

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	木原 孝輔
論文題目	Observational Study of Gradual Solar Energetic Particle Events Focusing on Timescale (タイムスケールに着目した太陽高エネルギー粒子イベントに関する観測的研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本博士論文では、太陽高エネルギー粒子 (Solar Energetic Particle; SEP) の予報の基礎研究として、その統計的な特徴、特にタイムスケールの特徴に着目した結果について論じている。SEPは、太陽面爆発 (太陽フレア) やコロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection; CME) といった太陽活動現象に由来してしばしば発生する、高エネルギー粒子 (陽子、電子、イオン) である。SEPは、宇宙飛行士や航空機乗員の放射線被曝、人工衛星の故障を引き起こし、社会基盤に重大な影響を与える。また、宇宙天気研究分野における主要な3要素のうちの一つとなっている。そのため、SEPの発生機構を解明すること、およびSEPの発生や到達・規模を予報することは、宇宙天気研究分野における重要な科学的・実用的な課題である。SEPの主要な起源の一つは、CMEの前面で形成する衝撃波が荷電粒子を加速することによるものである。CME由来のSEPイベントは、そのSEP強度の時間変化の特徴から特に「Gradual SEPイベント」と呼ばれている。他方、太陽フレアでのエネルギー解放現場で、直接荷電粒子が加速され宇宙空間に放出される、フレア由来のSEPもしばしば観測されるが、時間変化の特徴が優位にGradual SEPとは異なっており、「Impulsive SEP」と呼ばれている。本博士論文では、Gradual SEPについて、SEPの加速源であるCMEとSEPイベントとの関係、特にSEPのタイムスケールに着目し、タイムスケールを決定する要因を明らかにするため、観測データの解析を行った。</p> <p>第二章では、2006年12月から2017年10月の間に発生した高速かつ幅の広い257例のCMEについて、CMEの発生位置と速度に対するSEPの発生有無、およびSEPを伴ったイベントについては3つのタイムスケール「粒子到達時間 ; T_0」、「ピーク到達時間 ; T_R」、「継続時間 ; T_D」を調査し、かつてないイベント数のCMEとSEPについて、その統計解析を実施した。詳細な発生位置の特定の結果、CMEの発生位置が観測者から見て太陽面上西側 (東経20度から西経100度) にある場合に、SEPイベントを伴いやすいことが明らかになった。また、CME-SEPのタイムスケールについては、CMEが観測者に接続する磁力線の足元付近 (前後60度) で発生すると、T_0が短くなる傾向にあることが分かった。これはT_RやT_Dでも同様に見られるが、より弱い傾向として現れた。タイムスケールとCME速度とはやや弱く相関しており、T_RおよびT_DとCME速度の正の相関は、磁力線の足元から遠い位置でのみ見られた。加えて、T_0とCME速度の負の相関は磁力線の足元付近でのみ見られた。</p> <p>第三章では、二章で作成したイベントリストの中から、同様の経度から発生した同程度の速度のCMEを由来とするにもかかわらず、大きく異なるT_0を持つイベントを2つ選択し、それらについての詳細なイベント解析を実施した。T_0が長いイベントでは、噴出を伴った活動領域の磁場構造が比較的単純で空間スケールが大きいこと、SEPイベントに伴う太陽フレアおよび太陽電波放射のタイムスケールが長かったこと、CMEの加速のタイムスケールが長かったことなどに着目した。これらは結果として、CMEの緩やかな加速を生じ、また、CME前面の衝撃波パラメーター (アルベン・マッハ数) の緩やかな上昇を引き起こしたと考えられる。他方、T_0が短かったイベントでは、複雑な磁場構造を示す活動領域で発生し、短時間のうちにCMEが加速されていた。また、これら2つのイベントでは、アルベン・マッハ数が同程度に成長したタイ</p>			

ミングで、粒子(陽子)のが放出されていることが推定された。これらのことから、T0の違いは、粒子の放出時間の違いに由来すること、この放出時間の違いは、CME駆動の衝撃波の成長過程(アルベン・マッハ数)によることを示した。さらにCME同士の相互作用の違いが、陽子の放出時間に影響を与えた可能性についても議論した。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

宇宙天気研究の中でもSEPは、宇宙飛行士や航空機乗員の放射線被曝、人工衛星の故障を引き起こし、社会基盤に重大な影響を与える、重要な要因である。特に、SEPの到達時刻や継続時間などの「タイムスケール」を正確に予報することは、宇宙天気予報にとって極めて有効である。しかしながら、SEPは、発生位置は活動現象の特徴、惑星間空間磁場、衝撃波の強度など、多くのパラメーターに複雑に依存していると考えられ、観測されるSEPの規模やタイムスケールには大きな幅があることから、統計的な傾向や、発生・伝搬の仮定を詳細に調査することが必要である。

第二章では、地球静止軌道にあるGOES衛星だけでなく、STEREO-A衛星、STEREO-B衛星を加えた3つの異なる方向から太陽を観測する人工衛星によるデータを用いた。このことで、かつてない最大規模でのSEPイベントリストを作成しただけなく、SEPの起源となるCMEの正確な放出位置の特定を可能とした。加えて、3方向の人工衛星データは、1例のCMEに対して3例の異なるSEPイベントの観測を可能にし、結果的に700例を超えるCMEについてのSEPの観測の有無を検証することを可能とした。SEPの発生頻度をCMEの放出経度・放出速度ごとに分解してヒートマップとして示すことで、SEPの発生頻度を視覚的に明瞭に示し、放出経度、放出速度がSEPに与える影響や傾向を明らかにするだけでなく、宇宙天気予報におけるSEPの危険性を判断する上でも重要な結果を与えた。また、CME-SEPのタイムスケールについては、先行研究が限られていたこともあり、今回得られた大規模な統計解析に基づく傾向の抽出は重要である。本研究で得られた、タイムスケールとCME速度との相関は、CMEによって駆動される衝撃波がその先端付近で加速効率の良い粒子加速を行うことを示唆するものである。

第三章では、大きく異なるT0を持つイベントを2つ選択し、それらについてフレアやCMEの発生源となる活動領域の特徴や、CMEの放出過程、太陽電波放射の観測など多面的にこれらのイベントを詳細に解析した。これらのことから、T0の違いは、粒子の放出時間の違いに由来すること、この放出時間の違いは、CME駆動の衝撃波の成長過程（アルベン・マッハ数）によることを示した。これらの結果は、SEPがイベントごとに持つ多様な振る舞いを示す原因の一つとして、CMEや衝撃波の加速の特徴が重要であることを示している。また、観測されるSEPの特徴だけに限らず、原因となる活動領域の複雑性やフレアおよびCMEのタイムスケールと、SEPのタイムスケールとの関連まで広く調査を行ったことは、本研究のユニークな点であり、活動領域からフレア、CME、SEPまでの太陽現象を統一的に理解することの重要性を示した、非常に示唆の富んだ結果となっている。

これらにより、本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認められる。また、令和5年1月13日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降