

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540271

研究課題名（和文） 重力波の理論とデータ解析の研究

研究課題名（英文） Study of the theory and data analysis of gravitational waves

研究代表者

田越 秀行 (TAGOSHI HIDEYUKI)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：30311765

研究成果の概要（和文）：本研究では、地上及び宇宙空間レーザー干渉計の主要ターゲットである、合体する連星系や巨大ブラックホールへ別の星が落下衝突する現象により発生する重力波の波形の正確な数値評価と、解析的な波形モデルの構築を行った。また、日本の検出器を含む複数の重力波検出器のデータを最も有効に活用した場合の、重力波の検出効率と重力波を記述するパラメータの決定精度の定量的評価を行った。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we consider gravitational waves produced by the inspirals of compact binaries and a compact star inspiraling into massive black hole. We performed accurate numerical computation of those gravitational waves, and developed analytical model of waveforms. We also considered the optimal data analysis strategy for the network of gravitational wave detectors including the Japanese detector. We evaluated the detection efficiency and parameter estimation accuracy by using the optimal data analysis strategy.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学，素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：一般相対論，重力波，宇宙物理学，重力波検出器

## 1. 研究開始当初の背景

重力波は一般相対性理論で予言されている、時空の歪みが波動として伝搬する現象である。電磁気現象においては、電荷の運動によって電磁波が発生するが、重力波はその重力版であり、質量エネルギーの運動によって発生する。重力波源となりうる質量エネルギーの運動は、人工的なものは現在は絶望的であり、星の運動などの天体宇宙現象に限られる。それでも重力波は非常に微弱な時空の歪

みであるため、未だ直接的観測はされていない。重力波が観測されれば、それは物理学における4つの基本的相互作用の1つである重力を記述する理論としての一般相対性理論の正しさが更に確認される。また、重力波の振る舞いが一般相対性理論が予言するものと多少でも違っていれば、一般相対論を超えた重力理論への扉を開くことにもつながる。更に、宇宙からの重力波が直接検出できるということは、電磁波や宇宙線のように、

宇宙を観測する新たな手段を人類が手にすることも意味している。

重力波の直接検出を目指すレーザー干渉計重力波検出器の開発が1980年代より進められ、過去10年間に日本と欧米において大型検出器が建設されてきた。日本ではTAMA300検出器の建設が1995年より始まり、1999年に世界に先駆けて運転を開始し、先駆的な研究を行ってきた。その後アメリカのLIGO、ヨーロッパのVirgo検出器も稼働して観測を行って来ている。これらの検出器は初代のレーザー干渉計と呼ばれているが、実はこれらの検出器では重力波の直接検出は容易ではない。感度から想定される観測可能距離内で重力波を発生するような天体現象が発生するイベント発生率が低いためである。そのために各国では、更に高感度の次世代の検出器の建設を目指して開発を行っている。そして、次世代検出器が本格稼働する2016年頃には、重力波の初検出が出来るのではないかと期待されている。

重力波の直接検出のためには、検出器の性能向上が重要であるのはもちろんであるが、それと同時にデータの解析方法の工夫も非常に重要である。それは重力波信号が次世代検出器を持ってしても極めて微弱な信号であり、単純なデータ処理では見逃してしまう可能性が高いためである。そのような微弱な重力波信号の検出のためには、天体現象によって発生する重力波信号の詳細な波形があらかじめ理論的に分かっていることが非常に助けとなる。そのような理由により、一般相対論の理論研究は、レーザー干渉計検出器の開発以前は純粋に理論的側面の研究がほとんどであったが、現在では重力波の初検出と宇宙観測の新たな手段として重力波を用いるため、一般相対論においてもデータ解析方法の研究が非常に重要となっている。

## 2. 研究の目的

本研究では、重力波についてその理論的側面と、データ解析的側面の両方について研究を行っていく。特に、地上及び宇宙空間レーザー干渉計重力波検出器の主要なターゲットである、合体するコンパクト連星系、巨大ブラックホールへ中性子星や太陽の10倍程度の質量のブラックホールといったコンパクト星が落下・衝突する現象(EMRI(エムリ)、Extreme Mass Ratio Inspiralと呼ばれる)などによって発生する重力波の波形の理論的計算、それらの重力波を検出する方法、そして、その重力波の検出により可能となる新しいサイエンスの可能性の研究を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 重力波の理論研究

星がブラックホールの周りを運動する際には、ブラックホール時空の計量に従って運動するが、それと同時に重力波を放出する。また、星自身の重力場も運動に影響を与える。EMRI重力波を理論的に計算するためにはこれらの効果を取り入れる必要がある。また、回転ブラックホール周りの運動は、星のエネルギーと角運動量、そしてカーター定数というパラメータで決定されるが、これらのパラメータの時間変化を追うことが必要となる。本研究では、これらの第一段階として、星が回転ブラックホール周辺の一様な束縛運動をする際の、重力波による断熱的なエネルギー、角運動量、カーター定数の変化率の導出を行う。これらの計算の基礎となるのは、ブラックホールの摂動論の基本方程式である。研究代表者はこれまでにこの基本方程式を高精度に数値的に解く方法の開発を行ってきた。本研究ではそれをさらに発展させてこれらの研究を行っていく。

### (2) 重力波のデータ解析

地上検出器はLIGO3台、Virgo、GEO、TAMAがある。将来はLIGOとVirgoの感度向上と、日本のLIGOの実現が見込まれる。これら複数の検出器からのデータを最適に用いたデータ解析方法を導入することが必要である。連星合体重力波については、最尤法に基づいた方法が考えられており、コヒーレント解析法とも呼ばれている。それに対して従来から良く行われているのは、異なる検出器間でのイベントの時刻の一致や、質量などのパラメータの一致を要求して偽イベントを棄却するという、コインシデント解析法である。この2つの方法を定量的に比較してコヒーレント解析法の有効性を調べる。

## 4. 研究成果

### (1) 重力波の理論研究

①ブラックホール時空を星が運動する際に放出される重力波の数値的研究を行った。ブラックホール摂動の基礎方程式であるTeukolsky方程式を数値的に解くコードの改良を行い、計算精度をあまり犠牲にせずに計算速度を向上する方法の研究を行った。その結果、微分方程式をテイラー展開を用いて解く方法が有効であることが分かった。これは、従来用いてきた、解を超幾何関数展開で表す方法により、ある点で高精度に解を求め、その点を出発点として他の点の解はテイラー展開により次々と求めていく方法である。また、カーブラックホール周りの星の一般的な束縛運動による軌道をヤコビ楕円積分で表し、計算コードの高精度化を行った。以上の後これらの

コードにより、様々な軌道パラメータの場合について放出される重力波と、それによる軌道パラメータの断熱的变化率を数値的に評価した。この中で、これまで正確には求められていなかった軌道傾斜角及びカーター定数という運動の定数の変化率も求めた。それらの計算は、世界で初めてのものである。これらのデータから、星の軌道進化を追うことが可能である。

②カーブラックホール周りを小さな星が運動する際に放出される重力波波形のポストニュートン展開の表式から、因子分解・再総和法と呼ばれる方法で収束性の良い重力波波形の表式を導出した。その精度についてブラックホール摂動法に基づく数値計算結果との比較を行い、ポストニュートン展開より良い収束性が得られることを確認した。  
③ブラックホール周りの物体の運動に関連して、電荷を持つブラックホール周りの2つのダスト球殻の加速運動に対する自己重力の影響について調べた。自己重力効果により重心系エネルギーの発散は抑制されることを示した。

## (2)重力波のデータ解析

①2台の地上レーザー干渉計を用いて合体するコンパクト連星系からの重力波を検出する手法について、最尤法に忠実なコヒーレント法と、従来広く用いられているコインシデンス法の比較を行った。そして、コヒーレント法がより高い検出効率を与えることと、その差は5%程度であり大きくないことが分かった。  
②複数の地上レーザー干渉計を用いてコンパクト連星からの重力波を検出する際の、重力波を記述するパラメータの決定精度をフィッシャー情報行列に基づき理論的に評価した。波形としては振幅変調を取り入れない「制限波形」とそれを取り入れた「Full波形」を用いた。その結果、1から10倍の太陽質量で、200から300Mpcにソースがある場合、「制限波形」を用いた場合、Advanced LIGO相当の検出器ネットワークでは方向決定精度は約1°程度であるが、Einstein Telescopeでは数分程度まで良くなることが分かった。また10倍太陽質量以下ではFull波形の効果は小さいことが分かった。100倍の太陽質量以上の場合、正確な「Full波形」を用いると、方向決定精度はあまり変わらないが、距離の決定精度が2倍程度改善することが分かった。  
③ロングガンマ線バーストの中心天体として想定されているカーブラックホール周り

の物質から、逆チャープ信号となる重力波が放出されるというシナリオに基づき、TAMA300 アーカイブデータを用いながら、マッチドフィルター法による検出方法について調べた。LCGT や advanced LIGO などでは35Mpc から 50Mpc 程度の距離までその重力波を検出できる可能性があることが分かった。  
④データ解析方法研究を実際のデータ解析への応用として、神岡鉱山にある100mレーザー干渉計 CLIO が、2007年2月に取得した約80時間分のデータを解析して、パルサーPSR J0835-4510 (Velaパルサー)からの周期的重力波探査を行った。その結果、重力波振幅の上限値として $5.3 \times 10^{-20}$ という値を得た。このパルサーからの重力波探査はこれまで行われてこなかったため、これは世界で初めての結果である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- (1) Yi Pan, Alessandra Buonanno, Ryuichi Fujita, Etienne Racine, Hideyuki Tagoshi, "Post-Newtonian factorized multipolar waveforms for spinning, non-precessing black-hole binaries", Phys. Rev. D 83, 064003 (2011) 査読有
- (2) Maurice H. P. M. van Putten, Nobuyuki Kanda, Hideyuki Tagoshi, Daisuke Tatsumi, Masa-Katsu Fujimoto, Massimo Della Valle, "Prospects for true calorimetry on Kerr black holes in core-collapse supernovae and mergers", Phys. Rev. D 83, 044046 (2011) 査読有
- (3) Masashi Kimura, Ken-ichi Nakao, Hideyuki Tagoshi, "Acceleration of colliding shells around a black hole: Validity of the test particle approximation in the Banados-Silk-West process", Physical Review D83, 044013 (2011) 査読有
- (4) Chris Van Den Broeck, Duncan A. Brown, Thomas Cokelaer, Ian Harry, Gareth Jones, B. S. Sathyaprakash, Hideyuki Tagoshi, Hirota Takahashi, "Template banks to search for compact binaries with spinning components in gravitational wave data", Phys. Rev. D 80, 024009 (2009) 査読有
- (5) Himan Mukhopadhyay, Hideyuki Tagoshi, Sanjeev Dhurandhar and Nobuyuki Kanda, "Detecting gravitational waves from inspiraling binaries with a network of geographically separated detectors: coherent versus coincident strategies",

Phys. Rev. D, 80, 123019 (2009) 査読有  
(6)Ryuichi Fujita, Wataru Hikida and Hideyuki Tagoshi, "An Efficient Numerical Method for Computing Gravitational Waves Induced by a Particle Moving on Eccentric Inclined Orbits around a Kerr Black Hole", Prog. Theor. Phys. 121, 843-874 (2009) 査読有

(7)Tomomi Akutsu, Masaki Ando, Tomiyoshi Haruyama, Nobuyuki Kanda, Kazuaki Kuroda, Sinji Miyoki, Masatake Ohashi, Yoshio Saito, Nobuaki Sato, Takakazu Shintomi, Toshikazu Suzuki, Hideyuki Tagoshi, Hirotaka Takahashi, Daisuke Tatsumi, Souichi Telada, Takayuki Tomaru, Takashi Uchiyama, Akira Yamamoto and Kazuhiro Yamamoto, " Search for continuous gravitational waves from PSR J0835-4510 using CLIO data", Class. Quantum Grav. 25, 184013 (2008) 査読有

(8) Chul-Moon Yoo, Hideki Ishihara, Ken-ichi Nakao, Hideyuki Tagoshi, "Magnification Probability Distribution Functions of Standard Candles in a Clumpy Universe", Prog. Theor. Phys. 120, No. 5, 961-983 (2008) 査読有

[学会発表] (計2件)

- (1) 田越秀行, 地上レーザー干渉計ネットワークによる連星合体重力波のパラメータ決定精度, 日本物理学会, 2010年3月22日, 岡山大学
- (2) 田越秀行, 低温レーザー干渉計 CLIO(23): データ品質評価, 日本物理学会, 2009年9月10日, 甲南大学

[その他]

ホームページ等

<http://vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp/~tagoshi/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田越 秀行 (TAGOSHI HIDEYUKI)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 30311765