

修 士 学 位 論 文

茨城 32m 電波望遠鏡日立アンテナの
能率測定と評価

2011 年度

(平成 23 年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻

10NM155H

栗橋 潤

Abstract

現在、茨城大学では茨城 32m 電波望遠鏡運用に向けた整備を行っている。2 基のアンテナ (以後日立アンテナ、高萩アンテナとする) には 6.5 - 8.8GHz 帯広帯域冷却受信機搭載が完了し、大部分の立ち上げ作業は終了している。しかし本格観測を可能とする為には解決すべき課題が多く残されている。本研究では日立アンテナにおけるアンテナ性能のうち、ビームパターンと開口能率に関する測定を行ったので報告する。

アンテナに求められる性能には大きく分けて指向性と集光力がある。指向性を示すパラメータには指向精度とビームパターンが、集光力を示すパラメータには開口能率と主ビーム能率がある。その中で開口能率とビームパターンの測定を行った。開口能率 η_A とはアンテナの物理的な開口面積 A_p に対する実際に有効な面積 A_e の割合であり、 $\eta_A = A_e/A_p$ で表される。これはアンテナがどれだけ効率的に電波を集めているかの指標である。 η_A に影響を与える原因には、鏡面誤差やアンテナ開口の電界分布による照射パターン、副鏡のブロッキング等がある。またアンテナの受信感度には方向依存性があり、ビームパターン $P(\theta, \phi)$ と呼ばれる。天体信号を受信した際に得られるパワーは輝度分布とビームパターンの畳み込みであり、これも重要なアンテナのパラメータの一つである。

2011 年 6 月から 12 月にかけて 6.7GHz 帯と 8.4GHz 帯の電波強度測定によるアンテナ能率測定を行った。測定は連続的にデータ取得する事で強度の 2 次元分布が得られる OTF 観測で行った。広がり十分小さく点源と見なせる天体について $20[\text{arcmin}] \times 20[\text{arcmin}]$ の範囲を仰角 (El) 方向の間隔 $dEl = 1[\text{arcmin}]$ で方位角 (Az) 方向にスキャンをした。20 秒で 1 回の Az スキャンを行い、データは 1 秒間に 5 点取得した。これは空間分解能であるビームサイズ ($3.8[\text{arcmin}]@8.4\text{GHz}$) に対してサンプリングが十分密なことに対応する。約 10 分で 1 枚のビームパターンが得られた (以後 map と呼ぶ)。

天体には正確なフラックス密度 F_ν が既知であり強度変動の少ない点源 (3C286, 3C123 等) を選んだ。しかしこれらは絶対強度自体は弱く、測定の相対的な誤差が大きくなる為精度の高い測定が難しい。そこで強度変動が激しく絶対強度は不明であるが 10Jy 以上の全天でも有数のフラックスを持つ点源 (3C273B, 3C84 等) も測定した。結果はいずれの日程・天体においても同様で、再現性が確認された。得られた map を確認した結果、両帯域ともビーム中央の主ビームは軸対称であり、サイドローブは主ビームのピークに対して 5% 程度の強度であった。ビームサイズは 6.7GHz 帯で約 $4.6[\text{arcmin}]$ 、8.4GHz 帯で約 $3.8[\text{arcmin}]$ となった。各天体毎に得られた map を変数 dAz, dEl の二次元ガウシアンでフィットし、ピーク強度 T_A^* を推定した。その後 $kT_A^* = \frac{1}{2}F_\nu\eta_A A_p$ より開口能率 η_A を得た。絶対強度が不明な天体についてはある El で得られた測定結果 T_A^* には同 El で得られたフラックス密度が既知である天体による η_A が適用できるとして絶対的なフラックス密度を推定し、他の El における開口能率を求めた。その結果 6.7GHz 帯では $El = 10^\circ$ の 0.75 から仰角が高くなるにつれて悪化し、 $El = 80^\circ$ で 0.60 となった。8.4GHz 帯では $El = 20^\circ$ の 0.72 から $El = 80^\circ$ で 0.53 まで低下した。また、どちらの帯域でも η_A を El の関数とする 3 次多項式の近似曲線とした。誤差は 3% 程度であり、精度の高い結果となった。

今後の課題は輝線観測による開口能率の検証、さらに広い範囲のビームパターンを測定し、実際の観測で有効となるオフ点を見るためには観測天体からどの程度のオフセットであれば良いかを調べる必要がある。

目次

第1章 序論	1
1.1 電波天文学	1
1.2 干渉計観測	1
1.3 茨城 32m 電波望遠鏡	2
1.4 電波望遠鏡の構成	3
第2章 アンテナ	5
2.1 概要	5
2.2 必要となるアンテナ性能	5
2.2.1 ビームパターン (アンテナパターン)	5
2.2.2 指向精度	6
2.2.3 開口能率	7
2.2.4 主ビーム能率	9
第3章 能率測定	10
3.1 目的	10
3.2 測定方法	10
3.2.1 観測天体	10
3.2.2 測定の概要	11
3.2.3 解析手法	12
3.3 結果・考察	13
3.3.1 測定諸元	13
3.3.2 8.4GHz 帯 (X band)	15
3.3.3 6.7GHz 帯 (C band)	20
3.4 開口能率の周波数帯域依存性に関する考察	26
第4章 まとめ	29
4.1 結論	29
4.2 今後の課題	29

第1章 序論

1.1 電波天文学

現在天文学では、天体からやって来るガンマ線・エックス線・紫外線・可視光・赤外線・電波などほとんどの周波数の電磁波を観測している。しかし一部の周波数帯では地球大気中に存在する分子等で吸収・散乱され観測が困難である。電波は大気による影響をほとんど受けないため、地上からの観測が可能であるというメリットを持つ。電波の他に可視光と赤外線の一部(近赤外)でも地上観測が行われており、これらの大気透過率の良い周波数領域を大気の窓という。電波観測の受信システムは多くの場合、天体からの電磁波を赤外線や可視光の様に光子として検出するタイプではなく、波として検出(検波)するタイプである。これは次節 1.2 に記載の干渉計という技術にも応用されている。

電波天文学の観測対象は星間物質や原始星、星周物質、活動的現象など様々であり、これにより星形成等の現象を明らかにする事ができる。対象の温度や密度といった物理状態により、電磁波の放射機構は異なる。メーザー (MASER : Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation) は電波で観測される特徴的な放射機構の一つであり、レーザーの電波版とも言える。これは高密度のガス中などで粒子同士が衝突し合い、エネルギー分布の二準位間の中で下の準位よりも上の準位の方に多く粒子が存在する状態(反転分布という)のときに生じる。反転分布は大変不安定である為、外からこの準位間と同じエネルギーを持つ電波が入射すると、上の準位にいる粒子が下に落ち誘導放射を発生させる。ここで発生した電波がまた放射の種として次の粒子を刺激し、これが連鎖的に続く。誘導放射はコヒーレント¹であるため、最終的に放射されるのは元の電波が増幅された非常に強いものとなる。メーザーは星形成領域や活動銀河核 (AGN : Active Galactic Nucleus) などで観測され、それらのメカニズムを知る重要な手がかりとなる。

1.2 干渉計観測

望遠鏡が天体の細かい構造を見分ける力を空間分解能といい、分解可能な角度はアンテナの口径 D に反比例する。その為分解能を向上させる為には D を大きくする必要がある。しかし単一鏡の場合、口径を大きくすることには限界があり、他波長よりも低周波数である電波では高い分解能を得る事は困難である。電波観測にはこの弱点を克服する為に、天体信号を波として受信する特徴を活かした干渉計という技術がある。干渉計は複数の素子アンテナを相関器でつなげた装置である。各素子アンテナで得られた電波を相関器で干渉させる事で、天体位置や強度分布を知る事ができる。アンテナ間の距離(基線長) d が単一鏡の口径 D に相当し、基線長を大きくすることで空間分解能は向上する。

¹同位相で周波数と進行方向が揃っている

干渉計には大別して、基準となる電気信号をケーブルで分配することで素子アンテナ同士をつないでいる素子結合型干渉計と、素子アンテナは独立であるがそれぞれ水素原子時計等を用いて正確な時間で同期している超長基線干渉計 (VLBI : Very Long Baseline Interferometer) の 2 つがある。VLBI では受信電波信号をアンテナごとに磁気テープに記録し、後日それらを集め相関処理させている²。前者の代表的なものとしては ALMA (チリ) や VLA (アメリカ) が、後者の代表的なものには VLBA (アメリカ) や VERA (日本) などがある。VLBI は素子アンテナの基線長を制限なく配置する事できるため、非常に高い空間分解能を達成することが可能である。1997 - 2005 年には地球上を離れ衛星軌道にアンテナを配置し、 $d = 30000\text{km}$ もの距離で観測を行った SpaceVLBI (VSOP) も存在した。これによって非常に分解能の高い画像が得られた。しかし VLBI は集光力に劣るため天体強度の測定には向かない。

1.3 茨城 32m 電波望遠鏡



図 1.1: 手前が高萩アンテナ、奥が日立アンテナ

茨城 32m 電波望遠鏡は茨城県高萩市と日立市にあり、その正式名称を『国立天文台水沢 VLBI 観測所茨城観測局』という。高萩アンテナ・日立アンテナと呼ばれる口径 32m のアンテナが 2 基あり (図 1.1)、259.4m 離れて立地している。かつては KDDI で衛星通信用アンテナとして使用されていたが、2007 年の山口への基地局移転の際に国立天文台へ譲渡された。茨城大学では天文台より運用を委託され、新たな電波望遠鏡として立ち上げる為の観測システム整備を進めている。

²現在では磁気テープではなく各アンテナを光ファイバーでつなぎ、リアルタイム処理できる施設もある

観測周波数は 6.7GHz 帯 (C band)³、8.4GHz 帯 (X band)、22GHz 帯 (K band) の 3 バンドである。6.7GHz 帯では、メタノール分子のメーザー放射による線スペクトル (@ 6.668GHz) が観測のメインとなる。メタノールメーザーは大質量星形成領域に付随しており、大変強度の強い天体である。8.4GHz 帯では AGN や若い星からの連続波観測が、22GHz 帯では連続波観測や水メーザ (@ 22.24GHz)、単一鏡によるアンモニアの反転遷移による輝線観測 (強度が弱いため VLBI では観測できない) などが主なターゲットとなる。茨城局は単一鏡によるモニター観測やサーベイ観測だけでなく、単一鏡 2 基を用いた多波長同時観測や 2 素子干渉計としても整備可能である事に特徴がある。また日本国内の大学や研究機関が所有する電波望遠鏡同士が連携し VLBI 観測を行う JVN (Japanese VLBI Network) や EAVN (East Asia VLBI Network) にも参加している為、高空間分解能の観測も可能である。JVN では基線長は 50km から最大で 2500km にもなる。

どちらのアンテナにも 6.7GHz 帯及び 8.4GHz 帯をカバーする広帯域冷却受信機の搭載が完了している。日立アンテナは高萩アンテナに比べ駆動性能が単純であるため優先的に整備を進めて来た。電波望遠鏡としての大部分の立ち上げ作業が完了し、これまでに参加した VLBI 観測にも成功している。

1.4 電波望遠鏡の構成

電波望遠鏡とは遙か宇宙からの微弱な天体信号を観測する為の装置のことである。茨城 32m 電波望遠鏡では主に 3 つのパートで構成されている。各装置の役割と天体信号の流れは以下の通りである。

(1) アンテナ

アンテナは天体からの電波を集光し、指向性を持たせる装置である。口径 32m の回転放物面をした主鏡と口径 2.9m の双曲面である副鏡で構成される。カセグレン⁴クーデ⁵方式を採用しているため天体から平面波⁶としてやって来た電波は一度カセグレン焦点で集光するが、ビーム伝送系である 4 枚の反射鏡によって一次放射器 (フィード) へと導かれさらに収束する。このようにして伝播してきた電波は導波管のモードへと変換され、フロントエンドへと送られる。

³電波では 4-8GHz を C band、8-12GHz を X band、18-26GHz を K band という。

⁴カセグレン式：アンテナに入射した電波が、主鏡の放物面焦点 (主焦点) と副鏡の双曲面焦点が同一であるため、もう一方の双曲面焦点で集光する方式。

⁵クーデ式：数枚の反射鏡を用いてカセグレン式での焦点を別室に固定された観測装置に焦点を導く方式。アンテナが駆動しても焦点が変わらないというメリットがある。

⁶もとは球面波であるが遠方界条件により平面波となる

(2) フロントエンド (受信機システム)

フロントエンドは受信機システムとも呼ばれ、観測周波数信号 (RF : Radio Frequency) を扱いやすい信号 (IF : Intermediate Frequency) に変換する為の装置である。フィードから送られた電波は、約 10K 程度まで冷却されたデュワーと呼ばれる装置に入る。この中で電波は左旋偏波 (LHCP) と右旋偏波 (RHCP) の 2 偏波に分解され、LHCP と RHCP それぞれで電波から電気信号へ変換される。その後 IF 系と呼ばれる装置に送られる。IF 系では処理がしやすい適切な信号に変換する為に周波数変換と周波数フィルタリング、増幅を行う。周波数変換を行うのは、観測周波数 (RF 信号) のままでは数 GHz と高周波であり信号処理をする事が難しいためであり、数十 MHz の低周波 (IF 信号) へと変換される。また、天体信号は大変微弱であるので、アンプ (増幅器) を用いて増幅しなければならない。周波数フィルタリングを行うのは、観測される信号のうち、必要な周波数帯域のみを抽出する為である。

(3) バックエンド (分光計、検波器)

バックエンドは得られた電波から強度検出する為の装置であり、輝線 (線スペクトル) 観測に用いる分光計と連続波観測に用いる検波器とがある。分光計の場合、受信機からの IF 信号はサンプラーで A/D 変換される。その後信号は計算機へ入り、デジタル分光計によって自己相関とフーリエ変換が行われパワースペクトル (周波数に対するパワーの関数) を得る。検波器の場合、IF 信号を 2 乗検波など行ってパワーを検出する (パワーメータ等)。それらによって得られたパワーを解析する事により、最終的に天体の速度やフラックスといった情報を知る事ができる。

(4) その他

茨城 32m 電波望遠鏡ではその他に、

- アンテナ駆動装置
- デハイド (フィードホーンに乾燥空気を充填させる装置)
- 水素メーザー (茨城局の基準となる電気信号を出し、すべての装置に分配されている)
- 光ファイバー (日立アンテナからの天体信号を高萩アンテナ観測室へ、または基準信号を高萩アンテナから日立アンテナへ送る)
- E/O - O/E 変換装置 (電気信号を光信号に、または光信号を電気信号に変換する)
- テープ記録装置 (VLBI での観測データを磁気テープに記録する為の装置)

といった装置がある。

第2章 アンテナ

2.1 概要

アンテナにおける空間分解能はパワーがピークの半値となる角度と定義されている。これをビームサイズもしくは半値全幅 (Half Power Beam Width) θ_{HPBW} [rad] と呼び、口径 D [m] と観測波長 λ [m] との関係は式 (2.1) で表される。

$$\theta_{\text{HPBW}} = K \frac{\lambda}{D} \quad (2.1)$$

K はアンテナ開口面上の電界分布の形状による係数でありガウス型であれば 1.2 程度になるが、実際には各アンテナ毎の仕様により異なる値を持つ。

2.2 必要となるアンテナ性能

アンテナに求められる性能は大きく指向性と集光力とに分けられる。指向性とはアンテナの向きに関する性能であり、ビームパターンと指向精度がある。集光力は天体信号を集める性能であり、開口能率と主ビーム能率が含まれる。他に必要とされる性能には高速駆動である事、天体追尾誤差が小さい事などが上げられる。茨城 32m 電波望遠鏡における駆動性能は日立アンテナで最大 $0.3^\circ/\text{sec}$ 、高萩アンテナでは最大 $0.1^\circ/\text{sec}$ と大変遅い¹仕様となっており、観測を行う際には十分注意する必要がある。

2.2.1 ビームパターン (アンテナパターン)

理想的なアンテナ指向性とは、ある特定の方向にのみ感度を持ち、それ以外の方向には感度を持たないものである。しかし実際のアンテナはある程度広がりを持った範囲に感度を持つ。このアンテナ受信感度の角度依存性の事をビームパターン (アンテナパターン) $P_n(\theta)$ という。その中で感度が最大になる方向含む広がり为主ビーム (メインローブ)、その周囲の感度の低い広がりをサイドローブ、各ローブ間で感度が 0 となるところをヌルという。

¹VERA 4 局では最大 $2.1^\circ/\text{sec}$ 、山口局では最大 $0.25^\circ/\text{sec}$ となっている

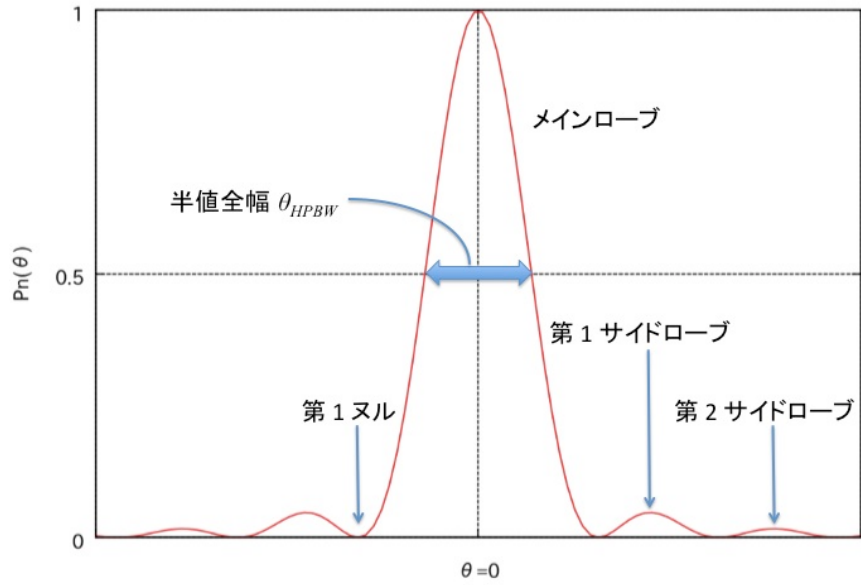


図 2.1: ビームパターン。横軸はアンテナの向いている中心方向 (光軸) からのズレ、縦軸は主ビームのピーク強度で規格化されたパワーを示している。

パラボラアンテナの場合、主ビームには通常 $P_n(\theta)$ として軸対称のガウス関数がモデル式として用いられる。一次元の場合、

$$P_n(\theta) = \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\theta}{\theta_{\text{HPBW}}} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

となる。

2.2.2 指向精度

指向誤差とは、アンテナ制御の際に指示した方向と実際の光軸とのズレの事である。

ズレの原因にはランダム誤差と系統誤差の 2 つがある。ランダム誤差とは測定による誤差であり、系統誤差とはシステムに起因する誤差の事である。また後者にはアンテナ構造により生じる再現性誤差と、熱や風によってアンテナが変形することで生じる非再現性誤差とに分けられる。非再現性によるものを取り除く事は難しいが、再現性誤差は 8 つのパラメータを用いたモデル式で表す事ができる。方位角 (Az) 方向のズレ $dAz \cos(El)$ は式 (2.3)、仰角 (El) 方向のズレ dEl は式 (2.4) である。式中における各パラメータは $Az \cdot El$ エンコーダ (角度読み取りセンサー) の原点ずれ ($A1, A2$)、天頂に対する Az 軸の東西・南北への傾き ($A3, A4$)、 Az 軸と El 軸の非直交性 ($A5$)、光軸と El 軸の非直交

性 (A7)、重力による鏡面の弾性変形 (A6, A8) を示している。

$$dAz \cos(El) = A1 \cos(El) + A3 \cos(Az) \sin(El) - A4 \sin(Az) \sin(El) + A5 \sin(El) + A7, \quad (2.3)$$

$$dEl = A2 - A3 \sin(Az) - A4 \cos(Az) + A6 \cos(El) + A8 \sin(El). \quad (2.4)$$

このモデル式はアンテナ制御プログラムに組み込まれており、パラメータを適切なものにする事により誤差を軽減する事ができる。

2.2.3 開口能率

開口能率 η_A はアンテナの性能のうち、どれだけ効率よく電波を集めているかのパラメータである。アンテナの物理的開口面積 A_p に対する実際に有効な開口面積 A_e の割合であり、

$$\eta_A = \frac{A_e}{A_p} \quad (2.5)$$

で表される。

観測されるアンテナ温度 T_A^* は、有効開口面積 A_e で受ける天体強度 F_ν を用いて表す事ができ、

$$\begin{aligned} kT_A^* &= \frac{1}{2} F_\nu A_e \\ &= \frac{1}{2} F_\nu \eta_A A_p \end{aligned} \quad (2.6)$$

となる。故に、開口能率 η_A が分かれば測定値より天体強度を求める事ができる。

η_A に影響を与える原因としては、副鏡等によるブロッキングや鏡面精度 (凸凹具合)、アンテナ鏡面の電場分布などがある。 η_A はこれらをまとめて、

$$\eta_A = \eta_s \eta_t \eta_{sf} \eta_{bl} \eta_{misc} \quad (2.7)$$

となる。ただし、 η_s はスピルオーバー能率、 η_t はテーパ能率、 η_{sf} は表面誤差、 η_{bl} はブロッキング能率、 η_{misc} はオーミックロスを示している。

(1) スピルオーバー能率とテーパ能率 アンテナ開口面の照射パターン (電場の強度分布) はスピルオーバー能率とテーパ能率によって決まる。スピルオーバー能率とはフィードから放射され副鏡で反射した電力が主鏡面でどれだけ漏れ出ているかを示している。受信で考える場合には主鏡面以外から入り込む電波の割合である。テーパ能率は開口面上の電場分布の一樣さを示している。開口面上の電場分布をガウス分布であると仮定し、開口中央部に対する開口端での電力強度比をエッジレベル [dB] とするとスピルオーバー能率とテーパ能率には図 2.2 の様な関係がある。

エッジレベルが小さいということは開口面上での電場が一樣に分布している事を示す。その為テーパ能率は高くなるが、開口から漏れる電力が多くなりスピルオーバー能率が悪化する。逆にエッジレベルが大きいと開口中心付近に電場が集中するためテーパ能率

が悪化するが、漏れる電力が減少するのでスピルオーバー能率は非常に高くなる。エッジレベルが約 11 [dB] のとき照射パターンによる能率は 0.81 で最大となる。

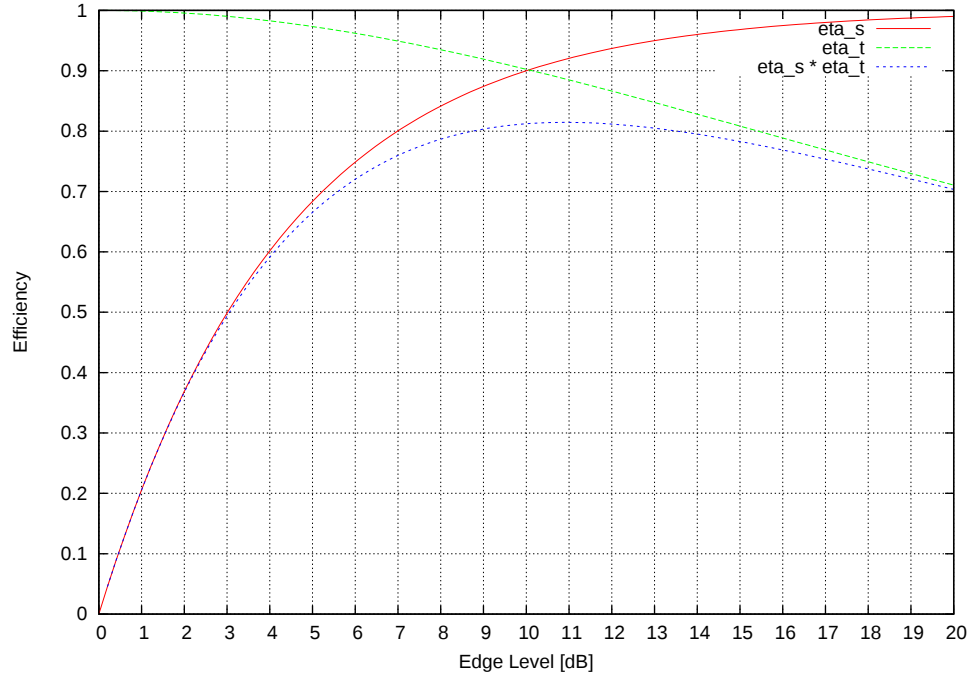


図 2.2: アンテナ開口の電場分布による能率の変化。赤はスピルオーバー能率 η_s 、緑はテーパー能率 η_t 、青は照射パターンによる全体の能率 $\eta_s \eta_t$ を示している。

(2) 鏡面誤差 天体からの電波は遠方界条件より平面波として伝達する。しかしアンテナで反射をする際、主鏡に理想的な放物面からのズレがあると反射後に位相誤差が生じる。焦点ではその位相誤差により、波が打ち消しあうため受信電力が低下する。放物面からのズレを ϵ とすると、鏡面誤差による能率 η_{sf} は

$$\eta_{sf} = \exp \left[- \left(\frac{4\pi\epsilon}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (2.8)$$

と表される。この周波数と鏡面誤差の関係をルッツの式という。ただしこれは鏡面の誤差がランダムであった場合の理想式である。

(3) ブロッキング能率 カセグレン式の望遠鏡では副鏡やその支持機構が主鏡の前に設置されている為、その方向からやって来る電波を受信する事ができない。これにより低下する受信能率の割合のことをブロッキング能率という。

(4) **オーミックロス** オーミックロスとは光学鏡面で反射する際に、金属の抵抗に起因する損失の事のことをいう。1 回当たりの反射による損失は式 (2.9) で表される。

$$1 - L^{-1} = 0.5 \sqrt{\frac{freq}{584[\text{GHz}]}} \quad [\%] \quad (2.9)$$

0.5 : 金属鏡がアルミである場合の係数
 $freq$: 観測周波数 [GHz]

光学系に設置された鏡の枚数 (主鏡、副鏡、反射鏡) を n とすると η_{misc} は

$$\eta_{\text{misc}} = 1 - \frac{n(1 - L^{-1})}{100} \quad (2.10)$$

茨城局の場合どちらのアンテナも計 6 枚 (主鏡、副鏡、反射鏡 4 枚) であるので、

	6.7GHz	8.4GHz	22GHz
$1 - L^{-1}$	0.054	0.060	0.097
η_{misc}	0.997	0.996	0.994

となる。

2.2.4 主ビーム能率

主ビーム能率は全ビーム立体角 Ω_M 対する主ビーム立体角 Ω_A の割合のことである。1 に近いほど主ビームで受けた信号の割合が大きくなる。つまり指向性が高く、性能が良い事を示している事になる。

$$\eta_M = \frac{\Omega_M}{\Omega_A}. \quad (2.11)$$

第3章 能率測定

3.1 目的

アンテナ性能のうち、アンテナのビームパターンと開口能率を 6.7GHz 帯と 8.4GHz 帯において調べ、明らかにする事が本研究の目的である。アンテナがどのような特性を持っているのかを正しく理解する事で、観測データを正しくキャリブレーションする事が可能となり、天体のフラックスや強度分布等を知る事ができる。

3.2 測定方法

3.2.1 観測天体

ビームパターンの測定には広がった構造を持たない天体を用いる必要がある。測定には、6.7GHz 帯のビームサイズ 4.8 [arcmin] と 8.4GHz 帯のビームサイズ 3.8 [arcmin] に対して広がり十分小さく、点源と見なす事が可能な天体を選んだ。開口能率の測定では、点源である事に加えて天体の絶対強度が既知である必要があるため、正確なフラックス密度が分かっている点源の中から選択し測定した (表 3.1)。しかしそれらは絶対強度が弱く、測定の相対的な誤差が大きくなるため精度の高い測定が難しい。そこで強度変動が激しく絶対強度は不明であるが、フラックス密度が 10 Jy 以上で強度の強い点源でも測定を行った (表 3.2)。強度変動は測定における時間スケール (半日程度) では変化しないものと仮定した。強い点源のデータ解析は、ある仰角での測定結果には、同じ仰角で得られたフラックス密度が既知の天体による開口能率が適用できるとして絶対強度を推定し、その上で式 (2.6) を用いて他 EI での開口能率を算出した。

	赤経 (RA)	赤緯 (DEC)	天体の広がり [arcsec]	フラックス密度 F_ν [Jy]	
				@6.668GHz	@8.400GHz
3C123	04 37 04.375	+29 40 13.819	23×5	11.76	9.29
3C286	13 31 08.288	+30 30 32.959	1.5×1.5	6.10	5.20
3C161	06 27 10.111	-05 53 04.713	3×3	4.82	3.79
3C48	01 37 41.299	+33 09 35.134	1.5×1.5	4.17	3.33

表 3.1: フラックス密度が分かっている天体 (Ott et al.1994)

	赤経 (RA)	赤緯 (DEC)	フラックス密度 F_ν [Jy]	
			@6.668GHz	@8.400GHz
3C273B	12 29 06.700	+02 03 08.598	約 33	約 28
3C84	03 19 48.160	+41 30 42.104	約 20	約 15
OV236	19 24 51.056	-29 14 30.121	約 16	約 12
4C39.25	09 27 03.014	+39 02 20.852	約 12	約 11

表 3.2: 10Jy 以上で全天で有数の強度を持つ天体。天体の広がりには分からないが一般的に点源であるとされている。強度は実際の測定値から推定した値を示した。

3.2.2 測定の概要

日立アンテナにおける測定は、6.7GHz 帯と 8.4GHz 帯の LHCP・RHCP の両偏波で行った。観測中心周波数 $\pm 256\text{MHz}$ の天体信号を、日立局観測室内に設置されたパワーメータで測定した。またパワーメータを PC につなぎ、VEE で作成された取り込みソフトを使用してそのデータを記録した。測定は On The Fly 法と呼ばれる方法で行った。これはアンテナを天体に対して連続的に動かしデータを取得する方法であり、短時間で広い範囲における強度の 2 次元分布を得る事 (マッピング) が出来る。今回は点源に対して $20[\text{arcmin}] \times 20[\text{arcmin}]$ の範囲で、図 3.1 のようにスキャンしデータを取得した。

ナイキストのサンプリング定理より、ビームパターンを十分な精度で得る為には $\theta_{HPBW}/2$ よりも狭いサンプリング間隔でデータを取得しなければならない。今回は 20 秒で 1 回の Az スキャンを行い、データ (パワーメータで検出されるパワー) を 1 秒に 5 点取得した。これはサンプリングが十分に密である事に対応する。21 回の Az スキャンを繰り返し行い、約 10 分で 1 枚のマップが得られた。通常であればマップは天体の輝度分布とアンテナのビームパターンの畳み込みされた強度分布となるが、天体に広がり構造のない点源を用いたため得られたマップはビームパターンそのものであると見なす事ができる (実際には角度のオフセットをかけて得られたマップであるので、実際のビームパターンは上下左右が逆である)。

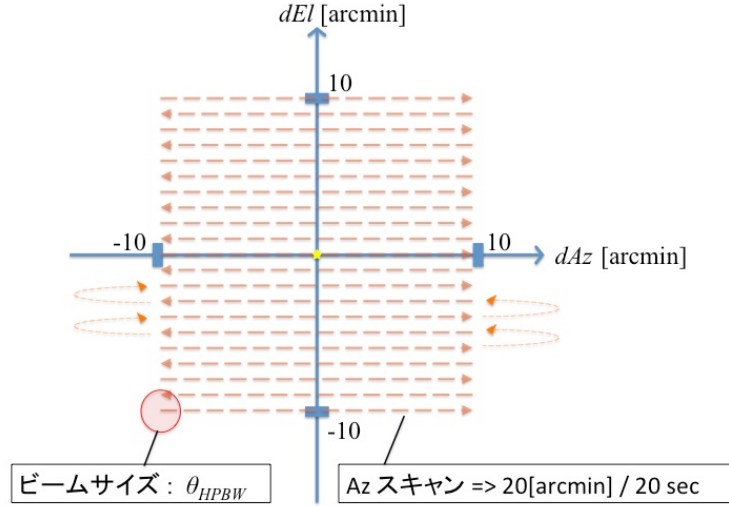


図 3.1: On The Fly 法：特定の領域をラスタースキャンし、データを連続的に取得する事で天体の撮像をする観測方法。今回は $(dAz, dEl) = (-10, -10)$ から方位角方向に $dAz = +20[\text{arcmin}]$ のスキャン、その後仰角方向へ $dEl = +1[\text{arcmin}]$ 移動し、再び $20[\text{arcmin}]$ の Az スキャンを行った。このようなラスタースキャンを $(+10, +10)$ まで繰り返す事で天体を中心とした領域のマップを取得した。

3.2.3 解析手法

取得されたデータ（パワー）は 1 点毎に チョッパーホイール法 (R-sky 法) でアンテナ輝度温度 T_A^* に変換した。オフ点にはその Az スキャンをした時の端と端の点 ($dAz = -10[\text{arcmin}]$ と $+10[\text{arcmin}]$) を線形で補完した値を、R のパワーには各測定前に行った T_{sys}^* と tau 測定のものを使用した。その後式 (2.6) を用いて観測されたフラックス密度 $F_{\text{obs}} (= \eta_A F_\nu = 2kT_A^*/A_p)$ に直し、得られたマップを dAz と dEl に対するフラックス密度分布へと変換した。

指向誤差を補正するため各マップごとに軸対称のガウス関数である

$$P(dAz, dEl) = a \exp \left[-4 \ln(2) \frac{(dAz - b)^2 + (dEl - c)^2}{d^2} \right] + e \quad (3.1)$$

のモデル式に最小自乗法で近似し（フィッティング）、観測されたピーク強度 a を推定した（式中で b, c は指向誤差、 d は半値幅 θ_{HPBW} 、 e はベースラインを表すパラメータである）。ピーク強度でマップ内のデータを規格化する事でビームパターンを得た。開口能率は観測されたフラックス密度のピーク強度 F_{obs} と既知の絶対強度 F_ν から $\eta_A = F_{\text{obs}}/F_\nu$ を用いて計算した。

3.3 結果・考察

3.3.1 測定諸元

8.4GHz 帯における測定は 2011 年 6 月と 10 月の 2 回行った。6 月の測定では強度の強い 3C273B (約 28[Jy])、4C39.25 (約 11 [Jy]) を選び測定した。またキャリブレーション用として 3C286 (5.20[Jy]) を 1 枚測定した。10 月にはより広い仰角範囲を調べるため $\text{El} = 85^\circ$ までのぼる 3C286 と 3C48 (3.33[Jy]) の追加測定をした。受信した周波数帯域は 8144 - 8656 MHz、中心周波数は 8400MHz である。観測日時とシステム雑音温度 T_{sys}^* は表 3.3 の通りである。

JST	観測天体	天候	気温 [$^\circ\text{C}$]	El 範囲	map 数	LHCP		RHCP	
						T_{sys}^* [K]	τ	T_{sys}^* [K]	τ
06/07 10:00-15:30	4C39.25	曇り	21.4	20° - 83°	31	30.1	0.011	23.6	0.010
06/07 15:55-16:05	3C286	曇り	22.9	50°	1	30.2	0.011	23.7	0.010
06/16 13:00-16:00	3C273B	晴れ	22.4	8° - 41°	17	30.6	0.012	24.2	0.012
10/12 05:00-13:15	3C286	曇り	15.6	9° - 78°	34	27.9	0.011	21.5	0.011
10/26 04:15-10:40	3C273B	晴れ	15.8	7° - 55°	35	26.8	0.009	20.5	0.009
12/28 11:00-18:05	3C48	晴れ	8.3	6° - 79°	36	26.0	0.009	21.2	0.009

表 3.3: 8.4GHz 帯の測定天体と諸元

6.7GHz 帯の測定は 2011 年 12 月上旬と下旬の 2 回行った。1 回目の測定は強度の強い 3C273B (約 33[Jy])、3C84 (約 20[Jy])、OV236 (約 16[Jy])、4C39.25 (約 12[Jy]) とキャリブレーション天体である 3C286 (6.10[Jy])、3C48 (4.17[Jy]) を選んだ。しかし 3C286 と 3C48 の測定は悪天候下であった為、精度の悪い結果となってしまう開口能率を求める事はできなかった。2 回目の測定は、その反省を踏まえ天候の良い日を選び実施した。天体にはキャリブレーション天体である 3C123 (11.76[Jy]) と 3C161 (4.82[Jy])、3C286、3C48 の 4 天体を選び、どれが一番相対的な誤差が小さく精度が高いかを検証した。また 3C286 を用いて再現性の確認も行った。受信周波数帯域は 6412 - 6924 MHz、中心周波数は 6668 MHz である。観測日時とシステム雑音温度 T_{sys}^* は表 3.4 と表 3.5 に記す。

JST	観測天体	天候	気温 [°C]	El 範囲	map 数	LHCP		RHCP	
						T_{sys}^* [K]	τ	T_{sys}^* [K]	τ
12/03 01:15 - 07:40	3C286	晴れ	8.6	6°-78°	35	26.9	0.013	25.7	0.013
12/03 20:30 - 04:00	4C39.25	雨	12.8	6°-83°	40	26.0	0.011	24.9	0.011
12/08 15:30 - 19:10	3C48	雨	5.1	34°-70°	17	24.6	0.014	23.7	0.015
12/22 00:30 - 06:55	3C273B	晴れ	4.8	7°-55°	32	24.6	0.009	23.5	0.009
12/22 09:15 - 12:00	OV236	晴れ	4.8	6°-22°	15	24.5	0.009	23.5	0.009
12/22 13:00 - 16:05	3C84	晴れ	8.1	7°-34°	17	24.8	0.009	23.9	0.009

表 3.4: 6.7GHz 帯における一回目の測定天体と諸元

JST	観測天体	天候	気温 [°C]	El 範囲	map 数	LHCP		RHCP	
						T_{sys}^* [K]	τ	T_{sys}^* [K]	τ
12/27 06:55 - 13:30	3C286	晴れ	-0.6	83°-11°	36	24.4	0.009	23.3	0.009
12/28 18:53 - 23:00	3C161	晴れ	4.6	8°-46°	24	24.6	0.009	23.7	0.009
12/28 23:30 - 06:05	3C286	晴れ	1.8	6°-79°	33	24.7	0.009	23.8	0.009
12/29 07:17 - 13:30	3C286	晴れ	10	77°-10°	33	25.8	0.009	24.7	0.009
12/29 14:40 - 22:00	3C123	晴れ	10	7°-81°	37	25.8	0.009	24.7	0.009
12/29 23:30 - 04:05	3C161	晴れ	4.4	47°-17°	25	25.9	0.009	24.9	0.009
1/13 12:30 - 17:10	3C48	晴れ	10.3	27°-81°	41	25.9	0.009	24.7	0.009

表 3.5: 6.7GHz 帯における二回目の測定天体と諸元

3.3.2 8.4GHz 帯 (X band)

(1) ビームパターン

図 3.2 と図 3.3 はビームパターンの測定結果である。El = 20° 毎の測定例を LHCP と RHCP とともに示した。主に 3C273B による結果を示したが 3C273B の最大仰角が El = 55° である為、それより高仰角におけるビームパターンは 4C39.25 の結果を示した (観測天体によりビームパターンが変化する事はなかった)。なおビームパターンはピーク強度で規格化した。

図 3.2 において、中央で同心円状の分布をしているのは主ビームであり、図 2.1 を $\theta = 0^\circ$ の軸の周りに 360° 回転させたものを上から見たものに相当する。これより軸対称性がある事が確認できる。主ビームの周囲にリング状に存在している第一サイドローブは、主ビームのピーク強度に対して約 4 % 程度である事が分かる。円の中心から 5 [arcmin] 付近には第一ヌルが存在している。仰角依存性に着目すると、高仰角においてはサイドローブが半分消失している。アンテナが元々低仰角の静止衛星を捉える為のものであり、副鏡が重力変形を考慮して低仰角時に焦点が合う様に最適化されていることが原因であると思われる。高仰角では副鏡が焦点位置よりも上側にズレる為、ビームパターンの下側 (観測されたマップとは上下左右が逆) が消失したと考えられる。また、LHCP と RHCP は残差が約 3% 程度で一致している事が分かった。

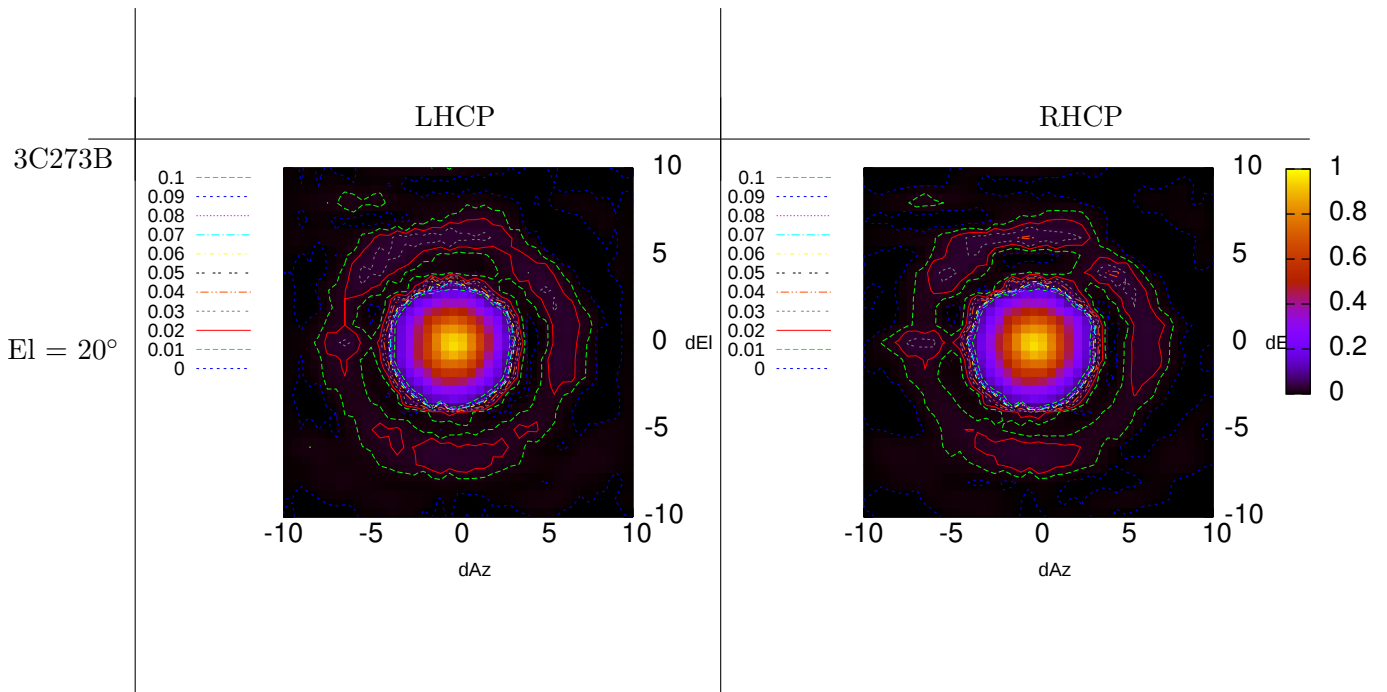


図 3.2: El = 20 におけるビームパターン。カラーバーは LHCP, RHCP とともに共通である。サイドローブの強度を示す為、ピーク強度の 0.1 以下に 0.01 毎のコントラストを示した。

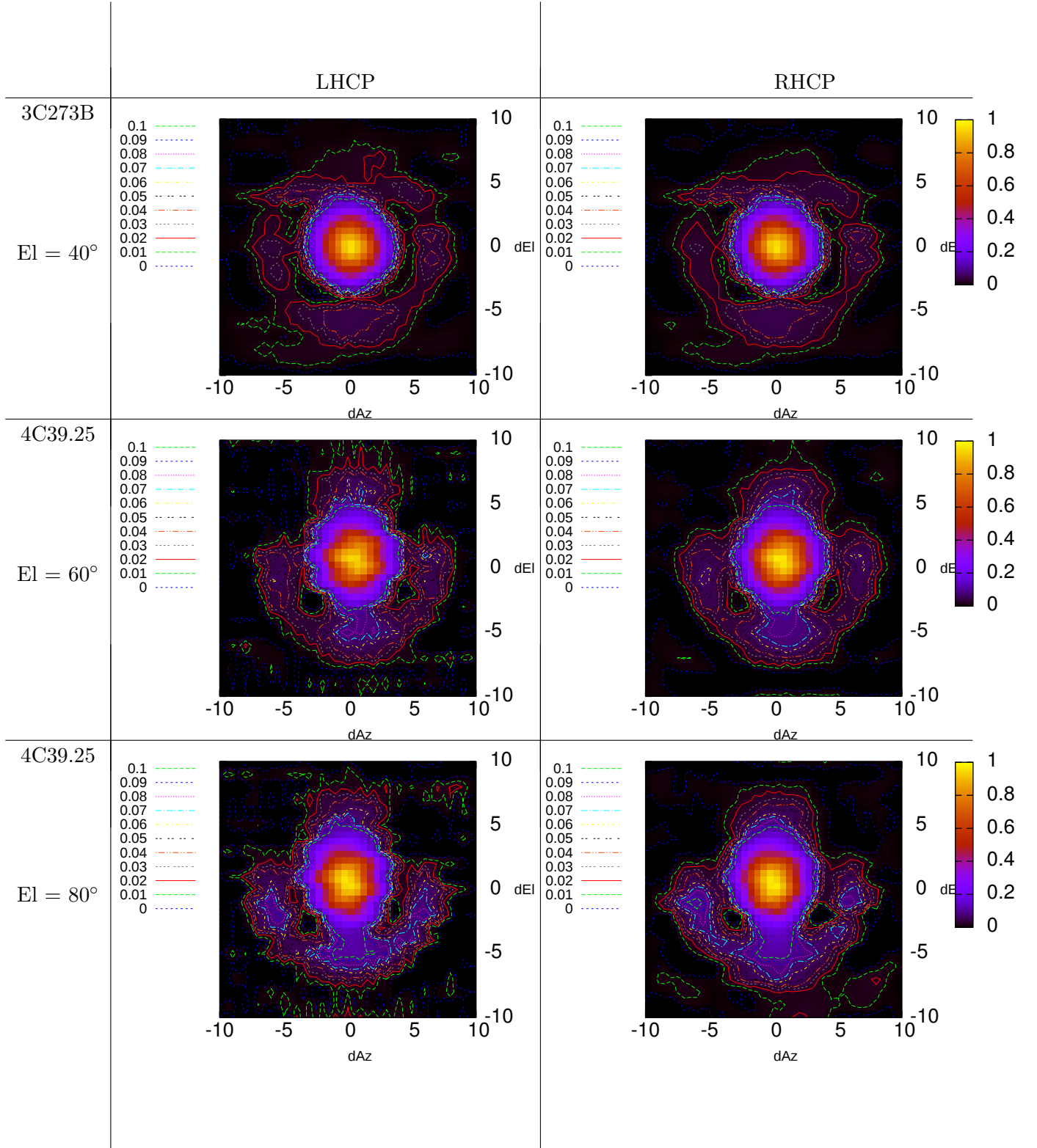


図 3.3: 8GHz 帯におけるビームパターンの仰角依存性

(2) 開口能率

測定結果の開口能率を仰角に対して示したものが図 3.4 (LHCP) と図 3.5 (RHCP) である。エラーバーはガウス関数にフィッティングした際のエラー値と測定誤差¹を足し合わせたものである。いずれの天体の測定においても同様の結果が得られ、再現性が確認された。開口能率は LHCP と RHCP 共に、 $El = 20^\circ$ 付近で約 0.72 程度で最大となり、仰角が大きくなるにつれて悪化し $El = 80^\circ$ 付近では約 0.53 程度となった。また開口能率の結果を、仰角 El を関数とする 3 次多項式に近似した。近似曲線のモデル式には山口 32m 電波望遠鏡で採用されているものと同様なものを使用した²。最適にフィッティングされた近似曲線は式 (3.2) と式 (3.3) となり、図 3.4 と図 3.5 にもその曲線を示した。

$$\eta_{L8}(El) = 1.37912 \times 10^{-6} El^3 - 0.000207815 El^2 + 0.00621504 El + 0.657819, \quad (3.2)$$

$$\eta_{R8}(El) = 1.0603 \times 10^{-6} El^3 - 0.00017171 El^2 + 0.00498983 El + 0.670286. \quad (3.3)$$

残差よりこの近似曲線は実測値に対し $\pm 5\%$ の精度を持つ。

結果には仰角依存性があるが、この原因としては鏡面精度の低下もしくは照射パターンの変化による開口能率の低下が考えられる。前者はルッツの式とアンテナの仕様によって決まる。

¹測定誤差として各 map の $dEl = -10[\text{arcmin}]$ における Az スキャン時のパワーの標準偏差を用いた。 $dEl = -10[\text{arcmin}]$ の Az スキャンはサイドローブにかかっておらずオフ点 (BlankSky) だけを見ており、そのときの測定誤差は map 中における測定点すべてに共通すると仮定した

²4 次関数でも行ったが、3 次関数との相違は見られなかった

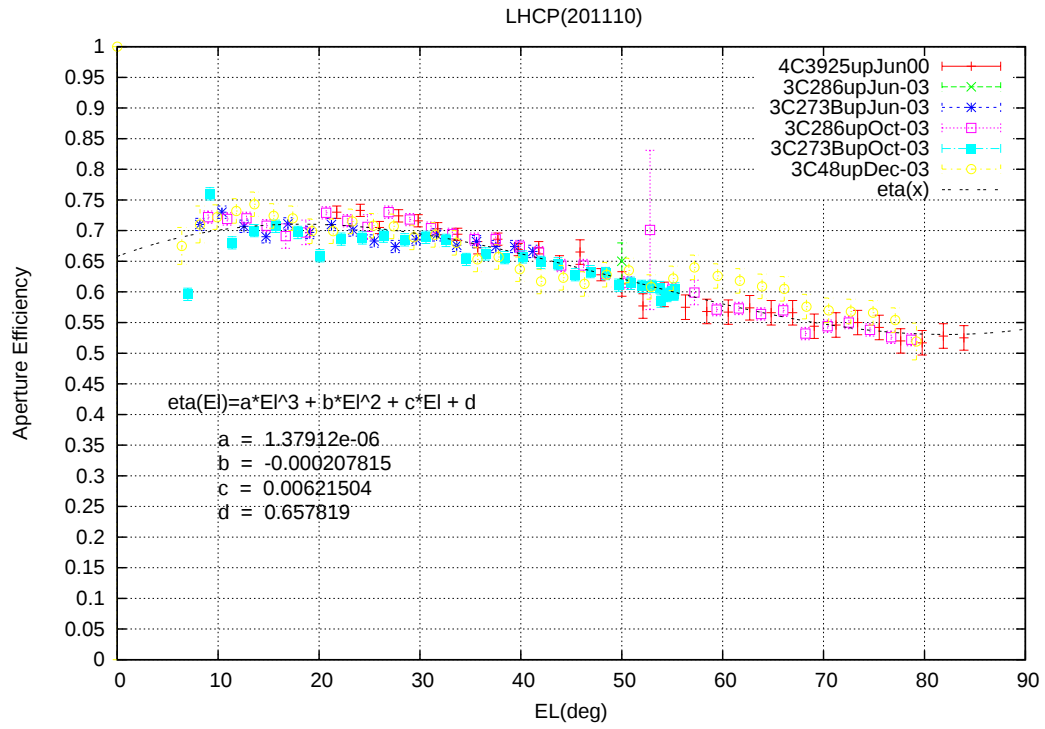


図 3.4: 開口能率 (LHCP@Xband)

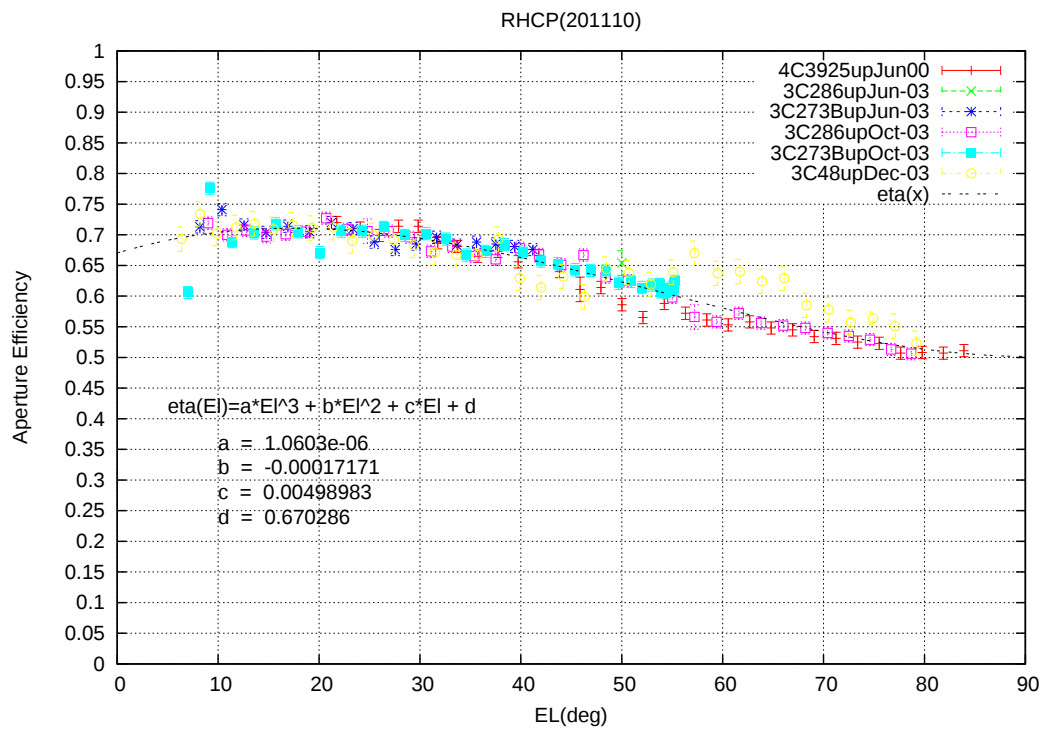


図 3.5: 開口能率 (RHCP@Xband)

(3) ビームサイズ

ビームサイズはこれまでのポインティング測定の副産物として約 3.8[arcmin] である事が分かっていった。今回はビームパターンを測定する事で、正確な測定結果を得る事ができた。測定結果は図 3.6 と 3.7 の通りであった。若干の仰角依存性は見られるが、LHCP も RHCP も共に約 3.8[arcmin] である事が確認された。

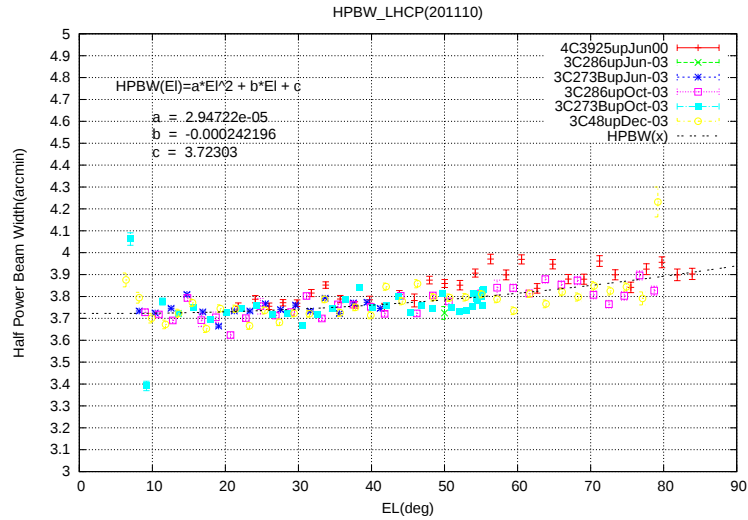


図 3.6: 半値幅 (LHCP@Xband)

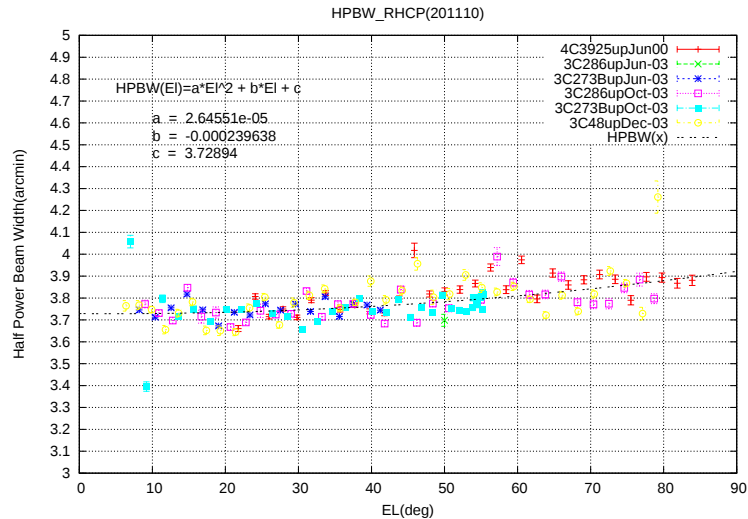


図 3.7: 半値幅 (RHCP@Xband)

ビームサイズは式 (2.1) で表され、今回得られた値は $K = 1.0$ 程度に相当する。一般的な電波望遠鏡 (カセグレンアンテナ) は $K = 1.2$ であるのに対し、ビームサイズが小さく

なったのは衛星用アンテナ (茨城 32m 鏡は修正カセグレンアンテナ) である為だと思われる。アンテナはビームサイズを狭くするとサイドローブの寄与が多くなるため天文学では観測精度が悪くなるが、通信用においては指向性を高める事がより重要であった為、このような仕様になっているのではないかと考えられる。

3.3.3 6.7GHz 帯 (C band)

(1) ビームパターン

図 3.8 と図 3.9 は 6.7GHz 帯におけるビームパターンの測定結果である。8.4GHz 同様、 $EI = 20^\circ$ 毎の測定例を LHCP と RHCP とともに示した。 $EI = 20^\circ$ と 40° のビームパターンは 3C273B、 $EI = 60^\circ$ と 80° のビームパターンは 3C123 の結果を示した。

主ビームは軸対称で、第一サイドローブは主ビームのピーク強度に対して約 3% 程度である。また、LHCP と RHCP は残差が 5% 程度で一致している。高仰角でサイドローブが半分消失してしているが、8.4GHz 帯と同様の理由であると考えられる。

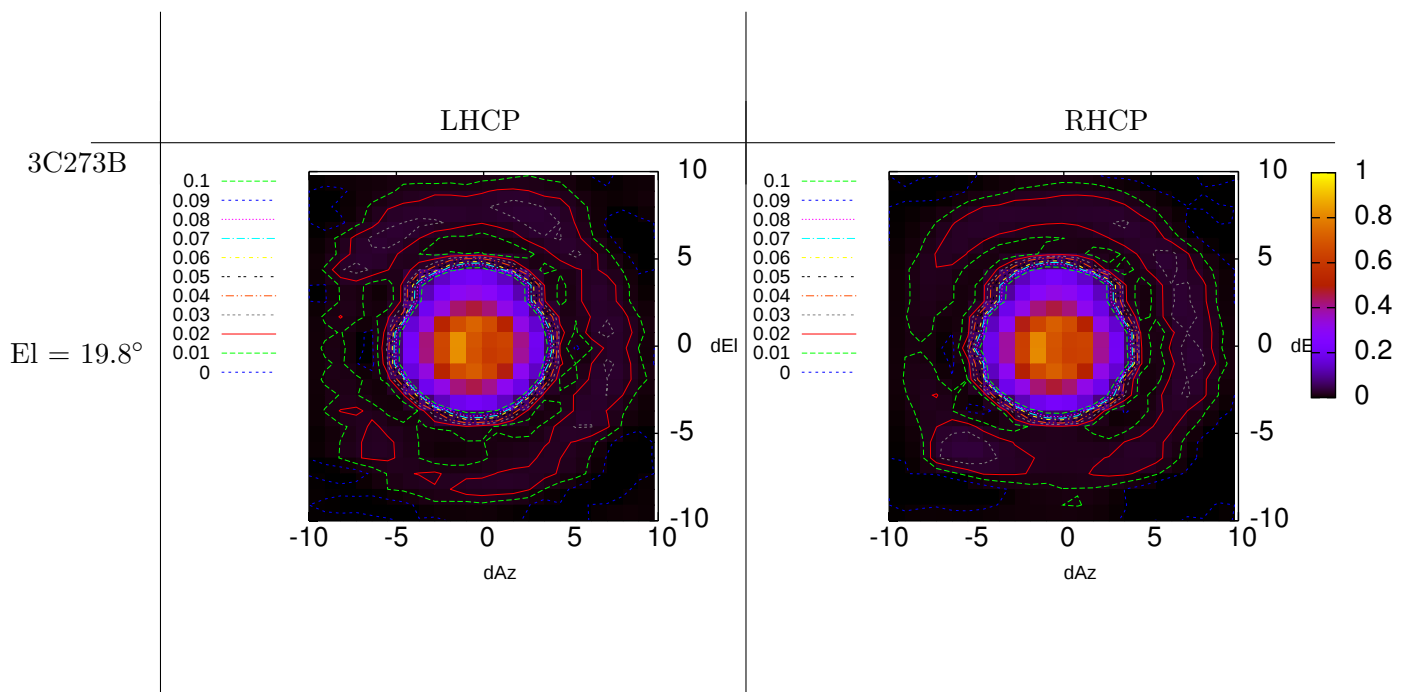


図 3.8: $EI = 20^\circ$ 付近のビームパターン

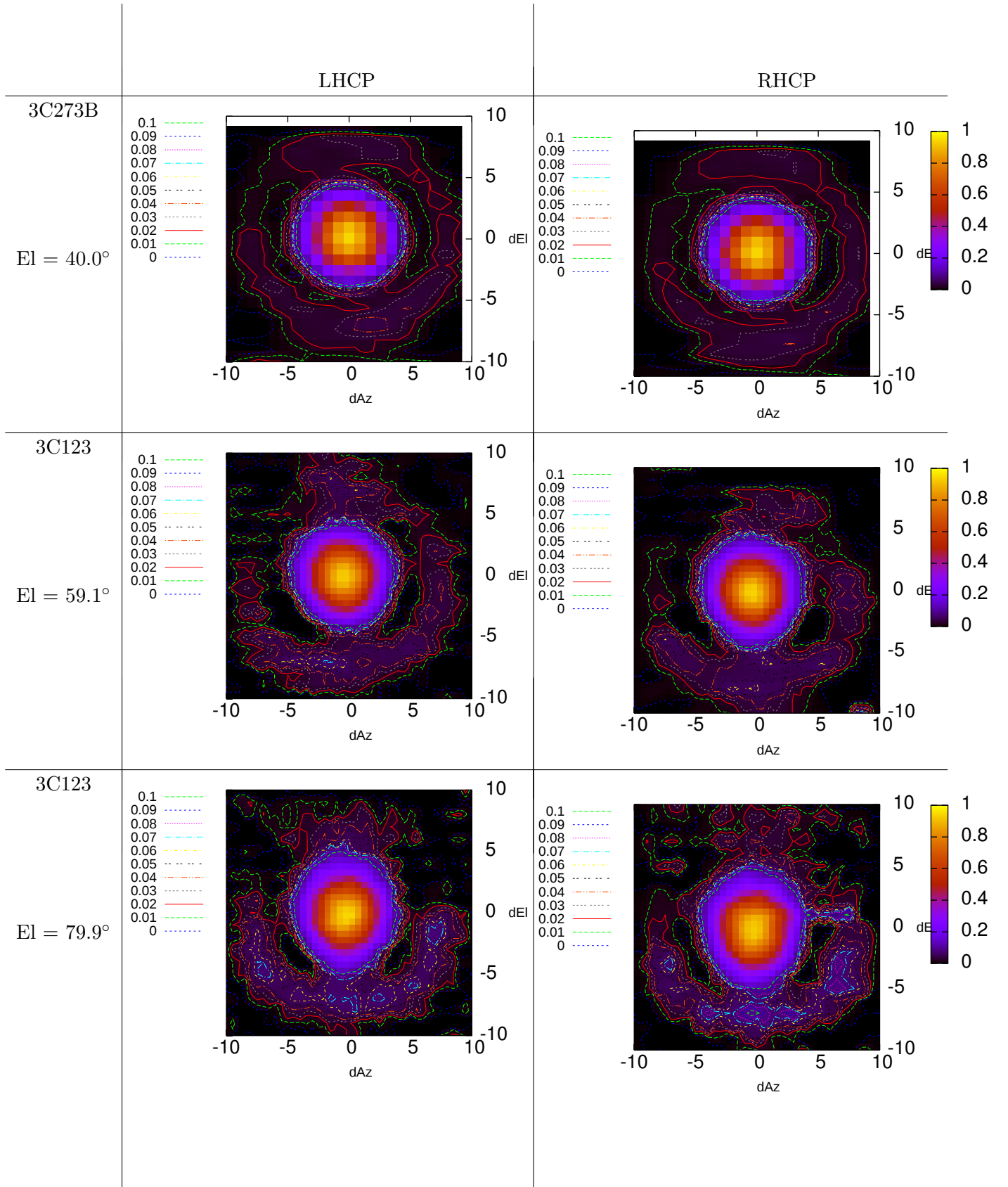


図 3.9: 6.7GHz 帯におけるビームパターンの仰角依存性

(2) 開口能率

誤差の評価方法は 8.4GHz 帯と同様である。図 3.10 と図 3.11 は一回目の測定による結果である。3C286、3C48、4C39.25 でばらつきが大きくなっているのは雨等の天候により相対的な誤差が大きかった事が影響した。

2 回目の測定 (図 3.12 と図 3.13) で用いた天体は、強度自体が小さいため誤差は大きいですが、1 回目の測定結果と似た傾向が得られた。3C161down で高い開口能率が得られたのは低仰角においてスカイラインの影響があったと思われる。天体追尾が上りであるか下りであるかに違いが見られるかどうかを 3C286 を用いて測定したが、誤差の範囲で一致した。3C123 は約 11[Jy] と強度が強いため誤差が $\pm 1\%$ の非常に良い結果が得られた。この結果をキャリブレーションの基準として、1 回目の測定のうち天候の影響を受けず強度が強い天体を用いて再度計算すると、図 3.14 と図 3.15 の結果が得られた。近似式には 8.4GHz 帯と同様に 3 次多項式を使用した。結果は式 (3.4) と式 (3.5) の通りである。

$$\eta_{L6}(El) = 7.50981 \times 10^{-7} El^3 - 0.000113888 El^2 + 0.002746 El + 0.717936 \quad (3.4)$$

$$\eta_{R6}(El) = 5.55793 \times 10^{-7} El^3 - 8.86508 \times 10^{-5} El^2 + 0.00226678 El + 0.706143 \quad (3.5)$$

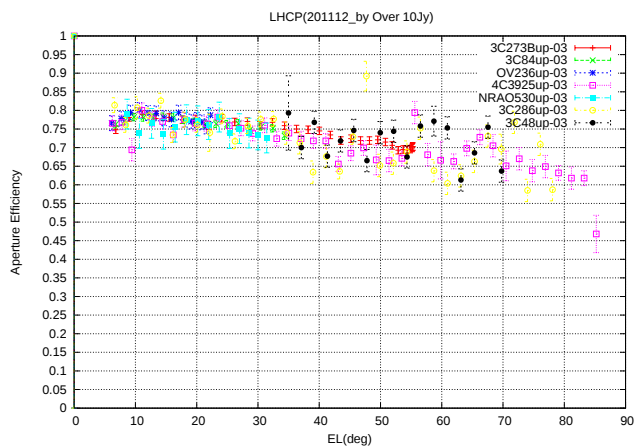


図 3.10: 12 月 1 回目測定 LHCP

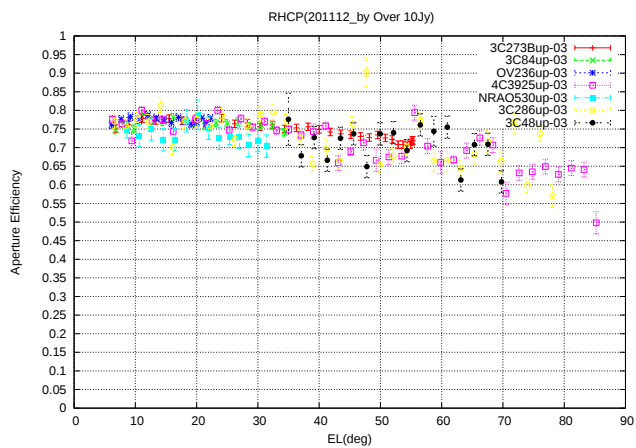


図 3.11: 12 月 1 回目測定 RHCP

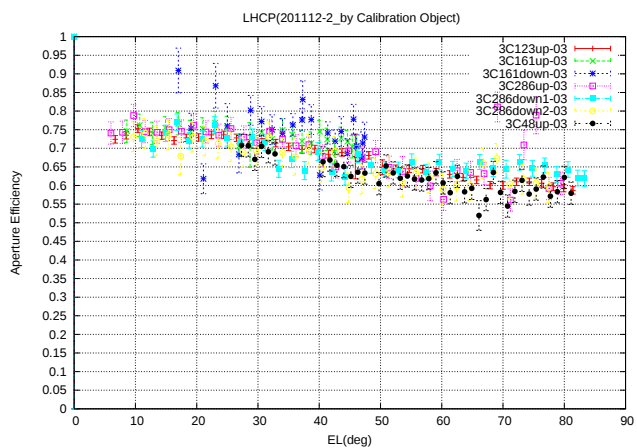


図 3.12: 12 月 2 回目測定 LHCP

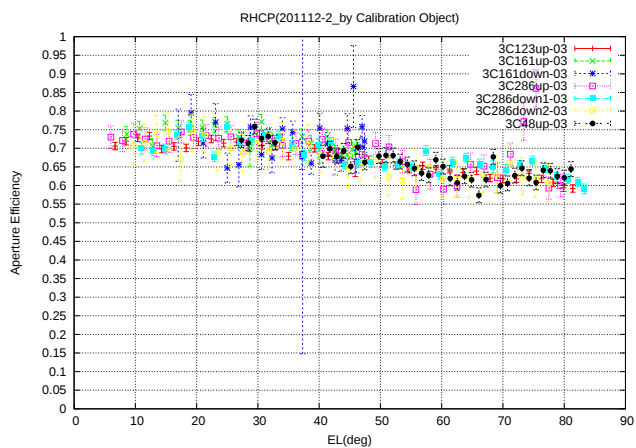


図 3.13: 12 月 2 回目測定 RHCP

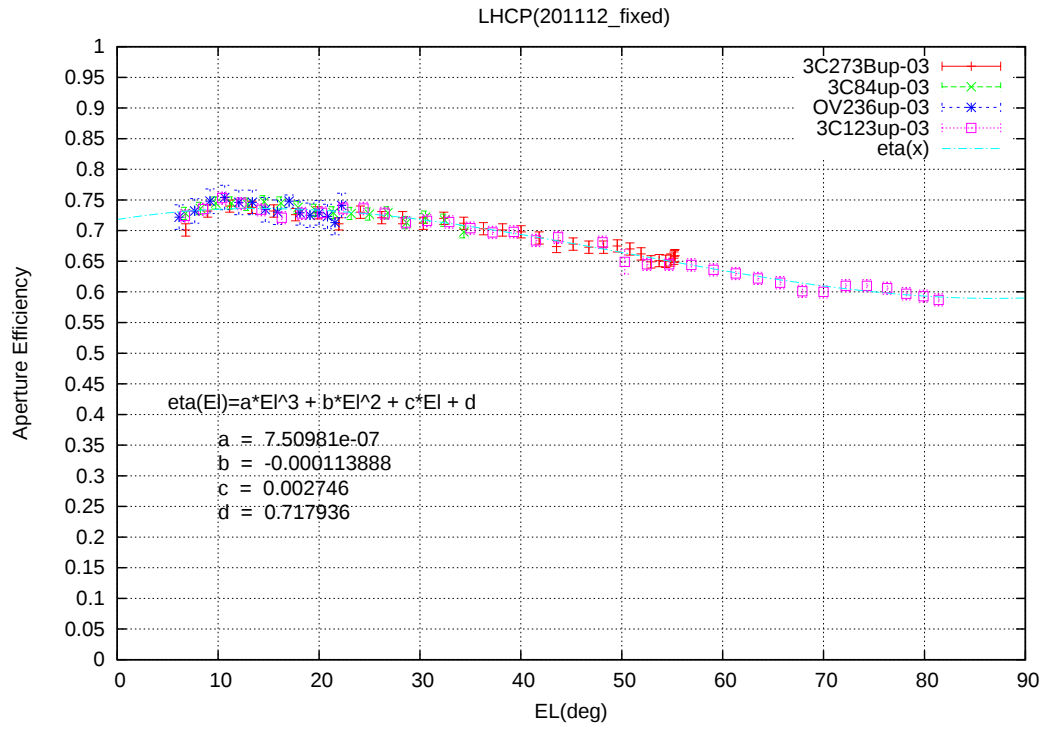


図 3.14: 開口能率 (LHCP@Cband)

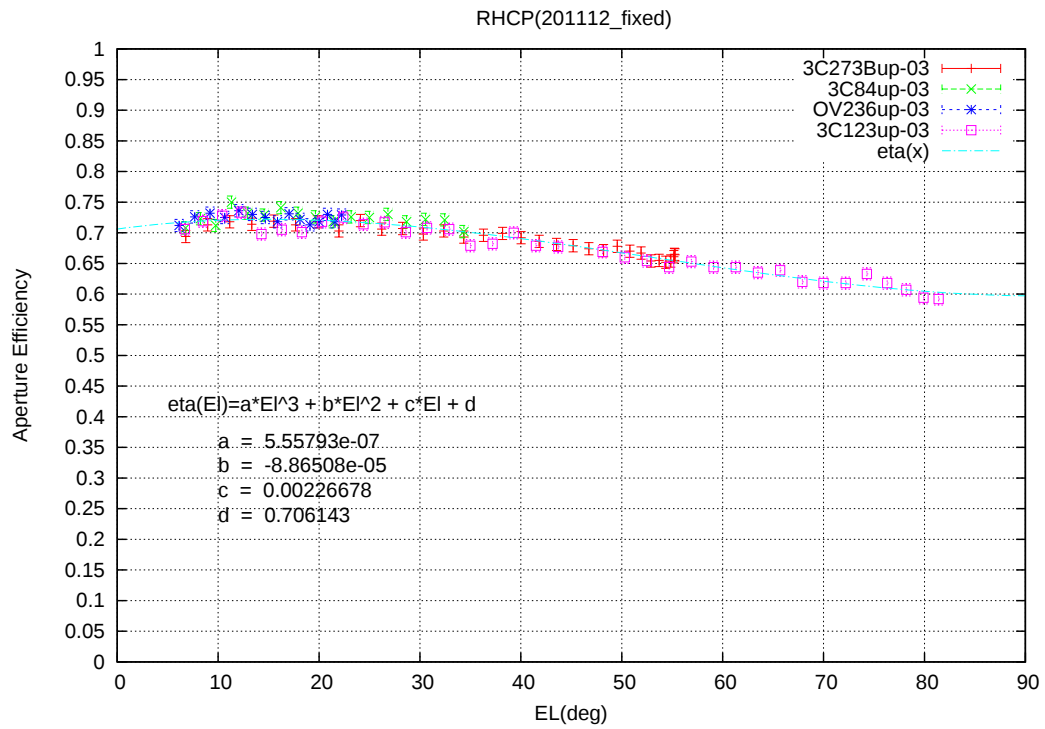


図 3.15: 開口能率 (RHCP@Cband)

(3) ビームサイズ

6.7GHz 帯におけるビームサイズはこれまで正確に測定された事はなかった。今回の測定により LHCP ,RHCP 共に約 4.6[arcmin] である事が分かった。

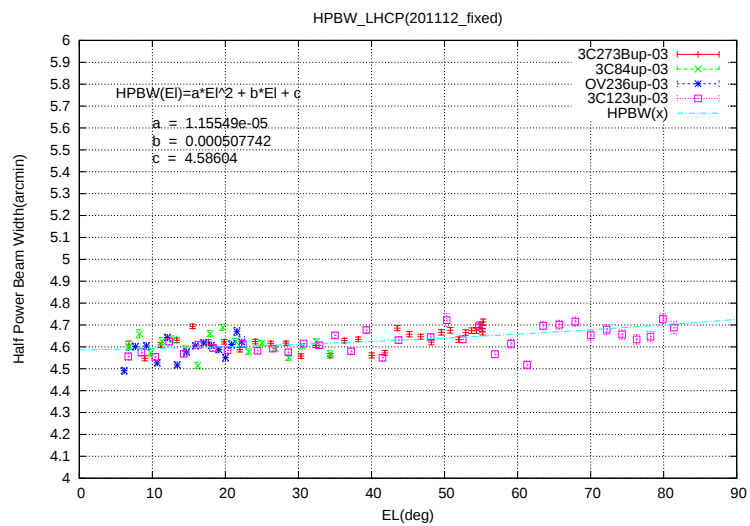


図 3.16: 半値幅 (LHCP@Cband)

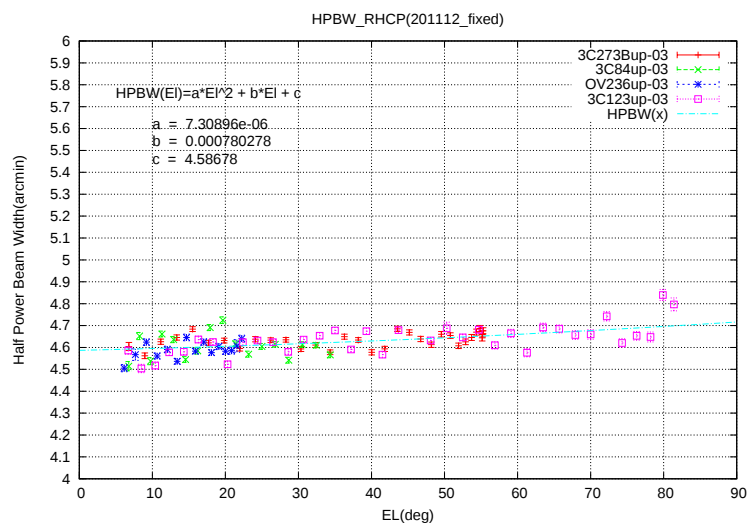


図 3.17: 半値幅 (RHCP@Cband)

8.4GHz 帯と同様仰角が高くなるにつれて、ビームサイズが大きくなっている。

3.4 開口能率の周波数帯域依存性に関する考察

図 3.18 は 6.7GHz 帯と 8.4GHz 帯の開口能率の比較である。これより高周波の電波ほど開口能率が低くなるという事が考えられる。

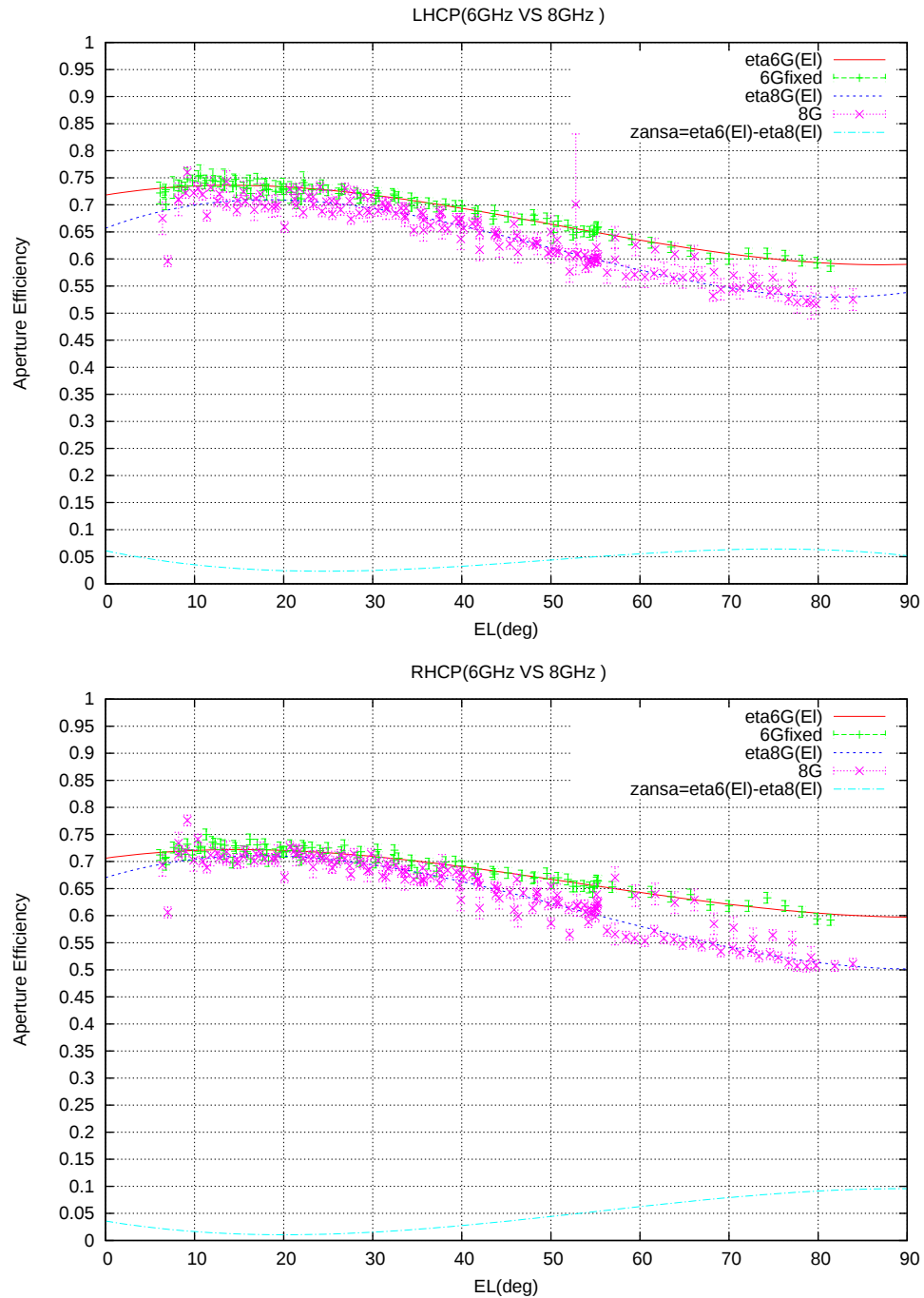


図 3.18: 6.7GHz 帯開口能率と 8.4GHz 帯開口能率の比較。残差も合わせて記した。

開口能率 η_A と周波数の関係はルッツの式で表される。今回得られた測定結果がこの関係と一致するかを検証した (LHCP と RHCP には相違がないため LHCP のみ議論した)。

開口能率 η_A は式 (2.7) と式 2.8 より式 (3.6) で表され、日立アンテナにおけるパラメータは表 3.6 の通りである。

$$\eta_A = \eta_s \eta_t \eta_{bl} \eta_{misc} \exp \left[- \left(\frac{4\pi\epsilon}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

El		η_{misc}	η_{bl}	η_A (LHCP)
35°	6.7GHz 帯	0.997	0.96	0.707 $\pm$ 0.03
	8GHz 帯	0.996	0.96	0.680 $\pm$ 0.05
90°	6.7GHz 帯	0.997	0.96	0.590 $\pm$ 0.03
	8GHz 帯	0.996	0.96	0.539 $\pm$ 0.05

表 3.6: 日立アンテナにおける各パラメータと測定結果。 η_{misc} は式 (2.10) において鏡を 6 枚 (主鏡、副鏡、反射鏡 4 枚) として計算した。 η_{bl} は三菱検査報告書を参照した。 η_A には近似曲線 (式 (3.2) から式 (3.5)) を用いた値を使用した。誤差は近似式の残差である。

式 (3.6) のうち η_A に影響するパラメータは照射パターンである $\eta_s \eta_t$ か鏡面誤差 ϵ である。しかし $\eta_s \eta_t$ は設計当時の資料がなく、またその値を測定する事も難しい。その為照射パターンは図 2.2 より最良値である 0.81 であると仮定し、 η_A の低下はすべて ϵ によるものであるとした。6.7GHz 帯と 8.4GHz 帯の測定結果 η_A を観測波長 λ [m] の関数とする式 (3.6) を用いて最小自乗法で近似して、 ϵ を推定した。開口能率には仰角依存性があるため、各仰角毎 (El = 35 ° と El = 90 °) で行った。結果は図 3.19 であり、また推定された ϵ と昭和 58 年の三菱検査報告書による ϵ は表 3.7 の通りである。

El	三菱検査報告書 ϵ [mm]	測定結果より推定された ϵ [mm]
35°	0.414	1.05 $\pm$ 0.01
90°	1.07	1.79 $\pm$ 0.08

表 3.7: 鏡面誤差 ϵ の比較

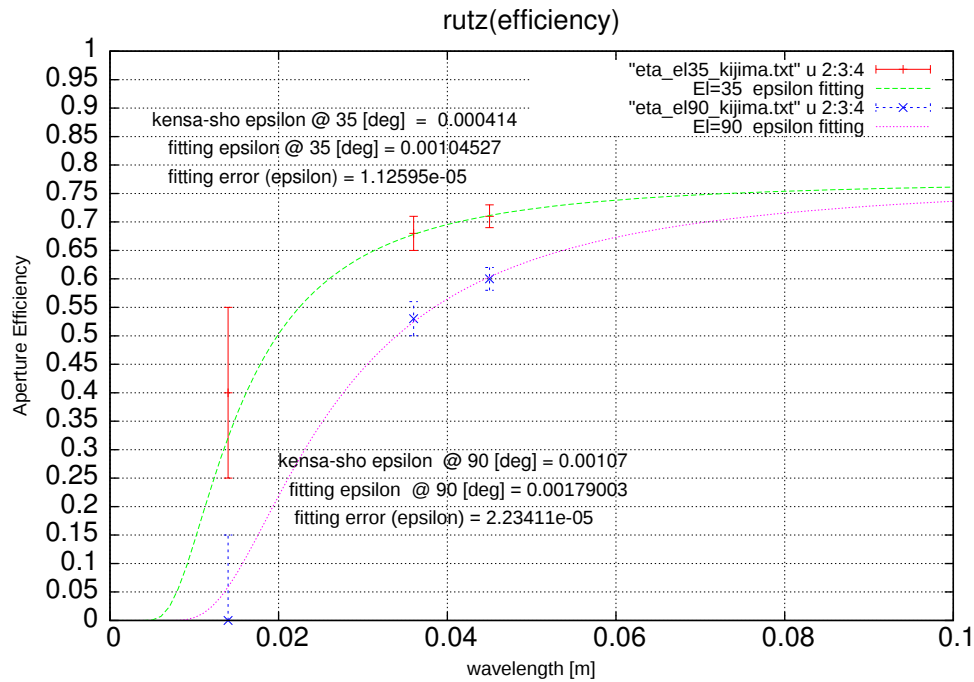


図 3.19: $EI = 35^\circ$ (赤) と $EI = 90^\circ$ (青) における開口能率 η_A の測定結果 (近似曲線によるもの) を横軸を波長 (6.7GHz 帯は 4.5[cm]、8.4GHz 帯は 3.6[cm] の波長である) としてプロットし、近似曲線とともに示した。22GHz (1.4[cm]) における測定値は 2010 年 2 月に常温受信機にて測定された参考記録 (常温受信機であった為測定誤差が大きい) であり、近似には用いていない。

図 3.19 より得られたルッツの式は 22GHz 帯における参考記録とも誤差の範囲で一致し、正しい事が確認された。 $\eta_s \eta_t$ は 0.81 であるとしているが、式 (3.6) よりこの項は y 軸方向の切片の様なものであり、傾き自体に大きく効く訳ではない。その為それぞれの仰角における 6.7GHz 帯よりも 8.4GHz 帯の方が開口能率が低くなる周波数依存性は鏡面誤差によるものが大きいと考えられる。

また日立アンテナが製造された 1983 年から約 30 年経過した事により、表 3.7 の様に鏡面誤差自体も悪化したと思われる。

第4章 まとめ

4.1 結論

今回の測定では茨城 32m 電波望遠鏡日立アンテナに搭載されている 6.7-8.4GHz 帯広帯域受信機を用いて、日立アンテナにおける 6.7GHz 帯と 8.4 GHz 帯のビームパターンと開口能率の測定を行った。6.7 GHz 帯のビームパターンの主ビームは $\theta_{\text{HPBW}} = 4.6[\text{arcmin}]$ の軸対称なガウス関数で表され、サイドローブ強度は約 4% 程度であった。開口能率は $\text{El} = 10^\circ$ 付近の 0.75 から仰角が大きくなるにつれ悪化し、 $\text{El} = 80^\circ$ で 0.60 となった。また測定結果を 3 次多項式に近似し、誤差が ± 0.03 と精度のよい近似曲線を得た。8.4 GHz 帯のビームパターンは $\theta_{\text{HPBW}} = 3.8[\text{arcmin}]$ の軸対称なガウス関数であり、サイドローブは約 5% 程度であった。開口能率は $\text{El} = 20^\circ$ 付近の 0.72 から仰角が大きくなるにつれ悪化し、 $\text{El} = 80^\circ$ で 0.53 であった。近似曲線の誤差は ± 0.05 である。また、同仰角における開口能率の周波数依存性は $\text{El} = 35^\circ$ では $\epsilon = 1.05[\text{mm}]$ の、 $\text{El} = 90^\circ$ では $\epsilon = 1.79[\text{mm}]$ の鏡面誤差の場合のルッツの式によるものと一致した。

4.2 今後の課題

1. 本研究では連続波を観測し開口能率を測定した。そのためこの結果が輝線観測にも適用できるかどうかを検証する必要がある。
2. より広い範囲でのビームパターンを測定し、サイドローブの影響のないオフ点を求める必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方にご指導とご協力を頂きました。

指導教員である百瀬先生には天文学の基礎をはじめ観測装置、論文・ポスター作成にいたるまで3年間親身にかつ熱心にご指導いただきました。高萩研究において直接的にご指導いただいた米倉先生には望遠鏡の仕組みや研究の進め方等多くの助言を頂きました。アンテナや高萩での研究を進めるにあたり多くの助言を頂き、大変お世話になりました。岡本先生には学部1年次物理学ゼミナールの天文学入門から Radiative Process ゼミまで丁寧にご指導いただきました。また高萩での研究を進めるにあたりお世話になりました宇宙科学研究教育センター、大阪府立大、山口大など多くの関連機関の方々に感謝致します。

長い大学生活を様々な面で支えてくれた家族に感謝致します。最後に同じく研究を進め、時に議論し合い支え合った研究室、高萩メンバーに感謝致します。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 中井直正ほか, “宇宙の観測Ⅱ-電波天文学 シリーズ現代の天文学 16 巻”, 日本評論社 (2009)
- [2] JOHN R.TAYLOR, “計測における誤差解析入門”, 東京化学同人 (2000)
- [3] 藤沢健太, “8GHz 開口能率測定測定 (第 1 回)”, 山口大学 (2002)
<http://www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/~kenta/Y4project/aperture-efficiency-021015.pdf>
- [4] 藤沢健太, “8GHz 開口能率測定測定 (第 2 回)”, 山口大学 (2003)
<http://www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/~kenta/Y4project/aperture-efficiency-031230.pdf>
- [5] 藤沢健太, “8GHz 開口能率測定測定 (第 3 回)”, 山口大学 (2004)
<http://www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/~kenta/Y4project/aperture-efficiency-040112.pdf>
- [6] 木村公洋, 博士論文, “電波望遠鏡に用いる高性能受信機光学系の開発”, 大阪府立大学大学院理工系研究科物質科学専攻 (2009)
- [7] 三菱電機株式会社通信機製作所, “検査成績書”, (1983)
- [8] M.Ott et al., “An updated list of radio flux density calibrators”, *Astronomy and Astrophysics* (ISSN 0004-6361), vol. 284, no. 1, p. 331-339 (1994)
- [9] 茨城大学 宇宙科学教育研究センター <http://www.asec.ibaraki.ac.jp/>
- [10] VLBA Calibrator Source List
<http://www.vlba.nrao.edu/astro/calib/vlbaCalib.txt>