低温焼成基板の次世代自動車部品への応用

西垣 進*

Application of LTCC^{*1} for Advanced Automobile Electrical Devices

Susumu NISHIGAKI*

*岐阜大学地域共同センター (〒501-1112 岐阜県岐阜市柳井1-1)

*Center for Cooperative Research, Gifu University (1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu 501-1112)

1. まえがき

低温焼成基板の研究開発が始められて久しく、15～20年の歳月を数える。幸い昨今の携帯電話等マイクロ波化ならびに高周波化の時代の流れに沿い、低温焼成基板というよりは低温焼成基板の各要素技術が実用化への味方となってくれた。電子部品、なかでもセラミックス電子部品の分野では世界のトップを走っているわが国で、低温焼成型の小型LCフィルタ、VCOやTCXOなどの優れた共振部品の量産化が本格化しており、世界に先駆けて成功したことは喜ばしい。

一方、実装基板としての低温焼成基板は多層PCBとの競合で、苦難の歴史が続いた。しかしドイツと日本のグローバルな共生的取り組みの成果として、ようやく耐熱性、信頼性のより求められる次世代の自動車用高密度実装用基板の分野で実用化が始まっている。

低温焼成基板、あるいは低温焼成技術が今後の重要な要素材料、要素技術になるものと予想されるので、以下に材料面を重点に、特に基板関係の最近の動向を紹介する。

2. 低温焼成基板（技術）の主要3用途

昨今、低温焼成基板（低温焼成技術）は、先端的な機器の実装基板あるいは高周波部品技術として不可欠な新材料、新技術となりつつある。例えば次の3用途に区分できる。

2.1 スーパーコンピュータ用多層基板^{1),2)}

低温焼成基板は小型化、信号の超高速化が求められるスーパーコンピュータにおいて、多層実装基板（別名：熱伝導セラミックモジュール：TCM）としてすでに実用化されている。従来はこの種、実装基板にはPCB多層基板あるいはアルミナ多層基板が用いられてきたが、信号スピードが対応できなくなってきた。

2.2 次世代自動車用多層基板（ECU部品）

低温焼成基板は高密度多層化・ハイブリッド化すること

により、従来のアルミナ厚膜ハイブリッドや多層PCBよりも高密度のモジュール化が可能で、次世代自動車の電子制御システム部品として、耐熱性も相まって、最近大いに注目され実用化が始められた。

2.3 高周波部品（VCO、TCXO等）

従来、高周波電子部品は、多層PCBにチップ実装され、あるいはハイブリッド基板にモジュール化して部品形成をしていたが、最近ギガHz帯へと超高周波化が進み特性確保が困難となり、低温焼成基板技術を用いた高周波部品が、携帯電話等の高周波機器に大量に使用されるようになってきた。

低温焼成基板が自動車用等先端機器部品として使用され始めた理由は、多層PCB/アルミナ多層ではハイブリッド化が困難であり、また厚膜ハイブリッドでは高密度化が困難であるため、以下にこれらを比較し、検討を加える。

なお低温（約900℃）とは、アルミナが高温（1600℃）で焼成するのに対比した言葉である。この低温化は、信号の高速化を図るため配線導体としてAg, Cu, Auを使用する必然性からで、これらの金属の融点が961℃～1084℃（表1）であるため、セラミックスは約900℃で焼成できることが必須となる。

3. 低温焼成基板の構造と特徴

3.1 高密度ハイブリッド用低温焼成基板誕生の背景

1980年代当時、従来型の厚膜ハイブリッド基板は民生・

表1. 配線導体用金属の特性
(セラミック用：厚膜or同時焼成用)

金属	融点 (℃)	沸点 (℃)	電気抵抗 ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	熱膨張係数 ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	焼成雰囲気
Ag	961	1980	1.6	19.1	空気
Au	1063	2600	2.2	14.2	空気
Cu	1084	2595	1.7	17.0	還元雰囲気
Ni	1452	3000	7.2	12.8	還元雰囲気
Pd	1550	2200	10.8	11.0	空気
Pt	1770	3800	10.6	9.0	空気
Mo	2617	4600	5.2	5.4	還元雰囲気
W	3377	5527	5.5	4.5	還元雰囲気

脚注 ※1：Low Temperature Cofireable Ceramic Substrate

産業用に大量に使用、生産されていた。すなわち、本格的なIC化に至る少量試作的段階でのハイブリッドICの形成方法として、また複雑化する電子回路を機能ブロック化する手段としてであった。最近、厚膜ハイブリッド基板の小型・高密度化はますます重要な課題となっている。

低温焼成基板は多層化が容易でかつコンデンサ (C) や抵抗 (R) の同時形成も可能であるなど、多くのメリットを有し、1980年代後半にすでに民生機器、産業機器メーカーからも次世代の高密度ハイブリッド用基板として大変歓迎された。しかし、低温焼成基板を製造するには同時焼成技術が必要で、ユーザの理解を得るにはあまりにも難題が多く、かつセラミックハイブリッド基板メーカーにとっても、絶えず安価な有機多層PCBと競合になり、大量生産実績を持たない状態では結果的には特殊なケースを除き低温焼成基板は採用されず、未だにわが国では定着するに至っていないのが現状である。むしろ高周波部品への展開が軌道にのっている。しかし、今や自動車の本場ドイツでは、自動車用電子制御系が今後急速に大規模化、多機能化が進むなかで、低温焼成基板が高密度ハイブリッド基板 (μ -ハイブリッド) を達成できる唯一の手段と目され、実用化が始まっている。

3.2 低温焼成基板の構造

従来の厚膜ハイブリッド基板では、アルミナ基板上に印刷法で各厚膜ペースト (導体回路層、絶縁層、抵抗層等) を逐次、繰り返し形成する方法がとられている。したがって表面のトポロジー (凸凹) のため、3～4層の積層化が

限界となっていた。これに対し低温焼成基板では、複数枚の平滑なグリーンテープ上に厚膜ペーストを並列印刷し、ラミネート後同時焼成する方法で、多層化が容易であり、かつ比較的低温の900℃で焼成できるため、抵抗のRuO₂や複合ペロブスカイト等のコンデンサ材料とも反応せず、同時焼成による内蔵化も可能で、従来型ハイブリッドに比べ、多層化、C/Rの内蔵化等大きなメリットが期待されている。

これらのプロセス的メリット以外にハイブリッドIC用低温焼成基板では、スーパーコンピュータにおけると同様に、セラミック材料の、低誘電率 (ϵ)、低熱膨張率 (α) 化と導体の低抵抗化が可能で、自動車においても、ECU (半導体を含む) の電子制御系が大規模化、高機能化、高速化、低電圧化するに伴い、スーパーコンピュータほどではないにしても、基板に対し同様のニーズが強い。

低温焼成基板の材料系を大きく分類すると、ガラス複合系すなわち硼珪酸ガラスを主体にしたガラスとアルミナあるいは石英等耐火性酸化粉末との混合系、結晶化ガラス系、非ガラス系の3種からなっている。スーパーコンピュータでの組成系は、低誘電率、低熱膨張率の特性を最優先するが、次世代自動車用等の高密度ハイブリッドでは、コスト優先ならびにC/R形成の可能性の観点から、気中焼成の可能なAg導体と両立性のある組成系が選択される。

表2はハイブリッド用に使用されている3種の基板の製法・特性を概念的に示す。低温焼成基板が次世代の多層高密度ハイブリッド基板として有望なことがわかる。ただし、熱伝導性がアルミナより低く、欠点となっているが、図1

表2. 3種類のハイブリッド実装基板の製法・特性比較

基板の種類	有機多層PCB	ハイブリッド基板 (厚膜)	低温焼成多層基板 (LTCC)
	ビア (ドリル) Cu ガラエポ		LTCCグリーンシート使用
製 法	両面銅張積層板 (エッチングパターン) を樹脂でホットプレス積層。ドリルビア、C/Rチップ	・アルミナ基板上に導体(Ag-Pd)、抵抗(RuO ₂)を、直接または誘電層を介し、焼き付ける方法 (850℃) ・直列逐次焼成法	・ガラスセラミックスシートの積層・低温同時焼成(900℃)(C/R付) 導体は内層Ag、外層Ag-Pd ・並列同時焼成法
主要用途	民生、産業用で一般的	・耐熱・高信頼部品基板 (自動車用等) ・機能ブロック用	・耐熱・高信頼・高密度基板 (自動車用等) ・高周波部品
欠点/特徴	・ビア高密度化困難 ・C/Rのハイブリッド化困難 (チップ実装) ・低 ϵ 、低抵抗導体Cuは優れる	・多層化困難 ・Rのハイブリッド化容易 ・高 ϵ 、高抵抗導体Ag-Pdは欠点	・多層化・ビア高密度化容易 ・C/Rのハイブリッド化容易 ・低 ϵ 、低抵抗導体Agは優れる
特性例	積層限界 積層温度 誘電率 熱膨張係数 熱伝導率 導体導通抵抗	3～4層 850℃(焼き付け) 9.5 7.5 20 5(Ag-Pd)	～30層 900℃ (同時焼成) 7～8 5～7.5 3(セラミック)～25(Agサーマルビア) 2(Ag:内層)

図1. 低温焼成基板による高密度ハイブリッド基板の構造概念図

の構造概念図に示すように、サーマルビアの形成によりアルミナなみの熱伝導性が確保できる。

4. ドイツでの自動車用低温焼成基板 (μ -ハイブリッド) の実用例^{3),4)}

4.1 Robert Bosch GmbHの公表資料から

ここでは、筆者が現在関係しているドイツRobert Bosch GmbHからの“Electronic Control Systems in Microhybrid Technology”と題する低温焼成基板 (LTCC) に関する最近の公表資料から、LTCC基板使用の電子制御系部品 (ECU) 2例を、抜粋し紹介する。

『急速に拡大しつつある自動車の電子制御系の大半はPCBが使用されている。この中で熱ならびに振動の厳しい環境に限ってハイブリッド基板技術が有効に用いられてきた。なかでもここ数年、ABS(Antilock Braking System)のような厚膜ハイブリッド技術によるマイクロ制御システムが大変数量的に伸びている。そこで新しく開発された μ -ハイブリッド技術は、複雑な設計やその自由度、さらにコストダウンの点で従来のハイブリッド技術をはるかにしのぐものである』とLTCCの重要性が述べられている。

4.2 LTCC μ -ハイブリッドによる小型・高密度機能基板

自動車用部品には、厳しい環境すなわち、高温、高湿、強い振動に耐えられる高信頼性、軽量、小型化が求められる。この部品実装にはハイブリッド技術が一般的に用いられてきた。しかし従来法はアルミナ基板上に厚膜ペースト (ボンドパッド、配線、抵抗、絶縁層) を各ペーストごとに印刷、乾燥、焼成 (焼き付け) を繰り返し層を重ねていく方法で、いわゆる直列逐次焼成法のため、歩留まりが層数が多くなると急速に悪くなるため、4~5層の多層ハイブリッド基板となると大変コスト高となった。

LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic: 低温焼成基板の学術用語) シートを用いる μ -ハイブリッド法では、アルミナの代わりに複数枚のシートを同時に使用し、各々にビア (貫通穴) をあけ、印刷後、良否判定し、ラミネート、焼成するいわゆる並列同時焼成法であるため、歩留ま

りの向上、製作期間の短縮が大きく期待できる。また従来法に比べ、並列プロセスであるためパターン設計の自由度が増えること、試作品の顧客への短納期化が図れるなどのメリットが多い。図2は従来ハイブリッド法と μ -ハイブリッド法の製造法の概念比較であり、図3は両者を同じ機能あたりで比較したサイズの違いである。

4.3 μ -ハイブリッドによるABS

ABSは自動車の安全確保の代表例として、わが国でも一般車まで最近装備され始め、話題となっている。ABSはBoschが安全の先駆けとして、世界で最初に開発した安全製品で、すでに1978年にPCBを用い、この革新的な製品を世に送り出している。日本でのABSの生産は、すでに1984年に合弁会社で始められた。ここでは有機PCBではなく、厚膜ハイブリッド基板が用いられている。しかし1996年ころから厚膜ハイブリッド基板でなくLTCCによる μ -ハイブリッドに切り替えられつつある。BoschではPCB⇒厚膜ハイブリッド⇒ μ -ハイブリッドへと基板の材料置換を前提にした技術革新が進んでいる。

μ -ハイブリッドABSでは、従来の厚膜ハイブリッド方式のABSに比べ、基板が高密度、小型化 (38mm×25mm) されたため、油圧系と一体化され、油圧系の小型化による重量減少 (1/2) と電子制御系 (μ -ハイブリッドによるECU) との直結によるケーブルハーネスの短縮など多くのメリットが生じた。

このABSは4個の車輪のスピードを絶えずECUで監視し、急ブレーキ時に起こるロック現象を速やかに検知し、ABSに直結した油圧系が作動しブレーキ圧を低減し正常な制動を実現する安全システムである。機器と電子制御系は一体化することにより、種々のシナジー効果が期待できる。図4は公表されたABSで、手前に2個のECU半導体を搭載した μ -ハイブリッドが、後方に油圧系が見られる。図5は同ABSの電子制御系で、チップ部品実装済みの低温焼成基板 (μ -ハイブリッド, LTCC) の拡大写真である。

4.4 μ -ハイブリッドによるEngine Management System

BoschでのEngine Management Systemの前身は、すで

図2. 従来厚膜ハイブリッド（直列逐次焼成）と μ -ハイブリッド基板（並列同時焼成）の製法比較

図3. 従来基板（PCB 4層：太線，厚膜4層：細線）と μ -ハイブリッド基板の面積（同一機能）比較

に1979年にMotoronicなる商品名で、Fuel-InjectionとIgnitionを同時に制御するデジタル電子制御系として製品化された（PCBを使用）。その後、厚膜ハイブリッド方式によりKnock-Control-ModuleとCAN InterfaceからなるIgnition系とDistributor-Less-Ignition-ModuleからなるMotoronic系の両者を統合した方式にバージョンアップされ、Engine-Compartmentに搭載されているのが現状である。さらにLTCCによる μ -ハイブリッド化（ECU、Flash Memoryを含む）により、Engine Management SystemはInjection、Knock-Control Ignition、Idle Speed Controlと

図4. μ -ハイブリッドによるECU（電子制御系）と油圧系を一体化したBosch社のABS

図5. ABSの電子制御系 μ -ハイブリッド（38mm×25mm）の拡大写真（Bosch社）

Closed Loop Exhaust Gas Recirculation（EGR）等の多くのモジュールを含み、かつ大幅に小型化されたものになる。次世代製品として発表されているものは、熱的等厳しい環境にも十分耐えるよう設計されているため、Compartmentではなくエンジンに直接搭載できる特徴を有し、かつABS同様シナジー効果大きい。図6は

図6. Bosch社の μ -ハイブリッド方式による
Engine Management Module(50.8mm×50.8mm)を
アルミ筐体内に固定しエンジンに搭載

Engine Management Systemの外観写真で、小型 μ -ハイブリッド基板(50.8×50.8mm²)によるECUが深絞りされたアルミベースプレート内に固定、ハーメチックシールされ、エンジンに直接搭載できる構造となっている。

5. 低温焼成基板の製法と焼結挙動

低温焼成基板の組成系は1980年～1990年当時、日米の多くの会社から発表が行われた。焼成温度は900℃近傍が最も多くほぼ共通しているが、低誘電率、低熱膨張率などの特性値にはかなりの開きがある。プロセスはいずれも同時焼成法によるが、詳細はほとんど開示されていない。したがってここでは筆者が長期にわたりかかわってきた硼珪酸ガラス $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ と Al_2O_3 粉末の複合ガラスセラミックス(LFC)^{5)~7)}の製法の概要を紹介する。

5.1 低温焼成基板(LFC)の製法

最初に $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 系の硼珪酸ガラス粉末とアルミナ粉末を60:40の重量比で混合し、有機系の溶剤、バインダ、可塑剤でスラリー化し、いわゆるドクターブレード法により100～300 μm 厚のグリーン(生)テープを作る。続いて生テープからブランクを打ち抜き、積層化に必要な複数枚のブランクとし、それぞれにビア形成、パターン印刷し(配線回路の他、内層コンデンサ、抵抗の形成も可)、ラミネートにより一体化する(3次元的にAg導体による高密度パターンを形成)。400～500℃で脱バインダ後900℃で気中同時焼成する。焼成された基板の両面にポストファイヤ(900℃後焼き付け)によりチップ部品(IC、キャパシタ等)用電極パッド(Ag-Pd, Au等)、ならびに配線回路の形成(同時焼成で形成も可)、厚膜抵抗形成等により、高密度ハイブリッド基板を得る。最後に各種チップ部品を搭載、ハウジングあるいはモールドディングにより、高密度多機能部品を完成する。図7に製法のプロセスフローの一例を示す。

5.2 低温焼成基板(LFC)の焼結挙動^{5)~7)}

5.2.1 同時焼成におけるAg導体とLFCテープの焼成収縮の近接整合化

焼成過程(常温から900℃)において、Ag配線導体(ビ

図7. 低温焼成基板(LFC)による高密度多機能部品の製法

図8. Ag配線積層LFC基板の焼成収縮カーブ
(両材料の単独の場合も併記)

ア導体含む)とグリーンテープの焼成収縮カーブをできるだけ近づけることが重要である。図8にその一例を示した。テープ上に厚膜印刷されたAg配線はAg粉末ペーストからなり、粉末の性状(比表面積、結晶性等)、粉末含有量等により、焼成収縮開始温度が400～600℃とかなり低く、かつ幅がある。一方、テープ収縮開始温度は730℃(構成ガラスの屈服点)とかなり高く、両者の近接化が課題となる。

図9. 低温焼成基板の構成ガラスの屈服点とバブル生成の関係

5.2.2 LFCテープ構成ガラスの高屈服点化とPbフリー化
低温焼成基板（積層Ag配線入）を焼成する場合、10%近く含む有機物（アクリル樹脂等のバインダ他）を酸化雰囲気中でガス化し、低温焼成基板の形態を維持しつつ排除（脱バインダ）しなければならない。脱バインダの際、構成ガラスの軟化点が低いとガスの排除に必要なLFC中の開気孔が400～600℃ですでにクローズし、ガスが飛散せずバブル状に基板内に形成され断線、凹凸、クラック、そり等の欠陥となる。すなわち構成ガラスの高屈服点化が重要である。なおガラスには一般に軟化点の調整からPbOを含む場合が多い。PbOフリーは、筆者らの当初からの強いターゲットであった。PbOは脱バインダ時、ならびに焼成時にAg（導体）のガラスセラミックス内への拡散を加速するのみならず、環境、公害の観点からもフリー化する必要がある。図9は構成ガラスの屈服点とバブル形成の様子を示す。

5.2.3 LFC基板の結晶化による耐熱性の付与

低温焼成基板は、電極パッドの形成等のため、複数回のポストファイヤが必要となる。このとき基板の変形は許されない。LFCは焼成の最終段階（850℃以上）において、耐熱性（1300℃）、低膨張性（ $4.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）と低誘電率（7.0）を有するアノーサイト（CaO・Al₂O₃・2SiO₂）が生成するため、図10に示すようにポストファイヤに十分耐えられるようになる。

なお、アノーサイトの生成の際には、構成アルミナ粉末の一部がガラス中に溶解し、結果として緻密な焼結体が得られる。図11にX線回折結果を、また図12は焼結後の緻密なLFCの微構造を示す。なおLFCは、図13の焼成ファイルの一例に示したように、焼成後半にプラスチックフローを示す領域があり、これはアルミナの焼結挙動と大きく異なる点で、焼成収縮コントロールに有利に作用する。

* LFC基板：アノーサイト結晶化、十分（高屈服点、上図）

** 未焼結LFC基板：アノーサイト結晶化、不十分（低屈服点、下図）

図10. 低温焼成基板（LFC）の後焼き付け時の耐熱性の比較

6. あとがき

公表資料を中心に、次世代自動車用低温焼成基板の全貌を紹介した。低温焼成基板に関する多くの方々の努力とグローバルな共生的取り組みが、今日の実用化を可能にした。新材料の開発は、大きく製品のプロセスやシステムを変え、ひいては産業構造を変革し、また新事業を創生する原動力を持っている。低温焼成基板もその可能性を示唆している。新材料開発による大きな技術の差別化により、過当競争を避け、秩序ある住み分け、ハイリスクハイリターンの実現など、ドイツ的なアプローチは、現在日本にも求められているのではなかろうか。

この拙文が、実装関係の新材料の開発を担当される研究者の方々の挑戦勇気と啓蒙につながれば、望外の幸いである。

(1998.4.7-受理 1998.4.17-再受理)

文 献

- 1) J.Blodgett, R.Barbour: "Thermal Conduction Module:A High Performance Multilayer Ceramic Package", IBM J.Res.Dev., Vol.26, No. 1, pp.30-36, 1982
- 2) 金子 明, 他: "FUJITSU VP-2000シリーズのテクノロジー

図11. 低温焼成基板 (LFC) の焼結挙動 (複合成分のアルミナが一部ガラス中へ溶解しアノーサイトを析出)

エッチング後 (a)エッチ部、(b)アノーサイト)

焼結のまま

図12. 低温焼成基板 (LFC) の微構造

ー”, FUJITSU, Vol.41, No. 1, pp.12-19, 1990

- 3) 西垣 進：“私の電子セラミックス研究実用化例（其の4）ードイツで自動車への実用化の始まった低温焼成基板の現状と展望”，岐阜大学地域共同センター研究成果報告書，第7号，pp.20-34, 1997
- 4) R.Schleupen, W.Reichert, P.Tauber, G.Walter：“Electric Control Systems in Microhybrid Technology”, SAE,

図13. 低温焼成基板 (LFC) の焼成プロファイルの一例

International Congress and Exposition Detroit, pp.89-97, 1995

- 5) S.Nishigaki, S.Yano, J.Fukuta, M.Fukaya, T.Fuwa：“A New Multilayered Low Temperature Fireable Ceramic Substrate”, Proceedings of ISHM 85, pp.225-234, 1985
- 6) S.Nishigaki, J.Fukuta, S.Yano, H.Kawabe, K.Noda, M.Fukaya：“A New Low Temperature Fireable Ag Multilayer Ceramic Substrate Having Post-Fired Cu Conductor”, Proceedings of ISHM 86, pp.429-437, 1986
- 7) S.Nishigaki, J.Fukuta：“Low-Temperature Cofireable Multilayered Ceramics Bearing Pure-Ag Conductors and Their Sintering Behavior”, Advances in Ceramics, J.Am.Ceram.Soc., Vol.26, pp.199-215, 1989

用語解説

LTCC：Low Temperature Co-Fired Ceramics 低温同時焼成セラミックスの略で，同基板の学術的表現になりつつある。高密度ハイブリッドIC基板に相当。

μ-ハイブリッド：マイクロハイブリッドと呼ぶ。Robert Bosch GmbHが開発したLTCC。

LFC：Low Temperature Fireable Ceramics 低温焼成セラミックスの略で，住友金属エレクトロデバイスが開発したLTCC。

ECU：Electronic Control Unit 電子制御系部品の略。

VCO：Voltage Control Oscillator 電圧制御発振器の略。

TCXO：Temperature Control Crystal Oscillator 温度制御水晶発振器の略。

西垣 進 (にしがき すずむ)

昭和6年生まれ。昭和30年，名古屋大学工学部応用化学科卒業。現在，岐阜大学地域共同センター客員教授，大研化学工業株式会社研究所長，住友金属エレクトロデバイス株式会社顧問，Robert Bosch GmbH技術顧問。低温焼成基板用各種ベースト材料（Ag導体，誘電体，抵抗等）の開発に従事。