

論文審査の結果の要旨

氏名 長谷川 邦彦

本論文は8章および2つの補遺からなる。第1章は本論文のイントロダクションとして、重力波とその観測手法について紹介した上で、レーザー干渉計型重力波望遠鏡の原理・主な雑音源について説明している。第2章では、重力波望遠鏡 KAGRA の概要が説明されている。KAGRA の光学系・防振系の構成を概説したうえで、本研究の主題と密接に関連する低温冷却系・真空系について詳細な説明がなされている。また、KAGRA の感度の評価、欧州の ET や米国の CE といった次世代重力波望遠鏡についても紹介されている。

第3章では、低温鏡表面への分子層吸着の解析・シミュレーション研究についてまとめられている。先行研究の紹介と本研究の位置づけ、および分子層吸着の一般論を示した上で、KAGRA の真空ダクトにおける圧力分布と分子移動の計算機シミュレーション研究の手法と結果を示している。真空ダクト内での圧力分布と分子移動をシミュレーションする Molfow+ というソフトウェアの動作を簡単なモデルで検証したのち、KAGRA の真空ダクトをモデル化したものでのシミュレーションを行い、水分子、窒素分子、酸素分子のそれぞれについて、低温鏡への分子吸着速度を定量的に見積もっている。

第4章では、KAGRA のクライオスタットを用いた低温鏡への分子層吸着実験についてまとめられている。まず、吸着した分子層の膜厚に応じて鏡の反射率や光吸収・散乱が生じることを説明した上で、小型の光共振器のフィネスの変化から膜厚を推定する実験原理について説明している。その後、実験セットアップの詳細な説明、および、約2か月間にわたる測定実験の結果を示している。結果として、分子層の形成を有意に確認している。また、この測定結果を、第3章で説明されたシミュレーションの結果も利用してフィッティング評価することで、分子吸着速度や吸着分子の屈折率といったパラメータを推定している。

第5章では、冷却鏡表面に分子層が形成された場合に、重力波望遠鏡の感度に応じたような影響があるのかを論じている。分子層形成による鏡反射率の変化や、光吸収による温度上昇を考慮し、連星合体イベントに対する重力波望遠鏡の観測可能距離の低減を定量的に評価している。その結果、観測可能距離が16%程度低下するという無視できない影響が起り得ることを示している。

第6章では、吸着した分子層を脱離するシステムについて、予備実験と KAGRA に導入した場合のシミュレーション結果を示している。CO₂ レーザー光を鏡に当てることによって加熱させ、分子層を脱離させる手法の概要を示したのち、どの程度の加熱が可能かを評価する予備実験の概要と結果について示されている。さらに、その結果を

外挿し KAGRA に導入した場合にどの程度の加熱が可能かを評価している。その結果、約 2 日で加熱と分子層の脱離、再冷却が可能である、との結果を得ており、重力波観測運用に対して重要な知見を与えている。

第 7 章では、得られた結果に対しての議論が行われている。第 3 章で行われたシミュレーションの結果を生かしたより良い冷却・真空系の設計の可能性、第 4 章の測定実験において、より正確に分子層吸着を測定するための改良点、第 5 章での感度評価における干渉計の非対称性の影響の考察、第 6 章のような分子層脱離手法を導入した際の観測のデッドタイムの影響についての考察がなされている。

最後に第 8 章は本論文のまとめになっている。今後の展望として、KAGRA サイトにおける分子層脱離システム導入の可能性や、分子層吸着を利用して干渉計の非対称性を緩和する可能性について論じた上で、本研究の総括が行われている。

本研究は、所属研究機関および KAGRA コラボレーション内での共同研究であるが、論文提出者が主体となって、研究課題への着眼と定量的な評価、KAGRA サイトでの測定実験と KAGRA 性能への影響の評価、分子層脱離手法の予備実験と評価、という一連の研究を進めたもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。重力波望遠鏡の低温鏡への分子層吸着という課題に対する独自性の高い系統的な研究であり、KAGRA のみならず、ET や CE といった次世代重力波望遠鏡の設計や観測運転計画においても重要な研究となっている点で、この分野における論文提出者の貢献は大きい。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。