

平成17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18年4月

情報通信研究機構

# 平成17年度 研究開発成果報告書 (一般型)

「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(平成18年3月末)	7
2-2-2	中間目標(平成17年1月末)	8
2-3	研究開発の年度別計画	10
3	研究開発体制	15
3-1	研究開発実施体制	15
4	研究開発実施状況	17
4-1	研究開発の構造	17
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	18
4-3	電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの研究開発	28
4-4	パッチアンテナ上の電波吸収体リッドに設けた誘電体窓の最適設計	35
4-4-1	電磁波吸収リッド内 円形電波透過窓の解析	35
4-4-2	測定結果	37
4-4-3	まとめ	39
4-5	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	40
4-5-1	ポスト壁導波路と平面アンテナ	40
4-5-2	接続方法	41
4-5-3	反射特性のコンピュータ解析	42
4-5-4	製造上の問題点	44
4-5-5	反射特性の実測	45
4-5-6	まとめ	47
4-6	温度補償VCOの開発	48
4-6-1	VCOの構成	48
4-6-2	位相雑音	49
4-6-3	発振器の温度特性	50
4-7	ミリ波メディアコンバータの構造	51
4-7-1	内部の構造	51
4-7-2	インターフェイス構造	52
4-8	ミリ波メディアコンバータの性能	54
4-8-1	ミリ波メディアコンバータの特性および製造性	54
4-8-2	伝送実験	55
4-9	信頼性試験	60
4-10	総括：ミリ波メディアコンバータの製品化にむけて	61
5	参考資料・参考文献	64
5-1	研究発表・講演等一覧	64

別紙

## 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。

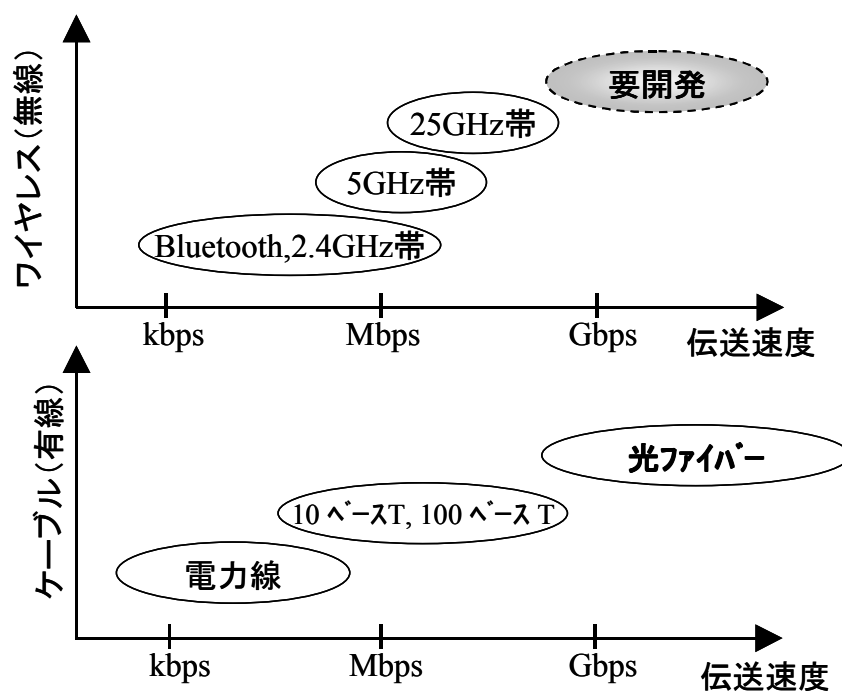


図 1-1. これまで開発されたケーブル(有線)及びワイヤレス(無線)の通信システムと伝送速度。ユビキタス社会では既存のあらゆるコミュニケーション手段が駆使される。

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。

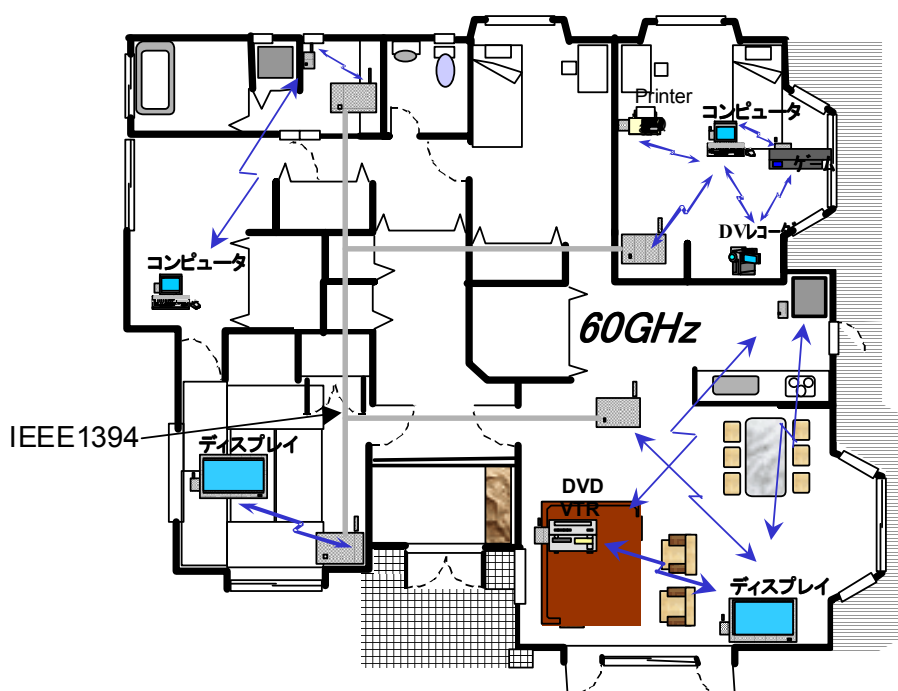


図 1-2. 数 Gbps の伝送速度を必要とするユビキタス  
コミュニケーション環境のイメージ

## (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 チャンネル 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) が現実のものになり、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 2-1. 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 mm<sup>3</sup> を仮定するが、これよりさらに小型化も検討に入れる。

図 2-1 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 mm<sup>3</sup> 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 2-2 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。

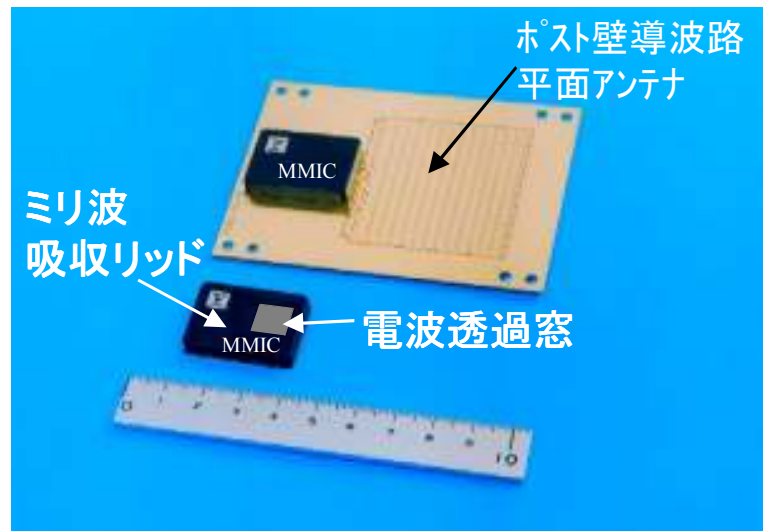


図 2-1. ミリ波メディアコンバータの完成イメージ。手前はアンテナを内蔵したミリ波メディアコンバータ。電波透過窓を備えたリッド（蓋）は、ミリ波吸収材で構成されている。パッケージサイズは  $30 \times 20 \times 6 \text{ mm}^3$ 。奥は MMIC と利得 25 dBi のポスト壁導波路平面アンテナと一体化されたミリ波メディアコンバータ。

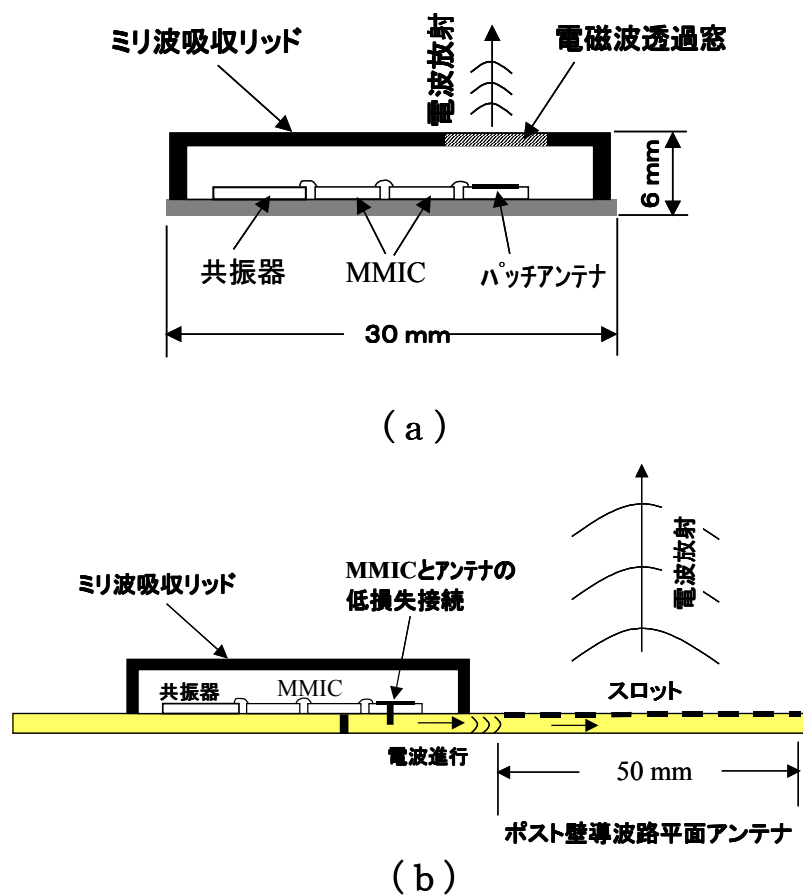


図 2-2 ミリ波メディアコンバータの断面構造イメージ。(a) 図 3. 手前のアンテナを内蔵したミリ波メディアコンバータ。(b) 図 3. 奥の MMIC とポスト壁導波路平面アンテナ一体型ミリ波メディアコンバータ。

## (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1 m x 0.5 m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2-3下段右に示すようなメタルパッケージ60 GHz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<sup>(註1)</sup>。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2-3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<sup>(註2)</sup>。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。

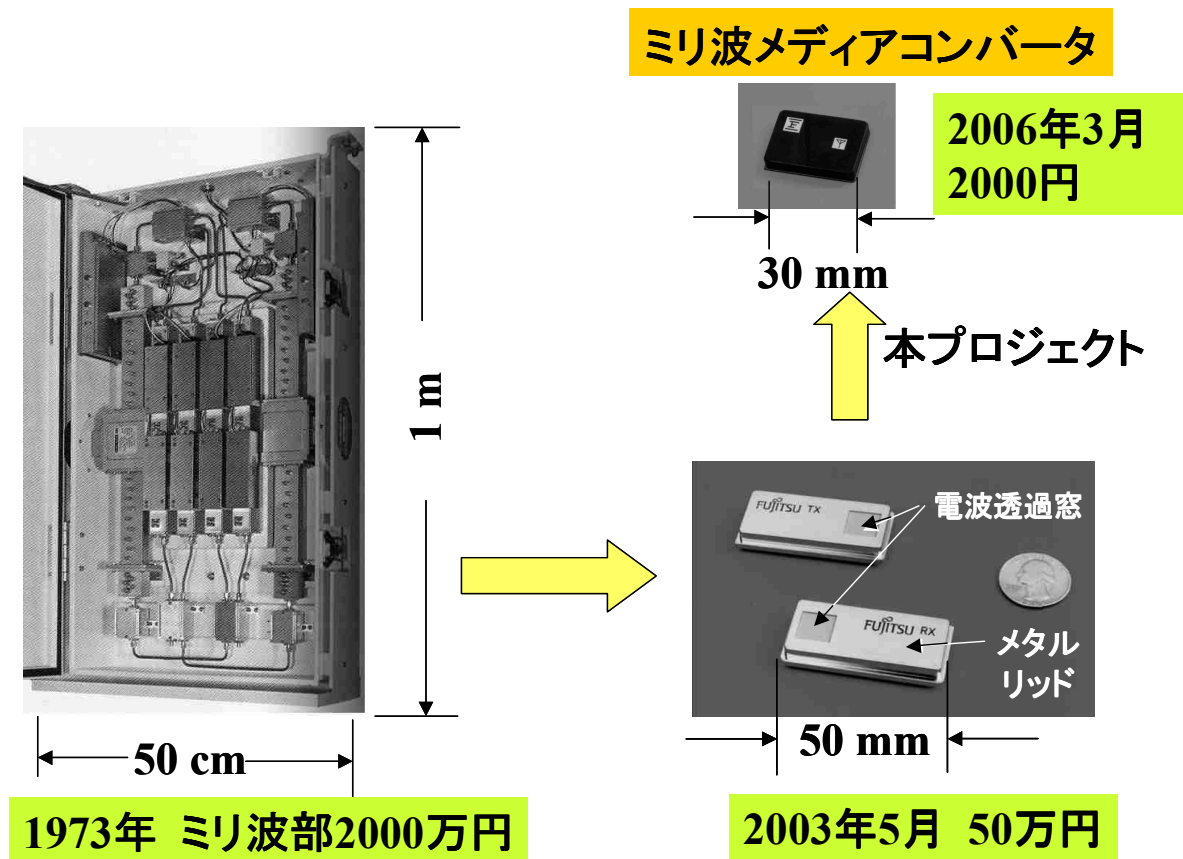


図2-3 ミリ波メディアコンバータの価格イメージ

## 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2-1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  $0 \pm 5$  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 0.5 dB以下、ミリ波吸収体の減衰値 20 dB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 1 dB以下、帯域 2.5 GHz以上)。

#### 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/°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 $\sigma$ で0.02を達成。
- (3) 材料の比誘電率温度係数のばらつきが $\sigma$ で2 ppm/°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) 60GHz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°C: 600°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 およびパッチアンテナ上の電波吸収体カバーに設けた誘電体透過窓の最適設計に関する研究開発

- (1) 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、60GHzで比帯域4%以上、反射-15 dB以下、挿入損失 0.5 dB以下。
- (2) パッチアンテナ上の電波吸収体カバーに設けた誘電体透過窓の最適設計を行う。  
電波透過窓の損失 1.0 dB以下 (60GHz)



## ミリ波メディアコンバータ（送信機）

### ■ 電気的特性

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	$\Delta f_{IF}$	3.0–5.5	GHz
IF 入力電力	$P_{i_{IF}}$	–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	p p m

### ■ 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 <sup>3</sup>

## ミリ波メディアコンバータ（受信機）

### ■ 電気的特性

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	$\Delta f_{IF}$	3.0–5.5	GHz
変換利得	$G_c$	20	d B
雑音指数	F	10.0	d B
動作電流	$I_D$	350	mA
周波数安定性	—	±500	p p m
アンテナ利得	G	25	d B 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 <sup>3</sup>
アンテナサイズ	—	50 x 50 x 1.2	mm <sup>3</sup>

表 2-1 ミリ波メディアコンバータの電気的仕様と外形サイズ(目標)

## 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/°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  $-25 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ 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 $\sigma$ で0.15 比誘電率の温度係数のばらつきが $\sigma$ で $3 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ 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 $-15 \text{ dB}$ 以下、挿入損失  $1.0 \text{ dB}$  以下。現状のポスト壁位置精度  $50 \mu\text{m}$  以内、エッチング幅精度  $20 \mu\text{m}$  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 低損失接続およびパッチアンテナ上の電 波吸収体カバーに設けた誘電体透過窓の 最適設計に関する研究開発							(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
<p>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)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>発振周波数温度係数-20 ppm/°Cを実現</li> <li>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)</li> <li>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)</li> </ul>		<p>中間評価</p>					
<p>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</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ミリ波メディアコンバータに実装時の発振器温度特性 <math>0 \pm 5</math> ppm を実現</li> <li>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)</li> <li>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)</li> <li>ミリ波メディアコンバータの信頼性確認</li> </ul>							
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							

(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							

(参考)

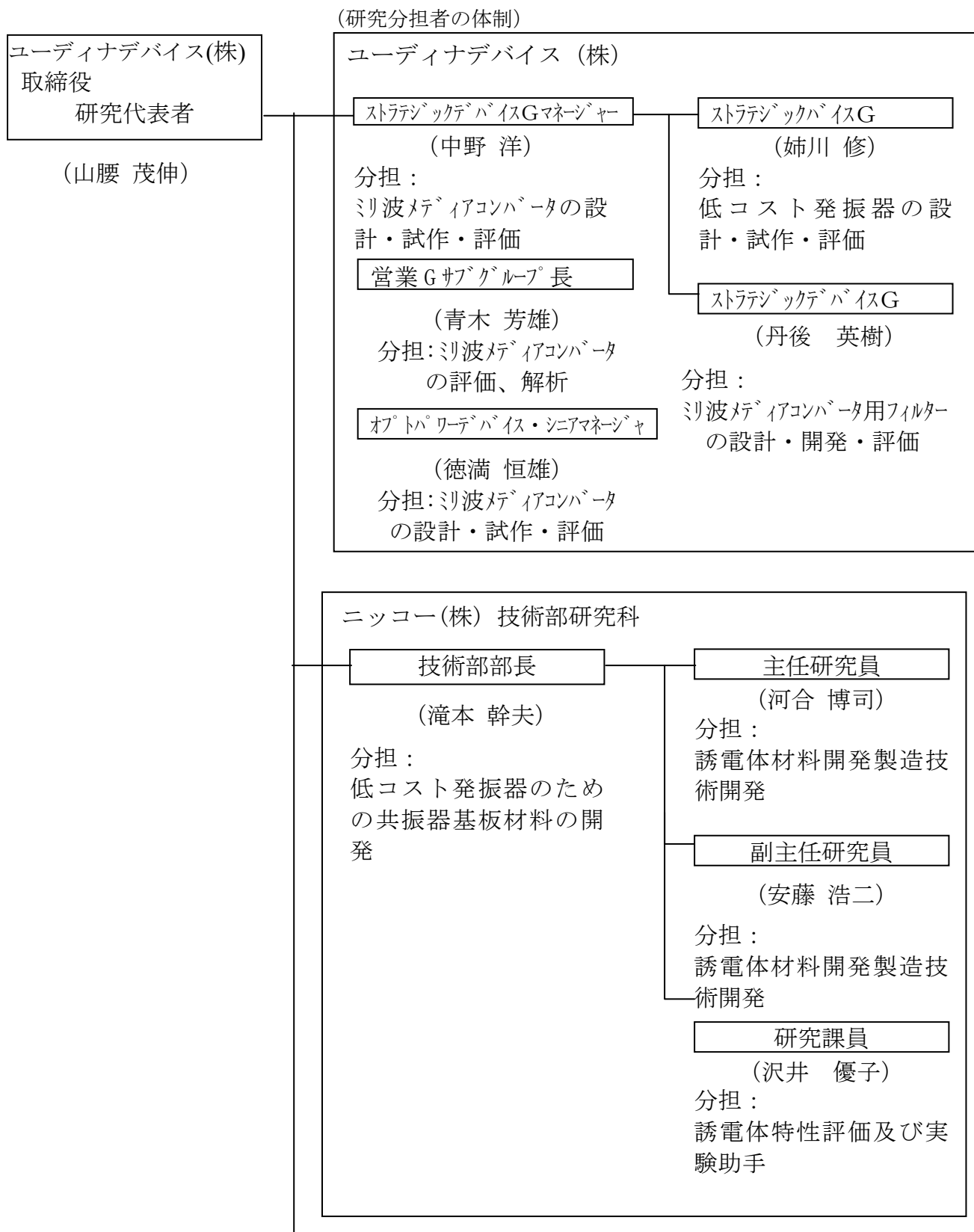
東京工業大学 サブテーマ：[ウ]ミリ波 MMIC とポスト壁導波路平面アンテナの低損失接続およびパッチアンテナ上の電波吸収体カバーに設けた誘電体透過窓の最適設計に関する研究開発

(金額は非公表)

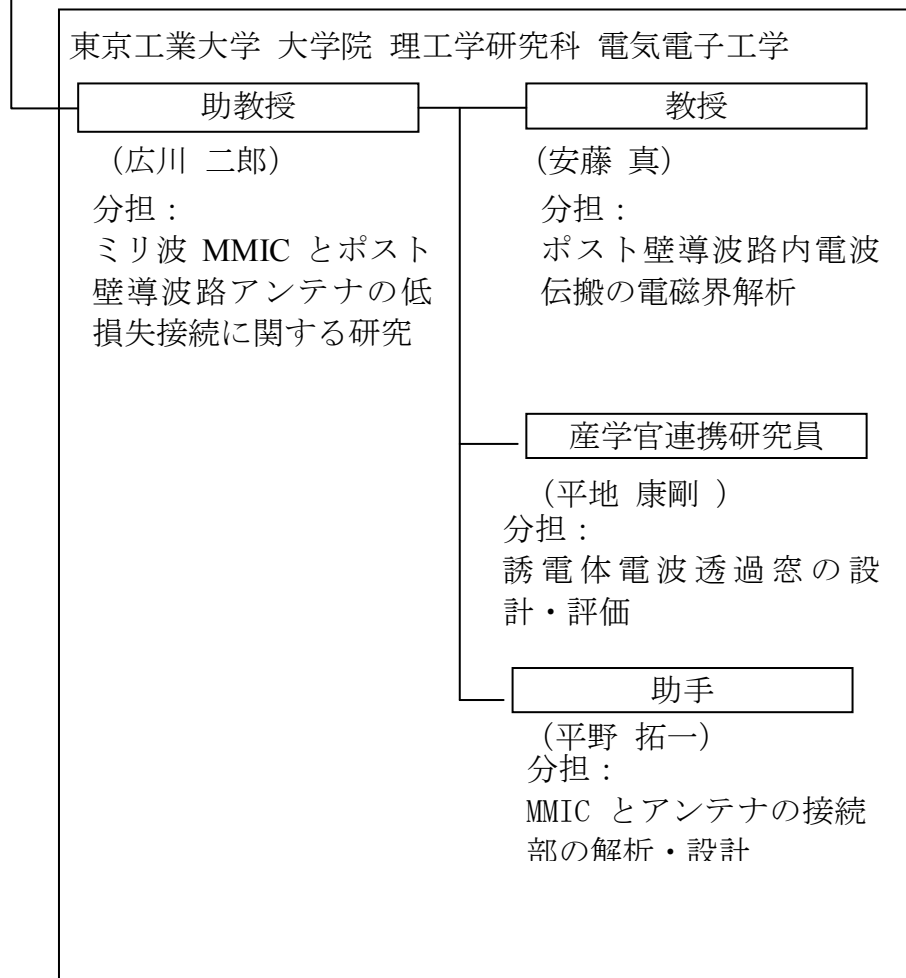
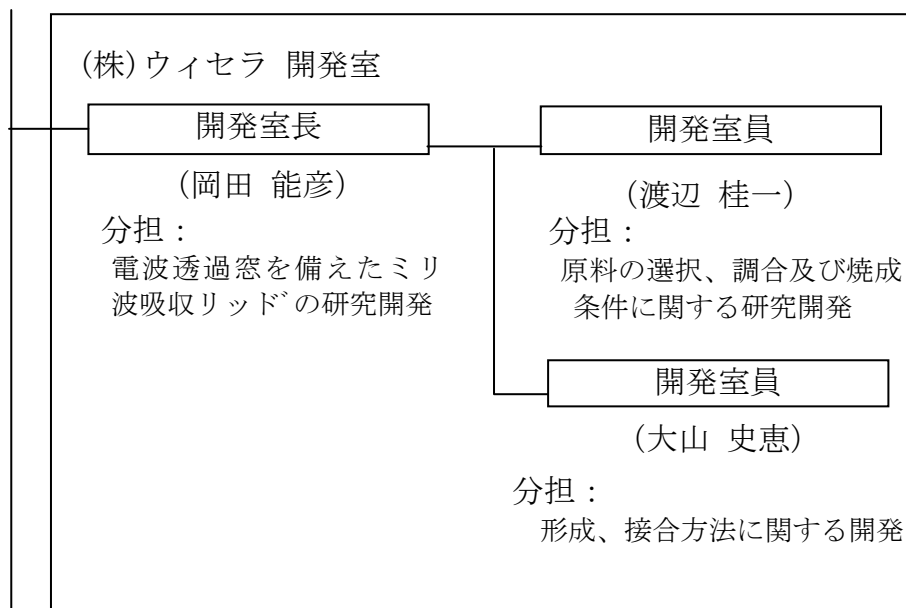
研究開発項目	15年度	16年度	17年度	年度	年度	計	備考
[ウ]ミリ波 MMIC とポスト壁導波路平面アンテナの低損失接続に関する研究開発		中間評価					
1. ミリ波 MMIC 平面線路と疑似同軸線路との低損失接続の実現(60 GHz で比帯域 4 %以上、 $S_{11} < -15$ dB、損失 1 dB 以下)	→						
2. ポスト壁導波路給電部同軸化(60GHz において比帯域 4 %以上、 $S_{11} < -15$ dB) ・モーメント法及び HFSS シミュレーションによる最適構造の検討 ・比誘電率 $\epsilon_r = 2.2$ 基板による同軸部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

### 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 研究開発の構造

ミリ波メディアコンバータの開発は、低コスト化のための基本的な技術開発を総合したものとなる。2-3 で述べた各サブテーマを含めた開発の構図を 図 4-1 に示す。送信・受信で基本的な技術は同じであるので、送信機の場合を示している。各サブテーマは各委託先で研究開発された。幹事社であるユーディナデバイス(株)は、これらの技術を集約してミリ波メディアコンバータ全体の設計・開発を行った。

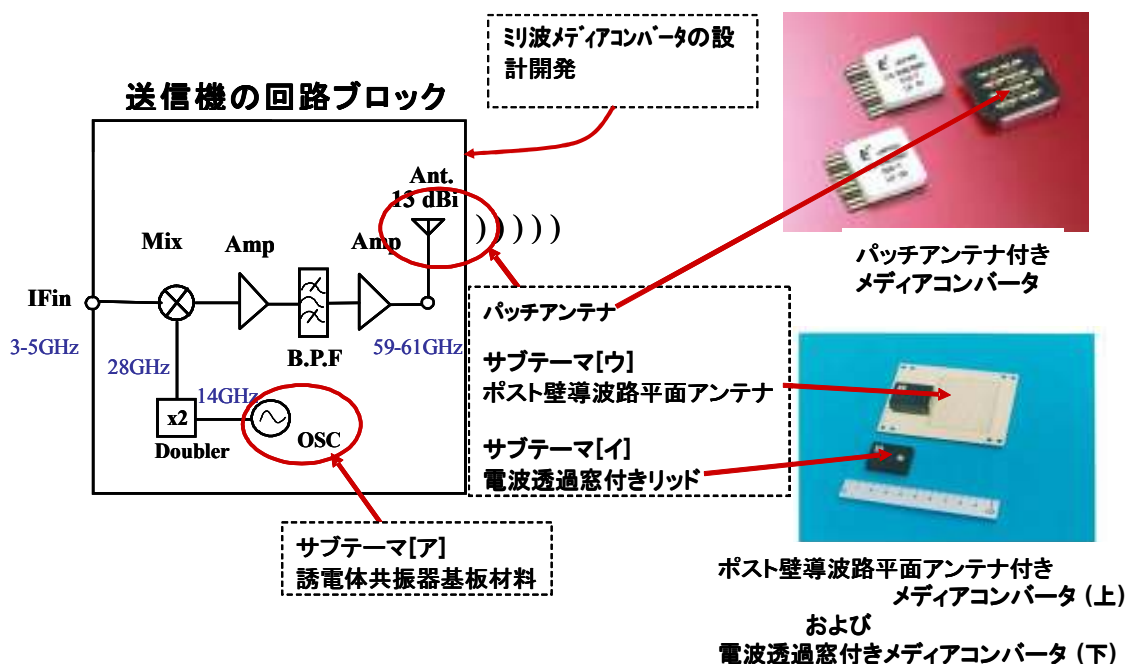


図 4-1 ミリ波メディアコンバータにおける基本要素技術

以下、4-2～4-5 では サブテーマについての成果をまとめる。

4-2 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

4-3 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

4-4 サブテーマ[ウ] パッチアンテナ上の電波吸収体リッドに設けた誘電体窓の最適設計

4-5 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

4-6 以降では それらを受けたミリ波メディアコンバータの開発を説明する。

4-6 温度補償VCOの開発

4-7 ミリ波メディアコンバータの構造

4-8 ミリ波メディアコンバータの特性および製造性

4-9 信頼性試験

## 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

### 最終目標

- (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 $\sigma$ で0.02を達成。
- (3) 材料の比誘電率温度係数のばらつきが $\sigma$ で2 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ を達成
- (4) 信頼性の確認

最終目標を以下の3段階での目標に分けて開発を行った。

### 第一段階目標

#### 1. 材料組成の最適化と基板化プロセスの確立による比誘電率温度係数 $-25\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ の誘電体基板材料の開発。

誘電体材料で比誘電率の温度係数がプラス材料の $\text{MgTiO}_3$ とマイナス材料の $\text{CaTiO}_3$ との混晶比率を最適化し、 $-25$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$ になる組成を決定する。その際それぞれの結晶構造がイルメナイト型とペロブスカイト型と異なるため、それぞれの生成温度を等しくし、結晶粒の大きさを均一化し、各結晶の分散状態を均一にする粉末合成条件、焼成条件をもとめる。基板化に関してはスラリー中の粉末の分散とバインダーの混合状態を均一にする条件を検討し、脱脂・焼成条件の最適化を図り均一な基板を実現する。

#### 2. 材料の比誘電率のばらつきを起こす因子の解明と変動を小さくする手法の開発。

材料の比誘電率変動因子を想定し、その影響度を調べる。比誘電率の変動因子は、材料組成の不均一性と空間を含めた構造体としての不均一性がある。材料組成の不均一性は混晶である本材料の各結晶の出現がそろっていないことで、その原因は使用原料の粒度や表面活性に左右され、さらに粉末合成条件が適していないと焼結不良や異常粒成長を起こす。これらに対しては、まずそれぞれの結晶が $6\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ の範囲で緻密に焼結する粉末原料の選定、混合時間とスラリー粘度の最適化で混合状態は制御できる。粉末合成工程である仮焼が大きな変動要因と予想され、その温度選定と許容温度ばらつき範囲の確認が必要になる。また、シート成形の分散状態と成形粘度は基板の構造の均一性に関係がありこの条件で内部閉気孔の大きさと均一性が決まる。この条件を詳細に検討しその許容範囲をつかむ。次に焼成条件は温度に対して敏感になっている場合には仮焼の再選定を実施する。焼成条件では炉内位置がポイントになり輻射熱の影響はどれだけあるかを確認し、炉内位置と昇温プログラムの最適化を検討する。さらにそれらが相互に影響する伝承も検討項目に入れる。

### 第一段階の実施結果と成果

#### 1. 材料組成の最適化

誘電率21の材料系(以下21材と略記)でマイナスの比誘電率温度係数を持つ材料は比誘電率温度係数がプラスのイルメナイト構造をもつ $\text{MgTiO}_3$ とマイナスのペロブスカイト構造をもつ $\text{CaTiO}_3$ の混合で実現できる。まず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4-2-1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 $-25$

ppm/°Cになるのは  $\text{CaTiO}_3$  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 ppm/°Cとなる。

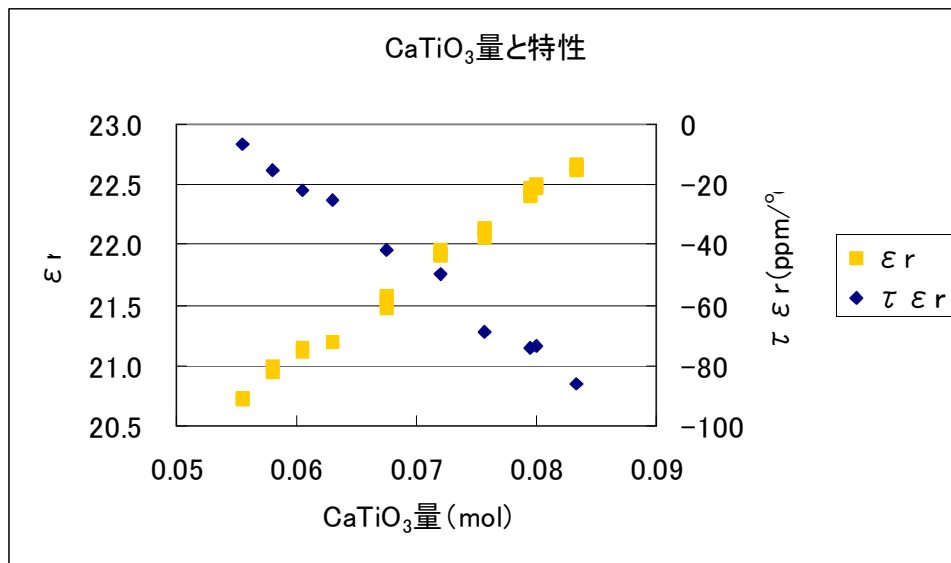


図 4-2-1  $\text{CaTiO}_3$  のモル比を変えたときの誘電率  $\epsilon_r$  と誘電率の温度特性  $\tau \epsilon_r$  の実測値

## 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（気孔）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。原料合成の際の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、原料の合成の際の結晶度の高い粉末を用いた方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。

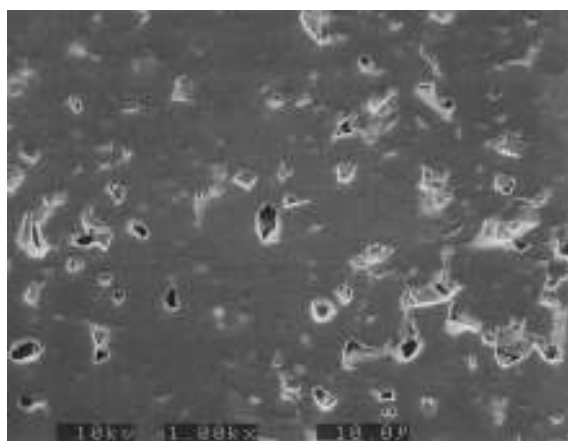


図 4-2-2 第一回目に製作した基板の研磨後の表面状態の SEM 写真。  
約  $10\ \mu\text{m}$  の多数のポアが見られる。

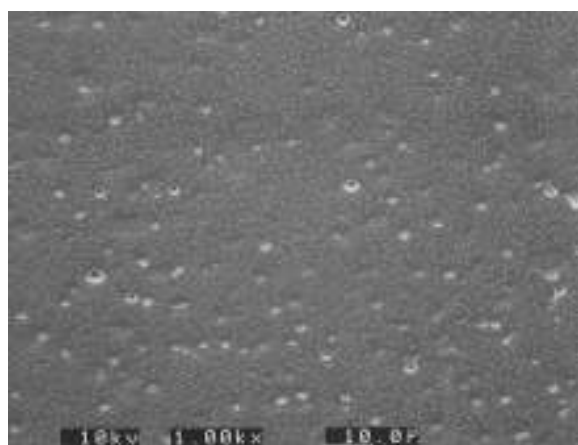


図 4-2-3 結晶度の高い粉末による基板。ポアの径はほとんど  
 $2\ \mu\text{m}$  以下になり基板の均一度も大きく改善。

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。

Observed Area	Pore Diameter D ( $\mu\text{m}$ )				
	$D \leq 2$	$2 < D \leq 5$	$5 < D \leq 10$	$10 < D \leq 15$	$15 \leq D$
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 4-2-1 初期の基板表面ポア分布

Observed Area	Pore Diameter D ( $\mu\text{m}$ )				
	$D \leq 2$	$2 < D \leq 5$	$5 < D \leq 10$	$10 < D \leq 15$	$15 \leq D$
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

表 4-2-2 改善後基板表面ポア分布

### 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ー

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。

#### 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

	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
$\sigma$	0.0536	0.0393	0.0268	特性不良

表 4-2-3 各温度で焼成した試料の誘電率の最大・最小値と分散  $\sigma$

下記にSEM観察像を示す。

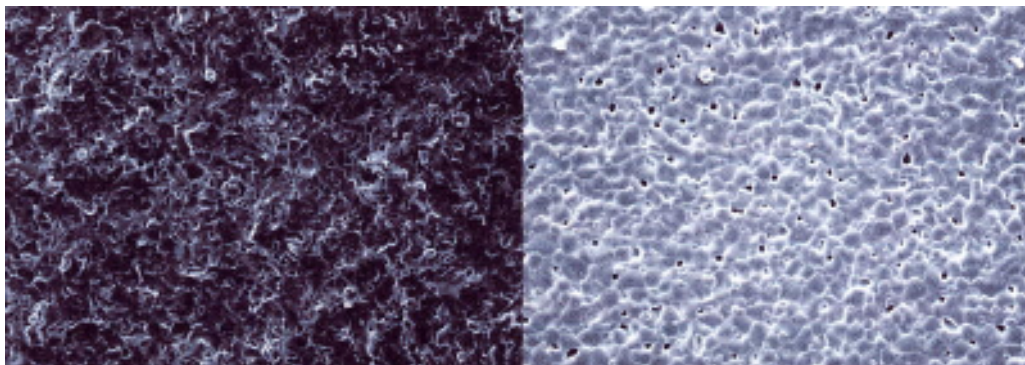


図 4-2-4 基板断面 基板表面 (未加工)  $\times 1000$   
1340℃

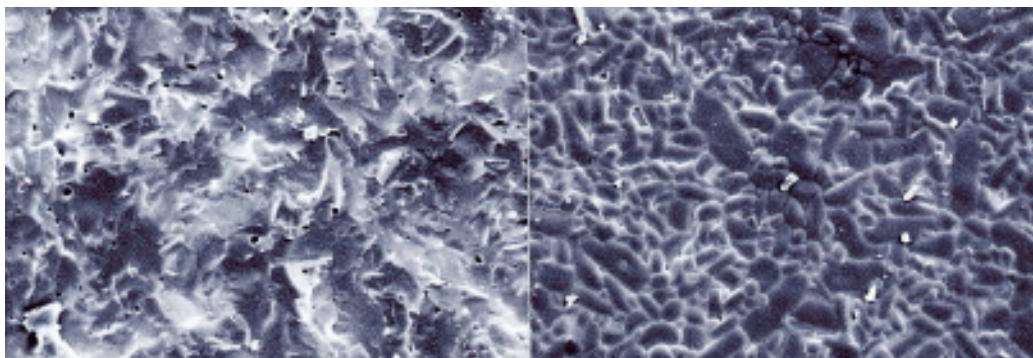


図 4-2-5 基板断面 基板表面 (未加工)  $\times 1000$   
1360℃

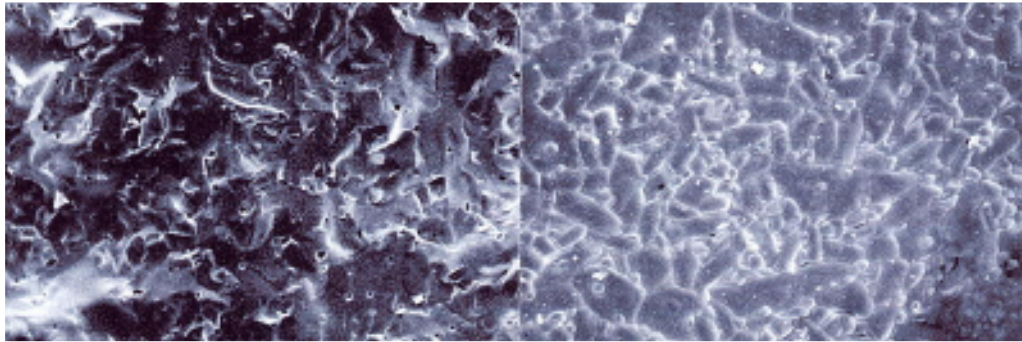


図 4-2-6 基板断面 基板表面（未加工） ×1000  
1 3 8 0 °C

1 4 0 0 °C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1 3 6 0 °C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1 3 6 0 °C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1 2枚 焼成炉 研究開発用電気炉 NH-3 0 6 0 F

	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
$\sigma$	0.0229	0.0410	0.0583	0.0535

表 4-2-4 誘電率の焼成ロット間バラツキ

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。

今回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1 3 6 0 °Cで評価基板は各1 2枚 焼成炉 研究開発用電気炉 NH-3 0 6 0 F

	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
$\sigma$	0.0222	0.0190	0.0239	0.0441

表 4-2-5 誘電率の材料ロット間バラツキ



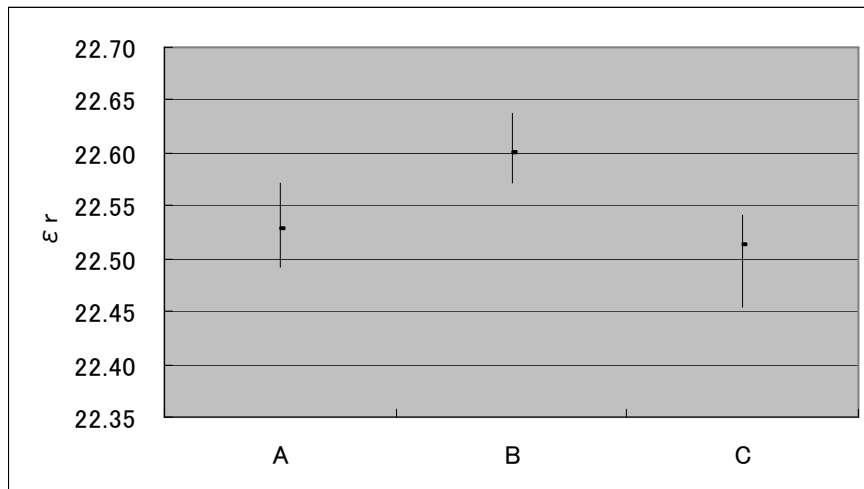


図 4-2-7 誘電率の材料ロット間バラツキ

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. 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。実際の製造では仮焼原料ロットを混合した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。

#### 第一段階のまとめ

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。

#### 第二段階目標

(1) 比誘電率温度係数  $-25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  材料ができていること。

さらに、比誘電率負温度係数  $-25 \sim -100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  材料形成技術を開発・確立。

- (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  $\sigma$  で  $0.15$  比誘電率の温度係数のばらつきが  $\sigma$  で  $3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  を達成。

## 材料の設計

イルメナイト構造を持つ  $\text{MgTiO}_3$  とペロブスカイト構造を持つ  $\text{CaTiO}_3$  とのモル比を変えることにより、比誘電率温度係数を  $0 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  から  $-120 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  にする材料の形成技術を開発した。材料の設計として、最終目標が達成できた。結果を図 4-2-8 に示す。

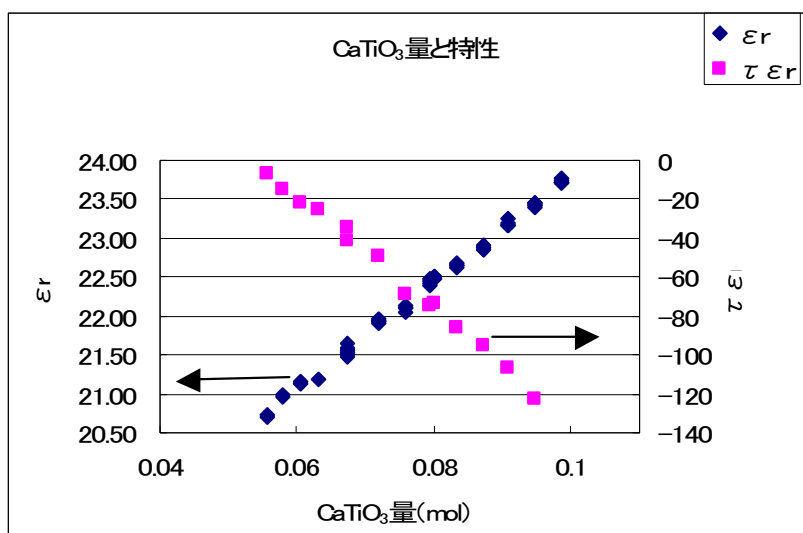


図 4-2-8  $\text{MgTiO}_3$  内の  $\text{CaTiO}_3$  のモル数を変えたときの比誘電率  $\epsilon_r$  (青) と比誘電率温度係数  $\tau \epsilon_r$  (ピンク) の変化。  $0 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  から  $-120 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  まで自在に調整可能。

## 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第一段階の報告書で述べたが、今回は、温度を  $1230 \text{ }^\circ\text{C}$  から  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$  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  $1310 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1370 \text{ }^\circ\text{C}$  では比誘電率のバラツキ  $\sigma$  は  $0.02 \sim 0.03$  となった。この値は今回目標の  $0.15$  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。

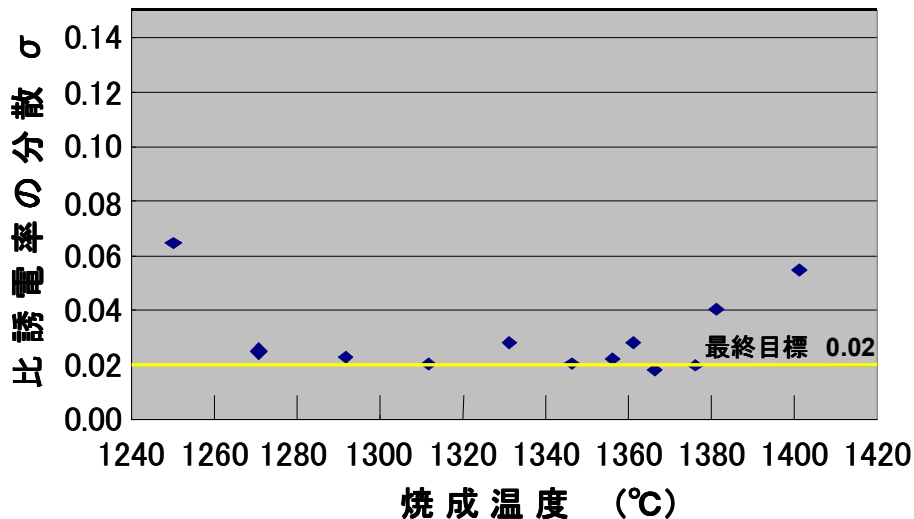


図 4-2-9 基板焼成温度の最適化 1310 °C~1370 °Cでは比誘電率のバラツキ  $\sigma$  は 0.02~0.03 である。

### 最終段階目標

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

### 結果とまとめ

#### 1. 比誘電率およびその温度係数のばらつきの抑制

前節までに述べたように、まず原料合成の際の結晶性の高い粉末を用いることで、比誘電率のばらつきの一因である大きなポアの発生を抑え、基板の焼成温度を 1360°C に設定して焼結状態でのばらつきを抑えることにより、ロット単位での比誘電率のばらつきとしてほぼ 0.02 が達成できる見通しが得られた。残された課題は、ロット毎の比誘電率そのものの値が、ばらつき以上の範囲で変動していることである。この原因としては、原料計量の精度、原料の混合状態のばらつき、仮焼温度のばらつきが考えられる。計量の精度を上げ、混合状態を改善し、仮焼時の温度分布を小さくすることなどを行うことで、ロット間の比誘電率のばらつきを抑えた。このような条件で 84 枚の基板を作り比誘電率とその温度係数の評価を行った。表 4-2-6 に評価結果を示す。比誘電率として 22.54、ばらつきとして 0.0185 が得られた。またその温度係数として -80.22、ばらつき 1.8 ppm/°C が得られた。

SND-21TN80  $\epsilon_r$ と $\tau \epsilon_r$ データ

基板No.	$\epsilon_r$	$\tau \epsilon_r$	基板No.	$\epsilon_r$	$\tau \epsilon_r$	基板No.	$\epsilon_r$	$\tau \epsilon_r$	基板No.	$\epsilon_r$	$\tau \epsilon_r$
1	22.52	-78.18	26	22.52	-78.62	51	22.57	-81.97	76	22.55	-82.43
2	22.57	-76.99	27	22.57	-78.04	52	22.54	-82.11	77	22.53	-81.40
3	22.53	-77.32	28	22.57	-78.54	53	22.54	-81.14	78	22.54	-82.58
4	22.54	-80.40	29	22.56	-77.65	54	22.53	-80.83	79	22.53	-81.92
5	22.57	-76.47	30	22.55	-78.78	55	22.56	-82.04	80	22.53	-81.58
6	22.56	-77.15	31	22.54	-77.02	56	22.54	-82.16	81	22.52	-78.91
7	22.54	-80.74	32	22.52	-78.51	57	22.55	-83.45	82	22.53	-80.57
8	22.52	-81.35	33	22.56	-78.55	58	22.58	-82.54	83	22.54	-82.44
9	22.56	-77.69	34	22.55	-77.80	59	22.53	-78.49	84	22.57	-80.94
10	22.57	-81.24	35	22.56	-80.23	60	22.54	-80.01	max.	22.58128	-76.4666
11	22.54	-79.06	36	22.56	-78.02	61	22.53	-81.08	min.	22.51505	-83.4481
12	22.54	-80.65	37	22.53	-77.70	62	22.56	-82.25	avg.	22.54494	-80.2167
13	22.53	-82.23	38	22.55	-81.24	63	22.58	-80.59	$\sigma$	0.018474	1.76679
14	22.53	-80.25	39	22.53	-79.23	64	22.53	-82.05			
15	22.52	-79.13	40	22.53	-82.39	65	22.57	-78.22			
16	22.54	-82.11	41	22.52	-79.31	66	22.53	-79.87			
17	22.52	-79.51	42	22.52	-80.26	67	22.54	-78.03			
18	22.56	-79.70	43	22.53	-81.95	68	22.53	-79.88			
19	22.57	-80.87	44	22.54	-82.25	69	22.55	-79.56			
20	22.53	-80.43	45	22.53	-81.53	70	22.55	-80.31			
21	22.54	-77.91	46	22.54	-80.41	71	22.57	-82.22			
22	22.52	-81.89	47	22.52	-81.13	72	22.57	-82.02			
23	22.57	-78.75	48	22.57	-82.92	73	22.58	-79.57			
24	22.53	-78.38	49	22.54	-81.94	74	22.54	-80.14			
25	22.53	-80.32	50	22.58	-82.87	75	22.52	-77.25			

表 4-2-6 基板 48 枚の比誘電率とその温度係数

## 2. 信頼性試験

信頼性の確認として、まず新たに開発した基板材料そのものの信頼性の確認が必要となる。ここでは材料の信頼性について述べる。本基板を共振器として用いた場合の信頼性は、メディアコンバータの信頼性試験で確認する（後述）。

基板材料の信頼性の確認として、(1)高温高湿試験（85℃、85%、2000 時間）、(2)ヒートサイクル試験（-40℃/125℃、2000 サイクル）、高温放置試験（125℃、2000 時間）をそれぞれ 5 個ずつ行った。評価項目は比誘電率とその温度係数である。

試験結果の詳細は、別紙に記載する。結果として、全ての試験項目において、大きな特性の変化はなく、実用上問題がないことが、確認された。

以上の結果から、全ての最終目標が達成された。

- (1) 比誘電率温度係数がセンター値で-25~-100 ppm/℃の範囲に自由に設計できる材料形成技術を確立した。
- (2) 目標の比誘電率の分散  $\sigma = 0.02$  に対し  $\sigma = 0.018$  を達成した。
- (3) 目標の比誘電率の温度係数の分散  $\sigma = 2$  ppm/℃に対し  $\sigma = 1.8$  ppm/℃を達成した。
- (4) 基板材料の信頼性試験を行い、問題の無いことを確認した。

### 4-3 電波透過窓を備えたミリ波吸収リッドの研究開発

#### 最終目標

- (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℃：600℃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。

#### 最終目標(1)について

##### 1. 材料の選択 (15, 16年度実施)

アルミナにグラファイトやカーボンブラックを混合して還元状態で焼結したセラミックスは、比誘電率の実部と虚部とを自在に制御することができる。

図4-3-1 に示す様にカーボンブラックを所定量混合し製造した試料の比誘電率を測定し、無反射解析を用いて、炭素の配合および厚さの設計を行った。

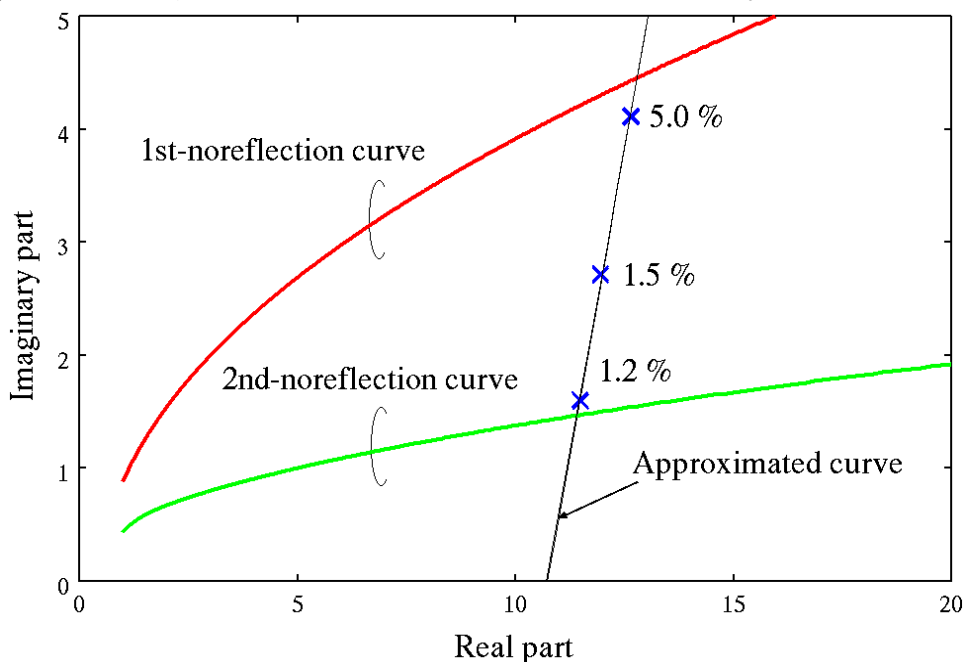


図4-3-1 無反射解析

アルミナにカーボンブラックを1.2, 1.5, 5.0%混合したセラミックスの比誘電率の実部、虚部を測定し無反射解析図にそれぞれをプロットした。

一次無反射曲線との交点は、炭素の混合量が5%以上で厚さは0.3mm程度、二次無反射曲線との交点は、炭素の混合量が1.2%、厚さは1.1mm程度との設計値を得た。

無反射解析の2つの設計値を比較検討し、強度の面から二次無反射曲線との交点であるカーボンブラックを1.2%含有し、試料の厚みを1.105 mmの設計値を採用した。この設計した材料の実測結果および計算値を図4-3-2に示した。61.25 GHzで減衰量28 dBが得られた。また、材料の均一性を確認する為に、100 × 100 mm板の各所の実測を行い、その結果から材料は均一に作られていることがわかる。

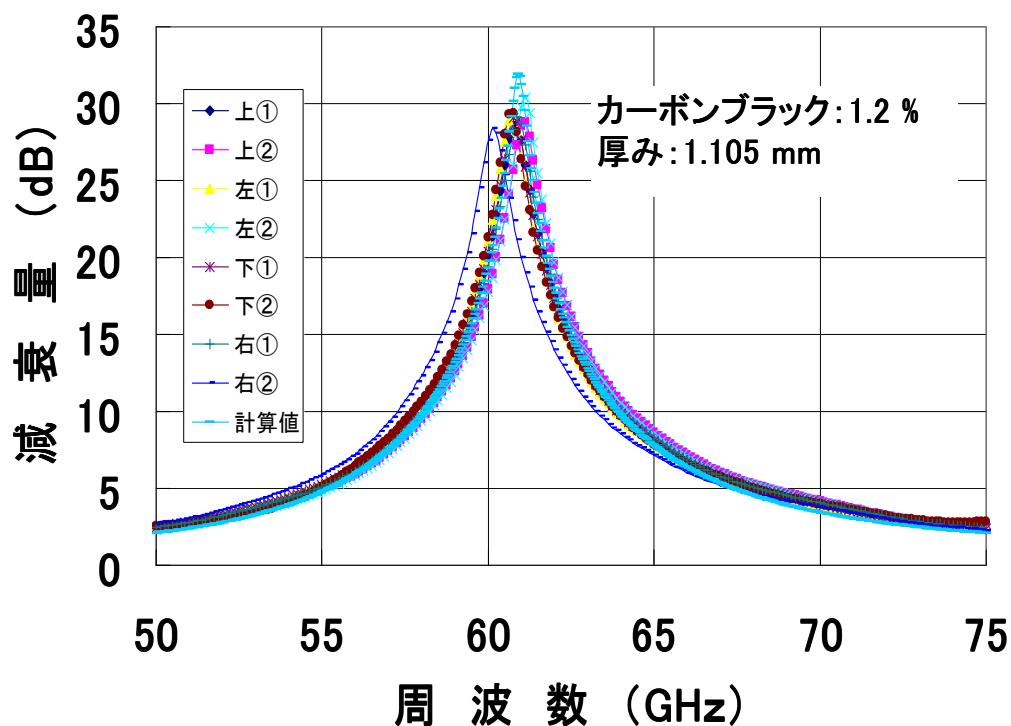


図4-3-2 アルミナ電波吸収体の吸収特性

カーボンブラックを1.2%混合し焼成した100×100mm厚さ1.105mmに調整した板の各部位を測定した結果と計算値を示した。開発の目標である-13dBi以上はクリアーし、60GHzから62GHzの間で-20dB以上の減衰が確認できた。

次に、電波透過窓に使用するアルミナセラミックスの特性を確認した。図4-3-3 (1)に46GHzでの透過量の実測値と計算値を示した。実測値と計算値はほぼ一致することから、ここで使用したアルミナセラミックスの複素比誘電率、を用いて(2)に示した60GHzでの透過量を計算した。60GHzでは、厚さを変えると約-4.5dBから-0.4dBの範囲で変化する。目標である-0.5dB以下は、セラミックスの厚さ0.79から0.87mmの範囲でクリアーできる事が解った。

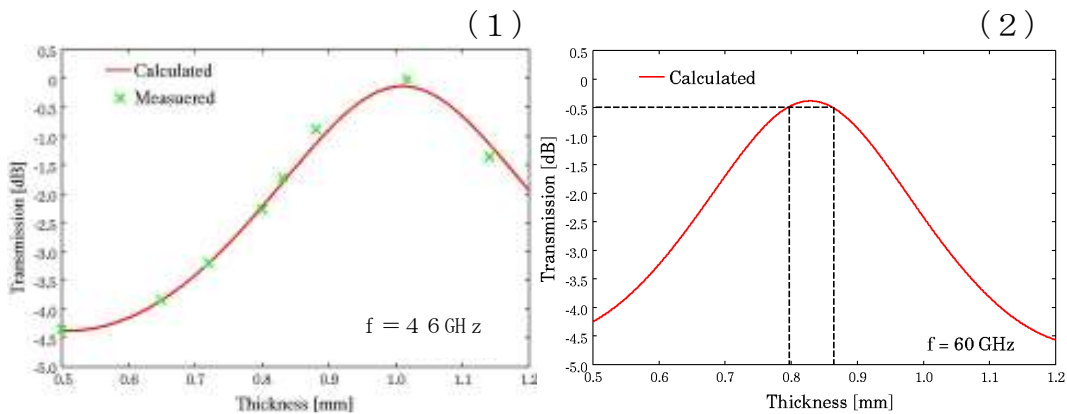


図4-3-3 アルミナセラミックスの電波透過特性

(1) 複素比誘電率から算出した4.6 GHzでの吸収量と実測値の比較

(2) 同じデータを用い算出した60 GHzでの吸収量、

計算値と実測値がほぼ一致する事から、アルミナセラミックスの複素比誘電率は妥当な値と判断し、60 GHzでの計算に用いた。-0.5 dB以下の吸収は0.79 mmから0.87 mmの間で可能である事を示している。

## 2. 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(15, 16年度実施)

セラミックスの異種材料の接合は、熱膨張率が異なる為に基本的には不可能である。しかし、電波吸収体の母材はアルミナセラミックスであり、電波透過窓に使用する材料と原料段階では同一ロットのものを使用することで、炭素の添加率が低い領域では、焼成時には両者は類似した結晶成長をすると予測され、異種材料ではあるが、接合は可能であると判断した。

接合を実現する為に、成型方法を検討した。両材料を接合し、窓を形成する成型方法として、当初、押し出し成型を検討した(平成16年度)。両材料を同時に押し出す為の粘度を揃える必要があり、これを実現する為の水分量、バインダー量が異なり、結果として、図4-3-4に示す様に成型体の乾燥収縮率が異なり亀裂が発生し、焼成時にもこの亀裂の修復は無く押し出し成型を断念した。

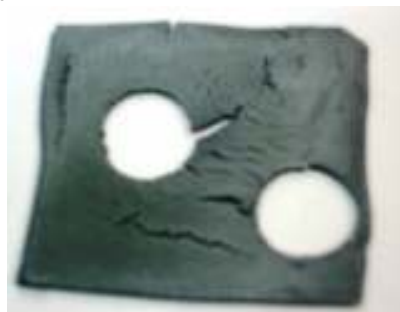


図4-3-4 押し出し成型による試作品

電波吸収体の原料に混合したカーボンブラックは、活性炭として働き、その表面積の大きさから水分、有機物(バインダー類)を大量に吸着し、乾燥時にこれらを放出し図に示した亀裂が多く発生した。

次に、押し出し成型の結果を踏まえ、両材料を接合させる為には、電波吸収材料と電波透過窓の材料の水分率が同じで、成型体の乾燥収縮率が均等であるプレス成型を検討した。

プレス成型では、均等な応力で均一な圧密度が必須である。図4-3-5 に示す様にプレス時の圧密度の違いから円周上の片側に（円、楕円ともに）亀裂が発生した。円に生成した等方的な亀裂は、焼成条件を考慮すると亀裂は修復した。



図4-3-5 接合の状況（1450℃で1時間）

厚さ5mmでアルミナ（窓部）と電波吸収材料を同時プレスし、1450℃で1時間保持した試料、窓の円周に沿って亀裂が生じ、窓部の焼成収縮が僅かに大きいことを示している。焼成エネルギーを高めることで、周辺部の電波吸収材料が収縮し、亀裂は修復されると考えられる。

### 3. リッドの試作(17年度実施)

接合技術が確立した後、東京工業大学の設計を基に窓の位置、大きさおよび深さを決定する為の試作を行った。

電波吸収材料（炭素1.2%、厚さ1.1mm）および電波透過窓（92%アルミナ、0.85mm）の最適な条件は、1で示した。電波吸収部と電波透過窓の厚さが異なる条件でのリッドの量産は、コスト的に無理があると判断し、試作は厚さ1.1mmを中心に作成し、一部窓部を0.85mmとした。

タイプA：窓の円周がリッドの辺と接する形状（窓径：5.2、6.3、7.7、9.2mm）

タイプC：窓の円周がリッドの辺オーバーする形状（窓径：8.2、9.2、11.8mm）

上面の厚さ：1.1mm、深さ2.5mmのリッドを作成した。



タイプA

タイプC



図4-3-6 電波透過窓の位置、大きさの評価に用いた窓付きリッド  
(タイプAおよびタイプC)

焼成条件を変えることで、図4-3-5で見られた円周上の亀裂の発生は無く両材料はよく接合した。タイプCは、比較試験のために手加工で製造したが、将来の低価格での量産には不向きな形状であり、量産時にはタイプAを推奨した。

評価の結果、電波吸収部の電波透過量 $-20\text{ dB}$ 以上が確保できる厚さ $1.1\text{ mm}$ の場合は、電波透過窓部の透過量は $60\text{ GHz}$ の計算値では $-3.8\text{ dB}$ となるが、厚さ $0.85\text{ mm}$ で $-0.4\text{ dB}$ となる事が判明した。

また、両材料の厚さを $1.1\text{ mm}$ とした場合、窓部の透過損失が大きくても誘電体膜によるレンズ効果で放射方向の相対利得が得られる効果があり、実質的な損失をキャンセルできる事が分かった。

#### 4. 目標の達成度

電波吸収部の電波透過量 $-20\text{ dB}$ 以上が確保できる炭素の混合量および厚さと、電波透過窓部材料とその厚さは個々に最適条件を選定した。また、両者を接合する方法は、プレス成型で可能な事を試作品の作成で立証した。

電波吸収部と電波透過窓部で相互作用が無いとした場合、目標を達成する為に、吸収部の厚さを $1.1\text{ mm}$ に、窓部を $0.85\text{ mm}$ に調整しなければならない、しかし、両材料の厚さを $1.1\text{ mm}$ とした場合、窓部の透過損失が大きくても誘電体膜によるレンズ効果で放射方向の相対利得が得られる効果があり、実質的な損失をキャンセルできる事が分かった。

本プロジェクトの目標の一つに低コストがあり、この観点から、量産では後者の特性を生かした設計が望ましい。本目標は達成したと判断できる。

#### 最終目標（2）について

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。(17年度実施)

##### 1. 耐熱性

本材料の母材がセラミックスであり、 $1500^{\circ}\text{C}$ 以上の雰囲気を通している事から有害ガスの発生は無いが、電波吸収の素材が炭素であり酸化し炭酸ガスを発生する。図 4-3-7 に

リッド素材の室温から 1150℃までの熱分析（示差熱分析）結果を示した。

TG(熱天秤)560℃以降に減量が見られ、534℃で DAT に発熱が見られる。恐らく 530℃以降で炭素が燃焼していると思われるが、セラミックス内に分散している事から酸素の供給も少なく急激な酸化には至らず、750℃付近まで徐々に進行している。発生したガスは 0.2 重量%以下で、無害な二酸化炭素である。

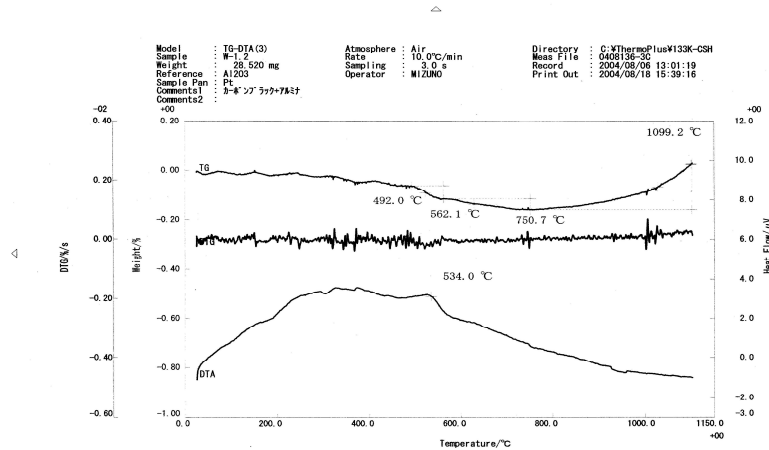


図 4-3-7 電波吸収材料の示差熱分析結果  
 TG：熱天秤（加熱時の重量変化を示す）  
 DTA：示差熱（発熱と吸熱を示す）

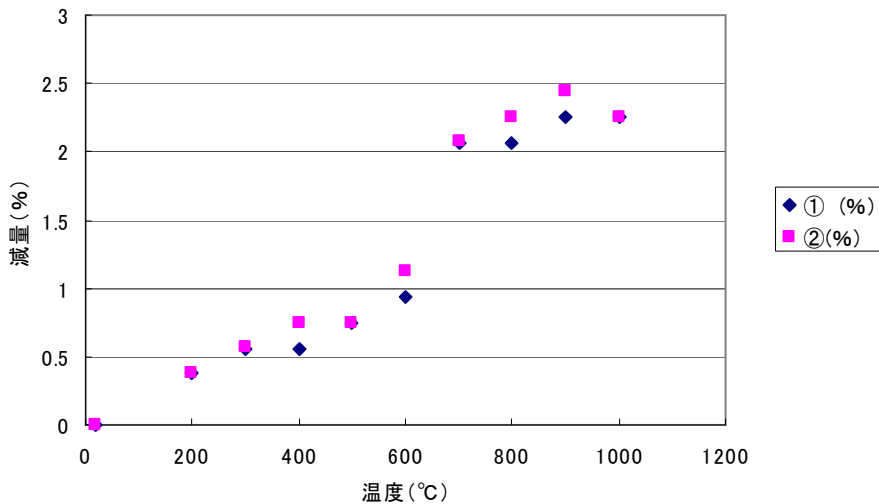


図 4-3-8 リッドの加熱重量変化

また、リッドそのものを 1000℃まで加熱し、その重量変化を図 4-3-8 に示した。

600℃までの緩やかな約 1%の減量は、炭素に吸着した水分、窒素ガス等の放出と推定され、600-800℃の間での約 1.5%の減量は混合した炭素の混合率と一致している。また示差熱分析の熱天秤の結果とも一致しており、電波吸収リッドの 600℃以下での耐熱性は

確保されている。

## 2. 吸湿性

図 4-3-9 に通常の使用条件を想定し、設定した恒温恒湿槽内に放置した場合の吸湿性を検討した。測定条件は、25℃で湿度の異なる条件で 1 日放置し、この間に吸着した水分を測定した。

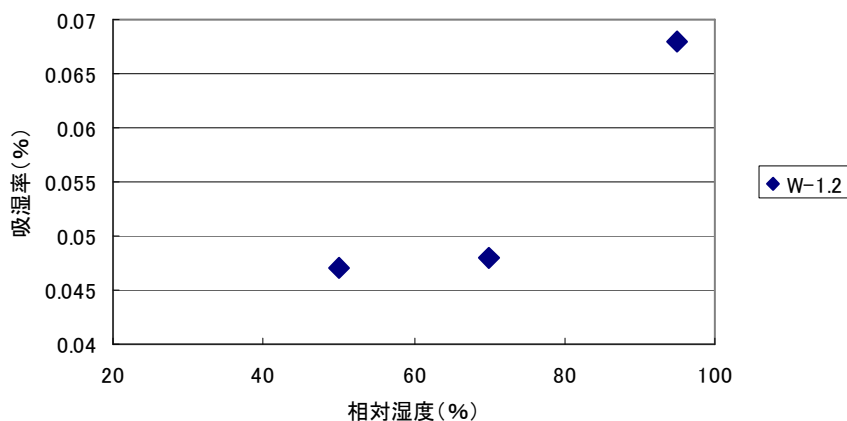


図 4-3-9 リッドの吸湿性

相対湿度 70%程度までは、ほとんど吸湿しないが、90%前後から急速な吸湿を示す。また、40%以下では、乾燥が進むと推定される。

リッドの吸湿は雨天を想定した相対湿度 95%の環境に放置しても吸湿率は 0.07%程度であり、問題とはならないと考える。

## 3. 目標の達成度

リッドに使用する 2 種類のセラミックスは、還元雰囲気中で 1600℃の高温で焼成されている事から、リッドの中にこの温度以下で分解される物質は存在しない。ただし、電波吸収の素材である炭素が 1%程度含まれているが、その酸化、分解は 700℃以上と考えられ、最終目標の「耐熱性 600℃。600℃以下でいかなるガスの発生も無いこと。」はクリアーしている。

### (3) 量産が可能で製造コストは数十円/個を目標とする。

現在、手作りで透過窓付きリッドの試作を行っているが、その手順は量産プレス成型を想定している。この方法で作製すると、大量生産が可能であり、数量が数十万個台の生産になれば、百円以下/個は十分可能である。

## 4-4 パッチアンテナ上の電波吸収体リッドに設けた誘電体窓の最適設計

### 4-4-1 電磁波吸収リッド内 円形電波透過窓の解析

解析モデルを図 4-4-1 に示す。60.0 GHz において、パッチアンテナの真上に比誘電率 9.6 の円形誘電体電波透過窓を設け、その周りには電磁波吸収体で覆っている。電磁波吸収体は損失を含んだ誘電体を使用している。アンテナは基板の端に配置されているため、電波吸収リッドの角の影響も含めて解析している。パッチサイズは前節と同様に 1.2 mm×1.8 mm、厚さ 0.3 mm、比誘電率 $\epsilon_r=4.22$ とする。FDTD プログラムにおいてセルサイズは $\Delta x=0.2$  mm、 $\Delta y=0.1$  mm、 $\Delta z=0.1$  mm、時間ステップ数を 5000 ステップとし、吸収境界条件として 4 層の PML を使用した。吸収境界壁のサイズは  $a=30$  mm、 $b=40$  mm、 $c=19$  mm とした。地板の端部回折の影響も考慮するためパッチ地板は有限とし、大きさは  $a'=20$  mm、 $b'=28$  mm、 $h'=1.1$  mm となっている。リッドの幅  $w_1$ 、 $w_2$ 、誘電体窓の厚さ  $t$  はそれぞれ 17.6 mm、19.6 mm、1.1 mm とする。誘電体窓の高さ  $h$  については 2.5 mm、3.0 mm、3.5 mm、4.0 mm の 4 種について検討した。誘電体窓の直径  $d$  を変化させながら正面方向に対する利得を計算した。誘電体窓のサイズを大きくしていった場合に、リッドの端と窓が重なるため図 4-4-2 に示す 2 種類のモデルについて検討した。リッドの端と窓が重ならない場合の Model A、リッドの端が窓と重なった場合の Model B となっている。製作過程を考慮し、Model B において側壁にも誘電体窓が空けられている。両モデルで  $d \leq 4.8$  mm のとき、および Model B において誘電体窓の中心からリッドの端までの距離  $s$  は 2.4 mm とした。

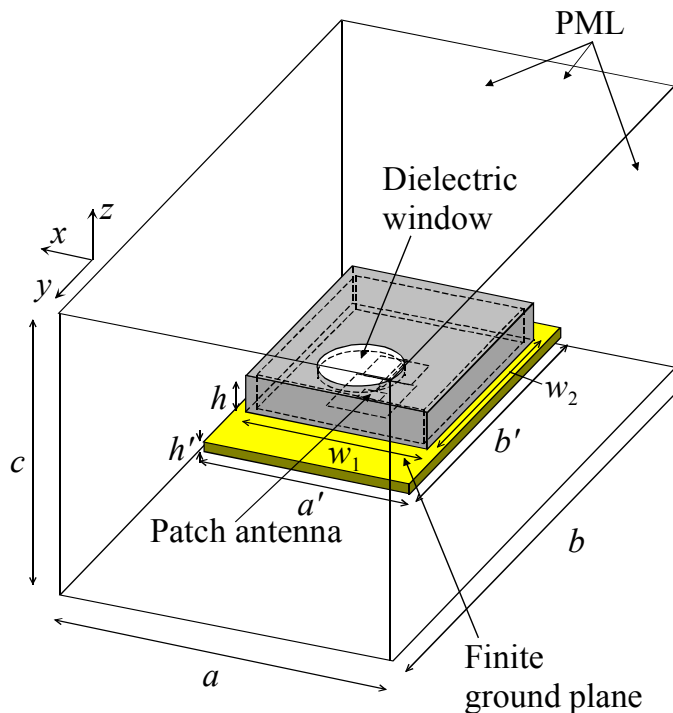


図 4-4-1 電磁波吸収リッドの FDTD 解析モデル

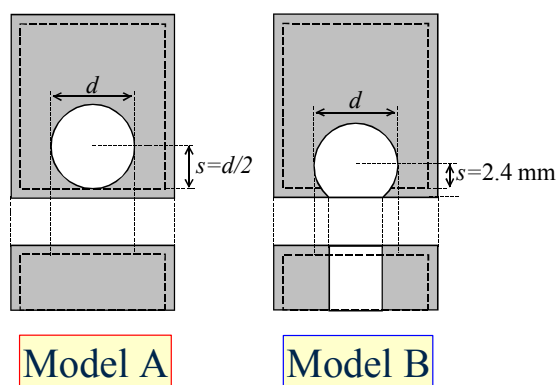
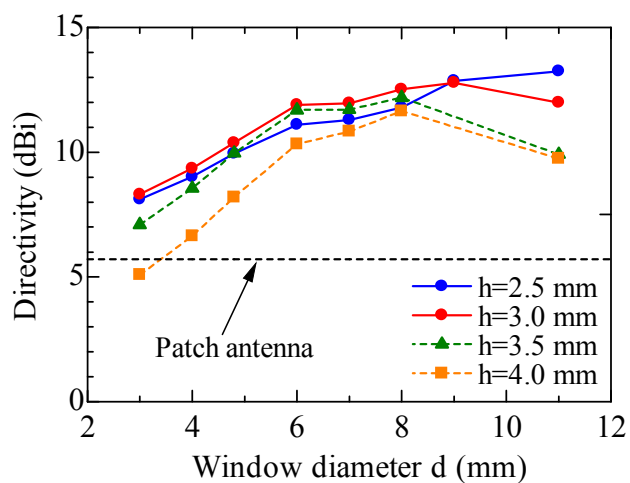
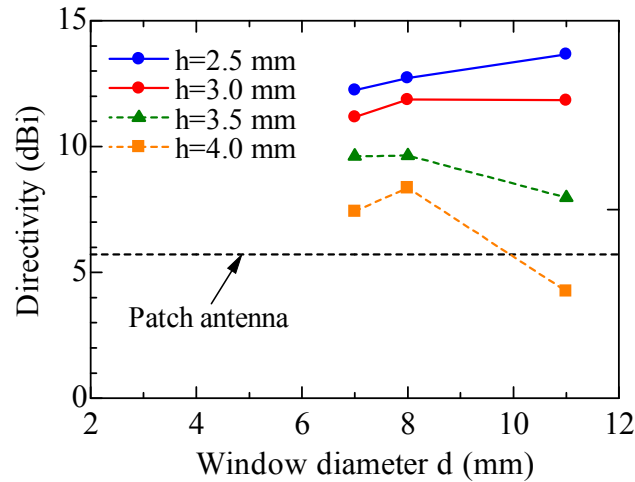


図 4-4-2 円形電波透過窓の解析モデル

パッチ単体の利得 5.7 dBi と比較した利得増加値の解析結果を図 4-4-3 に示す。リッド付パッチアンテナの利得増加値は  $h=2.5$  mm の時に最も高く、窓直径  $d=11$  mm において Model A は 7.5 dB、Model B は 7.9 dB 上昇した。誘電体平板のとき、 $h=4.0$  mm において利得上昇値は高くなっているが、側壁を考慮した Model A では  $h$  が 3.0 mm 以上において利得向上は見込めない。Model B について検討すると、 $h$  が高くなるにつれて Model B の利得上昇値は Model A と比べさらに大きく下がっている。Model B において  $h$  が高いとき、波の広がりが大きくなり窓に近い側壁の影響を受けやすくなるため利得が減少したと考えられる。



(a) Model A



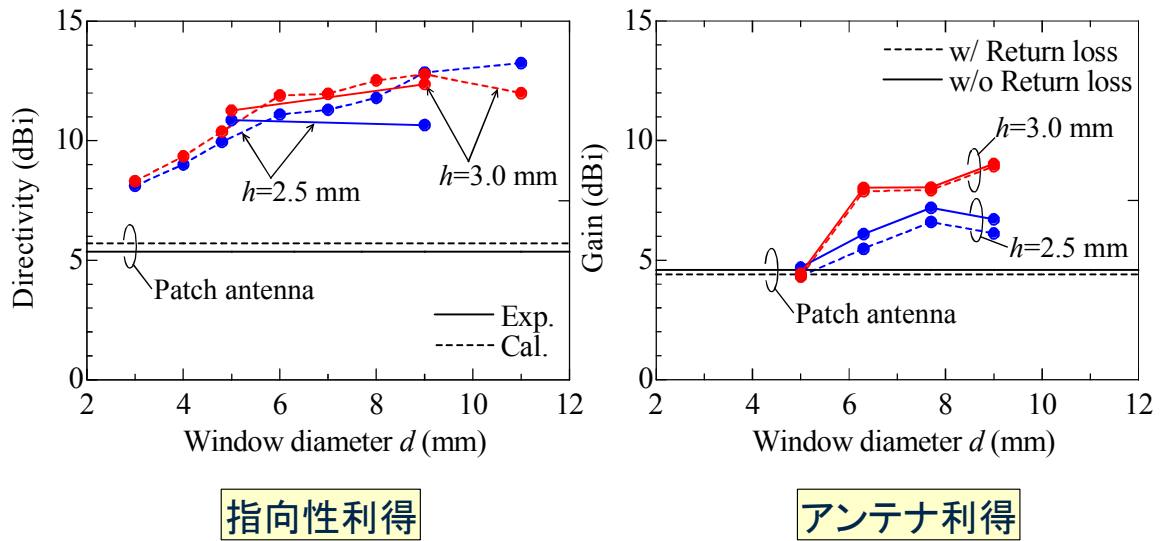
(b) Model B

図 4-4-3 円形電波透過窓による利得向上特性(解析値)

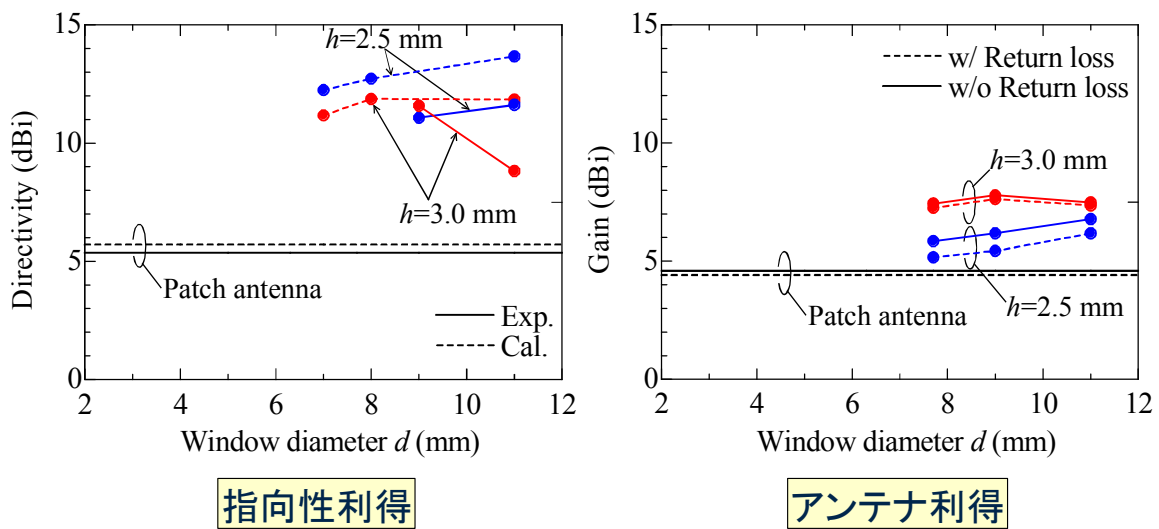
#### 4-4-2 測定結果

60 GHz 帯においてパッチアンテナ上に円形電波透過窓付 電磁波吸収リッドを装荷し、利得と指向性の測定をした。リッドの高さ  $h$  は解析で利得増加が大きかった 2.5 mm と 3.0 mm とし、図 4-4-2 に示す 2 種類のモデル、Model A、Model B のリッドを使用した。電波透過窓の直径  $d$  については Model A で 5.0mm, 6.3mm, 7.7 mm, 9.0 mm の 4 種、Model B で 7.7mm, 9.0 mm, 11.5 mm の 3 種について測定をした。(透過窓は厚さ 1.1mm の誘電体を使用した。)

図 4-4-4 に 60 GHz におけるパッチアンテナ上に電磁波吸収リッドを装荷したときの指向性利得計算値とアンテナ利得実験値を示す。パッチアンテナ単体の利得測定値は 60 GHz において 4.4 dBi となっている。Model A では高さ  $h=3.0$  mm、窓直径  $d=9.0$  mm において、パッチアンテナ利得に比べ 4.6 dB 上昇した。指向性利得計算値で 7.1 dB の増加に対してアンテナ利得上昇値が低下している原因は、吸収体での電力吸収、反射損、誘電体窓における損失などが考えられる。窓直径を大きくしたときに、 $h=2.5$  mm, 3.0 mm において共に利得の上昇が確認できる。Model B では高さ  $h=3.0$  mm、窓直径  $d=9.0$  mm において、指向性利得計算値で 6.1 dB、アンテナ利得実験値で 3.6 dB 上昇した。Model A と比べて Model B でも大幅な利得低下しないことが確認できる。



(a) Model A



(b) Model B

図 4-4-4 円形電波透過窓による利得向上特性

図 4-4-5、4-4-6 にそれぞれ Model A、Model B の電磁波吸収リッドをパッチアンテナ上に装荷したときの利得周波数特性の測定結果を示す。高さ  $h=2.5$  mm において、周波数 59.5 GHz 付近で Model A、Model B 共に利得の落ち込みが見られる。高さ  $h=3.0$  mm においては周波数変化による大きな変動はなく、リッドを装荷することにより周波数帯域が狭くなっていることを確認した。Model A、Model B 両モデルにおいて、 $h=3.0$  mm で  $d=6.0$  mm 以上であれば、周波数特性を変えずに約 3 dB 以上の利得増加が見込めることが本実験から得られた。

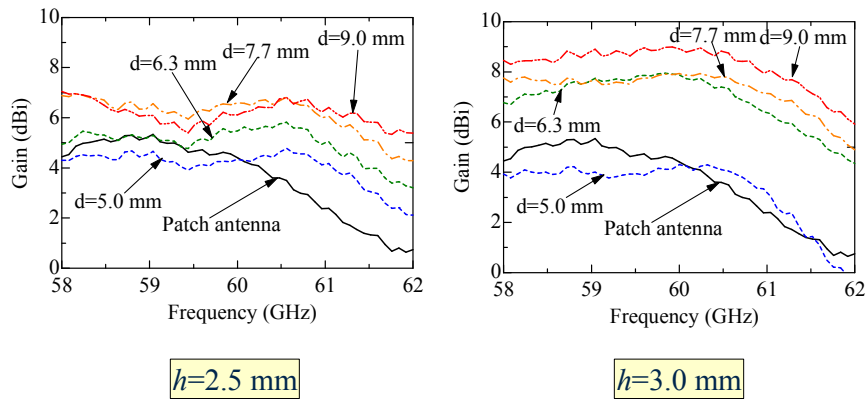


図 4-4-5 円形電波透過窓による利得周波数特性(測定値, Model A)

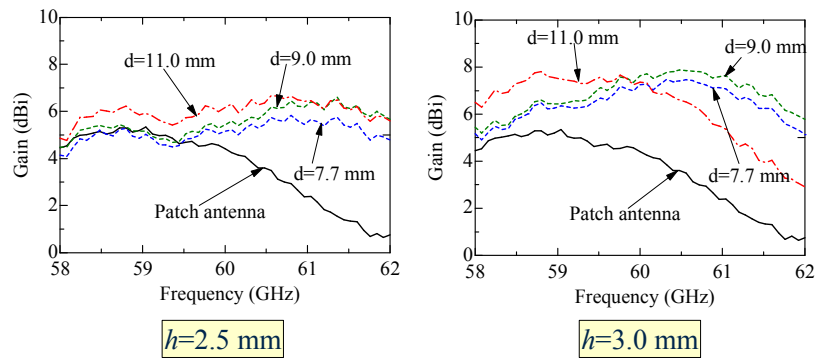


図 4-4-6 円形電波透過窓による利得周波数特性(測定値, Model B)

### 4-4-3 まとめ

パッチアンテナ用電磁波吸収リッド内 円形電波透過窓の側壁も含めたモデルを解析し、利得上昇値の検討をした。モデルとして、リッドの端と窓が重ならない場合の Model A、リッドの端が窓と重なった場合の Model B の 2 種類について解析を行った。その結果、Model A において 4.4 dBi のパッチアンテナ上に高さ  $h=3.0$  mm、誘電体窓直径  $d=9.0$  mm の電磁波吸収リッドを装荷したとき、測定結果として 4.6 dB 利得が増加した。



## 4-5 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

### 4-5-1 ポスト壁導波路と平面アンテナ

ポスト壁導波路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 4-5-1、4-5-2)。ミリ波では波長が短く物理的寸法も小さいので、製作が容易で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、60GHz 帯での試作・実験を行いそれらの反射特性を測定した。

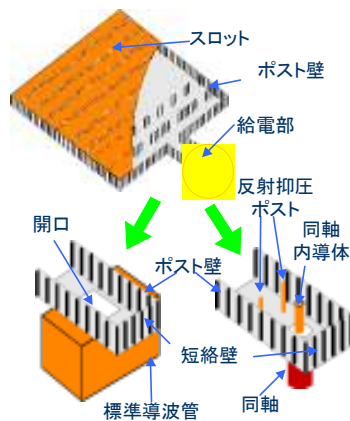


図 4-5-1 ポスト壁導波路アンテナの導波管給電と同軸給電

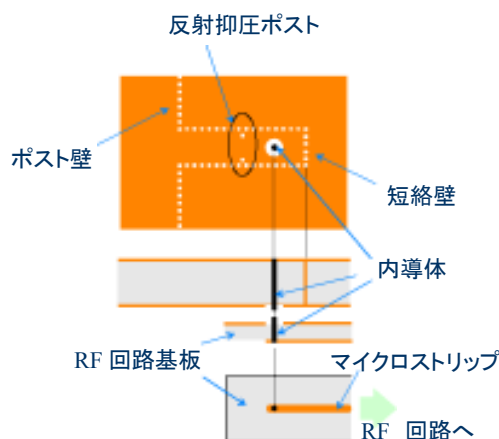


図 4-5-2. アンテナ給電部の断面図

## 4-5-2 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 4-5-3 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 4-5-4 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 4-5-5 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 4-5-6 のような構造である。 $\theta = 60^\circ$   $90^\circ$   $120^\circ$  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。

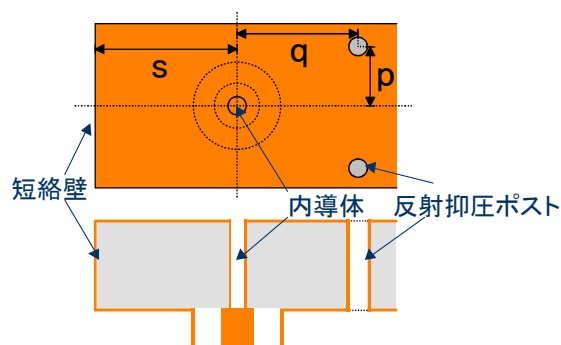


図 4-5-3. 先端短絡型

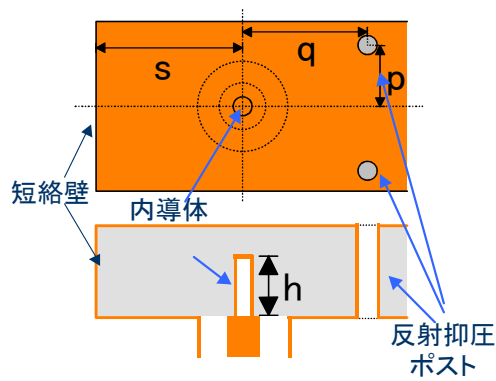


図 4-5-4. 先端開放型

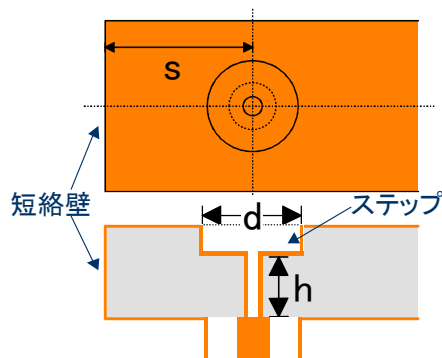


図 4-5-5. 先端ステップ短絡型

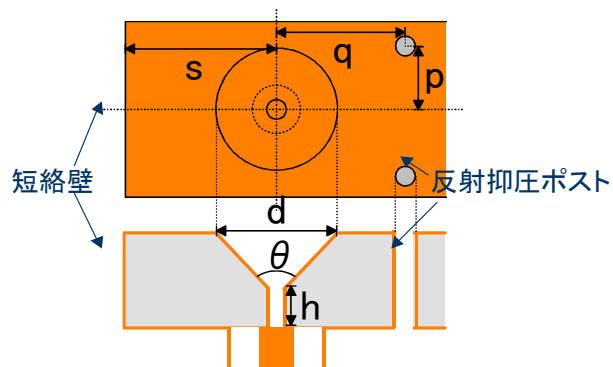


図 4-5-6. 先端傾斜ステップ短絡型

### 4-5-3 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 4-5-7 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 4-5-8 は先端傾斜ステップ型の傾斜角度  $\theta$  を  $0^\circ$  (先端短絡型)  $60^\circ$   $90^\circ$   $120^\circ$   $180^\circ$  (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  $s=1.8\text{mm}$ ， $p=1.2\text{mm}$ ， $q=1.5\text{mm}$  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， $\theta=0^\circ$   $60^\circ$  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。

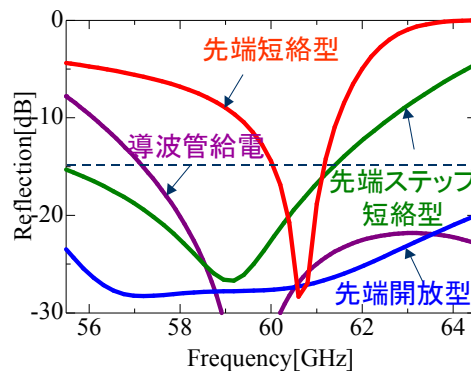


図 4-5-7. 給電部の反射周波数特性 (解析値)

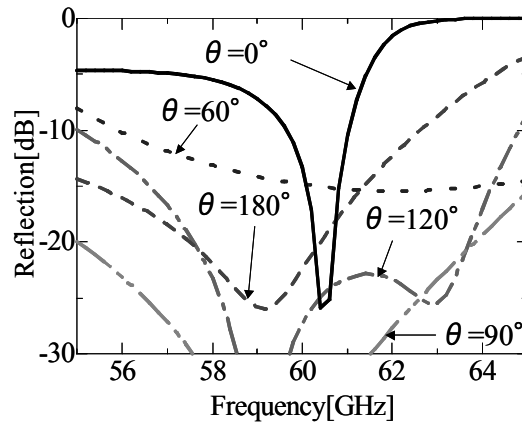


図 4-5-8 傾斜ステップ型の角度による反射特性(解析値)

#### 4-5-4 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 4-5-9, 4-5-10 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ければならないのに、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。

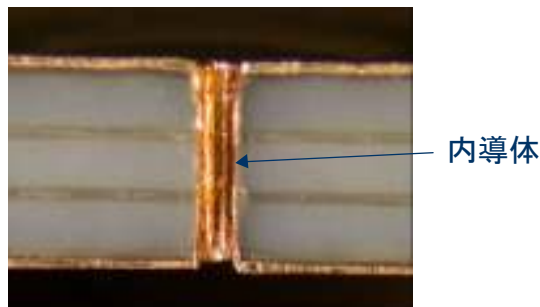


図 4-5-9. 先端短絡型のめっき状況

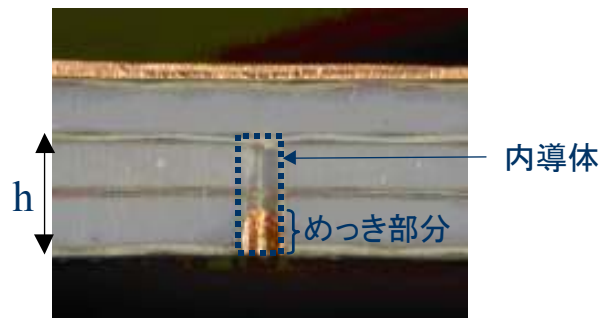


図 4-5-10. 先端開放型のめっき状況

図 4-5-11 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 4-5-5 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。

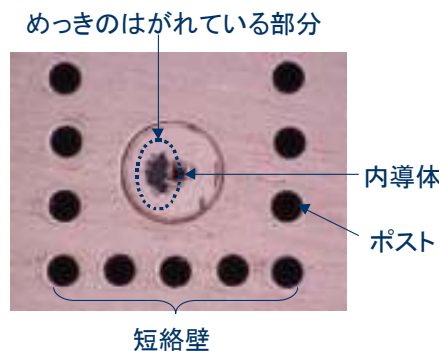


図 4-5-11 先端ステップ型のめっき状況

#### 4-5-5 反射特性の実測

##### 1. 各接続構造

得られた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4-5-12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、十分目標を満足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。

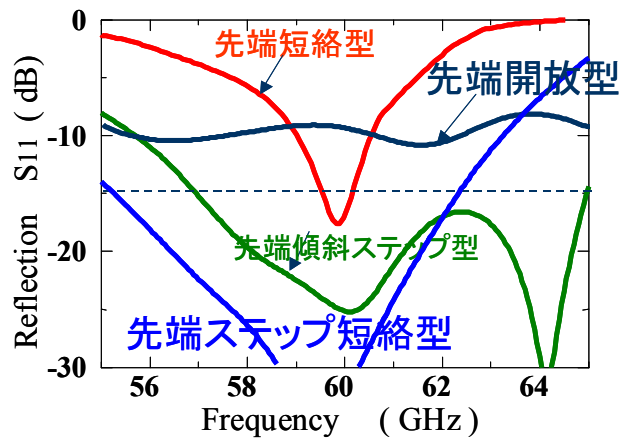


図 4-5-12. ポスト壁導波路と同軸線路の各種接続方法のS11の実測値

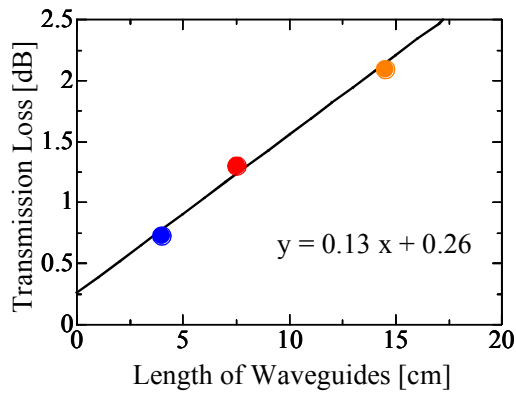


図 4-5-13. ポスト壁導波路長の変化に対する先端ステップ型接続方法の挿入損失の実測値。同軸/ポスト壁導波路変換部を2ヶ所構成。その距離を変化。したがって、実測値を内挿して同軸/同軸間距離が0 mmでの値は、2ヶ所の同軸/ポスト壁導波路変換部の損失を表している。したがって1ヶ所の損失はその1/2の0.13 dB(平均)となる。

## 2. 接続部損失

図 4-5-13 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4-5-13より損失は0.13 dB(平均)となる。

## 3. ポスト壁導波路平面アンテナの $S_{11}$ 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4-5-14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。

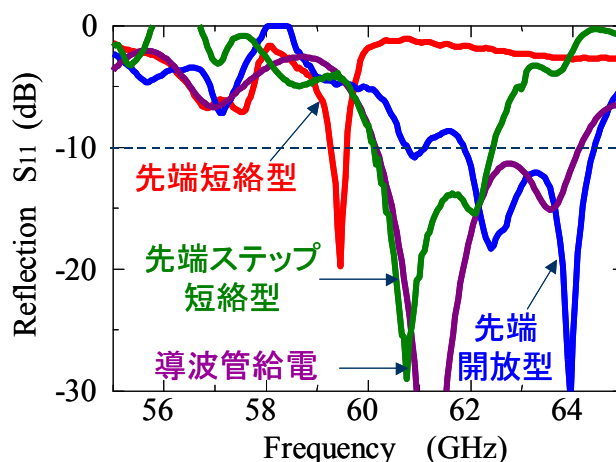


図 4-5-14 アンテナも含めた各種接続方法の反射特性 (Reflection =  $S_{11}$ )の実測値。

### 4-5-6 まとめ

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した。60 GHzにおいて反射-15 dB以下、比帯域4%以上、挿入損失 $\leq 0.5$  dBを目標とした。新接続構造の導入により、60 GHzで反射 -15 dB以下、比帯域 14.7%、挿入損失 0.3 dB以下の特性を達成した。



## 4-6 温度補償 VCO の開発

### 4-6-1 VCO の構成

発振周波数の温度安定性で目標値 $0 \pm 5$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$ を達成するため、サブテーマ[A]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用い、VCO の設計を行なった。幹事社(ユードイナデバイス)には位相雑音特性が優れた市販の発振器 MMIC があるため、発振源にはこの MMIC を採用した。開発した VCO は MMIC チップを用いた反射型の発振器である。この VCO に温度補償用基板を適用するには、図4-6-1のような構成とする。この構成により、部材点数と工数を最小にすることができる。

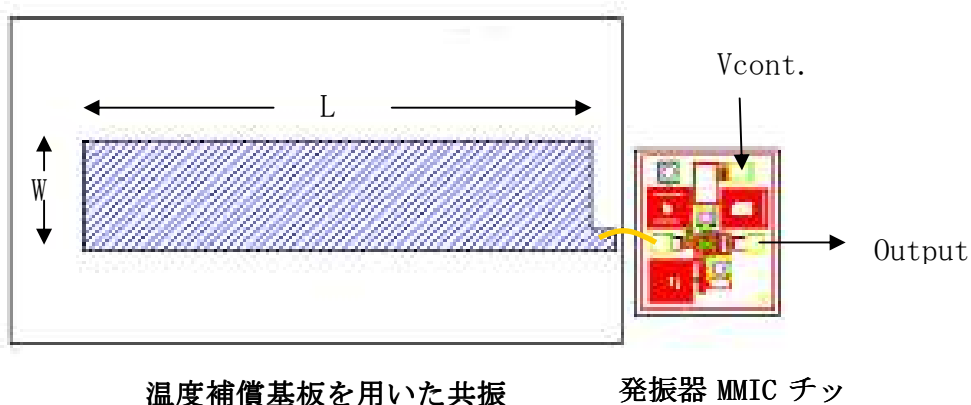


図 4-6-1 VCO の構成図

この VCO は 14GHz で発振するように設計する。14GHz の信号を4通倍 MMIC により 56GHz 信号に変換し、メディアコンバータの L0 信号とする。図4-6-2は 発振器 MMIC の共振ポートからみた MMIC の反射特性である。14GHz で負性抵抗がピークに設計されており、14GHz の発振に最適である。

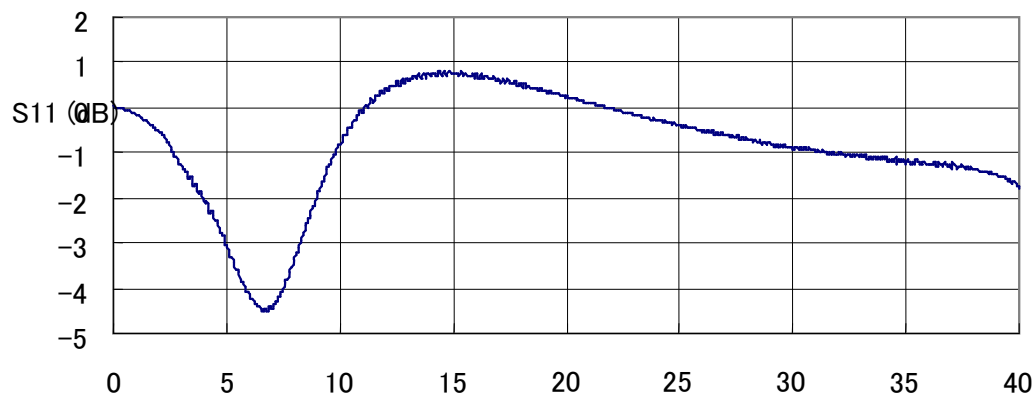


図4-6-2 発振器 MMIC の S パラメータ

共振回路は 開放終端のマイクロストリップ線路構成とした。図4-6-1の線路の長さ:Lは 発振周波数によって一意的に定まる。線路幅:W と基板材料の誘電率の温度係数を調整することで、発振周波数の温度変動を抑える設計とした。図4-6-3 は、 $\tau_\epsilon$ をパラメータとした発振周波数の温度安定性を示している。パラメータを $\tau_\epsilon = -80 \text{ ppm}$ にした時に、最適化できていることが分かる。

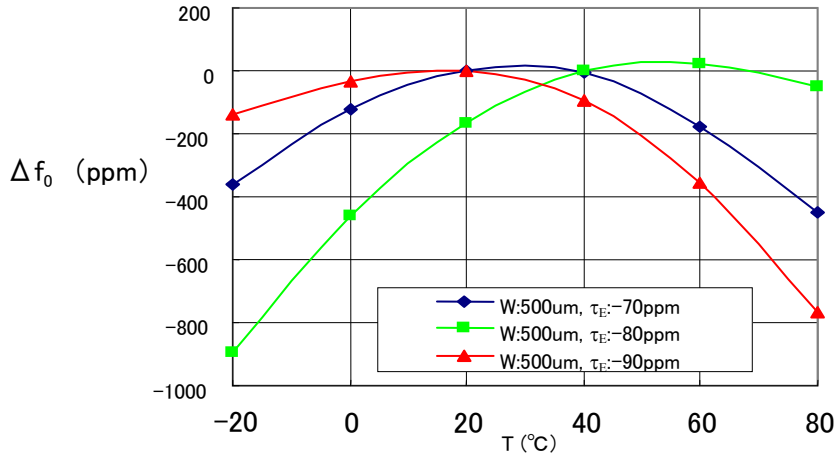


図4-6-3 発振周波数の温度変化のシミュレーション

#### 4-6-2 位相雑音

負誘電率温度特性を持った誘電体基板を使って50 GHz帯(源発振は14 GHz帯、MMICを使って4通倍している)発振器を試作し、位相雑音を実測した。その結果を図4-6-4に示した。発振周波数 $f_{osc} = 52.736 \text{ GHz}$ の時、位相ノイズ  $-92.39 \text{ dBc/Hz}$  (100 kHz off)が得られている。

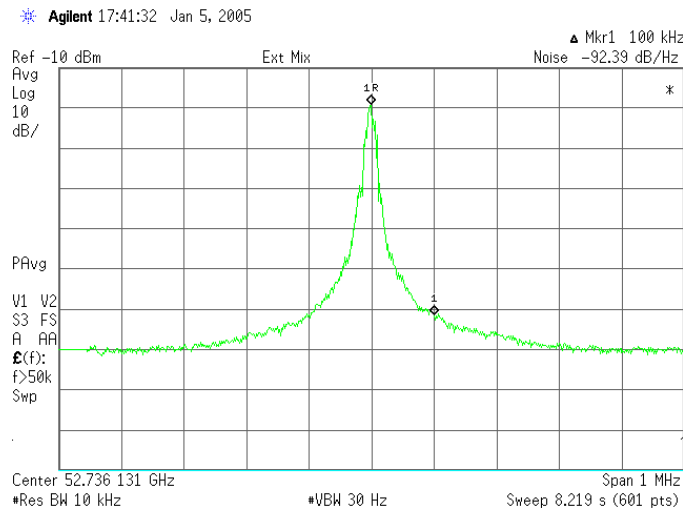


図4-6-4 発振器の発信特性。周波数52.736 GHzで、位相ノイズ $-92.39 \text{ dBc/Hz}$  (100 kHz オフキャリア) (マーカー1)。

### 4-6-3 発振器の温度特性

サブテーム[A]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 $f_{osc} = 13.466$  GHzを中心として、発振周波数の温度特性が平坦となった。その結果を図4-6-5に示す。さらに環境温度0°C ~125°Cの範囲で、発振周波数の温度変化が±500 ppm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 ppm/°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。

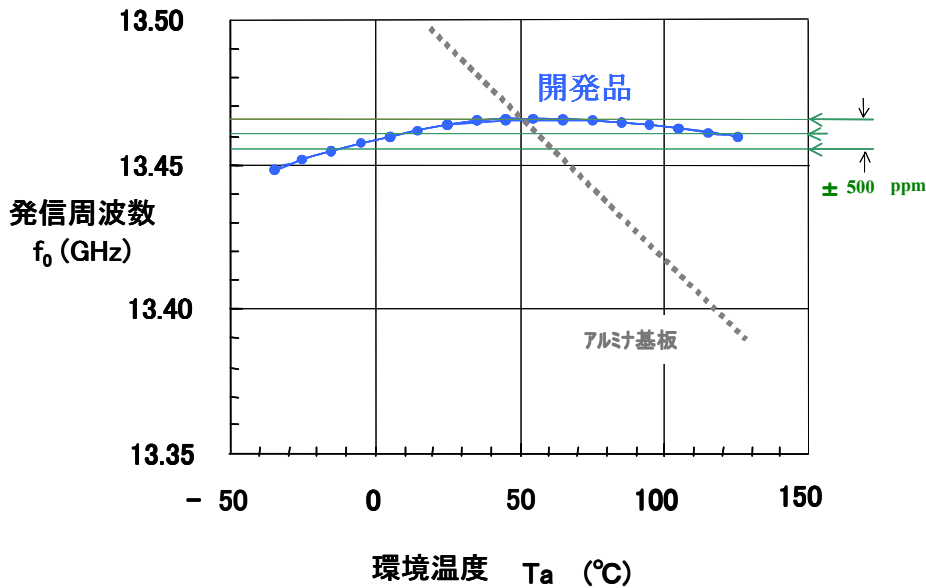


図4-6-5 サブテーム[A]によって開発した誘電体基板を共振器とした発信器の温度特性。環境温度50 °Cの時、0 ppm/°Cが実現している。図に示した範囲が±500 ppmである。参考として、従来のアルミナ基板の共振器を使った発信器の温度特性を載せた。

## 4-7 ミリ波メディアコンバータの構造

### 4-7-1 内部の構造

ミリ波メディアコンバータの構造を説明する。図4-7-1 は送信機の回路ブロックと内部の構造を比べた図である。(受信機の構造も同じである。)

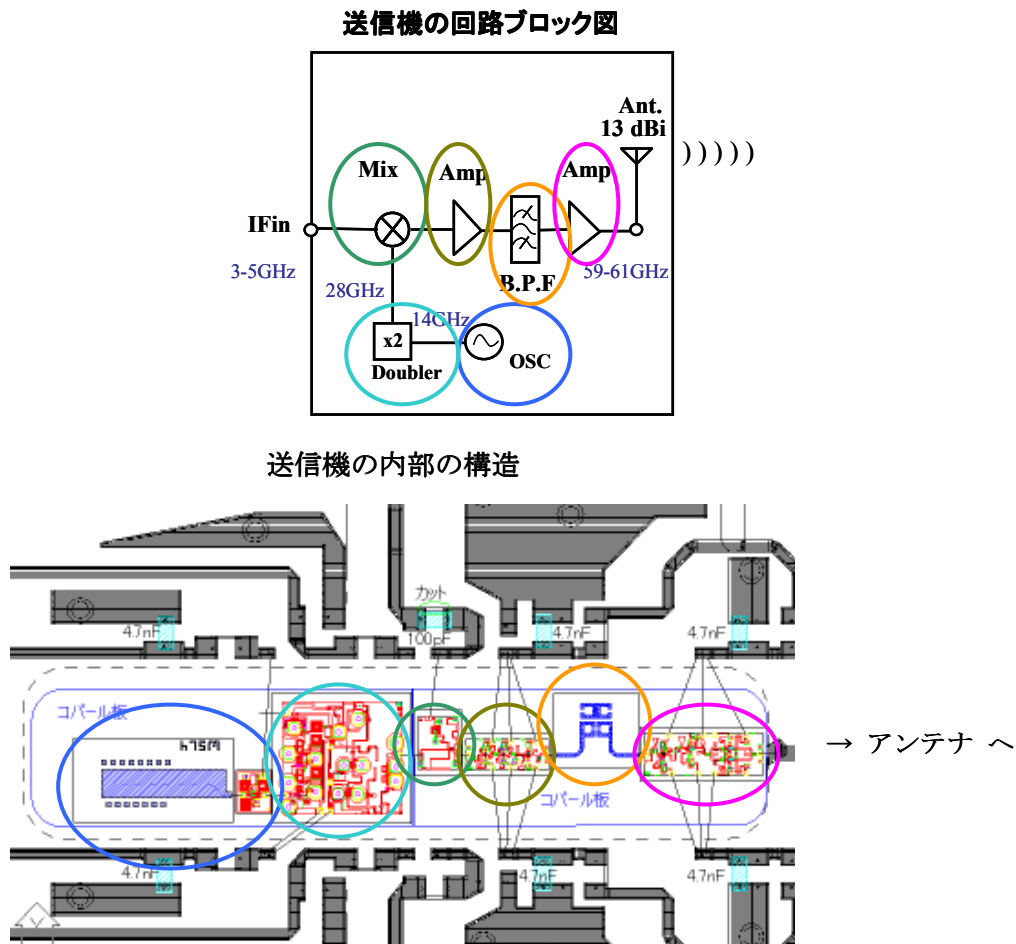


図4-7-1 ミリ波メディアコンバータ(送信機)の回路ブロックと内部構造  
対応する部分を同色円で囲んでいる

発振器は 4-6で説明した設計となっている。4-3 で説明したサブテーマ[ア]により開発した共振回路基板材料を採用して発振周波数の温度補償を実現している。周波数逡倍器、ミクサー、増幅器はそれぞれユーディナデバイス(株)製のMMICを使用している。帯域漏波フィルターは、セラミック基板を用いた簡易なヘアピン4セルの平面フィルターを開発した。これらすべてのエレメントを金属板の上に実装し、ワイヤで直結接続することでコンバータの主要機能が完成する。バイアスやIF信号は樹脂基板(ヘッダー)でインターフェイスをとっている。

#### 4-7-2 インターフェイス構造

ミリ波メディアコンバータの外形を、図4-7-2 に示す。アンテナの形状により 3態を開発している。

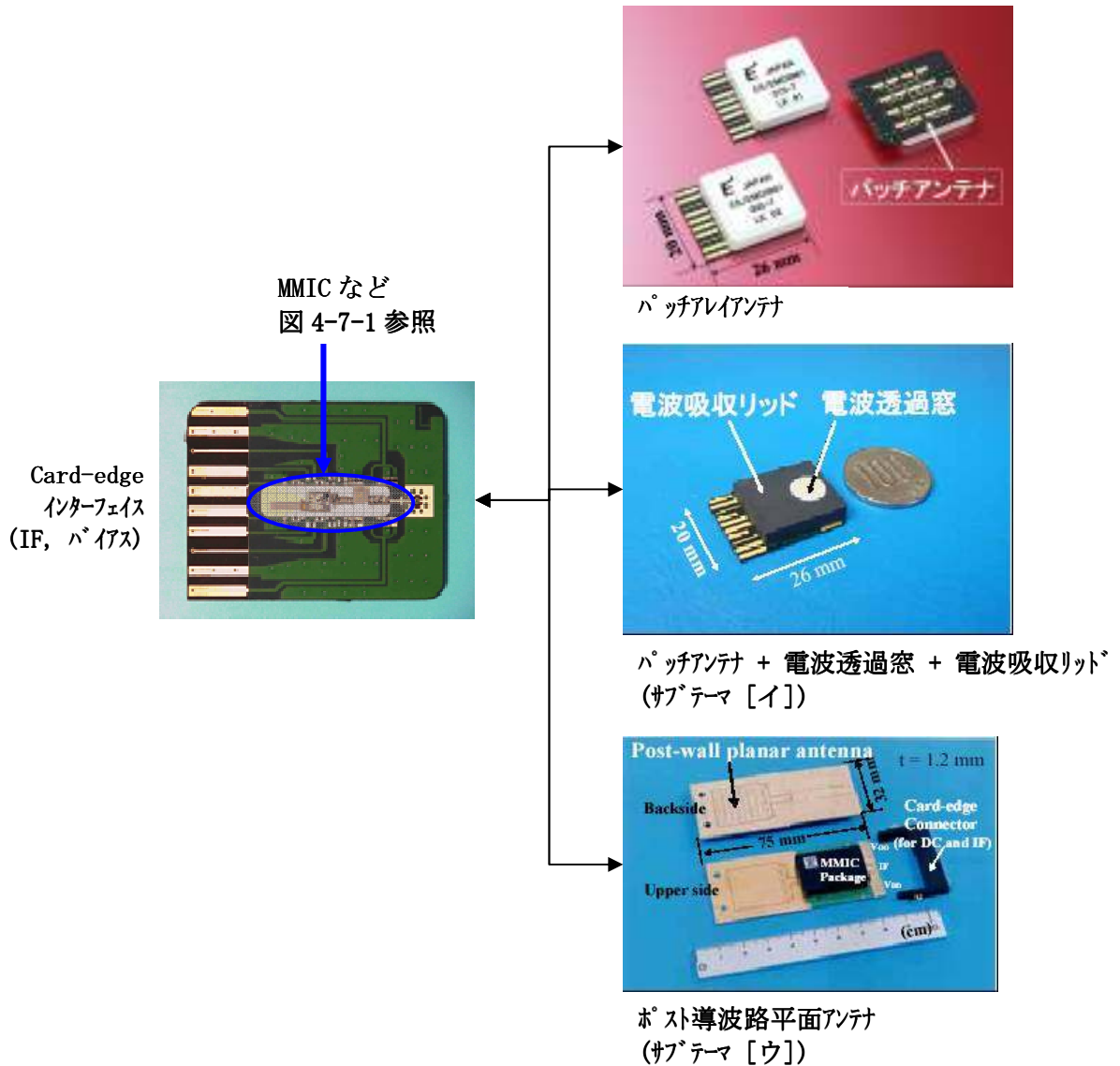


図4-7-2 ミリ波メディアコンバータの外形

ミリ波のインターフェイスは  
パッチアンテナ、電波透過窓、ポスト導波路平面アンテナ の 3態  
IFインターフェイスは Card-edgeコネクタ

##### (1) パッチ・アレイ・アンテナ

ヘッダーのデバイス搭載部の反対面にパッチアレイアンテナを設けたモジュール。ヘッダーの両面のミリ波接続は疑似同軸線路による。

## (2) 電波透過窓

デバイス搭載面にパッチアンテナを設け、リッドを通してミリ波のインターフェイスを取る構造としている。不要な電磁波の輻射を抑えるため、窓部を除いてリッド全体は電波吸収体となっている。詳細を4-3、4-4 で説明しているように、リッドは目標性能を達成している。電波透過窓は、形状を工夫することで レンズの効果を持たせることができるため、今後の製品化に当たっては、発展形への拡張が期待できる。また、ミリ波がリッドをよぎることがないため、ミリ波の伝送路が簡単であり、構造的に 最もシンプルである。

## (3) ポスト壁導波路平面アンテナ

サブテーム[ウ]によるポスト壁導波路平面アンテナを備えたモジュールである。アンテナの詳細は 4-5 を参照のこと。アンテナの利得・指向性を 随意に設計できるため、融通性の高いモジュールとなっている。

## 4-8 ミリ波メディアコンバータの性能

### 4-8-1 ミリ波メディアコンバータの特性および製造性

開発したミリ波メディアコンバータの基本特性は以下の通りである。

#### TX モジュールの基本スペック

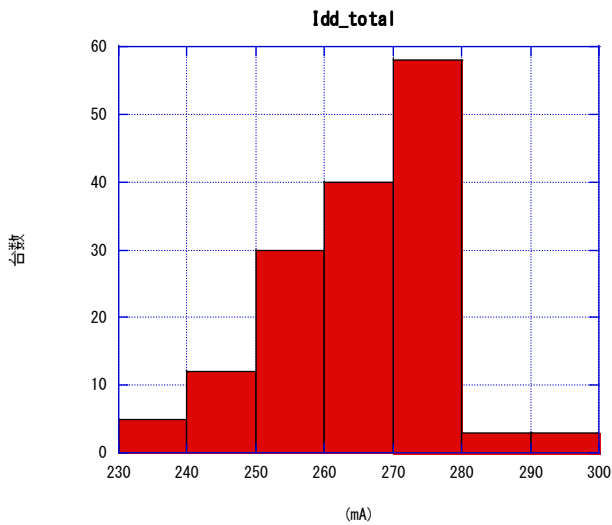
- IF frequency : 3 ~ 5.5 GHz
- RF frequency : 59.01 ~ 61.51 GHz
- Psat : 14 dBm
- IM3 : 30 dBc (at 8 dB back-off)
- Conversion gain : 23 dB

#### RX モジュールの基本スペック

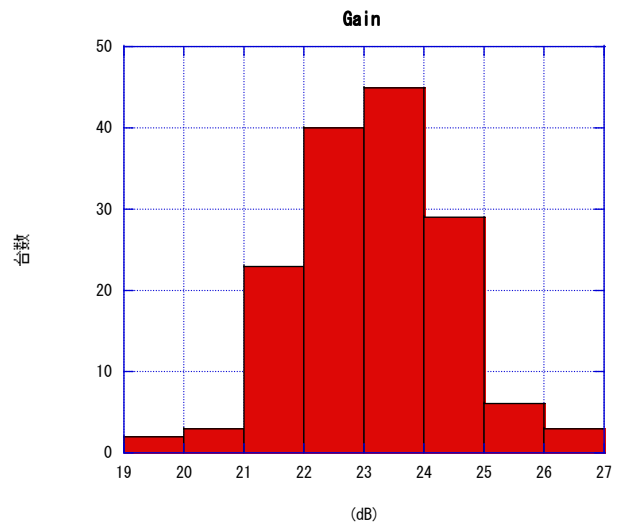
- IF frequency : 3 ~ 5.5 GHz
- RF frequency : 59.01 ~ 61.51 GHz
- Psat : -15 dBm
- Conversion gain : 27 dB
- Noise figure : 9 dB

これら諸特性の評価の詳細と 代表的特性例 を 付録 1 に列挙する。表2-1に掲げた目標特性を達成できた。

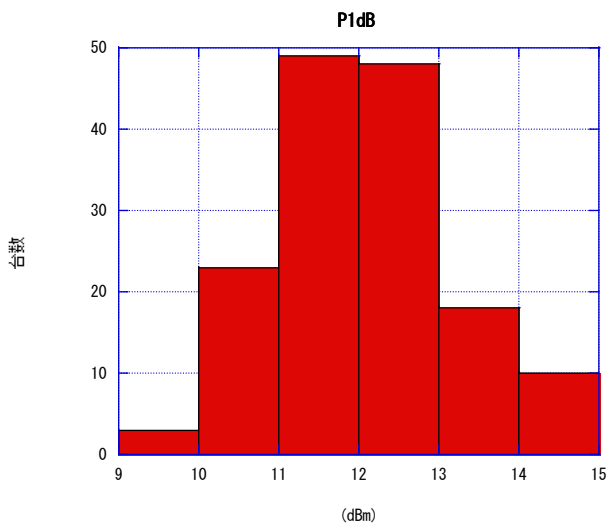
製造への技術適用を確認するために、量産仕様で組立を行ったモジュールについて、特性の分布を調査した。送信モジュール 総数 150台についての主な特性をヒストグラムに纏めた。図4-8-1に示す。(不良品は除いている。) この結果 特性分布のバラツキ(標準偏差)は 目標とする規格に対して製品としての余裕度を確保するに足るほどに小さいことが確認できた。この結果、開発した技術を総合して、製品化に足る完成度があることが示された。



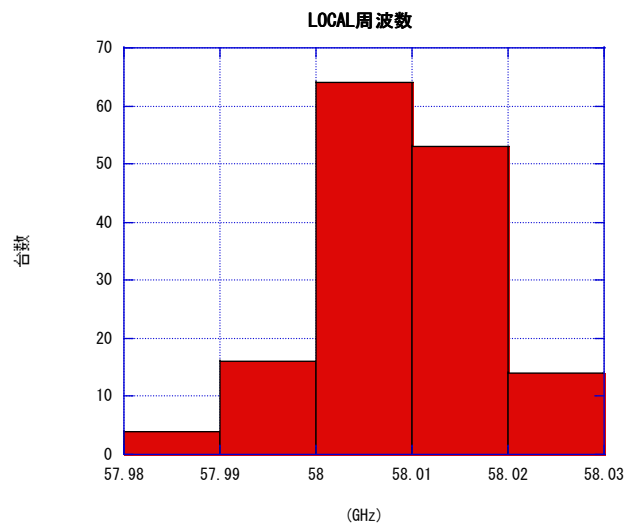
平均値 265.2 標準偏差 11.9



平均値 23.2 標準偏差 1.3



平均値 12.0 標準偏差 1.1



平均値 58.01 標準偏差 0.01

図4-8-1 ミリ波メディアコンバータ(送信機)の特性のヒストグラム

#### 4-8-2 伝送実験

開発したミリ波メディアコンバータの送受信機を用いた伝送実験を行ない、本コンバータの実用性を確認した。

本モジュールが主にホームユース製品の情報伝送に使われることを考えて、家庭用のAV機器を使って映像伝送を行った。送信側には家庭用のDVDプレーヤを用意し、プレーヤからの映像ソースをミリ波メディアコンバータに送るための変換機器を試作した。図4-8-2にこの送受信システムのブロック図を示す。図に示すように、送信機では、ビ



ビデオソースの信号を、2.4GHz の IF 信号に変換し、更に IF 信号をミリ波メディアコンバータに送り、60GHz の信号を出力する。また、受信機では逆に、60GHz の信号をミリ波メディアコンバータで2.4GHz の IF 信号にダウンコンバートし、IF 信号から、ビデオソースの信号を再生している。

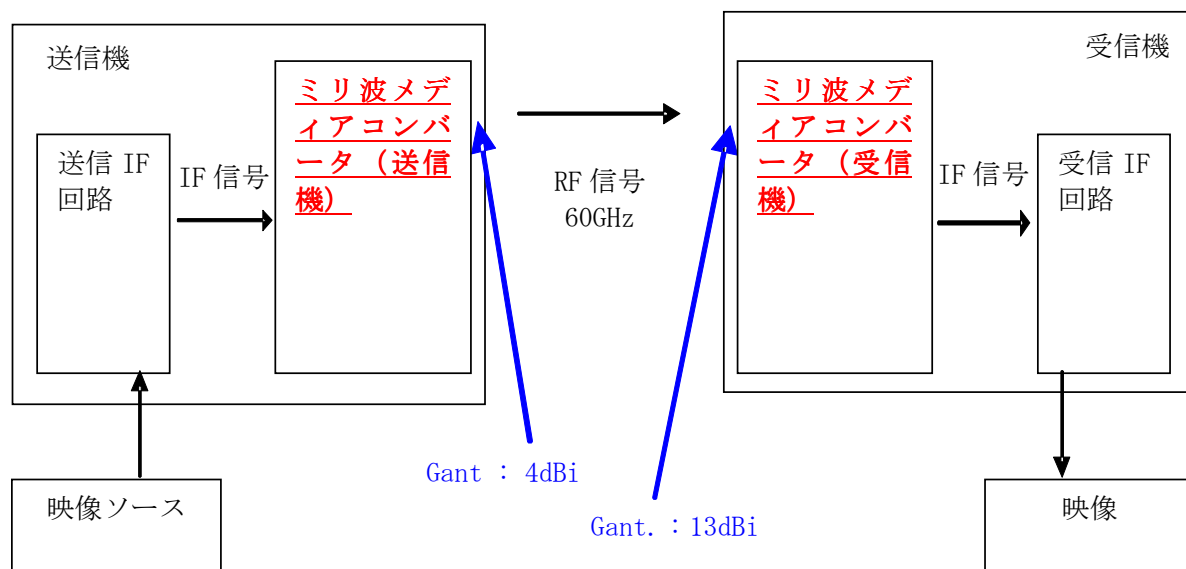


図 4-8-2 送受信システムのブロックダイアグラム

実験は送信側が窓つきリッドタイプを採用し、受信側はパッチアレイアンテナのタイプを用い、電波暗室で行なった。実験内容は、距離、角度、障害物のパラメーターについて、映像の映り具合を観測した。以下で各項目について報告する。

### (1) 距離特性

この実験では、送信機と受信機を対向させて、距離に対する映像の映り具合を観測した。同時に送信機からの受信機に入る RF 信号のパワーレベルを測定した。暗室スペースの制約上、伝送距離 0.5m~4m で測定を行なった。映像の映り具合に関しては、伝送距離、0.5m、4m で変化は無かった。図 4-8-3 と 4-8-4 に伝送距離 0.5m と 4m での映り具合を示す。また、図 4-8-5 に受信機に入る RF 信号のパワーレベルを距離に対してプロットしたグラフを示す。このグラフから、傾きは約-6dB/m であり、距離の 2 乗で減衰していることになる。これは一般的な電波の距離特性とも一致している。また、送信機から放出している電力を見積もると約 7dBm であった。電力的には 2dB 程度低いが、対向させた場合、アンテナの最大出力の方位が若干ずれていることを考えると、ほぼ設計通りである。図 4-8-6 には受信スペクトルの一例を示す。



図 4-8-3 0.5m伝送時の画像



図 4-8-4 4m伝送時の画像

差はみられない。

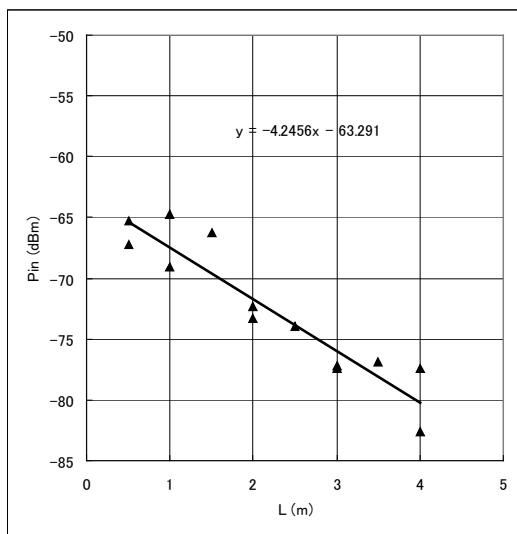


図 4-8-5 受信機の RF 受信電力の距離依存性

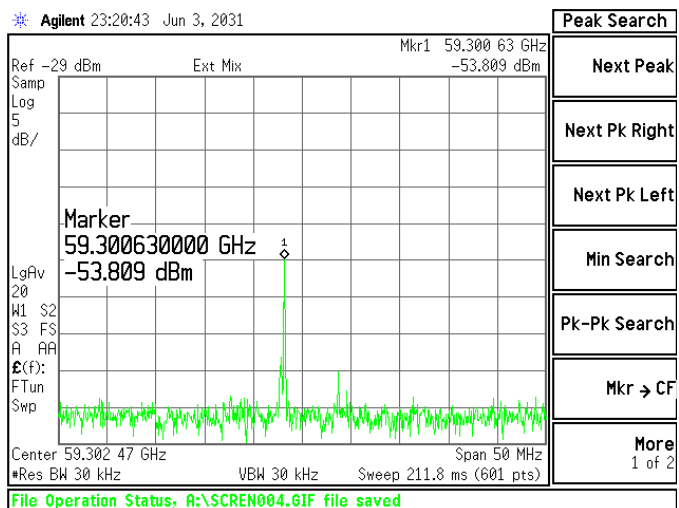


図 4-8-6 RF 信号のスペクトラム (伝送距離 1m)

## (2) 角度特性

この実験では、偏波面を水平と垂直に置き換え、各偏波面に対して水平方向の角度に対する映り具合を確認した。受信電力に対してはスペアナの測定感度以下になるため、測定は行なっていない。また、距離は 3 m に固定し、水平方向の角度は送信機のみ回転させている。

水平偏波の場合、角度を 90 度以上つけても問題なく画像が通った。図 4-8-7 に 0 度、90 度に対する伝送画像を示す。予想以上に受信感度が良かったため、暗室内の反射が原因で伝送している可能性があった。これを確認するため、モジュールのアンテナを結ぶ直線状に電波吸収体を置き、伝送画像を見ると画像は伝送されなくなった。このため、送信機からまっすぐ信号が受信機に伝わっていることが分かった。これは アンテナの指向性に加えて、装置の構造が原因しているものと考えられる。



図 4-8-7 水平偏波における水平方向の角度 0 度（左図）、90 度（右図）に対する伝送画像

偏波面を垂直にして同様の実験を行なった。この場合、70 度付近から映像に乱れが生じてきた。90 度では、完全に映らなくなった。

### (3) 障害物特性

大学ノート、ベニア板、電波吸収体、人を障害物にした場合の伝送状態を確認した。受信電力はスペアナの測定感度以下になるため、測定を行なっていない。また、距離は 3 m に固定した。大学ノート、ベニア板に関しては全く問題なく、映像が伝送できた。約 20dB の透過損失がある吸収体 1 枚を挟んだ場合では、映りは悪くなったが、まだ、映像が見られた。吸収体を二枚にすると完全に映らなくなった。電波吸収体の 1 枚の場合の画像を図 4-8-8 に示す。距離 3m に対して 20dB の減衰でも映像が見えるので、距離による空間ロスで見積もると、30m 近くまで映像は届くことになる。

間に人がいる時は、電波吸収が大きいので、当然ながら、映りは悪くなった。

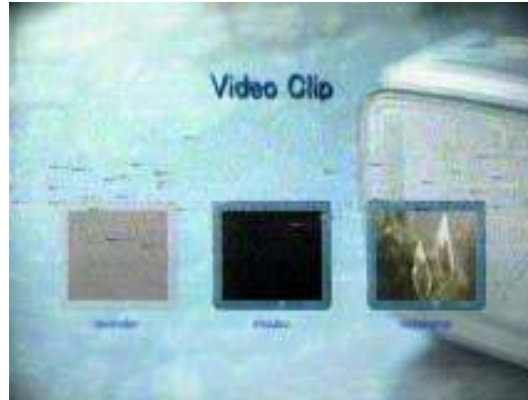


図 4-8-8 伝送距離 3m で電波吸収体 1 枚で電波を遮断した伝送画像

以上の実験で、以下のことが結論づけられた。

1. 屋内での実用的な距離(10m 程度) での画像伝送は問題ない。
2. 送信の指向性が低く、1 つの送信機で 部屋全体を伝送可能域とできる。
3. 偏波による 分離度が高いため、アンテナの設置向きでマルチパスによるゴーストを抑制できると考えられる。
4. 人体などの電波吸収の大きい阻止物体に対しては 弱い。

人体の影にならないように装置の設置に工夫をすることで、4 の問題は解消しうるものであり、メディアコンバータの有効性は確認できたと言える。

#### 4-9 信頼性試験

ミリ波メディアコンバータの開発で採用する技術の製品摘要確認として モジュールの信頼性試験を行った。要求される信頼度は、一般民生用途向けデバイスに要求されるレベルとして、試験条件を定めた。試験項目は、ユーディナデバイス(株)の非気密パッケージデバイスにおいて実施される項目となっている。(これらの条件は基本的にJIS, EIAJの規格に準拠している。)表4-9-1 に試験項目・条件をまとめた。

信頼性試験項目	試験台数	試験条件
高温通電試験結果	11台	Vdd=3V、Vgg=-0.1V、Tj:150°C、Tc:125°C、時間:1000時間
温度サイクル試験結果	11台	Tc:-40°C(30分)~RT(5分)~85°C(30分)、サイクル数:600サイクル
高温高湿通電試験結果	11台	Vdd=3V、Vgg=-0.1V、Tc:85°C、湿度85%、時間:1000時間
高温保存試験結果	8台	Tc:+100°C、時間:1000時間
低温保存試験結果	8台	Tc:-40°C、時間:1000時間
振動試験結果	8台	加速度20G、周波数10~2000Hz、XYZ各方向8分、4サイクル
衝撃試験結果	8台	最高加速度:14700m/s <sup>2</sup> 、パルス幅0.5ms、各方向3回

表4-9-1 ミリ波メディアコンバータの信頼性試験項目 一覧表

試験結果の詳細は、別紙 に記載する。結果として、すべての試験項目で破損なく 特性の変動は規格内であった。本ミリ波メディアコンバータに採用する技術が 一般の民生用途向けの製品に適用可能な水準に達していることが確認された。

#### 4-10 総括：ミリ波メディアコンバータの製品化にむけて

平成15年より、3年に渡るミリ波メディアコンバータの研究開発によって、当初目標を達成することができ、性能・コストの面で製品適用が可能な要素技術を完成させることができた。

平成16年11月10日付で、「ミリ波メディアコンバータ」の最初のサンプル提供を開始した。名称は「60-GHz モジュール」である。型格は ES/EMD5962015-R, ES/EMD5962005-R, ES/EMD5962015-T, ES/EMD5962005-T（末尾 R は受信用、T は送信用。このサンプルは ES:Engineering Sample, 性能確認サンプルとして提供している。）。平成17年度に完成した電波透過窓、ポスト導波路平面アンテナの技術を適用することにより、多様なインターフェイスを持つことができ、製品群の拡大が期待できる。

これらのサンプルにより、市場のニーズと価格などの市場要求を調査している。性能・価格(コスト)で市場の要求するところとの一致点を見いだして量産化のステップに進めたい。

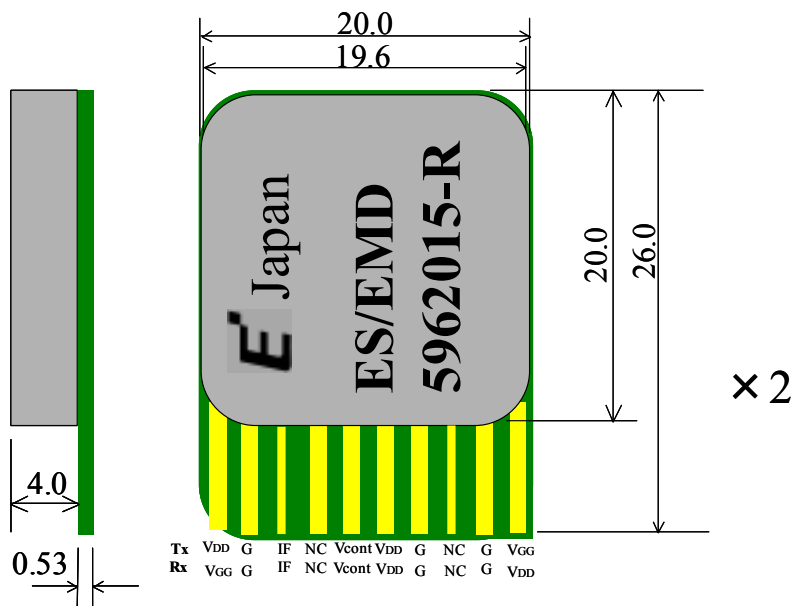


図 4-10-1 60 GHz モジュール外形

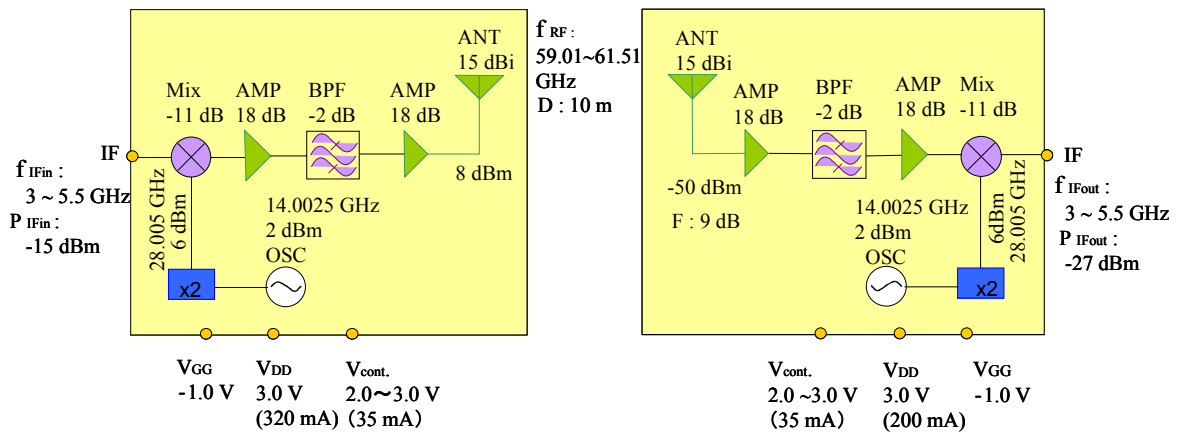


図 4-10-2 ブロックダイアグラム例

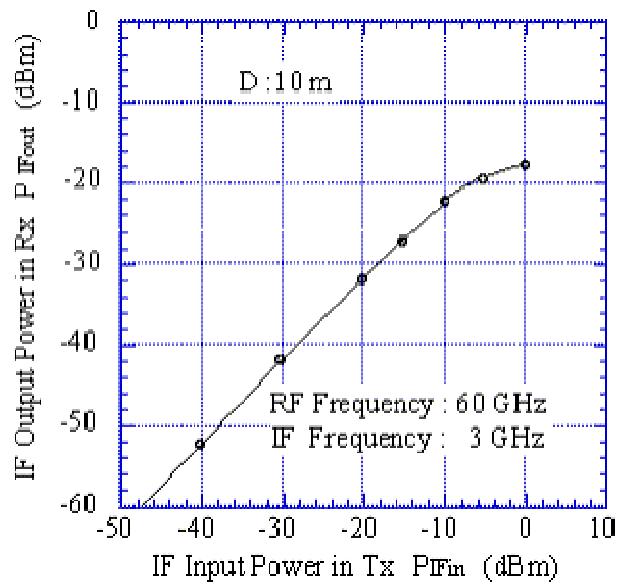


図 4-10-3 送受信機モジュールを 10 m (= D) の距離で動作させた場合の入出力特性

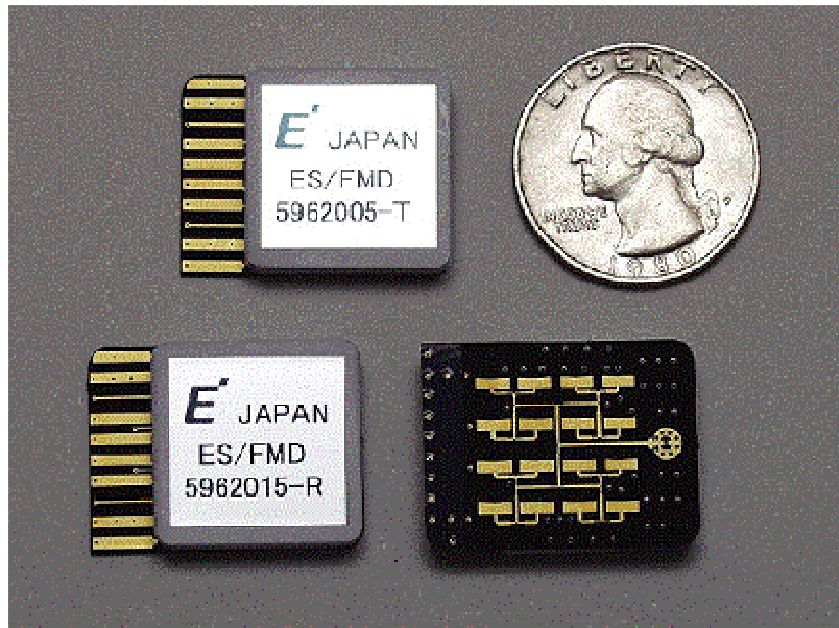


図 4-10-4 60 GHz モジュールの外形写真



## 5 参考資料・参考文献

### 5-1 研究発表・講演等一覧

1. 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、AP2003-258、pp. 53-58、2004年1月.
2. 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バータ”、無機マテリアル学会、第13回講演会テキスト、pp. 66-75、2004年2月.
3. ユーディナデバイス株式会社，“デジタル家電向け小型・低価格60-GHzモジュールの製品化”，マイクロウェーブ展2004（展示会、主催：電子情報通信学会APMC国内委員会店）、パネル展示、資料配布、2004年11月.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

9. 姉川 修、中野 洋、小瀬村 欣司郎、梶井 清、平地 康剛、“Cost-effective 60-GHz Modules with the Local-Oscillator having the Temperature-Coefficient of 0 ppm/°C for Digital@Home-Systems ” , European Conference on Wireless Technology 2005, 2005年10月.
10. 平地 康剛、“ “ユビキタス” がセラミックスに期待すること”、日本セラミックス協会北陸支部主催 秋期研究発表会、2005年11月.
11. 平地 康剛、中野 洋、滝本 幹夫、岡田 能彦、広川 二郎、“ミリ波 RF 部の低コスト化への一提案ミリ波メディアコンバータの開発”、電子情報通信学会、2006年総合大会、CS-2-5、2006年3月.
12. 須藤 薫、広川 二郎、安藤 真、中野 洋、岡田 能彦、平地 康剛、“ミリ波メディアコンバータ用電磁波吸収リッド内円形電波透過窓の設計と試作実験”、電子情報通信学会、アンテナ伝播研究会、AP2006-162、2006年2月.
13. 中野 洋、姉川 修、丹後 英樹、平地 康剛、“ミリ波メディアコンバータの開発”、電子情報通信学会、2006年総合大会、C-2-30、2006年3月.
14. 姉川 修、中野 洋、平地 康剛、“ミリ波メディアコンバータ用低コスト VCO” 電子情報通信学会、2006年総合大会、C-2-27、2006年3月.

# 別紙

## 1-1 共振器用基板の信頼性試験結果

### 1. 耐湿

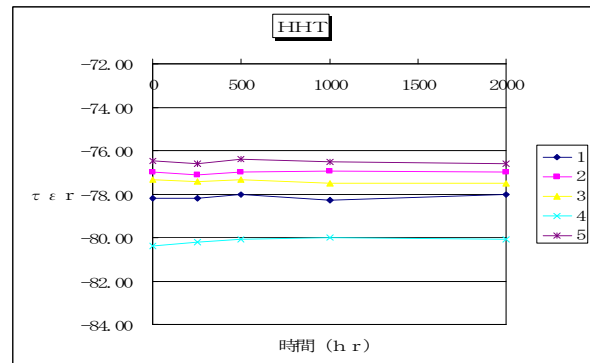
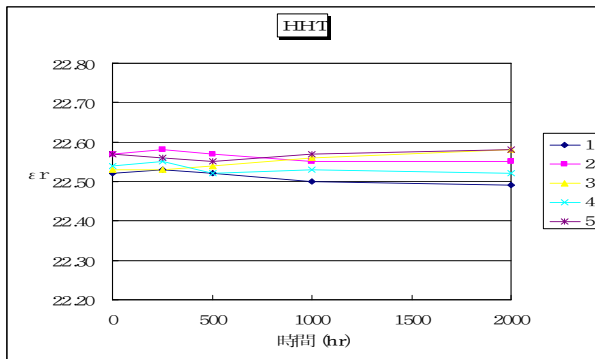
条件 +85C/85%

放置時間 0hr, 250hr, 500hr, 1000hr, 2000hr

測定 時間経過後24時間後測定

結果

No	0hr		250hr		500hr	
	比誘電率	比誘電率の温度係数	比誘電率	Q・F	比誘電率	Q・F
1	22.52	-78.18	22.53	-78.20	22.52	-78.00
2	22.57	-76.99	22.58	-77.10	22.57	-76.98
3	22.53	-77.32	22.53	-77.40	22.54	-7.35
4	22.54	-80.40	22.55	-80.22	22.52	-80.10
5	22.57	-76.47	22.56	-76.60	22.55	-76.40
No	1000hr		2000hr			
	比誘電率	Q・F	比誘電率	Q・F		
1	22.50	-78.30	22.49	-78.00		
2	22.55	-76.96	22.55	-76.99		
3	22.56	-77.50	22.58	-77.50		
4	22.53	-80.00	22.52	-80.10		
5	22.57	-76.50	22.58	-76.60		

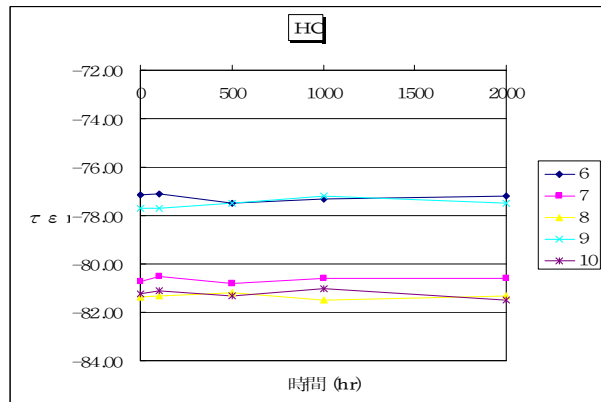
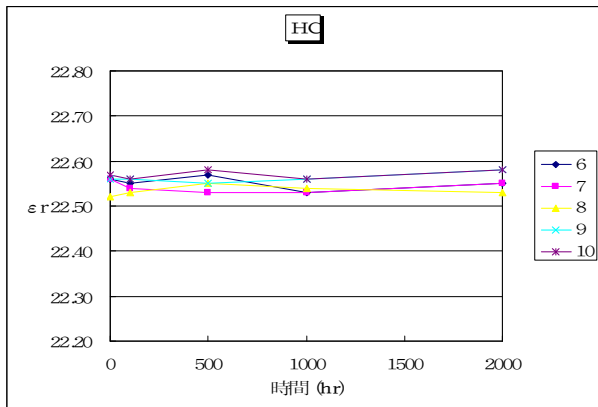


## 2. ヒートサイクル

条件 -40℃ 30分 ↔ +125℃ 30分  
 放置時間 0サイクル、100サイクル、500サイクル、1000サイクル、2000サイクル  
 測定 各サイクル後24h後に測定

結果

No	0サイクル		100サイクル		500サイクル	
	比誘電率	比誘電率の温度係数	比誘電率	Q・F	比誘電率	Q・F
6	22.56	-77.15	22.55	-77.10	22.57	-77.50
7	22.56	-80.74	22.54	-80.50	22.53	-80.80
8	22.52	-81.35	22.53	-81.30	22.55	-81.20
9	22.56	-77.69	22.56	-77.70	22.55	-77.50
10	22.57	-81.24	22.56	-81.10	22.58	-81.30
No	1000サイクル		2000サイクル			
	比誘電率	Q・F	比誘電率	Q・F		
6	22.53	-77.30	22.55	-77.20		
7	22.53	-80.60	22.55	-80.60		
8	22.54	-81.50	22.53	-81.30		
9	22.56	-77.20	22.58	-77.50		
10	22.56	-81.00	22.58	-81.50		



### 3. 高温放置

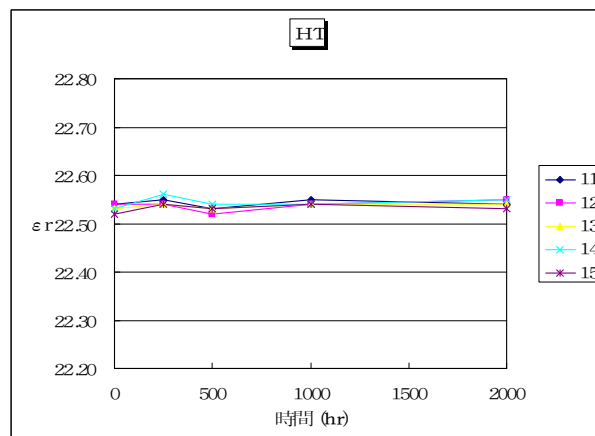
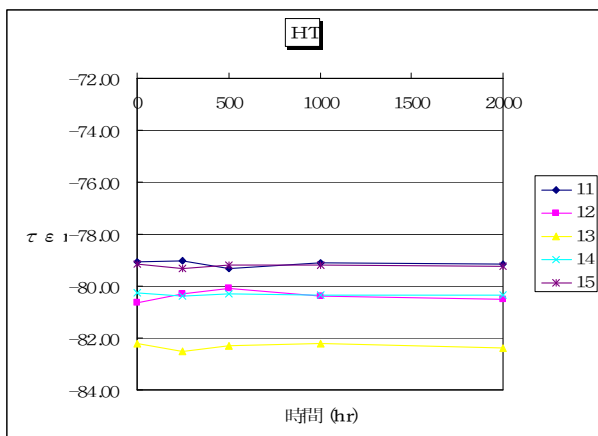
条件 +125C

放置時間 0hr 250hr 500hr 1000hr 2000hr

測定 各時間後24h後測定

結果

No	0hr		250hr		500hr	
	比誘電率	比誘電率の温度係数	比誘電率	Q・F	比誘電率	Q・F
11	22.54	-79.06	22.55	-79.00	22.53	-79.30
12	22.54	-80.65	22.54	-80.30	22.52	-80.10
13	22.53	-82.23	22.54	-82.50	22.53	-82.30
14	22.53	-80.25	22.56	-80.40	22.54	-80.30
15	22.52	-79.13	22.54	-79.30	22.53	-79.20
No	1000hr		2000hr			
	比誘電率	Q・F	比誘電率	Q・F		
11	22.55	-79.10	22.54	-79.15		
12	22.54	-80.40	22.55	-80.50		
13	22.54	-82.20	22.54	-82.40		
14	22.54	-80.35	22.55	-80.36		
15	22.54	-79.20	22.53	-79.22		



## 1-2 ミリ波メディアコンバータの主な特性

ミリ波メディアコンバータの特性例と 測定ブロック図を示す。

### 送信モジュールの基本特性

DC 特性 (typical)

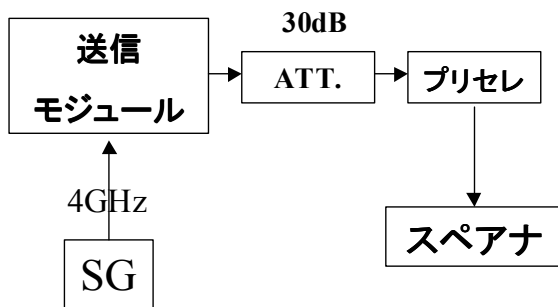
$V_{dm} = 3V$ ,  $V_{da} = 3V$ ,  $V_{cont} = 2.5 \sim 3.5V$ ,  $V_g = -0.1V$

$I_{dm} = 113 \text{ mA}$ ,  $I_{da} = 166 \text{ mA}$ ,  $I_{cont} = 24 \text{ mA}$ ,  $|I_g| < 1 \text{ mA}$

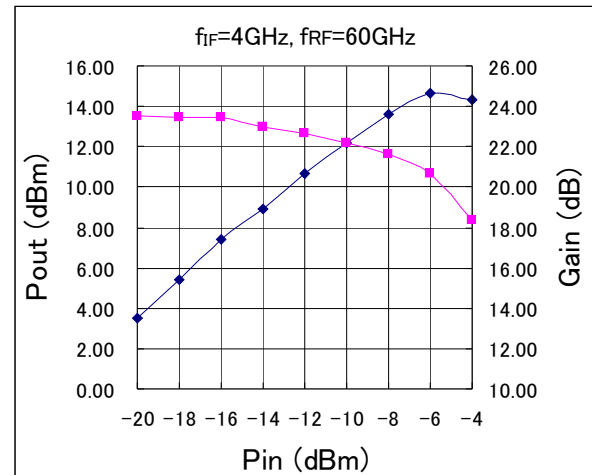
(上条件で  $f_0 = 56.010 \text{ GHz}$ )

RF 特性

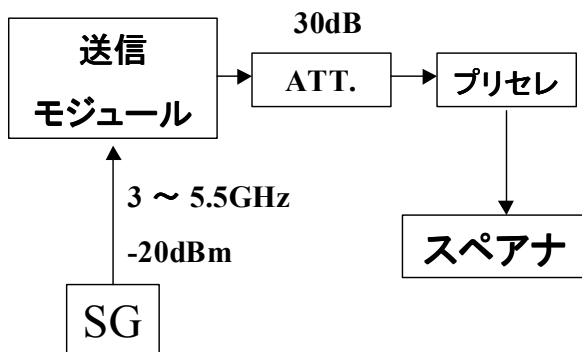
#### 1. 入出力特性



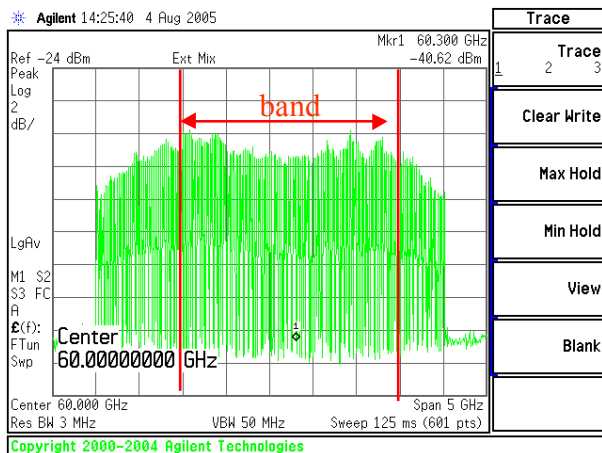
測定系



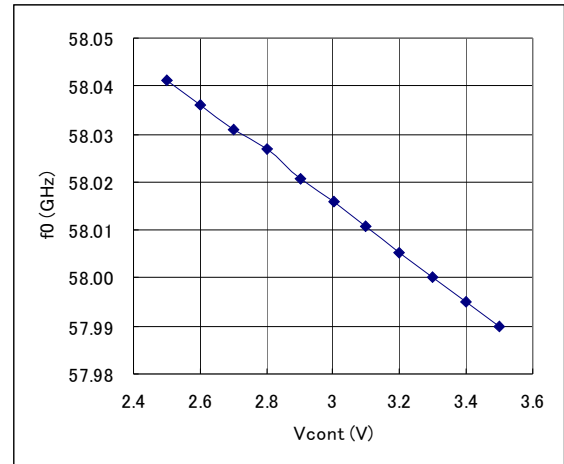
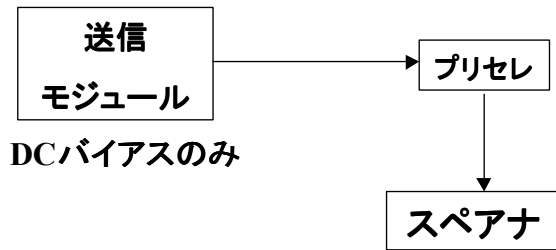
#### 2. 周波数特性



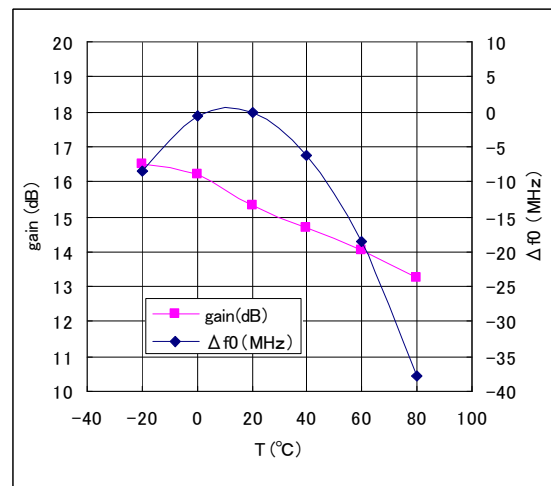
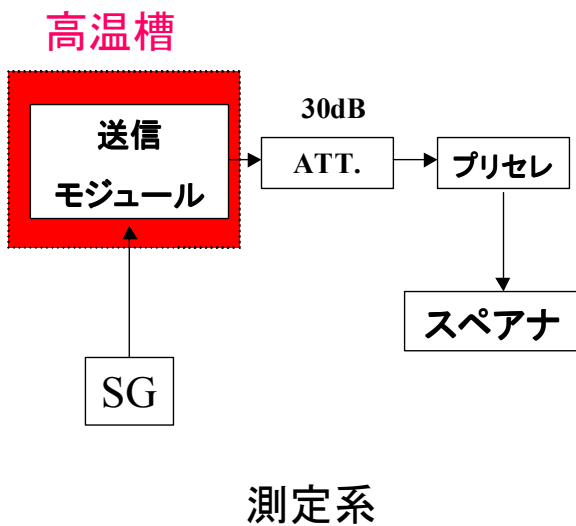
測定系



### 3. $f_0$ の $V_{cont}$ 依存性



### 4. 温度特性

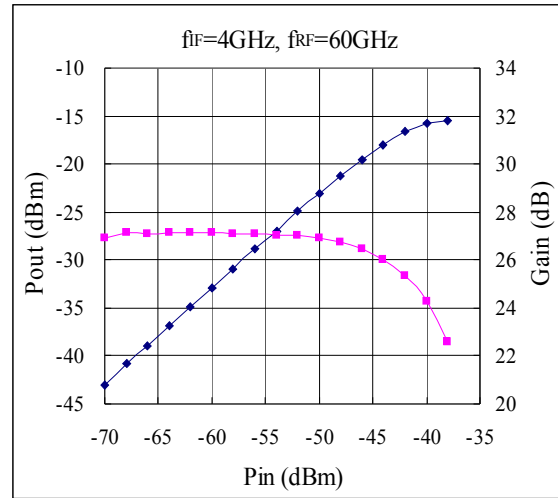
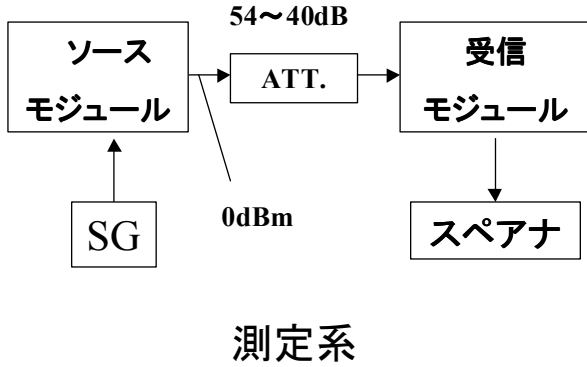


スプリアス

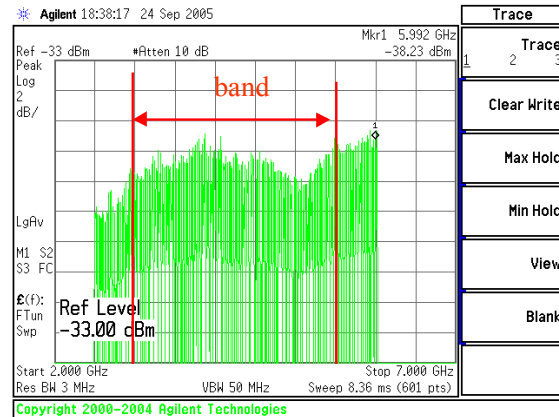
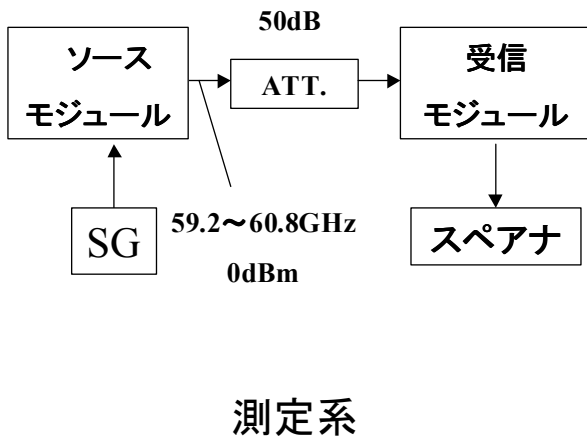
- 21.6dBm @58.02GHz
- 7.78dBm @56.22GHz (IF 入力時 : 1.8GHz、-18dBm)
- 9.51dBm @55.62GHz (IF 入力時 : 2.4GHz、-18dBm)

## 受信モジュールの基本特性

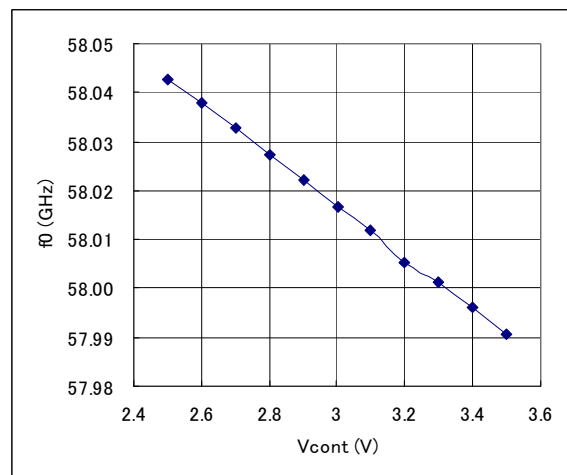
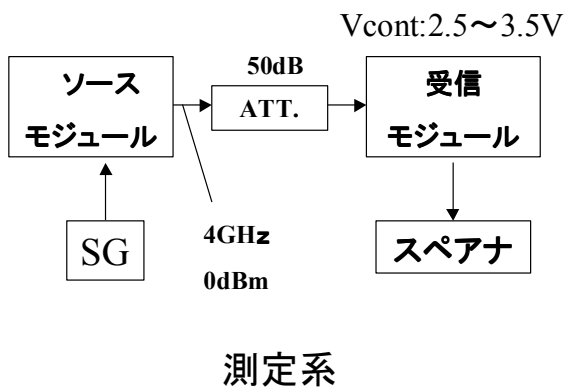
### 1. 入出力特性



### 2. 周波数特性

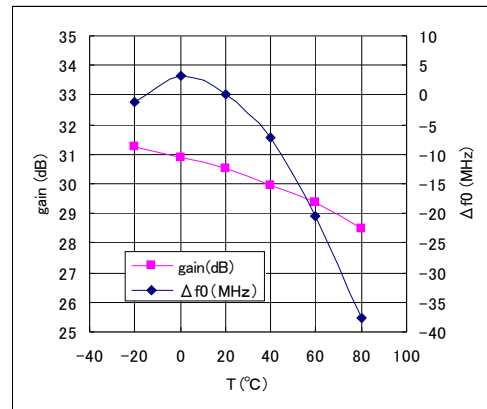
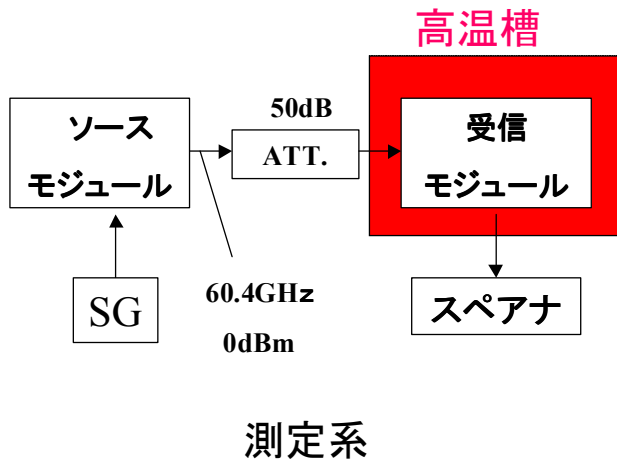


### 3. $f_0$ の $V_{cont}$ 依存性





#### 4. 温度特性



## 1-3 ミリ波メディアコンバータの信頼性試験結果

### 1. 低温保存試験

#### ○目的

この規格は、デバイスを長時間にわたって低温で保存した場合の耐久性を評価する方法について規定する。

#### ○試験条件

Tc: -40°C、時間: 1000 時間

#### ○試験数

8 台

#### ○試験結果

8/8 台、全数破壊無し。

#### ○考察

全数破壊等無く、特に RF 特性等問題無し。

長時間にわたって低温 (Tc: -40°C) で長時間保存した場合の耐久性有り。

#### ○測定結果

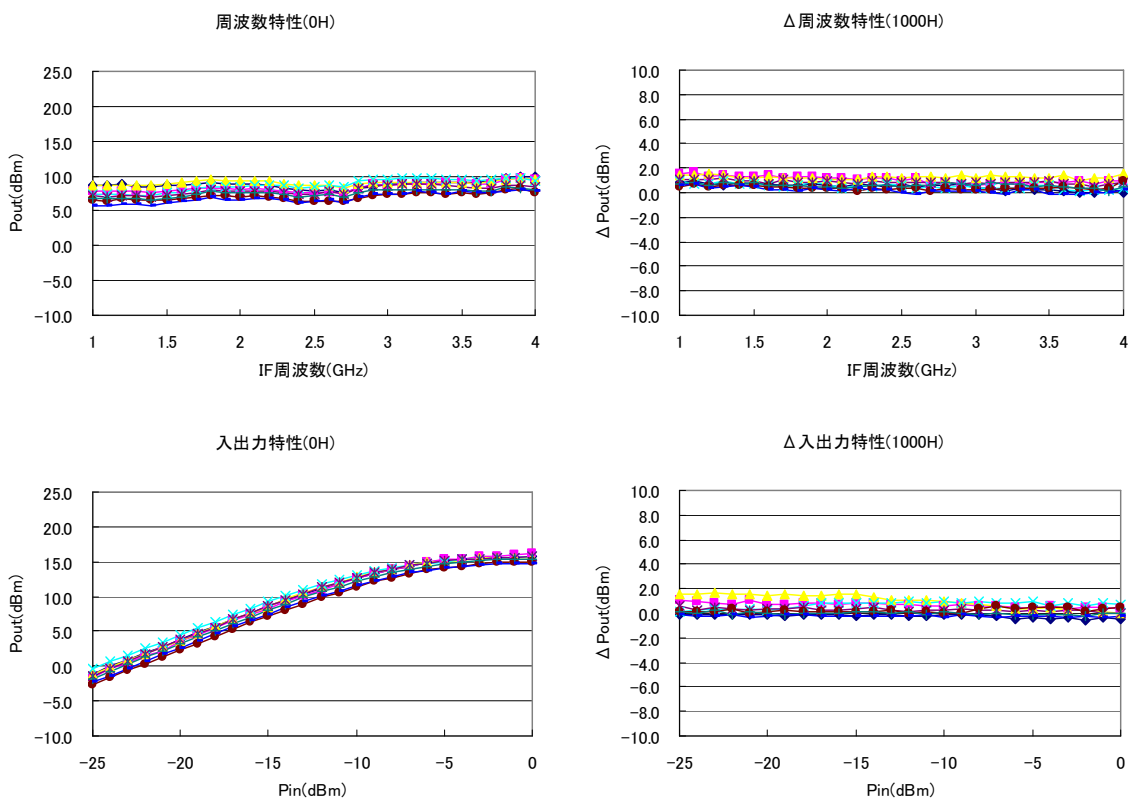
周波数特性: IF 周波数 1.0~4.0GHz 時の Pout 特性、Pout@Pin: -15dBm

入出力特性: Pin: -25dBm~0dBm 時の Pout 特性

#### ◇低温保存試験結果

試験前 (0H 時測定結果\_左側)

試験後 (1000H 後測定結果-0H 時測定結果\_右側)



○測定結果

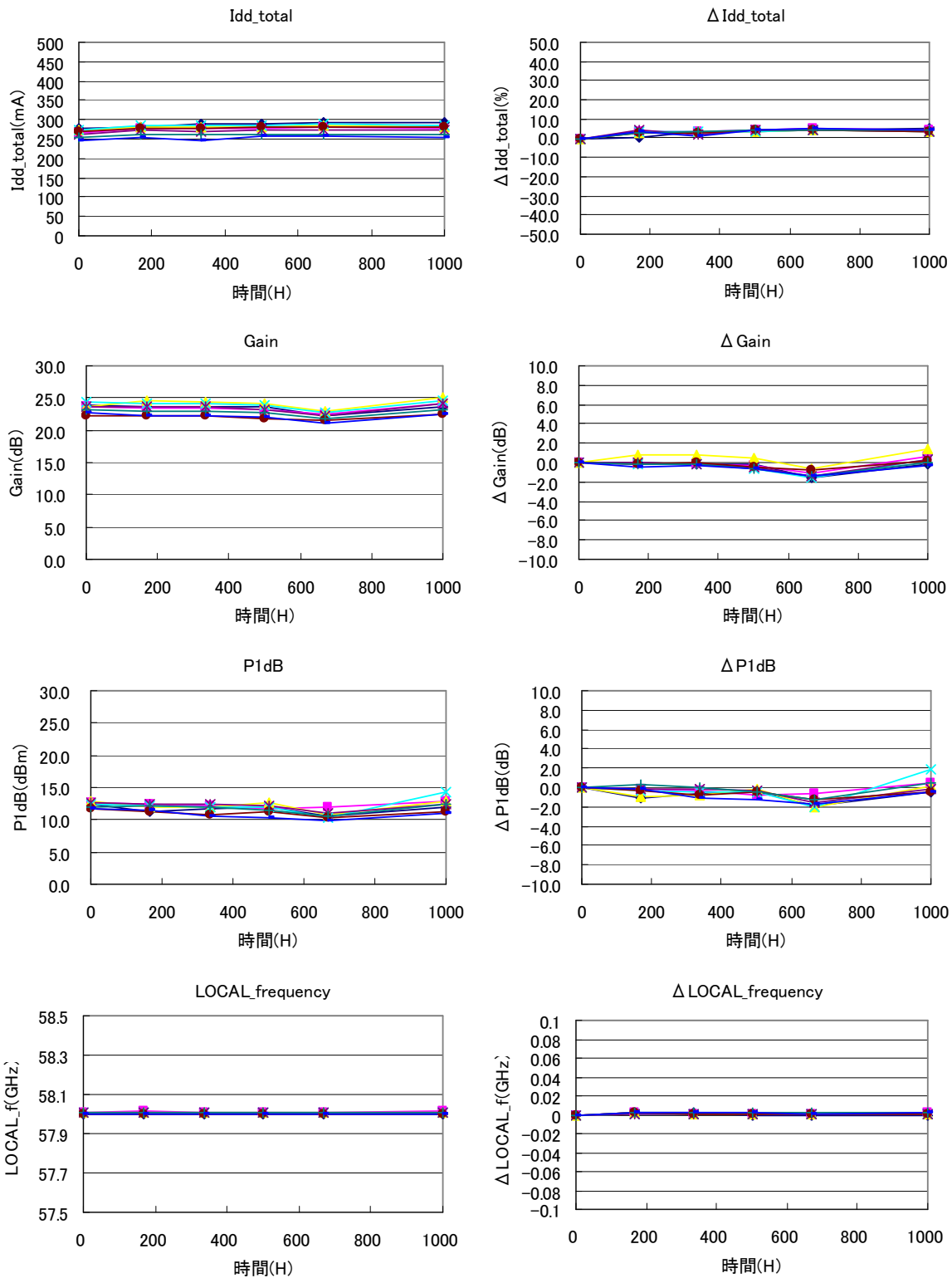
Idd\_total : RF-OFF 時のトータルドレイン電流値の変動結果。

Gain : Pin=-20dBm(線形性領域における)Gain 値の変動結果。

P1dB : P1dB 値の変動結果。

LOCAL\_frequency : LOCAL 周波数の変動結果。

◇低温保存試験結果



## 2. 高温通電試験

### ○目的

この規格は、デバイスに長時間電氣的ストレス及び熱的ストレスを加えた場合の耐久性を評価することを目的とする。

### ○試験条件

Vdd=3V、Vgg=-0.1V、Tc:125°C、時間：1000 時間

### ○試験数

11 台

### ○試験結果

11/11 台、全数破壊無し。

### ○考察

全数破壊等無く、特に RF 特性等問題無し。

デバイスに長時間電氣的ストレス及び熱的ストレスを加えた場合の耐久性有り。

### ○測定結果

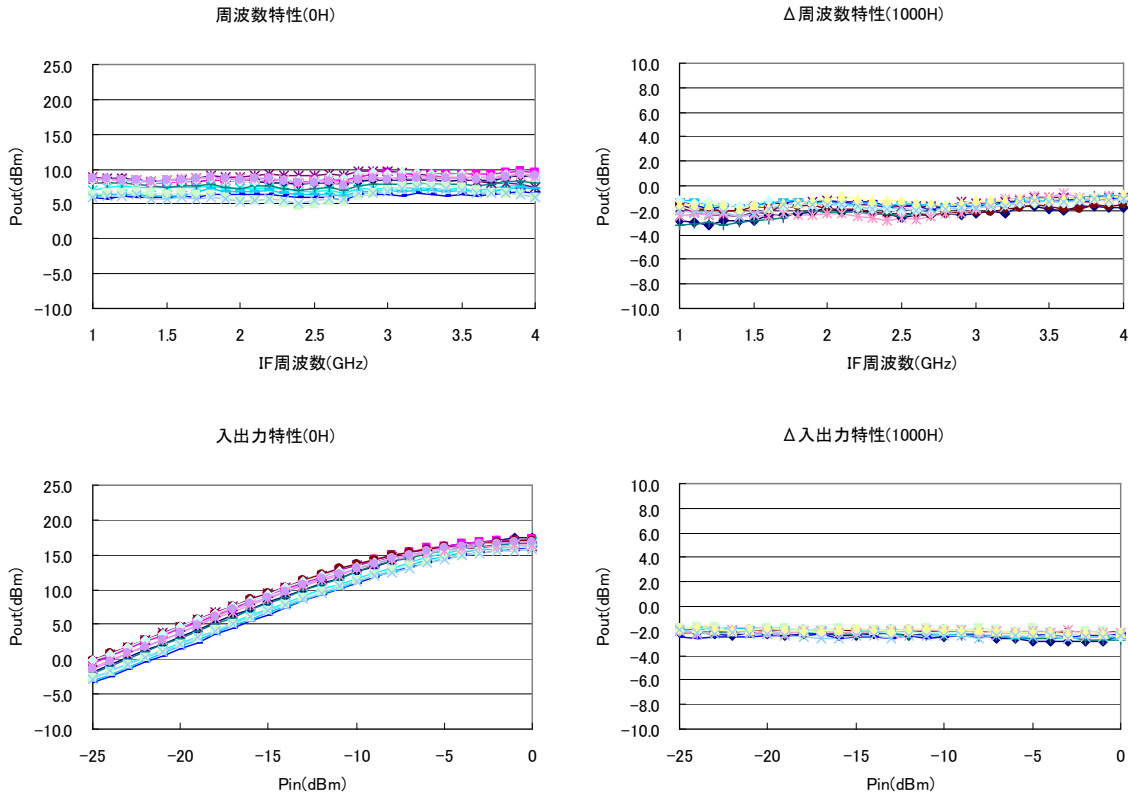
周波数特性: IF 周波数 1.0~4.0GHz 時の Pout 特性、Pout@Pin:-15dBm

入出力特性: Pin:-25dBm~0dBm 時の Pout 特性

### ◇高温通電試験結果

試験前 (0H 時測定結果\_左側)

試験後 (1000H 後測定結果-0H 時測定結果\_右側)



○測定結果

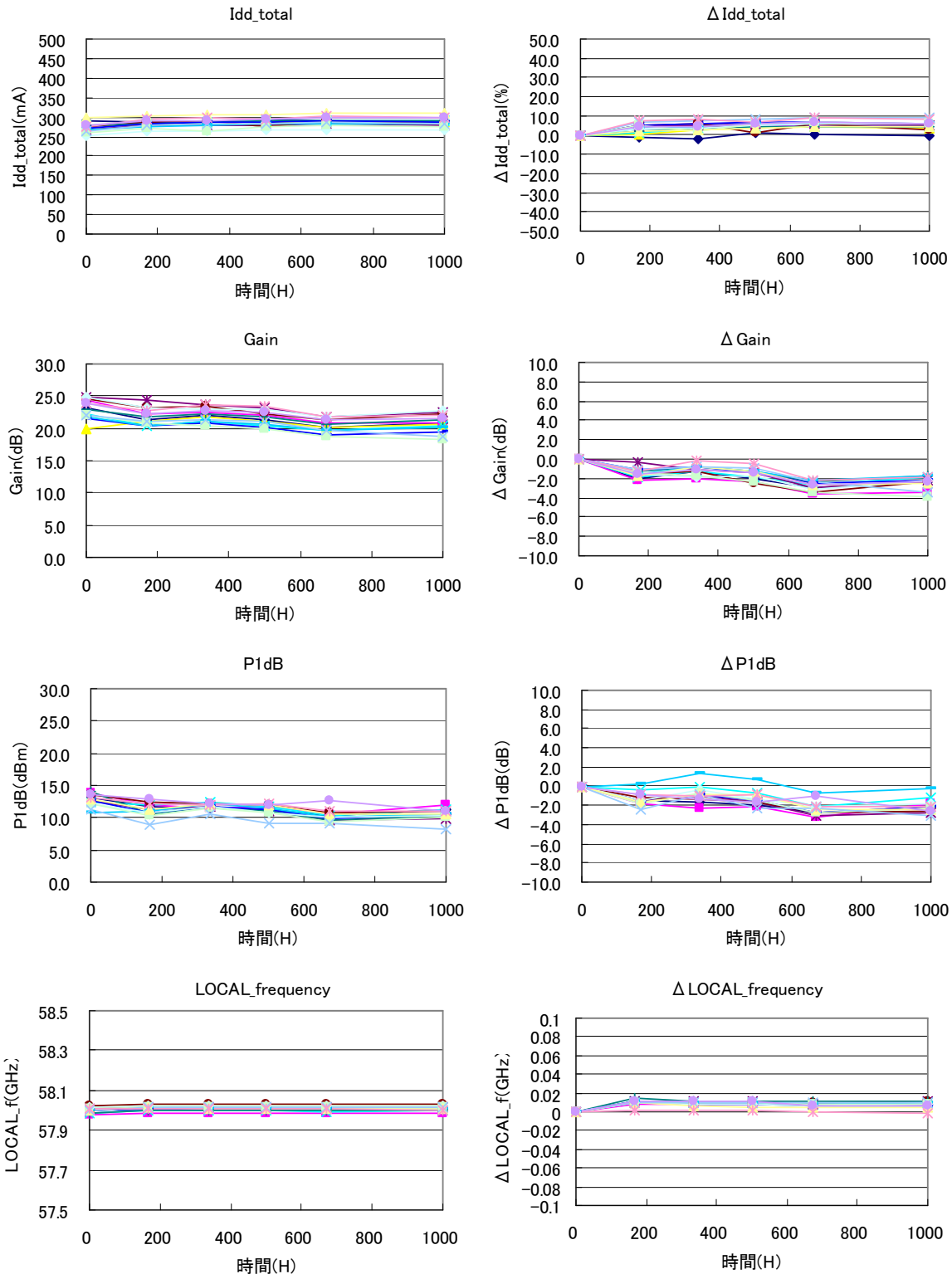
Idd\_total : RF-OFF 時のトータルドレイン電流値の変動結果。

Gain : Pin=-20dBm(線形性領域における)Gain 値の変動結果。

P1dB : P1dB 値の変動結果。

LOCAL\_frequency : LOCAL 周波数の変動結果。

◇高温通電試験結果



◇高温通電試験装置



### 3. 高温高湿通電試験

#### ○目的

この規格は、デバイスを長時間にわたって高温高湿の雰囲気中でバイアスを印加した状態で保存した場合の耐久性を評価する方法について規定する。

#### ○試験条件

Vdd=3V、Vgg=-0.1V、Tc:85°C、湿度 85%、時間：1000 時間

#### ○試験数

11 台

#### ○試験結果

11/11 台、全数破壊無し。

#### ○考察

全数破壊等無く、特に RF 特性等問題無し。

長時間にわたって高温高湿の雰囲気中でバイアスを印加した状態で保存した場合の耐久性有り。

#### ○測定結果

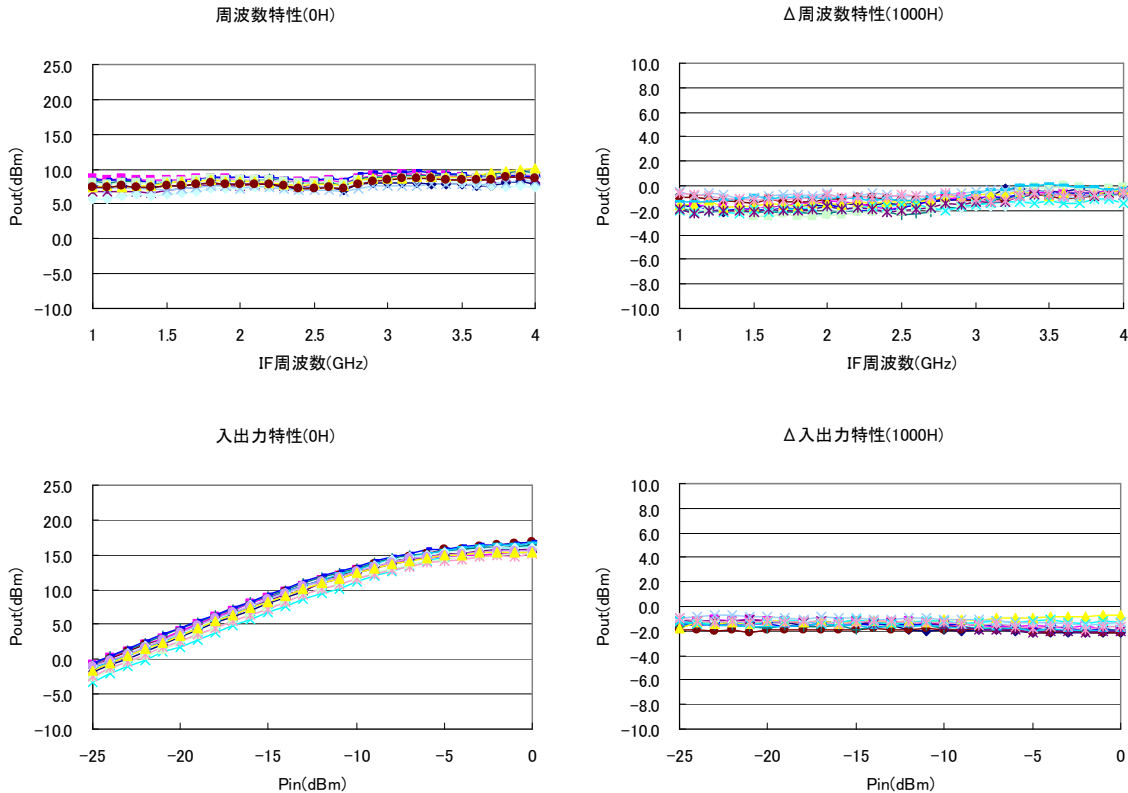
周波数特性: IF 周波数 1.0~4.0GHz 時の Pout 特性、Pout@Pin:-15dBm

入出力特性: Pin:-25dBm~0dBm 時の Pout 特性

#### ◇高温高湿通電試験結果

試験前(0H 時測定結果\_左側)

試験後(1000H 後測定結果-0H 時測定結果\_右側)



○測定結果

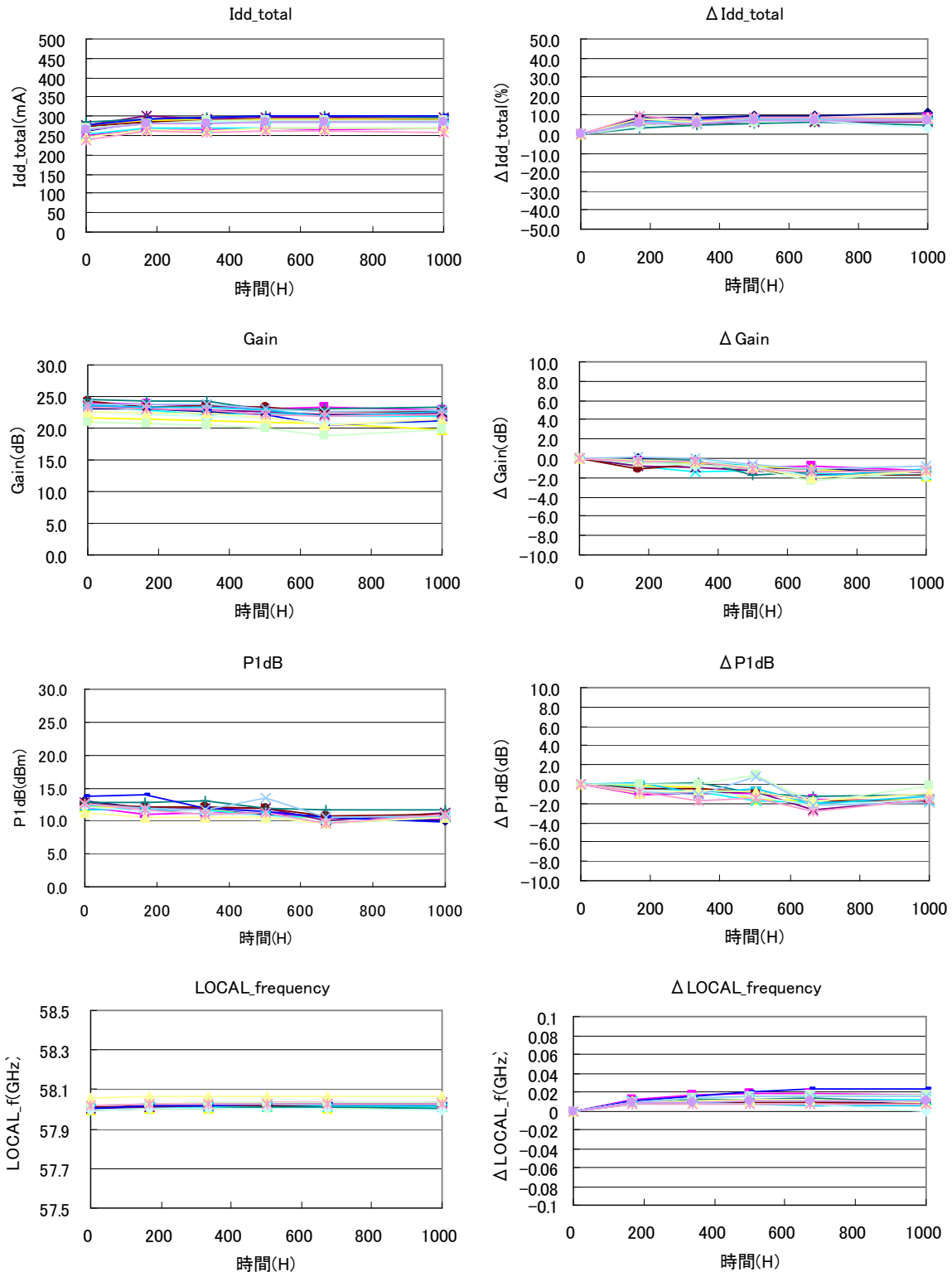
Idd\_total : RF-OFF 時のトータルドレイン電流値の変動結果。

Gain : Pin=-20dBm(線形性領域における)Gain 値の変動結果。

P1dB : P1dB 値の変動結果。

LOCAL\_frequency : LOCAL 周波数の変動結果。

◇高温高湿通電試験結果





◇高温高湿通電試験装置



#### 4. 高温保存試験

##### ○目的

この規格は、デバイスを長時間にわたって高温で保存した場合の耐久性を評価する方法について規定する。

##### ○試験条件

Tc:+100°C、時間：1000 時間

##### ○試験数

8 台

##### ○試験結果

8/8 台、全数破壊無し。

##### ○考察

全数破壊等無く、特に RF 特性等問題無し。

長時間にわたって高温 (Tc:100°C) で保存した場合の耐久性有り。

##### ○測定結果

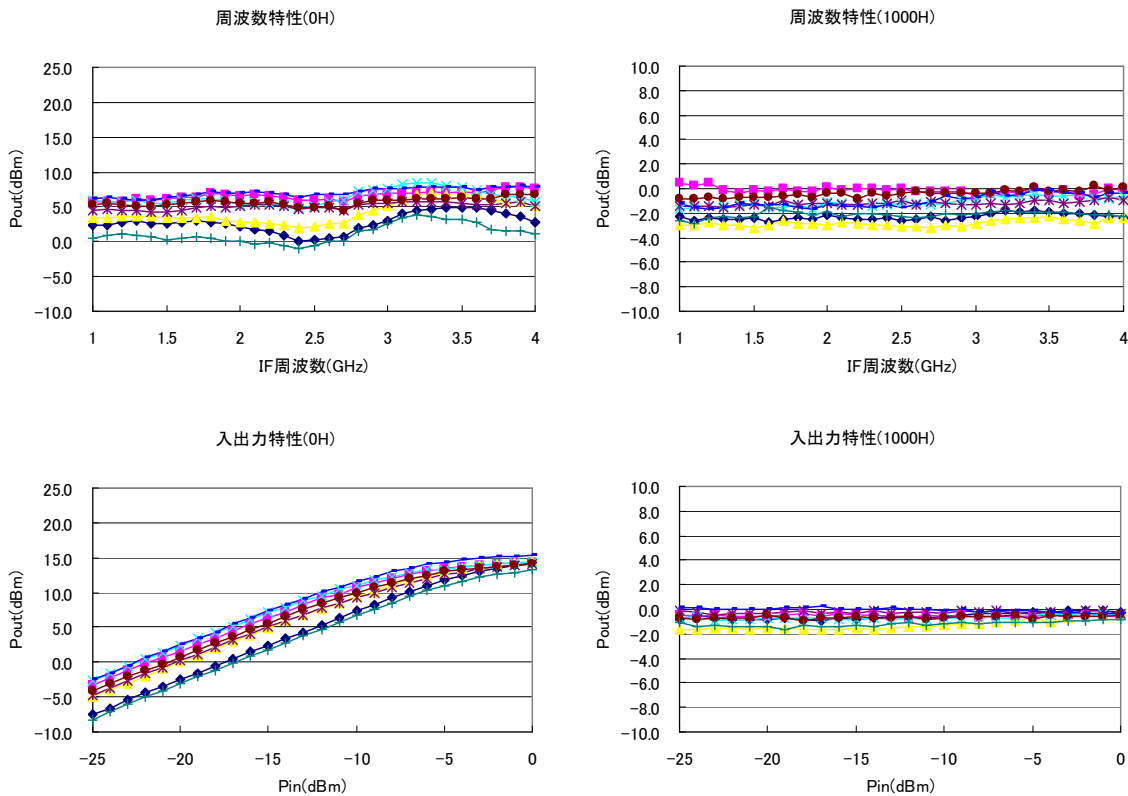
周波数特性: IF 周波数 1.0~4.0GHz 時の Pout 特性、Pout@Pin:-15dBm

入出力特性: Pin:-25dBm~0dBm 時の Pout 特性

#### ◇高温保存試験結果

試験前 (0H 時測定結果\_左側)

試験後 (1000H 後測定結果-0H 時測定結果\_右側)



○測定結果

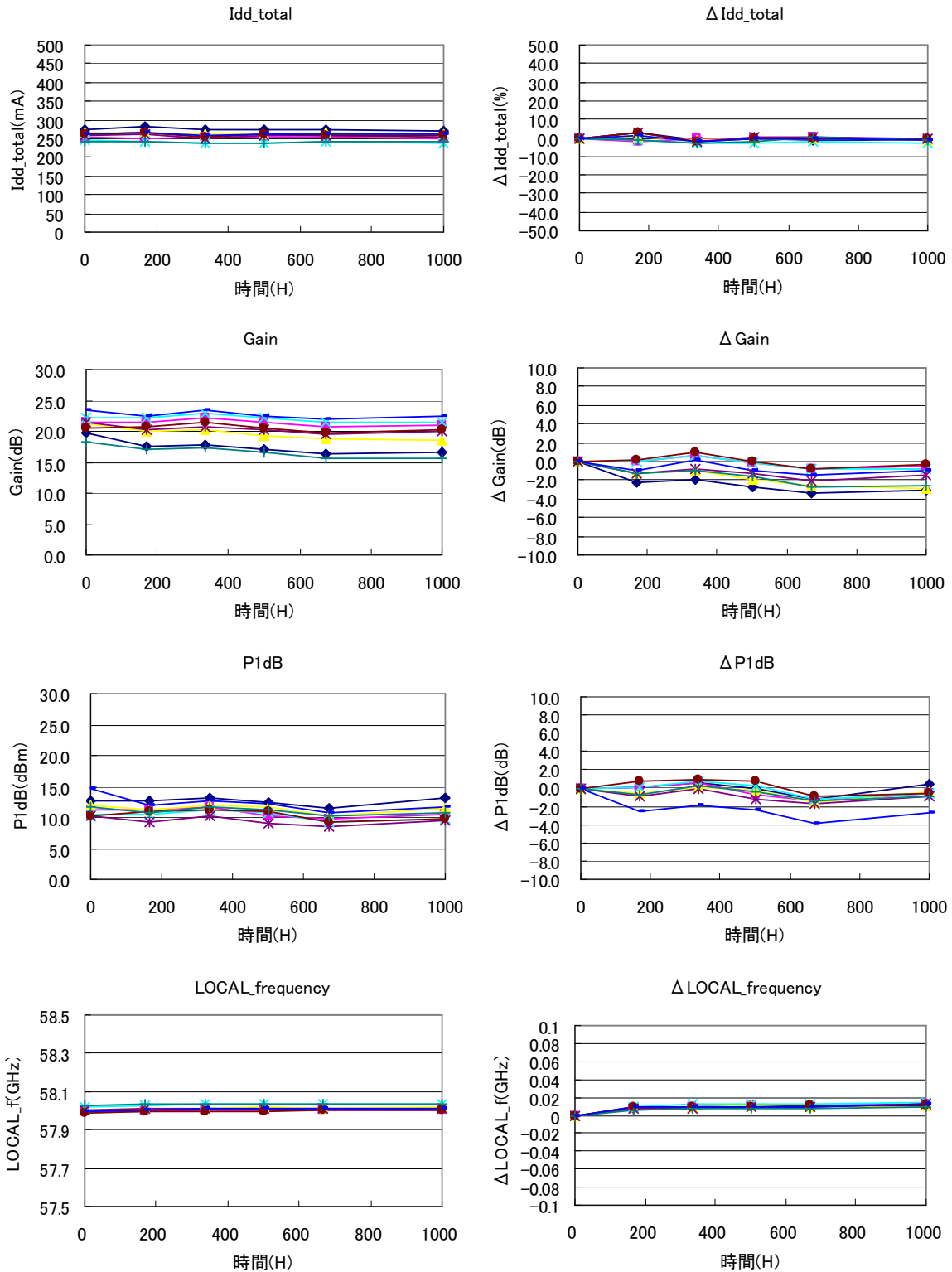
I<sub>dd\_total</sub> : RF-OFF 時のトータルドレイン電流値の変動結果。

Gain : Pin=-20dBm(線形性領域における)Gain 値の変動結果。

P1dB : P1dB 値の変動結果。

LOCAL\_frequency : LOCAL 周波数の変動結果。

◇ 高温保存試験結果



## 5. 温度サイクル試験

### ○目的

デバイスを高温及び低温にさらした場合の構造的な耐久性の評価、及び高温と低温の間で繰返して温度変化にさらした場合の耐久性の評価を目的とする。

### ○試験条件

Tc: -40°C (30分) ~ RT (5分) ~ 85°C (30分)、サイクル数: 600サイクル

### ○試験数

11台

### ○試験結果

11/11台、全数破壊無し。

### ○考察

全数破壊等無く、特にRF特性等問題無し。

デバイスを高温及び低温にさらした場合の構造的な耐久性の評価、及び高温と低温の間で繰返して温度変化にさらした場合の耐久性有り。

### ○測定結果

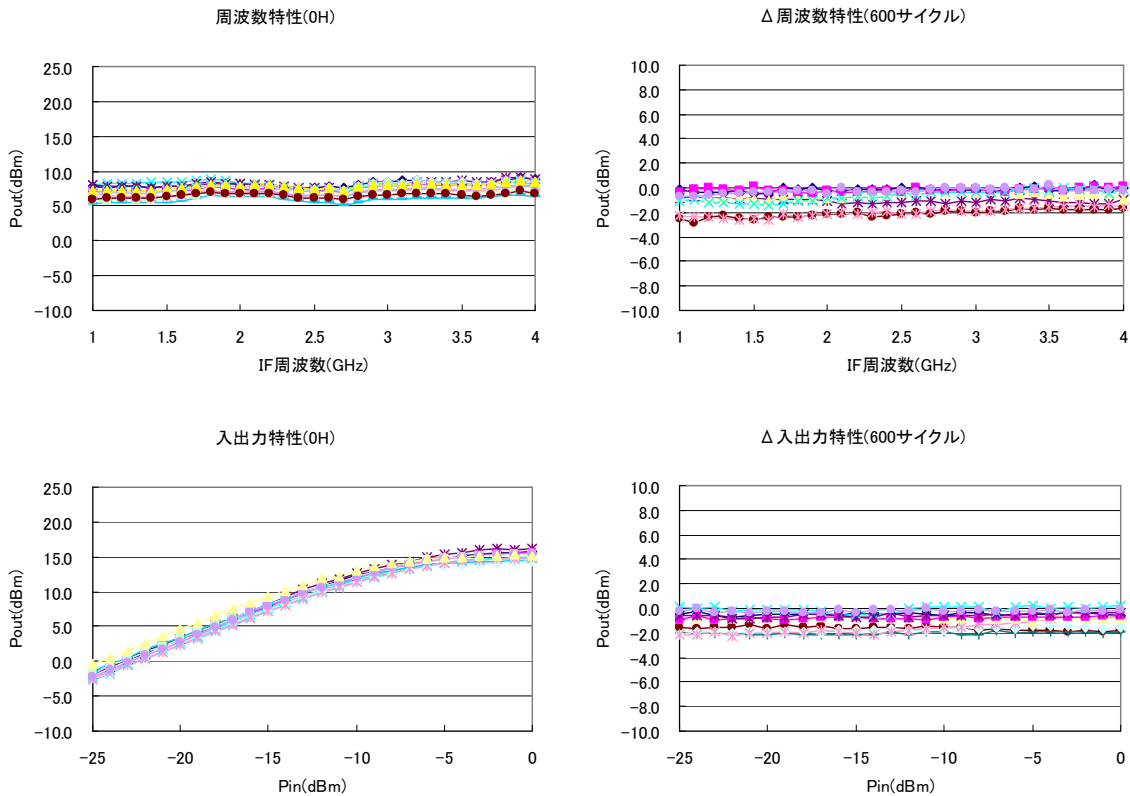
周波数特性: IF周波数 1.0~4.0GHz 時の Pout 特性、Pout@Pin: -15dBm

入出力特性: Pin: -25dBm~0dBm 時の Pout 特性

### ◇温度サイクル試験結果

試験前(0H時測定結果\_左側)

試験後(600cycle後測定結果-0cycle時測定結果\_右側)



○測定結果

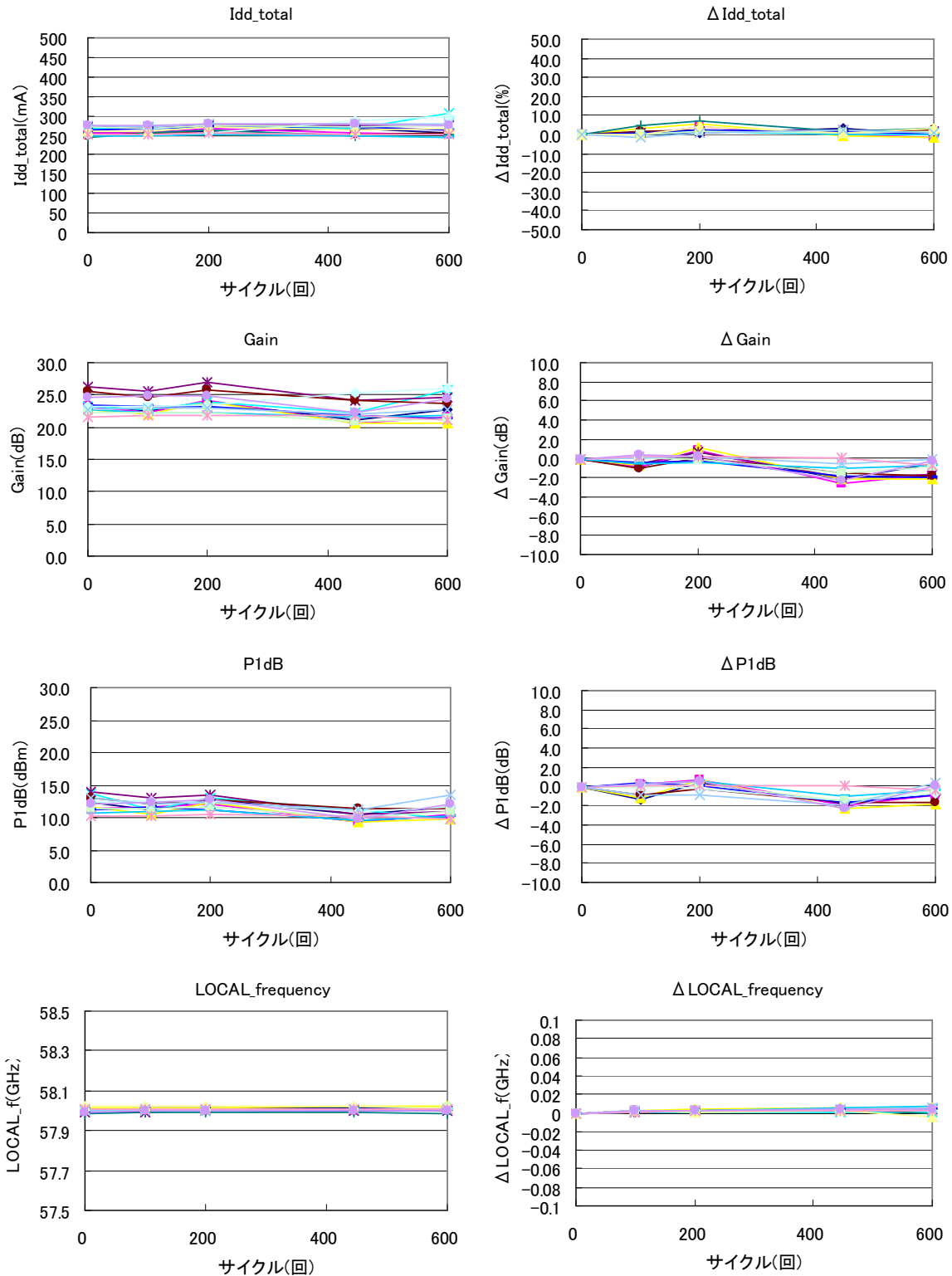
Idd\_total : RF-OFF 時のトータルドレイン電流値の変動結果。

Gain : Pin=-20dBm(線形性領域における)Gain 値の変動結果。

P1dB : P1dB 値の変動結果。

LOCAL\_frequency : LOCAL 周波数の変動結果。

◇温度サイクル試験結果



◇温度サイクル試験装置



## 6. 振動試験

### ○目的

半導体デバイスが輸送中および使用中に受ける振動に対する耐性を評価する。

### ○試験条件

加速度 20G、周波数 10~2000Hz、XYZ 各方向 8 分、4 サイクル

### ○試験数

8 台

### ○試験結果

8/8 台、全数破壊無し。

### ○考察

全数破壊等無く、特に問題無し。

半導体デバイスが輸送中および使用中に受ける振動に対する耐性有り。

### ○測定結果

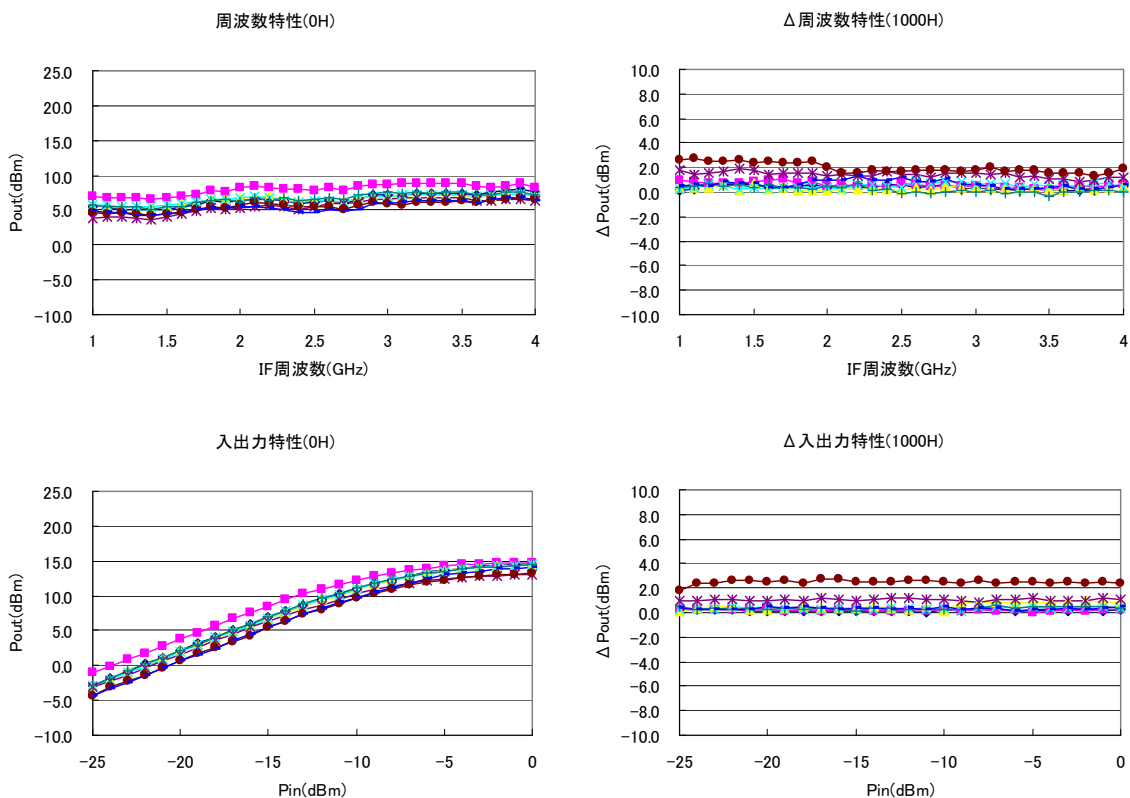
周波数特性: IF 周波数 1.0~4.0GHz 時の Pout 特性、Pout@Pin:-15dBm

入出力特性: Pin:-25dBm~0dBm 時の Pout 特性

### ◇振動試験結果

試験前(初期測定結果\_左側)

試験後(試験後測定結果-初期測定結果\_右側)



○測定結果

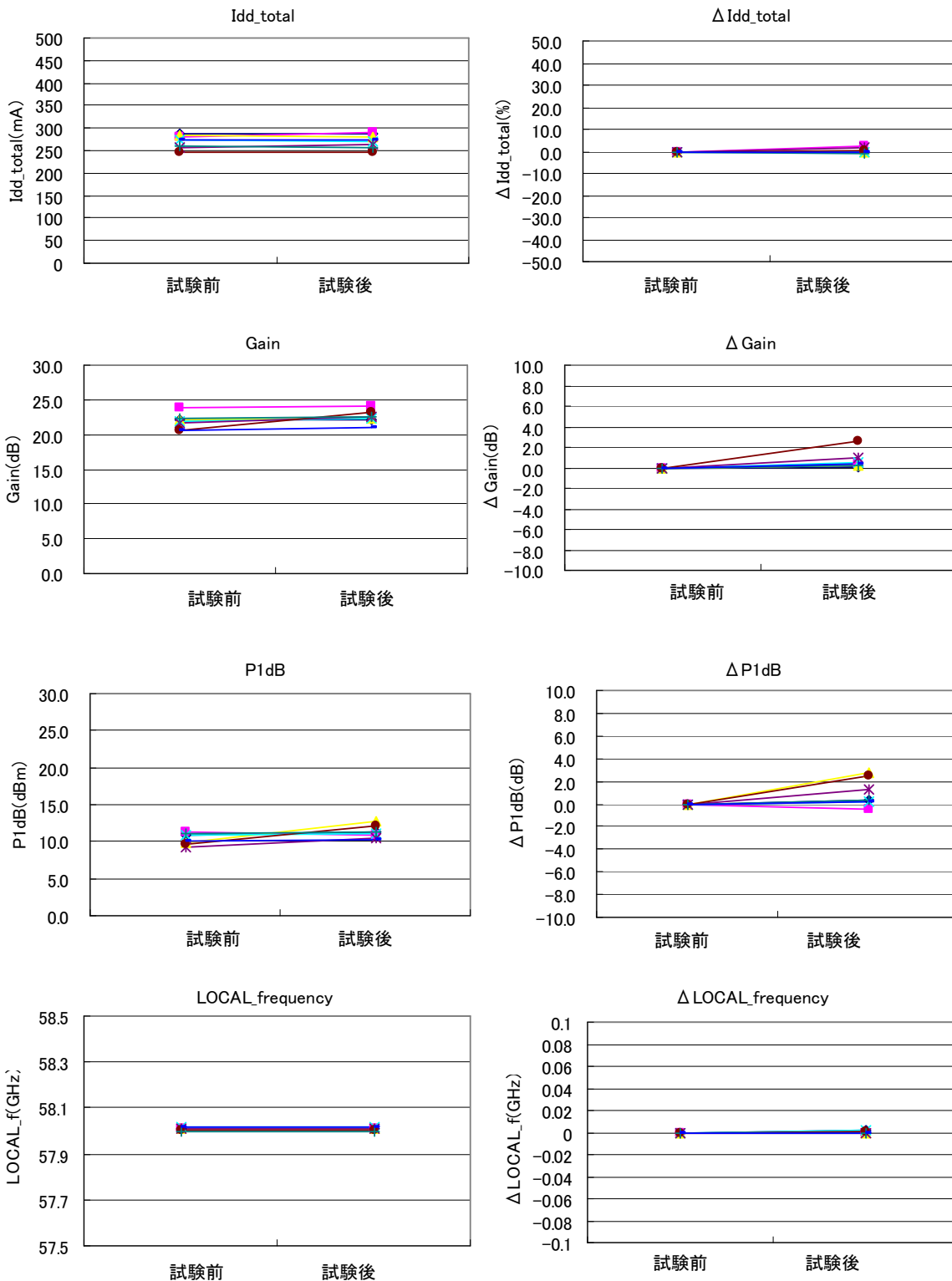
Idd\_total : RF-OFF 時のトータルドレイン電流値の変動結果。

Gain : Pin=-20dBm(線形性領域における)Gain 値の変動結果。

P1dB : P1dB 値の変動結果。

LOCAL\_frequency : LOCAL 周波数の変動結果。

◇振動試験結果





## 7. 衝撃試験

### ○目的

半導体デバイスの手荒な取り扱いや輸送中および使用中に受ける強度な衝撃に対する構造的、機械的な耐性を評価する。

### ○試験条件

最高加速度：14700m/s<sup>2</sup>、パルス幅 0.5ms、各方向 3 回、個数：8

### ○試験数

8 台

### ○試験結果

8/8 台、全数破壊無し。

### ○考察

全数破壊等無く、特に問題無し。

半導体デバイスの手荒な取り扱いや輸送中および使用中に受ける強度な衝撃に対する構造的、機械的な耐性有り。

### ○測定結果

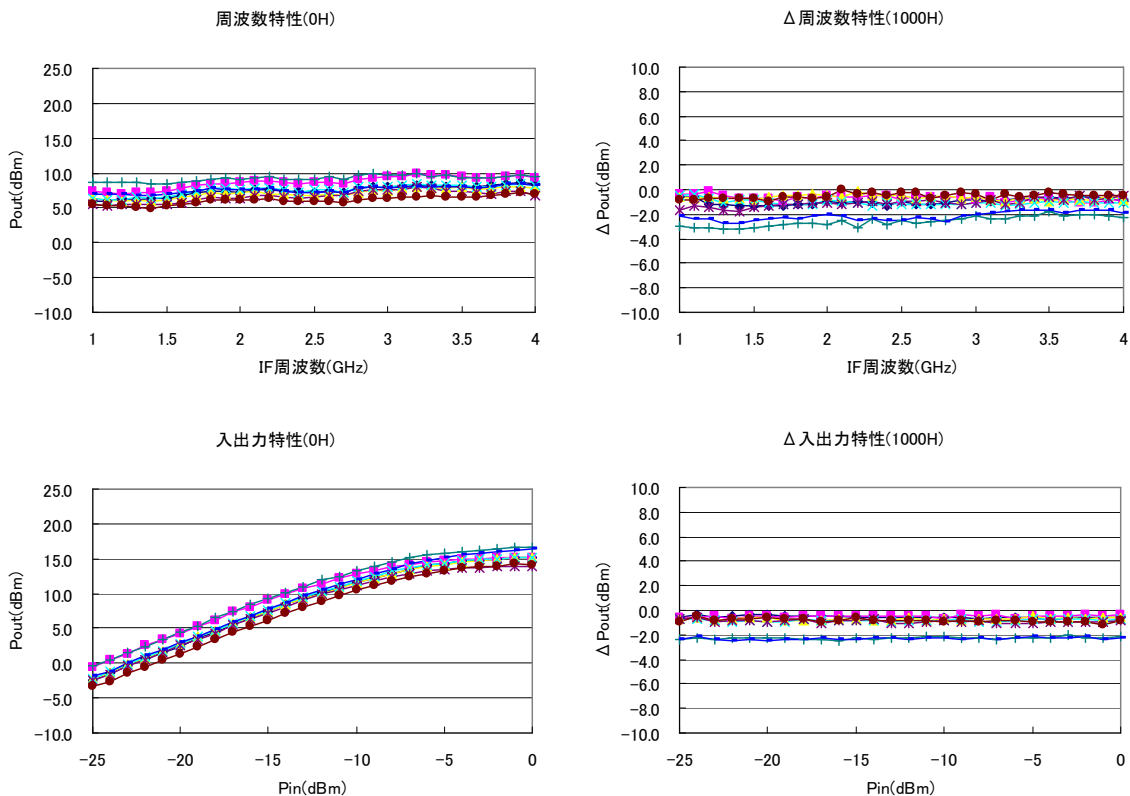
周波数特性：IF 周波数 1.0~4.0GHz 時の Pout 特性、Pout@Pin:-15dBm

入出力特性：Pin:-25dBm~0dBm 時の Pout 特性

### ◇衝撃試験結果

試験前(初期測定結果\_左側)

試験後(試験後測定結果-初期測定結果\_右側)



○測定結果

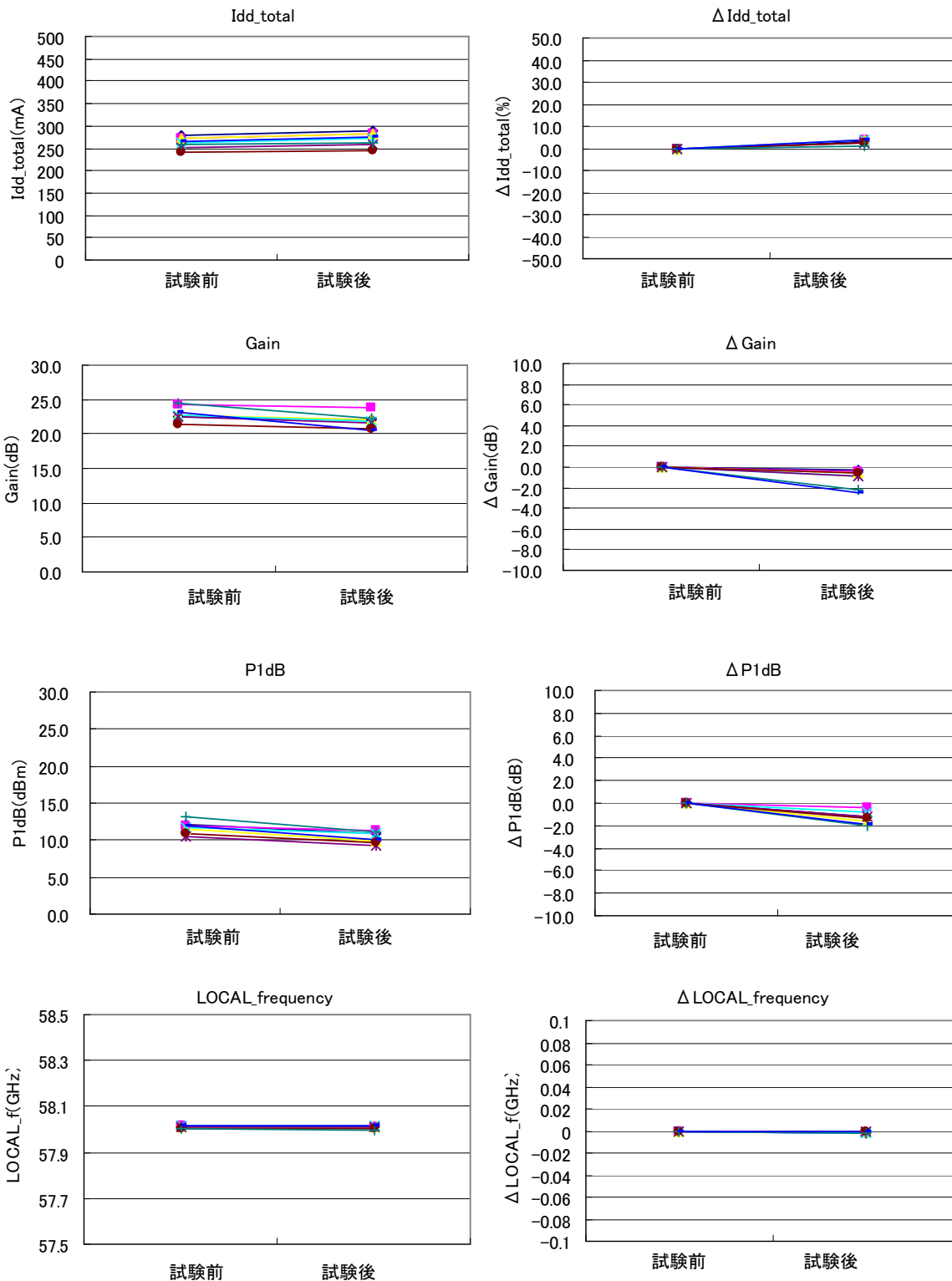
Idd\_total : RF-OFF 時のトータルドレイン電流値の変動結果。

Gain : Pin=-20dBm(線形性領域における)Gain 値の変動結果。

P1dB : P1dB 値の変動結果。

LOCAL\_frequency : LOCAL 周波数の変動結果。

◇衝撃試験結果



◇衝擊試驗裝置



## 8. 静電破壊試験

### ○目的

デバイスが取り扱い中に受ける静電気に対する耐性を評価する。

### ○試験条件

HBM:  $R=1.5\text{kohm}$ ,  $C=100\text{pF}$ , 3回印加, 1秒間隔

MM:  $R=0\text{ohm}$ ,  $C=200\text{pF}$ , 3回印加, 1秒間隔

電圧はデバイスが破壊するまで増加させた。(破壊試験)

註: HBM: Human Body Model, 人体モデル、MM: Machine Model, 機械モデル

### ○試験数

22台

### ○試験結果

HBM: 平均=3163V, Min=2350V, 平均-3 $\sigma$ =779V

MM: 平均=1212V, Min=1020V, 平均-3 $\sigma$ =646V

### ● DC 通電用ジグ写真

