

## 地上デジタル放送の受信障害に関する調査研究

地上デジタル放送受信障害研究委員会

代表研究者	宮澤 寛	(財)電波技術協会 常務理事
共同研究者	前田 幹夫	NHK技術局 送信・視聴者技術センター担当部長
"	南 圭	NHK技術局 送信・視聴者技術センター副部長
"	高山 享	日本デジタル放送システムズ 技師長
"	伊藤 士郎	(財)電波技術協会 特別顧問
協力者	山口 真吾	総務省情報通信政策局 放送技術課 課長補佐
"	渋谷 一彦	NHK放送技術研究所(システム)主任研究員
"	小倉 敏彦	(社)日本民間放送連盟企画部 主幹
"	小原 利一	(社)電子情報技術産業協会 受信システム事業委員会委員長(DXアンテナ株式会社)
"	橋口 信正	(社)電子情報技術産業協会 受信システム事業委員会副委員長(マスプロ電工株式会社)

### 目 的

地上デジタル放送は、基本的にはアナログ放送より様々な受信障害に強くなっている。しかし、受信障害が発生するとデジタル放送に特有なクリフエフェクト現象があるため、受信画面から原因が判断できず、その改善方法もまだ明確ではない。そこで、電波伝搬状況を含めてデジタル放送特有の受信障害の有無を調査し、受信側での改善手法を研究・開発する。さらに、改善手法の適用による長期安定性を調査し、地上デジタル放送の安定受信に向けた指針を示す。

### 方 法

ここでは、地上デジタル放送の受信障害についての研究として、表1に示す学識経験者による「地上デジタル放送受信障害研究委員会」を組織し、研究を行った。当協会の新百合ヶ丘事業所で地上デジタル放送の受信不良現象の状況を確認したことが、研究の動機となって研究を進めた。その概要は以下のとおりである。

#### (1) 受信不良の原因推定

受信電界強度、混信波、反射波等の各要素を受信不良の原因項目として考え、特に反射障害の可能性について理論検討を行った。

#### (2) ガードインターバル越え反射波障害の確認調査

当協会では受信不良を確認した結果、上記の受信不良の原因の中でも、これまで確認されていなかった遅延時間がガードインターバル(以下GI)を越える山岳反射波による受信障害の実例を確認する調査を行った。SFN障害に関しても調査した。

#### (3) 山岳反射波による受信障害の改善

調査において、受信アンテナを含む受信システムの性能差による受信障害の発生状況を分析した。

#### (4) 山岳反射波の反射源の探知

前項の調査で、山岳反射波による受信障害の可能性が得られた。遅延時間の測定結果から送信点と受信点を焦点とする楕円軌跡上に山岳が該当することが確認出来たので、さら

に、反射波の到来方法を測定して、山岳の山肌が反射源であることを検証した。

(5) S F Nによる受信障害例

S F Nは、複数の中継局が同一周波数を用いることで、効率的に放送ネットワークを構成できるが、複数局の電波が受信される場合には、それらの遅延時間がガードインターバルを越えないことが必須である。しかし、異常伝搬でこの条件を満足できない例を調査して、改善の可能性を調査した。

(6) 放送エリア内での受信障害の改善手法の開発

放送エリアであっても、地形やビルの影響を受けて一部のチャンネルが受信不可となることがある。その改善の可能性を調査した。

表 1 研究体制

	氏 名	所 属・役 職
委 員 長	前田 幹夫	N H K技術局 送信・視聴者技術センター担当部長
客 員	山口 真吾	総務省情報通信政策局 放送技術課課長補佐
委 員	南 圭	N H K技術局 送信・視聴者技術センター副部長
委 員	渋谷 一彦	N H K放送技術研究所（システム）主任研究員
委 員	小倉 敏彦	(社)日本民間放送連盟企画部 主幹
委 員	小原 利一	(社)電子情報技術産業協会受信システム事業委員会 委員長(D Xアンテナ株式会社)
委 員	橋口 信正	(社)電子情報技術産業協会受信システム事業委員会 副委員長(マスプロ電工株式会社)
委 員	高山 享	日本デジタル放送システムズ 技師長
委 員	伊藤 士郎	(財)電波技術協会 特別顧問
委 員	宮澤 寛	(財)電波技術協会 常務理事
事務局長	松下 信哉	(財)電波技術協会 技術本部長
事務局員	小松 章夫	(財)電波技術協会 部長
事務局員	山田 秀一	(財)電波技術協会 主任
事務局員	成田 文郎	(財)電波技術協会 主任

## 結 果

### 1. 新百合ヶ丘事業所での山岳反射波の把握

当協会の新百合ヶ丘事業所は、東京タワー方向が丘陵地のため地形による遮蔽を受けており、さらに周辺の高層マンションなどのビルの影響を受けて、テレビ放送の受信状況が良好ではなかった。地上デジタル放送についても、全チャンネルの受信が困難な地域である。

図1は、新百合ヶ丘事業所で地上デジタル放送のch 21 受信波の遅延プロファイルを測定した結果である。遅延時間100  $\mu\text{s}$ 以内の反射波が、多数測定されているが、ガードインターバル(以下GI)126  $\mu\text{s}$ を越えて250  $\mu\text{s}$ までの反射波も多数受信されている。その他のチャンネルも同様に、GIを越える反射波が測定されている。

図1のGI越え反射波の遅延時間を4つの範囲にブロック分けして、それらの遅延時間範囲で発生する可能性のある範囲を送信点と受信点を焦点とする楕円軌跡で色分けして、図2に示した。同図には、受信点からの見通しの地域を緑色で示したが、いずれの地域とも標高500mから1700m程度の山岳地域の山肌になっている。なお、同図にはこれらの山岳の名称を示した。

これらの結果からGI越えの反射波が遠方の山岳からの反射波によって受信不良になっていることが推測された。

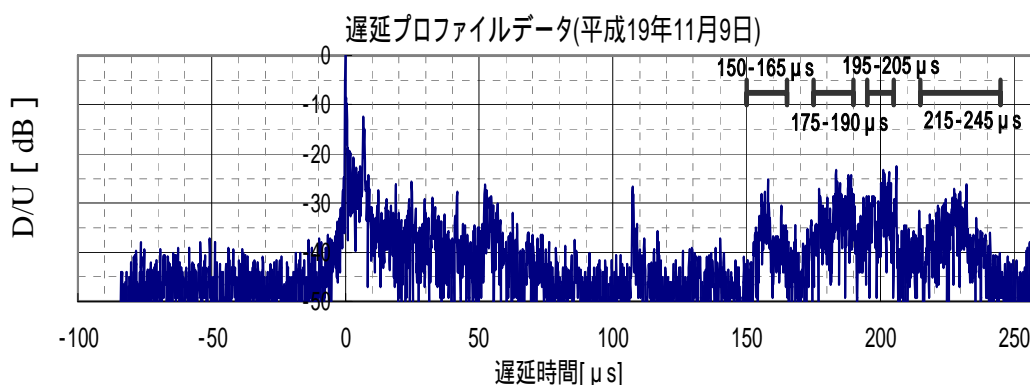


図1 新百合ヶ丘事業所での受信波の遅延プロファイル(ch.21)の例

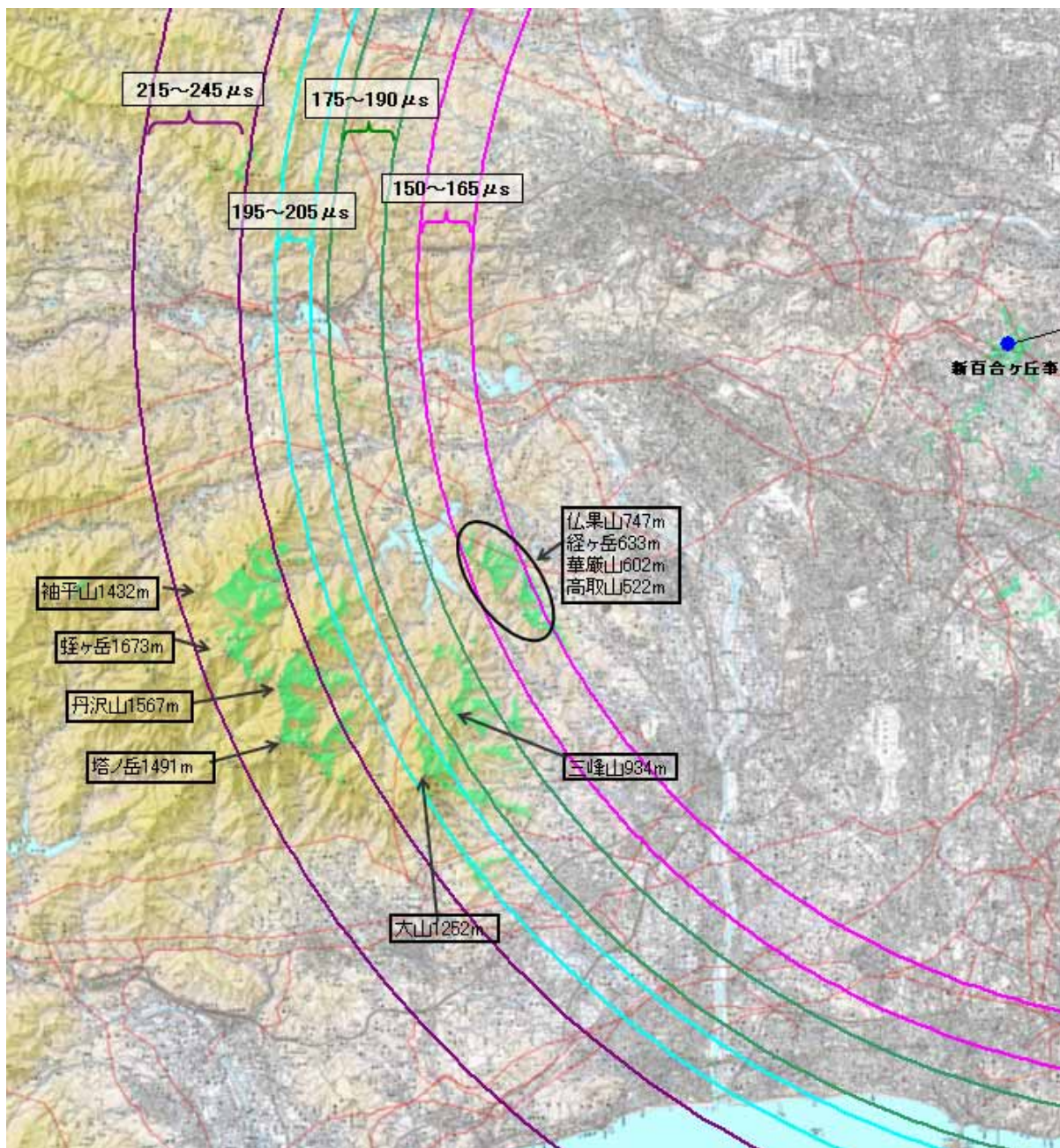


図2 新百合ヶ丘事業所への遅延波の発生場所・楕円軌跡図

: 新百合ヶ丘事業所から見通しの地域  
(カシミールで作成)

## 2. 粗い面大地からの反射波の理論検討

上記の調査結果から G I 越え反射波が受信不良の一因であると推測されたので、理論検討を行った。

凹凸等による粗い大地面からの反射波は一般に 2 つの成分から構成される。すなわち、入射波とコヒーレントな鏡面反射（スペキュラー）成分、および、振幅と位相がランダムに変動する拡散成分である。この問題は C C I R (現 I T U - R) でも議論されてきた。

粗面大地の鏡面反射係数  $R_s$  は、

$$R_s = \rho_s R$$

ただし、 $\rho_s$ : 逓減係数

$R$ : 滑らかな大地の反射係数

と表せる。

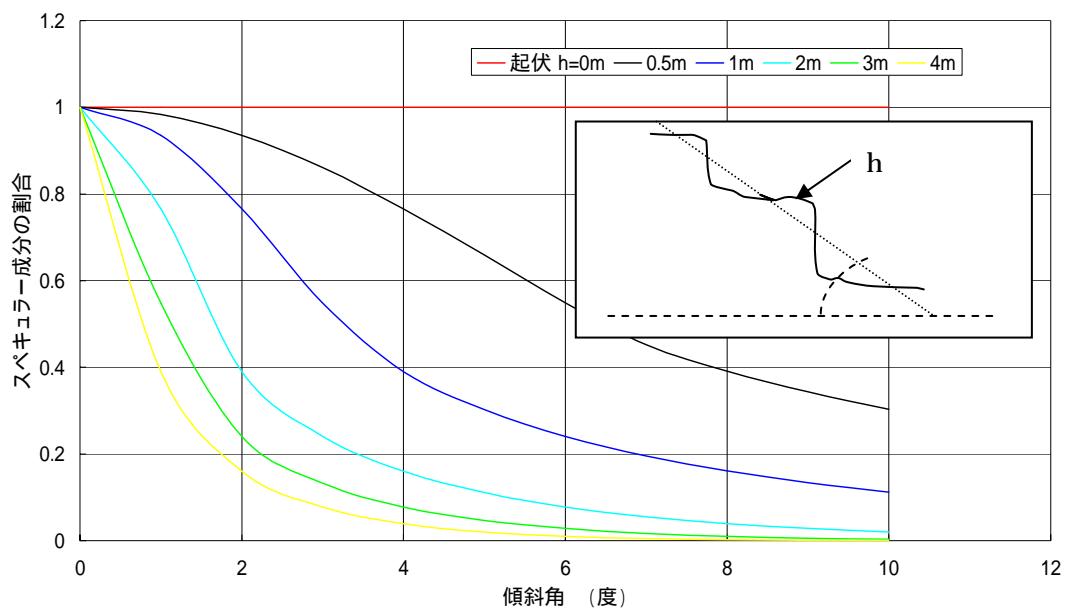


図3 逓減係数の周波数500MHzでの計算例

図3は、山肌に見立てた斜面上に電波が水平方向に入射する時の逓減係数、すなわちスペキュラー成分割合を示すが、 $h=2\text{ m}$ 以上とすると、ほとんど拡散成分のみが山肌からの反射波と推測できる。

この推定とNHK技研が行ったUHFパルス変調波による山岳反射実験報告<sup>文献[1]</sup>から、次式で表すことができる。

$$\frac{E_r}{E_0} [\text{上限, dB}] = -23 - 15 \log_{10} d_2 [\text{km}]$$

$E_r$  は、受信アンテナ位置での反射波の電界強度、 $E_0$  は山肌を照らす自由空間値、 $d_2$  は山肌から受信点までの距離である。

送信点および受信点ならびに山肌が、図 4 に示すような配置例にある時の受信点での反射波の D/U 比は、希望・妨害波の比に受信アンテナの弁別度を考慮すると、

$$\frac{D}{U} = 46 - (L_d - L_i - L_a) \quad (\text{dB})$$

ただし、 $L_d$ : 送信 - 受信点間伝搬損 (dB)

$L_i$ : 山肌 - 受信点間伝搬損 (dB)

$L_a$ : 受信アンテナの妨害波弁別度 (dB)

で表すことができる。山肌の標高が高いと山肌からの伝搬損失が、希望波の伝搬損失より少ないことがあるので、問題となる D/U 比の値になる可能性がある。

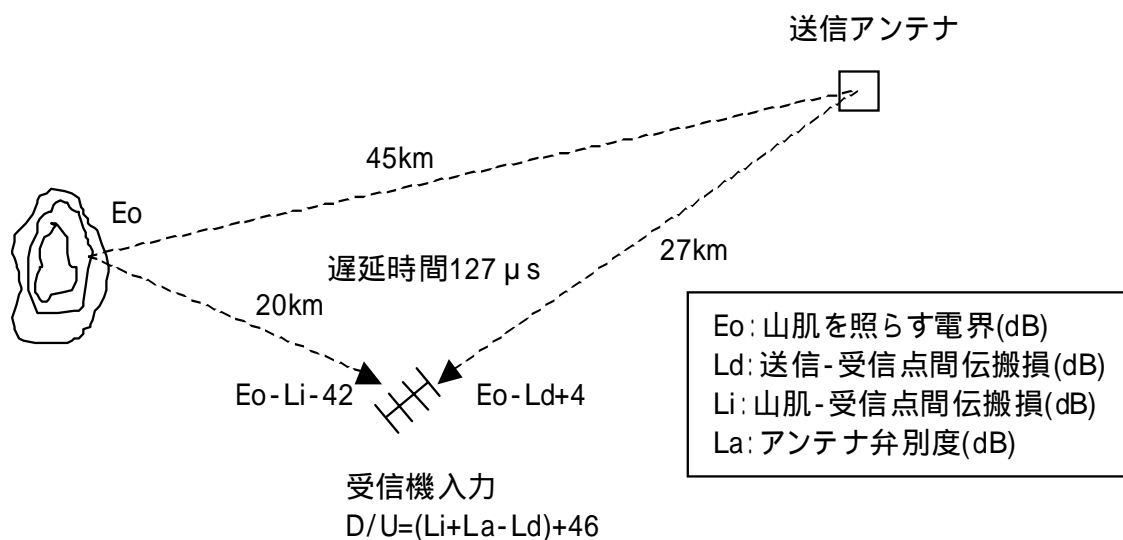


図 4 山肌反射波の D/U 比の推定

### 3. 地上デジタル放送の受信不良状況調査

山岳からの反射波が受信不良を発生させる可能性があることが明らかになったので、可能性のある地域を調査することとした。

図 5 に示すように、アンテナポール付きの測定車に測定機材を搭載して、事前に電波伝搬シミュレーションソフト「ミスターDENPA」を使用して東京都西部および神奈川県内の電界強度が 50 ~ 60 dB  $\mu$ V/m となる地域を選定して、図 6 に示す地点で調査した。希望波方向が地形の影響を受けて電界強度が低下していて、山岳方向が見通しである。

受信アンテナは、14 素子と 20 素子の八木アンテナを標準として、高性能アンテナとして 30 素子のアンテナを用いた。電界強度が低い地域であるため、標準家庭用と低 NF 家



庭用のブースタをアンテナと組み合わせて用いた。受信機は、地デジチューナ内蔵TV、チューナ内蔵録画機、外付けチューナを計5機種用いた。

表2は、調査地点が多摩地域での調査結果である。4種類のアンテナとブースタの組み合わせおよび5機種の受信機の結果は、他の地域も同様に、受信設備による差がでた。いずれの地域でも新百合ヶ丘事業所と同様の遅延プロファイルで、G I 越えの反射波が受信されていて、受信不良が発生する受信条件があった。図2と同様に遅延時間範囲で楕円軌跡を描くと、山岳反射と推測できた。

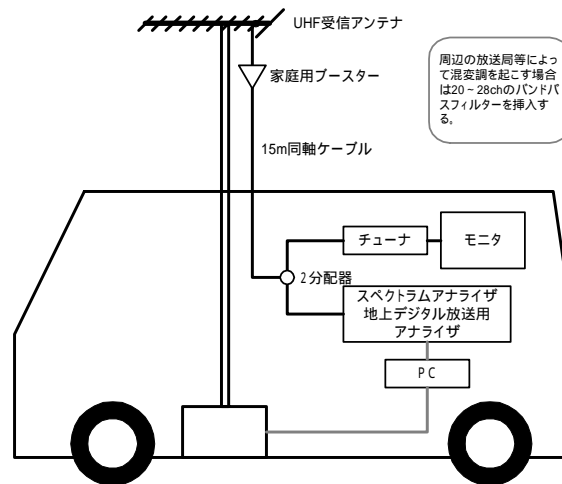


図5 地上デジタル放送の受信不良状況調査の測定系統

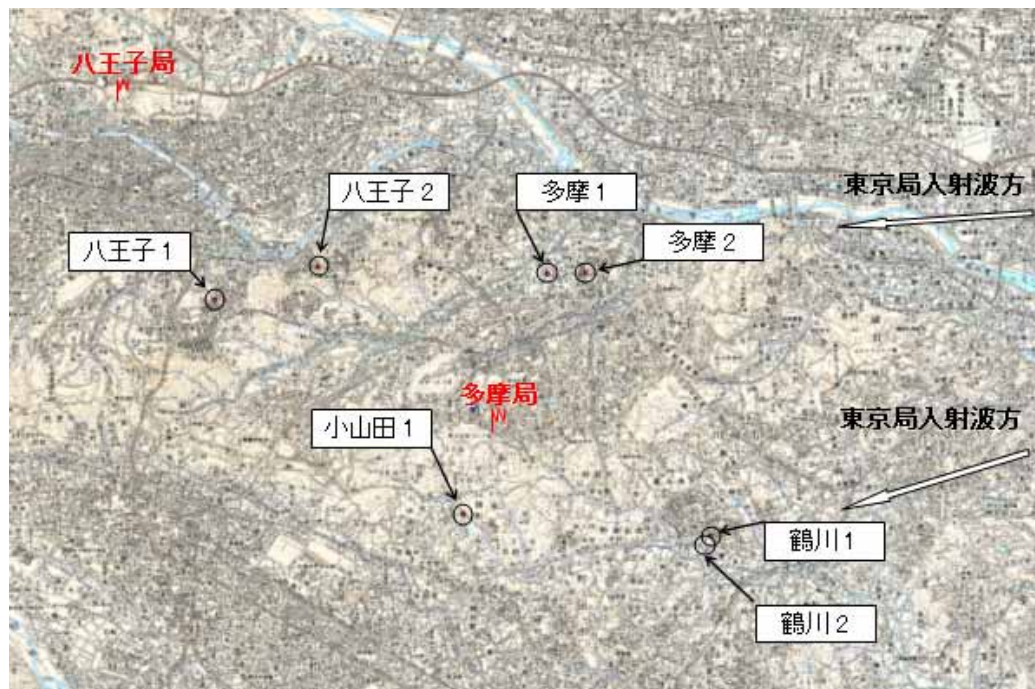


図6 調査地点の地図

表 2 多摩地区 No.1 の調査結果

受信設備	調査項目		27(DG)	26(DE)	25(NTV)	22(TBS)	21(CX)	24(EX)	23(TX)	20(MX)	28(放大)
ANT=14EL AMP=標準	電界強度 [dB(μ V/m)]		51.1	51.1	53.2	51.0	55.0	54.2	50.1	40.2	48.4
	端子電圧[dB(μ V)]		61.5	61.7	63.8	62.3	66.2	65.0	61.2	51.4	58.7
	M E R (dB)		10.5	15.3	11.5	4.8	***	11.6	12.1	10.2	15.2
	B E R *		5.E-02	5.E-02	2.E-02	6.E-02	4.E-02	3.E-02	6.E-02	7.E-02	1.E-02
	評価	受信機A	a	b	a	b	a	a	c	-	a
		受信機B	-	-	a	-	b	b	-	-	c
		受信機C	- 8e-2	- 8e-2	b 1e-3	- 8e-2	b 2e-2	b 2e-2	- 8e-2	- 8e-2	c 8e-2
		受信機D	c 3e-2	c 4e-2	b 1e-3	- 4e-2	c 3e-2	c 7e-3	- 4e-2	- 4e-2	c 1e-2
受信機E		a	b	a	c	a	a	-	-	a	
ANT=20EL AMP=標準	端子電圧[dB(μ V)]		63.0	62.9	66.1	64.0	67.2	66.3	62.8	51.4	61.0
	M E R (dB)		16.1	17.2	19.8	13.6	6.9	12.5	9.3	6.7	19.6
	B E R *		4.E-02	4.E-02	2.E-02	5.E-02	3.E-02	2.E-02	6.E-02	7.E-02	6.E-03
	評価	受信機A	a	a	a	a	a	a	b	c	a
		受信機B	-	-	a	-	b	a	-	-	a
		受信機C	- 5e-2	- 8e-2	a 2e-4	- 8e-2	b 5e-3	a 2e-3	- 8e-2	- 8e-2	a 2e-4
		受信機D	c 2e-4	- 4e-2	a 2e-4	- 4e-2	c 1e-2	b 3e-3	- 4e-2	- 4e-2	a 2e-4
		受信機E	a	a	a	b	a	a	b	-	a
ANT=30EL AMP=標準	端子電圧[dB(μ V)]		68.1	67.2	68.4	65.5	68.9	69.2	66.1	55.2	64.7
	M E R (dB)		11.8	13.0	23.5	13.0	19.4	24.0	18.3	15.8	21.5
	B E R *		2.E-02	1.E-02	4.E-02	3.E-02	1.E-02	1.E-02	2.E-02	3.E-02	6.E-04
	評価	受信機A	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		受信機B	a	a	a	-	a	a	a	a	a
		受信機C	a 2e-5	a 3e-4	a 1e-4	- 7e-2	a 3e-4	a 2e-5	b 2e-3	a 1e-4	a 8e-6
		受信機D	a 1e-5	a 4e-4	a 6e-5	c 2e-2	a 1e-4	a 5e-5	b 1e-3	a 4e-5	a 4e-6
		受信機E	a	a	a	a	a	a	a	a	a
ANT=30EL AMP=低 NF	端子電圧[dB(μ V)]		61.0	61.4	62.5	60.1	63.0	62.6	60.7	49.1	58.5
	M E R (dB)		13.7	16.9	17.5	3.1	20.9	15.7	11.1	13.9	20.6
	B E R *		2.E-02	2.E-02	1.E-02	3.E-02	1.E-02	1.E-02	2.E-02	5.E-02	2.E-03
	評価	受信機A	a	a	a	a	a	a	a	a	a
		受信機B	a	a	a	c	a	a	a	a	a
		受信機C	a 4e-5	a 8e-4	a 4e-5	c 4e-2	a 3e-4	a 8e-5	b 2e-3	a 8e-6	a 2e-6
		受信機D	a 6e-5	a 5e-4	a 2e-5	b 5e-3	a 2e-4	a 1e-4	b 3e-3	a 3e-6	a 4e-6
		受信機E	a	a	a	a	a	a	a	a	a

\*BERは、ピタビ復号前

## 4. 受信障害状況の分析

表 2 の調査結果を見ると受信機による差がある。そこで、各受信機の反射波の遅延時間特性(バスタブ特性と呼ぶ)を測定した。図 7 は、測定結果である。G I を越えた遅延時間で、受信可能な反射波DU比にかなりの差がある。この測定結果は、単一の反射波に対する特性であるが、実際の山岳反射波は、ほぼ連続的な遅延時間の複数である。そこで、複数の反射波の場合の特性を測定して見ると、複数波の場合は、各波の電力合成であることが確認できた。



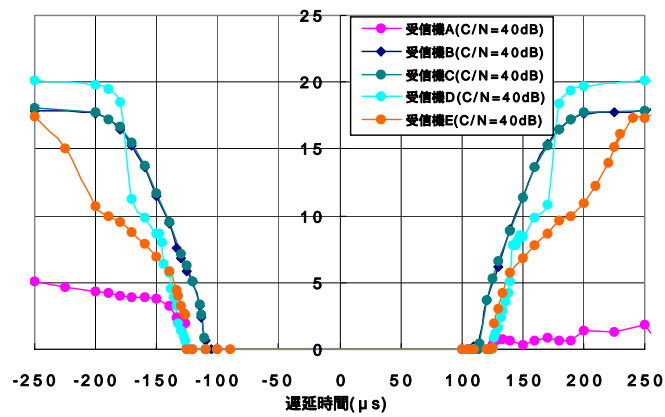


図7 地上デジタル放送受信機のパスタブ特性の調査結果

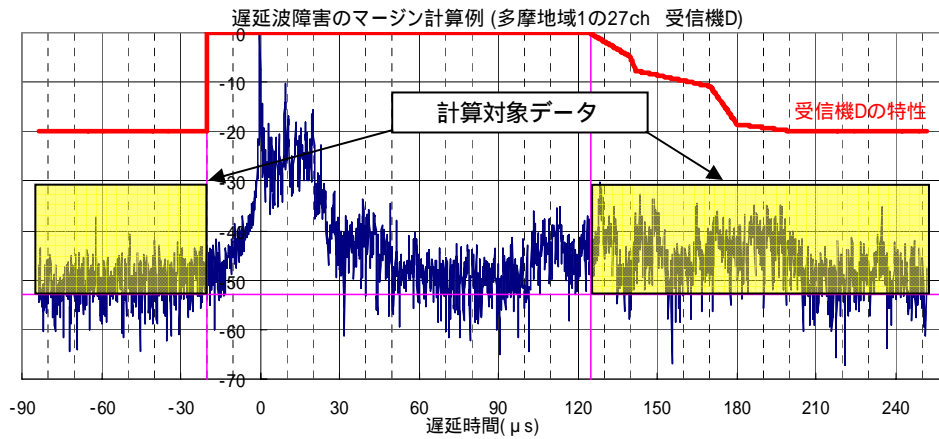


図8 遅延波障害の分析結果からの障害判定方法

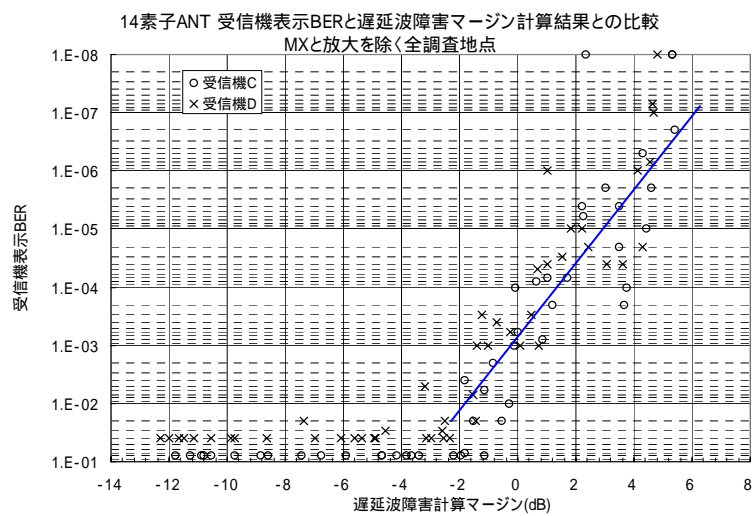


図9 遅延波障害の分析計算マージンと現地調査結果との比較

図 8 に示す様に各受信機のバスタブ特性と遅延波プロファイル実測データとの差を計算し、その電力合成した値を遅延波障害のマージンとした。この電力を A R I B の技術資料 T R - B 1 4 「地上デジタルテレビジョン放送運用規定」では「不良電力」として定義している。

計算の対象とする遅延時間範囲は、各受信機のバスタブ特性が 0 dB 以外の遅延時間とし、- 2 0 ~ 0  $\mu$ s を計算対象外、- 2 0  $\mu$ s 以下は回り込んで表示された 2 5 0  $\mu$ s 以上として処理した。（図 8 の黄色枠内）

以上の処理を行って、1 4 素子アンテナで受信機表示の B E R と遅延波マージンとを比較して図 9 に示した。一般的に地デジ受信の所要受信 B E R  $2 \times 10^{-4}$  の点は、約 1 d B となっており、マージンを適切に示している。

## 5 . 受信障害原因の反射波の発生源の調査

G I 越えの反射波障害が受信不良の原因であることが明確になったので、反射波の発生位置を探知する調査を行った。

図 1 0 に示す様に、受信アンテナを 2 基設置し、それらを混合し、一方の受信アンテナ（2 0 素子アンテナ）を希望局である東京方向に固定し、もう一方の受信アンテナ（3 0 素子アンテナ）を 1 0 度毎に 3 6 0 度回転させながら、遅延プロファイルを測定した。なお、遅延波の電圧が上昇しても希望波にプロファイルがロックするように、回転させる受信アンテナの出力にアッテネーターを挿入した。

各方向で測定した遅延プロファイルから遅延時間をブロックで区切って、その範囲内の総合 D / U を算出し、図 1 1（左下）に水平パターンとして示した。また、各ブロックの遅延時間に該当する楕円軌跡と受信点から見通しとなる場所を地図に示した結果、受信点から見通しの山肌の位置から反射波が到来していることを検証することができた。

なお、3 0 素子のアンテナの偏波面を垂直として実験したところ、偏波面の識別度（偏波面効果）が約 8 d B 認められた。

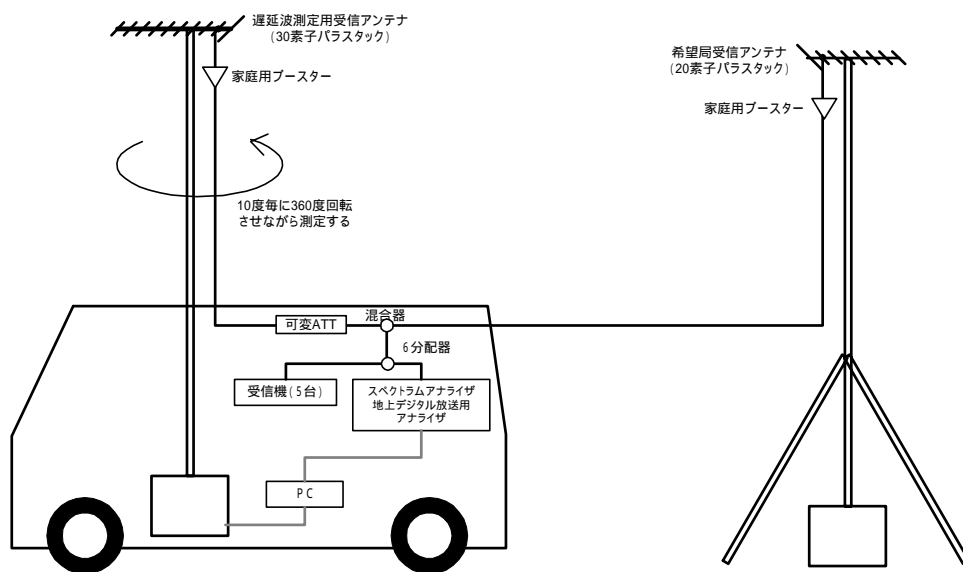
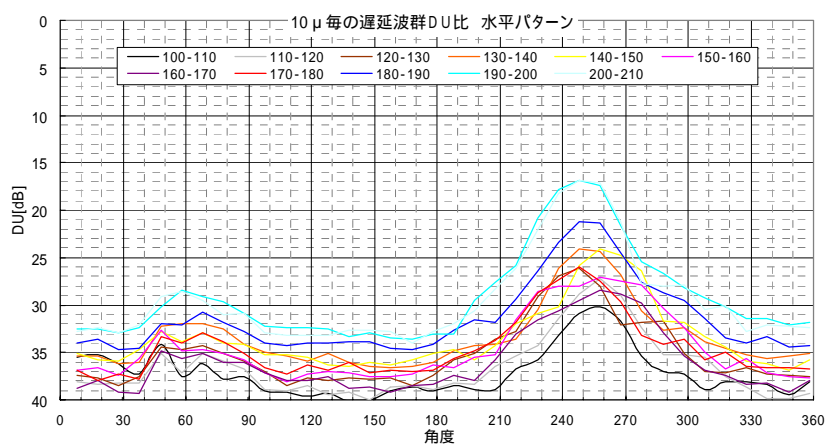
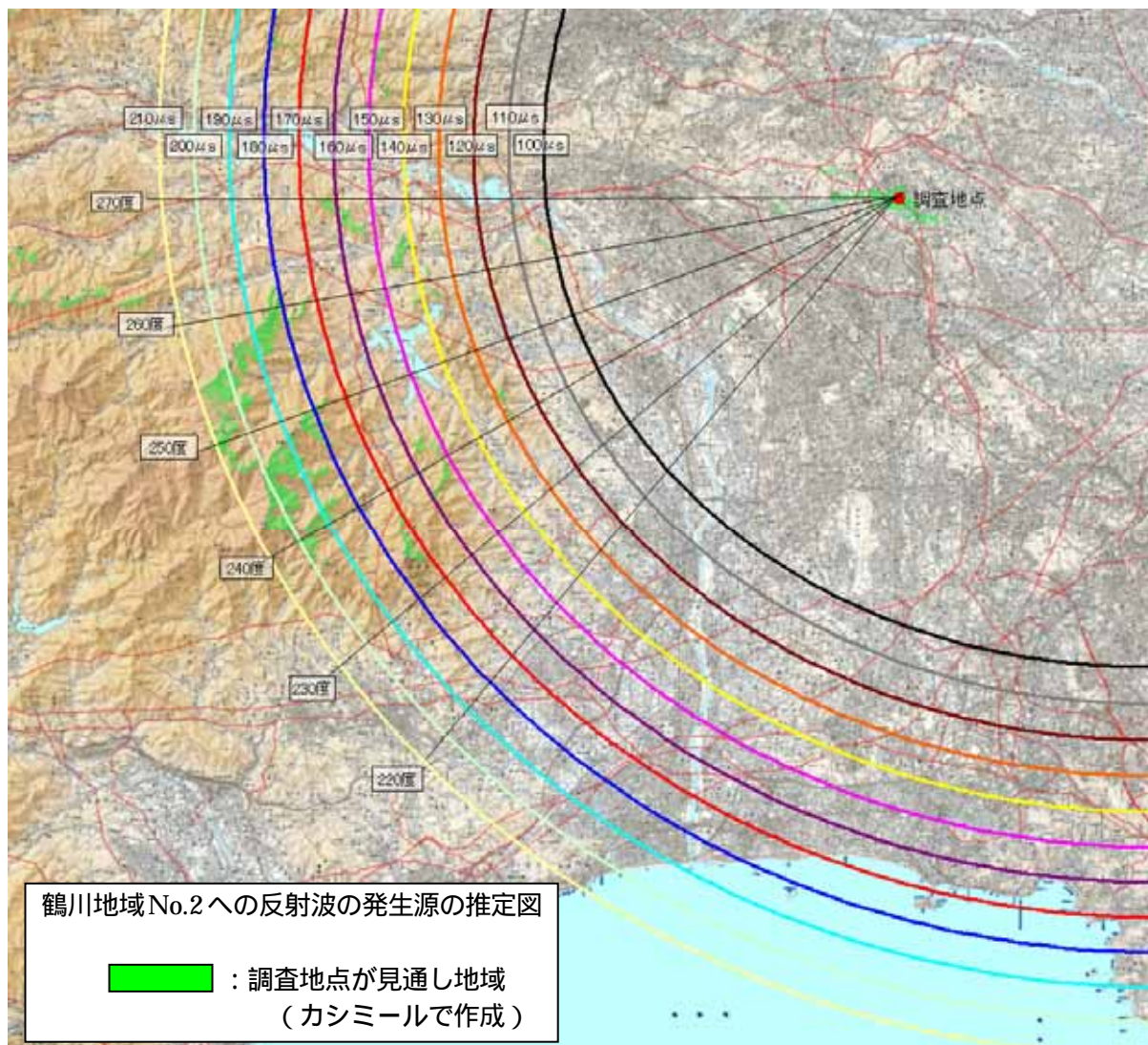


図 1 0 反射波障害の原因調査の測定系統図



遅延波群( $\mu$ s)	最大方向( $^{\circ}$ )
100 ~ 110	255
110 ~ 120	255
120 ~ 130	245
130 ~ 140	250
140 ~ 150	260
150 ~ 160	240 ~ 270
160 ~ 170	250 ~ 270
170 ~ 180	245
180 ~ 190	250
190 ~ 200	250
200 ~ 210	250

図 1 1 鶴川地域 No.2 での反射源の測定結果



## 6. 銚子地区における地上デジタル受信実験

ガードインターバル越えの反射波と同様の受信障害波として、SFN障害がある。銚子局は、東京タワーからの放送について、図12の伝送ルートの中継局であり、地上デジタル放送のch21からch26がSFNで放送されている。常陸鹿島局も同様にSFNで放送されている。図13にこれらの局の位置関係とチャンネル関係を示す。銚子局を受信している状況で、東京局および常陸鹿島局のSFN波によるガードインターバル越えの受信障害がフェージング時に発生することが確認できたので受信実験を行った。銚子局の受信波に対して、東京局の受信波は約175  $\mu$ s遅れ、常陸鹿島局からの受信波は約200  $\mu$ s遅れであった。

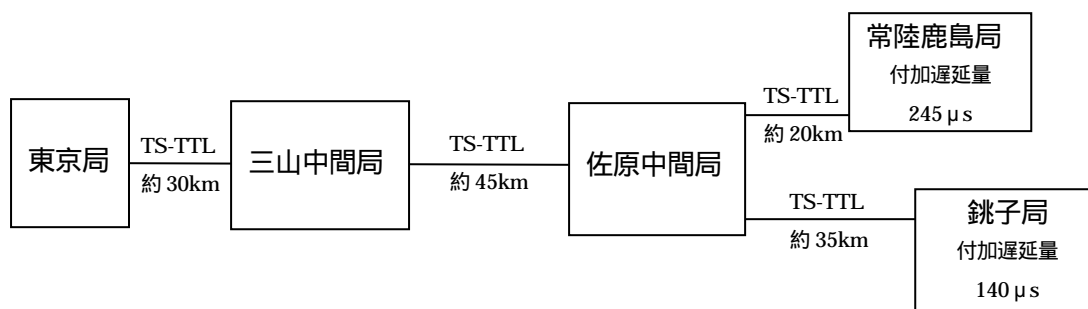


図12 東京局から銚子局への伝送ルート



図13 銚子地区におけるSFN関係局と位置関係とチャンネル関係

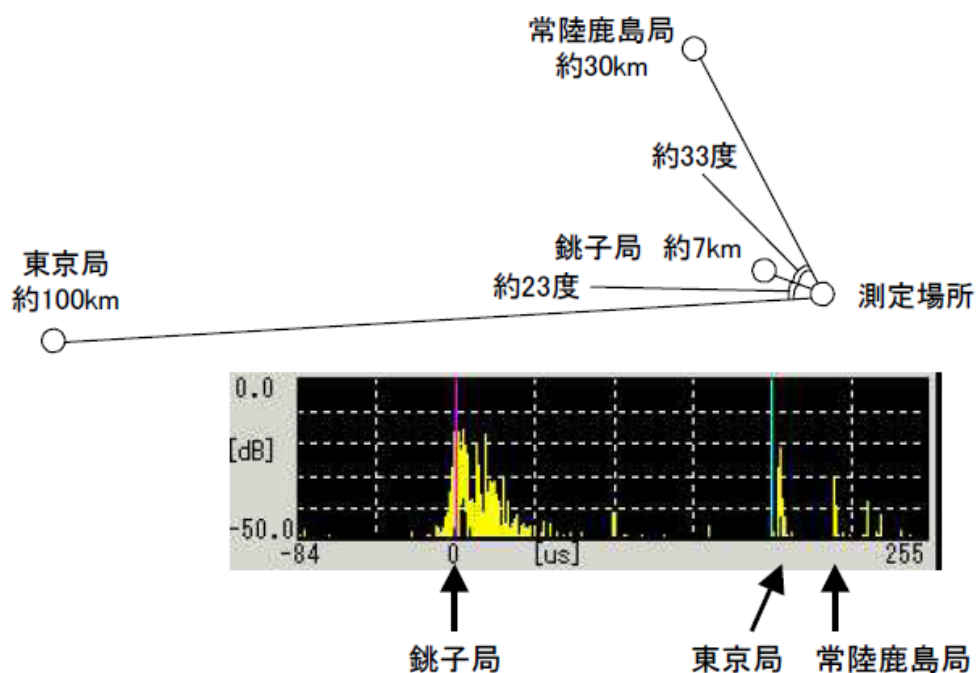


図 1 4 銚子地区における S F N関係局との位置関係および遅延プロファイル

	常陸鹿島 ch26 の DU 比	東京局 ch26 の DU 比	受信可否		
			受信機 A	受信機 B	受信機 C
鹿島常陸局 ch26 の DU 比が 30dB の場合	3 0 d B	9	×	×	
		10	×	×	
		15	×		
		20			
		25			
	常陸鹿島 ch26 の DU 比	東京局 ch26 の DU 比	受信可否		
			受信機 A	受信機 B	受信機 C
鹿島常陸局 ch26 の DU 比が 20dB の場合	2 0 d B	8	×	×	×
		10	×	×	
		15	×		
		20	×		
		25			
		30			

図 1 5 銚子地区における SFN 障害の受信実験結果

この受信点での通常時の銚子局との D U 比は、東京局が約 2 0 d B、常陸鹿島局は約 3 0 d B であるが、フェージング時には、東京局が  $\pm 1 0$  d B 以上の早い変化のレベル変動が見られ、常陸鹿島局は比較的ゆっくりとしたレベル変動であった。

そこで、常陸鹿島局と東京局のそれぞれの D U 比に対して、1 4 素子の受信アンテナと利得



30 dBのブースタを用いて、3種類の受信機A、B、Cで受信可否を調査した。その結果を図15に示す。

この調査結果を分析・考察すると、

- (1) 遅延時間差は、東京ch26が175  $\mu$ s、常陸鹿島ch26が約200  $\mu$ sで、いずれもガードインターバル越えとなっているが、受信機による受信可否の相違はバスタブ特性の相違に起因していると考えられる。
- (2) 常陸鹿島局ch26は現在(平成19年)ch26のみであるが、ch21～ch25も放送開始の予定であり、東京局D波(ch21～ch26)との混信のみでなく、常陸鹿島D波との相乗効果で混信障害がより発生しやすい環境になると考えられる。
- (3) 銚子地区で発生する「霧」、「靄」などにより、東京D波のレベルが大きく変動する事が確認できたがそのメカニズムは不詳である。
- (4) 常陸鹿島局のch26は、DU比が20 dBから30 dBへと数時間かけてゆっりと変動していたが、メカニズムは不明である。
- (5) 超狭指向特性アンテナによる受信改善

この場所では、東京D波と常陸鹿島D波の両方のDU比を改善する必要がある。

14素子アンテナ(半値角約60度)では、東京局D波はDU比20 dB、常陸鹿島局D波はDU比30 dBであったが、3素子4列スタックアンテナ(半値角約15度)では、東京局D波および常陸鹿島局D波共にDU比が約15 dB改善された。(アンテナ出力での比較)

注：本調査の後に、銚子局の電波を70  $\mu$ s遅らせて、東京局の遅延時間がGI内に収まるように変更し改善している。

## 7. 高感度受信システムの開発

新百合ヶ丘事業所は、地形的に周りの地域より標高が低い窪地に位置するため、放送エリア内でありながら電界強度はそれほど高くない。また、送信所方向および周囲にマンションなどのビルが立ち並んでいて、近接のマルチパスが多数存在する。そのため、地上デジタル放送の受信不良地区となっている。したがって、通常の実験方法では一部のチャンネルが受信できない。図16に示すようにチャンネル間の受信レベル差が20 dBもある。受信位置をずらすと、別の一部のチャンネルが受信不良となり、すべてのチャンネルが受信できない。

そこで、図17に示すように、受信アンテナを水平に2.5 m離隔して設置し、各アンテナにはアンテナ直下に低NFブースタを挿入した。

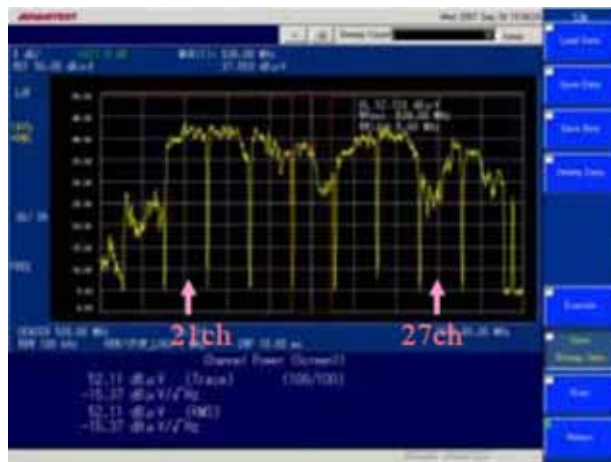


図16 新百合ヶ丘事業所の屋上から送信方向の風景と受信スペクトラム

両アンテナの出力を、それぞれ単独で受信、位相合成、RF選択（切替受信を想定）の各条件で受信した。その結果を、図18に一例として示した。2基の受信アンテナ単独では、それぞれ一部のチャンネルが受信できない。位相合成しても、1つのチャンネルが受信できない。RF選択により、受信可能なアンテナを選択すると全てのチャンネルが受信できた。

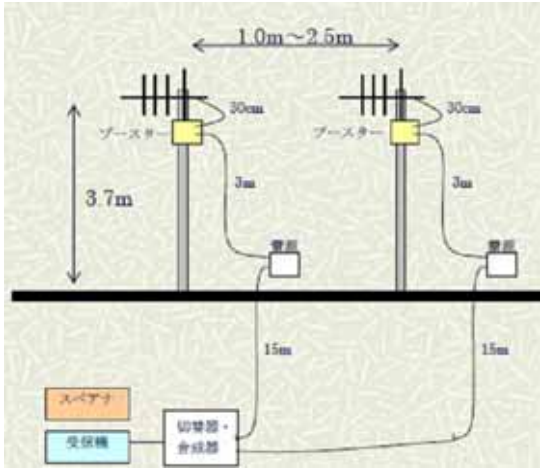


図17 高感度受信システムの系統図とアンテナ部概観

受信	受信チャンネル	フジ TV ch21	TBS Ch22	テレビ東 ch23	テレビ朝 ch24	日テレ ch25	NHK-E Ch26	NHK-G Ch27
アンテナ1	受信レベル	53.8	49.6	54.5	52.9	58.1	53.6	55.7
	受信評価		×					
アンテナ2	受信レベル	54.9	54.5	50.5	49.6	50.7	52.4	49.5
	受信評価			×	×			
位相合成	受信評価		×					
RF選択	受信評価							

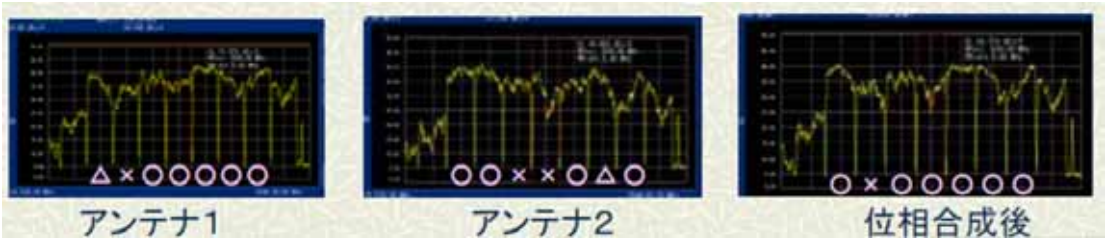


図18 実験結果の一例

14素子八木アンテナ2基水平配置（アンテナ間隔2.5m）

この受信実験結果から、

- ・ 地上デジタル難視聴地域でのダイバーシティ受信実験を行い受信改善効果を確認が確認できた。
- ・ 実用化に向けての課題は省スペースと調整の簡易化であることが分かった。

## 全体まとめ

- ・ 地デジの受信不良の原因として、電界強度不足とともにG I（ガードインターバル）越えの障害を確認した。
- ・ 希望局の電界強度が60 dB(μV/m)以下では受信機の簡易BERに劣化が確認でき、電界強度が55 dB(μV/m)以下ではほとんどの調査地点において受信不良が確認された。
- ・ 山岳反射波の影響地域は、山岳が見通せる地域全域と推測され、東京局以西において山岳（距離関係からG Iを越える）が見通せる地域については、希望局の電界が60 dB(μV/m)を下回る場合は受信不良を起こす可能性がある。
- ・ G I越えのマルチパス障害は、受信機特性の差があり、G I越えの反射波障害の受信マージンを受信機特性を考慮して判定できる。
- ・ 改善方法は、東京局に対し反射源となる山岳が逆方向になる地域が多いことから、前後比の良い受信アンテナを使用することが有効である。さらに、G I越えの遅延波の改善に対応した受信機も販売されていることから、これらを組み合わせることで改善の可能性がある。
- ・ 今回の調査結果で、G I越え遅延波の改善に対応した受信機にて、30素子の高性能アンテナを使用した調査データは、すべて評価[a]（良好）であったので、受信C/N比の改善と指向性は重要であるが、受信高が高いほど良好受信とは限らないことがある。
- ・ S/F/Nネットワークにおいて、遠方の親局や他のS/F/N運用局からG I越えの電波が受信障害を引き起こす可能性があり、受信アンテナ設備の高性能化あるいは受信機のバスタブ特性により改善できる場合があることが分かった。
- ・ 受信アンテナ2基の水平配置（スタック受信）の場合、位相合成よりRF選択が有効な場合がある。

## 文 献

〔1〕村上，杉山，金井，伊藤，高橋，平野，倉掛，金原，市川，池田：“UHFにおける山、建造物などの反射特性と反射波によるひずみ”，NHK技術研究，Vol.14，No.3, pp.187-218(1962.4)