

平成15年度 研究開発成果報告書

「ユビキタスワイヤレスコミュニケーションのための
ミリ波メディアコンバータの研究開発」

目 次

1	研究開発課題の背景	3
2	研究開発分野の現状	5
3	研究開発の全体計画	6
3-1	研究開発課題の概要	6
3-2	研究開発目標	9
3-2-1	最終目標	9
3-2-2	中間目標	10
3-3	研究開発の年度別計画	12
3-4	研究開発体制	17
4	研究開発の概要（平成15年度まで）	20
4-1	研究開発実施計画	20
4-1-1	研究開発の計画内容	20
4-1-2	研究開発課題実施計画	27
4-2	研究開発の実施内容	28
5	研究開発実施状況（平成15年度）	29
5-1	ミリ波メディアコンバータの研究開発	29
5-1-1	負誘電率温度特性	29
5-1-2	試作した発振器の温度特性	31
5-1-3	最終目標達成のための方針	32
5-1-4	まとめと今後の方針	32
5-2	低コスト発振器用誘電体共振器基板材料の研究開発	33
5-2-1	材料組成の最適化	33
5-2-2	製造プロセスの最適化	33
5-2-3	材料の比誘電率のばらつき	35
5-2-4	焼成温度の決定	36
5-2-5	まとめと今後の方針	38
5-3	電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの研究開発	39
5-3-1	課題の設定	39
5-3-2	試作品の製造	39
5-3-3	試作品の評価	40
5-3-4	測定結果	42
5-3-5	まとめと今後の方針	44
5-4	ミリ波MMICとポスト壁導波路平面アンテナの低損失接続 に関する研究開発	45
5-4-1	ポスト壁導波路と平面アンテナ	45

5-4-2	接続方法	46
5-4-3	反射特性のコンピュータ解析	48
5-4-4	反射特性の実測	50
5-4-5	製造上の問題点	51
5-4-5	まとめと今後の方針	53
5-5	総括	54
	参考文献	56

(添付資料)

1 研究発表、講演、文献等一覧

1 研究開発課題の背景

(1) ユビキタス社会のコミュニケーション環境と本研究開発課題の位置づけ

ユビキタス社会の到来が近い。ユビキタス社会では、日常生活に必要なあらゆる情報を検出、信号処理、制御、伝達するために、身の回りのすべての物に制御用小型コンピュータチップを埋め込み、それらのチップがお互いに連携動作可能なネットワークを構築する必要がある。このネットワークはケーブル（有線）とワイヤレス（無線）両方の手段で構成されるが、性能やコストが同程度なら移動の自由度を考えるとワイヤレス（無線）の方が便利である。

図 1-1 に、これまで開発された有線と無線の両システムを示す。簡単な制御信号を伝達するだけなら、有線では“電力線”が、無線では 2.4 GHz 帯を使った“Bluetooth”システムが使われる。高速の数 M~100 Mbps レベルの信号なら、“10 ベース T”や“100 ベース T”有線システムや、5 GHz 帯もしくは 25 GHz 帯の無線システムが使われる。

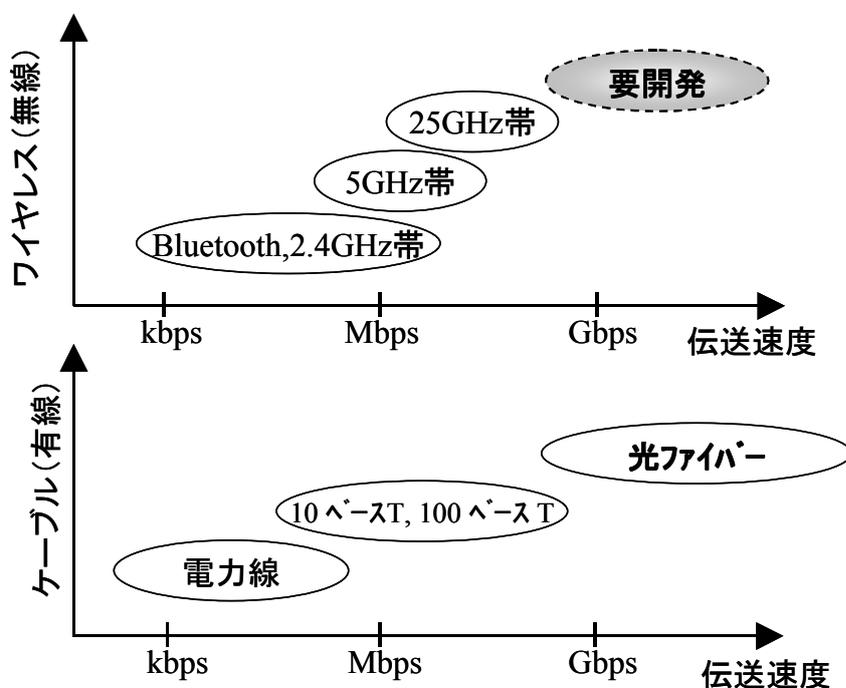


図 1-1. これまで開発されたケーブル(有線)及びワイヤレス(無線)の通信システムと伝送速度。ユビキタス社会では既存のあらゆるコミュニケーション手段が駆使される。

ユビキタス社会では複数の動画の情報を同時にやりとりすることが必要になる。動画情報を扱うためには、超高速の数 Gbps レベルの“光ファイバーシステム”が必要になるが、有線のため移動は不可能であり、既存の生活空間に設置しようとする自由度は著しく制限される。光ファイバーシステムに匹敵する安価な無線システムが必要であるが、図 1-1 に“要開発”と記したようにこのようなシステムはまだない。

本提案の“ミリ波メディアコンバータ”は、数 Gbps までの情報をワイヤレス(無線)で安価に伝達することを可能にするための研究開発課題である。

(2) ユビキタス社会における高速ワイヤレス(無線)伝送のイメージ

ユビキタスコミュニケーションの環境において、例えば家庭電化製品の中で、冷蔵庫、電気ポット、風呂の自動湯沸かし器などは数 kbps の制御信号ですむが、図 1-2 に示したようにテレビ、DVD、パソコン、デジタル・ビデオレコーダ、ゲーム機など動画映像や大容量ファイルを伝送する場合には数 Gbps の伝送速度が必要となる。例えば、2 時間の HDTV 映像を DVD に録画転送する場合、100 Mbps の伝送速度で 40 分かかかるが、2.5 Gbps ではわずか 1 分 30 秒ですむ。ダウンロードに長時間かかる大容量ファイルには誰もうんざりしている。パソコンや DVD などの電気製品の動作に、人間の行動が制限されたり制御されたりせず、人間の生活がシームレスにスムーズになるためには、人間を取り巻くすべてのコンピュータチップが時間を要せずにコミュニケーションすることが必須である。これが図 1-1 のワイヤレス(無線)の領域で数 Gbps の伝送速度が必要とされる理由である。

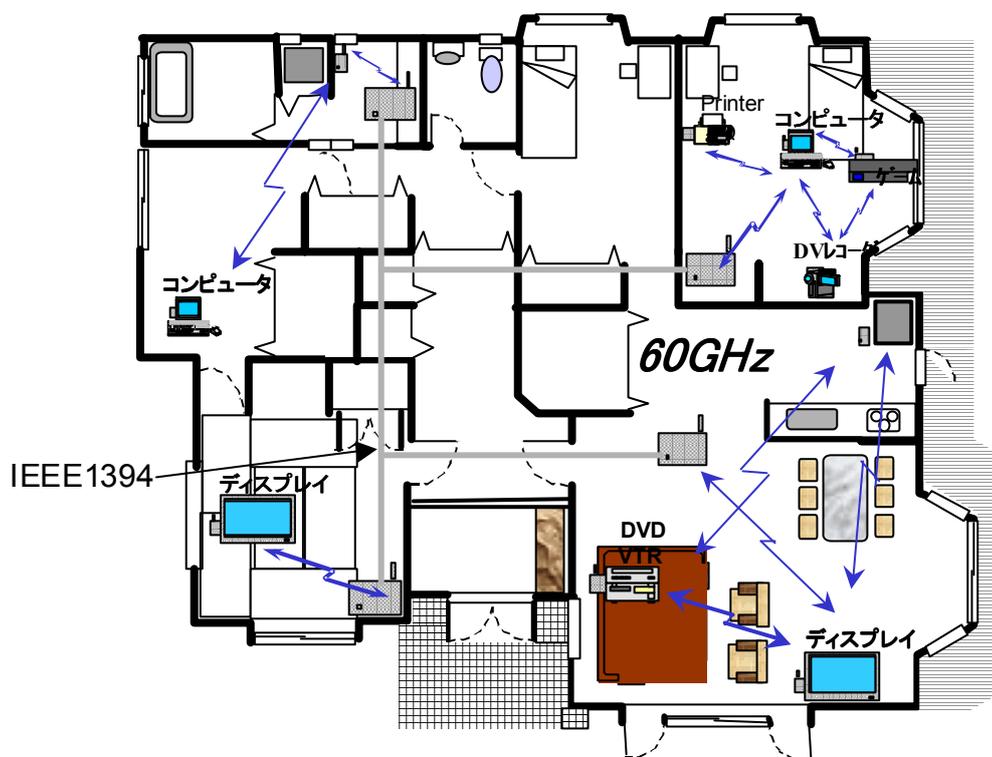


図 1-2. 数 Gbps の伝送速度を必要とするユビキタス
コミュニケーション環境のイメージ

(3) ユビキタス ワイヤレス コミュニケーションにはミリ波が最適

上で述べたように、簡単な制御信号を伝送する場合は低速のワイヤレスシステムで足りるが、動画映像や大容量ファイルを伝送する場合には高速伝送を必要とする。しかもユビキタス社会のように、多数のコンピュータチップが自由に通信し合う環境では、ミリ波のような未開発電波領域で 1 チャンネルの周波数帯域が極めて広く、しかも携帯電話と同様に無免許で電波を使うことができる周波数帯が有利である。特に 60 GHz を中心とした周波

数帯は酸素の吸収による減衰が極めて大きく遠距離には電波が届かない。この性質を逆手にとって、比較的近距离で複数の通信が可能とすることができる。多数のコンピュータチップが比較的近距离で通信し合うという意味で、まさにユビキタス ワイヤレス コミュニケーションには最適な周波数帯であると言えよう。しかも 1 チャネル 2.5 GHz が規格で割り当てられており簡単な変調方式でも数 Gbps の伝送が容易である。本研究はこのような近距离大容量多局通信システムに最適なミリ波メディアコンバータを開発するものである。

(4) ミリ波メディアコンバータの価格イメージ

従来ミリ波の有用性は十分に議論され周知のこととなっているが、マイクロ波帯に比べて通信システムの構成に精度を要求され、高価なものにならざるを得なかった。1970 年代初頭、日本を縦断する基本通信回線としてミリ波システムが当時の電信電話公社を中心に開発されその有用性が確認されたが、光ファイバーシステムに比べて極めて高価であったため実用にはならなかった。近年半導体チップの技術の向上とともに ミリ波で動作するモノリシック IC (MMIC) が現実の物になり、この周波数帯が安価に使える可能性が高まっている。本研究は、これらの状況を前提として、①製造工数削減のための発振周波数無調整化技術の開発、②寄生発振低減に効果を発揮する電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの開発及び③MMIC とアンテナとの低損失接続技術を開発して、安価なミリ波メディアコンバータを実現し、大容量ユビキタス ワイヤレス コミュニケーション システムの構築に寄与しようとするものである。

2. 研究開発分野の現状

(1) 国内

2 社が、アンテナ一体型の 60 GHz 帯の RF モジュールを学会発表している⁽¹⁾⁽²⁾。2 社のモジュールに共通していることは

- ① パッケージ、アンテナに LTCC 技術を使っている。LTCC 技術とは Low Temperature Cofired Ceramics の頭文字をとったもので、低温焼成のアルミナセラミックス技術である。この技術では、配線金属に銅を使う事ができ伝送損失を減らすことができる。ただしこの LTCC の技術は海外のメーカーでも開発されており、海外にたいして日本が高い競争力を保持するためには、材料技術から開発する必要がある。
- ② アンテナをパッケージの裏面もしくは一部に形成しているためアンテナ利得 20 dBi 以下の比較的小さなアンテナのみしか使えない。利得を 6 dB 増加させるごとにアンテナ面積は 4 倍になり、システムによっては利得 30 dBi 以上のアンテナを使用することもあり得る。本研究開発で提案するように、ミリ波 MMIC とポスト壁導波路平面アンテナを低損失で接続する構造の方がシステム構成に自由度を与えられる。
- ③ 2 社ともモジュール内部にローカル発振器を置いていない。これはモジュール外部に数 GHz の PLL 発振器を置き、それをモジュール内部で逡倍する方式を採用しているからであるが、逡倍部分にコストがかかる。また、ミリ波システムが普及するためにはシステムエンジニアが簡便にミリ波を使えることが重要であり、そのためにはミリ波メディアコンバータがローカル発振器も内蔵することが極めて重要である。本研究開発では、材料技術から開発してローカル発振器の低コスト化を計ると共にシステムエンジニアの使い勝手の向上を計る。

(2) 国外

UCLAのT. Itoh 教授のグループはMMICチップ上もしくはデバイス近傍基板セラミック上に5dBi以下の簡単なアンテナを備えた送受信機を開発し学会発表している⁽³⁾。アンテナの形はパッチ型や基板上にプリントされた八木アンテナである。彼らは、このようなアンテナ一体型デバイスを“アクティブアンテナ”と称しており、アンテナの一形態と捉えているようである。ただし、最終的には同じ分野のアプリケーションになるので基本的には本研究開発で提案するミリ波メディアコンバータのコンペティターといえる。

彼らの研究開発の水準は学会的には高いといえるが、実用的にはデバイスの信頼性を確保するためのパッケージやデバイスの実装をどうするかについては全く触れられていない。もちろん大学の研究なのでそこまでは必要ないと考えられるが、実際にはパッケージングするとアンテナ特性は変わるので、本研究開発で提案するようにパッケージする材料、厚み、アンテナからの位置などまで考慮しておく必要がある。

その他、外国のメーカーが本研究開発で提案するミリ波メディアコンバータと全く同じ研究開発をしている例はない。

3. 研究開発の全体計画

3-1 研究開発課題の概要

(1) ミリ波メディアコンバータの完成イメージ

図3-1. にミリ波メディアコンバータの完成イメージを示す。図手前はアンテナを内蔵したミリ波メディアコンバータ。発振器、ミキサ、アンプ等のMMICやプレーナ型フィルタなどから構成されており、送信機は60GHz帯で10mWの出力を可能とする。受信機は同周波数帯で雑音指数10dB以下の特性を持たせる。アンテナは利得5dBiのパッチアンテナである。利得5dBiのアンテナは放射角が約60°と一つの部屋にサービスするには適している。電波透過窓を備えたリッド(蓋)は、炭素を含有したアルミナセラミックを材料とするミリ波吸収材で構成されている。パッケージサイズは30×20×6mm³を仮定するが、これよりさらに小型化も検討に入れる。

図3-1奥は、利得25dBiのポスト壁導波路平面アンテナを備えたミリ波メディアコンバータを示す。アンテナのサイズは約50×50×1.2mm³である。アンテナの表面積はアンテナの利得で決まるのでシステムのデザインを考慮してアンテナを選択することも重要である。25dBiアンテナを備えたミリ波メディアコンバータを2台対向させた場合には30mの伝送も可能である。もちろんアンテナは5dBi、25dBiのみならず、15～35dBiも用意してシステム構成に自由度をもたせる。

図3-2にミリ波メディアコンバータの断面構造イメージを示した。(a)は図3手前のアンテナを内蔵したミリ波メディアコンバータを、(b)は図3奥のMMICとポスト壁導波路平面アンテナ一体型ミリ波メディアコンバータをそれぞれ示す。(a)は上で説明した通りであるが、(b)はリッドに電波透過窓はなくパッケージ内にアンテナも存在しない。20dBi以上の高利得アンテナはサイズが大きくなる。したがって(b)のようなMMICとアンテナとの一体構造となり、MMICとアンテナとの接続が技術開発のポイントとなる。

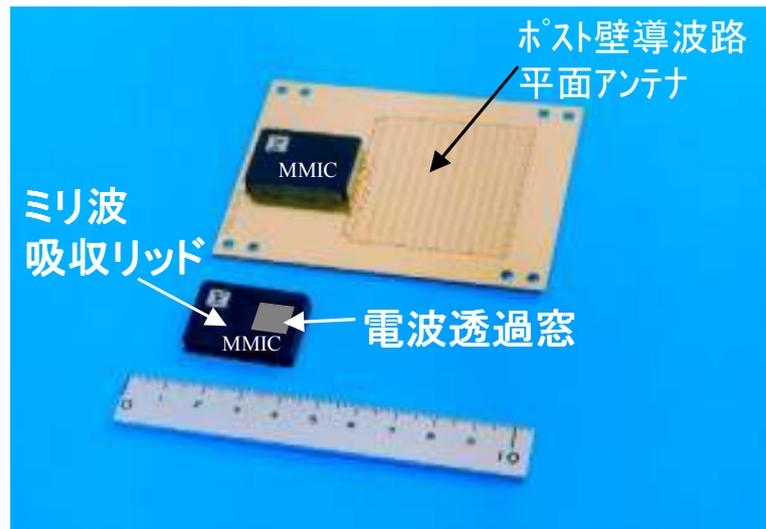


図 3-1. ミリ波メディアコンバータの完成イメージ。手前はアンテナを内蔵したミリ波メディアコンバータ。電波透過窓を備えたリッド（蓋）は、ミリ波吸収材で構成されている。パッケージサイズは $30 \times 20 \times 6 \text{ mm}^3$ 。奥は MMIC と利得 25 dBi のポスト壁導波路平面アンテナと一体化されたミリ波メディアコンバータ。

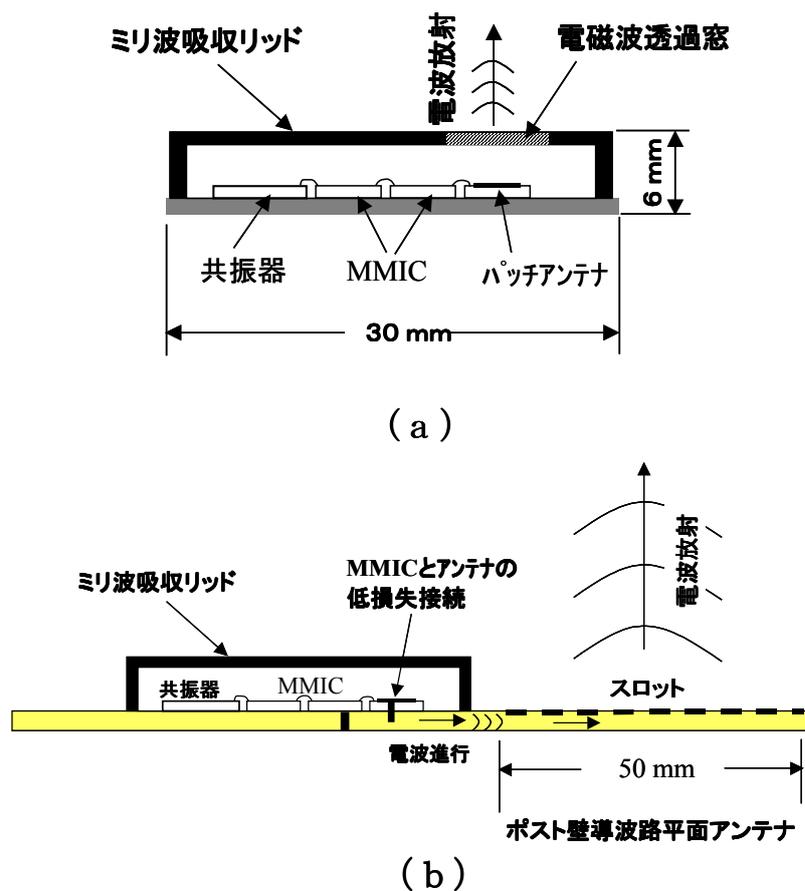


図 3-2 ミリ波メディアコンバータの断面構造イメージ。(a) 図 3. 手前のアンテナを内蔵したミリ波メディアコンバータ。(b) 図 3. 奥の MMIC とポスト壁導波路平面アンテナ一体型ミリ波メディアコンバータ。

(2) ミリ波メディアコンバータの目標価格

ミリ波メディアコンバータは周波数の安定性や広帯域性などミリ波通信で要求される特性を満足するのはもちろんのこと、さらに重要なのは低価格化である。1970年代の初頭に開発されたミリ波通信システム(中継局)を図3-3の左端に示す。全体のサイズは1m x 0.5mで、価格はミリ波部のみで2,000万円レベルであった。もちろんこれは試作品の価格であり、量産されたとしても200万円程度であったであろう。幹事社の富士通カンタムデバイス(株)では、2003年現在、図3-3下段右に示すようなメタルパッケージ60GHz帯モジュールを開発し、独立行政法人通信総合研究所様に数十台供給し、試作実験にお使い頂いているが、価格は試作品価格で50万円程度である^(註1)。量産価格としても10万円を切るのは容易ではないと思われる。このような価格ではとてもユビキタス コミュニケーション用としては使えない。

図3-3右上にミリ波メディアコンバータの完成時期と目標価格を示した。完成時期は本研究開発の終了する2006年3月とし目標価格は量産時で2,000円とする^(註2)。2,000円という価格は、1970年代初頭のシステム(試作)の実に1/10000であり、現在のメタルパッケージモジュール価格50万円の1/250となる。このような低価格化では、従来の技術は全く使えず、新たな技術開発が必要である。

(註1)メタルの切削技術などを使っているためコスト高になっている。

(註2)セラミックスやプラスチックの成形技術を使って実装を想定。

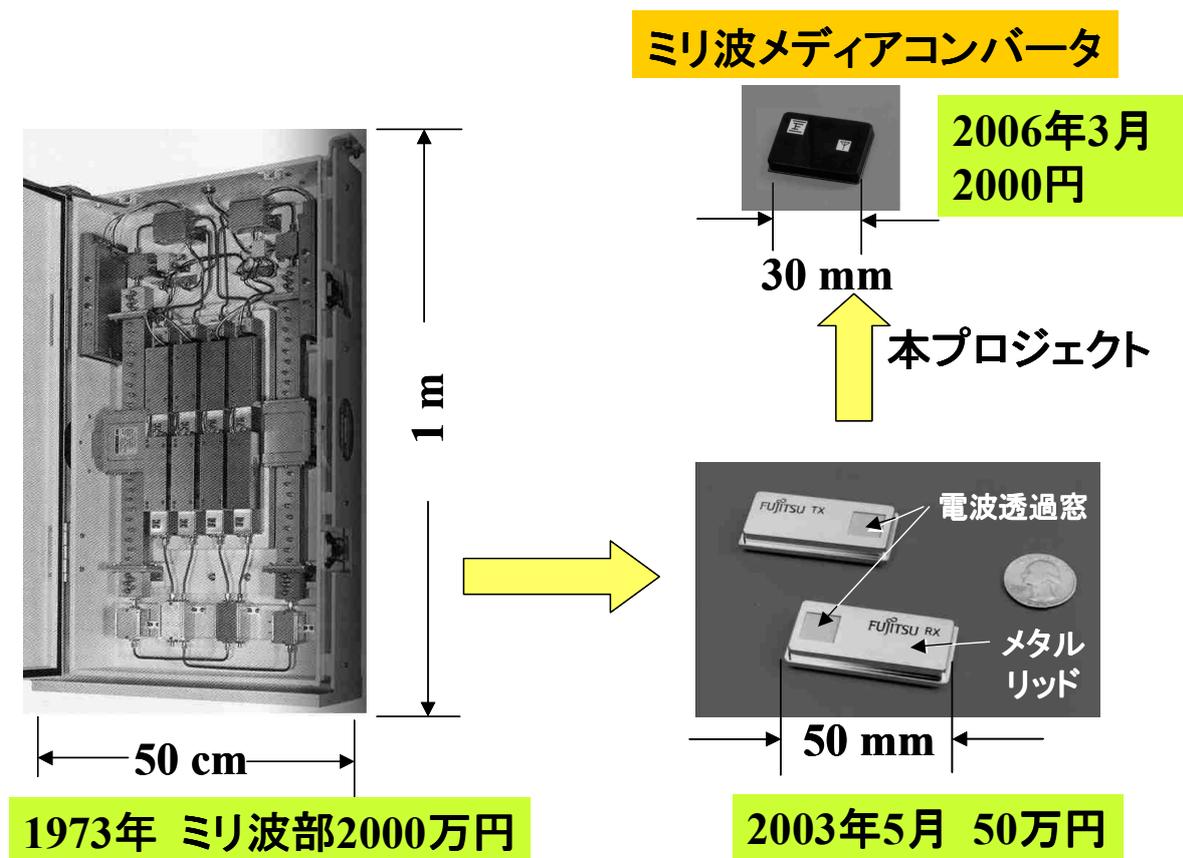


図3-3 ミリ波メディアコンバータの価格イメージ

3-2 研究開発目標

3-2-1 最終目標(平成18年3月末)

富士通カンタムデバイス(株) テーマ: ユビキタス ワイヤレス コミュニケーションのためのミリ波メディアコンバータの研究開発

本研究開発で目標とするミリ波メディアコンバータの電氣的仕様と外形サイズを表3-1に示した。2000年8月に制定された60GHzに関する電波法規(Regulation)((ARIB STD-T69 1.1版)を満足することを基本とする。伝送可能周波数帯域は1チャンネル分の2.5GHzとした。さらに、以下の目標を達成する。

- (1) 発振周波数の温度特性 0 ± 5 ppm/°Cが実現している。
- (2) 電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドが完成している(60GHzにおいて透過損失0.5dB以下、ミリ波吸収体の減衰値20dB以上)。
- (3) MMICとポスト壁導波路平面アンテナの低損失接続が完成している(60GHzにおいて損失1dB以下、帯域2.5GHz以上)。

ミリ波メディアコンバータ(送信機)

■ 電氣的特性

項目	記号	目標値	単位
RF周波数範囲	f_{RF}	59.01-61.51	GHz
IF周波数範囲	Δf_{IF}	3000-5500	GHz
IF入力電力	$P_{i_{IF}}$	-10	dBm
RF出力電力	P_o	10	dBm
動作電流	I_D	350	mA
周波数安定性	-	± 500	ppm

■ 外形サイズ

項目	記号	目標値	単位
MMICパッケージサイズ	-	30 x 20 x 6	mm ³

ミリ波メディアコンバータ(受信機)

■ 電氣的特性

項目	記号	目標値	単位
RF周波数範囲	f_{RF}	59.01-61.51	GHz
IF周波数範囲	Δf_{IF}	3000-5500	GHz
変換利得	G_c	20	dB
雑音指数	F	10.0	dB
動作電流	I_D	350	mA
周波数安定性	-	± 500	ppm
アンテナ利得	G	25	dB

■ 外形サイズ

項目	記号	目標値	単位
MMICパッケージサイズ	-	30 x 20 x 6	mm ³
アンテナサイズ	-	50 x 50 x 1.2	mm ³

表3-1 ミリ波メディアコンバータの電氣的仕様と外形サイズ(目標)

ニッコー(株) サブテーマ:[ア]低コスト発振器用誘電体共振器基板材料の研究開発

- (1) 比誘電率温度係数がセンター値で $-25\sim-100$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$ の範囲に自由に設計できる材料形成技術の確立。
- (2) 材料の比誘電率のばらつきが σ で0.02を達成。
- (3) 材料の比誘電率温度係数のばらつきが σ で2 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ を達成

(株)ウイセラ サブテーマ:[イ]電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの研究開発

- (1) 60 GHzにおける減衰量20 dB以上の電波吸収セラミックスと0.5 dB以下の電波透過セラミックスとを組み合わせ「電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドを開発」する。
- (2) 耐熱性600 $^{\circ}\text{C}$: 600 $^{\circ}\text{C}$ 以下でいかなるガスの発生も無いこと。
- (3) 量産が可能で製造コストは数十円/個を目標とする。

東京工業大学 サブテーマ:[ウ]ミリ波MMICとポスト壁導波路平面アンテナの低損失接続に関する研究開発

MMIC平面線路とポスト壁導波路を同軸線路構造を介して直接接続する。目標、60 GHzで比帯域4%以上、反射-15 dB以下、挿入損失0.5 dB以下。

3-2-2 中間目標(平成17年1月末)

富士通カンタムデバイス(株) テーマ: ユビキタス ワイヤレス コミュニケーションのためのミリ波メディアコンバータの研究開発

以下の性能を有する一次試作のミリ波メディアコンバータが完成していること。

- (1) 位相ノイズ -92 dBc/Hz (100 kHz off)以下
- (2) 発振周波数の温度係数 -20 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 以下
- (3) 電波透過窓の可能性の確認(電波透過損失0.5 dB以下、ミリ波吸収体の電波減衰値13 dB以上)
- (4) MMICとポスト壁導波路平面アンテナの接続の実現(接続損失1dB以下)。

ニッコー(株) サブテーマ:[ア]低コスト発振器用誘電体共振器基板材料の研究開発

- (1) 比誘電率温度係数 -25 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 材料ができていること。
- (2) 材料の比誘電率のばらつきを起こす因子を明らかにし、個々の因子の変動を小さくする手法が体系化できていること。具体的には比誘電率のばらつきが σ で0.15比誘電率の温度係数のばらつきが σ で3 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ を達成。

(株)ウイセラ サブテーマ：[イ] 電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの研究開発

- (1) 高炭素濃度アルミナセラミックス電波吸収体形成技術が確立している。(60 GHz における減衰量 13dB 以上)
- (2) 低損失アルミナセラミックス電波透過窓材と電波吸収体との接合技術が確立している。(電波透過窓特性 60 GHz における損失が 0.5 dB 以下)

東京工業大学 サブテーマ：[ウ] ミリ波 MMIC とポスト壁導波路平面アンテナの低損失接続に関する研究開発

ミリ波 MMIC 平面線路整合部とポスト壁導波路給電部のそれぞれに同軸線路を付加した構造で個別に検討を進める。目標は、それぞれの構造で、60 GHz 比帯域 4% で反射が -15 dB 以下、挿入損失 1.0 dB 以下。現状のポスト壁位置精度 50 μ m 以内、エッチング幅精度 20 μ m 以内の誤差でも上記特性を満足する新規な回路構造を提案し実現する。試作レベルで不良率を 1 % 以下に抑える。

3-3 研究開発の年度別計画

(金額は非公表)

研究開発項目	15年度	16年度	17年度	年度	年度	計	備考
[研究開発課題] ユビキタス ワイヤレス コミュニケーション のためのミリ波メディアコンバータの開発		中間評価					富士通カンタムデバイス(株)
(サブテーマ) [ア] 低コスト発振器用誘電体共振器基板材料 の研究開発							(再委託先)ニッコー(株)
(サブテーマ) [イ] 電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの 研究開発 (サブテーマ)							(再委託先)(株)ウィセラ
(サブテーマ) [ウ] ミリ波MMICとポスト壁導波路アンテナの 低損失接続に関する研究開発							(再委託先)東京工業大学
間接経費額(税込み)							
合計							

- 注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。
 2 備考欄に再委託先機関名を記載。
 3 年度の欄は研究開発機関の当初年度から記載。前年度(14年度)までは、合計が当該年度の契約額の実績値となるよう記載。

(参考)

富士通カンタムデバイス(株) :

(金額は非公表)

研究開発項目	15年度	16年度	17年度	年度	年度	計	備考
1. ミリ波メディアコンバーター一次試作 開発した誘電体材料で共振器を試作し発振特性を確認する。位相ノイズ-100 dBc/Hz (at100 kHz Off)	→	→					
・発振周波数温度係数-20 ppm/°Cを実現	→	→					
・電波透過窓付きミリ波吸収リッドの可能性の確認 (電波透過窓透過損失 0.5 dB 以下、ミリ波吸収体の電波吸収値 13 dB 以上)	→	→					
・MMIC とポスト壁導波管アンテナの同軸線路による接続を実現 (接続損失 1 dB 以下)	→	→					
2. 最終仕様を満足するミリ波メディアコンバータの実現		→	→				
・ミリ波メディアコンバータに実装時の発振器温度特性 0 ± 5 ppm を実現		→	→				
・電波透過窓付きミリ波吸収リッドの試作 (電波透過窓透過損失 0.5 dB 以下、ミリ波吸収体の電波吸収値 20 dB 以上)		→	→				
・MMIC とポスト壁導波管アンテナの同軸線路による広帯域接続を実現 (帯域 2.5 GHz 以上)		→	→				
合計							

(参考)

ニッコー(株) サブテーマ : [ア] 低コスト発振器用誘電体基板材料の研究開発

() 内は人数

(金額は非公表)

研究開発項目	15年度	16年度	17年度	年度	年度	計	備考
[ア]低コスト発振器用共振器誘電体基板材料の開発		中間評価					
1 比誘電率温度係数-25 ppm/°C材料の開発 ・材料の比誘電率のばらつきをσで0.15達成 ・材料の比誘電率の温度係数のばらつきをσで3 ppm/°Cを達成	→	→					
2. 比誘電率温度係数を-25~-100 ppm/°Cにする材料形成技術の確立 ・材料の比誘電率のばらつきをσで0.02を達成 ・材料の比誘電率の温度係数のばらつきをσで2 ppm/°Cを達成		→	→				
3. 共振器としての信頼性性能の確認 温度範囲-20 °C ~85 °C 湿度 85 %			→				
合計							

注) 消費税は、研究開発項目毎に内税で計上。

(参考)

(株)ウイセラ サブテーマ :[イ] 電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの研究開発 () 内は人数

(金額は非公表)

研究開発項目	15年度	16年度	17年度	年度	年度	計	備考
[イ] 電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの開発		中間評価					
1. 高炭素濃度アルミナセラミックス電波吸収体形成技術の確立 (60 GHz における減衰量 13 dB 以上 15 年度、20 dB 以上 16 年度)	→	→					
2. 低損失アルミナセラミックス電波透過窓と上記電波吸収体との接合技術の確立 (電波透過窓特性 60 GHz における損失 0.5 dB 以下)	→	→					
3. 高炭素濃度アルミナセラミックス電波吸収体の高気密化技術の開発	→	→					
4. 電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの試作			→				
5. ミリ波メディアコンバータ用電波透過窓付ミリ波吸収リッドの試作			→				
6. 吸湿性など信頼性特性の評価			→				
合計							

注) 消費税は、研究開発項目毎に内税で計上。

(参考)

東京工業大学 サブテーマ：[ウ]ミリ波 MMIC とポスト壁導波路平面アンテナの低損失接続に関する研究開発

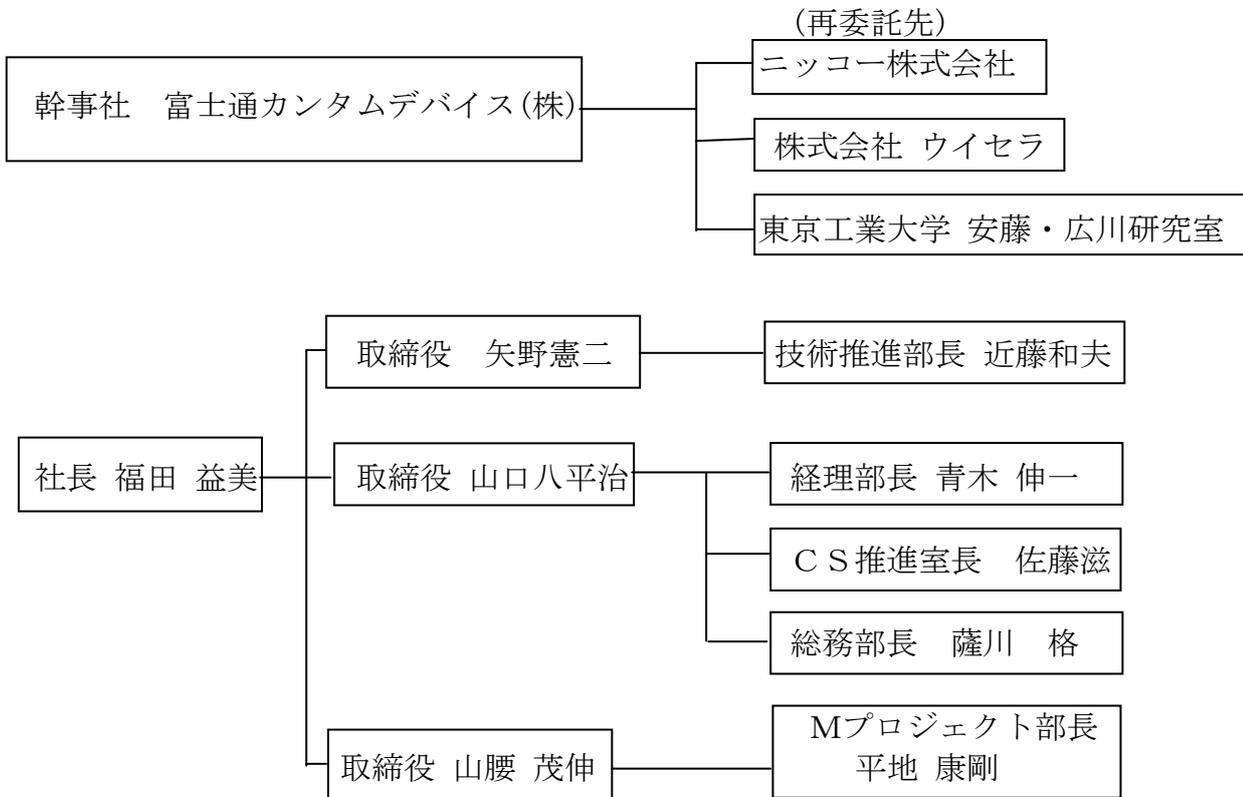
(金額は非公表)

研究開発項目	15年度	16年度	17年度	年度	年度	計	備考
[ウ]ミリ波 MMIC とポスト壁導波路平面アンテナの低損失接続に関する研究開発		中間評価					
1. ミリ波 MMIC 平面線路と疑似同軸線路との低損失接続の実現(60 GHz で比帯域 4 %以上、 $S_{11} < -15$ dB、損失 1 dB 以下)	→	→					
2. ポスト壁導波路給電部同軸化(60GHz において比帯域 4 %以上、 $S_{11} < -15$ dB)		→					
・モーメント法及び HFSS シミュレーションによる最適構造の検討	→						
・比誘電率 $\epsilon_r = 2.2$ 基板による同軸部の試作・評価		→					
3. ミリ波 MMIC とポスト壁導波路の直接接続法			→				
合計							

注) 消費税は、研究開発項目毎に内税で計上。

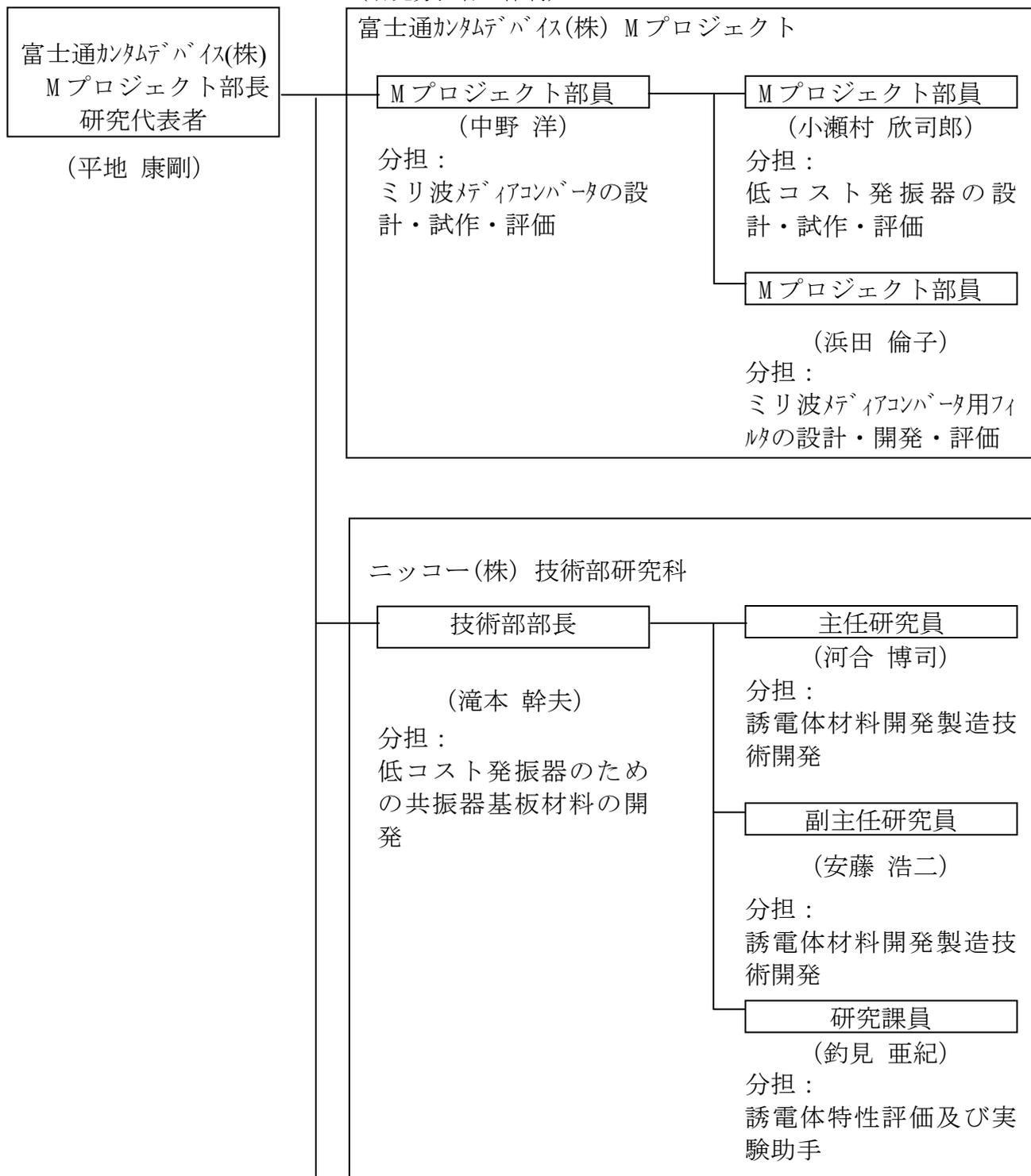
3-4 研究開発体制

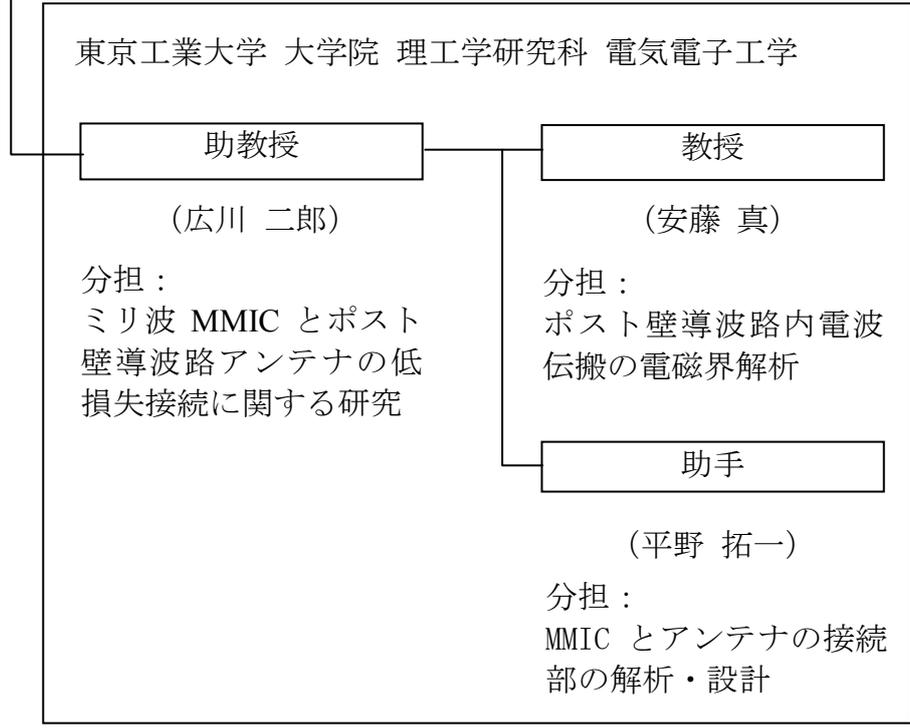
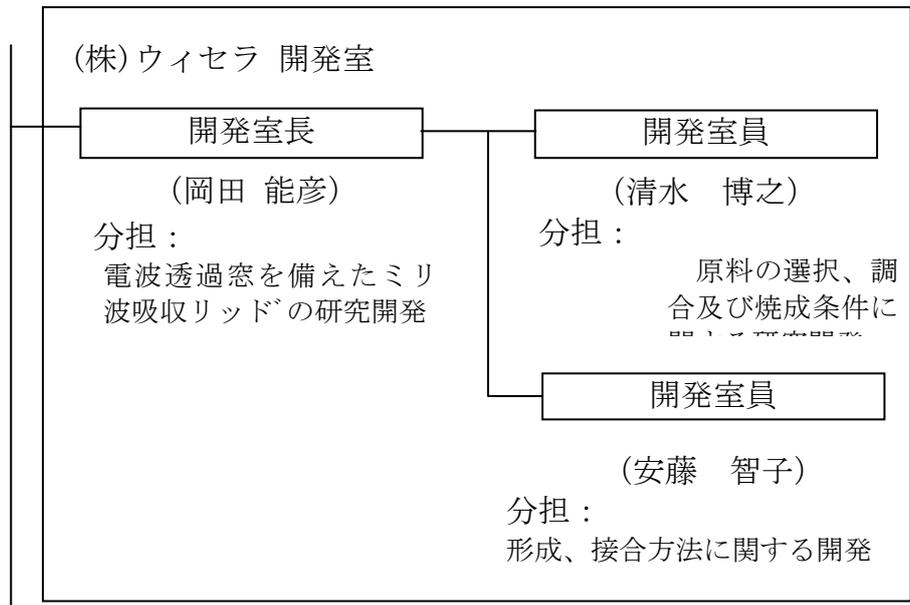
研究開発管理体制



研究開発実施体制

(研究分担者の体制)





4 研究開発の概要

4-1 研究開発実施計画

4-1-1 研究開発の計画内容

(1) ミリ波メディアコンバータ低価格化施策項目とサブテーマとの対応

図 4-1 にミリ波メディアコンバータの送信機ラインナップを示す。左側から中間周波信号(以下 IF 信号もしくは IF と略す)が入力する。ミキサ部はローカル(局発)信号と IF 信号からミリ波信号を形成する。この時フィルタは不要輻射を除去するために重要である。ミキサ-MMIC とフィルタを含めてミキサ部と呼ぼう。ミリ波信号はアンプ MMIC で増幅され、アンテナから放射される。受信機は全くこの逆の信号経路をたどる。

さて、図 4-1 各部の()の中に記された数字は、ミリ波メディアコンバータのコストを 100 とした時の各部のコスト見積もりを示す。①ローカル発振器が一番コストが高く 30%、②ミキサ部に 20%、③接続を含めたアンテナに 20% 及び④パッケージ、リッド(蓋)、組み立て等の実装に 20%、⑤アンプ部は 10% 程度である。本研究開発では、このうち①ローカル発振器、④リッド、③アンテナとの接続部を研究開発の対象とする。

①のローカル発振器の低コスト化のポイントは部材点数の削減と周波数無調整化である。

サブテーマ: [ア] 低コスト発振器用誘電体共振器基板材料の研究開発、に対応している。

④の実装では、リッドの低コスト化に取り組む。

サブテーマ: [イ] 電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの研究開発、に対応している。

③では MMIC とアンテナの接続に必要なコネクタ部品を削減する。

サブテーマ: [ウ] MMIC とポスト壁導波路平面アンテナの低損失接続に関する研究開発、に対応している。

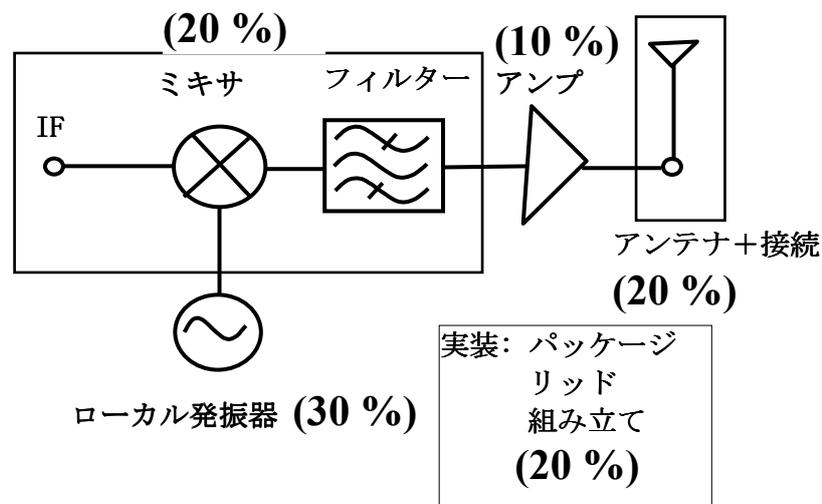


図 4-1 ミリ波メディアコンバータのラインナップ。全体のコストを

100 とした場合の各部のコストを()の中に%で示した。
一番コストがかかるのはローカル発振器である。

(2) サブテーマ: [ア] 低コスト発振器用誘電体共振器基板材料の研究開発

(a) 各種共振器比較

ローカル発振器の低コスト化には①部材点数の削減と②発振周波数の無調整化が必要である。表 4-1. に各種発振器の構成を示した。(a)は誘電体共振器(DR)を用いたもの、(b)は基板上に円形パターン共振器を準半導体プロセスで作る周波数調整用のバラクタダイオードを備えたもの。(c)は円形パターン共振器のみ、(d)は $1/4\lambda$ stub 共振器を用いたものである。それぞれ表に示したような特徴を持っている。

このうち色付きの項目で示したように、発振周波数の無調整化には(c) (d)が優れており、部材点数が少なくコストの点でも(c) (d)が優れていると判断できる。このうち(c)はQが高いため発振周波数を無調整で決められるが、要求される円形パターンの位置やサイズ、マイクロストリップライン(MSL)の精度が準半導体プロセスで対応できるか否かが課題である。また(d)はQが低いためMMICの印加電圧などの可変で発振周波数が決められるというメリットがあるが、材料の物性に負う所が大きい。つまり、共振器材料の誘電率の歩留りが発振周波数に大きく影響する。したがって材料の誘電率管理が最も重要となる。本研究開発では(d)のタイプの発振器を取り上げ、発振器用誘電体共振器基板材料の誘電率の高制御性及び分散 σ の最小化を目指す。

(b) 発振器用誘電体共振器基板材料の誘電率の温度係数

発振器の発振周波数の温度特性は0 ppm/°Cが理想である。本研究開発は、0 ppm/°Cの温度特性をもつ発振器を低コストで実現することを目標とする。低コストとは部材その物が安価という意味と所望発振周波数が無調整で得られることを意味する。

ほとんどの物体は温度が上がると伸びる。一般に使用されているアルミナ誘電体共振器とMMICで発振器を構成すると、発振周波数は温度の上昇と共に必ず下がる。共振器やMMICの長さが伸びるために共振器系が長くなるからである。さらにアルミナの誘電率の温度特性は約100 ppm/°Cで、これも温度の上昇と共に誘電率が大きくなり、したがって発振周波数は温度の上昇と共にさらに下がる。つまり、発振周波数の温度特性を負(-)にする要因のみが存在する。そこで逆に温度の上昇と共に誘電率が下がる材料を開発して、これら基板やMMICの温度の上昇による伸長を原因とする発振周波数の低下をキャンセルさせることが考えられた。これは誘電体共振器発振器(DR)として12GHzのDBSチューナなどで実用化されてきた。しかし、表4-1に示したように、誘電体共振器では部材点数が多いこと、調整が必要なこと、さらにミリ波用としてはサイズに対する精度が厳しく量産に適さないなど本研究開発で開発しようとするミリ波メディアコンバータの発振器用共振器としては適さない。

材料の比誘電率の温度係数が+側に動くか-側に動くかは材料のキュリー点(相転移点)の温度がどこにあるかで決まる。誘電体材料で代表的なペロブスカイト型構造ではキュリー点の使用温度範囲より低い常誘電体はその高いQ値の発現から使用される。本研究開発では、材料に求められる比誘電率の温度係数が-になる材料で複合化させることで最適な温度係数を得ること、また温度係数の中心値を任意に動かすことを可能にすることを追求する。

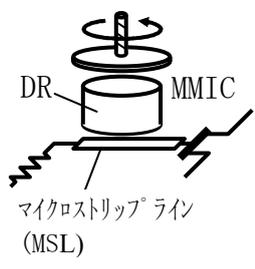
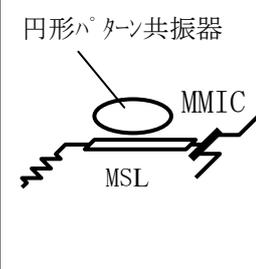
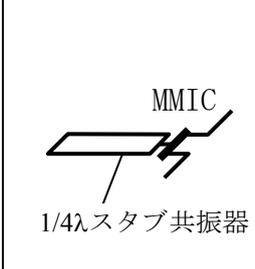
1. 発振器構成	(a) 誘電体共振器 (DR)  DR MMIC マイクロストリップライン (MSL)	(b) 円形ハターン共振器+バラクタ  円形ハターン共振器 MMIC MSL バラクタ	(c) 円形ハターン共振器  円形ハターン共振器 MMIC MSL	(d) 1/4λスタブ共振器  MMIC 1/4λスタブ共振器
2. 安定性 (Q)	高 (5000- 10000)	低 (100- 500)	中 (500- 1000)	低 (10- 100)
3. プロセスのポイント	誘電体共振器 (DR) の位置合わせ	準半導体プロセス	準半導体プロセス	準半導体プロセス
4. 部材点数	4	3	2	2
5. 調整の有無	要調整	要調整	無調整	無調整
6. 低コスト化への問題点・課題	バラツキ大 形状が三次元	バラツキ大 バラクタの特性に左右される	Q が高いため発振周波数の設計難	共振器材料の誘電率への要求が厳しい
7. コスト (MMIC のコストを 10 とする)	MMIC: 10 MSL: 50 DR: 50 ネジ: 50 計 160	MMIC: 10 共振器: 50 バラクタ: 100 計 160	MMIC: 10 MSL: 50 計 60	MMIC: 10 共振器: 50 計 60
8. 総合判定	×	×	○	○

表 4-1 ミリ波メディアコンバータ用発振器の低コスト化の検討

低コスト化のポイントは、①部材点数の低減と②無調整化の 2 点である。

- ・ 誘電体基板材料の誘電率の高制御性と分散の最小化

基板材料から見た場合比誘電率のばらつきは、誘電体材料結晶の均一性、誘電体多結晶材料と閉気孔からなる構造体の均一性の 2 点が大きな変動因子と考えられる。複合材料の比誘電率は対数混合法則が成り立ち以下の関係にある。

$$\log_{10} \epsilon_r = a \cdot \log_{10} \epsilon_a + b \cdot \log_{10} \epsilon_b \cdot \cdot \cdot + h \cdot \log_{10} \epsilon_h$$

$$a + b \cdot \cdot \cdot + h = 1$$

ここで ϵ_r : 構造体 (基板) の比誘電率、 $a \sim h$: 材料結晶や空間の体積比率、 $\epsilon_a \sim \epsilon_h$: a 結晶、 b 結晶、 \dots 空間 h のそれぞれの比誘電率。

この式から、ばらつきは誘電体多結晶材料 (複合材料) の均一性と空間も含めた均一性にあることがわかる。

現状材料は誘電体多結晶材料の比誘電率温度係数が不適であり、比誘電率のばらつきの観点からは閉気孔の大きさが大きい基板内、基板間での比誘電率のばらつきが大きくなっている。本研究開発では材料組成から材料の複合化で特性を合わせ、閉気孔を小さくしかも均一に分散させることで基板内、基板間の比誘電率のばらつきを小さくすることを目指す。材料組成の最適化もさることながら基板構造体としていかに均一性をあげるかは難易度が高く、プロセス全体の高精度化が課題となる。それらプロセス上のばらつき因子の解明をし、その制御方法を確立して高精度誘電体基板を実現する。

(3) サブテーマ : [イ] 電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの研究開発

・ミリ波メディアコンバータ用電波透過窓付リッドの効果

アンテナを内蔵したミリ波メディアコンバータの 2 タイプを図 4-2 に示した。(a)は上部に電波を放射するタイプ、(b)は横方向に電波を放射するタイプである。システムの構成によっては(b)のタイプも応用範囲は広い。リッド(蓋)に要求される条件は、デバイスの信頼性の確保、外部ノイズの防止、寄生発振の防止に加えて、ミリ波メディアコンバータでは電波を損失なく外部に放射することも重要である。外部ノイズを防止することと電波を損失なく外部へ放射するという相矛盾する条件を満足するためには電波の透過窓を設ける必要がある。

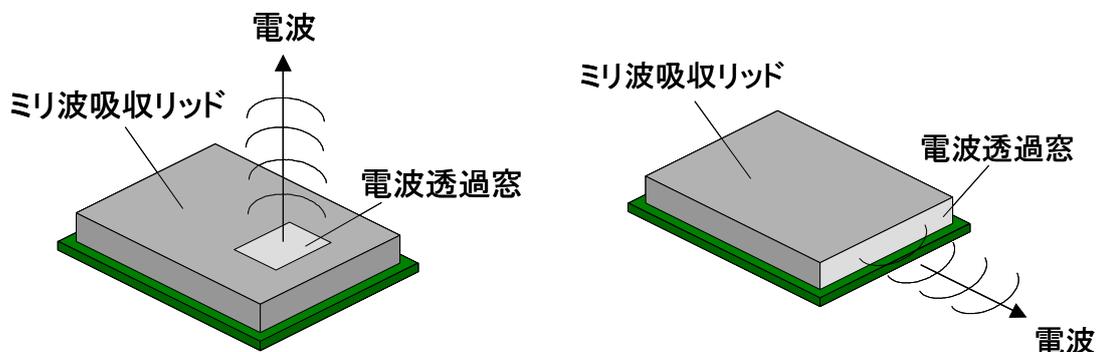


図 4-2. アンテナを内蔵したミリ波メディアコンバータ。
(a) 上部に電波を放射するタイプ、(b) 横方向に電波を放射するタイプ。

図 4-3 にメタル、セラミック、プラスチックを素材とした種々のリッドを示した。メタルリッドは外乱ノイズの防止、気密封止に適しているが、寄生発振を起こし易い。寄生発振を防止するために電波吸収体をリッド裏側に張り付けるが、異質なものが入ることによる信頼性の低下、コスト高となるなどデメリットも大きい。図 4-3 に示したようにメタルリッドに電波透過窓を形成することもできるが、気密封止とするにはさらにコスト高

になる。図 3-3 の右下の写真に示したメタルパッケージモジュールはこの例である。

Phase 3

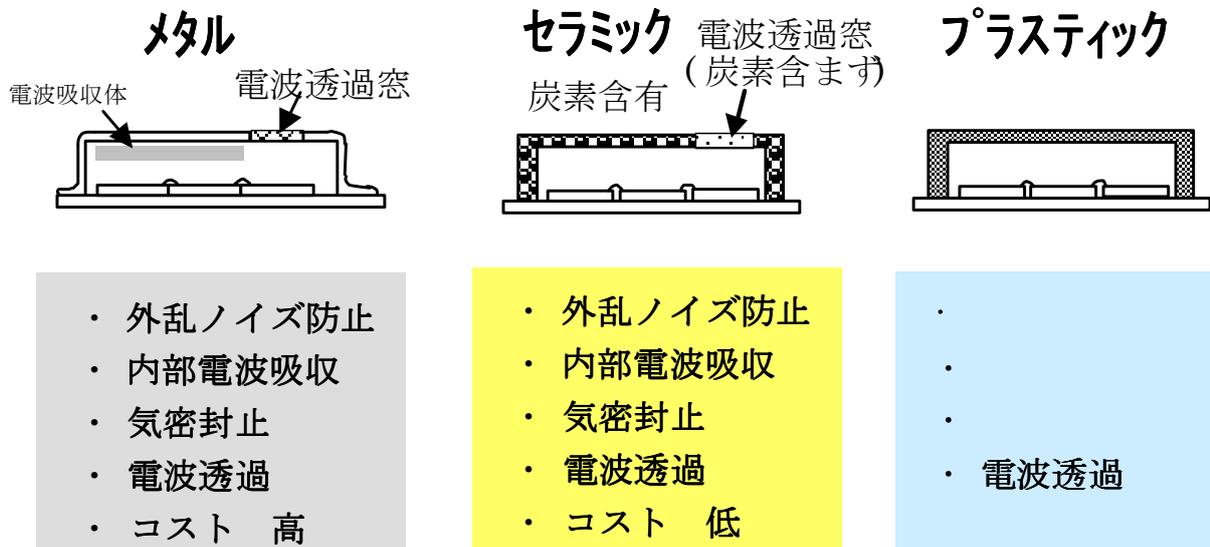


図 4-3 各種リッド比較。ミリ波メディアコンバータ用のリッドとしてはセラミックが適している。

セラミックリッドでは炭素を多量に含有させ通過する電波を低減させることにより、外部から入る電波や内部の不要放射にもとづく寄生発振を防げる可能性がある。後者の理由は内部で反射する電波を少なくできるからである。さらに、炭素を多量に含有させたリッドの一部を、炭素を全く含有しないセラミックと置き換えることにより電波透過窓を設けることができる。この構造を図 4-3 の中央に示した。炭素含有層と炭素を含有しない層は焼成によって形成する。

異種材料と接合した電波吸収セラミックスの開発

本開発では、電波を透過させるセラミックスと電波を吸収する炭素を含有したセラミックスとを接合しなければならない。一般にセラミックスは、均一な素材を成形した後に高温度（1600℃程度）で焼成し、結晶同士を結合（焼結）するのであるが、本開発では、異なる素材を焼結しなければならない。異なる素材（A, B）を同一の方法で成形し高温で焼成すると、それぞれの素材は特有の体積収縮（X, Y, Z 軸方向に特有の比率）率を持つ事から接合面が剥離したり亀裂が生じたりする。（図 4-4）

この現象を回避する為には、焼成時の体積収縮率を同じものにしなければならない。本開発では、同一の母材（アルミナセラミックス）を用い、微調整には

- ① それぞれに形状保持の為に添加、混練りする有機物の量
- ② アルミナ素材の粒度分布
- ③ 形状（厚さ）の制御

で収縮率を揃える条件を実験的に求める。

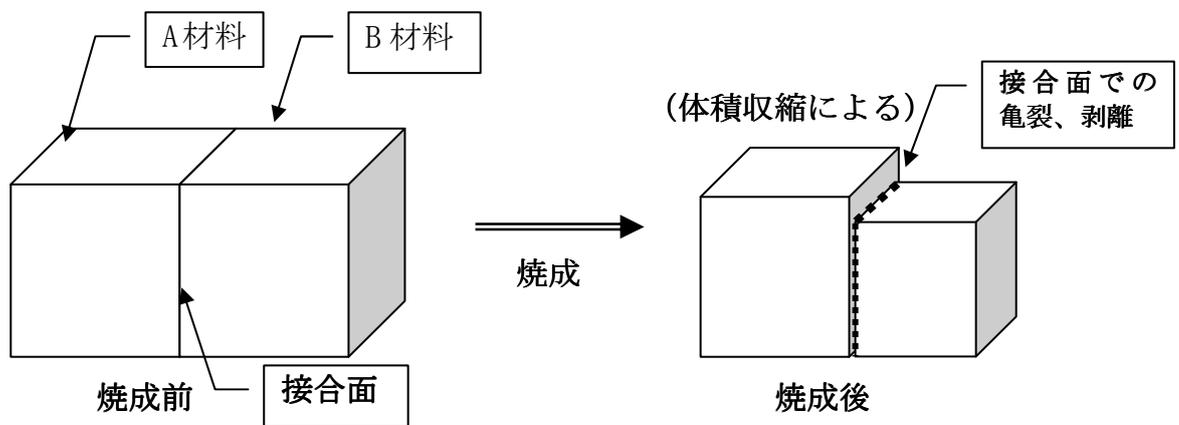


図 4-4 異種材料焼結（接合）の課題

(4)サブテーマ：[ウ] ミリ波 MMIC とポスト壁導波路平面アンテナの低損失接続に関する研究開発

ポスト壁導波路平面アンテナの特長

ミリ波帯平面アンテナでは低損失な導波路を簡易に製作する必要がある。ポスト壁導波路は図 4-5 のように誘電体基板にスルーホールを密に開けその表面をメッキして構成でき、放射部のスロットはエッチングでできる。これらはすべて既存のプリント基板技術で安価にできる。性能は、20 dBi から 35 dBi の利得が実現でき、効率は 35 % ~55 %と実用範囲にある。

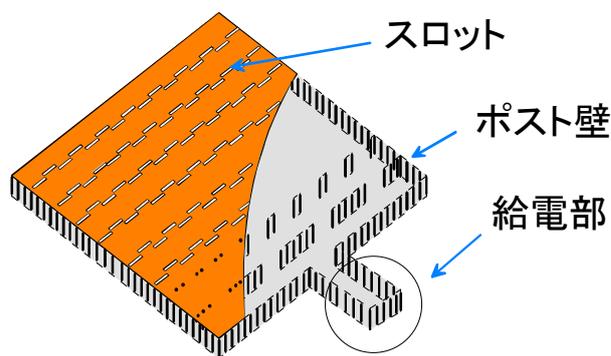


図 4-5 ポスト壁導波路平面アンテナ

ミリ波 MMIC とポスト壁導波路平面アンテナの接続

ポスト壁導波路と MMIC 用平面線路を同軸線路構造を介して小型かつ低損失で接続す

る必要がある。考えられる接続法を図 4-6 に示す。ミリ波帯では物理的寸法がマイクロ波帯に比べて小さいため、製作精度や誘電体の材料定数のばらつきによる影響を考慮した整合回路構造を新たに考案して実現する必要がある。ポスト壁導波路の高さが 1.2 mm と低い
ため、同軸線路の内導体の先端をポスト壁導波路上面で短絡した構造(a)が製作しやすい。しかしこの構造は整合しにくい。逆に製作は困難だが内導体の先端を導波路途中で開放して整合する構造(b)も検討する。最終的には製作しやすい先端短絡でかつ整合が取りやすい構造が望ましい。一例としては(c)のステップ装荷の構造が考えられる。4%の比帯域で反射が-15dB で挿入損失 0.5dB の変換器の実現をめざす。

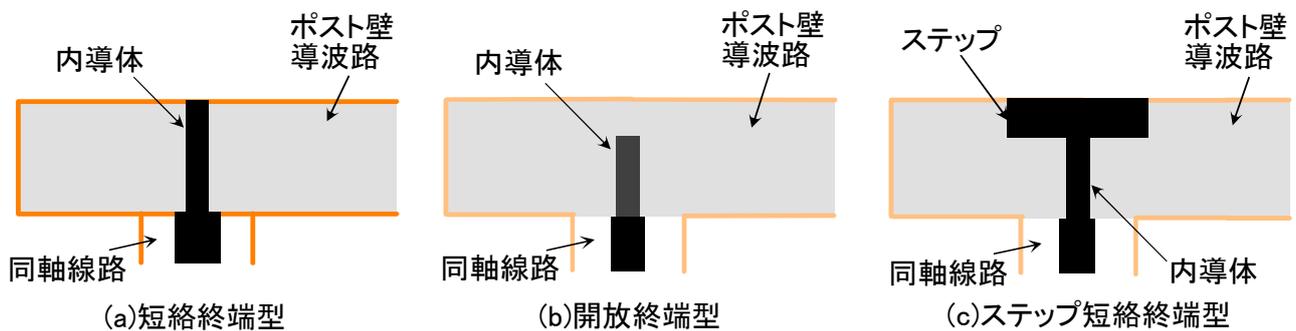


図 4-6 ミリ波 MMIC とポスト壁導波路平面アンテナの種々接続法

4-1-2 研究開発課題実施計画

(金額は非公表)

研究開発項目	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	計	備考
1. ミリ波メディアコンバータ用発振器一次試作				→		富士通カンタムデバイス(株)
2. 比誘電率負温度係数材料の開発				→		(再委託先)ニッコー(株)
3. 高炭素濃度アルミナセラミックス電波吸収帯形成技術及び低損失アルミナセラミックス電波透過窓接合技術の開発				→		(再委託先))株)ウィセラ
4. ミリ波 MMIC 平面線路と疑似同軸線路との低損失接続技術の開発				→		(再委託先)東京工業大学
間接経費						
合計						

注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。

(合計の計は、「3-1の研究開発課題必要概算経費」の総額と一致)

2 備考欄に再委託先機関名を記載。

4-2 研究開発の実施内容

ー平成15年度の研究開発業務の具体的内容ー

平成15年委託業務実施計画書に記した中間目標実現に向けて、平成15年度に実現すべき研究開発の内容を以下の通り決めて、幹事社、再委託社それぞれ研究開発に取り組んだ。具体的内容は各社以下の通りである。

富士通カンタムデバイス(株)

ミリ波メディアコンバータの開発

・ミリ波メディアコンバータ一次試作

- ①発振周波数温度係数 $-20\text{ppm}/^\circ\text{C}$ を実現
- ②電波窓付ミリ波吸収リッドの可能性の確認
- ③MMICとポスト壁導波路アンテナとの同軸線路による接続

ニッコー(株)

低コスト発振器用共振器誘電体材料の開発

・比誘電率温度係数 $-25\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 材料の開発

- ①材料組成の最適化
- ②製造プロセスの最適化
- ③材料の比誘電率のバラツキ $\sigma = 0.15$ の達成
- ④材料の比誘電率の温度係数のバラツキ $\sigma = 3\text{ppm}/^\circ\text{C}$ の達成

(株)ウイセラ

電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの開発

・高炭素濃度アルミナ電波吸収体形成技術の確立

- ①素材最適化
- ・低損失アルミナセラミックス電波透過窓と電波吸収体との接合技術の確立
- ①形成条件の最適化

東京工業大学

ミリ波MMICとポスト壁導波路平面アンテナの低損失接続に関する研究開発

ミリ波MMIC平面回路と疑似同軸線路との低損失接続の実現

ポスト壁導波路給電部同軸化

- ①モーメント法及びHFSSシミュレーションによる最適構造の検討
- ②比誘電率2.2基板による同軸部の試作・評価

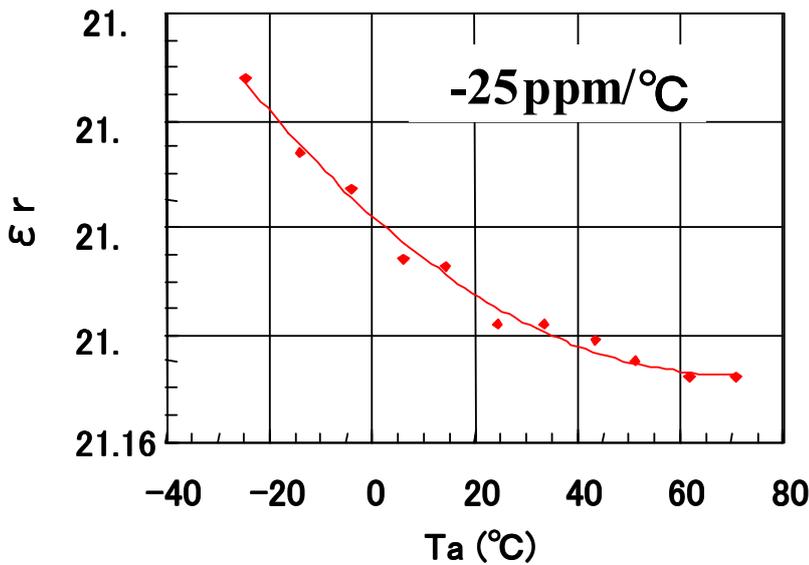
5 研究開発実施状況

5-1 ミリ波メディアコンバータの研究開発

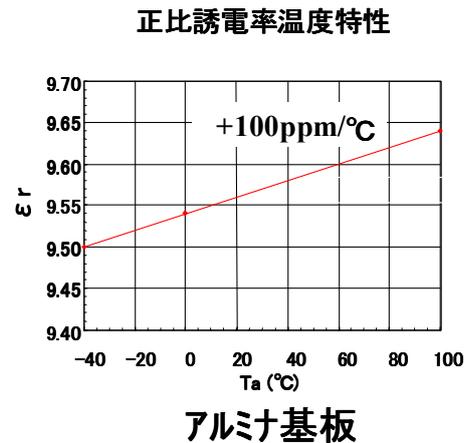
5-1-1 負誘電率温度特性

平成15年度は研究開発の第一歩として、ミリ波メディアコンバータの局発に使う発振器を試作した。負性抵抗を持つMMICと共振器としてのアルミナ基板の組み合わせで発振させる構造を採用した。図5-1-1(b)に示すように、従来共振器基板として広く使われてきたアルミナセラミックスの誘電率の温度特性は正である。それに対して同図(a)に示すように、5-2に報告する材料で構成した基板の温度特性は負を示す。この材料を使うことにより、MMICの持つ正の温度特性をキャンセルする事ができ、発振周波数の温度特性を0 ppmにすることができる。

負誘電率温度特性



(a)



(b)

図5-1-1 (a) 誘電率が負温度特性を持つ材料、温度係数は $-25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$
(b) 従来のアルミナ基板の誘電率の温度特性、温度係数は $+100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$

この材料からなる厚さ0.15 mmの基板をつかって共振器を試作したものを図5-1-2に示した。基板サイズは $3.0 \times 3.0 \text{ mm}^2$ 、共振器は $1/4\lambda$ 長を基本としている。図中「MMICへ」と記した箇所で負性抵抗性を持つMMICに接続して発振器を構成した。図5-1-3に発振特性を示す。本発振器の特性を表5-1-1にまとめた。印可電圧(動作電圧)は3.0 V、動作電流22 mA、で発振電力4.5 dBmが得られている。この時の位相雑音は $-102.3 \text{ dBc}/\text{Hz}$ (100 kHz)で60GHz帯まで4通倍して $-90.3 \text{ dBc}/\text{Hz}$ と良好な特性が期待できる。

試作共振器

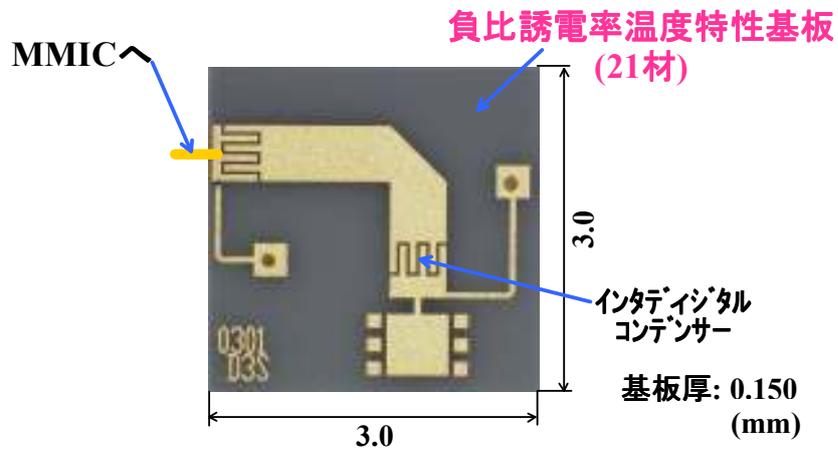


図 5-1-2 試作共振器の上面写真、

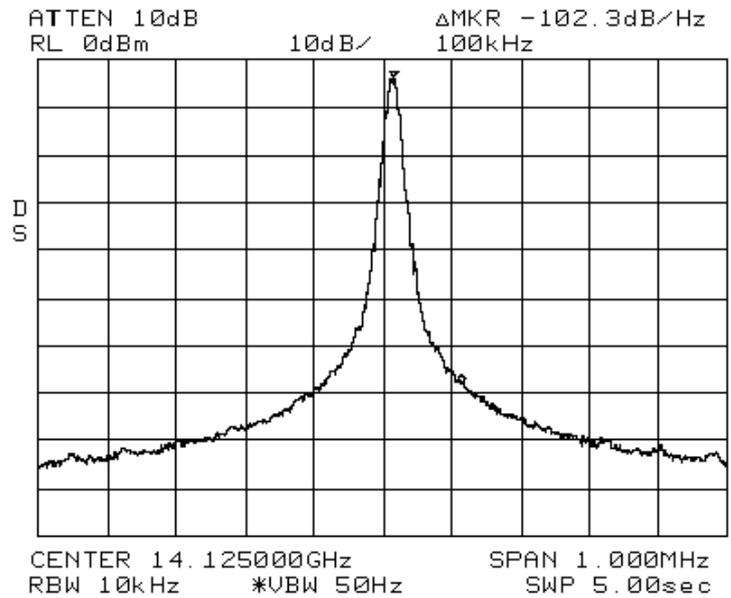


図 5-1-3 試作した発振器の発振特性。中心周波数は 14.125 GHz、位相雑音は-102.3 dBc/Hz (100 kHz off)。

表 5-1-1 試作した発振器の諸特性

項目	数値	単位
印可電圧	3.0	V
動作電流	22	mA
発振周波数	14.125	GHz
発振電力	4.5	dBm
位相雑音	-102.3	dBc/Hz (100KHz off)
発振周波数の温度特性	-20±10	ppm/°C

5-1-2 試作した発振器の温度特性

試作した発振器の発振周波数の温度特性の実測値を図 5-1-4 に示す。青い線で示したように従来のアルミナ材共振器の場合発振周波数が-5°Cで中心周波数に対して+38 MHz となり 25°Cで 0(中心周波数)、85°Cで-75 MHz となる。温度に対する発振周波数の変化率を図 5-1-5 に示した。この図の青線で示したように全体では発振周波数の温度特性は約 -89 ppm/°Cである。これに対して、図 5-1-4 の赤線でプロットしたように、負誘電率温度特性材共振器を用いた場合は、-5°Cで+8 MHz、25°Cで 0(中心周波数)、85°Cで -25 MHz となり、温度に対する発振周波数の変化が緩和されている。この特性を図 5-1-4 の赤線で示した。-負誘電率温度特性材共振器を用いた場合は- 20±10 ppm/°Cであることがわかる。

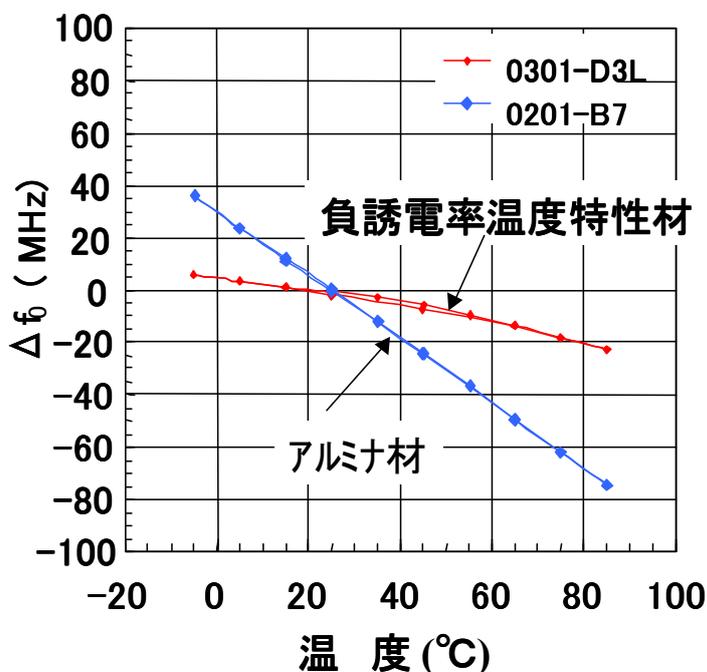


図 5-1-4 試作した発振器の発振周波数の温度特性の実測値

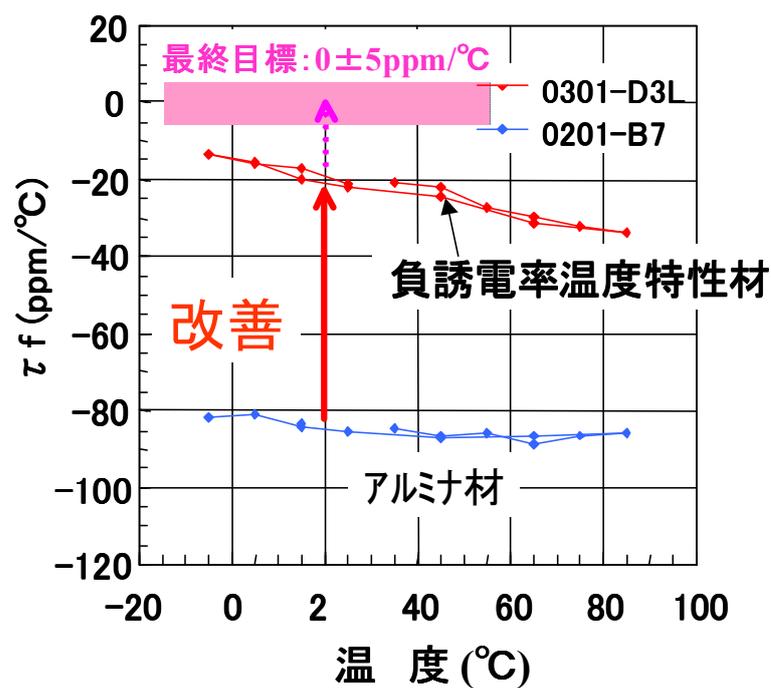


図 5-1-5 温度に対する発振周波数の変化率

5-1-3 最終目標 0 ± 5 ppm/°C 達成のための方針

今回試作したアルミナ材及び負誘電率温度特性材(-25 ppm/°C)を使った発振器の発振周波数温度特性の実測値より、0 ± 5 ppm/°Cを達成するためには-80 ppm/°Cの誘電率温度特性の共振器が必要であることがわかる。

5-1-4 まとめと今後の課題

- ① 発振周波数温度係数 -20 ± 10 ppm/°C が得られ、最終目標 0 ± 5 ppm/°C達成の見通しが得られた。
- ② 電波窓付きミリ波吸収リッドの可能性の確認。5-3 節を参照。
- ③ MMIC とポスト壁導波路アンテナとの同軸線路による接続。5-4 節を参照。

5-2 低コスト発振器用誘電体共振器基板材料の研究開発

5-2-1 材料組成の最適化

誘電率 21 の材料系(以下 21 材と略記)で比誘電率温度係数は比誘電率温度係数がマイナスのイルメナイト構造をもつ MgTiO_3 とペロブスカイト構造をもつ CaTiO_3 の混合で実現できる。比誘電率の温度係数が $-25\text{ppm}/^\circ\text{C}$ になる組成を調べた。図 5-2-1 のグラフがその実験結果を示す。この図より比誘電率の温度係数が $-25\text{ppm}/^\circ\text{C}$ になるのは CaTiO_3 のモル比で 0.063 であることがわかる。つまり $0.937\text{MgTiO}_3 : 0.063\text{CaTiO}_3$ で比誘電率 = 21.2、比誘電率の温度係数 = $-25\text{ppm}/^\circ\text{C}$ となる。

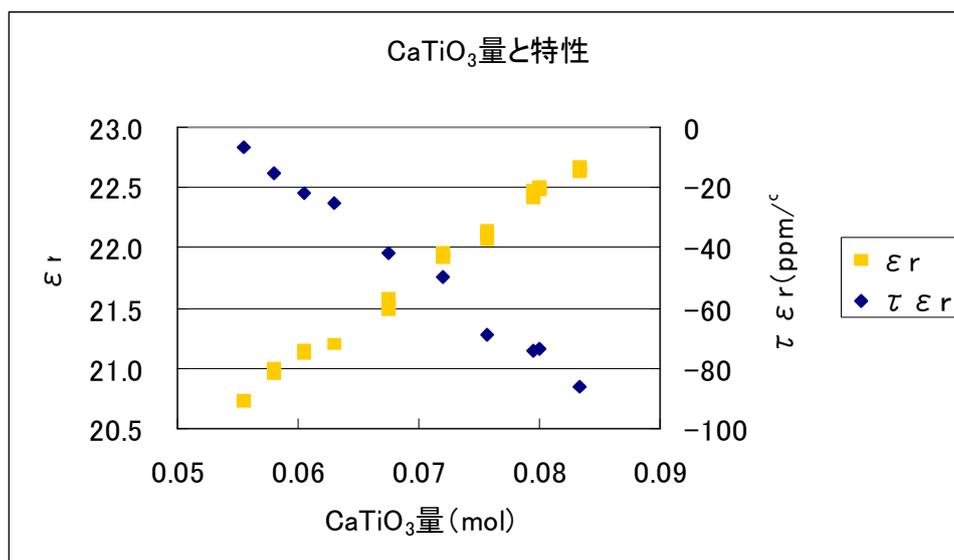


図 5-2-1 CaTiO_3 のモル比を変えたときの誘電率 ϵ_r と誘電率の温度特性 $\tau \epsilon_r$ の実測値

5-2-2 製造プロセスの最適化

本材料の基板化で最も重要なことは薄膜微細電極を形成することから基板に大きなポアがあってはならないことで製造プロセスの工夫が必要である。第一回目に製作した基板の研磨後の表面状態の SEM 写真を示す。約 $10\mu\text{m}$ の多数のポアが見られる。ポアの発生は、原料の分散状態が悪いのか、焼成での異常粒成長が考えられそれぞれについて検討した。原料の分散については、粉碎混合時間を変えて確認したが効果はほとんど見られなかったことから可能性が薄いと考えられた。次に焼結の際異常粒成長がないかどうか検討した。原料の純度は現在 99.9% はあるので不純物の影響は考えにくい。原料合成の進め方(結晶度)を変えた原料でシートを作成し焼成したところ大きな差があり、原料の合成を進めた結晶度の高い粉末がポアの発生に効果があることがわかった。以下にその研磨後の SEM 写真を示す。

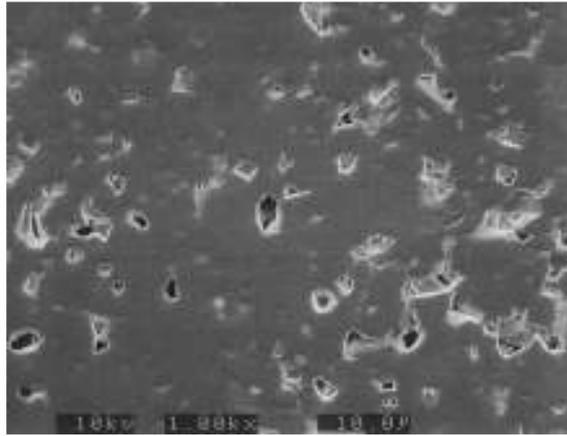


図 5-2-2 第一回目に製作した基板の研磨後の表面状態の SEM 写真。約 $10\ \mu\text{m}$ の多数のポアが見られる。

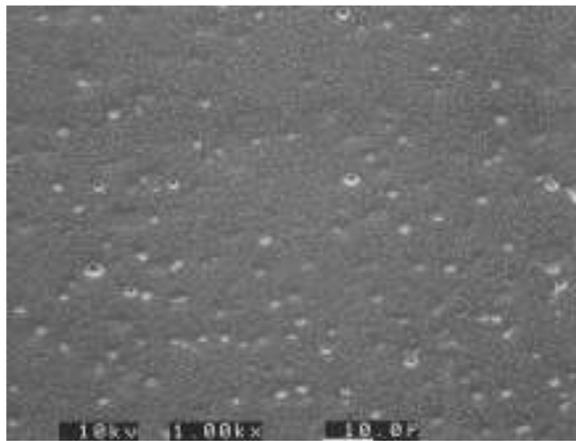


図 5-2-3 結晶度の高い粉末による基板。ポアの径はほとんど $2\ \mu\text{m}$ 以下になり基板の均一度も大きく改善。

ポアの径はほとんど $2\ \mu\text{m}$ 以下になり基板の均一度も大きく改善した。ポアの存在はミクロ的な比誘電率のバラツキの原因になり（材料と空間の混合材料となるため、比誘電率の対数混合法則が成り立つ）本製造プロセスにすることで比誘電率のばらつきも飛躍的に改善されることが期待される。以下ポアの大きさと数量を写真から読み取った結果を示す。原料合成の結晶度を管理することで薄膜に適した基板製造を実現できることが解った。

表 5-2-1 初期の基板表面ポア分布

Observed Area	Pore Diameter D (μm)				
	$D \leq 2$	$2 < D \leq 5$	$5 < D \leq 10$	$10 < D \leq 15$	$15 \leq D$
1	50	31	20	4	1
2	66	17	15	6	3
3	69	20	20	5	1
4	88	33	19	4	3
5	80	32	12	2	1
6	77	21	20	6	4
7	85	30	11	4	3
8	55	24	19	5	1
9	79	24	15	3	0
10	67	42	13	1	3
Average	72	27	16	4	2
Max.	88	42	20	6	4
Min.	50	17	11	1	0

表 5-2-2 改善後基板表面ポア分布

Observed Area	Pore Diameter D (μm)				
	$D \leq 2$	$2 < D \leq 5$	$5 < D \leq 10$	$10 < D \leq 15$	$15 \leq D$
1	97	1	1	0	0
2	90	0	0	0	0
3	79	2	0	0	0
4	78	1	0	0	0
5	77	1	1	0	0
6	68	1	1	0	0
7	58	1	0	0	0
8	69	4	0	0	0
9	88	3	0	0	0
10	81	3	0	0	0
Average	78	2	0	0	0
Max.	97	4	1	0	0
Min.	58	0	0	0	0

5-2-3 材料の比誘電率のばらつき

上記の結果から温度係数 $-25\text{ppm}/^\circ\text{C}$ の材料のめどがたったため今回のデバイスにマッチングすると思われる $-80\text{ppm}/^\circ\text{C}$ に相当する材料でばらつきの調査確認を実施した。

測定確度の確認

評価基板 2インチ□ 厚み 0.42 mm ラップ基板

測定器 HP 8 7 2 2C ネットワークアナライザ

測定方法 空洞共振器法

同一基板を繰り返し毎回治具セットして 30 回測定した。

結果から測定の確度は $\sigma = 0.006$ であるので今回目標としているばらつき $\sigma = 0.15$ 、さらに最終目標としている $\sigma = 0.02$ に対して評価判断は十分にできると判断した。

5-2-4 焼成温度の決定

上で材料のばらつきは原料仮焼粉の結晶度が大きな因子をもっていることを報告したが、基板焼結体の特性で大きな因子は焼結状態にあると考えられ焼成温度の最適化をねらった。

評価基板はそれぞれ $n = 12$ 枚。

焼成炉 研究開発用電気炉 NH-3060F

焼成設定温度 1340℃ 1360℃ 1380℃ 1400℃

この温度を選定した理由は本材料系の焼成温度を1370℃付近で焼成した製造実績から

表 5-2-3 各温度で焼成した試料の誘電率の最大・最小値と分散 σ

	1400℃	1380℃	1360℃	1340℃
MAX.	22.40	22.54	22.56	特性不良
MIN.	22.20	22.40	22.46	特性不良
AVG.	22.34	22.51	22.51	特性不良
σ	0.0536	0.0393	0.0268	特性不良

下記にSEM観察像を示す。

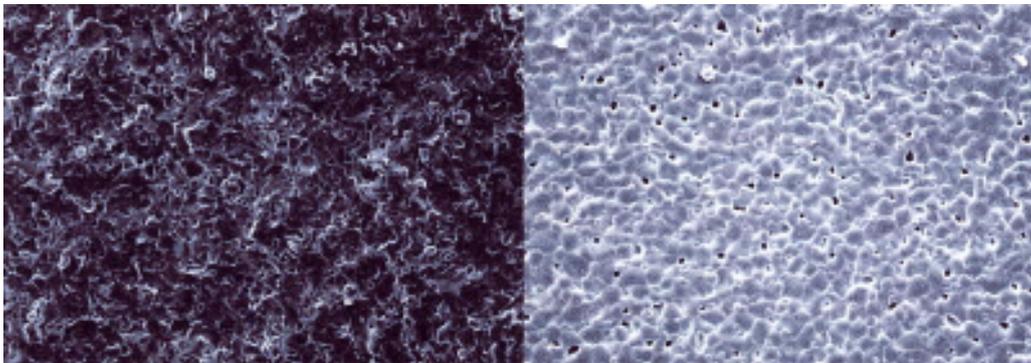


図 5-2-4 基板断面 1340℃ 基板表面 (未加工) ×1000

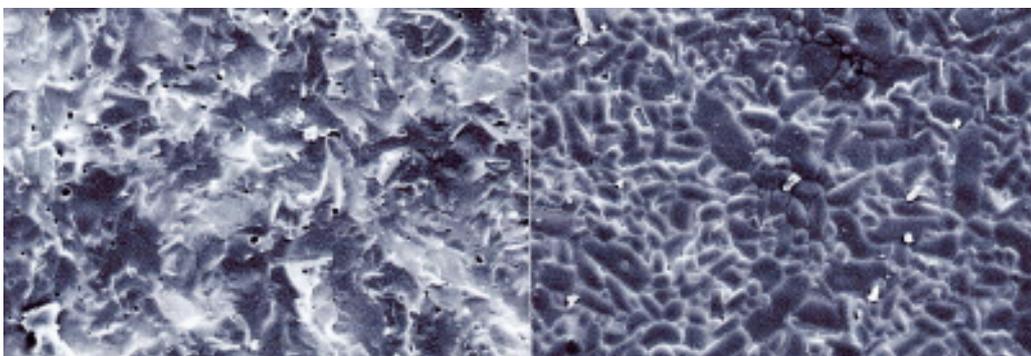


図 5-2-5 基板断面 1360℃ 基板表面 (未加工) ×1000

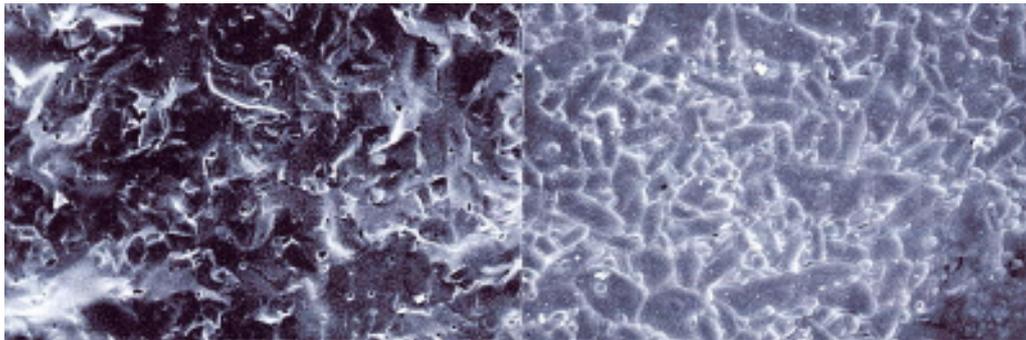


図 5-2-6 基板断面 1380℃ 基板表面（未加工） ×1000

1400℃は外観で明らかに粒成長が確認できSEM観察はしていない。比誘電率のばらつき粒成長の度合いから焼成温度は1360℃に決定する。ただし組成変更する場合は再度確認を行うこととする。

(1) 焼成ロット間のばらつき

焼成温度1360℃で焼成ロット3回実施しそれぞれのばらつきを確認した。

焼成数量は各ロット12枚

焼成炉 研究開発用電気炉 NH-3060F

表 5-2-4 誘電率の焼成ロット間バラツキ

	lot4103	lot4104	lot4105	全数量
MAX.	22.60	22.57	22.60	22.60
MIN.	22.53	22.43	22.40	22.40
AVG.	22.57	22.50	22.49	22.52
σ	0.0229	0.0410	0.0583	0.0535

本結果より焼成ロット間で比誘電率のばらつきが異なっている事がわかる。今年度目標としているばらつき $\sigma=0.15$ は達成しているがさらにばらつきを小さくするためには焼成ばらつき、元をただせばシートばらつきさらに原料ばらつきについて調査確認が課題と考えられる。

(2) 原料ロット間のばらつき

原料ロット3バッチを製作し同一焼成ロットで基板の比誘電率のばらつきを調べた。その結果を焼成は1360℃で評価基板は各12枚

焼成炉 研究開発用電気炉 NH-3060F

表 5-2-5 誘電率の材料ロット間バラツキ

	A	B	C	全体
MAX.	22.57	22.64	22.54	22.64
MIN.	22.49	22.57	22.45	22.45
AVG.	22.53	22.60	22.51	22.55
σ	0.0222	0.0190	0.0239	0.0441

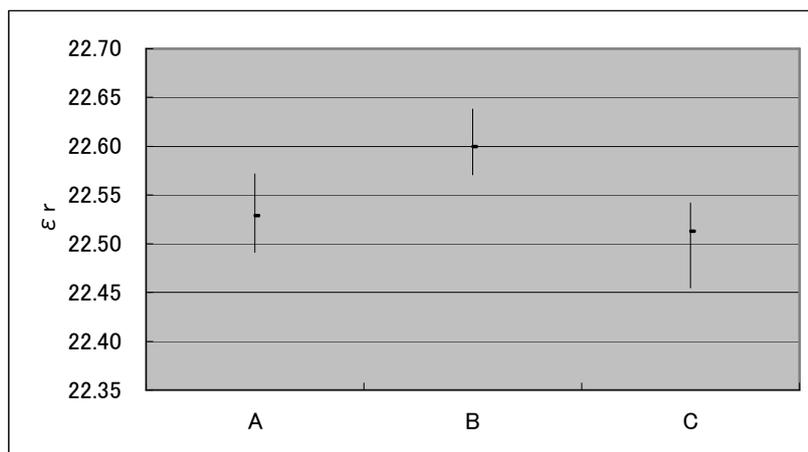


図 5-2-7 誘電率の材料ロット間バラツキ

本結果より原料ロット内では比誘電率のばらつきは小さいが、原料ロット間でセンター値が変動していることが解る。したがって3-3)で焼成ロット間のばらつきは原料ロット間のばらつきであった可能性がある。原料ロット間の比誘電率のばらつきの原因は原料計量のばらつき、混合状態のばらつき、仮焼温度のばらつきが考えられるがそれぞれ量産設備の条件に左右されるため設備選定で再度検討する。実際製造では仮焼原料ロットの混合原料で製造することを実施しているため今後はこの方法で実施していくことにする。全体の比誘電率のばらつきをみても中間目標としている比誘電率のばらつき $\sigma = 0.15$ は大きくクリアしている。

5-2-5 まとめと今後の方針

比誘電率の温度係数 $-25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ の材料開発完了。

- 1、 製造プロセスの最適化については変動因子は仮焼原料の結晶度にあることを明らかにし基板のばらつきは原料ロット間が大きな因子になっていることを明らかにした。まずは現実性のある原料ロットを複数混合した原料でシート化することに決定した。今後この効果の確認を実施する。
- 2、 材料の比誘電率のばらつきは原料ロット間でのばらつきを考慮しても $\sigma \approx 0.06$ が達成できており目標としていた $\sigma = 0.15$ を大きくクリアしている。
- 3、 材料の比誘電率の温度係数のばらつきは現在測定中で、まとめしだい報告する。
- 4、 材料の比誘電率の温度係数を変動させる組成については開発中。

5-3 電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの研究開発

5-3-1 課題の設定

(1) 高炭素濃度アルミナセラミックス電波吸収体成形技術の確立

- ・ 目標、60GHzにおける減衰量13dB以上を実現
- ・ 炭素の種類（結晶：粒度の異なるグラファイト、非晶質：カーボンブラック）
- ・ 添加量（添加する炭素の重量で規定すべきか、炭素の総表面積で規定すべきかを定める）
- ・ 成形方法（高密度の製品が期待できる押出し成形もしくはローラー成形、低コスト化が可能なプレス成形か）
- ・ 焼成条件（量産焼成ではトンネル炉が欠かせない。炭素を残存させる為の還元の度合を検討する。）
- ・ 炭素の種類、添加量、厚さに対する減衰量との関係を実験的に求める。
- ・ 耐熱性（600℃において変形しない、いかなるガスの発生もない）

(2) 低損失アルミナセラミックス電波透過窓と上記電波吸収体との接合技術の確立

- ・ 目標、ミリ波吸収リッド特性60GHzにおける減衰量13dB以上、電波透過窓特性60GHzにおける損失0.5dB以下
- ・ 異種材料接合面の検討（成形助剤と接合度）
- ・ 接合面の良否の判断基準と判定する為の評価方法を確立
- ・ 成形助剤の違いによる接合強度

(1)では、電波吸収体としての性能を確保できる炭素の種類、アルミナへの混合量、そしてその厚さを決定し、成形方法、焼成方法を決定する基礎データ - をとる事であり、(2)では、60GHzの電波で吸収、透過特性を評価する事と電波透過窓と電波吸収体との接合を行なう事である。

『材料の透過、吸収特性として富士通カンタムデバイス㈱で先行測定が行なわれており、アルミナ単独では電波は透過する事、炭素 - アルミナセラミックスで - 13dBの吸収を確認している。』

本委託開発では、先行評価以上（例えば、電波吸収体は - 20dB以上）に目標を置いた実験を行なった。ここに平成15年度の実験の成果を報告する。

5-3-2 試作品の製造

(1) 原料

アルミナ原料には住友化学工業㈱製 AES-11C ($D_{50} = 0.5 \mu m$) 用い、粒径の異なる炭素原料には、C:グラファイト ($D_{50} = 104 \mu m$)、G: ($D_{50} = 5.0 \mu m$) と CB:カーボンブラック ($D_{50} = 0.005 \mu m$) を使用した。使用した炭素類の諸物性は表 5-3-1 に示した。実験に供した炭素は○を記した。

表 5-3-1 実験に使用した炭素類と添加率

記号	W	C	G
炭素の種類	カーボンブラック	グラファイト	グラファイト
平均粒径 (μm)	0.005	5.0	104.0
添加率 (%)	2.5	○	○
	5.0	○	○
	10.0	○	○
	20.0		○

(2) 試作品の作成

炭素原料を混合したアルミナスラリーは通常の製法に従い PVA 等のバインダーを添加し、24 時間攪拌し、馴化を行なった。スラリーは、スプレードライヤー (270℃) を用い平均粒径が 100 μm 程度で炭素を 0.5~20% 含有する原料顆粒を製造した。

製造した顆粒を用いて 50 t の圧力で 120mm×120mm 厚さ 5mm の板に成形し、500℃で 4 時間、酸化雰囲気中でバインダーの脱脂を行なった。本焼成は、真空雰囲気炉を使用し、添加した炭素の酸化を防止する為に試料をグラファイト容器に入れ、アルゴンガス気流中で、100℃/時間で 1600℃まで昇温し、2 時間保持した後自然放熱で冷却した。

焼成終了後、表面を研削し、厚さの調整及び平滑な面の調整を行ない、電波吸収の評価に用いた。

5-3-3 試作品の評価

アルミナセラミックスに炭素を数%混合した材料は、導電性、磁性を持たない事から誘電性電波吸収材と考えられ、この比誘電率の複素数 (実部と虚部) を実測し、無反射曲線から、炭素の添加量、厚さが設計される。

(1) 誘電率の測定方法

複素比誘電率の測定は、図 5-3-1 に示したビーム収束型ホーンアンテナを用いたフリースペース法で行なった。

左右のホーンアンテナの間に 100mm 角の試料を挿入し、反射及び透過係数を測定し、複素比誘電率を逆推定した。

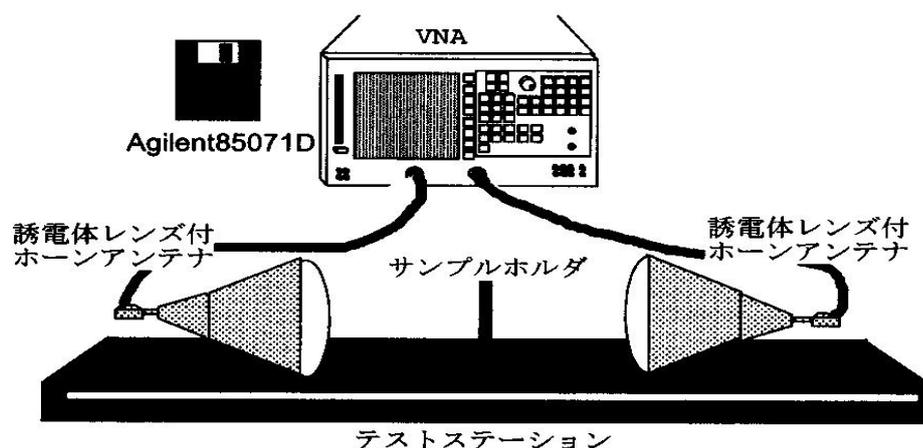


図 5-3-1 測定のブロック線図

(2) 反射減衰と透過減衰量の測定方法

電波吸収体の 60GHz での透過減衰量の目標は -13dB 以上（先行評価では -13dB 以上、開発完成時には -20dB 以上）、透過窓は -0.5dB 以下である。

この特性を確認する為に電波の反射及び透過減衰の測定を行なった。測定方法は、レンズ法と呼ばれる、図-5-3-2 に示すミリ波用レンズアンテナ方式電波吸収体・透過減衰測定システム（YIG 発信タイプ）（キーコム株製）を用いた。

透過減衰の測定条件

- ・周波数：60±1GHz、出力=1dBm（1.26mW）
- ・ホーンアンテナ：WR-15、利得=23dBi
- ・レンズ：径=100mm、焦点距離=100mm、利得=36dBi

試料の大きさ：100mm 角の板、厚さ 2mm

しかし、測定で得られる透過減衰量には、表面での反射が含まれることから反射減衰も考慮しなければならず、今後、無反射条件で作成した試料で透過吸収量を評価しなければならない。



透過減衰測定装置（全体）

透過減衰測定装置（測定部）
受信部、レンズ部、発信部

図 5-3-2 透過減衰測定装置（YIG タイプ）

5-3-4 測定結果

(1) 無反射解析結果⁽⁴⁾⁽⁵⁾

図 5-3-2 には、計算の結果から得られた無反射曲線と実測した炭素の添加率別に得られた実部と虚部関係を示した。それぞれの直線が無反射曲線と交差する点が、無反射条件を満たす炭素添加率であり、無反射曲線上の数字が厚さ (d/λ) を示す。

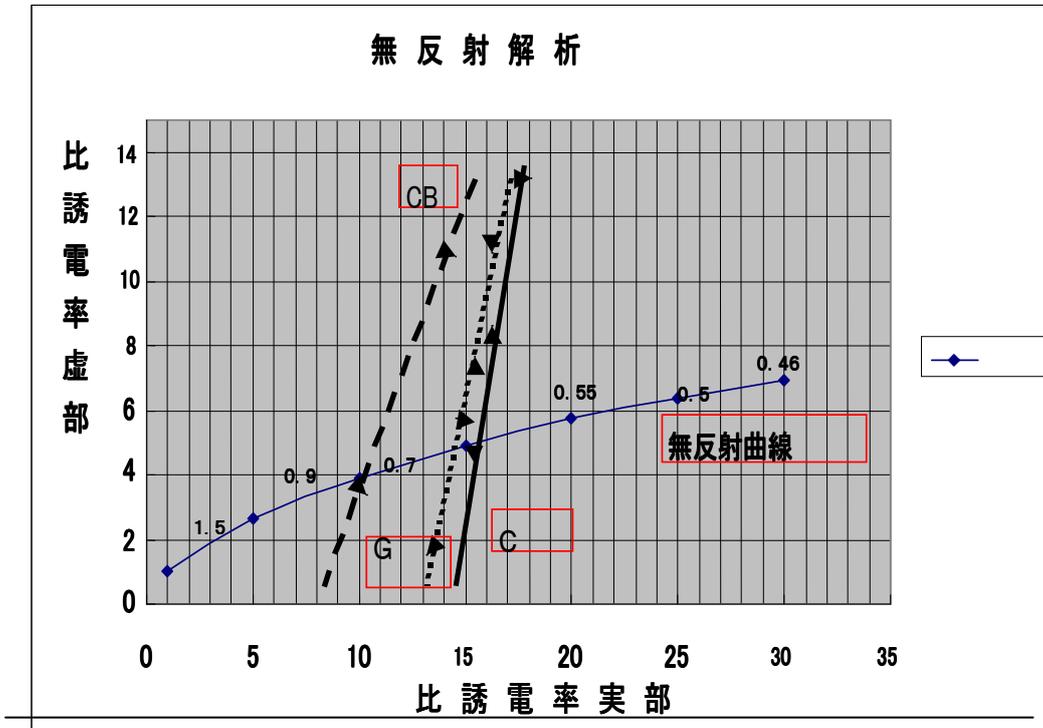


図 5-3-3 無反射曲線と実験試料の比誘電率（実部、虚部）

グラファイトは、粒径 $104\ \mu\text{m}$ と粒径 $5\ \mu\text{m}$ 共に類似した関係を示し、C の近似式は $y=4.55X-63.96$ であった。無反射曲線との交差する炭素濃度は 4.43% 、厚さを示す $d/\lambda=0.065$ から 60GHz ($\lambda=5\text{mm}$) では、厚さ (d) $=0.33\text{mm}$ が得られる。G の近似式は、 $y=3.73X-53.90$ であった。無反射曲線との交差する炭素濃度は 2.8% 、厚さを示す $d/\lambda=0.064$ から同様に厚さ (d) $=0.32\text{mm}$ が得られる。カーボンブラックの近似式は $y=1.78X-14.71$ であった。無反射曲線との交差する炭素濃度は 2.78% 、同様に厚さを示す $d/\lambda=0.078$ から厚さ (d) $=0.39\text{mm}$ が得られる。

このことは、アルミナ-炭素類系の電波吸収セラミックスは、セラミックスの裏面に金属を貼り、 60GHz (波長: 5mm) の平面波が垂直入射する単層形電波吸収体の条件では、炭素の添加量は約 $2.5\sim 4.5\%$ で、厚さは約 $0.3\sim 0.4\text{mm}$ で、電波を反射しない材料が設計できる事を示している。

(2) 透過減衰量の測定結果

グラファイト C をアルミナに 0～3% 混合し作成した試料の 60GHz における透過減衰量を図 5-3-4 に示した。

図に示した様に減衰量は炭素の混合量に比例する事が判明した。先行測定での -13dB を実証し、目標である -20 dB はグラファイト C を約 1.5% 混合したものがクリアーした。

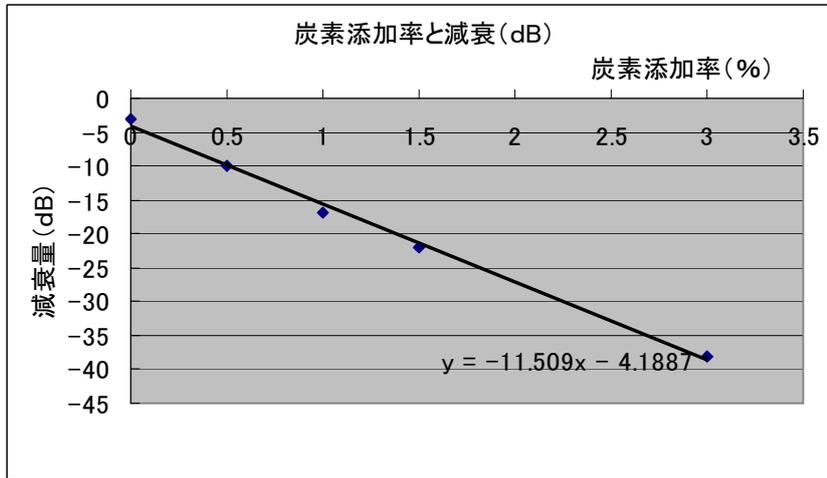


図 5 - 3 - 4 グラファイト C を混合した試料の 60GHz での透過減衰量

しかし、窓材を想定しているアルミナセラミックスでは、図 5-3-5 に厚さを調整したアルミナの透過減衰量を示したが、-3～-5 dB の減衰量を示し、入射した電波の 50% 以上が透過せず、目標の -0.5 dB をクリアーしてない事が判明した。現状では、表面反射による減衰か、セラミックス自体の吸収による減衰なのか判断は出来ず、今後精度の高い測定をしなければならない。

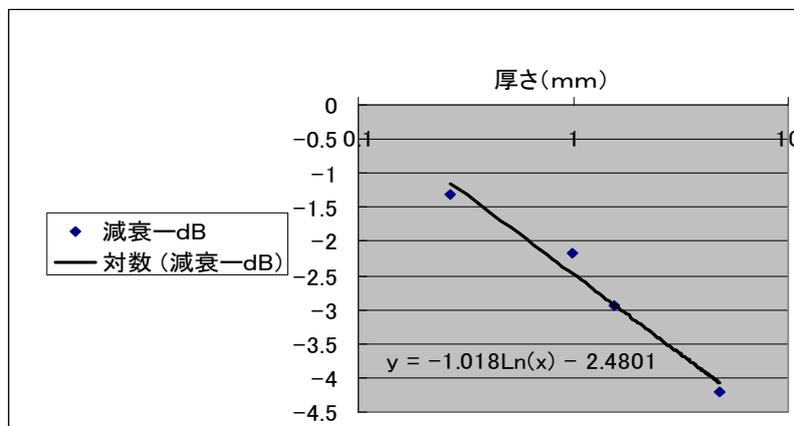


図 5 - 3 - 5 厚さの異なるアルミナセラミックスの透過減衰量

5-3-5 まとめと今後の方針

本年度の目標は、電波吸収体に使用する炭素の種類、添加量及びその製造方（成形方法、焼成方法）の目処を付け16年度の開発に繋げる事である。

実験の結果を以下に述べる。

(1) 遠方界（平面波）の評価であるが、材料の比誘電率の実部と虚部から求めた無反射条件では、炭素の種類、添加率に多少の差はあるものの、おおよそ3～4%添加し、厚さ0.3mm前後で60GHzの無反射の材料を設計できる事が判明した。

(2) 透過減衰の目標値(-20dB)については、炭素の混合量を調整し-20dB以上を確保できる事が判明した。しかし、窓材としてのアルミナセラミックスの目標値-0.5dBは2mmでは達成できず、0.15mm程度の厚さが必要であるとの予想される。

また、アルミナとアルミナに炭素を混合した異種材料の接合に関しては、押出し成形機を使用し、現在0.3～1mmのシートの成形条件を検討しているが、窓材の材質が決まっていない事もあり、平成15年度の目標である異種材料を接合する実験に至っていない。

5-4 ミリ波 MMIC とポスト壁導波路平面アンテナの低損失接続技術に関する研究開発

5-4-1 ポスト壁導波路と平面アンテナ

ポスト壁導波路⁽⁶⁾は上下に金属を張り合わせた誘電体基板の上にスルーホールを密に配置し、その壁面をめっきして金属壁と等価な金属ポスト列としたものである。既存のプリント基板加工技術で安価・容易に製作できる。

ポスト壁導波路と平面線路を低損失で接続する必要がある。従来導波管開口給電が用いられていたが、本報告ではマイクロストリップラインと同軸線路構造を介して給電する方法を検討する(図 5-4-1、-2)。ミリ波では波長が短く物理的寸法も小さいので、製作が容易かつ製作誤差に強い構造を検討しなくてはならない。同軸線路内導体はポスト壁と同時に製作できる。

本報告では、先端短絡型、先端開放型、先端ステップ短絡型、先端傾斜ステップ短絡型の4つを検討し⁽⁷⁾⁽⁸⁾、60GHz 帯での試作・実験を行いそれらの反射特性を測定した。

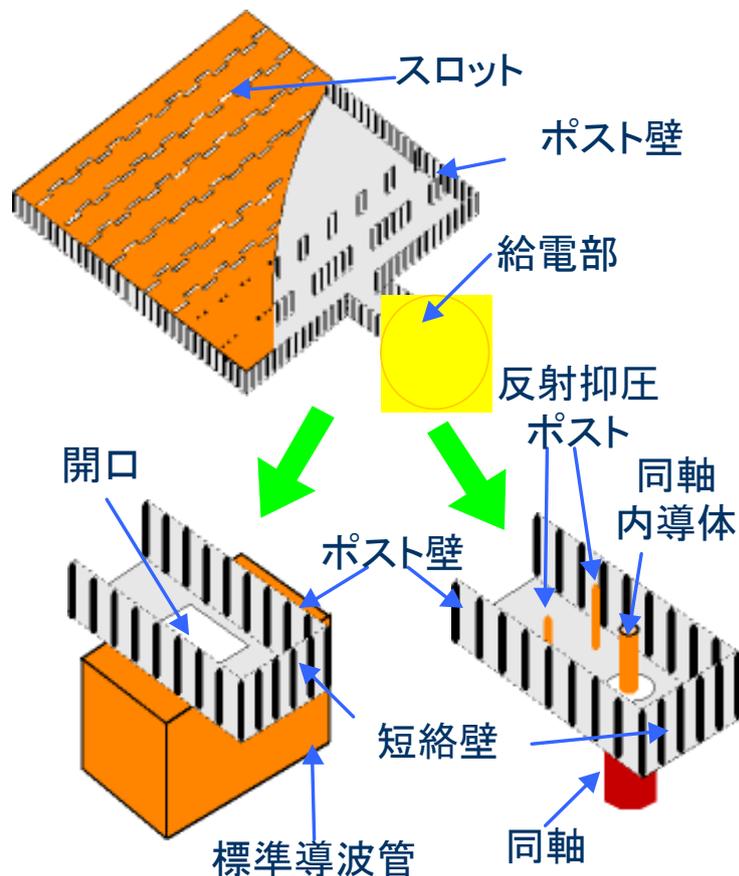


図 5-4-1 ポスト壁導波路アンテナの導波管給電と同軸給電

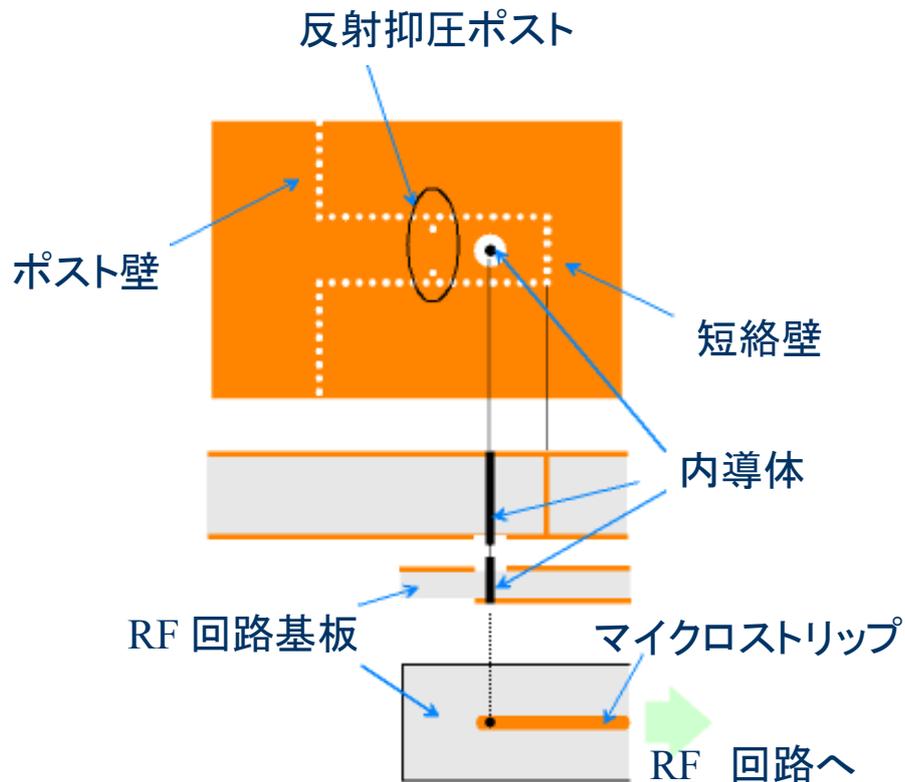


図 5-4-2. アンテナ給電部の断面図

5-4-2 接続方法

導波路幅中央に対して対称な構造のみを扱う。量産のため内導体は金属ピンを手作業で挿入するのではなく、金属めっきすることを考えている。

(1) 先端短絡型

先端短絡型は、図 5-4-3 のように内導体が誘電体基板を貫く構造である。短絡壁と反射抑圧ポストにより整合をとっている。この構造は加工がしやすくめっきがはがれにくいという利点があるが、入力インピーダンスが大きくなるため広い帯域での十分な反射抑圧が困難という欠点がある。

(2) 先端開放型

先端開放型は図 5-4-4 のように内導体の先端を基板途中で止め、その挿入長 h と短絡壁、反射抑圧ポストにより整合をとっている。この構造は、インピーダンスが小さくなり反射抑圧は容易だが、基板内に内導体を正確な位置に置く加工が困難である。また内導体の奥までめっきしにくいという欠点もある。

(3) 先端ステップ短絡型

先端ステップ短絡型は図 5-4-5 のように内導体が基板を貫き、先端にステップをつける

構造である。この構造は先端にステップをつけ入力インピーダンスを下げ、整合をとっている。この構造も整合がとりやすい反面、めっきがはがれやすいという欠点がある。その点を解消するべく、次の構造も検討する。

(4) 先端傾斜ステップ短絡型

先端傾斜ステップ短絡型は図 5-4-6 のような構造である。 $\theta=60^\circ$ 90° 120° の 3 つの角度について検討した。原理的には先端ステップ短絡型と同じであるが、めっきを考えたとき、先端ステップ短絡型よりもはがれにくいと考えられる。

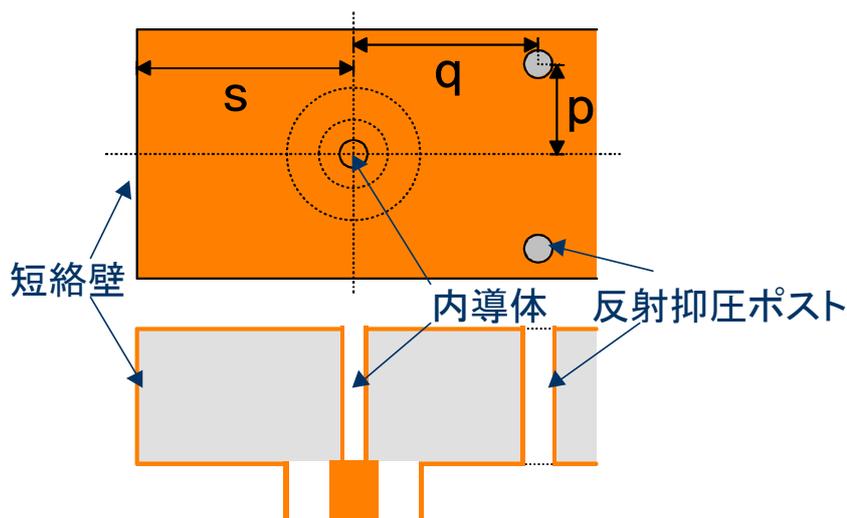


図 5-4-3. 先端短絡型

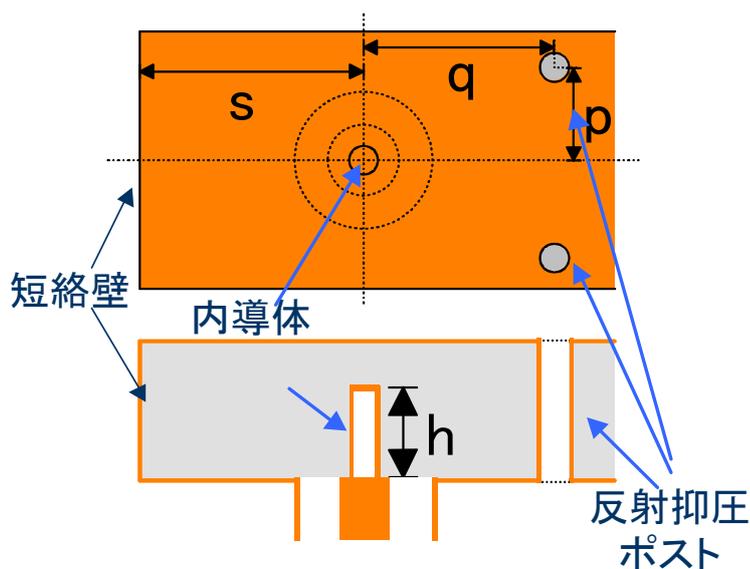


図 5-4-4. 先端開放型

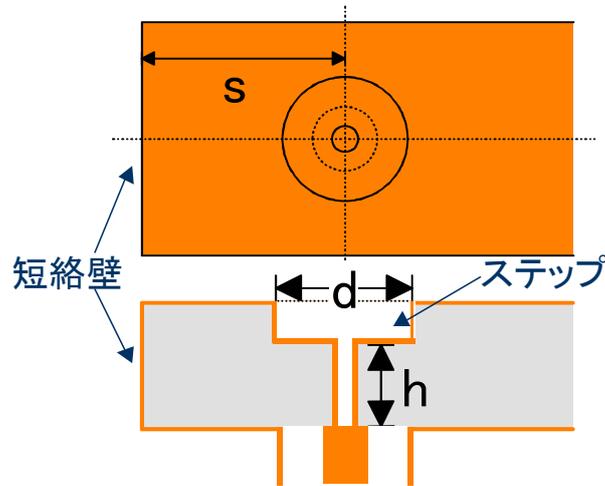


図 5-4-5. 先端ステップ短絡型

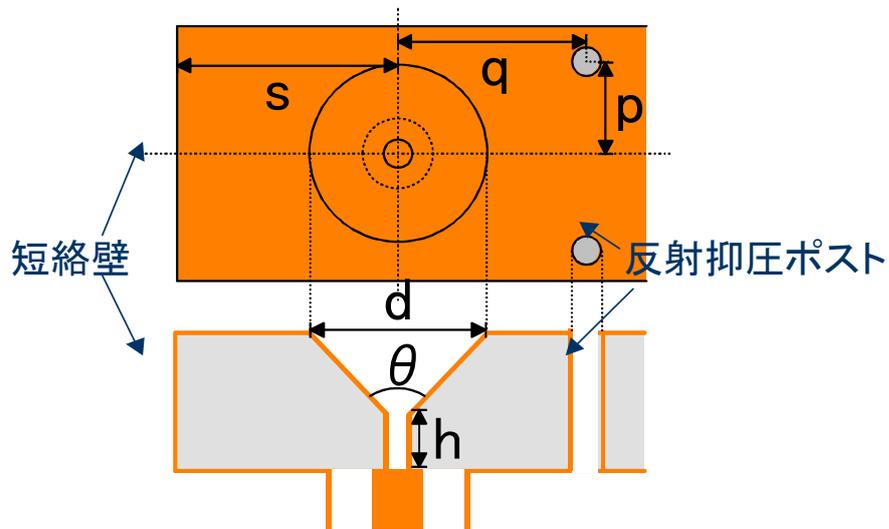


図 5-4-6. 先端傾斜ステップ短絡型

5-4-3 反射特性のコンピュータ解析

それぞれの構造について有限要素法シミュレータ HFSS で解析した。短絡壁の位置およびポストの位置，挿入長，ステップの大きさなどを変化させ，反射ができるだけ広帯域で小さくなるように設計する。設計周波数は 60GHz であり，誘電体は比誘電率 2.26 のテフロンを用いた。基板の厚さは 1.2mm，導波管幅は 3.08mm である。また同軸線の内導体外径は 0.55mm，外導体内径は 1.25mm，同軸内は中空で計算した。

(1) 構造による反射特性

図 5-4-7 は先端短絡型と先端開放型，先端ステップ短絡型，導波管給電の反射特性を示した．先端短絡型において $s=1.82\text{mm}$, $p=1.2\text{mm}$, $q=1.5\text{mm}$ である． -15dB 以下帯域幅は 1.2GHz ，比帯域 2.0% である．先端開放型において $s=2.7\text{mm}$, $p=1.2\text{mm}$, $q=1.5\text{mm}$, $h=0.9\text{mm}$ である．広帯域で -20dB 以下に抑圧できている．先端短絡型に比べインピーダンスが小さくなり広帯域になることが確認できた．先端ステップ短絡型において $s=1.4\text{mm}$, $h=0.8\text{mm}$, $d=1.6\text{mm}$ である． -15dB 以下帯域幅は 6.1GHz ，比帯域 10.1% である．先端開放型よりは狭いが，ステップ装荷による広帯域化を確認できた．

(2) 傾斜ステップ型の角度による反射特性

図 5-4-8 は先端傾斜ステップ型の傾斜角度 θ を 0° (先端短絡型) 60° 90° 120° 180° (先端ステップ短絡型) とした場合の反射の周波数特性である． $\theta=0^\circ$ において $s=1.82\text{mm}$, $p=1.2\text{mm}$, $q=1.5\text{mm}$ である． -15dB 以下帯域幅は 1.2GHz ，比帯域 2.0% である． $\theta=60^\circ$ において $d=1.4\text{mm}$, $s=2.6\text{mm}$, $p=1.2\text{mm}$, $q=1.6\text{mm}$ である． -15dB 以下帯域幅は 3.5GHz ，比帯域 5.9% である． $\theta=90^\circ$ において $d=2.0\text{mm}$, $s=3.0\text{mm}$, $p=1.2\text{mm}$, $q=1.7\text{mm}$ である．広帯域で -15dB 以下に抑圧できている． $\theta=120^\circ$ において $d=2.8\text{mm}$, $s=3.2\text{mm}$, $p=1.2\text{mm}$, $q=3.4\text{mm}$ である． -15dB 以下帯域幅は 7.7GHz ，比帯域 12.8% である． $\theta=180^\circ$ において $d=1.6\text{mm}$, $s=1.4\text{mm}$, $h=0.8\text{mm}$ である． -15dB 以下帯域幅は 6.1GHz ，比帯域 10.1% である．これらによりステップ装荷による広帯域化が確認できた．しかし， $\theta=0^\circ$ 60° ではステップが小さいため，入力インピーダンスに与える影響が小さく，インピーダンスが下がらないので十分な反射抑圧ができていないと考えられる．

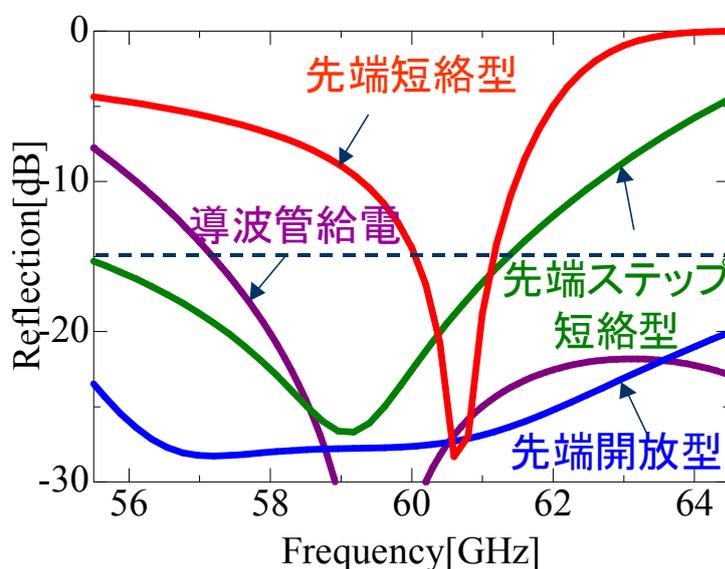


図 5-4-7. 給電部の反射周波数特性(解析値)

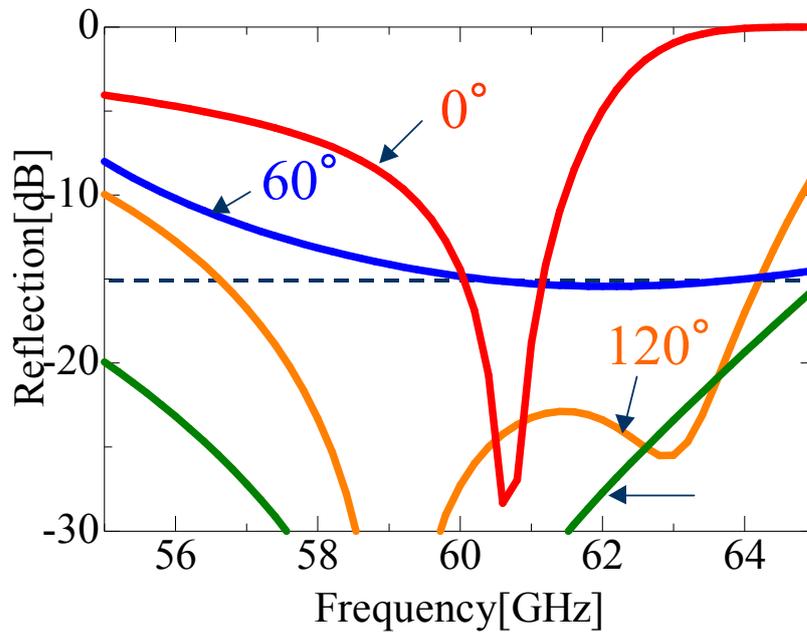


図 5-4-8 傾斜ステップ型の角度による反射特性(解析値)

5-4-4 反射特性の実測

図 5-4-9 に先端短絡型と先端ステップ短絡型の実験結果を示す。なお、内導体は金属めっきではなく、金属ピンを挿入している。先端短絡型は解析値より結果が悪く -10 dB 以下の帯域幅は 1.3 GHz、比帯域 2.1 %である。先端ステップ短絡型では -10 dB 以下では十分な反射帯域がとれていて、 -15 dB 以下の帯域幅は 7.2 GHz、比帯域 12.0 %である。解析値と同様に先端短絡型に比べ、先端ステップ短絡型のほうが反射を抑圧できている。

先端短絡型、先端開放型と先端ステップ短絡型の給電部を用いたアンテナを製作し反射を測定した。内導体は金属めっきではなく金属ピンを挿入している。導波管給電も含めた実験結果を図 5-4-10 に示す。アンテナの反射も含むので解析値との直接の比較はできない。結果が解析結果に比べ悪いため、 -10 dB 以下の帯域で議論する。先端短絡型では -10 dB 以下の帯域幅は 0.4 GHz、比帯域 0.6 %である。先端開放型では -10 dB 以下の帯域幅は 3.7 GHz、比帯域 6.2 %である。先端ステップ短絡型では -10 dB 以下の帯域幅は 2.3 GHz、比帯域幅は 3.8 %である。導波管給電では -10 dB 以下の帯域幅は 4.3 GHz、比帯域幅は 7.1 %である。いずれも解析値より反射は悪いが、先端短絡型に比べ、先端開放型、先端ステップ短絡型が反射抑圧できている。内導体寸止め、内導体ステップ装荷による広帯域化をそれぞれ確認できた。

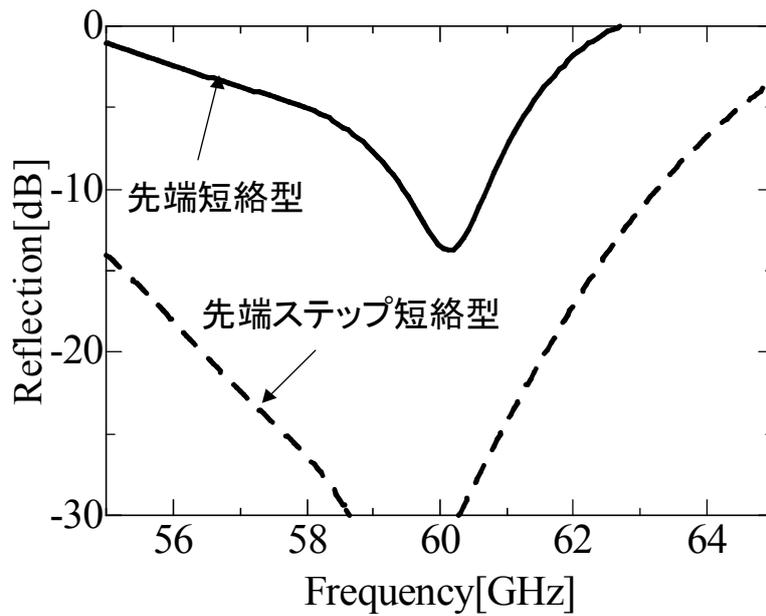


図 5-4-9. 給電部の反射周波数特性 (実験値)

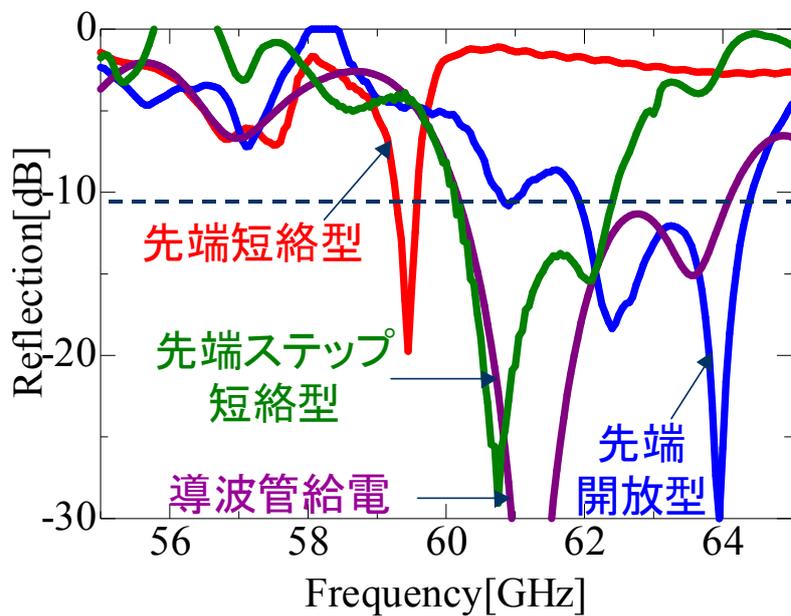


図 5-4-10 アンテナ全体の反射周波数特性 (実験値)

5-4-5 製造上の問題点

先端短絡型ではめっき・金属ピンともに大差のない解析どおりの結果が得られた。しかし、帯域特性の優れた先端開放型・先端ステップ短絡型は、金属ピンでは解析どおりの傾

向が得られたがめっきでは得られなかった。その理由として、めっきの強度があげられる。

図 5-4-11, 5-4-12 はそれぞれ先端短絡型, 先端開放型のめっき時の断面写真である。これを見ると, 先端短絡型には満遍なくめっきされているのに対し, 先端開放型は挿入長 h までめっきされていないのに, 途中までしかめっきが届いていない。この原因として, めっき液が狭い隙間には入りきれないことが考えられる。

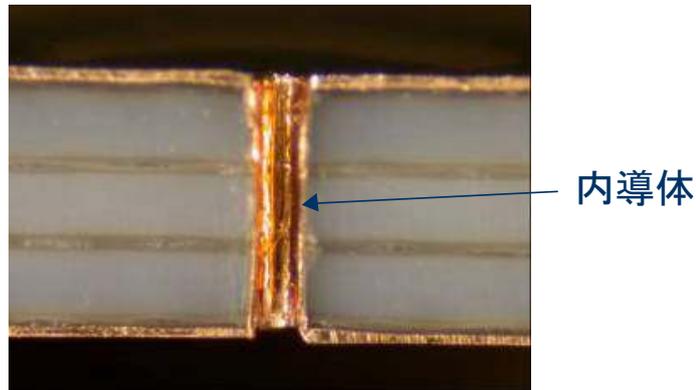


図 5-4-11. 先端短絡型のめっき状況

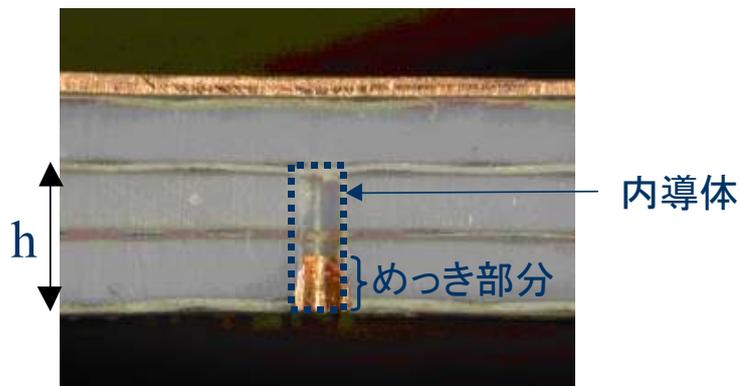


図 5-4-12. 先端開放型のめっき状況

図 5-4-13 は先端ステップ短絡型の給電部分を上から見たときの写真である。図 5-4-5 のステップ部がこれにあたる。この図を見るとめっきが少しはがれている。先端ステップ短絡型は, ステップ部のめっきが基板両面の銅箔とつながっていないため強度が弱く, はがれやすくなってしまふ。そのため, 量産には向いていないと思われる。その点, 先端傾斜ステップ短絡型は, 傾斜にするため基板両面の銅箔とつながりめっき強度が強くなると期待される。

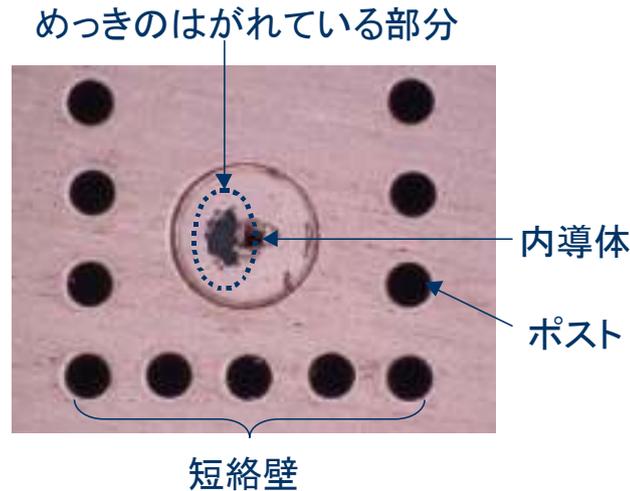


図 5-4-13. 先端ステップ型のめっき状況

5-4-5 まとめと今後の方針

ミリ波帯において、ポスト壁導波路平行平板スロットアレーと RF 平面回路を低損失で接続する同軸-ポスト壁導波路変換器の検討を行った。波長が短いため、製作が容易で製作誤差に強く、低コストな構造を目指した。検討した各構造の解析値・実験値・加工の難易度をまとめたのが表 5-4-1 である。解析値は-15dB 以下の比帯域、実験値は-10dB 以下の比帯域で議論した。解析結果は先端開放型、先端ステップ短絡型、先端傾斜ステップ短絡型は十分な反射抑圧ができ、広い帯域が得られた。先端開放型、先端ステップ短絡型はともに内導体を金属めっきしたものでは精度がでないことがわかった。しかし、金属めっきの代わりに内導体に金属ピンを挿入すると実験結果により、解析値どおり十分な反射抑圧ができ、広帯域となった。

今後の予定としては、先端傾斜ステップ短絡型の内導体を金属めっきした構造の導波路を試作・測定し、金属めっきでは精度のでなかった先端開放型、先端ステップ短絡型に対する優位性を確認する。以上まとめると、

課題

- ① モーメント法及び HFSS シミュレーションによる最適構造の検討
- ② 比誘電率 2.2 基板による同軸部の試作・評価

答え

- ① マイクロストリップ線路と導波路を擬似同軸構造を用いて接続する構造を有限要素法シミュレータにより設計し、61.25GHz で比誘電率 4.3 及び 3.5 の 2 層構造の基板で挿入損失 0.5dB を得た。
- ② ポスト壁導波路平行平板スロットアレーと RF 平面回路を低損失で接続する同軸ポスト壁導波路変換器を検討した。有限要素法シミュレータで解析した結果、同軸内導体の先端を基板途中で止める構造と、同軸内導体の先端にステップを付ける構造で、反射-15dB 以下となる比帯域がともに 10%以上となった。ステップ構造に関して 60GHz 帯で実験し、反射-15dB 以下となる比帯域幅が 12%得られた。

表 5-4-1. 各構造のまとめ

	先端短絡型	先端開放型	先端ステップ短絡型	先端傾斜ステップ短絡型 (120度)
解析値	2.0	15 以上	10.1	15 以上
実験値	0.6		15 以上	
加工	○	×	×	○

(解析値・実験値ともに単位は%)

5-5 総括

平成15年度はその第一歩として、材料組成の最適化、製造プロセスの最適化、高炭素濃度アルミナ形成技術の開発、モーメント法とHFSSの両手法を使った疑似同軸の最適化、等研究開発の基本となるテーマに取り組んだ。その結果、 $-25\text{ppm}/^\circ\text{C}$ の誘電率の温度特性の材料を使った共振器を試作し、発振器の発振周波数の温度特性を、アルミナ基板を使った従来の $-89\text{ppm}/^\circ\text{C}$ から $-20\pm 10\text{ppm}/^\circ\text{C}$ まで改善し、その技術の延長線に $0\text{ppm}/^\circ\text{C}$ の技術が存在することをつかんだ。また、電波吸収リッドを形成する基本技術が立ち上がった。同軸内導体の先端を基板途中で止める構造と、同軸内導体の先端にステップを付ける構造で、反射 -15dB 以下となる比帯域がともに 10% 以上となった。ステップ構造に関して 60GHz 帯で実験し、反射 -15dB 以下となる比帯域幅 12% が得られた。

これら成果を踏まえ引き続き研究開発を続けることにより、平成16年度の間目標達成は可能であると思われる。

参考文献

- (1) A. Yamada, Y. Amano, Y. Motouchi, N. Takahashi, E. Suemitsu and H. Sato, “ A compact 60 GHz sub-harmonically pumped mixer MMIC integrated with an image rejection filter,” 2002 IEEE MTT-S Dig., TH3A-5, pp. 1733-1736, 2002.
- (2) K. Maruhashi, K. Ikuina, T. Hashiguchi, J. Matsuda, W. Domon, S. Iwanaga, N. Takahashi, T. Ishida, Y. Yoshida, I. Izumi and K. Ohata, “ 60 GHz-band flip-chip MMIC modules for IEEE 1394 wireless adapters,” 2001 European Microwave Conference, Conference Proc., vol. 1, pp. 407 - 410, London 2001.
- (3) W. R. Deal, N. Kaneda, J. Sor, Y. Qian, T. Itoh, “ A new quasi-Yagi antenna for planar active antenna arrays,” IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. vol. 48, No. 48, pp. 910-918, June 2000.
- (4) 電波の吸収と遮蔽 日経技術図書株、1989年、P147、P110、
- (5) 橋本修 電波吸収体の話 日刊工業新聞社、2001年、P43 - 50, P111 - 113.
- (6) J. Hirokawa, M. Ando, IEEE Trans. Antennas Propagate, vol. 46 No. 5, pp. 625-630, may 1998,
- (7) A. G. Williamson, “Coaxially fed hollow probe in a rectangular waveguide” Proc. Inst. Elec. Eng., vol. 132, Part H, pp. 273-285, 1985
- (8) G. Williamson, “Analysis and modeling of a coaxial-line/rectangular-waveguide junction,” Proc. Inst. Elec. Eng., vol. 129, PtH, no. 5, pp. 262-270, 1972

(添付資料)

1. 研究発表、講演、文献等一覧

- 研究発表 1 件 -

加藤雄介、広川二郎、安藤 真、中野 洋、平地康剛、 “ミリ波帯ポスト壁導波路の同軸給電構造の基礎検討、” 電子情報通信学会、アンテナ電波伝搬研究会資料、
A・P2003-258、pp. 53-58、2004年1月。

- 講演 1 件 -

平地康剛、 “ ユビキタス・ワイヤレスコミュニケーションのためのミリ波メディアコンハータ、” 無機マテリアル学会、第13回講習会テキスト、pp. 66-75、平成16年2月。