

論文審査の結果の要旨

氏名 和田 有希

本論文は、雷放電にともない発生するガンマ線が大気中の ^{14}N や ^{16}O 等と $^{14}\text{N} + \gamma \rightarrow ^{13}\text{N} + \text{n}$ 、 $^{16}\text{O} + \gamma \rightarrow ^{15}\text{O} + \text{n}$ のように光核反応を引き起こし、中性子および ^{13}N 、 ^{15}O などの β^+ 崩壊原子核が生成されることを観測的に示したものである。和田氏は小型なガンマ線検出器を製作し、それらを新潟県柏崎刈羽原子力発電所に4台、石川県金沢市に3台、小松市に2台設置した。日本海沿岸は冬季に低い高度で雷が発生するため、大気中におけるガンマ線の散乱・吸収が少なく、光核反応の地上観測に適している。本論文では柏崎、金沢で観測された5例のガンマ線事象について報告しているが、特に2017年2月6日に柏崎で観測されたデータについて詳細に報告している。この雷放電では光核反応によって生成された中性子が $^{14}\text{N} + \text{n} \rightarrow ^{15}\text{N} + \gamma$ などの中性子捕獲反応をおこし、その際に発生する脱励起ガンマ線が作る約50ミリ秒の時定数の「短時間バースト」が観測された。そして、 ^{13}N 、 ^{15}O などの β^+ 崩壊にともない発生する陽電子が大気中の電子と対消滅して発生する0.511 MeVのガンマ線（約1分間継続）も観測された。加えて、短時間バーストの初め数ミリ秒間、検出器のアナログ回路系のベースラインが著しくシフトしていたことにより、地球ガンマ線フラッシュ（Terrestrial Gamma-ray Flash: TGF）の兆候も捉えた。これら一連の現象を捉えたのは世界で初めてである。さらに、和田氏はこうした過程のシミュレーションを構築した。それはTGFにおいて大気中で加速された電子に始まり、高エネルギー（ >10 MeV）のガンマ線の発生、光核反応による中性子および β^+ 崩壊原子核の発生、脱励起ガンマ線、対消滅ガンマ線の強度を計算した。そのシミュレーションと観測結果を比較することによって、TGFが起きた高度、TGFにおいて生じた電子の数を導出した。

論文は9章からなり、まず第1章では雷活動における高エネルギー現象の観測と、大気圧下で電子が加速されるメカニズムについて紹介されている。第2章では人工衛星でのTGFにともなうガンマ線の観測をはじめとして、これまでに報告されている雷放電のともなうガンマ線観測について詳しくレビューされている。特に、これまでは人工衛星によって上向きのTGFが観測されてきたが、本論文で議論されている下向きのTGFの地上検出も紹介され、これらが本質的に同じものであるかが重要なポイントであると述べられている。加えて、大気圧下での電子加速の理論について詳しい定量的な説明がされている。第3章では冬の日本海沿岸で観測を行うことの重要性、開発した小型ガンマ線検出器の詳細について書かれている。また、本論文では柏崎刈羽原子力発電所のモニタリングポストのデータを使ったTGF強度の見積もりや、Japanese Lightning Detection Network (JLDN) による電波データとの比較も行われているため、それらの説明も書かれている。第4章では観測結果について書かれている。小型ガンマ線検出器が捉えたデータの時間分布、エネルギー分布、それらから得られる時定数等について詳細が書かれている。対消滅ガンマ線

のデータでは雷から 35 秒遅れてカウント数が増加しているが、それは ^{13}N 、 ^{15}O の「同位体の雲」の地上風による移動として解釈できると書かれている。第 5 章では、GEANT4 パッケージ、ENDF/B-VII.1 核反応データを用い、光核反応によって生じる中性子、 β^+ 崩壊原子核のシミュレーションについて書かれている。第 6 章には中性子の熱化の過程、中性子捕獲反応のシミュレーションについて書かれている。第 7 章では複数のモニタリングポストが捉えた空間線量値から TGF の発生高度、場所、発生電子数を見積もる方法の詳細と得られた結果が述べられている。第 8 章では、中性子のデータ、対消滅ガンマ線のデータ、モニタリングポストのデータを比較し、お互いコンシステントな結果が得られていることを議論している。さらに、地球での ^{14}C 生成における雷放電での光核反応の寄与や、TGF による空間線量が人体に与える影響についても触れている。第 9 章では論文の結論を述べている。

本論文のデータは Gamma-Ray Observation of Winter Thunderclouds (GROWTH) 実験グループによって得られたものであるが、和田氏は検出器の製作とデータ解析に大きく寄与しており、またシミュレーションの構築、データとの比較による物理量の導出は和田氏が行ったものであり、論文提出者の寄与が十分大きいと判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。