

福島上空における放射線と大気電気

日本原子力研究開発機構 (JAEA) 福島環境安全センター

鳥居建男、眞田幸尚、西澤幸康

山田 勉、織田 忠

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 航空本部

村岡浩治、佐藤昌之

福島大学 共生システム理工学類

渡邊 明

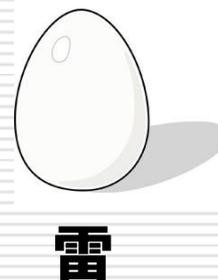
放射線と雷現象

□ 雷雲から放射線が出ている

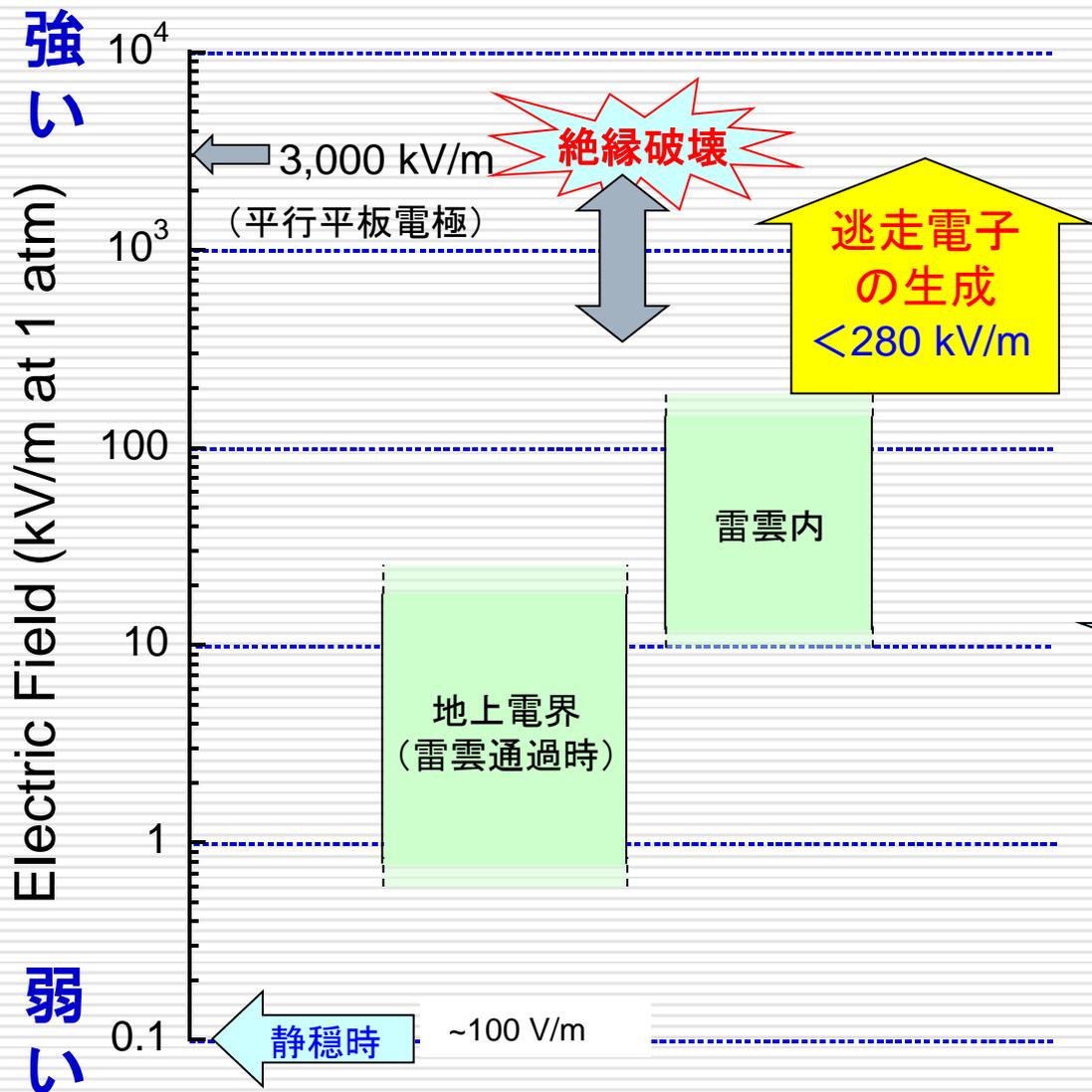
- 冬季雷活動時に2種類の放射線レベル上昇を観測(長時間・短時間バースト)
- 夏季雷でも高山(富士山頂等)でも観測される
- 雷雲の強電界領域において逃走電子/電磁シャワー発生の可能性
- “種”としての高エネルギー電子:2次宇宙線、大気中の放射性物質(ラドン)
- 宇宙線が“種”か? ラドン(大気中の放射性物質)の影響は?

□ 放射線が雷放電のトリガーになってる?

- 雷雲中の電界強度:Max. 200 kV/m @1atm ↔ 室内実験:3,000 kV/m
- 放射線起源の逃走絶縁破壊(Runaway Breakdown, 相対論的、非相対論的)?



雷雲中の電界強度と絶縁破壊(放電)



絶縁破壊電界と雷雲内電界 (観測値) のズレ: 約1桁

《原因未説明》

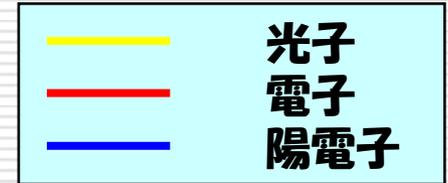
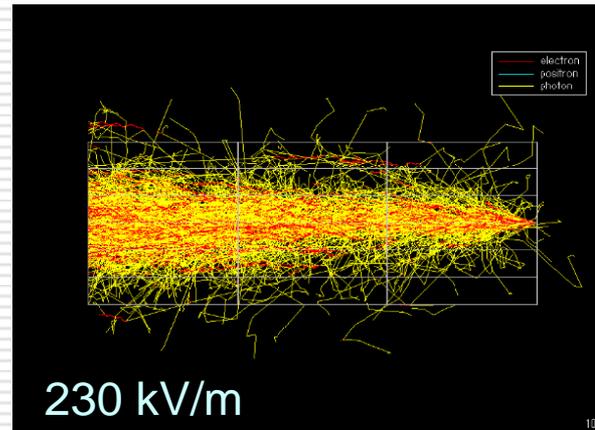
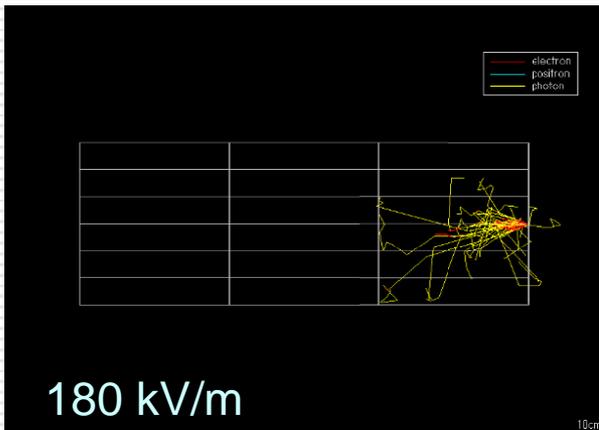
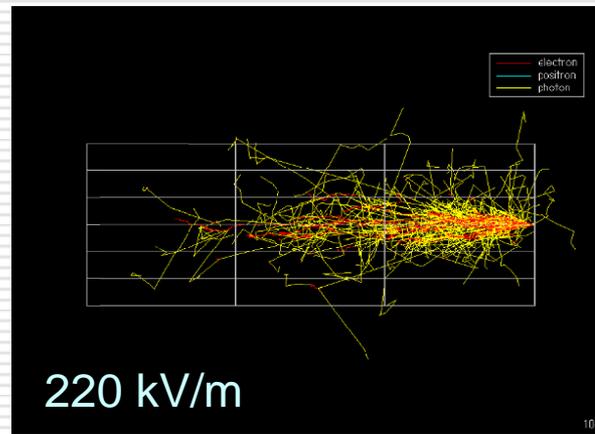
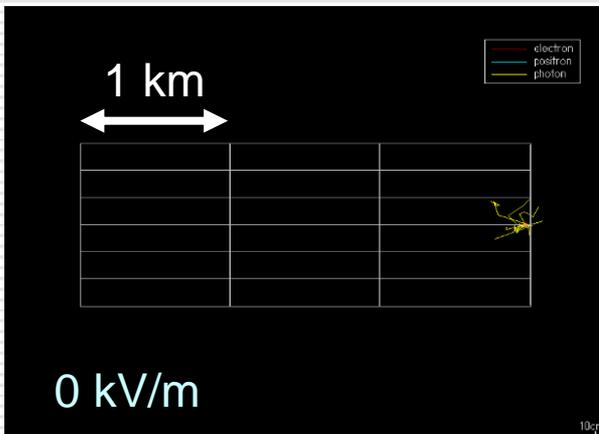
逃走電子と電磁シャワーの生成

雷雲電界を模擬し
逃走電子の生成・
制動放射線発生
のシミュレーション

- 雷雲をモデル化
- 大気中に放射線入射
- モンテカルロ計算

モンテカルロ計算による電子・光子の飛跡解析

- MC計算コードEGS4/5への電界効果の組み込み
- 高度 2 km (密度 1.0066 kg/m^3)
- 入射電子: 10 MeV、25 個



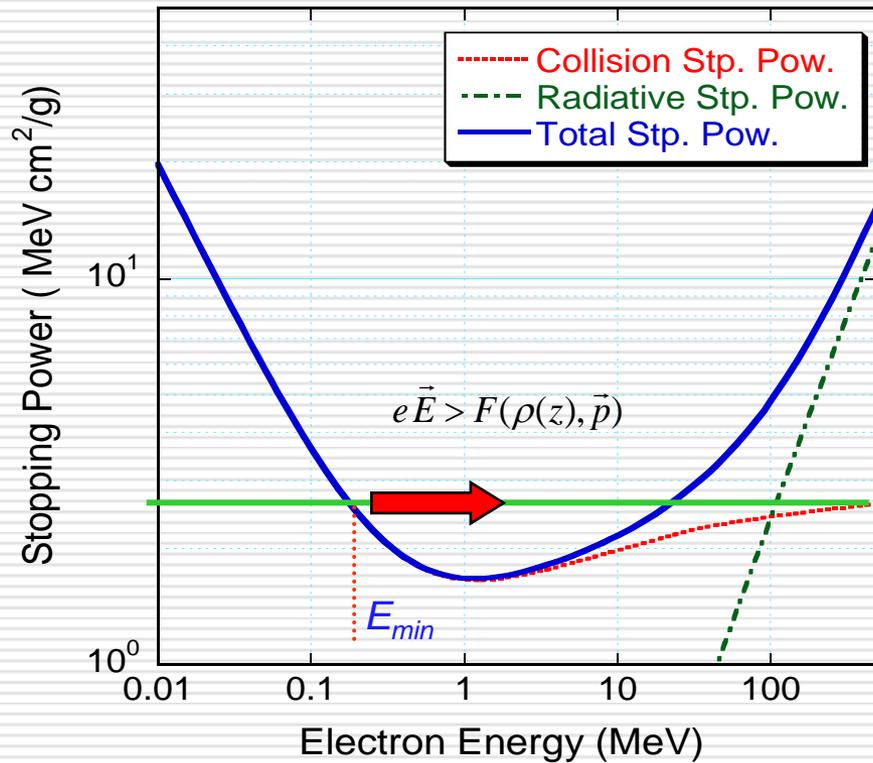
高度2kmでは
230 kV/mで
電磁シャワー
が連続的に発生

逃走電子の連続生成

$$E_{th} \approx 280 \times P \text{ [atm]} \text{ [kV/m]}$$

逃走電子の生成

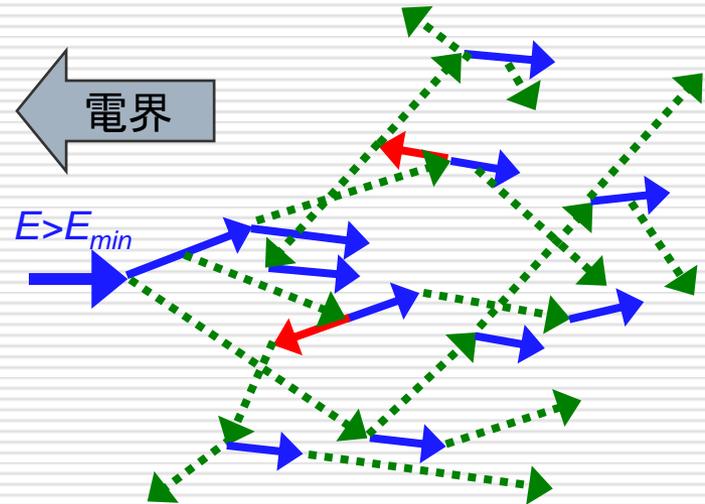
AIR, DRY (Near Sea Level)



Stopping Powers for Electrons and Positrons
[ICRU Rep. 37 (1984)]

逃走電子の発生条件

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{E} - F(\rho(z), \vec{p}) > 0$$



電子・光子なだれ(電磁シャワー)の発生

雷放電開始への放射線の寄与の可能性

- 雷雲の電界強度(観測値)が絶縁破壊電界の**1/10** (~200kV/m)
- 逃走電子が生成される電界 (~**280kV/m-atm**) は雷雲電界と同程度である



- 2次宇宙線(電子・陽電子・光子・ミュオン)
 - 特に透過性の高いミュオンからの崩壊電子、バックオン電子の影響
- ラドン壊変生成物の β ・ γ 線

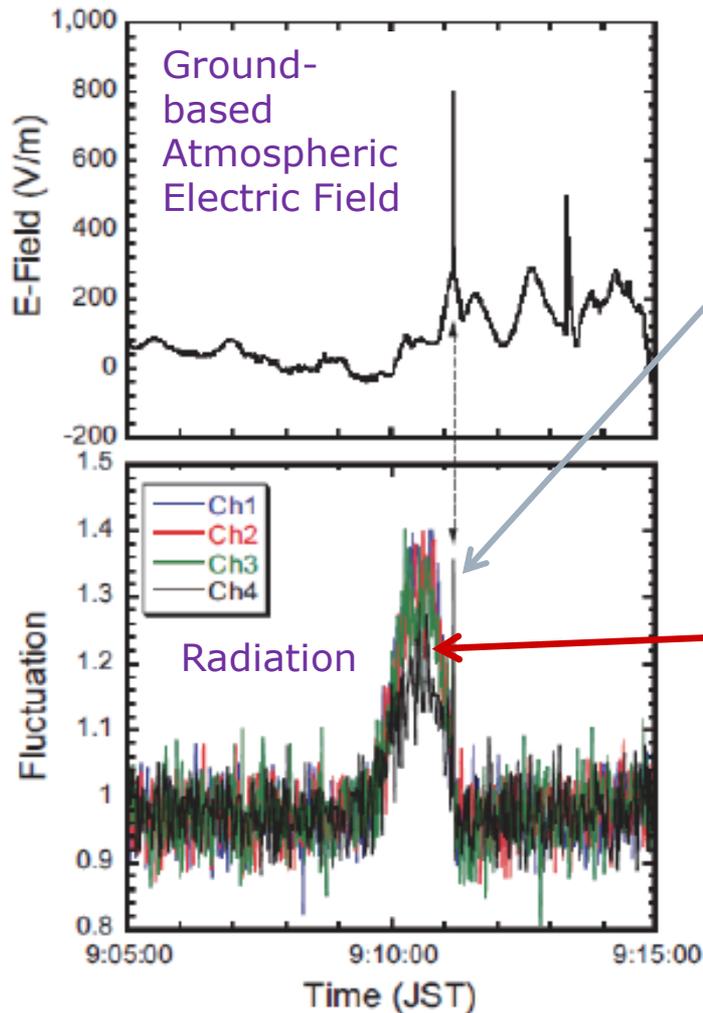
逃走絶縁破壊@1atm

Gurevich et al. : 220 kV/m

Dwyer et al. : 284 kV/m

Torii et al. : 280 kV/m

Energetic Radiation Associated with Thunderstorm Activity



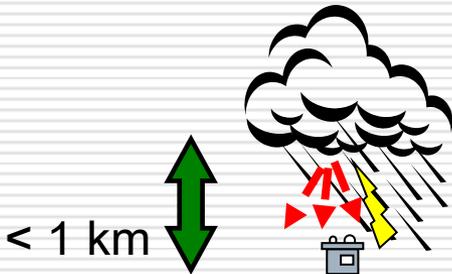
Two types of radiation

Short-burst
about 1 second **before** return-stroke
~millisecond order
~up to 250 keV in US
more than 30 MeV in Japan (?)

Long-burst
~Several minutes
~up to 20 MeV

Long-burst of energetic radiation is observed during ...

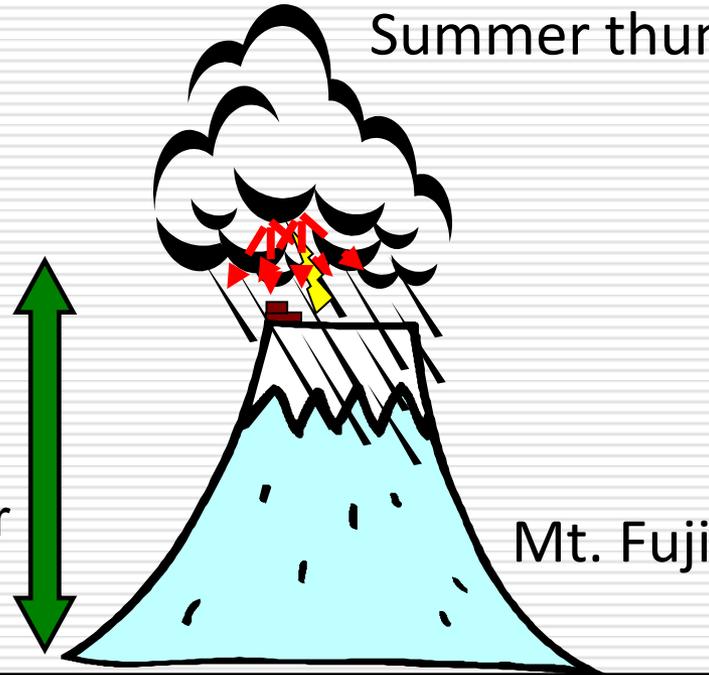
Winter thunderstorm
In Japan



< 1 km

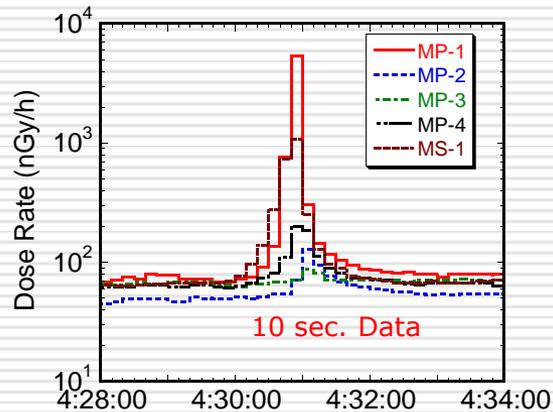
A few
kilometer

Summer thunderstorm



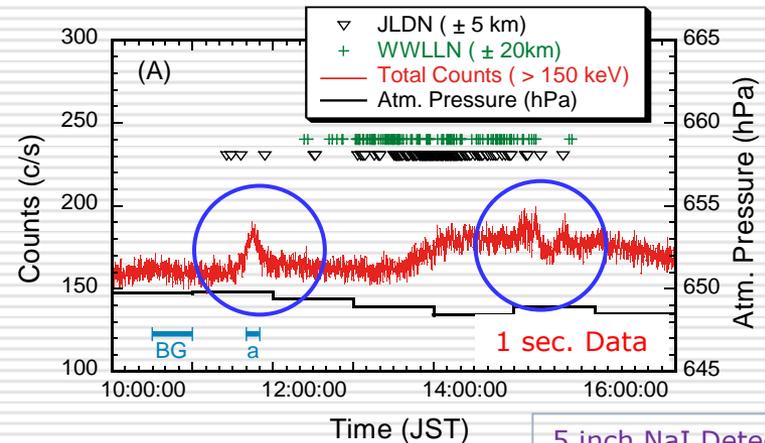
Mt. Fuji

Torii et al. (JGR, 2002)



Time (JST) 2 inch NaI Detector

Torii et al. (GRL, 2009)

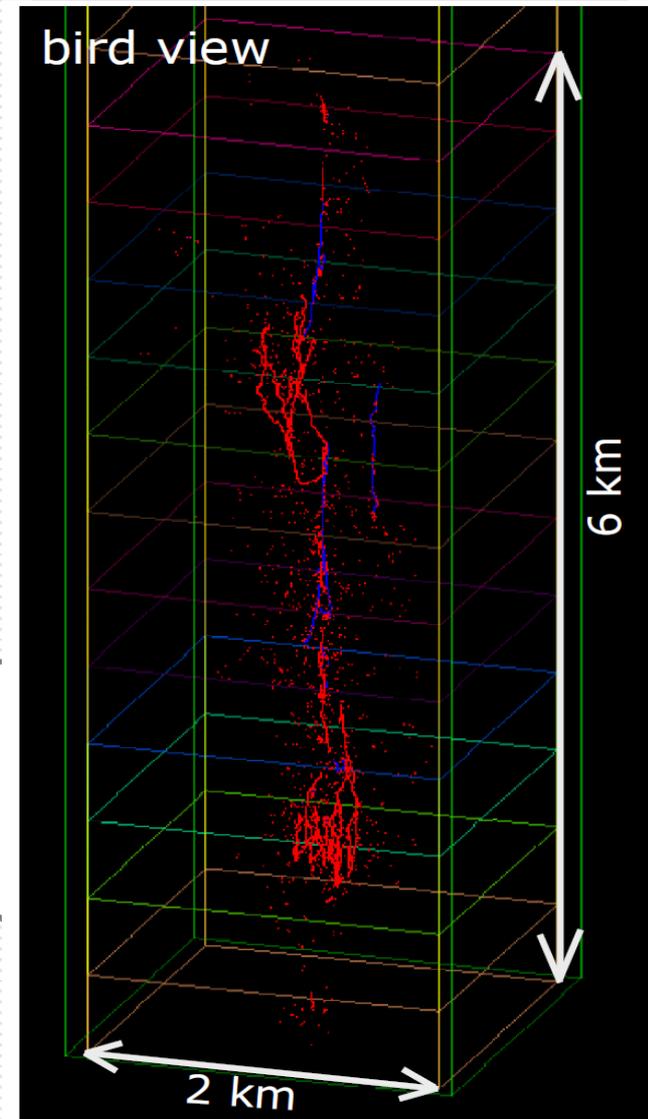
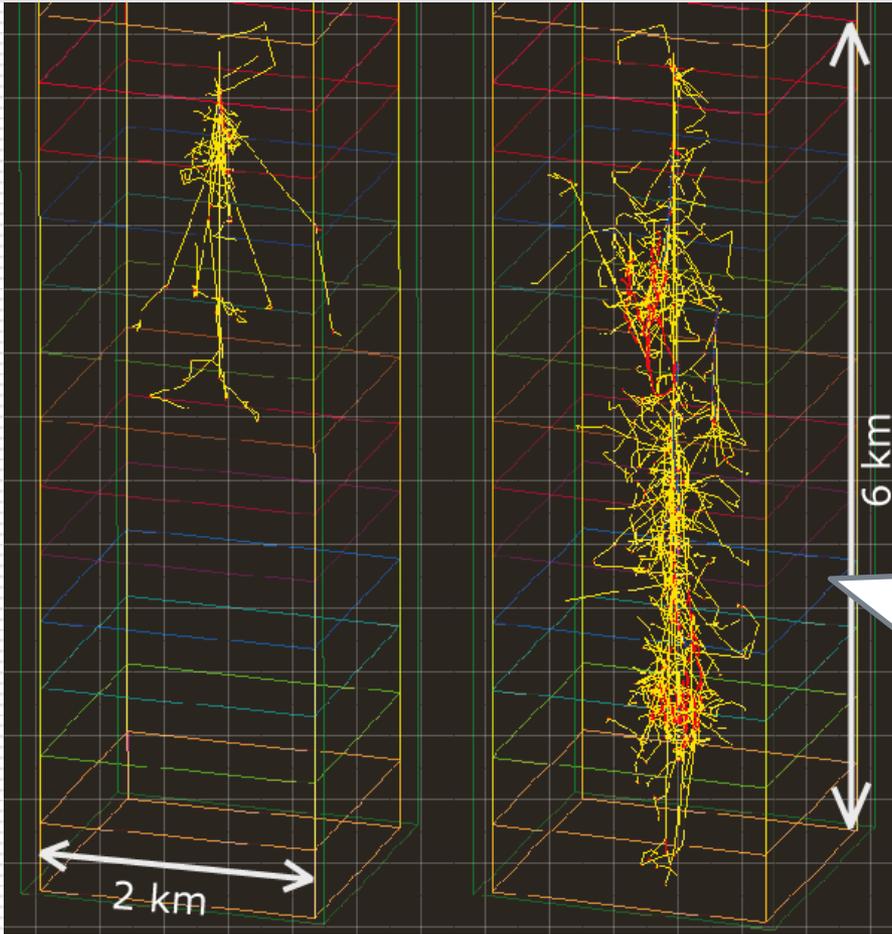


Time (JST) 5 inch NaI Detector

Monte Carlo Simulation (Torii et al., GRL, 2004) Shows

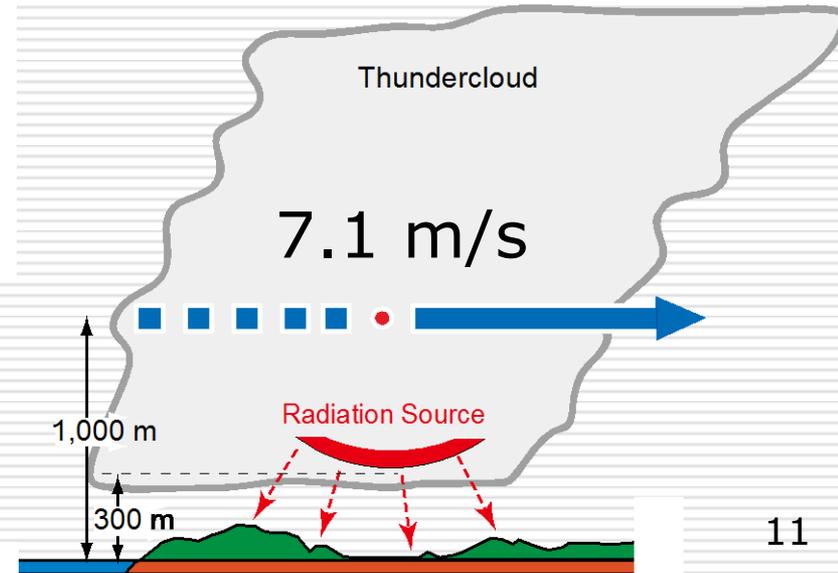
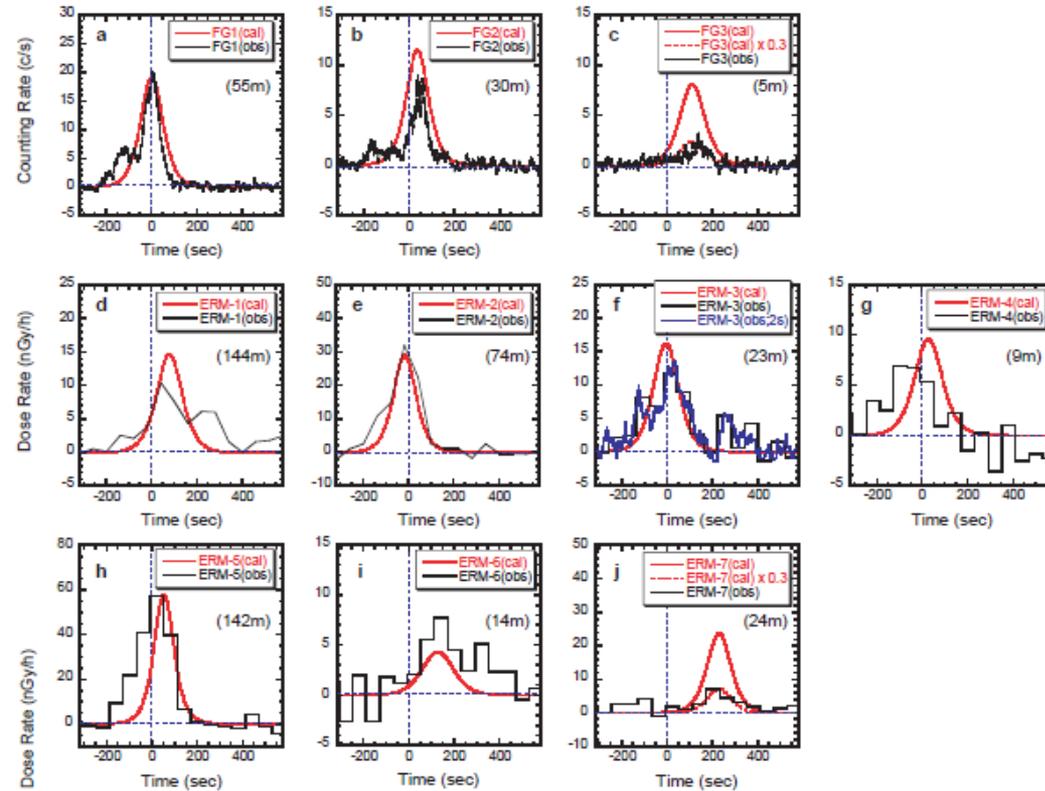
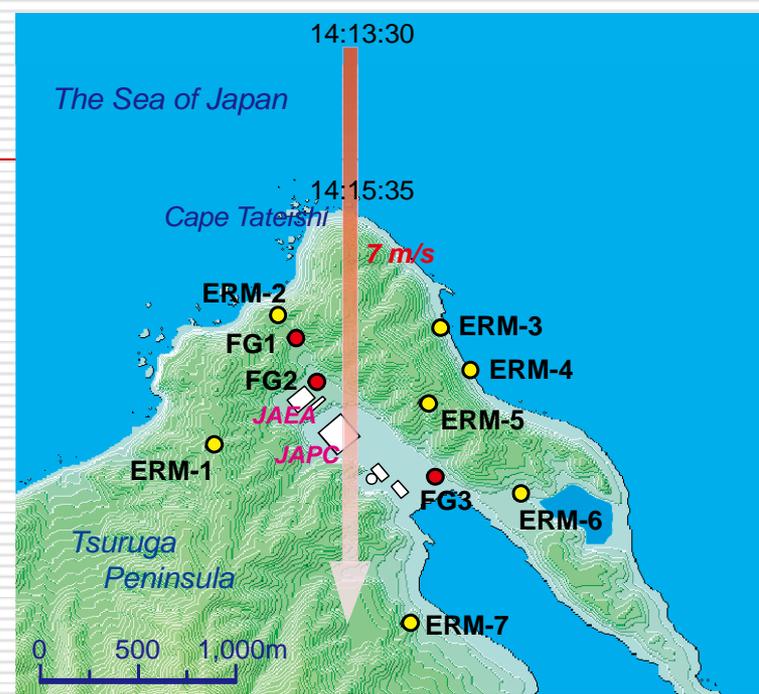
Without electric field

With electric field



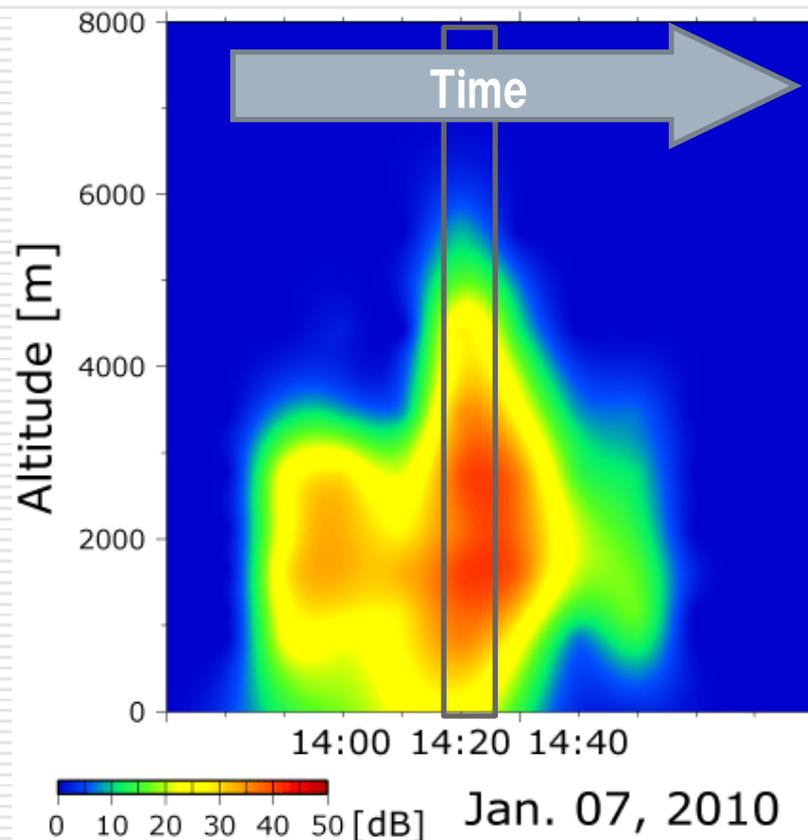
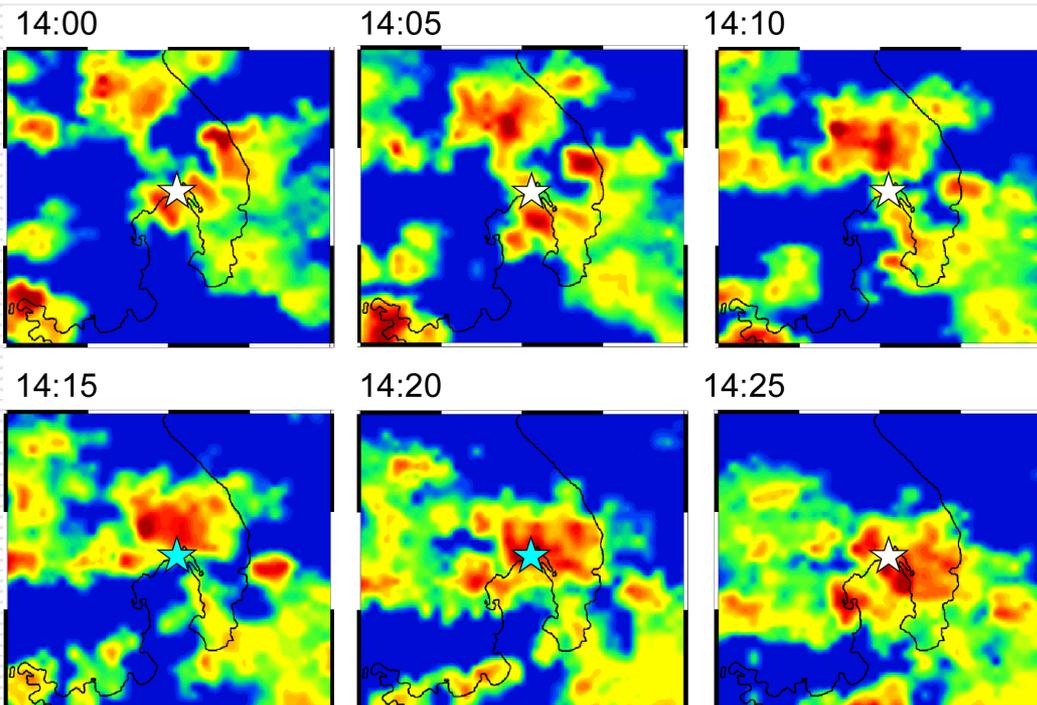
Runaway Electrons/Positrons

Estimated Source Location



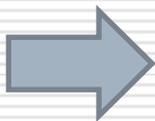
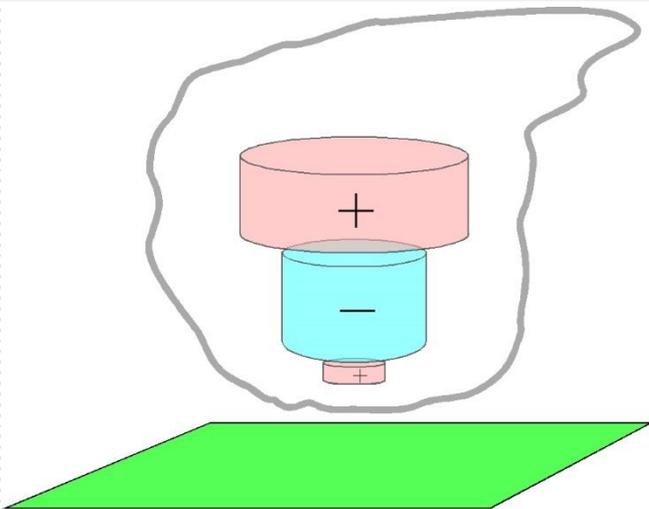
Radiation attenuation: $\exp(-r \ln 2/\lambda)/(4\pi r^2)$
 Half-length at 0.2 - 300 MeV: $\lambda \sim 300$ m

Radar Echo Profile

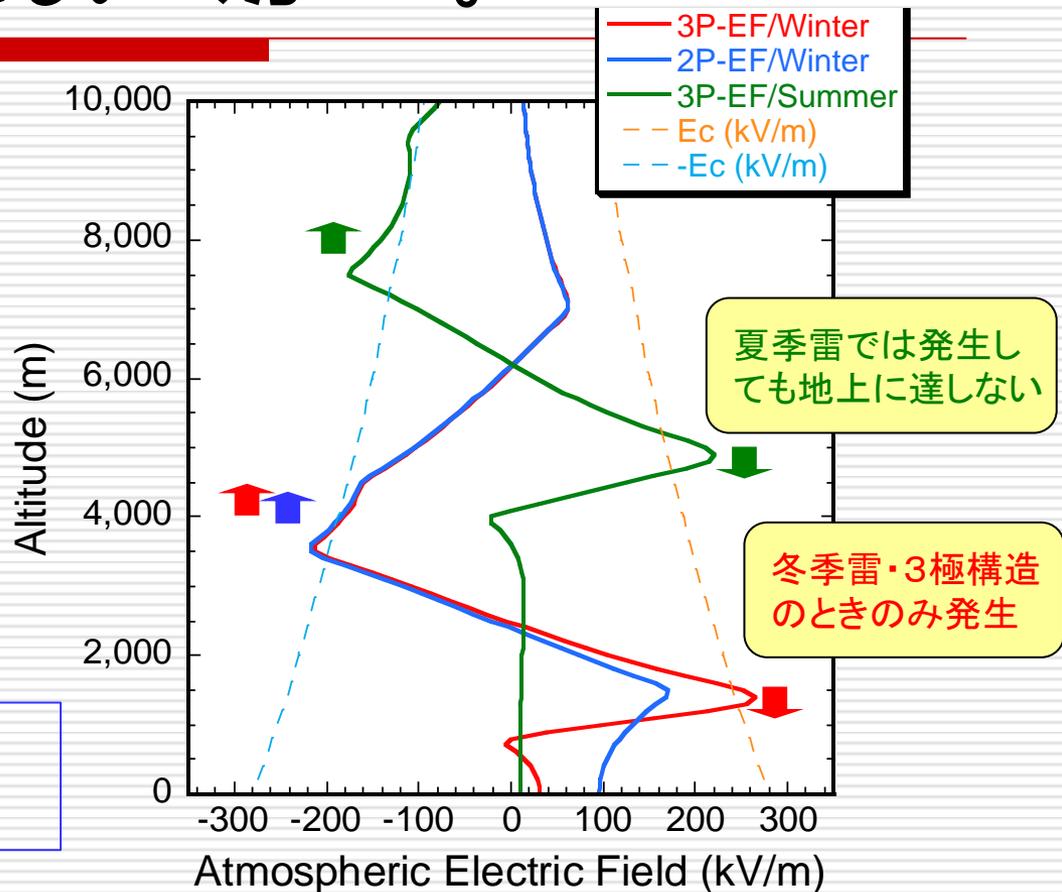


Vertical View of Radar Echo
above Fugen Site Observed
by the Tojinbo Cliff Radar

上方向では観測されないのか・・・。



雷雲中で放射線は発生し得るし、
雷雲上空でも発生する・・・。



電界強度の高度分布と電子加速の方向

- TGF (Terrestrial Gamma-ray Flash) との関係は？
- 航空機被ばく (雷雲上空、雷活動中の離着陸) は？

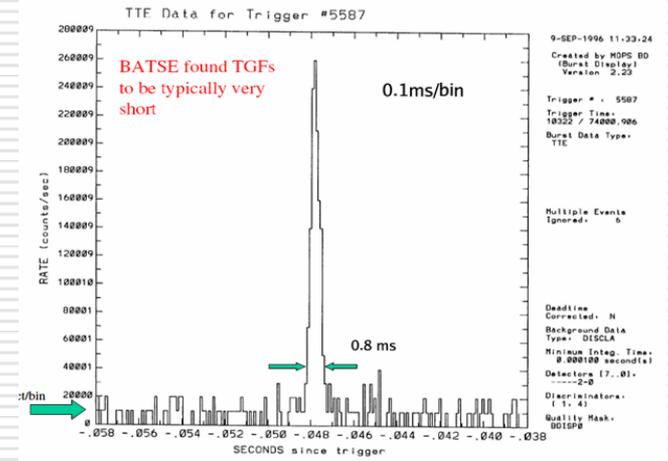
宇宙からのTGF観測

□ CGRO衛星 (1991~2000)

- NaI検出器
- 9年間で74回観測
- 上昇時間: ~1.0 ms

□ RHESSI衛星 (2002~)

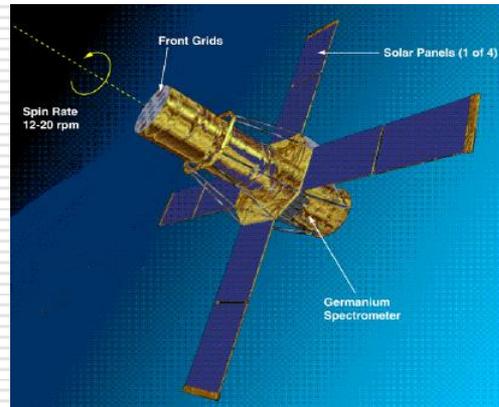
- Ge検出器
- 8ヶ月で125回も観測
- 上昇時間: 200 ms ~ 3.5 ms
- ~20 MeV も



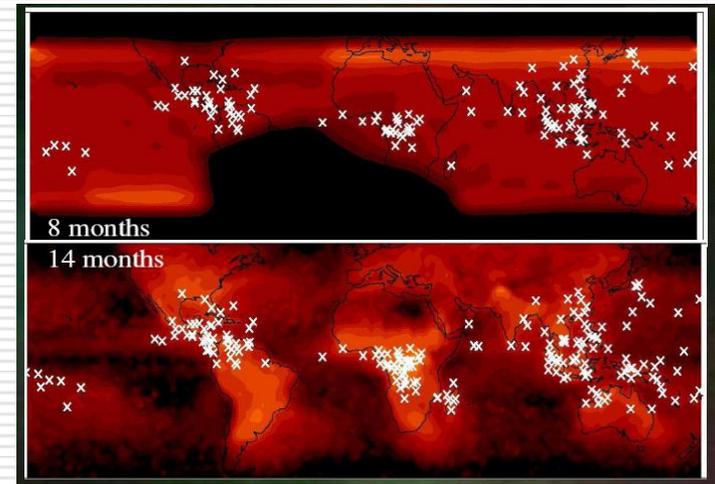
Fishman et al., Science, 1994



CGRO

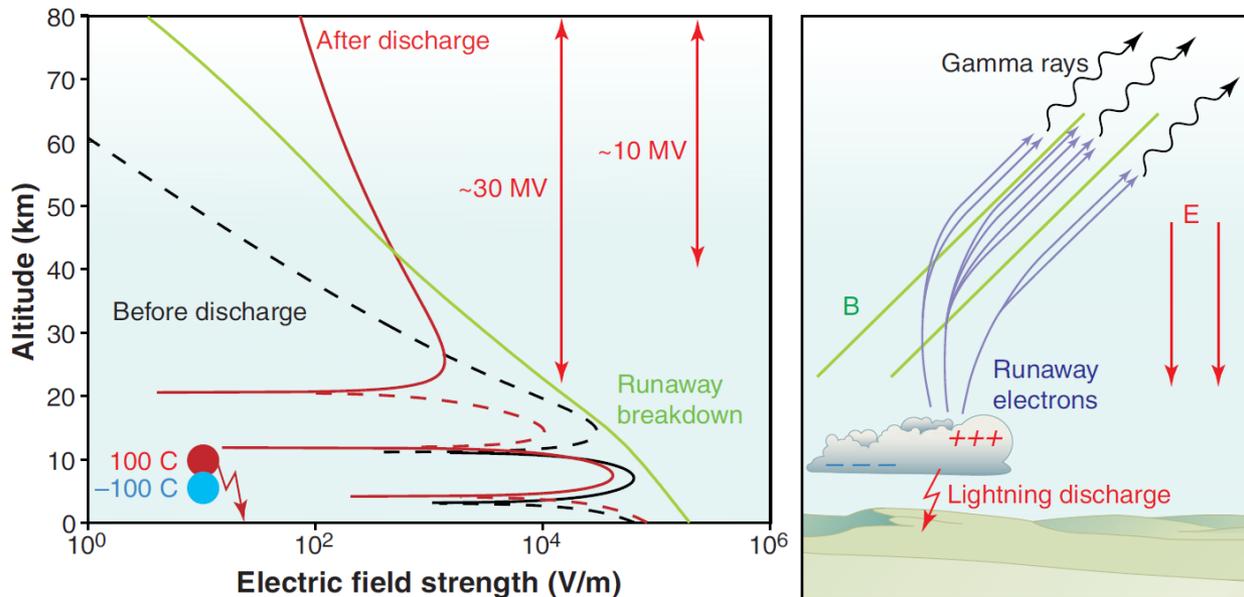


RHESSI



Smith et al., Science, 2005

TGF発生メカニズム?



1. 雷放電直後の電界変動
2. 逃走絶縁破壊電界を超える電界の発生
3. 逃走電子の発生
4. 空気分子との衝突によるγ線(光子)の発生
5. 光子が人工衛星に到達

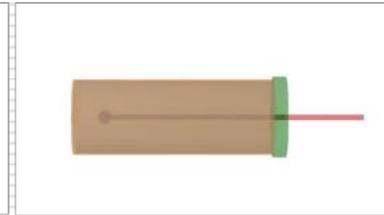
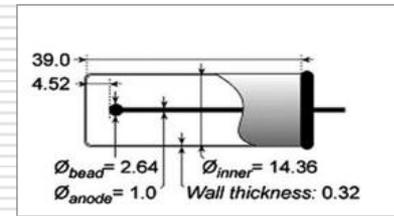
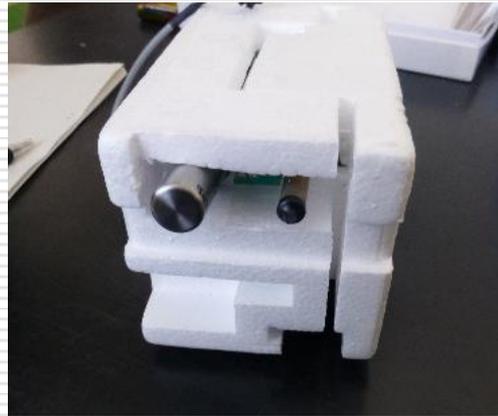
How terrestrial gamma-ray flashes form. (Left) The electric field before (black line) and after (red line) a positive lightning discharge that removes 100 C from the top of the cloud (at an altitude of 10 km). After the discharge, the relativistic runaway threshold field (green line) is exceeded above 40 km. Solid and dashed lines are downward and upward fields, respectively. (Right) Schematic of the relativistic electron avalanche and production of gamma rays after the lightning discharge. The scale roughly corresponds to the vertical scale on the left.

(Inan, Science, 2005)

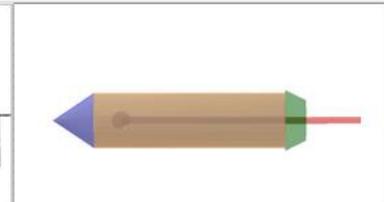
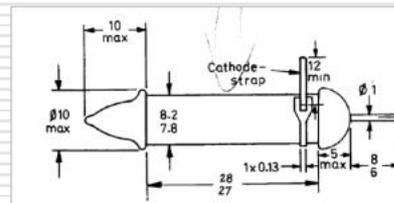
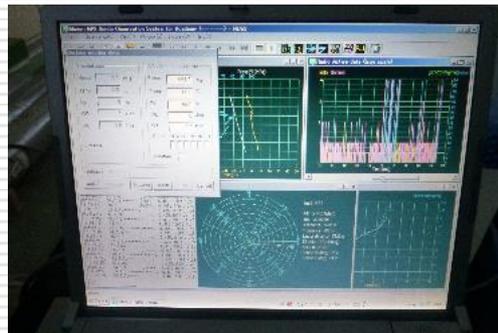
- 高度 400 km の人工衛星で観測されるなら雷雲中や雷雲上空では？
- 地上で観測される長時間バーストは？

放射能ゾンデによる雷活動中の放射線変動

- ❑ 福島大(渡邊)は、福島第一原発事故後、大気中の放射能濃度、降下量の分布測定を実施
- ❑ β 線・ γ 線検出器(GM管)を搭載した放射能ゾンデを定期的に放球し観測 (JAEAと共同研究=大気中の放射能分布の測定解析)



γ 線検出器



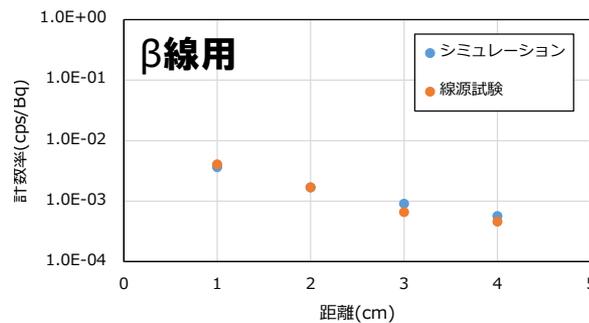
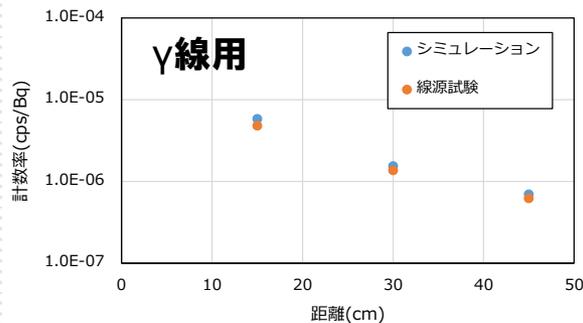
β ・ γ 線検出器

検出器の応答解析

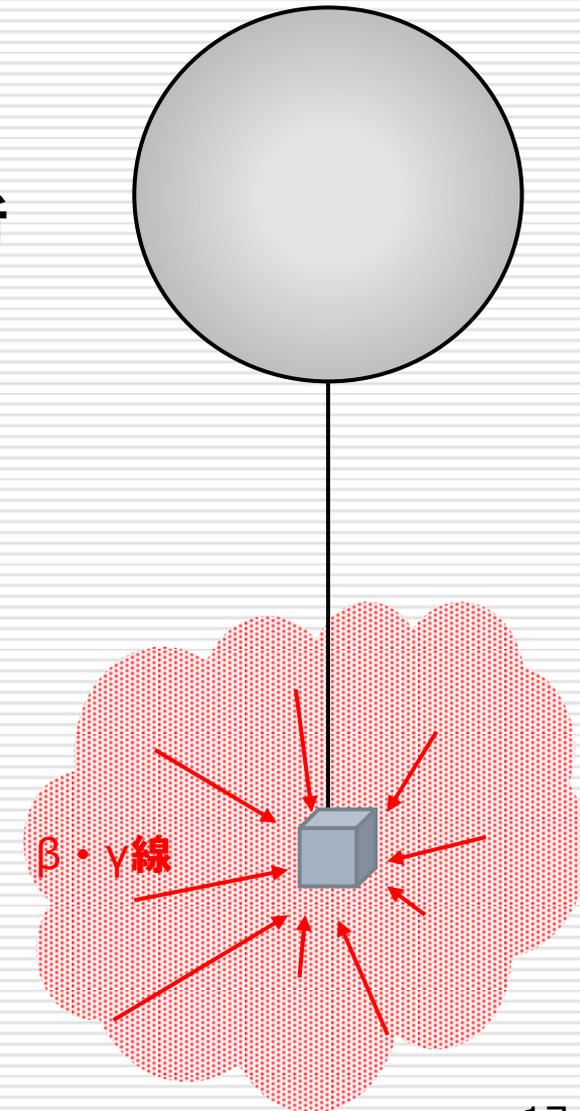
- 点線源(^{137}Cs 、 ^{36}Cl)を用いて感度試験を実施
- モンテカルロ計算で点線源に対する応答計算
- 大気中の放射性物質に対する検出器応答を解析

大気中に分布したCs-137、Cs-134に対する検出器(GM管)の応答

核種		計数率(cps/(Bq/m ³))
^{137}Cs	γ 線	1.7×10^{-3}
	β 線	1.3×10^{-5}
^{134}Cs	γ 線	4.7×10^{-3}
	β 線	6.5×10^{-6}

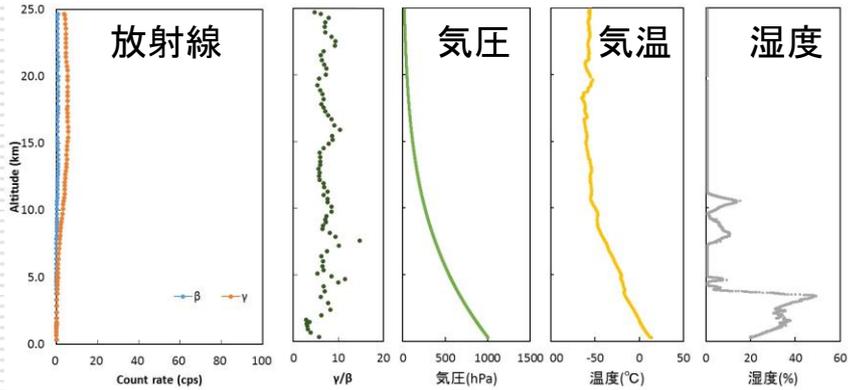


シミュレーションと線源試験(左:Cs-137、右:Cl-36)の計数率の比較

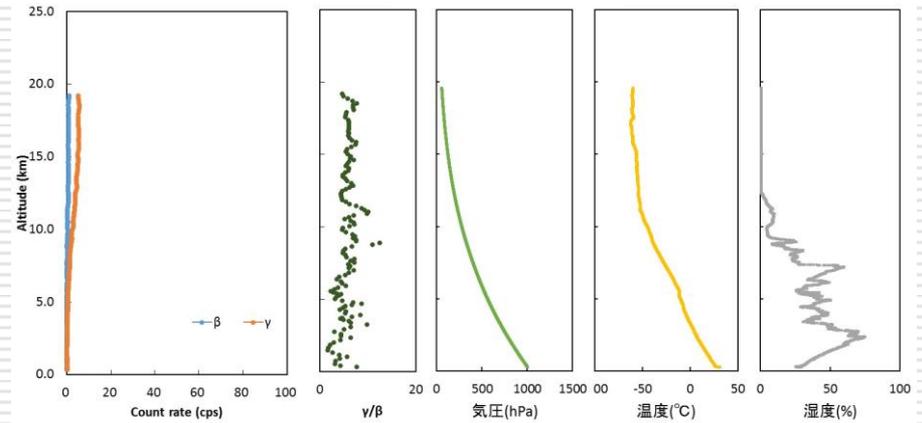


放射能インテによる福島上空の放射線の観測

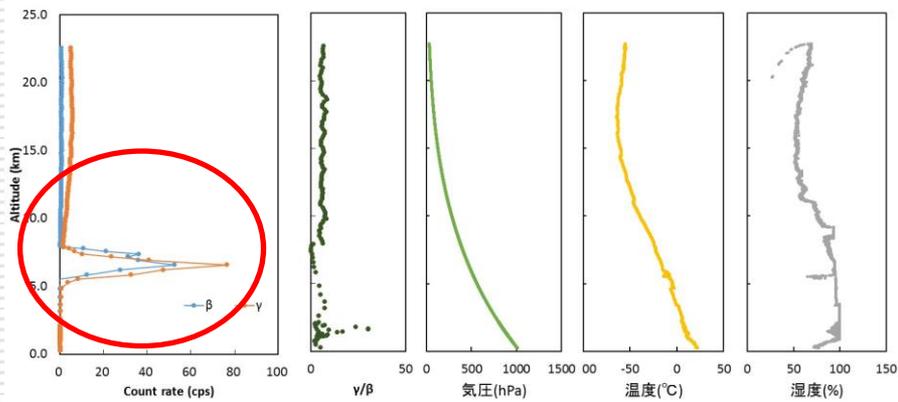
2014.4.12



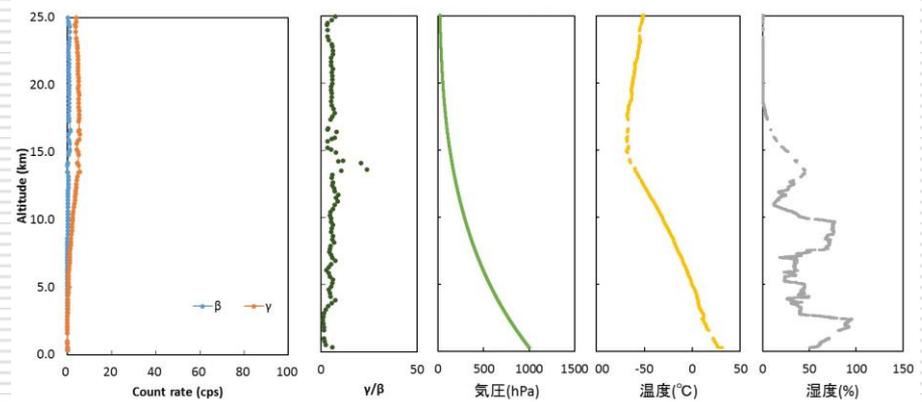
2014.6.16



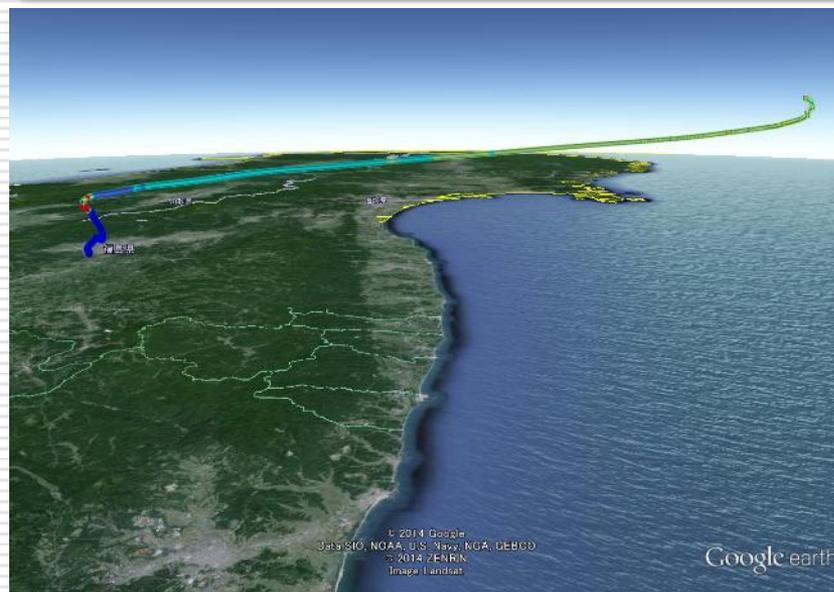
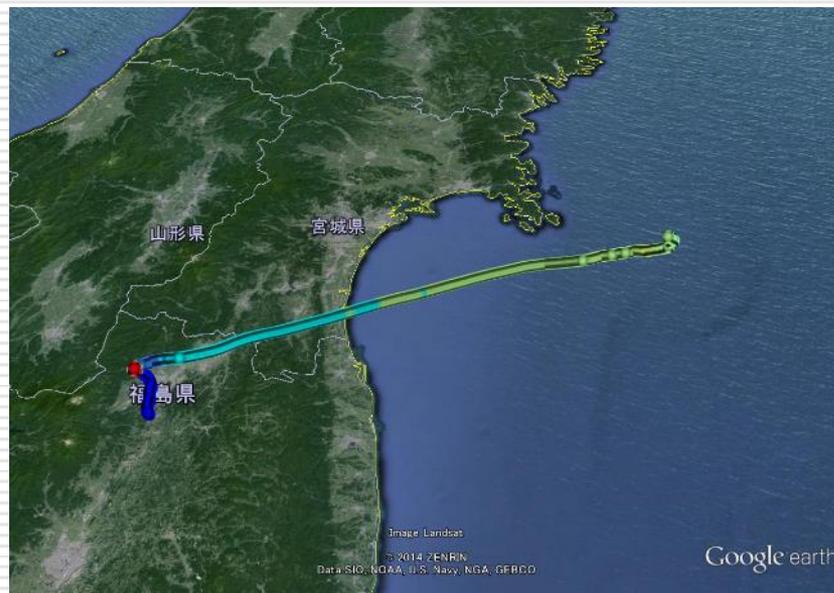
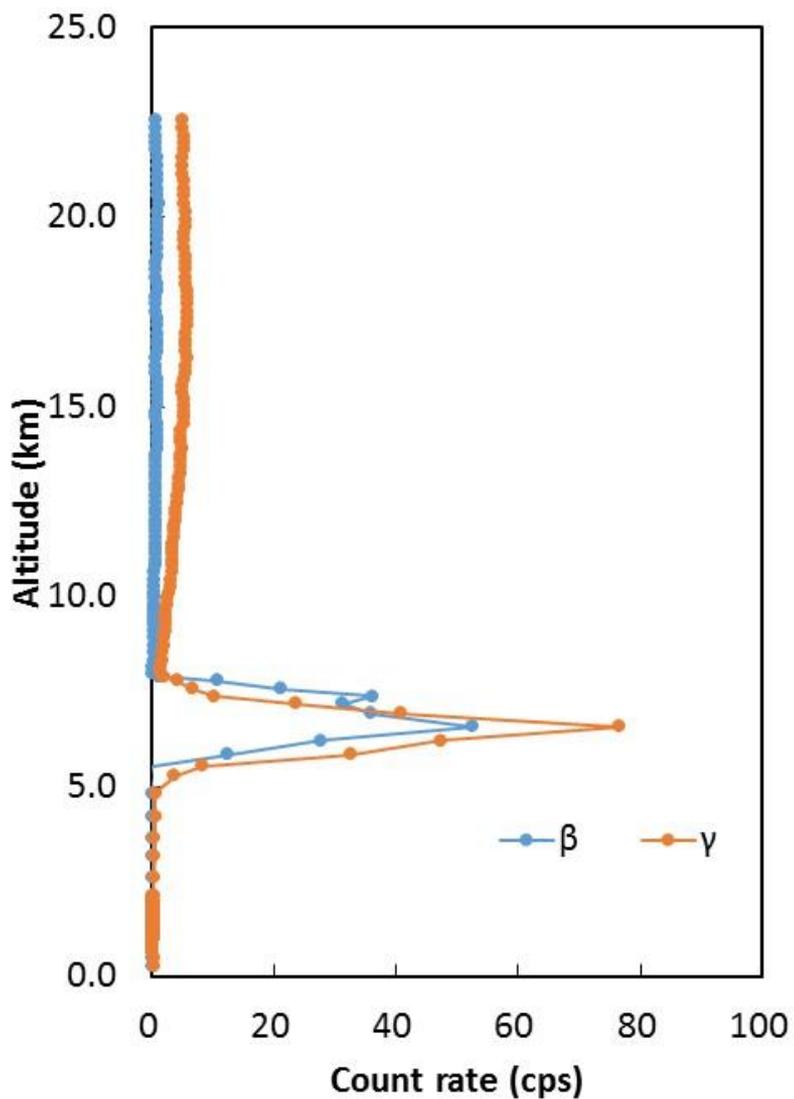
2014.6.18



2014.7.21

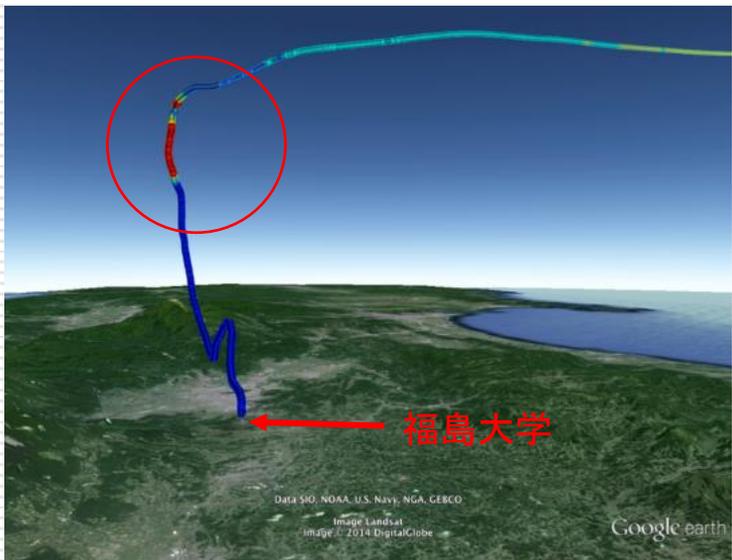
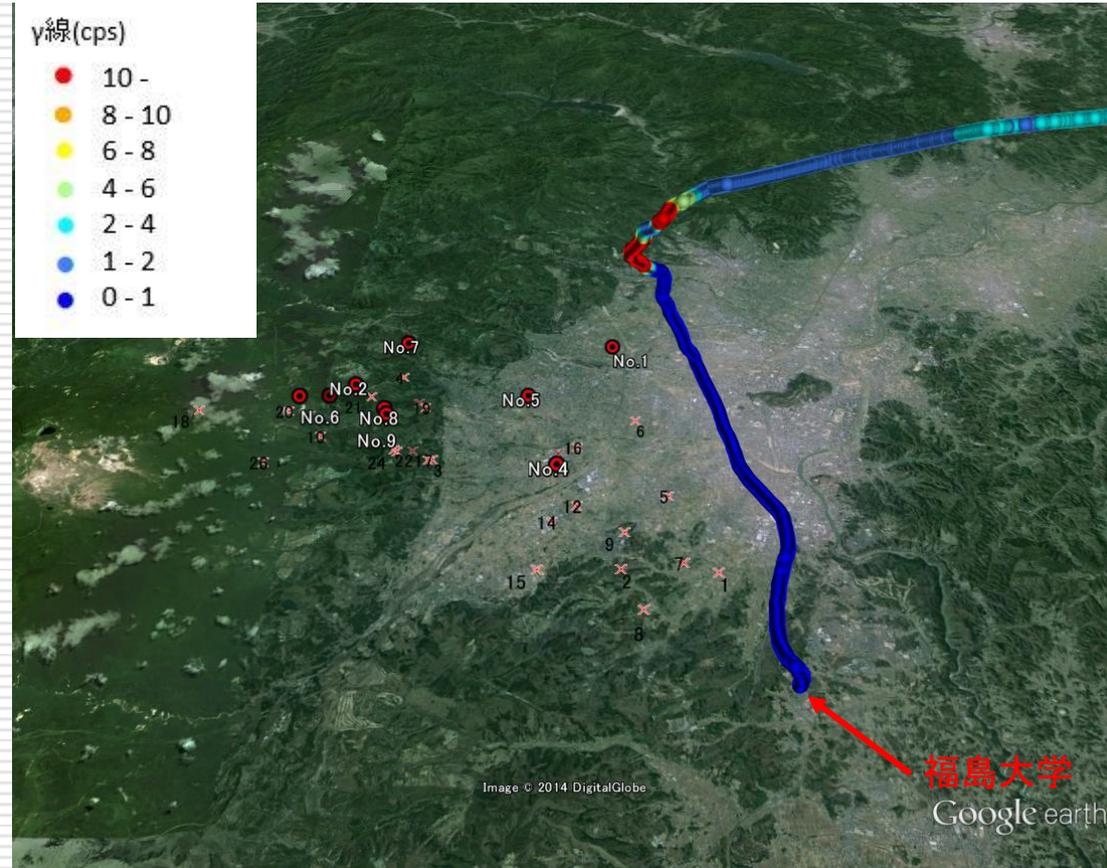
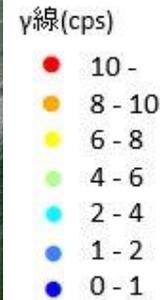
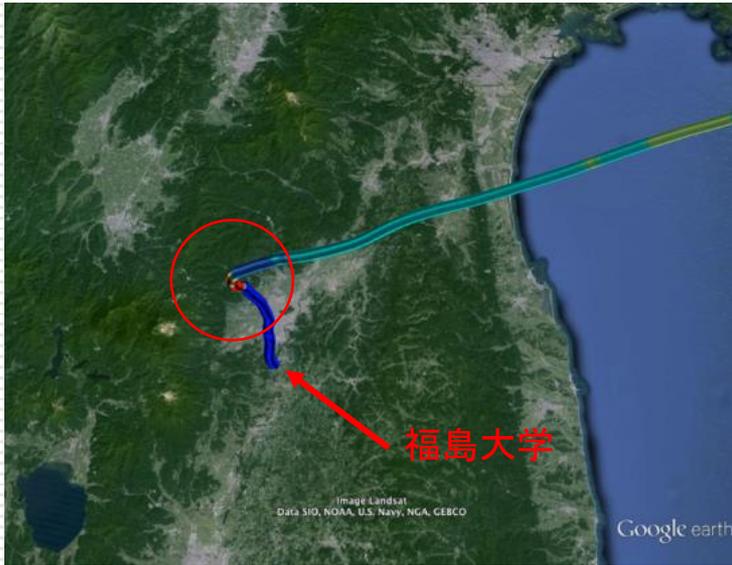


雷活動中(6月18日)の測定結果とソンの飛跡



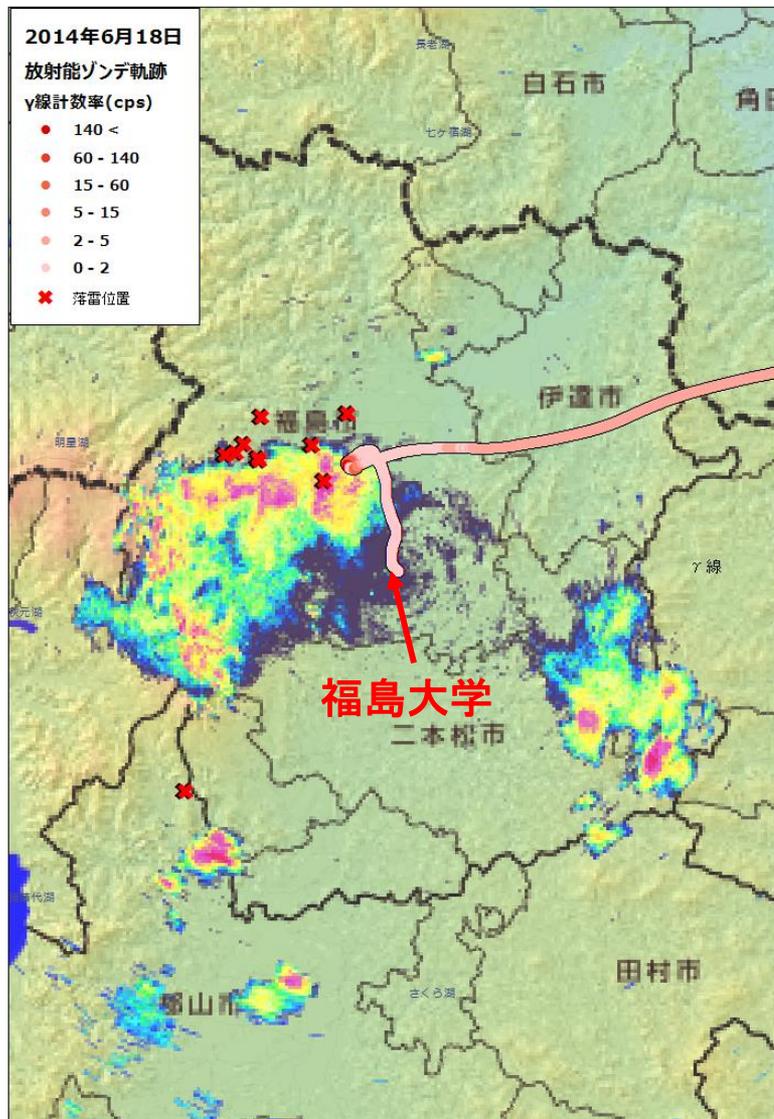
2014年6月18日事象の放射線変動

□ 雷雨活動中にゾンデを放球

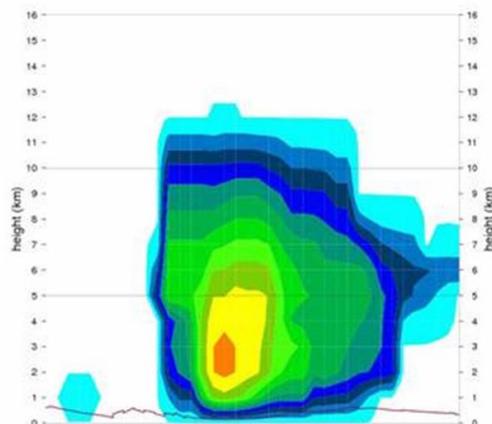


落雷地点：● 東京電力、× FJ社

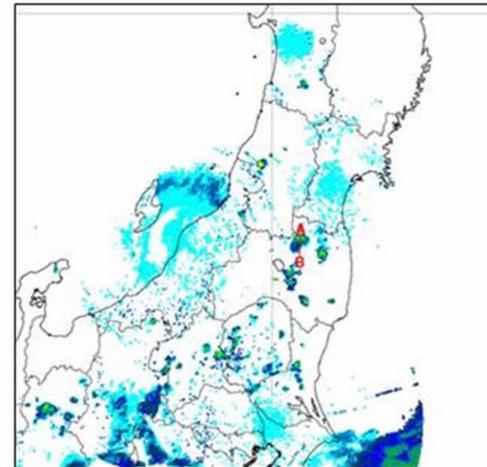
計数率上昇時のレーダー画像



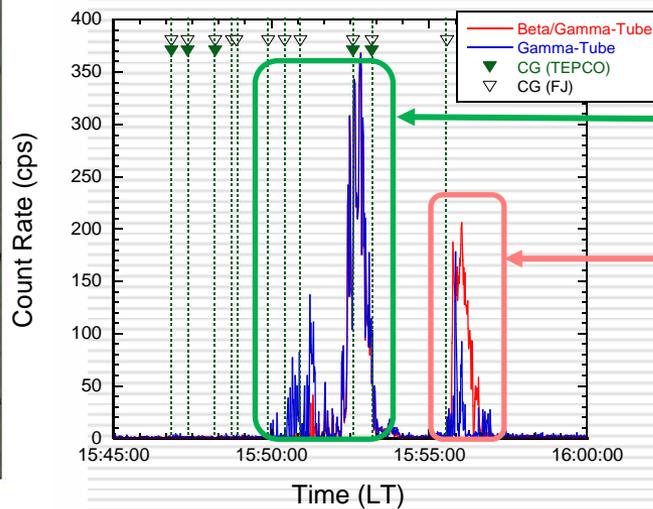
2014/06/18 15:40



RHI画像



福島大・渡邊先生より提供



高エネルギーの
電子・光子の混在場

低エネルギーの
電子・光子の混在場

PREMIUM

航空機を用いた放射線変動の観測

- JAXA実験用飛行機「飛翔」にγ線スペクトロメータを搭載し、雷活動中の福島上空（40,000-47,000 ft）で観測



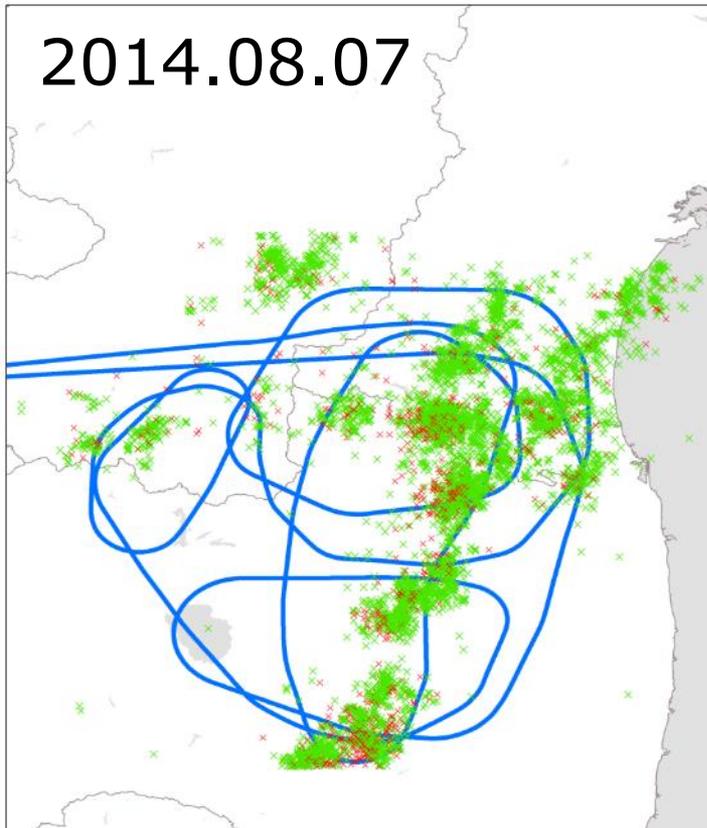
3インチ・5インチNaI検出器



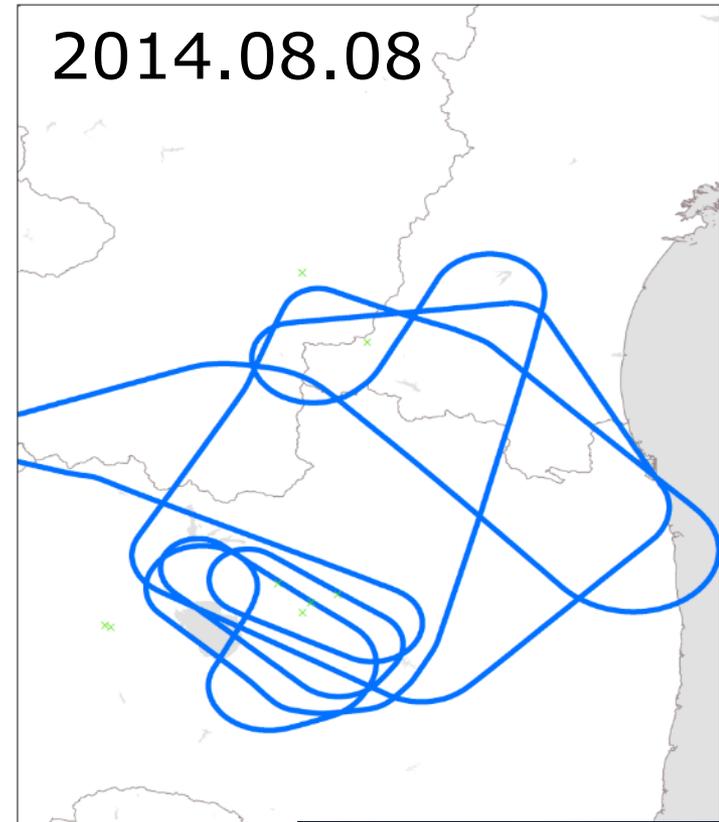
飛行ルート (2014年8月7日、8日)



飛行ルート（8月7, 8日）と雷活動



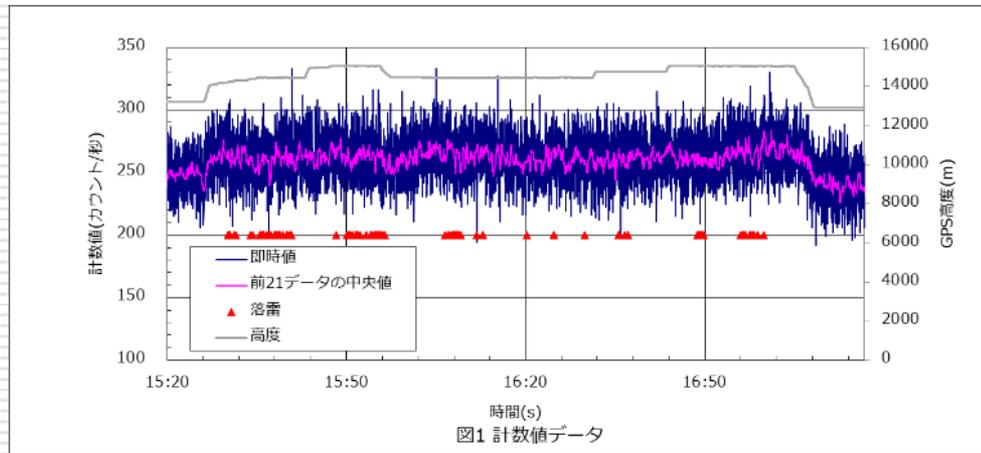
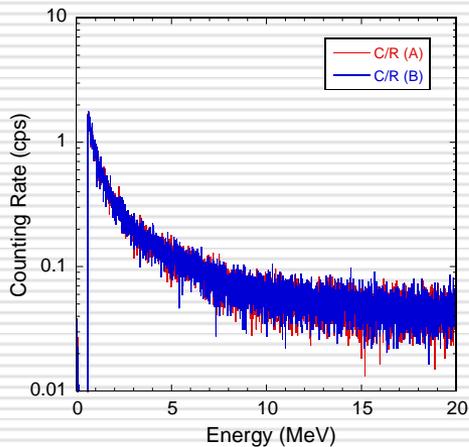
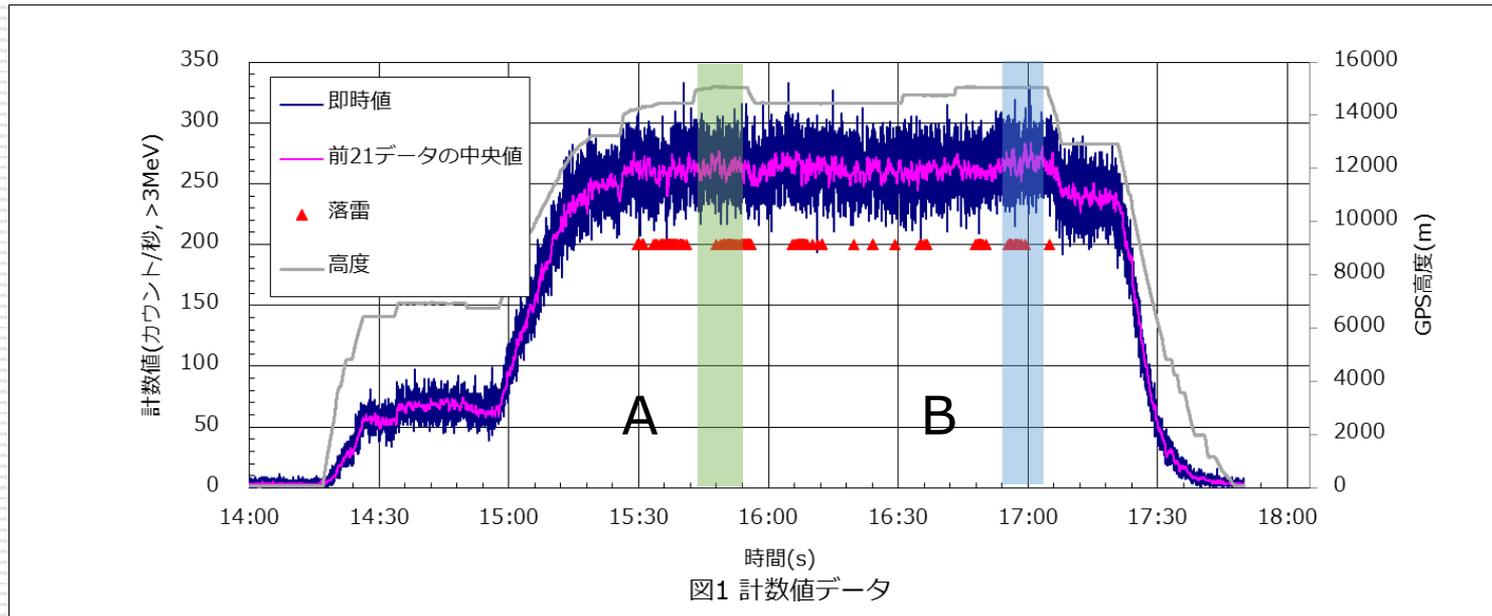
- 凡例
- 8月7日飛行軌跡
 - × 落雷
 - × 雲放電



- 凡例
- 8月8日飛行軌跡
 - × 落雷
 - × 雲放電



高度15kmでの計数率の変動



□ 有意なスペクトルの変動は認められなかった。

ゾンデ・航空機観測のまとめ

- 放射能ゾンデにより、雷活動中に放射線計数率の上昇が観測された。計数率の解釈はこれからである。
- 観測位置から強いレーダーエコーが観測される位置(高度:6 - 7 km)でBGの数100倍の計数であった。
- 航空機観測では、雷活動に起因する有意な放射線は観測されなかった。

(その原因として)

- 強い電場が近くにあったか？
(雷放電電流:-数 kA~-30数 kA)
- 雷雲電界の極性は？
- 8/7の雲頂高度が高かった(50,000 ft 超)。
(飛行高度:40,000 ~ 47,000 ft)
- 目視による飛行では雷放電の多発箇所が特定しにくい。
- 今後、観測法の検討・改善を行いつつ、観測を継続しデータ収集と分析を行う。

