

JEM-GLIMSの光学・電波観測によるスプローライトの空間分布特定とそれに伴うVHF帯電磁波の関係

三原正大¹, 佐藤光輝¹, 牛尾知雄², 森本健志³, 菊池博史², 足立透⁴, 鈴木睦⁵ 山崎敦⁵, 高橋幸弘¹, U.Inan⁶, I.Linscott⁶, 芳原容英⁷

[1] 北海道大学・理, [2] 大阪大学・工, [3] 近畿大学・理工,
[4]気象研究所, [5] 宇宙科学研究所(ISAS)/JAXA, [6] Stanford大学,
[7] 電気通信大学・情報

Introduction

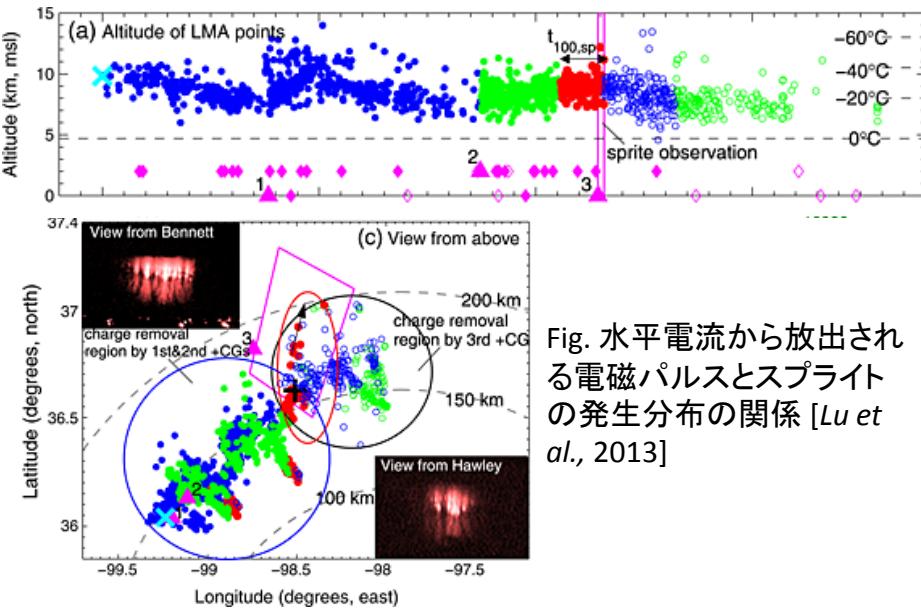


Fig. 水平電流から放出される電磁パルスとスプライトの発生分布の関係 [Lu et al., 2013]

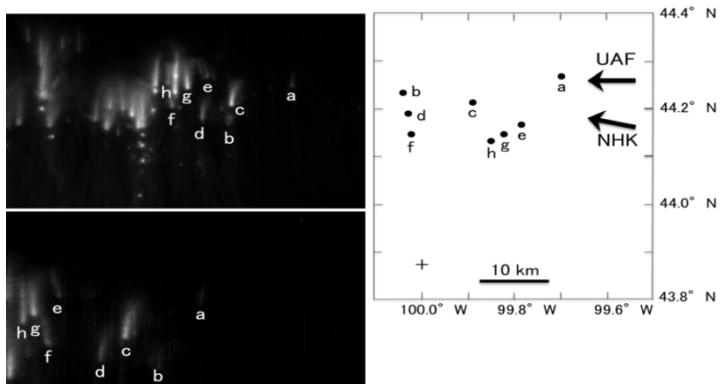


Fig. (左)航空機二機からの同時観測されたスプライトの水平分布. (右)三角測量法で求められたスプライトの水平分布 [Kobayashi et al., 2014]

- スプライトは雷放電に伴い雲内で中和される電荷量が多い領域の上空で発生するとされる。(準静電場の形成)
- スプライト発生の直前に観測された雲内放電の放射するVHF帯電磁波の上空付近にスプライトが発生することが確認されている。

しかし

- スプライトカラム一本一本の発生分布を何が決めるかは明らかにされていない。
- スプライトカラムの発生水平分布を明らかにするためには個々のカラムが認識でき、かつ三角測量を行う必要がある。

Introduction

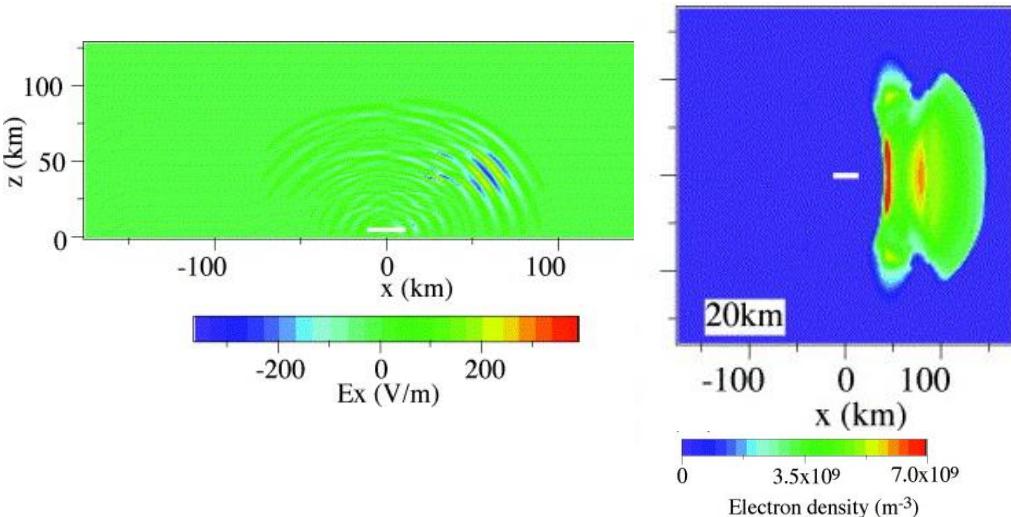


Fig. 数値計算による、水平電流の放射する電磁パルスが上空の電子密度に擾乱を生み出す結果. [Cho et al., 2001]

- 水平電流による電磁パルスが上空に生成する電子密度擾乱との関係が疑われているが、スプライトの観測と同時に検証された例はない.

スプライト・水平電流が放射する電磁パルスを同時に観測することが必要 ⇒ 天底観測

--- 本研究の目的 -----

- スプライトカラムの水平分布が何によって決まるのかを明らかにする
 - ・ スプライトカラムの水平分布を特定する
 - ・ 雲内の水平電流が放射する電磁パルスとの関係性を明らかにする

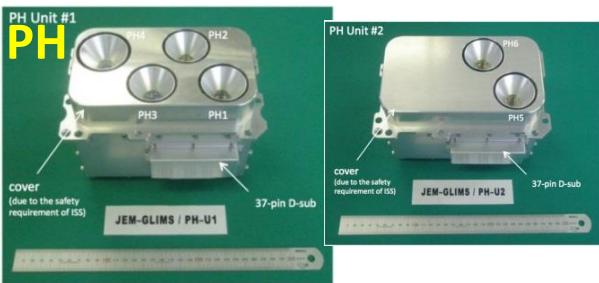
Instruments



LSI : Lightning & sprites imager (TWO CMOS cameras)

- 雷放電・TLEsによる発光の空間分布特定

- LSI-1 (Wavelength 765-830nm) : Lightning emission
- LSI-2 (Wavelength 762+/- 5nm) : TLEs emission



PH : 6 channel spectrophotometers

- 雷放電・スプライトの放射照度 [W/m²]
- 各チャンネル間での放射照度比

- 6 channel (150-280, 337, 762, 600-900, 316, 392 nm)
- Sample freq. : 20 [kHz]

ELF waveform data @ 南極昭和基地

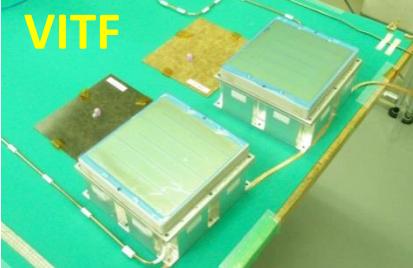
- 極性, CMCの導出

- Two orthogonal search coil magnetometers
- Sample Freq. : 400 [Hz]
- Wavelength bands : 1-100 [Hz] (ELF)

VITF : VHF Interferometer

- デジタル干渉法による雷放電由来の電磁パルス放射源の特定.

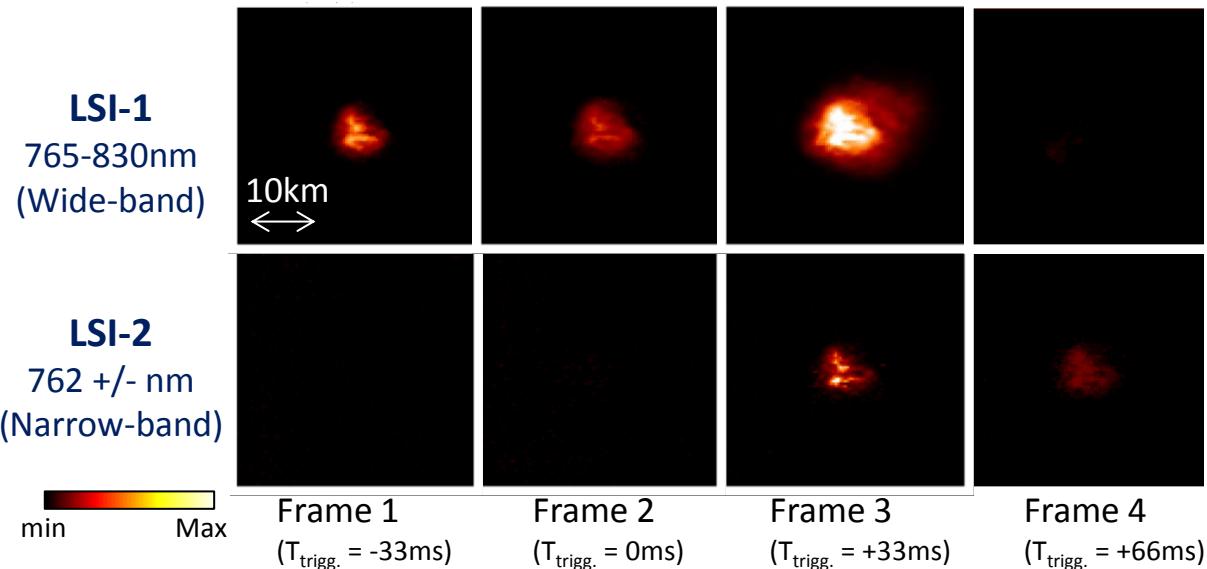
- Sample Freq. : 400 [Hz]
- Frequency Range : 1-100 [Hz] (ELF)
- Resolution : 8 bit



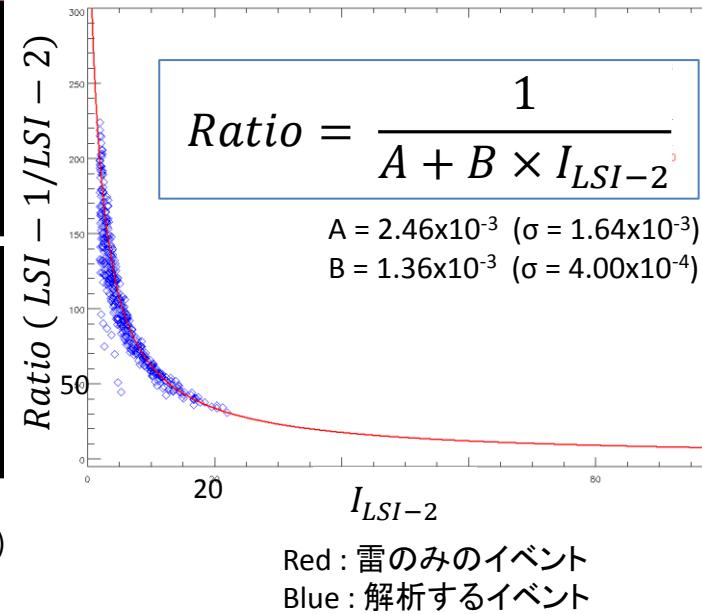
Analysis Method: TLEsによる発光の抽出

雷発光+スプライト発光 (LSI-2) から雷発光 (LSI-1) を差引く

Event1 : 2013/12/21 05:08:14.63340 (UT)



LSI-1, LSI-2で検出する発光強度の関係

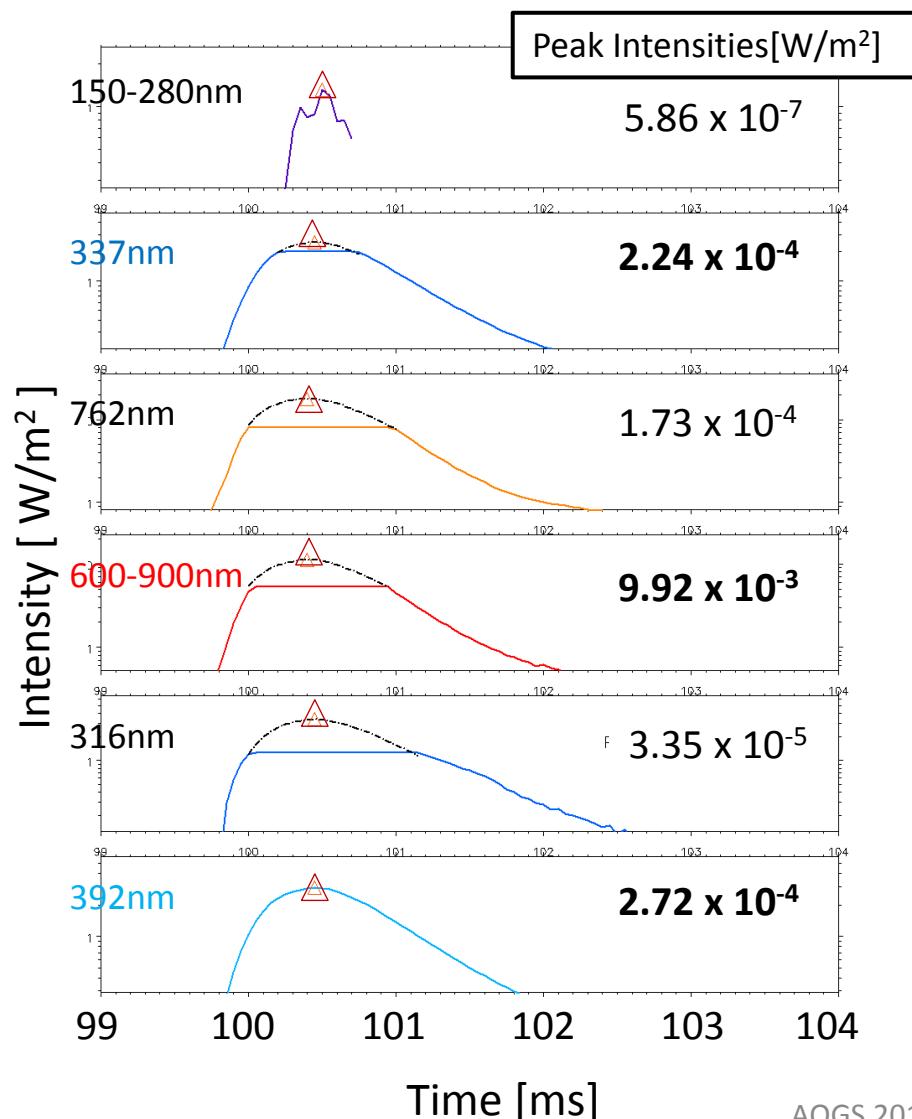


- LSI-1 (Wide-band) の発光強度を LSI-2 (Narrow-band) に合わせる($x1/\alpha$).
- α の値は雷のみのイベントで LSI-1, LSI-2 各ピクセルの発光強度の関係から導出された補正関数で決まる.

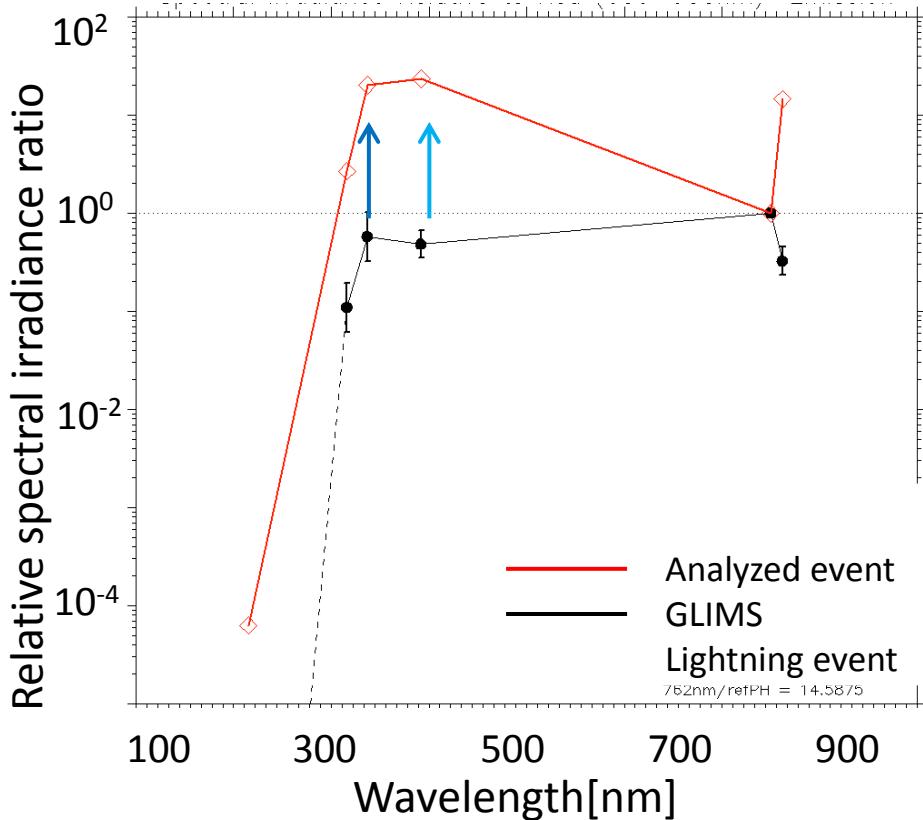
$$LSI-2(i,j) - \left(\frac{LSI-1(i,j)}{\text{Ratio}} \right)$$

TLEsイベントの特定 (Photometer data)

各チャネルでの放射照度絶対値



PH4 (600-900nm)を基準に求めた赤青比



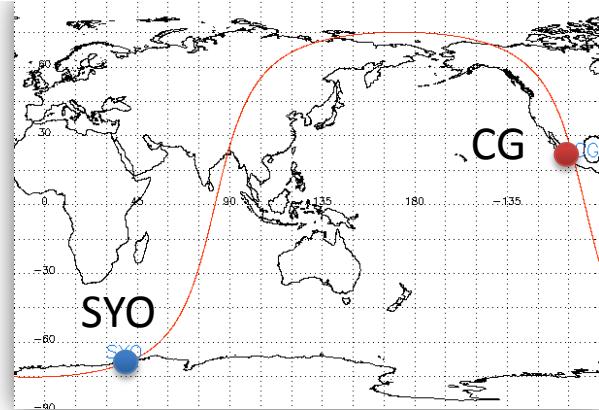
赤青比: 337nm / Red= 20
392nm / Red = 25

TLEsの発生確率 80 % at (337nm / Red) = 11.7
[Adachi et al., AGU-FM, 2013]

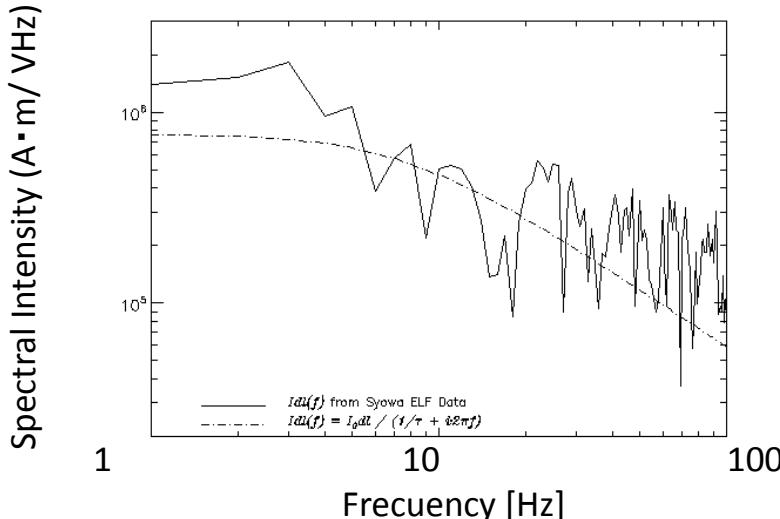
TLEsイベントの特定 (ELF data)

親雷のCMC, 極性

- CGからの電磁波伝搬経路



- 電流モーメントスペクトル



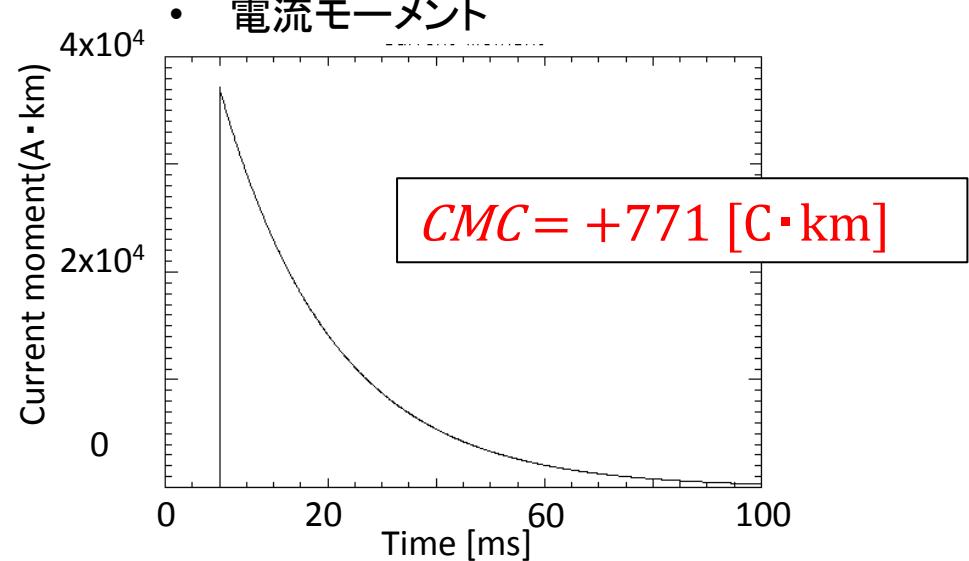
- 電流モーメントスペクトル

$$H_\phi = \frac{Idl(f)}{4\pi R_E h_0} \sum \frac{2n+1}{n(n+1)-\mu(\mu-1)} \frac{\partial}{\partial\theta} P_m(\cos\theta)$$

- ピーク電流値から電流波形を仮定

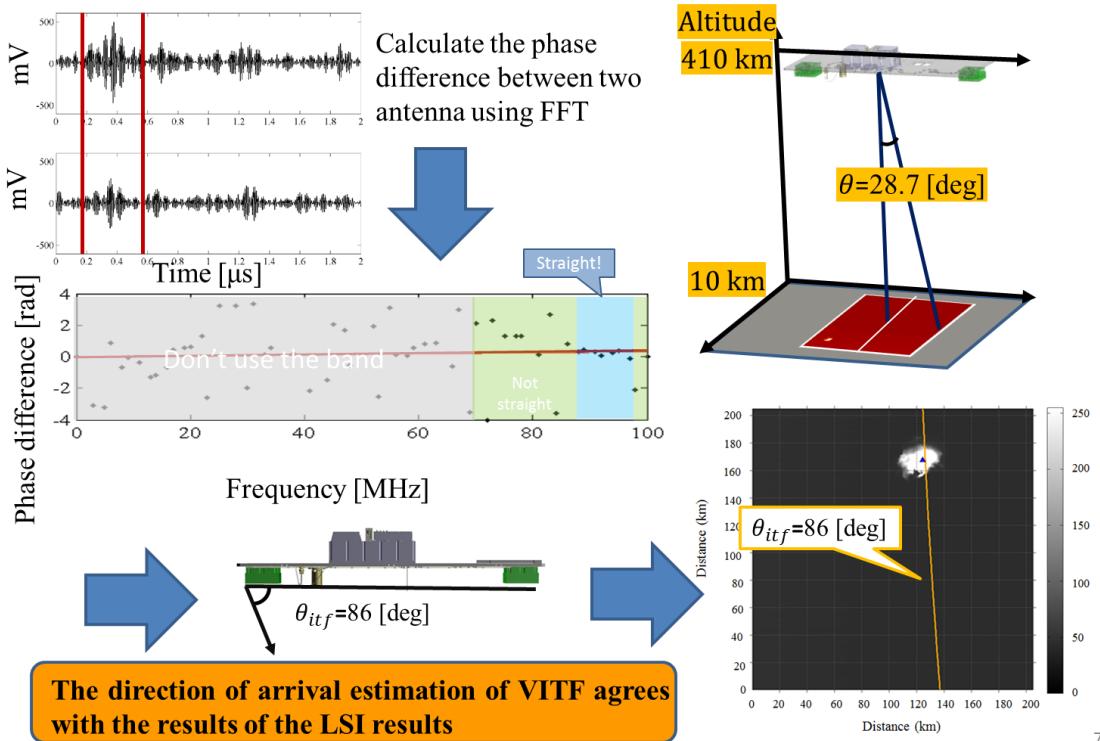
$$Idl(t) = I_0 dl \cdot \exp(-t/\tau)$$

- 電流モーメント



Analysis Method : 電磁パルス到来方向推定

(1) Direction of Arrival Estimation using an interferometric technique

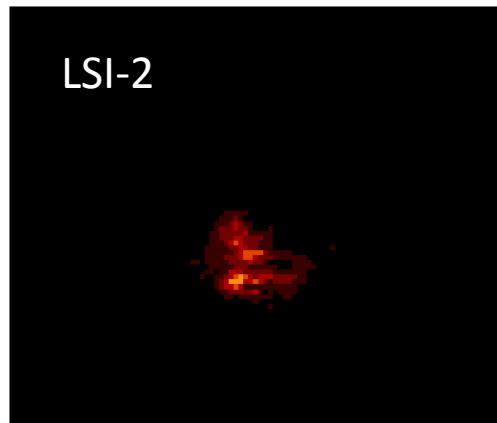
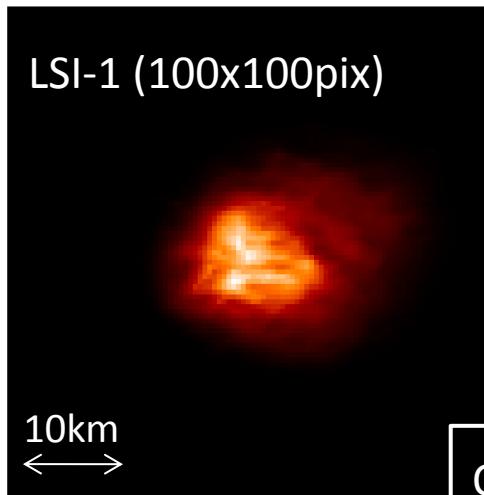


磁波の到来位相差から電磁パルス到来方向を推定する解析手法. [Kikuchi et al., 2014 AOGS]

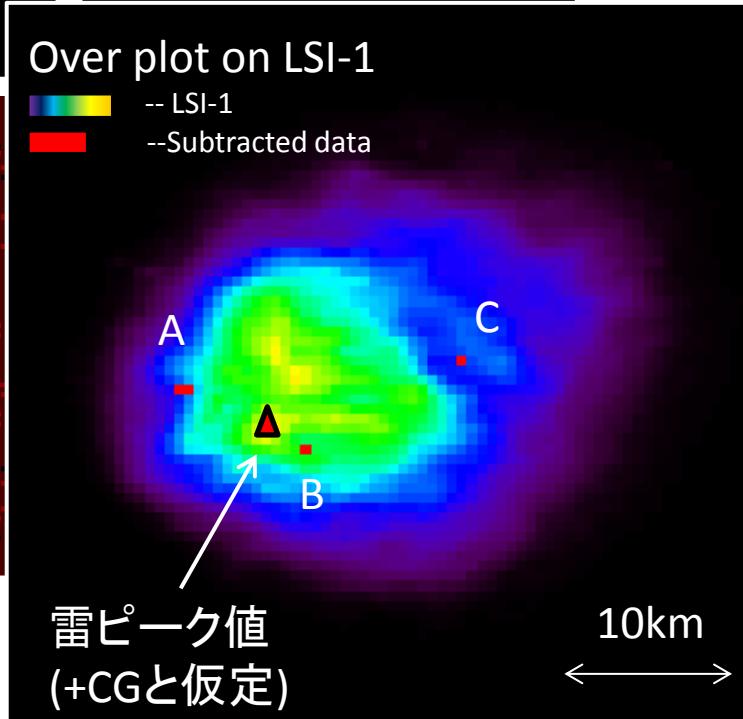
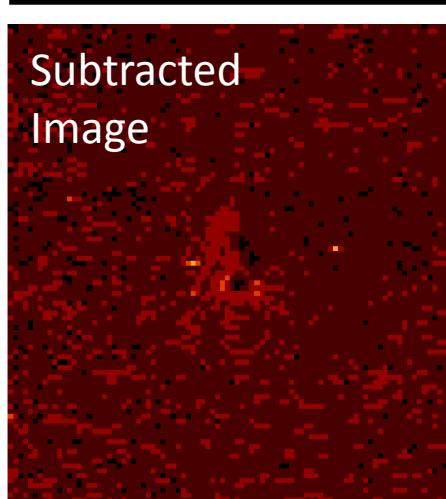
- 観測されたデータからパルス毎にフーリエ変換する.
- 位相差を一致させるようなNadirに対する到来方向の角度 θ_{itf} を求める.
- 電磁パルス波源高度を10kmと仮定し、 θ_{itf} を満たす線をLSI画像と対応させる.
 $\theta_{itf} = 0$ のとき、推定到来方向は画像中心を通る.

Result : Event No.1 -- 2013/12/21 05:08:14.63340 (UT)

Frame 3 : $T_{\text{trigg.}} = +33\text{ms}$)

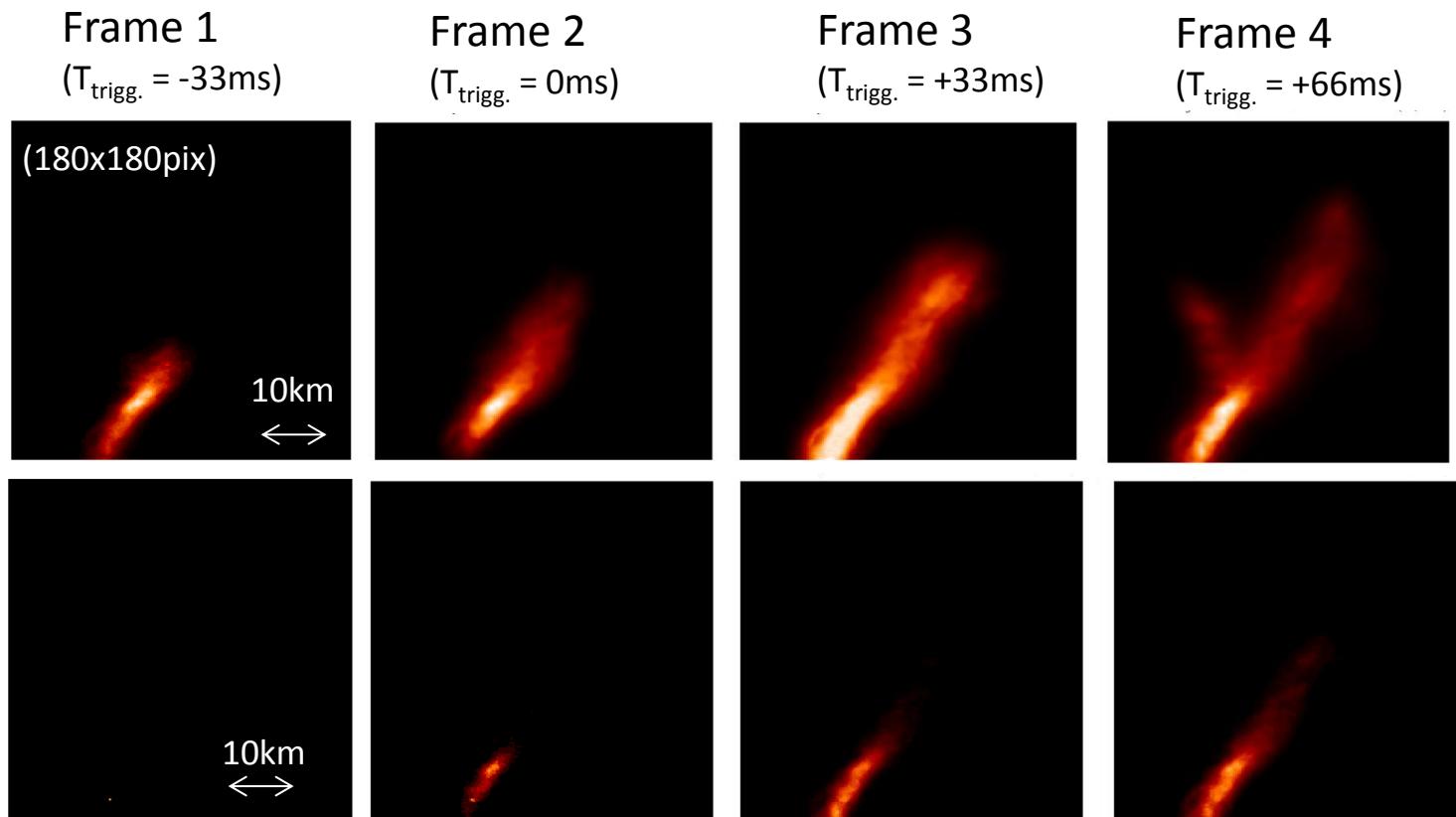


- 129/130パルスがサチュレーション. 解析困難



- A, B, C間の距離の平均 : 7.1 [km]
- 雷発光ピーカ値からA,B,Cまでの距離
 - +CG → A : 3.4 [km]
 - +CG → B : 1.5 [km]
 - +CG → C : 7.3 [km]

Result : Event No.2 -- 2014/06/10 03:48:24.74035 (UT)

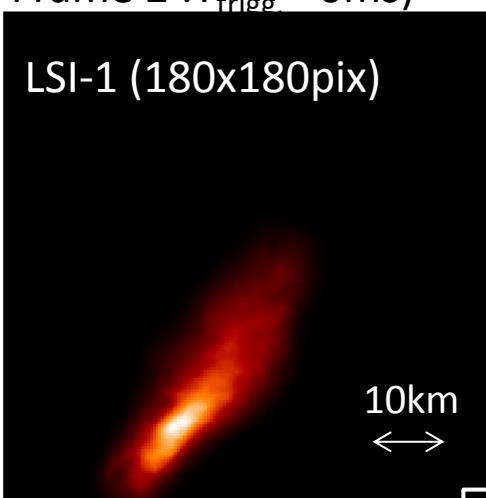


$$\text{CMC} = +2,376 \text{ [C} \cdot \text{km]} \quad (337\text{nm}/\text{Red}) = 24.7 \quad (392\text{nm}/\text{Red}) = 37.1$$

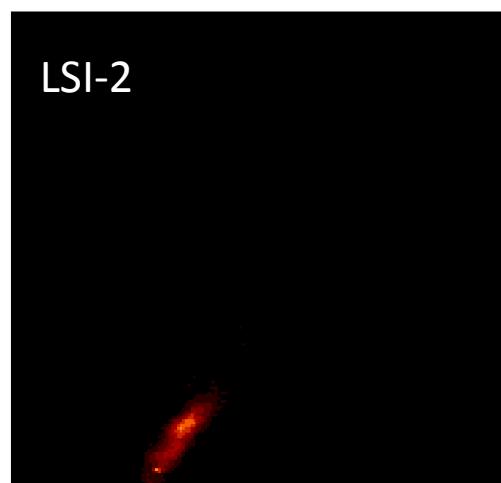
Result : Event No.2 -- 2014/06/10 03:48:24.74035 (UT)

Frame 2 : $T_{\text{trig}} = 0\text{ms}$

LSI-1 (180x180pix)



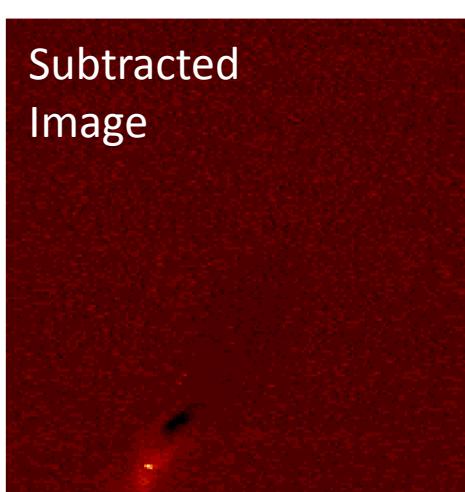
LSI-2



VHF到来方向推定結果

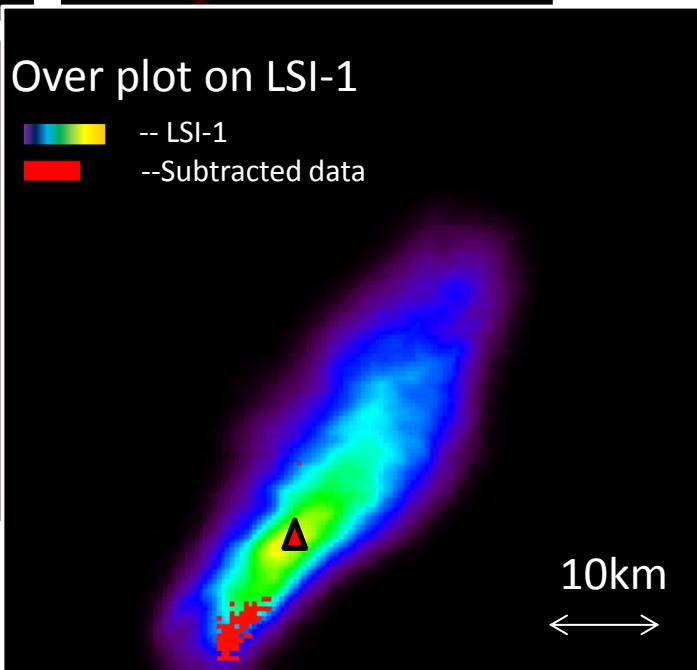
- 観測された電磁パルスなし

Subtracted
Image



Over plot on LSI-1

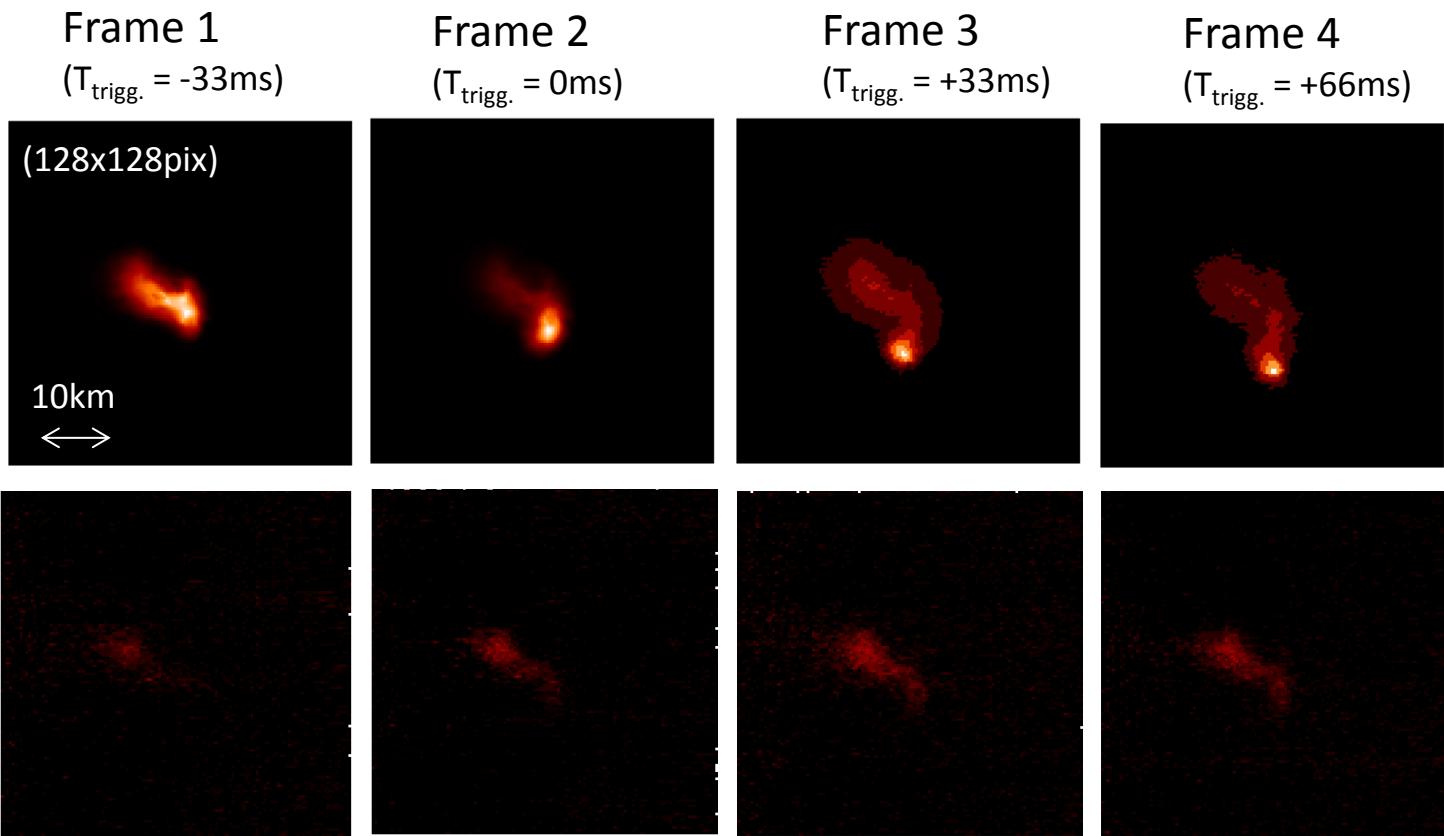
- LSI-1
- Subtracted data



Count > Ave+5 σ →

- 雷発光ピークから差し引き処理で
引き残ったカウントの重心まで : 8.1[km]

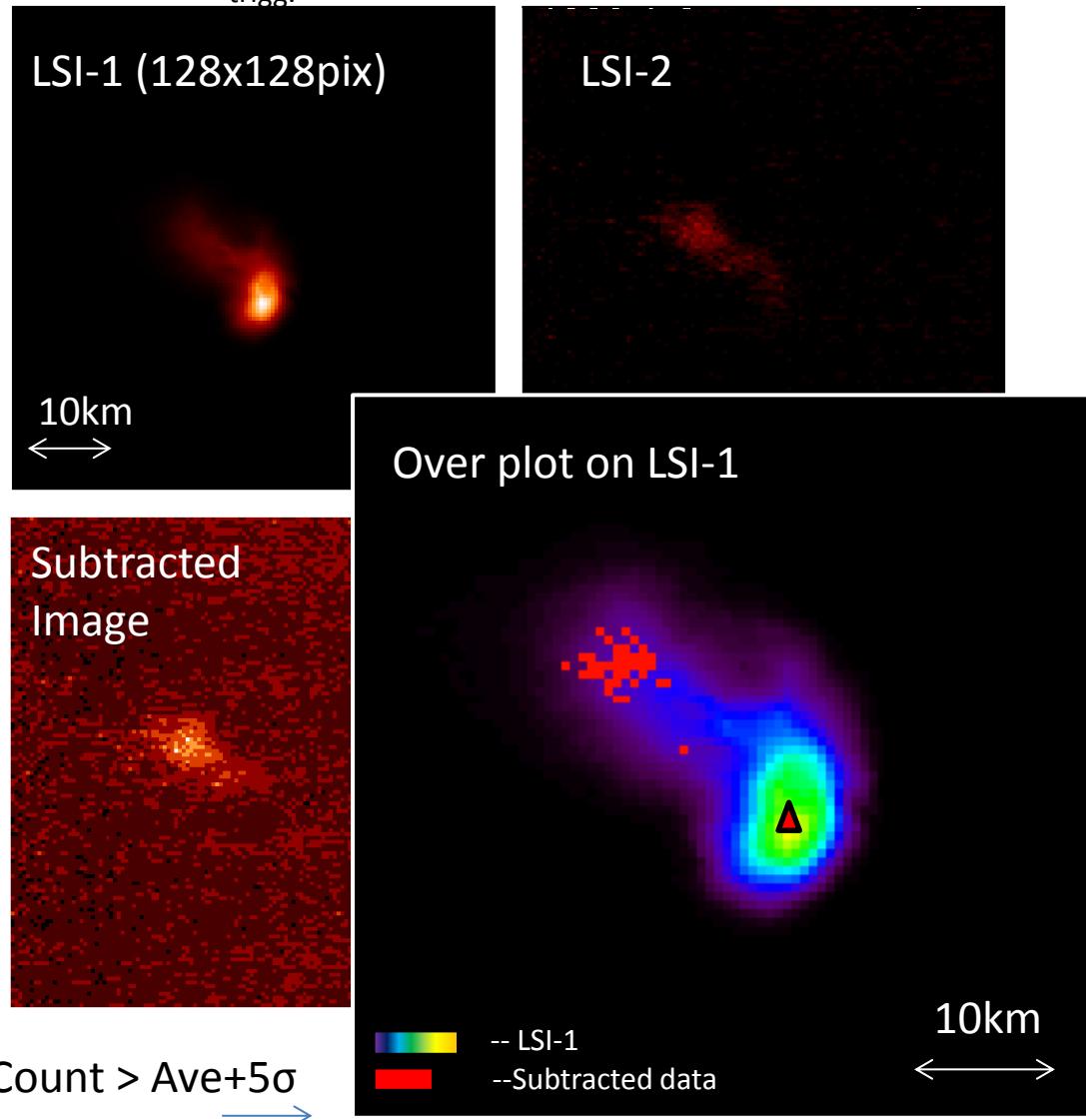
Result : Event No.3 -- 2014/06/12 06:41:14.68565 (UT)



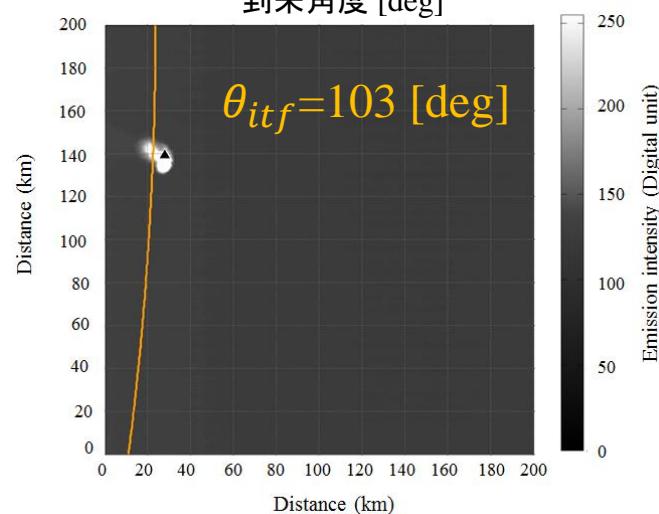
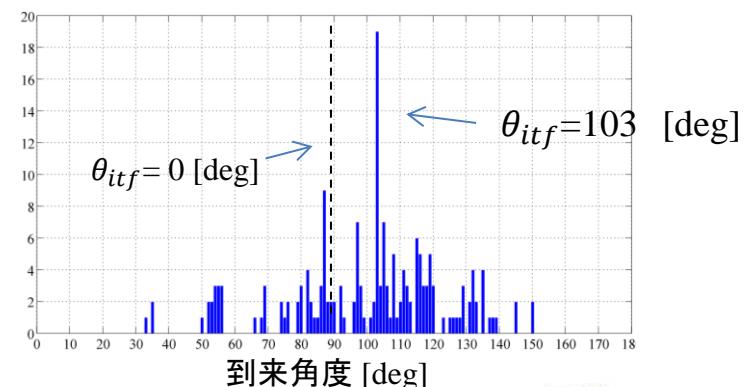
$$\text{CMC} = +2,567 \text{ [C} \cdot \text{km]} \quad (337\text{nm}/\text{Red}) = 19.1 \quad (392\text{nm}/\text{Red}) = 19.4$$

Result : Event No.3 -- 2014/06/12 06:41:15.68565 (UT)

Frame 2 : $T_{\text{trigg.}} = 0\text{ms}$



VHF到来方向推定結果



- 予想される到来方向はLSI画像を通過. 雷発光のピーク値からは数km左側
- 雷発光ピークから差し引き処理で引き残ったカウントの重心まで : 11.1[km]

Discussion

Event1

引き残ったピクセルは1ピクセルずつ独立。見えているスプライトの発光が高度70kmだと仮定した場合、1ピクセルあたり約0.35 [km]の発光範囲となる。
スプライトによる発光の特に強い部分だけが検出されたと考えられる。

Event2, Event3

引き残ったピクセルはいくつか隣り合っており、Event3では筋状の構造がいくつか見える。
→ **スプライトの立体構造が見えている可能性。**
スプライトと雷発光の位置関係を正確に知るには発生高度差(画像中の直下点)を考慮する必要がある。

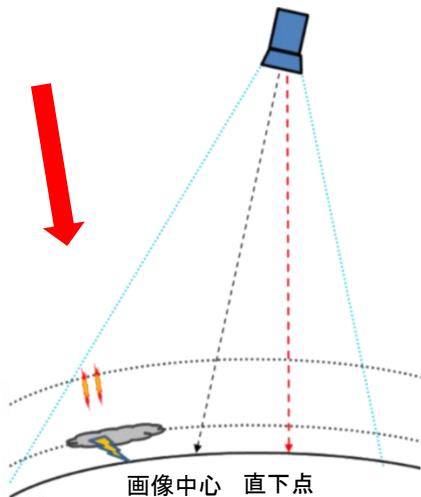


Fig. ISSから見えるカメラ視野の模式図

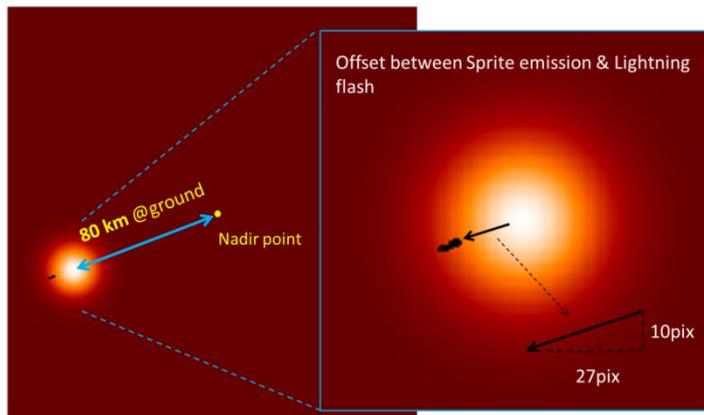


Fig. スプライトが高度70km – 75kmにかけて雷発光の真上で円筒状に発生したと仮定したときのスプライトの見え方

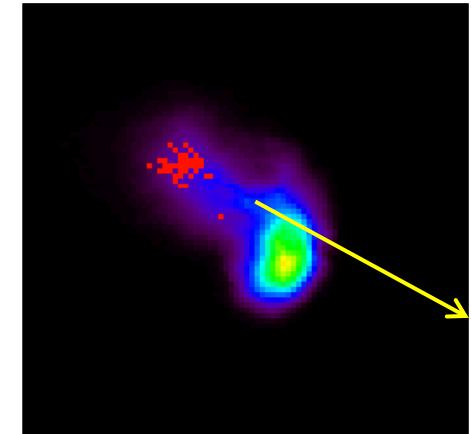


Fig. Event3で想定されるスプライト発光部の移動方向

Discussion

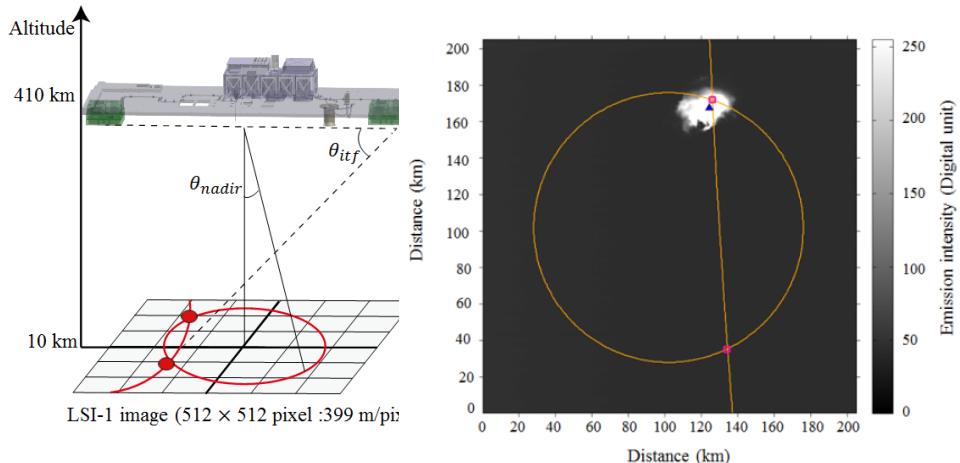


Fig. 群遅延による到来方向推定方法と、干渉法による到来方向推定法を組み合わせた予想波源位置. [Kikuchi et al., 2014 AOGS]

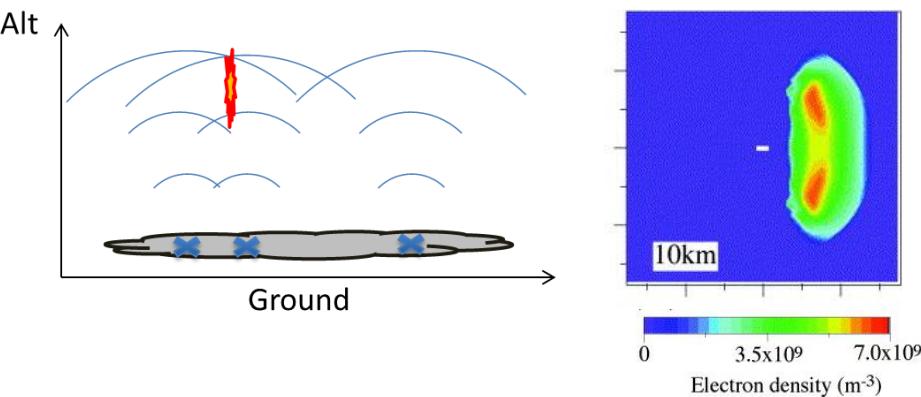


Fig. (左)想定されるVHF波源から上空へ伝搬する電磁波イメージ.
(右)上空から見た電子密度分布 [Cho et al., 2001]

- VITF解析では群遅延による到来方向推定法を組み合わせることにより、予想波源を2点に絞り込む.
- LSI画像の雷発光領域に一致する点を採用.

- VHF波源高度を仮定し、数値計算(FDTD法)によって下部電離圏の電子密度を推定.
 - スプライトの発生している場所の電子密度.
 - 電子密度分布の特徴的ポイント(低・高)間での距離とスプライト間距離の関係.
 - イベント毎の違い、CMCの関係.
⇒これらのことからカラム発生条件を推定

Summary

- JEM-GLIMS 搭載のCMOSカメラ(LSI), Photometer, 地上ELF観測網を組み合わせることでTLEsイベントの特定が可能.
- 観測波長帯の異なるLSI-1, LSI-2画像データを用いて、LSI-2データからLSI-1(雷による発光)を差し引きTLEsによる発光を残すことができた.
- VITFデータから干渉法を用いてVHFパルスの到来方向推定に成功し、LSI画像上を通る。さらに群遅延による推定を行えば推定波源は2点に絞りに入る。
- ISS高度からのスプライトの撮像観測では、高度方向に進展するスプライトの立体構造が見える可能性がある。
- スプライトと雷発光の位置関係性を知るために、画像中の直下点を求め、スプライトの発生高度を仮定する必要がある。→ 今後計算で求める。
- VITFで特定できる電磁パルス放射源から、上空に形成される電子密度擾乱を計算。スプライトの水平分布との比較を行う。