

インフラサウンド観測データを用いた火球の爆発地点の決定とエネルギー推定

1230128 蓮見 佑太 (宇宙地球探査システム研究室)
(指導教員 山本 真行 教授)

1. 背景と目的

インフラサウンドとは周波数 20 Hz 以下の低周波音のことで、津波や土砂崩れ、火球の爆発などの大規模現象により発生する。自然現象のほか、核実験や人工的な大規模事象のエネルギー推定に用いられている。著者の所属研究室ではインフラサウンド観測データのみを用いて小惑星探査機「はやぶさ 2」帰還カプセルの軌道決定に成功し、音響観測のみで飛翔物体の位置決定ができることを確認した(Nishikawa et al., 2022) [1]。

火球とはマイナス 4 等級より明るい流れ星の呼称である。その観測には主に光学観測が用いられている。光学観測は曇天時の観測が困難である。本研究は火球に焦点を当て、火球の爆発により発生したインフラサウンドを用いて火球の爆発地点を決定することを目的とする。インフラサウンド観測データから火球の爆発位置を決定できれば、曇天に影響されず光学観測の補助的手法になると考えた。また火球のエネルギーの推定も行い、インフラサウンド観測データだけで現象を判断するために必要なデータを蓄積することを目的とする。

2. 研究方法

2.1 火球の爆発位置解析方法

本研究では 2 つの火球の爆発によって発生したインフラサウンドを観測したデータを MATLAB で自作したプログラムを用いて解析した。図 1 のように火球が爆発した際に発生したイン

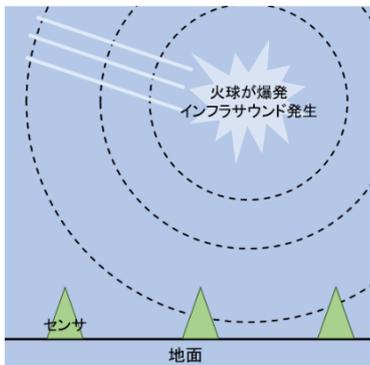


図 1 火球からインフラサウンドが発生しセンサに届くまでの簡略図

フラサウンドを複数のセンサが観測する時刻に差が生じる。その差をもとに火球の爆発位置を決定した。解析条件は、空間を南北方向の距離 1 km、東西方向の距離 1 km、高さ方向の距離 1 km ずつに区切ってできる 3 次元格子点位置と爆発時刻を変数とした。地球の半径を 6400 km、

経度 1 度あたりの距離は 111 km、音速は 310 m/s で一定と仮定した(長沢 工, 1978)[2]。解析手順は、観測が確認できたセンサの緯度経度情報をプログラムに入力、任意の 1 地点を原点としその緯度経度情報も入力した。その後火球が爆発したと考えられる範囲の空間を x,y,z 方向に 1 km ずつの格子状に区切り、どの時刻にどの格子点で火球が爆発したと考えれば観測事実にもっとも近い解析結果を得られるか選択範囲内のすべての格子点で解析した。今回の解析では残差の判断に最小二乗法を用いた。

2.2 火球のエネルギー推定の方法

今回は式(1)を用いて火球のエネルギー推定を行った(Ens et al., 2012) [3]。本来式(1)の変数 v は成層圏の波源から観測点の

伝播方向に沿った風速の平均成分であるが、本研究では簡単のため、東西方向の成層圏(高度 10~50 km)内の風速平均を与えた。それぞれの変数を求め、代入し最終的に W (kt: TNT 火薬質量換算)の値を求めた。

$$\log W = \frac{3}{b}(a - kv) + 3\log R - \frac{3}{b}\log A \quad \dots\dots(1)$$

W : 火球のエネルギー [kt], a : 3.36, b : -1.74, k : -0.0177 [s/m]

v : 成層圏の東西方向の平均風速, R : 音源からの距離 [km]

A : 音圧の peak-to-peak の値 [Pa]

3. 結果

各火球の爆発位置解析結果を表 1 に示し、各火球のエネルギー推定の結果を表 2 に示した。

表 1 各火球の爆発位置解析結果

| | 火球 1 | 火球 2 |
|----|-----------------------------------|------------------------------------|
| 緯度 | 33.3 °N | 34.26 °N |
| 経度 | 135.1 °E | 136.74 °E |
| 高度 | 26 km | 42 km |
| 時刻 | 2020 年 11 月 29 日 1 時 34 分 05 秒 | 2021 年 12 月 16 日 22 時 13 分 01 秒 |

表 2 観測データごとの火球のエネルギー推定の結果

| センサ No. | 火球 1 の エネルギー [kt] | センサ No. | 火球 2 の エネルギー [kt] |
|---------|-------------------|---------|-------------------|
| 14 | 0.409 | 30 | 0.3067 |
| 15 | 2.066 | 31 | 9.3596 |
| 16 | 3.495 | 33 | 0.7414 |
| 18 | 1.895 | 34 | 0.7785 |

4. 考察および結論

多地点のインフラサウンド観測データを用いた火球の爆発位置解析結果は、光学観測での解析結果と比較しても遜色ないものであった。このことからインフラサウンドセンサは光学観測の補助的手法として有用であることが示されたと考える。また得られたインフラサウンド観測データからエネルギー推定値も算出できた。今後は火球を光学的、音響的に同時観測を行い、さらに解析を進めていきたい。単純化した部分が多かったエネルギー推定の精度を高めたい。

参考文献

- [1] Y. Nishikawa, M.-Y. Yamamoto, E. Sansom, H. Devillepoix, M. Towner, Y. Hiramatsu, T. Kazuhisa, K. Fujita, M. Yoshikawa, Y. Ishihara, I. Hamama, N. Segawa, Y. Kakinami, H. Katao, Y. Inoue, P. Bland, "Modeling of 3d trajectory of Hayabusa2 re-entry based on acoustic observations" *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **74**, 308-317, 2022.
- [2] 長沢工, "1977 年 5 月 10 日の火球による空震の解析" *地震研究所彙報*, **53**, 271-280, 1978.
- [3] T.A. Ens, P.G. Brown, W.N. Edwards, E.A. Silber, "Infrasound production by bolides : a global statistical study" *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **80**, 208-229, 2012.