

スーパーコンピュータとAIを活用した 宇宙天気モデリングの研究

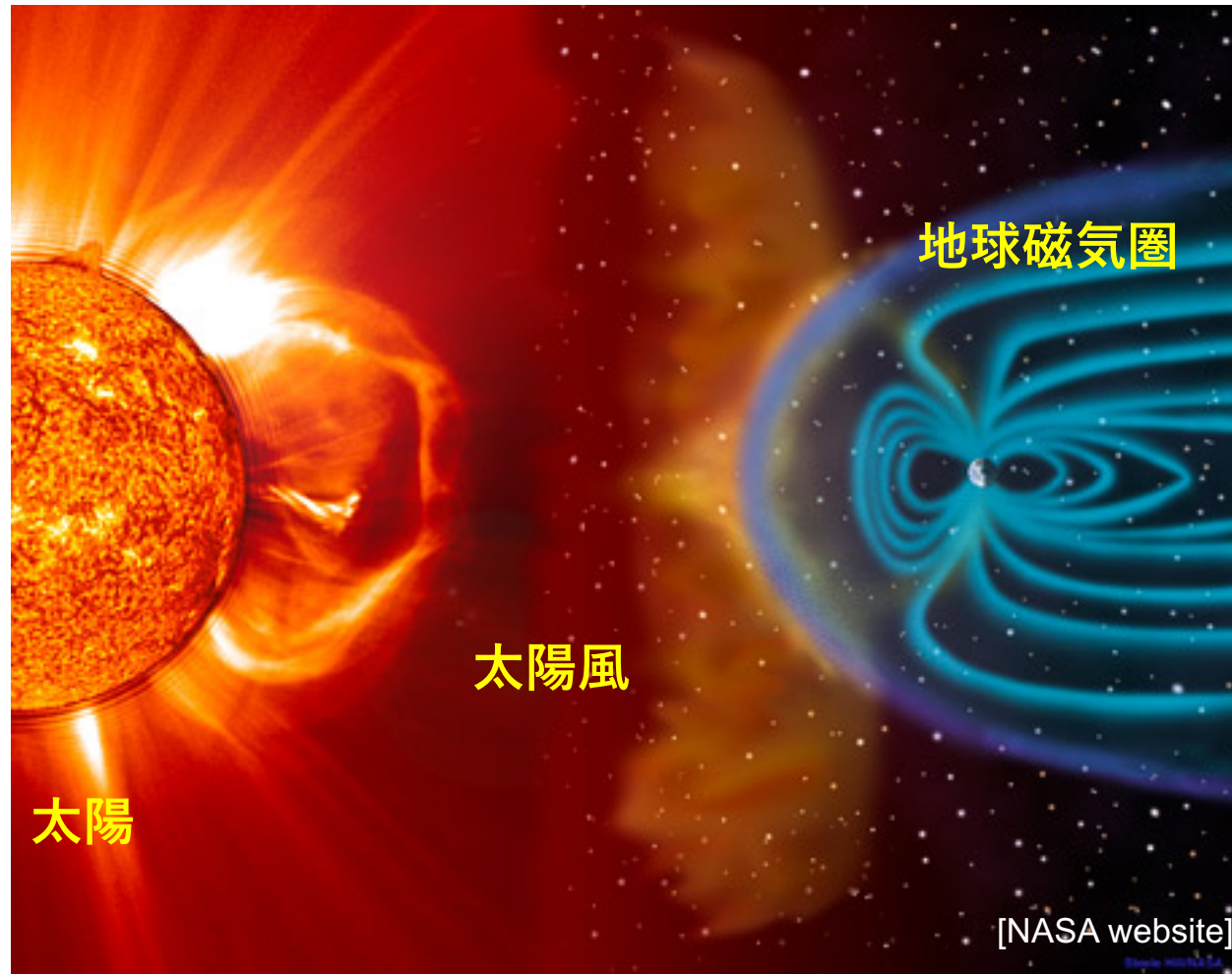
山川智嗣

名古屋大学宇宙地球環境研究所

スーパーコンピュータ「不老・弐」へ向けたユーザ集会

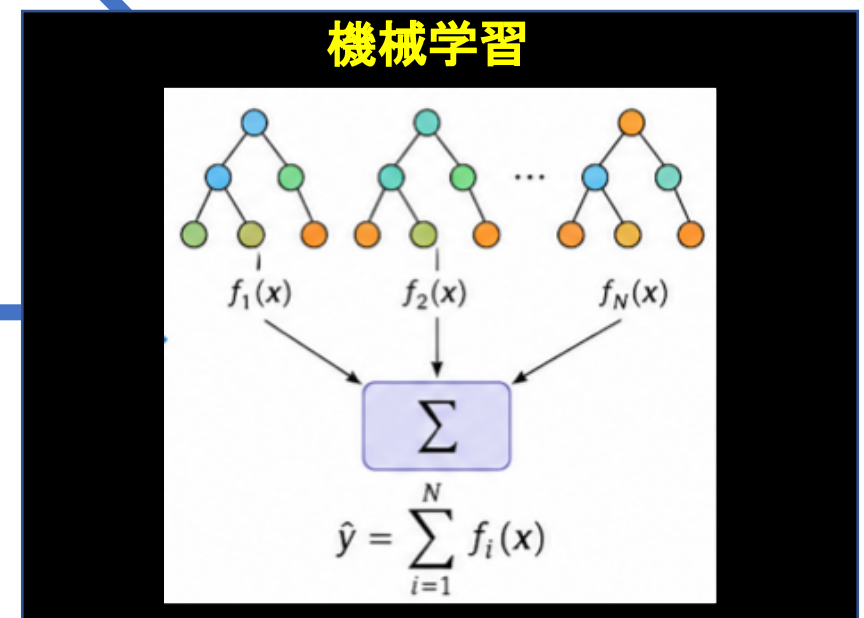
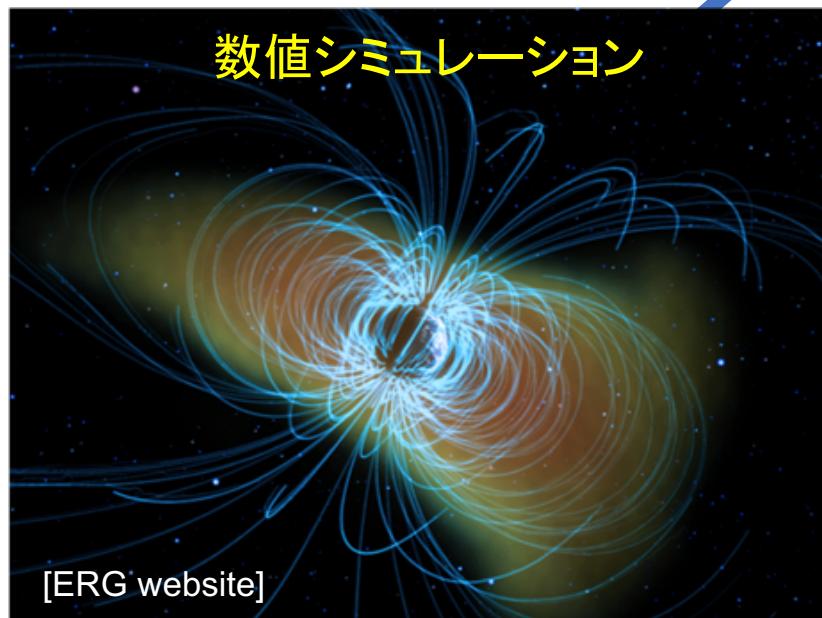
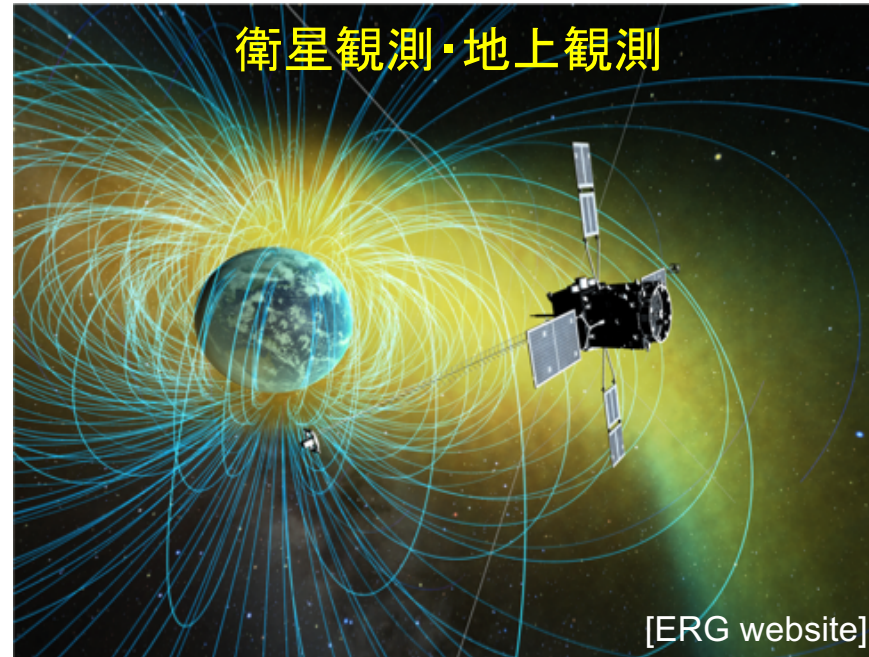
2026/09/08

宇宙天気とは？

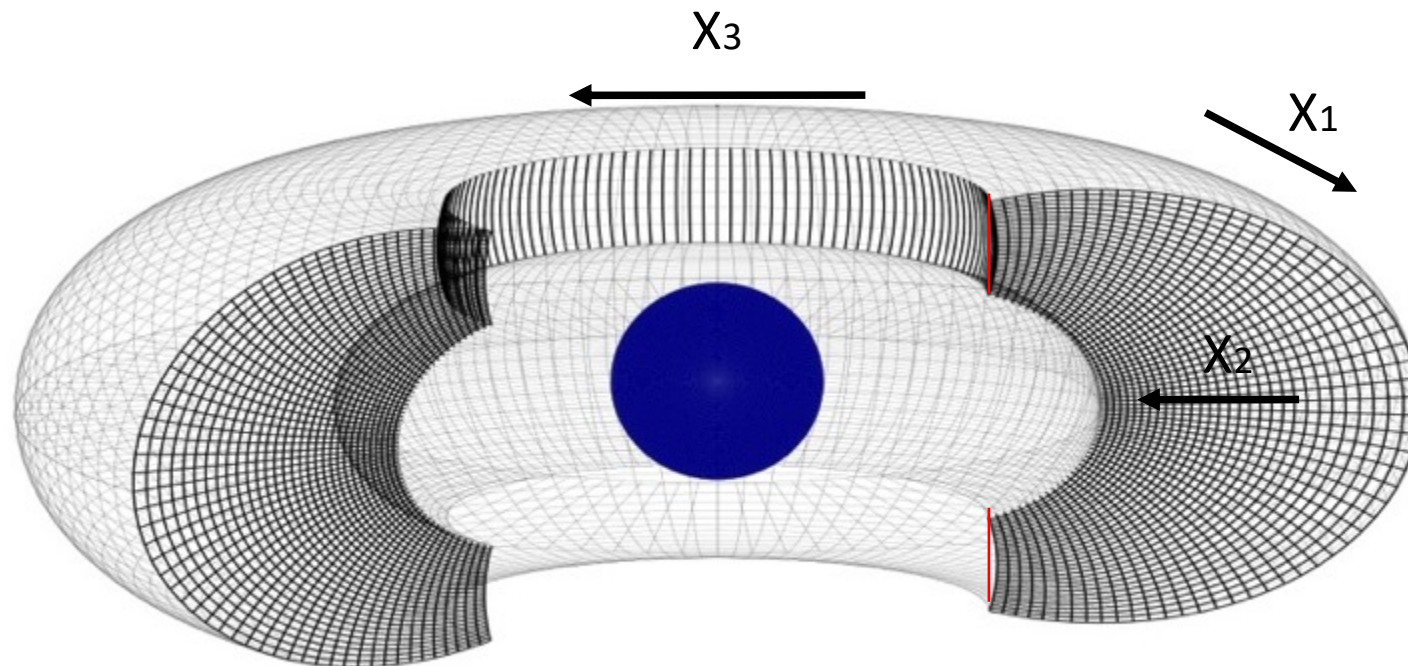


- 太陽活動によって変動する地球周辺の宇宙環境の状態・現象
- 宇宙嵐時には人工衛星・通信・測位などに影響
- 広大な磁気圏を理解・予測するには**観測と数値モデリング**が必要
- スーパーコンピュータとAIをどう宇宙天気研究に活用するか？

宇宙天気研究の3つアプローチ



- 地球近傍の宇宙空間(内部磁気圏)の電磁場と粒子の運動を自己無撞着に解くモデル
- 内部磁気圏における低温粒子(eV)や高温粒子(keV)の加速・輸送を計算
- 内部磁気圏における磁気流体波動の励起を再現できる。
- 5次元の位相空間密度(空間3次元・速度空間2次元)を解く必要がある。



Grid number

$$N_1 = 64$$

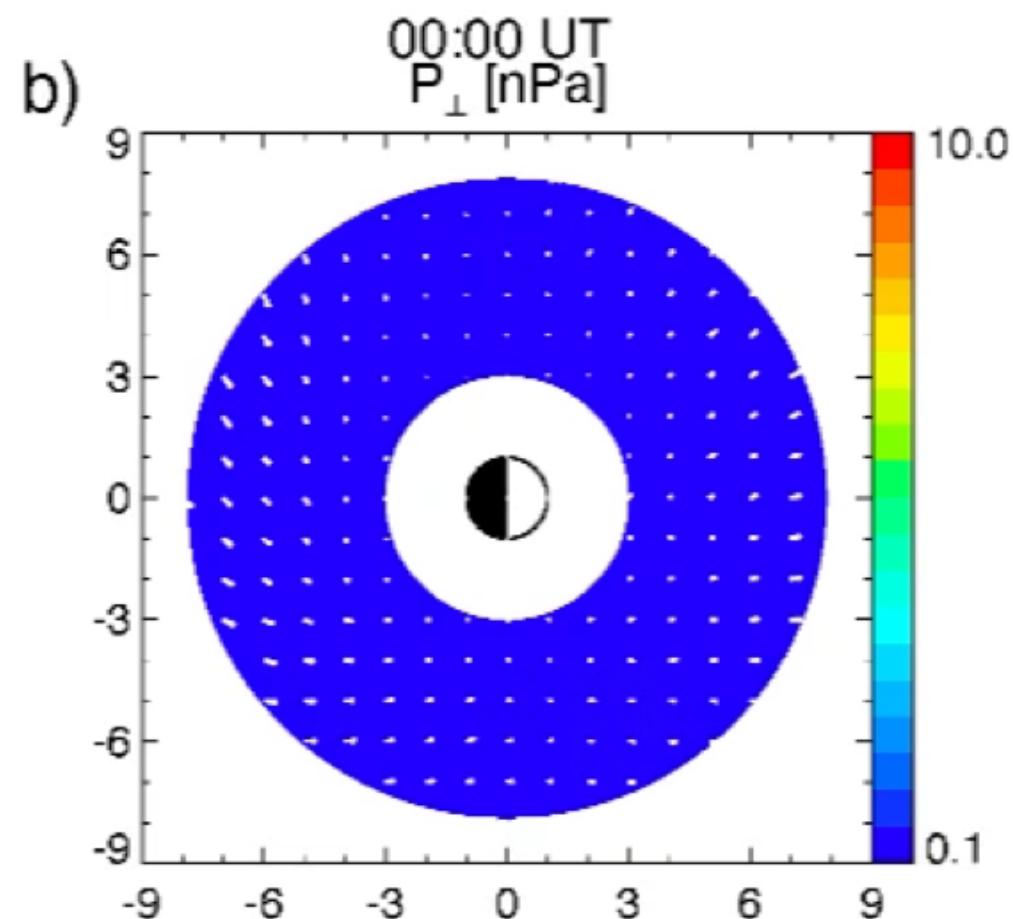
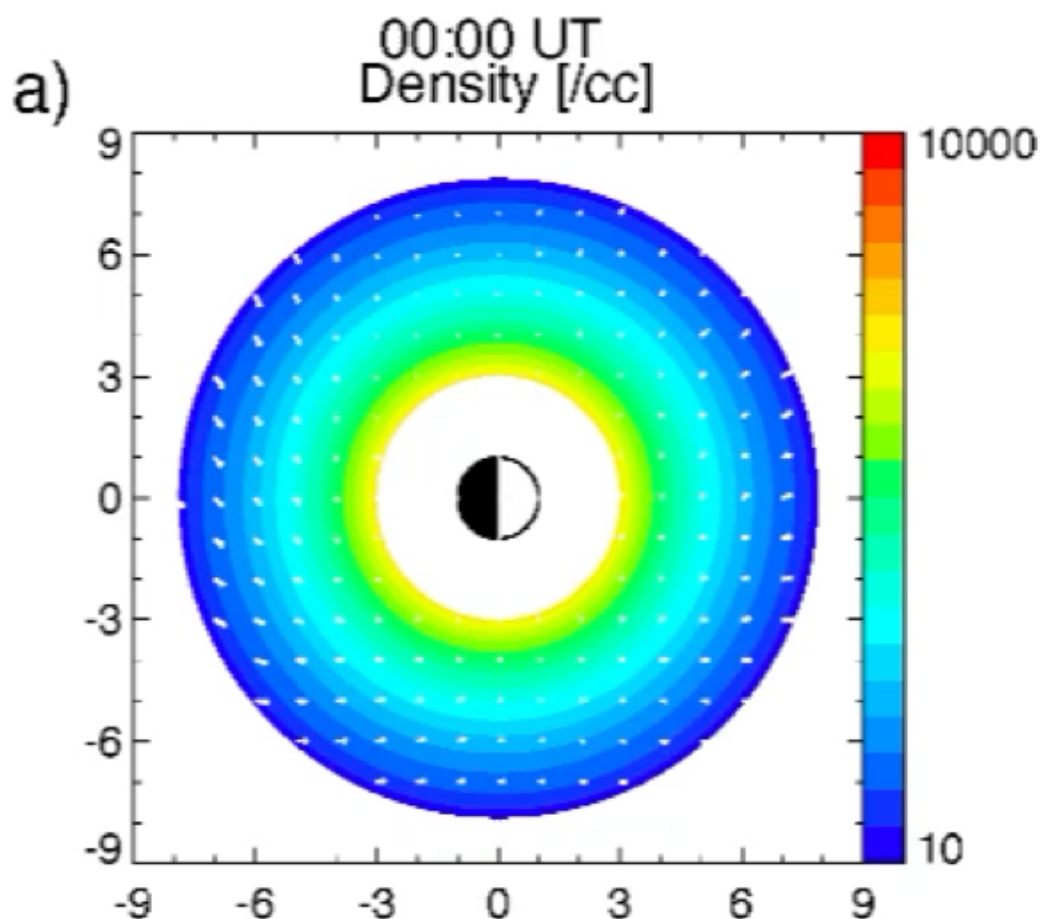
$$N_2 = 48$$

$$N_3 = 128$$

$$N_{v||} = 32$$

$$N_{\mu} = 32$$

赤道面での密度と圧力分布 (GEMSIS-RC)



- プラズマ圏低温粒子が密度を担う。
- 夜側の密度が減少し、プラズマ圏が収縮。
- 昼側の密度は増加し、プルーム構造ができる。
- keV帯の環電流粒子が発達し、圧力が増加。

GEMSIS-RC + スーパーコンピューター

- 5次元の位相空間密度(空間3次元・速度空間2次元)を解く必要があるの
で、大規模数値計算が必要。

現状のGEMSIS-RC (CPU)

Type I subsystem (Fortran + MPI)

64 nodes → Computation time : 6-7 days.



計算負荷の大きい処理の把握



並列性の高い処理からGPU化を検討

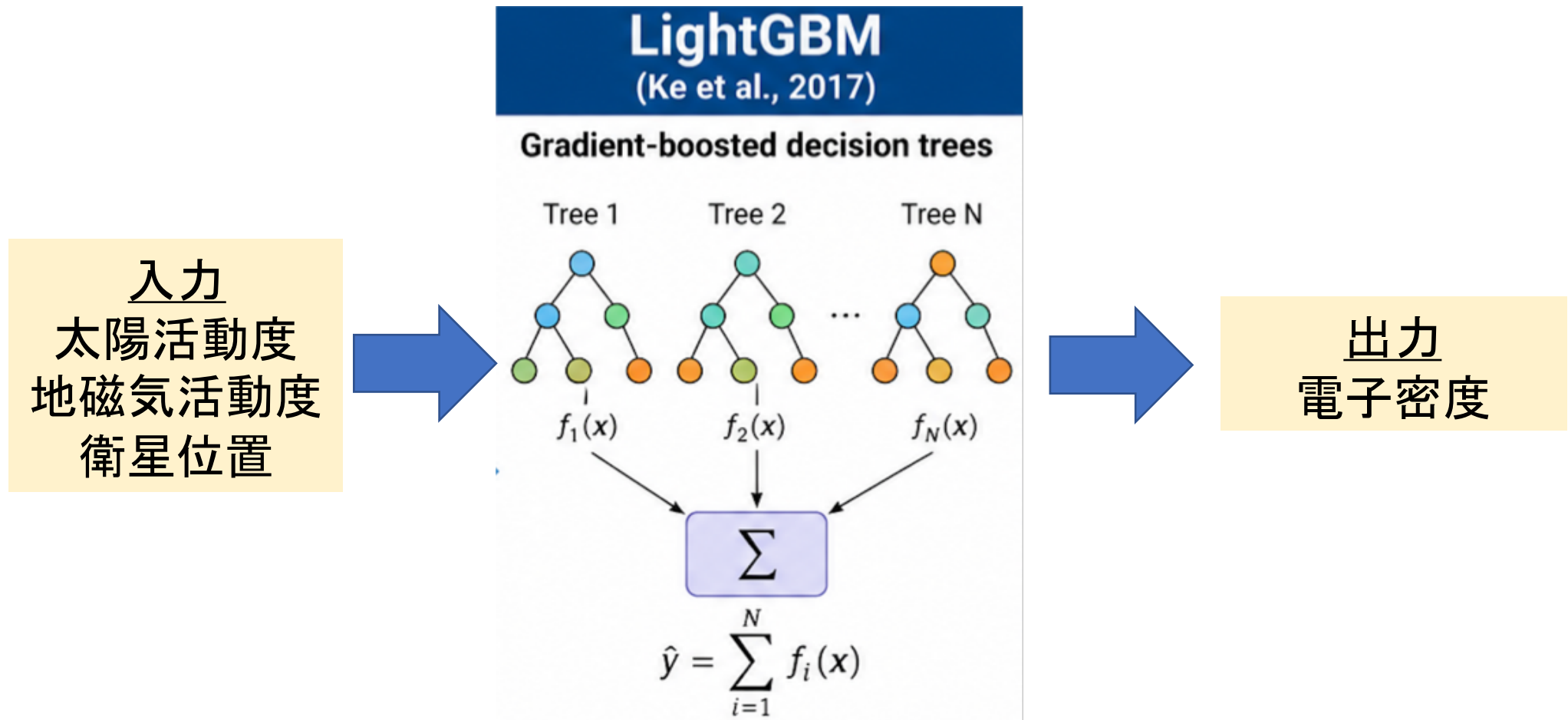
- 計算の高速化・多数ケース計算へ



数値シミュレーション結果をAI・機械学習に活用

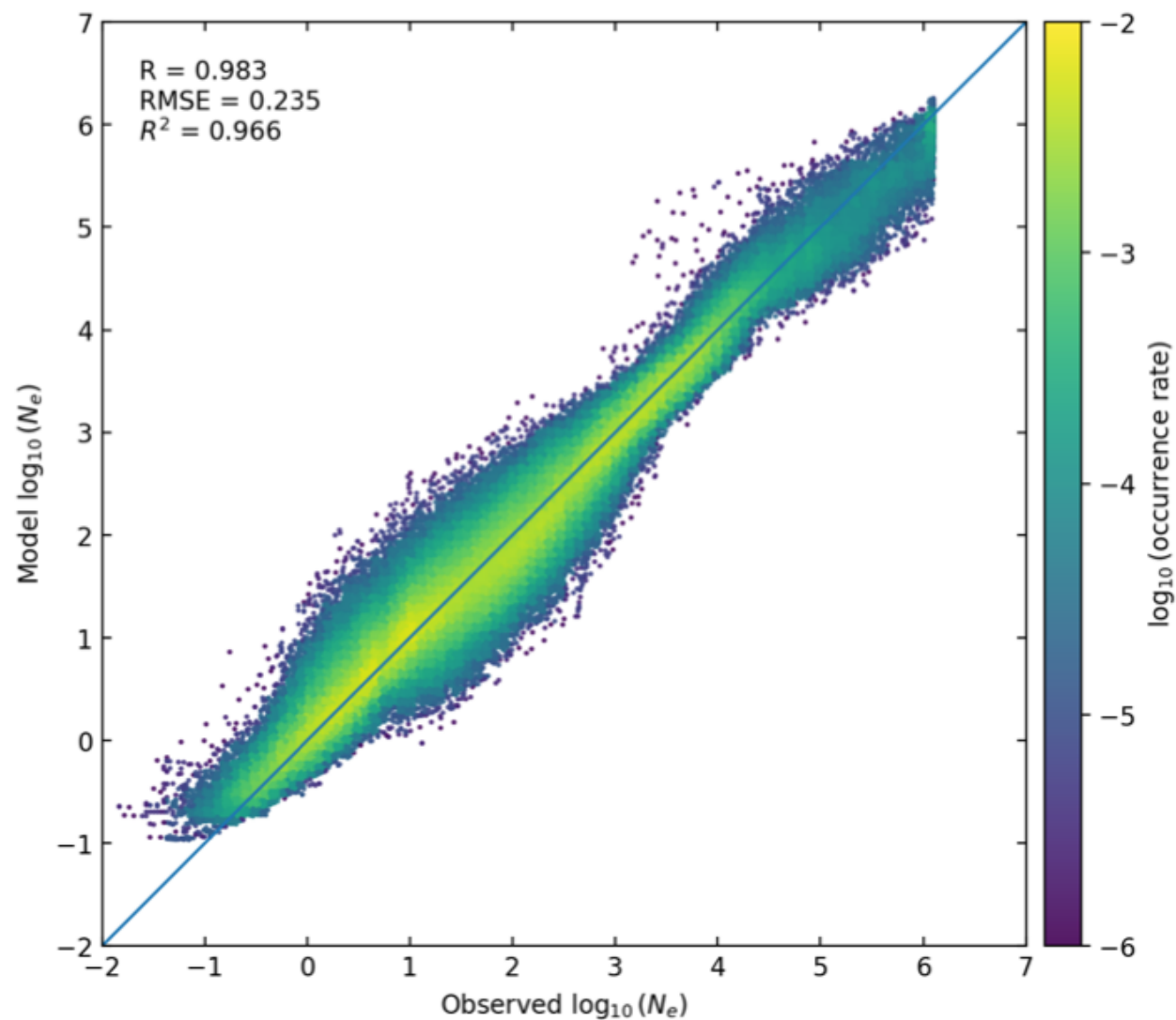
機械学習(LightGBM)を用いた宇宙天気モデリング

- LightGBM(Gradient Boosting Machine) (Ke et al., 2017)



- Arase衛星による**長期間の電子密度観測**を学習データとして利用
- 太陽活動・地磁気活動(F10.7, Ap30)と衛星位置から電子密度を学習
- 観測のない場所・時刻を含む**低温粒子電子密度分布の予測**を目指す。

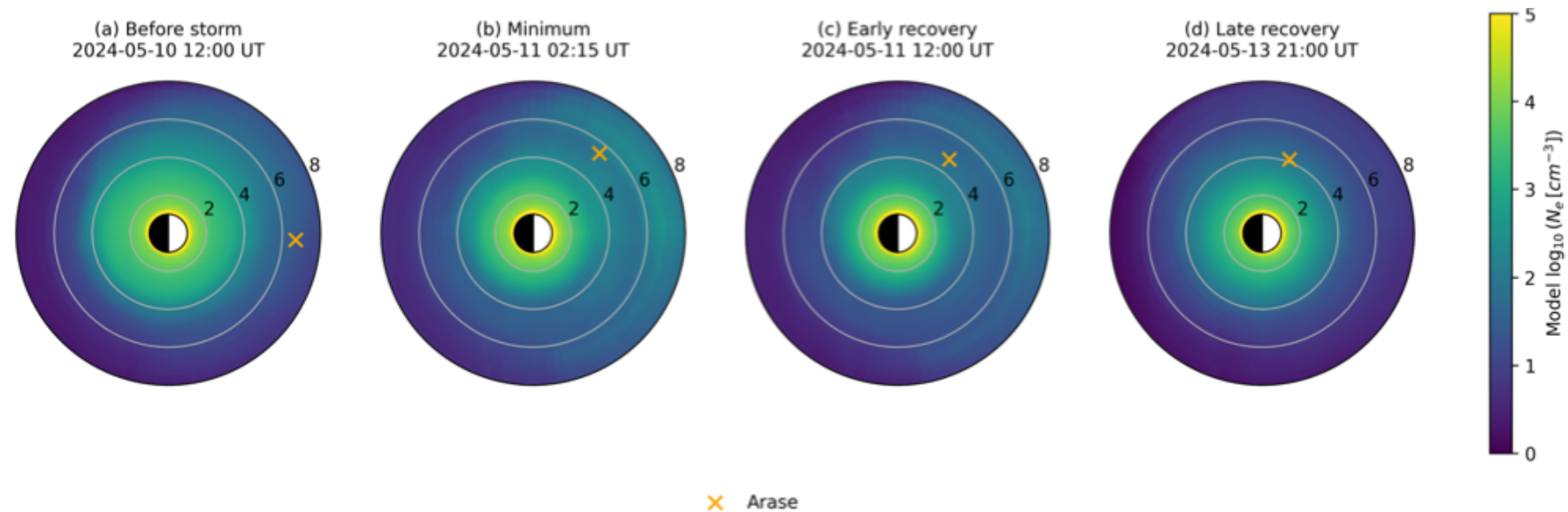
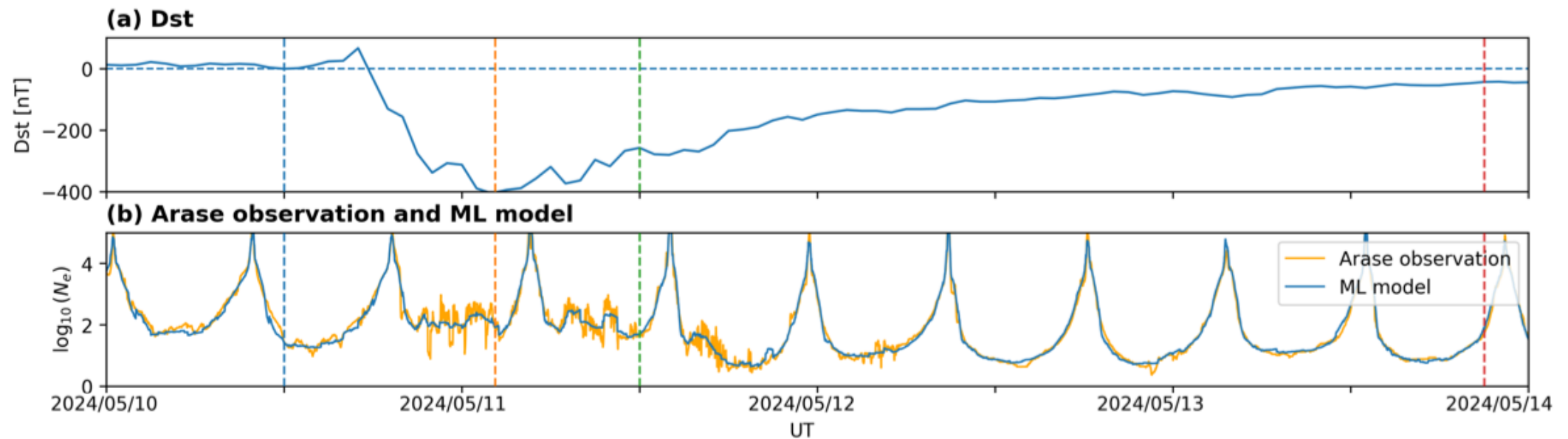
観測と機械学習モデルとの相関



- Correlation: 0.983
- $R^2 = 0.966$
- $\text{RMSE} = 0.235$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_{\text{true}} - y_{\text{pred}})^2}{\sum (y_{\text{true}} - \bar{y})^2}$$

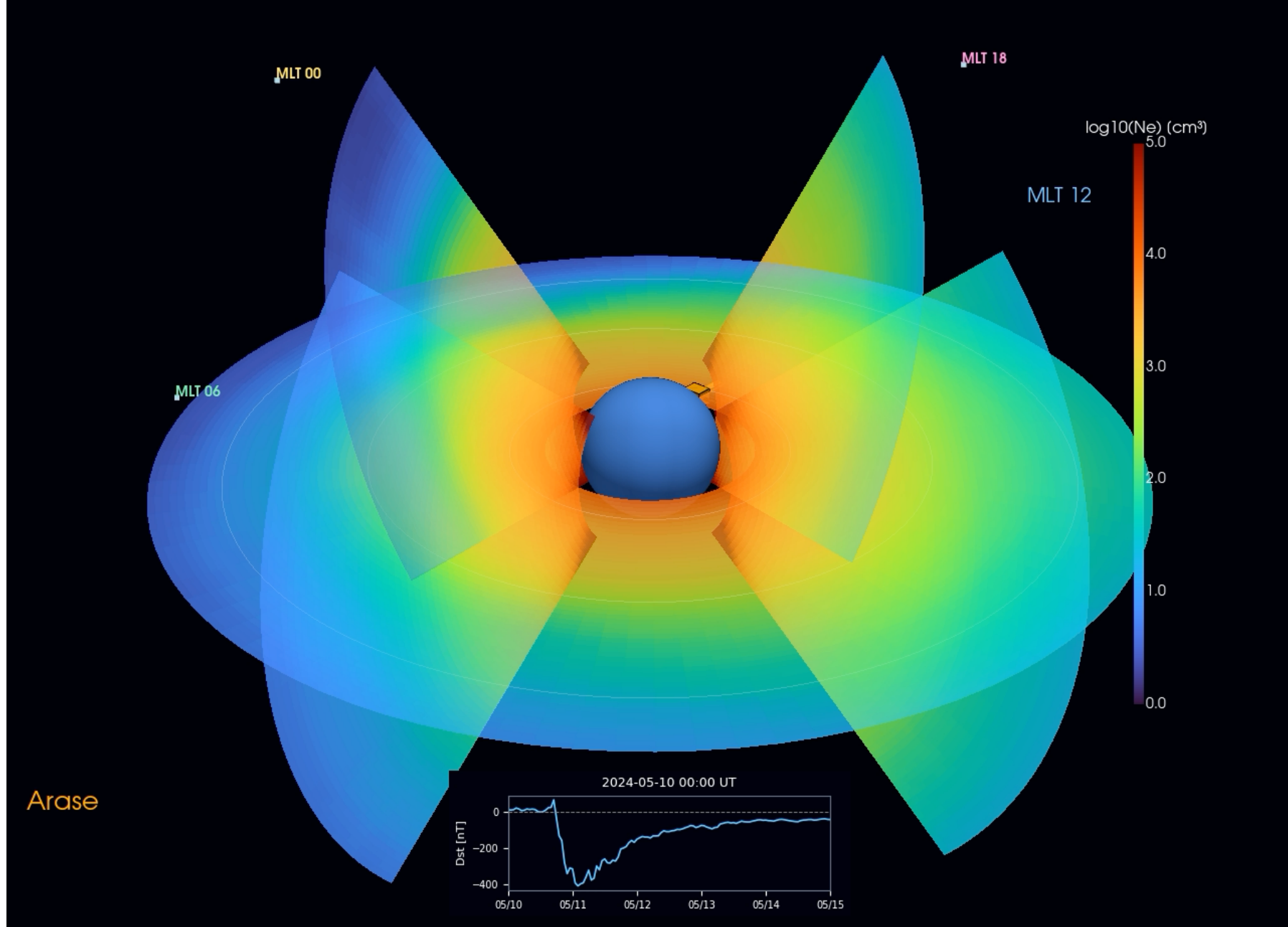
2024年5月の巨大宇宙嵐イベントへの適用



- 機械学習モデルはあらせで観測された電子密度をおおむね再現できている。

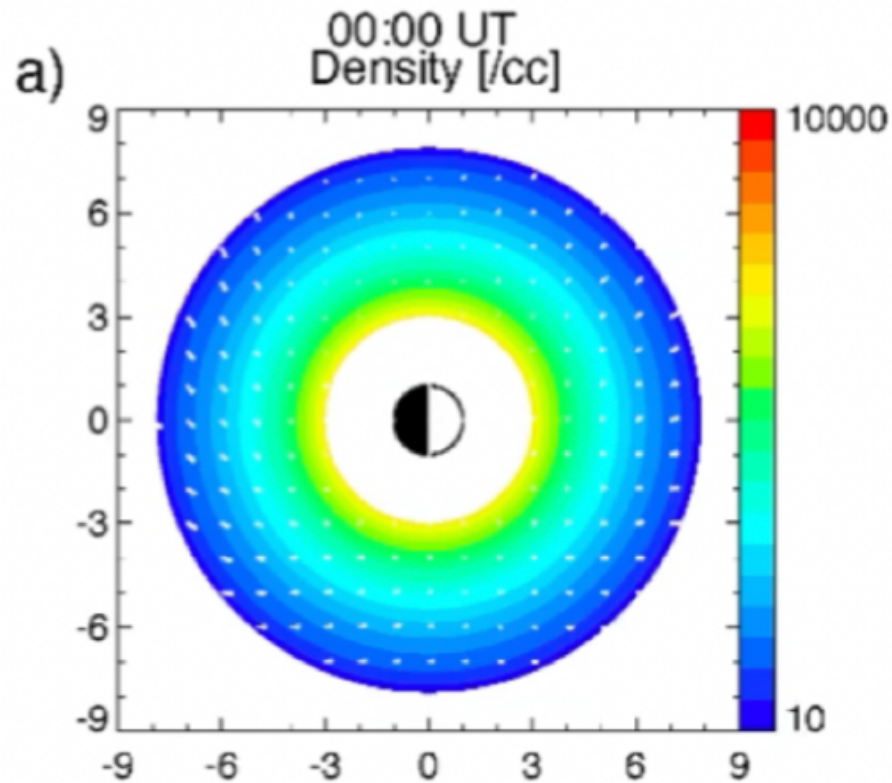
機械学習モデルにおける電子密度3次元分布

ML electron density: equatorial and MLT meridional planes



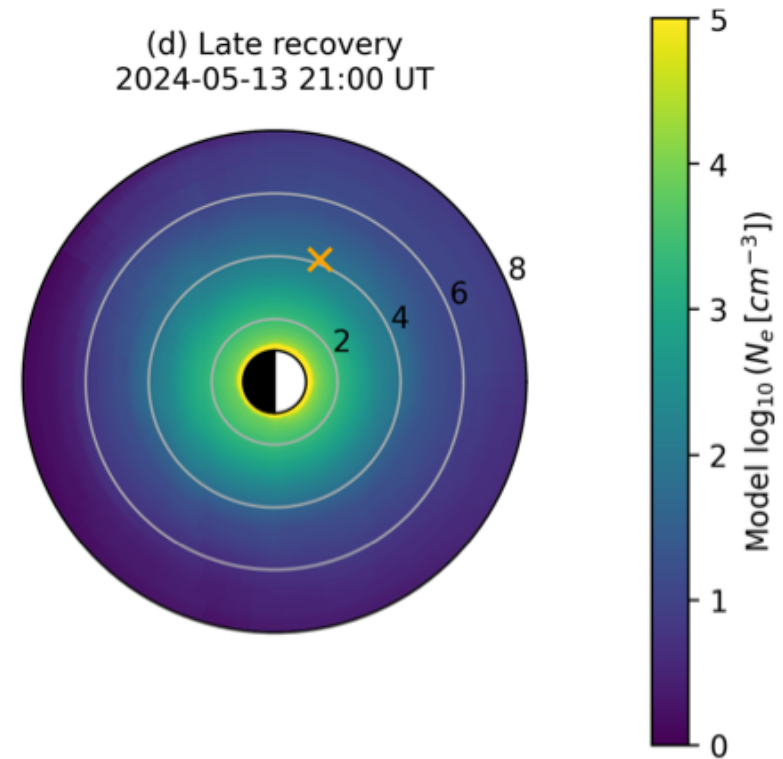
数値モデルと機械学習モデルとの融合

数値モデル



- 物理法則に基づく
- 計算コストは大きい
- 現象のメカニズムを再現

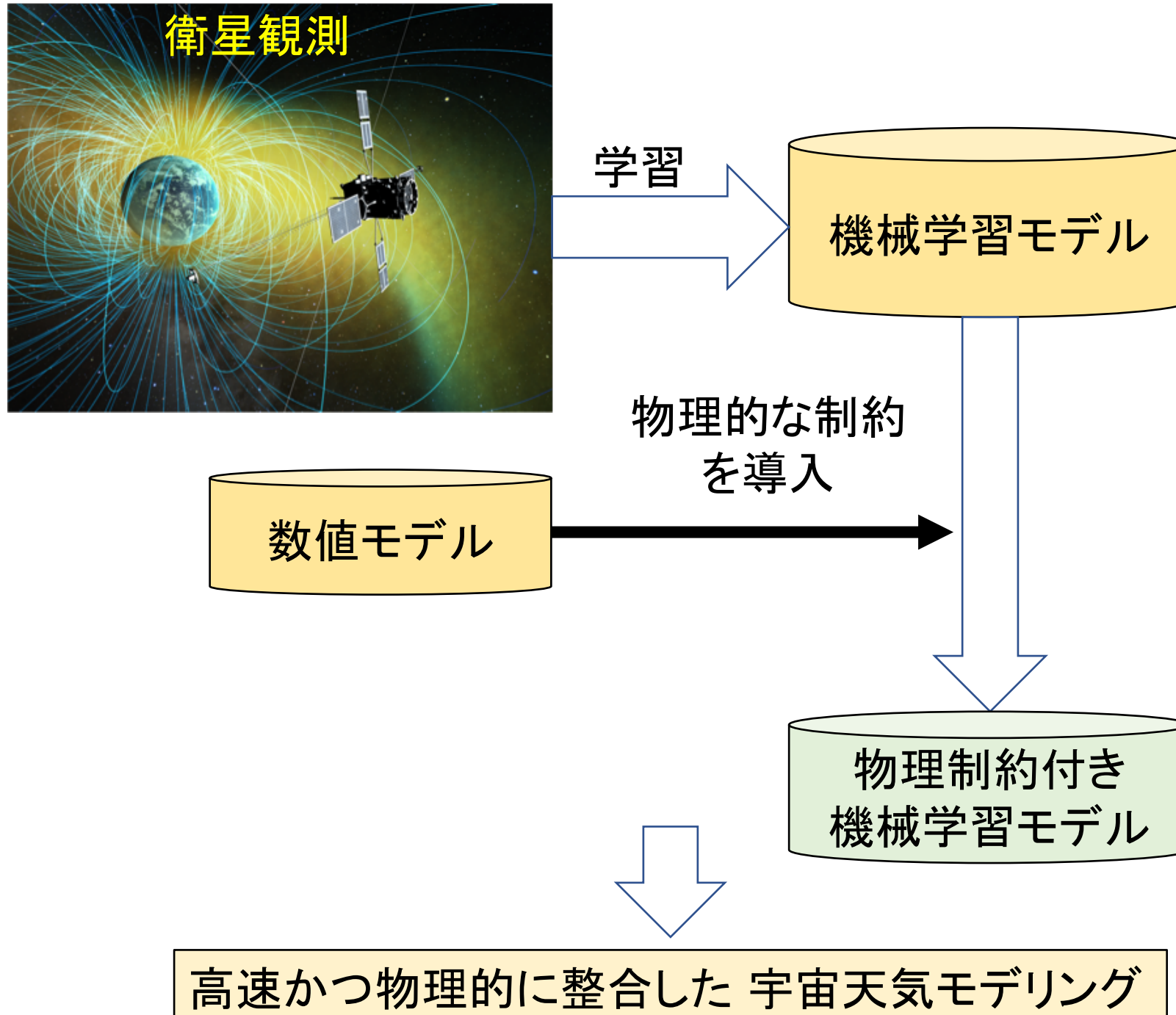
機械学習モデル



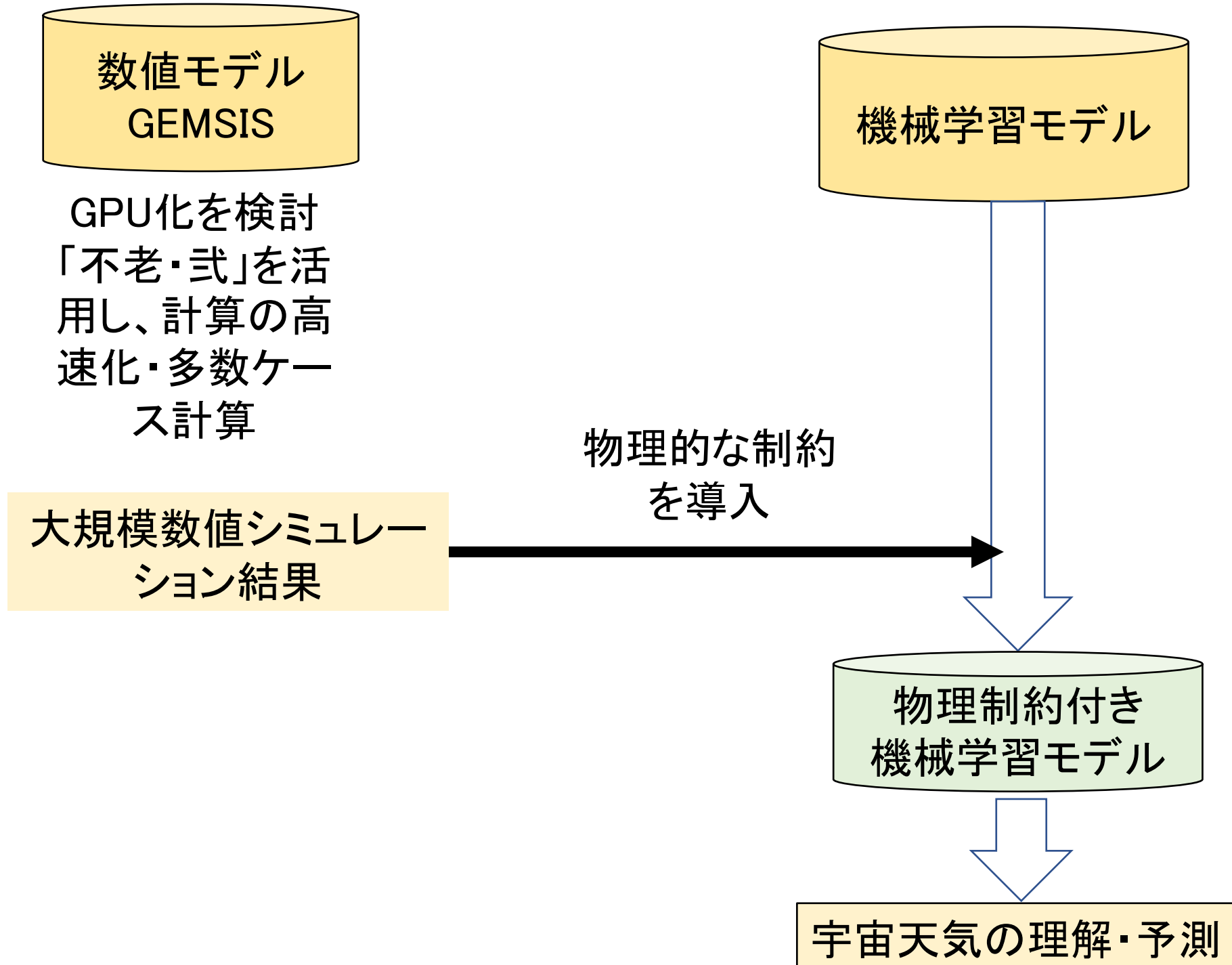
- 大規模データから学習
- 計算コストは小さい
- 学習後の予測は高速

両者の長所を組み合わせることにはできるのか？

Physics-informed Machine Learning



「不老・式」の今後の研究への活用



まとめと今後の展望

① 数値シミュレーション

GEMSIS-RCによる内部磁気圏シミュレーション

→ GPUによる高速・大規模化を検討

② 機械学習モデル

Arase長期観測 × 機械学習

→ プラズマ圏電子密度の予測

③ Physics × AI

物理モデル・観測・機械学習を融合

→ PIMLによる新しい宇宙天気モデリング

「不老・式」を活用した AI for Space Weather へ