

論文内容の要旨

氏名 酒井 一樹

本論文では、高分解能な時間-周波数解析手法である Hilbert-Huang 変換 (HHT) を重力波のデータ解析へと応用する研究の報告を行う。具体的には、ノイズに対しての HHT の解析および統計的な性能評価の結果と、連星ブラックホール合体重力波の解析によるブラックホールの準固有振動の開始時刻を推定する手法の提案および有効性の検証結果を報告する。

第 1 章では導入として、重力波に関する研究の現状や、これから重力波に関する研究に期待されていることについて述べている。

第 2 章は重力波データ解析の研究に取り組むにあたって前提となる重力波天文学の理論的な内容である。重力波は一般相対性理論の枠組みにおける現象であり、相対性理論の成り立ちから、重力波の方程式、重力波の各性質などについて、数式とその物理的な意味に重きを置いて記載してある。

第 3 章では重力波データ解析において現在主流となって用いられているマッチドフィルタ解析についての理論的な解説を主題としながら、データ解析に関する基礎的な内容について記載してある。理論的に波形の予測が可能である重力波源については、マッチドフィルタ解析によって検出および事後確率分布の推定が行える一方、波形の予測が困難な場合についてはデータから適合的に解析する手法が求められている。

第 4 章では本論文で主として用いる解析手法である Hilbert-Huang 変換 (HHT) について詳しく述べている。HHT はデータから適合的に固有モード関数 (IMF) に分解し、各 IMF の瞬時振幅 (IA) や瞬時周波数 (IF) を時系列として取り出す手法であり、直交基底に分解する従来の時間-周波数解析手法と比較して、局所的に高い分解能を出すことができるという特徴を持つ。瞬時振幅や瞬時周波数についての数学的基礎と、その考え方を活かすための工夫点などを詳細に記載してある。また、HHT の現在持っている課題についてもこの章で述べている。

重力波の観測器のデータは重力波が入射してきたとき以外はノイズだけを含んだデータであり、重力波が含まれていたとしてもその大きさはノイズに比べて小さいことが予想されている。したがって、HHT を重力波のデータ解析に応用するにおいては、ノイズを解析した際の挙動を調べておくことが有用である。それが第 5 章である。ガウスノイズに HHT を適用したときの結果を解析的および統計的に考察した結果が述べられている。特に、ガウスノイズにおける各 IMF の IA, IF の区間平均はピアソン分布族を考えることでその確率密度関数が精度良く推定できることについてまとめている。また、その結果を踏まえて、異常検知の枠組みに HHT を適用した手法を考案し、この章で評価を行っている。

第 6 章は連星ブラックホール合体重力波のデータ解析に HHT を応用した内容である。HHT を用いて、連星ブラックホール合体の合体後のブラックホールの準固有振動と呼ばれる現象から放射される重力波が開始する時刻を推定する手法の構築を行い、その性能評価を行った。数値シミュレーション波形において、推定された開始時刻をもとに時定数や

中心周波数を推定したところ、その結果は公表値と精度良く一致し、この手法による推定の妥当性が裏付けられている。また、LIGOによる重力波の初検出イベントであるGW150914やシミュレーション波形に人工的にノイズを加えたデータに対しても手法を適用し、性能の評価も行った。そしてその評価結果をもとに手法のさらなる改善をしたところ、改善した手法によってGW150914を解析して得られた結果はLIGOによる結果とコンシステントであり、なおかつ準固有振動の開始時刻という新しいパラメータの推定も行える可能性を示唆することができた。これらの結果について述べられている。

第7章はまとめであり、本論の流れの本質ではない数学的あるいは技術的なトピックに関しては付録に記載されている。