

宇宙天気観測データのための 高性能データ解析システムの開発

大嶋晃敏

High Performance System for the Space Weather Data Analysis

Akitoshi Oshima

The importance of space weather is becoming widely being accepted with its unexpected impact on our human society and highly developed infrastructure on and around the earth. The space weather is known to be driven by the solar activity such as high speed solar wind and/or solar flares and coronal mass ejection (CMEs). These eruptive phenomena affect the interplanetary magnetic field (IMF) and cause, so called, the geomagnetic storm at near earth space. We are trying to establish a completely new monitoring methodology for the space weather study utilizing the high energy galactic cosmic rays of about 100 GeV. Most of the cosmic rays are charged particles and they are sensitive to the IMF and its magnetic irregularity through the Lorentz force. Since an intensity variation of the galactic cosmic rays caused by the solar origin phenomena is tiny $\sim 1\%$, stable observation in long term and high statistic observation in short term is quite necessary to make the space weather study possible. One of the critical problem in the space weather study using the cosmic rays is a huge volume of data produced by the continuous high statistical observation. We report the new computing system for the data analysis of cosmic ray big data developed in Chubu university.

Keywords : Cosmic rays, Space weather, High performance computing, Big data

1. はじめに

近年，宇宙天気が人間社会に与える影響に関するニュースが多くのメディアで取り上げられ，その重大性が広く認識されつつある。宇宙天気とは，太陽活動が原因となって生じる惑星間空間の擾乱であり，地磁気や放射線帯，電離層やオゾン層，無線通信の障害や航空運用への影響，人工衛星の障害や全地球測位システム（GPS）の誤作動，航空乗務員や宇宙飛行士の被ばく，地上送電網やパイプライン設備の障害といった重要インフラへの直接的な影響が大きいため，宇宙天気による被害想定そのものも研究分野となっている。米国では，「Strategic National Risk Assessment 2011」[1]において，宇宙天気は地震や洪

水、感染症などと並ぶ大規模自然災害の一つに指定されている。したがって、宇宙天気による被害を最小限にとどめるために、宇宙天気事象をいち早く察知する必要がある、そのための常時監視体制の構築および宇宙天気の詳細な理解が重要な課題となっている。

従来の宇宙天気観測は、主として、科学衛星による「その場 (in situ) 観測」と、光学や電波、磁気などを用いた地上観測を組み合わせで行なわれており、太陽側の惑星間空間（昼側）がその監視対象となってきた。しかし将来的に、人類が宇宙空間に活動領域を広げたときには、太陽と反対側（夜側）まで、つまり地球を中心とした全方位の広域観測が必要になると考えられる。中部大学宇宙線グループでは、従来の宇宙天気観測を全方位観測に拡張するため、銀河宇宙線を用いた宇宙天気観測の手法を開発してきた。具体的には、太陽活動によってわずかに変動する銀河宇宙線を観測し、地球を中心とした約 1 天文単位の領域で起る宇宙天気を、リアルタイムで察知する技術と宇宙天気の可視化技術の確立を進めている。ここでは、中部大学宇宙線グループが推進する、高エネルギー銀河宇宙線観測プロジェクトで得られた膨大なデータを高速に処理するための基盤システムの開発について報告する。

2. 銀河宇宙線

2.1. 銀河宇宙線と宇宙天気

銀河宇宙線とは、超新星爆発のような高エネルギー天体現象で加速され、高いエネルギーを獲得したさまざまな粒子のことである。その組成は、90 %以上が陽子であり、10 %がヘリウムの原子核、以降、他の原子核がそれに続き、ごく微量ながら電子やガンマ線が含まれる。このように荷電粒子を主成分とする宇宙線は、宇宙磁場の中を運動することで進路が曲げられるため、発生源（起源天体）の情報は失われ、結果として星間空間のいたるところで一様等方に存在すると考えられている。したがって太陽圏（太陽の磁気的影響が及ぶ範囲）には、星間空間からほぼ一様等方的に銀河宇宙線が侵入し、惑星間空間磁場（IMF）を、太陽風の流れに逆らって侵入してくることになる。太陽圏の内部奥深くにある地球で観測される銀河宇宙線は、等方的な強度分布に太陽活動による変動（突発的なものから長期的なものまで）が重ね合わさったもので、それが宇宙天気の要因になる。このことは、銀河宇宙線を探針とすることで、宇宙天気を観測・監視することの可能を示しており、これまでの我々の観測からも、太陽活動に伴う宇宙線強度の変動が多数観測されている[2,3,4,5,6]。また、宇宙天気観測に用いる銀河宇宙線は、地球近傍で約 1 天文単位（約 1 億 5 千万 km）の磁気旋回半径を持っているため、科学衛星（地球から 150 万 km）よりも遠く、より太陽に近い宇宙空間の情報をもたらしてくれる。このことは、銀河宇宙線による観測によって、人工衛星よりも早く磁気擾乱の情報を捉えることの可能性をも示している。さらに、銀河宇宙線の観測は、地球の大気と地磁気によって守られた地上で行なわれるため、近傍の電磁環境の擾乱によって人工衛星が機能しなくなった場合でも、観測を継続することができる。また、銀河宇宙線では、光学観測とは異なり、太陽が視野の外にある場合でも、観測・監視できる。このように、銀河宇宙線を探針とすることは、現行の宇宙天気観測システムに対し、広域連続観測といった面で相補的な利点を持つ。

2.2. 宇宙線の地上観測

高エネルギー宇宙線が地球大気に突入すると、大気の成分である窒素や酸素の原子核を破碎する。このとき生じる高エネルギー原子核反応を通じて、多数の 2 次粒子が生成し、このうち、ミューオンや中性子などを地上に配置した放射線検出器で検出することで、宇宙線を用いた宇宙天気観測を行なうことができる。中部大学宇宙線グループは、主に宇宙線から生じたミューオンを検出することで宇宙天気観測を行っており、現在、インドと日本で、大型の比例計数管を用いたミューオンの連続観測を行なっている（図 1）。インドでの観測には、Tata 基礎研究所との共同観測 GRAPES-3 実験（南インド Ooty）で稼働している、世界最大の検出面積（560 m²）による高い統計精度と、ミューオンの入射方向を約 10

度の精度で記録し、視野を 169 方向 (ピクセル) に分割した観測ができるミュオン観測装置を用いる。一方の、山梨県での観測は、東京大学宇宙線研究所明野観測所に設置した、GRAPES-3 と同型のミュオン観測装置 (75 m²) を用い、GRAPES-3 を補完する観測を行なっている。両観測により、広い視野を互いに重複させることで、惑星間空間の広域観測を目指している (図 1)。この日印両観測により、2021 年 11 月 1 日に発生した M1 クラスのフレアによって生じた宇宙線強度が減少する現象 (Forbush Decrease 現象) を同時に観測することに成功している (図 2)。

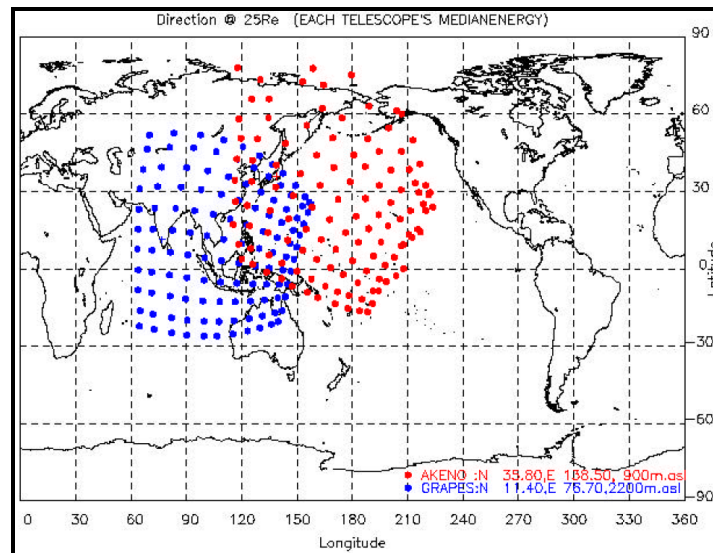


図 1. 宇宙線ミュオン観測による広域宇宙天気観測。青色の点は、GRAPES-3 のミュオン観測装置の視野を、赤色の点は明野ミュオン観測の視野を表している。

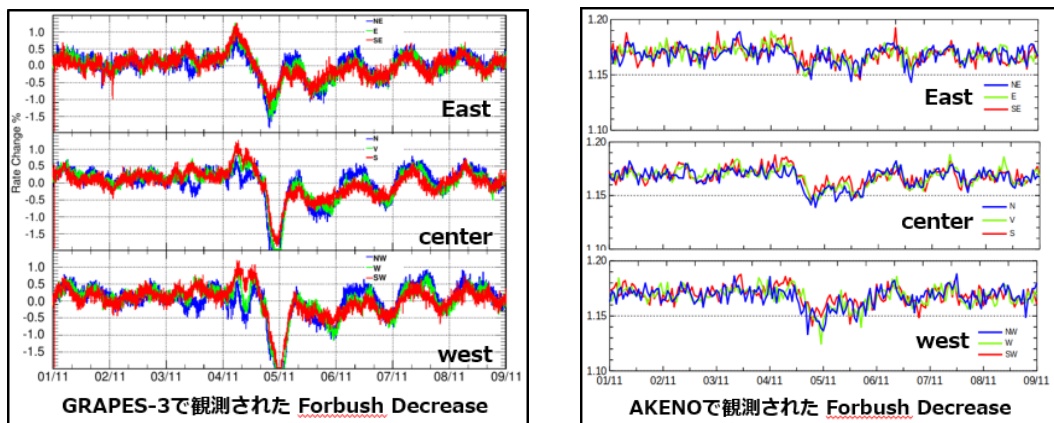


図 2. 日印のミュオン観測で捉えた宇宙天気事象。2021 年 11 月 1 日に発生した M1 クラスのフレアによって生じた Forbush Decrease 現象 (FD)。左図は、インドの GRAPES-3 で検出された FD。右図は、日本の明野ミュオン観測で検出された FD。

3. 宇宙線データ解析システム

前節で示した観測例など、宇宙天気に関連した宇宙線事象を大量のデータから抽出し、解析をおこなうためには、専用の計算機システムが必要になる。また、我々が宇宙天気研究で用いるミュオン観測のデータは、中部大学宇宙線グループが推進するいくつかの宇宙線観測プロジェクトで得られるデータ (~400 TB) の一部である。例えば GRAPES-3 の観測で得られるデータ量は年間約 2.6 TB になり、

GRAPES-3 の過去 22 年間におよぶ観測で得られたミューオンのデータ量は、~~57~~57 TB にのぼる。これに明野ミューオン観測のデータを加えると約 70 TB になる。宇宙天気研究においては、宇宙天気の予測の速報性と同程度に、個々の宇宙天気事象の物理的な理解が重要であるが、これを実現するためには、過去に得られたデータを総合的かつ詳細に解析する必要がある。しかしこのような大規模データの一括解析には、従来型の汎用計算機システムでは処理能力が足りない。そこで、高速な演算が可能なシステムに加えて大容量のデータを保管することができるファイルシステムが必要になる。今回、中部大学宇宙線グループでは、高性能コンピューティング (HPC) 分野で利用されている理論通信速度 56 Gbps の通信技術 Infiniband FDR を用い、大規模データ処理システムに向けた試作機の構築と性能評価試験を行なった。また、国内外の共同研究者がデータにアクセスし、効率的に解析が行なえるような共同利用型のシステムの開発も同時に行なった。

3.1. データ解析システム

今回、中部大学宇宙線グループで開発したデータ解析システム (図 3) では、以下の点に項目を念頭に置いて設計した。

- ① サーバー間データ通信の高速化
- ② 大容量データ通信とそれ以外の通信の分離
- ③ 国内外の共同研究者 (約 20 名) による利用
- ④ システム内でのアカウントの共通化
- ⑤ データ保管の冗長性

今回の主たる目標は、データ解析の高性能化・高効率化であるため、2 台の解析ファイルサーバー (100 TB) 間のデータ通信に、Infiniband FDR を用いた。これにより、通常の 1 Gbps で接続されたネットワークに比べて理論値で約 56 倍の広帯域・低遅延のデータ通信が実現できる。一方、宇宙線のデータ以外は、1 Gbps のネットワークを用いることで、システム構築と拡張性、保守性を担保している。また、現在、中部大学宇宙線グループでは、銀河宇宙線に関する多数の研究プロジェクトを進めており、国内では、東京大学宇宙線研究所、海外ではインド以外に、アメリカ、メキシコ、ボリビアと共同研究を進めている。この中でも中部大学宇宙線グループは、インドとの共同研究を主導する立場にあり、日本国内での拠点となっている。国内外の共同研究者が、観測データにアクセスし、容易にシステムを利用できるように、システム内でのアカウントの共通化と、解析ツールの共通化を行なった。これには、従来から Linux 系システムで利用されている NIS (アカウント共有) と NFS (ファイル共有) を用いている。また、計算機資源の効率的な利用のために、ジョブ管理システムを導入した。さらに、システム上での観測データの冗長性を保つために、ファイルサーバーとは別に恒久的な保管場所として、120 TB の分散ファイルシステムを接続している。これらの基本構成に加え、将来的には、より大規模にデータ解析を実行するために、約 400 コアの PC クラスタを接続する予定である。

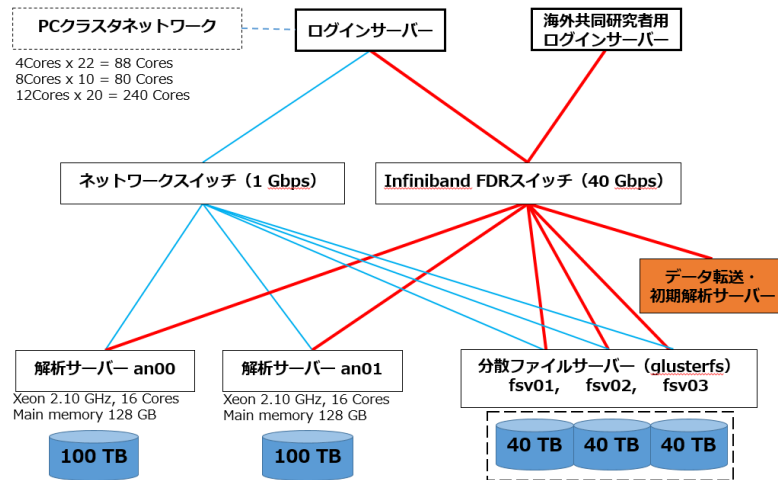


図 3. 中部大学宇宙線グループで開発した、解析システムの概略図。青色の線が通常のネットワーク（1 Gbps）、赤色の線が Infiniband ネットワーク（40 Gbps）を示している。

3. 2. 通信性能評価

今回、宇宙天気に関する宇宙線データの高速解析を実現するために、サーバー間通信に Infiniband FDR を導入した。このようなデータ通信専用のネットワークを実装する例としては、大規模ストレージシステムやスーパーコンピュータなどの大規模計算機システム（HPC）がある。今回、中部大学宇宙線グループでは、これまで HPC 分野で広く用いられてきた Infiniband を自前のシステムに導入した珍しい例である。Infiniband の特徴は、広い通信帯域と低遅延性であり、RMDA(Remote Direct Memory Access) を有効にすることで通常のネットワーク通信と異なり CPU を介さずデータ通信を実現ができる。Infiniband を用いたネットワークとしては RDMA 以外に IPoIB といった IP 上を実現する手法もあるが、今回は性能面で有利になる RDMA を用いた。基本的な性能評価として、Infiniband の通信帯域および遅延に関する試験を行ない、データサイズ（Message size）を変えながら Throughput（データ転送速度）と Latency（遅延時間）を計測した（図 4）。通信帯域の試験では、1 Gbps のネットワークで Throughput 約 100 MB/s に律速しているのに対し、Infiniband では約 4 GB/s まで伸びており、高速通信が実現できていることがわかる。一方で、Latency の計測においても Infiniband の明らかな有利性が示されている。

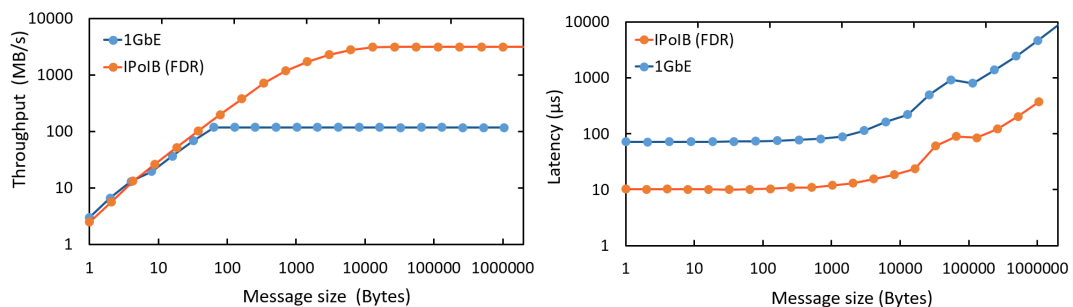


図 4. Infiniband ネットワークの通信帯域と遅延に関する性能評価。青色の線が通常のネットワーク（1 Gbps）、赤色の線が Infiniband ネットワーク（56 Gbps）を示している。

4. 結論

中部大学宇宙線グループでは、幅広いエネルギー領域で銀河宇宙線の解明を目指し、複数プロジェクトを推進している。今回は、約 100 GeV の銀河宇宙線から生じるミューオンを検出し、地球近傍（約 1

天文単位)の宇宙天気を理解するために必要な大規模データ解析のプラットフォームとして、大容量高速計算機システムを開発した。システムは、ログイン用サーバーと大容量ファイルサーバー、解析用サーバーで構成され、サーバー間通信は Infiniband FDR (56 Gbps) の高速通信で接続した。サーバー間通信の基本的な性能評価を行ない、Infiniband の性能が出ていることを確認した。また、国内・外の共同研究者にもシステムを開放することを念頭に置いたシステム設計を行ない、共同研究者がデータにアクセスし、解析を行なうための仕組みを、従来の Linux 系システムに実装されている基本的な機能を用いて構築した。今回開発した解析システムで保管することができるデータ量は、約 200 TB であり、中部大学宇宙線グループが扱う宇宙線データの約 50 % を処理することができる。今後は、全てのデータを同時に解析できるだけのストレージを充実させる必要があり、それを解析するための PC クラスターの構築をおこなう必要がある。宇宙線のデータは、一種のビッグデータであり、本研究で開発したシステムは他のビッグデータ解析にも応用できるものである。

謝辞

本研究は、中部大学先端研究センター 2021 年度プロジェクトの援助を受け遂行されたものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

1. <https://www.dhs.gov/xlibrary/assets/rma-strategic-national-risk-assessment-ppd8.pdf>
2. “Measurement of the radial density gradient of cosmic ray in the heliosphere by the GRAPES-3 experiment”, H.Kojima et al., Astroparticle Physics, 62, 21–29, 2015
3. “Dependence of cosmic ray intensity on variation of solar wind velocity measured by the GRAPES-3 experiment for space weather studies”, H. Kojima et al., PRD, 91, 121303(R), 2015
4. “Measurement of the radial diffusion coefficient of galactic cosmic rays near the Earth by the GRAPES-3 experiment”, H. Kojima et al., Physical Review D, Vol.98, 022004, 2018
5. “Transient Weakening of Earth’s Magnetic Shield Probed by a Cosmic Ray Burst”, P.K. Mohanty et al., PRL, 177, 171101, 2016
6. “Was the cosmic ray burst detected by the GRAPES-3muon telescope on 22 June 2015 caused by a transient weakening of the geomagnetic field or by an interplanetary anisotropy?”, P.K. Mohanty et al., Physical Review Letters, 122, 105101, 2019