

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01266

研究課題名(和文)次世代フェーズドアレイ電波望遠鏡の開発による太陽嵐伝搬過程の解明

研究課題名(英文) Investigation of solar storm propagation processes by development of next generation phased array radio telescope

研究代表者

岩井 一正 (Iwai, Kazumasa)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号：00725848

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では地球周辺環境にも深刻な影響を与え得るCMEの伝搬過程解明を目的とし、CMEが電波を散乱する現象(IPS)の観測のためのデジタルフェーズドアレイ技術を用いた電波の多方向同時観測装置の開発を行った。その結果、一度に8方向をIPS観測できるフェーズドアレイ装置の開発に成功した。並行して、IPS観測データをリアルタイム磁気流体シミュレーションに取り込み予測を行うデータ同化予測システムの開発研究も行なった。その結果、従来の予測モデルよりも高精度な予測が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CMEは地球周辺環境に擾乱をもたらす、通信障害や大規模停電など社会的な影響の大きい宇宙天気災害の原因となる。本研究ではその観測の高精度化を可能にするとともに、そのデータを取り込んだリアルタイム予測モデルを開発することで、高精度な予測を可能とした。本研究の成果は、宇宙天気の予報精度向上を通じて、今後ますます宇宙利用が進む社会の安定に貢献する。

研究成果の概要(英文)：We investigated the propagation process of CME, which can have a serious impact on the environment around the earth. We developed a digital phased array system that enables us to observe the radio scattering phenomena (so called IPS) in eight directions simultaneously. We also developed a data assimilation system that includes the IPS data into the real-time MHD simulation. We found that the developed simulation system has higher accuracy than conventional prediction models.

研究分野：地球惑星科学、天文学

キーワード：宇宙天気 電波観測 太陽風 FPGA フェーズドアレイ

## 1. 研究開始当初の背景

太陽の大気「コロナ」では太陽フレアと呼ばれる爆発現象が頻発している。この爆発では太陽大気の一部が爆風と共に宇宙空間に向けて吹き飛ばされる(コロナ質量放出:CME)。CMEは100億トンもの大量の大気が、秒速1000km以上もの超高速で吹き飛ばされていくダイナミックな現象である。一方、通信衛星に代表されるように、現在の社会基盤は、宇宙環境に進出している。地球の大気や磁場に守られない宇宙空間では、CMEが人工衛星等に対し甚大な影響を与える。そのため、CMEの到来予測は極めて重要である。

CMEの到来予測は研究開始当初においても難しかった。その理由は、太陽から放出後、宇宙空間におけるCMEの伝搬機構が未解明だからである。CMEは太陽フレアの爆発によって吹き飛ばされ、その後更に加速され、太陽から吹き出す風「太陽風」に乗って宇宙空間を伝搬中に徐々に減速されていくという古典的モデルは存在していた。CMEの伝搬は、太陽表面の観測データを境界条件とし、古典的モデルを用いた電磁流体シミュレーションで推定される。しかし、加速・減速過程はCMEの初期速度や総質量に加え、伝搬中の宇宙空間の環境や、伝搬中のCMEの広がりなどにも依存する。そのため、CME到来予測には最大10時間以上の誤差があった。

最大の問題点は宇宙空間を伝搬途中の観測データの不足である。宇宙空間を伝搬中のCME自体は非常に希薄で、その構成粒子の発光を捉えることは難しい。一方、CMEが通過することで、その背景の天体から来る電波を散乱し「またたき」現象が観測される。これを惑星間空間シンチレーション(IPS)と呼ぶ。研究代表者の研究グループでは、独自に保有する最大4000平方メートルの大型電波望遠鏡を用いて太陽風やCMEのシンチレーション観測を行ってきた。本観測では様々な方向の電波天体から散乱を検出することで、太陽風の構造を再現できる。IPSはこれまでもCMEの検出に用いられてきたが、観測天体数が少なくCMEの伝搬領域を空間的に分解できなかった。伝搬速度を正確に導出するには、最低でも現在の2倍の空間分解能(=4倍の天体観測数)が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、デジタルフェーズドアレイ技術を用いた電波の多天体同時観測を実現することで、太陽から放出される擾乱現象の伝搬過程を解明することを目的とした。太陽面爆発「フレア」では太陽大気の一部が吹き飛ばされ(=CME)、太陽から吹き出す電離気体「太陽風」に乗って地球にも到来し、地球周辺環境に深刻な影響を与える。本研究ではCMEが電波天体と地球との間を通過する際に散乱される電波の観測を行う。特に一度に複数の方向を観測できる特殊なデジタル受信機を新規開発し1度に1方向だけしか観測できない現在の装置に比べIPS観測天体を4倍増(=空間分解能を2倍化)させ、より詳細にCMEの伝搬を観測することを第一の目的とし、IPS観測データからCMEの加速領域や加速度を導出し、伝搬の物理機構を明らかにすることを第二の目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 独自のデジタルIPS観測装置の開発

アナログデジタル変換器とFPGAを用いて、各アンテナで受信された信号をデジタル化し合成する装置を開発する。ベースとして研究代表者が中心となって開発したデジタル信号処理装置を用い、IPS観測用の信号処理アルゴリズムを実装する。まず1台を試作し、小型のアンテナを用いて同時に複数の方向に望遠鏡の感度を調節できるように、信号合成処理がリアルタイムでできるかを電波の強い天体を用いて実験する。その後複数台量産し、連動して動作させることで、目的の性能を達成する。

### (2) CME伝搬機構の解明と宇宙天気予報への応用

CMEパラメータを、衛星観測から得られる太陽面におけるCME発生領域の情報や、地球近傍の太陽風データなどと比較する。その結果から、CMEの加速・減速にCMEの密度がどのように寄与するか、背景を流れる太陽風の速度・密度とCMEの加速・減速がどの程度相関するかを明らかにする。更にIPS観測データと電磁流シミュレーションとの比較を行い、IPS観測を再現できる電磁流体方程式の初期パラメータを見出す。

## 4. 研究成果

(1) 本研究では計画初年度に多数のアンテナからの電波入力信号をデジタル化し、リアルタイムに解析することで、任意の方向に複数のビームを作るリアルタイム受信機的设计及び開発を行った。その結果、当初の目的を達成しうる試作機的设计に成功した。次にこの设计に基づきFPGAとAD変換器を用いたデジタルボードによる試作機の開発を行った。その結果、当初の目標性能を達成できる信号処理装置の開発の目処が立った。2年目にはこの设计に基づきFPGAとAD変換

器を用いたデジタルボードによる試作機の開発を行った。その結果、当初の目標性能を達成できる信号処理装置が完成した。本装置は従来のデジタルフェーズドアレイ装置に比べて小型で、かつ極めて安価であり、量産によって超高性能なフェーズドアレイ観測ができる可能性がある。3年度目には、本装置に基準信号を入力することで、実際の天体観測を模擬した性能評価を行った。その結果、当初のビームフォーミング目標を達成していることがわかった。一方で、実際の天体観測では、アンテナや受信機系を含めた較正をアナログ系で行わず、デジタルフェーズドアレイ装置内部で行う方が効率的であることがわかった。そこで、この機能を持ったデジタル回路を設計し、FPGA に実装する開発研究を行なった。その結果、アンテナ・受信機系を含む全観測系をデジタル上で較正できる非常に画期的な装置にアップグレードすることに成功した(図1)。計画3年目にして、当初の想定以上の性能を有する画期的装置の開発に成功したことで、本装置を多数接続した大規模アレイの提案を最終年度前年度申請の制度を用いて基盤研究(A)に提案し、採択された。そのため、本研究は4年計画の3年目での終了となった。



図1 本研究で開発したデジタルフェーズドアレイ装置のプロトタイプ

上記の開発研究と並行して、本装置を搭載可能な小型のアンテナを開発し、デジタルフェーズドアレイ装置を搭載することで、フェーズドアレイ観測による天体検出の実証実験を行うための小型アンテナの設計を行なった。初年度には複数の有限要素法を用いた電磁界シミュレータを評価した結果、適切なシミュレータを選定・調達し、アンテナ設計ができる環境を整えた。2年度目には本シミュレーション環境を用いて小型アンテナの設計を行った。その結果、適当な大きさのアンテナ形状が有限要素法を用いた電磁界シミュレーションによって導出され、数個の候補に絞ることができた。

(2) 並行して、既存装置のデータ解析を行い、CME の IPS 観測データをリアルタイムシミュレーションと直接比較できるように、シミュレーション結果から得られる密度の三次元分布を用いて、地球の位置から任意の方向に電波の散乱方程式を解くプログラムを開発した。このことで、疑似的な IPS 観測データを計算できるようになり、IPS 観測結果と比較することで、伝搬に寄与する CME の初期パラメータを見つけ出すことができた。本研究では特に CME の動径方向初速度に着目し、多数の異なる初速度を持った CME をシミュレーションし、それぞれから疑似 IPS データを計算し、最も観測に合うシミュレーションを選択することで、伝搬を再現することに成功した(図2)。

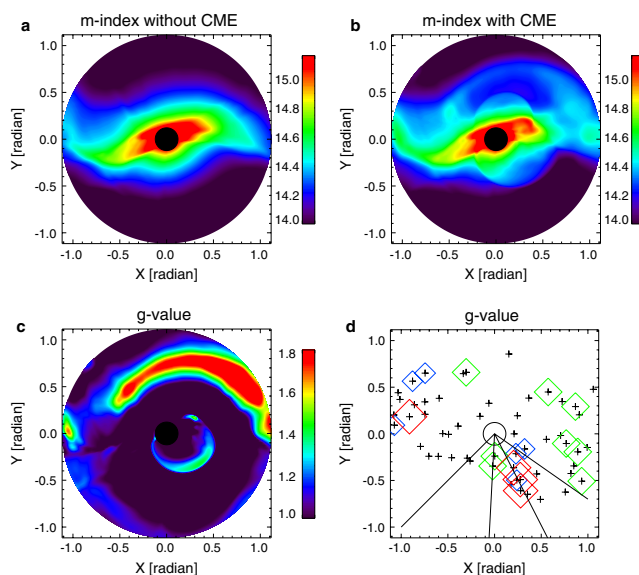


図2 本研究で開発した磁気流体シミュレーションの結果から疑似 IPS データを計算し、観測結果と比較した結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Iwai Kazumasa, Shiota Daikou, Tokumaru Munetoshi, Fujiki Ken'ichi, Den Mitsue, Kubo Y?ki	4. 巻 73
2. 論文標題 Validation of coronal mass ejection arrival-time forecasts by magnetohydrodynamic simulations based on interplanetary scintillation observations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-020-01345-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Mangano Valeria, 他20名, Iwai Kazumasa et al	4. 巻 217
2. 論文標題 BepiColombo Science Investigations During Cruise and Flybys at the Earth, Venus and Mercury	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Space Science Reviews	6. 最初と最後の頁 23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11214-021-00797-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Iwai Kazumasa, Shiota Daikou, Tokumaru Munetoshi, Fujiki Ken'ichi, Den Mitsue, Kubo Y?ki	4. 巻 71
2. 論文標題 Development of a coronal mass ejection arrival time forecasting system using interplanetary scintillation observations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 39
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-019-1019-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 4件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 岩井一正、徳丸宗利、藤木謙一
2. 発表標題 次世代太陽圏観測装置の検討と試作機的设计
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第146回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumasa Iwai
2. 発表標題 Next generation heliospheric observation instrument: design of the new radio telescope for the IPS observations
3. 学会等名 内部太陽圏探査の新展開 ~ 第25太陽活動周期に向けて ~ (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩井一正
2. 発表標題 2020年代の内部太陽圏研究：次世代IPS観測と国際/学際連携
3. 学会等名 太陽研究者連絡会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazumasa Iwai, Munetoshi Tokumaru, and Ken'ichi Fujiki
2. 発表標題 Radio telescopes at 327 MHz of ISEE, Nagoya University; System and its interplanetary scintillation observations
3. 学会等名 Science at Low Frequency V (SALF V) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazumasa Iwai
2. 発表標題 IPS observation of ISEE
3. 学会等名 The Workshop on Solar Radio and IPS Data Analysis (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩井 一正、徳丸 宗利、藤木 謙一
2. 発表標題 次世代惑星間空間シンチレーション観測用2次元フェーズドアレイ装置の開発
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020:Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩井 一正、塩田 大幸、徳丸 宗利、藤木 謙一、田 光江、久保 勇樹
2. 発表標題 Validation and operation of a coronal mass ejection arrival time forecasting system using interplanetary scintillation observations
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020:Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩井 一正、八代 誠司、Nitta Nariaki、久保 勇樹
2. 発表標題 Spectral Structures of Type II Solar Radio Bursts and Solar Energetic Particles
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020:Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazumasa Iwai
2. 発表標題 Next generation digital phased array IPS observation system of ISEE
3. 学会等名 Technology for Next Generation Space-Earth Environmental Radio Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩井 一正、塩田大幸、久保勇樹、田光江、徳丸宗利、藤木謙一
2. 発表標題 惑星間空間シンチレーション観測データを取り込んだMHDシミュレーションによる太陽嵐到来予報の精度評価
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩井 一正
2. 発表標題 Development of digital fast Fourier transform spectrometers by ADC and FPGA: OCTAD-S
3. 学会等名 The ALMA 2030 Vision: Design considerations for Digitizers, Backend and Data Transmission System (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩井 一正
2. 発表標題 次世代宇宙地球系観測のための汎用デジタルフェーズドアレイ装置の開発
3. 学会等名 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会の総会および講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩井 一正
2. 発表標題 次世代太陽風観測装置による太陽圏研究の新展開
3. 学会等名 2020年度太陽研連・太陽スペース研究シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Iwai K., Shiota D., Tokumaru M., Fujiki K., Den M., Kubo Y.
2. 発表標題 Validation of CME arrival-time forecasted by MHD simulations based on interplanetary scintillation observations
3. 学会等名 43rd COSPAR Scientific Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazumasa Iwai
2. 発表標題 Ground-based solar wind observation of ISEE and its possible collaboration with space instruments and simulations
3. 学会等名 名古屋大学宇宙地球環境研究所 共同研究集会 宇宙科学研究所 電離圏磁気圏シンポジウム「第25太陽活動周期における内部太陽圏研究の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩井 一正、徳丸 宗利、藤木 謙一
2. 発表標題 ISEE太陽風観測装置の次世代機の開発
3. 学会等名 ISEE合同研究集会「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」、「惑星間空間プラズマにおける波動現象」および太陽圏・宇宙線関連の共同研究成果報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩井 一正
2. 発表標題 次世代太陽風観測のための汎用デジタルフェーズドアレイ装置の開発
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------