

(別紙様式 5)

【課程終了によるもの】

## 論文内容要旨

(No.1)

氏名	渡邊拓男	提出年	平成 16 年
学位論文の 題名	Development of the observation system for the Jovian synchrotron radiation using an aperture synthesis array (アレイ方式による木星シンクロトロン放射観測装置の開発)		

## 論文目次

<b>Acknowledgements</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 The giant planet Jupiter . . . . .	1
1.2 Radio waves from Jupiter . . . . .	2
1.3 Observation history of the Jovian synchrotron radiation . . . . .	3
1.4 The purpose of this thesis . . . . .	4
<b>2 Characteristics of the Jovian synchrotron radiation</b>	<b>5</b>
2.1 Mechanism of synchrotron radiation . . . . .	5
2.2 Spectrum . . . . .	10
2.3 Beaming curve . . . . .	12
2.4 Spatial distribution . . . . .	13
2.5 Time variation . . . . .	21
2.5.1 Long term variation . . . . .	22
2.5.2 Events on the impacts of comet Shoemaker-Levy 9 . . . . .	23
2.5.3 Short-term variation . . . . .	26
<b>3 Remote sensing of the Jovian magnetosphere</b>	<b>29</b>
3.1 Summary of in-situ observation of the Jovian radiation belt . . . . .	29
3.2 Necessity of remote sensing of the Jovian radiation belt . . . . .	35
3.3 Antennas for JSR . . . . .	37
3.3.1 Required specifications for the JSR observation . . . . .	37
3.3.2 Basic design of the observation system . . . . .	38
3.3.3 Comparison with other antennas . . . . .	41

<b>4</b>	<b>Development of the observation system</b>	<b>45</b>
4.1	System for signal receiving	47
4.1.1	Antenna	47
4.1.2	Front-end	52
4.1.3	Combination of signals	60
4.1.4	Back-end	63
4.2	System for phase and gain calibrations: the loop-method	65
4.2.1	Principle of loop-method	65
4.2.2	Application to nine antennas	66
4.2.3	Example of loop-method	67
4.3	System for antenna control	71
4.4	System for communication	71
4.5	Control by software on PC	75
<b>5</b>	<b>Measurements of intrinsic parameters for synthesizing of signals</b>	<b>77</b>
5.1	Calibration of antenna axis	79
5.2	Measurement of antenna position	82
5.3	Measurement of eigen phase of each antenna	84
5.4	Calculation of synthesized beam	87
<b>6</b>	<b>Performance test of the observation system</b>	<b>89</b>
6.1	Noise temperature of receiver ( $T_{RX}$ )	89
6.2	Effective aperture area ( $A_e$ )	94
6.3	Observations of radio stars	98
<b>7</b>	<b>Discussions</b>	<b>107</b>
7.1	Effective antenna aperture area	107
7.1.1	Impedance mismatch between antenna and feeding cable	107
7.1.2	Ohmic loss in cables and combiners	108
7.1.3	Effect of phase irregularity	111
7.2	Phase difference in the bandwidth	111
7.3	Effects of solar radio emission	115
7.4	Monitor of loop-method calibration	116
7.5	Vision for an interferometric observation	116
<b>8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>121</b>
	<b>References</b>	<b>123</b>

### (No.3)

太陽系最大の惑星である木星は、その強力な磁場と高速の自転によって、強大かつ活動的な磁気圏を形成する。木星磁気圏では、オーロラ活動および粒子、電波バーストなどの惑星現象が、地球磁気圏からの相似では考えられないダイナミックな振る舞いをしていることが数多く観測されるが、未だその物理過程の多くが解明されていない天体である。特に放射線帯については、地球放射線帯でほとんど存在しない MeV のエネルギーの成分までを持つ粒子が豊富に存在するが、その高エネルギー粒子のダイナミクスや加速、輸送、消滅過程などはほとんど未解明である。さらに地球の放射線帯が 90 年代以降の衛星観測により、従来の平均的な描像では説明できない極めて動的な変動を示すことが明らかにされていることを考え合わせるとき、木星の内部磁気圏には未だ明らかにされていない磁気圏現象が潜んでいることも推定される。以上のような観点から近年、木星の内部磁気圏の研究は、重要性が増してきている。

木星放射線帯の観測手段としては、放射線によるダメージによって飛翔体による in-situ 観測が難しいため、地上からの木星シンクロトロン電波観測によるリモートセンシングが主である。シンクロトロン放射とは、光速に近い高エネルギーの粒子から放射される電磁波であり、木星放射線帯の場合は主に波長数 cm～数 m の電波が放射されている。シンクロトロン放射を用いた木星放射線帯のリモートセンシングは、1970 年頃から断続的に行われており、特に近年、干渉計によるイメージングによって得られたシンクロトロン放射の 2 次元さらに、3 次元の空間分布は、電子、磁場モデルとの比較により、木星放射線帯の静的な電子分布が得られている。一方、シンクロトロン電波の示す時間変化は、木星放射線帯の粒子フラックスの時間変動を反映するが、過去の 35 年間にわたるモニタリングによって、(a)長期(11 年)、(b)中期(数ヶ月)、(c)短期(数日から数週間)のタイムスケールを持った時間変動が観測されている。長期の時間変動については、相関解析により太陽風動圧との相関関係が見出され、さらに拡散過程を仮定したシミュレーションによって、変動の原因は外部境界(L=50)における電子密度の変動であることが確かめられている。一方、中期、短期の時間変動については、地球放射線帯で観測されているダイナミックな変動との対応で考えると、木星内部磁気圏で電磁場の大きな擾乱の介在を想定させるが、変動の存在は確認されていても、その特性、原因は明らかになっていない。

(No.4)

これらの中期、短期の時間変動の特性を解明し、さらには、その変動原因を明らかにすることは、木星磁気圏における未知のダイナミクスの解明にとって極めて重要である。

中期および短期の時間変動が明らかになっていない原因は、観測例の少なさにある。これは、木星シンクロトロン放射の受信可能な大型電波望遠鏡の多くは、共同利用であり、数日から数ヶ月にわたって占有することが難しいからである。ゆえに、中期および短期の時間変動を明らかにするためには、専用の観測装置による連続観測が不可欠である。これが、本研究における木星シンクロトロン放射に特化した特性を持つ観測装置の開発の目的である。また、本研究で開発を行った観測装置は、コンパクトかつ安価であるため、将来の干渉計によるイメージング観測のための、サテライト局としての応用も視野に入れている。

装置の基本的な設計は、以下の手順で行われた。まず、木星シンクロトロン放射のスペクトルおよび電波天文用保護周波数帯を考慮し、観測周波数は 327MHz に設定された。この周波数帯は、比較的低エネルギーの電子の寄与が大きく、内部磁気圏ダイナミクスの解明においては重要であるにもかかわらず、過去の観測例が少ない。次に、過去の観測結果をふまえ、典型的な木星シンクロトロン放射の強度(5Jy)の 2-4%程度の感度を持つように、最小検出感度は 0.1-0.2Jy と設定された。帯域幅、時定数、および、この周波数帯における銀河背景放射を考慮し、受信器には常温において最も低雑音であるガリウムヒ素電界効果トランジスタを用いることにした。この条件のもとで受信器雑音温度 90K を達成した場合に必要な有効開口面積は約 400m<sup>2</sup> と見積もられた。我々は、この有効開口面積を達成する方法として、複数のアンテナの開口面積を加算する加算型干渉計と呼ばれる方法を採用し、その配置はシミュレーションによるサイドローブの見積りの結果、Y字形が採用された。さらに、位相合成を可能にするための回路内位相を計測するための較正装置が必要とされた。

これらの基本的な設計のもとで開発、製作された観測装置の詳細は以下の構成である。設置場所は、惑星プラズマ・大気研究センター 惑星圏蔵王観測所である。

(No.5)

1. アンテナは、4×2 スタック 27 エレメントクロス八木アンテナ 9 基を、約 50m×50m の敷地にY字に配置する。
2. フロントエンドは、ガリウムヒ素電界効果トランジスタを用い、雑音温度 90K 程度を達成する。さらに遠隔操作が可能な、各アンテナのフロントエンド間の利得と位相を較正するための信号選択部、位相を調整するための移相器(6bit)、および、利得を調整するための減衰器(4bit)を備える。
3. バックエンドは、RF 信号の IF 信号へのダウンコンバート機能、および、増幅、周波数帯域選択機能を備える。
4. ループ法と呼ばれる較正手法を備え、各フロントエンド間の相対的な位相、利得差が計測可能である。
5. アンテナを方位角、仰角方向に駆動するアンテナ制御系とフロントエンドを遠隔操作する通信系を有し、バックエンドも含め全ての装置および計測器はパーソナルコンピュータによって集中的に制御される。

加算型干渉計においては、各アンテナからの信号を同位相で加算することが不可欠である。そのため、ループ法によるフロントエンド部の位相較正に加え、アンテナ部における以下のパラメータの測定および位相較正を高い精度で行う。

1. アンテナを正確に電波源の方向に向けるための軸較正パラメータ
2. 光路差を計算するための各アンテナの相対的な座標
3. アンテナの組上精度により必然的に生じる、各アンテナ毎の信号のオフセット位相成分（固有位相）

開発した観測装置を用い、木星シンクロトロン放射の試験観測を行い、木星電波の受信を確認した。さらに、較正電波源との電波強度の比較によって得られた木星シンクロトロン放射強度は、 $\sim 5\text{Jy}$ であった。この値は、過去の観測結果の典型値と一致し、本観測装置が機能していることが確認された。

また、1週間の連続的な試験観測から、受信機の増幅特性は設計どおりであり、かつ、安定して動作すること、および、開口面積の加算が達成されていることを確認した。し

(No.6)

かし、アンテナ単体の開口面積が設計値の 1/4 であり、アンテナ部分において 5.5dB の損失が発生していることが明らかにされた。この開口面積の減少の原因として、(a)アンテナと給電線間のインピーダンスミスマッチ、(b) 給電線のロス、(c)各ピックアップからフロントエンドへと送信される信号の位相差、の 3 成分が考えられた。これらについて定量的に検討した結果、(a)の寄与は無視できること、(b)の寄与は 1.7dB 程度であることが確認された。残る 3.8dB について、パラボラアンテナ反射面における実際の反射面と理想方物面との差異に起因する位相誤差損失の考え方を適応し検討した結果、各ピックアップの取り付け位置の 13cm 程度のばらつきによって説明できることが確認された。

さらに、帯域内における位相差をアンテナの配置を考慮して定量的に見積もった結果、現実的に取りうる最大の帯域幅 10MHz の観測においては、信号の合成時に最大 32%程度のロスになることを示した。また、アンテナの指向特性を考慮し、地上電波観測において最強の電波源である太陽電波の影響を見積もった結果、太陽と木星の位置関係により、木星シンクロトロン放射観測に無視できない影響が生じることを示した。

本研究の開発目的で述べたように、木星シンクロトロン放射の 2次元イメージの連続観測が内部磁気圏ダイナミクスの解明に今後重要となるであろう。本研究と同様に、連続観測を目指した現実的な干渉計装置としては、以下のような装置が考え得る。干渉計の配置としては、木星シンクロトロン放射の放射源分布を考慮すると、東西 5-10km 基線によって木星シンクロトロン放射の磁気赤道方向の輝度分布を観測することが有効であり、また、データ取得・記録系としては、現在開発が急速に進んでいるパーソナルコンピュータを基にした実時間 VLBI の手法が有効であろうと考えられる。本研究において開発された装置および手法は、このような干渉計観測のサテライト局への適用が期待でき、木星シンクロトロン放射研究の将来を切り拓く上で重要な役割を担うものである。