

平成26年度採択

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

「次世代型放熱部品の開発」

研究開発成果等報告書

平成29年5月

担当局 中国経済産業局

補助事業者 公益財団法人ひろしま産業振興機構

目 次

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	P 1
1-1-【1. LED用放熱部品の開発】	P 2
1-1-【1-1. 熱抵抗低減】	P 2
1-1-【1-2. 小型化】	P 3
1-1-【1-3. 低コスト化】	P 4
1-1-【2. IGBT用などの次世代放熱基板の改善】	P 4
1-1-【2-1. 熱伝導率向上】	P 5
1-1-【2-2. 熱劣化対応】	P 6
1-1-【2-3. 工程変更】	P 7
1-1-【3. グラフェンの製造技術の開発】	P 8
1-1-【3-1. グラフェンの大量製造技術の開発】	P 8
1-1-【3-2. 分離法の確立】	P 9
1-1-【3-3. 透明導電膜の検討】	P 9
1-2 研究体制	P 11
1-3 成果概要	P 12
1-3-【1. LED用放熱部品の開発】	P 12
1-3-【1-1. 熱抵抗低減】	P 12
1-3-【1-2. 小型化】	P 12
1-3-【1-3. 低コスト化】	P 12
1-3-【2. IGBT用などの次世代放熱基板の開発】	P 12
1-3-【2-1. 熱伝導率の向上】	P 12
1-3-【2-2. 熱劣化対応】	P 12
1-3-【2-3. 工程変更】	P 12
1-3-【3. グラフェンの製造技術の開発】	P 13
1-3-【3-1. グラフェンの大量製造技術の開発】	P 13
1-3-【3-2. 分離法の確立】	P 13
1-3-【3-3. 透明導電膜の検討】	P 13
1-4 当該研究開発の連絡窓口	P 13

第2章 本論

2-【1. LED用放熱部品の開発】	P14
2-【1-1. 熱抵抗低減】	P14
2-【1-2. 小型化】	P16
2-【1-3. 低コスト化】	P29
2-【2. IGBT用などの次世代放熱基板の改善】	P29
2-【2-1. 熱伝導率向上】	P29
2-【2-2. 熱劣化対応】	P44
2-【2-3. 工程変更】	P51
2-【3. グラフェンの製造技術の開発】	P53
2-【3-1. グラフェンの大量製造技術の開発】	P53
2-【3-2. 分離法の確立】	P59
2-【3-3. 透明導電膜の検討】	P59

最終章 全体総括

3-1 研究成果の総括	
3-1-【1. LED用放熱部品の開発】	P60
3-1-【2. IGBT用などの次世代放熱基板の改善】	P60
3-1-【3. グラフェンの製造技術の開発】	P61
3-2 事業化について	
3-2-【1. LED用放熱部品の開発】	P61
3-2-【2. IGBT用などの次世代放熱基板の改善】	P62
3-2-【3. グラフェンの製造技術の開発】	P63

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

中小ものづくり高度化法及び中小ものづくり高度化指針の該当項目が次の通り。

(ハ) 複合・新機能材料に係る技術に関する事項

(3) 川下分野横断的な共通の事項

- ①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ
ア. 高機能化

自動車業界では、エレクトロニクス部品の実装密度やパワー・デバイスの増加・高出力化により、放熱部品への負荷が増大している（図1）。そのため、放熱部品の高性能化が大きな課題となっている。これが本研究開発の背景である。

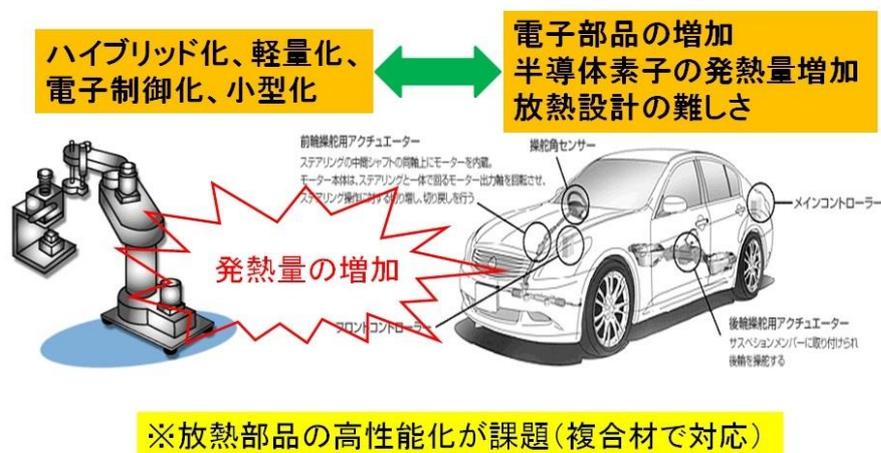


図1 開発の背景

一方、(株)アカネは、独自の「多軸通電焼結技術」(図2)を保有し、今までCu-天然黒鉛系の高熱伝導複合材料の開発を行ってきた実績がある。また、その応用製品の販売に努力してきたが、まだ商品化までには至っていない。そこで、これまでの顧客との接触で蓄積してきたニーズや技術知見を基に、次世代型と呼ぶべき高性能な放熱部品を開発し、ブレークスルーする。対象とする放熱部品は「LED用」と「IGBT用」の2種。超高熱伝導複合材には、天然黒鉛、あるいは天然黒鉛を改質し使用するとともに、金属材料と黒鉛との界面反応の制御技術なども確立する。天然黒鉛を改質するためのプロセスとして「グラフェンの製造技術開発」も本開発に含めている。

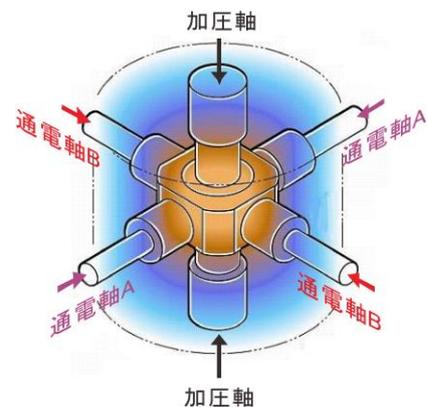


図2. 多軸通電焼結装置

(株)アカネの多軸通電焼結関係の特許
US特許：U6,610,246B 1
韓国特許：特許 513296 号
日本：特許第 4226674 号

主たる研究目的を達成するために以下の3つの大サブテーマを掲げた。それぞれの図

中に開発の目的、大まかな内容と開発の最終目標とを示す。詳細な研究目標も以下に述べる。

1-1-【1. LED用放熱部品の開発】

先ず、大サブテーマの第1は、自動車用ヘッドライトの「LED用放熱部品の開発」である。開発内容を図3に示すが、これは自動車部品メーカーのA社のニーズを反映して目標としている。

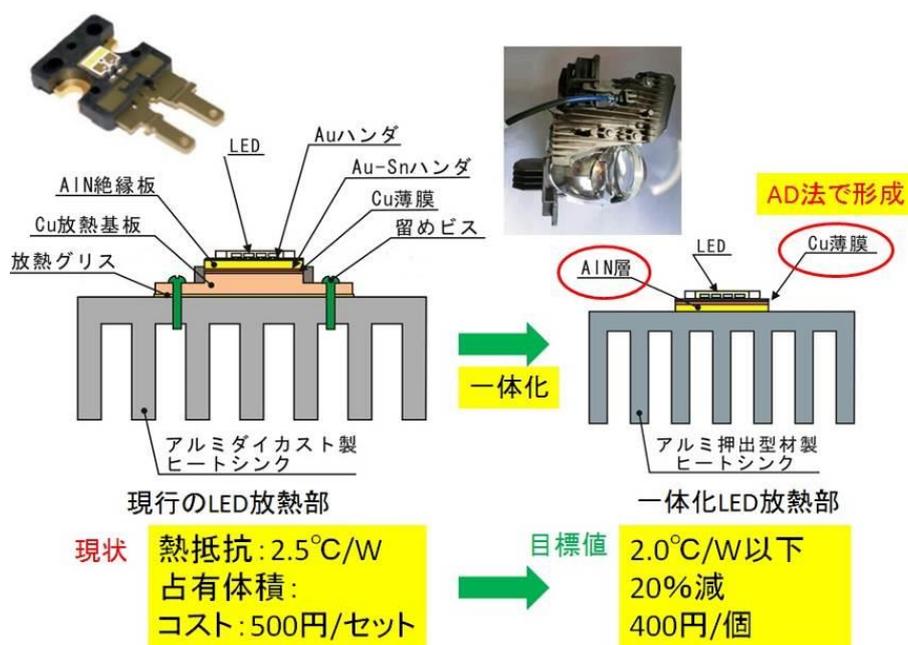


図3 LED用の放熱部品の開発の目的と最終目標

これらの開発目標を達成するために、三つの小サブテーマを設けている。

1-1-【1-1. 熱抵抗低減】

図3左図に示すように、LED素子の熱を逃がすための従来のやり方は、LED光源モジュールをヒートシンク上にビス留めし、放熱グリスを介してヒートシンク～空気中へと伝えていた（仮に分離型と呼ぶ）。それに対し本提案では、先ずAD（エアロゾルデポジション）法を確立し、ヒートシンク面にAlNとCuの薄膜コーティングができるようにする。こうしてできた薄膜を利用し、図3の右図に示すように、その上にダイレクトにLED素子をハンダ付けし、LED素子～ヒートシンク～周辺の空気間の熱抵抗を大幅に下げる（仮に一体型と呼ぶ）。

—開発目標—

- 熱抵抗低減：一体型として 熱抵抗：2.0°C/W以下

我々が得たA社の情報では、ある車で現在のヒートシンクの熱抵抗：2.5°C/W程度で、ヘッドランプのロービーム（20W）はLED化が可能とされる。ただしハイビーム（24W）への適用にはこの目標値が必要。

—開発手法—

(株)アカネは、図4に示す「エアロゾルデポジション法 (AD法)」を用いて AlN 薄膜と Cu 薄膜の作成に応用する。できあがった Cu 薄膜の上に LED 素子を載せ、さらにワイヤーボンディングによる配線もを行い一体型の LED 素子付きヒートシンクとする。ボンディングなどの関しては、広島総合技術研究所の支援を仰ぐ。

AD 装置は、アカネ内に自社で製作・組立てを行う。恒温・恒湿室の設置も社内で行う。

また、装置を稼働させ、Al 押出型材表面に直接に AlN 絶縁膜を形成する。さらには AlN 膜の上に Cu 膜を形成し、最終的には LED 素子を載置し、目標とする一体型 LED ヘッドライト構造での熱抵抗を測定する。

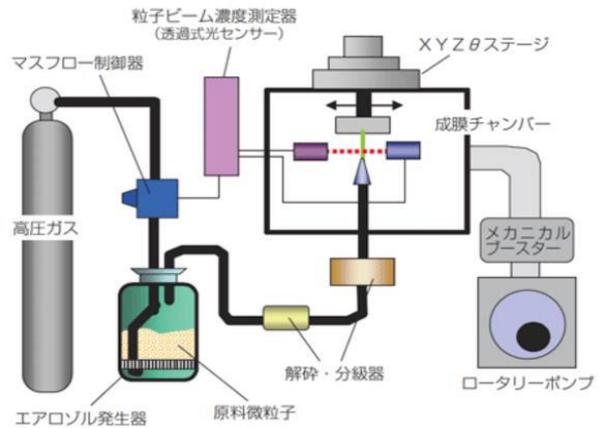


図4 エアロゾルデポジション法

本項目の実施結果は、エアロゾルデポジション法でアルミヒートシンク面上に AlN 絶縁膜+Cu 膜が形成できることがわかった。またこうした被膜を介して、LED素子のハンダ付けが可能であることも実証できた。その場合の熱抵抗は $2.0^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 以下となることも確認した。

1-1-【1-2. 小型化】

放熱フィン形状の最適化を図り、小型化を図る。

—開発目標—

- ・ヒートシンクのサイズ：占有空間比で 20%以上低減

—開発手法—

図5に示すアルミ・ヒートシンクを用いて、次頁の図6、図7に示す LED 素子装着アルミ製ヒートシンクを試作し、熱抵抗を測る。熱抵抗が $2.0^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 以下となれば、押出型材製ヒートシンクの長さを短くし、どこまでフィン面積が減らせるかを観る。



100mm×100mm×50mm高さ
(フィン数 9 枚×フィン高さ 40mm)

図5 アルミ・ヒートシンクとそのサイズ

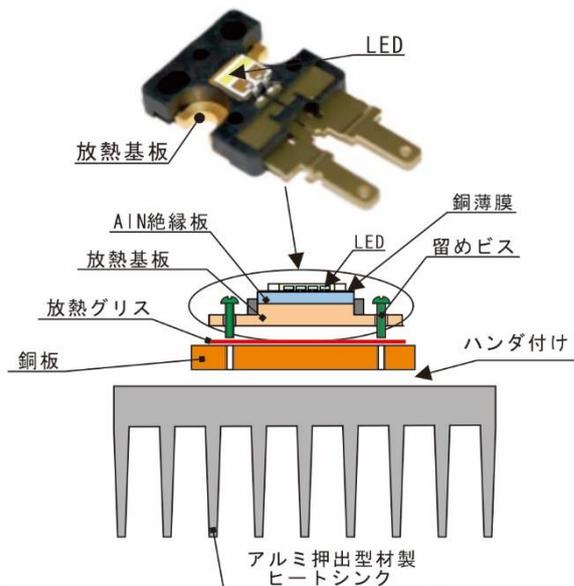


図6 A社量産品類似タイプ（分離型）

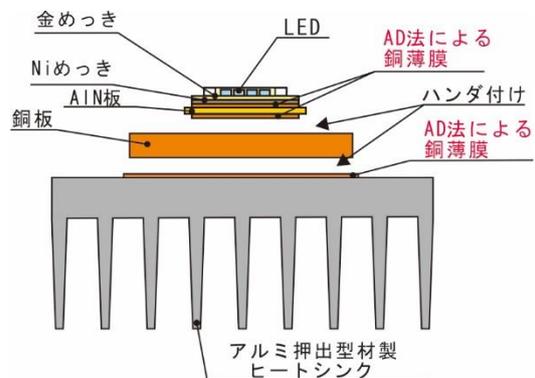


図7 一体型ヒートシンク

最終的にヒートシンクが占有する空間が20%以上減らせるかどうかを確認する。

本項目の開発実施結果は、図7のタイプで、フィン面積を50%程度にしても、量産品仕様に近い熱抵抗となり、一体型とすることでLED用ヒートシンクの小型化が十分に可能であることがわかった。

1-1-1 【1-3. 低コスト化】

上記の活動で、部品点数を大幅に減らすとともに、ヒートシンクを小さくし、低コスト化を実現する。

—開発目標—

- 低コスト化：一体型のコスト：400円/1個以下

現行は、放熱板とヒートシンクとで500円/1セットと推測しており、20%削減を行う。

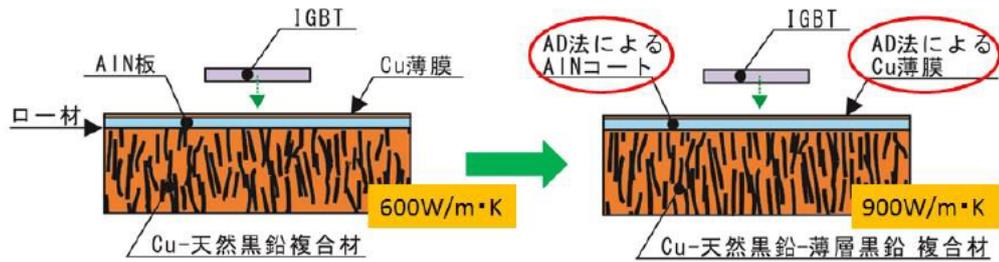
—開発手法—

コスト見積もりを行い、目標を達成しているかどうか判断する。

本項目の実施結果は、大幅なコストアップとなり。目標達成ができなかった。やはり、今後もコスト削減への努力を続ける。

1-1-1 【2. IGBT用などの次世代放熱基板の開発】

大サブテーマの第2は、自動車用の「IGBT用などの次世代放熱基板の開発」である（次頁 図8）。



現状

AlN接合時の割れ: 焼結時に接合
熱伝導率(複合材部): 600W/m·K
熱劣化: 現状は20%

目標値

AD法による薄層化
900W/m·K
10%以内

図8 IGBT用などの次世代放熱基板の開発の目的と最終目標

本件に関しては、自動車部品メーカーB社からの依頼が発端となったもので、800W/m·Kの基板が要求されている。この値は熱サイクル試験後の劣化（B社により指摘された現象で、複合材に起因するもの）も折り込んだ値で、熱サイクル試験前の初期の熱伝導率は900W/m·K以上が必要と考えている。この要求に応えるべく本開発を行なう。

図8中の右図赤丸の「AD法によるAlNコート」、「AD法によるCu薄膜の作製」については、1-1-【1-1】項と同じ内容であるので、ここではAD法の説明を省略する。

それ以外の目標を達成するために、以下の二つの小サブテーマを実施する。

1-1-【2-1. 熱伝導率向上】

複合材放熱基板の熱伝導率を向上させること。そのため、従来から高熱伝導材として検討してきた「Cu-天然黒鉛」複合材料（図9左）をベースに材料特性の改善を進める。

まず、天然黒鉛の有する欠陥を除くため、天然黒鉛の弱いところを剥離させ、特性の良いもののみを集めて利用することとした（以下、これを「薄層化天然黒鉛」と呼ぶ）。この天然黒鉛の剥離のために、1-1-【3】項を設けて、その中でグラフェンの製造技術を応用し、薄層化天然黒鉛（図10）を作ることとした。

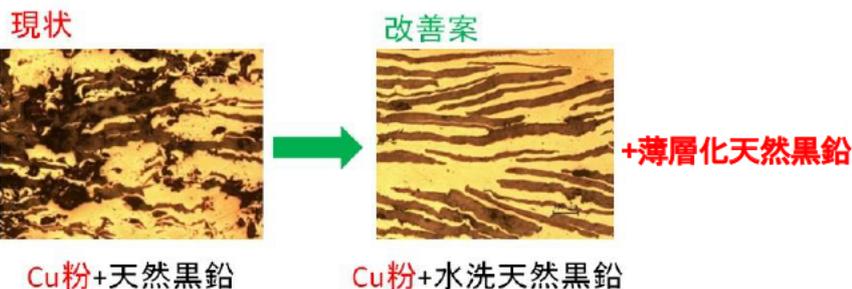


図9 Cu-天然黒鉛複合材の改善

最終的な高熱伝導複合材の姿としては、「Cu-天然黒鉛-薄層化天然黒鉛」を予定している（図9右）。

—開発目標—

- 複合材の熱伝導率 $900\text{W/m}\cdot\text{K}$ 以上

—開発手法—

複合材密度が熱伝導率に大きく影響する。そのため密度向上を目指して、鱗片状Cu粉、天然黒鉛、薄層天然黒鉛などのサなど、各種の組み合わせにより、最終目標焼結は、(株)アカネの独自技術である多軸焼結工程を示す。

また、3期目からの参加であったが、佐賀焼結型内の電流分布の解析方法、それに基づく型内温度分布の解析方法などを活用し、図11中の「⑥加圧/通電/焼結」段階での、焼結型内の温度分布を均一化する手法を見出す予定。

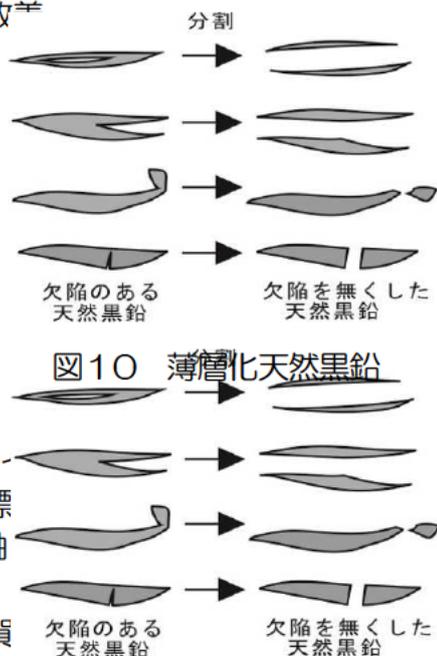


図10 薄層化天然黒鉛

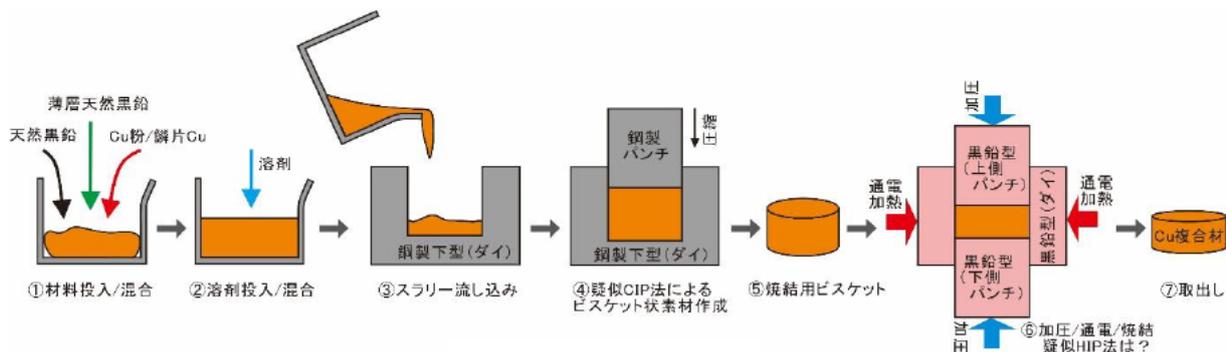


図11 焼結工程

本項目の開発を実施した結果、目標の $900\text{W/m}\cdot\text{K}$ を越えることはできなかったが、複合材の熱伝導率 $840\text{W/m}\cdot\text{K}$ までは到達した。

1-1-【2-2. 熱劣化対応】

熱劣化は、熱サイクル試験後の複合材の熱伝導率低下を言う。 $-40^\circ\text{C}\leftrightarrow 250^\circ\text{C}$ での200サイクルまでのB社での試験結果の例を図12に示すが、これで見られるように、当初 $600\text{W/m}\cdot\text{K}$ であったものが、480前後と約20%熱伝導率の低下が出ている。

こうした現象に対して、天然黒鉛-Cu複合材のCuとCとの界面挙動の解析や界面に発生する反応などを考慮した冶金学的な面から、熱劣化を減らす対応を取る。このために、各種添加元素やその濃度の影響、効

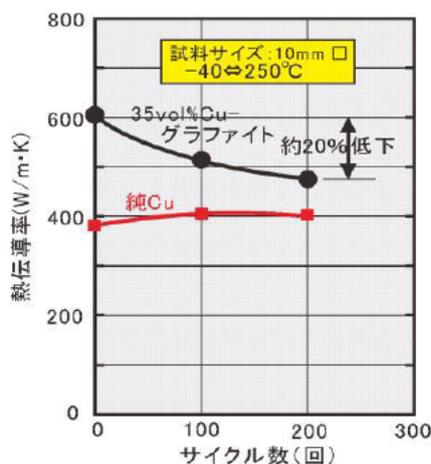


図12 熱サイクル試験結果

果など広島大学の材料関係の専門家を中心に研究を実施する。

また、複合材のCu-C界面挙動の解析には産業技術総合研究所の協力を得て、熱劣化に影響する要因を探る。

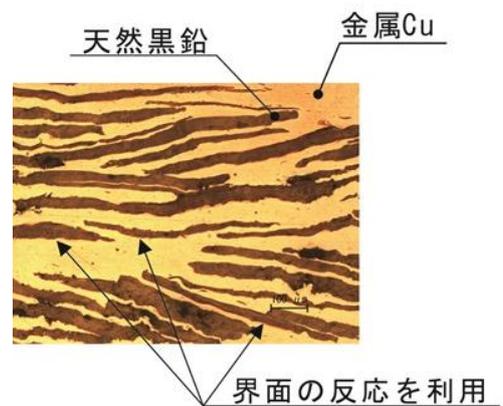
—開発目標—

- 熱サイクル試験 1000 サイクル後で熱劣化が 10%以下

—開発手法—

a. 熱サイクル試験

先ずは、熱衝撃サイクル試験機を製作し、1000サイクルまでの試験ができるようにする。その途中の200サイクルごとに熱伝導率を計測する。20サイクル/1日程度を想定すると50日以上
の長期実験となる。熱伝導率は、レーザーフラッシュ法により計測する。



b. 界面の濡れ性向上

広島大学にて、Cuへ極微量の添加成分を加えることで、Cu-黒鉛界面の濡れ性と接合強度を向上する研究(図13)を実施する。

図13 Cu-天然黒鉛複合材の界面の濡れ性向上

こうして、何とか熱疲労による劣化を低減できる対応を取る。

本開発の実施結果は、熱サイクル試験の加熱や冷却時に、Cu-C界面で割れが発生するのではなく、Cu-C界面近くのCの内部で割れが発生していることがわかった。

従って、熱劣化対策はCuを減らすのがベストであることがわかった。こうした対応を取った結果、熱劣化はほぼ5%以下に抑えることができた。

1-1-【2-3. 工程変更】

「Cu-天然黒鉛複合材」+ろう材とAlN板、Cu薄板+ろう材の5者一体通電焼結では、AlNが割れることがあるため、今回の「Cu-天然黒鉛-薄層天然黒鉛複合材」では、上記のAD法を適用し、複合材の上にAD法でAlN層+Cu層を形成する。

こうすることで最終的に、IGBT用放熱基板の価格低減を実施する。

—開発目標—

- 【2-1】～【2-3. 工程変更】全体で：□30×5mm t サイズでコスト 150円/1個以内

—開発手法—

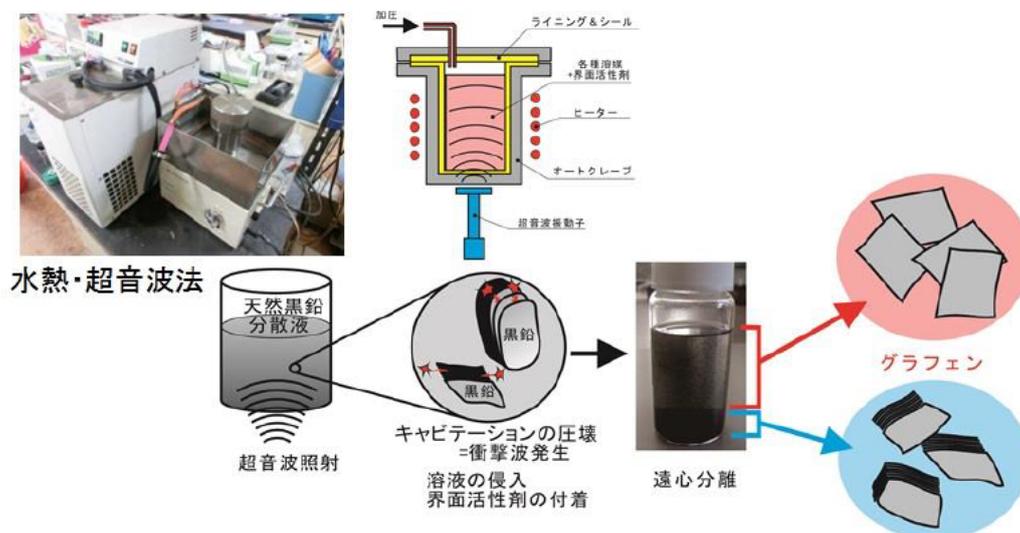
(株)アカネが製作するAD装置を用いて、Cu-天然黒鉛-薄層化天然黒鉛複合材放熱基板上へAlN膜とCu皮膜の成形を行う。

本項目の開発を実施した結果、Cu-C複合材の断面へのAINコート+Cuコートができることは解ったが、まだ改善すべき点があることもわかった。

また、コストも未達成であり、今後も安くできるような放熱構造や製造プロセスを見出す努力を続ける。

1-1-【3. グラフェンの製造技術の開発】

大サブテーマの第3は、グラフェンの製造技術の開発である。ここでは、1-1-【2-1. 熱伝導率の向上】項で述べた「薄層化天然黒鉛」を得るために、図14に示すようなグラフェンの製造プロセスを使う。



**グラフェンの大量製造技術の開発(容器サイズ:200ml→1.5l)
分離法の確立の確立**

副産物の薄層天然黒鉛を複合材に/グラフェンは、透明導電シートに利用
透明導電膜の試作

図14 グラフェンの製造技術の開発

そのために、以下の小サブテーマでの開発を設定している。

1-1-【3-1. グラフェンの大量生産技術の開発】

複合材製造には大量の素材が要る。従って、従来の超音波照射装置の高出力化、容器の大型化を図り、より多くの薄層天然黒鉛が得られるようにする。

兵庫県立大学では、既に図15に示すような「水熱・超音波法」を有しており、これの大型化を図りながら薄層化天然黒鉛やグラフェンの大量製造を目指す。



図15 水熱・超音波装置

—開発目標—

水熱・超音波製造装置の大型化：体積 1.5L 以上。

将来の大量生産に向けた剥離技術・操業条件などの技術データの収集・蓄積を行う。

—開発手法—

加圧用器、大型超音波照射装置などを購入し、大学にて組立て、より大量のグラフェンが製造できそうな装置、技術を作る。また、使用する溶媒なども各種検討する。

本開発では、振動条件の変化、溶媒の変更などを行ったが、グラフェンの生成は思ったほど多くなかった。剥離効率を高める手法として、ガラスビーズを溶媒中に入れて、超音波加振により硝子ビーズ間に働く剪断力を利用するにやり方も検討した。

各種条件でのグラフェン生成に関しては、かなりのデータが取得できた。

また、溶媒中に沈殿した薄層化天然黒鉛（天然黒鉛や天然黒鉛が少し壊されたもの）を集め、複合材に利用した。当初は複合材の熱伝導率が向上にかなり効果があるようなデータが数点得られたが、 n 増し評価を行うと、結局超音波加振の効果は無いという結論になった。

1-1-【3-2. 分離法の確立】

従来通り、グラフェンと残りの天然黒鉛とを遠心力分離する。

—開発目標—

将来の生産に向けた技術データの収集・蓄積を行う。

—開発手法—

分散液中の薄層天然黒鉛と浮遊物やグラフェンとを分離する実験を行う。

効率の高い手法として遠心分離機を使用する。得られた薄層天然黒鉛は複合材料の製造に用いる。

以上の方法を評価した結果、遠心分離と静置とを行うことで、分離は可能。

1-1-【3-3. 透明導電膜の検討】

薄層天然黒鉛を作る過程で、副産物としてのグラフェンが効率よく得られるようであれば、それらのグラフェンは、タッチパネル用の透明導電膜への応用を検討する。この部分に関しては、既に輸入グラフェン等を販売している(株)ニューメタルスエンドケミカルの支援やアドバイスを仰ぐ。

—開発目標—

・応用のスタート台としてグラフェンを透明な樹脂に混合し、透明度と電気伝導度を計測する。

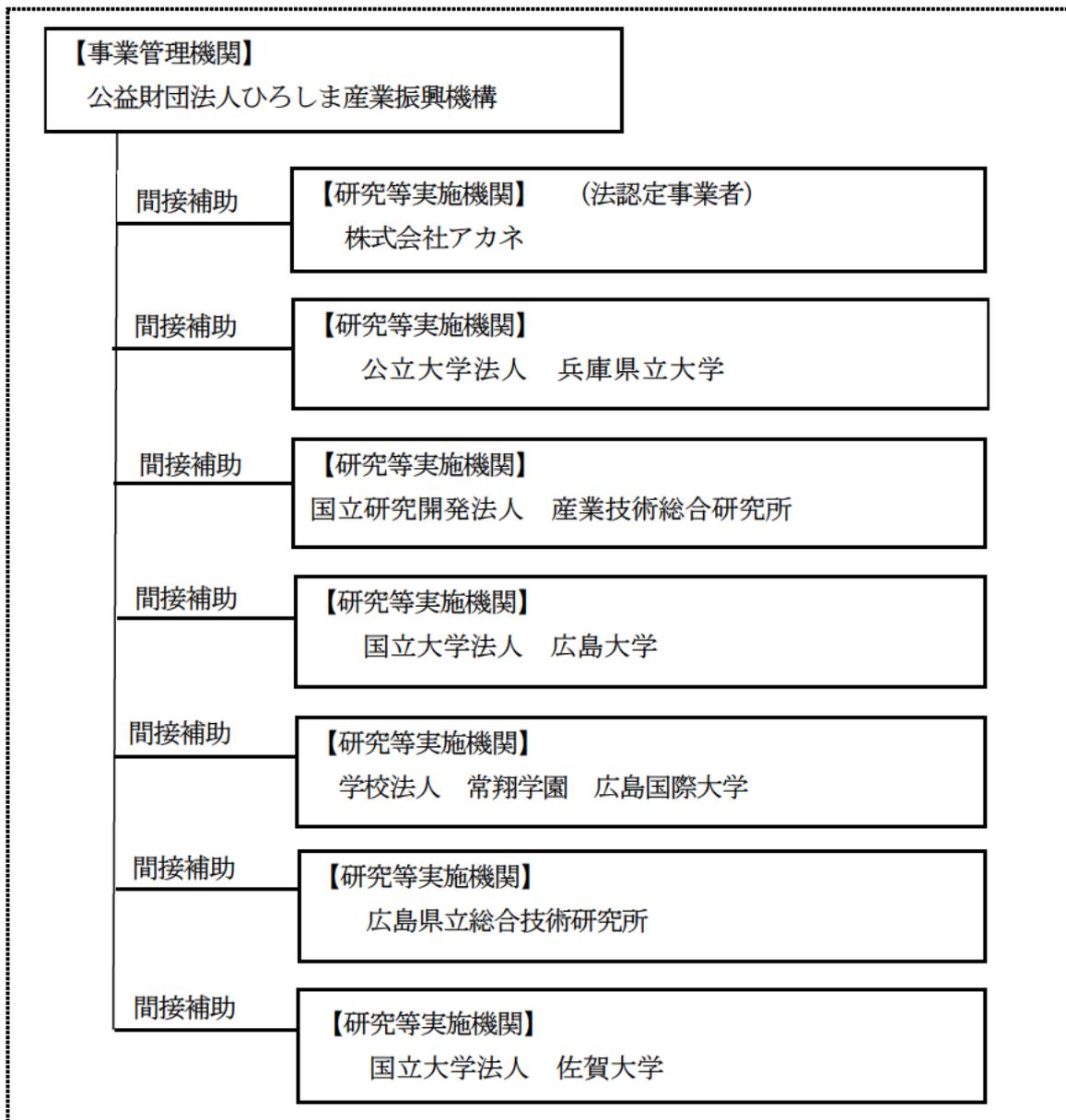
—開発手法—

得られたグラフェンを透明導電膜用フィルム（タッチパネル用）に試作する。フィルム特性は、光透過性、導電率の観点から調べることにしている。

これに関しては、H28年度に兵庫県立大で試作が可能となった。現段階では透過率、シート抵抗とも十分な値ではないが、製膜条件を工夫することによって導電性を有した透明性のフィルムが作製できることが明らかとなった。

以上、述べた内容が、「次世代放熱部品の開発」における研究目的・目標である。また、各項目の最後に、簡単に実際の活動結果についても記述した。

1-2 研究体制



【総括研究代表者】 (P L) 株式会社アカネ 代表取締役 砂本健市	【副総括研究代表者】 (S L) 公立大学法人 兵庫県立大学 大学院工学研究科物質系工学専攻 物質・エネルギー部門 准教授 松尾吉晃
---	--

アドバイザー	
株式会社 ニューメタルスエンドケミカルス コーポレイション	学校法人 工学院大学

1-3 成果概要

1-3-1 【1. LED 用放熱部品の開発】

1-3-1-1 【1-1. 熱抵抗低減】

AD (エアロゾルデポジション) 装置が完成し、Al 製ヒートシンク上へ、直接 AlN コーティングと Cu コーティングができるようになった。

1-3-1-2 【1-2. 小型化】

AD 法による Cu 成膜層の表面に LED 素子を並べ、点灯試験と熱抵抗計測を実施した。さらにフィン面積を減らしながらの熱抵抗計測も、実施した。最終的に、ヒートシンクの小型化と熱抵抗 2.0 以下の目標を達成した。

1-3-1-3 【1-3. 低コスト化】

AD 法による AlN+Cu のコーティングを行った後でのコスト (=Al ヒートシンク+AlN 層+Cu 層を一体化するコスト) を 400 円/1 個以下とする目標であったが、現状では、ほぼ 1500 円/個とみられ、大幅に目標未達成であった。ただし、より安く作る方法に関しての知見が得られ、将来は 400 円/個を切ることが可能と考えている。

1-3-2 【2. IGBT 用などの次世代放熱基板の改善】

1-3-2-1 【2-1. 熱伝導率の向上】

試作した Cu-C 複合材の熱伝導率の最高のデータは、 $840\text{W/m}\cdot\text{K}$ と目標の 900 に対して、若干未達成であった。ただし、後述の熱劣化の項目では大幅に目標達成 (目標 10%以下⇒結果 5%以下) した。

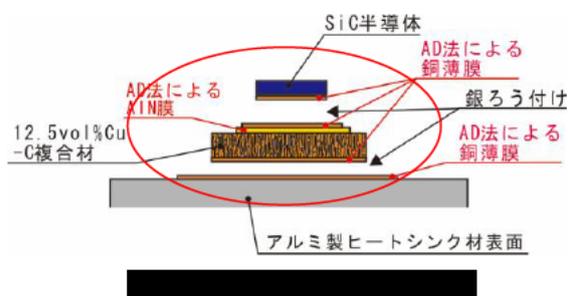
1-3-2-2 【2-2. 熱劣化対応】

熱劣化に関しては、主として複合材中の Cu 量を減らし、C (天然黒鉛) に加わる応力を減らす。水溶性不純物の削減などの対応をとった。そうした結果、熱劣化 10%以下の目標に対して、5%以下を達成した。

1-3-2-3 【2-3. 工程変更】

工程変更を行い図 16 に示す構造の次世代型ヒートシンクの部を試作した。

アルミ製ヒートシンク部分は客先要望により変動するため、図 16 にはヒートシンク部の詳細図を記載していない。試作でも、図中の赤○で囲った部分のみに留めた。また、このヒートシンクは次世代型と呼んでいるように、ヒートシンクの一体化、ヒートシンク材の複合材化だけでなく、将来の IGBT 用半導体として期待されている SiC の載置も試みた。



この工程変更によるコスト目標は、図中の複合材部分+を□30×5mmt のサイズで作製した時、150 円/1 個以内であった。最終的に□30×2mmt で十分であることがわかり、2mm厚みで試算したが、コストが400円強/個と大幅未達であった。未達の大きな要因は焼結型のコストである。やはり今後は客先と相談しながら、コストを低減あるいは吸収できるようにしたい。

1-3-【3. グラフェンの製造技術の開発】

1-3-【3-1. グラフェンの大量製造技術の開発】

平成 26 年度～27 年度にかけて、黒鉛粉末をN-メチル-2-ピロリドン (NMP) 溶媒中で超音波照射(50KHz、150W) することにより、天然黒鉛の剥離 (=一部がグラフェン化) を行ってきた。その際に得られたグラフェン量は 22 時間の超音波照射で 1.4 mg/mL が最大であった。

1-3-【3-2. 分離法の確立】

従来と同じように、遠心分離で、上記のグラフェンを分離した。

1-3-【3-3. 透明導電膜の検討】

今回初めてグラフェンを分散させたフィルムを作製できた。紫外～可視光の透過率は 6%程度であった。また、シートの電気抵抗は 1.2MΩ/sq.であった。従って、現段階では透過率、電気抵抗ともに十分な値ではないが、グラフェンが分散しにくいシクロヘキサンのような溶媒からでも、ポリマー (TOPAS) を添加し、成膜条件を工夫すれば、透明導電膜が作製できることがわかった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(公財) ひろしま産業振興機構 研究開発支援センター

参事 神田 敏和

電話：(082)240-7712 FAX：(082)242-7709

E-mail：t-kanda@hiwave.or.jp

株式会社アカネ

代表取締役 砂本 健市

電話：082-823-3859

E-mail：k.sunamoto@akane-kk.jp

第2章 本論

2-【1. LED用放熱部品の開発】

2-【1-1. 熱抵抗低減】

(1) AD法の確立

図17に示すAD（エアロゾルデポジション）法を、(株)アカネでも確立し、Al製ヒートシンクシンク上へ、直接にAlNコーティングとCuコーティングができるようにと、AD装置を製作した。

ここに到る経過は、先ず、H26年度に装置の仕様決定・設計を行った。

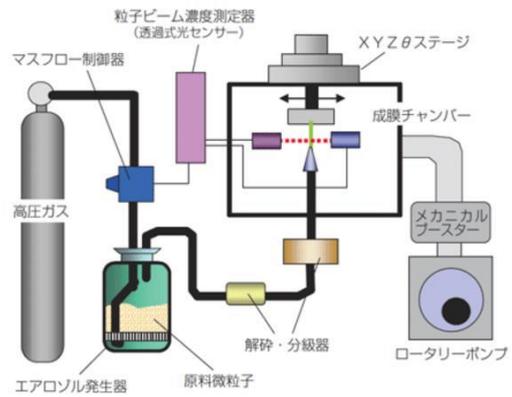


図17 AD装置の概念図

H27年度から、仕様書や図面に基づき、AD装置用部品の購入、外注を実施し（図18）、組立てを開始した。



真空チャンバー（外注）



XYテーブル（購入）



真空用配管部品（購入）



メカニカルブースター（購入）



制御ボックス（外注）



除湿機（購入）

図18 AD装置用購入品・外注加工品など

平成28年度前期に組立て完了。ほぼ同時に恒温・恒湿室も完成し、社内でのコーティング実験を開始した。

ただ、それまでも各種のコーティングの特性やコーティング条件を探るため、産総研でのコーティング実験も併行して実施している。

こうした結果、アルミ押出型材ヒートシンクのヒートスプレッター表面に直接にAlN皮膜とCu皮膜を成形することができるようになった。

(2) AD法の応用

LED素子の発熱をヒートシンクのアルミフィンまで効率よく伝えるためには熱抵抗を下げる必要があります、図19の「現行品類似タイプ（放熱グリス+ビス留め）」の冷却構造に代えて、LED素子とヒートシンクとを一体化する方式（図20）の可能性を探った。

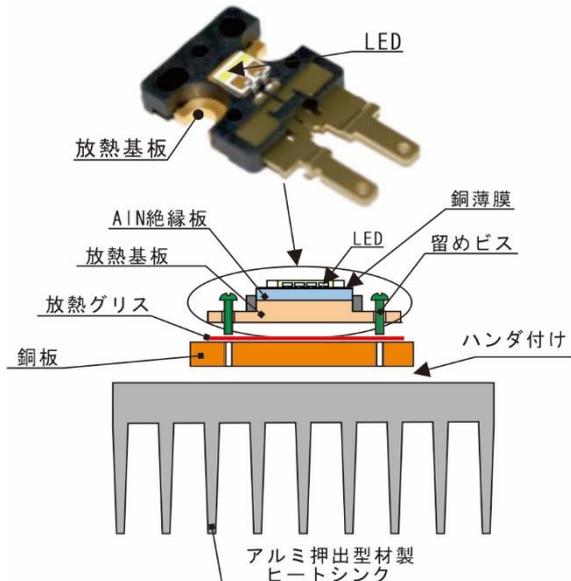


図19 現行品類似タイプ

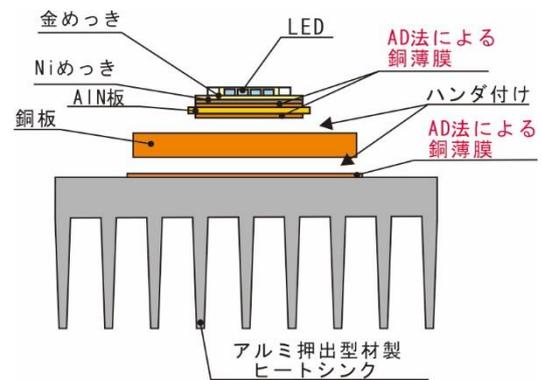


図20 一体型タイプ

その結果、図20に赤字で記したようなAD皮膜を応用した一体型タイプを試作することができた。

以上のように、アルミ・ヒートシンク表面や AlN 板表面への直接コーティングにAD法を応用することで、一体型タイプのLED素子積載ヒートシンクが可能となった。

(3) 熱抵抗の計測

図19「現行品類似」と図20「一体型タイプ」との二つの熱抵抗を計測した。計測の様子は図21～図23に示す。

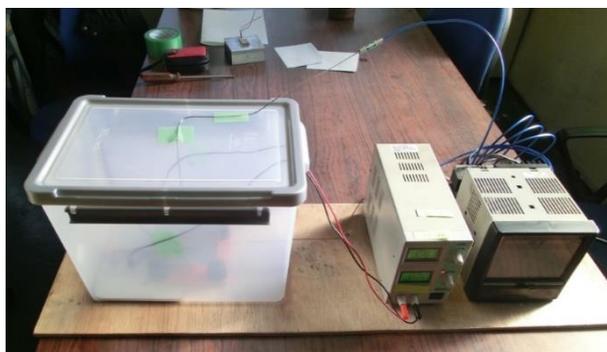


図21 熱抵抗計測装置

ヘッドライトのLED素子は、閉空間内での冷却となる。従って、左側に見えるプラスチックケースの中で計測した。

プラスチック箱の内容積：15L

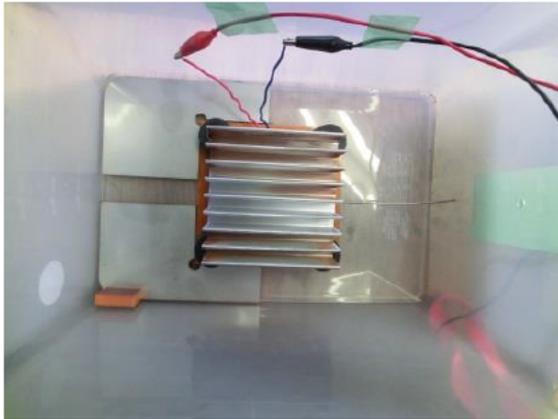


図22 プラスチックケース内に置いたヒートシンク

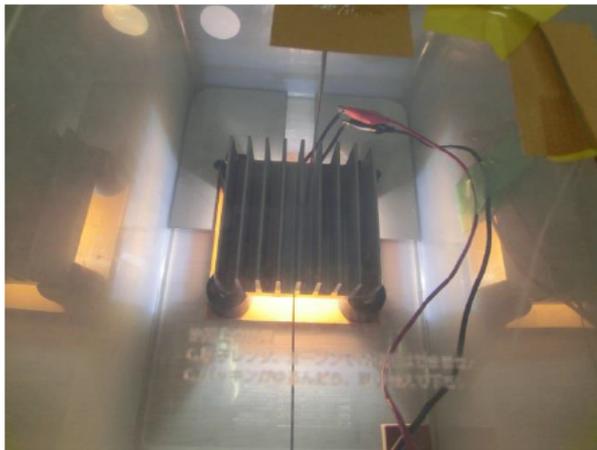
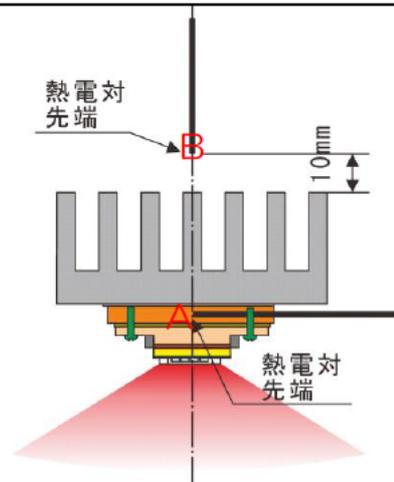


図23 計測時の熱電対位置

押出型材製アルミヒートシンク
 サイズ：100×100×40mm
 天板厚さ：10mm
 フィン数：9枚
 天板+フィンの全放熱面積：783cm²



本図中のA点、B点の温度が安定した時点で、2点の温度差から熱抵抗を求める

図23 計測時の様子

「現行品類似タイプ」と「一体型タイプ」の熱抵抗の計測結果は、「現行品類似」の仕様よりも「一体型タイプ」の放熱構造の方が20%程度熱抵抗が低いことがわかった。

2-【1-2. 小型化】

図20に示した一体型LED用アルミヒートシンクの両端を、図24に示すように削り取りながら、サイズの調整を行い（100 mm×100 mm：100%から⇒100 mm×75 mm：75%⇒100 mm×50 mm：50%まで。フィン面積がほぼこの割合で減少。）、その度に熱抵抗を計測し、放熱性能がどう変わるかを見た。

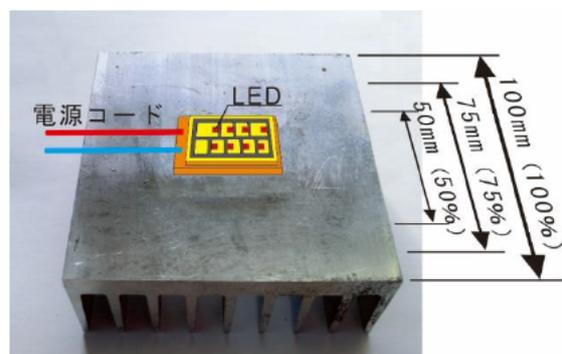


図24 ヒートシンクサイズ

その結果、当然のことながら、熱抵抗は、増加し、50%サイズの時に約3倍となった。ただ、「現行品類似タイプ」と「一体型タイプ」の差は常にあり、約80%~85%程度は一体型の方が低かった。

また、図19の現行品類似タイプの熱抵抗が2.5°C/Wを示すヒートシンクサイズ（推測値）の時に、図20の一体型の熱抵抗はどの程度になるのかを推測した結果、2.0°C/Wをぎりぎり下回る程度となった。従って、目標を達成できた。

参考：放熱システムについて

LEDヘッドライトの冷却システムの参考として、マツダの「デミオ」を例として取り上げ、分解調査、ベンチマークを実施した。

また、ロービームのLED化対応（12W）に対して、ハイビームのLED化対応（24W）は、こういった構造のヒートシンクが必要となるか、さらには小型化（空間体積20%削減）も検討した。検討は広島国際大学を中心に、アカネが手伝って実施した。

A. LEDヘッドライトの購入とヒートシンクの調査

現在量産されているA社のマツダ・デミオ用のLEDヘッドライトを購入し（図25、図26）分解調査を実施した。



図25 デミオ用のヘッドライト外観 図26 購入したヘッドライト単体（右側）

B. 購入ヘッドライトのヒートシンクの仕様・性能

ヘッドライトを分解し、中から取り出したヒートシンク部分（図27）を詳細に調査した。その結果、二つの大小のヒートシンクで構成され、ハイビーム用には「大」が、ロービーム用には「小」が組付けされていること（図28、図29）がわかった。

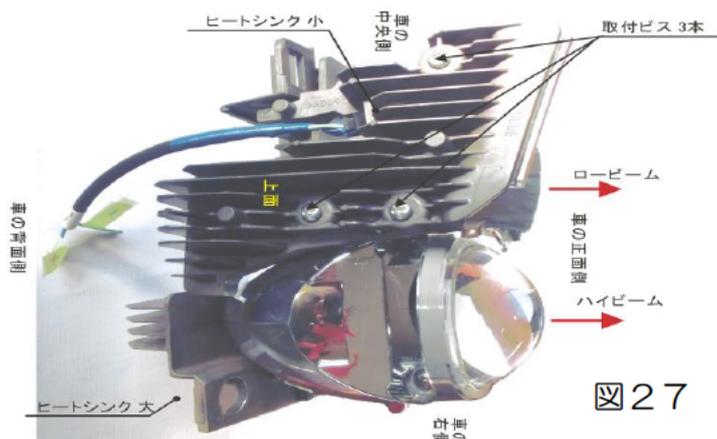


図27 ヒートシンク



図28 ヒートシンク大



図29 ヒートシンク小

これらの大小のヒートシンクの寸法計測の結果（図30）、表 1 に示すような値が得られた。

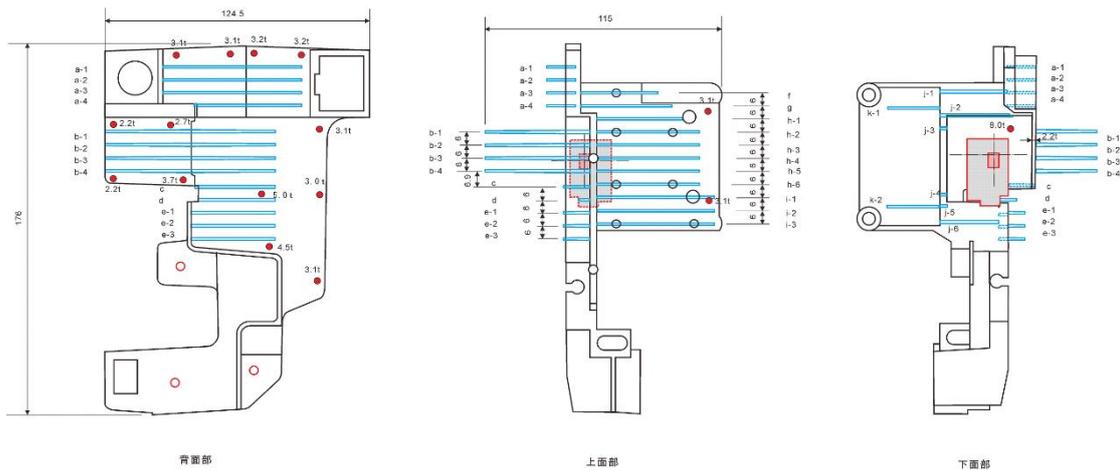


図30 ヒートシンク大の寸法計測例

表1 LEDヘッドライト用のヒートシンクの調査結果

	ヒートシンク大	ヒートシンク小	備考
全表面積 (m ²)	0.101	0.077	ベース面+フィン表面 +フィン先端面
同一表面積の 正方形の一辺長さ (mm)	225	196	裏+表面積を利用
重量 (g)	415.8	210.2	アルミ部分+LED+電 源コード
LEDとベース面中心間との 距離 (mm)	38.9	43.7	平均 41.3mm

C. 放熱性能のシミュレーション

C-1. 筐体内部ヒートシンク方式について

図26の自動車用のヘッドライトを模式的に示すと、図31のように、プラスチック製の筐体に囲まれた内部に、LEDやヒートシンクが配置されている。従って、LEDモジュールで発生した熱は、その裏面の伝熱板に伝えられ、次いでヒートシンク内を伝わりながらフィンから筐体内の空気に伝えられる。そして、筐体内の空気は対流を起こしながら、プラスチックの筐体面へと熱を伝える。あるいはヒートシンク表面からの熱放射により、直接にプラスチック筐体内面へと伝わる熱もある。最終的には、筐体外部からエンジンルーム内の空気に熱を伝えることで、LEDの冷却が行われることとなる。

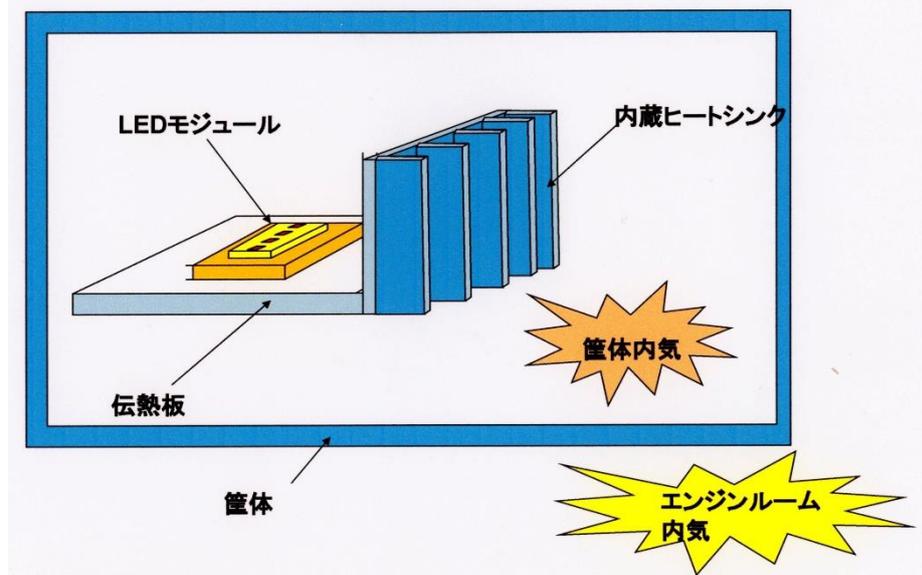


図31 LED放熱システムのモデル（筐体内部ヒートシンク方式）

以上の考えをシミュレーションするために熱の流れをまとめたものが、図32の「放熱システムの熱回路網モデル」である。

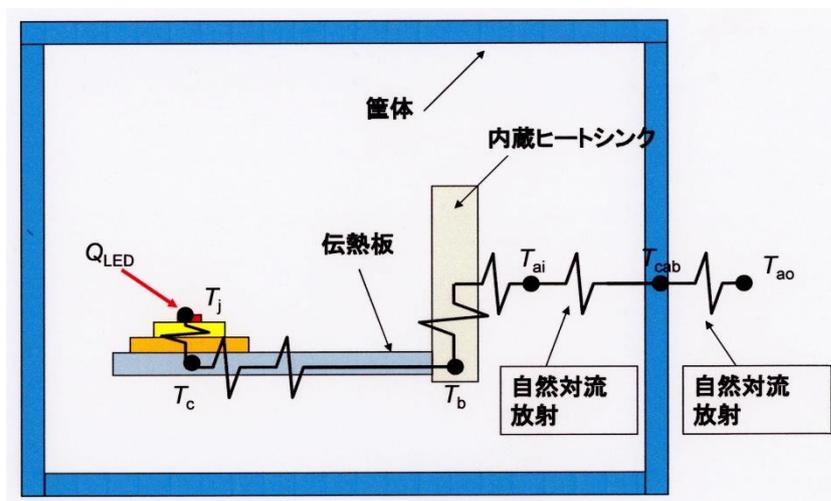


図32 放熱システムの熱回路網モデル

このモデルをベースに、図33～図35に示すような個々の部品形状に依存する変数を設定し、変数を変えながら放熱シミュレーションができるようにした。実際に用いた変数値と並べて示す。この実際に用いた値は、表1の調査結果を反映している。

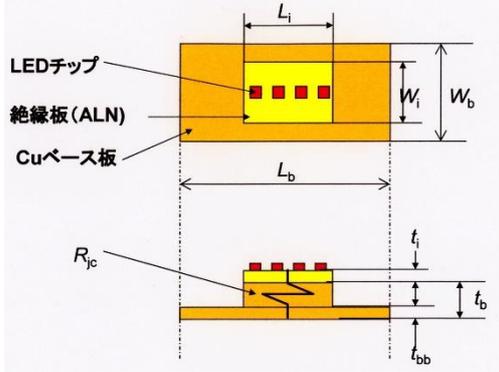


図33-1 LEDモジュールの形状変数

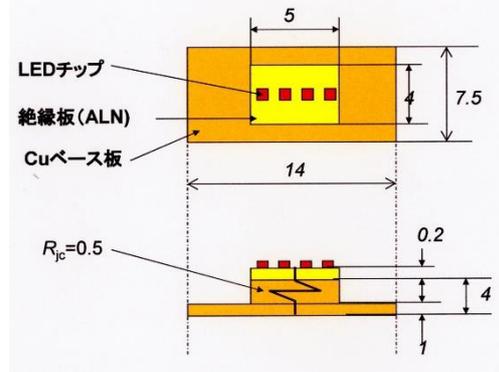


図33-2 計算に用いた数値

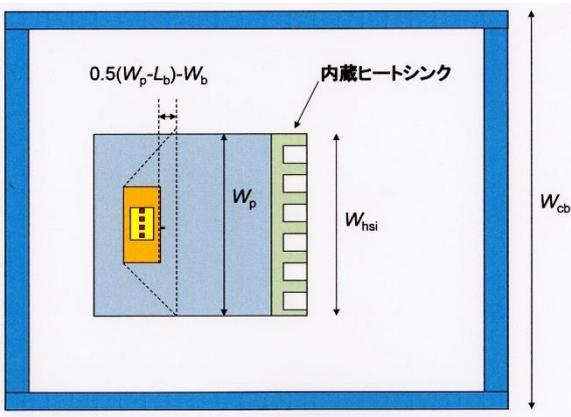


図34-1 放熱システムの形状変数 (平面図)

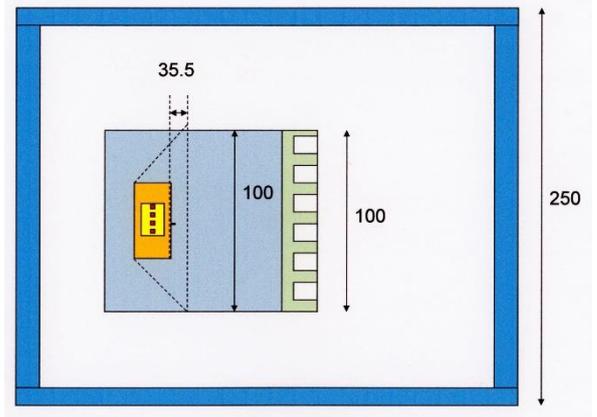


図34-2 計算に用いた数値

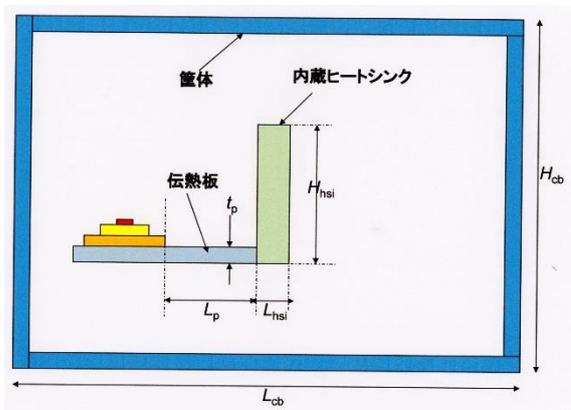


図35-1 放熱システムの形状変数 (正面図)

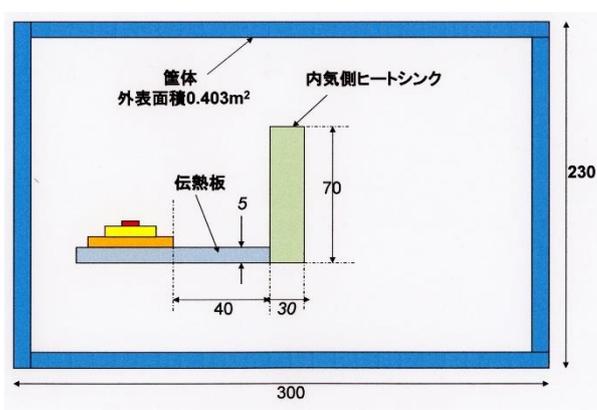


図35-2 計算に用いた数値

また、自然対流による熱伝達の計算には図36を、放射による熱伝達には図37、図38を用いた。

自然対流熱伝達率の計算式

(平均熱伝達率)

(1) 垂直平板および大直径円筒 代表長さは高さ

$$Nu_m = \frac{h_m H}{k} = 0.56(Gr Pr)^{0.25} \quad (3-1)$$

(2) 水平または垂直円筒 代表長さは直径

$$Nu_m = \frac{h_m d}{k} = 0.47(Gr Pr)^{0.25} \quad (3-2)$$

(3) 水平板正面側 代表長さは側長

$$Nu_m = \frac{h_m L}{k} = 0.54(Gr Pr)^{0.25} \quad (3-3)$$

(4) 水平板背面側 代表長さは側長

$$Nu_m = \frac{h_m L}{k} = 0.25(Gr Pr)^{0.25} \quad (3-4)$$

グラスホフ数 $Gr = \frac{g\beta x^3(t_s - t_\infty)}{\nu^2}$

g: 重力加速度[m/s²]
 h_m: 平均熱伝達率[W/m²K]
 k: 流体の熱伝導率[W/mK]
 t_s: 表面温度(°C)
 t_∞: 物体から十分離れた場所の温度(°C)
 x: 代表長さ[m]
 β: 膨張率(1/K)
 ν: 動粘性係数(m²/s)

図36 自然対流熱伝達率の計算式

放射熱伝達の基礎方程式

高温面 T_h 低温面 T_c

ステファン・ボルツマンの法則

$$Q = F_{hc} S_h \sigma (T_h^4 - T_c^4)$$

$$= h_r S_h (T_h - T_c)$$

σ: ステファンボルツマン定数
 (=5.67×10⁻⁸ W/(m²K⁴))

F_{hc} : 修正率
 (放射率と形態係数の関数)

$$h_r = F_{hc} \sigma (T_h^3 + T_h^2 T_c + T_h T_c^2 + T_c^3)$$

オームの法則

$$Q = (T_w - T_a) / R$$

熱抵抗 — $R_r = 1 / (h_r S)$

図37 放射熱伝達の基礎方程式

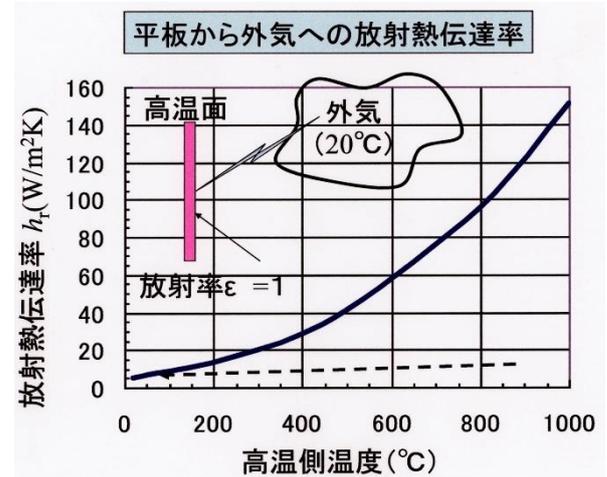


図38 平板から外気への放射熱伝達率

さらに、放熱性能に大きな影響を持つヒートシンク部分に関しては、図39の熱抵抗計算モデルを設定し、それに合わせて図40に示す入力仕様も設定した。実際の計算に用いた入力値も並べて示す。

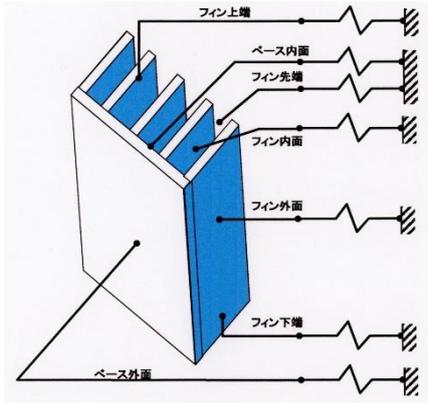


図39. ヒートシンクの熱抵抗計算モデル

ヒートシンク計算条件

タイトル **筐体外ヒートシンク** フィン枚数Nfの入力により自動的に変化

フィン厚さ ft (m) 0.001

フィン高さ fh (m) 0.02

ヒートシンクベース厚 tb (m) 0.004

ベース板幅 Wb (m) 0.8

ベース板長さ Lb (m) 0.1

発熱サイズ Ws (m) 0.8

発熱サイズ Ls (m) 0.1

周囲流体温度 Tl (°C) 60

フィンピッチ tp (m) 0.010114

フィン間隔 fs (m) 0.009114

フィン枚数 Nf (-) 80

ベース板外表面断熱 (有nb=1, 無しnb=0) (通常nb=1) 1

端部フィン外側断熱 (無しnfo=0, 片面断熱有nfo=1, 両面断熱有nfo=2) (通常nb=0) 0

ベース面平均温度 Tbase (°C) 73.85

発熱源位置 (中央Co=1, 横Co=1.414, 角Co=2) 1.414

流体の種類 (空気nf=1, 水nf=2, エンジンオイル50%nf=3, スピンドル油nf=4) 1

フィン材料熱伝導率kf (W/mK) 140

フィン材料密度ρf (kg/m3) 2700

ベース材料熱伝導率kb (W/mK) 140

ベース材料密度ρb (kg/m3) 2700

フィン放射率(ε) 0.1

図40-1 ヒートシンクの熱抵抗計算の入力仕様

温度差 ΔT_{sa} 20K
で計算

ヒートシンク大
全表面積0.101m²
熱抵抗 Rhs=3.589K/W
重量230g

ヒートシンク小
全表面積0.0759m²
熱抵抗 Rhs=4.020K/W
重量 172g

図40-2 ヒートシンクの熱抵抗計算に用いた数値 (入力値)

放熱設計の目標値も定めた (表2)。将来を想定し、一段と高い LED 発熱量をクリアできる放熱仕様を探るためである。

表2 放熱設計目標値

LED素子発熱量 Q_{LED} (W) = 24W
ジャンクション-外気間熱抵抗 R_{ja} (K/W) < 2.0 K/W
温度差 (K) ΔT_{ja} (K) < 48K

熱設計条件としては、図4-1を使用した。

素子全発熱量 Q_{LED} (W) =	24
外気温度 T_{ao} (°C) =	60
内気熱伝達率	
天井面 ha_{ic} (W/m ² K)	10.75
側面 ha_{is} (W/m ² K)	11.09
底面 ha_{ib} (W/m ² K)	9.35
外気熱伝達率	
天井面 ha_{oc} (W/m ² K)	10.75
側面 ha_{os} (W/m ² K)	11.09
底面 ha_{ob} (W/m ² K)	9.35
LED素子ジャンクション-ケース間熱抵抗 R_{jc0} (K/W) =	0.5

$R_{jc0}=0$ では計算に使用せず。
 $R_{jc0}>0$ ではこの値を計算に使用

図4-1 熱設計条件

実際に計算した結果を図4-2-1～図4-2-3に示す。

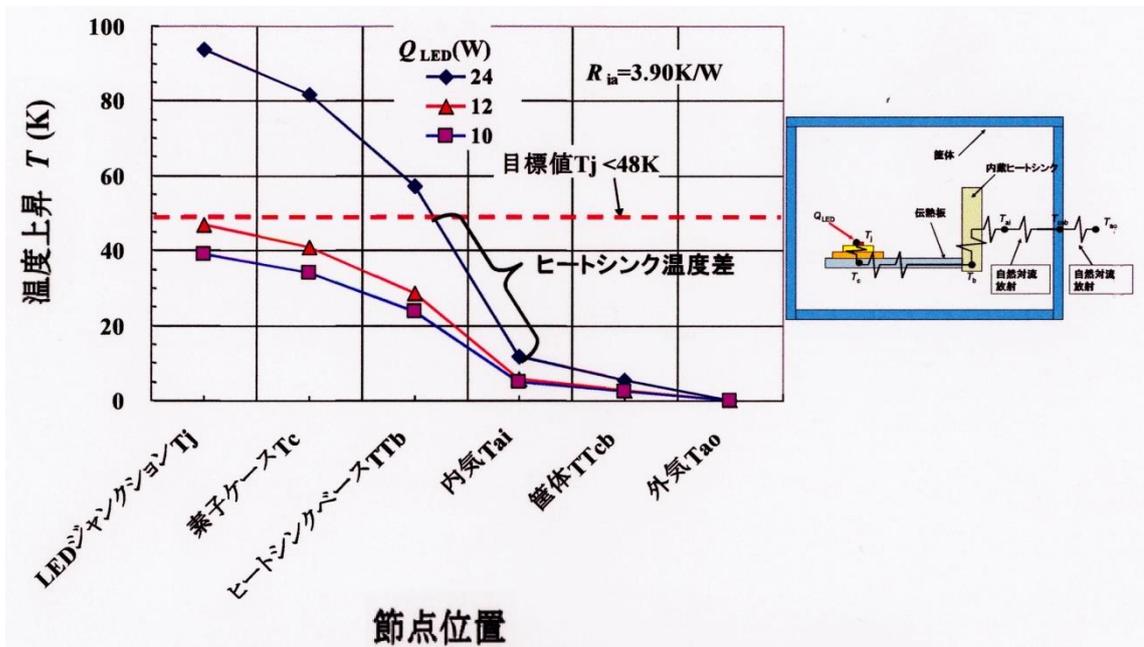


図4-2-1 LED素子発熱量に対する各部位の温度変化

このシミュレーション結果はからわかったことは、まず、LED素子の発熱量を増加させた場合、

- 現行のヒートシンク (図28、図29) では、内蔵ヒートシンクの放熱能力の不足により、ヒートシンク部分での温度差が大きくなる。
- 筐体 (図27の樹脂製外箱部分) の表面積は十分に広く、内気の温度上昇は、それほど大きくない。
- 現状の放熱能力は12W程度と考えられる。
- もし、LEDの発熱が今よりも大きくなれば (例えば24W)、放熱能力は不足する。

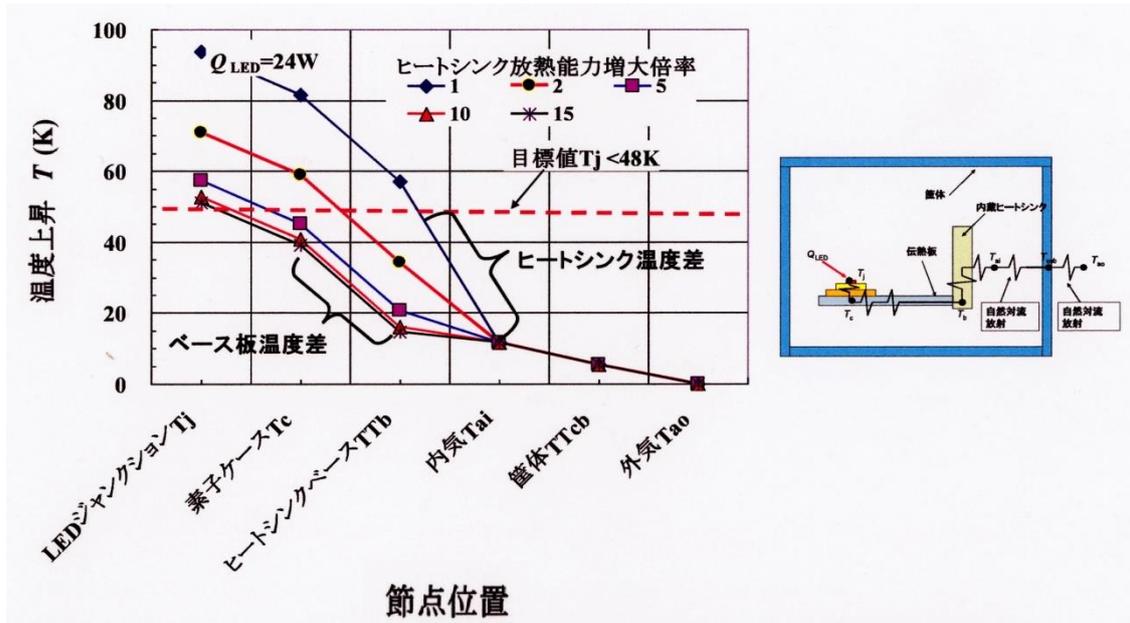


図43-2 ヒートシンクの放熱能力増大による各部の温度変化

現行のヒートシンクの放熱能力を今以上に増大させた場合は、どういう温度を示すかをシミュレーションしたものが、図43-2である。現行の放熱能力を1とし、最高15倍まで、増大させた結果を示している。

この結果から

- 内蔵ヒートシンクの放熱能力の増大だけでは、24W 発熱の場合、目標とする温度上昇48K を満足させることはできない。
- ベース板内での温度差が大きいことから、ベース板の熱伝導率の向上を図り、その部分の熱抵抗を下げる必要がある。

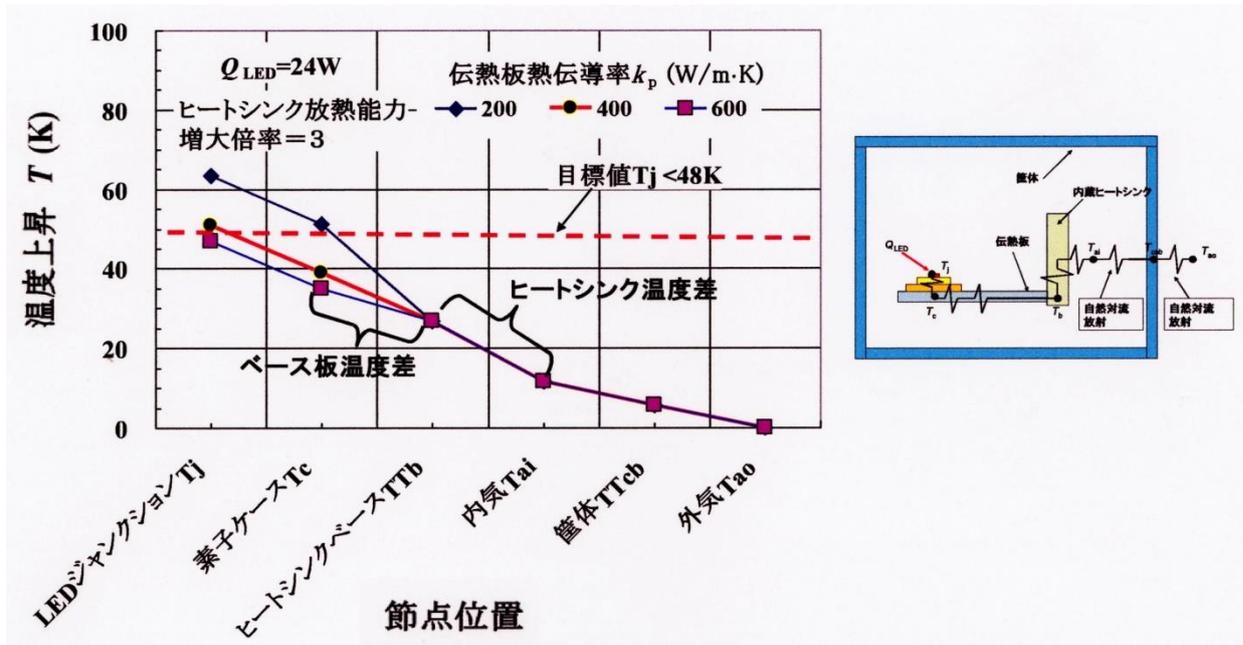


図43-3 伝熱板の熱伝導率を変化させた時の各部の温度変化

そこで、伝熱板の熱伝導率を変化させた場合の各部の温度変化もシミュレーションした。その結果が図43-3である。

この図から、内蔵ヒートシンクの放熱能力を放熱増大倍率=3に、ベース板の熱伝導率を400~600W/m・Kにすると、当初設定した温度上昇目標：48K以下を満足させることができる。

以上、現行の「筐体内部ヒートシンク放熱方式」のシミュレーション結果をもう一度まとめると、

- イ. 内蔵ヒートシンクの放熱能力不足により、ヒートシンク部での温度差が大きくなっている。
- ロ. 筐体表面積は十分に広く、内気温度上昇はそれほど大きくない。
- ハ. 現状の放熱能力は12W程度と推測される。

これらに対応するためには、

- ニ. 内蔵ヒートシンクの放熱能力を3倍程度増大させる。
- ホ. ベース板の熱伝導率を400~600W/m・K程度に向上させる。

③-2.伝熱板利用放熱方式について

これまでは、現行のヘッドライト構造を踏襲した「筐体内部ヒートシンク放熱方式」を中心にシミュレーションを行ってきたが、放熱方式には、その他にも伝熱板を利用し筐体外部にヒートシンクを設ける方式も考えられる。

「伝熱板利用+筐体外部ヒートシンク放熱方式」、略して「伝熱板利用放熱方式」とここでは呼ぶことにするが、この方式を適用した場合、どういう放熱形態になるのかも、シミュレーションを用いて検討した。

伝熱板利用放熱方式は図44に示すように、筐体外部にヒートシンクを設け、LEDモジュールからヒートシンクまでを伝熱板で繋ぐ方式である。シミュレーションのための熱回路網モデルは、図45の形とした。

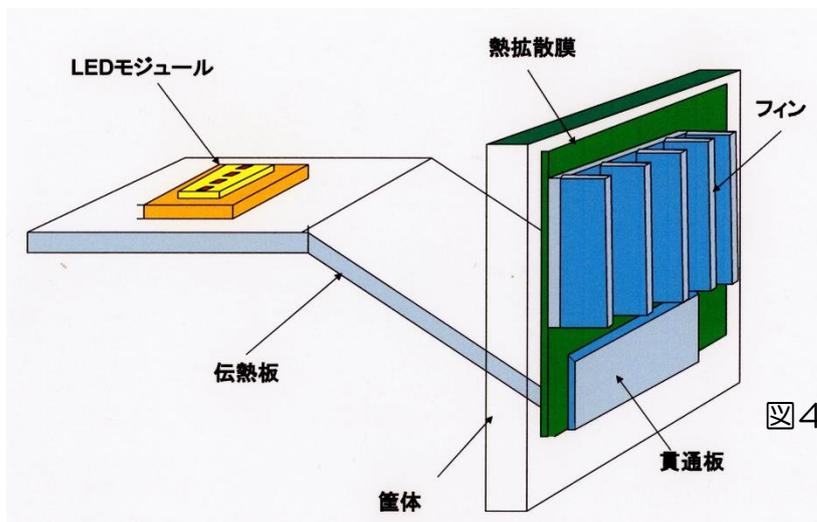
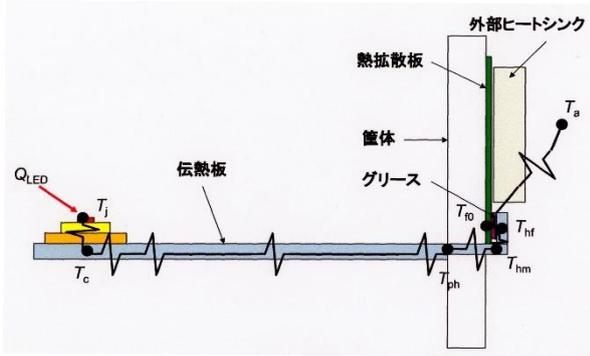
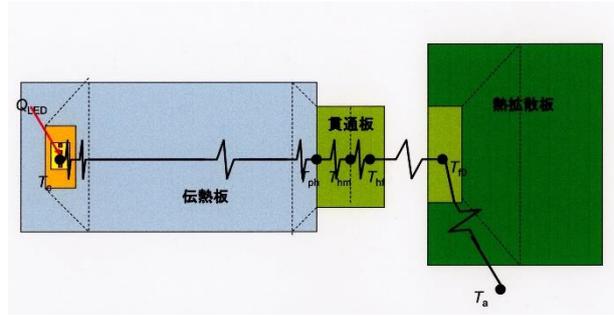


図44 伝熱板利用放熱方式の概念図



(正面図)



(平面図)

図45 伝熱板利用放熱方式の熱回路網モデル

また、放熱システムの形状変数と実際に入力した変数値とを図46～図48に示す。

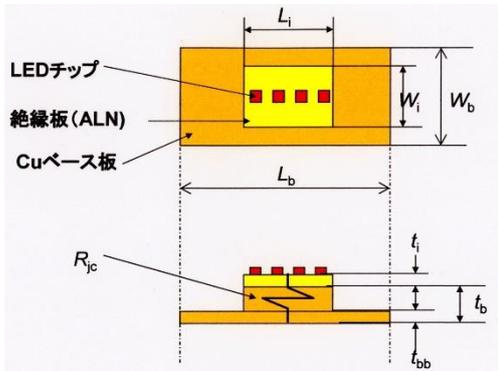


図46-1 LEDモジュールの形状変数

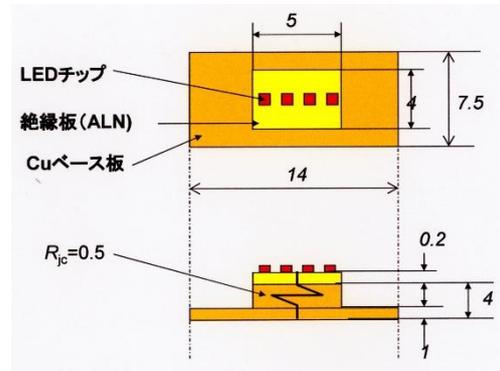


図46-2 入力値

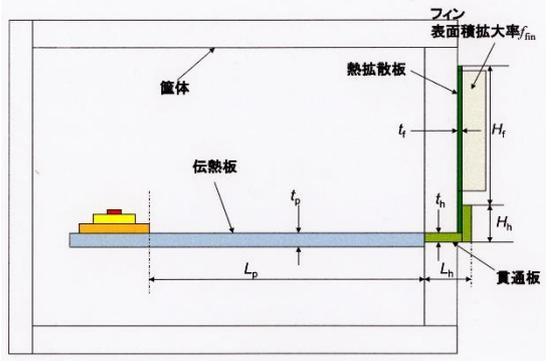


図47-1 伝熱板周辺の形状変数 (正面図)

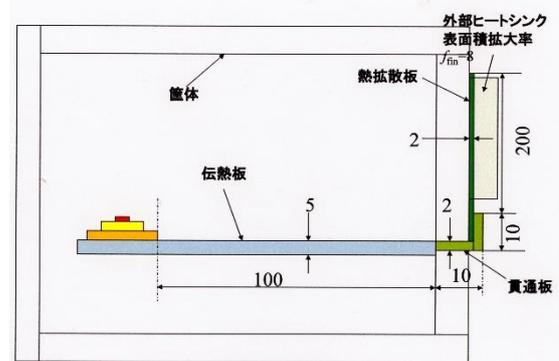


図47-2 入力値

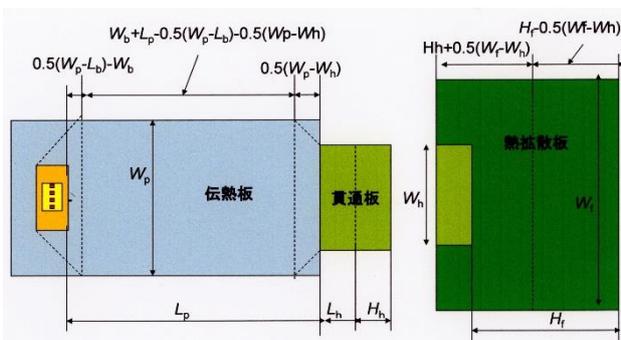


図48-1 伝熱板周辺の形状変数 (平面図)

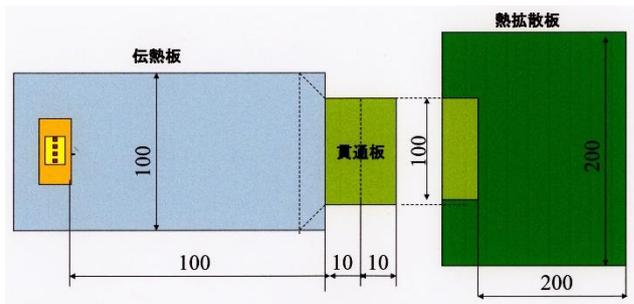


図48-2 入力値

また、熱設計の目標値も表3とした。

表3 熱設計目標値

LED素子発熱量 Q_{LED} (W) = 24W
ジャンクション-外気間熱抵抗 R_{ja} (K/W) < 2.0 K/W
温度差 (K) ΔT_{ja} (K) < 48K

熱設計条件は、図49のように設定した。

素子全発熱量 Q_{LED} (W) =	24
外気温度 T_a (°C) =	60
外気熱伝達率 h_a (W/m ² K) =	8
LED素子ジャンクション-ケース間熱抵抗 R_{jc0} (K/W) =	0.5

$R_{jc0}=0$ では計算に使用せず。
 $R_{jc0}>0$ ではこの値を計算に使用

図49 熱設計条件

以上の条件で、伝熱板利用方式の放熱シミュレーションを行った。
その結果を、図50-1~図50-2に示す。

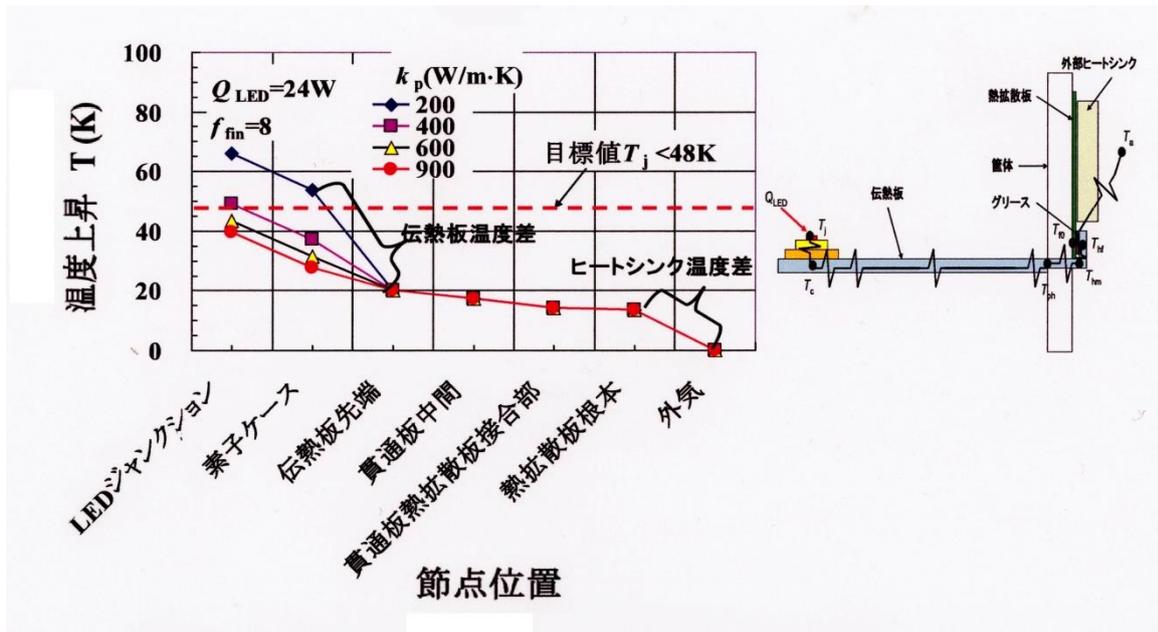


図50-1 伝熱板の熱伝導率 (k_p) に対する各部の温度変化

図50-1から、伝熱板（厚さ5mmで設定：図47-2）方式では、熱伝導率 (k_p) が400W/m·K以上で目標値（48K以下）を達成する。ただし、筐体の外部に設けたヒートシンクの表面積拡大率は8以上が必要。

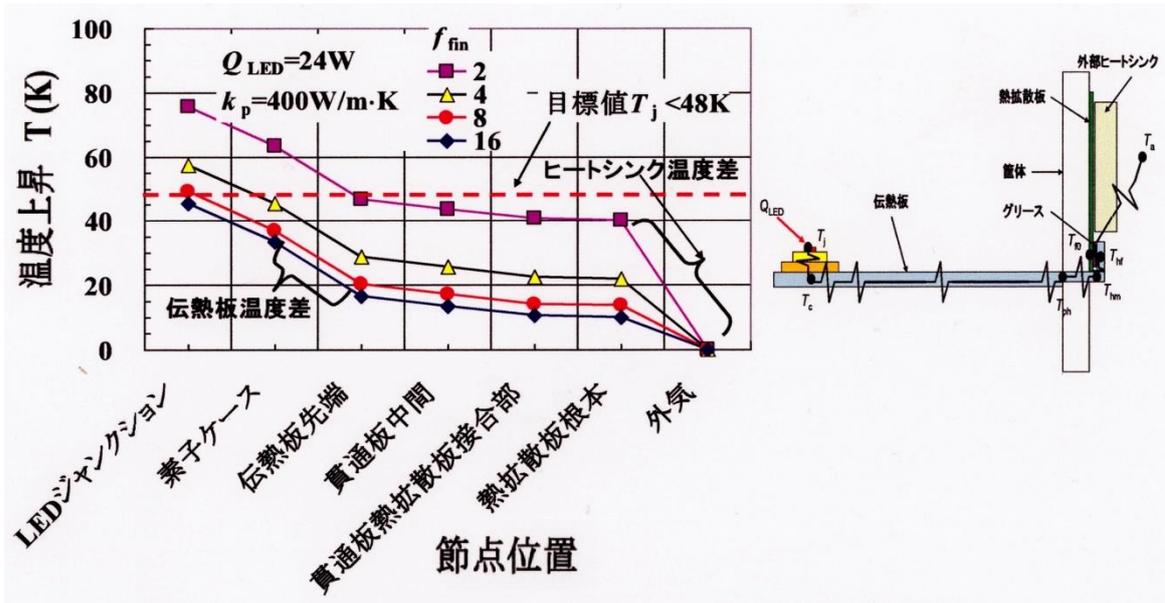


図50-2 ヒートシンクのフィン面積の拡大率を変化させた場合の各部の温度変化

図50-2から、フィン面積を拡大する場合、その拡大率=8以上で目標を達成する。ただし、8以上に拡大しても、それほど効果は得られない。

従って、この放熱方式を成り立たせるためには、表4のような条件を満足させる必要がある。

表4 目標値を満足させる設計条件（仮に標準条件と呼ぶ）

設計条件(追加)	
伝熱板 (P) 熱伝導率 k_p (W/mK)	400
ヒートシンク面積増大係数 f_{fin} (-)	8
このときのヒートシンク熱抵抗 R_{hs} (K/W)	0.569

ちなみに、表4の標準条件でシミュレーションした場合の放熱性能は表5の通り。

表5 標準条件での伝熱板方式の放熱性能

LED素子発熱量 Q_{LED} (W) = 24W	24
ジャンクション-外気間熱抵抗 R_{ja} (K/W) < 2.0 K/W	2.04
温度差 (K) ΔT_{ja} (K) < 48K	49.06

伝熱板を利用し筐体外部にヒートシンクを設ける「伝熱板利用方式」では、熱シミュレーションの結果、次のことが結論できる。

- イ. この方式では、伝熱板 (p) と熱拡散係数 (f) の性能が、放熱能力を左右する。
- ロ. 標準条件 (表4) では、目標性能 ($R_{ja} < 2.0K/W$) をほぼ満足するが、そのためには、伝熱板 (p) と熱拡散係数 (f) は次の条件を満足する必要がある。
- 伝熱板：幅 $W_p=100\text{ mm}$ 長さ $L_p=100\text{ mm}$ 厚さ $t_p=5\text{ mm}$
熱伝導率 $K_p=400W/m/K$
 - 熱拡散板：幅 (W_f) =200mm 高さ (H_f) =200mm 厚さ (t_f) =2mm
熱伝導率 (k_f) =900W/m・K
ヒートシンクによる面積増大係数 (f_{fin}) =8
- ハ. この「伝熱板利用方式」でも、理論的には可能であることを示したが、実際の自動車用ヘッドライトでの実現が可能か否かはまだ未知であり、今後検討する必要がある。
- ニ. 現在、自動車用ヘッドライトで使用されている「内蔵ヒートシンク」方式とこの「伝熱板+外部ヒートシンク」方式とのハイブリッドも考えられる。

2-【1-3. 低コスト化】

低コスト化の目標値 (一体型のコスト：400円/1個以下) に対しては、積算の詳細は省略するが 1465円と未達成であった。

ただ、AD コーティングに各種工夫を織込むことにより、目標達成は不可能ではない。また、現行品のメーカーの話では、前照灯ハイビーム24WのLED化が避けられない場合は、何らかの冷却対策の導入を考えないといけない場合もありうるということであり、その場合はコストアップも起こりうる。ということで、目標を緩めてもいい場合がありうる。今後の既存のヘッドライトメーカーへの売り込み過程で明らかにしたい。

以上のように、各種工夫を織り交ぜていけば、最終的には 400円/1個程度のコストも不可能ではないと考えている。

2-【2. IGBT 用などの次世代放熱基板の改善】

2-【2-1. 熱伝導率向上】

(1) 多軸通電焼結機の改善の効果

質のよいC-Cu複合材を得るには、バラツキの無い安定した条件で、焼結が実施できることが必要である。

そのためには、焼結型内の温度をできるだけ均一化することが望ましい。そこで、H27年度に、熱の逃げが多い加圧軸に断熱構造を織込むことで、焼結用黒鉛型の均熱化を向上させた。次頁の図5-1左に改善前の型構造の昇温カーブを図5-1右に改善後の型の昇温カーブを示す。

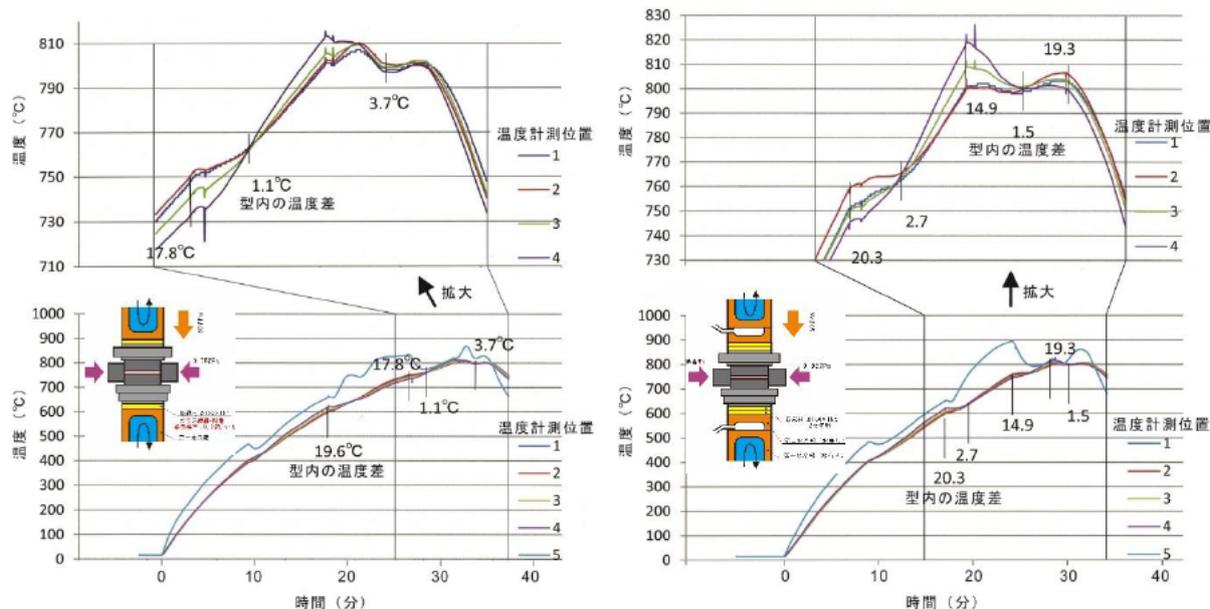


図5-1 黒鉛型の昇温カーブ

その結果、平均的には複合材の熱伝導率：650W/m・K、最高値で 750 程度が得られるようになった。ちなみに Cu-天然黒鉛複合材の熱伝導率データは、本テーマ開始以前の最高熱伝導率：600W/m・K 程度。平均的には、400W/m・K 程度であった。

(2) Cu-天然黒鉛複合材の熱伝導率のさらなる改善

平成 28 年度あたりから、複合材中の黒鉛量を増やし（75vol%⇒77.5 vol%⇒80 vol%⇒87.5 vol%）た結果、さらなる熱伝導率の向上が見られた。もちろん通常は通電焼結ができない（きれいに固まらない）とされる領域であるが、型内の温度の安定性、均一性の向上、ひいては高温下稼働を追求した結果である。

今のところ、最も高熱伝導率が得られた焼結条件は 980°C（真空中）加圧力 110 MPa となっている。ただ、加圧力 110MPa は高過ぎた設定となっており、つまり黒鉛型が割れやすい条件であるため、量産を前提とした型割れ防止の観点から 93MPa まで下げる予定である。

その場合は、740~790 W/m・K が、複合材として安定して得られる熱伝導率と考えられる。もし型割れの懸念を無視して焼結すれば、熱伝導率としては 840W/m・K が当社として得られるほぼ最高の値である。

結局、当初の複合材の熱伝導率目標 900W/m・K は未達成であった。

また、840 という値は、天然黒鉛の予備焼成や丁寧な水洗、予備焼成なども実施したことが影響していると推測している。

(3) 熱伝導予測

平成26～平成27年度にかけて、界面熱抵抗を考慮した熱伝導シミュレーションコードの開発も行った。界面熱抵抗を考慮するため、フォノン DMM (Phonon Diffuse Mismatch Model) というモデルから求めた界面熱伝達率を使用した。本研究では界面熱抵抗を考慮した熱伝導シミュレーションを用いて、種々の金属基複合材料の分散材のサイズが有効熱伝導率に与える影響を明らかにすることを目的とした。シミュレーションにおける熱伝導および熱伝達の計算方法は有限体積法を用いた差分法を用い、温度分布を計算した。図52は、有限体積要素のモデル図である。

要素内の Δt 秒後の温度 T は次式で示せる。

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \Delta t F_{i,j}^n$$

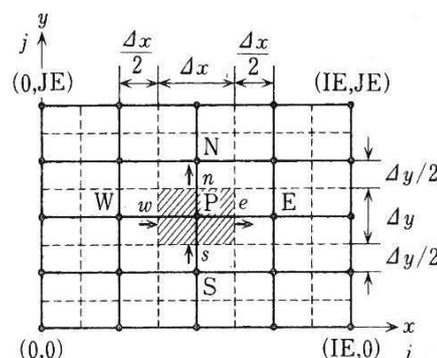


図52 有限体積要素モデル

ここで、 Δx は、要素の*i*方向の長さ、 Δy は要素の*j*方向の長さである。

熱伝導の場合、以下の式を用いて計算した。

$$F = \frac{1}{\Delta x} \left\{ \lambda_{i+\frac{1}{2},j} \left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta x} \right) - \lambda_{i-\frac{1}{2},j} \left(\frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{\Delta x} \right) \right\} + \frac{1}{\Delta y} \left\{ \lambda_{i,j+\frac{1}{2}} \left(\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta y} \right) - \lambda_{i,j-\frac{1}{2}} \left(\frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{\Delta y} \right) \right\}$$

また、隣り合う要素が異なる場合、 λ の値は母材と分散材の熱伝導率の調和平均をとり、以下の様に計算した。

$$\lambda_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{2\lambda_i\lambda_{i+1}}{\lambda_i + \lambda_{i+1}}$$

熱伝達の場合、以下の式を用いて計算した。

$$F = \frac{1}{\Delta x} \left\{ h_{i+\frac{1}{2},j} (T_{i+1,j} - T_{i,j}) - h_{i-\frac{1}{2},j} (T_{i,j} - T_{i-1,j}) \right\} + \frac{1}{\Delta y} \left\{ h_{i,j+\frac{1}{2}} (T_{i,j+1} - T_{i,j}) - h_{i,j-\frac{1}{2}} (T_{i,j} - T_{i,j-1}) \right\}$$

ここで、隣り合う要素が異なる場合、 h の値は母材と分散剤の界面熱伝達率を用いた。Cu中にCを垂直に配置させ、水平方向の有効熱伝導率の体積率に対する変化を図53に示す。

なお、本結果は、界面熱伝達を考慮している。

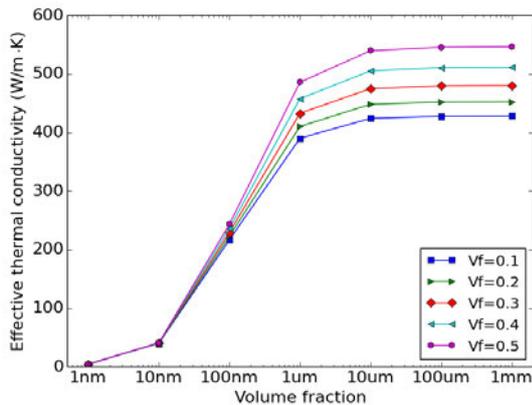


図5.3 Cu中にCを垂直に配置させた場合の水平方向の有効熱伝導率の体積率に対する変化

これより、全ての体積率において $10\mu\text{m}$ 以下の厚さでは、有効熱伝導率の低下が見られた。また、厚さが薄くなるほど、有効熱伝導率の低下は大きくなった。これより、Cu-C系複合材料では、炭素粒子が $10\mu\text{m}$ 以下になると有効熱伝導率の低下が見られることが分かった。

また、界面熱伝達が有効熱伝導率に影響を及ぼすメッシュ要素サイズは、母材と分散材の熱伝導率によって変化し、そのときのサイズを臨界要素サイズ L_{cr} と決め、その値は $L_{cr} = \lambda/h$ によって求められるということが分かった。 λ は母材と分散材の熱伝導率の調和平均であり、 h は界面熱伝導率である。これにより複合材料の分散剤の大きさが臨界要素サイズより大きければ、界面熱伝達の有効熱伝導率に与える影響は無視していいと考えられ複合則により有効熱伝導率は求められると考えられる。複合材料の分散剤の大きさが臨界要素サイズより小さければ、界面熱伝達の有効熱伝導率に与える影響は無視できず、界面熱伝達を考慮して有効熱伝導率を求める必要があると考えられる。表6に、各分散材（強化材）を用いた時の、臨界要素サイズ L_{cr} を示す。

表6 Al基複合材料において、各分散材（強化材）を用いた時の臨界要素サイズ L_{cr}

Reinforcement	λ_{Al} [W/m·K]	λ_x [W/m·K]	λ_{Al-x} [W/m·K]	h_{Al-x} [W/m ² ·K][6]	L_{cr} [m]
C(VGCF)	236	1200	394.429	110113846.7	3.58201×10^{-6}
SiC		270	251.8577	222728062.4	1.13079×10^{-6}
Si		168	196.2772	468353363.2	4.19079×10^{-7}
TiB ₂		100	140.4762	291188632.0	4.82423×10^{-7}
BN		50	82.51748	130892279.6	6.30423×10^{-7}
Al ₂ O ₃		30	53.23308	347844235.4	1.53037×10^{-7}
TiN		29	51.65283	433525385.1	1.19146×10^{-7}
ZnS		27.2	48.77812	859497881.3	5.67519×10^{-8}
ZnO		25.2	45.53752	1003088510.0	4.53973×10^{-8}
SiO ₂		8	15.47541	691323885.2	2.23852×10^{-8}

(4) 熱伝導シミュレーション

ヒートシンクの性能向上のために、放熱フィンの高密度化を進めるといふ考えもあるが、設計だけで達成するのは困難な場合も多く、高熱伝導率の複合材料開発への期待がある。しかし、複合材にも図5 4に示すように、複合界面での熱抵抗の発生がある。しかも、その発生メカニズムがよくわかっていない。あるいは定量的にどの程度の熱抵抗の低下が起こりうるのかもわかっていない。

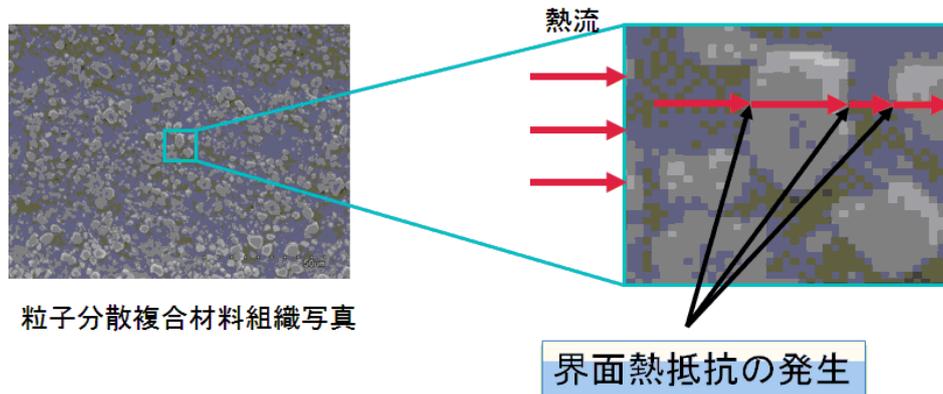


図5 4 複合材の界面熱抵抗

そこで、「界面熱抵抗を考慮した熱伝導シミュレーション」の開発を行なった。界面熱抵抗には、“フォノンDMM (Phonon Diffuse Mismatch Model)” というモデルから求めた“界面熱伝達率”を使用した。以下、その熱伝導シミュレーションのための計算条件を図5 5に、計算式を図5 6に示す。

- ・ 縦100×横110の要素を作成する。左右の縦100×横5の要素を熱源部とする。
- ・ 要素サイズは一辺が、 $1 \times 10^{-3}\text{m}$ (1mm)から $1 \times 10^{-9}\text{m}$ (1nm)まで 10^{-1} 刻みで変化させる。
- ・ 分散剤の体積分率を10%～50%まで、10%刻みで設定する。
- ・ 温度勾配を $10^3[\text{K}/\text{m}]$ と設定する。
- ・ 母材はCu、分散材はCとし、それらの熱伝導率 $\lambda_{\text{Cu}}=400[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$ 、 $\lambda_{\text{C}}=800[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$ 、Cu-C間の界面熱伝達率は $h=88577882.1[\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$ と設定する。
- ・ 許容差 10^{-14}

これらの条件下で計算を行い、有効熱伝導率を求める。

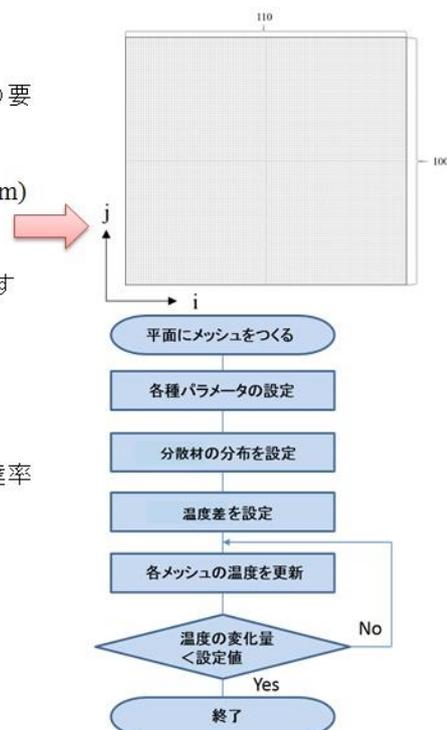
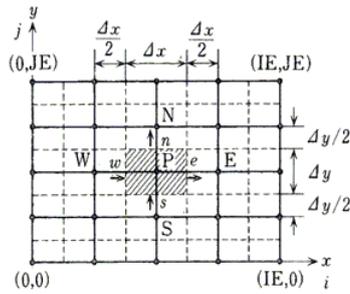


図5 5 熱伝導シミュレーションの計算条件



有限体積法を用いた差分法によって温度分布を計算した

要素内のΔt秒後の温度T

$$\Rightarrow T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \Delta t F_{i,j}^n$$

Δx: 要素のi方向の長さ
Δy: 要素のj方向の長さ

熱伝導の場合

$$F = \frac{1}{\Delta x} \left\{ \lambda_{i+\frac{1}{2},j} \left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta x} \right) - \lambda_{i-\frac{1}{2},j} \left(\frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{\Delta x} \right) \right\} + \frac{1}{\Delta y} \left\{ \lambda_{i,j+\frac{1}{2}} \left(\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta y} \right) - \lambda_{i,j-\frac{1}{2}} \left(\frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{\Delta y} \right) \right\}$$

隣り合う要素が異なる場合、λの値は母材と分散材の熱伝導率の調和平均をとり、以下のように計算した。

$$\lambda_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{2\lambda_i\lambda_{i+1}}{\lambda_i + \lambda_{i+1}}$$

熱伝達の場合

$$F = \frac{1}{\Delta x} \left\{ h_{i+\frac{1}{2},j} (T_{i+1,j} - T_{i,j}) - h_{i-\frac{1}{2},j} (T_{i,j} - T_{i-1,j}) \right\} + \frac{1}{\Delta y} \left\{ h_{i,j+\frac{1}{2}} (T_{i,j+1} - T_{i,j}) - h_{i,j-\frac{1}{2}} (T_{i,j} - T_{i,j-1}) \right\}$$

隣り合う要素が異なる場合、hの値は母材と分散剤の界面熱伝達率を用いた。

図56 熱伝導及び熱伝達の計算式

以上の計算により、Cu（銅）-C（炭素、グラファイト）複合材の熱伝導率のシミュレーションを行った。その結果を図57-1、図57-2に示す。

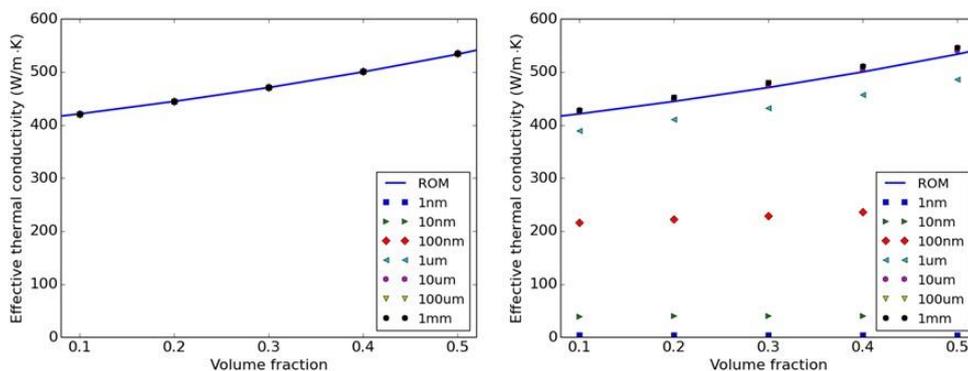
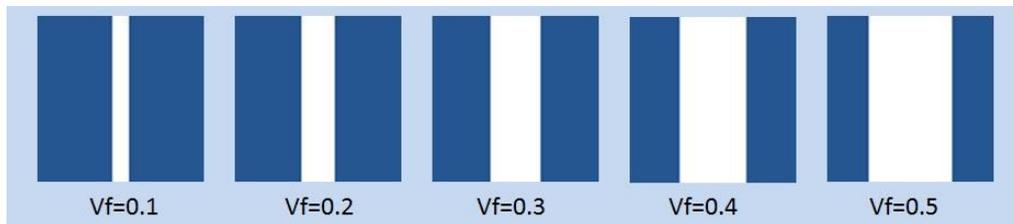


図57-1 Cu-C 複合材のC体積量が及ぼす熱伝導率の変化（Cu-C 垂直）

図57-1は、複合材中のC（炭素、グラファイト）の体積量が熱伝導率に及ぼす影響を見たもので、同時にCサイズの影響もシミュレーションしている。これで見ると、小さいC粒子を分散させたCu-C複合材の場合は、Cの体積率の影響をほとんど受けませんが、大きいC粒子を分散させた場合は、Cの体積率が多くなるほど熱伝導率が上がるこ

とがわかった。

上記の図を分散材 (C) のサイズでまとめなおしたものが図57-2である。

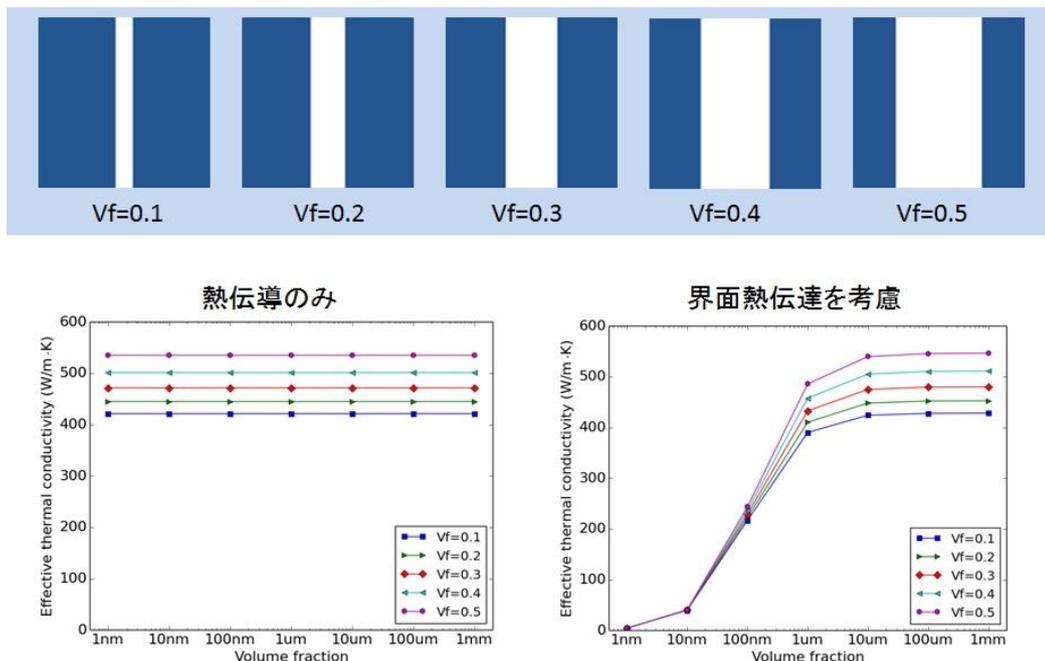
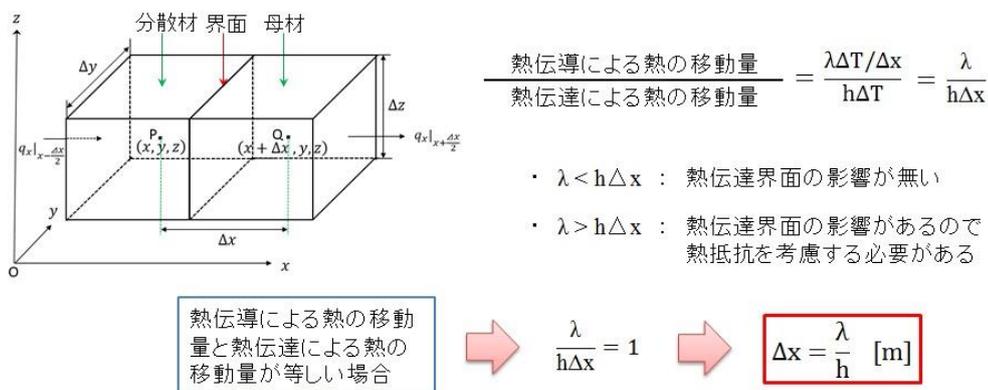


図57-2 Cu-C 複合材のC分散材のサイズに対する熱伝導率の変化

この計算からは、C粒子サイズが 10μ を越えてくると、複合材の熱伝導率は粒子サイズの影響を受けず、体積率のみの影響となることが予測できる。

また、分散材のサイズと界面熱抵抗の関係をシミュレーションするために、図58の前提を置いて、さらに計算を行った。その結果を図59、図60、図61に示す。

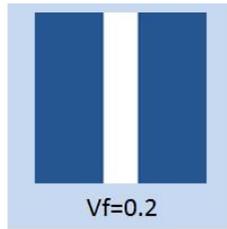


Δx を分散材の臨界サイズとする

$\lambda = 533.333$ [W/m·K], $h = 88577882.1$ [W/m²·K]から、
 $\Delta x = 6.021 \times 10^{-6}$ [m] (約 $6\mu\text{m}$)と求められる。

複合材料の有効熱伝導率を複合則により計算する際、分散材の平均サイズが Δx より大きければ、熱伝達界面は無視することが出来るので、複合則を用いることができる。その一方、分散材の平均サイズが Δx より小さければ、熱伝達界面の影響があるので複合則を用いることが出来ない。

図58 分散材のサイズと界面熱抵抗との関係



熱伝導のみ：分散材のサイズによらず一定の温度分布を示す。

界面熱伝達を考慮：分散材のサイズが $1\mu\text{m}$ と 100nm のときに界面での温度ジャンプが観察される。

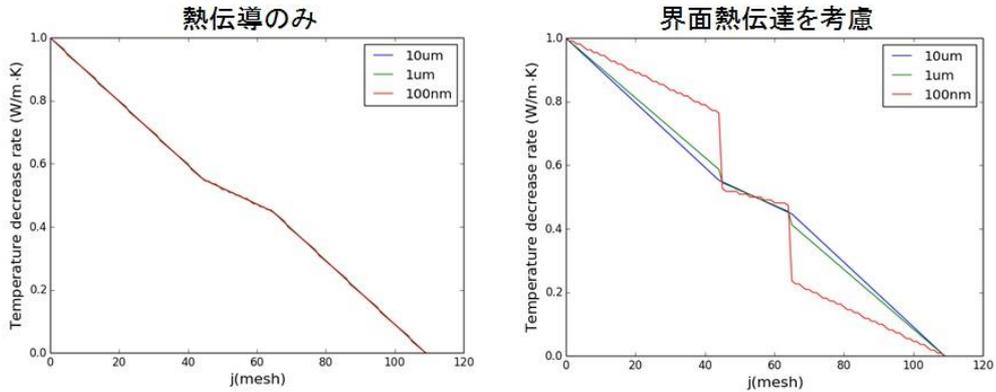


図59 界面付近の温度分布 (Cu-C 垂直)

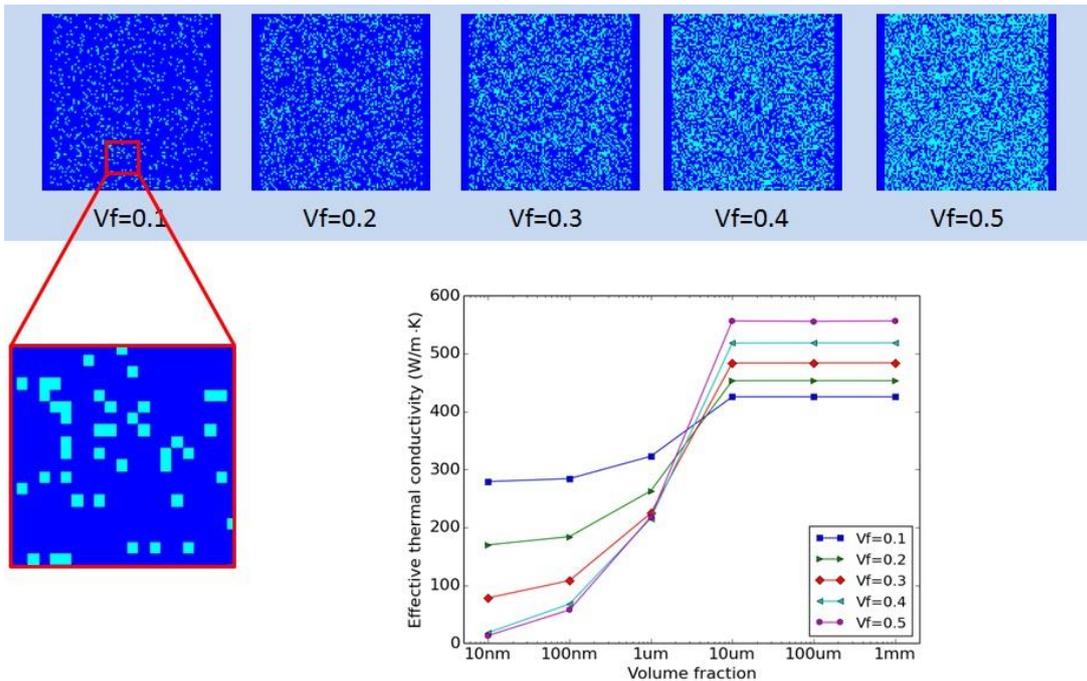


図60 均一分散の場合の熱伝導率の変化

分散材 (C) が Cu 中に均一分散した場合は、図60から、分散材の臨界サイズ 6μ を境に、それより小さい粒子は体積率が小さい方が熱伝導率が高く、それより大きいサイズの粒子は体積率が大きいほど熱伝導率が高くなる。

分散材のアスペクト比 (1:1 四角、1:2 横長、1:3 細長い) とその配置 (水平と垂直) による熱伝導率への影響を見たものを図61に示す。

※Vf=20%

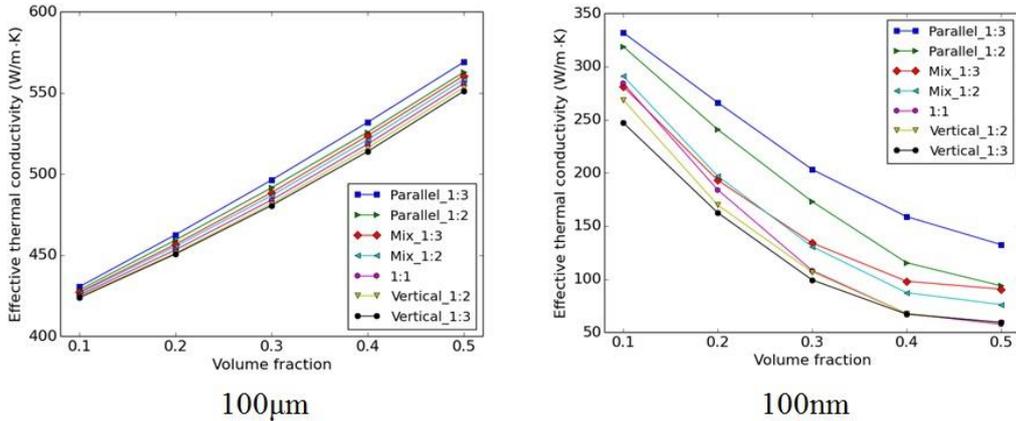
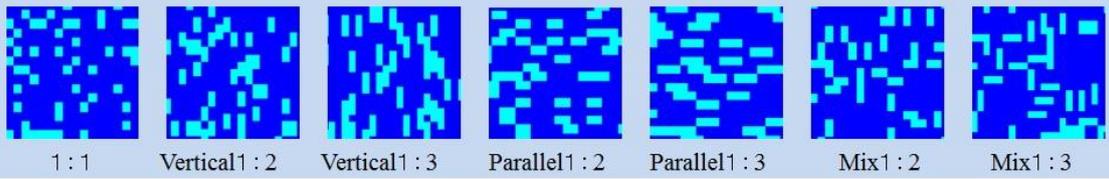


図6-1 分散材のアスペクト比と配置に対する熱伝導率の変化

以上の結果を、まとめると

- イ. 界面熱抵抗が熱伝導率に影響を及ぼし始める分散材のサイズは母材と分散材の熱伝達率及び界面熱伝達率によって変化し、その時のサイズを Δx とした場合、その値は、下記の式によって求めることができる。

$$\Delta x = \lambda / h$$

Δx : 臨界サイズ
 λ : 母材と分散材の熱伝導率の調和平均
 h : 界面熱伝達率

- ロ. Cu-C 複合材の Δx は約 6μ であり、これよりも分散材のサイズが大きい場合は複合側を用いることができ、小さい場合は複合側を用いることができない。
- ハ. 分散材のアスペクト比とその配向とが変化すると、熱伝導率も変化する。アスペクト比が大きく、かつ熱伝導方向に平行なものを多く含む複合材ほど熱伝導率が高くなる。
- ニ. 分散材のサイズが臨界サイズより大きい時は、分散材の体積率が大きいほど熱伝導率は大きくなる。一方分散材のサイズが臨界サイズより小さい時は、分散材の体積率が小さいほど熱伝導率は大きくなる。

(5) Cu-C 複合材の熱膨張係数

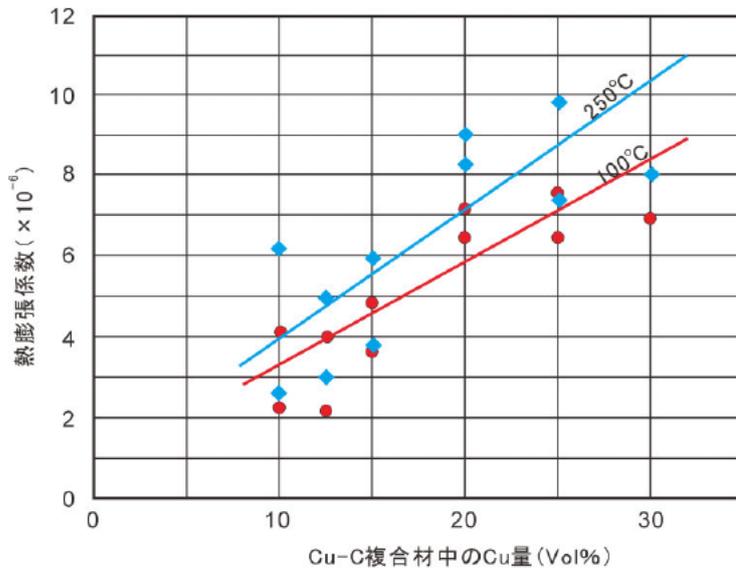


図62 Cu-C 複合材の熱膨張

図62にCu-C 複合材の熱膨張係数の計測結果を示す。

この結果は、Cu 量が減るほど熱膨張係数が小さくなっており、ほぼ複合則に則っているようである。

ちなみに、半導体素子や絶縁体などとしてよく使われる電気材料の熱膨張係数は Si:2.4 Si₃N₄:2.8 SiC:3.7 AlN: 4.8 W:4.5 Mo:5.3 (参考Cu:17.7) のようにほぼ5以下のレベルで、20vol%Cu 以下のCu-C 複合材料は、こうした電気材料との組み合わせに好都合である。

(6) Cu-C 複合材の曲げ強度

Cu-C 複合材の4点曲げ試験を実施した。その結果を図63に示す。

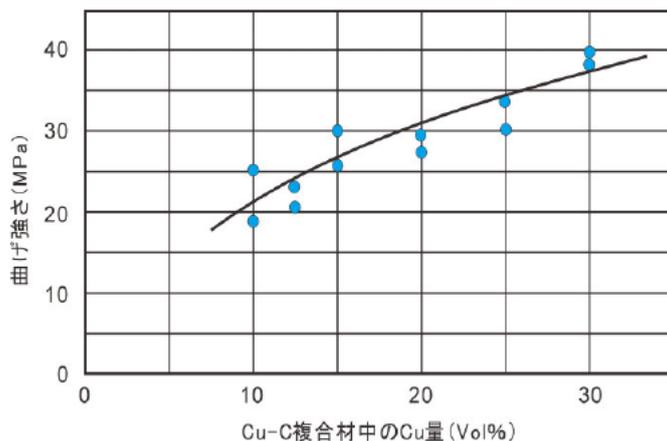
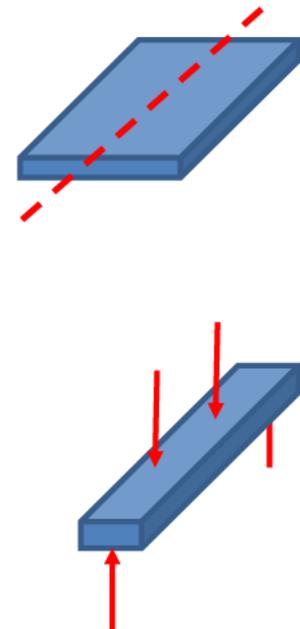


図63 Cu-C 複合材の曲げ試験結果

このグラフからわかるように、複合材の強度はかなり低い。



(7) 通電焼結型の電流分布、温度分布制御による型温度の均一化

H27 年度末までは、焼結機そのもののメカニズムに関する各種改善を実施してきた。H28年度から、佐賀大学工学部が加わり、通電焼結時に使用する黒鉛型に着目し、黒鉛型内の温度をできるだけ一定にできるような「型内電流の最適化」を図ることを試みた。

注：型内の温度が均一になると、C-Cu 複合材の品質が焼結型内のどの部分をとっても同じとなる。今は、型内の部位によってばらつきが出る。型内温度の均一化は、複合材の熱伝導率がベストとなる条件をピンポイントで設定できるようになってくる。また、焼結温度を高めるためにも重要。型内温度が不均一だと、温度の高い部分が熔融温度になったりする。

一般的に通電焼結法では、グラファイトなどの導電性焼結容器に試料を封入して大電流を流し、電流によって生じるジュール加熱によって容器および試料を加熱して焼結を進展させる。よって、ダイ、パンチ、焼結試料から構成される焼結容器の内部を流れる電流分布や挙動が、温度分布および焼結挙動に直接影響を与えている。電流分布は、焼結容器の形状や構造、粉末試料や焼結容器の導電率などによって影響を受け、さらに焼結途中でも複雑に変化すると想定される（図64）。また、電流を流すための電極機構、加圧ラム機構を通した熱伝導による熱損失や容器表面からの輻射による熱損失なども、温度分布に複雑に影響を与えていると考えられる。さらに特殊な例では、反応性焼結をする試料の場合では、試料からの発熱および吸熱も、電流分布および温度分布に相互に影響を与えている可能性がある。よって、均一な温度分布を実現するためには、複数の物理現象や試料の材質、物性、形状を考慮して、焼結容器の形状や構造、焼結条件などを決定、コントロールする必要があると考えられる。

(株)アカネの開発した多軸通電焼結（US特許：U6,610,246B1、韓国特許：特許513296号、日本：特許第4226674号）では、焼結容器の加圧軸と直角方向に印可する焼結電流の方向を、焼結途中で定期的に切り替える事によって、焼結容器内部の温度分布が時間的に平均化され、均一な焼結が実現できると考えられる。それでも、通電中の任意の瞬間においては、電流の流れる方向の温度分布は大きく、また焼結試料周辺での温度分布は複雑な分布を持っていると予想される。

本項の目的は、上記の様な焼結容器内部および焼結試料周辺の温度分布を抑制して均一化する為に、多軸通電焼結中の焼結容器内の温度分布を評価すると同時に、温度を均一化するための最適な形状、条件などを明らかにすることである。

温度分布の評価においては、計算、実験の両面から研究を進めた。計算においては、実際の多軸通電焼

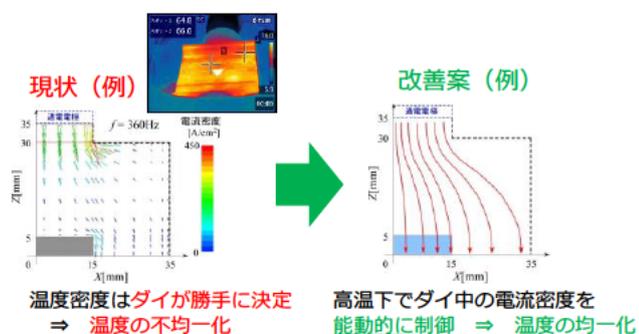


図64 焼結容器内部の局在する電流分布と改善

結で用いる焼結容器形状を仮定し、複数の物理現象を取り入れた有限要素法を用いて、焼結容器内部の温度分布を明らかにした。また、焼結容器のダイ部分に穴および溝を配置することによって、焼結容器内部の電流分布をコントロールし、温度の均一化できる条件を求めた。また、実験においては、上記の有限要素法を用いた計算から得られた知見を基に、焼結容器に実現可能な修正を加え、多軸通電焼結装置を用いて加熱実験を行い、複数の熱電対を用いた温度分布の計測実験を行った。

① 数値シミュレーションによる型構造の検討

焼結中の焼結容器の温度分布の解析では、複数の物理現象を考慮した有限要素法ソフトウェア「COMSOL Multiphysics」(本助成で購入)を用いた。本ソフトウェアは、追加のモジュールを組み合わせることで、電磁気学、熱力学、流体力学、材料工学、音響工学などの複数の物理現象を取り入れた統一的な解析が可能であり、また、様々な形状の対象物に対しても容易に適用が可能である。解析する焼結容器のモデルは、実際に㈱アカネの多軸通電焼結機で用いられている焼結容器を模擬して作成した(図65)。焼結容器はグラファイト製を想定し、155mm×155mm×50mmのダイに、外径82mm、内径50mmの4分割の割型、外径50mm、高さ25mmの2個のパンチから構成されており、中心に外径50mm高さ30mmの銅のバルク体があると想定した。また、電極が設置されているダイの四方の部分には、厚さ30mmのグラファイト製スペーサーを設置した。

解析条件としては、電極が対抗する1対のスペーサーの外側面に設置されていると想定し、スペーサー間に直流40Vの電圧を印可して電流を流し、焼結容器を加熱する。他の1対のスペーサーには電極は接触しているが、電流は流れないとした。

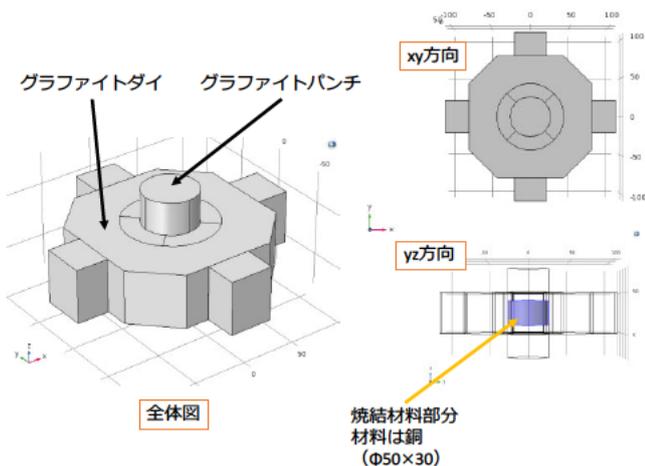


図65 有限要素法に用いた基本モデル

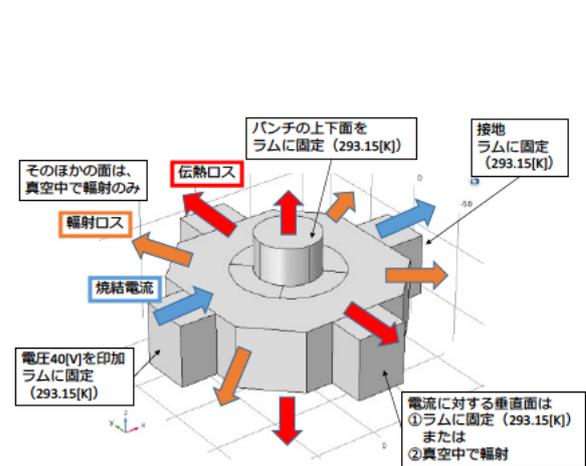


図66 有限要素法の解析条件

また、パンチ上下面およびスペーサーが接触している電極を通して、熱伝導による熱損失が生じていると想定した。パンチ上下面および電極の温度は、293.15 K (20℃) で固定し、それ以外の部分は輻射による熱損失が生じていると想定した。実際の多軸通電焼

結では、最大でも印可電圧が数V程度で、800~1000°Cまで数十分程度で昇温させるが、今回の解析では、計算の都合上、加熱時間は100秒とした。図67に、基本モデルを用いた場合の焼結容器内部の100秒後の等温面分布を示す。焼結容器内部で最も温度の高い領域は、電流が流入、流出している軸（以後、電流軸と呼称、図中、x軸）のスペーサーとダイの境界面近傍の領域であり、最大で1700~1800 K程度まで温度が上昇した。これと同じ傾向は、直方体のグラフィットブロックに通電加熱した場合のサーモカメラによる温度分布計測結果（図68）でも観測されており、電流軸側のスペーサー - ダイ境界面に高温領域が存在し、中心部の温度分布に影響を与えていることが明らかになった。

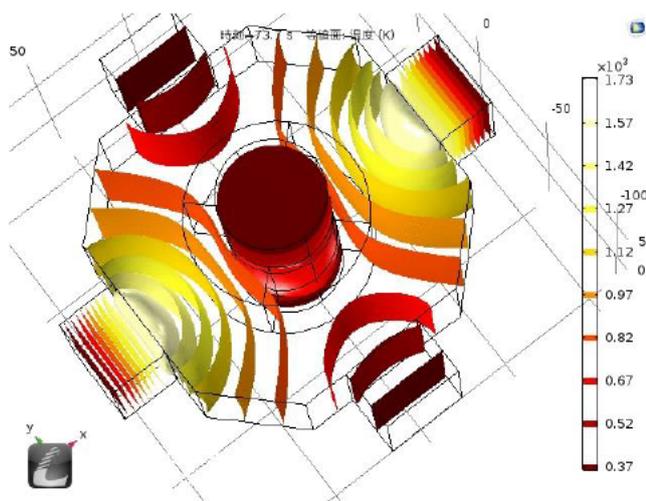


図67 基本モデルを用いた焼結容器内部の等温面分布

また、電流を流していないスペーサー側（以後、直角軸と呼称、図67中のy軸）および上下パンチ側（以後、加圧軸と呼称、図66中のz軸）では、スペーサーを通して熱

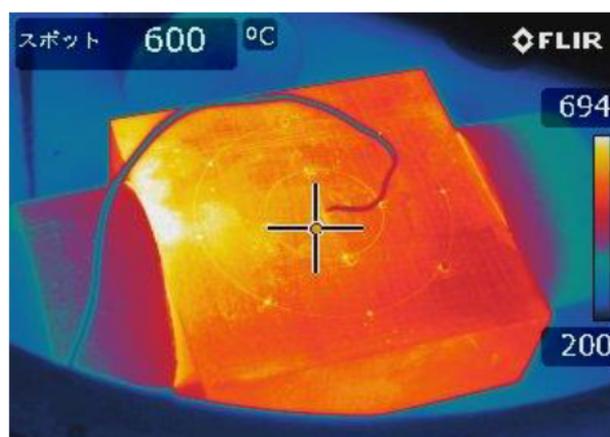


図68 直方体グラフィットブロックを用いた通電時の温度分布（サーモカメラによる観測結果）

が流出している。定性的には、電流軸のスペーサー - ダイ境界面 ⇒ 中心部 ⇒ 加圧軸のパンチおよび直角軸のスペーサー - ダイ境界面の順で温度が減少しており、中心部分では温度分布が複雑になっていることが分かる。特に、電流軸側の高温領域の形状がサンプル周辺まで影響を与えている可能性が高い。

以上の結果より、電流軸側のスペーサー - ダイ境界面に高温領域を抑制することによって、中心部分の温度の不均一性をコントロールできる可能性がある。そこで、ダイ内部の電流分布を制御する様に、ダイに穴、溝などを設置した解析モデルを用いて有限要素解析を行い、試料周辺での温度分布が緩和されるような条件を模索した。

図69に、ダイ内部に穴、溝などを設置した場合の解析モデルを示す。(a)および(b)のモデルは、ダイにφ10の貫通孔をあけることで、ダイ内部の電流分布をコントロールす

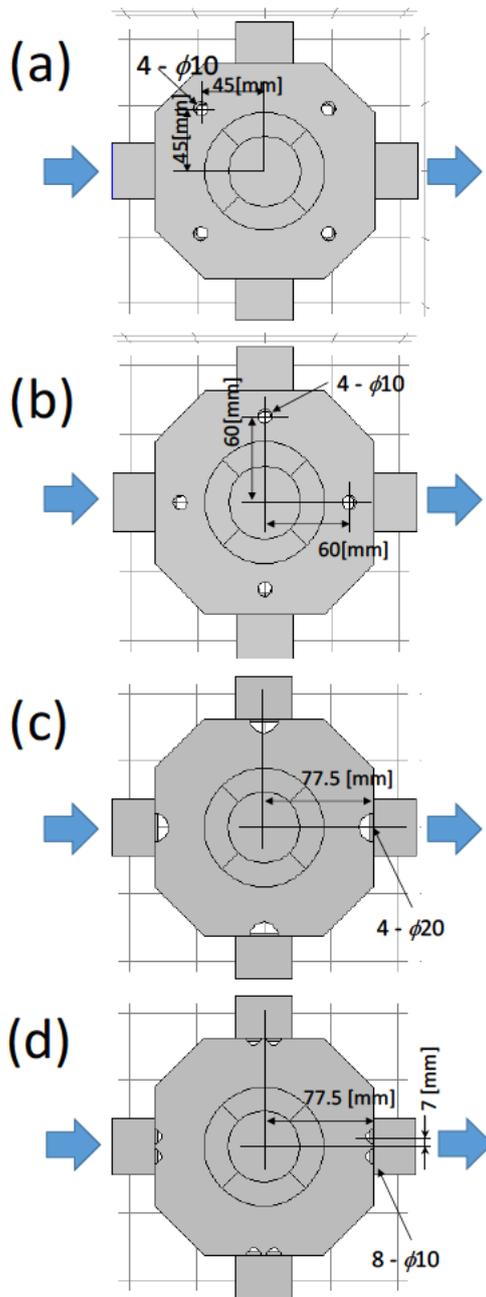


図 69 ダイ内部に穴、溝を設置した解析モデル

- (a) : 電流軸に対して 45° の位置に穴
- (b) : 電流軸および直角軸方向に穴
- (c) : スペーサー - ダイ境界面に $\phi 20$ の半円形の溝 4 本
- (d) : スペーサー - ダイ境界面に $\phi 10$ の半円形の溝 8 本

青の矢印は、電流の方向を示している。

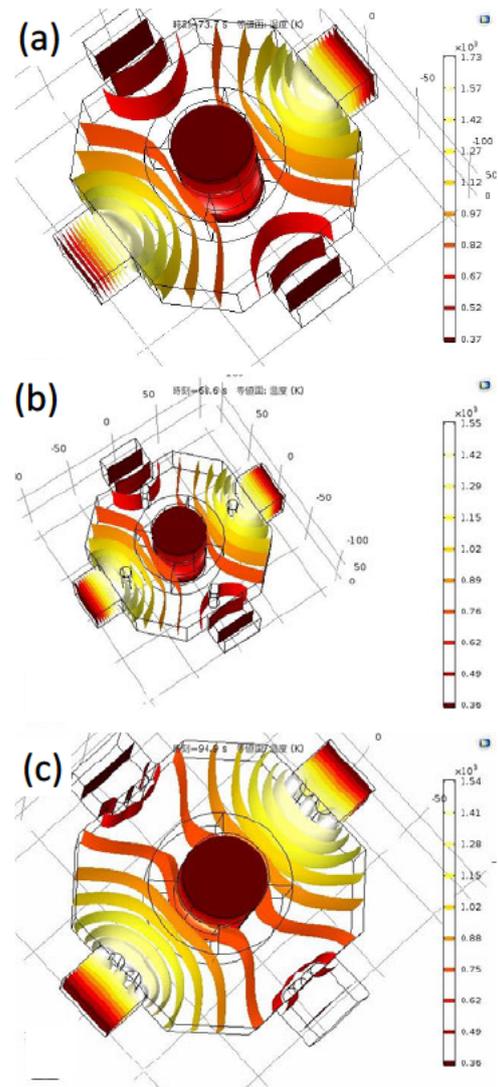


図 70 ダイに穴、溝を設置した場合の焼結容器内部の等温面分布

- (a) : 基本モデル
- (b) : 電流軸および直角軸方向に穴
- (c) : スペーサー - ダイ境界面に $\phi 10$ の半円形の溝 8 本

ることを想定しており、(c)および(d)のモデルは、スペーサー - ダイ境界面の高温領域を優先的に抑制すると同時に、直角軸方向の熱伝導を抑制することを目的としている。また、(c)と(d)では、スペーサー - ダイ境界面の設置面積を一定にするために、設置する溝の直径をそれぞれ $\phi 20$ と $\phi 10$ に変更している。解析条件は、基本モデルと同条件で解析を行なった。

図70に、3種類の解析モデルの等温面分布、つまり (a) 基本モデル、(b) 図69(b)仕様、(c) 図69(d)仕様 でシミュレーションした時の等温面分布を示す。基本モデルの結果に比べ、スペーサー - ダイ境界面付近に穴及び溝を設置することにより、高温領域が境界面側に圧縮され、結果として中心部分での温度分布が改善することが分かった。特に、境界面に溝を設置した場合は、効果が高い。また、穴を電流軸に対して 45° の位置に穴をあけた場合には (図69(a))、以上の様な効果は弱い。

以上述べたように焼結容器 (ダイ) に穴や溝を設けたり、あるいは、(本稿では省略するが) 焼結用電流を流したくない部分にBNコーティングを施したり、また、焼結時の型内に充填されているCu粉の電流分布への影響を考慮したり……といった各種条件を考慮しながら、焼結型の温度分布が均一になるような条件を探している。

そして最終的には、実際の焼結時の型をサーモカメラを用いて撮影すると同時に、型内にセットした複数の熱電対の温度観察データとも照合し、有限要素法による理論的なシミュレーション結果との整合性を図っている。

その観察の様子を図71に示す。こうした作業の繰り返しにより、シミュレーション精度を上げると共に、予測精度も向上させるべく、今後とも努力していく。

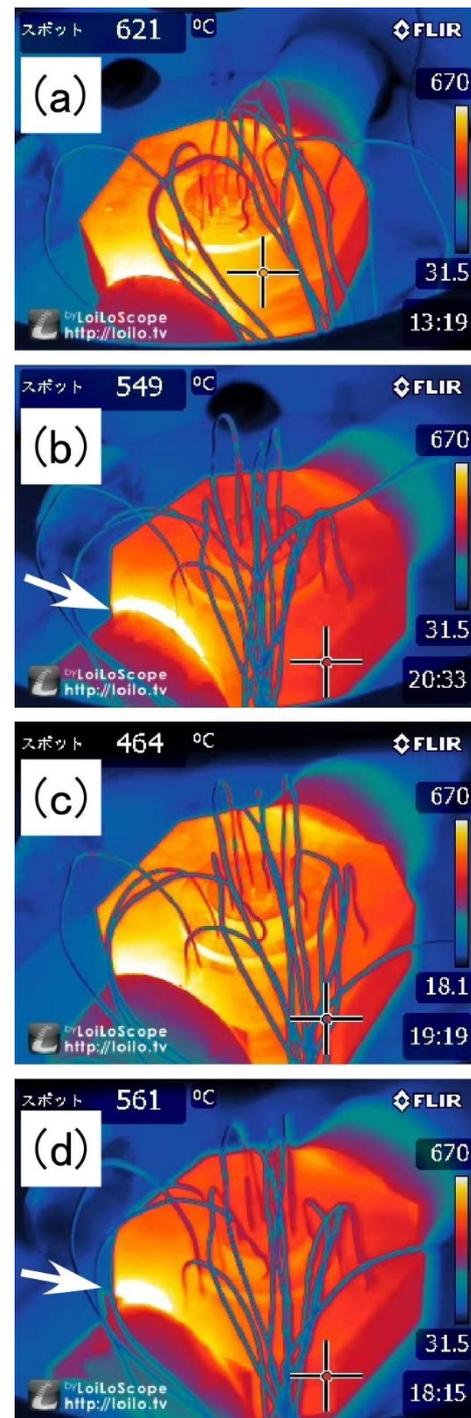


図71 サーマカメラを用いて計測した焼結容器表面の温度分布
 (a) : 内部試料無し、(b) : 銅粉末、
 (c) : BN スプレー10mm、
 (d) : BN スプレー30mm

2-【2-2. 熱劣化対応】

(1) 熱劣化の原因究明

Cu-C 複合材料の熱劣化に関しては、当初は、天然黒鉛 (C) と金属銅 (Cu) との界面で剥離が起こり、材料が温度サイクルを受けるたびにそれが進展することで、熱伝導率の低下 (いわゆる熱劣化) を起こすのではと予測していた。例えば、次の図72に示すようなもので、焼結直後の金属組織を観察すると、既に界面に割れがある場合がある。従ってCuとCとが互いに反応し接合を促進するような添加元素 (例えば、Ti、Si...) をCuに加えることで、界面反応を制御し、クラックを防ごうという考えがある。これに関して広島大学で検討したが、その内容については、別項 (3)、(4) 添加元素の探索で報告する。

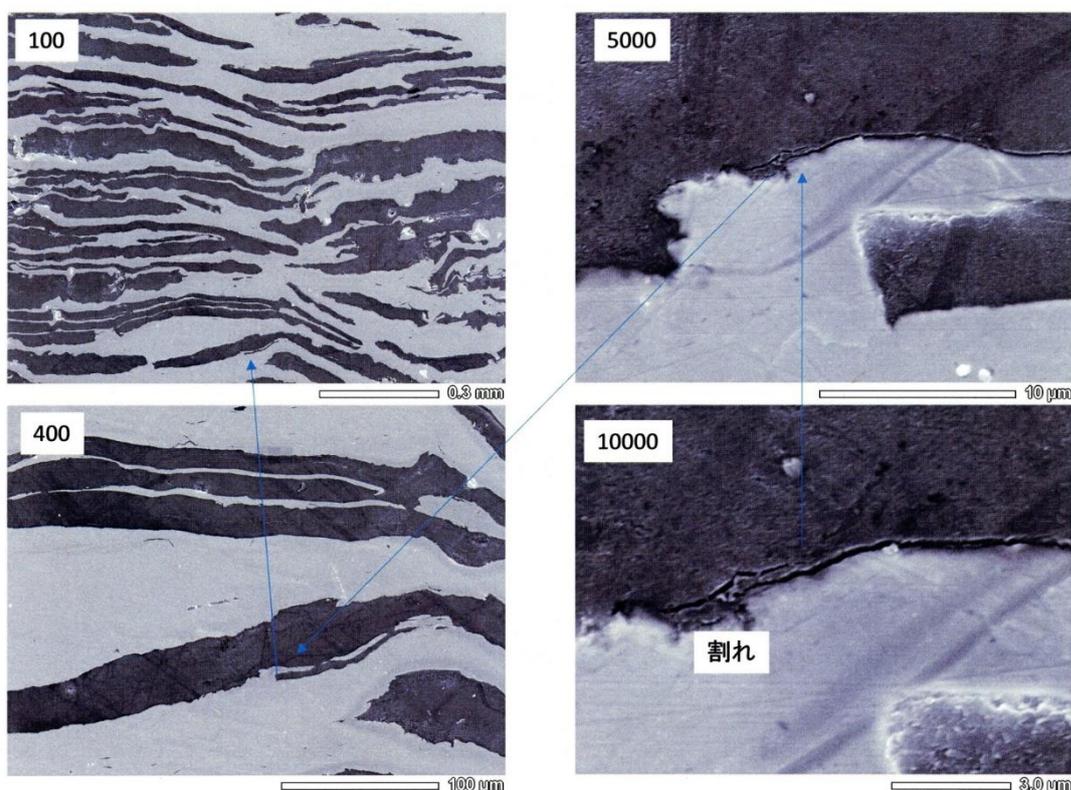


図72 焼結直後のCu-C界面の割れ

一方、本当にどういう割れ方をするのか、温度サイクルを负荷しながら、その場観察を実施し原因究明をすべく、産業技術総合研究所を中心に活動した。

(2) 高温下でのSEM/TEM観察

熱サイクル試験における銅/天然黒鉛複合材料の熱伝導率低下は、構成する素材の熱膨張率の差による界面組織の劣化に起因するものと考えられる。そこでH27年度に電子顕微鏡を用いたその場観察により、加熱・冷却時における銅/天然黒鉛複合材料の内部組織の変化について観察を試みた。

観察した試料は、(株)アカネの試料 No. 222 (熱伝導率 972.5W/m・K のもの :

ただし、その後の再測定で900越えの値は否定された。再測定では700W～750W/m・K レベルであった。)

実験に使用した SEM 及び観察条件を図73に示す。本実験では、試料加熱機能を有する SEM を用いて、室温から最大 300°Cまでの加熱・冷却過程で生じる銅/天然黒鉛複合材料の内部組織の変化や界面近傍における亀裂の有無についてその場観察を行った。観察用試料は、作製した銅/天然黒鉛複合材料から天然黒鉛配向方向に沿って切り出し、粗研磨した後に機械的研磨によるダメージを除去し表面を平滑にする目的でクロスセクションポリッシャーを用いてイオン研磨を行った。

装置: 電界放出形走査電子顕微鏡

(JSM-7001F)

分解能: 1.2nm (30kV)、3.0nm (1kV)

加速電圧: 0.5～30kV

倍率: ×10 ～ 1,000K

観察温度: 室温～300°C



図73 その場観察に使用した SEM 及び測定条件

まず、加熱・冷却実験を開始する前の銅/天然黒鉛複合材料について、内部組織観察及びエネルギー分散型 X 線分光法 (EDS) による元素分析を行った。作製後の試料には、銅-天然黒鉛界面近傍や黒鉛粒子内部で欠陥 (亀裂、空隙) が、さらには黒鉛粒子内部で不純物粒子が観察された。これらは複合材料作製時すでに導入もしくは混入されたと考えられる。

次に、EDS により同視野における元素マッピング分析も行った。その結果、黒鉛粒子内部に存在していた不純物は Al、Si、O で構成されることが明らかとなった。また、銅マトリックス内部にも Al、Si、O の元素ピーク強度が確認され、不純物として酸化物が存在していることも分かった。

次いで、試料に温度を掛けながら、複合材の組織観察を行った。その結果、割れは Cu-C 界面でなく、界面近傍の黒鉛 (C) 中に発生することが新たにわかった。従って、Cu と黒鉛との間に働く応力を緩和することが一つの対応であると分かり、単純に Cu 量を減らすことも熱疲労対策に有効であると認識できた。

(3) 添加元素の探索

－「Cu-Ti 合金とカーボンの濡れ性評価」－

広島大学にて、Cu-Ti 合金を作製しグラファイトシートとの濡れ性を調査し、濡れ性の改善を試みた。出発原料は、(株)高純度化学研究所の顆粒状 Cu (純度 99.9%、粒径 180 μ m) とニラコ(株)の Ti 小片 (純度 99.5%、 ϕ 1.0 \times 3.0mm) を用いた。Cu と Ti を質量比 99 : 1、97 : 3 となるように秤量し、アルミナるつぼに挿入後、シリコニット炉で 1423K まで昇温後、5h 保持し、合金を得た。得られた合金を直径 3mm 以下、長さ 4~8mm、体積 0.111cm³ となるよう加工し、滴下試料とした。基板は、直径 4cm のステンレス板に沿って厚さ 0.7mm の (002) 面配向のグラファイトシートをアロンセラミックで 150 $^{\circ}$ C、1h の温度条件で接着したものをを用いた。

図 74 に濡れ性測定装置の概略図を示す。なお、装置は自作である。チャンバー内に作製した合金をガラス管に設置し、チャンバー内を真空にした後、Ar ガスをフローしながら 1423K まで昇温した。その後、合金をアルミナ管に落とし 25 分間保持し、基板上に滴下し、ビデオカメラで 12min.撮影した。

ビデオカメラで撮影した映像から図 75 のように値を読み接触角を求めた。 $\theta/2$ 法を用いて接触角を求めた。液滴を円の一部と仮定し、以下の定理を用いた。

$$\theta = 2\theta_1$$

$$\theta = 2\tan^{-1}(r/h)$$

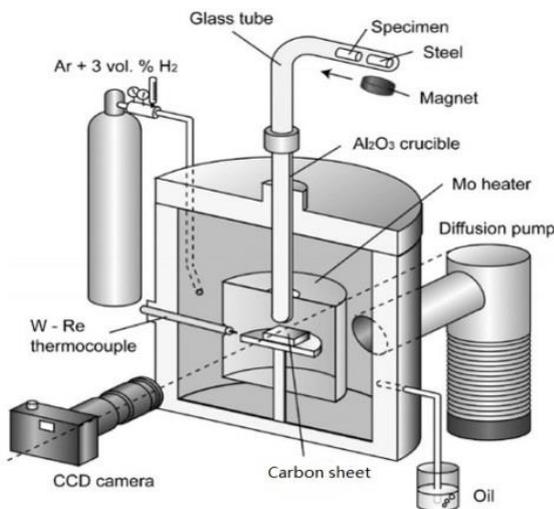


図 74 濡れ性測定装置の概観

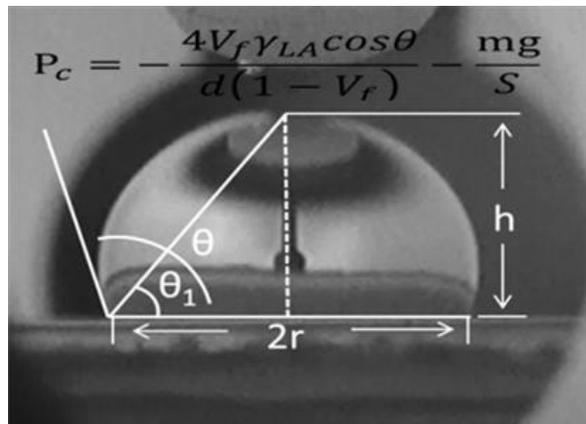


図 75 接触角の測定法

Cu-1wt%Ti 合金と Cu-3wt%Ti 合金の 1423K での濡れ角の時間変化を次頁の図 76 に示す。これより、Ti 添加量 3wt%の合金の濡れ角はおよそ 140 $^{\circ}$ なのに対し、方が 1wt%のものは 100 $^{\circ}$ 程度に比べ、40 $^{\circ}$ 程、濡れ角が小さくなっていることが分かる。これは、Ti 添加量の増加に伴い、グラファイトとの界面で濡れを改善する TiC が生成したことが原因であると思われる。

(4) C-Cu 界面の濡れ性改善
 — グラファイト/Cu 複合材料
 の熱伝導率の測定値と理論
 値の比較 —

図77は、グラファイトの体積率を変化させた場合の、熱伝導率の測定値と、空孔の影響とGrの異方性を考慮した理論値との比較である。測定値は、12vol%Cの複合材料を除き、理論値を大きく下回った。本複合材料中には、グラファイトとCuの間には、隙間が見られた。これは、グラファイトとCuとの濡れが悪いことにより発生した隙間に起因する熱伝達の低下が原因であると思われる。その為、Cuとグラファイト間の濡れの改善が重要な課題であることが分かった。

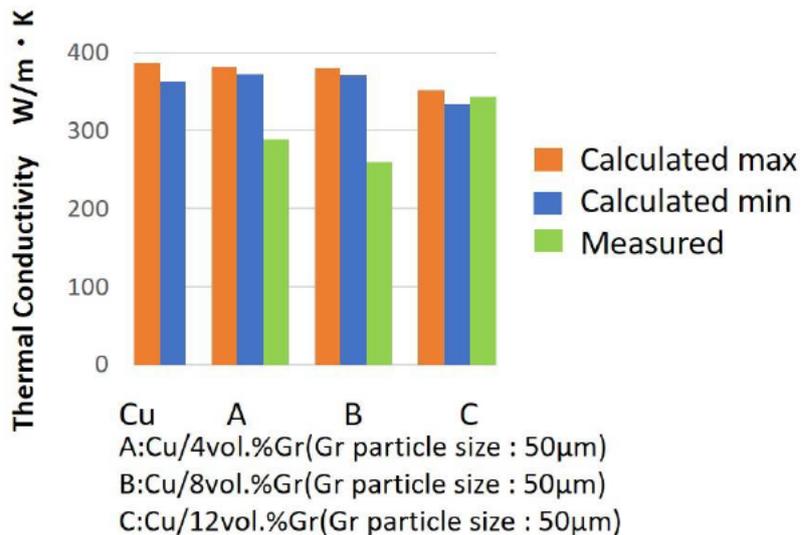


図77 グラファイト/Cu 複合材料の熱伝導率の測定値と理論値の比較

— 「Cu-Si 合金とカーボンの濡れ性評価」 —

Cu-Si 合金を作製しグラファイトシートとの濡れを調査し、濡れの改善を試みた。出発原料は、(株)高純度化学研究所の顆粒状Cu(純度99.9%、粒径180 μ m)と(株)高純度化学研究所の顆粒状Si(純度99.9%、粒径75 μ m)を用いた。CuとSiを質量比97:3、95:5となるように秤量し、アルミナるつぼに挿入後、シリコニット炉で1423Kまで昇温後、5h保持し、合金を得た。得られた合金を直径3mm以下、長さ4~8mm、体積0.111cm³となるよう加工し、滴下試料とした。基板は、直径4cmのステンレス板に沿って厚さ0.7mmの(002)面配向のグラファイトシートをアロンセラミックスで150 $^{\circ}$ C、1hの温度条件で接着したものを用いた。濡れ性測定装置は先述の「Cu-Ti」の時と同じものを使用した。計測条件、観察条件も同じにそろえた。接触角の計算も同様。

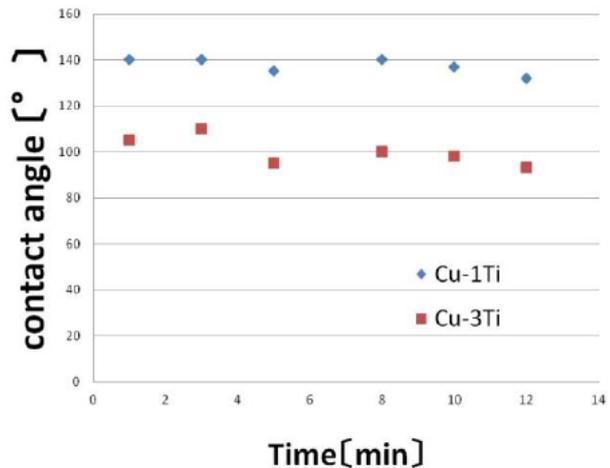


図76 Cu-Ti合金とグラファイトの濡れ角の時間変化

Cu-3wt%Si 合金と Cu-5wt%Si 合金の 1473K での濡れ角の時間変化を図78 に示す。これより、どちらの合金も濡れ角はおよそ 120°であり、時間変化による濡れ角の変化は見られなかった。一方、以前の研究により純 Cu とグラファイトの濡れ角は、およそ 145°であったので、Si 添加により、濡れ性は改善することができた。しかしながら、添加量の増加は濡れ性の改善には寄与しなかった。

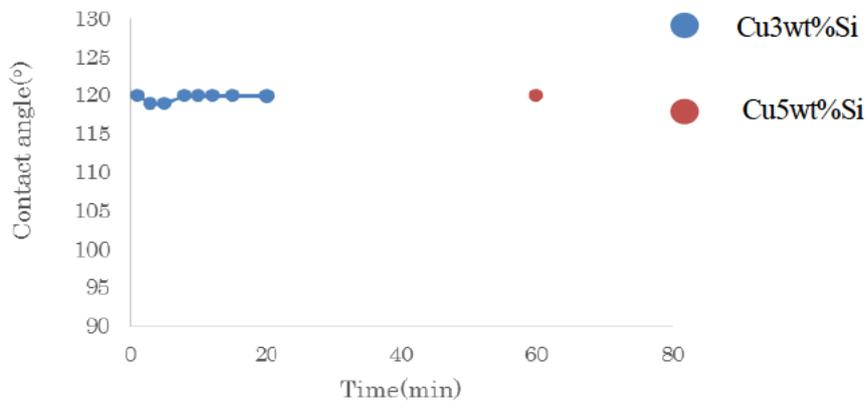


図78 Cu-Si 合金とグラファイトの濡れ角の時間変化

Cu-3wt%Si 合金と Cu-5wt%Si 合金のグラファイトとの接触界面の EPMA による元素マッピングの結果を図79、図80に示す。

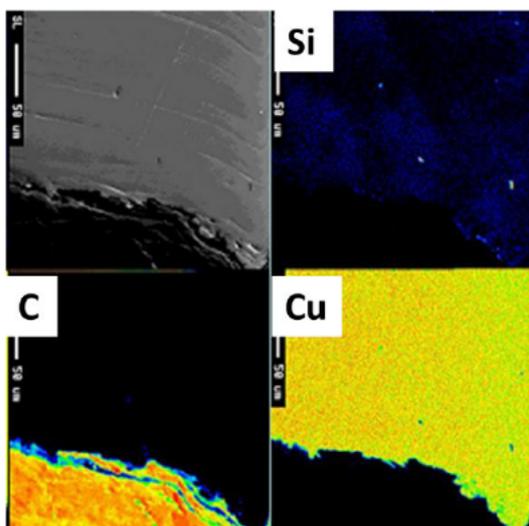


図79 Cu-3wt%Si とグラファイトとの接触界面の元素マッピング

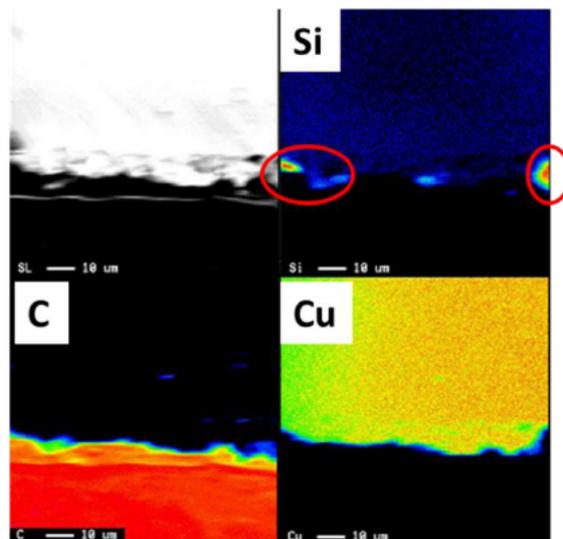


図80 Cu-3wt%Si とグラファイトとの接触界面の元素マッピング

これより、Cu-3wt%Si 合金では接触界面での Si とグラファイトの反応の痕跡が見られなかった。これより、界面の反応層厚さは検出限界以下であると考えられる。一方、Cu-5wt%Si 合金では接触界面の赤線で囲った一部に Si と C の反応が見られた。Cu への Si 添加により、濡れの改善が見られ、SiC の形成が濡れの改善に寄与したことが推察されるが、SiC 層の厚さの増加は、濡れの改善に影響を与えないと考えられる。

(5) Cu-C合金における焼結時Si添加の影響

Cu-Si合金中におけるSi量の影響について、焼結時に添加するとどういった特性になるのか、(株)アカネでも調査した。

この目的は、Si-Cu合金をマトリックスとした複合材を作った時の、マトリックスの影響はどうなるかを推定するためのデータを得るためである。

図81にCu-Si合金の熱伝導率へのSi添加の影響を、図82に熱膨張率へのSi添加の影響を、図83に曲げ強さへのSi添加の影響を示す。

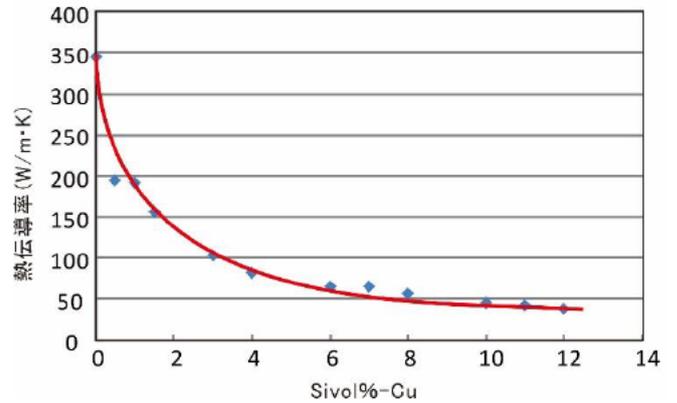


図81 Si添加Cu合金の熱伝導率

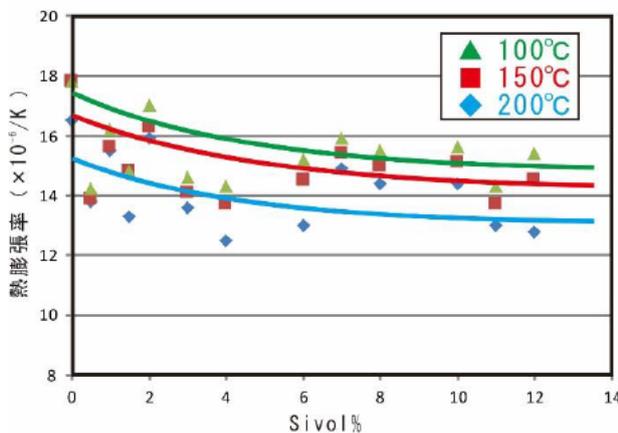


図82 Si添加-Cu合金の熱膨張率

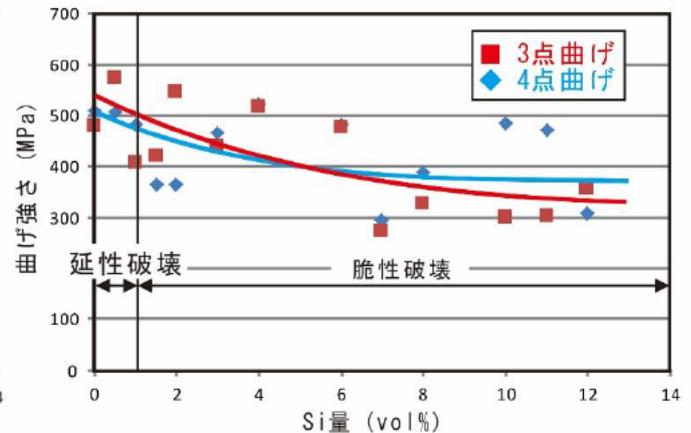


図83 Si添加-Cu合金の曲げ強さ

図81から、Si量が0数パーセント増えても、熱伝導率は急激に低下することが、また、図82から熱膨張率もSi量の増加に連れて徐々に低下していくことがわかった。さらに、図83からは、曲げ強さもSi量が増加するにつれて低下傾向を示した。

以上のように、Si添加は特に熱伝導率が大きく低下することから、本テーマの高熱伝導率複合材料のマトリックスには向いていない材料である。

(6) 熱サイクル試験

熱サイクル試験機(図84)は、H26年度に、設計・製作共に完了した。しかし、実際に作動させてみると、サイクルタイムが長く、1000回を実施しようとする時間が掛かり過ぎるため、サイクルタイムを短縮する



図84 熱サイクル試験機

改造を行った。

この装置を用いて、Cu-C 複合材の熱サイクル試験を行なった結果、次のことがわかった。

- ① 熱劣化は、500 サイクルくらいで底を打つ。
注：元々は1000 サイクルの試験をする予定であったが、飽和現象が見られたため、500 サイクル以降の評価は中止した。
- ② しいて言うならば、Cu の割合が多いほど、熱劣化が大きい。
- ③ 熱劣化対策は効果がある。対策後は、ほぼ5%程度の熱劣化に留まった。
例えば、当初800W/m・Kであれば、500 サイクル後には760 程度の熱伝導率（ $800 \times 0.95 = 760$ ）となる。

(5) 複合材の熱伝導率の目標 900W/m・K について

本開発の目標である 900W/m・K の設定根拠は、元々は自動車部品の製造会社B社の要望より発している。B社は、熱劣化が起こった後でも 700W/m・K を確保することが必要とのことであつたし、その根拠となるデータは図85に示すものであつた。従つて、この20%劣化を根拠に計算すると、 $900 \Rightarrow 20\% \text{劣化} \Rightarrow 720\text{W/m}\cdot\text{K}$ となる。つまり、熱伝導率目標としては900を掲げると、熱劣化が20%生じて、まだ20程度のマージンを残して700W/m・Kをクリアーできる。ということで、本研究の目標900を設定したものである。

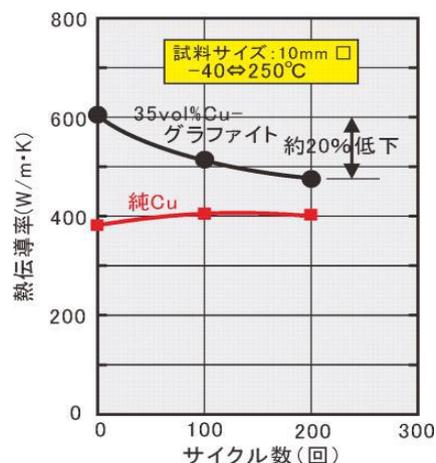


図85 熱サイクル試験結果

実際には、この3年間の開発の結果、複合材の熱伝導率は最高840（焼結時の加圧力110MPaの時）で、量産条件を考慮すると750~790W/m・K（加圧力93MPaの時）程度が妥当と考えている。つまり、開発目標の900には未達成のレベルである。

しかし、これらの素材に熱劣化対策を織込むと、熱劣化は5%程度に留まることがわかつた。そのため、新品時に750~790の熱伝導率があれば、例え劣化した後でも713（ $=750 \times 0.95$ ）~750（ $=790 \times 0.95$ ）となり、700W/m・Kを越える値が保証できそうである。つまり本来の要望700に対してはきちんと対応できていることになる。

以上のことから、複合材の熱伝導率目標900W/m・Kは未達成であつた（最高840）が熱劣化後の数値目標（表だつて出していないが）700は十分にクリアーしており、必要な目標を達成したと判断している。

2-【2-3. 工程変更】

アカネでは、複合材放熱基板の開発に当って、従来は Cu-C 複合材料の上に AlN 板と Cu 薄膜を重ね、それらを通電焼結装置の中で、同時にろう付けや拡散接合することで、IGBT 向けの放熱基板をサブアッシーする技術を開発してきた（図86）。しかし、AlN 板が割れる、AlN 板そのものが厚くて熱伝導を阻害するなど問題を抱えていた。

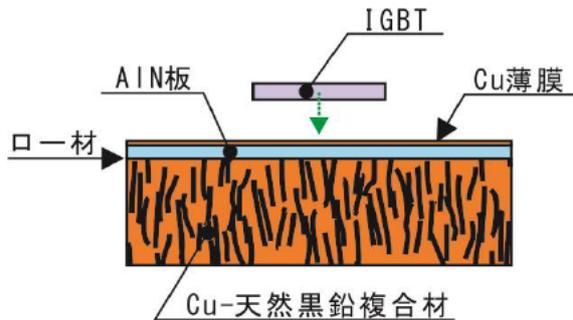


図86 従来のアカネのやり方

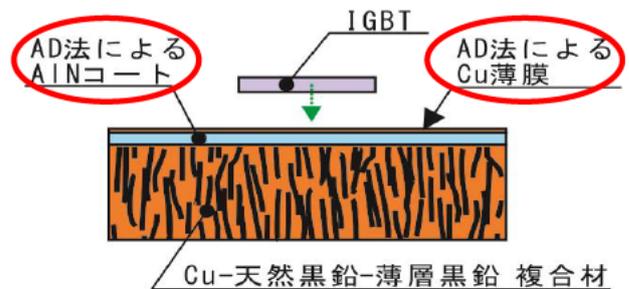


図87 AD法を取り入れたやり方

そこで、図88に示すように、Cu-C 複合材の上に、AD法により先ずは AlN 層を、次いでその上に Cu 薄膜を直接コートすることで、安価に且つ熱伝達性能の良いものを作ること検討した。

(1) Cu-C 複合材への AD 法による AlN コートと Cu コート

図89に示すように、Cu-C 複合材の表面に、AlN 層と Cu 層を AD（エアロゾル・デポジション）法にてコーティングすることはできた。

AlN 皮膜に関しては、印加電圧：1000V の状況でも、絶縁抵抗は 34MΩあり、十分に絶縁性があることも確認できた。

ただ、コーティングの断面を詳細に顕微鏡観察すると、まだ、コーティング層が完全でない部分も見られ、今後とも、技術改善を加えていく。

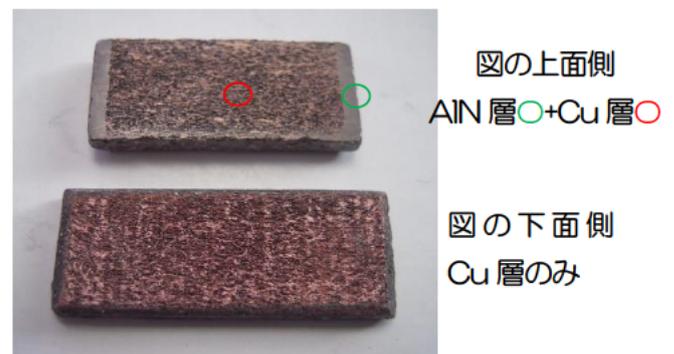


図88 複合材表面へADコートした AlN 層と Cu 層

(2) 工程変更を行った試作品の作製

工程変更を行い図89に示す構造、サイズの「次世代型ヒートシンク」を試作した。これは図1の上部のみを対象としている。下部のアルミ製ヒートシンク部分には客先の実情により変動するため図89には詳細図を記載していないし、試作も行わなかった。ま

た、このヒートシンクは次世代型と呼んでいるように、将来の IGBT 用半導体として期待されている SiC 半導体素子の載置も織り込んだ。

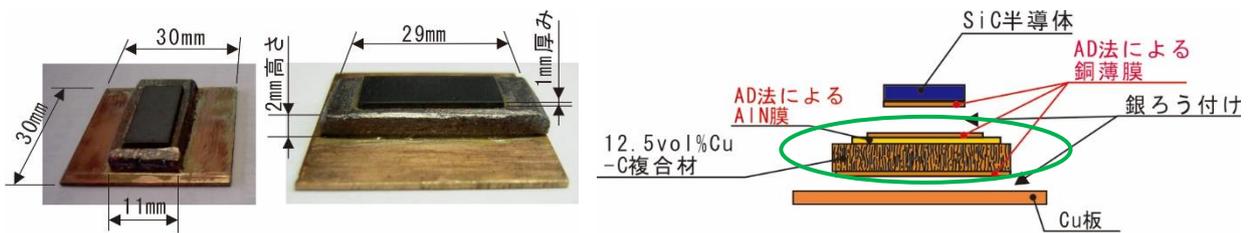


図 8 9 SiC 半導体と複合材放熱板の一体化

(3) コスト目標

この工程変更によるコスト目標は、図中の緑○で囲った部分を □30×5mm のサイズで作製した時、コスト 150 円/1 個以内であった。

最終的にサイズは□30×2mm で十分であることがわかり、2mm 厚みでコスト試算した。その結果の詳細は記述しないが、約 408 円/個であった。

このコストアップ要因は主として、焼結型代であった。もし型代が無ければ、202 円/個となり複合材料の価格はそれほど高くない。これは主として、天然黒鉛が非常に安いことに起因している。

ただ、いずれにしても、目標のコスト 150 円/1 個以内は未達成であった。今後の対応として、焼結型の寿命を如何に伸ばすか、あるいは壊れない型とするかが最も重要であることがはっきりした。また、焼結型の負担が0円であったとしても、202 円/個であり、目標の 150 円にはまだ及ばない。

ここで、今後のB社との関係について。

本開発に集中するため、しばらく遠ざかっていたが、最近、再び接触を持ち始めた。4 年前にコンタクトしていたメンバーで、彼らは今もそのまま継続して同じ業務を遂行している。

そこで、当社の開発の現状やヒートシンクに関する状況を説明すると共に、意見交換も行った。その結果、特に SiC 半導体素子を中心とする IGBT に対応した次世代の放熱基板構造に関しては、関係している各社共にかなり迷いがあり、まだ対応方法が見えていないように感じた。

今後はこのルートを維持しながら、B社向けの次世代型の放熱基板の提案や共同開発に臨みたい。

2ー【3. グラフェンの製造技術の開発】

従来、図90に示すような小型の超音波照射+水熱装置（容器の体積：200ml）を使用して、グラファイトの剥離実験を行ってきたが、薄層天然黒鉛を複合材に利用するとなると、より大量のグラファイトを処理する必要があり、H27年度から装置の大型を進めた。

ただ、大型装置だけでなく、従来型の超音波照射・水熱装置を用いた評価、複数のガラス瓶やビーカーを使用（複数の溶媒を同時に比較したい時などに便利）した多数個に同時超音波照射をする方法、なども、目的に応じて適宜使用している。



図90 超音波照射・水熱装置

2ー【3-1. グラフェンの大量製造技術の開発】

天然黒鉛の剥離は、超音波の照射条件や使う溶媒、圧力などにより、剥離（分離）の状況や剥離効率が変わる。その内容について二つ説明する。

- ① 最初は、グラフェンを作るために取り掛かった時に実施したことの内容。
予備実験として図92に示す方法・手順で、どの程度の剥離が可能か、どういった溶媒がいいのかを先ず調査した。その内容をまとめたもの。
- ② ガラスビーズを使った実験
黒鉛の剥離効率を高めるために、ガラスビーズを使った実験。

(1) 各種溶媒での超音波照射実験

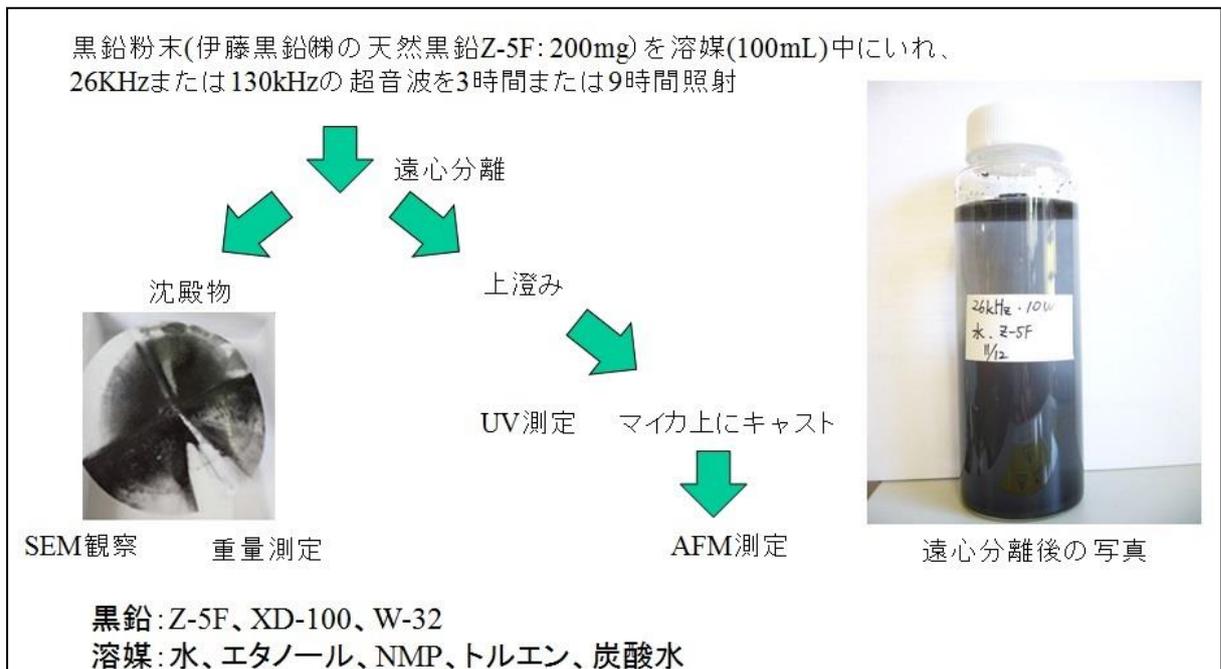


図91 予備実験の方法・手順

手順は、図91のように、伊藤黒鉛㈱の天然黒鉛「Z-5F」を用いて、4種の溶媒に分散させ、超音波照射により剥離させた。そのテスト結果を図92に示す。

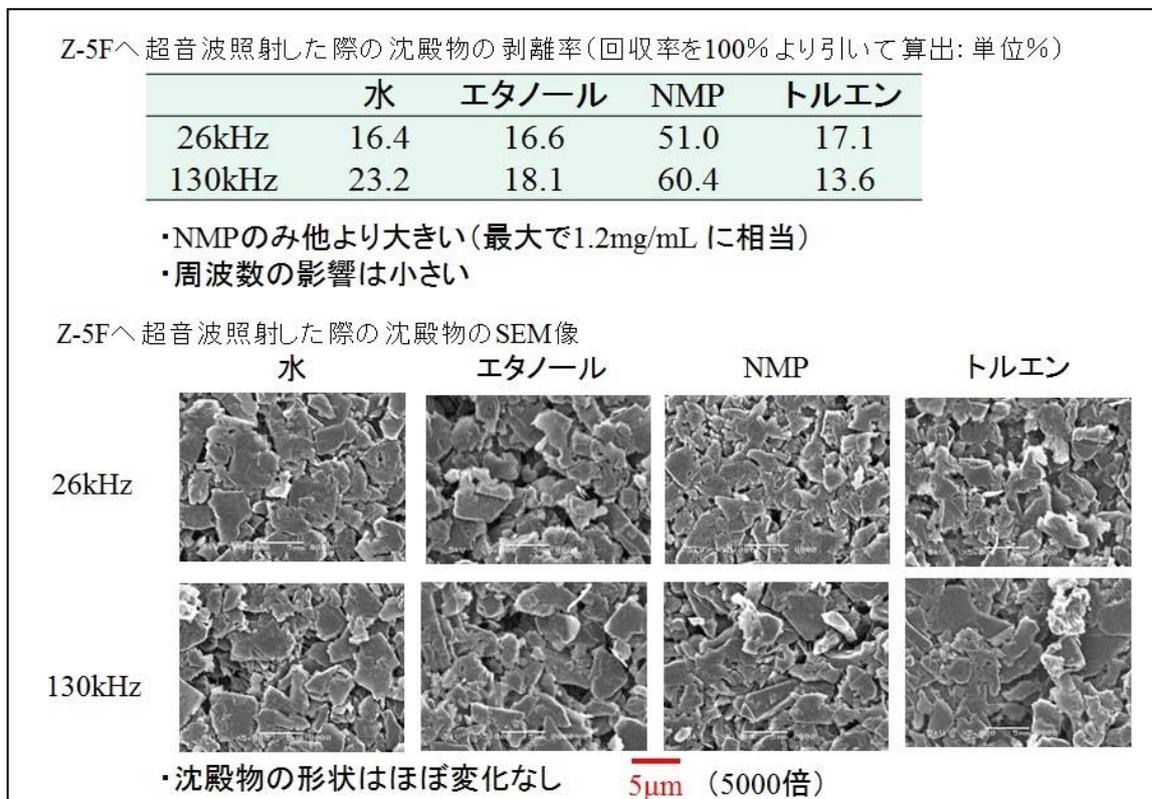


図92 周波数および溶媒の影響

図92より、わかることは、

- 剥離率はNMP(ノルマル メチル ピロリドン)が他の溶媒よりも大きい。
- 超音波の周波数の影響は小さい。
- 超音波照射後の沈殿物の形状は、照射前とあまり変わらない。
(Z-5F のサイズはほぼ5 μ 前後、照射後もほぼそれに近いサイズ)

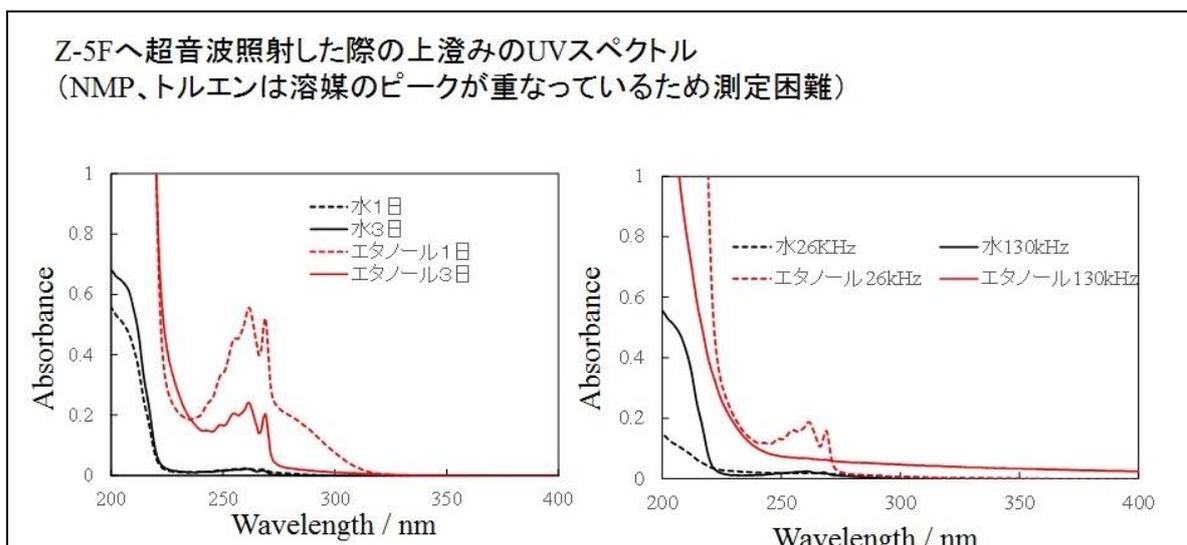


図93 超音波照射条件の影響（上澄み液の部分）

図93は、上澄み液（グラフェンやグラフェン類似のものが浮遊している可能性がある部分）の紫外線吸収スペクトルを測定したものであるが、このグラフからわかることは、

- 超音波照射時間を長くしても、吸収が大きくなるとは限らない。
- 吸収ピーク位置（260～270波長/nmの辺り）は、グラフェンとほぼ同じ位置であるが、単一の山ではなく微細構造が見られる。通常、水、エタノールのような極性溶媒中では大きなグラフェンは分散しにくいことがわかっており、非常に小さなグラフェンが存在している可能性がある。

同じ上澄み液をマイカ上にキャストし、上澄み液中の固形物を AFM（原子間力顕微鏡）にて観察した。結果を図94に示す。観察範囲は5 μ × 5 μ である。

この図から、上澄み液中に分散している固形物は非常に小さく、大きなグラフェンは含まれていないようである。しいて言えば、NMP(ノルマル-メチル・ピロリドン)中に見られるものが、1 μ 程度と大きい。

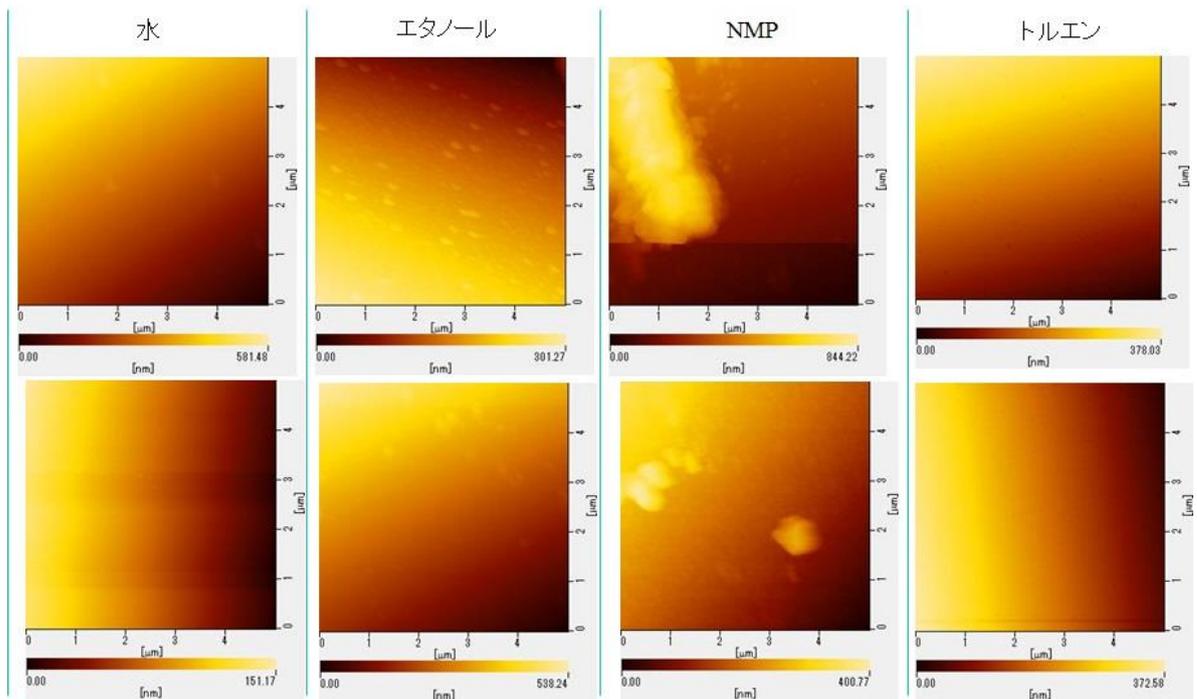


図94 上澄み液のAFM（原子間力顕微鏡）観察 その1

また、より視野を広げて $20\mu \times 20\mu$ の範囲で、同様な AFM 観察を行った結果を図95に示す。

この観察結果から、極性溶媒（水、エタノール）中では、上澄み液に分散している固形物はフラットな形状をしているものが無いのに対して、非極性溶媒の芳香族系トルエン中では薄くてフラットなもの(=グラフェンか、図中の赤い矢印)が得られているようである。ただ、固形物が多いがまだ塊状に留まっているよう。

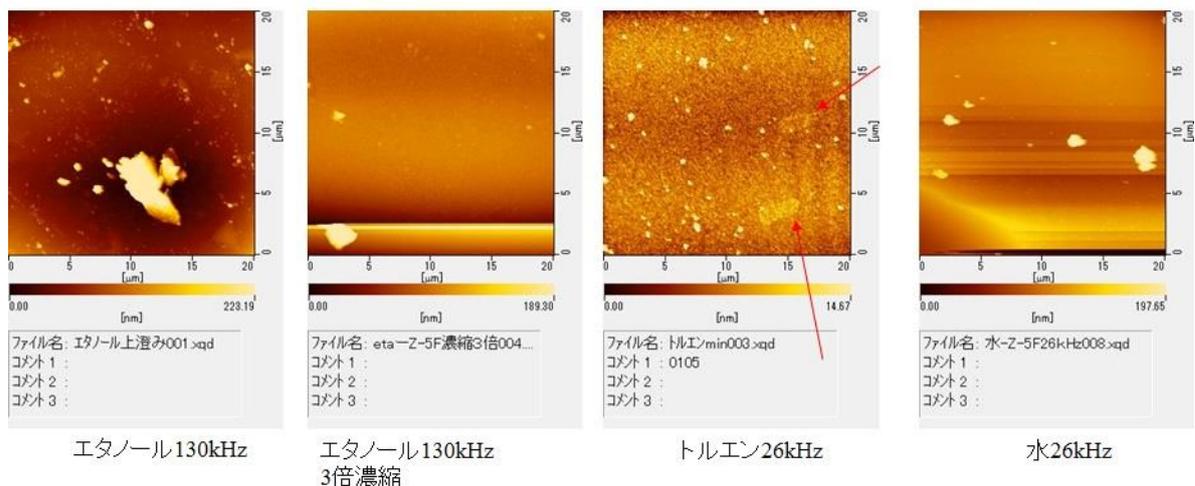


図95 上澄み液のAFM（原子間力顕微鏡）観察 その2

容器内を加圧した状態での超音波照射実験も行った。

加圧条件

圧力：5MPa（水/液体窒素を混合し、封入直後）
3時間後は3MPaまで低下

その結果剥離率は20%で、常圧の場合とほぼ同様であった。また、AFM 観察結果を図96に示すが、厚い固形物が多かった。

浮遊物の観察も実施した。浮遊物をSEM（電子顕微鏡）で観察した結果を図97に示す。

浮遊物は、剥片状では無かった。

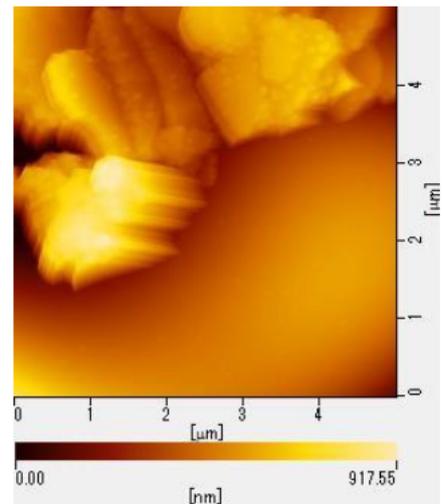


図96 加圧下での分離実験後の上澄み液中固形物のAFM観察結果

水、130kHz、3時間

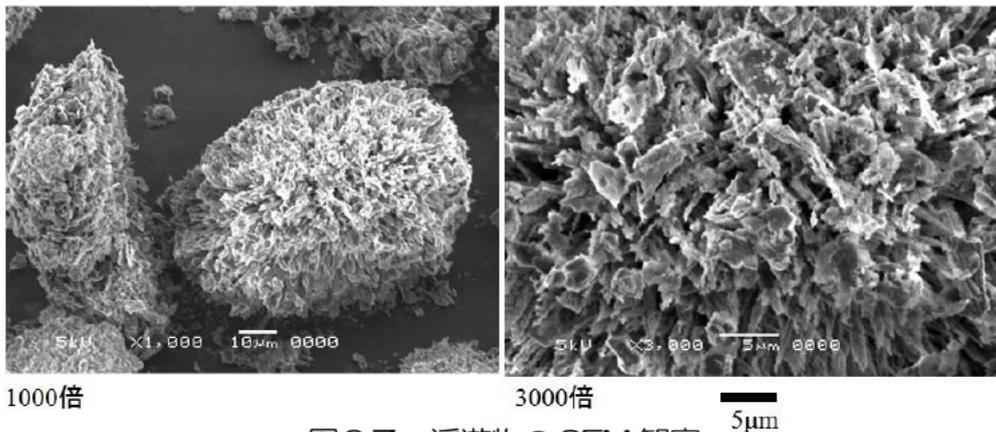


図97 浮遊物のSEM観察

以上をまとめると、次の図98のようになる。

- NMP中での超音波照射により最も高効率で剥離が起こる(1.2mg/mL)。
- 剥離した成分のサイズは原料よりも幾分小さい(5→1μmへ)。
- トルエン中で剥離すると平たい形状のものが観察される。

図98 浮遊物のSEM観察

(2) ガラスビーズ添加によるグラフェンの生産性向上

従来の超音波照射による天然黒鉛の剥離法では、グラフェンの生成が少なかったため、図99に示すようにガラスビーズ等の添加により生産効率を高めることを試みた。その結果、最大で8mg/mLのグラフェンを含む分散液が得られことが得られた。その詳細は省略。

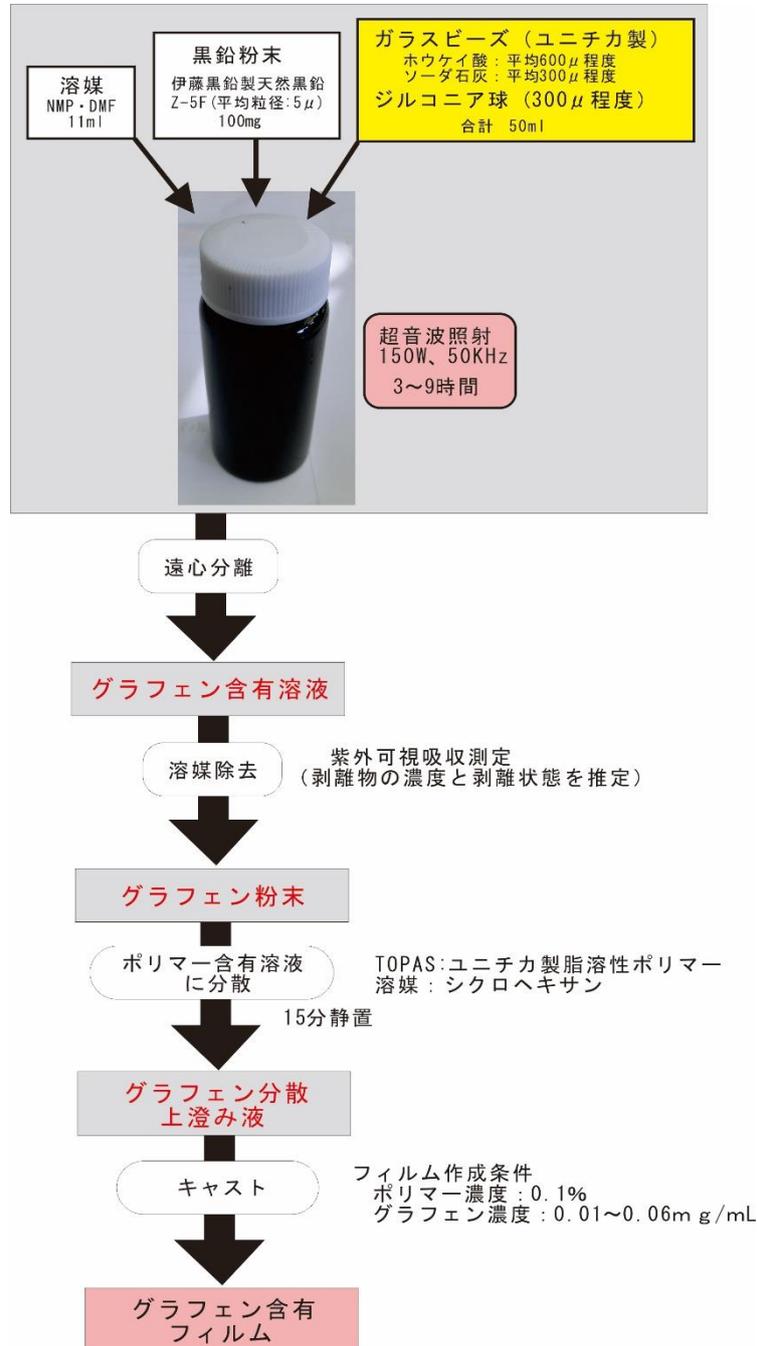


図99 グラフェンの大量生産とグラフェン含有フィルム作製の流れ

また、そのグラフェンを用いて透明導電膜の試作も行った（後述）。

2-【3-2. 分離法の確立】

省略。

2-【3-3. 透明導電膜の検討】(ニグラフェン含有フィルムの作製)

図99で得られたグラフェンのNMP分散液から、NMPを除去しグラフェン凝集体を得ることができる。これを再び、0.1%のTOPASを含むシクロヘキサン中に入れ超音波照射を行った。こうして得られた濃度の異なる分散液をガラス基板上にキャストすると、簡単にフィルムが得られた。しかも濃度によっては比較的均一な膜となっていた。

得られたフィルムは、まだ、透過率、電気抵抗共に十分満足のいく値ではないが、色々な実験を繰り返しながら、あるレベルの「グラフェン含有透明導電膜」ができないか検討を進めている。

最終章 全体総括

3-1 研究成果の総括

3-1-1 【1. LED 用放熱部品の開発】

本開発を通して、ヘッドライト中への LED 素子の載置の仕方、配線の仕方等が理解でき、且つヘッドライト内部構造や冷却のあり方、また LED の配線の仕方、配線設備の構造、使用条件（例えばワイヤーボンディング装置の構造や、その使用条件など）、前処理のあり方など、広範囲な知識、経験を積むことができた。こうしたことは、当社のような小企業にとっては重要で、今後は、部品メーカーA社殿との各種技術交換や折衝で、臆することなく、自信を持ってこちらの意見を述べられるようになったという意味でも、非常に価値のある開発であった。

また今回は、AD法と言う非常に新しい技術を取り入れたヘッドライト構造が開発できたこと、またAD法を用いて熱抵抗が具体的に下がったことが、実証できたことから、部品メーカーA社に対して、当社提案構造LEDヘッドライトのすばらしさを確信を持って売り込める状況となった。これも、本開発の大きな成果であった。

全般的には、以上のような成果であったが、コストだけは目標未達であった。コストは、当社だけの問題でなく、A社とも関係してくる。従ってコストに関しては、今後の売込みの中で、より詳細、精緻に積み上げて何とか相手の目標価格に合致するように努力していきたい。

既にA社からは、次のステップに上がるべく課題を頂いており、対応中である。

3-1-2 【2. IGBT 用などの次世代放熱基板の開発】

本開発により、熱伝導率 $840\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ という値のCu-C複合材を得ることができた。また、熱劣化目標（1000^{サイクル}で20%以内）も5%以内に抑えることができた。これらは、材料開発の大きな成果であると考えている。また、これは、特に当社にとっては、数年前に自動車部品メーカーのB社から頂いた大きな目標をほぼクリアできた（コストのみ微妙）ということで、B社へ正式に返事（技術的な回答）を出せる立場となっている。

以下、そうした状況に到った経緯やトピックを以下に述べる。

（1）設備導入

（株）アカネでは、平成27年度に、材料開発のための各種設備を導入した。材料開発に特に有効であったのが、レーザーフラッシュ式の熱伝導率測定装置で、これにより開発のサイクルが大幅に短縮された。今までは熱伝導率測定を外注（岡山セラミックセンター）していたため、外注費用の支払いが必要であったし、計測に1週間程度を要した。それが、試料作製⇒計測がその日のうちにできることとなった。

その結果Cu-C複合材の試作に限っても、今までで600回を越えるほどになった。こうした試作サイクル+評価の短縮は、B社への売込みに関しても有用である。

（2）高熱伝導率材料の保有

熱伝導率 840W/m・K という値は、いわゆるバルク材としては、素晴らしいものである。通常このレベルの値はレーザーフラッシュ法で測定できるのかも不明であるし、測定用の標準試料もない（金属で最もよい値は：銀 420）。

従って、この計測器の販売店「ネッチ・ジャパン」の篠田社長にチェックしてもらって得られた値が 840 である。この値に対して、バルク材としては世界最高レベルの熱伝導率ではないかとのコメントもあった。

このように、非常に高熱伝導率の材料が本事業から得られたことは、大きな成果、且つ大きな財産である。

3-1-【3. グラフェンの製造技術の開発】

透明導電膜への応用ができないかを検討中である。また、研究が不十分なところもありこの件に関しては、川下企業へ直ぐに売り込むことは難しい。もう少し、継続して開発を続ける。

3-2 事業化について

3-2-【1. LED 用放熱部品の開発】

A 社には、まだニーズがあることを掴んでいる。また、(株)アカネとの交流も続いている。従って、AD 法及びそれを用いた「押出型材製アルミヒートシンク+LED 素子装着」構造の売り込みを今後積極的に図る。既に試作に進めそうな雰囲気もある。

本年度は、おそらくテストピース錠サンプルの供給、及びそれらを用いたリグ評価やベンチ評価レベルの段階になりそうである。そして平成 30 年度から実機搭載できるレベルの開発になると想像している。

表7 LED 用放熱板の売込み・販売計画

製品等の名称		LED 用放熱板				
スケジュール	年度	平成 29 年度	平成 30 年度	平成 31 年度	平成 32 年度	平成 33 年度
	サンプルの出荷	→	→			
	追加研究		→	→		
	設備投資			→		
	製品等の生産				→	→
	製品等の販売				→	→
売上見込	想定売上高（千円）		80	48,000	96,000	144,000
	売上高の根拠	平成 31 年度から一部の量産車のヘッドライトに搭載する予定として見積もっている。				

平成 30 年度は試作品を供給するレベルであるので、(株)アカネの現有設備でもやりくりできるが、平成 31 年度からは量産であるので、今のままでは対応はできない。つまり、量産開始の前に、設備投資が必要となるが、それは

- ① AD 装置 現在はAD加工に時間が掛かるため、今後、多数個取りを検討し、生産能力を高める予定であるが、それでも量産となると圧倒的に装置の能力が足りない。従って、投資を誰がどこへするのが重要な決定となってくる。
- ② ハンダ付け 熱容量の大きいヒートシンクの上でのハンダ付けであるため、やはりそれなりの装置が必要。いずれにせよ、A社とどういうふうに業務・投資の分担をし、量産に進んでいくのかなど、議論を行いながら進めていく予定。

3-2-【2. IGBT 用などの次世代放熱基板の改善】

本文中でも述べたが、B社との交流は現在も続いている。また、当社の技術への関心も高い。それにB社も、SiC半導体が次のIGBT素材の主流になると予測しているようであるが、B社といえども、まだSiC半導体にどう対応したらいいのかを迷っているし、決まっていないようである。

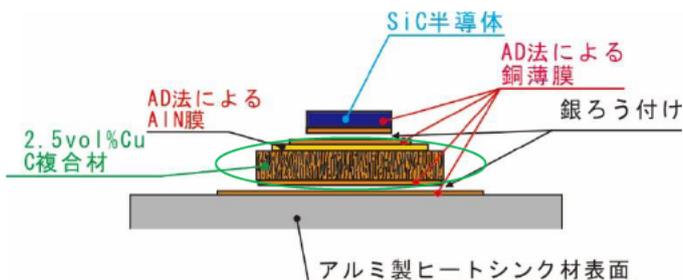
従って、本事業の成果も、B社の開発がスタートする時点から織込むことも可能と言える。こうした業界の状況下で、例えば大阪大学では、図100のような構造を一案として発表し



大阪大学 産業科学研究所
菅沼克昭 教授
平成28年11月28日講演より

図100 大阪大学案

ているが、図101の本事業の成果品（株）アカネ案の方が、積層段数も少なく構造的には優れていると思われる。熱伝導性の良い材料や熱膨張率が比較的揃った材料を使用しているからである。



※(株)アカネは緑○部分を供給

図101 本事業の成果品（株）アカネ案

以上のようなことを考慮し、B社への売込みを既に図っているが、サンプルの試作依頼が早速来ている。つまりB社の開発に参加するタイミングとしては、現在は最適な状況にある。是非、この機会にアカネ案を殿に提案し、図101の緑○の部分を納められるようにしたい。

表8 IGBT 用放熱板の売込み・販売計画

製品等の名称		放熱板（詳細はまだ不明だが、先ずは単純な放熱板を予定）				
スケジュール	事業終了後の経過年数	平成 29 年 度	平成 30 年 度	平成 31 年 度	平成 32 年 度	平成 33 年 度
	サンプルの出荷		→	→	→	
	追加研究	→	→	→	→	
	設備投資					→
	製品等の生産					→
	製品等の販売					→
見 売 込 上	売上高（千円）			15 千円/ 年	150 千円/ 年	1,500 千 円/年

ただし、技術売込みがうまくいき、アカネ案での開発に直ちに取り懸かってもらえたとしても、少し息の長い開発になるのではと感じている。IGBT はハイブリッド車の基幹部品であるため、性能・信頼性の保証などをきちんと対応しないといけない。従って、最終的には自動車会社なども含めた開発となってくる可能性があり、開発期間としては最低 3 年を考慮したい。つまり正式の販売は平成 32 年頃と予定している。大々的な量産は、平成 33 年度からとした。

3-2- 【3. グラフェンの製造技術の開発】

グラフェンに関しては、(株)アカネだけでなく、本開発に参加していた(株)ニューメタルス エンド ケミカルス コーポレイションも、非常に関心を持っており、継続的に支援したいとのことである。今後の展開にも興味があり、今後は本事業のアドバイザーの立場を離れ、協力事業者として積極的に参加していただく予定。

特に導電性シートに関して。展開を図るための次の具体的な性能目標や開発項目なども(株)ニューメタルスから呈示される予定である。臨機応変な対応を取りながら、今後も材料の開発・改善・試作と併行して売込みを図っていく予定。

以上