

配信先：大阪科学・大学記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会

2025 年 11 月 20 日

大阪公立大学

AI でブラックホールの謎に挑む！ 重力波パラメータ推定における機械学習の信頼性向上に貢献

<ポイント>

- ◇重力波信号の解析の従来手法は膨大な計算コストを要するため、近年では機械学習を用いて解析手法の高速化が進められているが、応用に向けては機械学習の信頼性に対する懸念が残っている。
- ◇機械学習モデルが予測時にどの領域に注目したかを可視化する Attention Map を導入することで、重力波信号から連星ブラックホール^{*1}のチャープ質量^{*2}と有効スピン^{*3}を推定するモデルを構築。
- ◇観測データに含まれる突発的雑音（グリッチ）が推定結果に与える影響を Attention Map で評価。

<概要>

重力波は、時空の歪みが光速で伝わる現象で、2015 年 9 月に初めて連星ブラックホール合体から検出されて以来、200 件以上のイベントが報告されています。重力波信号の解析により、ブラックホールの質量や自転などの物理量（パラメータ）を推定できますが、従来手法は膨大な計算コストが課題でした。近年、機械学習を用いて推定を高速化する研究が進み、精度を保ちながら効率化できる可能性が示されていますが、機械学習モデルを使用して得られた結果の信頼性向上が重要です。

大阪公立大学大学院理学研究科の岩永 響生氏（研究当時、大学院生）、伊藤 洋介准教授らの研究グループは、機械学習モデルが予測時にどの領域に注目したかを可視化する Attention Map を導入することで、重力波信号から連星ブラックホールのチャープ質量と有効スピンを推定するモデルを構築し、それぞれの注目領域を比較しました。さらに、観測データに含まれる突発的雑音（グリッチ）への影響も評価し、影響が大きい場合に注目度が高まる傾向を確認しました。このモデルは理論的に重要とされる信号領域に注目しており、物理的に意味のある情報に基づく推定の可能性が示されました。また、Attention Map により、推定結果の信頼性を判断できることが分かりました。本研究は、機械学習の利便性だけでなく信頼性の観点を重視し、今後は定量的評価や雑音除去後の適用など、さらなる発展が期待されます。

本研究成果は、2025 年 10 月 9 日に国際学術誌「Physical Review D」にオンライン掲載されました。

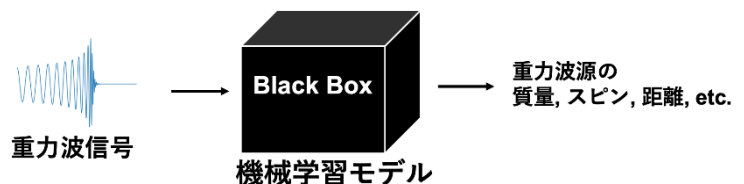
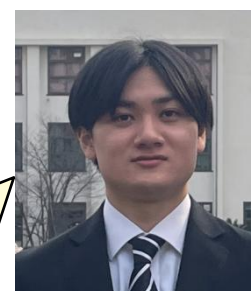


図 1：機械学習モデルを用いた重力波パラメータ推定に関する概念図

<研究者からのコメント>

物理学の分野などで敬遠されがちな機械学習の信頼性向上に貢献できたことを嬉しく思います。機械学習は計算効率が高いというメリットがある一方で、判断根拠が明確でないので、答えが得られるまでのプロセスが重要視される物理学の分野などではこの技術の導入に批判的な意見をもつ研究者が多くいます。この研究では機械学習も一定の信頼性をもつ可能性を示すことができました。この研究から、重力波の分野で機械学習の信頼性に関する議論がより活発になることを願っています。



岩永 響生氏

<研究の背景>

重力波は、時空の歪みが光の速度で伝播する物理現象です。2015年9月に世界で初めて連星ブラックホール合体からの重力波が検出されて以降も観測は続いており、現在までに200件以上の重力波イベントの詳細な情報が公開されています。今後も、観測装置の性能向上に伴い、検出されるイベント数が加速度的に増えていくことが期待されています。

重力波の信号を解析することで、例えばブラックホールの質量や自転に関する情報などの物理量（パラメータ）を推定することができます。これはパラメータ推定と呼ばれる作業で、従来のパラメータ推定手法には、膨大な計算コストがかかるという問題があります。そのため最近では、機械学習を用いて重力波源のパラメータ推定にかかる計算コストを削減する研究が盛んに行われています。実際にいくつかの先行研究では、機械学習を用いることで、従来手法と同等の精度かつ、高速にパラメータ推定が行える可能性が示されています。

しかし、重力波源のパラメータ推定に機械学習を用いる場合、機械学習がもつ「ブラックボックス」な性質を考慮しなければなりません。機械学習は大量のデータから特徴を学習し、自律的に出力を生成するため、判断根拠が不透明になりやすい性質を持っています。そのため、現実的な応用を考える上では、機械学習モデルの結果の信頼性を向上させることが重要です。

<研究の内容>

本研究では、機械学習モデルが予測を行う際にデータのどこに注目したのかを示すことができる **Attention Map** を導入しました。そして、重力波信号から連星ブラックホールのチャープ質量と有効スピンというパラメータを推定するモデルを独立に構築し、それぞれのモデルが注目した領域の違いを調べました。その結果、それぞれの機械学習モデルは、各パラメータの効果が顕著に現れる領域を注目していることが確認できました。重力波信号において、連星ブラックホールのチャープ質量と有効スピンの特徴を示すデータ上の領域は、理論的に分かっており、たとえばチャープ質量は、重力波信号の初期の、2つのブラックホールが互いの周りを公転している時にもっともその影響を強く示します。この理論的な予測と、重力波信号において機械学習モデルが注目した領域を比較することで、機械学習モデルが物理的に意味のある情報に基づいてパラメータ推定を行っている可能性を示すことができました。

また、本研究では、**Attention Map** を応用することで、グリッチと呼ばれる重力波の観測データに現れる突発的な雑音の影響を評価しました。その結果、グリッチのパラメータ推定への影響が大きいほど、グリッチへの注目度合いも大きくなる傾向が確認されました。そのため、**Attention Map** を用いることで、機械学習モデルによるパラメータ推定の結果が信頼できる場合とそうでない場合に区別することができました。

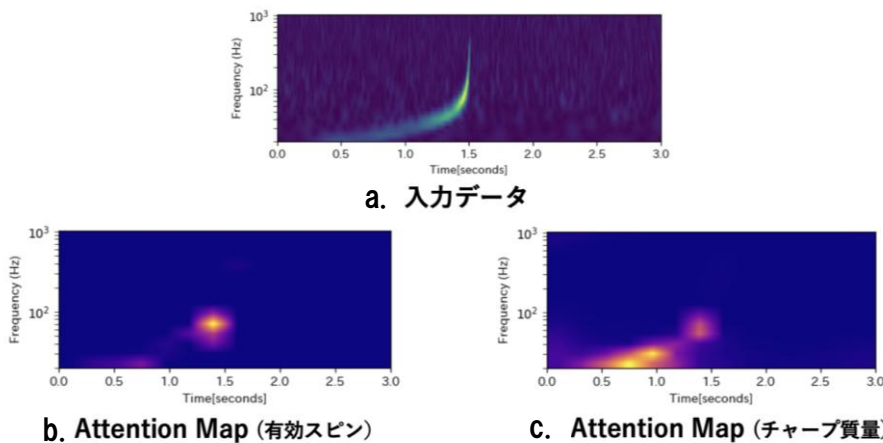


図 2 : Attention Map

a 機械学習モデルへの入力データであり、重力波信号の周波数の時間変化を示す。b、c はそれぞれ自転角運動量に関するパラメータ、質量に関するパラメータを推定するモデルの Attention Map。

<期待される効果・今後の展開>

機械学習の応用に関する先行研究には、既存の手法に対して計算効率が高いことを示すものや、特定の作業を自動化するものなど、機械学習の利便性を主張するものが多いです。このような中で、本研究では、機械学習やそれをベースとした人工知能（AI）のような技術を実用的に導入していくために、利便性のみでなく同時に「信頼性」の観点も重要であることを指摘し、また、機械学習も一定の信頼性をもつ可能性を示した内容であるといえます。

現時点では、本研究結果は機械学習モデルの注視領域と各パラメータの効果が現れる領域がおおよそ一致していることを示すに留まっています。しかし、今後はマルコフ連鎖モンテカルロ法や、フィッシャー解析と呼ばれる手法を用いることで、これらがどの程度一致しているかを定量的に示すことができる可能性があると思われます。また、グリッチの影響を取り除くための研究が既に行われているため、それらの手法を適用した後のデータに対して Attention Map を適用することも面白いのではないかと考えています。

<資金情報>

本研究は日本学術振興会科学研究費助成事業（課題番号：20H05639）の助成を受けたものです。

<用語解説>

- ※1 連星ブラックホール：一般相対性理論によると、質量の大きい星は、その一生の最後に超新星爆発を起こし、ブラックホールと呼ばれる天体を残すことがある。ブラックホールは、一度その中に入ると光でさえも外へ逃げ出すことのできない時空領域と定義されており、直接観測することはできないが、重力波など外部に及ぼす影響で存在を確認することができる。多くの、とくに質量の大きい星は連星として生まれ、その 2 つがともにブラックホールになると連星ブラックホールになる。連星ブラックホールは強力な重力によって互いの周りを高速に軌道運動し、重力波を放射する。重力波は連星ブラックホールの軌道運動のエネルギーを抜き去るため、2 つのブラックホールは次第に近づき、最終的に合体する。この現象は連星ブラックホール合体と呼ばれる。
- ※2 チャープ質量：2 つのブラックホールからなる連星系を考え、2 つのブラックホールは連星系の重心の周りを運動しているとする。一般相対性理論によればこのような連星系からは重力波が放出される。重力波はエネルギーを運び去るので、連星系は軌道運動のエネルギーを失い、次第に互いの方へと近づいていく。軌道半径が小さくなると軌道周期は短くなるが、その短くなり方を特徴づける主なパラメータがチャープ質量である。チャープ質

量は、2つのブラックホールの質量から計算することができ、ブラックホールの質量が大きいほど、チャープ質量も大きくなる傾向がある。

- ※3 有効スピン：ブラックホール連星系において、各々のブラックホールの自転角運動量の、連星軌道面に垂直な方向の成分を考える。これら2つの量について、ブラックホールの質量に応じた重みをつけた平均を求めたものを有効スピンと呼ぶ。有効スピンの大きいということは、少なくとも質量の大きなブラックホールの自転角運動量の軌道面に垂直な成分は大きいことになる。有効スピンは、天体の質量に次いで、重力波の時間発展を特徴づける主要なパラメータである。

<掲載誌情報>

【発表雑誌】 Physical Review D

【論文名】 Enhancing the reliability of machine learning for gravitational wave parameter estimation with attention-based models

【著者】 岩永 響生、松山 まほろ、伊藤 洋介

【掲載URL】 <https://doi.org/10.1103/blfk-7k9f>

【研究内容に関する問い合わせ先】

大阪公立大学大学院理学研究科
准教授 伊藤 洋介（いとう ようすけ）
TEL : 06-6605-2812
E-mail : yousuke.itoh@omu.ac.jp

【報道に関する問い合わせ先】

大阪公立大学 広報課
担当：谷
TEL : 06-6967-1834
E-mail : koho-list@ml.omu.ac.jp