

## 突発的重力波カタログ-5.0: LIGO-Virgo-KAGRA の第4期重力波観測運転の第2部によるカタログ更新

2026年5月、[LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) 共同研究グループは 2024年4月から2025年1月にかけて9ヶ月に渡り集められた第4期重力波観測運転の第2部 (以下、O4bと記す) の [干渉計のひずみ振幅](#) データを公開しました。このデータから [ブラックホール](#) や [中性子星](#) などの [コンパクト天体](#) の合体が波源と考えられる [重力波](#) を探索した結果、信頼度が高い重力波を新たに161個、検出しました。これらはすべて、合体する連星ブラックホールから放出されたと考えられる重力波でした。(過去のカタログ更新版とは異なり、O4bでは中性子星を伴う重力波は観測されませんでした。) 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特性の測定結果を集めた「[突発的重力波カタログ](#)」の第5版(GWTC-5.0)を発行しました。GWTC-5.0には過去に観測された重力波信号の再解析結果も含まれています。カタログに伴う一連の論文も公開しました。ここでは、GWTC-5.0の構成とその結果に焦点を当てて3つの論文を要約します。

### 「導入」論文の要旨

1つ目の論文、「GWTC-5.0: 導入」はカタログ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。この論文の目的は、読者が過去のカタログに付随するすべての論文を読むことなく、今回のカタログを理解できるようにすることです。

### 重力波イベントの命名法

私たちは重力波イベントを検出した日付と時間を [協定世界時](#) (UTC) で名付けます。例えば、2020年1月5日の16:24:26 UTC に検出された重力波イベントは GW200105\_162426 と表されます。(なお、[GW150914](#) や [GW250114](#) のように十分に例外的な重力波イベントについては、本文を読みやすくするため、時刻のタイムスタンプを省略することがあります。) 私たちは、たとえ天体物理学的起源でない可能性があっても、検出した重力波候補信号すべての名前に「GW」を付けます。これは直近のカタログ更新 (GWTC-4.0) での表記と一致しますが、以前のカタログ公開時の扱いとは明らかに異なります。とはいえ、カタログに重力波イベント候補が含まれるためには、そのイベントの天体物理学的起源である確率が高い (少なくとも50%) こと、さらにすべてのデータの質チェックおよび信号整合性チェックを通過することが必要です。

### この1つのカタログがすべてを網羅

GWTCは累積的なカタログです。GWTC-5.0は今まで未公開だったO4bのデータから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。つまり、GWTC-5.0はこれまでのすべてのカタログを置き換えるものです。さらに、GWTC-5.0にはO4の第1部 (O4a) の再解析によって追加された重力波イベントとそのパラメータ推定の結果も含まれます。カタログのその部分はGWTC-4.1と名付けられており、これは過去のカタログ版とともに導入された命名規則に従ったものです。この規則では、以前に公開された結果に変更があった場合にマイナーバージョン番号 (0や.1) が増加します。いつでも最も大きな番号を持つカタログが、その時に参照されるべきLVKのカタログということになります。

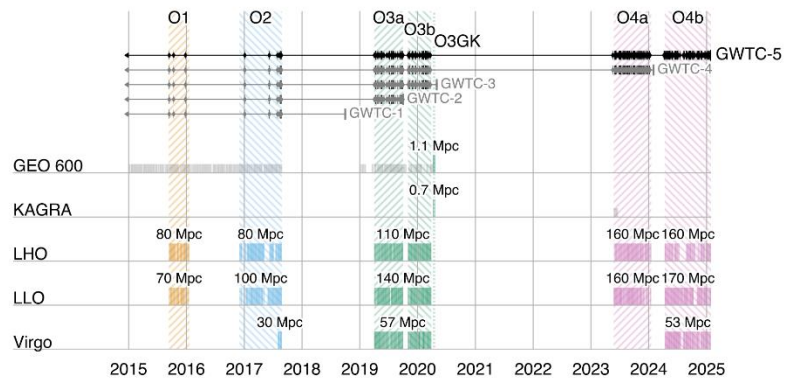


図1: 観測運転期間と重力波検出器、[GEO](#)、[KAGRA](#)、[LIGO-Hanford](#) (LHO)、[LIGO-Livingston](#) (LLO) と [Virgo](#) が観測していた期間を示す。色付きのブロック上部の数値は検出器が標準的な連星中性子星合体を観測できるおおよその距離 (メガパーセク、Mpc) を表し、検出器の感度の指標となる。図の上部にはGWTCに重力波イベントが追加された時期を印で表し、色付きの斜線部分はそれぞれのカタログに含まれるデータを収集した期間を表す。

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/)



このことは、GWTC-5.0が最初の観測運転（O1、2015年9月開始）から第4期観測運転の第2部（O4b）までの、信頼度の高い突発的重力波信号の候補イベントをすべて含むことを意味します。O1からO4bを通じて、重力波検出器は段階的に感度を高めてきました。感度向上の歴史は図1に示された観測運転の時系列で確認できます。

図1を見ると、Virgo検出器がO4b中にO4の観測に参加し、その感度は第3期観測運転で示されたものと同程度であったことがわかります。Virgo検出器がO4の観測に加わったことは、重力波検出器ネットワークの全体的な感度を高めるだけでなく、各重力波イベントの天球面上での位置特定能力を大幅に改善しました。結果の部分でその顕著な例を見ることができます。

## 空間時間超体積の積み重ねで宇宙を覗く

検出器の感度向上は角分解能の改善と距離感度の向上をもたらし、O4bはこれまでで最も感度の高い重力波探索となりました。私たちは検出器が観測した4次元体積（時間×空間体積）を算出することで、検出器の感度を定量化することが多く、従来のカタログ表記に倣ってこれを「超体積」と呼びます。さまざまな天体物理的距離や天球面上の位置で重力波イベントが発生した場合に、検出器で重力波信号がどのように見えるかをシミュレーションします。さらに、シミュレートされた信号を検出器のデータに人工的に挿入し、解析ソフトウェアが正しく検出できるかどうかを確認めます。検出器稼働率（デューティ比）で補正すると、確実に重力波信号を検出できる近傍宇宙の超体積の現実的な推定値が得られます。

図2は、この超体積の値を累積検出数と対比して表したものです。これにより各観測運転期間に検出された重力波イベント数が示されます。O4bで観測された重力波イベント数は総重力波イベント数をほぼ倍増させたことが視覚的にわかります！

探索感度の向上の証として、O4のこれまでの期間（O4a + O4b）を以前の観測運転期間と比較すると、O4の結果が今日までの重力波検出全体のおよそ75%を占めていることがわかります（図3はこれを別の方法で可視化しています）。

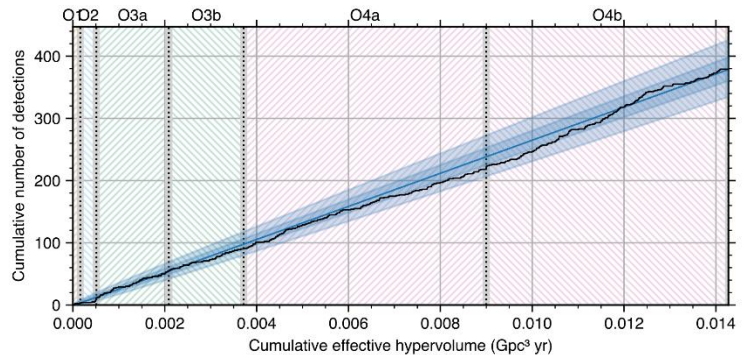


図2: 検出器が探索したおよその空間時間超体積と累積観測数の対応を表した図。検出した重力波イベントの数も、私たちが探索した局所宇宙もどちらも増加している。黒線は検出した重力波イベント数を表し、その周囲の青い帯はその測定の不確かさを表す。不確かさは、天体物理学的起源である確率が高い重力波イベントであっても（たとえ非常に小さくとも）別の起源である可能性が存在するという事実に由来する。観測された重力波イベント数が増えると、この不確かさは累積し、総検出数を理解するための統計的な尺度を与える。

## 「手法」論文の要旨

2つ目の論文「GWTC-5.0: 突発的重力波を特定し、分析する手法」では、GWTC-5.0を作成した手法の詳細を述べています。論文の冒頭では、私たちが探索している重力波信号をモデル化するための手法と、それらをデータの中から探索するために用いる解析ソフトウェアを扱います。続いて、データの質に影響を与える雑音変動の取り扱い方法を述べます。論文は、各重力波イベントの天体物理学的パラメータ（例えば、合体したコンパクト天体の質量）を推定し、結果の整合性を検証し、これらの大規模な作業を完了するために必要な複雑なデータ構造を管理するためのツールの概観で締めくくられます。

## 継続は力なり

GWTC-5.0におけるコアな手法の大部分は、O4aの重力波イベントの解析を行うにあたり使われたGWTC-4.0解析方法から大きく変わっていません。しかし、データの較正に影響するものや各重力波イベントの天体物理学的特性を推定する手法に影響するものなど、いくつかの小さなバグを特定し、修正しました。いずれのケースでも、これらのバグによる影響は個々の重力波イベントの統計的不確かさの範囲内に収まり、以前のカタログで述べられた科学的結論が影響を受けることはありません。

## 成長を続ける中で原点を忘れない

前回のカタログ更新の慣習に従い、この手法の論文には最初の観測運転に遡って解析アルゴリズムの歴史的記述も含まれています。これはGWTCが累積的カタログであり、再解析していない以前の結果も含めるために必要なことだからです。したがって、例えば最初の検出結果であるGW150914のようなO1の重力波イベントをGWTC-5.0カタログを閲覧しながら理解したい場合、その当時に用いられた解析ツールの全体的文脈が必要になります。この論文は、カタログに不慣れな読者が、過去の論文を参照せずとも現在の状態を完全に把握できるように意図して書かれています。

この歴史的な文脈と並行して、私たちは各カタログ版で解析を継続的に強化・改良するために有用な新手法の導入にも努めています。GWTC-5.0では、結果への信頼性を向上させるクロスチェックの方法として機械学習を取り入れたいくつかの解析を追加しました。これらの新アプローチは、大量のシミュレーション信号ライブラリでニューラルネットワークを使って学習させ、学習後は従来の解析手法が要していたよりもほんのわずかな時間で新しい信号の特性を推定できるようにします。ニューラルネットワークの迅速な近似と、より厳密な計算との間にある小さな差異は、その後の再重み付けのステップで補正されています。

## 「結果」論文の要旨

3つ目の論文「GWTC-5.0 : LIGO–Virgo–KAGRAの第4期観測運転第2部からの観測と突発的重力波カタログの更新」では、GWTC-5.0に追加された新しい重力波イベント候補の天体物理学的結果の概要を示します。各重力波イベントの主要な特性（質量、角運動量、距離などのパラメータを含む）に焦点を当てています。得られた結果をより詳細に解析した結果は、GWTC-5.0のデータ公開と同時にあるいは直後に発表される複数の関連論文に含まれる予定です。

### 400を目指して

私たちはO4bのデータ中に含まれる天体物理学的起源である可能性が高い重力波イベント候補を新たに161個、見つけました。これらすべてのイベントは、検出した重力波信号から推定した質量に基づき、連星ブラックホール合体であると考えられます。前版カタログのデータセットとは異なり、O4bでは中性子星を含む新しい重力波イベント候補は見つかりませんでした。

これらの新しい観測により GWTCに含まれる重力波イベント候補の総数は390となりました（図4を参照）。161個の新しい重力波イベント候補のうち、私たちは最も有意性が高い104個の重力波イベントについて詳細な追跡解析を行いました。有意性は「誤警報率」で示します。これはランダムな雑音変動が重力波信号のように見えるものをどれくらいの頻度で生じさせるかの指標です。私たちは誤警報率が年間1回未満の重力波イベントに対して追跡解析を行いました。

### 注目すべき重力波イベント

いくつかの極めて特筆すべき重力波イベント（内いくつかは既に公開済み）が今回のカタログに収録されています。これらには、今までに観測された中で最も大きな重力波信号であるGW250114、階層的（多重）ブラックホール合体の存在を強く示したGW241011とGW241110、そして、初めて天体物理学的校正の有益な適用に用いられた2つの重力波イベントのうちの1つであるGW240925が含まれます。これらの重力波イベントは既に個別に公開されていますが、注目すべき観測としてカタログでも強調しています。これらの特別な重力波イベントについては、次のページにまとめを用意し、それぞれの論文要約へのリンクも付けました。

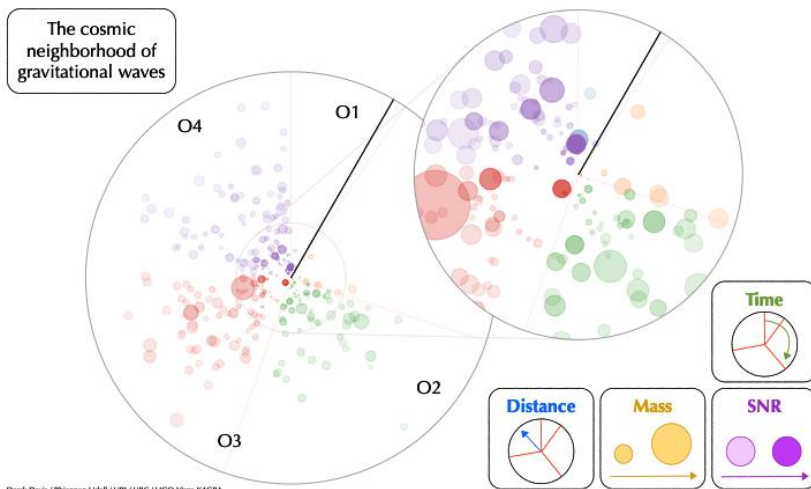


図3: 第4期観測運転期間はO1からO4bの観測運転期間の総時間の半分未満でありながら、これまでの重力波検出の約75%は第4期観測運転中に観測されている。この円グラフでは、各重力波イベントが円で表されている。円の大きさは合体した連星の総質量を表し、色の濃さは検出器での「大きさ」（信号雑音比）を示す。各円のグラフ中心からの距離は連星合体が地球からどの程度離れて起こったかを示す。各扇形は各観測運転期間（O1からO4bまで）を表し、重力波イベントの時刻は各扇形内で時計回りに進む。

### 可能性は無限大

GWTC-5.0は重力波天文学の精度で新たな記録を打ち立てました。これはいくつかの重力波イベントの位置推定が大幅に改善されたことによります。この重要性を理解するために、重力波検出器が重力波イベントの位置をどのように特定するかを説明しましょう。1つの重力波検出器だけでは重力波イベントが観測されたかどうかは分かって、天球面上のどこで起きたかを必ずしも特定できません。（せいぜい、検出器が実質的に感度を持たな

## 注目すべき重力波イベント

### GW250114 – これまでで最も大きい重力波イベント

GW250114は連星ブラックホール合体からの最強を記録した重力波信号です。重力波イベントの「大きさ」は信号雑音比で表されます。従来の記録はGW230814の信号雑音比42.4でしたが、GW250114の信号雑音比は76.9（ほぼ2倍の大きさ）であり、これにより一般相対性理論の厳密な検証やホーキングの面積増大定理の妥当性の確認が可能になりました。特に、合体した2つのブラックホール（質量はそれぞれ太陽質量の約34倍と32倍）は、初めて観測された重力波、GW150914を発生させた2つのブラックホール（質量はそれぞれ太陽質量の約36倍と約29倍）に非常に近い質量でした。さらに、これらの重力波イベントは地球からほぼ同じ距離で発生しており、GW250114が約13億光年、GW150914が約14億光年です。信号雑音比の大幅な向上は、ほとんどが検出器の改良によるもので、重力波源の特性に特別な違いがあったためではありません。

### GW241011 と GW241110 – 階層的（多重）合体の証拠

連星として生まれ、共に進化し、それぞれブラックホールを形成した恒星を起源とする2つのブラックホールは、それぞれの自転角運動量（軌道角運動量とは別）が軌道の回転方向とある程度一致していることが期待されます（太陽系の多くの惑星が同方向に自転するのと類似）。しかしGW241011とGW241110は、この期待に反し、精度良く観測された自転角運動量かつ、著しく不均等な質量比をもつことを示しました。これらは、密集した星団のような複雑な環境で形成された可能性を示す手がかりであり、そのような場ではブラックホール同士が動山に出会って捕獲され、過去の合体の残りが再び合体することがあります。これらの重力波イベントは、いわゆる「階層的（多重）合体」を示す現時点で最良の証拠です。

### GW240925 – 初めて天体物理学的較正に活用

重力波を検出するには、各重力波イベント検出時点での検出器の厳密な較正が必要で、通常は較正状態がよく把握されていますが、検出器の状態が変化して「落ち着く」まで時間を要し、較正状態が不確かな場合もあります。しかし、宇宙は必ずしも待ってはくれません。GW240925の場合、まさにそのような事態が起きました。重力波イベント自体は一見典型的で、合体したブラックホールの質量は太陽質量でそれぞれ約9倍と約7倍でしたが、LIGOハンフォード検出器が較正不良の状態でした。幸いにも信号はかなり強く（信号雑音比31.9）かつブラックホール合体からの重力波の波形はよく理解されていたため、私たちは較正状態の悪いデータを理論モデルと比較することができました。これにより、信号そのものを用いて検出器の較正を逆算することが可能になり、天文学的重力波イベントが直接検出器の較正に用いられた最初の事例となりました。（同様に天体物理学的較正に用いられた関連する重力波イベント、GW250207はGW240925と同時に発表されましたが、GW250207はO4b終了後に発生したためGWTC-5.0には含まれず、将来のカタログ更新で収録される予定です。）

い方向を除外することで「ここではない」ことは示せます。）しかし、2台の検出器が同じ信号をとらえると、各検出器で信号が観測された正確な時刻を比較でき、重力波が光速で伝わることを踏まえてその到来方向を三角測量で推定できます。これは携帯電話がGPS信号の到着時刻を用いて地上の位置を特定する仕組みに非常によく似ています。3台以上の検出器が観測に携わっている場合は、検出器の各対ごとにこの三角測量を行えるため、天球面上で事象が起きた場所を特定する能力が大幅に向上します。

O4aでは2台のLIGO検出器のみが観測しており、このことが重力波イベントの位置推定能力を根本的に制限していました。しかし、O4bではVirgoが観測運転に参加し、重力波検出器ネットワークに3台目の検出器が加わりました。これにより位置精度は飛躍的に向上し、これまでで最も良く位置が推定された重力波源GW240615\_113620のような重力波イベントもありました。この重力波イベントの天球面での領域はわずか6平方度で、腕を伸ばして手を空に向けた際に親指が覆う空の範囲の大きさ程です。比較として述べると、GWTC-4.0で達成された最も良い位置推定は110平方度で、およそ20倍程精度が低く、他の多くの重力波イベントの位置は数千（ときには数万）平方度にわたって広がっていました。

## GWTC-5.0 とその先へ！

GWTC-5.0は重力波探索における重要な節目です。初めての重力波検出、GW150914から十年余りで、重力波観測数は1つから約400に及ぶカタログへと発展しました。各観測運転期間ごとに、私たちは宇宙に潜むブラックホールや中性子星の集団についての知見を拡大しています。

## 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：<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500701/public/>, [arXiv](https://arxiv.org/abs/2501.1141)
- 手法の論文：<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600166/public/>, [arXiv](https://arxiv.org/abs/2501.1141)
- 結果の論文：<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600152/public/>, [arXiv](https://arxiv.org/abs/2501.1141)

- GWTC-5.0のデータはGravitational-Wave Open Science Centerから：<https://gwosc.org/GWTC-5.0/>
- 本要約の英語版は[こちら](https://arxiv.org/abs/2501.1141)

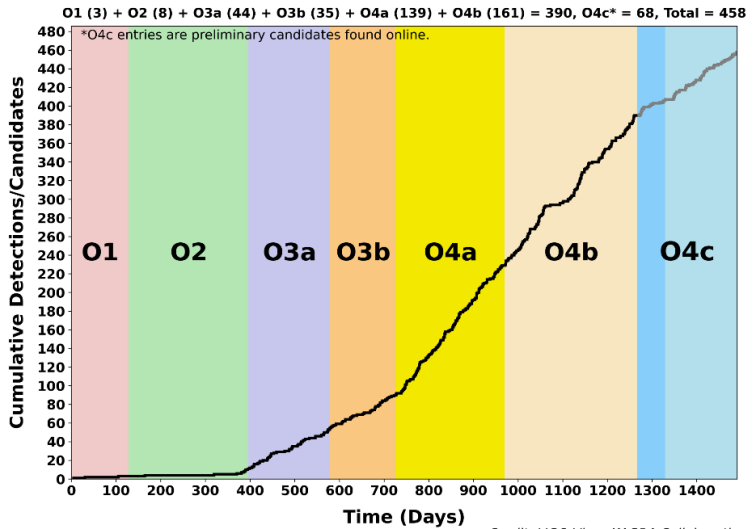


図4：GWTC-4.0は報告候補数を（GWTC-3.0時点の約90個から）200個超へと（実質的に）倍増させたことで有名である。GWTC-5.0ではO4b終了時点で合計390個の重力波イベントが含まれ、カタログの規模は再びほぼ倍増した！O4の第3部かつ最終部分（O4c）で観測された重力波イベント候補は次版カタログで解析および公開される。