

平成 23 年度第 3 次補正予算戦略的基盤技術高度化支援事業  
「150MHz 帯業務用アナログ/デジタル共用無線機開発」

## 研究開発成果等報告書

平成 24 年 1 2 月

委託者 近畿経済産業局

委託先 公益財団法人新産業創造研究機構



目 次	頁
第 1 章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	5
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7
第 2 章 本文	8
2-1 4 値 FSK 変復調技術の開発	8
2-1-1 目的・目標	8
2-1-2 昨年度の評価結果	9
2-1-3 昨年度の問題点に対する対応、改善内容	12
2-1-4 二次試作の最終評価結果	15
2-1-5 三次試作の作成	16
2-1-6 三次試作の評価結果	21
2-1-7 今後の課題	22
2-2 デジタル処理によるアナログ FM 変復調技術の開発	23
2-2-1 目的・目標	23
2-2-2 昨年度の評価結果	24
2-2-3 昨年の問題点に対する対策、改善内容	25
2-2-4 二次試作の最終評価結果	26
2-2-5 三次試作の作成	27
2-2-6 二次試作の評価結果	30
2-2-7 今後の課題	31
2-3 FPGA 処理のリアルタイム性の実現	32
2-3-1 目的・目標	32
2-3-2 昨年度の評価結果	33
2-3-3 三次試作の作成	36
2-3-4 三次試作の評価結果	37
2-3-5 今後の課題	42

2-4	デジタル処理部の FPGA によるアンテナ制御部の開発	4 3
2-4-1	150MHz 基地局用可変指向性アンテナの試作開発	4 3
2-4-2	150MHz 車載局用可変指向性アンテナの試作開発	4 5
2-4-3	指向性制御手法の設計・実装及び基本特性	5 5
2-4-4	屋外実験	6 2
2-4-5	成果のまとめと実用化における課題	6 4
第3章 全体総括		6 7
3-1	研究開発成果	6 7
3-2	研究開発後の課題・事業化計画	6 7

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究開発目的及び目標

業務用無線の分野でも、アナログ無線機のデジタル化が電波の有効利用の為、数年前から進んでいる。民需利用での業務用無線機のデジタル化の動向は、大規模なところではタクシー無線（400MHz帯）のデジタル化が行われている。タクシー無線のデジタル化のスケジュールは、アナログ方式の新規免許取得が、2011年6月1日までで終了し、アナログの使用期限は、2016年5月31日となっている。その他、電力事業者等もアナログの370MHz帯を使用していたものは、周波数の再編で400MHz帯に順次デジタル化されている。

本計画で開発を行う、150MHz帯は、新規の免許が下りないほど周波数の利用が混雑しており、これからデジタル化を行っていく予定になっている。現在、150MHz帯は、国の機関、防災、消防・救急、鉄道、電力、ガス、放送事業、船舶、テレメータ、AT、簡易無線等で利用されている。この中で、国の指導もあり、防災、救急・救急が先行してデジタル化を推進されているが、予算が少なく難航しており、当初の予定では、2028年にデジタル化を完了する予定であるが、完了するのは非常に難しい状況である。

アナログ150MHz帯を利用している民間企業は、阪急電鉄、阪神電鉄等の電鉄事業者、関西電力の電力事業者等がある。これらの企業は、総務省のデジタル化を推進したいという希望とは逆に、景気等の影響を受け、デジタル化をひかえ、アナログ系システムを利用することを選択している企業もある。総務省の本年度アクションプランでも、「アナログ方式の廃止については、無線機の耐用年数に従い、期限を定めず自然減としていくことが適当」となった。

上記の現状を踏まえて、本計画では、従来のデジタル無線機より低価格で、今後規格化される可能性のある変調方式やコーデックをソフトウェアに含んでおき、設定を変える事で様々な規格に対応した、アナログ/デジタル共用無線機を開発する。

具体的な目標は以下のとおりである。

- アナログとデジタル共用無線機能を、複数方式の変復調も対応可能にしてソフトウェア処理で実現させる。

- ・ スプリアス発射強度又は不要発射の強度

帯域外領域-80dB 以下、スプリアス領域-60dB 以下

選択度 選択 CH 以外は 70dB 以上

音声品質 S/N40dB 以上、歪率 20dB 以上

● 複雑な演算を行う FPGA の処理をリアルタイムで行う。

- ・無線機通話による音声遅延時間（無線機に音声が入力されてから対向の無線機から音声  
が出力されるまでの時間）

150ms 以内

● 広いサービスエリアを実現するアンテナ制御技術

- ・信号受信からアンテナ指向性フィードバックの時間

100ms 以内

- ・基地局用モノポール型可変指向性アンテナの目標性能

アンテナ利得 5dBi

半値角 90°

指向方向 6 方向

許容送信電力 25W

- ・車載用逆 F 型低背高型可変指向性アンテナの目標性能

アンテナ高 20cm 以下

アンテナ利得 4.5dBi

半値角 90°

指向方向 8 方向

許容送信電力 10W

今年度のサブテーマごとの開発内容を以下に記す。

① 4 値 FSK 変復調技術の開発

4 値 FSK は伝送容量が小さいものの増幅器の電力効率が良く、雑音に強い特性を持っているため、音声利用が中心のアナログ業務用無線機からの移行には適している。従来技術ではハードウェアで構築されるため、ひとつの方式の変復調しか選択できないが、

本研究では変復調部をソフトウェアで行えるように開発する。

これによって、複数の変復調方式をソフトウェアで切り替えて利用できるようにする。4 値 FSK 変復調自体は既存の技術であるが、業務用無線機に使用可能な性能（スプリアス特性、選択度、ノイズ耐性、フェージング耐性）を出すためにアナログ部を含めた研究開発が必要となる。開発はまず変調部、復調部から行い、低周波数での通信を確立させる。次に信号に帯域制限フィルタ回路を追加しての通信確認を行い、最後に RF 信号での信号品質、通信品質、妨害性能等が目標値を満足するよう、変復調処理や通信データの誤り訂正、音声コーデックの最適化を行う。

最後にアンテナ等も組み合わせた総合性能について評価を行い、実運用に耐える無線機を開発する。

## ② デジタル処理によるアナログ FM 変復調技術の開発

デジタル／アナログ切替型の無線機を作るにあたっては、従来はアナログ部品のみで構成されていた FM 変復調回路をデジタル同様に FPGA 内に取り込む必要がある。このため従来型アナログ無線機と通信可能で、かつ業務用無線機に使用可能な性能（スプリアス特性、選択度、S/N 比や歪率といった音声品質）を持ったアナログ FM 変復調部を FPGA で作り出すための研究開発を行う。

## ③ FPGA 処理のリアルタイム性の実現

アナログ無線機では音声信号の遅延時間が通話に与える影響は無かったが、変復調部をデジタル化することにより大きな遅延が発生する。これらの遅延時間の合計が 150ms を超えると無線システム構成時に通話品質に影響を与えるため、FPGA 処理のリアルタイム化についての研究開発を行う。変復調部がある程度できあがった時点で変復調にかかる時間（「音声圧縮部」、「音声伸長部」、「変調部」、「復調部」、「フィルタ部」等）、および受信感度向上対策にかかる時間の評価を行い、変復調処理や音声コーデックの最適化を行う。

#### ④ デジタル処理部の FPGA によるアンテナ制御部の開発

電波強度が弱いところでもアナログ方式の音声通信では通話者の能力によりそれなりに情報伝達ができるが、デジタル方式では閾値以下の限界域においてサービスエリアが減少してしまう。

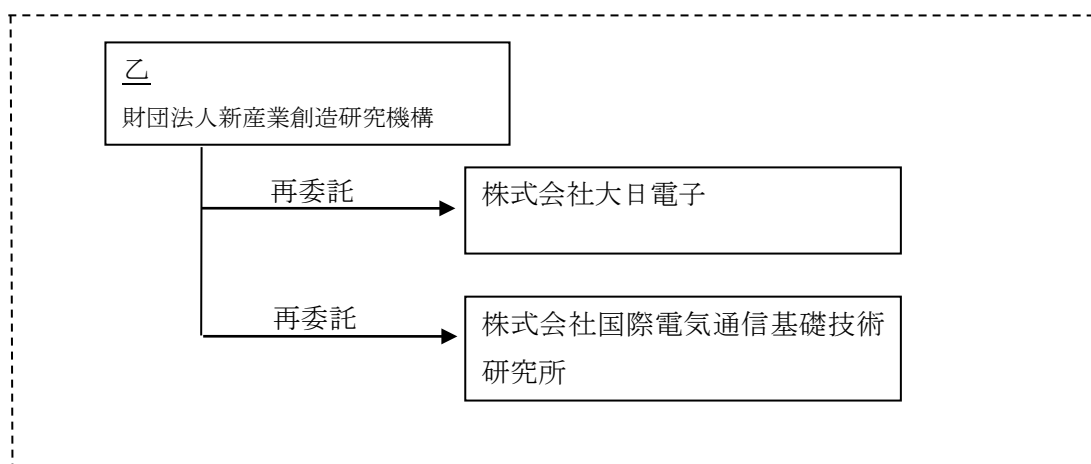
本研究開発では、基地局用に一給電素子六寄生素子の可変指向性アンテナを、車載には逆 F 型低背高可変指向性アンテナにより受信信号強度を高めると同時に受信限界付近で特性をアナログ時のように段階的に了解度を下げようようにすることで、受信限界付近の最終的な受信性能を実質的に上げる。

アンテナの指向方向制御サーチ方式、異なるアンテナ形状（モノポール型可変指向性アンテナ、逆 F 型低背高型可変指向性アンテナ、ダイバシチアンテナ等）でも同一の機器構成（2つの RF 入出力回路と 6 つの DC 制御出力）で実現できる指向性制御技術、省消費電力制御を開発する。

アンテナ特性の解析、制御方式の開発を株式会社国際電気通信基礎技術研究所が行い、機器の製作開発を株式会社大日電子が行う。



## 1-2 研究体制



総括研究代表者（P L）  
所属：株式会社大日電子  
役職：代表取締役  
氏名：杵本 日出夫

副総括研究代表者（S L）  
所属：公益財団法人新産業創造研究機構  
役職：研究一部 部長  
氏名：大築 康生

## 1-3 成果概要

### ① 4 値 FSK 変復調技術の開発

平成 23 年度に試作した第二試作無線機を使用して 4 値 FSK 変復調機能を確認し、性能面では、送受信機の各ブロックのローカル周波数の発信を確認した。FPGA 出力信号の C/N 比が不足していたが、高純度のクリスタル発振器の採用で 80dB まで改善した。しかし中間周波数の影響でスプリアス特性が要求性能を満たさなかった。

その結果を基に第三次試作無線機を製作した。クロック周波数の再生に、ナイキスト点に基づいた再生法を採用し、安定し再生を確認した。また、音声データ以外にもデータを送れるよう、ARIB-STD-T98 v 1.2 に準拠したパケット構造に改良した。性能評価を行った結果、選択度、S/N 比、占有周波数帯で開発目標値を上回った。一方、スプリアス発射は帯域外領域での目標 -80dB 以下に対して -78dB、スプリアス領域で -60dB 以下に対して -47dB、歪率は目標 20dB 以上に対して 12dB、隣接チャンネル漏洩電力は目標値 -55dB 以上に対して -48dB と、それぞれわずかに及ばな

った。

## ②デジタル処理によるアナログ FM 変復調技術の開発

平成 23 年度試作の二次試作試験器を使用し、性能評価試験を行った。送信機能は確認されたが、C/N 比が不足した。これにはクリスタル発振器を変更する対応方針を立てた。スプリアス特性では歪みやノイズレベルが高かったが、送信部のブロックごとのレベル調整とデジタル回路のグラウンドを独立とすることで改善することを確認した。

これら対策を施した第三次試作無線機を製作した。無線機としての性能評価は 4 値 FSK 変復調回路と同じである。目標値を満足しない項目もあるが、デジタルの 4 値 FSK 方式とアナログの FM 変調方式を切り替え可能な無線装置を実現し、実験局の免許を得られる性能を実現した。

## ③FPGA 処理のリアルタイム性の実現

平成 23 年度試作の第二次試作無線機を使用して遅延時間の実機検証を行った。ループバック試験を行った結果、遅延時間はデジタル方式で目標値 150ms 以下に対して 135ms、アナログ方式で目標値 5ms に対して 4.17ms を実現した。

第三次試作無線機を試作し、2 台を使用して対向試験を行った。4 値 FSK 方式では 146ms、アナログ FM 方式では 4.36ms の遅延時間を測定し、目標値以上の性能を確認した。

## ④デジタル処理部の FPGA によるアンテナ制御部の開発

150MHz 帯の基地局用可変指向性アンテナと、車載局用可変指向性アンテナを試作した。基地局用は、平成 23 年度に目標性能を実現していたため、屋外環境対応を目指して剛性や製作精度向上、部品の脆弱性見直しを行った。車載局用では、シミュレーション条件を実機の自動車搭載時に近づけることで実験結果との整合性を向上させた上で、レドームで覆うように実機使用時に近い条件で試作を行った。

評価実験は電波暗室で指向性をはじめとする特性計測を行うと共に、特定実験試験局取得に向けた無線局予備免許を取得して、屋外でのアンテナおよび無線機の機能確認を行った。屋外試験では自動車の屋根に送信機を載せて平坦なグラウンドを走行させ、基地局アンテナの指向性制御が

有効に働くことを確認した。また、電波暗室の試験で目標性能の各項目を実現したことを確認した。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属・役職： 公益財団法人 新産業創造研究機構 研究一部長

氏名： 大築 康生

電話： 078-306-6802

FAX： 078-306-6812

E-mail： [otsuki@ri.niro.or.jp](mailto:otsuki@ri.niro.or.jp)

## 第2章 本論

### 2-1 4値FSK変復調技術の開発

#### 2-1-1 目的・目標

4値FSKは伝送容量が小さいものの増幅器の電力効率が良く、雑音に強い特性を持っているため、音声利用が中心のアナログ業務用無線からの移行には適している。従来技術ではハードウェアで構築されているため、ひとつの方式の変復調しか選択できないが、本研究では変復調部をソフトウェアで行えるように開発する。

これによって、複数の変復調方式をソフトウェアで切替えて利用できるようにする。4値FSK変復調自体は既存の技術であるが、業務用無線機に使用可能な性能(スプリアス特性、選択度、ノイズ耐性、フェージング耐性)を出すためにアナログ部を含めた研究開発が必要となる。開発はまず変調部、復調部から行き、低周波数での通信を確立させる。次に信号に帯域制限フィルタ回路を追加しての通信確認を行い、最後にRF信号での信号品質、通信品質、妨害性能等が目標値を満足するよう、変復調処理や通信データの誤り訂正、音声コーデックの最適化を行う。

最後にアンテナ等も組み合わせた総合性能について評価を行い、実運用に耐える無線機を開発する。

H23年度第3次補正予算事業はH23年度に製作した第二次試作無線機の性能試験を行い、問題点の抽出、改善方法の検討を行った。また、検討結果を反映して第三次試作無線機を製作し、性能評価を行った。

## 2-1-2 昨年度の評価結果

H23年度は第二次試作無線機を作成し、無線機としての性能評価を行った。作成した第二次試作無線機を図 2-1-2-1 に示す。

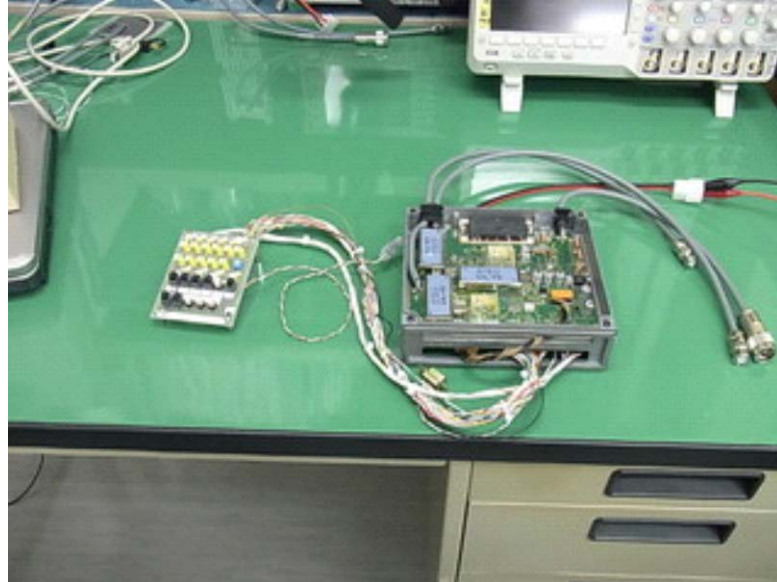


図 2-1-2-1 第二次試作無線機

第二次試作無線機の動作確認として、各ブロックのローカル周波数の発振を確認した。それぞれ受信部は 130.49MHz、20.945MHz、送信部は 40MHz、90.49MHz のローカル周波数を使用しているため、これらの発振スペクトルを測定した結果、各ローカル信号は正常に発振していることがわかった。また、FPGA から出力される送信信号を図 2-1-2-2 に示す。

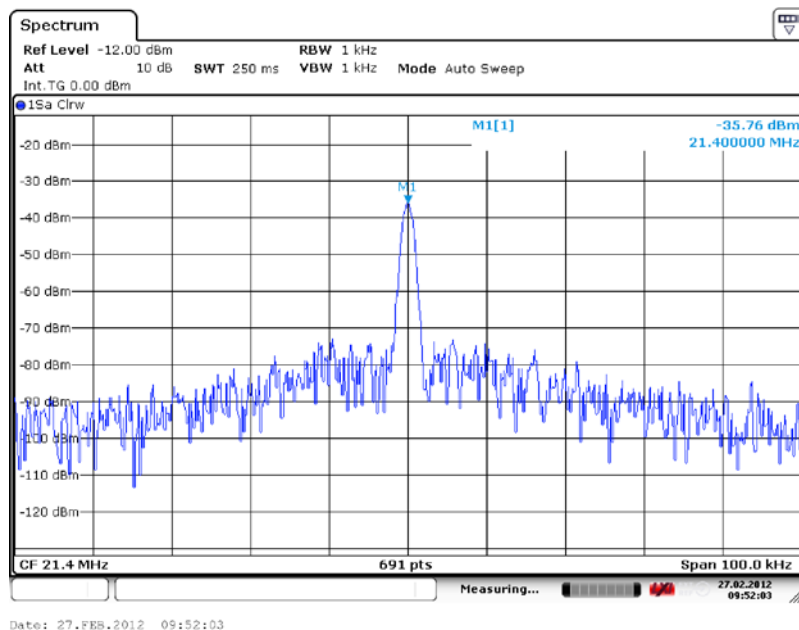


図 2-1-2-2 FPGA 出力信号(21.4MHz)

FPGA からの出力信号の C/N 比が、40dB 程度であることがわかる。これは無線機の規格で、スプリアス発射の規格を満たさないため、調整により C/N 比を上げることが必要である。原因として、FPGA のクロックのジッタ、FPGA 内部のクロック回路の設定などが考えられる。

また、シグナルジェネレータから 4 値 FM の変調信号を入力し、第二次試作で受信・復調させる試験を行った。シグナルジェネレータで作成した入力信号を図 2-1-2-3 に示す。

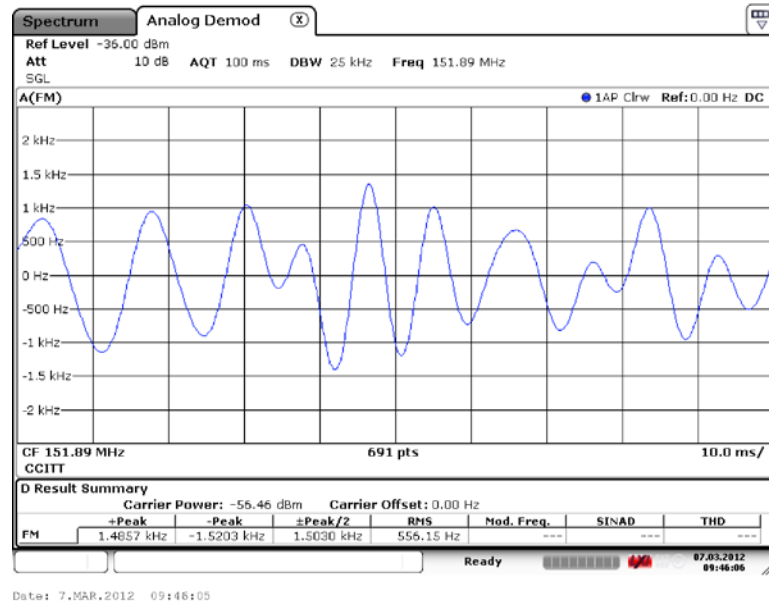


図 2-1-2-3 4 値 FM 入力信号

ここで入力信号は 4 値デジタル信号であるが、簡易無線の規格に従い信号にローパスフィルタをかけているため、高周波成分が減衰した波形になっている。この復調した結果を図 2-1-2-4 に示す。

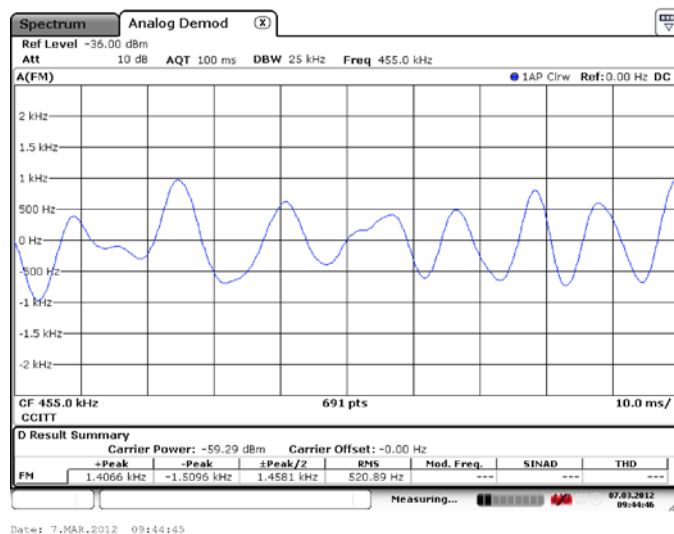


図 2-1-2-4 4 値 FM 復調信号

以上のとおり、4 値 FSK 信号に対して復調機能が正常に動作していることが確認できる。H23 年度は第二次試作を作成し、4 値 FSK の復調機能の確認まで終了したが、性能の調整を行っていないため感度は低い。また、送信機能については確認を行っていないため、H23 年度第 3 次補正予算事業では送信機能の確認と性能の調整を課題とした。

### 2-1-3 昨年度の問題点に対する対応、改善内容

#### (1) FPGA での対策

##### ●FPGA 出力信号 C/N 比の対策

昨年度の課題として残された FPGA 出力信号の C/N 比が 40dB と悪く、無線性能規格を満たさない件について調査を行ったところ、FPGA で変調出力信号を生成する際に使用しているクリスタル発振器 (SG-8003CE PCB 98.304MHz) の C/N 比が 40dB 程度と悪いため、FPGA の変調出力信号が劣化していることがわかった。

SG-8003CE は PLL を内蔵し、プログラムで出力周波数を設定できる機構であることから、通常のクリスタル発振器よりも信号の純度が低かったものと思われる。

このためクリスタル発振器を信号の純度が高いもの (KC5032C-C3 98.304MHz) に変更し、FPGA の変調出力信号を測定したところ、C/N 比が 80dB 程度に改善した。その効果を図 2-1-3-1、図 2-1-3-2 に示す。

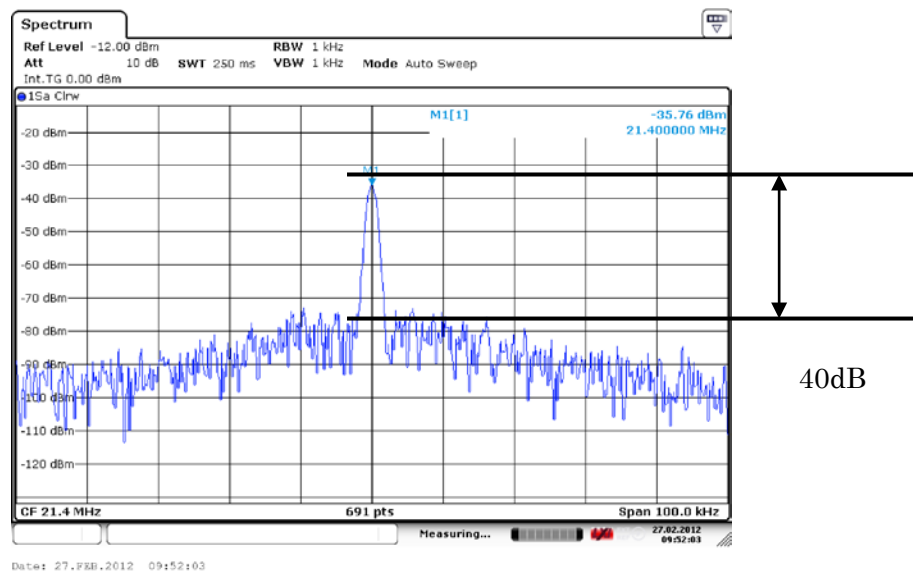


図 2-1-3-1 FPGA 出力波形 (クリスタル変更前)



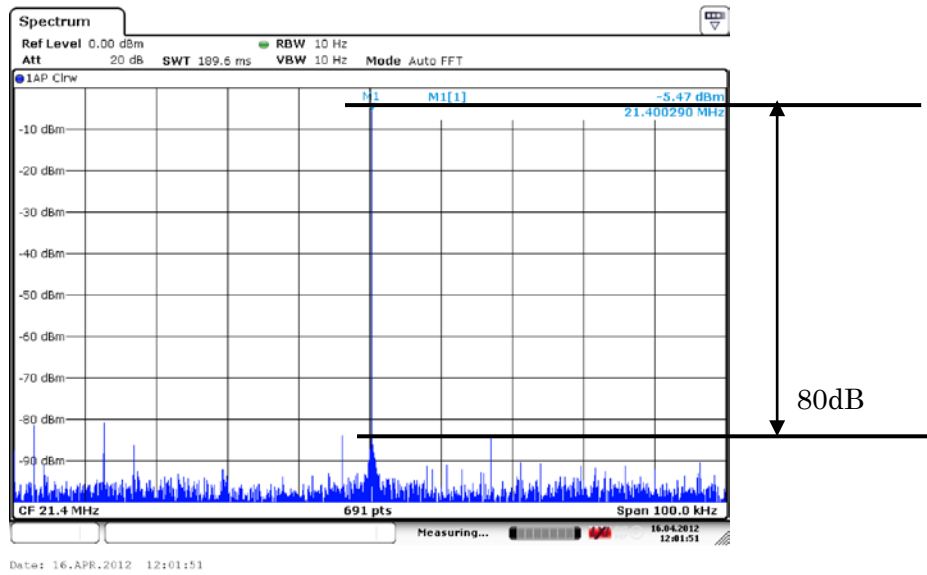


図 2-1-3-2 FPGA 出力波形 (クリスタル変更後)

(2) RF 基板での対策

昨年度製作した第二次試作機の送信部分の性能試験を行った。性能を測定した結果を表 2-1-3-1 に示す。

表 2-1-3-1 第二次試作機の送信性能

	目標値	測定値
スプリアス発射(帯域外領域)	-80dB 以下	-78dB
スプリアス発射(スプリアス領域)	-60dB 以下	-35dB

上記の表から、目標値を満たしていないことがわかる。

受信部においては、第二次試作を用いて受信試験をしていたときに、外部から信号を入力しないのに信号が受信されるという現象が発生した。調査の結果、送信と受信で使用している中間周波数が共通のため、図 2-1-3-3 のように信号が結合し自身の送信信号を受信していることが判明した。この問題は、FPGA からの送信周波数を変更することで対策できると考えられるため、周波数の決定が今後の検討課題である。

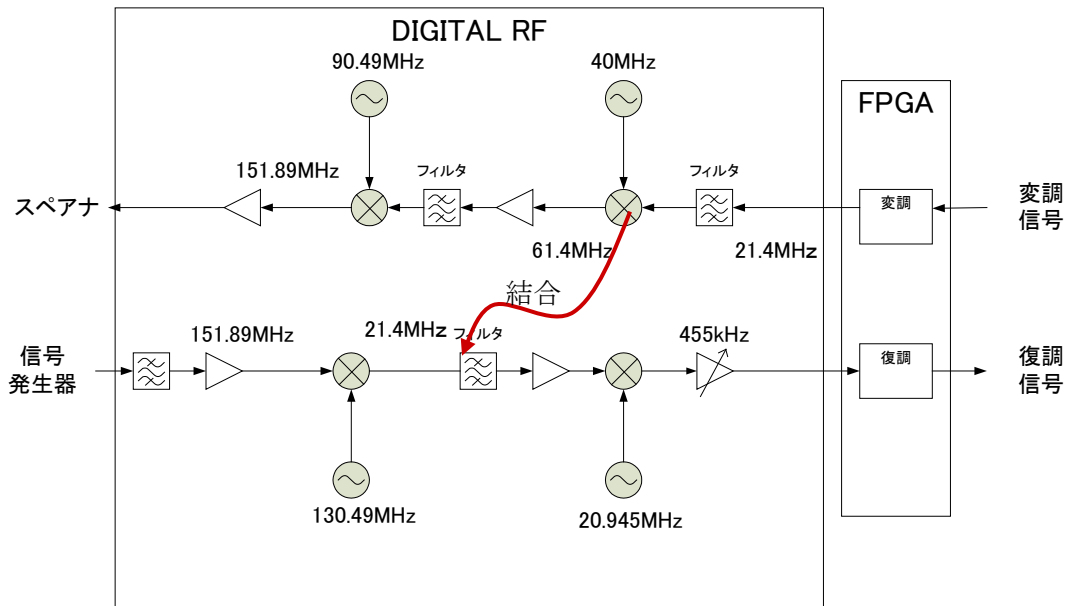


図 2-1-3-3 中間周波数の結合

#### 2-1-4 二次試作の最終評価結果

前章で示したように、第二次試作においては送信部のひずみが大きいため、無線機能の性能目標を達成できなかった。一方、ソフトウェア処理による4値FSKの変復調機能は実装ができ、第三次試作においてARIBで規定されているプロトコルを実装することで無線機として構成できる見通しができた。第二次試作での無線機性能測定結果を表2-1-4-1に示す。

表 2-1-4-1 第二次試作機の無線性能

測定項目	目標値	測定値
スプリアス発射(帯域外領域)	-80dB 以下	-78dB
スプリアス発射(スプリアス領域)	-60dB 以下	-35dB

その他、無線機として免許を取得するために必要な性能とその測定結果は表2-1-4-2のとおりである。

表 2-1-4-2 無線機免許に必要な性能測定値

測定項目	目標値	測定値
隣接チャネル漏洩電力	-55dB 以下	-35dB
占有周波数帯幅	5.8kHz 以下	3.1kHz

## 2-1-5 三次試作の作成

### (1) 4値FSK 復調

4値FSK変調・復調ができることは第二次試作無線機で確認をしたが、対向試験を行うとデータを正常に復調できないことが確認された。

原因は送信側と受信側の装置が別々になると、クロックタイミングが異なるため、復調したデータの読み取りが正常に行われなかったためであることが分かった。

そこで以下のクロック同期方法を実装した。

従来、2値FSKのクロック再生手法としては、ゼロクロスポイントとPLLを組み合わせた手法により、サンプリングクロックを再生する手法が用いられる(図2-1-5-1)。このクロックをもとに、データ再生を行う。

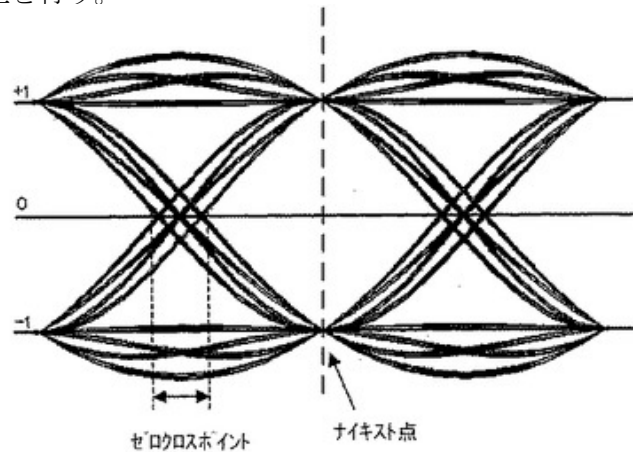


図2-1-5-1 2値FSKのアイパターン

しかし4値FSKではゼロクロスポイントの幅は一定しておらず、ゼロクロスの頻度も2値FSKほど多くないため、ゼロクロスポイントを用いた手法が有効に働かない。

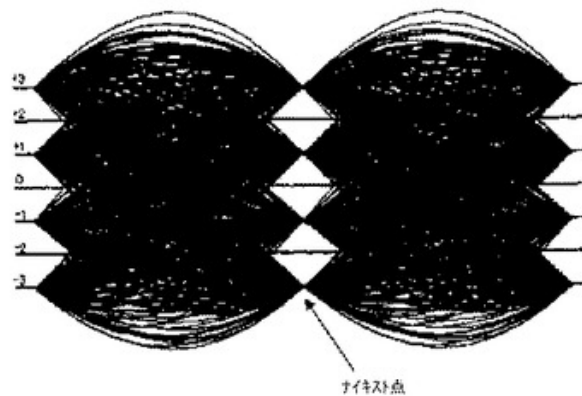


図2-1-5-2 4値FSKのアイパターン

そこで、4 値FSK ではアイパターンの集束点の位置（ナイキスト点）を求め、ナイキスト点に基づいてクロックを再生する必要がある（図2-1-5-2）。

4 値FSK では、以下2 つの性質を使ったクロック再生手法が用いられる。

- ・信号は一定間隔で3, 1, -1, -3 のいずれかの値をとる。
- ・データ集束（ナイキスト点）間隔は送信クロックとしてあらかじめ既知である。

送信クロックより細かいサンプリング周期で入力データを取り込み、入力データとナイキスト点の差を計算する。送信クロック間隔での分散を求め、分散の値が最少となるところを、ナイキスト点として推定することが可能である。

#### 【クロック再生手法】

送信クロックより短い周期で、入力信号とナイキスト点との差を求める（図2-1-5-3では送信クロックの4 倍）。入力値と3, 1, -1, -3 との差の絶対値をそれぞれ計算し、求まった差の最小値をナイキスト点と入力値との差とする。送信クロック間隔毎に最小値の分散を求める（図2-1-5-2では1-1, 2-1, 3-1, …、1-2, 2-2, …、1-3, 2-3, …、1-4, 2-4, …の4つの分散を求める）。求まった分散が最少になる点がナイキスト点に最も近いことがわかる。

この点をもとにクロックを作成することで、クロック再生ができる（図2-1-5-3）。

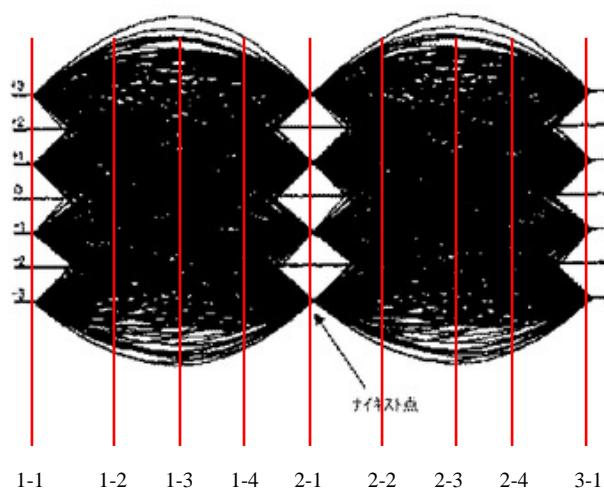


図2-1-5-3 計算間隔

さらに計算間隔をより狭くすることで、高精度なクロック再生が可能になる。

## 【シミュレーション】

チップスコープを用いて、実機より復調信号を取り込んだ。この時、サンプリング周波数はビットレート2400SPS の10 倍の24KHz、40 倍の96KHz、160 倍の384KHz を用いた。

求めた4 値FSK 復調信号に対し、ナイキスト点の振幅値（ここでは3：6000，1：2000，-1：-2000，-3：-6000）との差の絶対値を計算し、これらの最小値を求めた。

送信周波数（2.4KHz）に対し、サンプリング周波数の24KHz は10 倍、96KHz は40 倍、384KHz は160 倍であるので、10 サンプル、40 サンプル、160 サンプル毎に過去10 ポイントの「ナイキスト点との差」の和を求めた。（ここでは演算簡略化の為に、分散を求める代わりにナイキスト点との差の和を用いた。）

結果、10、40、160 サンプル毎にピーク値が存在することが分かった。サンプリング周波数も、送信クロックの10 倍の24KHz で十分ピーク点を確認できることが分かった。このピーク点で入力信号の値を読み込むことで、元データの復元を行うことができる。

次に4値FSKの復調波形と「ナイキスト点との差」の和（24KHz）を重ねたグラフを図2-1-5-4 に示す。

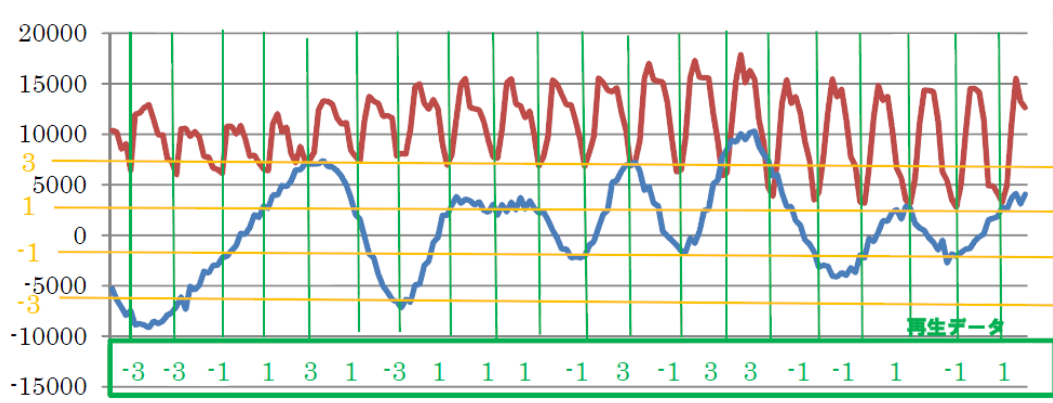


図2-1-5-4 再生データ

図より、ナイキスト点との差がピークするとき、4 値FSK 信号は3, 1, -1, -3 にほぼ一致していることがわかる。この点を基にデータ再生を行うことが可能であることが、シミュレーションで確認することができた。この手順を第三次試作無線機に実装する。

### (2) パケット構造

無線機の通信方法に汎用性を持たせ、音声通信以外にデータ通信を行えるように、『デジタル簡

易無線局の無線設備 ARIB-STD-T98 v1.2』に準拠した形で通信パケット構造を作り直した。

### ●パケット構造

第二次試作機までは4値FSK変調での通話試験は簡易的に図2-1-5-5のパケット構造で行っていた。

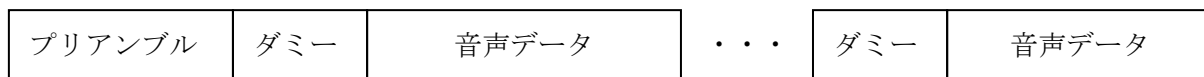


図2-1-5-5 従来の通信パケット

試験をする上ではこのような形でも問題はなかったが、実運用を考えた場合一度受信が途切れると、一旦通話を終了しなければ再度通話を再開することができないなどの問題があった。

このため、実際の無線機で使われている通信手順を実装することで通話の再開や、音声だけではなくデータも通信できるパケット構造に変更を行った。

変更後のパケット構造は図2-1-5-6～8の通り。

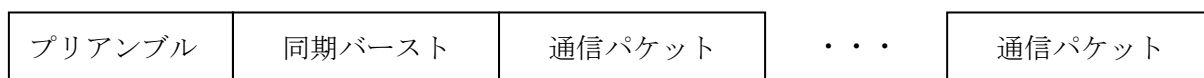


図2-1-5-6 変更後の通信パケット



図2-1-5-7 同期バーストの詳細



図2-1-5-8 通信パケットの詳細

### ●パケットのコーディング

無線通信では性質上ビット誤りが発生する。また、同じ値が連続すると受信側でビット同期が外れてしまう可能性が高くなる。このため追加したパケットのデータに誤り訂正符号やビットの配列変更の処理を行い、通信の信頼性を高める。図2-1-5-9にその手法を記載する。

なお、従来から音声データにはAMBE方式で圧縮処理を行う過程で誤り訂正等の処理が入っているため、追加で処理を行う必要はない。

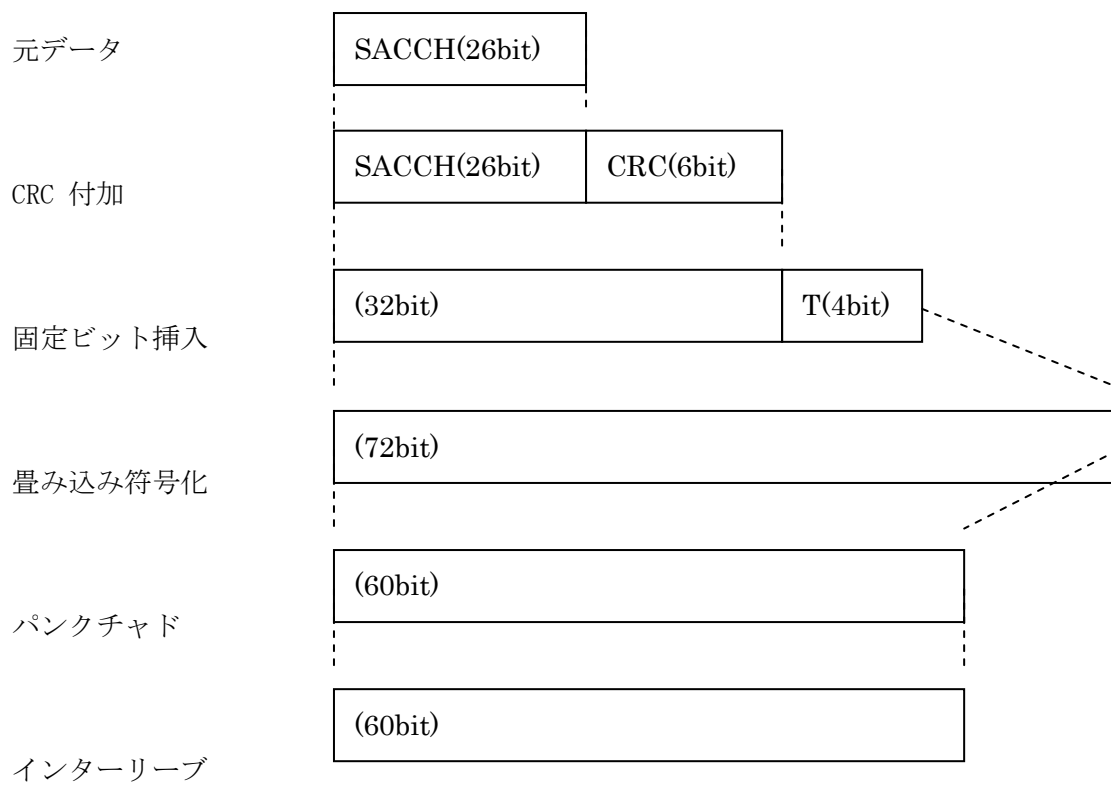


図 2-1-5-9 符号化処理 (SACCH の例)



## 2-1-6 三次試作の評価結果

第三次試作においては、第二次試作で判明した課題に対処した結果性能が改善し、出力 1W の実験局としての免許を取得できる性能となった。しかし、実用的な無線機とするための目標値には達しなかった。以下の表に、目標値と免許取得に必要な性能規格、および第三次試作の測定値を示す。

表 2-1-6-1 第三次試作無線機の性能

	目標値	免許の規格	測定値
スプリアス発射(帯域外領域)	-80dB 以下	-46dB 以下	-78dB
スプリアス発射(スプリアス領域)	-60dB 以下	-46dB 以下	-47dB
選択度	70dB 以上	規定無し	78dB
S/N 比	40dB 以上	規定無し	43dB
歪率	20dB 以上	規定無し	12dB
隣接チャネル漏洩電力	-55dB 以下	-45dB 以下	-48dB
占有周波数帯幅	5.8kHz 以下	5.8kHz 以下	3.1kHz

FPGA による変復調に関しては、ARIB の STD-T98 に規定されているプロトコルを実装し、シミュレーション上で送受信が可能であることを確認できた。

- ・占有周波数帯域幅の測定結果は 3.1kHz である。これは実験局の免許を取得するために必要な値をクリアしており、また目標値もクリアしている。
- ・隣接チャネル漏洩電力の測定値は-48dB である。これは免許を取得するための規格はクリアしているが、目標値の-55dB 以下には達しなかった。
- ・スプリアス発射(帯域外領域)の測定値は-78dB である。これは免許を取得するための規格はクリアしているが、目標値の-80dB 以下には達しなかった。
- ・スプリアス発射(スプリアス領域)の測定値は-47dB である。これは免許を取得するための規格はクリアしているが、目標値の-60dB 以下には達しなかった。

### 2-1-7 今後の課題

3年間の開発により、デジタルの4値FSK方式とアナログのFM変調方式を切替可能な無線装置を作り、性能評価を行うことができ、2-1-5節の通り実用に耐える通信パケットの実装もできた。しかし2-1-6節での性能評価の結果、業務用途で実際に運用するための目標性能に達していないことも確認された。

今後の課題として、実用的な無線機とするために無線性能を目標値まで向上させること、FPGAによるプロトコルに沿った変復調の実機による検証があげられる。また、無線機の受信性能に関しては、既存の無線機と同程度の性能が要求される。しかし既存の無線機の受信感度が0dBuV以下程度であるのに対して、現在の無線機は+10dBuVと悪いため受信性能の向上も今後の課題である。

特に4値FSKではクロック再生法による復調動作を実装したが、対向試験をした場合は時々データの復調に失敗することがある。2台の無線機による周波数のズレに対してはある程度の対策が取れているため、現時点で問題と考えられるのは信号の歪みとなっている。この歪みを取り除き、復調動作を安定させることも今後の課題である。

また、今年度は無線設備の仮免許を取得し、法的な無線性能はクリアできたため試験電波発射の許可を得るところまでできたが、無線性能の調整に時間がかかったため、屋外でのノイズ耐性試験やフェージング耐性試験を行うことができなかった。今後はこれらの試験を実施し、実用に耐える無線機の開発を行う。

## 2-2 デジタル処理によるアナログ FM 変復調技術の開発

### 2-2-1 目的・目標

デジタル/アナログ切替型の無線機を作るにあたっては、従来はアナログ部品のみで構成されていた FM 変復調回路をデジタル同様に FPGA 内に取り込む必要がある。このため従来型アナログ無線機と通信可能で、かつ業務用無線機に使用可能な性能(スプリアス特性、選択度、S/N 比や歪率といった音声品質)を持ったアナログ FM 変復調部を FPGA で作り出すための研究開発を行う。

H23 年度第 3 次補正予算事業では H23 年度に製作した第二次試作無線機の性能試験を行い、問題点の抽出、改善方法の検討を行った。また、検討結果を反映して第三次試作無線機を製作し、性能評価を行った。

## 2-2-2 昨年度の評価結果

H22年度は第二次試作無線機作成し、アナログFMの変調復調動作の確認、および無線性能を確認した。

送信・受信機能の確認では、送信部・受信部ともに入力から出力まで信号を通し、アナログFM送信機能の確認を行った。送信機能は、FPGAから21.4MHzの信号が出力されるので、これをRF基板で周波数変換・増幅し、出力を確認した。

送信機能が動作することが確認できたが、送信周波数の周りのノイズが大きくC/N比が小さいことが観測された。このスペクトル波形のうち、送信周波数近くのノイズはFPGAのノイズであり、RF基板のバンドパスフィルタを経由しているため、±10kHzより外ではノイズが押しえられている。現状のC/N比は約40dBであり、目標値は80dBである。また、外部から変調信号を入力したときの歪率は約20dBであり、目標値の20dBを満たしているが、今後の調整によってより性能を向上させることができると考えられる。

受信機能は、受信入力から151.89MHzの信号を入力し、制御基板に送られる455kHzの信号および制御基板で復調された信号を確認する。また、1kHzのFM変調がかかった信号を受信させて復調した波形を観察した結果受信機能が動作していることが確認できた。

送受信機能自体は動作していることが確認できたため、H23年度第3次補正予算事業では各部の調整を行い感度をはじめとした無線性能全体の向上を行う。

### 2-2-3 昨年度の問題点に対する対応、改善内容

#### (1) FPGA 出力信号 C/N 比の対策

昨年度の課題として残された送信周波数の周りのノイズが大きく C/N 比が小さい問題に関しては、4 値 FSK の「2-1-3 昨年の問題点に対する対応、改善内容」と同じ原因であったため、クリスタル発振器の変更で改善した。

#### (2) RF 基板での対策

昨年の課題として、第二次試作機の送信部分の性能試験を行っていなかったため、性能を測定した結果を表 2-2-3-1 に示す。

表 2-2-3-1 第二次試作機の性能

	目標値	測定値
スプリアス発射(帯域外領域)	-80dB 以下	-78dB
スプリアス発射(スプリアス領域)	-60dB 以下	-35dB
選択度	70dB 以上	78dB
S/N 比	40dB 以上	43dB
歪率	20dB 以上	8dB

以上の表から、複数の項目が目標値を満たしていないことがわかる。スプリアス領域のスプリアス発射をスペクトラムアナライザで測定した結果を見ると、中心の信号が希望波である 151.89MHz であるが、その両側に不要波があることがわかる。これは変復調部から送られる送信信号の周波数を変換するために使用しているミキサの歪であり、送信部分の各ブロックのレベルが適正でないために発生している。また、ノイズレベルが高いが、これは変復調部のデジタル回路と RF 部のグラウンドが共通のため、デジタル回路のノイズが RF 部に入っていることが原因である。第三次試作においてレベルを適正化することで歪が改善し、デジタル回路のグラウンドを独立させることでノイズが改善した。

#### 2-2-4 二次試作の最終評価結果

前節で示したように、第二次試作においては送信部のひずみが大きいため、無線機能の性能目標を達成できなかった。一方、ソフトウェアによるアナログ FM 変復調は基本機能が完成し、ループバック試験が可能になった。第二次試作での無線機性能測定結果を表 2-2-4-1 に示す。

表 2-2-4-1 第二次試作無線機の性能

測定項目	目標値	測定値
スプリアス発射(帯域外領域)	-80dB 以下	-78dB
スプリアス発射(スプリアス領域)	-60dB 以下	-35dB
選択度	70dB 以上	78dB
S/N 比	40dB 以上	43dB
歪率	20dB 以上	8dB

その他、無線機として免許を取得するために必要な性能とその測定結果は表 2-2-4-2 のとおりである。

表 2-2-4-2 無線機免許に必要な性能

測定項目	目標値	測定値
占有周波数帯幅	16kHz 以下	17kHz

測定結果は 17kHz であり、目標を達成していない。これは、変復調部で入力信号のレベル制限がうまく働いていないためであると推測される。

## 2-2-5 三次試作無線機の作成

### (1) アナログ FM エンファシスフィルタ

アナログFMの変調・復調ができることは第二次試作無線機で確認をしたが、エンファシスフィルタとスプラッタフィルタの特性を確認したところ図2-2-5-1のような特性であることが分かった。

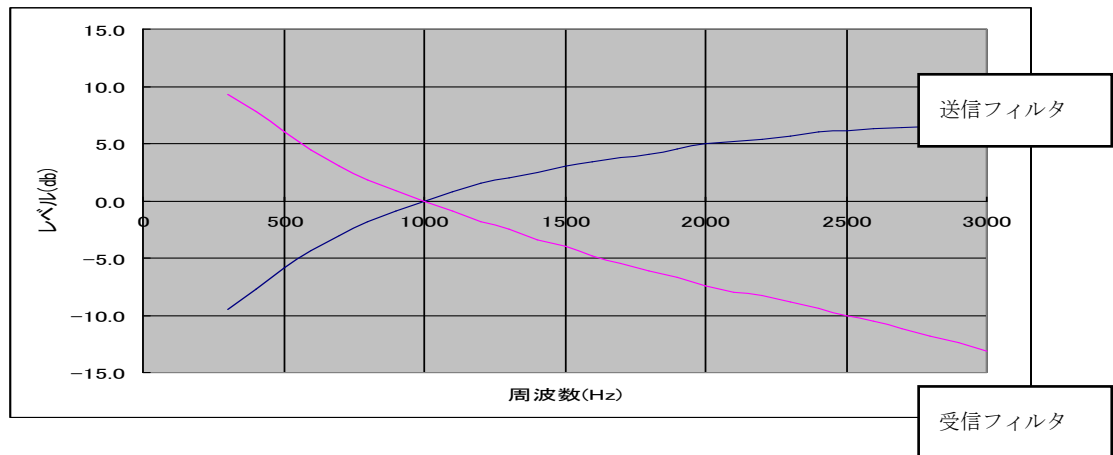


図2-2-5-1 エンファシスフィルタ+スプラッタフィルタ特性

一方、アナログFM無線機で要求されるエンファシスフィルタ+スプラッタフィルタの特性を図2-2-5-2~3 に示す。

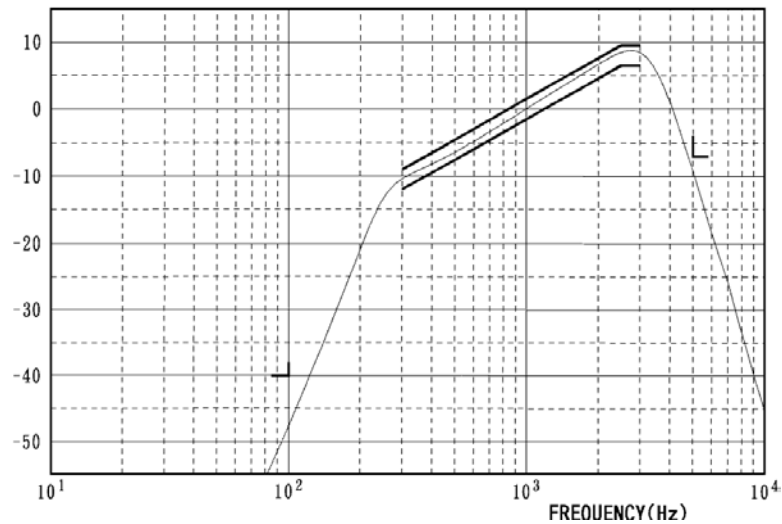


図2-2-5-2 送信フィルタ特性

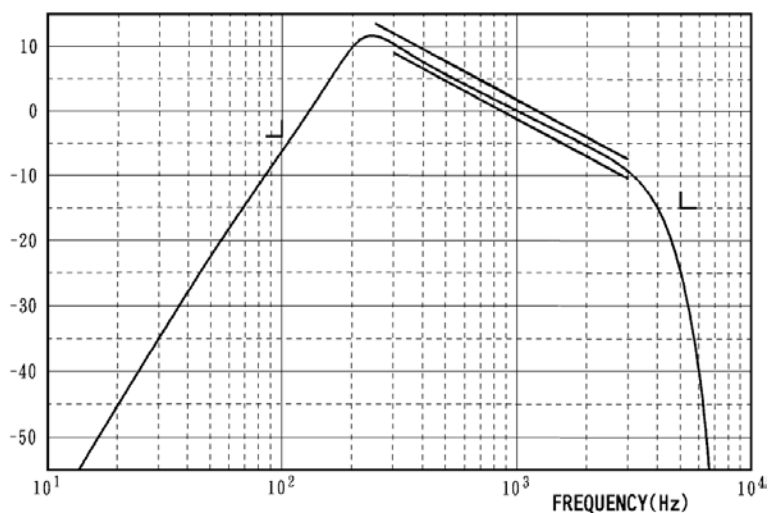


図2-2-5-3 受信フィルタ特性

このため、FPGA内のデジタルフィルタを調整した。調整後の測定結果を図2-2-5-4に示す。

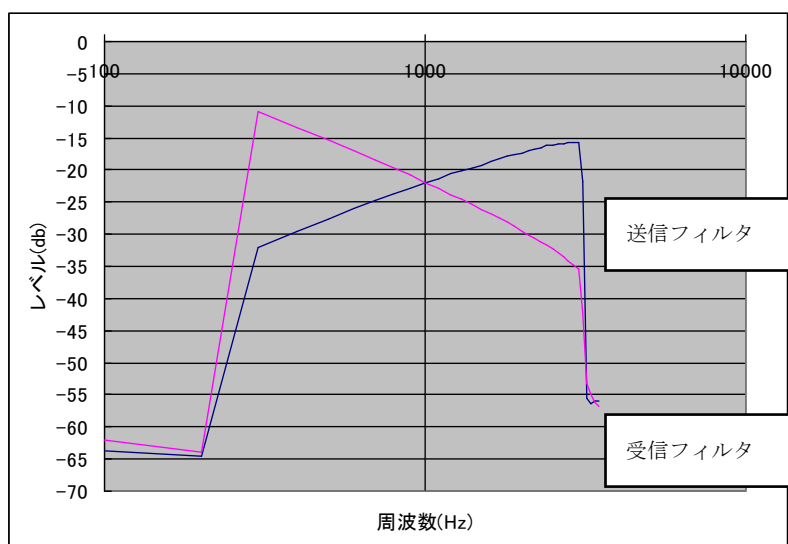


図2-2-5-4 エンファシスフィルタ+スプラッタフィルタ特性（調整後）

上記のように所望の特性を得ることができた。

## (2) 占有周波数帯域幅

アナログFMの規格において、音声入力を過大に入力した場合でも占有帯域幅が5.0kHzを超えてはならない。そこで第二次試作無線機で音声を過大入力（標準入力レベルよりも+10dB高く入力）したところ、占有周波数帯幅が7.2kHzまで広がることが分かった。この時の波形を図2-2-5-5に示す。



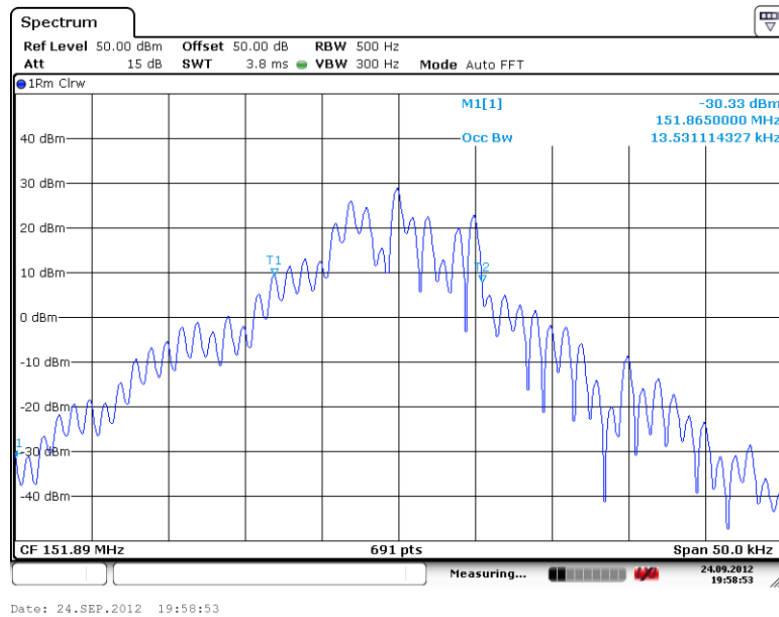


図2-2-5-5 変調波形

原因を調査したところ、FPGAに音声を入力する手前のAMPで波形が歪むこと、また、FPGAに音声を入力するためのA/Dコンバータの適正範囲を超えて音声信号が入力されていることが分かった。このため第三次試作無線機では図2-2-5-6に示すように音声入力回路の初段にALC（オートレベルコントロール）を追加した。

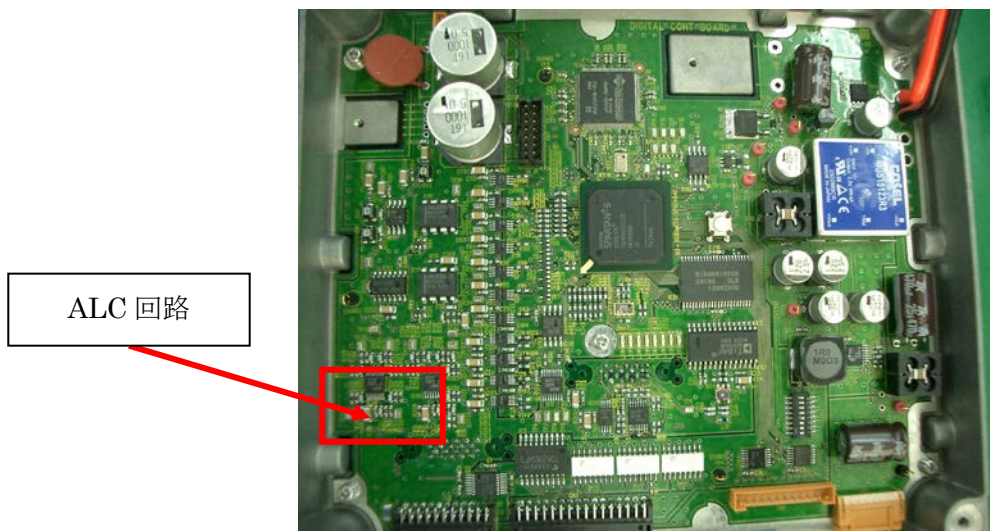


図2-2-5-6 第三次試作無線機

## 2-2-6 三次試作の評価結果

第三次試作においては、第二次試作で判明した課題に対処した結果性能が改善し、出力 1W の実験局としての免許を取得できる性能となった。しかし、実用的な無線機とするための目標値には達しなかった。以下の表 2-2-6-1 に、目標値と免許取得に必要な性能規格、および第三次試作の測定値を示す。

表 2-2-6-1 目標値、免許規格および第三次試作機の性能

	目標値	免許の規格	測定値
スプリアス発射(帯域外領域)	-80dB 以下	-46dB 以下	-78dB
スプリアス発射(スプリアス領域)	-60dB 以下	-46dB 以下	-47dB
選択度	70dB 以上	規定無し	78dB
S/N 比	40dB 以上	規定無し	43dB
歪率	20dB 以上	規定無し	12dB
最大周波数偏移	規定無し	5kHz 以下	0.96kHz
占有周波数帯幅	16kHz 以下	16kHz 以下	1.8kHz

FPGA による変復調に関しては、アナログ変復調機能を FPGA に実装し、送受信試験が可能となった。スプリアス発射の測定結果は 1.8kHz である。これは目標をクリアしているが、通常のアナログ無線機は 10~14kHz 程度であり、値が小さすぎるため、復調時に S/N 比が小さくなり実用的でないと考えられる。したがって、実用化までに調整を行う必要がある。

### 2-2-7 今後の課題

3年間の開発により、デジタルの4値FSK方式とアナログのFM変調方式を切替可能な無線装置を作り、性能評価を行うことができた。また、フィールド試験を行うために実験局の免許を申請し、実験局設置の仮免許を取得し、試験電波発射の許可を得るところまでできた。しかし2-2-6節での性能評価の結果、業務用途で実際に運用するためにはまだ不十分な性能であることも確認された。

今後の課題として、4値FSK無線機と同様に実用的な無線機とするために無線性能を目標値まで向上させることがあげられる。また、無線機の受信性能に関しては、既存の無線機と同程度の性能が要求される。しかし既存の無線機の受信感度が0dBuV以下程度であるのに対して、現在の無線機は+10dBuVと悪く、歪率も既存の無線機が40dB程度であるのに対して、現在の無線機は15dBと悪い。S/Nは既存の無線機よりも良い状態であるが、総合的な受信性能の向上が今後の課題である。

## 2-3 FPGA 処理のリアルタイム性の実現

### 2-3-1 目的・目標

アナログ無線機では音声信号の遅延時間が通話に与える影響は無かったが、変復調部をデジタル化することにより大きな遅延が発生する。これらの遅延時間が 150mS を超えると無線システム構成時に通話品質に影響を与えるため、FPGA 処理のリアルタイム化についての研究開発を行う。

H23 年度第 3 次補正予算事業では、H23 年度に行った遅延時間の検証結果から最適化の方法を検討し、その内容を第三次試作無線機に反映させ検証した。

### 2-3-2 昨年度の評価結果

H23年度はFPGA処理のリアルタイム性を実現するために、第二次試作無線機を用いた性能評価を行った。第二次試作無線機を用いたループバック試験の様子を図2-3-2-1に示す。

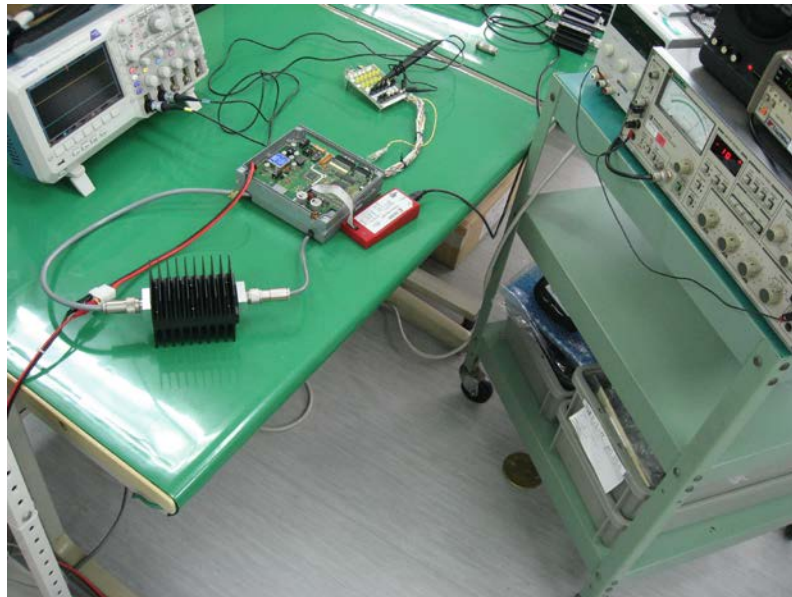


図 2-3-2-1 第二次試作無線機ループバック試験

ループバック試験は、第二次試作無線機にオーディオアナライザのオシレータより試験信号（1KHzのトーン信号）を入力し、送信出力と受信入力を同軸ケーブルとアッテネータで接続することで送信信号を折り返して受信させ、復調された試験信号をオシロスコープで確認して遅延時間を測定した。評価の模式図を図2-3-2-2に示す。

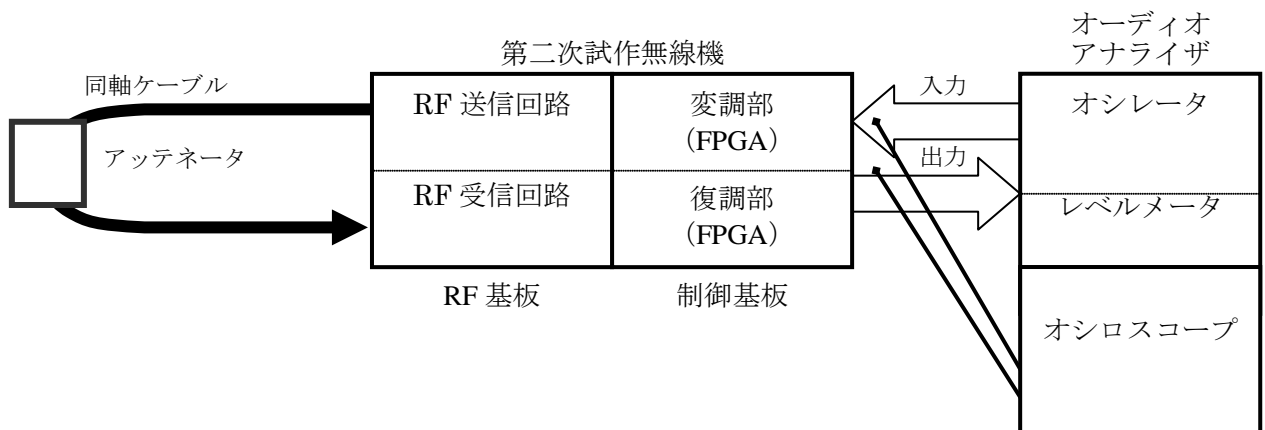


図 2-3-2-2 ループバック試験模式図

また、FPGA処理のリアルタイム性の実現を行う際の比較対象としては、H22年度に調査を行った、現在運用されているアナログFM無線機とデジタル簡易無線機の遅延時間を参考にした。

(1) 4 値 FSK 遅延評価

4 値 FSK 方式におけるループバック試験の測定結果を図 2-3-2-3 に示す。

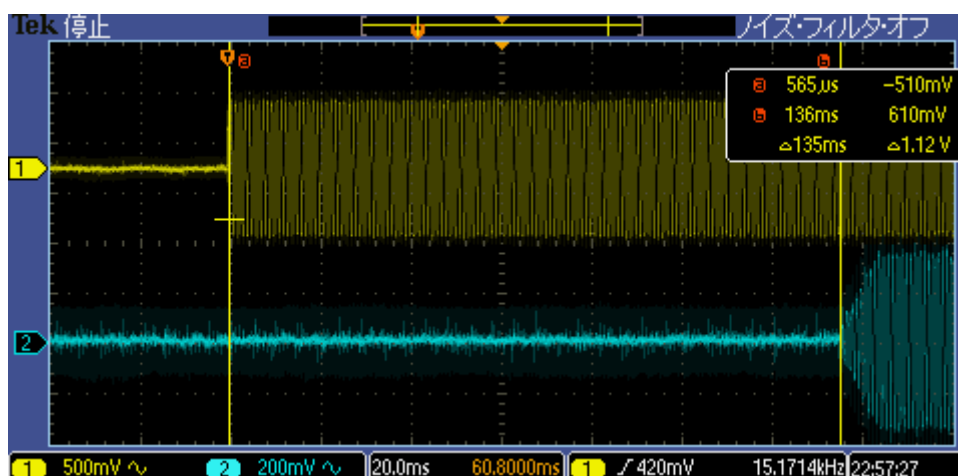


図 2-3-2-3 ループバック試験の入出力結果

4 値 FSK 方式では第二次試作無線機の遅延時間は約 135mS であった。この値はデジタル無線機のリアルタイム性としては問題ないと考えられる。

なお、第一次試作無線機の評価結果を比較すると表 2-3-2-1 のようになる。

表 2-3-2-1 無線機の遅延時間評価結果

変調方式	第一次試作無線機	第二次試作無線機	目標値	既存の無線機
4 値 F S K	90.5mS	135mS	150mS	290mS

第二次試作無線機で遅延時間が多くなったのは、第一次試作無線機で問題となったスプリアスや占有周波数帯域幅の対策のために FPGA に組み込んだ変調フィルタ、復調フィルタ等のデジタルフィルタが原因となっている。しかしフィルタへのデータ受け渡しにバッファを必要としない構成にできたこと、フィルタ回路の方式を SINC フィルタとしたことで遅延時間は目標値を達成することができた。

## (2) アナログ FM 遅延評価

次にアナログ FM 方式におけるループバック試験の測定結果を図 2-3-2-4 に示す。

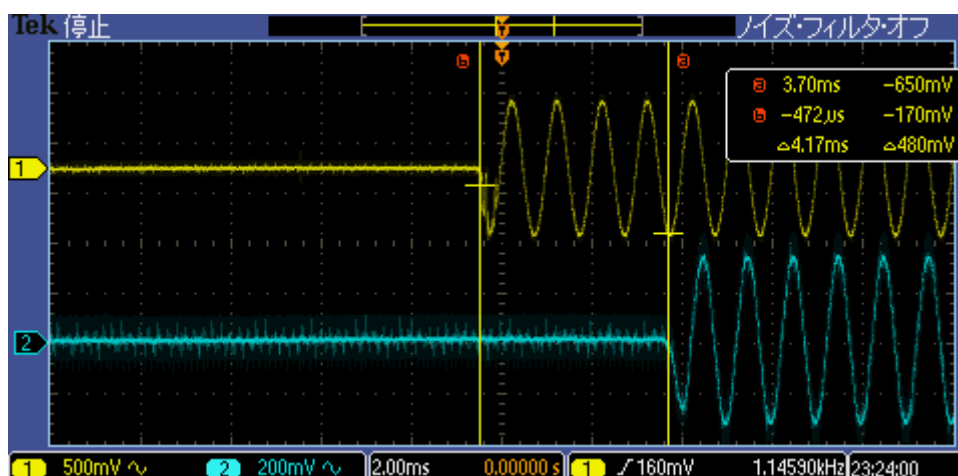


図 2-3-2-4 ループバック試験の入出力結果

アナログ FM 方式では第二次試作無線機の遅延時間は約 4.17mS であった。この値はアナログ FM 無線機のリアルタイム性としては問題ないと考えられる。

なお、第一次試作無線機の評価結果を比較すると表 2-3-2-2 のようになる。

表 2-3-2-2 無線機の遅延時間評価結果

変調方式	第一次試作無線機	第二次試作無線機	目標値	既存の無線機
アナログ FM	0.72mS	4.17mS	5mS	2mS

第二次試作無線機で遅延時間が多くなったのは、第一次試作無線機で問題となったスプリアスや占有周波数帯域幅の対策のために FPGA に組み込んだスプラッタフィルタ等のデジタルフィルタが原因となっている。しかしフィルタをフィルタへのデータ受け渡しにバッファを必要としない構成にできたこと、フィルタ回路の方式を SINC フィルタとしたことで遅延時間は目標値を達成することができた。

## (3) 今年度の課題

第二次試作無線機のリアルタイム性については 4 値 FSK 方式、アナログ FM 方式とも目標値を達成することができたが、性能面ではまだ調整不足で改善の必要が残されている。

このため今年度は性能面の向上を行うための改善が遅延時間に影響を及ぼさないよう、回路の調整、機能の追加を行った。

### 2-3-3 三次試作の作成

第二次試作無線機の問題点を解決するため、FPGA、制御基板、RF 基板に改善を行い、第三次試作無線機を開発した。詳細については4値FSKが「2-1-3 昨年の問題点に対する対応、改善内容」、「2-1-5 三次試作の作成」、アナログFMが「2-2-3 昨年の問題点に対する対応、改善内容」、「2-2-5 三次試作の作成」の通りである。



### 2-3-4 三次試作の評価結果

FPGA 処理のリアルタイム性を検証するために、2 台の第三次試作無線機を用いて対向試験を行った。

また、昨年の評価結果を比較し検討と評価を行った。

#### (1) 対向試験

2 台の第三次試作無線機を用いて対向試験を行った。一方の第三次試作無線機にオーディオアナライザのオシレータより試験信号 (1KHz のトーン信号) を入力し、送信出力をアッテネータに接続し、もう一方の無線機の受信入力に接続することで、送信信号をアッテネータ経由で折り返して受信させ、復調された試験信号をオシロスコープで確認して遅延時間を測定した。評価の模式図を図 2-3-4-1 に示す。

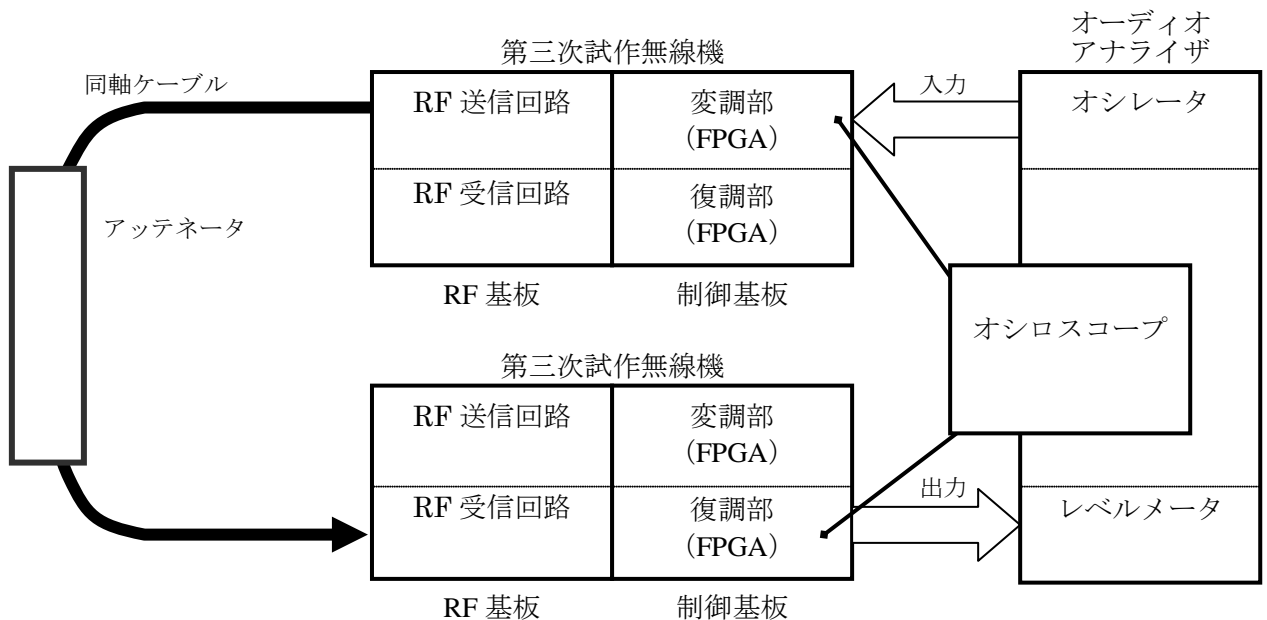


図 2-3-4-1 対向試験模式図

また、対向試験の様子を図 2030402 に示す。

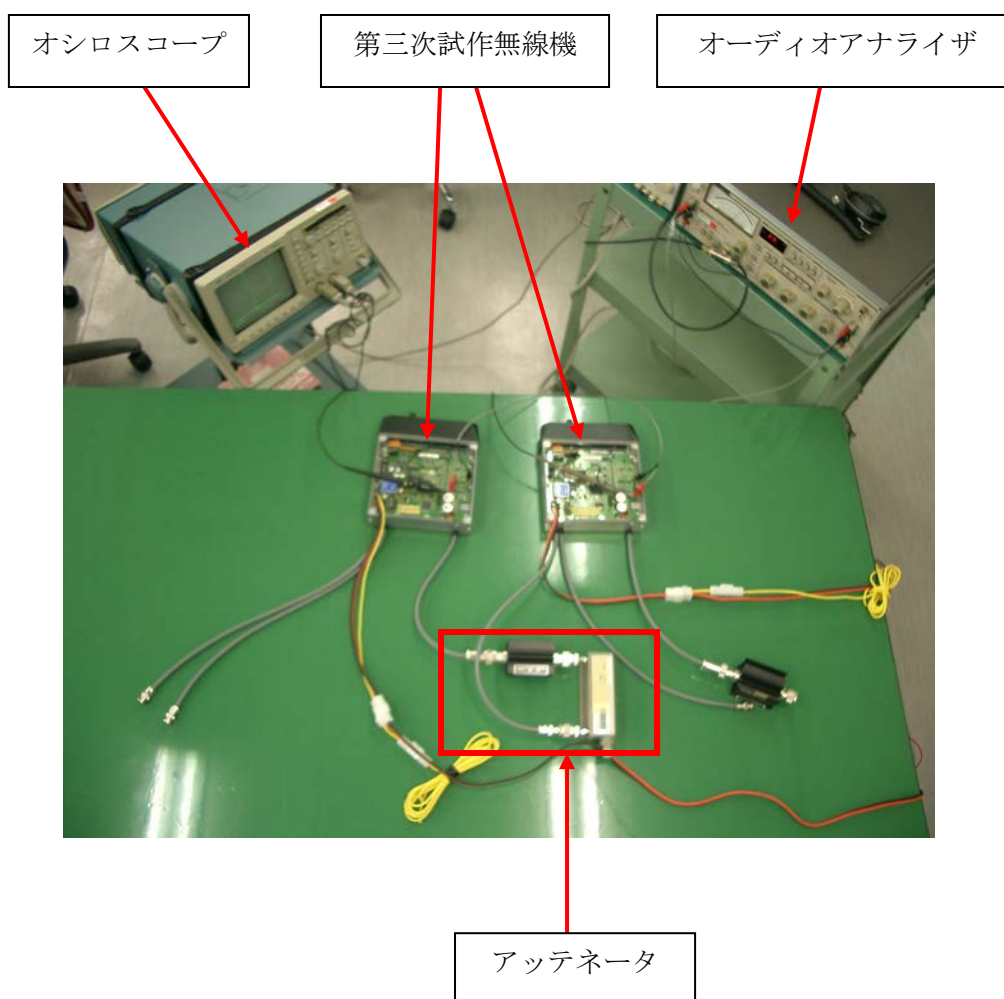


図 2-3-4-2 対向試験の様子

(2) 4 値 FSK 遅延評価

次に 4 値 FSK 方式における対向試験の測定結果を図 2-3-4-3 に示す。

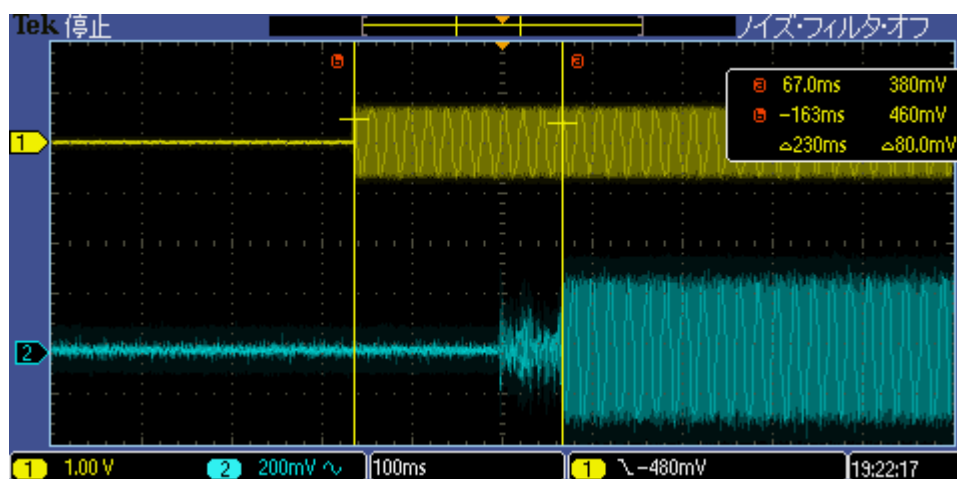


図 2-3-4-3 対向試験の入出力結果

4 値 FSK 方式では第二次試作無線機の遅延時間は約 135ms であったのに対し、第三次試作無線機では 230ms となっている。今回はパケット構造を変えたため若干の遅延時間が増えているはずであるが、100ms の増加にはならないはずである。そこで信号レベルを変えて再度遅延時間の確認を行った (図 2-3-4-4)。

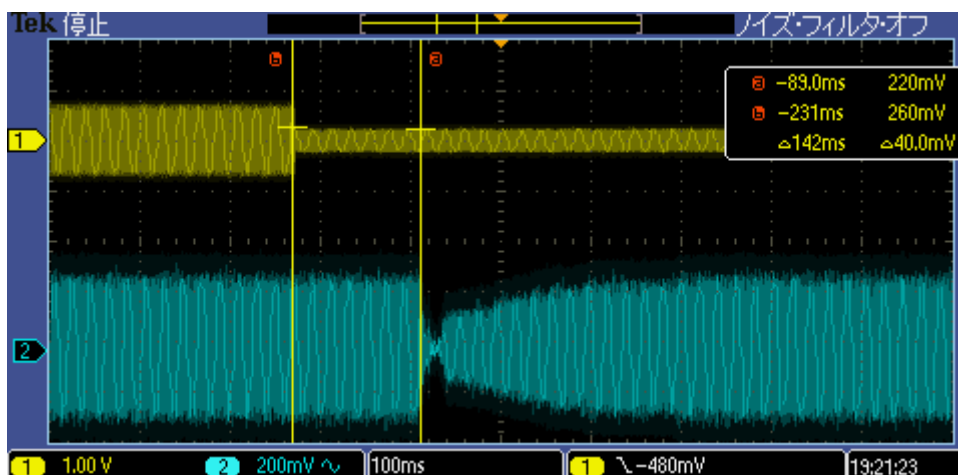


図 2-3-4-4 対向試験の入出力結果 (レベル変化)

ここでは 142ms 遅れて出力信号のレベルが変化していることが確認できた。これは FPGA における信号処理の遅延時間は 142ms であるが、第三次試作で追加したアナログ部の ALC (オートレベルコントロール) 回路の反応が 90ms 程度かかっていることが原因である。ALC は図 2-3-4-4 のように 10dB 程度のレベル変化なら短時間で追従できるが、図 2-3-4-3 のように無音から有音のよ

うに 60dB 以上の大きな変化があるとレベルの追従に 90ms 近い時間がかかってしまっている。しかし、音声の最初に 100ms の頭切れが生じて受話側ではあまり関知できないため、デジタル無線機のリアルタイム性としては遅延時間 142ms で問題ないと考えられる。

なお、第一次試作無線機、第二次試作無線機の評価結果と比較すると表 2-3-4-1 のようになる。

表 2-3-4-1 無線機の遅延時間評価結果

変調方式	第一次試作無線機	第二次試作無線機	第三次試作無線機	目標値	既存の無線機
4 値 F S K	90.5mS	135mS	146ms	150mS	290mS

パケットに追加したデータ処理で若干の遅延時間が増加したものの、目標値である 150ms を下回ることができた。これは既存の無線機 (デジタル簡易無線機) の遅延時間に比べ約半分の時間であるため、デジタル無線機使用時の応答性の悪さをかなり軽減できる結果となった。

#### (4) アナログ FM 遅延評価

次にアナログ FM 方式における対向試験の測定結果を図 2-3-4-5 に示す。

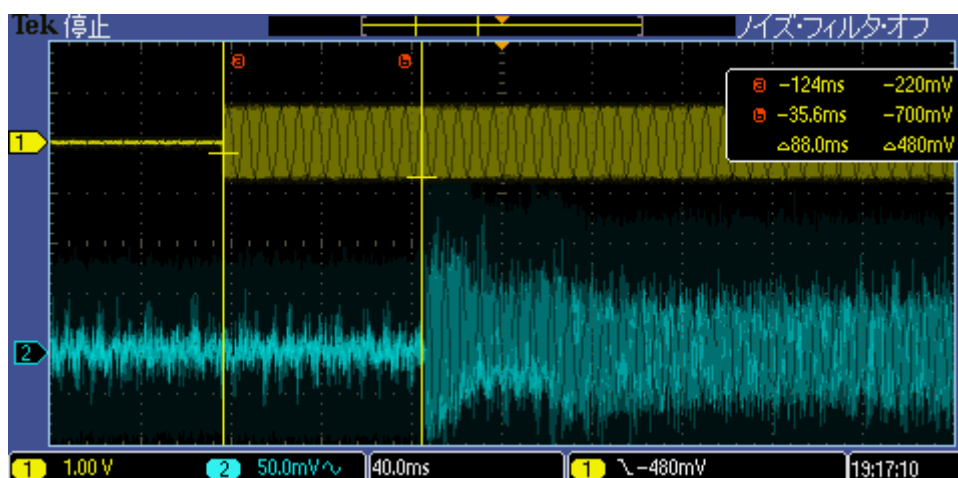


図 2-3-4-5 対向試験の入出力結果

第二次試作無線機では遅延時間が 4.17ms であったのに対し、第三次試作無線機では遅延時間が 88.0ms と大幅に増えてしまっている。しかしこれも 4 値 FSK と同様 ALC 回路の問題と考えられるため、ALC 回路をジャンパーして信号を入力し、測定を行った (図 2-3-4-6)。

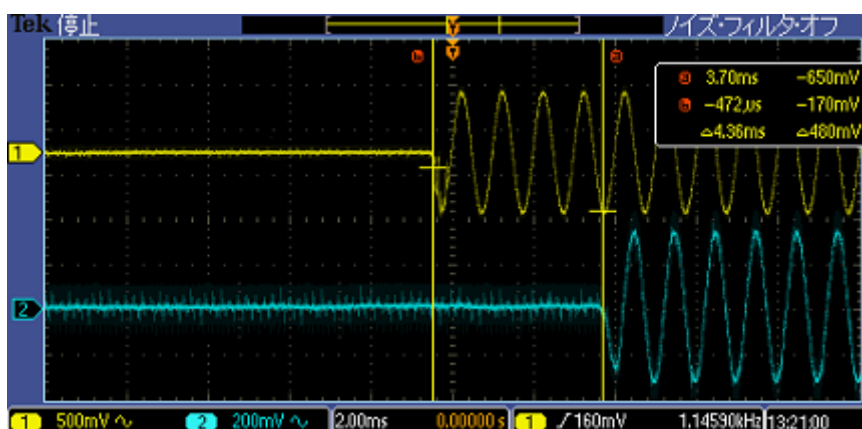


図 2-3-4-6 対向試験の入出力結果 (ALC なし)

ALC を通さない場合では第三次試作無線機の遅延時間は約 4.36mS であった。この値は第二次試作無線機と同じでアナログ FM 無線機のリアルタイム性としては問題ないと考えられる。なお、第一次試作無線機、第二次試作無線機の評価結果を比較すると表 2-3-4-2 のようになる。

表 2-3-4-2 無線機の遅延時間評価結果

変調方式	第一次試作 無線機	第二次試作 無線機	第三次試作 無線機	目標値	既存の無線機
アナログ FM	0.72ms	4.17ms	4.36ms	5ms	2ms

第二次試作無線機と第三次無線機では FPGA 処理のアナログ FM 部分にほとんど変更を加えなかったため、遅延時間はあまり変わらなかった。

### 2-3-5 今後の課題

3年間の開発により、デジタルの4値FSK方式とアナログのFM変調方式を切替可能な無線装置を作り、性能評価を行うことができた。特に変復調部をFPGAに取り込むことで懸念されていた遅延時間の増加を目標時間内に納めることができ、リアルタイム性を確保できた。

しかし、全体的な無線機としての性能面ではまだ調整不足で改善の必要が残されている。

このため今後の課題としては性能面の向上を行うための改善が遅延時間に影響を及ぼさないように注意を払いながら回路の調整や機能の追加を行うこととなる。

またALC回路のレベル追従速度を高め通話開始時の頭切れ時間を短縮することが課題となる。

## 2-4 デジタル処理部の FPGA によるアンテナ制御部の開発

### 2-4-1 150MHz 基地局用可変指向性アンテナの試作開発

#### 2-4-1-1 プロトタイプ設計

昨年度までの 150MHz 帯基地局用可変指向性アンテナ（以下、基地局アンテナと略す）の要素検討において、セクタ指向性やアンテナ利得に関する目標性能は達成していたため、今年度はその基本設計を踏まえた上で、屋外実験に供するに足る剛性確保やパーツの脆弱性を見直し等を行い、加工寸法精度を高めるために外注製作を行った。具体的には、アンテナ素子は従来の外径 2mm の真鍮線から外径 5mm のアルミパイプに素材を変更し、またピラーは商用時の仕様形態を想定して、樹脂製から金属製に変更した。ピラーを金属製に変更してもアンテナ利得や指向特性の劣化は無視できるほど小さいことを事前にシミュレーションで確認した。これらをもとにして設計の修正を行い、図 2-4-1-1-1 に示すアンテナを作製した。

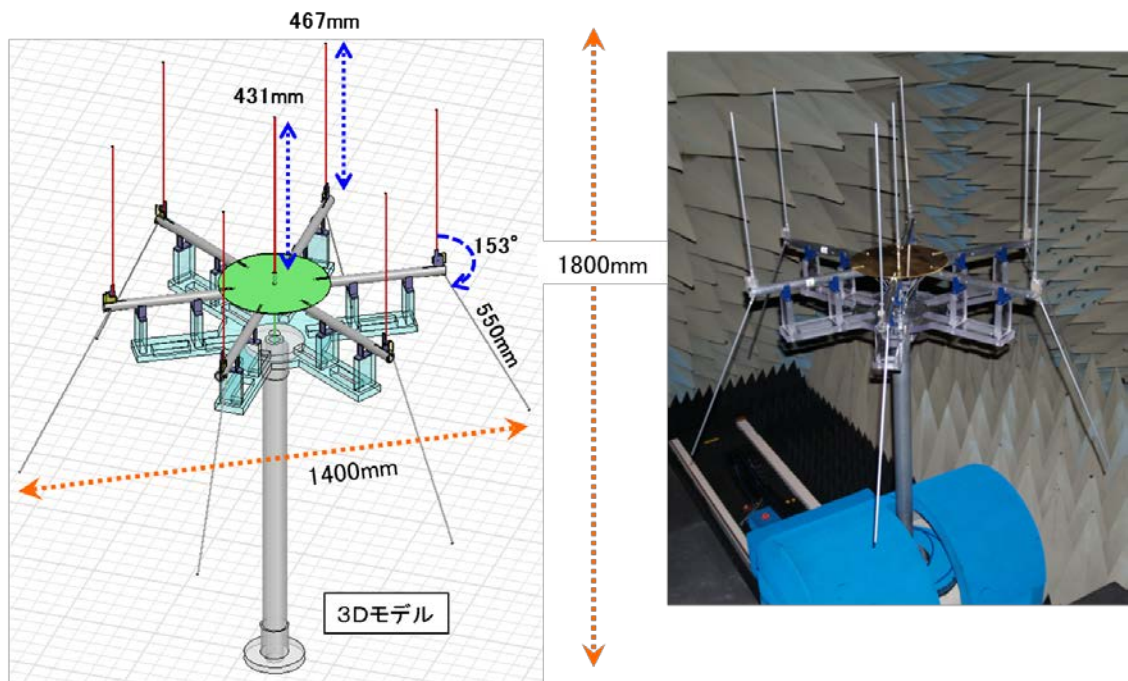


図 2-4-1-1-1 基地局用アンテナの設計及び製作した実機の写真

#### 2-4-1-2 単体特性

上記で製作した基地局アンテナの単体特性評価を電波暗室内で行った。なお、この評価は水平面内で評価しており、仰角は  $0^\circ$  である。基地局は高い位置に設置して、水平かむしろ見下ろす角度で送信するためであり、その仰角の調整用に斜め地線を用いている。

測定結果は、各セクタでほぼ同じ形状の指向性パターンを持ち、アンテナ利得は+8.0～+8.1dB と目標性能の+5dB よりも 3dB ほど良い特性が得られた。半値角は  $91\sim 96^\circ$  であった。

各セクタで最大利得点の左右のパターン形状が若干非対称であるのは、アンテナ素子と下方に張り出した仰角調整用の斜め地線が構造上少しずれた位置関係にあることに起因する。

送信出力耐性については、パラサイト素子の電子スイッチが重要であり、その耐電力で決まる。パラサイト素子は給電素子の送信により電力が印加されるためである。昨年度の電子スイッチの選定において 25W に耐える仕様として設計しているが、運悪く東日本大震災の影響を受けて品薄状態がおきていたことから、入手可能な範囲内で選定し、新日本無線製の NJG1608KB2 を採用した経緯がある。この電子スイッチの動作保証耐電力は 32dBm である。基地局アンテナに関してシミュレーション評価した結果を表 2-4-1-2-1 に示す。シミュレーションには電磁界シミュレータである HFSS (ANSYS 社) を用いた。計算結果は、セクタ指向時には隣接する 2 つのパラサイト素子に誘起される電力は 32dBm を超え、2.6~3.7dB ほど電力が過大になる結果となった。左右のパラサイト素子で若干の差があるのは図 2-4-1-2-1 に示す指向性の非対称性と関連していると思われる。他のパラサイト素子では定格の 32dBm を下回った。またオムニ指向性の場合にも定格未満であった。定格を超えても短期的にはスイッチング特性に非線形性が若干現れる程度であり実験上は問題ないため、今回の実験にはこの部品選定のままとした。なお NJG1608KB2 は低損失、中電力、高アイソレーションを特徴とする SPDT (Single Pole Double Throw) スイッチである。例えば高電力仕様である通信機器用電子スイッチの NJG1669MD7 であれば仕様上は 38dBm の耐電力を有するため、耐電力の問題は解消しうる。但しこのデバイスは切替電圧が 6V になるために、切替制御基板の出力仕様を 5V から 6V に変更する必要が生じる。商品化開発の際に、コストや出力仕様と併せて動作保証耐電力を考慮した部品選定を行い、切替電圧等を調整する必要がある。

表 4-1-2-1 25W 送信時にパラサイト素子に印加される電力  
(セクタ指向を 1~6 に設定した場合及びオムニの場合に、セクタ 1 に印加される電力)

セクタ指向	セクタ 1 に印加される電力 (dBm)
セクタ 1	+32.0
セクタ 2	+35.7
セクタ 3	+26.8
セクタ 4	+15.4
セクタ 5	+26.7
セクタ 6	+34.6
オムニ指向性	+30.2

これらより、当初の目標性能をほぼクリアしたことから、屋外実験用の基地局アンテナは完成と判断した。なお、VSWR は目標性能の項目ではないが、VSWR が 1.5 以下となる周波数幅は 7.35MHz と良い特性を示した。



## 2-4-2 150MHz 車載局用可変指向性アンテナの試作開発

### 2-4-2-1 構成の最適化検討

150MHz 帯車載局用可変指向性アンテナ（以下、車載局アンテナと略す）の場合は、これまでシミュレーション結果と実験結果に隔たりがあったことから、その原因究明を基本設計の事前プロセスとして行った。特に測定値においてアンテナ利得が予想以上に小さかったことから、原因の特定に注力した。その結果、実験評価においては、車両の天板を模擬する大地板として用いていた複合板が、高周波に対して金属として振る舞っていない事が判明した。そこで大地板の構成を再検討し、図 2-4-2-1-1 に示すように複合板の表面をアルミニウム板で覆い、アンテナ地板と接触させ、実験を行うとともにシミュレーション検討を行った。

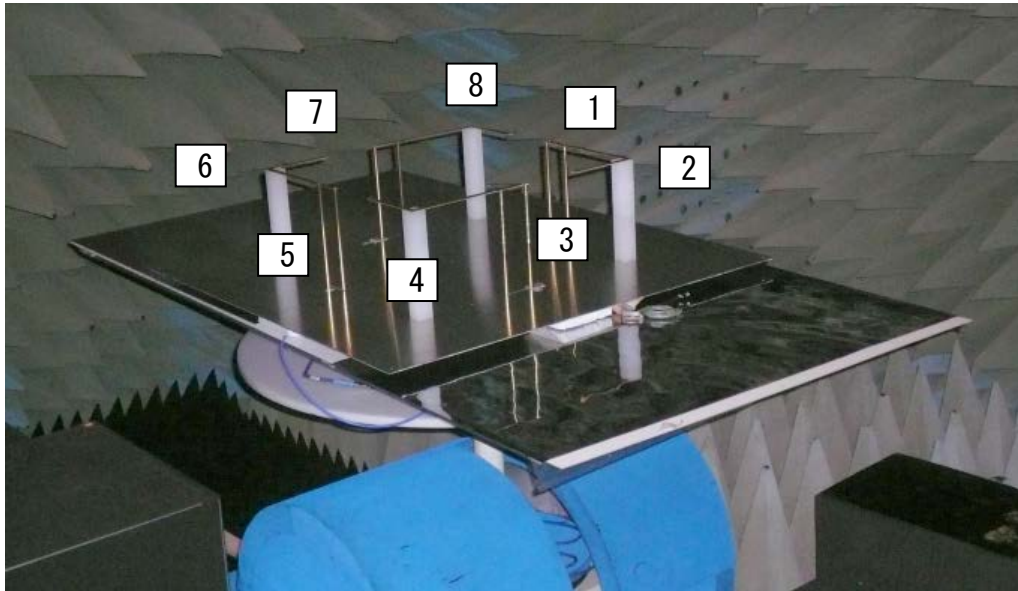


図 2-4-2-1-1 大地板の表面を金属板（アルミ）でカバー。図中の数字はセクタ方向

測定の結果、大地板表面を金属にしたら、最大利得方向は指定するセクタ方向に正しく向き、セクタ 5、7 以外は、仰角=12° の従来条件で目標性能の利得=+4.5dBi を超えた。また、セクタ 5、7 も仰角=20° 以上で+4.5dBi となり、目標性能の利得をクリアした。総括すれば、従来の測定結果よりも各セクタでアンテナ利得が 3dB 程度以上向上し、またシミュレーション結果に近づく結果となった。昨年度までは大地版に表面がフィルムコートされた金属板を用いて評価を行っていたが、今回の結果から、大地版の表面は金属であることが重要と判った。（後で述べるように、接地が重要と判明している）

そこで、シミュレーションと実験結果が乖離していた原因が地板の取扱いにあると判ったために、リアクタンスを微調整しつつ、シミュレーションを改めて行った結果、実験値とシミュレーション値の類似度は大幅に改善された。利得の数値自体はシミュレーション値と実験値で 1～2dB 程度の差が生じたが、これは寄生容量等のパラメータの調整でさらに改善できると思われた。

地板の表面の接地が原因であることを特定するために、図 2-4-2-1-2 に示すようにアルミニウムの大地板上に、さらに 1mm 厚の塩化ビニルシートを貼り付けて、検証を行った。大地板の表面の被覆状態と指向性特性の評価結果を図 2-4-2-1-3 に示す。



図 2-4-2-1-2 大地板に塩化ビニルシートを貼った様子

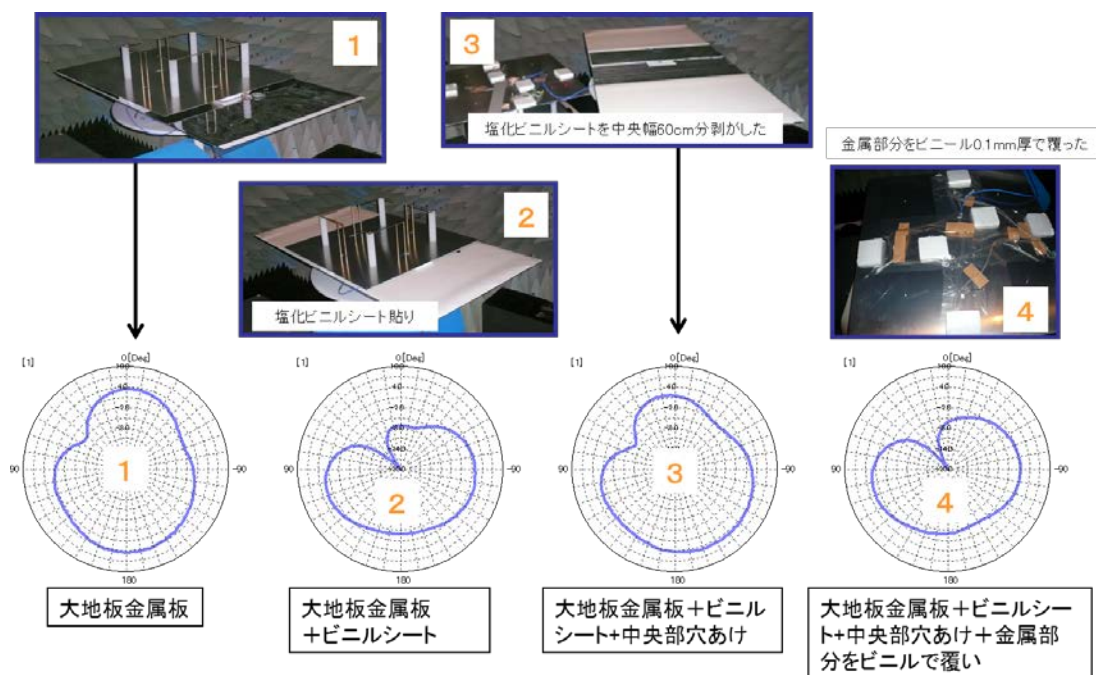


図 2-4-2-1-3 大地板の表面の被覆状態と指向性の測定結果の関係

この実験結果をもとにさらにいくつか検討を行った結果、アンテナ地板と大地版の導通が十分に確保されていれば大地版の表面に被膜があっても問題ないことが明らかとなった。実際に自動車に搭載する場合には、ルーフ等のすべての金属部には樹脂塗装が施されているために、この点は重要である。車載用アンテナを自動車に搭載する場合には、車体、特にルーフとの導通に十分な配慮を行う事が必要である。

この車載局アンテナの仰角特性について評価を行った。実験系を図 2-4-2-1-4 に示す。ATR の電波暗室は広いものの、波長が長いために図に示すような斜め方向で測定するような実験系を組んで行った。送信用ログペリアンテナは高さ 4m、送受信間距離は約 11m とした。

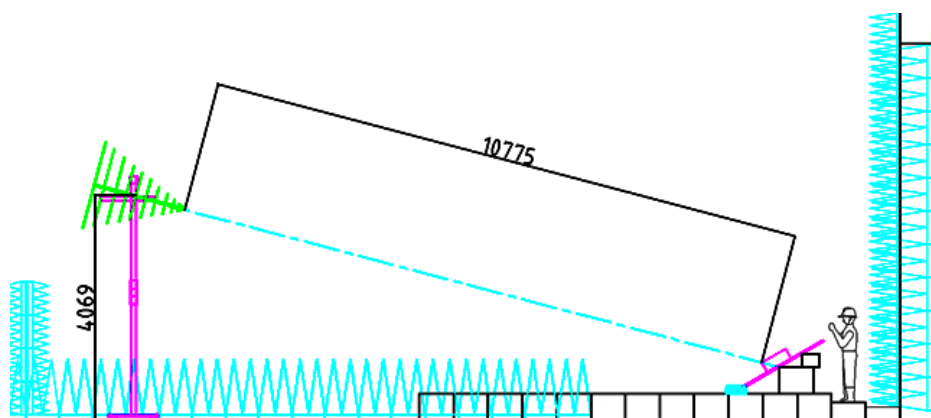


図 2-4-2-1-4 車載局アンテナの仰角方向の指向性測定に用いた実験系

車載局アンテナの仰角を変化させる測定の様子を図 2-4-2-1-5 に示す。セクタ 5 の実験結果では当初は仰角  $12^\circ$  で利得は+4.2dBi であったが、今回の評価から、仰角  $20\sim 41^\circ$  で利得は+4.5dBi 以上を達成することを確認した。なお  $41^\circ$  以上の仰角は、実験系の大きさの制限により実施できなかった。またセクタ 7 についても同様に、仰角  $12^\circ$  で利得は+4.3dBi であったものが、仰角  $18\sim 36^\circ$  で+4.5dBi 以上となった。これらから、車載局アンテナの場合は、大地版の影響を受けて最大利得方向はかなり仰角が高いところを向いていることが明らかとなった。但し後で述べるように、車載時には、ピラー等の車体の構造に起因して指向性や仰角特性が変化するため、車載時にもこのような高仰角のままであるということは一概に言えない。

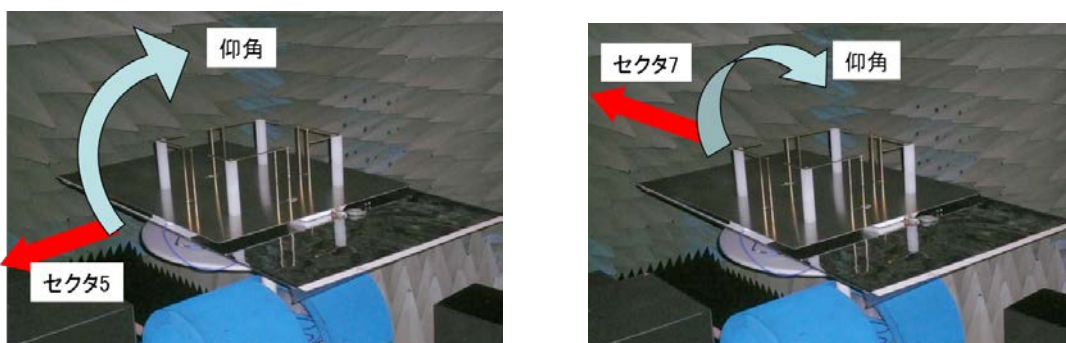


図 2-4-2-1-5 車載局アンテナの仰角方向の特性測定の様子



車載用アンテナの基本特性評価は、 $910 \times 1820\text{mm}$  の金属板（大地版）を車の天板とみなして評価を行っていたが、車載時には天井板の形状の違いやピラーの存在のために指向性が変化することが考えられた。そのため、車載時の特性を検討するために、電磁界シミュレータの HFSS で車体の三次元の簡易モデルを作製し、このモデルの上でアンテナの指向性特性のシミュレーション評価を行った。車体の 3D モデルは実際の車体の形状を参考にしつつ、外形の金属パーツのみを抽出して作製した。図 2-4-2-1-6 にモデルを、図 2-4-2-1-7 に車載用アンテナとそれを車体のルーフに設置したモデルを示す。

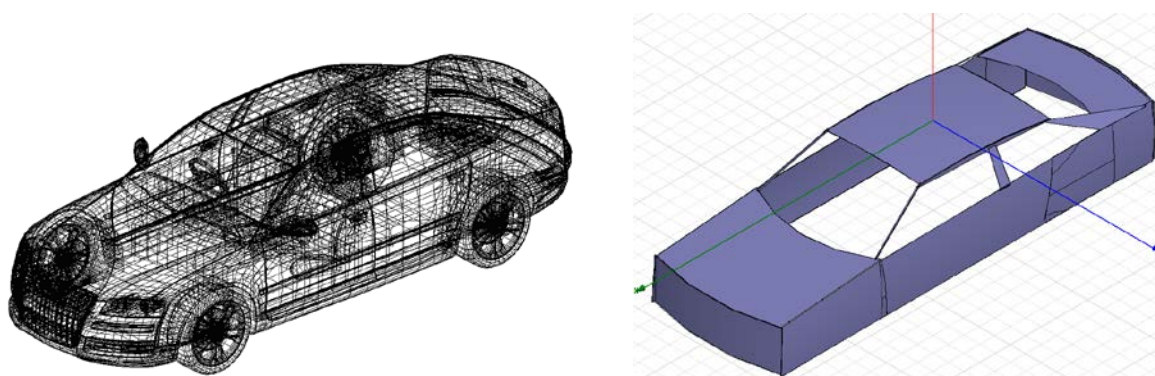


図 2-4-2-1-6 (左) 参考とした自動車車体モデル、(右) HFSS 上で作成した簡易モデル

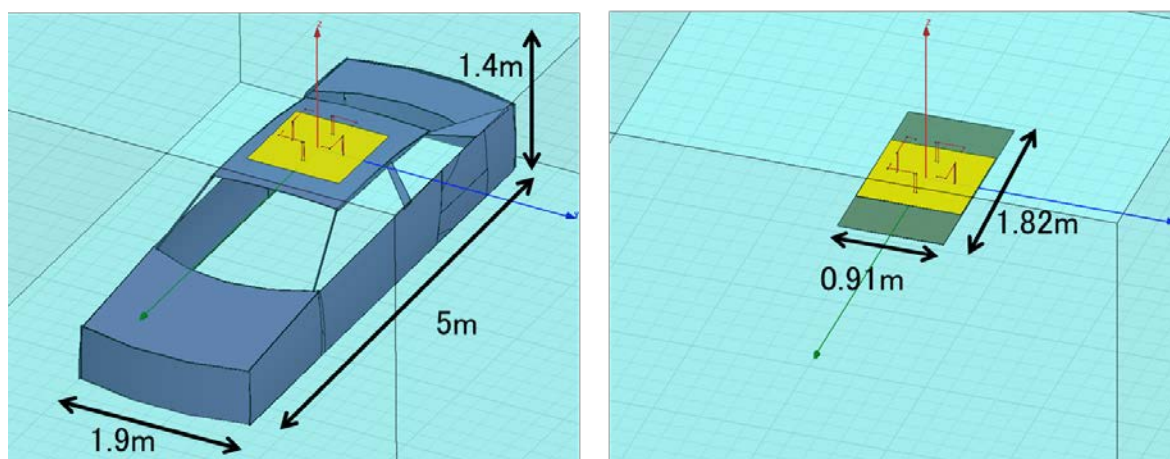


図 2-4-2-1-7 (左) 自動車ルーフ上にアンテナを設置したモデル (右) アンテナ単体

最初に仰角依存性の計算を行った。シミュレーション結果、大地板上の時では  $30^\circ$  方向に最大利得があったが、車体ルーフの上にアンテナを設置した場合には車体の影響により最大利得方向は  $8^\circ$  とかなり下方に抑えられる事が明らかとなった。

車体構造の影響の把握、及び車両搭載時における市販のモノポールアンテナとの比較について、シミュレーションでさらに検討を行った。評価は以下の 4 水準で行った。

- ① セダンのルーフ上に 2 給電 2 パラサイトアンテナを設置
- ② セダンのルーフ中央にモノポールアンテナを設置
- ③ セダンのルーフボックス上への 2 給電 2 パラサイトアンテナを設置
- ④ バンのルーフ上に 2 給電 2 パラサイトアンテナを設置

以下、順に評価結果を示す。

評価項目の①は図 2-4-2-1-7 のモデルでの計算である。シミュレーションの結果、一部のセクタで利得があまり出ておらず、 $+0.1\sim+5.9\text{dB}$  まで幅広い値となった。これは車体構造の影響であり、 $+0.1\text{dB}$  や $+0.5\text{dB}$  といった値は、極大点を選択したセクタの方向から  $30^\circ$  程度ずれた方向に現れるために低い値となった。

評価項目の②は通常よく使用されるモノポールアンテナをルーフ中央に設置したシーンである。モデルとシミュレーション結果を図 2-4-2-1-8 に示す。計算結果は、前方以外は逆Fアンテナよりも低い利得となった。

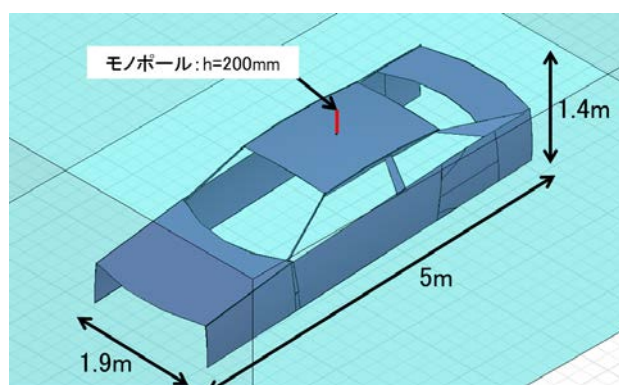


図 2-4-2-1-8 セダンのルーフ中央にモノポールアンテナを設置したモデル

評価項目の③は図 2-4-2-1-9 のように車載用アンテナをルーフボックスの上に設置するシーンである。シミュレーション結果、ルーフの直上に設置する場合に比べて全体的に利得は低下すること、車載用アンテナはルーフに近接しないと特性が発揮できないことが判った。

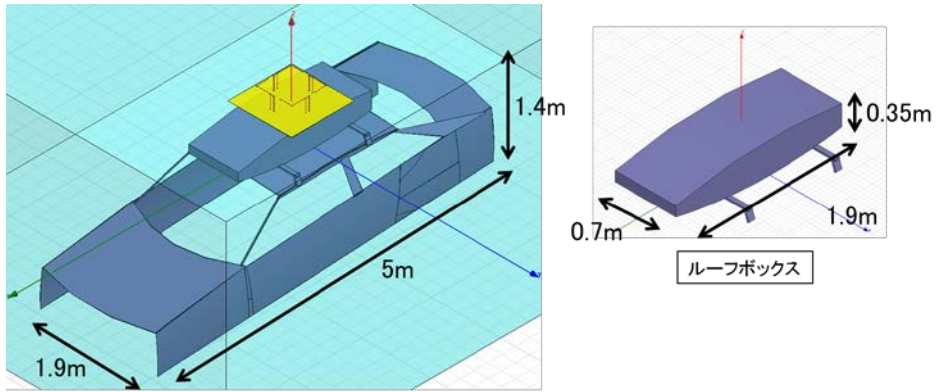


図 2-4-2-1-9 ルーフボックスの上に車載用アンテナを設置したモデル

評価項目の④はバンに設置するシーンである。図 2-4-2-1-10 のような作業車を想定したシミュレーションの結果として、セダントypeに比べてサイドローブの数が少ないこと、斜め方向の指向性が弱いことが判った。

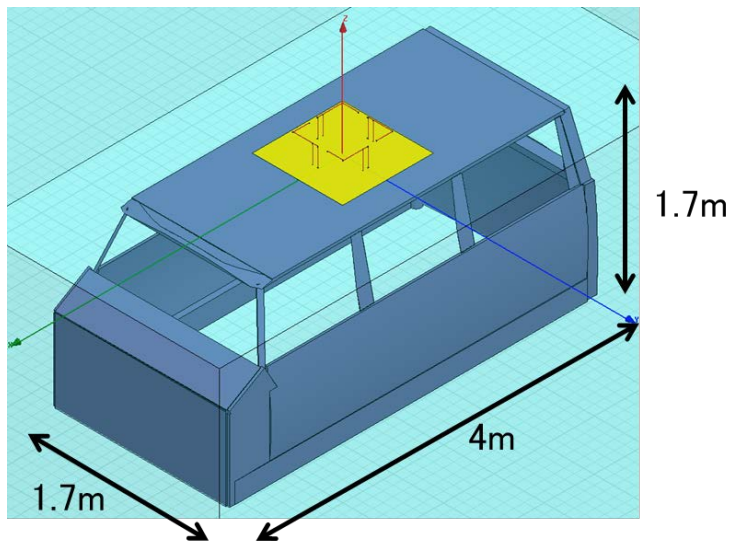


図 2-4-2-1-10 バンの上に車載用アンテナを設置したモデル

これらの結果から、車載時には車体や搭載の仕方の違いの影響を大きく受けることが判る。また、電波暗室内での基本特性の評価結果よりも総じて低いアンテナ利得を示している。但し、車載時には仰角方向の特性も変化していることは間違いないために、これらの結果が即、受信電力の低下に結びつくとは結論できない。この結果を踏まえ、アンテナの仕様は大地板を用いたモデルで最適化を行い、その有用性は車載の実験でモノポールアンテナとの比較により判断することにした。なお車載時のアンテナ特性の評価は、電波暗室内では大きさの制限から困難であったため、屋外実験で行う計画とした。

車載局アンテナの指向性の制御に用いるパラメータを表 2-4-2-1-1 に示す。2 つのパラサイト素子（スイッチ A1 及び A2）への電圧印加と 2 つの給電素子への位相制御（給電 P1 及び P2）により 8 方向のセクタ指向性を実現する。位相制御は 100° の遅延波の給電が最適である。

表 2-4-2-1-1 車載用アンテナのセクタ制御パラメータ

		指向性								
		セクタ1	セクタ2	セクタ3	セクタ4	セクタ5	セクタ6	セクタ7	セクタ8	オムニ
スイッチA1	端子1	5V	5V	5V	0V	0V	0V	5V	5V	5V
	端子2	0V	0V	0V	5V	5V	5V	0V	0V	0V
スイッチA2	端子1	0V	0V	5V	5V	5V	5V	5V	0V	5V
	端子2	5V	5V	0V	0V	0V	0V	0V	5V	0V
給電P1		0度	0度	0度	0度	0度	100度	100度	100度	0度
給電P2		0度	100度	100度	100度	0度	0度	0度	0度	0度

上記により、車載局アンテナの基本設計を確立した。

次いで、屋外実験のためのアンテナの設計の改良について取り組んだ。屋外実験では自動車のルーフの上に設置することから、車への設置面の加工や電気的な設置の仕方、移動時の風の抵抗によるアンテナの揺れなども考慮する必要がある。そのため以下の事項を検討した。

- ① アンテナへの配線はすべて地板の上面に行い、地板の下面をフラットにする
- ② 風防（レドーム）を付加する

これらの構造についてシミュレーションによって特性への影響を評価した。まず、アンテナへの給電等、配線をすべて地板の上面に行う場合と、従来の下面配線について比較した。結果を図 2-4-2-1-11 に示す。両者の差は小さく、アンテナ利得は上面配線にしても-0.2dB ほど小さくなる程度であり、上面配線の設計で問題ないことが明らかとなった。

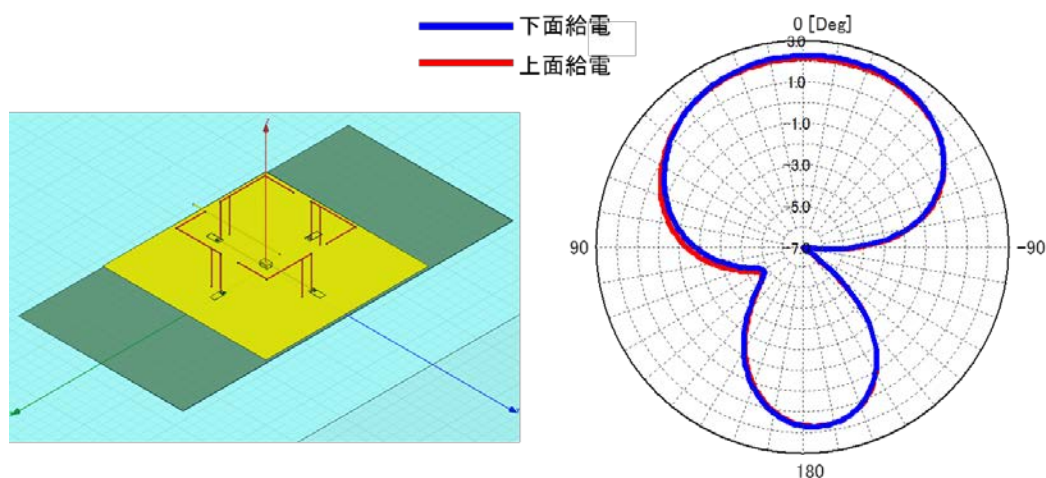


図 2-4-2-1-11 配線の位置によるアンテナ利得の差



次いでレドームの材質と構造について検討を行った。レドームの構造、材料とともにシミュレーション結果を図 2-4-2-1-12 に示す。評価の結果、レドームの有り無しの差は 0.5dB 程度であり、かつ誘電率が低いほどアンテナ利得の劣化は小さかった。そのため誘電率の大きくない材料（具体的には誘電率 3 程度）を選ぶことにし、また、ポリスチレンは亀裂が生じやすい事からポリカーボネートを選定した。なお厚さは、実験時に耐えられる強度を指針として調整することにした。

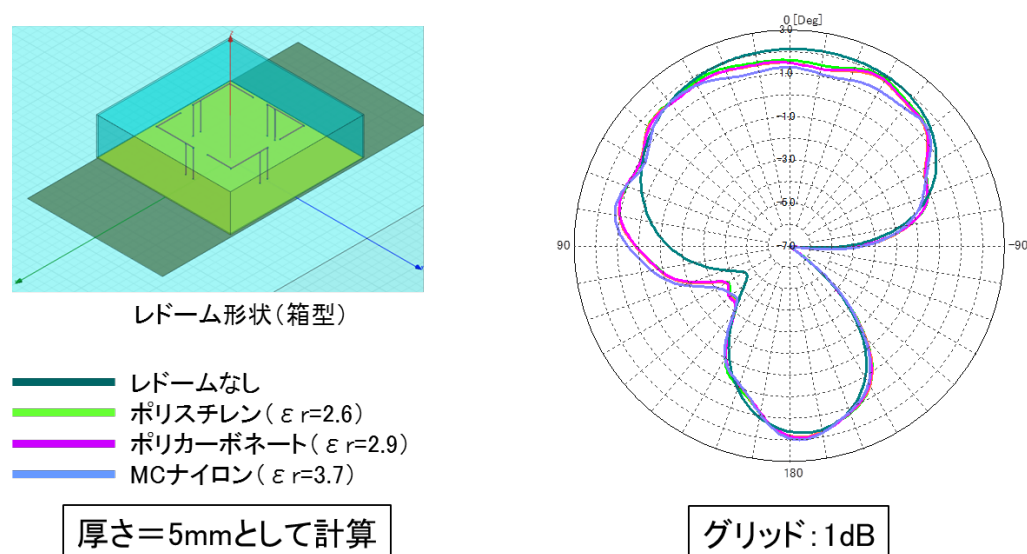


図 2-4-2-1-12 レドームの材質による影響

#### 2-4-2-2 プロトタイプ設計

上記の検討結果を基にして、屋外実験仕様の車載用アンテナの設計製作を行った。レドームは最終的に 5mm 厚のポリカーボネートで作製することにした。板上の配線は上面配置とし、剛性確保のために、ねじを樹脂製から金属製に変更した。製作は一定の加工精度を確保するために、外注で行った。設計・製作した車載局アンテナを図 2-4-2-2-1 に示す。アンテナ寸法は 52cm×52cm×20cm 高(地板 90cm 角)、レドーム寸法は 90cm×70cm×23cm とした。アンテナ高は目標性能に合わせて 20cm に収めているが、アンテナ作製の後に、レドームをその上に装着する形態としたため、レドームのトップまでの全高は 23cm となった。この全高については、アンテナとレドーム間にある現在 2cm 強のマーヅンを調整することや、アンテナ高の若干の短縮化などで、将来的には 20cm 以内に収める事は困難な事ではない。今回は屋外実験用ということでこのままの設計としたが、今後、商品化を行う際に、必要に応じて解決すれば良い。



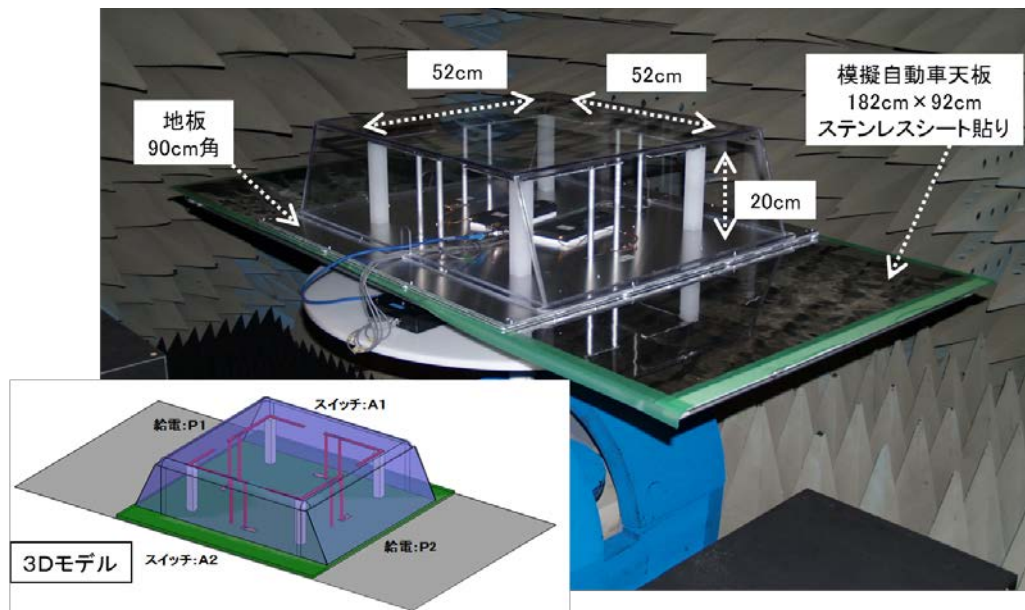


図 2-4-2-2-1 車載局アンテナ

### 2-4-2-3 単体特性

図 2-4-2-2-1 の車載局アンテナの指向特性を電波暗室内で評価した。測定条件として、仰角は  $20^\circ$  とした。結果、アンテナ利得の測定結果は  $+4.6 \sim +5.3\text{dBi}$  となり、目標性能の  $4.5\text{dBi}$  を上回る結果を得た。半値角は  $95 \sim 119^\circ$  となった。また、セクタ 1 と 5 を比較すれば判るように、対向するセクタ間の対称性も良好である。良い加工精度で製作できたことが反映されている。これらをもって屋外実験等の車載局アンテナは完成とした。

車載局アンテナの送信電力は目標性能を  $10\text{W}$  としている。基地局アンテナと同様、車載局アンテナもパラサイト素子の電子スイッチが耐電力を決める。今回の車載局アンテナの試作では基地局同様、新日本無線製の NJG1608KB2 を用いたが、車載局アンテナでパラサイト素子に印加される電力を HFSS を用いてシミュレーション計算すると表 2-4-2-3-1 となった。

表 2-4-2-3-1 10W 送信時に各パラサイト素子に印加される電力  
(セクタ指向を 1~6 に設定した場合及びオムニの場合に、セクタ 1 に印加される電力)

セクタ指向	セクタ 1 に印加される電力 (dBm)
セクタ 1	+37.6
セクタ 2	+32.5
セクタ 3	+43.0
セクタ 4	+42.0
セクタ 5	+43.0
セクタ 6	+41.4
セクタ 7	+43.0
セクタ 8	+34.5
オムニ指向性	+36.4

表 2-4-2-3-1 において 10W (=40dBm) の給電に対して 40dBm 以上の印加電力が出ているのは明らかにおかしい計算結果であるが、シミュレーション評価の課題を示すために表に掲げておく。この原因はおそらく、印加電力が位相差を考慮しない皮相電力で算出されているためと思われる。2 つの給電素子への給電は 100° の位相差をつけているので、本来はもっと低電力になるはずであり、実効電力はせいぜい基地局アンテナと同程度と想像される。但し現在使用している HFSS で車載局アンテナについて精度の高いシミュレーションを行おうとすると、現状、メモリエラーとなってしまったため、詳細な検討は今後の課題としたい。実験用途としては、高速のセクタ切替は後段で述べるように実現できており、指向性制御方法等の検討には問題の無いことが確認できている。

なお、基地局アンテナの目標性能と同様、VSWR は目標性能項目ではないものの、評価を行った。このアンテナの VSWR が 1.5 以下となる周波数幅は 2 つの給電素子において 3.0～3.2MHz と良い特性を示した。

### 2-4-3 指向性制御手法の設計・実装及び基本特性

#### 2-4-3-1 アルゴリズム設計

切替のアルゴリズムは各セクタを巡回して受信電力（RSSI）の最大値を探し、そこを選択する全周探索法と、ある時刻で選択されているセクタの隣接のみを評価してその中の最大値を逐次探す隣接探索法の2種類を考案した。基地局アンテナの6セクタの指向性制御を例に図化すると図2-4-3-1-1となる。①～⑥の数字はセクタの評価の順を示す。車載局アンテナの場合は8セクタとなるが、考え方は同様で、全周探索法と隣接探索法の2種類を実装することにした。

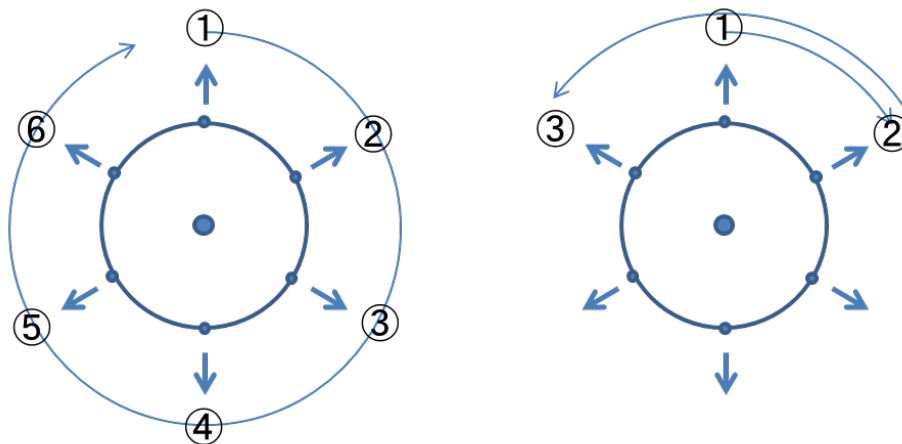


図 2-4-3-1-1 指向性制御アルゴリズム (左) 全周探索法 (右) 隣接探索法

後で述べるように、アンテナの指向性の切替速度自体は  $1\mu\text{s}$  を下回ることが出来る。しかし自動的に探索して最大受信電力の方向を選択するには、回路が受信電力（RSSI）を正しく検知して判断する時間が必要であり、回路の時定数の影響を受ける。また一方、切替速度を遅くすると通話品質に大きな影響を及ぼす可能性がある。従って、RSSI の取得のタイミングや切替速度、及び回路の時定数などは最適化の検討を要する課題であるが、今回の評価実験においては切替制御用の三次試作基板を用い、時定数等は動作検証を優先してマージンをとった設定値のままで評価を行った。

なお実利用シーンのシナリオとしては、送信時は基本的にオムニで送信し、受信時に指向性探索を行うことを想定している。アナログ通信の場合には、最大受信電力の探索はユーザの判断により任意のタイミングで行う。デジタル通信でもこのやり方を用いる事は差支えない。しかし、デジタル通信の場合には、特定のシンボルタイミングや、誤り訂正機能で訂正できるシンボル数の範囲内で指向性切替を行えると、実質的に通話品質に影響を及ぼさないようにすることが出来る可能性がある。まだアイデア段階に留まるため実験検証を行うまでに到達しなかったが、今後の検討すべき課題である。

### 2-4-3-2 基板実装

三次試作基板を作成した。基板の外観を図 2-4-3-2-1 に示す。



図2-4-3-2-1 三次試作基板の外観

アンテナ制御部においては二次試作基板では図2-4-3-2-2のようにフォトカプラでアンテナの電子スイッチを制御していたが、寄生容量等の問題でアンテナの切替時間が約5us程度までしか短縮できなかった。

また、図2-4-3-2-3に示すように、アンテナ切替時にオーバーシュートやアンダーシュートが発生し、アンテナ制御ICの定格を超える電圧が瞬間的にかかることがあった。

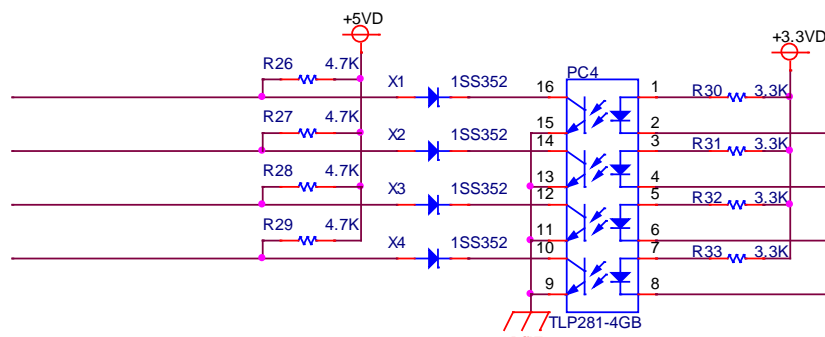


図2-4-3-2-2 二次試作基板のアンテナ制御回路

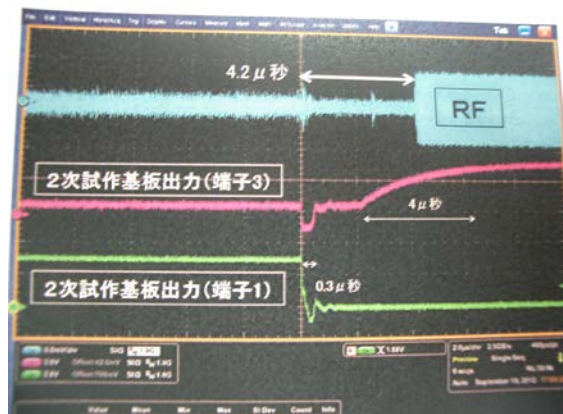


図2-4-3-2-3 二次試作基板のアンテナ制御タイミング (制御ケーブル接続)

このため、三次試作基板では、図2-4-3-2-4のようにアンテナ制御部にICを使用することで切替時間が約1usを切る事ができた。また、図2-4-3-2-5に示すようにオーバーシュートやアンダーシュートの発生も抑える事ができた。

なお、二次試作基板ではフォトカプラを使うことで、外来のノイズや静電気等から回路を保護していたが、三次試作基板ではICに変更したことで、サージアブソーバと抵抗による保護回路を追加した。

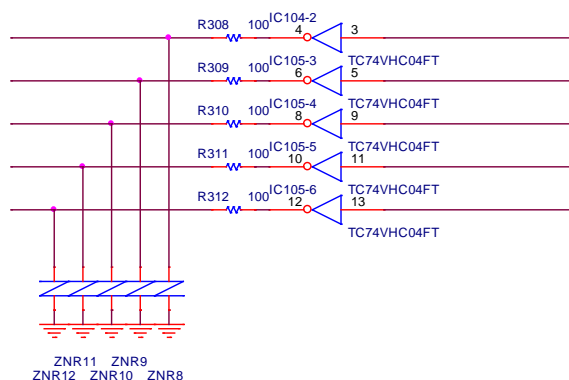


図2-4-3-2-4 三次試作基板のアンテナ制御回路

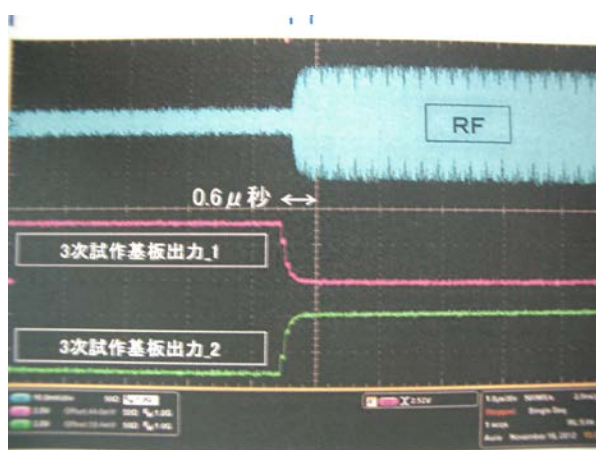


図2-4-3-2-5 三次試作基板のアンテナ制御タイミング（制御ケーブル接続）



### 2-4-3-3 アンテナとの結合試験、基本特性評価

#### (ア) 基地局アンテナ

基地局アンテナと三次試作基板を結合し、電波暗室内にて基本特性の評価を行った。実験風景を図 2-4-3-3-1 に示す。評価は、送信アンテナを 150MHz 帯ログペリアンテナとし、信号発生器を用いて  $f=151.89\text{MHz}$  : +10dBm、CW、FM シングルトーン 1KHz、デビエーション 3.5KHz、正弦波の条件で送信を行い、車載局アンテナで受信して、アンテナ切替特性、指向性制御、通話音質の評価を行った。

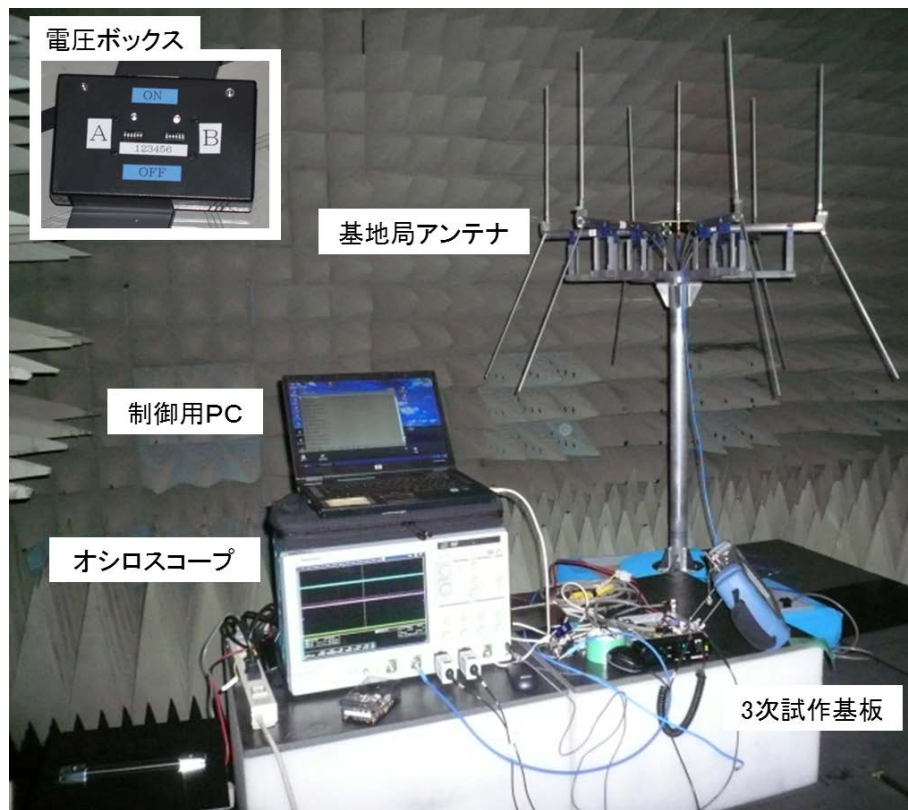


図 2-4-3-3-1 基地局アンテナと三次試作基板の結合試験風景

測定結果として得られた、セクタの切替応答を図 2-4-3-3-2 に示す。ここではセクタ 1 とセクタ 4 の切替を行った。三次試作基板の出力とほぼ同時にアンテナの受信強度は変化し 0.7~0.9 $\mu\text{s}$  で切替が完了していた。当初目標を 10 $\mu\text{s}$  以下としていたために、一桁以上の余裕をもって高速の切替速度を達成していることを確認した。

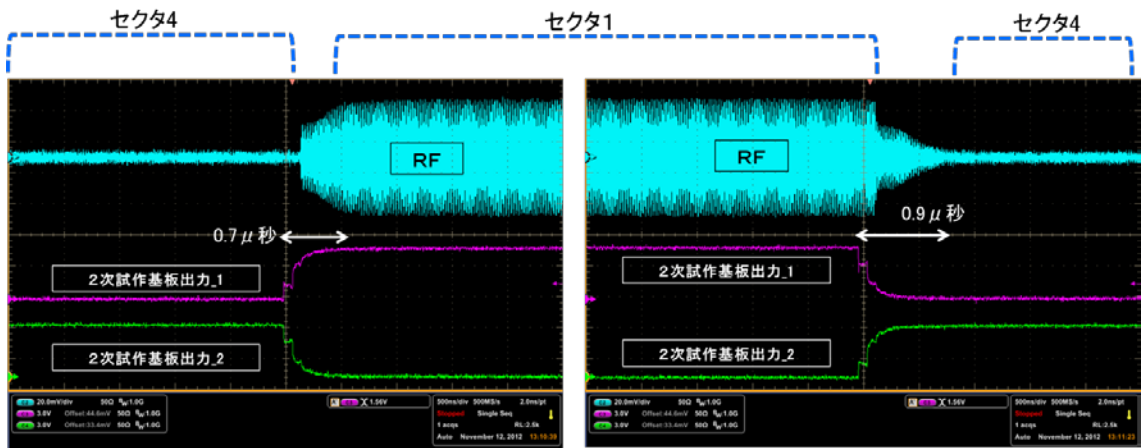


図 2-4-3-3-2 電子スイッチによるセクタの切替応答

基地局アンテナの指向性切替は、電子スイッチによるパラサイト素子の電気長制御によって行なわれる。図 2-4-3-3-3 に結果を示す。左図が 360° 6 方向を周回して最大利得方向を選択する全周探索方式であり、右図が 60° の隣接セクタを交互に評価してその中の最大方向を探索する隣接探索方式の結果である。両方法ともに非常にきれいな受信強度変化を示しており、安定して最大利得方向を捕捉できていることが確認できた。なお、今回は初期評価ということでセクタ切替の間隔を 5ms とマージンを長くとっているが、図の RF 受信強度の急峻な応答を見ればセクタの切替は 1ms 程度以下でも十分に適応可能であることが想像できる。

通話品質については全周探索方式ではポツポツという弱い断続音が聞こえた。おそらく全周する際に受信感度が最低になるセクタを通過するため、音が途切れているように聞こえるものと思われる。セクタ切替時間も関連しているはずであり、今後、セクタ切替時間の短縮化は検討すべき課題である。一方隣接探索方式では受信電力の変化が大きくないことから、そのような断続音は聞こえなかった。

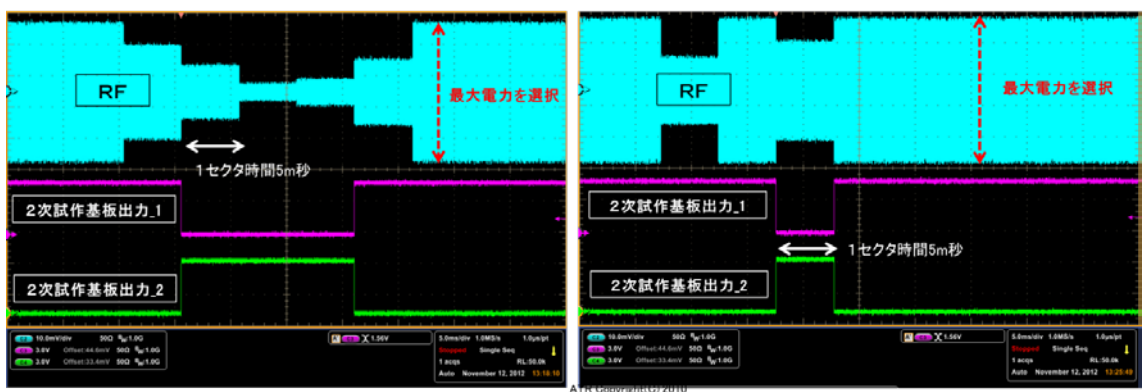


図 2-4-3-3-3 基地局アンテナのセクタ自動切替 (左) 全周探索方式 (右) 隣接探索方式

### (イ) 車載局アンテナ

車載局アンテナと三次試作基板を結合し、基地局アンテナと同様に、電波暗室内にて基本特性の評価を行った。実験風景を図 2-4-3-3-4 に示す。評価は、送信アンテナを 150MHz 帯ログペリとし、信号発生器を用いて  $f=151.89\text{MHz}$  : +10dBm、CW、FM シングルトーン 1KHz、デビエーション 3.5KHz、正弦波の条件で送信を行い、車載局アンテナで受信して、アンテナ切替特性、指向性制御、通話音質の評価を行った。

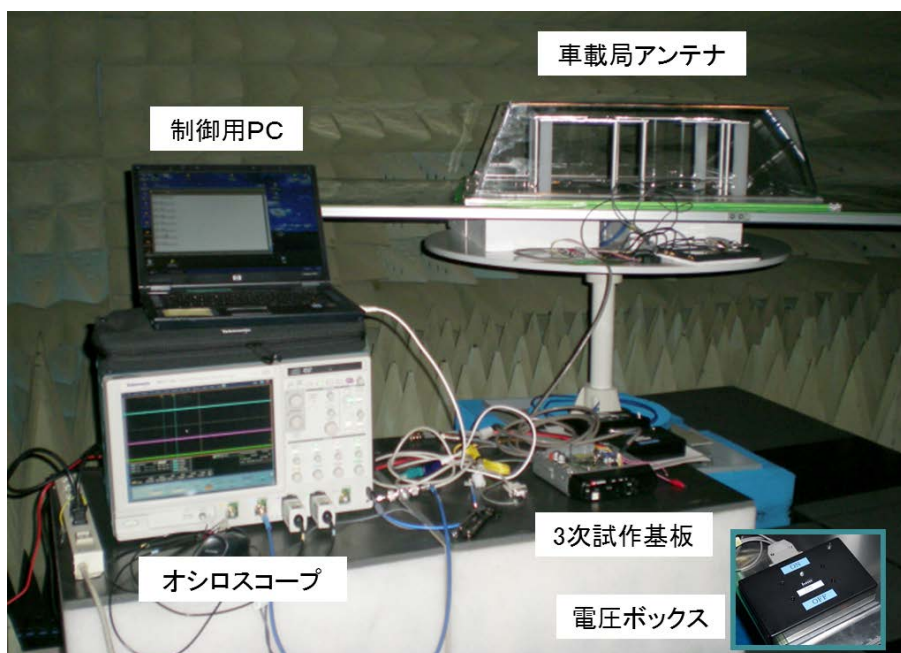


図 2-4-3-3-4 車載局アンテナと三次試作基板の結合試験風景

測定結果として得られた、セクタの電子スイッチのみによる切替応答を図 2-4-3-3-5 に示す（この評価では位相制御は行っていない）。ここではセクタ 1 とセクタ 5 の切替を行った。三次試作基板の出力とほぼ同時にアンテナの受信強度は変化し 0.4~0.6 $\mu\text{s}$  で切り替わりが完了していた。当初目標を 10 $\mu\text{s}$  以下としていたために、一桁以上の余裕をもって高速の切替速度を達成できることを確認した。



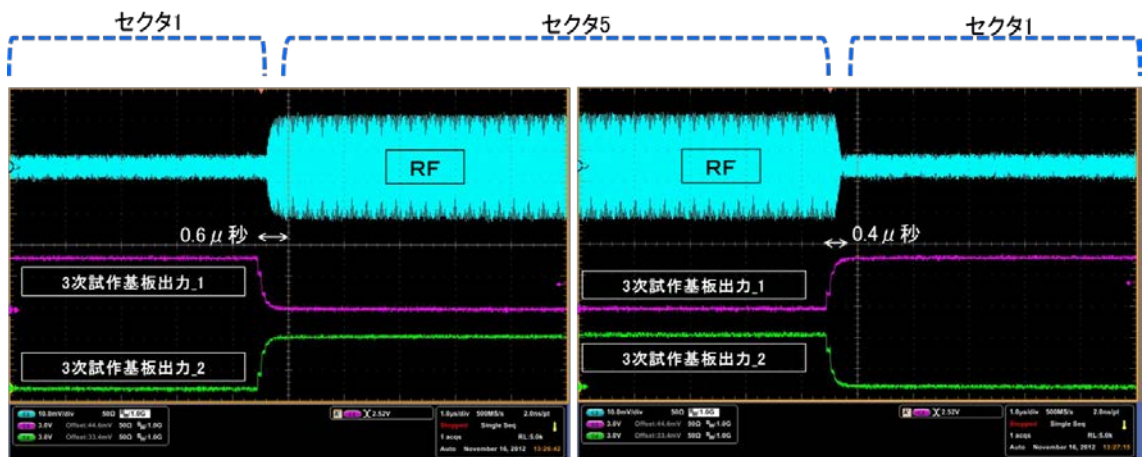


図 2-4-3-3-5 電子スイッチによるセクタの切替応答

車載用アンテナの指向性切替は、電子スイッチによるパラサイト素子の電気長制御と同時に、給電素子の位相制御を行う。同じ実験系を用いてセクタの自動探索—最大受信選択のテストを行った。図 2-4-3-3-6 に結果を示す。左図が 360° 8 方向を周回して最大利得方向を選択する全周探索方式であり、右図が 45° の隣接セクタを交互に評価してその中の最大方向を探索する隣接探索方式の結果である。今回は三次試作基板の位相制御のスイッチに同軸スイッチを用いていたことから位相切替 10ms 程度の時間を要しており、このために RF 受信強度が過渡的に変化の様子が観測されているが、最大利得方向はいずれのセクタ選択方式でも適切に動作し、最大利得を捕捉していた。今後位相制御の応答速度を高速化する必要はあるものの、セクタの自動選択機能は期待通りの動作を行うことが確認できた。通話品質に関しては、基地局の場合と同様、全周探索方式ではポツポツという弱い断続音が聞こえ、隣接探索方式ではそのような断続音はほとんど確認できない程度に留まった。

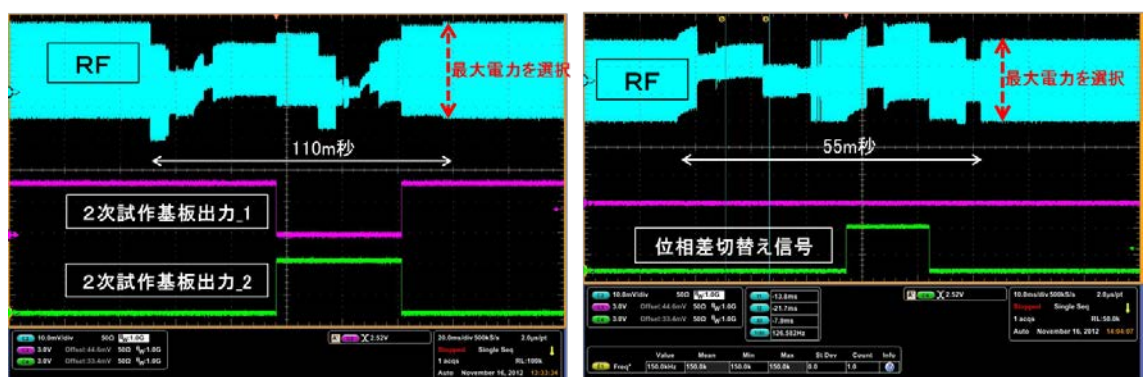


図 2-4-3-3-6 車載局アンテナのセクタ自動切替 (左) 全周探索方式 (右) 隣接探索方式

## 2-4-4 屋外実験

### 2-4-4-1 無線機の実験局免許

アンテナの特性は通常電波暗室で測定を行う。これは日常の空間では測定に使用する以外の電波が存在することや障害物が数多く存在することで、本来のアンテナ特性が測定できないためである。しかし実際に運用するのは日常の空間であるため、アンテナの指向性制御は電波暗室以外の場所でも正しく機能しなければならない。このため屋外でのアンテナ試験を実施する必要があるが、屋外で電波を発射すると他の無線局への影響が避けられないため、たとえ試験であっても総務省より無線局免許を取得し、電波発射の許可を得る必要がある。

そこで開発した無線機を調整し、無線局免許を取得できる状態に仕上げ、無線局の予備免許を取得した。取得した無線局予備免許通知書を図 2-4-4-1-1 に示す。



無線局予備免許通知書	
申請者の氏名	株式会社 〇〇〇
申請者の住所	〒〇〇〇〇〇〇 〇〇市 〇〇区 〇〇丁目 〇〇番 〇〇号
無線機の種別	試験用無線機
試験項目	無線機の性能試験
免許の有効期限	〇〇年 〇〇月 〇〇日
試験の目的	無線機の性能試験
通信事項	無線機の性能試験に関する事項
送信の電圧	電圧入出力の無線機
試験の日時	〇〇年 〇〇月 〇〇日 〇〇時 〇〇分
無線局の設置場所	無線局の設置場所は特設無線局
電波の形式、呼称及び空中電圧	電波の形式： 〇〇MHz 呼称： 〇〇 空中電圧： 〇〇dBm
試験の場所	無線局の設置場所
試験の結果	無線機の性能試験の結果は〇〇である。

図2-4-4-1-1 無線局予備免許通知書

屋外でのアンテナ試験は予備免許を取得した上で、試験電波の発射届けを申請して行った。

### 2-4-4-2 屋外実験評価

#### (a) 実験系の構成

屋外環境における受信状態や送信アンテナの追尾などの基本評価を行った。屋外実験は測定器の電源確保や操作性を考慮し、ATR のグラウンドで行った。評価条件等を以下に記す。

使用機材： 基地局アンテナ、三次試作基板、送信機、デジタルオシロスコープ

実験条件： 車からモノポールアンテナでシングルトーン FM 変調を送信、出力 1mW

基地局アンテナを中心にして半径約 7m の位置で車を周回  
(時速は大凡 4km/h 程度)

評価内容： ①基地局アンテナのセクタ追尾機能（制御は全周回・自動追尾）  
②通話品質

実験風景を図 2-4-4-2-1 に示す。グラウンドの平坦な地面に基地局アンテナを設置し、送信機を乗せた車で周囲を周回した。送信は基本評価のためにモノポールアンテナとした。また受信側ではデジタルオシロスコープで受信状況の確認を行った。



図 2-4-4-2-1 屋外実験の風景

実験の結果、走行する自動車に向けて基地局のセクタは正しく向き、自動追尾することを確認できた。時々、セクタの選択を誤る時があったが、すぐに最大利得方向に修正された。図 2-4-4-2-2 (右) にその状況を示す。オシロスコープの波形が画面中央付近で一旦弱くなっているが、すぐに復帰していることが見て取れる。セクタ選択誤りの原因の一つは送信出力が 1mW と弱かったことにあるが、もう一つは屋外環境に起因するノイズによるものと考えている。この実験環境ではグラウンドの向い側の方向から図 2-4-4-2-2 (左) に示すような 100Hz ほどのノイズが到来していた。これによる妨害でセクタ選択を誤ったものと想像している。逆にそのような妨害波でセクタを誤る事があっても妨害波の少ない方角では復帰することがこれから見て取れる。アンテナの利得はセクタ指向方向以外では低下するので、他の方向からの干渉波を低減する効果がある。これが効果的に作用したと推定している。通話品質については、暗室内実験と同様、ポツポツと

いう断続音がセクタ制御に伴って確認できた。

期間中に行った屋外実験はこれで終了した。

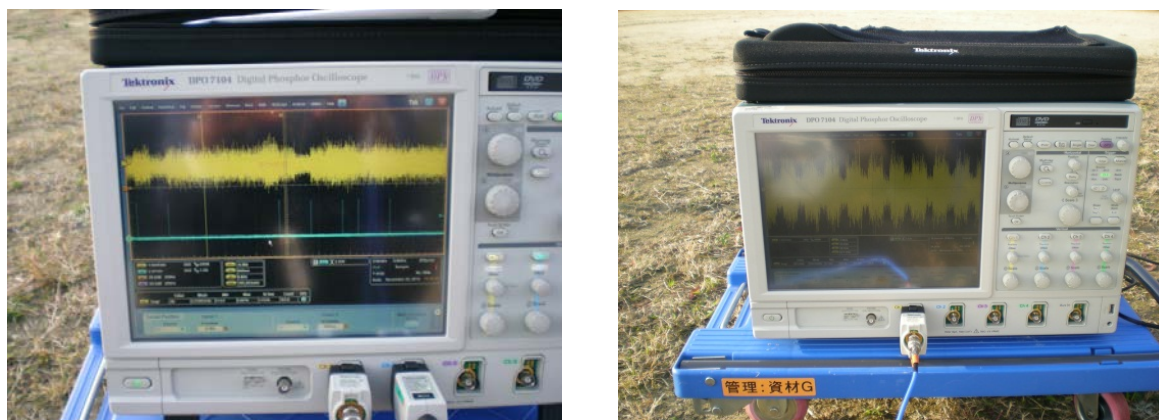


図 2-4-4-2-2 (左) セクタ選択エラーと復帰の様子 (右) 観測された妨害波

#### 2-4-5 成果のまとめと実用化における課題

本開発で目標とした、150MHz 帯用基地局用 1 給電 6 パラサイトアンテナ及び 150MHz 帯用車載局用 2 給電 2 パラサイトアンテナについては、設計の最適化と外注による加工精度の高い試作機を作製することにより、利得や半値角については当初目標をクリアできた。表 2-4-5-1 に当初の目標性能と達成結果を示す。特に基地局アンテナの利得については、目標性能を大きく上回る+8dBi を達成した。

また同表には受託後に自主検討した 450MHz 帯アンテナの到達値も掲げておく。性能目標は 150MHz 帯アンテナと同様とし、内製の一次試作品で得た達成値を記す。内製試作につき加工精度の問題から基地局アンテナの利得の達成値 (dBi) は 150MHz 用に比べて若干劣っているが、設計を最適化すれば 150MHz 用と同等の性能を達成することは十分に可能と考えている。逆に車載局アンテナについては、450MHz 用の方がアンテナ高の制限が緩くなることや相対的に地板を大きくとることができるために、150MHz 用よりも高い利得性能を達成する事が可能と考えている。

なお許容送信電力は電子スイッチの動作保証耐電力で決まるが、今回は東日本大震災の影響で部品の品薄状態が長く続き、十分なマージンを持った部品を選定することが出来なかったために、基地局アンテナのシミュレーション評価では一部未達となった。また車載局アンテナではシミュレーション計算の問題により、評価しうる結果が得られなかった。但し、実験評価においてはこれらのデバイスは問題なく動作し、1 $\mu$ s を下回る高速の指向性切替を達成している。そのために動作保証耐電力は、商用化時のコスト等を含めたデバイス選定の課題と整理することにした。450MHz 帯アンテナについては、設計寸法が異なるためにパラサイト素子に印加される電力は異なると考えられるが未評価である。



表 2-4-5-1 目標性能及び達成値

項目	目標性能	達成値
150MHz 基地局用可変指向性アンテナ		
アンテナ利得	+5dBi	+8.0～8.1dBi
半値角	90°	91～96°
指向方向	6 方向	6 方向
許容送信電力	25W	ほぼクリア (※1)
150MHz 車載局用低背高型可変指向性アンテナ		
アンテナ高	20cm	20cm
アンテナ利得	+4.5dBi	+4.6～5.3dBi
半値角	90°	95～119°
指向方向	8 方向	8 方向
許容送信電力	10W	— (※2)
450MHz 基地局用可変指向性アンテナ (内製一次試作品)		
アンテナ利得	+5dBi	+5.2～5.7dBi
半値角	90°	88～96°
指向方向	6 方向	6 方向
450MHz 車載局用低背高型可変指向性アンテナ (内製一次試作品)		
アンテナ高	20cm	7cm
アンテナ利得	+4.5dBi	+5.0～6.9dBi
半値角	90°	77～165°
指向方向	6 方向	8 方向

※1：今回使用した電子スイッチでは指向セクタの隣接でオーバーするが、電子スイッチを大電力仕様にすればクリアする

※2：シミュレーションに問題があり、判断は未定

可変指向性アンテナ及び指向性制御における今後の課題は大凡 2 点に集約される。

1 点目は、実運用を想定した本技術の適合性評価と課題の精査・対策である。今回の研究開発の中では、市街地での通信特性評価、通常の法定速度で走行する車両の車載局との通信特性や指向性制御などの評価が行えていない。また、指向性制御アルゴリズムに起因する断絶音やノイズ量等の通信音質評価も十分に行えなかったのが実情である。そのため、実運用時を想定した特性評価をさらに行い、長短所や技術課題をより明確にする必要がある。またそのような実証実験を通して、総合的な適用性を明らかとし、新たに判明する課題については十分に対策を行う必要がある。

2 点目は、実用化にむけた開発である。今回の試作機はアンテナ利得や指向性などの技術目標をクリアし、かつ屋外実験で性能評価が可能なレベルを目標として作製したものであり、基本技術を確立したレベルに留まる。そのため、実運用時に重要となる、規格の順守、耐風性、耐候性、耐久性、振動耐性、装着性、また商用化時のコスト面などを解決していく必要がある。

## 第3章 全体総括

### 3-1 研究開発成果

本研究開発では、全3年度に渡る開発計画において、各サブテーマ技術開発の改良・高度化を行うと共に、第三次試作無線機と基地局用および車載局用の可変指向性アンテナを製作し、各要素技術の試験の他に、無線機とアンテナを組合せてのシステム評価試験を行った。システム評価試験は電波暗室および特定実験局取得に向けた無線局予備免許を取得してのアンテナ及び無線機調整試験として屋外で実施し、最終的にほとんどの開発目標を達成した。

### 3-2 研究開発後の課題・事業化計画

今後は事業化を目指して技術の改良とビジネスモデルの構築を進めていく。

具体的には、無線機では受信エリアの拡張、復調動作の安定化、スプリアス性能や歪率の改良等の性能向上と、耐環境性能等の実用性の確保に注力する。アンテナ制御に関しては、通話品質や実環境下での指向性制御特性等を検証すること、実運用に向けての規格の順守、耐久性振動耐性、コスト低減等の検討を行う。

事業性については、アナログとデジタル共用業務用無線の動向は、150MHz帯の列車無線システムにおいて顧客の要求が出てきた。アナログ/デジタル共用無線で更新していき、すべての無線機がアナログ/デジタル共用無線に更新されたときに、ソフトウェアでデジタルに切り替えることで更新コストを削減できることが本無線機のメリットである。都心の鉄道会社では、相互乗り入れを行っており、列車無線の規格の統一を目指しているが、この動きはより広い地域の鉄道会社にも広がるものと予想する。この規格に合わせて、2014年4月の製品リリースを目指して製品化を急ぐ。

また、当面電鉄会社、電力会社をメインのターゲットとしてアプローチを行っていくが、本装置はソフトウェアで変調方式を変更することによりデジタル無線としても利用できるため、現在市場で利用されている変調方式を入れることでデジタル無線機として販売も行えるよう、独自開発を進めていく。

この報告書には、委託業務の成果として、産業財産件等の対照となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産件等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とする。ただし行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成 11 年法律第 42 号）に基づく情報開示請求の対象の文書になります。

この印刷物はリサイクル適正を満足するものです