

# 論文審査の結果の要旨

氏 名 陳 タン

重力波は約 1 世紀前にアインシュタインが一般相対論からその存在を予言した現象であり、その検出は天体物理学上 21 世紀最大の発見の一つになることが期待されている。本論文は世界初の重力波の検出を目指した我が国の冷却重力波望遠鏡 KAGRA の心臓部である干渉鏡部分のサファイヤファイバー支持部の低温強度、熱伝導度と機械損失、及び冷却部への振動伝達の測定・評価を行い、当初の目標を十分に満たす重力波望遠鏡の実現に大きく貢献したものである。

本論文は 10 章からなる。第 1 章は本論文で取り扱う測定の概要がまとめられている。第 2 章は重力波とその検出原理がまとめられ、本論文の重力波望遠鏡 KAGRA の要求精度が示されている。第 3 章は本論文の測定対象である干渉鏡の支持部の構造及び冷却系の詳細がまとめられている。第 4 章はサファイヤファイバー支持部の低温における雑音・強度の要求を、サファイヤファイバーおよび接着部にわけて詳細に記述している。

第 5 章は本論文の主要部分の一つである雑音源となるサファイヤファイバーおよび接着部についての機械損失の測定手法及びその結果がまとめられている。接着には、とりはずしが必要な部分にはインジウム、強度を必要とする部分には Hydroxide Catalysis Bonding (以下 HCB) が用いられ、それぞれの接着部について測定を行っている。共鳴モードの減衰を測定する手法を用い、 $10^{-7}$  レベルまでの機械損失を高い精度で測定し、要求値を満たすことが示されている。

第 6 章は同じく支持部の熱伝導度の測定について記述されている。重力波望遠鏡では高出力のレーザー光を参照光として用いるため、このエネルギーを効率良く低温部から取り除く必要があり、干渉鏡部分に高い熱伝導度が求められる。ここでは、サファイヤファイバー、インジウム接着部、HCB 接着部に分けそれぞれの測定を作動温度 (20K) で行い、要求を満たすことが示されている。

第 7 章は支持部の接着部の強度が十分であることを示す強度試験についてまとめられている。熱サイクルをかけたサンプルの試験も行い、いずれも十分な強度があることが示されている。

第 8 章では、本論文のもう一つの主要テーマである冷却部の振動測定がまとめ

られている。測定は KAGRA 望遠鏡が設置される神岡よりはるかに振動環境の悪い横浜で行われている。このため、まず常温部と低温部の振動を同時に測定し、振動の伝達関数を求め、実際の KAGRA 望遠鏡の冷却部の振動環境を見積もる手法がとられている。さらにパルス式冷凍機からの振動の影響を見積もるため、冷凍機を稼働、非稼働にした2つの場合の測定を行い、この差を冷凍機からの振動擾乱として見積もっている。結果として、神岡での振動環境は十分要求値を満たすものの、冷凍機からの振動擾乱は要求値を超えることが示された。

第9章は以上5, 6, 7, 8章の結果が総括され、干渉鏡支持部が設計要求値を満たしていることが示されている。まず測定された機械損失が KAGRA 望遠鏡の検出感度に与える影響が議論され、周波数 60Hz 以下ではサファイヤファイバーが、またそれ以上の周波数では HCB 接着部が熱雑音を支配しているが、いずれも要求感度以下に抑えられることが示されている。特に HCB 接着部については、接着する部分の質量を減らすことで、影響をさらに低減できる可能性が議論されている。次に支持部の熱伝導が十分にあること、また強度が十分であることがまとめられている。最後に次のステップとして、実際の支持部を模擬したモデルを製作し測定を行う計画が述べられている。また冷凍機からの振動擾乱を抑えるためにあらたな振動ダンパーの提案を行い、有限要素法 (FEM) の計算から要求値を満たすことを示している。

第10章は以上のまとめである。

以上、本論文は世界初の重力波検出を目指した冷却重力波望遠鏡 KAGRA の心臓部である干渉鏡の支持部の機械損失、強度、熱伝導及び冷却系の振動環境を初めて精密に測定・評価し、冷凍機からの振動擾乱以外はいずれも要求値を満たすことを示した。さらに要求値を超える冷凍機からの振動擾乱についてはあらたな抑制機構の提案・評価を行い、KAGRA が当初の目標通りの性能を達成することを実測により確認した重要な研究成果である。本研究は川村静児ら多くの研究者との共同研究であるが、測定手法の開発、実際の測定、結果の評価は論文申請者が創意工夫し主体となって行ったものであり、論文申請者の寄与は十分であると判断する。よって博士 (理学) の学位を授与できると認める。