

# インフラサウンドセンサ搭載 MOMO7 観測ロケットを用いた中層・高層大気中における低周波音計測

## Low-frequency sound measurements using MOMO7 sounding rocket equipped with infrasound sensors

1255044 水野和樹 (宇宙地球探査システム研究室)

(指導教員 山本 真行 教授)

### 1. 序

周波数が 20 Hz 以下の低周波域圧力波のことをインフラサウンドと呼ぶ。インフラサウンドは火山の噴火や、雷、津波、土砂崩れ、ロケット発射等の地球物理学的イベントにより発生し、圧力変化として大気中を音速で長距離伝搬する。高高度での測定が可能となるとインフラサウンドが直線的に伝わるだけでなく、高層大気中で反射して長距離伝搬する現象の理解につながる可能性がある。長距離伝搬の仕組みが解明できれば、大規模自然災害の減災に音の観点から貢献できる。高度 30 km 以上の大気での直接測定手法はロケットを使用する実験によって得られてきた。

### 2. ロケット実験の目的

MOMO7 ロケット実験が 2021 年に行われた。実験用に地上で打ち揚げた花火とロケット内に搭載したブザーの音をロケット内に搭載されたインフラサウンドセンサ 2 台で計測し、ロケット自身から発生する衝撃波を地上のインフラサウンドセンサで計測することで音波伝搬特性の解明を目的とする。

### 3. 3次元の平面波

音波の波長と比較して十分大きなスケールの空間領域における波の伝播を考えると、空間の任意の点の小さな領域ではその波を平面波とみなせるため

$$u(x, y, z, t) = A \cos(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t) \dots \quad \text{式(1)}$$

$$\vec{k} = (k_x, k_y, k_z) = (k \cos \alpha, k \cos \beta, k \cos \gamma) \dots \quad \text{式(2)}$$

と表せる。ここで、波動の変位の最大値(図 1)  $A$  を振幅、 $k$  を波数ベクトル、 $\omega$  は角周波数で  $\omega = \text{const}$  を仮定する。

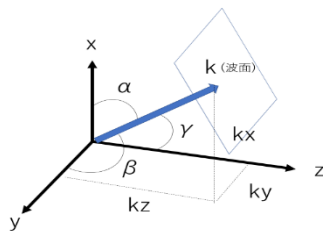


図 1 3次元の平面波

### 4. 花火打ち揚げ概要

本実験では三号玉の号砲花火を用い、表 1 に示す通り、ロケット打ち上げ 240 秒前から打ち上げ 60 秒後までの 300 秒間に 11 回計 21 発を打ち揚げた。花火をロケット打ち上げ前後で爆発させると、計算上はロケット上昇中および下降中に花火の音を計測可能である。

表 1 花火打ち上げ時刻(T:ロケット打ち上げ)

時間[s]	T-240	T-180	T-150	T-135	T-120	T-90	T-60	T+15	T+30	T+45	T+60
花火3号玉	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

### 5. MOMO ペイロードデータ

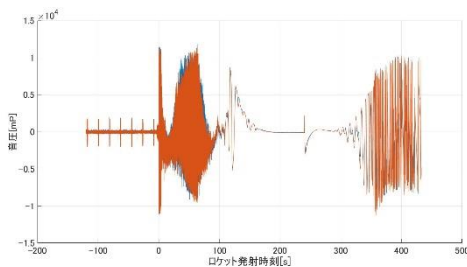


図 2 MOMO7 ペイロードデータ(INF03D)

MOMO7 号機のペイロードと地上局の通信は飛翔後 598 秒後まで正常に行われ、過去に成功した MOMO3 号機のデータと比べると 300 秒長くデータを得ることができ、着水の直前までデータを得ることができた。[1] INF03D センサで取得したデータを図 2 に示す。

ペイロードデータの最初の T-120 秒から打ち上げまではブザーの音を計測しており、その後燃焼が始まり、高度が高いところでは音圧が小さくなっていることがわかる。MOMO7 のペイロードデータには T+240 秒付近に大きな N 型波形が見られることから、高層大気中で何らかのイベントを検出した可能性がある。

### 5. 地上で観測した衝撃波

図 3 は射場付近の地上の全 9 地点でロケット下降時に発生した衝撃波を観測したものである。

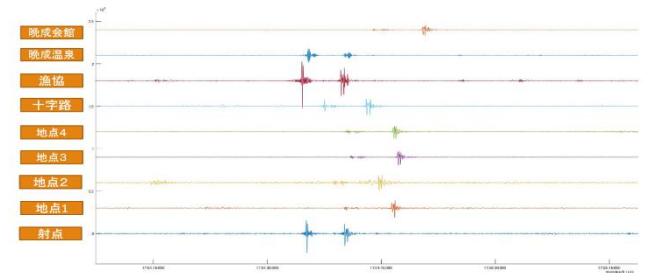


図 3 衝撃波の地上観測データ

### 6. 解析

衝撃波の波源位置予測結果を表 2 に示す。各センサに衝撃波が届いた時刻の差をとセンサ位置座標を用いてグリッドサーチ法により、波源位置を予測した。ロケットが高度 50 km にいるときの位置座標と衝撃波の位置推定結果を比べてみると、誤差が x は 24.2 km、y は 19.6 km あることが分かった。

表 2 基準点(緯度 42°30'0.00"N、経度 143°27'24.06"E)からの衝撃波距離

x(km)	y(km)	z(km)	音速v(m/s)
70km	-52km	50km	303

### 7. 考察と結論

MOMO7 のペイロードデータにある T+240 秒付近の大きな N 型波形は波源位置予測に誤差があるが、ロケット自身が頂点高度 99 km を通過後に再度音速を超えた高度 97 km で発生した衝撃波であると考える。衝撃波が発生するということは、その時のロケットの速度から大気音速と温度がわかる。今回音の観点から高度 97 km では音速が 254.1 m/s、気温が -129°C であることがわかった。NASA が提供している超高層大気モデルは高度 97 km の時、気温 -98.7 °C、音速 264.7 m/s であることから、妥当であると考えられる。花火音を用いた音波伝搬特性の解明を試みたがペイロードデータには花火音が見られず、花火の音圧が十分に足りず減衰してしまったのが原因と考えられる。またペイロード内のセンサの横にブザーを置いてブザー音の計測を試みた。高高度までブザーの音を直接計測することができたが高度毎の音圧の差を明確にすることは出来なかった。原因としては、ブザーの振動が空気中ではなく基板からセンサに伝導していた可能性がある。

### 参考文献

[1] 安河内 祐輔, 大気中での爆風圧の定量評価及び中層・高層大気中における低周波音/可聴音伝搬特性の直接計測, 令和元年度高知工科大学 修士論文, 2020.