

氏名・(本籍)	とく まる むね とし 徳 丸 宗 利
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 965 号
学位授与年月日	昭和61年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	Studies on source location of Jovian decametric radiation using 1 km and 75 km interferometers (1 km及び75 km基線干渉計を用いた木星デカメータ電波源の位置に関する研究)
論文審査委員	(主査) 教 授 大 家 寛 教 授 田 中 正 之 助 教 授 斎 藤 尚 生

論 文 目 次

ACKNOWLEDGEMENTS

CONTENTS

Chapter 1. General Introduction

Chapter 2. Characteristics of Jovian Decametric Radiation

2-1. Occurrence Characteristics

2-2. Classification of the Time Variation

2-3. Polarization Characteristics

2-4. Apparent Source Size and Apparent Source Motion

…… Review of the VLBI Observation

Chapter 3. Origin of Jovian Decametric Radiation

3-1. Energy Source of Jovian Decametric Radiations

3 - 2.	Review on Model for the Jovian Magnetosphere-Io Interaction
3 - 3.	Generation Mechanism of Jovian Decametric Radiation
Chapter 4.	Instrumentation
4 - 1.	Concept for the Development of the System
4 - 2.	Swept Phase Interferometer System with 1km Baseline
4 - 3.	75 km Interferometer System
4 - 4.	Polarimeter System
Chapter 5.	Analyses of the Fringe Phase Measured by 1km and 75 km Interferometers
5 - 1.	Results of the Swept Phase 1km Interferometer
5 - 2.	Observations of the 75km Interferometer
5 - 3.	Analyses of the Fringe Phase Distribution
5 - 4.	Comparison with Simultaneous Polarization Data
5 - 5.	Summary and Discussion
Chapter 6.	Propagation Effects in the Interplanetary Space and Terrestrial Ionosphere
6 - 1.	Interplanetary Scintillation and Cross Correlation Analysis
6 - 2.	Results of the Cross Correlation Analysis
6 - 3.	Ionospheric Effects on the Fringe Rate
6 - 4.	Summary and Discussion
Chapter 7.	Model for Jovian Magnetosphere-Io Interaction
7 - 1.	Interpretation of Switching Phenomena of Io-B Source
7 - 2.	Hydromagnetic Oscillation in Io's Coupling System
7 - 3.	Reexamination of the Beaming Model
7 - 4.	Summary and Discussion
Chapter 8.	Concluding Remarks
BIBLIOGRAPHY	
APPENDIX A.	Calculation of Fringe Phase Measured by Interferometer
B.	Circuit Diagrams of Swept Phase 1 km Interferometer
C.	Circuit Diagrams of 75 km Interferometer
D.	Circuit Diagrams of Polarimeter
E.	Design of PLL Local Oscillators for 75 km Interferometer System

論文内容要旨

1. 序 論

高速の自転をする不星は、強い主磁場をもち、75木星半径の規模をもった巨大な磁気圏をまとっている事が予想されていたが、1970年代から開始された飛翔体による探査によって、その大部分が確認された。さらに磁気圏境界域では太陽風プラズマと激しいせめぎ合いをしていて、その位置が45~100木星半径の範囲に大きく変る事も明らかにされた。この太陽風との相互作用以外にも、木星磁気圏では、回転するプラズマ、イオ衛星と磁星との相互作用といったさまざまな過程で莫大な擾乱のエネルギーが生みだされており、その一部は、電磁波へ変換されて、強力な木星デカメータ電波として放射されている。木星デカメータ電波は、地上で連続な観測が可能なことから、木星磁気圏の擾乱現象の物理過程を解明する有効な方法の一つとなっている。明らかにされた木星磁気圏に関する新事実は、地球と比較対照することで、従来、地球近傍のプラズマを対象としてきた磁気圏プラズマ物理学を応用するとともに、逆にこの方面の物理学を飛躍的に進歩させることが期待されている。その意味で、木星デカメータ電波研究の持つ重要性は日毎に高まっている。

また、木星デカメータ電波がそのエネルギーがイオ衛星によって制御されている成分（イオ依存性電波源）をもつことから、イオ衛星と木星磁気圏プラズマの激しい相互作用の研究にも重要であると考えられている。イオ衛星と木星磁気圏のような相互作用は非常に特異であり、磁気圏物理研究にとって意義深いものであるが、未だその詳細が解明されていない重要なテーマである。

これらの観点から研究してゆく上で木星デカメータ電波の放射源の位置は不可欠な情報であるが、現在のところ直接観測の例はなく、未解決な課題として残されている。そこで、本研究では新たに開発した1 km及び75 km基線の干渉計システムを用いて木星デカメータ電波の観測を行い、放射源の位置の決定を行った。

2. 観測システムの開発

木星デカメータ電波源の位置を探る為に、本研究では受信周波数21,860 MHzをもつ3種の観測システムを新たに開発した。第1は、1 km基線位相掃引型干渉計システムであり、第2はテレメータ方式による75 km基線干渉計システムである。両システム共に高い位相安定度を有し、木星電波バーストに対応する短い時間スケールでは、それぞれ $\pm 4 \sim 5^\circ$ の精度で受信信号の位相差(フリッジ位相)を決定できる。これらは、木星における距離にすると、それぞれ1木星半径及び2000 kmの精度に対応する。さらに、一基線の狭帯域干渉計システムを用いた位相測定では不可避である 2π の位相の任意性を、同時の偏波特性を知ることにより取りのぞく為、第3のシステムとして偏波計システムを開発した。この偏波計の性能は、銀河雑音等の無偏波成分の混入の効果を補正した場合、偏波の軸比を ± 0.1 の精度で決定できるものである。

3. 1 km及び75km基線干渉計による木星電波観測と、フリンジ位相の解析

1 km基線位相掃引型干渉計を用いた木星電波観測は、1981年3月より開始され、得られたフリンジ位相データを解析した結果、2つのイオ依存性の放射現象に対し有意なフリンジ位相の飛び（フリンジ位相スイッチング現象）をおこしていることが明らかとなった（図1参照）。このフリンジ位相スイッチング現象は、木星の南北両極域からデカメータ波が放射されていることを示唆するものであることが結論された。

1982年12月からは75km基線干渉計が稼動を始めたが、75km干渉計を用いた観測でも、イオ依存性早期電波源において明瞭なフリンジ位相スイッチング現象が認められた（図2参照）。さらに、典型的な木星電波放射現象11例についてフリンジ位相の定量的解析をおこなって、これらの現象がフリンジ位相分布により2つの型に大別できることが明らかとなった。第1の型のフリンジ位相分布では、現象を通じある一定のフリンジ位相角のところに出現頻度の最大があり、これは単独の放射源が定まった領域に安定に位置していたことに対応する。非イオ依存性及びイオ依存性主電波源の現象例はこの型のフリンジ位相分布を示した。一方、第2の型のフリンジ位相分布では、互いに $150^\circ \sim 270^\circ$ 異なる2つのフリンジ位相角に対応して出現頻度の最大が現われ、それらは約20分の間隔で交互に優勢になっている（スイッチング型フリンジ位相分布；図3参照）。イオ依存性早期電波源に属する現象例は、すべて第2の型のフリンジ位相分布を示した。そして、 150° から 270° にわたる位相角の差は、イオ衛星を横切る磁力管（IFT）中で、サイクロトロン周波数が2,860 MHzであるような木星南北極域電離層の2つの領域の隔りにはほぼ一致していることから、これらの南北の2地点が放射源の位置であることが結論された。

さらに、偏波計との同時観測結果からは、フリンジ位相スイッチング現象に同期して偏波特性のスイッチが生じていることが判明し、発生領域の磁場の向きと偏波との対応関係から南北の放射源の存在を確かに裏付けることができた。また、偏波とフリンジ位相のより詳しい対比によって、IFTに沿う南北放射源の他に、それと分離して南極付近に第3の放射領域が同定され、これら放射源の偏波特性は、プラズマ中の電波伝播に関し、L-Omodeをもって統一的に説明できることが明らかとなった。

4. 惑星間空間及び地球電離層における伝播効果

75km基線干渉計で受信された木星電波の信号が、如何なる程度、惑星間空間シンチレーションによって影響を受けているかという問題は、フリンジ位相データの解析から得られた結論の信憑性について重要な鍵をにぎっている。そこで、強度変動の相互相関解析を行い、その結果、木星に対する太陽離角が 80° 以上の期間における木星電波の受信信号強度の時間変動は、75kmはなれた2局で、遅延時間なしで非常によく相関していることが判明した。この相関の程度は、1 km基線の場合に得られる相関の程度に匹敵している。このことは、75kmはなれた2地点で受信された木星電波の信号は、ほとんど同じ伝播路上を伝ってきたことを意味する。即ち、フリンジ位相データは伝播路の効果によって大きく影響されていないことを示している。しかし、太陽離角が

69° の時期の木星電波放射現象においては、約 200 msec の遅延時間が検出され、これは従来、惑星間空間シンチレーションとして報告されている遅延量とより一致を示した。よって、この現象のフリンジ位相データは、惑星間空間プラズマにより大きく影響を受けていることから、放射源の位置の議論に直接使用することは不相当であることが判明した。

75km 干渉計によって得られたフリンジ・レート of MEM スペクトル解析からは、異常なフリンジ・レートをもつ、極く稀な木星電波放射現象が発見された。これは、地球電離層中において偶然に発生したスプレッド F 現象に対応する急激な電子密度変化によって起された見かけの現象であることが結論された。

5. 木星磁気圏—イオ衛星相互作用に関するモデル

本研究により、イオ依存性の早期電波源において南北放射源が、スイッチする現象が明らかとなったが、これはイオ衛星と木星磁気圏の結合状態を究明する鍵となる。イオ衛星との相互作用のエネルギーによる磁気共役な放射源の活動の姿を明らかにするという観点から、その発生機構の検討を行ったところ、まず、イオ衛星の相互作用として Gurnett と Goertz によって提出されている Alfvén 電流の多重反射モデルは、 $\pm 1^\circ$ 以下の非常に鋭い木星電波のビーム幅を仮定しなければならないので、電波源のスイッチング現象の発生機構として不相当であることが指摘された。そして、電波源のスイッチング現象の発生には、イオから放射源へのエネルギー供給自体が、間歇的または周期的におこなわれている必要があることが結論された。南半球を伝播するイオからの擾乱は、イオ・プラズマ・トーラスの高いプラズマ密度の為、北半球の擾乱より遅れて木星電離層へ到達するが、これが南北放射源のスイッチングの時間差約 20 分に対応している。イオからの間歇的なエネルギー供給の原因としては、木星磁場がイオから放出されたプラズマをローレンツ力で加速する際、プラズマの慣性によって過渡的に発生する磁気流体波動が有望である。

最後に、Alfvén 電流の多重反射モデルの検討の際、問題となった木星電波の鋭いビーム特性について検討を行った。従来、木星電波出現頻度の長周期変動は、木星電波が緯度方向に $\pm 3^\circ$ 程度の鋭いビーム幅で放射されている為に生じると解釈されてきた。しかし、計算機シミュレーションの結果は、木星電波出現頻度の長周期変動が地球電離層のしゃへい効果と木星—地球間の距離変化に伴う S/N 効果のみでよく説明できることを示した。したがって、 $\pm 3^\circ$ 程度のビーム・パターンの必然性は極めて薄くなったといえる。

6. 結 論

新たに開発された 1 km 基線位相掃引型干渉計及び 75 km 基線干渉計を用いた木星デカメータ電波の観測により、放射源の位置に関していくつかの重要な特徴が発見された。即ち、非イオ依存性及びイオ依存性主電波源の現象では、単独の放射源が定まった領域に安定に存在しているのに対し、イオ依存性早期電波源では、イオ衛星を横切る磁力線でつながった木星の南北極域電離層に、

それぞれ放射源が存在していることが判明した。そして、イオ依存性早期電波源の南北放射源は、約20分の間隔をおいて交互に活動していることが明らかとなり、このような放射源のふるまいは、木星磁気圏-イオ衛星結合系において発生する磁気流体波動によって、イオからのエネルギー供給が変調をうけ、間歇的となっていることに起因すると結論された。また、偏波計との同時観測からは、木星電波がL-Omodeであることの証拠が得られた。一方、75km干渉計によって得られたほとんどの木星電波の現象について惑星間空間及び地球電離層の効果は、極めて小さく、干渉計法による電波源の位置決定が有効であることが示された。最後に、木星電波出現頻度の長周期変動は、従来考えられてきた木星電波の鋭いビーム特性によるのではなく、主に地球電離層のしゃへい効果によって説明することができることが明らかとなった。

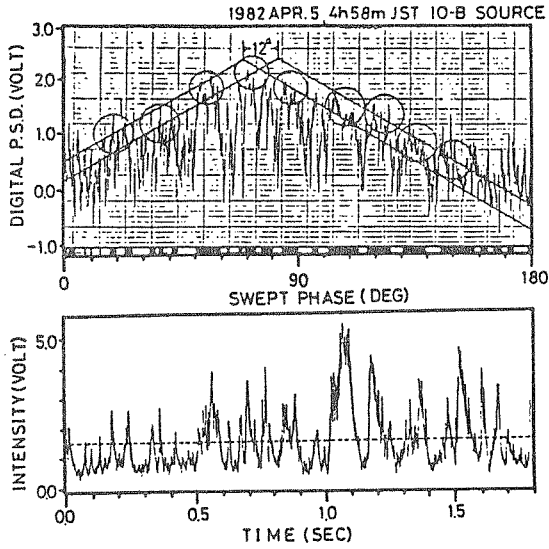


図1. 1 km基線位相掃引型干渉計によって観測されたイオ依存性早期電波源の現象例 (1982/415)

(上) 位相差出力
 (下) 受信強度出力
 12° のフリンジ位相の飛びがみられる。

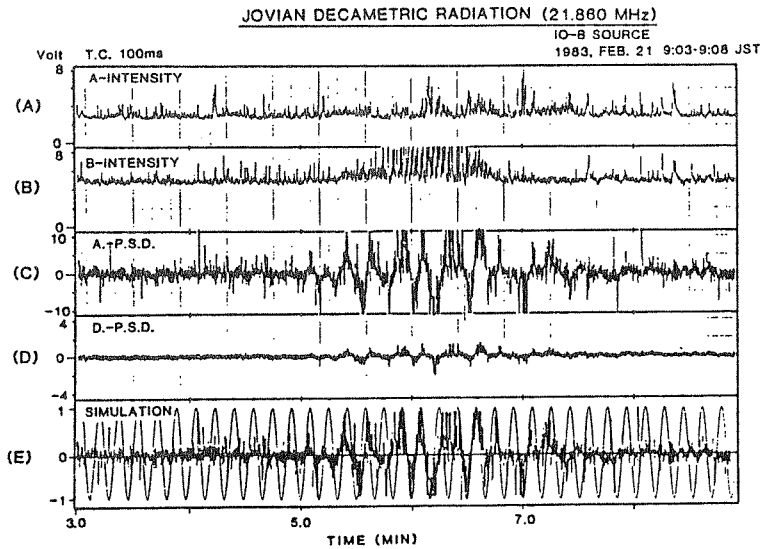


図2. 75 km基線干渉計によって観測されたイオ依存性早期電波源の現象例 (1983/2/21)
 (A), (B)は2地点での受信強度, (C), (D)は位相差出力, (E)はフリンジ・パターンの計算結果を示す。
 (E)において, 明瞭なフリンジ位相スイッチングが見られる。

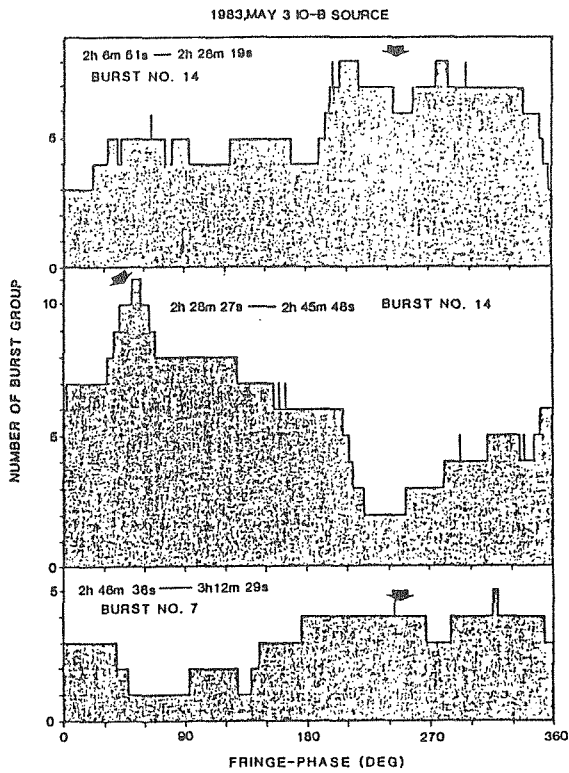


図3. イオ依存性早期電波源の
 フリンジ位相分布 (スイッチング型フリンジ位相分布)
 約 180° はなれた2つのピークが、約20分間隔で交互に現われている。

論文審査の結果の要旨

徳丸宗利提出の論文は、木星から放射されるデカメータ電波の電波源の位置を定め、その発射メカニズムを明かにしたものである。

研究は、まず、21.86 MHz の木星デカメータ波電波に対し、その間隔 1 km の干渉計を開発し、位相差 5° 以内の高い精度で観測した。

更に本研究では、75kmの間隔を持つ干渉計の開発を行ったが、この干渉計は二点間の電波位相を保持したまま高い安定度を持ったテレメータ電波で結合するユニークなもので、観測の結果、木星電波源が木星の南極及び北極付近にあり、約20分間隔でそれが交互に励起する状況が明らかになった。

この南極及び北極が交互に切り替わる事と呼応して、その平均の偏波特性は、左回り、及び右回り偏波性が交互に切り替わる事も明らかになった。この事は、比較的長時間にわたり継続するデカメータ成分は、その発生域でL-Oモード（正常波モード）を持って発射される事、したがって、その源では、静電的プラズマ波が電磁波に交換されるプロセスが働いている事を明かにした。

研究は、更に、この20分間隔をもって交互に切り替わる電波源では、そのエネルギー源が木星を周回するイオ衛星の電離層と、それを切って運動する木星磁場との相互作用にかかわる事を明かにした後、更に、この相互作用の過程で、20分前後の周期を持った振動的なエネルギー注入過程のある事も明かにした。

従来の研究では、木星に接近した探査機ボイジャーが、そのスペクトル構造に20分前後の時間間隔をもって変動している事を見だし、その原因としてイオ衛星から電磁流体波が発生して、伝播する事がエネルギー源になるといった理論の提唱があったが、本研究では、その時間変動が、南北の両極にわたって時間的に交互に切り替わっている事を明かにした点で画期的なものである。

以上、本論文は、著者が自立して研究を行うに必要な高度の研究能力と学識を有する事を示している。よって、徳丸宗利提出の論文は理学博士の学位として合格と認める。