

論文審査の結果の要旨

氏名 藤井 善範

本論文は、重力波検出器を使った高密度連星合体イベントの高速な位置決定法と重力波検出器KAGRAの低周波制振システム制御系の開発およびその性能評価を行ったものである。本論文は、8章で構成される。

第1章では、まず重力波の理論的背景やその特性、検出可能とされる重力波の天体候補が示される。次に、現在の主流となっているファブリーペロー式レーザー干渉計型の重力波検出器とその動作原理がまとめられ、その一つであるKAGRAの光学系が紹介されている。この章の最後には、本論文で取り上げる二つの主要な研究内容（感度の異なる重力波検出器群を使うことで位置精度の向上をもたらす高速波源位置決定法に関する研究と、干渉計ロックを実現した制振システムの開発に関する研究）が示されている。

第2章では、重力波検出器の観測による高密度連星合体イベントの位置決定手法について述べられている。まず、重力波信号の典型的な解析手法や検出器の指向性が示される。次に、二つの重力波検出器で検出されたイベントの波源位置の範囲の推定原理とこれまでに開発された手法についてまとめた上で、それらで得られる位置決定の性能が示される。そして、多波長観測で行うマルチメッセンジャー天文学に必要な重力波源位置精度の目標値と、それを実現するための手法が述べられている。

第3章では、本論文の主要な研究内容の一つが示されている。ここでは、感度の異なる重力波検出器群の観測データから、波源位置をより高精度に求めるオンライン解析手法を提示している。2台の重力波検出器LIGOで検出された高密度連星合体イベントのデータに対してこの手法を適用すると、より低感度の条件で初期運用が開始されるKAGRAのような検出器の観測データを有効に利用して、波源位置の候補範囲の絞り込み（階層的な位置決定）ができることを、追加される検出器の感度に対して定量的に示した。

第4章では、多段振り子に支えられたミラーで構成される重力波検出器の低周波域振動の抑制に関して、機械的制振機構と能動制御による制振手法が紹介されている。

第5章では、KAGRAの光学系を構成するミラー支持構造の制振システムについて述べられている。これらのミラーは、支持構造を経由して雑音振動が混入しないようにするため、制振機構付きの多段振り子にワイヤーで吊られている。また、位置を検出するセンサーや変位を加えるアクチュエーターを使って、ミラーの位置を局所慣性系に対して静止させるように能動制御がかけられる。KAGRAが使用する3種のミラー支持構造の中で最大のものが、重力波検出器動作で重要な光共振器ミラーを支持するType-Aサスペンション(SAS)である。この章では、Type-A SASに実装されたセンサーノイズの測定と論文提出者自身が関わったKAGRAのミラー支持構造の組み立てと設置についても述べられている。

第6章では、Type-A SASの制振システムの能動制御系について述べられている。この能動制御系は、位置を検出するセンサーと非接触アクチュエーターを使ってフィードバックループを構成するデジタルサーボシステムである。これにより、ミラー支持構造の機械的な

共振を高速に減衰させ、光共振器を構成するミラーの位置と角度を保持する。この章では、まずType-A SASの制御要件が整理され、目標が設定されている。次にType-A SASの機械特性を模擬する数値モデルを使い、また5章の事前測定で取得したセンサーノイズを考慮してデジタル制御系の設計を行っている。

第7章では、Type-A SASの局所制御性能について実測を通して調査している。まず、制振システムの各段のアクチュエーターを使用して擾乱を与え、それに対する支持構造の機械的な周波数応答を取得している。この応答と数値モデルの応答予測との比較から、多段振り子から構成される制振システムの機械的周波数応答を確認している。その後、Type-A SAS内の制御系のみを動作させると、この支持構造は要求時間内に制振され、自然外乱環境の良いときには干渉計がロックできることを確認した。さらに地面振動の影響をキャンセルするフィードフォワード制御を加えるとさらに制振レベルが改善して、自然外乱に対してロバストに干渉計をロックさせることに成功した。

第8章は、論文のまとめである。

低感度の重力波検出器を加え、本論文で階層的解析と呼ぶ高速なオンライン解析手法を使って重力波源の推定位置精度を向上させることは、高密度連星合体イベントのフォローアップ観測を通して行われるマルチメッセンジャー天文学を進める上で、低感度の重力波検出器を有効に使う独自のものである。また、KAGRAの光共振器ミラーの支持機構Type-A SASの能動制御のデジタル制御系の設計を行い、Type-A SASへの制御系の実装と測定を通したシステムの性能評価から、KAGRAのレーザー干渉計が安定的にロック状態を維持できることを確認したことは、KAGRAが重力波検出器として連続動作できる段階へ移行した点で、本研究の重力波天文学分野への大きな貢献が認められる。

なお、本研究は、Thomas Adams, Frederique Marion, Raffaele Flaminio, およびKAGRA Collaborationとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって、博士（理学）の学位を授与できるものと認める。