

2023 年度 修士論文  
シチズンサイエンスを活用した多地点観測による  
雷雲ガンマ線の観測と解析

青山学院大学 坂本研究室 修士 2 年  
京都大学 宇宙線研究室 特別研究学生  
学籍番号:35622016 鶴見美和

2024 年 3 月 4 日



# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>高エネルギー大気物理学の誕生</b>	<b>3</b>
1.1	自然界での粒子加速	3
1.2	高エネルギー大気物理学	4
1.3	雷雲内での粒子加速と雷放電	6
<b>第 2 章</b>	<b>雷雲電場による電子加速と制動放射ガンマ線</b>	<b>7</b>
2.1	雷雲電場の発達	7
2.2	雷雲内での電子加速メカニズム	11
2.3	これまでの雷雲ガンマ線の観測	15
2.4	宇宙線と雷の発生の関係	20
2.5	シンチレータによるガンマ線検出の仕組み	21
<b>第 3 章</b>	<b>多地点のガンマ線マッピング観測</b>	<b>25</b>
3.1	シチズンサイエンス「雷雲プロジェクト」	25
3.2	コガモ検出器 (Compact Gamma-ray Monitor)	27
3.3	コガモ検出器による環境放射線の測定	32
3.4	コガモの性能評価	35
3.5	観測体制	39
3.6	データサーバとアラートシステム	42
3.7	問題点と対策	44
<b>第 4 章</b>	<b>雷雲ガンマ線の探索と系統解析</b>	<b>49</b>
4.1	データのパイプライン処理と雷雲ガンマ線イベントの探索	49
4.2	代表的な雷雲ガンマ線の解析例	51
4.3	系統解析	54
4.4	本章のまとめ	57
<b>第 5 章</b>	<b>雷雲ガンマ線とレーダー観測の比較</b>	<b>59</b>
5.1	XRAIN 気象レーダー	59
5.2	降水粒子判別法	63
5.3	解析結果	65
5.4	本章のまとめ	68
<b>第 6 章</b>	<b>ガンマ線観測とレーダー観測の総合解析</b>	<b>69</b>
6.1	イベントの概要	69

---

6.2	雷雲ガンマ線の放射領域の推定 . . . . .	69
6.3	雷放電の発生位置と雷雲ガンマ線の放射域の比較 . . . . .	71
6.4	雷雲の反射強度と粒子判別の鉛直断面図 . . . . .	75
6.5	電荷構造の推定 . . . . .	76
6.6	本章のまとめ . . . . .	76
<b>第7章</b>	<b>まとめと今後の展望</b>	<b>79</b>
7.1	まとめ . . . . .	79
7.2	今後の展望 . . . . .	79

# 目次

1.1	1 次宇宙線のエネルギースペクトル	3
1.2	宇宙における粒子加速の例	4
1.3	高エネルギー大気物理現象の概要	5
1.4	雷雲ガンマ線と地球ガンマ線フラッシュのライトカーブ	6
2.1	シンプソンの電荷分布モデル	7
2.2	着氷電荷発生機構	8
2.3	夏季と冬季の雷雲の違い	9
2.4	落雷の 4 つのタイプ	10
2.5	三重落雷の静止写真と時間分解写真	11
2.6	大気中の電子のエネルギー損失と電場加速	12
2.7	モンテカルロシミュレーションによって求めたアバランシェ長と雲中電場の関係	13
2.8	相対論的フィードバックプロセス	14
2.9	大気中でのガンマ線の平均自由行程と電子の飛程距離	15
2.10	2007 年 1 月の柏崎刈羽原発における雷雲ガンマ線の観測例	18
2.11	雷雲ガンマ線の平均的なスペクトル	19
2.12	下向き TGF による光核反応の観測	20
2.13	雷放電と TGF によって終了した雷雲ガンマ線の観測	20
2.14	光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成の模式図。図は鶴見美和 (2021) より引用。	22
2.15	結晶シンチレータ内のエネルギー構造。	23
2.16	APD(Avalanche Photo Diode) の模式図とバイアス電圧を印加した際の電界の分布	23
3.1	シチズンサイエンス「雷雲プロジェクト」のイメージ	26
3.2	コガモ検出器 (仮)	28
3.3	コガモ検出器のシステムのブロック図	29
3.4	ガンマ線の CsI シンチレータに対する質量減弱係数	31
3.5	CsI シンチレータ内でのガンマ線の平均自由行程	31
3.6	厚さ 5 cm の CsI シンチレータ内でのガンマ線の反応確率	32
3.7	コガモ検出器で測定された晴天時と雨天時のライトカーブと環境データ。	33
3.8	コガモ検出器で測定された晴天時と雨天時のエネルギースペクトルの比較。	34
3.9	トリウム系列 (左) とウラン系列 (右) の崩壊図	34
3.10	コガモ検出器 ID32 に放射線源を当てた実験のセットアップ	35
3.11	理研・研究本館 604 の室内での環境放射線バックグラウンド	36
3.12	環境放射線バックグラウンドのエネルギースペクトルから算出したエネルギー較正関数	37

3.13	コガモのエネルギー分解能	39
3.14	実験室のコガモ柵 (左) と発送作業の様子 (右)	40
3.15	コガモ郵送の際の梱包物	41
3.16	2018 年度から 2023 年度のコガモ検出器の設置場所	42
3.17	雷雲プロジェクトのデータサーバーのウェブサイト。	43
3.18	移動平均でアラートをかける場合の例	44
3.19	コガモ検出器の観測停止	45
3.20	コガモ検出器で発生するノイズ	47
3.21	コガモ検出器の HK ファイルのデータフォーマットの破損	47
4.1	雷雲プロジェクトの放射線データの解析パイプラインの概要	49
4.2	フーリエ変換によるノイズ判定	50
4.3	ライトカーブカウントレートのヒストグラム	51
4.4	ID18 の 2021 年 2 月 3 日の 3 時台の 3MeV 以上の 5 秒ビンライトカーブとカウントレートのヒストグラム。	52
4.5	ID18 の 2021 年 2 月 3 日の 3 時台の 3MeV 以上の 5 秒ビンライトカーブ	53
4.6	ID18 が観測した 2021 年 2 月 3 日 3 時 16 分ごろに観測された雷雲ガンマ線イベントのエネルギースペクトル。	54
4.7	年度ごとコガモ検出器の設置数と雷雲ガンマ線の検出数	55
4.8	月ごとの検出数	55
4.9	GROWTH 実験の検出器とコガモ検出器の有効面積の比較	56
4.10	光子数と継続時間のヒストグラム	57
4.11	気温、風向、風速のヒストグラム	57
5.1	C バンドレーダーと X バンドレーダーの配置	59
5.2	気象レーダーの仕組み	60
5.3	XRAIN 能美レーダーの位置と観測範囲	62
5.4	PPI ボリュームスキャンのイメージ図と能美レーダーの運用方法	63
5.5	粒子判別におけるメンバーシップ関数の例	64
5.6	2021/01/09 06:03:48JST に ID12 と ID14 で観測された雷雲ガンマ線の検出時刻の 5 分前、検出時刻、検出時刻の 5 分後における、高度 2000 m の反射強度の水平断面、反射強度の鉛直断面、降水粒子分布の鉛直断面	66
5.7	積乱雲の各発達段階の特徴	67
6.1	2021 年 12 月 30 日 4 時 8 分ごろに 5 地点で観測された雷雲ガンマ線のライトカーブ	70
6.2	2021 年 12 月 30 日 4 時 6 分から 9 分の 4 分間の合成雨量データ	70
6.3	雷雲ガンマ線の放射域の推定	71
6.4	2021 年 12 月 30 日 4 時 8 分頃に ID62 と ID53 で観測された雷雲ガンマ線のライトカーブ。	72
6.5	FALMA と DALMA によって観測された雷放電の位置。	73
6.6	FALMA と DALMA によって観測された雷放電の位置。	74
6.7	FALMA によって観測された雷放電の電波波形と DALMA によって観測された雷放電の高度	75
6.8	2021 年 12 月 30 日 4 時 8 分の合成雨量データ	77

---

7.1	2018 年度から 2022 年度の全イベントの 3 Me 以上のライトカーブ . . . . .	94
7.2	2018 年度から 2022 年度の全イベントの 3 Me 以上のライトカーブ . . . . .	95
7.3	2018 年度から 2022 年度の全イベントの 3 Me 以上のライトカーブ . . . . .	96
7.4	2018 年度から 2022 年度の全イベントの 3 Me 以上のライトカーブ . . . . .	97
7.5	2018 年度から 2022 年度の全イベントの 3 Me 以上のライトカーブ . . . . .	98



# 表目次

3.1	コガモ検出器の諸元 (FY2021 モデル)	28
3.2	コガモ検出器で使用している部品の型番	29
3.3	コガモ検出器の分類	30
3.4	使用した放射線源	35
3.5	校正に使用した輝線	36
3.6	コガモで計測した核種ごとのエネルギー分解能	38
3.7	長期動作の作業内容	40
3.8	コガモ郵送の際の梱包物	40
4.1	パイプラインで出力される項目とその内容	49
4.2	2018-2022 年度のイベント	58
6.1	2021 年 12 月 30 日に 5 台で観測された雷雲ガンマ線の継続時間と放射領域の大きさ	71
7.1	config ファイルの設定	81
7.2	チャンネル・エネルギー変換ファイルに記されている較正式の係数の例	82
7.3	log ファイルのデータフォーマット	82
7.4	イベントファイル (2022 年 9 月以前)	83
7.5	イベントファイル (2022 年 9 月以降)	83
7.6	コガモ検出器のリスト	83
7.7	2018 年度コガモ設置場所	86
7.8	2019 年度コガモ設置場所	86
7.9	2020 年度コガモ設置場所	87
7.10	2021 年度コガモ設置場所	87
7.11	2022 年度コガモ設置場所	89
7.12	2023 年度コガモ設置場所	91



# 概要

発達した雷雲の内部では、強い電場によって電子が相対論的な速度まで加速され、制動放射によりガンマ線が放射される。宇宙線研究の大テーマである「粒子加速」を地上から観察できる他にない例である。「雷雲ガンマ線 (Gamma-ray glow)」はそのような現象の一つで、雷雲の通過に同期して、数十秒から 1 分程度にわたり、MeV 帯域のガンマ線が地上で観測されてきた。このエネルギーのガンマ線は大気中では数百 m で減衰するため、雷雲ガンマ線の地上検出には、高度の低い雲を観測する必要がある。冬季の日本海沿岸は、大陸からの冷たく乾燥した空気が暖かい対馬暖流の上を通過する際に低高度の雲が発達するため、雷雲ガンマ線の地上観測が活発に行われてきた。2006 年に立ち上がった GROWTH 実験では、冬季の北陸にガンマ線検出器を設置して観測を行い、これまでに 70 例以上のイベントが検出されている。これらの先行研究によって、雷雲中の電場によって電子が加速されガンマ線が放射されていること、その電場領域は雷雲内で帯電した氷晶やあられなどの粒子によって生成されていることなどが分かってきた。しかし、限られた観測地点数であったため、移動する雷雲を追跡することが難しく、雷雲ガンマ線の成長や消失、継続時間といった時間変化や、雲内の電子加速領域の高度や大きさなどの空間分布が測定出来ないといった点が課題であった。

これらの課題を解決するためには、さらに検出器の設置場所を増やして観測を行い、レーダーによる雷雲内部の発達度合いや雲を構成する粒子の判別からガンマ線を放射している領域を特定し、その大きさを見積もる必要がある。そこで本研究では、シチズンサイエンスの枠組みを用いた「雷雲プロジェクト」で多地点マッピング観測を行なった。このプロジェクトでは、北陸に住んでいる市民サポーターにご協力いただき、片手で持ち運べる軽量で小型なシンチレータ型の放射線検出器「コガモ」を冬季の石川県金沢市の周辺に設置し、さくら IoT による自動データ送信と組み合わせ、大規模な観測網を構築した。コガモにより、GPS で時刻付けされた 0.2-10 MeV のガンマ線光子のイベントデータ、気温、湿度、気圧などの環境データが収集できる。多地点で観測網のサイズと密度をあげて雷雲を追跡することで、(1) 雷雲内の電子加速がどのように開始しどのくらい継続し、どのように終わるのか、(2) どのような雷雲で電子加速が起きているのか、(3) 加速された電子が雷放電のトリガーになることはあるのか、といった雷雲ガンマ線の謎の解明を目指している。2021 年度は 56 台、2022 年度は 70 台、2023 年度は 69 台のコガモ検出器を、金沢市を中心に石川県の全域に設置して、11 月から 3 月まで観測を行なっている。本論文では、2018 年度から 2022 年度の 5 年間に雷雲プロジェクトによって観測されたデータの中から、雷雲ガンマ線のイベントを探索した。

多地点での観測により、たとえば 2021 年 12 月 30 日に金沢市内で検出されたイベントでは、一つの雷雲からの雷雲ガンマ線を 5 地点で同時検出することに成功し、地上でのガンマ線の放射領域は 2~2.5 km ほど広がっていた。さらに XRAIN レーダーのデータを用いて、イベントが発生した時刻に検出器上空にあった雷雲を解析し、雷雲ガンマ線の発生時の雷雲の発達強度や粒子の種類を調べた。検出器付近の地上から高度 2 km にわたって、強く発達したあられの領域が広がっており、その内部に電子の加速領域があると推定できた。また、同時刻には 5 台のコガモ検出器の付近で雷放電も発生しており、そのうち 2 台は雷放電の時刻に同期して雷雲ガンマ線の増光が終了する「瞬間途絶」を観測していた。この雷放電は、ガンマ線が放射されていたと推定される領域の内部か近傍から開始しており、雷雲ガンマ線を生成する相対論的な電子が、雷放電を引き起こす可能性を示唆している。これらの結果は Geophysical Research Letter に筆頭著者として発表し、京都大学でのプレスリリースも行った(Tsurumi et al. 2023)。本論文では、代表的な雷雲ガンマ線の解析結果と、検出された全イベントの特徴をまとめ、雷雲での電子加速現象の謎の解明に挑む。



## 第 1 章

# 高エネルギー大気物理学の誕生

### 1.1 自然界での粒子加速

粒子加速はごく少数の粒子が極めて大きなエネルギーを獲得する現象である。自然界での粒子加速の最たる例が宇宙空間のどこかで加速される宇宙線である。1912年にヘス (V.F.Hess) は、当時地球からやってきていると考えられていた放射線を気球に乗って測定することによって、宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギーの荷電粒子である宇宙線を発見した (Hess 1912)。最近では観測史上 2 番目に大きなエネルギーの宇宙線「アマテラス粒子」が観測され、地球に到達する宇宙線の最大エネルギーは  $10^{20}$  eV にも及ぶことがわかっている (Telescope Array Collaboration et al. 2023)。ヒッグス粒子を発見した大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) の陽子ビームでさえ、現在の最大エネルギーは  $10^{13}$  eV であり、地球上の粒子加速器で人工的に作ることができるエネルギーを宇宙線が遥かに超えているのは驚くべきことである。

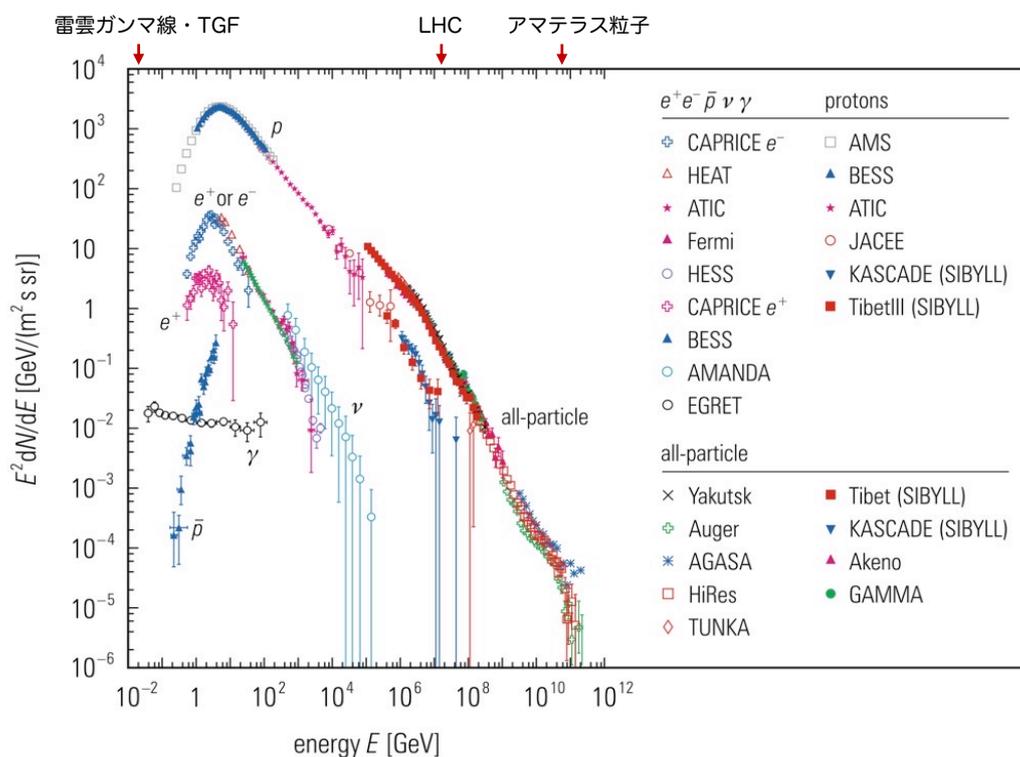


図 1.1 1 次宇宙線のエネルギースペクトル。

図 1.1 に示すように、宇宙線のエネルギースペクトルはべき分布をしており、これは一つの粒子が大きなエネルギーを得ていることを示唆している。宇宙空間を満たす星間ガスはイオンと電子からなるプラズマで構成されている。このガスは希薄であるため粒子同士の頻繁な衝突は発生しないが、例えば衝撃波のような特殊な環境では一つの粒子が磁場に繰り返し衝突することで大きなエネルギーを獲得することができる。宇宙空間はこのような粒子加速が発生できる特殊な環境がいくつかあると考えられている。このような宇宙線がどのような天体で作られるのか、またどのような物理過程を経て作られるのかは、宇宙線発見から 100 年以上経った現在でも未解決であり、これまで多くの物理学者の興味を惹きつけてきた。宇宙空間を満たす高エネルギー粒子である宇宙線の存在量は、宇宙環境を決めるパラメーター一つであり、宇宙空間における粒子加速の仕組みを理解することは、宇宙物理学における重要問題の一つである。

代表的な宇宙線の加速機構として、超新星残骸の衝撃波面でのフェルミ加速と中性子星の誘導電場による加速の二つがあげられる。前者は、星間ガス中を衝撃波が進む際に、プラズマ中に発生した磁場によって荷電粒子が反射され、衝撃波面上流と下流を往復することで加速される。代表例は図中の超新星残骸 SN1006 が挙げられる。後者は、強い磁場を持つ中性子星や白色矮星といった高密度天体が高速度で回転することで、その磁場に捕らえられた荷電粒子が磁場に沿って遠心力で加速されながら放出される現象である。代表例として図中のかに星雲の pulsar が挙げられる。これらの天体で加速された高エネルギーの粒子が星間ガスや光子と相互作用することで高いエネルギーのガンマ線が発生し、実際に GeV や TeV という超高エネルギーのガンマ線として検出されている。

このように自然界における電子加速機構は磁場を介しているものが多い。図 1.2 では、宇宙で発生する様々な粒子加速での宇宙観測から推定された最高エネルギーを縦軸に示している。この横軸には、それぞれの系の代表的な速度  $v$ 、磁場強度  $B$ 、特徴的な長さ  $L$  の積、すなわち誘導電場に対応する電圧が示されており、加速現象には磁場を介しつつも電場に換算して最大加速が決まると見られることもできる。このように電場は粒子加速の重要なパラメーターと考えられるが、静電場そのものによる直接の粒子加速現象はほとんど見つかっていない。たとえば、静電場が発生すると、プラズマ化した宇宙空間では電気的中性を保つためにすぐに遮蔽されてしまう。このため大きなスケールで静電場が存在することはできず、局所的に強い静電場しか存在し得ないと考えられる。宇宙空間での粒子加速では、例えば太陽フレアや衝撃波面内の大振幅電場など近傍の天体では静電場による粒子加速が議論されている。しかし、遠方の天体の局所的な静電場によって粒子が加速されたとしても、それを直接的に観測・研究するのは難しい。本論文では、宇宙空間では観測が難しい、電場での直接加速を実際に観測できる雷や雷雲に焦点を当てる。

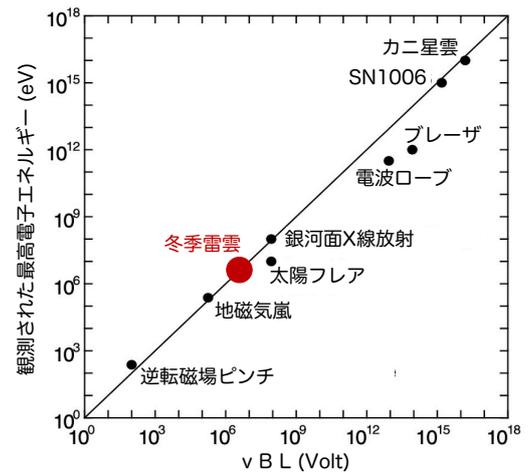


図 1.2 宇宙における粒子加速の例。横軸は、それぞれの系の代表的な速度  $v$ 、磁場強度  $B$ 、特徴的な長さ  $L$  の積、縦軸は観測された最高の電子エネルギーを示す。(Makishima 1999)

## 1.2 高エネルギー大気物理学

我々の身近に存在する雷雲や雷は、自然界でも珍しい静電場加速を直接検出することができる貴重な観測対象である。これは「高エネルギー大気物理学」という新しい分野として盛り上がり、近年観測が活発に行われている。図 1.3 に高エネルギー大気物理現象の概要を示す。積乱雲中では、強い上昇気流によって氷晶とあられがぶつかり合って電荷を持ち、強い静電場領域が現れる。電子がこの領域に飛び込むことで加速され、大気との相互作用で制動放射ガンマ線が放出される。これが本研究の対象である「雷雲ガンマ線 (Gamma-ray glow)」で、20 MeV 程度に及ぶガンマ線が数十秒から数分程度にわたって地上に降り注ぐ「ロングバースト」である。図 1.4(左)に、2021年に

石川県金沢市で観測された雷雲ガンマ線の 3 MeV 以上のライトカーブを示す。日本では特に 2006 年に立ち上がった GRWOTH 実験によって金沢市を中心に日本海沿岸で盛んに観測が行われている(榎戸輝揚 2006, Tsuchiya et al. 2007)。2016–2019 年の複数地点観測では 70 例の雷雲ガンマ線イベントを観測している(Wada et al. 2021, 和田有希 2017, 松元崇弘 2019)。これによって雷雲ガンマ線は雷雲内で加速された電子からの制動放射であることが確立し、さらに雷雲の移動とともにガンマ線の照射領域が移動していくこともわかった。

また、雷雲内の静電場加速によるロングバーストだけでなく、雷放電自体に同期した放射線現象も見つかっている。これは「地球ガンマ線フラッシュ (Terrestrial Gamma-ray Flash: TGF)」と呼ばれ、20 MeV に及ぶエネルギーのガンマ線がミリ秒の継続時間で放射される「ショートバースト」である。図 1.4(右) に 2021 年に新潟県で観測された地球ガンマ線フラッシュのライトカーブを示す。1994 年、ガンマ線観測衛星コンプトンの搭載されたガンマ線バーストを検出するための検出器 (BATSE) が、地球から到来するガンマ線のフラッシュを初めて発見し、その後 RHESSI 衛星や、Fermi 衛星、AGILE 衛星など他のガンマ線天文衛星による検出事例も報告されるようになった(Fishman et al. 1994, Briggs et al. 2010, Tavani et al. 2011, Smith et al. 2005)。これらは雷放電の最初の数ミリ秒に発生しており、放電の先駆現象であるリーダの先の強電場で加速された電子からの制動放射ガンマ線ではないかと考えられている。

さらに 2017 年には、雷放電に伴って光核反応が発生することも明らかになった(Enoto et al. 2017)。雷放電で生じたガンマ線 (地球ガンマ線フラッシュ) は大気中の窒素や酸素の原子核に衝突して光核反応を起こし、中性子と放射性同位体を生成させる。そして放射性同位体がベータ崩壊で陽電子を放出する。この中性子が大気に吸収される際に放出される脱励起ガンマ線と、陽電子が対消滅した際に放出される対消滅ガンマ線が地上で検出され、光核反応の証拠となった。この発見によって、雷放電が上空で陽電子を生成するという面白い事実が明らかになっただけでなく、雷の研究が新たに原子核分野や大気化学分野に広がっていくことも期待できる。

雷雲ガンマ線は、図 1.2 の宇宙の様々な粒子加速のエネルギーと比較するとどうなるのだろうか。観測される雷雲中の典型的な電場の強度を 100 kV/m、典型的な大きさを 100 m と仮定すると、

$$10^5 \text{V/m} \times 10^2 \text{m} \sim 10^7 \text{V} \quad (1.1)$$

となる。電場の強度や大きさにもよるが、このくらいの電場があれば、10 MeV から 100 MeV 程度まで電子が加速される可能性がある。加速器実験や宇宙空間での粒子加速は、真空もしくは希薄な星間ガス中で発生している。一方で雷雲内は極めて密度の高い大気中で発生しており、しかも電場の発生は一瞬ではなく数分スケールで続いている。このような準定常的な静電場による加速機構が大気中でどのように保たれているのかは大きな謎であり、自然界における粒子加速を理解する上で重要な鍵になると考えられる。

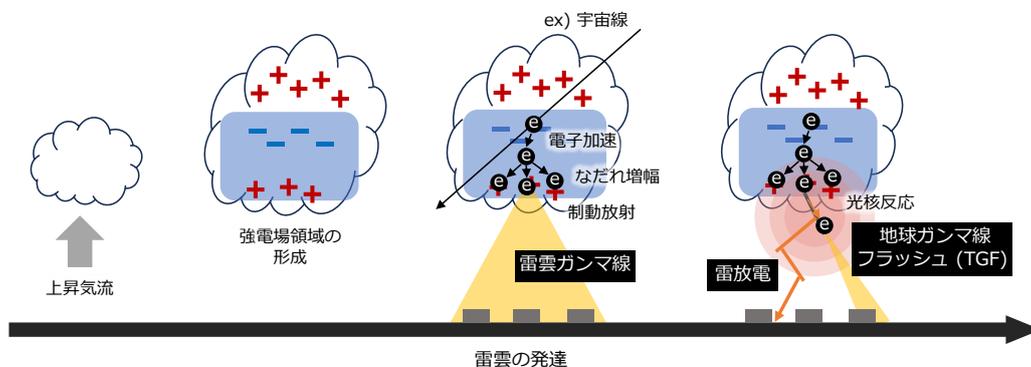


図 1.3 高エネルギー大気物理現象の概要。雷雲の発達に伴って形成された強電場領域によって「雷雲ガンマ線」が発生する。またその強い電場領域によって開始された雷放電に伴って「地球ガンマ線フラッシュ (TGF)」と「光核反応」が発生する。

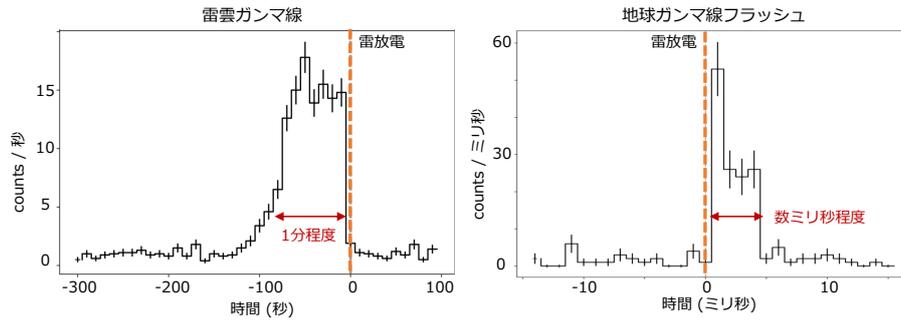


図 1.4 (左)2021 年 12 月 30 日 4 時 8 分に金沢市内に設置したコガモ検出器 ID53 で観測された雷雲ガンマ線の 3 MeV 以上のライトカーブ。(右) 同時刻に金沢市内に設置されたコンプトンカメラで検出された地球ガンマ線フラッシュのライトカーブ。どちらも時刻原点は雷放電が発生した 2021/12/30 04:08:34.8565 JST で、オレンジの点線で示す。

### 1.3 雷雲内での粒子加速と雷放電

雷雲内での粒子加速は、雷放電の発生のメカニズムの解明に関わる可能性もある。雷放電は、地球上で毎秒 100 回生じている身近なマクロ現象である。雷雲内の静電場が強くなると大気の絶縁作用が破壊され、強力な電磁波や音、光を伴って大電流が流れる。1752 年のフランクリンの凧揚げ実験によって「電気現象」であることが確認されて以降、さまざまな研究が行われてきたが、雷発生のメカニズムは未だに解明されていない。大気中で放電現象が発生するためには、大気中での絶縁破壊電場である  $3 \text{ MV m}^{-1}$  程度の電場が必要となる (Marshall et al. 1995)。しかし、実際に雷雲内で観測される電場は  $0.34 \text{ MV m}^{-1}$  程度と、絶縁破壊電場より一桁以上も小さい (Gunn 1948)。このため、雷の発生には電場以外にも他の要因が関わっていると考えられている。一方、雷雲ガンマ線が発生するための電子加速が起きる閾値電場は地上で  $0.28 \text{ MeV}$  程度であることがわかっている。また、実際に積乱雲中の電場を気球実験で測定した結果では、この閾値程度の電場が観測されており、その付近で雷放電が発生している (Marshall et al. 2005, 1995)。近年では、宇宙線空気シャワーと雷放電発生の相関を報告する研究結果も出てきており (Chronis 2009, Okike and Collier 2011)、雷雲と宇宙線の相互作用が、長い間解明されていない雷放電発生の要因の候補の一つとなっている。

本研究では、高エネルギー大気物理現象の中でも雷雲ガンマ線の焦点を当て、雷雲内の電子加速領域の開始、発達、衰退といった時間発展や、大きさ、移動速度などの空間分布の把握、雷放電との関係解明を目指して、多地点観測を行っている。シチズンサイエンス「雷雲プロジェクト」で市民サポーターの協力のもと、日本海沿岸に約 70 台のガンマ線検出器を設置する枠組みを構築し、観測を行っている。また、雷放電の時間と位置情報を観測できる FALMA (Fast Antenna Lightning Mapping Array)・DALMA (Discone Antenna Lightning Mapping Array) といった電波観測や、国土交通省が運営する X バンドの気象レーダーとの連携も行なっている。第 2 章では雷雲内の電場の発達や制動放射メカニズムを説明しつつ、これまでの雷雲ガンマ線観測を振り返る。第 3 章ではシチズンサイエンス「雷雲プロジェクト」の運営と観測、検出器について述べる。第 4 章では雷雲プロジェクトが立ち上がった 2018 年度から 2022 年度の 5 年分のデータから雷雲ガンマ線イベントを探索した結果と、イベントの詳細解析について述べ、第 5 章では気象レーダーの解析結果をまとめる。第 6 章では 2021 年度に観測した特徴的なイベントについてまとめる。第 7 章では全体のまとめと今後の展望について議論する。

## 第2章

# 雷雲電場による電子加速と制動放射ガンマ線

本章では、雷雲や雷からガンマ線が放射される仕組みと、これまでの高エネルギー大気物理現象の観測の歴史をまとめる。

### 2.1 雷雲電場の発達

積乱雲の発達過程は、一般的に「発達期」「最盛期」「衰退期」の三つの時期に分かれる。発達期から最盛期にかけては、雷雲内で強い上昇気流が発生し、雷雲内の氷晶やあられなどの氷の粒がお互いに衝突することで帯電する。氷晶は大気中の水蒸気が冷却され昇華してできる直径 0.01 mm 程度の氷の結晶のことで、あられは氷晶が過冷却水滴を捕捉しながら成長した直径 5 mm 未満の氷の粒のことを指す。あられが帯電した時の符号と分離電荷量は、雷雲内の温度と雲水量に大きく依存する。1973 年のシンプソンの気球実験によって、一般的な雷雲内の空間電荷分布は鉛直方向に正負正の三極構造になっていることが分かった。図 2.1 に三極構造のイメージ図を示す。一番下の正に帯電した小さな領域は「正電荷ポケット」と呼ばれる。

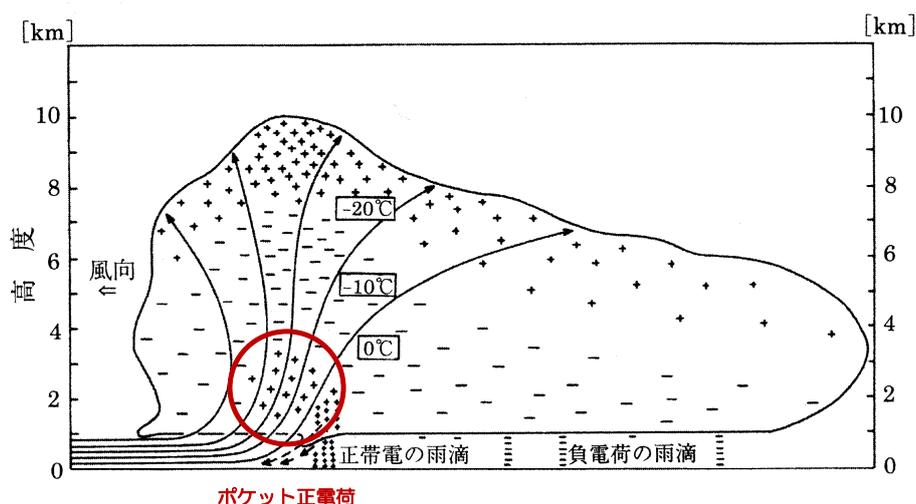


図 2.1 シンプソンの電荷分布モデル (Simpson and Scrase 1937)。雲の上部の広い領域に正電荷、中部には負電荷が分布し、直下の高度 2-4 km の狭い領域に正電荷が分布する。全体的には鉛直方向に正、負、正の三極構造となっている。下部の分布領域の小さい正電荷の部分を「ポケット正電荷」と呼ぶ(北川信一郎 2001)。

このような三極構造を形成するためには、雷雲内で電荷分離が発生する必要がある。これまで、活発な電荷分離のメ

カニズムとして「凍結電位説」「着氷電荷分離機構説」「融解電荷分離説」「雨粒分裂説」「イオン誘導説」「分極誘導説」「イオン対流説」などが多くの説が議論されてきたが(高橋 2009)、Reynolds が 1957 年に行った、冷凍庫内の雲中で銅球を回転させて電荷分離を発生させる実験(Reynolds et al. 1957)や、それをさらに詳細に測定した 1978 年の高橋らの実験(Takahashi 1978)などによって、今日では「着氷電荷分離機構」が電荷分離をもたらす有力な仮説となっている。

着氷電荷分離機構によって帯電するあられの符号と電荷量は、図 2.2 に示すように、温度と雲水量ごとに以下のように説明できる。ここで雲水量とは雲を構成する粒子状の水の空間重量濃度のことで、 $1 \text{ m}^3$  に含まれる水の重量を表す。

- 気温が  $-10^\circ\text{C}$  以上の時、あられの表面は水の層で覆われ、衝突する氷晶は水の一部をちぎり取って負に帯電し、あられは正に帯電する。
- 気温が  $-10^\circ\text{C}$  以下で、雲水量が多い時、あられの表面は硬く滑らかになり、氷晶が衝突することによって生じた氷の断片に負電荷が分離される。これがあられに付着して負に帯電する。
- 気温が  $-10^\circ\text{C}$  以下で、雲水量が少ない時、あられの表面に樹枝状に氷の枝が生じており、氷晶が衝突すると表面が破壊されて、氷の小片が負に帯電し、あられは正に帯電する。

雷雲内の雲水量は一般的に  $0.5\text{--}3 \text{ g/m}^3$  であるため、高度が上がると  $-10^\circ\text{C}$  前後で帯電符号が正から負に反転する(Takahashi 1978)。実際、雷放電の高度を測定することで負の電荷領域の高度を見積もった実験によって、 $0^\circ\text{C}\text{--}40^\circ\text{C}$  の間で電荷分離が発生することが示されている(Malan and Schonland 1951)。

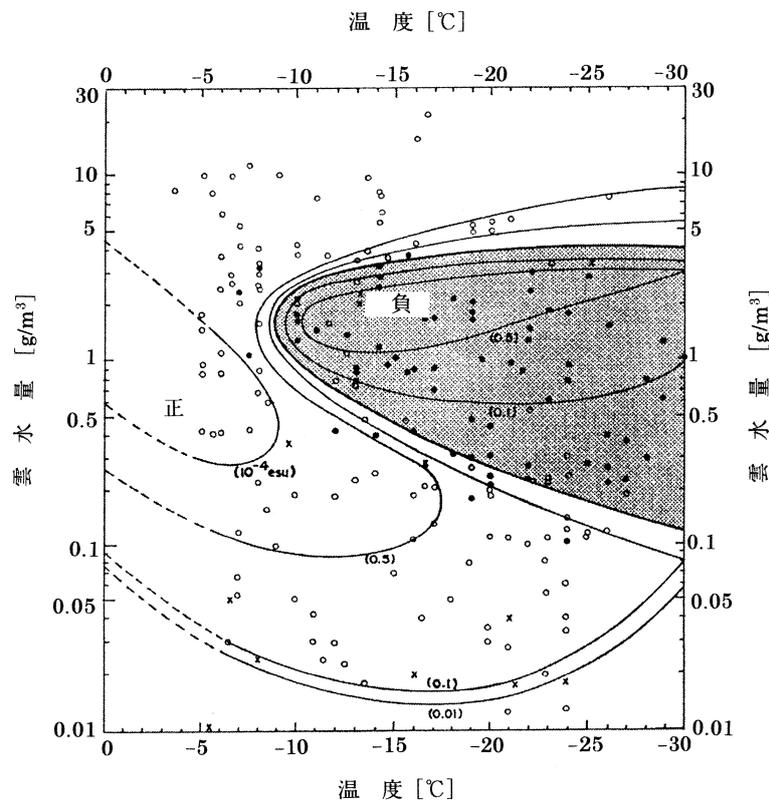


図 2.2 着氷電荷発生機構(Takahashi 1978)において、あられと氷晶の衝突の際に、あられに蓄積される電荷の符号と大きさが、周囲の大気温度(横軸)と雲内の水量(縦軸)によってどのように変化するかを示した図。点はあられに分離される電荷の符号を表し、白丸は正、黒丸は負である。表中の実線は衝突氷晶 1 個あたりの電荷の大きさを表す。

### 2.1.1 日本海沿岸の冬季雷雲

地上における雷雲ガンマ線の観測対象として最近注目されているのが、日本海沿岸の冬季の雷雲である。日本海沿岸では冬の降雪に伴って雷が多く発生しており、1991年から2020年の30年間の年間落雷日数は金沢が国内一位となっている(気象庁ホームページ)。このような気象条件は以下のように作られる。冬季に日本付近の気圧配置が西高東低になると、シベリア寒気団によって、大陸から寒冷で乾燥した空気が日本海上を通過して日本列島に吹き付ける。一方で、日本海では周囲の海水温度よりも高い対馬暖流が九州からやってきて北上する。この暖流の上を冷たく観測した空気が通過すると、熱と水蒸気が供給され、湿った空気へと気団変質する。この大気によって積乱雲が発達し、北陸地方をはじめ日本海沿岸の地域にしばしば大雪をもたらす。

このようにして形成された冬季の雷雲は、夏の雷雲と比べて、三つの特徴を持っている。一つ目の特徴は、雲の最も低い部分である雲底高度と最も高い部分である雲頂高度が、夏季の雷雲と比較して低い事である。図2.3に夏季雷雲と冬季雷雲の比較を示す。縦軸は「温度高度」で示されており、大気中の高度をその高度の気温で表している。細かい実線は雲の輪郭、太い実線は電波レーダー反射率が高いレーダーエコーの境界を示している。積乱雲が発達して雨粒や霰が形成されると、電波レーダーの反射率が高くなる。一般的にこのような領域は降水量も多くなる。また、あられや氷晶といった水の粒が形成される領域では2.1節で述べた着氷電荷分離機構によって電荷分離が発生するため、このようなレーダーエコーの強い領域は一般的に強く帯電している。

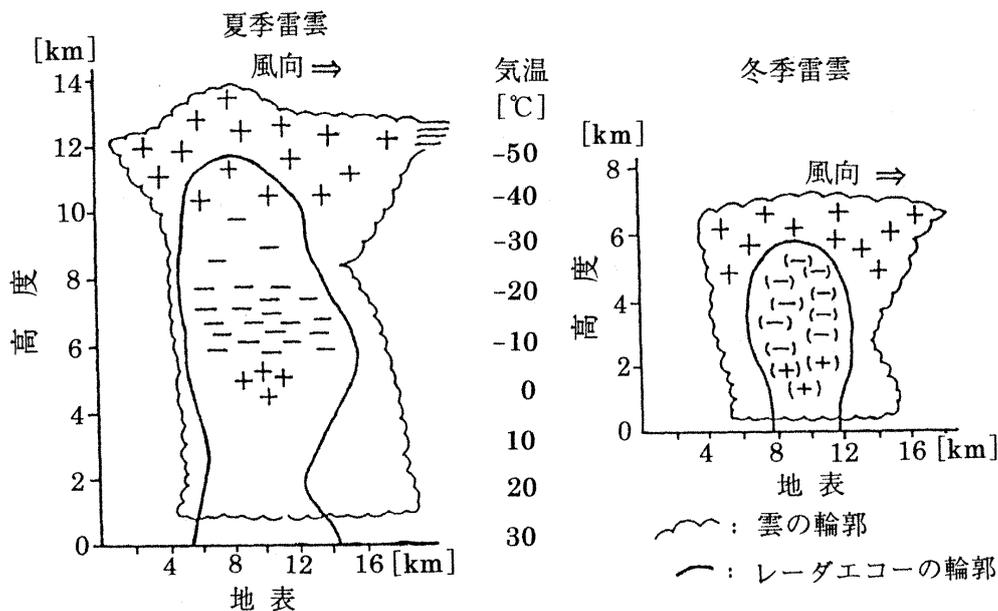


図2.3 夏季と冬季の雷雲の違い(北川信一郎 2001)。細かい実線は雲の輪郭、太い実線はレーダーエコーの強い領域を示している。冬季雷雲は夏季雷雲に比べて上昇気流が弱いため、あられが雲中に存在する期間が短く数分程度となる。(+)(-)はこのような短命な電荷領域を示している。

一般的に積乱雲は対流圏の上昇気流によって持ち上げられた空気が冷却されることによって発達し、その高さは対流圏の上端である対流圏界面の高度(平均10 km程度)にまで達する。対流圏の高度は、夏季に比べて冬季の方が低くなる。このため雷雲の雲頂高度は夏季では15 km以上に達することもあるが、冬季は4-6 km程度となる。

着氷電荷分離機構によると雷雲は $-10^{\circ}\text{C}$ から $-40^{\circ}\text{C}$ の高度で帯電する。このため夏季の雷雲では電場領域が形成され始める高度は4 km付近であるのに対して、冬季の雷雲では地表付近が $0^{\circ}\text{C}$ 近くになっているため、電場領域が高

度 1 km 程度と低くなる。以上より、雷雲内の電場領域と地表との距離が近く、電場領域で放射されたガンマ線が地上に届くまでに減衰されにくい冬季の雷雲は、地上観測における良い観測対象である。

冬季雷雲の二つ目は正極性雷が多いことである。雷放電は、雷雲中に分布する電荷が地表に誘導された電荷と中和する放電現象で、その機構は4つのタイプに分けられる。落雷の放電過程で、最初に空気の絶縁を破壊して進展する放電をリーダといい、リーダに続いて放電路を反対方向に進展する放電をリターンストロークと呼ぶ。図 2.4 に四つの落雷のタイプを示す。落雷は、リーダが雲から地表に向かって「下降」するか、地表から雲に向かって「上昇」するかによって、二種類に分けられる。さらにこのリーダが正負どちらに帯電しているかによって落雷は、負帯電リーダ下降型、正帯電リーダ上昇型、正帯電リーダ下降型、負帯電リーダ上昇型の4つに分類される。「負帯電リーダ下降型」は、リーダが雷雲の負電荷領域から出発して地表に向かって進展する中で、雲の負電荷がリーダ上に移動し放電路上に分布する。リーダが地表に達するとリターンストロークが起きて、リーダに分布した負電荷が地表の正電荷によって中和される。「正帯電リーダ上昇型」では、リーダが地表の正電荷領域から雷雲の負電荷領域に進む。リーダの進展とともに地表の正電荷がリーダ上に移動し、放電路上に分布する。リーダが雲の負電荷中心に達するとリターンストロークと類似した放電が起こり、リーダに分布した正電荷が中和される。「負帯電リーダ下降型」とは逆に、地面から負電荷領域が出發し雷雲の正電荷で中和されるタイプが「負帯電リーダ上昇型」、「正帯電リーダ上昇型」とは逆に、雷雲から正電荷リーダが下降し地表の負電荷で中和されるタイプを「正帯電リーダ下降型」と呼ぶ。4つのタイプうち、「正電荷リーダ下降型」と「負電荷リーダ上昇型」は落雷の正電荷を地表に誘導された負電荷によって中和することで、雷雲の正電荷を下しており、「正極性雷」と呼ばれる。一方で、雷雲の負電荷を下す落雷である「負電荷リーダ下降型」と「正電荷リーダ上昇型」は「負極性雷」と呼ばれる。冬季の雷雲は夏季の雷雲と比べると、雲頂高度が低く雲の厚さも約2分の1から3分の1になるため、雷雲の対流活動がその分弱まり上昇気流の速度が遅くなる。そのため、雷雲の三極構造の下の負電荷を担っているあられは短時間で落下する。さらに大陸からの寒気の風速は地表付近よりも上空の方が早いため、雷雲が変形し、上部の正電荷域が水平方向に大きくずれ、正電荷領域と地表面が向き合いやすい条件となる。このため、雷雲の正電荷を地表に下ろす正極性雷が発生しやすくなる。正極性雷は、夏季雷雲ではほとんど発生しないが、冬季の雷雲では全体の33%程度と多くなっている(北川信一郎 2001)。

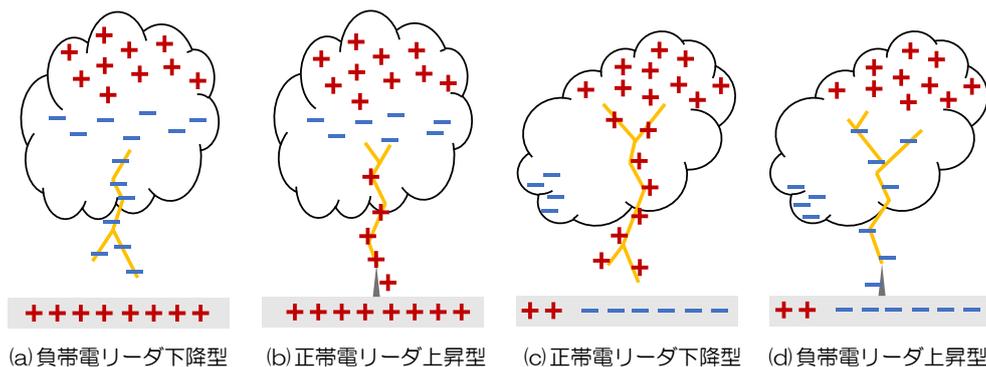


図 2.4 落雷の4つのタイプ(北川信一郎 2001)。落雷の先駆けであるリーダが、雲から地表に向かって「下降」するか地上から雲に向かって「上昇」するか、またそのリーダが正に帯電しているか負に帯電しているかによって、4つのタイプに分類できる。図は 鶴見美和 (2021)から引用。

三つ目は、一発の雷のエネルギーが大きいことである。図 2.5 に落雷の時間分解写真のスケッチを示す。雷雲の先駆けとして、ステップリーダが雷雲から地表、もしくは地表から雷雲へと到達すると、リターンストロークがステップリーダとは逆向きに進展し、大電流が流れる。一回のリターンストロークで電荷を中和できなかった場合は、さらにリターンストロークとは逆向きにダートリーダが進展し、それに対応するリターンストロークが生じる。冬季雷

雲によく見られる正極性雷では、雷雲上部に溜まっている大量の正電荷を中和するために何度もリターンストローク・ダートリーダが発生する。中和される電荷は夏季雷雲の 10 倍以上にもなり、エネルギーは 100–1000 倍以上になると言われている(北川信一郎 2001)。

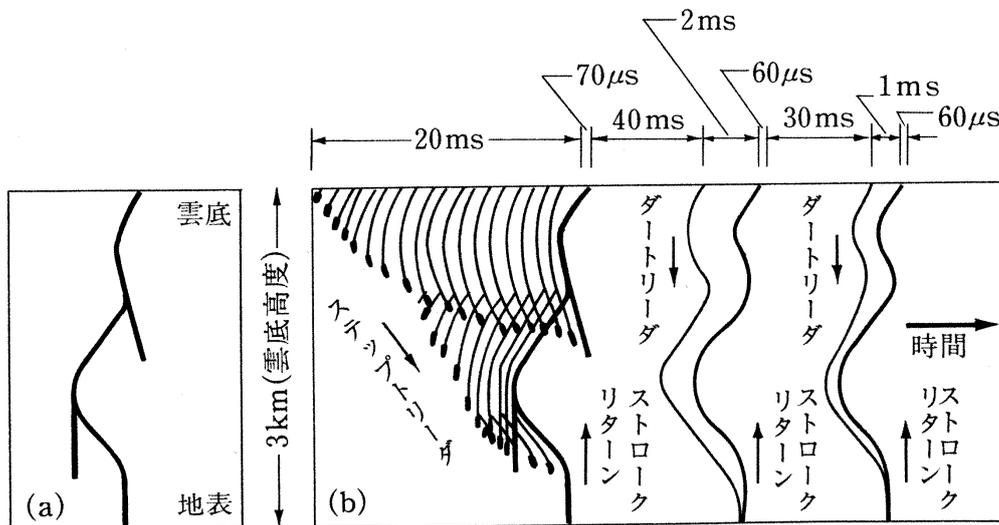


図 2.5 (a) 三重落雷の静止写真 (b) 時間分解写真 (北川信一郎 2001)。(b) は鉛直方向に走る放電路を一定間隔で撮影した時の様子で、横軸が時間経過、縦軸が高度となっている。

## 2.2 雷雲内での電子加速メカニズム

### 2.2.1 相対論的逃走電子雪崩モデル (Relativistic runaway electron avalanche : RREA)

1925 年、Wilson は雷雲内の電場によって電子が加速される可能性を指摘した (Wilson 1925)。その後、1992 年に Gurevich が相対論的逃走電子雪崩モデルと呼ばれるメカニズムを提案 (Gurevich et al. 1992) し、雷雲内の電場と高エネルギーの種電子による二次電子の生成と加速を説明した。

大気中を進む電子は、電離損失によって抗力を受ける。電子のエネルギー  $\epsilon$  が電子の静止エネルギー  $m_e c^2$  に対して、 $\epsilon \ll m_e c^2$  となるような非相対論的な領域の場合、抗力  $F_i$  は

$$F_i = \frac{4\pi N_m Z e^4}{m_e c^2} \ln \frac{m_e v^2}{z \epsilon_i} \sim v^{-2} \ln v^2 \quad (2.1)$$

となる。一方で、 $\epsilon \gg m_e c^2$  となるような相対論的な領域での抗力  $F_r$  は、

$$F_r = \frac{4\pi N_m Z e^4}{m_e c^2} \ln \gamma \frac{m_e c^2}{z \epsilon_r} \sim \ln \gamma \quad (2.2)$$

となる (Gurevich et al. 1992)。ここで、 $N_m$  は大気分子の数密度、 $c$  は光速、 $m_e$  は電子質量、 $e$  は電気素量、 $z \sim 7.25$  は大気組成における一原子あたりの平均電荷、 $Z = 2z$ 、 $\epsilon_i = 15 \text{ eV}$  と  $\epsilon_r = 270 \text{ eV}$  は、それぞれ非相対論的、相対論的な電子が空気分子一個を電離するときに失うエネルギー、また電子のローレンツ因子は  $\gamma = \epsilon / m_e c^2$  である。相対論的な領域では、電離損失だけでなく制動放射によるエネルギー損失が大きくなる。

大気中での電離損失と制動放射による抗力をプロットしたものが図 2.6 である。

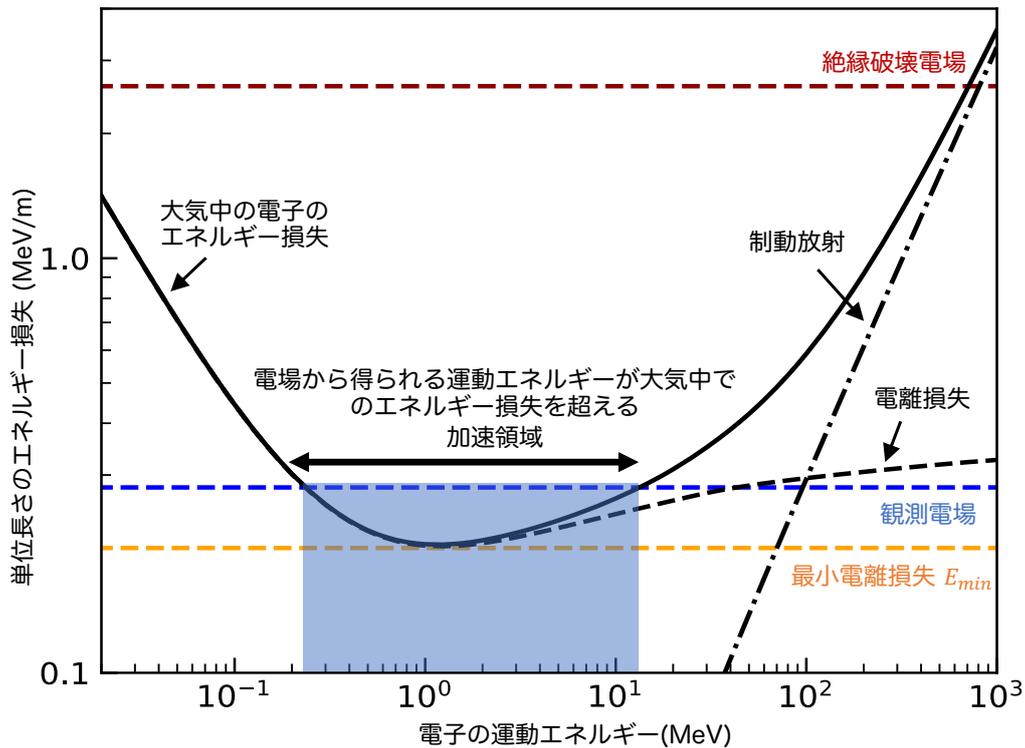


図 2.6 大気中 (1 気圧) での電子のエネルギー損失。破線が電離損失による損失、一点鎖線が制動放射による損失、実線が合計の電離損失を示す。大気中での絶縁破壊電場 (2-3 MV/m) に対して、雷雲中で観測される電場は 0.3 MV/m ほどである。この環境下では、数十 MeV 以上の電子は、制動放射による損失が電場による加速を超える。したがって、数百 keV から数十 MeV の範囲 (図の青マーク) に、電場から得られる運動エネルギーが大気中のエネルギー損失を超える領域が現れる。

図 2.6 には表示されていないが、非相対論的な領域では、抗力は 100 eV 付近に極大値を取る。それよりも高いエネルギー帯域ではエネルギーが高くなるほど単調減少する。一方、相対論的な領域では単調増加する。このため、抗力は非相対論的な領域と相対論的な領域の間の 1 MeV 付近で極小値  $F_{min} = eE_{min}$  を取る。ここで、 $eE > F_{min}$  となるような電場  $E$  の場合を考えると、直線  $F = eE$  と曲線  $F$  の交点、すなわち電子が電場によって加速される力と抗力が釣り合う点は 2 つ存在する。エネルギーの小さい方解を  $\epsilon_1$ 、エネルギーの大きい方の解を  $\epsilon_2$  とする。 $\epsilon < \epsilon_1$  では、制動放射や電離損失による抗力が電場から受ける力を上回るため電子は減速する。 $\epsilon_1 < \epsilon < \epsilon_2$  では、電場から受ける力が電離損失や制動放射による抗力よりも大きくなるため電子は加速する。 $\epsilon > \epsilon_2$  の場合、再び電離損失による抗力が電場から受ける力を上回るため電子は減速する。よって、雷雲内に  $F_{min}/e$  (標準大気では  $\sim 0.2$  MV/m) を超える電場が存在する場合、そこに  $\epsilon_1$  を超える電子が入射すると、電子は  $\epsilon_2$  まで加速される。雷雲中の通常の電場は数百 kV/m 程度であるため (Marshall et al. 2005)、 $\epsilon_2$  は 10 MeV に達し、電子は相対論的な速度まで加速されうる。このような電子を「逃走電子」と呼ぶ。

加速された電子は、大気中の分子をイオン化して二次電子を生み出し、その二次電子が同様に加速されて逃走電子を生み出す。このようにして電子の雪崩増幅が発生し、指数関数的に電子の数が増加する。

Dwyer (2003) は、モンテカルロシミュレーションによって、RREA 過程が閾値  $E_{th}$  よりも高い電場で発生することを確認した。

$$E_{th} = 0.284 \text{ MVm}^{-1} \times \frac{\rho}{1.293 \times 10^{-3} \text{ gcm}^{-3}} \quad (2.3)$$

$N_0$  の種電子から一回の雪崩増幅で生成される逃走電子の数  $N_{re}$  は、 $z$  を雪崩増幅の開始点からの距離とすると、

$$N_{re} = N_0 \exp\left(\frac{z}{\lambda}\right) \quad (2.4)$$

となる (Dwyer 2003)。 $\lambda$  は種電子が逃走電子を生み出すために必要な典型的な距離で「アバランシェ長」と呼ばれる。

モンテカルロシミュレーションで求められたアバランシェ長は、

$$\lambda = \frac{7.3 \text{ MeV}}{eE - F_d} \quad (2.5)$$

である (Dwyer 2012)。 $F_d = 0.276 \text{ MeV/m}$  はアバランシェ方向への最小電離損失での平均エネルギー損失を示す。

図 2.7 に、シミュレーションによって求めたアバランシェ長と雷雲電場の関係を示す。

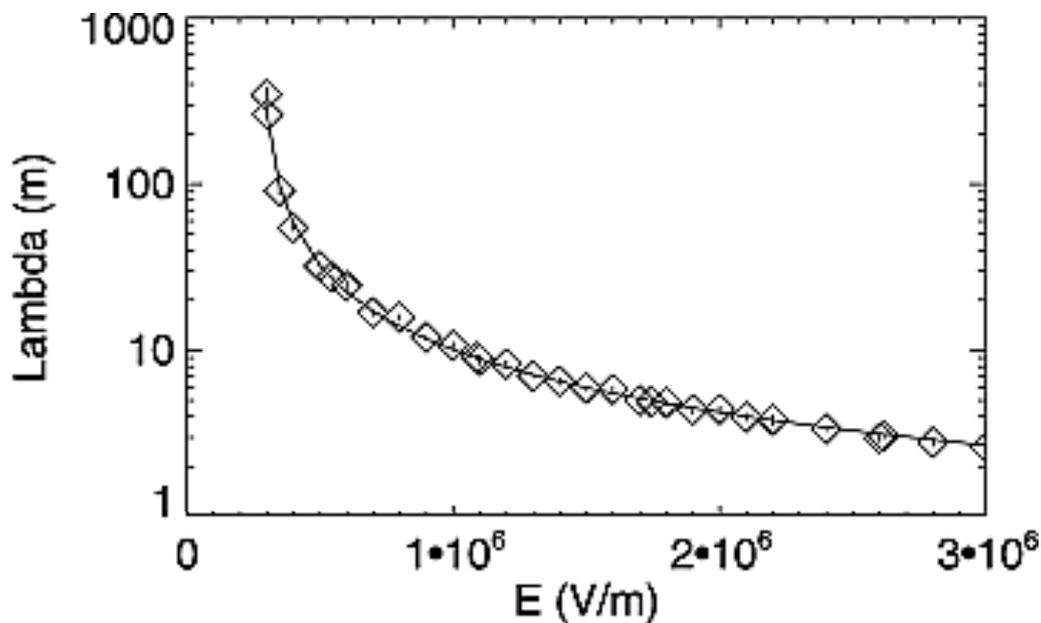


図 2.7 モンテカルロシミュレーションによって求めたアバランシェ長と雲中電場の関係 (Coleman and Dwyer 2006)。

このように雷雲内の典型的な電場で電子が加速されるメカニズムが提唱されている。これらの加速が起こるためには、この加速領域に種電子が入ってくる必要がある。その候補の一つとして考えられているのが、宇宙線である。

### 2.2.2 相対論的フィードバックプロセス (Relativistic feedback processes)

TGF は継続時間は短いけど、フラックスは大きい。加速長が長くなると逃走電子数は増える。しかし、Dwyer (2008) では、観測された TGF のフラックスに必要な種電子は、宇宙線によって供給できる種電子の  $5 \times 10^5$  倍に及ぶことがわかった。これを説明するためには、RREA に加えて種電子を供給する別のプロセスが必要となる。Dwyer (2003) で RREA の補完的なプロセスとして、「相対論的フィードバックプロセス」が提案された。図 2.8 にフィードバックプロセスのモンテカルロシミュレーション結果を示す。図中央に高エネルギー (1 MeV) の電子を大気中に入射すると RREA によって電子雪崩が発生する。相対論的な速さまで加速された逃走電子が大気とぶつくと制動放射ガンマ線 (破線) が発生する。このガンマ線が大気と相互作用することで、さらなる暴走を引き起こす 2 つのフィードバック機構が発生する。一つ目は図の右側に示す陽電子フィードバックである。発生したガンマ線 (破線) は対生成によって陽電子 (黒太線) を生成する。この陽電子は電場によって図の上向きに加速され、弾性散乱によって逃走電子

を発生させ、二次なだれを生成する。二つ目は左側に示すガンマ線フィードバックである。この場合ガンマ線(破線)は上部に散乱され、光電効果もしくはコンプトン散乱によって別の種電子を生成し、二次なだれを発生させる。これらの二次なだれによってフィードバック電子が生成され、プロセス全体で指数関数的に電子の数が増加する。

このプロセスはTGFだけでなく、高い電子フラックスを持つ雷雲ガンマ線にも適用されると考えられている(Kelley et al. 2015)。

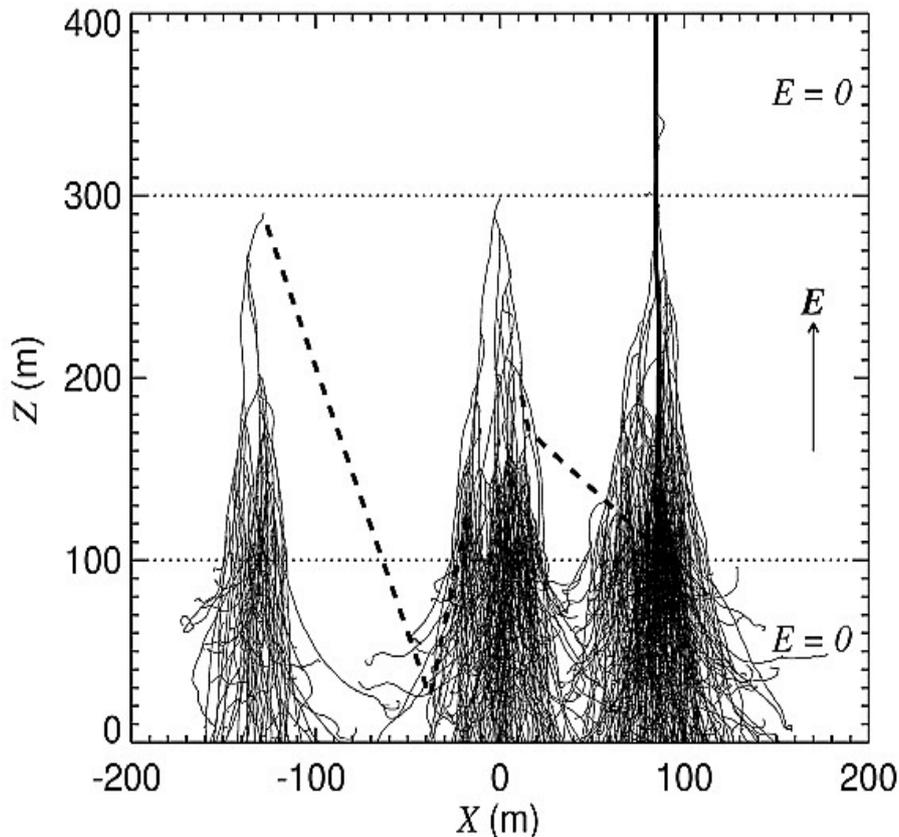


図 2.8 1 MeV の電子を大気に入射した時の相対論的フィードバックプロセスのシミュレーション結果 (Dwyer 2003)。黒細線は電子の飛跡、破線はガンマ線、黒太線は陽電子の飛跡を示す。

### 2.2.3 MOS (Modification of spectra)

RREA が発生する閾値より低い電場でも、2 次宇宙線中の荷電粒子は大気による減衰に逆らって加速されることがある(Dorman and Dorman 2004, Muraki et al. 2004)。雷雲内の電場が逃走電子が生成される閾値である  $0.216 \text{ MV m}^{-1}$  や、なだれ増幅発生する閾値である  $0.284 \text{ MV m}^{-1}$  よりも弱い場合は、逃走電子を生成することも雪崩を引き起こすこともできない。しかし、数百 MeV に及ぶ 2 次宇宙線の電子スペクトルは電場によって変化している。Chilingarian et al. (2014, 2012) や Cramer et al. (2017) は、EXPACS/PARMA モデルが提供する宇宙線スペクトルを弱い電場に入力するモンテカルロシミュレーションを行なった。一次宇宙線由来のガンマ線スペクトルの元成分と MOS による過剰成分を比較したところ、過剰成分は元成分の約 10% であり、数十 MeV まで広がっていたことがわかった。このモデルはガンマ線フラックスの低い雷雲ガンマ線やに適用出来ると考えられている。

### 2.2.4 雷雲電場内での電子のふるまい

宇宙から絶えず降り注いでいる宇宙線シャワーには高エネルギーの電子が含まれている。雷雲中の電場がこれらの電子を加速すると二次電子が発生し、さらに遠くまで到達できるようになる。2.2.1 節でも述べた通り、0.284 MV/m 以上の強電場では、電子が指数関数的に増加する相対論的暴走電子雪崩 (RREA) が発生する。しかし、雷雲で通常測定されるこの RREA の閾値以下の低電場領域でも、宇宙線シャワーの MOS として知られる雪崩過程を伴わずに、電子の運動エネルギーの増大と二次電子の生成が発生することがある。ここでは、Geant4 モンテカルロシミュレーションを用いて、RREA 閾値以下の電場内での電子の飛程距離と運動エネルギーを計算した。これによって、たとえば  $0.260 \text{ MV m}^{-1}$  という低い電場でも、電場によるエネルギー回復によって、入射した 20 MeV の電子ビームの飛程距離が 73 m から 562 m まで伸びることが分かった。図 2.9 に、 $0.15 \text{ MV m}^{-1}$  と  $0.26 \text{ MV m}^{-1}$  の雷雲電場下での電子の飛程距離のプロットを示す。

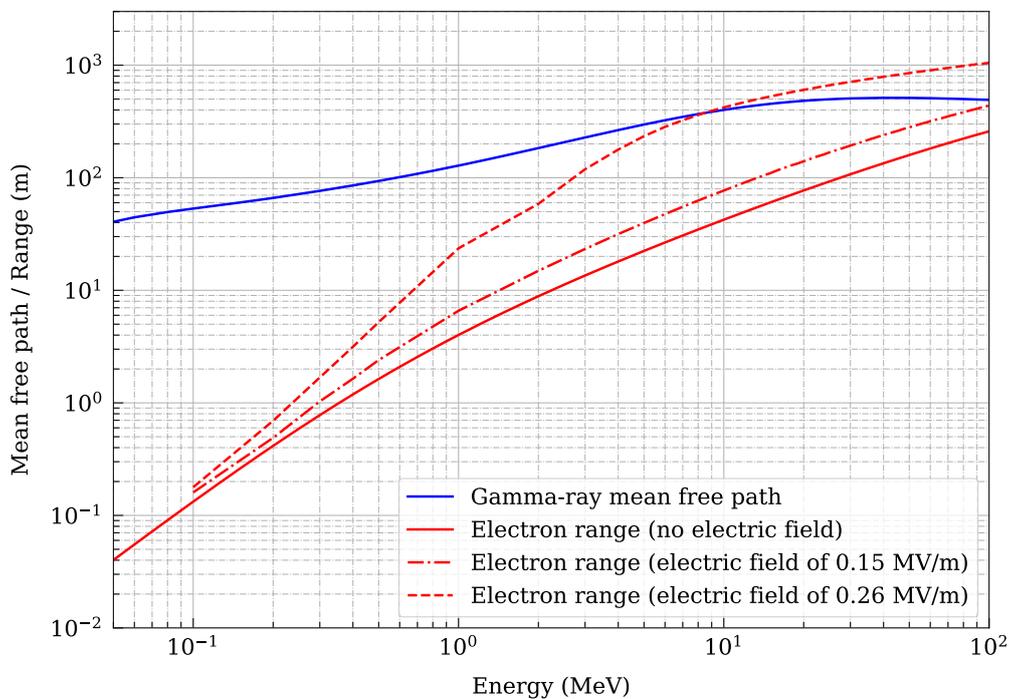


図 2.9 大気中でのガンマ線の平均自由工程と電子の飛程距離。ガンマ線の平均自由工程 (青線) は NIST データベースに掲載されている質量減弱係数から計算した。電子の飛程距離 (赤実線) は電場がない標準大気中の電子の飛程距離で、NIST ESTAR プログラムから作成した。赤破線と赤一点鎖線はそれぞれ  $0.15 \text{ MV m}^{-1}$  と  $0.26 \text{ MV m}^{-1}$  の雷雲電場下でのモンテカルロシミュレーションの結果である (Diniz et al. 2022)。図は Enoto, Tsurumi, et al., in prep から引用。

## 2.3 これまでの雷雲ガンマ線の観測

### 2.3.1 航空機・気球観測

Wilson によって雷雲内で電子が加速される可能性が指摘されてから、雷雲ガンマ線の観測に初めて成功したのは、1984 年の McCarthy と Parks の航空機観測である (McCarthy and Parks 1985)。NaI (Tl) シンチレータを用いた X

線検出器を飛行機に乗せて雷雲中を飛行し、5 keV から 110 keV 以上のエネルギーを持つ X 線フラックスの数秒間にわたる増加を検出した。また、1995 年には Eack らによって、NaI 検出器と電場計を気球に乗せて雷雲中を飛行する気球実験が行われた。その結果、気球が雷雲内の強電場領域を通過する約 1 分間の間に、X 線のカウントレートの強度が 100 倍程度大きくなることがわかった (Eack et al. 1996)。

### 2.3.2 高山観測

飛行体での観測だけでなく、比較的雷雲との距離が近い高山でも雷雲からのガンマ線が多数観測されている。高山では、湿った空気が山の斜面に沿って上昇することにより積乱雲が発達し、活発な雷雲となる。そのため雲底高度の高い夏季雷雲でも、高山であれば電子加速領域と地表との距離が近くなり、ガンマ線を検出しやすくなる。イタリアのグラン・サッソ山 (標高 2005 m) では、2000 年に Brunetti らによって、10 MeV まで及ぶガンマ線が 2-3 分にわたって継続する現象が観測された (Brunetti et al. 2000)。また、アルメニアのアラガツ山 (3200 m) でも Chilingarian らによってガンマ線や電場の観測が行われており、10 分を超える継続時間の長いガンマ線放射や、落雷に同期して雷雲ガンマ線が途絶する現象が観測されている (Chilingarian et al. 2015)。日本では、岐阜県の東京大学宇宙線研究所乗鞍観測所 (標高 2770 m) において、2000 年に高見らによる実験で雷雲ガンマ線が観測されている (Takami et al. 2001)。また 2008 年には土屋らによって、10 MeV にまで及ぶ雷雲ガンマ線が 90 秒継続する現象を観測した (Tsuchiya et al. 2009)。

### 2.3.3 人工衛星による TGF 観測

1992 年、宇宙からのガンマ線バーストを観測することを目的としたコンプトン衛星が、地球からのガンマ線フラッシュを観測した。この現象は、数百マイクロ秒から数ミリ秒程度の継続時間を持っており、Terrestrial Gamma-ray Flash (TGF) と名付けられた。また Fishman らによって、この現象が雷雲活動に同期したものであることが発見された (Fishman et al. 1994)。その後、RHESSI 衛星の観測によって 500 例以上の地球ガンマ線が検出され、平均すると 2 日に 1 事例という高い頻度で発生していることが分かった (Smith et al. 2005)。また、ガンマ線観測衛星であるフェルミ衛星に搭載された検出器でも、TGF が 1 年間に 12 回観測された。典型的な最大エネルギーは 30 MeV ほどで、そのうち 4 回の TGF は雷放電に同期していた (Briggs et al. 2010)。さらに、イタリアの AGILE 衛星によっても観測され、TGF のスペクトルが 100 MeV に及ぶべき関数成分を持つことがわかった (Tavani et al. 2011)。Fermi 衛星では、2009 年から 2016 年の間に 4144 個の TGF を観測されており、TGF 発生の月分布は雷の季節変動と強い相関があることがわかった (Roberts et al. 2018)。

### 2.3.4 地上観測

航空機や気球、高山といった高度の高い地点での観測だけでなく、標高の低い地上でも雷雲ガンマ線を観測することができる。実際に、日本海沿岸の原子力発電所の周辺のモニタリングポストでは、冬季雷雲の到来と主に放射線量の増大が観測された。しかし、当時は機器の異常動作であると考えられていた。そんな中、1997 年に鳥居らが福井県の高速増殖炉もんじゅにある線量計で観測された 1 分弱のガンマ線の増光が雷雲由来のものであると指摘した (Torii et al. 2002)。また、新潟県の柏崎刈羽原子力発電所 (Tsuchiya et al. 2007) や福井県の大飯原子力発電所 (Kuroda et al. 2016) でも雷雲からのガンマ線が観測された。このように、いくつかの観測事例から、地上でも雷雲からのガンマ線を観測できる事がわかってきた。しかし原子力発電所のモニタリングポストは、原発からの放射能の漏出を検知する目的で設置されているため、時間分解能が 30 秒と粗く、またエネルギースペクトルの取得も行なっていなかった。

そこで、2006 年に日本海沿岸の冬季雷雲を地上から観測する「GROWTH (Gamma-Ray Observation of Winter Thnuderclouds) 実験」が立ち上がった。最初の観測は、土屋、榎戸らによって行われた新潟県の東京電力柏崎刈羽原

子力発電所での観測であった。設置した検出器は、NaI (TI)、BGO、CsI、プラスチックシンチレータを搭載していた。もともと設置されていたモニタリングポストよりも高い時間分解能、広いエネルギー範囲での観測を目指して、最大 80 MeV までのガンマ線を 6 秒以下の時間分解能で測定できるよう設計されていた。2007 年 1 月 6 日には 1 分程度継続したガンマ線を観測した (Tsuchiya et al. 2007)。図 2.10 にこのイベントのライトカーブを示す。

このような日本海沿岸での観測によって、雷雲からのロングバーストは年 1-2 例ほど観測されるようになった。しかし、ガンマ線は大気中で数百メートルほどしか飛ばないため、遠方での観測は難しく、単地点での観測では限界がある。そこで、榎戸、湯浅、和田らによって、2015 年頃から金沢市での複数地点での観測が始まった。観測地点を増やすことによって、電子加速領域の生成、成長、消失を追跡し、電場加速の全貌を明らかにすることが目的であった。2016 年から 2019 年まで、10 台ほどの検出器を金沢市内に設置し、4 年間で 70 例の雷雲ガンマ線イベントを観測した (Wada et al. 2021)。これにより、雷雲ガンマ線の典型的な継続時間やスペクトルの形などが見えてきたほか、発生しやすい時期や風向・気温などの気象条件もわかってきた。図 2.11 に雷雲ガンマ線の平均的なエネルギースペクトルを示す。また、雷放電に同期して光核反応が発生した証拠の観測 (Enoto et al. 2017) や、雷雲ガンマ線が雷放電と TGF に同期して終了する瞬間途絶イベントの観測 (Wada et al. 2019) にも成功した。

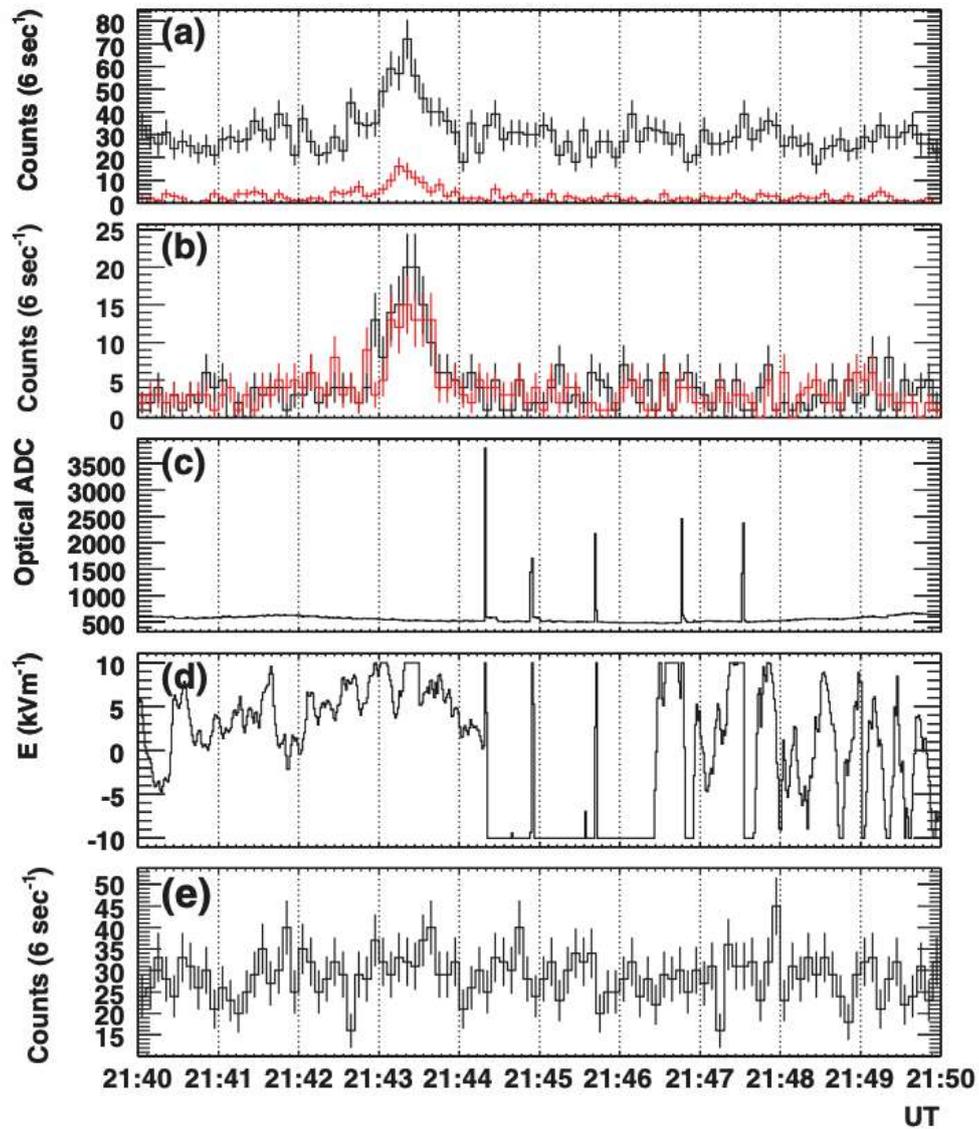


図 2.10 2007 年 1 月の柏崎刈羽原発における雷雲ガンマ線の観測例 (Tsuchiya et al. 2007) (a)NaI(Tl) シンチレータによる 3 MeV 以上のガンマ線 (黒) と NaI(Tl) シンチレータを取り囲む井戸型 BGO シンチレータとの半同時係数をとったカウントレート (赤)、(b)NaI(Tl) シンチレータ (黒) と CsI(Tl) シンチレータによる 3-10 MeV のガンマ線、(c)可視光検出器による雷モニター、(d) 大気電場、(e) プラスチックシンチレータによる 1 MeV 以上のカウントレート。

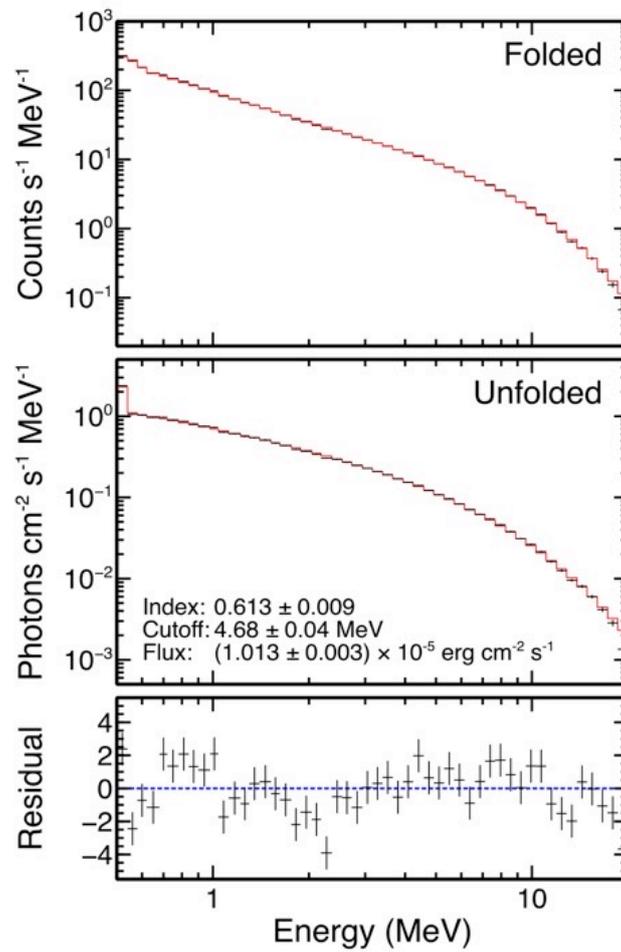


図 2.11 BGO シンチレータで検出された雷雲ガンマ線の平均的なエネルギースペクトル。赤線はベストフィット関数。(上) 検出器の応答が含まれたエネルギースペクトル。(中) 検出器に到達する直前の入射フラックス。(下) フィッティング残差。図は [Wada et al. \(2021\)](#) より引用。

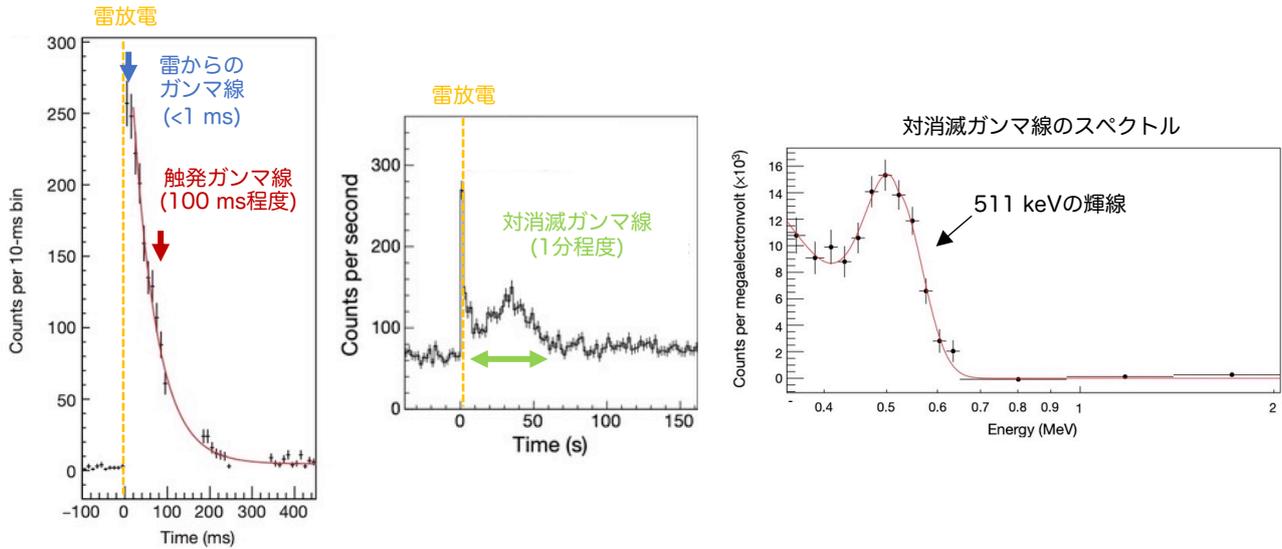


図 2.12 2017 年 2 月 6 日に観測された光核反応の観測 (Enoto et al. 2017)。 (左) 雷放電の直後に記録された数百 ms のガンマ線の残光のライトカーブ ( $>0.35$  MeV)。 (中) 対消滅線の強度変化。 (右) 落雷から 1–62 秒間の対消滅ガンマ線の積算エネルギースペクトル。図は Enoto et al. (2017) から改変。

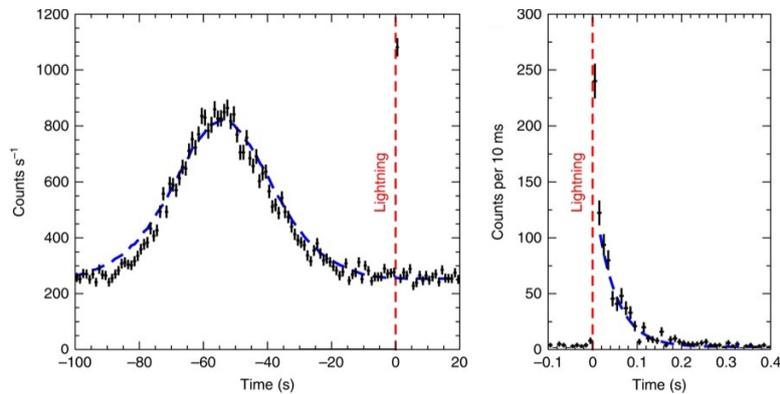


図 2.13 2018 年 1 月 9 日に観測された、雷放電に同期して発生した TGF(右) とそれによって終了した雷雲ガンマ線(左) の 0.4–20 MeV ライトカーブ (Wada et al. 2019)。青線はシミュレーションによる最良予測プロファイルを示す。時刻原点は雷放電が発生した 17 時 54 分 50 秒 308892(UTC) で、赤い破線で示す。

## 2.4 宇宙線と雷の発生の関係

宇宙線が雷放電の発生に関わっているかどうかについては、これまでたくさんの議論が行われてきた。1992 年、宇宙線の空気シャワーが雷雲内を通過したときに雷放電が発生することが Gurevich によって示唆された (Gurevich et al. 1992)。そして、2009 年には、同じく Gurevich によって RB-EAS 放電が観測された (Gurevich et al. 2009)。RB-EAS 放電とは、広域大気シャワー (EAS) が雷雲電場を通過する際、逃走絶縁破壊 (Ruaway Bbreakdown:RB) メカニズムによって発生する特殊な放電のことである。また、Chronis (2009) や Okike and Collier (2011) によって、雷放電と宇宙線空気シャワーに相関があることが示唆された。加えて、Gurevich and Karashtin (2013) は、ロシアとカザフスタンで検出した雷放電の電波パルス进行分析し、宇宙線空気シャワーによる逃走電子によって発生したことを

示した。このように、宇宙線が雷放電の発生に関わっているという示唆や観測結果がある一方で、反対の議論も存在する。Dwyer (2005)、Dwyer (2007)、Dwyer (2010)、Babich et al. (2011)、Babich et al. (2012)は、宇宙線はRREAを増強させるが、RREAは雷放電には直接関係しないことを示した。また、Rison et al., 2016では、雷放電の最初の段階を調べ、多くの雷はRREAではなくfast positive breakdownと名付けられた現象によって始まっていることがわかった。このfast positive breakdownは、従来考えられてきたストリーマーやリーダーに比べて、伝搬が速く( $3\text{-}7 \times 10^7$  m/s程度)、ピーク電流も大きい(数十kA程度)。また、いきなり数百メートルも伸びること、伝播の経路には導電性がほとんどないこと、強い電波放射を伴うといった特徴がある。また、Hare et al. (2017)では、雷放電と宇宙線空気シャワーの相関を調べたが、この二つの関係を示す証拠を見つけることができなかった。このように、雷の開始には宇宙線が関わっているのか、もしくは他の要因があるのかはまだ未解明のままである。

## 2.5 シンチレータによるガンマ線検出の仕組み

本研究では、ガンマ線観測の際、シンチレータ検出器を使用している。ここでは、シンチレータ検出器によるガンマ線検出の仕組みについて簡単にまとめる。

### 2.5.1 ガンマ線と物質の相互作用

ガンマ線と物質の相互作用のうち、放射線測定をする上で重要となるのは、光電吸収、コンプトン散乱、対生成の三つである。これらは全てガンマ線のエネルギーの全て、または一部を電子に変換する過程である。これらの反応の起こりやすさはガンマ線のエネルギーによって変わり、光電吸収は数百keVまで、コンプトン散乱は数百keVから数MeV、電子対生成は数MeV以上となっている。

図 2.14 に三つの過程の模式図を示す。光電吸収は、ガンマ線が物質の原子と相互作用することで完全に消失し、電子が原子の殻から放出される過程である。この光電子の運動エネルギー  $E_e$  は、入射したガンマ線光子のエネルギー  $h\nu$  から、光電子が最初に存在した殻の結合エネルギー  $E_b$  を用いて次の式で表せる。

$$E_e = h\nu - E_b \quad (2.6)$$

光電子放出によって電子殻にできる空席が電子の再配列によって埋められる過程で、それに対応するエネルギーは特性X線またはオージェ電子の形で放出される。オージェ電子はエネルギーが低いため飛程距離は極めて短く、特定X線もエネルギーが低いため、通常はすぐ周辺で光電吸収される。光電吸収が起こると、入射ガンマ線光子の大半のエネルギーを持つ光電子1個と、低いエネルギーの電子が1個以上放出される。検出器外への逃散がない場合は、作られた複数個の電子の運動エネルギーの和が入射ガンマ線光子の最初のエネルギーと等しくなり、検出器にはそのエネルギーに対応した全電子エネルギーのところに単一のピークが出現する。

コンプトン散乱は、入射ガンマ線光子と吸収物質中の一つの電子との間で起こる相互作用である。入射ガンマ線光子は電子と衝突することによって、入射方向から角度  $\theta$  の方向へと曲げられ散乱ガンマ線光子と、光子のエネルギーの一部が電子へ伝達され光子の入射方向に対し  $\phi$  の方向へすすむ反跳電子が生成される。入射ガンマ線のエネルギー  $h\nu$  と散乱ガンマ線のエネルギー  $h\nu'$  の関係式は次のようになる。

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.7)$$

$m_e$  を電子の質量、 $c$  を光速として、 $m_e c^2$  は電子の静止質量エネルギー (0.511 MeV) である。 $\theta = 0$  の場合、散乱ガンマ線は入射ガンマ線と同じエネルギーを持ち反跳電子はエネルギーを持たず、ただの通過となる。一方  $\theta = \pi$  の場合、入射ガンマ線は後方散乱され、電子は入射方向へ反跳される。この場合は、一回のコンプトン相互作用で反跳電子に最大のエネルギーが付与される。

電子対生成は、入射ガンマ線光子の消滅位置に電子と陽電子の対を生成する相互作用であり、吸収物質の原子核の近傍の強い電界の場で起こる。電子陽電子を対生成するには電子の静止質量 ( $m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$ ) の2倍である  $2m_e c^2$  のエネルギーが必要なので、入射ガンマ線光子エネルギーが  $1.02 \text{ MeV}$  を超えると、超過エネルギーが運動エネルギーの形で電子陽電子対に付与される。入射ガンマ線光子のエネルギー  $h\nu$  と生成された電子陽電子のエネルギー  $E_{e^-}$ 、 $E_{e^+}$  は次のように表せる。

$$E_{e^-} + E_{e^+} = h\nu - 2m_e c^2 \quad (2.8)$$

生成された陽電子が吸収物質中の他の通常の電子の熱エネルギーまで低くなると、陽電子は吸収物質中の通常の電子と結合して消滅する。この消滅点で  $m_e c^2$  の2個の消滅ガンマ線光子に置換される。陽電子が減速して消滅するまでの時間は短いため、電子対生成作用と消滅ガンマ線はほぼ同時に観測される。

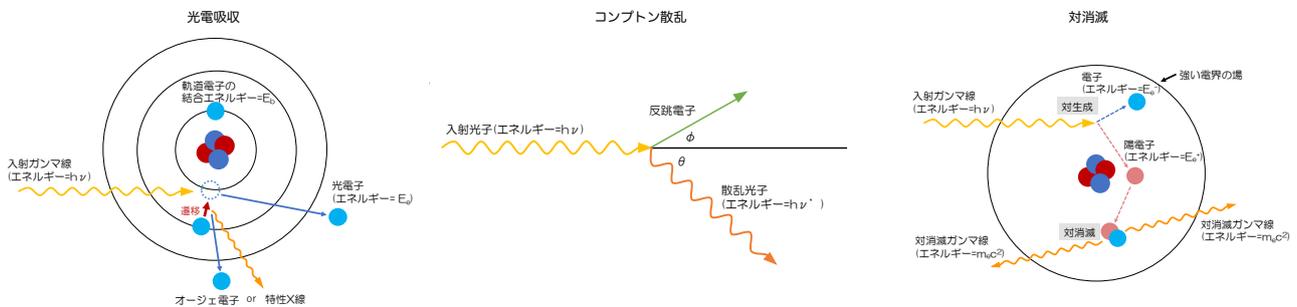


図 2.14 光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成の模式図。図は鶴見美和 (2021) より引用。

## 2.5.2 ガンマ線の計測

ガンマ線の計測には、電離箱、比例計数管、ガイガミュラー計数管などのガス検出器や、シンチレーション検出器を利用する方法などがあるが、本研究ではシンチレーション検出器を用いている。シンチレーション検出器は、主にシンチレータと呼ばれる結晶で出来ている。検出器に入射したガンマ線光子のエネルギーや荷電粒子の運動エネルギーを、シンチレータに取り付けた光検出器で検出可能な波長の光に変換することにより、放射線の測定を行う。シンチレータの種類は有機シンチレータ、無機シンチレータ、ガラスシンチレータなどがあるが、ガンマ線を比較的安価に測定することを狙い、本研究では無機シンチレータである CsI(Tl) を使用している。

無機シンチレータ内では、図 2.15 に示すように、電子の取り得るエネルギー状態は離散的な値を取り、原子に束縛された価電子帯と結晶内を自由に移動できる伝導帯の二つに分かれる。これらの間には禁制帯と呼ばれる禁止エネルギーギャップが存在する。ガンマ線が無機シンチレータに入射すると、価電子帯の電子が励起され、禁止エネルギーギャップを超えて伝導帯へと移動する。もともと価電子帯中で電子が満たしていた場所は正孔として残る。伝導帯の電子と、価電子帯の正孔は自由に動き回り、その二つが出会うことで、電子が価電子帯に落ち込み、余剰のエネルギーが光子として放出される。しかしこの禁止エネルギーギャップの幅はエネルギーが大きく、放出される光子が可視光にならない。そこで、純粋な無機シンチレータに活性化物質と呼ばれる少量の不純物を添加し、遷移過程で可視光が放出されるようにしている。活性化物質を加えることによって、禁止エネルギーギャップ内に新たなエネルギー状態が形成される。価電子帯の正孔は活性化物質の基底状態に捕獲され、伝導帯の電子は活性化物質の励起状態に捕獲される。このエネルギー幅は禁制帯エネルギーギャップよりも小さいため、この遷移は可視光を放出する。この可視光の光量がガンマ線がシンチレータに落としたエネルギーに対応している。



図 2.15 結晶シンチレータ内のエネルギー構造。図は鶴見美和 (2021)から引用。

シンチレータから放出された可視光は、MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)と呼ばれる半導体検出器で電気信号に変換・増幅される。MPPCはAPD(Avalanche Photo Diode)と呼ばれる半導体検出器を二次元に並べたものである。APDは、高い電圧を印加することによって起こるなだれ過程によって少量の電荷を増幅させることができる。図2.16の上図(a)はAPDの配置を示しており、下図(b)は電圧を印加した際の電界の分布を示している。入射した可視光は、図の左にある薄い $p^+$ 層を通して入射し、ダイオードの厚さの大半を占める $p^-$ 層のどこかの位置で反応を起こす。反応の結果、電子正孔対ができ、電子は右側にひかれて高い電解が存在するアバランシェ領域に入り、他の束縛電子を励起させる。さらに、その新しい電子が他の束縛電子を励起させ、これを繰り返すことによって電子を増幅させる。

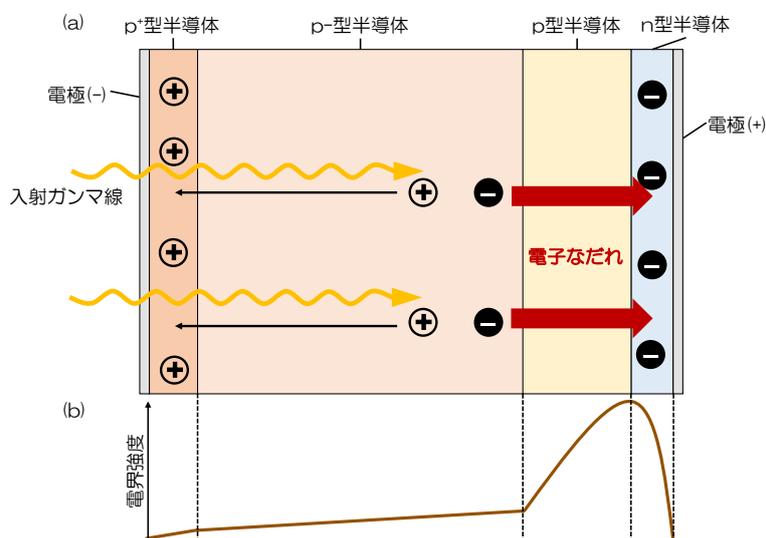


図 2.16 (a)APD(Avalanche Photo Diode)の模式図 (b) バイアス電圧を印加した際の電界の分布。図は鶴見美和 (2021)から引用。



## 第3章

# 多地点のガンマ線マッピング観測

### 3.1 シチズンサイエンス「雷雲プロジェクト」

これまでに行われてきた冬季の雷雲の放射線測定では、限られた地点数での観測だったため、移動していく雷雲を追跡しその全貌を明らかにすることは難しく、雷雲ガンマ線の開始、発展、衰退といった時間変化や、雲内の電子加速領域の大きさなどの空間分布は測定が出来なかった。金沢市は市街地で多数の雷雲や雷が観測できており、地上でも放射線測定ができることが期待できる上に、測定器に電源を供給できるような民家、公共施設が多数ある。そこで本プロジェクトでは、市民サポーターの方に協力していただくシチズンサイエンスの枠組みを用いて、石川県金沢市を中心に日本海沿岸に多数の放射線検出器を設置する「雷雲プロジェクト」を始めた。シチズンサイエンスとは、職業が科学者ではない一般の市民が科学研究に関わることを表す。このような活動の主な目的は、研究活動を科学者だけの閉じず一般に周知することで研究をさらに推進することであるが、教育の側面やアウトリーチの促進といった側面も大きい。雷雲ガンマ線の観測では、小型の装置でも観測できることに加え、多地点の同時測定が本質的に重要なため、金沢で多数の観測拠点を確保する観点で、シチズンサイエンスとの相性が良いと言える。また、物理学研究を市民サポーターとともに行うことで、アウトリーチが自然と行えるとも言える。図 3.1 は市民サポーターへの雷雲プロジェクトの宣伝のために@fancomi において作っていただいた雷雲プロジェクトのイメージである。

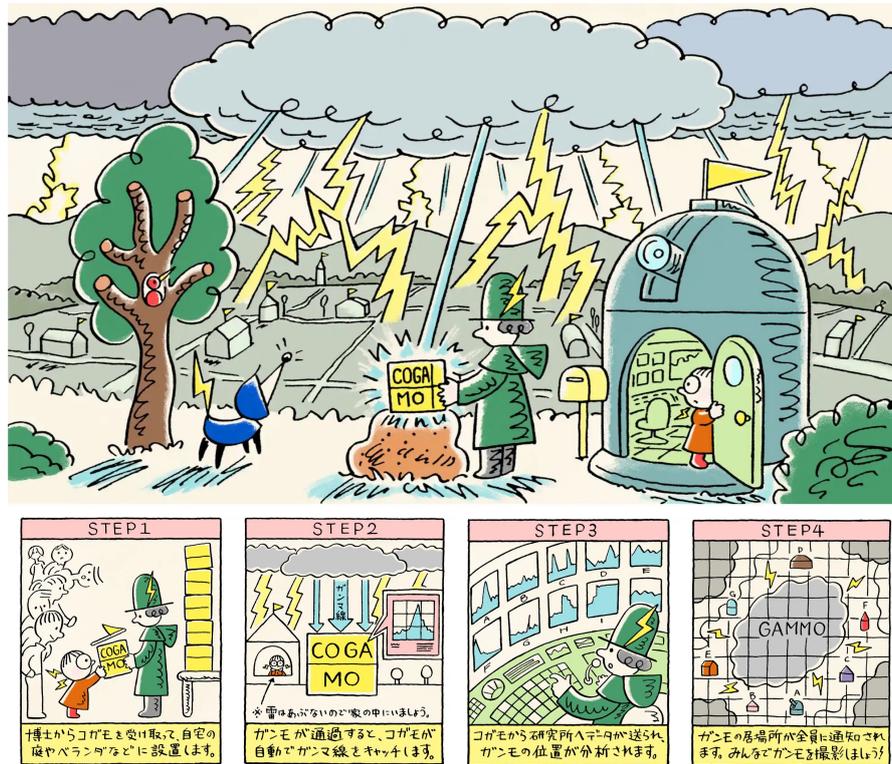


図 3.1 シチズンサイエンス「雷雲プロジェクト」のイメージ。イラストレーション@fancomi

科学的には、ガンマ線を放出する雷雲の移動をマッピング観測で追跡することで、以下のような謎の解明を目指している。

- 雷雲内での電子加速の始まりと終わりはいつか？ 継続時間はどのくらいか？  
一般的な雷雲ガンマ線は、徐々にガンマ線のカウント数が多くなり、ピークに達すると徐々に小さくなっていき、最後にバックグラウンドの値に戻る。しかし、雷雲ガンマ線を放出する雷雲は常に移動しているため、定点での観測では、このようなガンマ線の増減が雷雲との距離の変化によるものなのか、実際の放射強度の変化によるものなのかを特定することは難しい。そこで観測点を増やして雷雲を追跡することで、真の始まりと終わりを特定することが期待される。
- どのような雲で電子加速が起きるのか？  
同じくらいの降水量の雲でも、雷雲ガンマ線は検出されず雷のみ発生している雷雲や、逆に雷は発生せず雷雲ガンマ線のみが検出されている場合もある。このような雲の特徴を探るためには、「雷雲ガンマ線が発生していたが検出器が近くになかったために観測できなかった」という事例を減らす必要がある。多地点で観測することにより、どの雲で雷雲ガンマ線が発生していたのかを正確に捉えることができる。また、その結果をレーダーの結果と合わせることで雷雲内部の構造の違いを明らかにすることができる。
- 加速された電子やガンマ線が雷放電のトリガーになることはあるのか？  
雷放電が発生するメカニズムはいまだに解明されていない。雷の発生には理論上、絶縁破壊電場 ( $\sim 3 \text{ MV m}^{-1}$ ) が必要となるが、実際に雷雲中で観測される電場はこれよりも一桁以上小さい。そこで雷の発生には何か別の要因があると広く信じられており、その候補の一つとして雷雲ガンマ線を作り出す相対論的な電子がトリガーになっているのではないかと考えられている。本研究では多地点で雷雲ガンマ線の観測例を増やし、雷が発生した

箇所と照らし合わせることで、雷放電の発生と雷雲ガンマ線の関係解明につなげる。

## 3.2 コガモ検出器 (Compact Gamma-ray Monitor)

本研究では、ティーエーシー社と共同で開発を進めてきた、片手で持ち運びのできる軽量で小型の放射線検出器「コガモ (Compact Gamma-ray Monitor, CoGaMo)」を使用している。図 3.2 にコガモ検出器の写真を示す。雷雲プロジェクトではシチズンサイエンスで市民に協力してもらい測定する必要があるため、研究者ではない一般の市民サポーターの方も扱いやすくする必要がある。そこで、このコガモ検出器は、一般的な放射線検出器に比べて、小型で軽量な点に加え、ボタンひとつで全ての測定が開始できるなど、操作が簡単といった特長を持つよう設計されている。

コガモは何度かのアップデートをしながら開発が進んでいる。表 3.1、表 3.2 には、もっとも大規模に使われている FY2021 モデルのコガモ検出器の諸元、図 3.3 にコガモのシステムブロック図を示す。コガモ検出器に入射したガンマ線は、タリウム添加ヨウ化セシウムシンチレータ CsI(Tl) で可視光に変換され、さらにその可視光を光検出器の MPPC (Multi-Pixel Photon Counter : 浜松ホトニクス社 S13360 シリーズ) で電気信号に変換することで検出される。CsI シンチレータは米国コーネル大学などの素粒子実験 CLEOII で使用された中古品を購入し、 $5 \times 5 \times 15 \text{ cm}^3$  の直方体に加工し、 $5 \times 5 \times \text{cm}^2$  の側面側から光信号を読み出している。シンチレータの 6 面は、厚さ 2 mm のアルミニウムで囲われている。放射線信号はアナログ回路による波形整形の後、ADC でデジタル変換され、micro SD カードに記録される。また、気温、気圧、湿度、照度を測定する環境センサー BME280 や、時刻情報と位置情報を取得する GPS アンテナも搭載しており、一部のコガモは取得データの一部をサーバー上へ送信するための sakura IoT モジュールや、電源ケーブルを繋がずに測定するためのバッテリーを搭載している場合もある。コガモ検出器にはそれぞれ ID 番号が割り振られており、2023 年 11 月現在、ID 92 までのコガモ検出器が作成されている。屋外に設置するため、これらのコンポーネント一式は防水ボックスに収納されており、ID 29 までの旧式 (FY2019 モデル) はタカチ透明ボックスに入っており、ID 30 以降の新式 (FY2021 モデル) は黄色い防水ボックスに入っている (図 3.2)。表 3.3 にモデルやバッテリー、sakura io の有無、シンチレータの種類ごとの台数まとめる。付録の表 7.6 に ID ごとの諸元を示す。また、市民サポーターの配布で安全に観測が行われるように、ID29 までの旧式コガモはヒューズが入っており、過電流が流れると電源が落ちて停止する。ID30 以降では、過電流保護の電源を使っており、過電流があれば電源側で落とした後、再び電源を入れると戻る仕様になっている。

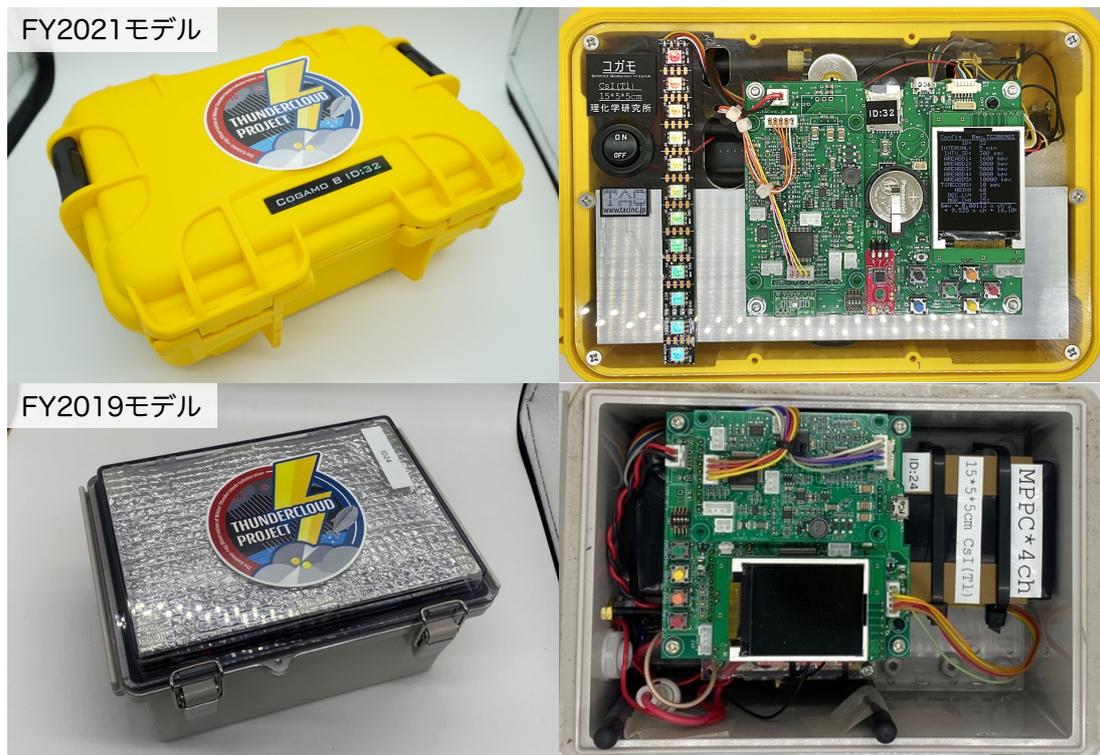


図 3.2 (左上) 検出器の外観コガモ検出器 (FY2021 モデル)。(左下) 検出器の外観コガモ検出器 (FY2019 モデル)。(右上) 検出器の内部 (FY2021 モデル)。(右下) 検出器の内部 (FY2019 モデル)。検出器のサイズは 23 cm×28 cm×10 cm。蓋に雷雲プロジェクトのロゴシールが貼ってある。内部には金属のシールドの中に CsI(Tl) シンチレータが搭載され、その上に信号処理回路と、ディスプレイ、LED などが搭載されている。

表 3.1 コガモ検出器の諸元 (FY2021 モデル)

外形サイズ	23 cm×28 cm×10 cm(FY2021 モデル)
重量	3 kg (FY2021 モデル)
駆動電圧	5V (外部の商用 100V 電源から内部で作成する。)
消費電力	1.1 V (220 mA, 液晶バックライト on) 0.95 V (190 mA, 液晶バックライト off)
バッテリー持ち時間	9 時間 (液晶バックライト on) 10 時間 (液晶バックライト off)
観測エネルギー帯域	約 0.2-12 MeV
データ保存	全データを microSD カードに保存。 一部を sakura IoT プラットフォームで送信。
送信頻度	2 分間隔 (放射線の 20 秒おきのデータ)
データ量	1 日で約 370 MByte ほど
スペクトルデータ	1024 チャンネル
イベントデータの時間タグ	0.1 msec

表 3.2 コガモ検出器で使用している部品の型番

部品	型番・サイズ・仕様
1 シンチレータ	CsI(Tl) シンチレータ 15 cm×5 cm×5 cm (15 cm×5 cm が上)
2 MPPC	浜松ホトニクス社 S13360-6050VE(4 個、受光面サイズ 6 mm×6 mm)
3 環境センサー	ボッシュ社 BME280
4 温度センサー	Mouser ADT7410TRZ
5 ケース	タカチ防水ケース NK903Y(FY2021 モデル) 23 cm×28 cm×10 cm
6 バッテリー※	リチウムイオンバッテリー 10,000 mAh
7 液晶画面	1.8 インチ SPI TFT カラー液晶モジュール
8 GPS	GPS サブメータ級測位補強サービス対応。測定誤差 2 m JCA002(FY2019) GN-13W(FY2021)
9 Sakura IoT モジュール	SCM-LTE-01
10 データ処理ボード	MCU STM32F405RGT6

※バッテリーはバッテリー仕様のみ搭載

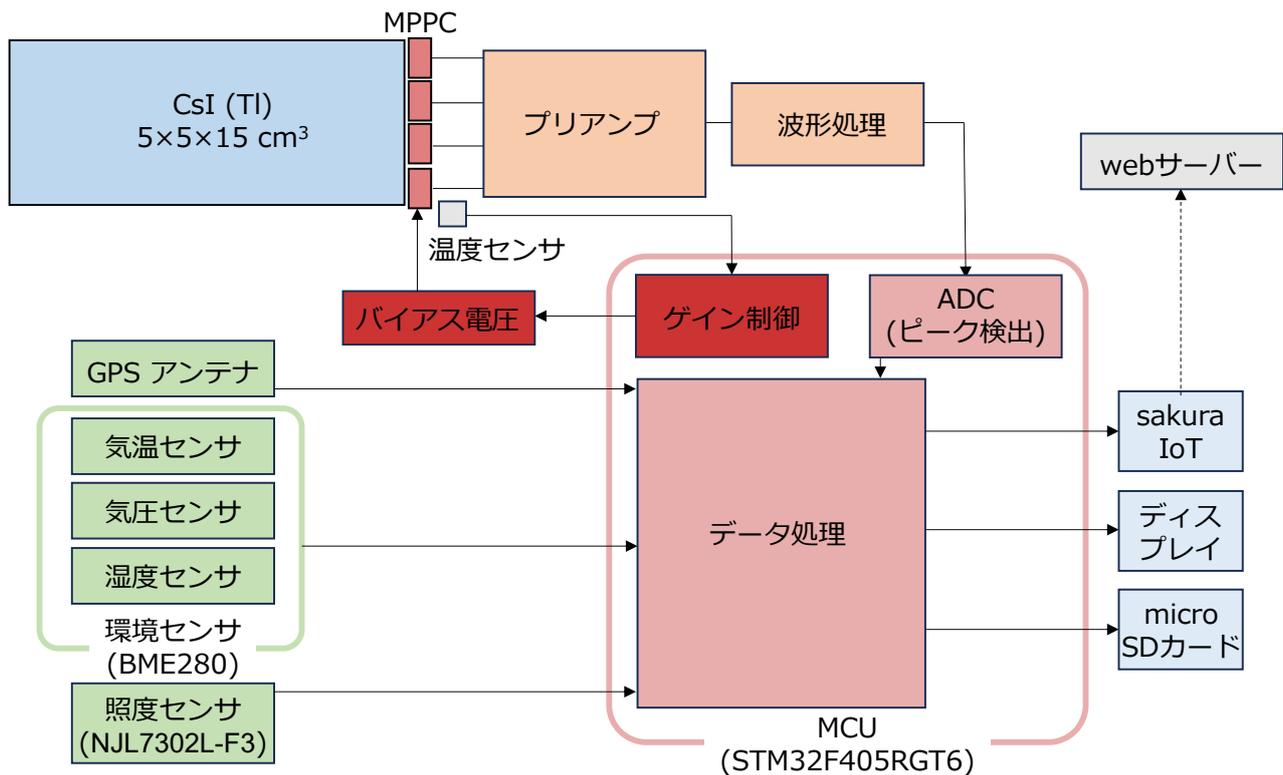


図 3.3 コガモ検出器のシステムのブロック図

表 3.3 コガモ検出器の分類

		FY2019 モデル	FY2021 モデル
バッテリー	有	0	63
	無	24	0
sakura io モジュール	有	24	6
	無	0	81
シンチレータ	標準型	20	87
	その他	4	0

### 3.2.1 CsI シンチレータでのガンマ線計測

ここでは、コガモ検出器のジオメトリを想定し、ガンマ線の CsI シンチレータ中での断面積を簡単に見積もる。物質中を通過するガンマ線光子が単位質量当たり相互作用する確率を質量減弱係数という。図 3.4 に 0.1–20 MeV のガンマ線の CsI シンチレータに対する質量減弱係数を示す。データは [NIST データベース](#) から取得した。コガモ検出器が測定できる 0.2 MeV から 10 MeV のエネルギー帯域では、およそ 0.3 MeV までは光電吸収、およそ 0.3 MeV からおよそ 6 MeV まではコンプトン散乱、それ以上では対生成が発生する確率が一番高いことがわかる。

コガモ検出器には  $5 \times 5 \times 15 \text{ cm}^3$  の CsI シンチレータが搭載されている。ここで、ガンマ線光子が厚さ 5 cm の CsI シンチレータ中で、光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成を起こす確率をそれぞれ求める。入射ガンマ線の光子数を  $I_0$ 、ガンマ線が物質中のある距離  $x$  を進んだ時に反応せずに残っている光子数を  $I(x)$  とする。 $\mu'$  を質量減弱係数、 $\rho$  を物質の密度、 $x$  と  $x + dx$  の間で散乱される確率を  $\mu' \rho dx$ 、とすると、ガンマ線が物質中のある距離  $x$  を進んだ時に反応しない確率を  $P(x)$  は、

$$P(x) = \frac{I(x)}{I_0} = \exp(-\mu' \rho x) \quad (3.1)$$

で示される。また、物質中をガンマ線が相互作用せずに通過する平均距離である平均自由工程  $\lambda$  は、

$$\lambda = \frac{\int_0^\infty x \exp(-\mu' \rho x) dx}{\int_0^\infty \exp(-\mu' \rho x) dx} = \frac{1}{\mu' \rho} \quad (3.2)$$

となる。図 3.5 に 0.1–20 MeV のガンマ線光子の平均自由工程、図 3.6 に厚さ 5 cm の CsI シンチレータ中で、光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成で反応する確率を示す。例えば、0.2 MeV の光子が 5 cm の CsI シンチレータに真上から入射した場合を考えると、約 94% の確率でコンプトン散乱、約 99% の確率で光電吸収、約 0% の確率で電子対生成が発生する。3 MeV の光子の場合は、約 48% の確率でコンプトン散乱、約 1% の確率で光電吸収、約 15% の確率で電子対生成が発生する。

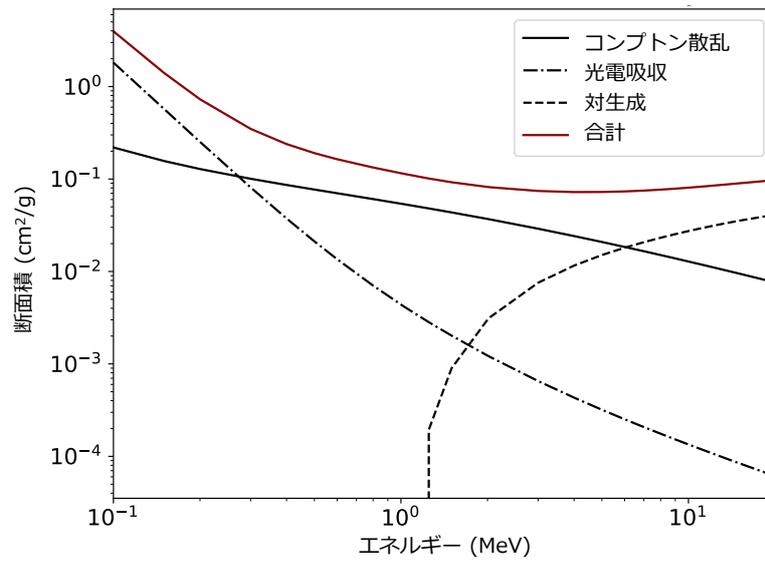


図 3.4 ガンマ線の CsI シンチレータに対する質量減弱係数。ガンマ線のエネルギー帯域は 0.1–20 MeV。実線がコンプトン散乱による反応、一点鎖線が光電吸収による反応、破線が電子対生成による反応、赤の実線が合計を示す。データは [NIST データベース](#) から取得した。

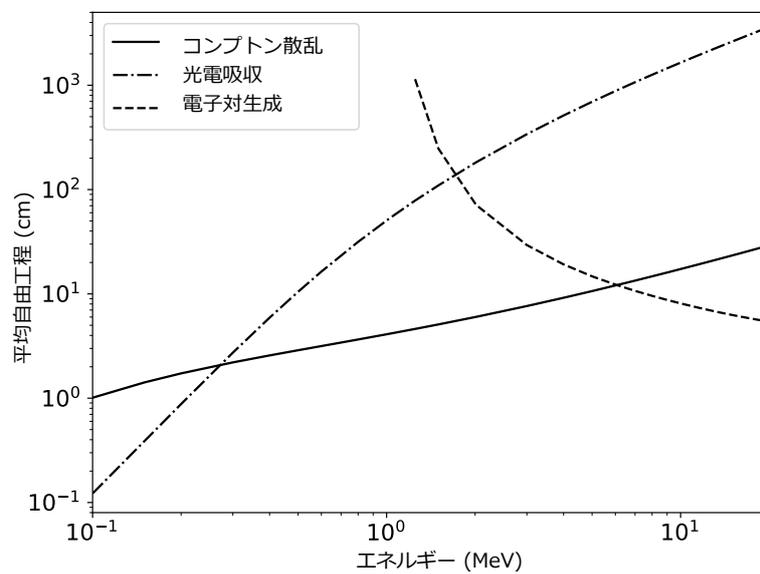


図 3.5 CsI シンチレータ内でのガンマ線の平均自由行程。ガンマ線のエネルギー帯域は 0.1–20 MeV。実線がコンプトン散乱による反応、一点鎖線が光電吸収による反応、破線が電子対生成による反応を示す。データは [NIST データベース](#) から取得した。

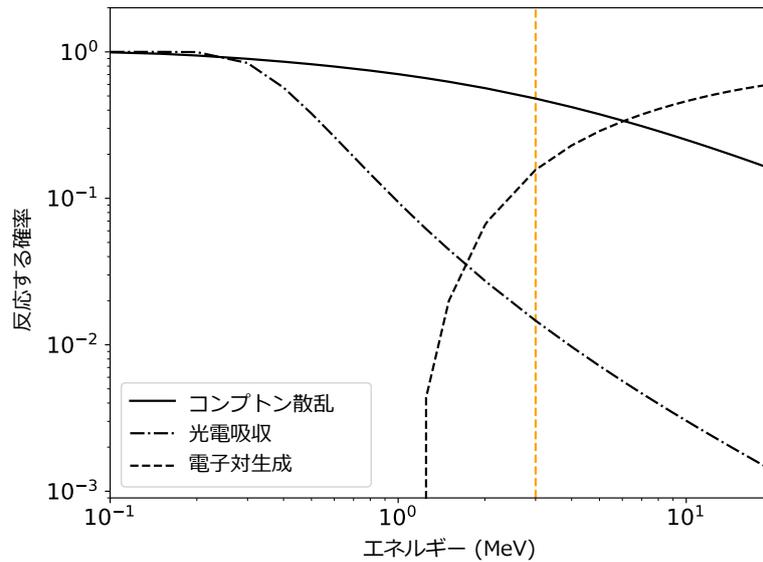


図 3.6 厚さ 5 cm の CsI シンチレータ内でのガンマ線がはじめて反応する確率。ガンマ線のエネルギー帯域は 0.1–20 MeV。実線がコンプトン散乱による反応、一点鎖線が光電吸収による反応、破線が電子対生成による反応を示す。データは [NIST データベース](#) から取得した。オレンジの破線は 3 MeV を示す。

### 3.3 コガモ検出器による環境放射線の測定

コガモ検出器は雷雲ガンマ線イベントがない時でも常に放射線イベントを観測している。図 3.7 に ID16 で 2021 年 1 月 15 日から 17 日の三日間に観測された、4 MeV 以下と 4 MeV 以上のライトカーブ、気圧、気温、湿度、照度といった環境データ、そしてアメダスで観測された降水量を示す。アメダスのデータは気象庁ホームページを参照した([気象庁ホームページ](#))。降雨があった 1 月 16 日 8 時台から 17 時台の 4 MeV 以下のカウントレートは、その他の晴天時のカウントレートと比較して大きいことが分かる。晴天時 (1 月 16 日 5:00–6:00) と降雨時 (1 月 16 日 10:00–11:00) の時間帯のスペクトルは図 3.8 のようになる。3 MeV 以下は土壌や周辺物質に含まれているウラン系列の環境放射線である。降雨時は、 $^{214}\text{Bi}$  の輝線が卓越しており、降雨によって検出器付近の  $^{214}\text{Bi}$  の量が増加したと考えられる。 $^{214}\text{Bi}$  は図 3.9 に示したウラン系列に属している。ウラン系列の中の  $^{222}\text{Rn}$  は一定の割合で地表から大気に拡散されており、降雨時に  $^{222}\text{Rn}$  の娘核や孫核が雨粒に取り込まれて落下し、地表に堆積する。そのため、地表での放射線量が増大する。これを  $^{222}\text{Rn}$  ウォッシュアウトと呼ぶ。一方、 $^{40}\text{K}$  の 1.46 MeV や  $^{208}\text{Ti}$  の 2.61 MeV は晴天時と降雨時の違いがほとんど見られないため、エネルギー較正に用いる。また、3 MeV 以上は宇宙線空気シャワー由来の成分で放射性核種による輝線は見られず、宇宙線のガンマ線成分やミューオン成分が支配的である。ウラン系列の核種からの放射線輝線は 3 MeV を超えるものがないため、この帯域は天気によるスペクトル変化がない。

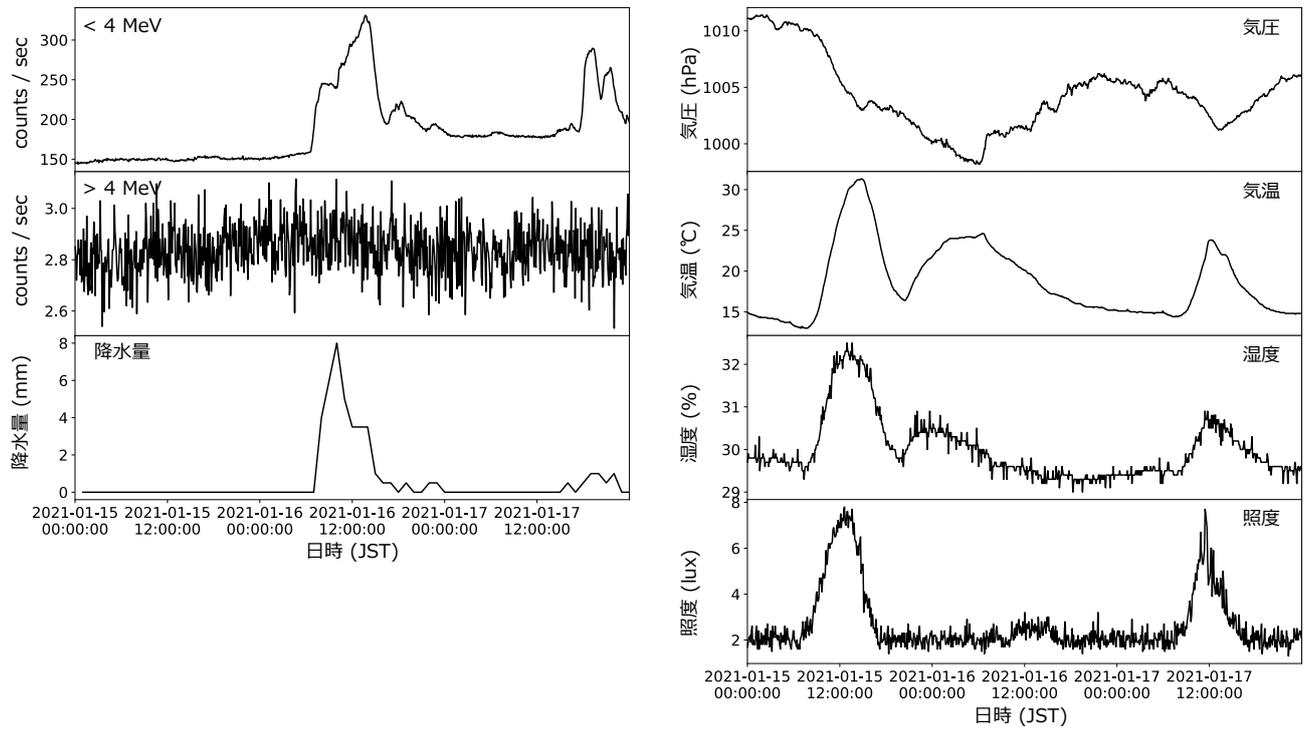


図 3.7 コガモ検出器で測定された晴天時と雨天時のライトカーブと環境データ。ID16 で測定された 2021 年 1 月 15 日から 2021 年 1 月 17 日までの 3 日間のデータを示す。降水量データは気象庁ホームページを参照した ([気象庁ホームページ](#))。

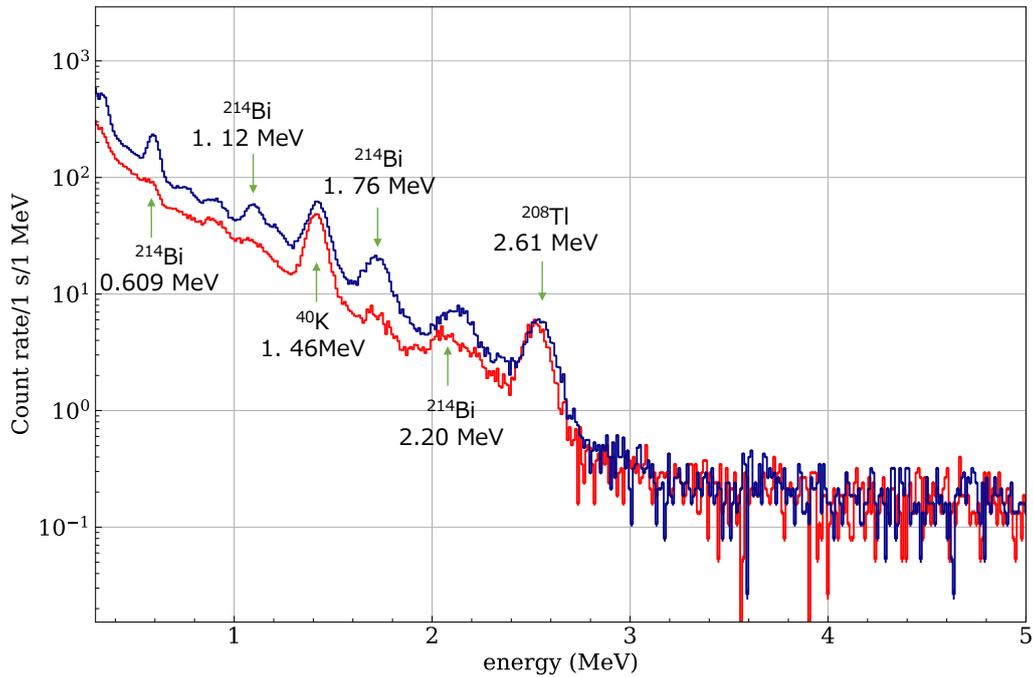


図 3.8 ID16 で測定された晴天時と雨天時のエネルギースペクトルの比較。赤は晴天時の 2021 年 1 月 16 日 5:00–6:00 のデータ、青は雨天時の 2021 年 1 月 16 日 10:00–11:00 のデータを示す。

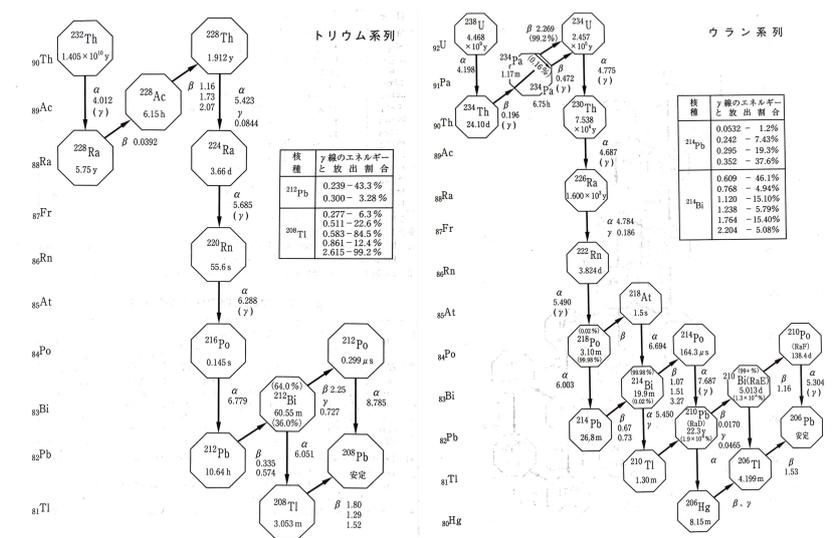


図 3.9 トリウム系列 (左) とウラン系列 (右) の崩壊図 (日本アイソトープ協会 2005)

### 3.4 コガモの性能評価

本節では、卒業研究の際にコガモ検出器 ID32 を用いて行った基本的な放射線実験の結果を再解析し簡単にまとめる。まず最初にコガモ検出器を用いて室内の環境放射線を 10 分間測定し、 $^{40}\text{K}$  と  $^{208}\text{Tl}$  の光電吸収ピーク輝線のエネルギーから、ADC チャンネル値とのエネルギー較正曲線を求めた。次に  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{133}\text{Ba}$ 、 $^{152}\text{Eu}$  の 5 つの放射線源を検出器に、横方向から 20 cm 離して鉛ブロックでコリメートして照射した。図 3.10 に実験のセットアップを示す。それぞれの線源で 10 分間ずつ計測を行い、線源の光電吸収ピークの輝線中心と較正曲線のずれを評価した。また求めたエネルギー較正曲線を用いて、エネルギー較正を行い、各放射線輝線についてエネルギー分解能を求めた。使用した線源のコードと基準日の放射能は表 3.4 に示す。

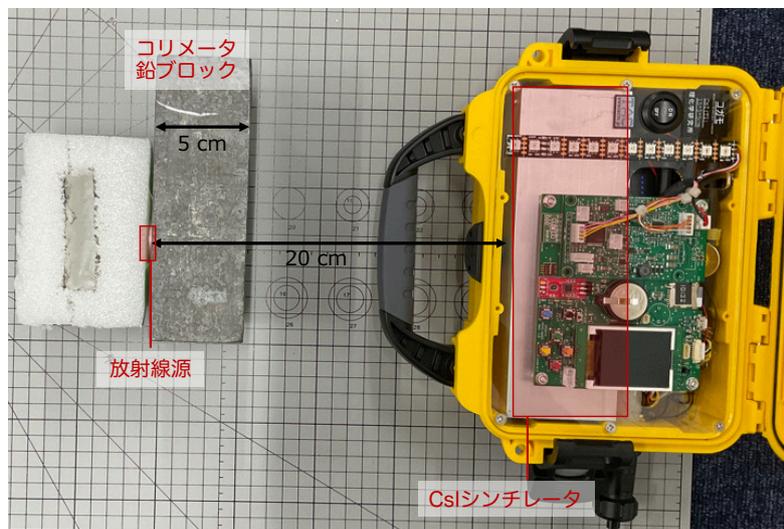


図 3.10 コガモ検出器 ID32 に放射線源を当てた実験のセットアップ

表 3.4 使用した放射線源

放射能は基準日の値。線源コードは日本アイソトープ教会(日本アイソトープ協会)で公表されている。

核種	線源コード	放射能 (Bq)	基準日
$^{137}\text{Cs}$	CS403	$9.33 \times 10^3$	2020/03/02
$^{60}\text{Co}$	CO403	$4.11 \times 10^4$	2020/03/02
$^{22}\text{Na}$	NA403	$8.16 \times 10^4$	2020/03/02
$^{109}\text{Cd}$	CD403	$3.97 \times 10^4$	2020/03/02
$^{133}\text{Ba}$	BA403	$8.91 \times 10^5$	2020/03/02
$^{152}\text{Eu}$	EU403	$3.97 \times 10^4$	2020/03/02

#### 3.4.1 エネルギー較正

コガモのイベントファイルには、放射線イベントのエネルギーとして ADC チャンネルが記録されている。コガモでは温度に応じて MPPC のゲインをリアルタイムに変化させ、温度によるゲイン変動を抑制して測定を行っているが、それでも補正しきれない変動が残る可能性がある。そこで、より詳細な解析にはエネルギーの分かっている輝線の

ADC チャンネルを用いて、ADC チャンネルをエネルギーに変換するエネルギー較正曲線を求める必要がある。環境放射線を 10 分間取得したデータからエネルギースペクトルを作成し、 $^{40}\text{K}$  と  $^{208}\text{Tl}$  の光電吸収ピークの輝線がスペクトルは、輝線を表すガウス関数とそのほかの連続成分を示す一次関数の和 (式 3.3) をモデルとしてフィッティングを行った。図 3.11 に環境放射線のスペクトルを示す。ADC チャンネル  $p(\text{ch})$  でのカウント数  $C(\text{count})$  は、

$$C(\text{count}) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(p-p_0)^2}{2\sigma^2}\right\} + a_0 + a_1p \quad (3.3)$$

ch は ADC チャンネル、 $\sigma$  は標準偏差、 $N$  はガウス関数の面積、 $p_0$  はガウス関数のピークチャンネルを示す。それぞれの輝線のピークチャンネルとエネルギーを一次関数でフィットし、ADC チャンネル (ch) をエネルギー (MeV) に変換するエネルギー較正関数を算出した。

表 3.5 校正に使用した輝線

輝線	エネルギー (MeV)	ピークチャンネル (ch)
$^{40}\text{K}$	1.46	$142.86 \pm 0.02$
$^{208}\text{Tl}$	2.61	$255.83 \pm 0.17$

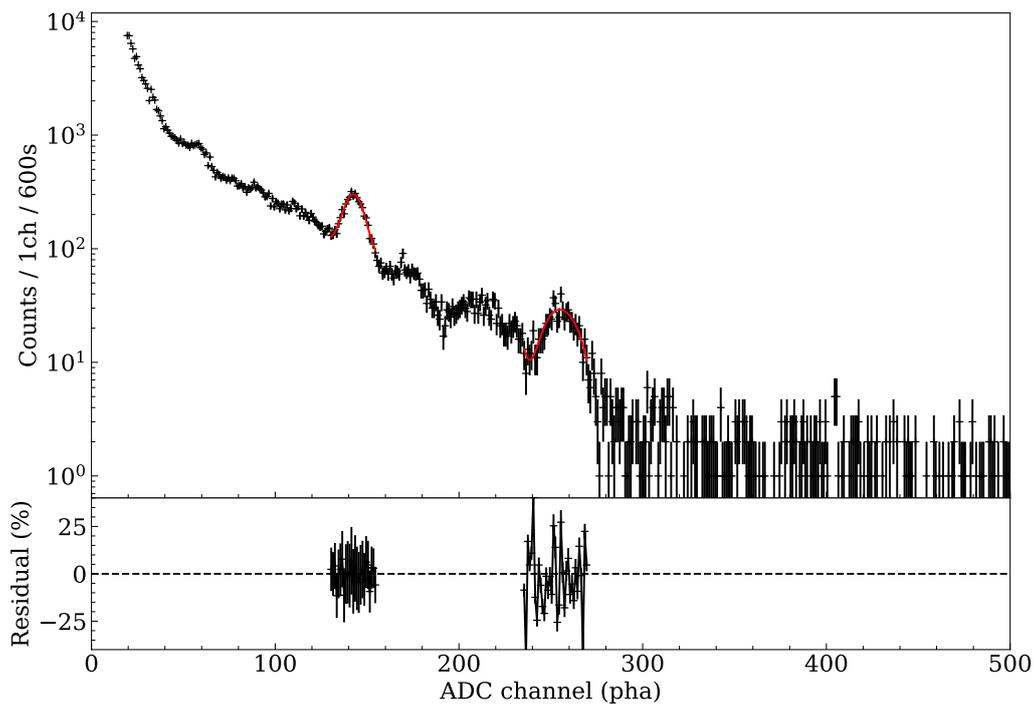


図 3.11 コガモ ID32 の 20201 年 12 月 15 日に計測した、理研・研究本館 604 の室内での環境放射線バックグラウンド。左側の輝線は  $^{40}\text{K}$  (1.46 MeV)、右側の輝線は  $^{208}\text{Tl}$  (2.61 MeV) を示し、それぞれガウス関数でフィットした。下図はそれぞれ、残差を示している。

それぞれの輝線のピークチャンネルとエネルギーを一次関数でフィットし、ADC チャンネル (ch) をエネルギー (MeV) に変換するエネルギー較正スペクトルを算出した。一次関数は  $a$  と  $b$  を定数として次のように表せる。

$$\text{エネルギー (MeV)} = a \times \text{ADC チャンネル (ch)} + b \quad (3.4)$$

使用した5種類の放射線源の輝線のエネルギーとピーク ADC チャンネルを表 3.4.1 に、エネルギー較正関数とそれぞれの放射線源のピークを図 3.12 に示す。黒色で示した較正曲線は  $\text{ADC チャンネル (ch)} = 98.23 \times \text{エネルギー (MeV)} - 0.56$  となった。較正曲線と放射線源の光電吸収ピークの輝線中心の残差はで 2.0% 以下となっており、線形性が高いと言える。

線源核種	エネルギー (MeV)	ピークチャンネル (ch)
152Eu	0.344	33.80
133Ba	0.356	34.61
22Na	0.511	49.84
137Cs	0.662	64.84
152Eu	0.779	75.88
152Eu	0.964	94.82
152Eu	1.112	108.07
60Co	1.17	114.55
22Na	1.27	124.67
60Co	1.33	130.9
152Eu	1.41	137.93
40K	1.46	142.86
208Tl	2.61	255.83

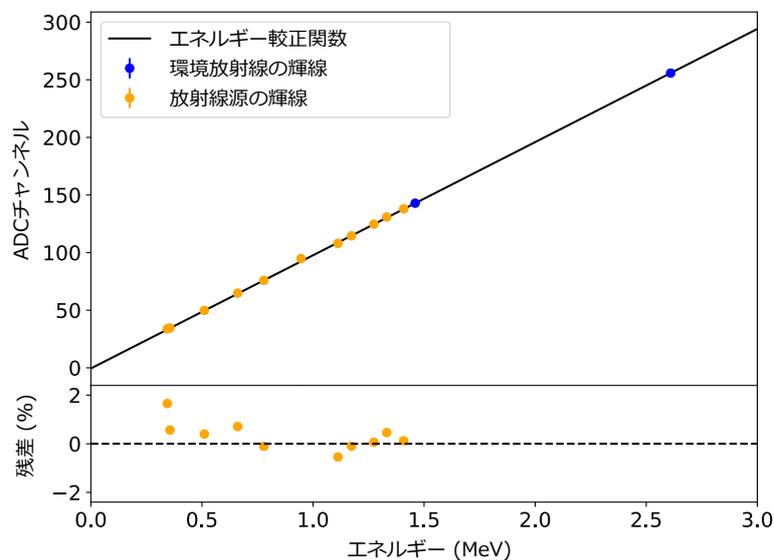


図 3.12 コガモ I32 の 2021 年 12 月 15 日 16 時台に計測した環境放射線バックグラウンド (青点) のエネルギースペクトルから算出したエネルギー較正関数 (黒線) と 6 種類の放射線源のピーク (オレンジ点)(上) と較正曲線と実測した輝線中心の ADC チャンネルの残差 (下)。較正曲線は  $^{40}\text{K}$ (1.46 MeV) と  $^{208}\text{Tl}$ (2.61 MeV) の輝線のピーク ADC チャンネル (ch) とエネルギー (MeV) を線形に繋いで求めた。

### 3.4.2 エネルギー分解能

シンチレータが検出するガンマ線のエネルギーは、シンチレーション光の統計誤差や電子回路のノイズなどによって広がりを持つ。これをエネルギー分解能という。エネルギー分解能  $R$  の定義式は、次のように表せる。

$$R = \frac{\text{FWHM}}{E_0} \quad (3.5)$$

FWHM(full width at half maximum) は半値幅と呼ばれ、ピークのちょうど半分の高さにおける分布の幅で定義される。 $E_0$  は輝線の中心エネルギーを表す。エネルギー分解能が小さいほど、接近した二つのエネルギーの輝線を見分けることができる。FWHM は通常、輝線をフィットしたガウス関数の幅  $\sigma$  を用いて次のように表せる。

$$\text{FWHM} = 2.35 * \sigma \quad (3.6)$$

ここでは、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{152}\text{Eu}$ 、 $^{133}\text{Ba}$  の放射線源の光電吸収ピークの輝線を用いて、検出器のエネルギー分解能を見積もる。横軸は ADC チャンネル (ch) である。それぞれの輝線をガウス関数でフィットし、 $\sigma$  と輝線のピーク値  $p$  をエネルギー較正曲線を用いてエネルギーに変換して、エネルギー分解能を求めた。

それぞれの輝線のエネルギーとエネルギー分解能は表 3.6 に示す。

表 3.6 コガモで計測した核種ごとのエネルギー分解能

線源核種	エネルギー (MeV)	エネルギー分解能 (%)
$^{152}\text{Eu}$	0.344	14.3
$^{133}\text{Ba}$	0.356	16.4
$^{22}\text{Na}$	0.511	13.7
$^{137}\text{Cs}$	0.662	11.6
$^{152}\text{Eu}$	0.779	11.7
$^{152}\text{Eu}$	0.964	7.9
$^{152}\text{Eu}$	1.112	8.3
$^{60}\text{Co}$	1.17	7.2
$^{22}\text{Na}$	1.27	8.4
$^{60}\text{Co}$	1.33	6.8
$^{152}\text{Eu}$	1.41	7.5
$^{40}\text{K}$	1.46	8.8
$^{208}\text{Ti}$	2.61	7.2

輝線中心のエネルギーとその輝線のエネルギー分解能をプロットしたものが、図 3.13 である。式 3.5 と式 3.6 より、エネルギー分解能は  $\text{Energy (MeV)}^{-0.5}$  に従うはずで、指数関数でフィットした場合、 $\text{Resolution}(\%) = 9.33 \times \text{Energy}(\text{MeV})^{-0.52}$  となった。0.3 MeV 以上で分解能が 20% 以下となっている。

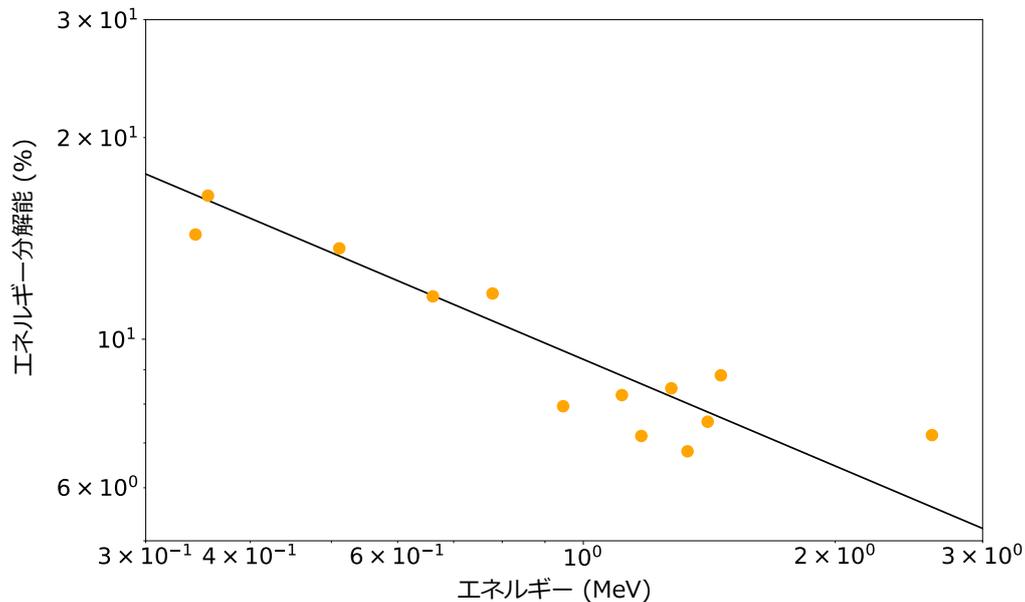


図 3.13 コガモのエネルギー分解能

## 3.5 観測体制

雷雲ガンマ線が日本海沿岸で観測されやすいは、厳冬期を中心に12月から3月である。そこで毎年10月から11月初旬にかけて、研究室でコガモ検出器をメンテナンスした後市民サポーターに郵送し、自宅の庭など雷雲ガンマ線が取りやすい場所に設置してもらっている。観測に適した場所の特徴としては以下が挙げられる。

- 雷雲ガンマ線はこれまでの観測から、雲からほぼ真下に降ってくると想定されるため、上空に空が開けている庭先やベランダなど
- 屋外電源が取れる場所
- 保安上の理由から、可能であれば不特定多数の目にはつきにくく、他人に触られないところ
- 水がたまらず、強風で吹き飛ばされないところ
- やむを得ず室内に設置する場合は、窓際など比較的外が見えやすいところ

### 3.5.1 コガモ検出器のメンテナンスと発送作業

2023年度は、京都大学理学研究科5号館の331実験室にて、GPSが取得しやすいように窓際に多段式の柵(コガモ柵)を設置し、9月から10月末まで約2ヶ月間の長期動作試験をし、表3.7を確認した後、梱包作業を行った。図3.14にコガモ柵と梱包作業の様子、表3.8と図3.15にコガモ送付の際の梱包物を示した。

表 3.7 長期動作の作業内容

#	作業内容
1	GPS 取得
2	sakura io の電波状態とサーバー上への送信
3	ファームウェアアップデート
4	micro SD カード内のデータ保存と消去
5	micro SD カードの差し替えと config ファイルの書き換え
6	ノイズの有無



図 3.14 実験室のコガモ棚 (左) と発送作業の様子 (右)

表 3.8 コガモ郵送の際の梱包物

1	コガモ検出器
2	電源ケーブル (10 m)
3	GPS アンテナ (3 m)
4	送付物一式をリストにした送り状
5	研究者からの手紙
6	コガモの使い方の説明書
7	雷雲プロジェクトのステッカー
7	2p3p 変換アダプタ



図 3.15 コガモ郵送の際の梱包物

市民サポーターは、研究者の知り合いやその紹介、SNS やテレビなどをみて興味を持ってくださった方などから募集した。2023 年度 11 月現在、約 80 名の市民サポーターの方にご協力いただいている。

図 3.16 に 2018 年度から 2023 年度の設定場所の地図をまとめた。

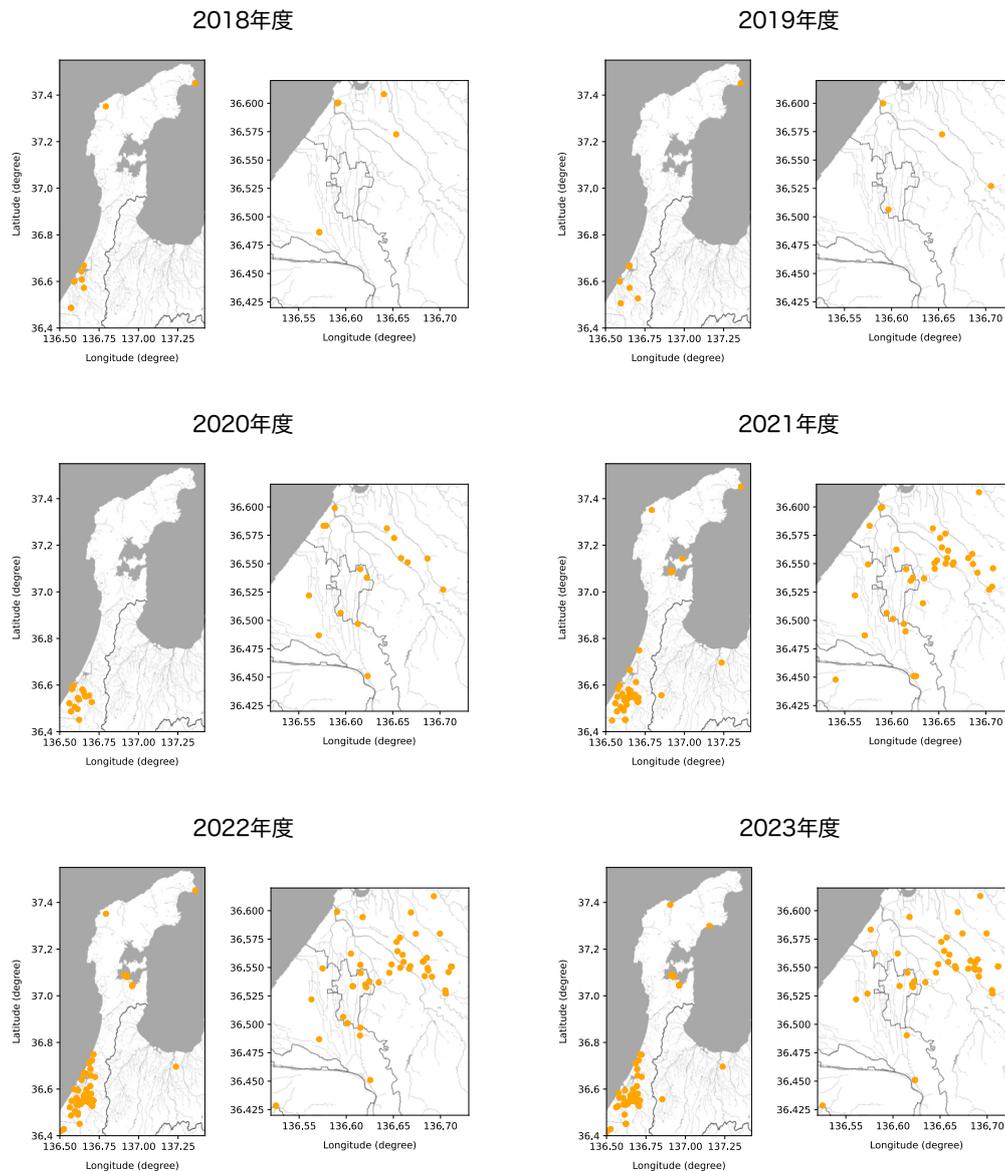


図 3.16 2018 年度から 2023 年度のコガモ検出器の設置場所。(左) は能登半島全体、(右) は金沢市周辺の拡大図である。オレンジがコガモ検出器の設置場所を示す。2018 年度は 10 台、2019 年度は 7 台、2020 年度は 19 台、2021 年度は 56 台、2022 年度は 70 台、2023 年度は 69 台を設置した。

### 3.6 データサーバとアラートシステム

雷雲プロジェクトでは、測定データを micro SD カードに保存するだけでなく、遠隔でのリアルタイムモニタリングを行うため、サーバ上へのデータの自動送信も行なっている。サーバには、2 分間隔で 6 個のエネルギー帯 (<0.5 MeV、0.5–1 MeV、1 MeV–2 MeV、2 MeV–3 MeV、3 MeV–8 MeV、>8 MeV) ごとの 20 秒値のカウントレートと 20 秒値の気圧、気温、湿度、照度といった環境センサーの測定値、GPS の測位値が送信されており、図 3.17 のようにネット上で確認することができる。図 3.17(左) は、2024 年 1 月 24 日に金沢市内で観測された雷雲ガンマ線のエリア 5 (およそ 3–8 MeV) のライトカーブで、ID と日時を指定することで簡単にライトカーブを確認することができる。

また、図 3.17(右)には GPS アンテナで取得された位置情報を地図上にプロットしており、どの ID がどこに置いてあるのかを確認できる。

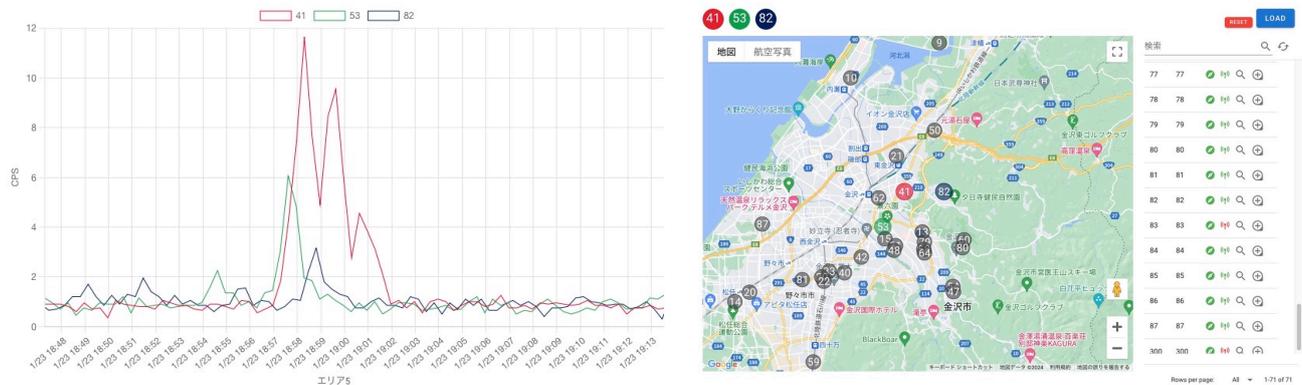


図 3.17 雷雲プロジェクトのデータサーバのウェブサイトの一部。カウントレートのプロットや検出器の位置を確認することが出来る。2024 年 1 月 24 日に金沢市内で観測された雷雲ガンマ線のエリア 5 (およそ 3–8 MeV) のライトカーブである。

2021 年 12 月からは、サーバに自動アラート機能を実装した。これは、送信されたカウントレートが移動平均から算出される閾値を超えたときに、自動で検出器の ID や検出時刻などの情報が X (旧ツイッター) に投稿される仕組みとなっている。

本節では、自動アラートの仕組みを簡単に述べる。自動アラート機能では、サーバ上に 2 分間隔で送信されてきた 20 秒ビンのカウントレートから、平均値  $R_{ave}$  と統計の揺らぎ  $\sigma_{stat}$  を計算する。これらを用いてアラートの閾値  $R_{alert}$  を算出し、閾値を超えるビンが現れるとアラートを出す仕組みとなっている。統計の揺らぎは、

$$\sigma_{stat} = \frac{\sqrt{\text{移動平均 } R_{ave} \times \text{ビン幅}}}{\text{ビン幅}} \quad (3.7)$$

アラートの閾値は

$$R_{alert} = R_{ave} + \alpha \times \sigma_{stat} \quad (3.8)$$

で計算する。

このアラートシステムのサーバ側で調整可能なパラメータは、計算に使用するエネルギー帯域、移動平均の計算に使うビン  $N_{window}$ 、閾値の設定に使う  $\alpha$  の 3 つである。使用するエネルギー帯域は、6 個のエネルギー帯から指定することができる。雷雲ガンマ線イベントの判定は、降雨の影響を受けない 3 MeV 以上で行うことが理想であるが、実験室にある  $^{60}\text{Co}$  線源でアラート試験ができるように、デフォルト値は 1 MeV 以上 (エリア 3,4,5,6 の総和) で設定した。また、降雨による放射線の変動は数分スケールで起こるため、 $R_{ave}$  (cps) の算出に使用する時間幅が 6 分となるよう、 $N_{window} = 6 \text{ min} \times 60 / 20 \text{ sec} = 18$  で設定した。統計的な揺らぎ  $\sigma$  に対する雷雲ガンマ線のカウントレートは、これまでの観測から  $5\text{--}8\sigma$  程度であることがわかっている。そこで、 $\alpha$  のデフォルト値はおよそ  $4\sigma$  に対応する  $\alpha=20$  に設定した。図 3.18 に移動平均でアラートをかける場合の例を示した。オレンジの実線が移動平均  $R_{ave}$ 、緑の破線がアラートの閾値  $R_{alert}$  を表す。アラートの閾値を超えたビンに赤い印をつけた。この自動アラートにより、リアルタイムに雷雲ガンマ線を検出できる。

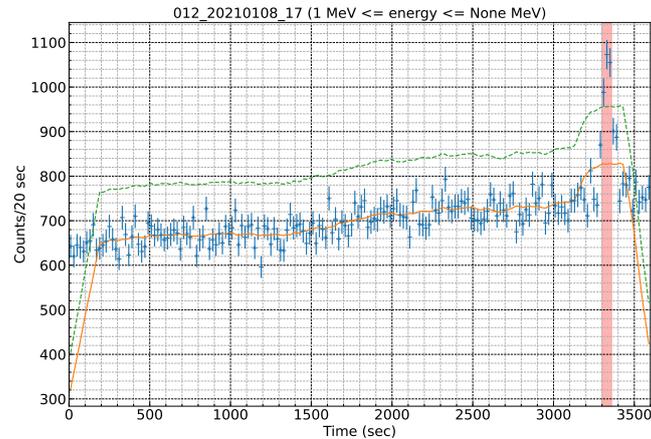


図 3.18 移動平均でアラートをかける場合の例。microSD に記録されたデータから検証した。

## 3.7 問題点と対策

雷雲プロジェクトが 2018 年に立ち上がって 5 年目になり、設置数が増えてきたことで屋外で長期動作する場合のコガモ検出器の問題点が浮かび上がってきた。本節では、雷雲プロジェクトでの問題点と現状の対策について、今後のプロジェクトの改善に役立てるために、記録としてまとめる。

### 3.7.1 観測停止

2021 年度の観測からはコガモ検出器のデータをモニタリングできるサーバーを導入し、遠隔でもリアルタイムでデータを確認できるようになった。その結果、冬季観測中に、電源スイッチを切ったり電源ケーブルを抜いたりしていないにもかかわらず、稀にコガモ検出器のデータ取得が停止していることがわかった。観測停止の際は、図 3.19 のように、基板の下の方のオレンジ色の LED が点灯し、液晶には何も写っておらず、ボタンを押しても反応しない状態となる。SD カードへのデータの書き込みも停止しており、イベントファイル、HK データともに同じ時刻で書き込みが止まっている。またサーバー上へのデータの送信も停止している。このオレンジ色の LED は、普段 HK データを SD カードに書き込む際に一瞬点灯するものであるため、SD カードへの書き込みで問題が起きていると考えられる。

そこで、2023 年度の 80 台の長期動作メンテナンスを行った際の観測停止に関する検証結果をまとめる。micro SD カードの書き込みによって観測が停止する原因としては、HK データの書き込み頻度が多すぎること、micro SD カードの耐久性がないことの二つが考えられる。そこでまず、長期動作を開始した 9 月の初めから 10 月 18 日の間に観測が停止していた 16 台について、micro SD カードへの HK ファイルの書き込み頻度と動作期間、動作日数を調べた。その結果を表 3.7.1 に示す。データが保存されていなかった ID12 と時刻付で問題があった ID24 を除いた 14 台を見てみると、平均の動作日数は 24 日で、ID 27 と ID 64 以外は昼以降、特に夜に止まっているものが多いことがわかった。コガモの HK ファイルは 1 日に 1 ファイルで、書き込むたびに一度そのファイル全体を読み直す仕様になっているため、1 日の中の遅い時間になればなるほど読み直すファイルのサイズも大きくなって負荷がかかりやすい。そのため、ファイルサイズが大きい夜に止まる傾向があると思われる。このことから、コガモ検出器の測定の停止は主に HK データを書き込む際に発生していると考えられる。そこで、コガモ検出器を開発した TAC 社にファームウェアの変更の際に watch dog timer の機能を追加してもらい、測定が停止したら自動で電源を入れ直す仕様に変更した。また、観測が

停止した16台は、その後もともと使用していたmicro SDカード (SanDisk:SDSQQNR-128G\*<sup>1</sup>) を、より耐久性が高いmicro SDカード (SDSQXAA-128G-GH3MA\*<sup>2</sup>) に変更して、郵送作業が始まるまでの2週間運用したところ、1台も停止しなかった。そこで、新しいmicro SDカードの方がコガモ検出器との相性がいいと考え、2023年度の観測では全てのコガモ検出器を新しいmicro SDカードに変更して運用した。その結果、2023年度の観測では、停止しているコガモ検出器は見つかっていない(2024年1月25日現在)。



図 3.19 コガモ検出器の観測停止状態の時の基板の様子。基板の下のオレンジ色の LED が点灯する。

\*1 [https://www.amazon.co.jp/dp/B07NY23WBG/ref=cm\\_sw\\_r\\_tw\\_dp\\_68Y945FK51EBBNX207TP](https://www.amazon.co.jp/dp/B07NY23WBG/ref=cm_sw_r_tw_dp_68Y945FK51EBBNX207TP)

\*2 [https://www.amazon.co.jp/microSD-書込最大90MB-SanDisk-Extreme-SDSQXAA-128G-GH3MA/dp/B0B21BDBN6?ref\\_=ast\\_sto\\_dp&th=1](https://www.amazon.co.jp/microSD-書込最大90MB-SanDisk-Extreme-SDSQXAA-128G-GH3MA/dp/B0B21BDBN6?ref_=ast_sto_dp&th=1)

ID	書き込み頻度	動作期間	停止した時間帯	動作日数
10	10 sec	9/27 - 10/5	14:00 台	8
12	10 sec	故障		
14	10 sec	9/7 - 10/13	21:00 台	36
24	10 sec	故障		
27	300 sec	9/27 - 10/5	20:00 台	8
29	10 sec	9/7 - 9/27	23:00 台	20
36	10 sec	9/7 - 9/26	23:00 台	19
40	10 sec	9/7 - 10/05	14:00 台	28
47	10 sec	9/7 - 10/11	20:00 台	34
52	10 sec	9/7 - 9/30	20:00 台	23
58	10 sec	9/14 - 10/7	20:00 台	23
60	10 sec	9/25 - 9/28	06:00 台	3
62	10 sec	9/7 - 9/27	21:00 台	20
64	300 sec	9/1 - 10/13	10:00 台	42
71	10 sec	9/7 - 10/10	23:00 台	33

### 3.7.2 ノイズの発生

コガモ検出器では、観測中にノイズ混入が発生する場合が見受けられた。図 3.21(左) は ID 63 で観測された 2023 年 9 月 25 日 0 時から 2023 年 9 月 26 日 0 時の HK データである。上から順に、<500ch (およそ <0.5 MeV)、500–1000 ch (およそ 0.5–1 MeV)、1000–2000 ch (およそ 1–2 MeV)、2000–3000 ch (およそ 2–3 MeV)、3000–8000 ch (およそ 3–8 MeV)、>8000 ch (およそ >8 MeV) のデータを示す。この図のような顕著な場合は、1 日を通して、断続的にノイズが発生していることがわかる。特に大きなノイズが発生している 4 時から 5 時の拡大図 (図 3.21(右)) を見てみると、2 分ごとの周期的なノイズが発生している。このノイズは、3 時から 6 時のように全エネルギー帯域で発生している時もあるが、15 時から 24 時のように低エネルギー側だけで発生している時もある。ノイズ発生時には、HK データだけでなくイベントファイルやデータサーバ上のライトカーブにも同様のノイズが見られる。通信用の Sakura io モジュールを通してサーバー上にデータを送信する頻度が 2 分ごとであるため、通信のタイミングでノイズが発生していると考えられる。実験室で再現しようともノイズが発生しないことも多く、現地の電波環境に強く依存し、ノイズの発生しやすさが変わっていると考えている。通信状況が悪い場合に、通信を確立しようとして出力が上がる場合に読み出し系に電気的ノイズが混入している可能性を疑っているが、実験室では再現できないため、詳細な原因は今後、特定する必要があると考えている。本研究では、雷雲ガンマ線のイベント探索時にノイズが発生しているファイルを除いて解析を行なった。

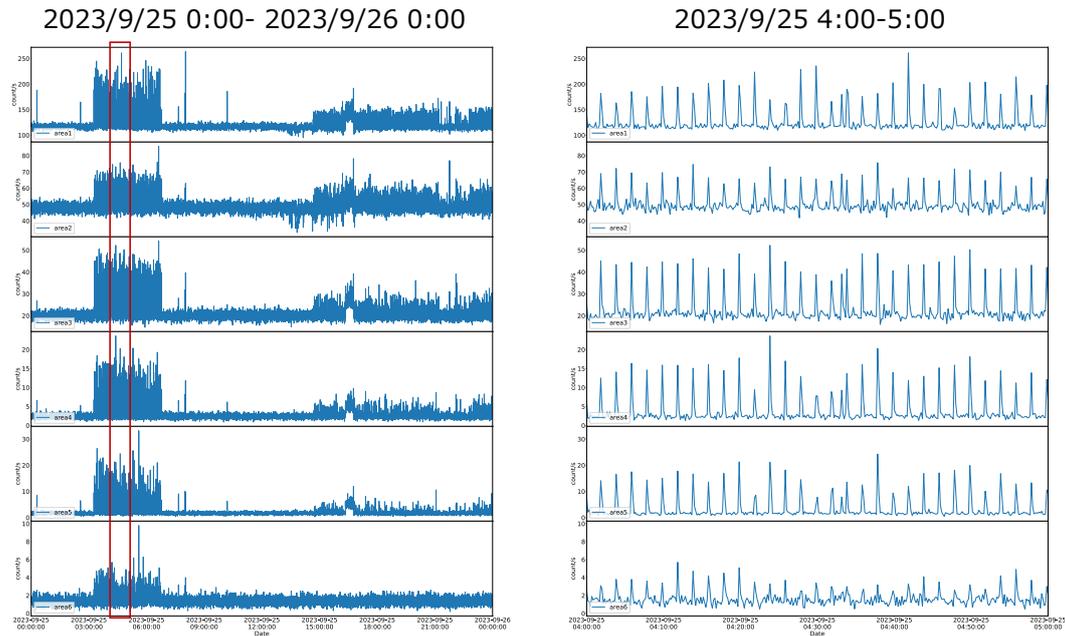


図 3.20 コガモ検出器でノイズが発生している期間のライトカーブ。(左) メンテナンス中に ID 63 で観測された 2023 年 9 月 25 日 0 時から 2023 年 9 月 26 日 0 時の HK データのライトカーブ。上から順に、<500ch (およそ <0.5 MeV)、500–1000 ch (およそ 0.5–1 MeV)、1000–2000 ch (およそ 1–2 MeV)、2000–3000 ch (およそ 2–3 MeV)、3000–8000 ch (およそ 3–8 MeV)、>8000 ch (およそ >8 MeV) のデータを示す。(右) は 2023 年 9 月 25 日 4 時から 5 時の拡大図である。

### 3.7.3 データフォーマットの破損

コガモ検出器の HK ファイルのデータフォーマットが破損している場合も見つかった。ID63 の 2023 年 9 月 25 日の HK ファイルの中でフォーマットが壊れている 3 箇所のスクリーンショットを図 3.21 に示す。1 つ目と 2 つ目は、新しくデータを追加する際に、改行されずに、間に空白や文字、記号が入っている。3 番目は、正常に改行はされているが、先頭に空白や文字、記号が入っている。また、1 つ目と 2 つ目については、エネルギー帯域 (area) 3、4、5 のカウントレートが以上に高い時に発生しており、ノイズが発生と同期して起こっていると考えられる。現在は、手動でフォーマットを修正してからプロットをしているが、今後、原因を突き止めていく必要がある。



- ① 改行されずに、空白や文字や記号が入っている。
- ② 改行はされているが、空白や文字や記号が入っている。
- ③ ①はarea 3,4,5のカウントレートが以上に高いときに発生。

図 3.21 コガモ検出器の HK ファイルのデータフォーマットの破損の例。ID 63 の 2023 年 9 月 25 日の HK ファイルの一部。



## 第 4 章

# 雷雲ガンマ線の探索と系統解析

### 4.1 データのパイプライン処理と雷雲ガンマ線イベントの探索

コガモの microSD カードには、放射線イベントごとに検出時刻、エネルギーに対応する波高値 (ADC チャンネル) が、event-by-event 形式で記録され、1 時間毎のファイルとして保存されている (データフォーマットの詳細は付録 7.2 を参照)。これをイベントファイルと呼ぶ。このイベントファイルに記録されたスペクトルの波高値 (ADC チャンネル) では、1 チャンネルはおよそ 10 keV に相当するように調整されている。雷雲ガンマ線の探索では、1 時間毎の各イベントファイルを図 4.1 のプロセスで解析し、その 1 時間内のイベント有無を判定するパイプラインを作成した。出力する項目は表 4.1 にまとめた。以下では、各チェック項目について記載する。

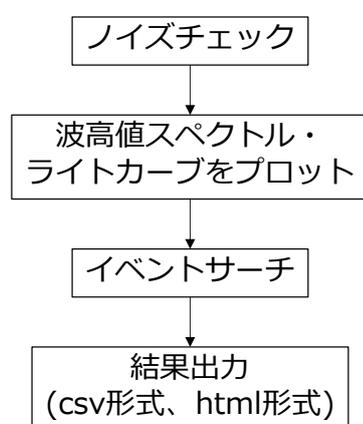


図 4.1 雷雲プロジェクトの放射線データの解析パイプラインの概要

出力項目	内容	
detid	コガモ ID	
time	1 時間ごとのファイルの開始日時	
process	プロセスの状況	
noise	ノイズチェック	ノイズ有無
sumamp		強度の積算値
fftlink		フーリエ変換の図
phalink	波高値スペクトル	波高値スペクトル
lclink	ライトカーブ	1 時間ライトカーブ
bstcand	イベントサーチ	閾値を超えたビンの数
bstlclink		ライトカーブ (閾値を超えたピンは色つき)
bstdistlclink		カウントレートのヒストグラム
bstlc_mean		ガウシアンフィット結果の中心値
bstlc_sigma		ガウシアンフィット結果の標準偏差
bstlc_area		ガウシアンフィット結果の面積

表 4.1 パイプラインで出力される項目とその内容

#### 4.1.1 ノイズチェックの前処理

3.7.2 節で述べたとおり、コガモは観測中に電氣的ノイズの影響を受けることがある。これらのノイズイベントは、パイプライン処理で雷雲ガンマ線のイベント候補として誤判定してしまう可能性があり、ノイズがある時間帯は今回の

解析ではイベント候補から除く必要がある。そこで、まず最初に各イベントファイルでノイズによる汚染がひどいかを確認した。コガモでの電氣的ノイズの特徴として、低エネルギー側で顕著で、周期的に発生することがわかっている。そこで、ノイズの有無は、1時間内の1秒のカウントレートを離散フーリエ変換することで調べる。図4.2に、(a)ノイズあり、(b)ノイズなし、(c)ノイズなし(雷雲ガンマ線の発生時)のそれぞれのライトカーブと、離散フーリエ変換の結果を示した。離散フーリエ変換後の強度を見てみると、ノイズがない(b)や(c)に対して周期的にノイズが出ている(a)は強度が大きくなっていることがわかる。それぞれ1/120以上の周波数帯の強度を積算した値を図4.2(左)に示した。ノイズありの(a)は5568、ノイズなしの(b)は1445となり、ノイズの有無によって積算値に違いが見られる。また、ノイズのないグロー発生時の(c)でも1842となり、グローが発生している時間帯でもこの判定が使えることが分かる。本解析では1/120以上の周波数帯の強度の積算値が2000以上のファイルはノイズ汚染の可能性ありと判定、下回るファイルはノイズなしと判定した。

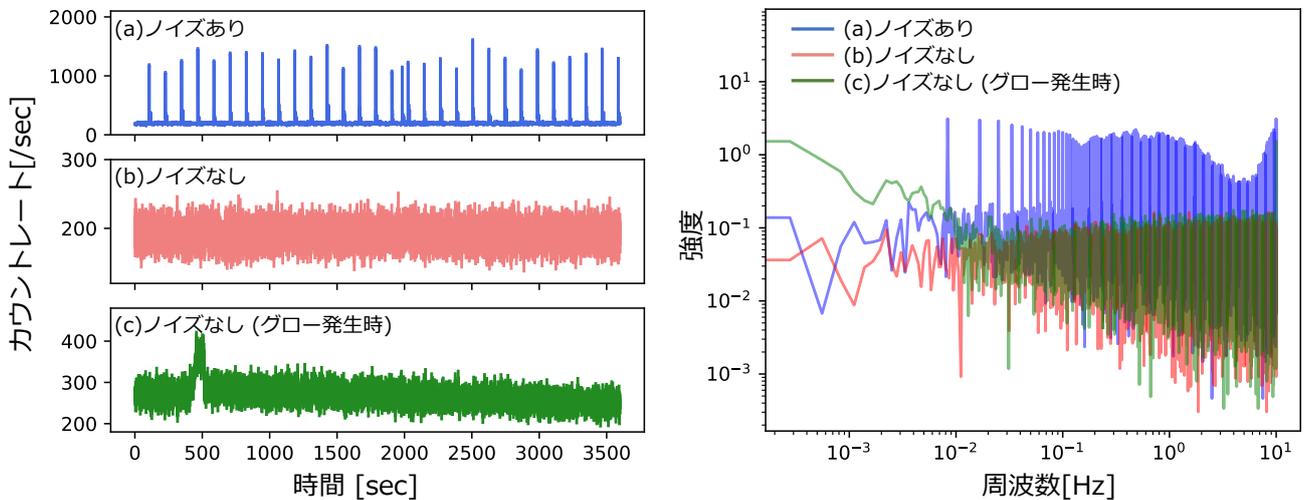


図4.2 コガモの全エネルギー帯域の1秒ピンのカウントレート(左)と、それをフーリエ変換した結果(右)。これらをノイズ判定の参考情報とした。

#### 4.1.2 イベントサーチ

雷雲ガンマ線発生時の3 MeV以上の放射線のカウントレートは、数十秒から数分程度に渡ってバックグラウンドの数倍～数十倍程度になることが分かっている。また、雷雲ガンマ線のイベント発生時には雷雲からの降雨・降雪がある場合が多く、その中に含まれるラドン娘核種による環境放射線の変動の影響を受ける3 MeV以下の低エネルギー側では、カウントレートが降雨に伴って増加する。したがって、雷雲ガンマ線イベントを見つけるためには、環境放射線による影響を受けない高エネルギー側(3 MeV以上)のエネルギー帯域を中心にカウントレートのヒストグラムを作成し、バックグラウンド変動に対して有意に超過した高カウントレートのビンがあるかどうかを確認していけば良い。

本解析では、増光が大きい雷雲ガンマ線イベントだけでなく、比較的小さいイベントも探索するため、100チャンネル以上(およそ1 MeV以上)の放射線イベントデータから16秒ピンのライトカーブを作成し、そこからカウントレート分布のヒストグラムを作成した。例として、図4.3はID53で雷雲ガンマ線イベントが検出された2021年12月30日4時台のライトカーブ(左)とカウントレート分布のヒストグラム(右)である。600 counts/sec程度で推移するバックグラウンドに対して、イベント発生時はカウントレートが2倍程度増加している。カウントレート分布のヒストグラムはガウス関数に従うと仮定して、式4.1でフィットした。

$$N(c) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(c-c_0)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (4.1)$$

ここで、 $c$  は 16 秒ビンのカウントレート、 $\sigma$  は標準偏差、 $a$  はガウス関数の面積、 $c_0$  はヒストグラムのピークのカウントレートを表す。フィット結果は図 4.3 右のヒストグラムの右上に示しており、縦の破線はそれぞれ、黄色が  $3\sigma$ 、青色が  $4\sigma$ 、緑色が  $5\sigma$  である。図 4.3 のライトカーブには破線を超えるビンに赤色をつけており、雷雲ガンマ線イベントに対応している。今回は  $4\sigma$  を閾値として、ノイズがなくビンが二つ以上連続している部分が含まれる時間帯を探し出した。バックグラウンドのカウントレートが正規分布に従うと仮定すると、 $4\sigma$  を超える確率は 0.0032% となる。1 時間ファイル内の 16 秒ビンは 225 個あるため、1 時間以内に  $4\sigma$  を超えるビンは平均で 0.72 個となり、この閾値で統計的な揺らぎでは説明が難しい雷雲ガンマ線のイベント候補のみを拾うことができる。最終的に、以下の条件に合致したものを雷雲ガンマ線イベントであると判断した。

- 1 MeV 以上のライトカーブのヒストグラムのから算出した閾値 ( $4\sigma$ ) を超えるビンが 2 つ以上連続する。
- 電氣的ノイズによる汚染が発生していない。
- 雷雲ガンマ線の増光時にレーダー観測によって雷雲の通過が確認できる。

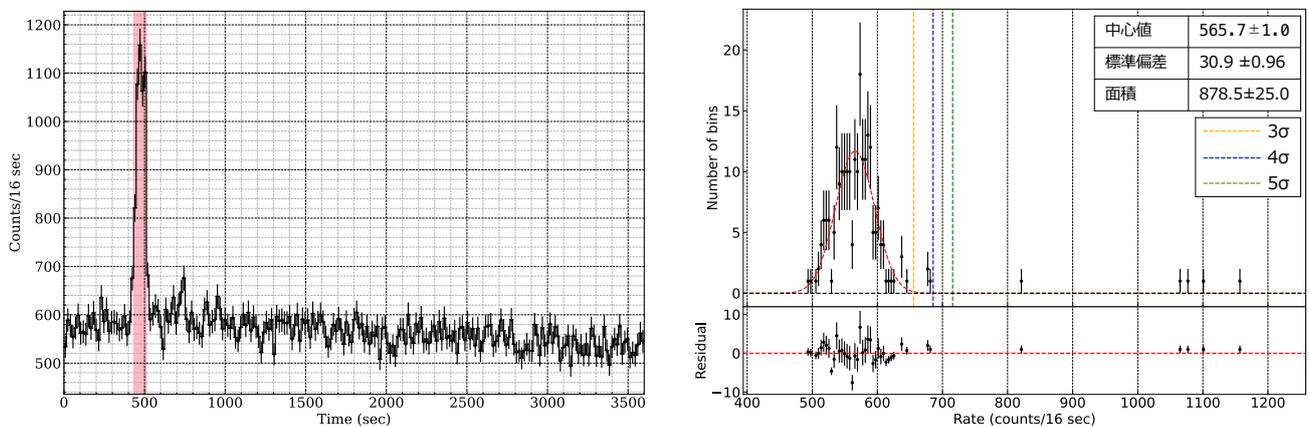


図 4.3 雷雲ガンマ線のイベントを検出した時間帯を含む波高値 100 チャンネル (およそ 1 MeV) 以上、16 秒ビンのライトカーブ (左) と対応するカウントレート分布のヒストグラム (右)。ライトカーブの時刻原点は 2021 年 12 月 30 日 4 時 00 分 (JST) である。カウントレートのヒストグラムはガウス関数でフィットしており、フィットの値を右上の表に示す。左の図では、閾値として右図の分布をガウス関数で近似した場合の  $4\sigma$  を超えるビンに赤色をつけた。右図の縦の破線は、黄色が  $3\sigma$ 、青が  $4\sigma$ 、緑が  $5\sigma$  を示す。

2018 年から 2022 年度のデータを用いてイベント探索を行った結果、39 個のイベントが見つかった。表 4.2 に詳細を示す。

## 4.2 代表的な雷雲ガンマ線の解析例

イベント探索で見つかったグローイベントの詳細解析を行う。本節では、2021 年 2 月 3 日 3 時 16 分に ID18 で検出された雷雲ガンマ線を例に、代表的な雷雲ガンマ線解析の手順を述べる。

### 4.2.1 時間補正

コガモの放射線イベントと環境データに記録されている時刻は、GPS から取得した PPS 信号を基準に付けている。コガモで使用している u-box M8 レシーバー<sup>\*1</sup>は、UBX-TIM-TP(UBX Protocol というバイナリの通信) と UBX-NAV-PVT の二つの時刻信号を取得できるが、両者は 1 秒ずれた時刻が配信されている。例えば、UBX-TIM-TP 信号が 8:30:00 の時は、UBX-NAV-PVT 信号では 8:29:59 となる。コガモのファームウェアで、UBX-NAV-PVT 信号に基づいて時刻付けをしているが、作成したレコードは UBX-TIM-TP を使って時刻付けをする仕様にしてしまったため、本来の時刻よりも 1 秒小さい値がついていた。本来の時刻に戻して解析するため、パイプライン処理においてイベントファイルの時刻に 1 秒追加する。

### 4.2.2 ライトカーブ

イベント探索 (4.1.2) では、1 MeV のイベントを用いたが、以下の詳細解析では、環境放射線の変動の影響を受けない 3 MeV 以上のエネルギー帯域を使用して雷雲ガンマ線の継続時間を評価する。図 4.4 に 1 時間分の 3 MeV 以上の 5 秒ビンのライトカーブと、そこから作成したカウントレートのヒストグラムを示す。第 4 章でのイベント探索の手法と同様に、このヒストグラムをガウス関数 (式 4.1) でフィットし、バックグラウンド変動レートの平均値と標準偏差を計算する。これを用いて、それぞれの時間ビンのカウントレートから平均値を引き、さらに標準偏差で割ることによって、バックグラウンドの平均値から何  $\sigma$  離れているのかを評価する。この中で、最大のものを雷雲ガンマ線イベントの強度とし、そのビンの時刻を検出時刻とする。さらに、雷雲ガンマ線・イベントの継続時間は、最大の強度を持つビンの周辺で、 $3\sigma$  を超える強度のビンが観測されている時間帯とする。 $3\sigma$  以上の強度の最初のビンのどこかで雷雲ガンマ線が始まったとすると、開始時刻にはビン幅の半分の誤差がつく。終了時刻の誤差も同様に考えられるため、継続時間 (終了時刻-開始時刻) の誤差はビン幅の半分の時間の二乗の和である 3.5 秒とした。図 4.5 のライトカーブの青い点線が継続時間の開始時刻と終了時刻を示している。また、継続時間内に検出された 3 MeV 以上の放射線イベント数の積算値を検出光子数とし、誤差は  $1\sigma$  で評価した。

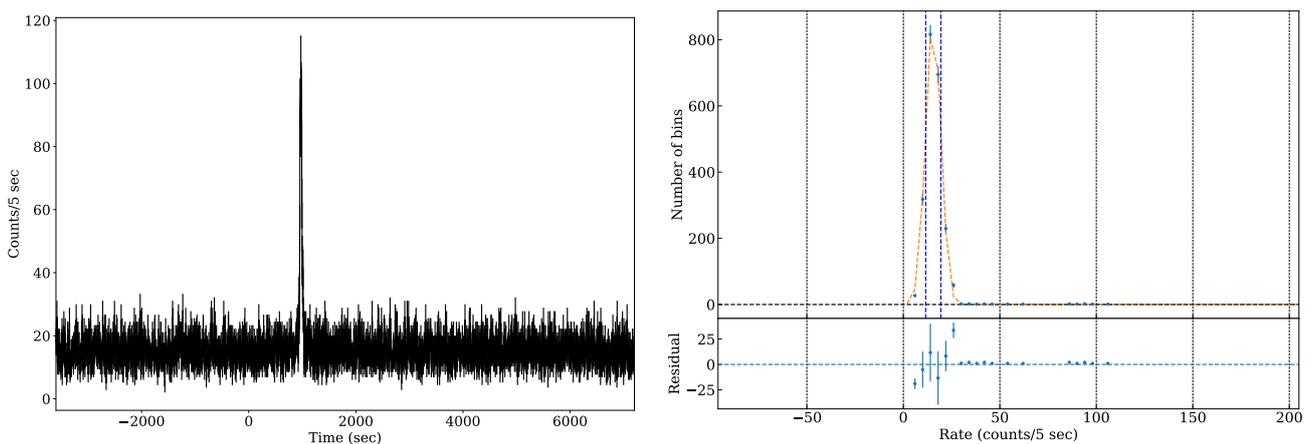


図 4.4 ID18 の 2021 年 2 月 3 日 03:00-04:00JST の 3 MeV 以上の 5 秒ビン幅のライトカーブ (左) と、対応するカウントレート分布のヒストグラム (右)。時刻原点は 2021 年 2 月 3 日 3:00JST。カウントレートのヒストグラムのオレンジの点線はガウス関数でフィットした結果、青線は  $3\sigma$  を示す。

\*1 [https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox8-M8\\_ReceiverDescrProtSpec\\_UBX-13003221.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox8-M8_ReceiverDescrProtSpec_UBX-13003221.pdf)

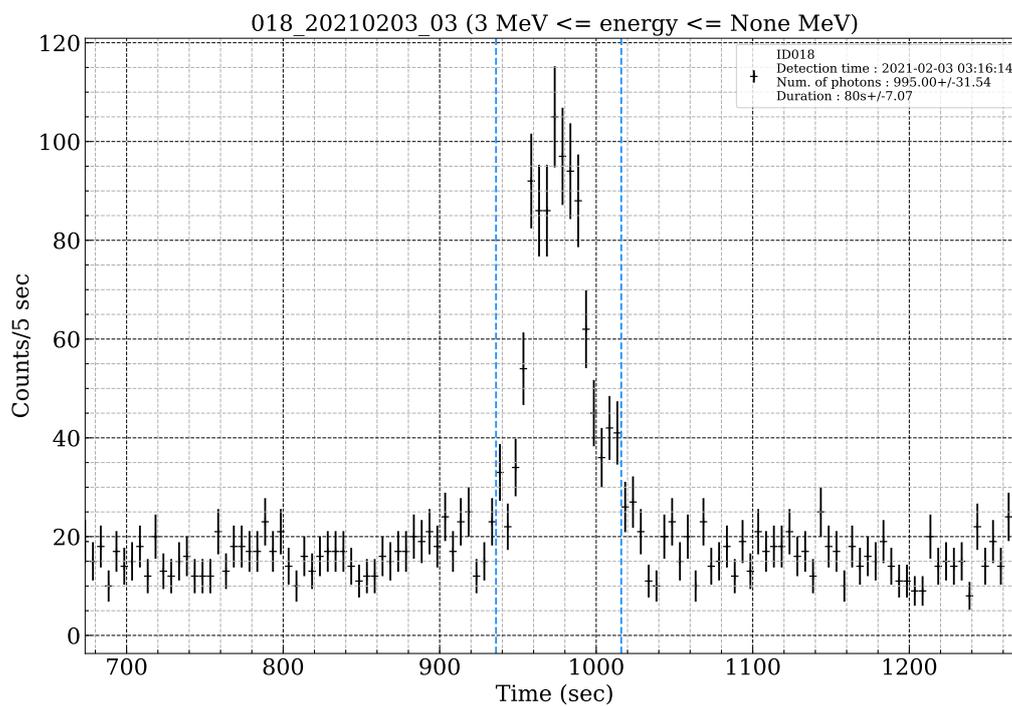


図 4.5 ID18 の 2021 年 2 月 3 日の 3 時台の 3 MeV 以上の 5 秒ビンライトカーブ。時刻原点は 2021 年 2 月 3 日 3:00JST。水色の破線は継続時間を示す。

### 4.2.3 スペクトル

ID28 が 2021 年 2 月 3 日 3 時 16 分ごろに観測した雷雲ガンマ線イベントのエネルギースペクトルの例を図 4.5 に示す。ライトカーブの解析から算出した継続時間内のエネルギースペクトルを信号 (ソース) スペクトルとし、バックグラウンドのエネルギースペクトルを減算した。バックグラウンドは継続時間とその前後 40 秒を除いた、前後の二つの時間帯で、それぞれソースの継続時間の 3 倍の時間のエネルギースペクトルを平均した。

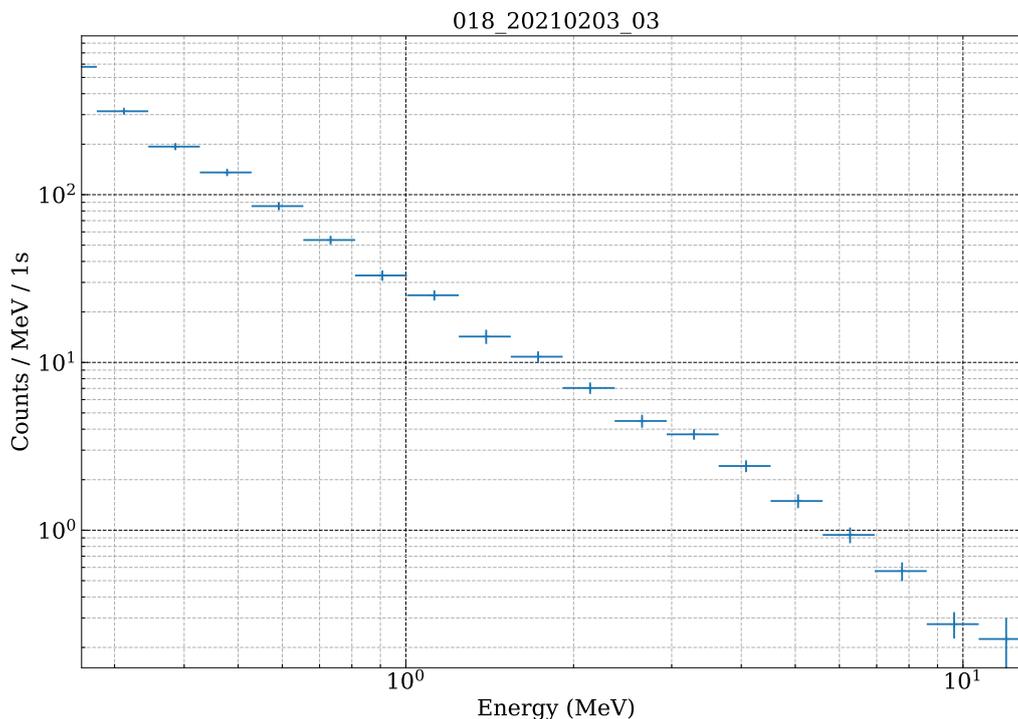


図 4.6 ID18 が観測した 2021 年 2 月 3 日 3 時 16 分ごろに観測された雷雲ガンマ線イベントのエネルギースペクトル。継続時間内の雷雲ガンマ線信号のエネルギースペクトルから、バックグラウンドスペクトルを減算した。バックグラウンドは継続時間とその周辺 40 秒を除いた前後で、それぞれ継続時間の 3 倍の時間のエネルギースペクトルを取り、平均した。

### 4.3 系統解析

前述のパイプライン処理により、2018 年度から 2021 年度の 4 期間の観測データについてイベント探索を行った結果、39 個の雷雲ガンマ線を見つけることができた。検出した一覧と、検出時の気象条件を表 4.2 にまとめた。そのうち、7 個は 2 台以上のコガモ検出器で検出された多地点イベントで、最も同時検出数が多いイベントは 2021 年 12 月 30 日 4 時台の 5 地点での検出であった。

風向と風速は、国土交通省が提供する XRAIN (参照: 第 5 章) の合成雨量データから求めた。風向は、風が吹いてくる方角を、北向きを  $0^\circ$  とした時計回りで表す。例えば  $270^\circ$  は西から東に風が吹いていることを示す。合成雨量データのオリジナルデータ (XRAIN リアルタイム雨量情報システム) からダウンロードすることができる。算出方法は Wada et al. (2019) を参照した。温度は検出時刻にコガモ検出器の環境データ (log ファイル) に記録されていた検出器内部の温度、気温は金沢 (N36.35°, E136.38°)、小松 (N36.22°, E136.26°)、かほく (N36.42°, E136.41°)、七尾 (N37.1°, E136.59°)、加賀中津原 (N36.15°, E136.23°) に設置されているアメダスの観測所で測定された地上気温の中から、検出器の設置場所に一番近い地点の値を参照した。表 4.2 の雷雲ガンマ線のイベント No.22-25 の風向風速は、合成雨量データを取得できなかったため、また、イベント No.9 の気温は検出器の設置場所に一番近い加賀中津原の気温データがなかったため “NA” としている。

図 4.7(左) に年度ごとの設置した検出器の台数、図 4.7(中) に年度ごとの雷雲ガンマ線の検出数を示す。それぞれの年度はその年の 10 月から次の年の 3 月までの期間を指す。2018 年は 1 個、2019 年は 0 個で、2022 年から 2022 年にかけては検出数が増加している。これはコガモ検出器の設置数が増加したことによるものと考えられる。それ

それぞれの期間中に稼働していたコガモ検出器の数で雷雲ガンマ線の検出数を割った、検出器一台あたりのイベント数を図 4.7(右) に示す。シチズンサイエンスが本格的に始まり、コガモ検出器の設置数を飛躍的に増加させることができた 2020 年度以降は、1 台あたり平均で 0.28 個のイベントが検出されている。解析した 5 年間の中で一番多いのは 2022 年度で、一台あたり 0.36 個のイベントが検出できた。GROWTH 実験での先行研究で、2016-2019 年度の 4 年間の観測の結果、1 年度 1 台あたりおよそ 1-2 個のイベントを検出していた。この先行研究ではサイズ  $2.5 \times 8 \times 25 \text{ cm}^3$  の BGO シンチレータや、 $5 \times 5 \times 30 \text{ cm}^3$  の CsI(Tl) シンチレータであり、図 4.9 には、これらとコガモ検出器の有効面積をエネルギーごとに比較した。青は GROWTH 実験の BGO シンチレータ ( $2.5 \times 8 \times 25 \text{ cm}^3$ )、緑は GROWTH 実験の CsI シンチレータ ( $5 \times 5 \times 30 \text{ cm}^3$ )、赤はコガモ検出器の CsI シンチレータ ( $5 \times 5 \times 15 \text{ cm}^3$ ) の有効面積を示す。先行研究で BGO 検出器は CsI 検出器よりも有効面積が大きい。また、コガモ検出器は GROWTH 実験の CsI 検出器の半分の大きさのシンチレータを搭載しているため、有効面積は CsI 検出器の半分になる。以上より、コガモ検出器は GROWTH 実験の検出器の三分の一程度の有効面積を持つことがわかり、1 台あたりのイベント数の差は妥当であると言える。また、第 3 章で述べた通り、コガモ検出器は ID によっては観測中にノイズが発生するものがあり、イベントを検出していてもノイズに埋もれていて探索されておらず、実際よりもイベント数が少なくなっている可能性もある。

また、図 4.8 に、月ごとの検出数を示す。(左) は 5 年間合わせた全イベント数、(右) は全イベント数をそれぞれの月に稼働していた検出器の総数で割り、30 日でノーマライズした値である。12 月の検出数が一番多く、10 月、11 月、3 月は一つも観測されなかった。また、1 台あたりの検出個数も 12 月が一番多かった。

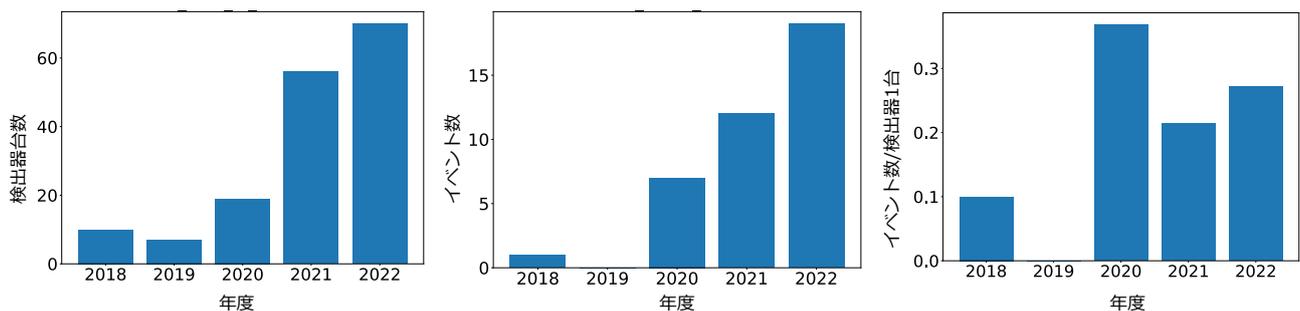


図 4.7 年度ごとコガモ検出器の設置数(左)、雷雲ガンマ線の検出数(中)、および 1 台あたりの検出数(右)。

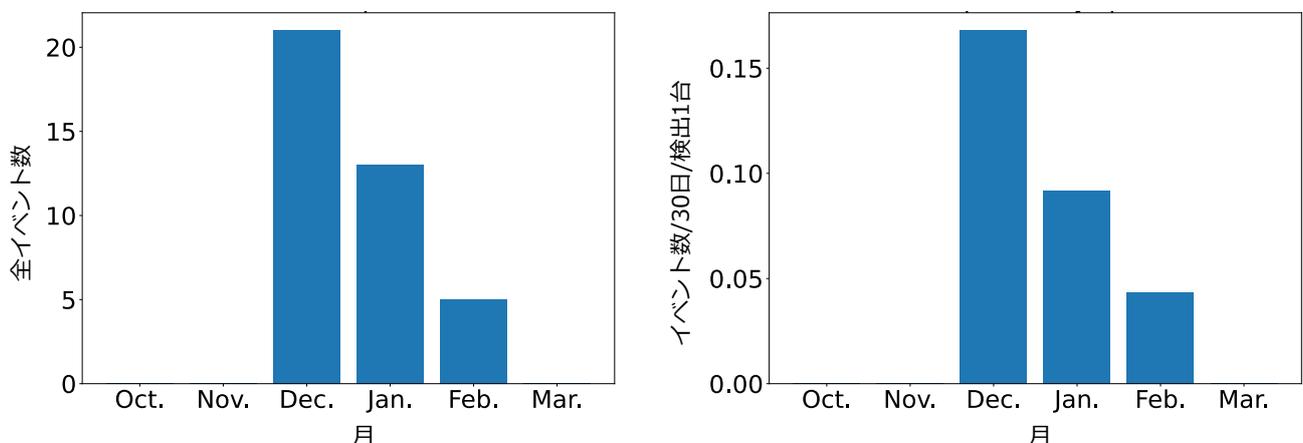


図 4.8 (左)5 年間合わせた月ごとの全イベント数、(右) 全イベント数をそれぞれの月に稼働していた検出器の総数で割り、30 日でノーマライズした値

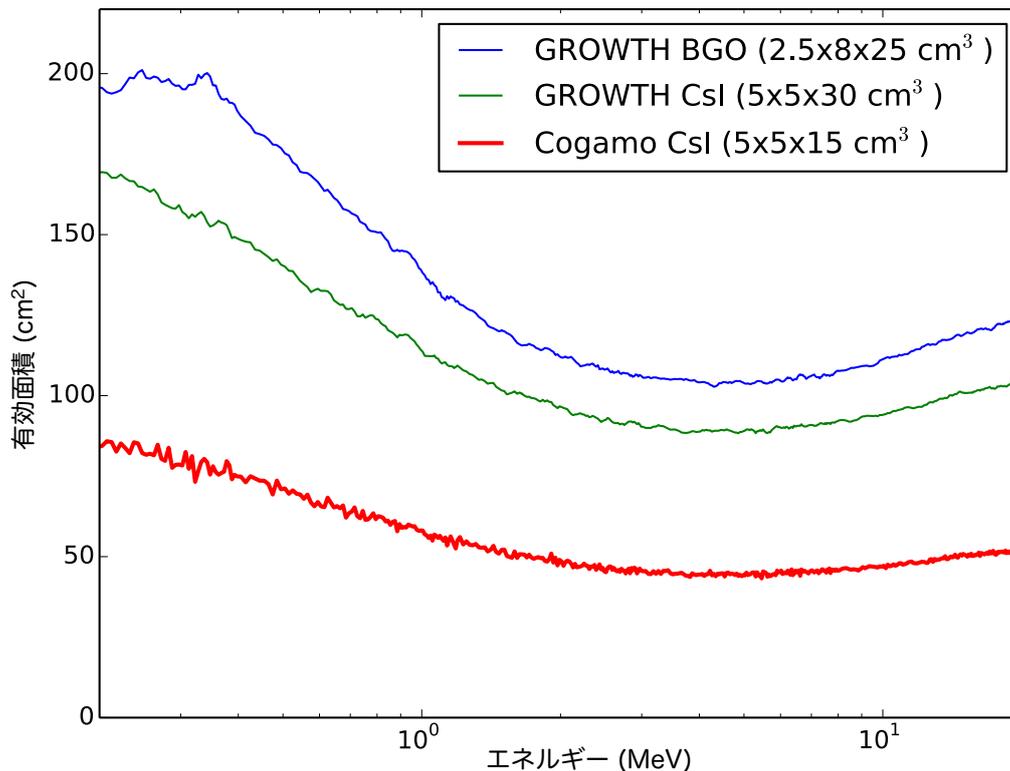


図 4.9 GROWTH 実験の検出器とコガモ検出器の有効面積の比較。青は GROWTH 実験の BGO シンチレータ ( $2.5 \times 8 \times 25 \text{ cm}^3$ )、緑は GROWTH 実験の CsI シンチレータ ( $5 \times 5 \times 30 \text{ cm}^3$ )、赤はコガモ検出器の CsI シンチレータ ( $5 \times 5 \times 15 \text{ cm}^3$ ) の有効面積を示す。

続いて、各イベントのガンマ線解析の結果の特徴をまとめる。図 4.10(左) に 3 MeV 以上の光子数のヒストグラムを示す。検出光子数の最大はイベント No.36 の  $3673 \pm 60.61$  個、最小はイベント No.14 の  $68 \pm 8.25$  個、平均は 820.41 個であった。図 4.10(右) は継続時間のヒストグラムを示す。継続時間の最大はイベント No.3 の  $160.0 \pm 3.54$  秒、最小はイベント No.14 と No.35 の  $15.0 \pm 3.54$  秒で、平均は 71.03 秒であった。また、イベント No.6、No.13、No.15、No.21、No.30、No.32、No.38、No.39 の 8 個は雷雲ガンマ線の増光が突然終了する瞬間途絶タイプであった。

最後に、雷雲ガンマ線イベントが検出された時の気象条件についてまとめる。図 4.11 に、地上気温、風向、風速のヒストグラムをそれぞれ示す。地上気温の平均は  $3.4^\circ\text{C}$  で、 $0^\circ\text{C}$  以上が最も多く、イベント No.30-32 のみ  $0^\circ\text{C}$  未満の時に発生していた。平均風速は、17.05 m/s、平均風向は  $262.59^\circ$  であった。多くの雷雲ガンマ線は西風の時が最も多く、南西の風の時もいくつか発生していた。南風、北風、東風の時は発生していなかった。

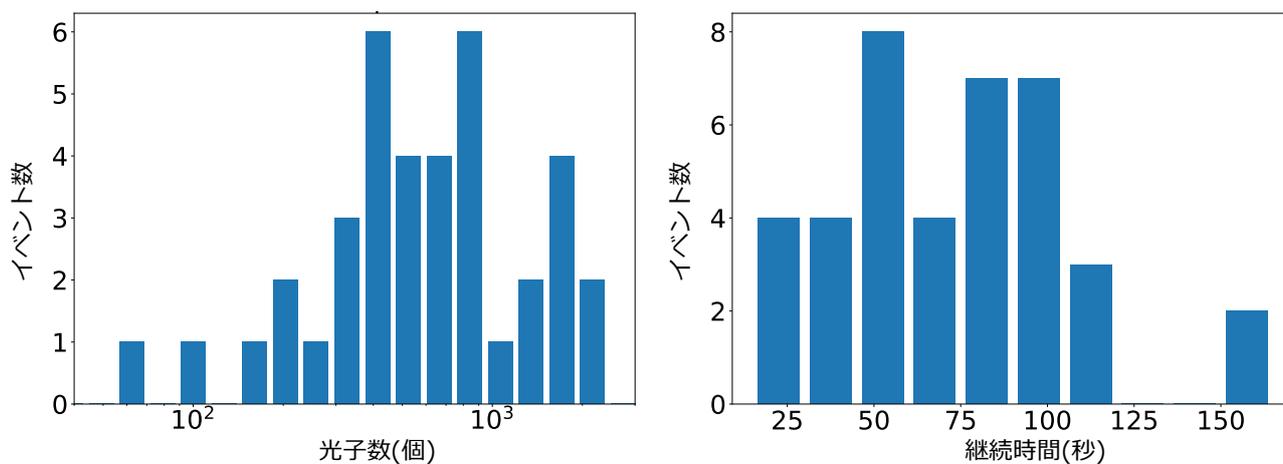


図 4.10 光子数と継続時間のヒストグラム

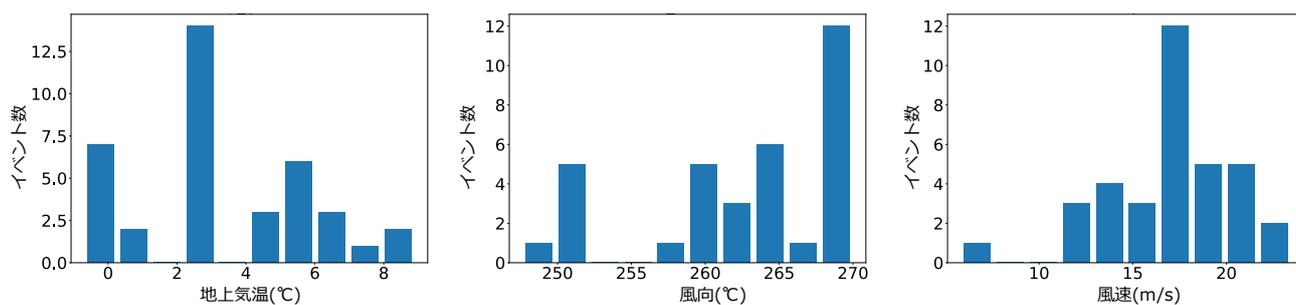


図 4.11 気温、風向、風速のヒストグラム

## 4.4 本章のまとめ

- 雷雲プロジェクトで観測した 2018 年度から 2022 年度の 5 年間のデータでイベントサーチを行い、39 個の雷雲ガンマ線イベントを発見した。
- 月ごとの検出個数では、12 月が最も多く、1 月、2 月の順に少なくなった。
- GROWTH 実験での検出個数と比較すると検出イベント数は 1/3 ほどであるが、これはそれぞれの検出器の有効面積の違いによって説明できる。

表 4.2

No.	検出時刻 (JST)	ID	強度	継続時間 (秒)	光子数 (個)	風速 (m/s)	風向 (degree)	温度 (°C)	気温 (°C)
1	2018/12/18 23:41:48	ID015	14.7	50.0±3.54	403±20.07	14.20 ± 0.78	270	16.8	8.1
2	2021/01/02 8:16:28	ID028	8.4	65.0±3.54	331±18.19	14.31 ± 0.78	259.62	16.7	4.3
3	2021/01/08 6:41:28	ID016	14	160.0±3.54	1273±35.68	14.85 ± 0.78	270	13.5	0
4	2021/01/08 17:55:48	ID012	8.8	80.0±3.54	511±22.61	17.63 ± 0.78	257.33	9.8	0.1
5	2021/01/09 6:03:24	ID012	20.3	100.0±3.54	771±27.77	12.57 ± 0.78	264.12	11.5	0
6	2021/01/09 6:04:54	ID014	13.4	75.0±3.54	474±21.77	12.57 ± 0.78	264.12	10.4	0
7	2021/02/03 3:16:14	ID018	31.5	80.0±3.54	995±31.54	17.50 ± 0.78	259.39	12.1	1
8	2021/02/16 6:48:24	ID016	7.3	40.0±3.54	206±14.35	18.16 ± 0.78	261.84	17.1	5.3
9	2021/12/19 12:20:18	ID038	35.4	50.0±3.54	761±27.59	13.53 ± 0.76	247.61	8.4	NA
10	2021/12/19 14:24:38	ID014	17.6	65.0±3.54	606±24.62	16.42 ± 0.78	270	19.5	6.3
11	2021/12/19 14:27:18	ID056	6.2	40.0±3.54	103±10.15	16.42 ± 0.78	270	6.5	5.8
12	2021/12/30 4:06:44	ID033	5.5	70.0±3.54	249±15.78	20.42 ± 0.78	264.57	29.7	6
13	2021/12/30 4:07:54	ID053	32.4	100.0±3.54	1540±39.24	20.42 ± 0.78	264.57	7.5	6
14	2021/12/30 4:07:58	ID015	6.0	15.0±3.54	68±8.25	20.42 ± 0.78	264.57	15.4	6
15	2021/12/30 4:08:34	ID062	9.0	20.0±3.54	158±12.57	20.42 ± 0.78	264.57	8.4	6
16	2021/12/30 9:33:34	ID018	6.8	90.0±3.54	443±21.05	19.71 ± 0.78	262.49	16	4.7
17	2022/1/4 5:58:34	ID028	184.4	55.0±3.54	2412±49.11	21.46 ± 0.7	NA	19.8	3.1
18	2022/2/16 7:32:44	ID042	21.1	100.0±3.54	895±29.92	16.73 ± 0.78	258.9	6.6	3
19	2022/2/16 7:33:48	ID052	9.8	90.0±3.54	502±22.41	16.73 ± 0.78	258.9	6.9	3
20	2022/2/16 7:33:58	ID043	8.8	115.0±3.54	626±25.02	16.73 ± 0.78	258.9	5.9	3
21	2022/12/6 21:49:34	ID014	49.4	90.0±3.54	1938±44.02	16.62 ± 0.78	261.08	23.3	7
22	2022/12/18 14:02:44	ID029	102.2	50.0±3.54	1453±38.12	NA	NA	24.7	2.8
23	2022/12/18 14:02:44	ID058	76.7	75.0±3.54	1525±39.05	NA	NA	8.2	2.8
24	2022/12/18 14:02:58	ID014	33.8	50.0±3.54	766±27.68	NA	NA	18.9	2.8
25	2022/12/19 8:56:28	ID079	10.3	105.0±3.54	624±24.98	NA	NA	5.2	6.1
26	2022/12/23 14:22:48	ID077	61.3	85.0±3.54	1748±41.81	19.04 ± 0.76	250.22	5.3	2.6
27	2022/12/23 14:23:08	ID066	45.7	75.0±3.54	1609±40.11	19.04 ± 0.76	250.22	5.9	2.6
28	2022/12/23 14:23:54	ID067	9.4	55.0±3.54	388±19.70	19.04 ± 0.76	250.22	5.6	2.6
29	2022/12/23 14:23:54	ID078	10.3	60.0±3.54	290±17.03	19.04 ± 0.76	250.22	6.4	2.6
30	2022/12/23 23:04:24	ID014	12.5	15.0±3.54	184±13.56	23.46 ± 0.78	268.43	17.1	-0.6
31	2022/12/23 23:15:34	ID084	34.9	55.0±3.54	778±27.89	21.90 ± 0.78	268.31	7.2	-0.7
32	2022/12/23 23:20:18	ID076	44.9	20.0±3.54	340±18.44	21.93 ± 0.78	270	11	-0.7
33	2023/1/1 18:00:34	ID084	10.0	115.0±3.54	853±29.21	13.31 ± 0.78	270	11.4	6.7
34	2023/1/9 16:42:38	ID062	7.7	80.0±3.54	412±20.30	15.64 ± 0.78	270	12.1	8.9
35	2023/1/9 17:19:24	ID044	9.6	100.0±3.54	452±21.26	14.09 ± 0.78	267.38	18.1	4.5
36	2023/1/29 22:52:18	ID046	79.0	165.0±3.54	3673±60.61	5.80 ± 0.77	250.55	7.5	0.5
37	2023/1/30 10:58:44	ID082	16.8	45.0±3.54	459±21.42	17.98 ± 0.78	270	6.5	2.2
38	2023/1/30 11:01:18	ID011	38.0	35.0±3.54	593±24.35	17.98 ± 0.78	270	12.9	2.2
39	2023/1/30 11:01:18	ID022	35.5	35.0±3.54	584±24.17	17.98 ± 0.78	270	11.6	2.2
ave			29.5	71.03	820.41	17.05	257.96	12.2	3.4

## 第 5 章

# 雷雲ガンマ線とレーダー観測の比較

ガンマ線観測のデータから雷雲ガンマ線イベントを探索した結果、39 個のイベントが見つかった。雷雲ガンマ線を放射する雷雲の特徴を解析するためには、ガンマ線の情報だけでなく気象情報と組み合わせて解析する必要がある。本章では、雷雲ガンマ線が検出された際の観測点上空の積乱雲の内部構造を調べるため、レーダーのデータの解析を行った。

### 5.1 XRAIN 気象レーダー

本研究では、国土交通省が運用する XRAIN(エクスレイン/eXtnded RAdar Information Network: 高性能レーダ雨量計ネットワーク)を使用する。XRAIN は、C バンド帯 (5 GHz 帯) と X バンド帯 (9 GHz 帯) の電波を用いたマルチパラメータのリアルタイム雨量観測システムである。2020 年 3 月末時点で、C バンドレーダーは全国に 26 箇所、X バンドマルチパラメータレーダーは全国に 39 箇所設置されており、全国の主要都市をカバーしている。

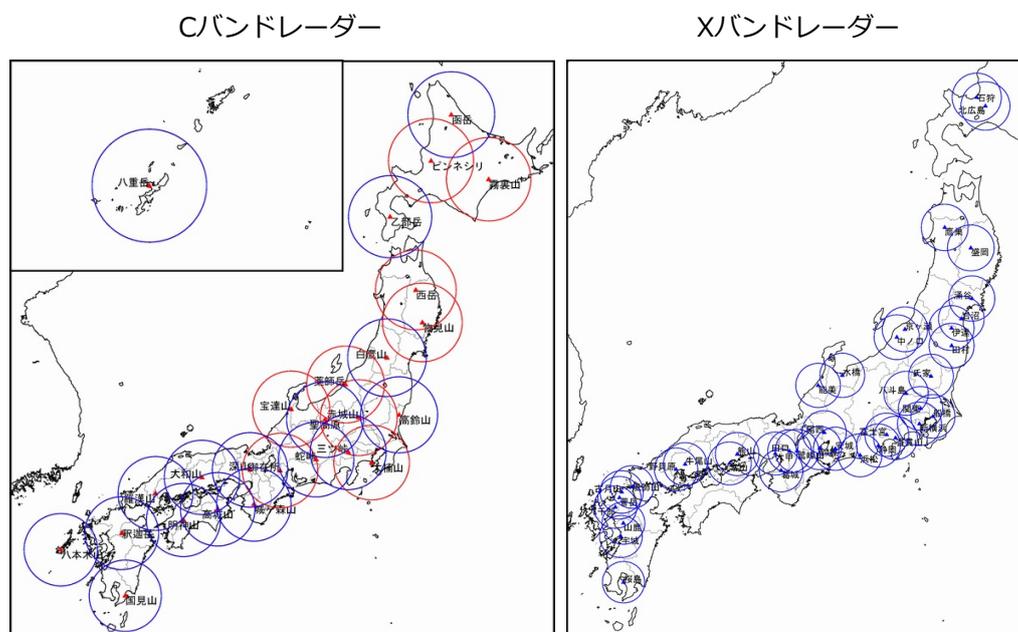


図 5.1 C バンドレーダー (左) と X バンドレーダー (右) の配置 (2021 年 10 月現在)。青円はマルチパラメータレーダの定量観測範囲、赤円は非マルチパラメータレーダの定量観測範囲を示す (一般財団法人 河川情報センター)。

ここからは武元清達 (2022), 小倉義光 (2019), 深尾昌一郎 (2009) を参考に、その概要を簡単に述べる。

### 5.1.1 気象レーダーの仕組み

気象レーダーは、雲の中の雨粒や氷の粒によって電磁波が散乱されることを利用して、雨雲の領域や降水の強度を観測する。現在使用されているレーダーでは、波長 3.2 cm、5.7 cm もしくは 10 cm のマイクロ波を細いビーム ( $1.3^\circ \sim 1.7^\circ$ ) のパルスにしてアンテナから送信する。雨粒の半径は mm 程度でレーダーの波長よりもはるかに小さいため、このマイクロ波は雨粒によってレイリー散乱される。レーダーでは、後方に散乱されてくる弱い電波 (レーダーエコー) をアンテナで受信し画像化する。反射電波が戻るまでの時間と方向から降水領域の範囲、レーダーエコーの強度から降水の強さを判断することができる。5.2 節に気象レーダーの仕組みを示す。

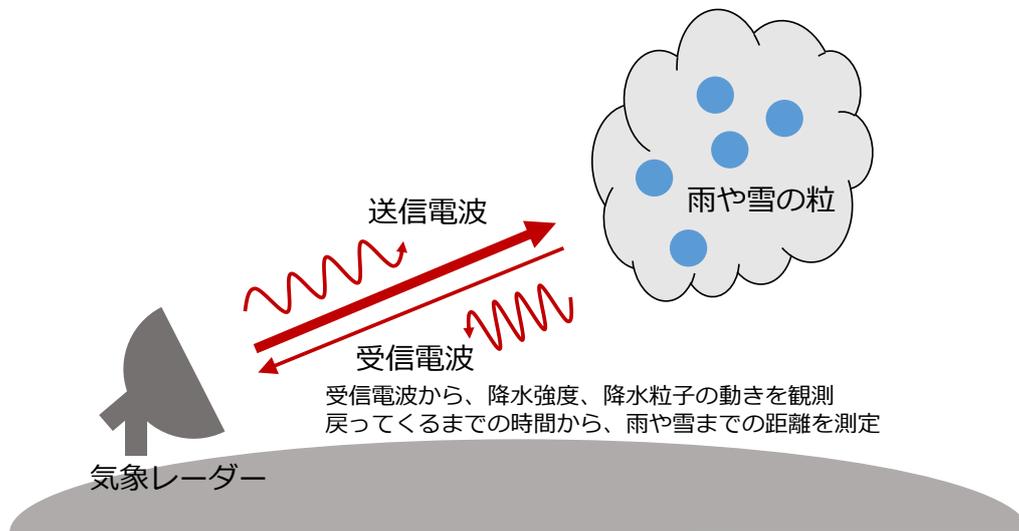


図 5.2 気象レーダーの仕組み。アンテナから送信された電波は、雷雲内の雨粒や氷粒によってレイリー散乱され、再びアンテナに戻る。受信電波から降水強度や降水粒子の動きを、電波が戻ってくるまでの時間から、降水粒子までの距離を測定する。

従来の気象レーダーは水平偏波のみを送受信することができ、レーダーエコーの強度を示す受信電力  $P_r$  は、レーダーのアンテナと雨雲との距離  $r$  や途中大気による減衰  $I^2$ 、レーダー反射因子  $Z$  を用いて、次のように示される。

$$P_r = \frac{CI^2Z}{r^2} \quad (5.1)$$

定数  $C$  は、送信電力、アンテナ利得、電波の波長、ビーム半値幅、パルス幅、光速度、などの値をまとめたもので、レーダー機器それぞれの固有の値である。

レーダー反射因子  $Z$  は、発射したビームの中に存在する降水粒子の半径  $D$  を用いて次のように示される。

$$Z^{\text{linear}} = \int_0^{\infty} D^6 N(D) dD \quad (\text{mm}^6 \text{m}^{-3}) \quad (5.2)$$

ここで、 $N(D)$  は粒径分布関数で、 $N(D)dD$  は単位体積中の直径  $D$  から  $D + dD$  の降水粒子の個数を表す。一般的にレーダー因子  $Z^{\text{linear}}$  は、レーダー反射強度  $Z$  に変換して表示される。

$$Z = 10 \log_{10} Z^{\text{linear}} \quad (\text{dBZ}) \quad (5.3)$$

このように、レーダー反射強度は、発射したビームの中に存在する降水粒子の半径  $D$  の 6 乗と降水粒子の総量に比例するという性質を持つ。すなわち、大きなレーダー反射強度は、粒径の大きな雨粒やあられの存在、もしくは多数の粒子の存在を示し、小さなレーダー反射強度は粒径の小さい霧粒や弱い雪の存在、もしくは少数の粒子の存在を示す。

### 5.1.2 マルチパラメータレーダー

XRAIN で使用されるマルチパラメータレーダーは、「二重偏波ドップラーレーダー」とも呼ばれ、水平偏波だけでなく、垂直偏波も同時に送受信して雨雲を観測する。そのため、従来の気象レーダーで取得できるレーダー因子  $Z^{\text{linear}}$  に加えて、水平偏波と垂直偏波の振幅や位相といった偏波パラメータも取得することができる。この偏波パラメータによって、降水粒子の形状（縦横比）や粒子のばらつきの判別も可能になった。

本研究で使用する偏波パラメータは、レーダー反射強度  $Z_h$ 、レーダー反射因子差  $Z_{dr}$ 、偏波間位相差変化率  $K_{dp}$ 、偏波間相関係数  $\rho_{hv}$  である (V.N. Bringi 2001)。

レーダー反射因子差  $Z_{dr}$  は、降水粒子の扁平度を示すパラメータで降水粒子の縦横比に依存する。水平偏波のレーダー反射強度  $Z_h$  と垂直偏波のレーダー反射強度  $Z_v$  を使って次のように示される。

$$Z = Z_h - Z_v = 10 \log_{10} Z_h^{\text{linear}} - 10 \log_{10} Z_v^{\text{linear}} = 10 \log_{10} \frac{Z_h^{\text{linear}}}{Z_v^{\text{linear}}} \text{ (dB)} \quad (5.4)$$

ここで、 $Z_h^{\text{linear}}$  と  $Z_v^{\text{linear}}$  はそれぞれ水平偏波と垂直偏波の反射因子である。式 5.4 より、降水粒子が横長であれば  $Z_{dr}$  が正の値を取り、縦長であれば負の値を取ることがわかる。一般的に落下中の雨粒は、粒径が小さい場合は表面張力の働きによってほぼ球形となる。したがって、霧雨のような小さい粒径の雨粒の  $Z_{dr}$  の値はおよそ 0 dB となる。しかし、雨粒は粒径が大きくなるにしたがって、空気抵抗を強く受けるようになり、扁平な形状になる。そのため大きな粒径の雨粒の  $Z_{dr}$  は大きな正の値をとる。また、表面が融解した雪片は他の雪片と合体して水平方向に成長するため、同様に  $Z_{dr}$  は大きな正の値となる。一方であられの場合は球形もしくは紡錘形をしており、他の粒子と比べると縦長になるため、 $Z_{dr}$  は、0 dBZ もしくは負の値を取る。

偏波間位相差  $\phi_{dp}$  は、水平偏波と垂直偏波の位相差を示す。レーダーからの送信波が空間中を伝播する際、散乱体があると位相変化が生じる。水平偏波と垂直偏波の位相変化をそれぞれ、 $\phi_{hh}$ 、 $\phi_{vv}$  とすると、偏波間位相差  $\phi_{dp}$  は以下のように示せる。

$$\phi_{dp} = \phi_{hh} - \phi_{vv} \quad (5.5)$$

例えば、粒径の大きい雨粒のような扁平粒子では、水平偏波による位相の遅れが垂直偏波による位相の遅れに比べて大きくなるため、 $\phi_{dp}$  は正の値を取る。

偏波間位相差  $\phi_{dp}$  の距離に対する変化率が偏波間位相差変化率  $K_{dp}$  で、降水強度を推定する上で重要なパラメータとして近年注目されている。(Sachidananda and Zrnich, 1985) これは、電波が伝播する経路乗の 2 点間を往復する間に生じる偏波間位相差  $\phi_{dp}$  の単位距離当たりの差であり、アンテナからの距離  $r_1$  と  $r_2$  での偏波間位相差をそれぞれ  $\phi_{dp}(r_1)$  と  $\phi_{dp}(r_2)$  とし、次のように表される。

$$\kappa_{dp} = \frac{\phi_{dp}(r_2) - \phi_{dp}(r_1)}{2(r_2 - r_1)} \quad (5.6)$$

粒径が小さい球形の雨粒が多く存在する場合は、 $\phi_{hh}$  と  $\phi_{vv}$  の単位距離あたりの変化はほぼ同じであるため、 $\kappa_{dp}$  は 0 に近い値を取る。逆に、粒径が大きい扁平な粒子が多く存在する場合は、水平偏波による位相の遅れが垂直偏波に比べて大きくなり、 $\kappa_{dp}$  は正の値を取る。

偏波間相関係数  $\rho_{hv}$  は、水平偏波と垂直偏波の受信強度の相関係数で、次のように示される。

$$\rho_{hv} = \frac{|\langle n s_{vv} s_{hh}^* \rangle|}{\langle n |s_{hh}|^2 \rangle^{1/2} \langle n |s_{vv}|^2 \rangle^{1/2}} \quad (5.7)$$

ここで、 $\langle * \rangle$  は期待値、 $n$  は単位体積あたりの粒子の大きさ分布を示し、 $\langle n \rangle$  は粒径分布に応じた粒子数の重みを考慮した期待値であることを示す。 $s$  は受信強度を表し、添字の一つ目は受信偏波、二つ目は送信偏波を示す。 $\rho_{hv}$  は粒径の不揃いを示すパラメータである。散乱体積内に異なる種類の粒子が混在している場合、水平偏波と垂直偏波の相関である  $\rho_{hv}$  の値は低下する。また、ひょうのような大粒で形状がいびつな粒子の場合は、粒子の振動や回転によって水平偏波と垂直偏波の信号強度比が変動するため、 $\rho_{hv}$  の値が低下する (深尾昌一郎 2009)。

### 5.1.3 XRAIN 能美レーダー

本研究では石川県能美市の能美局に設置されているレーダー (XRAIN 能美レーダー) のデータを使用する。観測範囲は 80 km である。図 5.3 に能美レーダーの位置と観測範囲、2023 年度のコガモ検出器の設置場所を示す。XRAIN 能美レーダーは PPI (plan position indicator) ボリュームスキャンと呼ばれる手法を用いて、レーダーエコーを三次元で測定している。図 5.4(左) に PPI ボリュームスキャンのイメージ図を示す。PPI スキャンでは一定仰角で全周観測を行い、取得されるデータは図 5.4 のような形で描画できる。仰角を変えて複数の PPI 観測を行うことをボリュームスキャン観測といい、これによって三次元でエコーを測定することができる。図 5.4(右) に能美レーダーの運用方法を示す。12 個の仰角が設定されており、5 分間で全ての仰角を走査する。能美レーダーでは、 $1.0^\circ$ 、 $1.7^\circ$ 、 $2.6^\circ$ 、 $3.6^\circ$ 、 $4.8^\circ$ 、 $6.1^\circ$ 、 $7.5^\circ$ 、 $9.0^\circ$ 、 $10.6^\circ$ 、 $12.3^\circ$ 、 $14.1^\circ$ 、 $16.0^\circ$  に設定されている。12 仰角のうち 2 番目と 3 番目は奇数分と偶数分に観測され、残りの 1 番目と 4 番目以降の 10 の仰角は 1 分間で 2 仰角ずつ、5 分間かけて観測される。

XRAIN 能美レーダーと金沢市内の距離は約 15 km である。そのため、 $1.0^\circ$  仰角の観測の時は金沢上空の約 260 m、 $16.0^\circ$  仰角の時は約 4300 m を観測していることになる。

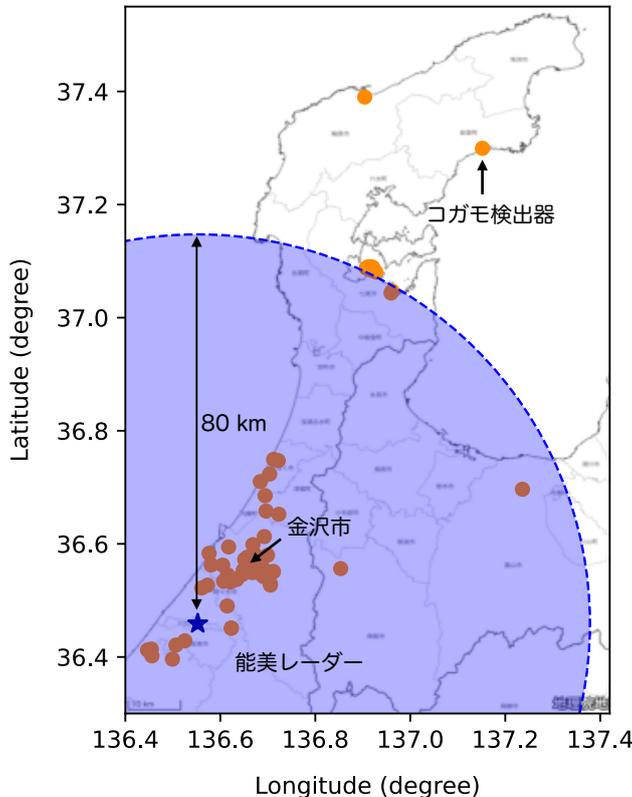


図 5.3 XRAIN 能美レーダーの位置を青い星、観測範囲 (80 km) を青い円で示す。オレンジは 2023 年度のコガモ検出器の設置場所を示す。

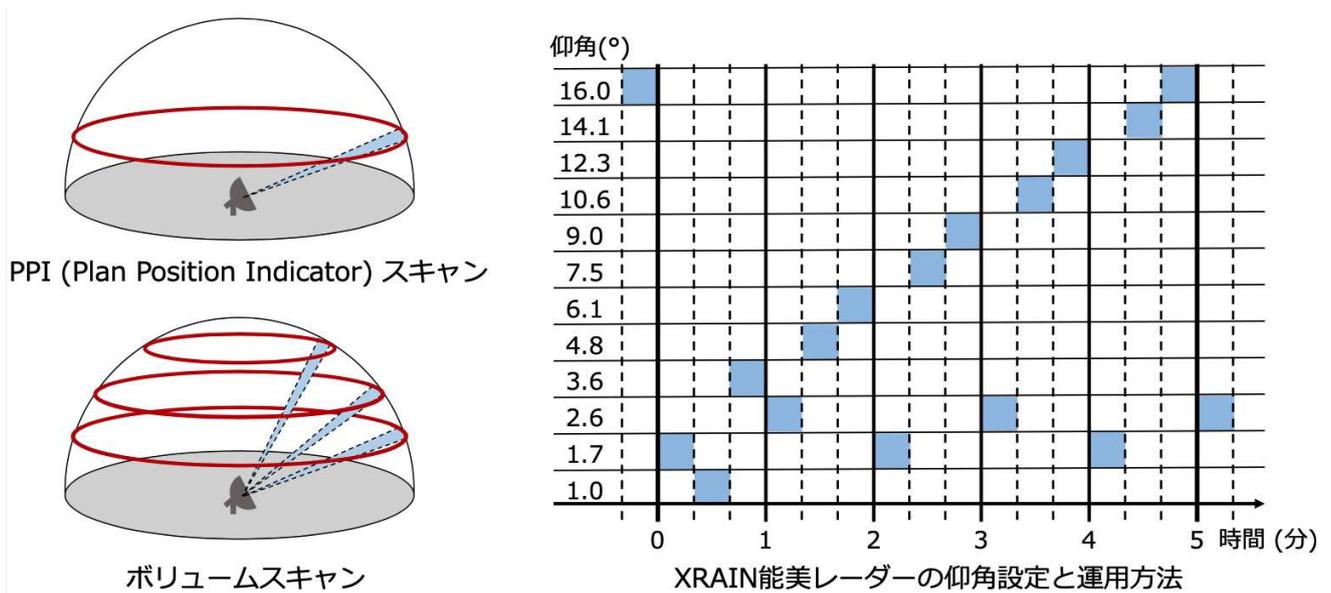


図5.4 (左)PPI スキャンと PPI ボリュームスキャンの概要。一定仰角で全集観測を行うことを PPI スキャン、仰角を変えて複数の仰角で PPI スキャンを行うことをボリュームスキャンという。(右)XRAIN 能美レーダーの仰角設定と運用方法。左の数字は仰角を示す。設定された 12 仰角のスカンを 5 分間で行う。2 番目と 3 番目の仰角は合成雨量データの取得のために 1 分ごとに交互に行い、残りの 10 個の仰角は 1 分間で 2 仰角ずつ、5 分間かけて観測される。

## 5.2 降水粒子判別法

雷雲ガンマ線を発生させる雷雲の内部の降水粒子の三次元分布を調べるため、「降水粒子判別法」に基づいて XRAIN データの解析を行う。ガンマ線が発生するような雷雲の内部には、あられや氷晶に帯電した降水粒子が存在し、これらが形成する電場によって電子が加速され、ガンマ線が放出されていると考えられている。そのため、どのような種類の降水粒子がどの高度に位置しているかを推定することで、積乱雲の発達どの段階でガンマ線が検出されているのか、また、雷雲内はどのような電荷構造になっているのかを考察することができる。

本研究では、X バンド偏波レーダー用に開発された降水粒子判別法 (Kouketsu et al. 2015) で、雷雲内部の降水粒子分布を推定する。この粒子判別法は名古屋大学宇宙地球環境研究所気象学研究室で長く研究されており、今回のデータの解析は同研究室篠田太郎氏より提供していただいた粒子判別の解析コードを使用した。

粒子判別法では、マルチパラメーターレーダーで観測できる偏波パラメータを用いて 8 つの粒子に判別することができる。判別する粒子のカテゴリは、①霧雨 (drizzle:DZ)、②雨 (rain:RN)、③湿雪 (wet snow:WS)、④乾雪 (dry snow:DS)、⑤氷晶 (ice crystal:IC)、⑥乾霰 (dry graupel:DG)、⑦湿霰 (wet graupel:WG)、⑧雨と雹の混合物 (rain and hail:RH) である。

あられについては、⑥乾霰 (DG) と⑦湿霰 (WG) の 2 種類がある。乾霰 (DG) は上昇気流が比較的弱く、過冷却水滴が少ない環境で、雲粒が少しずつ凍結してできた霰のことで、表面が乾燥していると想定されている。一方、湿霰 (WG) は上昇気流が比較的強く、過冷却水滴が多い環境で、大量の雲粒が霰の表面で大量に凍結してできた粒子である。凍結する際に潜熱放出の影響を受けて加熱されるため、霰の表面は少し溶けて濡れていると想定される。また、乾霰よりも湿霰の粒径の方がやや大きいと考えられている。

粒子判別は以下の手順で行う。粒子判別では、偏波パラメータと相対湿度を同時に考慮する必要がある。各パラメー

タごとに、8つの降水粒子カテゴリの存在確率を0から1の間で示すメンバーシップ関数を定義する。このメンバーシップ関数にはベータ関数 (5.8) を用いる。

$$\beta = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-m}{a}\right)^{2b}} \quad (5.8)$$

$m$  はベータ関数の中央値、 $a$  は関数の幅 (関数の値が 0.5 以上となる幅)、 $b$  は関数の裾野の部分を決める係数である。図 5.5 にメンバーシップ関数の例を示す。例えば、水平偏波の反射強度  $Z_h$  が 30 dBZ の時は、雨、湿雪、氷晶の可能性が高いが、他の粒子の可能性は低い。

本研究では、まずマルチパラメータレーダで観測された極座標データを3次元直交座標系に直した CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) データを作成する。そして、各格子点ごとに観測された、レーダー反射強度  $Z_h$ 、レーダー反射因子差  $Z_{dr}$ 、偏波間位相差変化率  $K_{dp}$ 、偏波間相関係数  $\rho_{hv}$ 、及び周辺の高層気象観測点の気温の鉛直プロファイルを入力し、メンバー関数値に変換して、各降水粒子カテゴリの存在可能性を評価する。

続いて、存在可能性が一番高い降水粒子カテゴリを判定する。判定は、降水粒子カテゴリごとに入力パラメータのメンバー関数値を積算し、その大小を比較することで行う。各パラメータのメンバーシップ関数の積であるルール・ストレングス (rule strength: RS) の式を以下に示す。

$$RS_j = \prod_{i=1}^5 \mu_{i,j} \quad (5.9)$$

ここで、 $\prod$  は要素の総乗を示し、 $i$  は入力パラメータの種類 (1:  $Z_h$ , 2:  $Z_{dr}$ , 3:  $K_{dp}$ , 4:  $\rho_{hv}$ , 5: 気温) を、 $j$  は降水粒子カテゴリを示す。また、 $\mu_{i,j}$  は、入力パラメータ  $i$ 、降水粒子  $j$  についてのメンバー関数値で、0 から 1 までの値を取る。計算されたルールストレングス値のうち、最も値が大きくなる降水粒子を、その格子点において最も卓越して存在している降水粒子とする。

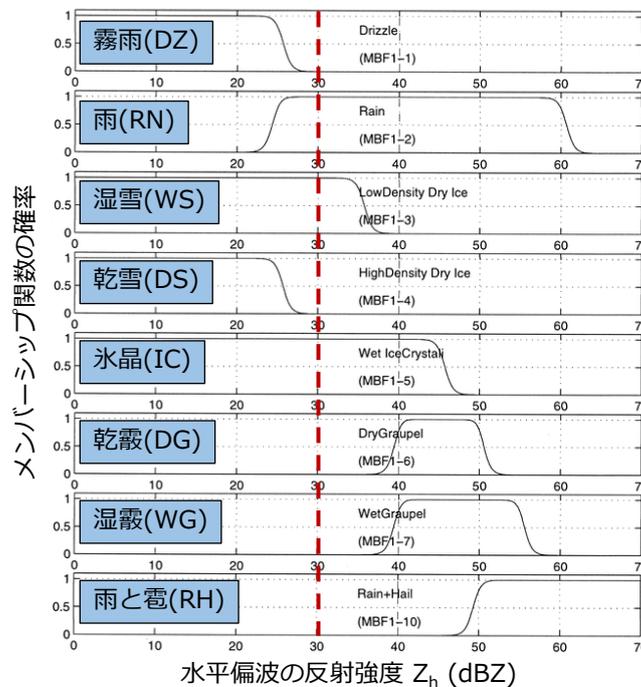


図 5.5 粒子判別におけるメンバーシップ関数の例。8つの粒子カテゴリそれぞれの、水平偏波の反射強度のメンバーシップ関数を示す。例えば、水平偏波の反射強度  $Z_h$  が 30 dBZ (赤点線) の時は、雨、湿雪、氷晶の可能性が高いが、他の粒子の可能性は低いことを示す。図は Liu and Chandrasekar (2000) を改変。

## 5.3 解析結果

雷雲ガンマ線をもたらした積乱雲の偏波パラメータや降水粒子の三次元分布とその時間変化を調べるため、5分間隔で作成した CAPPI データから偏波パラメータと降水粒子判別の鉛直断面図を作成した。5分は XRAIN 能美レーダーの1回のボリュームスキャンと同じ間隔で、全ての仰角を観測するのにかかる時間である。鉛直断面の中心位置は、雷雲ガンマ線を検出したコガモ検出器の設置位置とした。本節では、表 4.2 のイベント No.5 を例にとり、レーダーデータの解析結果を示す。

### 5.3.1 コガモ検出器上空の雷雲の鉛直分布

図 5.6 に、2021 年 1 月 9 日 6 時 3 分に雷雲ガンマ線を観測したコガモ検出器 ID12 の上空の検出時刻 5 分前、検出時刻、検出時刻 5 分後における雷雲の解析結果を示す。

図 5.6 の上段は、高度 2000 m のレーダー反射強度  $Z_h$  の水平断面図である。雷雲ガンマ線が検出されたコガモ (ID12 と ID14) を黒い星、検出されなかったコガモを白抜きの星で示す。また、図 5.6 中段はコガモ検出器上空の鉛直断面、図 5.6 下段は降水粒子の鉛直断面を示す。

高度 2000 m の水平断面によると、検出時刻付近で発達した降水エコーがコガモ検出器上空を西方向から東方向へ通過している。また、レーダー反射強度  $Z_h$  の鉛直断面図では、35 dBZ 以上の領域がコガモ検出器の上空を通過しており、その内部にはさらに反射強度の大きい領域 ( $Z_h > 40$  dBZ) が存在している。

レーダー反射強度の時間変化に注目すると、検出時刻の 5 分前には、35 dBZ 以上の反射強度を持つ領域が高度 1000 m から 4500 m に達しており、40 dBZ 以上の領域も 1250 m から 4000 m まで発達しているのに対し、検出時刻には 35 dBZ 以上の領域が地上から 4250 m に下がっている。さらに検出時刻の 5 分後には 3500 m まで降下している。反射強度が 35 dBZ 以上の領域は対流性の特徴を持っており、この領域で強い上昇気流が発生していると考えられる。また強い上昇気流がある環境下では、氷の粒が巻き上げられて成長するため、霰や雹といった大きな氷の粒が生成されやすい。そのため、このような反射強度の強い領域には霰や雹が存在すると考えられる (Dixon and Wiener 1993, Johnson et al. 1998, Yang et al. 2020)。

下段の降水粒子分布の結果では、全ての時刻で下層に「湿霰」、その直上に「乾霰」が判定されている。また検出時刻の 5 分前から 5 分後にかけて、その上端の高度が降下している。この結果は、中段の反射強度の断面図の結果とも一致し、検出時刻にはコガモの上空にたくさんの霰が存在していたと考えられる。

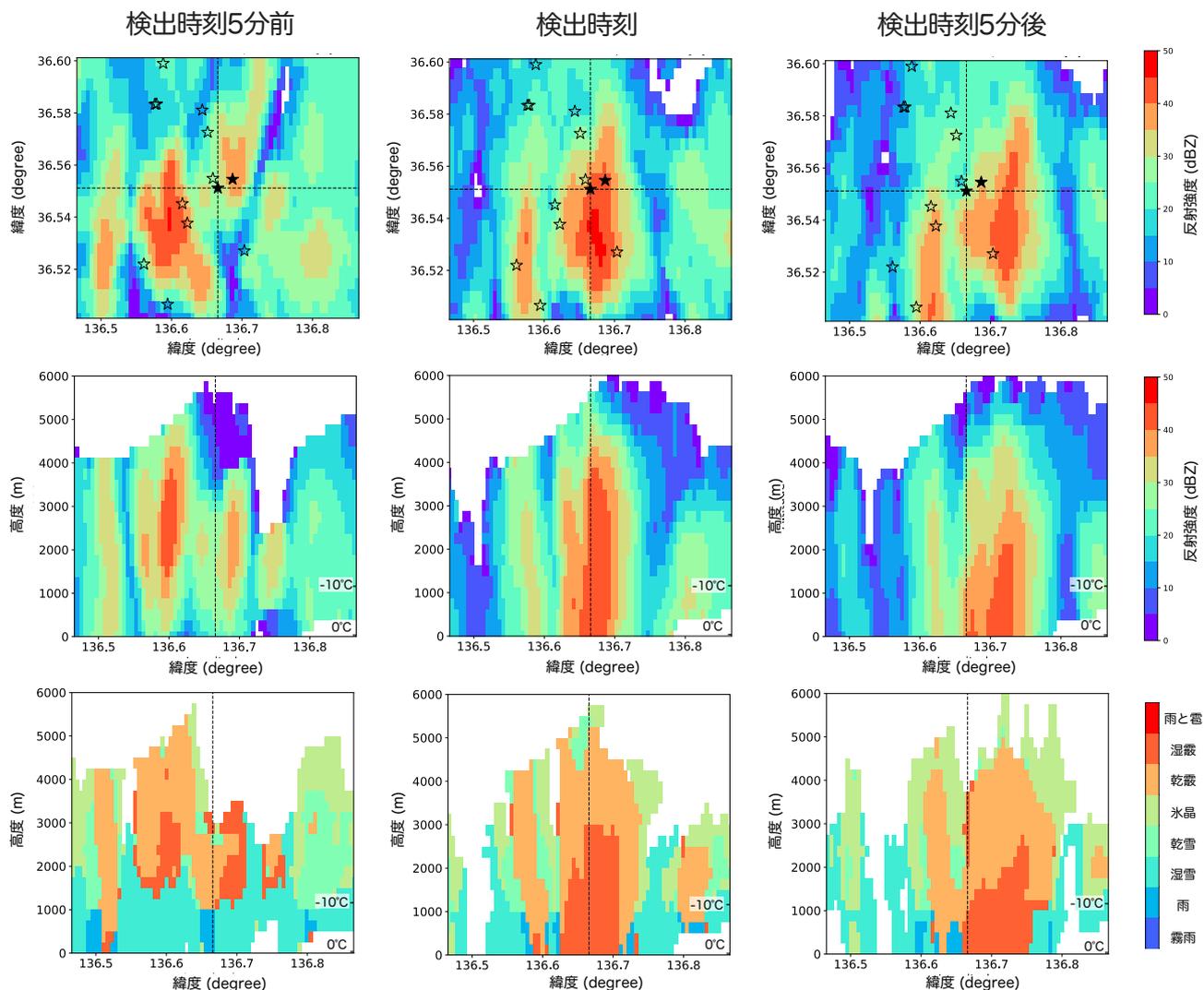


図 5.6 (上)2021/01/09 06:03:48JST に ID12 で観測された雷雲ガンマ線の検出時刻の 5 分前、検出時刻、検出時刻の 5 分後における、高度 2000 m の反射強度の水平断面。黒い星は雷雲ガンマ線を観測した ID12 の設置位置。(中)ID12 の上空の反射強度の鉛直断面。点線は ID12 の設置場所の軽度を示す。(下)ID12 の上空の降水粒子分布の鉛直断面。点線は ID12 の設置場所の軽度を示す。

### 5.3.2 鉛直分布の時間変化

一般的に、積乱雲のような降水セルは、発達期、最盛期、衰退期の三つの段階を経て一生を終える。一般的に一つの降水セルの寿命は 30 分から 1 時間程度である。図 5.7 に、各発達段階の特徴を示す。発達期には上昇気流が強まり、雲内には雲粒や雨粒、氷晶などが生成される。この段階では上昇気流が強いため、生成されたこれらの降水粒子が地上に落ちてくることはない。やがて雲頂が対流圏上部(約高度 10 km)に達する。この頃には雲内にはさらに雨粒が生成されている。また、氷晶などの小さい水の粒が成長して、雪、霰などの大きな水の粒も生成されている。このような大きな水や水の粒は落下速度が大きいため、上昇気流に打ち勝ち、落下を始める。この時に周囲の空気を一緒に引きずり下ろすため、下降流が始まる。これが最盛期である。氷粒子が 0 度の層を通過する際の融解や、雨粒の蒸発によって空気が冷やされ、さらに下降流が強まっていく。最終的に上昇流が消滅し、衰退期に移行する。雷雲内は全て下降流となり、残っていた氷粒子や雨粒も地上に降水として降るか、空気中で蒸発することによって、雲が消える。

今回の事例では、対流エコーと霰の高度が時間と共に降下している。このことから、積乱雲の衰退期に、上昇気流が弱まり上空の霰が落下して地上に到達したタイミングで、雷雲ガンマ線が検出されたと考えられる。

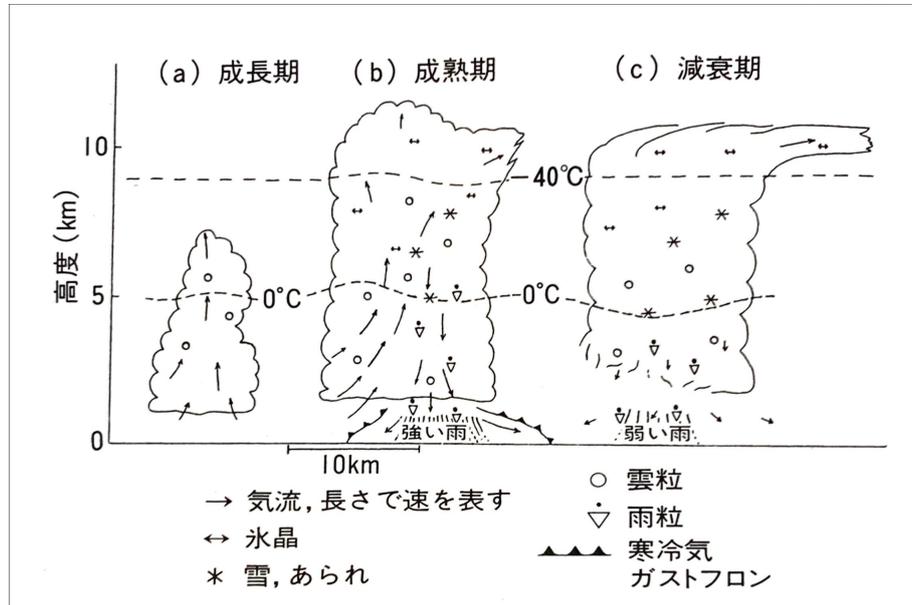


図 5.7 積乱雲の各発達段階の特徴。積乱雲の発達段階は、発達期、最盛期、衰退期の三つに大別できる(小倉義光 2019)。

### 5.3.3 電荷構造の推定

積乱雲は発達期から最盛期にかけて強い上昇気流が発生し、着氷電荷分離機構(第 2.1 節参照)によって三極構造ができる。着氷電荷分離機構では、雷雲内の雲水量と温度によって、霰と氷晶が帯電する富豪と電荷量を示しており、一般的に雷雲内部では下層は正に帯電したあられ、 $-10^{\circ}\text{C}$  層付近に負に帯電したあられと正に帯電した氷晶、上層には正に帯電した氷晶の構造になると考えられている(Takahashi 1978)。衰退期には、発達期と最盛期で上昇気流が発生していた積乱雲の中心付近で下降流が形成される。特に下降流が強い積乱雲の下層では、降水粒子の衝突がほぼ起こらず、新たな電荷分離は発生しないと考えられる。そのため、最盛期にかけて形成されていた電荷の層は、その構造を維持しながら落下すると推定される。すなわち、 $-10^{\circ}\text{C}$  層より下層の正に帯電したあられ粒子と、 $-10^{\circ}\text{C}$  層より上層の負に帯電した霰や氷晶がそれぞれの電荷を維持したまま下降し地上に到達する。図 5.6 の下段には、輪島の高層気象観測データから推定した  $0^{\circ}\text{C}$  と  $-10^{\circ}\text{C}$  の高度を追記している。 $0^{\circ}\text{C}$  の層は高度 35 m、 $-10^{\circ}\text{C}$  の層は 1160 m であった。検出時刻には、コガモ検出器の上空の雷雲の下層に「湿霰」、その上層には「乾霰」の領域が存在している。着氷電荷分離機構を考慮すると、地上付近の霰粒子は正に、 $-10^{\circ}\text{C}$  付近の霰粒子は負にそれぞれ帯電していると仮定できる。この二つの層の間には、下向きの電場が形成され、電子が地上向きに加速されていると考えられる。時間と共に霰の層が下方へ移動していることから、電子加速領域も降下していると考えられる。以上のことから、上昇気流が弱まった積乱雲の衰退期に、制動放射ガンマ線を放射する電子加速領域が地上のコガモ検出器の近くに到達し、地上で雷雲ガンマ線が検出されていると考えられる。

検出時刻の検出器上空の雷雲では、霰の領域が地上から高度 3000 m まで存在し、 $0^{\circ}\text{C}$  の層は高度 35 m、 $-10^{\circ}\text{C}$  の層は 1160 m であった。このことから、雷雲ガンマ線が地上で検出できている時の電場領域の大体の高度は地上からおよそ 1 km の間であり、電子加速領域の長さは数百から 1 km 程度であると推定できる。

## 5.4 本章のまとめ

- XRAIN 能美レーダーのデータを用いて、雷雲ガンマ線が検出されたときの雷雲の反射強度と降水粒子の空間分布を調べた。
- 雷雲ガンマ線の検出時には、検出器の上空約 3 km にわたって、高い反射強度の領域 (>35 dBZ) と霰の領域が広がっていた。着氷電荷分離機構を考慮すると、地上付近の霰粒子は正に、 $-10^{\circ}\text{C}$  付近の霰粒子は負にそれぞれ帯電していると推定され、その間の電場領域で電子が加速されガンマ線が放射されていたと考えられる。
- 検出時刻の 5 分前から 5 分後を比較すると、高い反射強度の領域 (>35 dBZ) と霰の領域の高度が低下していることがわかる。これにより、上昇気流が弱まって霰が地上に落ちてくる雷雲の衰退期に、雷雲ガンマ線が地上で検出されていたと考えられる。

## 第6章

# ガンマ線観測とレーダー観測の総合解析

本章では、2021年度に観測された特徴的なイベントの解析結果を述べる。これは [Tsurumi et al. \(2023\)](#) として、2023年に *Geophysical Research Letters* に受理された論文の内容である。

### 6.1 イベントの概要

2021年12月30日4時8分(日本時間,JST)ごろ、金沢市内の5個のコガモ検出器が一つの雷雲からのガンマ線を検出した。この5地点での検出は、雷雲プロジェクトが立ち上がって以来、最大となる。また同時刻に、電波を用いた雷マッピングシステムである FALMA (Fast Antenna Lightning Mapping Array) と DALMA (Discone Antenna Lightning Mapping Array) によって雷放電も観測された。

FALMA と DALMA は岐阜大学が運用する電波観測ネットワークである。FALMA は低周波数帯域 (0.5–500 kHz) の雷マッピングシステムで、冬季の観測では雷放電位置の二次元での評定と、電界変化の波形から雷放電の種類を特定することができる ([Wu et al. 2018](#))。位置の評定誤差は 200 m ほどである ([Wang et al. 2022](#))。また、DALMA は中周波数帯域から高周波数帯域 (1.0–12.5 MHz) で動作する雷マッピングシステムで、冬季の観測で雷放電の位置を三次元で観測することができる ([Wang et al. 2022](#))。位置の評定誤差は 50 m ほどである ([Wu et al. 2020](#))。

図 6.1 は 5 地点で検出された 3–10 MeV の 8 秒ビンのライトカーブである。統計誤差を  $1\sigma$  でつけており、 $3.5\sigma$  以上のビンに赤マークをつけており、それぞれのイベントの継続時間は  $3.5\sigma$  を超えたビンの数にビン幅をかけたものと定義した。それぞれのイベントの継続時間は表 6.1 に示す。ライトカーブの時刻原点は FALMA と DALMA によって雷放電が観測された 2021 年 12 月 30 日 04:08:34.8565 JST である。このうち ID62 と ID53 は雷放電に同期して雷雲ガンマ線の増光が終了している瞬間途絶イベントであった。

図 6.2 には検出時刻である 4 時 8 分を含む 4 時 6 分から 9 分の合成雨量データを示す。雷雲ガンマ線を検出した 5 台のコガモを赤、検出なかったコガモを灰色で示している。この時の風の吹いてくる方向を合成雨量データから推定したところ、風向は  $266.6^\circ$  (北向きを  $0^\circ$ 、時計回り) で、風速は  $21.15 \pm 0.78$  m/s であり、強い西風が吹いていた。検出時刻に 5 台のコガモの上空を発達した雷雲が西南西から東北東方向に移動していったことがわかる。

### 6.2 雷雲ガンマ線の放射領域の推定

雷雲ガンマ線が放射されていた領域を推定する。先行研究でも近年は雷雲ガンマ線イベントの検出数は増えているものの、これまでの 1 地点での観測がほとんどであった。そのため、見積もることができる放射領域の大きさは、西向きの風に平行な東西方向の広がりのみであった ([Wada et al. 2019](#))。今回ガンマ線グローが検出された 5 地点は図 6.3(右) に示すように南北方向に並んでおり、それぞれの放射領域を組み合わせることによって、南北方向の放射領域の大きさも推定することが可能になる。

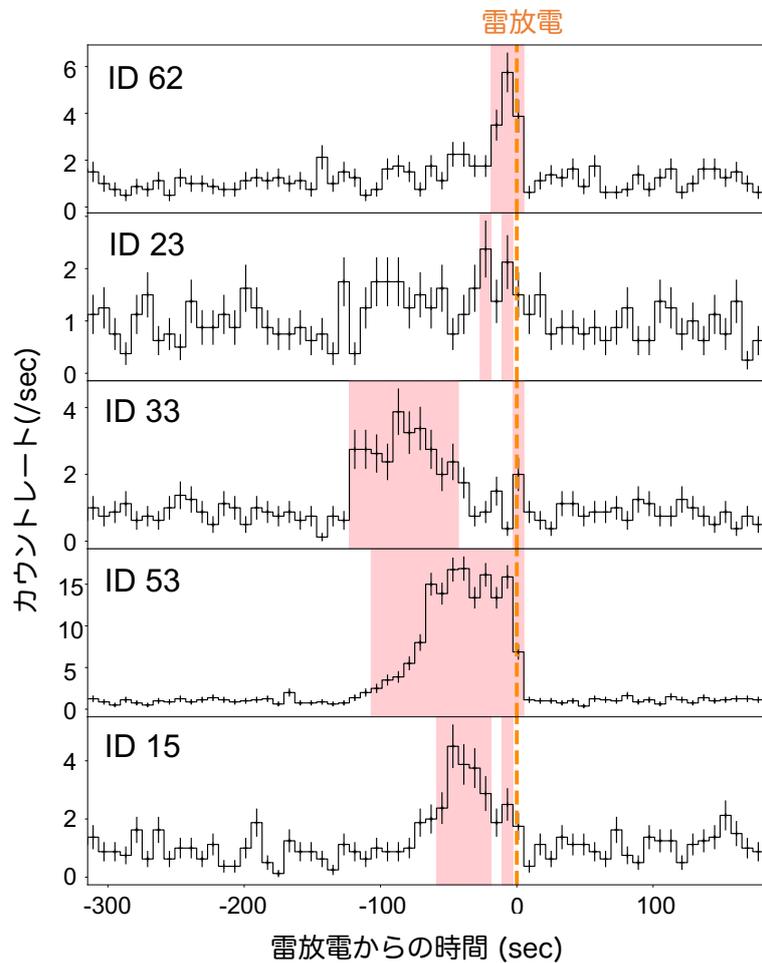


図 6.1 2021 年 12 月 30 日 4 時 8 分ごろに 5 地点で観測された雷雲ガンマ線の 3–10 MeV の 8 秒ビンのライトカーブ。時刻原点は FALMA と DALMA によって雷放電が観測された 2021/12/30 04:08:34.8565 JST。誤差は  $1\sigma$  でつけた。 $3.5\sigma$  以上のビンに赤マークをつけた。図は [Tsurumi et al. \(2023\)](#) から引用。

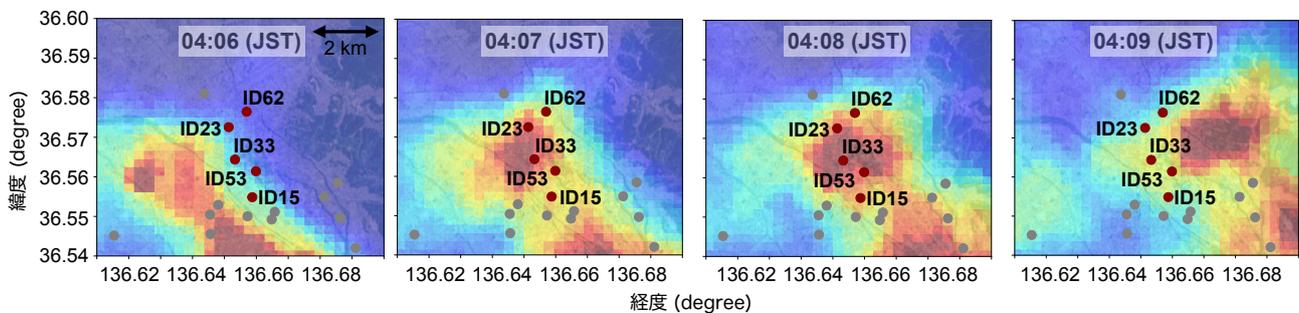


図 6.2 2021 年 12 月 30 日 4 時 6 分から 9 分の 4 分間の合成雨量データ。赤い丸は雷雲ガンマ線を検出したコガモ、灰色は検出しなかったコガモの位置を示す。図は [Tsurumi et al. \(2023\)](#) から引用。

表 6.1 2021 年 12 月 30 日に 5 台で観測された雷雲ガンマ線の継続時間と放射領域の大きさ。放射領域の大きさは、風速に継続時間をかけて算出した。

ID	継続時間 (s)	距離 (m)
62	24	507.6
23	24	507.6
33	80	1692
53	112	2368.8
15	56	1184.4

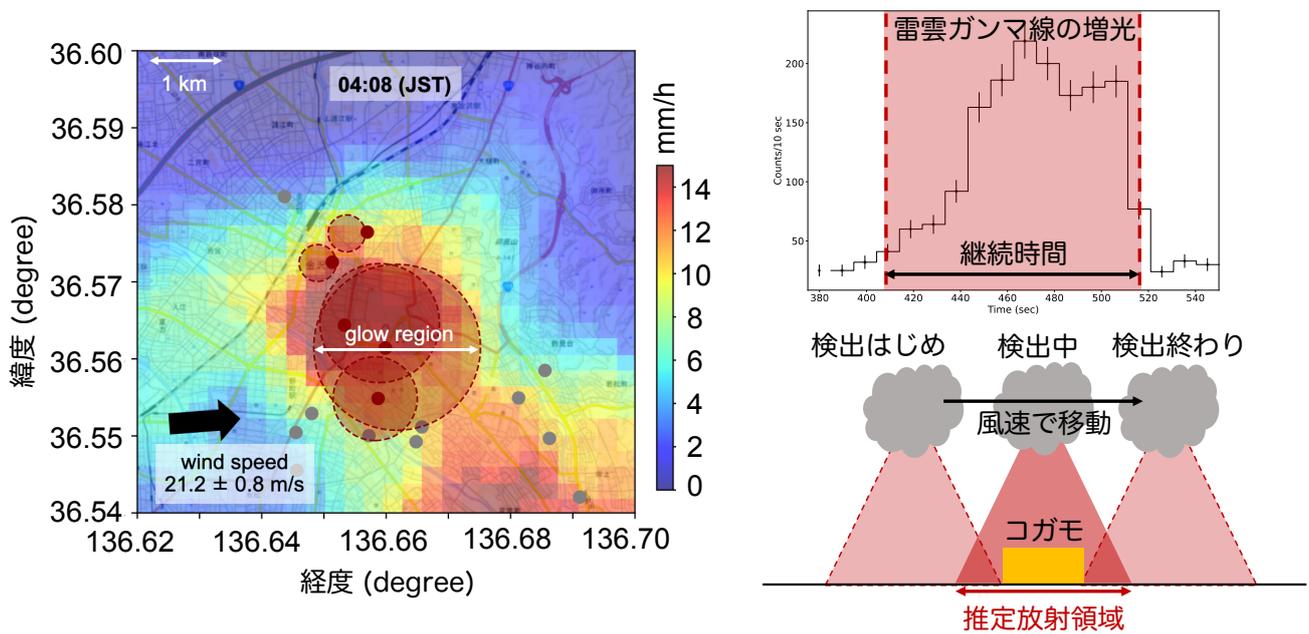


図 6.3 雷雲ガンマ線の放射域の推定。図は Tsurumi et al. (2023) から引用。

1 地点での見積もりは次のように行う。図 6.3(右) に示すように、推定放射領域を真円であると仮定する。雷雲ガンマ線を放射する雲がコガモの上空を風速で移動していったと考え、これまでの研究に基づき、ほぼ真下にガンマ線が降り注いでいるという仮定をする場合、放射領域の直径は、検出のはじめと終わりの時間差 (イベントの継続時間) に風速をかけることで算出できる。例えば、一番継続時間の長い ID53 の継続時間は 112 秒なので、放射領域の直径は 2.3 km になる。表 6.1 に 5 台の雷雲ガンマ線の継続時間と放射領域の大きさをまとめる。図 6.3(左) が 5 台の雷雲ガンマ線の放射領域をプロットしたものである。これによると、今回のガンマ線の放射領域は東西に 2 km、南北に 2.5 km 程度広がっていたことがわかった。

### 6.3 雷放電の発生位置と雷雲ガンマ線の放射域の比較

雷雲ガンマ線を観測した 5 台のコガモ検出器のうち ID62 と ID53 は雷放電に伴って増光が終了していた。図 6.4 に ID62 と ID53 の 3–10 MeV の 2 秒ビンのライトカーブを示す。オレンジの点線は、岐阜大学の FALMA と DALMA によって観測された雷放電の時刻を示しており、雷放電に伴って雷雲ガンマ線の増光が突然終了していることがわか

る。これは先行研究でも報告されており (Hisadomi et al. 2021, Tsuchiya et al. 2013, Wada et al. 2018, Wada et al. 2019)、「瞬間途絶イベント」と呼ばれている。

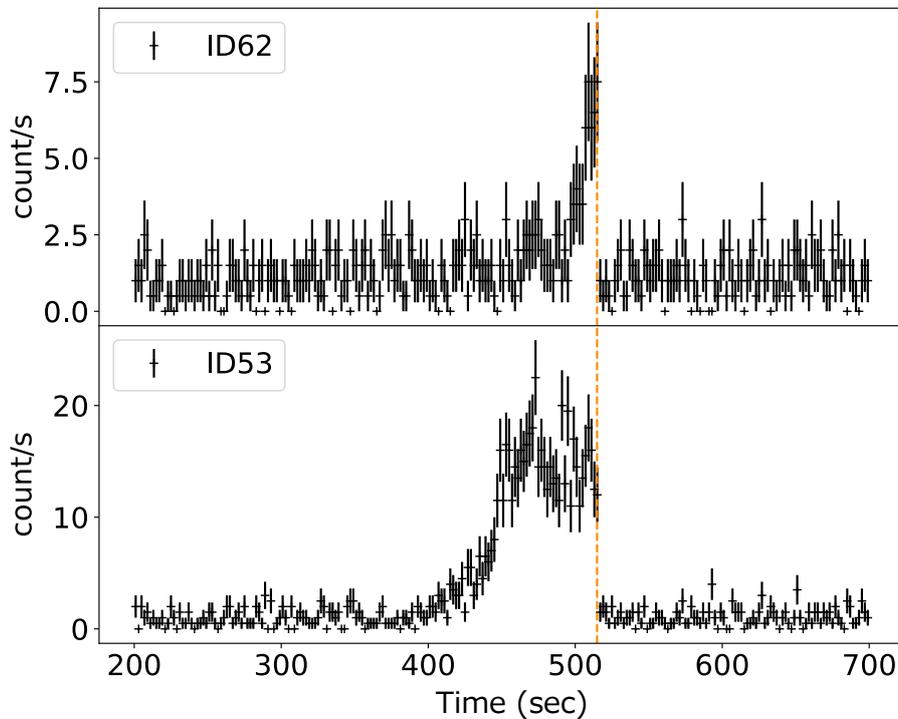


図 6.4 2021 年 12 月 30 日 4 時 8 分 (JST) 頃に ID62 と ID53 で観測された 3–10 MeV の 2 秒ビンのライトカーブ。時刻原点は、2021 年 12 月 30 日 4 時 00 分 (JST)。オレンジの点線は、岐阜大学の FALMA と DALMA によって観測された雷放電の時刻 (04:08:34.8565 JST) を示す。

図 6.5 に FALMA によって観測された雷放電の位置をプラスマークで示す。赤いマークは雷雲ガンマ線を観測した 5 台のコガモである。4 時 8 分の合成雨量データをグレースケールで重ねており、カラーバーは、雷放電が開始した 4 時 8 分 34.8565 秒を時刻原点として、時間発展を示している。雷放電は、雷雲ガンマ線が観測されたコガモの付近で発生し、一度北東に移動した後、南西に伸びている。

ID62 と ID53 は雷放電によって雷雲ガンマ線の増光が終了しているが、これは雷放電によって RREA が発生していた領域の電場が消滅したこと、そして雲内の荷電層が中和されたことを意味していると考えられる。図 6.5 に示す通り、一度発生した雷放電は元の雷雲ガンマ線の領域には入らず、そこを避けるように外側の領域に伸びている。これは、雷放電が一度開始されると、雷雲ガンマ線の終了とともに雷雲内の電荷が消滅し、その結果、電荷分離がまだ残っている場所に雷放電の経路が伝播していったことを示唆している。

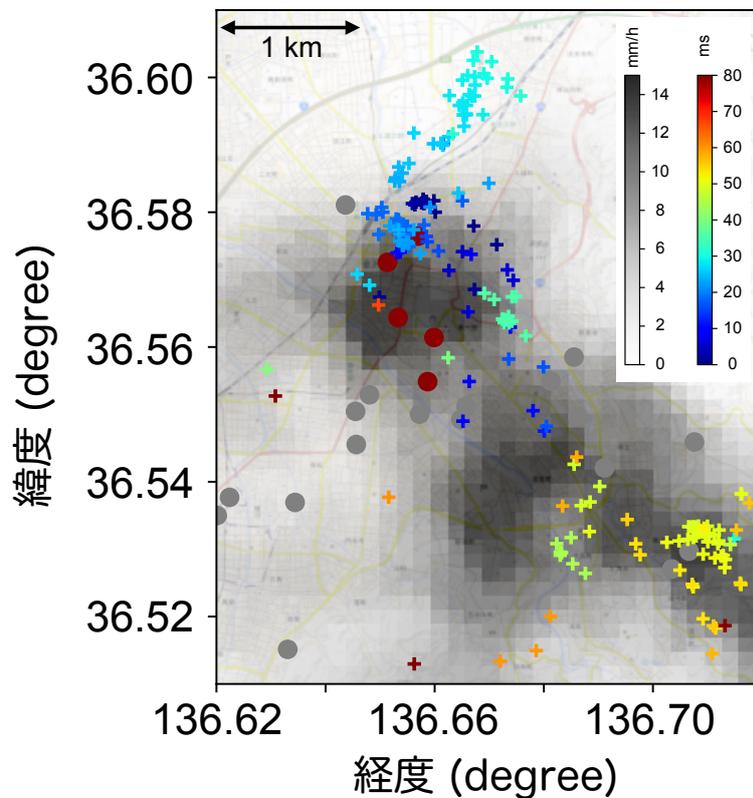


図 6.5 FALMA によって観測された雷放電の位置。カラーバーは雷放電の時間発展を示しており、時刻原点は 4 時 8 分 34.8565 秒 JST である。赤いマークは 2021 年 12 月 30 日 4 時 8 分ごろにガンマ線グローを観測した 5 台のコガモ検出器の位置を示す。グレースケールは、4 時 8 分の合成雨量データを示す。図は [Tsurumi et al. \(2023\)](#) から引用。

雷放電が開始した場所の付近を拡大したのが図 6.6 である。赤いマークは ID62 と ID23、赤い円は 8 分 34 秒における推定放射領域である。また、黄色の星マークは FALMA によって観測された雷放電の最初の 4 回、黄緑色の三角マークは DALMA によって観測された雷放電の最初の 3 回の位置を示す。これによると、FALMA によって観測された雷放電は ID62 から 420 m、DALMA によって観測された雷放電は 540 m、北東方向に離れた位置で始まっている。図にカラーの点線で示すように、FALMA と DALMA の位置決定精度はそれぞれ、200 m と 50 m であることから、この雷放電はガンマ線グローの放射領域の内部かごく近傍から始まっていることがわかる。この結果は、雷放電を開始する電場領域とガンマ線グローを発生させる相対論的な電子の加速領域が同じ空間に存在していたことを示唆している。

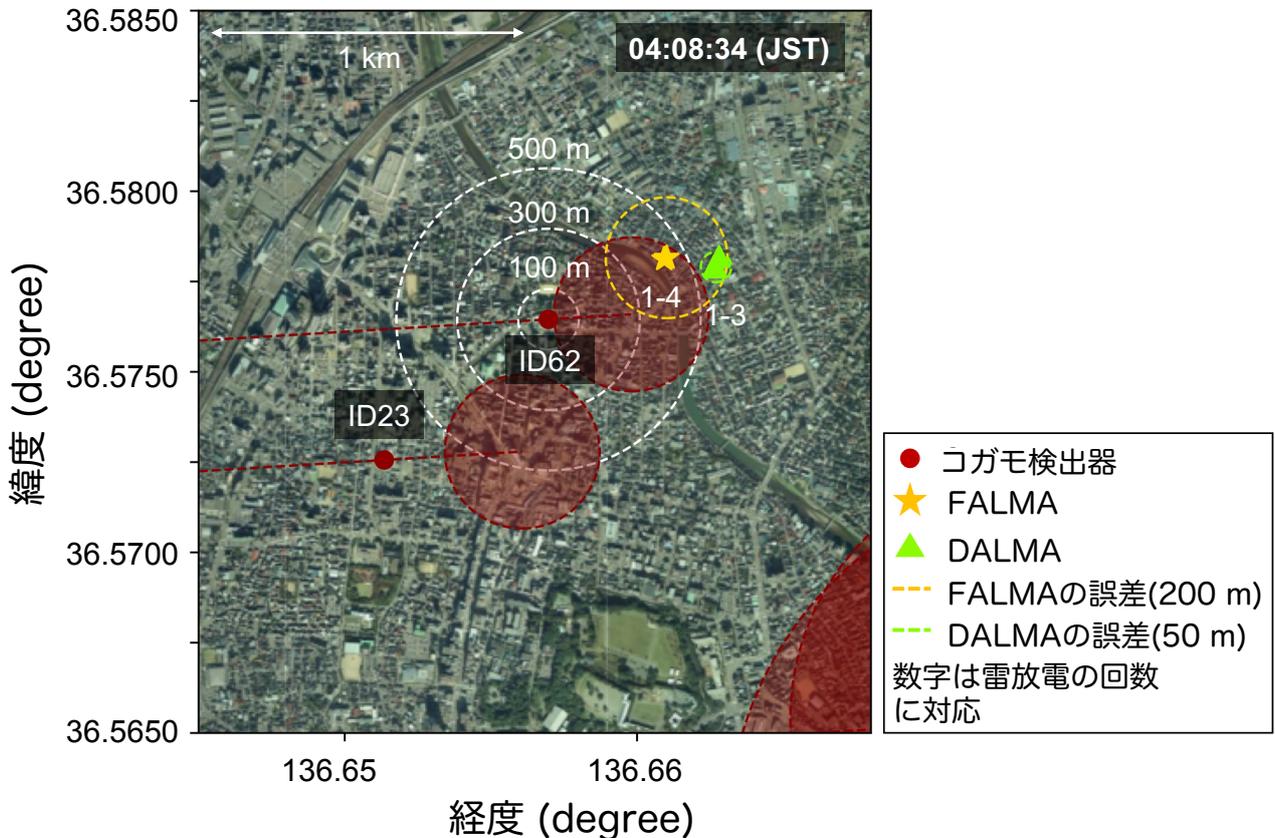


図 6.6 雷放電の開始位置付近の拡大図。赤いマークは ID62 と ID23 の位置を示し、赤い円はそれぞれの推定放射領域を示す。黄色と黄緑のマークはそれぞれ、FALMA で観測された最初の 4 回と、DALMA で観測された最初の 3 回の放電の位置である。また、それぞれの誤差範囲を点線で示す。図は [Tsurumi et al. \(2023\)](#) から引用。

また、電波観測では雷放電の水平位置だけでなく高度情報も得ることができる。図 6.7 には FALMA によって観測された雷放電の低周波の電波波形と DALMA によって観測された雷の発生高度を示す。初期放電は 1.6 km で開始した下向きの負のリーダーが 0.5 km まで降下しており、またその後、3 ms 以内に帰還雷撃が発生している。これにより、高度 0.5 km から 1.6 km の間に RREA が発生するしきい値 0.28 MV/m ([Babich et al. 2004](#), [Dwyer 2003](#)) に近い強い電場が形成されていたと考えられる。もし加速電子による制動放射が高度 0.5 km で発生していたとすると、地上に届くまでに 28% まで減衰するが、地上でのガンマ線の検出が可能な距離であると考えられる。

図 6.7 によると、初期放電の降下速度は  $3 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$  で、これはこれまでに報告された雷放電の降下速度と比べて約 1 桁大きい ([Saba et al. 2009](#))。大きなリーダーの速度は、周囲に強い電場が存在する証拠ではないかと考えられている ([Nag and Rakov 2009](#), [Shi et al. 2019](#), [Wu et al. 2022](#))。以上より、雷雲ガンマ線の発生源となる相対論的な電子が、高度約 1.6 km で雷放電を発生させた可能性がある。

RREA の閾値付近の周囲電場は、リーダープラズマを形成させる電子の密度を増加させると考えられている ([Francisco et al. 2021](#))。そのため、このリーダープラズマは雷放電の発生を促す効果をもたらす。RREA によって加速された電子だけでは雷を誘発することができないが ([Coleman and Dwyer 2006](#))、鋭く尖った氷粒子周辺の電子の増大によって電場が増強される可能性が議論されており、この仮説は過去のいくつかの気球実験でも検証されている ([Nicoll 2012](#))。この気球実験では、理論上、雷が発生する絶縁破壊閾値 ( $3 \text{ MV m}^{-1}$  ([Marshall et al. 1995](#))) よりも一桁以上小さい、RREA のしきい値 ( $0.2 \text{ MV m}^{-1}$ ) 程度の電場強度で雷放電の発生していることを報告している。

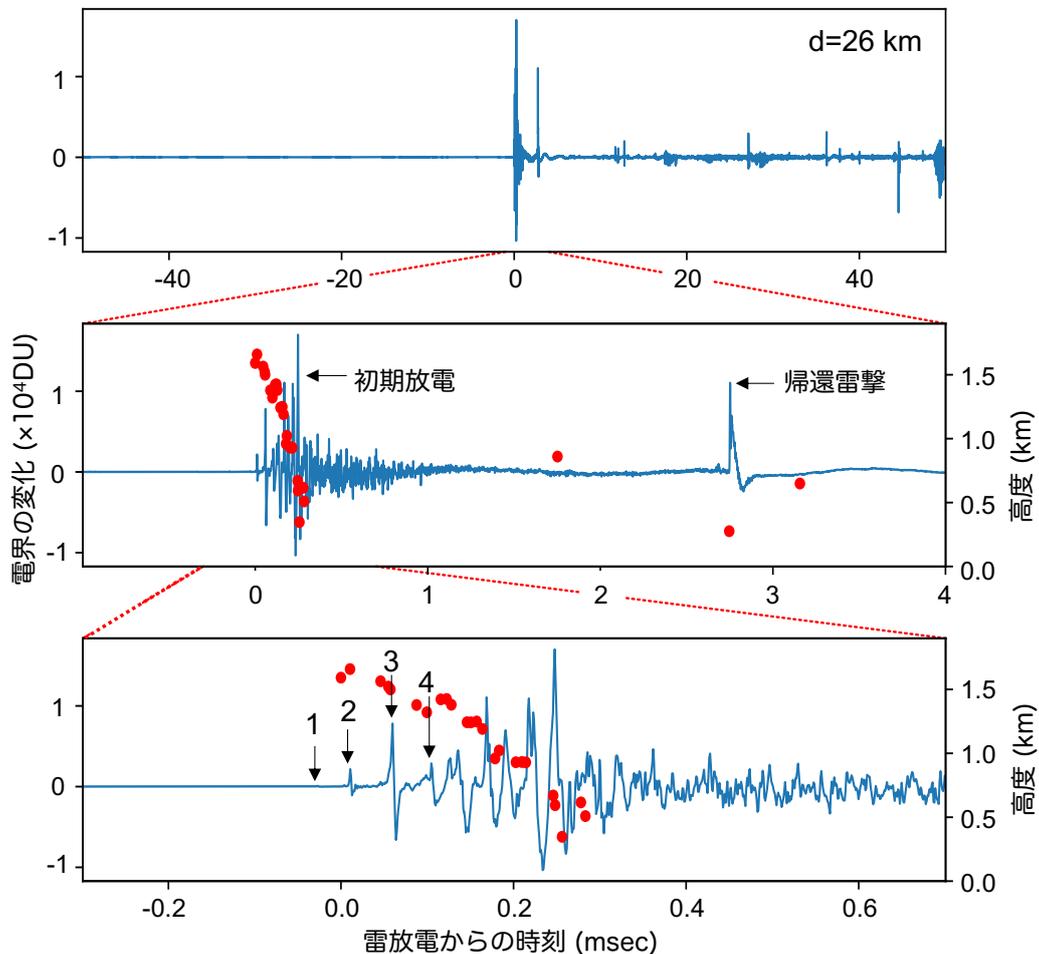


図 6.7 FALMA によって観測された雷放電の電波波形を青で、DALMA によって観測された雷放電の高度を赤で示す。左の軸が電界の変化、右の軸が高度を示す。時刻原点は雷放電が発生した 4 時 8 分 34.8565 秒である。パルスについている番号は、図 6.6 にプロットした最初の 4 回の放電と一致する。図は [Tsurumi et al. \(2023\)](#) から引用。

## 6.4 雷雲の反射強度と粒子判別の鉛直断面図

最後に、雷雲ガンマ線を放射した雷雲の内部の特徴を調べるため、XRAIN レーダーのデータを用いて、雷雲の反射強度と粒子判別の鉛直断面図を解析した。図 6.8(上) に、4 時 8 分の広域の合成雨量データを示す。降水強度の高い領域は北西から南東にかけておよそ 11 km に渡って広がっているが、雷雲ガンマ線は北西の 2 km に渡ってのみ観測されている。

この断面に沿って、反射強度と降水粒子の断面図を作成したのが図 6.8(中) と (下) である。北西の雷雲ガンマ線が検出された領域と、南東の検出されなかった領域を比較すると、図 6.8(中) の反射強度の鉛直分布では、雷雲ガンマ線が観測された領域では、高度 2 km を超える 40 dBZ 以上の高い反射率の発達領域が見られるが、南東部では 40 dBZ の領域の発達は低い高度のみであった。図 6.8(下) は降水粒子の鉛直分布である。雷雲ガンマ線の領域では、湿霰の領域が地上から高度 2 km まで達しているのに対し、雷雲ガンマ線が検出されなかった領域では高度 1.5 km 上空までしか見られなかった。

北西部でガンマ線が検出され、南東部では検出されなかった理由として、二つの仮説が考えられる。一つは、両者の間の気象条件の違いによるものである。雷雲のライフサイクルの後半では、上昇気流が弱まり正電荷を下層の湿霰が地上に落下する。これによって電場の領域も地上に近づき、地上で雷雲ガンマ線を検出しやすい条件となる。今回のケースでは、南東部の高反射領域と湿霰の領域はすでに地上付近まで落ちており、電場がなくなっていると考えられる。もう一つの仮説は、南東領域の雷雲内の電場が十分に発達しなかった可能性である。前者の場合は、雷雲ガンマ線が4時8分よりも前に発生していた可能性があるが、その地域にはコガモ検出器がなかったため、現段階では検証することができない。

## 6.5 電荷構造の推定

図 6.7 で雷放電が 1.6 km から始まっていることから、高度 2 km に負電荷を帯た中間層が出現していると考えられる。このことおから、今回の雷雲は、主に上昇気流によって形成される発達した雷雲で発生すると考えられている三極の電荷構造を持つ可能性が高い。着氷電荷分離機構によると、 $-10^{\circ}$  よりも温度が高い下層の湿霰が正に帯電し、 $-10^{\circ}$  よりも温度が低い中間の湿霰が負に帯電すると考えられる。そして、この正に帯電した湿霰の層と、負に帯電した湿霰と氷晶の層の間に電場が形成され、加速された相対論的な電子から下向きガンマ線が放射されていると予測される。レーダーのデータ (図 6.8) と放電の高度 (図 6.7) を組み合わせることで、今回のケースでは、高度約 2 km よりも低い位置にある負に帯電した中間層とその下の正に帯電した下層との間に強い電場が形成され、電子が下向きに加速されたことを示唆している。

## 6.6 本章のまとめ

- 2021 年 12 月 30 日 4 時 8 分 (JST) ごろに、金沢市内に設置した 5 台のコガモ検出器で 1 つの雷雲からの雷雲ガンマ線を観測した。5 台での同時検出は雷雲プロジェクトでの観測史上最大であった。
- 風速と雷雲ガンマ線イベントの継続時間から、雷雲ガンマ線の放射領域を推定し、南北におよそ 2.5 km、東西におよそ 2 km にわたって広がっていたことが分かった。
- 雷放電も同時刻に観測されていた。5 台のうち 2 台は雷放電によって雷雲ガンマ線の増光が終了する「瞬間途絶イベント」であった。この雷は雷雲ガンマ線の領域の内部かごく近傍からはじまっており、雷放電の発生と雷雲ガンマ線の電子加速領域の関係を示唆している

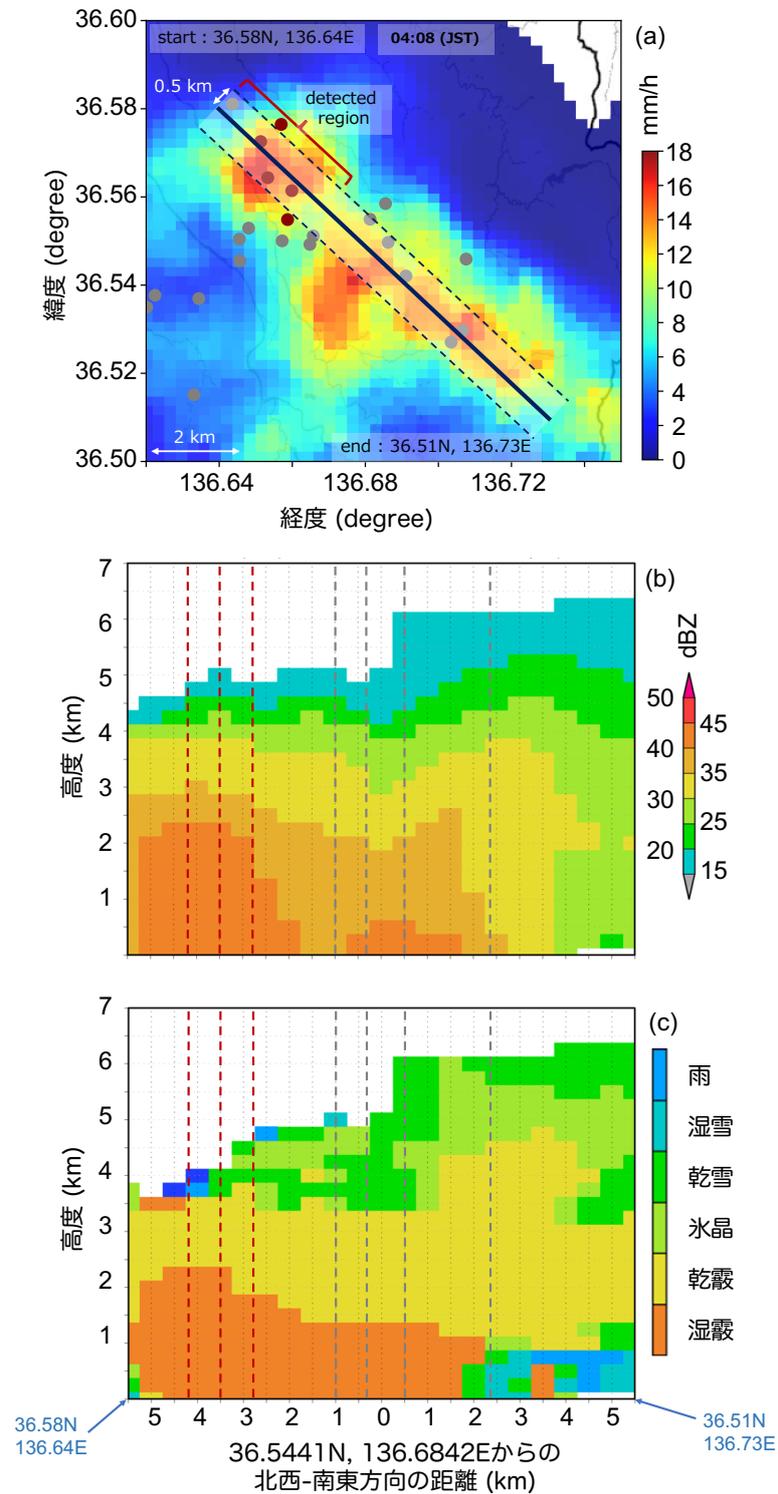


図 6.8 (上)2021 年 12 月 30 日 4 時 8 分の合成雨量データ。図 6.2 よりも広い範囲を示している。青の実線は鉛直断面、点線はその断面から 500 m の距離を示す。(中) レーダーの反射率の鉛直断面図。縦の破線は鉛直断面から 500 m 以内に設置されたコガモの位置を示しており、赤は検出されたコガモ検出器、灰色は検出されなかったコガモ検出器を示す。中心位置は、北緯 36.5441°、東経 136.6842°。(下) 降水粒子の鉛直分布。中段のパネルと同じ。図は Tsurumi et al. (2023) から引用。



## 第7章

# まとめと今後の展望

### 7.1 まとめ

- 雷雲電場による電子加速で発生する雷雲ガンマ線を多地点観測するため、シチズンサイエンスを活用した「雷雲プロジェクト」での観測網を拡大し、2023年度には69個を展開して長期測定を実施した。2018年度から2022年度のデータの系統解析から39個の雷雲ガンマ線を検出することに成功した。
- 放射線のみ解析に加え、レーダー観測による雲の動きと組み合わせた。先行研究と合わせ、雷雲ガンマ線が地上で検出される条件として、積乱雲の成熟期から衰退期にかけて、三極構造の下層の正電荷を担うあられが地上に到達し、電子加速領域の高度が下がってきた時であると推察した。
- 特に、多地点で測定できた2021年12月30日のイベントでは、雷雲プロジェクトで初めて同じ雲からのガンマ線の5地点での検出に成功した。同時刻に雷放電が発生しており、5台の検出器のうち2台は雷放電によってガンマ線増光が終了する「瞬間途絶イベント」を記録していた。この雷放電は雷雲ガンマの領域の内部か、ごく近傍から始まっており、雷のトリガーと雷雲ガンマ線の電子加速領域の関係を示唆している (Tsurumi et al. (2023)として出版)。

### 7.2 今後の展望

第5章では、レーダーの反射強度と降水粒子の鉛直分布を用いて、どの高度に電場領域が位置したのを推定した。さらに詳細な推定のためには、地上での電場観測や、電荷ゾンデによる雷雲内の降水粒子の種類と電荷の測定と、地上でのガンマ線観測を組み合わせる必要があると考えられる。また、雷雲ガンマ線が発生する雷雲の特徴から、気象シミュレーションで雷雲内の電荷分布と密度を算出し、雷雲の発達によって発生する電場を推定する。続いて、粒子飛跡シミュレータ Geant4 を用いて宇宙線空気シャワーを推定した電場に入力したときに、観測した雷雲ガンマ線のスペクトルを再現出来るか、雷のトリガーに発展するような相対論的な電子流を生成できるかを検討する。

また、第6章で述べたイベントでは、雷雲ガンマ線の放射領域から雷放電が始まっていた。しかし、ガンマ線の放射領域は風速と継続時間から見積もっているため誤差が大きくなってしまふ。雷放電と雷雲内の電子加速領域の位置関係をさらに精度よく調べるため、雷での光核反応で全方向に放出される中性子に注目する。地球ガンマ線フラッシュによって発生する高エネルギー (10–30 MeV) のガンマ線は、大気中の窒素や酸素の原子核と光核反応を起こし、中性子を発生させる。この中性子の発生場所を特定することで、強度の強い相対論的な電子流が発生している位置を間接的に観測できる。指向性のある地球ガンマ線フラッシュと比較すると、光核反応によって全方位に散乱する中性子は地上の検出器で観測できる確率が高く、冬季の観測期間中に数イベント検出できると期待できる。現在シチズンサイエンス「雷雲プロジェクト」で使用しているコガモ検出器に搭載している CsI(Tl) シンチレータは中性子に感度がないため、光核反応を検出することができない。そこで今後は雷雲ガンマ線だけでなく、光核反応を検出できる検出器にアップ

データして観測していきたいと考えている。具体的には、中性子撮像系による撮影と強度比や到来時間差による3点測量の二つの方法を用いて高い空間分解能で特定し、雷放電が発生した場所と比較したいと考えている。

# 付録

## コガモ検出器のデータフォーマット

ガンマ線検出器「コガモ」のデータは microSD カードに保存されている。この microSD カード内には主に 4 種類のファイルがある。観測前に設定が必要な検出器の設定を記録している config ファイル (例:config.csv) とチャンネル・エネルギーの変換係数を定めたファイル (例:032\_fact\_ch\_ev.csv)、観測データのうち、一定時間の間隔での環境センサーの値や放射線のカウントレートを保存する HK データファイル (例:032\_20210802.csv) と、放射線の各イベントデータを記録したイベントファイル (例:032\_20210802\_13.csv) がある。HK データは主に長期の変動の確認、イベントファイルは詳細なサイエンスの解析に使用される。

### config ファイル

ユーザーが設定するファイルであり、SD カードへのデータの記録間隔やディスプレイに表示されるカウントレート CPS(1 秒あたりのカウントレート) の移動平均の時間、エネルギー範囲の境界値などを書き込むことができる。エネルギー範囲は、HK ファイルに保存されるデータと IoT モジュールで送信されるモニタリングデータの 6 帯域のエネルギー範囲 (area) の境界の設定値のことである。この値に基づいて観測データの保存が行われる。表 7.1 にその設定値をまとめた。

表 7.1 config ファイルの設定

	カラム名	内容	FY2021 のデフォルト値 (例: ID32)
1	ID	検出器の ID	32
2	INTERVAL	sakura IoT モジュールで送信する間隔	2
3	INTV_SD	microSD カードへの記録間隔 (second)	300
5	AREABD1	エリア 1 と 2 の境界値 (keV)	500
6	AREABD2	エリア 2 と 3 の境界値 (keV)	1000
7	AREABD3	エリア 3 と 4 の境界値 (keV)	2000
8	AREABD4	エリア 4 と 5 の境界値 (keV)	3000
9	AREABD5	エリア 5 と 6 の境界値 (keV)	8000
10	TIMECONS	AREA・CPS 画面での各 CPS 値の移動平均の時間 ( )	10
11	SPCTRINT	スペクトルファイルの記録時間 (s)	300

### チャンネル・エネルギー変換ファイル

放射線イベントデータの各イベントの波高値である ADC チャンネル (0-1023) をエネルギーに変換する較正式の係数が保存されているファイルである。エリアを分割するエネルギーは以下の変換式で ADC チャンネルを変換し設定さ

れている。変換式は以下のように定義されており、ファイルには定数 a,b,c の値が書き込まれている。  
 エネルギー (keV)=a × ch × ch + b × ch + c (ch は ADC チャンネル)

表 7.2 チャンネル・エネルギー変換ファイルに記されている較正式の係数の例

係数	デフォルト値 (例: ID32)
a	0.001130
b	9.5347
c	18.1046

これは Quick look の目的で使われ、本研究ではさらに環境放射線の輝線を使ってチャンネルからエネルギーへの較正を行っている。

コガモでは、温度情報を用いて MPPC のゲインを自動で調整し、a,b,c の係数は温度に大きく依存しないようにしているが、わずかな変動をさらに補正している。

## log ファイル

各エネルギー帯域 (エリア) 別のカウントレート (CPS 値)、環境センサーの値、GPS 情報が記録されるファイルである。log フォルダの中に 1 日 1 ファイルが生成され、config.csv の INTERVAL の時間ごとに書き込まれる。ファイル名は検出器の ID と観測時の年月日に基づいてつけられ、例えば 014\_20210109.csv は ID14 の 2021 年 1 月 9 日のデータファイルであることを表す。表 7.3 に記録されたデータを示す。FY2020 では 5 分ごと、FY2021 では 2 分ごとに記録した。

表 7.3 log ファイルのデータフォーマット

	ファイルの内容
1	年月日 (JST)
2	時分秒
3	データ記録間隔時間 (minute)
4	エリア 1 のカウントレート (count/sec)
5	エリア 2 のカウントレート (count/sec)
6	エリア 3 のカウントレート (count/sec)
7	エリア 4 のカウントレート (count/sec)
8	エリア 5 のカウントレート (count/sec)
9	エリア 6 のカウントレート (count/sec)
10	温度 (°C)
11	気圧 (hPa)
12	湿度 (%)
13	10 秒の移動平均と CPS 値との差の最大値
14	照度 (lux)
15	GPS 測位状態 (0: 位置特定不可、1: 標準測位、2: 干渉測位)
16	緯度 (deg)
17	経度 (deg)

## イベントファイル

放射線イベントの検出ごとに、そのパルスの波高値 (ADC channel) を保存した、全ての放射線イベントが記録されるファイルである。ガンマ線がシンチレータに落としたエネルギーが光量として検出され、その光量は MPPC と信号処理回路によって増幅・計測され ADC チャンネル値として保存される。1 時間毎に 1 ファイルとなっており、ファイル名は ID と観測時の年月日、時刻に基づいてつけられ、例えば 014\_20210109\_06.csv は、ID14 の 2021 年 1 月 9 日 6 時台のデータファイルであることを表す。1 時間あたりの典型的なイベント量は  $1.1 \times 10^6$  個程度で、データ量は 15.5 MB である。ディレクトリ構造は年月日の順に階層構造となっており、年フォルダの中に月フォルダがあり、さらにその下に日フォルダがあり、そこに 1 日分のイベントデータが保存されている。時刻は日本時間 (JST) である。表 7.5 にイベントファイルのフォーマットを示す。

表 7.4 イベントファイル (2022 年 9 月以前)

ファイルの内容
1 分
2 秒
3 1/10000 秒
4 ADC チャンネル値 [ch]

表 7.5 イベントファイル (2022 年 9 月以降)

ファイルの内容
1 分
2 秒
3 1/10000 秒
4 ADC チャンネル値 [ch]
5 GPS ステータス

## コガモ検出器のリスト

表 7.6: コガモ検出器のリスト

#	コガモ ID	バッテリー	sakura io	ケース	シンチレータ	モデル (FY2019/FY2021)
1	4	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x5cm <sup>3</sup> )	FY2019
2	5	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x5cm <sup>3</sup> )	FY2019
3	6	無	有	タカチ透明	CsI(4x4x10cm <sup>3</sup> )	FY2019
4	7	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm <sup>3</sup> )	FY2019
5	8	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm <sup>3</sup> )	FY2019
6	9	無	有	タカチ透明	CsI(5.4x5.4x4.2cm <sup>3</sup> )	FY2019
7	10	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm <sup>3</sup> )	FY2019

次のページに続く

表 7.6 – 前のページから続く

#	コガモ ID	バッテリー	sakura io	ケース	シンチレータ	モデル (FY2019/FY2021)
8	11	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
9	12	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
10	13	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
11	14	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
12	15	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
13	16	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
14	17	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
15	18	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
16	19	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
17	20	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
18	21	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
19	22	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
20	23	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
21	24	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
22	27	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
23	28	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
24	29	無	有	タカチ透明	CsI(5x5x15cm3)	FY2019
25	30	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
26	31	有	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
27	32	有	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
28	33	有	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
29	34	有	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
30	35	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
31	36	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
32	37	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
33	38	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
34	39	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
35	40	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
36	41	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
37	42	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
38	43	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
39	44	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
40	45	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
41	46	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
42	47	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
43	48	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
44	49	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
45	50	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
46	51	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021

次のページに続く

表 7.6 – 前のページから続く

#	コガモ ID	バッテリー	sakura io	ケース	シンチレータ	モデル (FY2019/FY2021)
47	52	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
48	53	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
49	54	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
50	55	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
51	56	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
52	57	有	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
53	58	有	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
54	59	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
55	60	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
56	61	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
57	62	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
58	63	有	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
59	64	有	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
60	65	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
61	66	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
62	67	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
63	68	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
64	69	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
65	70	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
66	71	有	無	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
67	72	有	無	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
68	73	有	無	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
69	74	有	無	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
70	75	有	無	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
71	76	有	無	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
72	77	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
73	78	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
74	79	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
75	80	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
76	81	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
77	82	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
78	83	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
79	84	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
80	85	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
81	86	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
82	87	有	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
83	88	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
84	89	有	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
85	90	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021

次のページに続く

表 7.6 – 前のページから続く

#	コガモ ID	バッテリー	sakura io	ケース	シンチレータ	モデル (FY2019/FY2021)
86	91	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021
87	92	無	有	黄色	CsI(5x5x15cm3)	FY2021

## コガモ検出器の設置場所と設置期間

表 7.7 2018 年度コガモ設置場所

ID	観測場所	観測開始	観測終了
4	石川県輪島市上山町	2018/10/28	2019/03/06
5	石川県珠洲市三崎町	2018/10/16	2018/11/4
6	石川県河北郡内灘町	2018/12/26	2019/3/1
10	石川県白山市八束穂	2018/12/21	2019/3/27
12	石川県白山市八束穂	2018/11/8	2018/12/21
15	石川県金沢市金石西	2018/11/6	2018/12/21
16	石川県金沢市三口町火	2019/1/16	2019/9/6
17	石川県河北郡内灘町	2019/1/16	2019/9/11
18	石川県金沢市金石西	2019/1/6	2019/11/20
19	石川県金沢市武蔵町	2018/11/8	2019/3/26

表 7.8 2019 年度コガモ設置場所

ID	観測場所	観測開始	観測終了
4	石川県河北郡内灘町	2019/12/11	2020/02/21
5	石川県珠洲市三崎町	2019/12/19	2021/12/2
6	石川県河北郡内灘町	2019/12/20	2020/2/22
12	石川県金沢市太陽が丘	2019/11/28	2020/3/24
15	石川県金沢市金石西	2019/11/20	2020/5/24
19	石川県金沢市武蔵町	2019/11/19	2020/4/9
27	石川県野々市市末松	2019/11/22	2019/12/25

表 7.9 2020 年度コガモ設置場所

ID	観測場所	観測開始	観測終了
4	石川県河北郡内灘町白帆台	2020/11/21	2021/04/19
5	石川県珠洲市三崎町	2019/12/19	2021/4/19
6	石川県河北郡内灘町	2020/11/21	2020/12/12
10	石川県白山市馬場	2020/12/27	2021/05/09
11	石川県野々市市本町	2020/12/27	2021/03/09
12	石川県金沢市笠舞	2020/12/27	2021/02/10
13	石川県金沢市南四十万	2020/12/27	2021/01/20
14	石川県金沢市もりの里	2021/12/27	2021/06/06
15	石川県金沢市本多町	2021/02/15	2021/05/28
16	石川県金沢市太陽が丘	2021/01/01	2021/03/17
17	石川県野々市市末松	2021/01/07	2021/04/13
18	石川県白山市八束穂	2021/01/07	2021/03/17
20	石川県金沢市金石西	2021/01/03	2021/04/15
21	石川県金沢市金石西	2021/01/03	2021/01/08
22	石川県金沢市専光寺町	2021/01/03	2021/01/29
23	石川県金沢市武蔵町	不明	不明
28	石川県白山市鶴来本町	2020/12/23	2021/03/17
29	石川県野々市市押野	2020/12/27	2021/03/17
30	石川県金沢市広岡	2021/01/12	2021/02/25

表 7.10: 2021 年度コガモ設置場所

ID	観測場所	観測開始	観測終了
4	石川県河北郡内灘町	2021/11/13	2022/3/27
5	石川県珠洲市三崎町	2021/11/13	2022/06/25
6	石川県輪島市西二又町	2021/11/14	2022/1/4
7	石川県河北郡内灘町	2021/12/15	2022/2/17
9	石川県河北郡内灘町	2021/12/12	2021/12/25
10	石川県白山市馬場	2021/11/28	2022/3/12
11	石川県野々市市本町	2021/11/26	2022/3/13
12	石川県金沢市笠舞	2021/11/28	2022/1/8
13	石川県金沢市南四万十	-	
14	石川県金沢市若松	2021/12/17	2022/3/14
15	石川県金沢市本多町	2021/12/3	2022/3/20
16	石川県金沢市太陽が丘	不明	不明
17	石川県野々市市末松	不明	不明
18	石川県白山市八束穂	2021/11/27	2022/1/1
19	石川県河北郡内灘町	2021/12/3	2022/11/16

次のページに続く

表 7.10 – 前のページから続く

ID	観測場所	観測開始	観測終了
20	石川県金沢市金石西	2021/11/10	2022/2/21
21	石川県金沢市金石西	2021/11/10	2022/3/24
22	石川県金沢市専光寺町	2022/12/27	2023/3/16
23	石川県金沢市武蔵町	2021/12/11	2022/3/17
24	新潟県十日町市清水	2021/11/17	2022/01/01
27	石川県金沢市田上さくら	2022/1/5	2022/2/10
28	石川県白山市鶴来本町	2021/12/12	2022/3/12
29	石川県野々市市推野	2021/12/1	2022/3/10
30	石川県金沢市広岡	2021/12/2	2022/2/12
31	富山県富山市牛島町	2022/1/3	2022/3/11
33	石川県金沢市香林坊	2021/12/1	2022/2/27
34	(石川県内を移動)	2021/12/9	2022/1/29
35	富山県南砺市	2022/2/4	2022/3/11
36	石川県金沢市高尾南	2022/1/6	2022/1/17
37	石川県野々市市本町	2021/11/28	2022/3/12
38	石川県加賀市動橋町	2021/11/27	2022/3/19
39	石川県金沢市松島	2021/11/27	2021/12/30
40	石川県金沢市久安	2021/11/27	2022/3/13
41	石川県かほく市木津口	2021/11/30	2022/3/12
42	石川県金沢市泉が丘	2021/12/4	2022/3/13
43	石川県金沢市寺町	2021/12/20	2022/3/11
44	石川県七尾市能登島曲町	2021/12/3	2022/4/1
45	石川県七尾市能登島曲町	2021/12/3	2022/3/9
46	石川県七尾市和倉町二部	2021/12/3	2022/4/5
47	石川県七尾市和倉町	2021/12/2	2022/1/12
48	石川県七尾市和歌崎部	2021/12/2	2022/4/7
49	石川県七尾市和倉町ひばり	2021/12/2	2022/4/5
50	石川県金沢市吉原町	2021/11/27	2022/1/1
51	石川県金沢市太陽が丘	2021/11/27	2022/3/13
52	石川県金沢市城南	2021/11/27	2022/3/14
53	石川県金沢市本多町	2021/12/17	2022/4/9
54	石川県金沢市弥生	2021/11/29	2022/3/23
55	石川県金沢市野町	2021/12/5	2022/1/5
56	石川県金沢市角間町	2021/11/8	2022/3/18
57	石川県金沢市旭町	2021/12/13	2021/12/28
58	石川県金沢市旭町	2021/12/21	2022/3/9
59	石川県白山市曾谷町	2021/12/31	2022/3/12
60	石川県能美市上開発町	2021/12/29	2022/3/8
61	石川県野々市市上林	2022/1/19	2022/1/19

次のページに続く

表 7.10 – 前のページから続く

ID	観測場所	観測開始	観測終了
62	石川県金沢市瓢箪町	2021/12/26	2022/3/13
63	石川県白山市宮永新町	2021/12/24	2022/3/20

表 7.11: 2022 年度コガモ設置場所

ID	観測場所	観測開始	観測終了
4	石川県河北郡内灘町	2022/12/8	2023/4/24
6	石川県輪島市上山町	2022/4/22	2022/12/30
7	石川県河北郡内灘町	2022/12/17	2023/3/29
10	石川県金沢市武蔵町	2022/11/29	2023/1/23
11	石川県金沢市角間町	2022/12/27	2023/3/17
12	石川県金沢市笠舞	2022/12/27	2023/4/3
13	石川県金沢市角間町	2022/12/27	2023/3/16
14	石川県金沢市若松町	2022/11/26	2023/1/7
15	石川県金沢市本多町	2023/1/9	2023/2/23
16	石川県金沢市太陽が丘	2022/11/2	2022/12/23
17	石川県野々市市末松	2022/11/2	2023/3/30
18	石川県白山市八束穂	2022/1/5	2022/11/18
19	石川県河北郡内灘町	2022/12/8	2023/2/27
21	石川県七尾市和倉町	2023/1/10	2023/3/24
22	石川県金沢市角間町	2022/12/27	2023/3/16
24	石川県白山市馬場	2022/11/3	2023/4/1
27	石川県金沢市田上さくら	2022/12/6	2022/03/02
29	石川県金沢市旭町	2022/11/21	2023/3/19
30	石川県野々市市本町	2022/11/8	2023/3/14
31	石川県金沢市山の上町	2022/11/15	2023/3/13
33	石川県野々市市本町	2022/11/12	2023/3/25
35	石川県金沢市南四十万	2022/11/3	2022/11/5
36	石川県小松市河田町	2022/11/20	2023/3/11
37	富山県富山市綾田町	2022/12/13	2023/2/8
38	石川県加賀市動橋町	2021/11/18	2022/3/22
39	石川県金沢市松島	2022/11/6	2023/3/13
40	石川県金沢市久安	2022/11/3	2022/3/23
41	石川県かほく市木津口	2022/11/6	2023/3/17
42	石川県金沢市泉が丘	2022/11/3	2023/3/9
43	富山県南砺市山本	2022/11/15	2023/3/19
44	石川県白山市鶴来本町	2022/11/3	2023/3/29

次のページに続く

表 7.11 – 前のページから続く

ID	観測場所	観測開始	観測終了
45	石川県金沢市西金沢新町	2022/11/2	2023/01/21
46	石川県小松市こまつの杜	2022/11/2	2023/3/20
47	石川県河北郡内灘町鶴ヶ丘	2022/11/3	2023/2/27
48	石川県金沢市笠舞本町	2022/11/3	2023/3/17
49	石川県小松市八里台	2022/11/3	2023/3/28
50	石川県金沢市吉原町	2022/11/12	2022/11/21
52	石川県かほく市森	2022/11/20	2023/2/13
53	石川県金沢市本多町	2023/2/18	2023/3/20
54	石川県金沢市太陽が丘	2022/11/15	2023/1/23
55	石川県金沢市野町	2022/11/11	2023/3/7
57	石川県金沢市角間町	2022/12/7	2023/3/16
58	石川県金沢市旭町	2022/11/7	2023/3/14
59	石川県白山市曾谷町ハ	2022/11/3	2023/3/30
60	石川県野々市市押野	2022/11/21	2023/3/7
61	石川県野々市市上林	2022/11/8	2023/1/26
62	石川県金沢市瓢箪町	2022/11/3	2023/3/20
63	石川県白山市宮永新町	2022/11/15	2023/3/16
65	石川県七尾市和倉町	2022/12/20	2023/2/7
66	石川県七尾市和倉町	2022/12/18	2023/3/5
67	石川県七尾市和倉町	2022/12/20	2023/3/24
68	石川県七尾市馬出町	2022/12/17	2023/3/24
69	石川県七尾市石崎町	2023/2/12	2023/3/24
70	石川県七尾市西藤橋町	2023/1/5	2023/3/25
71	石川県河北郡津幡町	2022/12/25	2023/2/19
72	石川県金沢市旭町	2023/1/25	2023/3/30
73	石川県金沢市旭町	2023/2/3	2023/3/15
75	石川県金沢市三口新町	2023/1/5	2023/3/16
76	石川県金沢市香林坊	2022/12/21	2023/4/1
77	石川県七尾市奥原町	2022/12/19	2023/3/14
78	石川県七尾市和倉町	2022/12/17	2023/3/24
79	石川県かほく市木津	2022/12/17	2023/3/15
80	石川県小松市八里台	2022/12/14	2023/3/28
81	石川県野々市市本町	2022/12/14	2023/3/31
82	石川県金沢市御所町	2023/1/15	2023/2/22
84	石川県金沢市高柳町	2022/12/21	2023/3/28
85	石川県野々市市本町	2023/1/23	2023/3/11
86	石川県小松市園町	2023/2/6	2023/2/26
87	石川県金沢市角間町	2022/12/7	2023/3/15

次のページに続く

表 7.11 – 前のページから続く

ID	観測場所	観測開始	観測終了
88	石川県金沢市畝田東	2022/12/7	2023/3/31

表 7.12: 2023 年度コガモ設置場所

ID	観測場所
9	石川県河北郡津幡町
10	石川県金沢市専光寺町
12	石川県金沢市笠舞
13	石川県金沢市若松町
14	石川県白山市馬場
15	石川県金沢市本多町
16	石川県野々市市押野
17	石川県鳳珠郡能登町
18	石川県輪島市河井町
19	石川県小松市丸内町
20	白山市八ツ矢町
21	石川県金沢市高柳町
22	石川県野々市市本町
23	石川県かほく市大崎潮見台
27	石川県金沢市田上さくら
28	石川県金沢市畝田東
29	石川県小松市西軽海町
30	石川県野々市市本町
31	石川県金沢市山の上町
33	石川県野々市市本町
35	石川県金沢市野町
36	石川県小松市河田町
37	富山市綾田町
38	石川県加賀市動橋町
39	石川県金沢市松島
40	石川県金沢市久安
41	石川県かほく市木津口
42	石川県金沢市泉が丘
43	富山県南砺市山本
44	石川県かほく市横山
45	石川県小松市こまつの杜
46	石川県金沢市若松

次のページに続く

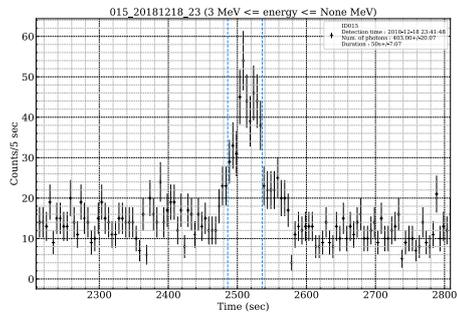
表 7.12 - 前のページから続く

ID	観測場所
47	石川県金沢市太陽が丘
48	石川県金沢市笠舞本町
49	石川県小松市八里台
50	石川県金沢市吉原町
51	石川県金沢市小立野
52	石川県かほく市森
53	石川県金沢市本多町
54	石川県金沢市太陽が丘
55	金沢市田上の里
56	石川県かほく市湖北
57	石川県金沢市若松町
58	石川県金沢市旭町
59	石川県白山市曾谷町
60	石川県金沢市角間町
62	石川県金沢市瓢箪町
64	石川県金沢市旭町
65	石川県七尾市和倉町
66	石川県七尾市和倉町
67	石川県七尾市和倉町
68	石川県七尾市馬出町
69	石川県七尾市石崎町
70	石川県七尾市西藤橋町
71	石川県河北郡津幡町
72	石川県金沢市旭町
73	石川県金沢市武蔵町
74	石川県金沢市若松町
75	石川県白山市八束穂
76	石川県金沢市香林坊
77	石川県七尾市奥原町
78	石川県七尾市和倉町
79	石川県金沢市もりの里
80	石川県金沢市角間町
81	石川県野々市市本町
82	石川県金沢市御所町
86	石川県小松市園町
87	石川県金沢市福増町南
90	石川県白山市鶴来本町

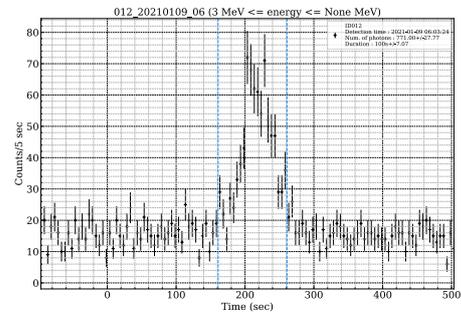
次のページに続く



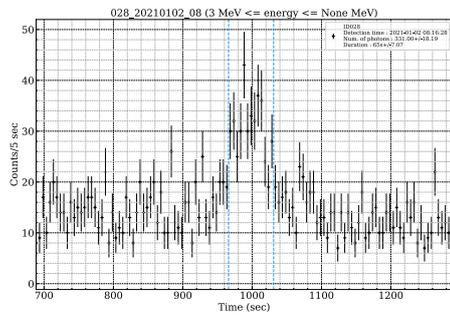
## 全イベントのライトカーブ



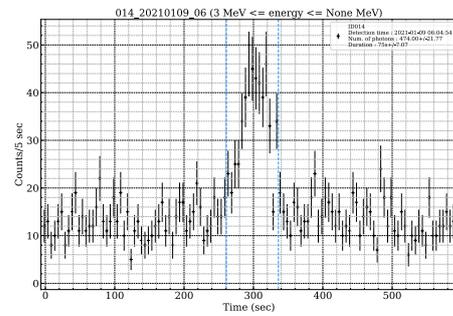
OD15 2018/12/18 23:41



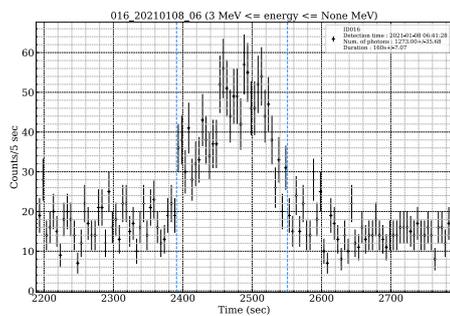
ID12 2021/01/09 06:03



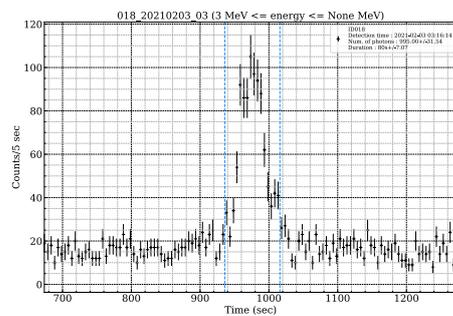
ID28 2021/01/02 08:16



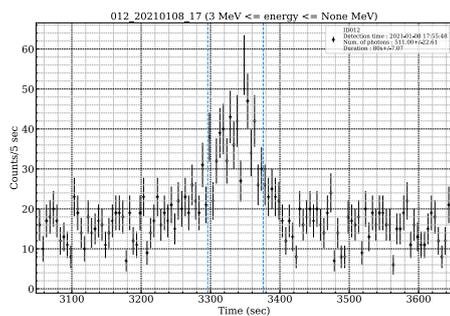
ID14 2021/01/09 06:04



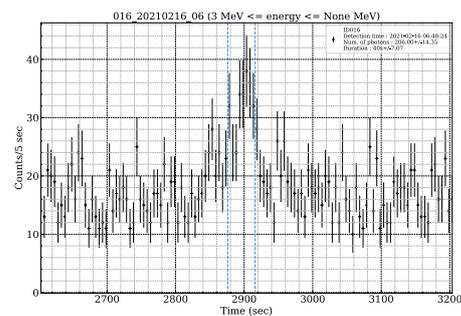
ID16 2021/01/08 06:41



ID18 2021/02/03 03:16

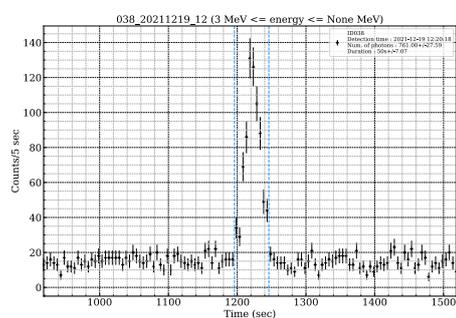


ID12 2021/01/08 17:55

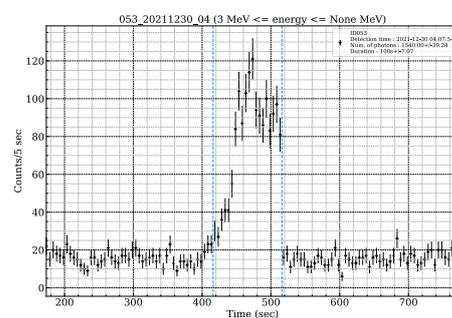


ID16 2021/02/16 6:48

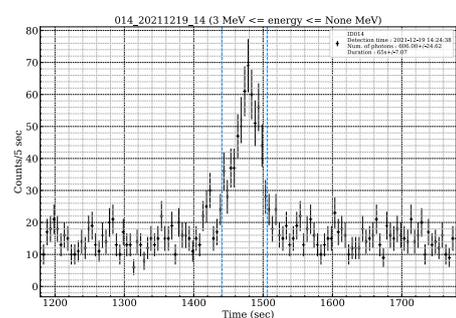
図 7.1 2018 年度から 2022 年度の全イベントの 3 Me 以上のライトカーブ



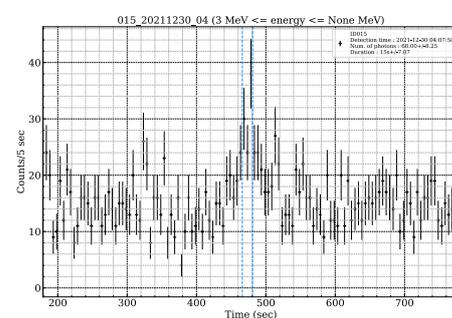
ID38 2021/12/19 12:20



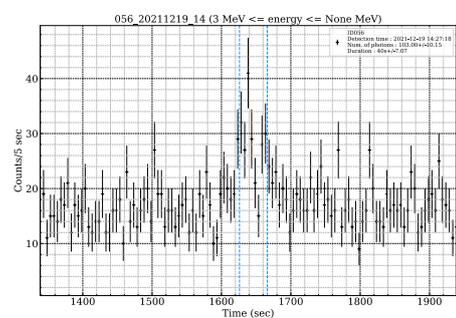
ID53 2021/12/30 04:07



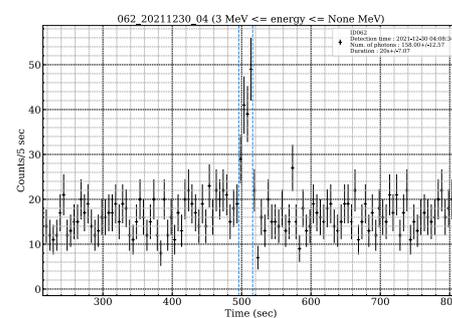
ID14 2021/12/19 14:24



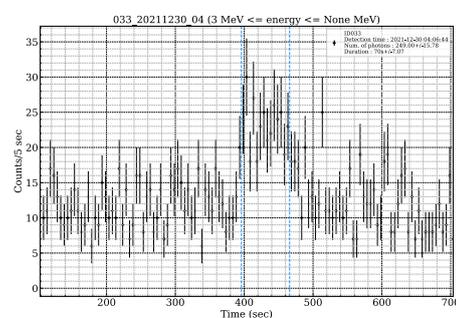
ID15 2021/12/30 04:07



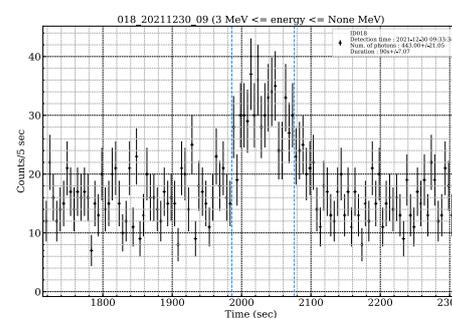
ID56 2021/12/19 14:27



ID62 2021/12/30 04:08

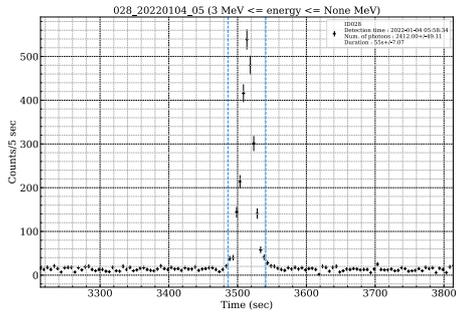


ID33 2021/12/30 04:06

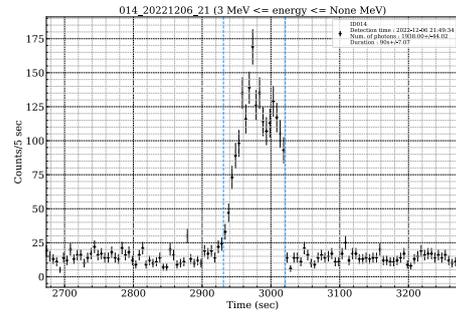


ID18 2021/12/30 09:33

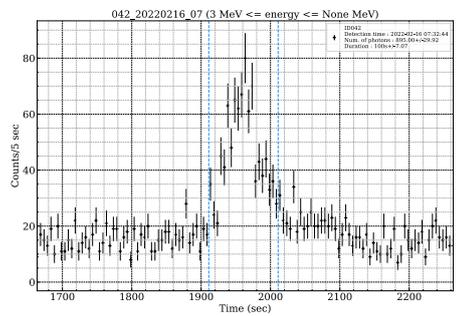
図 7.2 2018 年度から 2022 年度の全イベントの 3 Me 以上のライトカーブ



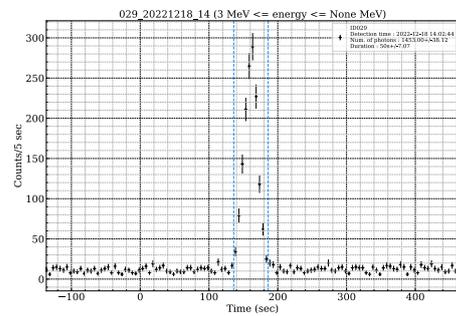
ID28 2022/01/04 05:58



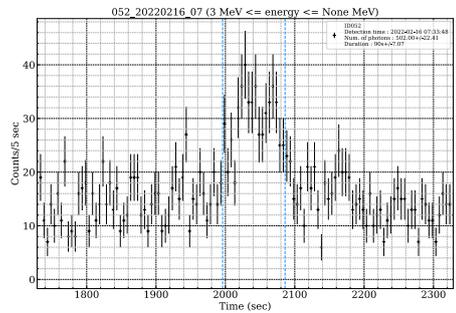
ID14 2022/12/06 21:49



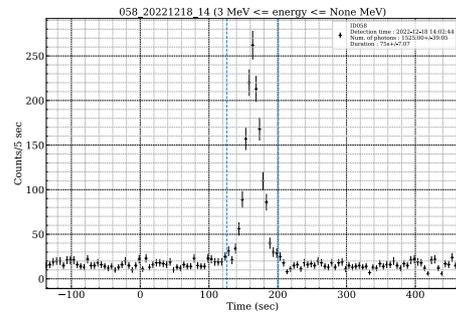
ID42 2022/02/16 07:32



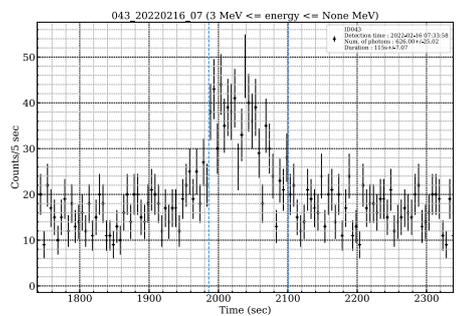
ID29 2022/12/18 14:02



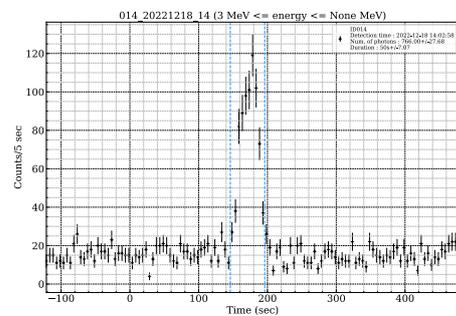
ID52 2022/02/16 07:33



ID58 2022/12/18 14:02

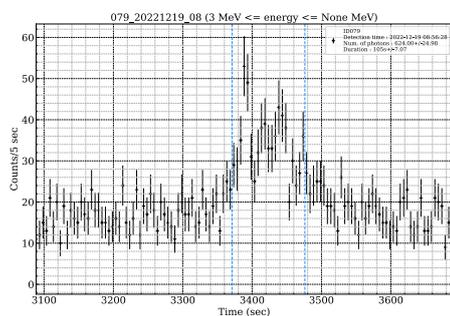


ID43 2022/02/16 07:33

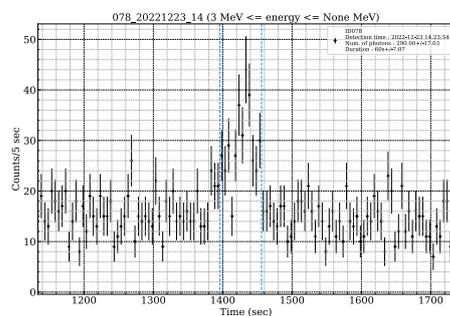


ID14 2022/12/18 14:02

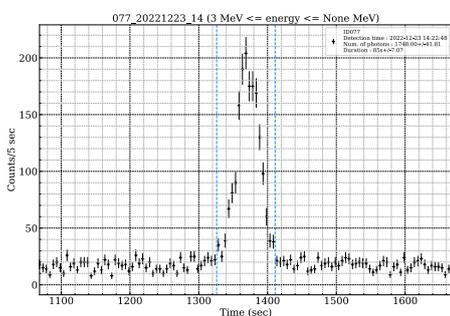
図 7.3 2018 年度から 2022 年度の全イベントの 3 Me 以上のライトカーブ



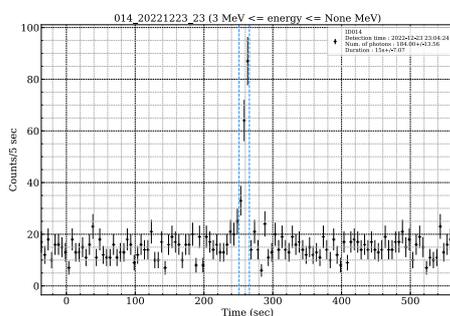
ID79 2022/12/19 08:56



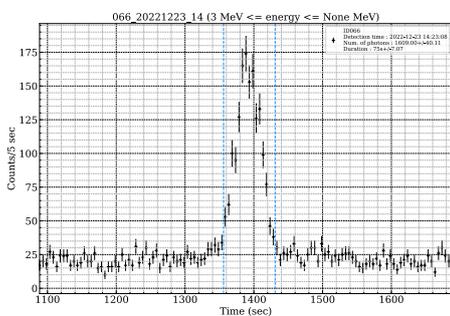
ID78 2022/12/23 14:23



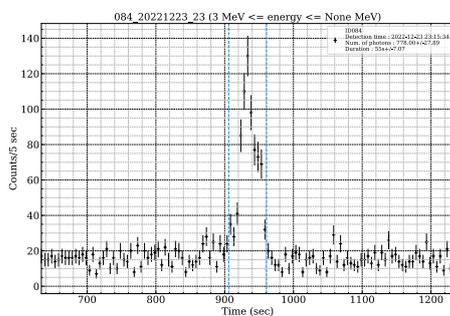
ID77 2022/12/23 14:22



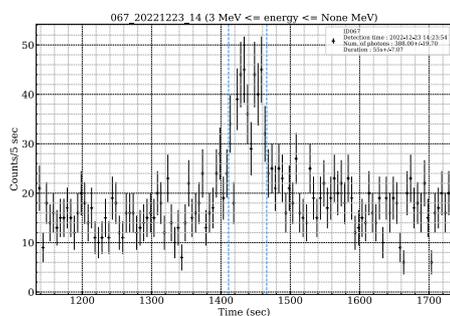
ID14 2022/12/23 23:04



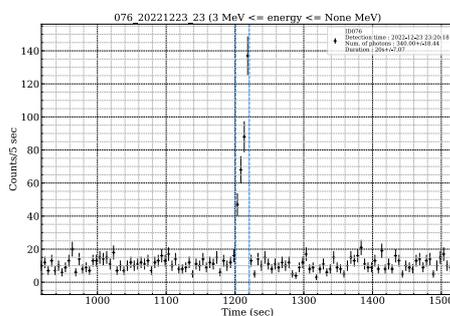
ID66 2022/12/23 14:23



ID84 2022/12/23 23:15

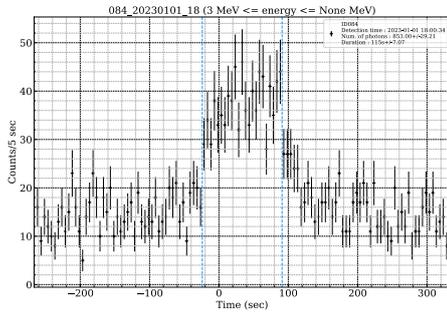


ID67 2022/12/23 14:23

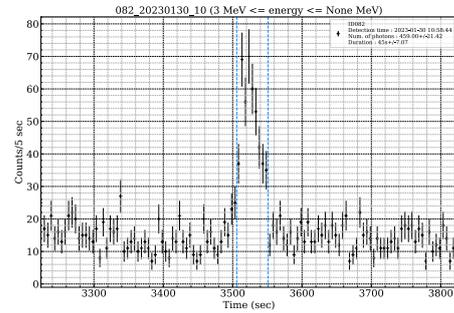


ID76 2022/12/23 23:20

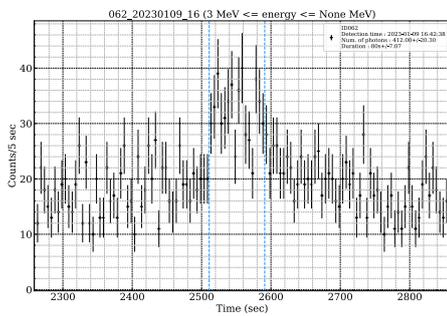
図 7.4 2018 年度から 2022 年度の全イベントの 3 Me 以上のライトカーブ



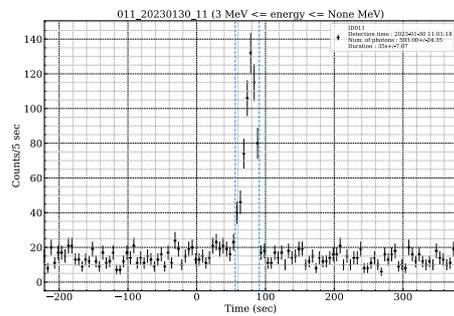
ID84 2023/01/01 18:00



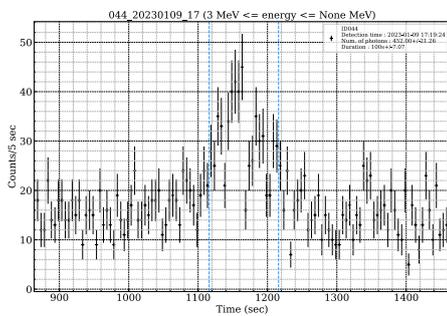
ID82 2023/01/30 10:58



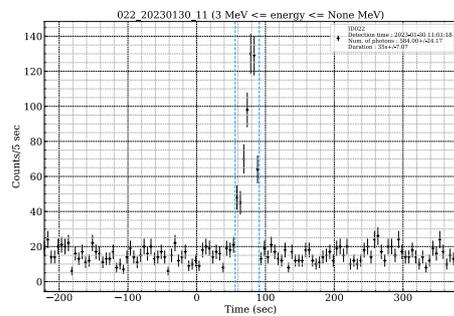
ID62 2023/01/09 16:42



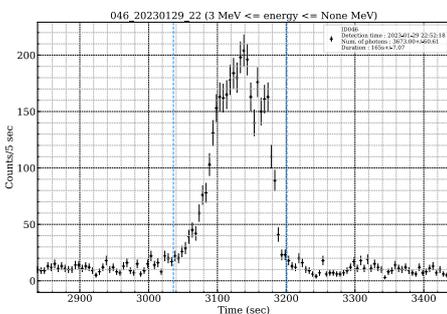
ID11 2023/01/30 11:01



ID44 2023/01/09 17:19



ID22 2023/01/30 11:01



ID46 2023/01/29 22:52

図 7.5 2018 年度から 2022 年度の全イベントの 3 Me 以上のライトカーブ

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、大変多くの方のご指導とご協力を賜りました。この場をお借りして、心より御礼申し上げます。

指導教官である京都大学の榎戸輝揚准教授には、理化学研究所の研修生として榎戸チームに入った学部4年生のからの3年間、大変お世話になりました。学会での発表や論文の書き方、実験解析の方法など1から大変丁寧に教えていただきました。心より御礼申し上げます。

青山学院大学の坂本貴紀教授には、学部4年と修士1年の2年間は理研の研修生として、修士2年の1年間は京都大学の特別研究学生として、大変貴重な環境で研究する機会をいただきました。研究室に顔を出した際には研究状況や進路など気にかけてくださいました。

名古屋大学の篠田太郎准教授には、本研究を進めるにあたりリーダーデータの解析コードを提供していただきました。また投稿論文執筆の際には多くの的確なコメントやアドバイスをいただきました。

金沢大学の一方井祐子准教授には、雷雲プロジェクトの運営や市民サポーターのみなさまとのやりとりなど、検出器の展開に際して大変お世話になりました。

また雷雲プロジェクトでのコガモ検出器の設置は、多くの市民サポーターの方のご協力があって実施することが出来ました。この場をお借りして感謝申し上げます。

理研から京都大学と一緒に移動した辻直希さんには、研究相談だけでなく引っ越しや進路についてもたくさん相談に乗っていただきました。発表練習や論文の草稿などにも何度も的確なアドバイスをいただき大変心強かったです。また、研究で行き詰まっている時もいつも研究室で声をかけてくださった山田智史さん、論文執筆や研究の進め方などたくさんの貴重なアドバイスをくださった川室太希さん、衛星設計コンテストの検討の際にたくさん相談に乗ってくださった長岡央さん、加藤陽さん、同じ研究分野の先輩としてたくさんの貴重なアドバイスをくださった Gabriel さん、毎日深夜まで一緒に衛星設計コンテストの検討に取り組んだ同期の谷口絢太郎くん、後輩として慕ってくれた加藤大輝くん、いつもいろんな相談に乗ってくださった深谷香織さん、そして栄転されてからもずっと気にかけてくださり仲良くしてくださった和田有希さん、沼澤正樹さん、木邑真理子さん、理研榎戸チームのみなさまの支えがあったからこそここまで研究を続けていくことが出来ました。ありがとうございました。

修士2年の1年間は、京都大学宇宙線研究室のみなさまにもお世話になりました。博士課程の先輩方である松田真宗さん、寺内健太さん、成田拓人さんは、私の学振提出の前日に深夜遅くまで一緒に研究室に残ってアドバイスをくださり、大変お世話になりました。同期の4人は今年から突然メンバーになった私を温かく迎えてくれました。みんなが研究に勤しんでいる姿をみて強い刺激を受けました。また、いつも仲良くしてくれてる後輩たちのおかげで楽しい時間を過ごすことが出来ました。本当にありがとうございました。

坂本研究室のみなさまにも本当にお世話になりました。今年度は大学に行く機会は少なくなりましたが、たまに顔を出した際には、先輩方、同期、後輩たちが変わらず声をかけてくれて大変嬉しかったです。

この3年間、多くの皆様に支えられて大変充実した研究生生活を送ることができました。ありがとうございました。来年度以降も引き続き頑張ってまいります。最後に、いつも近くで支えてくれる友人と東京から応援してくれている家族に感謝します。



## 引用文献

- L. P. Babich, E. I. Bochkov, and I. M. Kutsyk. Lightning initiation mechanism based on the development of relativistic runaway electron avalanches triggered by background cosmic radiation: Numerical simulation. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 112(5):902–909, May 2011. doi: 10.1134/S1063776111040145.
- Leonid P. Babich, Evgenii I. Bochkov, Joseph R. Dwyer, and Igor M. Kutsyk. Numerical simulations of local thundercloud field enhancements caused by runaway avalanches seeded by cosmic rays and their role in lightning initiation. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 117(A9):A09316, September 2012. doi: 10.1029/2012JA017799.
- L.P. Babich, E. N. Donskoy, R. I. Il'kaev, I. M. Kutsyk, and R. A. Roussel-Dupre. Fundamental parameters of a relativistic runaway electron avalanche in air. *Plasma Physics Reports*, 30:616–624, 2004. <https://doi.org/10.1134/1.1778437>.
- M. S. Briggs, G. J. Fishman, V. Connaughton, P. N. Bhat, W. S. Paciesas, R. D. Preece, C. Wilson-Hodge, V. L. Chaplin, R. M. Kippen, A. von Kienlin, C. A. Meegan, E. Bissaldi, J. R. Dwyer, D. M. Smith, R. H. Holzworth, J. E. Grove, and A. Chekhtman. First results on terrestrial gamma ray flashes from the Fermi Gamma-ray Burst Monitor. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 115(A7):A07323, July 2010. doi: 10.1029/2009JA015242.
- Michele Brunetti, Stefano Cecchini, Menotti Galli, Giovanni Giovannini, and Andrea Pagliarin. Gamma-ray bursts of atmospheric origin in the MeV energy range. *Geophys. Res. Lett.*, 27(11):1599–1602, June 2000. doi: 10.1029/2000GL003750.
- A. Chilingarian, G. Hovsepyan, and L. Vanyan. On the origin of the particle fluxes from the thunderclouds: Energy spectra analysis. *EPL (Europhysics Letters)*, 106(5):59001, June 2014. doi: 10.1209/0295-5075/106/59001.
- A. Chilingarian, G. Hovsepyan, G. Khanikyanc, A. Reymers, and S. Sghomonyan. Lightning origination and thunderstorm ground enhancements terminated by the lightning flash. *EPL (Europhysics Letters)*, 110(4):49001, May 2015. doi: 10.1209/0295-5075/110/49001.
- Ashot Chilingarian, Bagrat Mailyan, and Levon Vanyan. Recovering of the energy spectra of electrons and gamma rays coming from the thunderclouds. *Atmospheric Research*, 114:1–16, October 2012. doi: 10.1016/j.atmosres.2012.05.008.
- Themis G. Chronis. Investigating Possible Links between Incoming Cosmic Ray Fluxes and Lightning Activity over the United States. *Journal of Climate*, 22(21):5748, January 2009. doi: 10.1175/2009JCLI2912.1.
- L. M. Coleman and J. R. Dwyer. Propagation speed of runaway electron avalanches. *Geophys. Res. Lett.*, 33(11):L11810, June 2006. doi: 10.1029/2006GL025863.
- L. M. Coleman and J. R. Dwyer. Propagation speed of runaway electron avalanches. *Geophysical Research Letters*, 33(11), 2006. <https://doi.org/10.1029/2006GL025863>.
- E. S. Cramer, B. G. Mailyan, S. Celestin, and J. R. Dwyer. A simulation study on the electric field spectral

- dependence of thunderstorm ground enhancements and gamma ray glows. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 122(9):4763–4772, May 2017. doi: 10.1002/2016JD026422.
- G. Diniz, Y. Wada, Y. Ohira, K. Nakazawa, and T. Enoto. Atmospheric Electron Spatial Range Extended by Thundercloud Electric Field Below the Relativistic Runaway Electron Avalanche Threshold. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 127(3):e2021JD035958, February 2022. doi: 10.1029/2021JD035958.
- Michael Dixon and Gerry Wiener. TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting—A Radar-based Methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10(6):785, January 1993. doi: 10.1175/1520-0426(1993)010<0785:TTITAA>2.0.CO;2.
- L. I. Dorman and I. V. Dorman. Possible influence of cosmic rays on climate through thunderstorm clouds, 1. Theory on cosmic ray connection with atmospheric electric field phenomenon. In *35th COSPAR Scientific Assembly*, volume 35, page 3882, January 2004.
- J. R. Dwyer. A fundamental limit on electric fields in air. *Geophys. Res. Lett.*, 30(20):2055, October 2003. doi: 10.1029/2003GL017781.
- J. R. Dwyer. The initiation of lightning by runaway air breakdown. *Geophys. Res. Lett.*, 32(20):L20808, October 2005. doi: 10.1029/2005GL023975.
- J. R. Dwyer. Relativistic breakdown in planetary atmospheres. *Physics of Plasmas*, 14(4):042901–042901, April 2007. doi: 10.1063/1.2709652.
- J. R. Dwyer. Source mechanisms of terrestrial gamma-ray flashes. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 113(D10):D10103, May 2008. doi: 10.1029/2007JD009248.
- Joseph R. Dwyer. Diffusion of relativistic runaway electrons and implications for lightning initiation. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 115(3):A00E14, March 2010. doi: 10.1029/2009JA014504.
- Joseph R. Dwyer. The relativistic feedback discharge model of terrestrial gamma ray flashes. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 117(A2):A02308, February 2012. doi: 10.1029/2011JA017160.
- Kenneth B. Eack, William H. Beasley, W. David Rust, Thomas C. Marshall, and Maribeth Stolzenburg. Initial results from simultaneous observation of X rays and electric fields in a thunderstorm. *J. Geophys. Res.*, 101(D23):29,637–29,640, December 1996. doi: 10.1029/96JD01705.
- Teruaki Enoto, Yuuki Wada, Yoshihiro Furuta, Kazuhiro Nakazawa, Takayuki Yuasa, Kazufumi Okuda, Kazuo Makishima, Mitsuteru Sato, Yousuke Sato, Toshio Nakano, Daigo Umemoto, and Harufumi Tsuchiya. Photonuclear reactions triggered by lightning discharge. *Nature*, 551(7681):481–484, November 2017. doi: 10.1038/nature24630.
- G. J. Fishman, P. N. Bhat, R. Mallozzi, J. M. Horack, T. Koshut, C. Kouveliotou, G. N. Pendleton, C. A. Meegan, R. B. Wilson, W. S. Paciasas, S. J. Goodman, and H. J. Christian. Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin. *Science*, 264(5163):1313–1316, May 1994. doi: 10.1126/science.264.5163.1313.
- Hani Francisco, Behnaz Bagheri, and Ute Ebert. Electrically isolated propagating streamer heads formed by strong electron attachment. *Plasma Sources Science and Technology*, 30(2):025006, 2021. <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6595/abdaa3>.
- Ross Gunn. Electric Field Intensity Inside of Natural Clouds. *Journal of Applied Physics*, 19(5):481–484, May 1948. doi: 10.1063/1.1698159.
- A. V. Gurevich and A. N. Karashtin. Runaway Breakdown and Hydrometeors in Lightning Initiation. *Phys. Rev. Lett.*, 110(18):185005, May 2013. doi: 10.1103/PhysRevLett.110.185005.
- A. V. Gurevich, G. M. Milikh, and R. Roussel-Dupre. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *Physics Letters A*, 165(5-6):463–468, June 1992. doi: 10.1016/0375-9601(92)

90348-P.

- A. V. Gurevich, G. G. Mitko, V. P. Antonova, A. P. Chubenko, A. N. Karashtin, S. V. Kryukov, A. S. Naumov, L. V. Pavljuchenko, M. O. Ptitsyn, V. A. Ryabov, S. Ya. Shalamova, A. L. Shepetov, Yu. V. Shlyugaev, L. I. Vildanova, and K. P. Zybin. An intracloud discharge caused by extensive atmospheric shower. *Physics Letters A*, 373(39):3550–3553, September 2009. doi: 10.1016/j.physleta.2009.07.085.
- B. M. Hare, J. R. Dwyer, L. H. Winner, M. A. Uman, D. M. Jordan, D. A. Kotovsky, J. A. Caicedo, R. A. Wilkes, F. L. Carvalho, J. T. Pilkey, T. K. Ngin, W. R. Gamerota, and H. K. Rassoul. Do cosmic ray air showers initiate lightning?: A statistical analysis of cosmic ray air showers and lightning mapping array data. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 122(15):8173–8186, August 2017. doi: 10.1002/2016JD025949.
- V. F. Hess. . *Phys. Zeit.*, 1912.
- S. Hisadomi, K. Nakazawa, Y. Wada, Y. Tsuji, T. Enoto, T. Shinoda, et al. Multiple gamma-ray glows and a downward tgf observed from nearby thunderclouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(18):e2021JD034543, 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JD034543>.
- J. T. Johnson, Pamela L. Mackeen, Arthur Witt, E. Dewayne Mitchell, Gregory J. Stumpf, Michael D. Eilts, and Kevin W. Thomas. The Storm Cell Identification and Tracking Algorithm: An Enhanced WSR-88D Algorithm. *Weather and Forecasting*, 13(2):263–276, June 1998. doi: 10.1175/1520-0434(1998)013<0263:TSCIAT>2.0.CO;2.
- Nicole A. Kelley, David M. Smith, Joseph R. Dwyer, Michael Splitt, Steven Lazarus, Forest Martinez-McKinney, Bryna Hazelton, Brian Grefenstette, Alexander Lowell, and Hamid K. Rassoul. Relativistic electron avalanches as a thunderstorm discharge competing with lightning. *Nature Communications*, 6:7845, August 2015. doi: 10.1038/ncomms8845.
- Takeharu Kouketsu, Hiroshi Uyeda, Tadayasu Ohigashi, Mariko Oue, Hiroto Takeuchi, Taro Shinoda, Kazuhisa Tsuboki, Mamoru Kubo, and Ken-ichiro Muramoto. A Hydrometeor Classification Method for X-Band Polarimetric Radar: Construction and Validation Focusing on Solid Hydrometeors under Moist Environments. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32(11):2052–2074, November 2015. doi: 10.1175/JTECH-D-14-00124.1.
- Y. Kuroda, S. Oguri, Y. Kato, R. Nakata, Y. Inoue, C. Ito, and M. Minowa. Observation of gamma ray bursts at ground level under the thunderclouds. *Physics Letters B*, 758:286–291, July 2016. doi: 10.1016/j.physletb.2016.05.029.
- Hongping Liu and V. Chandrasekar. Classification of Hydrometeors Based on Polarimetric Radar Measurements: Development of Fuzzy Logic and Neuro-Fuzzy Systems, and In Situ Verification. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(2):140, February 2000. doi: 10.1175/1520-0426(2000)017<0140:COHBOP>2.0.CO;2.
- K. Makishima. Energy non-equipartition processes in the Universe. *Astronomische Nachrichten*, 320(4):163, January 1999. doi: 10.1002/1521-3994(199908)320:4/5<163::AID-ASNA163>3.0.CO;2-#10.1002/1521-3994(199908)320:4/5<163::AID-ASNA163>3.0.CO;2-#.
- D. J. Malan and B. F. J. Schonland. The Distribution of Electricity in Thunderclouds. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 209(1097):158–177, October 1951. doi: 10.1098/rspa.1951.0195.
- T. C. Marshall, M. Stolzenburg, C. R. Maggio, L. M. Coleman, P. R. Krehbiel, T. Hamlin, R. J. Thomas, and W. Rison. Observed electric fields associated with lightning initiation. *Geophys. Res. Lett.*, 32(3):L03813, February 2005. doi: 10.1029/2004GL021802.
- Thomas C. Marshall, Michael P. McCarthy, and W. David Rust. Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms. *J. Geophys. Res.*, 100(D4):7097–7103, April 1995. doi: 10.1029/95JD00020.
- M. McCarthy and G. K. Parks. Further observations of X-rays inside thunderstorms. *Geophys. Res. Lett.*, 12(6):

- 393–396, June 1985. doi: 10.1029/GL012i006p00393.
- Yasushi Muraki, William Ian Axford, Yutaka Matsubara, Kimiaki Masuda, Yoichi Miyamoto, Hiroaki Menjyou, Shizuko Sakakibara, Takashi Sako, Takashi Takami, Takami Yamada, Shoichi Shibata, Yoshinori Munakata, Kazuoki Munakata, Shinnichi Yasue, Takasuke Sakai, Kiyomi Mitsui, Kazuhiko Fujimoto, and Erwin Flückiger. Effects of atmospheric electric fields on cosmic rays. *Phys. Rev. D*, 69(12):123010, June 2004. doi: 10.1103/PhysRevD.69.123010.
- Amitabh Nag and Vladimir A. Rakov. Some inferences on the role of lower positive charge region in facilitating different types of lightning. *Geophysical Research Letters*, 36(5), 2009. <https://doi.org/10.1029/2008GL036783>.
- K.A. Nicoll. Measurements of atmospheric electricity aloft. *Surv Geophys*, 33:991–1057, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9188-9>.
- NIST データベース. <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>. 閲覧日 2024 年 1 月 21 日.
- O. Okike and A. B. Collier. A multivariate study of Forbush decrease simultaneity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73(7-8):796–804, May 2011. doi: 10.1016/j.jastp.2011.01.015.
- S. E. Reynolds, M. Brook, and Mary Foulks Gourley. Thunderstorm Charge Separation. *Journal of Atmospheric Sciences*, 14(5):426–436, October 1957. doi: 10.1175/1520-0469(1957)014<textless{}0426:TCS<textgreater{}2.0.CO;2.
- O. J. Roberts, G. Fitzpatrick, M. Stanbro, S. McBreen, M. S. Briggs, R. H. Holzworth, J. E. Grove, A. Chekhtman, E. S. Cramer, and B. G. Mailyan. The First Fermi-GBM Terrestrial Gamma Ray Flash Catalog. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 123(5):4381–4401, May 2018. doi: 10.1029/2017JA024837.
- Marcelo M. F. Saba, Leandro Z. S. Campos, E. Philip Krider, and Osmar Pinto Jr. High-speed video observations of positive ground flashes produced by intracloud lightning. *Geophysical Research Letters*, 36(12), 2009. <https://doi.org/10.1029/2009GL038791>.
- Dongdong Shi, Daohong Wang, Ting Wu, and Nobuyuki Takagi. Correlation between the first return stroke of negative cg lightning and its preceding discharge processes. *Geophysical Research: Atmospheres*, 124(15): 8501–8510, 2019. <https://doi.org/10.1029/2019JD030593>.
- George Simpson and F. J. Scrase. The Distribution of Electricity in Thunderclouds. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 161(906):309–352, August 1937. doi: 10.1098/rspa.1937.0148.
- D. M. Smith, B. W. Grefenstette, L. I. Lopez, R. P. Lin, S. A. Cummer, R. H. Holzworth, and E. H. Lay. Terrestrial Gamma-Ray Flashes: Statistical and Individual Properties from RHESSI. 2005:AE14A-04, December 2005.
- Tsutomu Takahashi. Riming Electrification as a Charge Generation Mechanism in Thunderstorms. *Journal of Atmospheric Sciences*, 35(8):1536–1548, August 1978. doi: 10.1175/1520-0469(1978)035<textless{}1536:REAACG<textgreater{}2.0.CO;2.
- T. Takami, Y. Muraki, Y. Matsubara, K. Masuda, T. Sako, S. Sakakibara, T. Murata, H. Tsuchiya, D. Yamamoto, K. Watanabe, S. Shibata, Y. Munakata, K. Munakata, S. Yasue, T. Sakai, K. Mitsui, and E. O. Flueckiger. Particle acceleration in thunderstorms. In *International Cosmic Ray Conference*, volume 10 of *International Cosmic Ray Conference*, page 4027, August 2001.
- M. Tavani, A. Bulgarelli, V. Vittorini, A. Pellizzoni, E. Striani, P. Caraveo, M. C. Weisskopf, A. Tennant, G. Pucella, A. Trois, E. Costa, Y. Evangelista, C. Pittori, F. Verrecchia, E. Del Monte, R. Campana, M. Pilia, A. De Luca, I. Donnarumma, D. Horns, C. Ferrigno, C. O. Heinke, M. Trifoglio, F. Gianotti, S. Vercellone, A. Argan, G. Barbiellini, P. W. Cattaneo, A. W. Chen, T. Contessi, F. D’Ammando, G. DeParis, G. Di Cocco, G. Di Persio, M. Feroci, A. Ferrari, M. Galli, A. Giuliani, M. Giusti, C. Labanti, I. Lapshov, F. Lazzarotto,

- P. Lipari, F. Longo, F. Fuschino, M. Marisaldi, S. Mereghetti, E. Morelli, E. Moretti, A. Morselli, L. Pacciani, F. Perotti, G. Piano, P. Picozza, M. Prest, M. Rapisarda, A. Rappoldi, A. Rubini, S. Sabatini, P. Soffitta, E. Vallazza, A. Zambra, D. Zanello, F. Lucarelli, P. Santolamazza, P. Giommi, L. Salotti, and G. F. Bignami. Discovery of Powerful Gamma-Ray Flares from the Crab Nebula. *Science*, 331(6018):736, February 2011. doi: 10.1126/science.1200083.
- Telescope Array Collaboration, R. U. Abbasi, M. G. Allen, R. Arimura, J. W. Belz, D. R. Bergman, S. A. Blake, B. K. Shin, I. J. Buckland, B. G. Cheon, T. Fujii, K. Fujisue, K. Fujita, M. Fukushima, G. D. Furlich, Z. R. Gerber, N. Globus, K. Hibino, R. Higuchi, K. Honda, D. Ikeda, H. Ito, A. Iwasaki, S. Jeong, H. M. Jeong, C. H. Jui, K. Kadota, F. Kakimoto, O. E. Kalashev, K. Kasahara, K. Kawata, I. Kharuk, E. Kido, S. W. Kim, H. B. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim, I. Komae, Y. Kubota, M. Y. Kuznetsov, K. H. Lee, B. K. Lubsandorzhev, J. P. Lundquist, J. N. Matthews, S. Nagataki, T. Nakamura, A. Nakazawa, T. Nonaka, S. Ogio, M. Ono, H. Oshima, I. H. Park, M. Potts, S. Pshirkov, J. R. Remington, D. C. Rodriguez, C. Rott, G. I. Rubtsov, D. Ryu, H. Sagawa, N. Sakaki, T. Sako, N. Sakurai, H. Shin, J. D. Smith, P. Sokolsky, B. T. Stokes, T. S. Stroman, K. Takahashi, M. Takeda, A. Taketa, Y. Tameda, S. Thomas, G. B. Thomson, P. G. Tinyakov, I. Tkachev, T. Tomida, S. V. Troitsky, Y. Tsunesada, S. Udo, F. R. Urban, T. Wong, K. Yamazaki, Y. Yuma, Y. V. Zhezher, and Z. Zundel. An extremely energetic cosmic ray observed by a surface detector array. *Science*, 382(6673):903–907, November 2023. doi: 10.1126/science.abo5095.
- Tatsuo Torii, Minoru Takeishi, and Teruo Hosono. Observation of gamma-ray dose increase associated with winter thunderstorm and lightning activity. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 107(D17):4324, September 2002. doi: 10.1029/2001JD000938.
- H. Tsuchiya, T. Enoto, S. Yamada, T. Yuasa, M. Kawaharada, T. Kitaguchi, M. Kokubun, H. Kato, M. Okano, S. Nakamura, and K. Makishima. Detection of High-Energy Gamma Rays from Winter Thunderclouds. *Phys. Rev. Lett.*, 99(16):165002, October 2007. doi: 10.1103/PhysRevLett.99.165002.
- H. Tsuchiya, T. Enoto, T. Torii, K. Nakazawa, T. Yuasa, S. Torii, T. Fukuyama, T. Yamaguchi, H. Kato, M. Okano, M. Takita, and K. Makishima. Observation of an Energetic Radiation Burst from Mountain-Top Thunderclouds. *Phys. Rev. Lett.*, 102(25):255003, June 2009. doi: 10.1103/PhysRevLett.102.255003.
- H. Tsuchiya, T. Enoto, K. Iwata, S. Yamada, T. Yuasa, T. Kitaguchi, et al. Hardening and termination of long-duration  $\gamma$  rays detected prior to lightning. *Physical Review Letters*, 111(1):015001, 2013. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013PhRvL.111a5001T>.
- M. Tsurumi, T. Enoto, Y. Ikkatai, T. Wu, D. Wang, T. Shinoda, K. Nakazawa, N. Tsuji, G. S. Diniz, J. Kataoka, N. Koshikawa, R. Iwashita, M. Kamogawa, T. Takagaki, S. Miyake, D. Tomioka, T. Morimoto, Y. Nakamura, and H. Tsuchiya. Citizen Science Observation of a Gamma-Ray Glow Associated With the Initiation of a Lightning Flash. *Geophys. Res. Lett.*, 50(13):e2023GL103612, July 2023. doi: 10.1029/2023GL103612.
- V. Chandrasekar V.N. Bringi. *Polarimetric Doppler weather radar : principles and applications*. Cambridge University Press, 2001.
- Y. Wada, G. S. Bowers, T. Enoto, M. Kamogawa, Y. Nakamura, T. Morimoto, et al. Termination of electron acceleration in thundercloud by intracloud/intercloud discharge. *Geophysical Research Letters*, 45(11):5700–5707, 2018. <https://doi.org/10.1029/2018GL077784>.
- Y. Wada, T. Matsumoto, T. Enoto, K. Nakazawa, T. Yuasa, Y. Furuta, D. Yonetoku, T. Sawano, G. Okada, H. Nanto, S. Hisadomi, Y. Tsuji, G. S. Diniz, K. Makishima, and H. Tsuchiya. Catalog of gamma-ray glows during four winter seasons in Japan. *Physical Review Research*, 3(4):043117, November 2021. doi: 10.1103/PhysRevResearch.3.043117.

- Yuuki Wada, Teruaki Enoto, Yoshitaka Nakamura, Yoshihiro Furuta, Takayuki Yuasa, Kazuhiro Nakazawa, et al. Gamma-ray glow preceding downward terrestrial gamma-ray flash. *Communications Physics*, 2(1):67, 2019. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019CmPhy...2...67W>.
- Daohong Wang, Ting Wu, Haitao Huang, Junchen Yang, and Kazuo Yamamoto. 3d mapping of winter lightning in japan with an array of discone antennas. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 17(11):1606–1612, 2022. <https://doi.org/10.1002/tee.23667>.
- C. T. R. Wilson. The Acceleration of  $\beta$ -particles in Strong Electric Fields such as those of Thunderclouds. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 22(4):534, January 1925. doi: 10.1017/S0305004100003236.
- Ting Wu, Daohong Wang, and Nobuyuki Takagi. Lightning mapping with an array of fast antennas. *Geophysical Research Letters*, 45(8):3698–3705, 2018. <https://doi.org/10.1002/2018GL077628>.
- Ting Wu, Daohong Wang, and Nobuyuki Takagi. Multiple-stroke positive cloud-to-ground lightning observed by the falma in winter thunderstorms in japan. *Geophysical Research: Atmospheres*, 125(20):e2020JD033039, 2020. <https://doi.org/10.1029/2020JD033039>.
- Ting Wu, Daohong Wang, and Nobuyuki Takagi. On the intensity of first return strokes in positive cloud-to-ground lightning in winter. *Geophysical Research: Atmospheres*, 127(22):e2022JD037282, 2022. <https://doi.org/10.1029/2022JD037282>.
- XRAIN リアルタイム雨量情報システム. <https://diasjp.net/service/xrain/>. 閲覧日 2024 年 1 月 21 日.
- B. Yang, X. Gao, Y. Han, Y. Zhang, and T. Gao. A Thunderstorm Identification Method Combining the Area of Graupel Distribution Region and Weather Radar Reflectivity. *Earth and Space Science*, 7(1):e00733, January 2020. doi: 10.1029/2019EA000733.
- 一般財団法人 河川情報センター. [https://www.river.or.jp/post\\_22.html](https://www.river.or.jp/post_22.html). 閲覧日 2024 年 1 月 21 日.
- 榎戸輝揚. 2006 年度修士論文 雷雲電場における粒子加速の観測的研究. 修士論文, 東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻, 2006.
- 気象庁ホームページ. <https://www.jma.go.jp/jma/index.html>. 閲覧日 2024 年 1 月 21 日.
- 高橋劭. 雷の科学. 東京大学出版会, 2009.
- 小倉義光. 一般気象学. 東京大学出版会, 2019.
- 松元崇弘. 2019 年度修士論文 雷雲ガンマ線スペクトルの測定と 将来の光中性子計測への拡張. 修士論文, 東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻, 2019.
- 浜津亨助 深尾昌一郎. 気象と大気のリモートセンシング. 京都大学学術出版会, 2009.
- 鶴見美和. 2021 年度学士論文 シチズンサイエンス「雷雲プロジェクト」の放射線モニタ「コガモ」による雷雲ガンマ線の観測と解析. 卒業論文, 青山学院大学 理工学部, 2021.
- 日本アイソトープ協会. <https://www.jrias.or.jp>. 閲覧日 2024 年 1 月 21 日.
- 日本アイソトープ協会. アイソトープ手帳. 丸善出版株式会社, 2005.
- 武元清達. 2022 年度修士論文 冬季北陸地方で発生したガンマ線グローをもたらす 対流雲内部の偏波パラメータの時間変化. 修士論文, 名古屋大学大学院環境学研究科 地球環境科学専攻, 2022.
- 北川信一郎. 雷と雷雲の科学. 森北出版, 2001.
- 和田有希. 2006 年度修士論文 雷雲ガンマ線の多地点検出に向けた観測網の構築. 修士論文, 東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻, 2017.