

第7節 5G向け銅－モリブデン複合材料による放熱材料の開発

(株)FJ コンポジット 津島 栄樹

はじめに

5G通信とは、第5世代(Generation)の通信方式を意味し、現在普及している4G通信の速度である225Mbpsに比べて4.1Gbpsと10倍以上の高速・大容量の通信を実現する技術である。携帯電話から発した微弱な電波は中継器と呼ばれる基地局で電波を増幅して基地間通信を行うが、その増幅機にはGaN(窒化ガリウム)半導体を使用したデバイスが使用される。GaNデバイスはSi(シリコン)製デバイスよりも高周波数帯で使用が可能で、高速通信を可能にする。半導体の発熱は周波数の2乗に比例して増加することから、GaNデバイスでは大きな発熱があり、デバイスの放熱性能が重要となる。

携帯電話の基地局は我々の身近にある中継局であるが、その設置数は全世界で4000万箇所ある。一つの基地局に数十個のデバイスが使用されていることから、世界のデバイス必要数量は20億個程度となる。初めての携帯電話サービスである1G(第1世代:Generation)が現れた1980年から現在の5Gまでの間、1世代の通信方式の存続期間は約10年間隔となる。仮に5Gの敷設にこれから10年必要と考えれば、そのデバイスの生産量は年間2億個となり、これは膨大な数量である。

本節では5G通信基地局で使用されるデバイスの放熱材料として銅とモリブデン複合材料、特にS-CMC(銅箔とモリブデン箔を積層一体化したクラッド材)を中心に、5G通信デバイスの放熱材料について述べる。

1. 銅－モリブデン複合材 S-CMCとは

S-CMC(Super Cu-Mo Clad 特許:386737, US 7951467ほか, 商標登録:5764464)とは、銅箔とモリブデン箔を多層に積層し、ホットプレスの真空雰囲気中で850℃以上に加熱し、5MPa以上の圧力で一体化(クラッド化)した金属複合材料である。モリブデン(Mo)は熱膨張率が極めて小さい特異な性質を持つ金属で、銅(Cu)と複合化する事により、低熱膨張で高熱伝導の材料となる。そのため、Mo(%)量を調整することにより、セラミックス(Al_2O_3 :アルミナ)と直接接合しても反りなどの発生は無い。この材料は銅と同等の高い熱伝導率を有する事から、衛星通信用の高性能GaNデバイスの放熱材として適していた。そのため2006年の量産化から今日に至るまで、最先端デバイスに採用されている。

このS-CMCの断面顕微鏡写真を図1の左の写真に示した。Mo層(銀色部=0.1mm厚さ)が2層、Cu層が3層のS-CMCの構造断面で、全体の厚さは1mmのMo=20%のS-CMCである。一方、Mo粉末を焼結し、粒子間の空洞に銅を溶融合浸させて熱膨張率を調整した材料がPCMと呼ばれるもので、そのPCMの表面に銅(Cu)を貼り付けた汎用材料がCPC¹⁾で図1の右の写真に示した。

また、これらの材料の熱伝導率と熱膨張率の値を表1に示した。また、その関係を図2に示した。銅とモリブデンを複合化する場合、モリブデン箔を使用した材料とモリブデン粉末を使用した材料では、その熱膨張率の制御する効果に差異が生じる。図2に示したとおり、Mo箔の材料系の方がMo粉末の材料系よりも1.5倍高い熱伝導性を示す。

以下、これら銅－モリブデン複合材料を用いた5G通信デバイスの放熱に関して、説明する。

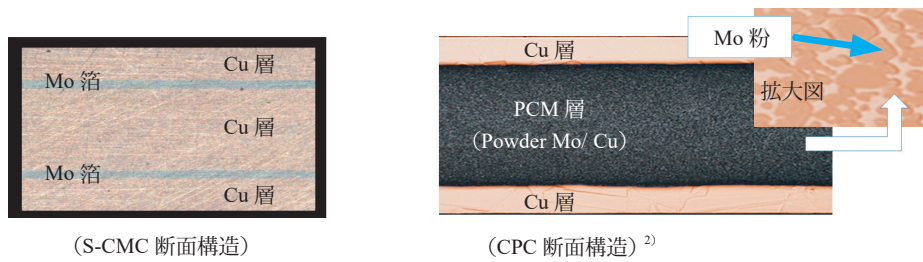


図1 S-CMC と CPC 材の断面構造の差

表1 銅-モリブデン複合材料の物性（各社カタログデータより）

		S-CMC (Mo 箔系)			CPC (Mo 粉末系)		
		Mo=5%	Mo=10%	Mo=20%	Mo=22%	Mo=43%	Mo=65%
熱伝導率	W/mK	362	335	291	260	220	210
熱膨張率	ppm/°C	9.5	7.5	6.5	9.5	8.7	8.3

（熱伝導率は室温における厚さ方向（Z方向）の値を記載した。）
 （熱膨張率は室温～800°Cまでの面方向（XY方向）の値を記載した。）

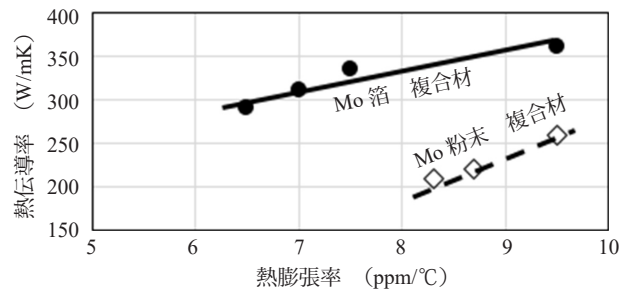


図2 銅-モリブデン複合材料（箔系と粉末系）の熱物性の比較

2. 5G 用携帯基地局向けデバイスの構造

半導体は基本的には空気中の酸素との反応を避けるためにパッケージと呼ばれる封止された構造に設置される。パッケージは構成する主要材料の種類により、セラミックスパッケージ、メタルパッケージ、プラスチックパッケージなどに分類される。パソコンなどで使用される半導体は、大きく分類すると中央演算素子(CPU)とメモリー(RAM)となるが、パソコンの黎明期には半導体は全てセラミックパッケージ構造であった。その後、量産性と低価格化の必要性からメモリーはプラスチックパッケージとなり、その後CPUもプラスチック化されるに至った。

携帯電話基地局に使用されるパッケージはセラミックスウォールパッケージ（Ceramic Wall Package）であるが、プラスチックパッケージの開発も進んでいる。このセラミックスウォールパッケージの断面構造を図3に示した。また、その製造工程を図4に示した。

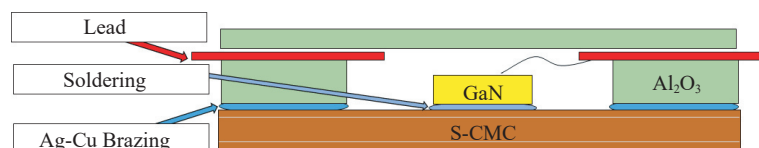


図3 5Gパッケージの構造

パッケージの中央に位置するのが半導体素子である GaN である。GaN は、その下方に位置する放熱材 (S-CMC) とハンダなどで接合されている。このハンダ接合の前工程では金属製の放熱材とセラミックスウォール (Ceramics Wall) であるアルミナ (Al_2O_3) と銀ロウ付けされる。セラミックスと金属 (銅など) を直接接合する方法としては、活性金属である Ti (チタン) などを含有したロウ材による活性金属法などの方法がある。但し、この方法はコスト等の面から一般的な通信用パッケージでは使用されていない。そのため、別の方法としてセラミックス側の接合面を予め金属化して、金属—金属のロウ付けによる接合が行われる。セラミックスの表面を金属化する方法としては、高融点金属法 (テレフケン法) とも言われている方法が一般的である。この方法は 1938 年にドイツのテレフケン社の Pulfrich によって始められた方法で、焼成前のアルミナ粉を成形したグリーンシートの段階で、その表面に Mo (モリブデン) や Mn (マンガン), W (タングステン) などの粉末を印刷などの手法によりコーティングして、アルミナ等と一緒に 1700°C 程度の温度で焼成すると、強固に Mo などの金属層が成形されたセラミックス基板となる。現在使用される高融点金属の主流は Mo と Mn の混合粉末で、両者を適当な比率で混合するとアルミナとの熱膨張率を同一にすることが可能で、焼成後のセラミックス板に反りを発生させる事無く製造することが出来る。そのため、この方法を Mo/Mn 法 (モリマン法) などとも省略して呼ばれている。この方法で Mo/Mn の金属層が成形されたアルミナ基板は、その後 Mo/Mn 表面だけに Ni (ニッケル) メッキが施され、S-CMC と銀ロウを用いて 850°C 程度の水槽雰囲気の中で加熱されて接合される。

その次の工程では、セラミックスとヒートシンクが一体化された金属部分に Ni メッキ+金メッキが施される。(この時にセラミックス表面にはメッキは析出しない) さらに、GaN デバイスが金錫ハンダ (Au/Sn=80:20 融点 280°C) や金ゲルマニウムハンダ (Au/Ge=80:20 融点 356°C) などの高温ハンダを用いて接合される。即ち、パッケージ工程における接合は、温度の高い工程から始まり徐々に低温工程に移る方法が採用されている。

次に、アルミナの枠 (フランジ) の上にはリード (Lead) と呼ばれる GaN と接続される端子が配置され、最後にセラミックスのキャップをしてパッケージは出来上がる。キャップの接合はハンダ付けや樹脂系の接着材が使用される場合がある。

GaN 素子は大きく発熱することからその発熱を外部に伝えて冷却する必要がある。そのため GaN 素子はヒートシンク材と放熱性の良いハンダ付けにより接合される。金錫ハンダ (Au/Sn ハンダ) の熱伝導率は 57 W/mK に対して、エポキシ樹脂などの接着材は 0.3 W/mK 程度と 2 桁も低い値である。同時に Au/Sn ハンダは 10 μm 程度の厚さで接合可能なのに対して、接着材では数倍以上の厚さを要するために大きな熱抵抗になって放熱を阻害することになる。Au/Sn ハンダでヒートシンクに接合された GaN は、その発生する熱はヒートシンクを介してパッケージの外部に放熱される構造となる。

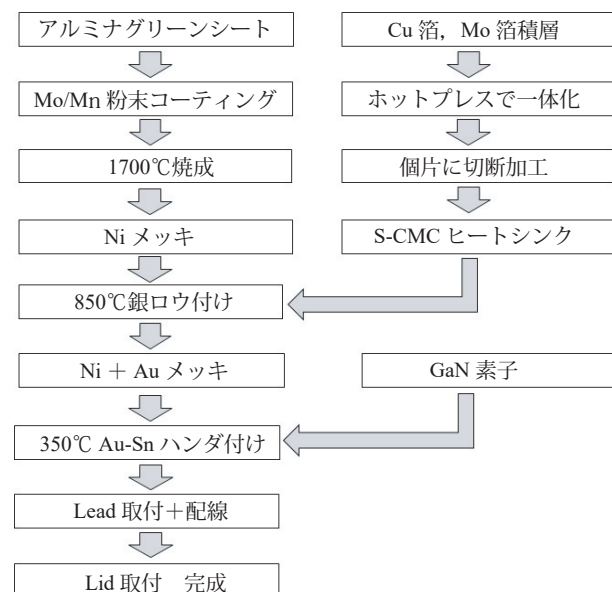


図 4 5G パッケージの製造工程表

3. 各種金属材料の特性

ヒートシンクとしての求められる性能は放熱性である。そのため、使用される材質は熱伝導率が高いことが必要である。表1に各種の金属の熱伝導率の他、熱膨張率などの主要な物性をまとめた。

表2 低熱膨張率金属の物性

項目	単位	Au	Ag	Cu	Pt	Al	Mg	W	Mo	Cr
熱膨張率	ppm/°C	14.1	19.1	17.0	9.0	23.5	26.0	4.5	5.1	6.5
熱伝導率	W/mK	315	425	397	73	238	155	174	137	91
電気抵抗	$\mu\Omega\text{cm}$	2.2	1.6	1.7	10.6	2.7	4.2	5.4	4.4	6.6
密度	g/cm^3	19.3	10.5	8.9	21.4	2.7	1.74	19.3	10.2	7.2
比熱	J/gK	0.13	0.23	0.39	0.13	0.92	1.04	0.14	0.25	0.46
熱容量	J/K	2.51	2.46	3.44	2.88	2.48	1.81	2.66	2.56	3.32
弾性率	G Pa	88	100	136	170	76	44	403	327	253

出典：金属データブック改訂4版（日本金属学会）

熱伝導率の高い金属として一般的なものは金・銀・銅である。最も熱伝導率の高い銀（Ag）は425 W/mKで、次に銅の397 W/mK、金は315 W/mKで、材料価格に熱伝導率は比例してはいない。2020年9月現在の金の建値は7,200円/g（2020年8月7日には7,769円/g）に対して、銀は90円/g、銅は0.7円/gである。銀の熱伝導率は銅の1.07倍に対して、価格は140倍の差異があり、そのためヒートシンクとしては銅が工業的に最も一般的な材質である。同様に安価な材料としてはアルミ（Al）やマグネシウム（Mg）もあるが、両方共にセラミックスウォールパッケージには一般に使用される事はない。その理由は製造工程において銀ロウ付け（850°C）を行う工程があることから、Al（融点 = 660°C）やMg（融点 = 659°C）ではプロセス温度に耐えられない事による。

図5には、各種金属の熱伝導率と電気抵抗の関係を示した。この図から熱伝導率と電気抵抗の間には相関関係が認められる。即ち、熱伝導率の高い材料ほど電気抵抗が小さいことが示される。この事は金属の伝熱には電子が関与していて、その伝達機構は分子振動による熱の伝達よりも自由電子の移動による熱伝導の方が数十倍以上も大きい。そのため金属は一般的に大きな熱伝導率の材料である。一方、セラミックスなどの絶縁材料の伝熱は分子振動による伝達である。そのため弾性率が大きく、分子量の小さな結晶ほど振動が伝わりやすい。その代表的な材料がダイヤモンドである。

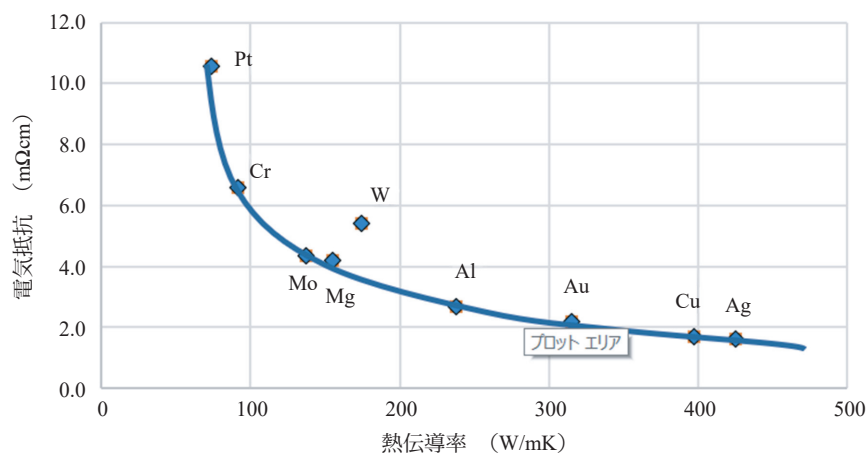


図5 各種金属の電気抵抗と熱伝導率の相関関係

5G パッケージのヒートシンク（放熱材）として、放熱性と融点、コストの面から考えれば Cu は良い材料であるが、熱膨張率が 17 ppm/°C とセラミックス (Al₂O₃) の 8 ppm/°C に対して大きな違いがある。この違いは、ロウ付け工程で銀ロウの共晶融点である 780°C で接合後に室温まで冷却される工程において、大きな熱膨張率の差により反りが発生したり、セラミックスを破壊したり、接合界面の剥離などを発生させる事になることから、銅とセラミックスを直接銀ロウ付けする事は困難である。そのため、ヒートシンクに求められる特性として高い熱伝導率と同時にセラミックスと同じ熱膨張率が重要である。セラミックスと同じ熱膨張率で高い熱伝導率を有する材料は、単一の材料としては存在しない。そこで、セラミックスよりも熱膨張率が小さい金属と銅を複合化することにより、求められるセラミックスと同じ熱膨張率の材料を作り出すことが可能となる。アルミナ (Al₂O₃) の熱膨張率は室温付近で 6 ppm/°C から、800°C 付近では 8 ppm/°C であるが、8 ppm/°C 以下の小さな熱膨張率を示す金属はタングステン：W (4.5 ppm/°C)、モリブデン：Mo (5.1 ppm/°C)、クロム：Cr (6.5 ppm/°C) の 3 種類（周期律表の VIA/6 属のクロム属元素）の他には、イリジウム (6.6)、タンタル (6.6)、ルテニウム (6.8)、ジルコニウム (5.8)、リチウム (1.0) だけであり、実用的には W、Mo、Cr の 3 種類の金属だけが工業的に使用出来る材料となる。この 3 種類の金属と銅 (17 ppm/°C) を複合化した材料がセラミックスとの接合に適した複合材料となる。

4. 銅とモリブデンの複合化（合金化しないメリット）

金属と金属による複合化で大きな問題となるのは合金の存在である。例えば銅と銀は自由な割合で合金を形成する。即ち、銅 28% と銀 72% で共晶合金を成形しその融点は 780°C である。同様に銅とクロムを複合化する場合、クロム銅の合金を形成する場合がある。合金とは構造の異なる原子同士が複雑に混じり合った状態であり、自由電子の移動が阻害され大きな電気抵抗を示す。また、電気抵抗と相関関係のある熱伝導率は大きく低下すると同時に、機械物性としても硬く、脆い材質となる。硬さが必要な用途として、例えば刃物などでは有効であるが、放熱材料としては不都合な現象である。このため、クロムと銅を合わせる場合、合金を形成しないように夫々の材料のままに複合化する事に注意が必要である。クロムは、タングステンやモリブデンよりも価格的には比較的割安な材料であるが、熱伝導率でも熱膨張率でもこれらの材料に対して劣っており、同時に合金化の問題もある。銅に異種金属が混じると著しく熱伝導率は低下する。例えば Cu に Ti を 3% 添加した銅チタン合金の熱伝導率は 50 W/ mK と 87% も熱伝導率が低下する。このため、クロムがヒートシンク材料としてタングステンやモリブデンのように使用されることは希である。

一方、タングステンとモリブデンは銅と合金を形成しない材料である。最初に半導体用のヒートシンク材料として利用されたのはタングステンであった。タングstenは粉末状の金属として精錬され、そこから板材などが圧延により製造されるが、粉末状のタングsten（融点 = 3400°C）を押し固めた状態の間に銅（融点 = 1083°C）を加熱溶解させて染み込ませた材料が、銅タングstenとして開発された。タングsten粉末の含有量が 94% ~ 80% 程度で、6% ~ 20% の銅が含浸した銅タングsten材料が市場に出回っている。これらの材料は熱膨張率が 6 ~ 8 ppm/°C 程度の材料である。タングstenは価格的にもモリブデンよりも高額であり、比重も 2 倍程度ある重たい材料であることから、熱膨張率でも僅かな差でしかないモリブデンがタングstenに代わって使用されるようになる。このモリブデン粉末を使用した材料を PCM（アライドマテリアル社）と呼び、銅タングstenと同様に半導体ヒートシンクとして利用されている。さらに、この PCM の表面に銅板を接合した 3 層構造の材料を CPC として熱膨張率をコントロールした材料として利用されている。

これらの銅タングstenも銅モリブデンも粉末原料に銅を溶解含浸させて材料であるが、粉末による熱膨張率の制御の効果は、箔による制御には及ばない。そこで、モリブデン箔と銅箔をクラッド状に積層して熱膨張率の制御と高熱伝導率を両立する材料として、S-CMC 材を（株）FJ コンポジットが開発した。

5. 熱膨張率に与えるモリブデン箔と粉末の効果の違い

モリブデンにより銅の熱膨張率を低く制御した材料は、半導体用のヒートシンクとして適した材料の組合せである。この材料系では、使用するモリブデンの形態により大きく分類して、①粉末状と、②箔形状、の2種類に分類することができる。箔を使用した場合と、粉末を使用した場合では、同じ量の Mo を使用しても、その熱膨張率の制御の効果には差異がある。

図6には Mo 箔と銅箔を積層し、その積層方向に力を作用した場合を (1) 式に示した。

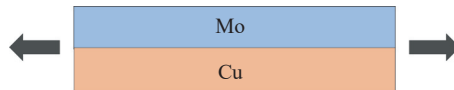


図6 Mo 箔と Cu 箔の積層材の構造図

この構造の複合材料の熱膨張率: $\alpha_{(ave)}$ は夫々の熱膨張率 $\alpha_{(Mo)}$, $\alpha_{(Cu)}$ と、弾性率: $E_{(Mo)}$, $E_{(Cu)}$ と、体積割合: $V_{(Mo)}$, $V_{(Cu)}$ により (1) 式で示される。

$$\alpha_{(ave)} = \frac{\alpha_{(Mo)} \cdot E_{(Mo)} \cdot V_{(Mo)} + \alpha_{(Cu)} \cdot E_{(Cu)} \cdot V_{(Cu)}}{E_{(Mo)} \cdot V_{(Mo)} + E_{(Cu)} \cdot V_{(Cu)}} \quad (1)$$

一方、Mo 粒子による場合は直列配列と考えれば、図7の (2) 式で示される。

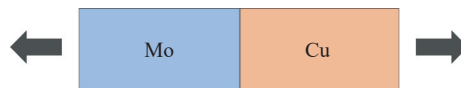


図7 Mo 粉末と銅による構造図 (1)

$$\alpha_{(ave)} = \alpha_{(Mo)} \cdot V_{(Mo)} + \alpha_{(Cu)} \cdot V_{(Cu)} \quad (2)$$

Mo 箔を使用した複合材料の場合の熱膨張率の (1) 式、粉体を用いた場合の (2) 式に、それぞれ Mo と Cu の熱膨張率、弾性率に表1から値を入れ、Mo の体積割合を変数にした場合の計算を実施した。その結果を図8に示した。Mo=0% (Cu=100%) は銅自信の、Mo=100% は Mo 自身の熱膨張率になるが、その間の熱膨張率は Mo (%) 量により箔を使用する場合と粒子を使用する場合では差異が計算される。Mo 箔を20% 使用した場合の熱膨張率は 12.5 ppm/°C であるが、粒子系では 14.6 ppm/°C と大きい値となる。この事は、モリブデンと銅を複合化する場合、箔を用いて複合化する方が粒子を用いるよりも同じ Mo 量で熱膨張率を小さく抑える効果は大きい事を意味している。熱伝導率の面からは、同じ熱膨張率の複合材料の場合、箔を使用する方が Mo の使用割合が少なくなり、熱伝導率は大きな値となる。即ち、粒子系よりも箔系の複合材料の方が高価が大きく合理的であることが計算で示された。

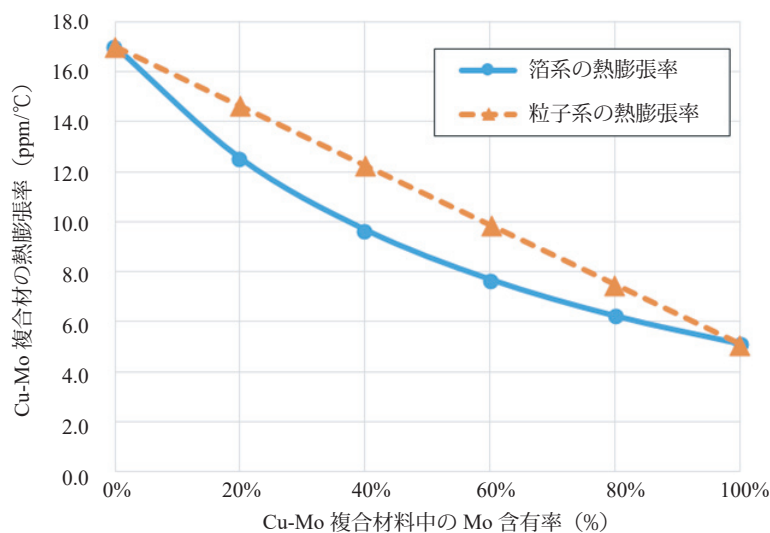


図8 Mo箔と粒子を使用した場合の複合材料の熱膨張率の違い

6. S-CMCの製造方法

S-CMCは2層以上のMo箔を使用し、Cu箔と交互に積層し一体化したヒートシンク材である。最外層はCu箔なので、最も簡単な構造のS-CMCはCu/Mo/Cu/Mo/Cuの5層構造となる。従来からCu/Mo/Cuの3層構造のヒートシンク材はあったが、Moを2層以上にする事に大きな意味があった。この材料は、本文書の筆者が考案し、国内外の特許を取得した。(特許番号3862737, US7951467, CN101291769B, 他)さらには、S-CMCの商標登録も国内、アメリカで取得している独自技術の材料である。この基本的な製造方法は、(1)CuとMo箔(2層以上)を用意する(2)ホットプレスにて850℃以上、5MPa以上圧力で接合する。Cu箔とMo箔の間には接着剤などは使用せず、CuとMoを温度と圧力だけで接合する方法である。この製造方法を図9に示した。

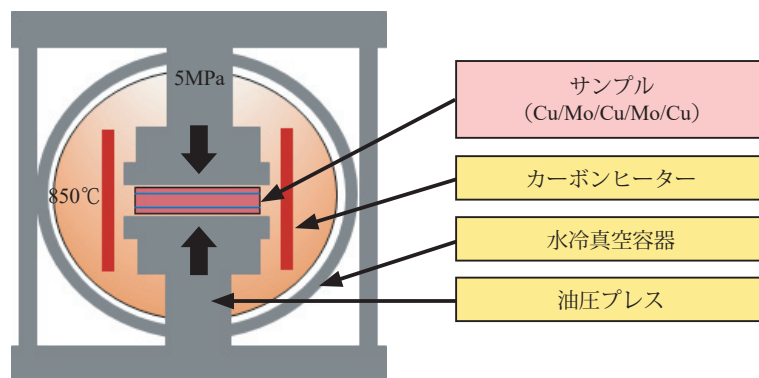


図9 ホットプレスによる製造方法(通常は多段成形を実施)

7. 膨張率の非線形性の不思議

一般に金属同士を接合するには、ハンダ付け(450℃以下)やロウ付け(450℃以上)などの溶融する金属を材料の間に液相を用いた接合方法が一般的である。それに対して、本技術ではCuとMoは固体のまま、液相を介せずに接合する事から、固相拡散接合(又は、拡散接合)と呼ばれる。使用するCuとMoの板厚を選択することにより、任意の厚さと任意のMo(%)量のS-CMCが容易に製造可能である。

このS-CMCの物性(熱膨張率、熱伝導率)は、Moの含有割合により決定される。Mo量が多くなれば熱膨張率は小さくなり、同時に熱伝導率は低下する。Mo(%)含有量を変えたS-CMCの熱膨張率の測定結果、及びアルミナの

熱膨張率の結果を合わせて図 10 に示した。横軸は温度を、縦軸は長さ 20 mm の試験片の温度による伸び量を μm で示した。●点と破線で示したアルミナ (Al_2O_3) は 800°C で 120 μm の伸びを示した。一方、図 11 には横軸に温度を、縦軸は熱膨張係数をプロットしたが、特徴的な現象として Al_2O_3 は低温域での熱膨張係数が 6 ppm/°C に対して 800°C 付近では 8 ppm/°C と増加するのに対して、S-CMC は低温域の熱膨張率は大きく、高温域では熱膨張率が小さくなっている。 Al_2O_3 とロウ付けして製造される 5G パッケージでユーザーが選択した S-CMC の Mo (%) 含有量は 10% 前後であった。Mo (%) = 10% の熱膨張率は、先の計算式に数値を代入すれば、14.5 ppm/°C と、セラミックスの 9 ppm/°C に比べて大きな値であるが、それは室温での熱膨張率で、800°C まで加熱した場合は 8 ppm/°C 程度となる。一方、先の計算式で熱膨張率を決定する因子は、複合材料の夫々の熱膨張率と弾性率、体積割合であった。この時、使用する銅とモリブデンの熱膨張率は温度による変化は僅かであるのに対して、S-CMC の変化は極めて大きい。熱膨張率、弾性率、体積割合は一定の値で変化が無ければ、複合材料の熱膨張率は一定の値であるはずなのに、実際は大きく変化をしている。この理由は、銅の弾性率が温度と共に大きく減少しているからと考えられる。銅は 250°C 以上の温度では結晶粒の再結晶化が起り、軟化する。そのため、銅の弾性率が低下したと同じ効果が発現していると解釈する。正確には、銅の塑性変形強度が著しく低下し、僅かな応力で塑性が発生することから、塑性域の弾性係数は完全弾塑性対ではゼロであり、実際の銅もゼロに近づいて行くと考えられる。

即ち、S-CMC などの銅とモリブデンを複合化した材料の熱膨張率は、温度に依存して値は変化する。温度が高くなるほど熱膨張率は小さくなる傾向がある。一方、セラミックス材である Al_2O_3 ではその傾向は逆で、温度が高くなるほど熱膨張率は大きくなる。この傾向はセラミックス全般に当てはまる事象である。そのため、 Al_2O_3 と同じ熱膨張率を全温度域で一致させる S-CMC は存在しない。そのため、S-CMC を選定する場合は、接合する相手材の熱膨張率と接合する温度により、S-CMC の Mo (%) 含有量は決定される必要がある。例えば、S-CMC と Al_2O_3 を銀ロウ付け (780°C 融点) で接合する場合のモリブデン量は、図 10 および図 11 から Mo (%) = 9.7% が最適である。即ち、接合温度である 800°C における熱膨張率は、 Al_2O_3 も S-CMC (9.7%) も同じ 7 ~ 8 ppm/°C の値となっている。一方、Au-Sn ハンダ (280°C 融点) や Au-Ge ハンダ (356°C 融点) などで接合する場合は、Mo (%) は 20% ~ 30% 程度が熱膨張率的に一致する。この S-CMC の熱膨張率の温度依存性を表 3 に示した。

表 3 S-CMC の熱膨張率の温度依存性 (非線形性)

		Super CMC Mo(%)				Reference	
		5%	10%	20%	40%	Cu	Mo
熱伝導率 (W/mK)	Z 方向	362	335	291	230	394	137
	XY 方向	381	369	344	290		
熱膨張率 XY 方向 (ppm/°C)	室温 ~ 250°C	14.8	11.8	7.4	6.6	17	5.2
	室温 ~ 400°C	13.5	9.3	6.8	6.2	18	5.6
	室温 ~ 800°C	9.5	7.5	6.5	6.1	19	5.7

この様な熱膨張率挙動を示す S-CMC と Al_2O_3 を 780°C 融点の銀ロウで接合した場合、 Al_2O_3 と同じ熱膨張率で反り等の発生しない Mo (%) 量は約 10% とであることが示された。実際に 5G パッケージにおいてロウ付け時に最もユーザーに支持される Mo (%) は 10% 前後である。

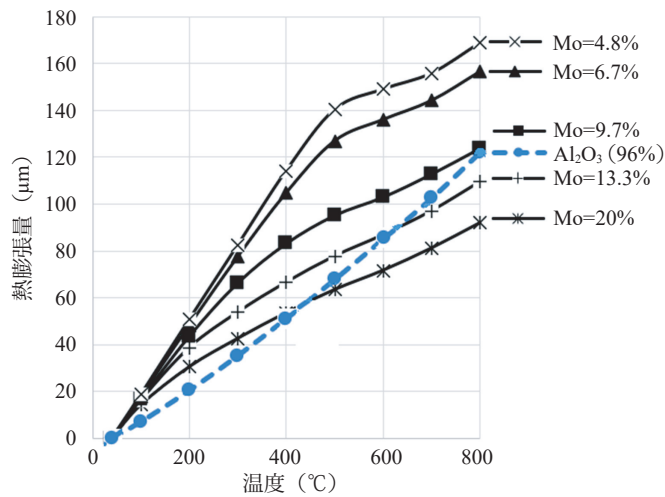


図 10 Mo 含有量の違いによる S-CMC の熱膨張量 (試験片長 = 20 mm)

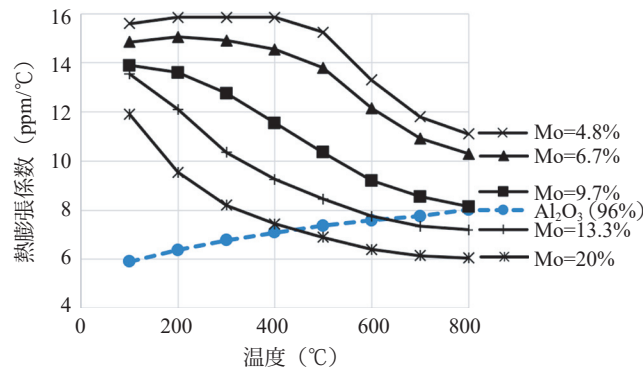


図 11 Mo 含有量の違いによる S-CMC の熱膨張係数の温度変化 (室温～測定温度までの平均熱膨張率を示す)

8. S-CMC の熱伝導率の発現性

S-CMC の熱膨張率は (1) 式に示される簡単な数式で算出できたが、温度が高くなると銅の軟化が起きて熱膨張率は非線形性の挙動を示した。一方、熱伝導率についても複合材料の板厚方向の熱伝導率は簡単な数式で算出することが出来る。S-CMC の板厚方向の熱伝導率 (A_{ave}) は、Mo の熱伝導率 (A_{Mo}) と Cu の熱伝導率 (A_{Cu})、および Mo の板厚 (t_{Mo}) と Cu の板厚 (t_{Cu}) より (3) 式で示される。

$$A_{ave} = \frac{t_{Mo} + t_{Cu}}{t_{Mo} / A_{Mo} + t_{Cu} / A_{Cu}} \quad (3)$$

熱伝導率：A は、熱容量を運ぶ速度であり、板厚 = t は距離であり、距離を速度で割ると到達時間が得られる。Mo と Cu の合計厚さ ($t_{Mo} + t_{Cu}$ = 距離) を、時間 ($t_{Mo} / A_{Mo} + t_{Cu} / A_{Cu}$) で割ると、速度 (熱伝導率) が得られることから、(3) 式で示されることになる。

この計算式の妥当性に関して、実際にレーザーフラッシュ法で測定した値と比較を行ったところ、高い確率で一致を見た。その結果を表 4 に示した。このことは、Cu と Mo の層間に熱伝導率を阻害するような化合物などが存在しないことを意味している。

表 4 熱伝導率の計算式の有効性と

S-CMC	(3) 式の計算値	熱サイクル試験前	熱サイクル 100 回後
Mo = 7.2%	349.3	332 (95%)	340 (97%)
Mo = 7.8%	345.8	319 (92%)	331 (96%)
Mo = 8.2%	343.5	327 (95%)	330 (96%)

表 4 は、Mo (%) 量が 3 種類の S-CMC における (3) 式からの計算による熱伝導率の値と、実際のレーザーフラッシュ法による計測結果と、さらには同じサンプルを (-50 ~ 150℃) までの熱サイクル試験 100 回を行った後の熱膨張率の計測結果を合わせて記載した。レーザーフラッシュ法は、測定される熱拡散率 (温度の伝達する速度) から、材料の比熱と比重を乗じることにより熱伝導率を算出するが、本来は均一材料に適用される測定方法である。今回の計測では多層モデルなどの計算方式を採用せず、単一材料の式を用いた。本来は、S-CMC のような複合材料には厳密には適合する事は出来ないが、幸いな事に銅もモリブデンも物性 (比重, 比熱など) は比較的近い材料である事から、二つの材料の体積比で S-CMC の物性を単純計算し、均一材量であると考えて熱伝導率を得た。レーザーフラッシュ法による測定は極めて短い時間 (ミリ sec.) の僅かな温度変化を、放射温度計で計測し、A/D 変換してコンピュータに伝送し、その温度曲線から温度上昇のハーフタイムを求める計測装置である。サンプル形状の平行度や表面粗さ、A/D 変換速度、断熱条件、サンプルセットの平行度など、計測結果に誤差を与える因子が多数あり、そのため測定誤差を多く含んだ計測法であると多くの文献が述べている。今回の計算式とレーザーフラッシュ法からの測定値は、ある意味で驚くほどの一致と言える。今回の S-CMC の Mo (%) は 8% 前後の狭い範囲であるが、もっと広い範囲においても計算値と計測値は良い一致を示す。

一方、S-CMC の面方向の熱伝導率は、Mo と Cu の熱伝導率の板厚割合計算され、単純な (4) 式に示される。

$$A_{ave} = \frac{t_{Mo} \cdot A_{Mo} + t_{Cu} \cdot A_{Cu}}{t_{Mo} + t_{Cu}} \quad (4)$$

この計算結果は、先の図 5 に記載を行った。

9. メタルパッケージ以外の用途

本節の冒頭に、5G 通信用の放熱材料に関して、S-CMC が有望であることを示した。同時に、携帯電話の基地局数が全世界で 4000 万箇所と莫大であることを示した。更に、これからの有望な用途として、電気自動車のパワーカードが現れた。パワーカードは電気自動車の速度を制御するユニット中にあり、バッテリーからの直流電流を任意の周波数の交流電流に変換して自動車の速度を制御するもので、その制御は半導体を用いて行われている。従来の IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) の構造は、放熱が下面のみに伝えられて水冷ユニットに接続されていた。一方、パワーカードの冷却は両面放熱構造である。

その構造を図 12 に示した。

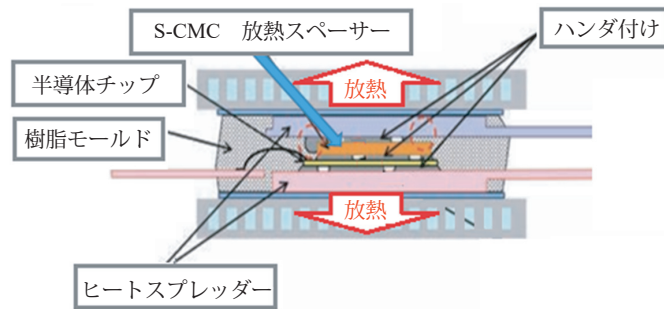


図 12 両面冷却方式によるパワーカード構造

パワーカードの構造は、Si 半導体や SiC 半導体などからの熱が上下方向に放熱されるものである。半導体チップの上下にはヒートスプレッダーが配置されるが、他の部品などの関係から、その間に空間が生まれる。上下の放熱のためには、この空間を埋める必要がある。この埋める材料をコンダクティブスパーサーと呼び、厚さの精度が高く、熱膨張率が半導体に近い、放熱性のある材料が求められる。この要求に一番近い材料が S-CMC である。半導体との接合のため低熱膨張率が強く求められ、Mo (%) は 20% 以上使用する場合がある。また厚さの精度は $\pm 10 \mu\text{m}$ 以下の厳しい要求が求められる事もある。1 台の車に使用されるパワーカード用の S-CMC は 36 個程度あり、将来の電気自動車の拡大により、莫大な市場となると考えられる。その市場規模は 5G 通信市場の 10 倍以上になると十分と予測される。

10. 新しい放熱材料

以上、5G 通信用の放熱材料として S-CMC を中心に記述してきたが、今後の多様な放熱材料の市場として、様々な要求性能に対応するヒートシンク材が求められている。例えば、S-CMC などの Mo による放熱材料では、Mo の熱膨張率 ($5.1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) 以下のヒートシンク材を製造することは不可能である。また、電気的に絶縁のある放熱材料も S-CMC では対応できない。そこで、それらの新しい要求に対応するには、セラミックス (AlN, ダイヤモンド) の表面を銅箔覆ったヒートシンク材の可能性がある。図 13 はその一例で、BeO (熱伝導率 = 330 W/mK) セラミックス 1 mm の上下両面に 0.3 mm の銅板を接合した材料と、SiN に銅を接合した材料の界面 SEM 観察結果を示した。また、図 14 は SiN に銅 (0.8 mm) を接合したサンプルにおける接合界面の SEM 観察写真である。セラミックスと金属を接合する方法としては、従来は DBC 法 (Direct Bonding Copper : Cu-O 結合) とよばれる酸化物系セラミックスと接合する方法が一般的であったが、(株) FJ コンポジットでは、窒化物系セラミックスにも接合が可能な新規の方法を開発した。その名称は S-DBC 法 (Sputtering Diffusion Bonding Copper) である。図 13, 14 は S-DBC 法によるセラミックスと銅の接合体で、セラミックスの表面にチタンをスパッタリングにより極薄くコーティングし、その後ホットプレスで固相拡散接合させ方法で作製した。

これら、セラミックスと銅を組み合わせることで、熱膨張率が極めて小さく、大きな熱で伝導率の放熱材料を製造することが可能となる。S-DBC 法で接合可能なセラミックス材料としては酸化物系、窒化物系、ホウ化物系でも種類は問わない。今までに接合を確認したセラミックスの一部を表 5 に示した。ダイヤモンドを使用した場合には 658 w/mK , $1.9 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ と極めて高い熱伝導率と低熱膨張率を実現することができた。コスト的には、ダイヤモンドを除いては、通常の銅モリブデン系の複合材料と同程度の価格帯で製造することが可能である。

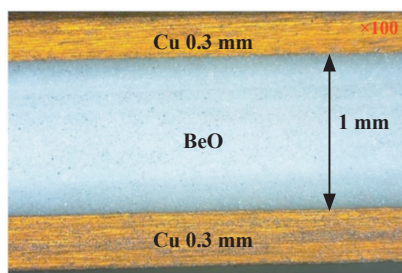


図 13 BeO と銅のクラッド材断写真

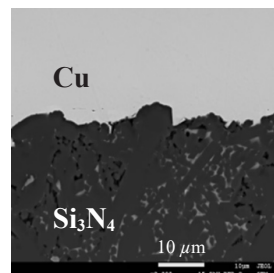


図 14 SiN と Cu の界面 SEM 観察

表 5 Cu とセラミックス複合材料の物性 (Cu/Ceramic/Cu 積層材)

構成材料の特性		Diamond	BeO	AlN	SiN	Al ₂ O ₃
熱伝導率 (Z 方向)	W/mK	2000	325	170	100	30
熱膨張率 (XY 方向)	ppm/°C	1	9	5	3	8
セラミックスの弾性率	GPa	1050	345	320	285	375
セラミックスの板厚	mm	0.20	1.00	0.64	0.32	0.64
Cu 板厚 (2 枚使用)	mm	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3

複合材物性 (Cu/Ceramic/Cu)		Dia/Cu	BeO/Cu	AlN/Cu	SiN/Cu	Al ₂ O ₃ /Cu
熱伝導率 (Z 方向)	W/mK	658	348	263	195	54
熱膨張率 (XY 方向)	ppm/°C	1.9	9.8	6.9	7.1	9.2

11. まとめ

5G 通信用のデバイスに使用される、銅とモリブデン複合材料によるヒートシンク材料に関して述べてきた。使用するモリブデンの形態として、箔を使用する S-CMC 材と、粉末を使用する CPC 材の 2 つのタイプがあり、箔を使用する場合の方が同じ熱膨張率で比較すると 1.5 倍程度の性能（熱伝導率）を示すことを示した。S-CMC は製造方法もシンプルであり、製造コストも低く有望である。

携帯電話の基地局数は全世界に 4000 万箇所あり、そこに使用されるデバイス数は莫大であると同時に、5G の次には 6G、7G と成長を続けることから、市場規模も益々成長する分野である。さらに、電気自動車のパワーデバイスのコンダクティブスペーサーなどの有望な市場も出現してきている。

半導体市場の成長は、留まることが無く続いており、それに伴い放熱材料の市場も拡大する事になるだろう。今後の進展が楽しみな分野である。

文 献

- 1) 2016 年 1 月・SEI テクニカルレビュー・第 188 号 63
- 2) プランゼー (株) ホームページより
- 3) デンソーテクニカルレビュー Vol. 16, 2011