

## 論文の内容の要旨

### 10年間の継続観測に基づく冬季雷雲由来ガンマ線の研究 (Compilation of 10 years of winter thundercloud gamma-ray observation)

氏名 榎本 大悟

近年、雷雲を由来とするガンマ線の発生が報告されるようになった。これらは「雷雲ガンマ線」と呼ばれており、この現象は雷雲が電子加速器として振る舞うことを示唆している。そのスペクトルはカットオフのあるパワーローで近似できることから、雷雲中に存在する、あるいは雷放電によって突発的に発生する、強い静電場の中で加速された電子の制動放射が起源であると予想されている。雷雲ガンマ線には多様性があり、これらは観測される場所と放射の継続時間によって分類できることが分かっている。宇宙で観測されるものは数ms程度の継続時間を持つものしかなく、Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGFs)と呼ばれ、雷放電と同期することが知られている。地上で観測されるものはThunder-cloud Gamma-ray Enhancements (TGEs)と総称され、継続時間が1 ms程度のもの、数百msのもの、数十秒続くものに明確に分類できる。はじめの二つは雷放電と同期する。最後のものは必ずしも雷と同期せず、殆どのケースで安定して放射を持続することが知られており、「ロングバースト」と呼ばれている。本論文は、この現象をテーマ

としてその性質を詳細に論じた。

ロングバーストの存在は、雷雲電場が数十秒よりも長いスケールで電場加速器として振る舞うことを示唆している。しかし、その起源と考えられる「雷雲加速器」の成立条件と維持機構、雷雲内の電荷配置との対応がまだ解明されていない。そこで、観測的に詳細を知ることが目的として、2006年から東京大学と理化学研究所によりGamma-Ray Observation of Winter THunderclouds (GROWTH)実験が観測を続けている。これは東京電力の協力のもと、新

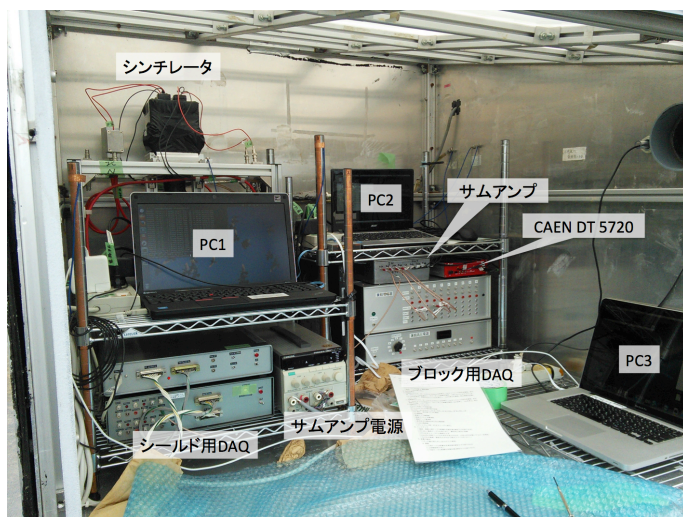


図1: daq0Aの設置状況。

瀧県にある柏崎刈羽原子力発電所内の2地点にシンチレーション検出器を配置し、東京電力が運用するモニタリングポスト(MP)のデータも用いて、冬の日本海側に到来する雷雲から生じたガンマ線を観測する地上実験である。

私は、この実験に2013年度から参加し、2014年度には図1に示す新たな検出器daq0Aを設計・製作し、設置した。この検出器には簡易的にガンマ線の到来方向を検知する能力があり、例えばガンマ線放射の源(放射源)が点源であれば、30度の角度差を検知する角度分解能がある。この他、2006年から2013年度まで観測を継続したdaq0B、2010年度から観測を開始したdaq1の3種類の検出器によって観測データが取得されてきた。2010年以降は毎年、daq0Bとdaq1、もしくはdaq0Aとdaq1による2地点観測が行われてきた。

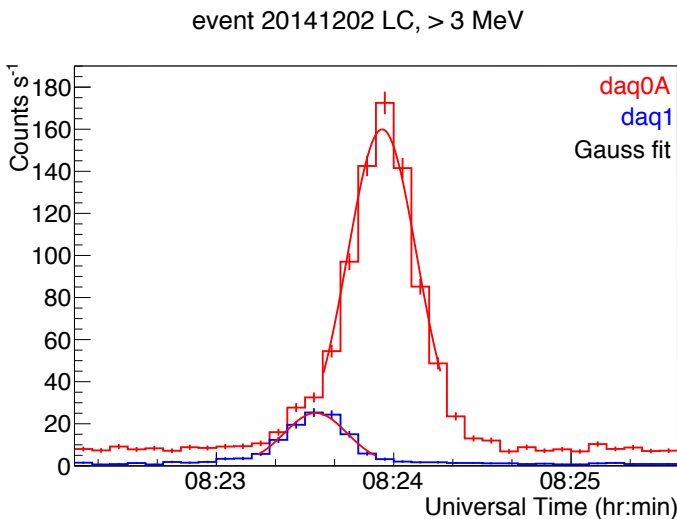


図2: 20141202のライトカーブ  
(照射域の東西断面に対応)。

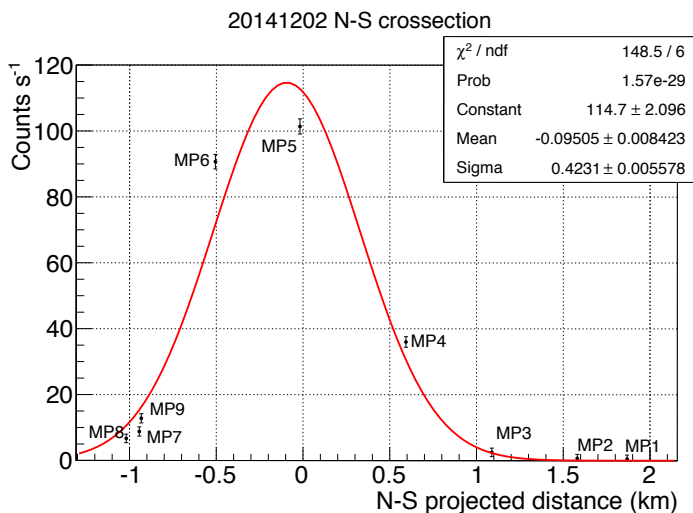


図3: MPのピーク強度分布  
(照射域の南北射影に対応)。

MPのライトカーブをFWHM=27 sのガウシアンでフィットしてピーク時刻を求め、その時刻差とMPの配置から風向と風速を割り出したところ、レーダーによる推測とほぼ一致したので、レーダーから求めた風速が信用できることが判明した。20141202の照射域の東西スケール(サイズ)はこの風速を用いて、 $675 \pm 54$  mと求まった。

2006年から2016年までの10年間に、19個のロングバースト(イベント)が検出された。本論文では、これら全てを統合的に解析し、性質を調べた。2014年度のイベント検出数は特に多く、8つのイベントを検出し、またそのうち2つは他のイベントに比べて20倍程度の強度を持っていた(以降、大統計イベントと呼ぶ)。本論文ではまず、これらの大統計イベントを解析することで雷雲ガンマ線のおおまかな描像の確立を目指した。

地上におけるガンマ線の分布(以降、照射域)の東西南北のサイズを観測で決定することを初めて試みた。大統計イベント20141202のガンマ線強度の時間変動(ライトカーブ)を図2に示す。左右対称な形状が特徴的であるため、ガウシアンでフィットした際のFWHMで「継続時間」を代表することにし、これを求めると27 sであった。雷雲は風によって動くため、継続時間を決めているのは、照射域のサイズと風速であると考えられる。そこで、以下の2つの方法で風速を推定して信頼性を評価し、サイズを推定することを試みた。

10分間隔の気象レーダーによる降水量分布から雷雲が存在する位置を求め、イベント前後10分間の移動距離から風速を求めたところ、24.2 m/sであった。また、照射域が形を変えずに移動したと仮定し、

さらに南北の大きさも同時に推定することに成功した。南北に並んだMPのピーク強度の分布を図3に示した。これは、照射域強度分布を南北に射影したものに对应する。これを東西と同様にガウシアンでフィットすると、そのFWHMは $966 \pm 29$  mと求まった。従って、イベント20141202は東西(~700 m)と南北(~1000 m)で大きさが異なり、その照射域が南北に長い形状であったことが判明した。同様に、2015年の初めの非常に明るいイベント20150124を解析した

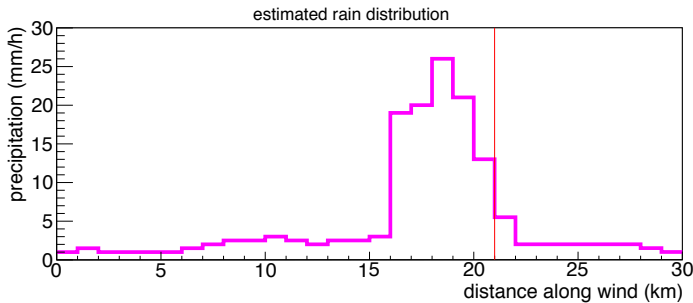


図4: 降水量分布と照射域の位置関係。

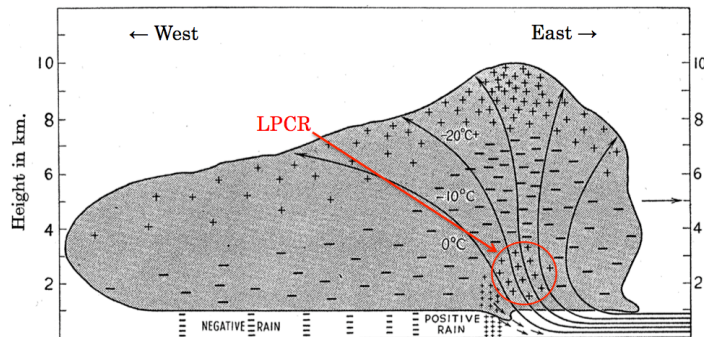


図5: 雷雲の構造(Simpson et al. 1925)。

daq0A shield 20141202 LC > 100 keV

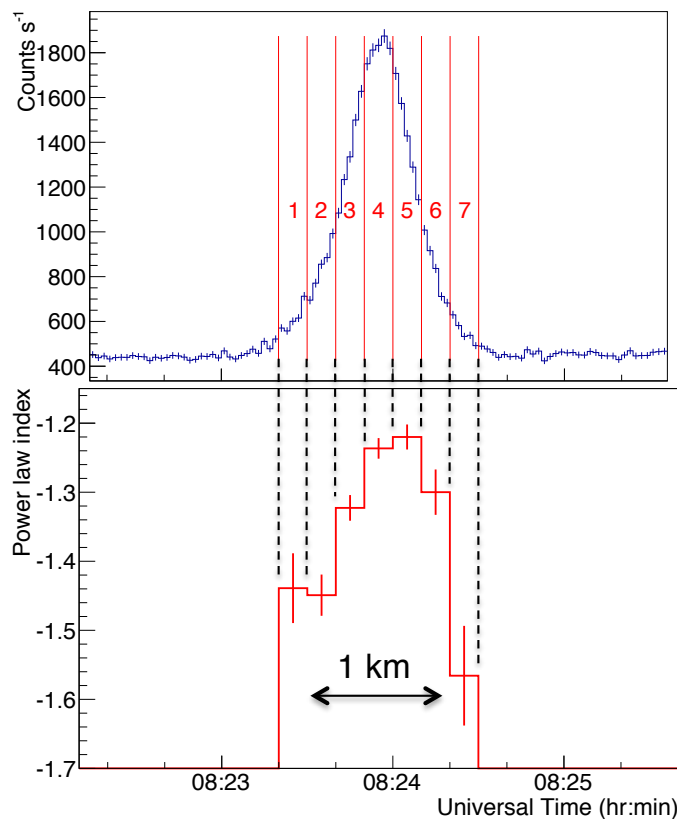


図6: イベント20141202発生時の冪の変動。

ところ、東西・南北のどちらにも~800 mのスケールを持っており、照射域の形がイベントによって異なる事実が初めて示された。

ここで、照射域と雷雲の位置関係を調べた。20141202の発生時における降水量の、風向にそった断面の分布(イベント発生前後の気象レーダーに基づく推定)を図4にマゼンタで示し、赤の垂線で検出器の位置を示した。この降雨域は風によって24.2 m/sで東(右)に向かって移動している。すなわちこの図は、約7 kmの広がりを持つ降雨域に先行して照射域(~1 km)が検出器の位置を通り過ぎる瞬間の様子を示している。この位置関係は図5に示した雷雲の構造とよく類似し、放射源に対応する構造を図5から探すと、雲底に浮かぶ正電荷の領域が該当することが読み取れる。これはポケット正電荷またはLPCR (Lower Positive Charge Region)と呼ばれ、以前からロングバーストの起源ではないかと指摘されてきたものである。本結果は、LPCRがロングバーストの起源であることを示す新たな傍証である。

仮に、雷雲中のこうした小さな構造で電子が下向きに加速されていて、ロングバーストがその制動放射を起源とするならば、強度が最も強い場所でスペクトルが最も硬くなり、イベントの開始・終了時には軟くなるものが以前から予想されている。これを確かめるため、イベント発生時の時間帯を複数に分割し、各時間帯におけるスペクトルの硬さを「冪」というパラメータによって代表し、その変動を追跡する解析を行った。「冪」とはスペクトルをパワーロー:  $a \times x^b$  でフィットした際の指数  $b$  のことである。その結果が図6で、ライトカーブのピーク付近で最も硬く、従来の予想が実際に成り立っていることが初めて明確に示されている。

本論文ではさらに、他のロングバーストをライトカーブの形状に基づいて分類した。19個のうち13個は図2と同様に左右対称な形状であり、「ガウス型」と分類した。このほか、ガウス型が2つ重なっていると解釈できる「ふたこぶ型」が1つ、途中で突然放射が中断したと解釈できる「瞬間途絶型」が4つ、放電とともにガウス型の放射が突然開始したと解釈できる「突然開始型」が1つ見られ、いずれもガウス型に別の要因を加えれば解釈できることを初めて指摘した。

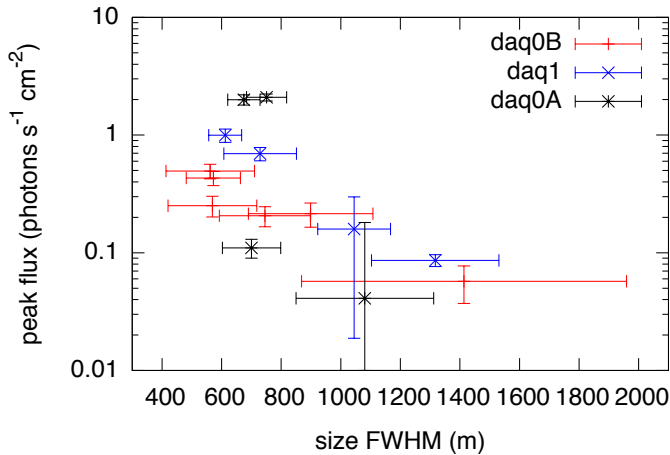


図7: 照射域のサイズとピーク強度の相関。

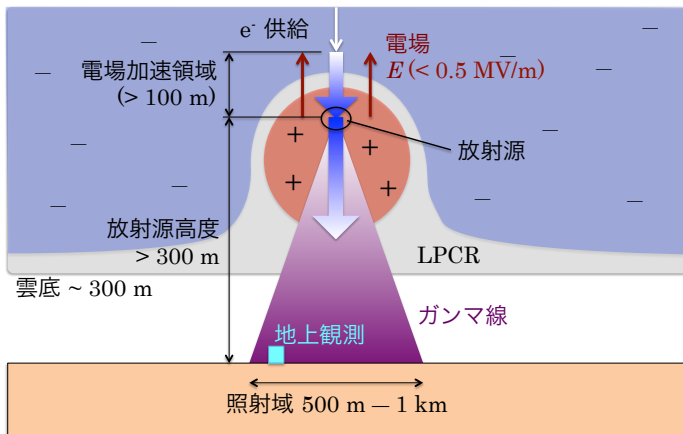


図8: 雷雲加速器の描像。

13個のガウス型のイベントに共通する特徴を見出すため、物理的に有意義で観測的にも決定しやすい3つの特徴量: 「サイズ」「ピーク強度」「冪」を、大統計イベントの解析と同様の方法で抽出し、その相関を調べた。その結果、図7に示すように、ピーク強度と照射域のサイズに逆相関があることを発見した。また、照射域のサイズは典型的に1 km程度のスケールを持つことを初めて明らかにした。

以上の観測結果から、図8に示す雷雲加速器の描像を確立した。LPCRの上部にある局所的に強い電場中で電子が真下に加速され、その制動放射が地上で1 km程度に広がって観測されたと考えられる。では元の「雷雲加速器」はどのような形状なのか。

本研究では最後に、大気伝播をモンテカルロ・シミュレーション(以降、MC)で評価することで、観測されたガンマ線から加速器の位置や広がりやを推定することを試みた。最初の一步として、最もシンプルな状況を想定したMCがGROWTHチームにより実行された。様々な高度から平行かつ太さゼロで10 MeVの単色な電子ビームを入射する「単純ビームモデル」の結果を、詳細な解

析結果のある大統計イベント20141202と比較した。電子の入射高度を1 kmと仮定すると、冪の絶対値はおおむね説明できる一方、照射域の広がり400 m程度にしかならず、実際に観測された~700 mの広がりを説明できない。さらに別の入射高度を仮定したMCにより、放射源の高度を上げれば照射域は広がるが冪は硬くなることが判明した。従って、単純ビームモデルを仮定したまま実データを説明できる高度は存在せず、照射域を広げる何らかの効果、例えば電子の加速方向の角度分布や、電子ビームの太さを考慮するなど、さらなるモデルの精密化が必要である。

今後、放射源の姿を地上で観測されたガンマ線から推定する上で、MCの改善は欠かせない。その際、特に図7の逆相関を説明できることが求められる。本研究ではさらに、上記のMCの結果を精査し、照射域中心の軌跡と検出器の最接近距離(衝突径数と呼ぶ)、および高度の違いによって、ピーク強度・冪・サイズがいずれも大きく変わることを明らかにした。従って、MCと実験結果を定量的に比較する上で、衝突径数と高度を観測的に決定することが重要である。これを達成するには、さらに密な検出器アレイの設置や、高度を三角測量するための高い角度分解能を持つ検出器の設置が有効である。