2024 年度卒業論文 センチメートル波帯の広帯域観測に向けた フィードホーンの開発

Development of a feed horn for wideband observations in the

centimeter-wave band

大阪府立大学 生命環境科学域 理学類 物理科学課程

電波天文学研究室

学籍番号:1211305130

宮崎正成

1

概要

次世代の電波干渉計として、SKA-Mid, ngVLA などの国際計画が進められている。これら の計画では重力理論の検証や宇宙の暗黒時代の探査などの多くの重要な科学目標のため に、これまでよりも広帯域な受信機が必要となっている。日本では SKA-Mid の 15 GHz 以上の周波数をカバーする受信機開発の検討が進められており、出来るだけ高い周波数ま でカバーするという目的のもと、導波管技術を使ってその比帯域の限界に近い 15-29 GHz の周波数で検討を進めている。

本研究では、電磁界シミュレーションソフトを用いて 15-29GHz 帯において低損失で高開 口能という設計目標のもと、フィードホーンの開発を行った。具体的には反射損失-20dB 以下、開口能率 80%以上という目標を設定し、この目標を達成するためにコルゲートホー ンの溝の深さのパラメーターを最適化させた。その結果、15-29GHz 帯全域で開口能率 80%は達成されなかったが、反射損失の目標は達成された。

既存の受信機の周波数帯域

Telescope	周波数 [GHz]	比帯域 [%]	fmax/fmin
ALMA Band 1	35-52	39	1.5
ALMA Band 2	67–116	53	1.7
OMU 1.85m	210-375	56	1.8
Nobeyama 45m eQ	30-50	50	1.7

周波数 比帯域[%] f_max/f_min Band [GHz] 100 3.0 1 0.35-1.05 0.95-1.76 60 1.9 2 (3) 1.65-3.05 60 1.8 1.9 (4) 2.80-5.18 60 1.8 5a 4.60-8.50 60 5b 8.30-15.40 60 1.9 _ 6 15.4-

SKA-Midの受信機の周波数帯域

ngVLAの受信機の周波数帯域

Band	周波数 [GHz]	比帯域[%]	f_max/f_mi n
1	1.2-3.5	98	2.9
2	3.5-12.3	111	3.5
3	12.3-20.5	50	1.7
4	20.5-34	50	1.7
5	30.5-50.5	49	1.7
6	70.0-116	49	1.7

表 1. 既存の受信機と SKA-Mid,ngVLA の観測周波数帯の比較

目次

1. イントロダクション			
	1-1.	電波天文学	••4
	1-2.	次世代干渉計計画	5

2. 設計に用いた理論

2-1.	電磁波	6
2-2.	伝送電磁波の方程式	7
2-3.	導波管	8
2-4.	フィードホーン	8
2-5.	特性インピーダンス	··· 12
2-6.	オフセットグレゴリアン光学系	··· 13

4. 結果

4-1. 設計目標	15
4-2. 簡単なモデル	
4-2-1. モデル作成	16
4-2-2. 解析結果	17
4-3. 溝の深さをそれぞれ変えたモデル	
4-3-1. モデル作成	20
4-3-2. 解析結果	21
5. まとめと今後	23
6. 謝辞	24
7. 参考文献	25

1. イントロダクション

1-1. 電波天文学

天文学は大昔より可視光で観測するものであった。しかし、1930年ごろに無線通信の 技術者であったカールジャンスキーによって偶然、宇宙からの電波が発見されたこと により電波で宇宙を観測する電波天文学が誕生した。

電波天文学は宇宙から届く電磁波を検出し、その性質を詳しく調べることにより、その電磁波を放射したり吸収したりした天体や宇宙物質の性質を明らかにする学問である。

電波による宇宙の観測は他の波長にはない以下のような特徴を持っており、天文学で 重要な位置を占めている。

- 可視光など他の波長では見えないものが見える。特に、シンクロトロン放射、中 性水素、極低音である分子ガスなどは電波の観測が必須である。
- 波長が長いので、星間微粒子による吸収を受けず、天の川や系外銀河の奥まで見 通すことができる。
- 電気的に干渉技術が容易である。そのため大きく離したアンテナ間で電波を干渉 させることができ、極めて高い角分解能を実現できる。

これらの特徴をもつ電波天文学では今までに様々な新しい発見がなされてきた。例えば、宇宙背景放射の観測、天の川銀河全体の渦巻き構造の解明などが挙げられる。[1]



図1.シンクロトロン放射で観測された天体の例:ヘラクレスA

1-2. 次世代干涉計計画

21 世紀の天文学は低周波電波から超高エネルギーガンマ線にわたる幅広い電磁波帯にお ける波長横断にとどまらず、重力波や高エネルギーニュートリノなども含めた観測手法の 分野横断で進めていく時代になる。ALMA や超大型の可視/赤外望遠鏡、Cherenkov Telescope Array (CTA)、JamesWebb Space Telescope (JWST)、Athena などの電磁波帯の 大型装置や LIGO/Virgo/KAGRA などの重力波望遠鏡、IceCube や KAMIOKANDE な どのニュートリノ望遠鏡が稼働する時代において、マルチメッセンジャー天文学が推進さ れるとともに、感度・空間・周波数・時間といったパラメータにおけるディスカバリース ペースはさらに広がりを見せていくはずである。この新しい天文学研究の時代の始まりに おいて、SKA や ngVLA は他の大型装置と並び重要かつ基本的な望遠鏡となることが期待 される。

SKA1-Mid (Square Kilometer Array)は南アフリカ北ケープ州の Karoo サイトに、最終的 には直径 15m のオフセットカセグレン型アンテナ 133 台と直径 13.5m の MeerKAT ア ンテナ 64 台の計 197 台からなり、最大基線長 150km にわたりこれらが配列される電波 干渉計となる。

ngVLA (next generation Very Large Array: 次世代大型電波干渉計)計画は、北米全域に 200 台以上のアンテナを分散して設置し、最大で 8,860 キロメートルもの口径をもつ電波 望遠鏡を実現しようという次世代電波望遠鏡プロジェクトである。ミリ波からセンチ波帯 までの比較的長い波長の電波を高感度・高解像度で捉えることにより、これまで見ること のできなかった宇宙の謎に挑もうとしている。2020 年代後半に建設開始、2040 年頃の本 格運用を目指し、米国を中心に世界の天文学コミュニティが協力しながら検討が進められ ている。



図 2. SKA-Mid





2.設計に用いた理論

2-1.電磁波

電波天文学では電磁波で宇宙を観測する。したがって、電磁気学の理解が必要。

電場と磁場の振る舞いを記述するのはマクスウェル方程式である。ε₀,μ₀を真空中の誘 電率と透磁率としたときの真空中のマクスウェル方程式を以下に示す。

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = 0 \quad (2.1.1)$$
$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \quad (2.1.2)$$
$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \quad (2.1.3)$$
$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \quad (2.1.4)$$

$$(\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} (2.1.5), \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} (2.1.6))$$

式(2.3)の両辺を時間微分すると、

$$\nabla \times \frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} = \frac{\partial^2 \boldsymbol{D}}{\partial t^2} \quad (2.1.7)$$

式(2.5),(2.6)を代入すると、

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2} \quad (2.1.8)$$

この式に(2.3)を代入すると、

$$-\frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}) = \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.1.9)$$

ここで、ベクトル解析の公式 $\nabla \times \nabla \times E = \nabla (\nabla \cdot E) - \nabla^2 E$ より

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2} \quad (2.1.10)$$

これは座標系の変数の2次微分と時間の2次微分が等しいという、いわゆる波動方程 式の形をしている。 Bについても同様にして波動方程式を求めることができる。

$$\nabla^2 \boldsymbol{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{B}}{\partial t^2} \quad (2.1.11)$$

波動方程式の性質から、**E**,**B**は波動exp [$-ik(x \pm ct)$]の形をとって、速度 $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ で伝搬していくことがわかる。以上のように電磁波を記述することができる。

2-2. 伝送電磁波の方程式

センチメートル波は物体を伝わらせて電磁波を送ることができる。そのような電磁波 に対する方程式を求めるために

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_{\boldsymbol{0}}(x, y)e^{i\omega t - \gamma z}, \boldsymbol{H} = \boldsymbol{H}_{\boldsymbol{0}}(x, y)e^{i\omega t - \gamma z} \quad (2.2.1)$$

の形におくと、 γ が純虚数 $\gamma = i\beta$ となるときに z 方向に進む波となる。 マクスウェル方程式で(2.2.1)とおいて整理すると次のような式が得られる。

$$\frac{\partial^{2} E_{z}}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} E_{z}}{\partial y^{2}} = -(\omega^{2} \varepsilon \mu + \gamma^{2}) E_{z} \quad (a)$$

$$\frac{\partial^{2} H_{z}}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} H_{z}}{\partial y^{2}} = -(\omega^{2} \varepsilon \mu + \gamma^{2}) H_{z} \quad (b)$$

$$(\omega^{2} \varepsilon \mu + \gamma^{2}) E_{x} = -i\omega\mu \frac{\partial H_{z}}{\partial y} - \gamma \frac{\partial E_{z}}{\partial x}$$

$$(\omega^{2} \varepsilon \mu + \gamma^{2}) E_{y} = -i\omega\mu \frac{\partial H_{z}}{\partial x} - \gamma \frac{\partial E_{z}}{\partial y}$$

$$(2.2.3)$$

$$(\omega^{2} \varepsilon \mu + \gamma^{2}) H_{x} = i\omega\mu \frac{\partial E_{z}}{\partial y} - \gamma \frac{\partial H_{z}}{\partial x}$$

$$(\omega^{2} \varepsilon \mu + \gamma^{2}) H_{y} = -i\omega\mu \frac{\partial E_{z}}{\partial x} - \gamma \frac{\partial H_{z}}{\partial y}$$

$$(2.2.4)$$

2-3. 導波管

周波数が高くなると中空の導体管の中に電磁波を通すことができる。これを導波管という。z 方向に進む伝送電磁波で、 $E_z = 0, H_z = 0$ の波を **TEM モード**、 $E_z \neq 0, H_z = 0$ の波を **TM モード**、 $E_z = 0, H_z \neq 0$ の波を **TE モード**とよぶ。いずれのモードも進行方向に垂直に交わる面には電場も磁場も存在する。

TM(Transverse Magnetic)モード	電磁波の進行方向に磁界成分のみが存在
TE(Transverse Electric)モード	電磁波の進行方向に電界成分のみが存在
TEM(Transverse Electric – Magnetic)モード	電磁波の進行方向に電界成分も磁界成分も存在しない(平面波)

・円形導波管

ここではホーンの基本構造である、円形導波管内における電磁波の振る舞いを表す方 程式を導く。

半径 R の中空円筒形の場合、TM モードについては(2.2.2a)式を極座標変換すると

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \theta^2} + k^2 E_z = 0, \quad k^2 = \omega^2 \varepsilon \mu + \gamma^2 \quad (2.3.1)$$

境界条件は、円周上で

$$\frac{\partial H_z}{\partial r} = 0 \quad (2.3.2)$$

この微分方程式の解は Bessel 関数で与えられ、m 次の Bessel 関数 J_m のn 番目の零点 ($J_m(x) = 0 \ e^{i\hbar c \ fx}$)を J_{mn} と書くと、k が

$$k = \frac{j_{mn}}{R} \equiv k_{mn}$$
, $m = 0, 1, 2, \cdots$, $n = 1, 2, \cdots$ (2.3.4)

のときに境界条件を満たす。kmnに対するものをTMmモードと呼ぶ。

次に TE モードについては、(2.2.2b)式を曲座標変換すると

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \theta^2} + k^2 H_z = 0 \quad (2.3.5)$$

境界条件は、円周上で

$$\frac{\partial H_z}{\partial r} = 0 \quad (2.3.6)$$

この微分方程式の解も Bessel 方程式となり、m 次の Bessel 関数の微分係数 J'_m のn番目の零点を j'_{mn} と書くと、k が

$$k = \frac{j'_{mn}}{R} \equiv k'_{mn}$$
, $m = 0, 1, 2, \cdots$, $n = 1, 2, \cdots$ (2.3.7)

のとき解が求まる。*k'mn*に対するものを **TEmn モード**と呼ぶ。

それぞれの電磁界分布を以下に示す。



図 4. 円形導波管の電磁界分布。実線が電場、破線が磁界のベクトルを示す。

2-4. フィードホーン

フィードホーンは電磁界分布を自由空間モードから導波管モードに変換する装置。自由空間を伝わる自由空間モード(TEM モード)は磁場と電場が直行する電磁界分布である。一方、導波管内では導体(金属)に囲まれており、導体の接線方向の電界は0という境界条件によって電磁界分布が変化する。円形導波管を伝搬するときはTE₁₁モード、矩形導波管を 伝搬するときはTE₁₀モードとなる。

フィードホーンでモード変換を行うことにより、受信機まで電波を効率的に給電できる。



図 5. フィードホーンとモード変換

・コニカルホーン

コニカルホーンは、円形導波管をテーパー状にしたもので基本電界モードである TE₁₁モ ードが自由空間へ伝搬する。金属壁の境界条件から電界のベクトルは壁面に対して垂直な 成分しか持たないため、中心から外れると曲率を持つ。つまり、 直行する偏波軸を考え た時に、交差偏波へ漏れ込む成分が多くなるということである。また、遠方界でのビーム パターンが楕円になってしまう。このように、コニカルホーンは構造がシンプルで作りや すい反面、交差偏波損失が多く、ビームが楕円形となるため、高感度かつ円形ビームが求 められる天文観測での使用は難しい。



図 6. コニカルホーン

・コルゲートホーン

コルゲートホーンは側面に溝を持つ構造のホーンである。溝部分で TM₁₁モードを発生さ せる。

溝の深さを d とすると、溝の根元(図 7 のオレンジで囲んだ部分)のリアクタンスは、Z₀を 自由空間のインピーダンスとして式(2.4.1)のように表される。リアクタンスは電流の流れ を妨げる電気的抵抗の一種のことである。

$$X = Z_0 tan \left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \quad (2.4.1)$$

 $d = \lambda/4$ のとき、X が無限大に発散する。このとき溝の根元の表面に流れる電流は0となり、T M_{11} モードが生成される。

全電界の内、85%が TE₁₁モード、15%が TM₁₁モードとなるとき HE₁₁モードが生成され

る。HE₁₁モードのとき交差偏波損失が少なく、軸対称でビームパターンも真円に近くなる。コルゲートホーンは以上の特徴を持ち、溝を持たない構造であるコニカルホーンに比べ天文学的に性能が良い。



図7. 開口部付近のコルゲートホーンの断面図



図8. コニカルホーン(左)とコルゲートホーン(右)のビームパターン比較

2-5. 特性インピーダンス

特性インピーダンスは、伝送線路上の進行波に対する電圧と電流の比のことである。電圧 と電流は TEM 波に対して一意的に定義されるため、TEM 波の特性インピーダンスは固有 のものである。しかし、TE 波および TM 波は、一意的に定義された電圧および電流を持 たないのでそのような波に対する特性インピーダンスは異なる方法で定義される。2 つの 線路の特性インピーダンスが同じでないと、伝送線路を他の線路と繋げる時、反射波が出 て、伝送に無駄が生じる。

2-6. オフセットグレゴリアン光学系

SKA-Mid ではオフセットグレゴリアンアンテナが採用されている。オフセットグレゴリア ン光学系は、回転放物面の主鏡と回転楕円面の副鏡から構成される光学系である。主鏡の 焦点と副鏡の焦点の1つが一致するように設置されている。主鏡で反射された電波は楕円 鏡の主鏡に近い側の焦点を通過し、副鏡で反射されもう一つの焦点に集光される。この焦 点の位置にフィードホーンが設置される。この光学系ではフィードホーンの見込み角が58 度であるため、フレア角が大きくなっている。そのため、今回は開口が大きく開いた形の Axially-corrugated horn モデルを検討している。



図 9. オフセットグレゴリアン光学系



Axially-corrugated horn

図 10. SKA-Mid で使用される光学系と Axially-corrugated horn

3.解析手法

電磁界シミュレーションソフト CHAMP を用いてコルゲートホーンモデルを設計し、ホー ン部分のみでのビームパターン、反射損失を導出した。反射損失は入力された電波に対す る、反射波の割合を表す。反射損失が大きいと入射する電波が少なくなるため、できるだ け小さくすることが設計において求められる。今回の設計手法としては、溝の数が8個、 溝と溝との間隔は一定とし、それぞれの溝の深さdのみを変えていくということを行なっ た。



図 11. CHAMP で表示したコルゲートホーンの断面図

そしてもう一つの電磁界シミュレーションソフトである GRASP を用いてフィード、副鏡 と主鏡を含めた光学系全体でビームをシミュレーションし、それぞれの周波数でゲインの ピーク値を算出した。GRASP のシミュレーションでは CHAMP の解析で得られたホーン におけるビームパターンを光学系全体に照射させている。



図 12. GRASP で表示した光学系全体の 3D 図

GRASP で求めたゲインのピーク値から性能指標の一つである開口能率を求めた。開口能 率はアンテナの面積 A のうち、有効的に使用されている面積の割合のことである。

開口能率ηは式(3.1)で与えられる。

$$\eta = \frac{\left(\frac{c}{f}\right)^2 \cdot 10^{\frac{G}{10}}}{4\pi A} \quad (3.1)$$

4.結果

4-1. 設計目標

SKA1SystemRequirement によると、15-20GHz 帯で開口能率 65%以上という技術要求が ある。しかし、実際の電波望遠鏡では鏡面精度の粗さの影響などによる開口能率の低下が 見込まれるため、設計の段階では要求されている値よりも高い 80%以上を設定している。

また、反射損失については一般的に設計の指標とされている-20dB以下を設定した。

本研究では以上の目標値を達成するようなコルゲートホーンの設計を試みた。

Requirement description

Aperture Efficiency.

For SKA1_Mid aperture efficiency, while operating under Precision and Standard environmental conditions, shall be above a lower limit linearly interpolated between the following specification points:

- 60% at 350MHz
- 65% at 400MHz
- 78% from 600MHz to 8000MHz
- 70% from 8 to 15 GHz
- 65% from 15 to 20 GHz

Aperture efficiency is the ratio of the maximum effective area to the physical aperture area (these are terms defined in IEEE Std 145 where the same ratio is referred to as Antenna Efficiency) calculated for a Gaussian feed illumination pattern with taper chosen to maximize aperture efficiency.

SKA1SystemRequirement より一部抜粋

4-2. 簡単なモデル

4-2-1. モデル作成

設計の足がかりとしてまずは簡単なモデルを作成、解析し性能を評価した。溝がないモデ ル、そして溝の深さを 22GHz の 1 波長(13.629mm)、1/2 波長(6.8135mm)、1/4 波長 (3.406mm)に揃えたモデルの計4つを作成した。



図 13. 作成した簡単なモデルの立体図と断面図

4-2-2. 解析結果

4-2-1節で述べた4つのホーンモデルの開口能率と反射損失の結果を以下のグラフにまとめた。



図 14.4 つのモデルの開口能率と反射損失

開口能率については4つ全てのモデルで目標値を達成することができなかった。 15~28GHz 帯では70%程度の値だが、29GHz で1/2 波長に揃えた以外のモデルで大幅に 低下した。29GHz における能率の低下についてはビームパターンにその要因があると考え られる。29GHz においての GRASP のビームパターンの解析結果を以下に示す。

開口能率が良いモデルのビームパターンは真円に近く、悪いモデルのビームパターンは楕 円に近い形をしていた。



図 15.4 つのモデルの 29GHz におけるビームパターン

また、反射損失についても、全てのモデルで目標値である-20dB以下を達成できなかっ た。しかし、各モデルで特定の周波数帯で損失が大きくなるという特徴が見られた。溝な しモデルでは 20GHz 付近でのみ、1 波長に揃えたモデルでは 15-29GHz のほとんど全て の帯域で、1/2 に揃えたモデルでは高い周波数である 25-29GHz、1/4 に揃えたモデルで は低い周波数の 15-19GHz 帯で損失が目標値を上回った。ホーンの溝部分で共振が起こっ ている他、インピーダンス整合が取れていないことが原因で反射波が生じ損失が大きくな っていると考えられる。

作成した4つのモデルは開口能率、反射損失どちらの目標も達成することができなかった ため、別のモデルを作成することが必要となった。

4-3. 溝の深さをそれぞれ変えたモデル

4-3-1. モデル作成

4-2-1 節の結果を受け、新たなモデルを作成した。新たに作成したモデルは以下の図のような構造をしている。このモデルをモデル1と名付ける。導波管側から4,5,6つ目の溝の深さを以前のモデルから大きく変化させている。導波管に近い側の溝は22GHzの1/2波長、開口側の溝の深さは1/4波長ほどの大きさにしている。

このモデル1の構造を決めるために、溝を一つ選びそれ以外のパラメータは一定としてそ の溝の深さを変えていき、どこの溝がどれほどの深さになると反射損失と開口能率がどの ように影響するのかということを調べた。その結果、導波管に近い溝は22GHzの1/2波 長程度の長さから大きく外れると、反射損失が悪化するということがわかった。また、開 口側は自由空間モードから HE₁₁モードに変換するモード変換部であるため、2-3節で述べ たリアクタンスの関係式から、溝の深さを1/4波長程度に設定した。



図 16. モデル1の立体図と断面図

4-3-2. 解析結果

モデル1の15-29GHzにおける開口能率と反射損失の結果を以下のグラフに示す。



図 17. 4つの単純なモデルとモデル1の開口能率、反射損失の比較

マゼンタの太い線で表されているものがモデル1の解析結果である。反射損失は15-29GHz 全域で目標値である-20dB を下回っており目標値が達成された。このモデルではう まくインピーダンス整合ができていることがわかる。

開口能率については 15-24GHz において簡単なモデルよりも悪化したが、24-29GHz では 目標値に近づいた。特に 29GHz の開口能率が 74%ほどとなり、改善が見られた。この 時、ビームパターンは真円に近かった。



図 18. モデル1の 29GHz におけるビームパターン

22GHz におけるモデル1と溝なしモデルのビームパターン(図内左下)とビームの 0,90 度 で切断した時のアンテナ指向性を示したグラフである。モデル1のグラフを見るとピーク の辺りで二つのグラフが溝なしのものよりも一致していることがわかる。したがってモデ ル1ではビームの軸対称性は良くなっていることがわかる。



図 19.22GHz におけるモデルと溝がないモデルのビームパターン比較

- 5. まとめと今後
- SKA-Midの将来計画に向けて15-29GHzにおいて低損失で高開口能率なフィードの 作成を試みた。電磁界シミュレーションソフトのCHAMPとGRASPを用いてコルゲ ートホーンの溝の深さをそれぞれ変化させ最適化を行なった。その結果、導波管15-29GHz帯全域で反射損失-20dB以下という目標値は達成されたが、開口能率80%以 上という目標値には達しなかった。
- 今後は溝と溝との間隔や溝の幅、溝の数などの溝以外のパラメータも変化させ、目標 値を達成するようなコルゲートホーンの開発を行っていきたいと考えている。また、 シミュレーションで性能の良いモデルが設計でき次第、実際に物を作成し測定を行 い、実物の性能評価も行う予定である。

6. 謝辞

指導教員の小川英夫客員教授、大西利和教授、前澤裕之准教授、村岡和幸准教授には様々 な面でサポートしていただきました。小川客員教授には私の研究の進捗の確認や、作成資 料の添削などをしていただきました。研究についてわからないことがあれば、丁寧に答え てくださり、研究の指針をわかりやすく教えていただきました。

国立天文台の山崎康正氏には小川客員教授と共に平日はほぼ毎日、私の研究のためにミー ティングを開いて、研究の進め方について丁寧に面倒を見ていただきました。また、最新 の研究や研究の楽しさなども紹介していただきました。

本研究を進めるにあたって、小川客員教授と山崎氏には本当にお世話になりました。心よ り感謝申し上げます。

西川悠馬さんには光学系で用いられる基本的な用語の説明や解析ソフトの使い方を丁寧に 教えてくださりました。データの数が膨大になり、整理する際はご協力していただきました。

月面天文台に取り組んだ際には、松本健さんに大変お世話になりました。実験の進め方や pythonの使い方などを丁寧に教えていただきました。また、定例会の発表資料や院試の志 望理由書の添削などをしていただきました。

1.85m 電波望遠鏡の光学ポインティングの際は、澤田-佐藤聡子研究員に付き添いをしていただきました。また、中川凌さんには作業内容を教えていただいたり、野辺山で過ごす上でお世話になりました。名古屋大学の高山楓菜さん、伊藤拓冬さんもこの際にお世話になりました。

近藤奨紀さんには研究で悩んだことがあり、相談した時にアドバイスをくださり、大変助 かりました。

普段の居室では席の近い安達大揮さん、國年悠里さん、東野康祐さん、小西亜侑さんとは 話す機会が多く、楽しい時間を過ごすことができました。

現 M1 の皆さんはイベントごとにお疲れ会を開いてケーキや飲み物をご馳走してくださり ました。毎回暖かくお祝いしていただいたのが嬉しかったです。

同学年の岡本結人くん、角越仰くん、藤本湧大くん、山下晃矢くん、山本美咲さんとは全 員研究テーマが違うながらも、いつも楽しく関わることができました。

最後に、私を大学まで通わせてもらっている両親と、いつも私のことを気にかけてくれて

いる祖父母、叔母、叔父にこの場を借りて感謝いたします。

参考文献

[1] 中井直正、坪井昌人 福井 康雄(2009)."宇宙の観測 II-電波天文学" (シリーズ現代の
 天文学 16 巻[第 2 版]).日本評論社

[2] 後藤憲一、山崎修一郎(1970)."詳解 電磁気学演習".共立出版株式会社

[3] 森田清、末武国弘、森周一(1962)."マイクロ波回路".オーム社

[4] 日本 Square Kilometre Array コンソーシアム技術検討班(2021) "SKA エンジニアリン グレポート 2021"

[5] 山崎康正"210-375 GHz 帯 超広帯域同時観測へ向けた電波望遠鏡光学系の開発"2020 年度修士論文