

# 論文審査の結果の要旨

氏名 穀山 渉

論文提出者は、回転式ねじれ型重力波アンテナ(回転式 Torsion-Bar Antenna; 回転 TOBA)を提案し、宇宙用の小型回転 TOBA である SWIM $\mu$ v を製作し、それを、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の開発した小型人工衛星 SDS-1 に搭載した。2009 年 1 月に打ち上げられた SWIM $\mu$ v は、1 年半に及ぶ運用に成功し、2010 年 6、7 月には、延べ 360 分の観測運転を実施した。観測データの統計的解析によって、観測周波数 18 mHz (帯域幅 4.5 mHz) において、宇宙背景重力波の臨界エネルギー密度に対する比 ( $\Omega_{gw}$ ) の上限値 ( $\Omega_{gw} < 1.7 \times 10^{31}$  (フォワードモード)、 $\Omega_{gw} < 3.1 \times 10^{30}$  (リバースモード)) を算出した。

本論文は全 9 章からなる。第 1 章は、イントロダクションであり、重力波検出の紹介や、本論文のテーマである SWIM $\mu$ v の意義が述べられている。第 2 章は、重力波の基礎についてまとめられている。重力波の導出、物質に対する影響、生成等を記述したあと、検出方法について、レーザー干渉計をはじめとして共振型、パルサータイミングについての現状を簡単に紹介し、最後に、考えられる重力波源についてまとめている。第 3 章は、TOBA について述べられている。まず、TOBA の原理について説明し、レーザー干渉計や共振型との違いについても述べ、TOBA で達成できる感度や主な雑音源について詳細な考察を行っている。次に、回転 TOBA の原理とその特徴について説明している。回転 TOBA には、重力波観測の周波数帯をアップコンバートできる点、信号の情報が通常の 2 倍取れる点、円偏光の 2 つのモードに独立に感度がある点の 3 つの利点があるが同時にそれらの限界もある。第 4 章は、宇宙用に製作した SWIM $\mu$ v について述べられている。SWIM $\mu$ v のテストマス、センサー、アクチュエーター、制御システムなどについてその構成及び仕様を説明した後、実現可能な設計感度を記述している。SWIM $\mu$ v を搭載する小型人工衛星 SDS-1 についても、バス、姿勢制御、打ち上げ、軌道などについて説明している。第 5 章では、SWIM $\mu$ v の実際の運用に関して述べられている。特に、達成された雑音レベルに関して、その原因について詳細な評価がなされ、その結果、観測周波数帯域においてはデータ処理にともなう量子化雑音が感度を制限していると結論付けている。また較正方法に関して説明をして、最終的にフォワードモードとリバースモードに対して重力波のストレイン感度として、それぞれ  $1 \times 10^0 \text{ Hz}^{-1/2}$  と  $5 \times 10^{-1} \text{ Hz}^{-1/2}$  が得られている。設計感度と実際の感度の差についての考察も行っている。第 6 章では、まず、データ取得システムについて説明し、データ取得中に起こった 3 つのエラー (パケットロス、ビットフリップ、ソフトのバグ) について、説明とその対策を説明している。なお、データ復旧方法の詳細は Appendix に述べられている。第 7 章では、背景重力波に対するデータ解析について述べられている。まず、背景重力波の特徴やこれまでに得られた上限値について簡単に説明した後、得られたデー

タを使って、Frequentist と Bayesian の 2 種類の解析手法を行い、結果的に、観測周波数 18 mHz (帯域幅 4.5 mHz) において、宇宙背景重力波の臨界エネルギー密度に対する比 ( $\Omega_{\text{gw}}$ ) の上限値 ( $\Omega_{\text{gw}} < 1.7 \times 10^{31}$  (フォワードモード)、 $\Omega_{\text{gw}} < 3.1 \times 10^{30}$  (リバースモード)) を算出した。第 8 章では、まず、SWIM $\mu$ v で得られた科学的成果と次回につなげるための貴重なレッスンをまとめられたのち、次のステップとして、10m サイズの地上回転 TOBA と 4m サイズの宇宙回転 TOBA で期待できる感度とサイエンスが記述されている。第 9 章は、サマリーと結論が述べられている。

以上の様に、本論文は、新しいタイプの重力波検出器を考案し、それを宇宙に打ち上げ、地上の検出器ではアクセスできない低周波領域において、重力波観測を試み、背景重力波の 2 つの円偏光に対して上限値を与えたものである。宇宙実験という非常に困難な研究の主要部分をほぼ一人で推進し、数々のアクシデントに対処しながら、人類初のスペース重力波アンテナの運用を成功させ、背景重力波に対する上限値を求めたことは、これ自体新しい知見であるばかりでなく、非常に興味深い結果であり高く評価できる。これらは今後の重力波検出実験に大きく貢献する成果であるといえる。

なお本論文は複数の研究者との共同研究であるが、論文提出者が主体となって開発、研究を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、審査委員の全員一致により合格と判定し、博士 (理学) の学位を授与できると認める。