機械学習を用いたスプライトの自動検出と発生地点の特定

立川高校2年 北村隆樹 大石雄稀 根本美優

概　要

スプライト ▶ 落雷に起因する中間圏～熱圏の発光現象の総称

発生要因 ▶ 雷のように枝分かれした形状と赤い色が特徴
現象の持続時間が高々50msと非常に短い
→肉眼での観測は困難

特徴 ▶ 落雷時に上空に向けて放出された
電子による窒素原子の励起(先行仮説)

先行研究・観測

メカニズム ▶ セントマン博士らが1980年の研究で、スプライトが窒素の励起によって発生するという仮説を立てている。
藤戸氏らが2012年の研究で上向き正極性落雷が上空に電子を放出しやすいとしている。

観測機器 ▶ 本校地学ゼミの流星研究班が作成した。
全天継続観測機器「Ten-Gu2.0」(図1)の記録映像に2024年の一年間で26個スプライトが写った。

※1 「Ten-Gu2.0」
安価な防犯ビデオカメラ
Atom-Cam2(図2)5台を用いて
全天の継続観測を行っている。
撮影された映像データは
リアルタイムでモニタリング
できるようにしている。

図1 本校屋上に設置した自動流星観測装置

図2 Atom-cam2

スペック
画質: 1080p
F値:1.6
画角:120度
Fps:20fps

観測システム

＜観測機器＞
AtomCam2より高い時間分解能を持ち、暗所でのカラー撮影に優れたWATEC社のWAT-06U2というUSBカメラ を用いて観測機器「U-mono1.0」を作成した。
観測機器は、カメラ本体を載せた円形の天板と、その下に設置したモータ、およびモータを制御するRaspberry Piから構成される(図3,4,5)。モータは天板の中心軸に接続されており、天板全体を回転させることでカメラの方位を360°自在に制御できる。Raspberry Piはモータの動作制御と撮影制御を統合的に行い、季節や気象条件に応じて観測方向を自動調整できる。

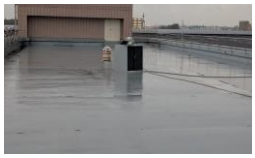

図3 機器の設置場所

図4 U-mono1.0

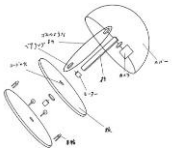

図5 U-mono1.0の見取り図

＜機器制御・自動検出プログラム＞
今までの観測では、自作した簡易的な検出プログラムを使用していた。本機材の運用にあたり、新たに機械学習を用いたスプライトの判別、および観測装置の自動制御が可能なシステムを構築した。従来と新規のプログラムのフローチャート(図6)に示した。

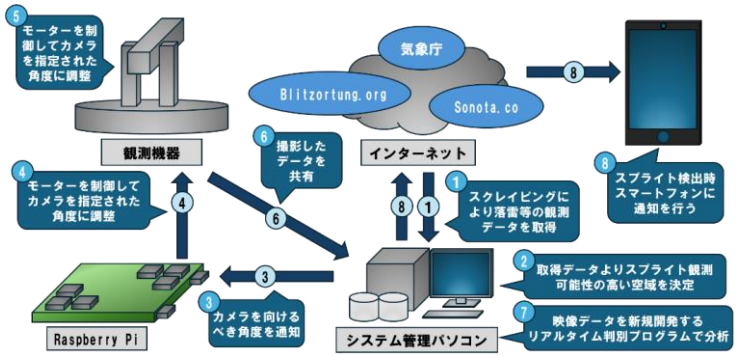

図6 U-mono1.0のシステム概要

このプログラムは以下の機能を実装している。
①落雷リアルタイム観測サイト「Blitzortung.org」からデータを取得し、スプライト発生確率の高いエリアを分析。観測点との経緯差を算出し、カメラを向ける方角・仰角を決定する。(図6①②)
②RaspberryPiを用いた経緯台の自動制御　(図6④⑤)
機器に搭載したRaspberryPiとサーボモータで経緯台を①で決定した方向に向ける。
③映像の自動分析　(図6⑦,図7)
「広空域にわたる短時間の赤色発光」の条件を満たす現象について、機械学習を用いてその形状を分析し、スプライトか否かを判定する。
加えて、雲がある領域を自動判別する機能の試験的運用を開始した。誤検知の主要因となっていた雲内放電による雲の発光との区別が可能になると考えている。

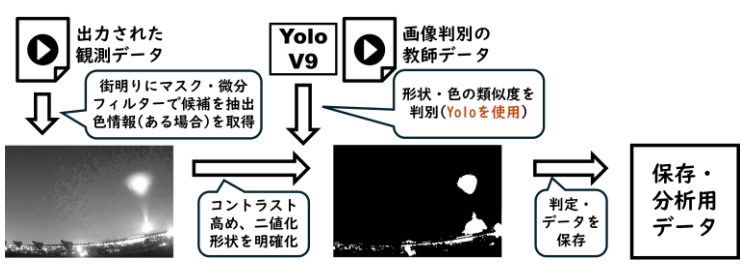

図7 U-mono1.0のシステム概要

自動判定の結果

観測機器にて撮影されたスプライト26件について、すべて正確に検知できた。
また、外部サイトから引用したスプライトの画像で検出テストを行ったところ、その精度は以下の表のようになり、F1スコアは0.730となった。

		手動観測		
		あり	なし	合計
AI	あり	92	37	129
	なし	31	78	109
	合計	123	115	238

図8 自動検出プログラムの精度

図9 プログラムの一部

図10 スプライト検知時の出力画像

親雲の特定とイオノグラム分析

＜親雲の特定＞
本機材がスプライトを観測したとき、その発生時刻・方角付近で発生した落雷をリアルタイム観測システム「Blitzortung.org」のデータと照合することで親雲(スプライトを引き起こした雷雲)を特定するシステムを構築・運用した。
スプライト発生位置は落雷地点から水平方向に数十キロ程度ずれることがあるため、先行研究では親雲特定は困難であると述べられているが、このシステムを用いることで正確な親雲の情報収集が可能になった。

＜イオノグラムの分析＞
先述の親雲の特定に加え、スプライトが発生している電離層付近の状態を調査するため、イオノグラム(短波レーダーを用いた超高層電離状態調査機器)のデータを外部より取得・分析するアプリを開発した。
その結果、スプライトの根元部分の高度と熱圏下部の電離層の高度がほとんど一致していることが分かった。デヴィッド・セントマン博士らの先行研究に基づき、電離層がスプライト発生と密接に関係しているという仮説をたて、検証を試みている。

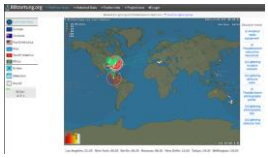

図11 Blitzortung.orgの画面

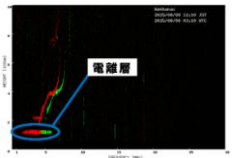

図12 イオノグラムの画面(一部加筆)

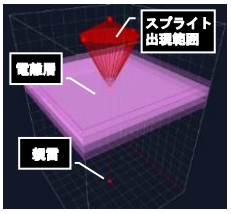

図13 スプライト・電離層の関係をプロットする自作アプリ

考察

＜機械学習による検出＞
あまり赤くないスプライトの見逃し率が50%程度と、他と比較して極めて高かった。
このことから検出プログラムは色判定に依存していることが分かった。データセットの拡張等により形状による判定の精度も向上させていきたい。
＜親雲の特定・イオノグラムを用いた分析＞
分析の結果から、スプライトは電離層の影響を強く受けているという仮説が立てられた。
分析のためのデータがそろっている観測結果がまだ少ないため、観測件数の拡大と並行して追加調査を行っていきたい。

参考文献

＜機械学習による検出＞
データライブラリの拡張を行い、形状によるスプライトの検出精度を向上させる。
また、誤検知を減らすための画像の前処理の方法を再検討する。
＜親雲の特定＞
複数の場所で同時にスプライトが発生した場合、誤判定が発生する可能性がある。
現在はモーターの角度と照らし合わせて判別しているが、別のアプローチも開発・組み合わせて判定精度を向上させる。
＜イオノグラムの分析＞
先述の仮説を証明するため、観測データをより多く得て、それぞれについて電離層とスプライトの発生位置を分析する。

今後の展望

参考文献

1. 東京都立立川高等学校 天文気象部 2年 大谷勇人 奥出理人 西梨杏 沼邉龍樹 水澤資人 村田圭総(2024)『流星の自動観測システム「Ten-Gu」ver2.0の開発』第13回高校 高専気象観測機器コンテスト16.tachikawa tengu.pdf
2. 東京都立立川高等学校 天文気象部 1年 大谷勇人・奥出理人 西梨杏 沼邉龍樹 水澤資人 村田圭総(2023) 『流星観測装置「TenGu」の制作 ～ビデオと電波による流星自動観測システムの構築～』高校 高専気象 観測機器コンテスト31.tachikawa TenGu.pdf
3. Sentman, D. D., E. M. Wescott, D. L. Osborne, D. L. Hampton, and M. J. Heavner, 1995.
4. Preliminary results from the Sprites 94 aircraft campaign: 1. Red sprites, Geophys. Res. Lett., 22, 1205-1208, doi: 10.1029/95GL00583 Preliminary results from the Sprites94 Aircraft Campaign: 1. Red sprites - Sentman - 1995 - Geophysical Research Letters - Wiley Online Library
5. SonotaCo.Network,スプライト談話室SonotaCo.JP :: フォーラムを表示 - スプライト談話室 (Sprites)
6. Astro-HS (2004) 「スプライト観測ハンドブック2005」(8~52ページ)
7. Hayakawa, M., T. Nakamura, Y. Hobara, and E. Williams, 2004. Observation of sprites over the Sea of Japan and conditions for lightning-induced sprites in winter, J. Geophys. Res., 109, A01312, doi:10.1029/2003JA009905
Observation of sprites over the Sea of Japan and conditions for lightning-induced sprites in winter - Hayakawa - 2004 - Journal of Geophysical Research: Space Physics - Wiley Online Library
8. 日本気象学会 スプライト　WTENK7-8 11190.pdf
9. 気象庁　雨雲の動き・雷活動度・竜巻発生確度（ナウキャスト）気象庁 | 雨雲の動き・雷活動度・竜巻発生確度（ナウキャスト）
10. 過去の雷情報　過去の雷情報(落雷) 気象庁 (GPV Weather)
11. 日本気象協会 雨雲レーダー（過去）雨雲レーダー(過去) - 日本気象協会 tenki.jp
12. 日本気象協会 過去の天気図 過去の実況天気図(2025年11月08日) - 日本気象協会 tenki.jp
13. JEM-GLIMS TLEs JEM-GLIMS - Science
14. 吉野正敏 甲斐啓子『日本の季節区分 と各季節の特徴』(1975)
15. J.T. Neubert, M. Rycroft, T. Farges, E. Blanc, O. Chanrion, E. Arnone, A. Odzimek, N. Arnold, C.-F. Enell, E. Turunen, T. Bösinger, A. Mika, C. Haldoupis, R. J. Steiner, O. van der Velde, S. Soula, P. Berg, F. Boberg, P. Thejll, B. Christiansen, M. Ignaccolo, M. Füllekrug, P. T. Verronen, J. Montanya & N. Crosby 「Recent Results from Studies of Electric Discharges in the Mesospher