

# 島根県大田市沖の日本海で観察された負極性落雷と雷雲内を広がるリーダーの様子

矢田 猛士\*

## Negative ground flash and leaders spreading inside the thundercloud observed in the Sea of Japan off the coast of Ohda City, Shimane Prefecture

Takeshi Yada\*

### 1. はじめに

雷は広く知られているように雲と雲との間、あるいは雲と地上との間の放電によって、光と音を発生する自然現象である。また、近年では雷放電によりガンマ線が発生し、大気中の窒素や酸素の原子核に衝突することで光核反応が起きていることが明らかになり「雷雲や雷放電の高エネルギー大気物理学」という新しい分野が発展してきている（例えば、榎戸ほか, 2019; Tsurumi et al., 2023）。雷の中で最も身近な存在は落雷（対地雷, 対地放電ともいう）である。落雷は雷雲内で放電が始まり、それが地上まで伸びてきて、雷雲の電荷を中和する。落雷は雲内の正電荷が中和される正極性落雷と負電荷が中和される負極性落雷の2種に分けられる。2023年8月26日の夜、島根県大田市沖の日本海において負極性落雷と雷雲内を広がるリーダーの様子が観察されたので、本稿で報告する。

### 2. 負極性落雷のプロセス

雷雲の中では、大小の氷の粒が互いにぶつかり合って電荷分離が生じ、強い電場が存在している。この電場が大気の絶縁作用を破壊し、プラズマ化した経路を通して雷雲中の電荷が強力な電磁波や音を放ちながら大地に流れ、中和される現象が落雷である。なお、雷に関するプラズマとしては、低温のプラズマ（ストリーマー）および高温のプラズマ（リーダー）が知られている。ストリーマーは、電場により加速された電子が大気分子に衝突して新たな電子を叩き出すことを繰り返す「電子雪崩」が連続的に発生している場所で見ら

れる線状のプラズマであり、電流は小さく伴う発光は弱い。リーダーは、電場が十分に強くなることでイオン化した分子も加速されて衝突を繰り返し高温となることで生じる熱電離により、電子密度が急上昇することで発生するプラズマで、流れる電流も大きくなり、強い発光を伴う。以下、吉田（2022）をもとに負極性落雷の諸過程を示す。

#### (1) 落雷発生直前

落雷が発生する直前では、電荷分解により雷雲内に電荷が存在している。これまでの観測によると、落雷が発生するような成熟した雷雲では、上から正、負、正の三重極分布になることが多い（図1a）。それぞれ、上からメイン正電荷領域、メイン負電荷領域、ポケット正電荷領域と呼ばれる。雷は、電荷領域間の最も電場の強い領域で発生する。図1aでは電場の強い場所が2ヶ所あり、点Aで発生した場合は雲放電（cloud flash）となり、点Bで発生した場合は負極性落雷（negative ground flash）となることが多い。

#### (2) リーダーの発生と進展

点Bでリーダーが発生した場合、発生地点から下向きには負リーダー、上向きには正リーダーが進展する（図1b, c）。特に、負リーダーは進んだり止まったり、間欠的に進むことからステップトリーダー（stepped leader）と呼ばれ、ジグザグに枝分かれしながら約 $10^5$  m/sで大地に向けて放電が進む（図1d）。ステップトリーダーが地上100 m付近まで近づくと、地表から正電荷の集団（upward connecting leader）が発生し、ステップトリーダーに接続する（図1e）。これをファイナルジャンプといい、その距離を電撃距離と

\* 島根県立三瓶自然館, 〒694-0003 島根県大田市三瓶町多根 1121-8

The Shimane Nature Museum of Mt. Sanbe, 1121-8 Tane, Sanbe-cho, Ohda, Shimane, 694-0003, Japan

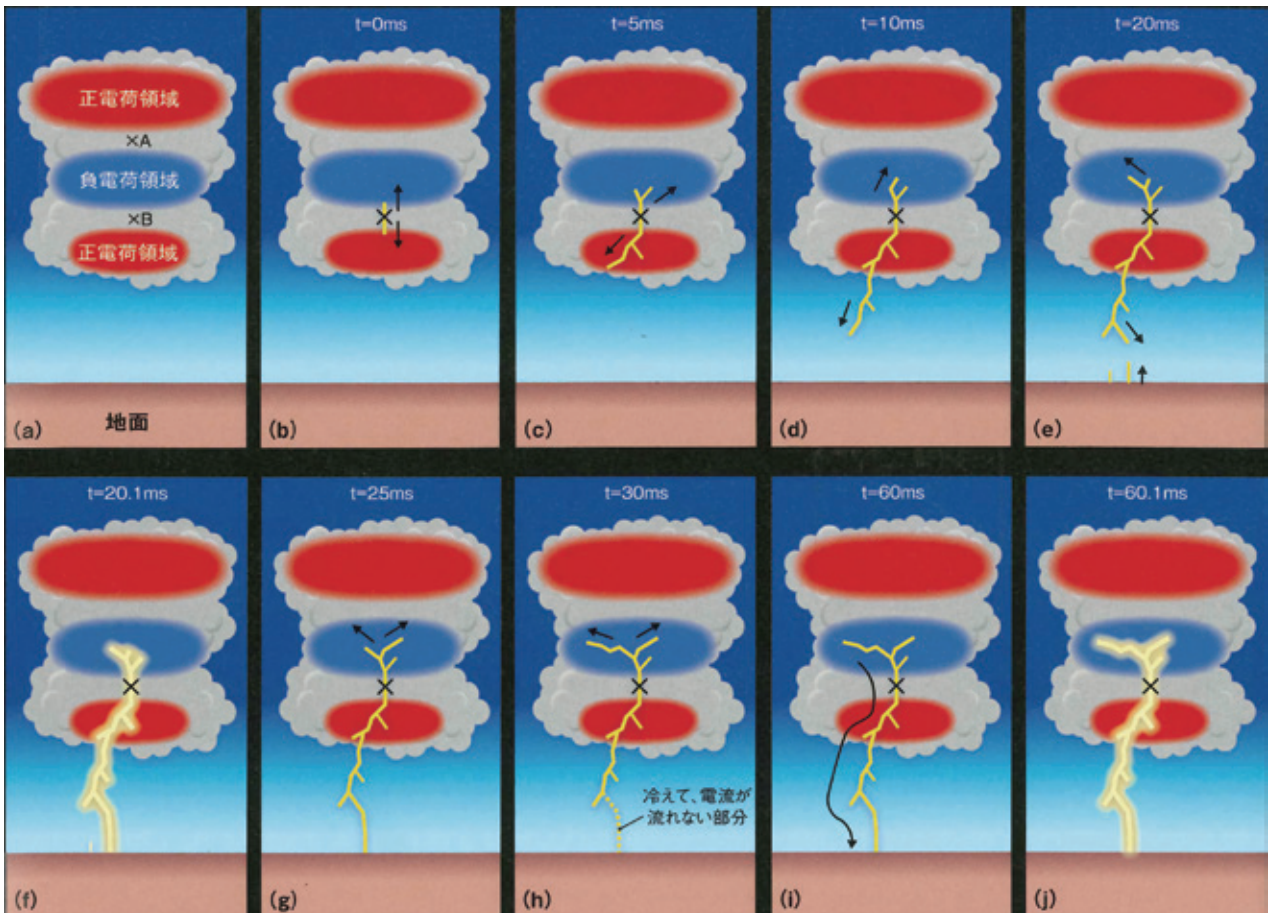


図1 負極性落雷の諸過程 (イラスト作成:宇田川由美子)

呼ぶ。

(図1h)。

**(3) リターンストローク (帰還雷撃)**

接続が起きると、雷雲内の負電荷領域と地上が電気的につながり、光速の3分の1程度の速度で地表から上空に放電が進展する(図1f)。これは第一帰還雷撃(first return stroke)と呼ばれる数十 $\mu$ s程度の継続時間の短い現象で、平均30 kA程度の電流が流れる。雷電流はステップリーダーが作った枝道をほぼそのまま進むため、ギザギザの道が強烈に光って現れる。

**(4) 雷雲内での正リーダーの進展と連続電流**

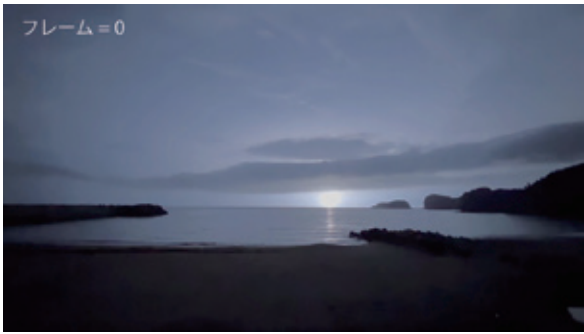
一回の帰還雷撃で負電荷領域の全てが中和されることは稀で、通常、帰還雷撃の後も雷雲内に負電荷が残っている。残存している電荷によって雷雲内電場が形成され、放電路先端部で電場強度が十分に強い場合は、放電路から正リーダーが伸び続ける(図1g)。また、雷雲内電荷領域と地表が放電路によって電気的につながっている間は、地上にも数十から数百Aの「連続電流」と呼ばれる電流が流れ続ける。その後、数msから数十msくらい時間が経つと、雷雲内と放電路は周囲の大気により急激に冷却され、電気伝導率が下がり、やがて電気を通さなくなり、連続電流は停止する

**(5) ダートリーダーと後続雷撃**

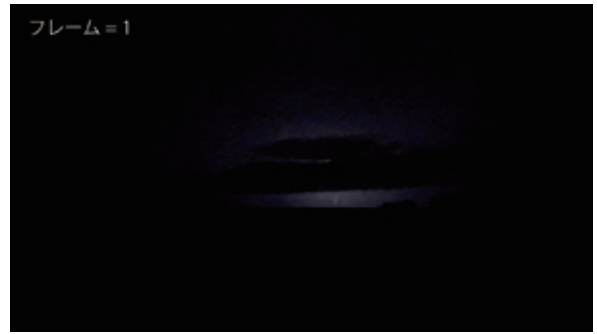
連続電流が停止した後も正リーダーが進展すると、正リーダーが通った経路を逆向きに負リーダーが発生する場合がある(図1i)。この負リーダーは、ダートリーダー(dart leader)と呼ばれ、第一帰還雷撃の電流が流れた放電路を $10^6$  m/s程度で下降し、地表面付近に達すると再び帰還雷撃に似た大電流が流れる(図1j)。これは先ほどの第一帰還雷撃に対して、後続雷撃(subsequent return stroke)と呼ばれる。こうした過程が何度も繰り返され、一つの雷放電が完結する。何回繰り返されるのか、その回数を多重度と呼ぶが、夏季の負極性落雷の場合、多重度4程度が平均値である。この間、雲内でも同時に放電が進展する場合があり、そのような帰還雷撃間における放電過程は、J過程、K過程、Mコンポーネントなどの様々な名前がつけられている。

**3. 観 測**

職場からの帰宅途中に、偶然、大田市沖の日本海に多数の落雷を目撃したため、仁万海岸において観測を



(a)



(b)



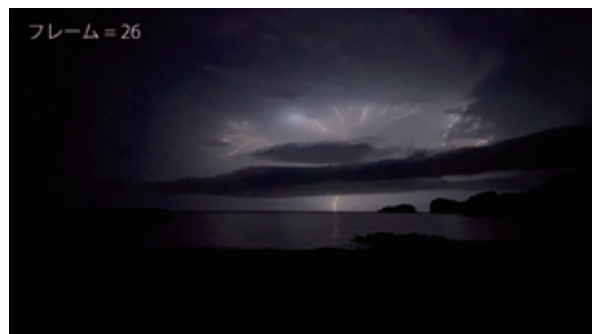
(c)



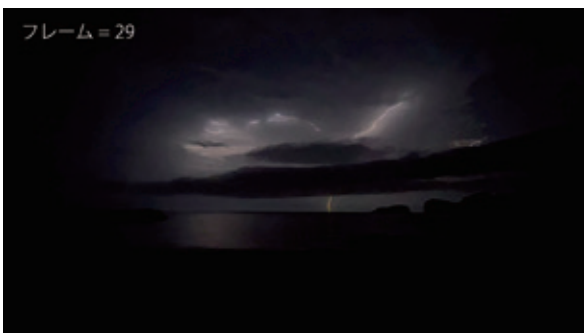
(d)



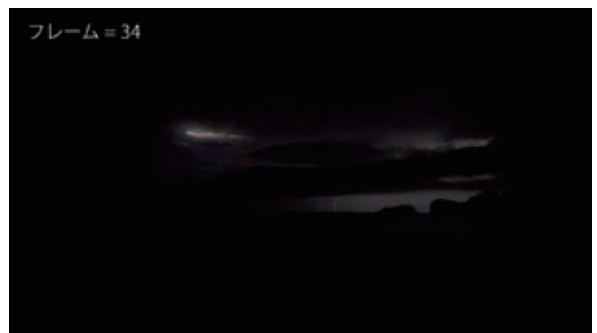
(e)



(f)



(g)



(h)

図2 2023年8月26日に記録された落雷

行った。観測は2023年8月26日23時40分ごろから24時10分ごろにかけて実施し、iPhone13 Pro 標準カメラにおいて動画撮影を行った。動画の仕様は表1の通りである。本稿では、そのうち23時50分21秒ごろに記録された帰還雷撃および雲内をリーダーが広がる様子について報告する。なお、気象庁気象研究所の吉田智氏により、この時間帯に気象庁雷監視システムLIDEN (LIghtning DEtection Network system) において、鳥根県大田市沖での負極性落雷の発生が確認されている。

表1 動画の仕様

解像度	3840x2160
動画ファイル形式	MOV
コーデック	H.264
フレームレート	60 fps
フィールドオーダー	プログレッシブ
ビットレート	1345 kb/s

以下、動画から書き出した静止画像について、第一帰還雷撃が記録されたフレーム(図2a)を基準(フレーム = 0)として放電の経過を示す。フレームレートは60 fpsであるため、1つのフレームの継続時間はおよそ17 msである。第一帰還雷撃の直後のフレーム(図3b)では発光が弱くなるが、その次のフレーム(図3c)では放電路の増光が見られる。その後、放電路の発光は継続し、フレーム = 12あたりより雷雲上方が全体的に明るくなり始めたのが確認された(図3d)後、雷雲内を広がるリーダーの様子が記録された。代表的なものを図3e および図3fに示す。29フレーム目から放電路の発光が弱くなり(図3g)、雷雲内を広がるリーダーも見られなくなった(図3h)。

## 4. ま と め

偶然に、帰還雷撃の後、雲内をリーダーがきれいに枝分かれしながら広がる落雷を記録することができた。この記録が雷の科学に貢献することを願うとともに、広く一般の方にとって身の回りで見ることができ美しい自然現象に興味や関心を持っていただける契機となれば幸いである。

## 謝 辞

気象庁気象研究所主任研究官の吉田智氏には本稿の内容について助言をいただきました。感謝申し上げます。イラストレーターの宇田川由美子氏にはイラストの使用について承諾をいただきました。御礼申し上げます。

## 引 用

- M. Tsurumi, T. Enoto, Y. Ikkatai, T. Wu, D. Wang, T. Shinoda, K. Nakazawa, N. Tsuji, G. S. Diniz, J. Kataoka, N. Koshikawa, R. Iwashita, M. Kamogawa, T. Takagaki, S. Miyake, D. Tomioka, T. Morimoto, Y. Nakamura, and H. Tsuchiya (2023) Citizen Science Observation of a Gamma-Ray Glow Associated With the Initiation of a Lightning Flash. *Geophysical Research Letters* DOI : 10.1029/2023GL103612
- 榎戸輝揚・和田有希・土屋 晴文 (2019) 雷放電が拓く高エネルギー大気物理学. 日本物理学会誌, 74, 4, 192-200
- 吉田智 (2022) 稲妻と雷の図鑑. グラフィック社.