

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400295

研究課題名(和文) GPGPUの高度並列化計算によるKAGRAデータの解析

研究課題名(英文) GPGPU advanced parallelization calculation for KAGRA data analysis

研究代表者

神田 展行 (KANDA, Nobuyuki)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50251484

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、GPGPUを利用して重力波探索の高速化を試みた。ラジオメトリ計算を中心に並列化と高速化を行った。

2016年3月～4月のKAGRA試験運転データを用いて計算を行った。1台しかないKAGRAデータを、仮想的に時間をずらして2台の検出器とみたと、ラジオメトリを適用し、データの様子と計算の確からしさを検証した。また、米国LIGO実験の公開データも利用し、重力波ラジオメトリ計算を実行した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we tried to accelerate gravitational wave search using GPGPU. Parallelization and speeding up were main tasks on radiometric calculation.

Calculations were also made using KAGRA test run data from March to April 2016. We confirmed the state of data and the probability of computation by applying radiometry, assuming that KAGRA data with only one unit is virtually shifted in time and it is two detectors. Also, gravity wave radiometry calculation was performed using the public data of the US LIGO experiment.

研究分野：重力波実験物理学

キーワード：重力波 データ解析 GPGPU 高度並列化計算 宇宙物理

1. 研究開始当初の背景

重力波はアインシュタインが一般相対論で予言した時空の歪みの波で、超新星爆発、中性子星やブラックホールといったコンパクト連星の合体、パルサー等から放射される。近年、高感度の大型レーザー干渉計型検出器が発展し、極近いうちに直接検出が達せされると期待されていた。実際に、本研究の期間内である2015年9月に、米国LIGO実験によって世界初の重力波の直接検出が達成された。

日本でもKAGRA実験が建設を開始しており、2015年末に常温鏡での運転、2017年後半から2018年には本格的な低温鏡での高感度観測運転を予定していた。KAGRAの最初の試験運転は2016年3月～4月に行われ、若干の遅れは生じたが本研究の期間内にそのデータを扱うことができた。

このように、開始時に想定した国内外の情勢、大型計画の予定はほぼ想定通りであったといえる。したがって、KAGRAデータを想定した本研究にとっても順調に条件が揃った。それでも、期待される重力波の振幅は検出器の雑音に比してかすかであり、また天体起源故に事前に到来を予想するのは困難であるうえ、理論予想の波形も多くの自由度を持つ。したがって重力波を探索するためには強力な計算能力を必要とするということは、開始時にも今日も変わっていない。

また、大型ブラックホール連星という、多くの研究者にとっては意外な重力波源が最初に見つかり、データ解析における多様な計算の必要性が再認識されたとも言える。

そこで、本研究は、GPGPU(画像処理演算装置による汎目的計算)を用いて、日本の重力波検出器KAGRAのデータの解析に、高度並列化計算や高速化をもたらそうという動機で開始した。

研究開始当初において、GPGPUの重力波データ解析への応用例は世界に何例もあり、我々のグループもまた『重力波ラジオメトリ計算』においてGPGPUを用いて、同程度の導入コストのCPU比で20～30倍の高速化を達成していた。

2. 研究の目的

本研究では、GPGPUを利用して重力波探索の高速化を試みた。特に、並列化して処理できるような計算手法を試み、GPGPUを有効に活用することが目的である。

- (1) GPUの多数のコアを有効利用する高度な並列化
- (2) 時系列でのマッチドフィルター
- (3) ラジオメトリ、背景重力波を探すための相関計算

(4) イベント到来方向推定への利用：天球マップの高速計算

(5) GPUの出力を直接用いた高速の計算結果表示

といったものが考えられ、それぞれの技術的検討やデータ解析への実装が目的である。

また、計画期間中にKAGRAの試験データが得られる見込みでもあったので、

(6) 実際の重力波検出器の観測データをGPGPUで処理する

ことも重要な目的であった。

3. 研究の方法

数値的な計算内容にはFFTや相関計算を中心とした比較的冗長な工程が多く存在し、データ長の扱いと並列化で効率を上げることが可能な探索がいくつか存在する。GPUは非常に多数のコア(最新のものでは1ユニットに2000以上のコア)を有する。デバイスメモリのサイズは現状では数～10GB程度である。また、条件分岐のようなものは苦手であるが、データを順繰りに処理するような工程は得意である。また、ホスト側メモリとの入出力は、計算機のメモリ転送速度(PCMCIAバスの速度)に依存する。したがって、重力波探索解析に応用するにあたっては、FFTのようなストレートな工程や、波形相関計算や、小さいデータを扱うといった工夫を行うと高速化ができる。

また到来方向や星の質量といった探索パラメーターのみを変えて、計算工程自体は同じという探索は高度な並列化が期待できる。

研究は、前半ではGPGPUサーバーを増強しつつ、我々自身による先行研究を活かして、解析コードの再整備や最適化を進めることになった。

一方後半では、KAGRAの試験運転データを用いて計算を行いつつ、GPGPUでの解析手法の研究を進めた。また、観測データの活用ができるよう、計算機ハードウェアの追加も行った。

また、米国LIGO実験の公開データも本研究では利用した。

4. 研究成果

最近のアーキテクトのGPUでの試験も行う必要が有る。この数年で、GPGPUの科学記述計算への応用が進んでおり、その性能を重力波の解析で検証する必要があった。そこで、初年度にはTitan Zアーキテクトのワークステーションを導入し、テストに使用を開始した。その後、最終年度にTitan Xアーキテク

トの GPU ボードを追加した。

2年目には、KAGRA のデータを利用するために、NAS (ネットワークストレージ) を準備し、実際に KAGRA の試験運転データや、LIGO のオープンデータを保存して利用した。



図 1 : GPGPU サーバー。

最下段右が本研究で調達・設置した GPGPU サーバーである。またモニター下に設置してあるのは KAGRA データを保管するための NAS サーバーである。

まずは我々自身の先行研究「ラジオメトリ計算」で培った知見 (GPU 上での FFT 計算、乱数発生、マザーボード-GPU 間のデータ転送の効率など) を整頓する必要があった。ラジオメトリ計算は、天球上に局在して常時放射されている重力波源について感度があるが、従来の研究では背景重力波的な非一様なホットスポットを想定していた。原理的にはパルサーからの連続重力波の探索も可能である。ただし、パルサーからの重力波は位相が決まった安定な発信源であると期待できるため、探索にはドップラー補正やヘテロダイン検出を行い感度を高くする工夫がなされている。その処理が全天探索を困難にしている。我々は、GPGPU を用いて連続重力波の処理の高速化に着目し、調査を開始した。

連続重力波探索計算の高速化の実装をどう行うかについての研究を進めてゆく上で、ラジオメトリを重力波の偏極をとりいれたものにするアイデア、アンテナパターンによるモジュレーションを利用して1台の検出器の時間差をつけての自己相関により背景重力波・連続重力波の非一様性を探るアイデアが浮上し

た。偏極ラジオメトリについては他者の先行研究で示唆されているが、計算量のことでもあって実際の計算などには至っていないこともわかり、本研究において計算できる可能性が出てきた。

ラジオメトリにおける重たい計算の一つに、点光源の拡散関数(point spread function)の畳み込みを逆解きする問題(de-convolution)がある。この計算では、天球マップ上のすべての方向について周辺のデータから逆解きを行うので、単純な天球マップについての場合に比べて計算量は格段に増える。インドのグループの先行研究ではスーパーコンピュータを使用していた。これを GPGPU 上で行うべく検討したが、計算工程の複雑さから、最終的にはまだ実装に至っていない。

1台しかない KAGRA データを、仮想的に時間をずらして2台の検出器とみたと、ラジオメトリを適用し、データの様子と計算の確からしさを検証した。その結果、積分時間を伸ばすに連れて、検出器の正弦波的な雑音が位相キャンセルされ、天球マップ上での雑音の構造が緩和されてゆく様子などが確認された。

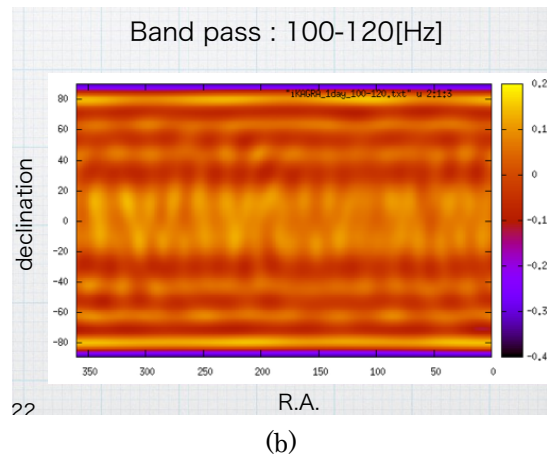
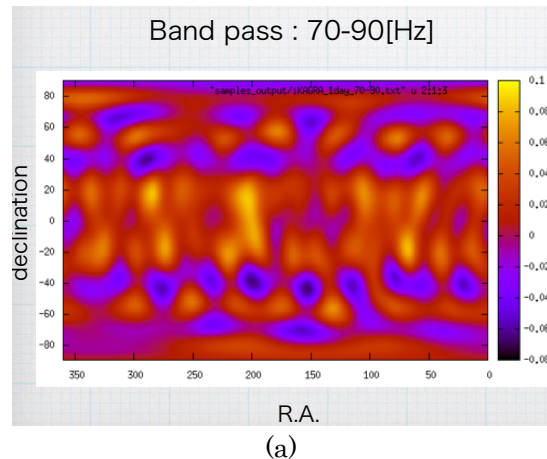


図 2 : 2016 年の KAGRA の試験運転データを仮想的に時間をずらして2台の検出器とみたラジオメトリ計算例。1日分の積分結果。(a)70-90Hz (b)100-120Hz のバンドパス

フィルタをそれぞれ適応している。

また、LIGO の公開データは実際に 2 台の検出器によるものなので、イベント探索の可能性はある。宇宙線や X 線・ γ 線などで明らかになっている天球上の非一様性と重力波ラジオメトリの相関に注目して解析を行い、現在論文を準備中である。

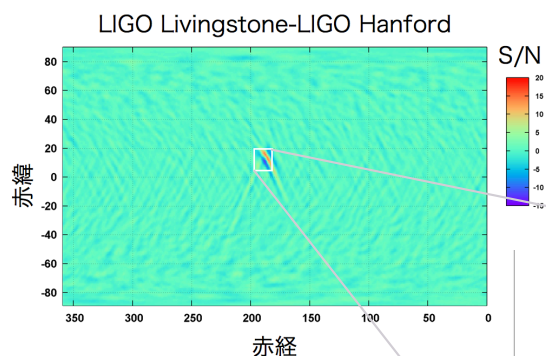


図 3 : 米国 LIGO 検出器の位置を想定してのシミュレーションデータによるラジオメトリ計算。天球上の配置した点状の重力波源が特徴的な拡散を示している。

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 5 件)

- ① Takahiro Yamamoto, Kazuhiro Hayama, Shuhei Mano, Yousuke Itoh, and Nobuyuki Kanda, "Characterization of non-Gaussianity in gravitational wave detector noise", *Phys. Rev. D*, 93 (2016) 082005, [dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.93.082005](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.082005), 査読有
- ② Tomoya Kinugawa, Akinobu Miyamoto, Nobuyuki Kanda and Takashi Nakamura, "The detection rate of inspiral and quasi-normal modes of Population III binary black holes which can confirm or refute the general relativity in the strong gravity region", *MNRAS*, 456 (2016) 1093–1114, [10.1093/mnras/stv2624](https://doi.org/10.1093/mnras/stv2624), 査読有
- ③ T.Yokozawa, M.Asano, T.Kayano, Y.Suwa, N.Kanda, Y.Koshio, M.Vagins, "Probing the rotation of core-collapse supernova with a concurrent analysis of gravitational waves and neutrinos", *The Astrophysical Journal*, 811 (2015),

10.1088/0004-637X/811/2/86, 査読有

- ④ Nobuyuki Kanda on behalf of the KAGRA collaboration, "Status of KAGRA –construction, commissioning and data distribution toward the first operation in 2015-", 14th Marcel Grossmann Meeting proceedings, in production (2016), 査読無
- ⑤ Tatsuya Narikawa, Koh Ueno, Hideyuki Tagoshi, Takahiro Tanaka, Nobuyuki Kanda, Takashi Nakamura, "Detectability of bigravity with graviton oscillations using gravitational wave observations", *Physical Review D* 91, Issue 6, 062007 (2015) (14 pages), [10.1103/PhysRevD.91.062007](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.062007), 査読有

[学会発表] (計 9 件)

- ① 田中一幸, KAGRA Collaboration, 「GPGPU 高速計算による frequency sliced GW Radiometry」, 日本物理学会 第 72 回年次大会 (2017 年), 2017/3/17, 大阪大学 豊中キャンパス
- ② 神田展行, KAGRA collaboration, "Gravitational Wave Observation : Recent Progress and Status", 第 9 回 Fundamental Physics using Atoms, 2017/1/10, 京都大学桂キャンパス, 招待講演
- ③ Nobuyuki Kanda, KAGRA collaboration, "Status and Future of KAGRA", The 26th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 2016/10/26, Osaka City University, 招待講演
- ④ 田中一幸, KAGRA Collaboration, 「GPGPU を用いた Radiometry 解析パイプラインの作成、テスト」, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016/9/22, 宮崎大学
- ⑤ 神田展行, 大原謙一, 伊藤洋介, 植木聡史, 金山雅人, 佐々木幸次, 高橋弘毅, 田越秀行, 田中一幸, 端山和大, 平沼悠太, 三代木伸二, 山本尚弘, 譲原浩貴, 「iKAGRA データ転送・保管システムの開発 II (ソフトウェア開発)」, 日本物理学会 (秋), 2015/9/27, 大阪市立大学杉本キャンパス
- ⑥ Nobuyuki Kanda, KAGRA collaboration, "KAGRA and the Global Network of Gravitational Wave Detectors - Construction Status and

Prospects for GW Astronomy with Data Sharing Era -", 21st International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics CHEP2015, 2015/4/14, OIST, Okinawa Japan, 招待講演

- ⑦ 神田展行, 「目指せ重力波「予報」! - KAGRA でのコンピューティング」, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015/3/21, 早稲田大学, シンポジウム講演
- ⑧ Nobuyuki Kanda et al., "New Developments in Astrophysics Through Multi-Messenger Observations of Gravitational Wave Sources", 新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2014, 2014/12/21-23, 富士 Calm, 招待講演
- ⑨ Nobuyuki Kanda, KAGRA collab., "KAGRA: Construction Status in Summer 2014 & its Science on SNe and GRBs, Supernovae and Gamma-Ray Bursts 2014", 2014/8/25-27, 理化学研究所, 招待講演

〔図書〕(計 2 件)

- ① 重力波の発見: 一般相対性理論の 100 年後の証明, パリティ, Vol. 31, No. 6, 40-42, (2016), 神田展行
- ② 初観測された重力波が開いた宇宙への新しい窓, パリティ, Vol. 31, No. 10, 14-18, (2016), 神田展行

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 展行 (KANDA, Nobuyuki)
大阪市立大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 5 0 2 5 1 4 8 4

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し

(4) 研究協力者

田中 一幸 (TANAKA, Kazuyuki)
大阪市立大学・大学院理学研究科・数物系
専攻 博士後期課程 3 年