

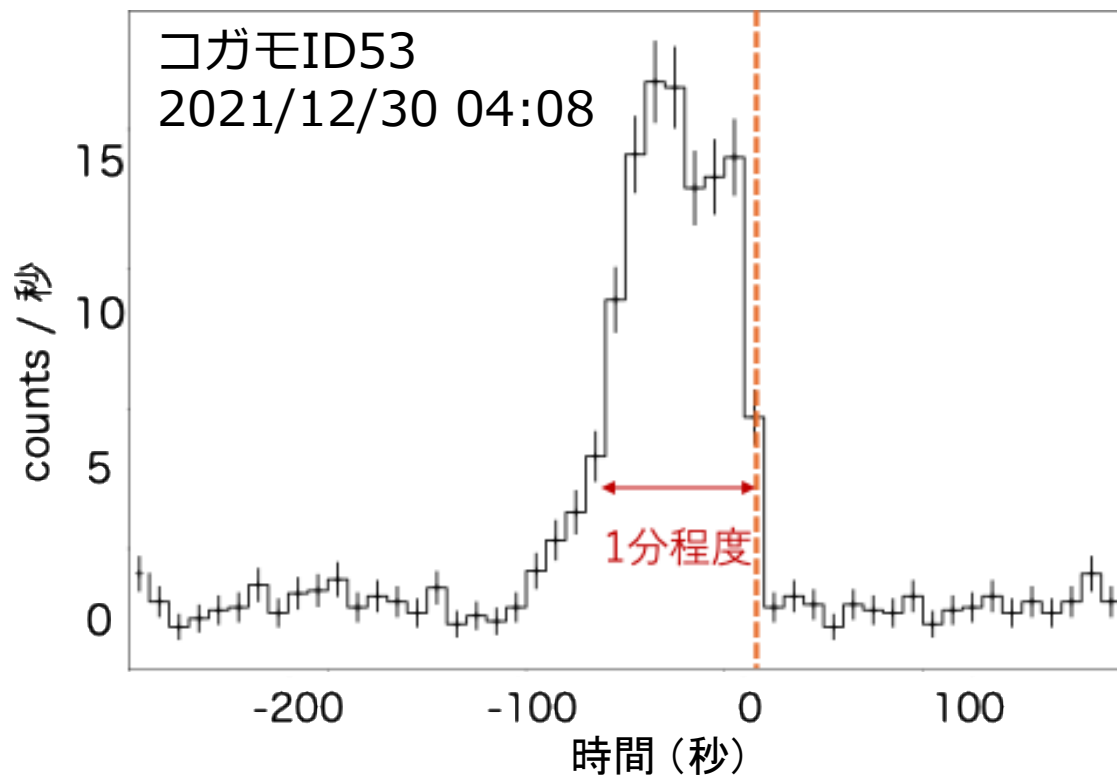
シチズンサイエンス「雷雲プロジェクト」による冬季雷雲の観測

鶴見 美和 (京都大学 宇宙線研究室)

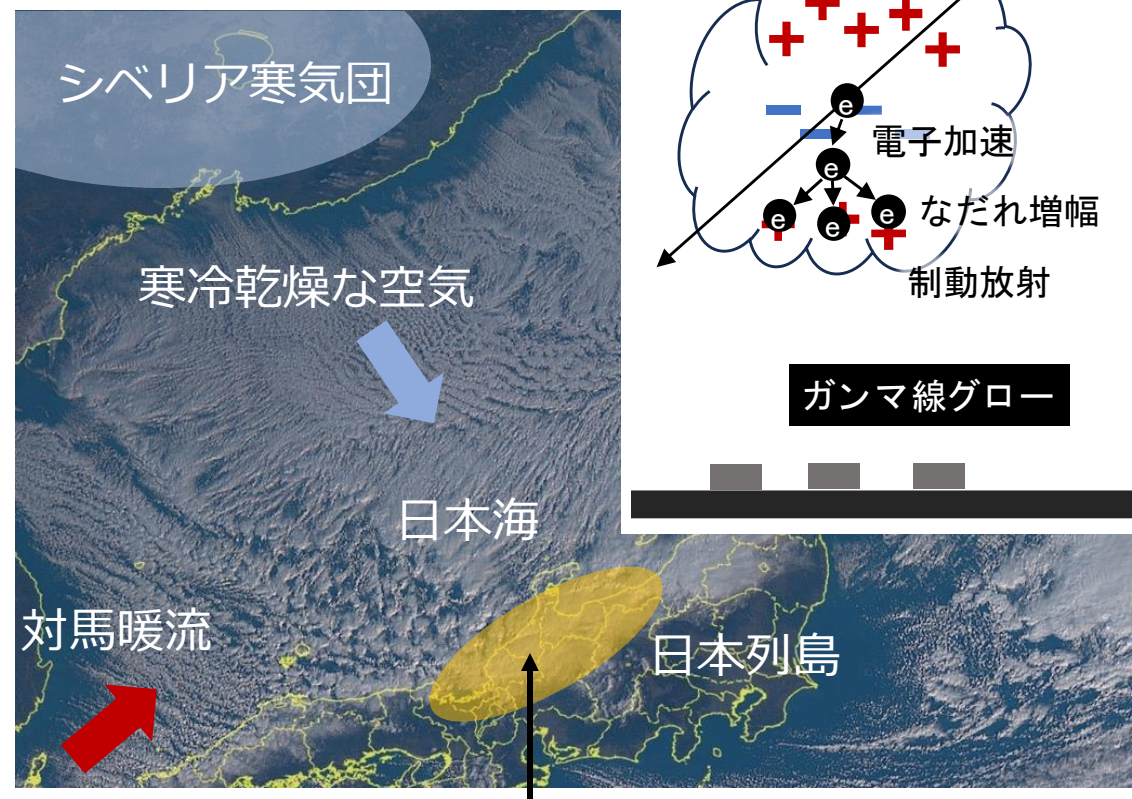
高エネルギー大気物理学

- 発達した雷雲中では、宇宙線空気シャワーを種電子にして電子加速が発生し、ガンマ線が放射される。
- ガンマ線グロー：雷雲通過時に10 MeVに達するガンマ線が数十秒にわたって地上に降り注ぐ。
- 冬季の日本海沿岸は背の低い雷雲が発達し、地上でガンマ線グローを観測しやすい。

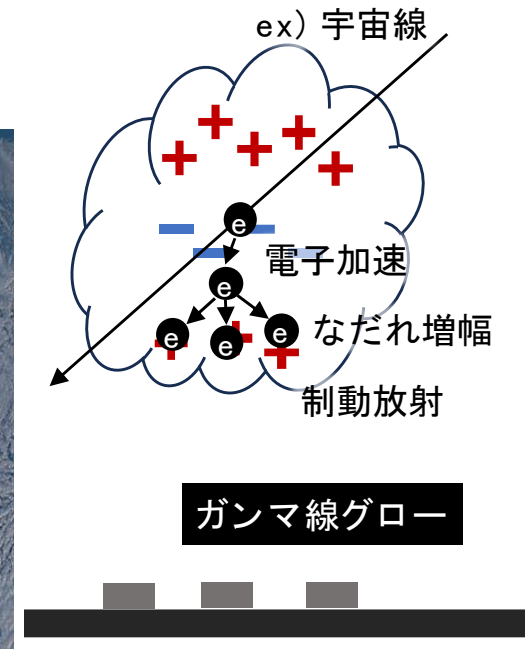
ガンマ線グローのライトカーブ



ひまわり8号の映像



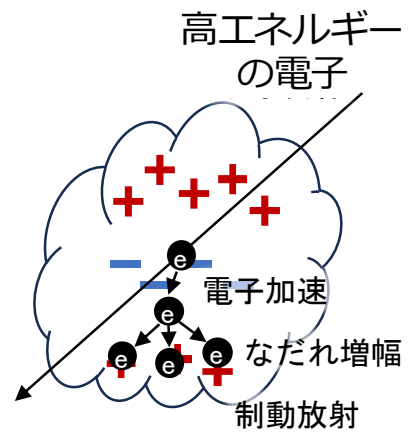
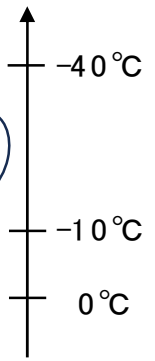
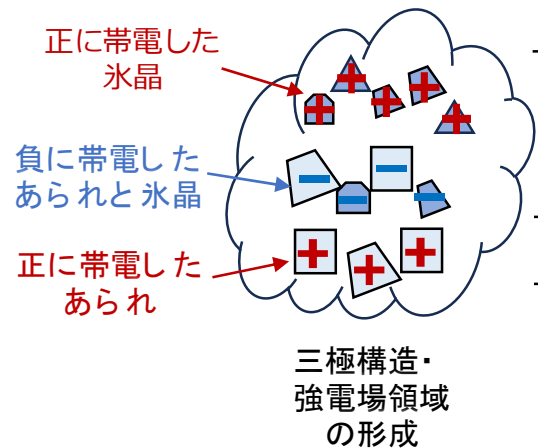
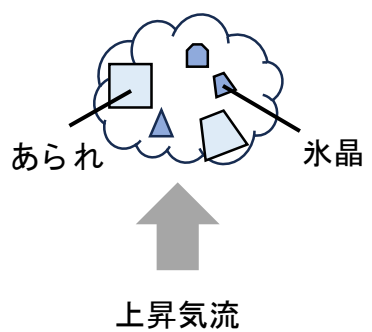
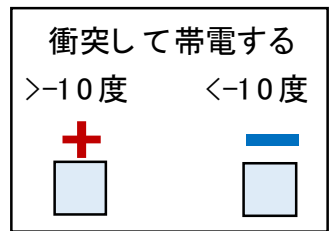
背の低い積乱雲が発達する地域



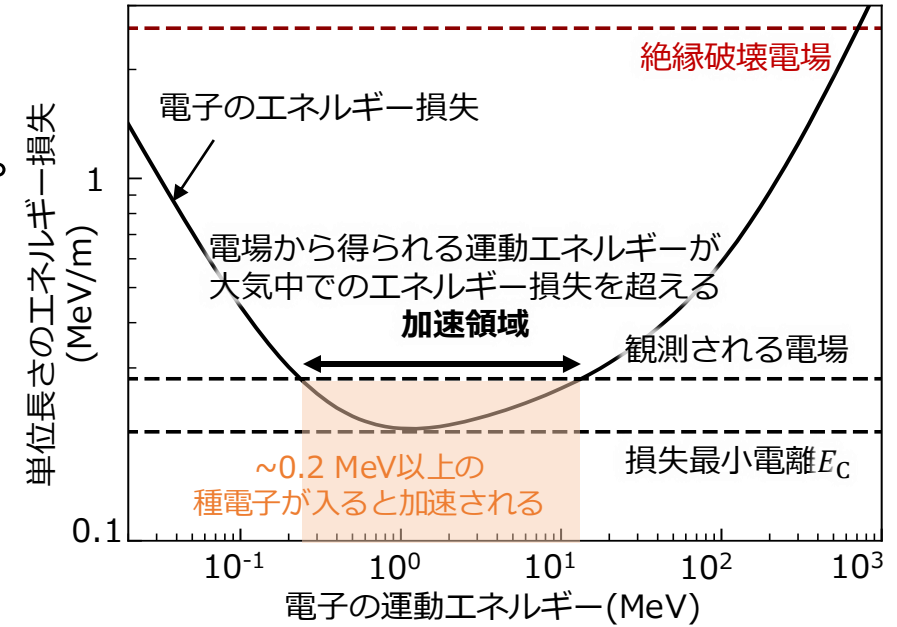
雷雲の盛衰とガンマ線グローの発生メカニズム

大気中の電子の電場加速

- 強い上昇気流によって、雷雲内に強電場領域が形成される。
- 雷雲中の強い電場領域によって、電子が加速・雪崩増幅される。
- 電子が大気とぶつかり、制動放射ガンマ線が放出される。
- 正に帯電したあられの高度が下がる。



ガンマ線グロー



発達期

最盛期

衰退期

<未解決問題> 雷放電との関係、放射領域 (電場領域) の大きさ、glowの種電子 など

多地点のガンマ線マッピング観測「雷雲プロジェクト」

コガモ (COmpact GAMma-ray MOonitor)

- 小型で持ち運びやすい放射線検出器。
- 市民サポーターに郵送し庭に設置してもらう。
- CsI (TI) シンチレータ (5×5×15 cm)
- ガンマ線帯域：0.2-10 MeV
- 環境データ：気圧、気温、湿度、照度

XRAIN (国土交通省)

- 3 cmの波長の電波を使った気象レーダー

FALMA・DALMA (岐阜大学)

- 低周波電波による雷観測

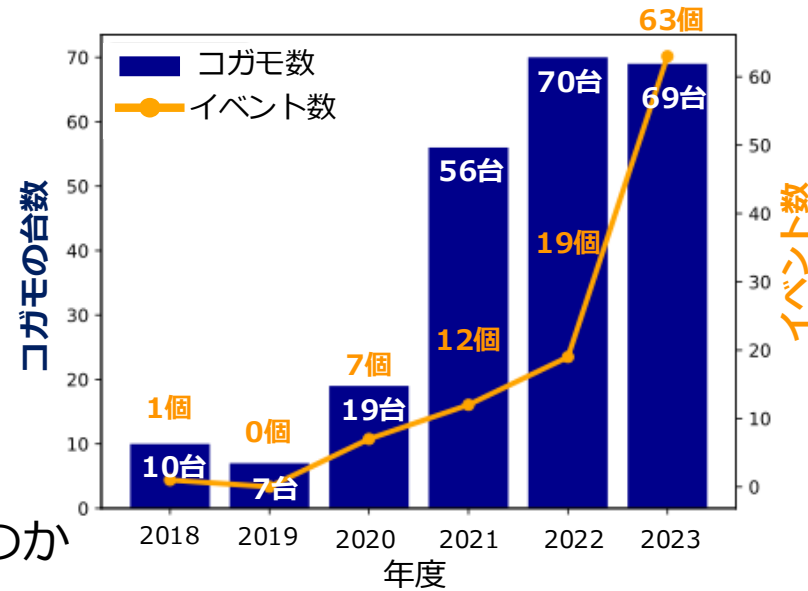
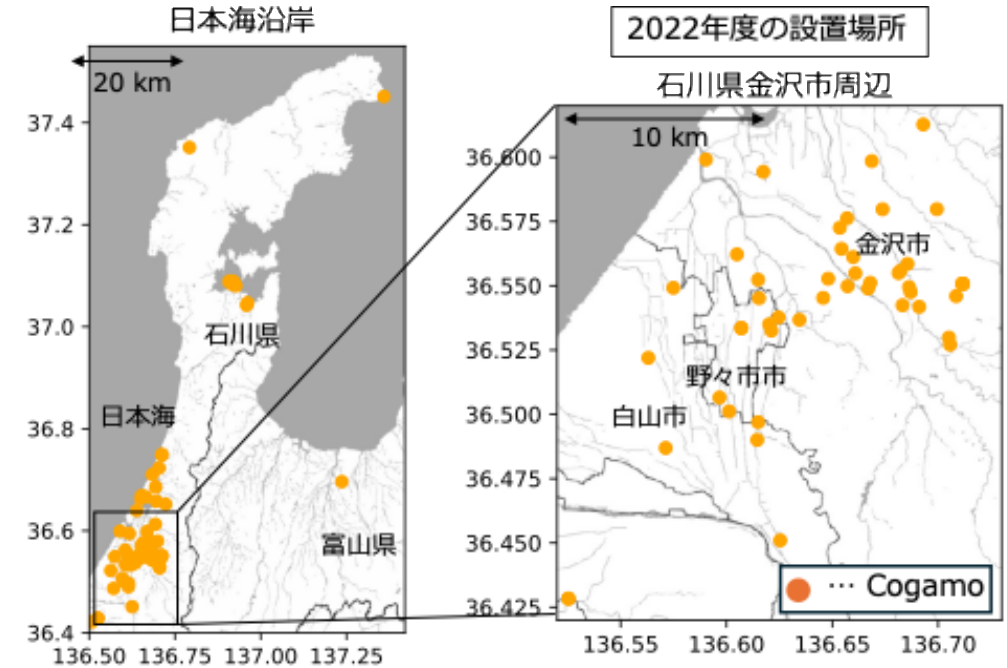
【本発表】

多地点観測でわかってきたこと

- glowと雷との関係 (2021/12/30)
- レーダー観測による放射領域の大きさ

これからやりたいこと

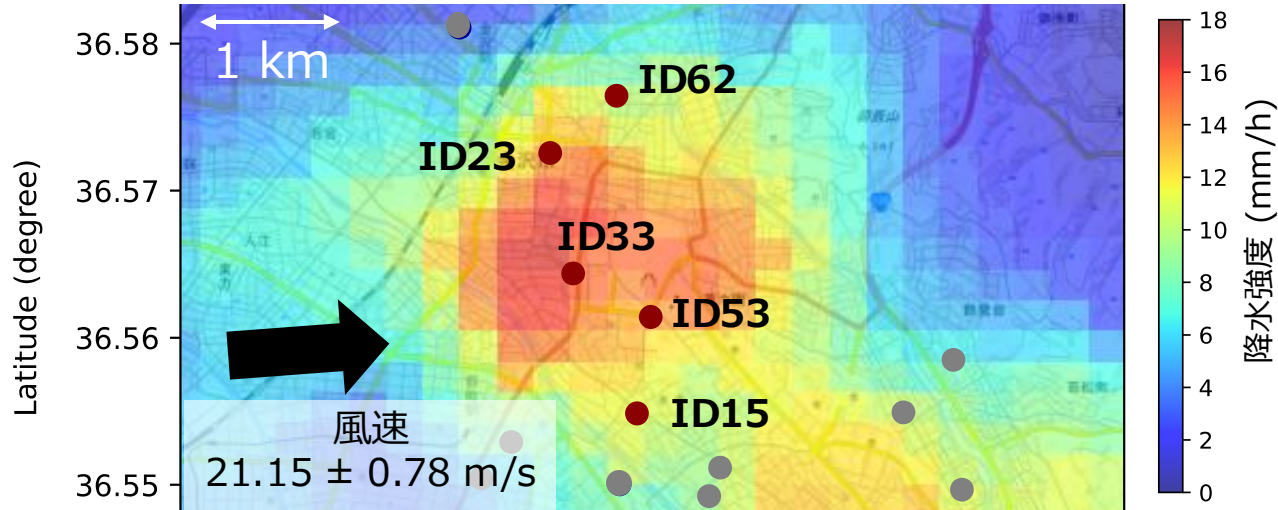
- glowの種電子に宇宙線が関わっているのか



ガンマ線グローと雷放電の位置の比較(2021/12/30のイベント)

2021/12/30 4:08(JST)

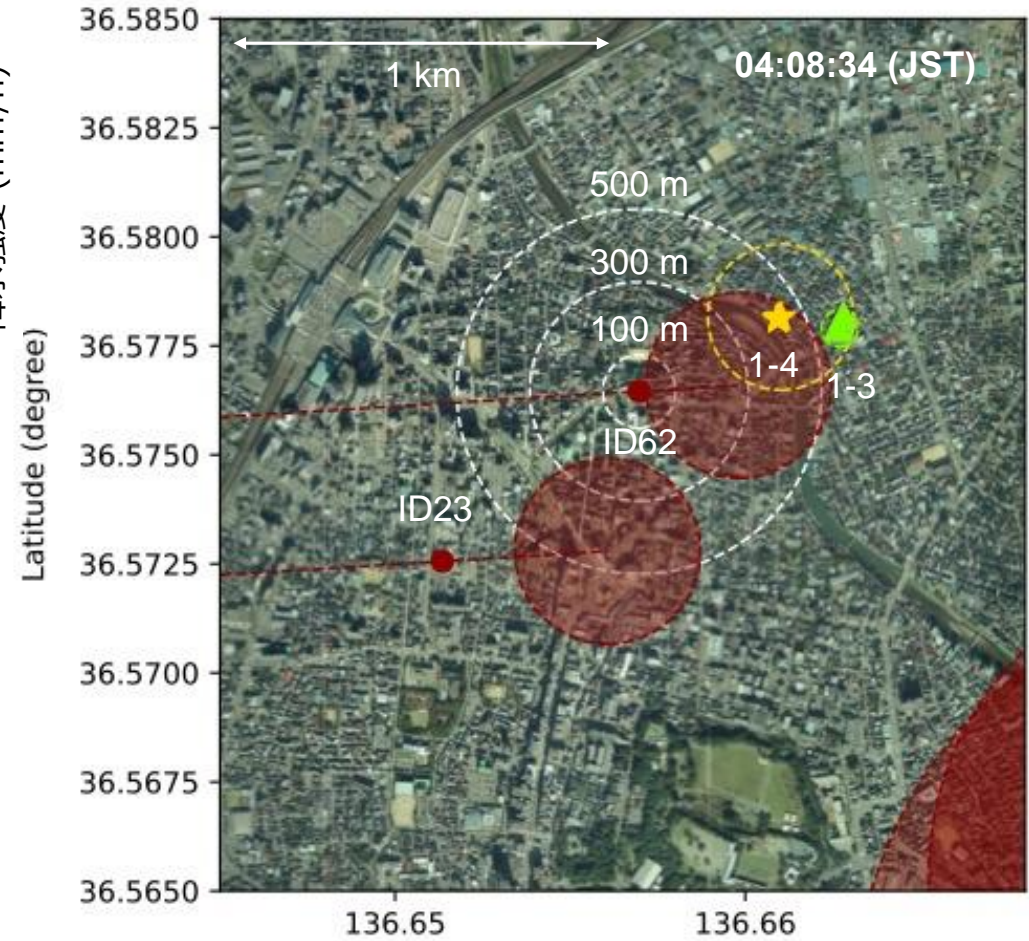
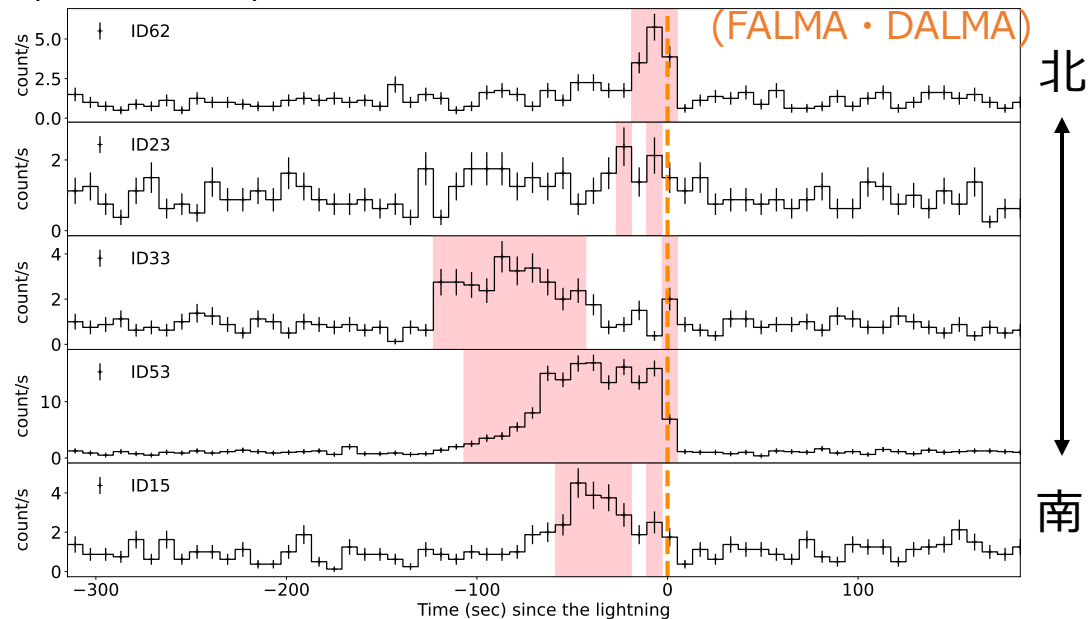
Tsurumi et al., GRL 2023



>3 MeV, 10 sec-bin, red:3.5 σ detection

雷放電

(FALMA · DALMA)

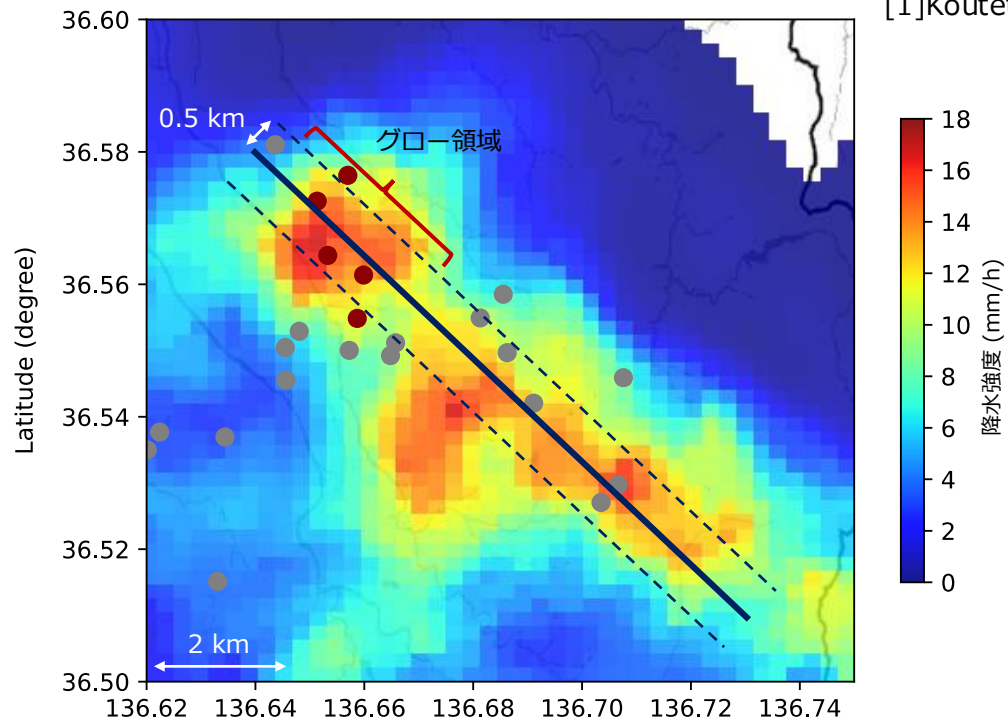


- Cogamo
- ★ FALMA
- ▲ DALMA

ガンマ線グローと雷放電の位置の比較 (2021/12/30のイベント)

グロー領域の反射強度と粒子判別の断面図[1]

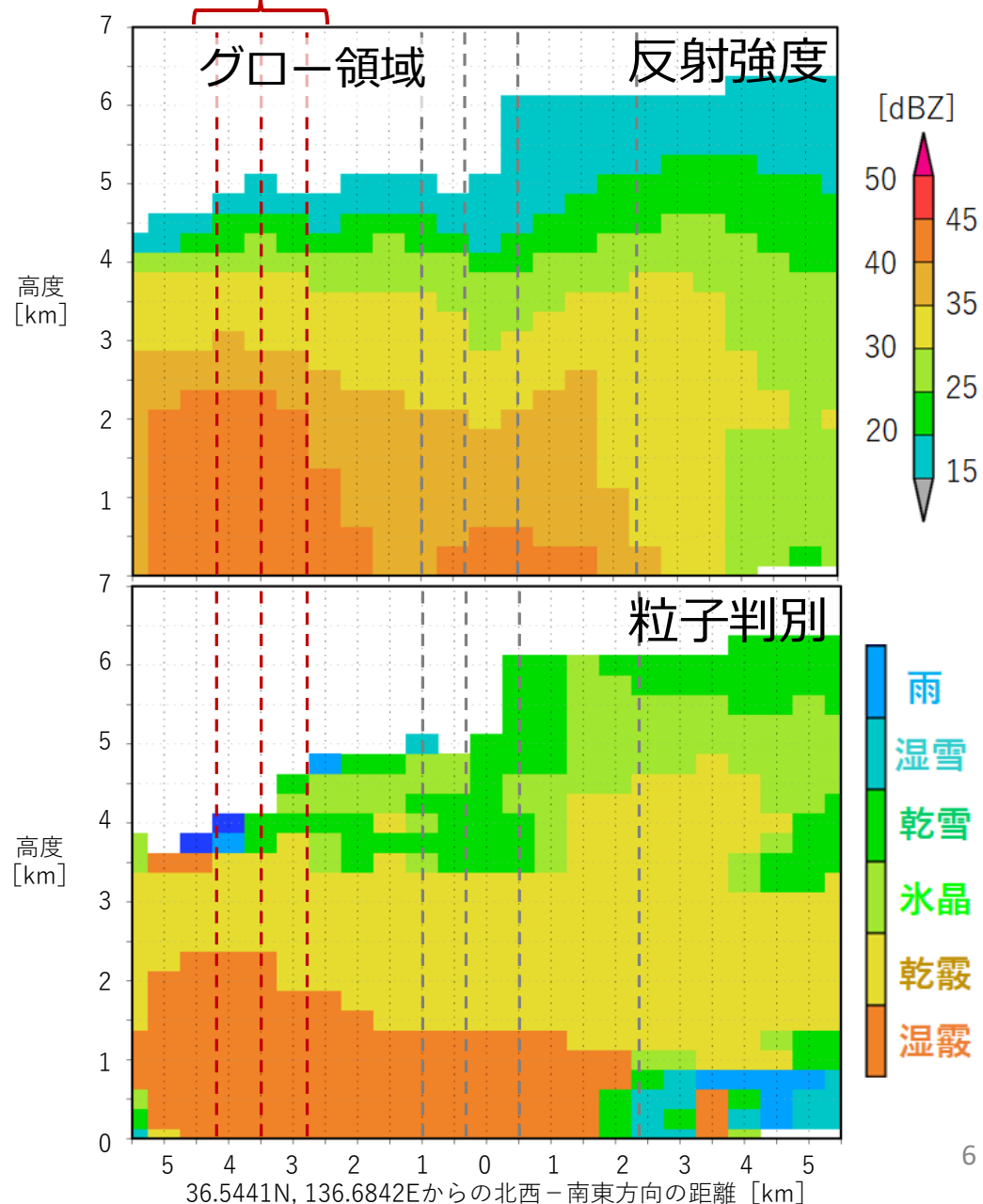
[1]Koutetsu et al., 2015



- … 検出したコガモ
- … 検出しなかったコガモ

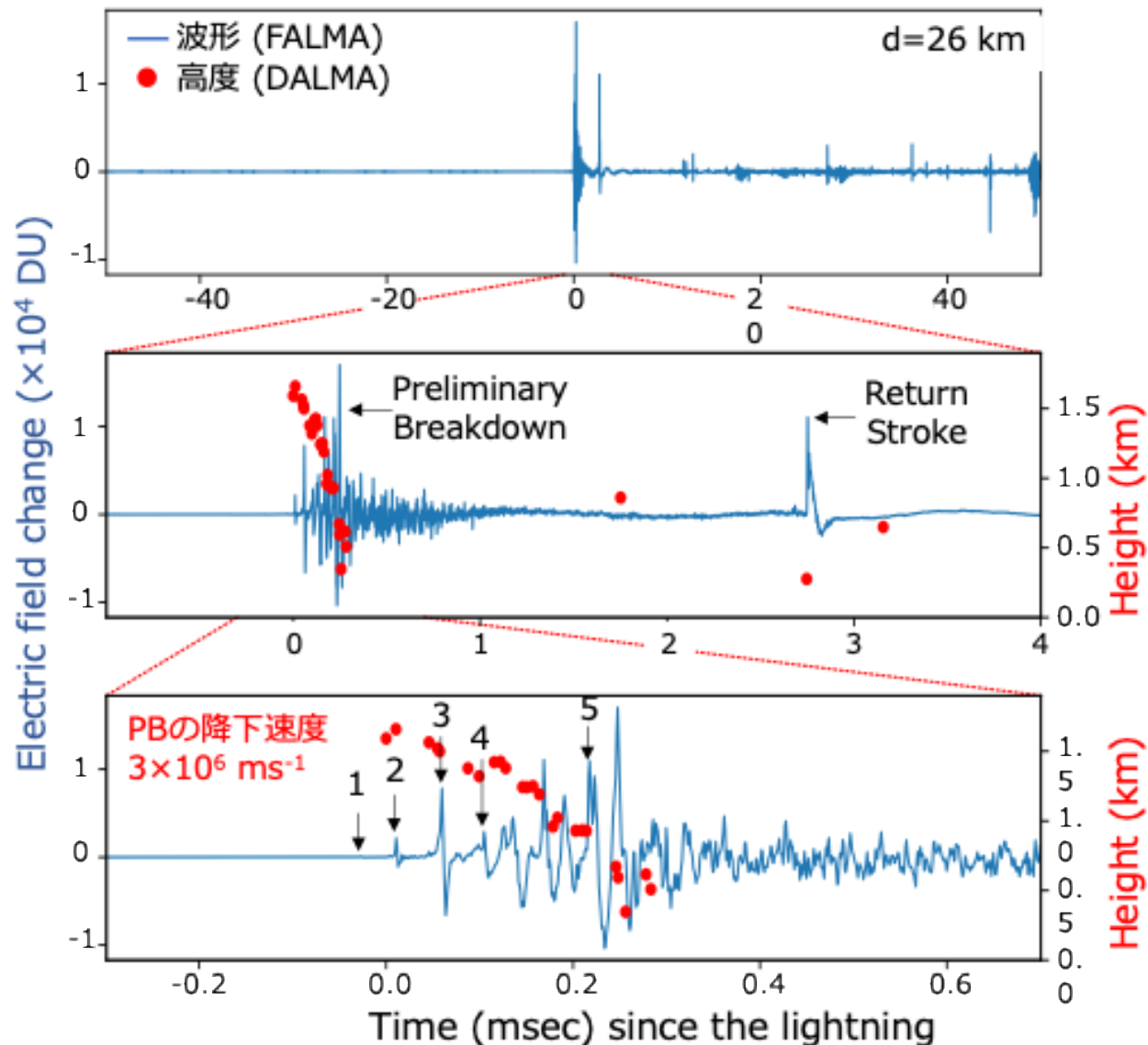
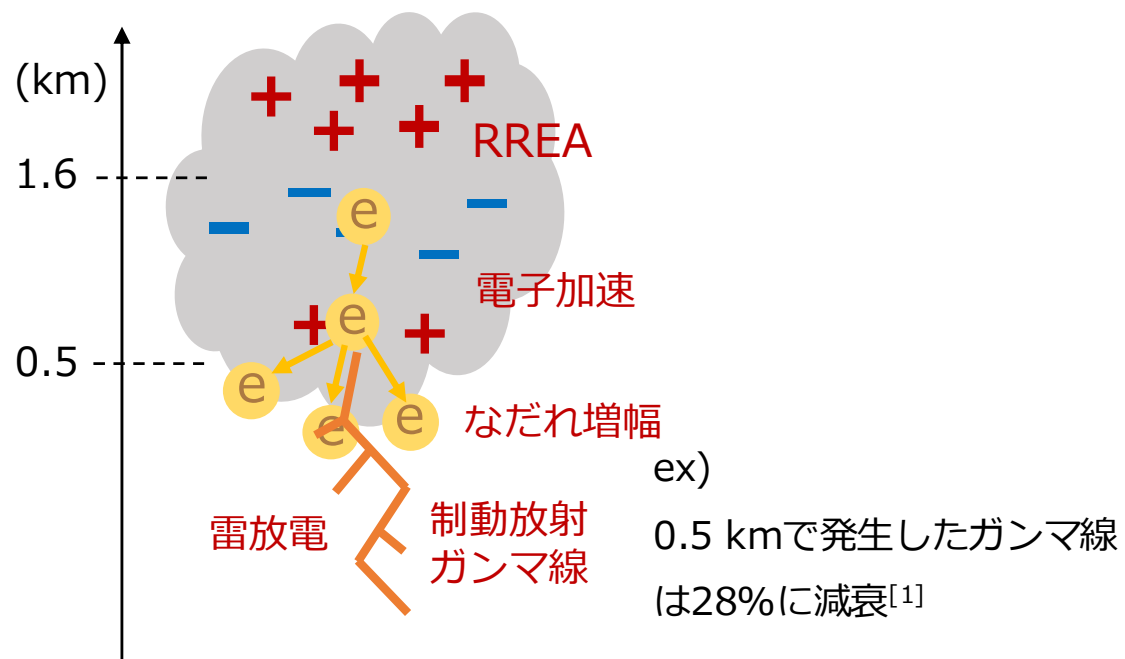
<グロー領域の特徴>

- 40 dBZ以上の領域が2 km付近まで広がる。
- あられが地上まで落ちてきている。



ガンマ線グローと雷放電の位置の比較 (2021/12/30のイベント)

- 雷放電は1.6 kmから0.5 kmで発生している。
 - 降下速度が通常に比べて1桁程度速い。
- この高度に、電場の大きな電子加速領域が存在すると考えられる。

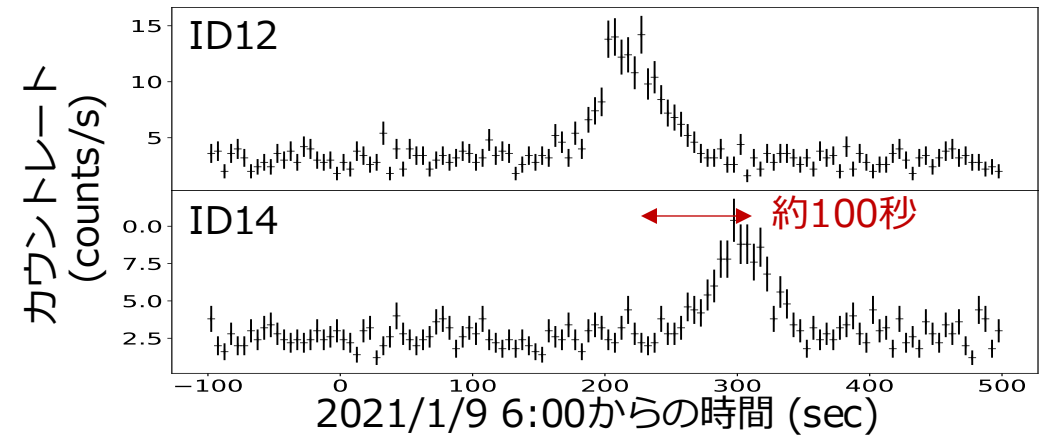


glowが発生した電子加速領域から雷放電が始まった可能性がある

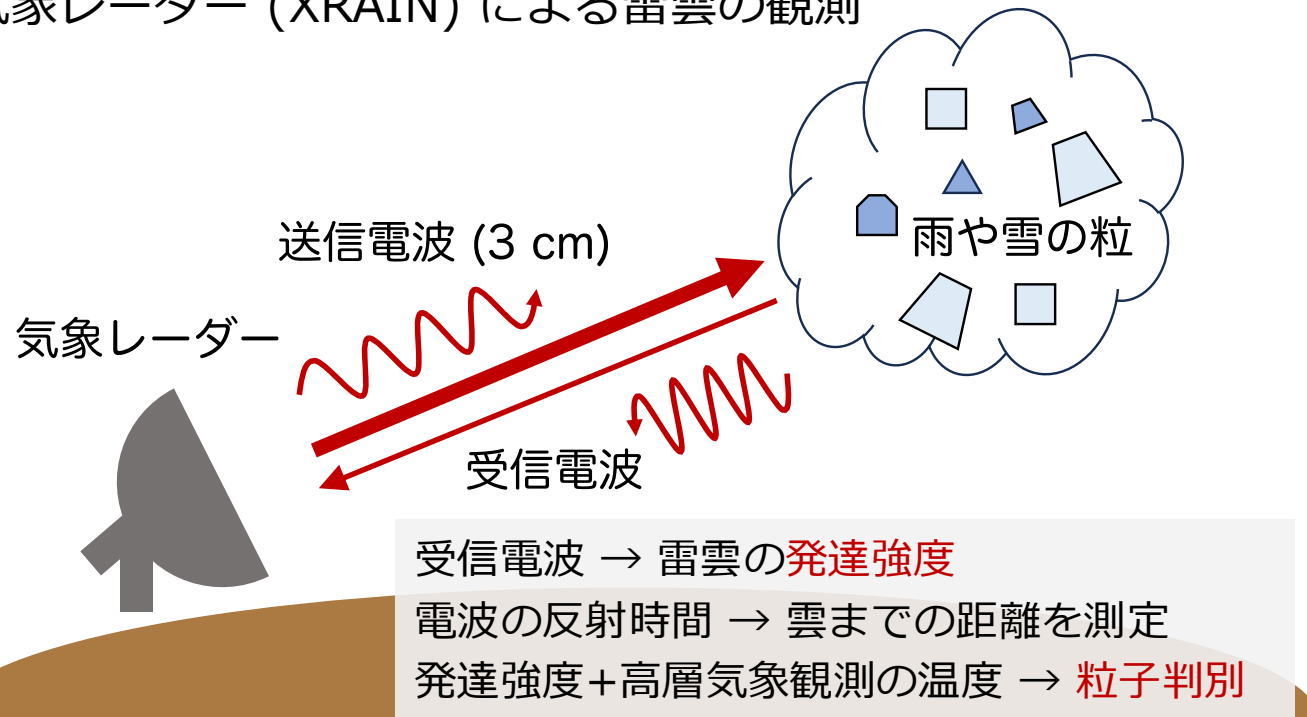
レーダー解析によるガンマ線グロー領域の特定

- 2021/01/ 09 06:03:48にコガモ検出器 ID12で検出し、100秒後にID14でガンマ線グローを観測。
- 検出時刻に発達した雷雲が検出器上空を通過していた。
- 気象レーダーを用いて、ガンマ線を放射していた雷雲の**発達強度(反射強度)**と**降水粒子**の空間分布を調べた。

3 MeV以上の放射線量の変化



気象レーダー (XRAIN) による雷雲の観測



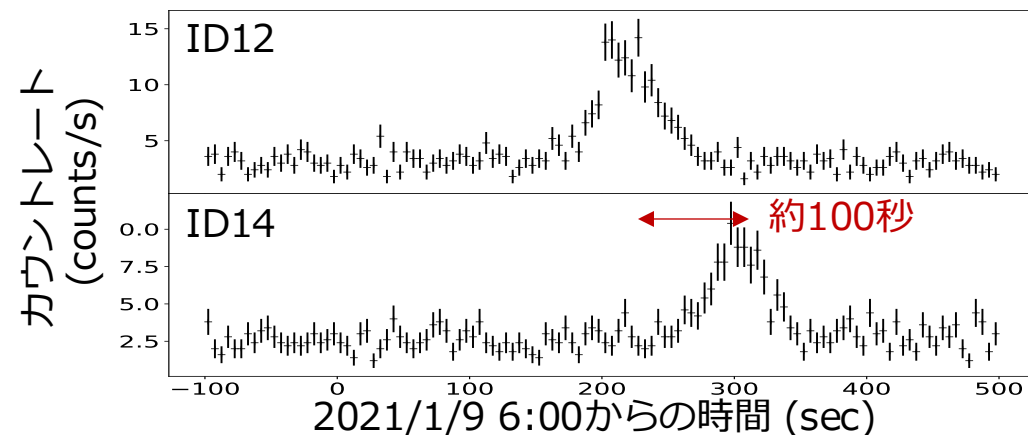
Google map上でのコガモの位置



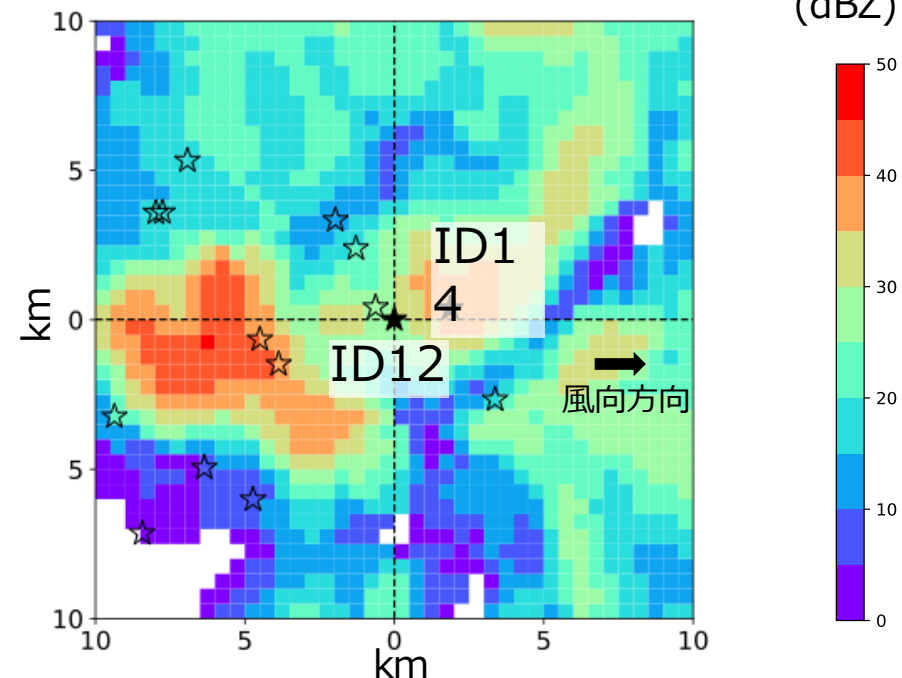
レーダー解析によるガンマ線グロー領域の特定

- 2021/01/ 09 06:03:48にコガモ検出器 ID12で検出し、100秒後にID14でガンマ線グローを観測。
- 検出時刻に発達した雷雲が検出器上空を通過していた。
- 気象レーダーを用いて、ガンマ線を放射していた雷雲の発達強度(反射強度)と降水粒子の空間分布を調べた。

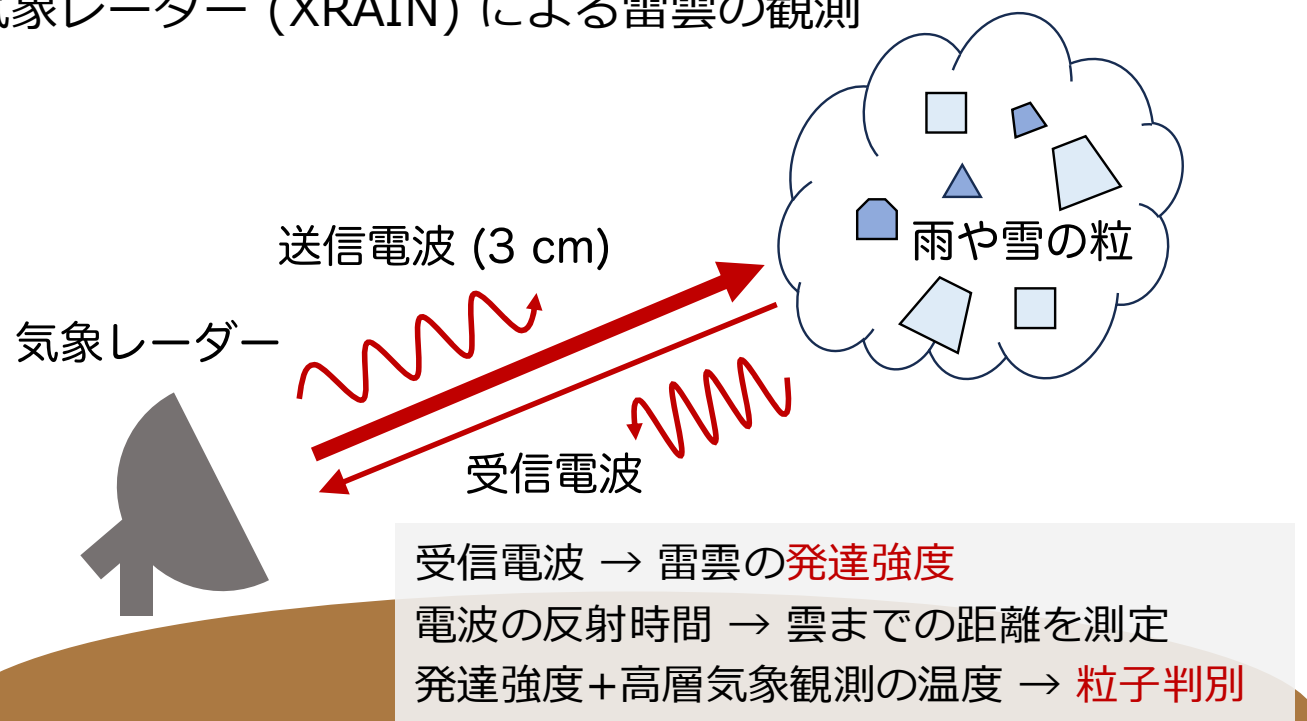
3 MeV以上の放射線量の変化



雷雲の発達強度(検出時刻の5分前) 発達強度 (dBZ)



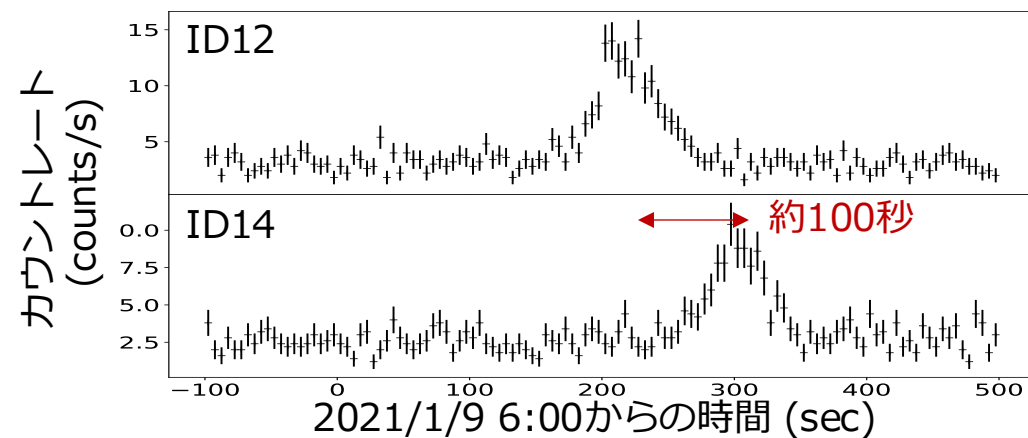
気象レーダー (XRAIN) による雷雲の観測



レーダー解析によるガンマ線グロー領域の特定

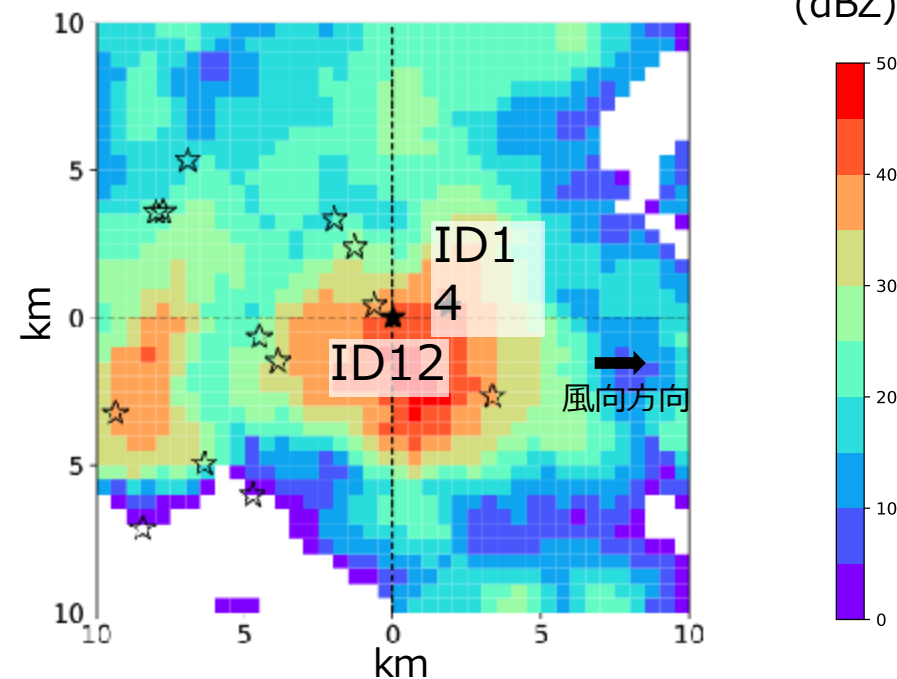
- 2021/01/ 09 06:03:48にコガモ検出器 ID12で検出し、100秒後にID14でガンマ線グローを観測。
- 検出時刻に発達した雷雲が検出器上空を通過していた。
- 気象レーダーを用いて、ガンマ線を放射していた雷雲の発達強度(反射強度)と降水粒子の空間分布を調べた。

3 MeV以上の放射線量の変化

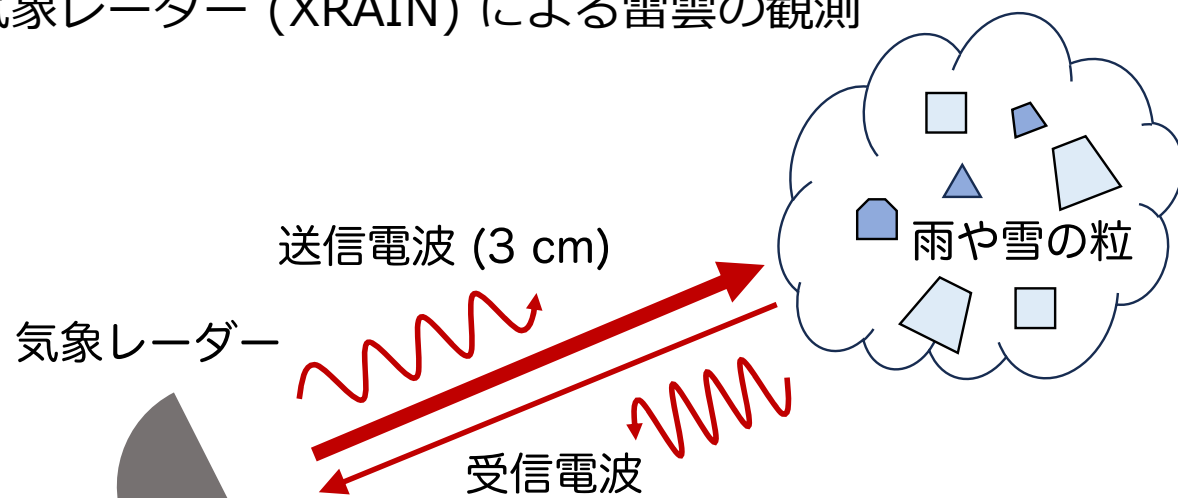


雷雲の発達強度(検出時刻)

発達強度 (dBZ)



気象レーダー (XRAIN) による雷雲の観測

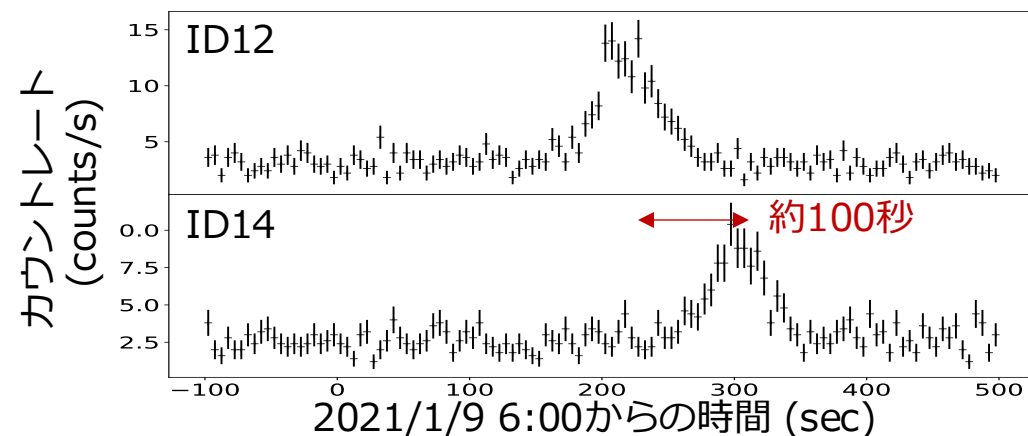


受信電波 → 雷雲の発達強度
電波の反射時間 → 雲までの距離を測定
発達強度+高層気象観測の温度 → 粒子判別

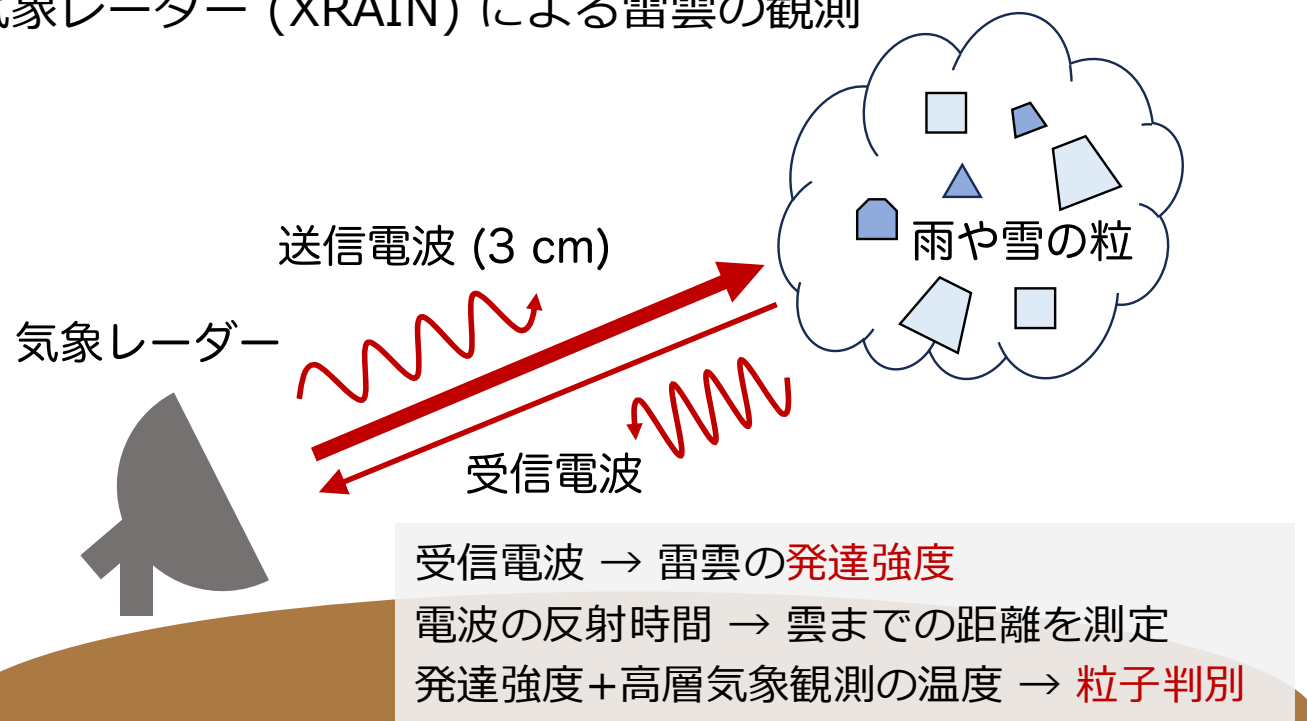
レーダー解析によるガンマ線グロー領域の特定

- 2021/01/ 09 06:03:48にコガモ検出器 ID12で検出し、100秒後にID14でガンマ線グローを観測。
- 検出時刻に発達した雷雲が検出器上空を通過していた。
- 気象レーダーを用いて、ガンマ線を放射していた雷雲の発達強度(反射強度)と降水粒子の空間分布を調べた。

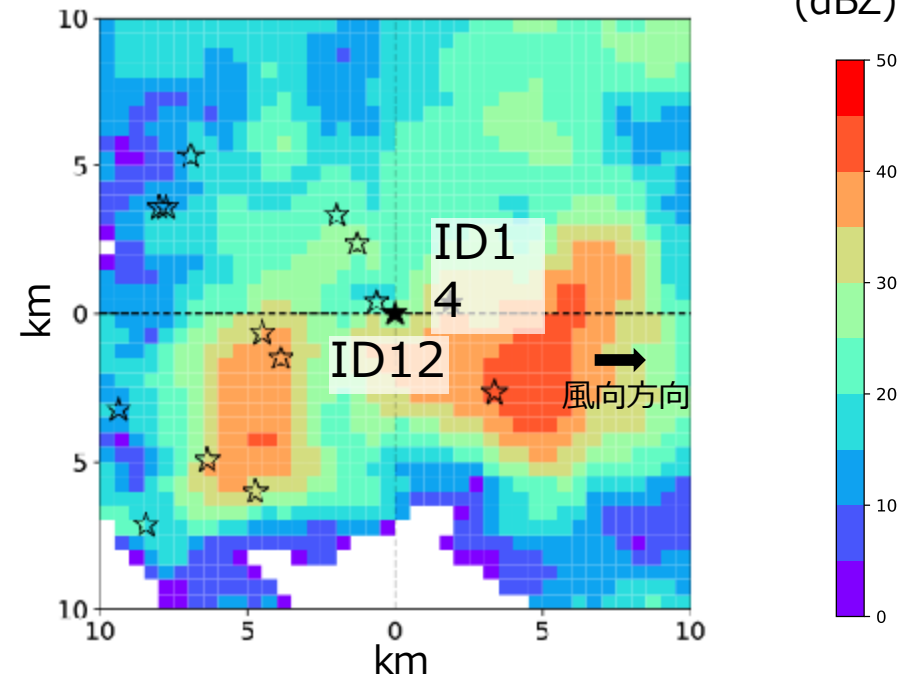
3 MeV以上の放射線量の変化



気象レーダー (XRAIN) による雷雲の観測



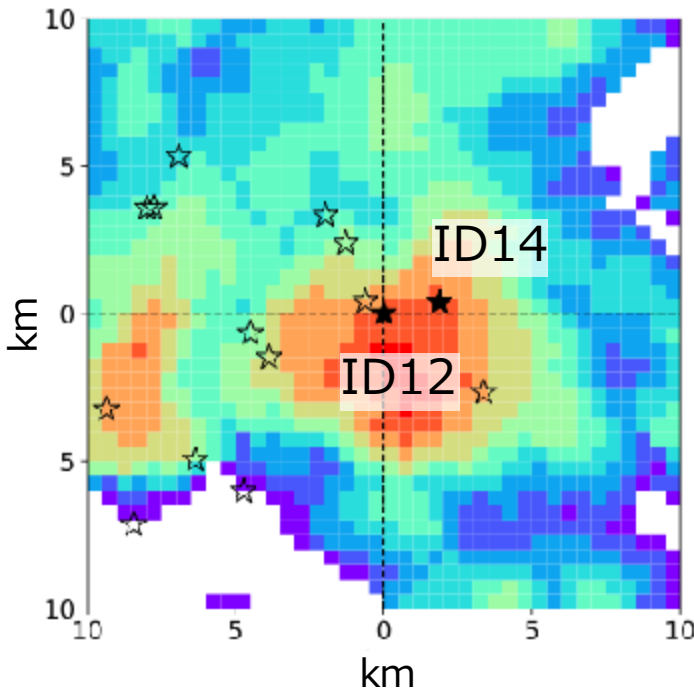
雷雲の発達強度 (検出時刻の5分後) 発達強度 (dBZ)



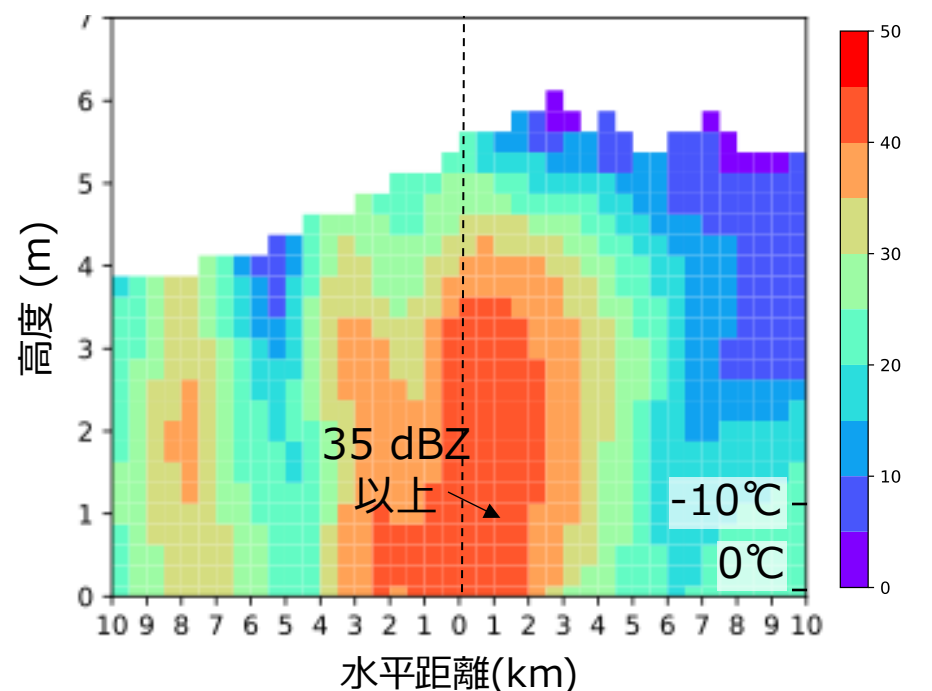
雷雲の鉛直分布の解析と電場領域の推定

- 検出時刻における検出器上空の雷雲の発達強度と降水粒子の空間分布を解析。
 - 強発達領域(35 dBZ以上)の領域が高度4250 mに達している。
 - 検出器の直上から高度3 kmまで湿ったあられ、その上では乾いたあられとなっている。
- ガンマ線を放射した電場領域は、検出器の直上の湿ったあられの領域、高度1~2 km付近に存在したと考えられる。

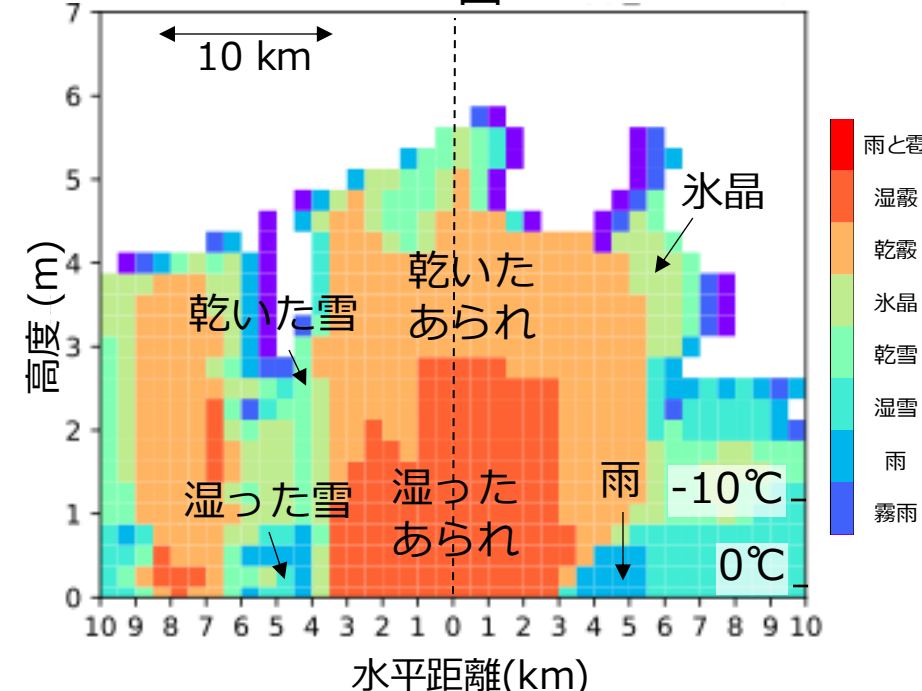
雷雲の発達強度・水平断面



雷雲の発達強度・鉛直断面



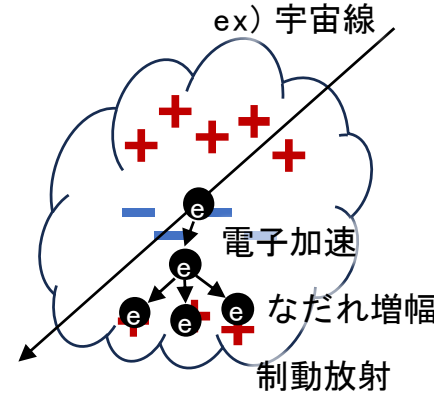
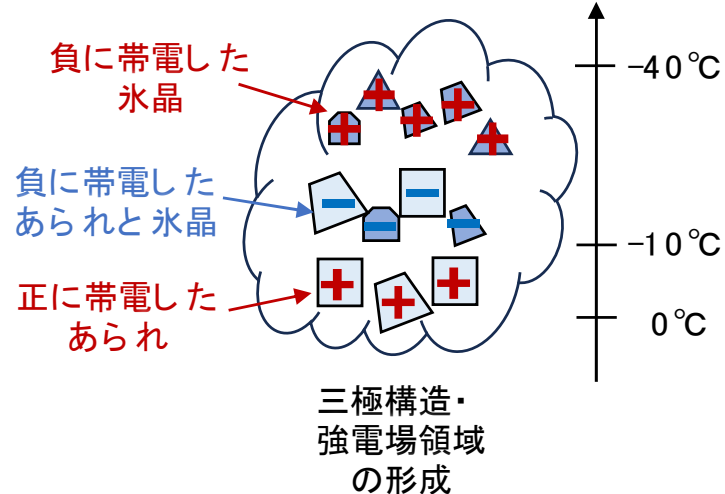
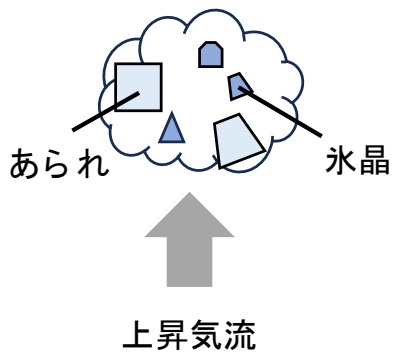
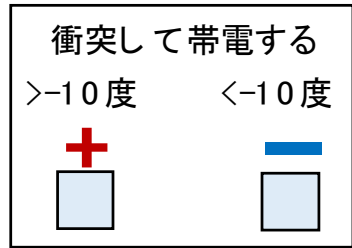
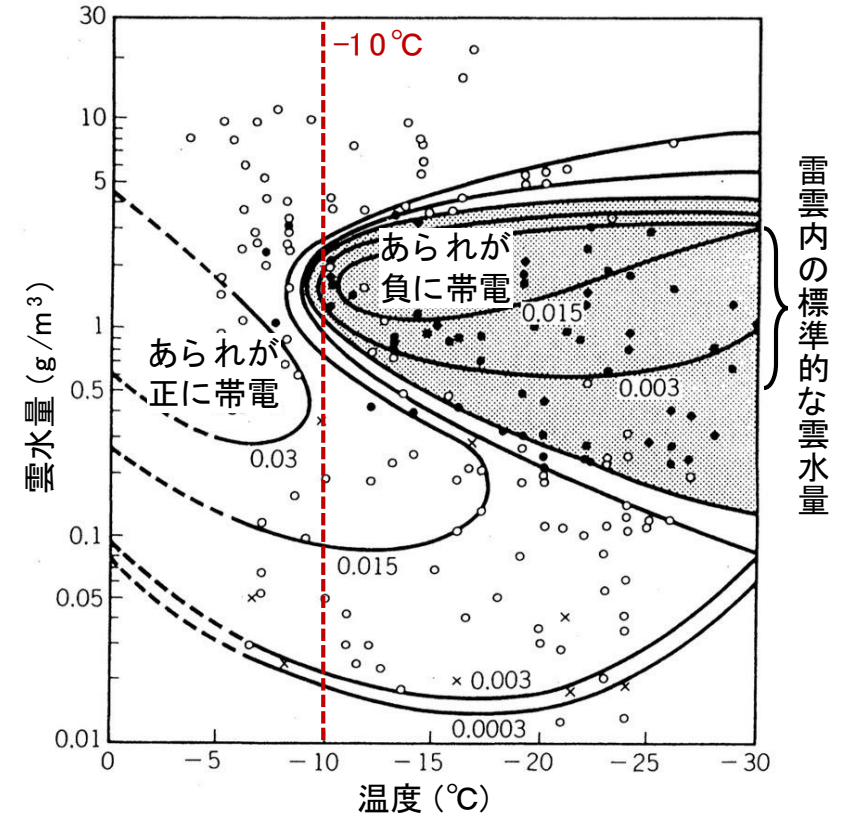
*Kouketsu et al. 2015
名古屋大学篠田太郎氏に解析コードをいただいた
粒子判別*・鉛直断面



雷雲の盛衰とガンマ線グローの発生メカニズム

- 強い上昇気流によって、雷雲内に強電場領域が形成される。
 - 着氷電荷分離機構によると、 0°C から -40°C の高度で帯電し、あられは -10°C 以上では正、 -10°C 以下では負に帯電する。
- 雷雲中の強い電場領域によって、電子が加速・雪崩増幅される。
- 電子が大気とぶつかり、制動放射ガンマ線が放出される。
- 正に帯電したあられの高度が下がる。

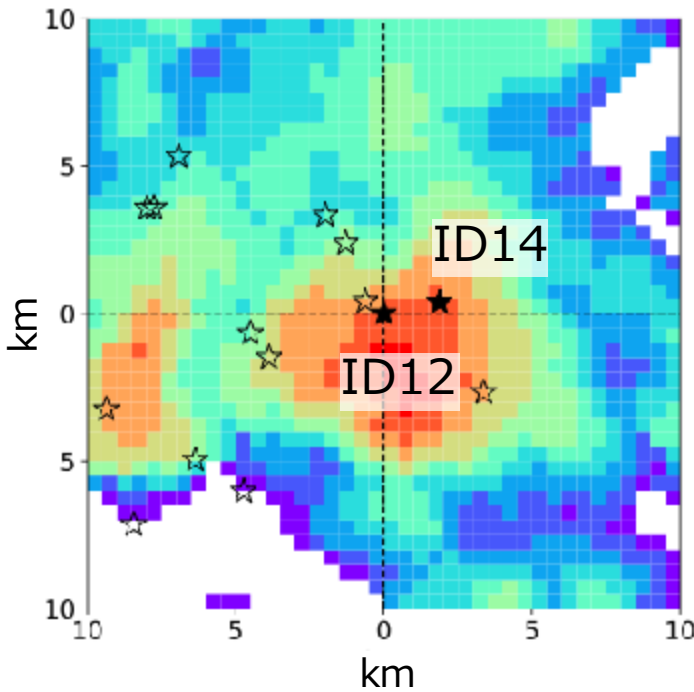
着氷電荷分離機構 (Takahashi 1978)



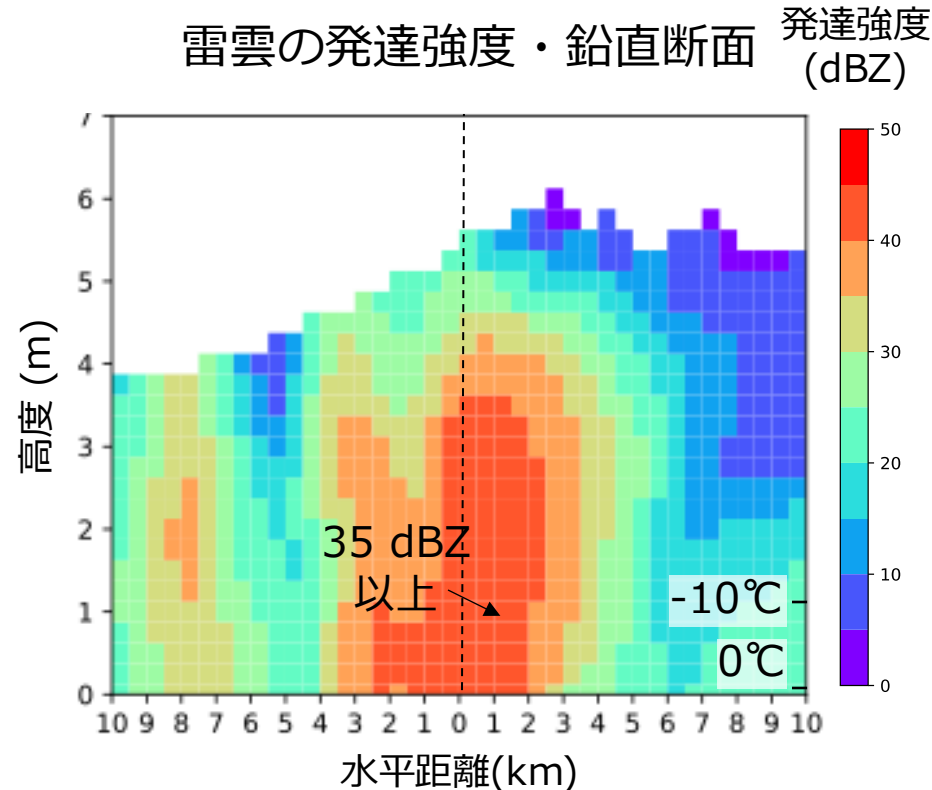
雷雲の鉛直分布の解析と電場領域の推定

- 検出時刻における検出器上空の雷雲の発達強度と降水粒子の空間分布を解析。
 - 強発達領域(35 dBZ以上)の領域が高度4250 mに達している。
 - 検出器の直上から高度3 kmまで湿ったあられ、その上では乾いたあられとなっている。
- ガンマ線を放射した電場領域は、検出器の直上の湿ったあられの領域、高度1~2 km付近に存在したと考えられる。

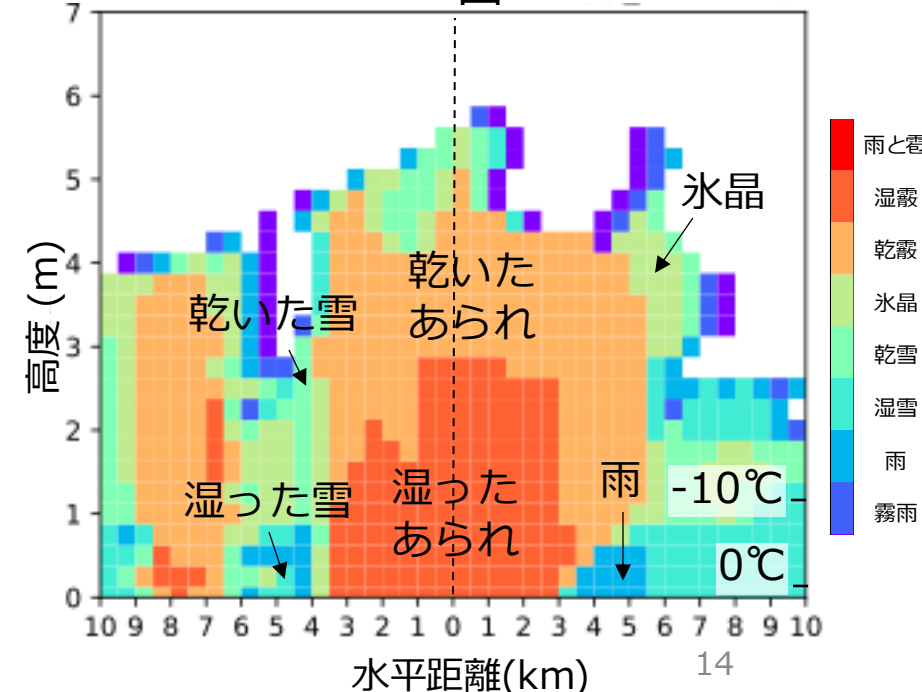
雷雲の発達強度・水平断面



雷雲の発達強度・鉛直断面



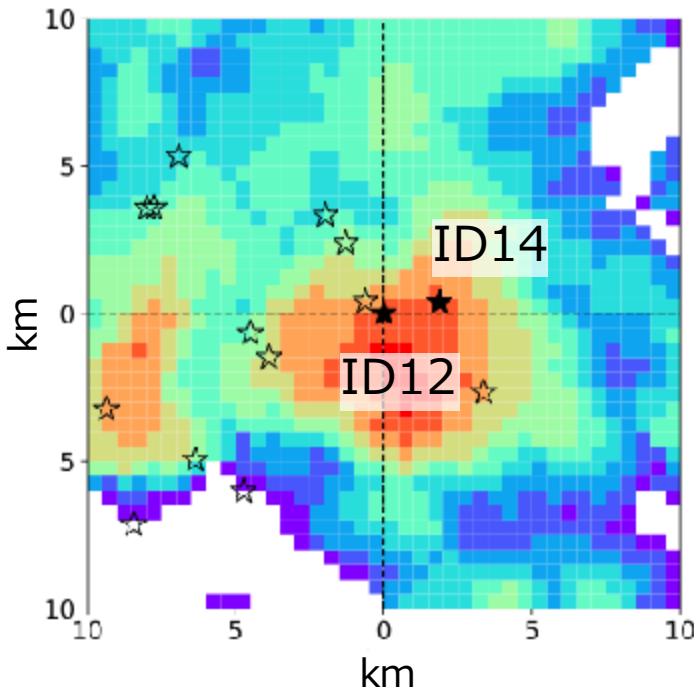
粒子判別*・鉛直断面



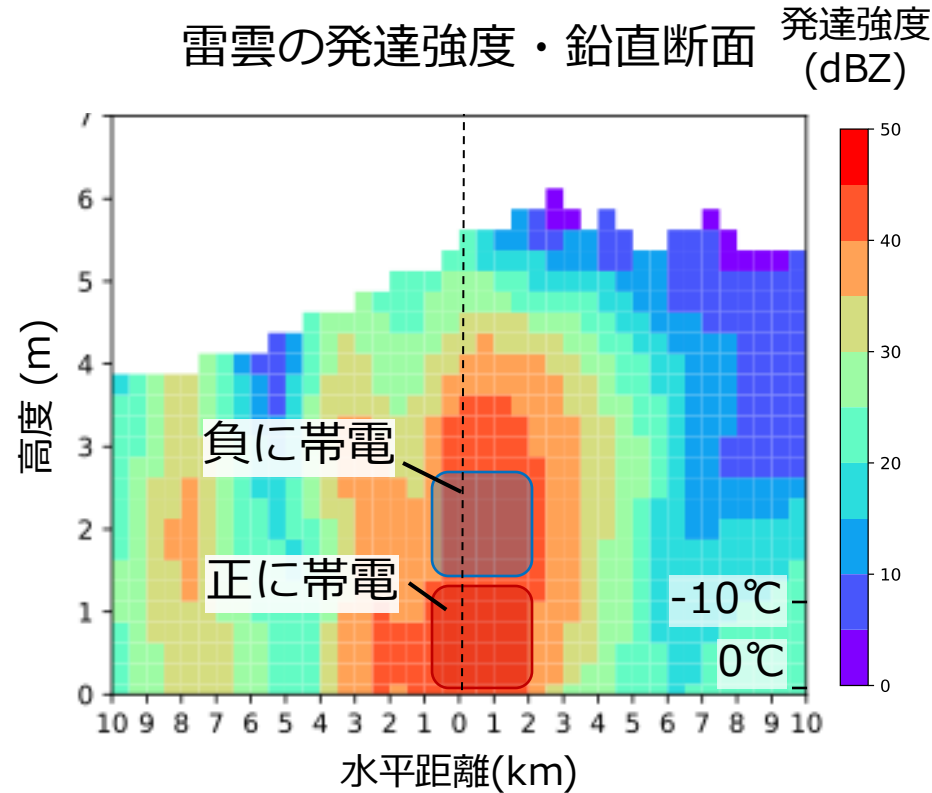
雷雲の鉛直分布の解析と電場領域の推定

- 検出時刻における検出器上空の雷雲の発達強度と降水粒子の空間分布を解析。
 - 強発達領域(35 dBZ以上)の領域が高度4250 mに達している。
 - 検出器の直上から高度3 kmまで湿ったあられ、その上では乾いたあられとなっている。
- ガンマ線を放射した電場領域は、検出器の直上の湿ったあられの領域、高度1~2 km付近に存在したと考えられる。

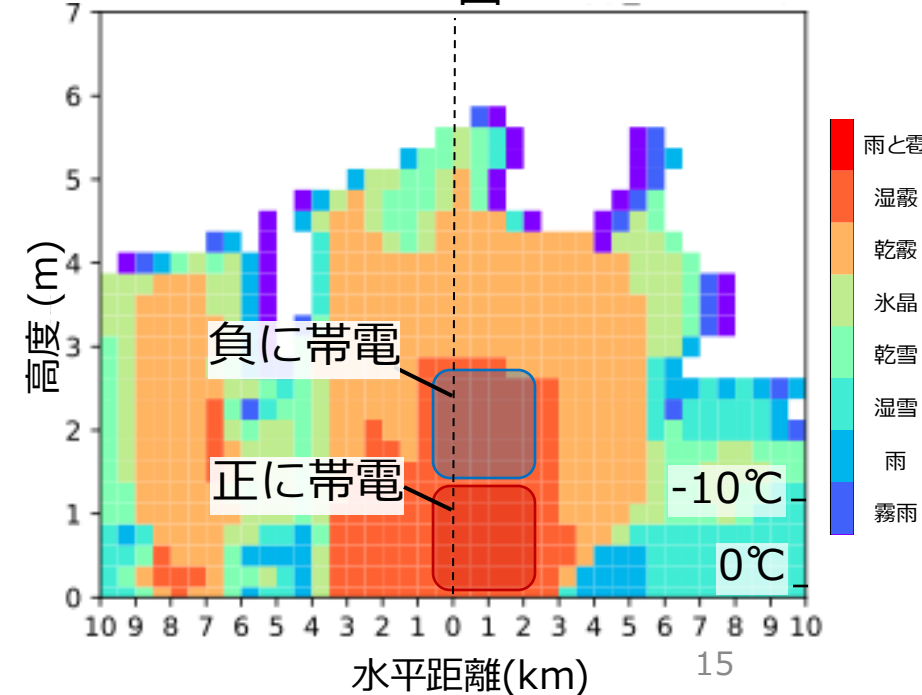
雷雲の発達強度・水平断面



雷雲の発達強度・鉛直断面

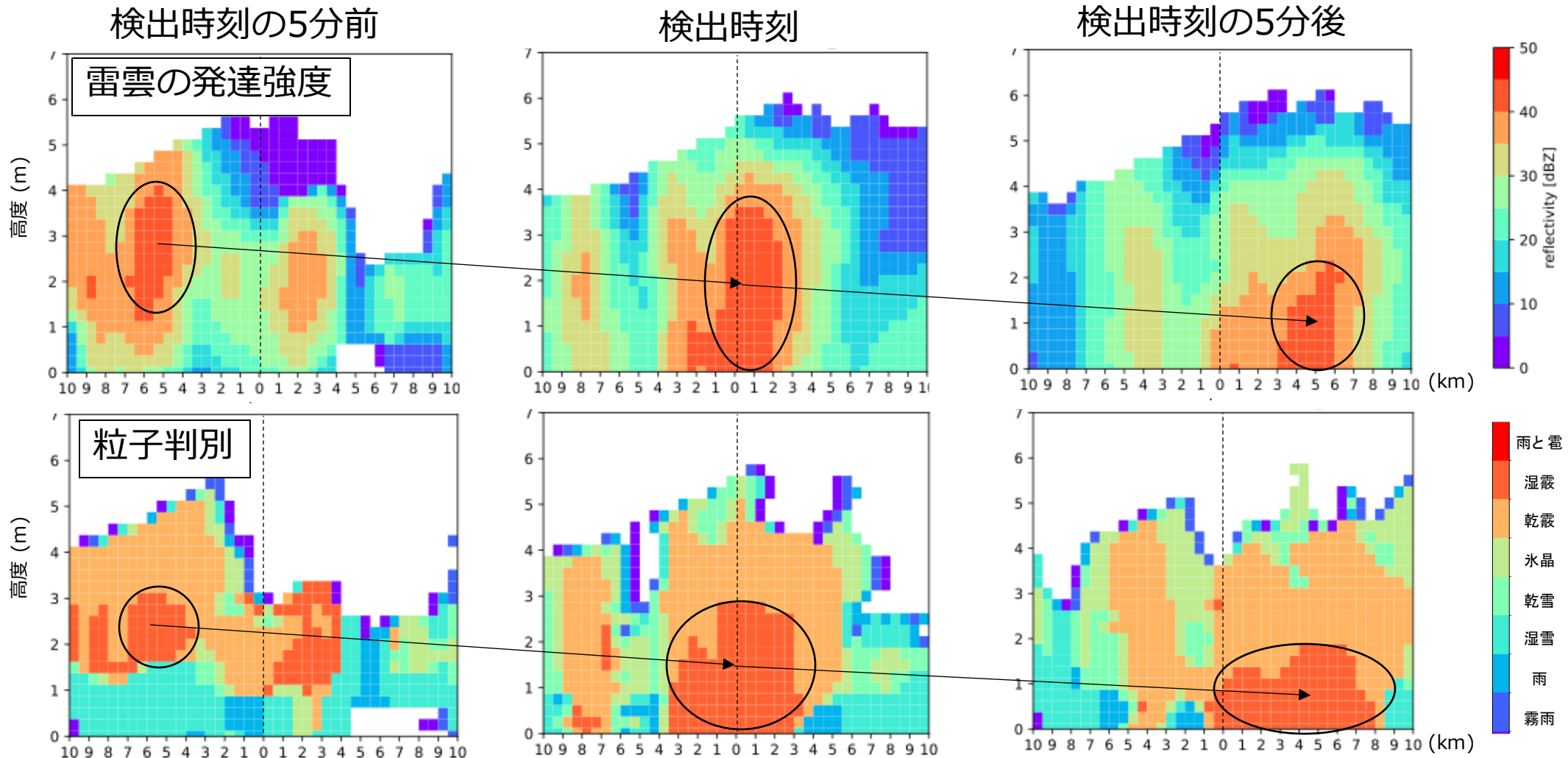


粒子判別*・鉛直断面



雷雲の鉛直分布の解析と電場領域の推定

- 強反射領域 (35 dBZ以上)とあられ領域の高度が下がっている。
- 雷雲の衰退期に、あられ領域に存在する電子加速領域が地上に落ちてくる際に、ガンマ線グローが地上で観測されていると考えられる。

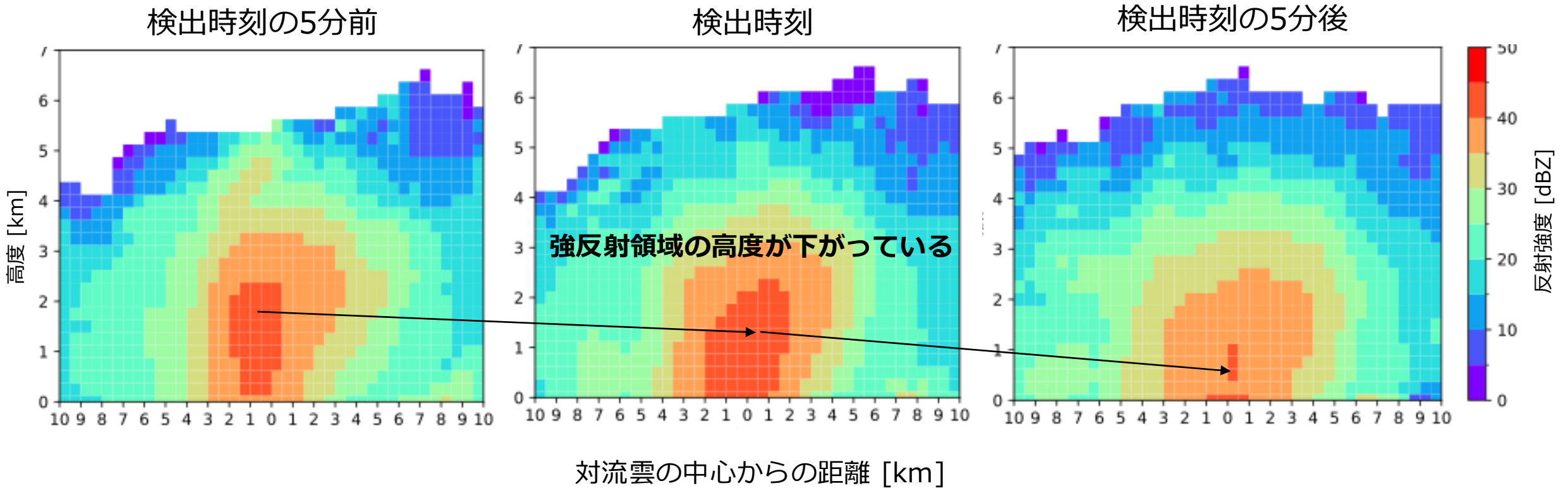


ガンマ線グローをもたらした雷雲の特徴

- 2018-2022年度に検出したガンマ線グローイベントは39個。
- 同一イベントの複数地点での観測やレーダーの観測範囲を考慮して、レーダー解析では**15事例**を抽出。
- 2022/12以降のデータ(事例10~15)は、反射強度の値が小さく補正が必要。→**事例1~9**を使って平均場を計算。

事例	検出日時	ID	エコー頂(>15 dBZ) [m]	エコー最大値 [dBZ]	ライフステージ	主な降水粒子
1	2018/12/18 23:41:48	15	6000	52.0	衰退期	湿霰
2	2021/1/2/ 8:16:28	28	4750	48.2	衰退期	湿霰&湿雪
3	2021/01/08 6:41:28	16	5500	43.8	衰退期	湿霰&湿雪
4	2021/01/08 17:55:48	12	6250	50.0	衰退期	湿霰
5	2021/01/09 6:03:24	12,14	5750	47.9	衰退期	湿霰
6	2021/02/03 3:16:14	18	4500	41.9	5分前のレーダーデータが欠損しているため不可	×
7	2021/02/16 6:48:24	16	4250	40.8	衰退期	湿霰&湿雪
8	2021/12/19 14:19	14,56	5750	48.3	衰退期	湿霰
9	2022/02/16 7:32	52,43,42	5250	45.5	衰退期	湿霰
10	2022/12/06 21:49:34	14	5500	39.4	衰退期	×
11	2023/01/01 18:00:34	84	4750	34.2	衰退期	×
12	2023/01/09 16:42:38	62	5000	34.7	衰退期	×
13	2023/01/09 17:19:24	44	4750	35.5	衰退期	×
14	2023/01/29 22:52:18	46	4500	36.5	衰退期	×
15	2023/01/30 11:02	82,11,22	5750	38.8	衰退期	×

9事例の反射強度の平均場の変化



- 検出器の上空を通った雷雲が、検出時刻の前後で平均的にどの程度発達していたのかを解析。
- 検出の5分前、検出時刻、検出の5分後にかけて、対流エコー (35 dBZ以上) の高度が平均的に下がっていた。
- 強反射領域 (あられ領域) は電子加速領域に存在する。

ガンマ線グローが放射されている電子加速領域は数km程度広がっている

ガンマ線グローの種電子はどこから来ているのか

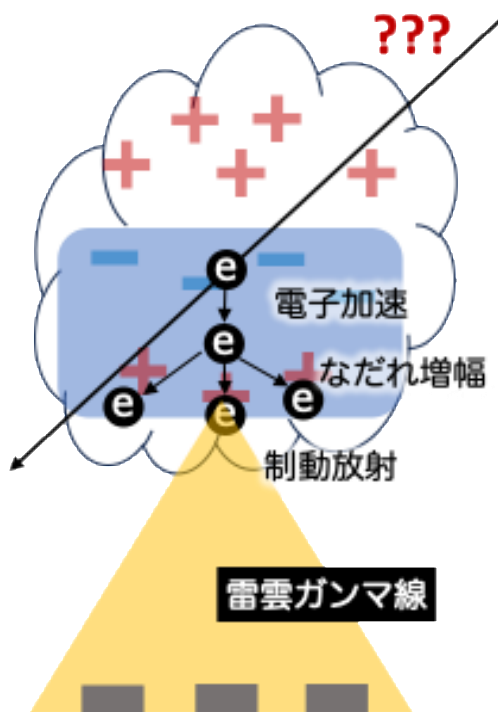
- 雷雲内の電場で電子が加速されるために必要な数百MeV以上の電子の起源を調べたい

1. 宇宙線空気シャワー由来の電子

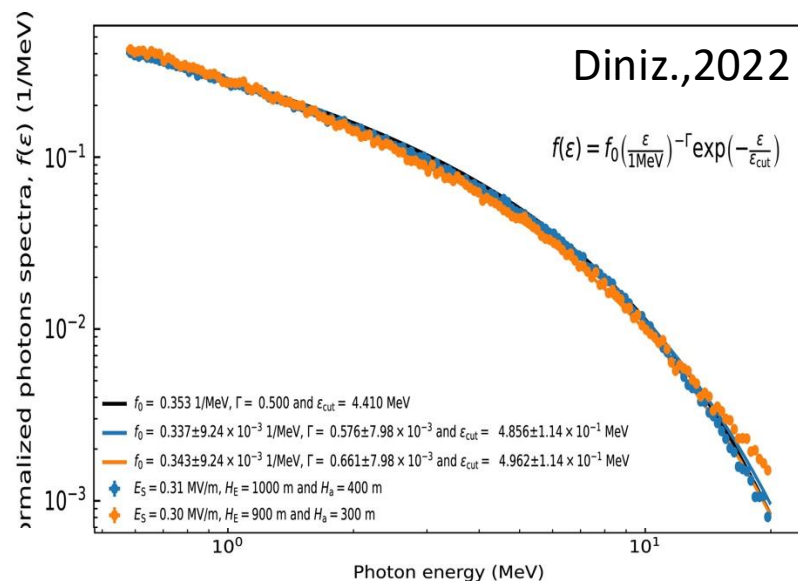
2. ウランやトリウムが崩壊する過程の ^{214}Bi から発生する電子

→電場によって、電子は増えるが、ガンマ線はわずかにしか増えないという結果がある

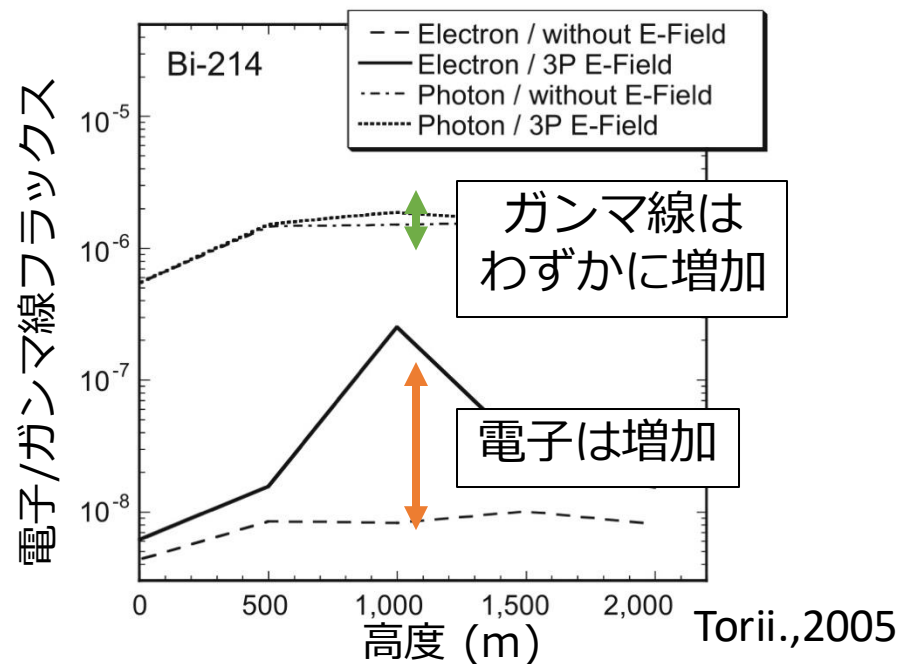
- 種電子の候補として有力なのは宇宙線だが、glowと宇宙線の関係はまだちゃんと調べられていない



宇宙線由来の電子を電場に入れた時の地上でのガンマ線スペクトル



^{214}Bi からの電子を種とした時の電場の有無によるフラックスの違い



雷雲プロジェクトの多地点観測網を使って、空気シャワーとglowの関係を調べたい

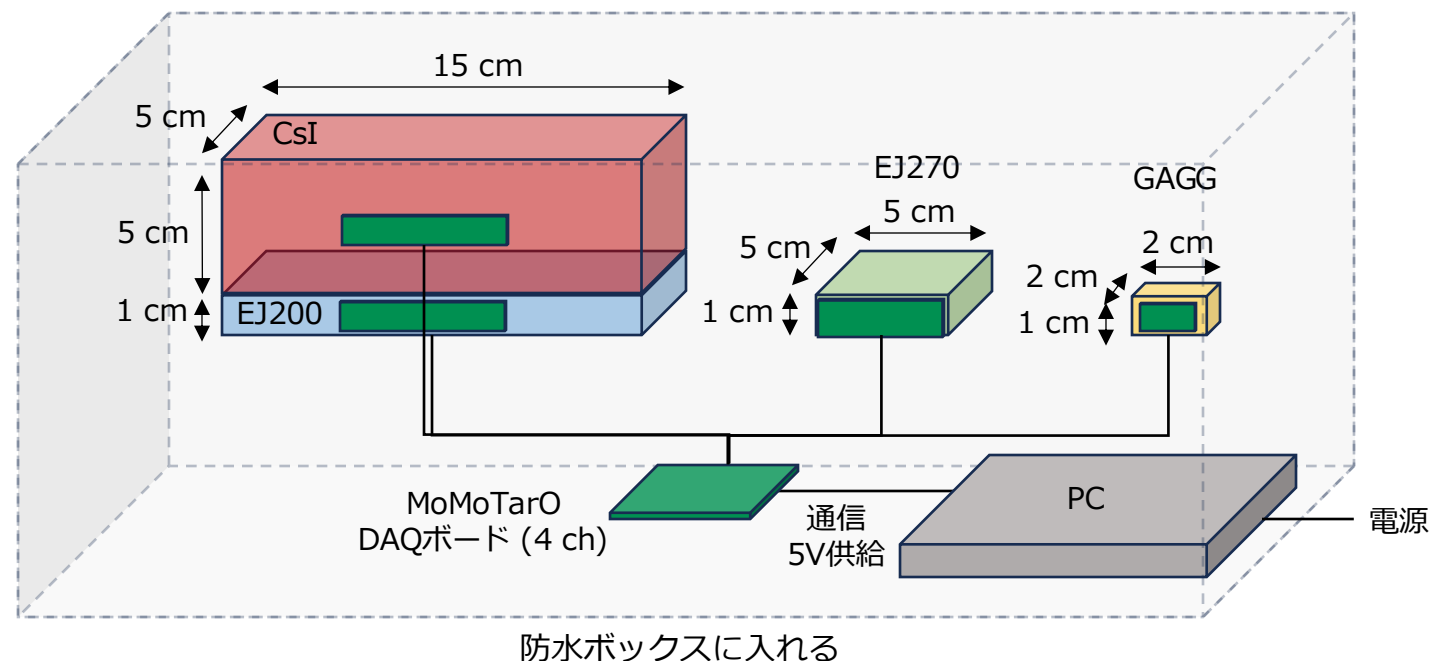
コガモ検出器のアップデート版を設置

- これまでのコガモ検出器
 - ガンマ線のみ
 - 時間分解能：100 μ s



荷電粒子と弁別したい

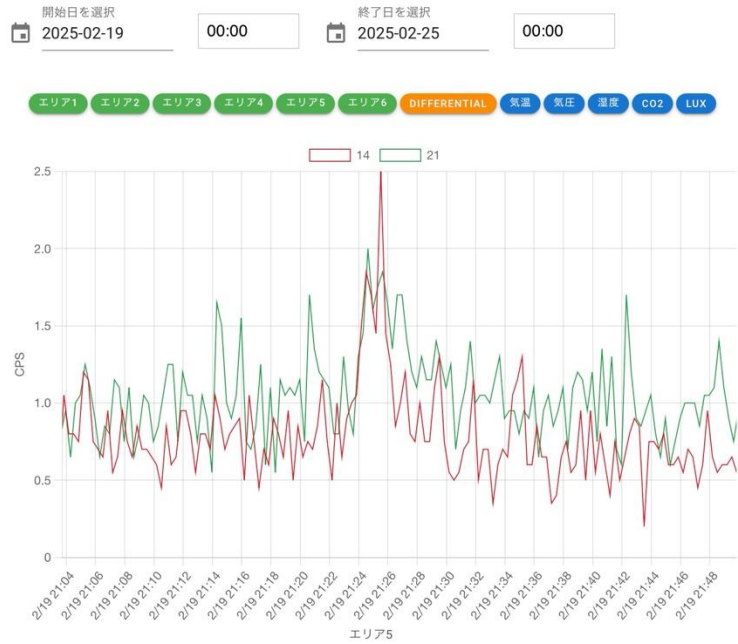
- 月面での放射線観測用に開発しているMoMoTarOボードを雷観測用に転用
- 新検出器
 - DAQボード：MoMoTarOrev3.0
 - MPPCボード：S14160
 - サンプリングレート：50 ns
 - シンチレータ
 - CsI (5*15*5 cm)
 - ガンマ線グロー用
 - EJ200 (5*15*1 cm)
 - 荷電粒子用
 - EJ270 (5*5*1 cm)
 - 中性子用
 - GAGG (2*2*1 cm)
 - FGF&TGF用
 - 1月末から屋外に設置して観測



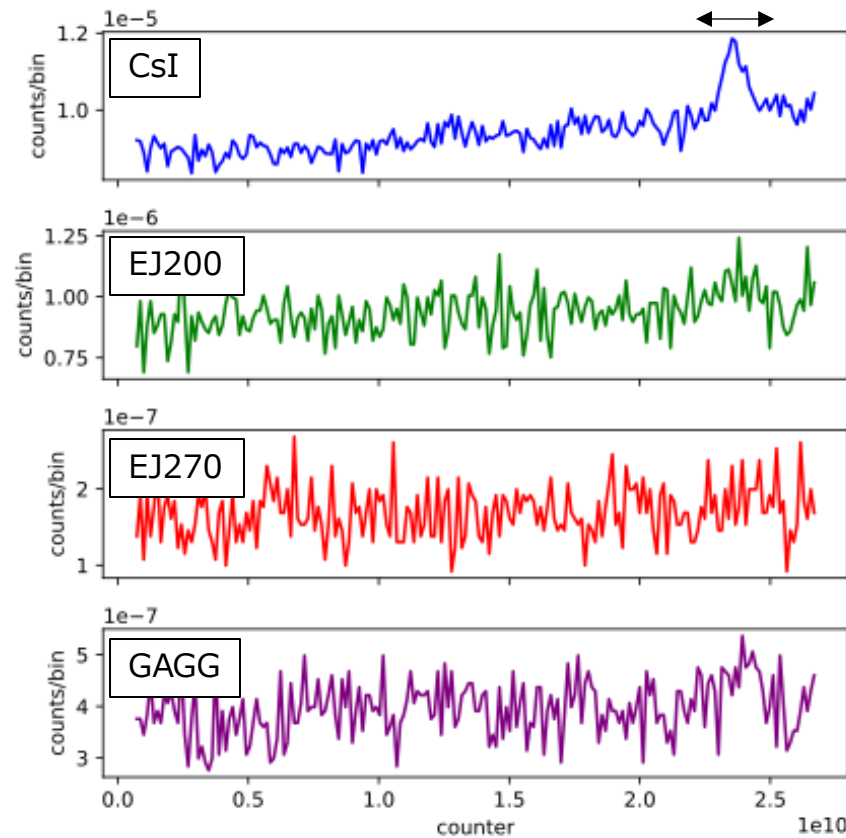
新検出器でglowを検出

- 2025/2/19 21:30ごろ、金沢大に設置したコガモID14,21と新検出器で弱いglowを検出。
- 同時刻に金沢大の上空に雨雲があった。

コガモのデータサーバ (ID14,21)



新検出器の各チャンネルの ライトカーブ



コインシデンスの改善、シンチレータの大きさや設置の距離などを検討して、来年度は複数設置する予定

まとめ

- ガンマ線グロー
 - 発達した雷雲からは、電場領域での電子の加速増幅によってガンマ線が放射される
 - 冬季の日本海沿岸は低い雷雲が発達するため、地上で観測しやすい
 - 未解決問題として、放射領域の大きさ、雷との関係、種電子は何か、などがある
- シチズンサイエンス「雷雲プロジェクト」
 - 多地点でガンマ線観測を行い、雷雲を追跡する
 - 2018年から2022年までに、約100イベントほど見つかっている
- 雷との関係
 - 2021/12/30に5地点でガンマ線が観測され、同時に雷放電も観測された
 - 放電の開始位置とガンマ線の放射領域を、水平方向と垂直方向から比較し、放電がガンマ線放射領域の内部か、ごく近傍から開始していたことがわかった
- 放射領域の大きさ
 - レーダーの解析を行い、放射領域は地上から高度2 kmまで、水平方向に数kmに広がっていることがわかった。
- 今後
 - 宇宙線との関係を調べたい