



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

ホームページ



松藤勇希¹, 朝比奈雄太^{1,2}, 大須賀健¹, 芳岡尚悟^{1,3}, 高橋博之²

1: 筑波大学, 2: 駒澤大学, 3: 京都大学

E-mail: matsufuji@ccs.tsukuba.ac.jp

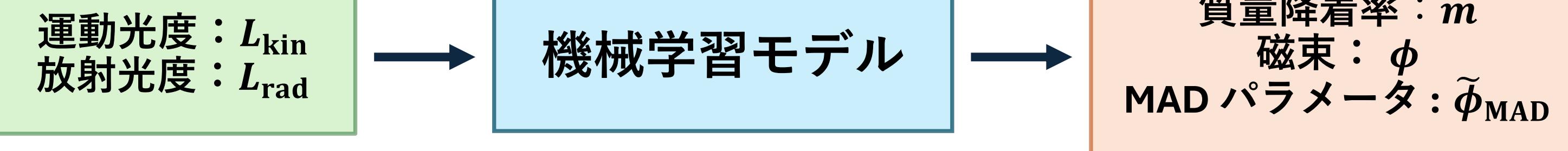
概要

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を、天体の運動光度及び放射光度の時系列データ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0.9前後を達成する有力な手法である。

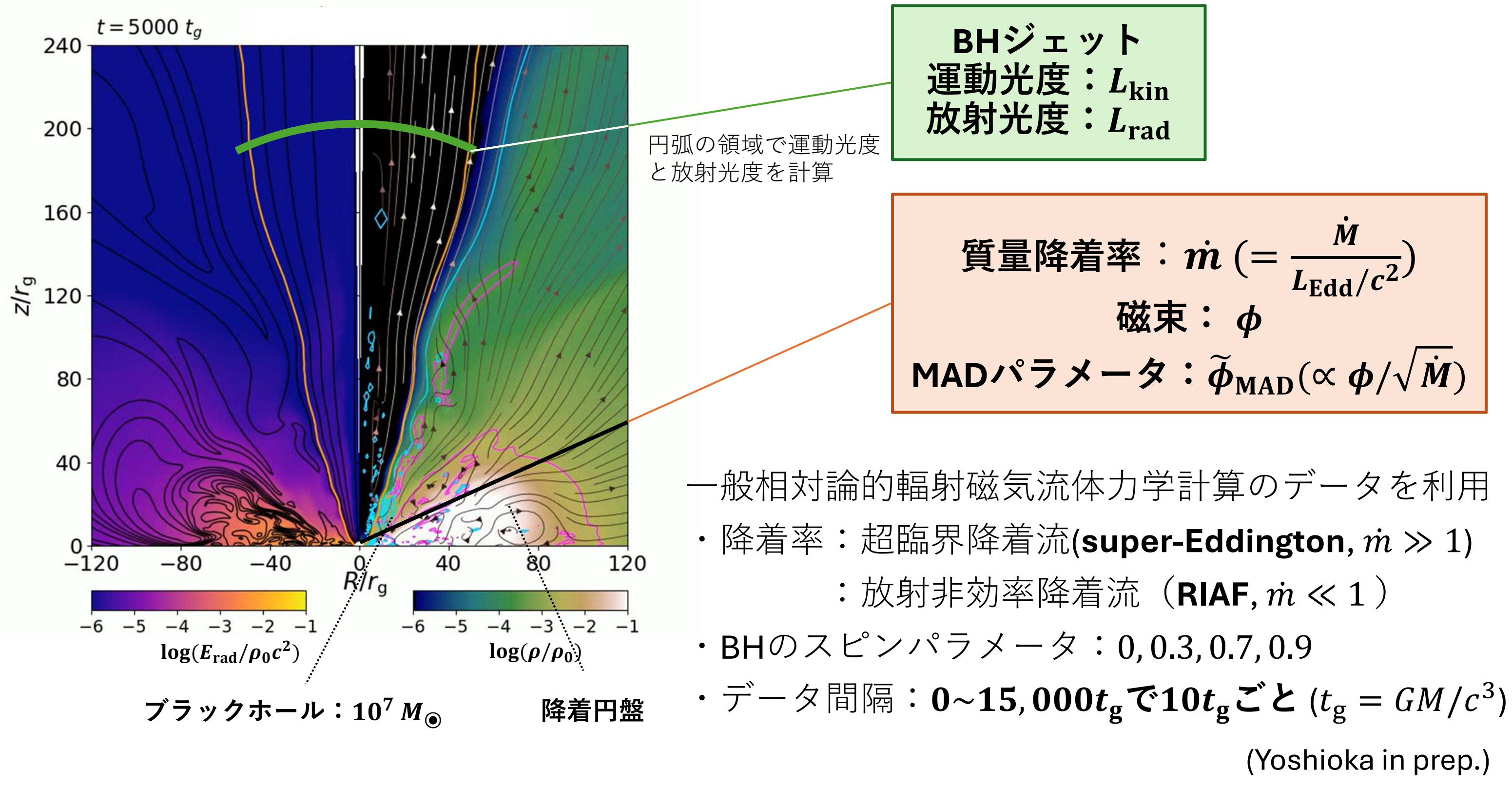
1. 背景と目的

銀河の進化にも影響を及ぼすと考えられるBHジェットを理解するには、BHの質量降着率や磁束、MADパラメータなどBH近傍の物理量の推定が不可欠である。

MADパラメータとは、磁束を質量降着率で規格化した量のこと、ジェットのエネルギー変換効率と強く相関すると報告されている。しかし、これらは直接観測できないため、その推定には不定性が残っている。そこで本研究では、一般相対論的磁気流体シミュレーションデータを用い、直接観測することが難しいBHの質量降着率、磁束、MADパラメータを、比較的容易に観測可能な天体の放射光度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。



2. シミュレーションデータについて



3. 手法 & 入力値の追加

時刻 (t_g)	入力値						出力値		
	L_{kin}	L_{rad}	$L_{\text{kin},-100t_g}$	$L_{\text{kin},-200t_g}$	$L_{\text{rad},-100t_g}$	$L_{\text{rad},-200t_g}$	\dot{m}	ϕ	$\tilde{\phi}_{\text{MAD}}$
...
5800	10	1	8	6	2	2	3	6	2
...
5900	13	3	10	8	1	2	3	7	2
...
6000	16	6	13	10	3	1	4	7	3
...

本研究では、決定木ベースの機械学習手法の1つであるLightGBMを用いた。

入力値として100tg前の光度 $L_{\text{kin},-100t_g}$, $L_{\text{rad},-100t_g}$ と200tg前の光度 $L_{\text{kin},-200t_g}$, $L_{\text{rad},-200t_g}$ を追加した場合(上表)としてない場合で結果を比較する。

全データの80%を学習データとして交差検証法 (k=10) を実施し、20%を評価データとした。評価指標には決定係数を用いた。

$$\text{決定係数: } R^2 = 1 - \frac{\sum_i (\text{正解値}_i - \text{予測値}_i)^2}{\sum_i (\text{正解値}_i - \text{正解値の平均値})^2}$$

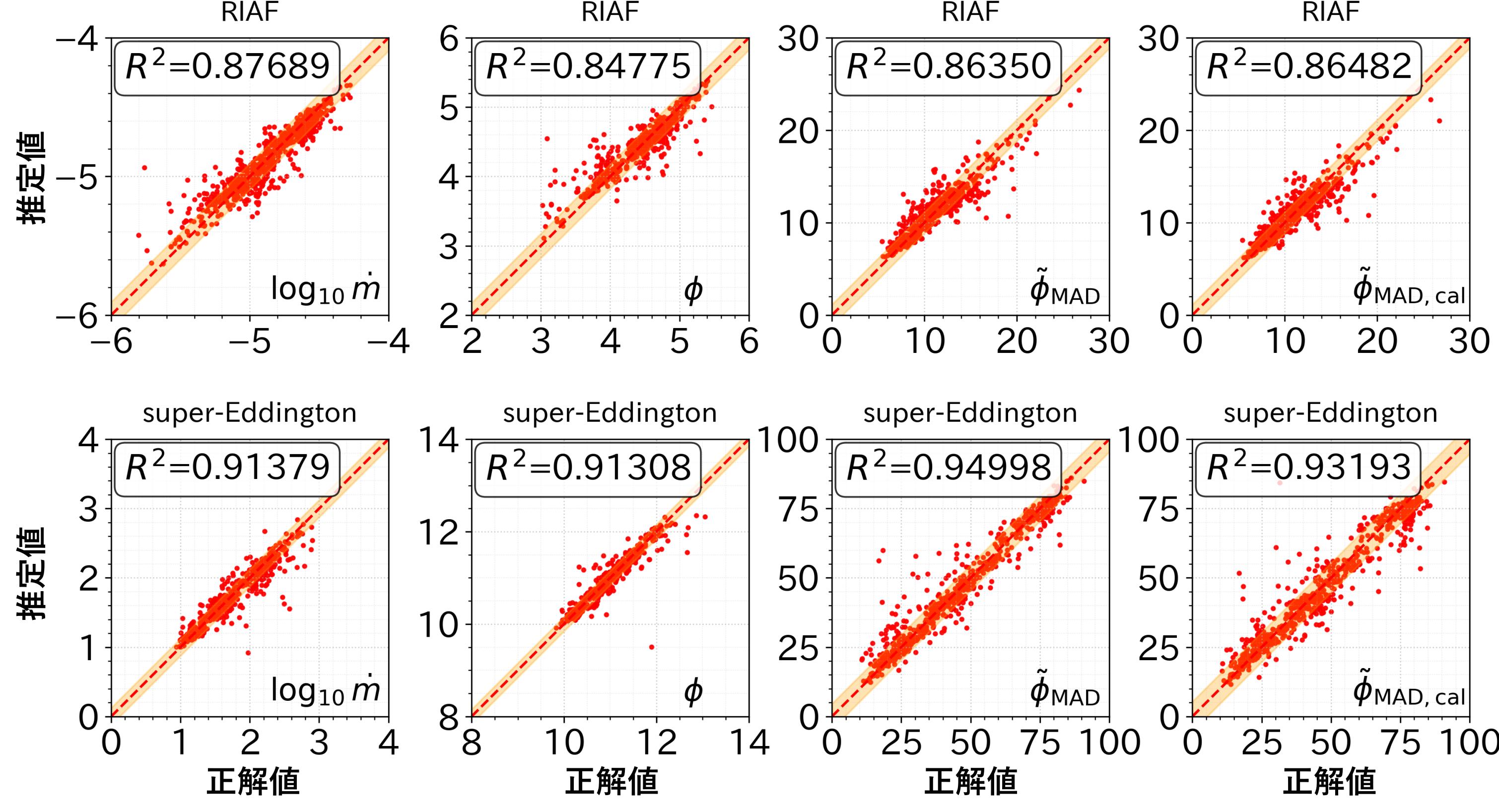
1に近いほど良い

まとめ

天体の運動光度と放射光度の時系列データを入力とし、質量降着率・磁束・MADパラメータを推定する機械学習モデルを構築した。評価した結果、決定係数は0.9前後を記録した。よって本手法が有効であるといえる。今後、観測データに適用していくために、広範なパラメータ空間をもつシミュレーションデータを用いて学習することで汎化性能を向上させたり、ノイズを入れた学習をしていく。

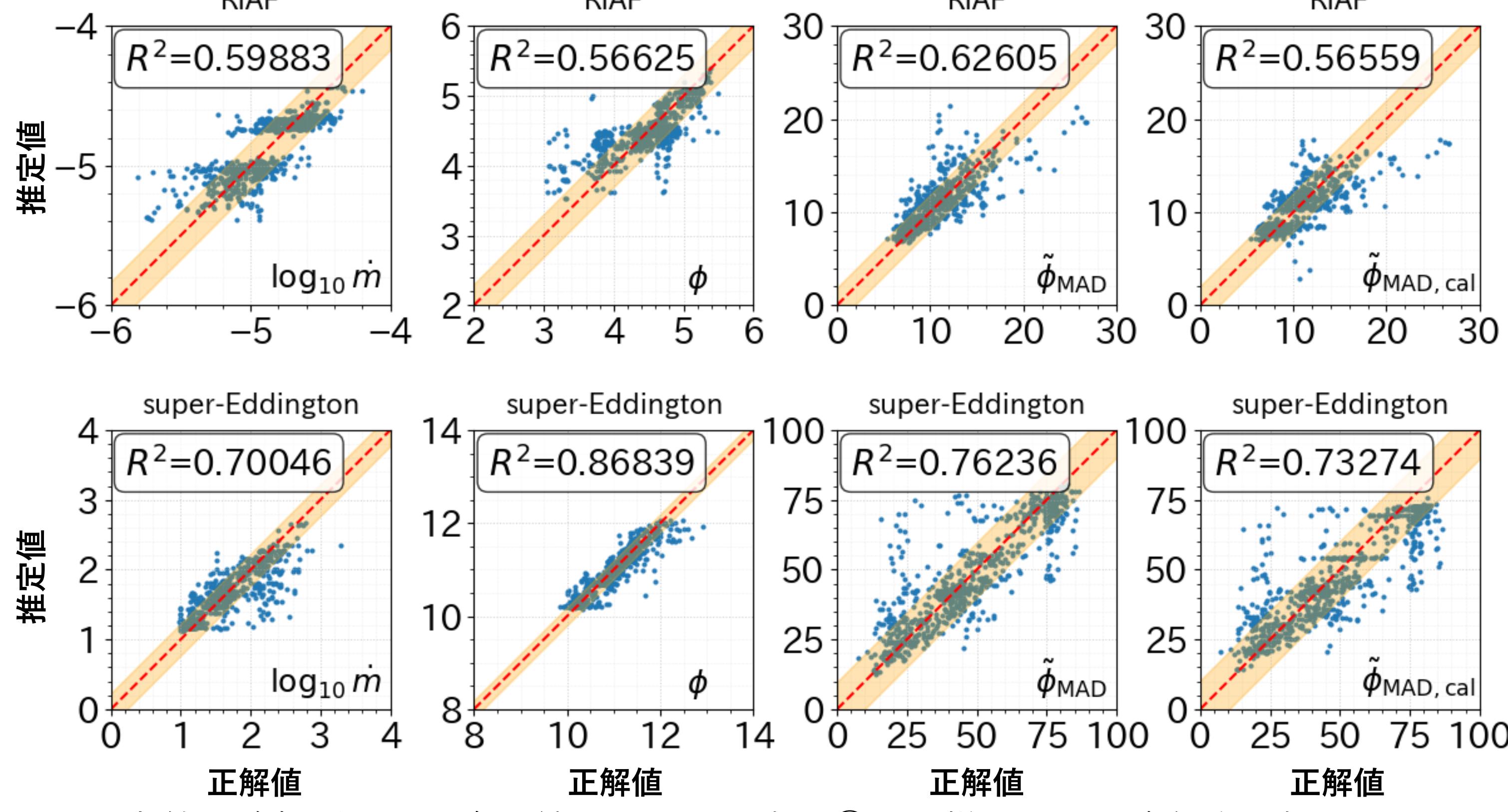
4. 推定結果

①入力値の追加あり ($L_{\text{kin},-100t_g}$, $L_{\text{rad},-100t_g}$, $L_{\text{kin},-200t_g}$, $L_{\text{rad},-200t_g}$ を追加)



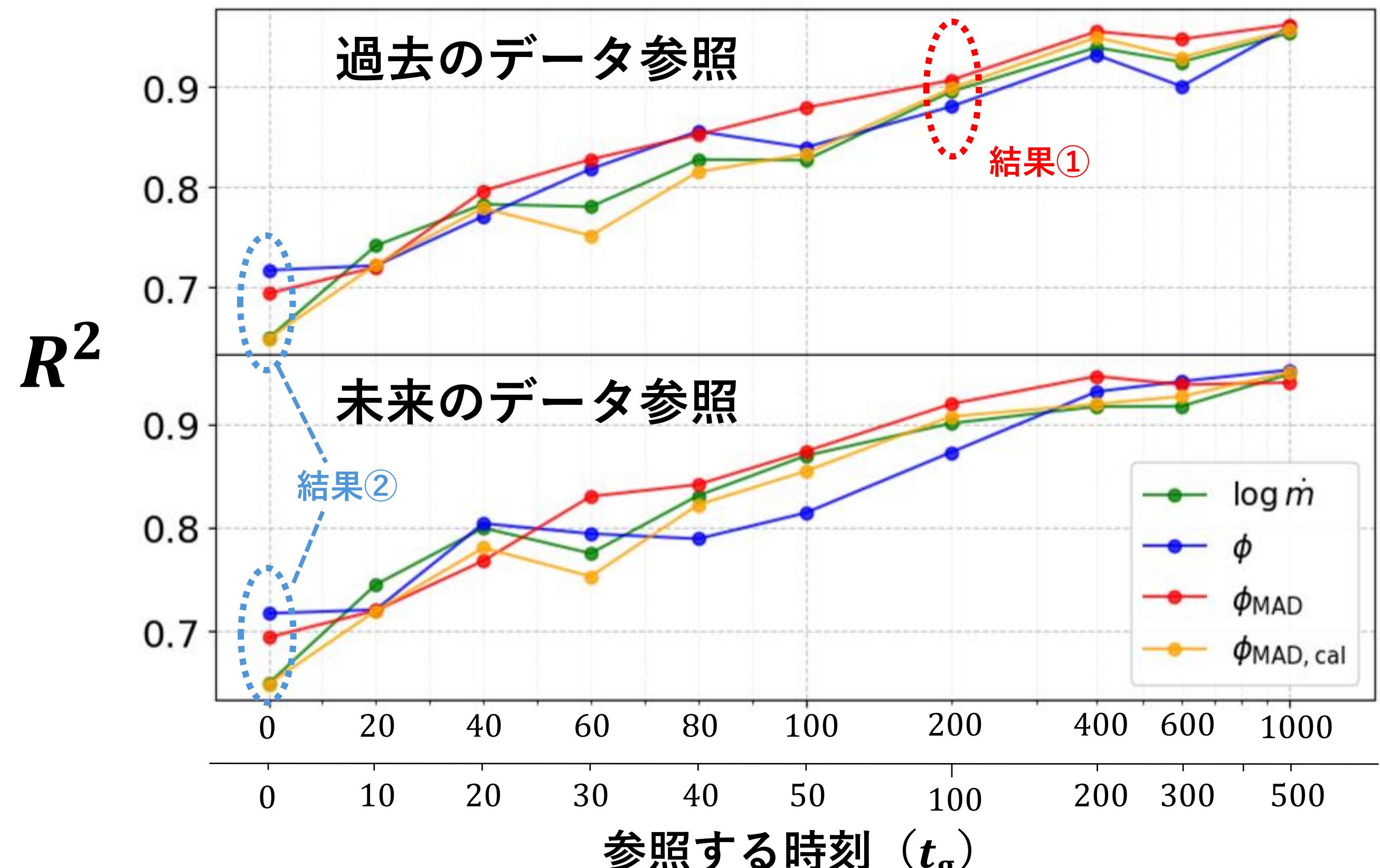
図は横軸: 正解値、縦軸: 推定値でプロットしたもので、赤破線は推定値と正解値が等しい線を示し、オレンジの帯は残差の標準偏差を表す。左から、質量降着率・磁束・MADパラメータ・推定した質量降着率と磁束から計算したMADパラメータを示し、上段がRIAF、下段がsuper-Eddingtonである。決定係数は高い値を示す ($R^2 \approx 0.8 \sim 0.9$)、良好に推定できていることが分かる。

②入力値の追加無し (L_{kin} , L_{rad} のみ)



入力値の追加がない場合の結果、図の見方は①と同様、ある程度傾向は捉えることはできているものの、十分に学習をしきれていないためにうまく予測できていない部分があることが分かる ($R^2 \approx 0.8 \sim 0.9 \rightarrow 0.6 \sim 0.7$)。

5. 議論



図は、入力値に追加する光度の参照時刻を横軸(線形領域と対数領域があることに注意)に、決定係数の値を縦軸にプロットしたものである。上段は過去の光度を追加した場合で下段は未来の光度を追加した場合である。例えば、下段の100tg(50tg)の点は50tgと100tg後の光度を入力値に追加したことを意味する。過去のデータを用いるにせよ、未来のデータを用いるにせよ、参照する時刻が200tg程度より大きくなると精度良く推定できる。ジェットの変動のタイムスケールより離れた時刻を参照することで、推定精度が良くなっている可能性がある。