

# 再帰的オートエンコーダによる クエーサーの可視光光度変化のモデル化と予測可能性

分類・検出・予測（工学）➡ 物理（理学）

東京工業大学大学院 理学院 河合研究室

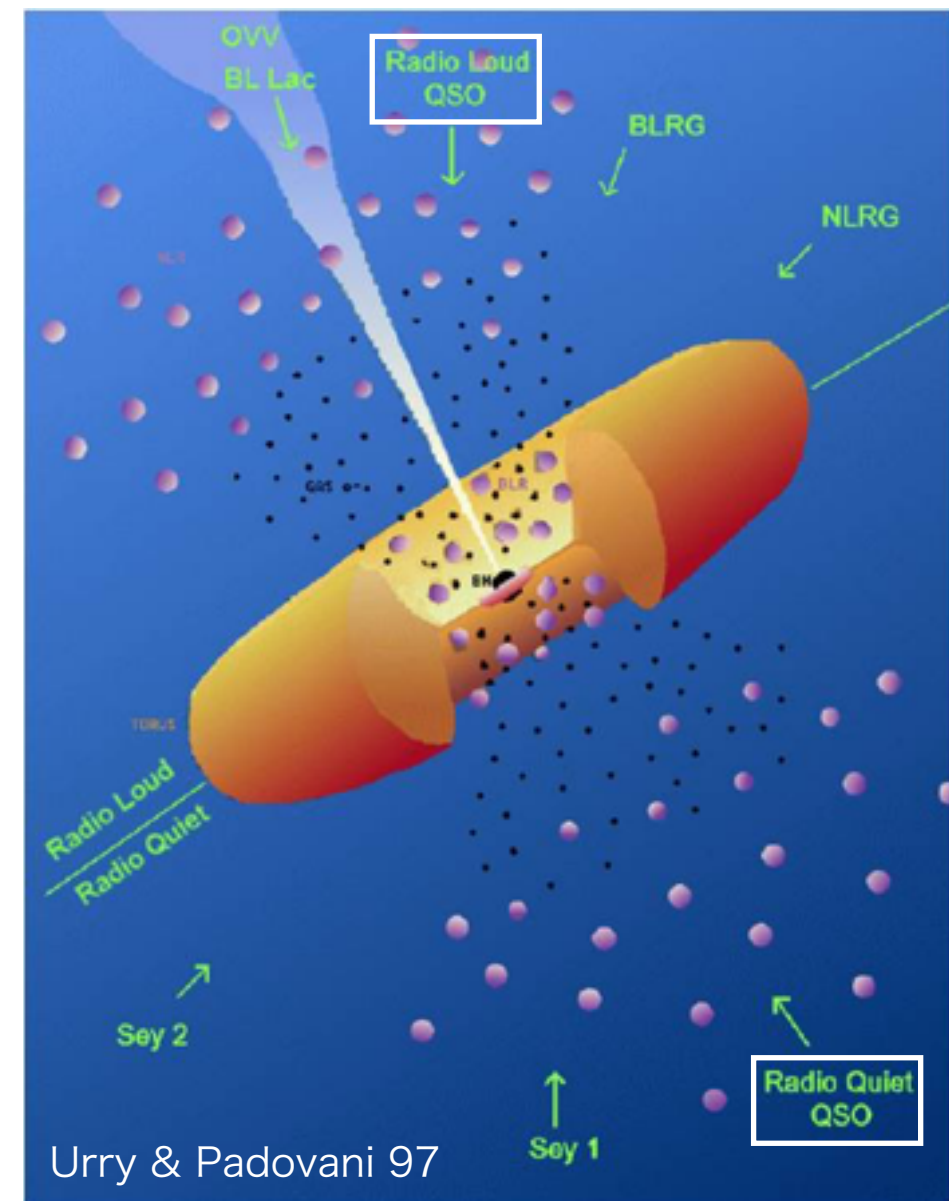
橘 優太郎

Matthew J. Graham(Caltech), 河合 誠之(東工大)

**非常に明るい** ( $>10^{46}$  erg/s) 活動銀河核のサブクラスで、しばしば**大きな光度変動**を有する。可視光領域の観測では、超巨大ブラックホール周辺の降着円盤を起源とする多温度黒体輻射が支配的であると考えられている。

- ・ 活動銀河核: 銀河中心の非常にコンパクトな銀河全体よりも明るく輝く領域
- ・ クエーサー: 活動銀河核のサブクラス
  - 広輝線領域
  - 質量( $M_{\text{BH}}$ ):  $10^6 - 10^{10} M_{\odot}$
  - 光度( $L_{\text{bol}}$ ):  $>10^{46}$  erg/s
  - 輝線に対して連続スペクトルが卓越
    - ← **降着円盤**の放射が卓越
  - 高い光度変動性
    - ← 円盤の状態に起因?  
e.g., Changing look quasar
  - **数万の候補天体と10年程度の光度曲線**

**降着円盤変動の研究に最適**

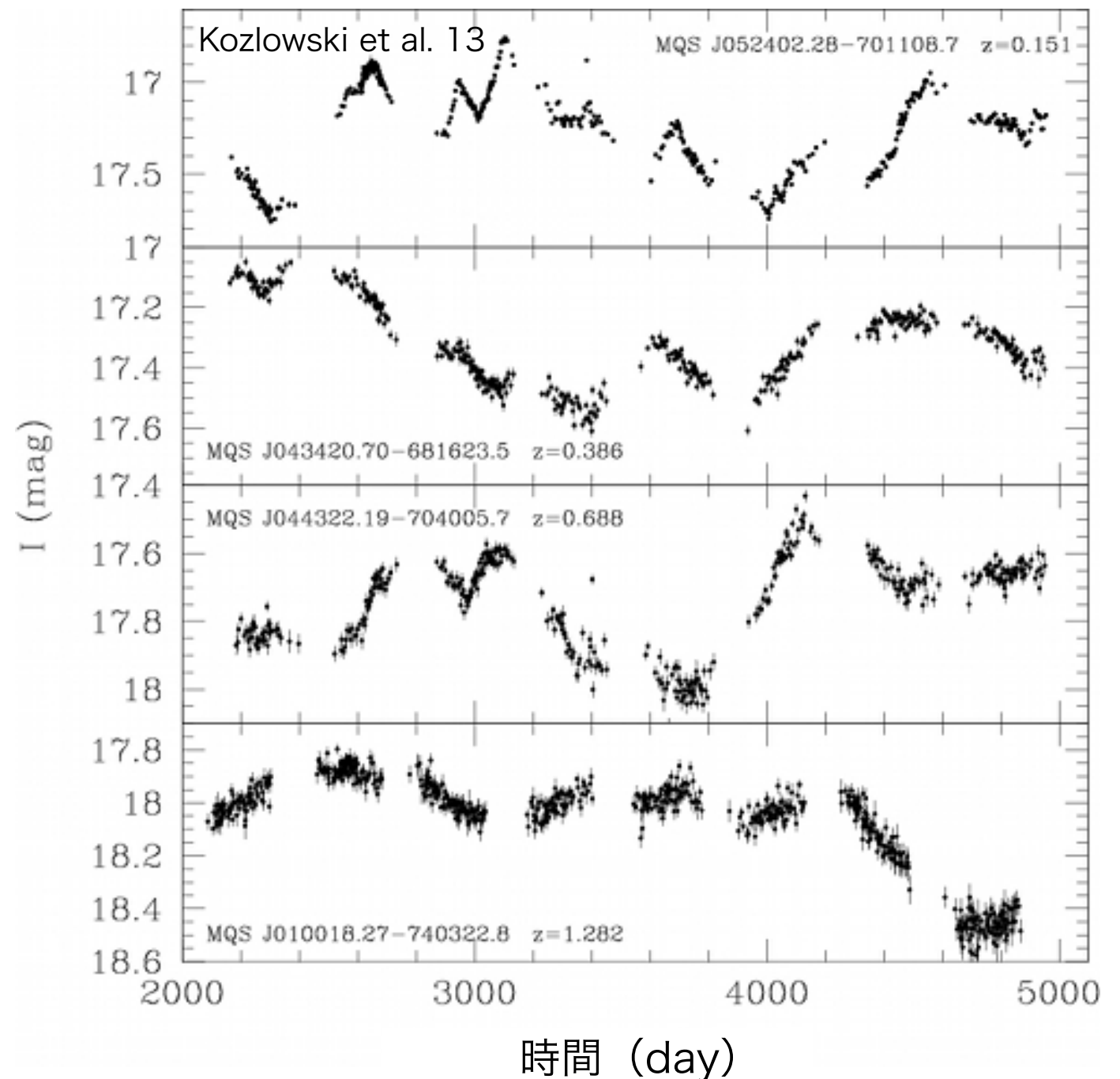
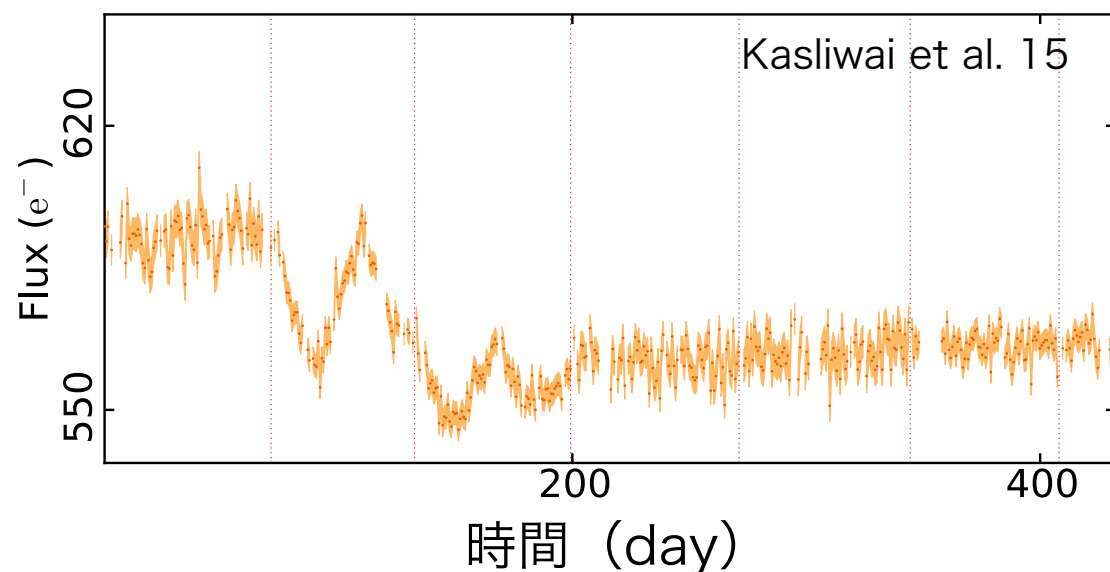


Urry & Padovani 97

数日から数十年の時間尺度での、**規則性が見られない**変動。放射起源は降着円盤であると考えられているが、その変動起源は未だ明らかにされていない。

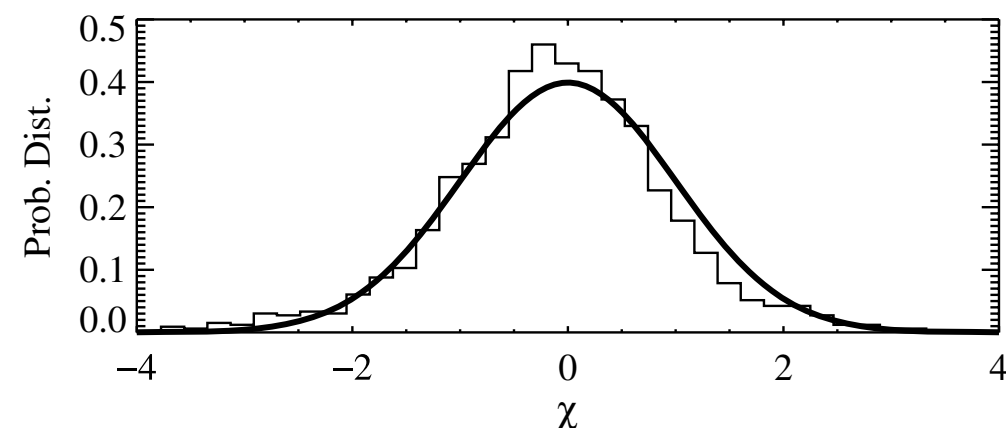
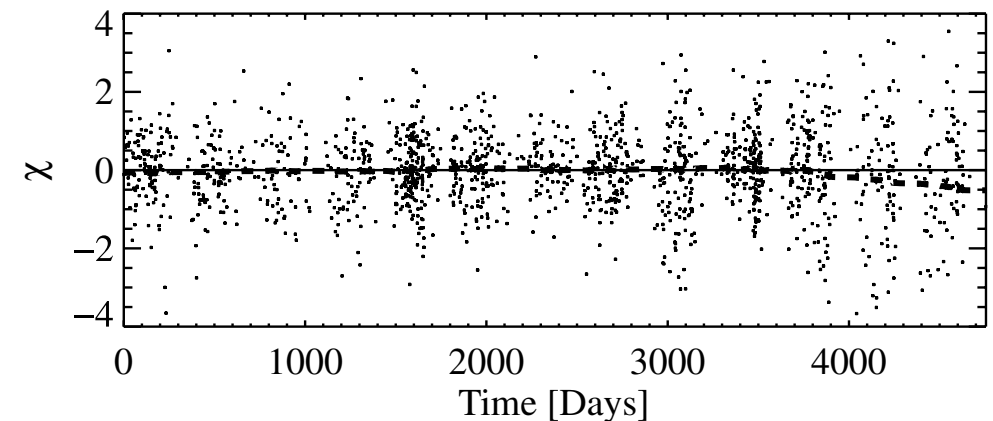
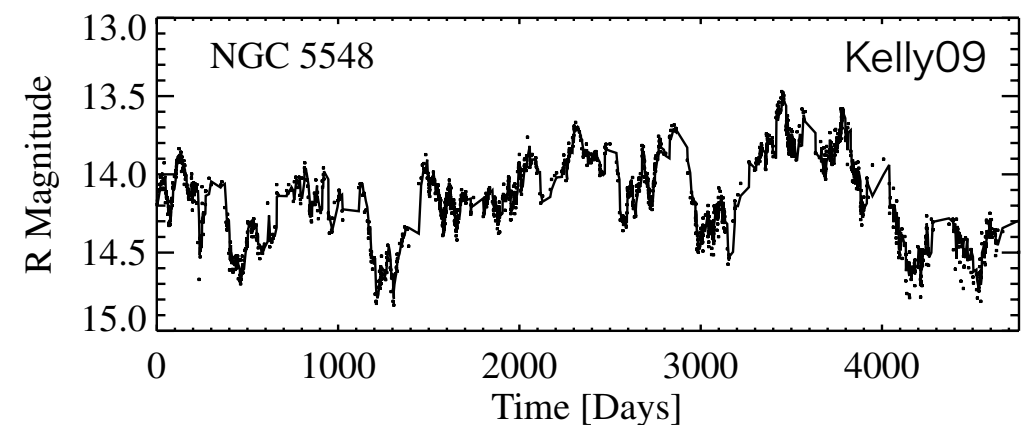
- ・ 光度と色の相関 (明るい→青い)
  - ← 温度が高い→光度が高い
- ・ 短波長で大きな変動
- ・ 不規則な変動 (Featureless PSD)
- ・ 変動幅と時間スケールの相関

← 酔歩的 and フラクタル的



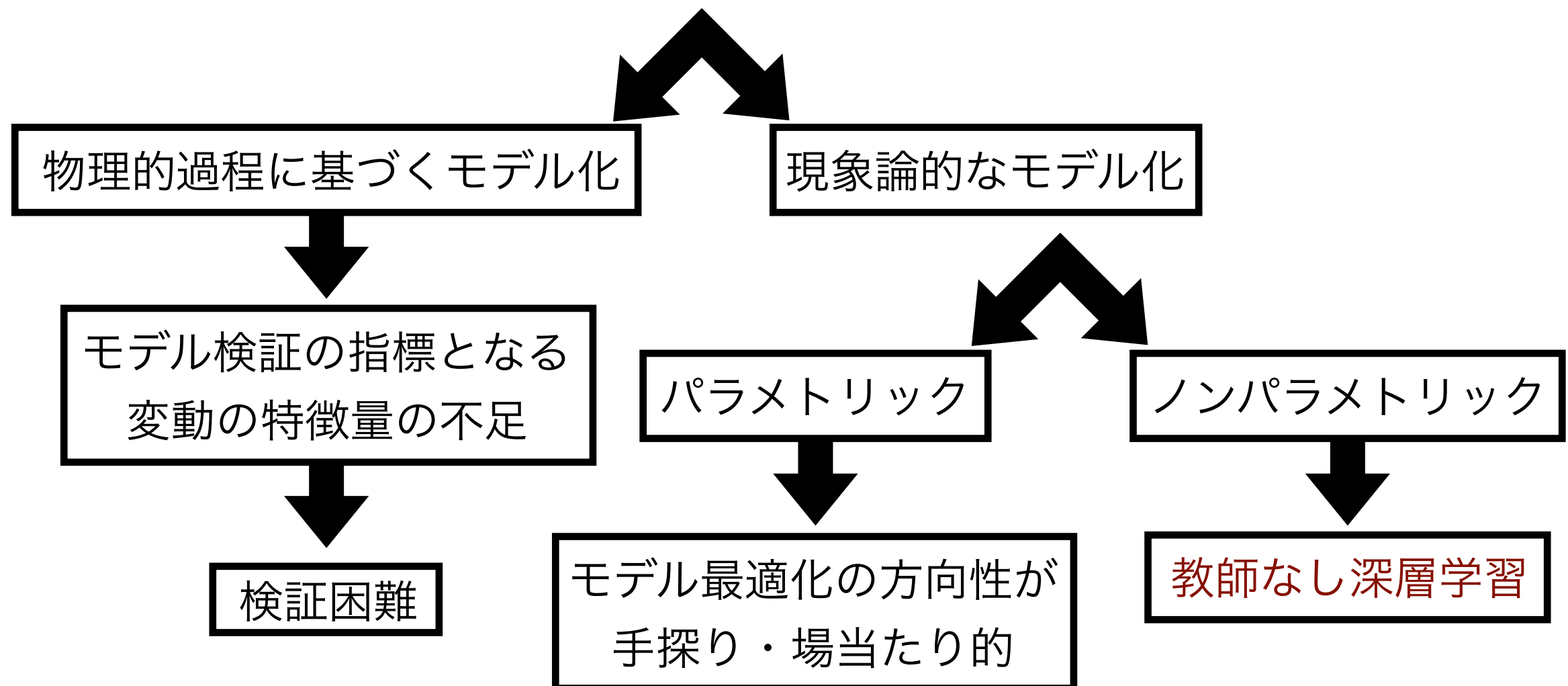
確率過程に基づく自己回帰モデルの一種。クエーサーの可視光光度変動をよく記述するモデルとして提案されて以来、本モデルを用いた種々の解析が行われているが、近年、その問題点が指摘された。

- Ornstein–Uhlenbeck (OU) process
  - クエーサーの光度変化をよく記述するモデル
$$\text{Var}(X(t + \Delta t) | X(t)) = \frac{\tau \sigma^2}{2} (1 - e^{-2\Delta t / \tau})$$
 $\tau$ : 減衰時定数,  $\sigma$ : 変動の大きさを表すパラメータ
  - クエーサーの平均パワースペクトルを近似
  - 降着円盤の確率的拡散方程式を近似 (Kelly09,11)
- OU process の問題点
  - $\tau$  の計算に  $\tau \times 10$  の長さの観測が必要
    - ← 現在までに求められた  $\tau$  は不正確 (Kozłowski17)
  - OU process 以外の過程も良く記述
    - ← OU process か否かの検定が困難 (Guo17)



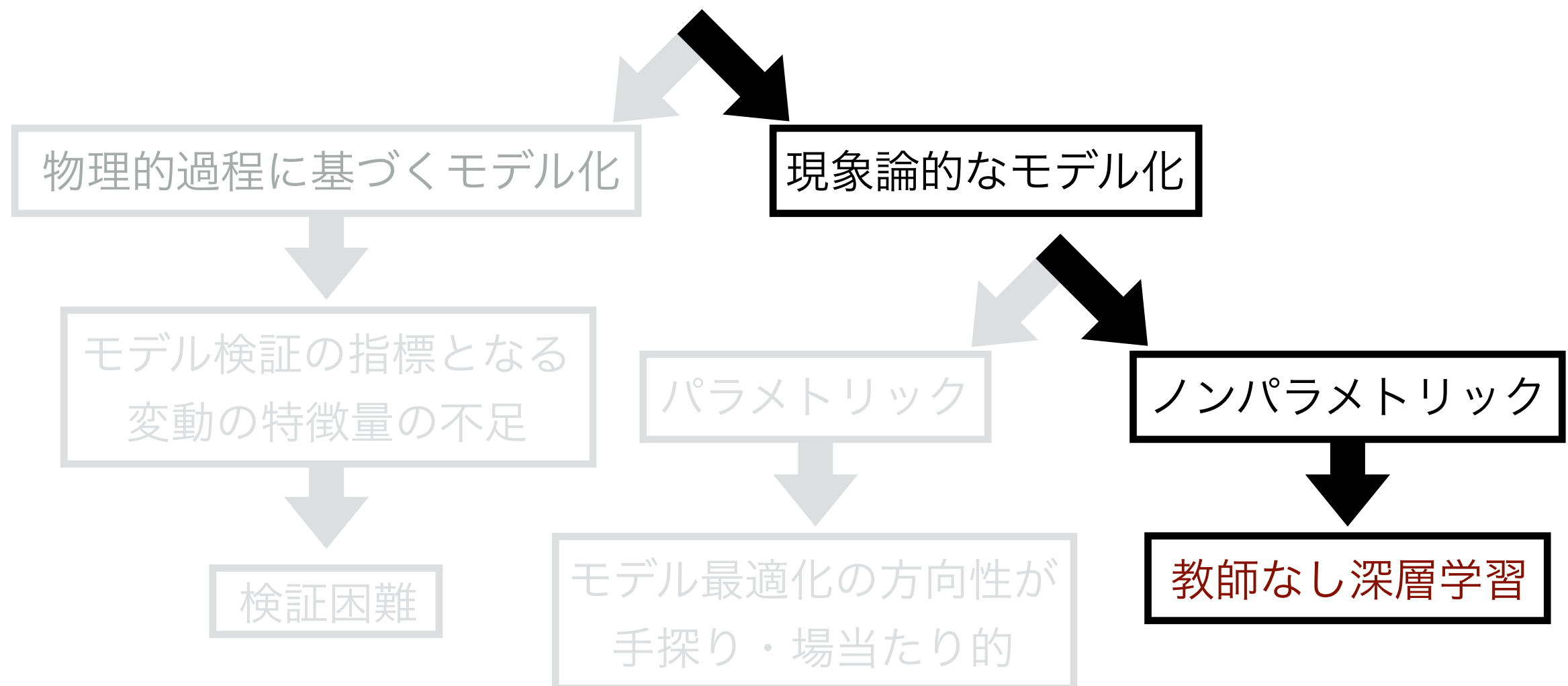
クエーサー光度変化の適切なモデル化は未だなされていない。そこで我々は、**ノンパラメトリック**な手法によるクエーサー光度変動の現象論的なモデル化を試み、さらにそこから新たな**物理的示唆**を得ることを目的とする。

- 既存のモデル（確率過程; Ornstein–Uhlenbeck過程）の問題点  
典型的な時定数が正確に決まらない → クエーサー光度変化の**パラメタライズが困難**  
何をパラメータとして考慮すべきか定かでない



クエーサー光度変化の適切なモデル化は未だなされていない。そこで我々は、**ノンパラメトリック**な手法によるクエーサー光度変動の現象論的なモデル化を試み、さらにそこから新たな**物理的示唆**を得ることを目的とする。

- 既存のモデル（確率過程; Ornstein–Uhlenbeck過程）の問題点  
典型的な時定数が正確に決まらない → クエーサー光度変化の**パラメタライズが困難**  
何をパラメータとして考慮すべきか定かでない

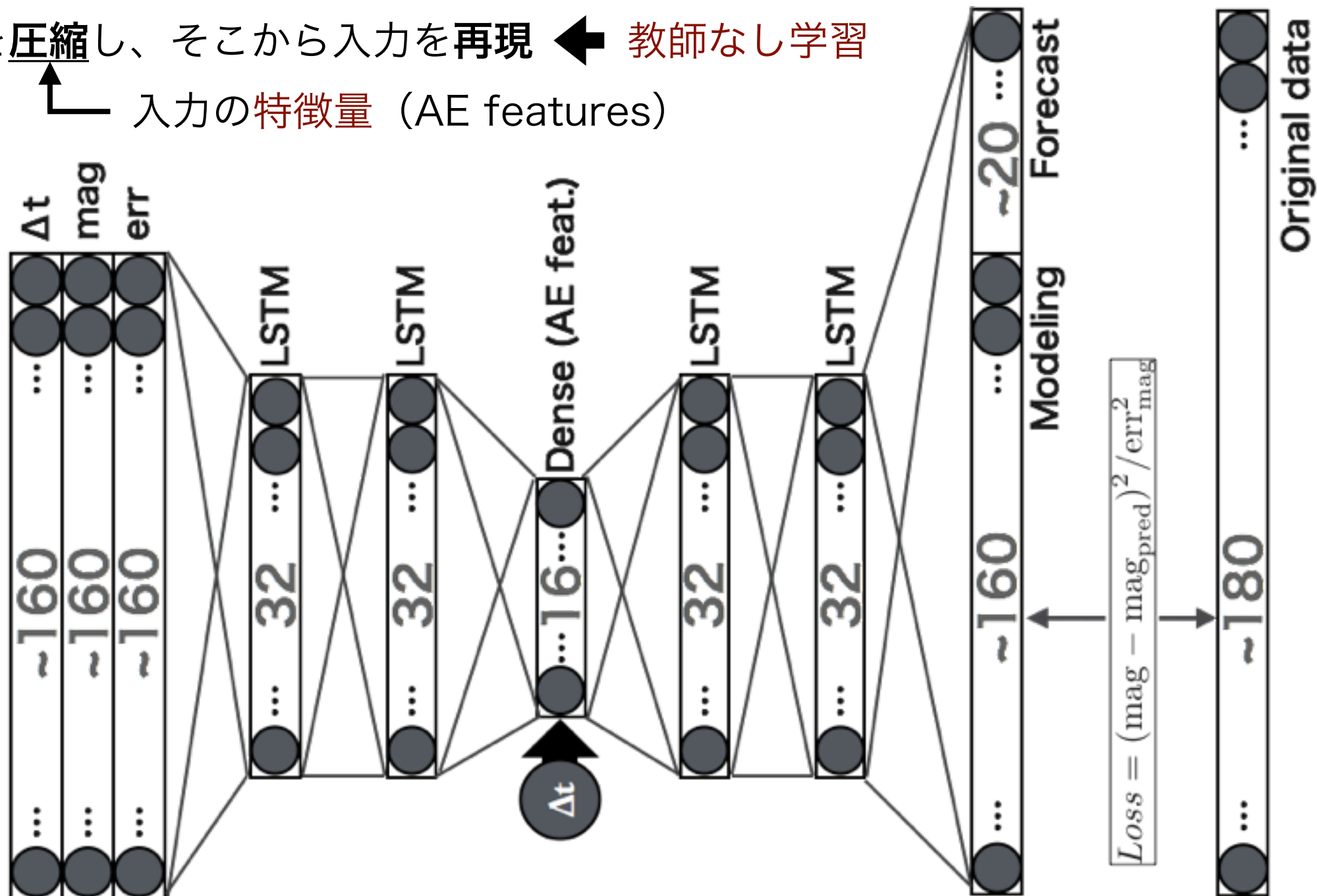




クエーサー光度変化のモデル化をノンパラメトリックに行うために、教師なし深層学習の一種である **Autoencoder** を用いる。

- Autoencoder (自己符号化器)

入力を圧縮し、そこから入力を再現 ← 教師なし学習  
↑  
入力の特徴量 (AE features)

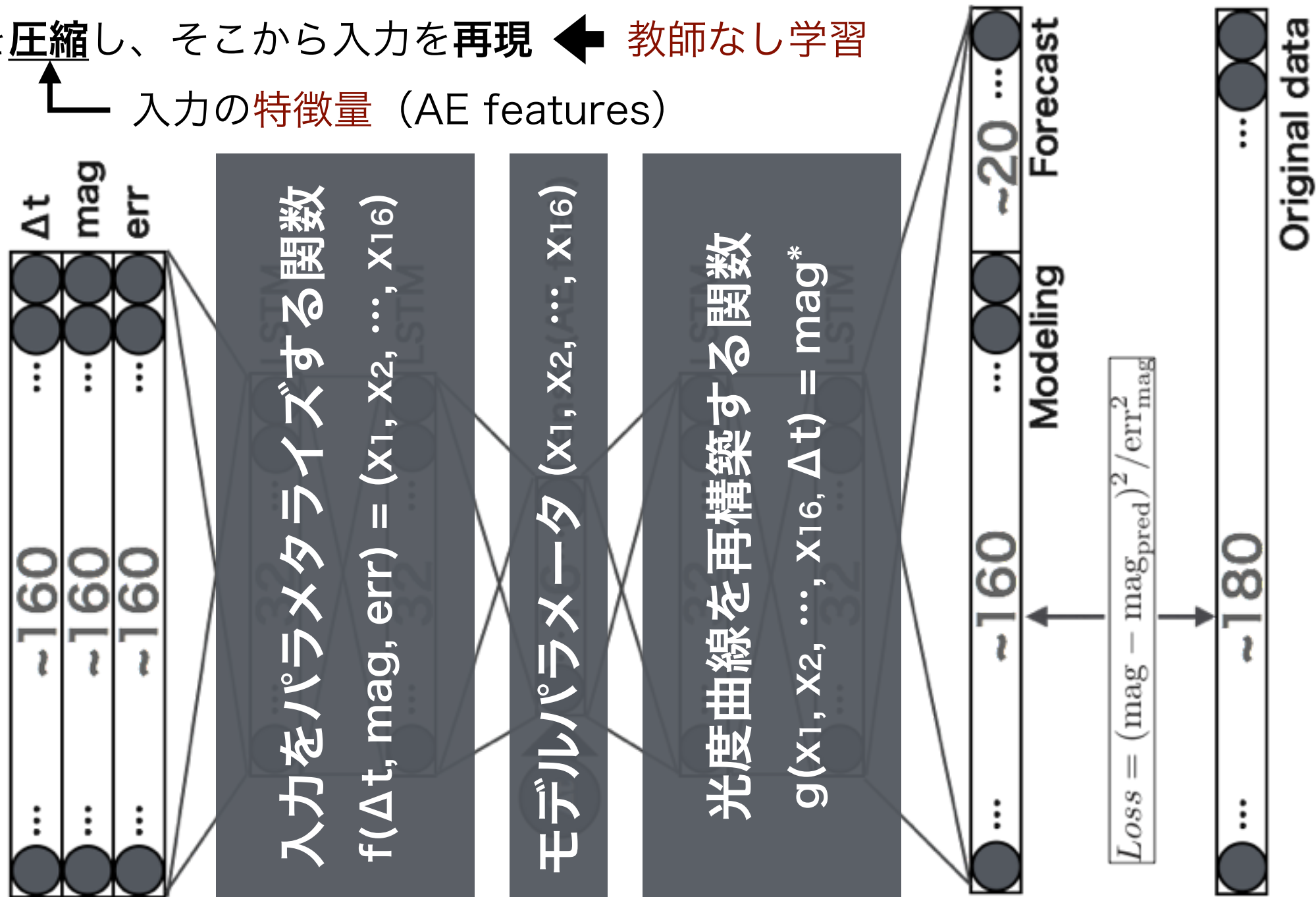


クエーサー光度変化のモデル化をノンパラメトリックに行うために、教師なし深層学習の一種である **Autoencoder** を用いる。

- Autoencoder (自己符号化器)

入力を圧縮し、そこから入力を再現 ← 教師なし学習

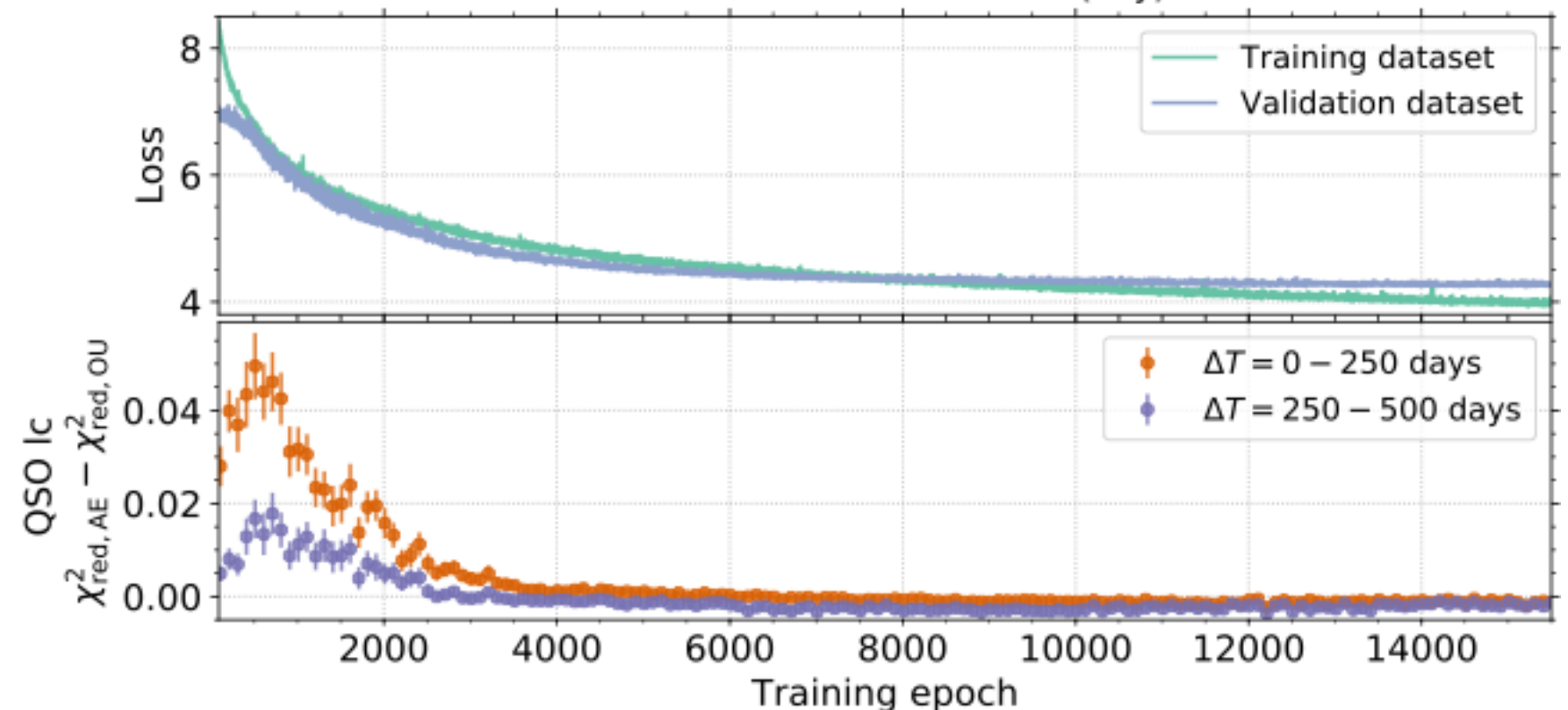
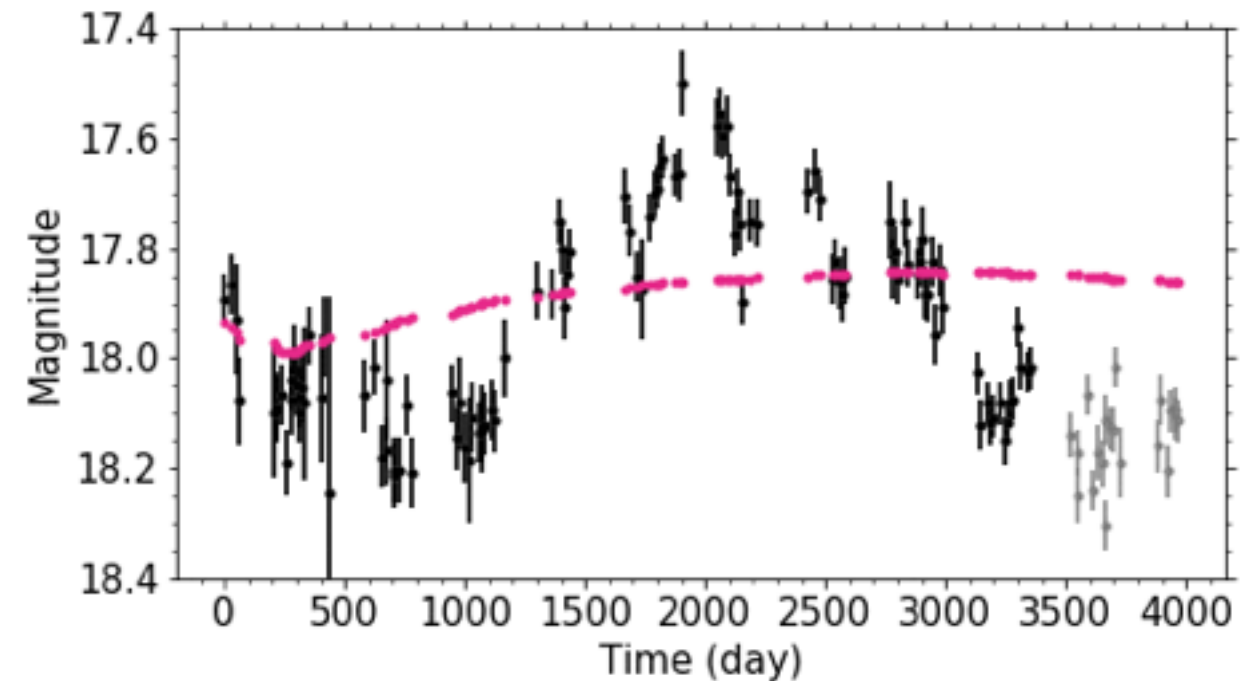
↑ 入力の特徴量 (AE features)



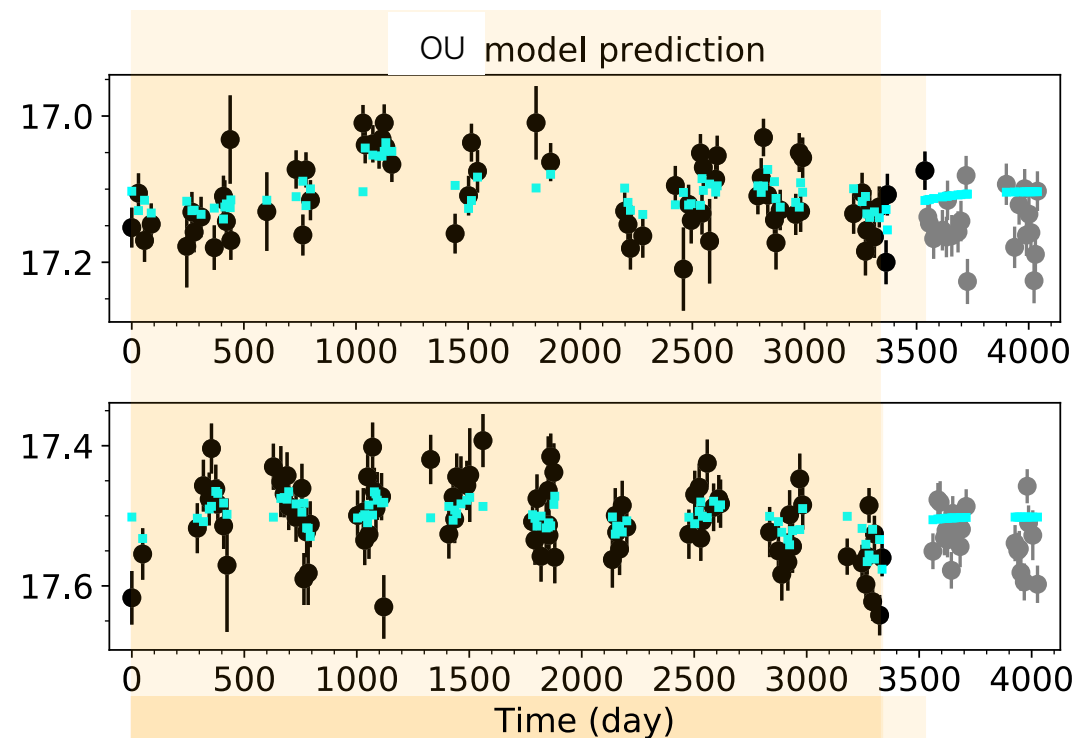
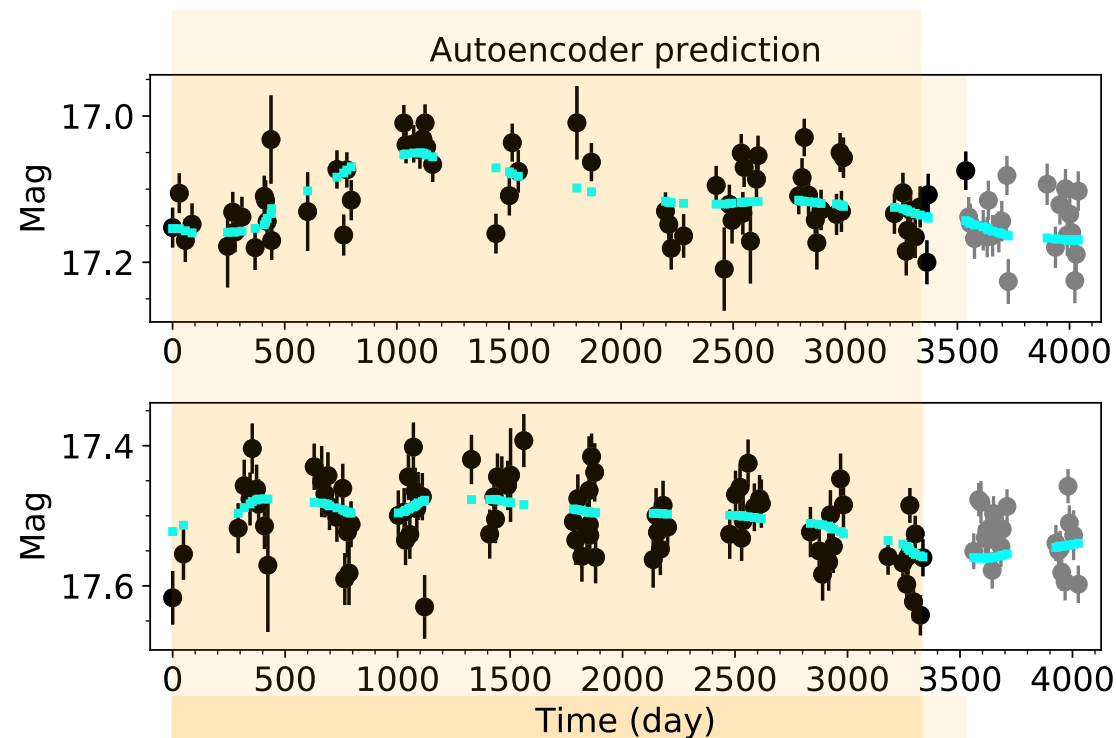


データセットの80%を学習に、残りの20%を検証に用いる。学習回数の増加につれて modeling part, forecasting part とともに Loss (Weighted Chi-square) が減少。

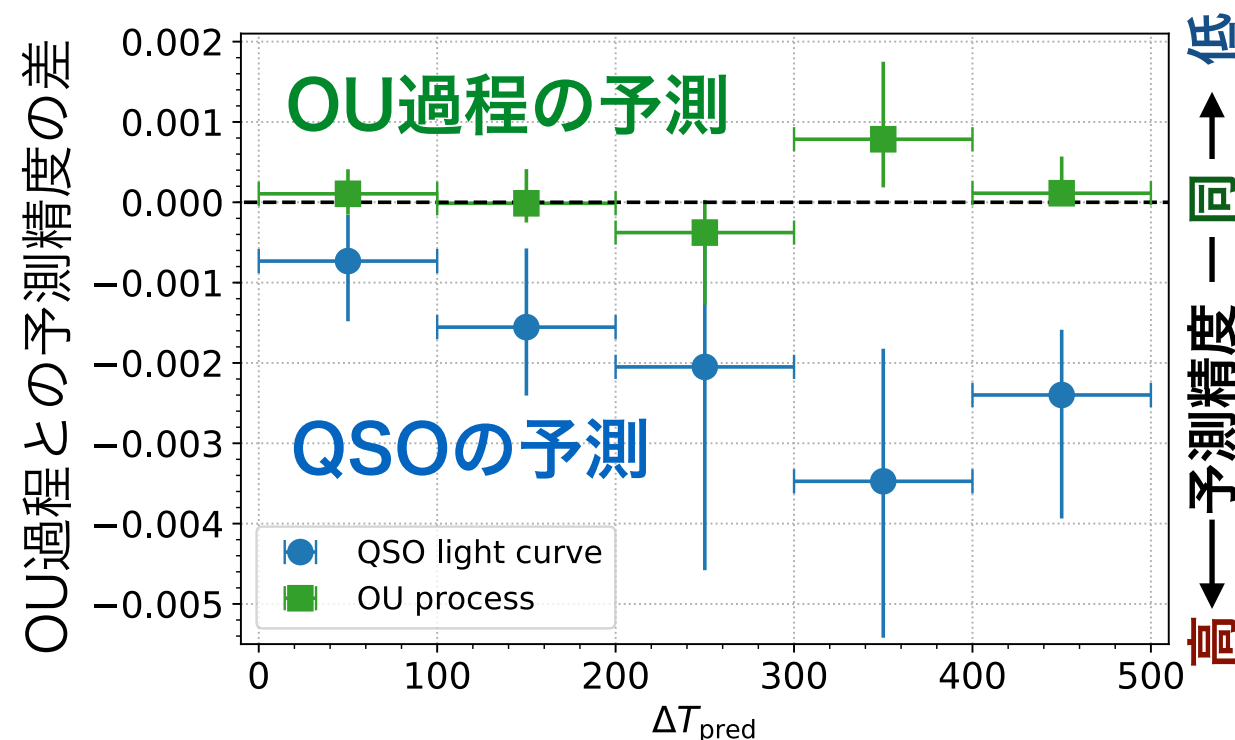
- ・ 学習データ: **12,350** 天体 (80%)
  - Modeling: 全長 – 500d
  - Forecasting: 500d
- ・ 検証データ: **3,088** 天体 (20%)
- ・ 学習: ~15,000 epochs
  - Batch size: 256
  - Optimizer: Adam
  - Learning rate: 1E-4
  - Dropout rate: 0.25
- ・ Modeling loss ↓
- ・ Forecast loss ↓



Autoencoder による光度曲線のモデル化は既存のモデルとは異なるが妥当であり、未来の変動の予測精度は既存のモデルより高い。



- モデル化  
OU processよりも滑らかな曲線  
← 学習データの統計誤差を反映
- 予測精度  
クエーサー: OU processよりも高い  
OU process: OU processと同等



Autoencoder によって抽出された特徴量は光度変動の本質的な情報を含んでいることが示唆された。ここから物理量に対する**情報量を抽出**するために、**決定係数を最大化**するように MLP の学習、最終的な**決定係数への寄与**を各特徴量の「**重要度**」と定義した。

抽出された特徴量と物理量の関係は非線形 → 多重回帰分析は不適

➡ Multilayer perceptron model を

決定係数 ( $R^2$ ) を最大とする学習

光度変動が持つ**情報量**

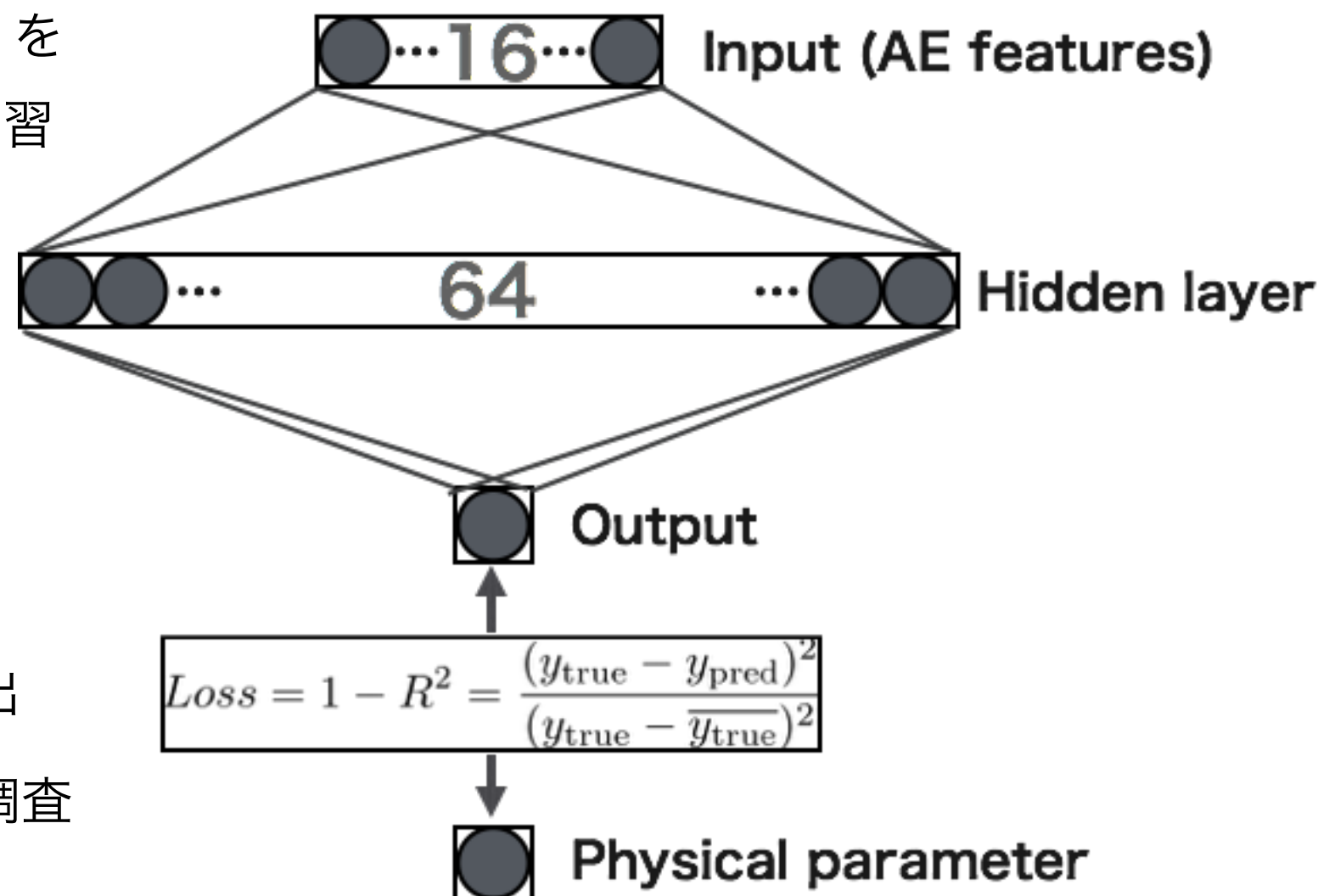
学習済みMLPを用いて

各特徴量の  $R^2$  への寄与を計算

➡ 物理量への**重要度**

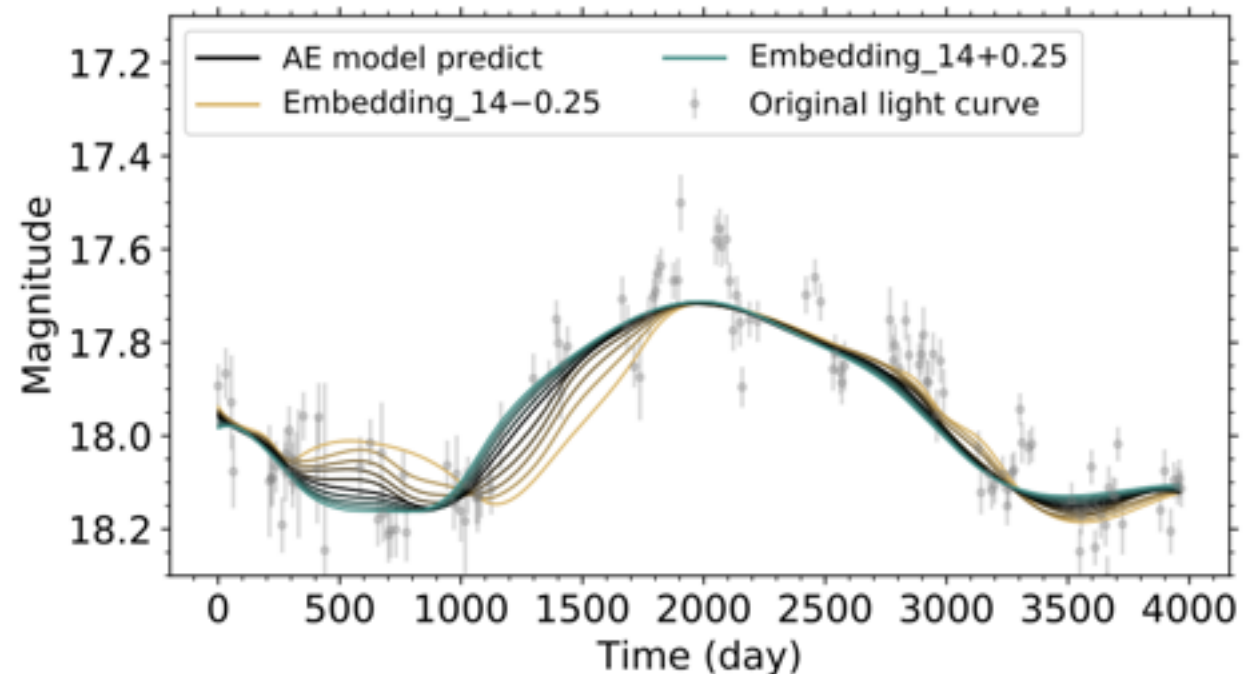
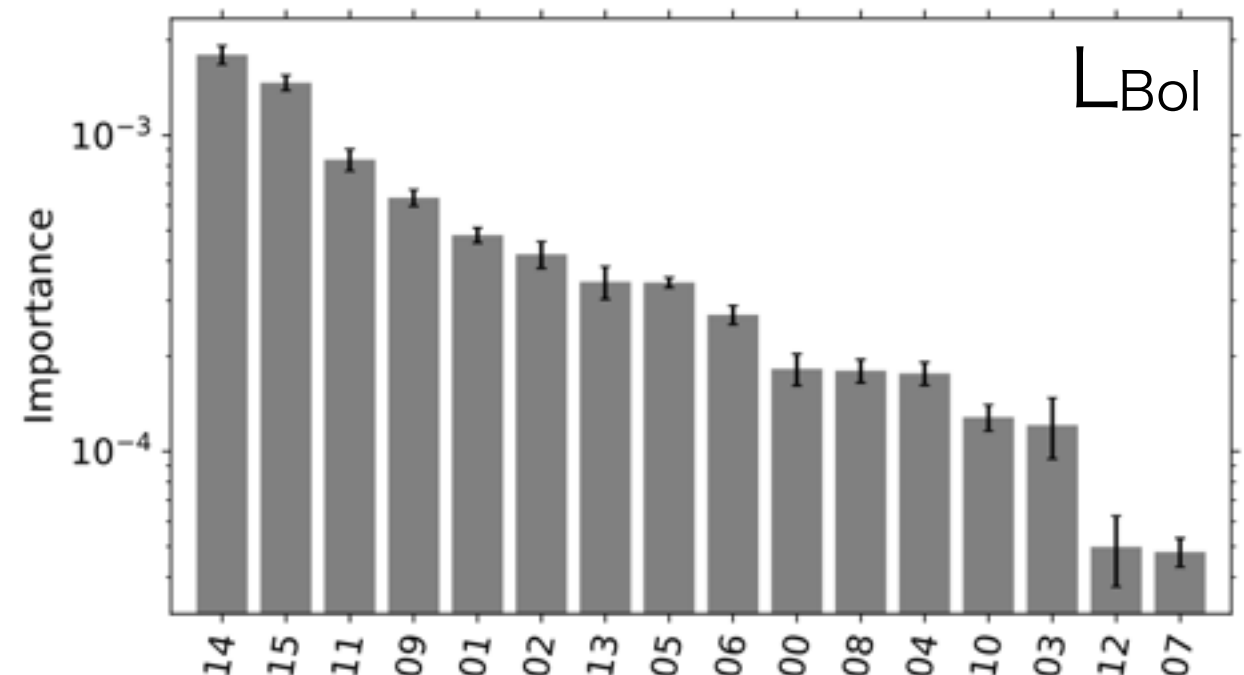
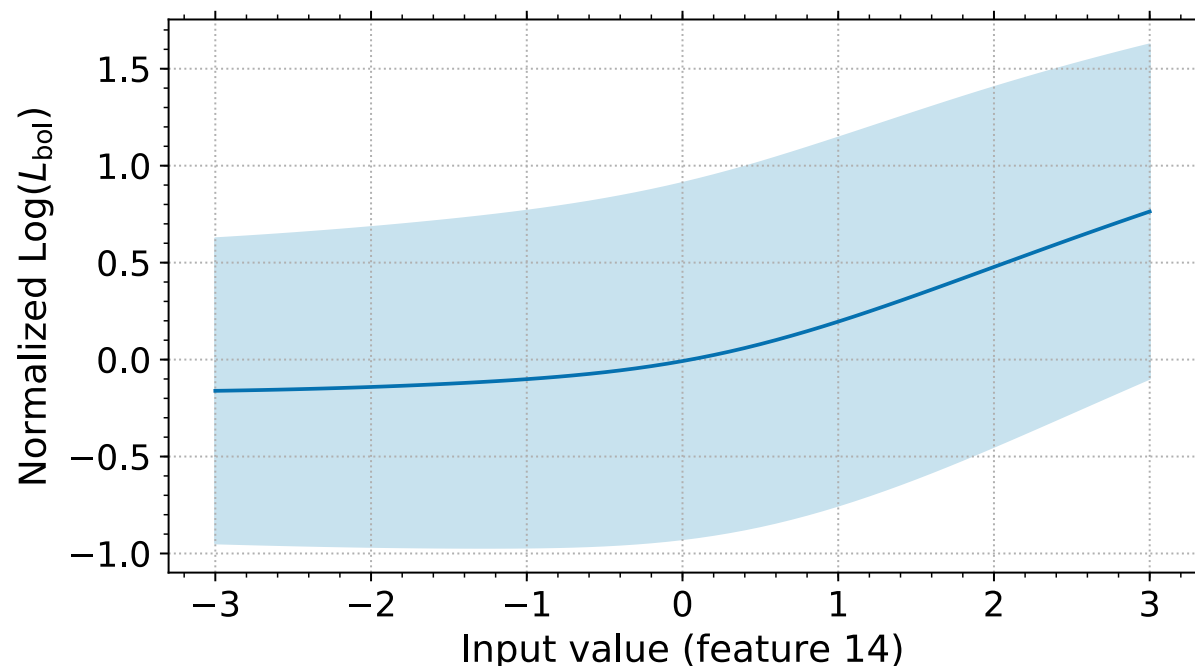
➡ 重要度が高い AE feature を抽出

➡ 光度変動と各物理量の関係性を調査



AE feature と**光度**の関係を調査した結果、光度変動の**非対称性**に関するAE featureの重要度が高いことがわかった。また、光度が高いほど対称性が高いことが示唆された。

- 光度と光度変動の関係性を調査
  - 赤方偏移と光度の相関を取り除くため  
赤方偏移もinputに付加
  - 重要度は赤方偏移からの $R^2$ の増分
  - ``feature 14``: **変動の対称性**と関係?
  - 光度  $\uparrow$   $\rightarrow$  変動の対称性  $\uparrow$**

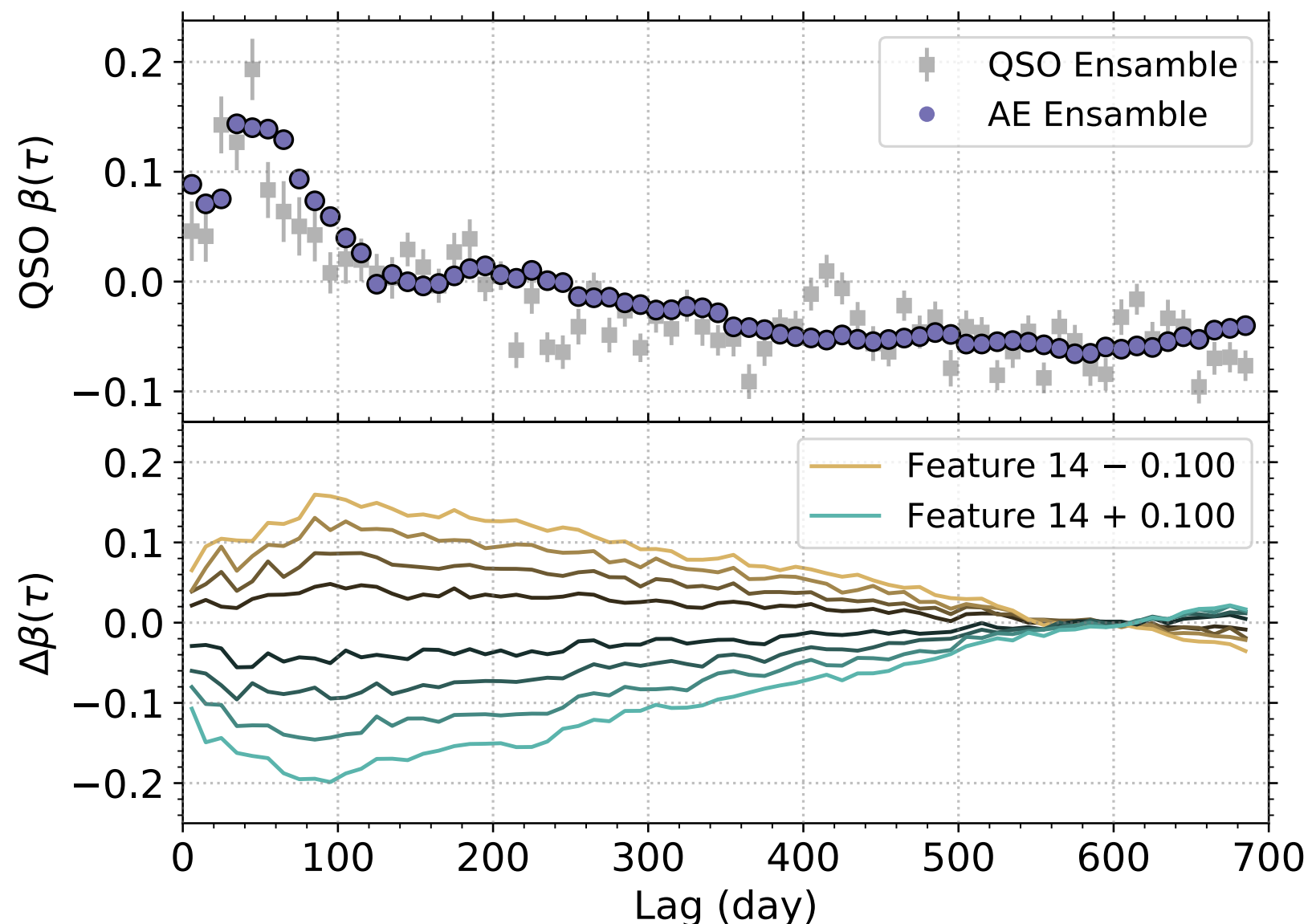


クエーサーの**光度変動対称性**を従来の時系列解析手法を用いて確認した。その結果、統計的に有意な**光度変動の非対称性**が確認され、また **Feature 14** は**短時間の光度変動対称性**に影響があるパラメータであることが分かった。

- Structure function をベースにした**変動対称性**の検定:  $\beta(\tau) = \frac{SF_{ic}(\tau) - SF_{dc}(\tau)}{SF_{tot}(\tau)}$  (Kawaguchi98)

- クエーサー光度曲線  
有意な**変動非対称性**を確認  
短時間では**増光**の振幅が優勢  
長時間では**減光**の振幅が優勢
- Feature 14 は**短時間の $\beta$** に関係
- Mock 光度曲線  
有意な非対称性は確認されず  
← OU過程は変動が対称

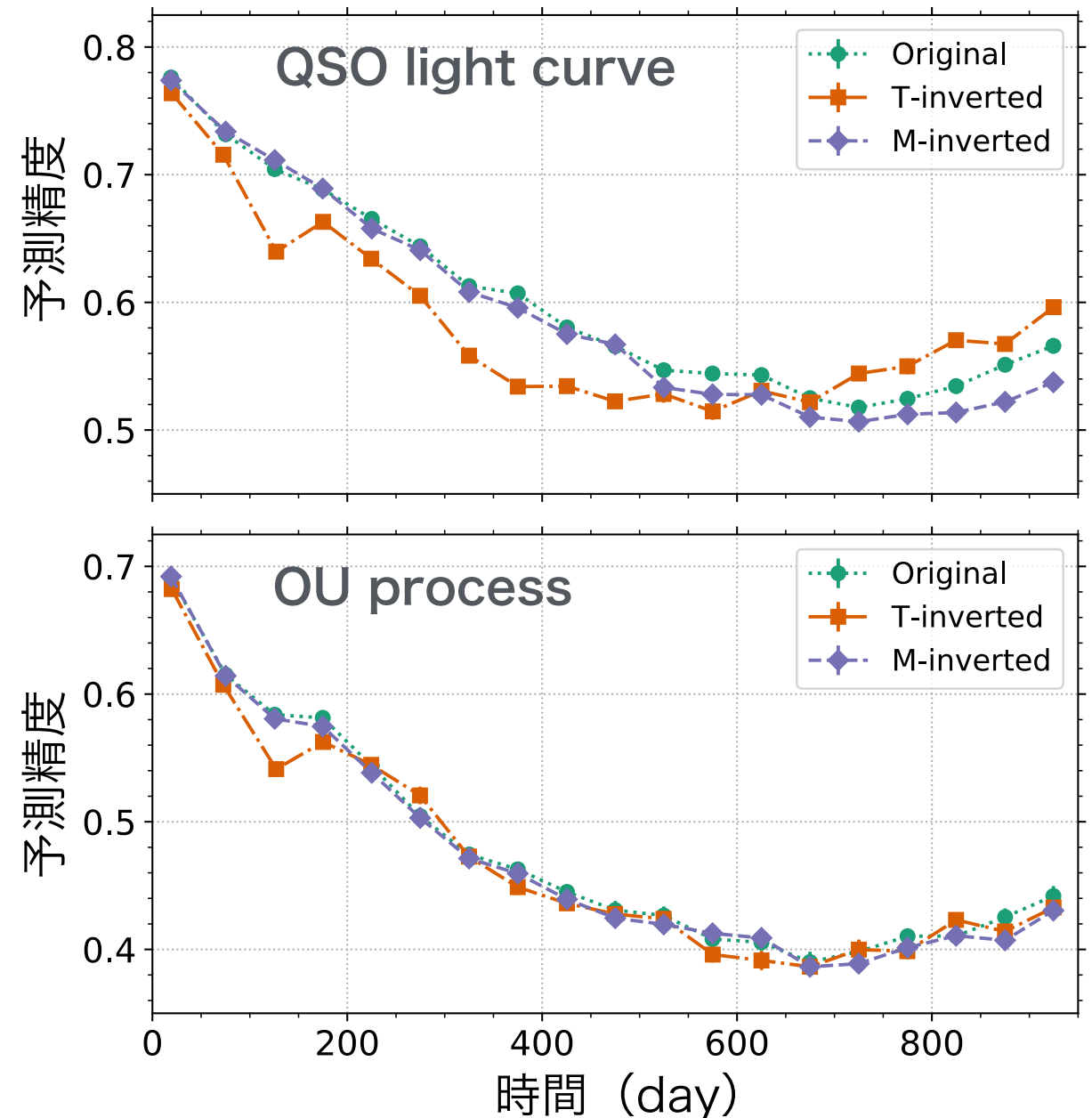
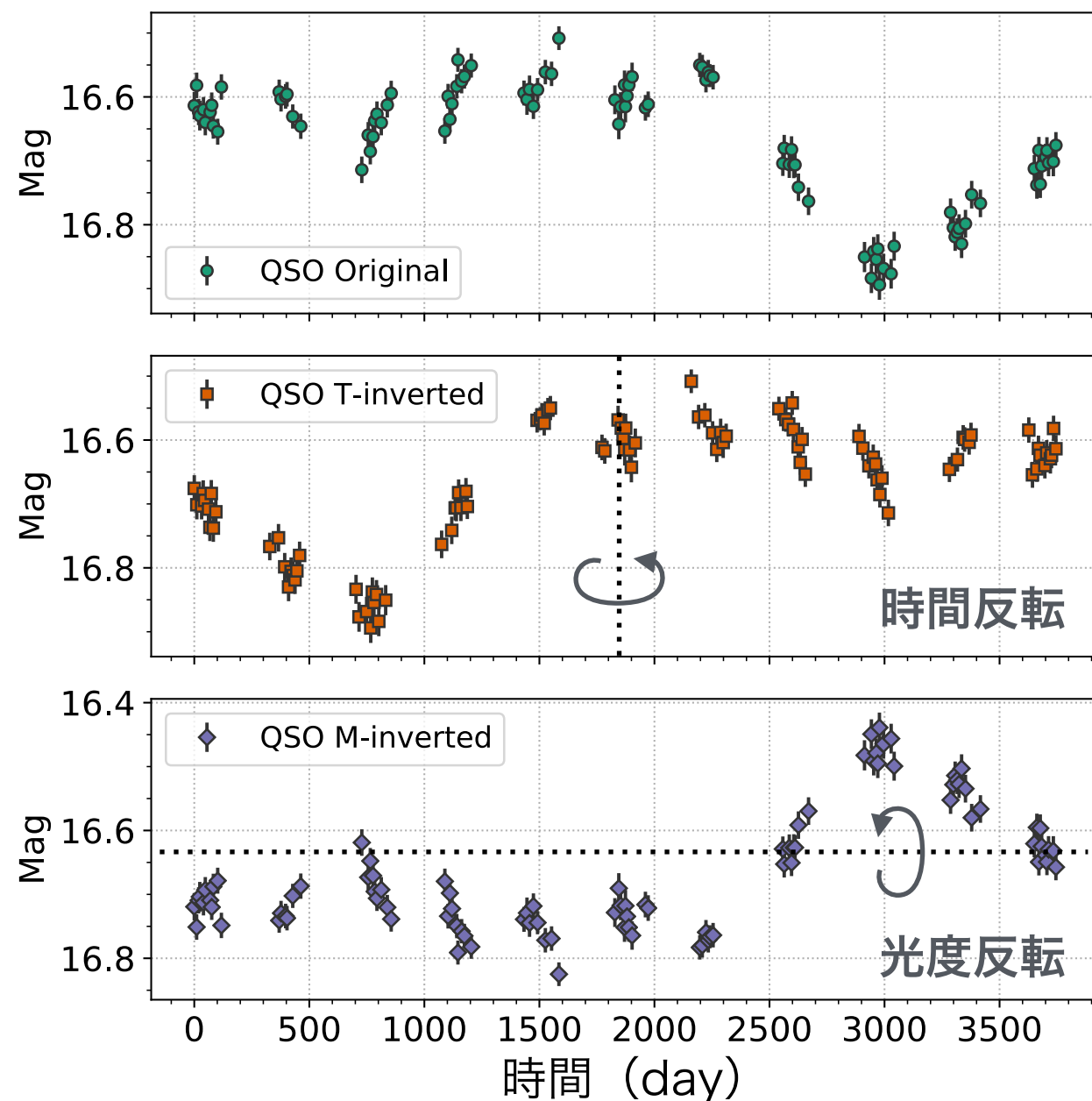
光度変動対称性の精査が必要





上下反転, 時間反転させた光度曲線に対してAutoencoderによるモデル化の精度を確認したところ、有意な違いが生じた。これはクエーサーの光度曲線が対称でないことを示唆する。

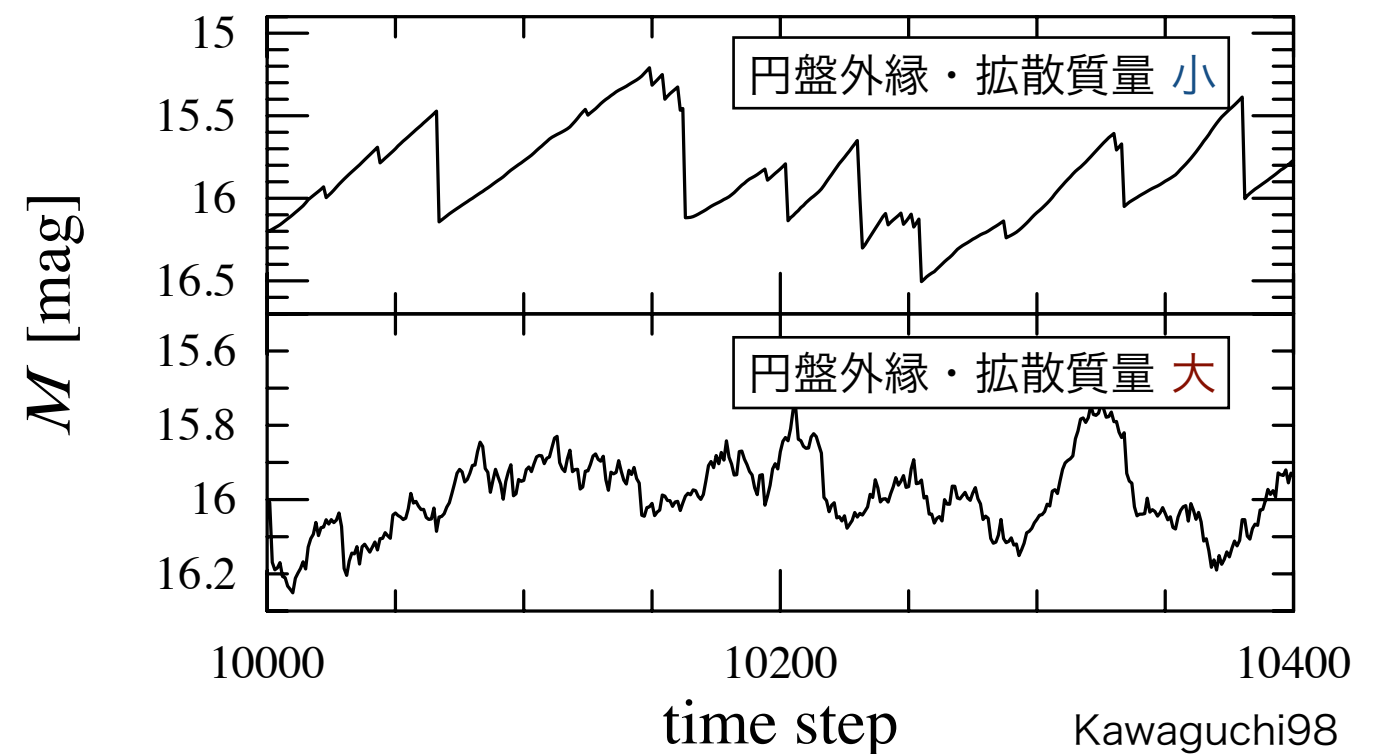
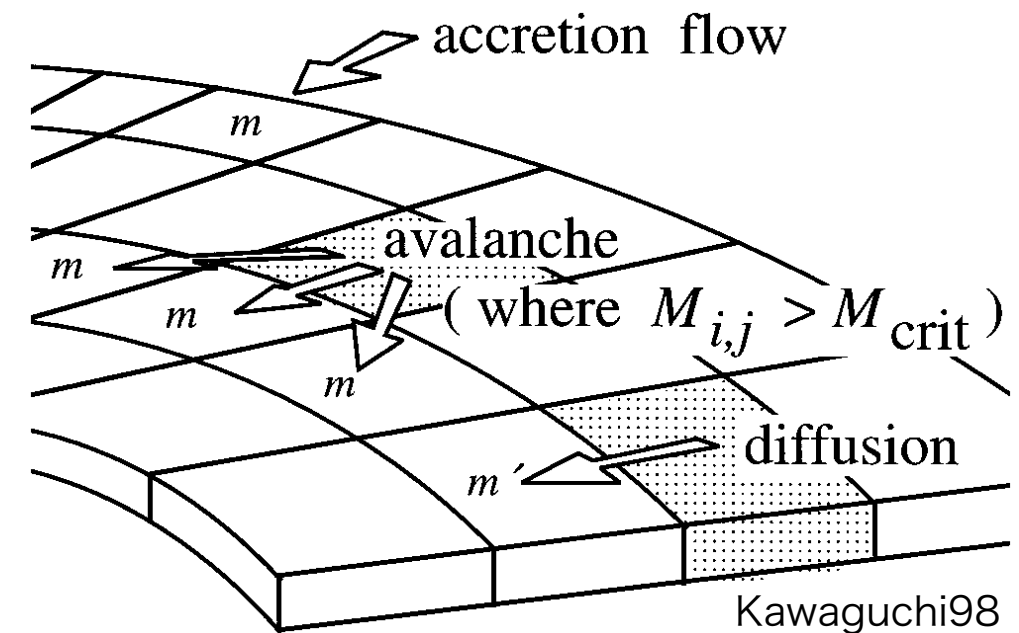
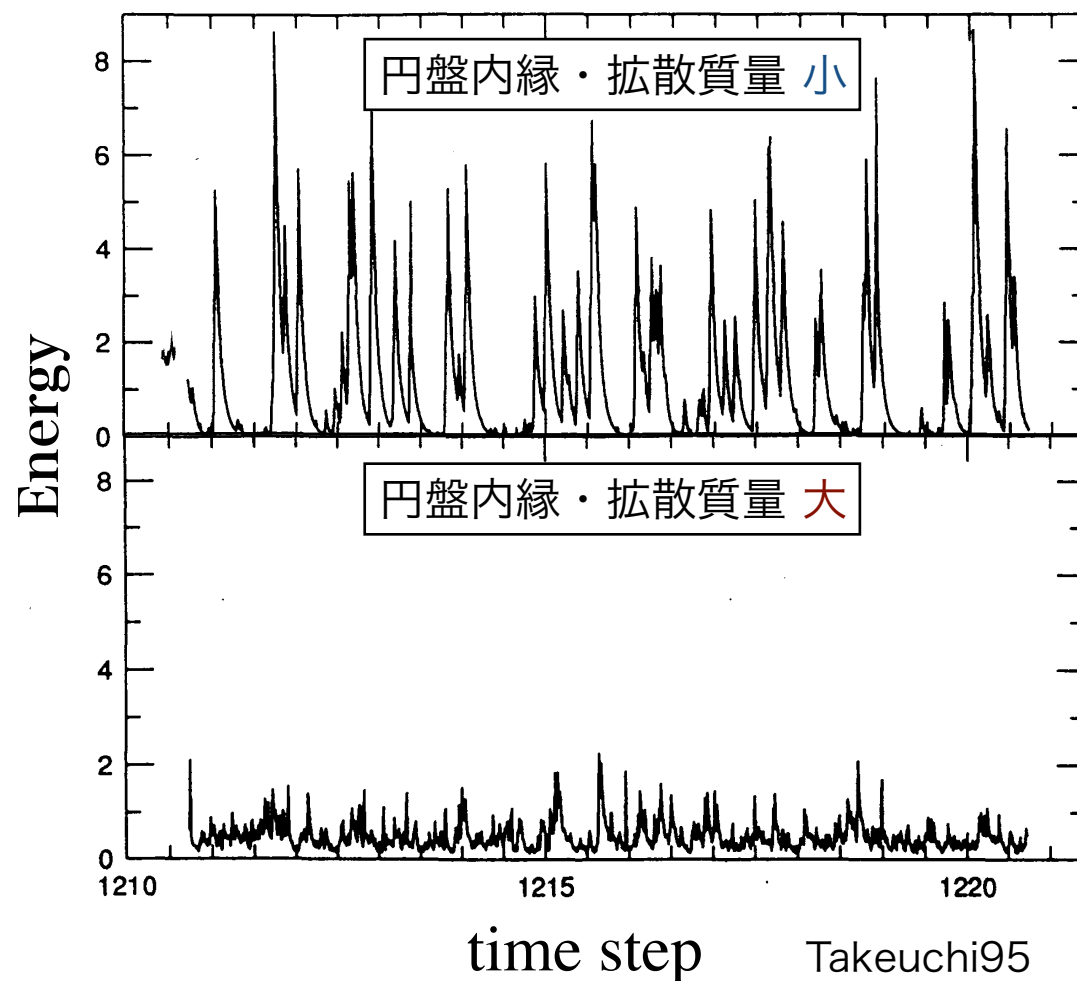
- 上下方向, 時間方向に反転させたクエーサー光度曲線のモデル化精度に**有意な違い**
  - ← (1)OU過程からの乖離, (2)増減光での物理過程の違い, (3)ヒステリシス を強く示唆



降着円盤由来の変動をモデル化した **Disk instability model** に基づいた場合、観測された光度変動非対称性を説明をすることが可能。

## • Disk instability model

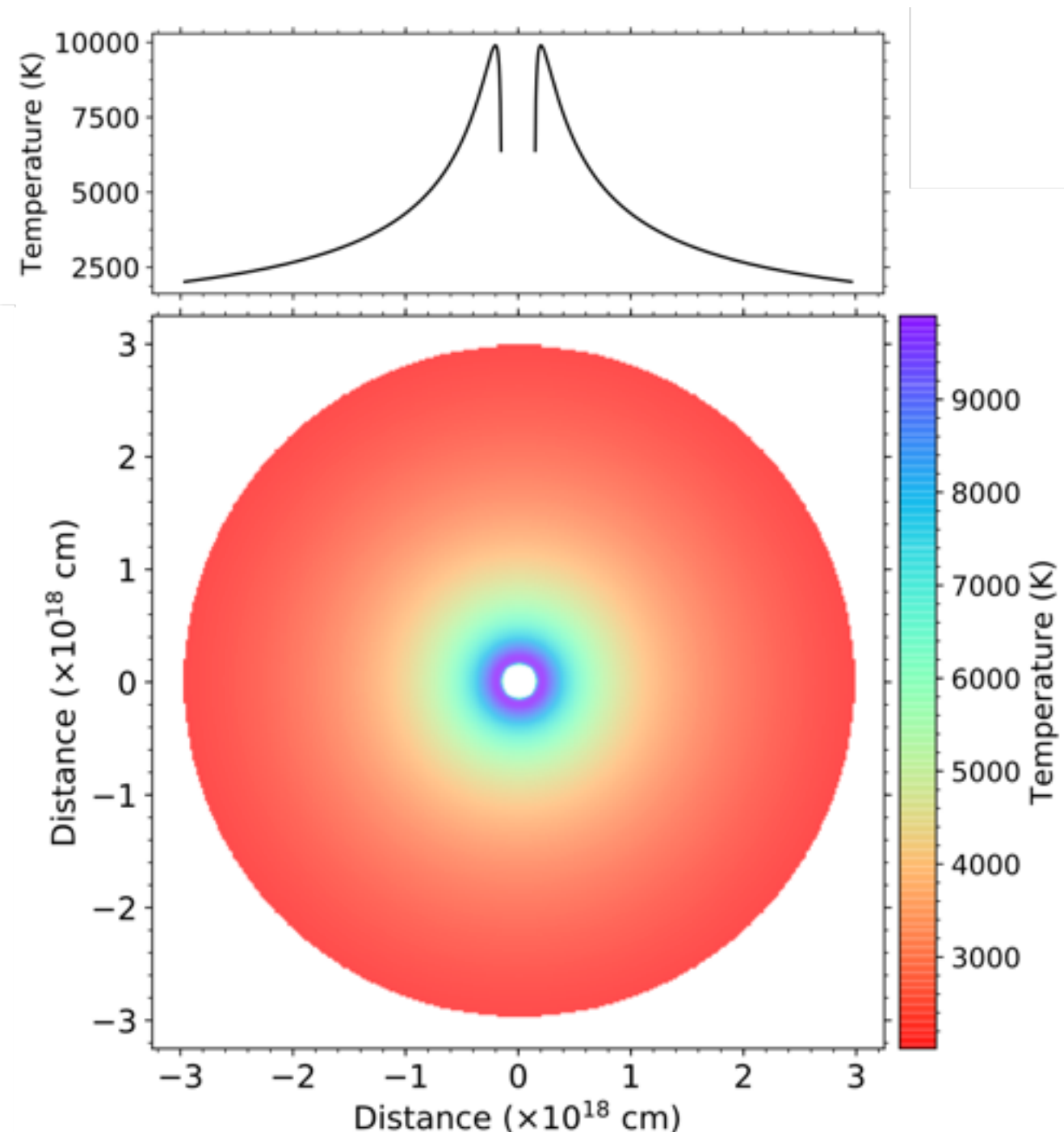
- 降着円盤内の**質量の拡散とアバランシェ**
- 放射領域 小  $\rightarrow$  positive asymmetry ( $\beta > 0$ )
- 放射領域 大  $\rightarrow$  negative asymmetry ( $\beta < 0$ )
- 拡散質量  $\uparrow \rightarrow$  asymmetry  $\downarrow$



CRTSは**white filter**を採用しているため、赤外 — 紫外の放射が含まれる。紫外では positive asymmetry、可視以降では negative asymmetryが観測されることが期待される。

- 放射領域と光度変動対称性
  - 紫外線: 円盤内縁の**狭い**領域
    - ➡ 早い変動 + positive asymmetry ( $\beta > 0$ )
  - 可視—赤外: 円盤外縁の**広い**領域
    - ➡ 遅い変動 + negative asymmetry ( $\beta < 0$ )
- クエーサー光度と変動対称性
  - 明るいクエーサー: 質量降着率 **大**
    - ➡ ガス圧 **大** ( $pV = nRT$ )
    - ➡ ガスの粘性 **↑**
    - ➡ 拡散質量 **↑**
    - ➡ 光度対称性 **↑** (アバランシェ回数 **↓**)

得られた示唆と矛盾なし



- ・ Autoencoder のクエーサー光度変動のモデル化への適用
  - OU過程と遜色ないモデル化精度
  - OU過程よりも高い将来の変動の予測精度
  - ➡ クエーサー光度変動の潜在的な特徴量を獲得している
- ・ Autoencoder が獲得した特徴量 (AE features) と物理量の関係
  - 深層学習における「重要度」の定義手法の提案
  - ➡ 赤方偏移と関係する AE feature の抽出により妥当性を確認
  - クエーサー光度変動に非対称性の存在を示唆
  - クエーサー光度と光度変動対称性の関係を示唆
  - ➡ 非対称性の存在を慣習的な時系列解析の手法からも確認
- ・ 光度変動非対称性は Disk instability model によって理解可能
  - 光度非対称性は変動の波長に依存する放射領域サイズの違いに起因
  - 光度と対称性の関係は降着円盤内の拡散質量の大きさに起因
  - ➡ 光度変動対称性を考慮に加えた詳細研究の必要性