

## 突発的重力波カタログ-4.0: LIGO-Virgo-KAGRA の 第4期重力波観測運転の第1部によるカタログ更新

2025年8月、[LIGO-Virgo-KAGRA \(LVK\)](#) 共同研究グループは 2023年5月から2024年1月にかけて集められた第4期重力波観測運転の第1部 (以下、O4a と記す) の [干渉計のひずみ振幅](#) データを公開しました。私たちはこのデータから [ブラックホール](#) や [中性子星](#) の合体が波源と考えられる [重力波](#) を新たに 128 個、観測しました。ひずみ振幅データの公開と併せて重力波の可能性が高い信号とその性質の測定結果を集めた「突発的重力波カタログ」の第4版 (GWTC-4.0) を発行しました。加えて、カタログに伴う論文のセットを特集号としてアストロフィジカルジャーナルに投稿しました。ここでは GWTC-4.0 の構成とその結果を焦点にしている 3 つの論文を要約します。

### 「導入」論文の要旨

本論文、「GWTC-4.0: 導入」は特集号の概要と付随する論文の詳細や重要な情報を含み、この分野の専門用語を解説します。

### 名付け方は？

私たちは重力波イベントを検出された日付と時間を [協定世界時 \(UTC\)](#) で名付けます。このカタログに含まれる時系列上で最初の重力波イベントは、2023年5月18日の12:59:08 UTC に検出されたもので、GW230518\_125908 と表されます。今回、私たちは検出された重力波イベントの候補である信号すべての名前に「GW」の表記をつけました。

(これはこれまでの慣例とは若干異なります。重力波イベントの候補である信号に加え、雑音由来と思われる信号も、重力波由来の信号でない可能性を示す追加のデータとともにカタログに含まれています。)

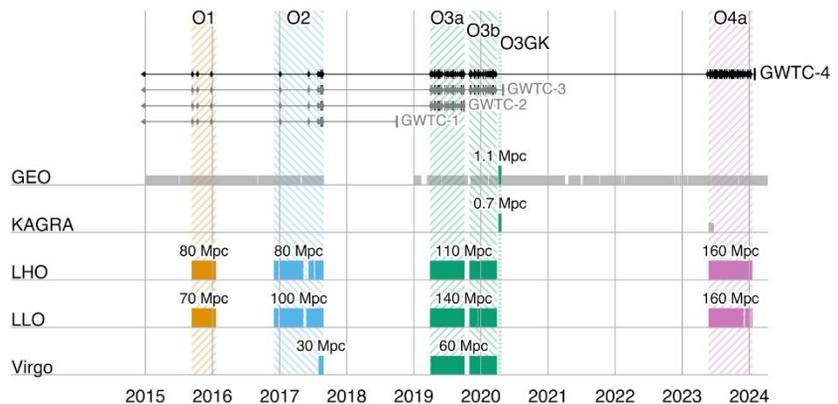


図1: 観測運転期間と重力波検出器、GEO、KAGRA、LIGO-Hanford (LHO)、LIGO-Livingston (LLO) と Virgo が観測していた期間を示す。色付きのブロック上部の数値は検出器が標準的な連星中性子星合体を観測できるおおよその距離を表し、検出器の感度の指標となる。図の上部には GWTC に重力波イベントが追加された時期を印で表し、色付きの斜線部分はそれぞれのカタログに含まれるデータを収集した期間を表す。

### 累積的カタログ

GWTC は累積的なカタログです。GWTC-4.0 は O4a に観測された新たな結果のみならず、過去のカタログすべての結果を含みます。図1に全観測運転期間と各GWTCに含まれるデータの期間を示します。カタログは GWTC-  
<メジャー>.<マイナー>、という慣習に従って命名されており、観測運転期間ごとにメジャーの数値が増加し、  
(データの再解析が行われた [GWTC-2.1](#) のように) 信号の解析方法や

データに変更がある場合、マイナーの番号が増加します。過去には ( [GWTC-3](#) のように) マイナーの番号が0の際は省略していました。しかし、GWTC-2 が GWTC-2.0 と GWTC-2.1 のどちらを指すのか、など混乱の可能性があるため、今後は特定のカテゴリを参照する際はマイナーの番号を必ず含めます。一方、図1 に示すように、データ取得期間のみを指す際はマイナーの番号を省略します。図1から、LIGO の2つの検出器が O4a 中にデータを収集していたことがわかります。O4a 中のすべての重力波イベントの候補信号の検出や測定は 2 機の検出器のみのデータを使って行われました。KAGRA は O4a の初期に一時的にデータを収集しましたが、カタログの結果に寄与するにはその感度が十分ではありませんでした。

もっと知るには：

ウェブサイト：[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/)



導入の論文では、今回初めて、各検出器のこれまでの進展の詳細な過程を記しました。このような情報を一箇所にまとめることで、今後、観測を行う天文学のコミュニティと検出器を建造するコミュニティの連携を強めることを目指しています。

### 宇宙を覗く

シミュレートされた信号を検出器で収集したデータに挿入し、その信号がデータの中から見つけられるかを調べることで検出器の感度が得られます。さらに、検出器の**デューティ比**の情報と合わせることで、私たちは検出器が測量した4次元の時空の体積（3次元より多い次元での体積なので私たちはこれを「超体積」と呼ぶ）を求めることができます。図2はこの超体積の概算と天体物理起源である確率が 50 % 以上である重力波イベントの候補の累積観測数を表します。この図は各観測運転期間にいくつの信号が観測されたかを示し、O4a では観測数を倍増させたことを視覚化しています。図中の帯は不確かさを表します。多くの重力波イベントの候補信号は天体物理起源である確率が 100 % 近いのに対し、その確率が 50 % のものは、**雑音**である可能性もまた 50 % なのです。このため、図中の帯は観測された重力波イベントの数の不確かさを表しているのです。

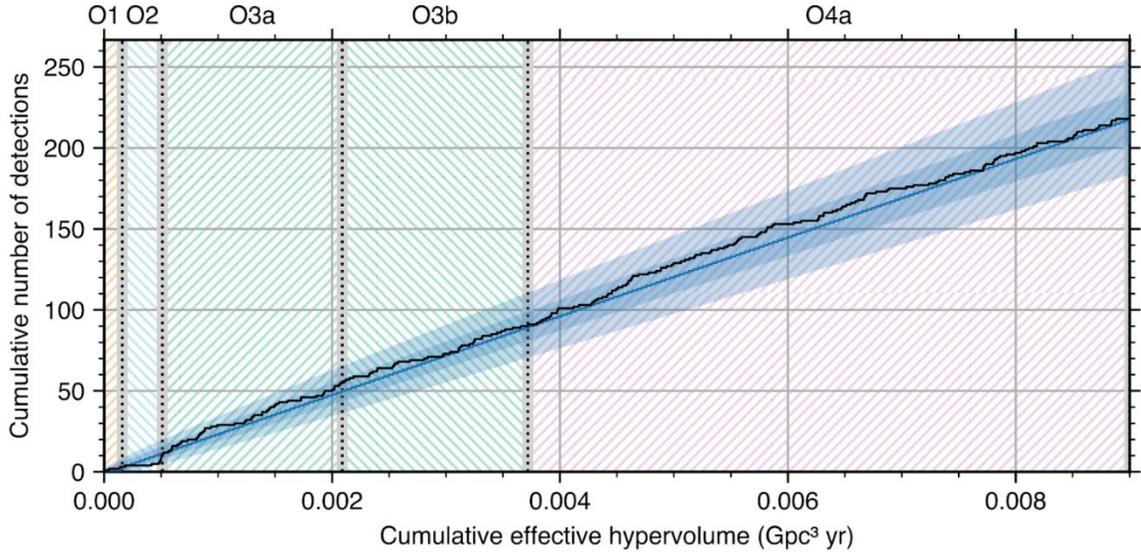


図2: (天体物理起源である確率が 50 % 以上である重力波イベント候補)の累積観測数を検出器で測量された空間時間超体積を軸にして表したものの。

論文の残り部分では観測される**突発的重力波源**についてまとめ、論文のあらましで締めくくります。このまとめは既存の優秀な教科書に置き換わるものとしてではなく、私たちが重力波源について述べるために特集号を通して使っている専門用語や数学を説明する目的で書かれています。このまとめがあることで、私たちが一貫した表記を使い、関心を持った読者がすぐに文献に辿り着けるようにしています。加えて、論文の付録では頻繁に使用される頭文字(略語)の解説や用語の定義、データ解析に使われる原則を簡潔に記しています。

導入の論文は特集号の基調となるものです。それ自体は科学的な結果を含まないものの、この論文は他の論文間の内容の重複を最小限にし、特集号のそれぞれの論文が一貫し、重力波天文学の分野にとって明瞭な定義を提供することを目的としています。

### 「手法」論文の要旨

手法についての論文、「GWTC-4.0: 突発的重力波を特定し、分析する手法」はGWTC-4.0を構成する方法論の詳細を述べています。ブラックホールや中性子星の合体の理論的な**波形モデル**の開発から始まり、重力波イベントの候補リストを提供する**探索パイプライン**の詳細を述べます。重力波イベントの候補信号はデータ検証を行った上で、**パラメータ推定**を行うかどうかの選定を行います。パラメータ推定は重力波源の特性を求めます。波形モデルの整合性の検証を通して基礎的な前提の有効性を議論します。

### より高みを目指して: 今までで最も複雑な解析

第3期観測運転期間終了後、そしてGWTC-3.0の出版以降、私たちは解析方法をより良くするために甚大な努力をしてきました。私たちは重力波源の物理をより良く表し、より計算速度に優れた新しい波形モデルを導入しました。GWTC-4.0では最新の波形モデルを使用するだけでなく、多くの重力波イベントの解析において、4つの異なる波形モデルを活用しました。GWTC-3.0の倍に相当するイベント数の解析によって、波形モデルの不確かさをより一層考慮できるようになりました。

さらに、私たちは探査アルゴリズムの改善を行い、検出**効率**を改善しました。これらの改良の多くはカタログの構成をより複雑化させました。私たちは新たな技術を開発し、解析をできる限り自動化し、より多くの解析を行い、その結果の再現を容易にすることを実現しました。

### 歴史的な視点

手法についての論文で、第1期観測運転期間にまで遡ってアルゴリズムの歴史的な描写を行っていることに読者は驚くかもしれません。これは、このカタログが累積的であることに由来します。古いデータが新しい手法で再解析されない場合、過去の重力波イベントの結果を使う人にとって、その結果を導いた（新しいデータを解析した手法とは大きく異なる可能性がある）手法を理解することが重要だからです。ゆえに、手法についての論文では歴史的な視点とともに手法に加えられた変更点を書き記しています。

要約すると、手法についての論文は、私たちが使うワークフローの概観を示すもので、どのように**低遅延・高遅延**解析を運用し、予備的な調査をし、丁寧にデータ検証を行い、厳密で最高水準の最終結果を得ているかを説明するものです。

### 「結果」論文の要旨

#### より多くの信号、より多様な結果

天体物理起源である確率が50%以上の重力波イベントの候補を新たに128個発見しました。GWTCに含まれる重力波イベント候補の合計数は倍増し、218個にのぼります。私たちはこのカタログに含まれる新しい信号のうち、86個について詳細な解析を行いました。これほど多くの新たな重力波イベント候補の観測は、検出器の感度が向上したことと、雑音の中から信号を見つけ出す解析技術の進展によって可能になりました。

多くの新しい観測結果があることは、胸躍するようなことです。新しく観測された重力波イベント候補の多くは、私たちが良く観測できるようになってきている**連星ブラックホール合体**ですが、ブラックホールと中性子星の合体を波源とする重力波も観測され、これは今まで私たちが観測してきたものとは全く異なるものでした。

#### 低遅延から高遅延へ（そしてまた元へ）

第4期観測期間中、私たちは重力波イベントと思われる候補について低遅延で（なるべく速く）公開アラートを出しています。これは、他の天文学者が重力波源からの「光」を観測するための追観測を行うことを可能にします。O4aでは1697のアラートが出され、そのうち82が天体物理起源である確率が高く、データ検証に問題もないものでした。上述のように、このカタログには128個の天体物理起源である確率が高い候補が含まれます。これらは改善された探査手法による高遅延解析によるものです。このうち低遅延解析で発見されていなかったのは、わずか8個でした。これは低遅延探査が重力波イベントの候補信号を良く見つけられていること、そして、天文学者が高い精度の情報を得られていることを示します。

#### 興味深い「もの」

カタログに含まれるもののうち、2つはブラックホールと中性子星の合体が波源と考えられます。物質がほとんど関わらない連星ブラックホール合体に比べ、中性子星を含む波源は重力波に特徴を示す可能性があるため、このような信号は非常に興味深いものです。今回の2つの信号からは物質による重力波への効果を測定できませんでしたが、このような信号を更に観測することでいずれ、物質効果を測定できる可能性が上がります。

#### 質量効果

信号から連星系の質量を直接測定することができます。図3は連星のそれぞれの天体の質量のうち、最も確からしい質量の組を示します。この図は新たな連星中性子星合体（図の左下の領域）が観測されなかったことを表します。一方、非常に興味深いブラックホールと中性子星の合体の可能性が高い信号や、合計質量が太陽質量の150倍以上の重力波イベントが観測されました。

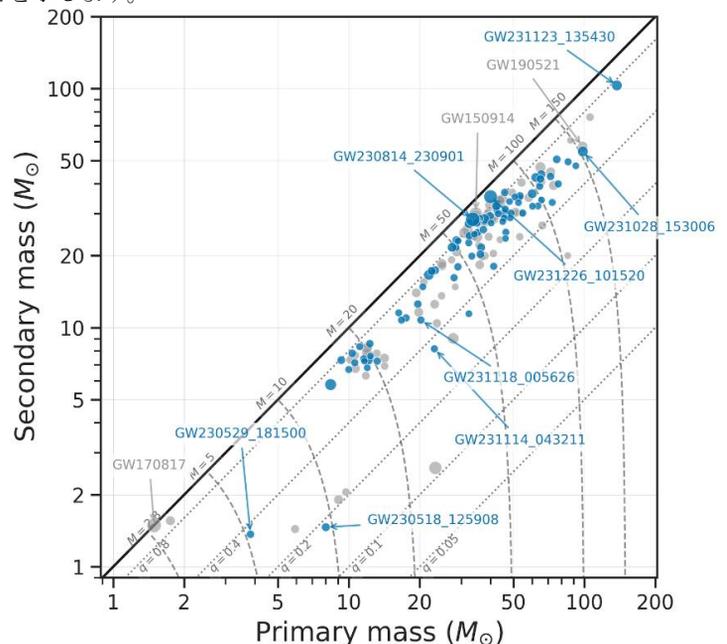


図3: O4aに観測された新たな重力波イベント候補（青）と第1期から第3期観測運転期間中に観測されたもの（グレー）を質量-質量平面上に示す。これらのデータ点は最も可能性が高い値を表し、不確かさは無視している。各重力波イベント候補のデータ点の大きさは、ネットワーク**信号雑音比**に比例した大きさを示している。点線はさまざまな質量比  $q$ （連星のうち軽い方の天体の質量を重い方の天体の質量で割ったもの）を表し、破線はさまざまな合計質量を表す。すべての質量は**太陽質量**を単位としている。（クレジット: G. Ashton, Royal Holloway University of London.）

## 正しいスピン

ブラックホールや中性子星の合体の過程で、私たちはその質量と**自転角運動量 (スピン)**の 2 つの物理量を測ることができます。測量できた場合、連星の各天体がそれぞれどのくらい速く自転し、また、それぞれの自転軸の相対的な傾き具合を知ることができます。私たちは 2 つの自転をまとめて表す**実効スピン**をそれぞれの信号で計算しました。実効スピンの値が大きい正の値であれば、1つまたは両方の天体が同じ方向に速く自転していることがわかり、負の値であれば2つの天体が公転軌道に対して逆方向に自転していることがわかります。

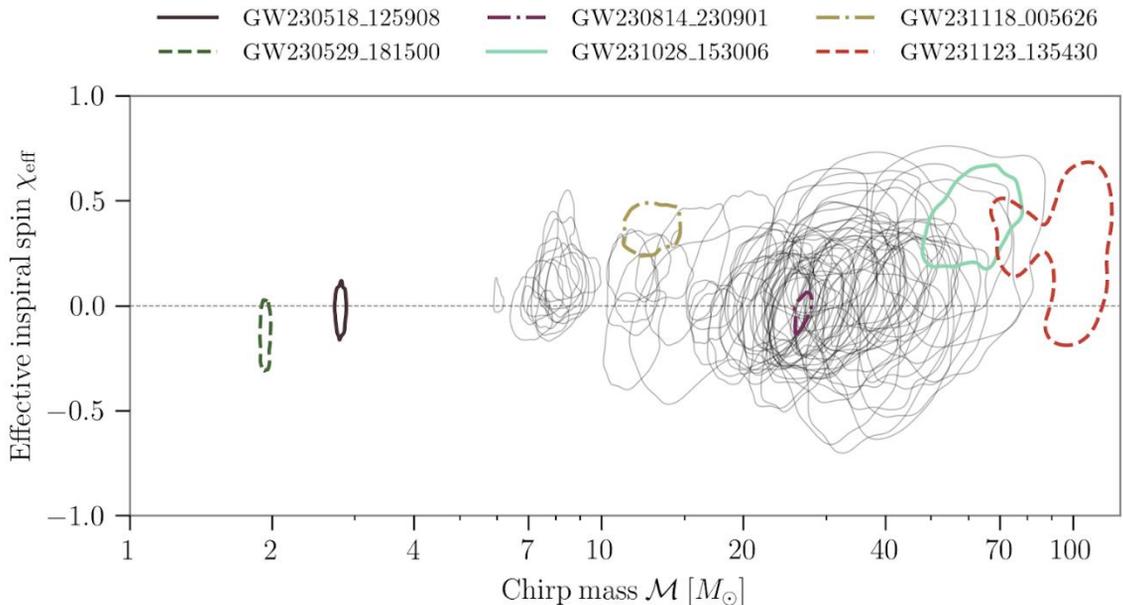


図4: GWTC-4.0に含まれるすべての新しい重力波イベント候補を**チャープ質量-実効スピン**平面に図示する。特に興味深い重力波イベントの候補は色をつけて表す。各輪郭はその重力波イベント候補の**パラメータの 90% の信頼度**を示す。

突発的重力波カタログ-4.0 (GWTC-4.0)は知られている重力波信号の数を倍増させました。これは目を見張るべき到達点であり、検出器にされたいくつもの改良点を実を結んだものです。新たに検出された重力波信号はブラックホールや中性子星についての新たな知見を私たちに与え、天文学コミュニティに大きな期待をもたらし、数々の新しい研究を可能にします。

## もっと知るには：

ウェブサイト：

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)  
[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)  
[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/)

論文の無料プリプリント：

- 導入の論文：[こちら](#)または [arXiv](#)
- 手法の論文：[こちら](#)または [arXiv](#)
- 結果の論文：[こちら](#)または [arXiv](#)
- GWTC-4.0 のデータは Gravitational-Wave Open Science Center から：  
<https://gwosc.org/GWTC-4.0/>

### 用語集 (ABC順)

- **ブラックホール (Black hole)**: 重力が非常に強いため光を含むあらゆるものが脱出することができない時空の領域。ブラックホールはさまざまなサイズがあり、恒星のブラックホールは恒星の崩壊によって生じ、その質量は太陽質量の数倍から 65 倍ほど。中間質量ブラックホールは太陽質量の 100 倍から  $10^6$  倍に及ぶ。最後に、超大質量ブラックホールは太陽質量の  $10^6$  倍から  $10^9$  倍に及ぶ。
- **チャープ質量 (Chirp mass)**: 連星のそれぞれの天体の質量を組み合わせることで計算される量。チャープ質量は重力波の放出によるエネルギー散逸がもたらす連星の軌道変化を特徴づける。
- **信頼度 (Confidence level)**: 記された数値の範囲内に真の値が含まれる確率。
- **デューティ比 (Duty cycle)**: 観測期間のうち、信号またはシステムが解析可能なデータを収集している割合。
- **検出効率 (Efficiency)**: ランダムな時間と方向から来るシミュレートされた信号を検出する割合。波形モデルの種類と強さの関数で表される。
- **重力波 (Gravitational waves)**: 合体する中性子星やブラックホールなどの高エネルギーを伴う過程で放出される時空の歪みが伝播する現象。
- **中性子星 (Neutron star)**: 寿命を迎えた大質量星の遺物。大質量の星が核燃料を使い果たすと、超新星爆発として知られる壊滅的な状態で死滅し、中性子星が形成されることがよくある。(ブラックホールほどではないが) あまりにも質量が大きくて密度が高いため、原子は地球上で通常観測されるような状態を保てず、中性子の塊になる、中性子星は太陽とほぼ同じ大きさの質量をもつにも関わらず、直径は 10 キロメートル程度しかない。
- **雑音 (Noise)**: さまざまな機器や環境の影響による重力波測定信号の変動。重力波検出器の感度は雑音によって制限される。
- **高遅延探索 (Offline search)**: 高遅延探索は探索のうち、既に収集されたデータの解析を行うもの。低遅延 (リアルタイムに近く) で行われる探索を補充するもの。
- **パラメータ推定 (Parameter estimation)**: 重力波信号から天体物理的パラメータを導く統計的手法。
- **探索パイプライン (Search pipeline)**: いくつかのプロセスから構成される計算プログラム。データの解析のために検出器のデータにフィルタをかけたり、さまざまな量を計算することによって、できるだけ多くの雑音事象を排除し、候補となる天体物理現象の重要性を推定する。
- **自転角運動量 (Spin)**: 天体の自転角運動量。ブラックホールでは質量と電荷に並んでブラックホールを特徴づける。
- **ひずみ振幅 (Strain)**: 通過する重力波によって引き起こされる時空の変形による 2 つの測定点間の距離変化の比率。地球に到達する最も強い重力波でさえ典型的なひずみは非常に小さく、通常は  $10^{-21}$  未満。
- **波形 (Waveform)**: 重力波が時間によって変化していくさま。