



**<論文内容の要旨>**

JASMINE 計画は、日本独自で位置天文観測衛星を打ち上げ、我々の住む天の川銀河の中心領域を世界で初めて近赤外線で探査しようとする計画である。これにより銀河中心方向の我々から3万光年以内にある星々の距離や横断速度を高い精度で求めることができると期待されている。JASMINE 計画が目標精度を達成するためには、観測衛星に搭載する望遠鏡や検出器という光学系の位置や大きさが極めて高い安定度を有することが保証されていなければならない。本学位申請論文は光学系の幾何学的配置（ジオメトリー）のごく僅かな変位をレーザー干渉計を用いて多自由度測定するジオメトリーモニターの開発について述べたものである。

第1章は、序章であり、本研究の目的と本論文の構成が述べられている。

第2章では、JASMINE 計画の内容、具体的にはミッションの概要、観測と解析の手順がまとめられている。3万光年離れた銀河中心の星々の距離を正確に決定するためには年周視差を10万分の1秒角( $10 \mu\text{as}$ )の精度で測定しなければならない。撮像した写真（フレーム）を多数重ね合わせることで星々の位置決定精度を向上させるが、その際、各フレームの拡大縮小と歪みを継続して監視しなければならないことが説明されている。

第3章で、申請者はJASMINE 計画で使用する光学系すなわち望遠鏡とCCD検出器の構造に踏み込み、測定誤差について議論している。主たる誤差要因である熱入力変動による変形を熱変動シミュレーションから定量的に評価し、望遠鏡のジオメトリーを15分間で100 pm ( $= 10^{-10}$  m) という精度で監視しなければならないと結論づけている。さらに、主鏡と副鏡のジオメトリーを複数台のレーザー干渉計を用いて多自由度の変位を監視するレーザー干渉計型ジオメトリーモニターについて具体的に説明している。

第4章は、光学系のジオメトリーの変形を検知するための変位センサーであるレーザー干渉計の議論に費やされている。第3章で提案されたジオメトリーモニターは、変位センサーを複数台組み合わせることで実現される。レーザー干渉計では、変位量を高精度で測定するためにファブリペロー共振器を用いることが多い。この場合、共振器中を光が幾度も往復するため共振器の長さの変位に非常に敏感なセンサーを作ることができる。しかしこの種のセンサーには、(1) 共振器型干渉計は制御が必要で、この制御系の雑音モニターの測定精度を低下させる、(2) 多自由度の変位を測定するジオメトリーモニターでは多くの共振器が必要になるため制御が複雑になる、(3) 打ち上げ時の衝撃や衛星の振動等の突発的な外乱により共振器が作動しなくなる危険性が高い、という問題が存在する。そのため、宇宙空間で使用するジオメトリーモニターの変位センサーには共振器を用いたものは適していない。申請者はその代わりに、ヘテロダイン型干渉計による変位センサーを提案している。さらにレーザーの周波数雑音などの誤差要因を分析し、ヘテロダイン方式でJASMINE の要求する精度を実現可能であると結論づけている。

氏名	丹羽 佳人
----	-------

第5章は、本学位申請論分の中核をなす部分である。JASMINEの要求する15分間で100 pmという測定精度がヘテロダイン型干渉計により実現できることが実験により示されている。まず本章前半部分で、実施した実験のセットアップが説明されている。変位センサーの精度を実証するためには、要求精度よりも安定で変形の小さい対象を準備しなければならない。申請者はこの目的のため低膨張ガラスベンチ上に配置されたビームスプリッターを測定対象として用意している。このビームスプリッターに2方向からレーザービームを照射さらに干渉させることでヘテロダイン型干渉計による変位センサーが実現され、ビームスプリッターの変形が測定できることが説明されている。

本章後半部分では精度実証実験の経過が詳細に述べられている。実験開始当初はJASMINEの要求精度に到達できなかった。そこで申請者は変位センサーの雑音の原因として(1)測定対象であるビームスプリッターに入射するレーザーの光軸のゆらぎ、(2)測定対象の温度変化、の2点を考え、対策を講じた。結果として、15分間で20 pmという精度を保持した測定が可能であること、すなわちJASMINEの要求精度を超える変位センサーが実現できることを実証している。

第6章では、申請者はヘテロダイン型干渉計を使用した多自由度の変位測定が可能であることを実証している。測定対象は鏡である。光学ベンチからの鏡の中心までの距離、および鏡面内の直交する2つの軸周りの角度という3つの変位量を4台のヘテロダイン型干渉計を用いて測定する実験を行っている。鏡の位置を外部から機械的に変動させたときに、3つの変位量を独立に測定できることが示されている。

最終章の第7章では、前章までの結果をまとめた後、JASMINE計画で使用するジオメトリーモニターの今後の開発計画について議論している。実際には今回より2桁大きい1 m程度の光学系の変位を15分間で100 pmという精度で測定しなければならない。そのためには周波数安定度が $\delta f/f = 10^{-10}$ のレーザーを用いなければならないこと、さらに分子の吸収線を周波数の基準として利用する安定化によりその安定度は達成可能であることが述べられている。

### 〈論文審査の結果の要旨〉

測地学はすべての科学の基礎になる重要な分野である。それは地球の子午線計測の結果がメートル法の基礎になっていたことから明らかである。この際、計測には三角測量という極めて単純な手法が用いられた。しかし、角度測定には当時の最新技術であったボルタ測角器が使用されていた。このように測地学と計測技術は密接な関係にある。現在、測地学は地球のみならず、宇宙にもその対象を拡げている。これが位置天文学とよばれる分野である。ここでも最も基本になる計測方法は年周視差による星までの距離の測定である。太陽のまわりを公転する地球の軌道を基線とする三角測量という単純な手法が最も信頼性の高い距離を教えてくれる。

本学位申請論文の申請者は、JASMINE 計画という衛星による位置天文学ミッションに参加している。この計画は我々の住む天の川銀河の中心付近の星々の距離を年周視差により高い精度で決定しようとしている。これまでの最も精度の高い年周視差の測定は約20年前に打ち上げられたヒッパルコス衛星によるもので、その精度は1ミリ秒角(1mas)、距離にして300光年ほどであった。一方、JASMINE 計画はその100倍遠方にある銀河中心の星々の距離を測定しようとしている。そのため年周視差の精度は10マイクロ秒角(10 $\mu$ as)に到達しなければならない。これは、月面に置いた1円玉を区別できる角度分解能である。

この精度を達成するためには望遠鏡や検出器などの光学系の位置や角度が高い安定度を有していなければならない。本研究は光学系の幾何学的配置(ジオメトリー)のごく僅かな変位をレーザー干渉計を用いて測定する望遠鏡ジオメトリーモニターを開発を目的としている。

第1章から第3章では、JASMINE 計画の概要から始まり、観測と解析手法、衛星に搭載する光学系の構造と誤差要因についての議論が展開されている。主たる誤差要因である熱入力変動による望遠鏡や検出器の変形については、熱変動シミュレーションによる解析が行われている。まだJASMINE 計画で採用する光学系の設計が完全に終了していないため、望遠鏡とCCD検出面の双方について、簡単なモデルでのシミュレーションを実施したにとどまっている。しかし、ジオメトリーモニターの目標精度を見積もるには十分な解析である。結果として、15分間で100pmという精度で光学系のジオメトリーを監視しなければならないと、申請者は結論づけている。

ジオメトリーモニターは望遠鏡や検出面のごく限られた場所の変位しか測定できない。そのため、どこを計測すべきか、という難しい問題が残されている。簡単なモデルを使っているとはいえ熱変動シミュレーションを行ったことで、光学系のなかで相対的に大きな歪みの生じる場所が明らかになってきている。本研究によりジオメトリーモニターの配置を決める指針を与えたことになり、その意義は大きい。

第4章は、ジオメトリーモニターを構成する変位センサーについての議論である。申請者は、(1)測定する自由度が複数であるため制御が簡単なことが望ましい、

氏名	丹羽 佳人
----	-------

(2) 打ち上げ時の衝撃や衛星の振動に耐えて安定に動作しなければならない、という2つの観点からヘテロダイン型干渉計による変位センサーが適していると主張している。さらに選択したヘテロダイン型干渉計の測定精度を決める4つの要素、(1) 基準信号の安定度、(2) ヘテロダイン信号の位相安定度、(3) レーザー周波数の安定度、(4) 位相検出器の測定精度、について詳細に検討し、既存の技術で目標の測定精度に到達できることを確認している。

第5章が本論文の核心部分であり、ここでヘテロダイン型干渉計による変位センサーが、15分間で20 pmと、JASMINE 計画の要求よりも高い精度で変位量を測定できることが実証されている。実験当初は、変位センサーは要求精度に到達できなかった。申請者は雑音の原因を(1) 測定対象に入射するレーザーの光軸のゆらぎ、(2) 測定対象の温度変化、と推測しこれらの雑音の除去に成功している。本章の後半で詳しく説明されている雑音源の同定と雑音低減のための対策の記述は、本学位申請論文の中でも特に秀逸で、精密測定実験の醍醐味を実感させてくれる。

さらに第6章では、ヘテロダイン型干渉計を4台組み合わせ、鏡の3つの変位量を独立に測定できることが示されている。ただし現段階では、多自由度測定が原理的に可能であることを示しただけである。その測定精度は、残念ながらJASMINE の要求精度に迫るものではない。多自由度測定での要求精度の達成については今後の研究の進展に期待したい。

本研究の意義は、JASMINE 計画の要求をみたく高精度変位センサーを実現したことにある。JASMINE 計画の目標とする観測精度が達成されれば、天の川銀河の構造の解明、さらにはその形成と進化の歴史の理解につながると期待される。また、このような精密な変位測定技術は測地学のみならず数多くの分野で利用できると予想される。

以上のように、本研究は、高精度計測技術の開発を通じて、広大な宇宙についての人類の理解を深めることに寄与したと評価できる。

また本学位申請論文は、宇宙環境の動的観測と解析を目的の1つとする相関環境学専攻自然環境動態論講座の理念にかなったものといえる。

よって本論文は、博士(人間・環境学)の学位論文として価値あるものと認める。平成21年1月26日、論文内容とそれに関連した事項について諮問を行った結果、合格と認めた。