

スプライトの発光継続時間と落雷規模の関係

Relationship between the charge moment change of parent CG and the duration of sprites' light emission

Takeshi Kudo¹, Yukihiro Takahashi¹, Mitsuteru Sato¹,
Taishi Yamada¹, Nui Kobayashi¹, Yusuke Sanmiya¹,
Tomohiro Inoue², H C Stenbaek-Nielsen³, Matthew G McHarg⁴,
Ryan K Haaland⁵, Takeshi Kammae³, Yoav Yair⁶,
Walter A Lyons⁷, Steven A Cummer⁸

1. Hokkaido University

2. Japan Broadcasting Corp. NHK Cosmic Shore Project

3. University of Alaska

4. US Airforce Academy

5. Fort Lewis Collage

6. Open University

7. FMA Research

8. Duke University

本研究は、NHK「宇宙の渚」プロジェクトよりデータ提供を受けています。

Introduction

What determine sprite structure?

■ Spriteについて

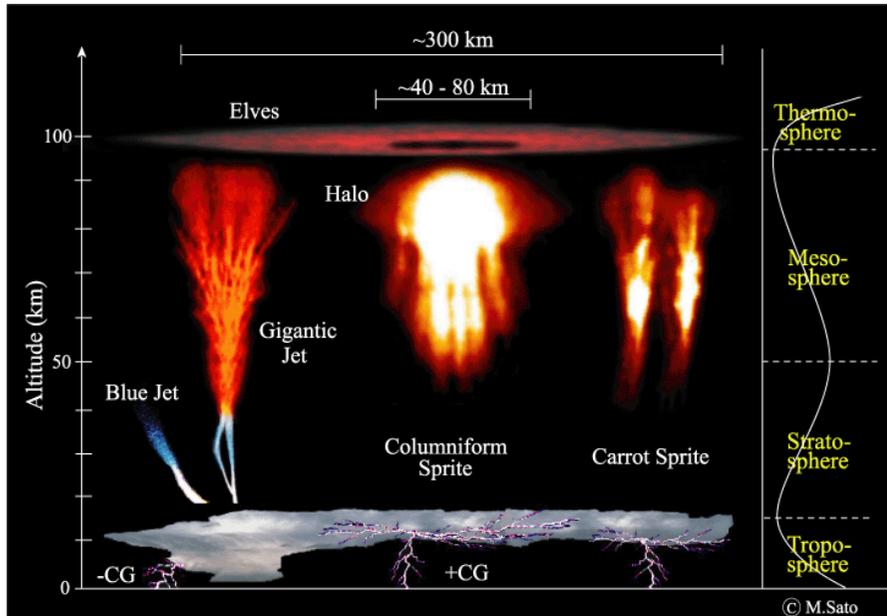


Fig.1 Illustration of TLEs. [Sato, 2004].

スプライトの基本的な発生メカニズムとして, QE-Modelが支持されている.

- ・大規模な正極性落雷に伴い, 雷雲上空に準静電場が印加
- ・準静電場により電子が加速され, 中性大気との衝突により発光

- ・雷雲上空に発生する高高度発光現象の1つ
- ・正極性落雷(+CG)に伴って発生

形状の多様性を決定する要因や、時空間構造など、未解明な問題が多い

Introduction

What determine sprite structure?

雷雲及び雷放電に伴い周囲に形成される電場 E

$$4\pi\epsilon_0 E \approx \frac{M}{r^3} + \frac{1}{cr^2} \cdot \frac{dM}{dt} + \frac{1}{c^2 r} \cdot \frac{d^2 M}{dt^2}$$

準静電場項 誘導電場項 放射電場項

ϵ_0 : 真空の誘電率

c : 光速

r : 電荷(親雷)からの距離

M : 電荷モーメント(中和電荷量と放電距離の積)

準静電場の強さは落雷の
電荷モーメントに比例

上空の電子密度・電気伝導度は
準静電場の大きさに比例

【モデル計算】



電場の緩和時間は準静電場が
大きいほど短くなる[Pasko et al., 1997]

電荷モーメント(Charge Moment Change)が大きい場合に, spriteが発生しやすいことは観測により明らかになっているが[Hu et al., 2002],
上記モデル結果の妥当性を定量的に評価する観測結果は示されていない。

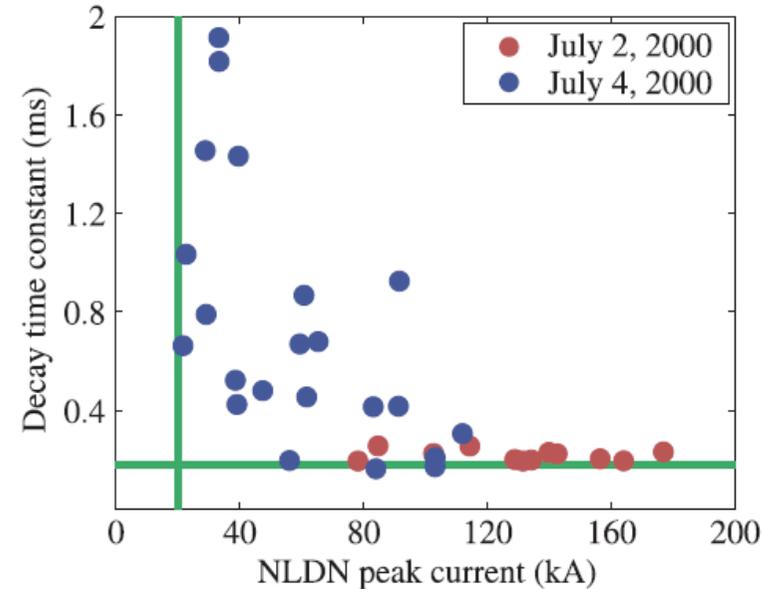


Fig.3 Decay time constants versus NLDN peak current for selected sprite events. [Gerken et al., 2004]

親雷のピーク電流値と発光減衰時間に相関がある
(spriteの形状については考慮無し)

Motivation

準静電場 \propto 電荷モーメント
準静電場 \propto 電子密度 \cdot 電気伝導度
準静電場 \propto 1/電場緩和時間



電荷モーメント \propto 1/電場緩和時間
電場緩和時間 \rightarrow spriteの発光継続時間

電荷モーメント(CMC)とsprite発光継続時間の関係を調べることで、
spriteの発生および形状などの発生条件の解明につながるのでは？

航空機からの光学観測と、地上での雷放電電磁波観測を行い、
spriteを引き起こす親雷の電荷モーメント(CMC)とスプライトの発光
継続時間および形状との関係を明らかにする。



航空機およびHigh-Speed Camera観測の利点

■ 航空機観測

- ・地上に比べ近距離での撮影可能
(雲の影響を受けにくい)
 \rightarrow S/Nがよくなる

■ High-Speed Camera

- ・高い時間分解能により発光の時定数が求まる
- ・spriteの形状, 時間変化が判別可能



spriteの全体的な形状に関する
統計的解析が少ない
特定の形状(例えばカラム形)
に絞った解析

Observation

- 2011年スプライトキャンペーン in US
2機の小型ジェット機にカメラ搭載
場所: アメリカ・コロラド周辺
観測期間: 2011年6月27日~7月10日
本キャンペーンはNHK「宇宙の渚」との
共同プロジェクト

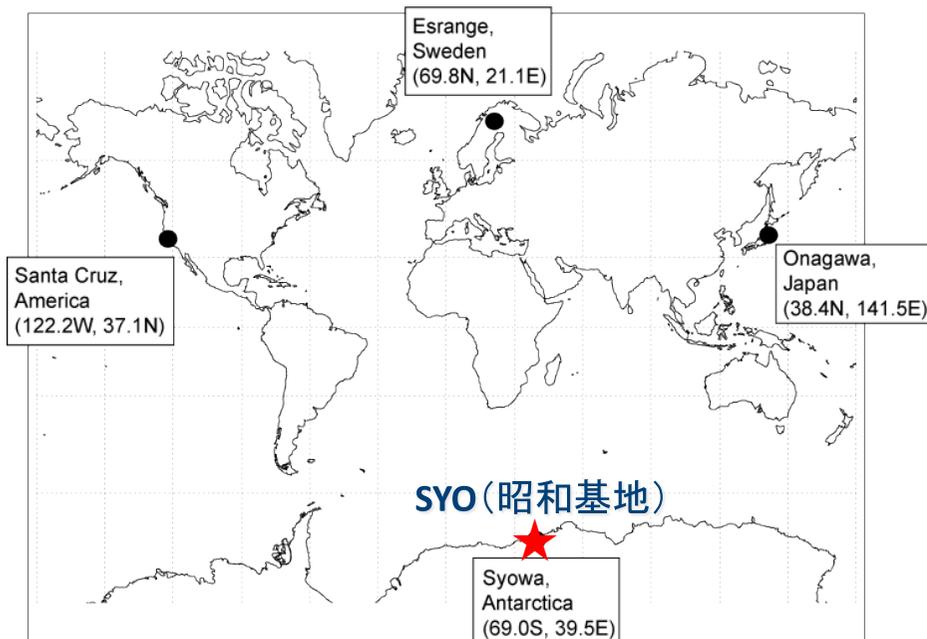


Fig. 6 GEON (Global ELF Observation Network) operated by Hokkaido University.

Aircraft Campaign in US



Fig.4 picture of the jets used for the campaign.



Fig.5 Inside the NHK aircraft.

- 地上雷電磁波観測
北海道大学が運用するGEON (Global ELF Observation Network) でELF帯のsfericを
期間中連続観測実施

Observation

Camera and ELF observation system



Fig. 7 NHK high-speed camera and EMCCD.

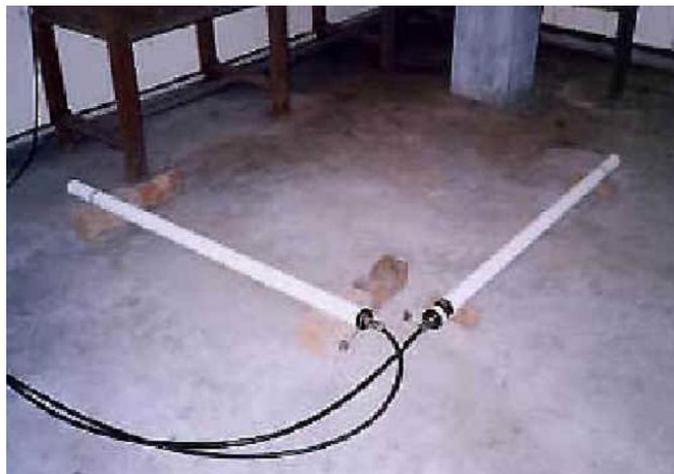


Fig.8 Magnetic search-coil antenna

■ NHKカメラの仕様

High-Speed Camera (Phantom V710)

- Pixel size: 1280×720
- FOV: 41°×37°
- Frame Rate: 8,000 or 10,000
- panchromatic

EM-CCD Camera

- Pixel size: 1024×720
- FOV: 67°×37°
- Frame Rate: 30fps
- color

■ ELF帯雷電磁波観測システムの仕様

station name	Syowa(SYO)
Location	39.506°E, 69.018°S
Sampling frequency	400Hz
Low pass filter	100Hz
High pass filter	1Hz
GPS	IRIG-E

期間中, 64イベントのHigh-Speed Imageの取得に成功 (NHK Camera)

【解析イベントの抽出】

大部分がFOVから外れた場合, S/Nが悪い場合, ELF波形が同定できない場合を除いた結果, 22例について解析

Table1. 22sprite events.

sprite形状	Column	Carrot	Clione	Jellyfish	Hybrid	total
	4	4	3	9	2	22

観測日別 取得数	7月3日	7月5日	7月6日	7月11日
	6	6	2	8

本発表では, Column, Carrot以外のspriteを, 以下のように分類する.

■ Clione

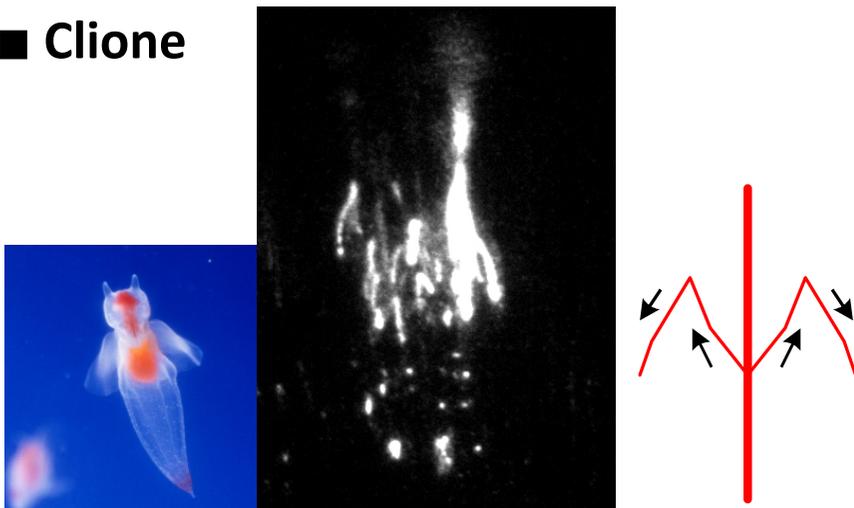


Fig.9 Clione type.

■ Jellyfish (Large Carrot)



Fig.10 Jellyfish type.

スプライトの発光継続時間と、親雷のCMC(Charge Moment Change)[Ckm], ピーク電流値 (I_{peak}) [kA]の関係を調べる.

■ CMC(Charge Moment Change)

- ・CMCはNormalized Amplitude Method [Yamashita et al., 2011]を用いて算出
観測地点から1000kmの距離で観測されるELF振幅値を1と正規化し,
観測地点から落雷地点までの距離とELF振幅値の関係式からCMCを算出する.

■ I_{peak} NLDN(National lightning Detection Network) 落雷データを使用

■ 発光継続時間 rise time(t_1), decay time(t_2)

- ・NHK High-speed Cameraの画面全体の相対的な光量を計算し, light-curveを求める.
- ・Light-curveのピークの前後20%になる値を求め
ピークまでに立ち上がる時間をrise time(t_1),
ピークから20%値に減衰する時間をdecay time(t_2)
とする.

rise time(t_1), decay time(t_2)とCMC、 I_{peak} を比較

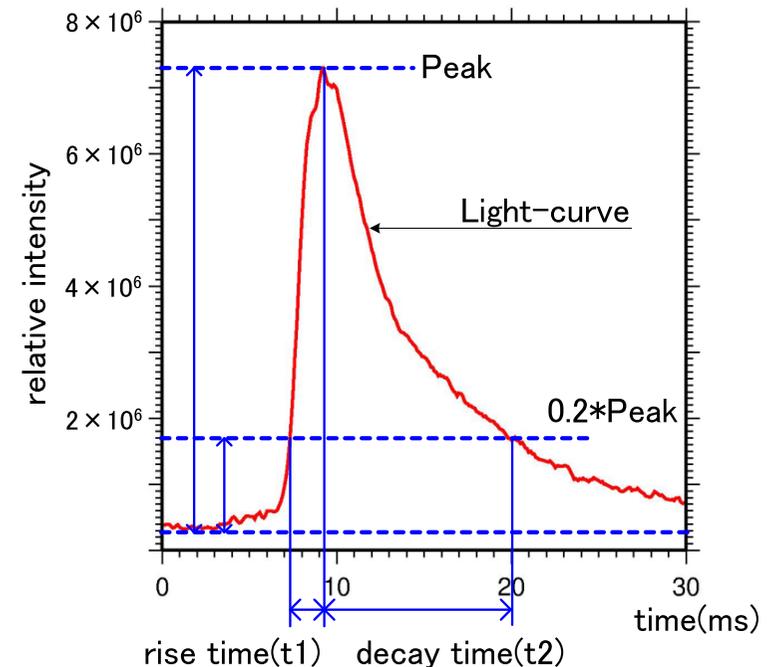


Fig. 11 Schematic diagram of Light-curve.

Methods

confirm the light-curve

■ Light-Curveの検証

解析対象22イベントのうち
20イベントは右図のように
背景ノイズの影響が少ない。

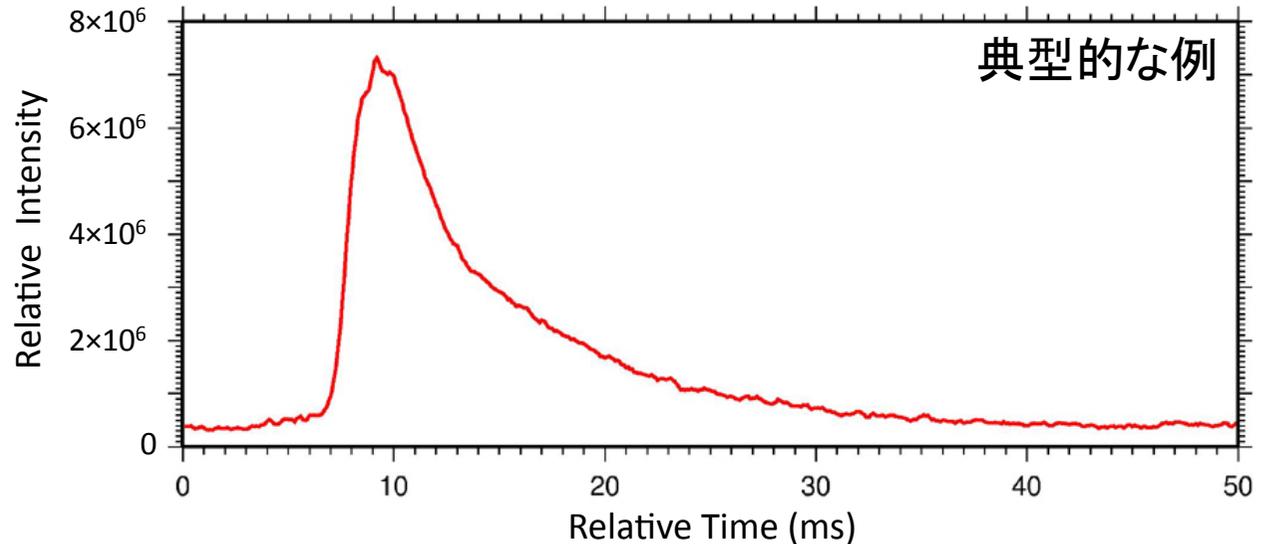


Fig.12 Light-curve at 6:35:11UT on 07/05/2011.

解析対象22イベントのうち
2イベントは右図のように
背景ノイズの影響が大きく
rise time(t_1), decay time(t_2)
の決定に影響が出る。
S/Nが5以上のものとした。

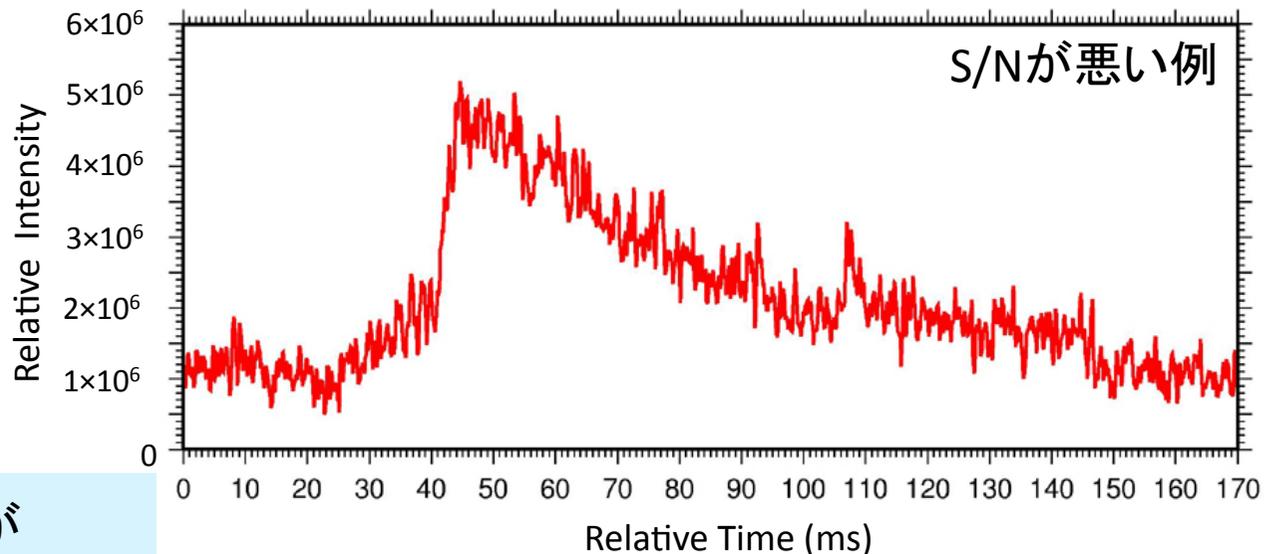


Fig.13 Light-curve at 5:7:55UT on 07/11/2011.

rise time(t_1)とdecay time(t_2)が
確実に決定できる20イベントを解析

7 comparisons

- Ipeak vs CMC
- rise time (t1) vs decay time (t2)
- CMC vs decay time (t2)
- Ipeak vs decay time (t2)
- CMC vs decay time (t2)
 - spriteの連続発生有無
 - elves,haloの発生無し

Result

Statistical analysis

全イベント:20

- ◆ Column
- ◆ Carrot
- ◆ Clione
- ◆ Jellyfish (Large Carrot)
- ◆ Hybrid (Co: Column, Ca: Carrot, J:Jellyfish)

■ CMC vs Ipeak

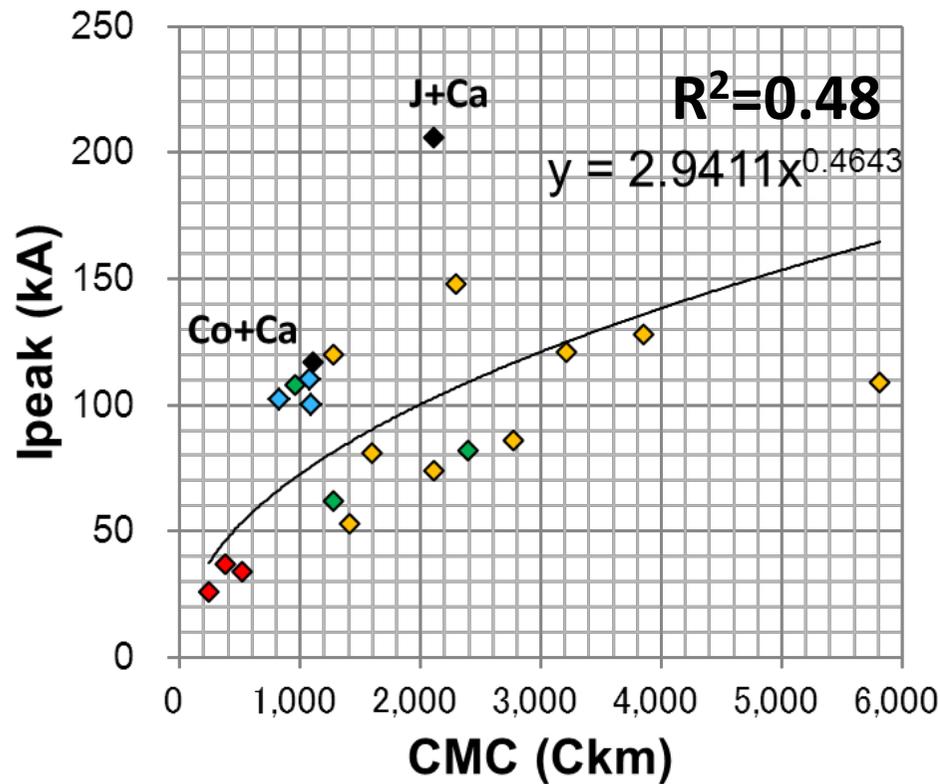


Fig.14 Charge Moment Change vs Ipeak.

CMCとIpeakの間に相関が見られる

■ rise time (t1) vs decay time(t2)

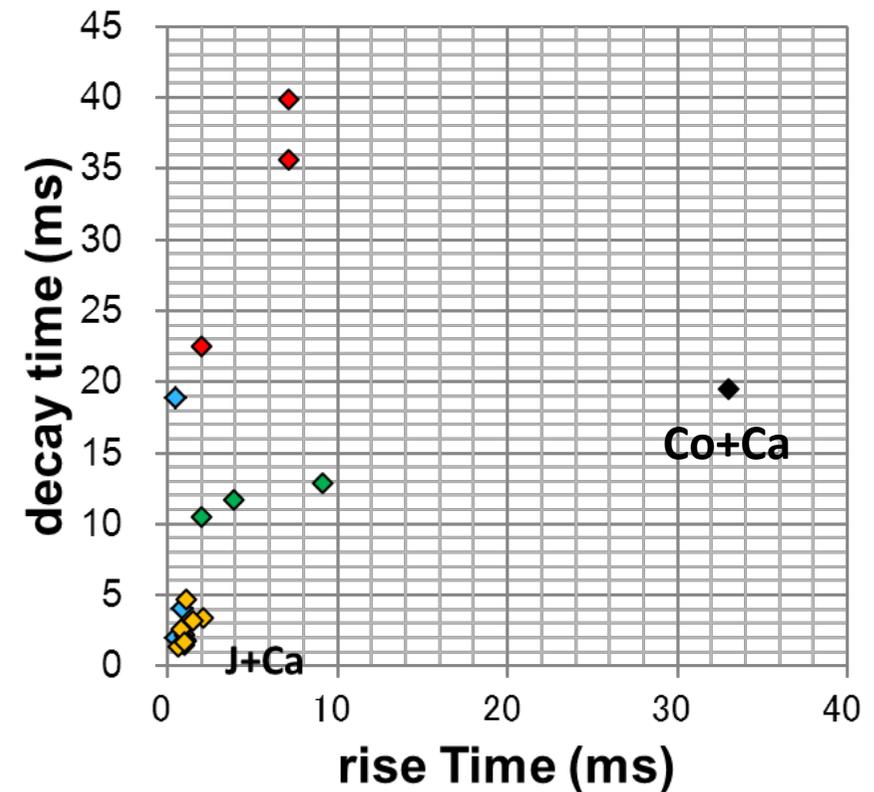


Fig.15 rise time (t1) vs decay time (t2).

spriteの形状ごとに特徴的な分布

Result

Relationship between the CMC/Ipeak and the decay time

全イベント: 20

- ◆ Column
- ◆ Carrot
- ◆ Clione
- ◆ Jellyfish (Large Carrot)
- ◆ Hybrid (Co: Column, Ca: Carrot, J: Jellyfish)

■ CMC vs decay time (t2)

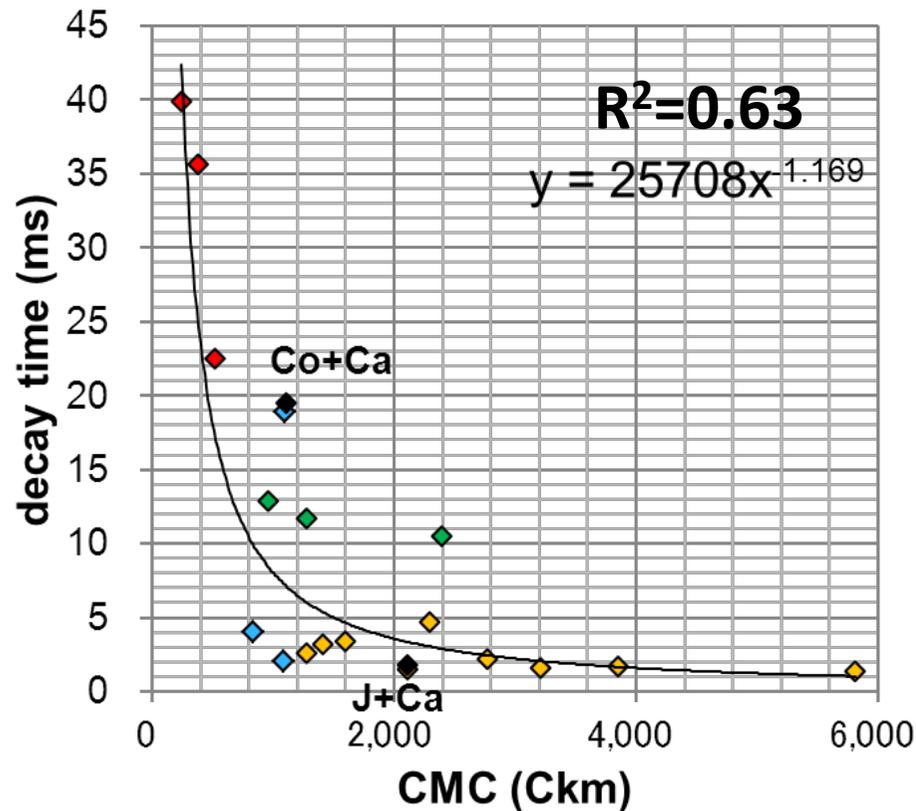


Fig.16 CMC vs decay time (t2)

CMCとdecay timeの間に強い相関

■ Ipeak vs decay time (t2)

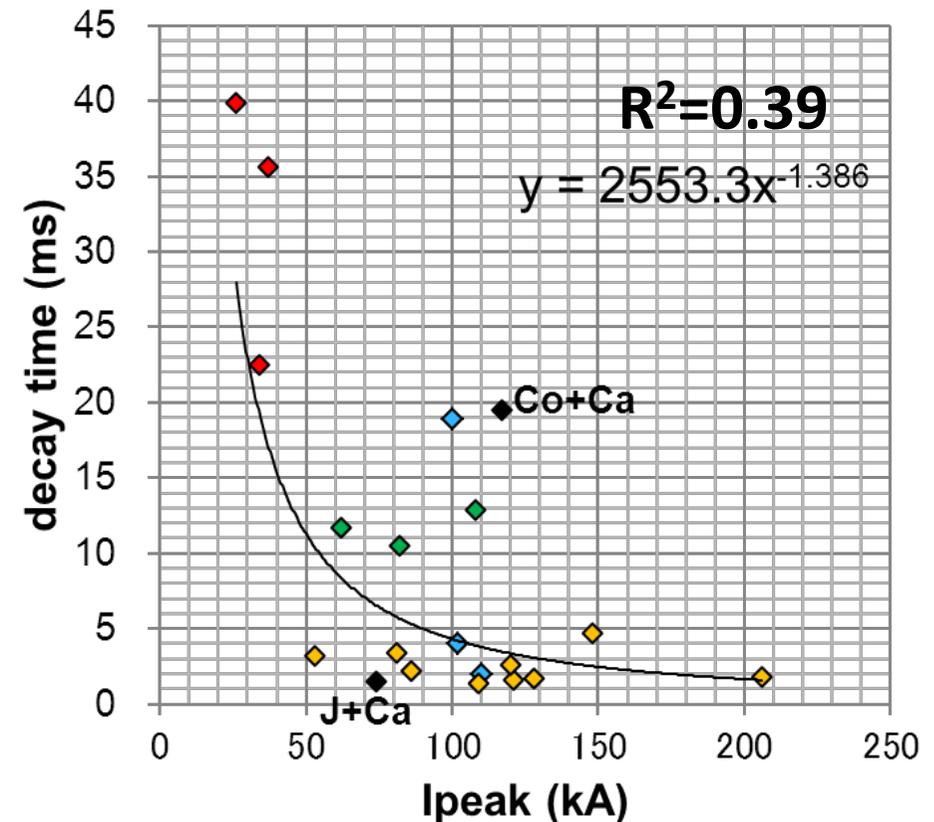


Fig.17 Ipeak vs decay time (t2)

全体の分布は先行研究の結果に近い

Result

Relationship between the CMC and the decay time

■ CMC vs decay time (t2)

spriteの連続発生の影響はあるか

- ◆ Column
- ◆ Carrot
- ◆ Clione
- ◆ Jellyfish (Large Carrot)
- ◆ Hybrid (Co: Column, Ca: Carrot, J: Jellyfish)

a. 数100ms以内にspriteが連続しない場合

対象イベント: 10/20

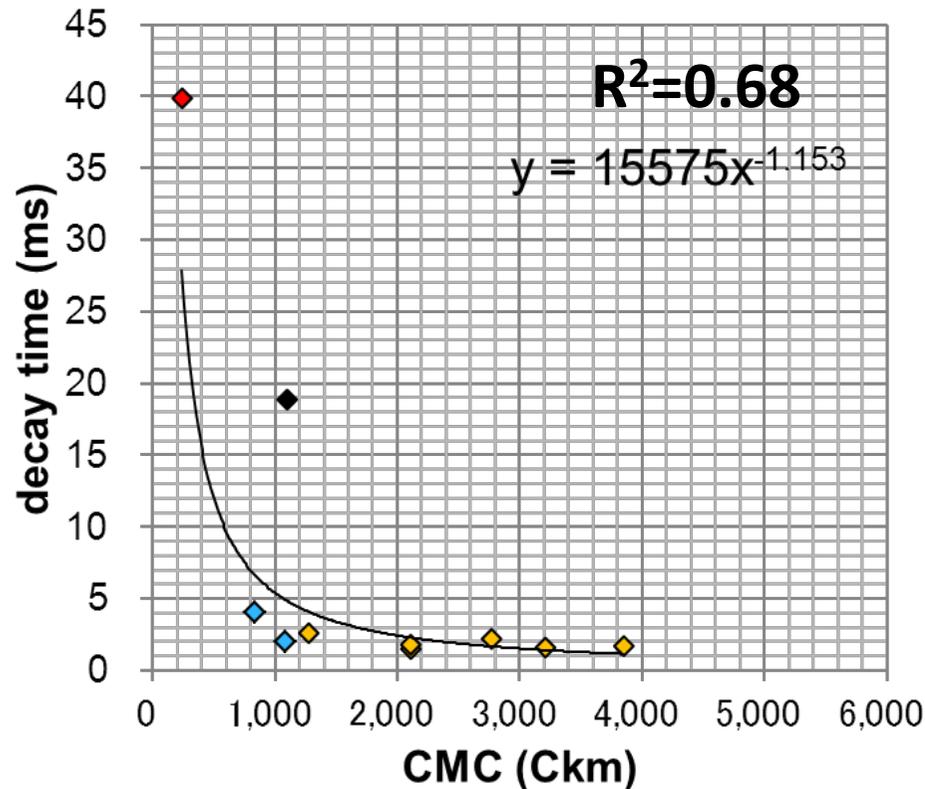


Fig.18 CMC vs decay time (t2)

b. 数100ms以内にspriteが連続する場合

対象イベント: 10/20

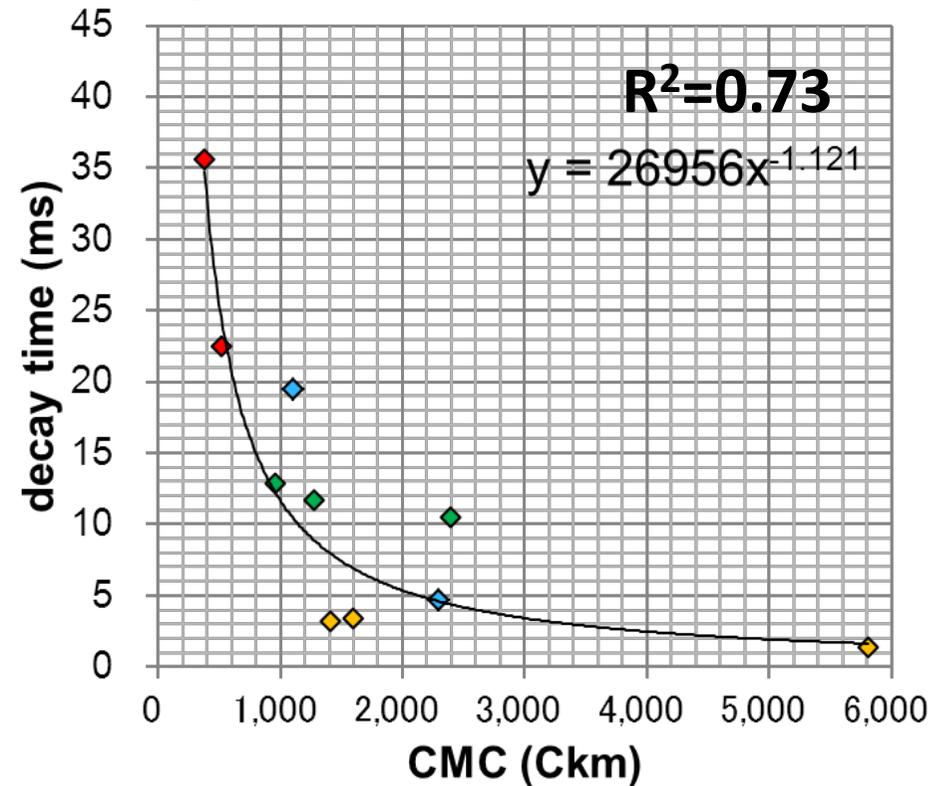


Fig.19 CMC vs decay time (t2)

spriteが連続する場合、1回目のspriteのdecay timeが長くなる傾向

Result

Relationship between the CMC and the decay time

■ CMC vs decay time (t2)

elves, haloの影響はあるか

elves, haloを伴わない場合
イベント数: 6/20

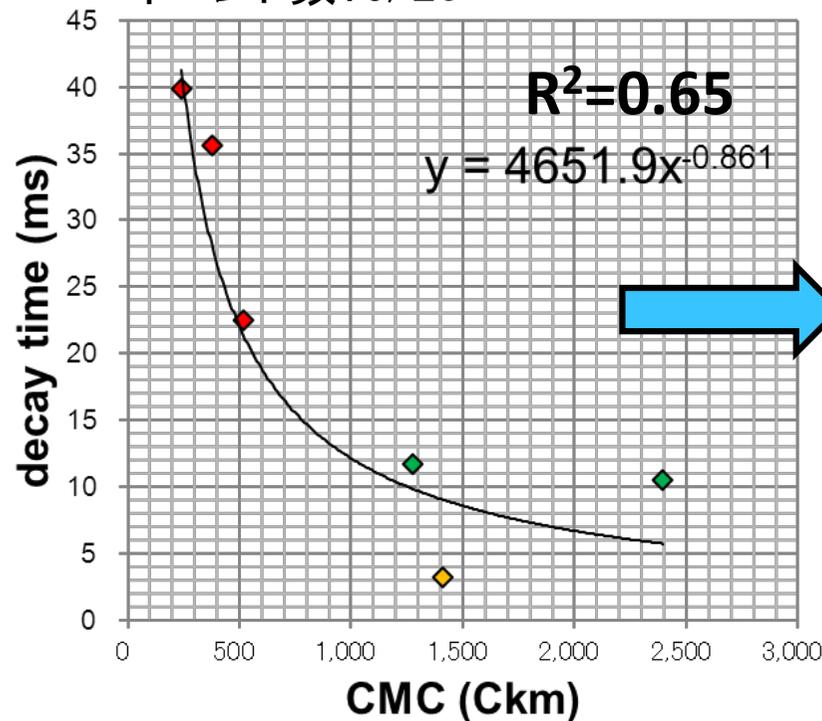


Fig.20 CMC vs decay time (t2).

- ◆ Column
- ◆ Carrot
- ◆ Clione
- ◆ Jellyfish (Large Carrot)
- ◆ Hybrid (Co: Column, Ca: Carrot, J: Jellyfish)

全イベント(20イベント)との比較

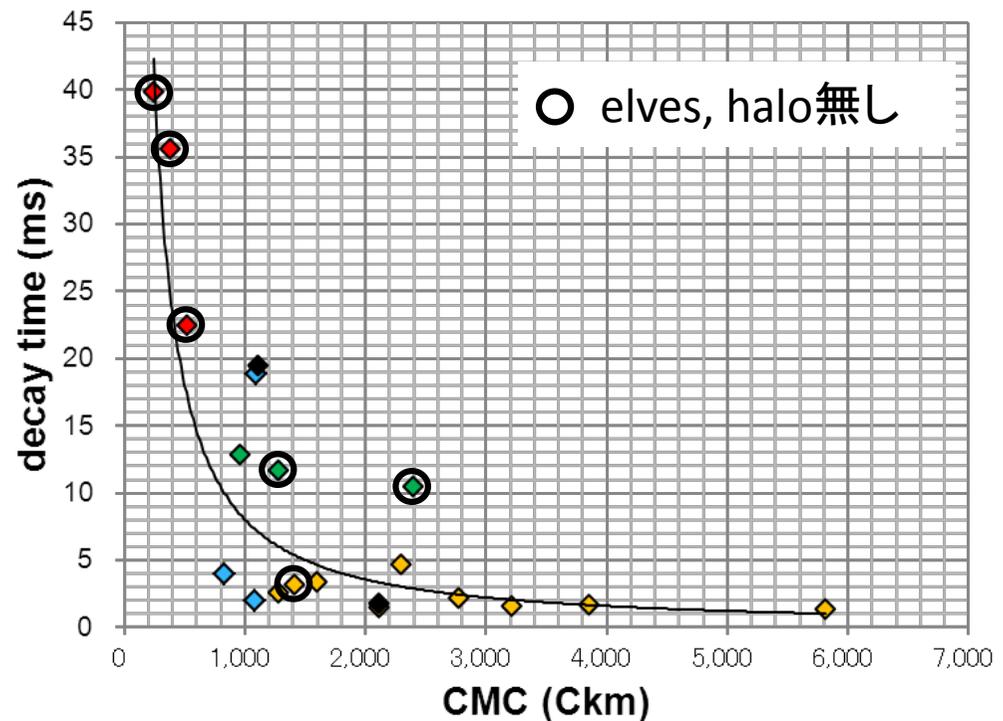
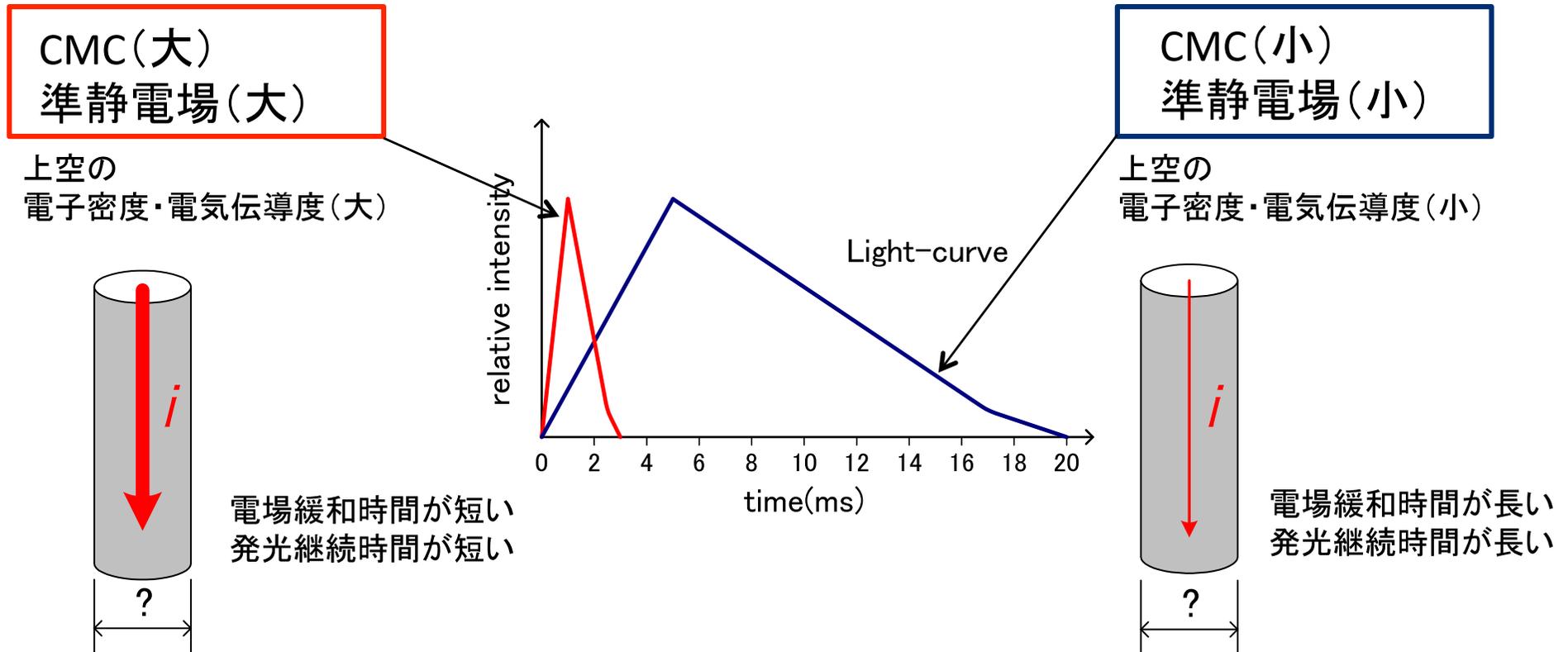


Fig.21 CMC vs decay time (t2).

elves,haloの有無がCMCとdecay timeやsprite形状の関係に影響している可能性

Discussion

■ CMCとdecay time (≡ 発光継続時間) の関係



■ elves, haloの有無とsprite形状への影響

elves, haloを伴わない場合, CarrotタイプやClioneタイプに集中
これらは発光継続時間も長い

elvesを伴わない場合 → Electro Magnetic Pulse(小) → ピーク電流値(小)
EMPもしくは放電初期の電荷量の違いが, sprite形状に影響を与えている可能性

Summary

- ・2011年6月27日ー7月10日の期間にNHK「宇宙の渚」プロジェクトと共同で、航空機・地上同時sprite観測キャンペーンを実施した。
- ・High-Speed Cameraを航空機に搭載し、上空からspriteを撮影するとともに、親雷から放出されるELF帯のsfericを北海道大学が運用するGEONで連続観測した。
- ・spriteの大部分がHigh-Speed Camera画面内に収まり、S/Nが確保され、ELF波形が同定できた20イベントについて、spriteの発光継続時間とCMCやIpeakとの関係を調べた。
- ・CMCとdecay timeの間に強い相関が見つかった($R^2 \sim 0.63$)。
ピーク電流値に比べ、より強い関係を持っている。
CMCが大きいほどdecay timeが短くなる → QE-Modelを支持する結果
- ・spriteが数100ms以内に連続して発生する場合、1回目のspriteのdecay timeが連続しない場合に比べ長くなる傾向が見られた。
- ・elves, haloを伴わない場合、decay timeが長くなる傾向が見られ、CMCが同じ値でも、elves, haloを伴っている場合はdecay timeが短い。
 - elves, haloを伴う場合、短時間に強い電場が加わり絶縁破壊が起こり、瞬間的に電流が流れる？
 - elves, haloを伴わない場合、時間をかけて絶縁破壊が起こるため、発光が複雑な構造になりやすい？