

平成 25 年度 (2013 年度)

卒業論文

茨城 32m 電波望遠鏡日立アンテナ  
22GHz 帯における開口能率測定

茨城大学理学部理学科  
学際理学コース

10S6031S

安井 靖晃

## Abstract

茨城 32m 電波望遠鏡とは、茨城大学が運用を行っている 2 基のアンテナ(日立アンテナ, 高萩アンテナ)のことである。現在, アンテナに搭載できる受信機は 6.5-8.8GHz 帯冷却受信機と 22GHz 帯冷却受信機がそれぞれ 2 機ずつである。今回の研究内容は, そのうちの 22GHz 帯冷却受信機(2 号機)を用いたものである。この受信機を日立アンテナに搭載し, アンテナの性能測定を行ったので報告する。

アンテナは電波望遠鏡の構成のうち, 最初に電波を取り扱う装置である。そのため, アンテナの性能は後段の装置にとって大きく影響を与える。アンテナに要求される主な性能にはビームパターン(アンテナパターン), 指向精度, 主ビーム能率, 開口能率, 鏡面精度がある。本研究ではこの中の開口能率の測定を行った。開口能率 $\eta_A$ とは, アンテナがどれだけ効率よく電波を受信できているかを表す指標であり, 物理的アンテナ開口面積 $A_p$ に対する有効アンテナ開口面積 $A_e$ の割合,  $\eta_A = A_e/A_p$ で表される量である。アンテナの開口能率を測定するときは, 観測天体としてフラックス密度 $F_\nu$ が既知であり, アンテナのビームサイズよりも十分小さく点源と見なせる天体のアンテナ温度 $T_A^*$ を測定することで簡単に求められる。式を用いると, Boltzmann 定数を $k$ として,  $\frac{1}{2}F_\nu\eta_AA_p = kT_A^*$ より, 開口能率 $\eta_A$ は  $\eta_A = 2kT_A^*/F_\nu A_p$ と求められる。

観測天体は点源と見なせる 3C273 を用いた。また, 点源とは見なしきれないが木星を用いた暫定的な測定も行った。3C273 は正確なフラックス密度が既知ではないため, 木星を用いた測定結果を用いて推定した。開口能率の測定結果は, EL=30° 以下の低仰角の範囲で, 0.35 以上の結果が得られた。また, EL=30° 以上の仰角では, 仰角の上昇に伴い開口能率は低下していく傾向が見られた。ただし今回の測定では観測天体の不十分さにより, より正確な開口能率を求めることはできなかった。

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| <b>第1章 序論</b>         | <b>1</b>  |
| 1.1 電波天文学             | 1         |
| 1.2 電波望遠鏡             | 2         |
| 1.2.1 茨城 32m 電波望遠鏡    | 2         |
| 1.2.2 アンテナ            | 2         |
| 1.2.3 受信機             | 2         |
| 1.2.4 検波器・分光器         | 2         |
| <b>第2章 アンテナの特性</b>    | <b>3</b>  |
| 2.1 ビームパターン           | 3         |
| 2.2 開口能率              | 4         |
| 2.2.1 スピルオーバー能率とテーパ能率 | 4         |
| 2.2.2 鏡面歪曲(Lutz の式)   | 4         |
| 2.3 アンテナ温度            | 5         |
| 2.4 ビームダイリューション       | 6         |
| 2.5 ビーム立体角と有効アンテナ開口面積 | 6         |
| <b>第3章 開口能率測定</b>     | <b>7</b>  |
| 3.1 目的                | 7         |
| 3.2 測定方法              | 7         |
| 3.2.1 開口能率の導出方法       | 7         |
| 3.2.2 観測天体            | 8         |
| 3.2.3 観測天体のフラックス密度補正  | 8         |
| 3.2.4 測定概要            | 9         |
| 3.2.5 解析方法            | 10        |
| 3.3 測定結果              | 11        |
| 3.4 考察                | 13        |
| <b>第4章 まとめ</b>        | <b>13</b> |

# 1 序論

## 1.1 電波天文学

電波とは、赤外線よりも周波数の低い(波長の長い)電磁波のことであり、電磁波の種類の中で最も周波数の低いものである。電波天文学とは、宇宙から来る電波の観測および研究を行う学問である。また電波望遠鏡はこの観測に用いられるものである。宇宙から来た電磁波の多くは、大気吸収の影響のため地上まで届かない。しかし電波を含む一部の電磁波は大気の影響を受けないため、地上での観測が可能である。ただし、電波の中でも電離層での反射の影響を受ける周波数帯は対象から外れる。電波天文学の特徴は、天体が放射する電波機構であるシンクロトロン放射・熱制動放射・電離原子の再結合・水素原子の 21cm 線・分子の回転遷移・宇宙背景放射・メーザーを観測できることである。具体例として星が誕生する前の冷たい星間ガスの観測が挙げられる。また電波は波長が長いので、ガスに混じっている星間微粒子による吸収の影響を受けないことも特徴である。さらに電波望遠鏡には単一鏡観測だけでなく干渉させることで複数の素子アンテナを同時に扱うことができる干渉計もある。

## 1.2 電波望遠鏡

電波望遠鏡は宇宙から来る電波を受信して観測することを目的とした装置である。ここでは本論文に関わる電波望遠鏡の主な構成を茨城 32m 電波望遠鏡の紹介を交えながら説明していく。

### 1.2.1 茨城 32m 電波望遠鏡

茨城 32m 電波望遠鏡は茨城県高萩市と日立市に各基(合計 2 基)あり、それぞれを高萩アンテナ・日立アンテナと呼ぶ。2 基のアンテナは 259.4m 離れている。そのため二素子干渉計としての整備が可能である。両アンテナともに、観測周波数は 6.7GHz 帯、8.4GHz 帯、22GHz 帯である。今回はこのうちの 22GHz 帯での測定を扱ったものである。また 2014 年 2 月現在、高萩アンテナが稼動不可の状態にあるため、測定はすべて日立アンテナを用いて行った。

### 1.2.2 アンテナ

電波天文学におけるアンテナとは宇宙から来る電波を集光する装置であり、電波望遠鏡の構成のうち、最初に電波を取り扱う装置である。茨城 32m 電波望遠鏡には口径 32m のパラボラアンテナが装備されている。パラボラアンテナとは、パラボラスなわち回転放物面の形状をした反射鏡を持つアンテナのことである。パラボラアンテナではまず宇宙から来る電波を一つの焦点に集め、次にフィードを介して受信機へ導く過程を持つ。アンテナに要求される主な性能にはビームパターン(アンテナパターン)、指向精度、主ビーム能率、開口能率、鏡面精度がある。

### 1.2.3 受信機

受信機はアンテナで集められた電波(RF; Radio Frequency)を取り扱いやすいように増幅や周波数変換を行う装置である。観測される電波は微弱であるため、受信機は低雑音であることが要求される。受信機の雑音は雑音温度をもって表される。ここで茨城 32m 電波望遠鏡に搭載されている受信機の説明を簡単にする。茨城 32m 電波望遠鏡ではフィードを介して来た電波はまずデュワーと言われる装置へと入力される。デュワーの中で電波は導波管、円角変換、円偏波分離器、低雑音増幅器の順で各コンポーネントを通過していく。このとき電波は左旋偏波(LHCP)と右旋偏波(RHCP)に分解され、各々の偏波は電波から電気信号へと変換される。また熱による雑音を抑えるためデュワーは冷却機と繋がっており、デュワー内は約 10[K]に冷却されている。電波は電気信号へと変換された後に同軸ケーブルを通してデュワーの外へと導かれ、IF(Intermediate Frequency)系と呼ばれる装置へ入力される。

### 1.2.4 検波器・分光器

検波器と分光器は電波を取り扱う後端にあるのでバックエンドと言われる。検波器は天体の出す連続波の観測で得られた強度を測定する装置である。連続波観測は広い周波数幅の電波をそのまま二乗検波する方式である。茨城 32m 電波望遠鏡における試験観測や測定では、検波器として[dBm]単位表示のパワーメーターを用いる。分光器は天体の出す線スペクトル(輝線)の測定で用いる装置である。線スペクトルを検出するためには受信した信号を狭い周波数ごとに分けて検出することが必要である。茨城 32m 電波望遠鏡では IF 系からの信号はサンプラーで A/D 変換され、計算機、デジタル分光器へと送られる。デジタル分光器では自己相関の計算とそのフーリエ変換が行われ、パワースペクトルが得られる。

## 2 アンテナの特性

ここでは本章に関わる受信を目的としたアンテナの特性を紹介していく．

### 2.1 ビームパターン

ビームパターンとはアンテナ感度の角度依存性のことである．理想的なアンテナはある方向にのみ感度を持つことである．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．またアンテナは電波の来る方向に対して等方的な感度を持つわけではなく，いくつかの方向で極大となるような感度を持つ．感度が最大になる方向を含む感度の広がりを主ビームという．主ビームの指向性の鋭さの指標には，主ビームの感度が半分になる角度の広がり(半値全幅; HPBW, Half Power Beam Width) $\theta_b$ [rad]を用いる．

$$\theta_b = K \frac{\lambda}{D}$$

ただし， $\lambda$ は観測波長， $D$ はアンテナ開口直径， $K$ は主ビームの形状による係数である．この $\theta_b$ をビームサイズ，または分解能という．通常，ビームパターン $P(\theta, \phi)$ を評価するには最大値 $P_{\max}$ で規格化したビームパターン $P_n(\theta, \phi)$ を用いる．

$$P_n(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_{\max}}$$

パラボラアンテナの場合，ビームパターン $P_n(\theta, \phi)$ の近似式として軸対称ガウシアンである

$$P_n(\theta, \phi) = \exp \left[ -4 \ln 2 \left( \frac{\theta}{\theta_b} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

がよく用いられる．

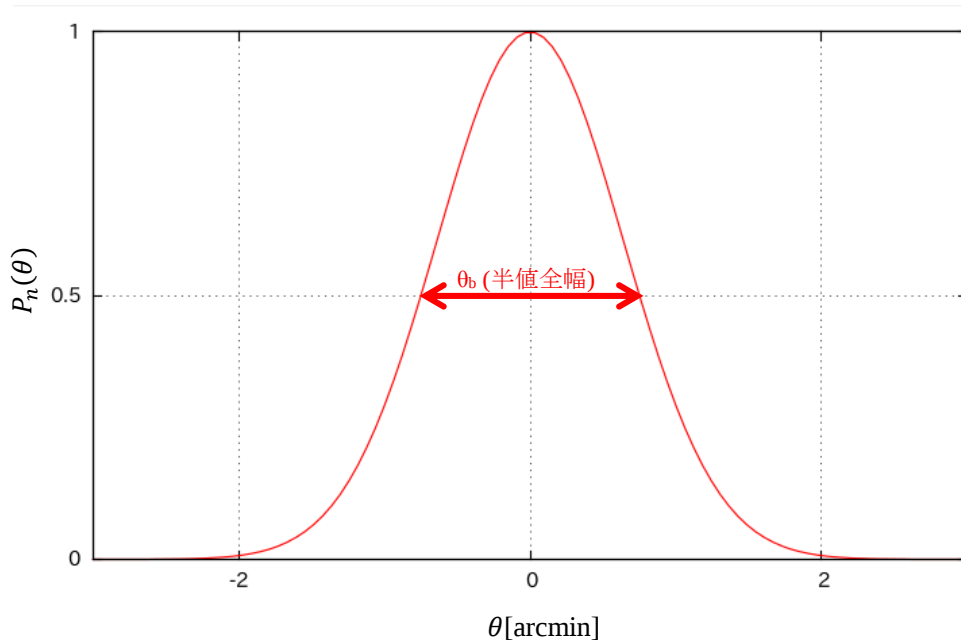


図 2.1 ビームパターンと半値全幅の概略

ビームパターンは式(2.1)で $\theta_b = 1.5$ [arcmin]の場合を表している．

## 2.2 開口能率

アンテナの感度が角度  $(\theta, \phi)$  に依存しない場合のアンテナの受信電力  $W_v$  [W Hz<sup>-1</sup>] は

$$W_v = A \iint_{\Omega} B_v(\theta, \phi) \cos\theta \, d\Omega$$

である。しかし、実際のアンテナの感度は等方的ではなくビームパターン  $P_n(\theta, \phi)$  を持っている。したがってアンテナの受信できる電波の量は輝度分布  $B_v$  とビームパターン  $P_n$  の畳み込みとなる。また、アンテナは電波の持つ二つの偏波を同時に受信できないので実際のアンテナの受信電力は、

$$W_v(\theta_0, \phi_0) = \frac{1}{2} A_e \iint_{4\pi} P_n(\theta - \theta_0, \phi - \phi_0) B_v(\theta, \phi) d\Omega \quad (2.2)$$

で与えられる。ただし、天体の方向を  $(\theta_0, \phi_0)$  とし、 $A_e$  は有効アンテナ開口面積、 $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$  である。有効アンテナ開口面積  $A_e$  とはアンテナとして機能する部分の面積であり、アンテナそのものの物理的アンテナ開口面積  $A_p$  とは異なる。実際のアンテナはアンテナの鏡面精度や反射率、アンテナ鏡面の電場分布の影響などのために物理的なアンテナ開口面に到達した電波をすべて受信できるわけではない。そこで物理的アンテナ開口面積に対する有効アンテナ開口面積の割合を開口能率  $\eta_A$  と定義する。

$$\eta_A \equiv \frac{A_e}{A_p}.$$

これは、アンテナがどれだけ効率よく電波を受信できているかを表す指標となる。

### 2.2.1 スピルオーバー能率とテーパ能率

理想的なパラボラアンテナでは遠方領域の天体から来た電波は平面波と見なすことができる。アンテナ開口部での平面波の電場の強度分布と位相分布を考えると、開口能率はアンテナ開口部での電場の強度分布と位相分布の一樣さを示すパラメータを用いても表される。このパラメータをテーパ能率  $\eta_t$  という。また、受信機はアンテナの主鏡面以外から入射する電波も受信してしまう。このとき主鏡面以外から入射する電波の割合を表すパラメータをスピルオーバー能率  $\eta_s$  という。ただし本来のスピルオーバー能率はフィードから放射される電力が主鏡面でどれだけ漏れているかを示すものである。開口能率をこの二つの能率を用いて表すと、

$$\eta_A = \eta_t \eta_s$$

という積の形で表される。

### 2.2.2 鏡面歪曲 (Lutz の式)

アンテナへ到達した平面波の位相はすべてそろっている。しかしアンテナの反射面に歪み(放物面からのずれ  $\epsilon$ )が存在すると反射した電波には位相差ができる。焦点では位相の違いがある電波どうしの重ね合わせで一部の電波が打ち消しあうので、アンテナが受信できる電力は低下する。放物面からのずれを  $\epsilon$  とすると、鏡面の歪みによるアンテナの開口能率  $\eta_{sf}$  は、

$$\eta_{sf} = e^{-\left(\frac{4\pi\epsilon}{\lambda}\right)^2}$$

で表される。アンテナの開口能率  $\eta_A$  はこの分だけ鏡面が理想放物面の場合に比べ劣化するので、

$$\eta_A = \eta_0 \eta_{sf} \quad (2.3)$$

で与えられる。ただし、 $\eta_0$  は理想放物面の場合の開口能率である。式(2.3)を Lutz の式と呼び、波長(周波数)と鏡面の歪みの関係を表した関係式である。Lutz の式はアンテナの使用周波数の上限を決める大きな手がかりを与える。

### 2.3 アンテナ温度

式(2.2)で表されるアンテナの受信する電力は Nyquist の法則より,

$$W_v(\theta_0, \phi_0) = kT_A(\theta_0, \phi_0)$$

とも表される. このときの温度  $T_A$  をアンテナ温度といい, アンテナから出力される電力を抵抗体の温度に換算したものである. アンテナ温度は輝度温度角度分布  $T_B(\theta, \phi)$  を用いると,

$$T_A(\theta_0, \phi_0) = \frac{\iint_{4\pi} P_n(\theta - \theta_0, \phi - \phi_0) T_B(\theta, \phi) d\Omega}{\iint_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega} \quad (2.4)$$

と表される. このことよりアンテナ温度は輝度温度角度分布のビームパターンの重み付き平均をしたものであることがわかる. 地上にある電波望遠鏡は大気の影響を受けるため, 実際に観測されるアンテナ温度を用いる場合は電波が大気を通過するときに受ける減衰を考えなければならない. そこでアンテナを地上から大気圏外に出した, つまり大気の影響を補正したアンテナ温度  $T_A^*$  を用いる. 大気天頂での光学的厚みを  $\tau$ , アンテナの仰角を  $EL^\circ$  とすると,

$$T_A^* = \frac{T_A e^{\frac{\tau}{\cos(90^\circ - EL^\circ)}}}{\eta}$$

で表される. ただし,  $\eta$  は望遠鏡のフィード能率である. 補正されたアンテナ温度  $T_A^*$  を測定するにはチョッパーホイール法を用いる. チョッパーホイール法では, アンテナで天体のある空を見たとき, 天体のない空を見たとき, 常温の電波吸収体を見たときの三つの出力が必要である. 天体のある空を見たときの出力は,

$$P_v(\text{source}) = Gk \left[ T_A + T_{RX} + (1 - \eta)T_{\text{amb}} + \eta \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{\cos(90^\circ - EL^\circ)}} \right) T_{\text{atm}} \right],$$

天体のない空を見たときの出力は,

$$P_v(\text{sky}) = Gk \left[ T_{RX} + (1 - \eta)T_{\text{amb}} + \eta \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{\cos(90^\circ - EL^\circ)}} \right) T_{\text{atm}} \right],$$

常温の吸収体と見たときの出力は,

$$P_v(\text{amb}) = Gk(T_{RX} + T_{\text{amb}})$$

である. ただし,  $G$  は増幅率,  $T_{RX}$  は受信機雑音温度,  $T_{\text{amb}}$  は望遠鏡周辺の温度(常温),  $T_{\text{atm}}$  は大気温度である. これらを組み合わせた補正温度  $T_C$  を定義する.

$$T_C \equiv T_{\text{amb}} \frac{P_v(\text{source}) - P_v(\text{sky})}{P_v(\text{amb}) - P_v(\text{sky})} = \frac{T_{\text{amb}} T_A}{\eta \left[ T_{\text{amb}} - \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{\cos(90^\circ - EL^\circ)}} \right) T_{\text{atm}} \right]}$$

ここで,  $T_{\text{amb}} = T_{\text{atm}}$  とすると,

$$T_C = \frac{T_A e^{\frac{\tau}{\cos(90^\circ - EL^\circ)}}}{\eta} = T_A^*$$

となりアンテナ温度  $T_A^*$  と一致する. よって,

$$T_A^* = T_{\text{amb}} \frac{P_v(\text{source}) - P_v(\text{sky})}{P_v(\text{amb}) - P_v(\text{sky})} \quad (2.5)$$

よりアンテナ温度  $T_A^*$  を求めることができる.

## 2.4 ビームダイリューション

天体の立体角 $\Omega_s$ 、アンテナの全立体角 $\Omega_A$ を次のように定義する.

$$\Omega_s = \int_{\text{source}} d\Omega$$

$$\Omega_A = \iint_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi P_n(\theta, \phi) \sin\theta \, d\theta d\phi$$

$\Omega_s \ll \Omega_A$ の場合、天体の広がりアンテナのビームサイズよりも非常に小さいので、天体の立体角はアンテナのビームパターンが最大となる部分にのみ分布していることになる.

ビームパターンの最大値は 1 で規格化されているので、式(2.4)の分子は

$$\iint_{4\pi} P_n(\theta - \theta_0, \phi - \phi_0) T_B(\theta, \phi) d\Omega = \int_{\text{source}} T_B(\theta, \phi) d\Omega$$

となる. ただし、このとき積分範囲は天体の存在する方向のみになっている. また、天体の平均輝度温度 $\overline{T_B}$ は

$$\overline{T_B} = \frac{\int_{\text{source}} T_B(\theta, \phi) d\Omega}{\int_{\text{source}} d\Omega}$$

と表される. よって式(2.4)は

$$T_A(\theta_0, \phi_0) \approx \frac{\overline{T_B} \Omega_s}{\Omega_A} \ll \overline{T_B}$$

となる. つまりアンテナのビームサイズの一部分にしか天体の広がりがなく、アンテナ温度が天体の立体角と全ビーム立体角の比だけ小さく観測されることになる. この効果をビームダイリューションという.

## 2.5 ビーム立体角と有効アンテナ開口面積

温度 $T$ の黒体でできた囲いのなかにアンテナがあると仮定する. Rayleigh-Jeans 近似を用いると囲いの内側表面の輝度は

$$I_\nu = \frac{2kT}{\lambda^2}$$

で一定である. したがって、アンテナの全立体角 $\Omega_A$ 、有効アンテナ開口面積 $A_e$ のアンテナの受信電力は

$$W_{\nu, \text{in}} = \frac{1}{2} I_\nu \Omega_A A_e = \frac{kT \Omega_A A_e}{\lambda^2}$$

となる. またアンテナに抵抗が接続されているとすると、この抵抗から出力される雑音電力は Nyquist の法則より

$$W_{\nu, \text{out}} = kT$$

となる. ここで囲いの内部がアンテナも含め熱力学平衡であると仮定すると、詳細釣り合いが成立して

$$\begin{aligned} W_{\nu, \text{in}} &= W_{\nu, \text{out}}, \\ \frac{kT \Omega_A A_e}{\lambda^2} &= kT, \\ \Omega_A A_e &= \lambda^2 \end{aligned} \tag{2.6}$$

となる. この関係はアンテナに関するパラメータと波長のみで成り立っているので一般に成り立つことがわかる.

### 3 開口能率測定

#### 3.1 目的

本研究の目的は茨城 32m 電波望遠鏡日立アンテナに 22GHz 帯冷却受信機を搭載し、アンテナの開口能率を測定することである。電波天文学における 22GHz 帯の観測の役割は天体から放射されるアンモニア分子輝線や水メーザーの観測が可能である。水メーザーは星形成領域中で多く検出されており、分子雲の進化やその中での星形成過程の情報を得ることができるものである。アンモニア分子輝線は輝線の強度比較により分子雲の物理量を推定することができるものである。このような観測がより正確に行えるようにするためにはアンテナの特性を測定し、実際の観測で得られたデータを正しく較正することが必要である。同時にアンテナがどれだけ信頼のできるデータを得ることができているかを評価できる指標ともなる。また開口能率がわかっているアンテナ温度を測定することで天体のフラックス密度を求めることができる。

#### 3.2 測定方法

##### 3.2.1 開口能率の導出方法

開口能率の測定には輝度温度のわかっている惑星を観測してアンテナ温度から導出する方法がある。観測する惑星の輝度温度 $T_B$ は一樣であり、惑星は視直径 $\theta_s$ の円盤とする。この惑星を軸対称ガウシアンビームパターン

$$P_n(\theta, \phi) = \exp \left[ -4 \ln 2 \left( \frac{\theta}{\theta_b} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

で観測したとすると、観測されるアンテナ温度は

$$T_A^*(\theta_0, \phi_0) = \frac{T_B}{\Omega_A} \frac{\pi \theta_b^2}{4 \ln 2} \left[ 1 - \exp \left\{ -4 \ln 2 \left( \frac{\theta_s}{\theta_b} \right)^2 \right\} \right]$$

となる。また式(2.6)より

$$\Omega_A = \frac{\lambda^2}{A_e} = \frac{\lambda^2}{\eta_A A_p}$$

であるので、開口能率 $\eta_A$ は

$$\eta_A = \frac{\lambda^2 T_A^* \pi \theta_b^2}{A_p T_B 4 \ln 2} \frac{1}{\left[ 1 - \exp \left\{ -4 \ln 2 \left( \frac{\theta_s}{\theta_b} \right)^2 \right\} \right]} \quad (3.2)$$

より求まる。ただし $\lambda$ は観測波長である。

また観測天体としてフラックス密度 $F_\nu$ が既知であり、アンテナのビームサイズよりも十分小さく点源と見なせる天体のアンテナ温度 $T_A^*$ を測定することでも求められる。

$$\frac{1}{2} F_\nu \eta_A A_p = k T_A^*$$

よって開口能率 $\eta_A$ は

$$\eta_A = \frac{2 k T_A^*}{F_\nu A_p} \quad (3.3)$$

より求められる。

### 3.2.2 観測天体

観測する天体は前項よりフラックス密度(強度)が既知の天体である必要がある．茨城 32m 電波望遠鏡の 22GHz 帯のビームサイズは $\theta_b = 1.583[\text{arcmin}] = 95.0[\text{arcsec}]$ であると仮定する．今回の開口能率測定で選出した天体は 3C273 と木星である．3C273 の見かけの大きさは約  $23[\text{arcsec}]^1$ なので、点源とみなして扱うことにする．一方、測定日の木星の視直径は  $0.78[\text{arcmin}]=46.6[\text{arcsec}]^2$ と十分な点源と見なしきれないが、後述の補正を考えることで観測天体として選出可能な天体であるとする．また、3C273 のフラックス密度は既知ではないが、木星のフラックス密度は既知であるため、木星を用いて推定することにした．測定日の木星のフラックス密度 $F_\nu$ は

$$F_\nu = \frac{2kT_B}{\lambda^2} \Delta\Omega$$

より求まる．ただし、 $k$ は Boltzmann 定数、 $\Delta\Omega$ は視直径から求まる立体角である．今回は 22GHz 帯で水メーザー(22.23508[GHz])の観測をしたので、観測波長 $\lambda$ は光速を $c$ 、観測周波数を $f$ とし、

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.0 \times 10^8 [\text{m/s}]}{22.23508 \times 10^9 [\text{Hz}]} = 1.349 \times 10^{-2} [\text{m}]$$

を代入し、立体角 $\Delta\Omega$ は測定日の木星の視直径が $\theta_s = 0.78[\text{arcmin}] = 46.6[\text{arcsec}]$ であったので $\Delta\Omega = 1.89 \times 10^{-8} [\text{str}]$ を代入する．また Ulich(1981)により木星の輝度温度は $T_B = 150 [\text{K}]$ とした．よって木星のフラックス密度は

$$F_\nu = \frac{2 \times (1.38 \times 10^{-23} [\text{J/K}]) \times (150 [\text{K}])}{(1.349 \times 10^{-2} [\text{m}])^2} \times (1.89 \times 10^{-8} [\text{str}]) = 90.97 [\text{Jy}]$$

と求まる．一方、3C273 を用いた開口能率の測定結果には、木星を用いた測定結果が適用できるとした．具体的には、3C273 のある仰角での測定結果は、木星の同じ仰角で得られた開口能率が適用できるとし、3C273 の絶対フラックス密度を推定した．このとき用いた木星の仰角は、開口能率が最大となる仰角とした．

### 3.2.3 観測天体のフラックス密度補正

今回の測定で選出した木星の視直径は、日立アンテナ 22GHz 帯のビームサイズに比べて十分小さいと見なしきれないため、観測される物理量(パワー)は大きく見積もられてしまっていることが推測できる．そのため、観測される物理量に対して何らかの補正を加える必要がある．輝度温度 $T_B$ が同様であり、視直径 $\theta_s$ の円盤の天体を考える．この天体を式(3.1)で表されるビームパターンで観測すると得られるフラックス密度 $F_{\text{obs}}$ は

$$\begin{aligned} F_{\text{obs}} &= \iint_{\Omega} B_\nu(\theta, \phi) P_n(\theta, \phi) d\Omega \\ &= \frac{\pi B_0 \theta_b^2}{\ln 2} \left[ 1 - \exp \left\{ -\ln 2 \left( \frac{\theta_s}{\theta_b} \right)^2 \right\} \right] \end{aligned}$$

となる．また天体の大きさがビームサイズに比べて十分小さい場合のフラックス密度 $F_{\text{obs}}$ は、

$$F_{\text{obs}} = B_\nu \Omega = \pi B_0 \theta_s^2$$

と求めることができる．この2式の比をとり、 $\theta_b$ 、 $\theta_s$ に上記の数値を代入すると

$$\frac{F_{\text{obs}}}{F_{\text{obs}}} = \frac{\theta_b^2}{\theta_s^2 \ln 2} \left[ 1 - \exp \left\{ -\ln 2 \left( \frac{\theta_s}{\theta_b} \right)^2 \right\} \right] = 0.9210 \quad (3.4)$$

と求まる．したがって開口能率の導出には、測定により算出されるフラックス密度に 0.9210 をかけた補正付きのフラックス密度を用いればよいことになる．

<sup>1</sup> Yasunobu Uchiyama, et al. 2006, “Shedding New Light on the 3C 273 Jet with the Spitzer Space Telescope” 参照

<sup>2</sup> 国立天文台．“天文情報センター 暦計算室”．<<http://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/skymap.cgi>> 参照

### 3.2.4 測定概要

測定は日立アンテナにて 22GHz 帯の左旋偏波(LHCP)でのみ行った。データの取得方法は日立アンテナの観測室に設置されたパワーメータを用いた。パワーメータをパソコンに接続し、VEE で作成された取り込みソフトを用いてデータの記録をした。アンテナの観測動作は On The Fly 法(OTF)を用いて連続波観測を行った。OTF 法とは、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る。(図 3.1 参照) 今回は観測天体の軌道を EL plot というソフトを用いて確認し、観測天体を中心とした10[arcmin] × 10[arcmin]の範囲のマップが取得できるように観測のスケジュールを組んだ。各スキャンに要する時間は 20 秒で、EL 方向に0.5[arcmin]移動するのに要する時間は 10 秒とした。また 1 マップにつき 21 回の AZ スキャンを行い、データは 1 秒あたり 5 点取得した。

表 3.1 観測諸元

| 測定日付(JST)              | 観測天体  | 天候 | 気温[°C] | EL 範囲   | map 数 | $T_{\text{sys}}^*[K]$<br>(EL = 85° ) | $\tau$ |
|------------------------|-------|----|--------|---------|-------|--------------------------------------|--------|
| 2014/1/16 16:30-翌 5:40 | 木星    | 晴れ | 7.0    | 8° -78° | 66    | 54.2                                 | 0.0444 |
| 2014/3/10 20:30-翌 6:34 | 3C273 | 晴れ | 2.3    | 5° -56° | 55    | 49.3                                 | 0.0342 |

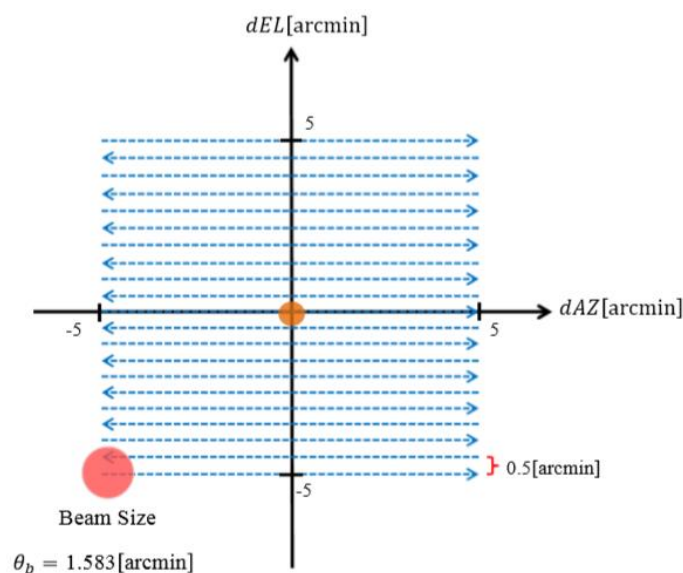


図 3.1 On The Fly 法の概要

観測天体を中心に AZ, EL それぞれ±5 分角を測定した。破線一本が 1 スキャンを表している。

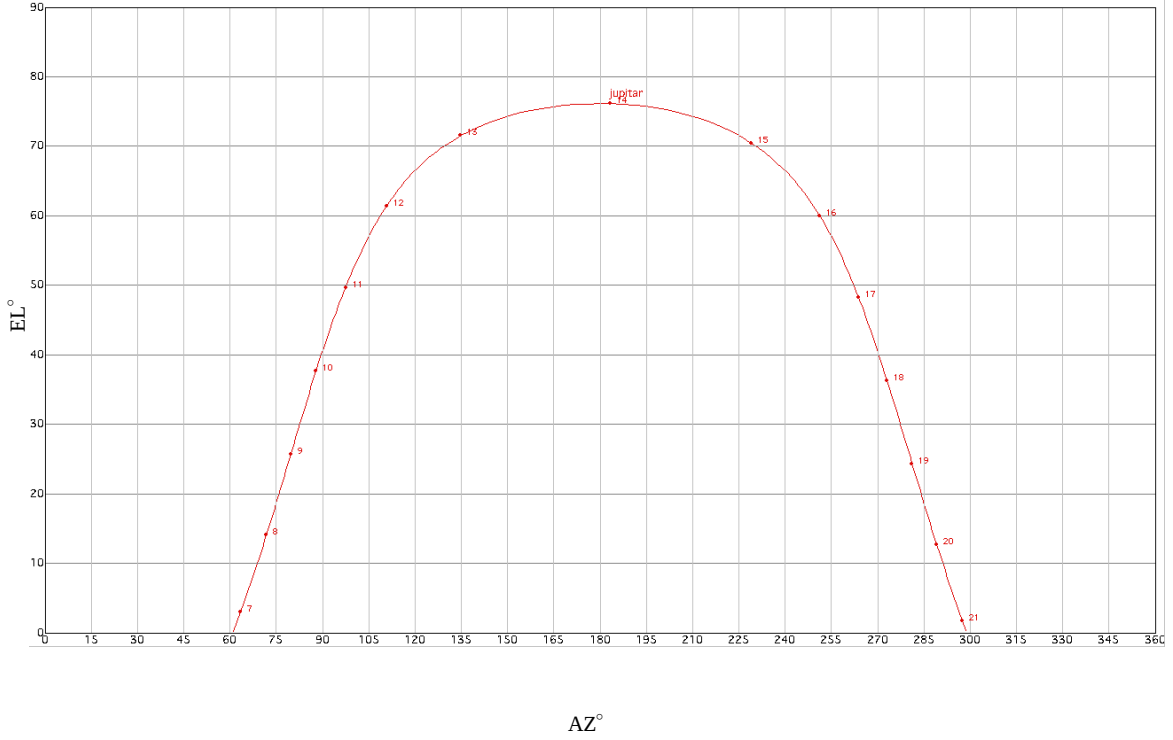


図 3.2 EL plot により取得した日立アンテナの(AZ,EL)に対する測定日の観測天体(木星)の位置関係．曲線に添えられている赤字は時刻(UT)である．

### 3.2.5 解析方法

取得したデータはチョッパーホイール法(式(2.5))よりアンテナ温度 $T_A^*$ に変換した．このとき用いる $P_v(\text{amb})$ には測定前に行った $T_{\text{sys}}^*$ ,  $\tau$ 測定時のものを用いた．また $P_v(\text{sky})$ には AZ スキャン時の端と端の点を線形補正した値を用いた．得られたアンテナ温度 $T_A^*$ は式(3.3)より観測されたフラックス密度 $F_{\text{obs}}$ ,

$$F_{\text{obs}} = \eta_A F_v = \frac{2kT_A^*}{A_p}$$

に変換し、観測されたフラックス密度 $F_{\text{obs}}$ を求めた．木星に関しては、さらに式(3.4)による補正を行い、 $F_{\text{obs}}^{\text{jupiter}}$ を求めた．ここで得られたマップを $dAZ, dEL$ に対するフラックス密度分布へ変換した．まず、このマップからわかるフラックス密度分布の形状が円盤と見なせるのを目視で判断して選別した．また、得られたマップの指向誤差を補正するために、各マップを軸対称ガウス関数である

$$P(dAZ, dEL) = a \exp \left[ -4 \ln 2 \frac{(dAZ - b)^2 + (dEL - c)^2}{d^2} \right] + e \quad (3.5)$$

のモデル式でフィットさせた．ここからピーク強度 $a(=F'_{\text{obs}})$ を推定し、

$$\eta_A = \frac{F'_{\text{obs}}}{F_v}$$

より開口能率 $\eta_A$ を求めた．木星に関しては、

$$\eta_A = \frac{F_{\text{obs}}^{\text{jupiter}}}{F_v}$$

より求めた。マップからわかるフラックス密度分布の形状が縦長など円盤と見なしきれないものは、モデル式でフィットを行っていない生のデータを取り扱っている。ここで式中の  $b, c$  は指向誤差,  $d$  は半値全幅,  $e$  はベースラインを表すパラメータである。

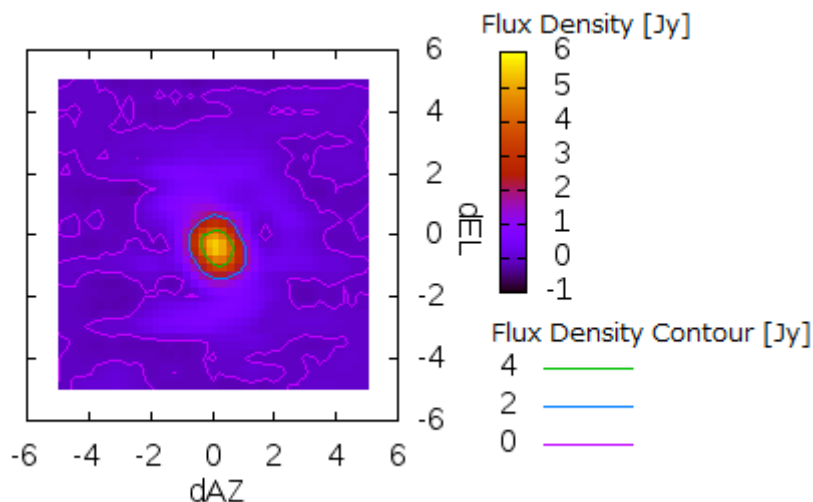


図 3.3 3C273 を観測後、式(3.4)のガウス関数のフィッティングで得られた map. アンテナの仰角は  $31.828^\circ$  である。

### 3.3 測定結果

開口能率の測定結果をアンテナの  $EL^\circ$  に対してプロットしたものが図 3.4 である。エラーバーはガウシアンでフィッティングした際のエラー値と測定誤差(マップの  $dEL=5[\text{arcmin}]$  における AZ スキャン時のパワーの標準偏差<sup>3)</sup> を足し合わせたものである。  $EL=30^\circ$  以下の低仰角において、開口能率がおおむね 0.35 以上の結果が得られた。ただし、 $EL=30^\circ$  以上は的確な解析を施しておらず開口能率の値は正確ではないが、仰角の上昇とともに開口能率は低下している傾向が分かる。また、3C273 の推定フラックス密度は  $16.61[\text{Jy}]$  とした。このとき木星の結果の中で開口能率が最大となる  $EL=12.388^\circ$  の値( $\eta_A = 0.432$ )を用いた。

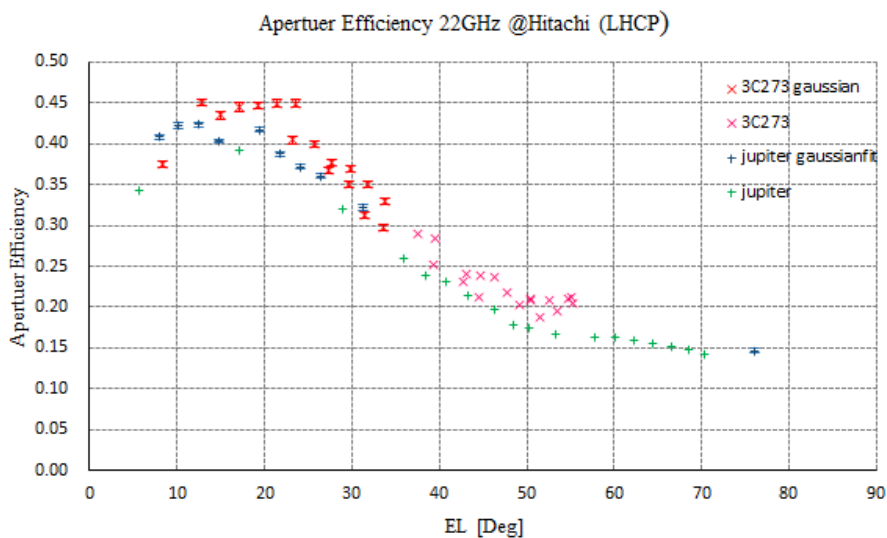


図 3.4 日立アンテナ 22GHz 帯(LHCP)における開口能率

<sup>3)</sup>  $dEL=5[\text{arcmin}]$  の AZ スキャンは、ほぼオフ点だけを見ているという仮定に基づいている。

3C273 の推定された絶対フラックス密度の妥当さを考察するために、フラックス密度を変えたプロットを加えたのが図 3.5 である。ここでは 3C273 のフラックス密度が 15[Jy]と 20[Jy]の場合を加えてある。22GHz 帯での 3C273 のフラックス密度は図 3.6<sup>4</sup>のように変動しているため、より正確に推定することは難しいが、推定されたフラックス密度は考え得る範囲内に収まっているといえる。

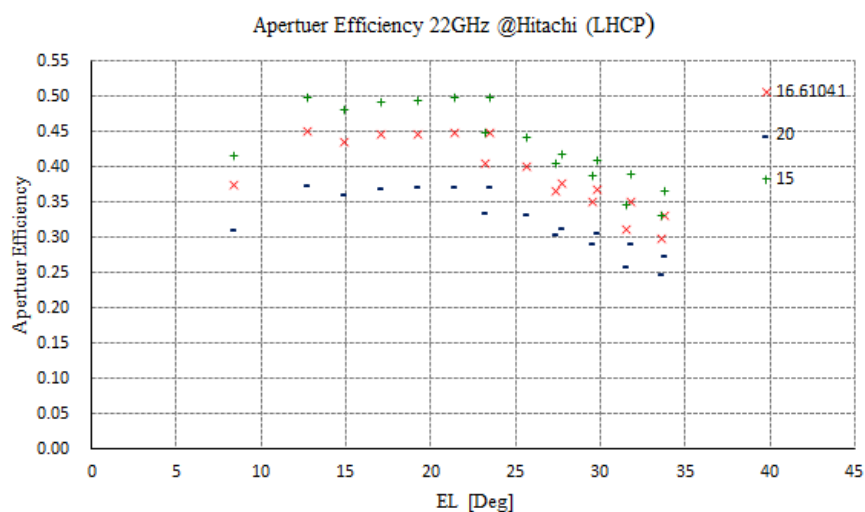


図 3.5 3C273 のフラックス密度の違いによる開口能率の変化。

ここでは、20[Jy]と 15[Jy]を追加している。

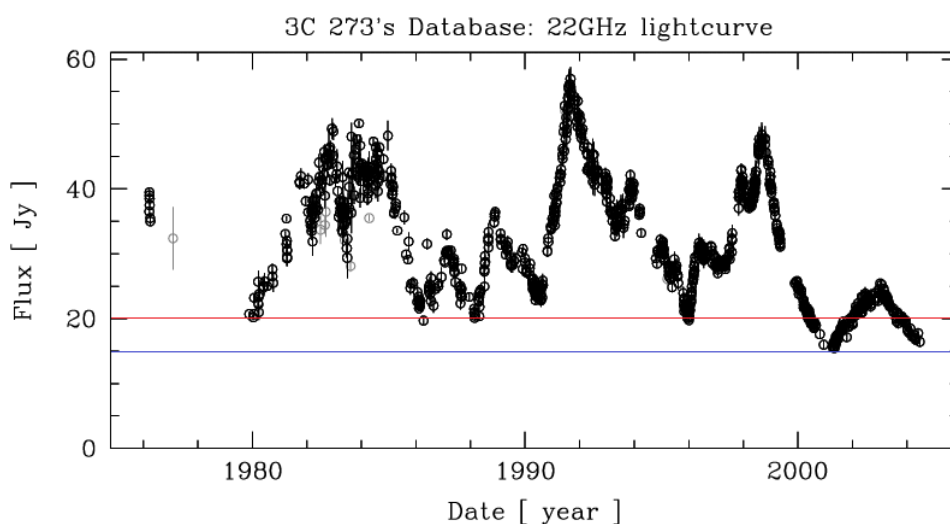


図 3.6 3C273 の 22GHz 帯でのフラックス密度の変動の様子。

<sup>4</sup> ISDC Data Centre for Astrophysics. "3C273's Database" <<http://isdc.unige.ch/3c273/>>参照

### 3.4 考察

以前, 同アンテナにて行われた開口能率の測定結果<sup>5</sup>から得られた近似曲線を図 3.4 に加えたのが図 3.7 である. 加えた近似曲線は 3 次多項式であり, それぞれ 8.4GHz 帯と 6.7GHz 帯のものである. 8.4GHz 帯の開口能率の近似曲線は,

$$\eta_A(EL) = 1.37912 \times 10^{-6} EL^3 - 0.000207815 EL^2 + 0.00621504 EL + 0.657819,$$

6.7GHz 帯の開口能率の近似曲線は,

$$\eta_A(EL) = 7.50981 \times 10^{-7} EL^3 - 0.000113888 EL^2 + 0.002746 EL + 0.71793$$

である.

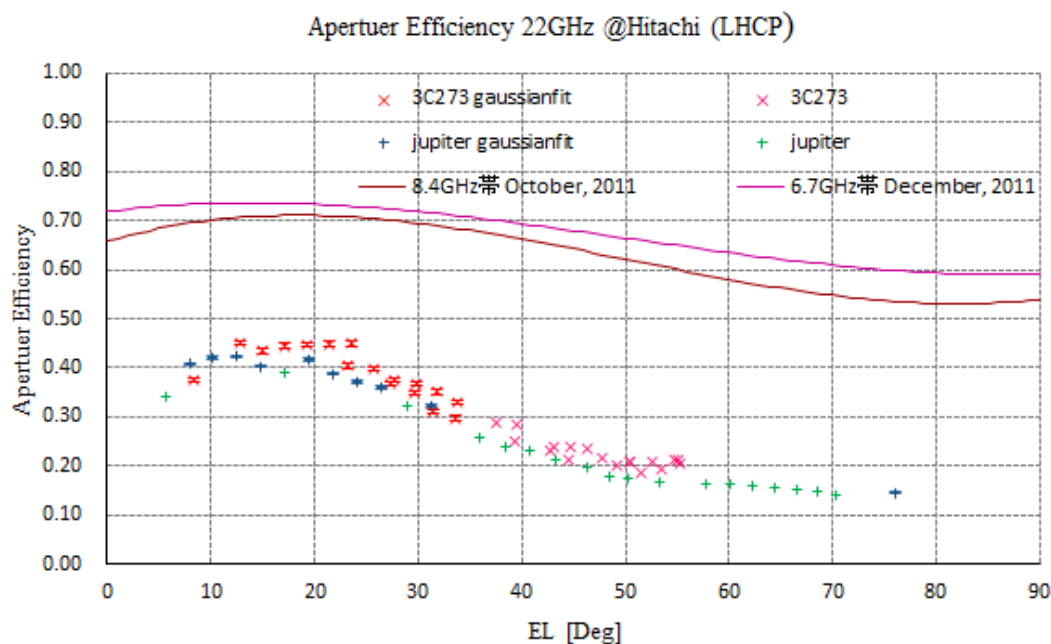


図 3.7 日立アンテナ 22GHz 帯(LHCP)における開口能率.  
以前行われた他の周波数帯での結果を加えている.

図 3.7 より観測周波数が高くなるにつれて開口能率は悪化することがわかる。また、仰角依存性は高周波数になるにつれ、なだらかではなくなることがわかる。22GHz 帯は 6.7GHz 帯や 8.4GHz 帯の能率の約 60%の能率しかなく、実際の単一鏡観測は精度が悪くなることがいえる。

## 4 まとめ

今回の測定では茨城 32m 電波望遠鏡日立アンテナに 22GHz 帯冷却受信機を搭載し、開口能率の測定を行った。開口能率の測定にもちいた観測天体は 3C273 と木星であり、天体のフラックス密度についていくつかの補正や仮定はあるものの、結果は導出できた。仰角 30° 以下の低仰角で開口能率は約 0.35-約 0.45 であった。仰角 30° 以上は仰角の上昇とともに開口能率は低下する傾向がみられた。これは、これまでに 6.7GHz 帯および 8.4GHz 帯にて得られた日立アンテナの開口能率の仰角依存性と矛盾しない結果である。

<sup>5</sup>栗橋潤 2011, 修士論文“茨城 32m 電波望遠鏡日立アンテナの 能率測定と評価” 参照

## 参考文献

- [1] 中井直正 他, “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
- [2] 栗橋潤 2011, 修士論文“茨城 32m 電波望遠鏡日立アンテナの 能率測定と評価”, 茨城大学
- [3] 宮村太基 2012, “山口 32m 電波望遠鏡 22GHz 受信機による開口能率測定”, 山口大学