

<宇宙天気 AI 予測>

1. 太陽フレア予報運用モデル Deep Flare Net

●太陽フレアと黒点観測

太陽フレアは黒点周辺で発生し、X線や荷電粒子を放出して社会に影響することがあります。そのためフレアの発生機構の解明と予測精度の向上は、重要な課題となっています。フレアの予測には、黒点付近に蓄積された余剰エネルギーやフレアの前兆現象を監視することが大事です。黒点観測の歴史は古く、大きく複雑な黒点ほど大規模なフレアが発生しやすいことがわかっています。近年は人工衛星による太陽観測が行われるようになり、リアルタイムで見られる情報も増えています。

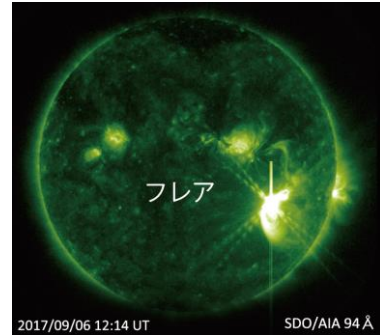


図 1: 太陽フレアの極端紫外線観測画像 (SDO 衛星/NASA)

●機械学習を用いた太陽フレア予測

NICT では約 30 万枚の太陽観測画像に深層学習を適用し、太陽フレア予測モデル Deep Flare Net を開発しました。同モデルでは黒点毎に 24 時間以内に発生する太陽フレアの発生確率を規模別に予測することができます。衛星観測データ取得、黒点自動検出、特徴量抽出、そして深層学習による予測を行います。入力には、太陽研究の歴史や宇宙天気予報の経験を活かした特徴量を用います。また Residual Net を元にスキップ接続を組み込み、かつ重みつき損失関数を用いるなど工夫しました。その結果、従来の人手による 3-5 割の予測精度を 8 割程度まで向上することに成功しました。

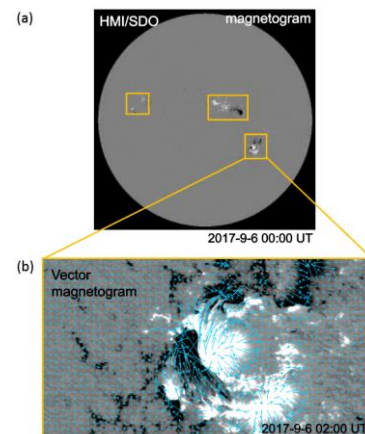


図 2: 太陽衛星観測磁場データの例 (SDO 衛星/NASA)。[1]

●予報運用と宇宙天気予報会議での利用

本モデルは 2019 年から運用を開始し、Web で予報結果を公開しています。6 時間更新され、リアルタイムの太陽画像と検出活動領域を示し、右側に領域毎のフレア発生確率を示しています。これは毎日 NICT で行う宇宙天気予報会議でも参考に活用されています。人手予報と AI 予報を比較検証することで、双方の予測精度向上にも寄与しています。2025 年頃が次の太陽活動ピークと予想されています。近頃太陽フレアの発生数は増加し、今後さらに活躍の機会は増えると期待されます。

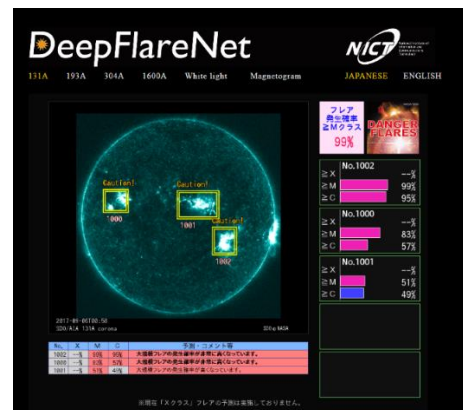


図 3: Deep Flare Net の予報ページ[2,5]

【関連資料】

- [1] NICT 研究報告、宇宙環境計測・予測技術特集、vol.67, No. 1, 2021
4章 太陽・太陽風研究, 4-3節 太陽フレア発生予測
<https://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/houkoku67-1/book/html5.html#page=155>
- [2] Deep Flare Net 予報運用ページ
<https://defn.nict.go.jp/>
- 論文
 - [3] Nishizuka, N., Sugiura, K., Kubo, Y., et al. "Solar Flare Prediction Model with Three Machine-learning algorithms using Ultraviolet Brightening and Vector Magnetograms", *Astrophysical Journal* 835, 156 (2017).
<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/835/2/156/meta>
 - [4] Nishizuka, N., Sugiura, K., Kubo, Y., et al. "Deep Flare Net (DeFN) Model for Solar Flare Prediction", *Astrophysical Journal* 858, 113 (2018).
<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aab9a7/meta>
 - [5] Nishizuka, N., Kubo, Y., Sugiura, K. et al. "Operational solar flare prediction model using Deep Flare Net", *Earth Planets Space* 73, 64 (2021).
<https://doi.org/10.1186/s40623-021-01381-9>

<宇宙天気AI予測>

2. 機械学習を用いたリアルタイム電離圏監視システム

●電離圏とイオノゾンデによる観測

超高層大気である電離圏は高度 80-800km に位置し、太陽活動や下層大気の気象の影響を受けながら変化しています。電離圏の状態は、短波通信や衛星測位に影響を与えるため、その状況を知ることは重要です。イオノゾンデという電離圏観測装置では、上空に打ち上げた電波パルス信号のエコーを聞くことにより、電離圏の状態を把握します。NICT ではイオノゾンデ観測を国内 4 地点で行うことで、電離圏の監視を常時行っています。



図1 イオノゾンデ (小金井)

●電離圏からの山びこ(エコー)、イオノグラム

イオノゾンデ観測データから電離圏の状態を把握するには、イオノグラムと呼ばれる観測結果画像から電離圏エコーの値を読み取る必要があります。従来、専門家が目視で読み取りを行ってきましたが、観測データの増加やリアルタイム解析の必要性などから自動読み取りの必要性が高まってきました。

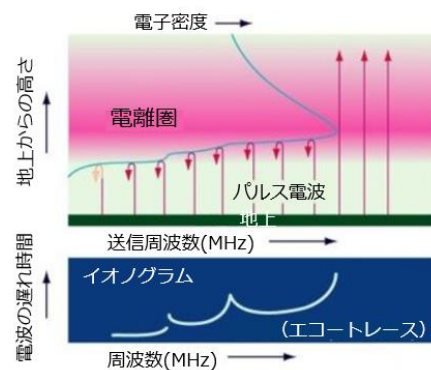


図2 イオノグラムの原理

●機械学習によるイオノグラムの画像認識

NICT では、イオノグラムに機械学習の物体検出モデルを適用することで、リアルタイムかつ高精度な電離圏エコーの読み取りを可能にしました。また電波伝搬に影響を与えるスプラディック E 層 (Es) や電離圏嵐を、より高精度に自動検出できるようになりました。物体検出モデルには Faster-RCNN (Region with Convolutional Neural Network) を使用しました。また学習データには 2018 年の 1 年間に国内 4 観測点で取得されたイオノグラム 1 万枚を用い、教師データには専門家による手動読み取りデータを用いて再現した矩形データを使用しました。検出の成功率 (Accuracy) は、エコーの極大周波数である F 層臨界周波数 (foF2) が 68% から 91% に上昇、エコー出現の見かけ高さ (h'F) が 22% から 83% に上昇と、飛躍的な改善が見られました。

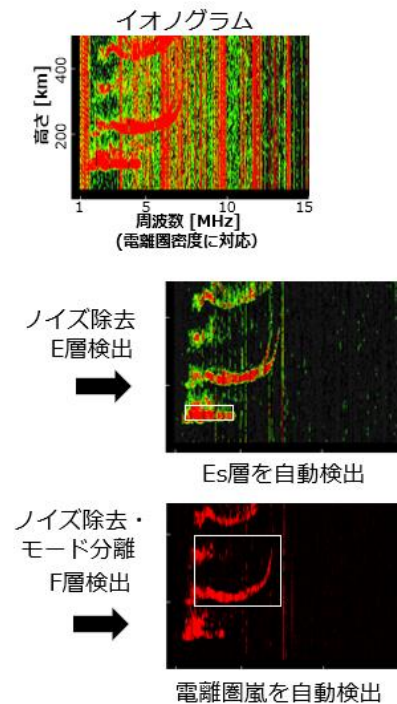


図3: 画像検出の説明

●リアルタイム表示による予報運用での活用

本手法は 2020 年以降、イオノゾンデ観測データに適用され、自動読み取り手法として公開されています。図 4 にその例を示します。赤色が新モデルによって読み取られた foF2、黒線が基準値としての過去 27 日間の中央値です。赤点が黒線よりどれだけ増加または減少しているかの値に応じて、背景に灰色で基準が示されており、その基準に基づいて電離圏状況を配信しています。図中の 5 月 20 日に表示されている「I_p2」は、foF2 が基準よりも大きい「正相嵐」が起きていることを示しています。「I_p2」の正相嵐は月に 1 回程度の頻度で起こることが統計的に明らかにされています[Nishioka et al., 2017]。

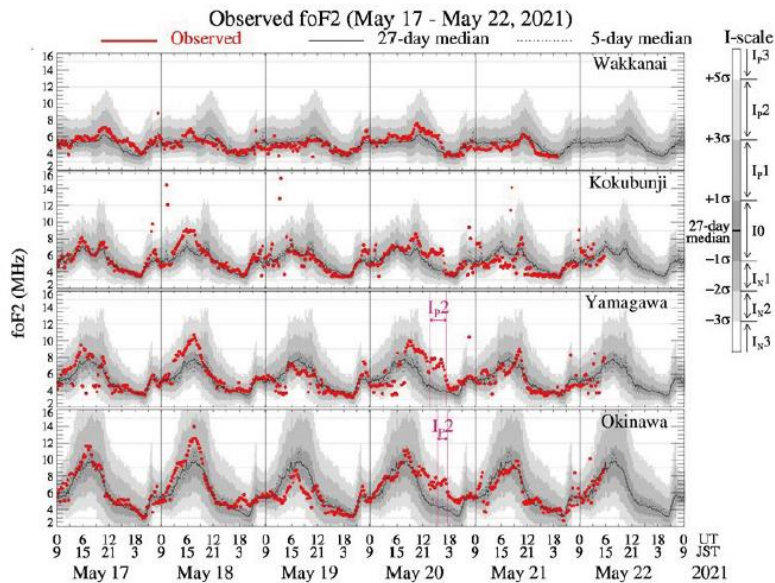


図 4 新自動読み取り手法でリアルタイムに表示される foF2 の値。6 日間の時系列プロット。4 観測地点 (サロベツ局、国分寺局、山川局、大宜味局)

【関連資料】

- NICT 研究報告、宇宙環境計測・予測技術特集、vol.67, No. 1, 2021
2 章 電離圏観測, 2-1 節 VIPR2 による国内電離圏定常観測
<https://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/houkoku67-1/book/html5.html#page=11>
- イオノゾンデとイオノグラムについての説明
<https://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/contents/Ionogram.html>
- 電離圏観測リアルタイム (イオノゾンデ、全電子数)
<https://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/realtime.html>
<https://wdc.nict.go.jp/ISDJ/index.html>
<https://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/index.html>
- 国内定常観測自動読み取り値
https://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/auto_txt.html
- WDC for Ionosphere and Space Weather
<https://wdc.nict.go.jp/IONO/wdc/index.html>
- 論文 Nishioka, M., T. Tsugawa, H. Jin, and M. Ishii (2017), A new ionospheric storm scale based on TEC and foF2 statistics, Space Weather, 15, 228–239, doi:10.1002/2016SW001536.

<宇宙天気 AI 予測>

3. 放射線帯高エネルギー電子数レベルの確率予報

●人工衛星と放射線帯の影響

GPS 衛星による位置情報サービスや、気象衛星の観測データをもとにした天気予報など、人工衛星は現代の私たちの生活を支えている重要な社会基盤と言えます。人工衛星には持続的かつ安定した運用が求められますが、宇宙空間は過酷な環境です。地球磁気圏に閉じ込められた高エネルギーの電子は、人工衛星の電気電子機器に影響を与え、不具合や障害の原因となります。NICT では、この高エネルギー電子が閉じ込められている電子放射線帯の予報を行なっています。

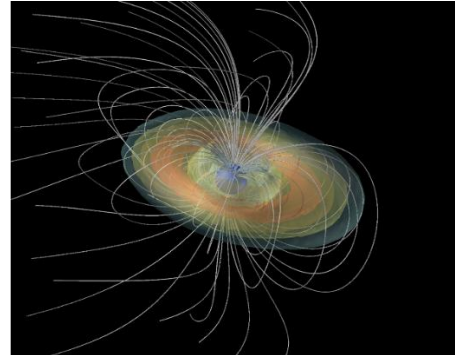
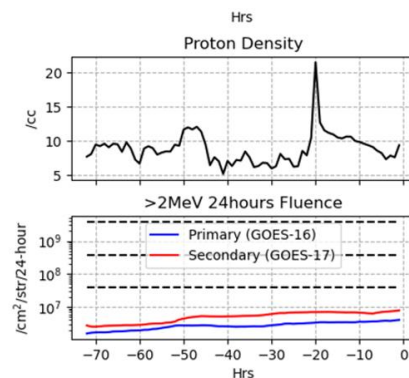


図 1: 地球周辺の放射線帯電子の分布。白線は地球の磁力線。

●機械学習を用いた放射線帯電子の時系列予測

NICT では、気象衛星ひまわりが飛ぶ静止軌道での 24 時間後の高エネルギー電子数のレベルを確率予測する深層学習モデル RadeAI (**R**adiation belt **e**lectrons – **A**.I.) を開発しました。同モデルでは、光速の約 90% 程度の速さを持つ放射線帯電子が人工衛星に降り注いだ 24 時間積算量について、4 段階レベルで確率予測することができます。



本モデルでは、多層パーセプトロン 4 層を用いて予測を行います。入力データとしては、米国気象衛星 GOES によって観測された放射線帯電子 24 時間積算量に加え、過去 72 時間の太陽風の速度、密度、磁束量を用います。学習データには GOES 衛星等の約 24 年間の観測データを用いました。そして 24 時間先の放射線帯電子 24 時間積算量レベルの確率予報が円グラフで出力されます。

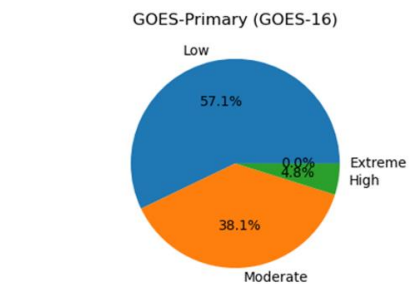


図 2: 放射線帯電子の観測データ、及び RadeAI による放射線帯電子確率予報。

●RadeAI の宇宙天気予報での利用

現在 RadeAI は日々の宇宙天気予報会議で用いられています。宇宙天気予報会議では、GOES-16・17 観測による放射線帯高エネルギー電子積算量について同モデルによる確率予報結果を参照し、総合的に人が判断して 24 時間後の放射線帯予報を行ないます。2024 年から 2025 年以降、太陽活動とあわせて放射線帯電子の変動も激しくなることが予想され、RadeAI による予報がより重要になると期待しています。

静止軌道の高エネルギー電子

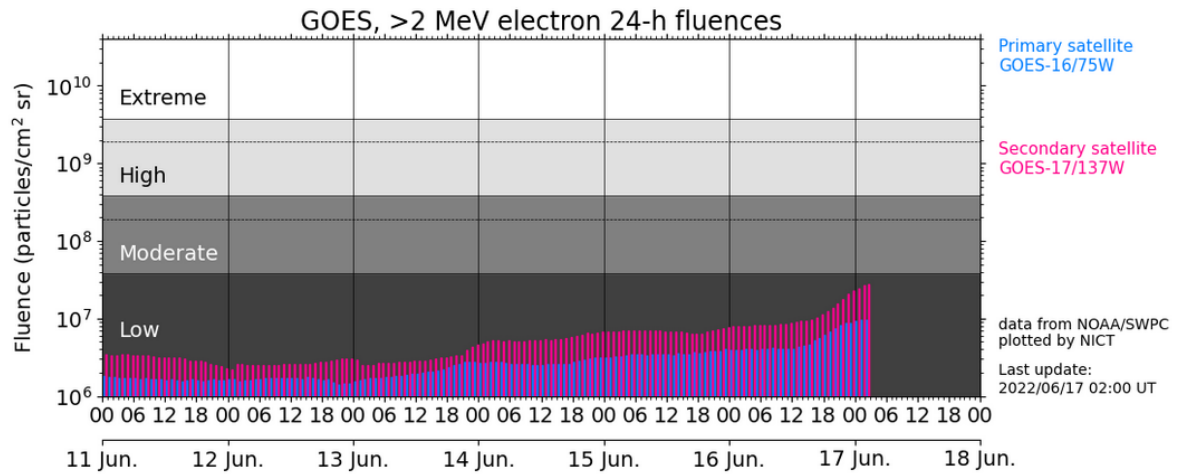


図 3: 放射線帯電子の現況の予報ページ (<https://swc.nict.go.jp/trend/electron.html>)

【関連資料】

- NICT 研究報告、宇宙環境計測・予測技術特集、vol.67, No. 1, 2021
3章 磁気圏研究, 3-2節 放射線帯粒子シミュレーション
<https://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/houkoku67-1/book/html5.html#page=111>
- 放射線帯について
<https://radi.nict.go.jp/radio/>
- 放射線帯電子の現在値
<https://swc.nict.go.jp/trend/electron.html>