

冬季スプライトの形状と気象条件の関係

静岡県立磐田南高等学校
地学部大気班 2年 上川 敬人 他3名

1 動機

先行研究では、スプライトの形状と地形との関係について研究を行い、この結果、スプライトの形状は陸と海とで大きな違いは見られなかった(柿澤ほか, 2013). しかし、気象条件による形状の違いについては未解明である. そこで、冬季(11月～3月)に日本海付近で発生したスプライトに着目して、冬季スプライトの形状と気象条件の関係について研究を行い、発生モデル構築を目的に研究した.

2 スプライトとは

高高度発光現象(TLEs: Transient Luminous Events)とは、雷雲地上間放電(CG: Cloud-to-Ground discharge)に伴って雷雲上空、中間圏・熱圏下部で発生する発光現象の総称で、ジェット、エルブス等が知られている. 高高度発光現象は1989年に初めて確認されたが、(Franz et al, 1990)、現在でもその発生メカニズムは不明な点が多い. スプライトもこの一種で下端は高度約70km、上端は約80kmの発光現象である. スプライトには様々な形状があることが知られており、本研究では、図1のように①Column(柱状)、②Angel(天使の羽のような部分を持つ)、③Carrot(人参の髭のような部分を持つ)、④Wishbone Tree(枝分かれ部分を持つ)の4種類に形状を分類した(Bor, 2013).

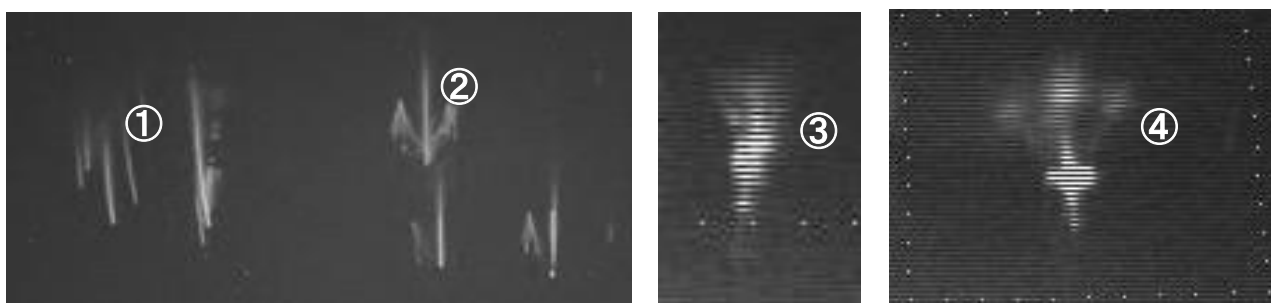


図1 スプライトの形状一覧 ①Column ②Angel ③Carrot ④Wishbone Tree

3 研究方法

図2-1は本校のTLE観測システムの模式図である. 図2-2の高感度CCDカメラで撮影された映像を動体検知ソフトで常時監視することにより、自動観測を行っている. PCの時刻はGPS時計により1/100秒の精度で管理されており、正確な観測時刻を知ることができる. また、カメラの視野範囲(図2-3)を元に、スプライトの発生地点を特定する. さらに、スプライトを形状により分類し、気象庁が公開している気象情報や日本気象協会が公開している気象衛星による赤外雲画像や雨雲レーダー画像を用いて、スプライトの形状と気象条件の関係について解析する.

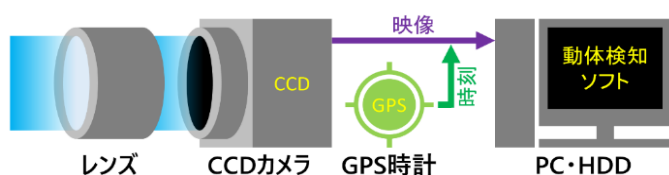


図2-1 TLE観測システムの模式図



図2-2 高感度CCDカメラ (WAT-100N)

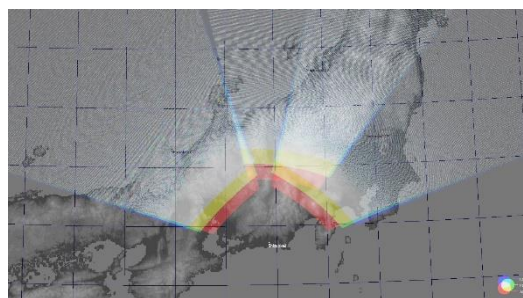


図2-3 カメラの視野範囲

4 結果

(1) スプライト形状別の特徴

2019年11月16日から2022年2月27日までに本校から観測された190のスプライトを撮影した。

形状別スプライトの発生件数を示す図3より、Columnが131件、Wishbone Treeが23件、Angelが21件、Carrotが15件となり、Columnが他の3種類と比べて圧倒的に多かった。

Columnは図4-1のような他3種類の形状と同時に発生した件数が多くみられた。また、1件あたり平均4本の発光が観測された。

図4-2の通り、Columnの中でも大きさや太さ、光度に様々なものが存在した。本研究では、球状の発光は極端に短いColumnスプライトとみなした。

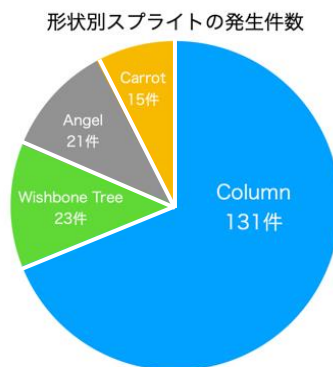


図3 形状別スプライトの発生件数割合

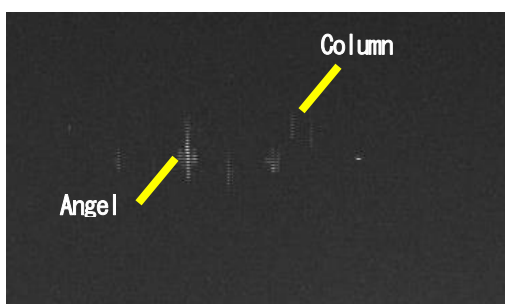


図4-1 ColumnとAngelの同時発生画像



図4-2 Columnの複数同時発生画像

Angelは190件のうち、21件であった。Angelは他の形状と同時に発生する傾向が顕著であり、21件中14件が他の形状、特にWishbone Treeと同時に発生するものがあった(図5)。

Carrotは190件のうち、15件であった。稀ではあったが、図6のように髭部分が下部に見られたものも観測された。Carrotの発光規模はColumnよりは大きいものの、Wishbone TreeやAngelよりは小さかった。

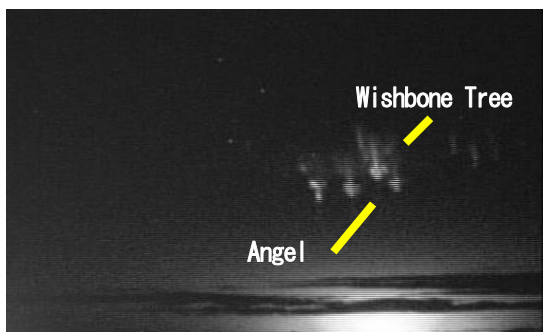


図5 AngelとWishbone Treeの同時発生画像



図6 髭部分が下部に見られたCarrot

Wishbone Treeは190件のうち、23件であった。また、他の形状と比較して、発光の光度と体積が最も大きかった。Wishbone Treeには木の幹部分と枝部分のように分かれているもの(図7-1)と釣り針のような形状のもの(図7-2)があった。

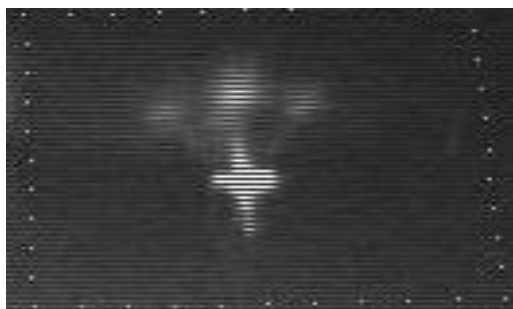


図7-1 木型 Wishbone Tree



図7-2 釣り針型 Wishbone Tree

(2) スプライト発生時の気象条件

スプライトの形状や成因を気象条件と関連させて解明することにした。参照したデータは以下の通り。

ア 気象庁のホームページに掲載されている発生地点に最も近い気象台記録(気温, 湿度, 降水量)

イ 日本気象協会のホームページに掲載されている天気図, 衛星画像, レーダーによる雨雲画像, アメダスの記録

ウ 過去の雷記録を公開しているサイト(<https://weather.kakutyoutakaki.com/thunder/index.php>)

エ 世界の気象記録をビジュアライズしているサイト(<https://earth.nullschool.net/jp/>)

(3) スプライトの形状と気象

4-1 で判明したスプライト形状別の特徴と気象条件の関連を発見することを目的に行った。

Column は, 図 8-1 に示す 2020 年 2 月 18 日 1 時頃に発生したスプライトのように大規模な雲の内部で発生したものも存在すれば, 図 9-1 に示す 2020 年 12 月 24 日 23 時頃に発生したスプライトのように雲が比較的小規模でも発生したものも確認された。また, Column は積乱雲による単発のスプライトも見られた。



図 8-1 2020 年 2 月 18 日 1 時頃に発生した Column スプライト



図 8-2 スプライト発生時の雨雲画像
(日本気象協会 HP より引用、加筆)



図 8-3 スプライト発生時の赤外画像
(日本気象協会 HP より引用、加筆)



図 9-1 2020 年 12 月 24 日 23 時頃に発生した Column スプライト



図 9-2 スプライト発生時の雨雲画像
(日本気象協会 HP より引用、加筆)



図 9-3 スプライト発生時の赤外画像
(日本気象協会 HP より引用、加筆)

Angel は図 10-3 のように寒冷前線または 20mm/h 以上の降水量を伴うものが 21 件中 18 件あった。その他の 3 件も 10mm/h 以上の降水を伴っており、発達した雲の中で発生していた。

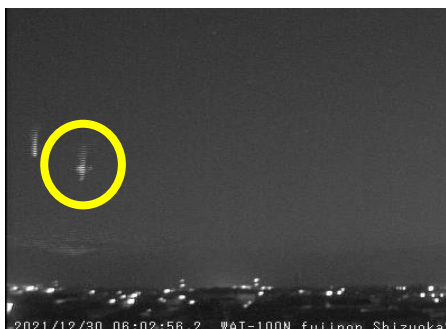


図 10-1 2021 年 12 月 30 日 6 時頃に発生した Angel スプライト



図 10-2 スプライト発生時の雨雲画像
(日本気象協会 HP より引用、加筆)



図 10-3 スプライト発生時の天気図
(日本気象協会 HP より引用、加筆)

Carrot は図 11-3 のように寒冷前線を伴うものが 15 件中 14 件あった。観測件数は一番少なかったものの、寒冷前線との関係は非常に強く見られた。その他の 1 件でも 10mm/h 以上の降水が見られた。



図 11-1 2021 年 12 月 13 日 21 時頃に発生した Carrot スプライト



図 11-2 スプライト発生時の雨雲画像
(日本気象協会 HP より引用、加筆)

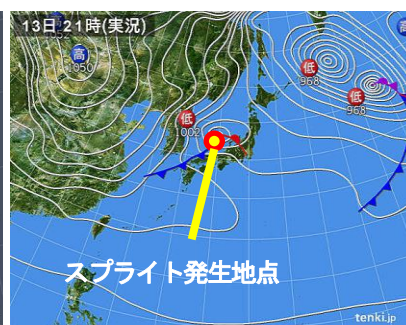


図 11-3 スプライト発生時の天気図
(日本気象協会 HP より引用、加筆)

Wishbone Tree は図 12-3 のように寒冷前線または 20mm/h 以上の降水量を伴うものが 23 件中 19 件あった。その他の 4 件でも 10mm/h 以上の降水が見られた。



図 12-1 2021 年 12 月 13 日 22 時頃に発生した Wishbone Tree スプライト



図 12-2 スプライト発生時の雨雲画像
(日本気象協会 HP より引用、加筆)

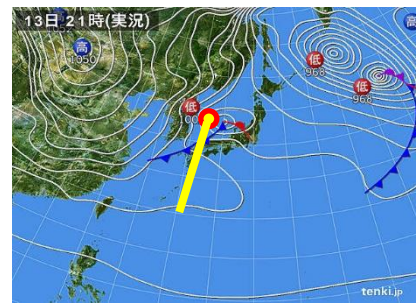


図 12-3 スプライト発生時付近の天気図
(日本気象協会 HP より引用、加筆)

それぞれの形状の特徴を発見することができたが、Angel, Carrot, Wishbone Tree の気象条件が非常に類似しており、明確な区別ができなかった。

そこで我々は図 13 のように、地上・上空 500hPa の気温と湿度をそれぞれ形状別にまとめた。

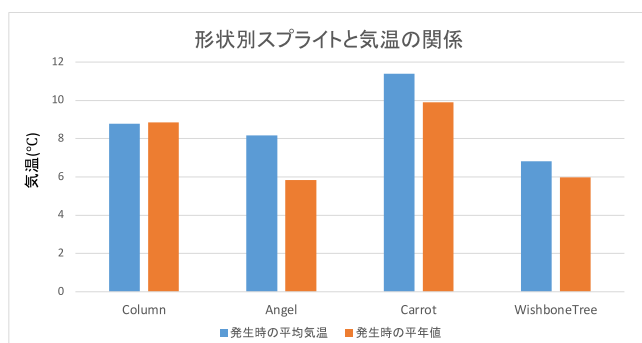


図 13-1 形状別スプライトと気温の関係

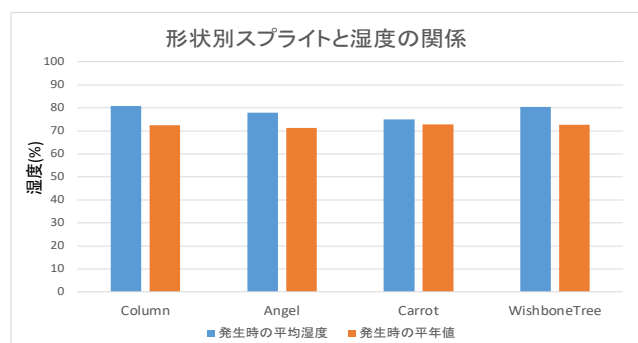


図 13-2 形状別スプライトと湿度の関係

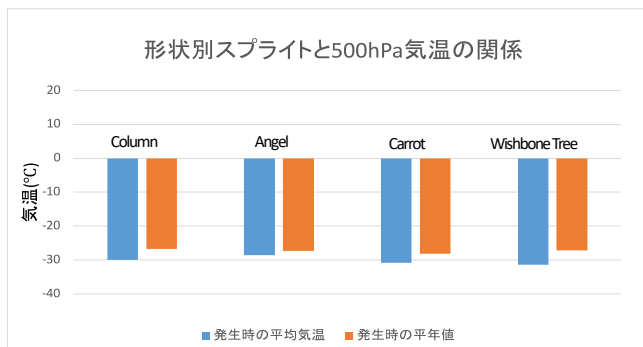


図 13-3 形状別スプライトと 500hPa 気温の関係

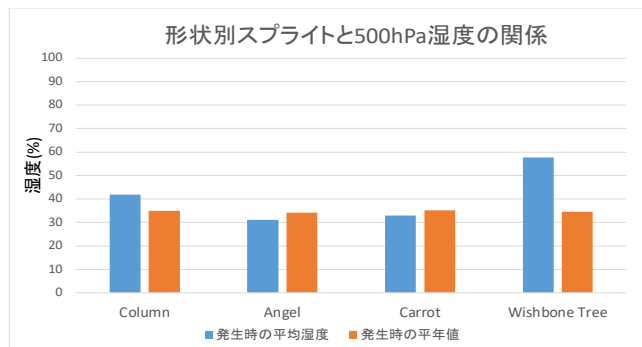


図 13-4 形状別スプライトと 500hPa 湿度の関係

地上の気温において, Angel, Carrot, Wishbone Tree の平年気温との差が一番大きく, 特に Angel が一番大きいという結果が見られた. 500hPa の気温は 4 種類とも平年値を下回った. また, 500hPa 湿度において, Wishbone Tree の湿度が高いという強い傾向が見られた.

(4) スプライトの成因と気象

冬季スプライト発生成因を気象的側面から解明することにした.

足立・福西・高橋(2003)は寒冷前線に伴って冬季スプライトが発生するとしている. 日本気象協会のホームページに掲載されている天気図を参照したところ, 寒冷前線の通過後にスプライトイベントが確認されたのは 185 件中 70 件であった. その他にも図 14 のように線状になった雨雲が 28 件, 数時間後に寒冷前線となる雨雲に伴って発生したスプライトイベントが 13 件存在した.

また, スプライト発生領域を降水レベル別ごとに分類し, 集計した図 15 を作成した. スプライトを発生させる雲は降水量が多く, 発達している傾向にあり, スプライトを発生させた雲は全て降水が見られた. さらに, 日本気象協会のホームページに掲載されている気象衛星の赤外画像によってスプライト発生時の雲の状況を調べると, 図 16 のように薄く, 広がった形状の雲が多く見られた. 浅井(1988)より, この雲は冬季に偏西風蛇行が激しく, 気圧の谷が大きくなった際に生じた切離低気圧(寒冷渦)による対流不安定層によるものであると考えられる.

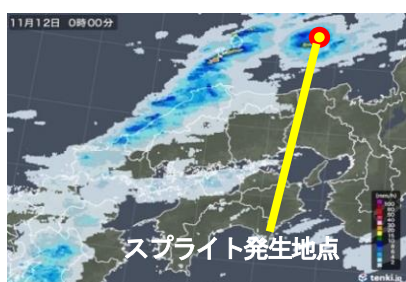


図 14 2021 年 11 月 12 日のスプライト発生時の雨雲レーダー画像(日本気象協会 HP より引用、加筆)

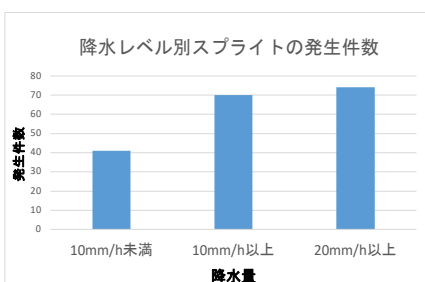


図 15 降水レベル別スプライトの発生件数

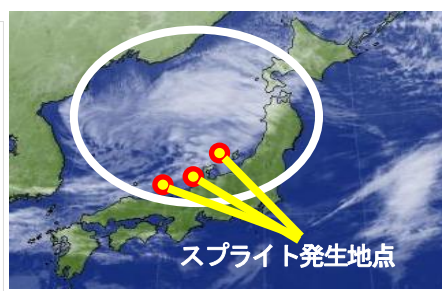


図 16 2020 年 12 月 13 日スプライト発生時の赤外画像(日本気象協会 HP より引用、加筆)

次に, スプライトは放電現象のため雷放電を伴っていると考え, 気象庁の観測している雷監視システム(LIDEN: Lightning Detection Network system) の記録を参照した. 図 17 のように, 2021 年 11 月 11 日 23 時~翌 12 日 5 時まで時間経過とともに東へスプライト発生地点が移っていたが, それに伴って対地放雷や雲間放電の発生地点も移動していた.

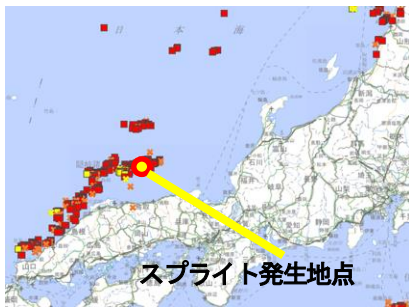


図 17-1 2021 年 11 月 11 日の
23 時の放雷情報

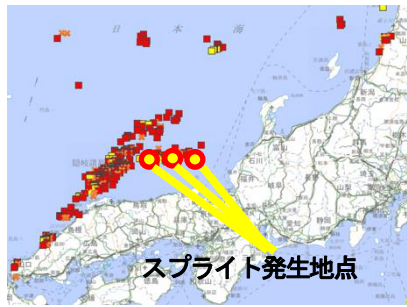


図 17-2 2021 年 11 月 12 日の
0 時の放雷情報

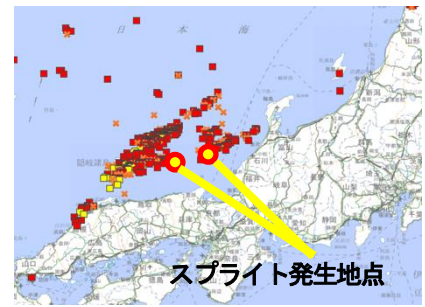


図 17-3 2021 年 11 月 12 日の
1 時の放雷情報

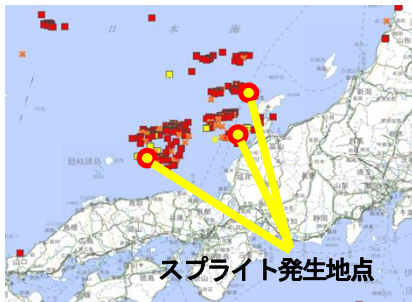


図 17-4 2021 年 11 月 12 日の
2 時の放雷情報

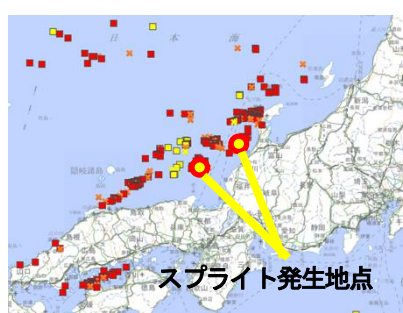


図 17-5 2021 年 11 月 12 日の
3 時の放雷情報



図 17-6 2021 年 11 月 12 日の
4 時の放雷情報

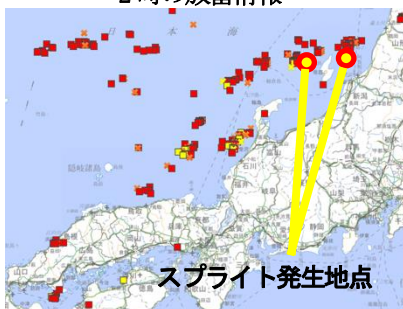


図 17-7 2021 年 11 月 12 日の
5 時の放雷情報

2 時間以内・・・×：雲間放電 ■：落雷

1～3 時間・・・×：雲間放電 ■：落雷

3 時間以上前・・・×：雲間放電 ■：落雷

図 17-1～7 は気象庁より引用、加筆

5 考察

(1) 形状別スプライトの発生条件

Column は観測件数が多いこと、他の形状と同時に発生した件数が多いことや、1 件あたり平均 4 本の発光が観測されたことから、1 本の発光に要する最低の電気エネルギーが一番小さいと考えられる。

Angel は 21 件中 14 件が他の形状、特に Wishbone Tree と同時に発生していた。Angel と Wishbone Tree は共に枝分かれ状であること、共に寒冷前線や 20mm/h 以上の降水を伴う活発な雷雲での発生が多いことから発生条件が近似していた。しかし、図 13-4 より上空 500hPa の湿度が Wishbone Tree より極端に低かった。この理由は、Wishbone Tree 発生時に湿度が足りず枝部分が短くなり、羽のような形に見えたと考えられる。そのため、発生に必要な電気エネルギーの大きさも近いと考えられる。

Carrot は Wishbone Tree や Angel より比較的規模が小さかった。しかし、寒冷前線の近辺で発生する傾向が最も顕著であり、発生に必要な電気エネルギーは比較的大きいと考えられる。

Wishbone Tree も Angel, Carrot と同様に寒冷前線や 20mm/h 以上の降水を伴う活発な雷雲での発生が多かったが、他種と比較して発光の光度と体積が最も大きく、発生に必要な電気エネルギーが一番大きいと考えられる。また、図 13-4 より上空 500hPa の湿度が高い傾向にあった。上層の湿気が多くなり、電気が通りやすい場所を探しながら進むために、枝分かれ状になると考えた。

以上より、発生に必要な電気エネルギーは Column, Carrot, Angel, Wishbone Tree の順に大きいと考えられる。

(2) 冬季スプライトと気象条件

観測結果と、文献より冬季スプライトの発生モデルと発生条件の仮説を考えた。以下がスプライトの発生条件である。

ア 降水を伴っている。

イ 大量の電荷と大規模な積乱雲が必要なため、寒冷前線や線状降水帯が伴っている。

ウ スプライト発生前に、積乱雲による正極性落雷(+CG)が発生する。

エ 上層と下層の温度差が大きく、大気の状態が不安定(浅井, 1988 より)。

仮説4に関しては、発生に必要な電気エネルギーが大きいと考えられる Carrot, Angel, Wishbone Tree の3種類は、図13-1, 13-3より地上の気温と上空500hPaの気温の差が大きかったため、整合性がある。

(3) 冬季スプライトの発生モデル

以上より、冬季に日本海上空や日本海沿岸部上空で見られたスプライトの多くは以下のモデルで発生したと考えられる(オ, カはPasko, Inan, & Bell, 1997より引用)。

ア 偏西風波動が激しくなることで、気圧の谷が発達する。

イ 気圧の谷が過度に大きくなることで、切離低気圧(寒冷渦)が形成される。

ウ 上層に寒冷な空気、下層に対馬海流で温められた温暖な空気が位置することで、対流不安定層が形成される。

エ 対流不安定層によって日本海上空は長期的に大気が不安定になり、寒冷前線や雷雲が多く発生する。

オ 発生した雷雲による正極性落雷によって雷雲内が電氣的に中性になることで、雷雲上端と電離圏の間に大電場が生じる。

カ 大電場によって中間圏(50km-90km)大気の絶縁破壊が起こり、大量の電子が放出されることで、空気中の窒素が電子と衝突を繰り返して発光し、スプライトが発生する。

キ 雲の持つ電気エネルギーの大きさや湿度や塵などの影響による上空の絶縁性によって、発生するスプライトの形状が決定される。



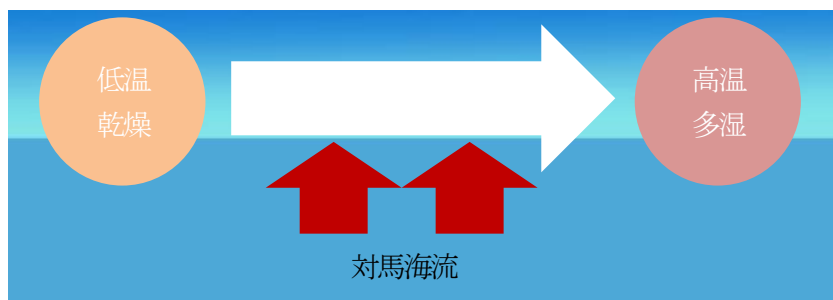
ア-1 極と赤道の温度差や地球の自転の影響で偏西風が蛇行する



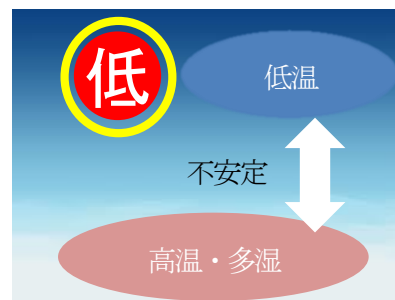
ア-2 気圧の谷が発達



イ 低気圧が風の蛇行から切り離される



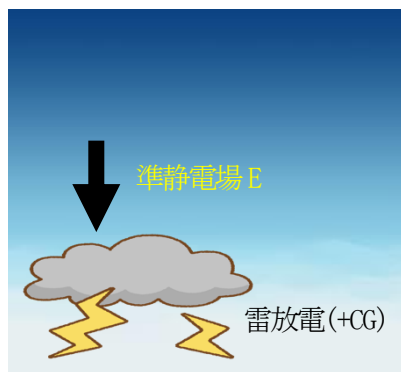
ウ-1 地表付近では、冬の季節風が対馬海流によって気団変質を起こす



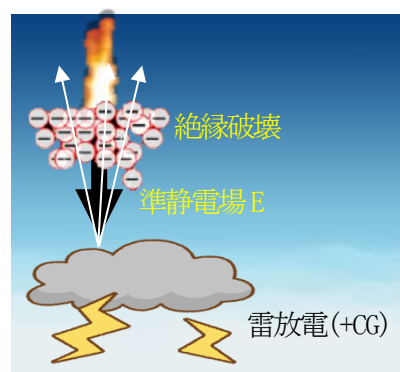
ウ-2 上層と下層の温度差より対流不安定層の形成



エ 対流不安定層は寒冷前線の
バググラウンドとなる



オ 正極性落雷によって電場が
発生する



カ 絶縁破壊によってスプライトが
発生

6 結論

- (1) 寒冷前線や20mm/h以上の降水を伴う活発な雷雲が発生した場合はAngel, Carrot, Wishbone Treeなどの複雑な形状のスプライトが発生する確率が高い。
- (2) 発生に必要な電気エネルギーはColumn, Carrot, Angel, Wishbone Treeの順に大きいと考えられる。
- (3) 上空の湿度が高い場合はWishbone Tree, 低い場合はAngelになる。

7 今後の課題

雲の持つ電気エネルギーの大きさと形状の関連を詳しく調べるとともに、具体的な数値を用いた冬季スプライトの発生モデルを構築し、スプライトの発生メカニズムの完全解明に努めたい。

8 引用・参考文献

浅井富雄, 1988, 日本海豪雪の中規模的様相

足立透・福西浩・高橋幸弘, 2003, 冬季日本に発生するスプライトと雷雲の特徴

福西浩, 2004, 雷雲から超層大気への上方放電発光現象の研究

József Bór, 2013, Optically perceptible characteristics of sprites observed in Central Europe in 2007-2009

柿澤文哉ほか6名, 2013, 高高度発光現象「スプライト」の発生位置ごとの性質の違いについて

V. P. Pasko, U. S. Inan, T. F. Bell, 1997, Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere