

S-310-41/PDI による高層大気中の音波計測と真空チャンバ内模擬実験との比較

木原大城^{#1}、山本真行^{#1}、畠山彩乃^{#1}、真鍋雄大^{#1}、森永隆稔^{#2}、古本淳一^{#3}

#1 高知工科大学、#2 北海道大学、#3 京都大学 生存圏研究所

1. はじめに

高層大気中における音波伝搬路は基本的に温度場と風速場に依存しており、主な大気モデル(MSIS)により導出可能であるが、詳細な音波伝搬の解明には至っていない。(Sutherland et al., 2004)。この領域での実測は、比較的難しく過去の実験例も極めて限られている。1960年代には、観測ロケット搭載の火薬を爆発させ地上の複数地点における音波伝搬時刻から温度と風速の計測を行ったグレネード法(Stroud et al., 1960)が実施され、1990年代には低周波音発生装置により地上から100 Hz帯の低周波音を高層大気に向けて送り大気疎密を発生させMUレーダー(Middle and Upper Atmosphere Rader; 中層・高層大気観測レーダー)で観測を行うRASS(Radio Acoustic Sounding System)による結果が報告されている(Tsuda et al., 1994)が飛翔体を用いた直接的な高層大気の音波計測はこれまで実施されてこなかった。

2. 目的

本研究では、S-310-41号観測ロケット搭載音波伝搬特性計測装置PDI(Propagation Diagnostics in upper atmosphere by Infrasonic/Acoustic waves)を用いて中間圏・下部熱圏の音波伝搬特性を世界で初めて直接計測し、高度プロファイルを取得するとともに、地上設置センサ群にてインフラサウンド(周波数20 Hz以下の可聴低音)と可聴音(同20 Hzから20 kHz)の同時観測を行うことでインフラサウンドと可聴音の3次元長距離音波伝搬路の解明を目的とする。さらに地上設置MUレーダー・RASS用低周波音発生装置から音波を上空に送出し、飛翔中のロケットで観測するとともに、ロケット燃焼時の燃焼音、ノズコーン(NC)開頭およびメインペイロード分離時の火薬爆発音を音波源として搭載用マイクにより計測することで音速、大気温度の算出を行うことを目的とする(森永, 2012a)。

3. PDIおよびS-310-41号ロケット実験の概要

搭載機器PDI(図1(a))は、音波源となるスピーカー、検出器である3台のマイク、音波制御などを行うエレキ部、および圧力センサにより構成される(森永, 2012b)。スピーカーからは出力電力1 Wの7周波(10 Hz、20 Hz、50 Hz、100 Hz、200 Hz、500 Hz、

1000 Hz)の正弦波および無音を0.2秒刻み計1.6秒の音波として繰り返し送出しPDIマイクにより計測、ならびにロケット燃焼時の燃焼音、NC開頭およびメインペイロード分離時の火薬爆発音を音源として観測を実施した。また、地上からはロケット打ち上げ前よりRASS用低周波音発生装置から周波数50 Hz、100 Hzの2周波を出力120 dBにて1秒ずつ送出後、3秒間の無音を含む送出パターンで計5秒間の音波を繰り返し送出し、ロケット飛翔中にPDIマイクによる観測を試みた。

実験手法(図1(b))としては、打上げ前よりPDIスピーカー送出音の送信を開始し、PDIマイクより計測、同時にPDI圧力センサで気圧・温度を計測、打上げ10分前より地上設置RASS用低周波音発生装置から音波の送出を実施した。ロケット飛翔開始後は、PDIマイクで打上げ直後からしばらくはロケットモータ燃焼音の計測、その後はPDIスピーカー送出音、地上送出音波、NC開頭およびメインペイロード分離時の火薬爆発音の計測を、メインペイロード分離後の姿勢擾乱の影響等によりテレメトリが受信困難となるまで実施した。また、地上6地点にてインフラサウンドセンサ、ICレコーダー、圧力計を設置、ロケットモータ燃焼音を音波源とするインフラサウンドならびに可聴音の観測を実施した(木原, 2013)。

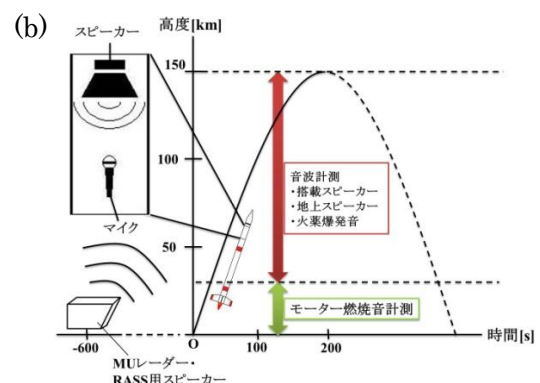


図1(a) PDI(左から圧力センサ、サブマイク2、エレキ部、スピーカー、メインマイク)、(b)実験概要図

4. 真空チャンバによる希薄大気中での模擬実験

PDI の搭載を行うにあたり高知工科大学における小型真空チャンバと宇宙科学研究所における大型スペースサイエンスチャンバを用いて希薄大気を模擬した実験を実施した(図 2(a))。実験手法(図 2(b))としては、PDI スピーカーとマイクをロケット搭載時と同等の距離でチャンバ内に配置し、希薄大気を伝搬した PDI スピーカーより送出した音波を PDI マイクで計測した。計測された音波は、真空チャンバの外部に設置した PC で録音した。

計測された音波の解析から、気圧の低下に伴って、信号強度が低下していることを確認することができた。このことから、PDI により希薄な大気中で音波を計測することが可能であることを確認でき、実際の地球高層大気中での直接計測により取得されたデータと比較を行うための重要な基礎実験データを取得できた。

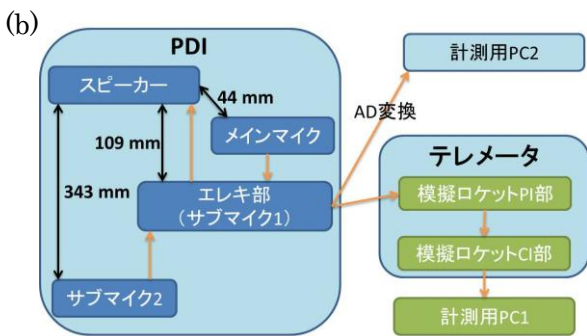
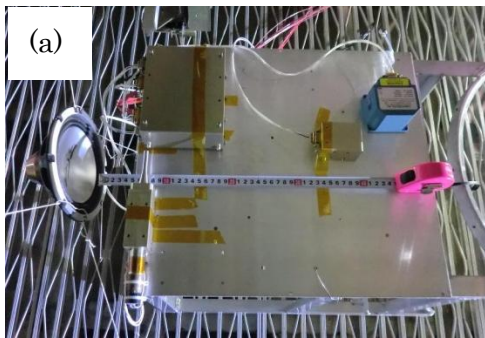


図 2 (a)希薄大気を模擬した実験、(b)実験概要図

5. 飛行実験の結果

2012 年 8 月 7 日 16:30 (JST)、JAXA 内之浦宇宙空間観測所 (USC/JAXA) より観測ロケット S-310-41 号機が打上げられた。我々の搭載機器 PDI は、モータ燃焼終了後の約 34 秒後(高度約 35 km)から PDI スピーカーからの出力を確認でき、最高高度 150 km に到達後も正常に動作した。姿勢擾乱によりロケットテレメトリが受信困難となるまで PDI スピーカーからの出力音を確認することができ、飛行中に実施されたノーズコーン開頭およびメインペイロード分離時の火薬爆発音についても観測を行うことができ

た。また同時に、地上 6 地点の設置センサ群ではロケットモータ燃焼音を音源とするインフラサウンドならびに可聴音の観測に成功した。地上より送出した音波については PDI マイクより取得したデータからは確認することが出来なかった。

PDI マイクにより取得したデータを波形化したものを図 3 に示す。図 3 の波形は、打上げ約 47 秒後から 20 秒間の間に取得した波形である。この 20 秒間にヨーヨー展開と NC 開頭が実施され、この図からそれらにより波形が変動したことを読み取ることができた。取得データを用いて PDI スピーカー出力音を解析したものを図 4 に示す。搭載された 3 台のマイクにより PDI スピーカー出力音を打上げ約 35 秒後からそれぞれ確認することができた。メインマイクにより取得された音波からは気圧(高度)の変化により PDI スピーカーからの出力音が徐々に減衰していることを明瞭に読み取ることが成功した。2 台のサブマイクにより取得された音波からは気圧の変化に伴って出力音が徐々に減衰している様子は確認できなかったが、大気圧状態 (1×10^5 Pa) 時と比べてロケット飛行中に取得された音波の信号強度は大きく減衰していることを確認することができた。

本実験で PDI マイクにより取得した音波伝搬特性と打上げ前に行った希薄大気模擬実験により取得したデータとの比較を行った(図 5)。それぞれ本実験時の気圧状態に近い模擬実験時の計測データと比較した。メインマイクで取得した音波は、大気圧状態では模擬実験時と同等の信号強度を確認できた。気圧が 581 Pa、116 Pa 時の音波は、模擬実験時よりも信号強度が低いことが確認できた。

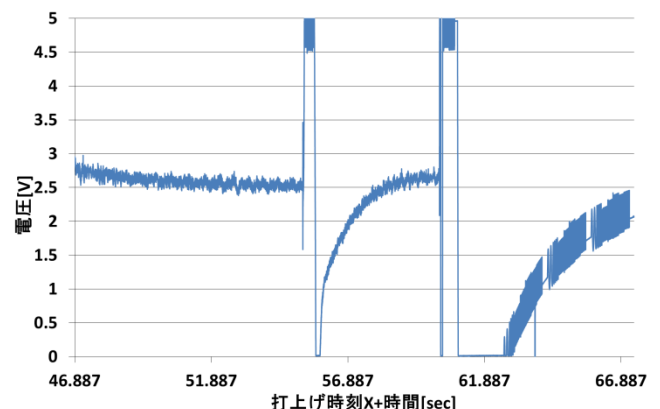


図 3 PDI マイクにより取得した波形

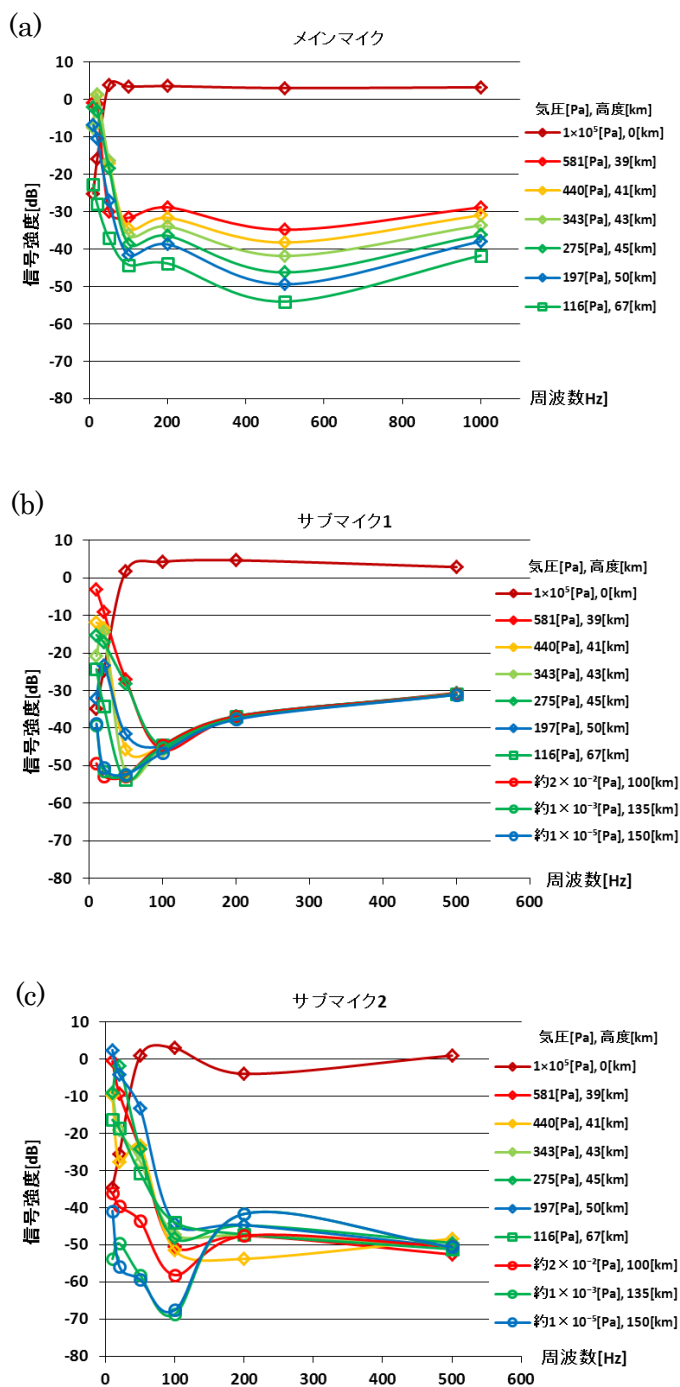


図 4 PDI マイクにより取得した音波伝搬特性
(a)メインマイク、(b)サブマイク 1、(c)サブマイク 2

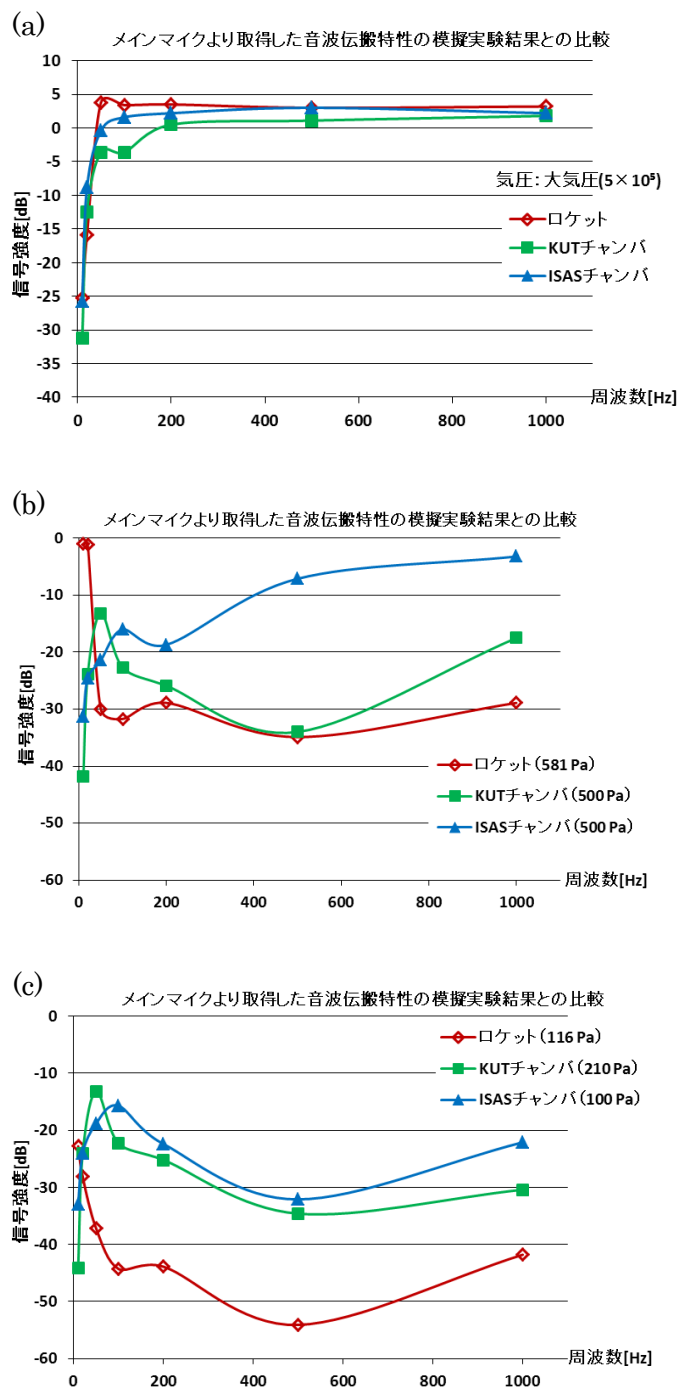


図 5 音波伝搬特性の模擬実験結果との比較
各気圧状態:(a)大気圧、(b)約 500 Pa、(c)約 100 Pa

6. まとめ

S-310-41号ロケットに搭載したPDIは、高度約35 kmより最高高度150 kmに到達まで正常動作し、世界初となる中間圏・下部熱圏における音波伝搬特性プロファイルの直接計測に成功した。

PDIスピーカー出力音の計測では、メインマイクは高度約76 km(気圧約30 Pa)まで、サブマイクは当初の予測を超え、最高高度150 km到達時の希薄大気中も含めロケット下降時にテレメータロックオフされるまで計測に成功した。メインマイクにより計測された同出力音の音波伝搬特性から、気圧の低下(高度の上昇)に伴い信号強度が徐々に減衰していることを確認することができたが、サブマイクにより取得した出力音からは徐々に信号強度が減衰する様子を確認することは出来なかった。真空チャンバを用いた希薄大気を模擬した実験では、真空チャンバの動作音、外部からの振動などの影響を大きく受けたことにより信号強度が直接計測により取得した信号強度より大きくなったことが考えられ、実際の飛翔環境は、はるかに静穏であった。

今回、地上より送出した音波は、PDIマイクより取得したデータからは確認することは出来なかった。ロケット飛翔中の伸展物展開用の実施した火薬点火により発生した火薬爆発音の計測では、すべての動作音の計測に成功した。また、地上でのロケット打上げに伴うモータ燃焼音の観測は、射点から13 km以内に設置した全6地点で可聴音もしくはインフラサウンドの観測に成功した。これらの詳細な結果については、木原(2013)、畠山(2013)を参照されたい。

参考文献

- [1] Sutherland, Louis C., Bass, Henry E., Atmospheric absorption in the atmosphere up to 160 km, *J. Acoust. Soc. Am.* **115**(3), pp.1012-1032, 2004.
- [2] Stroud, W. G., W. Nordberg, W. R. Bandeen, F. L. Bartman, and P. Titus, Rocket-Grenade Measurements of Temperatures and Winds in the Mesosphere over Churchill, Canada, *J. Geophys. Res.*, **65**(8), 2307-2323, 1960.
- [3] Tsuda, Toshitaka., Adachi T., Masuda Y., Fukao S., Kato S., Observations of Tropospheric Temperature Fluctuations with the MU Radar-RASS, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**, 50-62, 1994.
- [4] 森永隆稔, 中層・高層大気における音波伝搬特性計測用ロケット搭載装置の開発, 平成23年度高知工科大学大学院特別研究報告, 2012a.

- [5] 森永隆稔, 山本真行, 阿部琢美, S-310-41号搭載音波伝搬計測装置PDIの開発, 平成23年度スペースプラズマ研究会, 2012b.
- [6] 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24年度高知工科大学卒業研究報告, 2013.
- [7] 畠山彩乃, ロケット発射時のインフラサウンド多地観測とデータ観測ソフトウェアの開発, 平成24年度高知工科大学卒業研究報告, 2013.