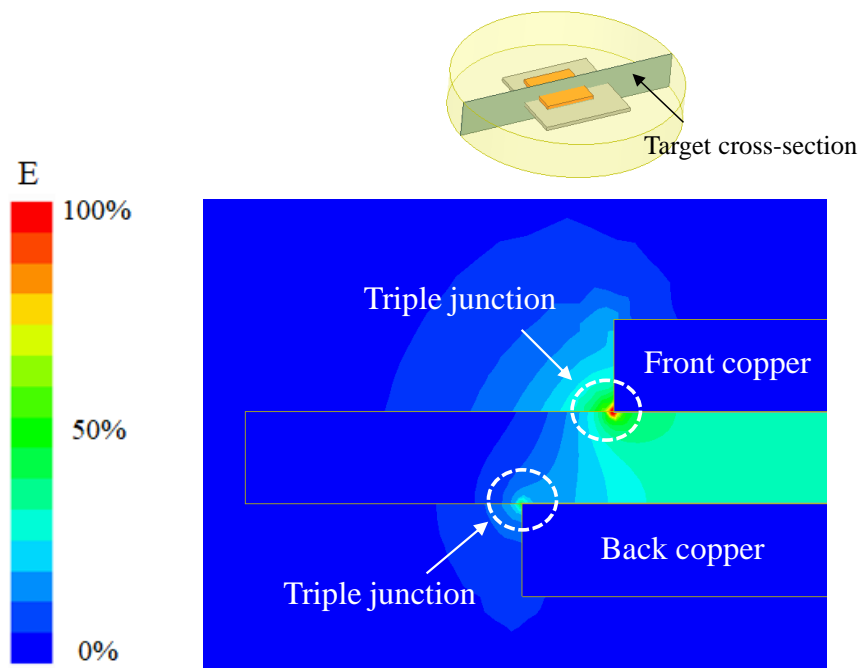


Fig. 5-6 Contour diagram of electric field strength.

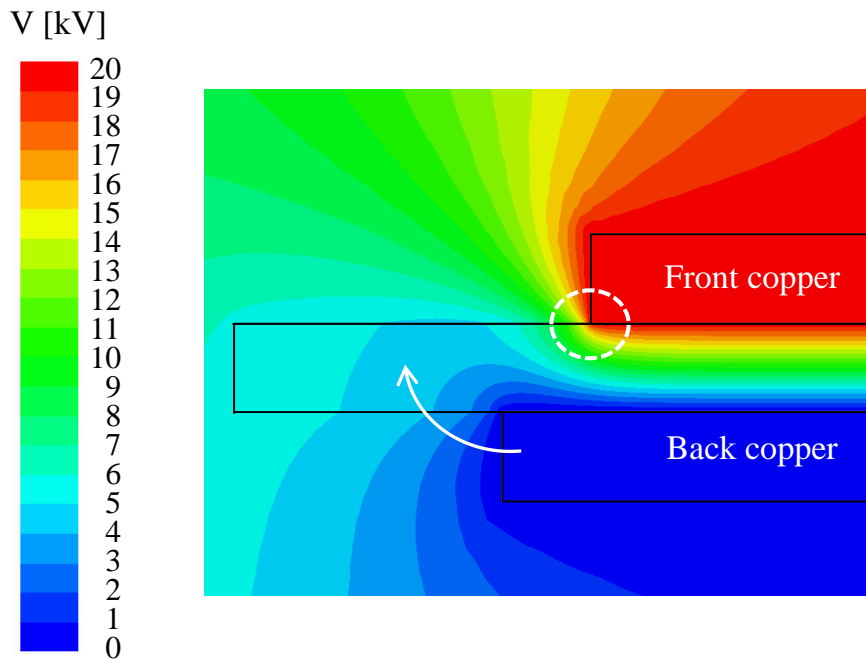


Fig. 5-7 Equipotential diagram of electric field strength analysis.

三重点は、3次元的に見た場合、銅箔角部にも存在する。図5-8に、図5-6と同様、表銅箔と裏銅箔の相対位置 $d1=1\text{ mm}$ の条件における、表銅箔と AlN の接合面で見した場合の電界強度のコンター図を示す。表示は図5-6と同様、電界強度 60 kV/mm を100%とし表示している。表銅箔の全ての外辺部が三重点であるため、電界強度は外辺部に沿って高くなり、特に、裏銅箔が背後電極となる表銅箔の2辺 (Edge_x と Edge_y) において高くなる。その結果、2辺の接合点である表銅箔角部 (Corner) の三重点において、電界強度は更に高くなる。以下に考察を行った。

表銅箔角部 (Corner) の三重点において電界強度が高くなる理由は、(5-1)式からなる、2辺の表銅箔端部の電界の重ね合わせ (電界ベクトル和) となるためである。

$$E(\text{corner}) = E(\text{edge}_x) + E(\text{edge}_y) \quad \dots\dots\dots (5-1)$$

ここで、 $E(\text{corner})$: 表銅箔角部の電界ベクトル

$E(\text{edge}_x)$: Edge_x 側表銅箔端部の電界ベクトル

$E(\text{edge}_y)$: Edge_y 側表銅箔端部の電界ベクトル

$E(\text{edge}_x)$ と $E(\text{edge}_y)$ の電界ベクトルのなす角度 θ は、(5-2)式の関係と考えられる。

$$0^\circ < \theta < 90^\circ \quad \dots\dots\dots (5-2)$$

イメージ図を用い説明する。図5-9は、図5-7を線のみで表示した等電位線図である。表銅箔の Edge_y の面である。基本、電界ベクトルの向きは、等電位線と直角方向となるため、表銅箔から裏銅箔に向かう垂直方向となる。但し、表銅箔角部においては、等電位線が斜めに湾曲しているため、電界ベクトルも斜めとなる。同じように、表銅箔角部を構成している、もう一方の辺である表銅箔の Edge_x も同様であるため、表銅箔角部の電界ベクトルは、図5-10のような関係となる。ここで、E (edge_x)と E (edge_y)の電界ベクトルのなす角度 θ は、もし、各々の電界ベクトルが表銅箔から裏銅箔に向かう垂直方向である場合には 0° となり、もし、各々の電界ベクトルが水平方向である場合には 90° となる。従って、電界ベクトルのなす角度 θ は、(5-2)式の関係になると考えられる。

(5-1)式より、電界ベクトルの重ね合わせ後の大きさは、(5-3)式となる。

$$E(\text{corner}) = E(\text{edge}_x)\cos\frac{\theta}{2} + E(\text{edge}_y)\cos\frac{\theta}{2} \quad \dots\dots\dots (5-3)$$

(5-3)式を用い、 $\theta=0^\circ$ の場合と $\theta=90^\circ$ の場合の電界の重ね合わせ後の大きさを求める。

$\theta=0^\circ$ の場合は、 $\cos 0^\circ=1$ であるから、

$$E(\text{corner}) = E(\text{edge}_x) + E(\text{edge}_y) \quad \dots\dots\dots (5-4)$$

$\theta=90^\circ$ の場合は、 $\cos 45^\circ=0.71$ であるから、

$$\begin{aligned} E(\text{corner}) &= E(\text{edge}_x) \times 0.71 + E(\text{edge}_y) \times 0.71 \\ &= \{E(\text{edge}_x) + E(\text{edge}_y)\} \times 0.71 \quad \dots\dots\dots (5-5) \end{aligned}$$

ここで本研究では、表銅箔と裏銅箔の相対位置を X 方向と Y 方向で同じ量にしているため、(5-6)式の関係となる。

$$E(\text{edge}_x) = E(\text{edge}_y) = E(\text{edge}) \quad \dots\dots\dots (5-6)$$

従って、(5-4)式は、

$$\begin{aligned} E(\text{corner}) &= E(\text{edge}_x) + E(\text{edge}_y) \\ &= E(\text{edge}) + E(\text{edge}) \\ &= 2 E(\text{edge}) \quad \dots\dots\dots (5-7) \end{aligned}$$

(5-5)式は、

$$E(\text{corner}) = \{E(\text{edge}_x) + E(\text{edge}_y)\} \times 0.71$$

$$\begin{aligned}
&= \{E(\text{edge}) + E(\text{edge})\} \times 0.71 \\
&= 2 E(\text{edge}) \times 0.71 \\
&= 1.42 E(\text{edge}) \quad \dots\dots\dots (5-8)
\end{aligned}$$

(5-7)式と(5-8)式より、2辺の接合点である表銅箔角部（Corner）の三重点における電界強度は、2辺の表銅箔端部の電界強度の1.42～2.00倍になると考えられる。

図5-11に、表銅箔と裏銅箔の相対位置をパラメータとした場合の、表銅箔端部の三重点と、表銅箔角部の三重点の電界強度の推移を示す。三重点の電界強度は、表銅箔と裏銅箔の相対位置がd=0mm（同位置）の場合に最も低い値となり、表銅箔の位置をずらすことにより増加する傾向となった。図5-7で説明したように、裏銅箔からの電位線の回り込みによる影響である。表銅箔角部の三重点の電界強度は、表銅箔端部の三重点の電界強度より大きく、その差は1.46～1.89倍であり上記の考察結果（1.41～2.00倍）と概ね一致した。

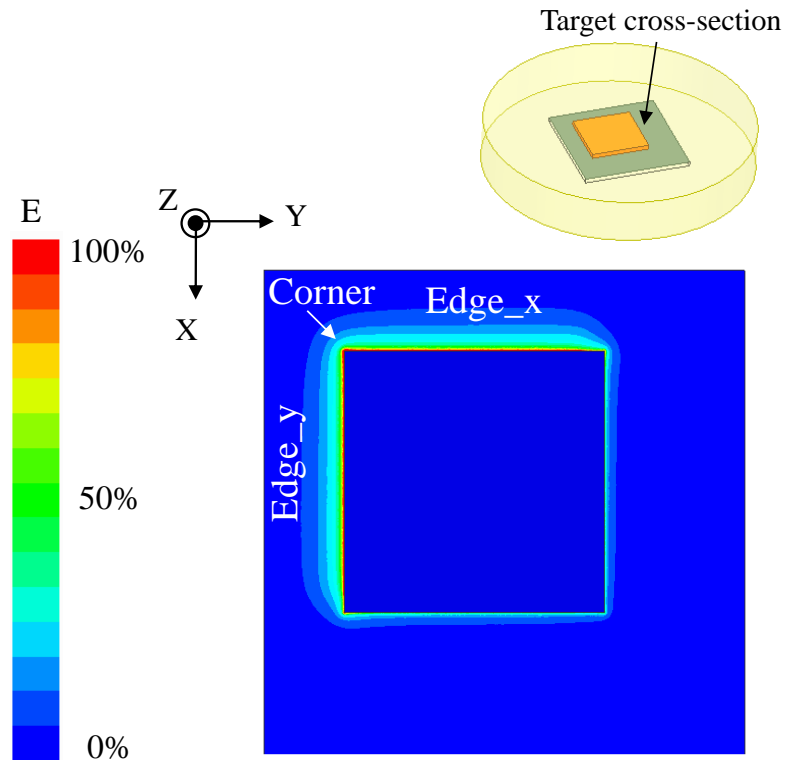


Fig. 5-8 Contour diagram of electric field strength analysis.

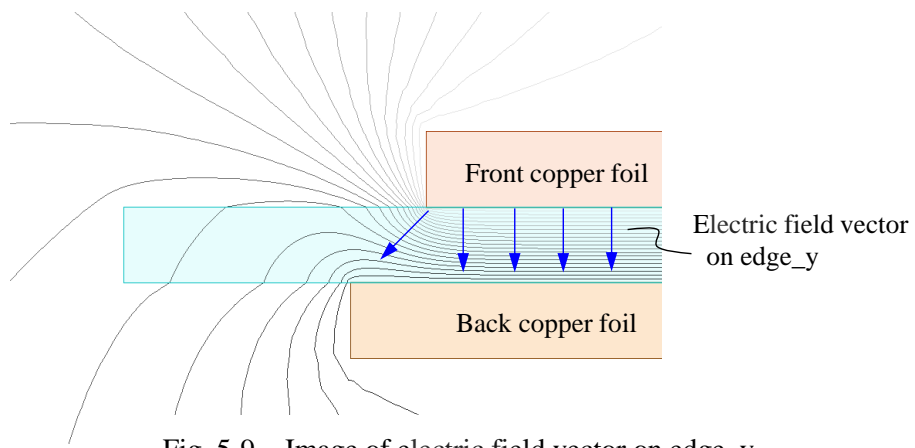


Fig. 5-9 Image of electric field vector on edge_y.

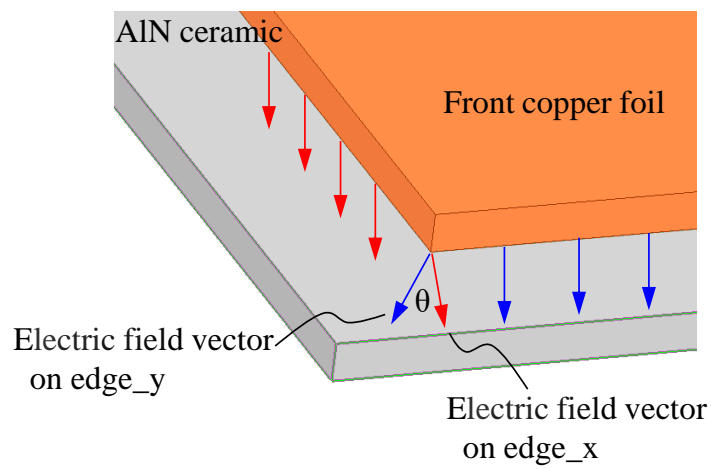


Fig. 5-10 Image of electric field vector on corner.

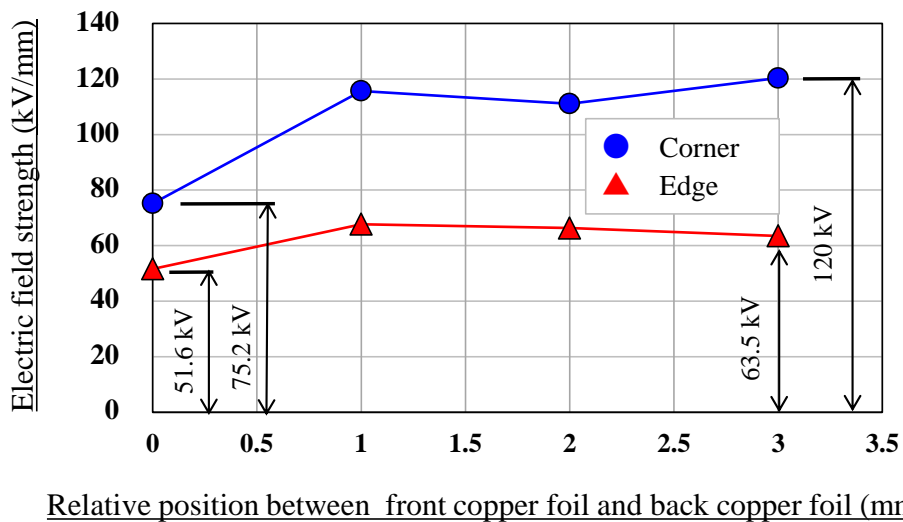


Fig. 5-11 Electric field strength at triple junctions of AlN ceramic.

5.4 実験方法

図 5-1 2 に、実験構成の概略図を示す。絶縁基板を模擬した試験サンプルの AlN バルク材の絶縁破壊電圧を測定するために、試験サンプルを絶縁性液体であるフッ素系不活性液体（3M 製、フロリナート）に浸漬させ、絶縁破壊電圧試験器にて、表銅箔と裏銅箔に交流電圧（60 Hz）を印加する構成とした。試験サンプルを絶縁性液体に浸漬させることで、AlN 外縁部での沿面破壊を抑制している。また銅箔と AlN の間にボイドが入らないように、部品を絶縁性液体で濡らした後、ボイドが無い状態を確認後、組立を行った。表銅箔と裏銅箔の相対位置 d をパラメータとし（図 5-5 参照）、試験は常温 20°C で行い、昇圧速度を 0.33 kV/sec とし、絶縁破壊するまで電圧を上げていった。サンプル数は、各条件 3 個とした。絶縁破壊の判定値であるカットオフ電流は 5 mA とした。

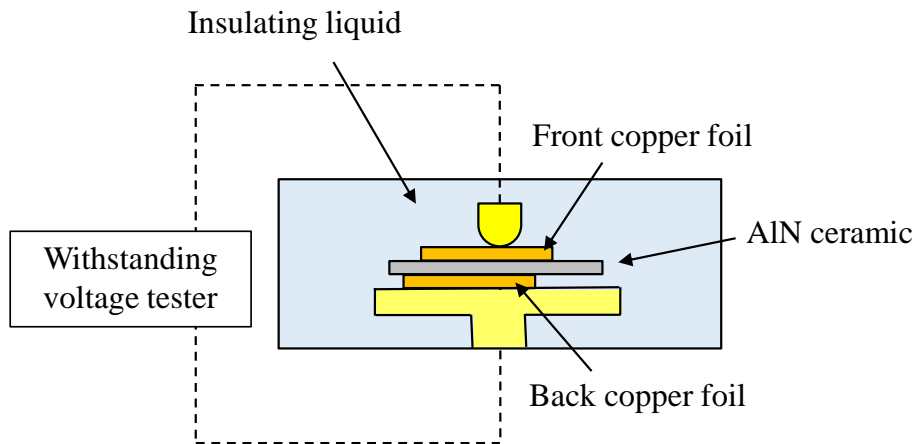
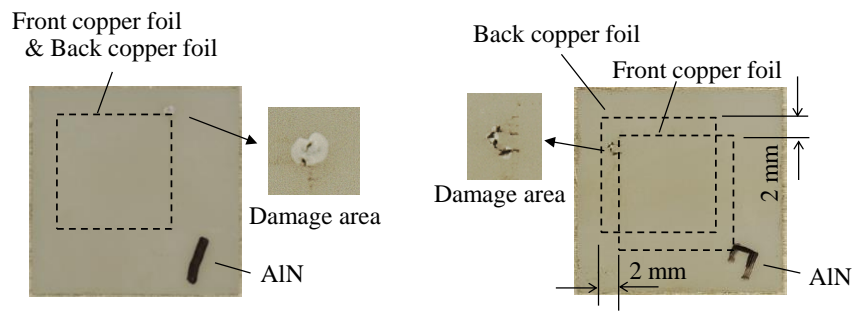


Fig. 5-12 Schematic diagram of experimental setup.

5.5 実験結果および考察

5.5.1 実験結果

図 5-1 3 に、代表的なサンプルの絶縁破壊箇所観察結果を示す。(a)が表銅箔と裏銅箔の相対位置 $d=0$ mm（同位置）の場合の結果、(b)が相対位置 $d=2$ mm の場合の結果である。(a)の場合、絶縁破壊箇所は表銅箔角部であり、表銅箔側から裏銅箔側に貫通破壊している。(b)の場合、絶縁破壊箇所は表銅箔端部であり、(a)と同じく、表銅箔側から裏銅箔側に貫通破壊している。AlN の銅箔位置には放電痕が見られ、放電が発生した後、貫通破壊に至ったと推定される。図 5-1 4 と図 5-1 5 に、その他のサンプルの絶縁破壊箇所観察結果も示す。



(a) Relative position 0 mm.

(b) Relative position 2 mm.

Fig. 5-13 Photograph of dielectric breakdown voltage test.

Relative position	Photographs of dielectric breakdown test
0 m m	
1 m m	

Fig. 5-14 Photographs of dielectric breakdown voltage test.

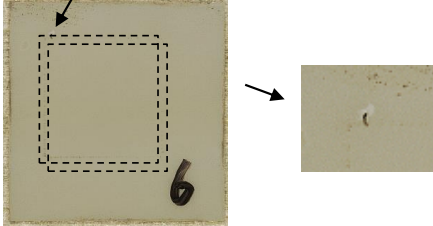
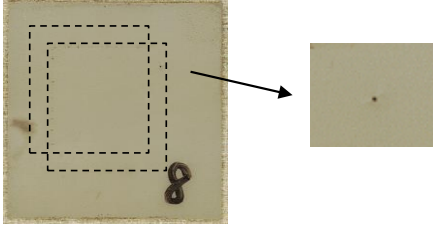
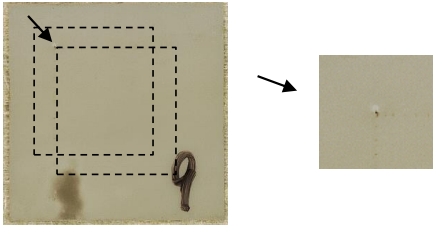
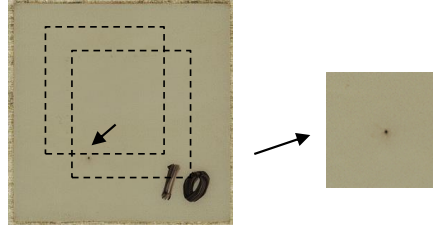
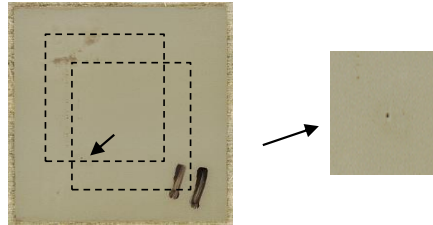
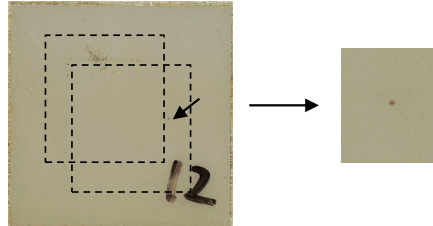
Relative position	Photographs of dielectric breakdown test
0.5 mm	
2 mm	
	
3 mm	
	
	

Fig. 5-15 Photographs of dielectric breakdown voltage test.

図 5-16 に、全てのサンプルの絶縁破壊電圧試験結果を示す。破壊は、表銅箔と裏銅箔の、銅箔角部および銅箔端部の三重点で発生しており、全て貫通破壊である。絶縁破壊電圧は、表銅箔と裏銅箔の相対位置 $d=0$ mm (同位置) の場合に最も高くなり、相対位置をずらしていくほど低下していく傾向となった。この傾向は、図 5-11 に示した、相対位置をパラメータとした場合の、表銅箔端部と表銅箔角部の三重点の電界強度の傾向と逆であり、相対位置をずらすことにより、同じ印加電圧であっても三重点の電界強度が高くなるため、絶縁破壊電圧が低下したと解釈できる。但し 5.3 節の解析結果では、銅箔角部と銅箔端部の三重点で 1.46~1.89 倍の差があったのに対し、実験結果では、銅箔角部と銅箔端部の三重点で、絶縁破壊電圧に特に差が見られなかった。この結果については、理由が明らかになっておらず今後の研究課題と考えているが、現時点での考察を以下に行った。

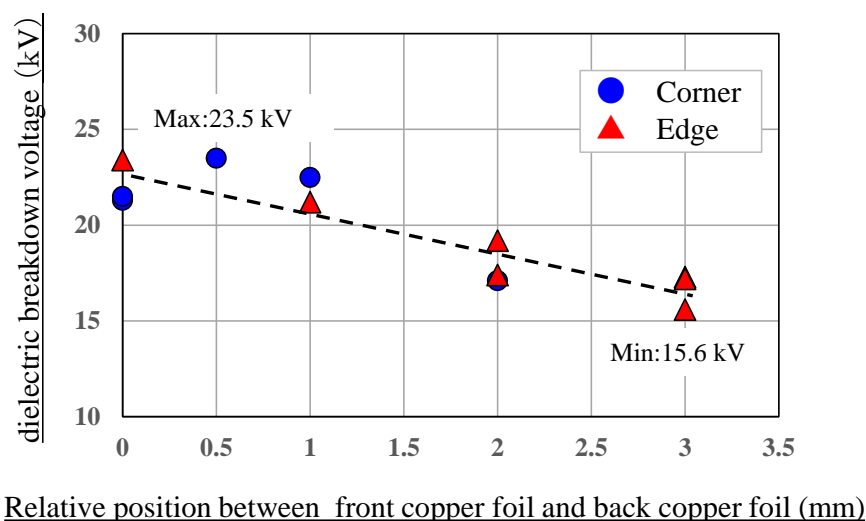


Fig. 5-16 Results of dielectric breakdown voltage test.

5.5.2 銅箔角部と銅箔端部で差が見られなかったことについての考察

(1) 考察1：破壊箇所周辺の放電の影響

図 5-8 の電界強度コンター図で示したように、銅箔角部が点で電界強度が高いのに対し、銅箔端部は辺全体に渡って電界強度が高い領域が存在する。これらの領域で部分放電が生じたと仮定すると、単位面積で考えた場合は、銅箔角部の方が銅箔端部より放電量は大きいですが、ある領域で考えた場合は、銅箔端部の辺の方がトータルの放電量が大きくなると考えられる。第 2 章で述べたように、一般に絶縁破壊は部分放電を経たのち、セラミッ

クが侵食穿孔し貫通破壊に至ると考えられている。但し、貫通破壊した箇所、その周辺の放電の影響については明らかになっていない。従って、絶縁破壊がその箇所の電界強度の大きさのみによって決まるのではなく、その周辺含めた放電状況も影響している可能性があり、図5-16の結果はそのことを示している可能性がある。

(2) 考察2：絶縁性液体に含まれる電荷の移動の影響

第2章で述べたように、絶縁油中に含まれる電荷が電界により移動し、電界分布に時間的变化を生じさせる現象がある[3]～[5]。本章における実験は絶縁性液体中で実施しており、このような現象が生じている可能性もある。図5-17に想定メカニズムを示す。電界解析時の電圧条件と同じく、表銅箔に20 kV印加、裏銅箔に0 kV印加した場合を想定すると、表銅箔端部の三重点で電界強度が高くなる。表銅箔は正の電極であるため、絶縁性液体中の負電荷が三重点に引き寄せられ、負電荷の形成する空間電荷の効果により電界緩和が生じると想定される。電界が高いほど移動する電荷も多くなるため、電界強度が高い銅箔角部の三重点に、より多くの電荷が引き寄せられ、電界緩和の程度もその分大きくなると考えられる。その結果、銅箔角部の三重点と銅箔端部の三重点の電界強度の差が縮小した可能性も考えられる。

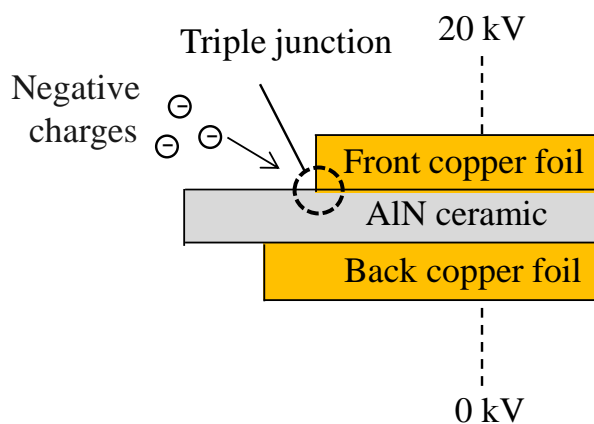


Fig. 5-17 Assumed mechanism.

5.6 結言

第5章では、パワーモジュール絶縁基板の絶縁破壊に大きな影響を与える因子の1つである、銅箔、絶縁層、封止材からなる三重点の電界強度に着目し、絶縁層に対する表裏銅箔の位置を変え、意図的に三重点の位置を変えた絶縁破壊電圧試験と、それに対応した電界解析を行い、実験による絶縁破壊電圧および絶縁破壊箇所を調査した。その結果、絶縁破壊箇所が、銅箔、AIN、封止材からなる三重点と一致し、絶縁破壊電圧が三重点の電界強度と相関をもつことが明らかとなった。本研究で得られた成果を以下に記載する。

- 1) AIN 基板における電界強度分布は、表裏の銅箔に挟まれている AIN 内部で高い値を示すが、特に銅箔と AIN、封止材の交わる AIN 基板表裏の三重点において極大値となる。三重点の箇所は、大きく分けて銅箔角部と銅箔端部に分かれ、更に表銅箔側と裏銅箔側に分かれる。電界強度は、AIN を挟んで反対側の銅箔が背後電極となる条件における、銅箔角部にて最大となり、銅箔角部と端部の電界強度の差は、1.46 ～ 1.89 倍となる。
- 2) 三重点の電界強度は、絶縁層に対する表銅箔と裏銅箔の相対位置を同位置にした場合に最も小さくなり、相対位置をずらすことにより増加する傾向となる。銅箔の位置関係を調整することで、電界強度を制御できることが明らかとなった。
- 3) 絶縁破壊電圧は、表銅箔と裏銅箔の相対位置を同位置にした場合に最も高くなり、相対位置をずらしていくほど低下していく傾向となり、三重点の電界強度（上記2）と逆の傾向となる。三重点の電界強度が大きいほど、AIN は絶縁破壊し易くなり、絶縁破壊電圧が小さくなることを示しており、両者は相関関係をもつことが明らかとなった。また絶縁破壊箇所は、表銅箔および裏銅箔周辺の銅箔角部および銅箔端部の三重点に集中し、両者も相関をもつことが明らかとなった。但し、詳細は第6章で述べるが、絶縁破壊箇所と三重点が一致する結果は、AIN の内部応力がほとんど無い理想条件の場合に限られる。

参考文献

- [1] 山野芳昭, 首藤克彦, 貫洞正明, 岡本勝弘: “プリント配線板ファインパターン導体間のサージ特性”, 電学論 A, Vol.127, No.2, pp.121-127 (2007).
- [2] 平田智之, 古賀充真, 上野秀樹, 中山博史: “背後電極付き微小間隙内の沿面放電特性”, 電学論 A, Vol.128, No.7, pp.483-489 (2008).
- [3] 向當政典, 岡部成光: “Kerr 効果を用いた電界測定装置による油ギャップ中の多点電界計測”, 電学論 B, Vol.126, No.3, 2006.
- [4] 高橋英希, 堤泰行, 尾形文夫, 奥山賢一: “油浸絶縁物の直流沿面フラッシュオーバー特性”, 電学論 A, Vol.98, No.8, 1978.
- [5] 花岡良一, 細谷直輝, 高橋尉治朗, 高田新三: “EHD 液体ジェット発生用の実用的電極系と液体ポンピング特性”, 電気学会誌, Vol.127, No.12, 2007.

第6章 絶縁基板の絶縁破壊に影響を及ぼすセラミック内部応力の影響調査

6.1 緒言

前章までの研究結果にて、パワーモジュール絶縁基板の絶縁破壊箇所は、電界解析における電界強度の高い、銅箔、絶縁層、封止材からなる三重点で生じていたが、実際のパワーモジュールにおいては、絶縁破壊箇所が必ずしも三重点になるとは限らない。そこで、第6章では、エポキシ樹脂により封止されたパッケージ形態を想定した絶縁基板に対し、温度をパラメータとした絶縁破壊電圧試験を行い、温度による破壊箇所の違いと内部応力の関係および破壊に至るまでのメカニズムについて明らかにした。なお絶縁基板は、第4章の実験において、絶縁破壊電圧が高い結果となった AlN 基板を用いた。また、温度 30°C における実験結果は第4章のものを流用し、電界解析結果も第4章の結果にデータを追加し考察を行っている。

6.2 実験方法

6.2.1 試験サンプル構成

図6-1に、本実験および解析にて使用した、絶縁基板のサンプル構成を示す。これは、第4章のサンプル構成と同様であるが、本章では AlN 基板のみを対象としている。絶縁層は、厚さ 1.0 mm の AlN を用い、その表裏に厚さ 0.02 mm のろう材を介し、厚さ 0.3 mm の銅箔を配置する構成とした。表裏の銅箔は同じ位置としている。平面寸法は、絶縁層を 24×24 mm、表裏の銅箔を 21×21 mm とし、表裏の銅箔と絶縁層端部との間の距離（外縁部長さ）を 1.5 mm とした。

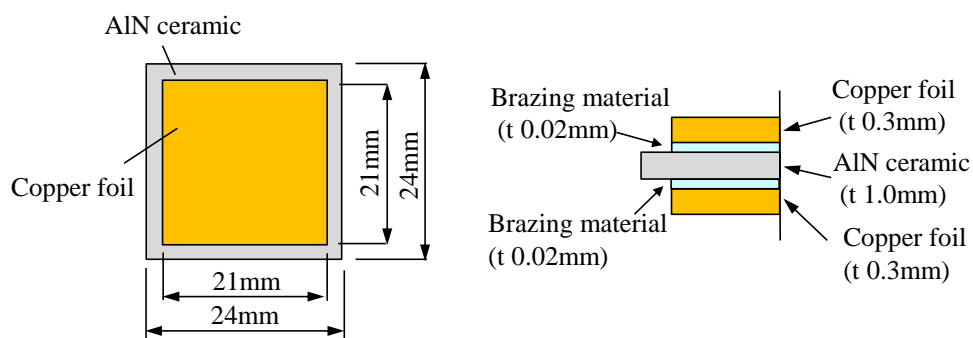


Fig. 6-1 Schematic diagram of test specimen.

6.2.2 実験構成

図6-2に、実験および解析構成の概略図を示す。これも第4章の実験構成と同様である。封止材により封止された実際のパッケージ形態を想定し、絶縁基板をエポキシ樹脂にて円筒状に封止し絶縁性液体中に浸漬させ、絶縁破壊電圧試験器にて、表側の銅箔と裏側の銅箔に交流電圧（50 Hz）を印加する構成とした。絶縁性液体はシリコンオイル（信越シリコン製，KF96-100CS）を使用し、温度は 30°C と 300°C の 2 条件とし、昇圧速度 0.33 kV/sec にて絶縁破壊するまで電圧を上げていった。絶縁破壊の判定値であるカットオフ電流は 5 mA とした。

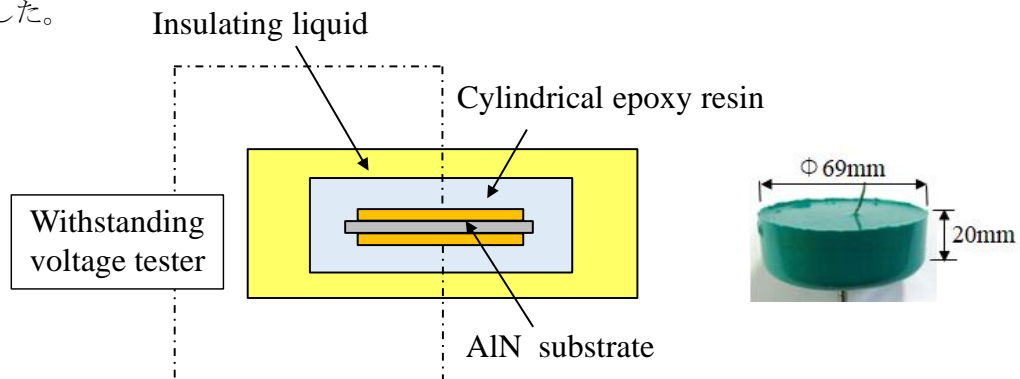


Fig. 6-2 Schematic diagram of experimental setup.

6.3 実験結果

図 6-3 に、絶縁破壊電圧試験結果を示す。サンプル温度 30°C の条件における絶縁破壊電圧は、実測値で 25.6~34.2 kV、平均値で 30.9 kV (サンプル数: 5 個) である。この結果は、第 4 章の値を流用している。200°C の条件における絶縁破壊電圧は、実測値で 28.3~30.4 kV、平均値で 29.6 kV (サンプル数: 3 個) である。30°C の実験結果のばらつきが $\Delta 8.6$ kV、200°C の実験結果のばらつきが $\Delta 2.1$ kV と、温度によってばらつきに差はあるものの、平均値はほとんど変わらない結果となった。

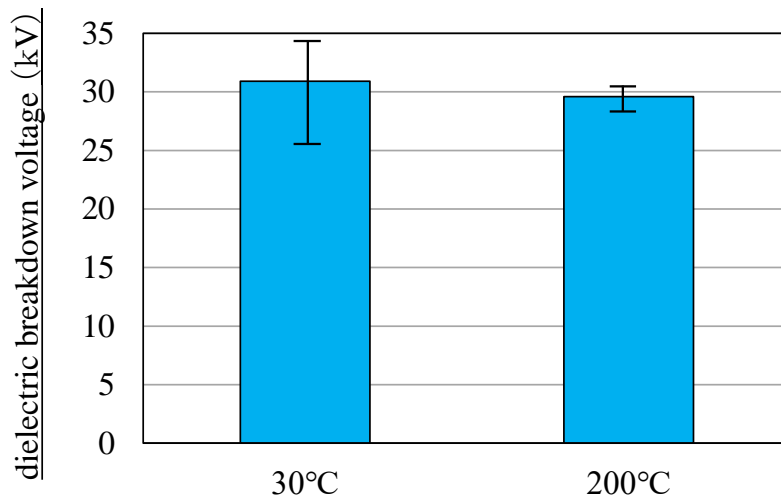


Fig. 6-3 Results of dielectric breakdown voltage test.

図 6-4 と図 6-5 に、絶縁破壊箇所の観察結果を示す。円筒状のエポキシ樹脂を四角に削り、AlN 基板と平行に上面からエポキシ樹脂と銅箔を削り、AlN の黒くなった破壊痕が見えるまで削っていった。図において、白い部分が AlN、水色の部分が封止しているエポキシ樹脂である。図 6-4 が、サンプルの温度 30°C の条件における試験後の代表写真である (5 サンプル中 2 台分の結果)。この図も、第 4 章の結果を流用している。破壊位置は、サンプル全て AlN 端部から 1.5 mm 内寄りで、銅箔端部と一致する位置であった。また、図 6-5 が、サンプルの温度 200°C の条件における試験後の代表写真である (3 サンプル中 2 台分の結果)。破壊位置はサンプルによって異なり、AlN 端部から 6~9 mm の位置であった。サンプル温度の違いにより、絶縁破壊箇所が異なる結果となった。第 5 章までの結果では、絶縁破壊箇所は、電界強度の高い三重点である銅箔端部と全て一致していたが、サンプルの温度 200°C の条件では異なる結果となった。

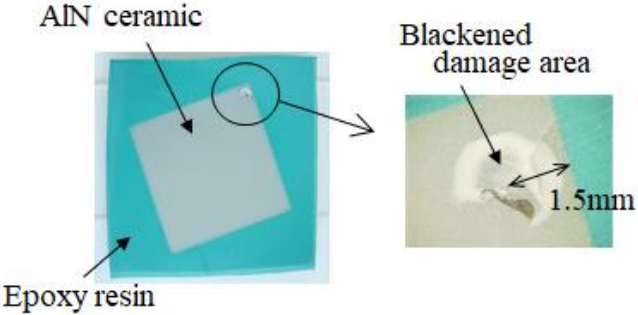
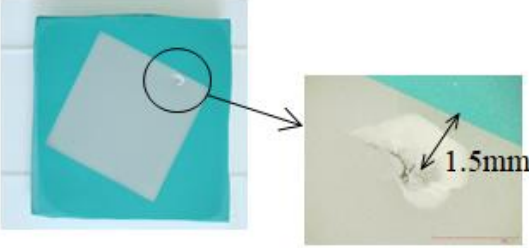
N o	Photographs of dielectric breakdown test
1	 <p>AlN ceramic</p> <p>Epoxy resin</p> <p>Blackened damage area</p> <p>1.5mm</p>
2	 <p>1.5mm</p>

Fig. 6-4 Photographs of dielectric breakdown test at 30°C.

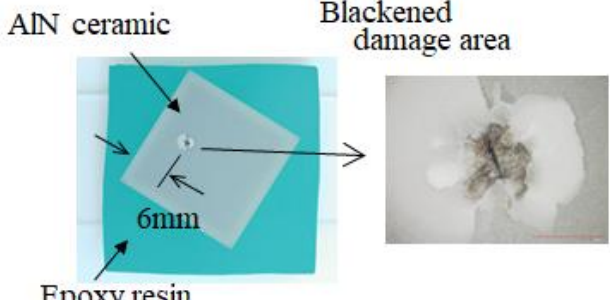
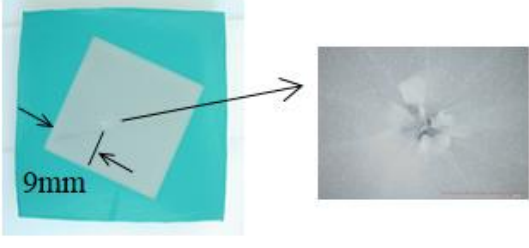
N o	Photographs of dielectric breakdown test
1	 <p>AlN ceramic</p> <p>Epoxy resin</p> <p>Blackened damage area</p> <p>6mm</p>
2	 <p>9mm</p>

Fig. 6-5 Photographs of dielectric breakdown test at 200°C.

6.4 電界解析方法

絶縁破壊箇所と電界強度分布の関係を詳細に調べるため、電界解析を行った。第3章、第4章と同じく、解析ソフトは ANSYS 社の電磁界解析ソフト Maxwell 2D (ver. 2021 R2)を用いた。

第4章で、 Si_3N_4 基板と AlN 基板の2つの絶縁基板を用いた電界解析を行っていたため、第4章の AlN 基板の結果を元に、詳細なデータを追加し検討を行った。図6-6に解析モデルを、図6-7にメッシュモデルを示す。実験と同様、 AlN 基板をエポキシ樹脂にて円筒状に封止したモデルの2次元モデルとし、 AlN 基板は、厚さ 1.0 mm の AlN の表裏に、厚さ 0.3 mm の銅箔をろう材 0.02 mm にて接合したモデルとした。電圧条件は、温度 30°Cにおける絶縁破壊電圧の平均値 30.9 kV を用い、表側の銅箔と裏側の銅箔の間に設定した。表6-1に使用した物性値を示す。 AlN は、比誘電率の温度依存性が少ない[1]ことから、常温の物性値を用い、解析は常温にて実施した。

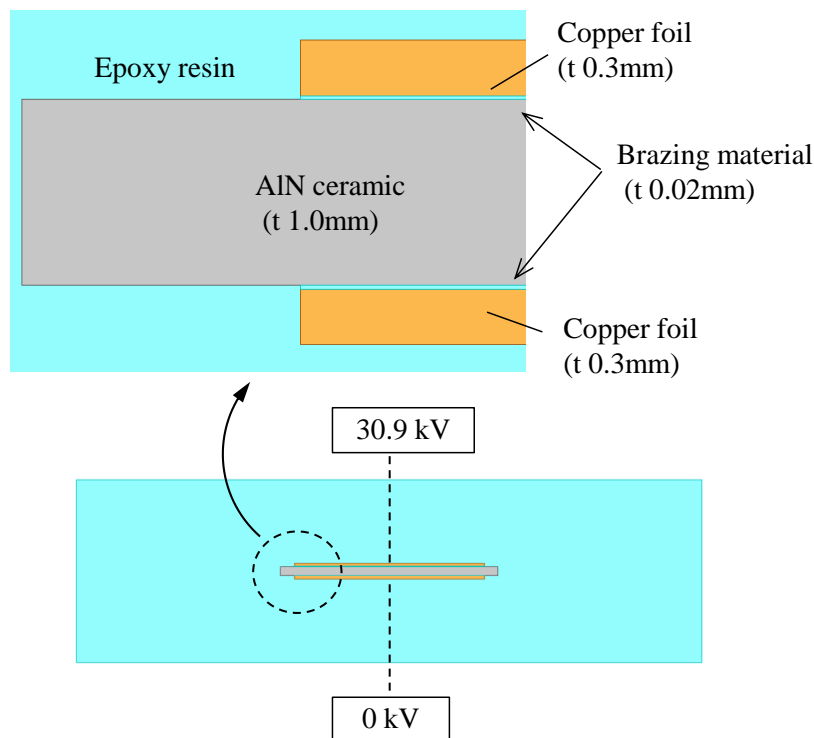


Fig. 6-6 Analysis model for electric field analysis.

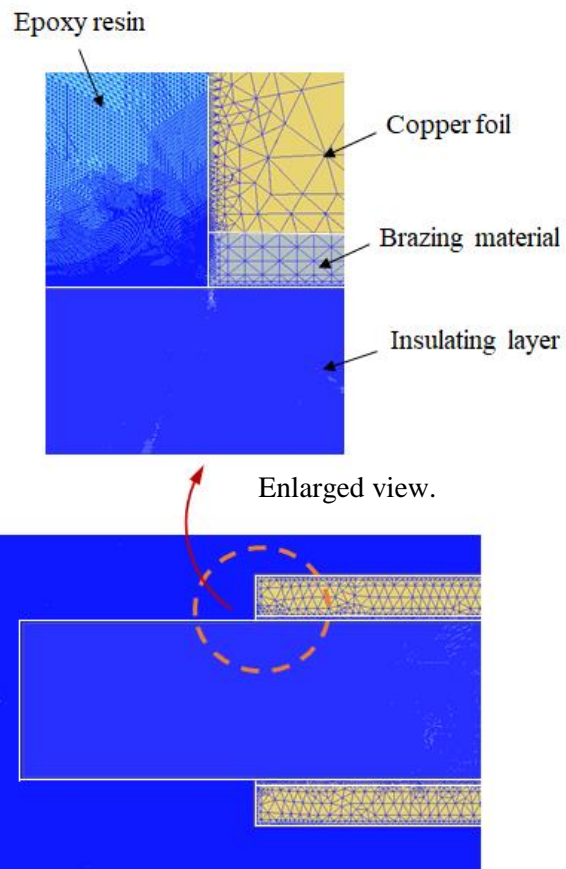


Fig. 6-7 Mesh model for electric field analysis.

Table 6-1 Properties of electric field analysis.

	Relative Permittivity [-]	Bulk Conductivity [S/m]
Cu	—	58×10^6
AlN	8.8	0
Brazing material	—	61×10^6
Epoxy resin	3.6	0

6.5 電界解析結果および考察

図 6-8 に、電界強度のコンター図を示す。(a) が全体図、(b) が電界集中部の拡大図である。最大電界強度 90.4 kV/mm を 100% とし表示している。電界強度は、銅箔と AlN、エポキシ樹脂の交わる AlN 基板表裏の三重点にて最大となり、表裏の銅箔に挟まれている AlN 内で高い値を示している。

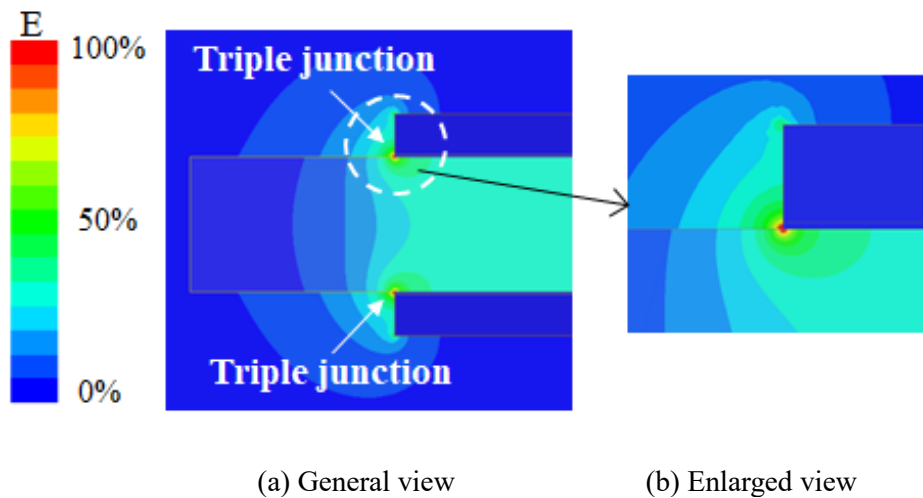


Fig. 6-8 Contour diagram of electric field strength.

図 6-9、図 6-10 に、電界強度の詳細を示す。図 6-9 が、表裏の三重点間の直線上における、AlN の厚さ方向（垂直方向）の電界強度であり、図 6-10 が、AlN 内部の中心線上（水平方向）における電界強度である。図 6-8 の電界強度コンター図と同様、縦軸は最大電界強度 90.4 kV/mm を 100% とし表示している。図 6-9 において、AlN の厚さ方向（垂直方向）の電界強度は、表裏の三重点部で極大値を示し、AlN 内部に行くにつれ急激に低下し、表層から少し内側にて飽和する傾向をもつ。また、図 6-10 の AlN の中心線上（水平方向）の電界強度は、AlN 端部から電圧印加している銅箔端部に近づくほど電界強度が高くなり、AlN 端部から約 2.0 mm、銅箔端部の三重点から更に約 0.5 mm 内部に入り込んだ位置まで上昇し、その後飽和している。

上述した電界強度結果の理由を、図 6-11 の等電位線図を用い説明する。等電位線は、銅箔表裏の AlN 内部で密集しているため、基本的にこの部分の電界強度は高くなる。但し、銅箔端部から外側に行くにつれ、等電位線が外に拡がり始めるため、銅箔端部の電界強度は、等電位線の歪みによる影響で密集し高くなるが、銅箔端部直下の AlN 中心部では、等電位

線が多少疎になるため、電界強度は低下する傾向となる。そのため、図 6-10 のような AlN 内部の中心位置においては、銅箔端部の三重点位置ではなく、AlN 端部から約 2.0 mm、銅箔端部から更に約 0.5 mm 内部に入り込んだ位置で最大となり飽和する結果となった。

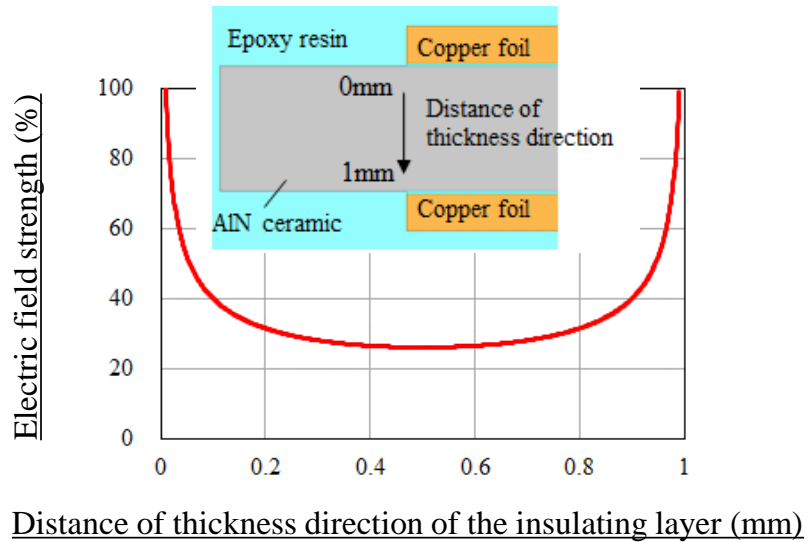


Fig. 6-9 Electric field strength distribution along thickness direction (vertical direction) between upper and lower triple junctions.

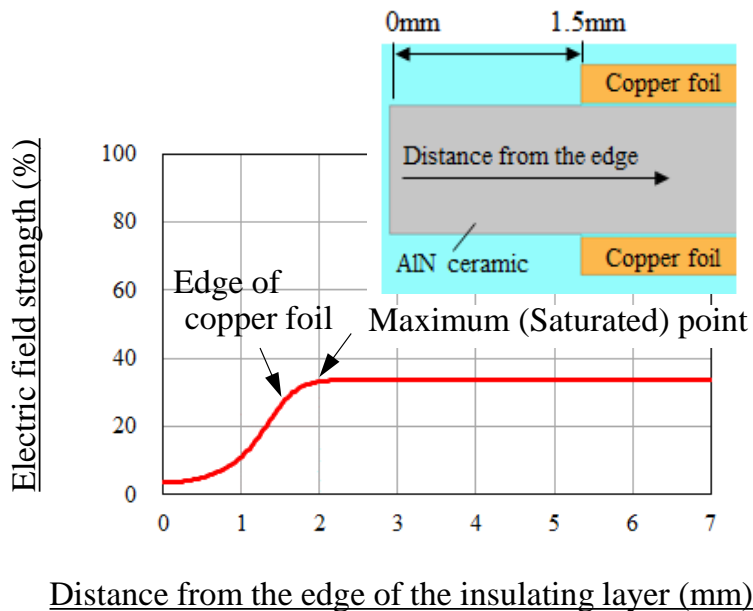


Fig. 6-10 Electric field strength distribution at centerline (horizontal direction) of AlN ceramic.

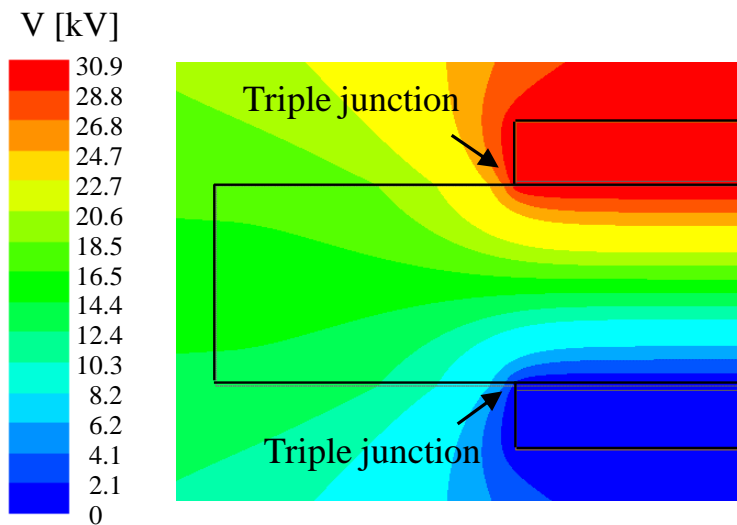


Fig. 6-11 Equipotential diagram of result of electric field strength analysis.

次に、絶縁耐圧試験における絶縁破壊箇所について、電界解析結果を元に考察する。図6-4のサンプル温度30°Cにおける絶縁破壊箇所は、AlN端部から1.5mm内寄りであり銅箔表裏の三重点の位置に相当する。電界強度は、三重点の位置で極大値を示し、AlN内部の電界強度も表裏の銅箔に挟まれているため高く、電界強度分布と破壊箇所は一致する。但し、図6-5のサンプル200°Cの試験結果は、絶縁破壊箇所がAlN端部から6~9mm中央に寄った位置で、電界強度の極大値と関係のない結果であった。そこで、その原因を調べるため、実験サンプルの温度条件により、AlNにかかる応力について調査を行った。

6.6 熱応力解析方法

樹脂封止サンプルの内部応力を求めるため、熱応力解析（弾塑性解析）を行った。解析ソフトは、ANSYS 社の構造・伝熱解析ソフト Mechanical (ver. 2021 R2)を用いた。図 6-1 2 に 3 次元の解析モデルを示す。電界解析と同様、AlN 基板をエポキシ樹脂にて円筒状に封止した形状とした。AlN 基板は、厚さ 1.0 mm の絶縁層の表裏に、厚さ 0.3 mm の銅箔をろう材 0.02 mm を介して接合した構成とした。メッシュ条件は、AlN 部を微細（0.08 mm）に分割し、銅箔、エポキシ樹脂部にいくにつれ粗くした。図 6-1 3 に全体のメッシュモデルを、図 6-1 4 にメッシュ断面図を示す。境界条件は、図示していない弱いバネを用い固定した。温度条件は、樹脂封止時の残留応力の影響を考慮するため、初期温度を樹脂封止時の 100°C とし、それを常温 30°Cにした条件と、その後更に、高温 200°Cにした条件とし、それぞれの AlN 内部にかかる応力を求めた。表 6-2 に使用した代表的な物性値（常温）を示す。解析は弾塑性解析とした。

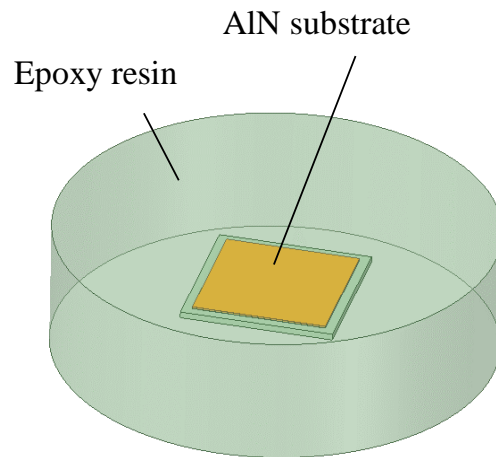


Fig. 6-12 Analysis model for thermal stress analysis.

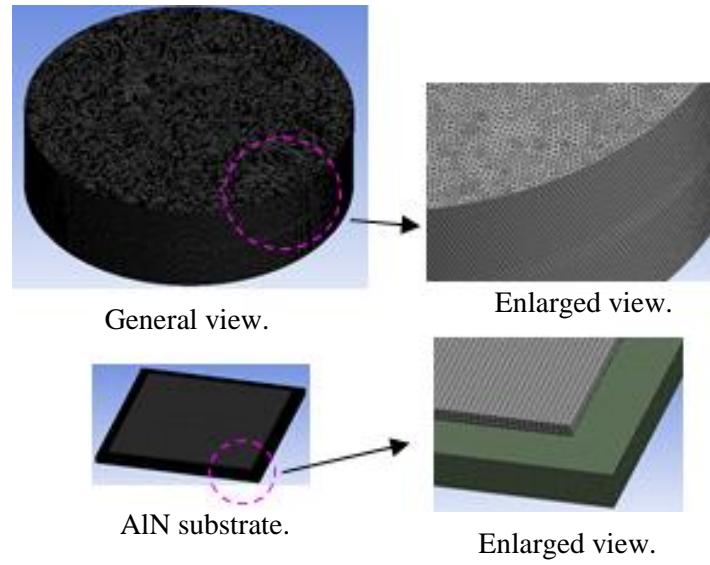


Fig. 6-13 Mesh model for thermal stress analysis.

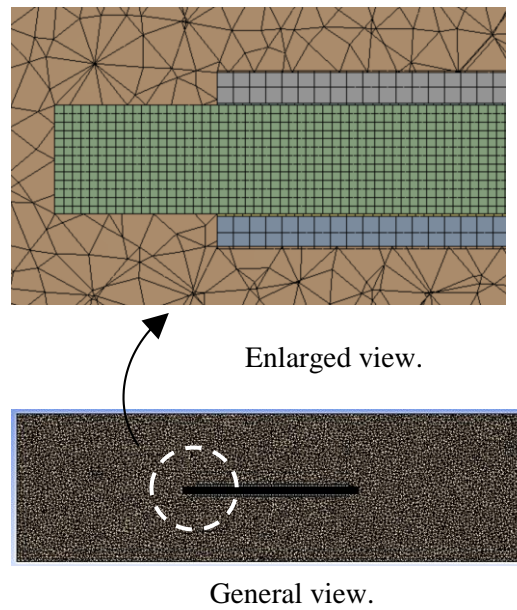


Fig. 6-14 Cross-section view of mesh model for thermal stress analysis.

Table 6-2 Properties of thermal stress analysis.

	Young's modulus [GPa]	Poisson's Ratio [-]	CTE [1/K]
Cu	97.0	0.33	16.7×10^{-6}
AlN	304.0	0.24	4.6×10^{-6}
Brazing material	66.6	0.36	18.1×10^{-6}
Epoxy resin	5.1	0.37	17.3×10^{-6}

6.7 熱応力解析結果および考察

図 6-15 に、サンプル 30°C の条件における、熱応力解析結果の変形図を示す。(a) が全体図、(b) が側断面図である。初期温度 100°C から常温 30°C となったため、エポキシ樹脂、AlN 基板とも収縮する方向に力が働き、円周方向にも厚さ方向にも縮小する。

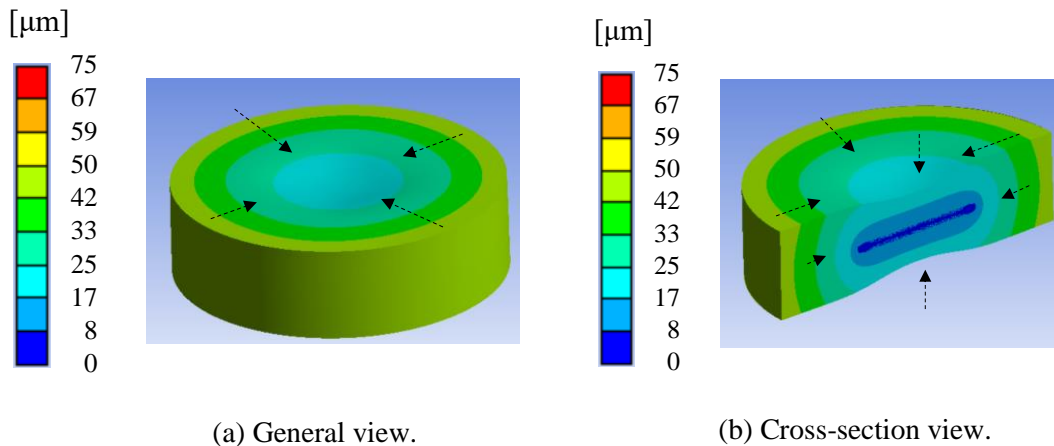
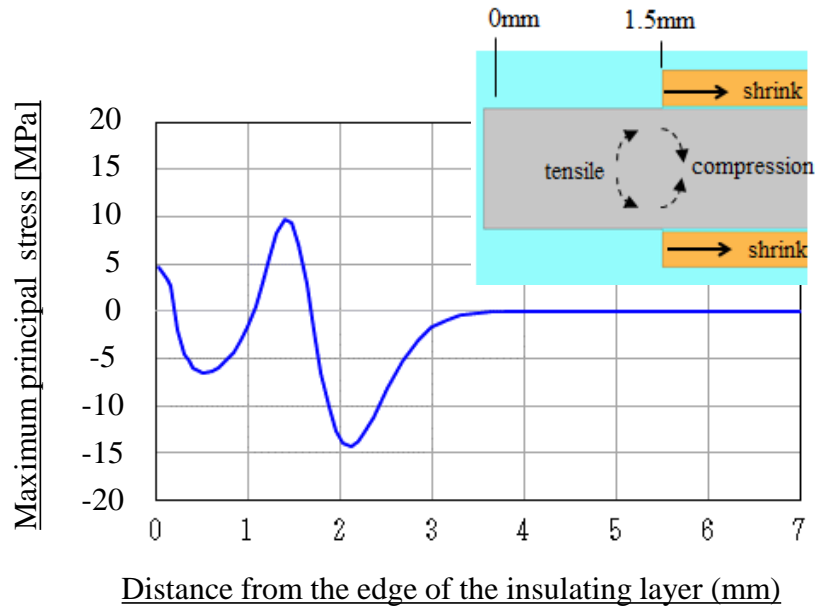


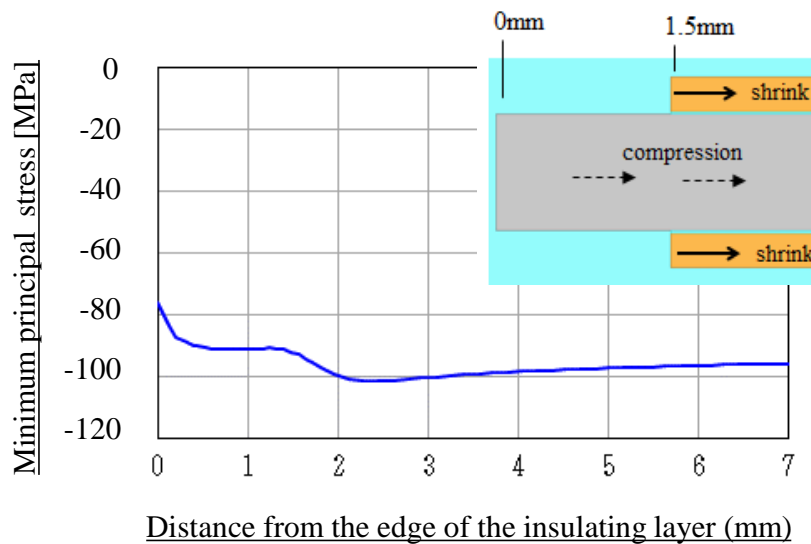
Fig. 6-15 Deformation diagram of thermal stress analysis at 30°C.

図 6-16 に、サンプル 30°C の条件における、熱応力解析結果の応力分布グラフを示す。応力値は、電界解析結果と同じく、AlN 基板断面の端部からの値とし、AlN 厚さの中心線にかかる応力とした。(a) が最大主応力、(b) が最小主応力である。最大主応力は AlN 厚さ方向にかかる応力となり、(a) より、AlN 端部から 1.5 mm の銅箔端部において引張応力、その左右の位置において圧縮応力となる。この理由は、初期温度 100°C から 30°C に温度が低下した場合、線膨張係数の大きい銅箔および樹脂が線膨張係数の小さい AlN より大きく収縮しようとするため、AlN は表裏の銅箔により AlN 基板中心に向かう水平方向に力を受け、その結果、境界となっている銅箔端部の位置では、水平方向から転じるように厚さ方向の引張成分が生じるためである。その引張成分の影響で、銅箔端部より少し中央寄りの位置では、反作用として圧縮成分が生じる。また AlN 端部から 1.5 mm の範囲内では、表裏の銅箔が無い場合、周囲のエポキシ樹脂による圧縮応力がかかる。最小主応力は AlN 基板水平方向にかかる応力となり、銅箔および樹脂が収縮することにより、(b) のように高い圧縮応力がほぼ均一にかかっている。AlN 含め、一般的にセラミックは内部に微小欠陥が存在し、引張に弱く圧縮に強い傾向がある[2][3]。微小欠陥は機械的応力により進展し、絶縁破壊電圧を低下させる[4][5]。従って、サンプル 30°C の条件において、AlN 端部から 1.5 mm の銅箔端

部の位置で絶縁破壊を生じたのは、図 6-8 に示したように、この位置に電界強度の極大値があり、尚且つ相対的に大きな引張応力が生じていたことが原因であると推定される。図 6-17 にコンター図も示す。(a)が最大主応力、(b)が最小主応力である。

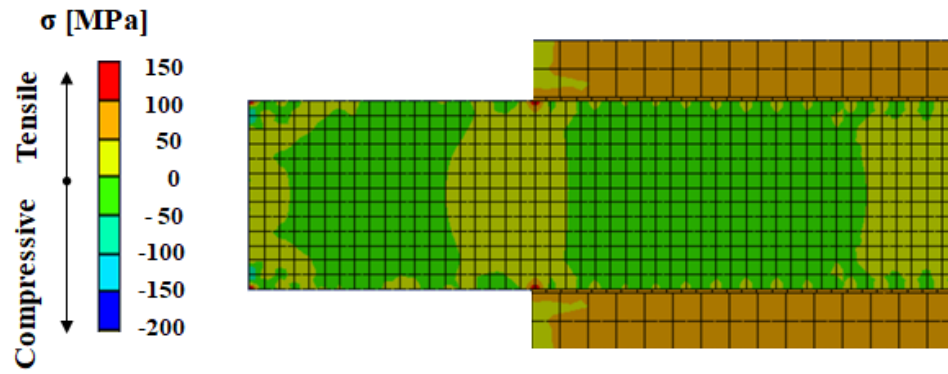


(a) Maximum principal stress.

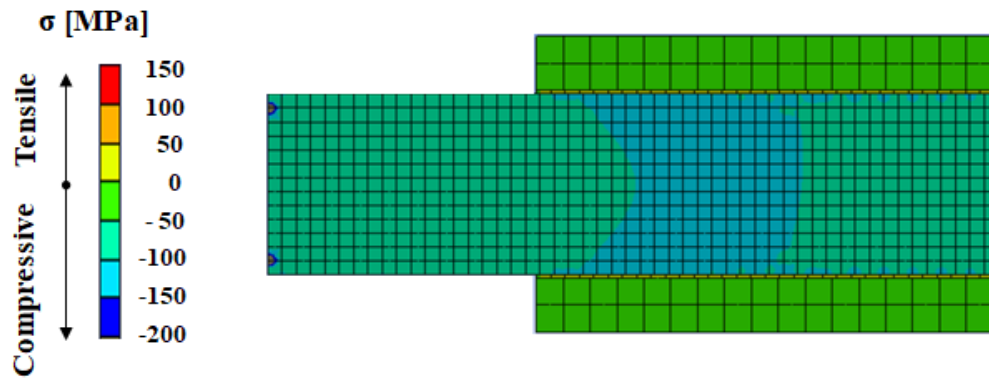


(b) Minimum principal stress.

Fig. 6-16 Stress distribution of thermal stress analysis at 30°C.



(a) Maximum principal stress.



(b) Minimum principal stress.

Fig. 6-17 Contour diagram of thermal stress analysis at 30°C.

次に図 6-18 に、サンプル 200°C の条件における、熱応力解析結果の変形図を示す。(a) が全体図、(b) が側断面図である。初期温度 100°C から常温 30°C 経由し 200°C となったため、エポキシ樹脂、AlN 基板とも膨張する方向に力が働き、円周方向にも厚さ方向にも拡大する。

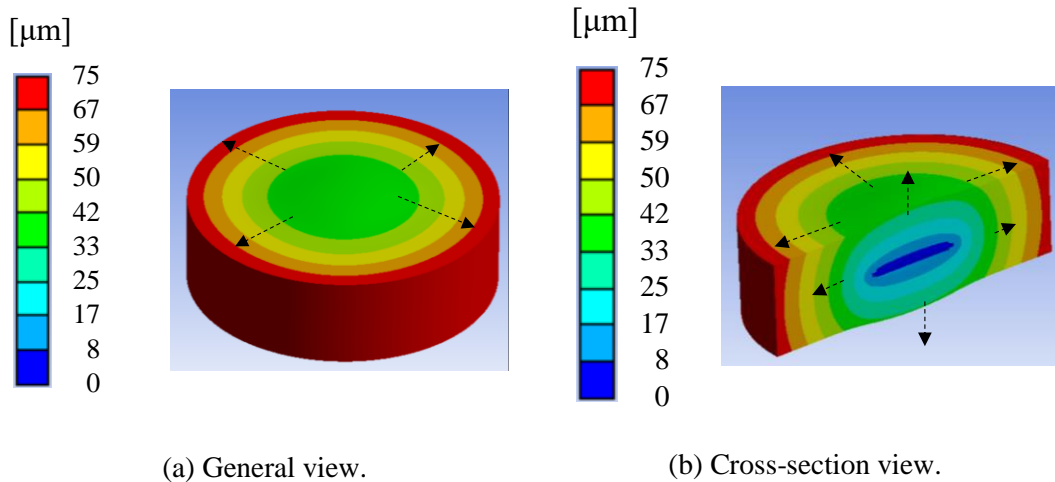
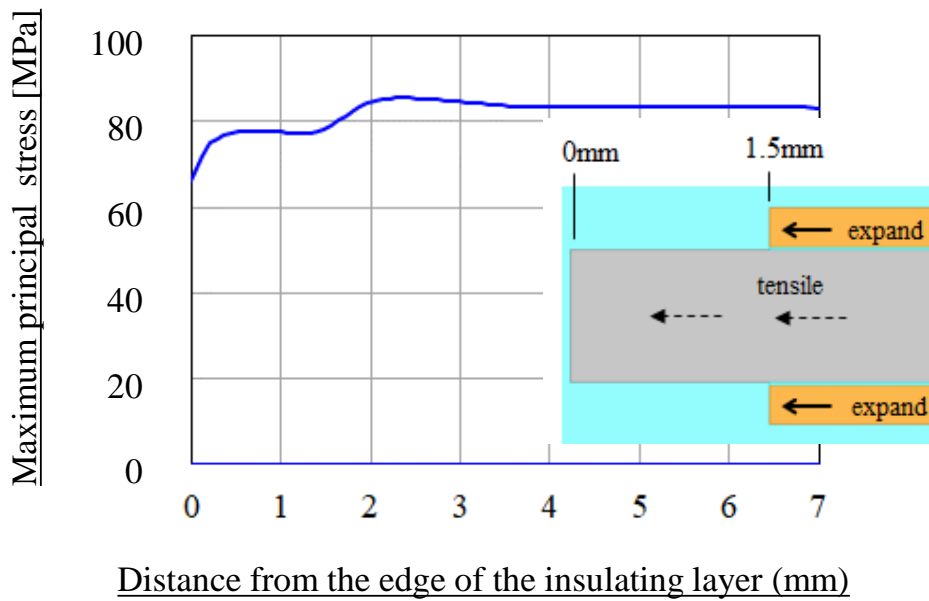
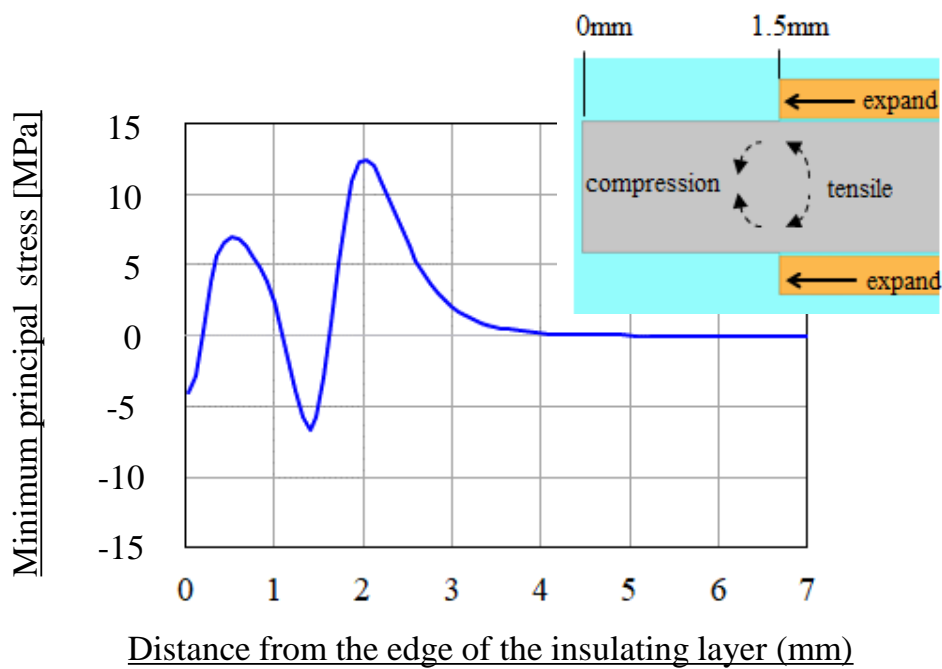


Fig. 6-18 Deformation diagram of thermal stress analysis at 200°C.

図 6-19 に、サンプル 200°C の条件における熱応力解析結果の応力分布グラフを示す。(a) が最大主応力、(b) が最小主応力である。最大主応力は AlN 基板水平方向にかかる応力となり、(a) より、銅箔および樹脂が膨張することにより、AlN には水平方向に高い引張応力がほぼ均一にかかっている。但し、サンプル 30°C の解析結果とは逆で、(b) のように、AlN は表裏の銅箔により AlN 基板端部に向かう水平方向に力を受ける結果、境界となっている銅箔端部の位置では、水平方向から転じるように厚さ方向の圧縮応力が生じる。(a) において、AlN 端部から 1.5 mm の範囲内で応力が 10MPa 程度低いのは、この影響である。従って、サンプル 200°C の条件において、図 6-5 に示したように、銅箔端部では無く、AlN 端部から 6~9 mm 離れた位置で絶縁破壊を生じたのは、AlN 端部から 2 mm 以上中央寄りの位置の方が、銅箔端部より高い引張応力が生じていたことが原因であると推定される。そこに微小欠陥が存在し、それが起因となり絶縁破壊したと推定される。図 6-20 にコンター図も示す。(a) が最大主応力、(b) が最小主応力である。

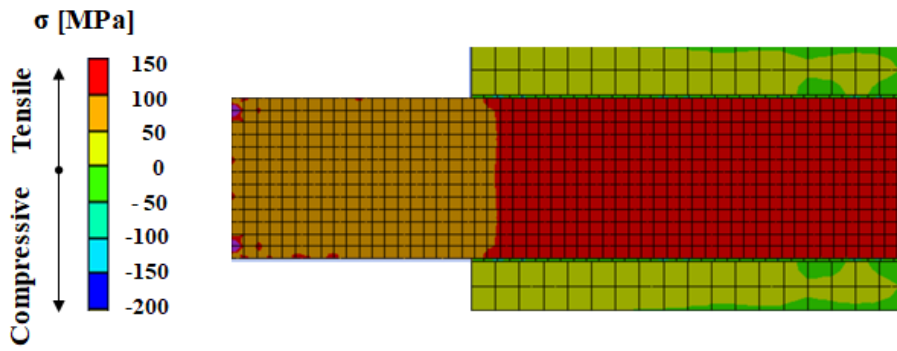


(a) Maximum principal stress.

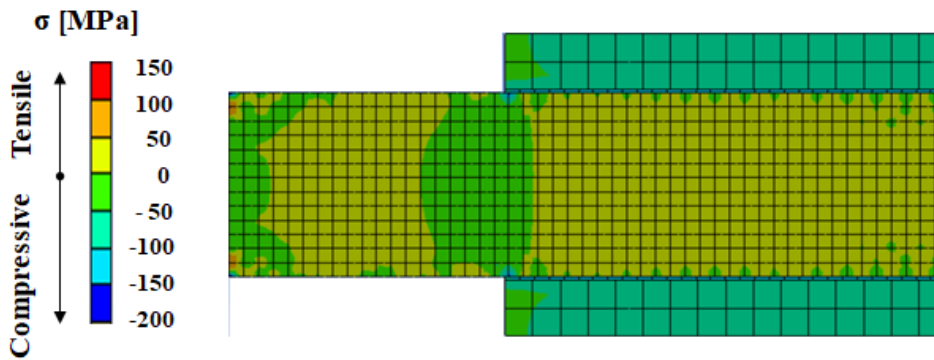


(b) Minimum principal stress.

Fig. 6-19 Stress distribution of thermal stress analysis at 200°C.



(a) Maximum principal stress.



(b) Minimum principal stress.

Fig. 6-20 Contour diagram of thermal stress analysis at 200°C.

6.8 結言

第6章では、エポキシ樹脂により封止された、パワーモジュールのパッケージ形態を想定した AlN 基板における、温度条件を変えた場合の絶縁破壊箇所と電界強度分布の関係について調査し、絶縁破壊電圧に影響を与える要因が、AlN 内部の電界強度分布の他に、機械的応力もその1つであることを明らかにした。本研究で得られた成果を以下に示す。

- 1) 第5章でも述べたが、AlN 基板における電界強度分布は、表裏の銅箔に挟まれている AlN 内部で高い値を示すが、特に銅箔と AlN、封止材の交わる AlN 基板表裏の三重点において極大値となる。
- 2) 封止温度 100°Cのエポキシ樹脂にて封止したパッケージ構成においては、サンプル 30°Cにて、銅箔端部の位置における AlN 内部には引張応力が生じているが、それ以外の位置では圧縮応力が生じている。またサンプル 200°Cにおいては、銅箔端部によらず、AlN 内部全体に引張応力が生じている。
- 3) AlN 基板の絶縁破壊箇所は、上記1)の電界強度分布と上記2)の AlN 内部応力の関係で決まり、銅箔端部の三重点のような電界強度の極大値が存在していても、必ずしもその位置で破壊するとは限らず、表裏の銅箔に挟まれている AlN 内部の電界強度と引張応力成分への依存性が高い。

参考文献

- [1] 秋山守人, 田原竜夫, 岸和司: “圧電体薄膜を用いた圧力センサーの開発”, *Synthesiology*, Vol.5, No.3, 2012.
- [2] 松尾重友: “窒化アルミニウム”, *真空ジャーナル*, 第9巻, 5号, 1966.
- [3] 多賀野久: “セラミックスと金属の接着について”, *真空ジャーナル*, 10巻, 7号, 1967.
- [4] 吉村昇, 伊藤淳, 船木重浩, 小笠原正: “誘電体セラミックの電気伝導と絶縁破壊に及ぼす気孔の影響”, *電学論 A*, 108巻4号, 1988.
- [5] 志波光晴, 岸輝雄: “セラミックスの絶縁靱性”, *日本金属学会会報*, 第27巻, 第8号, 1988.

第7章 本研究論文のまとめと今後の課題

本研究では、高耐圧、低損失、高温動作、高周波数動作化等の WBG デバイスの特長を最大限に活かすことを可能とする、パワーモジュールのパッケージ構造の実現を最終目的とし、その特長の一つである高耐圧特性に着目し検討を行った。従来のような、絶縁基板を厚くしたり沿面距離を延ばす等の設計方法から、絶縁破壊に影響を与える諸因子をコントロールし最適化することで、パッケージの大型化やコストアップを抑制することにつながる、幾つかの研究成果が得られたと考えている。以下、本研究の主要な成果を示す。

■ エポキシ樹脂封止材適用による沿面破壊抑制とメカニズム解明

同じ実験構成（絶縁基板）において、封止材をシリコーンゲルとエポキシ樹脂にした場合の絶縁破壊電圧試験を行い、絶縁破壊電圧が、エポキシ樹脂封止の方がシリコーンゲル封止より約 1.9 倍高いことが確認できた。この理由は、エポキシ樹脂の方がシリコーンゲルより、絶縁基板の銅箔およびセラミックとの密着状態が良く、ボイド・剥離等の未接合部が少ないため部分放電を起こしづらく、その結果、絶縁基板の外縁部にて沿面破壊しづらいためである。一般的に絶縁破壊の種類としては、絶縁材料自体のバルク破壊と絶縁材料表面で生じる沿面破壊があり、沿面破壊の方が低い電圧で生じるため、エポキシ樹脂による沿面破壊の抑制は、封止材のみを変えるだけでパッケージの絶縁破壊電圧を上げる、非常に有効な手段であることが明らかとなった。実際には、シリコーンゲルとエポキシ樹脂にはそれぞれ特徴があり、パッケージ形態に応じて使い分けされている。従って、パッケージ内部の封止を全てエポキシ樹脂封止にしなくても、例えば沿面破壊しやすい部分のみエポキシ樹脂にする等の工夫を施すことで、その効果を取り入れることも可能であると思われる。

■ 絶縁基板の表裏銅箔位置調整による三重点電界強度低減と絶縁破壊電圧向上

絶縁層に対する表銅箔と裏銅箔の位置を調整することで、銅箔、絶縁層、封止材からなる三重点の電界強度の大きさを制御できることを確認した。例えば AlN 基板の場合、表銅箔と裏銅箔の相対位置を同じにした場合と 3 mm ずらした場合には、三重点の電界強度は 3 mm ずらした方が約 20% 増加する。また絶縁破壊電圧は、三重点の電界強度の大きさに連動し変化し、両者には相関関係があることが明らかとなった。例えば、三重点の電界強度が大きいほど、AlN は絶縁破壊し易くなり、絶縁破壊電圧が小さくなる。表銅箔と裏銅箔の相

対位置を同じにした場合と 3 mm ずらした場合では、絶縁破壊電圧は 3 mm ずらした方が約 30%低下した。また、AIN の内部応力がほとんど無い理想条件の場合であるが、絶縁破壊箇所は、電界強度が高い三重点と一致しており、理想条件では三重点の電界強度低減が絶縁破壊電圧向上にダイレクトに結びつくことが明らかになった。

■ 常温と高温の絶縁破壊箇所の違いに対する破壊メカニズム解明

実際のパワーモジュールの絶縁破壊電圧試験において、絶縁破壊箇所が必ずしも三重点にならないことがあったが、この理由が AIN 内部の機械的応力であることが明らかになった。例えば、封止温度 100°C のエポキシ樹脂にて封止したパッケージ構成においては、サンプル 30°C にて、銅箔端部の位置における AIN 内部には引張応力が生じているが、それ以外の位置では圧縮応力が生じている。銅箔端部の三重点では電界強度も極大値を取るため、絶縁破壊箇所は、引張応力が生じており電界強度も高い銅箔端部の近傍となる。一方、サンプル 200°C においては、銅箔端部によらず AIN 内部全体に引張応力が生じているため、絶縁破壊箇所は、銅箔端部の三重点近傍では無く、AIN 端部から 6~9 mm 離れた位置となった。そこに微小欠陥が存在し、それが起因となり絶縁破壊したと推定される。このように、三重点のような電界強度の極大値が存在していても、必ずしもその位置で破壊するとは限らず、表裏の銅箔に挟まれている絶縁層内部の応力成分に大きく依存することが明らかになった。従来、絶縁層内部の応力分布については、ヒートサイクル試験等の耐環境性の面で注視しており、絶縁性能との関係はあまり意識してこなかったが、本研究により、例え三重点のような電界強度の極大値が存在していても、内部応力が圧縮状態であればその影響が低減することも判明し、応力状態をうまくコントロールできれば、絶縁破壊電界強度を向上させることができる可能性があることが分かった。

最後に、今後の課題について述べる。

本研究では、WBG デバイスの特長である、高耐圧、低損失、高温動作、高周波数動作化等のうち、高耐圧特性に着目し検討を行った。中でも、絶縁基板を対象としたパッケージ内部の高耐圧化に絞った検討を行い、封止材による沿面破壊の抑制や、銅箔位置の調整による三重点の電界強度低減、内部応力の制御等が絶縁特性を向上させるために有効であることが確認できた。但し第 5 章で記載したとおり、電界解析上最大の電界強度となる銅箔角部と、2 番目に電界強度の高い銅箔端部の違いが実験結果には表れず、今後、更なるメカニズムの解明が必要な現象もまだまだ多い。パワー半導体のパッケージ構造も、第 1 章や第 2 章で示

したような形態で長年使用され改善されてきており、これらの構造を WBG デバイスの特長を最大限に活かすよう変えていくためには、他の技術項目である低損失、高温動作、高周波数動作化等に対しても、同様の基礎的な検討が必要だと考えている。

現在、SiC を始めとする WBG デバイスは、コストが課題となり当初予想したような大幅な普及とはなっていないが、自動車や高速鉄道分野で適用が進んできており、中長期的には更に市場が伸びていくと期待されている。第 1 章で記載したように、Si デバイスと比較し優れた特性を持つため、Si デバイスで適用できなかった新規分野への普及も見込める。これらを実現するためにも、WBG デバイスの特長を最大限に活かす、パワーモジュールのパッケージ構造を実現する必要があると考えている。

研究業績

■ 学術論文

- 1) Motohito Hori, Yuichiro Hinata, Katsumi Taniguchi, Yoshinari Ikeda and Tomoyuki Yamazaki, “Enhanced Breakdown Voltage and Low Inductance of All-SiC Module”, IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD), Chicago, pp.459-462, 2018.
- 2) 堀元人, 谷口克己, 日向裕一朗, 齊藤まい, 池田良成, 山崎智幸, 村中司, 鍋谷暢一 : パワーモジュールの絶縁基板における電界強度分布と絶縁破壊箇所の関係, 電気学会論文誌 A, Vol.142, No.7, 2022.

■ 現在査読中の論文

- 1) 堀元人, 池田良成, 山崎智幸, 村中司, 鍋谷暢一 : パワーモジュールの絶縁基板における三重点の電界強度と絶縁破壊電圧に関する研究, エレクトロニクス実装学会誌, 2022.
※査読中

■ 国際学会 (発表)

- 1) Motohito Hori, Yuichiro Hinata, Katsumi Taniguchi, Yoshinari Ikeda and Yoshikazu Takahashi, “Enhanced Breakdown Voltage for All-SiC Modules”, IEEE CPMT Symposium Japan, pp.127-130, 2017.

■ 国内学会

- 1) 堀元人, 日向裕一朗, 谷口克己, 池田良成, 山崎智幸 : All-SiC モジュールの高耐圧化と低インダクタンス化, 電気学会 電子デバイス/半導体電力変換合同研究会, 2018.

■ 共著論文

- 1) 平尾章, 日向裕一朗, 金子悟史, 堀元人, 谷口克己, 池田良成 : All-SiC モジュールの高耐圧化, mate 2018, 2018.
- 2) 池田良成, 堀元人, 谷口克己 : 高密度パワーモジュール ~次世代半導体の価値を惹き

だすパッケージ技術～，応用物理学会・先進パワー半導体分科，2018.

- 3) 池田良成，谷口克己，金井直之，保谷昌志，高柳良平，堀元人，熊田恵志郎，丸山宏二：高耐压 SiC パワー半導体モジュールの開発，第 28 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム，2018.
- 4) Motohito Hori, Yuichiro Hinata, Katsumi Taniguchi, Masayoshi Nakazawa, Thomas Heinzel, Yoshinari Ikeda and Tomoyuki Yamazaki, “Enhanced Breakdown Voltage and High Current of All-SiC Module with 1st Generation Trench Gate SiC MOSFETs”, PCIM Europe, 2018.
- 5) R. Takayanagi, K. Taniguchi, M. Hoya, N. Kanai, T. Tsuji, M. Hori, Y. Ikeda, K. Maruyama and I. Kawamura, “3.3kV Power Module for Electric Distribution Equipment with SiC Trench-Gate MOSFET”, International Conference on Electronics Packaging, 2019.
- 6) D. Hongfei, H. Takubo, M. Hori, A. Toba, “SiC MOSFETs Circuit-Modeling Considering Characteristics Variation for Module Parallel Applications”, IEEE Energy Conversion Congress & Expo, 2019.
- 7) 佐藤以久也，田中孝明，堀元人，山田隆二，鳥羽章夫，久保田寿夫：SiC MOSFET とパワー系 INV 基板を用いた高密度モータ駆動用インバータ，電気学会論文誌 D, Vol.140, No.7, 2020.
- 8) S. Otake, M. Hori, R. Kato, Y. Ikeda, V. Parque, “Relationships of design parameters and the cooling performance of the spiral-fin heatsink”, International Conference on Electronics Packaging, 2021.
- 9) 須賀唯知，竹内魁，申盛斌，池田良成，平尾章，堀元人：表面活性化による Cu バンプと WBG デバイスの低温接合，第 35 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会，2021.
- 10) 平尾章，堀元人，池田良成，島津武仁：WBG デバイスを搭載する低熱抵抗、低インダクタンスなパワーモジュール，Mate2022, 2022.

■ 特許

- 1) 特許 6398270 号 「半導体装置」
- 2) 特許 6248803 号 「パワー半導体モジュール」
- 3) 特許 6233507 号 「パワー半導体モジュールおよび複合モジュール」(他、中国)
- 4) 特許 6617490 号 「半導体装置」(他、米国、中国)
- 5) 特許 6604184 号 「半導体モジュール」(他、米国、ドイツ、中国)
- 6) 特許 6741135 号 「半導体モジュール及び半導体モジュールの製造方法」

- 7) 特許 6884624 号 「半導体装置、半導体装置の製造方法及びインターフェースユニット」(他、米国、ドイツ、中国)
 - 8) 特許 6958274 号 「電力用半導体装置」(他、米国)
 - 9) 特許 6958301 号 「インターフェースユニット及び半導体装置」
 - 10) 特許 6954816 号 「インターフェースユニット及び半導体装置」
 - 11) 特許 10867980 号 「半導体装置」(米国のみ登録)
 - 12) 特許 11251163 号 「半導体装置」(米国のみ登録)
- 他、出願中 13 件

謝辞

本研究の実施と本論文の作成にあたり、たいへん多くの方にご協力を頂きました。皆様に厚く御礼申し上げます。

指導教官として長い間、様々なご指導、ご助言を頂きました、山梨大学大学院 鍋谷 暢一教授に感謝致します。また、初めての学術論文の作成にあたり、丁寧なご指導、ご助言を頂きました、山梨大学大学院 村中 司 准教授に感謝致します。また、山梨大学大学院博士課程において、常に温かくご指導して頂きました、山梨大学大学院 矢野 浩司 教授、白木 一郎 准教授、松本 俊 特任教授、佐藤 隆英 教授に感謝致します。

本研究を実施する貴重な機会を与えて頂き、また多大なご支援をして頂きました、富士電機株式会社 半導体事業本部 CTO 藤平 龍彦 博士、開発統括部長 大西 泰彦 博士、パッケージ開発部長 山崎 智幸 博士、先行開発課長 池田 良成 博士、富士電機から現在は東北大学 国際集積エレクトロニクス研究開発センターに在籍されている高橋 良和 教授に感謝致します。また本研究に関して、実験および考察でご協力をして頂きました、谷口 克己様、日向 裕一朗 様、齊藤 まい 様に感謝致します。