第 10 回高校・高専気象観測機器コンテスト

流星出現通知システム ver. 3.0 の開発

―流星群の自動観測・通知システムの開発を目指して―

中央大学附属中学校・高等学校　地学研究部
李弘思・佐藤弘一・磯田隼佑・安藤美月・小田美桜・安江華・戸田敬仁

概要

私たちは誰でも容易に流星を観測できるようにすることを目的として「流星出現通知システム」の開発に取り組んでいる（第 8 回および第 9 回気象文化大賞「高校・高専『気象観測機器コンテスト』」にて発表）。これまでの開発では、HRO（Ham-band Radio Observation）による流星自動観測システムの構築、流星出現シグナルの検出手法の開発、流星出現シグナルの検出からデータ出力までの完全な自動化、および定量的かつ、安定したデータの収集と流星出現情報の取得、チャット機能を持ったアプリケーションである「Discord」を用いた流星出現情報の配信に成功した。

今回はこれまでの開発過程で見つかった課題を解決すべく、本システムのバージョンアップを試みた。まず、本システムをより多くの人に利用してもらうために、Discord よりも利用者数の多いメッセンジャーアプリケーション「LINE」を介して流星の出現情報を配信できるようにシステムを改良した。さらに、流星出現シグナルの判別精度の向上を目指して、流星出現シグナルおよびノイズの、深層学習（ディープラーニング）を用いた判定システムを新たに考案した。複数の実証実験により、私たちは流星出現シグナルを従来よりも遥かに高い精度で検出し、より多くの人に流星出現情報をリアルタイムで配信できるシステムの開発に成功した。

本稿では、「流星出現通知システム ver. 3.0」の開発過程とその特徴について報告する。

1. はじめに

一般的に流星電波観測は、特定の周波数の受信が可能な受信機とアンテナを用いて世界中で取り組まれている。これは、流星が大気圏を通過した際に起こる電離現象によって、地上から発信されたある周波数帯の電波が反射されるという特徴を活かした観測手法（HRO）である。この手法で観測された流星データは、流星電波観測用のソフトウェアである「HROFFT」によって画像ファイルとして出力される。また、流星数は流星シグナルの個数または Activity Level （観測したシグナル数と過去 2 週間の同データ平均値との差分）を基準としてカウントされる。流星電波観測には、目視観測とは異なり、時間帯および天候に左右されないという利点がある。しかし、従来の流星電波観測手法は受信機などの機器やシステム等を構築するためのコストが大きく、多くの市民にとって手軽に観測できる手法とはいえない。

そこで私たちは、誰でも容易に流星群を観測できるようにすることを目的とし、「自動観測」および「流星出現情報の速やかな通知システム」の実現を目指してシステム開発に取り組んできた（第 8 回および第 9 回気象文化大賞「高校・高専『気象観測機器コンテスト』」にて発表）。これまでの開発では、HRO による流星自動観測システムの構築、流星出現シグナルの検出手法の開発、流星出現シグナルの検出からデータ出力までの完全な自動化、および定量的かつ、安定したデータの収集と流星出現情報の取得、Discord を用いた流星出現情報の配信に成功した。

一方で、従来の通知システムは Discord というプラットフォームに依存しており、流星出現の通知を受信できる者が Discord の利用者のみに限られるという課題が残されている。さらに、流星電波観測によって得られた音声データから流星出現シグナルを判定する過程では、流星出現シグナルの判定基準値と音声データ中のノイズに認められる不確実性が判定精度に影響する可能性がある。

そこで今回は、「より多くの人へ流星出現情報を配信すること」と「流星出現シグナルの判定精度を向上させること」を目標として、「流星出現通知システム ver. 3.0」の開発を試みる。まず、Discord よりも国内利用者数が多いメッセンジャーアプリケーションである LINE に着目し、LINE を介した通知システムの開発を行う。さらに、多量のデータをコンピュータに学習させ、蓄積したデータ傾向をもとに答えを導き出すことができる深層学習に着目し、この手法を本システムに新たに取り入れることでより高精度な流星出現シグナルの判定を可能にする。

なお、新型コロナウィルス感染症の感染拡大に伴い実測によるデータの収集が限られたため、今回の開発および実証実験には実測データに加えてこれまでの研究・開発にて蓄積されたデータも用いた。

2. 資材

＜ハードウェア＞

・2 素子アンテナ（Comet CA-52HB, 50MHz）	1 本
・物干し竿（エスコ EA951FB57, φ25mm／1650-3000mm）	1 本
・受信機（YAESU 小型 HF ベースステーション FT-450DS）	1 台
・直流安定化電源（CUSTOM DP-3003S）	1 台
・同軸ケーブル（shengocase MP-MP コネクタ 5D-FB, 20 m）	1 本
・コンピュータ（富士通 FMV LIFEBOOK A573/G FMVA03008）	1 台
・音声ケーブル（JVC CN-2033A, 3 m）	1 本
・Arduino（Arduino UnoR3）	1 セット
・ワニロクリップ	4 本
・ジャンパーコード	11 本
・通知受信用端末（Panasonic Let's note CF-SX2ADHCS)	1 台

＜ソフトウェア＞

・Anaconda（2020 年 7 月版）
・Audacity （2.3.3）
・Discord（Stable 70781 [6d2522f]）
・LINE（7.3.1.2631）
・Matplotlib ライブラリ（3.3.2）
・Microsoft Excel（2010 年版）
・Python（Python 3.7.6）
・WaveSpectra（1.5.1）

3. 流星出現通知システムの概要

3-1. 流星出現通知システムのセクション

本システムは、主に 3 つのセクション：1）流星電波観測セクション、2）解析セクション、3）送信セクションで構成される（図 1）。

それぞれのセクションの構成と機能は次の通りである；

1）流星電波観測セクションは 2 素子アンテナ、受信機、直流安定化電源によって構成される。このセクションでは、流星電波観測を自動で行い、観測で得た音声データを Arduino に出力する。

2）解析セクションは Arduino およびコンピュータによって構成される。このセクションでは、Arduino における Fast Fourier Transform ライブラリ（以下、「FFT ライブラリ」とする）を用いて音声データに対して高速フーリエ変換を行う。そして、出力された音声データを解析して流星出現シグナルを検出し、それをコンピュータへと送る。「流星出現通知システム ver. 2.0」では 495 Hz を基準として流星出現シグナルを検出するシステムとなっていたが、バージョンアップした「流星出現通知システム ver. 3.0」では本セクションに深層学習を取り入れた。
なお、フーリエ変換とは、重なり合った音などの波形を周波数成分に分離することである。

3）送信セクションは、コンピュータによって構成される。このセクションでは、Arduino から送られた音声データをテキスト形式に加工し、BOT を通じて各端末のアプリケーション（Discord、LINE）へ送信する。なお、BOT とはある一定のタスクを自動で処理するアプリケーションである。

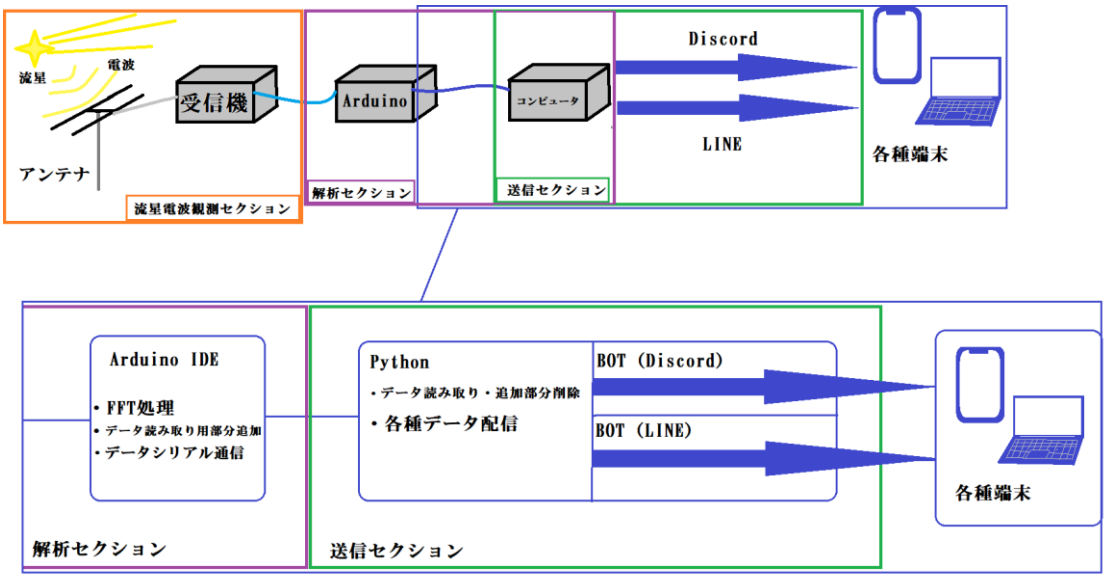


図 1. 流星群の自動観測・通知システムの概要図

上図は本システム全体の概要図であり、下図は解析セクションと送信セクションの詳細を表す。各セクションを構成する機材とその機能は本文中に示した。

3-2. 流星電波観測セクションの機材の設置方法

① 2 素子アンテナを組み立て、同軸ケーブルにつなぐ。
② アンテナをポールに固定し、観測場所に設置する（図 2）。
③ アンテナを送信局のある方角（福井県永平寺町方向）へ向ける。
④ 同軸ケーブルの一端を受信機に接続する。
⑤ 受信機の受信周波数を CW（USB）モードで 53.75510 MHz に設定する。なお、本研究で使用する電波は JH9YYA 福井県立大学アマチュア流星電波観測研究会より福井県永平寺町から 53.75500 MHz で送信されたものを使用する。本観測方法は送信周波数と受信周波数との差を利用して発生させた音を記録する仕組みであるため、受信周波数と送信周波数との間には 10 MHz の差を設定する。
⑥ コンピュータと受信機を接続する。
⑦ 流星電波観測によって得られた音声データを Audacity で録音する。



図 2. 中央大学附属高等学校 1 号館屋上に設置された流星電波観測用のアンテナ

ポールの上端に 2 素子アンテナを固定し、アンテナを福井県永平寺町方向へ向けて設置する。なお、設置場所である中央大学附属高等学校 1 号館屋上は、建物の 8 階に相当し、周辺に電波を阻害し得るような建物は存在しない。

4. 実験I　散在流星観測によって得られた録音データの送受信と LINE による配信シミュレーション

4-1. 実験目的

従来の通知システムは Discord を使用していたが、より多くの人に流星出現情報を配信するため、国内利用者の多い LINE を介して配信する新たな通知システムを開発する。散在流星を観測した際に録音した音声データを解析し、解析したデータを端末に配信する実験とリアルタイムで一連の流れを実行する実験を行う。

4-2. 実験方法

① Arduino とコンピュータを接続した。
② 散在流星観測時に取得した音声データを Arduino に出力した。
③ Arduino への出力と同時に、Arduino の FFT ライブラリを用いて音声データに対して高速フーリエ変換を行った。
④ ③によって得られた音声データのうち、流星出現の検出基準である 495 Hz 周辺に該当する部分（流星出現シグナル）を抽出した。
⑤ 抽出したデータをテキストデータに加工した。また、このときに処理時刻を記録した。
⑥ テキストデータを BOT によって LINE へ配信し、受信端末で配信を確かめた。
⑦ ②～⑥をリアルタイムで作動させた。

4-3. 結果と考察

本システムにおける処理のフローを図 3 に示す。散在流星観測時に取得した音声データから流星出現シグナルを検出し、その情報を BOT によって LINE に配信した（図 4）。配信した情報は処理時刻（日本標準時）と解析後の音声データの音量（dB）である。図 5 と図 6 では、経過時間 40～50 秒に流星出現シグナルを示すピークがみられた。送信側データ（図 5）と受信側データ（図 6）の間では、このピークを記録した際にタイムラグが生じた。また、送信側および受信側のピークの最大値は、それぞれ 186.56 dB および 130.16 dB であり、その差は 56.40 dB であった。このようなピークのタイムラグと最大値における差は、送信側と受信側の処理速度の違いにより生じたものであると考えられる。また、流星出現シグナルを示すピークを除いた平均値は、送信側で 37.25 dB、受信側で 37.24 dB であり、その差は 0.01 dB であった（図 5, 6）。この差は非常に小さく、データの送受信は正常に行えているといえる。

本システムをリアルタイムで作動させたときの送信データと受信データを図 7 に示す。送信画面と受信画面に表示されたデータが一致していたことから（図 7 の青枠部分）、データをリアルタイムで正しく LINE 上に送信できたといえる。

以上の実証実験により、本システムは Discord だけでなく LINE を介しても流星出現情報を配信できることが確かめられた。

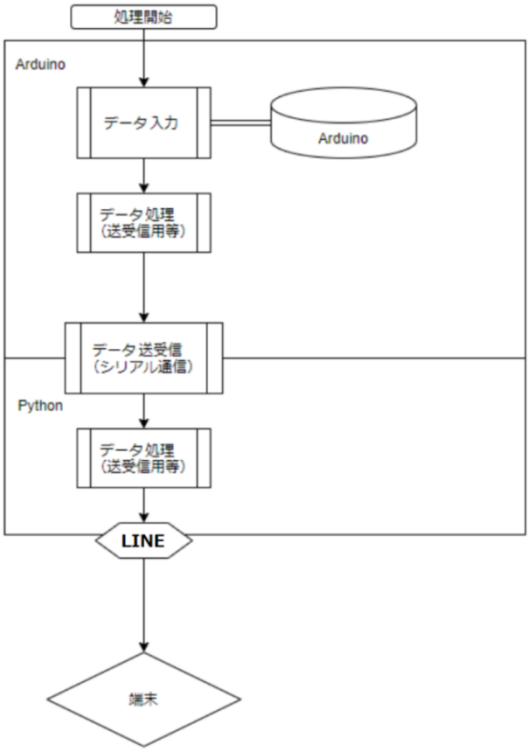


図 3. 処理の流れを示したフローチャート

本システムでは、端末に流星出現シグナルを配信する際に LINE を使用した。バージョンアップ前の「流星出現通知システム ver. 2.0」では、Discord を使用していた。

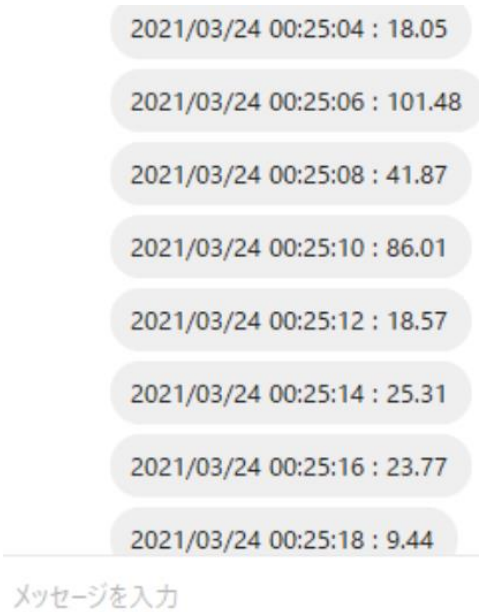


図 4. LINE のデータ受信側画面

データを受信した端末に表示されるメッセージには、処理時刻（日本標準時）と解析後の音声データの音量（dB）がそれぞれ表示されている。

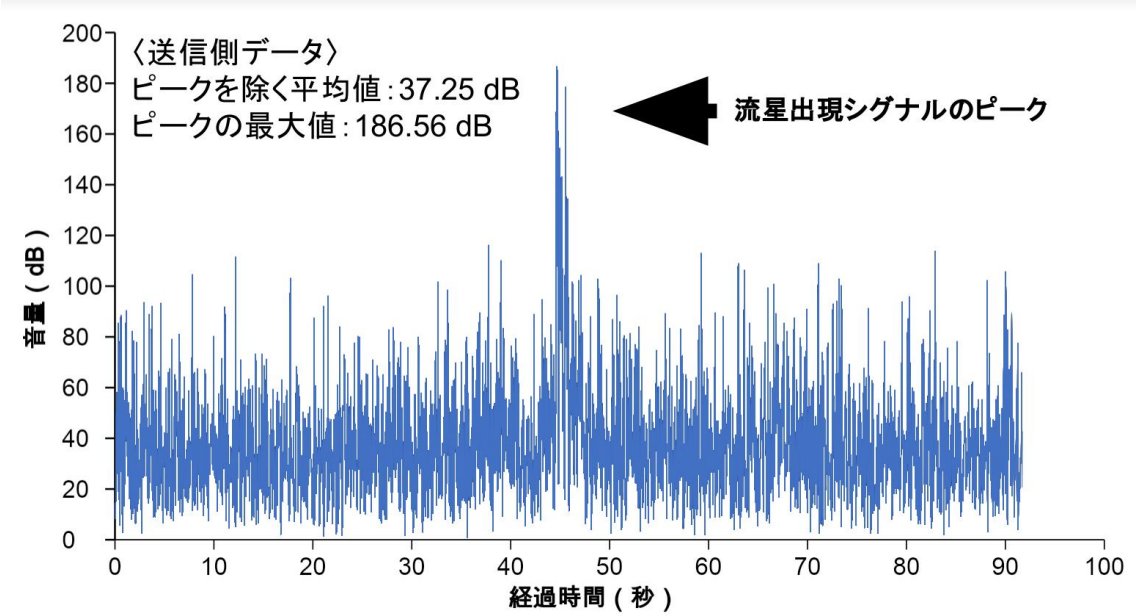


図 5. 送信側データ

散在流星観測時に取得した音声データを送受信した際の送信側データを示す。図の縦軸は音量（dB）、横軸は経過時間（秒）である。図中の矢印は流星出現シグナルのピークを指している。

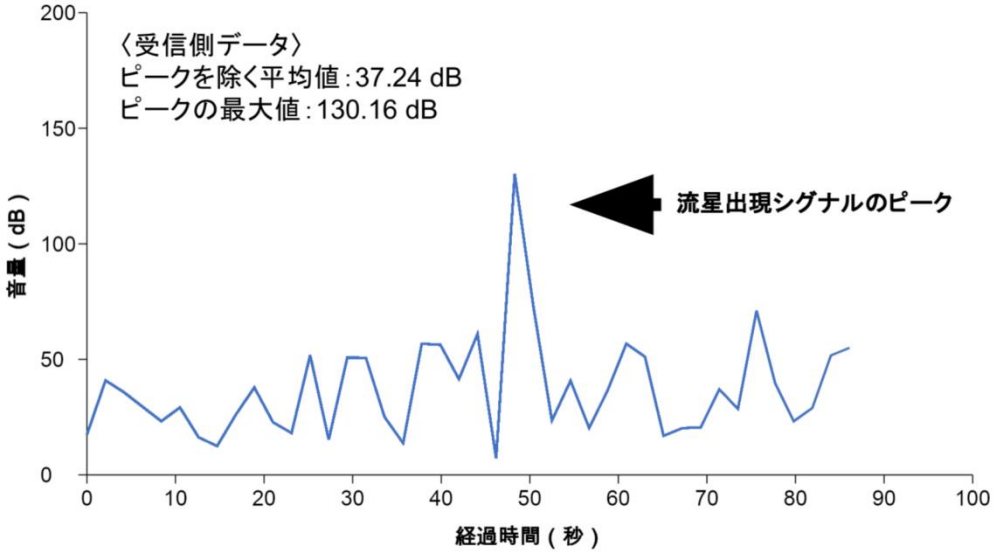


図 6. 受信側データ

散在流星観測時に取得した音声データを送受信した際の送信側データを示す。図の縦軸は音量（dB）、横軸は経過時間（秒）である。図中の矢印は流星出現シグナルのピークを指している。データ送信は一定以下の間隔で行えないため、受信側のデータ間隔は送信側よりも大きくなっている。

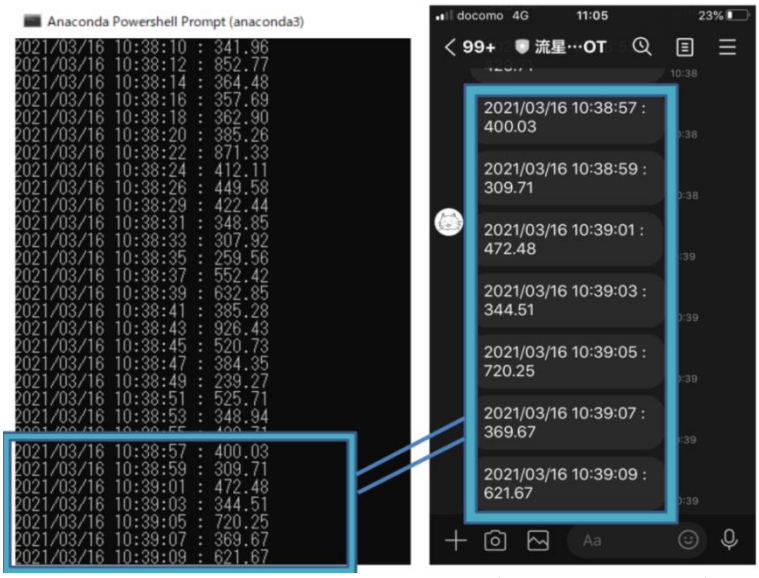


図 7. リアルタイム配信を行った際の送信側データと受信側データの比較

図の左側が BOT のコンソール画面（送信側）、図の右側が端末画面（受信側）である。どちらの画面にも、処理時刻（日本標準時）と解析後の音量（dB）がそれぞれ表示されている。

5. 実験II　録音データを用いた判定シミュレーション①

5-1. 実験目的

これまでの開発過程において、流星電波観測時に発生しているノイズが流星出現シグナルを検出する際に影響を及ぼしている可能性が示唆されていた。そこで、従来の手法（閾値によって流星出現シグナルを検出・判別する）から深層学習を用いる手法に変えることで、流星出現シグナルとノイズをより高精度に判別できるのではないかと考えた。

本実験では、深層学習を用いて流星電波観測時に収集した音声データからスペクトログラム（時間・周波数・音量で構成される 3 次元グラフで、周波数分析を時間的に連続して行うことで算出される）を作成し、流星出現シグナルとノイズを判別する（つまり、流星出現シグナルか否かを判定する）モデルを作成する。これは、深層学習モデルの特徴を活用し、画像の特徴を視覚的に判断することで判別できるという仕組みである。この新たな手法によって、流星出現シグナルの特徴を明確に捉え、より高精度に検出できると予想される。

5-2. 実験方法

① 10 月りゅう座流星群（Draconids）を観測対象として、2021 年 10 月 8 日（金）に流星電波観測を行い、音声データを収集した。観測場所は、中央大学附属高等学校 1 号館屋上（東京都小金井市、図 2）、観測開始時間は 17 時 22 分、連続観測時間は 19 時間であった。

② 連続する音声データを 1 秒ごとに区切り、解析に用いた。流星出現シグナルとノイズを検出するため、ある区画ごとに周波数 495 Hz かつ、音量－30.29 dB 以上を一定以上記録していた部分を抽出した。この音量値（dB）は、音声データから特定周波数における音量を出力するプログラムを通して、流星出現シグナルおよびノイズを多量に含むように手動で決定した音声データの音量を音声信号解析ソフトウェア「WaveSpectra」上で変換したものである。判定システムの動作検証には流星出現シグナルおよびノイズそれぞれのデータが最低一つずつ含まれている必要があり（つまり、$n \geqq 1$）、n 数が十分であれば動作の検証を問題なく行うことができる。

③ ②で抜き出したデータを Python を用いてスペクトログラムに加工し、それぞれ 1 枚の画像ファイルとして出力した（合計 389 枚）。

④ それぞれのスペクトログラムに対して、流星出現シグナルとノイズを手動でそれぞれ判別したデータラベルを作成し、これを学習用データとした。

⑤ ③で作成したスペクトログラムのうち、正答率判定に用いるため一部を除外した。

⑥ ④で作成した学習用データを深層学習モデルに入力し、画像認識についての学習を行い、流星出現シグナルであるかノイズであるかを判別するシステム（判定システム）を作成した。

⑦ ⑥で作成した判定システムについて、⑤で除外したスペクトログラムを用いて実際に判定を行い、その正答率を算出した。なお、本実験における正答率とは、判定システムにデータを入力して判定した結果をデータラベルと比較し、同一である場合を「正」、そうでない場合を「誤」として、その結果の合計を百分率で算出したものである。

5-3. 結果と考察

10 月りゅう座流星群の流星電波観測によって得られた音声データを処理し、周波数 495 Hz かつ、音量－30.29 dB 以上を閾値として抽出した音声データについてスペクトログラムを作成した。その例を図 8 に示す。図 8 では 495 Hz 周辺で音量が大きいことを示しており、流星出現シグナルの検出基準値に概ね一致した。したがって、スペクトログラムが正しく作成されていることが確かめられた。

学習用データを深層学習モデルに入力して作成した判定システムでは、95.57%の正答率を得た（図 9）。よって、－30.29 dB 以上の音量で抽出した音声データについて、流星出現シグナルとノイズを判別できるようになった。

以上のシミュレーション実験により、流星電波観測で得られた音声データについて、深層学習を用いることで流星出現シグナルをより正確に判定できる可能性を見出すことができた。

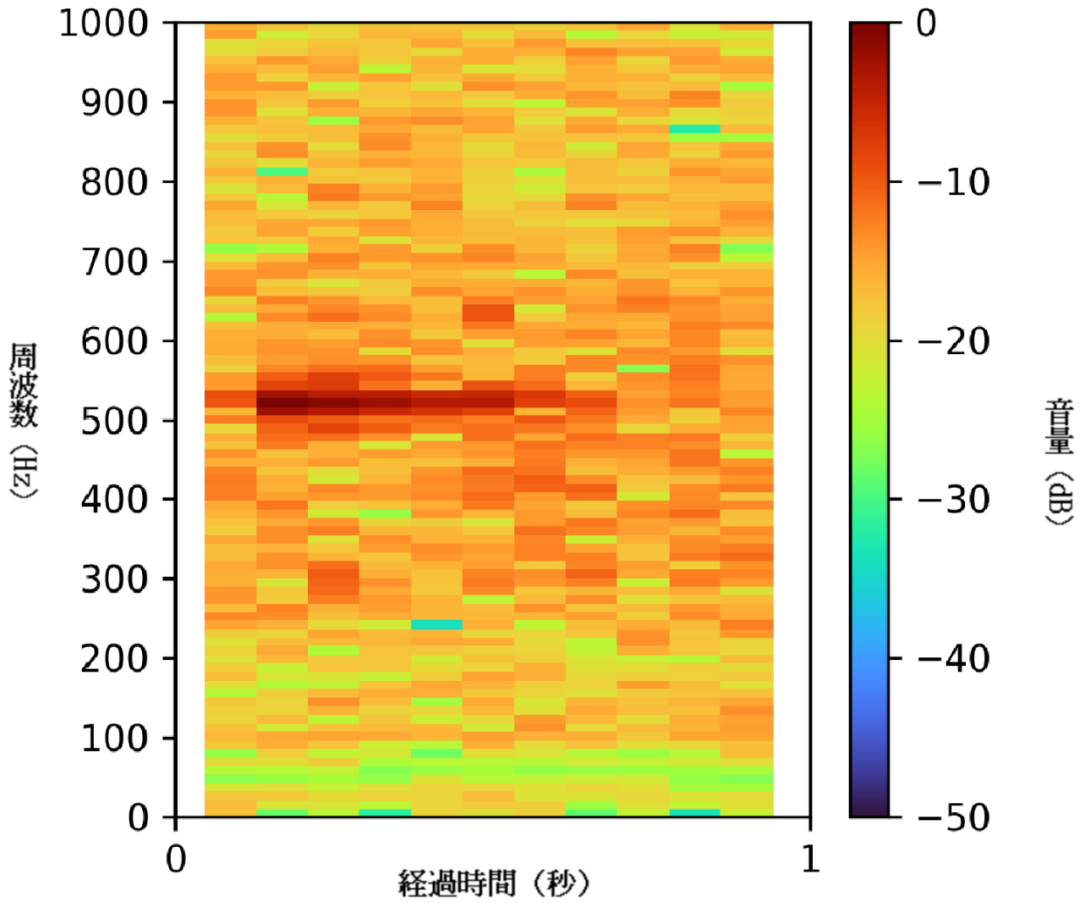


図 8. プログラムによって生成された流星出現シグナル発生時のスペクトログラム
縦軸は周波数（Hz）、横軸は時間（秒）、カラーバーは音量（dB）を示す。図中の色の寒色は暖色に向かうにつれて音量が大きくなることを示している。このグラフにおける音量（dB）は Python における Matplotlib ライブラリ上の数値を基準としている。なお、図中の両端にみられるブランクはプログラム処理におけるデータの欠損を示す。図中の濃い赤色部は流星出現シグナルを示す。

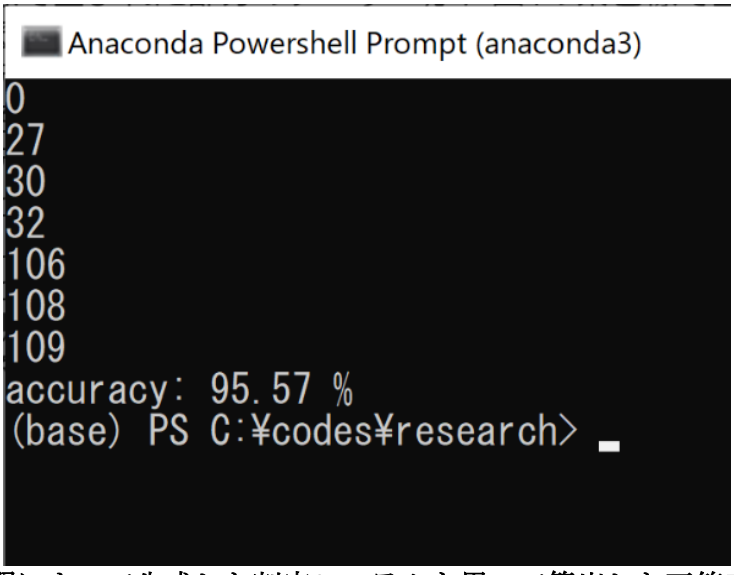


図 9. 深層学習によって生成した判定システムを用いて算出した正答率（実験 II）

学習用データを繰り返し用いる回数であるエポック数は 30 とした。図中の情報のうち「95.57%」は正答率（accuracy）を意味する。なお、その他の数字および文章は進捗度などを示したものである。

6. 実験III　録音データを用いた判定シミュレーション②

6-1.　実験目的

実験IIの結果を踏まえ、流星電波観測によって得られた音声データのうち流星出現シグナル以外のものをすべて「ノイズ」と定めることで、（流星出現シグナルとノイズのそれぞれを判定する基準値を設定せずに）流星出現シグナルのみを検出できる可能性に着目する。実験IIと同様に流星電波観測で録音した音声データを用いてシミュレーション実験を行い、具体的な基準値を設定せずに流星出現シグナルを検出できるかどうか検証する。

6-2.　実験方法

① 10 月りゅう座流星群（Draconids）の音声データを収集した（詳細は実験 II と同様である）。
② 連続する音声データを 1 秒ごとに区切り、Python を用いてスペクトログラムに加工して、それぞれ 1 枚の画像ファイルとして出力した（合計 467 枚）。なお、本実験では流星出現シグナルとノイズのそれぞれを判定する基準値を設定しないため、周波数に関わらず、すべてのデータを用いた。
③ それぞれのスペクトログラムに対して、流星出現シグナルか否かをそれぞれ手動で判別したデータラベルを作成した。
④ ②で作成したスペクトログラムのうち、実験IIと同様、正答率判定に用いるための一部を除外して深層学習モデルに入力し、判定システムを作成した。
⑤ ④で作成した判定システムについて、④で除外したスペクトログラムを用いて実際に判定を行い、その正答率を算出した。なお、本実験における正答率とは、判定システムにデータを入力して判定した結果をデータラベルと比較し、同一である場合を「正」、そうでない場合を「誤」として、その結果の合計を百分率で算出したものである。

6-3. 結果と考察

正答率は 95.57%であり（図 10）、実験IIの結果と同じ正答率となった。従来の流星出現シグナルの検出方法は、周波数を特定（495 Hz）した上で、ノイズとの明確な判別をするために一定以上の音量を有するデータのみを解析対象としていた。しかし、この手法では微弱な流星出現シグナル（音量が小さい流星出現シグナル）を検出することはできなかった。一方で、本実験によって新たに開発した手法では、秒単位で測定したすべての音声データを解析対象として流星出現シグナルを判定できるようになった。この新たな手法は、これまで検出することができなかった極めて微弱な流星であっても流星出現シグナルとして検出することができると期待される。

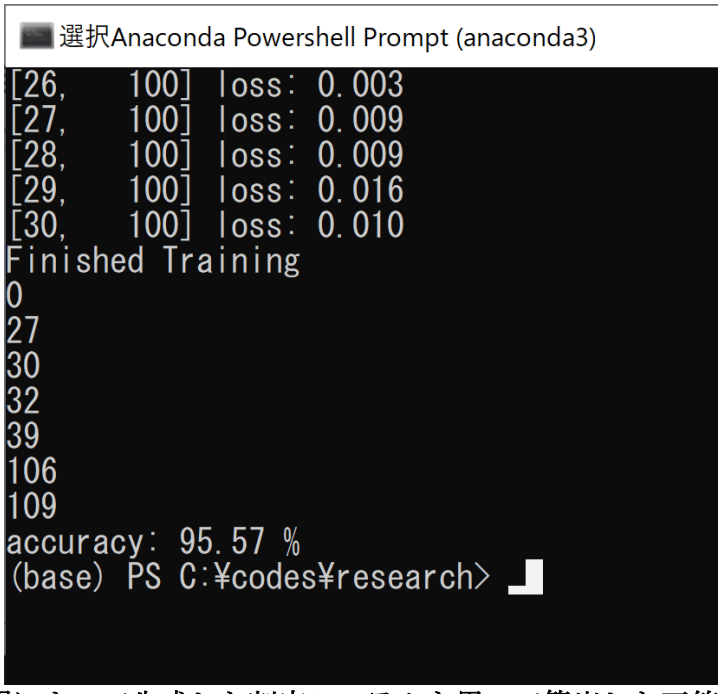


図 10. 深層学習によって生成した判定システムを用いて算出した正答率（実験 III）

学習用データを繰り返し用いる回数であるエポック数は 30 とした。図中の情報のうち「95.57%」は正答率（accuracy）を意味する。なお、その他の数字および文章は進捗度などを示したものである。

7. 実験IV　録音データを用いた判定シミュレーション③

7-1.　実験目的

流星電波観測を行う際、観測対象の流星群や観測の時間帯、周辺の環境などによってノイズのパターンが変化してしまうことが懸念される。このようなノイズパターンの変化は、蓄積された過去のデータから流星出現シグナルを判定する深層学習にとって弱点となりうる。そこで本実験では、深層学習のプログラムを構築したタイミングとは異なる時期に行った流星電波観測のデータを用いて、流星出現シグナルの判定システムの正答率を算出し、その値について考察する。

7-2.　実験方法

① オリオン座流星群（Orionids）を観測対象として 2021 年 10 月 21 日（木）に流星電波観測を行い、音声データを収集した。観測場所は、中央大学附属高等学校 1 号館屋上（東京都小金井市、図 2）、観測開始時間は 16 時 20 分、連続観測時間は 23 時間であった。

② 実験IIと同様のプログラムによる処理（5-2. 実験方法②および③を参照）を行い、スペクトログラムを作成して画像ファイルとして出力した（合計 318 枚）。 なお、実験IIIの手法は音声データ数が多かったため、本実験では採用しなかった。

③ それぞれのスペクトログラムに対して、流星出現シグナルか否かをそれぞれ手動にて判別したデータラベルを作成した。

④ ②で作成したスペクトログラムを実験IIIで作成した判定システム（6-2. 実験方法④を参照）に入力し、実際に判定を行ってその正答率を算出した。なお、本実験における正答率とは、判定システムにデータを入力して判定した結果をデータラベルと比較し、同一である場合を「正」、そうでない場合を「誤」として、その結果の合計を百分率で算出したものである。

7-3.　結果と考察

本実験によって得られた流星出現シグナルの判定システムの正答率は 94.97%であった（図 11）。実験IIおよび実験IIIの正答率はいずれも 95.57%であり、本実験の結果とは 0.6%の差がみられた。この差は、観測対象とした流星群（10 月りゅう座流星群／オリオン座流星群）によってノイズのパターンに違いがあるために生じると考えられる。

しかし、いずれも 94%以上の正答率を有していたことから、流星出現シグナルの判定システムとしては十分な精度であるといえる。したがって、異なる流星群を対象に本システムを利用した場合でも、特定のノイズパターンによる影響を受けることなく判定システムとして十分な精度が維持されることが確認できた。

以上の結果より、今回開発した判定システムは、異なる流星出現シグナルや異なるノイズパターンにも十分に対応できると考えられる。今後、本システムを用いて様々な流星群を対象に流星出現シグナルを判定できると期待される。

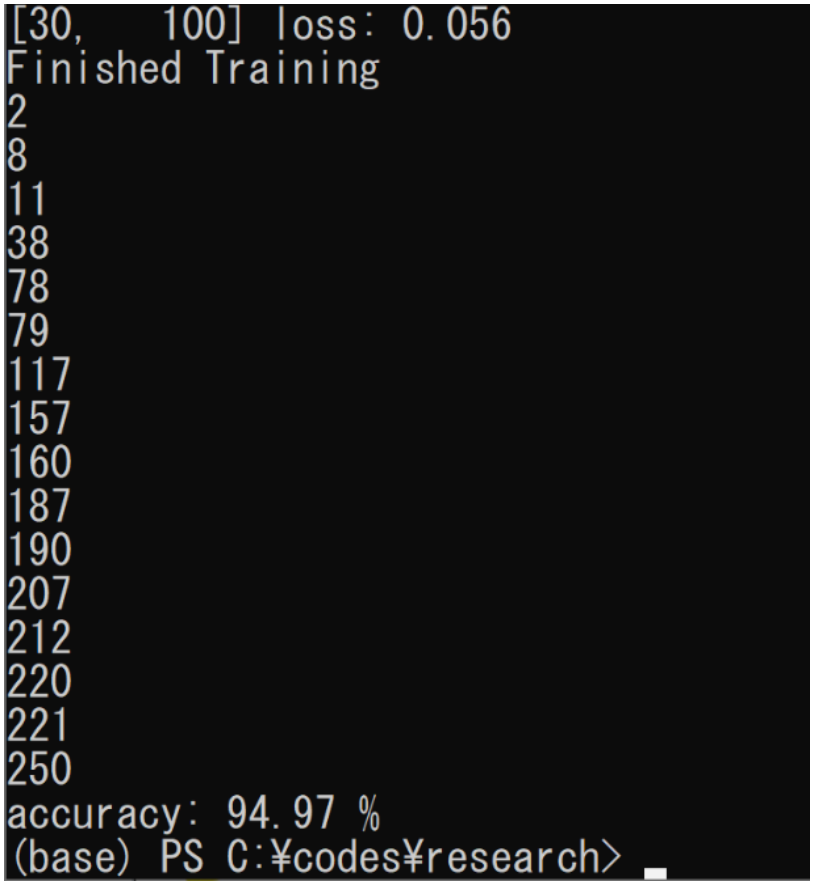


図 11. 深層学習によって生成した判定システムを用いて算出した正答率（実験 IV）

学習用データを繰り返し用いる回数であるエポック数は 30 とした。図中の情報のうち「94.97%」は正答率（accuracy）を意味する。なお、その他の数字および文章は進捗度などを示したものである。

8. 結論

私たちは、誰でも容易に流星群を観測できるようにすることを目的とし、「自動観測」および「流星出現情報の速やかな通知システム」の実現を目指してシステム開発に取り組み、改良を重ねてきた。今回は、「より多くの人に流星出現情報を配信すること」と「流星出現シグナルの判定精度を向上させること」を目標として、「流星出現通知システム ver. 3.0」の開発に取り組んだ。その結果、より利用者の多い LINE を用いた配信システムと、流星出現シグナルおよびノイズの深層学習による判定システムを新たに搭載させることに成功した。

実験Iでは、これまで Discord のプラットフォーム上で行っていた流星出現シグナルの通知を LINE を用いて行えるようにシステムを改良し、動作を確かめた。この新たなシステムにより、さらに多くの人に流星出現情報の配信を行えるようになった。

実験IIでは、流星出現シグナルの検出について従来の手法（閾値によって流星出現シグナルを検出する）から深層学習を用いる手法に変えることで、流星出現シグナルとノイズをより高精度に判別できるシステムを開発し、判定正答率 95.57%という結果を得ることができた。

実験IIIでは、秒単位で測定したすべての音声データを解析対象として流星出現シグナルを判定できるシステムを開発した。特定の周波数かつ、ある一定以上の音量を有するデータのみを解析対象としていた従来の手法よりも解析対象となるデータ数が増えたため、深層学習によって蓄積されるデータ数も増えた。したがって、様々なパターンに対応した判定が可能になり、これまで検出することができなかった極めて微弱な流星も流星出現シグナルとして検出することができるようになる。本実験における判定正答率は実験 II と同様に 95.57%であり、流星出現シグナルを検出するための精度を十分に有しているといえる。

実験IVでは、深層学習のプログラムを構築したタイミングとは異なる時期に行った流星電波観測のデータを用いて判定正答率を算出した結果、判定正答率は 94.97%であった。異なる流星出現シグナルや異なるノイズパターンにも十分に対応できる精度を有しているといえる。

これらの実験およびシステム開発によって、「流星出現通知システム ver. 3.0」は解析セクションと送信セクションにおいて大幅なバージョンアップが施された。

9. 今後の展望

本研究では、より多くの人が本システムを利用できるようにLINEを用いた通知システムを構築し、さらに、深層学習を用いた流星出現シグナルの新たな検出手法を開発した。将来的には、流星群の出現を予測して知らせる独自の『流星群予報』の実現、流星群予報専用のアプリケーションの開発などを行うことによって、専門的な知識を持たない多くの人がより容易に流星の観測を楽しむことができるような改良を目指したい。

また、深層学習を用いた流星出現シグナルの検出をより正確に行うには、より多くの観測データが必要である。観測回数とデータを増やすことで、これまでに学習していないパターンや航空機などから発せられる特殊なシグナルを判別できるようになると考えられる。今後は、深層学習を用いた流星出現シグナルの検出システムとリアルタイムでの解析システムを統合することを目指し、検出精度のさらなる向上を目指したい。

謝辞

本研究では、中央大学附属中学校・高等学校の、平野誠先生（司書教諭／顧問）、伊藤早織先生（博士／委嘱指導者）、田島丈年先生（理科兼任講師／委嘱指導者）、石本貴昭（京都大学／OB）、米村優輝（中央大学／OB）、白石知也氏（技術協力）にご指導を頂いた。ここに深謝の意を表する。また、本研究に協力してくださった地学研究部員に感謝の意を表する。

参考・引用文献

1. 小川 宏（日本流星研究会）「達人が伝授！2002 しし座流星群攻略法電波編」＜https://www.astroarts.co.jp/special/leo2002/hro/index-j.html＞（2020 年 4 月 19 日取得）
2. 国立天文台（NAOJ）「主な流星群」＜https://www.nao.ac.jp/astro/basic/major-meteor-shower.html＞（2019 年 11 月 8 日閲覧）
3. 佐藤弘一・大熊順正（2020）「流星出現通知システム ver.2.0 の開発―流星群の自動観測・通知システムの開発を目指して―」気象文化大賞第 9 回「高校・高専『気象観測機器コンテスト』」報告書 <https://www.wxbunka.com/cms/wp-content/uploads/2017/01/9-29.ryusei_chuo2.pdf>（2021 年 10 月 26 日閲覧）
4. 中村卓司 監修／RMG 編集委員会 編著（2002）『CQ ham radio 増刊流星電波観測ガイドブック』CQ 出版社
5. 米村優輝・佐藤弘一・村上敦紀・椿恵・鈴木涼太・小池正祥・米原万葉（2019）「流星出現通知システムの開発―流星発生の予測と発生情報配信の確立を目指して―」気象文化大賞第 8 回「高校・高専『気象観測機器コンテスト』」報告書（2021 年 10 月 26 日閲覧）
6. 「流星電波観測国際プロジェクト-Radio Meteor Observation」＜http://www.amro-net.jp/hro_index.htm＞（2019 年 11 月 9 日閲覧）
7. 流星電波観測集計センター HRO（流星電波観測）ライブ -BIGLOBE＜http://www5f.biglobe.ne.jp/~hro/Live/index.htm＞（2019 年 11 月 9 日閲覧）
8. Martin Beech（原著）長谷川 一郎（翻訳）（2009）『天体観測の教科書　流星観測編 Meteors and Meteorites』誠文堂新光社