

次世代パワーエレクトロニクス  
プロジェクト  
研究概要集

平成23年2月23日

財団法人 神奈川科学技術アカデミー

## 次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト研究概要 目次

・プロジェクト総括	1
-----------	---

### ■研究テーマⅠ エコ未来型電気自動車の提案と実現

・総括	21
・Design of High Efficiency and High Power Density DC-DC Converter	27
・エコ未来型電気自動車用小型軽量高効率 SAZZ チョップ <sup>®</sup> の開発	33
・電気自動車用直列チョップ <sup>®</sup> 駆動方式の総合性能に関する実験データ解析	37

### ■研究テーマⅡ パワーデバイス高集積化に対応する実装技術の開発

#### <封止材料用高耐熱樹脂>

・総括	41
・エポキシ変性ポリベンゾオキサジンの高性能化	43
・マレイミド-ベンゾオキサジン反応を利用した耐熱性樹脂の研究	45
・多価フェノール二量体硬化多環芳香族型エポキシ樹脂の研究	47
・ <i>In situ</i> 重合改質剤による高耐熱シアナート樹脂の強靱化	49
・ネガ型反応現像画像形成法に基づくアルカリ水溶液現像型感光性スルホン化ポリイミドの開発	51

#### <高密度実装評価>

・総括	53
・パワーデバイス疲労寿命評価	69
・めっきの疲労特性を考慮した高耐熱実装構造の接合部における熱疲労寿命予測手法に関する研究	83

#### <接合工法及び評価>

・総括	87
・銀ナノ粒子を用いた接合技術	95
・金サブミクロン粒子を用いたダイボンド技術の開発	107
・金属多層膜を用いた高耐熱電極に関する研究	119
・電子後方散乱回折像法によるアルミワイヤ接合部観察	123
・パワーチップ接合部の熱伝導解析と赤外線による表面温度分布評価	127
・一方向熱流定常比較法による貴金属ダイアタッチ層の熱抵抗評価	133
・半導体の実装構造における熱特性評価技術	135



# 次世代「パワーエレクトロニクス」プロジェクト

プロジェクトリーダー 河村篤男

## 1. 基本構想

2005年に発効された京都議定書における温室効果ガスの排出量削減の目標達成期間（2008～2012年）がスタートし、日本は対基準年（1990年）比6%の削減の責務を課せられているが、現在の排出量は対基準年比6%増であることを考えると、これはかなり高い目標といえる。また、将来的には究極の目的である「気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼさない水準での濃度の安定化」を達成するための更なる厳しい削減目標が設定されることが予想される。

本プロジェクトは、温室効果ガスの削減、特に二酸化炭素の排出量削減を目的に神奈川県が進める政策と一体となって目標を達成するために企画されたものである。県のインフラ整備及び電源開発事業等を技術的側面から支援することを目的に、横浜国立大学、神奈川県産業技術センター並びに関連企業とも協力し、高密度高効率チョップ回路の性能向上を軸に小型で高効率の電気自動車を提案するとともに、そのために必要となる大電流高密度・高耐熱性パワーデバイス実装技術を開発し、機電一体型超小型実装技術の高度化を目指す。これらは、省エネルギー型の分散電源や家電製品に応用する基盤的技術である。

さらに、本研究で得られた成果を基に更なる研究を展開し、県内中小企業支援のための持続的な体制づくりとして、信頼性評価を軸とした公共試作開発ラボを確立することを目指す。

## 2. 全体計画と遂行方針

本プロジェクトは、横浜国立大学、神奈川県産業技術センター、KASTの3機関を中心に推進する。「EV（電気自動車）」及び「それに関わる実装技術開発」という2つの分野についてそれぞれ次のテーマを設定し、相互で補完しあいながら研究を行う。そのため、事業全体を統括するプロジェクトリーダー及びサブリーダーには、各研究テーマのリーダーを配置し、プロジェクト全体の一体化を図りながら、効率よく研究を進める体制を整える。

研究テーマⅠ：エコ未来型電気自動車の提案と実現

研究テーマⅡ：パワーデバイス高集積化に対応する実装技術の開発

まず、研究テーマⅠでは、「“電費”世界一の概念」の明確化、燃費との差別化を検討する。試作する車の仕様の策定-各要素技術の効率は98%を目標として、未来型EVのあるべき形を検討する。現在は、都市内走行、1充電走行距離100km、最高速100kmを想定し、走行距離と車重のバランスが最適化された「高電費」EV車を開発する。

研究テーマⅡについては、パワーデバイスの主要な要素技術となる「封止材料」「評価技術」「接合法」の3チームで構成し、研究リーダーの統括のもと、以下の実験を通して、実装技術高度化を達するための課題解決や検討を行う。

まず、当初の開発ターゲットであるパワーデバイスと研究開発の分担を図1に示す。開発リソースの観点から主要技術を絞り、封止材料用高耐熱樹脂、高密度実装評価、接合法及び評価の3つのグループに分けた。封止材料と実装評価を横浜国立大学、接合法を神奈川県産業技術センターが担当することにした。

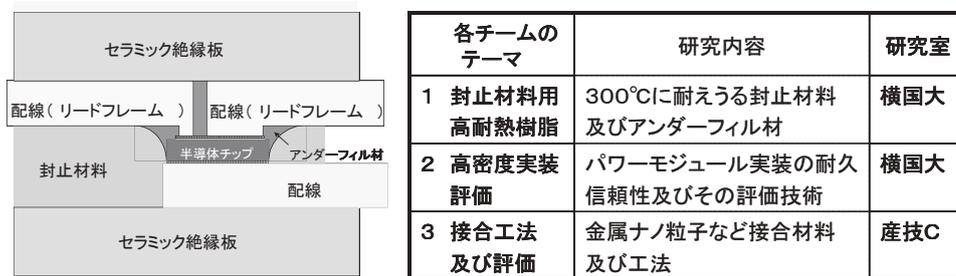
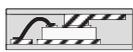


図1 パワーデバイス実装技術と研究開発の分担

県内自動車メーカーの研究者の協力を得てロードマップを作成し、それをもとに表1に示す開発技術の目標をたてた。各技術の開発目標は本プロジェクトが終了する次世代'09～'10年を対象とした。具体的には封止材は、長期使用温度200°Cに耐える耐熱性、熱伝導率5W/mK以上、熱膨張率10ppm以下とした。接合技術は金、銀ナノ粒子の特徴を活かした低温接合で高温に耐える技術、信頼性評価はSiC実装を対象とした300°Cまで評価できる手法の確立を目標とした。詳細は各技術担当から報告する。

表1 パワーデバイス実装技術ロードマップと開発目標

	第1世代(現状) '07~'08	第2世代 '08~'09	次世代 '09~'10	未来世代 '10~'15
デバイス 形態				?
デバイス	Si	Si	SiC	SiC(GaN)?
パワー密度	5~20W/cm <sup>3</sup>	20~30W/cm <sup>3</sup>	30~80W/cm <sup>3</sup>	100W/cm <sup>3</sup>
使用温度	175°C	200°C	200°C	
封止材	耐熱性 :150°C 熱伝導率:2.5W/mK 熱膨張率:40ppm	耐熱性 :200°C 熱伝導率:5.0W/mK 熱膨張率:40ppm	耐熱性 :200°C 熱伝導率:5.0W/mK 熱膨張率:10ppm	耐熱性 :300°C 熱伝導率:10W/mK 熱膨張率:10ppm
接合技術		材料:鉛フリーはんだ 方式:溶融 試験,評価環境構築	材料:Au,Ag+粒子 方式:焼結 評価:非破壊可視化	
信頼性 評価	構造:電気・熱練成 はんだ	高温環境:Su・Ag・Cu Pbフリーはんだ,熱・構造 一貫設計手法確立	SiC実装を対象とした 新材料接合技術の 信頼性評価手法確立	品質保証,プロセス評価 ,新実装技術確立

また、「次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト」を効率よく進めるためには、パワーモジュール実装技術の研究を実際の市場動向と乖離せず進めることが必要であり、常に現状を把握し、反映させていくことが欠かせない。

そのため、本プロジェクトの主要拠点である横浜国立大学内に設置され、実装技術のネットワーク体制に対しては定評のある NPO 法人 YUVEC/よこはま高度実装技術コンソーシアム (YJC) に委託し、YJC の企業ネットワークや専門知識をパワーエレクトロニクス実装技術に関する国内外の技術動向調査、企業ニーズ等の情報収集に活用する。また、YJC 内に設置された「パワーエレクトロニクス実装研究会」を本技術分野における産学公連携・交流の場として活用し、フォーラムを通じて中堅中小企業を含めた開発成果・新技術等の普及に役立てる。

### 3. 研究体制及び組織

#### 研究施設

- 横浜国立大学工学部 河村研究室、高橋研究室、于研究室
- 神奈川県産業技術センター

#### 研究組織

[氏名]	[職種]	[在籍期間]
河村 篤男	プロジェクトリーダー/テーマⅠ研究リーダー 横浜国立大学大学院工学研究院 教授	2008.4.1 ~ 2011.3.31
高橋 昭雄	プロジェクトサブリーダー/テーマⅡ研究リーダー 横浜国立大学大学院工学研究院 教授	2008.4.1 ~ 2011.3.31

#### 研究テーマⅠ：エコ未来型電気自動車の提案と実現

Martin Pavlovsky	非常勤研究員 Lecturer, Royal University of Bhutan 兼務	2009.7.1 ~ 2011.3.31
	常勤研究員	2008.10.16 ~ 2009.6.30
弦田 幸憲	非常勤研究員	2008.4.1 ~ 2011.3.31
藤本 博志	非常勤研究員 東京大学工学部 准教授 兼務	2010.5.1 ~ 2011.3.31
	共同研究員/横浜国立大学大学院工学研究院 准教授	2008.4.1 ~ 2010.3.31
筒木 壮太	研究補助員	2009.4.1 ~ 2011.3.31
渡辺 祐樹	研究補助員	2010.4.1 ~ 2011.3.31
水上 英俊	研究補助員	2010.4.1 ~ 2010.6.30
稲坂 翔	研究補助員	2008.4.1 ~ 2010.3.31
藤本 康孝	共同研究員/横浜国立大学大学院工学研究院 准教授	2008.4.1 ~ 2011.3.31

Giuseppe Guidi	共同研究員/横浜国立大学大学院工学研究院 研究教員	2009.9.1	～	2011.3.31
中井由美子	事務補助員	2008.4.17	～	2011.3.31
<b>研究テーマⅡ：パワーデバイス高集積化に対応する実装技術の開発</b>				
于 強	共同研究員/実装分野チームリーダー 横浜国立大学大学院工学研究院 准教授	2008.4.1	～	2011.3.31
篠原 俊朗	共同研究員/実装分野チームリーダー 神奈川県産業技術センター電子技術部 副部長	2008.4.1	～	2011.3.31
篠原 主勲	常勤研究員	2008.10.1	～	2011.3.31
杉原 弘恵	研究補助員	2009.4.1	～	2011.3.31
賀川 美香	研究補助員	2009.4.1	～	2011.3.31
高岩 玲生	研究補助員	2010.3.1	～	2011.3.31
小林 宇志	研究補助員	2010.3.1	～	2011.3.31
曾根 竜介	研究補助員(経産省委託事業に従事)	2009.10.2	～	2010.2.29
小林 将広	研究補助員(経産省委託事業に従事)	2009.10.2	～	2010.2.29
大西 裕一	研究補助員	2009.3.1	～	2010.2.29
篠崎 裕樹	研究補助員	2008.4.1	～	2009.2.28
安澤 貴志	研究補助員	2008.4.1	～	2009.2.28
大山 俊幸	共同研究員/横浜国立大学大学院工学研究院 准教授	2008.4.1	～	2011.3.31
澁谷 忠弘	共同研究員/横浜国立大学大学院環境情報研究院 准教授	2008.4.1	～	2011.3.31
三橋 雅彦	共同研究員/神奈川県産業技術センター電子技術部	2008.4.1	～	2011.3.31
八坂 慎一	共同研究員/神奈川県産業技術センター電子技術部	2008.4.1	～	2011.3.31
伊藤 健	共同研究員/神奈川県産業技術センター電子技術部	2008.4.1	～	2011.3.31
安井 学	共同研究員/神奈川県産業技術センター電子技術部	2008.4.1	～	2011.3.31
櫻沢 啓太郎	共同研究員/神奈川県産業技術センター電子技術部	2008.4.1	～	2011.3.31
田口 学	共同研究員/神奈川県産業技術センター電子技術部	2008.4.1	～	2011.3.31
曾我 雅康	共同研究員/神奈川県産業技術センター機械・材料技術部	2008.4.1	～	2011.3.31
増田 信次	共同研究員/神奈川県産業技術センター機械・材料技術部	2008.4.1	～	2011.3.31
伊東 秀高	共同研究員/神奈川県産業技術センター機械・材料技術部	2008.4.1	～	2011.3.31
本泉 佑	共同研究員/神奈川県産業技術センター機械・材料技術部	2008.4.1	～	2011.3.31
金子 敦子	事務補助員	2008.4.15	～	2009.3.31
防後 登美子	事務補助員	2009.4.1	～	2010.3.31
佐藤 ひろみ	事務補助員	2010.4.20	～	2011.3.31

#### 4. 研究成果の概要

##### (1) 研究テーマ I

電気自動車用直列チョップパによる駆動系を提案し、インホイールモータ前輪駆動型の実証実験車両を製作して、5.5kWh の電池容量で、JCO8モード1 充電走行距離約 100km、JCO8モード電力消費率(燃費: km/kWh) 約 18km/kWh を実現した。

直列チョップパとしては、ソフトスイッチングを実現する高効率高電力密度のチョップパ SAZZ-1 を用いて、効率 98% 程度の車載用の 30kW の 4 象限 SAZZ-1 チョップパを開発した。

実験室で駆動系の試験が行えるチョップパ・インバータ・モータテストベンチを開発し、上記の駆動系の試験を行った。力行、回生、機械ブレーキ、電気ブレーキなどの調整が行え、かつ、各要素装置の効率が測定できる試験装置となっており、公共試作開発ラボ機能として使用できる。

高密度チョップパの研究として、SAZZ チョップパを工夫した 4 象限チョップパを開発(特許出願)し、15kw 出力で効率 99%、電力密度 40kw/l の試作機を完成させ、上記データを実測した。

KAST-EV を製作し、上記のチョップパ、インホイールモータ、インバータを搭載した 2 人乗り電気自動車試作機を製作

した。この報告書原稿を提出する時点(2011年1月上旬)では、シャーシダイナモでの試験が終了していない。ただ、上記、公共試作開発ラボ機能において、JC08モードと同等の試験を行い、プロジェクト代表者が提案している”電費“(1トンあたりのバッテリー容量あたりの走行距離: km/(kWh/ton))として、14.5を測定し、シャーシダイナモ試験でもこれに近い値が予想される。これが実現されれば、現時点では、世界最高の値と考えられる。

さらに、直列チョップを用いることにより、JC08モードにおいては、チョップを用いない場合に比べて約1割程度、1充電走行距離が伸びることを実証した。これは、加減速を頻繁に行う走行モードにおいては、高効率高電力密度のチョップの特性である、回生および電圧昇降圧機能の効果が大きいことを示している。

## (2) 研究テーマⅡ

前掲のロードマップの目標における達成度については、以下のとおりである。

1. 封止材は、長期使用温度 200°Cに耐える耐熱性、熱伝導率 5W/mK 以上、熱膨張率 10ppm 以下とした目標に対し、高耐熱・低熱膨張骨格を有するエポキシ樹脂、ベンゾオキサジン樹脂とチツ化ホウ素 (BN) 充填材の形状と充填率について検討し、60vol%の充填で熱伝導率で 5W/mK、熱膨張率で 10~12ppm/mK とほぼ目標特性を満たす材料が得られることを確認した。

2. 信頼性評価では SiC 実装を対象とした 300°Cまで評価できる手法の確立という目標に対し、以下の成果が達成できた。

(1) 電気・熱・構造の連成解析システムを構築した。このシステムを用いて、パワーモジュールの設計評価のみならず、長期耐久性評価なども定量的に行うことができ、開発における長期耐久評価試験の短縮などの効率化を支援できる。

(2) SiC 実装の有力材料として、検討されている Ag ナノ粒子材料、Au 微粒子材料、Sn ナノ粒子材料の特性評価システムとシミュレーション方法を確立した。これで整備した設備と評価方法を用いればこれまでに計測が難しいとされている耐高温の実装新材料の特性評価を可能にし、(1) のシステムを用いて SiC 素子のパワーモジュールの開発と設計の支援を行うことが期待できる。

(3) さらに、これまでに確立した手法を用いて、実機のパワーモジュールの信頼性評価を実施し、確立した手法の有効性を確認した。さらに、Ag ナノ材料の特性評価を行い、SiC 素子の予備開発の検討を行った。これまでの評価から本プロジェクトで整備した上記評価システムと設備は汎用性が認められ、公共試作開発ラボ機能の環境の整備を実現できた。

なお、平成 21 年度経済産業省の委託事業において、中小企業が開発する超省エネ型の熱衝撃試験機の試作過程で、これまでに確立したシミュレーション技術を、開発コンセプトと設計段階で活用し、短期間で先進的な開発を行うことが確認できた。

3. 金、銀ナノ粒子の特徴を活かした低温形成で高温に耐えるパワーチップ接合技術の確立という目標に対して以下の成果が得られた。

(1) 金ナノ粒子、銀ナノ粒子のペーストによるパワーチップ接合では、共に目標としていた 20MPa 以上の接合強度を実現できる接合条件を見いだした。

(2) 金ナノ粒子、銀ナノ粒子のペースト焼結層は、共に電気抵抗率  $5\mu\Omega\cdot\text{cm}$  以下、熱伝導率 150W/m·K 以上が得られ、それぞれ  $15\mu\Omega\cdot\text{cm}$  以下、50W/m·K 以上という目標を達成できていることを確認した。

(3) この接合条件で実デバイスを模擬した接合サンプルを作製し、接合部の信頼性について評価を行った結果、300°C、1000 時間の高温放置試験、-50°C~+300°C、300 サイクルの熱衝撃試験を実施した後も十分な接合強度を保っていることがわかった。

(4) 上記高耐熱接合の評価のために、高温下での接合強度試験装置、接合プロセスの in-situ 観察・記録装置、ペースト塗布装置、大電流配線ボンディング装置等を活用した評価や、赤外線方式や一方向定常熱流方式、ダミーチップ実装構造を用いた通電測温方式等による熱特性の評価を行ってノウハウ蓄積を行い、パワーエレクトロニクス実装技術の評価のための環境構築を行った。

## 5. 課題及び今後の展望

EVの開発では、さらなる高効率高電力密度のチョップを開発し、それを搭載することにより、電気で駆動される自動車は総合性能が約1割向上することが実証された。走行距離が1割伸びることは、1割のエネルギーを節約したことにな

る。電気自動車だけでなく、ハイブリッド車、あるいは、同様な駆動系を有する鉄道などにも同様なことが言える。したがって、更なる高電力密度のチョッパを開発することは、省エネの観点からも重要である。

また、試作機として開発した 40kW/l の装置をさらに小型化するには、半導体デバイスのパッケージングから見直す必要がある。それには、多種多様な研究開発が必要となる。このプロジェクトの半分を受け持った実装の研究がこれに対応する。

一方で、現存するパッケージングでも車載用のための高電力密度化は地球温暖化防止の意味でも多大な効果がある。それには、電気電子回路だけでなく、熱設計、磁気回路設計、配線、構造設計などの総合的な融合分野の学問としての進展が必須となる。

実装分野の研究については、EV の開発で得た成果を更に発展させるために必要な実装技術の開発を更に推し進める。今後は、個々の研究で得た課題について検証するとともに、本プロジェクトの研究成果を基に、これからパワーモジュールとその関連技術の開発を行う中小企業を支援する、公共試作開発ラボを神奈川県産業技術センター、横浜国立大学等で展開していく。

横浜国立大学においては以下の設備と開発の支援が可能となる。

- 1) 電気-熱-構造連成シミュレーションシステム、初期設計における耐久性の効率評価
- 2) 実装プロセス評価シミュレーションシステム、実装プロセスの評価と改善
- 3) バルク材料の材料特性評価システム、新規はんだ材料の特性評価
- 4) 薄接合層の材料評価システム、新規実装材料の特性評価
- 5) 表面熱ひずみの計測システム、温度変化における構造の表面熱ひずみの計測
- 6) 接合部の疲労特性評価システム、微小接合部の疲労特性の計測
- 7) 高温環境 (350°C) の温度サイクル試験装置 (-50°C~350°C)
- 8) パワーデバイスのパワーサイクル試験装置

また、神奈川県産業技術センターにおいては、本プロジェクトで得られた高耐熱パワーチップ接合技術、接合状態観察・特性評価技術を公共試作開発ラボ機能として中小企業支援に活かすとともに、これらと従来から実施してきた中小企業支援策との相乗効果により中小企業のパワーエレクトロニクス分野への進出、拡大を技術支援する。

## 6. 業績

### 【原著論文】

#### 研究テーマ I :

1. A. Kawamura, M. Pavlovsky and Y. Tsuruta :

State-of-the-Art High Power Density and High Efficiency DC-DC Chopper Circuits for HEV and FCEV Applications

Przeglad Electrotechniczny, ISSN 0033-2097, R-84 NR9/2008, 1-13, 2008

(same as EPE-PEMC plenary speech, Poland, 7-20 (2008))

2. Y.Tsuruta, Y. Ito and A. Kawamura :

Snubber-Assisted Zero-Voltage and Zero-Current Transition Bilateral Buck and Boost Chopper for EV Drive Application and Test Evaluation at 25kW

IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.56, No.1, 4-11 (2009)

#### 研究テーマ II :

3. 三角潤、大山俊幸、高橋昭雄 :

In situ 法を利用したスチレン-N-フェニルマレイミド交互共重合体とポリエチレンオキシドからなるグラフトコポリマーによるエポキシ樹脂の強靭化

高分子論文集,562-572, 65[9] (2008)

4. 大山俊幸、高橋昭雄：  
In situ 重合改質剤を利用した熱硬化性樹脂の強靱化  
ネットワークポリマー,175-186,29[3] (2008)
5. 山際正憲：  
高耐熱パワー半導体モジュールの実装技術における熱疲労信頼性評価に関する研究  
予備審査報告書(2009.3)
6. Tadahiro Shibutani, Qiang Yu, Masaki Shiratori, Michael G. Pecht：  
Pressure-Induced Tin Whisker Formation  
Microelectronics Reliability, Vol. 48, 1033-1039 (2008)
7. Tadahiro Shibutani, Ji Wu, Qiang Yu, Michael Pecht：  
Effect of Process-Induced Voids on Isothermal Fatigue Resistance of CSP Lead-Free Solder Joints  
Microelectronics Reliability, Vol. 48, 1613-1627 (2008)
8. K.Shinohara and S.Georgescu:  
Innovation Diffusion Modelling  
Far East Journal of Applied Mathematics, Vo.37, No.3, 237-259 (2009)
9. K.Shinohara:  
Adjoint variable Method for Drag Reduction Under Oseen Flow  
International Journal of Numerical methods and Applications, Vol.2, 1-46 (2009)
10. 篠崎裕樹、大山俊幸、高橋昭雄：  
In situ 生成ポリベンジルメタクリレートによるアミン硬化エポキシ樹脂の強靱化、  
高分子論文集 Vol.66. No.6, 217-224 (2009)
11. K. Shinohara and Q. Yu:  
Evaluation of Fatigue Life of Semiconductor Power Device by Power Cycle Test and Thermal Cycle Test Using  
Finite Element Analysis  
Engineering, 2(2010), 1006-1018 (2010)
12. K. Shinohara and S. Georgescu:  
Modelling Adopter Behaviour Based on the Navier Stokes Equation,  
ISRN Mathematical Analysis, Vol. 2011, Article ID 894983, 10 pages, 2011. doi:10.5402/2011/894983 (2011)
13. K. Shinohara:  
Swimmer Simulation Using Robot Manipulator Dynamics Under Steady Water,  
Natural Science, Vol.2, No.9(2010), 959-967 (2010)
14. K. Shinohara and S. Georgescu:  
Space-Time Innovation Diffusion Based on Physical Analogy,

Journal of Enterprise Transformation,(submitted)

15. K. Shinohara:

Optimal Trajectory of Underwater Manipulator Using Adjoint Variable Method for Reducing Drag,  
Modelling and Simulation in Engineering, (submitted)

16. 山際正憲、于強、藤田雅人、篠原正典、村上善則 :

高純度アルミニウムを利用した高耐熱パワーデバイス実装構造における信頼性評価  
エレクトロニクス実装学会誌, Vol012, No3,238-247 (2009)

17. 松崎富夫、于強、澁谷忠弘、松本翼 :

はんだバンプ接続の熱衝撃試験寿命ワイブル分布傾きと破壊モードの関係  
エレクトロニクス実装学会誌、Vol. 12 No.4 320-332 (2009)

18. 宮内裕樹、于強、澁谷忠弘 :

チップ部品の鉛フリーはんだ接合部における疲労寿命のばらつき  
日本機械学会論文集A編、75巻 755号 39-46 (2009)

29. 松本翼、松崎富夫、澁谷忠弘、于強

樹脂-シリコンの微細不完全接合層を考慮したはく離強度評価  
日本機械学会論文集A編、75巻 755号、63-68 (2009)

30. 安澤貴志、山際正憲、澁谷忠弘、于強、篠原主勲 :

パワーモジュールのはんだ接合部における信頼性解析,  
日本機械学会論文集A編、(2009)

31. 高木寛二、于強、澁谷忠弘、宮内裕樹、野呂幸弘 :

チップ部品におけるはんだ接合部の信頼性設計手法に関する研究 ～き裂進展モードの解明とはんだ接合部の設計方法～,  
エレクトロニクス実装学会誌, Vol.12 No.7 (2009.11)

32. 高木寛二、于強、澁谷忠弘、宮内裕樹、野呂幸弘、:

チップ部品におけるはんだ接合部の信頼性設計手法に関する研究 ～はんだ接合寿命に及ぼす実装プロセスのばらつきの影響～”,  
エレクトロニクス実装学会誌, Vol.12 No.7 (2009.11)

33. 高木寛二、于強、澁谷忠弘、宮内裕樹、野呂幸弘 :

チップ部品におけるはんだ接合部の信頼性設計手法に関する研究 (第二報) ～はんだ接合寿命に及ぼす実装プロセスのばらつきの影響～  
エレクトロニクス実装学会誌,12,7,643-650 (2010)

34. Takashi Anzawa, Qiang Yu, Masanori Yamagiwa, Tadahiro Shibutani, Masaki Shiratori :

Reliability Evaluation on Deterioration of Power Device Using Coupled Electrical-Thermal-Mecahnical Analysis,  
Journal of Electronic Packaging (ASME JEP),132,Iss.3Selected Paper(ThETA2)

35. T.Oyama, Y.Shimizu, A.Takahashi :  
Effect of Maleimide Compounds on Pattern-forming Property of Photosensitive Polyimide Based on Negative-tone Reaction Development Patterning  
Journal of Photopolymer Science and Technology, 23(1),141 (2010)
36. S.Tsuda et al. :  
Application of Biomass-Derived Lignophenol to Epoxy Resin  
Japanese Journal of Polymer Science and Technology, 67 (9),497 (2010)
37. 篠原俊朗、三橋雅彦、八坂慎一、伊藤健、田口勇、伊東秀高、増田信次、本泉佑 :  
パワーエレクトロニクス実装に向けた高耐熱接合技術の研究  
神奈川県産業技術センター研究報告、(No.15、pp.49-50、2009)
38. 三橋雅彦、八坂慎一、伊東秀高、増田信次、篠原俊朗 :  
鉛フリーはんだ接合における熱伝導解析  
神奈川県産業技術センター研究報告、(No.15、pp.51-52、2009)
39. 八坂慎一、篠原俊朗、田口勇 :  
銀ナノ粒子を用いた接合の高温下シェア強度の評価  
神奈川県産業技術センター研究報告、(No.15、p.53、2009)
40. 篠原俊朗、八坂慎一、伊東秀高 :  
一方向熱流定常比較法による貴金属ダイアタッチ層の熱抵抗評価  
神奈川県産業技術センター研究報告、(No.16、2010)
41. 田口勇、八坂慎一、三橋雅彦、篠原俊朗 :  
マイクロ接合用金属多層膜に関する研究  
神奈川県産業技術センター研究報告、(No.16、2010)
42. 伊東秀高、増田信次 :  
BGA 接合部の品質確認—X 線による非破壊検査事例—  
神奈川県産業技術センター研究報告、(No.16、2010)
43. 伊藤健、田口勇、曾我雅康、本泉佑、平井、篠原俊朗、秋山伸之、西森尚、小柏俊典 :  
サブミクロン金属粒子を用いたダイボンド技術の開発  
第 17 回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集、(Vol.17 2011)
- 44.八坂慎一、篠原俊朗、久枝籬、遠藤圭一 :  
銀ナノ粒子を用いた接合部の高温信頼性  
第 17 回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集、(Vol.17 2011)

**【総説・解説・書籍】**

研究テーマⅡ :

1. 高橋昭雄 :  
低炭素イノベーション  
日本経済新聞、(2008. 10.27)
2. 于強、近藤悟史、佐次敬太 :  
信頼性検討の新技术 設計因子間の相互作用を解明  
日経エレクトロニクス、77-84 (2009.7.13)
3. 于強、山際正憲、安澤貴志 :  
パワーデバイスの実装技術の研究動向 (2009.10.7 発刊)
4. 于強、白鳥正樹、荒木敏弘、:  
自動車の高機能化・電子化における設計支援技術  
日本機械学会論文集 A 編、75 巻、758 号、1-9
5. 篠原俊朗 :  
次世代パワーエレクトロニクス用実装技術の研究－電気自動車等の電動部品の小型・軽量化をめざして  
神奈川県産業技術センターニュース 3 (2008.11 月号掲載)
6. 伊東秀高、増田信次、小森谷廣子 :  
BGA 接合部の X 線による品質確認  
神奈川県産業技術センター研究報告、No.14、34-35 (2008)

#### 【口頭発表】

##### 研究テーマ I :

1. 稲坂翔、河村篤男  
直流アクティブフィルタによる自動車駆動系の電氣的損失の低減に関する一考察  
平成 20 年電気学会産業応用部門大会、高知 (2009.8)
2. 河村篤男、弦田幸憲、稲坂翔  
EV/HEV での電費の概念  
平成 20 年電気学会産業応用部門大会、高知 (2009.8)
3. S.Inasaka, A. Kawamura and Y. Tsuruta :  
Discussion on High Efficient DC Power Management for Electric Vehicle  
International Technical Meeting on Semiconductor Power Converter, SPC-08-126, pp.67, 韓国 (2008.9)
4. A. Kawamura, Y.Tsuruta and M. Pavlovsky :  
State-of-the-Art High Power Density and High Efficiency DC-DC Chopper Circuits for HEV and FCEV  
Applications,13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC2008),ポーランド  
(2008.9)
5. Y.Tsuruta and A. Kawamura :  
Back to Back System for the Development and Testing of High Power DC-DC Converter

Conference IEEE Industrial Electronics and Control (IECON), アメリカ (2008.11)

6. 弦田幸憲、M.Pavlovsky、河村篤男：  
SAZZ チョップパ高効率化のための損失評価と低減  
平成 21 年電気学会全国大会、北海道 (2009.3)
7. Pavlovsky、弦田幸憲、河村篤男：  
Efficiency Improvements in SAZZ Topology by Using Synchronous Rectification  
平成 21 年電気学会全国大会、北海道 (2009.3)
8. 稲坂翔、河村篤男、弦田幸憲：  
双方向チョップパを用いた電気自動車の高効率電力制御に関する一考察  
電気学会産業応用部門大会 (2009.9.2)
9. 弦田幸憲、M.Pavlovsky、河村篤男：  
中電力応用 SAZZ チョップパの高効率化のための改良  
電気学会産業応用部門大会 (2009.9.2)
10. Y.Tsuruta, M. Pavlovsky, A. Kawamura：  
Very High Efficiency SAZZ Chopper Using High Speed IGBT  
2009 IEEE 6<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC) (2009.5.19)
11. Y. Tsuruta, M. Pavlovsky, A. Kawamura：  
Improvement for Very High Efficiency Chopper Circuit SAZZ  
13<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (2009.9.8)
12. M. Pavlovsky, A. Kawamura, Y.Tsuruta：  
Bi-directional Buck-Boost Dc-Dc Converter with Ultra High Efficiency Based on Improvement SAZZ Topology  
IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2009) (2009.9.23)
13. M. Pavlovsky, A. Kawamura, Y. Tsuruta：  
Fully Bi-directional Dc-Dc Converter for EV Power Train with Power Density of 40kW/l  
IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2009) (2009.9.23)
14. Y.Tsuruta, M. Pavlovsky and A. Kawamura：  
Very High Efficiency SAZZ Chopper Using High Speed IGBT,  
2009 IEEE 6<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2009), (2009.5)
15. 弦田幸憲、M.Pavlosky、河村篤男：  
中電力応用 SAZZ チョップパの高効率化のための改良  
平成 21 年電気学会産業応用部門大会 (2009.8)
16. 稲坂翔、河村篤男、弦田幸憲：  
双方向チョップパを用いた電気自動車の高効率電力制御に関する一考察

平成 21 年電気学会産業応用部門大会オーラルセッション講演 (2009.8)

17. 稲坂翔、河村篤男、弦田幸憲、Guiseppe Guidi :

電気自動車の総合的な回路効率を向上させるための駆動回路に関する一提案、  
産業計測制御研究会 (2010.3.9)

18. M.Pavlovsky, Y.Tsuruta, A.Kawamura :

Recent Improvements of Efficiency and Power Density of DC-DC Converters for Automotive Applications  
International Power Electronics Conference(IPEC-Sapporo2010) (2010.6.23)

19. S.Tsutsuki, Y.Watanabe, G.Guidi, A.Kawamura :

Total Efficiency Improvement of EV Power Train by Series Chopper  
2010Korea-Japan Joint Technical Workshop on Semiconductor Power Converter  
(電気学会産業応用部門 半導体電力変換技術委員会) (2010.10)

20. 弦田幸憲、M.Pavlovsky、河村篤男 :

SAZZ チョップパ高効率化のための損失評価と低減  
平成 21 年電気学会全国大会 (2009)

21. 筒木壮太、渡辺祐樹、亀井亮、G.グイディ、弦田幸憲、河村篤男 :

電気自動車用直列チョップパ駆動方式の総合性能に関する実験データ解析、  
平成 23 電気学会自動車研究会、VT-11-009,pp.45-50、(2011.1)

22. 筒木壮太、渡辺祐樹、亀井亮、G.グイディ、弦田幸憲、河村篤男 :

KAST-EV における直列チョップパ駆動方式の総合性能に関する実証データ解析  
第 25 回エレクトロニクス実装学会、(2011.3)

23. 弦田幸憲・河村篤男 :

高効率 S A Z Z チョップパの概要  
平成 23 年電子情報通信学会総合大会シンポジウム、(2011.3 発表予定)

24. 弦田幸憲、筒木壮太、グイディジュセッペ、河村篤男、徐培爾、岩倉哲史 :

30kW 車載用 4 象限双方向チョップパの開発  
平成 23 年電気学会全国大会、(2011.3 発表予定)

25. Y. Tsuruta, M. Pavlovsky and A. Kawamura:

Four Quadrant SAZZ-1 Chopper for EV and HEV Power Train,  
Proceedings of ICPE2011, (2011.5 発表予定)

26. Y. Tsuruta, G. Guidi and A. Kawamura:

SAZZ Chopper for EV and FCEV Applications,  
EVTec'11, (2011.5 発表予定)

研究テーマ II :

27. X.Cheng, A.Takahashi, T.Oyama :  
Development and Improvement of Chemically Amplified Reacting Development Patterning,  
Polycondensation, 138, 2008, (2008. 9)
28. 津田祥平、大山俊幸、高橋昭雄 :  
リグノフェノール硬化エポキシ樹脂に関する研究,  
第 7 回高分子討論会 (2008-9)  
57<sup>th</sup> SPSJ Symposium on Macromolecules, Polymer Preprints,Japan,57[6]、(2008.9)
29. 大西裕一、大山俊幸、高橋昭雄 :  
多環芳香族骨格によるエポキシ樹脂の低熱膨張率化,  
第 7 回高分子討論会(2008-9)  
57<sup>th</sup> SPSJ Symposium on Macromolecules, Polymer Preprints,Japan,57[6]、(2008.9)
30. 篠崎裕樹、大山俊幸、高橋昭雄 :  
エポキシ樹脂の強靱化における in situ 生成ビニルポリマー改質剤の利用,  
第 7 回高分子討論会(2008-9)  
57<sup>th</sup> SPSJ Symposium on Macromolecules, Polymer Preprints,Japan,57[6]、(2008.9)
31. 北村あい、大山俊幸、高橋昭雄 :  
in situ 重合架橋型 N-フェニルマレイミド-スチレン交互共重合体によるシアナート樹脂の強靱化  
第 58 回ネットワークポリマー講演大会,165 (2008. 10)
32. 戸坂彰彦, 于強, 澁谷忠弘, 白鳥正樹 :  
複合負荷を受けるはんだ接合部の疲労寿命の定量的評価に関する研究  
日本機械学会 2008 年度年次大会 Vol.6 223-224 (2008)
33. 丸岡敏明, 于強, 澁谷忠弘, 白鳥正樹 :  
車載用電子デバイスのはんだ接合部の熱疲労信頼性バラツキ評価とワーストケースの検討  
日本機械学会 2008 年度年次大会、Vol.6 225-226 (2008)
34. 佐次敬太, 于強, 澁谷忠弘, 白鳥正樹 :  
電子デバイス BGA パッケージにおける信頼性の簡易評価に関する研究  
日本機械学会 2008 年度年次大会、Vol.6 229-230 (2008)
35. 高木寛二, 于強, 澁谷忠弘, 宮内裕樹 :  
流動解析を用いたチップ部品におけるはんだ接合部のばらつき発生評価  
エレクトロニクス実装学会第 18 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム,251-254 (2008)
36. 竹中国浩, 于強, 松本翼, 下池正一郎 :  
プリント配線板におけるガラス繊維と樹脂の積層構造を考慮した IVH(interstitial Via Hole)の熱疲労解析  
エレクトロニクス実装学会第 18 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム, 263-266 (2008)
37. 松本翼, 于強, 澁谷忠弘, 松崎富夫 :

樹脂とシリコンの微細界構造を考慮したはく離強度評価手法の開発

エレクトロニクス実装学会第 18 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム 307-310 (2008)

38. 安澤貴志, 于強, 澁谷忠弘, 山際正憲, 白鳥正樹 :

電気-熱-構造連成解析を用いたパワーモジュールにおけるはんだ接合部の劣化を考慮した信頼性評価  
エレクトロニクス実装学会第 18 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム 295-298 (2008)

39. 守本直樹, 于強, 澁谷忠弘, 野田隼也 :

トレードオフ・交互作用を考慮した設計支援手法に関する研究と車両性能設計への適応  
日本機械学会第 21 回計算力学講演会 363-364 (2008)

40. 篠原主勲, 于強, 安澤貴志, 石井秀明 :

パワーデバイス疲労寿命評価,  
第 23 回エレクトロニクス実装学会講演大会,177-178 (2008)

41. 佐藤俊一郎, 于強, 澁谷忠弘, 近藤悟史, 白鳥正樹, 浅田敏明, 天野俊昭, 児島直之 :

応力緩和構造を有する WL-CSP の信頼性設計  
第 22 回エレクトロニクス実装学会講演大会 (研究奨励賞受賞) (2008)

42. 丸岡敏明, 于強, 澁谷忠弘 :

車載用電子デバイスはんだ接合部における熱疲労寿命のバラツキ評価手法  
MES2009 (2009)

43. 梅澤祐紀, 于強 :

乗員拘束系における設計変数の交互作用を考慮した設計支援手法の開発  
日本機械学会第 22 回計算力学講演会 (2009)

44. 梅澤祐紀, 于強 :

乗員拘束系における設計変数の交互作用を考慮した設計支援手法の開発  
CDAJ CAE Solution Conference パシフィコ横浜 (2010)

45. 阿久津敬弘, 于強, 西村悠司 :

マイクロ構造を考慮した鉛フリーはんだ接合部の疲労強度特性に関する研究  
第 23 回計算力学講演会 449-450、北海道 (2010.9.23-25)

46. 高橋智弘, 于強 :

電気-熱-構造連成解析によるパワーサイクル下におけるパワーモジュールの信頼性評価  
第 23 回計算力学講演会、 455-456 北海道 (2010.9.23-25)

47. 佐藤裕之, 于強, 曾根竜介 :

硬化過程を考慮した封止樹脂の熱変形と機械特性に関する研究  
第 23 回計算力学講演会 459-461、北海道 (2010.9.23-25)

48. 篠原俊朗 :

高耐熱接合技術の開発と実装技術支援  
平成 20 年度神奈川県ものづくり技術交流会 (2008.10)

49. 伊東秀高 :

BGA 接合部の X 線による品質確認  
平成 20 年度神奈川県ものづくり技術交流会  
非破壊検査フォーラム (2008.10)

50. 伊東秀高、増田信次 :

BGA 接合部の X 線による品質確認、  
神奈川県非破壊試験技術交流会技術発表会、第 1 回非破壊試験技術フォーラム、(2009.6.8)

51. 大西裕一、大山俊幸、高橋昭雄 :

多環芳香族系エポキシ樹脂の高温力学物性  
第 23 回エレクトロニクス実装学会講演大会論文集 11B-02,25、(2009.3)

52. K. Shinohara, Q. Yu, T. Anzawa, H. Ishii :

High-Accuracy Fatigue Evaluation of Power Devices by Multicoupled Analysis  
Proc. interpack09, 89043, (2009.7.1).

53. Hiromi Sugihara, Masanori Yamagiwa, Masato Fujita, Toshikazu Oshidari, Qiang Yu, :

Thermal Fatigue reliability of High-Temperature-Resistant Joint for Power Devices,  
Proc. of the ASME 2009 InterPACK, (2009.7)

54. 篠原俊朗 :

高耐熱接合技術の開発と実装技術支援  
富山県工業技術センターテクノシンポジウム、(2009.7.23)

55. Kazunori Shinohara, Qiang Yu, :

Fatigue Evaluation of Power Devices,  
Proc. ICEPT-HDP 2009, GP-26 (2009. 8)

56. 賀川美香、大山俊幸、高橋昭雄 :

エポキシ変性ポリベンゾオキサジンの研究  
第 58 回高分子討論会 (2009.9.16)

57. Yu.Q Shibutani T. Tanaka A. Koyama T. and Shiratori M :

Low - cycle fatigue reliability evaluation for lead - free solders in vehicle electronics devices  
Proc. of the ASME 2008 InterPack Conference

58. Kondo.S., Yu.Q., Shibutani.T. and Shiratori .M. :

Evaluation Method of Interaction Relation between Design Factors Andsimple Assessment Approach for BGA  
Package Reliability,  
Proc. of the ASME 2008 InterPack Conference

59. Yu.Q., Fujita.M., Shibata.T., Katahira.T. and Shiratori.M. :  
A Study on Repetitive Drop test Method and for Electronic Component,  
Proc. of the ASME 2008 InterPack Conference
60. Tosaka.A., Yu.Q., Shibutani.T., Kondo.S. and Shiratori.M :  
Reliability Evaluation of Lead Free Solder Joints Subjected to Multi - Loads,  
Proc. of the ASME 2008 InterPack Conference
61. Kondo.S., Yu.Q., Shibutani.T. and Shiratori.M. :  
New Reliability Assessment Method for Solder Joints in BGA Package by Considering the Interaction between  
Design Factors,  
Proc. of the International Workshop on THERMal Investigation of Ics and Systems
62. Miyauchi.H., Yu.Q., Shibutani.T. and Shiratori.M :  
Evaluation Technique for The Failure Life Scatter of Lead-Free Solder Joints in Electronic Device, :  
Proc. of the International Workshop on THERMal Investigation of Ics and Systems
63. Yu, Q., Shibutani, T., Shiratori, M., Matsuzaki, T. and Matsumoto, T :  
Delamination Evaluation Approach for Bimaterial Structure Considering Interfacial Layer,  
Proc. of the 2008 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition
64. Miyauchi.H., Yu.Q., Shibutani.T. and Shiratori.M :  
A Study on Evaluation Technique for the Fatigue Life Scatter of Lead-Free Solder Joints,  
Proc. of the 2008 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition
65. T.Anzawa, Q.Yu, T.Shibutani, M. Shiratori :  
Reliability Evaluation for Power Electronics Device using Electrial Thermal and Mechanical Analysis,  
Proc. Of 9th Electronics Packaging Technology Conference (2008)
66. K..Shinohara, Q.Yu, M. Fujita and H. Ishii H. Ishikawa :  
Ball Impact Response Based on Modeling Techniques  
Proc. EPTC2009, P0325, (2009.12.11)
67. K. Shinohara, Q. Yu, T.Anzawa and H. Ishii :  
High-Accuracy Fatigue Evaluation of Power Devices by Multicoupled Analysis  
Proc. interpack09, 89043, (2009.7.1)
68. K.Shinohara and H.Okuda :  
Shape Optimization Using Adjoint Variable Method for Drag Reduction  
15<sup>th</sup> International Conference on Finite Element Problems, (2009.4.1)
69. Y.Ohnishi, T.Oyama and A.Takahashi :  
Low CTE epoxy resins containing polyaromatic backbone

13<sup>th</sup> International IUPAC Conference on polymers and Organic chemistry (PPC'09) (2009.7.6)

70. K. Shinohara and Q. Yu :

Fatigue Evaluation of Power Devices

Proc. ICEPT-HDP 2009, GP-26, (2009.8)

71. Vidya Challa, and Michael Pecht, Shilin Liu and Qiang Yu :

A Verification of Application Specific Component Qualification

Proc. of ICEP2010, 西安

72. H. AKAEDA, Q. Yu :

Characteristics and mechanism of surface roughness generated in substrate used for vehicle power device

Proc. of New Methods of Damage and failure Analysis of Structural Parts, 129-136, オストラバ

73. R. SONE, Q. YU :

Deformation of resin materials due to the curing in the thermal process

Proc. of New Methods of Damage and Failure Analysis of Structural Parts, 343-350, オストラバ

74. H. SATO, Q. YU, R. SONE :

A Study of the Thermal Deformation and the Mechanical Properties due to Curing Process of the Encapsulation Resin

Proc. of New Methods of Damage and Failure Analysis of Structural Parts, 51-58, オストラバ

75. Takahiro AKUTSU, Qiang YU, Yuji NISHIMURA :

Effect of Micro Structure on Fatigue Characteristics of Lead Free Solder Joints

Proc. of EPTC2010, Singapore

76. Tomohiro TAKAHASHI, Qiang YU :

Precision Evaluation for Thermal Fatigue Life of Power Module using Coupled Electrical-Thermal-Mechanical Analysis

Proc. of EPTC2010, 201-205

77. 賀川美香、大山俊幸、高橋昭雄 :

エポキシ変性ポリベンゾオキサジンの研究

第 58 回高分子討論会 (2009.9.16)

78. 大西裕一、大山俊幸、高橋昭雄 :

多環性香族型エポキシ樹脂の高温力学物性

第 59 回ネットワークポリマー講演大会(2009.10)

79. 賀川美香、大山俊幸、高橋昭雄 :

エポキシ変性ポリベンゾオキサジンの研究

第 59 回ネットワークポリマー講演大会(2009.10)

80. 北村あい、友井、大山俊幸、高橋昭雄：  
*In situ* 重合架橋型 *N*-フェニルマレイミド-スチレン交互共重合体による高耐熱性シアナート樹脂の強靱化  
第 59 回ネットワークポリマー講演大会 (2009.10)
81. 篠原主勲、奥田洋司：  
流れの場に置かれた物体の随伴変数法による形状最適化 (遅い流れ場における表面力)  
第 14 回計算工学講演会、(2009.5.13)
82. 秋山伸之、西森尚、宮入正幸、小柏俊典、伊藤健、篠原俊朗：  
パワーデバイス素子接合に向けたサブミクロン Au 粒子の開発  
平成 21 年度神奈川県ものづくり技術交流会エレクトロニクスフォーラム、(2009.10.21)
83. 遠藤圭一、久枝穰、長原、池田、篠原俊朗、八坂慎一：  
銀ナノ粒子の接合への応用  
平成 21 年度神奈川県ものづくり技術交流会エレクトロニクスフォーラム、(2009.10.21)
84. 唐澤志郎、篠原主勲、臼井重徳、于強、篠原俊朗、八坂慎一：  
温度特性評価用小型熱衝撃試験機の開発  
平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業 (経済産業省補正予算事業) 成果報告書, 2009.
85. Toshiaki MARUOKA, Qiang YU, Tadahiro SHIBUTANI :  
Dispersion and Evaluation of Thermal Fatigue Reliability of Solder Joint by Using Normal Random Umbers,  
Proc. of PHM2010 Macau
86. Masahiro KOBAYASHI, Qiang YU :  
Reliability Evaluation for Specify Factor of Fatigue on Power Device,  
Proc. of PHM2010 Macau
87. Kanji Takagi, Qiang Yu, Tadahiro Shibutani, Hiroki Miyauchi :  
Reflow Process Simulation for Dispersion Evaluation of Solder Joint Shape on Chip Component,  
Proc. of the ASME 2009 InterPACK Conference
88. Masanori Yamagiwa, Masato Fujita, Qiang Yu, Hiromi Sugihara :  
Reliability Study of High-Temperature-Resistant Mouting Structure Considering Share Behavior of Joint Layer,  
Proc. of the ASME 2009 InterPACK Conference
89. Hiromi Sugihara, Masanori Yamagiwa, Masato Fujita, Toshikazu Oshidari, Qiang Yu :  
Thermal Fatigue Reliability of High-Temperature-Resistant Joint for Power Device,  
Proc. of the ASME 2009 InterPACK Conference
90. Ryusuke Sone, Qiang Yu, Tadahiro Shibutani :  
Deformation of Resin Material due to Curing in the Thermal Process,  
Proc. of the ASME 2009 InterPACK Conference

91. Yuji NISHIMURA Qiang YU, Toshiaki MARUOKA:  
Reliability Evaluation of Fatigue life for Solder Joints in Chip Components Considering Shape Dispersion,  
Proc. of EPTC2009
92. Hiroyuki Sato, Qiang Yu:  
A study on the Thermal Dformaion and the Mechanical Properties Due to Curing Process of the Encapsulation Resin,  
Proc. of EPTC2009
93. K. Shinohara and Q. Yu:  
Reliability Evaluation of Power Semiconductor Devices Using Coupled Analysis Simulation,  
Proceedings of ITherm, (2010), Paper No.2507. (2010)
- 94.八坂慎一、篠原俊朗、久枝穰、遠藤圭一：  
銀ナノ粒子ペーストを用いた実装における高温接合信頼性  
神奈川県ものづくり技術交流会エレクトロニクスフォーラム (2010. 10.13)
- 95.遠藤圭一：  
銀ナノ粒子を用いた接合例の紹介  
神奈川県ものづくり技術交流会エレクトロニクスフォーラム (2010. 10.13)
- 96.秋山伸之、西森尚、小柏俊典、伊藤健、篠原俊朗：  
サブミクロン Au 粒子を用いた気密封止技術の開発  
神奈川県ものづくり技術交流会エレクトロニクスフォーラム (2010. 10.13)
- 97.伊藤健、田口勇、篠原俊朗、秋山伸之、西森尚、小柏俊典：  
サブミクロン Au 粒子を用いたダイボンド技術の開発  
神奈川県ものづくり技術交流会エレクトロニクスフォーラム (2010. 10.13)
- 98.白井重徳、于強、篠原主勲、篠原俊朗：  
小型熱衝撃試験機の開発  
神奈川県ものづくり技術交流会エレクトロニクスフォーラム (2010. 10.13)
- 99.伊藤健、田口勇、曾我雅康、本泉佑、平井清人、篠原俊朗、秋山伸之、西森尚、小柏俊典：  
サブミクロン金属粒子を用いたダイボンド技術の開発  
第 17 回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム (2011. 2.3)
- 100.八坂慎一、篠原俊朗、久枝穰、遠藤圭一：  
銀ナノ粒子を用いた接合部の高温信頼性  
第 17 回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム (2011. 2.3)

## 【その他】

研究テーマⅡ：

1. 第 19 回マイクロマシン／MEMS 展  
東京ビックサイト 2008 年 7 月 30 日～8 月 1 日
2. かながわ科学技術フェア 2010 「神奈川県試験研究機関等活動成果発表会」2010 年 11 月 15 日  
電気自動車のキーテクノロジー（次世代パワーデバイスの開発をめざして）、発表者；篠原主勲
3. パワーエレクトロニクス実装研究会第 1 回公開フォーラム  
ー未来型電気自動車のコンセプトに向けてー  
神奈川県産業振興センター 2008 年 6 月 13 日
4. パワーエレクトロニクス実装研究会第 2 回公開フォーラム  
ーユーザーからの実装への要望と世界の SiC 開発動向ー  
横浜国立大学教育文化ホール 2008 年 12 月 22 日
5. パワーエレクトロニクス実装研究会第 3 回公開フォーラム  
ーワーキンググループによる調査報告と ICSCRM2009 報告ー  
横浜国立大学教育文化ホール 2009 年 12 月 24 日,2010 年 3 月 5 日(再)
6. パワーエレクトロニクス実装研究会第 4 回公開フォーラム  
ー電気自動車とパワーエレクトロニクス実装ー  
横浜国立大学教育文化ホール 2011 年 2 月 2 日

#### 【特許】

公開日：平成 22 年 10 月 14 日 公開番号：特開 2010-233312 号

発明者：Martin Pavlovsky 弦田幸憲 河村篤男

発明の名称：双方向昇降圧チョッパ回路

公開日：平成 22 年 11 月 11 日 公開番号：特開 2010-254895 号

発明者：高橋昭雄 大山俊幸 賀川美香

発明の名称：エポキシ樹脂組成物及びその硬化物

その他 国内出願済 3 件

#### 【共同研究など】

共同研究 6 件

委託事業 1 件

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業(補正予算)採択



# エコ未来型電気自動車の提案と実現

河村 篤男

## 1. 全体計画と遂行方針

プロジェクト1年目となる20年度は、以下の各項目を重点項目として研究を行なった。

### ①高効率な電気自動車用パワートレインの検討

自動車の環境性能を向上させる手段としては、走行抵抗の低減、回生効率の向上、そしてバッテリーからモータまでの駆動エネルギー効率の向上が挙げられる。本研究では、従来の電気自動車に比べて、エネルギー伝達効率を向上させ、回生エネルギーを有効利用することにより、さらに環境性能に優れた電気自動車の実現の検討を行った。

### ②昇降圧直列チョップ方式 SAZZ-1 の開発

昇降圧直列チョップ方式のEV駆動システムに用いる常用域全域で98[%]以上の高効率運転が可能な30[kW]SAZZ-1チョップを開発した。常用域全域で高効率化という課題を解決するために、最適周波数を25[kHz]、補助回路に可飽和リアクトルを挿入し、スナバダイオードおよび回生ダイオードすべての補助ダイオードをSiCダイオードとした。挿入した可飽和リアクトルやSiCダイオードの効果で、サージ電圧が抑制され、常用域全域で、ほぼ目標値である効率98[%]を越えるデータが得られた。

### ③高密度高効率DC-DCコンバータの設計と実測

SAZZ-1チョップよりもさらに高密度高効率チョップを実現するために、SAZZ回路を改良したプロトタイプを設計製作し、効率を実測した結果、エネルギー密度40kw/lで効率99%を超える実測データが得られた。

プロジェクト2年目となる21年度は以下の各項目を重点項目として研究を行った。

### (1)高効率な電気自動車用パワートレインの研究開発とランニングシャーシの製作

1-1 パワートレイン性能評価装置を構築する。それを用いて、昨年度試作したチョップ、インバーター・モータのパワートレインとしての性能試験を引き続き行い、電費の予想値をより正確に算出する。

1-2 車載用のパワートレインを開発するために、要素部品の開発発注を行う。

①:車載用4kw/lのSAZZ-1チョップ2号機の開発と発注、

②:2組目のインホイールモータとインバータセットの発注、

③:完全電気ブレーキの開発および検証、

④:バッテリーの発注の準備、

⑤:ランニングシャーシの設計と製作

### (2)高効率高電力密度チョップの実現

昨年度に引き続き、ポストドクによる試作実験を続け、実験室レベルでの世界最高性能のチョップの性能を正確に測定する。

プロジェクト3年目となる22年度は以下の各項目を重点項目として研究を行った。

### (1)車体を完成させる。

1-1: バッテリーおよび低空力抵抗カウルを発注する。さらに、内部の配線および電気ブレーキ系の油圧・電気系を完成させる。

1-2: ジャッキアップ状態で、チョップの制御性能および完全電気ブレーキの基礎試験を行う。

1-3: 国大内で簡単な走行試験を行う。

### (2)ダイナモ上走行試験による電費の実測を行う。

2-1: ランニングシャーシを日産の研究所のダイナモ上へ運び、各種試験する。

定常動作試験や過渡応答試験(完全電気ブレーキ系)を行い、データを収集した後、1015モードやJC08モードで電費を測定する。

2-2: 上記の結果を受けて、各種改良を行う。(9月、11月、1月)

### (3)電費向上対策の研究

3-1: PAMインバータおよびチョップの制御法を改良して国大の1軸試験装置で基礎性能試験を行う。各種組み合わせ試験を行い、実測データに基づく、電費のシミュレーションを行い、提案手法での実験上の最大電費を予想する。

3-2: 各種走行パターンでの電費シミュレーションを行い、電費最大化の方策を提案する。

### (4)外部公表向けの検討

4-1: 外部アピール方法を検討し、対外的に公表する。

## 2. 研究成果の概要

### 2.1 20年度の研究成果

#### (1) 高効率駆動回路方式に関する研究

自動車の環境性能を向上させる手段としては、走行抵抗の低減、回生効率の向上、そしてバッテリーからモータまでの駆動回路のエネルギー効率の向上が挙げられる。本研究では、いくつかの電力制御方式を検討し、そのエネルギー伝達効率の評価をシミュレーションにて行なった。

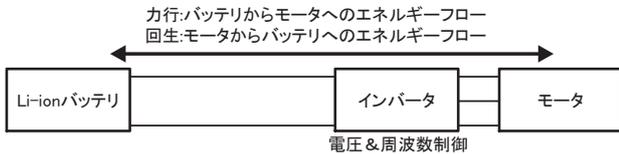


図1. 最もシンプルな駆動回路

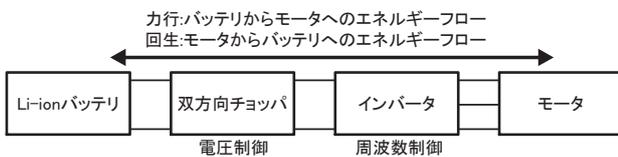


図2. 直列チョップ方式

の低減が挙げられる。モータ基本波周波数の数十倍以上のスイッチングを行なうPWM制御に対して、PAM制御は基本波と同程度のスイッチング周波数で動作を行なう。

そのため、インバータでのスイッチング損失や、モータでの鉄損を低減できると考えられる、

現在我々は、PAMによる電力制御方式の性能の評価を、シミュレーションソフトを用いて行なっている。現時点では、大まかなモデルは完成しており、モータやインバータの詳細な回路モデルを製作できるように、実験や論理式の導出を進めていく予定である。

#### (2) 昇降圧直列チョップ方式 SAZZ-1 の開発

図3に示す昇降圧直列チョップ方式のEV駆動システムに用いる常用域全域で98[%]以上の高効率運転が可能な30[kW]SAZZ-1チョップパを開発した。図4に今回試作した高効率SAZZ-1チョップパの回路構成を示す。

常用域全域で高効率化という課題を解決するために、最適周波数を、今回使用するIGBTの能力にあわせ25[kHz]を選択。図4に示すように、補助回路に可飽和リアクトルSL1, SL2, SL3, SL4を挿入し、スナバダイオードおよび回生ダイオードすべての補助ダイオードをSiCダイオードの多重並列化構成とした。図5に示すのは、実際に30[kW]過負荷試験時の動作波形である。挿入した可飽和リアクトルやSiCダイオードの効果で、サージ電圧が抑制され、綺麗なソフトスイッチング波形が得られている。常用域全域で、ほぼ目標値である98[%]以上の高効率運転が可能である。

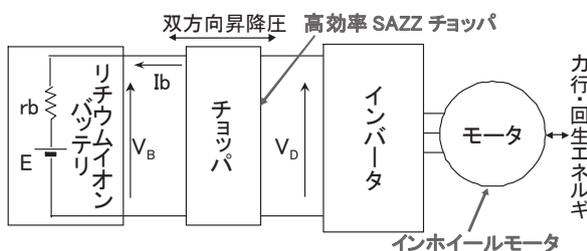


図3 システム構成(昇降圧直列チョップ方式)

図1は、一般的に用いられている電気自動車の走行用。

この方式では、バッテリーの直流電圧をインバータにてPWM(パルス幅変調)制御することにより、モータに印加される電圧とその周波数を変化させて駆動制御を行なう。部品数が少ないため、車体重量の軽量化と回路での損失発生箇所を最低限に抑えられる最もシンプルな構成である。しかし、PWMによって生じる高調波により、エネルギー伝達効率が悪化してしまう恐れがある。また、バッテリー電圧の低下に伴い、モータに印加される最高電圧も低下してしまうため、自動車の最高速度も低下してしまうなどの問題が懸念される。

図2は、我々が現在継続して検討している駆動回路である。この回路の特徴は、バッテリーとインバータの間に双方向チョップパが挿入されている点である。チョップパを用いることでモータのPAM制御が可能となり、主に低速域においてモータやインバータの効率を向上させることができる。

その理由としては、第一にインバータのスイッチングロス

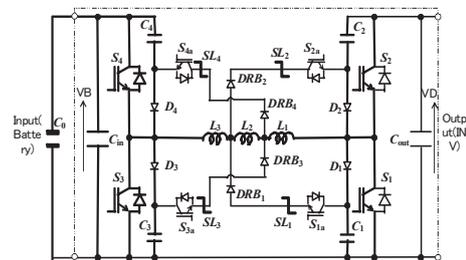
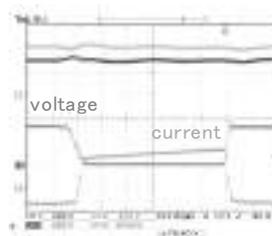


図4 双方向昇降圧 SAZZ-1 チョップパ回路構成

表 1. SAZZ-1 チョップパの仕様

項目	定格	電圧変動範囲
入力(バッテリー側)	DC300V	240~320V
出力(INV 側)	DC400V	20~420V
定格出力電力	8kW 連続	30kW(20sec)
効率	常用域全域にて、98%以上	

図 5 30[kW]過負荷試験結果(順方向昇圧)



(3) 高密度高効率 DC-DC コンバータの設計と実測

この研究の目的は、サイズと重さをなるべく小さくしながら、高効率な電気自動車パワートレイン用 DC-DC コンバータを設計することである。提案の設計では、効率をさらに高めた改良型 SAZZ トポロジーを採用した。同時に、高密度化を念頭に置いた空間設計、熱設計、磁気回路設計を行った。これらの視点から、この提案手法では、DC-DC コンバータの究極の設計を行った。現時点まで、要素部品と全体の構造について検討を行った。現在は、試作したプロトタイプを測定中である。最初の測定から得られた結果は、期待以上のものがある。ある電圧変換比の条件では、効率 99%以上が幅広い負荷変動範囲で得られた。同時に、電力密度 40kW/l が実現できた。この 2 つのデータは、この分野の文献での限界値 (最高データ) を示している。(抄訳)

2. 3 21 年度の研究成果

(1)高性能なパワートレインの研究開発

公共試作開発ラボ機能を想定したパワートレイン試験性能評価装置を製作した。図 6 に示すように、少ない電源容量でエネルギーの回生が行えるように工夫してある。

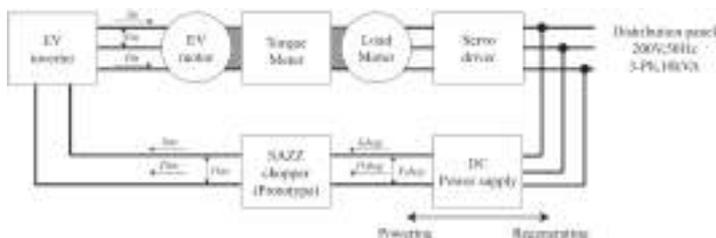


図 6 パワートレイン試験性能評価装置

これを用いて、高効率駆動回路方式に関する研究を行った。定常状態のチョップパ、インバータ、モータの効率から 10-15 モードでの性能をシミュレーションにより評価した結果、10%以上走行距離が伸びることを確認した。次に、定常状態での各動作点での効率を測定した結果、チョップパによる効率向上が確認された。さらに、PAM 動作での効率向上に関して種々の検討を行った。

次に、SAZZ-1 チョップパの 2 号機に関して、実装のための小型化や電力潮流制御などについて検討を行い、搭載用として設計製作した。特に、①水冷による小型・軽量化で外形-40%、質量-20%、②基板改版と機構検討による集積化で外形-10%、(a)表示パネル撤去、(b)入出力接続最適化、③バスバーのアルミ化、等の試作により、小型・軽量化の予測値として、容積/1号機: 31L→2号機: 14L、質量/1号機: 30kg→2号機: 24kg、電力密度/1号機: 0.97kW/l →2号機: 2.2kW/l を実現した。

さらに、車載用のパワートレインを開発するために、以下の要素部品の開発発注を行った。①2 組目のインホイールモータとインバータセットの発注、②完全電気ブレーキの開発および検証、③バッテリーの発注の準備。これらのサイズを考慮して、図 7 に示したランニングシャーシの設計と製作を行った。

図 7 ランニングシャーシの概観



## (2)高密度高効率 DC-DC コンバータの設計と実測

昨年度に引き続き、ポストクによる試作を続けた結果、電力密度 40kw/l の試作機により効率 99%の実測データが得られた。試作 EV は、このチョッパと互換性がある形で製作した。

## 2. 4 22 年度の研究成果

### (1) KAST-EV の製作

バッテリーおよびカウルを発注して、KAST-EV 完成に必要な要素装置はすべて揃ったので、制御装置を開発した。手順としては、パワートレイン性能試験装置（公共試作開発ラボ機能）にて、走行モードに応じた制御が行える制御装置を開発した。さらに、その配線を生かして、実車の配線を行い、カウルと組み合わせた。この原稿の提出時点では、KAST-EV のシャーシダイナモ上での試験は 2 月中旬に予定されている。ただし、性能データは、以下の（3）項で示すように、すでに取得されており、当初の性能を実現するのは確実であると予想される。

なお、1 月中旬での配線を終えて組立作業中シャーシの写真を、図 8 に示す。



図 8 組み立て作業中の KAST-EV

### (2) 燃費と電費の測定結果

直列チョッパの効果を明らかにするために、従来方式と直列チョッパ PWM 方式に関して 1015 モードおよび JC08 モードの走行試験を行なった。試験では各方式において満充電状態から各モードを繰り返し走り続け、止まるまでの走行距離を測定した。

#### バッテリー電圧と最高速度の関係について

速度が上がっていくとモータには大きな逆起電力が生じ、この電圧がバッテリー電圧を超えると制御が行えなくなる。この対策として従来方式では弱め界磁制御が用いられているが、この制御にも限界があり一定の電圧よりバッテリー電圧が下がると最高速度が仕様を満たせなくなってしまう。以下にその関係を示す。

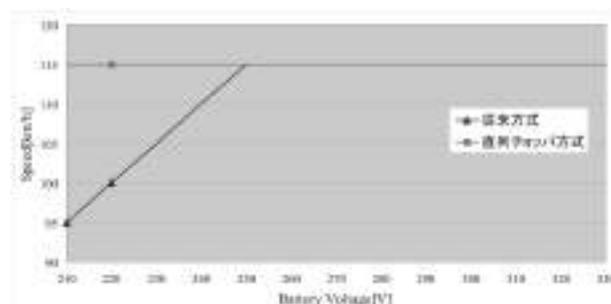


図 9. バッテリー電圧と最高速度の関係

図 9 より、従来方式では 250V より電圧が下がると最高速度が下がっていくことが確認できた。よって従来方式では安全に走行するためにシステムを停止させる閾値を 250V に設定する必要があることがわかる。表 2 に実験結果をまとめる。

表 2. 実験結果まとめ

項目	1015モード								JC08モード	
	(1)200kg 全負荷時				(2)100kg 全負荷時				(3)200kg 全負荷時	
	有	無	有	無	有	無	有	無	有	無
平均消費電力(kWh)	5.20	5.75	5.37	5.40	5.46	5.59	5.57			
走行距離(回約210V)	103.4	(105.4)	121.8	(126.4)	124.7	101.2	(103.3)			
走行距離(回約250V)	-	97.2	-	114.5	-	-	94.3			
燃費(回約210V)	18.7	(18.0)	22.6	(21.1)	22.6	18.3	(18.6)			
燃費(回約250V)	-	17.5	-	21.0	-	-	16.9			
電費(回約210V)	14.8	(15.2)	15.9	(16.2)	15.0	14.5	(14.8)			
電費(回約250V)	-	14.0	-	16.8	-	-	13.6			

※燃費の値は最高速度(155km/h)を保持しないときのデータ、電費の値はSAZZを参照。  
※走行距離(km)、燃費(km/kWh)、電費(km/kWh)を参照

以下に表 2 のまとめを示す。

- ・従来方式に 250V の閾値を設定すると、1015 モードで 5.3%、JC08 モードで 7.3%新方式の方が 1 充電走行距離が長くなる。
- ・全負荷での電圧変動を考慮し、かつ SAZZ を 2 台運転から 1 台運転に切り替えることで 1015 モードで 8.0%、JC08 モードで 10.8%の 1 充電走行距離の改善が見込める。

(3) SAZZ-1 チョップパ走行モード時の性能

直列チョップパは、運転動作のよって、力行や回生を行う機能を有しているが、その動作点は、刻々変化する。図 10 は、その変化するときの効率をプロットしたものであり、これによりチョップパの高効率性の重要性が明らかになると同時に、その軽量化の重要である。したがって、高電力密度でチョップパの性能を評価する視点は重要である。

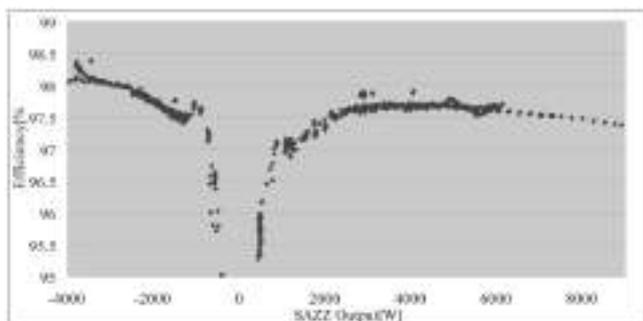


図 10 SAZZ-1 チョップパの効率の変化 (JC08 モード時)  
縦軸：効率、横軸：パワー (原点の右が力行、左が回生)

2. 5 3年間のまとめ

電気自動車用直列チョップパによる駆動系を提案し、インホイールモータ前輪駆動型の実証実験車両を製作して、5.5kWh の電池容量で、JC08モード1充電距離約 100km、JC08モード電力消費率(燃費:km/kWh)約 18km/kWh を実現した。

直列チョップパとしては、ソフトスイッチングを実現する高効率高電力密度のチョップパ SAZZ-1 を用いて、効率 98%程度 の車載用の 30kW の 4 象限 SAZZ-1 チョップパを開発した。

実験室で駆動系の試験が行えるチョップパ・インバータ・モータテストベンチを開発し、上記の駆動系の試験を行った。力行、回生、機械ブレーキ、電気ブレーキなどの調整が行え、かつ、各要素装置の効率が測定できる試験装置となっており、公共試作開発ラボ機能として使用できる。

高密度チョップパの研究として、SAZZ チョップパを工夫した 4 象限チョップパを開発(特許出願)し、15kw 出力で効率 99%、電力密度 40kw/l の試作機を完成させ、上記データを実測した。

KAST-EV を製作し、上記のチョップパ、インホイールモータ、インバータを搭載した 2 人乗り電気自動車試作機を製作した。この報告書原稿を提出する時点(2011年1月上旬)では、シャーシダイナモでの試験が終了してない。ただ、上記、公共試作開発ラボ機能において、JC08 モードと同等の試験を行い、プロジェクト代表者が提案している”電費“(1トンあたりのバッテリー容量あたりの走行距離: km/(kWh/ton))として、14.5 を測定し、シャーシダイナモ試験でもこれに近い値が予想される。これが実現されれば、現時点では、世界最高の値と考えられる。

さらに、直列チョップパを用いることにより、JC08 モードにおいては、チョップパを用いない場合に比べて約 1 割程度、1 充電走行距離が伸びることを実証した。これは、加減速を頻繁に行う走行モードにおいては、高効率高電力密度のチョ

ツパの特性である、回生および電圧昇降圧機能の効果が大きいことを示している。どのような電気自動車駆動系においても直列チョップパの省エネ効果は現れると考えられる。

### 3. 課題及び今後の展望

本プロジェクトの積み残した課題としては、いろいろな視点から議論できる。その大きいものを列挙すると以下のよう  
にまとめられる。

- ① さらなるチョップパの高効率化かつ高密度化のための研究、特にパッケージングの研究開発
- ② インバータの制御、特に PAM インバータでの効率向上の実証実験
- ③ 電気ブレーキと機械ブレーキの組み合わせの度合いによって乗り心地と 1 充電走行距離に相関関係があるか  
いかに明らかにすること
- ④ KAST-EV 車両を用いての各種性能評価
- ⑤ 技術移転の可能性の追求
- ⑥ その他

本プロジェクトの結論として、高効率高電力密度のチョップパを開発し、それを搭載することにより、電気で駆動される自動車は総合性能が約 1 割向上することが実証された。走行距離が 1 割伸びることは、1 割のエネルギーを節約したことになる。電気自動車だけでなく、ハイブリッド車、あるいは、同様な駆動系を有する鉄道などにも同様なことが言える。したがって、更なる高電力密度のチョップパを開発することは、省エネの視点からも重要である。

試作機として開発した 40kW/l の装置をさらに小型化するには、半導体デバイスのパッケージングから見直す必要がある。それには、多種多様な研究開発が必要となる。このプロジェクトの半分を受け持った実装の研究がこれに対応する。

一方で、現存するパッケージングでも車載用のための高電力密度化は地球温暖化防止の意味でも多大な効果がある。それには、電気電子回路だけでなく、熱設計、磁気回路設計、配線、構造設計などの総合的な融合分野の学問としての進展が必須となる。

# Design of High Efficiency and High Power Density DC-DC Converter

Ing. M. Pavlovsky PhD.

## 1. Introduction

Many power electronic applications require power converters with high efficiencies and high power densities. The main goal of the APEP is to investigate the feasibility of improving the efficiency of an electric vehicle drive train as a system while the impact on the size and weight of the vehicle should be kept low in the same time. This report concerns the work regarding the design of the DC-DC converter which is placed between the batter and the motor drive as shown in Figure 1.

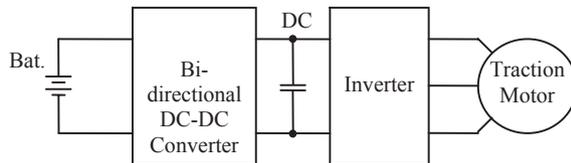


Figure 1. Block diagram of a vehicle drive system

Considerable efforts are being made by the scientific community to reach the efficiency and power density goals and there have been substantial improvements reported in recent years, for example in [1] and [2]. The design presented in [1] reaches power density in excess of 27 kW/l and its efficiency peaks at approximately 98 %. On the other hand, the design presented in [2] reaches efficiencies higher than 99 % but the power density is rather low due to a low operating frequency. The presented results are remarkable; however, reaching ultra high efficiencies, in 99 % region, and very high power densities in the same time presents a major challenge. In APEP, we work on improving the efficiency as well as the power density of the DC-DC converter in the same time. The design is based on an improved SAZZ topology which showed a potential of reaching high efficiencies. In the same time, great care is given to a careful spatial converter design in order to reaching high power densities. This report considers preliminary results of the converter design as well as of the initial experiments. As shown, the presented approach is capable of reaching efficiencies in the 99 % region and in the same time the converter power density is over 40 kW/litre.

## 2. Improved SAZZ Topology

SAZZ (Snubber Assisted Zero Voltage and Zero Current Transition) topology was proposed in [3] in its one directional version with the goal of reducing switching losses in dc chopper circuits and hence allowing for a high frequency operation. The loss reduction is obtained by combining a conventional dc chopper topology with a snubber placed across the main switch and an auxiliary circuit discharging the snubber

prior to the next switching cycle. Details on the Original SAZZ topology can be found in many previous publications for example in [3] and [5].

Bi-directional buck/boost SAZZ topology was proposed in [4] in order to enable the fully bi-directional buck/boost operation with the soft switching properties of the SAZZ topology. It operates on the same operating principles as the basic SAZZ circuit where the mode of operation is preselected by a pair of semiconductor switches.

As shown in published papers, SAZZ topology improved the DC-DC converter performance with respect to the hard switching counterparts. The converter prototypes reached efficiencies of 97 % in 8 kW, 100 kHz uni-directional boost SAZZ converter based on IGBTs [3], 95.4 % in 8 kW, 200 kHz forward boost/reverse buck bi-directional SAZZ converter based on MOSFETs [5] and 96.5 % in 25 kW, 50 kHz fully bi-directional SAZZ converter based on IGBTs [4]. However, the investigation also revealed the main functional limitations of SAZZ topology being the reverse recovery of the rectifying diodes and the output capacitance of the auxiliary switch. For this reason the possibility of further improvements of SAZZ topology were investigated in the course of APEP.

The new improved SAZZ topology was proposed in order to mitigate the above mentioned issues and hence improve the performance and the efficiency further. The improved topology addresses the main issues by following countermeasures:

- Modified snubber configurations – extending soft switching area to wider voltage range
- Saturable inductors in snubber circuit – suppression of MOSFET output capacitance effects
- Synchronous rectification – reduction of reverse recovery and conduction losses in diodes

The circuit diagram of the improved bi-directional buck/boost SAZZ topology is shown in Figure 2.

## 3. Converter Design Concept

Converter designs with ultra high efficiency and power density in the same time require considerable attention to design details in order not to waste a single watt of energy or  $\text{cm}^3$  of space. This is due to the fact that such designs approach the boundary of what is possible using the available technology and every wasted watt or  $\text{cm}^3$  contribute substantially to the final efficiency and power density figures.

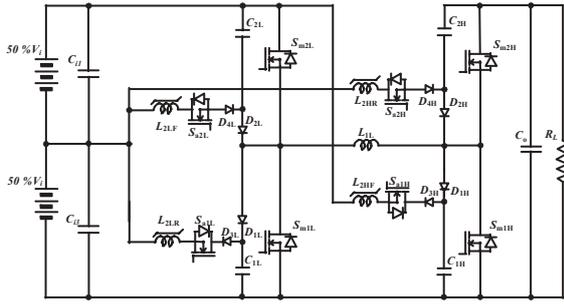


Figure 2: Circuit diagram of improved bi-directional buck/boost topology

The design used in APEP is based on the design concept published in [5] which reached the efficiency of 95.4 % and power density over 25 kW/litre operating at 200 kHz [5]. In order to improve on these results, the presented design concept was critically evaluated and updated with respect to the new design specifications. One of the new design requirements is that the converter must allow full bi-directional buck/boost operation and therefore a bi-directional SAZZ topology as introduced above must be used. In the same time, the new design requires rather wide operating voltage ranges in order to effectively control the power flow at acceleration and deceleration of an electric vehicle where it would be applied. The operating voltage ranges are 300 V – 420 V at the input and 50 V – 420 V at the output. The required power output increases linearly with the output voltage due to a constant torque operation of the traction motors. Another important design aspect is the frequency reduction from 200 kHz to 50 kHz in order to reduce the switching losses. This together with a lower  $R_{DSon}$  of paralleled CoolMOS devices should yield a substantial improvement of the efficiency and hence the efficiency approaching 99 %. In order to compensate for the reduced frequency, the magnetic material of the main inductor core was changed from ferrite to an amorphous metal. The higher saturation flux density allows for higher fluxes in the core and hence the inductor size is not impacted much by the reduced frequency. Other aspects implemented in the design concept are redesign of various converter sub-modules and of the converter layout. The main criterion for these redesigns was a good match between the various component parts and rejection of the air from the converter structure.

A 3D exploded view of the single phase module is shown in Figure 3a. The structural layout takes into account the current flow through the structure in order to simplify the module interconnects. Minimising empty spaces inside of the structure as well as good heat removal from components were other design priorities. The single phase module is mostly symmetrical with respect to input and output. Therefore, two modules can fit together with the

inductor of one module filling the gap in the other module. The complete structure with four modules designed for 60 kW output power has a brick like shape with only power terminals and liquid cooling fittings protruding outside the external contour as shown in Figure 3b. The external dimensions are as small as 175 mm x 105 mm x 80 mm which yields the overall power density higher than 40 kW/litre. Practical realisation of the single module converter prototype is shown in Figure 4. In the shown figure, the main and auxiliary inductors are not included.

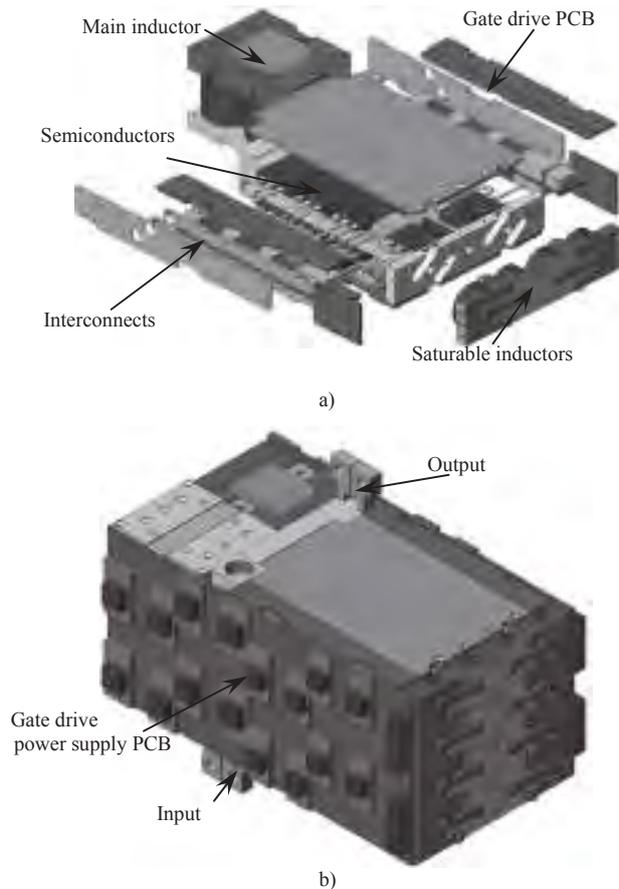


Figure 3: 3D model of converter prototype; a) single phase exploded view, b) complete converter structure

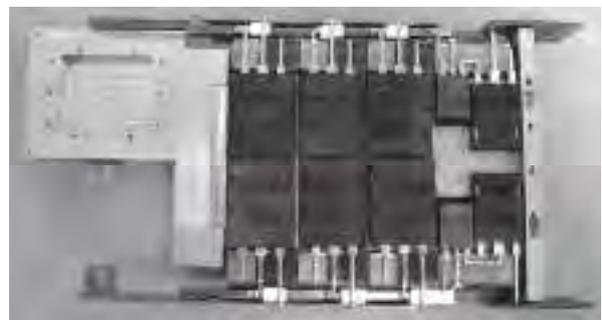


Figure 4: Single module converter prototype

## 4. Experimental Results

### 4.1. Single Converter Module

Two single module converter prototypes as shown in Figure 5 were constructed and tested in the laboratory. These modules were experimentally tested in various operating modes in order to verify the prototype functionality as well as performance. The primary concerns during the experiments were the required maximal power performance at selected input to output conversion ratios and the related efficiency curves. The operating range with respect to input/output voltage conversion ratio in forward as well reverse direction is depicted in Figure 6 and Figure 7 respectively. The figures also list efficiencies measured at the maximal power output for the specific tested operating point for the single converter module. An Example of operating waveforms of some of the components are depicted in Figure 8 and Figure 9 for the forward boost 300 V – 420 V operating mode for the converter operating at 15 kW output power. As can be seen, all main waveforms are clean without excessive noise or oscillations. Some noise is visible on the gate signals but it is within the reasonable limits and the converter operating functions remain without disturbance. A part of the noise measured on of the gate signals can be due to poor voltage probe performance as observed during some experiments.



Figure 5: Prototype of single converter module

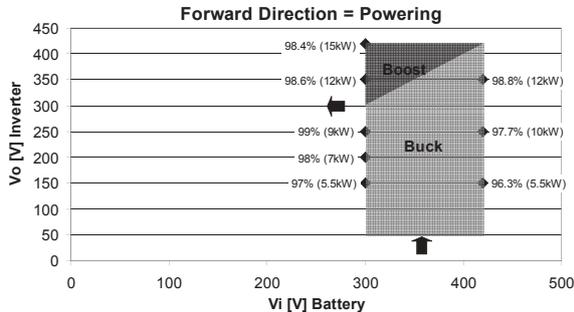


Figure 6: Converter operating region in forward direction with measured efficiencies at maximal power output for single module operating with 70 °C coolant

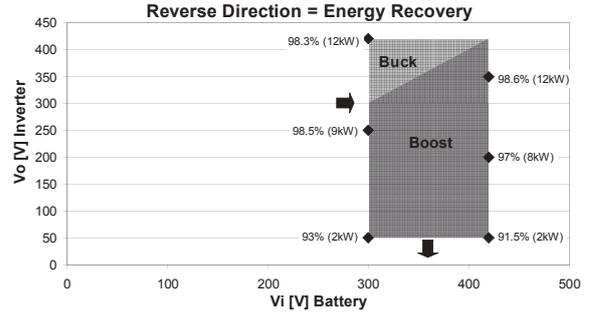


Figure 7: Converter operating region in reverse direction with measured efficiencies at maximal power output for single module operating with 70 °C coolant

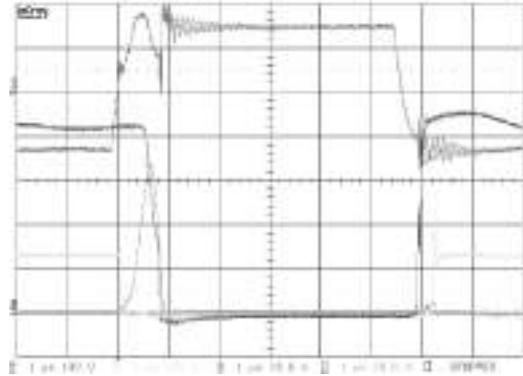


Figure 8: Waveforms measured on single module converter prototype in forward boost mode 300 V – 420 V operating at 15 kW output power; Ch1 – Aux. switch  $S_{a1H}$  voltage 100 V/div, Ch2 – Main switch  $S_{m1H}$  voltage 100 V/div, Ch3 – Aux. switch  $S_{a1H}$  gate voltage 10 V/div, Ch4 – Aux. switch  $S_{a1H}$  current 20 A/div

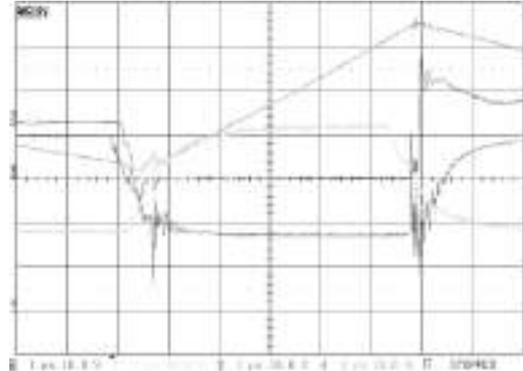


Figure 9: Waveforms measured on single module converter prototype in forward boost mode 300 V – 420 V operating at 15 kW output power; Ch1 – Main switch  $S_{m1H}$  gate voltage 10 V/div, Ch2 – Synchronous rectifier  $S_{m2H}$  1/3 current 10 A/div, Ch3 – Synchronous rectifier  $S_{m2H}$  gate voltage 10 V/div, Ch4 – Main inductor  $L_1$  current 10 A/div

The complete efficiency curves are shown in Figure 10 to Figure 15 for all directions of operation and various voltage conversion ratios. As can be seen the efficiencies are very high and 99 % efficiency can be reached in all directions of operation all the way up to the full output power. The efficiency is reduced with the conversion ratio increasing. However, it remains above 97 % for conversion ratio less than 1:2 and above 96 % for the ratios less than 1:3. The efficiency drops

further below 96 % for very large conversion ratios into the 94 % region and 92 % region for the ratios 1:6 and 1:8 respectively. This efficiency reduction is due to poor utilisation of semiconductor switches and high current levels at the low output power.

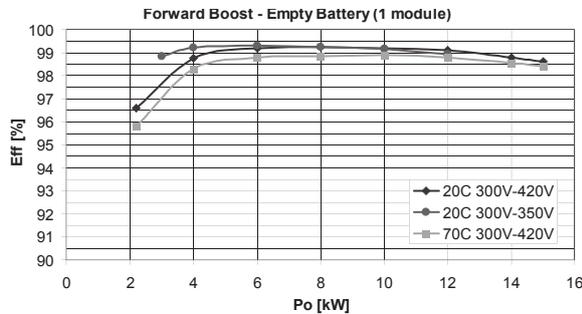


Figure 10: Efficiency curves for single converter module operating in forward boost mode; empty battery; cold/hot coolant

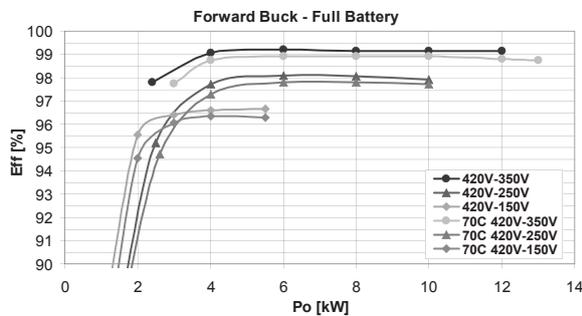


Figure 11: Efficiency curves for single converter module operating in forward buck mode; full battery; cold/hot coolant

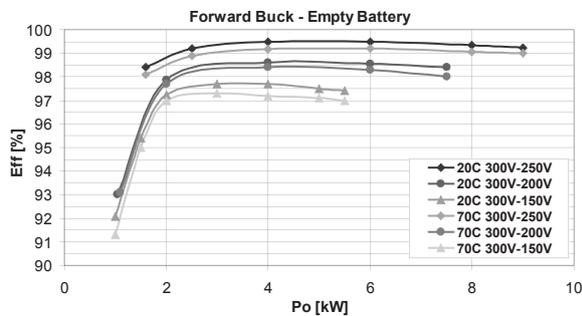


Figure 12: Efficiency curves for single converter module operating in forward buck mode; empty battery; cold/hot coolant

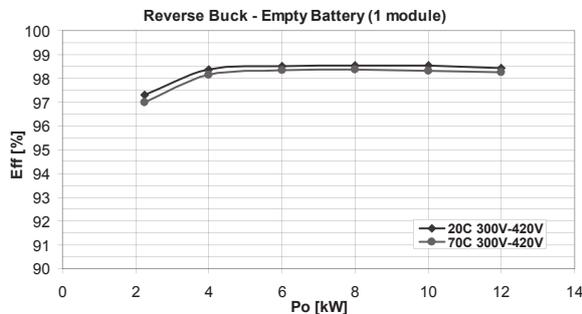


Figure 13: Efficiency curves for single converter module operating in reverse buck mode; empty battery; cold/hot coolant

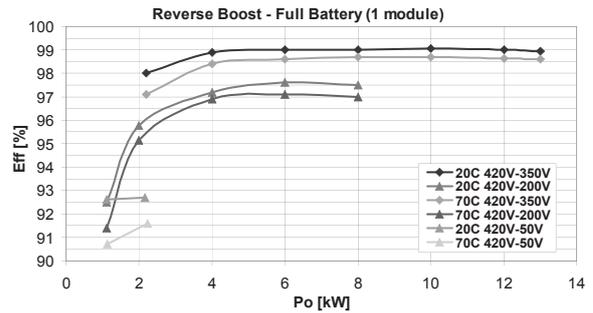


Figure 14: Efficiency curves for single converter module operating in reverse boost mode; full battery; cold/hot coolant

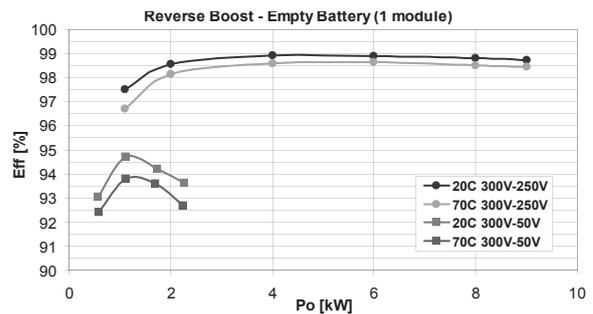


Figure 15: Efficiency curves for single converter module operating in reverse boost mode; empty battery; cold/hot coolant

## 5. Two Parallel Converter Modules

Single converter modules were designed so that they fit seamlessly into a cube like converter structure. This is illustrated in Figure 16 for two single modules. As shown, there is little empty space left inside the structure. The whole 30 kW converter in this case would be only 40 mm thick which results in the power density of 40 kW/litre.



Figure 16: Integration of two converter modules into single converter structure

The two single converter modules were tested individually as well as together in parallel operation. The performance in parallel operation is demonstrated by the efficiency curves depicted in Figure 17 for the forward boost operating mode. As can be seen the measured efficiencies are even slightly higher than for the single module which is due to the loss reduction in the input and output filters. The efficiency was also in this case in the 99 % region all the way up to the

maximal tested power of 25 kW. The test up to the full power of 30 kW was not possible due to some slight differences between the two converter modules which resulted in a power imbalance. This could be solved by modifying the control signals for the individual modules which was not possible at the time of the experiment. The measured waveforms on both converter modules are shown in Figure 18. The power imbalance is clearly visible on the difference between the main inductor currents of the two power modules.

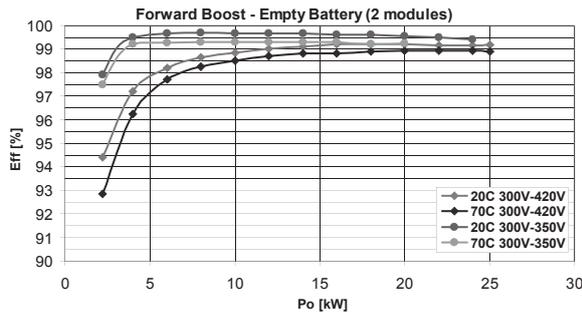


Figure 17: Efficiency curves for two modules operating in parallel; forward boost mode; empty battery; cold/hot coolant

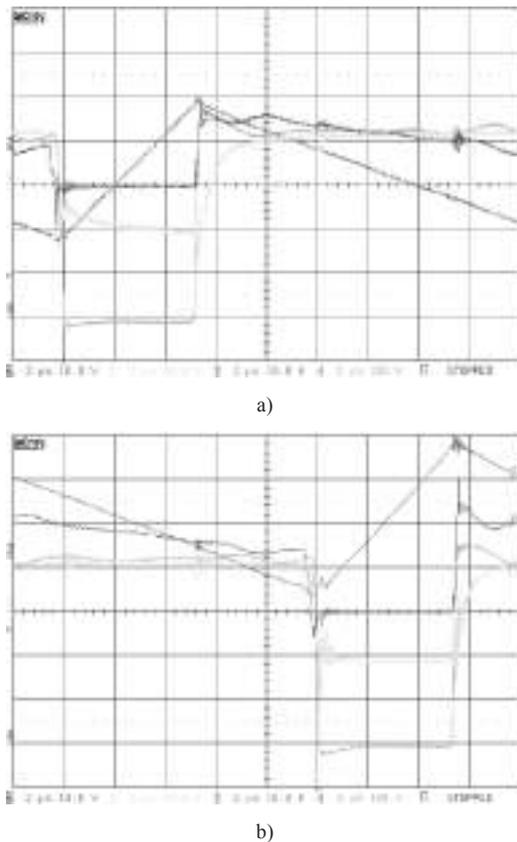


Figure 18: Waveforms measured on two parallel converter modules; a) converter 1, b) converter 2; forward boost mode 300 V - 420 V operating at 25 kW output power; Ch1 - Synchronous rectifier  $S_{m2H}$  gate voltage 10 V/div, Ch2 - Synchronous rectifier  $S_{m2H}$  1/3 current 10 A/div, Ch3 - Main inductor  $L_1$  current 10 A/div, Ch4 - Main switch  $S_{m1H}$  voltage 100 V/div

## 6. Conclusions

As discussed in this report, the main goal of APEP is to investigate the possibility of designing automotive DC-DC converters with high efficiency and high power density and this was pursued throughout the whole design process briefly presented here.

As shown, efficiencies in the 99 % range are achievable in a broad load range for various operating modes and input to output voltage ratios. This is very beneficial for automotive applications where a dc-dc converter is used to improve the power flow from a battery to an inverter. In the same time, the power density of designed prototypes is as high as 40 kW/litre. The high power density translates into a very low space requirement for placing the dc-dc converter in the vehicle.

The construction and testing of the converter prototypes revealed also several issues of the present converter structure. The issues are for example: small tolerances on some component dimensions, insufficient pressure from the MOSFET pressure plate, difficulty to seal the heatsinks and liquid distribution pieces and too much flexibility in Teflon plastic pressure plates. This and other issues should be resolved in the design of the next converter prototype. Simplifying the converter structure from the assembly complexity point of view should be also considered during the design revision.

## 7. References

- [1] S. Waffler, J. W. Kolar, "A novel low-loss modulation strategy for high-power bi-directional buck+boost converters", *Proceedings of International Conference on Power Electronics, ICPE 2007*, Oct. 2007, pp.: 889-894
- [2] Y. Wensong; L. Jih-Sheng, "Ultra high efficiency bidirectional dc-dc converter with multi-frequency pulse width modulation", *Proceedings of Applied Power Electronics Conference 2008, APEC 2008*, Feb. 2008, pp.: 1079-1084
- [3] Y. Tsuruta, Y. Ito and A. Kawamura, "A High Frequency, High Efficiency and High Power Chopper SAZZ and the Test Evaluation at 100kHz-8kW", *Proceeding s of Power Electronics Specialists Conference, PESC'06*, Jun 2006
- [4] Y. Tsuruta, Y. Ito, M. Bando and A. Kawamura, "Proposal of Bilateral Buck and Boost Chopper Circuit SAZZ-1 for EV Drive Application and the Test Evaluation at 25kW", *Proceedings of International Conference on Industrial Technology, ICIT-2006*, pp.1504-1509, Dec. 2006
- [5] M. Pavlovsky, Y. Tsuruta, A. Kawamura, "Pursuing high power-density and high efficiency in DC-DC converters for automotive

- application”, *Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, PESC 2008*, Jun 2008, pp.: 4142 – 4148
- [6] M. Pavlovsky, Y. Tsuruta, A. Kawamura, “Bi-directional Buck-Boost Dc-Dc Converter with Ultra High Efficiency Based on Improvement SAZZ Topology”, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2009)
- [7] M. Pavlovsky, Y. Tsuruta, A. Kawamura, “Fully Bi-directional Dc-Dc Converter for EV Power Train with Power Density of 40kW/l”, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2009)

# エコ未来型電気自動車用小型軽量高効率 SAZZ チョッパ<sup>®</sup> の開発

弦田 幸憲

## 1. はじめに

近年の地球環境問題や新省エネの視点から、高効率・高出力を目的とした車載用チョッパの研究が課題となっている。本研究プロジェクトでは、電費世界一のエコカーの実現に向けて、直列チョッパ方式 EV 駆動システムに適用する直列チョッパ装置としてスナバ補助零電圧零電流方式 4 象限双方向大電力チョッパ回路(Snubber Assisted Zero Voltage and Zero Current Transition chopper : 以下 SAZZ-1 と略称)を提案し、試作実験検証を行ってきた(50kHz, 25kW の定格, 効率 96%~97%)<sup>(1)</sup>。

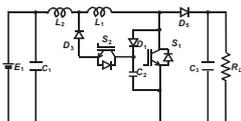


図 1 基本昇圧 SAZZ チョッパ。

そこで、その結果を踏まえ、平成 20 年度から、さらなる高効率化を目指し、常用域全域で 98%以上の効率向上を目標に、SAZZ 基本昇圧チョッパ(図 1)による基礎実験を行なった。その



図 2 30kW SAZZ-1 チョッパ試作 1 号機

その結果、効率 98.96% の良好な結果が得られた<sup>(2)</sup>。その結果を踏まえ、図 2 に外観を示す 30kW 4 象限双方向チョッパ SAZZ-1 試作 1 号機を試作し、試験検証を実施した結果、図 3 に示すように、常用域全域で、ほぼ目標値である 98%以上の高効率運転が可能であることが、検証された<sup>(3)(4)</sup>。

平成 21 年度は、この成果を踏まえ、車載用として小型化検討や力行・回生制御、先行時間可変制御、電力潮流制御を搭載した 30kW 車載用 4 象限チョッパ SAZZ-1 の設計製作を行ってきた。

平成 22 年度は、完成した 30kW 車載用 4 象限チョッパ SAZZ-1(2 号機)を用いて、車載制御特性試験として、力行・回生電力潮流制御効果について主に EV 駆動ベンチ試験を実施して検証確認した。

## 2. 研究の目的

電費世界一のエコカーの実現に向けて、小型、高効率、高出力の双方向昇降圧形コンバータのための回路方式として提案しているスナバ補助零電圧零電流方式 4 象限双方向チョッパ SAZZ-1 を試作し、小型電気自動車用として問題なく動作し高い効率を得られることを確認することを目的とする。

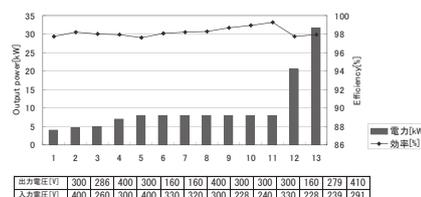


図 3 30kW SAZZ-1 チョッパ試作 1 号機の検証試験結果。

## 3. 30kW 車載用 4 象限双方向チョッパ(2 号機)の開発

### 3. 1 直列チョッパ EV 駆動システム

今回開発した車載用 SAZZ-1 チョッパ(2 号機)を適用する直列チョッパ方式駆動システムを図 4 に、車載時のフロントフードの位置を図 5 に、主回路構成を図 6 に示す。

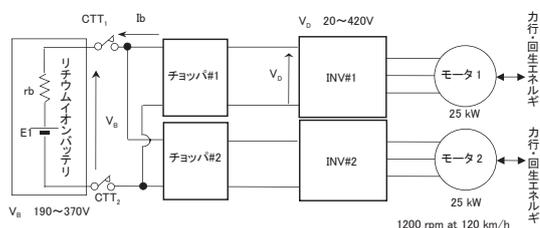


図 4 駆動システム(SAZZ-1 直列チョッパ方式)。



図 5 SAZZ-1(2 号機)車載位置。

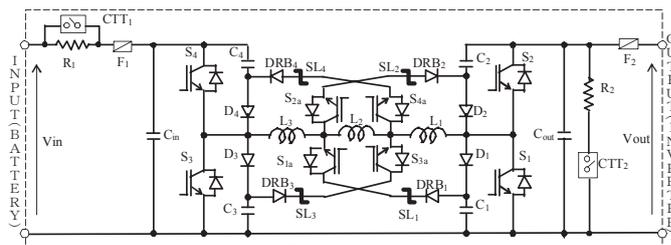


図 6 30kW SAZZ-1 チョッパ主回路構成。

### 3. 2 30kW 車載用 4 象限双方向チョップ SAZZ-1

#### (1)出力定格および仕様

- ①定格出力(短時間) 30 kW(400V, 20sec)②定格出力(連続) 8kW(420V, 連続)
- ③スイッチング周波数 25kHz
- ④効率 常用域において 98%以上
- ⑤制御 上位 EV 駆動システム制御からの基準指令に基づき, 0~30kW の電力を双方向に安定に変換制御すること。
- ⑥外形寸法 300W×300D×150H 以下
- ⑦チョップ質量 23kg 未満
- ⑧周囲温度 -30~+75°C
- ⑨冷却方式 水冷
- ⑩耐振動・衝撃 車載に耐えること

#### (2)小型・軽量化

表 1 に定格諸元, 図 7 に装置外観を示す。以下, 試作 1 号機との比較を示す。

- ①水冷による小型・軽量化 外形-40%, 質量-20%
- ②基板改版と機構検討による集積化 外形-10%  
(a)表示パネル撤去, (b)入出力接続最適化
- ③バスバーのアルミ化
- ④小型・軽量化  
容積/1号機: 31L → 2号機: 14L  
質量/1号機: 30kg → 2号機: 24kg  
電力密度/1号機: 0.97kW/l → 2号機: 2.2kW/l

表 1 定格諸元.

Input voltage	Vin=300V (190~370V)
Output voltage	Vout=400V (70~420V)
Output power	30kW-20sec, 8kW continuous
Switching frequency	25kHz
Circuit method	SAZZ
Efficiency	Over 98% over whole practical region
Control	Pulse width control
Size	Under 300W×300D×150H mm
Weight	Under 23 kg
Cooling	Water-cool
Use	Onboard use

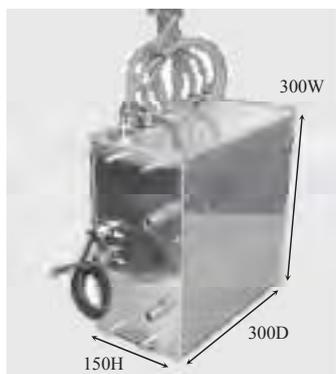


図 7 SAZZ1 (2号機) 装置外観.

### 3. 3 車載のためのデジタル制御の開発

SAZZ-1(2号機)は, 下記の制御機能搭載している。

- 1) 力行・回生制御: 双方向昇降圧チョップは, 出力電圧基準指令に基づき, 順方向に出力電圧を可変させる PAM 制御し連続運転可能なこと。また, 回生指令に基づき, 逆方向にモータの回生エネルギーをバッテリーへ回生制御し連続運転可能なこと。
- 2) 先行時間可変制御: 双方向昇降圧チョップは, 補助 SW 先行時間可変制御により, ソフトスイッチング動作による高効率連続運転が可能なこと。
- 3) 電力潮流制御: 車速(モータの回転数)やバッテリー電圧, 力行・回生の運転状態に応じて, 電力潮流制御を行い, ソフトスイッチングによる力行・回生高効率連続運転が可能なこと。
- 4) 自動運転制御: 運転指令が与えられれば, 車速(モータの回転数)やバッテリー電圧, 力行・回生の運転状態に応じて, インバータへの直流電圧(チョップの出力電圧)を一定または, 線形に増加させる PAM 制御による自動運転が可能なこと。
- 5) 起動・停止制御: チョップ内部に初充電回路・放電回路を有し, 起動・停止が可能なこと。

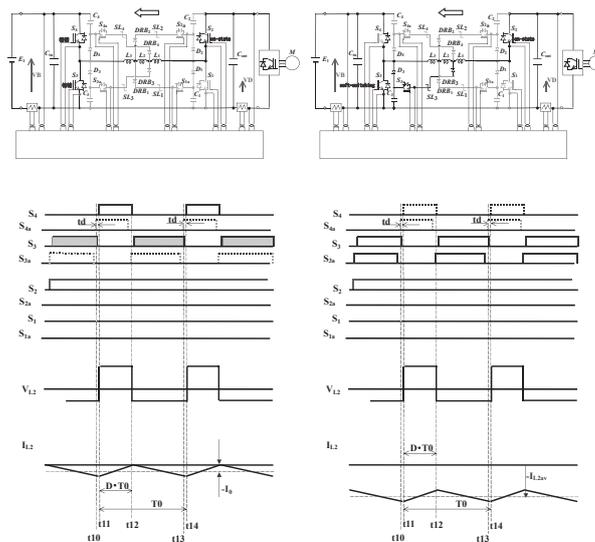


図 8 電力潮流制御の原理.

図 8 に, 回生(相補制御)→回生(ソフトスイッチング)に制御が切り替わる電力潮流制御を示す。直流電流が負になり, 直流電流の負の設定値 $-I_0$ に達した場合, 補助スイッチ S3a の動作は停止し, 主スイッチ S4 と主スイッチ S3 の相補制御が保持される。ソフトスイッチングは停止。

次に, 回生パワーが増加し, 直流電流が切替設定値 $-I_0$ より負になった( $-I_0 > I_{L2}$ )場合, ゲート信号は, 主スイッチ S3 と補助スイッチ S3a に図示のように遅れ時間  $td$  を保持した状態で供給され, SAZZ1 チョップはソフトスイッチングで逆方向昇圧の高効率運転を行なう。

#### 4. 実験と結果

図9に電力潮流制御システムのブロック図を示す。4象限双方向チョップSAZZ-1ではEVを駆動するために、車載のためのデジタル制御を搭載している。SAZZ-1は上位EV駆動システム制御からの基準指令に基づき、0~30kWの電力を双方向に安定に変換制御できる。

SAZZ-1チョップの試作1号機(車載デジタル制御機能なし)による効率測定結果を図10に示す。図10は、主に、8kW以下の実際の運転条件に合わせた軽負荷領域の実測効率を入出力電圧条件を変えて、測定したものである。2kW以上の軽負荷領域において、98%以上の高効率に達している。8kWの連続定格動作でも、99%に近いピーク効率に達している。

車載用SAZZ-1の力行・回生制御、電力潮流制御、起動・停止制御のEV駆動ベンチ試験結果を図11と図12に示す。

図11は、車載用SAZZ-1を起動した際の起動デジタル制御特性を検証した結果である。今回制御開発のポイントは、提案しているソフトスイッチング方式SAZZによる連続運転を車載チョップにおいて実現することであった。起動もデジタル制御系のゲイン調整により、スムーズな起動特性を確認した。

図12は、力行から回生への電力潮流デジタル制御特性の検証試験結果を示す。力行から回生および回生から力行へのスムーズな電力潮流制御も提案したSAZZ方式による電力潮流制御のゲイン調整により、電力を双方向に安定に変換制御できることを確認した。

#### 5. 考察及び今後の展望

車載用4象限双方向チョップSAZZ-1を開発完了し、EV駆動ベンチ試験装置において、インバータモータヤリチウムバッテリーとの組み合わせ試験を行い、搭載した車載制御システムの安定な制御特性を確認した。

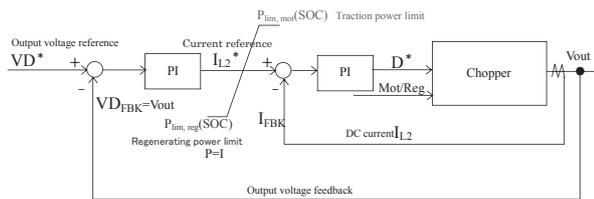


図9 電力潮流制御システムのブロック図。

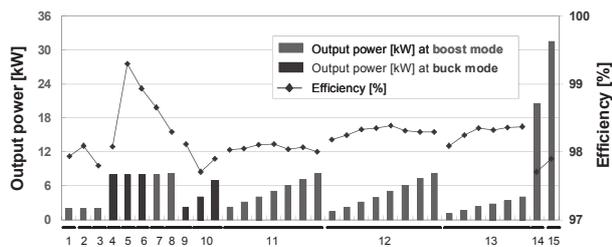


図10 SAZZ-1チョップ(1号機)の軽負荷領域における効率測定結果。

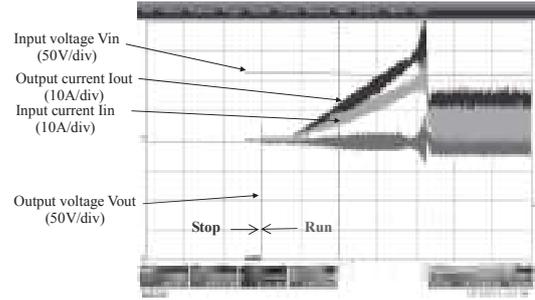


図11 起動制御試験

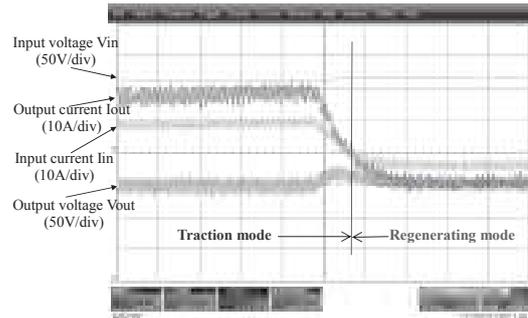


図12 電力潮流制御試験

提案したSAZZ方式による車載用4象限双方向チョップの実現により、今後は1象限、2象限チョップを含めた多くの用途の高効率・高出力・高電力密度コンバータへ応用できることが期待できる。

#### 【参考文献】

1. Y. Tsuruta, Y. Ito and A. Kawamura : "Snubber-Assisted Zero-Voltage and Zero-Current Transition Bilateral Buck and Boost Chopper for EV Drive Application and Test Evaluation at 25 kW", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.56, NO.1, pp.4-11, Jan. (2009)
2. 弦田幸憲・パヴロフスキーマーチン・河村篤男 : 「SAZZチョップ高効率化のための損失評価と低減」, 平成21年電気学会全国大会講演論文集[4], 4-033, pp.58-59(2009)
3. 弦田幸憲・パヴロフスキーマーチン・河村篤男 : 「中電力応用SAZZチョップの高効率化のための改良」, 平成21年産業応用部門大会講演論文集, vol.I, pp.675-678 (2009)
4. Y. Tsuruta, M. Pavlovsky, and A. Kawamura, "Improvement for Very High Efficiency Chopper Circuit SAZZ", in Proc. of 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2009), DS1.1, 0138, pp. 1-8, (2009)



# 電気自動車用直列チョップパ駆動方式の 総合性能に関する実験データ解析

筒木 壮太, 渡辺 祐樹

## 1. はじめに

電気自動車の駆動方式は、直流電圧をインバータで三相交流へ変換するPWM方式が一般的であるが、バッテリー電圧が変動しても希望する性能を保障しようとする回路損失が大きくなるという欠点がある。回路損失は、燃費や一充電走行距離へ悪影響を与えるため、出来るだけ少なく抑える必要がある。本稿では、双方向昇降圧チョップパを用いた高効率な駆動方式についてモータテストベンチでの模擬走行実験を行ったので、その解析を行う。

## 2. モータベンチにおける走行実験

### 2.1 実験装置の概要

図1に実験装置の概略図を示す。

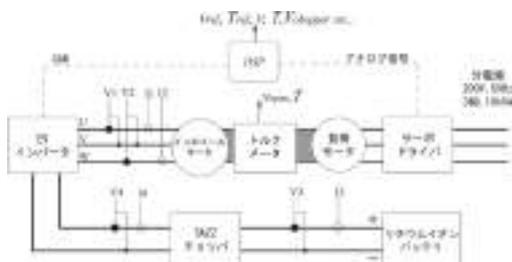


図1. 実験装置の概略図

EV モータ、インバータ、SAZZ チョップパは DSP からの CAN 通信、負荷モータはアナログ信号により各指令を入力している。この装置では負荷モータを除いて実車で用いる機器を使用している。よってこのテストベンチは実車の片輪の走行状態を再現している。

### 2.2 実験概要

従来方式と直列チョップパPWM方式に関して1015モードおよびJC08モードの走行試験を行なった。試験では各方式において満充電状態から各モードを繰り返し走り続け、止まるまでの走行距離を測定した。ただしモータテストベンチではSAZZチョップパ、モータ、インバータはそれぞれ1つずつであるため走行負荷も半分となっている。システムはバッテリー電圧が210Vに達した時点で止まるように設定してある。

### 2.3 実験結果

以下に例として1015モードにおける直列チョップパ方式でのバッテリー電圧の変化およびトルク結果を示す。

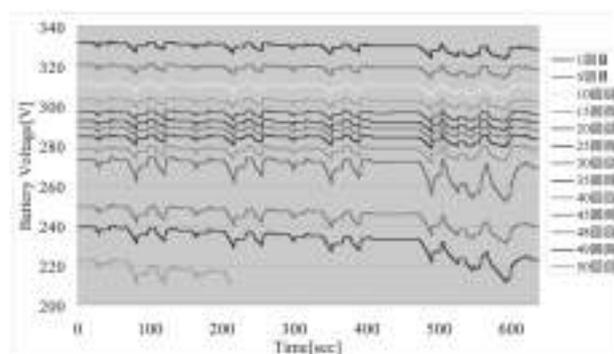


図2. バッテリー電圧の変化

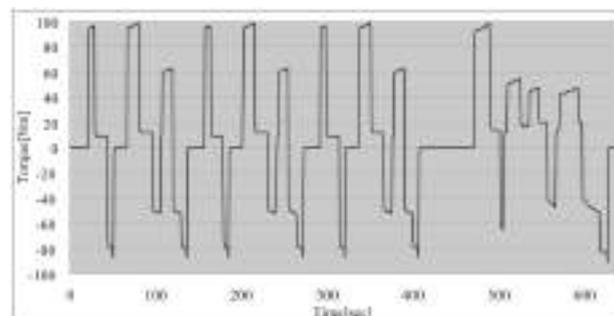


図3. トルク結果

バッテリー電圧はサイクルを重ねるごとに低下していき、210Vに達した時点で停止していることが確認できる。また、速度に関しても正確にサイクルを再現していることが確認できた。

### 2.4 全負荷での走行試験

以上までの実験では前述の通り、片輪を再現していることから負荷トルクは実際の半分であった。しかし、実車ではその倍の負荷がバッテリーにかかるため電圧変動が大きくなり、ベンチでの試験よりも早く閾値に達することが考えられる。そこでその程度を確認するため、モータベンチにおいて負荷を2倍にして実験を行なった。ただしここでは、電気ブレーキとメカブレーキを併用した運転を想定している。以下にバッテリー電圧およびトルク結果を示す。

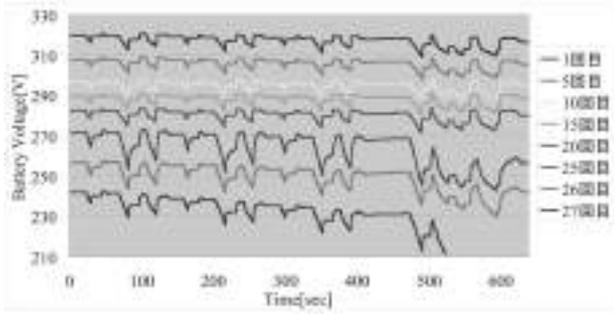


図 4. バッテリー電圧の変化

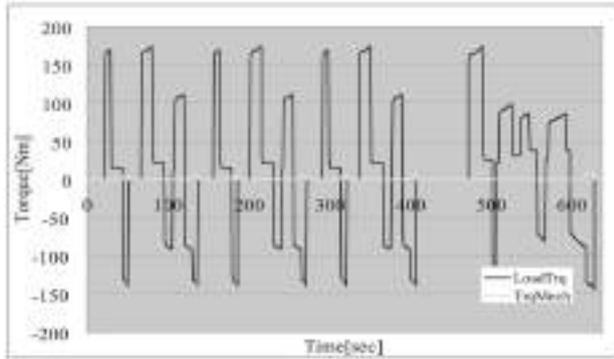


図 5. トルク結果

図 5 より、トルクが 200Nm 以下ではほぼ完全回生が行えることが確認できた。

### 2. 5 バッテリー電圧と最高速度の関係

速度が上がっていくとモータには大きな逆起電力が生じ、この電圧がバッテリー電圧を超えると制御が行えなくなる。この対策として従来方式では弱め界磁制御が用いられているが、この制御にも限界があり一定の電圧よりバッテリー電圧が下がると最高速度が仕様を満たせなくなってしまう。一方直列チョップ方式では、バッテリー電圧が低下してもチョップで昇圧を行なうため、最後まで仕様を満たしつつ駆動することができる。このバッテリー電圧と最高速度の関係を以下に示す。

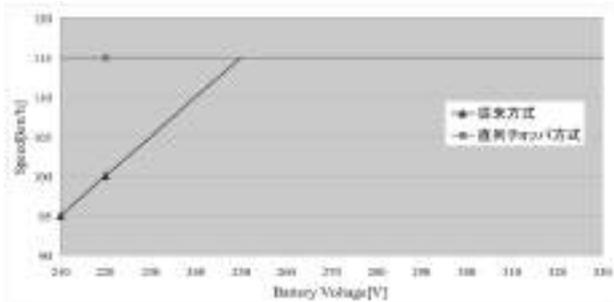


図 6. バッテリー電圧と最高速度の関係

図 6 より、従来方式では 250V より電圧が下がると最高速度が下がっていくことが確認できた。よって従来方式では安全に走行するためにシステムを停止させる閾値を 250V に設定する必要があることがわかる。

## 2. 6 結果

表 1 に実験結果をまとめる。また表 2 に日本の自動車メーカー各社及び大学で開発された電気自動車の性能を示す。

表 1. 実験結果まとめ

条件	1015 モード				JC08 モード			
	(1180kg, 全負荷)		(2700kg, 全負荷)		(1180kg, 全負荷)		(2700kg, 全負荷)	
	有	無	有	無	有	無	有	無
往復走行エネルギー [kWh]	5.53	5.55	5.97	7.41	5.40	5.39	5.97	5.97
走行距離 (制限 210V)	102.4	105.4	123.0	125.4	125.7	101.2	101.3	101.3
走行距離 (制限 250V)	-	97.2	-	114.5	-	-	94.1	94.1
燃費 (制限 230V)	18.5	19.05	22.6	23.1	22.6	18.1	18.6	18.6
燃費 (制限 250V)	-	17.5	-	21.0	-	-	19.1	19.1
燃費 (制限 230V)	14.8	15.2	15.9	16.2	15.9	14.3	14.4	14.4
燃費 (制限 250V)	-	14.0	-	16.8	-	-	18.1	18.1

※ 燃費の単位は km/kWh、走行距離は km、燃費は km/kWh、燃費は km/kWh、燃費は km/kWh

表 2. 各社 EV との比較

車種	車重 [ton]	バッテリー容量 [kWh]	一充電走行距離 [km]	燃費 [km/kWh]	燃費 [(km/kWh)・ton]
KAST-EV 予備機	0.8	5.5	101.2	18.1	14.5
ハイパーミニ	0.8	10.8	115.0	16.6	8.9
iM-EV	1.1	10.0	100.0	16.0	10.6
RAV4EV	1.5	27.3	215.0	8.9	11.5
EV plus	1.0	27.4	210.0	11.5	12.4
リーフ	1.5	24.0	200.0	8.8	12.5
プラグインストラ	1.0	9.0	83.7	9.5	9.5

※ KAST-EV の車重は車台重量含む。

以下に表 1 のまとめを示す。

- ・従来方式に 250V の閾値を設定すると、1015 モードで 5.3%、JC08 モードで 7.3% 新方式の方が良い結果が得られる
- ・全負荷での電圧変動を考慮し、かつ SAZZ を 2 台運転から 1 台運転に切り替えることで 1015 モードで 8.0%、JC08 モードで 10.8% の改善が見込める
- ・他社の EV と比較しても電費世界一を達成できることが見込める

## 3. 考察及び今後の展望

現在 SAZZ の最大出力が 25kWh×2 台と使用範囲よりも大幅に大きく最適化が出来ていない問題がある。ブレーキに関しては、電気とメカの割合を議論する必要がある。また現在は PWM 方式でインバータを制御しているが、PAM 方式により回路損失の低減が見込まれている。今後はこれらの課題をクリアし、更なる燃費の向上を行う予定である。PAM 方式の実装にあたり、現在研究されている切り替え運転に関する研究の進捗状況を報告する。

### 3. 1 PWM 制御と PAM 制御の比較

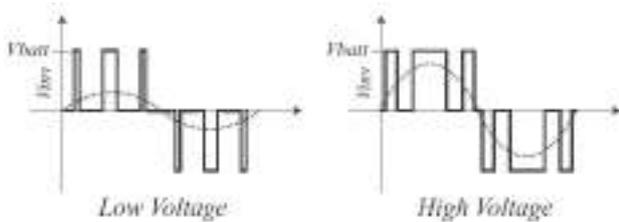


図 7：PWM 制御方式のインバータ出力電圧

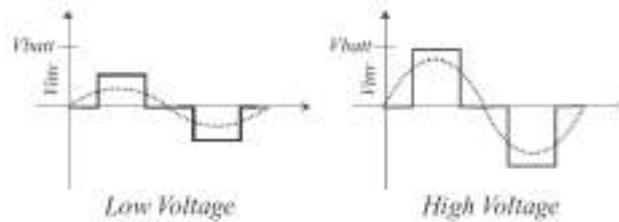


図 8：PAM 制御方式のインバータ出力電圧

図 1, 2 に示すように PWM 制御方式の場合インバータの印加電圧がバッテリーの出力電圧に固定されるのに対し、PAM 制御方式の場合チョップを用いてモータの回転速度に応じてインバータの印加電圧を降圧する。また、PAM 制御方式のほうがインバータのスイッチング周波数が低く、高調波成分も低減できる。

ここで、インバータにおけるスイッチング損失  $P_{sw}$  [W] は以下の式で与えられる。

$$P_{sw} = \frac{V_{inv} \times I_{ave}}{6} \times (\Delta T_{on} + \Delta T_{off}) \times f_{sw}$$

ただし、 $V_{inv}$  [V] はインバータの DC リンク電圧、 $I_{ave}$  [A] はスイッチング素子に流れる平均電流、 $\Delta T_{on}$  [S] はターンオン時間、 $\Delta T_{off}$  [S] はターンオフ時間、 $f_{sw}$  [Hz] はスイッチング周波数である。また、モータの鉄損はヒステリシス損  $p_h$  [W] と渦電流損  $p_e$  [W] からなり、以下のように与えられる。

$$\begin{cases} p_h = \frac{k_h \cdot k_m^2}{S^2} \times \frac{V_m^2}{f^{2-1}} \\ p_e = \frac{k_e \cdot k_m^2}{S^2} \times V_m^2 \end{cases}$$

ただし、 $V_m$  [V] は高調波電圧、 $S$  [m<sup>2</sup>] は鉄心の断面積、 $B$  は材料に依存するスタインメッツの定数である。

すなわち、インバータのスイッチング損失はインバータの DC リンク電圧とスイッチング周波数に比例し、モータの鉄損は高調波電圧が小さいほど低減できるため、PAM 制御方式を用いることにより、PWM 制御方式と比較してスイッチング損失と鉄損を低減できると考えられる。しかし、PAM 制御方式では PWM 制御方式と違い双方向チョップを用いるので、チョップの効率がシステムの効率に影響する。

響する。

### 3. 2 シミュレーション

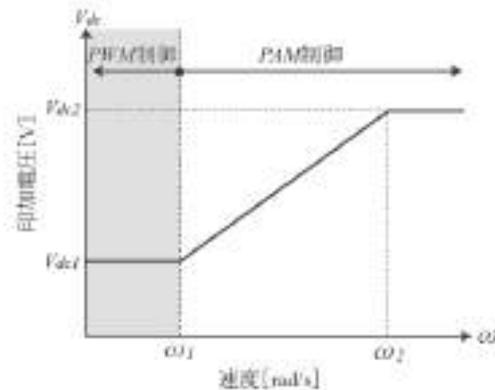


図 9：実車における DC リンク電圧と制御方式の構成

実車における効率試験では図 3 に示すように低速域においては PWM 制御、ある速度を境に高速域では PAM 制御を用いることを想定している。そこで、0[rad/sec]から 100[rad/sec]まで加速させたときに PWM 制御から PAM 制御に切替えたときのシミュレーション結果を次に示す。

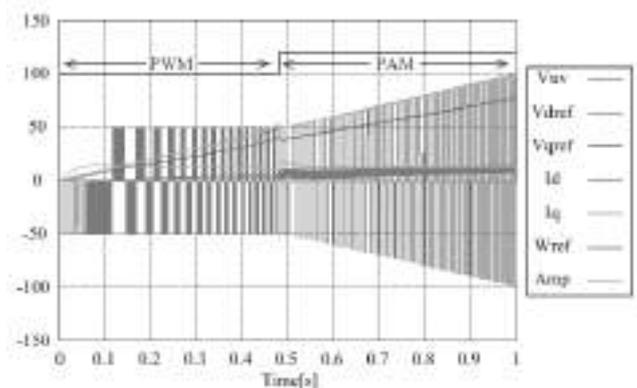


図 10：PWM 制御から PAM 制御への切替え

図 4 より、線間電圧が減圧することなく切替えができてはいるが、 $V_{qref}$  や  $I_q$  が切替えの前後で変化している。これは速度に対して印加電圧が低いため、変調信号がキャリア信号の振幅を上回り、過変調領域に達してしまうことが原因だと考えられる。

### 3. 3 THIPWM 制御方式

速度に対して印加電圧が低いと変調信号がキャリア信号の振幅を上回り、過変調領域に達してしまうため正確な PWM 制御を行うことができない。そこで、等価的に変調信号の振幅を抑えることにより過変調領域に達するのを遅らせ、線形変調領域を延長する方法として、THIPWM(Third-Harmonic Injection Pulse Width Modulation)制御方式を導入した。

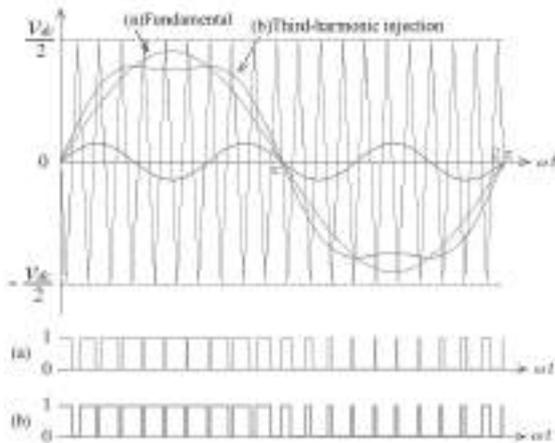


図 11 : PWM 波形および THIPWM 波形とスイッチング素子のゲートロジック信号(線形変調領域)

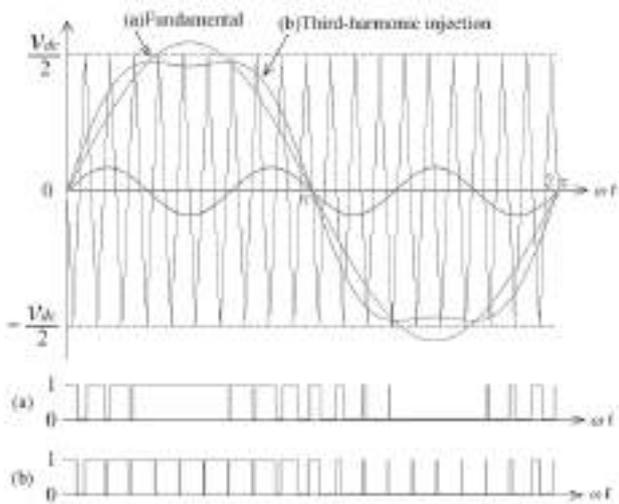


図 12 : PWM 波形および THIPWM 波形とスイッチング素子のゲートロジック信号(過変調領域)

THIPWM 制御方式とは、基本波に基本波の 3 倍の周波数と 1/6 倍の振幅の 3 次高調波を重畳することにより等価的に変調信号の振幅を抑えた PWM 制御である。図 5,6 は線形変調領域と過変調領域における PWM 制御の変調信号と THIPWM 制御の変調信号を表している。図 5 では、どちらの変調信号を用いてもスイッチングできているが、図 6 では、PWM 制御の変調信号の振幅がキャリア信号の振幅を上回っているためスイッチングできていないのに対し、THIPWM 制御の変調信号の振幅はキャリア信号の振幅よりも小さいため、正確なスイッチングができています。このまま振幅が増加すれば THIPWM 制御を用いても過変調領域に達するが、PWM 制御と比較して線形変調領域を延長できたことが分かる。

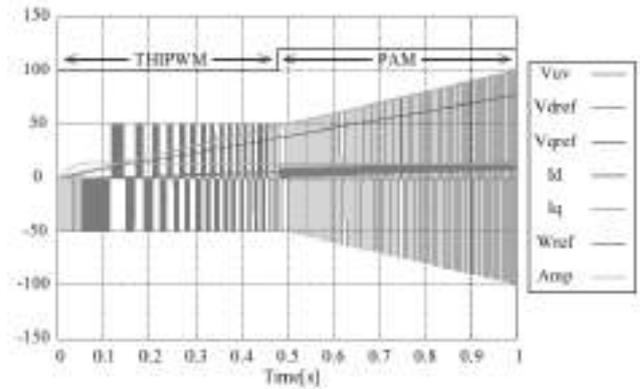


図 13 : PWM 制御から PAM 制御への切替え

そこで、0[rad/sec]から 100[rad/sec]まで加速させたときに THIPWM 制御から PAM 制御に切替えたときのシミュレーション結果を次に示す。

図 4 と図 7 を比較すると、PWM 制御を用いた場合は、過変調領域で切替えているため  $V_{qref}$  や  $I_q$  が変化しているが、THIPWM 制御を用いた場合は線形変調領域で切替えているため、電圧や電流が変化していない。以上より、THIPWM 制御を用いて線形変調領域を延長することにより、電圧や電流が変化することなく PAM 制御へ切替えることができた。

#### 【参考文献】

1. 河村篤男, 弦田幸憲, 稲坂翔:"電動コンピュータビークルの電費の概念の提案と一考察", 電気学会自動車研究会, 2007, 12月, 東京, 電気学会研究会資料 VT-07-13, pp.17-22
2. Sho Inasaka, Yukinori Tsuruta, Atsuo Kawamura: "Discussion on High Efficient DC Power Management for Electric Vehicles", 2008 Korea-Japan Technical Workshop on Semiconductor Power Converter, pp.67-70, 2008
3. 稲坂翔, 河村篤男, 弦田幸憲:"双方向チョップを用いた電気自動車の高効率電力制御に関する一考察", 平成21年電気学会産業応用部門大会講演論文集, R1-15, I667-I670, 2009
4. 稲坂 翔, 河村 篤男, 弦田 幸憲, ジュセッペ グイディ, "電気自動車の総合的な回路効率を向上させるための駆動回路に関する一提案", 2010, 3月, 産業計測制御研究会

# 次世代パワーデバイス実装用封止材料

## 1. 全体計画と遂行方針及び体制

SiC パワーデバイスを見据えた大電流高密度・高耐熱性技術を開発、機電一体型超小型実装の基盤技術を確立することを目的に 2008 年（平成 20 年度）より神奈川科学技術アカデミーのプロジェクトを進めている。本報告は、素子高温動作化と高密度化に対応した封止材料用高耐熱樹脂の研究に関する。全体総括に記載したように封止材料の開発目標は、短期的には 300℃に耐え、長期使用温度として 200℃を有する耐熱性を掲げ、熱伝導率は 5W/mK 以上、熱膨張率は 10ppm/K 以下とした。

高橋昭雄教授が封止材料の設計と開発全般、大山俊幸准教授が高分子材料の設計と合成を担当した。研究補助員として 2008 年度は篠崎裕樹、2009 年度は大西裕一、賀川美香、2010 年度は賀川美香、小林宇志、高岩玲生が参加した。2008 年度に封止材料用高分子材料の設計と合成、2009 年度はさらなる耐熱性の向上を目指したリファイン化とチ化ホウ素（BN）の充填効果を確認した。最終年度である 2010 年は封止材に適用するための課題抽出と改良を進めた。

## 2. 研究成果

### 2. 1 高耐熱・低熱膨張骨格を有するエポキシ樹脂

高耐熱・低熱膨張骨格を有するエポキシ樹脂の分子設計として、多環芳香族骨格を有するエポキシ樹脂を提案、アントラセン、ナフタレン骨格ポキシ樹脂と芳香族ジアミン（DDS）の組合せで熱膨張率を 67ppm から 50ppm へと低減できることを確認した。さらに、DDS 硬化のビフェニル骨格を有するエポキシ樹脂について 200℃での長期耐熱性をより高温での加速試験により評価した。物性面での確認は必要であるが加熱減量特性では、図 2 に示すように、従来の封止材料用エポキシ樹脂に比べ 3 倍の 30,000 時間を示すことを確認した。

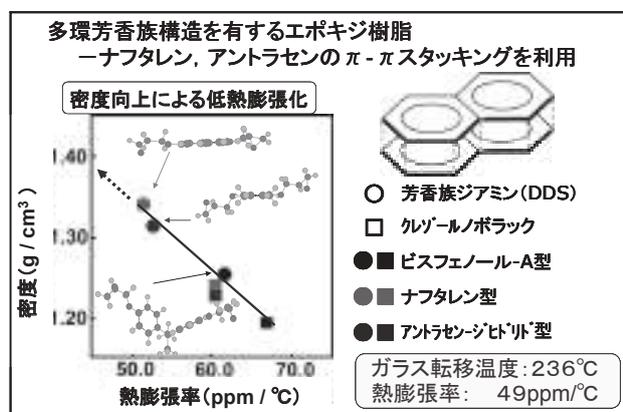


図1 エポキシ樹脂硬化物の密度と熱膨張率

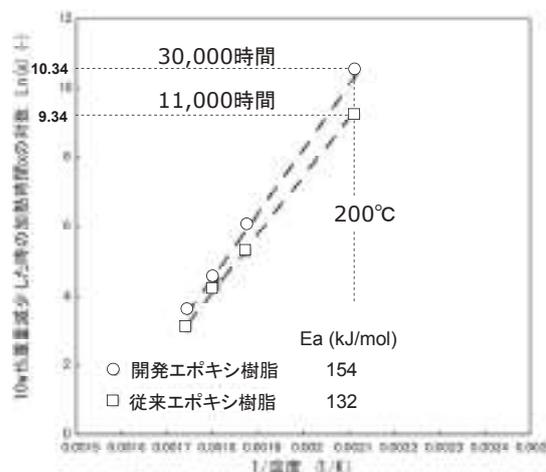


図2 200℃での長期耐熱性加速評価

### 2. 2 ベンゾオキサジン樹脂

上述の低熱膨張エポキシ樹脂と耐熱的には同程度であるが、さらに熱膨張率が低く、成形硬化性も改善が期待できるベンゾオキサジン樹脂を検討した。紙面の都合上、詳細は省略するが樹脂単独で 47ppm の熱膨張率と 200℃を越えるガラス転移温度（Tg）得る新規組成物を得たので特許出願により権利化した。

表1 ベンゾオキサジン樹脂の特性

No.	Ar-OH:エポキシ	Tg <sup>2)</sup> [°C]	架橋密度 <sup>2)</sup> [kmol/m <sup>3</sup> ]	熱膨張率 <sup>3)</sup> [ppm/°C]	Td <sub>5</sub> <sup>4)</sup> [°C]	残渣 <sup>4)</sup> [%]
PPd	—	195	2.4	43.7	301	53.0
PdBA(1)	1 : 1	183	4.2	54.8	361	41.5
PdBA(0.5)	1 : 0.5	202	4.5	51.5	354	41.2
PdBA(0.3)	1 : 0.3	206	3.9	47.3	358	45.9

1) 硬化条件: 200℃/4h  
2) 動的粘弾性試験により測定  
3) 熱機械分析により測定  
4) 熱重量分析により測定

また、前述の高耐熱・低熱膨張骨格を有するエポキシ樹脂、ベンゾオキサジン樹脂とチツ化ホウ素（BN）充填材の形状と充填率について検討し、60vol%の充填で熱伝導率で5W/mK、熱膨張率で10~12ppm/mKとほぼ目標特性を満たす材料が得られることを確認した。

### 2.3 超高耐熱性樹脂

エポキシ樹脂に変わる超高耐熱樹脂として長期耐熱性でも300℃を超えるシアネート樹脂についても初期的な耐熱及び機械特性を確認した。高耐熱性骨格であるノボラック構造を有したシアネート樹脂(NCY)と汎用のシアネート樹脂であるビスフェノール型構造のBADCYを混合することで、高い耐熱性を維持しつつ機械的物性の優れた樹脂が得た。

さらに、図4に示すベンゾオキサジン変性ビスマレイミド樹脂について、その可能性を調べた。

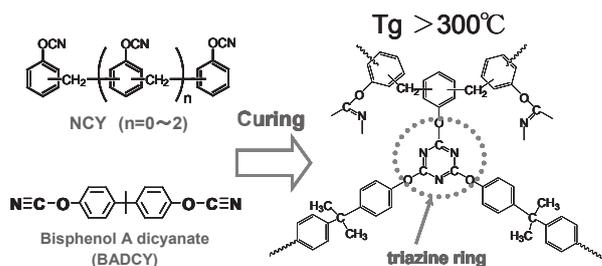


図3 300℃対応シアネートエステル樹脂



図4 ビスマレイミドとベンゾオキサジン

その結果を図5に示すように、組成の最適化により200℃、4時間硬化で310℃に達するTgが実現し、熱膨張率も48ppmと超高耐熱性、低熱膨張率の樹脂硬化物を得ることができた。特許出願すると共に学会でも発表した。

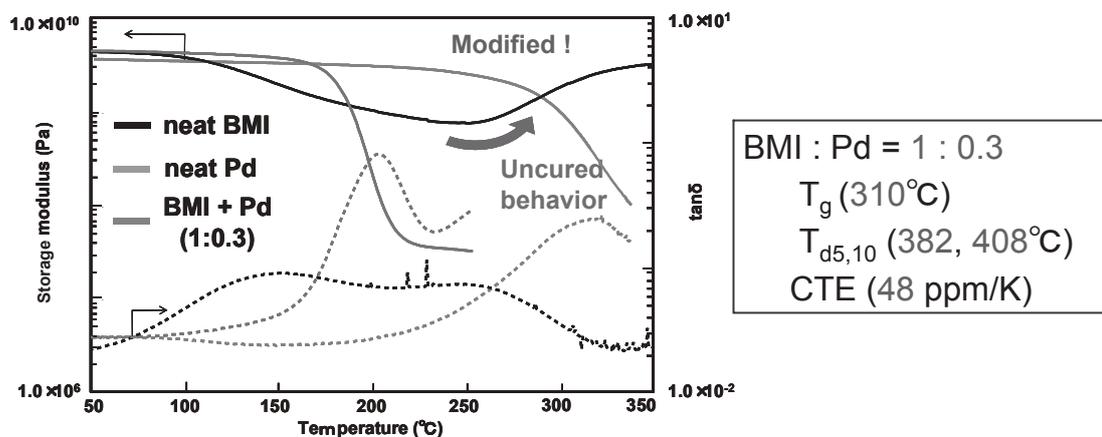


図5 ベンゾオキサジン変性ビスマレイミド樹脂の動的粘弾性特性及び熱的特性

### 3. 課題及び今後の展望

封止材料として評価するためには、離型剤、カップリング剤、カーボンなどの充填剤を加えて適正化する必要がある。この後、実際にパワーデバイスを封止したパッケージを作製して信頼性を評価する計画である。これに関しては、本プロジェクトと併行して進めてきたパワーエレクトロニクス実装研究会で計画している信頼性評価のための試作を通して確認する。

# エポキシ変性ポリベンゾオキサジンの高性能化

賀川 美香 高岩 玲生 大山 俊幸 高橋 昭雄

## 1. はじめに

ポリベンゾオキサジンは自己重合によりフェノールを生成する新規フェノール樹脂として知られている。これは、従来のフェノール樹脂の特性だけでなく、分子設計の自由度が高い、副生成物を発生しない、高い寸法安定性を有するなど、多くの特徴を示す。特に、低熱膨張率及び高強度は特筆すべき特性であり、我々はポリベンゾオキサジンが持つこれらの特性に着目した。しかし、高温下での可塑性な挙動の改善、重合硬化条件の緩和などが課題となっており、さらなる耐熱性の向上も求められている<sup>1)</sup>。以前<sup>2)</sup>、ポリベンゾオキサジンとエポキシ樹脂を反応させたところ、 $T_g$ を超えた後に見られる熱可塑性な挙動が改善された。さらに、最適な当量比について検討した結果、当量比 1 : 0.3 とエポキシ樹脂が少量の時に  $T_g$  が最大値を示し、47ppm/K の低熱膨張率を得た。本研究では、樹脂マトリックスとして確立したエポキシ変性ポリベンゾオキサジンのさらなる高性能化を目指し、2つのアプローチを試みた。

### 1. 1 目的

これまで、パワー半導体用の封止材として利用可能な低熱膨張率を有する熱硬化性樹脂の開発に取り組んできた<sup>2,3)</sup>。第1のアプローチは、エポキシ樹脂により変性されたポリベンゾオキサジンに窒化ホウ素(BN)フィラーを混合することにより、低熱膨張率かつ高熱伝導率のコンポジット材料を得ることである。

ポリベンゾオキサジンは高強度という特性を有するために、構造材料への展開が注目されている。改質剤ポリマーとマトリックス樹脂の重合を同時進行させる *in situ* ラジカル重合による改質を図ったが、ベンゾオキサジン存在下では改質剤ポリマーの重合が阻害された。そこで、エポキシ樹脂を媒体として改質剤ポリマーを生成した後、ポリベンゾオキサジンと溶解させた。第2のアプローチは、ポリベンゾオキサジンがエポキシ樹脂により変性されると共に、曲げ強度の低下を抑制しつつ、破壊靱性値を向上させることである<sup>4)</sup>。

## 2. 実験・結果及び考察

### 2. 1 エポキシ変性ポリベンゾオキサジンの特性<sup>2)</sup>

熱的特性に優れた P-d 型ベンゾオキサジンと、エポキシ樹脂にビスフェノール A ジグリシジルエーテル(DGEBA)を用い、フェノール性水酸基当量に対するエポキシ基当量の比を 1 : 1, 1 : 0.5, 1 : 0.3 と振り、200°C/4h で硬化させた。

Fig. 1 より、ポリベンゾオキサジン単独硬化物 (PPd) は分子鎖中で水素結合を形成しているために高温で可塑性を示した。しかし、エポキシ樹脂と反応させた PdBA では可塑性が

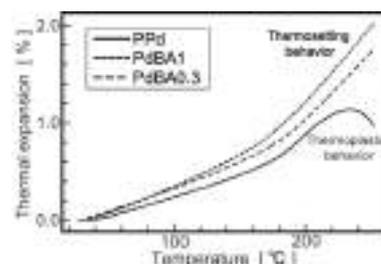
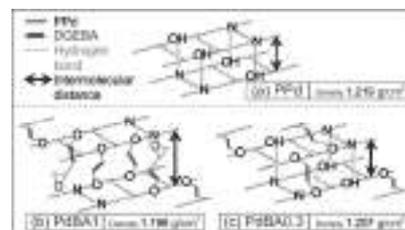


Fig. 1 Thermal expansion behavior of PPd and PdBA

観察されなくなった。また、Table 1 より、当量比 1 : 1 から当量比 1 : 0.3 へ大幅にエポキシ樹脂の配合量を減らすと、 $T_g$  は最も高い 206°C を示し、熱膨張率は 47ppm/K まで低下した。このように当量比 1 : 0.3 の時に最も優れた特性を示したことから、ポリベンゾオキサジン中の水素結合による物理的架橋とエポキシ樹脂による新たな化学的結合が効率良く活かされる最適な配合割合が存在する事が示唆された (Scheme 2)。



Scheme 2 Chemical structure of compounds.

Table 1 Physical properties of Pd+DGEBA (PdBA)<sup>1)</sup>

No.	Ar-OH : epoxy	$T_g^{2)}$ [°C]	Crosslink density <sup>2),3)</sup> [kmol/m <sup>3</sup> ]	CTE <sup>4),5)</sup> [ppm/K]	$T_d^{6)}$ [°C]	Residue <sup>6),7)</sup> [%]
PPd	—	195	2.4	43.7	323	53.0
PdBA1	1.0 : 1.0	183	4.2	54.8	335	37.7
PdBA0.5	1.0 : 0.5	202	4.5	51.5	335	40.3
PdBA0.3	1.0 : 0.3	206	3.9	47.3	339	41.4

1) Curing condition: 200°C/4h

2) By DVA (heating rate: 5°C/min, frequency: 1Hz) 3) By rubber state formula T: ( $T_g+40$ )

4) By TMA (heating rate: 5°C/min, under N<sub>2</sub>: 20ml/min) 5) Range: 50°C~100°C

6) By TGA (heating rate: 10°C/min, under N<sub>2</sub>: 20ml/min) 7) At 700°C

### 3. 2 BN フィラーをブレンドしたコンポジット材料の特性

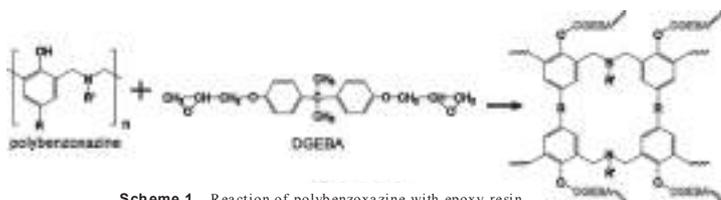
樹脂マトリックスに低熱膨張率を示した PdBA0.3 を用い、表面修飾を施したリン片状の BN を 40, 50, 60vol% 充填し、プレスオープンにて 150°C/5h+200°C/4h で硬化させた。

Fig. 3 より、BN の充填率の増加に伴い、熱膨張率は

Mean diameter: 12  $\mu$ m  
Density: 2.3 g/cm<sup>3</sup>  
CTE: 2.8 ppm/K  
TC: 60 W/m·K



Fig. 2 Properties of BN filler.



Scheme 1 Reaction of polybenzoxazine with epoxy resin.

低下した。コンポジットの熱膨張率は、Fhamy-Ragai の理論式から大きく外れたことから、単なる樹脂マトリックスと BN の混合物とは異なる特性を持っていることが示唆された。ポリベンゾオキサジン中に存在する N 原子及びフェノール性水酸基と BN の N 原子との間に分子間相互作用が働き、分子間が密にパッキングしたために熱膨張率が理論値より大幅に低下したと推測される。これに対し、熱伝導率は主にフィラーの形状因子が特性に影響を及ぼす。コンポジットの熱伝導率は、フィラーの形状因子を考慮した Kanenari の理論曲線とほぼ一致する傾向を示した。これより、樹脂マトリックス中に BN が均一に分散している可能性が示唆された。

パワー半導体の封止材として用いる際の目標となる物性値は、CTE は 10 ppm/K 以下、TC は 5 W/m・K と報告されている<sup>5)</sup>。通常、このような物性値を得るためには 70vol% を超える多量のフィラーが必要とされるが、本報では低熱膨張率を有するポリベンゾオキサジンを樹脂マトリックスとして用いる事で 60vol% という低い充填率でほぼ達成された。

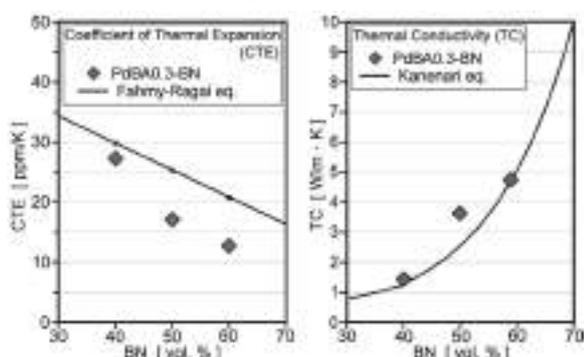


Fig. 3 Relation between BN and CTE(left) or BN and TC(right) for PdBA0.3.

Table 2 Thermal properties of Pd+epoxy+BN filler

Matrix	Epoxy resin	BN vol%	CTE <sup>(3,4)</sup> [ppm/K]	Density <sup>(5)</sup> [g/cm <sup>3</sup> ]	Cp <sup>(6)</sup> [J/g・K]	Diffusivity <sup>(6)</sup> [mm <sup>2</sup> /s]	Thermal Conductivity [W/m・K] at 25°C
PdBA0.3 <sup>1)</sup>	DGEBA	—	47.9	1.207	1.260	0.133	0.202
PdBA0.3 <sup>2)</sup>	DGEBA	40	27.3	1.609	0.889	1.010	1.445
PdBA0.3 <sup>3)</sup>	DGEBA	50	17.2	1.732	0.744	2.816	3.630
PdBA0.3 <sup>2)</sup>	DGEBA	60	12.8	1.846	0.771	3.326	4.732

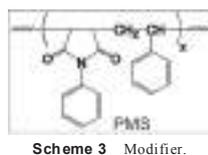
1) Curing condition: 200°C/4h 2) Curing condition: 150°C/6h+200°C/4h

3) By TMA (heating rate: 5°C/min, under: N<sub>2</sub> 20ml/min) 4) Range: 50°C-100°C

5) Picnometer method 6) By laserflash method at 25°C

## 2. 3 *In situ*生成 *N*-フェニルマレイミド-スチレン交互共重合体(PMS)によるポリベンゾオキサジンの強靱化<sup>4)</sup>

PdBA1 及び PdBA0.3 を溶解させた後、改質剤モノマー及び開始剤を加え、樹脂マトリックスと PMS の重合が同時に進行する加熱条件 120°C/1h+150°C



/10h+180°C/1h+200°C/3h で硬化させた(Method A)。一方、DGEBA を媒体とし改質剤モノマーと開始剤を加え、120°C/1h+150°C/3h で PMS を生成させた後に、ベンゾオキサジンを溶解させ、上記

同様の条件で硬化させた (Method B)。

Method A はマトリックスの重合と同時に改質剤ポリマーPMS を生成する従来の *in situ* 重合法である。しかし、Fig. 4 (A)は平滑な破断面を示し、PMS 粒子はほとんど認められなかった。モデル反応を行ったところベンゾオキサジンがPMS の重合を阻害していることがわかった。これに対し、Method B を適用すると Fig. 4 (B)(C)に見られるように、海島型相分離構造が観察された。また、破壊靱性値(K<sub>IC</sub>)も向上し、エポキシ樹脂中に溶け込んだPMS がベンゾオキサジン中に均一に分散している可能性が示唆された。さらに、エポキシ樹脂の配合量の少ない当量比 1:0.3 とした場合、当量比 1:1 に比べ、ポリベンゾオキサジンに特徴的な高弾性率と高強度を示しつつ、K<sub>IC</sub> がコントロールに対し 36~49% 向上した。

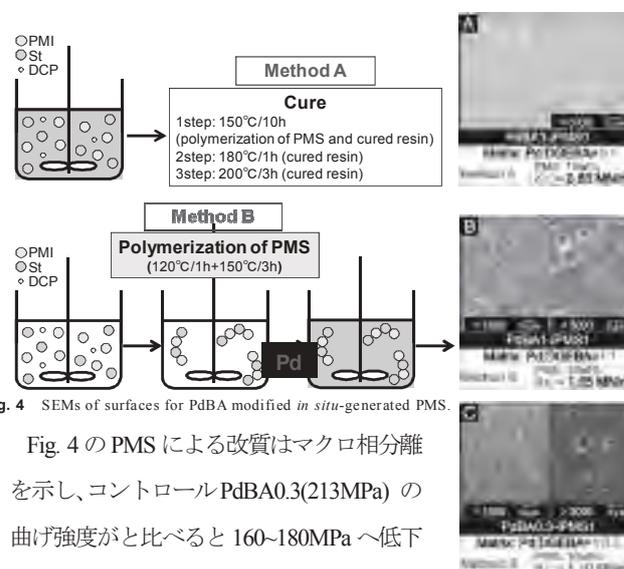


Fig. 4 SEMs of surfaces for PdBA modified *in situ*-generated PMS.

Fig. 4 の PMS による改質はマクロ相分離を示し、コントロール PdBA0.3(213MPa) の曲げ強度がと比べると 160~180MPa へ低下した。これはマトリックス樹脂と相溶性の悪い PMS との界面に欠陥が生じたことが原因として考えられる。解決する手段として、エポキシ樹脂と相溶性の高いポリエチレンオキシドやグリシジル基を持った改質剤をポリマー鎖にグラフトし、物理的及び化学的結合により界面での接着性の改善を試みた。

## 4. 参考文献

- 1) 竹市力, ネットワークポリマー, **27**, 4(2006)
- 2) 賀川美香, 第 59 回ネットワークポリマー講演要旨集, 161(2009)
- 3) 大西裕一, 高分子論文集, *In Press*
- 4) 賀川美香, 第 60 回ネットワークポリマー講演要旨集, 49(2010)
- 5) 高橋昭雄, エレクトロニクス実装学会 材料委員会, 公開研究会, 88(2009)

# マレイミド-ベンゾオキサジン反応を利用した耐熱性樹脂の研究

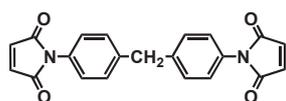
高岩玲生 賀川美香 大山俊幸 高橋昭雄

## 1. はじめに

本研究の目的は、電気自動車やハイブリッド車等のパワーデバイスへの実装を目指した、高耐熱・低熱膨張率を示す高性能な半導体封止材用樹脂の作製である。

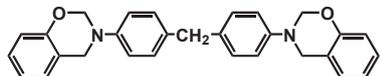
パワーデバイス用の封止材には、半導体を外部環境から保護する為の高い耐熱性が求められるだけでなく、熱サイクルによる収縮が招くクラックを防ぐ為に、周囲の材料にあった低熱膨張率を示すことが必要とされる。

この性能の発現を本研究では2つの樹脂のアロイ化によって図った。樹脂は、その硬化物の剛直な構造から優れた耐熱性を持つ



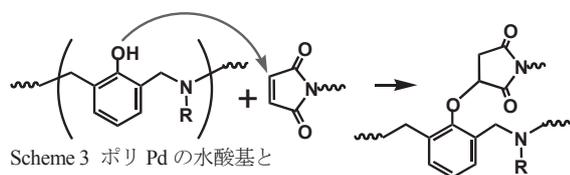
Scheme 1 BMI

4,4'-Bismaleimide diphenyl methane (Scheme 1 BMI)と、重合体がペンダントな部位を持たず、かつ構造中の芳香環が重合体中でスタッキングを起こすことにより低熱膨張率を示す3,3'-(methylenedi-4,1-phenyl)bis(3,4-dihydro-2H-1,3-benzoxazine) (Scheme 2 Pd型ベンゾオキサジン)が用いられた。



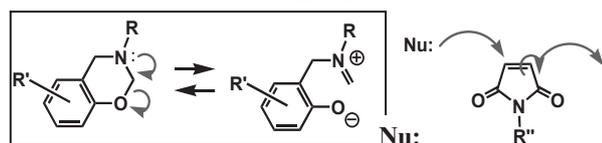
Scheme 2 Type Pd benzoxazine

BMIとPdは共に2官能性であり単独でも三次元網目構造を形成するが、この2つの樹脂は相互に反応する可能性も示唆されており、ポリベンゾオキサジンの持つフェノール性(マンニッヒ)水酸基とマレイミド二重結合との反応の可能性が報告されている<sup>1)</sup>(Scheme 3)。さらにベンゾオキサジンが持つ3級アミン構造や、その硬化中に発生するとされるフェノキシド等の求核成分もマレイミドの二重結合を攻撃すると予想されており(Scheme 4)、本研究ではこの様なBMIとPd間の反応による高耐熱性ポリマーアロイの可能性が調査された。



Scheme 3 ポリ Pd の水酸基と

BMI 二重結合の反応



Scheme 4 BMI 二重結合と求核成分との反応(BMI アロイ重合)

## 2. 実験と結果

### 2. 1 反応挙動調査

硬化物作製に先駆け、BMIとPdの単独系と混合系における反応挙動が示唆走査型熱量分析(DSC)によって調査され

た。サンプルは試料を塩化メチレンに溶解させた後、減圧乾燥して作製された。

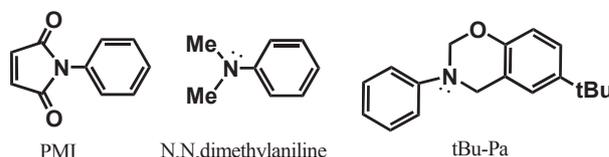
### 2. 2 硬化物作製-特性調査

硬化物はBMI: Pdの当量比を変えて混合され、200°C/4hの加熱によって作製された。溶融混合時の成形性はBMIを融点の低いPdに溶かし込む事で確保された。硬化物の熱的特性は動的粘弾性試験(DMA)、熱機械分析(TMA)、熱重量分析(TGA)によって評価された。

### 2. 3 モデル反応

マレイミドの二重結合とフェノール性水酸基とのマイケル付加反応の可能性を調査する為、フェノールとN-フェニルマレイミド(PMI Scheme 5)を用いたモデル反応が行われた。反応はフェノール: PMI=10:1でフェノールの反応性を高めるリン系触媒を入れて100-110°C/8hで加熱(N<sub>2</sub>下)する事で行われ、精製はメタノール中での再沈殿・洗浄後、濾過・減圧乾燥する事でなされた。

さらに3級アミンやベンゾオキサジンのマレイミドに対する効果を調査する為に、PMIにN,N-dimethylaniline(Scheme 5), tBu型単官能ベンゾオキサジン(tBu-Pa Scheme 5)を1phr添加した系でのモデル反応(100-110°C/8h)も行われた。



Scheme 5 Model compounds

## 3. 考察及び今後の展望

### 3. 1 反応挙動調査

DSC測定の結果はFig. 1に示す。BMIとPdの単独系チャートはそれぞれ黒線と緑線で示し、BMI: Pd=1:0.3の混合系は赤線で示した。混合系チャートは単独系チャートの単純な重ね合わせではなく、BMIのピークがシャープになり反応性が向上した事やPdの反応温度の低温シフトが観測され、BMI-Pd間での相互反応の可能性が示唆された。

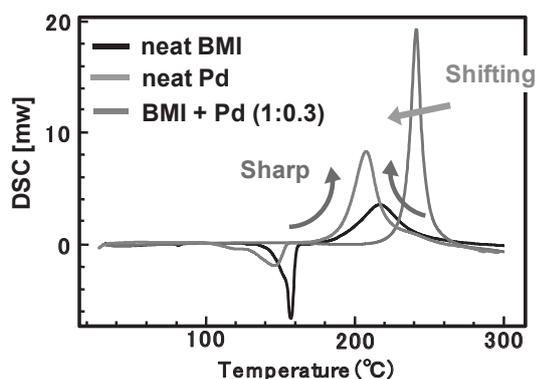


Fig. 1 DSC charts of resins

### 3. 2 硬化物作製と特性調査

作製した硬化物の熱的特性は Table 1 に、その  $T_g$  と  $T_{d5}$  と配合比の関係は Fig. 2 に示した。

Table 1 Thermal properties of polybenzoxazine modified bismaleimide

Equivalence ratio (BMI : Pd)	$T_g^{1)}$ (°C)	CTE <sup>2)3)</sup> (ppm/K)	$T_{d5}^{4)}$ (°C)	$T_{d10}^{4)}$ (°C)
neat BMI 1: 0	151	50.3	485	500
1 : 0.1	263	45.3	439	480
1 : 0.3	310	47.6	382	408
1 : 1	240	47.6	334	360
0.5 : 1	213	46.1	327	357
neat Pd 0 : 1	204	41.6	314	358

1) By DMA (heating rate: 5°C/min, frequency: 1Hz) 2) By TMA (heating rate: 5°C/min, Under: N<sub>2</sub> 20ml/min)  
3) Range 50°C to 100°C 4) By TGA (heating rate: 5°C/min, Under: N<sub>2</sub> 20ml/min)

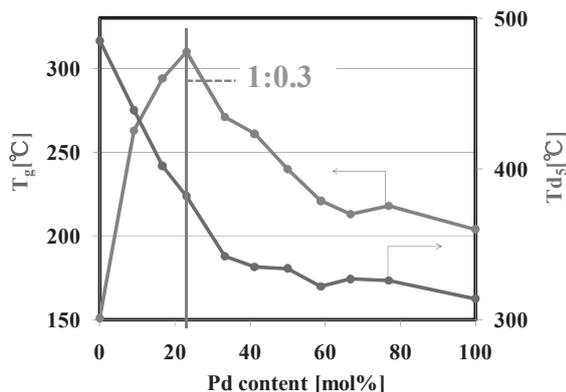


Fig. 2 Relationship between heat resistance and compounding ratio

Table 1 より、BMI 単独硬化物の  $T_g$  が低いのは、本樹脂が本来完全硬化に高温長時間の加熱を要する為に 200°C/4h という限られた硬化条件では未硬化である為である。しかし Fig. 2 からは混合系で単独系よりも高い  $T_g$  を示している事が明らかであり、特に BMI: Pd=1 : 0.3 の系では 200°C/4h の加熱条件では 310°C の高い  $T_g$  が示された。これは BMI と Pd の相互作用によって BMI の硬化性が改善された為だと考えられた。特に Scheme 4 に示したような求核攻撃は BMI に通常の熱ラジカル重合に加え、アニオン重合を起こさせる可能性があり、反応性の向上に寄与すると推測される。

$T_g$  が最高値を取った 1 : 0.3 の系における  $T_{d5,10}$  は 382, 408°C と高い値が示され、この系が物理的・化学的耐熱性共に優れている事が判明した。さらに熱膨張率も 47ppm/K という値が得られ、これは汎用エポキシ樹脂の 70ppm/K と比較して十分に低い値である。

Fig. 3 には DMA 測定の結果を示した。BMI 単独系のチャ

ートは  $T_g$  後の貯蔵弾性率の再上昇や不明瞭な  $\tan\delta$  のピークといった未硬化な樹脂の挙動を示したが、それと比較して BMI : Pd=1 : 0.3 の系は Pd 単独系と同様の硬化物としての挙動を示しており、ここからも BMI の硬化性の改善が示唆された。

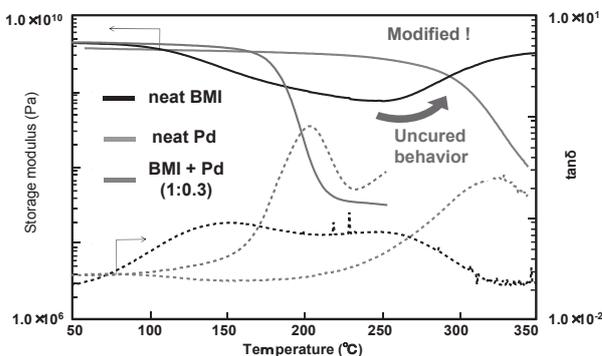


Fig. 3 DMA charts of resins

### 3. 3 モデル反応

Phenol と PMI を用いたモデル反応の結果、Fig. 4 で示された化合物が主生成物として得られ、マレイミドの二重結合とフェノール性水酸基との反応性が確認された。

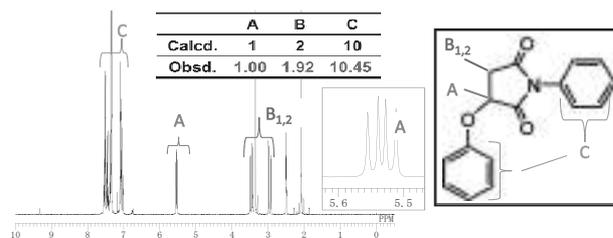


Fig. 4 Product of model reaction between Phenol and PMI

また、PMI に N,N'-dimethylaniline と tBu-Pa を添加した系では主生成物としてポリ PMI が得られ、3 級アミンやオキサジンが PMI のアニオン重合開始材として働き、反応を促進している可能性が示唆された。

### 4. 参考文献

- 1) T. Takeichi, Y. Saito, T. Agag, H. Muto, T. Kawaguchi, *Polymer*, **49**, 1173 (2008).
- 2) 高岩, 賀川, 大山, 高橋, ネットワークポリマー講演討論会, **60**, 122 (2010).

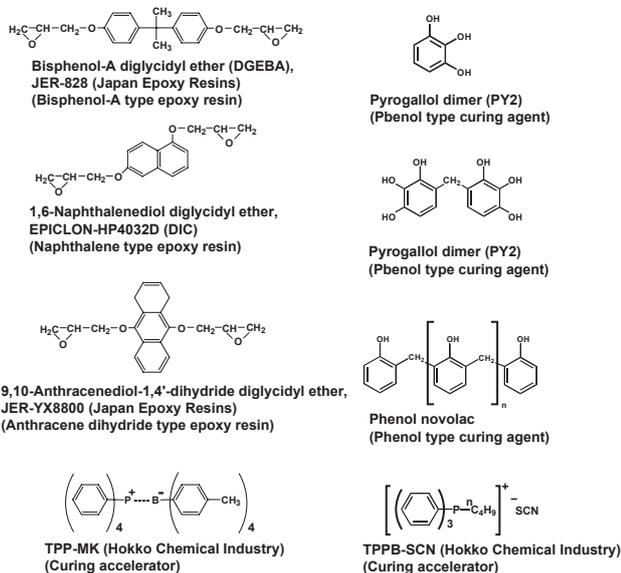
# 多価フェノール二量体硬化多環芳香族型エポキシ樹脂の研究

小林宇志 堀内悠斗(横国大) 大山俊幸 高橋昭雄

## 1. はじめに

エポキシ樹脂は優れた熱的、機械的、電気的性質を有し、接着剤、電気・機械用材料など、多方面に使用されている。しかし、その応用が先端技術分野に広がるとともに、より高性能の樹脂が要求されている。特に、電子材料の分野では、LSIの大容量・高集積化による発熱対策、高密度実装による応力対策の観点から耐熱性の向上が求められ、さらに材料の信頼性の観点から、低熱膨張率が求められている。芳香環同士のスタッキング効果により、密にパッキングされ、特性が向上すると考えられており<sup>2)</sup>、主骨格にナフタレンやジヒドロアントラセン骨格といった多環芳香族を導入したエポキシ樹脂を芳香族ジアミンである4,4'-ジアミノジフェニルスルホン(DDS)で硬化させることにより、高い耐熱性、低熱膨張率の樹脂硬化物が得られることが報告されている<sup>1)</sup>。

本研究では、多官能フェノール構造であるピロガロールを用いて、そのエポキシ樹脂との反応性を調べると共に、多官能フェノール化合物 PY2 を合成し、硬化剤として用いることにより、硬化剤と硬化条件の検討による多環芳香族のスタッキング構造と諸特性の関係を調べた。

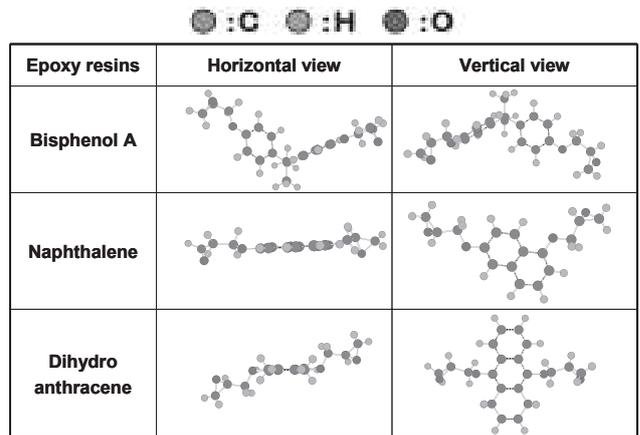


Scheme 1 Epoxy resins, curing agents, and curing accelerators

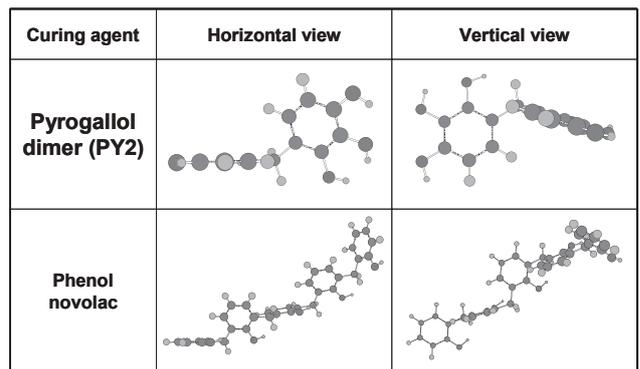
## 2. 実験と結果

三官能フェノール構造であるピロガロールの全てのフェノール性-OH基とエポキシ基との反応性を調査した。次いで、ピロガロールとホルムアルデヒドから多官能フェノール二量体である硬化剤 PY2 を合成した。そして、Fig. 1 に示すような構造をもつエポキシ樹脂と硬化剤として PY2、フェノールノボラック、硬化促進剤としてリン系4級ホスホニウム

塩を用いて樹脂硬化物を作製した。作製方法としては、エポキシ樹脂と硬化剤、硬化促進剤を、有機溶剤を用いて溶かし均一にし、その後テフロンシートにキャストし、60℃減圧乾燥、注型、さらなる減圧乾燥の工程を経た後、加熱して硬化させた。PY2については仕込み比を変化させて同じく樹脂硬化物を作製した。硬化物は動的粘弾性試験(DMA)、熱機械分析(TMA)により物性を評価した。さらに硬化条件の間にもう1段階硬化温度を加えて段階的加熱により硬化させ、硬化温度と物性の関係を調査し、さらに硬化物の吸湿試験を行った。また硬化剤の仕込み比を変化させた硬化物を作製し、諸特性との関係を調査した。



Scheme 2 Stereostructures of epoxy resins



Scheme 3 Stereostructures of curing agents

物性試験の結果を Table 1~4 に示した。Table 1,2 より多環芳香族型エポキシ樹脂はビスフェノール A 型エポキシ樹脂と比較すると、低い熱膨張率(CTE)を維持し、高いガラス転移温度(Tg)を示した。Scheme 2 より、これはナフタレンやジヒドロアントラセン骨格のような平面構造を有するエポキシ樹脂の多環芳香族環のスタッキング効果により耐熱

性が向上したものと考えられる。さらに硬化剤 PY2 を用いた場合、汎用な硬化剤であるフェノールノボラックを用いた硬化物に比べ 180°C/2h の硬化条件で耐熱特性は大きく向上し、高い Tg を示した。Scheme 3 より、同一平面上にフェノール性-OH 基を多く有することで硬化剤がエポキシ樹脂のスタッキング効果を阻害せずに硬化したことにより、耐熱性が向上したものと考えられる。Table 3 より加熱条件を段階的に変え、緩やかに硬化させることにより硬化物の熱膨張率が低下し、Tg がさらに向上した。硬化時の加熱条件がエポキシ樹脂硬化物の立体構造に影響を与え、特性が向上する

により確認できた。さらにピロガロールを用いて二量体を合成し、PY2 硬化とフェノールノボラック硬化を比較すると、より平面構造に近い PY2 硬化のほうが 180°C を超える高い Tg を示した。また同じ PY2 硬化でも、平面構造を有する多環芳香族型エポキシ樹脂はビスフェノール A 型エポキシ樹脂よりも低熱膨張率を示した。さらに硬化温度も耐熱性に影響を与えることがわかった。

また、PY2 の仕込み比を変化させることで硬化物の吸水特性に影響を与えることができ、最適化により、低吸湿性かつ高耐熱性の材料が期待できる。

Table 4 Thermal properties of epoxy resins<sup>1)</sup>

No.	PY2 ratio	Curing condition	Tg <sup>2)</sup> (°C)	CTE <sup>3)</sup> (ppm)
1	0.6	120°C/1h+180°C/2h	162	57.5
2	0.8		199	57.7
3	1		205	57.1
4	1.2		185	53.2

1) Epoxy Resin: HP-4032D

Curing agent: PY2

Curing accelerator: TPP-MK (0.5 phr)

2) By DMA Heating rate: 5°C/min under air

3) By TMA(heating rate: 5°C/min

load:5.0g

under (N<sub>2</sub> 20ml/min), range: 50~100°C

ものと思われる。

また Table 4 より、PY2 の仕込み比を変化させるとエポキシ樹脂:PY2 のモル比が 1:0.8 のときは 1:1 のときとほぼ同様な値を示した。

Table 1 Thermal properties of epoxy resins cured phenol novolac

Epoxy resin <sup>1)</sup>	Curing agent	Tg <sup>2)</sup> (°C)	CTE <sup>3)</sup> (ppm)	Remark
BisphenolA	Phenol Novolac	139	69.1	Transparent
Naphthalene	Phenol Novolac	150	60.5	Transparent
DihydroAnthracene	Phenol Novolac	166	58.4	Transparent

1) Curing accelerator: TPPB-SCN 0.5 phr Curing condition: 120°C/2h+180°C/2h

2) By DMA Heating rate: 5°C/min under air

3) By TMA(heating rate: 5°C/min load:5.0g under (N<sub>2</sub> 20ml/min) range: 50~100°C

Table 2 Thermal properties of epoxy resins

Epoxy resin <sup>1)</sup>	Curing agent	Tg <sup>2)</sup> (°C)	CTE <sup>3)</sup> (ppm)	Remark
BisphenolA	PY2	182	72.3	Transparent
Naphthalene	PY2	198	61.0	Transparent
DihydroAnthracene	PY2	203	58.7	Transparent

1) Curing accelerator: TPPB-SCN 0.5 phr Curing condition: 120°C/2h+180°C/2h

2) By DMA Heating rate: 5°C/min under air

3) By TMA(heating rate: 5°C/min load:5.0g under (N<sub>2</sub> 20ml/min) range: 50~100°C

Table 3 Thermal properties of epoxy resins

Epoxy resin <sup>1)</sup>	Curing agent	Curing condition	Tg <sup>2)</sup> (°C)	CTE <sup>3)</sup> (ppm)
Naphthalene	PY2	120°C/1h+180°C/2h	198	61.0
Naphthalene	PY2	120°C/1h+140°C/2h+180°C/2h	201	57.7

1) Curing accelerator: TPPB-SCN 0.5 phr

2) By DMA Heating rate: 5°C/min under air

3) By TMA(heating rate: 5°C/min load:5.0g under (N<sub>2</sub> 20ml/min) range: 50~100°C

さらに Fig. 5、Table 5 の硬化物の吸湿試験の結果から、PY2 の当量比が減少するにつれて低吸湿性を示した。この結果より、PY2 の仕込み比により、低吸湿性かつ高耐熱性の材料が期待できることが示唆された。

### 3. 考察及び今後の展望

多官能フェノール構造であるピロガロールの全てのフェノール性-OH 基はエポキシ基と反応することがモデル反応

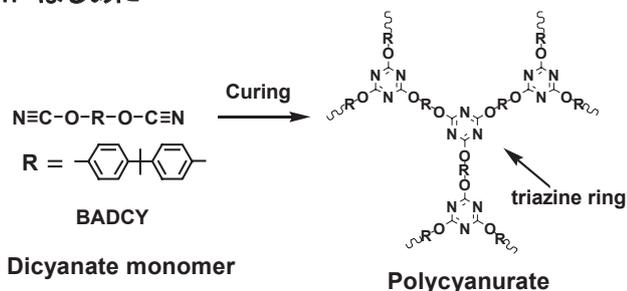
### 【参考文献】

- 1) 大西裕一, 大山俊幸, 高橋昭雄, ネットワークポリマー講演討論会講演要旨集, **59**, 129 (2009)
- 2) 小椋一郎 DIC Technical Review No.7 / 2001

# In situ 重合改質剤による高耐熱シアナート樹脂の強靱化

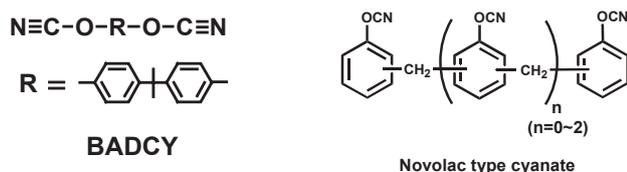
磯野学(横浜国大) 大山俊幸 高橋昭雄

## 1. はじめに



Scheme 1

シアナート樹脂は加熱によりトリアジン環構造を形成し硬化する (Scheme 1)。そのため、シアナート樹脂の硬化物は 300°C に達する高いガラス転移温度を有し、高耐熱性でありまた電氣的にも優れた性質を示す。このため、パワーデバイスが駆使される次世代カーエレクトロニクス用の半導体実装材料として有望な高分子材料である。しかし、低分子量からの架橋反応を含む機構で硬化するために脆い。これは、熱硬化性樹脂に共通する欠点でもあり、耐衝撃性や耐クラック性が不足していることが課題であった。本研究ではまずビスフェノール A ジシアナート (BADCY) (Scheme 2) に、耐熱性に優れたノボラック型シアナート (NCY) (Scheme 2) を混合させ樹脂の耐熱性を向上させた。そして脆さの課題を克服するために改質剤の添加を行い、靱性の向上を図った。

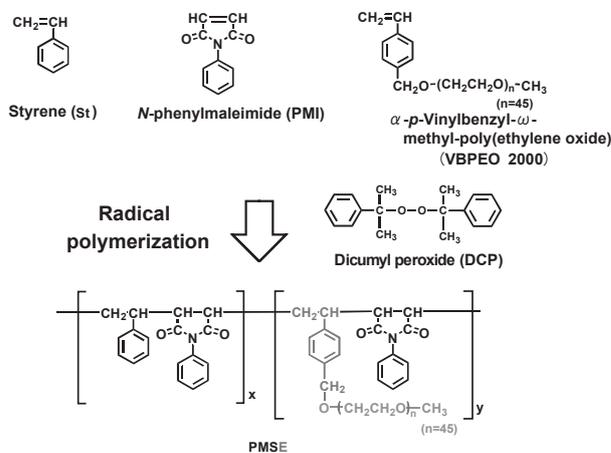


Scheme 2

改質剤モノマーとしてスチレン (St)、N-フェニルマレイミド (PMI)、そして樹脂との相容性を上げるために長い PEO 鎖をもつ  $\alpha$ -p-ビニルベンジル- $\omega$ -メチル-ポリ(エチレンオキシド) (VBPEO 2000) を、またラジカル重合開始剤としてジクロムペルオキシド (DCP) を用いて、*in situ* 法によりこれらの交互共重合体ポリマー PMSE (Scheme 3) を樹脂中にて生成させ改質を試みた。その結果、耐熱性、その他の物性を損なうことなく靱性を向上させた。

## 2. 実験と結果および考察

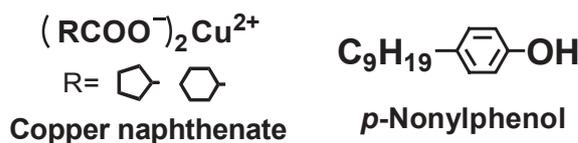
二種類のシアナート樹脂をオイルバス中 80°C で溶解させた後、改質剤モノマー (PMI+St+VBPEO 2000) を溶解させ、全モノマーに対して 1mol% のラジカル重合開始剤 DCP と硬化促進剤 (ナフテン酸銅+p-ノニルフェノール) (Scheme 4) をシア



Scheme 3

ナート樹脂に対し 2phr 添加し攪拌した。その後、予め 85°C で予備加熱したアルミ板に注型し、85°C/3h+100°C/4h+150°C/1h+177°C/3h+210°C/1h+250°C/2h の加熱条件で硬化させた。また、改質剤を添加していない系では改質剤の重合反応が必要ないためシアナート樹脂の硬化条件だけである 150°C/1h+177°C/3h+210°C/1h+250°C/2h で硬化させた。

この作製した樹脂に対して物性試験、走査型電子顕微鏡 (SEM)、透過型電子顕微鏡 (TEM) による破断面のモルフォロジーの観察、フーリエ変換赤外分光 (FT-IR) 測定による反応率の算出を行った。また熱的特性は動的粘弾性試験 (DMA)、熱重量測定 (TGA) によって評価した。



Scheme 4

物性試験及び動的粘弾性試験の結果を Table 1 に示す。以前の結果から BADCY と NCY が重量比 2.5 : 1 で最もバランスの取れた物性結果が得られることが確認されている [1]。まず PMS に PEO 鎖を導入させることでさらなる改質効果があるのかを調査した。表に示す通り PMS 改質に比べて PEO 鎖を導入した PMSE 改質の方が靱性値の向上に高い効果があることが確認された。これは PMSE 改質では、ポリマーが樹脂中でより細かく分散し、クラックの応力分散を促進させることで靱性が向上したものと考えられる。

Table 1 Physical properties of BADCY+NCY+PMSE cyanate ester resins

Resin	Modifier		K <sub>IC</sub>	Flexural Properties <sup>5)</sup>			T <sub>g</sub>
	PMS <sup>4)</sup> (wt%)	VBPEO <sup>5)</sup> (mol%)		Strength	Modulus	Strain	
			(MN/m <sup>3/2</sup> )	(MPa)	(GPa)	(%)	(°C)
BADCY+NCY(2.5:1) <sup>1)</sup>	-	-	0.60±0.03	158±11	3.4±0.03	8.8	316
+PMSE <sup>2), 3)</sup>	8	3	1.03±0.04	160±6	3.5±0.2	8.3	312
+PMS <sup>2), 3)</sup>	8	0	0.72±0.02	156±5	3.5±0.1	8	319

1) Curing conditions; 150°C/1h+177°C/3h+210°C/1h+250°C/2h  
 2) Curing conditions; 85°C/3h+100°C/4h+150°C/1h+177°C/3h+210°C/1h+250°C/2h  
 3) Initiator; DCP(1mol%), 4) (PMS+St)/(Resin+PMS), 5) VBPEO/(PMS+St)  
 6) Sample size; 2×10×41.5mm

DMA 測定 (ガラス転移温度測定) (Fig. 1) では改質剤ポリマー鎖由来の緩和ピーク (α') と樹脂由来のピーク (α) の二つが現れたことから相分離構造が示唆された。しかしポリマー鎖由来のピークから極度に弾性率が低下するようなことは無く、高温側の樹脂由来のピークまで高い弾性率を保つ結果となった。また PMSE 改質の方が低温側に α' ピークが見られるのは PEO 鎖のガラス転移温度によるものと推察される。

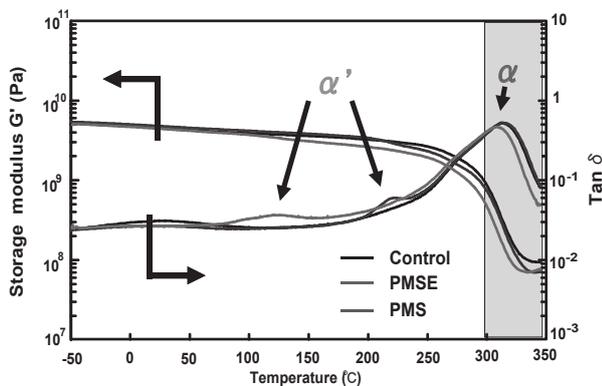


Fig. 1 DMA charts of resins

そこで相分離構造を確認するために SEM により破断面を観察した。(Fig 2)、PMS 改質では樹脂との相溶性が十分では無いために左図のような海島構造が確認されたが、右図の PMSE 改質では観察されなかった。このことから SEM では確認できないほどの細かい分散が示唆された。これは PEO 鎖の導入によりポリマーと樹脂の界面での相溶性が向上したことで、ポリマーが更に細かく分散したと考えられる。

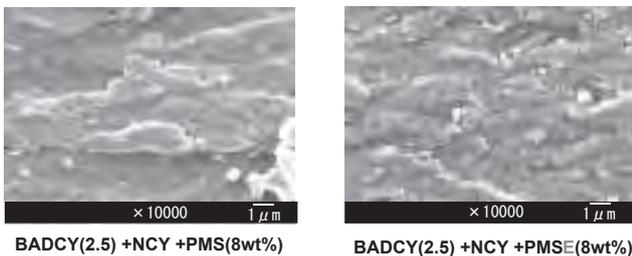


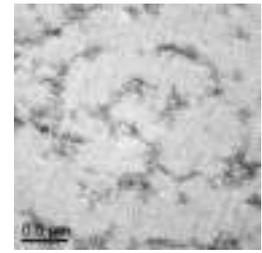
Fig. 2 SEMs of fracture surface for resins

また PMSE 改質の樹脂を TEM により観察した (Fig. 3)。改質剤ポリマーがナノオーダーレベルで細かく分散しているのが確認できた。このことは相分離構造を示唆させる DMA の結果と一致するものであった。

これらの PMSE 改質効果が認められたことから最適な添加条件を検討した (Table 2)。その結果、樹脂に対して PMS 8wt%、PMS に対して 3mol% の VBPEO 2000 を添加した系で未改質系



A) BADCY(2.5)+NCY+PMSE(8wt%)



B) BADCY(2.5)+NCY+PMSE(13wt%)

Fig. 3 SEMs of fracture surface for resins

Table 2 Physical properties of cyanate ester resins

Modifier	K <sub>IC</sub>	Flexural Properties <sup>3)</sup>			T <sub>g</sub> <sup>4)</sup>	
		Strength	Modulus	Strain		
PMS <sup>1)</sup> (wt%)	VBPEO <sup>2)</sup> (mol%)	(MN/m <sup>3/2</sup> )	(MPa)	(GPa)	(%)	(°C)
-	-	0.60±0.03	158±11	3.4±0.03	8.84	316
6	3	0.87±0.02	165±6	3.5±0.1	8.88	311
8	3	1.03±0.04	160±6	3.5±0.2	8.3	312
10	3	1.00±0.02	150±2	3.3±0.1	8.45	308
12	3	0.96±0.04	140±5	3.3±0.1	8.1	306
13	3	0.93±0.02	123±5	3.2±0.1	7.2	305

1) (PMS+St)/(Resin+PMS), 2) VBPEO/(PMS+St)

3) Sample size; 2×10×41.5mm, 4) By DMA

に比べて、最大 72%破壊靱性値が向上し、さらに曲げ強度、曲げ弾性率の低下も認められなかった。またガラス転移温度も依然 300°Cを超える高いものとなった。

最後に TGA 測定による熱的特性を評価した。(Table 3) PMSE 改質剤の量に比例して 5、10%重量減少温度 (T<sub>d5</sub>, T<sub>d10</sub>) は低下する傾向が見られたが、軒並み 400°Cを超える高い温度を保つ結果となった。

Table 3 Thermal properties of resins

Modifier (PMS+St) <sup>3)</sup> (wt%)	VBPEO 2000 Conc. <sup>4)</sup> (mol%)	T <sub>d5</sub> <sup>2)</sup> (°C)	T <sub>d10</sub> <sup>2)</sup> (°C)	Residual weight <sup>2)</sup> 600°C(%)
-	-	435	439	56.3
6	3	420	425	50.8
8	3	415	424	49.1
10	3	412	419	47.1
12	3	411	420	45.6
13	3	401	415	44.8

1) By DMA, 2) By TGA (under N<sub>2</sub>)

3) PMS/(Resin+PMS), 4) VBPEO/(PMS+St)

[1] 北村あい, 大山俊幸, 高橋昭雄, ネットワークポリマー, 59, 109 (2009)

# ネガ型反応現像画像形成法に基づく アルカリ水溶液現像型感光性スルホン化ポリイミドの開発

笠原彩(横浜国大) 高橋昭雄 大山俊幸

## 1. はじめに

感光性ポリイミド (PI) などの感光性エンブレは電子・電気産業などにおける微細パターン形成に有効に利用されている。しかし PI に感光性を付与するためには、PI の前駆体であるポリアミック酸 (PAA) 誘導体や官能基化された PI を用いる必要があり、その結果、ポリマーの合成が複雑化・高コスト化するとともに、パターン形成後の高温処理による PAA から PI への変換が必要になるなどの問題が生じている。それに対して、当研究室では市販の PI にジアゾナフトキノン系感光剤や *N*-フェニルマレイミド (PMI) を混合し、製膜、露光を行なった後、アルカリ水溶液含有現像液で現像を行うことによりネガ型パターンが得られるネガ型反応現像画像形成 (NRDP) を開発しており、その応用展開などを進めている。

一方、当研究室では最近、有機溶媒に可溶、且つ、対応する PAA がアルカリ水溶液に可溶性 PI (Scheme 1) に、感光剤 (ジアゾナフトキノン (PC-5<sup>®</sup>))、PMI、*p*-ヒドロキシベンゼンスルホン酸 (HBSA) (Scheme 1) を添加し、製膜および光照射後にアルカリ水溶液 (水酸化テトラメチルアンモニウム (TMAH) 水溶液) を用いて現像するだけでネガ型パターン形成が可能となる、アルカリ水溶液現像型 NRDP の開発に成功している<sup>2)</sup>。この方法は、アルカリ水溶液のみで現像可能であるという利点を有するが、一方で現像時間が長いことが欠点である。また、PI が有機溶媒に可溶でなければ製膜できないため、酸二無水物として 6FDA (Scheme 2) を用いなければならない、アルカリ水溶液現像型 NRDP を適用可能な PI 構造には制限がある。

そこで本研究では、スルホン化ポリイミド (SPI) にアルカリ水溶液現像型 NRDP を適用することで、短時間でのパターン形成を目指すとともに、これまで低溶解性であるためにアルカリ水溶液現像型 NRDP を適用できなかった種々の PI に、スルホン酸基を導入することで溶解性を向上させ、アルカリ水溶液現像型 NRDP を適用することを目的とした。

## 2. 実験及び結果・考察

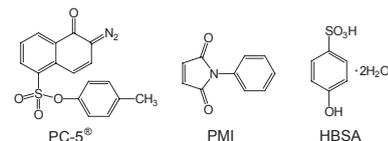
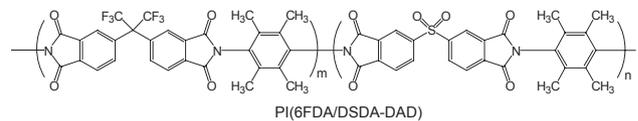
### SPI の合成

Scheme 1 におけるジアミンモノマーの一部を、スルホン酸含有ジアミン (PDAS (Scheme 2) など) に変更することにより、様々な酸含有率のスルホン化ポリイミドをワンポット重合により合成した。

また、BTDA、BPDA (Scheme 2) を 6FDA (Scheme 2) の代わりに用いた SPI を合成した。

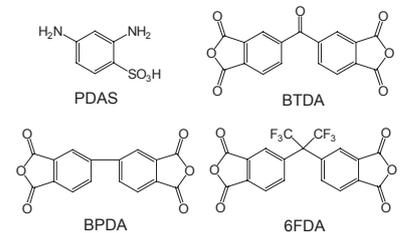
### 製膜～現像工程

SPI の 1-メチル-2-ピロリドン (NMP) 溶液にジアゾナフト



Scheme 1

キノン系感光剤 (PC-5<sup>®</sup>)、PMI を添加し、溶解させた。得られた溶液を 10 分間脱気し、銅箔面上へスピコート法により塗布し、75°C で



Scheme 2

10 分間加熱することにより膜を調製した。得られた膜を超高圧水銀灯 (波長領域 365nm~436nm) によりマスク上から接触露光した。露光後の膜を現像液 (5wt% TMAH 水溶液) に室温で一定時間浸漬した後、イオン交換水でリンスし、乾燥させることにより微細パターンを得た。

### フェノール性水酸基含有低分子化合物添加膜の溶解挙動調査

以前の研究<sup>2)</sup>において HBSA (Scheme 1) のフェノール性水酸基には露光部溶解抑制効果があることが示唆されたため、SPI においてもフェノール性水酸基を有する低分子化合物 (Scheme 3) を添加し溶解挙動調査を行い、同様の傾向が見られるかを調査した。SPI (BTDA/DSDA-DAD/PDAS) の 20wt% NMP 溶液に、感光剤 (PC-5<sup>®</sup>)、PMI、および Scheme 3 の化合物をそれぞれポリマーに対して 10wt%、20wt%、5wt% 添加し溶解させた。得られた溶液を 10 分間脱気し、銅箔上へスピコート法により塗布し、75°C でプリベークすることにより膜を調製した。超高圧水銀灯を用いて露光 (300mJ/cm<sup>2</sup>) したのち、5wt% TMAH 水溶液に室温で一定時間浸漬し、残膜率の測定を行った。現像時間と規格化した膜厚との関係から露光部・未露光部の溶解曲線を作成した。

### 加熱によるスルホン酸基の脱離

SPI を永久レジストとして用いる場合、吸水性が高いことや基板 (銅箔など) の腐食が懸念される。そこで、加熱処理によるスルホン酸基の脱離を <sup>13</sup>C-NMR 測定によって調査した。また、微細パターン形成後の加熱処理がパターン形状に及ぼす影響を SEM により観察した。

## SPI への NRDP の適用

様々なスルホン酸含有ジアミンを用いて SPI を合成しアルカリ水溶液現像型 NRDP を適用した結果、PDAS (Scheme 2)を用いて合成した SPI が最も優れた感光特性を示した。さらに、PDAS の比率を変え、スルホン酸含有率を変化させたところ、スルホン酸含有率が大きいほど膜の親水性部位が増えるため現像時間は短縮されるが、露光部の残膜率が低下することが分かった (Table 1, Entries 1, 2, 3)。また、SPI (Table 1, Entry 2)と低分子有機酸を添加したポリイミド (Table 1, Entry 5)<sup>2)</sup>を比較すると、現像時間の短縮は見られなかったが、SPI は銅箔との接着性が良く、解像度が大きく向上した。一方、Table 1, Entry 3 の SPI においては、PMI の有無によりパターン形成機構が変化し、PMI 無添加系ではポジ型になることが判明した。

## 低溶解性ポリイミドへの NRDP の適用

本来は低溶解性である BTDA、BPDA 含有ポリイミドにスルホン酸基を導入し溶解性を向上させた結果、アルカリ水溶液現像 NRDP が適用可能となった。また、6FDA のような疎水性の高い構造を含まないために、未露光部の溶解速度が向上し、現像時間の短縮が可能となった (Table 1, Entries 6, 7)。

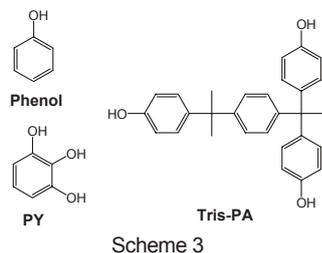
Table 1 Effect of sulfonic acid content on pattern formation<sup>1)</sup>

Entry	Tetra carboxylic anhydride	Sulfonated diamine (Content of sulfonic acid [wt%])	Development time [min:sec]	Film thickness <sup>3)</sup> [μm]	Residual <sup>2)</sup> [%]	Resolution <sup>4)</sup> [μm]
1		PDAS (3.0) <sup>2)</sup>	47'36	10.3→7.7	75	25
2		PDAS (8.8) <sup>2)</sup>	23'34	9.9→6.2	63	15
3	6FDA	PDAS (11.7) <sup>2)</sup>	19'21	14.2→3.5	25	15
4		-(HBSA 5.0)	32'42	10.6→3.5	77	-
5		-(HBSA 10.0)	27'42	11.7→8.9	76	200
6	BTDA	PDAS (10.0) <sup>2)</sup>	16'06	10.3→3.8	37	15
7	BPDA	PDAS (10.3) <sup>2)</sup>	18'41	8.8→3.2	36	100

1) PC-5<sup>®</sup> (10wt% for SPI), PMI (20wt% for SPI), Exposure dose : 300mJ/cm<sup>2</sup>  
Development condition : 5wt% TMAHq, r.t. / immersion  
2) Content of sulfonic acid [wt%] = (Molecular weight of sulfonated amine units / Molecular weight of all units) × 100  
3) At exposure area 4) By SEM

## フェノール性水酸基含有低分子化合物添加膜の溶解挙動調査

BTDA を用いた SPI において、フェノール性水酸基を有する化合物 (Scheme 3) を添加したとき露光部の残膜率が向上することが分かった。そこで、これら添加膜の溶解挙動調査を行ったところ、SPI においても PI 同様、フェノール性水酸基含有低分子化合物に露光部溶解抑制効果があることが明らかになった。特にフェノール (Scheme 3) が最も残膜率向上に効果的であることが分かった。これは、フェノールの露光部溶解抑制効果は他の添加物と比較して低いが、未露光部の溶解促進効果が大きく現像時間が短縮されることが原因であることが、溶解挙動から明らかとなった。



## 加熱によるスルホン酸基の脱離

加熱前後の SPI 膜の <sup>13</sup>C-NMR 測定を行った結果、230°C の加熱処理によりスルホン酸基が脱離することが分かった。この結果を踏まえて加熱前後でのパターンの形状を SEM で観察したところ、加熱処理によるスルホン酸基脱離後もパターン形状を維持していることが分かった (Fig. 1)。

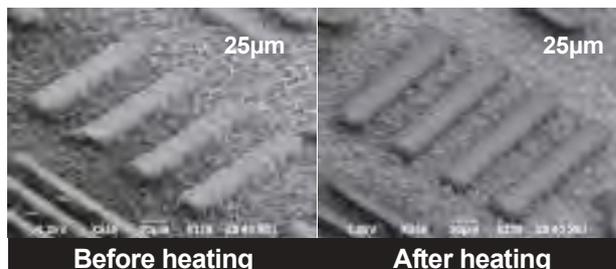


Fig. 1 SEM images of patterns of SPI (BTDA/DSDA-DAD/PDAS) based on NRDP

Conditions : 10wt% PC-5<sup>®</sup>, 20wt% PMI and 5wt% Phenol for SPI.  
Development : 5wt% TMAHq, r.t. / immersion / 16 min 06 sec. Film thickness : (Before) 8.0 μm, (After) 7.0 μm

## 4. 今後の展望

SPI へのアルカリ水溶液現像型 NRDP の適用により、テトラカルボン酸二無水物に 6FDA を用いた系では解像度が向上し、また、PMI の有無によってポジ型 (PMI 無) にもネガ型 (PMI 有) にもなることが分かった。一方で、BTDA を用いた系においては、現像時間が短縮され、さらにフェノールを添加することで露光部の残膜率を向上させることに成功した。また、加熱処理によるスルホン酸基脱離後もパターン形状が維持されることが分かった。

## 【参考文献】

- 1) T. Oyama, S. Sugawara, Y. Shimizu, X. Cheng, M. Tomoi, A. Takahashi, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **22**, 597 (2009).
- 2) 中村裕美子, 高橋昭雄, 大山俊幸, 池本慎, 水谷文一, 高分子討論会予稿集, **58**, 4138 (2009).

# 高密度実装評価

于 強

## 1. 全体計画と遂行方針及び体制

次世代パワーモジュールの開発においてその実装技術の確立および信頼性評価技術の実用化と高度化が重要である。表1には本プロジェクトの実装グループにおいて計画した研究目標を示す。さらに、表2にパワーモジュールの実装材料として使用される鉛フリーはんだ、高温はんだと次世代実装材料とそれぞれの評価課題を示している。

表1 次世代実装技術の開発目標

	第1世代(現状) '07~'08	第2世代 '08~'09	次世代 '09~'10	未来世代 '10~'15
デバイス 形態				?
デバイス	Si	Si	SiC	SiC(GaN)?
パワー密度	5~20W/cm <sup>2</sup>	20~30W/cm <sup>2</sup>	30~80W/cm <sup>2</sup>	100W/cm <sup>2</sup>
使用温度	175°C	200°C	250°C	
封止材 第1チーム	耐熱性 : 150°C 熱伝導率: 2.5W/mK 熱膨張率: 40ppm	耐熱性 : 200°C 熱伝導率: 5.0W/mK 熱膨張率: 40ppm	耐熱性 : 200°C 熱伝導率: 10W/mK 熱膨張率: 30ppm	耐熱性 : 300°C 熱伝導率: 15W/mK 熱膨張率: 15ppm
信頼性 評価 第2チーム	構造・電気・熱構造 シミュ	高温環境-Si-Ag-Cu Pbフリーはんだ、熱・構造 シミュ設計手法確立	SiC実装を前提とした 新材料適合試験の 信頼性評価手法確立	信頼性評価、評価 新実装技術確立
接合技術 第3チーム		材料: Sn/Pbはんだ 方式: 電熱	材料: Au, Ag <sup>+</sup> (粒子 方式); 電熱	

表2 パワーモジュールに使用される実装材料と評価項目

接合部温度	150°C	175°C ~ 300°C		
接合材料	鉛リッチ はんだ	鉛フリー 高温はんだ	Agナノ粒子	Au
接合工法	リフロー	リフロー	高温加圧	高温加圧
特性評価 解析技術	バルク材データ		薄膜材料データ	
信頼性評価	高温放置、熱サイクル、パワーサイクル			

表1と表2に示すように、第1世代と第2世代のパワーモジュールの実装においては使用される実装材料として従来の鉛フリーはんだや高温はんだなどが挙げられている。すなわち、実装技術においては材料の評価技術および実装方法はすでに確立されている技術で対応できるが、実用開発の効率化および高精度の支援技術の確立が課題である。一方、第3世代および第4世代においては、SiCの実装材料は従来のはんだ材料では対応できない可能性が高いため、新たなナノ粒子などの新コンセプト材料の使用が検討されている。そのため、材料の評価技術と実装方法の検討が新たな課題として加えられる。このような異なるコンセプトのパワーモジュールの物作りの支援を実現するために、本プロジェクトの実装評価チームにおいては以下のような研究計画と遂行方針を掲げている。

- (1) Si系パワーモジュールの信頼性評価の技術課題に優先順位を付けるために、モジュールの試作を実施する前に使用条件におけるモジュールのシミュレーション技術を確立する。この技術では電気・熱・構造・破損の一連の使用状況を再現することができ、これによってモジュールの実装接合部の信頼性問題の課題を設計段階から明らかにすることができる。

- (2) SiC パワーモジュールの実装技術に使用されるナノ粒子新接合材料、接合部の微細化に備え、微粒子デジタル相関法を用いてミクロン接合体の非接触かつ高精度の材料特性の評価技術を確立する。
- (3) さらに、確立した技術を公共試作開発ラボ機能としての機能を果たすために、必要とされる評価技術と設備の整備を行う。

また、接合工法及び評価チームとしては、高耐熱接合技術開発のため、接合材料として高温鉛フリーはんだに加えて金ナノ粒子、銀ナノ粒子など新材料の接合技術応用を狙った研究、接合工法としてリフローの高温化の他、高温加圧金属結合やナノ粒子間金属結合技術の研究を行う。さらに、これらの材料、工法で形成した接合の高温・大電流密度下における高信頼性を狙って接合部の機械特性変化、材料特性変化をバリアメタル構造および実装基板との関連において明らかにし、高耐熱化可能性を明らかにする。これらの研究を遂行することにより、高耐熱接合の評価技術獲得を行う。

## 2. 研究成果の概要

### 2. 1 パワーモジュールの信頼性評価のためのシミュレーション技術

パワーモジュール部品実装において、はんだは素子を基板に接続する重要な方法であるため、はんだ接合部の信頼性が重要な問題として注目されている。はんだ接合部にき裂が生じ破断に至る主な原因として、熱応力と温度サイクル負荷による低サイクル疲労が挙げられる。この現象は、異なる熱膨張係数を有する、コンポーネント、はんだ接合部、基板が繰り返し温度変化(チップキャリアからの発熱、外気温度の変化、電源のON/OFFなど)を受けることによって生じる。

自動車における実使用時には、その電氣的な負荷によりパワーデバイスチップでジュール熱が発生する。これにより、その周辺のワイヤやはんだ接合部の熱疲労破壊が引き起こされる。このように、チップ周辺における電氣的負荷の変化によるジュール熱の温度上昇・下降を対象にし、ワイヤボンディング、はんだ接合部の熱疲労寿命を評価するのがパワーサイクル試験である。

パワーモジュールの動作寿命の推定に使用されているのは、パワーサイクル試験(断続通電試験)である。パワーサイクル試験はモジュールを放熱プレートに固定した状態で電圧の通電・遮断の電氣的負荷を与え、チップの接合温度( $T_j$ )を上昇・下降させることにより、熱負荷を発生させ、破壊するまで行うものである。パワーサイクル試験は、図1に示すように接合温度を比較的短時間の周期で上昇・下降させる試験であり、主にワイヤ接合部およびチップ下はんだ接合部の寿命を評価するものである。

また、パワーサイクル試験ではデバイス内部の温度分布は不均一になる事が知られている<sup>[32]-[40]</sup>。そのため、デバイスが均一に温度上昇する温度サイクルによる信頼性評価とは、その疲労破壊メカニズムが異なることが考えられる。そこで、より短期間で簡便的にはんだ接合部の熱疲労寿命について評価し、熱疲労寿命を設計の段階で評価する手法が求められている。

本プロジェクトではパワーモジュールのはんだ接合部に対して短時間で効果的な熱疲労信頼性評価を行なうため、FEM解析によるパワーサイクル試験下での熱疲労寿命の定量的評価手法を確立した。

パワーサイクルによる熱疲労破壊のメカニズムを評価するためのFEM解析は以下のような手法によって行われる、まず、不均一な温度分布を考慮するために、電気-熱連成解析を行う。この解析では電氣的負荷を与えることにより発生するジュール熱を計算し、パワーモジュール内部における不均一な温度分布を明らかにする。この解析は電氣的特性が温度依存性を持つ弱連成解析である。次に、電気-熱連成解析より得られた不均一な温度分布を熱-構造連成解析に適用させ、非線形構造解析を行う。この解析は機械的特性が温度依存性を持つ弱連成解析である。はんだ接合部の熱疲労寿命は非線形ひずみ振幅に依存する。そこで、パワーサイクルにより生じるはんだ接合部での相当非線形ひずみ振幅を算出し、値が大きい要素から削除することにより、き裂進展過程を再現した。そして、要素を削除したモデルを用いて、再び電気-熱連成解析を行った。この過程を繰り返すことにより、パワーサイクルによるはんだ接合部のき裂進展経路評価が可能となる。さらに、この一連の手法を行なうことにより、き裂進展過程における電氣的特性や放熱性の評価も可能となる。この提案した手法を用いることにより、パワーサイクル試験における熱疲労寿命の定量的信頼性評価手法としての検討を行う。

パワーサイクル試験においては、温度サイクル試験と同様に熱疲労によりき裂が進展することが考えられる。ここでは、このメカニズムを応用する事により、き裂進展解析を行なう。き裂進展解析にはまず、き裂を進展させたモデルを作成し、各き裂進展モデルの熱疲労解析を行う。その解析結果から非線形ひずみを測定し、Manson-Coffin 則で疲労寿命の算出する。算出した疲労寿命から線形被害則(マイナー則)を用いて累積破断寿命を計算する。はんだ接合部の最終破断は、繰り返しのひずみによる局所的な疲労き裂の発生、疲労き裂の連続化、疲労き裂の進展と最終破断などの段階を経て生じる。それぞれの段階の損傷が蓄積し、その損傷率 $\eta$ は次式に示す線形被害則によって定量的に評価することができる。複数

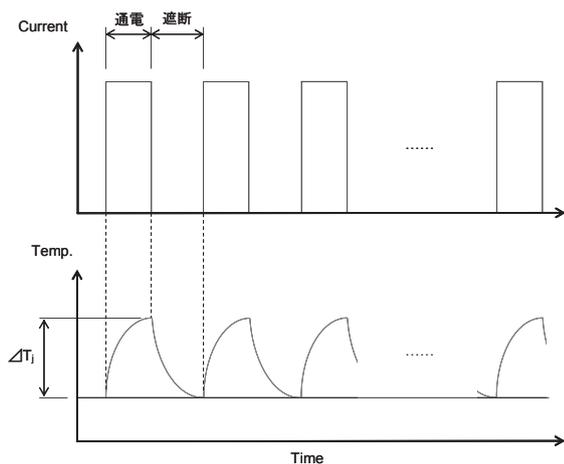


図1 パワーモジュールの Power-on-off 試験

のひずみ振幅  $\Delta\varepsilon_i$  が  $N_{fi}$  回繰り返された場合の損傷率である。

$$\eta = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{fi}} \quad (1)$$

$$N_{fi} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta\varepsilon_i}{\varepsilon_0} \right)^a \quad (2)$$

ただし、 $N_{fi}$  は式 (2) に示すようにそれぞれのひずみ振幅  $\Delta\varepsilon_i$  で単独負荷する時の疲労寿命である。そして、損傷率が 1.0 になったとき、ここで定義した疲労寿命に達する。また、

線形被害則の確認実験から、はんだに対して線形被害則がほぼ成り立っており、これを用いて評価を行うことの妥当性が

示されている。

き裂進展解析とは、はんだ接合部の損傷を判定し要素を削除することにより、き裂が進展した場合の構造体で行う解析である。き裂進展解析は図2に示す順序で行なう。まず、き裂の存在しないモデルに熱負荷を加え、はんだ接合部に発生するダメージを抽出する。次に損傷度が大きい要素の削除を行う。要素削除に関しては、各解析ソルバーのオプションによって異なるが、直接要素を無効にする場合や材料物性を変化させ擬似的に削除する場合などいくつかの方法が挙げられる。この要素の削除により、き裂を進展させたモデルを作成する。そして再び、熱負荷を加え、結果の抽出、要素の削除、熱負荷を加える、といったプロセスをはんだ接合部の破断近傍まで繰り返す。

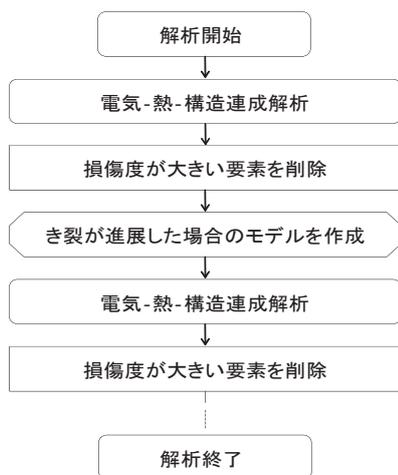


図2 パワーモジュールの Power-on-off サイクル試験の解析手順

ここでは、解析に使用したパワーデバイスモデルは自動車用のパワーデバイスとして広く用いられている IGBT パワーモジュールの構造を参考にし、評価用モデルを作成した<sup>[1], [2]</sup>。解析に用いたモデルを図3に示す。このモデルはシリコンチップ(IGBT)、絶縁基板(Cu、AlN、Cu)、そして放熱板(Al)の3構造から成り立っており、それらを Sn-Ag-Cu はんだで接合している。そして、チップと Cu パターンを Al ワイヤボンディングで接続している。現在一般的に、自動車用のパワーデバイスにおける1次実装(チップ直下のはんだ接合部)に対しては、高温はんだが用いられていることが多いが、環境問題への関心の高まりや、今後、鉛フリー化への移行が予想されることから、今回の解析では1次実装側にも鉛フリーはんだ(Sn-Ag-Cu)を使用した。

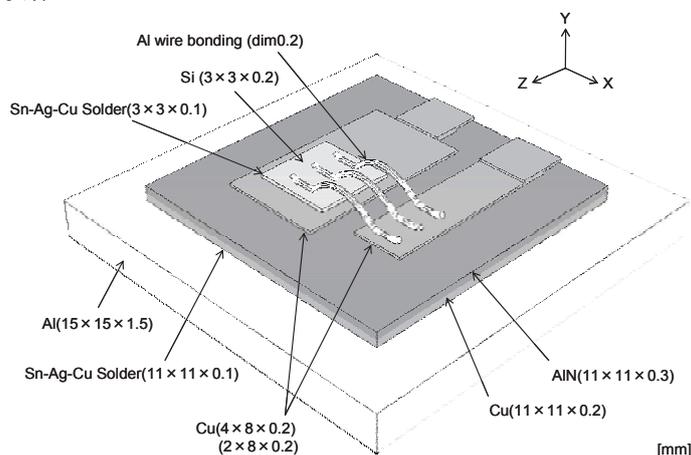
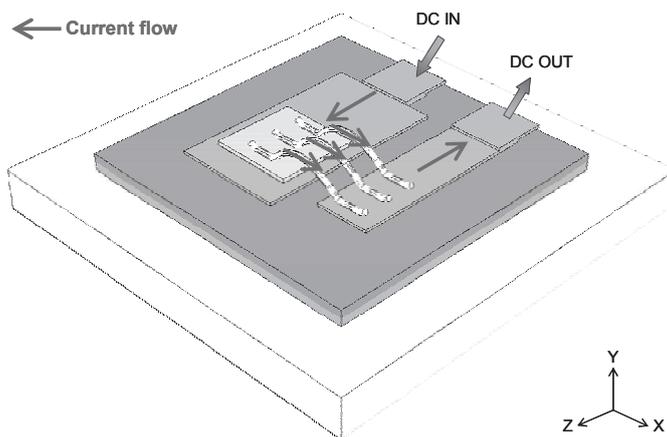
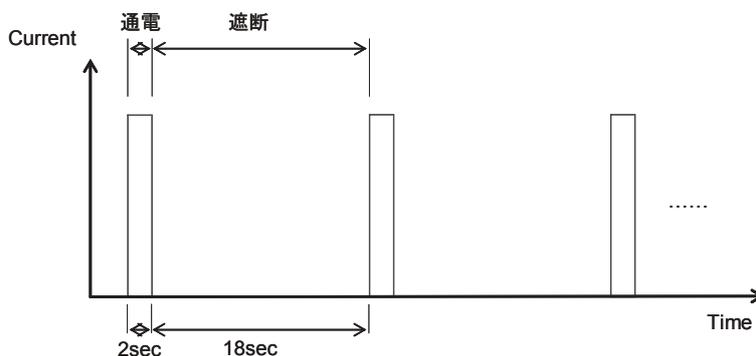


図3 IGBT パワーモジュールの解析モデル

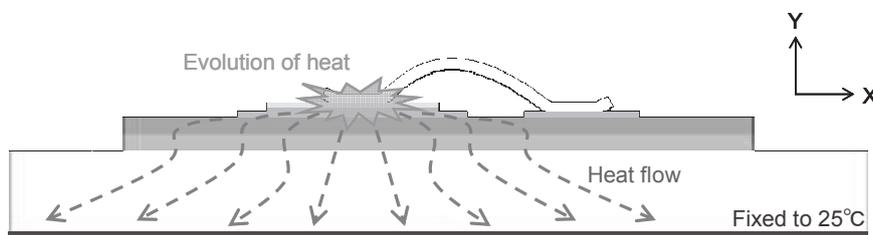
FEM 解析(電気-熱連成解析)を用いることにより、電氣的負荷により発生するジュール熱とその温度分布の關係性を明らかにする。電気-熱連成解析における解析条件を図4に示す。電氣的条件としては図4(a)の DC IN(コレクタ側)と DC OUT(エミッタ側)の間に電氣的負荷を与えた。電流は、コレクタ側から Cu パターン、Al ワイヤボンディングを通してエミッタ側へと流れる。この電流はコレクタ電流である。コレクタとエミッタ間の電圧差がコレクタ・エミッタ間電圧である。電氣的負荷時間条件は JIS 規格 C7021 B-6(この規格は 1997 年に廃止されている)を参考にし、ON 時間を 2 秒、OFF 時間を 18 秒とした。その電気負荷条件を図4(b)に示す。そして、温度条件としては、図4(c)のモデル底面部表面温度を 25°Cで固定し、冷却を考慮した。放熱の流れとしては、チップ周辺で発生した熱を放熱板にて拡散させる。最後に、この解析で使用した電氣的、熱的な材料物性値を表3に示す。



(a) 電気特性の解析条件



(b) 印加電流の履歴



(c) 熱の境界条件

図4 解析条件

表3 電気-熱解析モデルの材料特性

	Al		Si	SnAgCu	Cu	AlN
	wire bonding	heat spreader	chip	joint layer	pattern	insulator
Conductivity [W/mm·K]	0.237		0.148	0.055	0.401	0.15
Electrical Conductivity [ $\Omega$ ·mm]	37700		0.5	9090.9	59600	$1 \times 10^{-15}$
Density [ $10^6$ kg/mm <sup>3</sup> ]	2.69		2.33	7.4	8.96	3.4
Specific Heat [J/kg·K]	900		700	234	380	710

パワーサイクルによるジュール熱分布の熱疲労破壊への影響を明らかにするために電気-熱連成解析を行った。はんだ接合部の熱疲労寿命は非線形ひずみ振幅によって評価できることが知られているため、本研究でははんだ接合部の非線形ひずみ振幅を抽出するために FEM 解析を使用する。熱-構造連成解析には電気-熱連成解析と同様に図3の解析モデルを用いた。また、FEM 解析モデルは4節点四面体要素にて構成されている。ここで、すべての材料はヤング率、ポアソン比、熱膨張係数を有する。この材料物性値を表4に示す。また、はんだ材料は弾塑性クリープ体と仮定した。パワーサイクルにより発生したジュール熱の構造に対する影響を明らかにするため、電気-熱連成解析の各時間における温度節点解を温度境界条件として熱-構造連成解析へと適用させ解析を行った。解析結果として、1実装側はんだ接合部での相当非線形ひずみを取得した。これは、下側(2次実装側)はんだ接合部よりも1実装側はんだ接合部がチップ近傍に存在し、発熱が大きくなるためひずみが集中し、熱疲労が厳しくなることが想定されるためである。

表4 熱-構造解析モデルの材料特性

	Al		Si	SnAgCu	Cu	AlN
	wire bonding	heat spreader	chip	joint layer	pattern	insulator
Young's Modulus [MPa]	70000		130800	40000	120000	320000
Poisson's ratio	0.3		0.28	0.3	0.3	0.24
CTE [ $10^{-6}$ /°C]	21.5		4.2	23	17	4.6

き裂進展解析では削除要素の判定基準であるしきい値は“相当非線形ひずみ振幅の値、上位 500 要素”とした。この解析により、き裂発生場所の判断は相当非線形ひずみ振幅値の大きい要素から毎ステップごとに 500 要素の削除を行い、き裂進展経路を得た。

ここでは Manson-Coffin 則のひずみ振幅  $\Delta \epsilon_{in}$  によってはんだ接合部の疲労寿命を整理している。ここでは疲労寿命評価に使用される力学的パラメータを次のように定義した。まず、図5はパワーサイクル試験を行った際の電氣的負荷と非線形ひずみ履歴で1.5サイクル分の履歴を示すものであるが、図に示すように、そのうちの1サイクルの間に発生する非線形ひずみをとって  $2\Delta \epsilon_{in}$  とした。そして、 $\Delta \epsilon_{in}$  が非線形ひずみ振幅となる。ここで、非線形ひずみとは、塑性ひずみとクリープひずみの和である。

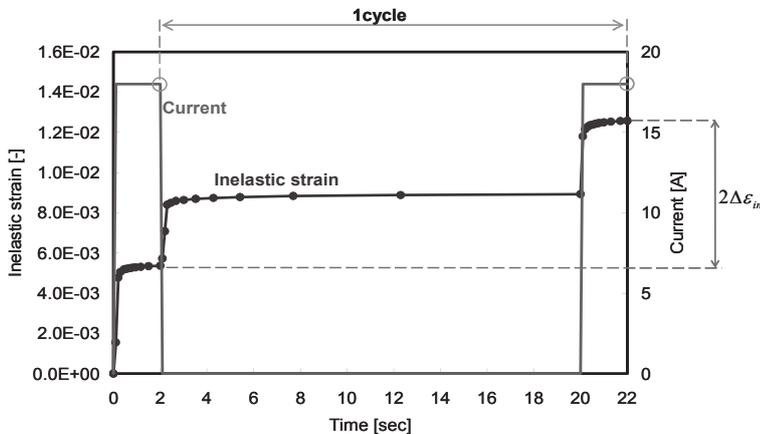


図5 非線形ひずみ幅の評価

次に電気-熱連成解析の結果を図6(a)~(d)に示す。図6(a)の電位分布が示すように、コレクタ・エミッタ間に電位差を与えると Cu パターンを通り、Sn-Ag-Cu はんだ、チップ、ワイヤボンディングへと電流が流れていることがわかる。図6(b)の電流密度分布から電流はワイヤボンディング部に集中していることがわかる。この電位分布、電流密度分布より発生したジュール熱による温度分布を図6(c)、(d)に示す。図6(c)より、デバイス内部で不均一な温度分布が発生していることがわかり、チップとワイヤボンディング接続部で最高温度が生じている。また、熱的特性として、放熱への影響を見ると、底面部の冷却条件により、絶縁層、放熱板では温度上昇が低いことがわかる。さら

に、パワーデバイス内部での温度分布を知るために図 6 (d) に 1 次実装側のはんだ接合部における温度分布を示す。これより、ワイヤボンディング直下で高温となり、そこから同心円状に温度が分布していることがわかる。次に、この電気-熱連成解析より得られた温度分布を用いて、熱-構造連成解析を行った。

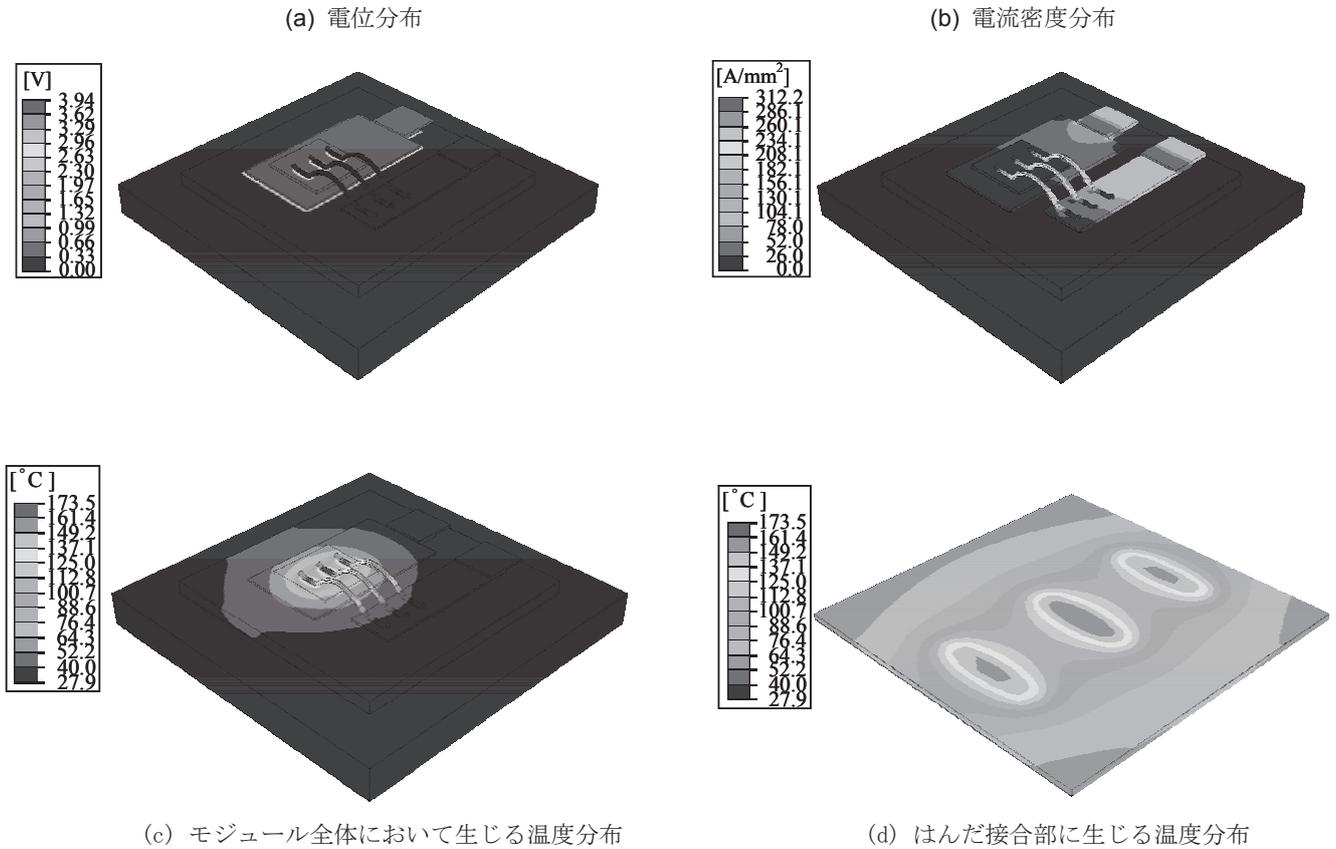


図 6 電気-熱連成解析の結果

熱-構造連成解析の結果を図 7 (a)~(b) に示す。図 7 (a) に示す 1 次実装側のはんだ接合部における相当クリープひずみ分布では、ワイヤ直下にひずみが集中し、そこから同心円状に分布していることがわかる。また、図 6 (d) の温度分布と比較するとひずみ分布はジュール熱による温度分布に依存していることがわかる。そして、図 7 (b) の 1 次実装側はんだ中央部での相当非線形ひずみと温度の履歴を見ると、温度変化に追従し、ひずみが累積して行くことがわかる。これより、ひずみの分布や履歴はパワーサイクル荷重に依存していることがわかり、パワーサイクル下における熱疲労を評価することが可能であることがわかる。次に、この熱-構造連成解析により得られた 1 次実装側はんだ接合部におけるひずみデータを用いて、き裂進展解析を行った。

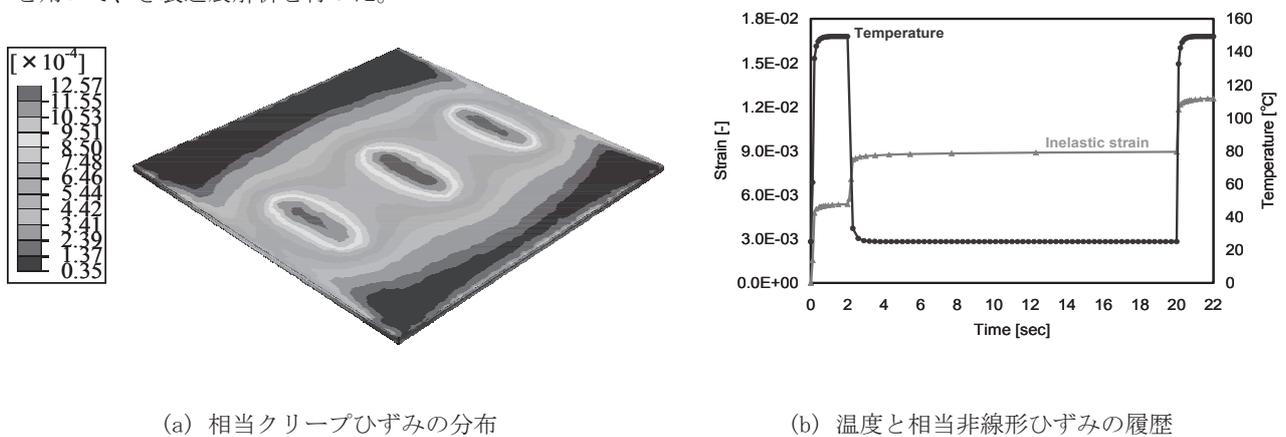
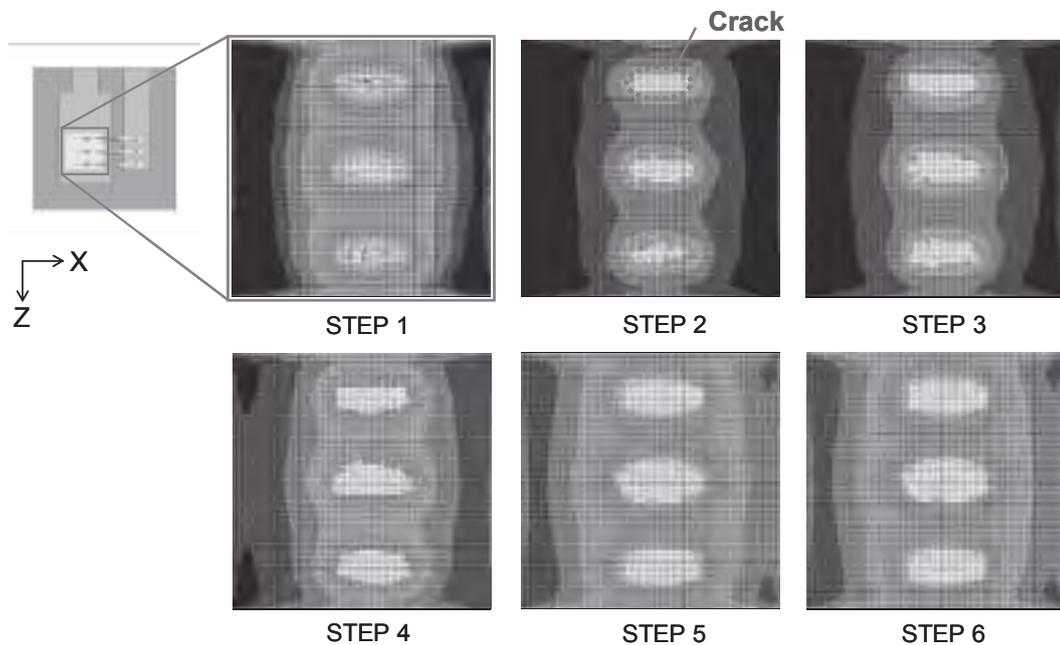
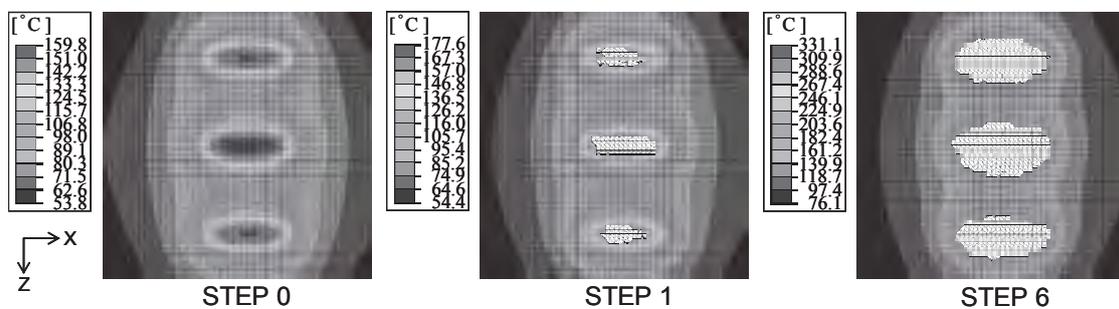


図 7 熱-構造連成解析の結果

次にパワーサイクル下でのき裂進展解析結果を示す。解析は6ステップ行った。図8に1次実装側はんだのき裂進展結果を示す。白い部分が削除された要素である。初期き裂はワイヤボンディング直下において発生し、そこから同心円上にき裂が進展する。また、3箇所の子裂進展部を比較すると、はんだ中央部でのき裂進展量が多いことがわかる。一方、この他の部分ではき裂が発生することは無かった。また、き裂が進展するに従って温度が上昇していることがわかる。このことから、はんだ接合部の劣化は構造的な問題だけではなく、電気的、熱的な問題へと発展する事が予測される。



(a) パワーサイクルを受けるはんだ接合部の疲労き裂



(b) き裂進展モデルに生じる温度分布の変化

図8 き裂進展解析の結果

パワーサイクルと温度サイクルによるき裂進展経路を比較すると、き裂発生場所に大きな差異が見られた。均一な温度分布である温度サイクルはチップと基板とのミスマッチをはんだ接合部が緩和することにより、はんだ端部にき裂が発生する。しかし、不均一な温度分布であるパワーサイクルでは、チップと基板のミスマッチ以上に、高温部となるワイヤボンディング直下のはんだ接合部での熱疲労が大きく、き裂が発生する場合もあると考えられる。すなわち、き裂の発生は、端部に集中するとは限らずその温度分布に依存することがわかった。よってパワーモジュールの信頼性を向上させるためには、温度分布を考慮した設計が必要であると考えられる。

また、き裂進展量の増加に伴い、最大発熱温度も増加していることがわかる。このことから、はんだ接合部が劣化することにより、発熱温度の増加が生じ、熱疲労が大きくなり、疲労破壊が加速度的に進行して行く事が予測される。

## 2. 2 次世代実装材料の評価技術

SiC 素子を用いる次世代のパワーモジュールの実装方法の一つとして、銀(Ag)ナノペーストによる接合を検討している。これは、サブミクロンの Ag 系粒子と Ag ナノ粒子の混合物からなり、300°C程度 of 加熱と一定の加圧によって Ag ナノ粒子を覆う有機物が分解され銀化しながら接合させる方法である。形成された接合層は接合時の加圧により薄膜となり、十分な耐熱性と接合強度が期待できる。しかしその一方で、焼結によって形成される接合層はバルクと比べて低い弾性係数を示すことが指摘されている。この原因としては、有機物を含む金属ペーストは焼結時に発生するガスがトラップされ接合層全体が多孔質の組織で密度が低いことや、はんだのような熔融接合とは異なり 1 つ 1 つの結晶が非常に細くなるため粒界すべりや部分的な粒界のき裂など変形に対して粒界の影響が顕著に表れる可能性、さらには、加圧によって結晶が配向し接合層の機械的特性に異方性が生じる可能性、などが考えられる。従って、高耐熱構造の高精度な信頼性評価を可能にする数値解析には、従来のはんだのようにバルク材の特性を用いることができず、薄膜接合層の状態での強度特性が要求され、その評価法を新たに確立する必要がある。

本プロジェクトでは、実際に SiC チップ実装部で生じる力学的挙動を再現した薄膜接合層の強度評価法を考案し、これによって取得したデータを用いた解析を可能にすることによって、高耐熱構造のより高精度な熱疲労信頼性評価を可能にすることを目的とした。また、き裂進展量の増加に伴い、最大発熱温度も増加していることがわかる。このことから、はんだ接合部が劣化することにより、発熱温度の増加が生じ、熱疲労が大きくなり、疲労破壊が加速度的に進行して行く事が予測される。

そこで、本研究においては、材料の CTE の差を利用した薄膜せん断強度評価法を考案した。本評価法の原理について説明する。図 9 に試験治具の概要と実際に使用した治具の写真を示す。これらは CTE の大きいアウターフレームと CTE の小さいインナーフレームで構成されている。インナーフレームは 2 つに分かれている (図 9(a)の (A)、(B))。2 つに分かれたインナーフレームの間に接合層が形成されている。アウターフレームとインナーフレームの端部は接着材で接合する。この試験治具全体を加熱すると、アウターフレームはインナーフレーム (A) (B) を逆方向へ引っ張る。この変位量はアウターフレームとインナーフレームの CTE のミスマッチ量とアウターフレームのスパンおよび加える温度差によりコントロールすることが出来る。

このとき、発生する変位量  $x$  は理想的には次式により算出される。

$$x = L \times (\alpha_{high} - \alpha_{low}) \times \Delta T \quad (3)$$

$L$  はアウターフレームのスパン、 $\alpha_{high}$ 、 $\alpha_{low}$  はアウターフレームとインナーフレームの CTE、 $\Delta T$  は加える温度差である。実際は、アウターフレームとインナーフレームを接合している接着材が変形するため、式 (3) の通りにはならない。この変位量を正確に測定し、それによって接合層に発生するせん断荷重をインナーフレーム (A) の架橋部に貼り付けたひずみゲージを用いて測定することによって、薄膜接合層のせん断方向の機械的強度特性の評価が可能となる。

30 $\mu$ m 程度の薄膜接合層のせん断方向の弾性率や材料特性を評価するためには、30nm 程度の変位分解が必要となる。そこで、接合層の周辺を撮影し変位負荷前後の画像を撮影し、デジタル画像相関法 (Digital Image Correlation Method; DICM) により処理し、変位量を算出する方法を用いた。接合層周辺を直接観察することで、接合層周辺の弾性変形などの影響を排除することが可能となり、変位測定精度を向上させた。また、試験片の寸法は 5 $\times$ 5 $\times$ 2cm 程度の大きさであるため、電子顕微鏡などの高倍率で測定のできる装置を用いることで 1nm 程度まで変位分解を向上することができると考えられる。

測定した変位量よりせん断ひずみ  $\gamma$  は、次式により算出される。

$$\gamma = \frac{x}{t_{joint}} \quad (4)$$

$x$  は測定したせん断変形量、 $t_{joint}$  は薄膜接合層の厚さである。薄膜接合層に発生する荷重は架橋部に接着されたひずみゲージにより測定する。一般的にひずみゲージを試験体に接着した場合は、外力によるひずみはなくても、温度が変われば試験体とゲージ受感部材料の線膨張係数の差により見かけひずみが生じる。そのため、引張力により発生する架橋部のひずみ量を算出するには、見かけひずみを補正する必要がある。

補正はひずみゲージを接着したインナーフレームを単体で加熱し、その際に発生す見かけひずみ $\epsilon_{thermal}$ を測定する。アウターフレームに引っ張られることで架橋部に発生するひずみ $\epsilon_{bridge}$ は、試験時にゲージより出力されるひずみ $\epsilon_{bridge}$ と $\epsilon_{thermal}$ を用いて次式により算出される。

$$\epsilon_{bridge} = \epsilon_{gauge} - \epsilon_{thermal} \quad (5)$$

接合層に負荷されるせん断力 $F$ は、 $\epsilon_{bridge}$ と架橋部の材料のヤング率 $E_{bridge}$ 、架橋部の断面積 $S_{bridge}$ を用いて次式により算出される。

$$F = \epsilon_{bridge} \times E_{bridge} \times S_{bridge} \quad (6)$$

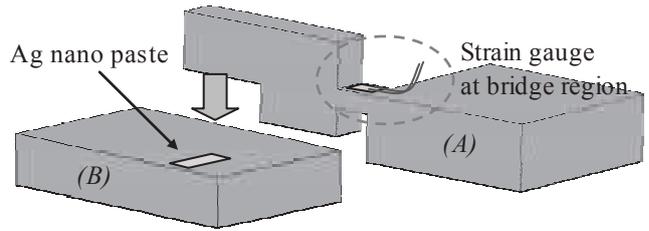
せん断応力 $\tau$ は、式(7)により算出される。

$$\tau = \frac{F}{S_{joint}} \quad (7)$$

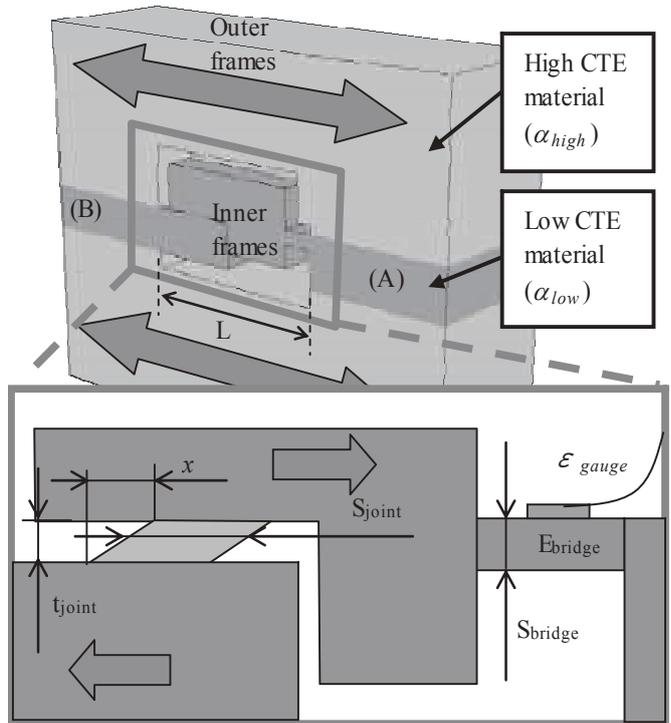
$F$ は式(6)により求めたせん断力、 $S_{joint}$ は接合層の断面積である。接合層の断面積は試験後に、インナーフレームを液体窒素により冷却後、脆性破壊し観察を行い求める。

考案した薄膜せん断強度評価法においては、インナーフレーム (A) と (B) の変位測定と架橋部に貼り付けたひずみゲージによるひずみ測定、および見かけひずみを正確に算出するための試験片の温度測定が必要となる。以下に、それぞれの測定に使用する測定装置について説明する

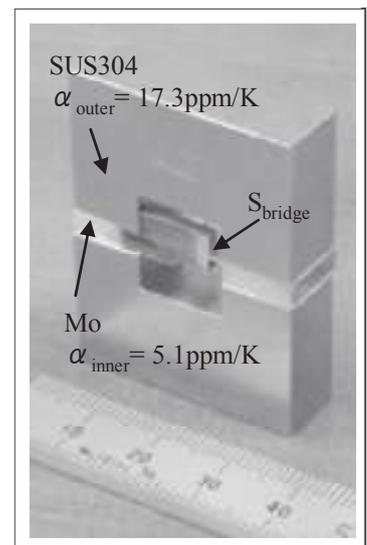
高い変位分解能を実現するため、光学顕微鏡による拡大装置と加熱用のヒーターを備えた光学式 DICM システムである Omistrain™ (OMI 社製) を用いた。簡単に変位の測定原理を説明する。試験装置の概要を図 10 に示す。光学 CCD カメラにより事前に撮影した基準画像と温度変化後の対象画像の間の差をデジタル画像分析により算出することで、観察領域における変位  $D_x$ 、 $D_y$  を計測することができる。これによって、相対的に各部の変位を求めることが可能となる。測定領域にはチャンバーを具備しており、温度サイクルを負荷することが可能であり、熱変形下の変形挙動を詳細に検証することができる。変位分解能は 14nm (20 倍の対物レンズ使用の場合) となっている。加熱可能な温度範囲は  $-65^{\circ}\text{C} \sim 350^{\circ}\text{C}$  で、最大加熱・冷却率は  $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$  となっており、パワーデバイスの使用温度領域をカバーしている。



(a) Ag ナノ粒子ペーストで接合したインナーフレーム



(b) 試験装置と計測原理



(c) 試験用の計測装置

図 9 Ag ナノ粒子接合層材料の特性計測装置

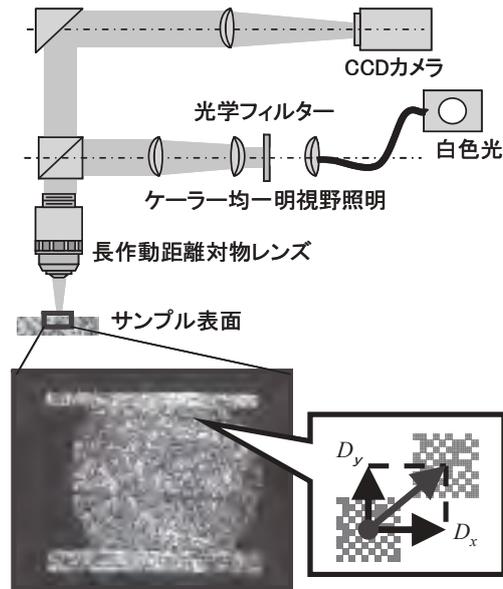


図 10 DICM 計測システム

本研究で用いた治具と装置の仕様について示す。

アウターフレーム材料：S U S 304 (17.3 p p m/K)

インナーフレーム材料：M o (5.1 p p m/K)

接着材：東亜合成社製 アロンアルファ EXTRA4020

変位分解能：14nm

荷重分解能：0.3N (ひずみゲージの分解能を  $1.0 \times 10^{-5}$  とした場合)

測定可能な温度範囲：-10°C ~ 80°C

最大変位量： $x_{\max} = L \times (\alpha_{\text{outer}} - \alpha_{\text{inner}}) \times \Delta T$  (L=36mm とした場合)

$$= 36\text{mm} \times (17.3\text{ppm/K} - 5.1\text{ppm/K}) \times 90^\circ\text{C}$$

$$= 39\mu\text{m}$$

最大荷重： $P_{\max} = \sigma_y \text{Mo} \times S_{\text{bridge}}$  ( $S_{\text{bridge}} = 2\text{mm}^2$  とした場合)

$$= 400\text{MPa} \times 2\text{mm}^2$$

$$= 800\text{N}$$

以上の仕様から、薄膜接合層の特性を測定するには十分な性能を有していることが分かる。図 11 には実際計測した Ag ナノ粒子接合層の特性の例を示す。

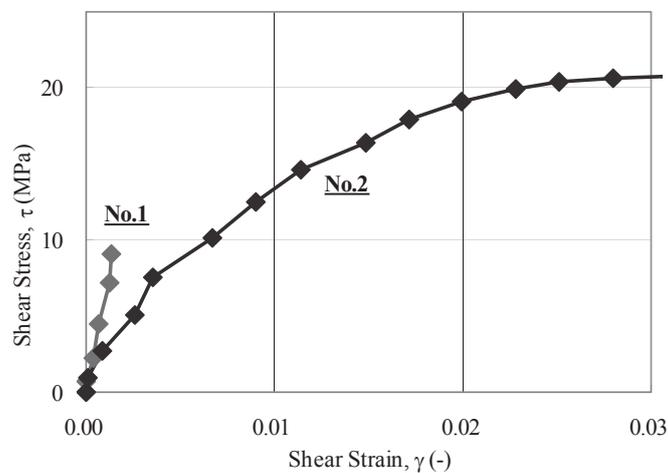


図 11 Ag ナノ接合層の応力-ひずみの計測結果の例

## 2. 3 公共試作開発ラボ機能のための環境整備

本プロジェクトの大きな目的の1つは研究成果をこれからパワーモジュールとその関連技術の開発を行う中小企業のための公開試作開発ラボ機能の整備である。本件研究において確立されたシミュレーション評価技術、新材料の評価技術のほかに、次世代のパワーモジュールの開発に必要とされる 300℃以上の環境で実施できる、温度サイクルの耐久疲労試験と Power-on-off のパワーサイクル試験の設備である。本チームは平成 21 年度において経済産業省の委託事業を申請し、その支援を受けて、超省エネ型の熱衝撃試験機を製作し、公開試作開発ラボ機能の整備を進めている。図 12 には開発した試験の概念図である。また、開発コンセプトと設計段階においてこれまでに確立したシミュレーション技術を活用し、短期間で先進的な開発を行うことができ、そのコンセプトを特許として出願している。

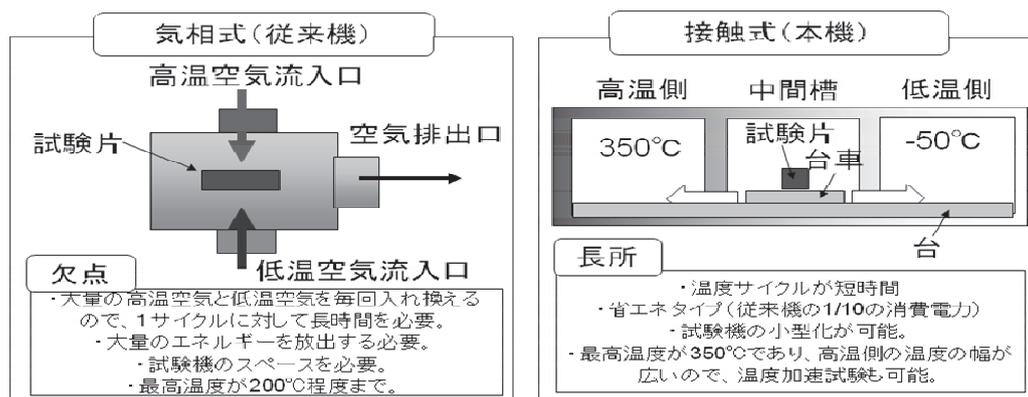


図 12 接触と蓄熱式温度サイクル試験の構想図

公開試作開発ラボ機能のシステムと設備：

- (1) 電気-熱-構造連成シミュレーションシステム
- (2) 実装プロセス評価シミュレーションシステム
- (3) バルク材料の材料特性評価システム
- (4) 薄接合層の材料評価システム
- (5) 表面熱ひずみの計測システム
- (6) 接合部の疲労特性評価システム
- (7) 高温環境 (350℃) の温度サイクル試験装置 (-50℃~350℃)
- (8) パワーデバイスのパワーサイクル試験装置

## 3. 課題及び今後の展望

さらなるパワーモジュールの小型化技術もこれから求められている。それに向けては、(a)低損失化、(b)高放熱化、(c)高耐熱化の 3 つの技術課題に分けられる。低損失化においては、例えばパワーデバイスとして最も一般的な IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) において、ウエハーの薄膜化やトレンチゲート構造の採用<sup>[47-49]</sup>などこれまでも様々な対策が施されている。そして今後は、デバイス材料として Si に代わるシリコンカーバイド (SiC) やガリウムナイトライド (GaN) などの化合物半導体を利用した超低損失化の技術が注目を集めている。

高放熱化においては、例えばパワーデバイスの実装基板として一般的に用いられているセラミックス絶縁基板において、アルミナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) から熱伝導率の高い窒化アルミニウム (AlN) への変更や、基板の金属回路を厚膜化してチップ直下での熱拡散を効果的に利用するなど<sup>[51]</sup>、材料や形状および実装プロセスにおいて数多くの対策が実施されている。最近ではチップで発生した熱を下面だけではなく、銅 (Cu) のリードフレームを用いてチップ上面からも抜熱させる構造が開発されており、熱解析の結果によると 2~3 割程度の低熱抵抗低化が実現できると考えられる。

高耐熱化においては、従来 Si デバイスはその物性から最大でも 150℃程度が使用限界とされてきた。これに対して、先にも述べた SiC を用いた高温デバイスの研究開発が近年盛んである。これらの材料からなるデバイスは Si と比べて損失が 2 桁小さいだけでなく、約 400℃という高温動作に対する可能性も期待されている。すなわち、チップの高耐熱化によって従来より電流密度を増加させることができ、その結果、チップのシュリンクによるパワーモジュールの更なる小型

化が可能になる、または、冷却システムの簡素化によるインバータ全体の小型化が可能になると考えられている。しかしながら、高耐熱化に向けては、はんだに代わる実装接合材料やその周辺部材の耐熱性向上、さらにはそれらの信頼性評価手法の確立等、実装技術における多くの課題を解決する必要がある。

SiC 高耐熱モジュールの実現に向けては、そのプロセスによって大きく 3 つの技術開発が必要とされる。一つはウエハー技術でもう一つがデバイス技術、そして最後にその実装技術である。デバイス技術にはオン抵抗や SW 損失など基本特性の改善から高耐熱化した場合の個別課題<sup>[52-53]</sup>などが含まれる。実装技術においては、材料と実装プロセスの開発、電気や熱特性など実装部における機能や構造の設計技術、およびその信頼性評価技術といった 3 つの技術領域に分解できる。

このうちのひとつとして、材料とプロセスの開発について説明する。その最も大きな問題として、SiC は Si と比べてより高い温度域でも動作するため、その実装に従来のはんだを使用することができない点が指摘されている。これに対して、いくつかの高温接合材料に関する研究開発が進められているものの、いずれも信頼性に課題が残る。その他にも絶縁樹脂の耐熱性の問題などが考えられる。これには、ポリイミド系やガラス系などの耐熱樹脂を利用したモジュール封止方法が考えられる。最近では ADEKA (旧旭電化) が 400°C耐熱のゴム状樹脂を開発したと報告しており、今後も更なる材料開発が期待される。

次の設計技術については、FEM モデルの作成から電場や熱応力の解析、および熱電対や赤外線カメラを利用した温度計測等、概ね従来の Si からなるモジュールの評価・設計手法を転用できると考えられる。

そして最も重要で検討に長期間を有するのが信頼性評価技術である。特にチップ接合部においては、今まで以上の温度差が加わることになり、従来より厳しいと言われてきた車載向けの信頼性要求を超える過酷な試験条件が課されることになる。従って、まず最優先で取り組むべき課題として、従来のはんだが有していた機能を確保できる高耐熱実装技術の確立があげられる。

また、すでに図 13 のような新しい高耐熱構造も提案されている。これはチップと基板の CTE 差による熱膨張または熱収縮のミスマッチを、接合層ではなく基板側の金属に担わせる実装構造である。具体的には、基板金属に接合層より低い応力で変形が可能となるアルミニウム (Al) を、高耐熱接合層には高強度になる接合法を検討している。つまり、Al ははんだに近い機械的特性として、低い引張強度 (降伏強度) と高い延性を示す材料であり、基板金属に Al を適用し、接合層に Al より高い引張強度 (降伏強度) を示す材料である AlSi や AuSn 等のろう材を用いることで、応力緩和と接合信頼性の課題を基板金属が解決する構造である。これらの接合層は、チップと接合層自体との CTE 差による熱応力を抑制するために、極力薄く形成する必要がある。例えば、低温実装プロセスによる高いメリットを期待して銀 (Ag) ナノ粒子とサブミクロン粒子を混合したペーストによる接合方法を用いられる例がある。この接合法は、300°C前後でのチップ実装が可能で、接合後はバルク化するため十分な耐熱性と共に高い接合強度が期待できる。さらに、低温加圧接合によって薄膜になるため、チップに余計な残留応力を発生させないメリットもある。

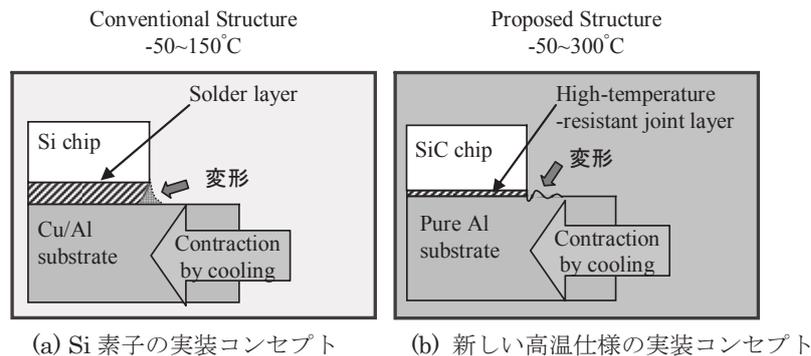


図 13 SiC 素子の実装新技術のコンセプト

このような高耐熱構造の実装部に求められる機能には、高温でも安定した電氣的・熱的特性を維持できることと共に、基板金属と高耐熱接合層には以下にあげるような機械的特性が要求される。

- (a) 基板金属 (Al) は、チップと基板の CTE 差に対して、Al 自身が変形して実装部の応力緩和を実現すること。
- (b) 基板金属 (Al) は、変形の繰返しに対して、安定した疲労を経て要求される信頼性を確保すること。
- (c) 高耐熱接合層 (Ag 接合層) は、Al より先に疲労破壊しないこと。

これらを確認するためには、高品質な接合層の実装技術が必要とされるが、実用的な方法の確立が待たされている。

【参考】プロジェクト関連共同研究等

20年度 共同研究 13件、受託研究 1件

21年度 共同研究 9件、受託研究 2件

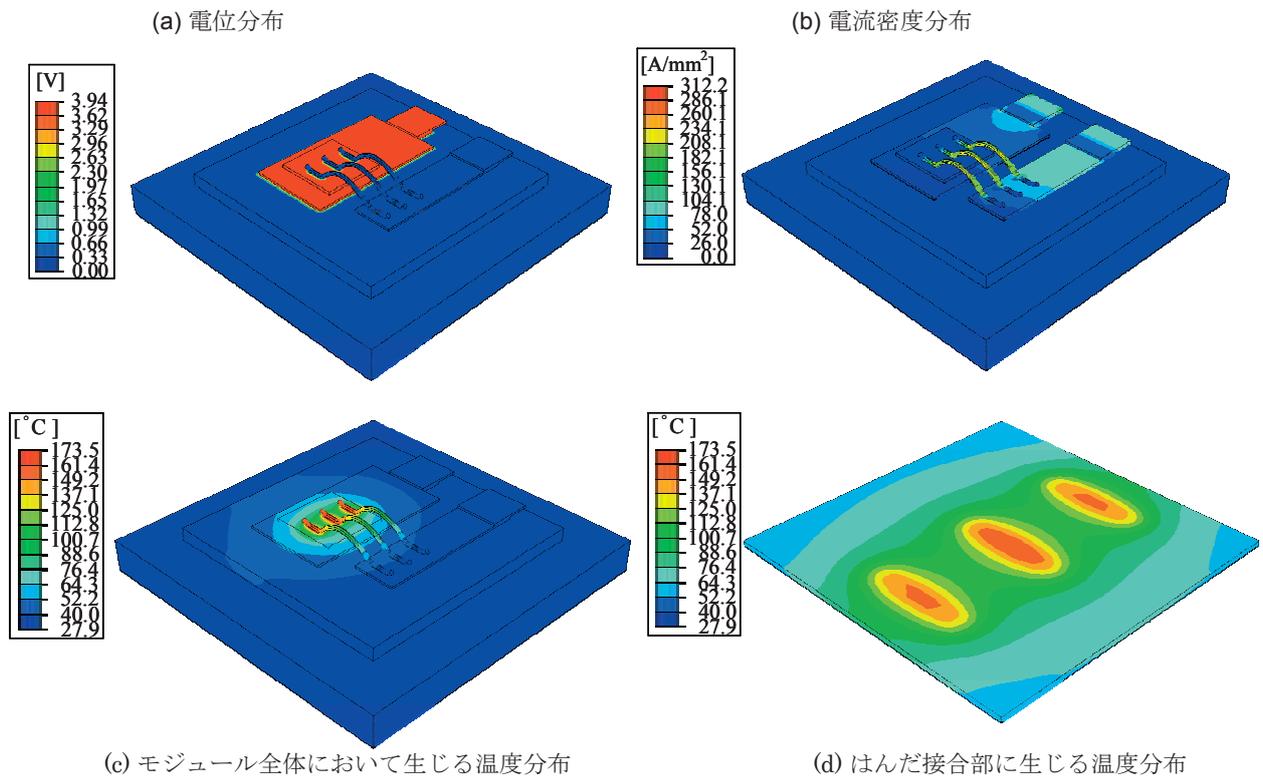
22年度 共同研究 8件

同受賞

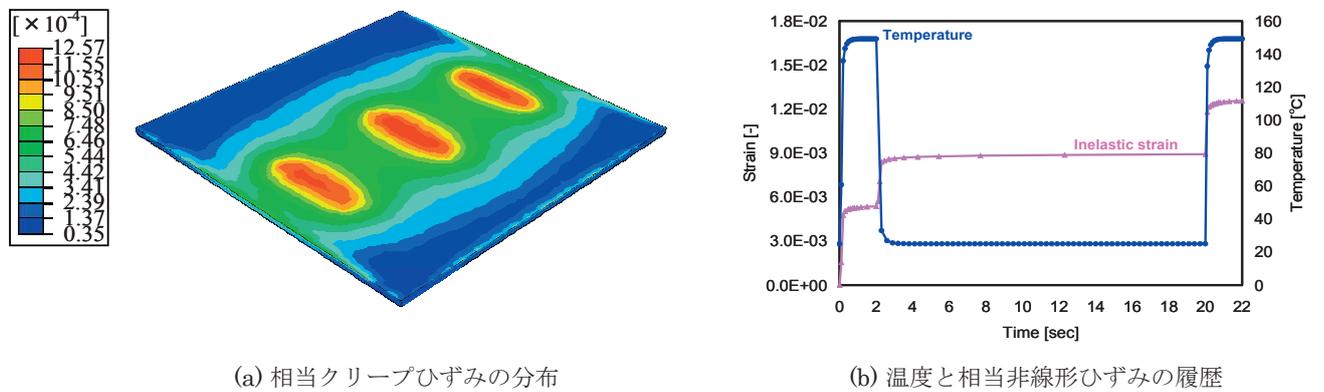
20年度 第22回エレクトロニクス実装学会講演大会（研究奨励賞受賞）

21年度 EPTC2009 ベストポスターペーパー賞

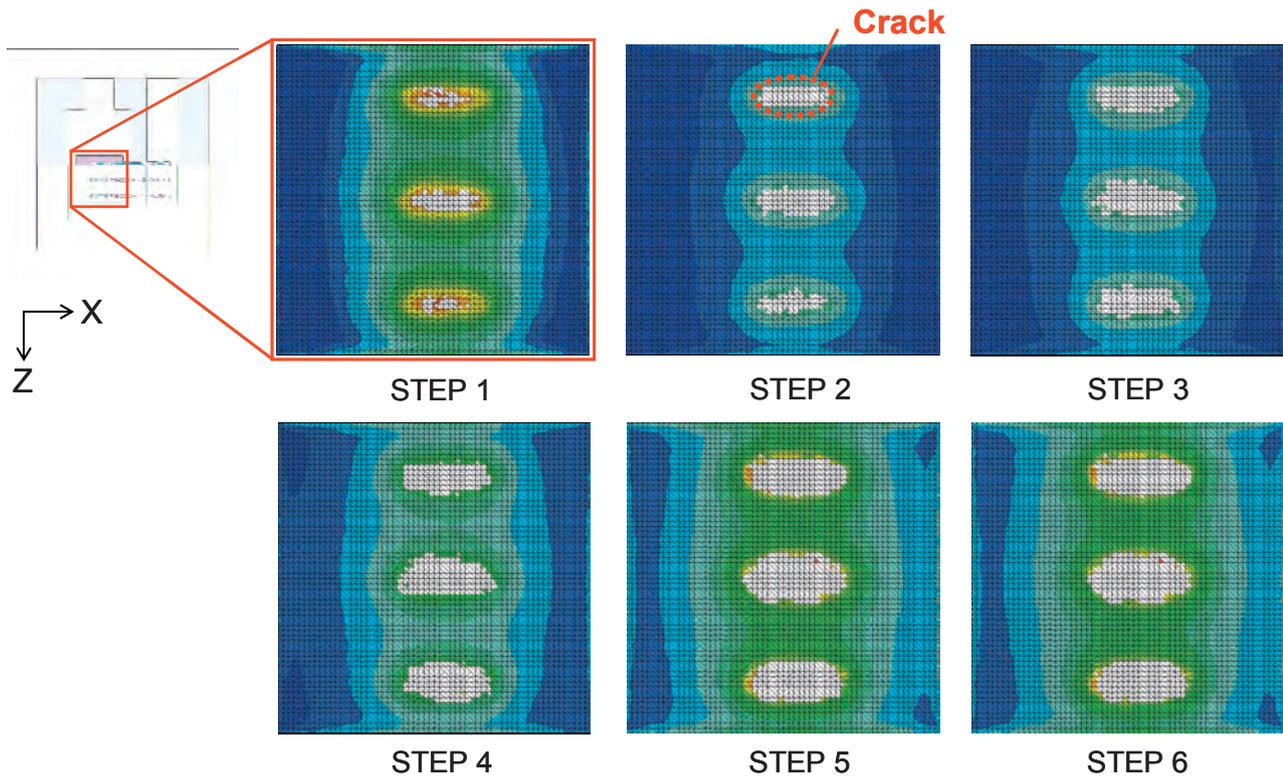




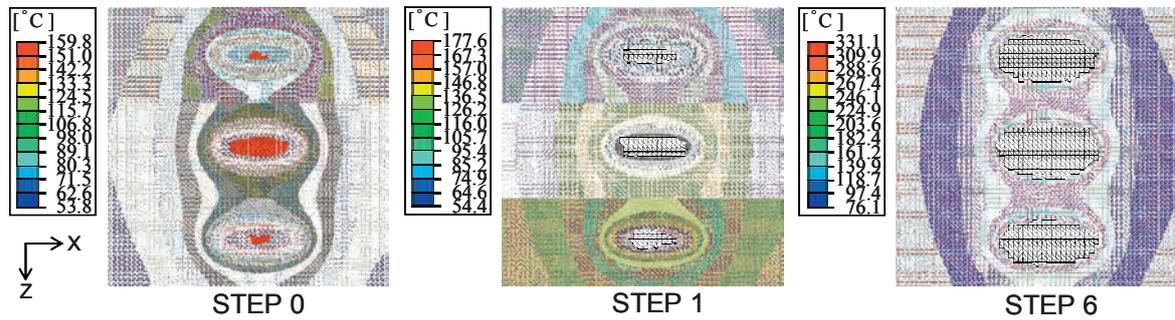
P.58 図6 電気-熱連成解析の結果



P.58 図7 熱-構造連成解析の結果



(a) パワーサイクルを受けるはんだ接合部の疲労き裂



(b) き裂進展モデルに生じる温度分布の変化

P.59 図8 き裂進展解析の結果

# パワーデバイス疲労寿命評価

篠原 主勲

## 1. はじめに

パワーデバイスは電流や電圧を制御するために用いる半導体である。その主な特徴は大電流を通電するところである。ハイブリット車、エレベーター、空調機の中のパワーを制御するため、このデバイスを用いる[1]。パワーデバイスの電流や電圧は、時間に対して非定常である。起動時には、電流が流れ始め、ハイブリット車などに内蔵された制御装置の動作が一定になれば、電流が減少する。このような起動時と停止時の動作が常に繰り返される。

1970年代にパワーデバイスは開発された。そのとき以来、大電流を取り扱うパワーデバイスが常に求められた。同時に、コンパクトなパワーデバイスの開発も検討された。パワーデバイスの性能を判断する基準としてパワー密度が用いられる。このパワー密度は年を重ねるにつれて、増加した。1970年代と比較して、2010年度現在では、パワー密度は1000倍以上にまで到達した[2]。

パワーデバイスの構造は複数の層からなる。それらの層をなまりフリーはんだ合金で接合する。線膨張係数の影響より、内部応力がその接合部に負荷される。この応力より、パワーデバイスが損傷する[3][4]。高信頼性、高効率を維持するため、接合材料の融点に到達しないように、熱の放熱技術が重要である[4-8]。従来方法の一つとして、熱回路網法を用いて、パワーデバイスの温度分布を予測してきた。熱回路網法では以下の式を用いる。

$$\text{温度差 (}^{\circ}\text{C)} = \text{熱抵抗 (}^{\circ}\text{C/W)} \times \text{熱エネルギー (W)} \quad (1)$$

この方法は、オームの法則の類似性を利用して提案された。この方法は熱抵抗値を必要とする。パワーデバイスの構造を変更すると、実験より測定した熱抵抗も変化するため、汎用的に用いることが困難である。

2010年において、コンピュータの発達に伴い、有限要素法などより、パワーデバイスの計算モデルを用いて、パワーデバイスの信頼性を評価できるようになる。文献[8, 9]では、効果的な熱を放熱するための最適なシリコンの板厚を求めている。文献[10]では、複数のシリコンを配置したパワーモジュールにおいて、最適なシリコンの配置間隔を決定した。文献[11]では、電気-熱連成解析を用いて、パワーデバイス内の温度分布が均質になるように、最適な配置場所を計算した。

本研究では、有限要素法による疲労寿命を解析するため、熱-電気-構造解析による連成解析手法を開発した。き裂は、時間に対して連続的に広がる。文献[14][15][16]では、き裂進展より、パワーデバイス内の温度、電圧、抵抗が増加

することが報告されている。計算モデルにおいて、き裂の材料物性値が、はんだの材料物性値と異なることを意味する。本研究の計算モデルでは、このき裂を空間でモデル化した。き裂に対応する計算モデルの要素を削除する。この削除した要素は、物理量を計算しないため、熱や電気の流れを遮断する。

計算時間を短縮するためには、メッシュの解像度を調整する必要がある。パワーデバイスの疲労寿命の計算精度を検証するため、メッシュの解像度が疲労寿命評価に与える影響を検討した。

## 2. パワーデバイス構造

図1にリードフレームタイプのパワーデバイスを示す。図内の数字はミリメートル  $mm$  を示す。パワーデバイスは多層構造からなる(リードフレーム、導電板、放熱板、チップ、接合部、絶縁板と基板)。シリコンは銅板に、はんだ接合される。はんだは合金である。チッカアルミ板は、銅板を通してアルミ板に接合される。材料の選択の基準について、主に2つの目的がある。その目的は電流を流すために用いる材料とパワーデバイスから熱を逃がすために用いる材料の2つである。2010年現在において、はんだの融点は約  $220^{\circ}\text{C}$  程度[2]である。そのためパワーデバイスは  $175^{\circ}\text{C}$  以下で使用することが一般的である。絶縁板は、熱を放熱しやすく、電流の流れを遮断するものが望ましい。一般には、アルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、窒化ケイ素 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )、チッカアルミ ( $\text{AlN}$ ) などを使用する。線膨張係数および熱伝導率を表1に示す。チッカアルミの熱伝導率はアルミナよりも大きい。一方でアルミナはチッカアルミよりも剛性があるため、アルミナの層を薄く作成することが可能である。

表1に示すように他の部材と比較してシリコンの線膨張係数は低い。そのため、シリコンの線膨張係数に適合するような材料がない。そのため、他の層間よりも線膨張係数の影響によるCTE mismatchesが大きい。熱の影響より機械的な応力を受けやすい。この応力を吸収するため、接合部には、降伏応力が低く、延性を有するはんだが適している。熱を放熱するため、チッカアルミの接触面積はシリコンの接触面積よりも大きい。

図1の境界(i)と(ii)はコレクタ側とエミッタ側を示す。電流はコレクタ側から、リードフレームを通し、エミッタ側に流れる。境界(i)の電流をコレクタ電流、エミッタ(i)とコレクタ(ii)の電圧の差をコレクターエミッタ電圧とする。

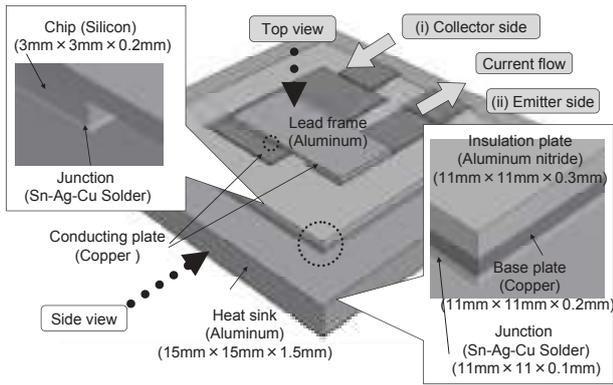


Fig. 1 Structure of power device.[17]

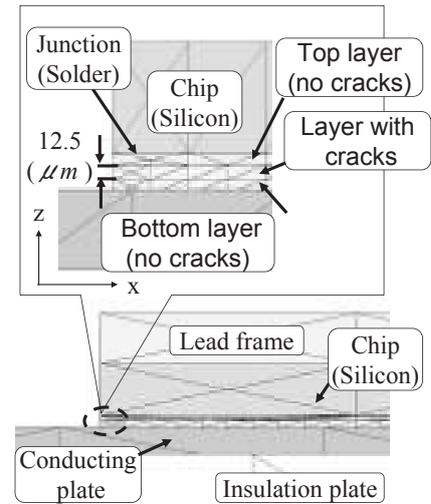


Fig.2 Model of power device

(Side view in Fig.1)

Table 1 CTE (coefficient of thermal expansion)

and thermal conductivity [13,18].

Material	Coefficient of thermal expansion	Thermal conductivity
Silicon	2.6 ppm/°C	100 W/m·K
Aluminum	23 ppm/°C	237 W/m·K
AlN	4.3 ppm/°C	170 W/m·K
Copper	17 ppm/°C	390 W/m·K
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.2 ppm/°C	23 W/m·K
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3.4 ppm/°C	90 W/m·K
AlSiC	7.0 ppm/°C	200 W/m·K

### 3. 計算条件

図2、図3にパワーデバイスの計算モデルを示す。はんだの厚さは、37.5 μmとする。図2に示すようにはんだのメッシュを、z方向に対して3分割した。この計算モデル内において、はんだ層の中間にあるメッシュの層のみにき裂が生じるものと仮定する。4つのメッシュデータ(モデル1, モデル2, モデル3, モデル1')を表2に示す。はんだ層のメッシュをそれぞれ、50 μm x 50 μm, 100 μm x 100 μm, 200 μm x 200 μm および 50 μm x 50 μm のグリッド上に分割した。要素は四面体1次要素を用いた。時間の刻み幅を0.1(s)とした。ただし、CFL条件を満たさない場合などにおいて、小さい時間刻み幅を用いる。

境界条件を図3に示す。電気解析において、コレクタ電流(i)を60Aに設定した。エミッタ電圧(ii)を0.0(V)に設定した。熱解析において、放熱板底面の温度を25°C(自然境界条件)に設定した。その底面の熱伝達率を、 $5.0 \times 10^{-3}$  (W/(mm<sup>2</sup>·K)) [17]とした。構造解析において、放熱板の底面の端点を固定した。計算モデルに用いた材料の物性値を表3にまとめる。はんだの降伏応力に対する塑性ひずみ、クリープひずみを表4および表5にまとめた。本研究の計算モデルのき裂に関する熱伝導率において、二重要素を導入した[32]。本研究ではON-OFFを繰り返すパワーサイクル試験を適用した。図4に示すように通電時間を3.5(s)、遮断時間を18(s)に設定した[19]。

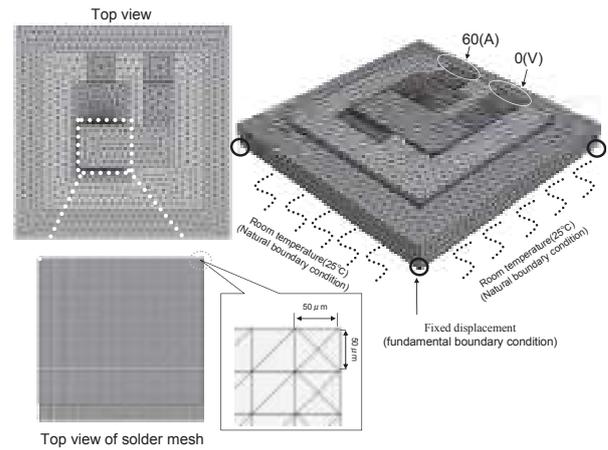


Fig. 3 Model of power device (Model 1).

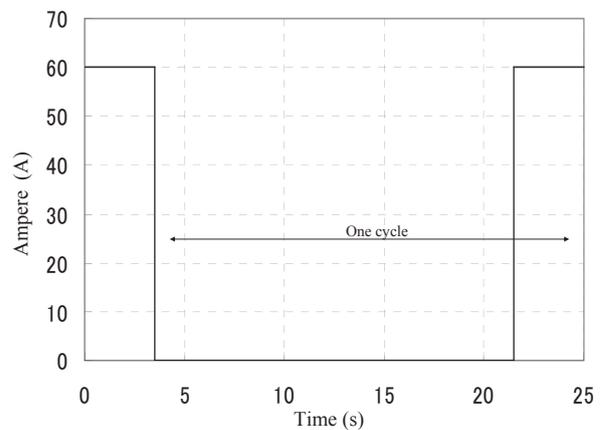


Fig. 4 Power cycle.

Table 2 Mesh resolution data.

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1'
Total number of nodes	24647	9460	3815	20211
Total number of elements	130766	49249	18146	109196
Number of elements in the solder layer (Number of nodes with respect to solder layer with cracks(Fig. 2))	67105 (22371)	32496 (10832)	8180 (2729)	67110 (22365)
Number of elements in the chip	16033	5007	1633	23642
Number of elements in the lead frame	909	452	465	612
Number of elements in the conducting plate	12387	5706	2281	11812
Number of elements in the insulation plate	3233	832	832	1260
Number of elements in the base plate	3288	828	834	834
Number of elements in the junction	3348	849	844	849
Number of elements in the heat sink	24463	3079	3077	3077

Table 3 Material constants.

Material (Unit)	Silicon	Aluminum	Copper	Solder (Sn-Ag-Cu)	Aluminum nitride
Heat Conductivity (W/(mmK))	0.148,27 (27°C)	0.237 (27°C)	0.401 (27°C)	0.060 (50°C)	0.17 (27°C)
	0.119, (77°C)	0.240 (77°C) [25]	0.396 (77°C)	0.0587 (100°C) [26]	0.10 (123°C) [27][28]
	0.0989 (127°C) [24]		0.393 (127°C) [25]		
Electrical conductivity (S/mm)	0.5	$37.7 \times 10^3$	$59.6 \times 10^3$	$9.1 \times 10^3$	$1.0 \times 10^{15}$
Density (kg/mm <sup>3</sup> )	$2.33 \times 10^{-6}$	$2.70 \times 10^{-6}$	$8.96 \times 10^{-6}$	$7.40 \times 10^{-6}$	$3.40 \times 10^{-6}$
Specific heat (J/(kg·K))	700.0	900.0	380.0	234.0	710.0
Young's modulus (GPa)	131.0	70.0	120.0	40.0	320.0
Poisson's ratio (Nondimensional)	0.28	0.30	0.30	0.30	0.24
Coefficient of thermal expansion (1/K)	$2.63 \times 10^{-6}$ (27°C)	$21.0 \times 10^{-6}$ (38°C)	$16.5 \times 10^{-6}$ (20°C)	$2.2 \times 10^{-5}$ (22°C)	$4.3 \times 10^{-6}$ (25°C)
	$2.99 \times 10^{-6}$ (77°C)	$25.0 \times 10^{-6}$ (94°C) [25]	$18.5 \times 10^{-6}$ (227°C) [25]	$2.3 \times 10^{-5}$ (100°C) [30]	$4.6 \times 10^{-6}$ (400°C) [27]
	$3.27 \times 10^{-6}$ (127°C) [29]				

(Note)  $1.00 S = 1.00 \Omega^{-1} = 1.00 A/V$

Table 4 Solder parameters of plastic strain [12,31].

Temperature [°C]	Yield stress [MPa]	Plastic strain
-55	30.5	0.0
-55	38.6	0.00352
-55	50.9	0.0214
-40	29.0	0.0
-40	36.7	0.00352
-40	48.4	0.0214
-25	27.5	0.0
-25	34.8	0.00352
-25	45.9	0.0214
0	25.0	0.0
0	31.6	0.00352

0	41.7	0.0214
20	23.0	0.0
20	29.0	0.00352
20	38.3	0.0214
25	22.5	0.0
25	28.4	0.00352
25	37.5	0.0214
40	21.0	0.0
40	26.5	0.00352
40	35.0	0.0214
50	19.9	0.0
50	25.2	0.00352
50	33.3	0.0214
60	18.9	0.0
60	23.9	0.00352
60	31.6	0.0214
75	17.4	0.0
75	22.0	0.00352
75	29.1	0.0214
80	17.0	0.0
80	21.5	0.00352
80	28.3	0.0214
85	16.5	0.0
85	20.9	0.00352
85	27.6	0.0214
100	15.2	0.0
100	19.2	0.00352
100	25.3	0.0214
120	13.4	0.0
120	16.9	0.00352
120	22.4	0.0214
125	12.9	0.0
125	16.4	0.00352
125	21.6	0.0214

Table 5 Solder parameters of creep strain in Eq. (2) [12,31].

Temperature	A [MPa/sec]	n
-40.0	$1.1 \times 10^{-25}$	13.2
-30.0	$7.0 \times 10^{-25}$	12.9
-20.0	$3.4 \times 10^{-24}$	12.5
-10.0	$1.7 \times 10^{-23}$	12.2
0.0	$8.3 \times 10^{-23}$	11.9
10.0	$4.1 \times 10^{-22}$	11.6
20.0	$2.0 \times 10^{-21}$	11.3
30.0	$9.9 \times 10^{-21}$	10.9
40.0	$4.9 \times 10^{-20}$	10.6
50.0	$2.4 \times 10^{-19}$	10.3
60.0	$1.2 \times 10^{-18}$	10.0
70.0	$5.9 \times 10^{-18}$	9.6
80.0	$2.9 \times 10^{-17}$	9.3
90.0	$1.4 \times 10^{-16}$	9.0
100.0	$7.1 \times 10^{-16}$	8.7
110.0	$3.5 \times 10^{-15}$	8.4
120.0	$1.7 \times 10^{-14}$	8.0
130.0	$8.4 \times 10^{-14}$	7.7

## 4. 理論

### 4.1 ひずみ

応力の影響による微小変形において、はんだ層は弾性挙動を示す。弾性挙動では、応力の負荷を取り除くと、はんだ層の変形が完全にもとの状態に回復する。しかし、大変形において、応力の負荷を取り除いても、完全に、もとの状態に戻ることがない。本研究では、はんだの塑性ひずみとして、この応力をモデル化した。塑性ひずみのデータを

表 4 に示す。

はんだのクリープひずみを次式で計算する。

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A(\sigma_m^2)^n \quad (2)$$

パラメータ  $A$  と  $n$  を表 5 にまとめる。変数  $\sigma_m$  はミーゼスの相当応力を示す。

$$\sigma_m^2 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \quad (3)$$

変数  $\sigma_1 \sim \sigma_3$  は主応力を示す。

#### 4. 2 疲労寿命評価

パワーデバイスの疲労寿命ははんだ層のき裂の成長に関係する。本研究では、図 1 に示すチップと導電板の間のはんだ層のき裂より、パワーデバイスの疲労寿命を推定する。対象とする理由は、他の部材よりも早い段階で、このはんだ層にき裂が生じるからである。

2010 年度現在において、疲労寿命の評価は、理論的に明らかにされていない。その評価は、実験データに基づいて、経験的に定式化するのが一般的である [22]。

疲労寿命の評価には、確率論的手法と決定論的手法がある [20, 23]。確率論的手法は、大規模なサンプルポイントからなる不確定な分布を用い、定式化される。このアプローチによるアルゴリズムは、一般的に非常に多くの反復計算を必要とする。決定論的手法は、解を方程式より一意的に決定する。そのため不確定なパラメータを考慮しない。

本研究において、決定論的手法を適用する。疲労寿命を、従来から適用されている Manson-Coffin 則で評価する。この法則は、ひずみ幅を必要とする。BGA (Ball grid array) による機械疲労試験から得られた Manson-Coffin 則の実験データを利用した。はんだ材料  $Sn-Ag-Cu$  を用いて、ひずみ幅と疲労寿命の関係を検証した [12]。Manson-Coffin law を次式で示す。

$$N = 1000 \left( \frac{\Delta\varepsilon}{0.01} \right)^{-1.24} \quad (4)$$

$N$  はパワーサイクル数を示す。ON 時間幅と OFF 時間幅の全時間を 1 サイクルとする。パラメータ  $\Delta\varepsilon$  はひずみ幅を示す。次式に示すように、ひずみ幅を、塑性ひずみとクリープひずみの合計の半分とする。

$$\Delta\varepsilon = \frac{|\Delta\varepsilon_p| + |\Delta\varepsilon_c|}{2} \quad (5)$$

$\Delta\varepsilon_p$  と  $\Delta\varepsilon_c$  は塑性ひずみ幅とクリープひずみ幅を示す (図 11 および図 15 参照)。パワーサイクルが ON から OFF へ変化するとき、塑性ひずみやクリープひずみが増大し、これらのひずみが蓄積される。インデックス  $i$  はき裂のフェーズを示す。フェーズは、ある時間を分割したある時間の通過点を示す。フェーズ  $i=0$  ははんだ層にき裂が生じていない初期状態を示す。フェーズが進展するにつれて、き裂ははんだ層内を伝播する。

アルゴリズムを図 5 に示す。最初に、温度データを取得するため電気-熱連成解析を実施する。次に、塑性ひずみやクリープひずみのデータを得るため、熱-構造連成解析を実施する。最後に、ひずみデータから疲労寿命サイクル数を計算する。これらの処理を 1 フェーズと定義する。その後、2 番目のフェーズとして、アルゴリズムは電気-熱連成解析に戻る。

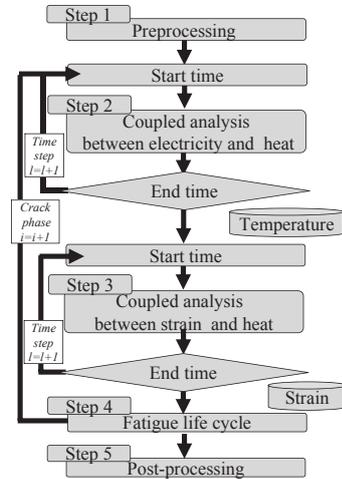


Fig. 5 Algorithm.

それぞれのフェーズにおいて、はんだ層の最大ひずみ幅から疲労寿命サイクル数を計算する。き裂は、最大ひずみ幅が発生した点で生じる。

本研究では、累積損傷則に従うことを仮定する。人工的なき裂の進展のイメージを図 6 に示す。初期状態  $i=0$  のときに、材料に損傷はない。損傷が  $D=1$  に到達したときに、材料内にき裂が生じる。最大ひずみが要素  $\langle l \rangle$  に生じた場合と仮定すると、損傷を次式で計算する。

$$D_{1,\langle l \rangle} = \frac{n_1}{N_{1,\langle l \rangle}} \quad (6)$$

変数  $n_i$  は現在のサイクル数を示す。式 (6) の変数  $N_i$  は式 (4) より計算される。損傷が  $D=1$  に到達した場合において、変数  $n_i$  を次式で計算する。

$$n_1 = N_{1,\langle l \rangle} \quad (7)$$

フェーズ0において他の要素の損傷を計算する。フェーズ1において、はんだ層にき裂が入っている状態で、電気、熱、構造連成解析を再び、実施する。フェーズ1において、要素<1>の損傷は  $D=1$  に到達している。すなわちフェーズ1の疲労寿命は、式(4)で求めた  $N$  である。フェーズ1の最大ひずみが要素<2>に生じる場合、疲労寿命サイクル数を要素<2>で計算する。変数  $D$  は次式で計算する。

$$D_{2,<2>} = \frac{n_1}{N_{1,<2>}} + \frac{n_2}{N_{2,<2>}} = \frac{N_{1,<1>}}{N_{1,<2>}} + \frac{n_2}{N_{2,<2>}} = 1 \quad (8)$$

$n_2$  は次式となる。

$$n_2 = N_{2,<2>} \left( 1 - \frac{N_{1,<1>}}{N_{1,<2>}} \right) \quad (9)$$

フェーズ2において、同様に損傷を計算する。

$$D_{3,<3>} = \frac{n_1}{N_{1,<3>}} + \frac{n_2}{N_{2,<3>}} + \frac{n_3}{N_{3,<3>}} \\ = \frac{N_{1,<1>}}{N_{1,<3>}} + \frac{N_{2,<2>}}{N_{2,<3>}} \left( 1 - \frac{N_{1,<1>}}{N_{1,<2>}} \right) + \frac{n_3}{N_{3,<3>}} = 1 \quad (10)$$

$n_3$  は次式となる。

$$n_3 = N_{3,<3>} \left\{ 1 - \frac{N_{1,<1>}}{N_{1,<3>}} - \frac{N_{2,<2>}}{N_{2,<3>}} \left( 1 - \frac{N_{1,<1>}}{N_{1,<2>}} \right) \right\} \quad (11)$$

式(6)-(11)は、フェーズ0-2までのき裂進展評価手法を述べた。アルゴリズム(図5)のステップ4を詳細にまとめる。人工き裂のイメージを図6に示す。

- ①それぞれのフェーズにおいて、連成解析より得られる結果を用いて、図6に示すようにはんだ層の最大ひずみ幅の節点を抽出する。
- ②Manson-Coffin 則を用いて、その節点で疲労寿命を評価する。
- ③他の要素の損傷のデータが得られる。
- ④フェーズ0において、図6に示すように疲労寿命サイクル数を要素<1>で計算する。要素<1>をき裂と見なす。その要素を計算モデルから削除する。
- ⑤その後、アルゴリズムは連成解析に戻る。フェーズ0と比較してフェーズ1において、はんだ層の接触面積が減少する。そのため、パワーデバイスの性能(熱伝導率など)、信頼性(疲労寿命)が低下する。

上記のプロセスを繰り返すことで、計算モデルのはんだ

層内に人工き裂が進展する。この方法の問題は計算時間である。計算モデルのメッシュの要素数は、一般に数千から数万におよぶ。もし、1フェーズあたり1要素を削除することで人工き裂が進展するならば、はんだ層の要素の数と同じフェーズの反復計算を必要とする。PC(性能: Core(TM)2 Quad 2.83GHz)を用いれば、電気-熱-構造連成解析において計算時間は1フェーズあたり約1.5時間である。そのため、推定の計算時間は次式となる。

$$\frac{22371(\text{Number of elements in model 1}) \times 1.5(h)}{24(h) \times 365(\text{days})} \quad (12) \\ = 3.8(\text{years})$$

式(12)より、このアプローチは非現実であることがわかる。図6の下側に示すように、特に高い損傷を受けた要素を抽出する。それらの要素を、フェーズが進むとき、同時に削除する。1フェーズあたりの要素削除数が多いならば、計算時間は短い。そのかわり、疲労寿命の計算精度は低下する。一方で、1フェーズあたりの要素削除数が少ないならば、計算時間は増大するが、計算精度は上昇する。図6の下側に示すように計算時間を短くするため、損傷が  $D=1$  に到達していない場合でも、1フェーズあたり、複数の要素を、損傷が高い方から順に同時に削除する。

本研究では、500の要素を同時に削除した。推定の計算時間は次式となる。

$$\frac{22371(\text{Number of elements in model 1}) \times 1.5(h)}{500 \times 24(h)} \quad (13) \\ = 2.8(\text{days})$$

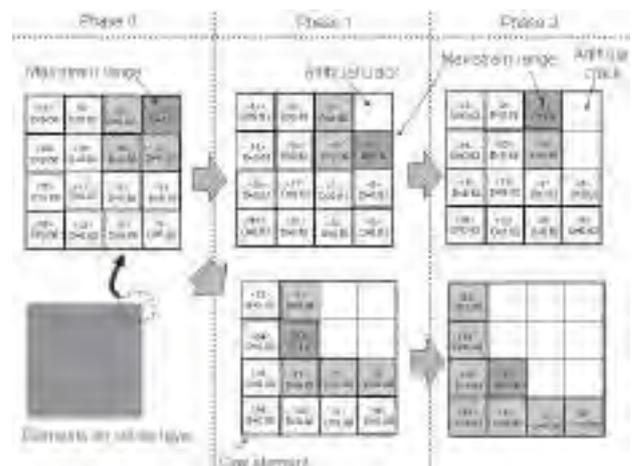


Fig. 6 Image of artificial crack propagation

#### 4. 3 き裂の面積計算

き裂の面積を次式で計算する。

$$(\text{き裂の面積}) = (\text{フェーズ数}) \times (\text{フェーズあたりのき裂の増加面積}) \quad (14)$$

フェーズあたりのき裂の増加面積を、1フェーズあたりの削除した要素の数より、計算する。

$$(\text{フェーズあたりのき裂の増加面積}) = (\text{はんだ層の面積}) \times (\text{1フェーズあたりの削除要素数}) / (\text{はんだ層の要素数}) \quad (15)$$

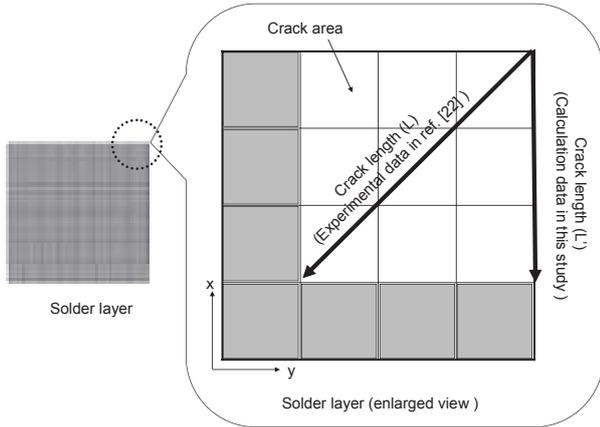


Fig.7 Crack length

#### 4. 4 実験による亀裂評価

文献[22]において、実験データより、電子機器の接合部のき裂の長さに対する疲労寿命サイクル数を同定した。

$$N = \frac{L}{0.00562(\Delta\varepsilon)^{1.023}} \quad (16)$$

Lはき裂の長さを示す。単位はmmである。Nはサイクル数である。はんだ層のき裂の長さの定義を図7に示す。実験データ[22]において、き裂長さは対角線である本研究では、き裂の長さはx軸に沿った長さを示す。そのため次式となる。

$$N = \frac{\sqrt{2}L'}{0.00562(\Delta\varepsilon)^{1.023}} \quad (17)$$

表7のひずみ幅を用いて、実験による疲労寿命を得ることができる。

$$N = \frac{\sqrt{2} \cdot 50 \times 10^{-3}}{0.00562(2.33 \times 10^{-3})^{1.023}} = 6570 \quad (18)$$

(in 50 $\mu\text{m}$ )

同様に、き裂の長さ 700 $\mu\text{m}$  の実験による疲労寿命は下記

のように求めることができる。

$$N = \frac{\sqrt{2} \cdot 700 \times 10^{-3}}{0.00562(9.12 \times 10^{-3})^{1.023}} = 21500 \quad (19)$$

(in 700 $\mu\text{m}$ )

#### 4. 5 誤差

式(17)で得られた実験のデータと本研究で算出した疲労寿命の計算より、誤差を次式で定義する。

$$(\text{誤差}) = \frac{(\text{実験値(式(17))}) - (\text{計算値})}{(\text{実験値(式(17))})} \quad (20)$$

式(20)を用いて、本研究の計算精度を検証する。

#### 5. アルゴリズム

この研究では汎用ソフトに、ABAQUS を用いた。連成解析は、弱連成および強連成解析からなる。強連成解析では、同時に生じる多様な現象からなる1つのシステムを求める必要がある。異なる現象は、それぞれの支配方程式に依存する。本研究では弱連成解析を適用した。弱連成解析では、関連した情報を伝達しながら、独立した方程式を、別々に解いていく。最初に、電気-熱解析を計算する。温度データを各時間ステップにおいて、ファイルで保存する。その後、熱-構造連成解析を計算する。それぞれの時間ステップで温度データを参照しながら、ひずみを計算する。従って2つの連成解析を実施する。アルゴリズムを図5に示す。解析アルゴリズムは5つのステップからなる。最初のステップにおいて、境界条件と材料定数を計算モデルに設定する。2番目のステップにおいて、電気-熱連成解析を実施する。開始時間から終了時間までのすべて時間ステップにおいて温度データを決定する。ステップ3において、ひずみデータを得るために、計算開始時間に戻って、温度データを参照しながら、熱-構造連成解析を行う。ステップ4において、計算で求めたひずみ幅から、疲労寿命サイクル数を決定する。ステップ5においてデータを可視化する。

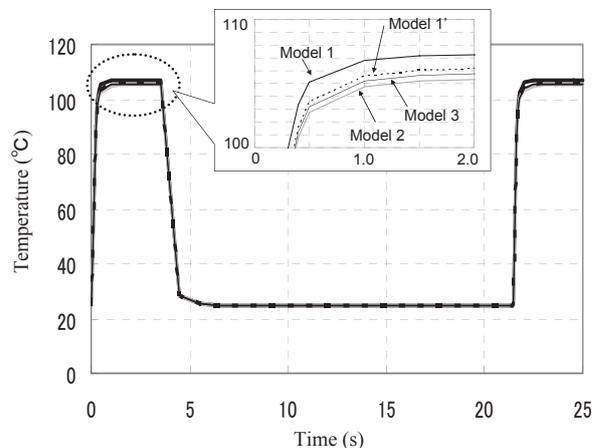


Fig. 8 Time history of maximum temperature on solder layer (phase 0).

## 6. メッシュ解像度による計算精度

### 6.1 はんだ層の最大温度の時刻暦

はんだ層上の最大温度の時刻暦を図8に示す。図9と図10は計算終了時間(25(s))ではんだ層の温度分布と温度コンター図を示す。図9の横軸は、図10の点線で示す対角線上に沿った距離を示す。縦軸は温度を示す。温度は、はんだ層の端からはんだ中央部へと移動するにつれて、上昇する。温度ははんだ中心部で最大値に到達する。

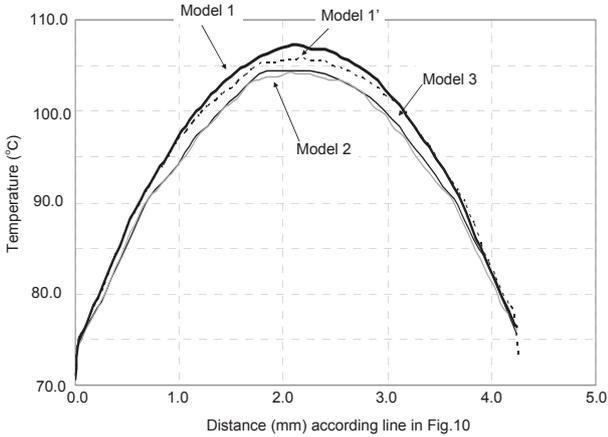


Fig. 9 Temperature distribution on solder layer at 25(s)

(phase 0)

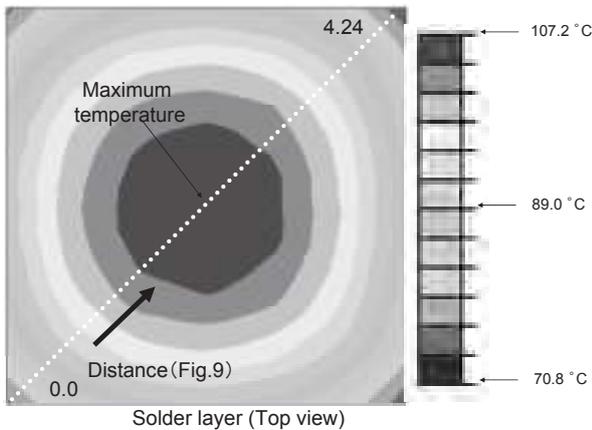


Fig. 10 Temperature contours on solder layer at time 25 (s)

(Model 1) (phase 0).

Table 6 Maximum temperature of solder layer in Fig. 9

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1'
Max temperature of solder layer	107.2°C	105.3°C	105.7°C	106.2°C

### 6.2 はんだ上の塑性ひずみの挙動

図11にはんだ層の塑性ひずみの時刻暦を示す。横軸は時間を示す。縦軸は、塑性ひずみを示す。塑性ひずみは、3.5(s)で ON から OFF ヘスイッチが切り替え時、21.5(s)

時での OFF から ON ヘスイッチが切り替え時に、塑性ひずみが蓄積する。25(s)時における塑性ひずみ分布を図12と図13に示す。図12の横軸は図13の対角線上に沿った距離を示す。縦軸は、塑性ひずみを示す。はんだ層のエミッタ側で塑性ひずみが大幅に変化する。塑性ひずみの変化は、はんだ層の中心部付近では、生じない。図13に示す4.3mm付近のはんだ層の端部において、計算精度はメッシュの解像度に依存する。モデル3の塑性ひずみはモデル1の塑性ひずみより低い。

図14にパワーデバイス側面の温度コンター図を示す。パワーデバイスの放熱板の底面の温度と比較して、上部は高温である。リードフレームは長い長さを有する形状である。そのため、熱による膨張で伸びる。リードフレームはアルミから作成され、他の部材と比較して、高い剛性を有する。はんだの剛性は、他の部材の剛性より低い。リードフレームの熱膨張より、x軸に沿って、プレートの上をリードフレームが横滑りすることで、応力のはんだ層に負荷される。以上より、はんだ層のひずみは、CTE ミスマッチによる内部応力と、リードフレームの熱膨張から得られた外部応力により生じる。

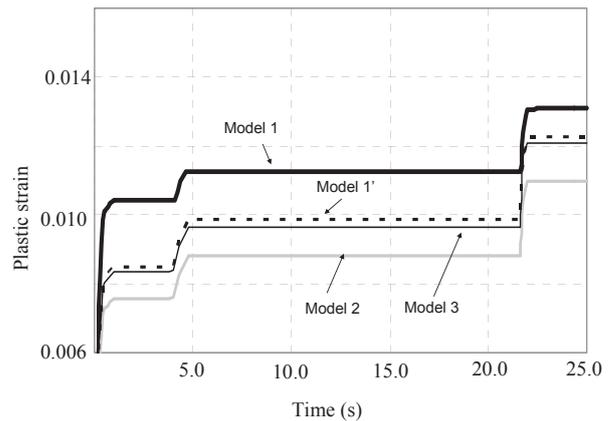


Fig. 11 Time history of maximum plastic strain on solder layer

(phase 0).

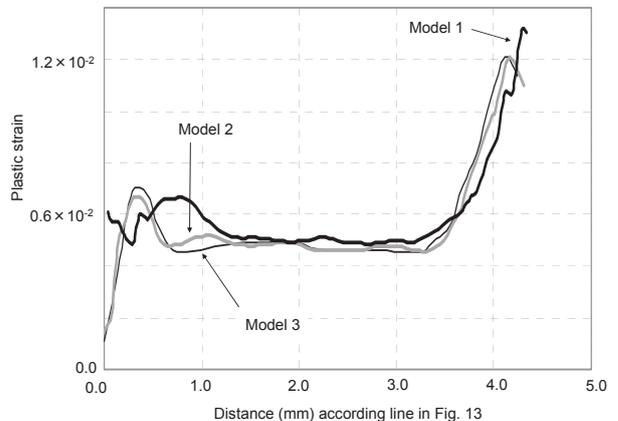


Fig. 12 Plastic strain distribution on solder layer (phase 0).

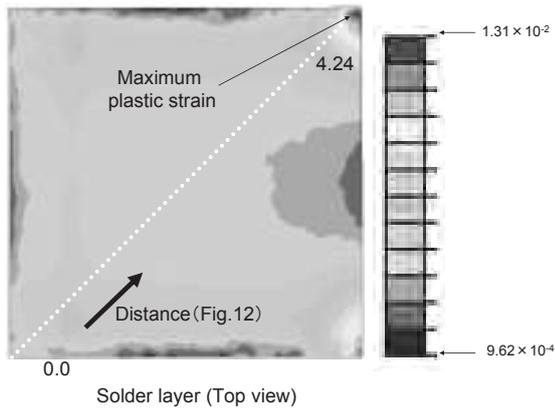


Fig. 13 Plastic strain contour map of solder layer at time 25 (s)

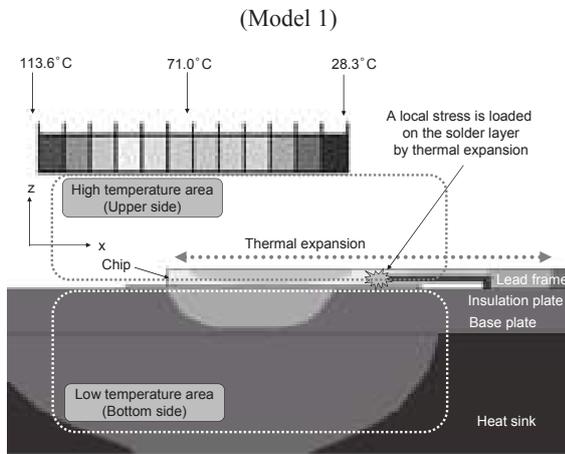


Fig. 14 Temperature contours at time 25 (s) (Model 1) (phase 0)

(Side view in Fig. 1).

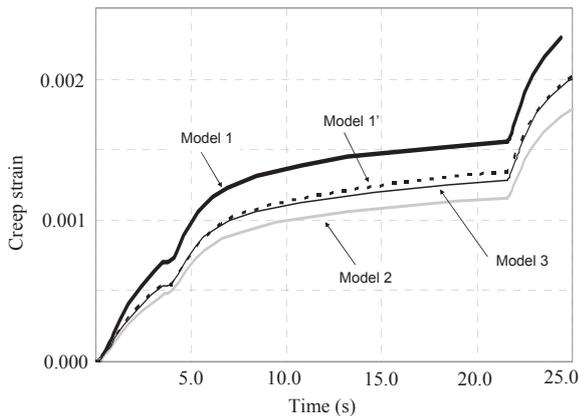


Fig. 15 Time history of maximum creep strain on solder layer (phase 0).

### 6. 3 はんだ上のクリープひずみの挙動

はんだ層の最大クリープひずみの時刻歴を図 15 に示す。横軸は時間、縦軸はクリープひずみを示す。クリープひずみは時間経過に従い、ひずみが蓄積される。クリープひず

みは ON から OFF ヘスイッチが切り替わる 3.5(s) 付近と、OFF から ON にスイッチが切り替わる 21.5(s) 付近で大きく変化する。計算モデルのすべてにおいて、クリープひずみは最初の数秒付近で同じような値を持つ。その後、時間が経過するに従い、クリープひずみが蓄積する。モデル 1 のクリープひずみはモデル 3 のクリープひずみより低い。

### 6. 4 特異性

本研究のアルゴリズムは、電気-熱連成解析を用いて、温度データを、開始時間から終了時間まですべての時間ステップで計算する。この段階で、電気-熱連成解析の計算を終了する。その後、再度、同じ時間内で、開始時間から終了時間まで、温度データを参照しながら、熱-構造連成解析を計算する。そのため、本研究の評価手法は、弱連成解析に基づく。強連成解析では、電気-熱-構造解析において、それぞれの支配方程式を離散化し、単一の連立一次方程式 ( $AX=B$ ,  $A$ : 行列,  $X$ : 求める値,  $B$ : ベクトル) を解くことが必要である。(本研究では、1 タイムステップを進めるため、電気、熱、構造を別々に複数の  $AX=B$  を解く。)

モデル 2 とモデル 3 のメッシュの解像度が異なるが、ひずみの時間履歴 (図 11、図 15) を確認すると、ほぼ一致しているように見える。すなわち、解像度が上昇しても、計算精度が改善されていない。メッシュデータを表 2 にまとめる。モデル 2 のメッシュの解像度 (全要素数: 49249) と比較して、モデル 3 のメッシュの解像度は低い。しかし、モデル 3 のリードフレームのメッシュの要素数は、モデル 2 の要素数とほぼ同程度である。図 14 に示すようにリードフレームの温度は高い。熱解析において、はんだ層の温度分布の計算がメッシュの解像度に依存してない (もしくは、温度分布の計算において、十分にメッシュが分割されている) ことが考えられる。そのため、モデル 2 の温度分布がモデル 3 の温度分布とほぼ一致した可能性がある。温度は敏感にひずみに影響を与える。モデル 2 とモデル 3 より算出された温度データが同じになれば、その温度データより算出するひずみもまた同じになる。

この仮定を検証するため、モデル 1' を作成した。そのデータを表 2 に示す。モデル 1' のはんだ層のメッシュ解像度はモデル 1 の解像度と同一である。しかし、モデル 1' の他の部材 (リードフレームなど) のメッシュをあらくし、メッシュを分割した。モデル 1' を用いて、温度分布とひずみを計算した。その結果を図 8、図 9、図 11 と図 15 に示す。図 8 と図 9 において、モデル 1' の最大温度は減少し、モデル 2-3 の最大温度に近づいた。モデル 1' のひずみも、図 11 と図 15 に示すように減少した。以上から、疲労寿命を評価するためには、はんだ層以外のメッシュ分割についても、高精度に温度分布を計算するため、高解像度を必要とする。

### 6. 5 疲労寿命評価

き裂進展とはんだ層の温度分布を図 16 に示す。フェーズあたりのき裂の面積を  $0.2(mm^2)$  づつ、はんだ層に発生さ

せる。図の白い領域はき裂を示す。き裂ははんだ層の端部から進展する。温度分布はき裂進展に従って変化する。フェーズに対するはんだ層内の最大温度を図 17 に示す。最大温度はき裂進展に従って増大する。この現象は定性的に文献[14]と一致する。フェーズに対する電圧履歴を図 18 に示す。き裂が進展しても、電圧は常に一定である。文献[16]では、き裂がはんだ内に発生したとしても、初期段階において、パワーデバイスの電気的抵抗は低いままであることが報告されている。文献[15]では、電気的抵抗の急速な増加が、はんだ接合部の約 60%が劣化したあとに観察されることが報告されている。本研究では、フェーズ 9 に対して、はんだ層のき裂の割合は約 20%である。

はんだ層の応力とひずみ分布を図 19 と図 20 に示す。フェーズ 0 に対してクリープひずみと塑性ひずみを表 7 に示す。ひずみ幅を、図 11 と図 15 の 3.5(s) のひずみと 21.5(s) 時のひずみの差から計算する。モデル 1 の疲労寿命サイクル数はモデル 3 の疲労寿命より高い。その理由はモデル 1 のひずみ幅がモデル 3 のひずみ幅より低いためである。フェーズ 9 におけるはんだ層の最大塑性ひずみと最大クリープひずみの時間変化を図 21 と図 22 に示す。最大クリープひずみ幅と最大塑性ひずみ幅を表 8 をまとめる。フェーズ 0 のひずみ幅と比較して、フェーズ 9 のひずみ幅は増大する。

き裂長さに対する疲労寿命サイクル数を図 23 に示す。横軸はパワーサイクル数を示す。縦軸はき裂の長さを示す。き裂の長さに対するパワーサイクル数を表 9 にまとめる。表 9 の括弧は式(20)で得られた誤差を示す。モデル 1 を用いれば、亀裂の長さ (50  $\mu\text{m}$ ) において、本研究で求めた疲労寿命サイクル数が、実験による疲労寿命サイクル数と一致した。メッシュ解像度が低解像度になるに従い、この誤差は増大する。き裂の長さ (700  $\mu\text{m}$ ) において、本研究による疲労寿命サイクル数は実験によるサイクル数は、誤差が約 30%あるものの、ほぼ一致した。文献[22]の式(17)において、き裂の成長に従って、はんだの幾何形状が変化し、この変化が応力や損傷の分布を変える。しかし、そのことが考慮されていない。

以上より、疲労寿命やき裂の進展の計算精度は、メッシュの解像度に依存しているのは明らかである。

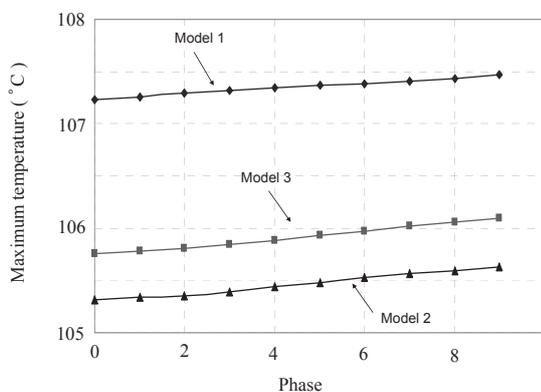


Fig. 17 history of the maximum temperature with respect to phases

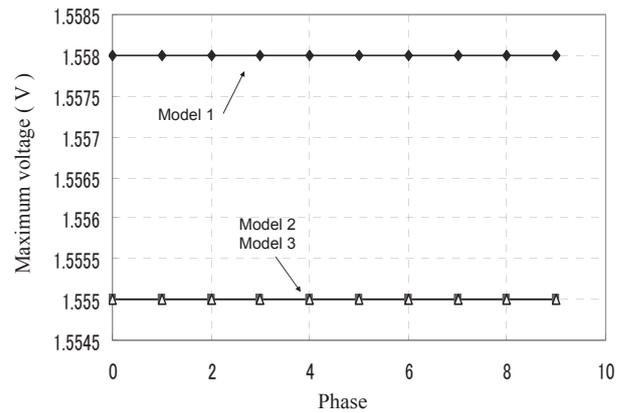


Fig. 18 history of the maximum voltage with respect to phases

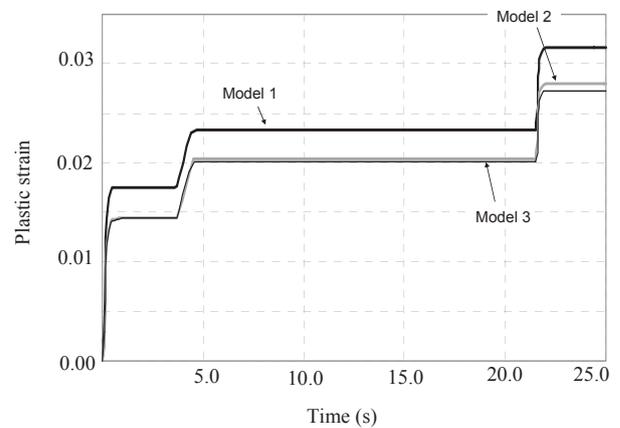


Fig. 21 Time history of maximum plastic strain on solder layer (phase 9).

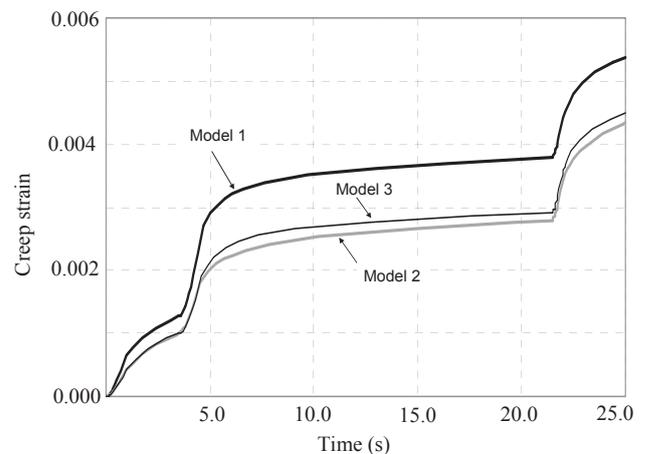


Fig. 22 Time history of maximum creep strain on solder layer (phase 9).

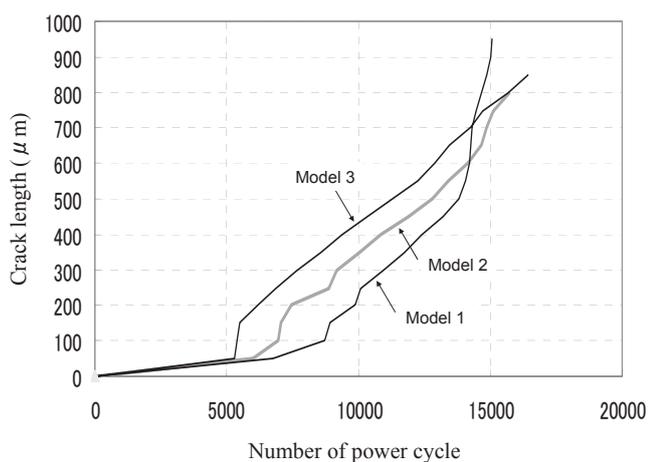


Fig. 23 Crack length with respect to power cycles.

Table 7 Strain range (maximum point) (phase 0).

	Model 1	Model 2	Model 3
Creep strain range ( $\Delta\epsilon_c$ ) in Fig. 15	$1.66 \times 10^{-3}$ (= $2.37 \times 10^{-3}$ $-7.1 \times 10^{-4}$ )	$1.32 \times 10^{-3}$ (= $1.79 \times 10^{-3}$ $-4.74 \times 10^{-4}$ )	$1.46 \times 10^{-3}$ (= $2.00 \times 10^{-3}$ $-5.39 \times 10^{-4}$ )
Plastic strain range ( $\Delta\epsilon_p$ ) in Fig. 11	$2.64 \times 10^{-3}$ (= $1.31 \times 10^{-2}$ $-1.04 \times 10^{-2}$ )	$3.42 \times 10^{-3}$ (= $1.10 \times 10^{-2}$ $-7.58 \times 10^{-2}$ )	$3.76 \times 10^{-3}$ (= $1.21 \times 10^{-2}$ $-8.34 \times 10^{-2}$ )
$\Delta\epsilon$ in Eq. (5)	$2.15 \times 10^{-3}$	$2.37 \times 10^{-3}$	$2.61 \times 10^{-3}$

Table 8 Strain range (maximum point) (phase 9).

	Model 1	Model 2	Model 3
Creep strain range ( $\Delta\epsilon_c$ ) in Fig. 22	$4.11 \times 10^{-3}$ (= $5.38 \times 10^{-3}$ $-1.27 \times 10^{-3}$ )	$3.31 \times 10^{-3}$ (= $4.33 \times 10^{-3}$ $-1.02 \times 10^{-3}$ )	$3.47 \times 10^{-3}$ (= $4.48 \times 10^{-3}$ $-1.01 \times 10^{-3}$ )
Plastic strain range ( $\Delta\epsilon_p$ ) in Fig. 21	$1.41 \times 10^{-2}$ (= $3.17 \times 10^{-3}$ $-1.75 \times 10^{-4}$ )	$1.36 \times 10^{-2}$ (= $2.80 \times 10^{-2}$ $-1.44 \times 10^{-2}$ )	$1.29 \times 10^{-2}$ (= $2.73 \times 10^{-2}$ $-1.44 \times 10^{-2}$ )
$\Delta\epsilon$ in Eq. (5)	$9.12 \times 10^{-3}$	$8.43 \times 10^{-3}$	$8.20 \times 10^{-3}$

Table 9 Number of power cycles with respect to crack length

Crack length	Model 1	Model 2	Model 3
50 $\mu\text{m}$	6727 (0.2 %)	6000 (9.5%)	5308 (23.8%)
700 $\mu\text{m}$	14319 (33.4%)	14267 (33.6%)	14884 (30.8%)

## 7. 結論

パワーデバイス、リードフレームタイプの疲労寿命を評価するため、電気、熱、構造解析からなる連成解析評価手法を提案した。この方法は有限要素法に基づく。そのため、累積損傷則と Manson-Coffin 則に基づく計算精度はメッシュの解像度に依存することがわかった。本研究で得られた計算モデル作成のノウハウより、疲労寿命評価の計算精度の改善が期待できる。

## 参考文献

- [1] B.J. Baliga, Fundamentals of Power Semiconductor Devices, Springer, 2008.
- [2] M. Ishiko, Y. Nishibe, Y. Yamada, T. Sugiyama, High Power Density Inverter for Automotive Electronics, IEICE technical report, 106, (2007), pp.17-22.
- [3] H. Ye, M. Lin, C. Basaran, Failure modes and FEM analysis of power electronic packaging, Finite Elements in Analysis and Design, 38, 7, (2002), pp.601-612.
- [4] K. Nakahara, M. Tomoike, K. Nishimura, Heat Dissipation Technologies for Power Devices, Fujitsu Denso Review, 9, 2, (1999), pp.47-51.
- [5] A. Hamidi, G. Coquery, R. Lallemand, P. Vales, J.M. Dorkel, Temperature measurements and thermal modeling of high power IGBT multichip modules for reliability investigations in traction applications, Microelectronics Reliability, 38, (1998), pp.1353-1359.
- [6] Z. Khatir, S. Lefebvre, Thermal analysis of high power IGBT modules, Proc. IEEE Int. Symp. Power Semiconductor Devices ICs, (2000), pp.271-274.
- [7] S. Benczkowski, Thermal SPICE Model, PCIM, (1998), pp.61-66.
- [8] Y. Fukuoka, M. Ishizuka, Thermal Analysis of a New High Density Package Cooling Technology Using Low Melting Point Alloys, Japanese Journal of Applied Physics, 30, (1991), pp.1313-1319.
- [9] O. Usui, H. Muto, T. Kikunaga, Evaluation of temperature distribution of a power semiconductor chip using electrothermal simulation, IEEJ Transactions on Industry Applications, 124, 1, (2004), pp.108-115.
- [10] Y. Ikeda, K. Yoshihara, Thermal Design of Power Modules, Fuji Electric Journal, 74, 6, (2001), pp.370-373.
- [11] Y. Nagatomo, T. Nagase, S. Shimamura, FEM Analysis of Thermal Cycle Properties of the Substrates for Power Modules, Journal of Japan Institute of Electronics Packaging, 3, 4, (2000), pp.330-334.
- [12] K. Shinohara, Q. Yu, Reliability Evaluation of Power Semiconductor Devices Using Coupled Analysis Simulation, Proceedings of ITherm, (2010).
- [13] W.D. Zhuang, P.C. Chang, F. Y. Chou, R. K. Shiue, Effect of solder creep on the reliability of large area die attachment, Microelectronics Reliability, 41, (2001), pp.2011-2021.

[14] J.B. Sauveplane, P. Tounsi, E. Scheid and A. Deram, 3D electro-thermal investigations for reliability of ultra low ON state resistance power MOSFET, *Microelectronics Reliability*, 48, 8-9, (2008), pp.1464-1467.

[15] B. Khong, M. Legros, P. Tounsi, Ph. Dupuy, X. Chauffleur, C. Levade, G. Vanderschaeve and E. Scheid, Characterization and modelling of ageing failures on power MOSFET devices, *Microelectronics Reliability*, 47, 9-11, (2007), pp.1735-1740.

[16] Y.C. Chan and D. Yang, Failure mechanisms of solder interconnects under current stressing in advanced electronic packages, *Progress in Materials Science*, 55, 5, (2010), pp.428-475.

[17] H. Iwasaki, K. Hisano and T. Takamatsu, "Thermal Problem of Next Generation Semiconductor Power Devices," *JSME 2003 Annual Meeting*, pp.251–252.

[18] T.J. Martens, G.F. Nellis, J.M. Pfothenhauer, T.M. Jahns, Double-sided IPEM cooling using miniature heat pipes, *IEEE transactions on components and packaging technologies*, 28, 4, (2005), pp.852-861.

[19] Japanese Industrial Standards, Environmental testing methods and endurance testing methods for discrete semiconductor devices, *IS C 7021*, 1977.

[20] H. Lu, W.S. Loh, T. Tilford, M. Johnson, C. Bailey, Reliability of power electronic modules, *Proceedings of InterPACK*, (2007), pp.883-888.

[21] C. Bailey, H. Lu, C. Yin, Modelling Reliability of power electronics packaging, *Proceedings of InterPACK*, (2009).

[22] Hua Lu, Chris Bailey, Chunyan Yin, Design for reliability of power electronics modules, *Microelectronics Reliability*, 49, (2009), pp.1250–1255.

[23] L.J. Ladani, J. Razmi, Stochastic finite element modeling of fatigue damage evolution for visco-plastic materials in micro-electronics, *Proceedings of ITHERM*, (2010).

[24] eFunda: The Ultimate Online Reference for Engineers, <http://www.efunda.com/>.

[25] Edited by the National Astronomical Observatory, *Chronological Scientific Tables*, Maruzen Co., Ltd. (2005).

[26] M. Sc. Souad Mhiaoui, Souad, Physical properties of lead free solders in liquid and solid state, von der Fakultät für Naturwissenschaften der Technischen Universität Chemnitz genehmigte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades, (2007).

[27] A. Franco Júnior, D. J Shanafield, Thermal conductivity of polycrystalline aluminum nitride (AlN) ceramics, *Cerâmica*, 50, 315, (2004), pp.247-253.

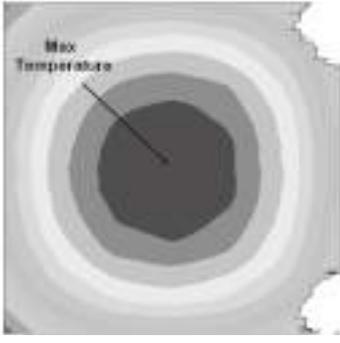
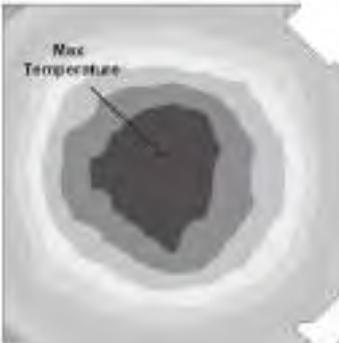
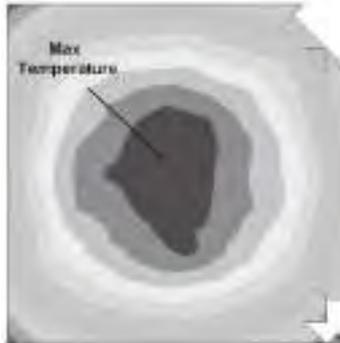
[28] Glen A. Slack, The intrinsic thermal conductivity of AlN, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 48, 7, (1987), pp.641-647.

[29] M. Okaji, Absolute thermal expansion measurements of single-crystal silicon in the range 300–1300 K with an interferometric dilatometer, *International Journal of Thermophysics*, 9, 6, pp.1101-1109.

[30] T. Siewert, S. Liu, D.R. Smith, J.C. Madeni. Properties of Lead-Free Solders. Database for solder properties with emphasis on new lead-free solders, Release 4.0, 2002.

[31] The Society of Materials Science, Japan, Factual Database on Creep and Creep-Fatigue Properties of Sn-37Pb and Sn-3.5Ag Solders, The Society of Materials Science, (2004).

[32] T. Anzawa, M. Yamagiwa, T. Shibusaki, Q. Yi and K. Shinohara, Reliability Analysis of Solder Joint on Power Module, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*. 75(2009), pp.1340-1346.

	Model 1 (Solder mesh size: 50 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ )	Model 2 (Solder mesh size: 100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ )	Model 3 (Solder mesh size: 200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ )
Phase i=2 (Crack area : 0.40mm <sup>2</sup> )			
	(Number of deleted elements: 1000)	(Number of deleted elements: 484)	(Number of deleted elements: 122)

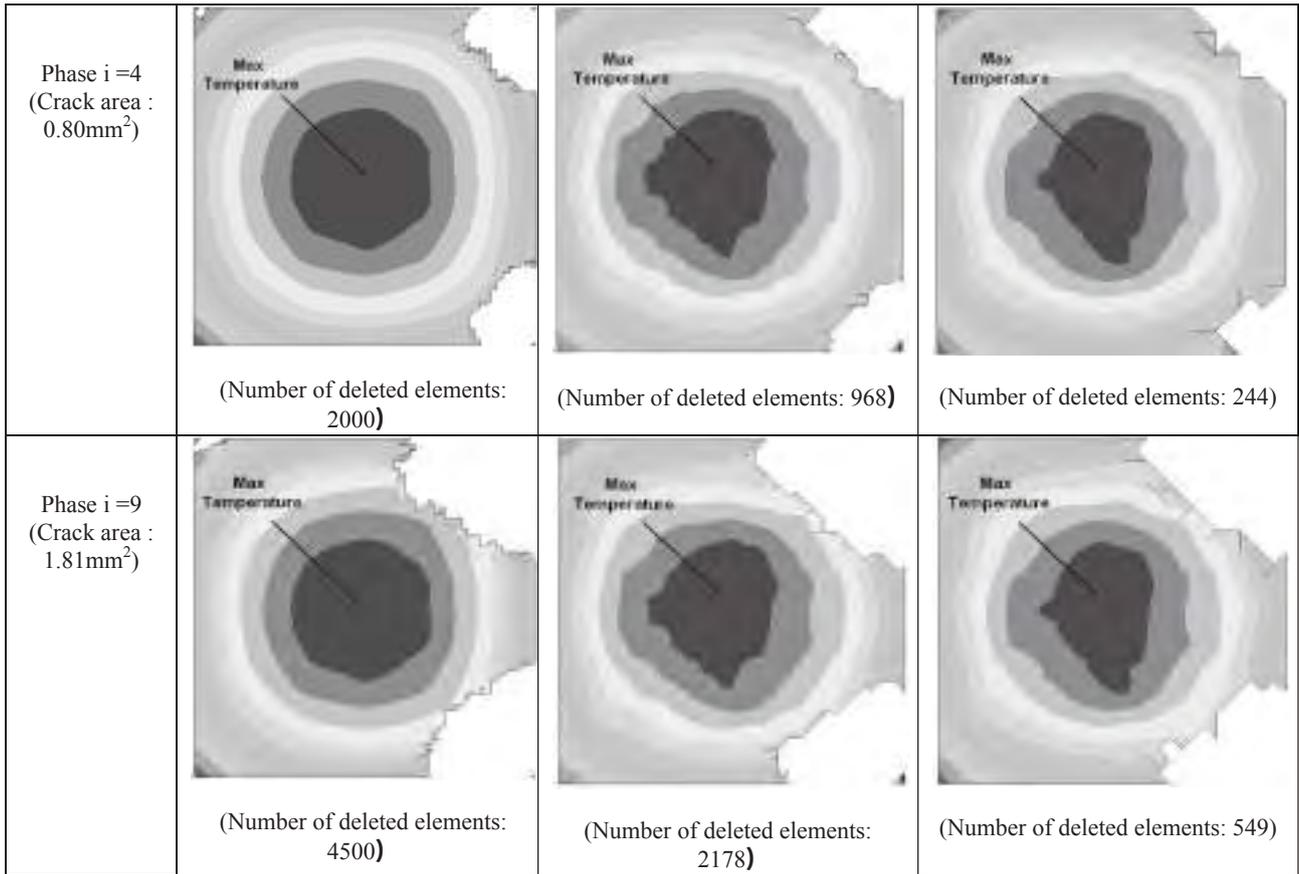
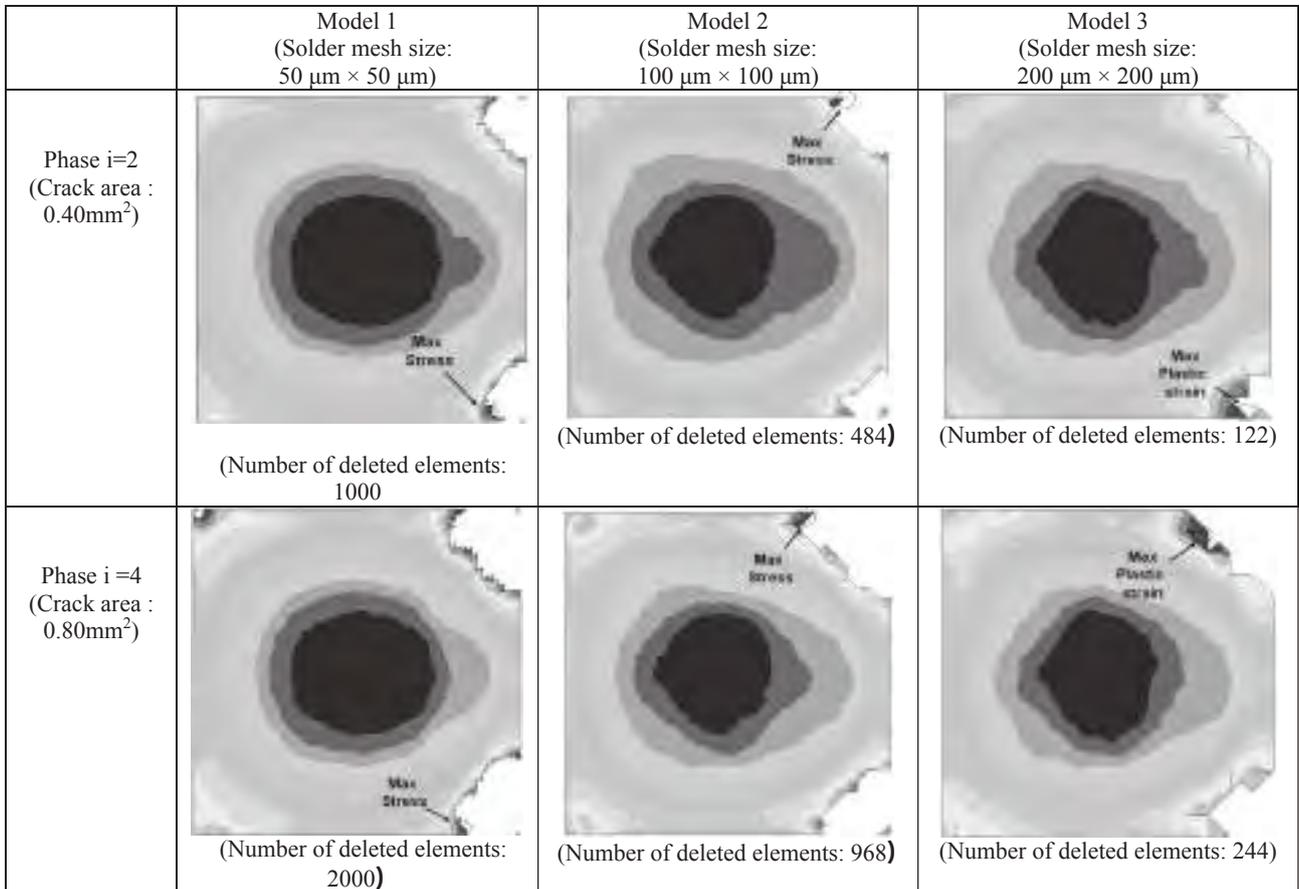


Fig. 16 Crack propagation on solder layer (temperature counter maps).



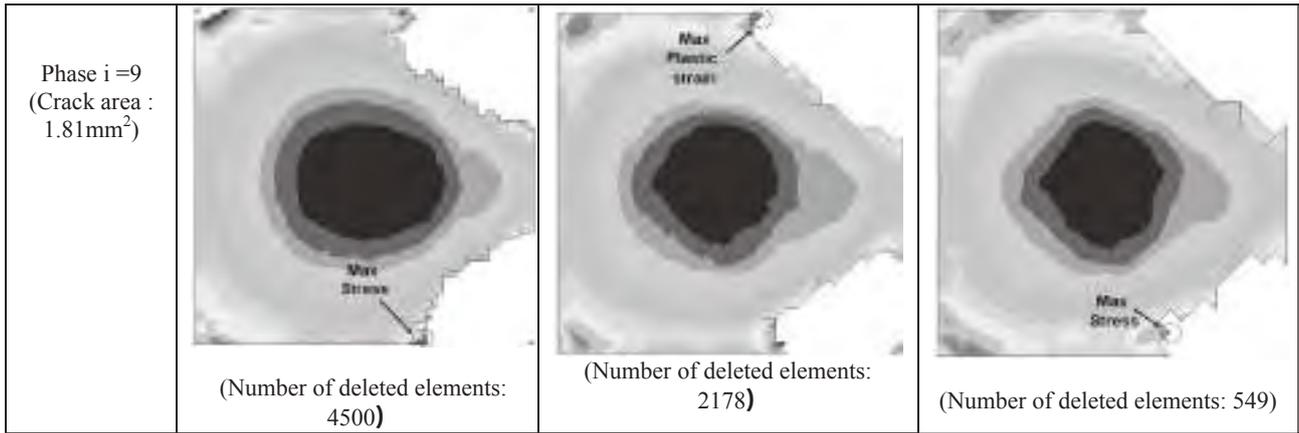


Fig. 19 Crack propagation on solder layer (Von Mises stress counter maps).

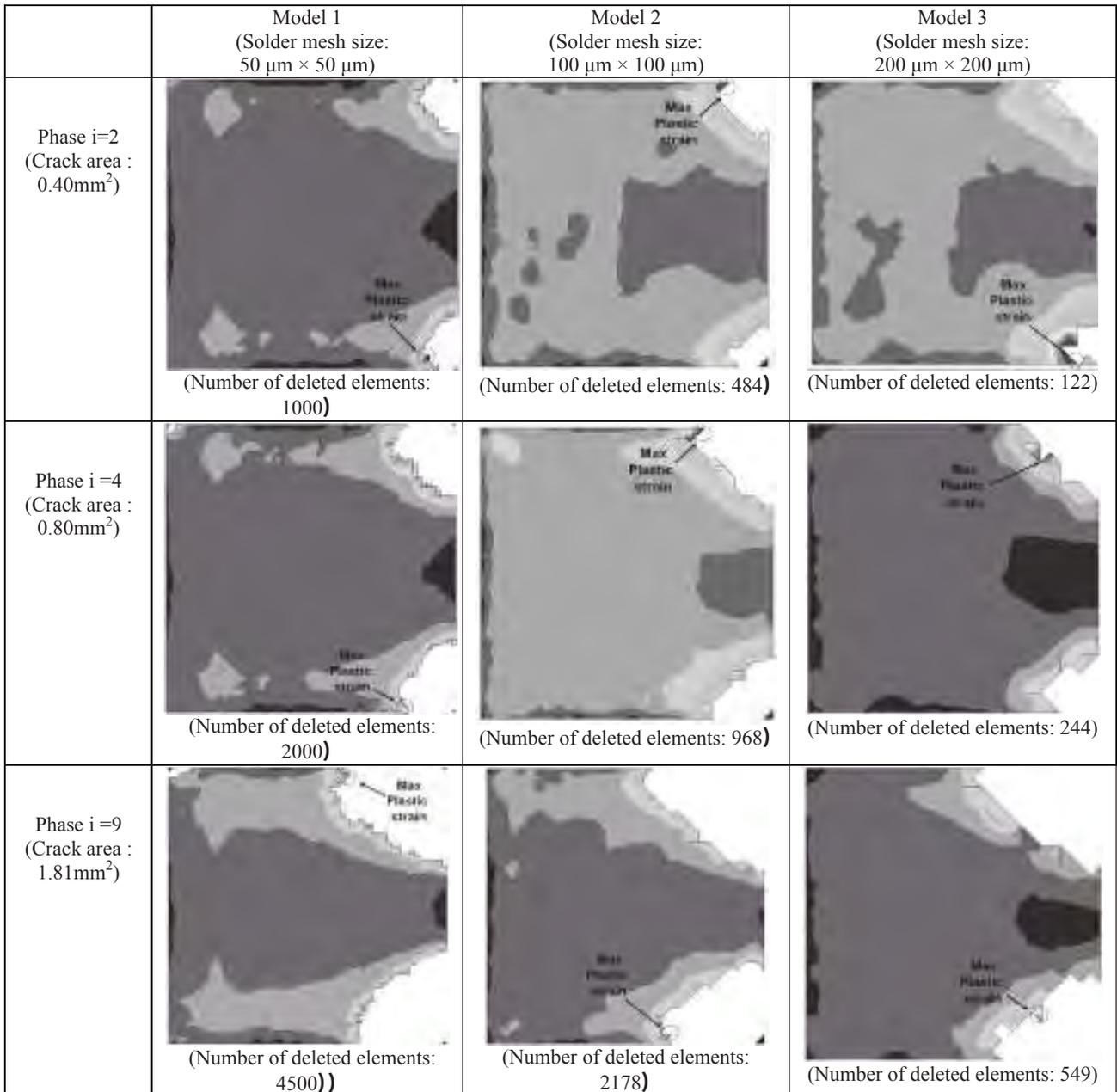


Fig. 20 Crack propagation on solder layer (plastic strain counter maps).



# めっきの疲労特性を考慮した高耐熱実装構造の 接合部における熱疲労寿命予測手法に関する研究

杉原 弘恵

## 1. はじめに

近年、環境問題の高まりやエネルギー問題の深刻化により、自動車の電動化による環境対応が進みつつある。電動車両には、共通の構成要素としてモータ、インバータ、バッテリーが存在する。本研究においては、これらの構成要素の中でもインバータに注目している。インバータに対しては、小型軽量化を実現するために高出力密度化が求められている。さらなる高出力密度化のために、SiCを用いたパワーデバイスが注目されている。SiCパワーデバイスは300°C以上の高温で動作することが可能といわれており、高温使用することでインバータの高出力密度化が可能となる<sup>[1]</sup>。しかし、従来のSiパワーデバイスの実装に使用されているのはんだは、使用可能温度が150°C程度であり、150°Cを超える環境下での実装技術は確立されておらず、温度サイクルに対する接合部の信頼性が確保できない。そこで、既存のはんだを用いた実装方法に代わり、純Al基板に、Agナノ接合でSiCチップを実装する高耐熱実装構造が提案された。Agナノ接合のためには、純Al基板にNiめっきとAgめっきを施す必要があり、接合部は数十 $\mu\text{m}$ 程度の微小構造となる。

これまでの研究で純Alの応力緩和機能が確認でき、Agナノ接合の有効性も明らかになったが、一方Fig.1に示すように、Niめっきからき裂が発生し、そのき裂がAgナノ接合層に進展することがわかった。したがって、高耐熱実装構造の信頼性を評価するためには、めっきの疲労特性を評価する必要がある。

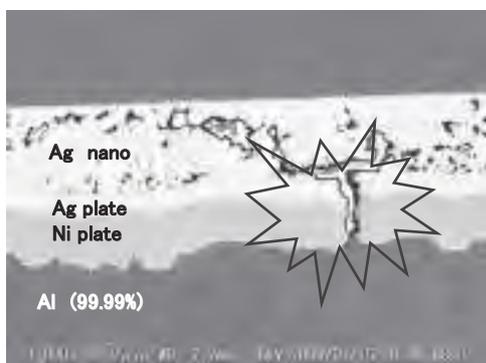


Fig.1 Cross sectional SEM image at High Temperature Resistant joint layer after thermal cycle between -50~300°C

パワーデバイスに限らず、一般的な電子機器における小型化・多機能化の要求は、高密度実装をさらに進めるものと考えられる。高密度実装が進むことで、材料寸法の微細化が進

み、ここでも薄膜材料の疲労特性評価が必要とされる。

一方、めっきなどの薄膜材料の機械的特性はバルク材とは異なり、組織や寸法などに依存して大きく変化することが知られている<sup>[2]</sup>。したがって、実際に使用される薄膜材料と同じ厚さの材料特性を評価することが重要となってくる。しかし、厚さが数 $\mu\text{m}$ 程度のめっきの低サイクル疲労特性に関する研究はほとんど行われていない。

本研究では高耐熱実装構造に使用されるNiめっきの機械的特性について検討を行い、疲労特性を評価する試験方法を提案し、これを検証した。また、電子機器の高密度実装を進める上で重要となるCuめっきについても疲労特性を評価する手法を提案し、検証を行った。

## 2. 実験と結果

### 2.1. Niめっきの物性値検証

高耐熱実装構造でAgナノ接合の際に必要なNiめっきはこれまでの研究において疲労特性が取得されたのだが、実際とは異なった結果となっている。そこで、疲労特性の高精度化を目的として、これまでの研究で取得されたNiめっきの機械的特性の検証を行った。

物性値の取得においては、めっきのみの引張試験が不可能であったので、アルミニウムの母材にNiめっきを施した試験片を用いて、3点曲げ試験から物性値を求めた。Fig.2にめっきを施した試験片とめっきを施していない試験片の試験結果からめっきの影響と考えられる部分を抽出した結果の例を示す。

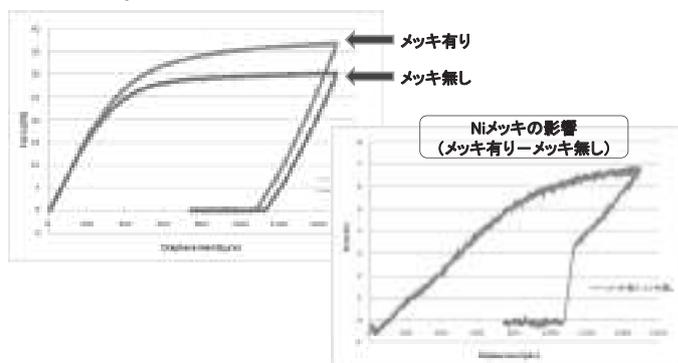


Fig.2 Example of load-displacement curve of Ni plating

めっきの物性値が正しく取得できているかを検証するには3点曲げ試験から正しい結果が得られているかを検証する必要がある。そのため、3点曲げ試験で用いた試験片に引張試験を実施して応力-ひずみ線図を求めることで、3点曲げ試験から求められた物性値の妥当性を検証した。

引張試験では、めっきの母材として使用した長さ 30mm、幅 6mm、厚さ 0.5mm のアルミニウム試験片を用いた。試験装置は Instron 社製マイクロフォース試験機を使用し、ひずみの取得には共和電業製ひずみゲージを使用した。今回の試験では、降伏応力にばらつきが見られたため、弾性率において妥当性の検証を行った。

5 試料の測定結果の平均ヤング率は 63GPa、最大ばらつきは±15% 以内であった。3 点曲げ試験から得られたヤング率は 60GPa であり、誤差は 5% 以内に収まった。よって、3 点曲げ試験で取得した物性値の妥当性を検証することができた。

## 2.2. Ni めっきの疲労特性評価手法

次に、Ni めっきの疲労特性を評価するために 4 点曲げ疲労試験を行った。試験片は物性取得で用いた母材の両側に厚さ 5 $\mu$ m の Ni 電解めっきを施したものを使用し、表面は平滑になっている。試験装置は Instron 社製マイクロフォース試験機を使用した。疲労試験用の治具を Fig.3 に示す。

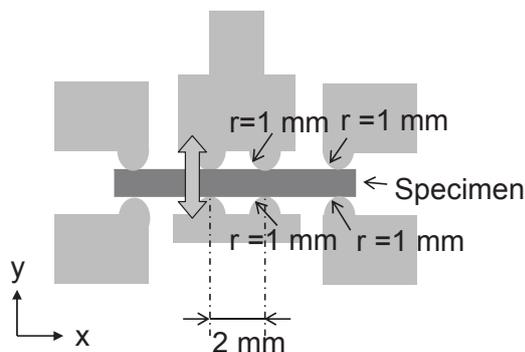


Fig.3 4 point bending fatigue test equipment

試験は 25 サイクルごとに停止し、キーエンス社製レーザ顕微鏡で表面に発生したクラックの有無を確認した。表面に観察されたき裂は、サイクル数の増加とともにき裂の長さが増加し、その数も増えていることがわかった。これは、4 点曲げ疲労試験がうまく実施されており、この試験結果から疲労特性を評価することは、妥当性があると考えられる。疲労特性評価手法として、観察する試験片表面を 100 $\mu$ m のブロックごとに 5 つに区切り、合計 500 $\mu$ m の各ブロックの中でき裂が発生したサイクル数を記録していく。全てのブロックにおいてき裂が生じた時点で試験を終了する。そして、最初にき裂が発生したサイクル数と試験終了時のサイクル数の平均を疲労寿命として定義し、評価する手法を提案した。表面観察を行った例を Fig.4 に示す。疲労寿命曲線を作成するために必要な塑性ひずみ振幅は有限要素法解析(FEA)を用いて求めた。解析に使用した材料物性は、これまでの研究において取得された Ni めっきの物性値で、移動硬化則を用いた弾塑性体とした。この評価手法を用いて、切り欠きを有さない表面が平滑な試験片の疲労特性評価を実施し、提案した評価手法の妥当性を検証した。

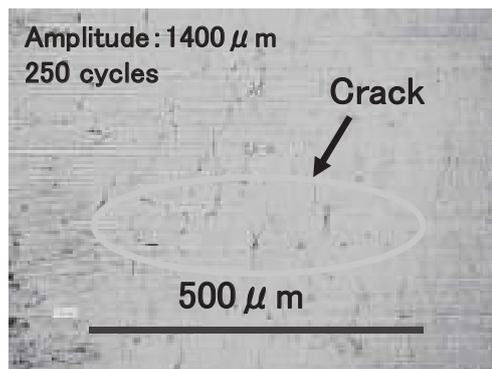


Fig.4 Image of fracture surface of Ni plate

## 2.3. Ni めっきの S-N 曲線

本研究で取得された Ni めっきの S-N 曲線をバルク Ni の S-N 曲線と合わせて Fig.5 に示す。Ni めっきの疲労特性は、バルク Ni のものとほぼ同じ結果となった。

この結果に対し、き裂の進展特性とめっきの組織から考察を行う。

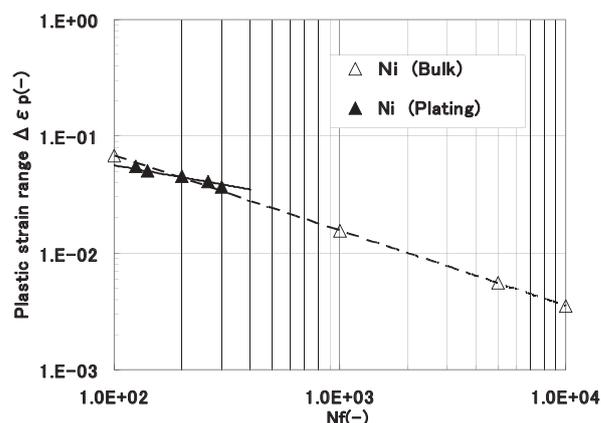


Fig.5 Low cycle fatigue properties of Ni plate and bulk Ni

Fig.6 に示されるように主き裂は開口し、二次き裂の発生も認められる。このことから、Ni めっきにおいてもバルク材で知られているき裂進展メカニズムによって疲労き裂が成長したと考えられる。また、Fig.7 に示されるように断面の組織についてもバルク材と同様な組織が見られる。これらのことから、本研究での Ni めっきの低サイクル疲労特性は、バルク材料に近いものになったと考えられる。よって、本研究において提案された表面が平滑な薄膜材料に対する疲労特性評価手法の妥当性が明らかとなった。

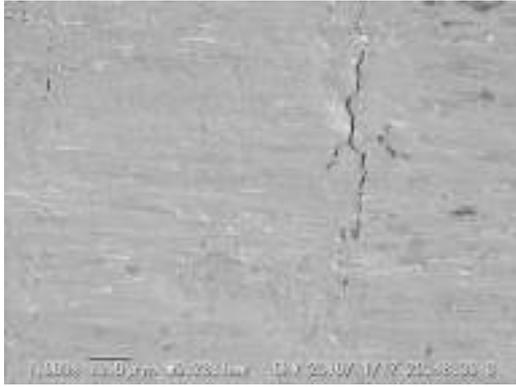


Fig. 6 SEM image of surface of Ni plate after bending fatigue test

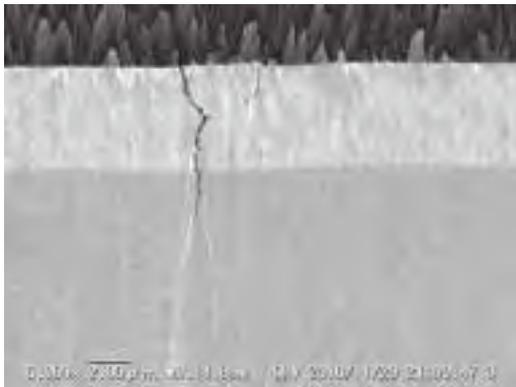


Fig. 7 Cross sectional SEM image of Ni plate after bending fatigue test

#### 2.4. Cu めっきの疲労特性評価手法

電子デバイスに多く使用されるめっきとして、Cu めっきがある。そこで、電気めっき法で作成されたCu めっきの疲労特性の評価手法を検討した。

切り欠きを入れた試験片を作成し、3点曲げ試験を実施して、疲労特性評価を実施した。

試験片を Fig.8 に示す。3点曲げ疲労試験用の治具を Fig.9 に示す。試験装置は Instron 社製マイクロフォース試験機を使用し、室温、大気中において変位制御、の低サイクル疲労試験を実施した。用いた波形は、周波数が 1Hz の両振り対称三角波である。本研究では、き裂がめっきを貫通した時点で試験を終了した。

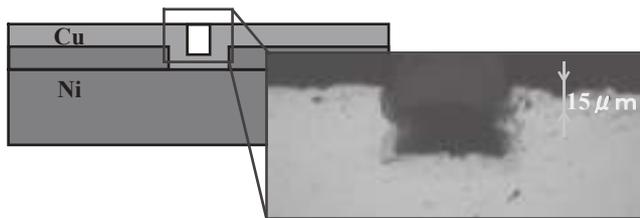


Fig. 8 Fatigue test specimen

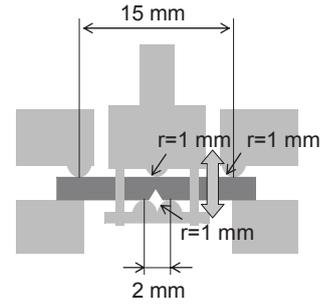


Fig. 9 Image of 3 point bending test jig

#### 2.5. 3点曲げ疲労試験結果と考察

Fig.10 に試験終了後の代表的な切り欠き部の観察写真を示す。

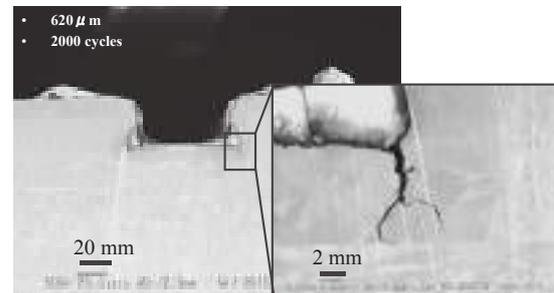


Fig. 10 Cross sectional SEM images of fatigue test specimen

切り欠きのエッジ部にひずみが集中し、き裂が進展していることがわかる。

次に、切り欠き部で発生するひずみを取得するために、観察結果から切り欠き部の形状を再現した有限要素法解析 (FEA) を実施した。解析に使用した材料物性は、これまでの研究において取得された Cu めっきと Ni の値で、移動硬化則を用いた弾塑性体とした。Fig.11 に示すように、ひずみは切り欠きのエッジ部に集中し、実際のき裂発生箇所と一致したため、解析結果が妥当と判断した。評価は、切り欠き部で発生した相当塑性ひずみ  $\epsilon_p$  の累積値の半分を、1 サイクルでの相当塑性ひずみ振幅  $\Delta\epsilon_p$  とした。切り欠き部で発生する相当塑性ひずみの累積値を Fig.12 に示す。

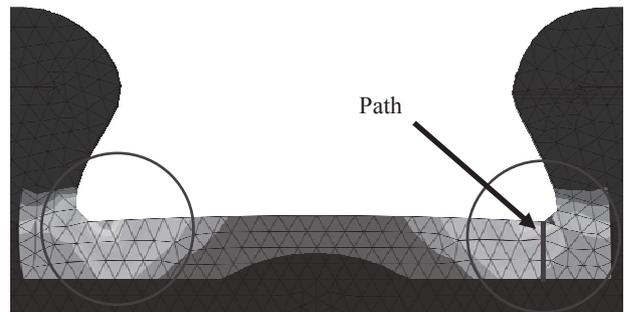


Fig. 11 Results of Finite Element Analysis

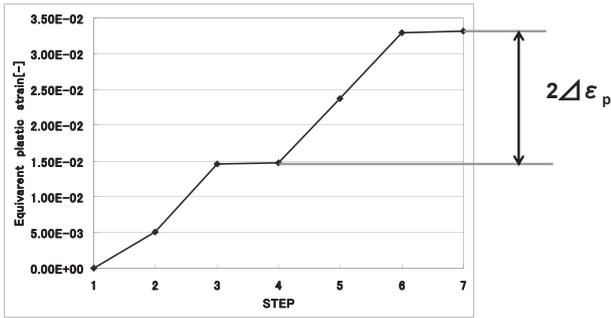


Fig. 12 Equivalent plastic strain history on Cu plate at the notch

## 2.6. CuめっきのS-N曲線

Fig.13に今回取得したCuめっきとバルク無酸素銅のS-N曲線を示す。Cuめっきの疲労特性は、バルクの銅とほぼ同じ結果となった。これを、Fig.10に示されるき裂の進展特性と断面のめっきの組織から考察する。Cuめっきにおいて、主き裂は開口し、二次き裂の発生も認められる。このことから、Cuめっきにおいてもバルク材で知られているき裂進展メカニズムによって疲労き裂が成長したと考えられる。また、めっきの組織についてもバルク材と同様な組織が見られる。これらのことから、本研究でのCuめっきの低サイクル疲労特性は、バルク材料と近いものになったと考えられ、本研究において提案された薄膜材料の疲労特性評価手法の妥当性が明らかとなった

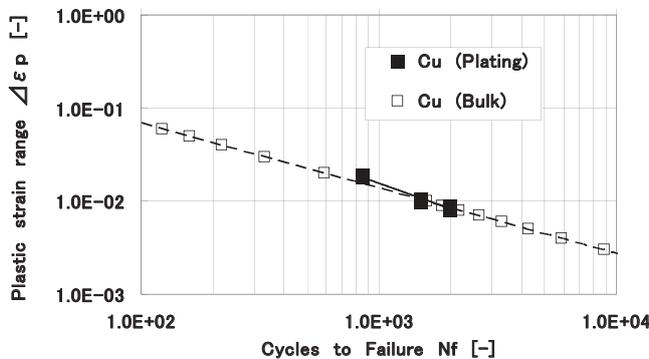


Fig. 13 Low cycle fatigue properties of Cu plate and copper

## 3. 考察および今後の展望

以上、めっきなどの数 $\mu\text{m}$ 程度の薄膜に対する疲労特性の評価手法として新たな手法を提案し、その結果に対して検討を行った。その結果、以下のような結論を得ることが出来た。

- (1) 高耐熱実装構造に用いられる薄膜の疲労特性評価手法として、平滑な表面のNiめっき試験片を用いて、新たな疲労寿命評価手法の提案を行った。その結果、厚さ $5\mu\text{m}$ 程のNiめっきの疲労特性を取得することが出来た。また、得られた疲労特性の妥当性も検証することができた。
- (2) 切り欠きを入れたCuめっきを施した試験片に3

点曲げ疲労試験を実施し、切り欠き部の形状を再現したFEAを実施した。その結果、Cuめっきの疲労特性を取得し、その妥当性も検証された。よって、本研究で提案した、薄膜材料の疲労特性評価手法の妥当性も示すことが出来た。

今後の展望としては、温度を上昇させた際のめっきの材料物性や疲労特性を取得することで、本手法によって取得されるめっきの疲労寿命の高精度化を行う計画である。

### 【参考文献】

1. Iwasaki, et al. “Thermal Problem of Next Generation Semiconductor Power Devices”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 2003, No. 6, pp. 251-252, 2003.
2. 張聖徳ら： “配線用銅薄膜の低サイクル疲労き裂発生および進展特性”， MES2009 論文集， pp.233-236, 2009.

# パワーエレクトロニクス実装のための高耐熱接合・評価技術

神奈川県産業技術センター 篠原俊朗

## 1. はじめに

平成20年度から22年度まで神奈川県産学公プロジェクトとして実施した次世代パワーエレクトロニクスプロジェクトにおいて、パワーデバイス高集積化実装に対応する高耐熱接合技術および評価技術の研究を行った。個々の研究成果詳細については本研究概要集に掲載した他の個別報告にゆだねるとして、ここでは標記テーマに関して実施した研究の総括を行う。

## 2. 研究課題と研究実施体制

### 2.1 研究課題

本研究においては、パワーエレクトロニクス実装の高耐熱化を目的として接合工法およびその評価法にフォーカスし、以下の課題に取り組んだ。また、これらの各研究課題を実施するための接合部特性評価環境構築として①室温から高温までの接合強度評価環境構築、②X線による非破壊接合面評価技術確立、③接合内部や表面、断面を観察・分析するために必須の断面形成技術確立、④EPMA（電子線マイクロアナライザー）やXPS（X線光電子分光）、EBSD（Electron Backscatter Diffraction）による接合部の表面分析技術確立、⑤接合プロセスをその場観察する評価系の構築なども行った。

#### （1）微小サイズ金属粒子を用いた高耐熱接合技術の研究

本課題は、パワーエレクトロニクス実装の高耐熱化を実現するための中核技術として取り組んだ課題である。従来のパワーデバイス接合材料である鉛リッチ高温はんだを用いた接合技術に代わる高耐熱かつ鉛フリーの接合技術として、金および銀のナノ粒子ペーストによるパワーデバイス接合に着目し、高耐熱接合を実現できるペースト材料、接合工法、評価技術に取り組んだ。銀ナノペーストによる接合は、比較的低コストの高耐熱接合が期待でき、サブミクロン金のペーストによる接合では、マイグレーション耐性が高く残留カーボンを抑制した接合が期待できる。

#### （2）接合用高耐熱電極の研究

本課題は、プロジェクト開始当初の主要課題ではなかったが、上記（1）の研究を進める過程で、パワーデバイス裏面や基板側に形成する接合用電極の耐熱性の重要度が明らかになり、途中から正式課題として取り組んだものである。

#### （3）ワイヤボンディング部の接合観察技術の開発

本課題は、同種金属同士を接合したときの接合界面観察技術に関するものであり、主として接合部近傍の結晶粒径分布や個々の結晶粒の結晶方位に注目しての解析を行ったものである。ここではパワーデバイス表面のアルミ電極に超音波接合法で形成されるアルミワイヤに注目し、この接合面を観察する技術に取り組んだ。

#### （4）パワーチップ接合部の熱特性評価技術の研究

新しい接合技術を開発する際に特にパワーデバイス接合において重要になるのが接合部の熱特性である。この課題においては、①熱特性評価技術としてシミュレーションによる熱解析と赤外線を用いた表面温度分布評価手法、②テストピースを用いた接合界面を含む接合材料の評価手法、そして③擬似半導体デバイス実装構造における電氣的パワー印加と測温に基づく熱特性評価手法に取り組んだ。

### 2.2 研究実施体制

上記の各課題に対して産業技術センター内部での研究実施の他、以下のように外部機関を交えた研究実施体制を組んだ。

課題（1）：サブミクロン金ペーストについて、田中貴金属工業株式会社、(財)神奈川県科学技術アカデミーと「金微粒子による高耐熱化パワーデバイス実装技術の研究」のタイトルで平成20年度から22年度まで共同研究を実施し、また、銀ナノペーストについて、DOWA エレクトロニクス株式会社、(財)神奈川県科学技術アカデミーと「半導体チップ実装用銀接合技術の研究」のタイトルで平成20年度から22年度まで共同研究を実施した。

課題（3）：カルソニックカンセイ株式会社、(財)神奈川県科学技術アカデミーと「パワーチップ接続技術の研究」のタイトルで平成20年度から22年度まで共同研究を実施した。

このほか、課題（1）、（2）で実験に使用した信頼性試験装置を大幅に小型化、低排出エネルギー化するために、本プロジェクトの補完研究として理想計測株式会社が実施した平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業課題「自動車用インバータのモジュール等の温度特性評価用小型熱衝撃試験機の開発」にアドバイザーとして参画し、また課題（4）にお

いてエスペック株式会社に熱特性評価に関する協力を頂いた。

### 3. 研究計画

#### 3. 1 微小サイズ金属粒子を用いた高耐熱接合技術の研究

本課題においては、接合形成初期状態および信頼性試験実施後において、20MPa 以上という十分な接合強度を保つパワーチップ接合を形成することを目標として、直径が数十～数百 nm の銀粒子表面を有機物でコーティングしたものを溶媒に分散させた銀ナノ粒子ペーストおよび、直径が数百 nm のサブミクロン金粒子表面を有機物でコーティングしたものを溶媒に分散させたサブミクロン金スラリー、サブミクロン金ペーストを用いた接合実験とその評価を行った。またパワーデバイス接合層としてはその電気抵抗と熱抵抗が重要な特性値となるため、本実験で使用したペースト焼結層に対して電気抵抗率  $15 \mu \Omega \cdot \text{cm}$  以下、熱伝導率  $50 \text{W/m} \cdot \text{K}$  以上の実現を目標とした。このために、複数のペーストに対して接合時の温度、加圧力、ペースト塗布方法、仮乾燥の有無などをパラメータとして接合実験を行い、接合強度シェア強度試験、シェア強度試験後の破断面観察と分析、接合部断面観察と分析、さらには  $300^\circ\text{C}$  での高温保持試験、 $-50^\circ\text{C} \sim +300^\circ\text{C}$  での冷熱衝撃試験などの信頼性試験を行い接合領域劣化の評価を行って目標達成を目指した。そのなかで、特にサブミクロン金粒子に対しては、ドライ接合、超音波接合、ウェット接合の比較を行い、最適な接合法の検討も行った。

#### 3. 2 接合用高耐熱電極の研究

本課題においては、従来パワーデバイスの裏面金属として一般的に用いられている Ti/Ni/Ag の接合用複合膜をリファレンスとし、その高温下での使用における問題点を明らかにした。その後、耐熱性を高めるために Pt の効果について調査した。また金微粒子ペーストへの適合性を考慮して最表面を Au 膜とした複合膜についても調査した。

#### 3. 3 ワイヤボンディング部の接合観察技術の開発

本課題においては、パワーデバイス表面アルミ電極に超音波接合でアルミワイヤを接合する時の加圧力、超音波出力をパラメータとして接合を行い、接合界面付近の直接的な観察法として EBSD 法の可能性を調査した。そのために、加圧力や超音波出力をパラメータとして接合した接合界面のアルミ結晶粒の分布を EBSD 法で観察し、接合条件との相関を調査した。

#### 3. 4 パワーチップ接合部の熱特性評価技術の研究

本課題では、熱特性評価技術として以下の3つの手法を検討した。

##### ①シミュレーションによる熱解析と赤外線を用いた表面温度分布評価手法検討

ここでは、まずパワーデバイスを鉛フリーはんだで接合する時のプロセスとボイドの関係を調査し、ボイドの少ないプロセスを開発した。さらにこのボイドがパワーデバイスの表面温度に与える影響をシミュレーションにより熱解析して投入パワー依存性やボイドサイズ依存性などを評価した。その後、実際のパワーデバイスを模擬したチップを作製し、ボイドの多い状態でチップと基板を接合してチップにパワーを投入した時のチップ表面温度を赤外線温度分布測定器で測定しパワーチップ接合部の熱特性評価法としての可能性を調べた。

##### ②テストピースを用いた接合界面を含む接合材料の評価手法検討

この評価法はエスペック株式会社の協力を得て実施した。まず、サブミクロン金ペーストおよび銀ナノペーストを用いた接合層膜厚の異なる接合構造テストピースを作製し、これらを一方向熱流定常比較法により全熱抵抗値を測定した。その後、この接合層膜厚依存性を解析することにより接合層の熱伝導率と接触熱抵抗を求めた。その解析結果から本手法のパワーチップ接合部の熱特性評価法としての可能性を調べた。

##### ③擬似半導体デバイス実装構造における電氣的パワー印加と測温に基づく熱特性評価手法

この評価法は、実際のパワーデバイスを模擬したチップを基板に銀ナノペーストで接合し、チップ上面と接合層下面の温度測定を行うことにより接合部の熱特性を評価しようというものである。チップに発熱体と測温センサを半導体プロセスで形成することによりパワー投入とチップ上面の測温の高精度化を図った。

### 4. 研究成果と今後の展望

#### 4. 1 微小サイズ金属粒子を用いた高耐熱接合技術の研究 <sup>1), 2)</sup>

まず、銀ナノ粒子を用いた接合技術については、本研究を実施することにより目標としていた 20MPa の接合強度を実現できる接合条件を見いだした。また、ペースト焼結層の電気抵抗率  $2.8 \mu \Omega \cdot \text{cm}$ 、熱伝導率  $224 \text{W/m} \cdot \text{K}$  が得られ、目標としていた特性を満たしていることを確認した。この接合条件を用いて、実デバイスを模擬した接合サンプルを作製し、接合部の信頼性について評価を行った結果、 $300^\circ\text{C}$ 、1000 時間の高温放置試験、 $-50^\circ\text{C} \sim +300^\circ\text{C}$ 、300 サイクルの熱衝撃試験を実施した後も十分な接合強度を保っていることがわかった。

しかしながら、接合面を詳細に調査した結果、300℃の環境下ではチップ裏面における接合用複合金属がTi/Ni/Agの場合、AgとNiの相互拡散が起り、カーケンダルボイドに発展する懸念が明らかになった。この現象については後述の4.2項において明らかになったPtバリア膜の使用により大幅に低減できる見込みであり、高耐熱接合材としての可能性を示すことができた。今後、1000サイクル以上の熱衝撃試験を実施するなど実験的に使用限界温度、時間等を確認していくことが必要である。

続いて、サブミクロン金粒子ペーストを用いた接合技術について述べる。本接合材料においても目標としていた20MPaの接合強度を実現できる接合条件を見いだしており、また、ペースト焼結層の電気抵抗率、熱伝導率についても、それぞれ $5\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 、 $150\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ が得られ、目標特性を満たしていることを確認した。また、接合面を分析した結果、接合面へのカーボン残留がかなり抑制されており、狙い通りの結果が得られた。この接合条件を用いて、実デバイスを模擬した接合サンプルを作製し、接合部の信頼性について評価を行った結果、300℃、1000時間の高温放置試験、 $-50^\circ\text{C}\sim+300^\circ\text{C}$ 、300サイクルの熱衝撃試験を実施した後も十分な接合強度を保っていることがわかった。本研究ではバリア膜としてPtを用いたが低コスト化に向けて他のバリア膜の検討や金接合層厚みの更なる低減が今後の課題である。

#### 4. 2 接合用高耐熱電極の研究<sup>3)</sup>

Ti/Ni/Agを接合用金属積層膜として用いた試料を300℃、100時間放置したところNiとAgの相互拡散が観測され、接合層劣化が懸念された。そこで、Ti/Au、Ti/Pt/Auについて300℃、300時間、Ti/Pt/Agについて300℃、100時間の放置実験を行い、その試料の分析を行った。その結果、Ptをバリア膜に用いた試料では金属間相互拡散が大幅に抑制され、高耐熱接合用積層金属におけるバリア膜としてPtが有用であることを実験的に明らかにした。今後、TaやWなど他の金属についても実験し、データを整備していく。

#### 4. 3 ワイヤボンディング部の接合観察技術の開発<sup>4)</sup>

パワーデバイス表面のアルミ金属とアルミワイヤを超音波接合した試料についてその接合界面付近の断面をEBSD観察した。その結果、超音波接合時の加圧力や超音波出力などボンディング条件とEBSDでビジュアル観察される結晶粒分布には相関があり、同種金属同士の接合界面評価に有効である事が分かった。この手法を活用することによりボンディング条件の検討だけでなくその後のアニールによる結晶性回復など様々な検討が可能になり、これとパワーデバイスの電気特性への影響評価およびワイヤ接合強度を総合的に評価することによりワイヤボンディング工程設計への適用可能性が明らかになった。

#### 4. 4 パワーチップ接合部の熱特性評価技術の研究

##### 4. 4. 1 パワーチップ接合部の熱伝導解析と赤外線による表面温度分布評価<sup>5)</sup>

はんだ接合におけるボイドの熱的影響を解析し、ボイドサイズが表面温度に与える影響を調べた。今回の実験に用いた赤外線カメラでは2mm□程度の大きなサイズのボイドについては過渡応答、定常状態の観察が可能であったが、当初狙っていた数十～数百 $\mu\text{m}$ サイズの微小なボイドに対しては、カメラの応答速度の制限から十分な知見は得られなかった。今後赤外線カメラの応答速度も考慮しながら種々の試料に対しての測定を行い熱シミュレーションへのフィードバックを行って、解析精度向上を行うことが必要である。

##### 4. 5. 2 一方向熱流定常比較法による貴金属ダイアタッチ層の熱抵抗評価<sup>6)</sup>

サブミクロン金ペーストを用いて2枚の銅プレートを接合した試料に一方方向の定常的な熱流を与え、接合層上下において温度測定を行う事で、この試料の接触熱抵抗と接合層内部の熱抵抗からなる全熱抵抗を計算により求めた。接合層厚さの異なる複数の試料で同様の測定を行い、その結果を解析することにより接触熱抵抗と内部熱抵抗を分離でき、内部熱抵抗から熱導電率を計算できる。非常に熱伝導率が大きくかつ接合層の厚さが薄いため、測定値の不確かさが大きい。接触熱抵抗 $0.82\times 10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 、接合層内部熱抵抗 $0.56\times 10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ が得られた。両者の比率は6:4となり接触熱抵抗の寄与が非常に大きいことが分かった。またこの内部熱抵抗から得られる熱伝導率は $325\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ であった。今後この手法を金や銀など高熱伝導の接合層評価に適用していくためには不確かさの改善が必要であり、試験片両端の温度差を大きくするために加熱部の温度を上げる、冷却部の温度を下げるなどの対策が必要である。

##### 4. 5. 3 半導体の実装構造における熱特性評価技術<sup>7)</sup>

実デバイス実装構造での熱特性を評価する計測系を構築した。実デバイスとしては、シリコンチップに半導体工程により白金薄膜からなるヒータと測温センサを形成したものを使用し、実装用基板として電極付セラミック基板への機械加工による温度センサ実装を行ったものを使用した。接合は銀ナノペーストで行っている。白金ヒータに通電しながらチップ表面温度を測温し、その結果と銀ナノペーストによる接合層下部の温度測定結果から熱パラメータを算出した。通電による投入パワーによらず熱パラメータが一定になると予想したが発熱量依存性のある結果が得られた。各部材の熱伝導率が

もつ温度依存性が一つの要因と考えており、この検証が今後の課題である。またサンプル間ばらつきが大きく系全体の改善の余地は大きいと考えている。

## 5. 今後の展望

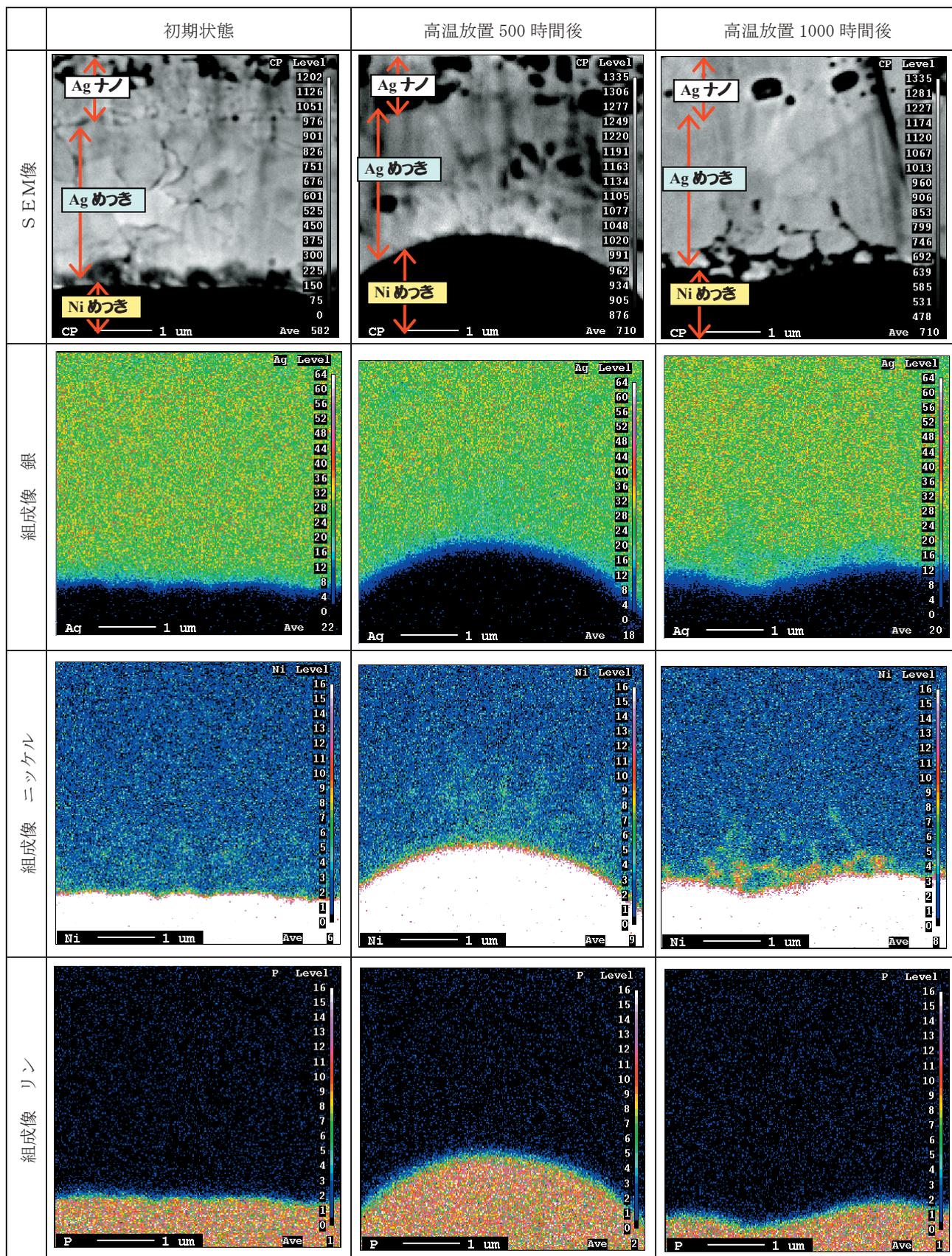
本研究によりパワーデバイス高集積化実装に対応する高耐熱接合技術および評価技術に関して多くの知見が得られ、また新たに明らかになった課題も多い。今後、今回明らかになった新たな課題に取り組むと共に、得られた知見と従来からの接合技術、評価技術とを合わせ、パワーエレクトロニクス実装技術はもちろんのこと、他の電子実装技術にも活用できる公共試作開発ラボ機能として活用し、研究開発や不良解析等における企業支援に活かしていきたい。

### 参考資料

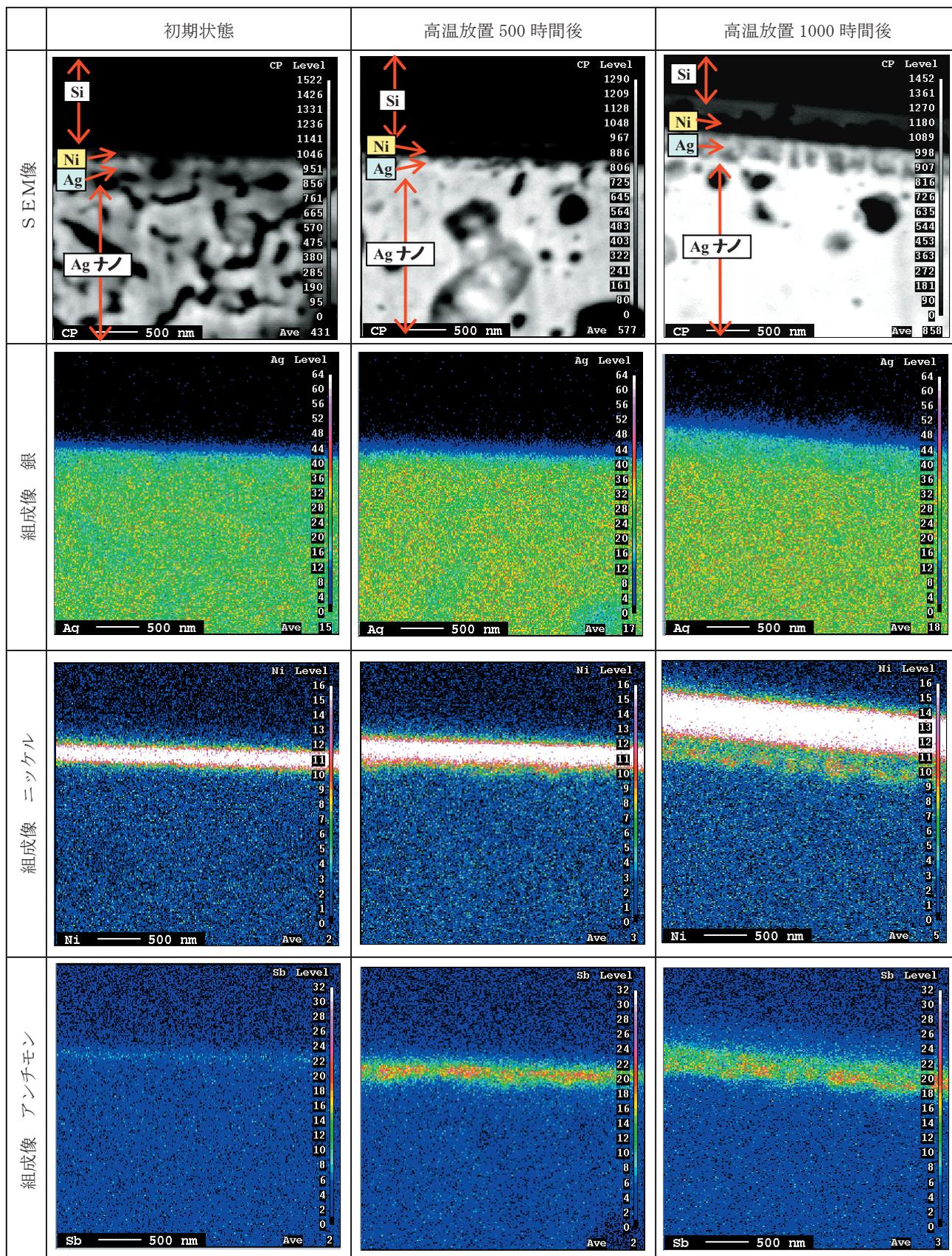
- 1) 本プロジェクト研究概要集：八坂、他、「銀ナノ粒子を用いた接合技術」
- 2) 本プロジェクト研究概要集：伊藤、他、「金サブミクロン粒子を用いたダイボンド技術の開発」
- 3) 本プロジェクト研究概要集：田口、他、「金属多層膜を用いた高耐熱電極に関する研究」
- 4) 本プロジェクト研究概要集：篠原、他、「電子後方散乱回折像によるアルミワイヤ接合部観察」
- 5) 本プロジェクト研究概要集：三橋、他、「パワーチップ接合部の熱伝導解析と赤外線による表面温度分布評価 —接合部のポイドが表面温度に与える影響—」
- 6) 本プロジェクト研究概要集：篠原、他、「一方向熱流定常比較法による貴金属ダイアタッチ層の熱抵抗評価」
- 7) 本プロジェクト研究概要集：八坂、他、「半導体の実装構造における熱抵抗評価技術」

	断面SEM像	面分析 (炭素)
ペーストA 乾燥 60°C 加圧 5MPa		
ペーストA 乾燥 60°C 加圧 1MPa		
ペーストA 乾燥 60°C 加圧 0MPa		
ペーストB 乾燥 60°C 加圧 5MPa		

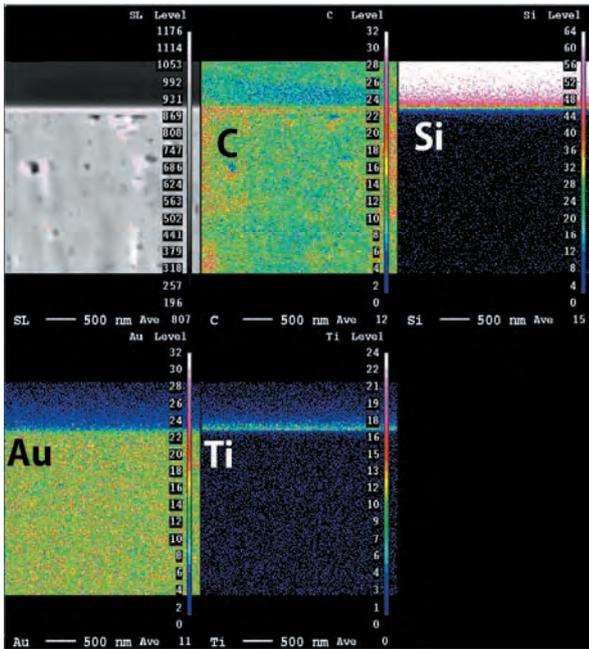
P.100 図15 接合部断面観察



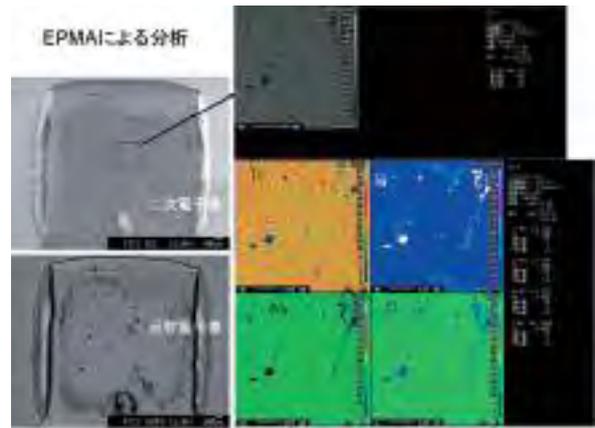
P.104 図 2 7 面分析基板側



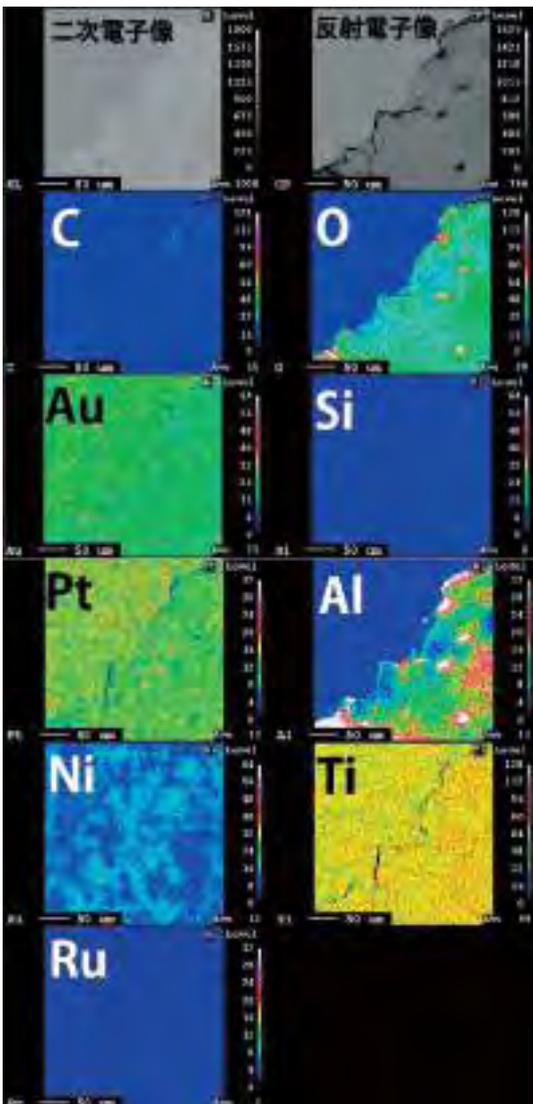
P.103 図 2 8 面分析チップ側



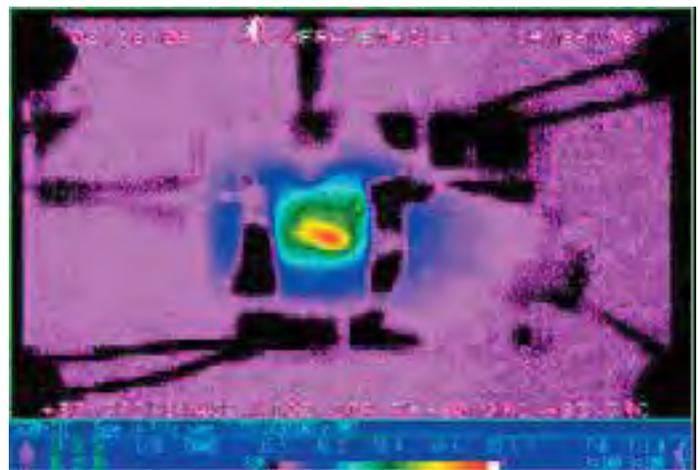
P.110 図10 図9に示した断面の表面を元素分析した結果



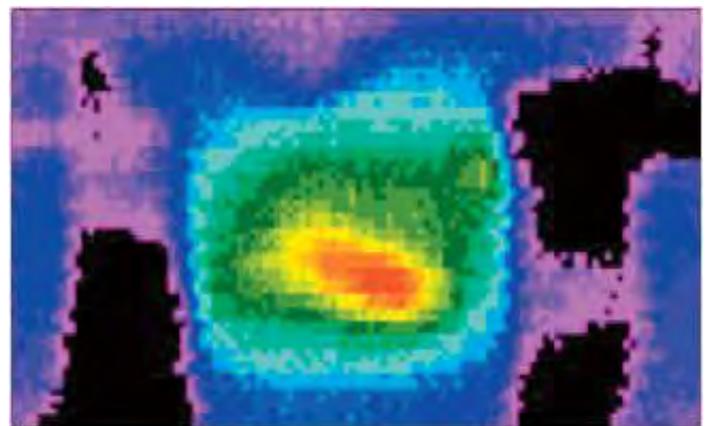
P.113 図15 高温放置(300°C、300h)後のサンプルをシヤア強度試験した破断面(基板)のEPMA観察の結果。



P.115 図21 熱衝撃試験後の破断面の基板側SEM像(上図)とEPMAによる元素マッピング(下図)



P.130 図18 試料を通電加熱した場合の赤外線画像



P.131 図19 チップ部分の拡大図(図3のパターン付きチップに対応)

# 銀ナノ粒子を用いた接合技術

神奈川県産業技術センター 八坂 慎一、田口 勇、本泉 佑、三橋 雅彦、篠原 俊朗

DOWAエレクトロニクス株式会社 久枝 穰、遠藤 圭一

## 1. はじめに

### 1. 1 概要

近年環境問題の観点から鉛含有製品に対する規制が高まり、はんだについても鉛フリー化に関する研究開発が進められ、低温はんだについてはほぼ実用化されている。しかしながら、高温はんだについては有力な代替材料が開発されておらず、環境規制項目からも適用除外されている状況である。一方では、金属ナノ粒子の低温焼結性を利用した接合技術、特に銀ナノ粒子に関する研究が、高温はんだ代替接合技術として進められている<sup>1-3)</sup>。

我々は、この銀ナノ粒子を半導体ダイボンディング部接合材料として用いる手法を検討し、シリコンチップと実装基板の接合において十分な接合強度を得られる接合条件を見出した。さらにこの接合法を用いて、実際のパワーデバイスを想定した10mm角の面積チップを実装基板に接合したサンプルを試作し、初期の接合状態とともに高温放置試験、温度サイクル試験などにより接合部の信頼性を評価したのでその結果について報告する。

### 1. 2 銀ナノ粒子の低温焼結性

一般に銀ナノ粒子は粒子径が数ナノから数十ナノメートルのサイズであるが、このようなナノサイズの粒子はバルクの銀よりも大きな表面エネルギーを持っており、ナノ粒子同士が接触すると、バルクの銀の融点よりも低い温度で焼結する。しかしながらこのままの状態であると室温でも焼結反応が進行してしまうため、図1のようにナノ粒子の表面を有機物で保護して焼結反応を制御している。さらに、この銀ナノ粒子を、凝集防止や印刷性向上などを目的として、溶媒中に分散させたものが銀ナノ粒子ペーストである<sup>1)</sup>。銀ナノ粒子ペーストを用いた接合の工程は、ペースト印刷後に予備乾燥によって溶媒を揮発させた後、本加熱によってナノ粒子表面の有機物を脱離・分解させることによって行う(図2)。

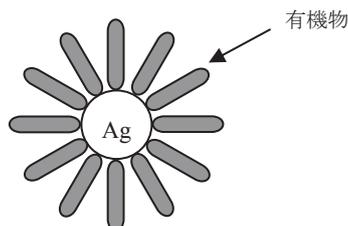


図1 銀ナノ粒子のイメージ

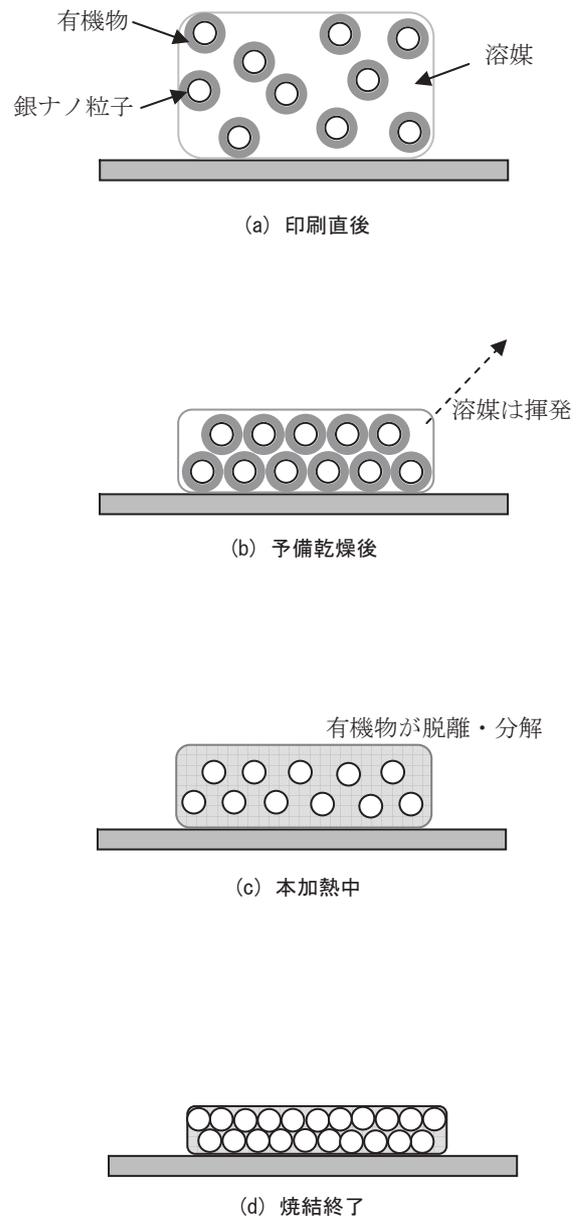


図2 銀ナノ粒子ペーストの焼結工程

## 2. 実験と結果

### 2. 1 接合工程の検討

最初に銀ナノ粒子ペーストの特性について調査し、最適な接合工法の検討を行った。接合部の評価はダイシエアテストおよび接合部断面観察によって行った。

#### 2. 1. 1 銀ナノ粒子ペーストの熱分析

銀ナノ粒子ペーストについては、ペーストA（ターピネオール溶媒、Ag濃度78.3wt%、粘度167Pa・s）およびペーストB（ケロシン溶媒、Ag濃度86.1wt%、粘度33Pa・s）の2種類のペースト（DOWAエレクトロニクス株式会社製）について検討を行った。分解・焼成温度を調べるため、それぞれの銀ナノ粒子ペーストについて熱分析（TG、DTA）を行った。ペーストAについては、ナノ粒子のみ、および分散剤のみについても熱分析を行った。

それぞれの銀ナノ粒子ペーストの熱分析（TG、DTA）の結果を図3～6に示す。ペーストBについては、300℃でほぼ反応が終了するのに対し、ペーストAでは300℃以上の温度でも反応が続いている。しかしながら図4を見ると銀ナノ粒子の焼結は300℃以下で完了しており、図5を見ると300℃以上での反応は分散剤によるものと考えられる。したがって、ペーストAおよびペーストBの焼成温度は、300℃にすることが妥当であるが、ペーストAは予備乾燥で十分に溶媒を揮発させる必要があると考えられる。

また、焼成温度300℃で焼結させた銀ナノペーストの体積抵抗率と熱伝導率を測定したところ、それぞれ $2.8\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 、 $224\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ という結果が得られた。

#### 2. 1. 2 接合基板およびチップ

接合基板としては、パワーデバイス実装用のアルミ貼り窒化アルミ基板を採用し、基板表面にはNi下地Agめっきを施した。チップには2mm角のシリコンチップで、ドライプロセスによりチップ裏面にTi/Ni/Agの順に成膜したものをを用いた。（図7）

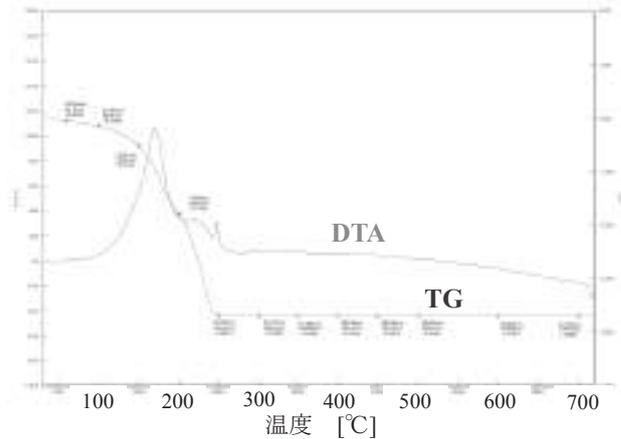


図4 ペーストA（粒子のみ）の熱分析

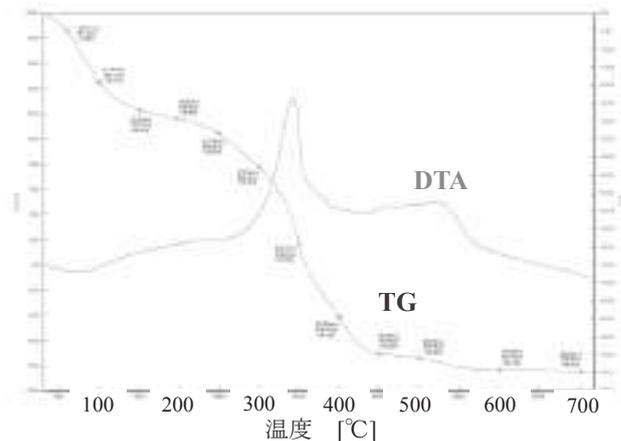


図5 ペーストA（分散剤のみ）の熱分析

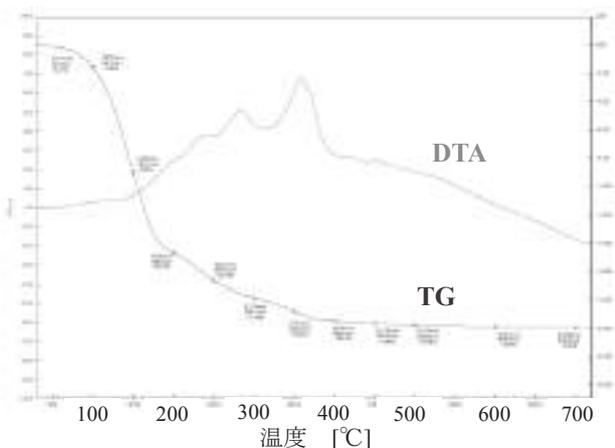


図3 ペーストA（ターピネオール分散）の熱分析

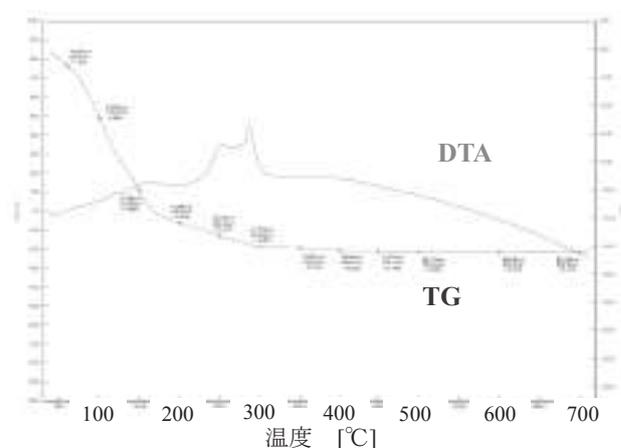


図6 ペーストB（ケロシン分散）の熱分析

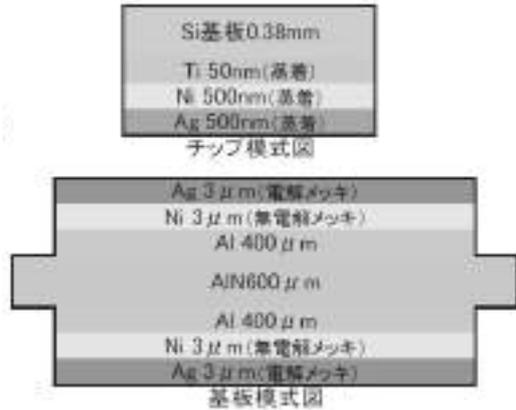


図7 基板およびチップ

### 2. 1. 3 接合条件

銀ナノ粒子ペーストを用いた接合の流れを図8に示す。ペーストの印刷は開口2mm角、厚さ50 $\mu$ mのメタルマスクを用いて基板に印刷した。印刷後ただちにチップをマウントし、フリップチップボンダ（ハイソルMODEL6000）を用いて0.2MPaの加圧力で加圧しチップの片あたりを修正した。その後、オープンに入れてペーストの乾燥を行った。乾燥条件は大気中で保持時間60minとし、60 $^{\circ}$ Cもしくは100 $^{\circ}$ Cの温度で行った。接合はフリップチップボンダを用いて0, 1, 5MPaの加圧力、大気中で300 $^{\circ}$ Cの温度で行った。最初に60 $^{\circ}$ Cに保持されたヒートステージ上にチップがマウントされた基板を置き、60 $^{\circ}$ Cに保持したツールで上から加圧し、設定された加圧力に荷重が到達してから昇温を開始した。0MPaの加圧力の場合は、チップに接触したところでツールを固定し、加熱を行った。加熱はステージとツール両側から加熱を行い、昇温レートは1 $^{\circ}$ C/secとし300 $^{\circ}$ Cで2min保持して、終了後ただちに加圧を中止し、基板をステージから取り出して自然冷却させた。チップは、1枚の基板にアレイ状に複数個配置した。5MPa加圧用のサンプルについては、基板あたり6チップ、0, 1MPa加圧用のサンプルについては、基板あたり20チップとし、複数のチップを同時に加圧し接合した。

### 2. 1. 4 接合強度試験

接合強度はボンドテスター（Dageシリーズ4000）を用いてダイシエア試験により評価した。試験条件は、シエア高さ50 $\mu$ m、シエア速度10 $\mu$ m/sec、試験温度は室温および、ヒートステージを用いて、250 $^{\circ}$ C、300 $^{\circ}$ Cの加熱条件下で行った。

図9, 10に各接合条件に対する室温におけるシエアテストの結果を示す。ペーストAについては、1MPaの加圧で接合すれば十分な接合強度が得られるのに対し、ペーストBについては、同等の接合強度を得るためには5MPaの加圧を必要とすることがわかった。また、図11~13に250 $^{\circ}$ Cおよび300 $^{\circ}$ Cでのシエアテストの結果を示す。ペーストA、Bとも5MPaの加圧では試験温度の上昇にともなって破壊強度が低下するが、強度値のばらつきは小さくなることわかった。



図8 接合シーケンス

1MPaの加圧では、試験温度の上昇にともなって強度は低下するが、ばらつきの変化は見られなかった。また、乾燥温度による接合強度の影響は、加圧0MPaではほとんど変化がないが、加圧1MPaでは、100 $^{\circ}$ Cで乾燥させたほうが、接合強度が高く、ばらつきも小さくなった。

図14にシエアテスト後の破断面の顕微鏡写真を示す。写真で黒灰色に見える部分が接合していた箇所である

と考えられる。ペーストA、Bとも加圧力の低下にしたがって接合部の面積が減少しているが、ペーストAでは接合材と基板との界面で剥離しているのに対し、ペーストBでは接合材とチップの界面で剥離している。また、ペーストBでは接合材の表面にひび割れが発生しており、チップマウント前に既にペースト表面の乾燥が進んでいたことがわかる。これは、ペーストBの溶剤の揮発性が高かったためと考えられ、これによって乾燥したペースト表面とチップとの密着性が下がり、接合力が低下したものと考えられる。

300°Cでのシェアテスト後の破断面を見ると、ペーストA、Bとも、接合材内部でひび割れが発生している。アルミニウムは高温では温度の上昇にしたがって引張強度と耐力が低下し、伸びは増大する傾向にあることが知られており<sup>4)</sup>、接合材内部のひび割れは、基板のアルミニウムの塑性変形が進んだことにより引き起こされたものと考えられる。高温下での接合強度が低下した原因としては、このアルミの塑性変形に起因するものと考えられる。

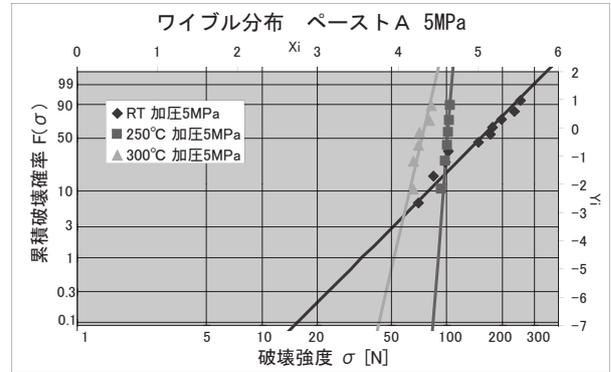


図 11 シェアテスト結果 (ペーストA 5MPa)

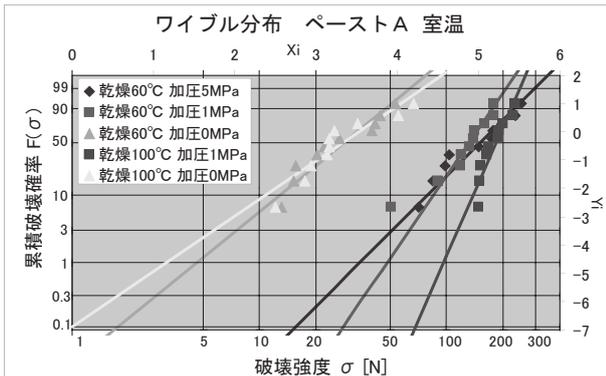


図 9 シェアテスト結果 (ペーストA 室温)

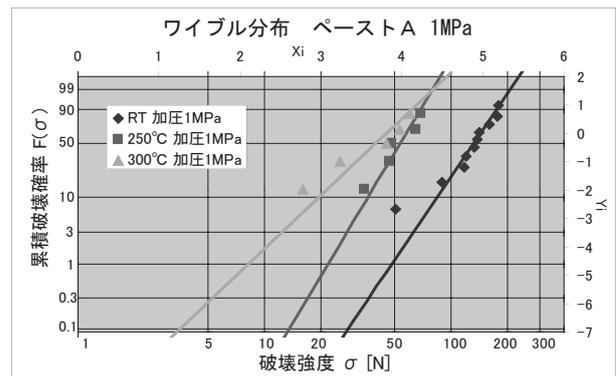


図 12 シェアテスト結果 (ペーストA 1MPa)

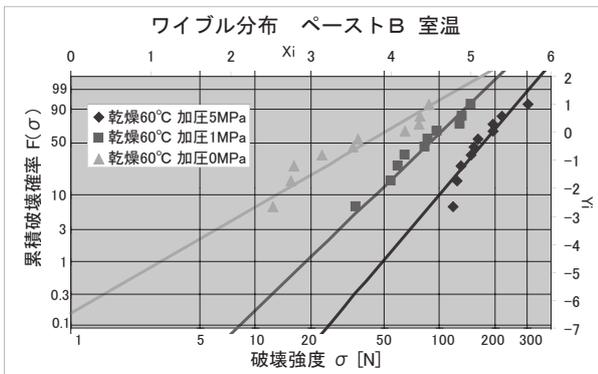


図 10 シェアテスト結果 (ペーストB 室温)

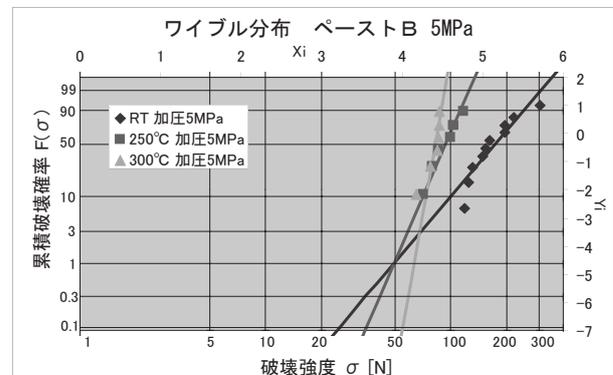


図 13 シェアテスト結果 (ペーストB 5MPa)

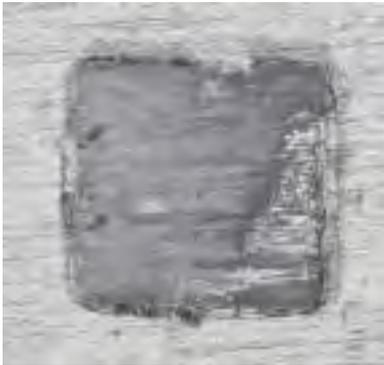
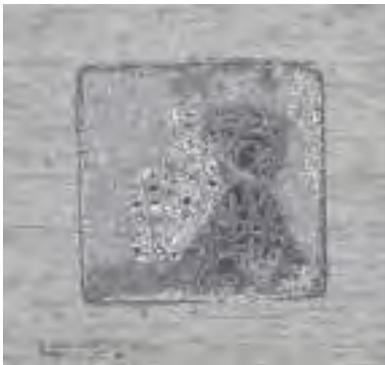
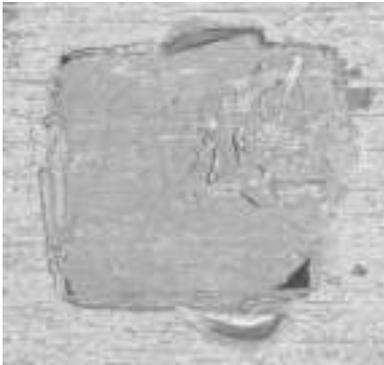
	ペーストA	ペーストB
乾燥 60℃ 加圧 5MPa 試験温度：室温		
乾燥 60℃ 加圧 1MPa 試験温度：室温		
乾燥 60℃ 加圧 0MPa 試験温度：室温		
乾燥 60℃ 加圧 5MPa 試験温度：300℃		

図 1 4 シェアテスト後の破断面

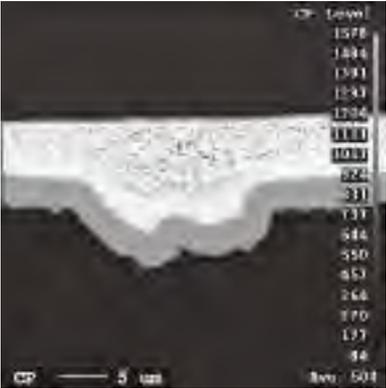
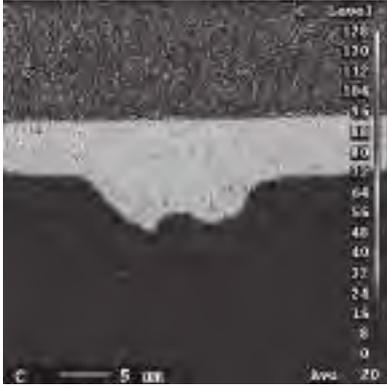
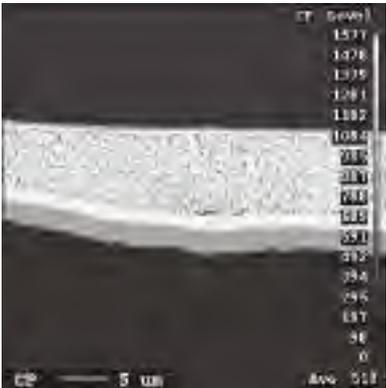
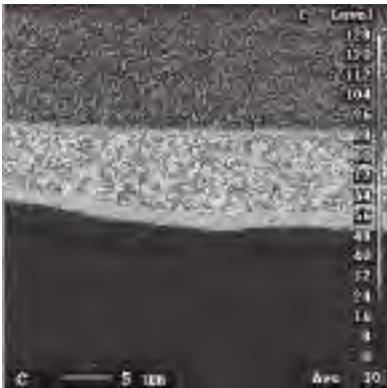
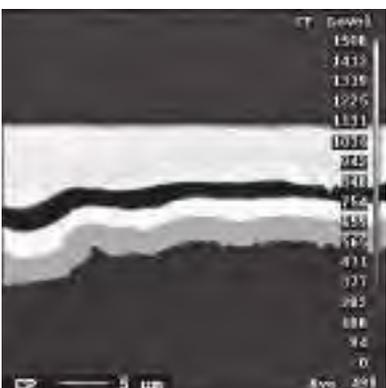
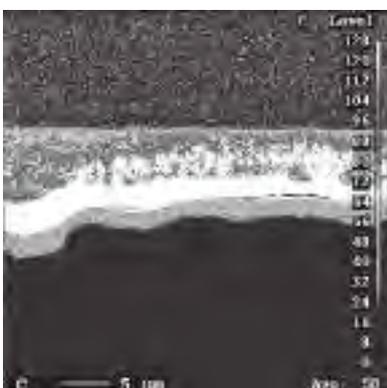
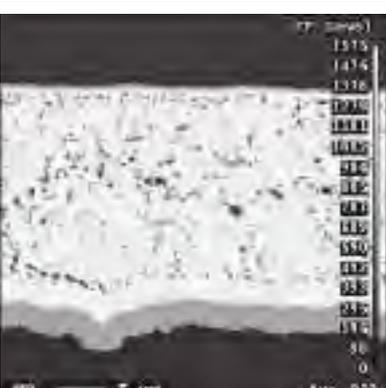
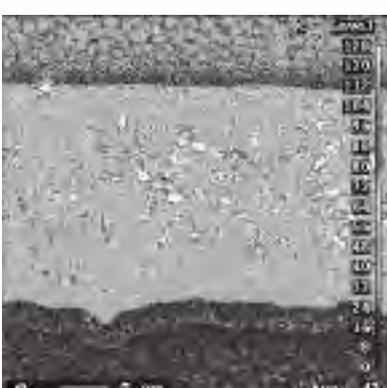
	断面SEM像	面分析 (炭素)
ペーストA 乾燥 60°C 加圧 5MPa		
ペーストA 乾燥 60°C 加圧 1MPa		
ペーストA 乾燥 60°C 加圧 0MPa		
ペーストB 乾燥 60°C 加圧 5MPa		

図 15 接合部断面観察

## 2. 1. 5 接合部断面観察

接合部断面試料の作製は、サンプルを切断機・機械研磨により大まかに加工した後、クロスセクションポリッシャにより仕上げ研磨を行った。断面観察は走査電子顕微鏡（SEM）により行い、また、電子線マイクロアナライザ（EPMA）による面分析も行った。

図15にペーストA（乾燥 60℃ 加圧 5、1、0MPa）およびペーストB（乾燥 60℃ 加圧 5MPa）の接合断面のSEMによる観察像と EPMA による面分析の結果を示す。ペーストAにおいて、加圧 0MPa の接合では、基板と接合材の界面で剥離している様子がわかる。加圧 5MPa と 1MPa では接合層の組織の緻密さなどはあまり変わらないように見えるが、炭素の分布を見ると加圧 5MPa では接合層中の炭素の量が減少していることがわかる。これは銀ナノ粒子の焼結時に発生する反応有機生成物が加圧力によって外部に排出されたためであると考えられる。加圧 0MPa ではこの有機物の蒸気圧によりチップが押し上げられ、チップが基板から剥離してしまったものと考えられる。ペーストBでは加圧 5MPa での接合でも炭素の残留が多く、反応有機生成物が効率よく外部に排出されていないものと考えられる。

## 2. 1. 6 まとめ

銀ナノ粒子ペーストを用いたシリコンチップと実装基板の接合において以下の知見が得られた。

- ① ペーストA、Bともに 300℃以下の温度で焼結を開始する。
- ② ペーストA、Bともに接合温度 300℃、加圧力 5MPa の接合条件で十分な接合強度が得られた。
- ③ ペーストAにおいては、乾燥条件などの改善により加圧力 1MPa 程度でも十分な接合が得られる可能性がある。
- ④ 250℃、300℃の高温下でも十分な破壊強度が得られた。高温では接合基板のアルミ基材から破壊が始まっていると考えられる。



図16 接合部のX線透視像

## 2. 2 接合部の信頼性評価

前セクションでは、銀ナノ粒子ペーストを用いた接合工法の最適条件の検討を行ったが、本セクションでは、得られた接合条件を用いて実際のパワーデバイスを想定した10mm角程度の面積での接合試験を行い、接合直後と高温放置試験、温度サイクル試験などを行った後の接合状態を比較し、接合部の信頼性を評価した。

### 2. 2. 1 供試品

銀ナノ粒子ペーストは、ペーストA（ターピネオール溶媒、Ag濃度 78.3wt%、粘度 167Pa・s）のペーストを用いた。接合基板とチップは前セクションと同様の膜構成のものを採用した（図7）。ただしチップについては10mm角のサイズに加工した。

### 2. 2. 2 接合条件

銀ナノペーストの印刷は開口10mm角、厚さ50μmのメタルマスクを用いて基板に印刷した。印刷後ただちにチップをマウントし、フリップチップボンダ（ハイソル MODEL6000）を用いて0.2MPaの加圧力で加圧しチップの片あたりを修正した。その後、100℃の温度に設定したオーブンに入れて、大気中で60分保持しペーストの乾燥を行った。接合はフリップチップボンダを用いて1MPaの加圧力、大気中で300℃の温度で行った。最初に100℃に保持されたヒートステージ上にチップがマウントされた基板を置き、100℃に保持したツールで上から加圧し、設定された加圧力に荷重が到達してから昇温を開始した。加熱はステージとツール両側から加熱し、昇温レートは1℃/secとした。300℃にて5min保持の後、終了後ただちに加圧を中止し、基板をステージから取り出して自然冷却させた。

接合したサンプルのX線透視像を図16に示す。接合部に欠陥はなく良好な接合ができていたことがわかる。チップ周辺部に見える黒い陰影は加圧時に接合部からはみだしたペーストの残渣である。

### 2. 2. 3 信頼性試験

信頼性の評価は高温放置試験（300℃：500時間、1000時間）と温度サイクル試験（-40℃～+150℃：10、100、500、1000サイクル）および熱衝撃試験（-50℃～+300℃：300サイクル）により行った。温度サイクル試験は一つの恒温層の中で高温あるいは低温側の設定温度になるまで加熱あるいは冷却を行い、設定温度に達したら15分保持する温度プログラムで行った。熱衝撃試験は高温あるいは低温の設定温度で保持している二つの恒温層の間を試料を移動させそれぞれ45分保持することにより行った。温度サイクル試験および熱衝撃試験の温度プロファイルをそれぞれ図17および図18に示す。これらの信頼性試験終了後、接合強度試験と断面観察により接合状態を評価した。

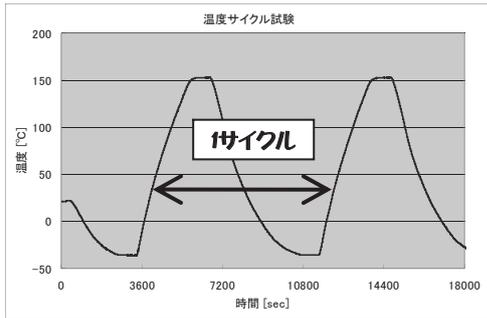


図 17 温度サイクル試験の温度プロフィール

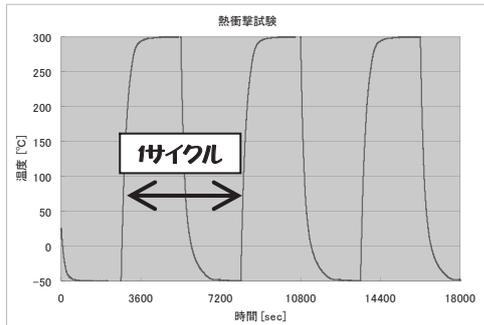


図 18 熱衝撃試験の温度プロフィール

## 2. 2. 4 接合強度試験

接合強度はボンドテスター (Dage シリーズ 4000) を用いてダイシエア試験により評価した。試験条件は、シエア高さ  $50\ \mu\text{m}$ 、シエア速度  $10\ \mu\text{m}/\text{sec}$ 、試験温度は室温で行った。

ダイシエア試験の結果は、接合直後、信頼性試験後のサンプルのほとんどが試験装置の最大荷重 (1 kN) を加えても破壊しなかった。ただし、1 サンプルのみ (温度サイクル 1000 サイクル) 信頼性試験中にチップが剥離したものがあつたが、このサンプルは基板表面が他のサンプルと比較して変色が著しく、基板表面の洗浄不足あるいはめっき不良などに起因するものと考えられる。

## 2. 2. 5 接合部断面観察

接合部断面試料の作製は、サンプルを切断機・機械研磨により大まかに加工した後、クロスセクションポリッシャにより仕上げ研磨を行った。断面観察は走査電子顕微鏡 (SEM) により行い、また、電子線マイクロアナライザ (EPMA) による面分析も行った。

図 19～26 に初期状態と高温放置試験後 (500、1000 時間)、温度サイクル試験後 (10、100、500、1000 サイクル)、および熱衝撃試験後 (300 サイクル) のサンプルの接合断面 SEM 像を示す。高温放置試験を行ったサンプルについては、時間の経過とともに銀ナノ粒子接合層中の小さいボイドが大きいボイドに凝集している。これは接合後も高温環境にあると銀ナノ粒子の焼結反応が進行することによるものと考えられる。また、温度サイクルを行ったサ

ンプルについては接合層中のボイドからクラックが発生している様子がわかるが、100 サイクルと 500 サイクルではあまり変化がなく、温度サイクル初期に発生したクラックは急速に進展することはないものと考えられる。

しかしながら熱衝撃試験後のサンプルについては、接合層中に大きなクラックが発生しており、接合層の熱疲労がかなり進んでいることがわかる。温度サイクル試験と熱衝撃試験については温度幅や温度変化率が大きく異なっており、この結果から、銀ナノ粒子接合層の信頼性試験を行う上では試験条件の設定を慎重に決めることが重要であると考えられる。また、熱衝撃試験後のクラックは基板のめっき層中にも発生しており、使用環境  $300^\circ\text{C}$  での信頼性を考えた場合、基板のめっき構成から検討しなおす必要があると考えられる。さらに熱衝撃試験後のサンプルでは、シリコンチップと接合層の界面で剥離していることが観察されたが、これについては高温放置試験後のサンプルとともに考察する。

高温放置試験後のサンプルについてはニッケルめっきと銀めっきの界面で元素の拡散によるものと思われる構造が観察された。このめっき部の界面を拡大し EPMA による面分析を行った結果を図 27 に示す。図中でリンの分布は、高温放置 1000 時間後においても銀めっき中への拡散は見られず、このラインが無電解ニッケルめっきのめっき直後の状態であると考えられる。ニッケルの分布を見ると、初期状態と高温放置 500 時間後ではほとんど拡散の状態は変化がなく、銀めっきの粒界にわずかにニッケルが拡散している程度であるが、1000 時間後においてはニッケルの拡散がかなり進んでおり、 $300^\circ\text{C}$  という高温環境においてはニッケルめっきがバリア層としては不十分であることがわかる。チップ側の層構成も同様の金属を使用しているため、同じような拡散現象が起きている可能性がある。膜厚が  $500\text{nm}$  と薄いため、さらに倍率をあげて面分析を行った結果を図 28 に示す。こちらも同じように時間の経過とともにニッケルが銀の中に拡散している様子がわかる。しかしながら、高温保持 1000 時間後においてもニッケルの拡散はチップ側の銀メタライズ層までであり銀ナノ粒子接合層へは拡散していないことがわかる。図中でアンチモンの分布を見ているが、これは基板側の銀めっき層に光沢剤として添加されていた元素である。このアンチモンの分布を見ると銀へのニッケルの拡散層の位置と対応しており、銀ナノ粒子接合層を通して拡散してきたアンチモンがニッケル拡散層に偏析しているものと考えられる。

熱衝撃試験後にシリコンチップと接合層の界面で剥離しているサンプルについては、チップ電極層の近傍で破壊がおきており、おそらくは、 $300^\circ\text{C}$  の高温時にニッケルと銀の界面で固相拡散が進み機械的強度が低下した界面に、熱膨張差や温度急変時の熱応力がかかり剥離したものと推測できる。以上のことから Ni/Ag の電極構成は  $300^\circ\text{C}$  の高温環境での信頼性はあまり高いとは言えず、高温環境で連続動作を考えた場合、チップおよび基板の電極構成から検討する必要がある。

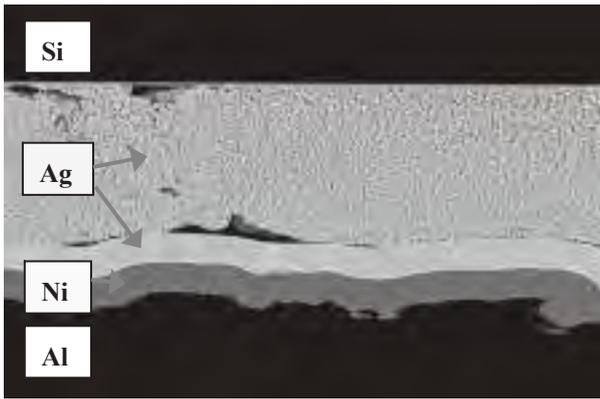


図 1 9 断面 SEM 像 初期状態

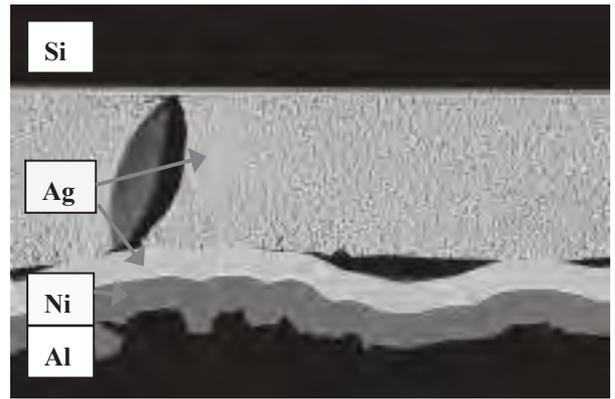


図 2 3 断面 SEM 像 温度サイクル 10 サイクル後

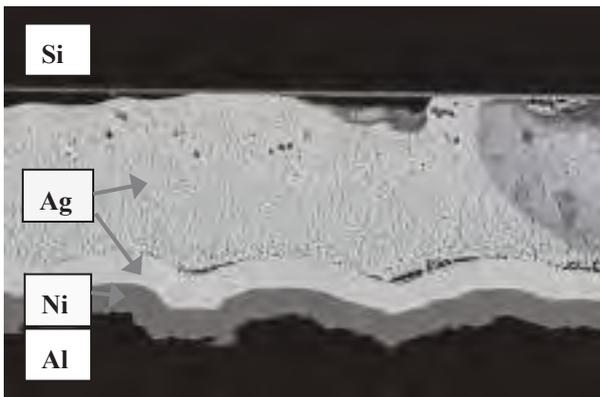


図 2 0 断面 SEM 像 高温放置 500 時間後

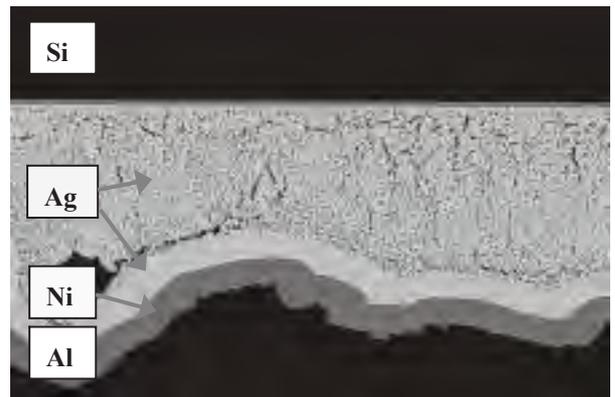


図 2 4 断面 SEM 像 温度サイクル 100 サイクル後



図 2 1 断面 SEM 像 高温放置 1000 時間後



図 2 5 断面 SEM 像 温度サイクル 500 サイクル後

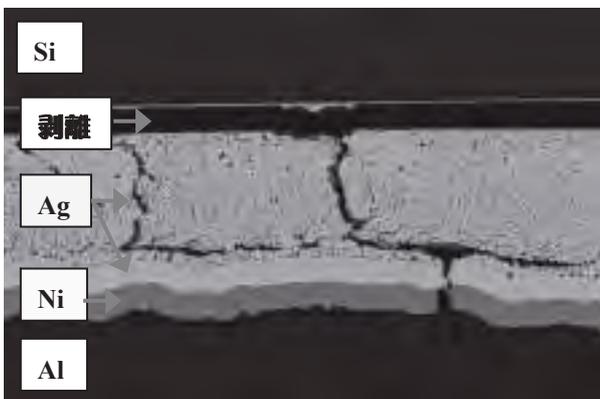


図 2 2 断面 SEM 像 熱衝撃試験 300 サイクル後

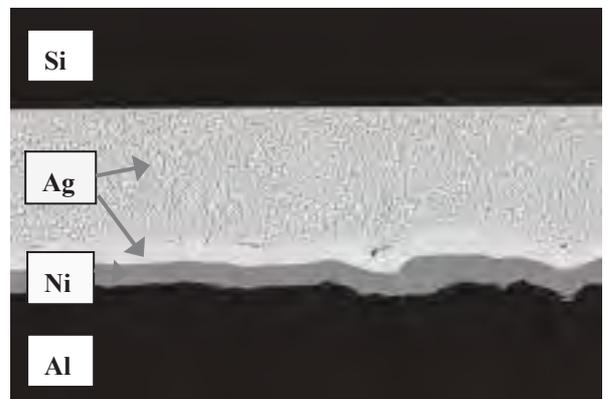


図 2 6 断面 SEM 像 温度サイクル 1000 サイクル後

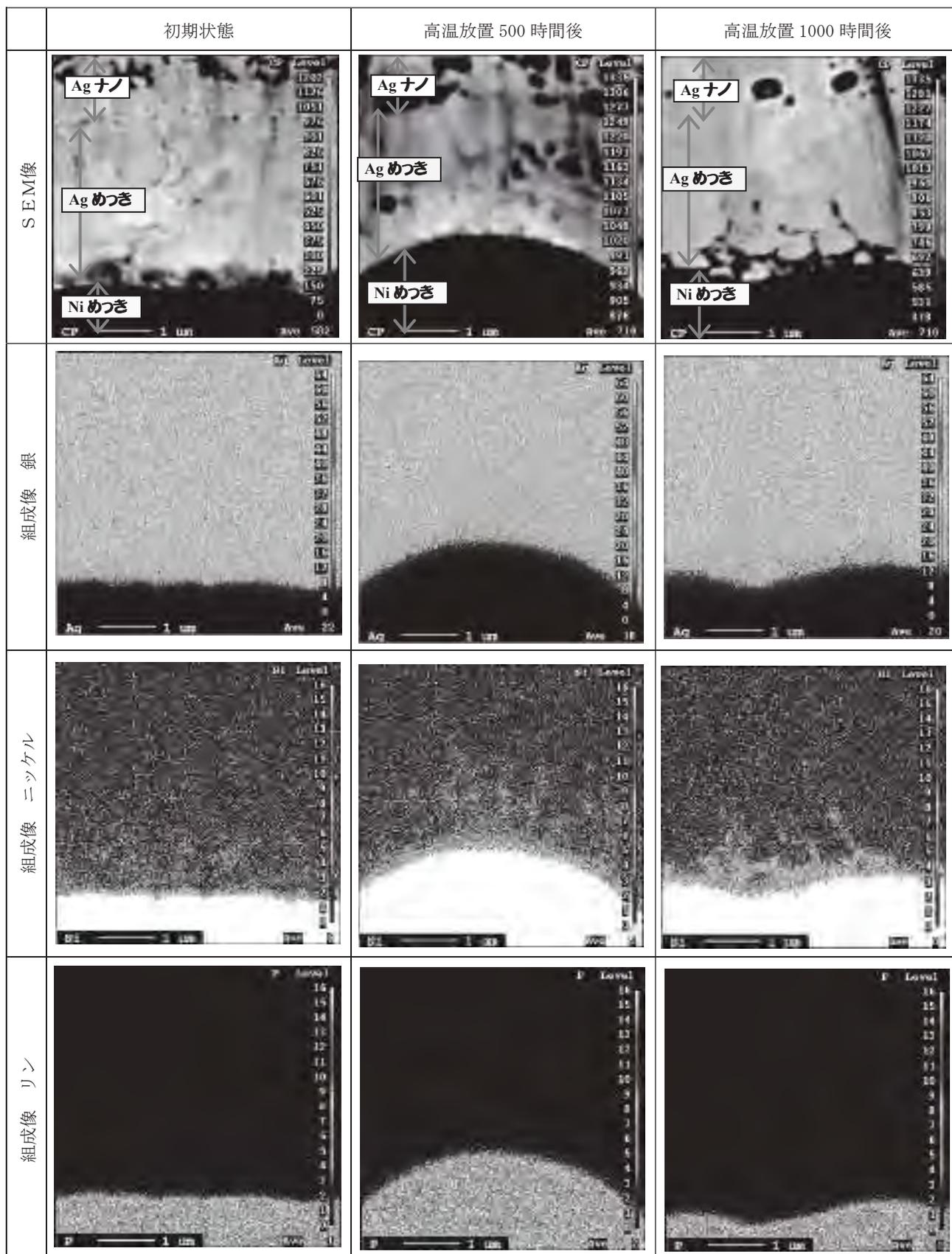


図 2 7 面分析基板側

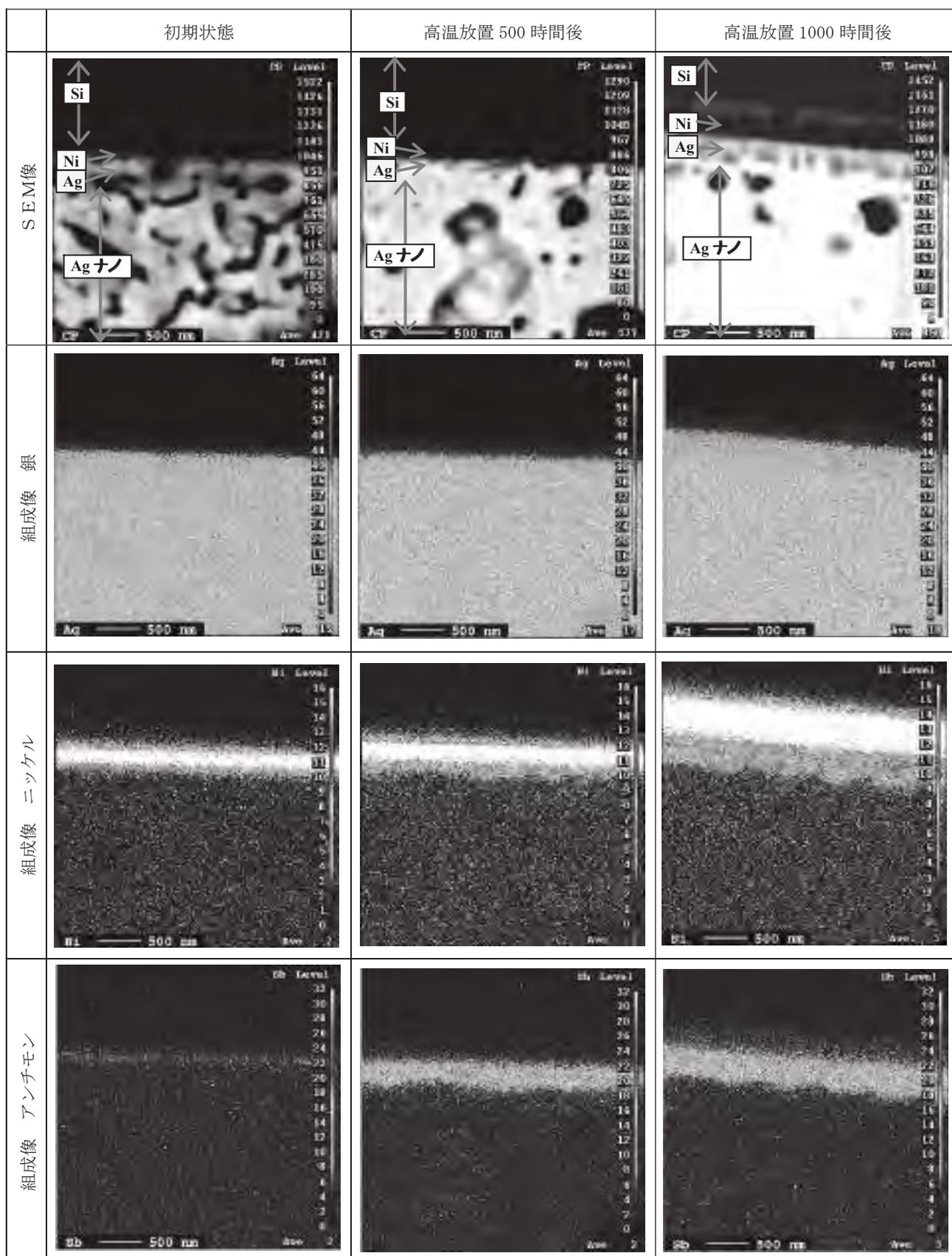


図 28 面分析チップ側

## 2. 2. 6 まとめ

銀ナノ粒子ペーストを用いて、実デバイスを模擬した10mm角サイズのシリコンチップをアルミ張り窒化アルミ実装基板に接合したサンプルを作製し、接合部の信頼性について評価したところ以下の知見が得られた。

- ①接合強度は実用上十分な強度（1kN以上）であり、高温放置試験（300℃ 1000時間）、温度サイクル試験（-40～+150℃ 1000サイクル）、熱衝撃試験（-50～+300℃ 300サイクル）を行ったあとも強度を保っている。
- ②300℃の環境では接合終了後もAgナノ粒子の焼結反応が進行する。
- ③温度サイクル試験ではAgナノ粒子接合層中のボイドからクラックが発生する。
- ④高温放置試験では接合層よりもチップおよび基板の電極が劣化している。

## 3. 考察及び今後の展望

以上の結果をまとめると、次のようになる。まず、銀ナノ粒子ペーストを用いた接合工法について検討を行い、実用上最適な接合条件を見出した。さらにその接合条件を用いて、実デバイスを模擬した接合サンプルを作製し、接合部の信頼性について評価を行った。高温放置試験の結果を見ると、銀ナノ粒子接合層は接合終了後も、300℃の環境では焼結反応が進行し緻密化することがわかった。この反応が接合層の中で均一に進行した場合には、接合層の性能を向上させる方向に働くものと考えられるが、実デバイスでは温度分布が発生するため、焼結反応も不均一に進行することが予測される。そのため、この焼結反応の不均一な進行により、接合部に大きなひずみが発生し信頼性を低下させる懸念がある。また、300℃の環境ではチップおよび基板の電極部において銀とニッケルの界面で固相拡散が進行しており、このまま拡散が進行すると界面でのカーケンダル効果によってボイドが発生し、接合強度を低下させる等の問題がおきる懸念がある。一方、温度サイクル試験

においては接合層中の微小なボイドからクラックが発生するが、温度サイクル試験初期に発生したクラックはその後進展する様子はなく、このクラックが信頼性に与える影響はこの温度条件では少ないものと考えられる。しかしながら熱衝撃試験後のサンプルについては、接合層中に大きなクラックが発生しており、温度幅や温度変化率を上げるとクラックの進展が加速されることがわかる。ただし熱衝撃試験の結果ではめっき層の中にもクラックが発生しており、その破壊モードについては十分に検討する必要があるものと考えられる。

今後の方針としては、1000サイクル以上の温度サイクル試験を行い、熱衝撃試験の結果と比較して、Agナノ粒子接合層中のクラックの進展状況を確認し信頼性を評価する。また、300℃の高温放置試験で観察された電極部の劣化について、拡散速度の温度依存性などを調べて、その使用限界温度・時間を確認し、電極構造の検討をおこなう。

### 【参考文献】

1. 井出英一、安形真治、廣瀬明夫、小林紘二郎、“銀ナノ粒子を用いた接合プロセス～Cuとの接合性の検討～”、MES2004論文集、(2004)、pp. 213-218.
2. 長岡 亨、森貞好昭、福角真男、柏木行康、山本真理、中許昌美、吉田幸雄、垣内宏之、松村慎亮、“銀および銅ナノ粒子を用いた低温接合プロセスの検討”、Mate2008論文集、(2008)、pp. 191-194.
3. 松林 良、岩黒弘明、丸山 稔、小松晃雄、磯田正二、“銀ナノ粒子ペーストを用いた焼結接合と半導体接合への適用”、Mate2009論文集、pp. 185-188.
4. 社団法人日本アルミニウム協会、“アルミニウムハンドブック（第7版）”、(2007)、pp. 44-51.

# 金サブミクロン粒子を用いたダイボンド技術の開発

神奈川県産業技術センター

伊藤 健、田口 勇、本泉 祐、篠原 俊朗

田中貴金属工業株式会社 秋山 伸之、稲垣 克二、宮入 正幸、西森 尚、小柏 俊典

## 1. はじめに

近年、電気自動車用パワーモジュールや高輝度LEDなど大電流を必要とするパワーデバイスが注目されている。ハイブリッド自動車や電気自動車などにおいては安全性向上や居住性向上、さらには小型化・軽量化による更なる二酸化炭素排出量削減のため、今後ますますデバイスにおけるパワー密度向上が進められていく方向にある。限られたスペースにデバイスを搭載するためには電力変換器の小型化、高効率化が必要であり、そのために利用温度上限を高めてパワー密度を高める必要がある。高温駆動デバイス用材料としてSiCやGaNなどが注目され研究開発が行われているが、素子と基板などを接合し高温において信頼性の高い実装技術の開発が重要となっている。現在、パワーデバイス接合用ダイボンド技術は、Sn-Pb系はんだが主流であるが耐熱性が低い。またRoHS規制等により鉛の使用が制限される方向にある。そのため、Au-Sn共晶など金属間化合物を積極的に利用する接合技術が開発されている[1-4]。一方、金属ナノ粒子は、低温で融着を開始し融着後はバルクと同じように高温まで耐久性があるため、ナノ粒子を用いたダイボンド技術が注目されている[5-8]。銀ナノ粒子を用いた接合技術では、金属粒子の表面活性を下げるために化学結合を利用して粒子表面と有機シエルを接合させ、高温でその有機シエルを除去する技術が利用されているが、残留カーボンの影響を無視することができない。また、銀はマイグレーションの問題を抱えており、高温でも安定した接合を可能にする材料の開発が望まれている。そこで、我々は界面活性剤を比較的大きなサブミクロンサイズの金ナノ粒子の表面に物理的に吸着させることで粒子間の融着を阻止し、非常に低い温度(～100℃)でお互いの粒子間接着を開始することに注目し[9]、低温で焼結でき、残留カーボンの影響を受けにくいダイボンド技術について検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 被接合材

被接合材は、直径3インチのSi基板上に薄膜を最表面から順番にAu/TiまたはAu/Pt/Tiの順にスパッタリングにより製膜した。製膜時の基板温度は200℃とした。その後、ダイシング装置(DAD-2H/6T、Disco製)を用いて基板側は8mm角、チップ側は1mmまたは2mm角に切り分けて利用した。

### 2.2 ドライ接合

接合に使用するペースト(Au含有率98.7mass%)及びスラリー(Au含有率99.9mass%)は、共同研究先の田中貴金属工業(株)より入手した。被接合材にメタルマスク(マスク厚:30μm)を介してスクリーン印刷技術によりペースト又はスラリーを塗布した後、ホットプレート上(200℃)で仮乾燥を行った。その後、図1に示すようにチップと基板の接合面を対面させて230℃にて接合を行った。接合時のパラメーターとして表1に示すように圧力、接合時間を変化させた。仮乾燥後の膜厚を

表1 ドライ接合における接合条件

材料	ペースト		スラリー	
	シングル	ダブル	シングル	ダブル
工法	シングル	ダブル	シングル	ダブル
接合温度	230 [°C]			
圧力	30, 60 [MPa]			
接合時間	1, 3, 5 [min]			
評価温度	25, 200 [°C]			

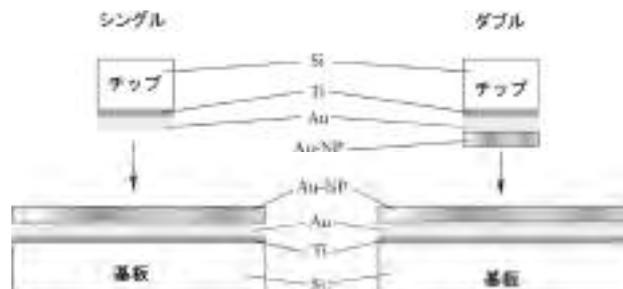


図1 ドライ接合評価に用いた試料の作製工法

非接触厚さ測定器 (THS-10、ユニオン光学製) を用いて評価し、表面粗さは超深度形状測定顕微鏡 (VK-8500、キーンズ製) を利用して評価した。接合は、フリップチップボンダー (Model-6000、ハイソル製) を用いて行った。接合条件は金ナノ粒子を塗布した基板と金薄膜が形成されたシリコン基板を接合する工法 (図 1 左: シングル) と金ナノ粒子を塗布した基板同士を接合する工法 (図 1 右: ダブル) を検討した。ダブル工法におけるチップの準備は、金薄膜上に接合層を塗布し、仮乾燥してからダイシングにより切り分けた。各工法でのチップサイズは 1mm とした。接合強度については、25°C 及び 200°C の温度下においてボンドテスター (Series 4000、Dage 製) を用いてシエア試験を行うことで評価した。

### 2. 3 超音波接合

接合層の平坦化を目指し、超音波を用いたドライ接合法について検討を行った。2.2 節で利用したスラリーを被接合材に塗布した後に仮乾燥 (150°C、2 分) を行った。続いて、表面粗さの改善のため超音波接合装置 (UFB-2-1B、超音波工業製) を用いて接合を行った。超音波処理後の表面を顕微鏡で観察し、粗さや片あたりの具合を判断した。作業時の基板温度は 150°C または 230°C とし、超音波のパワーは 5W (装置の最大値)、処理時間は 5 秒 (装置の最大値)、押し込み量は 500  $\mu\text{m}$  とした。押し込み時の荷重をコントロールするパネは 2 種類あり、パネ 1 では加重が 300~2550g、パネ 2 では 800~3900g である。その加重は、装置本体に付属する加重コントロール目盛りで調整可能であるが、物理量として把握することは困難であった。そこで、ここでは装置の目盛り通りに「目盛り 1~3」で記載することとする。但し、目盛りの数値が大きいほど加重が大きくなることを示している。

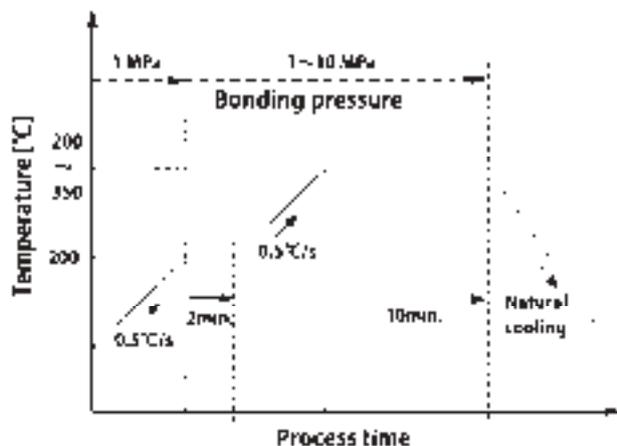


図2 ウエット接合時のプロセス図

### 2. 4 ウエット接合

ドライ接合では、接合時の加圧が大きいいためプロセス中に半導体素子などにダメージを与える可能性がある。そのため、接合時の加圧を低減できるプロセスの検討が必要である。2.2 節で記述したペースト及びスラリーを基本に、溶媒の粘度や金濃度を变化させたペーストを準備した。ペーストの種類によるボイド発生率を評価するため、透過 X 線 (XVA-160、ユニハイトシステム製) を用いて接合層内部を観察した。接合のプロセスを以下に記す。まず、メタルマスク (開口: 5mm 角、厚み 10~30  $\mu\text{m}$ ) を用いて金サブミクロン粒子含有ペーストを印刷した後、フリップチップボンダーを用いて図 2 に示すプロファイルにより接合した。室温から 200°C まで片あたり補正のために 1MPa で加圧し、200°C に到達した後にこの温度を 2 分維持する間に所定の加圧 (1~10MPa) を行った。続いて所定の温度 (200~350°C) まで昇温させ、その温度・加圧を 10 分間維持した後圧力をリリースし、自然冷却を行った。すべての昇温プロセスにおける昇温速度は 0.5°C/s とした。作製したサンプルの接合強度は、ボンドテスターを用いてシエア試験を行うことで評価した。また、試験温度は室温から 300°C とした。

### 2. 5 高温耐久性評価

次世代ダイボンド技術では 300°C での耐久性が要求されている。そこで、接合したサンプルを小型高温チャンバー (STH-120、ESPEC 製) 内に放置して 300°C の高温において最大で 1000 時間放置した後にシエア試験を行うことで接合材の高温耐久性を評価した。

### 2. 6 接合組織の観察

接合試験、高温耐久性評価により得られたサンプルの接合部断面をクロスセクションポリッシャー (SM-09010、JEOL 製) を用いて作製し、電子線マイクロアナライザー (JXA-8500F、JEOL 製) を用いて二次電子像及び反射電子像観察、元素マッピングを行った。

### 2. 7 温度サイクル試験

ウエット接合を用いてチップと AlN 基板を接合したサンプルを小型環境試験機 (STH-120、ESPEC 製) に放置し、-40°C から +150°C の範囲で温度サイクル試験を行った。各温度での保持時間は 15 分である。AlN 基板の膜構成は表面から

Au(200nm)/Pt(100nm)/Ru(100nm)/Au(<100nm)/Ni(<10 $\mu$ m)/Al(400 $\mu$ m)/AlN(600 $\mu$ m)とし最表面の Au 膜から Ni 膜までを湿式(メッキ)法により製膜した。一方、接合するチップ側は、2.1 節に記載したとおりスパッタ法により Au/Pt/Ti を Si 基板上に製膜したものをを用いた。さらに、より温度負荷の大きな試験として熱衝撃試験をヒートショック試験装置(TSC-103、タバイエスペック製)を用いて行った。この時の温度条件は、-50 $^{\circ}$ C $\sim$ +300 $^{\circ}$ C(各温度での保持時間は 15 分)とし、300 サイクル実施した。それぞれの試験後にボンドテスターを用いてシエア試験を行うことで強度劣化を把握した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3. 1 ドライ接合

はじめに、スラリーを用いた結果について示す。スラリーをスクリーン印刷法を用いて塗布した場合、金サブミクロン粒子の凝集により平面内で粒子密度の異なる場所が形成され、凹凸が激しくなることがわかった。同一基板内での膜厚分布は、図3に示すようにばらつきが大きく、平均値は 74 $\mu$ m、標準偏差が 44 $\mu$ m、表面粗さは 5.7 $\mu$ mであった。図4に超深

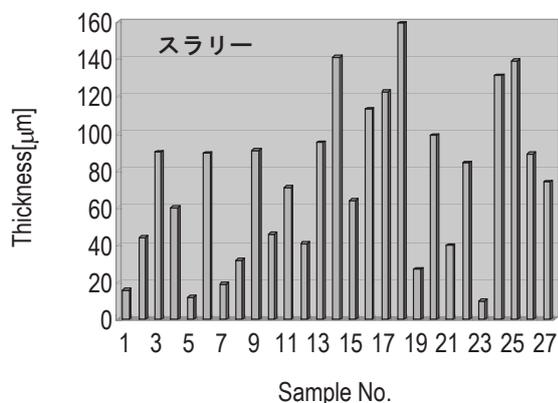
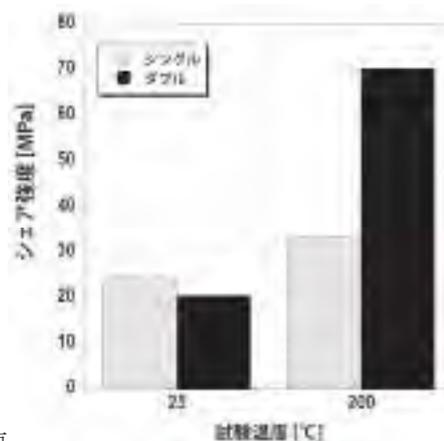


図3 スラリー塗布後の3インチウエハ内の膜厚分布



図4 スラリー塗布後の表面状態(超深度形状測定顕微鏡像)

度形状測定顕微鏡による観察結果を示す。図を見て分かるように、表面の凹凸が非常に大きく均一な膜が形成できていないことがわかる。スラリーを用いた場合には形成されるサブミクロン粒子塗布層の金純度は99.9%以上と高いが、平坦かつ薄い膜を塗布することが困難であることが分かった。また、シエア試験の結果を図5に示す。シエア強度は200 $^{\circ}$ Cにおいてシングル工法よりもダブル工法の方が大きかった。この結果は、ナノ粒子間の接着がナノ粒子-金薄膜間の接着よりも生じ易いことを示唆しており、ナノ粒子を用いたことによる特性であるといえる。また、ダブル工法の場合には25 $^{\circ}$ Cよりも200 $^{\circ}$ Cにおけるシエア強度が大幅に増加した。この結果は、金ナノ粒子を用いた接合が高温でも高い耐久性を持つことを示唆しているが、標準偏差が50Nと大きい信頼性の高い接合とは言い難い。また、シングル工法における断面形状の観察結果を図6に示す。図から明らかなように、チップの接合層へのめり込みが大きく、サブミクロン粒子層を大きくゆがませていることがわかる。シエア試験における標準偏差の大きさは、チップのめり込みによるシエア試験への影響



が要

図5 スラリーを用いた接合におけるシエア強度の温度依存性

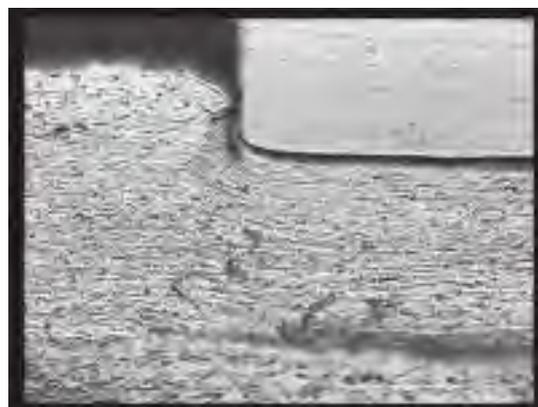


図6 スラリーを用いたシングル工法の接合部断面(超深度形状測定顕微鏡像)

因の一つと推測される。以上のことから、スラリーを用いた場合にはスラリー自体の改善と基板への塗布性能の向上が必要であることがわかった。

続いてペーストを用いた接合についての結果を記す。図7にサンプル番号と膜厚について示す。ペースト膜厚は平均 $4.8\mu\text{m}$ で、標準偏差は $1.1\mu\text{m}$ とスラリーに比べて薄膜化が可能であり、比較的均一な膜を形成することができた。表面粗さは $0.6\mu\text{m}$ であり、金薄膜をスパッタリングで形成した基板の粗さ( $0.06\mu\text{m}$ )よりは大きいものの比較的平坦な層を形成できているといえる。図8に超深度形状測定顕微鏡像を示すが、スラリーに比べて表面の凹凸が改善されていることは明らかである。ペースト1回塗り、つまり膜厚 $5\mu\text{m}$ 相当でのシヤ強度試験の結果を表2に示す。全体的にシングル工法に比べてダブル工法におけるシヤ強度が大きく、室温で測定したシヤ強度に比べて $200^\circ\text{C}$ で測定したシヤ強度の方が大きかった。また、接合時間をパラメータとして見た時にシヤ強度の変化が顕著に見られないことから接合時間は1分で十分だといえる。接合時の圧力は $60\text{MPa}$ から半分の $30\text{MPa}$ に低下させても顕著な低下が見られないことから

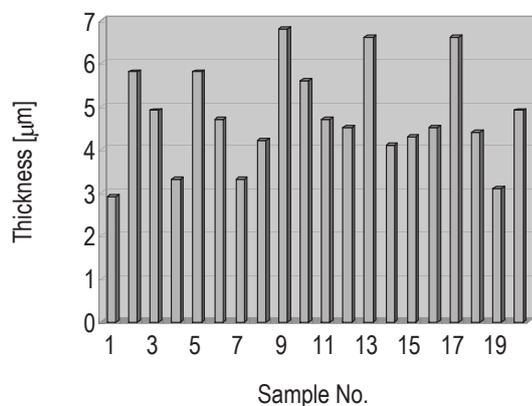


図7 ペースト塗布後の3インチウエハ内の膜厚分布 (ペースト1回塗り)

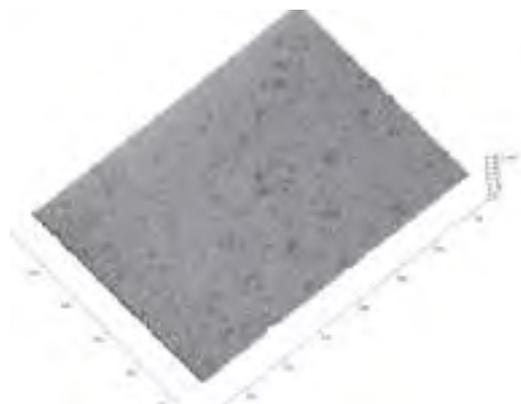


図8 ペースト塗布後の表面状態(超深度形状測定顕微鏡像)

表2 ペーストを用いた場合のシヤ強度(1回塗り)

工法	接合時間[分]	評価温度 $[\text{C}]$		
		25	200	
		接合時加圧 $[\text{MPa}]$		
		60	60	30
シングル	1		55.4	56.2
	3	51.1	48.6	
	5	34.4	66.8	56.7
ダブル	1			64.4
	3	44.4	89.5	
	5	31.3	76.2	65.8

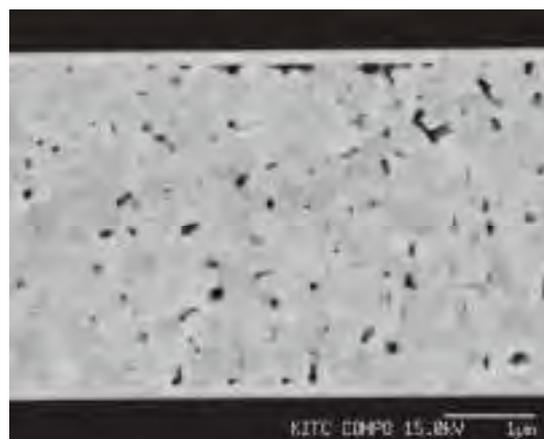


図9 シングル工法における金ナノ粒子を用いた接合層の断面SEM像(印加圧力 $60\text{N}/\text{mm}^2$ 、接合温度 $230^\circ\text{C}$ 、接合時間10分)

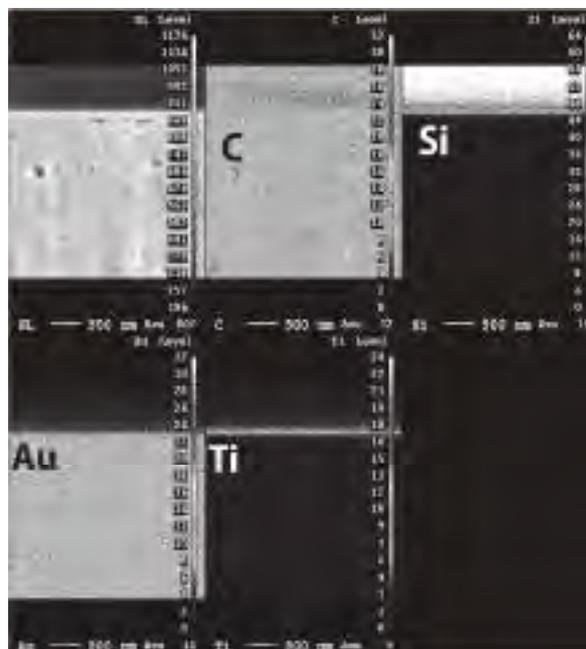


図10 図9に示した断面の表面を元素分析した結果

接合時圧力は $30\text{MPa}$ で十分といえる。しかしながら印加圧力を $10\text{MPa}$ まで低下させると接合層間に大きなギャップを生じ、接合面積の低下を引き起こすためシヤ強度が極端に低下することから印加圧力は $30\text{MPa}$ が下限値と考えられ

表3 ペーストを用いた場合のシア強度(4回塗り)

工法	接合時間[分]	評価温度[°C]	
		200	
		接合時加圧 [MPa]	
		30	60
シングル	1	31.1	30.3
	3		33.9
	5	30.9	39.9
ダブル	1	24.7	19.9
	3		22
	5	42.7	42.3

る。図9にシングル工法における印加圧力 60 MPa、接合温度 230°C、接合時間 10 分における試料の断面 SEM 像を示す。ナノ粒子接合層には空隙が見られる。本研究では、ナノ粒子層に存在する微小空隙が環境負荷において発生する歪を和らげる可能性に期待している。そのため、この空隙が本当に存在するかを確認するため元素分析を行ったところ図10に示すとおり、大きな空隙と思われる部分には何も存在していないことが明らかとなった。カーボンが全体的に多く存在するのは、本実験で用いた金ペーストの有機溶媒は、蒸発温度が高い成分が含まれており、230°Cにおける熱処理でも蒸発せずに留まるためだと考えられる。次にペースト4回塗り、つまり 20 μm 相当の結果について記す。4層塗りの膜厚は平均 23 μm であり、塗り回数によりほぼ線形的に膜厚をコントロールすることが可能であることを示唆している。これはプロセス的に重要な知見であるが、コストの面を考えれば高価な金ナノ粒子を利用する場合には、低コスト化のために薄層化が必要となる。また、表2と表3を比較すると同一条件においては1層塗りのシア強度が4層塗りのそれよりも大きい。表3では、ダブル工法の場合、接合時間のシア強度への依存性が示唆され、接合時間が長いほどシア強度が大きい結果となった。また、印加圧力とシア強度の関係は顕著ではなかった。

以上の結果からドライ工法では、スラリーでは接合材の膜厚及び平坦性のコントロールが難しいがペーストでは比較的制御できることが分かった。ペーストを用いた場合には、ナノ粒子層を基板及びチップの両面に施した場合(ダブル工法)の方が概ね良好な接合強度を得ることができ、室温よりも 200°C におけるシア強度が大きいことから高温での使用に期待が持てる。しかしながら、ドライ工法では、接合時に比較的大きな加圧が必要であるため、低加圧で接合できるプロセスが必要不可欠であり、その検討結果については3.3にて述べる。

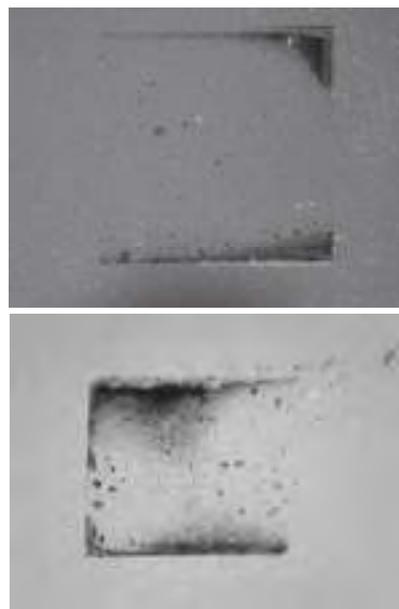


図11 超音波接合機を用いた表面状態の顕微鏡写真  
(上:150°Cでの最適条件。下:230°Cでの最適条件)

### 3. 2 超音波接合

超音波による表面への影響を観察したところ、150°Cで最適な条件を得られたのはバネ2、目盛り2の場合であった。この条件下で押し込み量を 400~900 μm で変化させ、その圧痕を顕微鏡写真で判断すると 700 μm の時が最も状態が良かった(図11上)。しかしながら、接触面全体が押されているようには見受けられなかった。次に、230°Cで同様に試験を行ったところ、バネ 2、目盛り 3 の場合が最適であった。この条件下で押し込み量を 300~900 μm で変化させたところ 700 μm のときが最も状態が良かった(図11下)。また、押し込み量 900 μm では基板が破壊した。230°Cの最適条件を用いて基板を接合し、シア強度を測定した結果は12.7MPaであった。この値は、3.1節で議論したドライ接合の場合の接合強度に対して1/3以下であった。このシア強度の低下は、図11から判断すると接合している面積が小さいことが原因と予想される。また、今回の接合条件は、パワー、時間、押し込み量、加重などのパラメーターは装置が出しうる最大であることから、超音波接合を用いた場合ではこれ以上の改善は難しいと判断した。

### 3. 3 ウエット接合

#### 3. 3. 1 ペーストの開発

ドライ接合では、基板へのペーストの塗布・乾燥とチップ接合を別々の工場で行うときに有利な加工法であるが接合時に大きな加重が必要であった。実際の製品で想定されるチップ

表4 ウエット接合に利用したペーストの特性

サンプル名	Au 濃度 [%]	粘度 [Pa·s]	溶媒
MA-F	80.6	超高粘度	高粘度溶媒
MA-M	89.8	77	中粘度溶媒
F92	91.5	144	高粘度溶媒
F92-M	95	256	高粘度:中粘度=1:1

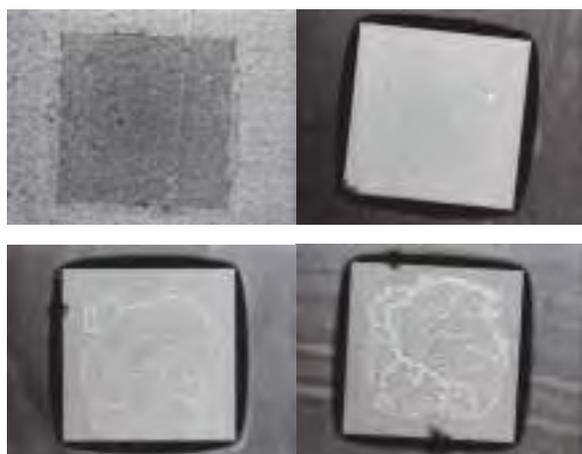


図12 各ペーストを用いた接合後の透過 X 線像 (MA-F(左上)、MA-M(左下)、F92(右上)、F92-M(右下))

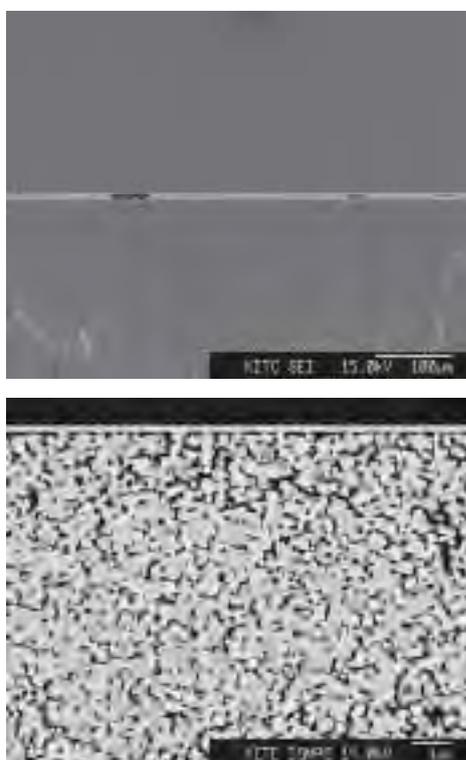


図13 ウエット接合を用いた接合部の断面 SEM 像

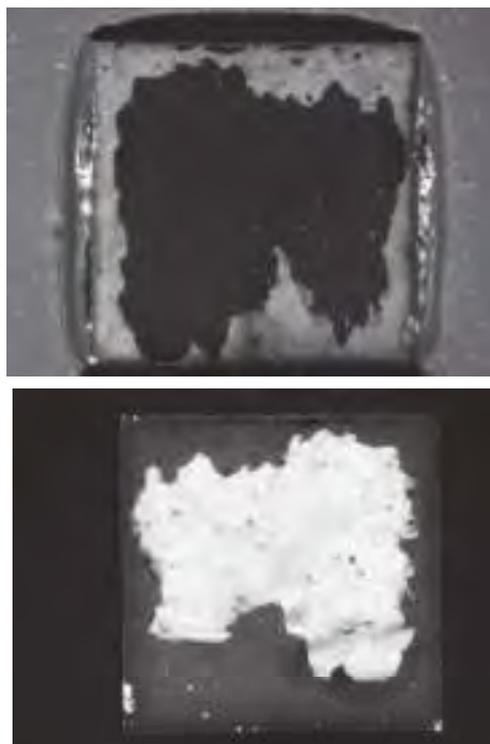


図14 高温放置(300°C、300h)後にシエア試験を行ったサンプルの破断面(上:基板側、下:チップ側)

ブサイズが最低でも 5mm 角とすると、現状では 750N(30MPa)が必要となり、量産を考えたときには現実的な工法とは言えない。そこで、ペーストを塗布後、乾燥する前にチップを乗せ、フリップチップボンダーを利用して加熱しながら接合する手法に着手した。しかしながらドライ法で利用したペースト(ここでは F80 と記載する)では、接合時にペーストが接合界面から逃げ出す現象が観察された。そこで、ペースト中の金濃度や溶媒の粘度を調整してこの現象を抑え、最適なペーストの選別を行った。表4に試験に供したペーストの特性を示す。また、150°Cにて仮接合した後の透過 X 線像を図12に示す。MA-M、F92-M では縞状のボイドが見受けられ、そのボイド率は17%以上であった。これは、中粘度溶媒を利用しているためと推測される。熱伝導の観点からボイド率は 5%以下に抑えたいため、MA-F、F92 をその後の試験に供した。MA-F 及び F92 についてシエア強度試験を行ったところ、それぞれのシエア強度は 10.1MPa、45.4MPa であった。このことから、F92 がウエット接合で利用できる可能性を示した。また、F92 のシエア強度は、ドライ接合のそれと同等であった。以上の結果から今後の試験には F92 を用いることとした。

230°C、加圧 0.25MPa、接合時間 3 分で接合したサンプルの断面 SEM 像を図13に示す。透過 X 線で見られるような大きなボイドが所々で確認できた。しかし、小さなボイドはみら

れなかった。また、ナノ粒子間の融着が行われているが、薄膜とナノ粒子間の接合が進んでいなかった。

続いて高温における接合部の耐久性について評価した。基板及びチップの膜構成は Au/Ti/Si である。300°Cにおいて 300 時間放置後のシヤ強度は 15.2MPa であった。この値は、高温放置前の約 1/3 であり、大幅な接合力低下が生じている。強度試験後の破断面を図14に示す。破壊モードは基板-接合層界面であり、基板上の Au 膜を境に剥離が生じているのがわかる。この結果から、Ti バッファー層における劣化が考えられる。そこで、破断面を EPMA で分析したところ図15のように、ほぼ全面に Au、Ti、C が存在していることが明らかとなった。Ti については、表面に拡散してきているのか、分析上 Au の下の層が見えているのか判断がつかなかった。C の存在は、スラリーの溶媒に起因するものと考えられる。なぜなら、F92 の溶媒は 350°C 付近に沸点を持つことから、今回の実験温度では十分に揮発していないため残留してしまったと推測される。高温保持試験後の断面 SEM 像を図16に示す。ナノ粒子の結晶化が

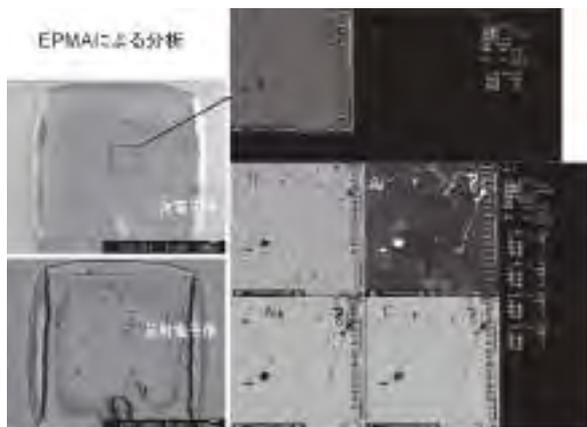


図15 高温放置 (300°C、300h) 後のサンプルをシヤ強度試験した破断面 (基板) の EPMA 観察の結果

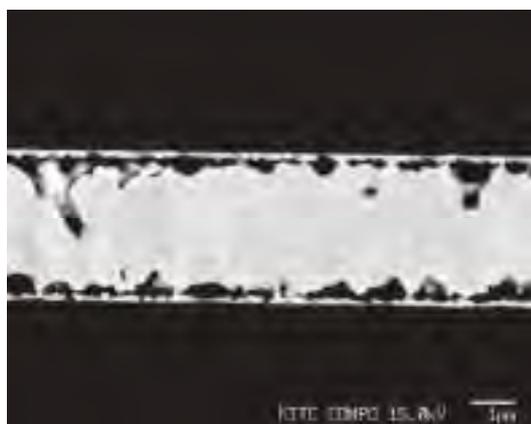


図16 高温放置 (300°C、300h) 後の接合部断面 SEM 像

進んでいるが、基板及びチップ上の薄膜とナノ粒子間に大きなギャップが形成していることが明らかとなった。また、薄膜の一部では連続性を維持できない部分も生じている。この現象が、高温保持試験後の接合強度低下につながっているものと判断できる。この原因として、高温下での金属拡散が考えられる。300°Cという高温下で接合耐久性を向上させるためには金属間拡散を抑えるためのバリアメタルの選定が重要な研究対象といえる。また、F92 をベースに、さらに蒸発温度の低い有機溶媒に変更することで AuRoFUSE™ TR-191R (Au 含有量: 90 mass%以上)を完成させた。3.3.2 項以降での実験では AuRoFUSE™ TR-191R を実験で用いており、単に金ペーストと記述することにする。

### 3.3.2 高温耐久性を有する接合

3.3.1 項で用いたメタライズ構成では、高温耐久性がないと判断したため、別報で取り扱う高耐熱電極膜について評価を行った結果 Au/Pt/Ti という膜構成に至った。図 17 に金ペ

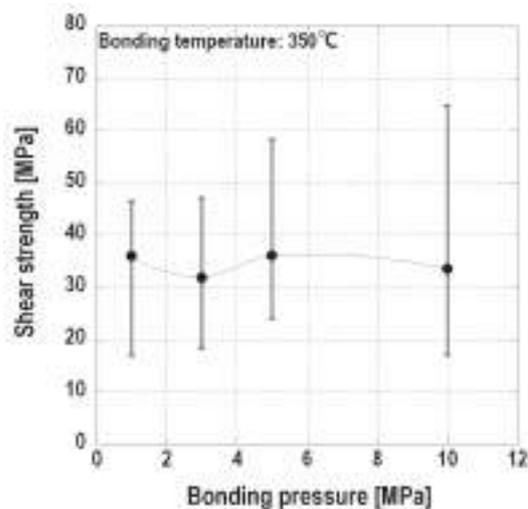
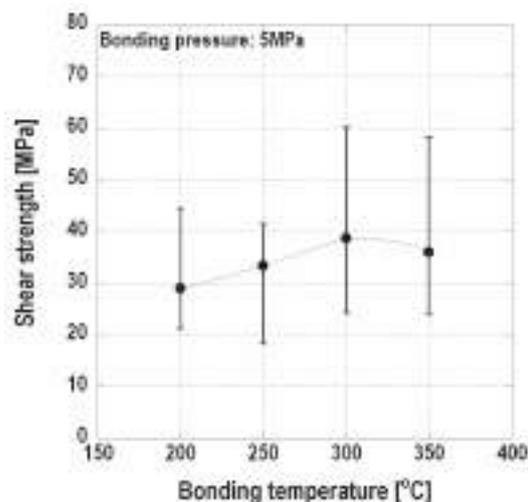


図17 シヤ強度に対する接合温度 (上) 及び加圧依存性 (下)

ストを用いた際のシヤ強度に対する接合時温度(加圧は5MPaに固定)、接合時加圧(温度は350°C固定)依存性について示す。エラーバーは測定時に計測された最大値及び最小値を示している。金ペーストの評価結果から、200°Cから350°Cの範囲内で接合した場合のシヤ強度平均値の差は10MPa以内であり、比較的低温(200°C)でも十分なシヤ強度を得られることがわかった。さらに、より高温で接合するほどエラーバーを含めて全体的にシヤ強度が増加した。破壊モードは、250°C以下では接合層内部破断が主であったが300°C以上では基板破壊が主要因となり基板が先に壊れるほどの強固な接合が得られた。一方、接合時加圧については、1MPaの低加圧条件でも30MPa以上のシヤ強度を得ることができた。また、平均値は接合時加圧に対して大き

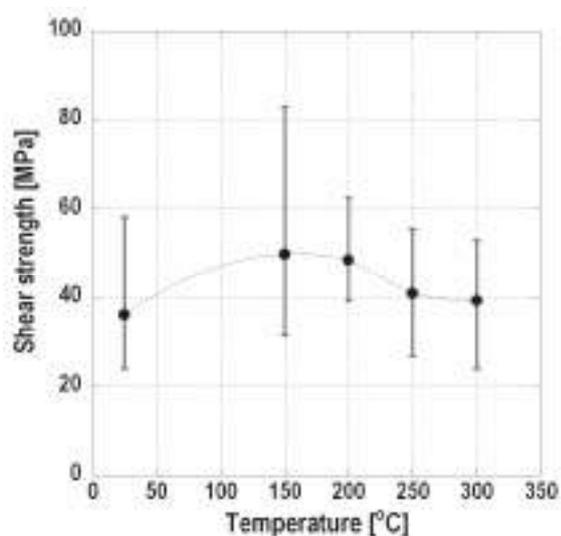


図18 シヤ強度の試験温度依存性

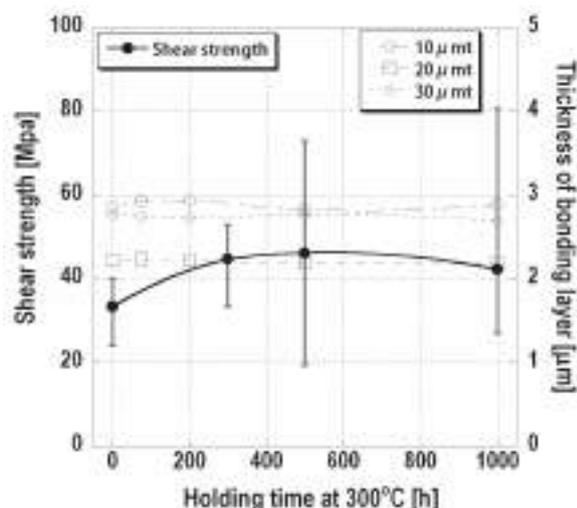


図19 高温放置時間とシヤ強度変化及び接合層厚みの変化  
但し、接合層厚みはペースト塗布時のメタルマスクの厚み(10、20、30 μm)を変化させている

な変動は無かったが、最大値に関しては接合時加圧が上昇するにつれてシヤ強度が増加する傾向にあった。加圧1MPaでの破壊モードは、接合層内部破断が主であったが5MPa以上での破壊モードは、基板破壊が主となり強固な接合が行えていることが示唆された。プロセスの理想からすると低温、低加圧での接合が望ましいが、後に示す断面観察の結果から350°C、5MPaでの接合を今後の標準的な接合条件とした。

金ペーストを用いて接合した後に、ボンドテスターのサンプルステージを高温(150~300°C)に保持し、そのステージに接合サンプルを固定し、シヤ試験を行った。図18に示すように、シヤ強度は、室温時に比べて一度上昇するものの、150°Cから300°Cにかけて徐々に低下することが確認された。主な破壊モードは、試験温度が上昇するにつれて基板またはチップ破断から接合層内部破断へと変化した。室温に比べて150°Cでシヤ強度が増加した要因の一つとして、室温における測定では接合時(350°C)との温度差が大きいことためサンプルに蓄積された応力がSi基板などの壊れやすい部位に集中したためと考えられる。また、150°Cから300°Cにかけてのシヤ強度の低下は、金サブミクロン粒子の結合体が高温で軟化することに起因していると考えられる。そのため、温度上昇とともにぜい性的な破壊から延性的な破壊モードに改善されたものと考えられる。しかしながら、高温でもシヤ強度は40MPa程度であり、十分な強度を有していることが明らかとなった。

金ペーストを用いて接合されたサンプルを300°Cの高温において長時間放置した後にシヤ強度を測定した。その結果を図19に示す。シヤ強度の最大値は放置時間が長くなるにつれて増加し、平均値も初期状態に比べて高温に放置した方が増加した。これは、後に示すように、粒子間の密着が進むことで接合層がバルクのように結晶化したためと考えられる。また、メタルマスクの厚みを10~30 μmに変化させた時に、接合層断面の厚み変化を高温放置時間をパラメータとして評価したところ、すべてのサンプルにおいて厚さ方向への変化はごく僅かであり無視できると考えられる。また、メタルマスクの厚みに因らず接合層厚みは2~3 μmであり、この非常に薄い接合層でも高温に対して信頼性の高い接合が行えていることから、本技術は微量の金量で接合可能であり、実用化に際してのコストダウンが見込める。

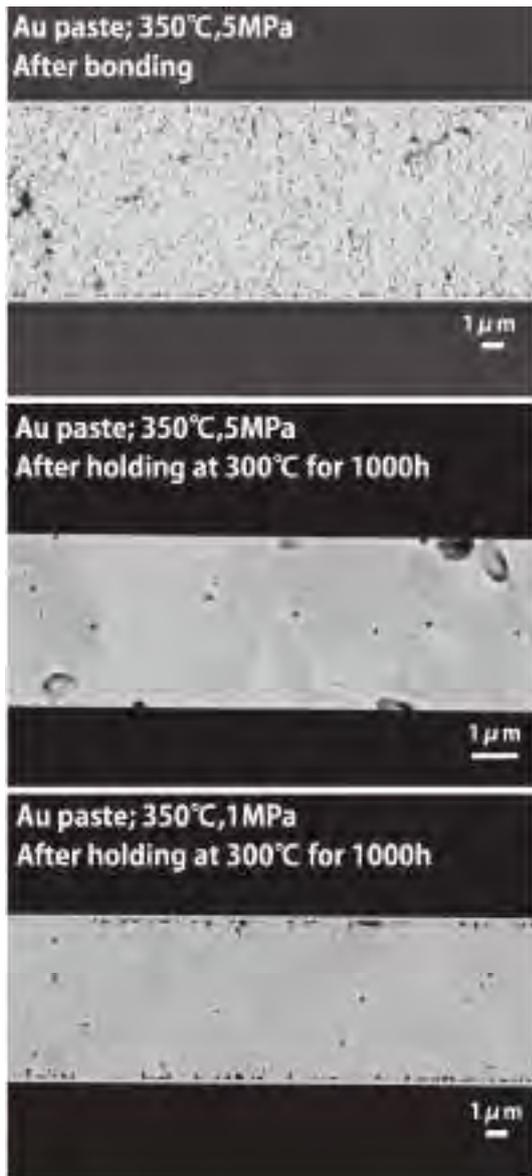


図20 AuROFUSE™ TR-191R を用いた接合サンプルの接合後断面 SEM 像(上)及び高温放置後の SEM 像(中: 加圧 1MPa、下:加圧 5 MPa)

次に、金ペーストを用いた時の接合後の断面 SEM 像ならびに、300°Cにおいて1000時間保持後の断面 SEM 像を図20に示す。但し、上記 SEM 像は反射電子像である。接合後は、サブミクロン粒子が近傍にある粒子と融着している様子が確認され、粒子間に非常に小さな空隙が存在しているが大きなポイドは発生していない。また、薄膜と接合材の界面がはっきりしていることがわかる。一方、300°Cにて1000時間保持したサンプルは、粒子間の小さな空隙は消滅し、1 μm 程度のポイドが発生すると共に薄膜と接合材の界面は消滅し、金の結晶に由来する像が得られた。この結果は、先述したように高温保持後にシア強度が上昇することを支持するものである。また、接合時加圧が1

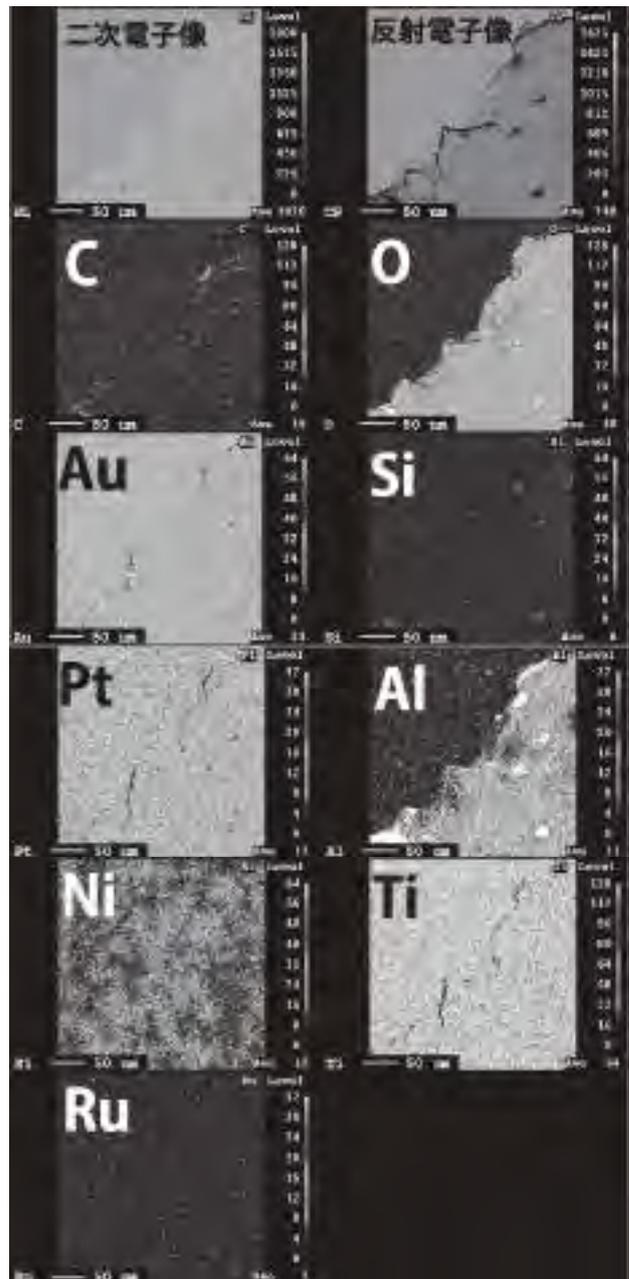


図21 熱衝撃試験後の破断面の基板側 SEM 像(上図)とEPMAによる元素マッピング(下図)

MPa の初期状態は加圧 5MPa とあまり変わらないが、300℃にて1000時間保持した後は薄膜と接合層の界面にサブミクロンレベルの小さなポイドが多数見られた。この状態は、界面での熱伝導を悪くし、熱の集中によるデバイス破壊につながる可能性があるため避けるべきだと考えている。

### 3.3.3 温度サイクル試験

温度サイクル試験では、温度ギャップによるストレスがかかりやすくする為にチップサイズを 1×8mm と短冊状し、AuROFUSE™ TR-191R を用いて接合を行った。100 サイクルの試験後はシヤ強度が初期常態に比べて上昇していた。これは、金サブミクロン粒子の成長及びセラミック基板特有の表面ラフネスによる接合層界面との強固な結合に起因していると推測される。また、破断モードは接合層内部破断が主であった。また、500 サイクルの試験を行った後のシヤ強度は若干低下するものの、40MPa 以上を維持していた。破断モードはチップ破断が主であり、接合層は強固であることがわかった。以上の結果から、この温度範囲では温度ストレスを吸収できていると判断できる。

次に、熱衝撃試験の結果について記す。-50～300℃の範囲の温度サイクルを300サイクル繰り返した後、シヤ強度を測定した。その結果、シヤ強度は15MPa程度であり、初期状態に対して半分以下となった。図21に破断面のSEM像を示すと共に、EPMAによる分析結果を示す。SEM像から、破断面の左上には、金サブミクロン粒子からなる接合層が残されており、右下部にAlN基板側から積層された膜が見られる。EPMAの結果からAu、Pt、Tiが分析ポイント全体に渡り存在しているのに対し、O、Alが右下部にだけ存在していた。この結果はSEM像と一致しており、評価に供したサンプルではチップ側のTi/Si界面での破断が主であったと推測された。ここでは図に示さないが、同じサンプルのごく一部では、破断面を組成分析したポイントにNi、Alが多く存在している部分も観察されていた。これは、熱衝撃試験の際に発生する熱ストレスを柔らかい材料であるAlで吸収するため、Alとその上の構造で破断が発生する可能性があるためである。しかしながら、今回の試験結果から、接合層の熱ストレスによる劣化を見ているというよりもむしろ電極の耐熱性の影響を見ている結果となってしまった。従って、高耐熱電極膜の仕様が、高温駆動型デバイスの実装に対して長寿命化に寄与する要因の一つであるといえる。

### 3.3.4 熱伝導率及び電気抵抗

高温で利用する場合には、デバイスの破壊を招かないためにもデバイスから基板などへ効率良く放熱する必要がある。その際、ダイボンド材料の熱伝導率が重要なパラメーターとなる。測定法は、別報に示す通り熱特性評価システム(TCS-100、エスペック製)を利用した。測定の結果、おおよそ $1.5 \times 10^3 \text{W/m}\cdot\text{K}$ であった。この値は、バルク状金の値の半分程度であるが、はんだ等と比較して優位な熱伝導性を持つことがわかった。また、電気抵抗については、200℃焼成後において $5 \mu \Omega \cdot \text{cm}$ であり、バルクに比べて2.5倍程度の抵抗値を持つが、電気抵抗として問題となるようなレベルでは無いと判断している。

## 4. まとめと今後の展望

低温で接合でき、高温でも耐久性を持つダイボンド用材料として金サブミクロン粒子を含有したペーストの開発とダイボンド材料としての各種試験を行った。その結果、ペーストを塗布後、チップを搭載し、適当な加圧、温度のもとで接合を行うことにより300℃という高温で1000時間の耐久性を持つペーストAuROFUSE™ TR-191Rを開発した。初期状態では、サブミクロン粒子がお互いに結合をしているが、高温に放置することで結晶化していく様子が観察された。また、各種実験から高温耐久性を有する材料開発では接合材のみならずバリアメタルの構成が重要であることが示唆された。本研究では、バリアメタルとしてPtを利用しているが今後実用化のためには低コスト化に向けたバリアメタルの検討、接合層厚みの調整、銀サブミクロン粒子を用いたダイボンド技術の検討などが必要であると考えている。

#### 【参考文献】

- 1) G. S. Matijasevic, C. Y. Wang, C. C. Lee, IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 13, 1128 (1990).
- 2) L. Fenggun, Y. Hayashi, et al., Electronics Packaging Technology Conference, 597 (2006).
- 3) S. K. Jong, P. J. Wang, C. C. Lee, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 31, 875 (2008).
- 4) R. Kisiel, Z. Szczepański, Microelectronics Reliability, 49, 627 (2009).
- 5) T. Morita, E. Ide, Y. Yasuda, A. Hirose, K. Kobayashi,

Jpn, J. Appl. Phys., 47, 6615 (2008).

6) 中許昌美、山本真理、柏木行康、長岡亨、森貞好昭、福角真男、Mate2010, Yokohama, Vol. 16, 99 (2010).

7) 福角真男、長岡亨、森貞好昭、山本真理、中許昌美、Mate2010, Yokohama, Vol. 16, 111 (2010).

8) 山口拓人、井出英一、廣瀬明夫、小林紘二郎、山際正憲、

村上善則、MES 2005, Osaka, Vol. 15, 237 (2005).

9) 小柏俊典、澁谷忠弘、宮入正幸、藤沢良知、鶴見和則、干強、エレクトロニクス実装学会誌, 10, 560 (2007).



# 金属多層膜を用いた高耐熱電極に関する研究

神奈川県産業技術センター 田口勇、伊藤健、曾我雅康、八坂慎一、三橋雅彦、篠原俊朗

## 1 はじめに

電子機器の微小・高密度化が進んでいる。特に、電気自動車等に搭載するために、SiC を使用したパワーデバイス等の開発が進んでおり、高温環境下での使用や高パワー密度への対応可能性が拡大している。これに伴い、高耐熱性に対応する電極が求められている。

パワーデバイスの電極には、様々な材料・構造のものがあり、例えば、チタン、ニッケル、銀及び金等を使用した金属多層膜等が用いられている。しかし、これらはシリコンデバイスの動作温度を想定した低温環境での使用については問題無いが、300°C程度の高温環境下での信頼性等については、十分に検討されていない状況である。

特に、高濃度の酸素を含んだチタン、ニッケル及び銀の金属多層膜を用いた電極については、高温放置時に金属間拡散と金属界面の酸素に関する問題があり、接合の機械的・電気的特性に影響を及ぼす可能性があることから、これらの課題を解決する新たな構造の金属多層膜が求められている<sup>1)</sup>。

本研究では、チタン、ニッケル、銀、白金及び金を使用した金属多層膜について、高温放置時の金属間拡散と金属界面の酸素に関する評価等を行うことにより、高耐熱電極として有望な金属多層膜の構造について検討する。

## 2 実験方法

### 2.1 試料作製

直径3インチのシリコン基板上にチタン、ニッケル、銀、白金及び金のいずれかの薄膜を順に成膜した4種のサンプル (Si/Ti/Ni/Ag、Si/Ti/Au、Si/Ti/Pt/Au 及び Si/Ti/Pt/Ag) を用意した。

これらのうち Si/Ti/Au 及び Si/Ti/Pt/Au については、

典型的なスパッタ法により成膜した田中貴金属工業(株)製のサンプルを使用した。

その他のサンプルについては、神奈川県産業技術センターにおいて、三元 RF マグネトロンスパッタ装置を使用して、スパッタ法により真空中で連続的に成膜を行った。このときの成膜条件を表1に示す。

表1 成膜条件

Base Pressure	2.0×10 <sup>-4</sup> Pa
Substrate Temperature	R. T.
Sputtering Gas	Ar
Sputtering Pressure	2.0Pa
RF Power	150W

### 2.2 評価

用意したサンプルを10mm角にダイシングした。ダイシングは、50μm幅のダイシングブレードを用いて、純水で冷却し、切削屑を洗い流しながら行った。このとき、切断速度は1mm/secとした。また、ダイシングを行ったサンプルの表面を観察して膜剥がれの有無を調べることにより、膜の付着力について確認した。

次に、イオンスパッタを併用したオージェ電子分光分析法 (以下、「AES」という。)により、表面から最下層のシリコン層に向かって深さ方向の元素組成の分析を行った。このとき、イオンスパッタのスパッタ速度は、2.5nm/min (SiO<sub>2</sub>換算)とした。

さらに、高温放置試験として、大気雰囲気中に300°Cで30時間、100時間又は300時間サンプルを放置した。また、同様にAESによる深さ方向の元素組成の分析を行った。

## 3 結果と考察

### 3.1 Si/Ti/Ni/Agについて

Si/Ti(50nm)/Ni(300nm)/Ag(300nm)のサンプル作製後、ダイシングを行ったところ、膜の剥離は見られなかった。これにより、この構成の多層膜については密着性に大きな不具合が無いことを確認した。

次に、30 時間及び 100 時間の高温放置試験を行った。図 1 に、AES により元素の組成分析を行った結果を示す。図 1 より、各金属の境界領域において、隣接する元素が同時に検出されるスパッタ時間（以下、「スパッタ時間幅」という。）について、どの金属界面でも高温放置により大きく増加し、これまでの研究<sup>1)</sup>と同様の金属間拡散の問題が再現したことがわかった。また、100 時間高温放置後の酸素混入の様子について、ニッケルと銀の界面に最大 40at%程度、チタン層に最大 20at%程度の酸素が混入しており、これまでの研究<sup>1)</sup>と比較すると、高温放置前の酸素混入の有無に関わらず、高温放置により高濃度の酸素が各層に混入することがわかった。さらに、30 時間と 100 時間の高温放置後の酸素混入の様子について比較すると、ニッケルと銀の界面に 40at%程度の酸素濃度のピークが常にあり、高温放置時間が経過するにしたがって、ニッケル層の酸素濃度が増加し、チタン層の酸素が最大 10at%から 20at%程度に増加したことがわかった。

これは、高温放置試験により混入する酸素について、高温放置時に銀層を通じて供給される酸素によるニッケル層及びチタン層の酸化が支配的であり、ニッケル層からチタン層へと酸素混入が進展することを示唆している。したがって、高温放置試験による酸素混入の課題を解決するためには、高温放置時にニッケル層の酸化を抑制する必要があると考えられる。高温放置時に酸化しにくい典型的な金属として、白金及び金が挙げられる。これらが Si/Ti/Ni/Ag のニッケルの代替となり得るかにについて検討が必要である。

### 3. 2 Si/Ti/Au 及び Si/Ti/Pt/Au について

Si/Ti(50nm)/Au(200nm)及び Si/Ti(50nm)/Pt(50nm)/Au(200nm)の両サンプルについて、ダイシングを行ったところ、膜の剥離は見られなかった。これにより、これらの構成の多層膜について密着性に大きな不具合が

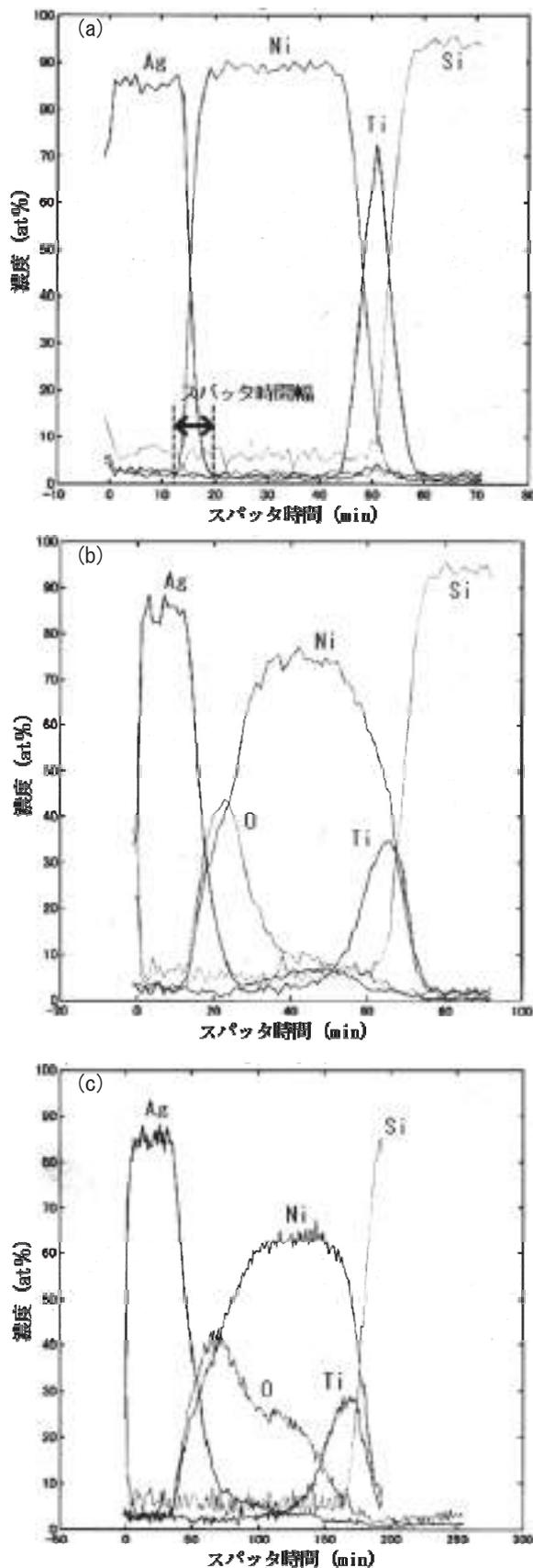


図 1 (a) 高温放置前、(b) 30 時間高温放置後、及び (c) 100 時間高温放置後の AES による分析結果

無いことを確認した。

次に、300 時間の高温放置試験を行った。両膜構成について、AESによる元素の組成分析結果をそれぞれ図2及び図3に示す。

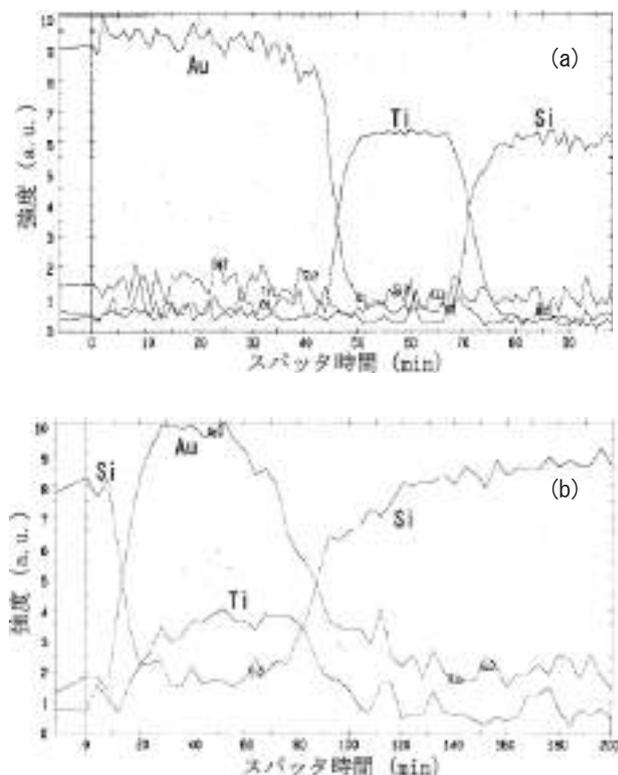


図2 (a)高温放置前、及び(b)300時間高温放置後のAESによる分析結果

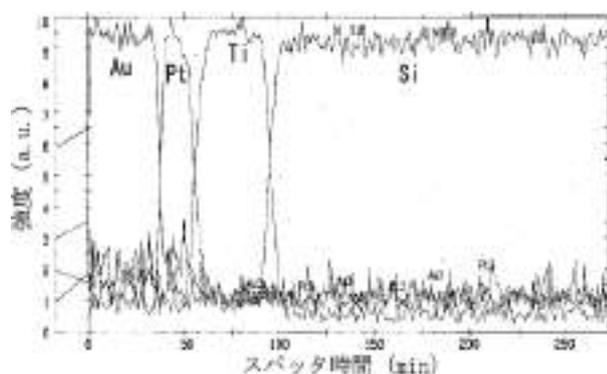


図3 300時間高温放置後のAESによる分析結果

図2より、Si/Ti/Auについては、高温放置により最表面にシリコンが拡散し、チタンと金はその全領域において相互拡散しているなど各金属の金属間拡散が明らかに大きいことを確認した。また、高温放置による酸素の

混入は見られなかった。一方、図3より、Si/Ti/Pt/Auについては、高温放置後であっても各界面におけるスパッタ時間幅が10min以下と小さいことがわかった。これは、高温放置時の各金属の金属間拡散が明らかに小さいことを示唆している。また、高温放置による酸素の混入は見られなかった。

以上の結果より、Si/Ti/Pt/Auを使用した電極については、300°Cの大気雰囲気中で300時間以内の使用に対応可能であることがわかった。また、Si/Ti/Ni/Agのニッケルの代替については、高温放置時にチタンとの相互拡散が小さく、酸化しにくいことから、白金が有望であると考えられる。

### 3.3 Si/Ti/Pt/Agについて

Si/Ti(50nm)/Pt(300nm)/Ag(300nm)のサンプル作製後、ダイシングを行ったところ、膜の剥離は見られなかった。これにより、この構成の多層膜については密着性に大きな不具合が無いことを確認した。

次に、100時間の高温放置試験を行った。図4に、AESにより元素の組成分析を行った結果を示す。図4より、高温放置によるスパッタ時間幅の変化は、各界面において数%程度の増加となったことがわかった。これは、高温放置時の各金属の金属間拡散が明らかに小さいことを示唆しており、特に白金層については、100nm以下の膜厚であっても耐熱電極としての機能を果たすことができる可能性があると考えられる。また、高温放置試験による酸素の混入が見られないことから、高温放置時の酸素混入を抑制できたことがわかった。したがって、Si/Ti/Pt/Agを使用した電極については、300°Cの大気雰囲気中で100時間以内の使用に対応可能であることがわかった。

## 4 まとめと課題

Si/Ti/Ni/Ag、Si/Ti/Au、Si/Ti/Pt/Au及びSi/Ti/Pt/Agの各サンプルについて、金属多層膜の密着性については大きな不具合が無いことを確認した。また、AESによる元素の組成分析を行うことにより、金属間拡散と金属界面の酸素について評価を行った。

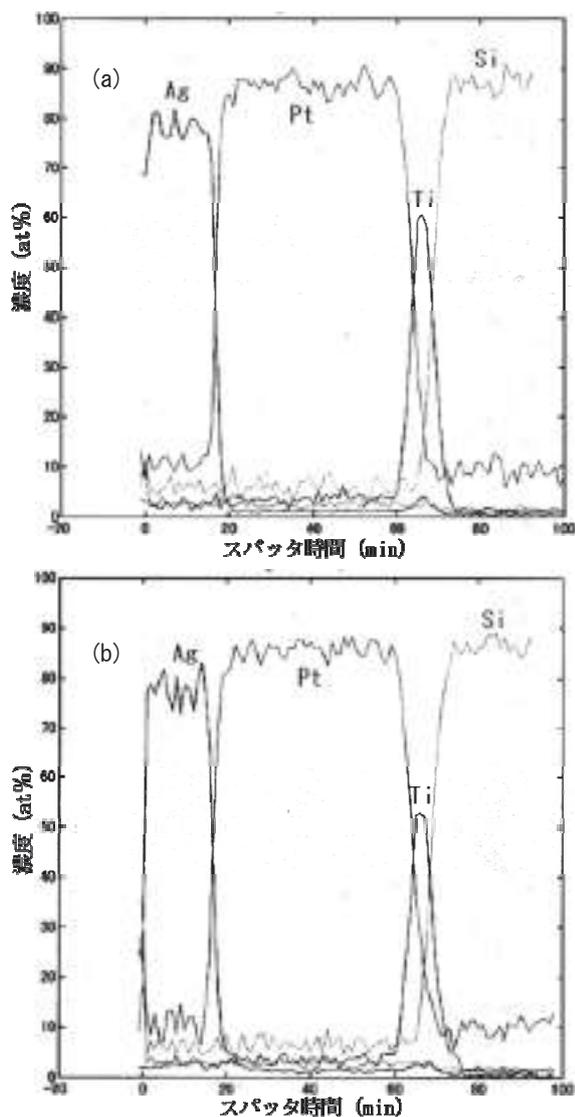


図4 (a)高温放置前、及び(b)100時間  
高温放置後のAESによる分析結果

その結果、Si/Ti/Pt/Au を使用した電極については、300℃の大気雰囲気中で 300 時間以内の使用に対応可能であり、Si/Ti/Pt/Ag を使用した電極については、300℃の大気雰囲気中で 100 時間以内の使用に対応可能であることがわかった。

これらの電極について、より長時間・高温条件下で高温放置試験を行うことにより、耐熱電極としての信頼性を明らかにすることが急務であると考えられる。

また、本研究では、最下層にチタンを用いた電極について検討を行ったが、銅配線等の様々な部品に対応可能な高耐熱電極を実現させるためには、タンタルやタングステン等を用いた金属多層膜についても検討を行う必要がある。

#### 謝辞

本研究で使用した試料の一部は、本プロジェクトで共同研究を行っている田中貴金属工業(株)の作製によるものであり、その協力に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 田口勇, 八坂慎一, 三橋雅彦, 篠原俊朗; 神奈川県産業技術センター研究報告, 16, 69(2010)

# 電子後方散乱回折像法によるアルミワイヤ接合部観察

神奈川県産業技術センター 篠原俊朗、八坂慎一  
カルソニックカンセイ(株) 富永 保、佐藤 豊

## 1. はじめに

IC など半導体チップで多用されるワイヤボンディングは、一般的にシヤ強度やプル強度で工程管理される。しかしこれらの方法は測定値のバラツキが大きく、工程管理には役立っても工程設計（ボンダーの条件設定）には適していない。IC のアルミパッドと金ワイヤのボンディングでは接合部を断面カットし、アルミ・金合金化層の厚さを金属顕微鏡で測定することにより適正条件を判断できる。これに対し、パワーデバイスチップのアルミパッドにアルミワイヤをボンディングするような同種金属同士の接合の場合、合金層が形成されないため観察が容易ではない。アルミパッドとアルミワイヤの添加金属の違いに注目し、元素分析を行えば可能であるが、接合面積や膜厚を考えると工程設計に用いるには非現実的である。そこでワイヤボンディング工程におけるボンダーの条件設定に応用できる技術として、ボンディングストレスによる金属膜の結晶粒径などの変化を計測できないかを検討する為に電子後方散乱回折像法（Electron Backscatter Diffraction : EBSD）<sup>1)</sup>による観察を検証した結果、接合断面のEBSD観察によって、アルミ・アルミ接合部の状態をビジュアルチェックできることが確認された。

## 2. 実験と結果

### 2. 1 サンプル作製

今回作製したサンプルは図 1 の断面模式図に示すようにアルミ基板表面に形成された銅パターン上にチップをはんだ接合し、さらにチップ表面のアルミ電極とアルミ基板上の銅パターン間にアルミワイヤをボンディングしたものとした。作製したサンプルの表面写真を図 2 に示し、使用したワイヤとチップの仕様を表 1 に示す。

またワイヤボンディング条件として加圧力と超音波出力をパラメータとし、チップを破壊せず界面剥離が発生しない範囲にて表 2 に示す条件のサンプルを作製した。

### 2. 2 観察用試料作製

前項にて作製したサンプルの接合部を EBSD 観察するために接合部の断面形成を行った。断面形成場所は図 3 に示すようにアルミワイヤ接合部の中央付近とした。サンプルをエポキシ樹脂中に埋めて EBSD で観察可能な大きさに切り出した後、観察断面付近まで機械研磨を行い（図 4 参照）、クロスセクションポリリッシャ（以下 CP）を用いたアルゴンイオンビーム研磨により平滑な断面を露出させて結晶

観察に適した断面形成を行った。CP 処理後の断面状態を図 5 に示す。

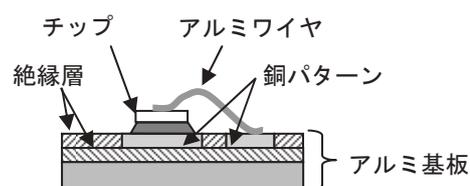


図 1 作製サンプルの断面模式図

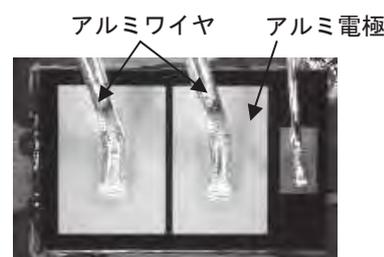


図 2 作製サンプルの表面写真

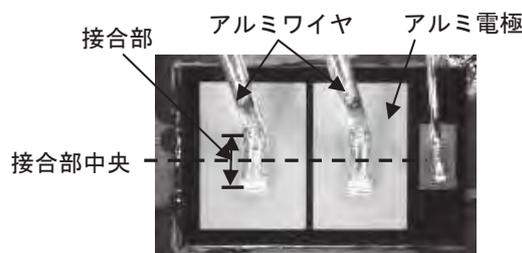


図 3 観察用断面形成

表 1 ワイヤ及びチップ仕様

ワイヤ		アルミワイヤ $\phi 500 \mu\text{m}$
チップ	素子種類	IGBT チップ
	アルミ電極	AlSiCu 厚さ $3.2 \mu\text{m}$

表 2 ワイヤボンディング条件

	加圧力	超音波出力
条件 1	小	小
条件 2	大	大



図4 研磨、切り出し後のサンプル写真（上面）

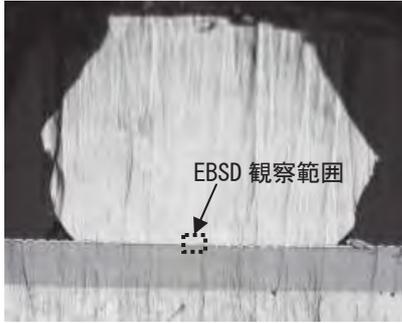


図5 CP処理後の接合部断面および観察範囲部



図6 EBSD観察・解析装置

### 2. 3 EBSD 観察

EBSD 観察は図6に示すFEI社製のショットキー型電界放出タイプ走査型電子顕微鏡（FE-SEM）「XL-30 Sirion」にオックスフォード・インストゥルメンツ社製の結晶方位解析装置「INCA Crystal」を組み込んだものを使用した。アルミワイヤとチップ表面アルミ電極間接合部を図5に示す約 $30\mu\text{m}\times 40\mu\text{m}$ （H×W）の範囲で観察しクオリティマップおよび結晶方位像を取り込んでいるが、今回の評価にはクオリティマップのみで十分でありこれを使用した。

### 2. 4 EBSD 観察結果

まず、非接合部におけるアルミワイヤとアルミ電極の観察結果を図7、図8に示す。図7より、ワイヤ径 $500\mu\text{m}$ から推定するとアルミワイヤ中の結晶粒径は数十～ $100\mu\text{m}$ 程度にも達することが分かる。なお、図中ワイヤ周囲の黒い部分はEBSD解析を行っていない領域であり、解析時間の短縮を図っている。また、図8より、厚さ $3.2\mu\text{m}$ のチップ表面アルミ電極中においては厚さ方向には一つの結晶粒しか存在せず横方向においても数 $\mu\text{m}$ から数十 $\mu\text{m}$ のサイズとなっていることが分かる。

一方、表2に示す条件1および条件2でワイヤボンディングしたサンプルをEBSD観察した結果をそれぞれ図9、図10に示す。この結果、ボンディング条件によりアルミワイヤ、アルミ電極ともに結晶粒の様子が大きく異なることが分かる。例えば図9に示す加圧力、超音波出力とも小さい条件1のサンプルではアルミワイヤの結晶粒径が条件2のサンプルよりも大きく、また加圧力、超音波出力が大きい条件2のサンプルでは、図10に示すようにアルミワイヤの結晶が横長で細かいものが多く加圧により潰されたように見え、また電極部の潰れと結晶の微細化も著しい。

以上のように、EBSD観察を行う事により接合条件によるアルミワイヤの結晶状態の差を明確に確認できた。しか

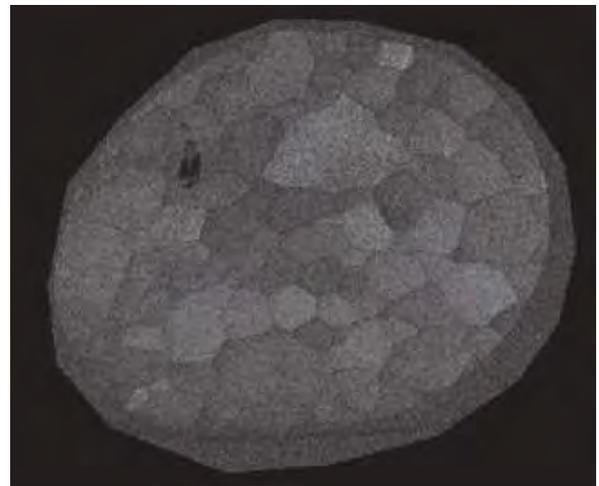


図7 アルミワイヤのEBSD観察結果



図8 チップ表面アルミ電極のEBSD観察結果

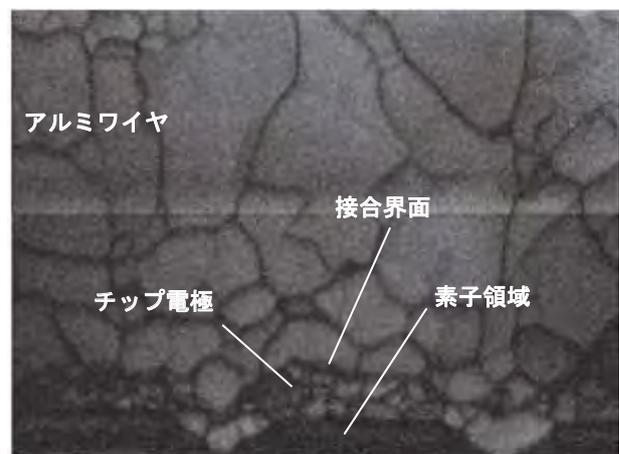


図9 接合部アルミ（条件1）のEBSD観察結果

し、今回の2条件では接合部付近のワイヤやチップ電極の結晶構造はいずれも初期状態から大きく変化しているものの、ボンディング条件による差は見られなかった。

なお、 $\phi 400\mu\text{m}$  のアルミワイヤを使用した IGBT モジュール市場流通品のアルミ接合部を同様に観察した結果を図 11 に示す。アルミワイヤ、チップ電極部共に結晶粒径が大きいことがわかる。

### 3. 考察および今後の展望

ボンディング前後のアルミワイヤおよびチップ上アルミ電極の結晶構造の変化はボンディング（加圧・超音波接合）によるストレスの大きさを示しており結晶粒径が小さいサンプルは受けたストレスが大きい。

今回試作した  $\phi 500\mu\text{m}$  ワイヤ品は市場流通の  $\phi 400\mu\text{m}$  ワイヤ品に比べてチップ電極の結晶粒径が著しく小さくなっており、試作品の方が大きなストレスを受けていると推定される。この要因としては、①接合強度重視のため必要以上に大きなボンディング条件に設定した、②太線を接合するために、より大きなボンディング強度を必要とした、などが考えられる。このほか、試作品はボンディング直後の接合面を EBSD 観察しているのに対して市場流通品ではボンディング後のプロセスで副次的に実施される加熱工程によりアニールされ、結晶粒径が回復したことも考えられる。今回評価した  $\phi 500\mu\text{m}$  のアルミワイヤ径での接合条件範囲においては、両ボンディング条件でワイヤ部の結晶粒径、状態に差違が見られ、ボンディングストレスの大きさを観察する手段として EBSD というビジュアルな評価手法が有用であることが分かった。

今後、ワイヤ径やボンディング条件、熱アニール効果など種々のパラメータと EBSD 観察結果を詳細に評価することによりボンディングストレス評価が可能となり、この結果と接合強度および接合工程による素子へのダメージを総合的に判断することにより、ワイヤボンディングの工程設計に適用できると考えている。

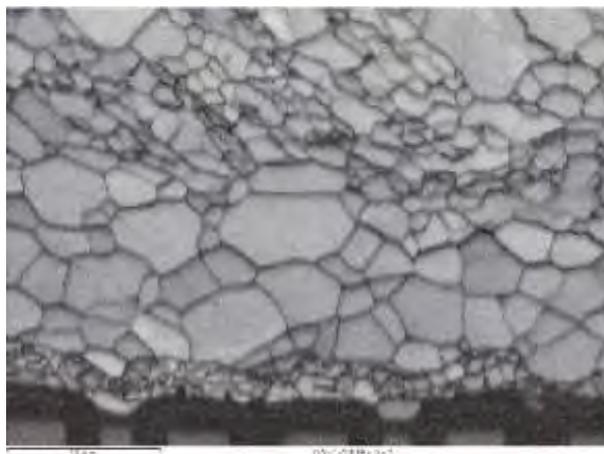


図 10 接合部アルミ（条件 2）の EBSD 観察結果



図 11 接合部アルミ（市場流通品）の EBSD 観察結果

#### 【参考文献】

- 1) V.Randle: Microtexture Determination and Its Applications, (1992) The Institute of Materials



# パワーチップ接合部の熱伝導解析と赤外線による表面温度分布評価 — 接合部のボイドが表面温度に与える影響 —

神奈川県産業技術センター 三橋雅彦、八坂慎一、伊東秀高、増田信次、篠原俊朗

## 1. はじめに

電気自動車をはじめとして、制御性が高く高効率な電気エネルギーの利用が高まっており、電子機器のより高温環境下での使用やハイパワーでの使用が求められている。一方、素子自身の微細化も進み、ますますパワー密度が増大している。これらを背景として高耐熱性、高電流密度に対応する実装技術が求められる。その重要な要素技術である接合形成技術を開発するにあたり、実際に発生するボイドやクラックなどの不具合を抑えるプロセス技術の向上が必要となる。そのためには接合部の不良部が与える熱的な解析技術、並びにその評価技術が重要となる。評価技術としては X 線の透過や CT 測定<sup>(1)</sup>、赤外線を用いた観察<sup>(2)</sup>などが行われている。これらの評価方法は非破壊で可能なため、特に不良解析の初期評価として用いられることが多いが、接合部の不具合がチップに与える影響まで調べられている例は少ない。

今回、シリコンチップの鉛フリーはんだ接合部におけるボイドの発生状況を X 線 CT 装置で確認し、それがチップ表面温度分布に与える影響について、シミュレーションを用いた熱伝導解析と赤外線観察により評価した。

## 2. 実験と結果

### 2. 1 鉛フリーはんだ接合

接合用チップとして厚さ 0.2 mm、サイズ 10.5 mm×17.5 mm のシリコンを使用し、接合面に Cr (20~30 nm) / Ni (1.5 μm) を積層蒸着した。接合する実装基板は厚さ 1.0 mm のアルミナ基板上に 0.3 mm 厚の Cu 板を貼り、その表面処理として Ni (5 μm)、Au (0.1 μm) をめっきしたものである。

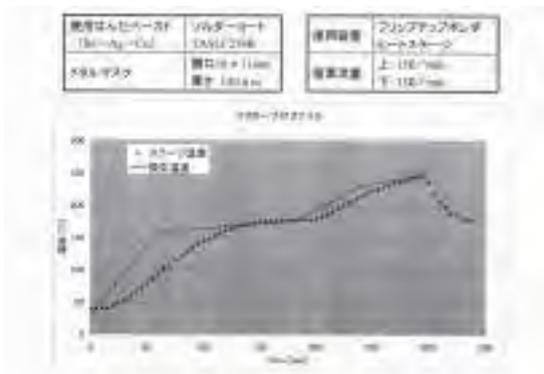


図1 はんだ接合時のリフロープロフィール

鉛フリーはんだとしては市販の Sn-Ag-Cu はんだを厚さ 150 μm のメタルマスクを用いて塗布した。はんだ接合のためのリフロープロファイルは図1の通りである。

### 2. 2 X 線 CT による接合界面評価

このはんだの接合部について非破壊で内部断層撮影を始めとした様々な 3 次元画像を構築出来る X 線 CT 装置を用いて評価した。用いた X 線 CT 装置を図2に示す。この装置は (株) ユニハイトシステム製の XVA-160 (Noix・Presto) であり、3 次元斜め CT 機能を持つことにより、基板上的のサンプルに対する優れた形状適合性を特徴とする。

はんだ接合面の X 線透過モードでの観察結果を図3に示す。このはんだ接合部の X 線 CT による断面像を図4に示す。これらの写真から、図3の黒い部分がチップの Cr / Ni 膜にはんだが濡れ接合した部分、中の白い島状部がボイド部分であることが分かる。このように非常に大きなボイドが鉛フリーはんだ接合部に存在することが確認された。

この大きなボイドはチップ面積が比較的大きく平坦であるためにリフロー時に蒸気化したはんだの揮発成分(フラックス)が残留したことが原因と考え、真空雰囲気中でリフローを行った。この真空リフロー時の様子を in-site でモニターしたところ、熔融したはんだの接合部からガスが抜ける様子が観察された。この真空雰囲気で作製した接合チップの X 線透過像を図5に示す。この図から小さなボイドが残存するものの図3の様な大きなボイドは見られず、真空雰囲気の効果のある程度は確認できた。



図2 X 線 CT 装置の外観図  
(ユニハイトシステム製, XVA-160)

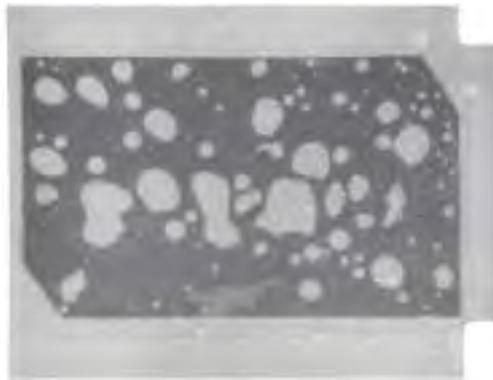


図3 チップ接合部の X 線透過像

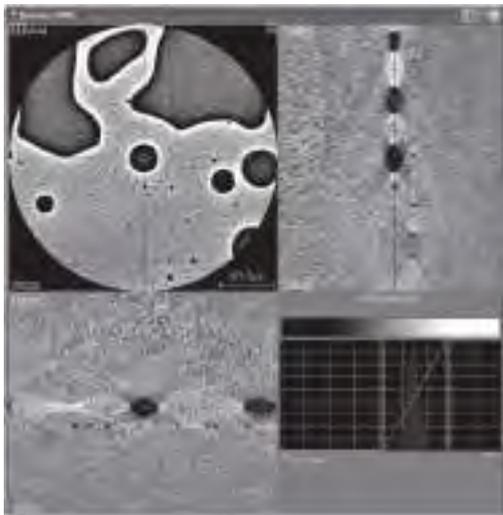


図4 チップ接合部の X 線 CT 像 (断面像)



図5 真空中で接合したチップの X 線透過像

### 2. 3 シミュレーション

シミュレーションには 3 次元汎用熱流体解析ソフト「PHOENICS」、熱弾塑性解析ソフト「MemsONE」を用いた。「PHOENICS」は 3 次元の熱流対応に適しているため、実際の環境により適した解析ができることを期待し、「MemsONE」では素子パターンとの整合性が高いためプロセスでの試作パターンを作製する時に用いた。

高温用素子の実装モデルとして「PHOENICS」では図 6 の解析モデルとした。これは実際のチップ実装を想定した構

造であり、チップと高温はんだを 25℃、A11 層以下を 150℃ の加熱保持とし、この加熱保持を停止してからの冷却の様子を 0.1msec 単位で非定常計算した。解析領域は 100×100×100mm、セルの分割数は 78×78×61 件である。T1: 0.5mm 口のボイド中心部のチップ表面温度、T2: ボイド中心部から約 4mm 離れたチップ中心部の表面温度とし、その解析結果を図 7 に示す。この図 7 には表示されていないが熱平衡時(1 秒後)は T1=149.3℃、T2=149.0℃であり、熱時定数はそれぞれ T1: 7.3msec、T2: 6.7msec、ボイドによる温度変化  $\Delta T$  の最大値は 2msec 時において 6.3℃であった。また、メッシュサイズ等の計算上の条件が異なるが「MemsONE」でもほぼ同程度の結果を得た。

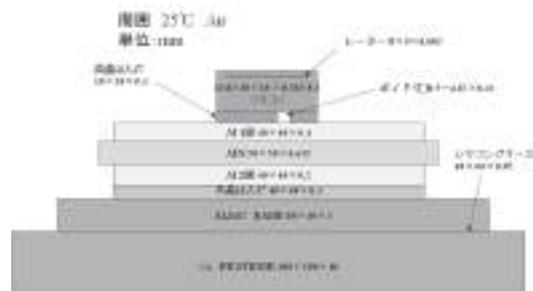


図6 PHOENICS で用いた解析モデル

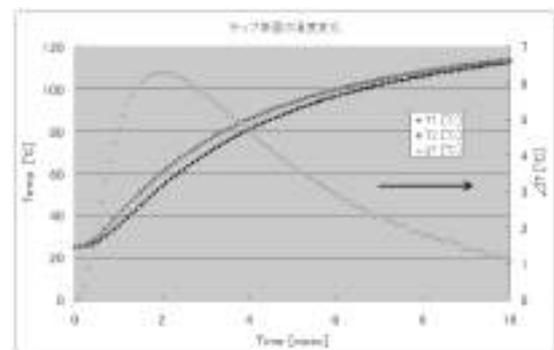


図7 ボイド部とチップの表面温度  
(T1: ボイド部の表面温度,  
T2: チップ中心部の表面温度)

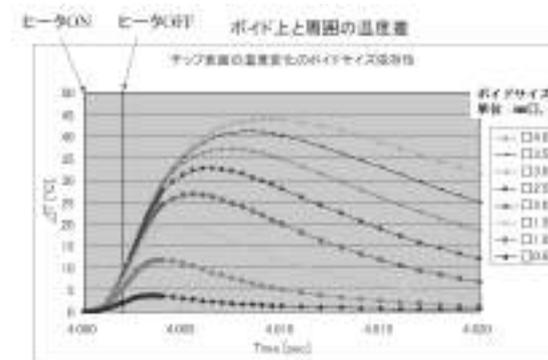


図8 各ボイドサイズでのチップ表面温度との差異

また、実デバイスを模擬して、図6のヒートシンクを60℃で4秒間保持しチップ(厚さ0.2mm)上の温度分布がない状態からチップ上のヒータを2kW、2msecで加熱した後ヒータをOffし、ボイドサイズ(0.5~4.0mm□)による表面温度への影響を解析した結果を図8に示す。この結果から、ボイドサイズが大きいほど周囲との温度差が大きいことが分かる。

さらにボイドサイズが大きければ定常状態でも温度差が観察可能と考え、ヒートシンクを60℃に保持し、ヒータを4W、40W、200W、400Wでの連続加熱とした場合、ボイドサイズが表面温度分布に与える影響を算出した。図9には2.0mm□のボイドサイズにおけるヒータ出力の影響を示し、図10にはヒータ出力200Wでのボイドサイズの影響を、図11にはチップ厚さを0.38mm、0.2mmとした時の影響を、それぞれ示す。これらの結果からボイドサイズが大きければ定常状態でも観察可能である。今回の結果からはボイドサイズ2mm□以上、ヒータ200W以上の場合には温度差 $\Delta T$ が10℃程度となり、定常状態でも観察可能となる結果であった。また、チップ厚さが薄い程、温度差が大きくなることも確認できた。

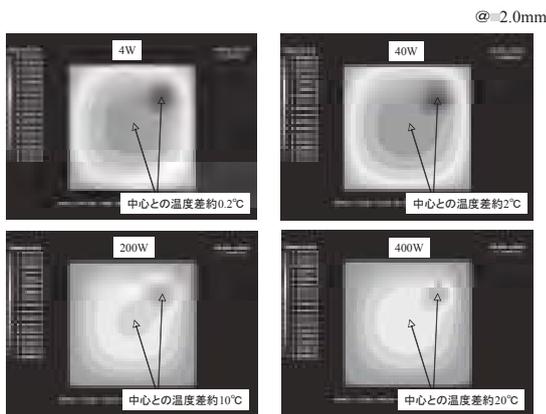


図9 ボイドサイズ2mm□での温度分布  
(ヒータ出力: 4, 40, 200, 400W)

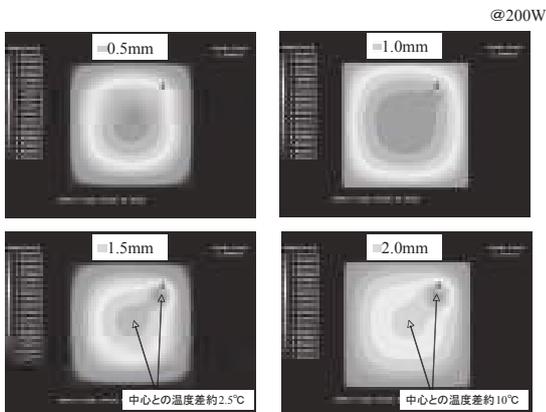


図10 200Wでの温度分布  
(ボイドサイズ: 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm□)

これらの解析結果を基として、実際に試作するヒータチップについて「MemsONE」を用いて設計した。その時の解析モデルと条件を図12に示す。図13に示すヒータパターンをモデルとして解析した時の、このチップの表面温度分布を図14に示す。この2mm□のボイド部の表面温度は77℃と算出され、また、このチップの表面温度はおよそ66℃なのでボイド部との表面温度差は10℃程度と算出された。

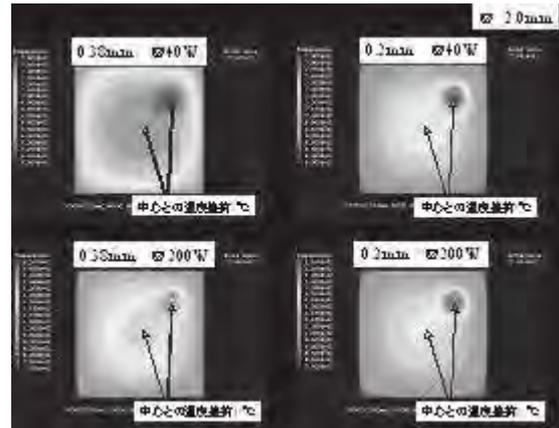


図11 ボイドサイズ2mm□での温度分布  
(チップ厚さ: 0.38mm, 0.2mm)



図12 試作するヒータチップの解析モデル

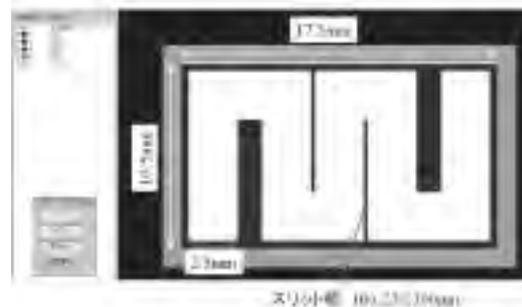


図13 ヒータチップのパターン

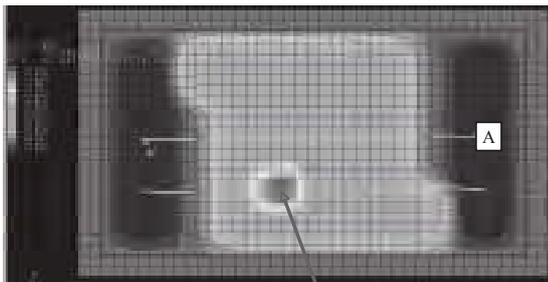


図 1 4 ヒータチップとボイドの表面温度分布

## 2. 4 赤外線画像による表面温度分布観察

実際にボイドが表面温度分布に与える影響を確認するために図 1 5 に示す赤外線温度分布測定機（米国 Inframetrics 社製、600L 型）を用いてボイドがあるヒータパターンの表面温度分布状態を観察した。この赤外線カメラの温度分解能は  $0.1^{\circ}\text{C}$ 、画像分解能は 256 点/本 $\times$ 200 本である。シリコンチップは図 1 2 の解析モデルで示した構造を考慮し、両面鏡面研磨した厚さ 0.2mm のシリコン上に Cr/Au の積層膜（膜厚 150nm）で図 1 3 のヒータパターンを作製した。その裏面にははんだ接合用の Cr(20-30nm)/Ni(1.5 $\mu\text{m}$ ) の成膜を行った。実装基板としては厚さ 1mm のアルミナ基板上に厚さ 0.3mm の Cu 板を貼ったものである。この Cu 板の上に表面処理として Ni(5 $\mu\text{m}$ )/Au(0.1 $\mu\text{m}$ ) の薄膜がめっきされている。この実装基板に 2.1 節に記した条件で鉛フリーはんだをリフロープロセスで接合した。ボイドが多いはんだ接合の試料として図 3 で示したサンプルを用いた。

ヒートシンクとしてペルチェ素子を用いて温度  $40^{\circ}\text{C}$  で一定とした試料ホルダーに熱伝導ペーストを塗布した上でサンプルを固定した。この時の試料の様子を図 1 5 に示す。また、リファレンスとなる  $40^{\circ}\text{C}$  に加熱した試料ホルダーの赤外線画像を図 1 6 に示す。この左下の円形の画像は测温用の熱電対である。チップパターンへの印加電圧：10.68V、電流値：3.05A、その時に熱電対での測定温度は  $46.2^{\circ}\text{C}$  であった。この時の赤外線画像を図 1 7 に示す。この画像では放射率を 1.0 としてあるので、正確な温度表示は望めないが、周辺部は約  $40^{\circ}\text{C}$  程度に対しチップの中心部の高温部は  $78^{\circ}\text{C}$  程度となっている。図 3 のボイドの分布と比較するために、この図 1 7 をチップサイズに拡大したものを図 1 8 に示す。左右の低温部は通電用のリード線、及び、固定のための導電ペーストの影響である。中心部の温度分布はボイドの形状を反映してはいないが、これはサンプル接合部のボイドが中央部を中心にサイズ、量が多いためシミュレーションよりも高温になってしまった影響と考えられる。また、用いた赤外線カメラは 1 秒間に 60 フレームの撮影である。つまり、応答速度は約 17msec であり、シミュレーションの結果からも高い分解能を望むのは難しい。しかし、ボイドサイズと温度分布との相関などの知見を蓄積すれば、試料の非破壊でのスクリーニングなど、応用への可能性を示すことはできた。



図 1 5 赤外線温度分布測定機の外観図  
(Inframetrics 社製、600L 型)



図 1 6 赤外線カメラ観察時の状況

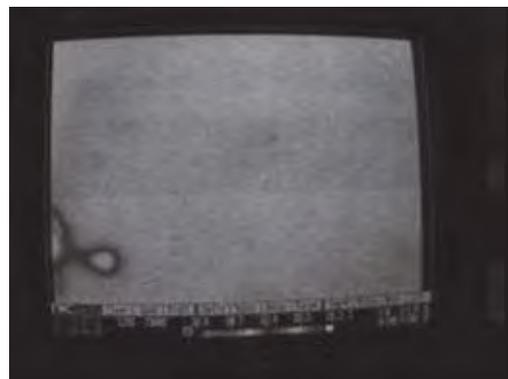


図 1 7  $40^{\circ}\text{C}$  での試料ホルダーの赤外線画像



図 1 8 試料を通電加熱した場合の赤外線画像



図19 チップ部分の拡大図  
(図3のパターン付きチップに対応)

### 3. 考察及び今後の展望

本研究でははんだ接合におけるボイドの熱的な影響を解析し、ボイドサイズが表面温度に与える影響、熱時定数との関連等を調べた。2.3節のモデルのシミュレーションの結果からチップ表面の熱時定数としては7msec程度であり、ボイド(サイズ0.5mm<sup>2</sup>)が表面温度へ与える影響のうち、その時間変化は2msec程度が最大値であった。

したがって、より小さなボイドサイズまで測定するためには、赤外線カメラの時間分解能を上げる必要がある。最近の赤外線カメラではmsecオーダーでの測定も可能な機種があるので測定の可能性はある。また、ボイドサイズがある程度大きければ、定常状態でも観察が可能なことは確認できた。ボイドを始めとする様々な接合部の不具合についての知見を蓄積することにより、赤外線画像観察を不良解析などへ応用することの可能性は示せたと考える。

今後の課題としては、赤外線カメラの応答速度なども考慮しながら、様々なボイドサイズの表面温度や熱分布を測定しシミュレーションへフィードバックを行うことにより、シミュレーションの精度向上を図り測定表面温度との相関性向上を行うことである。また、プロセス条件の検討などにより、はんだ接合におけるボイド発生のも更なる低減も求められる。

#### 【参考文献】

1. 塩田忠弘 *et al*, *非破壊検査*, 54, 238(2005).
2. 植村英幸, *非破壊検査*, 50, 302(2001).



# 一方向熱流定常比較法による貴金属ダイアタッチ層の熱抵抗評価

神奈川県産業技術センター 篠原俊朗、八坂慎一、伊藤健

## 1. はじめに

### 1. 1 熱抵抗測定的重要性

これからの低炭素社会実現に向けて、系統電力網に接続される電力変換器や自動車の電動化に重要な役割を果たす電力変換器などの低損失化が重要な課題となっており、様々な取組みがなされている。電力変換器を安定して高性能に駆動するための重要な一要素が、電力変換器を構成しているパワーモジュール内部における、パワーデバイスと基板とを接合する厚さ数十 $\mu\text{m}$ のダイアタッチ層の熱抵抗値を安定的に低減させることである。このダイアタッチ層は従来、熱伝導率が約 $50\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 程度の高鉛含有はんだが使用されてきたが、近年鉛フリー化の要請および高温駆動化追求のため、金属微粒子結合を代替手段として使う研究が盛んに行われており、この熱伝導率は $200\sim 300\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ にも達すると予想されている。このような高熱伝導率のダイアタッチ層においては、材料そのもののバルク熱抵抗に接触界面の熱抵抗を加えた総合的な熱抵抗値が重要となり、さらにダイアタッチ層の不良や劣化がパワーモジュールの破壊に直結するため、この総合的な熱抵抗値を測定できることが極めて重要である。

### 1. 2 カートリッジ方式一方向熱流定常比較法

カートリッジ方式一方向熱流定常比較法は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「導電性接着剤実装技術に関する標準化調査事業」において開発された、実装状態を模擬した試験片の熱抵抗測定技術である<sup>1), 2)</sup>。

この方法は、接着剤を基材で挟み込んだ試験片を用意し、その熱抵抗値を一方向熱流定常比較法により測定することにより接着剤の熱抵抗値と接着界面熱抵抗値の合計値を測定する評価手法であり、接着剤層の厚さを変えた複数の試験片を測定することにより、接着剤の熱伝導率と接着界面熱抵抗の両方を得る事ができる。本報告では、従来ダイアタッチ層としての熱抵抗評価が報告されていない貴金属微粒子結合層について本手法を適用した結果について報告する。

## 2. 実験と結果

### 2. 1 試験片準備

今回の実験においては、高耐熱パワーモジュールの実装状態でのダイアタッチ部熱抵抗測定を念頭に、サブミクロン金粒子を用いたスラリーによる接合層を測定対象とし、表面に金めっきを施した2枚の銅ブロック (JIS C1100-P,  $398\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$  20mm $\times$ 20mm $\times$ 5mm) をこのスラリーで接合したものを試験片とした。接合層の厚さはスペーサを使用することにより3水準設定し、接合後の試験片厚さおよび接合前の上下2枚の銅ブロック厚さの実測値から算出した接

合層厚さは、0.182mm, 0.391mm, 0.679mmであった。図1に試験片の一例を示す。

### 2. 2 一方向性熱流定常比較法による熱抵抗測定系

本測定系は図2に示すように、熱流を発生させるための加熱部と冷却部そして、試験片に対して一方向に一定の熱流を与えるための、熱伝導率が既知の上部ロッドおよび下部ロッドから構成されている。上下ロッドには温度測定のため、熱流が生じる垂直方向にそれぞれ5本の熱電対が取り付けられており、試験片の上下銅ブロックには水平方向にそれぞれ3本の熱電対が取り付けられている。

本装置の定常状態における上下ロッドの温度分布と試験片の温度および上下ロッドの熱伝導率を用いて全熱抵抗値を算出する。ここで全熱抵抗値とは試験片における接合層と上下の銅ブロックとの接触熱抵抗および接合層のバルク熱抵抗が直列接続された合成熱抵抗値である。



図1 熱抵抗評価用試験片

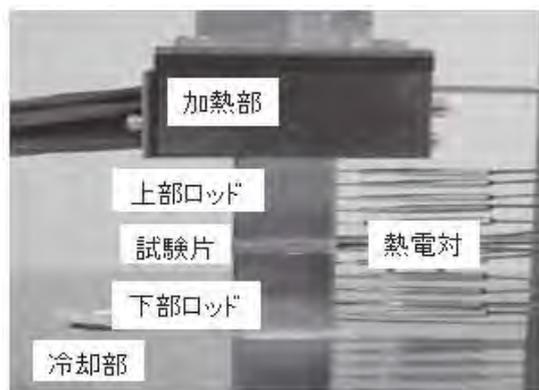


図2 実装状態熱抵抗測定装置

### 2. 3 熱抵抗測定結果

図3に接合層の厚さと全熱抵抗値の関係を示す。3つの試験片が同様の接触熱抵抗を持ち接合層内部の熱伝導率が均一な理想状態ならば、この測定点は直線上にプロットされ、その直線のY切片が接触熱抵抗、傾きの逆数が接合層内部の熱伝導率になるはずであるが、実際には図3に示すように直線から外れて、熱伝導率は153W/m・Kとなった。厚さ0.679mmの試験片において何らかの理由により接触熱抵抗が大きくなったと仮定して計算から除外し他の2点から計算した熱伝導率は325W/m・Kとなった。厚さ0.182mmの試験片における内部熱抵抗は $0.56 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 、接触熱抵抗は $0.82 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ となり、両者の比率は約4:6であった。

### 3. 考察

本手法により測定されたサブミクロン金粒子スラリーによる接合層の熱導電率はバルク金の熱伝導率とほぼ同等の値であり、本材料・工法による接合層は従来の高鉛含有はんだに比べ非常に小さな熱抵抗を実現できることが分かった。また内部熱抵抗より接触熱抵抗が大きな値となっており、接触面の影響が大きいことも分かった。なお、上記結果からも分かるように現状では熱抵抗値の測定不確かさが大きく改善が必要である。温度や試験片寸法の現実的な測定精度や材料物性値の現実的な不確かさを前提とすると試験片両端の温度差をさらに大きくすることが必要であり、加熱部の温度を上げる、ロッド長を短くする、冷却部の温度を下げるなどの対策が有効と思われる。

### 4. まとめと今後の展望

カートリッジ方式一方向熱流定常比較法によりサブミクロン金粒子スラリーによる実装状態での接合層の熱抵抗測定を行った。この材料・工法を用いると従来の高鉛含有はんだに比べ非常に小さな熱抵抗の接合層を実現できる。接合層の熱抵抗には接触熱抵抗が大きく寄与し更なる熱抵抗低減のためには界面の接触熱抵抗低減が重要であることがわかった。

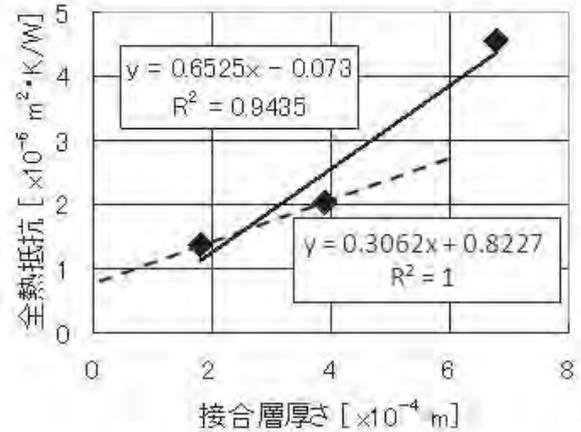


図3 全熱抵抗の接合層厚さ依存性

### 謝辞

本研究におけるカートリッジ方式一方向熱流定常比較法での熱抵抗測定および関連データの提供において、エスペック株式会社の田中氏に多大なるご協力を頂いたことに深く感謝の意を表します。

### 【参考文献】

- 1) 平成20年度 NEDO 委託事業成果報告、開発成果標準化フォローアップ等標準化調査研究事業「導電性接着剤実装技術に関する標準化調査事業」活動成果報告書、pp. 18-19、平成21年3月
- 2) 平田拓哉、田中浩和、柳浦聡、渡邊聡、大串哲朗；日本機械学会熱工学コンファレンス 2009 講演論文集、No. 09-33、[2009. 11. 7-8、宇部]

# 半導体の実装構造における熱特性評価技術

神奈川県産業技術センター 八坂 慎一、三橋 雅彦、田口 勇、篠原 俊朗

## 1. はじめに

### 1. 1 実装構造での熱特性測定の重要性

近年、電子機器の小型化・高性能化に従って、デバイスの消費電力や発熱密度が増加することにより、デバイスの実装構造における熱対策の重要性が高まっている。特にパワーデバイスの分野では、放熱特性がデバイスの低損失化に直結しており、実装構造での放熱特性の向上は重要な課題である。パワーデバイスの実装構造において、ダイボンディング接合層は放熱特性に大きな影響を与える要素であり、このダイボンディング部の熱特性によってデバイスの性能や寿命が左右される。一般に、ダイボンディング部の熱設計については、接合材の熱伝導率と厚みから換算されることが多いが、実際にはデバイスと接合材の間の界面熱伝達率と実装基板と接合材の間の界面熱伝達率の影響があり、熱伝導率の高い接合材を使用してデバイスを実装しても期待した熱特性が得られない場合がある。したがって実際の構造を模擬した接合サンプルを作製し、その接合部の熱特性を測定することはきわめて重要である。

### 1. 2 熱抵抗と熱パラメータ

パワーデバイスの分野では、デバイスから外部への温度の伝えにくさを表す、熱抵抗という値によって、デバイスの実装構造の放熱特性を評価することが多い。図1のように、熱抵抗とは任意の2点間の温度差を熱流量で割ったものとして表されるが、この場合の熱流量とは厳密に2点間の温度差に寄与するものであり、実際の実装構造では厳密にこの熱流量を測定することは困難である。そこで現実的な方法として、2点間の温度差を点Aにおける発熱量で割ったものとして表される熱パラメータという値を用いる<sup>1)</sup>。この場合には熱流量は点Bを通るものだけでなく、その他の経路を通るものも含むため、厳密には熱抵抗とはいえないが、実装構造の熱特性を評価する場合には実用性が高いため多くの場面で用いられている。本報告では、実際の構造を模擬した接合サンプル作製し、接合部近傍の熱パラメータについて計測を行ったので、その結果について報告する。

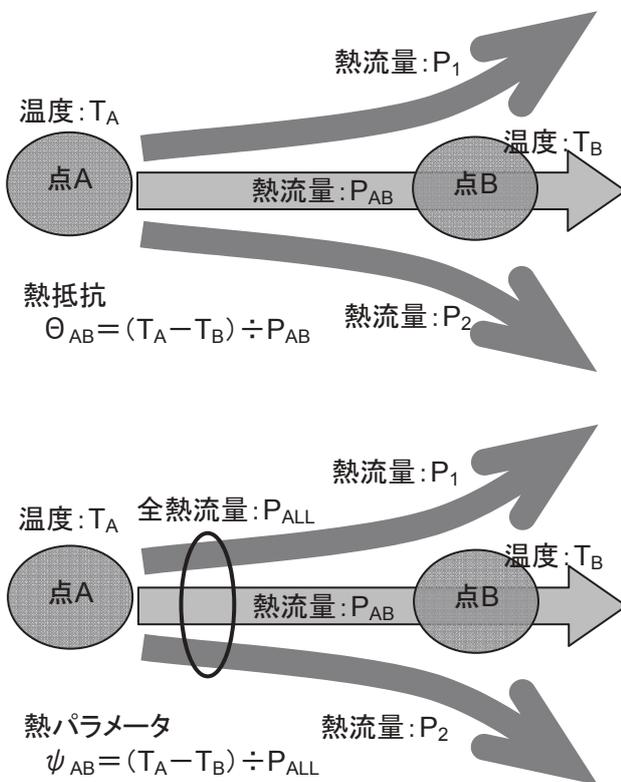


図1 熱抵抗と熱パラメータ

## 2. 実験と結果

### 2. 1 接合サンプル

今回の実験においては、銀ナノ粒子ペーストを用いて、実際の実装構造を模擬した接合サンプルを作製し熱パラメータの測定を行った。接合サンプルの構成を図2に示す。基板としては、パワーデバイス実装用のアルミ貼り窒化アルミ基板を採用し、基板表面にはNi/Agめっきを施した。チップには5×20mmのシリコンチップで、ドライプロセスによりチップ表面にTi/Ptを裏面にTi/Pt/Agを成膜したものをを用いた。表面の電極は電流を流して薄膜ヒーターとして利用するとともに、白金測温抵抗体として温度計測に用いる。裏面電極は銀ナノペーストとの接合のためである。この接合サンプルに線径500μmのアルミ太線でワイヤーボンディングを行い、電気的な接続を行った。実装基板のチップ接合部の直下には直径0.3mmの穴をあけて直径0.25mmのシース熱電対を取り付けチップ直下の温度を計測できるようにした。作製した接合サンプルの写真を図3に示す。

### 2. 2 熱パラメータ測定系

本測定系の概要を図4に示す。試験サンプルの白金薄膜ヒーターで発生した熱が接合部を通過してヒートシンクに流れるような構造となっている。ここで重要なのはヒーターで発生する熱量とヒートシンクから逃がす熱量を大きくとって接合部に流れる熱量を大きくとり、測定精度を

高めることである。そのためヒートシンク部の冷却はチラーによって冷却水を循環させる機構となっている。ヒーターの発熱量はヒーターに一定の電流を流し、電圧を計測することによって消費電力を算出しこれがすべてジュール熱となっているものとして発熱量とした。ヒーターの温度は発熱量と同様に電流と電圧からヒーターの抵抗値が算出できるので、事前に計測しておいたヒーターの温度-抵抗特性から算出した。このヒーター温度と熱電対によって計測したチップ直下の温度との差を発熱量で割ったものを接合部の熱パラメータとした。

### 2. 3 熱パラメータ測定結果

図5に銀ナノ粒子ペーストを用いてヒーターチップを実装した4個の接合サンプル(#12~15)における、ヒーター発熱量と熱パラメータの関係を示す。これを見ると熱パラメータの値は発熱量の増加にしたがって大きくなっていることがわかる。また、サンプル間のばらつきが大きくっており、この結果から推測すると銀ナノ粒子ペーストを用いた接合の放熱特性のばらつきも同程度であると考えられる。

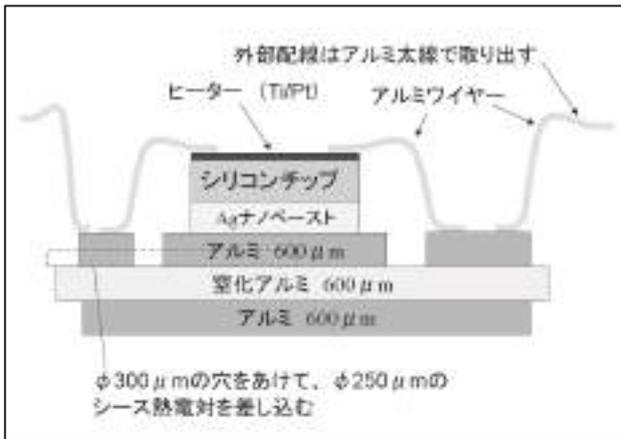


図2 接合サンプルの構成



図3 接合サンプルの写真

### 3. 考察および今後の展望

実装構造での熱特性を評価する計測系を構築し、銀ナノ粒子ペーストを用いて実際の実装構造を模擬した接合サンプルを作製し、熱パラメータについて測定を行った。その結果、測定した熱パラメータの値は発熱量の増加にしたがって大きくなっていることがわかった。その原因については確認できていないが、接合材やチップおよび基板の熱伝導率には温度依存性があるため、発熱量の増加によって各材料の温度が上昇し熱伝導率に変動することによるものと推測できる。今後は、この仮説についての検証を行う必要があると考える。また、サンプル間のばらつきの原因についても、接合層の厚さやボイドの存在などが考えられるため、これについても確認する必要がある。

#### 【参考文献】

1. JEITA 規格、EDR-7336、“半導体製品におけるパッケージ熱特性ガイドライン”。

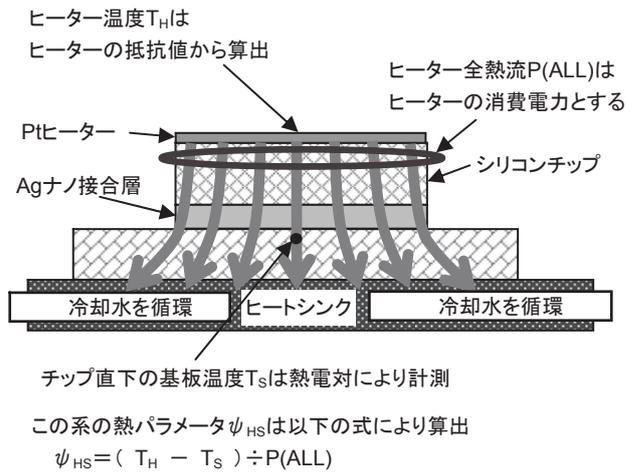


図4 熱パラメータ測定系の概要

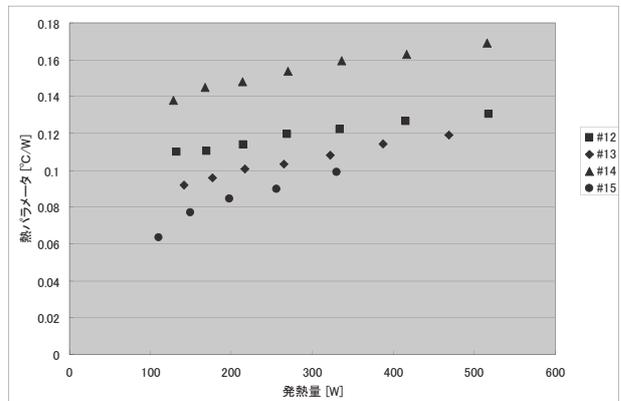


図5 発熱量と熱パラメータの関係

