

氏 名 武田 芽依

学 位 の 種 類 博士 (理学)

学 位 授 与 年 月 日 令和5年3月31日

学 位 論 文 名 Hilbert-Huang 変換を用いた突発天体からの重力波の汎用的な解析手法の研究
(Study of a versatile analysis method using the Hilbert-Huang transform
for gravitational-wave transients)

論文審査委員 主査 教授 神田 展行

副査 教授 常定 芳基

副査 准教授 伊藤 洋介

副査 特任教授 大原 謙一 (放送大学新潟学習センター所長)

論文内容の要旨

本研究は、重力崩壊型超新星爆発やブラックホール連星合体のような突発的に発生する重力波源からの重力波に対して、高い時間-周波数分解能を持つ解析手法である Hilbert-Huang transform (HHT) を用いたデータ解析手法の研究を行ない、その汎用性と最新の重力波物理に対する展望を示した。

重力波とは、物体の加速度運動による時空の歪みが伝播する波動現象であり、その波形は放射源の物理量を反映する。2015年の直接観測以来、重力波から天体現象の解明が可能となった。天体起源の重力波のモデルは大別して、解析的な理論波形モデルと、解析的な波形を用いずに数値計算などから得たモデルがある。例えば、代表的な突発天体である超新星爆発に起因する重力波は後者であり、乱流などにより波形は確率的に変化する。しかし爆発機構に起因した特徴的な周波数モードを持つことが知られているため、信号を時間-周波数空間上に展開して解析する。従来の手法では、分解能に制限がある時間-周波数図から間接的に周波数の時間変動を抽出している。しかし HHT は瞬時振幅と瞬時周波数を定義できるため、時間的に遷移する信号を直接的に解析できる有利さがある。

本研究は HHT が様々な重力波源の波形に対して有用なことを示した。まず、数値シミュレーションから得られた重力崩壊型超新星爆発からの重力波について、爆発機構の解明に重要な周波数モードを HHT を用いて初めて抽出した。重力崩壊型超新星爆発からの重力波は周波数帯域が大きく異なる複数の周波数モードが同時刻に到来する。HHT を用いることで本研究は先行研究よりも高い時間-周波数分解能を得ることができ、瞬時周波数を解析して時間変動の有無を推定した。次に、観測されたブラックホール連星合体からの重力波に HHT を適用し、特徴的な周波数の時間発展を抽出した。さらに、連星合体後に放射される、短時間で急激に減衰する重力波についても HHT を用いて、ブラックホール準固有振動の複数のモードを分離できる可能性を示した。これらの解析により、HHT が最先端の重力波天体物理学の解析に有用であることを示した。

論文審査結果の要旨

重力波は一般相対性理論の予言した時空の歪みの波動である。2015年の初観測以来、ブラックホールや中性子星の連星であるコンパクト連星からの重力波が多数観測されている。重力波は重力理論の検証に不可欠であるとともに、超高密度な天体内部の情報を持つ。重力波と電磁波やニュートリノが協調して観測する「マルチメッセンジャー天文学」は、重元素の起源、ガンマ線バーストや超新星爆発のメカニズムの解明など、高エネルギー突発天体現象の仕組みを探る新たな手段として期待されている。

武田芽依氏は、重力崩壊型超新星爆発や連星合体起源の突発的に発生する重力波に対して、近年注目されている比較的新しい解析手法である Hilbert-Huang transform (HHT) を用いたデータ解析手法の研究を行なった。武田氏は、HHT を用いて重力崩壊型超新星爆発からの数値シミュレーションによる重力波の解析を行い、爆発機構の解明に重要な周波数モードを HHT を用いて初めて抽出した。定在降着衝撃波不安定性に起因する重力波成分と原始中性子星の形成に関わるモードの周波数変化を定量的に評価した。さらに、これまでの重力波観測で得られた連星ブラックホール合体の観測波形に HHT を適用し、特徴的な周波数の時間発展を確認し、合体直後のブラックホール準固有振動の複数のモード分離の可能性も示した。

これらの武田氏の研究は、HHT が最新の重力波天体物理学の解析に有用であることを示した先駆的なものである。よって、本論文は博士（理学）の学位を授与するに値するものと審査した。