

地球磁気圏 MHD モデルを模倣するエミュレータの開発

中溝 葵¹, 片岡 龍峰², 藤田 茂^{3,4}, 中野 慎也^{4,3}

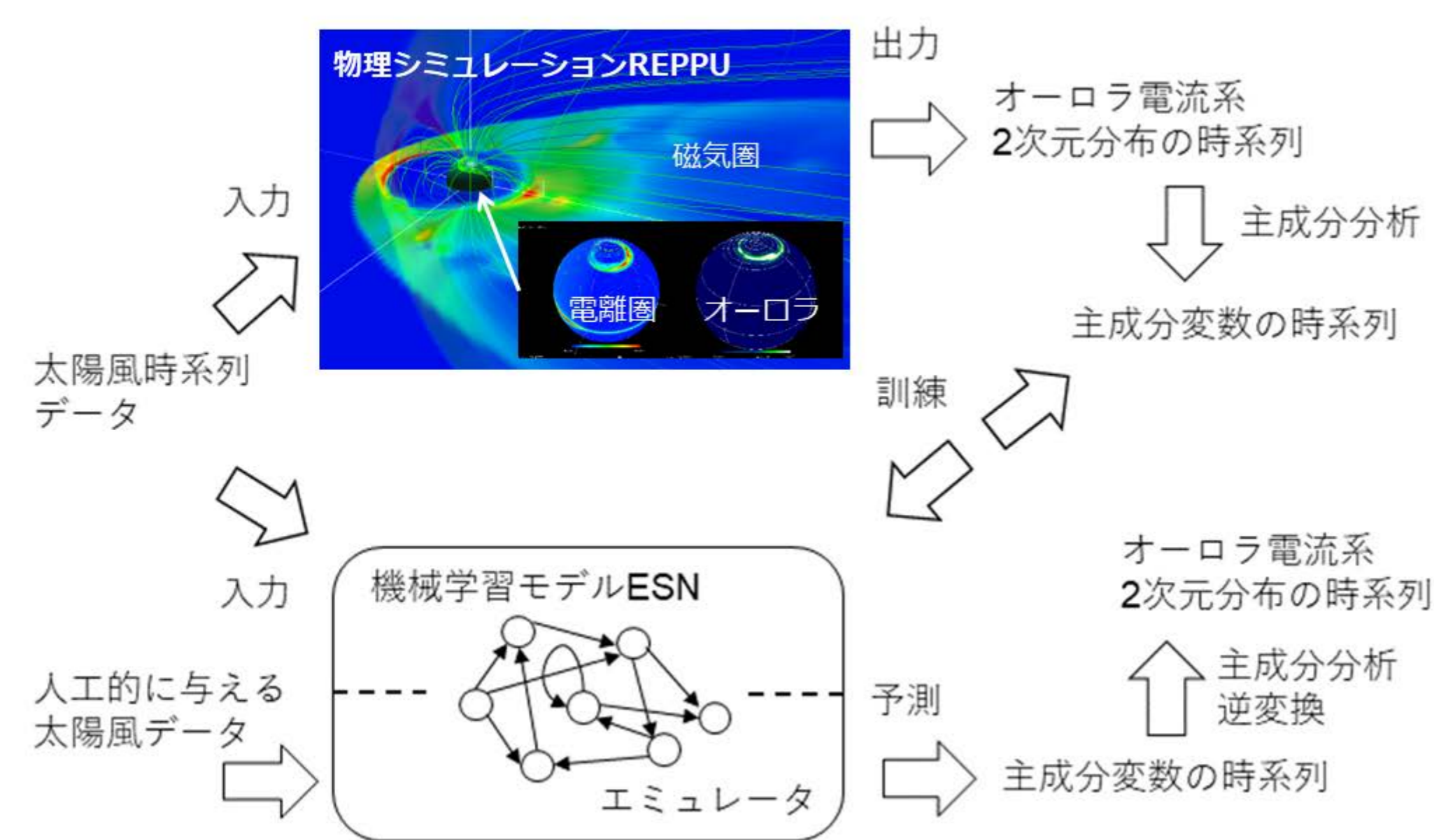
1. 情報通信研究機構; 2. 情報・システム研究機構 国立極地研究所; 3. 情報・システム研究機構 データサイエンス共同利用基盤施設データ同化研究支援センター; 4. 情報・システム研究機構 統計数理研究所

はじめに

- 極域電離圏では、オーロラ電流などによる激しい電磁気的な現象が起こり、場合によっては、地上インフラや航空機の運用などにも影響を及ぼし得る。
- 極域電離圏の変動は、主として太陽風に駆動される磁気圏の現象に支配されており、極域電離圏の電場や電流の変動を予測、再現するには、磁気圏のモデルが必要である。
- しかし、磁気圏・電離圏の諸現象を再現できるMHDモデルは、計算コストが高く、確率的な予測、リスク評価などには向かない。

本研究では、

- ▶ 情報通信研究機構が宇宙天気予報の一環として運用している磁気圏電離圏モデルREPPU(Tanaka, 2015)の改良版で計算した、太陽風の入力に対する電離圏の応答を、echo state network (ESN) (Jaeger and Haas, 2004) と呼ばれる機械学習モデルに学習させ、REPPUの出力を模倣するエミュレータSurrogate Model for REPPU Auroral Ionosphere version 2 (SMRAI2) を開発した (Kataoka et al., 2024)。
- ▶ SMRAI2は、pilot studyである前バージョン(Kataoka et al., 2023)よりも大量のデータを学習データに用いており、極域電離圏の電場ポテンシャル分布だけでなく、電気伝導度、沿磁力線電流分布も出力できるようになり、そこから、様々な太陽風の条件に対するオーロラ電流の強さの予測もできるようになった。



Overview of SMRAI2

• Tanaka, T. (2015), in *Auroral Dynamics and Space Weather* (pp. 177–190), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, doi:10.1002/9781118978719.ch13 .
• Jaeger, H. and Haas, H. (2004), *Science*, 304, pp. 78–80, doi:10.1126/science.1091277 .
• Kataoka, R. et al. (2024), *Space Weather*, 22, e2023SW003720. doi: 10.1029/2023SW003720 .
• Kataoka, R. et al. (2023), *Earth Planets Space*, 75, 139, doi: 10.1186/s40623-023-01896-3 .

エミュレータの開発

エミュレータは、入力の太陽風データと、REPPU改良版による出力との関係をESNに学習させることで構築した。ESNは、リカレントニューラルネットワークの一種で、状態ベクトルのi番目の要素 $x_{k,i}$ は各時間ステップ k で以下の漸化式により更新する:

$$x_{k,i} = \tanh(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_k + \mathbf{u}^T \mathbf{z}_k).$$

また、内部状態変数の重み付き和で出力を与える:

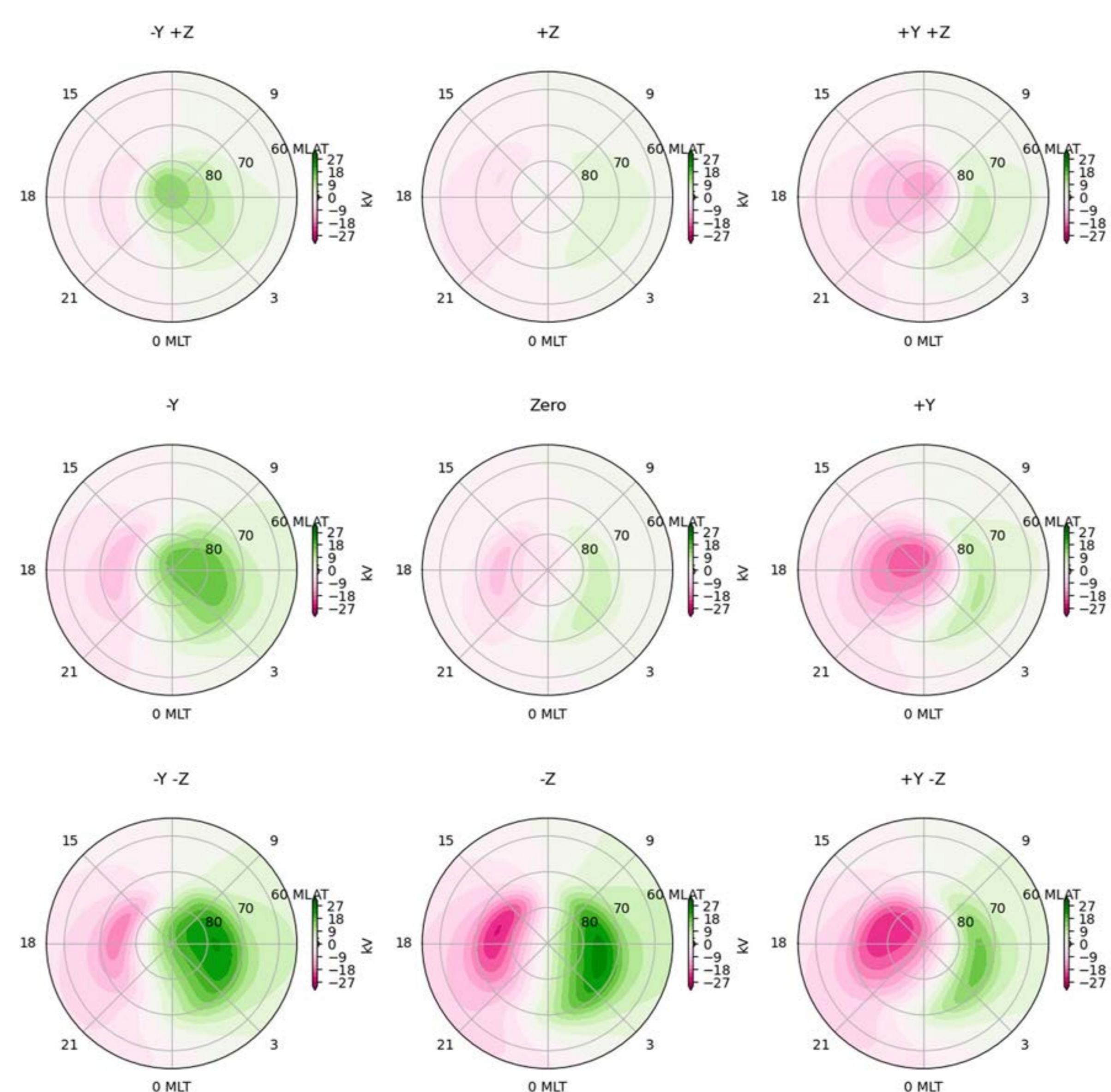
$$\mathbf{y}_k = \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{x}_k.$$

ESNでは、ネットワーク内部の結合は固定しておき、状態変数と出力との関係を決める重みのみをデータに基づいて最適化することで学習を行う。重み $\mathbf{\Gamma}$ を決める際には、以下の目的関数を最小化する:

$$J = \sum_{k=1}^K \|\mathbf{d}_k - \mathbf{y}_k\|_2^2 + \lambda^2 \|\mathbf{\Gamma}\|_F^2 = \sum_{k=1}^K \|\mathbf{d}_k - \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{x}_k\|_2^2 + \lambda^2 \|\mathbf{\Gamma}\|_F^2,$$

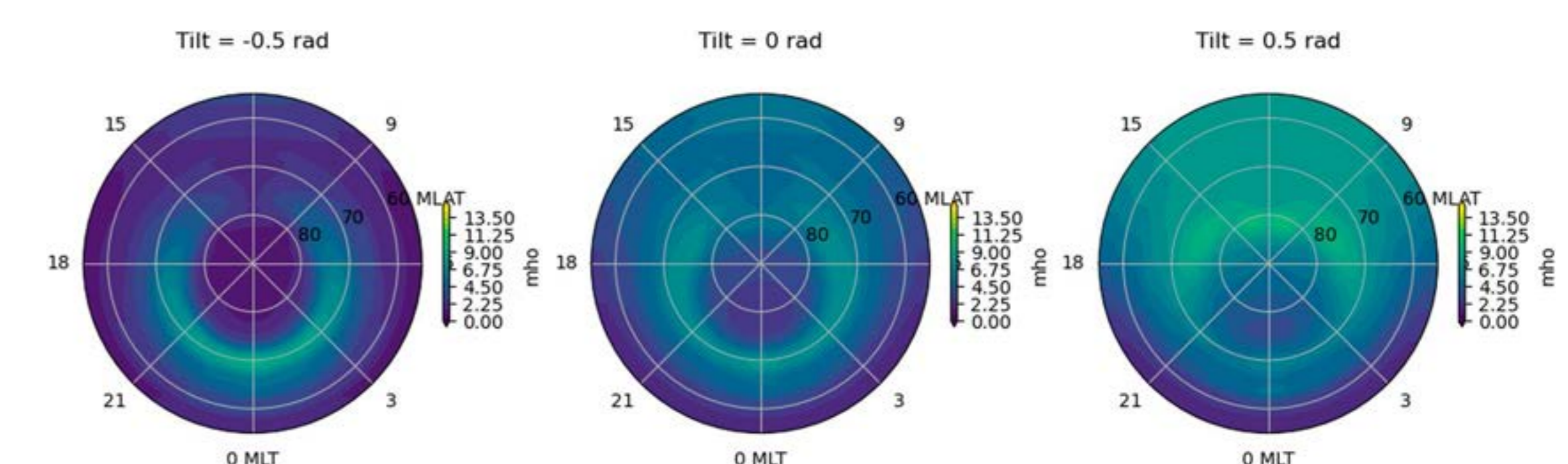
但し、 \mathbf{d}_k はネットワークの出力と比較すべきデータである。

ここでは、REPPUの出力結果を予め主成分分析にかけておき、各成分の強さ(主成分得点)の時系列を \mathbf{d}_k として用いている。

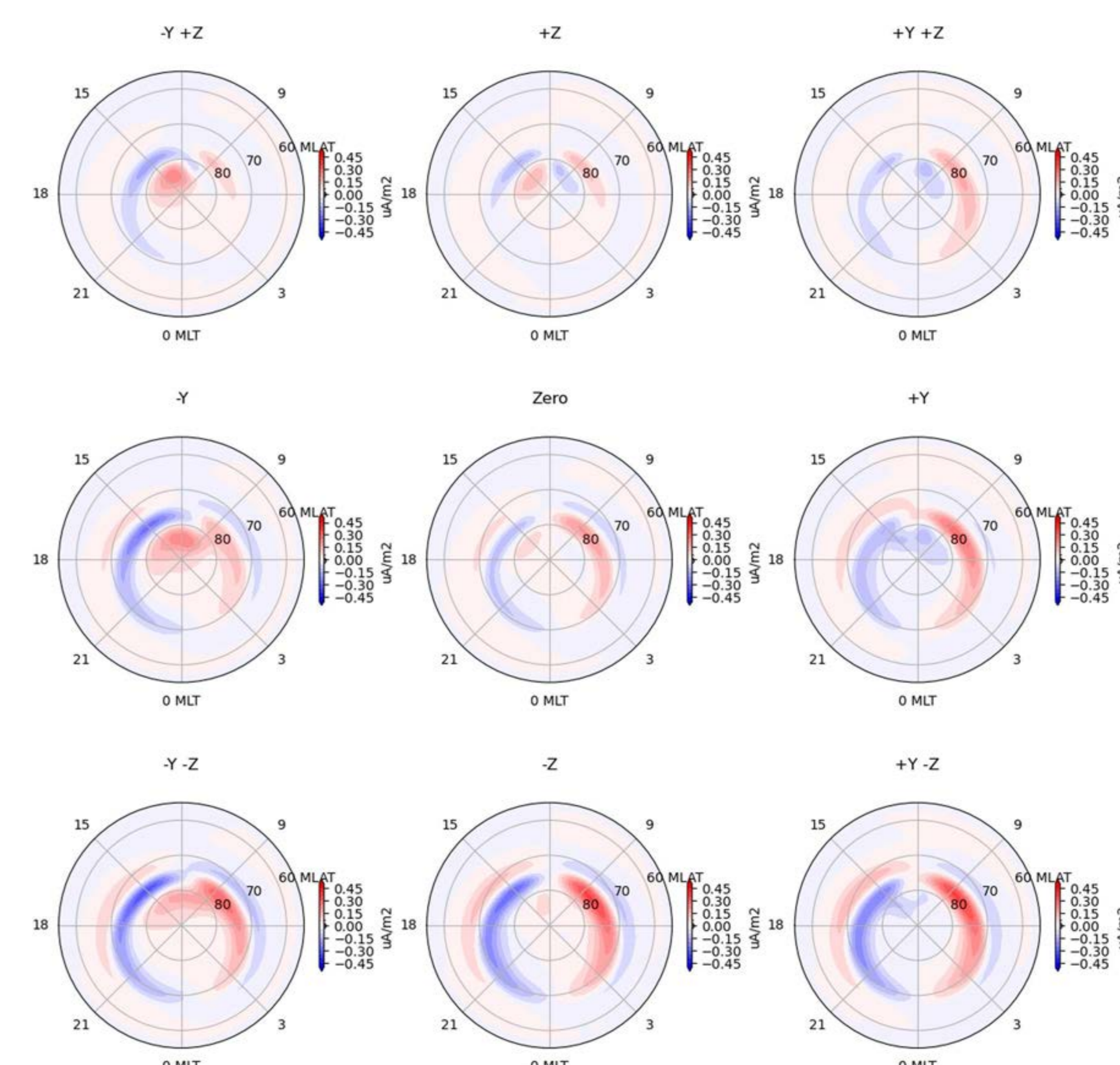


エミュレータから得られた定常的な太陽風条件下での極域電離圏電位分布。

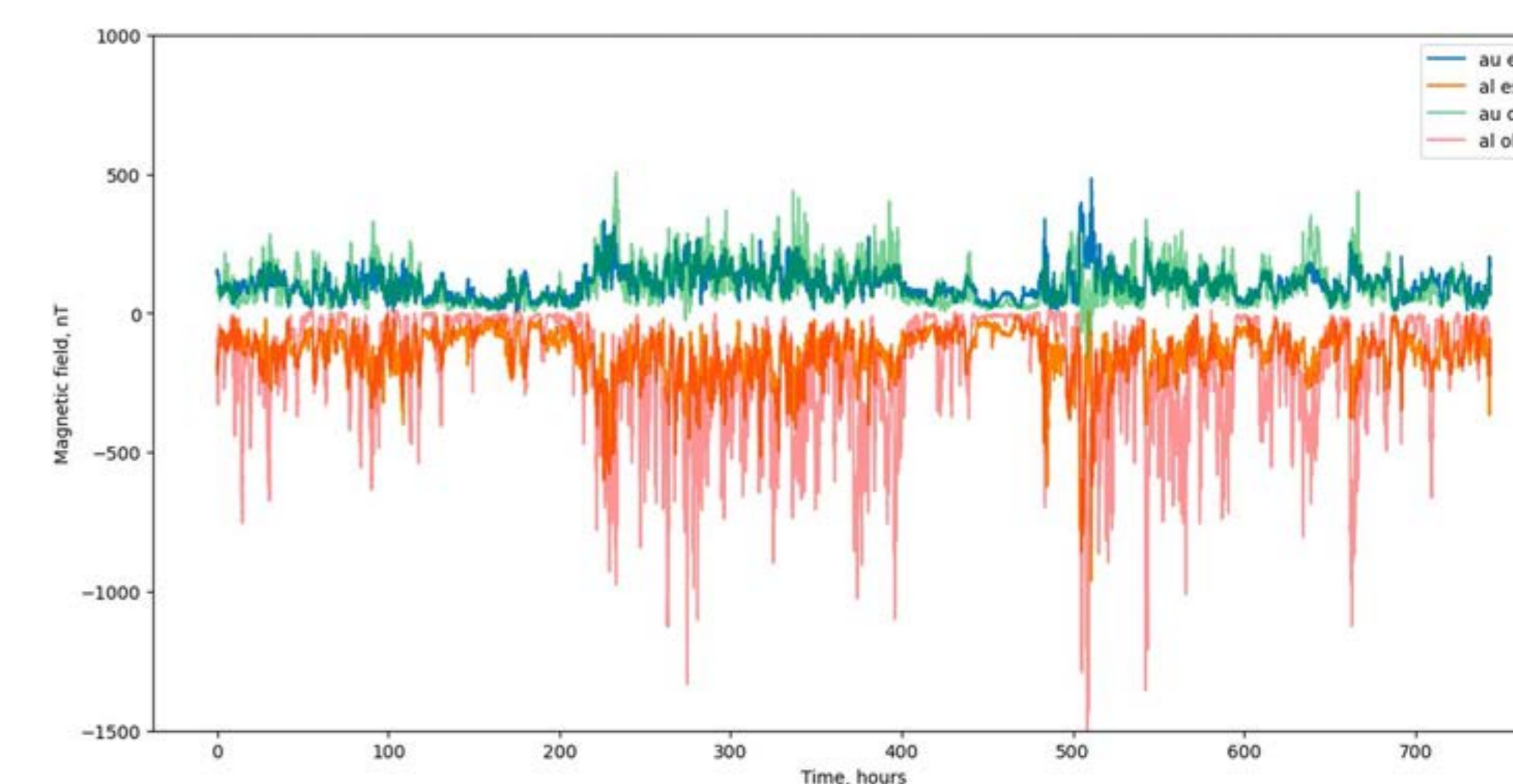
極域電離圏の特性の再現



エミュレータから得られた定常的な太陽風条件下での極域電離圏電気伝導度分布。



エミュレータから得られた定常的な太陽風条件下での極域電離圏沿磁力線電流分布。



エミュレータで再現したオーロラ活動度指数 (AU/AL 指数) の長期変化。

なお、本研究はROIS-DS-JOINT 012RP2023の支援を受けて実施した。エミュレータに関する成果は、Kataoka et al. (2024)で発表し、極地研、情報通信研究機構、統計数理研究所、DS施設の共同でプレスリリースを出した。