

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22028

研究課題名（和文）先端情報通信技術を用いた宇宙災害予測：宇宙版気象レーダーへの挑戦

研究課題名（英文）Forecasting of space disasters using advanced ICT: Challenge to the space meteorological radar

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、宇宙空間において太陽が原因で発生する災害の早期予報を目的とした「宇宙気象レーダー装置」の開発を行った。その結果、同時に8方向を観測できるデジタルビームフォーミング装置の開発に成功し、開発したフェーズドアレイ装置に自動較正機構を追加する開発研究を行った。更に開発した装置を用いた較正やビームフォーミング実験を行うことと並行して、本装置を多数接続した大規模な観測システムによる本格的な宇宙気象レーダーの実現に向けた提言も行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、宇宙空間において太陽が原因で発生する災害の早期予報を目的とした「宇宙気象レーダー装置」の開発を行っている。情報通信衛星、宇宙ステーション、民間による宇宙旅行など、我々の生活基盤は近年急速に宇宙空間に進出している。太陽ではフレアと呼ばれる爆発現象が頻発し、その爆風が「太陽嵐」となって地球に到達する。このとき宇宙空間では地上でいうゲリラ豪雨のような激しい環境変動が発生し、衛星障害など人類の宇宙活動に深刻な影響が生じる。本装置を用いることで太陽嵐の予報精度が格段に向上することが期待され、宇宙利用の進む昨今において社会的意義が大きい成果となった。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have developed a "space weather radar" for the purpose of early forecasting of disasters caused by the sun in the geospace. We succeeded in developing a digital beam forming device that can observe 8 directions simultaneously. We also developed an automatic calibration system on the developed phased array device. In parallel with conducting calibration and beam forming experiments using the developed device, we also made recommendations for the realization of a full-scale space weather radar using a large-scale observation system connected to a large number of this device.

研究分野：防災工学

キーワード：宇宙天気予報 太陽嵐 気象レーダー フェーズドアレイレーダー 宇宙防災

1. 研究開始当初の背景

我々の生活基盤は、近年急速に宇宙空間に進出している。例えば多くの情報通信衛星や宇宙ステーションに加え、民間による宇宙旅行も計画されている。この宇宙空間は、太陽から吹き出す希薄な電離大気で満たされ、全くの真空ではない。太陽ではフレアと呼ばれる爆発現象が頻発し、その爆風が「太陽嵐」となって地球に到達する。このとき宇宙空間では地上でいうゲリラ豪雨のような激しい環境変動が発生し、衛星障害など人類の宇宙活動に深刻な影響が生じる。太陽フレアの発生は事前の予知が難しく、地球に到来する直前に、ようやく予報が可能となる。太陽嵐はまさに「宇宙版のゲリラ豪雨」と言える。この太陽嵐を地球近傍に到達する前に予報することが本研究の目的である。

太陽嵐は希薄な電離した大気の塊のため電波を散乱する。そのため、天体観測中に太陽嵐が天体と地球の間を通過すると、散乱によって電波強度が激しく変動する。応募者のグループなどでは、この現象から太陽嵐の伝搬過程など宇宙物理学の基礎研究が行われてきた。しかし観測の迅速さを求められない理学観測用の装置では、一度に1方向しか観測できない。現状では太陽方向全体を観測（スキャン）するのに12時間以上かかるため、最短で24時間程度で地球に到来する太陽嵐を1回しかスキャンできない。つまり時間変動（＝接近速度）が導出できず、到来の予報が不正確という問題があった。そこで本研究では、「デジタルフェーズドアレイ方式」の観測技術に着目した。この技術は多数の入力信号を並列にデジタル処理することで、複数の方向を同時に観測できる。その反面、多数の信号処理装置が必要となり高価で研究開始当初には特に太陽風分野において極めて応用例が少なかった。応募者らは汎用のデジタルデバイスを組み合わせ、それに自分たちでデジタル回路を実装することで、大幅にコストを削減したデジタル装置の開発に成功してきた。この経験を活かすことで低コストに太陽嵐の散乱現象を多方向で観測できる装置を開発できる可能性が、研究開始当初に期待できた。

2. 研究の目的

本計画では、宇宙空間において太陽が原因で発生する災害の早期予報を目的とした「宇宙気象レーダー装置」の開発を目的とした。特に、太陽嵐が地球に到来する前に観測し、その到来時刻を正確に予報するために、最低でも4方向同時に観測できる装置を開発する必要がある。そこで、デジタルフェーズドアレイ装置を開発し、FPGA上にデジタルフォームフォーミング回路を並列に4つ以上実装することを基本目標と設定した。

3. 研究の方法

太陽嵐は希薄な電離した大気の塊のため電波を散乱する。そのため、天体観測中に太陽嵐が天体と地球の間を通過すると、散乱によって電波強度が激しく変動する。本研究では、この散乱現象を検出す流ことで太陽嵐を検出する。電波はほぼ光速で伝播するため、理論上は太陽嵐の到来を事前に予測できる。しかし観測の迅速さを求められない理学観測用の装置では、一度に1方向しか観測できない。現状では太陽方向全体を観測（スキャン）するのに12時間以上かかり、最短で24時間程度で地球に到来する太陽嵐を1回しかスキャンできない。つまり時間変動（＝接近速度）が導出できず、到来の予報が不正確となる。そこで本研究では迅速な情報収集が可能な「デジタルフェーズドアレイ方式」の信号処理技術を導入する。この技術は多数の入力信号を並列にデジタル処理することで、複数の方向を同時に観測できる。

まず、汎用デジタルボードに多数の信号を並列解析する回路を実装した装置を低コストに開発する。同時に4方向の天体を観測可能にすることで、1回の観測時間を1/4（約3時間）に短縮する。太陽嵐到来までに複数のスキャンが可能となるため、時時刻々と近づいてくる太陽嵐の表面の時間変動（＝接近速度）が導出できる。散乱領域の2次元分布から太陽嵐までの距離がわかるのに加え、その

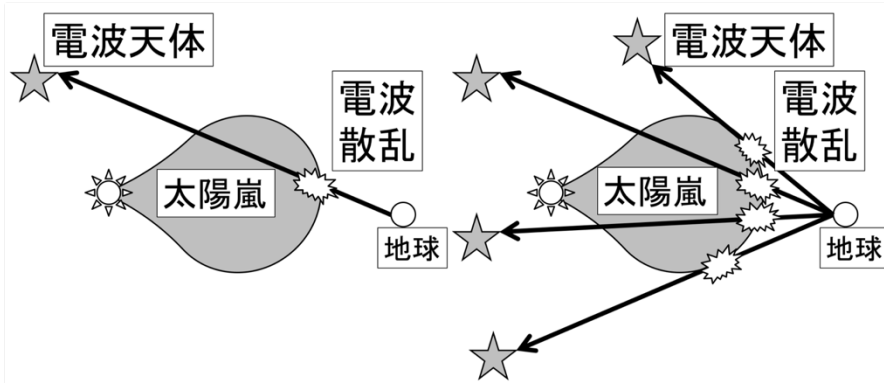


図1 従来の観測（左）と本研究で開発する装置で可能となる観測（右）。

時間変動から、接近速度が求まるため、地球への渡来時刻の正確な予報が初めて可能となる（図1）。

4. 研究成果

まず、AD変換とFPGAを組み合わせた汎用デジタルボードに多数の信号を並列解析する回路を実装した装置を低コストに開発するための開発研究を行った。特にデジタル回路に実装するアルゴリズムの検討と、意図した方向にビームを形成するためにアルゴリズムに与える設定パラメータの検討を行った。この結果、同時に4方向を観測できるデジタルビームフォーム装置の開発に成功した。本装置を用いると、1回の太陽嵐の

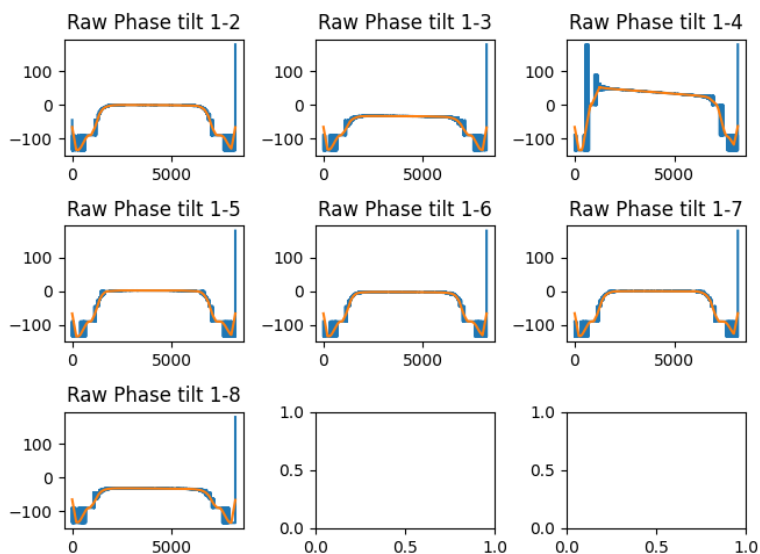


図2 各入力チャンネルに含まれるアンテナ・受信機・伝送系の位相誤差全てを自動で較正するプログラムの動作結果

観測時間を1/4に短縮でき、太陽嵐到来までに多数のスキャンが可能となるため、時時刻々と近づいてくる太陽嵐の表面の時間変動（＝接近速度）が導出できる。更にデータを即時解析できる本装置のデータを日本の宇宙天気予報システムに組み込むことで、その精度向上に寄与し、人工衛星の運用効率の向上などの波及効果が期待出来る。

次に、開発したフェーズドアレイ装置に自動較正機構を追加する開発研究を行った。その結果、各チャンネルに入力する信号の位相・振幅の誤差を自動で補償するアルゴリズムをFPGA上に実装することに成功し、既存のアナログシステムに対して較正の精度を向上し、加えて較正にかかる時間的コストの大幅な短縮にも成功した（図2）。この較正プログラムは各チャンネルに接続されるアンテナ・受信機・および伝送途中のケーブルが持つ位相・振幅誤差を全て較正できる性能を持ち、当初の計画よりもより高性能な較正を実現できる結果となった。ビームフォーミングおよび較正系は実験室実験に加えて、本装置を簡便なダイポールアンテナに接続し試験した結果、所定の性能を持っていることが確認された。

本システムはFPGA上に実装するFFTやビームフォーミングの回路を工夫することで高効率に演算できるため、当初想定したFPGAリソース上に最大で8個のフィードフォーミング回路を実装できることが分かった。そこで、本回路を実際にFPGA上に実装することで、最大8箇所を観測を同時にできる装置となり、当初の計画を一部上回る性能を持つ観測装置を実現できることとなった。

開発した装置を用いた較正やビームフォーミング実験を行うことと並行して、本研究の総括として、開発の成果を国内外の学会で発表した。更に、本装置を多数接続した大規模な観測システムによる本格的な宇宙気象レーダーの実現に向けた提言も行なった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kusano Kanya, Ichimoto Kiyoshi, Ishii Mamoru, Miyoshi Yoshizumi, Yoden Shigeo, Akiyoshi Hideharu, Asai Ayumi, Ebihara Yusuke, Fujiwara Hitoshi, Goto Tada-Nori, Hanaoka Yoichiro, Hayakawa Hisashi, Hosokawa Keisuke, Hotta Hideyuki, Hozumi Kornyanat, Imada Shinsuke, Iwai Kazumasa, et al	4. 巻 73
2. 論文標題 PSTEP: project for solar?terrestrial environment prediction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01486-1	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 Volwerk Martin, Sanchez-Cano Beatriz, Heyner Daniel, Aizawa Sae, Andr? Nicolas, Varsani Ali, Mieth Johannes, Orsini Stefano, Baumjohann Wolfgang, Fischer David, Futaana Yoshifumi, Harrison Richard, Jeszenszky Harald, Kazumasa Iwai, et al	4. 巻 39
2. 論文標題 Venus's induced magnetosphere during active solar wind conditions at BepiColombo's Venus 1 flyby	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annales Geophysicae	6. 最初と最後の頁 811 ~ 831
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/angeo-39-811-2021	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 Hadid L. Z., Gnot V., Aizawa S., Milillo A., Zender J., Murakami G., Benkhoff J., Zouganelis I., Alberti T., Andr? N., Bebesi Z., Califano F., Dimmock A. P., Dosa M., Escoubet C. P., Griton L., Ho G. C., Horbury T. S., Iwai K., et al	4. 巻 8
2. 論文標題 BepiColombo 's Cruise Phase: Unique Opportunity for Synergistic Observations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Astronomy and Space Sciences	6. 最初と最後の頁 718024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fspas.2021.718024	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 Tokumar Munetoshi, Fujiki Ken ' ichi, Kojima Masayoshi, Iwai Kazumasa	4. 巻 922
2. 論文標題 Global Distribution of the Solar Wind Speed Reconstructed from Improved Tomographic Analysis of Interplanetary Scintillation Observations between 1985 and 2019	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 73 ~ 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac1862	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 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 -

[学会発表] 計21件(うち招待講演 3件/うち国際学会 6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IPS観測装置の開発: 科学検討と実験機
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
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デジタルフェーズドアレイ装置の開発2: 多段接続による大規模アレイの実現
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第150回総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩井一正
2. 発表標題 次世代太陽風観測装置による太陽圏研究
3. 学会等名 日本天文学会 2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazumasa Iwai
2. 発表標題 Development and Validation of CME Arrival-Time Forecasting System by MHD Simulations based on Interplanetary Scintillation Observations
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazumasa Iwai
2. 発表標題 IPS based heliospheric MHD simulation for the space weather forecasting
3. 学会等名 Online Radio Heliophysics Catch-up (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩井一正
2. 発表標題 次世代太陽風観測装置による革新的太陽圏科学の実現
3. 学会等名 シンポジウム「太陽研究：30年代の科学研究戦略」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩井一正
2. 発表標題 IPS観測による太陽圏研究の展望と次世代太陽風観測装置
3. 学会等名 茨城大学重点研究「宇宙科学教育研究センターを核とした宇宙惑星科学教育研究の新展開」サマリー研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩井一正
2. 発表標題 次世代太陽風観測装置の開発と科学課題
3. 学会等名 太陽研究者連絡会シンポジウム2021
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazumasa Iwai
2. 発表標題 Next generation interplanetary scintillation observation system of ISEE
3. 学会等名 15TH QUADRENNIAL SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS SYMPOSIUM (STP-15) (国際学会)
4. 発表年 2022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の計画と 2021 年度の進捗
3. 学会等名 「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」、「太陽風プラズマ物理の最新成果と今後の展望」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 2022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向けたデジタルアレイの開発検討
3. 学会等名 日本天文学会 2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩井一正
2. 発表標題 地上電波観測による太陽嵐の検出と宇宙天気予報への応用
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム2021
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazumasa Iwai
2. 発表標題 Interplanetary scintillation observation of ISEE during the BepiColombo cruise phase
3. 学会等名 第25太陽活動周期における内部太陽圏研究の新展開 2021 (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 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 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", a workshop by ISEE (招待講演) (国際学会)
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 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

1. 発表者名 岩井一正、徳丸 宗利、藤木 謙一
2. 発表標題 327MHz帯域における惑星間空間シンチレーション観測のための次世代装置の開発検討
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020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