

雷放電によって破壊された 雷雲内の電場加速機構

和田有希 (東京大学/理化学研究所)

G.Bowers (LANL), 榎戸輝揚 (京都大), 鴨川仁 (東京学芸大),
中村佳敬 (神戸高専), 森本健志 (近畿大), D.Smith (UCSC),
古田禄大 (東京大), 中澤知洋 (名古屋大/東京大), 湯浅孝行,
玉川徹 (理研), 牧島一夫 (理研), 土屋晴文 (原子力機構)

Wada et al. in prep.

ロングバースト - 安定な電場加速機構

・ロングバーストの特徴

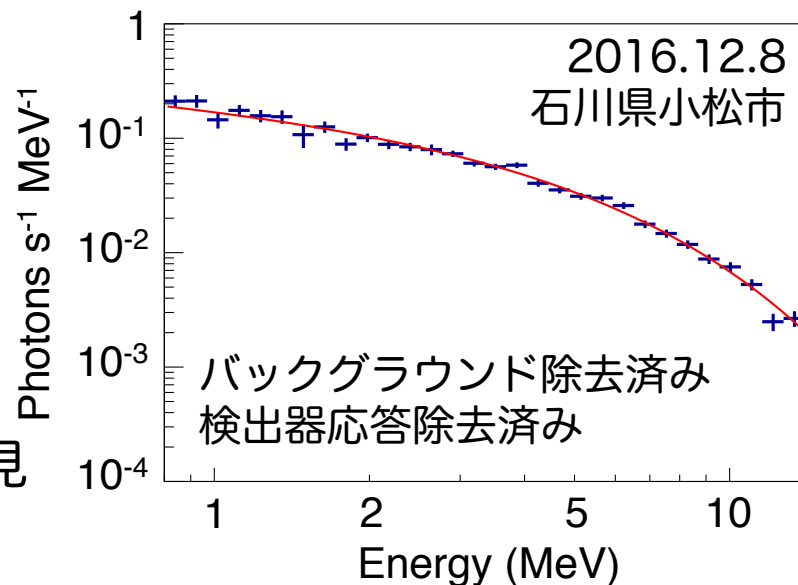
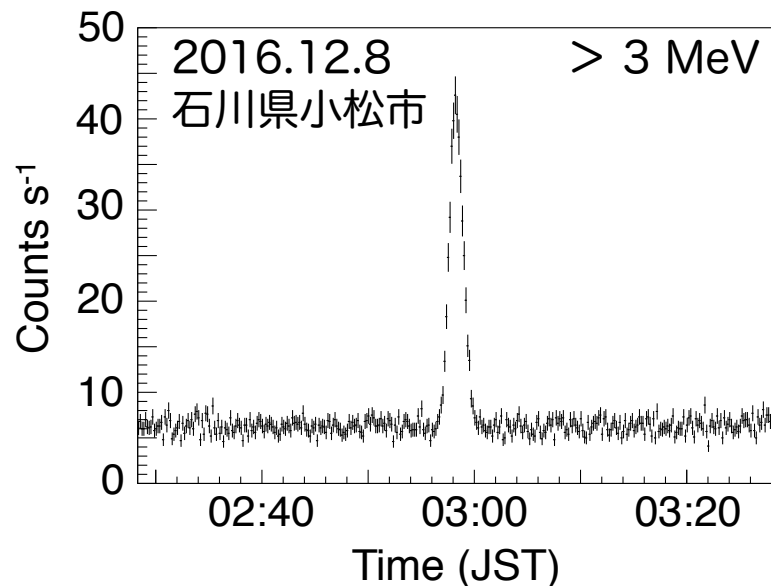
- 雷雲の通過にともなう数分の線量増加
- 雷雲内の強電場による安定的な電子加速？
- 数十 MeVに達する連続分布のガンマ線

・ロングバーストの未解決問題

- 電子加速のメカニズム
 - > 相対論的逃走電子なだれ増幅モデル？
 - > 修正スペクトル (MOS) モデル？
- 継続時間や発生・成長・消滅の過程
- 加速領域の雷雲内での位置や構造

・これまでの北陸冬季雷の観測実績

- 柏崎刈羽原発で2006年からの観測
 - > ロングバーストの確立、光核反応の発見 (土屋+07, 11, 13, 榎本+16, 榎戸+17)
- 石川県内での多地点観測



GROWTH実験の配備体制

- ・発生 - 成長 - 消滅という大局を追う
 - > 金沢・小松地域における広域な多地点観測
- ・加速領域の位置や高度、構造を調べる
 - > 柏崎刈羽における高密度な多地点観測



GROWTH実験の配備体制

- ・発生 - 成長 - 消滅という大局を追う
 - > 金沢・小松地域における広域な多地点観測
- ・加速領域の位置や高度、構造を調べる
 - > 柏崎刈羽における高密度な多地点観測

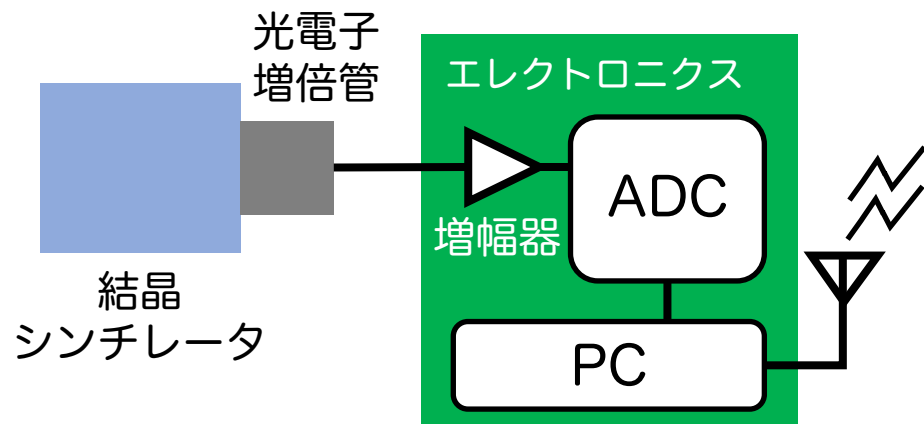


GROWTH実験の配備体制

- ・発生 - 成長 - 消滅という大局を追う
 - > 金沢・小松地域における広域な多地点観測
- ・加速領域の位置や高度、構造を調べる
 - > 柏崎刈羽における高密度な多地点観測



可搬型の放射線検出器 (1) - 標準検出器



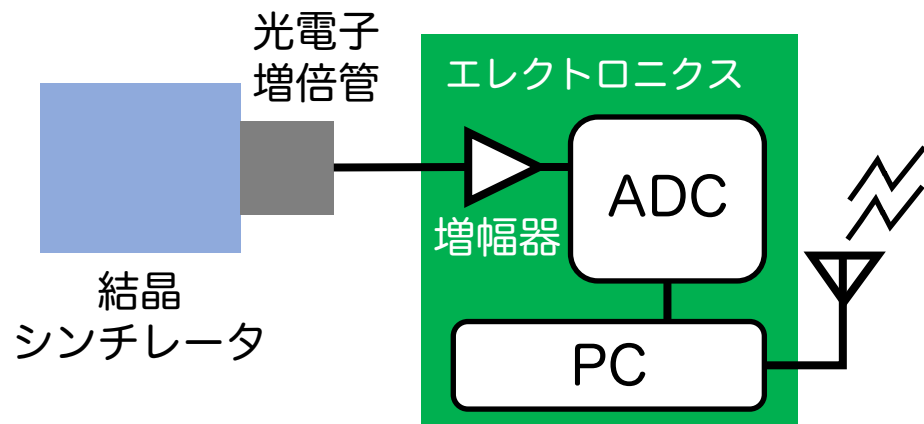
- ・ 結晶シンチレータ+光電子増倍管でガンマ線検出
- ・ 光子毎のエネルギーと到来時刻を測定 (時刻はGPS同期)
- ・ Raspberry Piによるデータ取得

- ・ 可搬サイズの防水ボックスに封入
- ・ メインのガンマ線検出器にBGOやCsIシンチレータを使用 (加速器実験の貸借品や中古品)
- ・ 2016年に開発したデータ取得系 (10×10×10 cm³)
- ・ 5 GB/月の通信回線で即時データ転送
- ・ 現地で組み上げ/立ち上げ作業が必要

多地点観測網の柱として機能



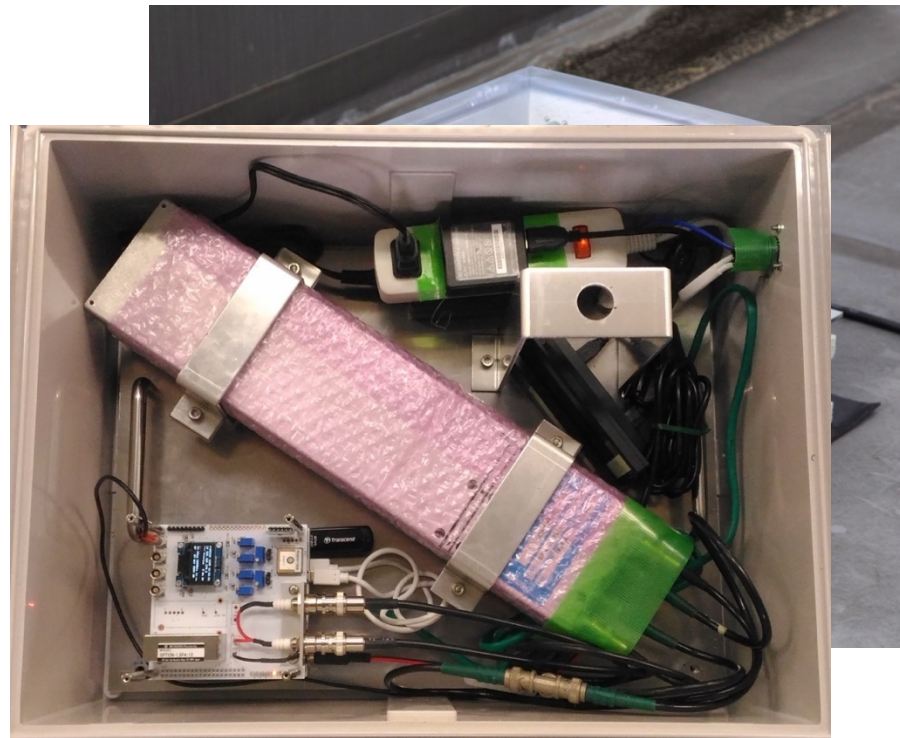
可搬型の放射線検出器 (1) - 標準検出器



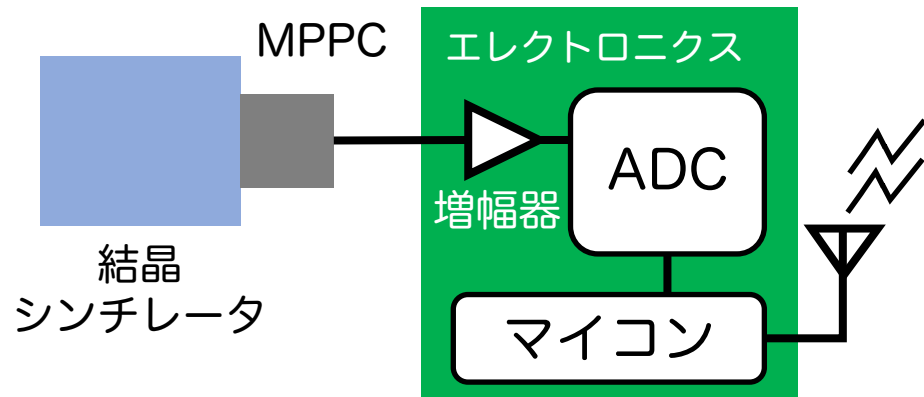
- ・ 結晶シンチレータ+光電子増倍管でガンマ線検出
- ・ 光子毎のエネルギーと到来時刻を測定 (時刻はGPS同期)
- ・ Raspberry Piによるデータ取得

- ・ 可搬サイズの防水ボックスに封入
- ・ メインのガンマ線検出器にBGOやCsIシンチレータを使用 (加速器実験の貸借品や中古品)
- ・ 2016年に開発したデータ取得系 (10×10×10 cm³)
- ・ 5 GB/月の通信回線で即時データ転送
- ・ 現地で組み上げ/立ち上げ作業が必要

多地点観測網の柱として機能



可搬型の放射線検出器 (2) - TAC社製検出器

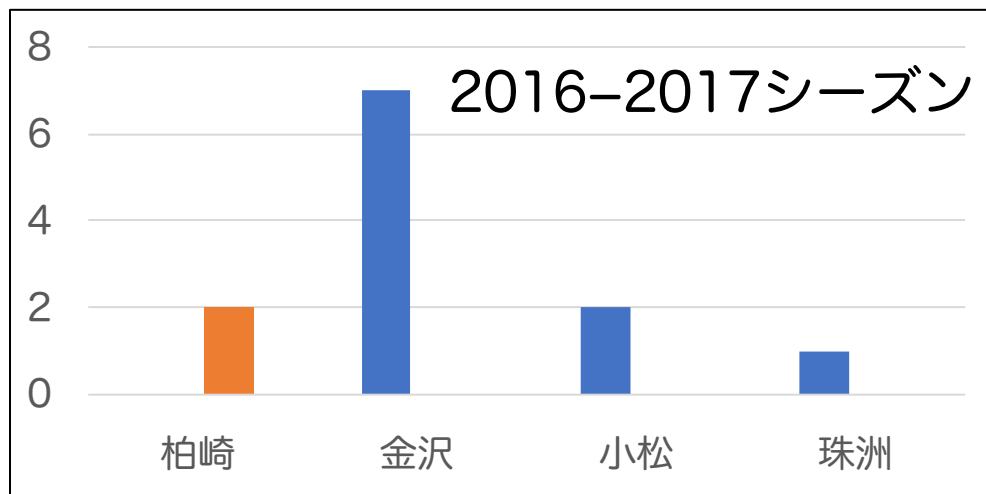
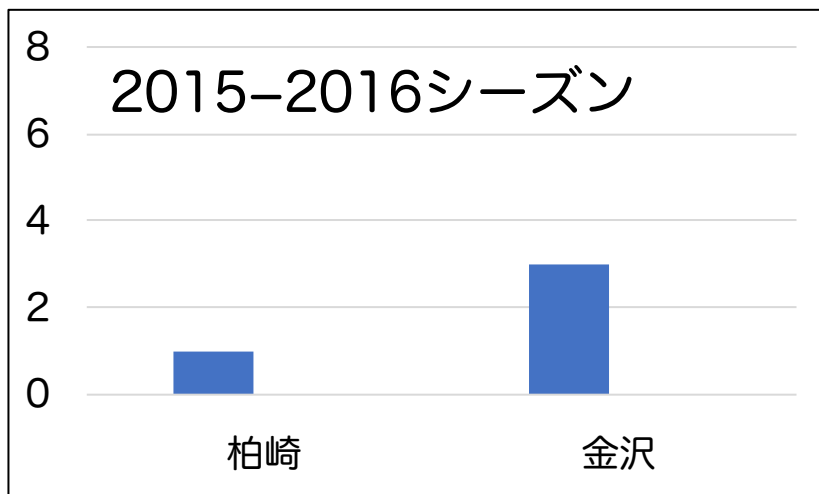


- ・ 結晶シンチレータ+MPPC
- ・ 光子毎のエネルギーと到来時刻を測定 (時刻はGPS同期)
- ・ マイコンによる制御
- ・ スイッチひとつで測定開始
- ・ バッテリーで24時間ほど稼働させることも可能

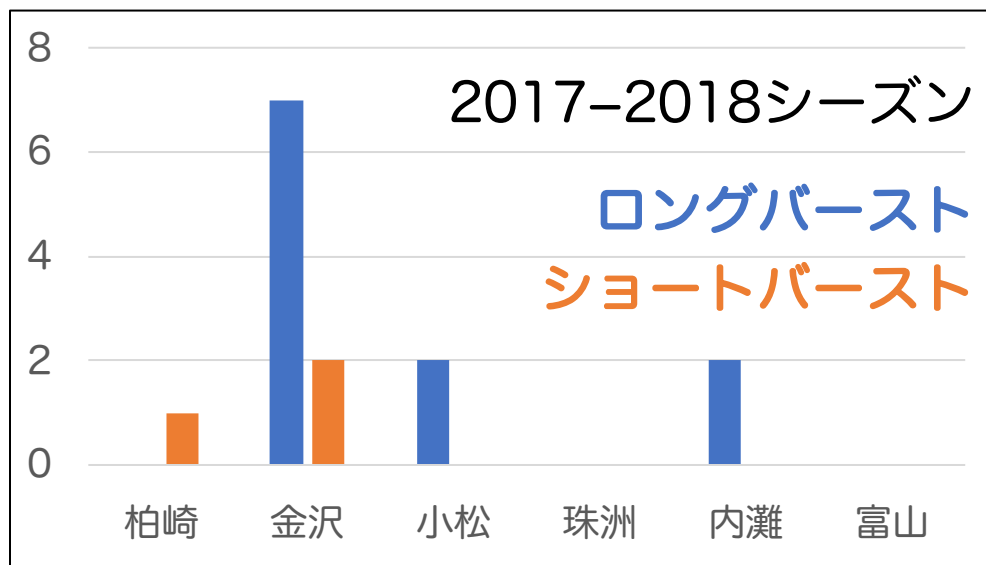


標準検出器の補助として多地点観測網の密度を高める役割

2015年からの観測成果



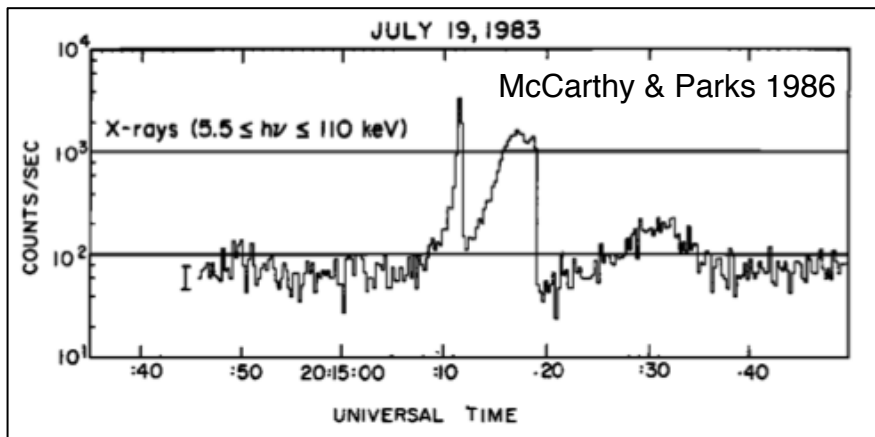
- ・ 検出器の設置場所/台数が増加
- ・ イベント数も増加傾向
- ・ 2017年2月6日の柏崎でのショートバースト
-> [Nature論文](#)
- ・ 2017年2月11日の珠洲でのロングバースト -> 本講演後半



多地点観測によりロング/ショートバーストの検出例が増加中

雷放電で途絶したロングバースト

- ロングバーストの観測手段
 - 放射線・電場 (フィールドミル)・気象レーダー
 - 一般的に雷を伴わず、電波での観測ができない
- 雷によるロングバーストの途絶
 - 航空機による観測 (McCarthy & Parks 1985)
 - 北陸冬季雷や夏季高山での観測 (土屋+13, Chilingarian+17)

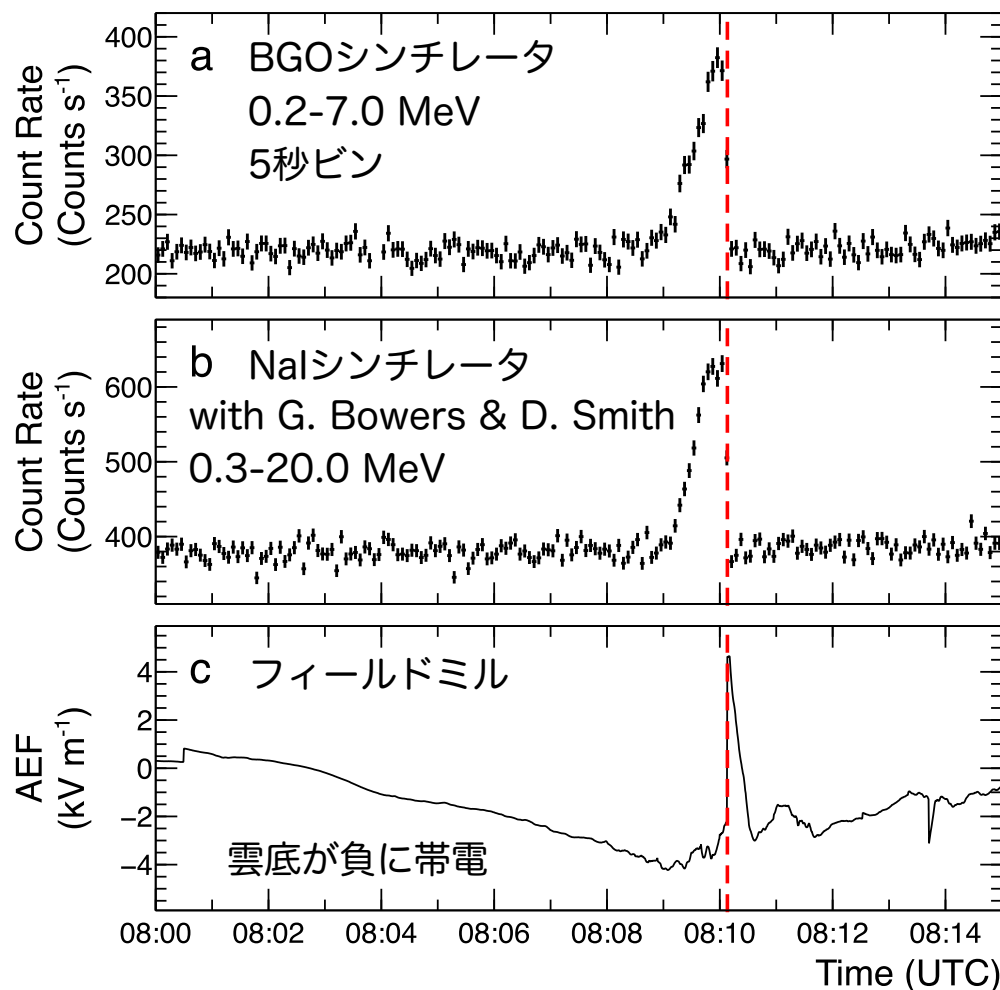


- 雷によって放射線量が瞬時にバックグラウンドレベルへ戻る
- 加速領域がある時とない時の電場強度の比較が可能
- 電波で途絶を起こした雷を観測可能

- ロングバースト観測手法としての電波
 - 近年の観測手法の発展 (LMA・BOLT) によって3次元位置標定も可能
- 放射線・電場・電波・気象レーダーによるガンマ線途絶イベントの観測は
電場加速機構の解明の鍵となるか

2017年2月11日の観測例

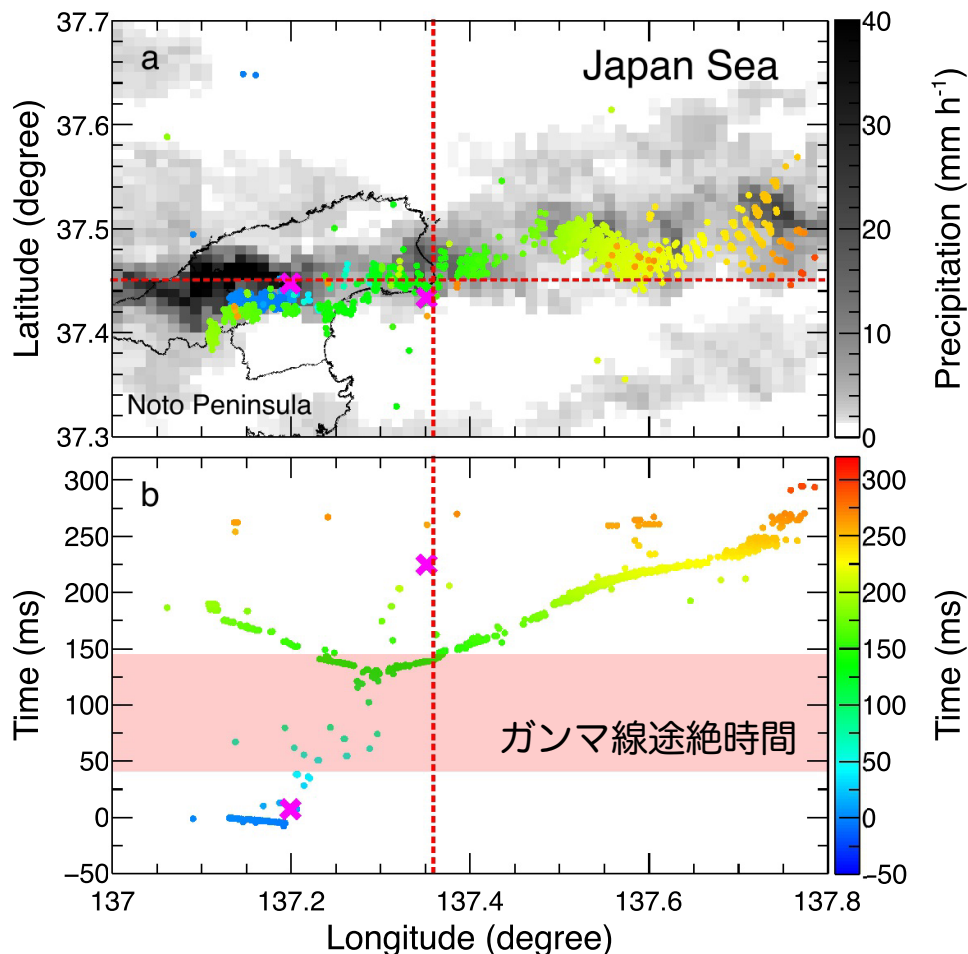
- ・ 石川県珠洲市 (能登半島の先端) で瞬間途絶イベントを観測
 - ガンマ線検出器2台、フィールドミル (with 鴨川先生) が稼働
 - 富山湾の電波観測網 (LF帯域 with 森本先生・中村先生) が放電を検出



- ・ BGO/NaIシンチレータの2台でガンマ線増光を検出
- ・ 08:10:08UTCに線量がバックグラウンドレベルへ戻る -> 途絶イベント
- ・ 途絶時間をステップ関数で評価
- ・ フィールドミルの値は負 -> 上空の雷雲の雲底は負に帯電
- ・ ガンマ線途絶の瞬間にパルス -> 雷の兆候

LF観測による電波源の位置評定

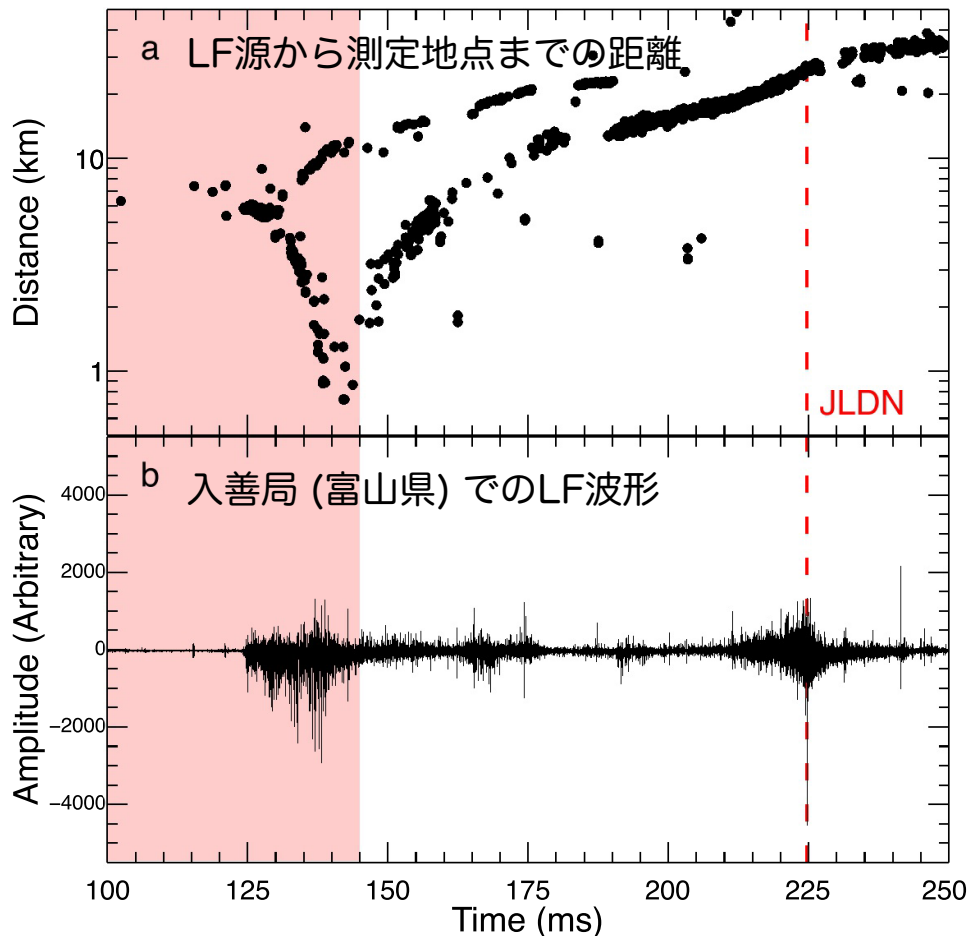
- ・ 富山湾に設置した5台のLF帯電波受信機 (400 Hz – 500 kHz) により time-of-flightで電波源の位置と時刻を標定
- ・ ガンマ線途絶の発生した時刻に～70 km、300 msにわたる放電が発生 - JLDNはそのうち振幅の大きかった2つのパルスを雲中雷と標定



- ・ 放電路は強雨域に沿って雲中を駆け抜けた。

LF観測による電波源の位置評定

- ・ 富山湾に設置した5台のLF帯電波受信機 (400 Hz – 500 kHz) により time-of-flightで電波源の位置と時刻を標定
- ・ ガンマ線途絶の発生した時刻に ~ 70 km、300 msにわたる放電が発生
 - JLDNはそのうち振幅の大きかった2つのパルスを雲中雷と標定



- ・ 放電路は強雨域に沿って雲中を駆け抜けた。
- ・ 雲放電の一部はガンマ線観測地点から南東1 km未満を通過。
 - > 通過時刻はガンマ線の途絶時刻とコンシステント。
 - > この雲放電によって雲中の電場加速機構が破壊。
- ・ JLDNは225 msで放電を検知
 - > LFの観測からCG/IC判定は困難
 - > 加速機構の破壊には関係ない

考察

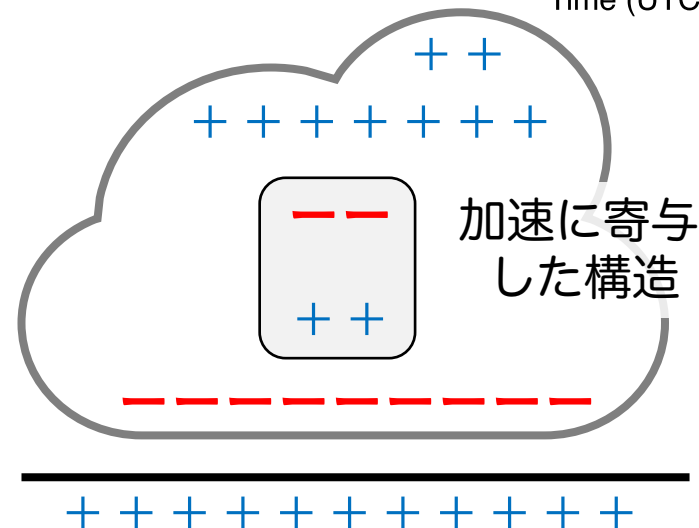
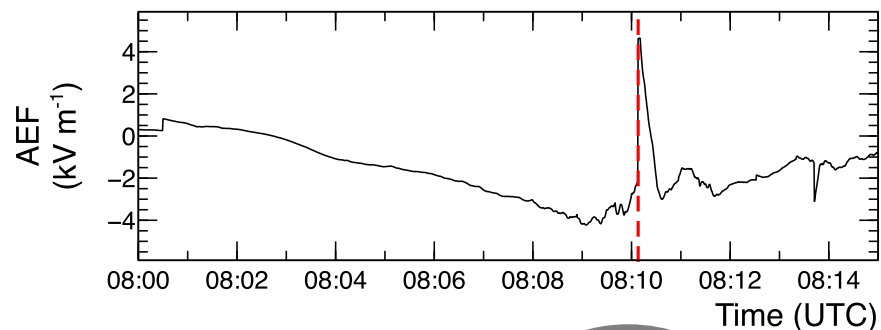
電波観測より

- 電場加速機構はガンマ線観測点の至近で発生した一連の雲放電によって破壊され、ガンマ線放射は停止した。
- メインのリターンストローク (CG) またはリコイルストリーマ (IC) はガンマ線途絶の後におきており、微弱な連続ICによって破壊が起きうる。

電場観測より

- 雷雲通過中は放電時を除いて負である
 - > 雲底は負に帯電している
 - > ポケット正電荷は存在しない
- 放電後も値が負に戻っている
 - > 雲底部分の電荷は解放されていない
 - > 雲底部分は加速に寄与していない

=> 雲底ではなく内部の電荷構造が加速に寄与



まとめ

- ・ ロングバーストの電子加速機構とその発生メカニズムを明らかにするため金沢や柏崎での多地点観測を推進。
- ・ 可搬型の検出器を制作し、多地点に配備できる体制が整いつつある。ボタン一つで観測開始できる装置も開発中。
- ・ これまで石川県、新潟県内に16地点の観測点を確保。観測点の増加により検出できたイベント数も増加傾向にある。
- ・ 2017年2月11日に珠洲市で雷放電によるロングバーストの途絶を検出。
- ・ 観測点の至近で起きた微弱な連続ICによって電子加速機構が破壊され、ガンマ線放射が停止した。
- ・ 電子加速には雲底付近の負電荷は寄与しておらず、雲底よりも内側に存在する電荷構造によるものだと考えられる。