

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

Quantitative evaluation of blast pressure in the atmosphere and direct measurement of low-frequency/audible sound propagation characteristics in the middle and upper atmosphere

1225056 安河内 祐輔 (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

地球大気中の気圧、温度、密度、風、および組成(特に湿度としての水蒸気の比率)の変動は、気象学者が把握すべき最も重要なパラメーターである。高高度での測定が技術的に可能になると、気象現象のうち特に太陽エネルギーと大気との相互作用から生じる現象も長期変動の理解のために重要であり、それらは上層大気のさらなる探査によってのみ理解できることを認識した。黎明期の30~100 kmの高層大気に関する知識は、ほぼロケット実験によって得られた。本研究では音波伝搬特性を求めるとともに、音波伝搬路の大気モデルとの比較、検証を行う。

2. ロケット実験の目的

MOMO3 ロケット実験が2019年に行われた。実験用に打ち上げた花火の音やロケット自体の打ち上げ時に発生する可聴音およびインフラサウンドを音源とし、地上観測とロケット搭載機器による直接計測データとの比較から中層~超高層大気における音波伝搬特性を求めるとともに、音波伝搬路の大気モデルとの比較、検証を行うことを目的とする。

3. 音波伝播基礎方程式

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。このような条件下では射線という概念を導入することができる。音線の考え方は音線法といわれ、基礎方程式がある。

ここで、音線の基礎方程式の導出は3次元Hamilton方程式を用いると、

$$\dot{\mathbf{k}} = -\frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{r}}, \dot{\mathbf{r}} = \frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{k}} \quad (13)$$

である。ここで、 $\dot{\mathbf{r}}$ は群速度、 \mathbf{k} は波数ベクトル、 ω は角周波数かつ $\omega = \text{const}$ を仮定する。

4. 花火打ち揚げ概要

本実験ではロケット打ち上げとは別にインフラサウンド、音源を人工的に作るため花火の打ち揚げを行った。花火を打ち揚げてロケット飛行中に INF03D が花火音を計測することで地上から上空までの音波伝搬路を予測できる。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。花火打ち上げ条件は、 $T=0$ をロケット打ち上げ時刻として、 $T-90$ s~ $T-30$ s まで15 s 間隔で計5回打ち揚げた。さらにロケット打ち上げ後 $T+105$ s~ $T+165$ s まで15 s 間隔で計5回花火を打ち揚げた(表1, 図1)。

表1 花火情報

時間 [s]	T-90	T-75	T-60	T-45	T-30	T+105	T+120	T+135	T+150	T+165
花火種類	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
花火機銃 (MOMO3)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

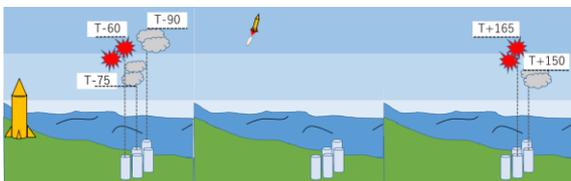


図1 花火概念図

5. MOMO ペイロードデータ

MOMO3 のペイロードと地上局の通信は飛行後 282.5 秒間行われ、高度 0~113 km のデータを取得した。INF03D で取得したデータを図2に示す。

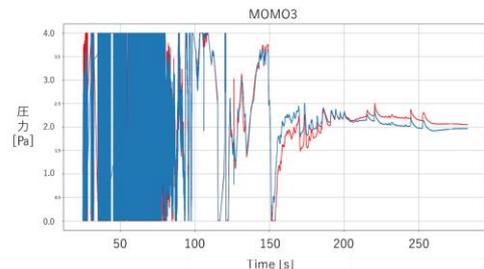


図2 MOMO ペイロードデータ(INF03D)

MOMO3 のペイロードデータには急激な変動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。ペイロードデータの最初の $T+120$ 秒はロケット燃焼音をセンサが計測しており、一部の時間帯では値が完全に飽和しサチュレーションしている。センサの値は $T+120$ 秒まで激しく変動しており、その後 $T+200$ 秒にかけて、徐々に値の変動が小さくなっている。 $T+200$ 秒以降に4つの特徴的信号をとらえた。

6. 解析

温度、風の高度分布を考慮したイベント検出予想時刻を、表2に示す。基本的に温度分布は音のスカラー量を変化でき、風はベクトル量を変化させることが可能である。風を考慮すると3章の射線の概念によってロケットとイベントの関係を算出した。

表2 イベント検出予想時刻(温度、風を考慮した場合)

イベント	イベント検出予想時刻1	イベント検出予想時刻2
花火 (T-90)	T+144.52~144.64	T+271.96~272.41
花火 (T-75)	T+137.14~137.62	T+279.46~279.91
花火 (T-60)	T+130.81~131.26	T+285.88~286.27
花火 (T-45)	T+125.05~125.5	T+291.46~292.06
花火 (T-30)	T+119.74~119.8	T+297.25~297.37
ロケット打ち上げ音	T+108.25~108.37	T+307.78~308.23

7. 考察と結論

MOMO3 実験は約 $T+200$ 秒まで衝撃波をペイロード内のセンサが計測している可能性があり、 $T+200$ 秒以降の4つの波形は、射線(花火音)が上空で温度、風の急激な変化などで屈折し、その音をセンサで計測した可能性がある。

MOMO3 では、花火音による音波伝搬特性の解明を試みた。解析に用いた手法は、音源予測に有効であると結論づける。しかし、解析に必要な温度、風の情報は平均値であり、ロケットを打ち上げた時の高度毎のパラメーターではない。1回のロケット実験データでは、音源の予測はできてその明確な特定には至らなかった。

参考文献

[1] 木原大城, S-310-41号ロケット搭載PDIの開発と中層・高層大気中における音波伝搬特性の直接計測, 平成25年度高知工科大学卒業研究報告, 2013.