

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17620

研究課題名(和文) 太陽ベクトル磁場観測データのリアルタイム解析によるフレア予測モデル開発

研究課題名(英文) Solar Flare Prediction by Real-time Observation Data Analysis of Solar Vector Magnetograms

研究代表者

西塚 直人(Nishizuka, Naoto)

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所宇宙環境研究室・研究員

研究者番号：10578933

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：機械学習とビッグデータを用いた予測モデル開発により、宇宙天気予報の精度を格段に上げることに成功した。宇宙天気予報は毎日配信されているが、予報精度の向上が長年の課題である。本研究では、複数の機械学習手法を太陽観測データ解析に応用することで、大量の情報処理による統計的な太陽フレアの予測を可能にした。その結果、従来の人手による5割程度の手法に比べ、8割を超える世界トップクラスの精度まで予測精度を上げることに成功した。また、太陽フレア発生前の特徴を統合的に機械学習によるデータ分析から明らかにし、太陽フレアの謎を解く鍵が得られた。さらに現在、リアルタイム予報運用へ向けて準備を進めている。

研究成果の概要(英文)：Our flare prediction model using machine-learning techniques and big data of solar observation images dramatically improved our skill of the space weather forecast. Whereas the space weather forecasting service has been delivered every day for a long time, we had a difficulty in improving its accuracy. In this research, we applied machine-learning techniques to solar observation data analysis, and we developed a new model to predict solar flares statistically by dealing with the huge amount of data. As a result, we succeeded in improving the prediction accuracy up to 80%, much better than the human forecasting around 50%. We also revealed the ranking of features effective for flare prediction. Using our new prediction model, the real-time forecasting operation system of solar flares will be prepared soon.

研究分野：太陽物理

キーワード：太陽フレア 予測 宇宙天気 機械学習 衛星画像 画像検出 深層学習 ビッグデータ

1. 研究開始当初の背景

太陽面爆発フレアの発生機構は、太陽物理における長年の謎の一つである。近年の太陽観測から、磁場エネルギーをプラズマの熱・運動エネルギーに変換する磁気リコネクションモデルはほぼ確立した。しかしながら、エネルギーの蓄積過程や、磁気リコネクションのトリガー機構はまだ解決されていず、フレアの予測はまだ困難である。

フレア予測は宇宙天気予報の重要課題でもある。一番の問題点は、トリガー機構の正体が未解明な点である。全フレアにおける検証作業もデータが膨大で困難である。現在、特定の物理量や「特徴量」を使ってデータを一括解析する方法が考えられているが、適切な物理量や特徴量の選定においても解決すべき問題が多い。

2. 研究の目的

本研究の目的は、宇宙天気予報の一項目である太陽フレア発生予測の精度を上げることであり、太陽黒点磁場の歪みや浮上磁場観測データを用いたフレア発生確率の予測と、従来の予報手法と組み合わせた将来予報モデルのプロトタイプを開発することである。

本研究では、近年の衛星観測により可能になった高精度3次元ベクトル磁場の定常観測をフレア予測の判断材料として組み込むことでフレア発生と規模の予報精度の向上を図った。また、そのために必要な過去の観測データを用いた検証、リアルタイム予報(1日毎)に使える手法の確立と簡易化(自動化)、データ解析環境の整備、国内協力体制の強化推進を行う。最終的には3-5年後の実用化を目指し、萌芽的研究として本課題を提案した。

3. 研究の方法

本研究では、太陽3次元ベクトル磁場データを用いて太陽黒点磁場の歪みやフレアのトリガーとなる浮上磁場を検出し、フレア発生確率を予測する新手法を開発する。まずマニュアル解析で検証した後、プロセスを自動化・半自動化し、最終的にリアルタイムで取得された太陽磁場データをもとに自動画像判別によって磁場の歪みや浮上磁場の出現を検知測定し、フレア発生確率と発生規模を予測する予報モデルを作る。磁場の歪みはベクトル磁場の水平方向成分から導出する。磁気中性線上の浮上磁場は、磁気中性線の微小な変化から捉える。さらに画像類似検索の手法(機械学習)を用いて、より広範にフレア発生前の前兆現象(類似パターン)を探索し、各状態におけるフレア発生確率を統計データベース化する。そして、最終的に実証実験を行って、3-5年後の実用化を目指す。

4. 研究成果

(1) 太陽フレア予測プロトタイプモデル:

過去の太陽観測画像データ約30万枚をNASAアーカイブから収集し、3種類の機械学習手法を用いて、翌24時間の太陽フレア発生を予測するモデルを開発した(図1)。その結果、従来の人手による予測を超える予測精度8割を達成することに成功し、機械学習手法の有効性を示した。また、太陽画像からフレア発生直前の特徴量として何が有効かランキングを示し、太陽フレア発生機構を解明する新たなアプローチを開拓した。

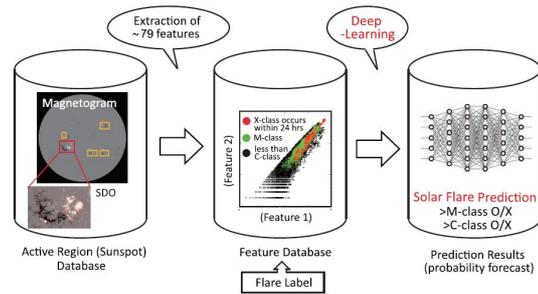


図1: 太陽フレア発生の予測モデルのフローチャート(概要図) [Nishizuka et al. 2018 ApJ から引用]

学習データ作成には、NASAのSDO衛星観測による高分解能データ30万枚を用い、約60個の物理特徴量に注目した。用いた特徴量は、長年の宇宙天気予報の経験や過去の論文をもとに決定した。今回開発した太陽フレア予測のモデル概要を図1に示す。まずNASAから2010年~2015年の6年分の太陽観測画像データを取得し、各太陽全面画像から活動領域(黒点周辺領域)を自動検出した(図2)。次に各領域から黒点面積や磁場強度、歪みエネルギーといった特徴量約60個を計算し、太陽フレア発生直前データに関してはラベルを付与することで教師データを作成した。最後に全データを学習用と訓練用とに分割し、複数の機械学習手法を用いて太陽フレアの予測を行った。

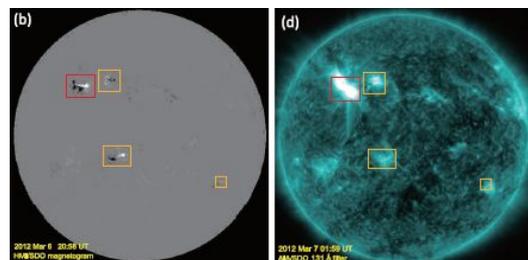


図2: 太陽画像と検出された黒点(SDO衛星/NASA)

今回、一般的な機械学習手法であるサポートベクターマシン(SVM)、k近傍法(kNN)、アンサンブル学習(ERT)を用いた。太陽フレアの予測結果を図3に示す。従来人手では5割弱程度だった予測精度から、どの機械学習手法を用いても8割(TSS=0.80)を超える世界トップクラスの精度を達成することに成功した。

		Observation						SVM		Observation	
		flare	no			flare	no			flare	no
Prediction	flare	TP	FP			144	15				
	no	FN	TN			18	54439				
		TSS = $\frac{TP}{TP+FN} - \frac{FP}{FP+TN}$				TSS= 0.889					

		Observation						kNN		Observation	
		flare	no			flare	no			flare	no
Prediction	flare	146	6			130	1				
	no	16	54448			32	54453				
		TSS= 0.927				TSS= 0.802					

図 3: 機械学習による X クラス以上の太陽フレアの予測結果とスコア(TSS)

図 4 に、選んだ黒点の特徴の例として、磁気中性線(図 4 右上、黄線)や磁場の歪み(図 4 左下、赤矢印)、彩層低部の発光(図 4 右下)を示す。本研究では、約 60 個の黒点の特徴について、太陽フレア発生前の重要度のランキングについても、統合的に機械学習を用いた分析により明らかにした。すると、従来重要だと思われていた黒点の特徴のほかに、磁気中性線の長さや本数、及び今回新たに採用した彩層低部の発光の面積も重要であるということが明らかになった。

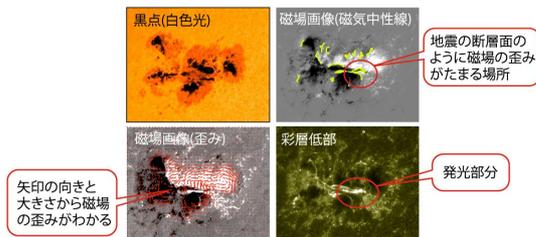


図 4: 太陽黒点の磁場と彩層低部画像 (SDO 衛星/NASA)

磁気中性線の長さや本数は、地震発生メカニズムに類似して、太陽黒点に蓄積された歪みエネルギーや、フレアのトリガメカニズム候補である小規模磁場の出現と関連が強いと考えられる。また、彩層低部の発光も、小規模磁場の太陽大気下層からの出現と関連があると解釈され、未だに解明されていない太陽フレアの発生メカニズムを知る手がかりを示している。

(2) 予報運用モデル開発(深層学習モデル):

現在、国際民間航空機関(ICAO)では2020年頃を目標に、海洋上・極域航路での通信、宇宙放射線被ばく、さらにGPSを利用した測位などに影響を与える宇宙天気の情報、通常の運航業務で利用しようという計画が進められている。このような状況において、本太陽フレアの予測モデルが、リアルタイム(最短1時間間隔が目標)で、より精度の高い予測情報として活用される必要がある。

そこで次に、運用形式での太陽フレア予測モ

デルの開発に着手した。プロトタイプモデルの場合、予報運用形式では予測精度が十分でないことが明らかになったため、より高精度な深層学習手法を用いた太陽フレア予測モデル開発に挑戦した。

予報運用形式には直前データが有効なため、学習データ作成には、プロトタイプと同じ60種類の特徴量の他に、軟X線や極端紫外線強度の1, 2, 3時間前頃の各最大値を追加し、約80個の特徴量を用いた。深層学習手法に関しては、機械学習の専門家との連携により、音声翻訳に使われる新技術を太陽フレアの予測に応用した。その結果、運用形式でも8割を超える予測精度を達成し、かつ各領域に対して太陽フレアの発生確率の算出が可能になった(図5)。

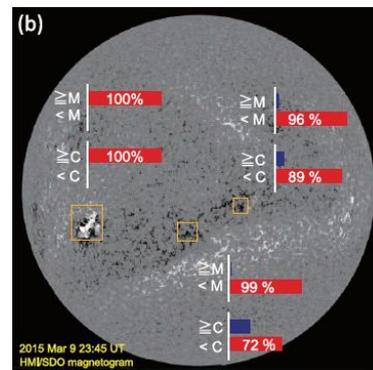


図 5: 深層学習モデルによる太陽フレアの確率予報の例[Nishizuka et al. 2018 ApJ から引用]

これらの研究成果は、米国科学誌 ApJ に論文出版した他、プレスリリースして新聞 Web にも多数掲載された。現在は、深層学習モデル(Deep Flare Net, 略称 DeFN と命名)の特許申請を行いつつ、リアルタイム予報運用化に向けた準備を、今夏を目処に進めている。

最後に、本研究では黒点毎の太陽フレア予測を行った(図6)。太陽の見かけ上、真ん中付近で太陽フレアが発生すると、地球への影響は大きくなる傾向がある。そのため、場所を考慮することで地球への影響が判断できるのも、本モデルの特長である。さらに、今後は地球への影響とも照し合せながら、今まで一日一回だけ行われていた予報からリアルタイム予報へと移行し、検証をしながら実用化を進めていきたい。

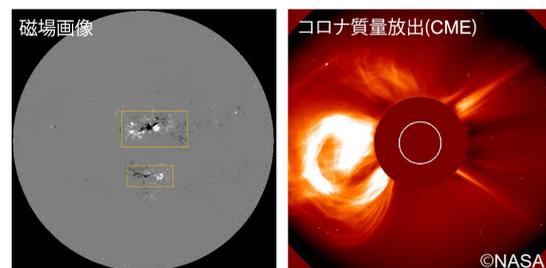


図 6: (左) 太陽磁場画像と検出黒点(SDO/NASA) (右) 外へ飛び出す太陽大気プラズマ(SOHO, ESA/NASA)

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

Nishizuka, N., Sugiura, K., Kubo, Y., Den, M. & Ishii, M., “Deep Flare Net (DeFN) Model For Solar Flare Prediction”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 858, 2018, 113-120, DOI: 10.3847/1538-4357/aab9a7

Nishizuka, N., Sugiura, K., Kubo, Y., Den, M., Watari, S. & Ishii, M., “Flare Prediction Using Machine Learning with Multiwavelength Observations”, *The Proc. IAU Symposium No. 335, 2017 (C. Foullon & O. Malandraki, eds.)*, *Space Weather of the Heliosphere: Processes and Forecasts*, 査読有, 印刷中, 2018

Joshi, N. C., Nishizuka, N., Filippov, B., Magara, T. & Tlatov, A. G., “Flux Rope Breaking And Formation Of A Rotating Blowout Jet”, *Monthly Notice of Royal Astronomical Society*, 査読有, 476, 2018, 1286-1298, DOI: 10.1093/mnras/sty322

西塚直人, 堀田英之, 鳥海森, “太陽ダイナモを起点とした黒点形成とフレア爆発への物理過程”, *プラズマ核融合学会誌*, 査読有, 94 巻, 2018, 51-57,
http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2018_02/jspf2018_02-51.pdf

西塚直人, “宇宙天気予報の精度を上げる技術の開発 –機械学習とビッグデータで、太陽フレアの発生予測を8割へアップ–”, *電子情報通信学会誌*, 査読有, 100巻, 2017, 517-518

Nishizuka, N., Sugiura, K., Kubo, Y., Den, M., Watari, S., & Ishii, M., “Solar Flare Prediction Model with Three Machine-learning Algorithms using Ultraviolet Brightening and Vector Magnetograms”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 835, 2017, 156-165, DOI: 10.3847/1538-4357/835/2/156

西塚直人, 久保勇樹, 杉浦孔明, 田光江, 亘慎一, 石井守, “機械学習を用いたリアルタイム太陽フレア予測”, 第13回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集, 査読無, JAXA-SP-16-010, 2017, 103-106
<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/bitstream/am/a-is/599476/1/AA1630038018.pdf>

Kang, J., Magara, T., Inoue, S., Kubo, Y., Nishizuka, N., “Distribution Characteristics of Coronal Electric Current Density as an Indicator for the Occurrence of A Solar Flare”, *Publication of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, 68, 2016, 101-108, DOI: 10.1093/pasj/psw092

〔学会発表〕(計 29 件)

西塚直人, “太陽フレアの磁気リコネクション観測とサブストームとの比較”, 磁気圏ダイナミクス研究会, **招待講演**, 2018年3月19~20日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

西塚直人, “機械学習で巨大太陽フレアはどこまで予測できるか?”, PSTEP・ISEE研究集会「太陽地球圏環境予測のためのモデル研究の展望」第2回, **招待講演**, 2018年2月26日~27日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

西塚直人, 久保勇樹, 杉浦孔明, 田光江, 石井守, “宇宙天気予報のための太陽観測とフレア予測”, 2017年度太陽研連シンポジウム「太陽研究の将来展望」, 2018年2月19日~21日, 京都大学(京都府京都市)

西塚直人, 杉浦孔明, 久保勇樹, 田光江, 亘慎一, 石井守, “Flare Forecast using Machine-learning of Multi-wavelength Observations of Active Regions”, *The 4th Asia-Pacific Solar Physics Meeting (APSPM 2017)*, 2017年11月7日~10日, 京都大学(京都府京都市)

西塚直人, 杉浦孔明, 久保勇樹, 田光江, 石井守, “NICT Flare Prediction Model: machine-learning model”, ISEE/PSTEP workshop “Bench Marks for Operational Flare Forecasts”, **招待講演**, 2017年10月31日~11月2日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

西塚直人, “Review of Known Types of Pulsations in Solar Flares & their Interpretation by Intermittent Magnetic Reconnection”, ISSI-BJ Team Meeting “Pulsations in solar flares: matching observations & models”, **招待講演**, 2017年10月16~20日, 北京(中国)

西塚直人, 杉浦孔明, 久保勇樹, 田光江, 亘慎一, 石井守, “Machine-learning of Solar Flare Prediction and Operational Evaluation Method”, SHINE conference 2017 (Solar Heliospheric & Interplanetary Environment), 2017年7月24日~28日, サンソヴェール(カナダ)

西塚直人, 杉浦孔明, 久保勇樹, 田光江, 亘慎一, 石井守, “Flare Prediction Model with Vector Magnetogram and Chromospheric Brightening Using Machine-learning”, IAU Symposia (International Astronomical Union) IAUS 335 “Space Weather of the Heliosphere: Processes and Forecasts”, 2017年7月17日~21日, エクセター(英国)

西塚直人, 杉浦孔明, 久保勇樹, 石井守, “Solar Flare Prediction using the Machine-learning and Operational Evaluation Method”, 日本地球惑星科学連合連合大会2017年大会, 2017年5月21日~24日,

幕張メッセ(千葉県幕張市)

西塚直人, 杉浦孔明, 久保勇樹, 田光江, 巨慎一, 石井守, “Solar Flare Prediction using Machine-learning Algorithms”, The 2nd PSTEP International Symposium (PSTEP-2), **招待講演**, 2017年3月23日~24日, 京都大学(京都府京都市)

西塚直人, 杉浦孔明, 久保勇樹, 石井守, “Gradient Boosted Treesによる太陽フレア予測と時系列交差検証”, 日本天文学会2017年春季年会, 2017年3月15日~18日, 九州大学(福岡県福岡市)

西塚直人, 久保勇樹, 杉浦孔明, 田光江, 巨慎一, 石井守, “宇宙天気予報のための太陽フレア予測”, 太陽研究者連絡会シンポジウム, 2017年2月20日~22日, JAXA宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

西塚直人, 杉浦孔明, 久保勇樹, 田光江, 巨慎一, 石井守, “太陽フレア予測への機械学習の応用”, 宇宙科学情報解析シンポジウム, 2017年2月10日, JAXA宇宙科学研究所(神奈川県相模原市)

西塚直人, 久保勇樹, 杉浦孔明, 田光江, 巨慎一, 石井守, “機械学習を用いたリアルタイム太陽フレア予測”, 第13回宇宙環境シンポジウム, **招待講演**, 2016年11月1日~2日, 情報通信研究機構(東京都小金井市)

西塚直人, 杉浦孔明, 久保勇樹, 田光江, 巨慎一, 石井守, “Flare Prediction Model with Machine-learning using Vector Magnetogram and Chromospheric Brightening”, The 4th AOSWA Workshop (AOSWA-4), 2016年10月24日~27日, チェジュ(韓国)

西塚直人, 久保勇樹, 田光江, 巨慎一, 石井守, 杉浦孔明, “太陽フレア予測のための特徴量の重要性と評価手法考察”, 日本天文学会2016年秋季年会, 2016年9月14日~16日, 愛媛大学(愛媛県松山市)

西塚直人, 久保勇樹, 田光江, 巨慎一, 石井守, 杉浦孔明, “太陽フレア発生予測のための太陽画像認識と機械学習の応用”, 日本天文学会2016年秋季年会, 2016年9月14日~16日, 愛媛大学(愛媛県松山市)

西塚直人, 杉浦孔明, 久保勇樹, 田光江, 巨慎一, 石井守, “Machine-learning Flare Prediction Using Vector Magnetogram and Chromospheric Brightening”, Hinode-10 Science Meeting, 2016年9月5日~8日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

西塚直人, Sterling, A. C., “Relationship between Chromospheric Anemone Jets in an Active Region and Photospheric Magnetic Field Dynamics”, Hinode-10 Science Meeting, 2016年9月5日~8日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

西塚直人, 林由記, 田辺博士, 桑波田晃弘, 神納康宏, 井通暁, 小野靖, 清水敏文, “A Laboratory Experiment of Magnetic Reconnection: Outflows, Heating and Waves in Chromospheric Jets”, The 2016 International Congress on Plasma Physics (ICPP 2016), **招待講演**, 2016年6月27~7月1日, 高雄市(台湾)

21 西塚直人, 杉浦孔明, 久保勇樹, 田光江, 巨慎一, 石井守, “Solar Flare Prediction with Vector Magnetogram and Chromospheric Brightening using Machine-learning”, 日本地球惑星科学連合 連合大会2016年大会, 2016年5月22日~26日, 幕張メッセ(千葉県幕張市)

22 西塚直人, 久保勇樹, 杉浦孔明, 田光江, 巨慎一, 石井守, “太陽磁場観測による機械学習を用いた太陽フレア予測モデル開発”, 日本天文学会2016年春季年会, 2016年3月15日~17日, 首都大学(東京都南大沢市)

23 西塚直人, “Impulsive Reconnection driven by Multiple Plasmoid Ejections in Solar Flares and Laboratory Experiments”, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection (MR2016), **招待講演**, 2016年3月7日~11日, ナパ(米国)

24 西塚直人, 久保勇樹, 田光江, 巨慎一, 石井守, 杉浦孔明, “太陽観測データと機械学習を用いた宇宙天気予報モデル開発”, 太陽研連シンポジウム「ひので10年目の成果とSolar-Cを柱とする太陽研究の新展開」, 2016年2月15日~17日, 国立天文台(東京都三鷹市)

25 西塚直人, 久保勇樹, 田光江, 巨慎一, 石井守, 杉浦孔明, “Solar Flare Prediction with Machine-learning of Real-time Vector Magnetogram Data, 新学術領域太陽地球圏環境予測 (PSTEP) 第1回国際シンポジウム, 2016年1月13日~14日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

26 西塚直人, 小野靖, “トピックス1: プラズモイド(太陽側/実験側話題提供)”, 第23回ひので-実験室研究会, 2015年10月13日, 東京大学(東京都文京区)

27 西塚直人, 久保勇樹, 田光江, 巨慎一, 石井守, “Development of Solar Flare Prediction Technique Based on Image Processing of Real-time Solar Magnetogram Data”, SCOSTEP-WDS Workshop on Global Data Activities for the Research of Solar-Terrestrial Variability, 2015年9月28日~30日, 情報通信研究機構(東京都小金井市)

28 西塚直人, 久保勇樹, 田光江, 巨慎一, 石井守, “フレア発生前磁場特徴量の統計的傾向とフレア予測手法開発”, 日本天文学会2015年秋季年会, 2015年9月9日~11日, 甲南大学(兵庫県神戸市)

- 29 西塚直人, “Modeling of Fractal Reconnection and Particle Acceleration in Solar Flares”
12th Annual Meeting, Asia Oceania
Geosciences Society (AOGS 2015), **招待講演**,
2015年8月2日~6日, サンテックシティ(シンガ
ポール)

〔図書〕(計 1 件)

柴田一成, 西塚直人, 三宅美沙, 村主崇行, 野
津湧太, 独立行政法人 国立科学博物館 出版,
自然と科学の情報誌「milsil(ミルシル)」特集
太陽フレア~地球の生命を支える恵みの風か、
災いをもたらす恐ろしい嵐か~, 2017年7月発
行, 第10巻, 第4号(通巻58号), pp.6-19

〔その他〕(計 7 件)

ホームページ、一般向け講演会等

宇宙天気予報の精度を上げる技術の開発
(NICTプレスリリース)、2017年1月26日
[https://www.nict.go.jp/press/2017/01/26-1.ht
ml](https://www.nict.go.jp/press/2017/01/26-1.html) (新聞掲載7件、Web記事掲載15件)

西塚直人, “AIで宇宙天気の予報精度アップ”,
科学技術館, 科学ライブショー「ユニバース」,
2017年4月8日, 科学技術館(東京都千代田区)

平成29年度NICT成績優秀表彰、優秀賞(個人)
受賞、2017年4月27日 [https://www.nict.go.jp/
info/topics/2017/04/170427-1.html](https://www.nict.go.jp/info/topics/2017/04/170427-1.html)

西塚直人, Academist Journal, 「機械学習とビ
ッグデータで、太陽フレアと宇宙天気を予測す
る!」, 2017年5月19日掲載,
<https://academist-cf.com/journal/?p=4717>

西塚直人, “宇宙天気ミニ講座 太陽編”, 第12回
宇宙天気ユーズフォーラム, 2017年7月5
日, 国立科学博物館(東京都台東区)

西塚直人, “宇宙天気予報の機械学習を用いた
技術開発と実用化へ向けて”, けいはんな情
報通信フェア2017 – NICT, 2017年10月26日
~28日, 情報通信研究機構(京都市相楽郡精華
町), NICTオープンハウス2017, 2017年11月
9~10日, 情報通信研究機構(東京都小金井市)

毎日新聞、科学の森：太陽フレアの予測に挑む
通信障害などトラブル警戒「宇宙天気予報」、
2017年11月2日掲載 [https://mainichi.jp/
articles/20171102/ddm/016/040/008000c](https://mainichi.jp/articles/20171102/ddm/016/040/008000c)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西塚 直人 (NISHIZUKA Naoto)
国立研究開発法人 情報通信研究機構・
電磁波研究所宇宙環境研究室・研究員
研究者番号：10578933