

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高Q・低誘電率高密度実装用LTCC基板の開発」

成果報告書(概要版)

平成26年 3月

委託者 中部経済産業局

委託先 一般財団法人ファインセラミックスセンター

## 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
- 1.2 研究体制
- 1.3 研究開発委員会の活動
- 1.4 成果概要
- 1.5 当該研究開発の連絡窓口

### 第2章 低温焼成誘電体材料の開発

- 2.1 珪酸塩材料の高Q・低誘電率化
- 2.2 珪酸塩材料の低温度係数化
- 2.3 合成・試作
- 2.4 開発材料の物理的特性評価

### 第3章 グリーンシート成形技術の確立

- 3.1 積層接着可能なバインダの選定
- 3.2 シート成形
- 3.3 シートの物理的・電気的特性評価

### 第4章 低温同時焼成技術の確立（新LTCC基板開発）

- 4.1 焼結シミュレーション
- 4.2 LTCC基板の同時焼成温度プロファイルの決定
- 4.3 LTCC基板のミリ波帯特性評価(デモンストレーターによる検証)

### 第5章 事業化の取組み

### 第6章 全体総括

[用語解説]

## 第1章 研究開発の概要

高温焼成で高Qを呈するウィルマイト母材に低温化焼結助剤候補として第1、第2の2種を選定し、目標とする高Q・低誘電率を実現した(H23, H24年度)。この新誘電体材料を基に今年度は、LTCC基板として必須となる残りの目標、高密度実装問題(誘電体材料のメッキ耐性)の解決を含め、以下の課題に取り組んだ。

- ・メッキ問題(成分溶解, パターン外析出)の検討と、結果の材料開発へのフィードバック
- ・母材ウィルマイトからの不要成分(ZnO)の析出に関する生成プロセスの検証と量産化対策
- ・第1候補材料のグリーンシート作製用のスラリー硬化対策他と量産化検討
- ・第2候補材料焼成時間短縮の検討と第3候補材料シリカーウィルマイト-硼酸の評価
- ・原料粒径の材料特性(特に第1候補材料グリーンシート中の残存空孔)に及ぼす影響の検証、
- ・デモンストレータとしてのミリ波スロットアレーアンテナの試作評価、
- ・試作アンテナサンプルを持参しての各社ヒヤリング等の事業化検討の開始

### 1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標

自動車及び情報機器・家電産業分野では、正に普及開始し始めたミリ波帯無線通信用モジュールの小型・低価格化の為、多層集積化基板へのニーズが高いが、LTCC多層基板は誘電損失が過大で現在迄は使用されていない。その理由は、市販LTCC材料はガラス相を多く含み、ミリ波帯域では誘電損失が大きくなるからであり、これ迄に実用化されたLTCC基板材料は、殆どマイクロ波帯での使用に限定されていた。従って、ミリ波帯で高Qを維持する新規材料(図1.1-1)の開発が喫緊の課題である。

H18年度制定「中小企業ものづくり基盤技術高度化指針」で指定された基盤技術の一つ「粉末冶金技術」の高度化、即ち原料粉末の高精度化及び成形技術の高精度化に沿い、

- ・結晶化法等を用いる事により低損失かつ低誘電率の新規材料を開発し、
- ・グリーンシート成形及びLTCC基板の低温同時焼成技術を確立し、
- ・ミリ波帯で、「高Q・低誘電率高密度実装用LTCC基板」の開発を目指す。

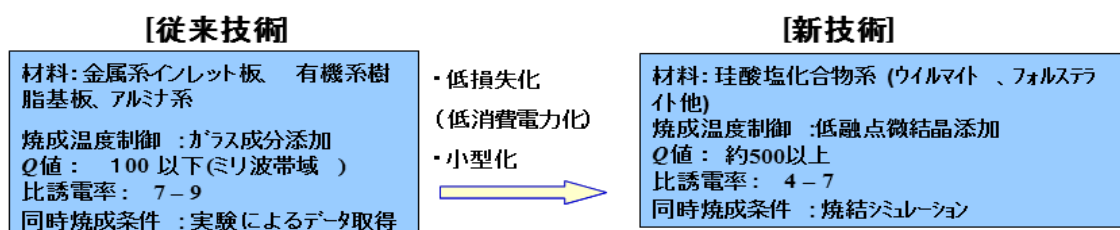


図 1.1-1 高度化する技術

研究開発の分担は表 1.1-1 の通りである。

表 1.1-1 研究内容の分担

サブテーマ	機関	研究分担
①低温焼成材料技術の開発	丸ノ内薬合資会社 国立大学法人名古屋工業大学 学校法人名城大学	LTCC 用粉末合成 高 Q・低誘電率化 比誘電率の低温度係数化
②グリーンシート成形技術の確立	国立大学法人名古屋工業大学 (株)ヤスフクセラミックス 一般財団法人ファインセラミックスセンター	シート成形用バインダ探索 シート成形条件の最適化 物理・電気的特性評価
③低温同時焼成技術確立, 新 LTC C 基板開発	平井精密工業(株) 一般財団法人ファインセラミックスセンター 独立行政法人産業技術総合研究所 国立大学法人東京工業大学	焼結設計及びアンテナ試作 焼結シミュレーション メッキ課題対策 アンテナ設計・評価

課題を克服すべく技術的目標値を以下の通り設定した。

#### 技術的目標値

##### ① 低温焼成誘電体材料の開発

①-1 ミリ波に適帯に対応できる誘電特性と金属導体との一体化焼結性を備えた以下の特性を有する LTCC 材料を開発する。

- (1) 低抵抗導体材料とセラミックス材料との同時焼結が可能であること。
- (2)  $Q$  値：約 500 以上(ミリ波帯において、③-1(1)の目標値を満足する事。)
- (3) 比誘電率( $\epsilon_r$ )： 4 - 7

①-2 比誘電率の低温度係数化(周波数温度係数( $Tcf$ )) ≒ 数 10 ppm/K)

##### ② グリーンシート成形技術の確立：新規に開発する LTCC 粉末のシート成形加工技術の開発

②-1 導体ペーストが印刷でき、穿孔、積層化できるシート成形用バインダの決定。

②-2 厚さ 50  $\mu$ m 以下のテープ成形を可能とする。

##### ③ 低温同時焼成技術の確立(新 LTCC 基板の開発)

③-1 ミリ波帯小型・高集積実装基板の下記目標値を満足。但し、(2)から(6)は参考値。

- (1) マイクロストリップライン(50  $\Omega$ )のロス  $\leq$  0.5 dB/cm (67 GHz)
- (2) 基板収縮率誤差  $\leq$   $\pm$ 0.5 %
- (3) 基板厚の誤差  $\leq$   $\pm$ 2 %
- (4) 基板の反り  $\leq$  10  $\mu$ m/L10 mm
- (5) 基板表面粗度  $\leq$  0.2  $\mu$ m Ra
- (6) 抗折強度  $\geq$  200 MPa

(7) 導体パターン解像度(ライン・アンド・スペース)  $\leq 60 \mu\text{m}/60 \mu\text{m}$

③-2 仕様を満たす LTCC 基板の同時焼成温度プロファイルを決定する。

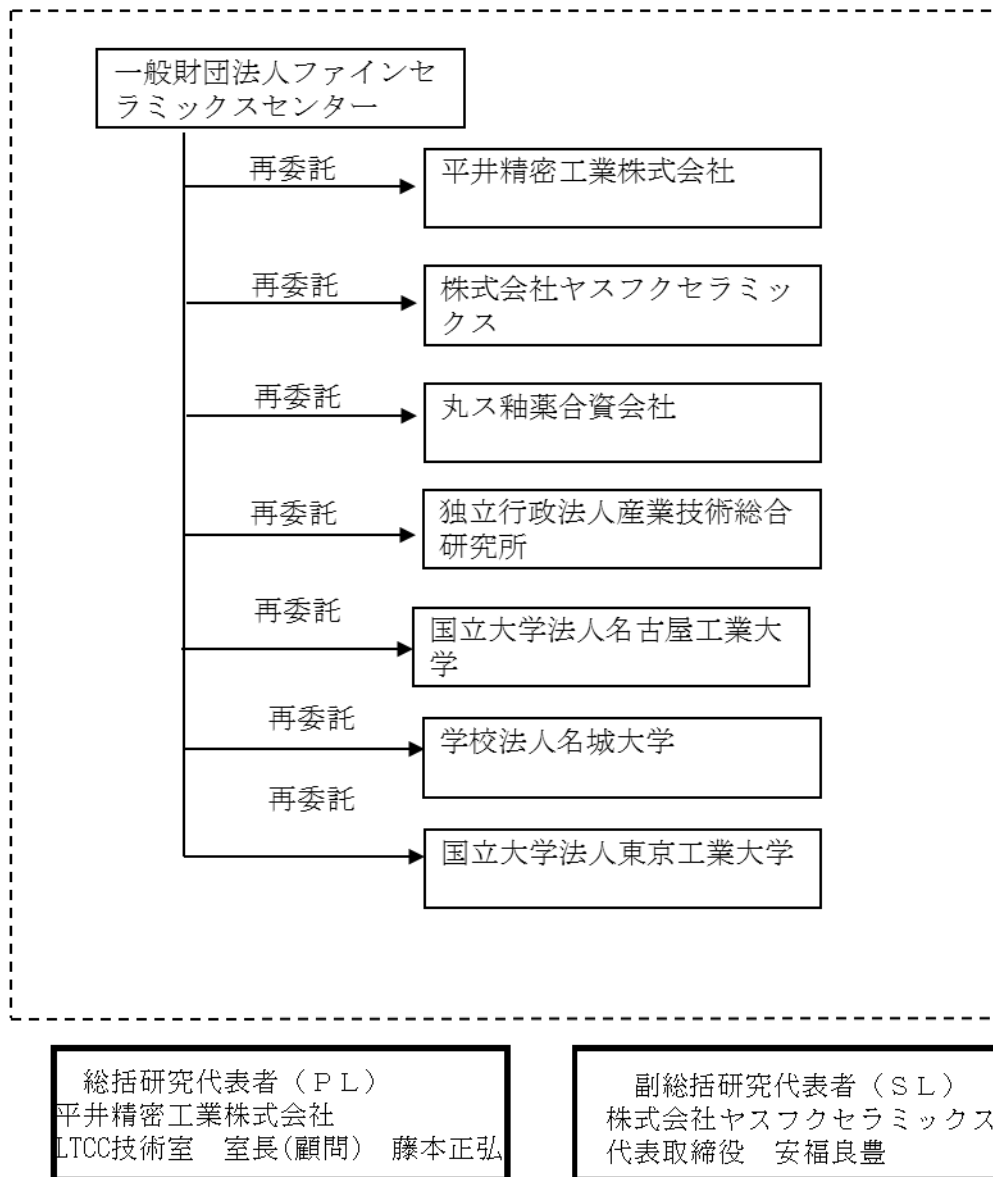
③-3 LTCC 基板のミ波帯特性評価 (デモンストレータによる検証) を行い、アンテナを設計・製作し低損失・高性能であることを検証する。

④メッキ時に基板材料成分の溶融がなく、デバイス実装が可能であること。

## 1.2 研究体制

### (1) 研究組織及び管理体制

#### 1) 研究組織 (全体)



### 1.3 研究開発委員会の活動

#### (1) 委員会設置の目的

研究開発が計画通りに円滑に進められるよう、2回の研究開発委員会を開催して、研究開発の進め方についてアドバイザーの意見を十分反映させ、研究開発を円滑に進捗させる。

#### (2) 委員構成

	氏名	機関名	所属	役職	備考
委員長	藤本 正弘	平井精密工業株式会社	LTCC技術室	室長	P L
副委員長	安福 良豊	株式会社ヤスフクセラミックス		代表取締役	S L
委員	大林 和重	日本特殊陶業株式会社	総合研究所	主幹技師	アドバイザー
委員	島方 幸広	太陽誘電株式会社	R&Dセンター開発研究所 無線グループ	課長	アドバイザー
委員	大森 靖男	株式会社ディーマテリアル	—	顧問	アドバイザー
委員	小林 禧夫	サムテック有限会社		代表取締役 (埼玉大学名誉教授)	アドバイザー
委員	一ノ瀬 昇	早稲田大学	理工学術院総合研究所	名誉教授	アドバイザー
委員	鈴木 貞彦	丸ノ穂薬合資会社		無限責任社員	
委員	廣瀬 伸吾	産業技術総合研究所	先進製造プロセス研究部門	主任研究員	
委員	大里 齊	名古屋工業大学	ながれ領域	プロジェクト教授	
委員	小川 宏隆	名城大学	大学院理工学研究科	教授	
委員	廣川 二郎	東京工業大学	理工学研究科電気電子専攻	准教授	
オブザーバー	新藤 公人	中部経済産業局	産業部製造産業課	課長	オブザーバー
事務局	東田 豊	一般財団法人ファインセラミックスセンター	材料技術研究所	参事	

## 1.4 成果概要

本事業で開発した新 LTCC 基板用誘電体材料はミリ波帯で高 Q 値(500)/低誘電率(6.6)/共振周波数温度係数の目標値を達成、高熱伝導率(4.7W/mK)も確認され基板上の伝送線路は世界最小ロス(0.5dB/cm)を実現した。技術的目標値(1.1 項)に対する達成度を下表に示す。

【技術目標に対する達成度】

技術的目標値 \ 候補材料	BC5	52B48L	52B48LG	LiBO2(LB)→ 55LB45Z	SiO2-B2O3	備考
導体材料Agペーストとの同時焼成 (特に、Ag拡散)	○	△	△	△	-	Auペーストは可。 但し、コストが問題
Q値: 約500(ミリ波帯において)	○	○	○	○	○	
比誘電率ε <sub>r</sub> : 4-7	○	○	○	○	◎	
誘電率温度係数	-	-	-	○	-	
グリーンシート成形性	○	×	○	△	-	
厚さ50μ m以下のテープ成形	○	×	○	△	-	
μ ストリップラインロス: 0.5dB/cm	○	-	-	○	-	
基板寸法精度(収縮率、厚み、反り)	△	-	△	△	-	
基板表面粗度: 0.2μ m Ra	○	X	○	○	-	
抗折強度: 200 MPa	-	-	-	△	X	必要性に応じ、 支持体を工夫。
ライン&スペース: 60μ m/60μ m	○	-	-	○	-	
実装性: メッキで成分溶融なき事	×	○	○	△	-	

開発材料は母材粒子間を助剤で埋め母材粒子同士を”接着焼結”するもので従来の LTCC 基板がガラスの海に母材粒子(アルミナ)を混入させたもの(液相焼結)とすると、浜辺の砂に海水(助剤)が浸み込むイメージの新しいコンセプトのものである。Q 値劣化をもたらすガラス量が少ない分高 Q 値が得られるが、助剤の浸み込みは助剤-母材間の濡れ性、助剤の添加量、粘性(焼結温度依存)、母材(助剤)の形状、粒径等々の様々な影響を受け易く、空孔の無い緻密焼結体を得るのは困難で、又メッキ問題を誘発すると思われる。今年度は空孔対策として焼結助剤の改善及びメッキ工程の検討を行い、中性無電解メッキ液で成分溶融問題解決の見通しを得た。但し、銀ペースト粒子の誘電体内への拡散が未解決でパターン外析出が予見された為、デモ用アンテナは金ペーストを使用して試作評価を行った。試作のデモ用アンテナを持参しカスタマーヒヤリングを行い、事業化に向けた課題、及び技術的課題も新たに抽出する事が出来た。研究成果を第 2 章～第 4 章に詳述する。

## 1.5 当該研究開発の連絡窓口

一般財団法人ファインセラミックスセンター 材料技術研究所 東田 豊

電話 052-871-3500

FAX 052-871-3599

E-mail [higashida@jfcc.or.jp](mailto:higashida@jfcc.or.jp)

## 第2章 低温焼成誘電体材料の開発

### 2.1 珪酸塩材料の高Q・低誘電率化

#### 2.1.1 低誘電率骨材と低融点フィラー材との複合化

酸塩材料としてウィルマイトーホウ酸カルシウム及びシリカーウィルマイトー酸化硼素材の検討を行い、得られた結果を以下に示す。

##### 1) ウィルマイトー硼酸カルシウム：

ウィルマイトの合成温度が低いほど  $Qf$  値は大きくなった。合成温度 1,100°C のウィルマイトを用いた場合、比誘電率 6.7、 $Qf$  値 25,000 GHz (17GHz) となり、比誘電率は目標値 7 以下であったが、 $Q$  値はミリ波帯において 500 以下であった。

##### 2) ウィルマイトーシリカー酸化ホウ素：

① 酸化ホウ素からホウ酸への調合転換により、アルコール系スラリーの乾燥や焼成の際のホウ素の放散が抑制され、ボールミル粉碎に水、アルコール系溶剤のいずれでも使用できるようになった。

② (ウィルマイトーアモルファスシリカーホウ酸) の調合から、900°C 以下での焼成で (ウィルマイトーホウ珪酸ガラス) 複合焼結体を得た。

③ 調合組成 ( $\text{SiO}_2/\text{Zn}_{2.05}\text{SiO}_{4.05}/\text{H}_3\text{BO}_3 = 59.28/32.47/\text{B}_2\text{O}_3$  として 8.24/wt%) の試料では、850°C 前後で焼結し、ミリ波帯 (66GHz) での比誘電率は 4.2  $Qf$  値は 95,000GHz となり、共に目標値をクリアした。

④ 上記試料の曲げ強度は目標値 200MPa に対して、約 40MPa、熱膨張係数は 1.7 ppm/°C であった。

#### 2.1.2 珪酸塩融液の微結晶粒化

誘電率 5 を切る次期材料としてコーディエライト/インディアライトの LTCC 化を進めた。本年度は、インディアライト結晶粉 (1  $\mu\text{m}$ ) を作製し、LTCC 助剤を検討した。7 種の助剤を選び、計 15 種の LTCC 素地を作製し、低温焼成実験をした。中で、CuO を含む系の助剤の特性が良かった。誘電率 5 を下回り、且つ  $Q$  値が目標値 500 (ミリ波帯) を越えるものも得られ、更に精査すれば特性の良いものが得られる方向性が得られた。LTCC 基板へのメッキ処理において、本インディアライト LTCC は耐酸性が確認された。



## 2.2 珪酸塩材料の低温係数化

### 2.2.1 低温温度係数 HQW-TiO<sub>2</sub> の低温焼成化の検討

表 2.2.1-1 熱膨張率

測定温度 (°C)	HQW-4wt%LB		HQW-10wt%LB	
	線膨張 (%)	平均線膨張率 (ppm/K)	線膨張 (%)	平均線膨張率 (ppm/K)
30-80	0.01	2.4	0.02	3.3
30-100	0.02	2.4	0.02	3.3
30-200	0.04	2.6	0.06	3.6
30-200	0.08	2.9	0.11	4.0

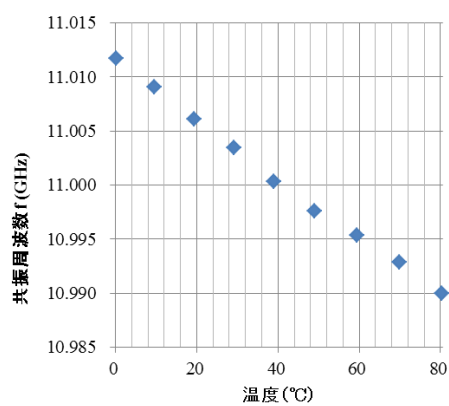


図 2.2.1-1 共振周波数の温度変化

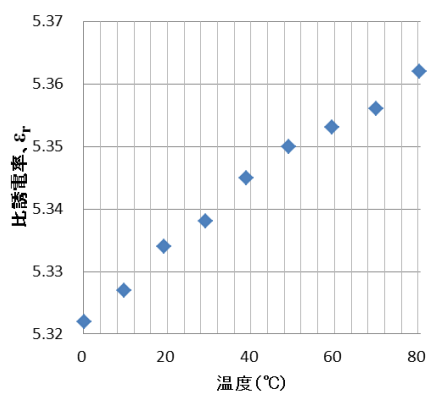


図 2.2.1-2 比誘電率の温度変化

代替焼結助剤 LB を用いた LTCC の TCf は約-25ppm/K であり、目標値の範囲内にあることを確認した。

### 2.2.2 HQW の低温焼成化の検討

焼結助剤を 52B48L として低温焼成化を達成した誘電体材料(H24 年度)のスラリーの凝集抑制のため、ガラスフリット化した 52B48LG を作成し、低温焼成が可能であると共に、技術目標値を達成する事を明らかにした ( $\epsilon_r < 7$ ,  $Qf \approx 35,000\text{GHz}$ )。合成プロセスの簡素化に向け、助剤のフリット化を必要としない代替助剤を焼結助剤として用い、HQW①への添加試験を行った。焼結後のバルク密度を図 2.2.2-1 に示す。助剤の添加は HQW の低温での焼成に有効であることが示唆される。一方、他の助剤を添加した試料では、925℃以上で密度がほぼ一定となっており、この温度以上で焼結するものと思われる。

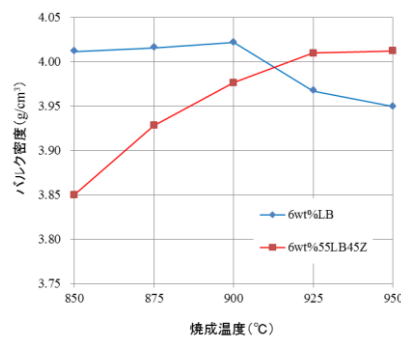


図 2.2.2-1 焼結体のバルク密度

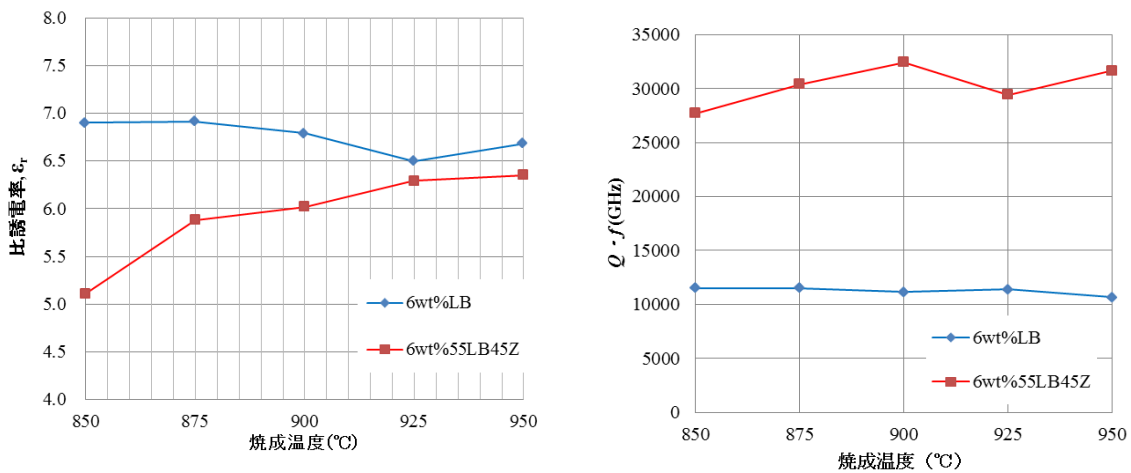


図 2.2.2-2 焼結体の誘電特性

図 2.2.2-2 に誘電特性を示す。比誘電率は 7 以下の値を示し密度変化と同様な変化を示している。Q 値は助剤により大きく異なり、約 11000GHz～他の添加試料では 35000GHz が得られる事が明らかとなった。フリット化した助剤と略同等である事も明らかとなった。誘電率及び Qf 値ともに目標値を達成できた。

## 2.3 合成・試作

ウィルマイト合成上の課題について取り組んだ。ZnO と SiO<sub>2</sub> 粉末各 3 種類を使用しウィルマイト (HQW, HQW-H, HQW-L, HQW-SO, HQW-M) を合成した。測定結果を基に合成粉末を決定し増量作製を行ったが XRD 回析で ZnO-SiO<sub>2</sub> の未反応が確認された為、調合量と合成条件を再度検討し未反応層のないウィルマイトを得る事が出来た。

## 2.4 開発材料の物理的特性評価

異なる ZnO、SiO<sub>2</sub> 粉末の組合せで合成された 4 種のウィルマイト粉末のマイクロ波誘電特性の測定を行った所、比較的安価な HQW-L が Qf 値が 160,000 程度と高い値となった (表 2.4-1)。

表 2.4-1 4 種類 (HQW、HQW-H、HQW-L、HQW-SO) のウィルマイト各 5 個の特性

試料名	仮焼温度	焼成条件	NO.	試料直径 (mm)	試料厚さ (mm)	周波数 $f_0$ (GHz)	比誘電率 $\epsilon_r$	誘電正接 $\tan \delta$	$Q \cdot f$ (GHz)
HQW	1150°C	1340°C × 2h	1	9.509	4.757	17.405	6.25	0.00019	93,000
			2	9.508	4.758	17.391	6.25	0.00017	101,000
			3	9.507	4.754	17.404	6.25	0.00018	97,000
			4	9.507	4.757	17.407	6.24	0.00019	92,000
			5	9.507	4.757	17.405	6.25	0.00019	93,000
平均				9.508	4.757	17.402	6.25	0.00018	95,000
HQW-H	1150°C	1340°C × 2h	1	9.470	4.756	17.572	6.15	0.00012	145,000
			2	9.504	4.758	17.536	6.15	0.00013	132,000
			3	9.473	4.757	17.570	6.14	0.00013	138,000
			4	9.506	4.760	17.538	6.14	0.00013	140,000
			5	9.506	4.757	17.534	6.15	0.00012	141,000
平均				9.492	4.758	17.550	6.15	0.00013	139,000
HQW-L	1150°C	1340°C × 2h	1	9.504	4.758	17.390	6.26	0.00012	143,000
			2	9.499	4.755	17.402	6.26	0.00010	167,000
			3	9.504	4.756	17.393	6.26	0.00011	163,000
			4	9.509	4.756	17.389	6.26	0.00011	156,000
			5	9.501	4.755	17.405	6.25	0.00011	156,000
平均				9.503	4.756	17.396	6.26	0.00011	157,000
HQW-SO	1150°C	1340°C × 2h	1	9.510	4.754	16.664	6.83	0.00054	31,000
			2	9.508	4.754	16.653	6.84	0.00058	29,000
			3	9.509	4.761	16.647	6.84	0.00055	30,000
			4	9.507	4.756	16.655	6.84	0.00045	37,000
			5	9.511	4.756	16.657	6.84	0.00060	28,000
平均				9.509	4.756	16.655	6.84	0.00054	31,000

注)1150°C仮焼品は 72hr ボールミル粉砕を行い 1340°Cの焼成試料は浸漬試験に合格したもの

図 2.4-1 に、遮断円筒導波管法によるミリ波誘電率の測定原理を示す。厚さ  $t$ 、直径  $D$  の試

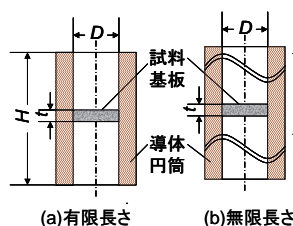


図 2.4-1 遮断円筒導波管法の測定原理

料基板を導体円筒の中央に装荷し、遮断誘電体円板共振器を構成する。本配置では、円筒軸に垂直な面内に電気力線がある  $TE_{0m1}$  モードを用いる。 $TE_{0m1}$  モードでは周方向にその電気力

線の大きさが変わらないためモード分離が起こらない。比誘電率は  $TE_{0m1}$  ( $m = 1, 2, \dots$ ) モードの共振周波数  $f_0$  の測定より、また、誘電正接  $\tan \delta$  は共振ピークの無負荷  $Q$ 、 $Qu$  の測定値より次式から求められる。リッツガレルキン法を用いて、同軸励振線が挿入される穴の部分の縁端効果を含めた厳密な電磁界分布計算を行う (1)式; 行列方程式)。

$$\det H(f_0, \epsilon_r, D, H, t, d) = 0 \quad (1) \quad \tan \delta = A/Q_u - BR_s \quad (2)$$

ここで、 $R_s$  は導体の表面抵抗で  $A, B$  は(1)式を用いて、導体寸法  $D$  及び  $H$  から計算される。

図 2.4-2 に測定システムと遮断円筒導波管治具の構造を示す。このとき、導体円筒部は  $TE_{01}$  モード遮断円筒導波管となるが、不要な空洞共振モードを抑制するために、導波管の両端に電波吸収材を配置する (図 2.4-2(a)参照)。また、図 2.4-2 に示す測定システムにより、110GHz までの  $TE_{011}$  モード及び  $TE_{012}$  モードの共振周波数  $f_0$  及び無負荷  $Q$ 、 $Qu$  の測定から、直径  $D$ 、長さ  $H$  及び銅の実効比導電率  $\sigma_r$  を予め計算する。ミリ波誘電率の測定結果を(表 2.4-2)に、 $Qf$  一定則 (直線) からのズレを図 2.4-3 に示す。

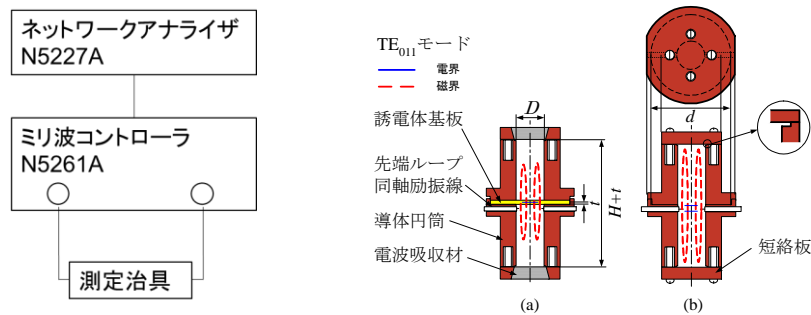


図 2.4-2 遮断円筒導波管法の測定システムと測定治具の構造

表 2.4-2 HQW-52B48LG のミリ波誘電特性

試料名	焼成条件	NO.	試料厚さ (mm)	周波数 $f_0$ (GHz)	比誘電率 $\epsilon_r$	誘電正接 $\tan \delta$	$Q \cdot f$ (GHz)
HQW① (1150°C × 2hr) 4wt%52B48LG	900°C × 1hr	1	0.290	59.654	6.58	0.00124	48,000
		2	0.290	59.566	6.61	0.00135	44,000
		3	0.291	59.613	6.57	0.00168	35,000
平均			0.290	59.611	6.59	0.00142	42,000

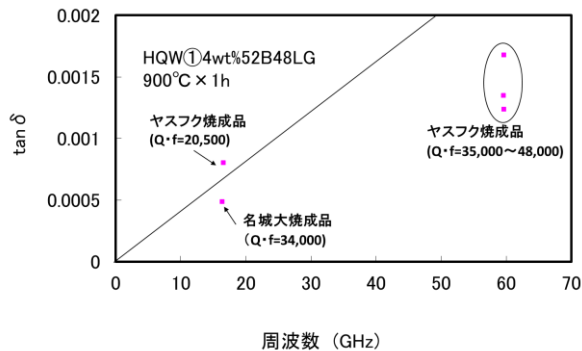


図 2.4-3  $\tan \delta$  の F 特

### 第3章 グリーンシート成形技術の確立

#### 3.1 積層接着可能なバインダの選定

シート成形可能なバインダー(溶剤系)を選定することができた。

#### 3.2 シート成形

スラリー性状の最適化及びシート成形技術の確立に取り組んだ。図 3.2-1 にスラリー調整及びシート作製の標準フロー図を示す。今年度に真空脱泡行程を追加した事で、スラリー中の気泡を更に取り除く事ができ、シート表面粗度を改善出来た。当初の目標  $Ra \leq 0.2 \mu m$  を略クリアする  $0.22 \mu m$  を達成した。又もう一つの目標であった、厚さ  $50 \mu m$  以下のテープ成形を可能とすることについては、前年度に既に達成済みである。



ポット回転機



真空脱泡機



ドクターブレードシート成形

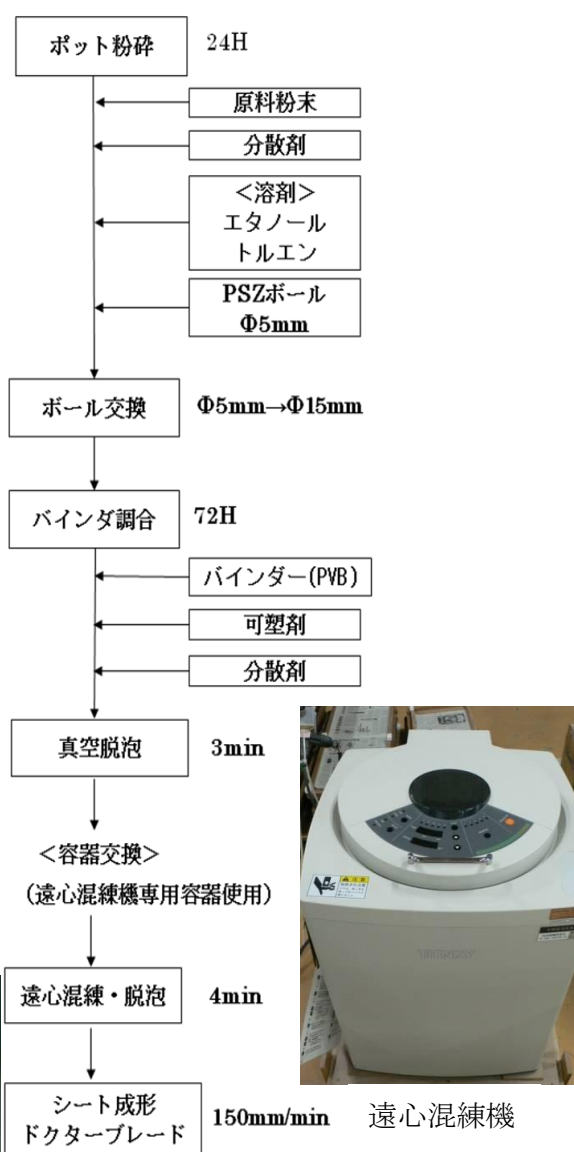


図 3.2-1 スラリー調整及びシート作製フロー

### 3.3 シートの物理的・電気的特性評価

LTCC 基板候補の抵折強度試験を実施した。試験方法は3点曲げ試験であり、試験片サイズ以外は JISR1601 に準拠している。試験条件は、支点間距離：30mm、治具材質：SiC、支持棒直径：φ5mm、負荷速度：0.5mm/min. である。表 3.3.-1 に試験結果を示す。

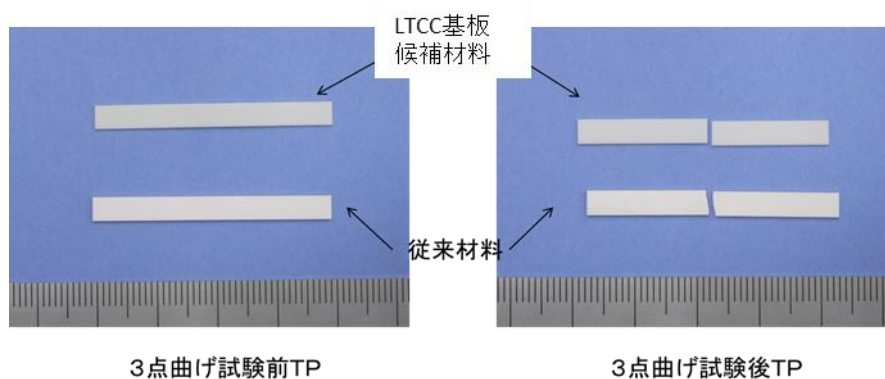


図 3.3-1 3点曲げ試験片

表 3.3-1 試験結果

試料名	No.	厚さ	幅	破壊荷重	曲げ強さ
		(mm)	(mm)	(N)	(MPa)
LTCC基板候補材料	1	0.494	4.010	2.145	99
	2	0.497	4.007	2.554	116
	3	0.499	4.005	1.779	80
	4	0.499	4.005	2.797	126
	5	0.500	4.005	2.244	101
平均		—	—	—	104
従来材料 焼結体	1	0.704	4.006	12.87	292
	2	0.706	4.009	14.22	320
	3	0.705	4.007	13.47	304
	4	0.705	4.007	13.01	294
	5	0.706	4.008	12.18	274
平均		—	—	—	297

100MPa 前後の値となったが、従来材料約 3 分の 1 程度の値である事が分かった。

## 第4章 低温同時焼成技術の確立（新 LTCC 基板開発）

### 4.1 焼結シミュレーション

H25 年度は助材としてデモ用アンテナ基板と同じ材料を採用した基板の FEM 解析を行った。

- ・シミュレーション用パラメータ：グリーンシートでディスク状ペレットを作製し、
  - ・相対密度変化--誘電体のみを各温度点まで上げてデータ取得。
  - ・反りデータ(反り量  $h$ /ディスク半径  $r$ )--銀導体との同時焼成で取得
- 相対密度の実験結果(図 4.1-1(収縮曲線))からは、
- ・焼結ピーク保持温度(880℃)で急激に焼結が進む昨年度の助剤対し、今年度の助剤使用の基板は緩やかに焼結が進行する。しかしながら、
  - ・880℃でも相対密度は 95.7%であり、まだ緻密化の途中である。

事が解る。

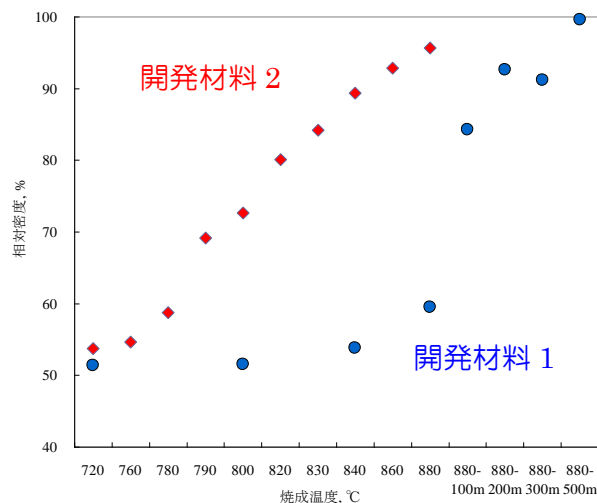


図 4.1-1 誘電体材料による収縮曲線の違い

・FEM 解析：収縮曲線を基にシミュレーションを行い、実験と解析による  $h/r$  値を比較した。解析結果は概ね実験値と合っているが、実験結果の 760℃での急激な反り上がりが FEM 解析では再現できていなかった。この理由としては、実験での同時焼成したものは Ag がセラミックスに拡散し中間層を生成する可能性が考えられ、その場合には Ag と中間層とセラミックスの 3 層の積層体での反り挙動を示しているものと考えられる。一方、FEM 解析では中間層は考慮せず Ag とセラミックス 2 層の積層体としてシミュレーションしているためと思われた。

今後、この焼結シミュレーションは、案件/回路毎にカスタマイズされた複雑な導体パターン・構造を持つ LTCC 基板の反り防止対策としてフル活用して行く予定である。

## 4.2 LTCC 基板の同時焼成温度プロファイルの決定

### 4.2.1 メッキ技術

プロジェクト開始後のこれまでに於いて、用意した LTCC 基板を素材として、めっき工程で必要な処理を行った場合、活性化処理の工程でベージュ色が白色化し、無電解 Ni の工程で基板全体に Ni 析出が生じていることがわかった。また、ウィルマイト系 LTCC 素材について中性無電解 Ni-P めっき、無電解 Ni-B めっき、無電解 Au めっきを施した場合、めっき工程が進むにつれ重量減少しており、素材の変色が生じていた。本プロジェクトで開発した LTCC 素材は多孔質状であり、酸に弱い素材であることがわかったため、アルカリ洗浄のみで、化学エッチング工程を行わないことで対応することで、無電解ニッケルめっき、無電解金めっき工程をアルカリ浴をベースとして開発することとした。

「無電解ニッケル工程」では、銀ペーストと金めっきとの密着性を確保するために、セラミック素材への電極形成に用いられている。LTCC 素材が酸性の溶液に弱いことから、アルカリ性のニッケルーボロン浴を選択した。めっき浴組成は、塩化ニッケル六水和物、クエン酸カリウム、塩化アンモニウム、ボランジメチルアミン、水酸化ナトリウム (pH 調整剤) とした。めっき条件は、めっき時間 40 min, 浴温度 75°C, pH 8 とした。

金焼成ペーストを施した LTCC 素材を用いて、セラミック素材へのニッケルーボロン (Ni-B) めっきを行った結果、金焼成ペーストのみでニッケルが析出しており、めっき前後での重量変化もなく、素材変色も殆ど生じていない事が解った。これにより、提案したアルカリ性ニッケルーボロンめっき浴を用いる事で正常な無電解ニッケルめっきが達成できたといえる。

「無電解金めっき」工程では環境対応としてノーシアン浴として、弱アルカリ領域の無電解めっき浴の開発を行った。その際に、浴温度が使い易い範囲(浴の分解を防ぐ)観点から浴温度もできるだけ低温の 60°C の浴温度と設定した。この新規めっき浴を用いて、LTCC 素材金ペーストパターン形成されたグリーンシート成型材への無電解金めっき処理を試みた所、金めっき、銀めっき、何れの場合においても LTCC 素材へのめっきの異常析出はなく、変色や重量減少も生じなかった。又、水素発生によるピンホールも発生しなかった。

これらの結果から、焼成 LTCC 素材を用い、めっき工程をアルカリ性浴を提案し、「洗浄」、「無電解ニッケルめっき」、「無電解金めっき」工程で、正常なめっきが実現できた。また、活性化についてもアルカリ性に近づけることで工程の改善がみられており、複数のめっき工程において最適化への目処がついたといえる。本プロジェクトにおけるめっき工程の結果を表 4.2.1-1 にまとめた。



表 4. 2. 1-1 めっき工程に関わるプロジェクト成果まとめ

	本プロジェクト 参入前	本プロジェクト 終了時(1年後)
洗浄	×(酸洗では、重量減少、変色、 銀ペースト消失)	○アルカリ洗浄 (重量減少なし、変色なし、銀 ペースト保持)
化学エッチング	×(重量減少、変色、 銀ペースト消失)	○工程削減
活性化	×(変色)	△ 本行程は必要に応じて対応
無電解ニッケルめっき	×(変色、銀拡散による全面ニッ ケル析出)	○新規アルカリ浴の実施 (重量減少なし、変色なし、金 ペースト保持)
置換金めっき	×(変色、銀拡散による全面金析 出)	△ 本行程は必要に応じて対応
無電解金めっき	×(変色、銀拡散による全面金析 出)	○新規アルカリ浴の実施 (重量減少なし、変色なし、金 ペースト保持)

#### 4. 2. 2 基板の同時焼成

4. 2. 2. 1 Ag 導体の拡散対策：従来の LTCC 基板も銀導体はマイグレーションや拡散を生じ易い事が知られているが開発材料は特にその傾向が強い。導体の誘電体中への拡散は短絡やメッキの異常析出を誘引する為、拡散抑止策の種々の検討を行った。

4. 2. 2. 2 Ag 拡散対策誘電体材料の評価

4. 2. 2. 3 グリーンシートの加工性、基板評価：成膜したグリーンシートで図 4. 2. 2-1 のテストパターン基板を作製し、LTCC 作製プロセスおよびミリ波帯での電気的特性の評価を行った。メッキを除いてほぼ問題なく加工が可能で、作製した評価用基板では、ミリ波帯(67GHz)で 0. 45dB/cm という低損失な伝送特性結果が得られた。

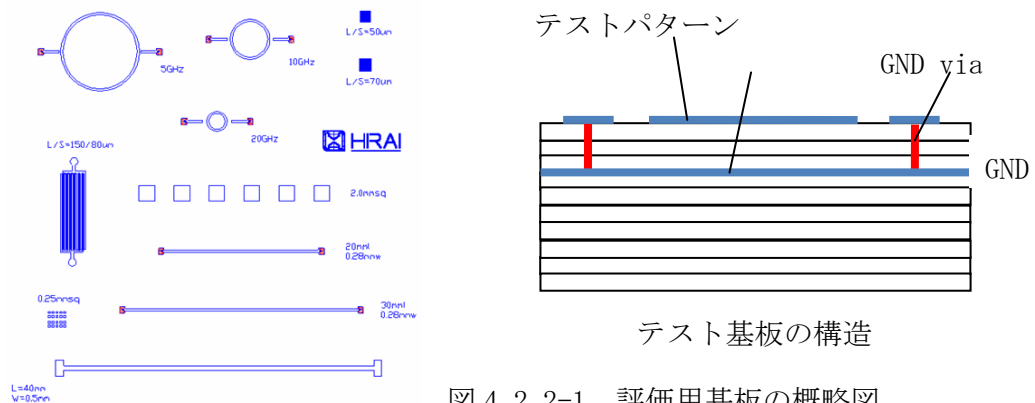


図 4. 2. 2-1 評価用基板の概略図

#### 4.2.2.4 基板の伝送ロス

開発した各種基板の伝送ロスの測定結果を従来 LTCC 基板のロスと合せ図 4.2.2-2 に示す。基板のロスは 0.45dB/cm @67GHz で従来の LTCC 基板に比し飛躍的改善で、目標値 (0.5dB/cm) を達成した。

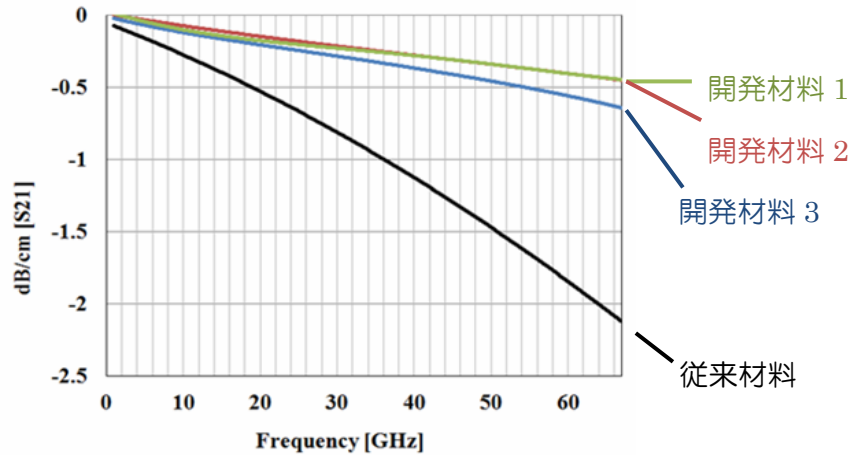


図 4.2.2-2 開発基板 vs. 従来 LTCC 基板の伝送ロス比較

従来材料の誘電体 Q 値を 90 (周波数によらず一定)、開発材料(デモアンテナ使用)の誘電体 Q 値を 700、 $\epsilon_r=6.6$  としてアジレント社の高周波回路シミュレータ ADS で解析した結果に実測結果を書き添えたものを図 4.2.2-3 に示す。点線が解析結果、実線が実測値となっている。線路両端にプローブパッドを付与して測定している為、リターンロスが多少劣化している。開発材料の  $S_{21}$  実測結果は特に低周波数帯域で解析結果と非常に良く合っている。開発材料では従来材料に比し、DC から 67GHz まで直線状に変化しており、これは誘電体によるロスが顕在化していないためで、つまり開発材料は 67GHz までの周波数帯では十分に誘電体 Q 値が高いということが分かる。

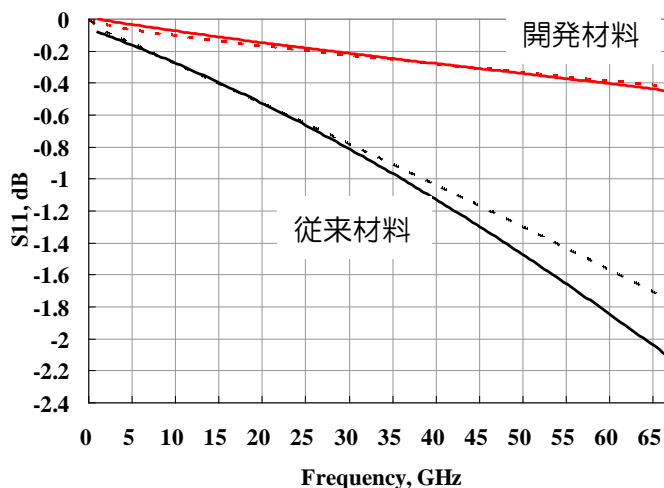


図 4.2.2-3 マイクロストリップ線路の伝送ロス比較

#### 4.2.2.5 ミリ波帯 BPF (62GHz 帯 Micro-strip Coupled Line Band Pass Filter)

開発材料を使用した LTCC 基板で、表 4.2.2-1 に示す仕様の BPF を設計(図

4.2.2-4, 5)、試作、評価した。

表 4.2.2-1 BPF 設計仕様

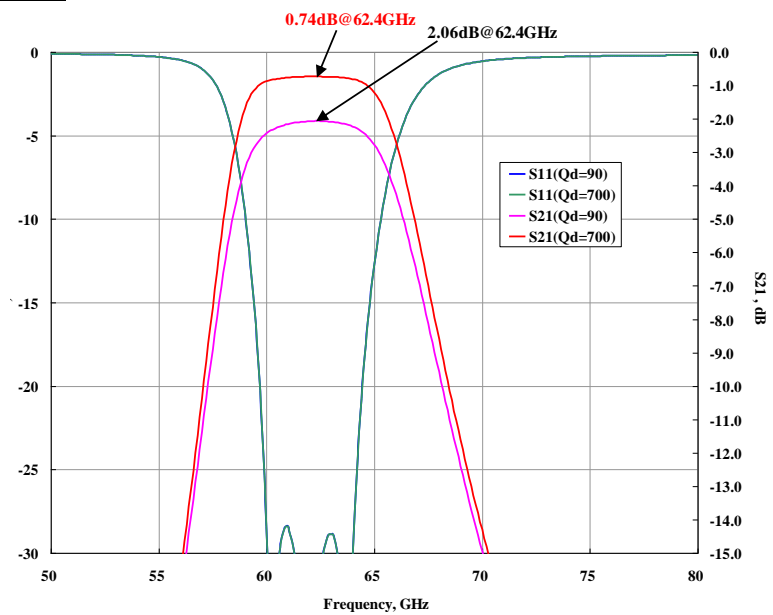
フィルタタイプ	チェビシエフ
段数	3 段
中心周波数	62GHz
通過帯域幅	9.3GHz
比誘電率	6.6
誘電正接	0.0014
導電率	$3.0e^7$ S/m



図 4.2.2-4 作製した BPF

図 4.2.2-5 開発材料で設計の  
3 段 BPF シミュレーション結果

(赤) \*ピンクは従来材料

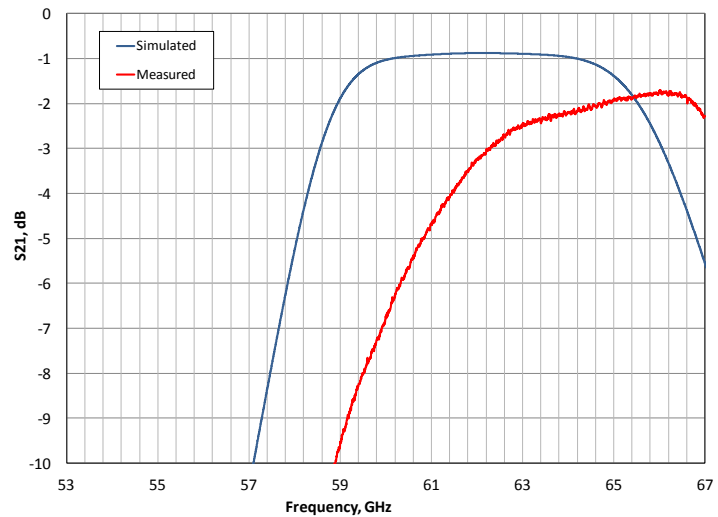


作製した BPF 基板は、誘電体材料の収縮率のバラツキにより、基板厚みは約 20um 薄くなり、共振器長と幅は 10~20um 短くなっていた。その為、図 4.2.2-6 のように中心周波数は約 3GHz 高周波側へシフトしたが、解析結果に近い結果が得られた。

図 4.2.2-6

3 段 BPF の実測値(赤)

\*青は設計値



#### 4.2.2.6 デモ用アンテナ（77GHz 帯スロットアレイアンテナ）

BPF の他、東京工業大学により設計されたスロットアンテナ基板の試作、評価を行った。アンテナ放射面の反り量は約 30 $\mu\text{m}/27\text{mm}$  であり、従来基板の反り量 10 $\mu\text{m}/10\text{mm}$  に対しても良好な結果であった。但し、2ton/cm<sup>2</sup> の WIP を外部業者で行った為、寸法精度、特に厚み方向について WIP 圧微調による収縮率の補正が叶わず、BPF 同様に課題が残った。

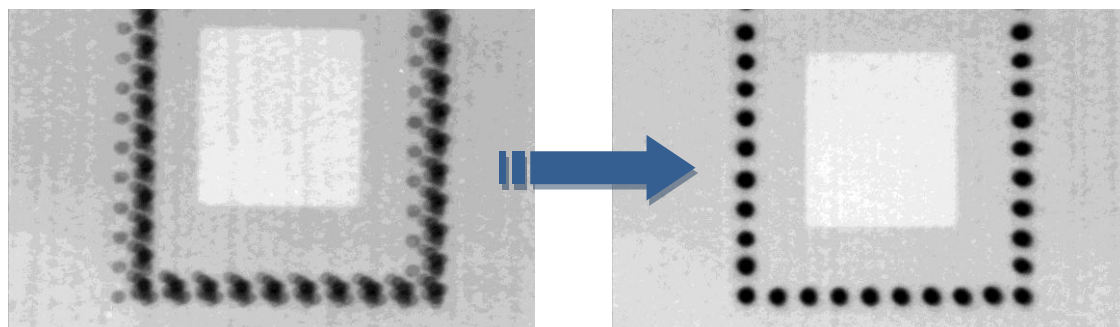


図 4.2.2-7 X線透過装置でみた via のズレ(左：改善前、右：改善後)

#### 4.2.2.7 抗折強度試験サンプル及び熱伝導率測定サンプル

抗折強度目標に対する評価及び熱伝導率測定用サンプルを、850°C30min. 及び 900°C1H の焼成条件で、作製した。試験結果は約 100MPa と目標値の半分であり(2.4, 3.3)、本接着焼結法では予測されるものであった。今後必要に応じた支持層の挿入・支持構造の考案追加が望まれる。

#### 4.2.2.8 同時焼成内層抵抗

RuO<sub>2</sub> 抵抗体をスクリーン印刷したグリーンシートが内層となるように積層し、同時焼成した基板の抵抗値を評価した。抵抗体は Au 導体のランド間に形成し、表層に同様に形成したパッドとビアで接続した。測定の結果は、 $\square 0.3\text{mm}$  では  $60 \pm 20 \Omega$  ( $\pm 33\%$ ) となり、従来材料の  $70 \pm 21 \Omega$  ( $\pm 30\%$ ) と大きな違いはなかった。今後経年試験等の確認が必要であるが、開発した新 LTCC 基板の L, C, R の回路素子の集積は、カスタマーの要求に応えられる重要なポイントになると期待される。

#### 4.2.2.9 収縮率バラツキ

グリーンシートの成型ロットごとの収縮率バラツキの評価を行った。XY 平面方向は約 15~19.5%の間でばらつき、徐々に収縮率が高くなる傾向にある。Z 厚み方向は 18.5~28%の間でランダムにばらついている。これら収縮率のバラツキは作製する基板の寸法公差に直接大きな影響を及ぼす為、今後収縮率を安定化させるという課題が残った。

### 4.3 LTCC 基板のミリ波帯特性評価(デモンストレーターによる検証)

図 4.3-1 にポスト壁導波路給電平行平板スロットアレーアンテナの構造を示す。スロットペアアレーの範囲は約 30mm×20mm である。設計周波数 76.5GHz で一様励振されるよう設計した。図 4.3-2 には、測定した近傍電磁界分布を用いた 81GHz での指向性を示す。H 面は給電導波路と平行な方向であり、対称構造から指向性も対称になっている。-3dB ビーム幅は 8.3 度である。E 面は放射導波路と平行な方向であり、主ビームが 7.2 度傾いている。-3dB ビーム幅は 10.6 度である。図 4.3-3 に実現利得と指向性利得の実験値を示す。ピーク値に関しては、指向性利得は 81GHz において約 26dBi と計算値に近い値が得られているのに対し、実現利得は約 22dBi と計算値に比べ約 2dB 低い。反射の実験値が約-10dB であるので反射損は 0.45dB である。設計周波数帯域 76GHz~77GHz に対し、動作周波数が約 81GHz と周波数ずれがみられた。放射導波路方向の位相分布に傾きはみられるものの、近傍電磁界の振幅は放射導波路、給電導波路方向ともおおむね一様になった。現時点では、基板の厚さにばらつきがみられ、動作周波数を設計周波数帯域に近づけるのは難しいと思われる。

長さ 20mm, 24mm, 42mm の 3 種類の直線ポスト壁導波路を製作して伝送損失を測定した。基板の厚さは 0.79mm である。図 4.3-4 は 71GHz での伝送損失の長さ依存性を示す。▲の点はそれぞれの長さの導波路での損失であり、直線は 3 つの結果から最小 2 乗法で近似したものである。63~72GHz において 0.045~0.060dB/mm の低損失性が確認できた。

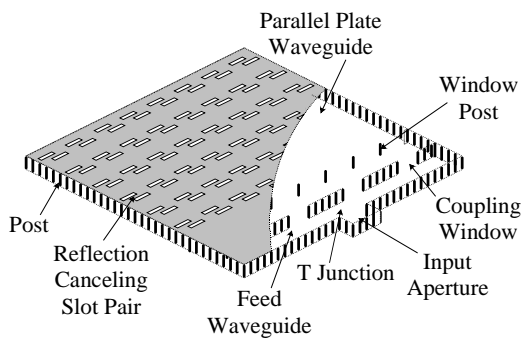


図 4.3-1 ポスト壁導波路給電平行平板  
スロットアレーアンテナ

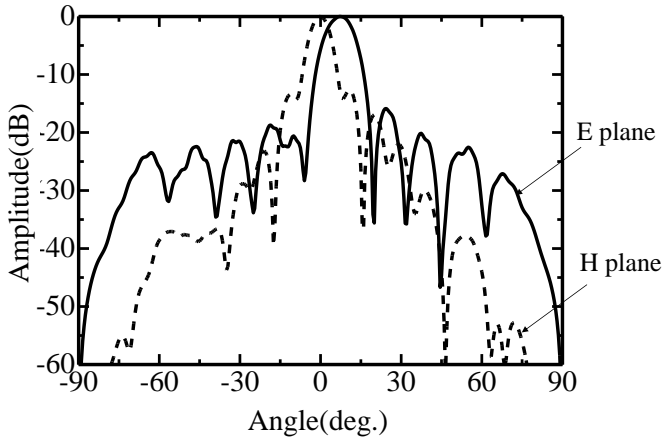


図 4.3-2 指向性(実験値, 81GHz)

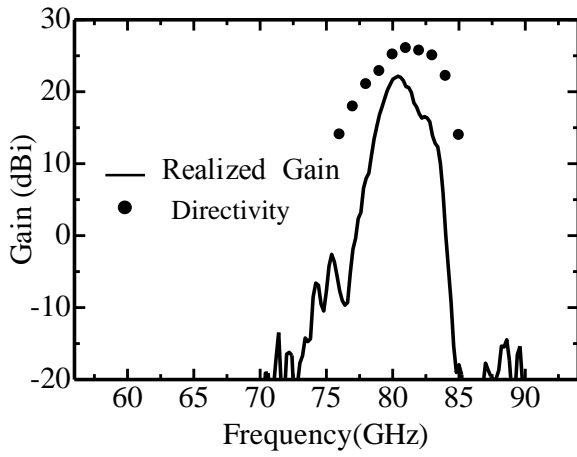


図 4.3-3 実現利得と指向性利得(実験値)

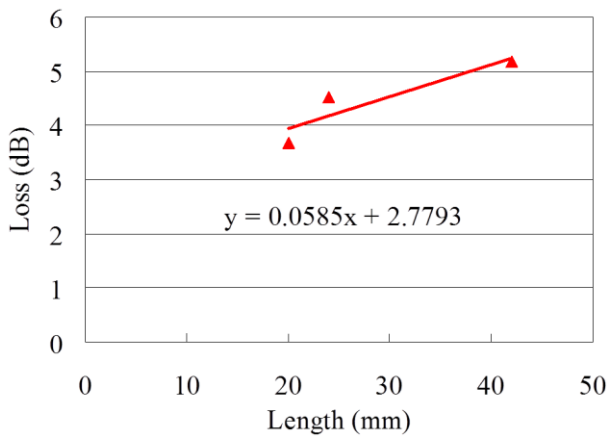


図 4.3-4 71GHz での伝送損失の長さ依存性(実験値)

## 第5章 事業化の取り組み

開発開始当初に夢の様だと評されたミリ波用 LTCC 基板が世界最小の線路ロスを達成し、昨年 11 月、マイクロ波展(MWE2013)に出展、来場したマイクロ波エンジニアからは超低損失 LTCC 基板に対する反響は非常に大きく、多層集積小型化(従って、販売面積・量が小)の特徴が故に低迷する LTCC 業界に、ミリ波帯 radar on a chip, phone on a chip 等の新マーケット創出の為の芽の出る種は植え付けられたと感じた。しかし、その後の現業最前線数社のカスタマーヒヤリングの結果、コストが最重要課題と判明した。更には、LTCC 基板はミリ波帯では特性上の難点と単純にコストが高いと言う固定観念から LTCC 基板を避け、PCB 基板(日立化成、ピラー工業、…)を現行使用していると感じさせられた。

現時点、自動車衝突防止用センサーは自動車装備品としての立上げ普及が最優先で、カメラ(スバルのアイサイト等、¥10 万@昨年)、ミリ波レーダー(独 Bosch 社製は¥3.6 万@今年 2 月)、レーザー等の競争から(或いは戦略的に)価格が極端に抑えられ(約千円)、同様に携帯機器用も 10mm 角程度で¥100 辺り、基地局間リンク(backhaul)でさえ”安かろう..”又は流行の、reasonable device の状況を呈している。しかし、この第一世代終了後は携帯電話の機能追加競争同様、電子走査アンテナ+ミリ波回路にベースバンド回路(CMOS IC)迄を小型集積化したミリ波帯高 Q・低誘電率高密度実装用 LTCC 多層基板の出番が近々に来る筈である。

開発のミリ波 LTCC 基板は高 Q 誘電体原材料=>グリーンシート=>導体印刷・加工・同時焼成から成るが分担各社が上記工程の順に以下の工程検討、価格、生産キャパ試算等を行った。

- ・ ウィルマイト量産化に向けての追加プロセスの検討、価格試算(丸ス釉薬合資会社)
- ・ 材料微粉碎法確立、収縮率/厚み歩留改善の為のスラリー調整(株ヤスフセラミックス)
- ・ 低コスト製造プロセス自動化、生産キャパ、安価な PCB 基板との比較<sup>(\*)</sup>(平井精密工業株)

最終材料組成決定前の原料の試算結果(¥3k/kg @200kg(50mm 角 0.7mmt 自動車用レーダ用基板で凡そ 1 万枚相当)からグリーンシート(20cm 角 0.1mmt)1 枚当りの原料費は約¥40 であった。以前行ったグリーンシートの概々算コスト試算(¥800/シート)では 50mm 角 0.7mmt LTCC 基板用グリーンシート単価は従来 LTCC 基板の約 5 倍(¥1,000 程度)となる為、LTCC 基板のコストは製造工程人件費の占める割合が大きいが、上記グリーンシート単価の更新を予定している。当初の事業化シナリオでは、本事業終了後 2 年目の売上を 3.6 万枚(自動車レーダ用約 50mm 角基板)とした。焼結体緻密化の為の 2ton/cm<sup>2</sup> の WIP 機はないがプロセスは現状のまま使用可能でキャパは最大約 15 万枚/年、事業終了後 3 年目(自動車レーダ 40 万枚+屋内通信機 150 万枚)から設備投資で対応する事を確認した。(平井精密工業株)。

## 第6章 全体総括

「複数年度の研究開発成果」

H23年度に開発済みのウィルマイト母材に  $\text{CaB}_2\text{O}_4$  を低温焼結助剤とする非ガラス材料 BC5<sup>(\*)</sup> の評価を始め、翌年  $\text{B}_2\text{O}_3$  にウィルマイトとの濡れ性改善の  $\text{Li}_2\text{O}$  を微量添加した助剤で低温焼成可能な誘電体材料 52B48L ( $\text{B}_2\text{O}_3$  と  $\text{Li}_2\text{O}$  のモル比 52:48) を開発、何れも低温焼成 (850-880°C) で高 Q 値を維持し、LTCC 基板上の伝送線路ロス是世界最小となる目標値の 0.5dB/cm を早々と達成した。(\*) ref. :D. Suvorov, “Contemporary Materials For Electronic Applications”, 6<sup>th</sup>. MMA, 1-4 Sept., 2010, Warsaw, Poland

開発した材料は、母材粒子同士を助剤で”接着焼結”する新しいコンセプトの LTCC 基板で、接着焼結の状態は助剤-母材間の濡れ性、助剤の添加量、粘性(焼成温度依存)、母剤(・助剤)の形状、粒径等々の様々な影響を受け易く、空孔の無い緻密な完全焼結体を得るのは相当困難で、実装用基板としてメッキ問題が現れた。材料開発=>グリーンシート=>LTCC 基板試験評価=>材料開発の三位一体のサイクルを速め繰返す手法を心掛けたが、短期間で何種類もの材料を開発・用意(グリーンシート化の量問題)する事は叶わず、実質的には上記の 2 候補のみに絞られた。最終年度に、BC5 はシリカ-ウィルマイト-硼酸(2.1.1)に進展、52B48L は 52B48LG=> $\text{LiBO}_2$ (1 化合物助剤)=>55LB45Z(2.2.2)へと有意に助剤の改善が進み、後者の材料(母材ウィルマイト、助剤  $\text{LiBO}_2$ -4wt.%)でデモ用の LTCC 基板としては初のミリ波スロットアレーアンテナ(4.3)の試作評価を行った。但し、銀ペースト粒子の誘電体材料中への拡散が完全には解決出来ず、メッキ工程でのパターン外析出が予見された為、高価な金ペーストの使用を余儀無くされた。最終年度終了時点での技術目標達成度は 1.4 項の表に示す通りである。

「研究開発後の課題」

1.4 項の達成度表で△印の付いたもの(6 項目)が目標未達である。期初に今期の取組みとして 7 課題を上げたが(第 1 章冒頭)、内 4 課題は完了、上の 3 課題は継続中で持ち越しとなった結果である。持ち越し 3 課題は以下の通りである。

- ・メッキ問題(成分溶解, パターン外析出)の検討と、結果の材料開発へのフィードバック
  - ・母材ウィルマイトからの不要成分 ( $\text{ZnO}$ ) の析出に関する生成プロセスの検証と量産化対策
  - ・助剤  $\text{B}_2\text{O}_3+\text{Li}_2\text{O}$  の上記材料のグリーンシート作製のスラリー硬化対策他と量産化検討
- 母剤の不要析出問題は量産化に悪影響を及ぼす可能性が有る為、要因を掴み量産化に備える事が望まれ、3 番目前半は終了したがシート厚みの管理等が積み残されて居り量産化(含、



ドクターブレードの導入) 検討を行う必要が有る。以上は、継続して取組む事に依り技術目標達成度表(1.4項)の殆どの△は○になると予測される。

1 番目のメッキ溶融、Ag 拡散=パターン外析出問題は研究開発後の喫緊最重要な課題である。考え得る限り全てのアプローチで同時併行トライが求められる。

1) 誘電体材料の改善: (2.1.1) ウィルマイト-シリカ-硼酸、但し抗折強度不足と判明、

(2.2.2) HQW①55LB45Z をトライ---結果は(4.2.2.2)

2) メッキ法の改善: (4.2.1) アルカリ洗浄+アルカリ性 NiB メッキ+弱アルカリノーシアン Au 低温メッキで見通しを得た) →実基板を用い工場メッキ設備への移管実験が必須で計画中。

3) Ag, Au ペースト以外: (4.2.2.1.1) Cu ペーストを用いた還元焼成 →標準品 Cu ペーストは従来の LTCC 基板用に収縮率・線膨張係数がチューニングされていて、本ミリ波基板用にチューニングを取るには、マーケット規模・実績を示さないと開発費と期間に困難を伴う。

4) 薄膜 Au ペースト: (4.2.2.1.2) ペイするには印刷厚 1umt 程度、但しペースト粒径(約 1.5 um)がハードルに。

5) 拡散防止用セラミックコーティング Ag ペースト使用: (4.2.2.1.3) 焼結開始温度をパラメータとして、現在も改善試作で評価継続中。

6) WIP に依る基材の緻密化: (4.2.2.1.4) 2tonWIP 機を借用使用。従来の LTCC は 350kg/cm<sup>2</sup>。

7) 基板セラミック部の保護: (4.2.2.1.5) OCG コーティング。但し、上記 3) 同様のハードル。

8) メッキレスペースト: Ag-Au-Pt, Pd ペースト- 既調査。

9) Ag ナノペースト: 低温インクジェットプリンティング- 最近登場の新技术。

以上、積み残した課題は半年後(10月迄)の解決を目途に、開発を継続する予定である。

「研究開発後の事業化展開」

半年近くの冬の間、霧で視界を全く遮られるヨーロッパではミリ波レーダーが唯一の衝突・追突防止の手段となる。国内向けにはミリ波以外も一時は存在するものの輸出を含めた市場規模から見て、国内でもミリ波に収斂すると予想される。自動車レーダマーケットシェアトップの独 Bosch は昨年 100 万台を出荷し 2016 年には 1,000 万台を、又独 Continental 社は米向けに 300 万台を予定している (EE Times 今年 3 月 26 日号)。

開発の低損失 LTCC 基板は通信用としては、バッテリー駆動で特に低電力を要求されるポータブル機器用に WiGig integration の形で重用され、又新たに介護ロボット、目のセンサー、ウェアラブル機器等の販路を見出し、繋ぎとしてはニッチな市場(backhaul, 衛星通信, 防衛..)も考えられる。新マーケットへの LTCC 付加価値性、需要、市場性、市場動向、戦略を

見極めつつ、下記 LTCC 基板の優位性・付加価値性アピールしつつサンプル提供・デザインインを目指して行く予定である。

(\*)LTCC 基板の優位性 (“ LTCC 基板>PCB 基板” )

「伝送線路ロス」「多層小型集積化」「寸法精度・安定性」「3次元構造の加工容易性」  
「耐環境性」「高熱伝導率」「フリップチップ 実装 IC との線膨張係数のマッチング」  
「適度な硬さによるワイヤーボンディングの実装歩留り」「印刷/厚膜抵抗精度」

## 専門用語の解説

- ・ LTCC : 低温同時焼成セラミックス (Low Temperature Co-fired Ceramics)。良導体(銀や銅)とグリーンシートの同時焼成が可能。
- ・ ミリ波 : 30~300GHz の周波数帯を指す。周波数帯域が広く、大きな情報量を高速に伝送することができる。
- ・ モジュール : アンテナやフィルタなどの回路、部品を集積したもの。携帯電話や自動車等様々な無線通信機器等に搭載される。
- ・ Q 値 : 誘電体材料の品質を表す係数で、高い程低損失。損失係数  $\tan \delta$  の逆数。
- ・ グリーンシート : 焼成前の誘電体基板用シート又はテープ状の誘電体材料。スラリー(泥漿)をドクターブレード法等で成形する。
- ・ マイクロストリップライン : 高周波用の不平衡型伝送線路。
- ・ SiP、AiP : System in Package (システム・イン・パッケージ)、Antenna in Package (アンテナ・イン・パッケージ)の英略語。
- ・ スラリー : 原材料を溶媒や分散剤と混合させ、泥状にしたもの。
- ・ 焼結助剤 : 焼結時に、粒子同士を拡散・安定化させ易くし焼結温度を低下させる材料。
- ・ スロット(アレー)アンテナ : スロット共振器を放射器と(して多数個合成)するアンテナ。
- ・ CMOS、Bi-CMOS : Complimentary Metal Oxide Semiconductor、Bi-polar CMOS の略語で、低消費電力、高速の各々シリコン電界効果形トランジスター、バイポーラ複合電界効果トランジスター。低価格で PC、TV 等の家電機器に頻繁に使用される。

- ・  $Q \cdot f$  値：誘電体材料の品質係数(Q)と当該周波数(f)の積。凡そこの値が一定となる為、Q値は周波数に反比例して低下する。
- ・ TCf：誘電体材料を共振器として用いた場合の、共振周波数の単位温度に対する変化を表わす係数。
- ・ フォルステライト：組成  $Mg_2SiO_4$  ミリ波帯においても高いQ値を有し、1,500°Cで結晶化する。誘電率は7程度。
- ・ フィーダー：アンテナとRF送受信回路を繋ぐ給電線・回路。
- ・ プリクラッシュセーフティーシステム(PCS)：車載レーダは、プリクラッシュセーフティーシステム(PCS)へと発展している。高級乗用車や大型トラックへの搭載から始まり、低コスト化すれば市場が一挙に広がる趨勢にある。
- ・ ECU：自動車に搭載されるエンジン・コントロール・ユニット(Engine Control Unit)。
- ・ アンテナビームスキャン：アンテナのメインビームを、機械的又は電子的に振る(スキャン)すること。
- ・ バインダー、脱バインダー：各々、焼結時の助材、助材を焼き飛ばすこと。
- ・ チタニア：酸化チタン( $TiO_2$ )。高温で焼成することで得られる。
- ・ シートアタック：導体ペーストをグリーンシートに印刷した時、グリーンシートに含まれている有機バインダーを溶解させる作用。同時焼成後に、層剥離を起こす原因の一つ。
- ・ 焼成用セッター：焼成時に、LTCC基板等の被焼結物を置く為の治具。
- ・ デラミネーション：積層剥離(de-lamination)
- ・ マイグレーション：湿気、経時変化等により、対抗する微細電極又は導体パターン間の絶縁体(誘電体)にウィスカーが成長する現象。最悪の場合は、電極間に導通・短絡の故障を発生してしまう。
- ・ ポスト壁導波路：マイクロ波、ミリ波帯で使用される矩形導波管に於いて、電界に平行となる短辺の導体壁をLTCC基板のビアホールを用いたポストで構成した導波路又は導波管のこと。