

## CN5-(7) アンテナ測定

v4.6 Nov.2019

### 【目的】

赤道上空 36,000 km の高度にある衛星は地球の自転速度と同じ角速度で移動しているため、地上から見て常に同じ位置に静止して見える。また、1 つの衛星で日本全体をカバーできるほど広範囲の電波を一斉送信できることから、通信・放送に適している。本実験では Broadcast Satellite (BS) 電波を利用したパラボラアンテナおよび、ルーネベルクレンズアンテナの指向性測定、BS 電波の周波数スペクトル測定、偏波確認を行い、衛星受信アンテナの特性、衛星電波の性質、静止衛星の軌道について理解する。

### 【原理】

#### ・放送衛星の概要

衛星放送はアップリンクセンター(主局:渋谷, 副局:埼玉県菖蒲, 予備局:千葉県君津)から 17 GHz 帯で情報をアップリンクし、12 GHz 帯を用いて宇宙から各家庭にダウンリンクしている。衛星の姿勢制御は衛星管制センター(主局:埼玉県川口, 副局:千葉県君津)で行っている。放送衛星の位置は東経 110 度、地球半径の約 6 倍に相当する赤道上空 36,000 km にあり、現在は BSAT-3a, BSAT-3b, BSAT-3c の 3 機が運用されている。衛星本体の全長は、太陽電池パネルを展開した状態で 15-20 m 程度ある。他国も同様に自国領土をカバーする位置に複数の静止衛星を打ち上げており、赤道上空には数珠状に分布している。このため、静止衛星全体は地球のネックレスとも呼ばれている[1]。

また、表 1 に放送種別と周波数・変調方式の一覧を示す。BS は周波数 11.7-12.2 GHz のキャリア周波数を 38 MHz ごとに分けており、PSK でデジタル変調している。偏波には右旋円偏波が用いられている。また、受信側に該当する一般家庭の配線例を図 1 に示す。屋外アンテナから屋内テレビまでは特性インピーダンス  $Z_0 = 75 \Omega$  の同軸ケーブルが使われている。

表 1. 放送種別と周波数・変調方式の違い

	放送種別	バンド	周波数	波長	チャンネル帯域幅	変調方式	偏波
1	AM ラジオ	MF	526.5-1606.4 kHz	570 - 187 m	9 kHz	AM	垂直
2	FM ラジオ	VHF	76.1 - 94.9 MHz	3.94 - 3.16 m	200 kHz	FM	水平
3	地デジ	UHF-L	470 - 578 MHz	63.8 - 51.9 cm	6 MHz	PSK, QAM	水平
4	BS	SHF	11.7-12.2 GHz	2.56 - 2.46 cm	38 MHz	PSK	右円

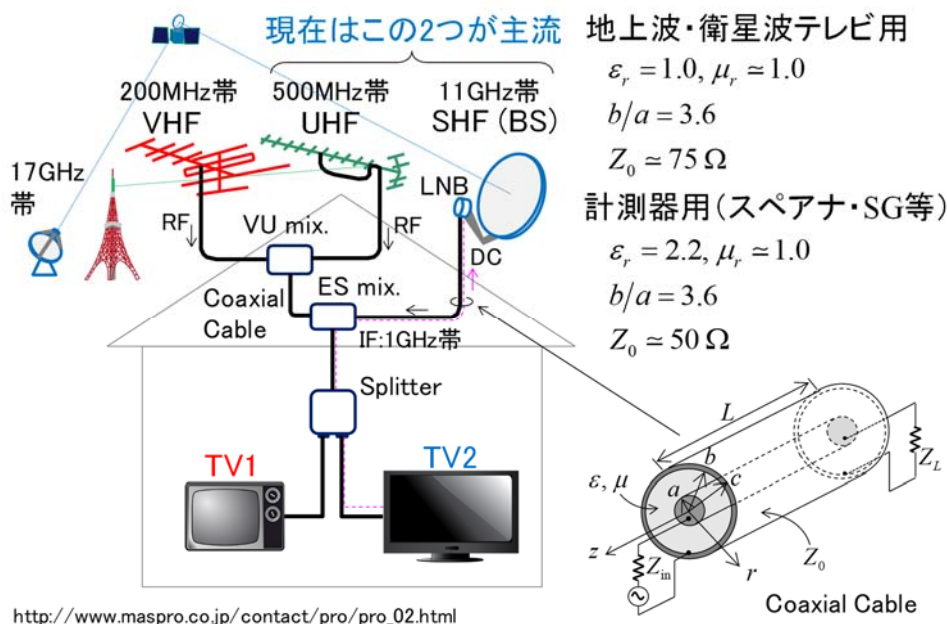


図 1. 受信側配線の一部と接続用同軸ケーブル

## ・受信アンテナの利得と半値幅

静止衛星から送信される電力は 120 W 程度である。地上で十分な信号感度を得るためには、受信アンテナの特性が重要なパラメータの一つになる。パラボラアンテナのような開口面アンテナは、開口面が大きく波長が短いほど高次球面波モードが伝搬できるようにするため指向性が鋭くなる性質がある。アンテナの開口直径を  $D$  [m]、波長を  $\lambda$  [m]、半値ビーム幅を  $\theta_{1/2}$  [degree] とすると、次の近似が成り立つ[2]。

$$\theta_{1/2} [\text{deg}] \approx 70 \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

ここで、ラジアンで表した半値ビーム幅を  $B$  とおくと次式となる。

$$\theta_{1/2} [\text{rad}] \equiv B = 70 \frac{\lambda}{D} \frac{\pi}{180} \quad (2)$$

ここで(2)の両辺を 2 乗して、

$$B^2 = \left(\frac{7\pi}{18}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2 \quad (3)$$

さらに(3)を変形して、 $\pi \approx 4$ 、 $7\pi/18 \approx 1$  とすれば

$$\frac{4\pi}{B^2} = 4\pi \frac{1}{B^2} = 4\pi \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{18}{7\pi}\right)^2 \approx \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 = G \quad (4)$$

となって、右辺最終項は一様分布の開口面アンテナ利得  $G$  に等しい。従って、開口面アンテナ利得  $G$  は半値ビーム幅  $B$  を用いると(5)となる。即ち、(5)を使えば受信アンテナのおよその利得を見積ることができる。

$$G \approx \frac{4\pi}{B^2} \quad (5)$$

## 【測定系】

図2に衛星電波の測定回路の一例を示す。Low Noise Block converter (LNB) はアンテナ受信部と一体型になっており、シールドケース内部に低雑音のマイクロ波トランジスタ回路が内蔵されている。この出力を分配器に送ることで屋内の複数のテレビで同時受信できる。LNB 内部では、ヘテロダイン方式によって 11 GHz 帯の RF 信号を約 1/10 の IF 信号にダウンコンバートしている。このため LNB 内部に LO 信号源用としてバイアス電源が必要となるが、アンテナ一体型 LNB は一般に電源を取ることが困難な屋外に置かれるため、室内のチューナから受信用の同軸ケーブルを介して直流電力を送っている。即ち、屋外 LNB と屋内チューナ

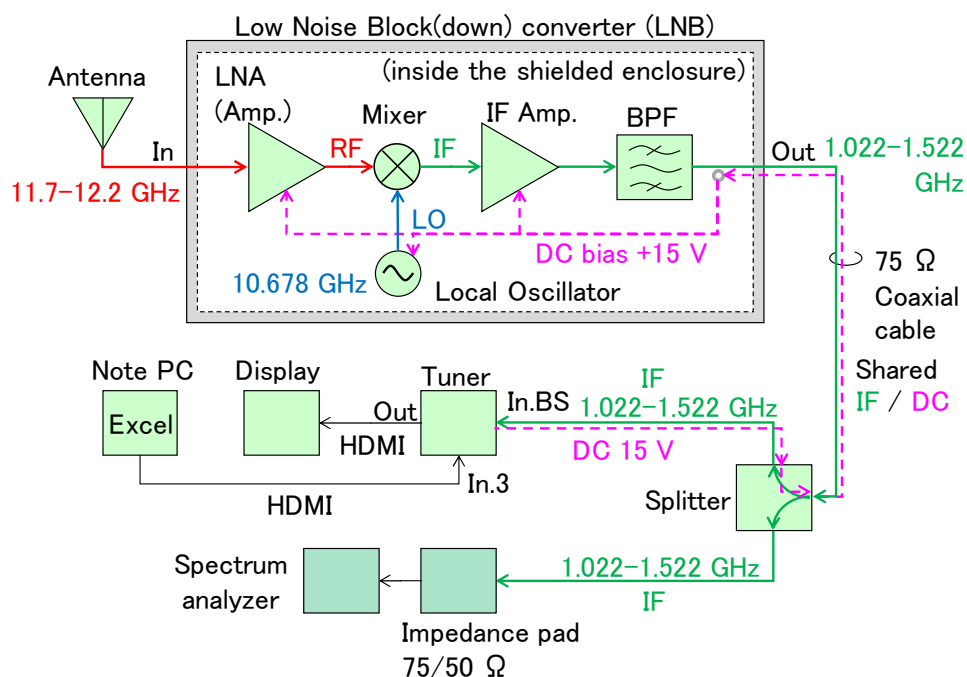


図2. 衛星電波の測定回路

一を接続している同軸ケーブルは、受信 IF 信号と直流バイアス共用となっている。図3に受信アンテナ指向性の測定イメージを示す。通常、アンテナ特性を測定する際に全反射となる GND 板は不要であるが、パラボラアンテナは指向性が鋭いため、上空に向けて使用する場合には GND の影響は少ないとして扱う。さらに、指向性測定では送受アンテナ間の距離  $r$  が十分に離れている遠方界条件(球面波でなく平面波が照射されるための条件)を満たしていることが必須である。開口面の大きさを  $D$ 、波長を  $\lambda$ 、開口面中心から最も離れた  $D/2$  の位置における球面位相誤差を  $\pi/8$  rad 以下と仮定すると次式で与えられる[3][4]。

$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (6)$$

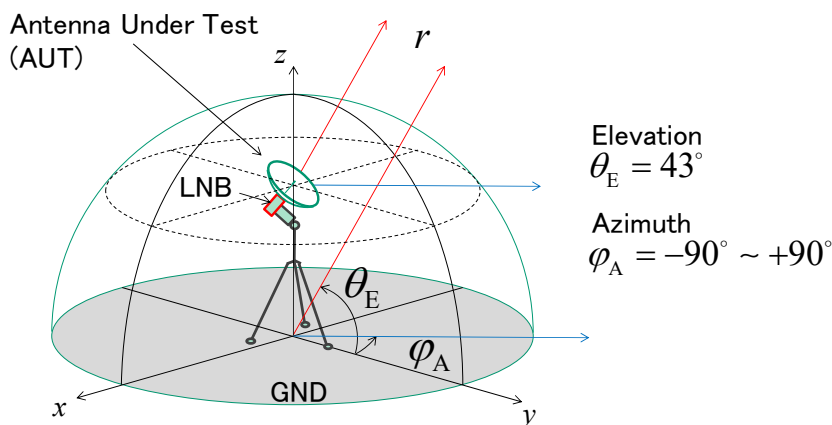


図3. 受信アンテナ指向性の測定イメージ

**【注意事項】**

- (1) 測定器類には極力振動や衝撃を与えないように細心の注意を払うこと。振動や強い衝撃が加わると、内部電子回路のはんだ接続部分にクラックを生じ、結露で腐食した場合に導通不良となって修理不可能な故障原因となる。
- (2) グラフは方眼用紙に手書きするか、エクセルでデータ入力からグラフ描画まですべて自作すること。

**【レポートについて】**

- (1) 実習結果や測定結果に関する表やグラフは必ず各自で作成すること。
- (2) 実験テキストの電子ファイルはダウンロードできるが、原理と測定系の単なるコピー貼り付けは不可。式の導出過程等を確認して自分のレポートを作成すること。
- (3) 実験テキストの間違い訂正や改善など、今後の学生実験にとって有益なアドバイスがあれば加点されることがある。

**【使用機材】**

(1) パラボラアンテナ (LNB 一体型)	BS-TA45DHV	×1	第3基礎
(2) ルーネベルクレンズアンテナ	LuncQ-40	×1	第3基礎
(3) 液晶テレビ (ディスプレイのみ)		×1	第3基礎
(4) チューナー (BS/CS/地デジ対応)		×1	第3基礎
(5) 1億分の1地球儀	Blue Terra	×1	第3基礎
(6) 75Ω 同軸ケーブル		×3	第3基礎
(7) 分配器	SSE-2A	×1	第3基礎
(8) 仰角測定器		×1	第3基礎
(9) スペアナ	HP 8567A	×1	第3基礎
(10) 長机		×1	第3基礎
(11) 測定値描画用ノートPC		×1	持参
(12) 夏季は屋外作業のため帽子		×8	機械工作室

# 【1. 測定】

## 1-1. 指向性測定

- (1) <http://www.cn.kagawa-nct.ac.jp/~kusama/> の実験の中のアンテナ測定から、エクセルシート .xlsm をデスクトップに保存する。その中にあるワークシート「指向性測定」を開く。
- (2) 図2と図3を参考に指向性測定回路を組む。初めにパラボラアンテナ、次にルーネベルクレンズアンテナを測定する。
- (3) 図4を参考にして受信感度が最大になる位置にアンテナを固定する。衛星電波が受信できない場合は、三脚ごと手で持ち上げて衛星を探して強制的に受信してみる。図4左より四国地区の仰角はほぼ  $\theta_E = 43^\circ$  一定とみなしてよい。
- (4) 図5のように測定器の初期設定を行う。
- (5) 仰角  $\theta_E$  を固定したまま、図6に示すイメージで方位角  $\phi_A$  のみをパラメータとして指向性パターンを測定する。※時間を有効に使うため、必ず測定データをエクセルで描画確認しながら適切な測定ポイントを決めること！
- (6) レポートの理論計算のためにパラボラアンテナの開口径  $D$  を測定する。また、遠方界条件を満たしているか確認する。
- (7) パラボラアンテナ先端の受信部のヘリカル構造の詳細を調べて記録する。

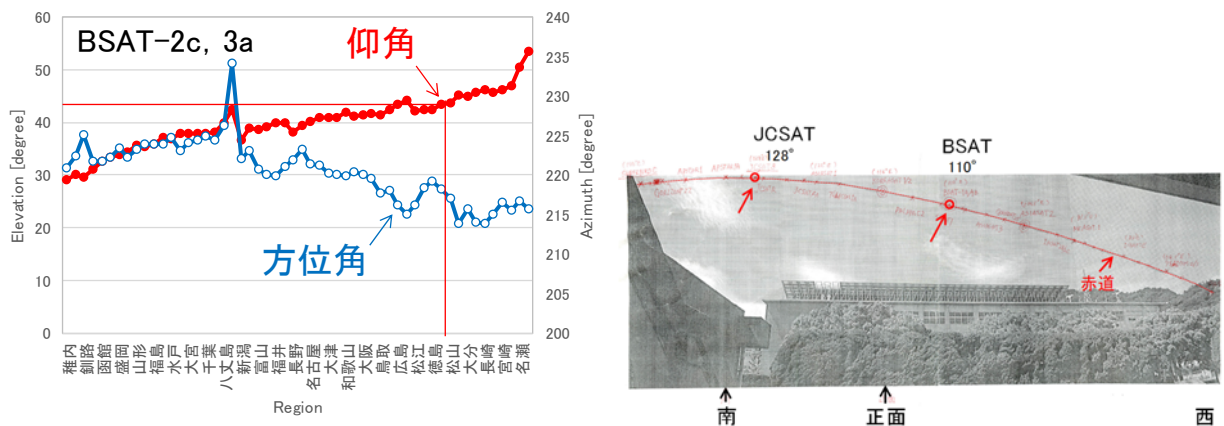


図4. 日本における BSAT の仰角と方位角(左)と第1 学科棟から第1 講義棟方向を見たときの衛星の位置(右)  
日本では南下する(赤道に近づく)ほど仰角は上がり、西に行くほど方位角は下がる。

### 1. 周波数マーカー操作

#### MARKER

- ⇒ Normal 押して
- … 矢印キー↑ ↓ 又は、ダイヤルを回して目的周波数に合わせる …
- ⇒ MKR CF

### 2. IF帯域選択

- RESBW を押して
- ⇒ テンキーで 300 kHz

### 3. トレース操作

- ⇒ TRACE B MaxHOLD を押して
- … しばらく待ってから …
- ⇒ TRACE A BLANK を押して
- ⇒ 画像記録

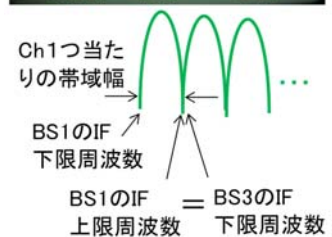
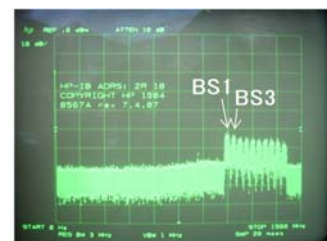


図5. スペアナの操作方法(左)と周波数帯域幅の読み方(右)

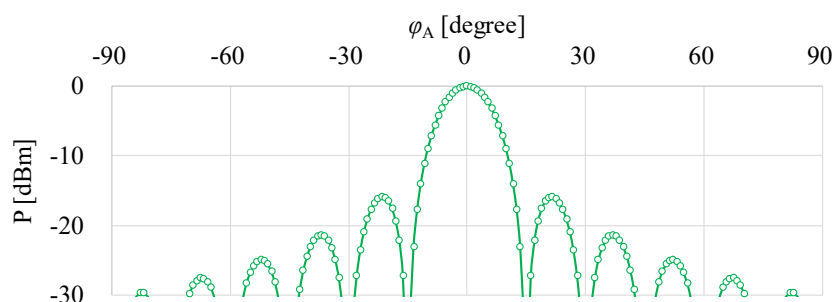


図6. 指向性パターンの一例(測定ではヌル点はきれいに測定できないこともある)

## 1-2. 衛星電波および地デジ電波のスペクトル測定

- (1) 先に保存した測定データシートの中のワークシート「BS 周波数スペクトル測定」を開く。
- (2) 受信感度が最大の位置にアンテナを固定する。なお、地デジスペクトルを測定する場合は、図2においてチューナー入力を地デジ入力ポートに変更し、屋内アンテナポートに直結する。
- (3) 図5右を参考にしてチャンネルスペクトル(下限, 上限, 帯域)の測定を行う。パラボラアンテナ一体型LNBのローカル信号源の発振周波数は $f_{LO} = 10.678$  GHz, ルーネベルクレンズで使用する分離型LNBの場合は $f_{LO} = 10.75$  GHzである。
- (4) 最大信号強度が得られる状態でスペクトルを画像として記録する。
- (5) ウェブで公開されている各チャンネルのスペクトルデータ(周波数・帯域幅)と比較する。パラボラアンテナ一体型LNBとルーネベルクレンズで使った分離型LNBで測定したスペクトル波形が異なる理由を考察すること。
- (6) 同軸ケーブルの減衰特性を測定する。
- (7) LNBの増幅度周波数特性を測定する。

## 1-3. 偏波確認

- (1) 先に保存した測定データシートの中のワークシート「誘電体板」を開く。
- (2) 受信感度が最大の位置にアンテナを固定する。
- (3) LNBフィードホーン内に誘電体板を挿入(右45°傾斜と左45°傾斜の2ケース)し、IF周波数スペクトルの違いを比較する。また、スペクトル特性が異なる理由を考察せよ。
- (4) 円偏波の確認方法について検討せよ。

## 【2. シミュレーション】

### 2-1. 波動の伝搬シミュレーション

- (1) 別紙「波動伝搬アニメーション」を参照して、円筒波と球面波の伝搬の様子をシミュレーションせよ。
- (2) ルーネベルクレンズアンテナの指向性パターンをシミュレーションで求めよ。

## 【3. 計算】(以下から4題選択)

### 3-1. 同軸ケーブルの特性計算

同軸ケーブルの特性インピーダンス $Z_0$ と減衰定数 $a$ は(7)と(8)で与えられる。ただし、 $a$ は同軸線路の内導体半径、 $b$ は外導体半径、 $\eta$ は波動インピーダンスである[5][6]。

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{59.9586}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{138.061}{\sqrt{\epsilon_r}} \log\left(\frac{b}{a}\right) \quad (7)$$

$$\alpha_{e\text{TEM}} = \frac{1}{2} \frac{R_s}{\eta \ln b/a} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}}}{\eta \ln b/a} \frac{1}{b} \left( \frac{b}{a} + 1 \right) \propto \frac{b/a + 1}{\ln b/a} = \frac{x+1}{\ln x} = f(x) \quad (8)$$

- (1) 同軸線路の損失が最小となる $b/a$ の値が $b/a = 3.591$ になることを確認せよ。また、 $\epsilon_r = 1.0$  および  $\epsilon_r = 2.1$  のときの特性インピーダンスを計算せよ。※ヒント: エクセルを使う場合、関数 $f(x)$ が最小になるためには $f'(x)$ がゼロ(厳密には $f''(x) > 0$ )になる点を見つければよいので、Excel上で関数を描画することで視覚的に最小値を確認できる。即ち、 $f(x)$ と $f'(x)$ の両方を描画して最小値を確認すればよい。 $x$ の刻み幅は0.001としてみよ。

※参考: 数値計算ソフトを使う場合、Mathematica, Maxima, Scilabなどを使って非線形方程式の解法の一つであるニュートン法を適用すると瞬時に答えが出る。

- (2) 同軸線路の理論減衰特性を求め、測定値と比較せよ。

### 3-2. 高周波回路素子の計算

- (1) 入力インピーダンス $50\Omega$ のスペクトラムアナライザがある。これを特製インピーダンス $75\Omega$ の同軸線路と接続するとき、整合回路を挿入しない場合の反射係数 $\Gamma$ とVSWRおよび、透過係数 $T$ はいくらになるか。また、スペアナに送られる信号電力は

本来の何%か。

- (2) ミキサに  $f_1$  と  $f_2$  の周波数を入力した場合、出力に  $f_1 - f_2$  および  $f_1 + f_2$  の周波数が出力されることを証明せよ。

### 3-3. 衛星通信に関する計算

- (1) 静止衛星の高度と速度を計算で求めよ。
- (2) 衛星通信は赤道上空 36,000km の位置に衛星を配置し、これを中継して地球上の 2 地点間で通信を行う方法である。この方法では 1 機の衛星により地球表面の何%の面積をカバーできるか。また、地球全域をカバーするためには何機の衛星が必要か計算で確認せよ[7]。
- (3) 送信電力 100 W, アンテナ利得 37.7 dBi の放送衛星から送信される電波を直径 50 cm のパラボラアンテナで受信すると、受信電力は何 W になるか。ただし、使用周波数は  $f = 12$  GHz, 地球と衛星間の距離は 36,000 km とし、パラボラの開口効率を  $\eta = 0.64$  とする[7]。

### 【研究事項】（以下から 2 題選択）

- (1) LNB を使って周波数をダウンコンバートする理由を回路寸法と波長の観点から説明せよ。
- (2) アンテナ有効面積, フリスの伝達公式について説明せよ。
- (3) 衛星電波を受信アンテナとして用いられているオフセット型パラボラ, センターフィード型パラボラ, パラボラの代わりとして将来普及することが予想される平面アンテナの特徴についてまとめよ。
- (4) 地デジ, BS 電波の変調方式について調べよ。
- (5) スプリッターとインピーダンスパッドの回路構造を調べよ。

### 【参考文献】

- [1] BSAT 株式会社放送衛星システム, <http://www.b-sat.co.jp/broadcasting-satellite/>
- [2] 三輪, アンテナおよび電波伝搬, p. 66, 東京電機大学出版局
- [3] 橋本, 電波吸収体のはなし, pp. 90-92, 日刊工業新聞社
- [4] 松本, 電波工学入門, pp. 138-139, 朝倉書店
- [5] D. M. Pozar, Microwave Engineering 3<sup>rd</sup>, p.81, John Wiley & Sons, Inc.
- [6] Inan, Electromagnetic Waves, p.367, Prentice Hall.
- [7] 鹿児島, 光・電磁波工学, p.11, p.146, コロナ社

### 【付録 1】演習事項のまとめ

#### 1. 実験

- (1) パラボラ指向性パターン測定
- (2) ルーネベルクレンズ指向性パターン測定
- (3) BS 周波数スペクトル測定
- (4) 地デジ周波数スペクトル測定
- (5) 偏波確認

#### 2. シミュレーション

- (1) 電磁界シミュレータによるルーネベルクレンズアンテナのシミュレーション

#### 3. エクセル計算および手計算

- (1) 同軸ケーブルの最小損失断面寸法の確認および、同軸ケーブルの理論減衰特性
- (2) インピーダンス変換器の計算
- (3) ミキサによる周波数変換
- (4) 通信衛星の必要最小数
- (5) 通信衛星からの受信電力

以上