

# 機械学習を用いたブラックホールの質量降着率と磁束の推定

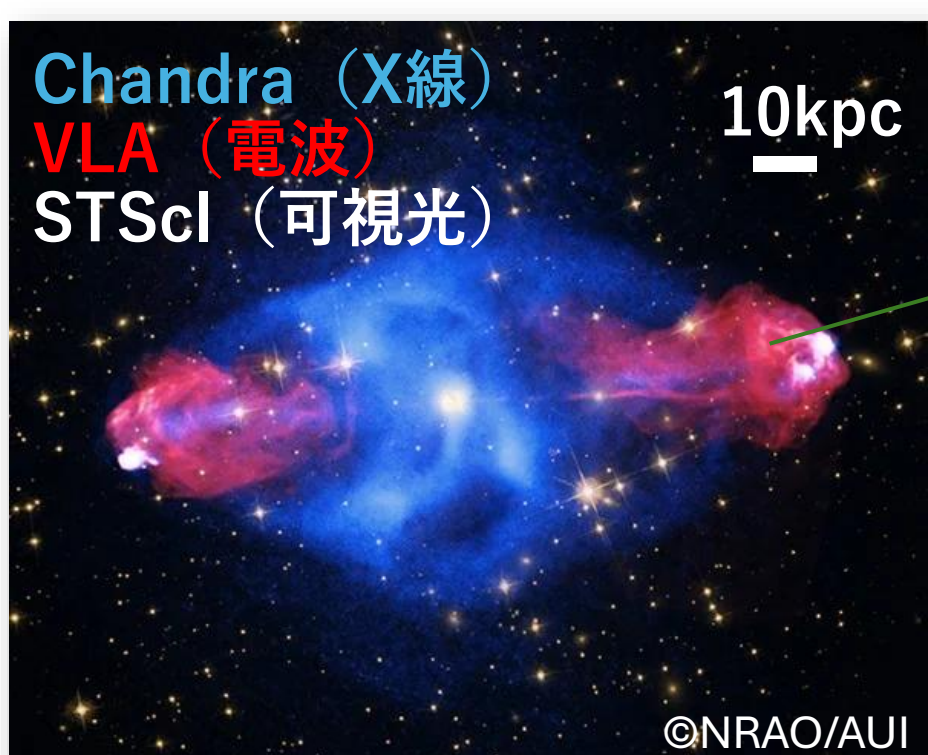
松藤勇希（筑波大学M1），朝比奈雄太（駒澤大学・筑波大学），大須賀健（筑波大学），芳岡尚悟（京都大学・筑波大学），高橋博之（駒澤大学）

## 要旨

観測から制限することが困難なブラックホール（BH）の質量降着率や磁束，スピンを，天体の放射光度および運動光度から推定する機械学習手法を提案する．シミュレーションデータを用いたテストで決定係数0.99を達成する有力な手法である．

## <背景と目的> 質量降着率やスピンの推定手法の課題とその代替手法

銀河進化に対するブラックホールジェットの影響を理解するには，BHの質量降着率や磁束，スピンなどBH近傍の物理量の推定が不可欠である．The Event Horizon Telescope Collaborationによるスピンや磁場構造の計測が試みられているが，十分とは言えず，しかも適用天体はごく僅かである．そこで本研究では，直接観測することが難しいBHの降着率，磁束，スピンを，比較的容易に観測可能な天体の放射と運動光度から推定する新しい機械学習モデルを開発する．



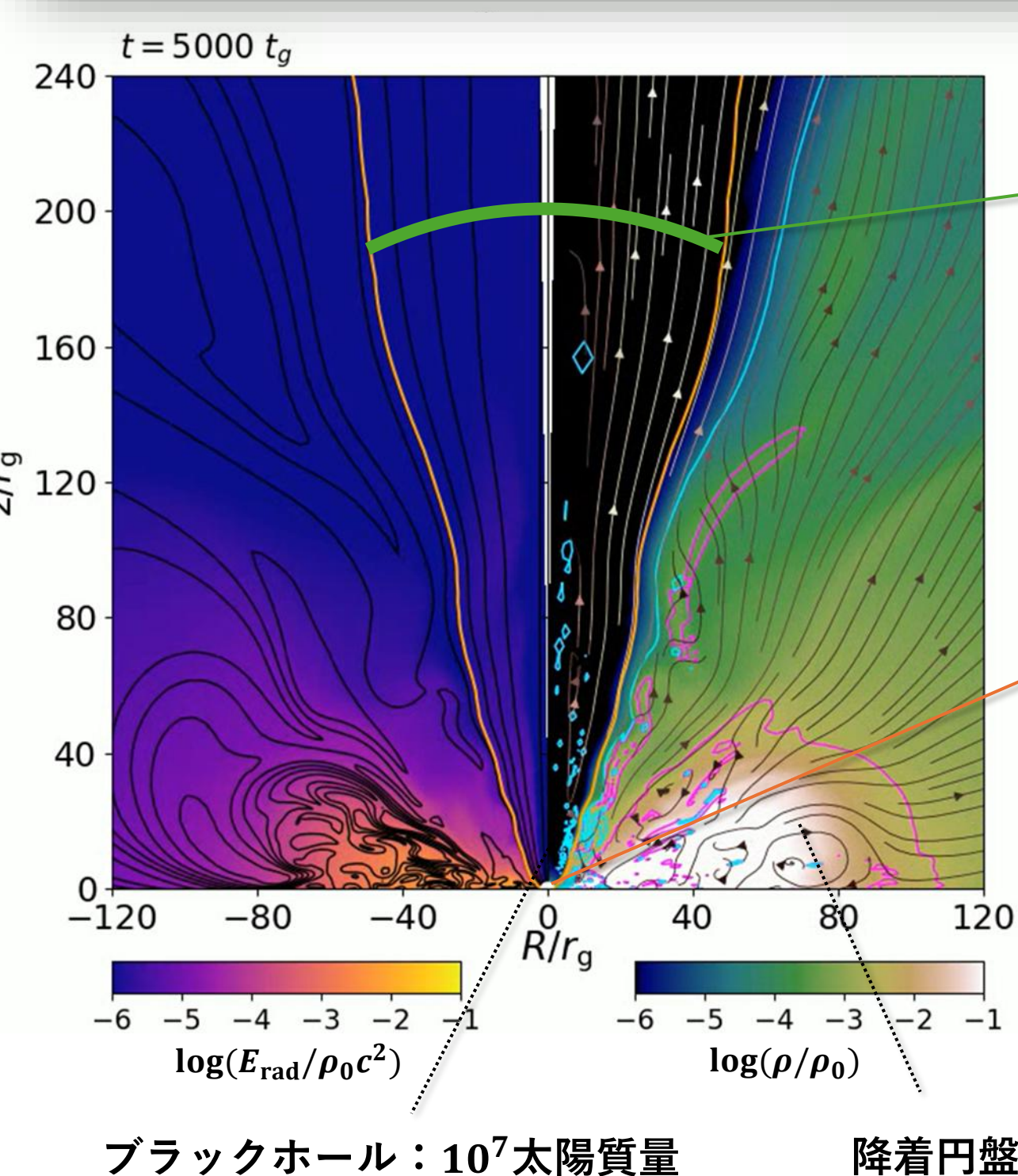
運動光度： $L_{\text{kin}}$   
放射光度： $L_{\text{rad}}$

機械学習  
モデル

質量降着率： $\dot{M}$   
磁束： $\phi$   
スピン： $a$

あらかじめ  
シミュレーションデータ  
を用いて学習済み

## <セットアップ> シミュレーションデータについて



円弧の領域で運動光度と放射光度を計算

BHジェット  
運動光度： $L_{\text{kin}}$   
放射光度： $L_{\text{rad}}$

質量降着率： $\dot{m} (= \frac{\dot{M}}{L_{\text{Edd}}/c^2})$

磁束： $\phi$

スピンパラメータ： $a$

MADパラメータ： $\tilde{\phi}_{\text{MAD}} (\propto \phi / \sqrt{\dot{M}})$

一般相対論的輻射磁気流体力学計算のデータを利用

・降着率：超臨界降着流(super-Eddington,  $\dot{m} \gg 1$ )  
：放射非効率降着流 (RIAF,  $\dot{m} \ll 1$ )

・BHのスピンパラメータ：0, 0.3, 0.7, 0.9

・データ間隔：0~15,000 $t_g$ で10 $t_g$ ごと ( $t_g = GM/c^3$ )  
(Yoshioka in prep.)

## <教師データ> 入力値として時系列情報の追加の有無

①時系列情報の追加無し：シミュレーションデータをそのまま教師データに使う

| 時刻( $t_g$ ) | 入力               |                  | 出力         |                    |              |   |
|-------------|------------------|------------------|------------|--------------------|--------------|---|
|             | $L_{\text{kin}}$ | $L_{\text{rad}}$ | スピン( $a$ ) | 質量降着率( $\dot{m}$ ) | 磁束( $\phi$ ) | MADパラメータ( $\tilde{\phi}_{\text{MAD}}$ ) |
| 5000        | 11               | 1                | 0          | 1                  | 3            | 1.5                                     |
| 5010        | 11.1             | 1.1              | 0          | 2                  | 8            | 2                                       |
| 5020        | 11.2             | 1.2              | 0          | 1                  | 5            | 2                                       |
| ...         | ...              | ...              | ...        | ...                | ...          | ...                                     |
| 15000       | 101              | 20.1             | 0          | 6                  | 20           | 7                                       |

×スピン4モデル  
×降着率2モデル

②時系列情報の追加あり：シミュレーションデータに100 $t_g$ 前後の時刻の運動光度と放射光度を入力値として追加

| 時刻( $t_g$ ) | 入力                 |                  |                       |                       |                       |                       | 出力         |                    |              |   |
|-------------|--------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|--------------------|--------------|---|
|             | $L_{\text{kin}}$   | $L_{\text{rad}}$ | $L_{\text{kin},-100}$ | $L_{\text{kin},+100}$ | $L_{\text{rad},-100}$ | $L_{\text{rad},+100}$ | スピン( $a$ ) | 質量降着率( $\dot{m}$ ) | 磁束( $\phi$ ) | MADパラメータ( $\tilde{\phi}_{\text{MAD}}$ ) |
| 5000        | 11                 | 1                | 10                    | 12                    | 0                     | 2                     | 0          | 1                  | 3            | 1.5                                     |
| 5010        | 11.1               | 1.1              | 10.1                  | 12.1                  | 0.1                   | 2.1                   | 0          | 2                  | 8            | 2                                       |
| ...         | 追加入力値(100 $t_g$ 前) |                  |                       |                       |                       |                       | ...        | ...                | ...          | ...                                     |
| 5200        | 13                 | 3                | 12                    | 14                    | 2                     | 4                     | 0          | 1                  | 5            | 2                                       |
| ...         | 追加入力値(100 $t_g$ 後) |                  |                       |                       |                       |                       | ...        | ...                | ...          | ...                                     |
| 5300        | 14                 | 4                | 13                    | 15                    | 3                     | 5                     | 0          | 3                  | 5            | 1                                       |
| ...         | 追加入力値(100 $t_g$ 前) |                  |                       |                       |                       |                       | ...        | ...                | ...          | ...                                     |
| 5400        | 15                 | 5                | 14                    | 16                    | 4                     | 6                     | 0          | 6                  | 20           | 7                                       |
| ...         | 追加入力値(100 $t_g$ 後) |                  |                       |                       |                       |                       | ...        | ...                | ...          | ...                                     |
| 14000       | 101                | 91               | 100                   | 102                   | 90                    | 92                    | 0          | 3                  | 6            | 2                                       |

×スピン4モデル  
×降着率2モデル

## 学習・評価方法について

(手順1) 学習

|      | 入力               |                  | 出力  |       |     |          |
|------|------------------|------------------|-----|-------|-----|----------|
|      | $L_{\text{kin}}$ | $L_{\text{rad}}$ | スピン | 質量降着率 | 磁束  | MADパラメータ |
| 5000 | 0.3              | 0.1              | 0   | 1     | 3   | 1.5      |
| 5010 | 0.6              | 0.4              | 0   | 2     | 8   | 2        |
| 5020 | 1                | 1.3              | 0   | 2.5   | 10  | 2        |
| 5030 | 2                | 2                | 0   | 5     | 12  | 1.2      |
| 5040 | 5                | 2.5              | 0   | 10    | 16  | 0.8      |
| ...  | ...              | ...              | ... | ...   | ... | ...      |

学習

機械学習モデル

(手順2) 推定

|      | 入力               |                  | 出力  |       |     |          |
|------|------------------|------------------|-----|-------|-----|----------|
|      | $L_{\text{kin}}$ | $L_{\text{rad}}$ | スピン | 質量降着率 | 磁束  | MADパラメータ |
| 5000 | 0.3              | 0.1              | 0   | 1     | 3   | 1.5      |
| 5010 | 0.6              | 0.4              | 0   | 2     | 8   | 2        |
| 5020 | 1                | 1.3              | 0   | 2.5   | 10  | 2        |
| 5030 | 2                | 2                | 0   | 5     | 12  | 1.2      |
| 5040 | 5                | 2.5              | 0   | 10    | 16  | 0.8      |
| ...  | ...              | ...              | ... | ...   | ... | ...      |

推定

機械学習モデル

| 推定値   |    |          |
|-------|----|----------|
| 質量降着率 | 磁束 | MADパラメータ |
| 4     | 13 | 1.1      |
| 9     | 17 | 1        |
| 2     | 3  | 4        |

(手順3) 評価

|      | 入力               |                  | 出力    |     |          |  |
|------|------------------|------------------|-------|-----|----------|--|
|      | $L_{\text{kin}}$ | $L_{\text{rad}}$ | 質量降着率 | 磁束  | MADパラメータ |  |
| 5000 | 0.3              | 0.1              | 1     | 3   | 1.5      |  |
| 5010 | 0.6              | 0.4              | 2     | 8   | 2        |  |
| 5020 | 1                | 1.3              | 2.5   | 10  | 2        |  |
| 5030 | 2                | 2                | 5     | 12  | 1.2      |  |
| 5040 | 5                | 2.5              | 10    | 16  | 0.8      |  |
| ...  | ...              | ...              | ...   | ... | ...      |  |

正解値

比較して  
評価

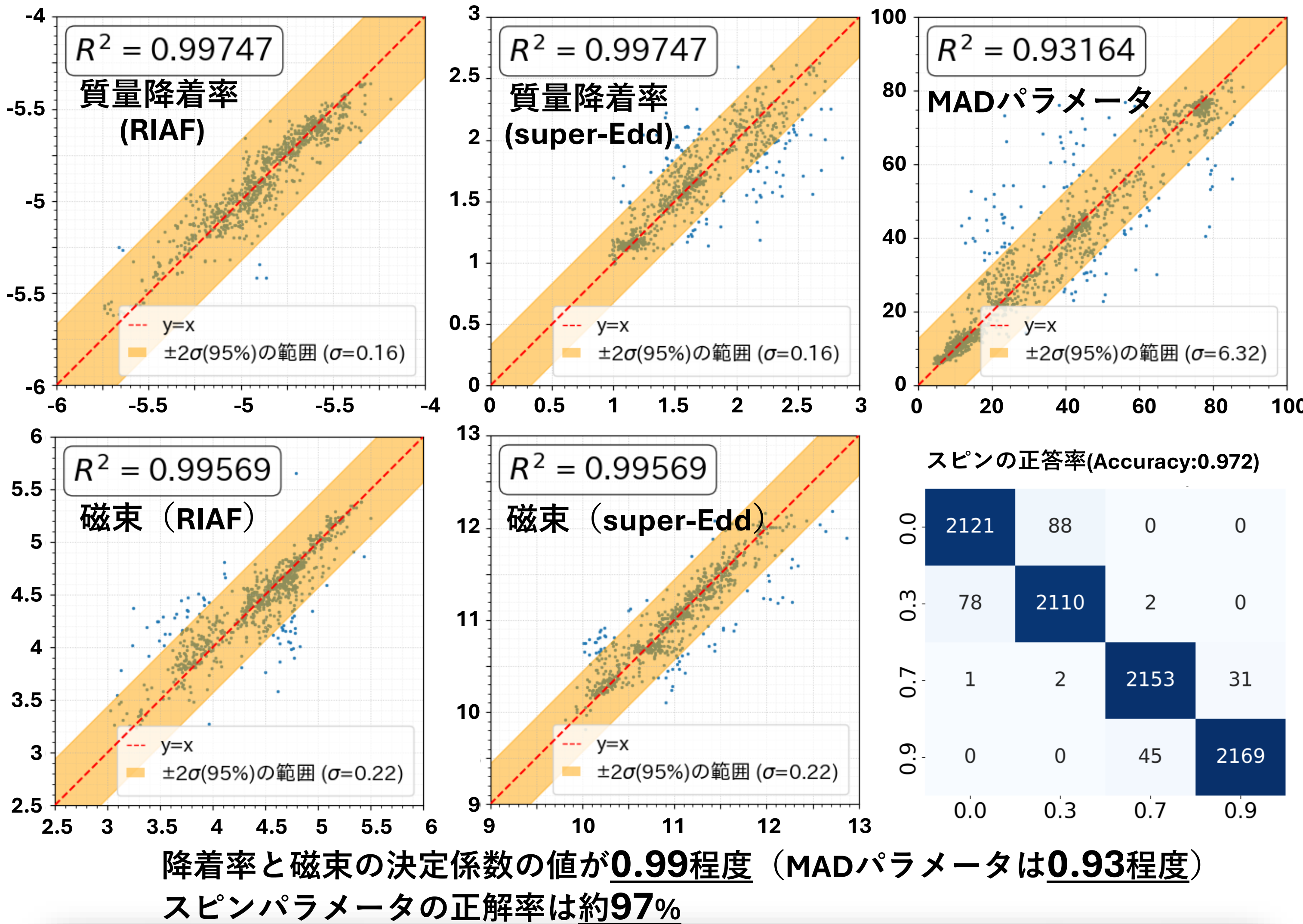
機械学習モデル

推定

| 推定値   |    |          |
|-------|----|----------|
| 質量降着率 | 磁束 | MADパラメータ |
| 4     | 13 | 1.1      |
| 9     | 17 | 1        |
| 2     | 3  | 4        |

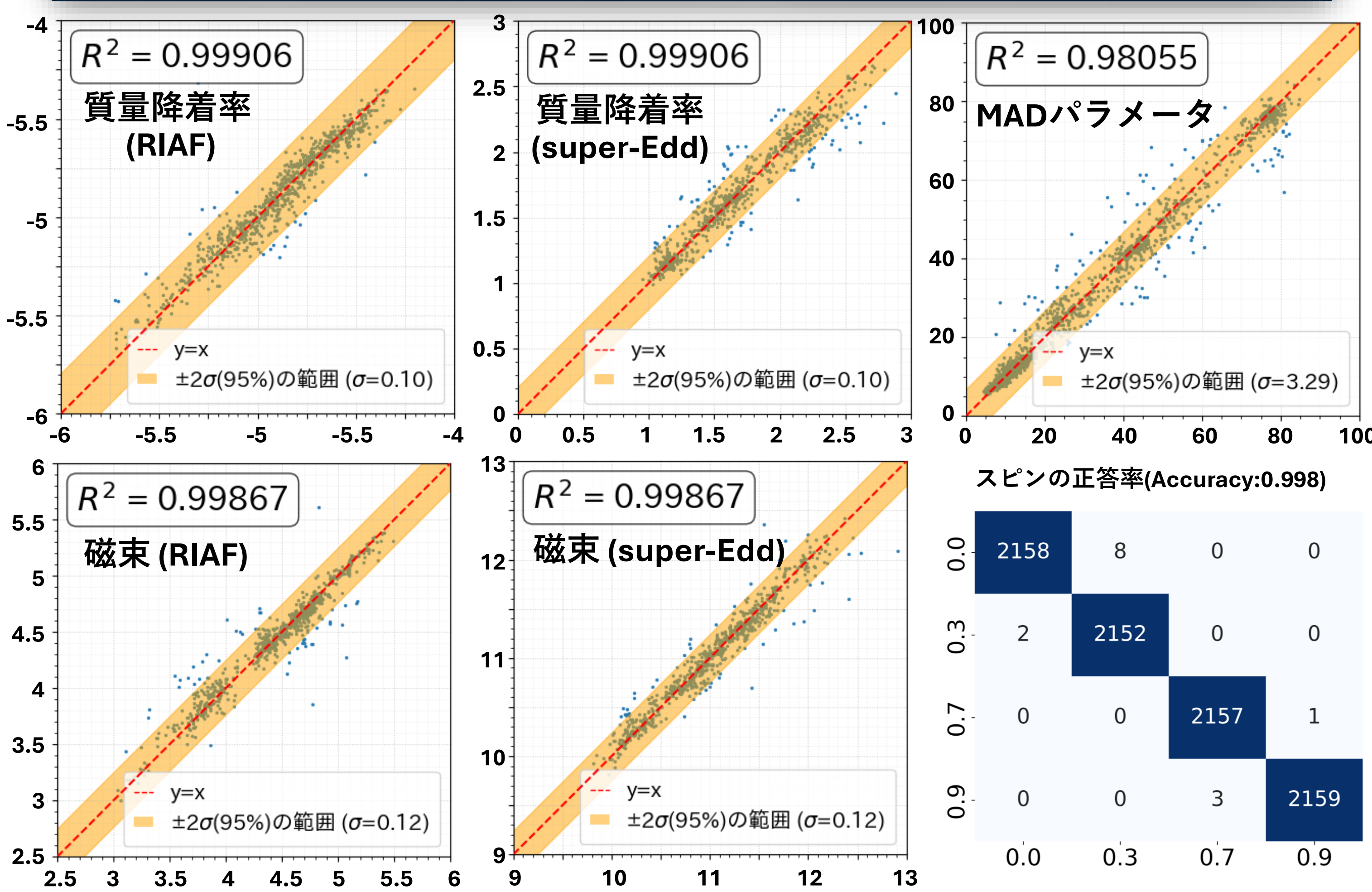
## <結果①> 時系列情報の追加無し

推定結果 (横軸：正解値，縦軸：推定値)



降着率と磁束の決定係数の値が**0.99程度** (MADパラメータは**0.93程度**)  
スピンパラメータの正解率は約**97%**

## <結果②> 時系列情報の追加あり (→①に比べて大幅に改善)



結果①と比較すると，**MADパラメータの決定係数の値が上昇，0.93→0.98**  
**スピンパラメータの正解率が上昇，97.2%→99.8%**

## 結論と今後の展望

天体の運動光度と放射光度を入力とし，質量降着率・磁束・MADパラメータ・スピンを推定する機械学習モデルを構築した。テストの結果，決定係数は0.99程度，スピンの正解率は99.8%を記録した。本手法が有効であるといえる。今後は，教師データのデータ分布を均一にすることでより精度の高いモデルへと発展させ，観測データに適用できるようにノイズを入れた学習を実施する。

総サンプル数：7200(900スナップショット×8モデル)のうち80%を学習に，20%を評価に使用

評価指標：決定係数 ( $R^2 = 1 - \frac{\sum_i (\text{正解値}_i - \text{予測値}_i)^2}{\sum_i (\text{正解値}_i - \text{正解値の平均値})^2}$ ),  $\pm 2\sigma$  ( $\sigma$ : 標準偏差)に  
1に近いほど良い  
含まれるデータの割合, Accuracy (= (正解した数) / (すべての数))

本研究では，決定木による機械学習手法の1つであるLightGBMを用いた。