

OSIRIS-REx サンプルリターンカプセルにより発生した インフラサウンドの観測と解析

Observation and Analysis of Infrasound Generated by OSIRIS-REx Sample Return Capsule

1275043 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・目的

本研究では NASA の小惑星探査機 OSIRIS-REx のサンプルリターンカプセル(以下 SRC)が大気圏突入の際に発生させる 20 Hz 以下の音であるインフラサウンドの観測と解析を行った。インフラサウンドの主な発生源である噴火や津波などの自然現象は発生が予測不可能である。発生予測可能なデータとして、SRC のインフラサウンドを観測・解析することはインフラサウンド研究の応用において重要である。今回の観測は国際チーム全体の観測網を考えると地上観測や上空観測など大規模な観測であるが、当研究室が設置したセンサのみに着目すると、数 km 規模の小さな観測網のみである。また観測地が観測対象に対して真下に近いため、音の伝播過程に屈折や反射が少なく直線的な伝播と考えられることから軌道解析に適している。本研究はインフラサウンド観測データを用いて SRC の軌道解析を行うこと、観測対象に対して小規模観測になった際に観測データから解析可能なこと不可能なことを明確にして今後の SRC 観測計画におけるセンサ設置規模の決定につなげることを目的とする。

2. 研究方法

2.1. SRC の軌道決定方法

SRC の軌道と Z 軸を一致させた直交座標を考えると衝撃波面(マッハコーン)を簡単に表せ、解析を容易にすることができる。このような計算方法は一般的に用いられる(Ishihara et al., 2004) [1]ため、本研究もそれに倣う。

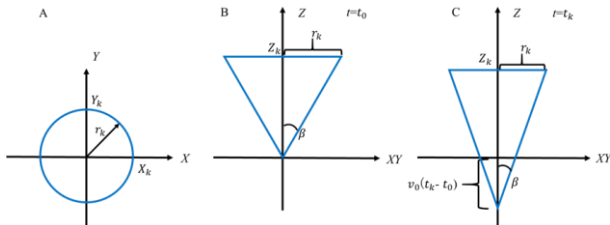


図 1. マッハコーンの外形を簡易的に表した図。

この座標を採用することで、三角錐であるマッハコーンが XY 平面上で $X=0, Y=0$ を中心とする円として簡単に表すことができる(図 1-A)。SRC が時刻 t_0 に $Z=0$ の XY 平面(原点)に到達したとする(図 1-B)。この時、任意の時刻 $t_k (> t_0)$ における XYZ 座標とマッハコーンの関係は図 1-C のように示され、その時のマッハコーンの式は

$$[v_0(t_k - t_0) + Z_k] \tan \beta = \sqrt{X_k^2 + Y_k^2}, \quad (1)$$

と表せる。ここで v_0 は SRC の速度、 β はマッハ角($\sin \beta = \frac{c}{v_0}$)、 c は音速である。さらに実際は地球を平面とした経度・緯度・高度が xyz 軸となる局所平面座標で考えるので回転行列

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma \sin \theta & \sin \gamma \sin \theta & -\cos \theta \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ \cos \gamma \cos \theta & \sin \gamma \cos \theta & \sin \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

を用い変換した。ここで γ は方位角、 θ は仰角、 (x, y, z) はセンサの設置位置、 $(x_0, y_0, 0)$ は SRC が減速しなかった場合に軌道の延長線上で地表面と交差する座標である。式(1)、(2)は $v_0, x_0, y_0, \gamma, \theta, t_0$ の 6 つのパラメータが決まればセンサの位置における観測時刻 t_k を理論的に導くことができる。各パラメータをある範囲で総当たりに計算し、実際の観測時刻との最小二乗法の残差が最小になった条件を SRC の軌道とした。

2.2. 実際の観測データから考えるノミナル軌道の妥当性

当初予測であるノミナル軌道データ(①)にはある時刻 t にお

ける経度・緯度・高度の位置情報が含まれている。センサ設置位置における経度・緯度・高度情報(②)も既知である。まず①と②を地球中心を原点とする球面極座標系として考えると任意の位置は

$$x = (R + alt) \times \cos(lat) \times \cos(lon), \quad (3)$$

$$y = (R + alt) \times \cos(lat) \times \sin(lon), \quad (4)$$

$$z = (R + alt) \times \sin(lat), \quad (5)$$

と表せる。ここで地球の半径を R 、経度を lon 、緯度 lat 、高度 alt とした。また球面極座標系の 2 点間の距離 d は

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}, \quad (6)$$

と表せる。式(6)で求めた距離を音速 c で除算すれば軌道上のある点から地上の観測点に届くまでの時間が求まる。さらに軌道上のある点にいた時刻に伝播時間を加算し地上の観測点に届いた時刻 T_{cal} が求まる。この T_{cal} と実際の観測時刻 T_{obs} を比較しノミナル軌道データの妥当性を検証した。

3. 結果

3.1. SRC の軌道決定結果

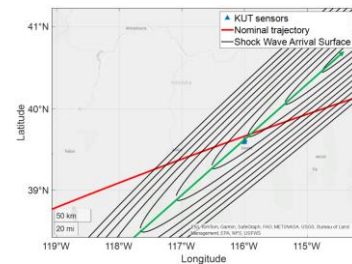


図 2. 解析軌道(緑矢印)を示した図。

ことがわかる。センサの設置分布が狭く観測対象に対して適切でなかったことが原因と思われる。

3.2. ノミナル軌道からの観測値評価結果

ノミナル軌道から計算した地表面への到達時刻の分布を図 3 に示した。カラーバーの値は 7:46:00 を基準として地表に届く時間差を示している。この値が 0 から -2 の間つまり 7:45:58 から 7:46:00 の間に衝撃波音が地表に届くことがわかる。観測データと比較すると同時刻に観測されている。(図 3 右)

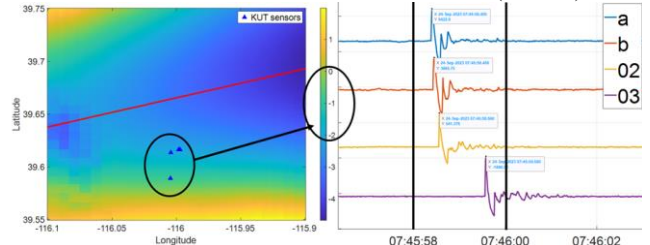


図 3. ノミナル軌道から計算した地表面への到達時刻

4. まとめ

4 地点の観測データのみからの軌道決定は良好な結果が得られなかった。しかしノミナル軌道から観測時刻を計算した結果と実際の観測データの比較では大きな差異がなく観測は時刻精度に問題なく成功したと考える。今回の観測データのみからの軌道決定が難しかった理由は制限された設置範囲と 4 台という観測地点数にあると考えられる。

参考文献

[1] Y. Ishihara, M. Furumoto, S. Sakai, and S. Tsukada, "The 2003 Kanto large bolide's trajectory determined from shockwaves recorded by a seismic network and images taken by a video camera," *Geophysical Research Letters*, **31**, 661–675, 2004.