

# 突発的重力波カタログ-5.0: コンパクト連星合体の母集団の特性

最新の突発的重力波カタログ **GWTC-5.0** は **GWTC-4.0** を基にし、2024年4月10日から2025年1月28日の間に得られたデータを含めています。ここでは、**GWTC-5.0**に含まれる **267 個のコンパクト連星合体**の母集団の特性を報告します。個々の連星合体は貴重な知見をもたらす一方、母集団の特性全体を調査することでコンパクト連星がどのように形成され、進化し、合体するかという一連の描像について知ることができます。

宇宙にはあらゆる質量や進化の過程にある星々が存在します。小さく、数百億年の間存在する比較的軽い星もあれば、数百万年という短い期間で燃料を使い果たし、一生を終えるものもあります。後者に該当する大質量星は質量が**太陽質量**の数十倍から数百倍に及び、死のあとにコンパクトな残骸を残します。これらの残骸には**中性子星**や**ブラックホール**が含まれ、時に対を成して最終的に合体することがあります。**そのような合体**は時空のさざ波である**重力波**を発生させます。重力波は宇宙の歴史を通して存在するコンパクト天体の形成と進化を理解するための主要な手段の一つとなっています。また、重力波は何十億年もの間、宇宙を伝搬し、途中の物質や銀河にほとんど影響されることなく地球で検出されます。

検出器がより遠方を探れるようになるにつれて、コンパクト連星の母集団の研究はブラックホールや中性子星の振る舞いや相互作用について、より詳細な姿を私たちに見せてくれます。また、これらの研究は大質量星の性質、進化、一生の終え方についての洞察を与え、その結果はブラックホールや中性子星の宇宙史の理解へとつながります。

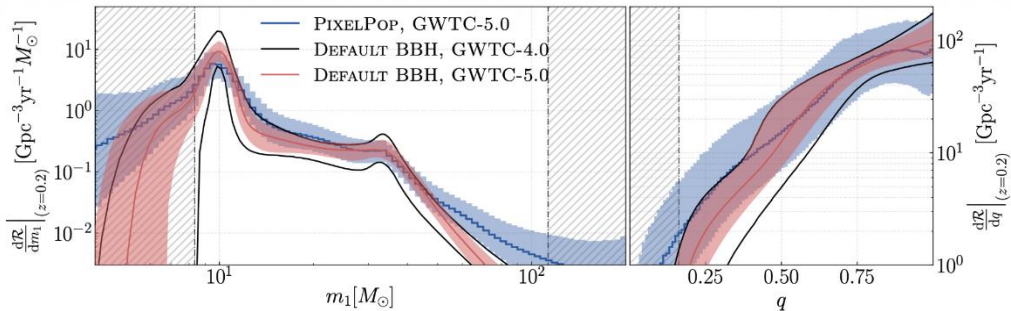


図1 (本論文の図2)。

左: 連星ブラックホールの重い方の天体の質量分布。GWTC-5.0の結果(青と赤)はGWTC-4.0(黒線)で見られた構造を概ね保持し、 $10 M_{\odot}$  付近と  $35 M_{\odot}$  付近が比較的多い特徴が見られる。(  $M_{\odot}$  は太陽の質量を表す。)

右: 質量比 (連星ブラックホールの質量の比)  $q$  の分布を示す。質量比  $q=1$  は連星を成すブラックホールが等質量であることを示す。

## 解析の手法

本研究で扱うコンパクト連星の合体には、連星中性子星 (BNS)、中性子星・ブラックホール系 (NSBH)、そして、連星ブラックホール (BBH) が含まれます。本論文は、これらの系がどのように形成されるか、それらの性質、および**宇宙年齢**を通してどのように合体するかの概要を示します。本論文で扱う解析の対象は、新たに公開された突発的重力波カタログ **GWTC-5.0** から抽出され、**LIGO-Virgo-KAGRA (LVK)** の第4期観測運転期間の第2部 (O4b) で高い信頼度で検出されたものを含みます。また、第4期観測運転期間の第1部 (O4a) の結果が更新されたことにより、解析に使われた267の重力波イベント候補には**GWTC-4.0の母集団解析**で使われたものに、さらに2つが追加されています。

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/)



母集団の特性を推定するには、観測上の**選択効果**を慎重に理解する必要があります。これは観測天文学で共通の課題です。重力波検出器は遠方の低質量系よりも近傍の大質量系の合体に対する感度が高く、解析を行う際にはこの**選択効果**（バイアス）を適切に補正する必要があります。コンパクト連星からの重力波信号は**一般相対性理論**で的確に表すことができます。私たちはコンパクト連星系の軌道がほぼ完全な円形であるという仮定の下、一般相対性理論による予測を重力波信号の理解に用いています。

重力波は電波放射などの**電磁波**とは異なり、伝播途中の物質の影響をほとんど受けないため、選択効果を高精度でモデル化することができます。これらの効果を定量化するために、質量、**角運動量**、**赤方偏移**をさまざまに変えた数百万の重力波信号をシミュレートして実際の検出器データに挿入し、**探索パイプライン**でそれらを検出できるかを測定しました。これらの測定により選択効果を「取り除き」、合体するコンパクト連星の実際の母集団分布を構築することができます。さらに、母集団分布の誤モデリングなどに起因する他の系統的誤差を考慮するため、複数の母集団分布のモデルの結果を照らし合わせ、得られた結果の妥当性を確かめました。

## 主な結果

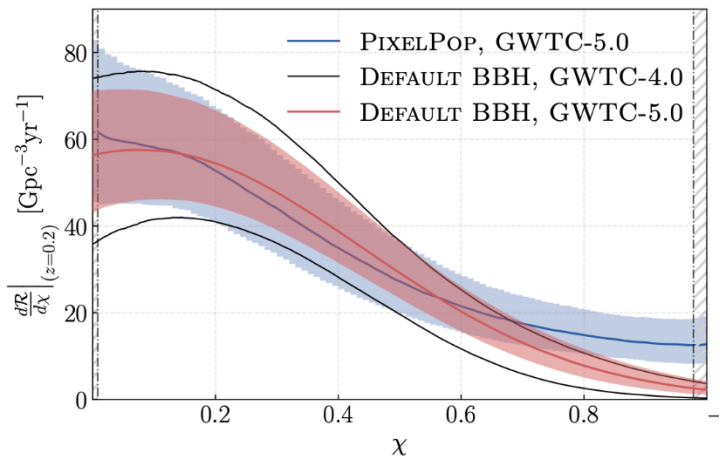
**質量分布:** GWTC-4.0の解析で確認された構造と特徴は本研究でも確認されています。

**図1 (左パネル)** はブラックホールの質量分布を示しており、大まかに、2つのべき乗則で表すことができます。10  $M_{\odot}$  付近 ( $M_{\odot}$  は**太陽質量**を示す) には過密領域が見られ、35  $M_{\odot}$  付近ではべき乗則の傾きに変化が見られます。**図1 (右パネル)** は、ブラックホールは同程度の質量をもつ他のブラックホールと対を成す可能性が高いことを示しており、この傾向は35  $M_{\odot}$  付近のブラックホールでさらに顕著です。経験則として、恒星も同程度の質量をもつ恒星と連星を作る傾向にあるため、ブラックホールにも同様の傾向が見られることは驚くべきことではありません。

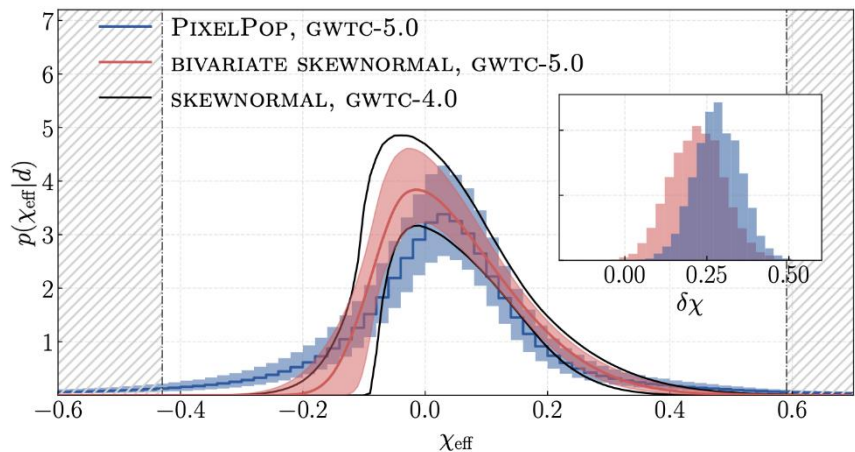
**角運動量:** ブラックホールの特性は質量と角運動量によって決まります。角運動量は独自にあるいは質量と組み合わせて、ブラックホールが形成された環境、形成過程、そして進化の軌跡に関する情報を含んでいると考えられます。

ブラックホールの自转角運動量は無次元のパラメータ $\chi$ で特徴付けられ、 $\chi$ は0~1の範囲の数値をもちます。 $\chi = 0$ のブラックホールは自転していないもの、 $\chi = 1$ のブラックホールは一般相対性理論で許される理論上の最大値で自転しているものを示します。解析の結果、ほとんどのブラックホールは小さな角運動量をもちます(**図2**参照)が、約15%は大きな角運動量( $\chi \sim 0.7$ )をもつことがわかりました。

コンパクト連星系の角運動量を表す有用なパラメータに**実効角運動量** $\chi_{\text{eff}}$ があります。



**図2** (本論文の図3): 個々のブラックホールの自转角運動量の分布。一般相対性理論で許される最大角運動量に対する割合である無次元量で表す。GWTC-5.0の結果(青と赤)はGWTC-4.0(黒線)で見られた構造を概ね保持し、結果に矛盾はない。ほとんどのブラックホールは小さな角運動量をもつが、ごく一部は大きな値をもつ。



**図3** (本論文の図4): 連星系の実効角運動量( $\chi_{\text{eff}}$ )の分布。右の挿入図はこの分布の非対称性を示す。分布の非対称性は連星ブラックホールの形成過程に依存することがある。ここでは、GWTC-5で使用した2つのモデルの結果を表している。

これは連星系を成すコンパクト天体の個々の自転角運動量が軌道角運動量とどの程度同じ向きで揃っているかを示す量で、一般に重力波で最も精度よく測定されるパラメータの一つです。本論文に記されているすべての推定量と同様に、これは単一の数値で表されるものではなく、確率分布で表されます。観測データに対して物理量の異なる値がどの程度あり得るかを示す量です。図3は実効角運動量の分布を示しており、その形状はブラックホールの形成過程を示す有用な指標となり得ます。分布が0を中心に非対称で、負の値（軌道角運動量と逆向きの自転角運動量）よりも正の値（軌道角運動量と自転角運動量が同じ向き）をもつ連星が多いことがわかります。この非対称性に基づき、少なくとも9%の連星ブラックホールは通常の連星進化の過程を辿ってきたこと、すなわち、潮汐効果やブラックホール・恒星間の相互作用によって自転角運動量と軌道角運動量が同じ向きをもつように進化してきたことを確実に結論付けることができます。

速く自転するブラックホールがどれかを詳しく調べると、図4に示されるように、約10–20  $M_{\odot}$  の範囲、または、45  $M_{\odot}$  以上の領域、のいずれかの質量帯に現れることがわかりました。これらの質量帯のブラックホールが大きな自転角運動量をもつことを標準的な恒星の形成モデルだけで説明することは難しく、階層的合体（または、多重合体）（過去の世代のブラックホール同士の合体で形成されたブラックホールが再び合体する）などの他の異なる形成過程が関与している可能性を示唆します！階層的合体によって形成されたと考えられている、LVK によって最近検出された GW241110 および GW241011 の観測結果とも合致します。なお、この関連は非常に魅力的ではあるものの、大きな自転角運動量をもつブラックホールが他のメカニズムによって形成される可能性を確実に排除することはできません。

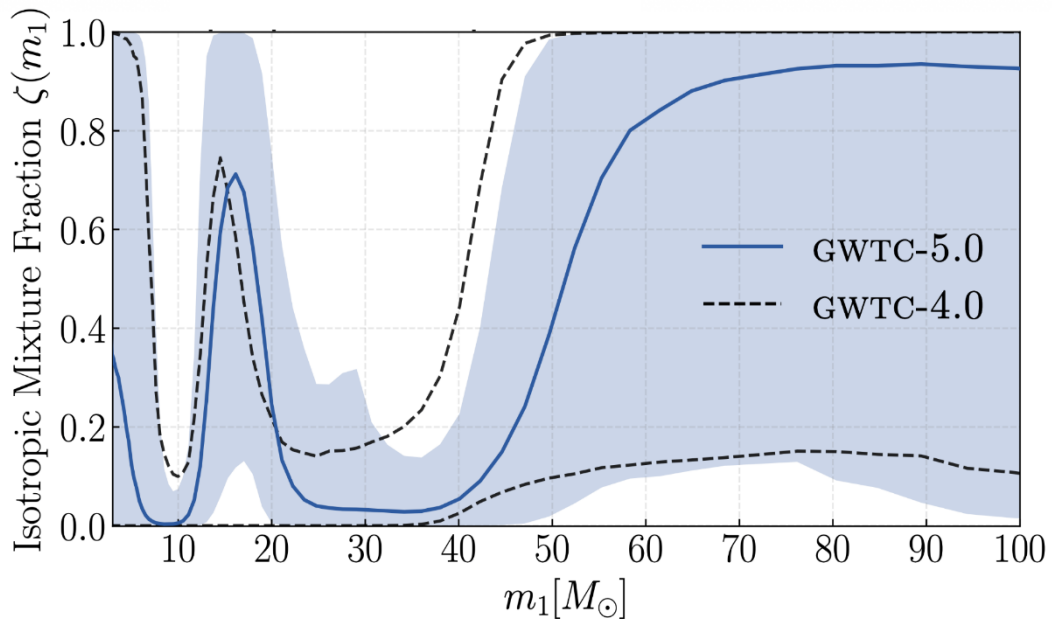


図4 (本論文の図10): 高速で自転するブラックホールをもつ連星系の割合をブラックホールの質量を関数として示した図。大きな自転角運動量をもつブラックホールは概ね 10–20  $M_{\odot}$  の質量帯、または 45  $M_{\odot}$  以上の質量帯に見られる。青の実線はGWTC-5.0から推定した中央値を、青の帯は90%信頼区間での範囲を示す。

## 結論

GWTC-5.0に含まれる新たな重力波イベントの数々は、合体するブラックホールや中性子星の母集団分布に関する今までで最も深い洞察を提供します。本解析ではいくつかの興味深い特性が明らかになりました。大きな自転角運動量をもつブラックホールの存在もその一つです。総じて、このデータは連星ブラックホールが複数の異なる形成過程をもつことをこれまで以上に明確に示しています。数か月後には第4期観測運転期間の最後のデータ公開 (GWTC-6.0) が行われる予定です。GWTC-6.0 はこれらの新しい発見にさらに光を当てることになるでしょう。

## 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：

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600045/public/>  
 または <https://arxiv.org/abs/2605.27226>

GWTC-5.0の論文：

- ・ 導入の論文：<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500701/public/>, [arxiv](https://arxiv.org/abs/2507.13111)
- ・ 手法の論文：<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600166/public/>, [arxiv](https://arxiv.org/abs/2601.12111)
- ・ 結果の論文：<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600152/public/>, [arxiv](https://arxiv.org/abs/2601.12111)

GWTC-5.0のデータは Gravitational-Wave Open Science Centre から：  
<https://gwosc.org/GWTC-5.0/>

本要約の英語版は [こちら](#)