

要旨

地球を取り囲む放射線外帯に存在する数 MeV の高エネルギー電子は、磁力線に沿って数秒周期の往復運動を行っている。この電子が放射線帯を飛び出して中層大気まで降下する現象を Relativistic Electron Precipitation (REP) という。地球磁気圏では磁気嵐時にプラズマ波動と呼ばれる波動が励起することが知られており、このプラズマ波動によって加速を受けた高エネルギー電子が REP 現象を引き起こすことが示唆されているが、詳細については明らかになっていない。現在、REP 現象の観測を目的とした Particle Instrument for Nano-satellite (PINO) ミッションモジュールの開発が、宇宙科学研究所主導で進められている。PINO ミッションは、本校で開発されている超小型人工衛星 BIRDS-5 に搭載されている。BIRDS-5 は、2022 年夏頃に打ち上げられ、その後 ISS 軌道への放出が予定されている。

本研究の目的は、REP 現象とプラズマ波動の関係をより詳細に明らかにすることと、検出した REP イベントの解析結果から PINO モジュールで REP 現象を効率的に観測するための運用方法について検討することである。

International Space Station (ISS) に搭載された CALorimetric Electron Telescope (CALET)/CHarge Detector (CHD) の観測データを用い、2017 年から 2021 年の期間に観測された REP イベントが観測された場所や検出頻度を統計的に調べた。また、CALET/CHD で REP イベントが観測された時刻で、ISS と同磁力線上にあらせ衛星が位置するイベント（コンジャンクションイベント）を特定した。あらせ衛星に搭載された Plasma Wave Experiment (PWE)/ Onboard Frequency Analyzer (OFA) と Magnetic Field Experiment (MGF) の観測データを用いて、コンジャンクションイベント中にあらせ衛星で観測されたコーラス波動と静電ホイッスラー波、EMIC 波動などのプラズマ波動と REP イベントの関連性についても統計的に調査を行った。

CALET/CHD によって検出された REP イベントは、北アメリカの西経 75—125 度北緯 45—55 度の範囲、オーストラリア大陸南側の東経 50—175 度南緯 45—55 度の範囲に ISS が位置するときに集中して検出されることが分かった。この範囲は $L > 3$ に位置し、放射線帯外帯に対応する。また REP イベント数は 2017 年から減少傾向にあり、太陽活動の極小期にあたる 2020 年は REP イベント数も大きく減少していた。このことから太

陽活動に対応して REP イベント数は変化しているといえる。コンジャンクションイベント下で検出された 31 例の REP イベントで、数 kHz の周波数を持つホイッスラーモード波動や数 Hz の周波数を持つ EMIC 波動が観測されたことから、REP 現象が引き起こされる原因としてプラズマ波動が関与していることは十分明らかであると言える。このことは、太陽活動周期によって REP イベントの総数が変化していることから信頼性は高い。

以上の解析結果より、2022 年に ISS と同軌道へ放出され高エネルギー電子の観測を行う PINO は、 $L > 3$ の範囲にあたる北アメリカ大陸やオーストラリア大陸南側の南極海付近を飛行する際に運用を行うことでより多くの REP イベントが観測できるといえる。また REP イベントの総数は太陽活動周期に対応していると考えられるため、太陽活動が増大する 2022 年から数年間は多くの REP イベントの観測が期待できる。

Research of the Relativistic Electron Precipitation events

using CALorimetric Electron Telescope at International Space Station and ARASE satellite

Iwase Tomoya

Abstract

Energetic electrons with energies up to a few MeV in the outer radiation belt bounce along geomagnetic field lines. Relativistic Electron Precipitation (REP) is a phenomenon, in which the MeV electrons in the outer radiation belt lost into the middle atmosphere. Previous studies suggest plasma waves accelerate the energetic electrons in the radiation belt and cause REP event during magnetic storms. However, the relationship between plasma waves and REP events have not been clarified in detail. Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) develop the Particle Instrument for Nano-satellite (PINO) aboard CubeSat BIRDS-5 to observe REP phenomena. BIRDS-5 will be launched into the International Space Station (ISS) orbit in the summer of 2022. The purpose of this study is to clarify the relationship between REP phenomena and plasma waves in more detail and to examine efficient operation methods to observe REP phenomena with the PINO module based on the statistical analysis of REP events using CALorimetric Electron Telescope (CALET) at ISS.

We identified REP events from data observed by CALET /CHD aboard ISS in the period from March 2017 to December 2021 and statistically investigated observed locations and occurrence rate. We detected the conjunction events, in which ISS and the Arase satellite were located at points along the almost same geomagnetic field lines. We also statically studied the relationship between REP events and plasma waves, using the electric field and the magnetic field data observed by Plasma Wave Experiment (PWE)/ Onboard Frequency Analyzer (OFA) and Magnetic Field Experiment (MGF) aboard the Arase satellite.

REP events detected by CALET/CHD were concentrated in the region at 75-125°W and 45-55°N in North America and 50-175°E and 45-55°S in the south side of Australia. These regions correspond to $L > 3$ and the outer radiation belt. The number of REP events was tending to decrease from 2017 and the number of REP events also decrease significantly in 2020, in which the solar activity is at a minimum. This result indicates that the number of REP events depends on the solar activity. In 31 REP events out of the conjunction events, we found that the Arase satellite could detect whistler mode waves and EMIC waves which have a few kHz and a few Hz frequencies, respectively. This result indicates that the plasma waves in the magnetosphere can clearly cause

the REP event. The solar cycle dependence of the REP events numbers may also support the indication.

Therefore, PINO will be able to observe more REP events when it is operated above the North America and the Antarctic Ocean in the south side of the Australia at $L > 3$. In addition, we found that the total number of REP events depends on the solar activity. From this result, we suspect that many REP events will be observed by PINO in several years after 2022 in which solar activity will increase.

第 1 章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 放射線帯と REP 現象及びプラズマ波動.....	1
1.1.2 過去の研究.....	4
1.1.3 BIRDS-5 と PINO ミッション	7
1.2 研究目的.....	8
第 2 章 使用データ	9
2.1 ISS/CALET/CHD	9
2.2 ERG プロジェクト	9
2.2.1 PWE/OFA.....	9
2.2.2 MGF	10
第 3 章 解析手法.....	11
3.1 使用データの取得.....	11
3.2 REP イベントの取得.....	12
3.3 コンジャンクションイベントの取得.....	13
3.4 コンジャンクション REP イベントの取得.....	14
第 4 章 結果.....	16
4.1 イベントの観測位置.....	16
4.2 イベントの観測時間分布	17
4.3 REP イベントとプラズマ波動.....	23
第 5 章 考察.....	30
5.1 REP 現象とプラズマ波動の関連性.....	30
5.2 PINO の運営についての検討.....	32
第 6 章 結論.....	34
参考文献.....	35
謝辞.....	37
付録.....	38
付録 A 放射線帯粒子の往復運動と消失効果[1].....	38
付録 B 解析用プログラム	40
B.1 データ取得用プログラム (myreplib.py より抜粋)	40
B.2 Datetime 用プログラム (myreplib.py より抜粋)	47
B.3 REP イベント検出関数.....	48

B.4 コンジャンクションイベント検出関数	49
B.5 コンジャンクション REP イベント検出関数	52
B.6 L 値表示関数.....	53

全文を希望の方は cho@ele.kyutech.ac.jp までご連絡下さい。