

氏名（本籍地）	奥村 大志（静岡県）
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	博甲第 9630 号
学位授与年月日	令和 2 年 4 月 30 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

Analytical and Numerical Study of a Radio Point-Diffraction Interferometer as a Novel Reflector Surface Measurement Method for the Antarctic Terahertz Telescope  
(南極テラヘルツ望遠鏡に向けた新しい鏡面測定法としての電波点回折干渉計の解析的及び数値的研究)

主査	筑波大学教授	博士(理学)	小沢 顕
副査	筑波大学教授	博士(理学)	久野 成夫
副査	筑波大学教授	理学博士	中井 直正
副査	宇宙科学研究所教授	博士(理学)	関本 裕太郎
副査	関西学院大学教授	博士(理学)	瀬田 益道

## 論 文 の 要 旨

審査対象の論文は、南極テラヘルツ望遠鏡の鏡面測定法として電波点回折干渉計を提案し、解析計算および数値計算によって、その原理を示し測定精度の検証を行ったものである。

第1章では、筑波大学を中心とする南極天文コンソーシアムによって推進されている南極テラヘルツ望遠鏡計画の概要と、南極テラヘルツ望遠鏡の鏡面測定からの要求についてまとめ、本論文の目的について述べている。ストレーン比  $S > 0.8$  を実現するためには、波長  $200 \mu\text{m}$  まで観測を目指す南極テラヘルツ望遠鏡では、波面誤差の測定精度として  $4.7 \mu\text{m}$  以下が求められることを述べている。

第2章では、ホログラフィーなど既存の鏡面測定法について述べるとともに、南極という厳しい環境下での測定で要求される条件について述べ、その条件を満たす方法として可視や赤外領域で提案されている点回折干渉計(PDI)を用いた波面測定法について解説している。PDIでは、光学系の途中に小さな回折体を置き、この回折体が入射してきた波に対して点回折を起こし、波面誤差を持たない理想的な球面波(参照波)を生成する。参照波の位相を  $0, \pi/2, \pi, -\pi/2$  の4通りに変調し、測定したい波面を持つ試験波と干渉させて4通りの2次元の像(干渉像)を生成する。これらの干渉像を用いて波面が推定される。PDIでは原理的に  $\lambda/100$  の精度で波面を推定できることが先行研究によって示されていることを示し、南極テラヘルツ望遠鏡の要求を満たす測定方法であるとしている。

第3章では、南極テラヘルツ望遠鏡の鏡面測定法としてPDIを電波領域に導入した電波点回折干渉計(RPDI)を提案し、その構成と原理について述べている。RPDIは瞳面に偏波点回折ビームスプリッタ(PPBS)を

設置し、焦点面で干渉像を取得する仕組みとなっている。鏡面誤差を持った反射鏡によって反射され、波面誤差を持った入射波が PPBS を通過すると、直交偏波として参照波と試験波が独立して伝搬する。焦点面に置かれた受信機内部の伝送路に両波を独立して導き、それぞれを 4 つに分岐する。遅延回路を用いて、4 つに分岐された参照波にそれぞれ  $0, \pi/2, \pi, -\pi/2$  の 4 通りの位相変調を行う。カプラを用いて、これら参照波と試験波の干渉を行い、検波素子で同時に 4 通りの干渉像を取得する。これらの干渉像から、鏡面上の波面を推定する。この構成についての解析計算を行い、原理的に RPDI によって波面測定が可能であることを示している。

第 4 章では、RPDI によって波面誤差が推定できることを、数値シミュレーションを用いて検証している。物理光学シミュレーションソフトを用いて、測定される鏡として試験鏡を設定し、実際に測定される電場を模擬して干渉像を生成したうえで、第 3 章で示した解析的計算を用いて作成した波面推定プログラムにより、干渉像から鏡面上の波面の推定を行っている。まず鏡面誤差のない平面鏡を仮定し、RPDI の解析計算によって生じる系統誤差について考察している。系統誤差として、解析計算と数値計算の間の誤差と、解析計算で用いたスカラー近似による二つの誤差について考察し、これらの系統誤差の RMS がおよそ  $\lambda/43$  であり、鏡面測定の際にはこの系統誤差の差し引きが必要であることを示している。次に、試験鏡に変形を与え、目標の精度で測定が可能であるかを検証している。試験鏡の変形として、2 次元ガウス関数型の変形と 1 枚の扇型パネルの変位による変形の 2 種類について検証を行い、どちらの場合も波面の測定誤差の RMS が目標精度の  $\lambda/42$  (波長  $200 \mu\text{m}$  で  $\sim 4.7 \mu\text{m}$ ) を達成できることを示した。また、どちらも変形の大きさが小さいほど波面誤差の推定精度が良くなることから、鏡面形状の推定と補正を繰り返すことで推定精度を上げられると述べている。さらに、鏡面の中心や縁の変形に対しては、それ以外の場所の変形の推定と比べて精度が悪くなることを示した。

第 5 章では、PPBS の偏光特性の測定誤差による波面の推定精度への影響について調べている。PPBS の偏光特性として、PPBS が透過軸に対して等しい方向の偏波に対する振幅透過率  $|T_1|$ 、透過軸に対して直交した方向の偏波に対する振幅透過率  $|T_2|$ 、この 2 つの間で生じる位相差  $\Phi_T$  を設定し、これらの測定誤差  $\delta_{T_1}$ 、 $\delta_{T_2}$ 、 $\delta_{\Phi_T}$  の値を変えて公差感度解析を行なっている。結論として、PPBS の偏光特性の較正精度が  $\delta_{T_1} \leq 10^{-4}$ 、 $\delta_{T_2} \leq 10^{-6}$ 、 $\delta_{\Phi_T} \leq 0.01 \text{ deg}$  であれば、推定精度が  $\lambda/100$  を満たすことを示した。

第 6 章では、受信機雑音による波面の推定精度への影響を調べ、 $\text{SNR} \geq 10 \text{ dB}$  であれば、推定精度が  $\lambda/100$  を満たすことを示している。

第 7 章では、本論文の結論と今後の課題について述べている。

## 審 査 の 要 旨

[批評]

これまで実際に電波望遠鏡の鏡面測定に用いられている手法は、付加的な装置を装着しアンテナ外での作業を必要としたが、南極テラヘルツ望遠鏡では、建設される環境の厳しさから、それらの方法を用いるのは困難である。本論文で提案されている電波点回折干渉計は、これまで主に可視・赤外領域で提案されている点回折干渉計を、電波の特性を生かして電波領域に発展させたものであり、必要な装置をアンテナ内に設置することができるように考案されている。本研究は、電波点回折干渉計という電波望遠鏡の新しい鏡面測定手法を切り拓くために、原理の検証という基本的な部分から取り組んだものであり、当該分野において独自性の高い極めて重要な研究であると高く評価できる。実用化に向けて克服すべき課

題は多いが、簡便な鏡面測定方法として南極テラヘルツ望遠鏡に限らず多くの場合にとって魅力的なものであり、今後の研究の進展が期待される。

〔最終試験結果〕

令和2年3月11日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。