

スプライト放電の発生条件を与える雷パラメータに関する考察

平木 康隆 [1]; 福西 浩 [1]

[1] 東北大・理・地球物理

Theoretical criterion of charge moment change by lightning for initiation of sprites

Yasutaka Hiraki[1]; Hiroshi Fukunishi[1]

[1] Dept. of Geophysics, Tohoku Univ.

Sprites appearing at altitudes of 40–90 km are known as one of secondary discharges induced by lightning. From the analysis of VLF/ELF electromagnetic pulses radiated by lightning, it has been suggested that the charge moment change is a good index for the initiation of sprites, or the intensity of the produced electric field. However, the observed lowest value (~ 100 C km) seems to be much smaller than that given by numerical simulation. Furthermore, although it is suggested that the field intensity depends on the timescales of charge removal and relaxation by space charges along with charge moment, the criterion for sprite initiation and its correspondence to observation has not been understood systematically. In this paper, we investigate the minimum values of charge moment by conducting a classical electrostatic model simulation.

Results show that the discharge time (hereafter t_d) is an essential parameter that determines the criterion for sprite initiation along with the charge moment (hereafter M). Sprites can be initiated under small M as several hundreds of Coulomb kilometers if t_d is sufficiently short as hundreds of microseconds, whereas they cannot be done even with one thousand Coulomb kilometers if t_d is in the order of milliseconds. We generalize the criterion as an analytical expression of two internal factors, M and t_d , based on a simple electrostatic consideration. We argue that the critical M value is not allowed to be as small as 100 C km because of a fast relaxation of electric field by space charges in the finite t_d of actual lightning; the values of M_{cr} are actually as large as ~ 400 – 600 C km. The values estimated from observation are almost explainable with this understanding. We also propose that sprites are roughly classified into three types, a halo and a cluster of streamers with or without halo, using the two parameters of M and t_d .

スプライトは雷放電に伴って成層圏中間圏に発生する二次放電であり、そのダイナミカルな構造形成は非線型物理学の見地からも興味深い。主に対地性雷による事例が多く、その理由はそのときに大量の雷雲内電荷が消費されるためであると思われる。雷放射電波観測によって、消費電荷量とその高度の積で定義される電荷モーメント（以下 M とする）が推定され、スプライト発生条件の指標としてよく引き合いに出される。上空で放電が発生する理由は以下のようなものである。雷雲内電荷による静電場 E は M/r^3 に比例する（ r は距離）。一方で、弱電離気体中の電子の電場加速において、雪崩式に電離が進行する基準電場が与えられており、気体の密度（物理的には電子の平均自由行程の逆数）に比例する。このためこの電場は高度とともに指数関数的に減少するのに対し雷電場は三乗で減少するので、ある高度（ちょうど中間圏界面付近）で強烈な電子加速が起こり局所的に放電に至る。一般にスプライトは下方に成層圏界面付近まで発達するが、その理由は放電を持続させるに十分な電場が開始位置より上空には存在しないためであると思われる。本研究の目的は、 M に加えて別な雷パラメータである電荷消費時間（以下 t_d とする）を用いて、スプライト発生までの観測事実を統括的に簡潔に解釈することである；とりわけ、 M の最小値について議論する。

まず注目すべき事実は、雷が起った直後にのみスプライトが発生する点である。以上の考察から、大気が完全な真空とみなせ、雷雲内で電荷が生成/存在しその場が上空に印加されるならば、放電が起きてしまう。しかし、電荷生成の時間スケールに比べその電場を誘電遮蔽する時間スケール（1秒程度のオーダ）が十分小さいため、この相では何も起らない。このときの系の電場は理想的には $E \sim M/r^3 (1 - 1) + O(\dots)$ と表される；ここで、第二、第三項が空気中の電荷による場である。雷によって雷雲内電荷が消費される（この時間スケールが t_d ）と第二項が残り、それは上空の電子にとってみれば（第一項と同程度に）強い場となる。すなわち、これがスプライトの駆動源となる。しかしながら、 t_d があまり大きいとこの新しい電場も遮蔽されてしまう（百マイクロ-ミリ秒のオーダ）。なぜなら、中間圏界面付近は下部電離圏に当り、電気伝導度が比較的大きいからである。この遮蔽効果は、スプライトの発生が雷の“直後”に限定され、また、上方に発達しない要因と考えられる。この高度での t_d と遮蔽時間スケールの兼ね合い、及び M の大きさでその発生が左右されると思われる。本研究では、理想的な状況下におけるこの“兼ね合い”に対して解釈を与える。時間 t_d が大きい場合ほど（電場 $-M/r^3$ の遮蔽の進行度も大きいので） M が大きくなければならないという関係から、これら二つの観測可能なパラメータを用いてスプライトの発生条件を表現することができた。遮蔽効果がないなら $M_{cr} \sim 100$ C km となるのだが、実際の最小値はよくて 400-600 C km 程度であるという結果を得た。さらに、局所的な電子の物性に関する知見をもとに、その形態を3つに分類できることを提案する。以上のように、スプライトの発生/発達を議論する上で、雷が放射する電磁波は本質的な役割を果たさないとと思われる。なぜなら、それが位置を通過する時間スケールは放電の駆動される時間スケールに比べ十分小さいからである。このように系を簡潔に捉えることによって、その複雑な発達過程に対しても解釈の見通しが立つものと考えている。