

平成 28 年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「異方性グラファイトをヒートスプレッドとして用いた
高熱伝導パワーモジュール基材の開発」

研究開発成果等報告書

平成 29 年 4 月

担当局 東北経済産業局
補助事業者 株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

目 次

第1章 研究開発の概要	．．．．	2
1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標		
(1) 背 景		
(2) 研究目的および目標		
1) グラファイト製ヒートスプレッタの開発		
2) 回路付き放熱基板の開発		
1－2 研究体制	．．．．	3
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)		
1－3 成果概要	．．．．	4
1－4 当該研究開発の連絡窓口	．．．．	5
第2章 本論	．．．．	6
(1) 異方性グラファイトの切断		
(2) 回路付き放熱基板の作成	．．．．	7
(2)－1 積層基板の接合		
(2)－2 異種材料の一括接合	．．．．	9
(2)－3 絶縁溝加工およびセラミック分割	．．．．	10
(3) 熱伝導解析および応力解析	．．．．	11
(4) 放熱特性の評価	．．．．	14
最終章 全体総括		
(1) 研究開発成果	．．．．	15
(2) 研究開発後の課題	．．．．	16
(3) 事業化展開		

第1章 研究開発の概要

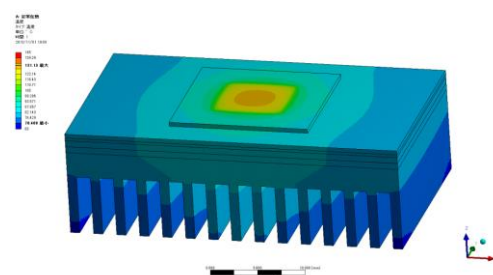
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究の背景

パワー半導体の搭載用途は情報・通信機器から電力インフラまで多岐に渡り、その用途に応じて電力、電流値が異なる。2013年時点では最も市場規模が大きいのが産業機器向けであるが、今後はハイブリッド自動車、電気自動車の普及により2019年には自動車向けが産業機器向けを上回るようになることが予想されている。

パワーモジュールは制御するモーターの出力の増大に伴い高耐圧・大電流を扱えるものが求められてきており、車載の場合は更に小型軽量化が求められるため、放熱対策との両立は容易ではない。産業界からは、より効率的な放熱技術が求められている。右図は、ヒートスプレッドの構成とグラファイトの場合の熱シミュレーションを表しており、同一構造の銅製ヒートスプレッドとグラファイト製ヒートスプレッドでは半導体チップの温度に10℃の差がでることが判る。

本テーマは、高熱伝導グラファイトを利用した高熱伝導パワーモジュール基材が未だ実用化されていないことを鑑み、実用化に向けて3企業と1公設試が協同して課題の解決を図る。



構成と温度シミュレーション

(2) 研究目的及び目標

1) グラファイト製ヒートスプレッドの開発

1)-1 異方性グラファイトの切断

生産性の高いマルチワイヤーによる切断条件の最適化検討と、接合切断用サンプルの供給を効率的に行う。また、切断によるソリおよび表面粗さも後工程なしで接合できるものをめざす。（目標値）：切断ロス $\leq 0.2\text{mm}$ ，表面粗さ $R_a \leq 1\text{ }\mu\text{m}$

2) 回路付き放熱基板の開発

2)-1 異種材料の接合

グラファイト・窒化ケイ素・銅板を一括接合で接合し、大判サイズの実現と課題であるロウ材の銅表面への回り込み、反りの解決を図る。

2)-2 絶縁溝加工およびセラミック分割

a) 絶縁溝加工

銅板の導体回路形成はエッチング装置で可能であるが、グラファイトやろう材を含んだものでの絶縁溝加工が必要で、切削加工や放電加工など幅広く形成技術確立する。

b) ブレークライン形成技術の確立

取扱い易いファイバーレーザ加工機を使って、大判から個品への分割箇所にはブレークラインを形成し、きれいに分割できること。

2)-3 伝熱及び応力解析

各種組合せにおける伝熱評価とサイズアップした基板の反りや使用時の熱応力シミュレーションを行い、CAE／実績値の相互比較による精度・確度の向上を図り、シミュレーション結果を顧客へ提案する放熱基材の最適設計に反映させる。

2)-4 放熱特性の評価

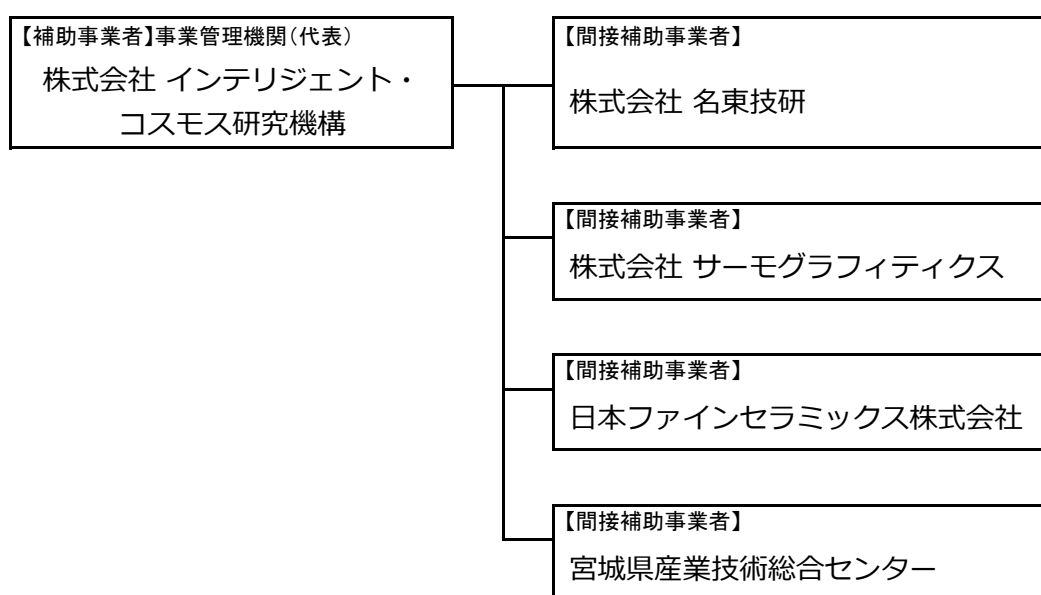
一括接合サンプルの面内方向の熱伝導を含めた放熱特性を評価する。

[目標値]：温度サイクル試験（-40～150℃ 1000 サイクル特性の劣化無き事）

シミュレーション結果を裏付けできる評価方法を確立する。

1-2 研究体制

（研究組織・管理体制）



(研究者氏名、協力者)

株式会社 名東技研	佐藤 伸	PL
	澤田 浩明	
	田中 宏	
株式会社 サーモグラフィティクス	竹馬 克洋	SL
	野上 美郎	
日本ファインセラミックス株式会社	森 信一	
	足立 茂	
	梁川 昌紀	
	古川 博道	
宮城県産業技術総合センター	久田 哲弥	
	阿部 宏之	
	林 正博	
	矢口 仁	
株式会社インテリジェント・システム研究機構	猪股 則夫	
	菊地 公博	

1-3 成果概要

1) グラファイト製ヒートスプレッタの開発

1)-1 異方性グラファイトの切断

マルチワイヤーにより目標値の切断を実現できた。量産に向けては更にワイヤー本数が多い状態での加工が必要で、加工品の固定や加工条件の詰めが必要になる。

2) 回路付き放熱基板の開発

2)-1 異種材料の接合

59mm×50mm サイズで一括接合条件を確立し、120×100mmにも展開し、超音波探傷装置で評価して接合ムラにならない接合条件の確立ができた。ソリは材料構成と厚みを組合せることで 120×100mmサイズで 0.1mm以下のソリ量を実現した。ろう材の回り込みも狭い条件ではあるが防止できることが確認できた。

2)-2 絶縁溝加工およびセラミック分割

a) 絶縁溝加工

グラファイトとろう材と銅板が一括で固定されたものに、基板の回路や分割部を作るべく部分除去する加工で、研削・切削・放電にて加工してサンプルを得た。元材のソリや固定によりろう材残りやコーナー残りが発生して、更なる追加研究が必要である。

b) ブレークライン形成技術の確立

ファイバーレーザ光源の光を絞って窒化ケイ素基板に照射させることで、容易にU溝に近い形のV溝の除去加工が可能で、それをブレークするときれいに個品分割が可能である。

2)-3 伝熱及び応力解析

数多くの部材の構成と厚みの組合せの伝熱シミュレーションにより、銅板に比較して高熱伝導グラファイトを用いたヒートスプレッドの優位性が認識できた。また、構成部材の厚み依存性の確認によりコストと性能両立させる方向を見出した。

反りの少ない基板は、構成部材と部材の厚みを組合せて熱応力シミュレーションを実施し、ソリの少ない基材の実現を可能にした。

2)-4 放熱特性の評価

ろう材で精度よく固定されている開発品のヒートスプレッドの性能を確認する上で最も影響する発熱源の半導体ヒータチップの固定が難しく、評価結果がばらつくと言う課題があったが、終盤にばらつきを少なくする固定が出来るようになり、伝熱評価方法の確立ができた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社 名東技研 東北製造部部長 佐藤 伸

TEL : 022-378-7825 E-mail : satousin@meitogkn.co.jp

第2章 本論

(1) 異方性グラファイトの切断

ダイヤモンドワイヤーには、砥粒の固定方法として電着ワイヤー（図1）とレジンワイヤーの2種類があり、レジンワイヤーは高い張力の場合に撓みが発生することがあり、異方性グラファイトの切断には向いていないことが分かった。次に切断面の面粗度では図2のように、異方性グラファイト全周を治具で固定することで切断時のブレを抑えられ、表1のように表面精度が改善することが分かった。

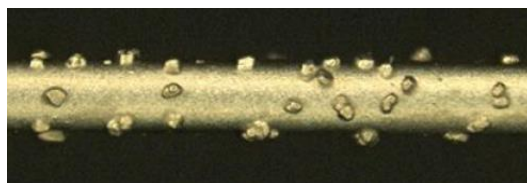


図1 電着ワイヤー



図2 全周を治具固定

次にマルチワイヤーと長尺サンプル120×20×1Tの組合せで切断検討し、長尺になることで表面粗さが大きくなることが分かった。そこで、ワイヤーに固定されている砥粒の径を30-40 μm から10-20 μm にして、長尺サンプルにおいても表2のように表面粗さが1 μm 以下の精度を出せることが分かった。

治具固定無し					
20幅		40幅		60幅	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
2.867	12.286	2.905	12.688	2.811	12.776

治具固定有					
20幅		40幅		60幅	
Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
0.691	5.204	0.803	5.497	0.864	5.006

表1 治具固定有無での面精度

切削速度	切断厚(mm)	平均Ra (μm)	平均Rz (μm)	板厚誤差(mm)
0.4mm/min	1	0.982	8.765	0.01
0.5mm/min	1	1.003	8.821	0.01
0.6mm/min	1	1.221	9.554	0.01

表2 長尺品 砥粒径 10-20 μm による表面精度



図3 0.5t 切断品

(2) 回路付き放熱基板の作成

(2) - 1 積層基板の接合

(2) - 1 - 1. 高熱伝導グラファイトの接合

高熱伝導グラファイトは方向によって熱伝導率が大きく異なるため、ヒートスプレッドとして利用するには、接合によりコンポジット化する必要があり、図4にコンポジット化の接合を表している。図中の赤矢印は熱伝導率が大きい方向を示している。

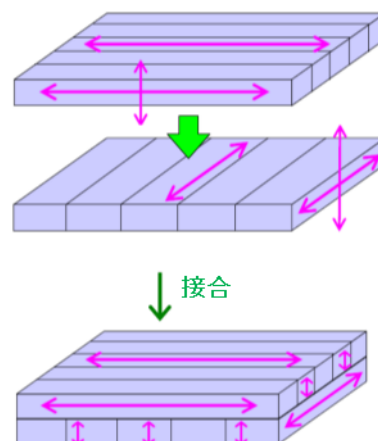


図4 コンポジット化の接合

接合は、市販の活性ろう材を推奨接合条件に基づき検討し、図5は接合したコンポジットサンプルの外観画像である。

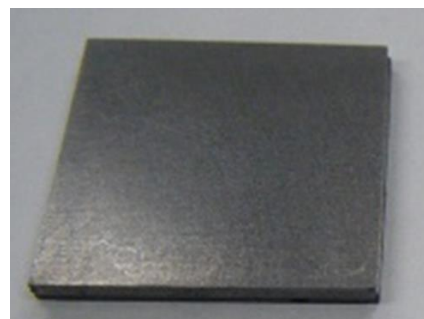


図5 コンポジットサンプル

高熱伝導グラファイトの接合状態を確認するため、作製したコンポジットサンプル断面の元素マッピング分析をおこなった。

図6はコンポジットサンプル断面の SEM 画像（左上）と元素マッピング分析画像（左上以外）である。

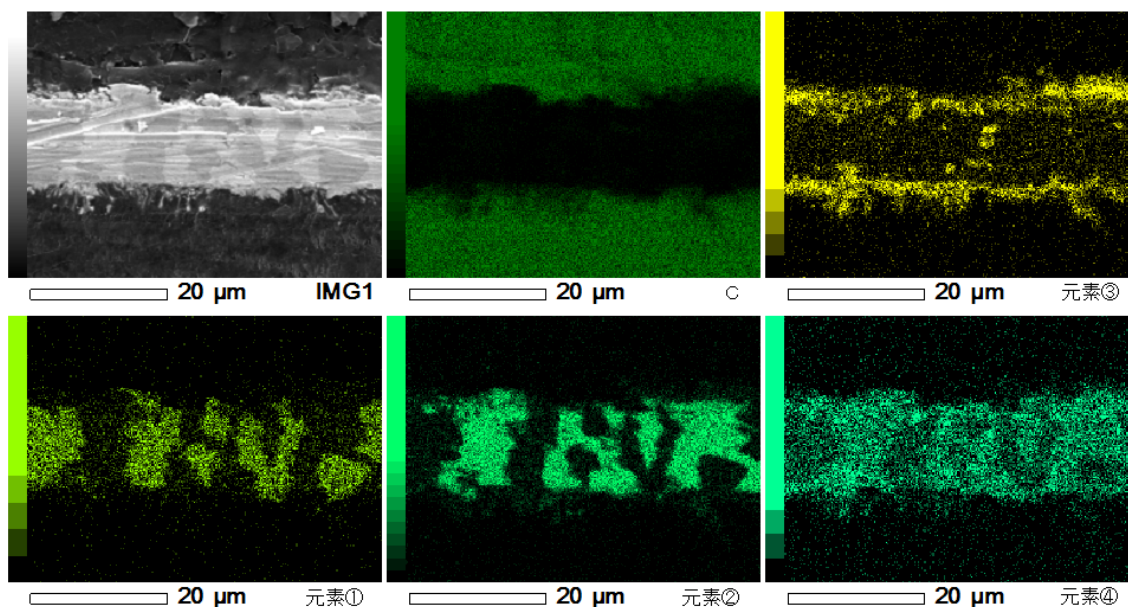


図6 コンポジットサンプル断面の SEM 画像と元素マッピング分析画像

SEM 画像の中央の白く見える部分がろう材層であり、その上下の黒く見える部分が高熱伝導率グラファイトである。元素マッピング分析の対象元素は、高熱伝導グ

ラファイトのC（炭素）と、ろう材の成分元素①～④である。ろう材に含まれる活性金属は元素③である。元素③のマッピング分析画像から、ろう材中の活性金属が高熱伝導グラファイトの方へ移動し、ろう材層との界面に偏析していることが確認できた。このことから、ろう材中の活性金属が高熱伝導グラファイトと反応して接合が成されると推測される。

（２）－１－２．高熱伝導グラファイトの接合強度

高熱伝導グラファイトの接合強度を確認するため、コンポジットサンプルの圧縮せん断強度測定をおこなった。測定に用いた試験片は、試験方法の妥当性を確認する意味でカーボンをエポキシ接着剤で接合した試験片と、素材の異なる比較サンプルとしてカーボンを活性ろう材で接合した試験片を加え、 $20 \times 5 \text{ mm}$ の素材中央に $7 \times 5 \text{ mm}$ の素材を接合したもの。

表３に試験結果を示し、
カーボンをエポキシ接着
剤で接合した試験片の試

試験片素材	接合方法	最大荷重 (N)	強度 (Mpa)	破壊モード
カーボン	エポキシ接着剤	920	18.8	接着面破壊
カーボン	活性ろう付け	886～1240	21.1～25.5	素材破壊
高熱伝導グラファイト	活性ろう付け	測定不可	－	素材変形

表3 圧縮せん断強度測定結果

験結果は、接合面からの剥離であり圧縮せん断強度は、18.8MPa と測定された。

カーボンを活性ろう材で接合した試験片の試験結果は、接合面からの剥離ではなく、素材の破壊であった。この結果から、接合強度はカーボン自身の素材強度よりも強いことがわかった。

高熱伝導グラファイトを活性ろう材で接合した試験片の試験結果も、接合面からの剥離ではなく素材の変形（座屈）であった。この結果から、高熱伝導グラファイトの接合強度は高熱伝導グラファイト自身の素材強度よりも強いことがわかった。

（２）－１－３．コンポジットサンプルの熱伝導率

コンポジットサンプルの厚さ方向の熱伝導率を確認するため、レーザーフラッシュ法で熱伝導率測定をおこなった。高熱伝導グラファイトの熱伝導率は 1700 W/mK である。しかしながらコンポジット化することで、高熱伝導グラファイトよりも熱伝導率の小さいろう材層が熱抵抗となり、熱伝導率を下げることになる。

コンポジットサンプルの熱伝導率の測定結果は $1200 \sim 1300 \text{ W/mK}$ であり、選定した活性ろう材および接合条件で 1000 W/mK 以上の目標値達成を確認した。

(2)－2. 異種材料の一括接合

(2)－2－1. 異種材料の一括接合サンプル

回路付き放熱基板の開発には、回路電極としての銅、絶縁基板としての窒化ケイ素、ヒートスプレッドとしての高熱伝導グラファイトと異種材料の接合が必要である。

異種材料の一括接合条件は、高熱伝導グラファイトのコンポジット化の接合条件に準じた条件である。

図7は、一括接合サンプルの外観画像である。サンプルサイズは $\square$ 2インチ程度であり、外観上の接合不具合は無い。

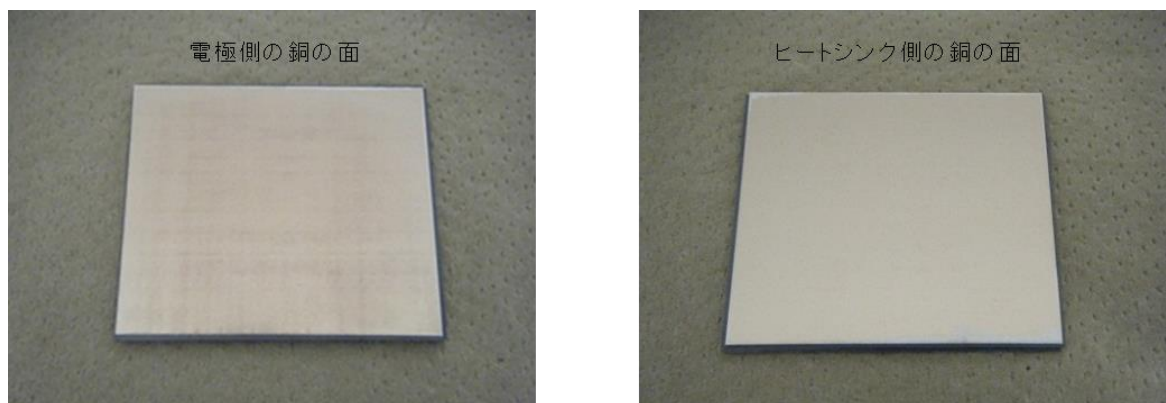


図7 一括接合サンプル(サイズ= $\square$ 2インチ程度)

一括接合サンプルの各基板間の接合状態は、超音波探傷測定による超音波探傷画像にて評価し、評価結果を基に適宜接合条件の最適化をおこなった。

図8は、開発を目標 120×100mm サイズでの一括接合サンプルの外観画像で、このサイズでも、外観上の接合不具合は無く目標を達成することができた。

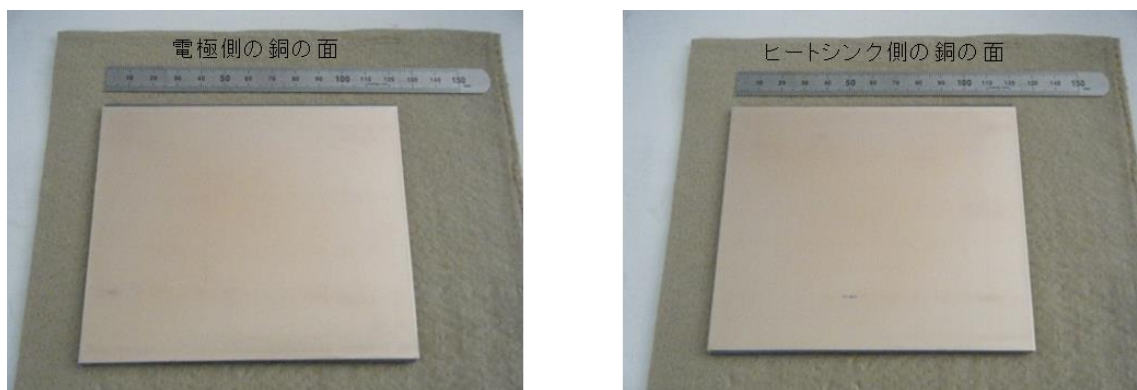


図8 一括接合サンプル(サイズ=120×100)

(2)－2－2. 一括接合サンプルの信頼性評価

一括接合サンプルの信頼性評価として、温度サイクル試験を実施した。試験の評価は、温度サイクル試験前後でサンプルの各接合界面を超音波探傷画像にて観察して評価

した。実施した温度サイクル試験条件は、－40～150℃、1000 サイクルである。この温度サイクル条件は、本プロジェクトの目標条件である。

試験片は、一括接合サンプルから□20mm 程度に切り出したものを用いた。

表4は、信頼性評価結果で、No.1～3 が一括接合サンプルで、No.4～5 は高熱伝導グラファイトを用いない従来構成の接合サンプルで比較サンプルとした。

信頼性評価結果はいずれのサンプルも、1000 サイクル後の各接合界面の超音波探傷画像に変化はなく、良好な結果であった。

試験片 No.	基板厚(mm)				試験片 サイズ	温度サイクル	
	電極側 銅板	異方性グラファイト	窒化ケイ素 基板	ヒートシンク 側銅板		500	1000
1	0.15	1×コンポジット	0.34	0.5	□20mm	○	○
2	0.15	1×コンポジット	0.34	0.4	□24mm	○	○
3	0.3	0.5×コンポジット	0.34	0.6	□20mm	○	○
4	0.5	なし	0.34	0.5	□20mm	○	○
5	0.3	なし	0.34	0.3	□20mm	○	○

表4 信頼性評価結果

(2)－3 絶縁溝加工およびセラミック分割

(2)－3－1 絶縁溝加工

本テーマの納入形態として、顧客要求に応じた回路パターン加工があり、図9のような絶縁基板上的ろう材・グラファイト・銅板を除去が必要で、かつ、溝加工後の窒化ケイ素基板上に導電性のグラファイトやろう材が残らないことが求められる。

これに対応する加工方法として、研削加工及び切削加工及び放電加工にて加工し、評価した。

図10は研削加工により溝加工したもので、基板のソリにより研削残りがでる。

図11は、絶縁溝を仮定した形状で、この形状に向けて切削と放電加工を実施したのが、図12，13。

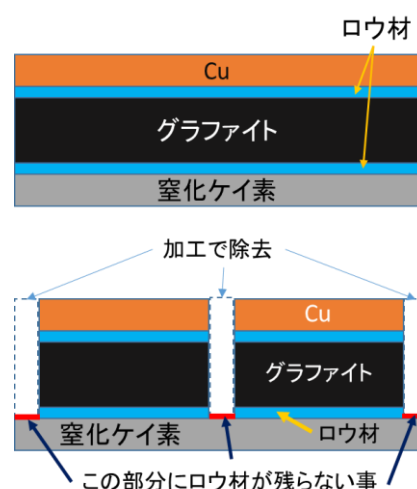


図9 絶縁溝加工前後



図10 研削加工品

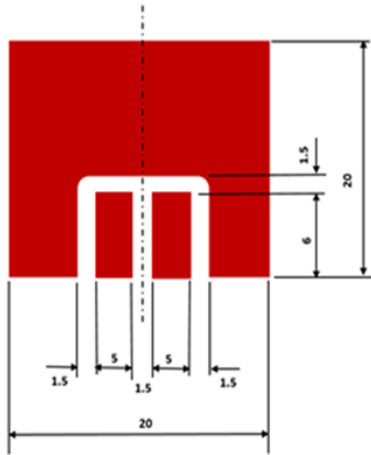


図11 仮定形状

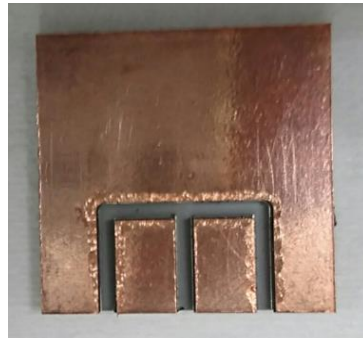


図12 切削加工品

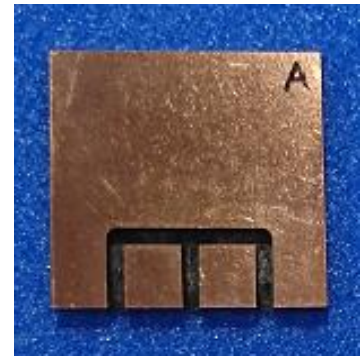


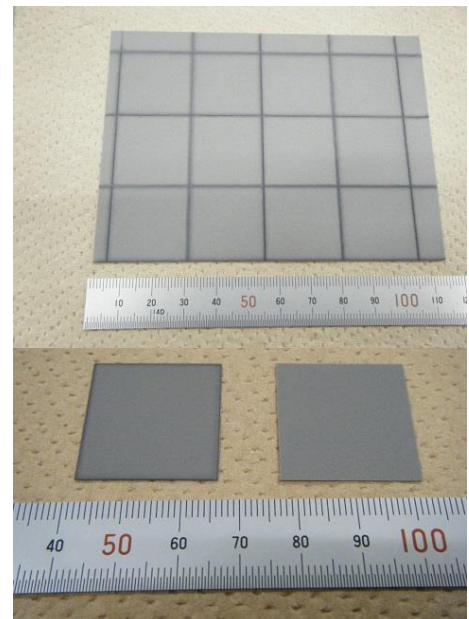
図13 放電加工品

切削および放電加工品とも加工は出来るものの、絶縁基板とのコーナーに丸みが残る状態にあり、荒加工と仕上げ加工の工程分割と加工条件の詰めが必要な状態にある。

(2) -3-2 セラミック分割

本テーマでは、100mm 角程度の基板加工後に単体製品への分割加工を想定しているので、導入したレーザ加工機を使って厚さ 0.325mm の窒化ケイ素基板にレーザ出力 100W で約 0.1mm 深さの少し丸みがあるV溝を形成した。図14が溝加工した画像と個辺に分割した画像で、折損により容易に個辺へ分割できることを確認した。

図14 ブレーク前の窒化ケイ素基板と
ブレーク後の個片基板



(3) 熱伝導解析および応力解析

(3) -1 はじめに

回路付き放熱基板は異方性グラファイト製ヒートスプレッダ（以下、GHという）、セラミック基板（以下、SiN という）、銅板（銅配線）および銅製ヒートシンク等で構成されている。ここでは有限要素法によるシミュレーションにより、放熱特性が高くロウ付け時または稼働時の熱変形が小さい構成部材の厚さおよび配置を検討する。

(3)－2 放熱特性が高い放熱基板構成の探索（伝熱解析）

放熱特性の解析モデルは、パワー半導体（以下、Si という）の直下の銅板（銅配線）とヒートシンクの間、SiN1 枚と GH2 枚を厚さと配置を任意に変えた①から③までの3種類の解析を行った。また参考として、GH がない④と①

素材名	熱伝導率(W/m/K)
銅	404
SiN	100
ロウ材	394
GH	結晶方向:1700 積層方向:7

表5 解析で用いた材料特性

の GH を銅に置き換えた⑤の解析も行った。表5は本解析で用いた材料特性である。

解析モデルは全体の 1/4 とし、Si の表面に 100W（全モデルでは 400W に相当）の熱の流入条件を、熱を逃がすヒートシンクの端面は 60℃一定の温度条件を与えた。

図15は解析で得られた Si の最高温度であり、最高温度が低いほど放熱特性が高いと言える。図15から、GH の存在により放熱特性が向上すること、また①の配置が最も放熱特性が高いことがわかる。

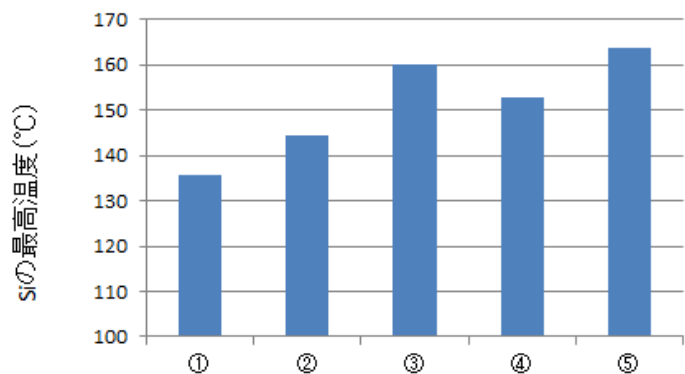


図15 部材の厚さと配置を変えたときの Si の最高温度

図16は、①を基準として GH、銅板およびヒートシンクの厚さを2倍および半分にしたときの解析（⑥～⑪）で得られた Si の最高温度である。16図から各部材の厚さの影響が明らかになったが、GH については一定以上厚みを変えても放熱特性が変わらな

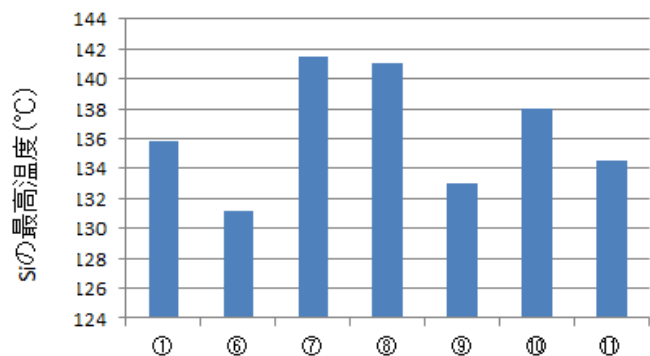


図16 部材の厚さと配置を変えたときの Si の最高温度

なる結果が得られており、コストとの兼ね合いから最適な厚さをシミュレーションで求める必要がある。

(3)－3 熱変形が少ない放熱基板構成の探索（熱応力解析）

本解析の目的は部材の厚さや配置を変えることでロウ付け後や稼働時の熱変形が抑えられる構成を見つけ出すことである。表6は本解析で用いた材料特性である。GH の値については九州大学のユン・宮脇研究室のデータを用いた。※

※ http://carbon.cm.kyushu-u.ac.jp/handout/emef/2011_9.pdf

解析は伝熱解析と同様に
1/4 モデルで行い、初めに
ロウ材の融点である 770℃
に加熱し接合された後、室
温の 20℃まで温度が下

素材名	ヤング率 (GPa)	ポアソン比(-)	線膨張係数 × 10 ⁻⁶ (1/°C)
銅	129.8	0.3	16.8
SiN	308	0.29	2.7
異方性グラファイト (x,z 方向が結晶方向)	x,z: 1020 y: 36	ν _{xy} : 0.16 ν _{yz} : 0.34 ν _{zx} : 0.012	x,z: 0.3 y: 28

がったときの熱変形の状態を

表6 解析で用いた材料特性

シミュレーションした。さらに Si が稼働したときの温度分布を放熱特性の境界条件から伝熱解析で求め、室温時の応力分布を初期値としてその温度分布での熱変形解析を行った。なお熱の流入条件については、本モデルでは Si はモデル化していないので、Si と銅板の接合面から 100W の熱が流入することとした。またロウ材については、非常に薄いことや材料特性が不明であることから本解析では省略した。

熱変形については基礎的な解析より、以下の知見が得られている。

- 銅や GH の厚さを変えることによる変形の傾向
- 銅, GH, SiN の配置および厚さを最適化することで熱変形が大きく抑えられる

これらの知見を踏まえて、本解析では部材の配置や厚さを変えた 15 種類について解析を行った。なお反り量は放熱基板の厚み方向の変形量変形の最大値（プラス）と最小値（マイナス）の差として定義している。

図 17 は 770℃から室温に下げたときの反り量と稼働時の温度分布の時の反り量を、図 18 は稼働時の放熱基板の最高温度を示している。

この結果から、S2-1 から S2-3 の形状で反り量を大きく低減できることがわかった。



図 17 各放熱基板の反り量 (青: 室温時, 赤: 稼働時)

その一方で部材の厚さについて放熱特性と反り量が相反の関係にあることから、両者の仕様を満足する最適な放熱基板の設計のノウハウを獲得する必要がある。

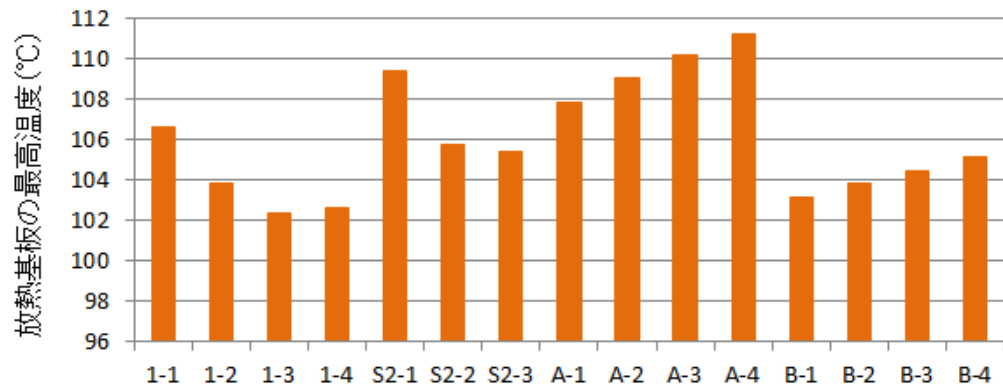


図 18 各放熱基板の稼働時の Si の最高温度

(4) 放熱特性の評価

回路付き放熱基板の性能を示す指数として、放熱特性（熱抵抗）の評価は非常に重要で、自動車会社・自動車部品会社の研究部門および自動車の熱工学を扱う大学との協議により、図 19 のような構成で数値化すれば良いことが判り、評価治具を準備した。

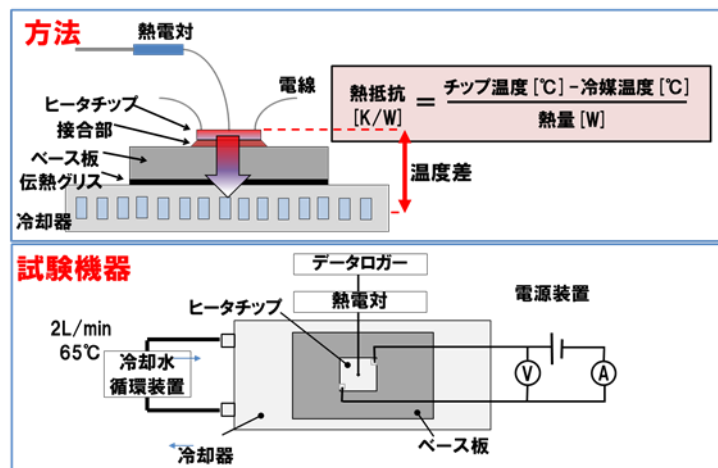


図 19 放熱特性評価の構成

この評価治具を用いて銅/異方性グラファイト（Gr）の接合基板は、図 20 のように銅（Cu）、銅/モリブデン（CuMo）合金と比較し、10～20%熱抵抗が下がるという結果が得られた。

ただし、放熱特性評価は、周辺部材の影響が大きく、例えば、放熱基板にヒータチップを搭載しても、ヒータチップの接合面にボイドがある場合正しい評価にはならない。これらの周

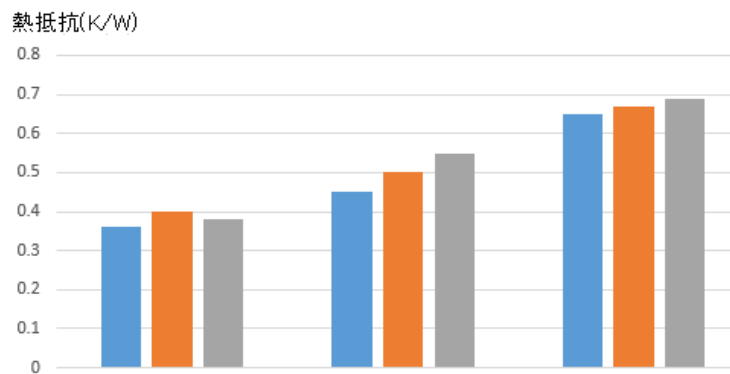


図20 熱抵抗測定結果

辺技術の充実も含めて進め、セラミックスを含む一括接合品での評価において、標準サンプルを繰り返し測定しても、表7のように熱抵抗値が5%以内に収まる測定系を確立できた。

表7 標準サンプルの繰り返し熱抵抗測定

	熱抵抗値 (°C/W)		
	1回目	2回目	3回目
標準サンプルA	3.12	3.27	3.21
標準サンプルB	4.76	4.89	4.79

最終章 全体総括

(1) 研究開発成果

半導体チップが搭載される銅板と高熱伝導性を誇る異方性グラファイトと高熱伝導絶縁基板（本開発では窒化ケイ素を使用）の組合せで、高効率なヒートスプレッドを実現しようとした本テーマの目的・目標はほぼ計画通りに実現できた。

性能では、厚い銅板を使用したものに対して、異方性グラファイトを使用したものは15℃～60℃半導体チップの温度を下げる効果が望めることがシミュレーションで明らかにでき、実際の熱伝導評価でも裏付けができた。

また、これを確実にする技術として高熱伝導グラファイトの切断や各部材の活性ろう材による接合があり、方向性をしめすシミュレーション技術も大きく関係した。

さらに、事業化に不可欠な周辺技術確立として、基板のパターン製作に欠かせない絶縁溝加工や個辺分割時に必要なレーザ加工によるブレイクライン加工や、本内容では説明を省略したセラミック基板のソリ低減加工の他に、評価技術として非接触形状計測や超音波探傷による接合評価など盛りだくさんの成果を得ることができた。

（２）研究開発後の課題

構成と板厚の組合せで何とか目標を実現したものの最後まで苦しんだのが「ソリ」であった。機械的にも熱伝導的にも確実な固定方法として「ろう接」を選択するものの、線膨張係数が異なる材料の組合せであり、高熱伝導グラファイトに至っては線膨張係数も異方性を示すなど、ソリの低減と熱伝導性とコストのバランスは継続した課題である。勿論、これの根本的解決方法は接合温度を下げる確実な接合であり、継続して追求する。

（３）事業展開

自動車および電気業界のユーザーと話す機会が増えて、銅板を使ったヒートスプレッドに続くヒートスプレッドの必要性が高まっていることを感じる事ができ、本研究内容が近い将来事業としてスタートすると確信している。その中にあって、手頃な価格で市場参入する上ではある程度標準的な形状やものづくりが不可欠で、現時点ではまだ定まっていない箇所が多いのが実態。

補完研究や顧客との話し込みなど今しばらく足元を固める期間を経て、事業化投資もままならないので顧客を絞っての事業化スタートが望ましいと感じている。