

機関番号：13101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540260

研究課題名（和文） 数値相対論による重力波テンプレートの構築と
重力波データ解析法の研究研究課題名（英文） Making gravitational wave templates by numerical relativity
and methods of gravitational wave data analysis

研究代表者

大原 謙一（OOHARA KEN-ICHI）

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：00183765

研究成果の概要（和文）：

重力波テンプレートを作成するための数値シミュレーションを実行するための計算サーバの作成とその性能評価を詳しく行った。また、重力波のデータ解析をマッチドフィルタ法で実行するために効率よいテンプレート配置方法を開発した。さらに、新しい解析方法として、マッチドフィルタ法だけでは困難なバースト的シグナルにも適した、Hilbert-Huang法を用いたデータ解析法の実現可能性も明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We made computer servers for computer simulation to make gravitational wave templates and carried out performance tests. As for data analysis, an efficient structure of template bank is given. In addition, we revealed that the analysis using the Hilbert-Huang transformation is effective for burst sources, to which it is hard to apply the matched filter method simply.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：宇宙物理学理論

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：相対論・重力（理論）、重力波、計算物理学

1. 研究開始当初の背景

(1) 一般相対論によりその存在が予言されている重力波が、中性子星やブラックホールなどのコンパクト星の連星系（コンパクト連星）から放射されていることは、連星パルサー PSR1913+16 などの電波観測で間接的に明らかになっている。しかし、重力相互作用は非常に弱いので、この重力波を直接検出することは未だ実現していない。

(2) 近年のレーザーを用いた微小計測技術の発展により、重力波を直接検出することが実現可能となりつつある。重力波の検出は、一般相対論の検証において、動的な重力場の性質に関するものとして非常に重要であると同時に新しい天文学を拓く可能性を秘めている。特に、途中の物質との相互作用が小さいという重力波の特質から、電磁波による観測とは質の異なった新しい情報が得られる

ことが期待できる。このような「重力波天文学」の創生に向け、1995年から進められている日本の TAMA プロジェクトをはじめとして、アメリカの LIGO, イタリア, フランスの VIRGO, ドイツ, イギリスの GEO600 など、世界各国で大型レーザー干渉計型重力波検出器の建設が進められている。特に、アメリカの LIGO の3台の検出器は 2005 年末に、設計通りの感度を実現し、第 5 次観測が 2005 年 11 月より始まっている。また、日本においては、TAMA300 検出器が感度向上を目指し改良を行っており、さらに、日本の将来計画を視野においた低温重力波検出器 CLIO を建設中である。

(3) しかし、LIGO, GEO, TAMA, CLIO 等の重力波検出器によって得られたデータから重力波の情報を取り出し、さらに、それを元に重力相互作用や天体現象に関する物理学的な研究を行うためには、データ解析方法の確立が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、コンパクト星のスピン(自転)の効果を含めたコンパクト連星から重力波のデータ解析法の研究及び実装をおこなうことを目的とする。具体的な内容は以下の通りである。

(1) コンパクト星のスピンを考慮すると、軌道角運動量と星やブラックホールのスピン角運動量が平行でない場合、軌道面の向きは時間変化をし、観測者の見る重力波の振幅と位相に影響を与える事になる。そのため、スピンの影響を考慮したテンプレートを用意する必要があるが、その波形は、非常にたくさんのパラメータに依存しているため、すべての波形データをテンプレートとしてそのまま使用する事は、計算コストの問題上不可能である。そこで、まず、このテンプレートを用いた、スピンの効果を考慮したブラックホール連星から放出される重力波探査の一連のデータ解析法を確立し、実際のレーザー干渉計のデータに適用する事を目指す。

(2) いっぽう、合体開始後の波形についても、Ajith たちが、数値相対論の計算データとポストニュートン近似でのデータをつなぐ形で、「現象論的テンプレート」の構築方法を提唱している。しかし、この場合にも、数値相対論による多数の波形データを準備する必要があり、高精度の数値シミュレーション

を効率よく高速に実行する必要がある。このような大規模な数値シミュレーションは、従来スーパーコンピュータを用いて行ってきたが、近年のデスクトップ PC の性能向上により、常に独占して使用できる PC を用いたほうが効率がよくなっている。そこで、実行する数値計算に最適化した PC を市販のパーツから組み立てて、シミュレーション・コードを実行するための効率を詳しく調べる。

3. 研究の方法

(1) 数値相対論に関する問題に対して、実行する数値計算に最適化した PC を市販のパーツから組み立て、シミュレーション・コードによるベンチマークテストを実行する。利用するパーツについては、CPU スピードだけでなく、それとメモリアクセス速度のバランスがもっともいいものを選択し、それぞれ 4 つのコアを持つ 2 つの CPU からなる並列計算機システムを構築する。

(2) データ解析法の開発では、始めに、これとは独立に、スピンを考慮したブラックホール連星から放出される重力波のチャープ波形を中心とした、探査コードの開発を重点的に行う。スピンを考慮したブラックホール連星から放出される重力波探査は、理論的に予想されるその波形をテンプレートとして用い、重力波検出器からのデータと相関を取るマッチドフィルタ法を用いて行われる。

(3) 大質量の連星ブラックホールや超新星爆発のようなバースト的シグナルに対しては、マッチドフィルタ法だけを用いることは必ずしも最適な方法ではない。このようなシグナルを含んで、多くの重力波シグナルを高速に解析する方法として、Hilbert-Huang 法とマッチドフィルタ法の連携の可能性を調べる。

4. 研究成果

(1) 数値相対論の数値シミュレーションを実行するサーバの性能評価を行った。比較したのは以下のような CPU, メモリーで構成されたマシンである。

① astro3: Core2 Duo E6750(メモリー DDR2-667 2GB×2), ②grape: Xeon X3360(メモリー DDR2-800 ECC 2GB×2), ③gwave-x: Intel Xeon X5550×2(DDR3-1333 Reg. ECC 2GB×6), ④ gwave-o: AMD Opteron 2382 × 2(DDR2-667 Reg. ECC 2GB×4)。

	SSS	SS	S	M	L	LL
size (MB)	3.8	3.0	3.5	2.75	2.174	(*)
	MFLOPS ratio	MFLOPS ratio	MFLOPS ratio	MFLOPS ratio	MFLOPS ratio	MFLOPS ratio
astro3 (F)	2.722 1.20	2.260 1.00	1.146 0.51	1.125 0.50	1.069 0.47	
(D)	2.350 1.10	2.136 1.00	1.176 0.55	1.137 0.53	1.098 0.51	
grape (F)		2.990 1.00	1.237 0.41	1.251 0.42	1.111 0.37	
(D)		2.576 1.00	1.274 0.49	1.279 0.50	1.148 0.45	
gwave-x (F)		3.219 1.00	2.210 0.69	2.317 0.72	2.192 0.68	1.835 0.57
(D)		3.359 1.00	2.304 0.69	2.343 0.70	2.196 0.65	1.838 0.55
gwave-o (F)		1.888 1.00	1.143 0.61	1.179 0.62	1.092 0.58	849 0.45

	CPU	Clock (GHz)	Cache (MB)	Memory (GB)	CPUs	Cores
astro3	Core2 Duo E6750	2.67	4	DDR2-667	4	2
grape	XEON X3360	2.83	12	DDR2-800	4	4
gwave-x	XEON X5550	2.67	8	DDR3-1333	12	8
gwave-o	Opteron 2382	2.60	6	DDR2-1066	8	8

	SSS	SS	S	M	L	LL
	31 × 31 × 31 (3GB)	35 × 35 × 35 (5.0MB)	69 × 69 × 69 (35MB)	197 × 197 × 197 (275MB)	273 × 273 × 273 (2.1GB)	471 × 471 × 471 (10.9GB)
(*)						401 × 401 × 401 for gwave-o (6.7GB)

表1 シングルスレッドでの性能

これらのマシン上でベンチマークテストを実行し、計算能力を測定した。

表1にシングルスレッド(非並列計算)での性能を示した。いずれのマシンも、メモリー上のデータがすべてキャッシュに入るような小規模の性能がもっとも良く、データがキャッシュから溢れると性能が大きく落ちる。その中でも、メモリーのアクセス速度が大きい XEON X5550(gwave-x)は、比較的、性能劣化が小さいことが明らかになった。

	cores	SS		S		M		L		LL	
		MFLOPS	ratio	MFLOPS	ratio	MFLOPS	ratio	MFLOPS	ratio	MFLOPS	ratio
grape	I	2,990	1.237	1,251	0.42	1,111	0.37				
	4(1×2×2)0123	4,857	1.428	1,300	0.41	1,441	1.22	1,371	1.21		
	4(1×1×4)0123	6,280	1.487	1,403	0.41	1,403	1.19	1,307	1.20		
	2(1×1×2)01	3,484	1.185	1,218	0.41	1,186	1.01	1,119	1.02		
	2(1×1×2)02	3,545	1.188	1,407	0.41	1,438	1.22	1,326	1.21		
gwave-x	I	3,219	1.237	2,210	0.69	2,317	0.72	2,192	0.68	1,835	0.57
	8(2×2×2)0123-4567	12,703	3.95	7,225	3.50	7,694	3.32	7,458	3.40	6,975	3.80
	8(1×2×4)0123-4567	14,274	4.43	6,170	3.70	7,567	3.44	7,486	3.41	7,079	3.86
	8(1×1×8)0123-4567	13,771	4.28	6,084	3.66	7,417	3.20	7,452	3.40	7,076	3.86
	4(1×2×2)0123	6,815	2.14	6,414	2.90	6,395	2.76	5,262	2.40	5,262	2.87
	4(1×1×4)0123	8,467	2.73	6,493	2.94	5,598	2.57	5,848	2.71	5,351	2.82
	4(1×1×2)01-45	8,810	2.74	6,397	2.90	6,396	2.76	6,699	2.60	5,270	2.87
	4(1×1×4)01-45	8,473	2.63	6,494	2.94	5,946	2.57	5,943	2.71	5,357	2.82
	I	1,888	1.143	1,179	0.62	1,092	0.58			849	0.45
gwave-o	8(2×2×2)0123-4567	6,162	3.26	3,181	2.78	3,200	2.71	2,248	2.37	2,822	3.38
	8(1×2×4)0123-4567	7,678	4.17	3,411	2.98	3,273	2.78	2,802	2.57	2,886	3.52
	8(1×1×8)0123-4567	7,221	3.83	3,145	2.75	3,182	2.68	3,164	2.90	3,018	3.56
	4(1×2×2)0123	4,539	2.40	1,645	1.44	1,684	1.43	1,468	1.34	1,147	1.35
	4(1×1×4)0123	4,098	2.17	1,696	1.47	1,645	1.49	1,545	1.41	1,149	1.35
	4(1×2×2)01-45	4,590	2.43	2,553	2.23	2,597	2.20	2,157	1.98	2,115	2.49
	4(1×1×4)01-45	4,129	2.19	2,648	2.32	2,647	2.42	2,541	2.33	2,228	2.62

表2 並列計算での性能

表2に示すように、MPIによる並列計算では、メモリーの速度が小さい XEON X3360(grape)は、並列化の効果がほとんどないが、メモリーの速度の大きい XEON 5550(gwave-x)は、並列化の効果が十分大きいことが明らかになった。さらに、XEON X3360(grape)では、並列化に用いるコアの組合せで性能に違いが出てくる。これは、コア間でキャッシュを共有しているかどうかの違いであり、キャッシュを共有している場合、キャッシュミスが頻発し、性能が劣化するものと考えられる。以上のことから、我々のようなシミュレーションにおいて、計算速度は、メモリー・アクセスの速度に大きく依存していることが明らかになった。

(2) 自転を考慮したブラックホール連星から放出される重力波探査は、理論的に予想されるその波形をテンプレートとして用い、重力波検出器からのデータと相関を取るマッチドフィルタ法を用いて行われる。その重力波の波形は、ブラックホールの質量に関連した2つのパラメータと、軌道面歳差運動のタ

イムスケールに関連した1つのパラメータ、合計3つのパラメータを探査すればよい事が知られている。しかし、マッチドフィルタ法は一般に非常に多くのテンプレートを必要とするので、3つのパラメータといえども、多くのテンプレートを必要とすることが予想される。そのため、効率のよいテンプレート配置の方法をCardiff大のグループとともに開発し、静的ガウスノイズのデータおよびLIGO検出器の実データに適用し、その有効性を示した。

(3) LCGTのプロトタイプ CLIO は、LCGTの建設予定地と同じ神岡鉱山内に設置された基線長 100 m の低温レーザー干渉計である。LCGTはこの鉱山内という静かな環境を生かして(特に、地面振動が特に影響を与える低周波帯域において)高品質の観測データを生み出すものと期待されている。

本研究では、CLIOのデータを用いて、今までは低周波帯は地面振動のノイズが優位であったため探査されていなかったベラパルサーから放出される重力波(22Hz)を探査するデータ解析工程の設計からコード開発、統計処理方法の研究を行った。これらは、探査を行うためのデータ前処理部分、探査コード本体、イベントに対する検出効率を評価する部分からなる。これらのコードおよび2007年2月のCLIOのデータを用いて、ベラパルサーから放出される重力波探査を行った。その結果、得られた重力波振幅の上限値を基に天文学の議論を行う事は出来ないが、重力波観測を実際に行って得られた、純粋な観測的制限であると言意味で、意義のあるものと言える。

(4) 材料損傷検出や生体モニタリングの分野において用いられている時間-周波数解析の一つである Hilbert-Huang 変換(HHT)を重力波データ解析に適用することを検討し、HHTを用いたデータ解析工程の設計からコード開発、統計処理方法の研究を行なった。HHTは、時系列データの解析手法の新しいアプローチであり、この変換は、固定された基底セットをデータに課さない適応型の時間-周波数分解を用いるため、フーリエ変換やウェーブレット変換などに比べ、高い周波数分解能をもつことが知られている。高い周波数分解能で解析できる HHT を重力波のデータ解析手法に応用することにより、従来の解析法ではできえなかった、ノイズが非常に多いデータから微弱な重力波の情報を取り出し、詳細な解析をすることが可能になる。

我々は、大質量連星ブラックホールの合体の際に放射される重力波の解析では HHT を用いた手法が有効である可能性を見いだした。HHT 解析では、まず、一種の high-pass

filter を繰り返して適用する Empirical Mode Decomposition (EMD) を行う。これにより時系列データからノイズを除去するとともにデータを複数の周波数帯域モード (IMF: Intrinsic Mode Functions) に分解する。さらに、それぞれの IMF に対して Hilbert 変換を用いた Hilbert Spectral Analysis (HSA) を行い、瞬時振幅や瞬時周波数の時間的変動を解析する。EMD はその名の通り経験則的な手法であり、J. B. Camp たちの NASA グループや我々の平成 22 年度の研究で、重力波データ解析においては、EMD の計算に必要ないくつかのパラメータの設定方法の重要性が明らかになってきた。最適なパラメータは、信号やノイズの性質に依存する面もあり、我々が取り扱う重力波検出器データに対する系統的なサーチが、今後必要である。また、日本の LCGT、米国の Advanced LIGO、および、欧州の Advanced Virgo など、複数の大型重力波検出器が稼働する予定である今、これらの複数の検出器データを用いた HHT 解析の手法を検討・開発する事は必須である。これらの課題にも着手し始めた。

これらの成果は、国内においては、2010 年度から建設が開始された LCGT プロジェクトで、さらに、国際的な重力波観測ネットワークの中のデータ解析チームに生かされていく。その中では、HHT とマッチドフィルタ法という異なるデータ解析法の連携も今後考えていく必要がある。すなわち、比較的計算量の少ない HHT により、観測データ中に重力波が存在する可能性を示唆し、それをトリガーとして、パラメータ領域を限って、より詳しいマッチドフィルタ法を適用する。さらに、その結果から、もう一度、HHT を適用し、瞬時振幅や瞬時周波数の詳細な解析を行うことにより、観測される重力波の性質を明らかにし、重力波源の物理を解明していくことが可能となる。

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 Koji Ishidoshiro, Hiroataka Takahashi (4 番名) et.al. (計 10 名), First observational upper limit on gravitational wave backgrounds at 0.2 Hz with a torsion-bar antenna, Physical Review Letters, Vol. 106 161101 (2011), 査読有
- ② Y. Hiranuma, K. Oohara and H. Takahashi, Effectiveness of Empirical Mode Decomposition in Search for

Gravitational Wave Signals, Proc. of 20th Workshop of General Relativity and Gravitation in Japan, in press (2011). 査読有

- ③ Masaaki Morita, Hiroataka Takahashi, Specially-induced gravitational wave background in modified gravity, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 229, 012054 (2010), 査読有
- ④ Chris Van Den Broeck, Duncan A. Brown, Thomas Cokelaer, Ian Harry, Gareth Jones, B. S. Sathyaprakash, Hideyuki Tagoshi, and Hiroataka Takahashi, Template banks to search for compact binaries with spinning components in gravitational wave data, Physical Review D, Vol. 80 024009 (2009). 査読有
- ⑤ B. Abbott, H. Takahashi (363 番目) et al. (LIGO Scientific Collaboration) (計 429 名), Observation of a kilogram-scale oscillator near its quantum ground state”, New Journal of Physics vol. 11 073032 (2009). 査読有
- ⑥ Tomomi Akutsu, Hiroataka Takahashi (13 番目) et al. (CLIO Collaboration)(計 19 名), Search for continuous gravitational waves from PSR J0835-4510 using CLIO data”, Classical Quantum Gravity, 25 184013, (2008). 査読有
- ⑦ K. Yamamoto, H. Takahashi (23 番目) et al. (CLIO Collaboration) (計 30 名), “Current status of the CLIO project”, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 122 012002 (2008). 査読有
- ⑧ B. Abbott, H. Takahashi (363 番目) et al. (LIGO Scientific Collaboration) (計 429 名), Implications for the Origin of GRB070201 from LIGO Observations, Astrophysical Journal 681, 1419-1430 (2008), 査読有

[学会発表] (計 4 件)

- ① Yuta Hiranuma, Jordan B. Camp, Ken-ichi Oohara, Makoto Saito, Masatomo Saito, Alexander Stroeer, Hiroataka Takahashi, Effectiveness of Empirical Mode Decomposition in Search for Gravitational Wave Signals, 日本物理学会 (春), 新潟大学, 2011 年 3 月.
- ② Jordan B. Camp, Yuta Hiranuma, Ken-ichi Oohara, Alexander Stroeer, Makoto Saito, Masatomo Saito, Hiroataka Takahashi, Effectiveness of

Empirical Mode Decomposition in search for Gravitational Wave Signals, The 20th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG20) in Kyoto 2010.

- ③ Masaaki Morita and Hirotaka Takahashi, Gravitational wave background in modified-gravity dark energy models, The 20th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG20) in Kyoto 2010.
- ④ 平沼悠太, 齊藤真, 齋藤眞朋, 大原謙一, 高橋弘毅, Hilbert-Huang 変換を用いた重力波探査法の検討, 日本物理学会(春), 岡山大学 2010年3月

[図書] (計1件)

- ① 高橋 弘毅, “なぜ人は宇宙を知りたいのか? --宇宙を観る新しい目--”, 「挑戦こそが成功の鍵」, 吉川 敏則, 末松 久幸 (編), pp. 179-185, 近代科学社, ISBN: 978-4-7649-5021-4, 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大原 謙一 (OOHARA KEN-ICHI)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 00183765

(2) 研究分担者

高橋 弘毅 (TAKAHASHI HIROTAKA)
山梨英和大学・人間文化学部・講師
研究者番号: 40419693