

平成16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

委託先：ユーディナデバイス(株)

平成17年5月

情報通信研究機構

平成16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	2
2	研究開発の全体計画	4
2-1	研究開発課題の概要	4
2-2	研究開発目標	7
2-2-1	最終目標	7
2-2-2	中間目標	8
2-3	研究開発の年度別計画	12
3	研究開発体制	16
3-1	研究開発実施体制	16
4	研究開発実施状況（平成16年度）	17
4-1	ミリ波メディアコンバータの研究開発	17
4-1-1	位相雑音	17
4-1-2	発信器の温度特性	17
4-1-3	電波透過窓	18
4-1-4	低損失接続	18
4-1-5	ミリ波メディアコンバータの製品化	19
4-2	低コスト発振器用誘電体共振器基板材料の研究開発	21
4-2-1	材料の設計	21
4-2-2	基板焼成温度の最適化	21
4-3	電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの研究開発	22
4-3-1	誘電率の実部と虚部の自在制御	22
4-3-2	電波透過窓材と電波吸収体との接合技術	22
4-4	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	24
4-4-1	種々の接続方法	24
4-4-2	接続部損失の実測	25
4-4-3	ポスト壁導波路平面アンテナの S_{11} 特性	26
4-5	総括	27
5	参考資料・参考文献	27
5-1	研究発表・講演等一覧	

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。

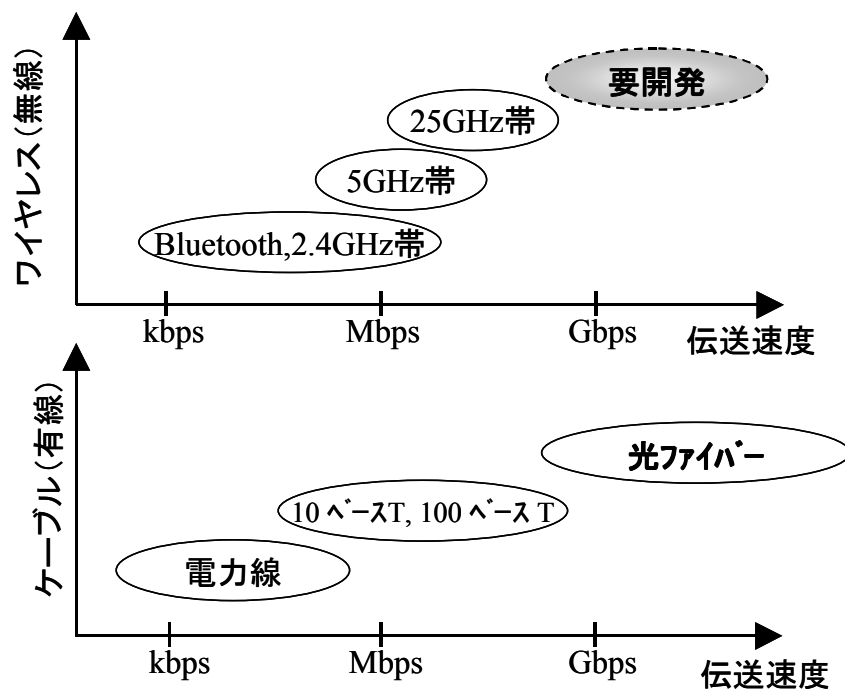


図 1-1. これまで開発されたケーブル(有線)及びワイヤレス(無線)の通信システムと伝送速度。ユビキタス社会では既存のあらゆるコミュニケーション手段が駆使される。

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とも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。

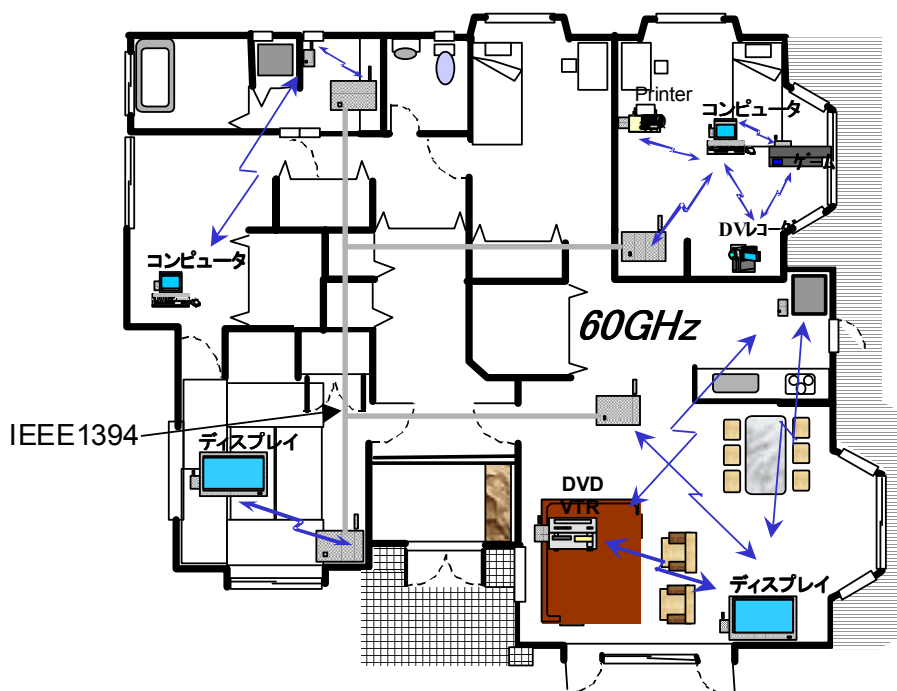


図 1-2. 数 Gbps の伝送速度を必要とするユビキタス
コミュニケーション環境のイメージ

(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離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③ MMIC 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. 研究開発の全体計画

2-1 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装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 60 GHz 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 10 dB 以下の特性を持たせる。アンテナは利得 5 dBi のパッチアンテナである。利得 5 dBi 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 30×20×6 mm³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 25 dBi 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 x 50 x 1.2 mm³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。25 dBi 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 30 m の伝送も可能である。もちろんアンテナは 5 dBi、25 dBi のみならず、15 ~ 35 dBi 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。20 dBi 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。

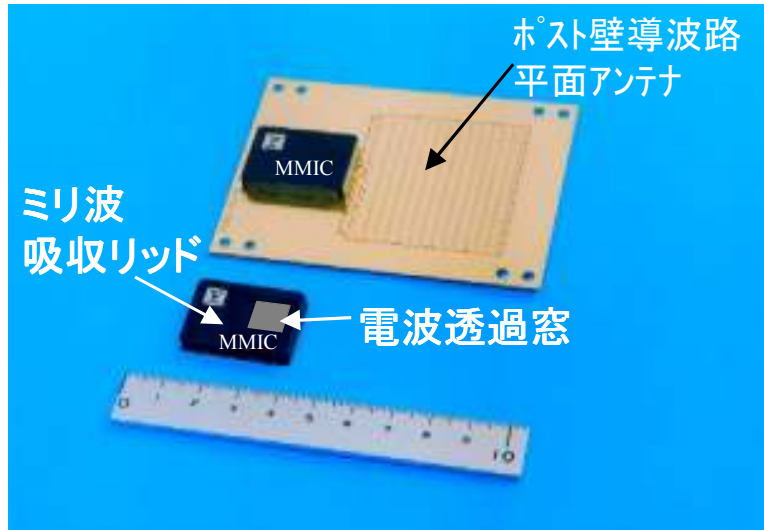


図 2-1. ミリ波メディアコンバータの完成イメージ。手前はアンテナを内蔵したミリ波メディアコンバータ。電波透過窓を備えたリッド（蓋）は、ミリ波吸収材で構成されている。パッケージサイズは $30 \times 20 \times 6 \text{ mm}^3$ 。奥は MMIC と利得 25 dBi のポスト壁導波路平面アンテナと一体化されたミリ波メディアコンバータ。

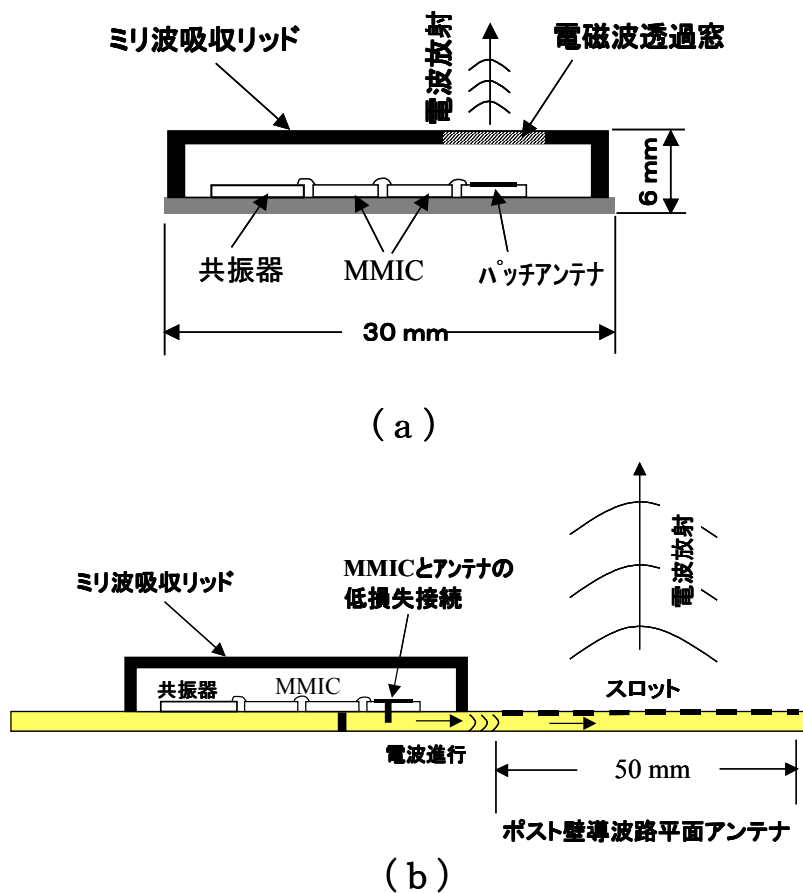


図 2-2 ミリ波メディアコンバータの断面構造イメージ。(a) 図 3. 手前のアンテナを内蔵したミリ波メディアコンバータ。(b) 図 3. 奥の MMIC とポスト壁導波路平面アンテナ一体型ミリ波メディアコンバータ。

(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。幹事社のユーディナデバイス(株)(当時富士通カンタムデバイス(株))では、2003年時点で図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。

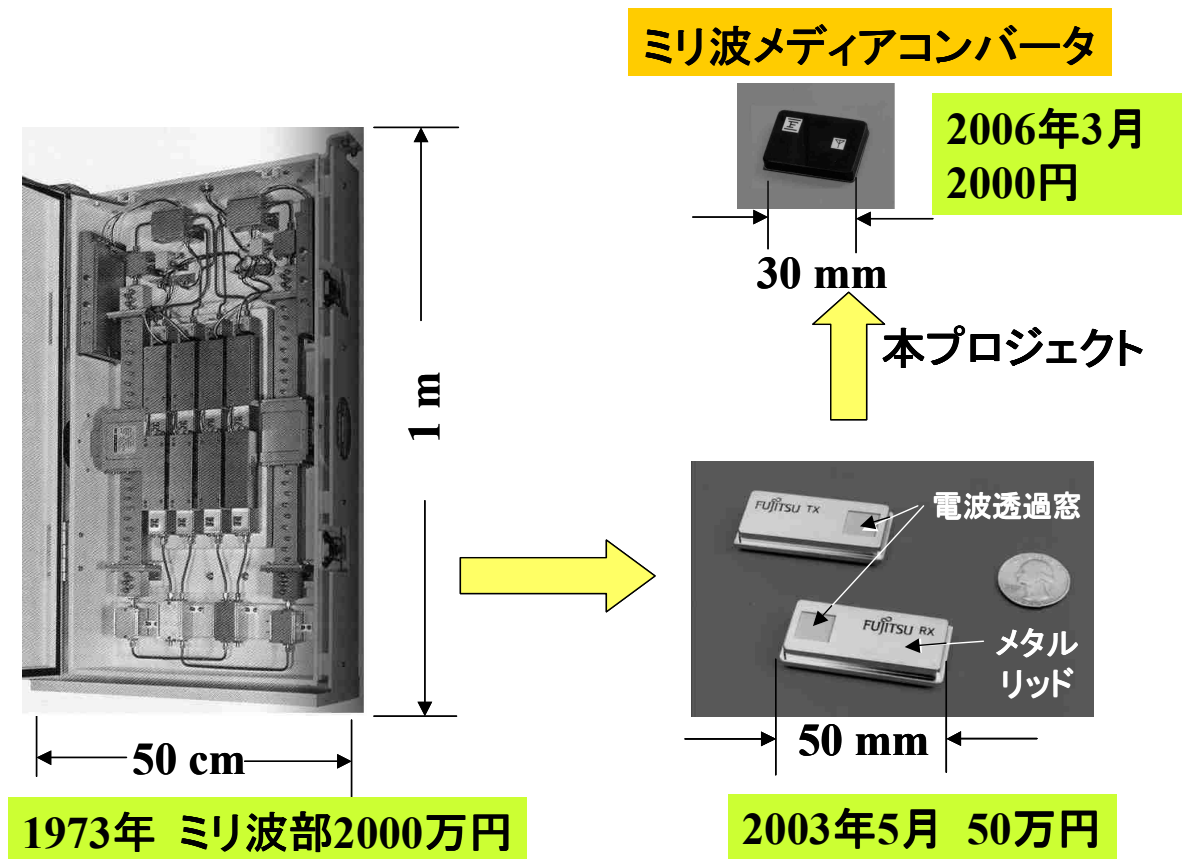


図 2-3 ミリ波メディアコンバータの価格イメージ

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標(平成18年3月末)

ユーディナデバイス(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 $0 \pm 5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 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	$P_{i_{\text{IF}}}$	-10	d Bm
RF 出力電力	P_o	10	d Bm
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 i

■ 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 2-1 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 0.5dB 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。

2-2-2 中間目標 (平成 17 年 1 月末)

ユーディナデバイス(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。

2-3 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					ユーディナデバイス(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。

(参考)

ユーディナデバイス(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

(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

(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

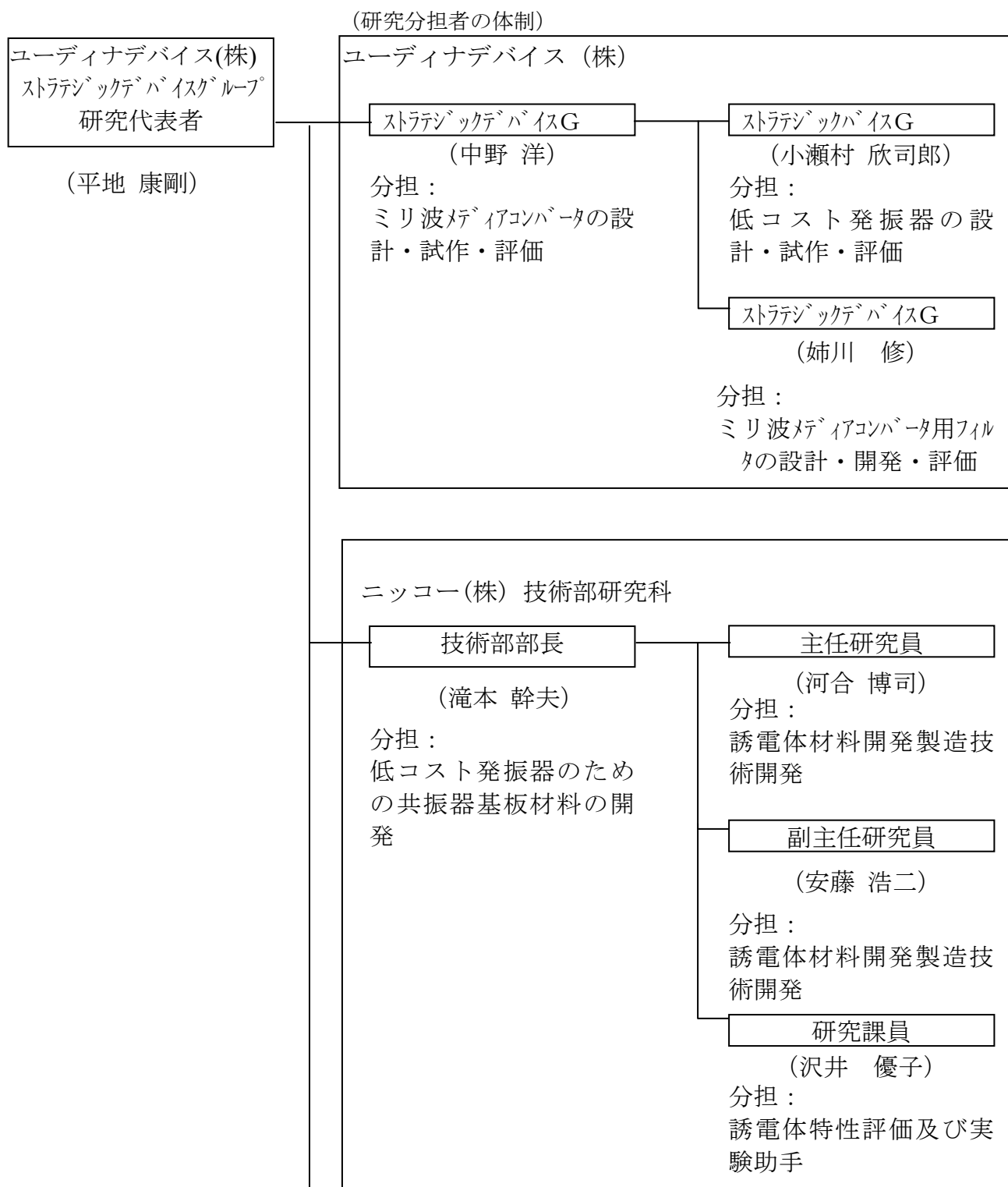
(金額は非公表)

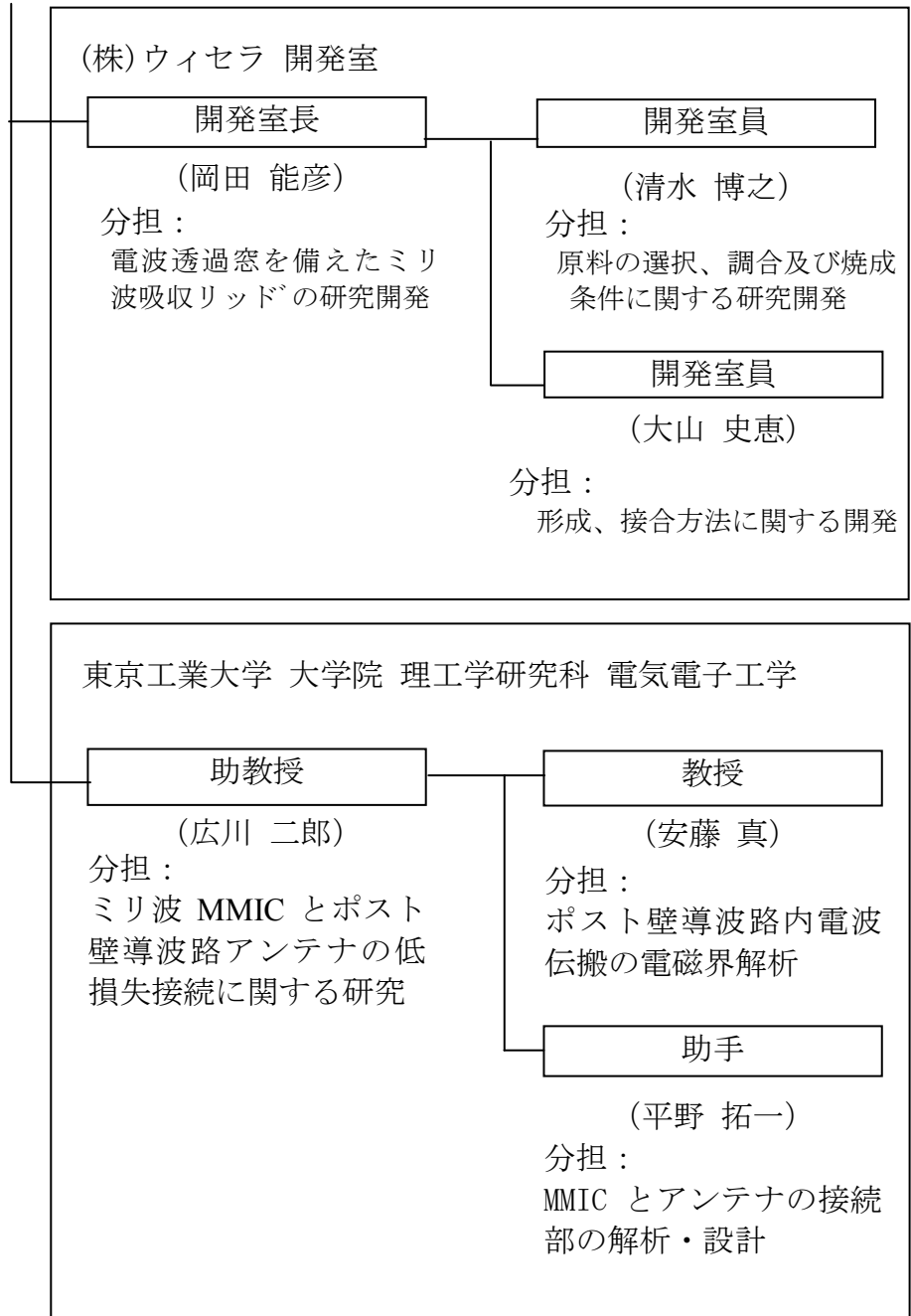
研究開発項目	15年度	16年度	17年度	年度	年度	計	備考
[ウ]ミリ波 MMIC とポスト壁導波路平面アンテナの低損失接続に関する研究開発		中間評価					
1. ミリ波 MMIC 平面線路と疑似同軸線路との低損失接続の実現(60 GHz で比帯域 4 %以上、 $S_{11} < -15$ dB、損失 1 dB 以下)	→	→					
2. ポスト壁導波路給電部同軸化(60GHz において比帯域 4 %以上、 $S_{11} < -15$ dB)		→					
・モーメント法及び HFSS シミュレーションによる最適構造の検討	→						
・比誘電率 $\epsilon_r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

3-1 研究開発実施体制





4 研究開発実施状況

4-1 ミリ波メディアコンバータの研究開発

4-1-1 位相雑音

サブテーマ[ア]によって開発した負誘電率温度特性を持った誘電体基板を使って50 GHz帯(原発振は14 GHz帯、4倍している)発振器を試作し、位相雑音を実測した。その結果を図4-1に示した。発振周波数 $f_{osc} = 52.736\text{GHz}$ の時、位相ノイズ -92.39 dBc/Hz (100 kHz off)が得られている。

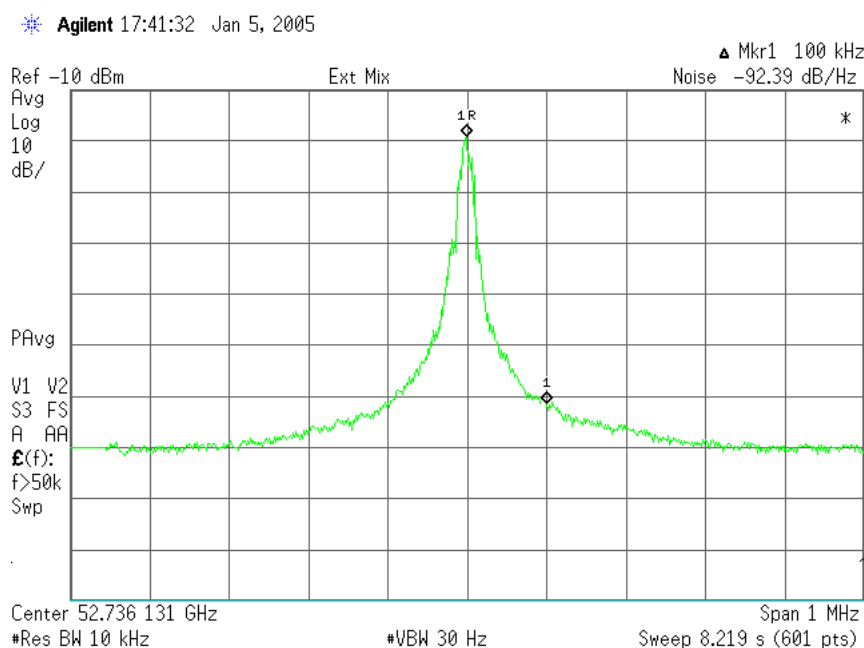


図 4-1. サブテーマ[ア]によって開発した誘電体基板を共振器とした発信器の発信特性。周波数52.736 GHzで、位相ノイズ -92.39 dBc/Hz (100 kHz オフキャリア) (マーカー1)。

4-1-2 発信器の温度特性

サブテーマ[ア]によって開発した負誘電率温度特性を持った誘電体基板を使って、14 GHz帯発振器を試作した結果、環境温度 50°C の時、発振周波数 $f_{osc} = 13.466\text{ GHz}$ を中心として、発振周波数の温度特性 $0\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ を得た。その結果を図 4-2に示す。さらに環境温度 $0^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ の範囲で、発振周波数の温度変化が $\pm 5\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ の範囲に入ることを確認した。参考として、従来のアルミナ基板の共振器を使った発信器の温度特性を載せた。温度特性は $-70\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ であり、開発した負温度誘電率基板の効果がよく分かる。

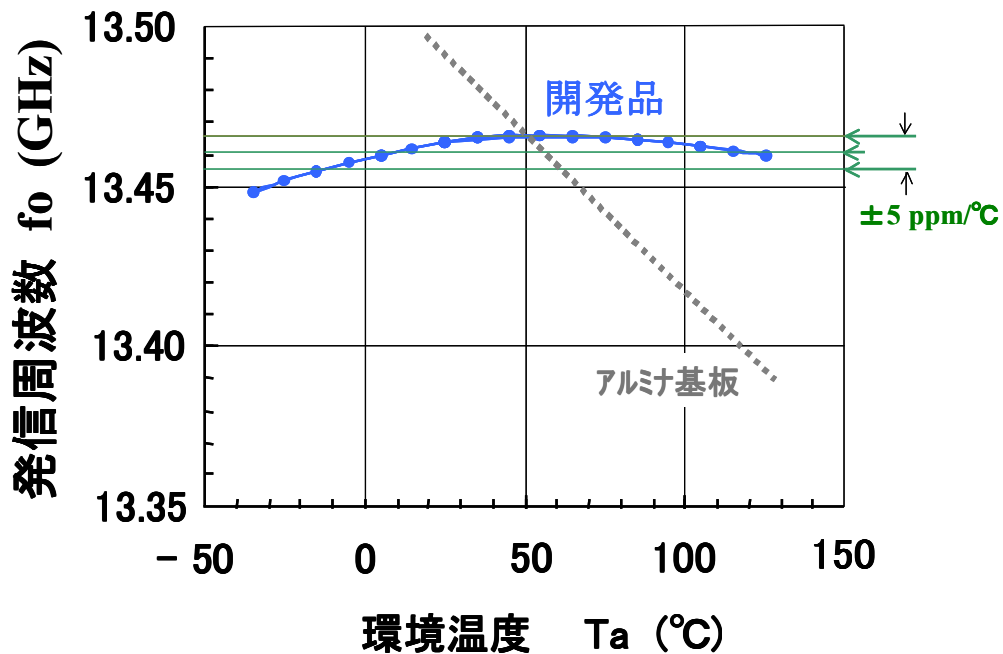


図 4-2. サブテーマ[A]によって開発した誘電体基板を共振器とした発信器の温度特性。環境温度50 °Cの時、0 ppm/°Cが実現している。図に示した範囲が±5 ppm/°Cである。参考として、従来のアルミナ基板の共振器を使った発信器の温度特性を載せた。

4-1-3 電波透過窓

電波透過窓の可能性の確認が中間目標でありその電気的特性の目標は、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以上である。デバイスのリッドとして製造するためには電波透過窓とミリ波吸収体部分との厚みを一致させねばならず、最終的には両者のトレードオフになろう。現在までに、実現可能な厚みの1 mm前後で透過損失1 dBが得られている。ミリ波吸収体の電波減衰量は組成配合を最適化し、リッドの厚みを1.1 mmにすれば、60 GHz帯の吸収20 dB以上が可能であることがシミュレーションで得られ、さらに実測によって確認した。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] の項で、詳細を述べる。

4-1-4 低損失接続

今期は、MMICと比誘電率が2.2のPTFE(テフロン)基板を用いたポスト壁導波路平面アンテナとを低損失で接続することを目指した。その結果、先端ステップ短絡型の接続構造で、61.4 GHzを中心として帯域2.5 GHz、比帯域4.1 %の特性が得られている。詳細を、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で述べる。

4-1-5 ミリ波メディアコンバータの製品化

2004年11月10日付で、「ミリ波メディアコンバータ」は製品として発売された。製品名は「60-GHz モジュール」である。現状は、エンジニアリングサンプル (ES) で、価格も高価であるが、現在本研究開発で開発中の技術が完成すれば、順次技術を適用し価格を下げていく計画である。

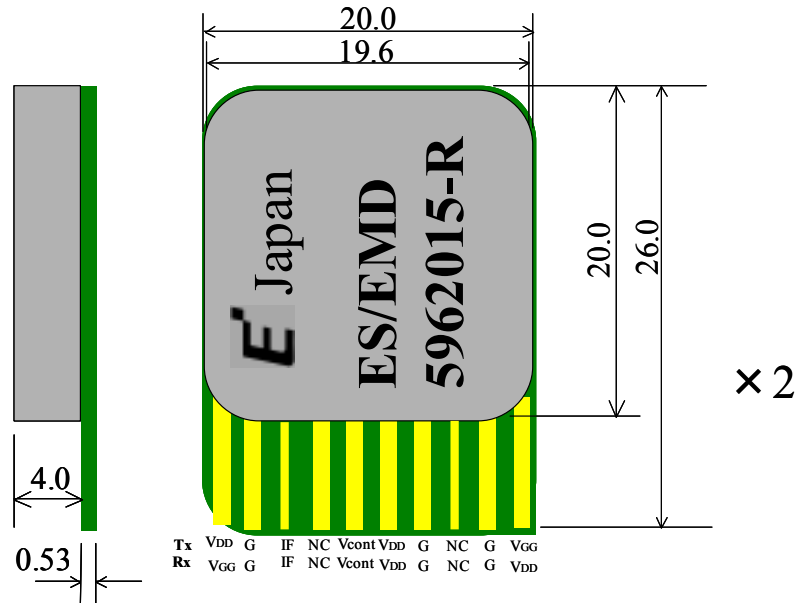


図 4-3. 60-GHz モジュール外形

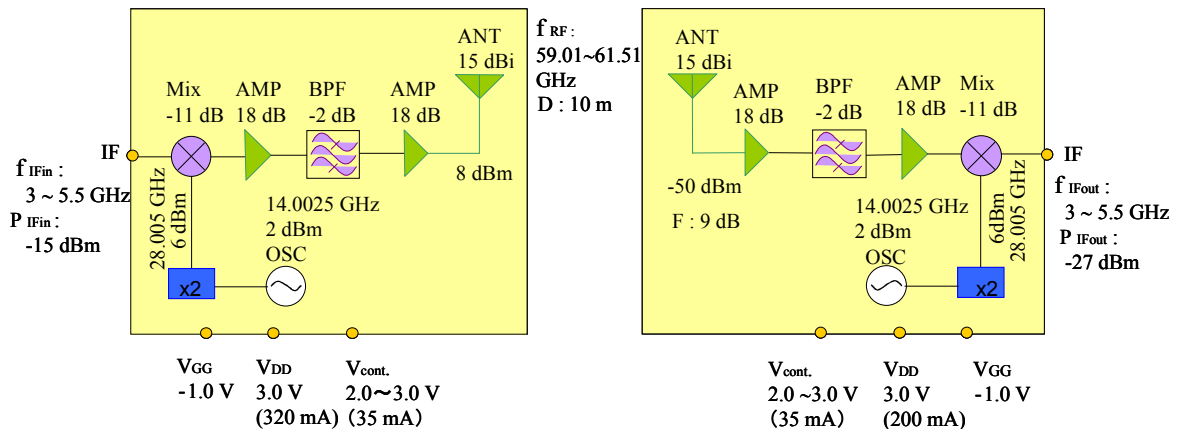


図 4-4. ブロックダイアグラム例

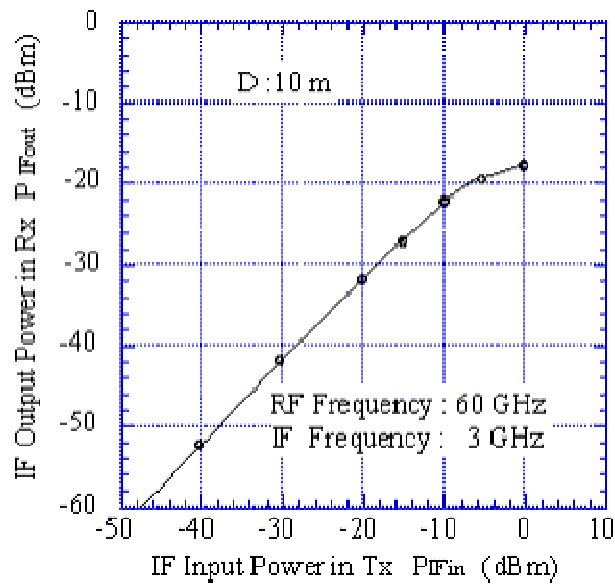


図 4-5. 送・受信機モジュールを 10 m (= D) の距離で動作させた場合の入力・出力特性。

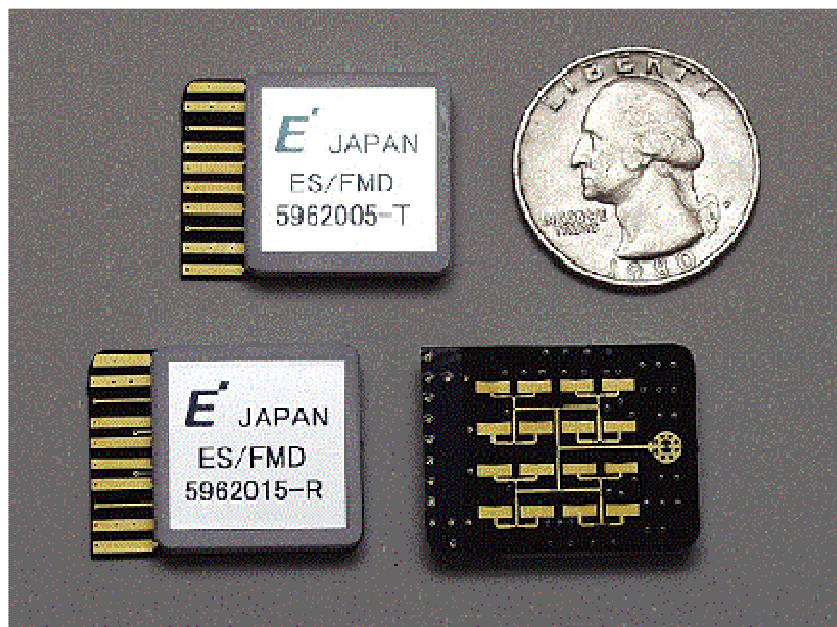


写真 4-1. 60 GHz モジュールの完成写真

4-2 低コスト発振器用誘電体共振器基板材料の研究開発

4-2-1 材料の設計

イルメナイト構造を持つ MgTiO_3 とペロブスカイト構造を持つ CaTiO_3 とを自在に組み合わせることにより、比誘電率温度係数を $0 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ から $-120 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ にする材料開発について材料組成の調整で達成できた。結果を図 4-6 に示す。

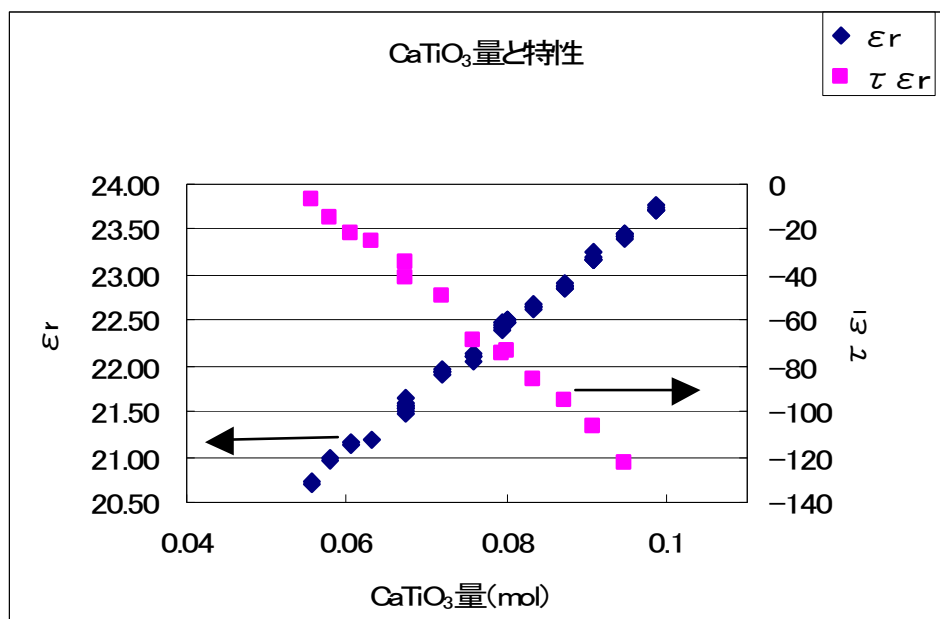


図 4-6. MgTiO_3 内の CaTiO_3 のモル数を変えたときの比誘電率 ϵ_r (青) と比誘電率温度係数 $\tau \epsilon_r$ (ピンク) の変化。 $0 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ から $-120 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ まで自在に調整可能。

4-2-2 基板焼成温度の最適化

材料の比誘電率のばらつきを起こす重要な因子の一つに基板焼成温があることは平成15年度の報告書で述べたが、今期は、温度を 1230°C から 1400°C まで $10^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ ずつ変化させてさらに詳細に基板焼成温度の最適化を求めた。その結果を図4-7に示した。温度範囲が $1310^\circ\text{C} \sim 1370^\circ\text{C}$ では比誘電率のバラツキ σ は $0.02 \sim 0.03$ となった。この値は中間目標の 0.15 はおろか最終目標の 0.02 に匹敵するものである。このようにして試作した基板の比誘電率の温度係数のばらつきは実測で $\sigma = 2.6 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ となり、中間目標の $3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ をクリアした。

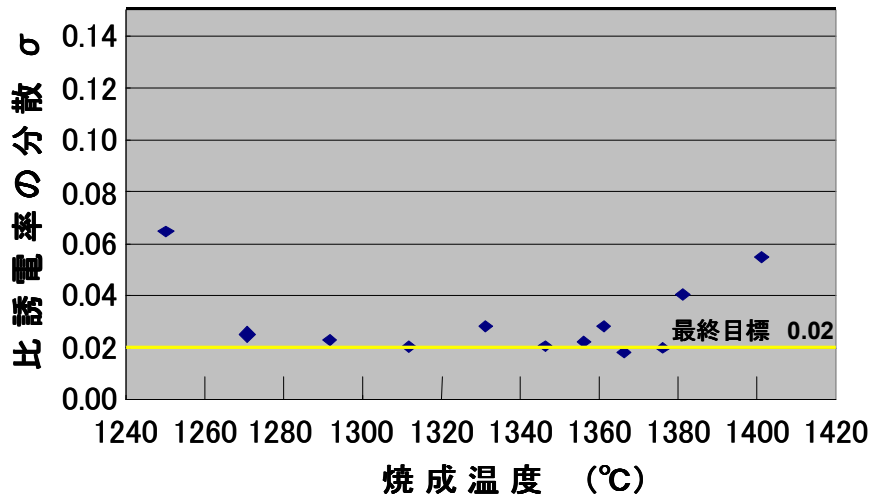


図 4-7. 基板焼成温度の最適化 1310 °C～1370 °Cでは比誘電率のバラツキ σ は 0.02～0.03 である。

4-3 電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの研究開発

4-3-1 電波吸収体の設計チャート

電波吸収体の設計チャートを図4-8に示した。この図は周波数を60 GHzとしたときの無反射条件を満たす誘電体の厚みおよび誘電率の実部と虚部の組み合わせの計算値が一次無反射曲線と二次無反射曲線として表されている。一方アルミナにカーボンブラックを数%含有させた場合の誘電率の実測値をプロットしたものがW-5.0、W-1.5、W-1.2と表されている。これら計算値と実測値の交点が、電波吸収体リッドの設計値となる。その結果、例えば、グラファイトを含有させ、厚みを1.06 mmにした場合、電波吸収は60 GHzで12 dBが得られた。また、図 4-7に示すように、アルミナ材にカーボンブラックを1.2%含有し、試料の厚みを1.105 mmとすると、61.25 GHzで減衰量28 dBが得られた。試料は100 × 100 mm²の各所の実測結果であり、材料は均一に作られていることがわかる。

4-3-2 電波透過窓材と電波吸収体との接合技術

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については、リッド量産を考慮してプレス成形が有利であると判断した。この方法は水分量が0.4%と極端に少なくよく、乾燥・焼成時の収縮が無視できからである。窓の形状は、矩形の場合、角の四隅に亀裂が入り易い。一方、窓が円形である場合、収縮時に発生する円の外側に向かえ応力は等方的に分散され、力の集中は無く亀裂が生じにくくなる事が分かった。電波透過窓特性は、60 GHzにおける損失が1.0 dBであり、電波吸収部での厚みとの整合性を考慮すると、0.5 dBの実現は困難かも知れない。

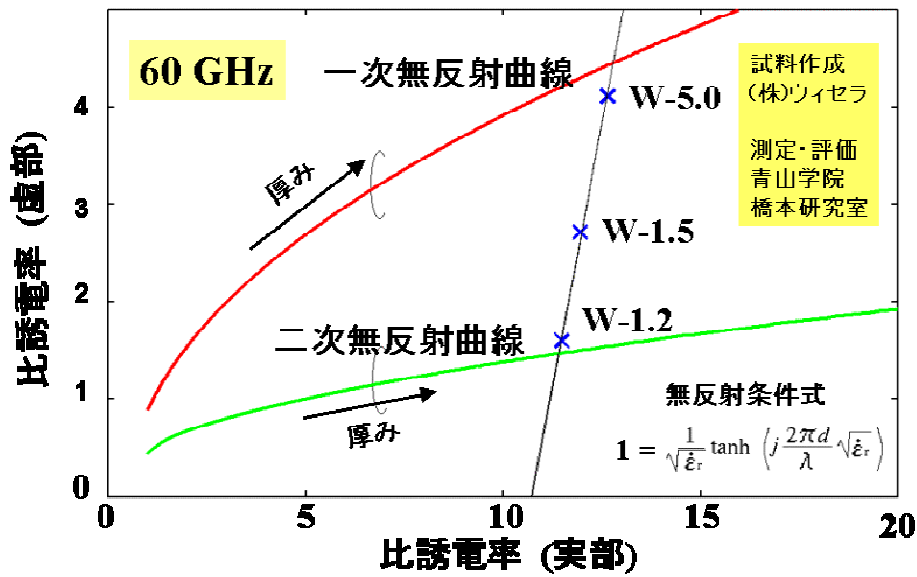


図 4-8. 電波吸収体の設計チャート。周波数を 60 GHz としたときの無反射条件を満たす誘電体の厚み d 、誘電率の実部と虚部の組み合わせの計算値が一次無反射曲線と二次無反射曲線として表されている。一方アルミナにカーボンブラックを数 % 含有させた場合の誘電率の実測値をプロットしたものが W-5.0、W-1.5、W-1.2 と表されている。これら計算値と実測値の交点が、電波吸収体リッドの設計値となる。

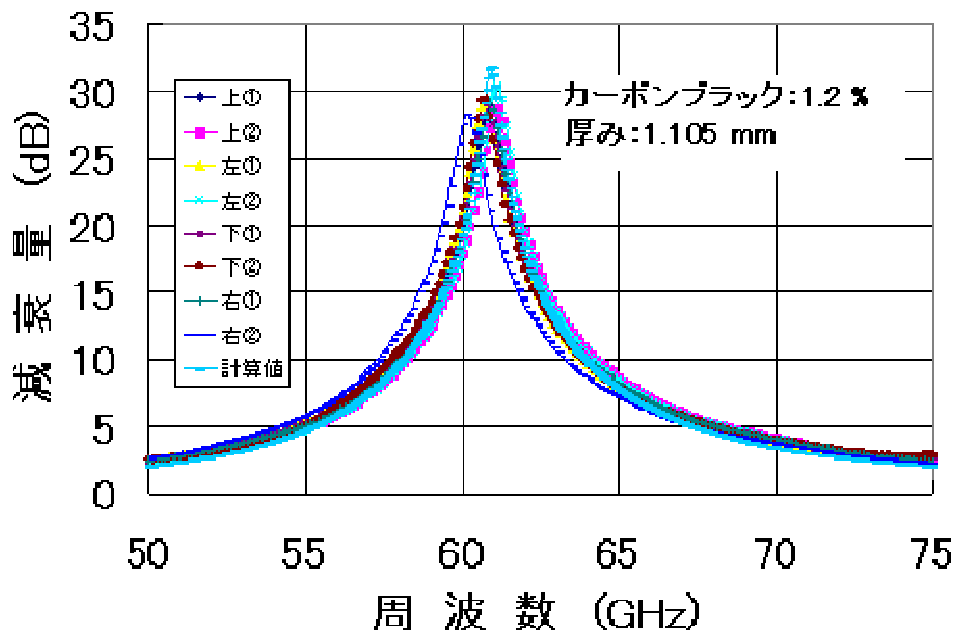


図 4-9. アルミナ電波吸収体の吸収特性の実測値。カーボンブラック含有量 1.2%、試料の厚み 1.105 mm。60 GHz から 62 GHz にわたって減衰量 20 dB が得られている。

4-4 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

4-4-1 種々の接続方法

比誘電率が2.2のPTFE(テフロン)基板を用いて、マイクロストリップ線路とポスト壁導波路を擬似同軸構造により接続する構造を有限要素法シミュレータにより設計した。今期は反射(Reflection = S_{11})が -15dB 以下で比帯域4%の構造の実現をめざした。先端短絡型(短絡終端型)、先端開放型(開放終端型)、先端短絡ステップ型(ステップ短絡終端型)、先端短絡傾斜ステップ型の4種類の構造に関して解析した。図4-10にそれぞれの上面構造、断面構造を示す。同軸側からの反射特性(S_{11})で特性の良否を判定した。

図4-10(a)の同軸内導体の先端が基板の一方の導体に接続されている先端短絡型及び(b)の同軸内導体の先端を基板途中で止める先端開放型は、内導体の長さ h 、内導体の中心からポスト壁導波路(疑似導波管)の短絡壁までの距離 s 、反射抑圧ポストの導波路中心からの距離 p 及び同軸内導体の中心までの距離 q 、によって反射特性が決まる。一方、(c)の先端短絡ステップ型は反射抑圧ポストは不要で、ステップの直径 d が影響する。また(d)

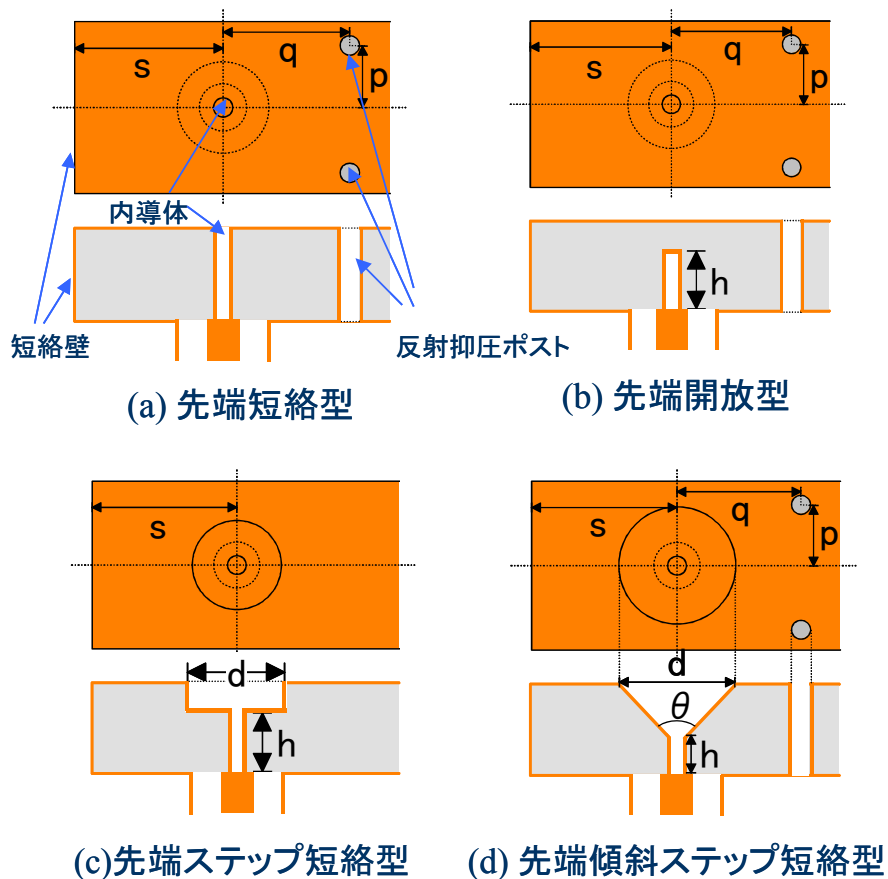


図 4-10. ポスト壁導波路と同軸線路の各種接続方法

の先端傾斜ステップ短絡型は傾斜角度も影響する。このような構造についてそれぞれ反射特性の最適値を有限要素法シミュレータにより求めた。それらの結果を基にして各接続構造を試作し、同軸側にVコネクタを装着して反射特性を実測した。その結果を図4-11に示す。

先端短絡型は反射特性(Reflection = S_{11})が-10 dB以下としても帯域幅は1.3 GHz, 比帯域2.1%で、目標に達しない。先端ステップ短絡型では-15 dB以下の帯域幅は7.2 GHz, 比帯域12.0%で、十分目標をクリアーしていることがわかる。先端傾斜ステップ短絡型も同様に広帯域である。

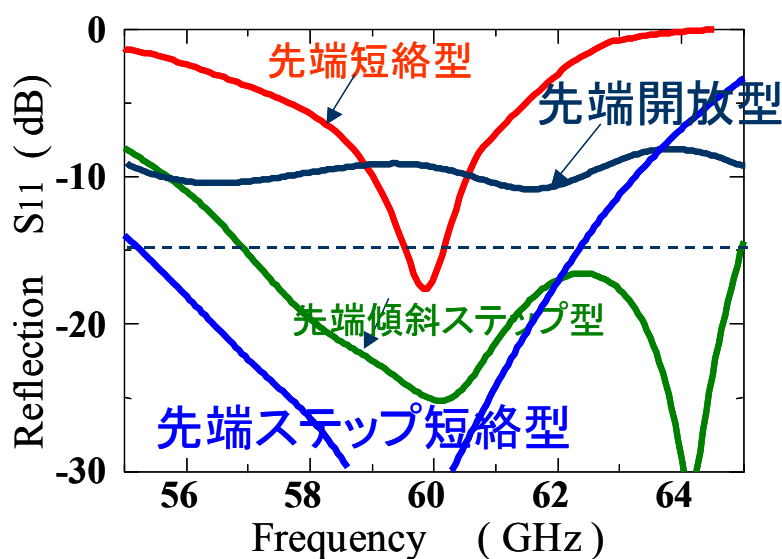


図 4-11. ポスト壁導波路と同軸線路の各種接続方法の S_{11} の実測値

4-4-2 接続部損失の実測

図 4-8 にポスト壁導波路長を種々変えた時の先端短絡型接続構造の挿入損失の実験値を示す。実験では、PTFE(テフロン)基板の上に同軸/ポスト壁導波路変換部を2ヶ所を変えたものを5種(40、70、100、130、160 mm)作成し S_{21} を測定した。それらの実測値のプロットを内挿して同軸/同軸間距離が0 mmでの値を2で割ったものを1ヶ所の同軸/ポスト壁導波路変換部の損失とした。図8. より損失は0.9 dB(平均)となる。これは、先端短絡型の実測値であるが、 S_{11} が -15 dBとなる周波数59.5 GHzで測定しており、他の接続構造も S_{11} が -15 dBならば同様の特性となるはずである。

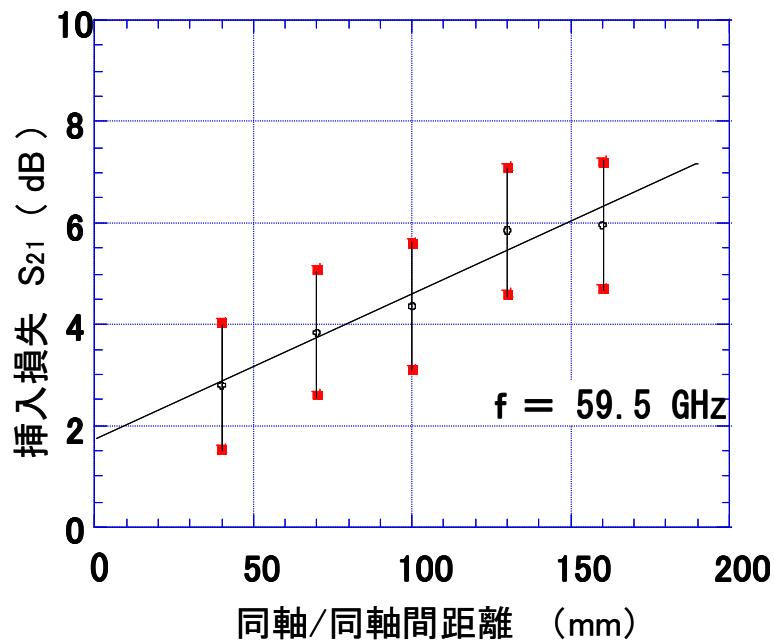


図 4-12. ポスト壁導波路長の変化に対する先端短絡型接続方法の挿入損失の実測値。同軸/ポスト壁導波路変換部を2ヶ所構成。その距離を変化。したがって、実測値を内挿して同軸/同軸間距離が0 mmでの値は、2ヶ所の同軸/ポスト壁導波路変換部の損失を表している。したがって1ヶ所の損失はその1/2の0.9 dB(平均)となる。

4-4-3 ポスト壁導波路平面アンテナのS₁₁特性

これらの接続構造を、ポスト壁導波路の先にさらにポスト壁導波路型平面アンテナを形成して、同様に同軸端にVコネクタを装着して反射特性を実測した。その結果を図4-9に示す。先端開放型の場合、反射特性(Reflection)が-10 dB以下となる周波数が61.9 GHzから64.5 GHzで、周波数63.2 GHzを中心として帯域2.6 GHzとなっており比帯域としては4.1%である。また、先端ステップ短絡型は、同条件で60.2 GHzより62.6 GHzで、61.4 GHzを中心として帯域2.5 GHzとなっており比帯域としては4.1%が得られている。ミリ波メディアコンバータの仕様帯域2.5 GHzを満足している。

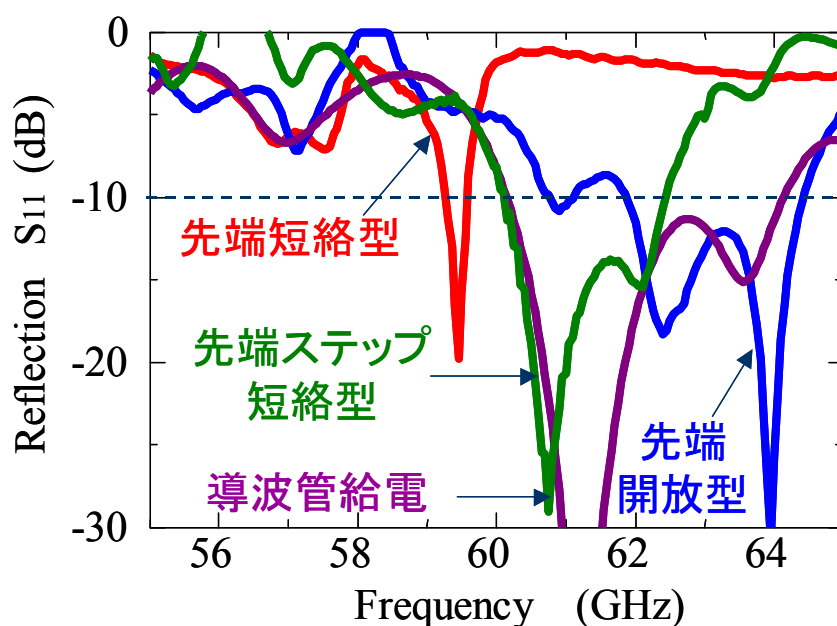


図 4-13. アンテナも含めた各種接続方法の反射特性 (Reflection = S_{11}) の実測値。

4-5 総括

以上報告したように、ほぼ中間目標を達成してきており、一部は最終目標に迫る特性も得られている。一方、電波透過窓の60 GHzに於ける損失を0.5 dB以下に抑える目標は、リッド(蓋)を構成する電波吸収体の厚みとの兼ね合いで、必ずしもそれじたいのみで決定できないために、当初目標を達成できないものも見えてきており、厚みの最適化を測っていく必要があることが分かってきた。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

1. 中川貴夫・広川二郎・安藤 真・平地康剛, “誘電体カバーによるパッチアンテナの利得向上効果に関するFDTD解析による理解”, 電子情報通信学会2004年総合大会、B-1-79、2004-3.
2. 中川貴夫・広川二郎・安藤 真・中野 洋・平地康剛, “パッチアンテナ上の電波吸収体カバー内誘電体透過窓のFDTD解析と設計”, 電子情報通信学会技術研究報告、AP2004-198、2005年1月.

3. 高瀬康治、岡田能彦、平地康剛、橋本 修、“ミリ波帯における近傍界電波吸収体に関する検討、” 電子情報通信学会、信学技報Vol. 104、No. 672、MW2004-257、pp. 131-133、2005年3月.
4. 熊田健人、岡田能彦、平地康剛、橋本 修、“ミリ波帯におけるアルミナの電波吸収・透過特性の検討、” 電子情報通信学会、信学技報Vol. 104、No. 672、MW2004-257、pp. 135-139、2005年3月
5. 甲斐貴文、広川二郎、安藤 真、中野 洋、平地康剛、“ミリ波メディアコンバータ用ポスト壁導波路の同軸給電、” 電子情報通信学会、2005年総合大会、マイクロA、C-2-24、2005年3月.
6. 中川貴夫、広川二郎、安藤 真、中野 洋、平地康剛、“ミリ波メディアコンバータ用電波吸収リッド内電波透過窓のFDTD解析と設計、” 電子情報通信学会、2005年総合大会、マイクロA、C-2-25、2005年3月.
7. 高瀬康治、岡田能彦、平地康剛、橋本 修、“ミリ波メディアコンバータ用電波吸収リッドのFDTD法による最適設計、” 電子情報通信学会、2005年総合大会、マイクロA、C-2-26、2005年3月.
8. 熊田健人、根岸博和、岡田能彦、平地康剛、橋本 修、“ミリ波メディアコンバータ用電波透過窓付電波吸収体セラミックリッドの設計、” 電子情報通信学会、2005年総合大会、マイクロA、C-2-27、2005年3月.