

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「低熱膨張率・高熱伝導性基板等の研究開発」

## 研究開発成果等報告書

平成 2 2 年 3 月

委託者 中部経済産業局  
委託先 財団法人ファインセラミックスセンター

## 目次

### 第1章 研究開発の概要第

- 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 合成粉末の量産化技術の確立

- 2.1 フォルステライト原料粉体の設計
  - 2.1.1 粒子径の異なるシリカ ( $\text{SiO}_2$ ) の試験
  - 2.1.2 マグネシア ( $\text{MgO}_2$ ) の粒子径の違いによる仮焼粉の形態観察
  - 2.1.3 ルチル化率の異なるチタニア ( $\text{TiO}_2$ ) の効果
- 2.2 ウイルマイト原料粉体の設計
  - 2.2.1 ウイルマイト ( $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ ) 原料粉体の性状
  - 2.2.2 ウイルマイト材料の合成方法
  - 2.2.3 ウイルマイト材料の焼成温度依存性の評価
  - 2.2.4 チタニア添加ウイルマイト ( $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{-x wt\% TiO}_2$ ) 材料の温度係数の最適化
- 2.3 量産化試験
  - 2.3.1 合成工程
  - 2.3.2 製造工程
  - 2.3.3 チタニアの添加及び造粒
  - 2.3.4 まとめ

### 第3章 基板の量産化技術の確立

- 3.1 成形密度の均質化
  - 3.1.1 バインダ及び可塑剤
  - 3.1.2 ウイルマイトの不均質性評価
  - 3.1.3 顆粒原料評価
  - 3.1.4 成形体の不均質性評価
  - 3.1.5 焼成体の不均質性評価
- 3.2 超平滑研磨方法の開発
  - 3.2.1 ラップ盤の仕様
  - 3.2.2 研削および研磨試験結果
- 3.3 高周波・物理的特性評価
  - 3.3.1 概要
  - 3.3.2 機械的強度
  - 3.3.3 熱膨張率
  - 3.3.4 熱伝導率

3.3.5 高周波誘電特性（複素比誘電率）

第4章 回路基板の高密度実装化

4.1 基板仕様の検討

4.1.1 比誘電率と誘電正接

4.1.2 基板の厚み検討結果

4.1.3 表面条件

4.2 基板評価用回路の設計

4.3 評価用回路の試作

4.4 治工具の開発

4.5 基板と回路の評価

4.6 計画時との差異

4.7 まとめ

第5章 全体総括

引用文献

付録 A1 専門用語・略語の解説

付録 A2 第1回及び第2回研究開発委員会議事録

## 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

川下製造業者としての「自動車メーカー」では自動車の「安全性能・快適性向上」が要請されており、「車内外通信技術及び高信頼性高速データ処理技術の高度化」によりその目標を達成しようとしている。平成18年に策定された「中小企業の特定期ものづくり基盤技術の高度化に関する指針」（「高度化指針」と略す）によれば、「(三) 電子部品・デバイスの実装に係る技術（電子実装技術）は、我が国の電子機器産業の競争力と発展を支える重要な技術であると位置づけられている。我が国製造業の国際競争力の維持・強化を図るためには、「小型・高集積化」、「高機能・大容量高速情報処理化」、「安全性能・快適性の向上」、「省エネルギー・環境対策」、「小型・高機能化」、「自律型の実現」、「耐環境性対応」等が必要な機能として挙げられ、これら機能と共に低コスト化を達成することと、環境対応材料・プロセスに関する技術を達成することが重要となる。

「電子実装技術」を用いた機器モジュールを搭載する自動車メーカーにおいては、自動車の安全性能向上・快適性向上、省エネルギー・環境対策が求められており、エンジンコントロールユニット、エアバッグシステム、衝突防止レーダシステムを始めとした各種制御ユニット等の電子技術を活用して解決するよう研究開発が進められている。しかしながら、自動車に搭載する機器は、-30 以下の低温から 80 以上の高温に至る環境下での動作保証に加えて、エンジンや走行による 4G もの振動による影響も吸収しなければならず非常に厳しい環境にある。これらに加えて、搭乗者の安全性に直接関係することから、情報家電より高い信頼性が求められる。情報家電に求められている電子実装技術に加え、耐環境性、高信頼性実現のため、「安全性・快適性の向上」が要請されている。

本研究では、自動車の衝突防止及び予知を行うプリクラッシュセーフティシステム（車載用ミリ波レーダ）や高速データ処理による車内外通信を可能とするミリ波 LAN/PAN 等の高周波回路の小型化に不可欠な「超高密度実装」に適合する「低熱膨張率・高熱伝導性基板」を開発する。即ち、超高密度実装実現のためセラミック製の低熱膨張率・高熱伝導性基板の研究開発を行う。

超高密度実装用の低熱膨張率・高熱伝導性基板の量産化のために次の2つの大きな目標を掲げる。

大目標：プリクラッシュセーフティシステムに用いられる車載用レーダは、ラジエータ前等の狭い空間に設置されるので、小型化することが課題となっている。レーダの周波数を現行の 77GHz から 150GHz へ高周化することにより小型化が可能であることが原理的に分かっている。しかし、150GHz の超高周波帯では、基板の高密度実装化が必要となり発生する熱を放散させるために高熱伝導性が要求される。樹脂基板では誘電率が小さく小型化に不向きである上に、熱膨張率が大きいこと、熱伝導率が低いこと、伝播損失が大きいこと等のためレーダ特性の温度安定性とその性能が不十分となることが予想される。本研究開発では、現在使用されている樹脂基板を、更に伝播損失の小さいセラミックス基板に置き換えることによって目標を達成する。金属の薄膜電極パターンを基板上に形成する際に、基板の熱膨張率が金属と同程度であること

が望ましく、セラミックスは樹脂に比べ低熱膨張率であるため基板として好適である。特にフォスフェイト等の熱膨張率は金属のそれに近いので密着性がよく、かつ損失も小さいので高周波回路の高性能化に繋がる。

大目標：本研究開発は、3つのシーズ（特許化済み）に基づいてセラミックス製の低熱膨張率・高熱伝導性基板を作製し、その基板回路の高密度実装化技術の開発を行う。

( )低伝播損失・低誘電率の特性を有するフォスフェイト基板開発、( )温度特性ゼロの特性を有するフォスフェイト基板開発、( )温度特性ゼロ及び低伝播損失・低誘電率の特性を有するウイلمイト基板開発を目指す。

最後に、本研究開発の具体的な数値目標を掲げる。

大目標：樹脂基板を低熱膨張率・高熱伝導性セラミックス基板に置き換える。

大目標：低熱膨張率・高熱伝導性セラミックス基板の量産化を行う。

大目標では、次の表に示したように低熱膨張率・高熱伝導性に優れたセラミックスに置き換えを図る。

物理的特性値	樹脂（セラミックス配合 PTFE）基板	セラミックス（フォスフェイト/ウイلمイト）基板
熱膨張率（ppm/K）	20	10
熱伝導率（w/mk）	0.8	3.3

注)フォスフェイト： $Mg_2SiO_4$ 、ウイلمイト： $Zn_2SiO_4$

大目標では、株式会社マツケセラミックスと名古屋工業大学がこれまでに取得したシーズ（フォスフェイト材料及びウイلمイト材料等、特許化済み）を用いて、超高周波用低熱膨張率・高熱伝導性基板の量産化と事業化を図る。

2つの大目標を達成するために、以下の3つのサブテーマを実施する。

### 1．合成粉末の量産化技術の開発

初年度は、合成粉末を1ロット 10kg 単位（最終目標は、200kg/ロット）で量産化する技術を確立する。

### 2．基板の量産化技術の開発

下記仕様を満たす2インチ角、厚さ：0.254 mmの基板の量産化技術を確立する。

(1) フォスフェイト基板：生密度 2.10 g/cm<sup>3</sup> 以上、見かけ密度 3.20 g/cm<sup>3</sup> 以上、表面荒さ (Ra) 0.02 μm 以下、誘電率 12、品質係数 6 万 GHz 以上、誘電率の温度係数 ±30ppm/ の範囲で所定の値に調整可能。

(2) ウイلمイト基板：表面荒さ (Ra) 0.01 μm 以下、誘電率 9.3、品質係数 9 万 GHz 以上、誘電率の温度係数 ±30ppm/ 以下。

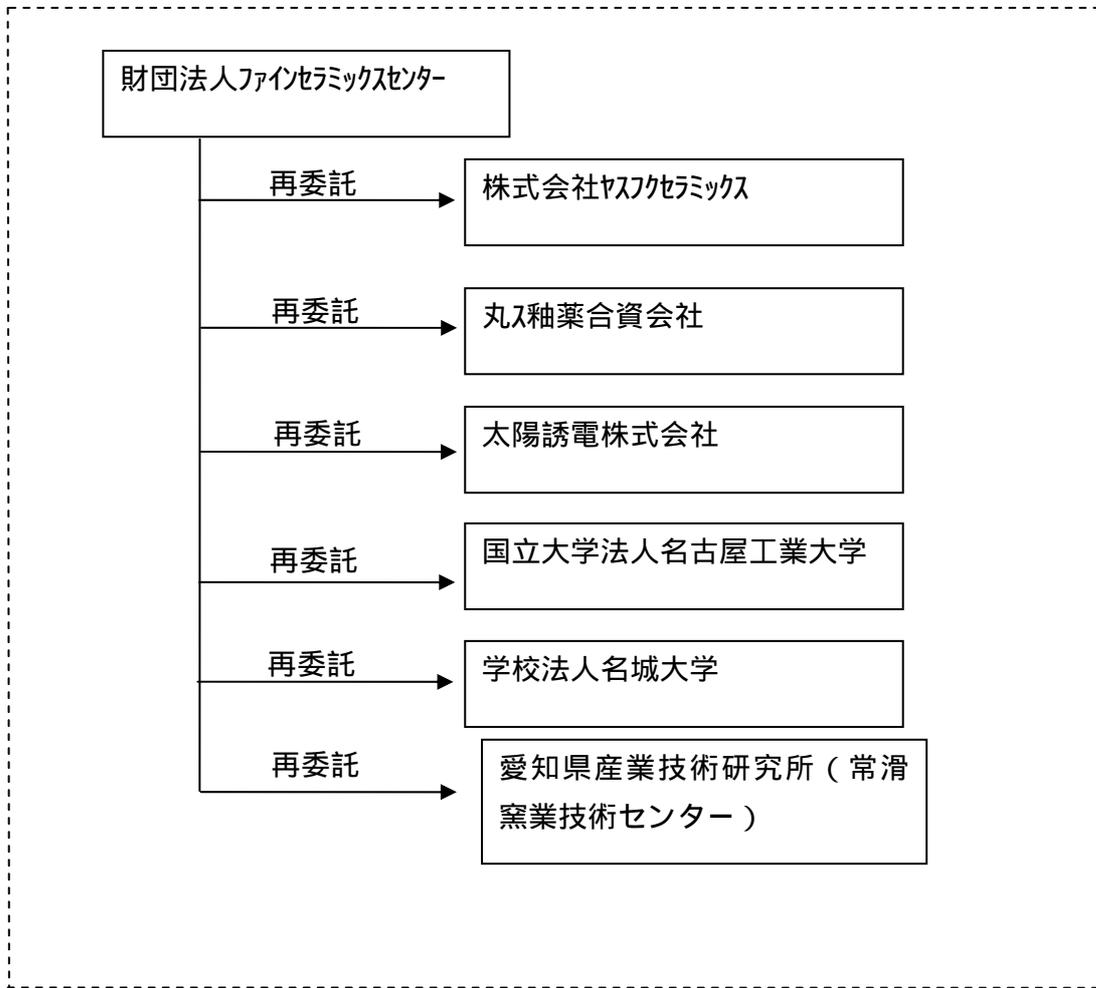
### 3．基板回路の高密度実装化

回路設計と試作により、従来の基板回路の4倍の高密度実装化を行う。

## 1.2 研究体制

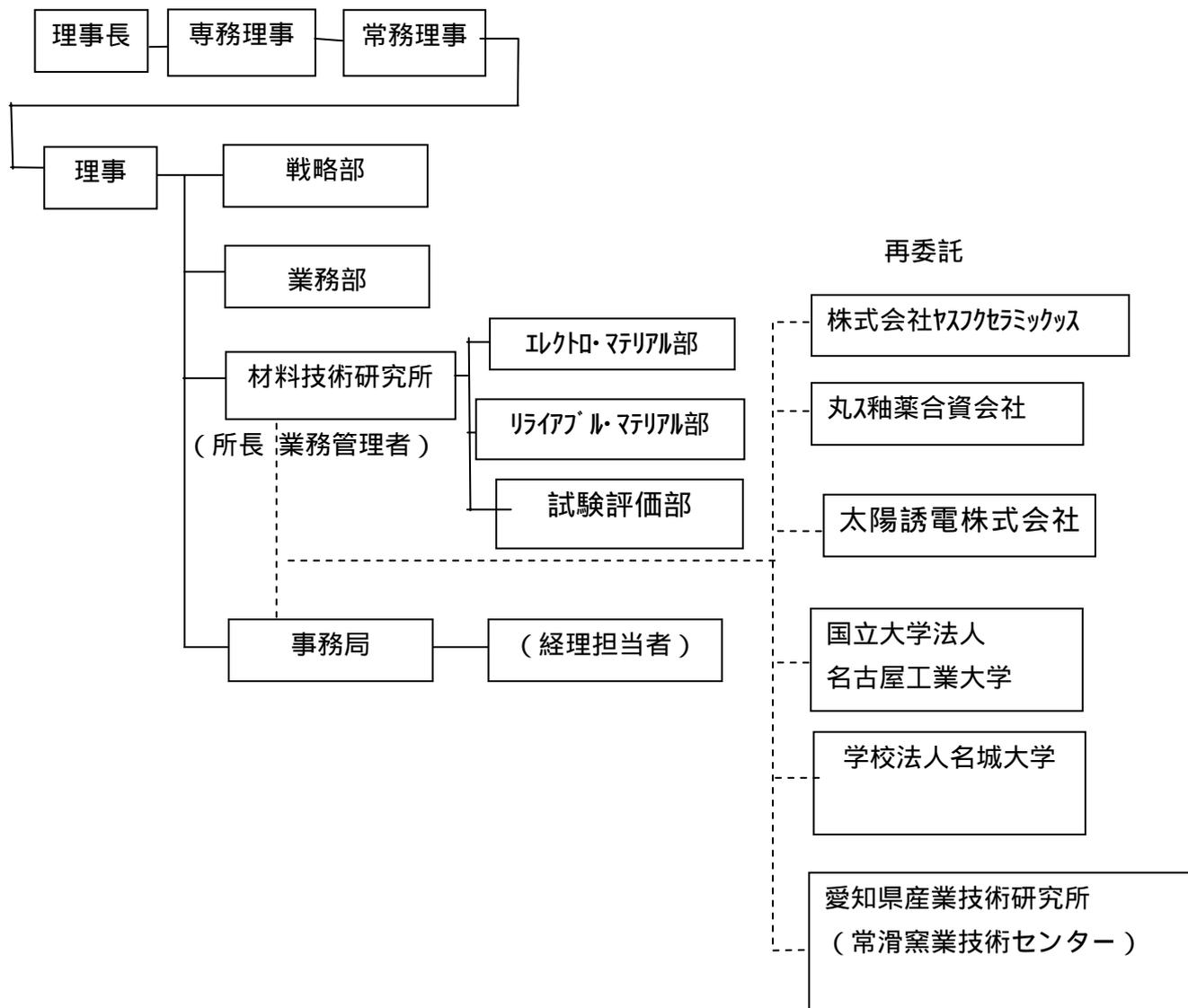
### (1) 研究組織及び管理体制

#### 1) 研究組織（全体）



総括研究代表者（P L）  
株式会社マスカセラミックス  
代表取締役 安福良豊

副総括研究代表者（S L）  
丸ノ糸薬合資会社  
無限責任社員 鈴木貞彦



2) 管理体制

事業管理者

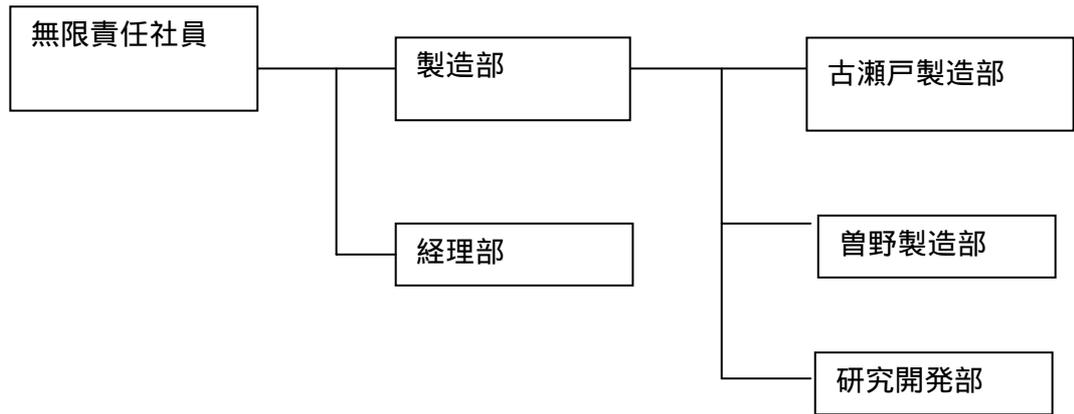
財団法人ファインセラミックスセンター

(再委託先)

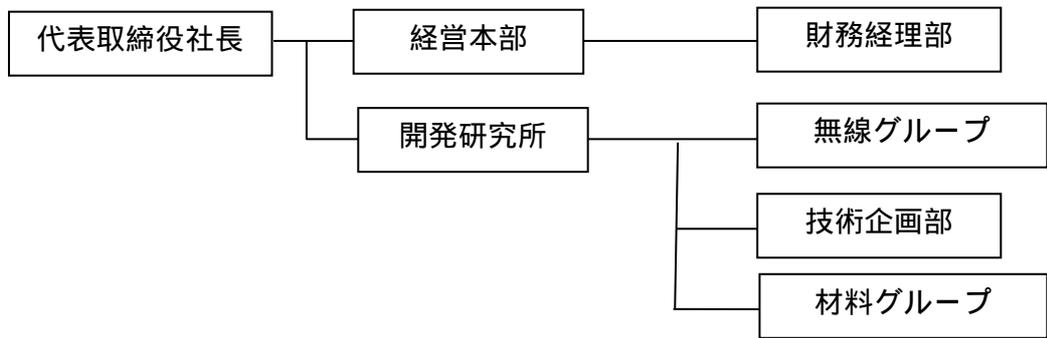
株式会社ヤスクセラミックス



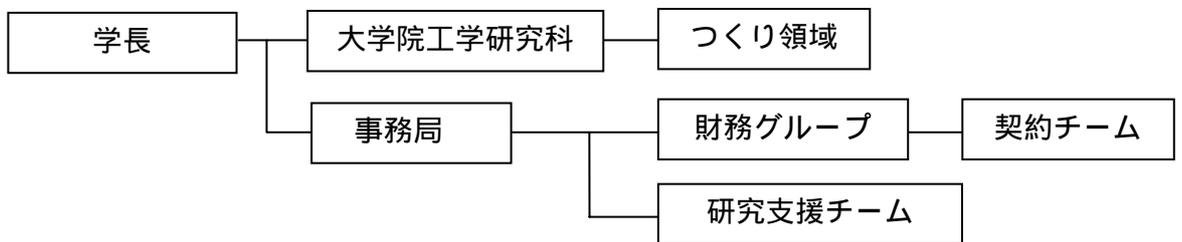
丸ス軸薬合資会社



太陽誘電株式会社

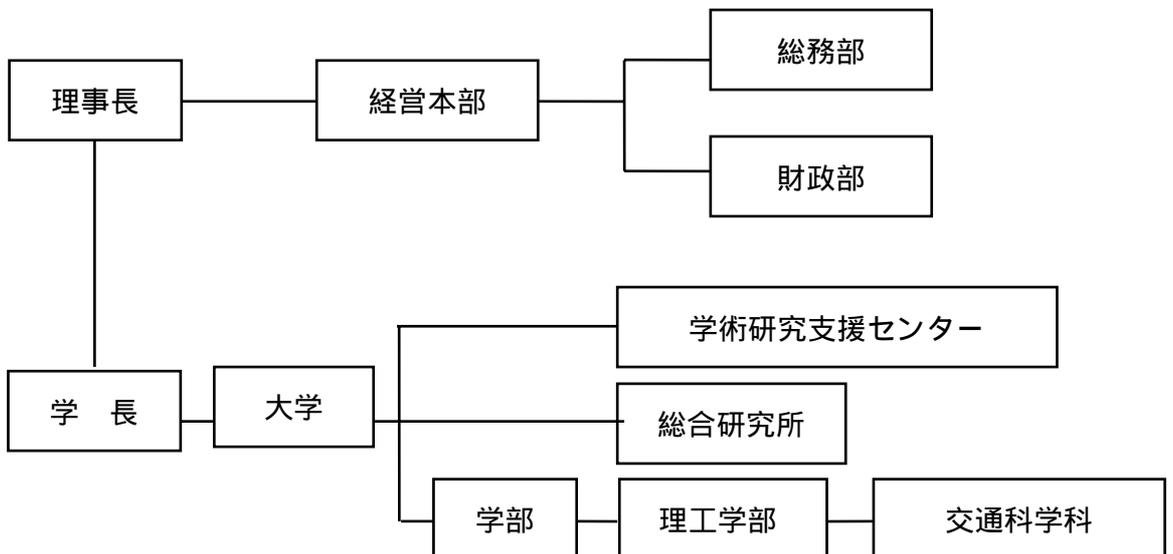


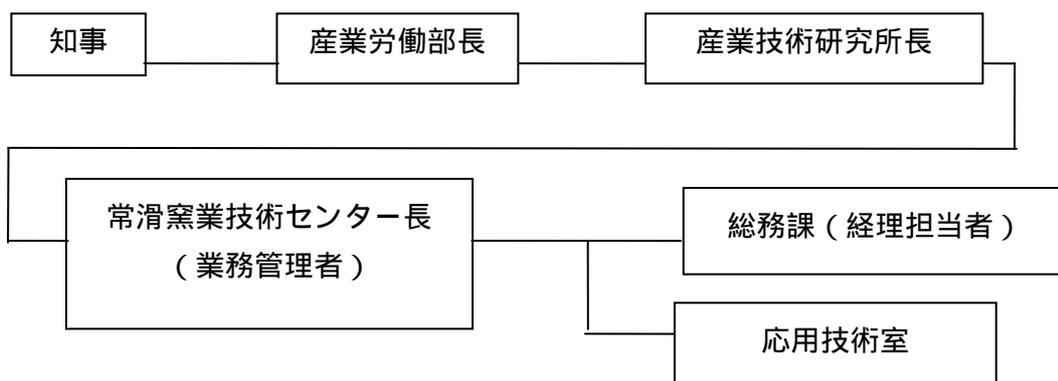
国立大学法人名古屋工業大学



学校法人名城大学

愛知県産業技術研究所（常滑窯業技術センター）





(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】 財団法人ファインセラミックスセンター

管理員

氏名	所属・役職
東田 豊	材料技術研究所エレクトロ・マテリアル部 参事

研究員

氏名	所属・役職
東田 豊	材料技術研究所エレクトロ・マテリアル部 参事
小川 光恵	材料技術研究所リライアブル・マテリアル部 副主任研究員
伊岐見 大輔	材料技術研究所試験評価部 副主任技師
川松 琢磨	材料技術研究所エレクトロ・マテリアル部

【再委託先】

研究員

株式会社ヤスクセラミックス

氏名	所属・役職
安福 良豊	代表取締役社長
安福 千博	常務取締役
大萱 建夫	技術セクション マネージャー
半田 隆直	品質保証セクション マネージャー
近藤 忠	成形セクション

丸ノ穂薬合資会社

氏名	所属・役職
鈴木 貞彦	無限責任社員
山内 登	製造部長
高橋 武	主任補佐
熊澤 利泰	主任
永井 美紀也	主任

太陽誘電株式会社

氏名	所属・役職
茶園 広一	開発研究所 所長，執行役員
太田 謙一	開発研究所 技術企画部 課長
島方 幸広	開発研究所 無線グループ 課長
中澤 博和	開発研究所 無線グループ 課員

国立大学法人名古屋工業大学

氏名	所属・役職
安達 信泰	つくり領域 物質工学科 准教授
藤 正督	ながれ領域 物質工学科 教授
籠宮 功	しくみ領域 物質工学科 助教
大里 齊	ながれ領域 プロジェクト教授
角岡 勉	ながれ領域 プロジェクト教授
安藤 汀	ながれ領域 プロジェクト教授
鈴木 章平	ながれ領域 プロジェクト教授

学校法人名城大学

氏名	所属・役職
小川 宏隆	理工学部交通科学科 教授
菅 章紀	理工学部交通科学科 准教授

愛知県産業技術研究所（常滑窯業技術センター）

氏名	所属・役職
光松正人	応用技術室主任研究員

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人ファインセラミックセンター

(経理担当者) 事務局係長 松田 典子

(業務管理者) 材料技術研究所長 種村 栄

(再委託先)

株式会社ヤスクセラミクス

(経理担当者) 経理担当 松田 いよの

(業務管理者) 常務取締役 安福 千博

丸入釉薬合資会社

(経理担当者) 経理部主任 鈴木 昌子

(業務管理者) 無限責任社員 鈴木 貞彦

太陽誘電株式会社

(経理担当者) 財務経理部 課長 志村 孝明

(業務管理者) 開発研究所長 茶園 広一

国立大学法人 名古屋工業大学

(経理担当者) 財務グループ契約チーム チームリーダー 武川謙一

(業務管理者) 大学院工学研究科 つくり領域 准教授 安達 信泰

学校法人 名城大学

(経理担当者) 学術研究支援センター 主査 古幡 昭英

(業務管理者) 理工学部長 安藤 義則

愛知県産業技術研究所(常滑窯業技術センター)

(経理担当者) 常滑窯業技術センター総務課長 三輪通夫

(業務管理者) 常滑窯業技術センター長 星幸二

(4) その他

なし

### 1.3 研究開発委員会の活動

本事業を適正かつ円滑に実施するため、開発しようとしているセラミック基板のユーザーである自動車メーカー、当該分野の専門家、及び研究開発分担者から構成される研究開発委員会を組織し、研究開発の進め方・方針等を決定した。

#### 1.3.1 委員構成

#### 1.3.2 委員会の目的

研究開発を適正かつ円滑に推進するとともに、当該分野の専門家(アドバイザー)から指導、協力を受ける。

#### 1.3.3 活動概要

## 第1回委員会

日時 2009年11月16日(月) 13時30分 - 16時30分

場所 財団法人ファインセラミックスセンター 2階 技術相談室

### 議事内容

- ・委員長挨拶
- ・出席者紹介
- ・委託業務実施計画説明
  - 1) 総括研究代表者
  - 2) 管理事業者
  - 3) 各研究分担者
- ・全体討論及び今後の予定

## 第2回委員会

日時 2010年2月19日(金) 14時00分 - 17時45分

場所 名古屋工業大学22号館2階 プレゼンテーションルーム

### 議事内容

- ・挨拶(中部経済産業局 製造産業課 課長 岡本正弘(代理/課長補佐 長谷川貴弘))
- ・委員長挨拶
- ・第1回議事録確認
- ・プロジェクト成果概要の説明(総括研究代表者)
- ・分担研究の進捗状況(各研究実施者)
- ・全体討議

なお第1回及び第2回研究開発委員会の議事内容の詳細は付録A1に記載した。

## 1.4 成果概要

川下製造業者としての「自動車メーカー」では自動車の「安全性能・快適性向上」が常に要請され、「車内外通信技術及び高信頼性高速データ処理技術の高度化」がその主要な役割を担うものと期待されている。我が国が策定した「高度化指針」によれば、「(三)電子部品・デバイスの実装に係る技術(電子実装技術)は、我が国の電子機器産業の競争力と発展を支える重要な技術であると位置づけられている。

本研究開発(2009年度補正予算事業)では、現在使用されている樹脂基板を、低熱膨張率、高熱伝導性、かつ低損失のセラミックス基板に置き換えることによって、現在の電子実装技術において更に高密度実装化(高度化)し、この基板を高周波回路用基板としてミリ波レーダやミリ波無線 LAN/PAN 等に搭載し、車内外通信技術に使用される通信機器等に組み込むことを目標として実施した。実施計画の当初の目標値の達成状況は下表の通りである。

目標値の細目	結果	備考
大項目		
・熱膨張率が樹脂基板より小さい		
・熱伝導率が樹脂基板より大きい		1桁以上高い
大目標		
合成粉末の量産化技術(1ロット10kg単位)		次年度の目標は200kg/ロット
基板(2インチ角)の量産化技術の開発		
-1 フォルステライト基板		
・ 生密度2.10g/cm <sup>3</sup> 以上、見かけ密度3.20g/cm <sup>3</sup> 以上		見かけ密度は3.2以上である
・ 表面粗さ Ra0.02 μm以下		Raだけでは鏡面出ない場合がある
・ 比誘電率:12程度		
・ 品質係数(Q・f値):60,000以上		
・ 比誘電率の温度係数:±30ppm/K以下		
-2 ウイルマイト基板		
・ 表面粗さ Ra0.01 μm以下		Raだけでは鏡面出ない場合がある
・ 比誘電率:9.3程度		
・ 品質係数(Q・f値):60,000以上:±30ppm/K以下		
・ 比誘電率の温度係数:±30ppm/K以下		
基板回路の高密度実装化		

次に、各章毎に得られた結果を以下に記す。

## 研究成果

### 第2章

- ・ シリカ（球状、非晶質）、マグネシア（0.05 μm）、チタニア（ルチル化率 40wt%、アナターゼ 60%）を用いて、量産用フォルステライト原料粉末の合成・設計を行った。
- ・ 高密度基板を作製するには、粒子径の小さい MgO 原料粉末（0.05 μm）の使用が有効である。
- ・ アナターゼ相が多く、ルチル相化率の低い原料の方が反応性が高く 1200 以下の低温での焼成に向いている。
- ・ チタニア添加ウイルマイト（Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>-x wt% TiO<sub>2</sub>）において、x = 9 の組成の試料を大気中 1250、2 時間の焼成することにより比誘電率の温度係数 TC がゼロの基板が得られる。
- ・ 不純物の混入を避けるための製造技術が確立され、量産化試験により良質な造粒粉が得られた。
- ・ 専用機器や隔離設備を使用せず、一般的な調合工程に則り量産化試験を実施した。以上の条件差を踏まえた上で、不純物によるコンタミネーションの防止、脱水条件、焼成条件の最適化に成功した。

### 第3章

- ・ HQF 材料及び HQW 材料の成形体の評価を行ったところ、実体顕微鏡および電子顕微鏡による観察では、ラミネーション及び貫入等の成形欠陥がないことが確認された。ウイルマイト原料粉末の性状及びプレス成形特性は特に良好であり改良の余地はない。
- ・ チタン添加 HQF 材料及び HQW 材料の焼成体の焼成品密度は、それぞれ、3.2 g/cm<sup>3</sup> 及び 4.1g/cm<sup>3</sup> 以上となり目標値が達成できた。
- ・ 基板焼成用電気炉において焼成治具等を考慮し、5 段積み焼成を行ったが、温度差を 10 程度に炉内温度の均一化を図ることが出来た。

- ・研磨材 G C # 3 0 0 0 では、加工レートが約 2  $\mu\text{m}/\text{min}$  程度であるため、0.45mm 削るのに 4 時間弱かかった。加工時間短縮のため研磨材、加工代、荷重、表面粗さ等の条件を見直し、量産対応可能な加工条件を検討する必要がある。
- ・試作されたフォルステライト基板及びウイلمイト基板の機械的強度、熱膨張率、熱伝導率、及び高周波誘電特性等の測定評価を行ない、樹脂基板（例えば ARLON 製セラミックス配合 PTFE (AD1000)）との比較したところ、開発したセラミックス基板は樹脂基板より熱膨張率が低く、熱伝導率が高いことが判明し、実施計画の大目標 が達成された。
- ・高周波誘電特性においてはセラミックス基板は樹脂基板よりも損失が一桁小さく、ゼロ温度特性であるなど圧倒的に優れることが分かった。

#### 第 4 章

低熱膨張率・高熱伝導性等の特徴をもつ基板をミリ波で実用化・事業化を目指した際に、ユーザの立場として基板回路の高密度実装化に必要な条件を検証した。

- ・今回の検討範囲では本基板はミリ波の回路を実現する上で十分な特性が期待でき、実用に近づかせるために結果に基づく要求仕様を提示した。
- ・低熱膨張率・高熱伝導性等の特徴をもつ基板の実用化・事業化を目指し、基板回路の高密度実装化技術を開発した。

#### 1.5 当該研究開発の連絡窓口

所属：材料技術研究所 エレクトロ・マテリアル部

氏名 東田 豊

電話 052-871-3500

FAX 0 5 2 - 8 7 1 - 3 5 9 9

E-mail higashida@jfcc.or.jp

## 第2章 合成粉末の量産化技術の確立

### 2.1.1 フォルステライト原料粉体の設計

フォルステライトの合成反応はシリカ粒子内へのマグネシアの拡散によって進行すること、したがって合成されたフォルステライトの粒子径の分布は元のシリカの粒子径分布が反映されたものになることは、これまでの研究成果から明らかにされている。<sup>[1]</sup>したがって、粒子径の小さいシリカを用いるほど粒子径の小さいフォルステライト粒子が合成され、焼結性の向上が期待される。そこで、平均粒子径の異なる3種類のシリカを用いてフォルステライトを合成し、その焼成温度と嵩密度との関係を調べた。

図 2.1-1 に3種類のシリカ原料粉体の SEM 写真、図 2.1-2 にその粒径分布、図 2.1-3 にシリカ原料の異なる合成フォルステライトの焼成温度と嵩密度の関係を示した。シリカ A は、 $0.1\sim 1\mu\text{m}$  の分布を持ち最も粒径が揃っている。シリカ B は、高純度(99.8%)珪石を粉砕した細粉で  $0.04\sim 1.5\mu\text{m}$  の粒径分布をもつ、3種の中では分布が広く、小さい粒径をもつ粉体を含んでいる。シリカ C は、球状溶融シリカで粒径分布は  $0.05\sim 1.1\mu\text{m}$  と中庸である。マグネシア原料粉は、粒径  $0.05\mu\text{m}$  の最も細かい比表面積の大きい高純度品を用いた。チタニア原料は、ルチル化率 40% (アナターゼ 60%) を用い、添加量は 15wt% で合成した。

この原料を用いてチタニア添加フォルステライトを合成した。フォルステライト粉は、これまでの合成条件: 1175 24h で合成し、チタニアを 15wt% 添加して、焼成温度を変えて合成した。その結果得られた嵩比重を図 2.1-3 に示した。その結果、シリカ C を用いた合成物は、1140 の温度でもシリカ A と B に比べて、嵩比重が  $3.2\text{g}/\text{cm}^3$  と良い結果を得た。1170 では、いずれのシリカ原料を用いた合成物も  $3.18\text{g}/\text{cm}^3$  以上で良い結果を得たが、シリカ C は  $3.27\text{g}/\text{cm}^3$  の最高の結果を得た。シリカ B は、シリカ A に比べて平均粒子径は大きい、 $0.1\mu\text{m}$  以下の粒子を含んでいるため、含まないシリカ A より高い嵩密度をもたらしたと考えられる。

量産用フォルステライト原料粉体は、以上の結果に基づき、シリカ C (球状、非晶質)、マグネシア ( $0.05\mu\text{m}$ )、チタニア (ルチル化率 40wt%、アナターゼ 60%) のものを用いて設計し、丸ス釉薬 (資) で原料粉の製造に回した。

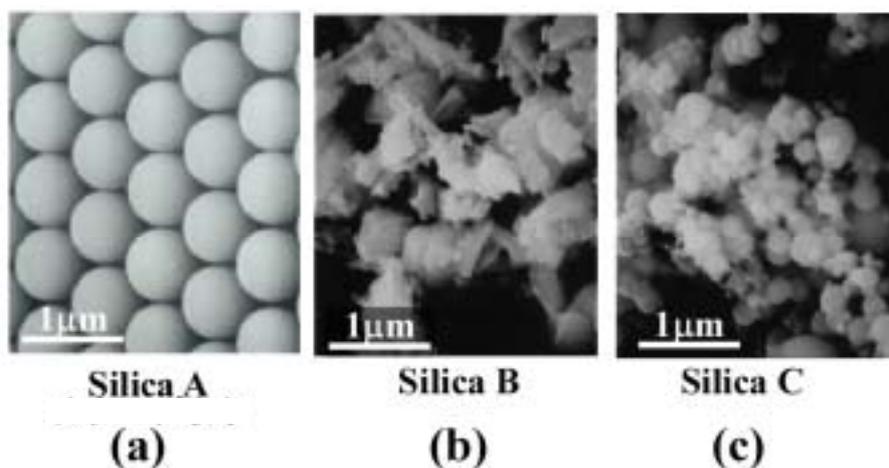
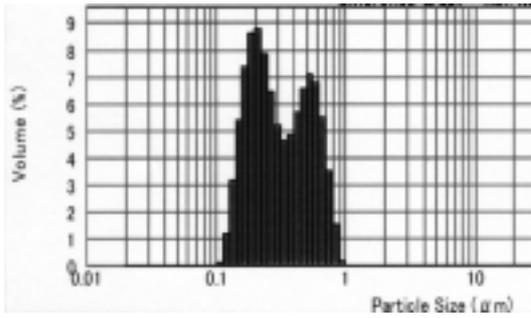
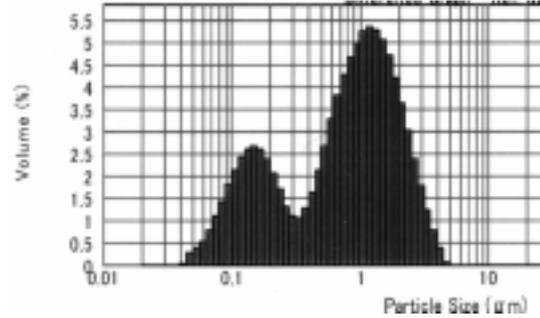


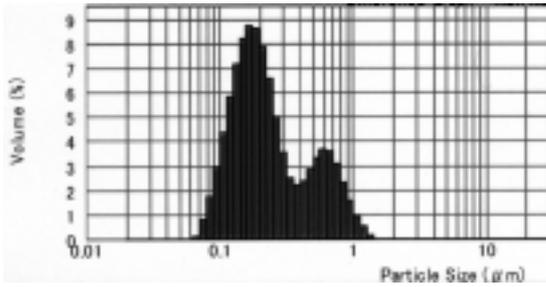
図 2.2-1 シリカ原料粉体の SEM 写真



Silica: A



Silica B



Silica C

図 2.1-2 シリカの粒子径分布

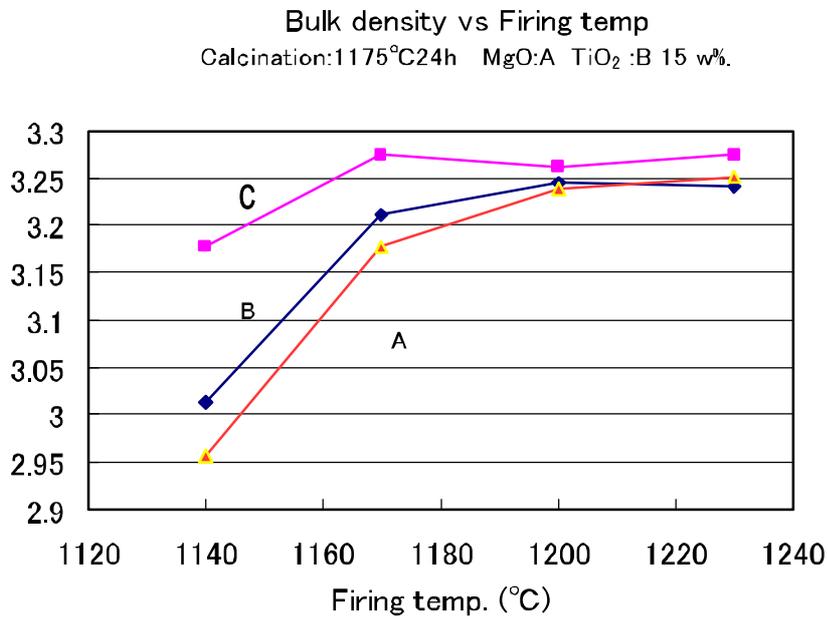


図 2.1-3 粒子径の異なるシリカを用いた場合の嵩密度の焼成温度変化

### 2.1.2 マグネシア(MgO)粒子径の違いによる仮焼粉の形態観察

図 2.1-4(a)に生原料の球状シリカの SEM 写真を示した。従来の細かい MgO (0.05 μm) を用いたカ焼粉 (b) は、シリカの形体がよく保存されたカ焼粉が得られた。粗い MgO (0.1 μm) を用

いた力焼粉 (c) は、あまり原料シリカの形体が反映されていない。球状のものとそうでないものが混在していた。MgO 粒子が粗いために MgO 粒子の近傍の粒子は、Mg の濃度が高いために反応が進んで変形し、そうでないところは反応が進まず、原料粒径を保っているものと考えられる。図 2.1-5 に力焼粉 (1175 °C、24h) の XRPD 図形を示した。原料粉体のマグネシアが、24h の長時間の力焼にもかかわらず、残留していた。マグネシアの原料粉体の粒径が大きいためにマグネシア過多の領域ではマグネシアが残留したものと考えられる。以上より、高密度グリーン基板作製技術には、細かい MgO 原料が効果的である結論を得た。

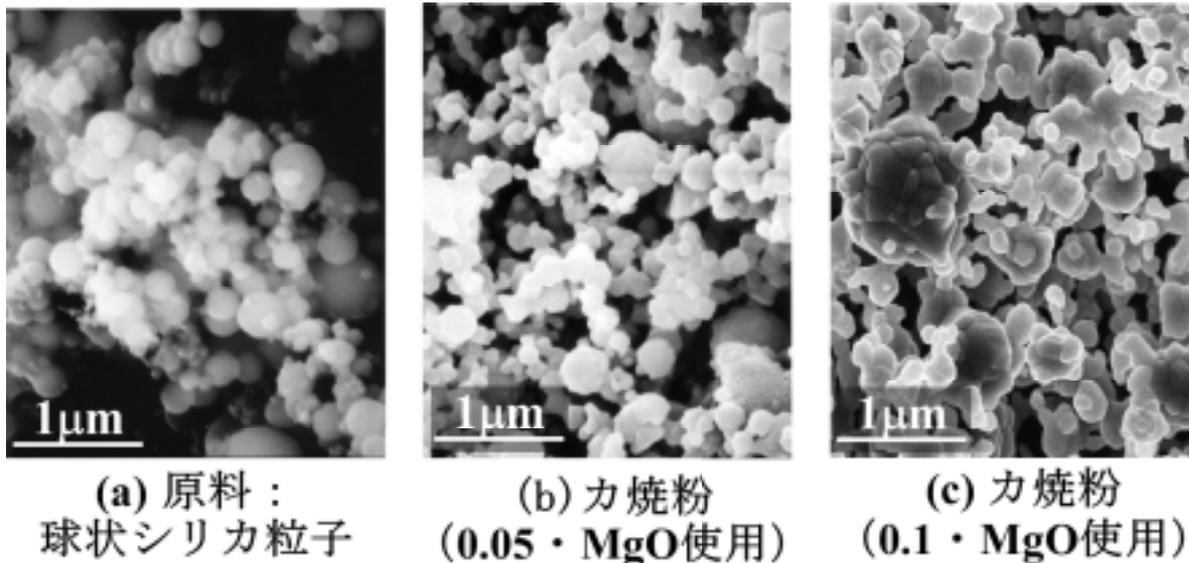


図 2.1-4 球状シリカと、異なる粒径のマグネシアを用いて合成したフォルステライト粒子の SEM 像

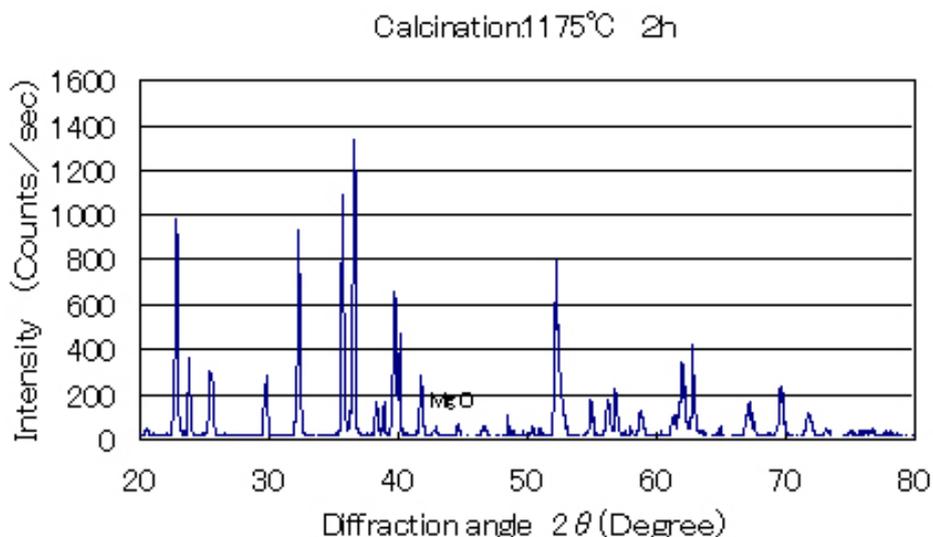


図 2.1-5 粒径の粗い MgO (0.1 μm) を用いた仮焼条件の異なる粉末試料の XRPD 図

### 2.1.3 ルチル化率の異なるチタニア (TiO<sub>2</sub>) の効果

チタニア原料として、ルチル化率：40%、アナターゼ：60%の材料について試験を行った。

図 2.1-6 にルチル化率の異なるチタニアを用いて合成したフォルステライトの焼成温度と嵩比重を示した。1157 での合成では、ルチル化率が 40%と低いものを用いた方が嵩みつどは高く、良く焼けている。1187 では、焼け具合はどちらもほぼ同じであった。焼成温度が高いので、どちらも同じになったと考えられる。ルチル化率の低い、アナターゼの多い原料の方が低い温度で反応性が高い結果が得られた。1200 以下の焼成にはアナターゼの多い原料は効果的である。

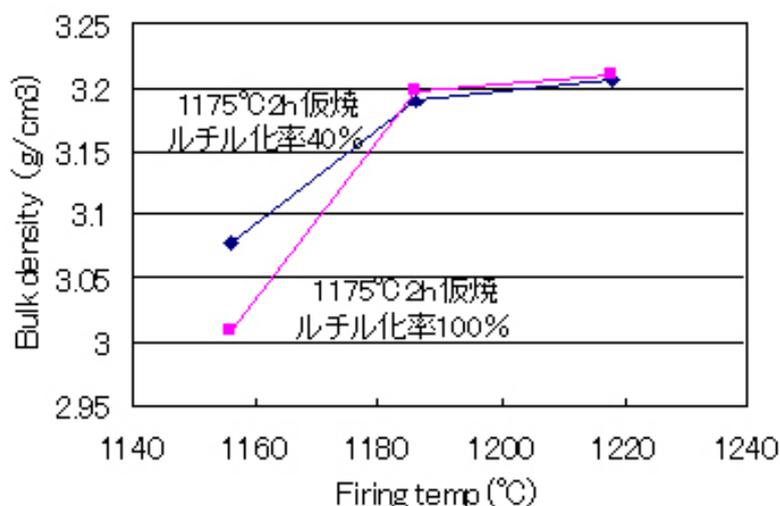


図 2.1-6 ルチル化率の違うチタニア原料を用いて合成したルチル添加フォルステライトの嵩密度

## 2.2 ウイルマイト原料粉体の設計

### 2.2.1 ウイルマイト ( $Zn_2SiO_4$ ) 原料粉体の性状

ウイルマイト原料として球状溶融シリカ (純度 99.99%)、試薬酸化亜鉛 (亜鉛華、純度 99.5%) の材料を用いて試験した。

仮焼粉の合成：ウイルマイト純組成に上記原料を用いて秤量し、湿式ボールミル混合し、風乾した。風乾した試料を 1100 、2時間カンタルスーパー炉で仮焼した。図 2.1-7 にカ焼物の表面 SEM 写真を示した。一部球状の粒子が観察されるが、量は多くない。イレギュラーな形態のものが多く観察され、六角板状に近い形態のものが散見される。図 2.1-8 に XRPD 図形を示した。ウイルマイトと亜鉛華より成る。亜鉛華の粒が大きいので、 $ZnO$  の原料粉が残ったものや、気相成長で粒成長したものが観察された。亜鉛華の原料は、工業用のものが無く試薬を使った。また、結晶粒の細かいものが得られないのも問題であった。

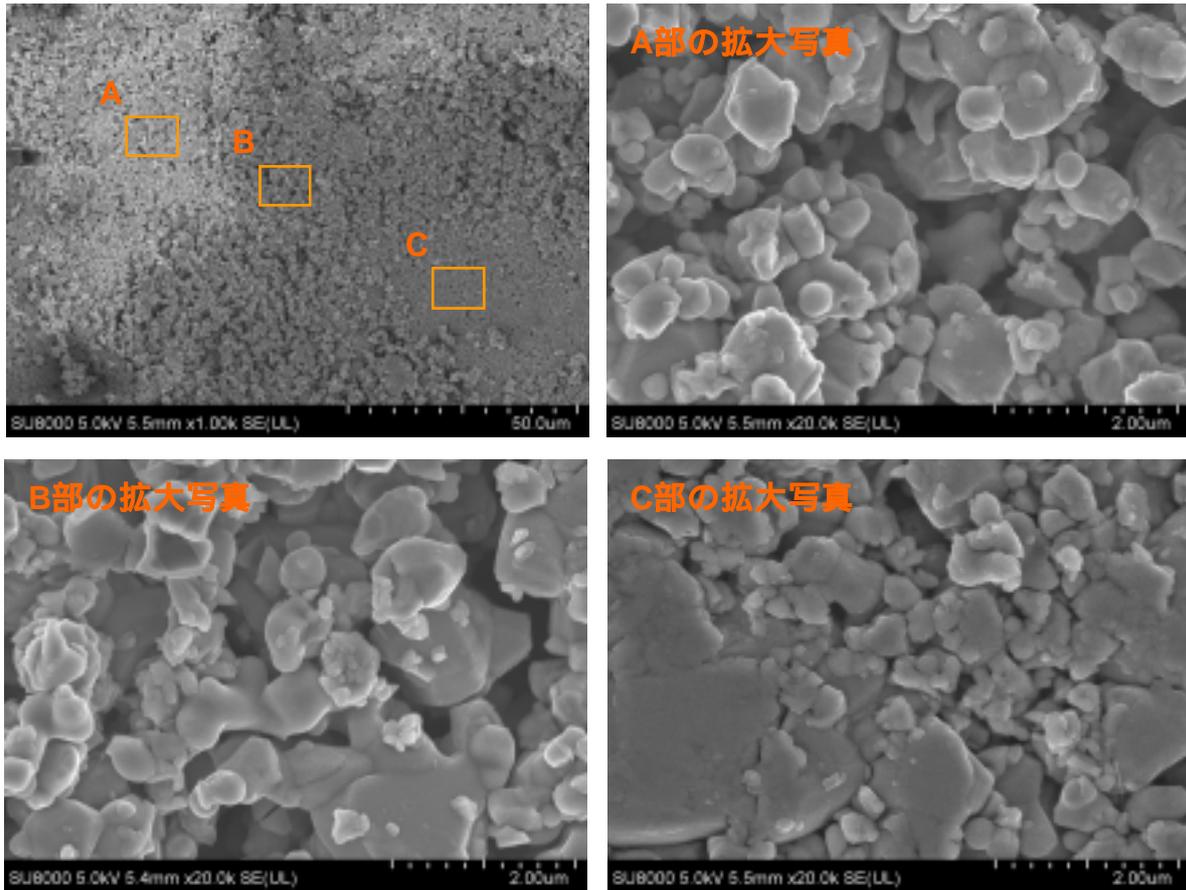


図 2.1-7 カ焼粉の SEM 写真 . 球状のシリカと六角板状の亜鉛華より成る

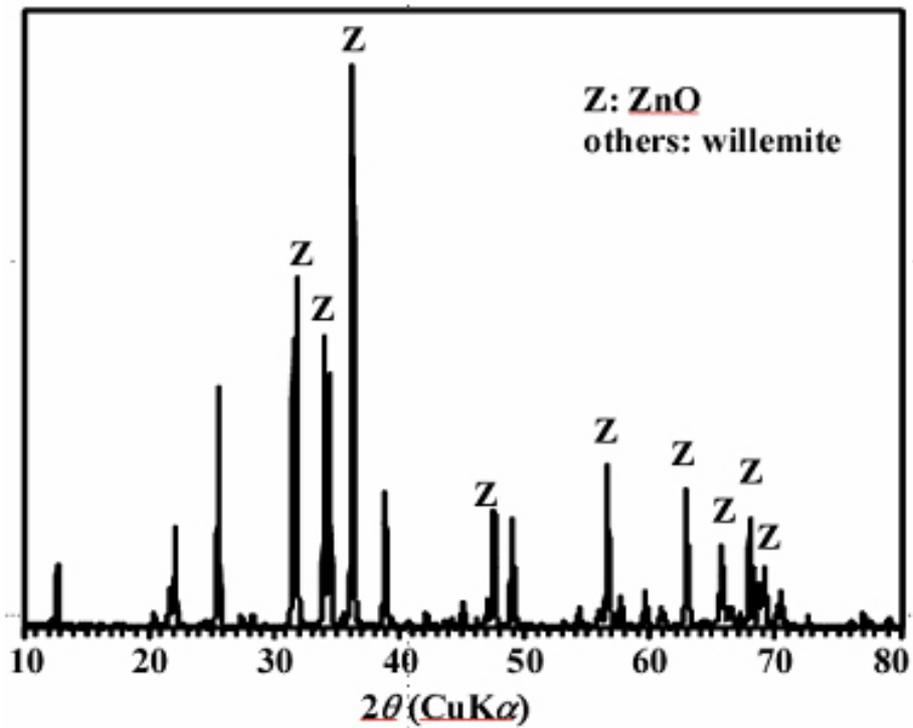


図 2.1-8 ウィルマイトカ焼粉の粉末 X 線回折

SiO<sub>2</sub>-ZnO 二成分系状態図 (図 2.1-9) の SiO<sub>2</sub> リッチ側に共融温度 1432 が存在する。ウイلمイト焼成時にこの温度近傍で焼成すると液相を生じ、マイクロ波誘電特性を悪くする可能性がある。フォルステライトの生成反応に於いても同様な共融温度が存在し、仮焼条件が不十分で MgO を固溶した SiO<sub>2</sub> が存在する場合は液相を生じ、特性の劣化に繋がった。この点も考慮して反応過程を明らかにし、原料設計に生かすことが必要である。

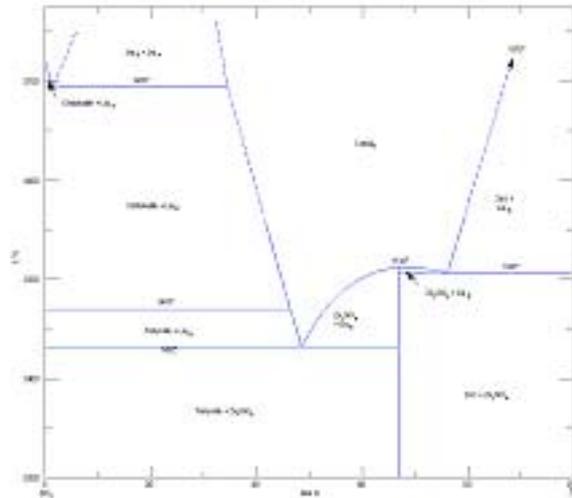


図 2.1-9 SiO<sub>2</sub>-ZnO 二成分系状態図

## 2.2.2 ウイلمイト材料の合成方法

ウイلمイト材料は図 2.2-1 に示すフローチャートに基づき合成した。出発原料として ZnO (純度 99.9%) および SiO<sub>2</sub>(純度 99.9%)を用い、化学量論組成に基づき調合し、ジルコニアボールを媒体としたボールミルにて 24 時間混合した。混合後の粉末を乾燥し、大気中にて 1100 °C、2 時間仮焼成した。仮焼成後の粉末を粉砕し、チタニアを 0~20wt%添加し、再度ボールミルにて 24 時間混合した。得られた粉末に対し、5.0wt%の PVA を添加し、造粒を行い、98MPa の一軸加圧にてプレス成形を行い、12mm×7mm のペレットを作成した。チタニアを添加したウイلمイト材料では、1210~1280 °C で 2 時間大気中にて本焼成を行い、測定に適した所定のサイズに加工し、その試料表面を鏡面研磨した。比誘電率および品質係数の評価には既存のネットワークアナライザー(Agilent 8720E)を用い、Hakki and Coleman 法により評価し、共振周波数の温度係数は、20 °C および 80 °C における共振周波数より求めた。また、誘電率の温度係数は、既存の LCR メータ(Agilent 4284A)を用い、1MHz での 20 °C および 80 °C におけるキャパシタンスから誘電率を求め、それぞれの値を用いて算出した。相の同定および微構造観察には、それぞれ既存の粉末 X 線回折装置(XRPD, Rigaku, RINT2000)および電界放射型走査電子顕微鏡(FE-SEM, JEOL, JSM6330-F)を用いた。

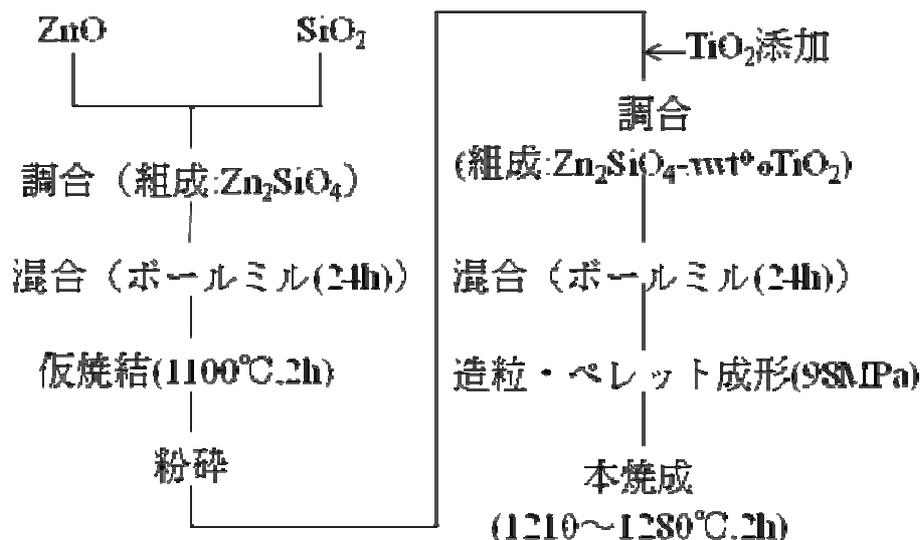


図 2.2-1 チタニアを添加したウilmait材料の合成フローチャート

### 2.2.3 ウilmait材料の焼成温度依存性評価

チタニア添加によるウilmait材料の温度係数のゼロ化に向け、ウilmait材料単体における焼成温度の変化によるマイクロ波誘電特性、微構造および見かけの密度を評価した。粉末 X 線回折 (XRPD) より、本試験で得られたウilmaitは図 2.2-2 より明らかなように、全ての焼成温度において単相であり、第 2 相の生成は認められなかった。さらに、図 2.2-3 および相対密度の変化から明らかなように、1320 以上の焼成温度においてウilmaitの焼結が可能であることが明らかとなった。また、ウilmait単体でのマイクロ波誘電特性は、表 2.2-1 に示すように比誘電率(  $\epsilon_r$ )は 6.3~6.7 であり、 $Q \cdot f$  値は焼成温度に依存し、160,500~212,000GHz に及んでいる。しかしながら、共振周波数の温度係数(  $\alpha_f$ )は-61ppm/°C 程度であり、LCR メータを用い、1MHz におけるキャパシタンスより求めた誘電率の温度係数(  $\alpha_{\epsilon_r}$ )は、105.2ppm/°C を示し、プラス側に大きな値を示している。このため、チタニアの添加の最適化による誘電率の温度係数のゼロ化の検討を行った。

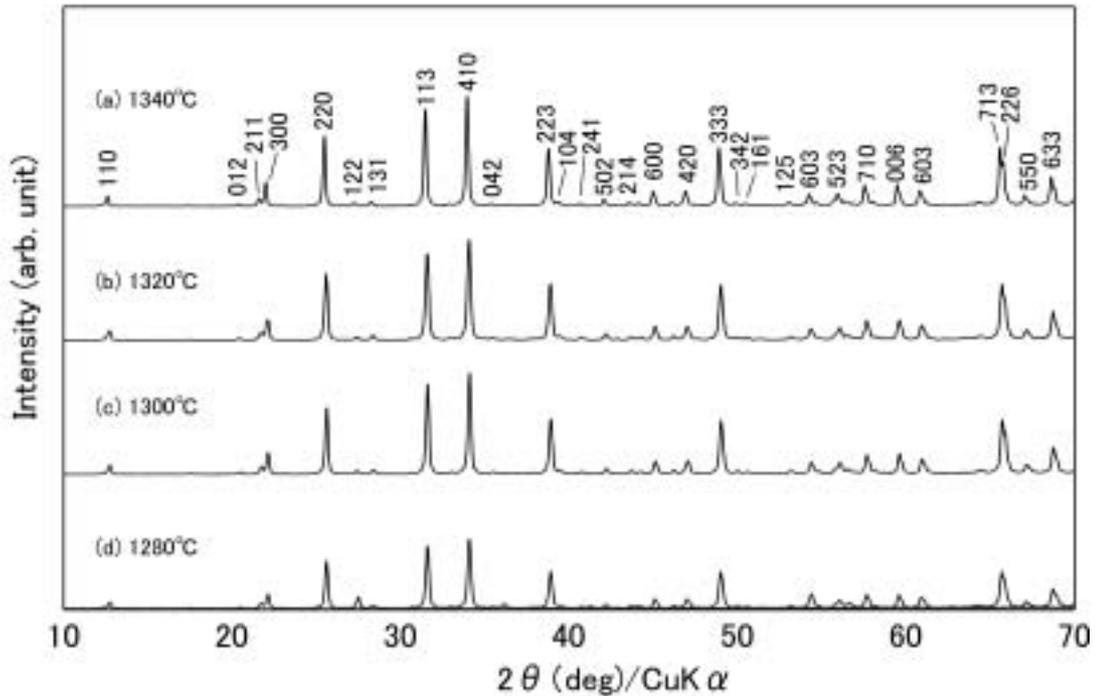


図 2.2-1 ウイルマイトの焼成温度毎の XRPD パターン

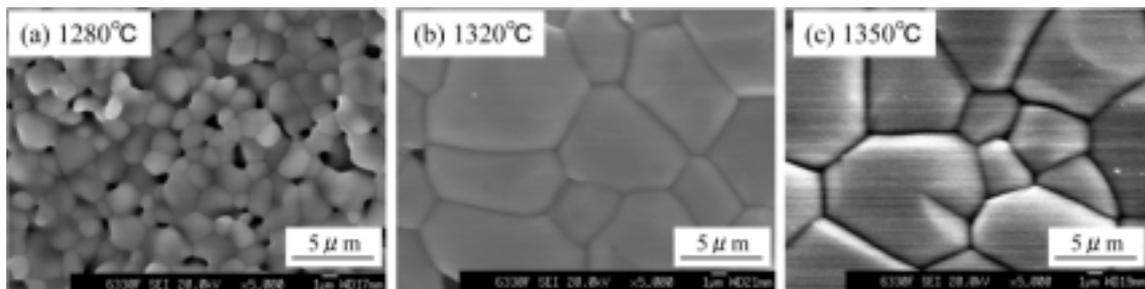


図 2.2-3 ウイルマイトの表面 FE-SEM 写真

表 2.2-1 ウイルマイトのマイクロ波誘電特性および相対密度

Ts( )	Time(h)	r	$Q \cdot f$ (GHz)	$\mu$ (ppm/ )	$D_r$ (%)
1280	2	6.3	160521	-61.5	92.1
1300	2	6.3	182110	-61.5	94.3
1320	2	6.4	205432	-61.4	98.5
1340	2	6.4	212357	-61.3	98.6

#### 2.2.4 チタニア添加ウイルマイト( $Zn_2SiO_4-x$ wt% $TiO_2$ ) 材料の温度係数の最適化

本試験では、ウイルマイトに対して  $x=0 \sim 20$ wt% のチタニアを添加し、 $Zn_2SiO_4-x$ wt% $TiO_2$  の組成からなる材料を図 2.2-1 のプロセスに基づき合成し、評価を行った。以下に得られた結果を示す。一例として、 $x=11$  の組成において 1210~1280 で焼成した  $Zn_2SiO_4-x$ wt% $TiO_2$  の XRPD パターンを図 2.2-4 に示す。図から明らかなように XRPD からは、ウイルマイト( $Zn_2SiO_4$ )およびルチル( $TiO_2$ )の存在が認められ、これらの化合物の反応による第 2 相の生成は認められなかった。このため、このことより、ウイルマイトとルチルとの反応性は低く、チタニアの添加量  $x$  を調整す

ることにより誘電率の温度係数をゼロに調整することが可能であることが示唆される。また、 $x=11$  における  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4-x\text{wt}\%\text{TiO}_2$  の見かけの密度は、図 2.2-5 に示すように焼成温度の上昇に伴い向上し、1250 以上の焼成温度では、ほぼ一定の値を示した。このことより、チタニアの添加によりウイلمットの焼結温度を低温化することができ、1250 近傍での焼成が最適であることが明らかとなった。

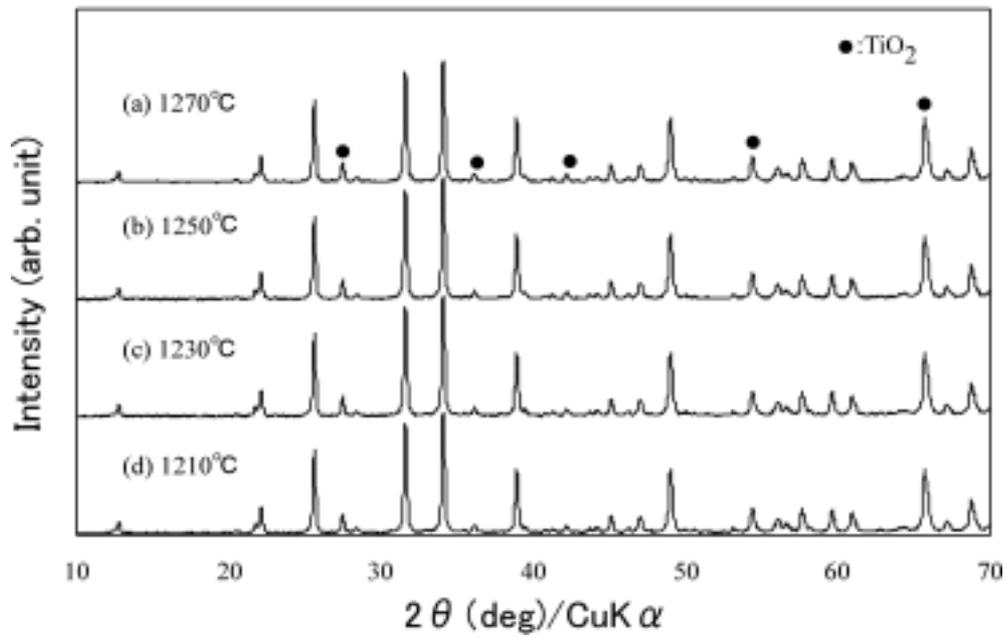


図 2.2-4  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4-x\text{wt}\%\text{TiO}_2$  ( $x=11$ ) の XRPD パターン

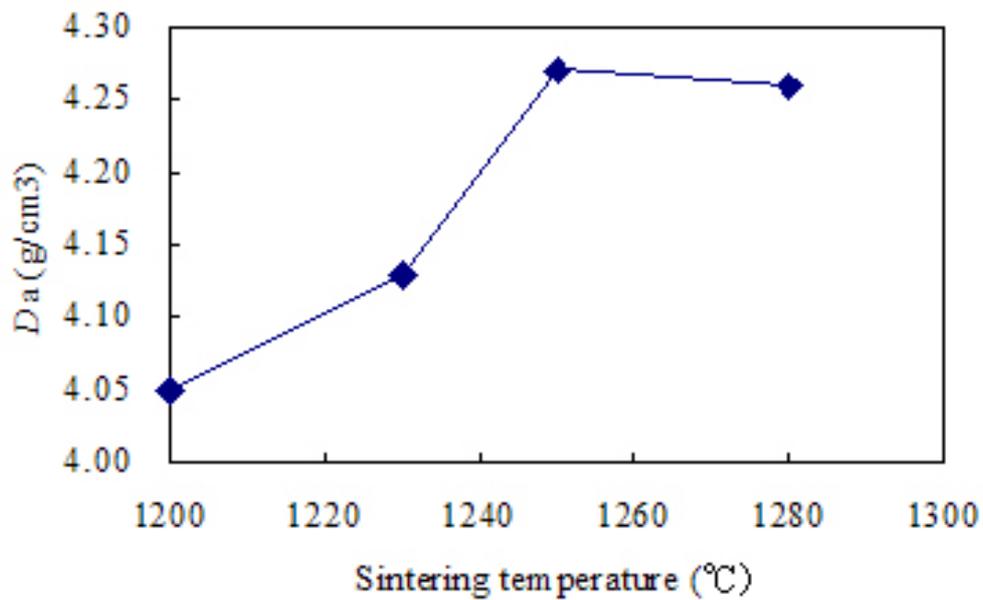


図 2.2-5  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4-x\text{wt}\%\text{TiO}_2$  ( $x=11$ ) の見かけの密度の焼成温度依存性

次に  $x=0 \sim 20$  における  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4-x\text{wt}\%\text{TiO}_2$  のマイクロ波誘電特性と焼成温度の関係を図 2.2-6 および図 2.2-7 に示し、その詳細を表 2.2-2 に示す。 $\text{Zn}_2\text{SiO}_4-x\text{wt}\%\text{TiO}_2$  の比誘電率はチタニアの添加量  $x$  に大きく依存し、6~11 程度に及ぶことが明らかとなった。また品質係数はチタニアの添加によりウイلمイト単体のものより大幅に減少するものの、図 2.2-6(b) より明らかなように、1230~1250 の焼成温度域では、 $x=9$  および 11 の試料では  $x=0$  のものと同様の値を示し、1250 で焼成した試料では、100,000GHz 以上の  $Q \cdot f$  値が得られている。 $\text{Zn}_2\text{SiO}_4-x\text{wt}\%\text{TiO}_2$  の共振周波数の温度係数も図 2.2-7 に示すように比誘電率と同様にチタニアの添加量に大きく依存し、-60~50ppm/ に及んでいる。

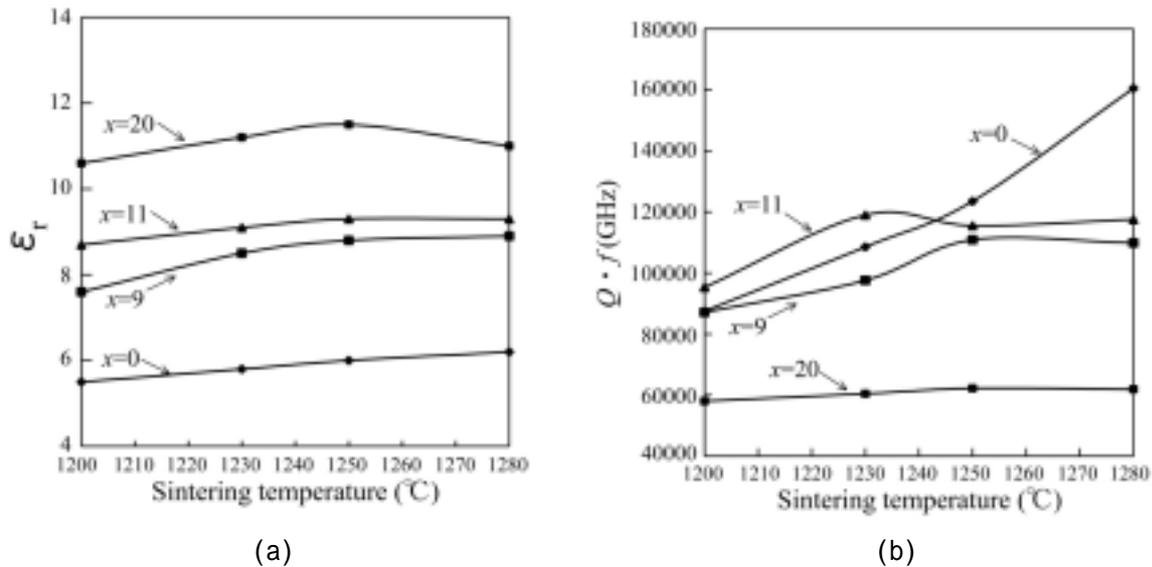


図 2.2-6  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4-x\text{wt}\%\text{TiO}_2$  の比誘電率および品質係数の焼成温度依存性

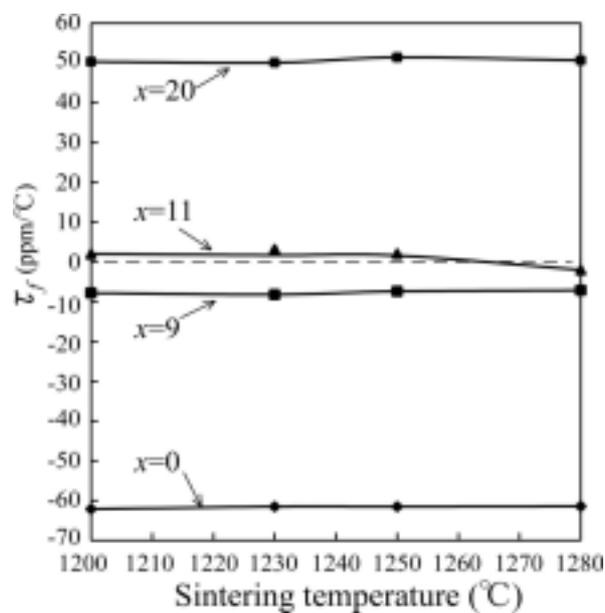


図 2.2-7  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4-x\text{wt}\%\text{TiO}_2$  の共振周波数の温度係数

表 2.2-2  $Zn_2SiO_4-xwt\%TiO_2$  のマイクロ波誘電特性

$x$ (wt%)	焼成温度 ( )	焼成時間 (h)	比誘電率	$Q \cdot f$ (GHz)	$\tau_f$ (ppm/ )
0	1250	2	6.0	123503	-62.1
	1280	2	6.3	160521	-61.5
	1300	2	6.3	182110	-61.5
	1320	2	6.4	205432	-61.4
9	1230	2	8.5	97602	-8.2
	1250	2	8.8	110873	-7.4
	1280	2	8.9	109872	-7.1
11	1200	2	8.7	95312	2.0
	1230	2	9.1	119015	1.7
	1250	2	9.3	115520	1.6
	1280	2	9.3	117543	-2.1
20	1230	2	11.2	60430	50.1
	1250	2	11.5	62189	51.4
	1280	2	11.0	61890	50.7

共振周波数の温度係数の組成依存性から、 $x=9 \sim 11$  の組成域において  $Zn_2SiO_4-xwt\%TiO_2$  の共振周波数はゼロの値をとるものと考えられ、チタニアの添加が温度係数の制御に有効であることが明らかとなった。そこで、本試験では、これらの知見より各組成  $x$  において最適な温度で焼成した試料に対して、LCR メータを用いて、誘電率の温度係数を求めた。得られた結果を図 2.2-8 および表 2.2-3 に示す。図からも明らかなように、誘電率の温度係数は  $x=9$  において  $= 5.3\text{ppm/}$  を示しており、チタニアの添加量を調整することにより、所定の温度係数を有する材料を合成することが可能であることが明らかとなった。

以上のことから、本試験では  $Zn_2SiO_4-xwt\%TiO_2$  の組成において、図 2.2-1 に示した合成プロセスに基づき、 $x=9$  の組成において焼成温度 1250、焼成時間 2 時間、大気中での焼成により誘電率の温度係数がゼロに近い材料が得られることが明らかとなった。

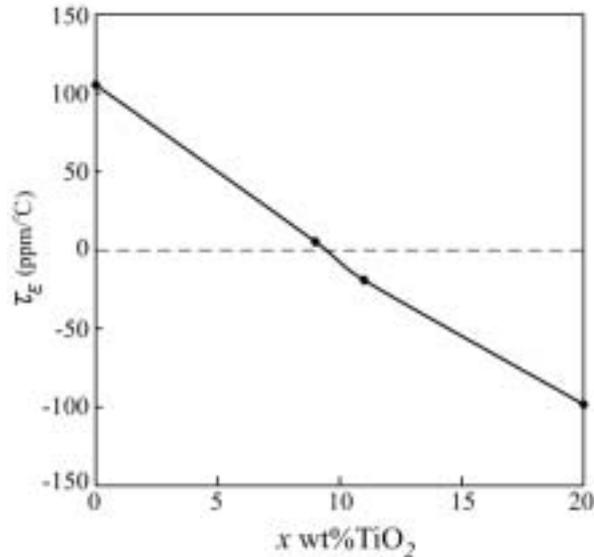


図 2.2-8 Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>-xwt%TiO<sub>2</sub> の誘電率の温度係数とチタニア添加量の関係

表 2.2-3 Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>-xwt%TiO<sub>2</sub> の焼成温度と誘電率の温度係数

x wt %	Ts( )	(ppm/ )
0	1320	105.2
9	1250	5.3
11	1250	-19.1
20	1250	-98.3

### 2.3 量産化試験

高純度原料を用いて高純度ウイلمイト粉末を合成し、これにチタニアを添加して造粒して均質な成型しやすい原料粉体を設計した。約 10,000 個のデバイス量産化技術を確認するために合成粉末の試作 (10kg/ロット) を行った。

#### 2.3.1 合成工程

ウイلمイト原料粉体の原料となる高純度ウイلمイトの合成工程の開発を行った。大学の研究室による基礎的な研究では、生産量が少ないこと、工程や合成品に対する評価を容易にすることなどの理由により、なるべく単純な系で実験を行うことになる。こうして得られた成果をそのまま量的にスケールアップしても、一般的な工場での生産工程に置き換えることは困難である。特に製造技術上の問題としては品質の均一性が、商業的には経済性 (価格) が問題点となる。さらに、従来のウイلمイトは工業的には主に釉薬原料として広く用いられてきたが、その経緯から高純度合成品が要求されることは無く、高純度品を合成するためのノウハウの蓄積が無かった。そこで、愛知県産業技術研究所常滑窯業技術センターでは、従来のウイلمイトの合成方法を基として、名城大学の分担課題である誘電率の温度係数ゼロとなる化学組成および名古屋工業大学の分担課題であるプレス成形しやすい合成プロセスの二つの知見を受けて、

工業的に利用可能な量産化を前提とした誘電体材料用高純度ウイルマイトの生産工程を開発した。工業的な量産化の量的な目標は1ロット10kgとした。

高純度ウイルマイト合成工程の改良点の特徴を従来の釉薬用の合成ウイルマイトの合成工程と比較する。はじめに、合成工程の改良点として各工程について次に記す項目に着目した。

- ・原材料の選定については純度、粒度、反応性、結晶性等の基本的な性質に加えて、入手の容易性。

- ・混合粉碎工程では使用する機械装置からの不純物の混入を少なくすることと、粉碎助剤等の添加を少なくする。

- ・乾燥工程では、粉体の成分および粒度の偏りが起こりにくい方法を選択する。

- ・焼成工程では、炉内雰囲気からの不純物の混入を少なくする。

原材料および試薬は一般に工業的な規模で入手が容易なものを選定した。合成に用いた機械装置および器具は丸ス釉薬合資会社の所有設備または丸ス釉薬合資会社で所有しない設備については窯業生産に一般的に使用される設備を使用した。

### 1) 原材料および試薬

二酸化亜鉛には高純度化学研究所製亜鉛華（二酸化亜鉛）を、シリカには雪印製二酸化けい素 SP-3 を、チタニアには東邦チタニウム製高純度酸化チタンを用いた。水は蒸留水を用いた。

### 2) 機械装置および器具

混合粉碎工程では混合粉碎容器にはウレタン張りボールミルを用いた。また、混合粉碎媒体には鉄芯入りウレタンボールを用いた。

乾燥工程ではスプレードライヤーを用いた。

焼成工程では電気炉を用いた。

### 3) 合成工程の改良

本事業で改良した高純度ウイルマイト合成工程を表 2.3-1 に示す。比較として、従来の合成ウイルマイトの合成工程を併せて記す。

表 2.3-1 高純度ウイルマイト合成工程と合成ウイルマイトの合成工程

原料	改良した合成工程			従来の合成工程		
	二酸化亜鉛	二酸化けい素	蒸留水	亜鉛華	珪砂	井戸水
混合粉碎工程	ウレタン内張りボールミル + 鉄芯入りウレタンボール			アルミナボールミル + アルミナボール		
乾燥工程	スプレードライヤー			フィルタープレス + 温風乾燥器		
焼成工程	電気炉			ガス炉		
合成品	高純度ウイルマイト			合成ウイルマイト		

以上の合成方法に従って合成した高純度ウイلمイトにチタニアを添加してウイلمイト原料粉体とした。ウイلمイト原料粉体の合成工程を表 2.3-2 に示す。

表 2.3-2 ウイلمイト原料粉体の合成工程

ウイلمイト原料粉体の合成工程	
原料	高純度ウイلمイト   チタニア
混合粉碎工程	ウレタン内張りボールミル + ジルコニアボール
乾燥工程	スプレードライヤー
合成品	ウイلمイト原料粉体

以上の二段階の合成により、1ロットあたり10kgのウイلمイト原料粉体を合成することができた。

### 2.3.2 製造工程

(ノウハウ)

#### 2.3.3 チタニア添加と造粒

図 2.3-5 に、チタニア添加及び造粒工程(製造工程2)を示す。合成を行った HQF/HQW にチタニアを添加行い、乾式プレスに必要なバインダー(成形に必要な有機溶剤)を混合し造粒する。  
調合：ウレタン張りポッドミル、ジルコニアボール 10 を使用  
造粒：スプレードライヤー

球形で変形のない顆粒が得られるが、スプレードライヤーの歩留率が悪く、乾燥時(34%)造粒時(17%)など、排気とサイクロン分級過程で目減りする問題点があった。合成前の微粉原料がスプレードライヤーの風に流されて排気されてしまうためではないかと考え、風量の調整を行ったが解決しなかった。

#### 2.3.4 まとめ

良質な造粒粉が得られ、不純物の混入を避けるための製造技術を確立出来た。

実験室規模と量産規模の調合との違いとしては、製造工程や使用機器による不純物の混入、調合する水分や脱水条件の違い、焼成時の炉内温度差、コスト面での問題などが考えられる。専用機器や特殊な設備を使用せずに、一般的な調合工程において不純物の排除、脱水条件、焼成条件の見直しを実施した。

今後は複数ロットの合成粉末の製造を行い製造の安定化を検証する必要がある、それに次いで更に大きな規模の合成粉末の製造(200kg以上)で、焼成時の温度分布差等が電気的特性に与える影響を見極めて検査項目・検査技術の確立を図る必要がある。

### 第 3 章 基板の量産化技術の確立

#### 3.1 成形密度の均質化

##### 3.1.1 バインダ及び可塑剤

(ノウハウ)

##### 3.1.2 ウイルマイトの不均質性評価

ウイルマイト焼成体についてアルキメデス法による密度測定を行った。その結果を表 3.1-2 に示す。

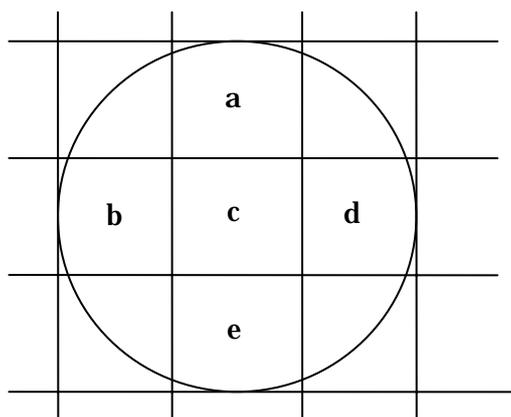
表 3.1-2 ウイルマイト焼成体のかさ密度

試料名	かさ密度
1	4 . 1 8 2
2	4 . 1 8 4
3	4 . 1 8 3
4	4 . 1 8 2

注) 焼成温度 1250 、成形圧力 200MPa

ウイルマイト焼成体試料 1 を図 3.1-12 のように直交する軸方向に三等分に切断し、それぞれのかさ密度を測定した。その結果を表 3.1-3 に示す。かさ密度測定の結果から、焼成体ごとのばらつき及び焼成体内のばらつきは極めて小さく良好な成形および焼成状態だといえる。

表 3.1-3 ウイルマイト焼成体内のかさ密度



試料名	かさ密度
a	4 . 1 8 0
b	4 . 1 8 3
c	4 . 1 8 4
d	4 . 1 8 1
e	4 . 1 8 1

図 3.1-12 密度測定試料の切り出し方法

さらに、均質性の評価のためにウイルマイト焼成体試料 a と c について、表面の実体顕微鏡観察及び電子顕微鏡観察を行った。実体顕微鏡による観察では両者に差異は認められなかった。電子顕微鏡観察結果を図 3.1-13 及び図 3.1-14 に示す。図 3.1-13 及び図 3.1-14 からわかるように c の表面部分のほうが a の表面部分よりも緻密であるが、二つの試料ともに亀裂、貫入、ラミネーション等の欠点は観察されなかった。

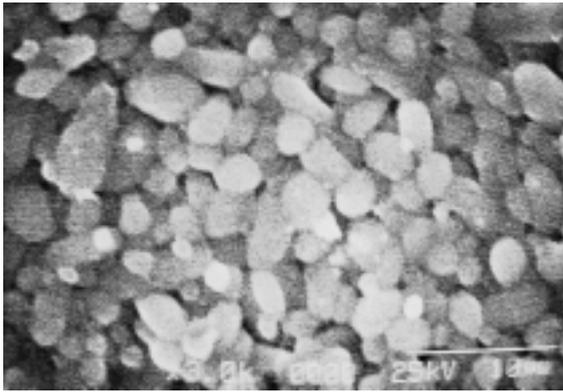


図 3.1-13 ウイルマイト焼成体 a の表面

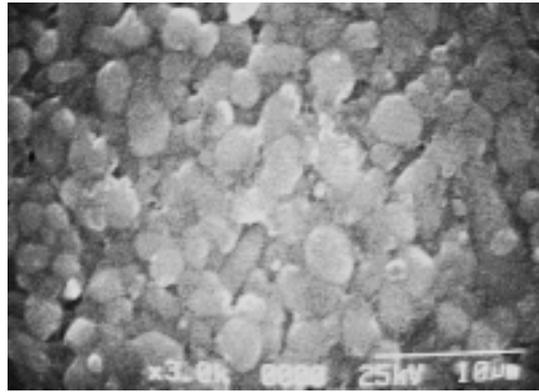


図 3.1-14 ウイルマイト焼成体 c の表面

### 3.1.3 顆粒原料評価

HQF 材料の粒度分布、嵩比重、安息角、水分、の測定結果を図 3.1-15、図 3.1-16 に HQW 材料の粒度分布、嵩比重、安息角、水分、の測定結果を図 3.1-17 に示す。また HQF 材料の実体顕微鏡観察結果を図 3.1-18 ~ 23 に、HQW 材料の実体顕微鏡観察結果を写真 3.1-24 に示す。

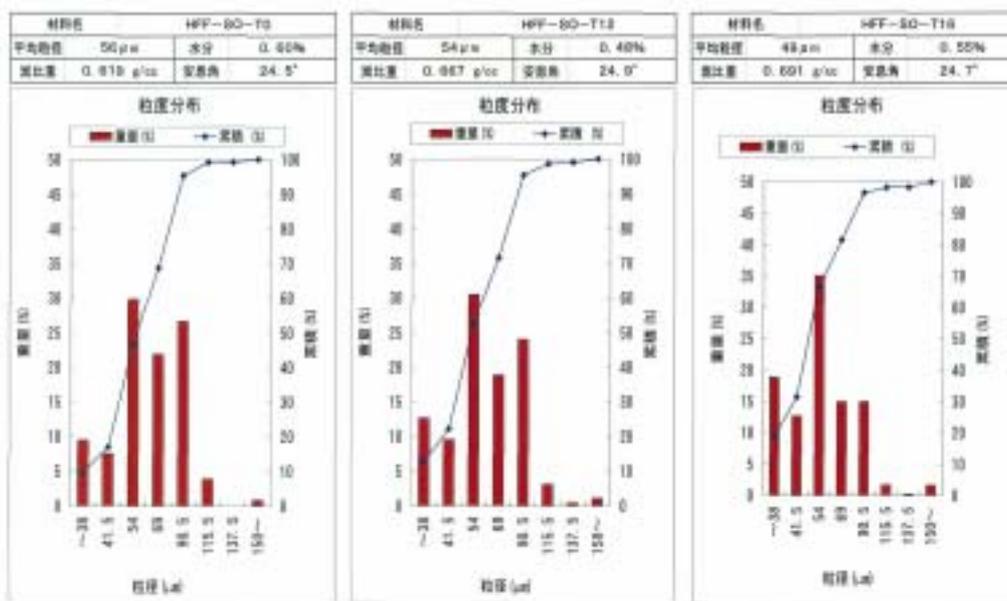


図 3.1-15 フォルステライト顆粒の特性

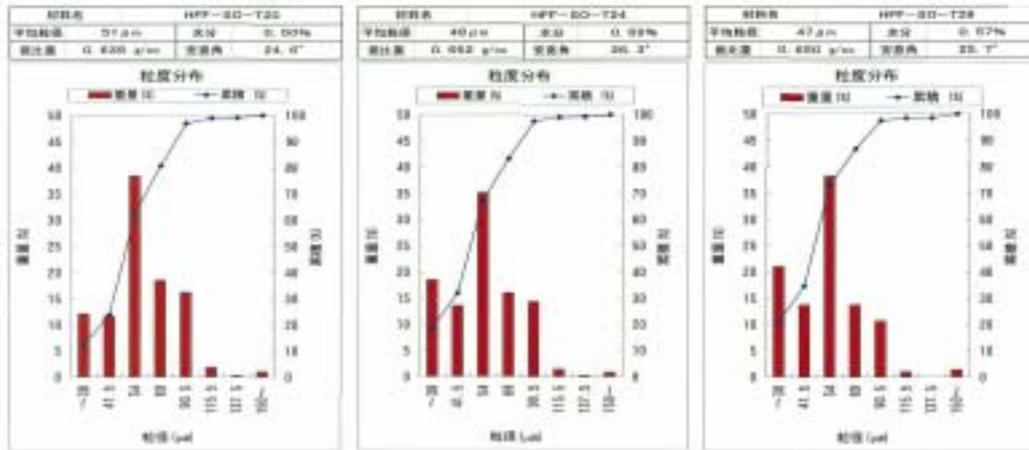


図 3.1-16 フォルステライト顆粒の特性

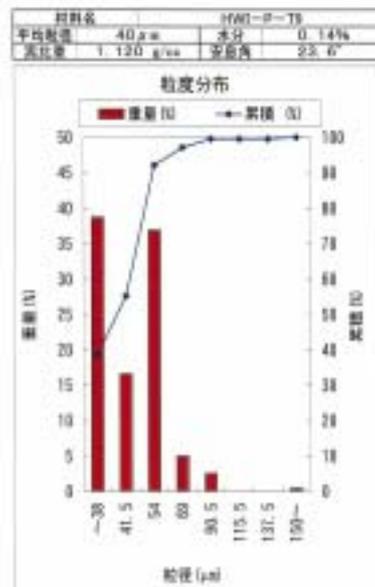


図 3.1-17 ウイルマイト顆粒特性



図 3.1-18 HFF-SO-T0



図 3.1-19 HFF-SO-T12

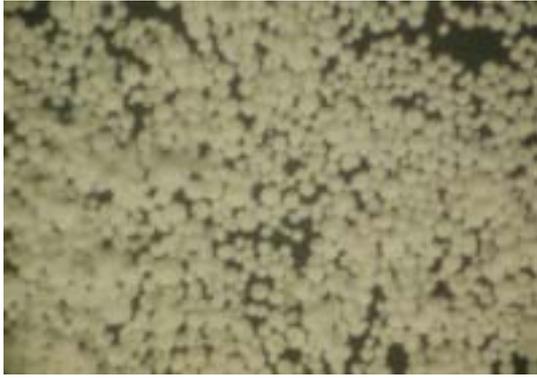


図 3.1-20 HFF-SO-T24

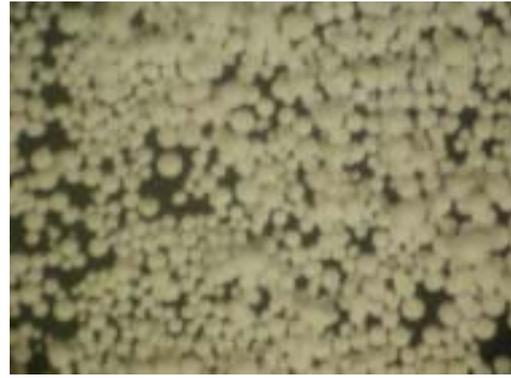


図 3.1-21 HFF-SO-T28



図 3.1-22 HFF-SO-T24



図 3.1-23 HFF-SO-T28



図 3.1-24 HWI-P-T9

顆粒原料評価より以下の知見が得られた。

- ・HQF 材料、HQW 材料の各水準ともに平均粒径、安息角、水分が安定して製造されており、流動性の良い顆粒が製造できた。
- ・実体顕微鏡観察より、陥没粒子の存在が確認された。高密度化を目指すためにも造粒条件、バインダー等の見直しを行い陥没粒子の割合を少なくすることが必要である。

### 3.1.4 成形体の不均質性評価

HQF 合成粉末材料について 34mm の金型（図 3.1-25）を使用して、粉末自動成形機にて 2ton/cm<sup>2</sup> の圧力で成形を行った。

成形開始から 800 ショット後迄の成形密度のバラツキを乾式自動密度計にて測定した結果を表 3.1-4 および図 3.1-26 に示す。チタン添加品の T12～T28 において、成形体密度 1.8g/cc 以上の高密度成形体を得ることができた。また 800 ショット後までは、各水準とも高密度成形体が安定して得られており、成形密度の均質化を達成した。HQW 材料の成形体密度は、2.688g/cc であった。



図 3.1-25 34mm 成形用金型

表 3.1-4 ショット数毎の成形密度測定結果

	TiO <sub>2</sub> 添加量 (%)				
	1 2	1 6	2 0	2 4	2 8
1 . 成形開始	1.809	1.846	1.844	1.871	1.886
2 . 200 ショット	1.808	1.845	1.847	1.872	1.883
3 . 400 ショット	1.816	1.840	1.846	1.874	1.884
4 . 600 ショット	1.813	1.845	1.848	1.872	1.885
5 . 800 ショット	1.813	1.844	1.845	1.871	1.885
AVE	1.812	1.844	1.846	1.872	1.884
MAX	1.816	1.846	1.848	1.874	1.886
MIN	1.808	1.840	1.844	1.871	1.883
R	0.008	0.005	0.004	0.003	0.002
	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001

単位：(g/cc)

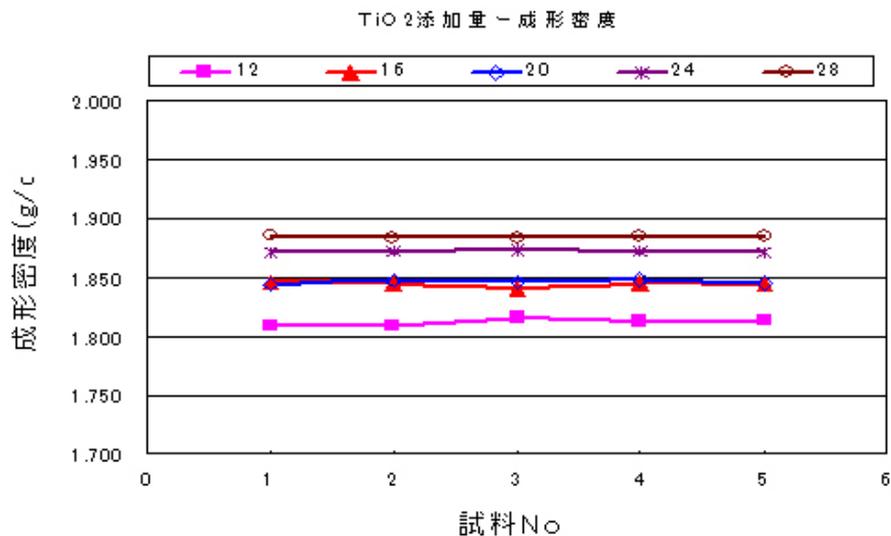


図 3.1-26 ショット数毎の成形密度

成形体評価結果は以下のようにまとめられる。

- ・チタンの添加量が増すにつれて、成形性が悪くなる傾向がある。バインダーの組成添加量等の再検討が必要である。成形圧力を 2ton/cm<sup>2</sup> 以上でも成形体にラミネーションが入ってしまいうまく成形できなかった。代表例を図 3.1-27 および図 3.1-28 に示す。

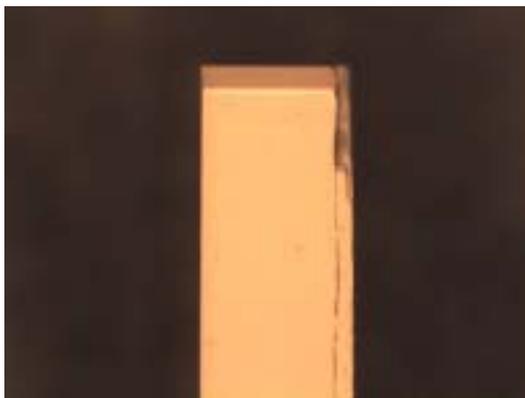


図 3.1-27 HFF-S0-T16(成形圧力 3ton/cm<sup>2</sup>)



図 3.1-28 HFF-S0-T20(成形圧力 3ton/cm<sup>2</sup>)

より高密度化に対応するためにも、高い成形圧力でもラミネーションが発生しない顆粒造りが必要である。

### 3.1.5 焼成品の不均質性評価

HQF 成形体 (成形圧力 2ton/cm<sup>2</sup>) について、基板焼成用電気炉 (図 3.1-29) にて、3 条件で焼成を行った。また焼成品の密度を乾式自動密度計 (図 3.1-30) にて測定を行った。測定結果を図 3.1-31 に示す。



図 3.1-29 基板焼成用電気炉



図 3.1-30 乾式自動密度計

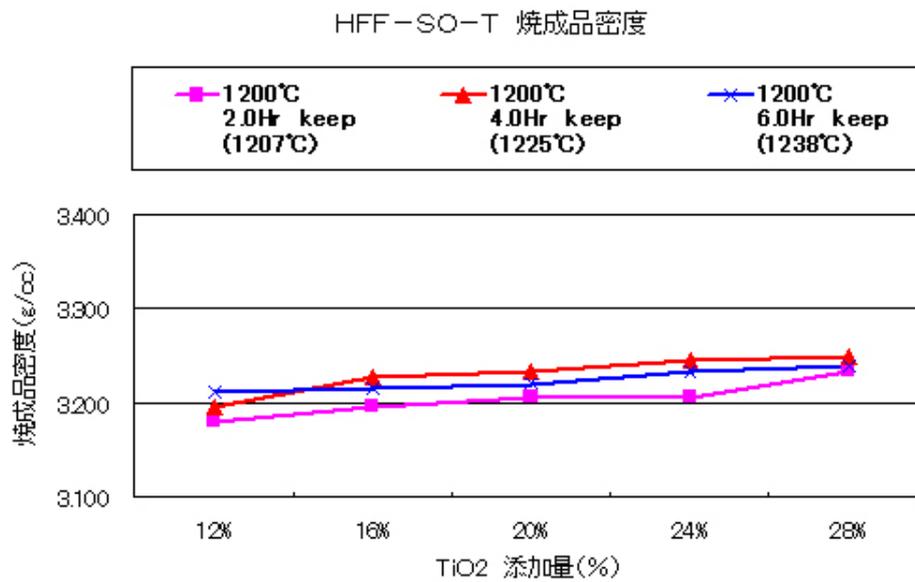


図 3.1-31 フォルステライト焼成品密度

HQW 材料 (HWI-P-T9) についても基板焼成用電気炉を使用して焼成を行った。焼成品密度を乾式自動密度計にて測定を行った結果を、表 3.1-5 および図 3.1-32 に示す。また、炉内の温度分布を把握するため、5 段積みでの焼成を実施した。

表 3.1-5 ウイルマイト焼成結果

成形圧力: 2ton/cm<sup>2</sup>

品番	HWI(wt%)	91					
	TiO <sub>2</sub> (wt%)	9					
成形体	NO.	1	2	3	4	5	X-bar
	成形体外径Φ(mm)	34.360	34.350	34.360	34.360	34.360	34.358
	成形体重量(g)	3.263	3.280	3.284	3.278	3.281	3.277
	成形体厚さ(mm)	1.312	1.316	1.315	1.319	1.316	1.316
	生密度(g/cc)	2.684	2.691	2.695	2.682	2.690	2.688
	成形体の反り(mm)	0.008	0.020	0.011	0.023	0.013	0.015
1250°C 2.0Hr Keep (1257°C) 1段目	焼成品重量(g)	3.177	3.183	3.179	3.176	3.171	3.177
	焼成品外径Φ(mm)	29.290	29.280	29.280	29.280	29.290	29.284
	焼成品厚さ(mm)	1.130	1.149	1.129	1.125	1.125	1.132
	焼成品密度(g/cc)	4.175	4.116	4.184	4.195	4.185	4.171
	焼成品の反り(mm)	0.027	0.031	0.039	0.039	0.045	0.036
1250°C 2.0Hr Keep (1263°C) 2段目	焼成品重量(g)	3.173	3.171	3.169	3.172	3.171	3.171
	焼成品外径Φ(mm)	29.290	29.290	29.300	29.300	29.290	29.294
	焼成品厚さ(mm)	1.127	1.130	1.125	1.126	1.128	1.127
	焼成品密度(g/cc)	4.181	4.167	4.180	4.180	4.174	4.176
	焼成品の反り(mm)	0.025	0.033	0.053	0.034	0.035	0.036
1250°C 2.0Hr Keep (1265°C) 3段目	焼成品重量(g)	3.185	3.183	3.182	3.191	3.186	3.185
	焼成品外径Φ(mm)	29.300	29.290	29.290	29.300	29.300	29.296
	焼成品厚さ(mm)	1.137	1.133	1.125	1.141	1.130	1.133
	焼成品密度(g/cc)	4.157	4.172	4.200	4.150	4.184	4.172
	焼成品の反り(mm)	0.019	0.021	0.019	0.063	0.030	0.030
1250°C 2.0Hr Keep (1265°C) 4段目	焼成品重量(g)	3.184	3.172	3.176	3.175	3.183	3.178
	焼成品外径Φ(mm)	29.300	29.280	29.310	29.300	29.300	29.298
	焼成品厚さ(mm)	1.137	1.126	1.129	1.126	1.130	1.130
	焼成品密度(g/cc)	4.155	4.186	4.171	4.184	4.180	4.175
	焼成品の反り(mm)	0.021	0.022	0.025	0.050	0.061	0.036
1250°C 2.0Hr Keep (1267°C) 5段目	焼成品重量(g)	3.168	3.179	3.169	3.169	3.172	3.171
	焼成品外径Φ(mm)	29.280	29.280	29.300	29.290	29.290	29.288
	焼成品厚さ(mm)	1.126	1.132	1.129	1.127	1.130	1.129
	焼成品密度(g/cc)	4.181	4.173	4.165	4.175	4.168	4.172
	焼成品の反り(mm)	0.016	0.017	0.023	0.030	0.025	0.022

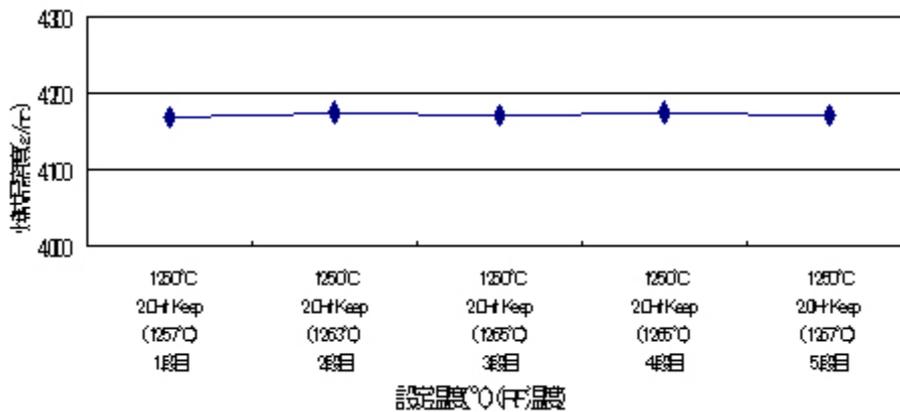


図 3.1-32 ウイルマイト焼成品密度

HQF 材料 (6 種類)、HQW 材料 (1 種類) について成形体の評価を行った。実体顕微鏡および電子顕微鏡による観察では、ラミネーション、貫入等の成形にかかわる異状は認められなかった。成形体の観察結果から、ウイルマイト原料粉体の性状及びプレス成形特性は良好であった。

焼成品による評価結果は以下の通りである。

- ・HQF 材料については、どのチタン添加量においても当初の目標である焼成品密度 3.2 g/cm<sup>3</sup> を達成できた。

- ・HQW 材料についても、焼成品密度  $4.1\text{g}/\text{cm}^3$  以上を達成できた。
- ・基板焼成用電気炉において焼成治具等を考慮し、5 段積み焼成を行ったが、温度差がレンジで 10 であり、炉内温度の均一化を図ることが出来た。
- ・HQF 材料、HQW 材料ともに基板内の密度バラツキについて、充分検討が出来なかった。

### 3.2.1 ラップ盤の仕様

図 3.2-1 に、導入した機械加工装置「ラップ盤」を示す。主な仕様は以下の通り。

軸受け構造 : 流体軸受け (油動圧すべり軸受け)

定盤修正方式 : 修正キャリア方式

加工径 : 70mm まで

加工最小厚み : 0.04 mm ( 10mm の場合 )

回転数 : 5 ~ 45 rpm ( 無段階 )

上下定盤の間に、ワークキャリアに基板をセットし、キャリア自体が自転と公転を行いながら、基板にかかる荷重を制御して研磨加工を行う。



(a)



(b)

図 3.2-1 超精密研削及び鏡面研磨加工用ラップ盤

(a) 本体 (b) ワークキャリア

### 3.2.2 研削および研磨試験結果

(ノウハウ)

LCR メータ(図 3.2-3)及び平板試料用空洞共振器(図 3.2-4)により、温度特性及び誘電特性のばらつき測定を実施した。温度特性については、LCR メータにより概略特性が変化しないことが確認でき、また、平板試料用空洞共振器についても誘電特性を概略把握できることが分かった。



図 3.2-3 LCR メータ

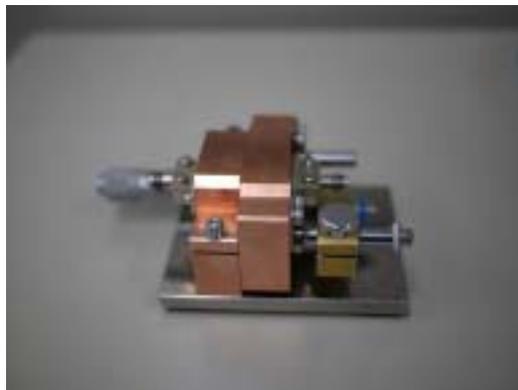


図 3.2-4 平板試料用空洞共振器

### 3.3 高周波・物理的特性評価

#### 3.3.1 概要

研究開発を行っているフォルステライト系およびウイلمイト系基板の高周波・物理的特性の測定を行った。物理的特性として、機械的強度（試験法：3点曲げ試験法）、熱膨張率（試験法：示差熱分析計）、熱伝導率（試験法：レーザフラッシュ法）等の評価を行い、電気的特性については、高周波での比誘電率及び誘電損失の測定評価を新たに導入した摂動法用空洞共振器等により実施し、また、セラミック基板との比較を行うべき樹脂基板として ARLON 製セラミックス配合 PTFE (AD1000) を選定し、同様な測定評価を行った。表 3.3-1 に示す値が得られ、開発したセラミックス基板はいずれも樹脂基板より熱膨張率が低く、熱伝導率が高いことが判明した。したがって、実施計画の大目標 が達成されたと考える。また、高周波誘電特性においてもセラミックス基板は樹脂基板よりも損失が一桁小さく、温度特性に優れることが分かった。

表 3.3-1 開発基板と市販品との高周波・物理的特性の比較

試料名	比誘電率	誘電正接	誘電率の 温度係数 (ppm/K)	熱膨張係数 (ppm/K)	熱伝導率 (W/m・K)	曲げ強度 (MPa)
フォルステライト (TiO <sub>2</sub> :20wt%)	9.6	0.00015	11.5 <sup>*1</sup>	9.25	7.46	186
ウィルマイト (TiO <sub>2</sub> :9wt%)	8.8	0.00010	16.0	-	-	83
セラミックス配合樹脂 (AD1000) <sup>*2</sup>	10.7	0.00230	-380	X軸方向 8 Y軸方向 10 Z軸方向 20	0.81	87 <sup>*3</sup>

注 1)文献値<sup>[2]</sup>

注 2)カタログ値<sup>[3]</sup>

注 3)JFCC にて測定した値

### 3.3.2 機械的強度

作製したセラミックス基板と樹脂基板の機械的強度を評価するために、26mm × 1mm の開発試料から 1mm × 4mm × 20mm の試験片を切り出し、大気中・室温にてインストロン製電気機械式万能試験機 5582 型 (図 3.3-1) を用いて 3 点曲げ強さ試験を行った。試験条件は、JIS R 1601 に準拠し、クロスヘッドスピードを 0.5mm/min とした。ただし、支点間距離は試験片長さが足りないため 16mm に設定した。



図 3.3-1 3点曲げ強度試験機

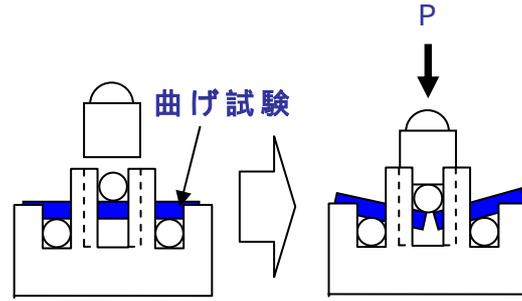


図 3.3-2 3点曲げ強度試験概

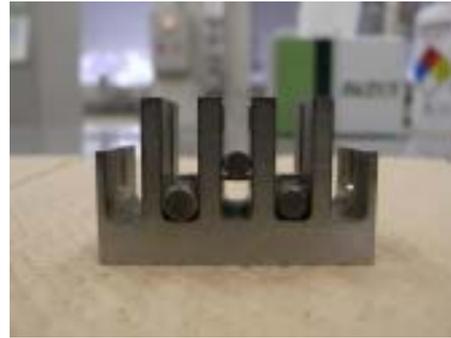


図 3.3-3 3点曲げ強度試験ジグ

3点曲げ試験より得られた荷重と試験片寸法から式(3.3-1)より曲げ強度を求めた。その結果を表 3.3-2 に示す。また、各試験片の負荷挙動を図 3.3-4 に示す。この結果より、セラミックス基板は樹脂基板より高強度であることが分かった。

$$\sigma_{b3} = \frac{3PL}{2wt^2} \quad (3.1-1)$$

ここに、

- $\sigma_{b3}$  : 3点曲げ強さ (MPa)
- P : 試験片が破壊したときの最大荷重(N)
- L : 支点間距離 (mm)
- w : 試験片の幅 (mm)
- t : 試験片の厚さ (mm)

表 3.3-2 三点曲げ強度試験結果

	フォルステライト (TiO <sub>2</sub> 20wt%)	ウイلمライト (TiO <sub>2</sub> 9wt%)	セラミックス配合 PTFE (樹脂)
曲げ強度 (MPa)	186	83	87

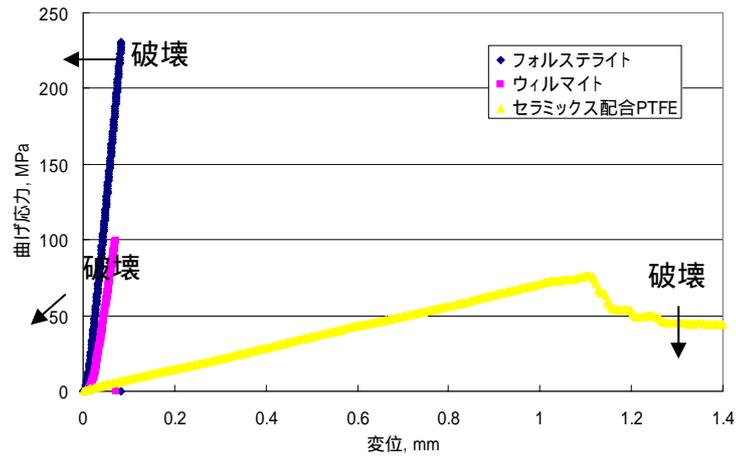


図 3.3-4 開発基板と樹脂基板の応力-変位曲線

### 3.3.3 熱膨張率測定

1mm×4mm×20mmの試験片を切り出し、大気中にてNETZSCH社製超高精度熱膨張計DIL402C(図3.3-4)を用いて熱膨張率の測定を行った。試験は室温から所定の温度(100、200、300)までの試料の膨張量の測定を2/minの昇温速度にて行った。このときの標準試料(溶融石英)の膨張量と式(3.3-2)より平均線熱膨張率を求めた。測定結果を表3.3-3および図3.3-6に示す。



図 3.3-4 熱膨張率測定器

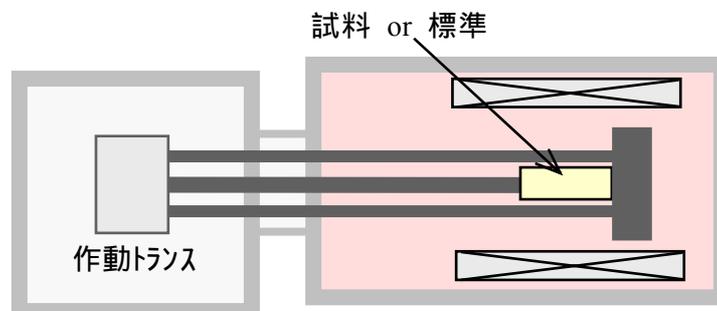


図 3.3-5 熱膨張率測定の概要

$$\Delta L = \Delta L_m + \Delta L_r - \Delta L_b \quad (3.3-2)$$

ここに、

- L : 熱膨張量 (mm)
- $L_m$  : 試験測定時の検出変位置量 (mm)
- $L_r$  : 標準試料の膨張量 (mm)
- $L_b$  : 標準試料測定時の検出変位置量 (mm)

表 3.3-3 平均線熱膨張率の測定結果

TiO <sub>2</sub> 添加量 (wt%)	温度範囲		
	30 ~ 100	30 ~ 200	30 ~ 300
12	9.45	10.2	10.5
16	8.98	9.86	10.2
20	9.25	9.68	10.2

( × 10<sup>-6</sup>/K )

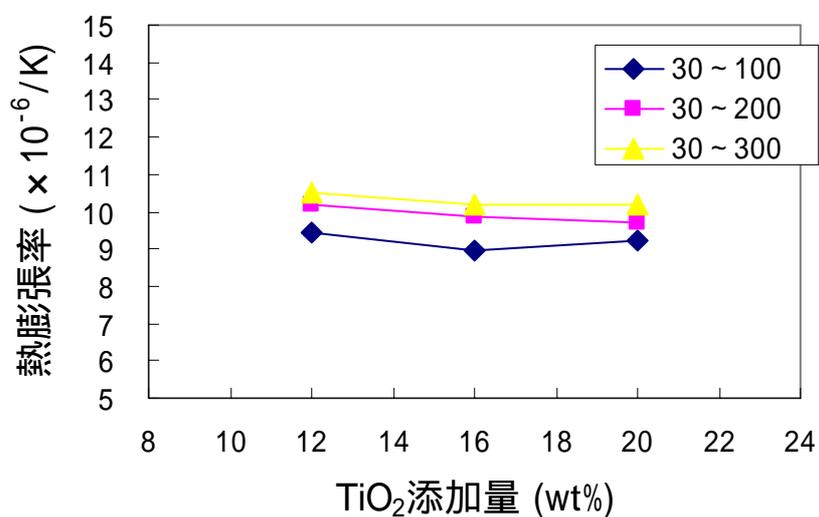


図 3.3-6 平均線熱膨張率の測定結果

上記結果より、開発したセラミックス基板の熱膨張率は樹脂基板より低くなることが分かった。

### 3.3.4 熱伝導率

熱伝導率は試料の密度、レーザフラッシュ法による熱拡散率および疑等温法による比熱容量から式 3.3-3 より求めた。それらの試験片として、10mm × 1mm (熱拡散率用) と 6mm × 0.3mm (比熱容量用) を 26mm × 1.0mm の円板試料から切り出し、熱拡散率用は京都電子工業製熱物性測定装置 LFA501 (図 3.3-7)、比熱容量は TA インストルメント製示差走査熱量計 Q1000 (図 3.3-9) を用いて測定を行った。その結果を表 3.3-4 および図 3.3-11 に示す。これより、開発したセラミックス基板の熱伝導率は樹脂基板より高いことが分かった。

$$\lambda = C_p \cdot \alpha \cdot \rho \quad (3.3-3)$$

ここに、

- : 熱伝導率 (W/(m·K))
- C<sub>p</sub>: 比熱容量 (kJ/(kg·K))
- : 熱拡散率 (m<sup>2</sup>/s)
- : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)



図 3.3-7 熱拡散率測定機

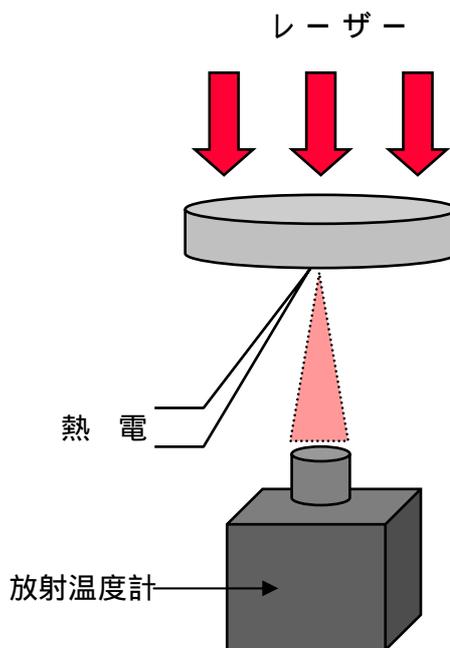


図 3.3-8 熱拡散率測定の原理



図 3.3-9 比熱容量測定機

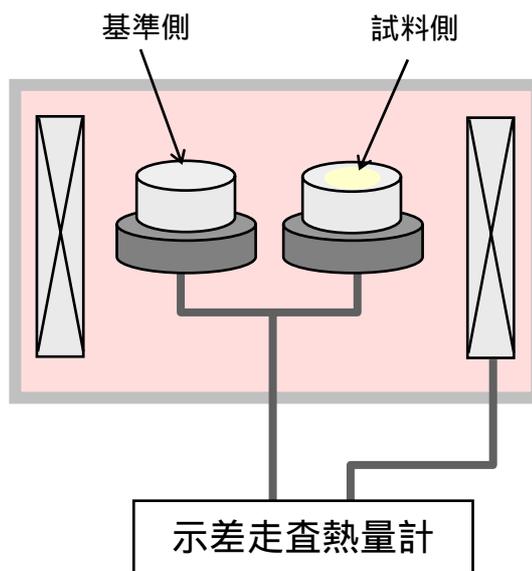


図 3.3-10 比熱容量測定の概要

表 3.3-4 熱伝導率測定結果

TiO <sub>2</sub> 添加量 [wt%]	密度 [ × 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> ]	比熱容量 [kJ/(kg·K)]	熱拡散率 [ × 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s]	熱伝導率 [W/(m·K)]
12	3.06	0.834	2.85	7.27
16	3.19	0.831	2.89	7.64
20	3.18	0.826	2.84	7.46

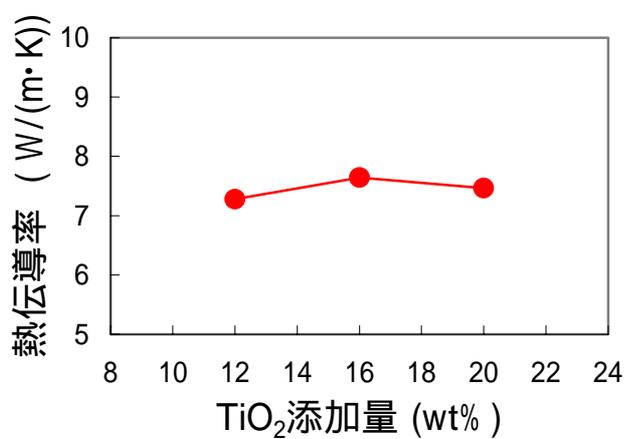


図 3.3-11 熱伝導率測定結果

### 3.3-5 高周波誘電特性（複素比誘電率）

焼成後の試料を平面研削により面粗度を平滑化にし、厚さ約 1mm の試験片を作製した。複素比誘電率の測定は、アジレント・テクノロジー製ネットワークアナライザ 8722D（図 3.3-12）およびサムテック製空洞共振器（高純度銅製、内径 22mm×高さ 8mm、演算ソフト SUM-PLATE）を用いて、大気中、室温において周波数 12GHz 付近の複素比誘電率の測定を JIS R 1641 により実施し、式 3.3-4 より比誘電率を、式 3.3-6 より誘電正接を求めた。その結果を表 3.3-5 及び図 3.3-13 に示す。これより、開発したセラミックス基板は樹脂基板より損失が一桁低い結果となった。

$$\varepsilon' = \left( \frac{c}{\pi L f_0} \right)^2 \left\{ X^2 - Y^2 \left( \frac{L}{2M} \right) \right\} + 1 \quad (3.3-4)$$

ただし、

$$X \cdot \tan X = \frac{L}{2M} Y \cdot \cot Y \quad (3.3-5)$$

$$Y = \sqrt{\left( \frac{2\pi f_0}{c} \right)^2 - \left( \frac{2j_{01}}{D} \right)^2} = jY' \quad (3.3-5)$$

ここで、

- ' : 比誘電率
- c : 光速度
- L : 試料の厚さ(mm)
- f<sub>0</sub> : 共振周波数(GHz)
- M : 導体空洞の高さ(mm)
- D : 導体空洞の直径(mm)

なお、式において根号内の値が正の場合は Y、負の場合は Y' を用いる。

$$\tan \delta = \frac{A}{Q_u} - R_s B \quad (3.3-6)$$

$$A = 1 + \frac{W_2}{W_1} \quad (3.3-7)$$

$$B = \frac{P_c}{\omega R_s W_1} \quad (3.3-8)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} \quad (3.3-9)$$

ここで、

$\tan \delta$  : 誘電正接

$Q_u$  : TE<sub>011</sub> モードの無負荷Q

$\sigma$  : 空洞共振器を構成する材料の電気伝導度

$W_1$  : 試験試料内部の電界の蓄積エネルギー

$W_2$  : 空洞部の電界の蓄積エネルギー

$P_c$  : 共振器の導体損失

$\omega$  : 角共振周波数

$\mu_0$  : 真空の透磁率



図 3.3-12 複素比誘電率の装置外観

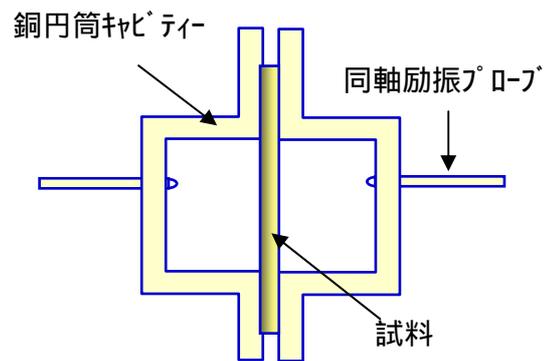


図 3.3-13 空洞共振器の構造

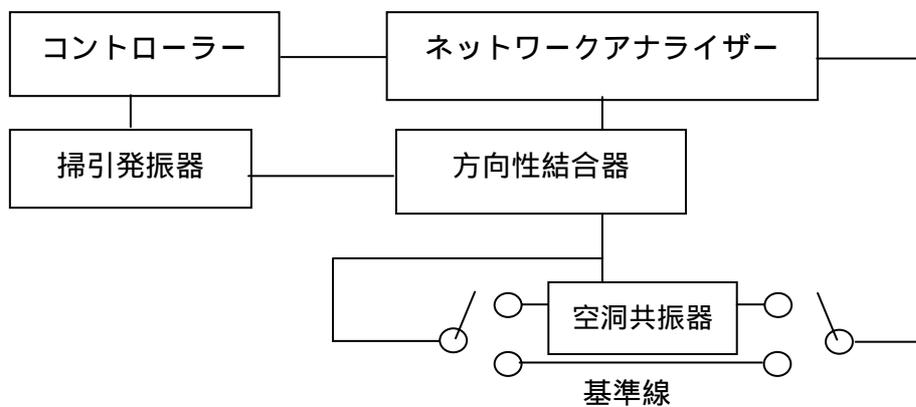


図 3.3-14 空洞共振器法による測定システムブロック図

表 3.3-5 空洞共振器による複素比誘電率の測定結果

試料名	TiO <sub>2</sub> 添加量 (wt%)	焼成時間 (Hr)	焼成温度 (°C)	周波数 $f$ (GHz)	比誘電率 $\epsilon'$	誘電正接 $\tan \delta$	$Q \cdot f$ (GHz)	備考 (1GHzの $\epsilon'$ )
HFF-SO-T0	0	2	1,320	13.493	6.7	0.00011	122664	6.5
HFF-SO-T12	12	"	1,200	12.382	8.1	0.00012	104052	8.0
HFF-SO-T16	16	"	"	12.208	8.5	0.00012	101732	8.2
HFF-SO-T20	20	"	"	11.759	9.6	0.00013	94070	9.0
HFF-SO-T24	24	"	"	11.185	10.6	0.00015	73582	10.2
HFF-SO-T28	28	"	"	11.519	9.8	0.00014	82282	9.6
HFF-SO-T30	30	"	"	13.493	9.9	0.00015	89953	9.7
HWI-P-T9	9	"	1,250	12.631	8.8	0.00010	126310	8.8
セラミックス配合樹脂	-	-	-	9.430	10.1	0.00220	4286	9.8

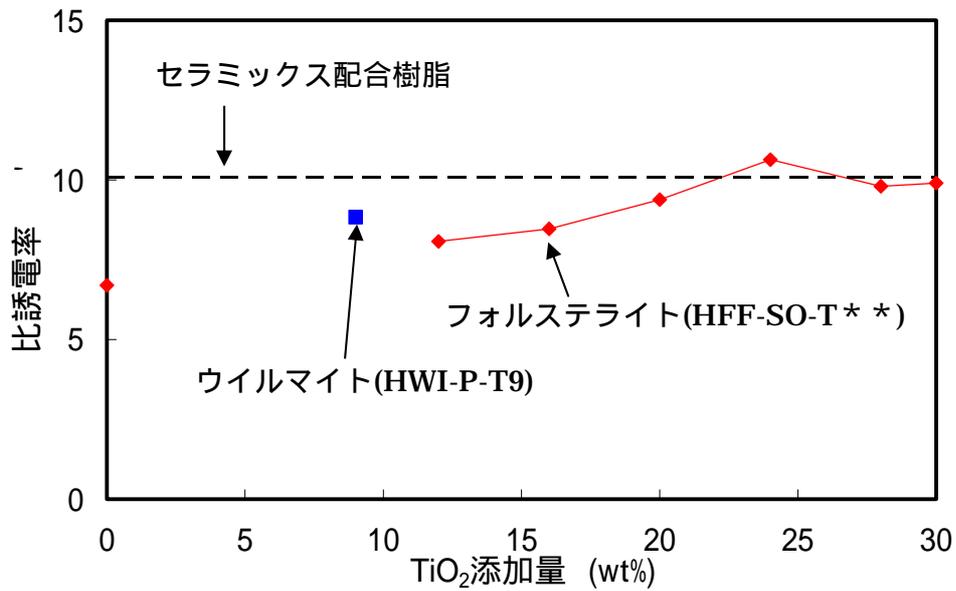


図 3.3-15 12GHz における比誘電率の測定結果

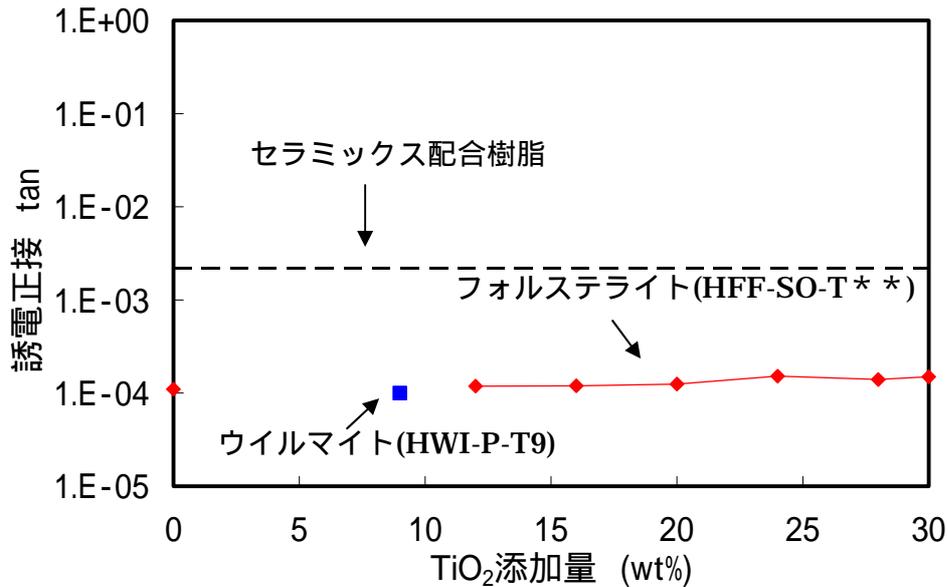


図 3.3-16 12GHz における誘電正接の測定結果

以上までは約 12GHz における誘電特性の評価を行ったが、他の周波数帯域においても評価する必要があり、3GHz にて測定が可能なサムテック製の 3GHz $TM_{0m0}$  モード円筒共振器（図 3.3-17）および丸棒試料測定ソフトウェア（SUM-TM0m0\_MANUAL Ver.1.3）を導入した。

#### 1) 摂動法

摂動法は  $TM_{0m0}$  空洞共振器の中心軸上に誘電体丸棒試料へ挿入し、挿入前後のネットワークアナライザからの測定データ（共振周波数  $f_0$ 、無負荷  $Q, Q_u$ ）を取得し、誘電体丸棒の軸方向の複素比誘電率を算出する方法である。そこで、直径 3mm × 長さ 50mm の試料を用意し複素比誘電率の測定を実施した。<sup>[4]</sup>

$$\varepsilon' = 1 + \frac{S_C}{\alpha S_S} \cdot \frac{F_r - F_s}{F_r} \equiv 1 + \frac{S_C}{\alpha S_S} \cdot \frac{k_f}{F_r} \quad (3.3-10)$$

$$\varepsilon'' = \frac{S_C}{2\alpha S_S} \left( \frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_r} \right) \equiv \frac{S_C}{2\alpha S_S} k_q \quad (3.3-11)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3.3-12)$$

ここで、

- Fr : 試料非装荷時の共振周波数
- Fs : 試料装荷時の共振周波数
- Kf : 試料非装荷時の共振特性摂動

$k_q$  : 試料装荷時の共振特性摂動  
 $Q_r$  : 試料非装荷時の無負荷 Q 値  
 $Q_s$  : 試料装荷時の無負荷 Q 値  
 $Sc$  : 電界に垂直な共振器の断面積  
 $Ss$  : 電界に垂直な試料の断面積



図 3.3-17 3GHz $TM_{0m0}$  モード円筒(摂動法)共振器

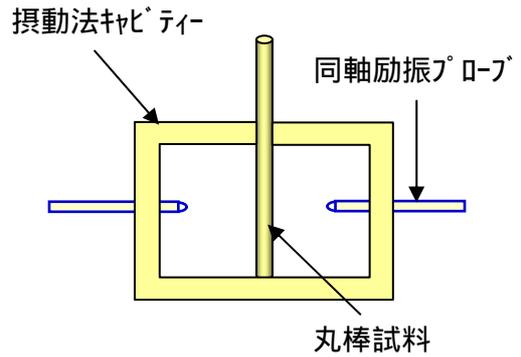


図 3.3-18 摂動法共振器の構造

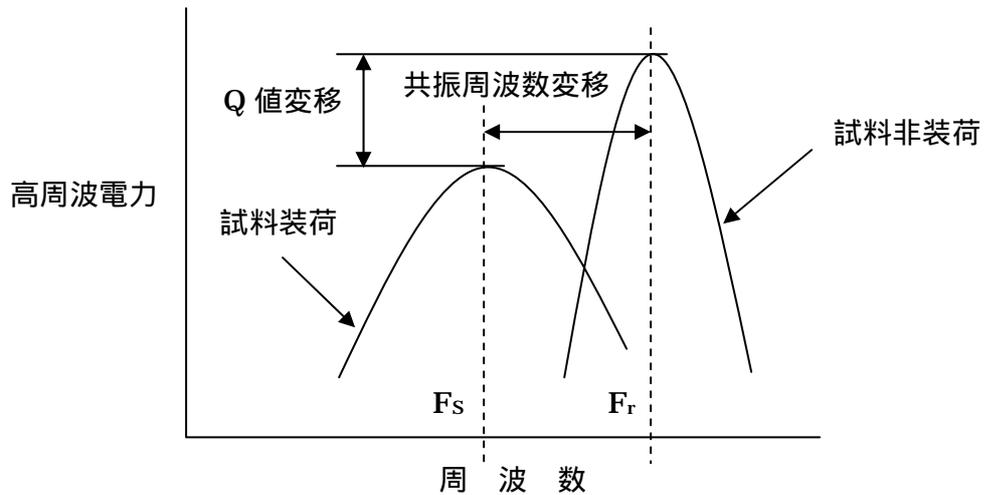


図 3.3-19 摂動法測定の概略

## 2) 厳密解析法

摂動法は従来、マイクロ波帯における誘電体棒状試料の簡便な複素比誘電率の測定法として一般に用いられてきたが、従来のこの方法には摂動公式に含まれる誤差および孔の影響が考慮されていないために、3 ~ 10 % 程度の測定誤差が生じる問題がある。<sup>[5]</sup>そこでより高精度な測定値を得るために、厳密解に基づく高精度な測定をサムテック製の  $TM_{0m0}$  モード円筒空洞共振器と解析ソフトを用いて行った。直径  $d_1$  の誘電体丸棒が、直径  $D$ 、高さ  $H$  および

試料挿入直径  $d_2$  を持つ導体円筒空洞の中心軸上に配置される。TM<sub>0m0</sub> モードの試料挿入前後の共振周波数  $f_0$ ,  $f_1$  および無負荷  $Q$ ,  $Q_{u0}$ ,  $Q_{u1}$  の測定値、空洞共振器寸法  $D$ ,  $H$ ,  $L$ ,  $d_2$  および  $d_1$  から、複素比誘電率の厳密な値を式 3.3-13 と 3.3-14 より求めた。<sup>[6]</sup>

$$\det X(\epsilon_r; f_1, d_1, d_2, D, H, L) = 0 \quad (3.3-13)$$

$$\tan \delta = \frac{A}{Q_{u1}} - BR_s \quad (3.3-14)$$

ただし、 $L=H+2g$  であり  $g$  は試料挿入深さである。また、 $A$ ,  $B$  は厳密解析<sup>5)</sup>により求められる定数、 $R_s$  は円筒空洞の表面抵抗である。この厳密解析法と摂動法により算出した合成石英の複素比誘電率の結果を表 3.3-6 に示す。

表 3.3-6 合成石英の複素比誘電率の測定結果

測定法	試料直径 (mm)	共振周波数 $f_0$ (GHz)	比誘電率 $\epsilon'$	誘電正接 $\tan \delta$
厳密解析法	2.693	2.98211	3.80	$3.19 \times 10^{-5}$
摂動法	"	2.98190	3.70	$2.67 \times 10^{-5}$
合成石英の特性値 <sup>[7]</sup>	-	2.9	3.81	$3.0 \times 10^{-5}$

各測定法による測定誤差は、厳密解析法については、 $\epsilon'$  が 0.3%以下、 $\tan \delta$  は 10%以下となり、摂動法については、 $\epsilon'$  が 3%、 $\tan \delta$  は 15%以下となった。この結果より、厳密解析法は摂動法より高精度な測定が可能であることが分かった。

## 第4章 回路基板の高密度実装化

太陽誘電株式会社は低熱膨張率・高熱伝導性等の特徴をもつ基板でミリ波帯の自動車レーダーや通信機へ実用化・事業化を目指した際に、基板のユーザの立場で基板回路の高密度実装化に必要な条件を検証する。高密度実装は本基板を用いて製作するデバイスを最小にする事で実現できる。本章では基板について仕様の検討から評価までを検証した結果から本基板がミリ波用デバイスに利用できる可能性を各機関へフィードバックした内容を記す。

### 4.1 基板仕様の検討

(ノウハウ)

#### 4.1.1 比誘電率と誘電正接

高周波回路技術者が最も重要視する項目が比誘電率と誘電正接である。比誘電率の値はプロジェクト開始時から10前後との事であったが、完成品はHQFが平均9.6、HQWが平均8.8であり、設計には問題ない値である。基板ユーザは基板1枚毎のばらつきが無い事は当然として、1枚の基板から数mm角の部品を大量に作らなくてはならないので、面内のばらつきも最小化しなくてはならない。ミリ波のSIM結果では比誘電率が10の場合、0.1変化することで共振周波数に換算すると約300MHz遷移する事が確認された。温度変化に対しては後述するように安定度が高いだけに、比誘電率のばらつきには配慮すべきと考える。局所的な比誘電率の測定は、今後の課題とする。比誘電率では更に電極面に対して水平と垂直で差異が無いことも必要である。使用する伝送線路により、水平と垂直の比誘電率の影響度が異なるからである。

誘電正接については当初からミリ波用途を目標にしていたため十分な値である。

#### 4.1.2 基板の厚み検討結果

先ず、厚みを決定する際に前提となる伝送線路の選択について記す。今回試作した伝送線路はCPWであり、プロジェクト開始時に予定していたMSLと対比することで変更理由を説明する。CPWのSパラメータはエアラインコプレーナプローブで直接接触し高確度の測定ができる。それに対しMSLのSパラメータを最も高確度で評価するには、スルーホール又は端面電極で基板の両面に存在する電極を片面に集約させる必要がある、次善はモード変換用の治工具を開発する事であるが、治工具部分の特性を測定値から除去する必要がある。又、CPWは無限の厚みを有する基板の表面に電極を形成する伝送線路が発端であるため、十分な厚みが必要とされる。十分な厚みとは言え、ミリ波では1mm程度である。それに対しMSLは表面電極と裏面電極間を電磁界が伝送する。このため比誘電率が10前後であれば、厚みは0.2mm程度でないとミリ波は高次モードとなり損失が発生する。更に又、CPWは中心導体の幅がMSLより一桁細くできる事から、回路の小型化へより一層貢献できる。以上の理由からCPWを採用する事でスルーホールや端面電極が不要となり、高確度の測定ができ、さらに基板をある程度以上厚くできることから遠く離れた各研究機関間を移送する際の破損への耐性を高めることができる。

次に、厚みの検討結果を記す。今回設計したCPWの基板厚みはミリ波では理想と看做せる厚

さは 1mm であり、基板を薄くしたときの CPW の反射損失と RES の共振周波数の変動を SIM した。0.5mm 程度で反射損失は 10dB 劣化し、共振周波数は 0.3%変化した。これは反射損失を計算する数式<sup>[8]</sup>からも同程度の値が得られている。本検討結果から一般に流通されている基板の厚みと等しい 0.635mm を採用した。

最後に、実用化された際本基板を使用する顧客は必ずしも CPW を選択するとは限らない為、厚みの範囲は研磨工程で充分対応可能 0.2mm から 1mm 程度とした。

#### 4.1.3 表面条件

ミリ波回路は電極寸法や断面形状への要求精度が非常に高い。これを実現するには印刷による電極形成では不十分であり薄膜技術が必要とされる。薄膜技術はシリコンウェファアの表面が対象であるため、セラミックである本基板の表面へは従来に無い平滑性が要求される。

薄膜工程は半導体製造工程と同程度に異物を排除しなくてはならず、洗浄は必須である。研磨した表面を侵すことなく不要物を除去する条件を明確にすることが必要である。

成膜は数 10nm の薄さで金属を蒸着する為、表面に数 10nm 以上の深い傷があってはならない。Ra=0.02 $\mu$ m を目標としたが、深い傷を見逃す危険があるため、Rz または Pt を追加することとした。

マスクとの密着を高める為に反りは 1 $\mu$ m 以下である。

#### 4.2 基板評価用回路の設計

太陽誘電株式会社は本事業で研究開発が行われる基板のユーザとしての立場から 4.1 項の基板仕様にに基づき、回路 SIM と電磁界 SIM にて CPW と RES を設計した。

CPW は伝送線路として MSL と共に高周波信号を基板上で伝搬させる際に最も基本となる回路でありこの特性評価は避けることができない。RES は急峻な周波数特性を有する事から、基板の物理的变化に対する影響を測定し易い。基板の電気的特性を評価するには文献<sup>[9]</sup>で示すような手法が提案されているが、ここでは基板の実用例として提示している自動車レーダーや通信機への適用の可能性を確認する事が目的の為、温度に対する諸特性の変化から周波数の安定度を確認するために RES を採用した。

図 4.2-1 と図 4.2-2 に CPW と RES のパタン図を、図 4.2-3 と図 4.2-4 に各パタン図で CPW と RES を SIM した S パラメタをそれぞれ示す。

#### 4.3 評価用回路の試作

( ノウハウ )

#### 4.4 治工具の開発

( ノウハウ )

#### 4.5 基板と回路の評価

4.3 項の工法にて試作した HQF と HQW それぞれの回路の S パラメタを当社が所有している VNA

とプローブを用いて測定した。図 4.5-1 に CPW の写真を図 4.5-2 に RES の写真をそれぞれ示す。ここで記す内容は薄膜による電極形成のファーストトライであり、電極精度が十分でない中から測長し最適寸法を選定した被測定物 1 個のデータであり、基板も各 1 枚であることを前提としている。実用化へは被測定物の数量増加によりデータの信頼度を上げる必要がある。

まず、CPW の S パラメタを検証する。図 4.5-3(a)に HQF を、同図(b)に HQW の S パラメタを 110GHz まで示す。HQF, HQW 共に反射係数は -20dB 以下と充分小さく伝送線路へ信号が給電されている事が解る。HQF, HQW 共に 60GHz での伝送損失は 0.6dB 未満である。樹脂基板で CPW を採用した場合を SIM した損失は 0.8dB となり、本基板の優位性が認められる。

次に RES の測定結果を検証する。図 4.5-4(a)に HQF を、同図(b)に HQW の周波数特性を温度をパラメタとして重ね書きする。HQF, HQW 共に RES の共振周波数は基板表面温度が常温から 108 に変化したときに -130MHz@60GHz の遷移、リニアに換算して周波数比で -24ppm/ である。この RES の遷移は発振器とした場合の周波数偏差に相当するので、自動車レーダーの規格である周波数の許容偏差幅 1GHz 以内<sup>[10]</sup>を十分に満足すると言える。レーダーより厳しい規格であるミリ波画像伝送設備やミリ波データ伝送設備（ミリ波無線 LAN）の  $\pm 30\text{MHz}@60\text{GHz}$ <sup>[11][12]</sup>には不十分であるものの、市販のセラミックス共振器と比較して同等の特性であるため、これら設備のフィルタやアイソレータとしては十分使用に耐え得る特性である。樹脂基板では温度特性が更に 1 桁劣化しているため、フィルタやアイソレータ回路としては特性が不十分であるから、セラミックや水晶の実装部品を使用せざるを得ない状況と比較すると、本基板では部品点数削減と小型化にメリットがありそうである。

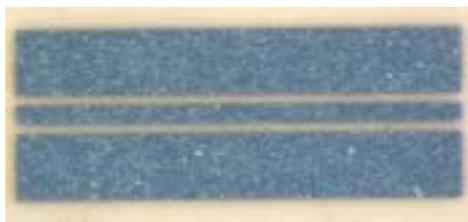


図 4.5-1 CPW の写真

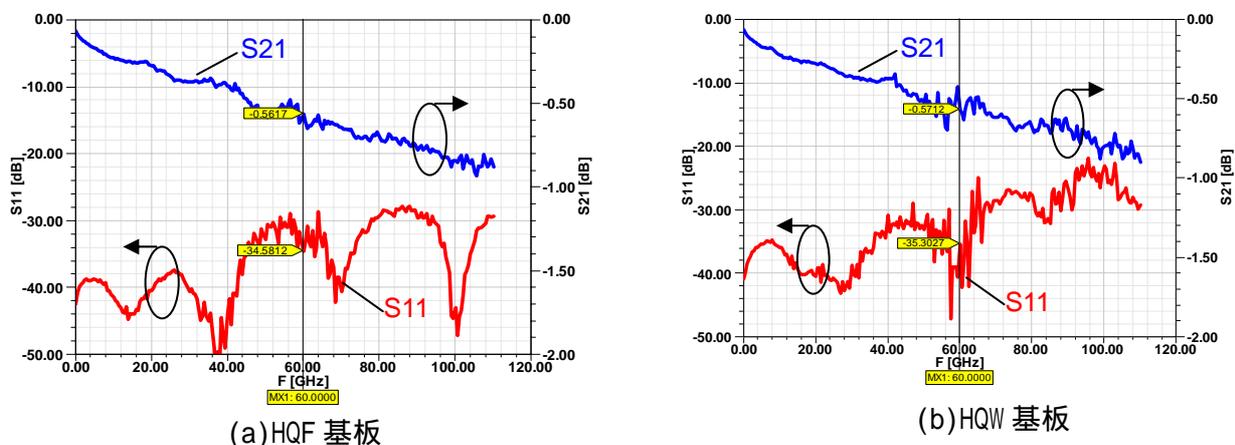


図 4.5-3 CPW の特性

RES の温度特性の評価結果を図 4.5-5(a)に HQF を，同図(b)に HQW を示す。常温から 108 の周波数遷移はどちらも 130MHz であるが，HQF は 60 付近までで変化するのに対して HQW は常温から 90 付近まで周波数が変化しない事が解る。今回の測定は周波数間隔が 137MHz と広過ぎたため，共振周波数近傍を二次曲線で補間した結果であり，断言は難しいが HQW はコンシューマ用途としては極めて高い期待感がある。

#### 4.6 計画時との差異

##### (1) 基板の厚み

今回の基板は 0.635mm から 0.254mm へ変更，理由は 4.1.2 項へ記述した。利用者要求に配慮すべき。

##### (2) バンドパスフィルタ

試作を完了し，無線通信システムの見地からは特性を確認しているが，フィルタの学術的考察が不十分との印象を払拭できない為今回は割愛する。

##### (3) 電極の工法

計画当初はセミアディティブによるCu配線を予定していたが，基板が小さいためCuメッキの膜厚均一性の制御が困難 Cuの酸化による特性評価への悪影響が懸念されたため，

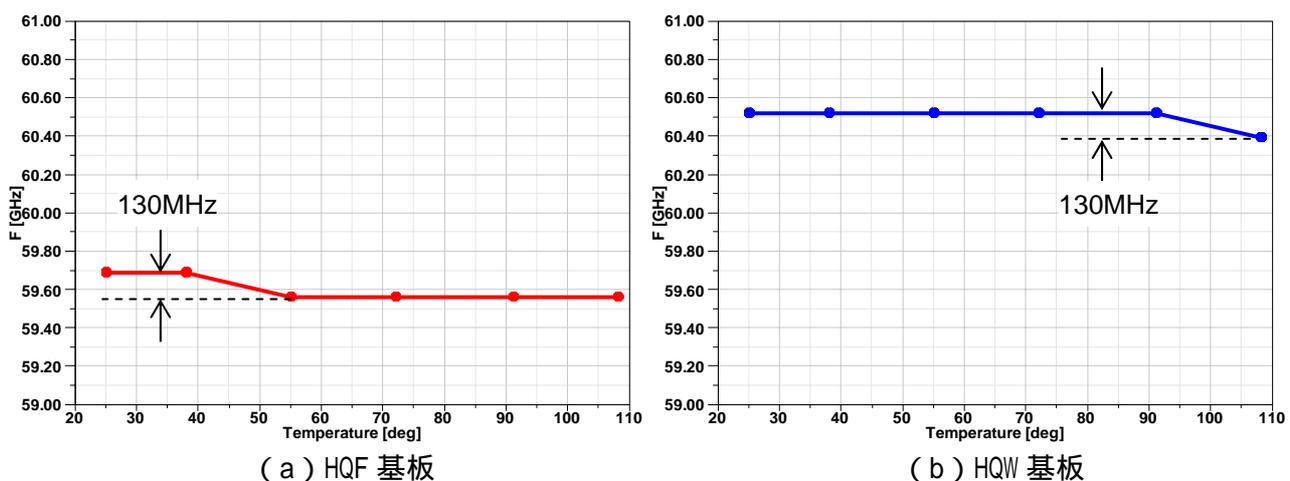


図 4.5-5 基板温度に対する共振周波数

サブトラクトによるAI配線へ変更した。

##### (4) 測定用治工具

計画時は MSL を想定していたが，CPW に変更したため不要となった。理由は 4.1.2 項へ記述した。

##### (5) 結果のフィードバック

評価結果を基に名古屋工業大学と基板の要求仕様について論じた結果は，4.1 項へ記載した。

#### 4.7 まとめ

低熱膨張率・高熱伝導性等の特徴をもつ基板をミリ波で実用化・事業化を目指した際に、ユーザの立場として基板回路の高密度実装に必要な条件を検証した。今回の検討範囲では本基板はミリ波の回路を実現する上で十分な特性が期待できる。実用に近づかせるために結果に基づく要求仕様を提示した。

低熱膨張率・高熱伝導性等の特徴をもつ基板の実用化・事業化を目指し、基板回路の高密度実装化技術を開発した。

## 第5章 全体総括

川下製造業者としての「自動車メーカー」では自動車の「安全性能・快適性向上」が常に要請され、「車内外通信技術及び高信頼性高速データ処理技術の高度化」がその主要な役割を担うものと期待されている。我が国が策定した「高度化指針」によれば、「(三) 電子部品・デバイスの実装に係る技術(電子実装技術)は、我が国の電子機器産業の競争力と発展を支える重要な技術であると位置づけられている。

本研究開発(2009年度補正予算事業)では、現在使用されている樹脂基板を、低熱膨張率、高熱伝導性、かつ低損失のセラミックス基板に置き換えることによって、現在の電子実装技術において更に高密度実装化(高度化)し、この基板を高周波回路用基板としてミリ波レーダやミリ波無線 LAN/PAN 等に搭載し、車内外通信技術に使用される通信機器等に組み込むことを目標として実施した。実施計画の当初の目標値の達成状況は下表の通りである。

目標値の細目	結果	備考
大項目		
・熱膨張率が樹脂基板より小さい		
・熱伝導率が樹脂基板より大きい		1桁以上高い
大目標		
合成粉末の量産化技術(1ロット10kg単位)基板(2インチ角)の量産化技術の開発		次年度の目標は200kg/ロット
-1 フォルステライト基板		
・生密度2.10g/cm <sup>3</sup> 以上、見かけ密度3.20g/cm <sup>3</sup> 以上		見かけ密度は3.2以上である
・表面粗さ Ra0.02 μm以下		Raだけでは鏡面出ない場合がある
・比誘電率:12程度		
・品質係数(Q・f値):60,000以上		
・比誘電率の温度係数:±30ppm/K以下		
-2 ウイルマイト基板		
・表面粗さ Ra0.01 μm以下		Raだけでは鏡面出ない場合がある
・比誘電率:9.3程度		
・品質係数(Q・f値):60,000以上:±30ppm/K以下		
・比誘電率の温度係数:±30ppm/K以下		
基板回路の高密度実装化		

次に、各章毎に得られた結果を以下に記す。

### 研究成果

#### 第2章

- ・シリカ(球状、非晶質)、マグネシア(0.05 μm)、チタニア(ルチル化率 40wt%、アナターゼ 60%)を用いて、量産用フォルステライト原料粉末の合成・設計を行った。
- ・高密度基板を作製するには、粒子径の小さいMgO原料粉末(0.05 μm)の使用が有効である。
- ・アナターゼ相が多く、ルチル相化率の低い原料の方が反応性が高く 1200 以下の低温での焼成に向いている。
- ・チタニア添加ウイルマイト( $Zn_2SiO_4-x \text{ wt\% } TiO_2$ )において、 $x = 9$  の組成の試料を大気中 1250 、2時間の焼成することにより比誘電率の温度係数  $TC$  がゼロの基板が得られる。

- ・不純物の混入を避けるための製造技術が確立され、量産化試験により良質な造粒粉が得られた。

- ・専用機器や隔離設備を使用せず、一般的な調合工程に則り量産化試験を実施した。以上の条件差を踏まえた上で、不純物によるコンタミネーションの防止、脱水条件、焼成条件の最適化に成功した。

### 第3章

- ・HQF材料及びHQW材料の成形体の評価を行ったところ、実体顕微鏡および電子顕微鏡による観察では、ラミネーション及び貫入等の成形欠陥がないことが確認された。ウイلمライト原料粉体の性状及びプレス成形特性は特に良好であり改良の余地はない。

- ・チタン添加 HQF 材料及び HQW 材料の焼成体の焼成品密度は、それぞれ、 $3.2 \text{ g/cm}^3$  及び  $4.1 \text{ g/cm}^3$  以上となり目標値が達成できた。

- ・基板焼成用電気炉において焼成治具等を考慮し、5段積み焼成を行ったが、温度差を10程度に炉内温度の均一化を図ることが出来た。

- ・研磨材 G C # 3 0 0 0 では、加工レートが約  $2 \mu\text{m/min}$  程度であるため、 $0.45\text{mm}$  削るのに4時間弱かかった。加工時間短縮のため研磨材、加工代、荷重、表面粗さ等の条件を見直し、量産対応可能な加工条件を検討する必要がある。

- ・試作されたフォルステライト基板及びウイلمライト基板の機械的強度、熱膨張率、熱伝導率、及び高周波誘電特性等の測定評価を行ない、樹脂基板（例えば ARLON 製セラミックス配合 PTFE (AD1000)）との比較したところ、開発したセラミックス基板は樹脂基板より熱膨張率が低く、熱伝導率が高いことが判明し、実施計画の大目標 が達成された。

- ・高周波誘電特性においてはセラミックス基板は樹脂基板よりも損失が一桁小さく、ゼロ温度特性であるなど圧倒的に優れることが分かった。

### 第4章

低熱膨張率・高熱伝導性等の特徴をもつ基板をミリ波で実用化・事業化を目指した際に、ユーザの立場として基板回路の高密度実装化に必要な条件を検証した。

- ・今回の検討範囲では本基板はミリ波の回路を実現する上で十分な特性が期待でき、実用に近づかせるために結果に基づく要求仕様を提示した。

- ・低熱膨張率・高熱伝導性等の特徴をもつ基板の実用化・事業化を目指し、基板回路の高密度実装化技術を開発した。

### 本研究実施終了時の検討課題

- ・製造の安定化を検証する複数ロットの合成粉末の製造を行う必要があり、更に大きな規模の製造（ $200 \text{ kg}$  以上）焼成の際の温度分布差が合成粉末の電気的特性に与える影響と電子部品としての合成時の検査項目・検査技術の確立を図る。粉末の製造工程、機器使用等による不純物の混入、使用する水の純度と、最後の脱水方法の選択等は、実験室規模と量産規模で、条件が大きく異なることが予想される。

- ・ HQF 材料、HQW 材料ともに基板面内の密度及び比誘電率の大きさバラツキの、充分検討が出来なかったが、次年度以降の課題となる。
- ・ 表面粗さについては、この後ポリシング工程を別途行い最終目標である Ra0.02 $\mu$ m を達成したが、深さ 0.2 $\mu$ m 程度のキズがあり、フォトリソグラフィーなどによる薄膜プロセスにおいて致命的欠陥となることが予想された。薄膜電極形成プロセスに耐える鏡面を実現するには、Rz、Ry に関する規格を設ける等表面粗さの要求仕様を更に厳しくする必要がある。

#### 今後の進め方

開発材料は、幾つかの今後検討が必要な 2、3 の課題が浮上したものの、低熱膨張率・高熱伝導性基板として有効であることが立証された。この基板を用いたデバイスを薄膜プロセス技術により実現するには、

- ・ スルーホールを形成できること
- ・ 0.2mm 程度の薄板が製造可能であること

などがクリアされねばならない。また、今回の開発材料は基本的に比誘電率が温度に依らず一定である（温度係数  $TC = 0$  ppm/K）ことを大きな特徴としており（アルミナ基板では温度係数  $TC : = -110$ ppm/K など）、高コストの原因となる表面弾性波（SAW）素子や誘電体共振器を搭載することなく、薄膜電極のパターニングのみで、同じ機能を果たすことができる。今後、このような特徴を生かしたデバイス化や製品化を目指すことが重要である。

## 引用文献

- [1] Minato Ando, Hitoshi Ohsato, Isao Kagomiya, and Tsutomu Tsunooka, "Quality factor of forsterite for Ultrahigh Frequency Dielectrics Depending on Synthesis Process", J. J. Applied Physics, 47(9), 7729-7731(2008).
- [2] T.Tunooka, H.Sugiyama, K.Kakimoto, H.Ohsato and H.Ogawa, "Zero Temperature Coefficient  $\tau_f$  and Sinterability of Forsterite Ceramics by Rutile Addition", 科学研究費補助金研究成果報告書, 珪酸塩系のマイクロ波・ミリ波誘電体セラミックスの研究, p.p.166-169, May.2008.
- [3] ARON 社カタログ, AD1000, Rn.504-08.11 版
- [4] 小柳, 三浦, 中山, 東田, 石川, 松井, "高周波でのアルミナ基板の比誘電率及び誘電正接測定方法", 技術解説書, 日本電子材料工業会, pp.5-8, January.1998.
- [5] 小林, 川端, 小林, "TM<sub>0m0</sub> モード円筒空洞共振器を用いた丸棒試料の複素誘電率周波数依存性測定", 信学技報, MW2006-18, pp.37-40, May.2006.
- [6] H.kawabata, T.Kobayashi, Y.Kobayashi, and Z.Ma, "Measurement Accuracy of a TM<sub>0m0</sub> Mode Cavity Method To Measure Complex Permittivity of Rod Samples", Proc.2006 Asia-Pacific Microwave Conf., FR1C-5, pp.1465-1468, Dec.2006.
- [7] 信越石英株式会社, "石英硝子の技術ガイド-1", October.2005.
- [8] 本城和彦, "超高周波エレクトロニクス入門", 日刊工業新聞社, p.78, 1999
- [9] 小林禧夫, "銅張り誘電体積層基板のマイクロ波評価技術", 電子情報通信学会論文誌 C Vol.J89-C No.5 pp.210-216
- [10] ARIB, "特定小電力無線局ミリ波レーダー用無線設備 (STD-T48 2.1 版)", p.3, 2005.11.30
- [11] ARIB, "特定小電力無線局ミリ波画像伝送用無線設備 (STD-T69 2.1 版)", p.21, 2005.11.30
- [12] ARIB, "特定小電力無線局ミリ波データ伝送用無線設備 (超高速無線 LAN システム) (STD-T74 1.1 版)", p.4, 2005.11.30

## 付録 A1 専門用語・略語の解説

プリクラッシュセーフティシステム(PCS):

レーダで緊急性を予測し、車の安全性を図るシステムである。ミリ波レーダで進路上にある車両や障害物を検知して、衝突の可能性を事前に判断し、警告、ブレーキ、シートベルトを作動させ、安全を図る。

無線 PAN (Personal Area Network) :

数十センチから数メートルといった狭い範囲内の機器を相互に接続するためのネットワーク。無線 PAN ではこれまでケーブルで接続していた機器同士を、ブルートゥースなどで相互接続する。ハイビジョン映像のような大容量の情報を扱うことは、これまでの無線通信手段では通信速度が追いつかなかった。身近な距離で利用できるデータ通信手段としてミリ波は新たな PAN を提供してくれる。60GHz 帯のミリ波帯は免許不要で利用できる。

マイクロ波： 波長の区分上はセンチメートル波で 3GHz ~ 30GHz の周波数の電波。

ミリ波： 波長の区分上のミリメートル波で 30GHz ~ 300GHz の周波数の電波であるが、ここでは通信用の 60GHz 帯と自動車レーダー用の 76GHz 帯を指す。

準ミリ波： 10GHz ~ 30GHz の周波数の電波。

高周波： 一般に分布定数回路で機能回路を設計する周波数。ここではマイクロ波とミリ波を併せて高周波と称する。

フォルステライト： 組成  $Mg_2SiO_4$

ウイلمライト： 組成  $Zn_2SiO_4$

シリカ：  $SiO_2$  (石英)

マグネシア：  $MgO$

酸化亜鉛：  $ZnO$

チタニア：  $TiO_2$  (ルチル、アナターゼ等の結晶相が存在する)

PTFE：ポリテトラフルオロエチレン (Polytetrafluoroethylene, テフロン) とは、テトラフルオロエチレンの重合体で、フッ素原子と炭素原子のみから成るフッ化炭素樹脂である。テフロン (Teflon) は、デュポン社の商品名。

HQF： フォルステライトへチタニアを配合した基板。本プロジェクト内で HFF-S0-T20 と称する基板を評価した結果を第 4 章で記す。

HQW： ウイلمライトへチタニアを配合した基板。本プロジェクト内で HWI-F-P9 と称する基板を評価した結果を第 4 章で記す。

仮焼： 物質を空气中で強熱して、揮発性成分を除き灰状の物質とすること (広辞苑)。

比誘電率  $\epsilon_r$  (または  $\epsilon'$ ):

物質の分極のしやすさを表す材料定数。電磁波の波長短縮効果がある。マイクロ波領域では、機器の小型化のために高誘電率の材料が求められる。ミリ波帯では、波長が短いので、値が小さい方がデバイスの寸法が小さすぎることがなく工作精度の点で有利となる。低誘電率であれば、遅延時間が小さいので高速伝送が可能となる。

品質係数  $Q$ : 材料の誘電正接  $\tan \delta$  の逆数。

$Qf$  値:

品質係数  $Q$  と周波数  $f$  (GHz) との積。一般的にセラミックス材料では  $Qf$  値=一定の関係が成り立つので材料の良否を判別できる。 $Qf$  一定則から別の周波数の  $\tan \delta$  ( $=1/Q$ ) が求まる。

$TCF$ : 共振周波数の温度係数 (Temperature Coefficient of Resonant Frequency)

$TC$ :

誘電率の温度係数 (Temperature Coefficient of Dielectric Constant:  $TC$ )。共振器の場合は  $TCf$ 、コンデンサの場合は  $TC$  を用いる場合が多い。温度係数ゼロの材料は、共振周波数や比誘電率の温度に依存しないので、広範囲の温度域で安定に動作する回路素子に使用される。

ストリップライン:

表裏面に導体箔を形成した板状誘電体基板の内部に線状の導体箔を形成した構造を持ち電磁波を伝達する伝送路。内部導体から外部導体に向かう方向の電界と、内部導体周囲を囲む方向の磁界によって電磁波を伝送する。伝送路から漏洩する電磁波が少ないという利点を有する反面、表面、裏面および内部の3層に導体箔パターンを形成する必要があり製造工程が複雑になることから、一般にはこれを半分にした構造に相当するマイクロストリップラインが多用される。

CPW: CoPlanar Waveguide の略。中心導体と左右接地導体が基板の片面に配された共平面構造導波路。

MSL: MicroStrip transmission Line の略。二つの導体から構成され、一つは基板の片面に適当な幅・厚みを有し、他の一つは基板の他面全体に形成された接地導体として使用される2平面構造導波路。

RES: 共振子 resonator の略。ある周波数の電気振動により電氣的に共振する電気回路素子。

SIM: シミュレーション simulation の略。

Sパラメタ: Scattering parameter の略。被測定回路の高周波信号に対する反射係数と通過係数を複素周波数に対して表示した値。

VNA: Vector Network Analyzer の略。Sパラメタを測定する機器。

樹脂基板: ここではミリ波で利用されている PTFE 基板を指す。例えば ARLON 社の AD1000 を想定している。

## 付録 A2 第 1 回及び第 2 回研究開発委員会議事録

### 第 1 回

1 . 日時 2009 年 11 月 16 日 ( 月 ) 13 時 30 分 - 16 時 30 分

2 . 場所 財団法人ファインセラミックスセンター 2 階 技術相談室

3 . 出席者 ( 敬称略 )

#### 1 ) アドバイザ

小林禧夫 ( サムテック ( 有 ) ) 、 大林和重 ( 日本特殊陶業株式会社 ) 、 大川隆 ( 大研化学工業株式会社 ) 、 藤本正弘 ( 平井精密工業株式会社 )

#### 2 ) 分担研究機関

安福良豊 ( 株式会社ヤスフクセラミックス ) 、 鈴木貞彦 ( 丸ス釉薬合資会社 ) 、 島方幸広 ( 太陽誘電株式会社 ) 、 大里斉、角岡勉、鈴木章平 ( 名古屋工業大学 ) 、 光松正人 ( 愛知県産業技術研究所 ( 常滑窯業技術センター ) ) 及び名城大学の代理 )

#### 3 ) 事業管理機関

小川正樹、東田豊、小川光恵、伊岐見大輔 ( 財団法人ファインセラミックスセンター )

#### 4 . 配布資料

資料 1-1 委託業務実施計画書

資料 1-2 プロジェクト概要

資料 1-3 各研究実施者の分担研究内容

資料 1-4 研究開発委員会委員名簿

#### 5 . 議事内容記録

1 ) 財団法人ファインセラミックスセンター業務部常務理事 小川 正樹より挨拶があった。

#### 2 ) 委員長挨拶

事務局東田提案により、研究開発の総括研究代表者である株式会社ヤスフクセラミックスの安福良豊委員長が、以後司会を務めることとなった。

#### 3 ) 委員長挨拶

#### 4 ) 出席者自己紹介

#### 5 ) 委託業務実施計画説明

##### 1 ) 総括研究代表者

株式会社ヤスフクセラミックスの安福委員長より、資料 1-2 を用いて本プロジェクトの概要の説明がなされた。

##### 2 ) 管理事業者

財団法人ファインセラミックスセンターの東田より、資料 1-1 を用いて、本事業の実施計画全体の説明がなされた。

##### 3 ) 各研究分担者

資料 1-3 を用いて、全体計画の中での各研究分担機関の研究実施内容の詳細が報告された。

##### 4 ) 全体討論及び今後の予定

本事業の実施計画の進め方等について、アドバイザを含む出席者で全体的な討議が行われた。以下に主な特記事項を列記する。

- ・現在、日本国内の情勢としては、セラミックメーカーの事業からの撤退が相次いでおり、逆に、韓国（KEC）などのメーカーの動きが活発になっている。今回の事業を成功させ、日本のセラミックスをも活性化してほしいとの励ましと、専門分野である電気特性測定評価技術に関する指導・協力を約束された（サムテック（有）小林禧夫委員）。
- ・日本のセラミックメーカーが韓国他と対抗して生き残る道は、日本の得意とする技術を生かすことである。例えば、焼成条件を2~3 以内に抑えるなど厳しい製造条件の管理を行うなどが考えられる（大研化学工業株式会社大川委員）。
- ・ミリ波領域では、マイクロストリップラインに要求されるエッジ部分のラフネスは2μm以下である（サムテック（有）小林禧夫委員）。
- ・ロット内、ロット間の誘電率のばらつきを管理する必要がある。また試料厚みが薄いので、厚み評価も注意すべきである。表面にポアがあるとストリップラインが切断されるので、バインダの最適化の検討も必要と思われる（日本特殊陶業株式会社大林委員）。
- ・セラミック基板と有機樹脂基板とを比較した場合、性能的には圧倒的にセラミックスが優れているが、コストの点から有機樹脂基板が使用されているのが現状である。しかし、LTCC(Low Temperature Cofired Ceramics)を用いた多層配線技術は、樹脂多層積層技術とコスト的にも十分対抗できる技術である（平井精密工業株式会社藤本委員）。
- ・12月2日（水）に、本研究で購入を予定している摂動法等を含む情報提供が行なわれるとのアナウンスがあり、そのような調査が必要である（サムテック（有）小林禧夫委員）。
- ・購入を予定している機械装置の内、JFCCで購入が予定されている「摂動法による誘電率測定装置」については、見積段階では、関東電子応用開発製の製品を想定していたが、更に、精度の高い装置があるとの情報が得られた（サムテック（有）小林禧夫委員）。
- ・試作する高周波用セラミックス基板の回路設計の側からのニーズについて、午前中の研究打合せ資料1-3-3 基板厚の検討結果を基に太陽誘電から説明された（太陽誘電株式会社島方委員）。

## 第2回

1．日時 2010年2月19日（金） 14時00分 - 17時45分

2．場所 名古屋工業大学22号館2階 プレゼンテーションルーム

3．出席者（敬称略）

### 1) アドバイザ

吉川泰男(株式会社デンソー)、一ノ瀬昇(早稲田大学)、小林禧夫(サムテック(有))、藤本正弘(平井精密工業株式会社)

### 2) オブザーバー

長谷川貴弘(中部経済産業局)

### 3) 分担研究者

安福良豊（株式会社ヤスフクセラミックス）、鈴木貞彦（丸ス釉薬合資会社）、島方幸広（太陽誘電株式会社）、大里斉、角岡勉、鈴木章平、安藤汀（名古屋工業大学）、光松正人（愛知県産業技術研究所（常滑窯業技術センター））

### 4) 事業管理者

東田豊、伊岐見大輔（財団法人ファインセラミックスセンター）

### 4. 配布資料

資料 2-1 第1回委員会議事録

2-2 プロジェクト成果概要（2月19日現在）

2-3 研究開発の進捗状況

2-4 成果報告書様式

### 5. 挨拶

中部経済産業局 製造産業課 課長 岡本正弘氏（代理/課長補佐 長谷川貴弘氏）

### 6. 議事内容

#### 6.1 委員長挨拶

#### 6.2 第1回委員会議事録確認

事務局より、第1回委員会の議事録（資料2-1）が読み上げられました。

#### 6.3 委託業務概要及び進捗状況の説明

資料2-2を用いて、安福委員長より本プロジェクトの概要及び本年度の進捗状況の説明がなされた。

#### 6.4 研究開発進捗状況の説明（各研究分担者）

資料2-3により、各研究分担機関毎の研究開発の進捗状況が報告された。

#### 6.5 全体討議及び決定事項

本事業の研究開発進捗状況及び今後の進め方等について、アドバイザを含む出席者間で全体的な討議が行われた。以下に主な事項を列記する。

・最近のサポイン事業においては、従来以上に市場性があるか、つまり、川下業者（本テーマの場合は、自動車メーカ）が実際に購入する製品を開発できるか（事業化に結びつけることができるかどうか）が問われるようになって来ている（中部経済産業局長谷川氏）。

・プリクラッシュシステムは、将来、全ての車種に装備される見込みであるが、そのためには、システムとしてのユーザー価格が2~3万円ぐらいまで落ちてくる必要がある。現在、デンソーでは、77GHz帯ミリ波レーダの高周波回路基板として、セラミック基板の方が樹脂基板より性能が良いことは分かっているが、低価格化の観点から樹脂基板を採用している（吉川委員）。

・価格が高いセラミック基板の代わりに樹脂基板が選択される場合であっても、樹脂基板に混ぜるフリットやLTCC（低温同時焼成セラミックス）基板等へのセラミックス材料の用途はある（藤本委員）。

- ・現在、パナソニックでは、ミリ波ワイアレス機器を 55,000 円で販売を行っているが、採算がとれるとは到底思えない。将来の需要を見込んだ多分に政策的な色彩が強い価格設定ではないかと思われる（小林委員）。
- ・ミリ波帯では、電極形状の僅かな変更により特性が大きく変化することがあり、その特性が基板材料の物理的特性によるのか、電極構造によるのかの判定が難しい。特に、CPW（コプレーナウェーブガイド）デバイスでは、放射が大きくなることがあり、60GHz バンドパスフィルタ（BPF）は設計通りに作ることは至難の業である。試作された BPF の挿入損失は予想より大きく、損失は、基板の  $\tan$  よりも電極による損失の方が効いているだろう。基板としての特性評価を行なうのであれば、マイクロ波帯でデバイスを作製して、電気特性を測定評価する方法が考えられる（小林委員）。
- ・電極の影響を避けるには、電極を形成しないレンズ等を作製して、樹脂製で作製したものと特性を比較する方法もある（小林委員）。
- ・薄いチタン薄膜層は基板と電極との密着性を高める目的で設けられている（島方委員）。
- ・基板厚みが 1mm の場合には、ミリ波帯で多数の高次モードが励振されるので、0.254mm 等の標準的な厚みにするのが望ましいとの指摘があった（小林委員）。当初は、0.254mm の予定であったが、ハンドリング及び高周波・物理的特性評価の利便性を考慮して今年度は敢えて 1mm 厚を採用した（島方委員）。
- ・ウイラマイトの表面は少し黄色の着色が見られかつ光沢があり、ガラス相が出来ている可能性がある。また、XRD データのピーク強度比の解析から、焼結体は結晶相自体が少し配向している形跡があり、高周波特性・物理的特性等にどのような影響があるのかチェックする必要がある（大里委員、一ノ瀬委員）。
- ・セラミック基板との比較用として購入した樹脂基板 AR-1000 は、主として試作実験用に用いられるもので、試作が終わればアルミナ等のセラミックス基板に置き換えられる場合が多く、材料特性のばらつきはやや大きいとのことであった（小林委員）。
- ・現在、酸化亜鉛（ZnO）は試薬としてしか入手できず、高純度の比較的安価な原料粉末を大量に仕入れることが難しいという問題点がある（鈴木委員）。