

修士論文

火星表層模擬環境および地球成層圏下部実大気中での

音波特性の実験的検証

Experimental verification of sound characteristics in simulated

environment of Martian surface and real lower stratosphere of the Earth

報告者

学籍番号: 1205071

氏名: 藤津 裕亮

指導教員

山本 真行 教授

平成 30 年 2 月 12 日

目次

第 1 章 はじめに	1
1.1 背景	1
1.1.1 火星探査の歴史	1
1.1.2 インフラサウンドを利用した火星観測	1
1.1.3 火星大気観測に向けたマイク駆動実験	2
1.1.4 BEXUS プロジェクトについて	3
1.2 目的	4
第 2 章 火星大気における音波伝搬	5
2.1 火星の大気構造	5
2.2 音波とインフラサウンド	5
第 3 章 火星大気模擬実験	7
3.1 JAXA での音波伝搬実験	7
3.1.1 実験概要	7
3.1.2 使用機器	9
3.2 気球観測に向けた JAXA での音波伝搬実験	11
3.2.1 実験概要	11
3.2.2 使用機器	14
3.3 スウェーデンでの高層大気中音響実験	14
3.3.1 実験概要	14
3.3.2 地上実験	18
第 4 章 解析結果	20
4.1 JAXA での音波伝搬実験の解析	20
4.1.1 音速の導出	20
4.2 気球観測に向けた JAXA での音波伝搬実験の解析	23
4.2.1 音速の導出	23
4.2.2 振動・回転がマイクに及ぼす影響の評価	26
4.3 気球実験の解析	32
4.3.1 音波伝搬特性	32
4.3.2 地上実験	34

第 5 章 評価と考察	38
第 6 章 結論	43
謝辞	44
参考文献	45
付録	46

第1章 はじめに

1.1 背景

1.1.1 火星探査の歴史

火星探査の歴史は長く、1960年代より続いてきた。旧ソ連が先導し、マーズニクス1号、2号、スプートニク24号など数多くの火星探査ミッションが行われてきたが多くの失敗と成功を重ね、1973年にマルス3号探査機により火星着陸に初成功した。その後、1975年に米国のヴァイキング1号、ヴァイキング2号によって初めて地上の鮮明な写真と気温や気圧などのデータの取得に成功した。約十年の停滞ののち現在では米国 NASA の火星探査ローバー「キュリオシティ」による詳細な火星探査が行われるようになった。今日まで長い時間をかけ、多くの火星に関する表層および大気データが蓄積され火星がどのような惑星なのかがわかり始めてきた。それに伴い、火星環境は人類が住むには苛酷な環境であることが分かってきた反面、生命が誕生する可能性を持つ水の存在も示唆されている。しかしながら、これだけの情報の蓄積がありながら、火星大気中での音波の観測は、計画はあったものの未だ一度も行われていない。2020年代にも火星探査機の打ち上げ実験が予定されており、探査用ローバーに本研究を反映して設計・開発するマイクを搭載することで音波観測を行い、火星探査において画像による撮影可能範囲外での現象の遠隔観測や火星大気の温度場、音速場、大気密度、大気組成などの物理量の推定が可能となる。つまり、大気の変動を伴う多岐にわたる現象を音波観測という一つの手法で観測することが可能となるとともに、春先の季節に発生するといわれるガス放出現象など最近注目され始めた火星地表面活動にもフォーカスしたりリモートセンシングに応用できると期待される。

1.1.2 インフラサウンドを利用した火星観測

自然現象の多くは専用に開発された探査機器を搭載することにより、目的に合致したものとしてその現象の存在や特性を確定させることができる。しかし音波観測では観測した波形から音源となった現象を断定することは難しい。そこで用途を長距離伝搬する可聴周波数下限 20 Hz 以下の音であるインフラサウンド帯域の観測に特徴付けることで、大気の揺れから現象の推定と大気中伝搬プロセスを計測することが可能となる。また、可聴音を観測することで他の観測機器が捉えた現象の発生の裏付けを行うことができる。

火星の多くの地域では強大な局所砂嵐「ダストデビル」あるいは全球的な砂嵐「ダストストーム」が度々現れ、地球上の火山雷のように微粒子の摩擦・帯電により雷が発生すると提唱されている。しかしこの雷の存在は従来の着陸機搭載の科学計測機器では確認されておらず、今後の調査によって明瞭なものになっていくだろう。

これまで実績のあるインフラサウンドセンサとして、Chaparral Physics 社製の Model25 と ParoScientific 社製のナノバロメーター(6000-16B)がある。新型の国産インフラサウンドセンサとして

株式会社サヤ製インフラサウンド津波センサー ADX II-INF01B を共同開発した著者所属の研究
室では、津波の発生検知やインフラサウンドを伴う物理現象の観測を、高知県内を中心に行っ
ており、今後は日本の太平洋沿岸部周辺への設置を進める計画である。

1.1.3 火星大気観測に向けたマイク駆動実験

これまでの研究において、コンデンサマイクと MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)マイク
を用いた火星模擬環境下比較実験を行った(藤津, 2016)。どちらのマイクが火星大気において適
しているかを比較した結果、7 hPa, -120°C 条件の苛酷条件下において両者ともに動作したもの
の低圧下での駆動と低周波受音特性においてはコンデンサマイクが優れた特性を持っていることが
分かった[12]。各気圧条件における S/N 比と常温・大気圧で 0.1 Hz を測定したときのコンデンサ
マイクと MEMS マイクを比較したデータを図 1、図 2 にそれぞれ示す。試験に供したサンプルにおい
ては火星大気条件下での駆動にはコンデンサマイクが適しているという結果となった[1]。-60°C に
おけるコンデンサマイクの結果は測定時の誤差とし、-120°C の低温で MEMS マイクよりコンデンサ
マイクの S/N が優れていることより温度試験としての結果に影響はないと判断した。

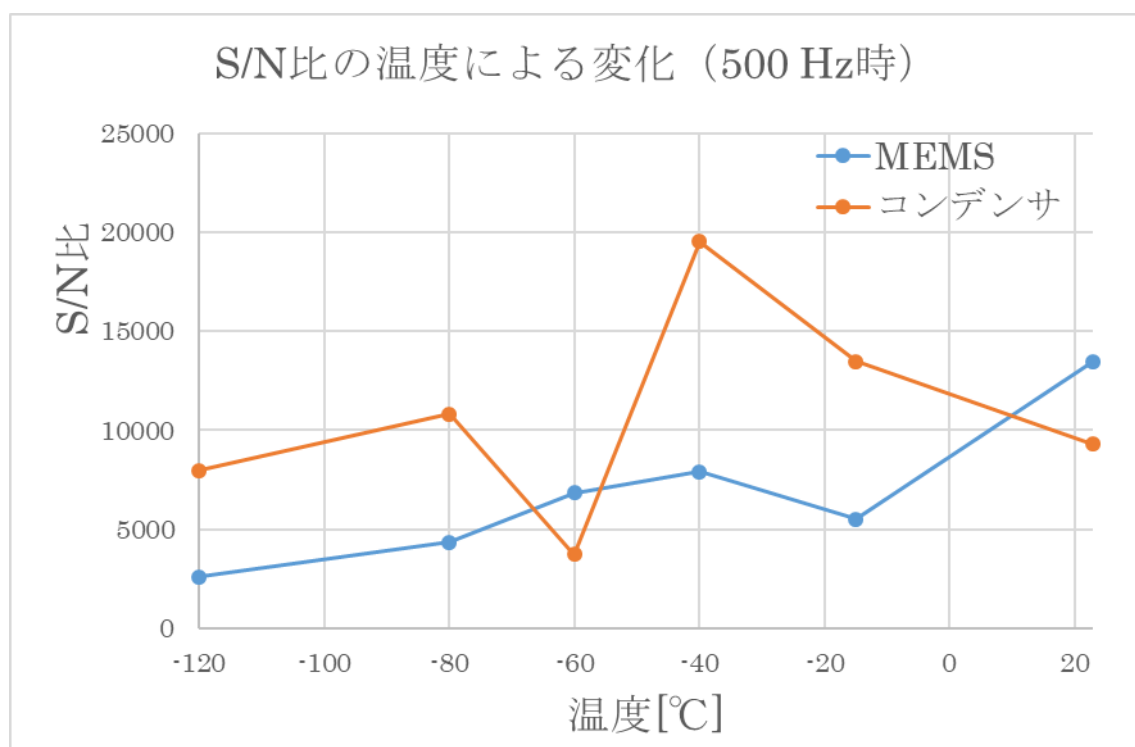


図 1. 500 Hz での S/N 比の温度特性比較[1]

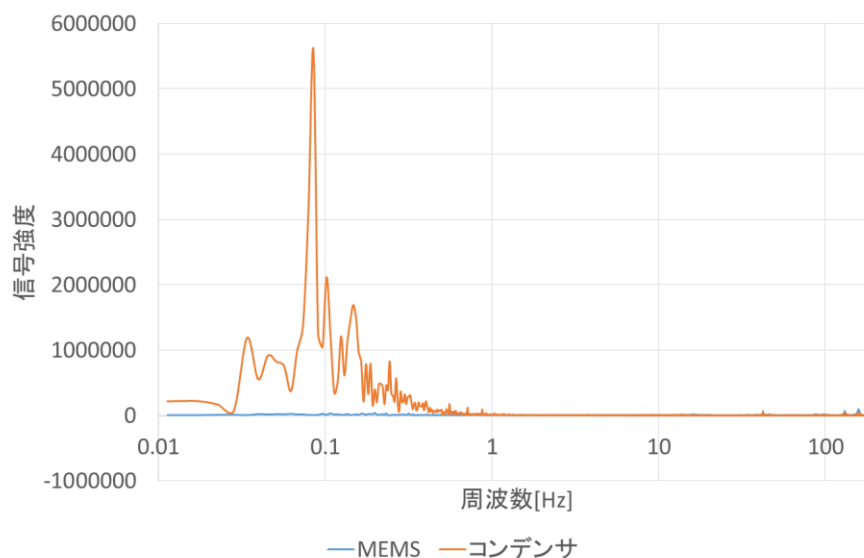


図 2. 0.1 Hz 付近の圧力波に対する周波数特性[1]

図 2 より、MEMS マイクは常温においても 0.1 Hz 帯における性能を持たないことが結論付けられている。

1.1.4 BEXUS プロジェクトについて

学生チームが提案、主体となり大気球を用いた高層大気での様々な観測・実験ミッションを行うための ESA 主導の宇宙教育プロジェクトが存在する。2007 年より ESA が主体となり、スウェーデン・キルナ近郊の大気球および観測ロケット等の実験場である Esrange Space Center において BEXUS (Balloon Experiments for University Student) プロジェクトが開催されてきた。ESRANGE の位置を図 3 に示す。



図 3. ESRANGE の位置

ESA 加盟の欧州各国の大学チームの中からセレクションが行われ 8 チームが選出されたのち 2 機の大気球を用い、2 つのゴンドラに各 4 グループに分かれ、学生が製作した機器が搭載され各種の実験が行われている。

1.2 目的

火星大気を模擬した苛酷環境条件下での音波伝搬特性の理解を進め、火星探査機に搭載可能な改良型マイクの苛酷環境下での試験を行うこと、さらに大気球を用いて地球高層大気中で実際の観測を行うことにより大気組成の違いを除いて火星大気環境に近い条件下での実証試験を行うことを目的とする。希薄大気中や低温条件下での動作性能を確認可能な複合的な耐久動作試験と評価を行い、火星地表面における観測のための性能を確認することを目的とする。

第2章 火星大気における音波伝搬

2.1 火星の大気構造

火星の大気構造は地球とは大きく異なる。火星表面での大気圧は地球の大気圧の 6/1000 である 7 hPa 程度、気温は-15℃～-120℃である。火星の質量は地球の 1/10 程度であり、 6.39×10^{23} kg となっている。質量の差に対して大気圧が小さい理由としては火星の核の流動がほぼ停止している状態にあり、そのため磁場が発生せず太陽風の直撃を受けて軽い分子が重力圏外に飛ばされていったことに起因すると考えられている[7]。地球と火星の大気組成は表 1 のようになる。

表 1 地球と火星の大気組成[6]

	分子	容積比[%]
地球	窒素	78.10
	酸素	20.90
	アルゴン	0.93
	二酸化炭素	0.03
	水	0.00～2.00
火星	二酸化炭素	95.32
	窒素	2.70
	アルゴン	1.60
	酸素	0.13

表 1 からわかるように二酸化炭素が 95%と火星大気の大部分を占めていることが分かる。二酸化炭素の分子量(44)は地球大気の主成分である窒素分子量(28.8)よりも大きく、地球に比べ大気密度も希薄である。

2.2 音波とインフラサウンド

音波とは、空気や水などの媒質を介して圧力変動が伝搬する物理現象のことであり、媒質中の分子の疎密による縦波である。音速は媒質や温度、気圧によって変化し、減衰は媒質、気圧、周波数により変化する。火星大気における音波伝搬は地球に比べ、媒質の平均分子量が大きく、音速は遅くなり減衰はやや大きくなる。音速の式は

$$c = \sqrt{\frac{kRT}{M}} \dots \dots \dots (1)$$

c: 音速[m/s]、k: 比熱比、R: 気体定数[J/(K*mol)]、T: 絶対温度[K]、M: 平均分子量
で与えられる。減衰は

$$p = p_0 e^{-\alpha x} \dots \dots \dots (2)$$

p : 受音時の音圧[Pa]、 p_0 : 基準点の音圧[Pa]、 α : 減衰係数、 x : 距離[m]

となる。減衰係数 α は周波数、密度、組成の係数であり、振幅が $1/e$ になる距離の逆数である。[10]

周波数が 20 Hz 以下の音波をインフラサウンドと呼び、地球大気中において数千 km に及ぶ超長距離伝搬を可能とする特性を有している。空気の粘性による減衰が周波数の 2 乗に反比例することから、大気中で 1 kHz の音波が 1 m 進むときに生じる減衰量と、1 Hz の音波が 1000 km 進むときに生じる粘性による減衰量が同じとされている。インフラサウンドを観測するにあたり小型のマイクを利用する場合、複数のマイクを面状に配置(アレイ配置)することで模擬的に大きな膜面を作り、その上部にピンホールを開けた板を 3 層配置することにより図 4 のように音波がコンデンサに到達する距離を均一にすることが可能となる。また、この構造の写真を図 5 に示す。

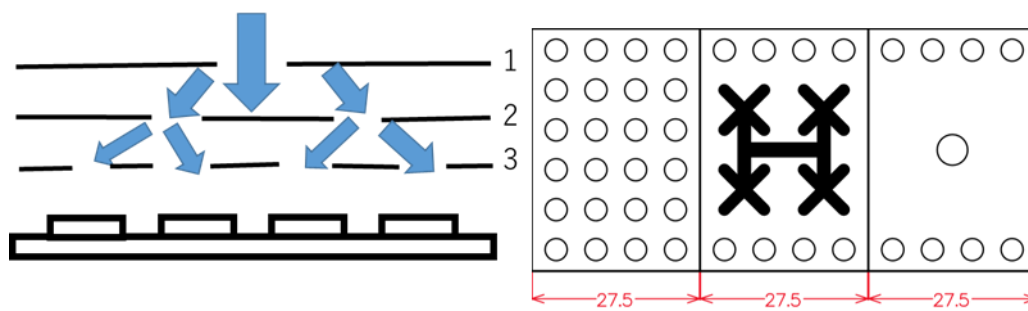


図 4. ピンホールの配置(左:横から見た図 右:上から見た図(SAYA 提供))

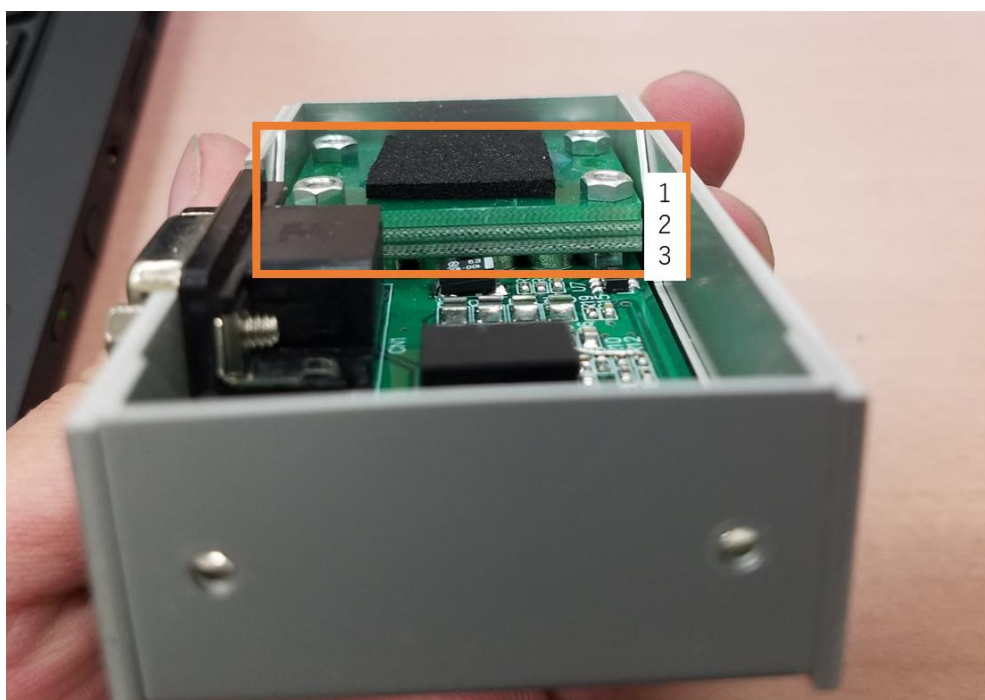


図 5. 実際の構造

第3章 火星大気模擬実験

3.1 JAXA での音波伝搬実験

3.1.1 実験概要

2016 年 10 月 3 日~10 月 7 日の 5 日間、神奈川県相模原市にある宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所にて、大型サイエンススペースチャンバーを用いて火星大気を模擬した音波実験を行った。直径 2.5 m、長さ約 4 m の大型の真空チャンバー内には、アルゴンや窒素、ヘリウム、二酸化炭素などのガスの導入が可能であり、到達真空度は約 5×10^{-5} Pa である。温度変化は模擬できないため常温のみの測定を行った。大型サイエンスチャンバーの外観を図 6 に示す。また、真空チャンバーは円柱形であるため定在波が発生する。



図 6. 大型サイエンススペースチャンバー外観

真空チャンバー内部には真空引きを行ったあとでも外部から遠隔動作させることが可能なアームがついており、2 つのコンデンサマイクを奥部とアーム上部に設置することで距離ごとの音波が計測可能である。アームは 3 軸動作可能であるが今回は長手方向にのみ動作させた。測定方法としては、真空チャンバー内の 2 点に設置した 2 つのマイクによって、2 点間距離と周波数による進行波の位相差から音速を導出するよう試みた。しかし、この実験方法では定在波によりどちらから進行してきた波であるか判断できず、正確な音速の算出は困難と判断したため、今回は補助的に測定しチャンバー内定在波の状況を測定したデータ群から音速を算出した。その方法としては、大型サイエンススペースチャンバーを用い、チャンバー内を二酸化炭素、アルゴン、空気それぞれ 7 hPa、70 hPa の条件に設定した。また、内部にスピーカーを設置することで図 7 に示す配置と手法にて音速と音波減衰の測定を行った。実際の実験風景を図 8 に示す。

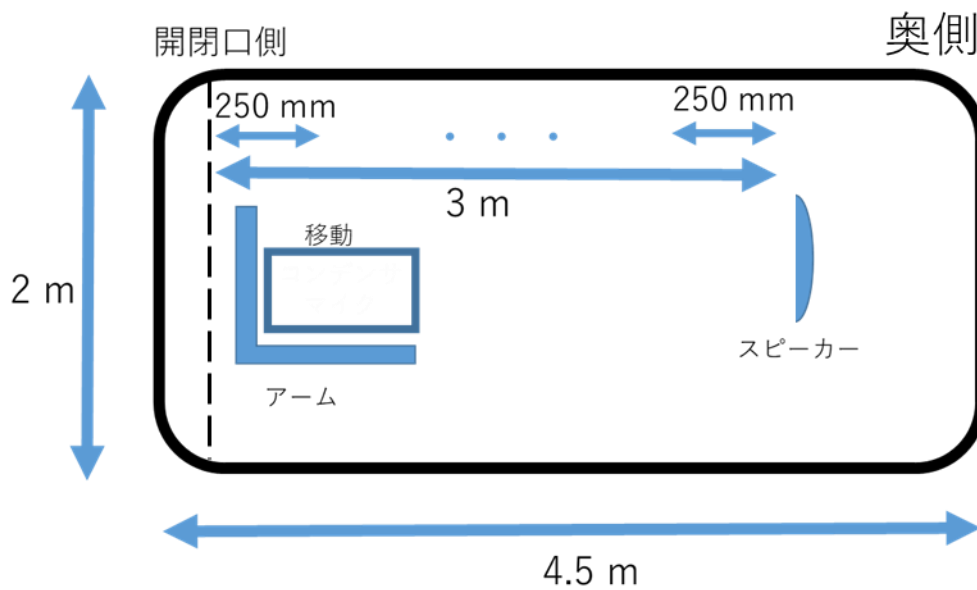


図 7. 実験手法概略図

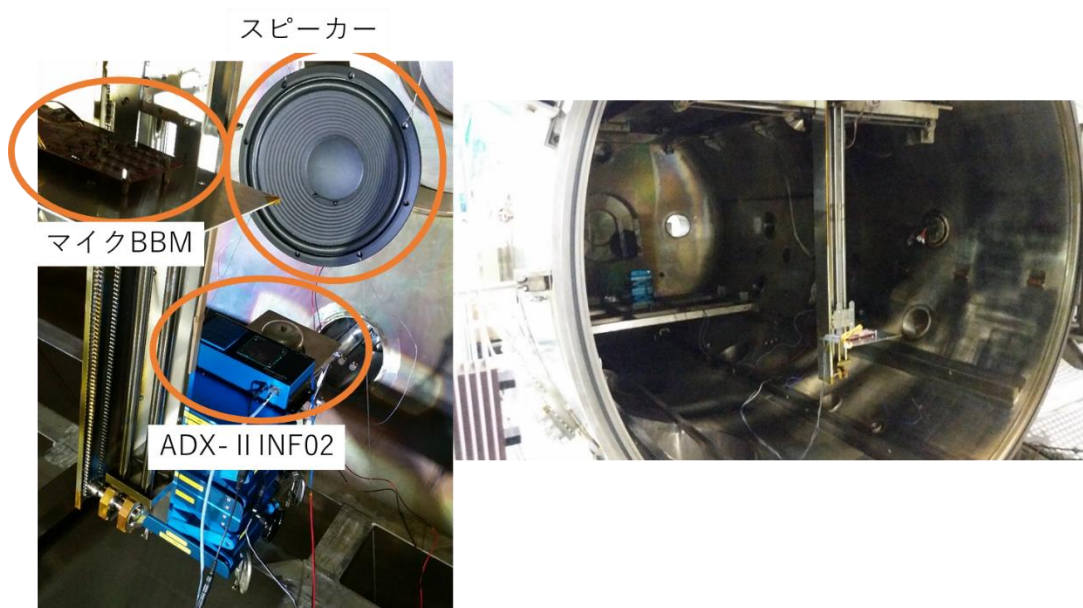


図 8. 観測機器の設置図

実験方法としては可動アーム上にコンデンサマイクアレイ(ADX-II INF02)を配置し、3 m の可動範囲内を 250 mm ずつ動かすことで常時奥側に設置したスピーカーから 70、95、100、108 Hz といった特定の周波数の sin 波を出力し続け、測定した振幅値から腹と節の半波長を算出し、出力した周波数から音速を実験的に求めた。各場所にて約 4 秒ずつ波形データを記録した。この時チャンバー内に存在した定在波のイメージを図 9 に示す。

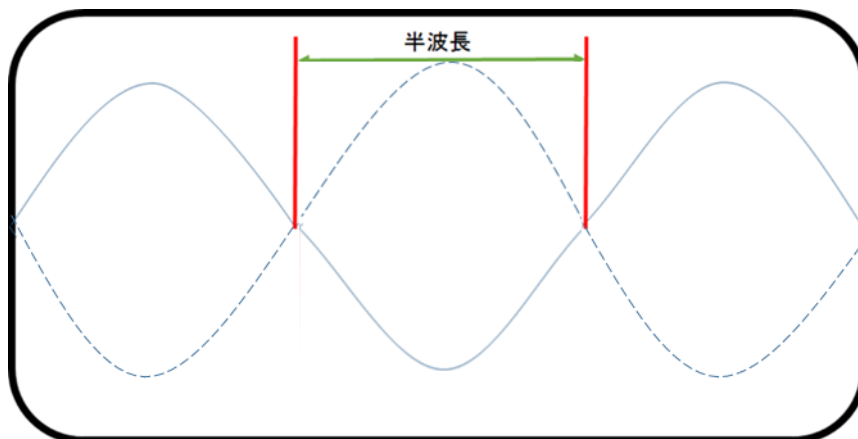


図 9. 真空チャンバー内の半波長イメージ

図 9 に示すように、真空チャンバー内の空間に現れる定在波の腹と節が存在しており、マイクを移動させながら位置による受音振幅の変化をみることで半波長分の長さを測定する。本実験では 250 mm 間隔で移動させたため、音速測定の分解能が 70 Hz で 35 m/s, 100 Hz で 50 m/s, 108 Hz で 54 m/s である。

真空チャンバー内の測定条件を表 3 に示す。

表 3 測定条件

空気圧力	周波数		
7 hPa	70 Hz	95 Hz	100 Hz
70 hPa	70 Hz	95 Hz	100 Hz
CO ₂ 圧力			
7 hPa	70 Hz	100 Hz	108 Hz
Ar 圧力			
7 hPa	70 Hz	100 Hz	108 Hz
70 hPa	70 Hz	100 Hz	108 Hz

3.1.2 使用機器

本実験において使用した機器の詳細を以下に記載する。

火星大気模擬環境下における動作確認と音波伝搬特性の取得のために使用したコンデンサマイクアレイ(株式会社サヤ製 ADX-II INF02)を図 10 に示す。図 10(右)のマイクが図 10(左)の筐体内に格納されている。各センサーは 16 個のマイクが 4×4 正方形配置されており、ボード長手方向に 4 つのマイク受音データを平均処理した信号がアナログデータとして出力される。BBM の寸法は 170 mm×85 mm であり、マイクアレイ配置部は 30 mm×55 mm である。

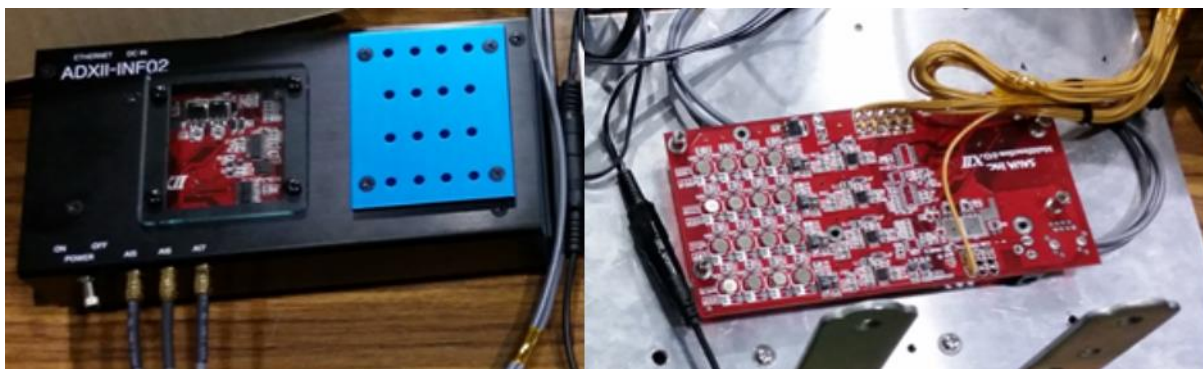


図 10. 左:ADX-II INF02 右:コンデンサマイク BBM

マイクにより測定されたデータは図 11 に示す A/D 変換ボード(株式会社サヤ製 ADX II 42FE-250K-Ethernet)へ入力され、Ethernet 経由で PC に入力される。A/D 変換ボードの仕様は表 4 に示す。A/D 変換ボードは 16 Bit バイポーラであり、 $0.06103515625 \text{ mPa/LSB}$ とデータの積で Pa に変換できる。



図 11. A/D 変換ボード

表 4. A/D 変換ボードの仕様

ADX II 42FE-250K-Ethernet
AD(250 KHz or 2 KHz/16 Bit/8 ch)
DA(16 Bit/2 ch)
DI 16ch/DO 16ch
32 Bit エンコーダーカウンタ 4 ch
PWM16 ch
Ethernet 接続
リングバッファに AD/DA/DI/DO を接続可
多機能ハードウェアトリガ
10 V～10 mV 電圧、熱電対・測温抵抗体・4-20 mA・騒音・振動・粉塵計を直結可能なプログラマブル信号調節搭載

3.2 気球観測に向けた JAXA での音波伝搬実験

3.2.1 実験概要

2017 年 6 月 19 日～6 月 23 日の 5 日間、JAXA 宇宙科学研究所にて火星大気を模擬した音波実験を行った。本実験は前年に行った前モデルの改良版のマイクを用いた測定精度を上げた環境動作試験と音波伝搬特性の取得、気球観測に向けた揺れや回転による影響を検証する実験となっている。音速を導出するため大型サイエンスチャンバーを用いて実験を行った。また、低周波での音波の振幅を上げるため、音波源としてチャンバー最奥に図 13 のようにスピーカーを2つ向かい合わせに設置した。

定在波より音速を導出するため、3.1 章での実験では 250 mm 間隔でアームを移動させたところを 50 mm 間隔に変更して密にデータを取得することとし、アーム上にコンデンサマイクを 2 台配置した。さらに固定マイク 1 台をスピーカー近傍に設置した。実験方法の概略を図 12 に、実際の写真を図 13 に示す。音速の導出において理論上の最大誤差は 108 Hz で 27.00 m/s、145 Hz で 36.25 m/s、210 Hz で 52.50 m/s、280 Hz で 70.00 m/s である。

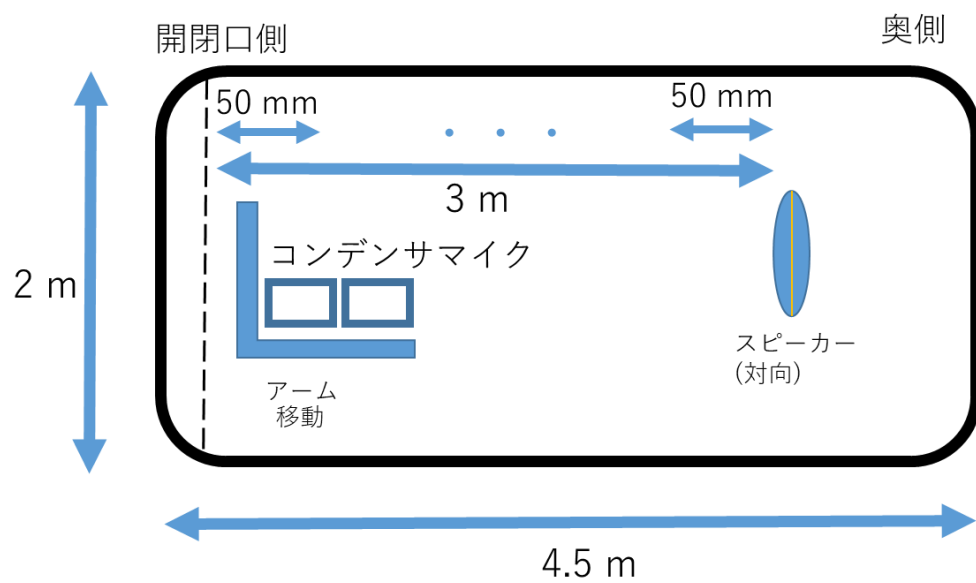


図 12. 実験方法概略図

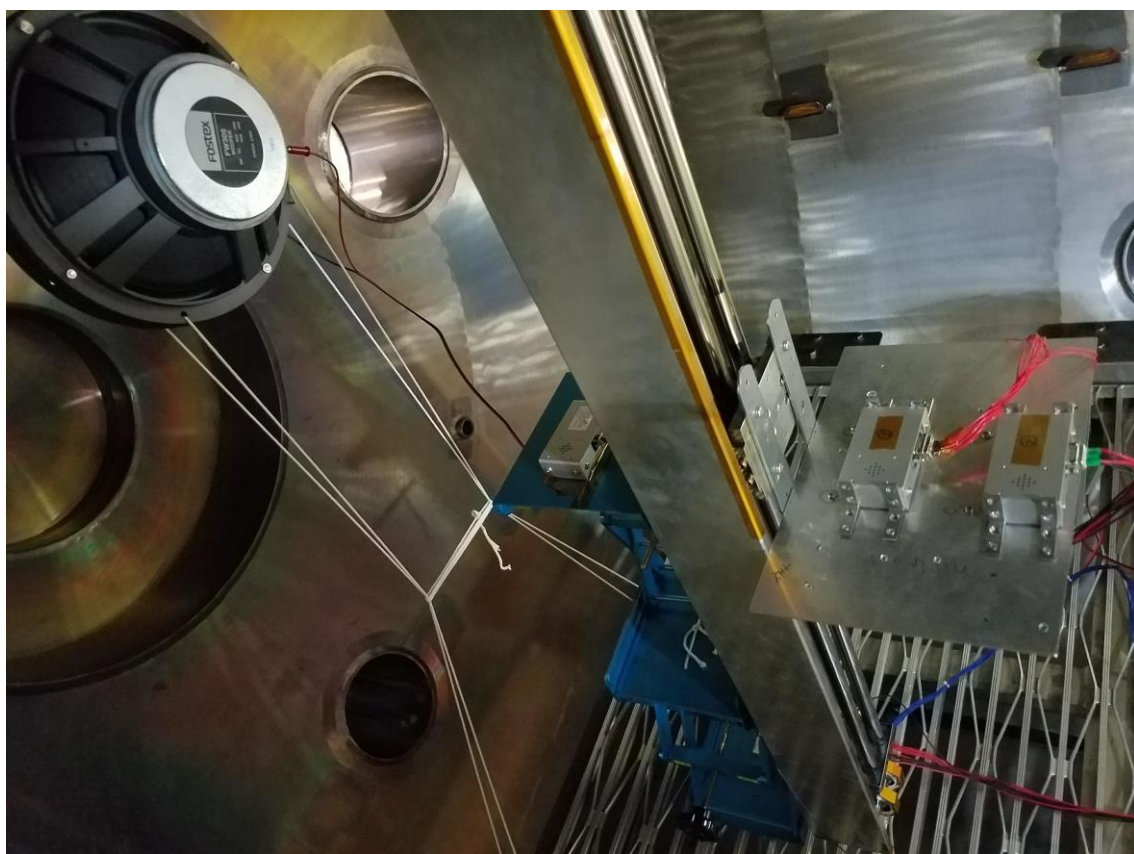


図 13. 実験風景

大型サイエンススペースチャンバーを用いた実験での環境と測定条件を表 5 に示す。

表 5. 測定条件

空気圧力				
7 hPa	108 Hz	145 Hz	210 Hz	
70 hPa	108 Hz	145 Hz	210 Hz	
大気圧	108 Hz	145 Hz	210 Hz	
CO2 圧力				
7 hPa	108 Hz	145 Hz	210 Hz	280 Hz
70 hPa	280 Hz			

あわせて、副次的な実験として低圧環境下にてチャンバーに充填したものと同種のガスを少量流入させ、低周波の圧力波を模擬的に生成させた。また、マイク自体に振り子運動、回転運動を加えたり、内部に置いたプラスチックの板 2 枚をアーム操作により倒したときに発生する圧力波への応答も測定した。この様子を図 14 に示す。赤矢印の方向にそれぞれ振り子運動、回転運動を行う。また、図 15 に振り子運動の概要を示す。

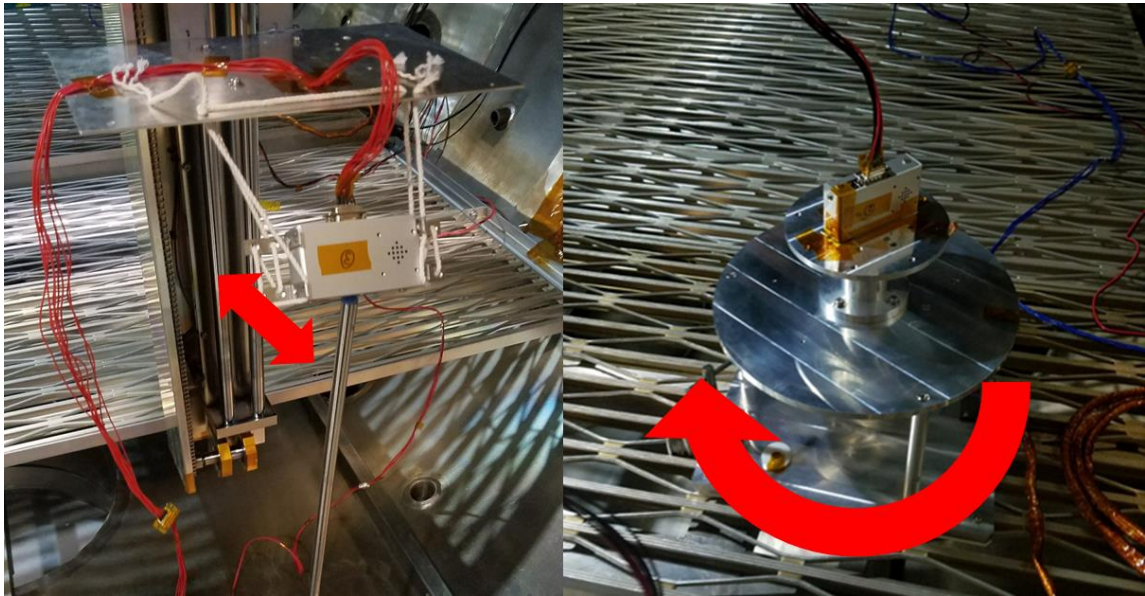


図 14. 実験風景

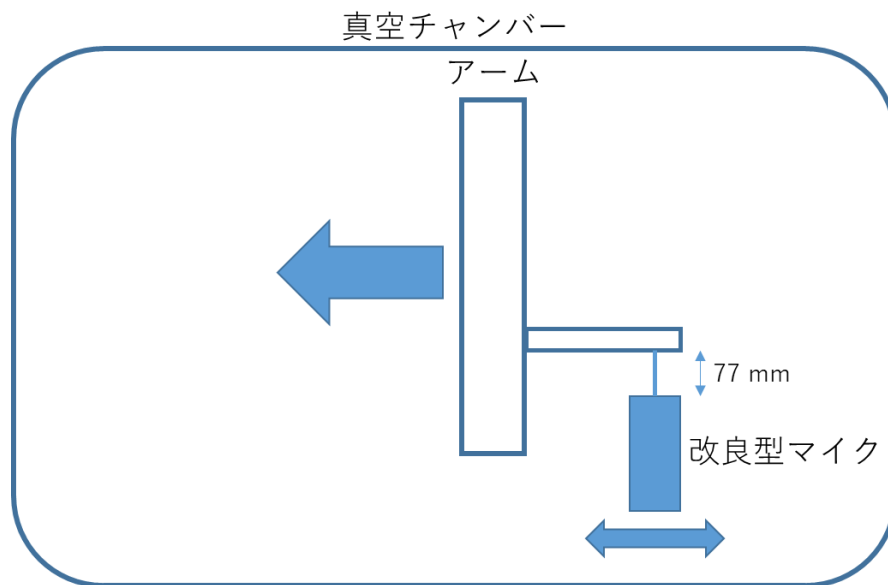


図 15. 振り子運動概要

3.2.2 使用機器

3.1 章で用いたコンデンサマイクを小型化した改良型火星探査用コンデンサマイクを図 16 に示す。



図 16. 火星探査用コンデンサマイク(ADX-II INF02 A4)

図左側は火星探査用コンデンサマイクの外観であり、右側はその内部である。電源とデータ通信は 9pin の D-sub で供給・通信が可能である。

A/D 変換ボードは 3.1 節の実験と同製品を使用した。

3.3 スウェーデンでの高層大気中音響実験

3.3.1 実験概要

火星大気を模擬するため、これまで真空チャンバーを用いた室内実験を行ってきたが、音響計

測においてチャンバー壁面による定在波の影響が無視できないものであると判断したため空間的な境界面の存在しない実際の高層大気中での音波伝搬実験を行った。本実験では2017年10月に行われた BEXUS プロジェクトの採択チームであるルレオ工科大学((Luleå University of Technology)の EXIST チームに本研究室で使用している火星探査用コンデンサマイクを提供し、上空でのインフラサウンド計測試験を EXIST チーム主体で行った。2017 年 10 月 18 日に放球実験が行われた。BEXUS にて使用した大気球の配置を図 17 に示す。

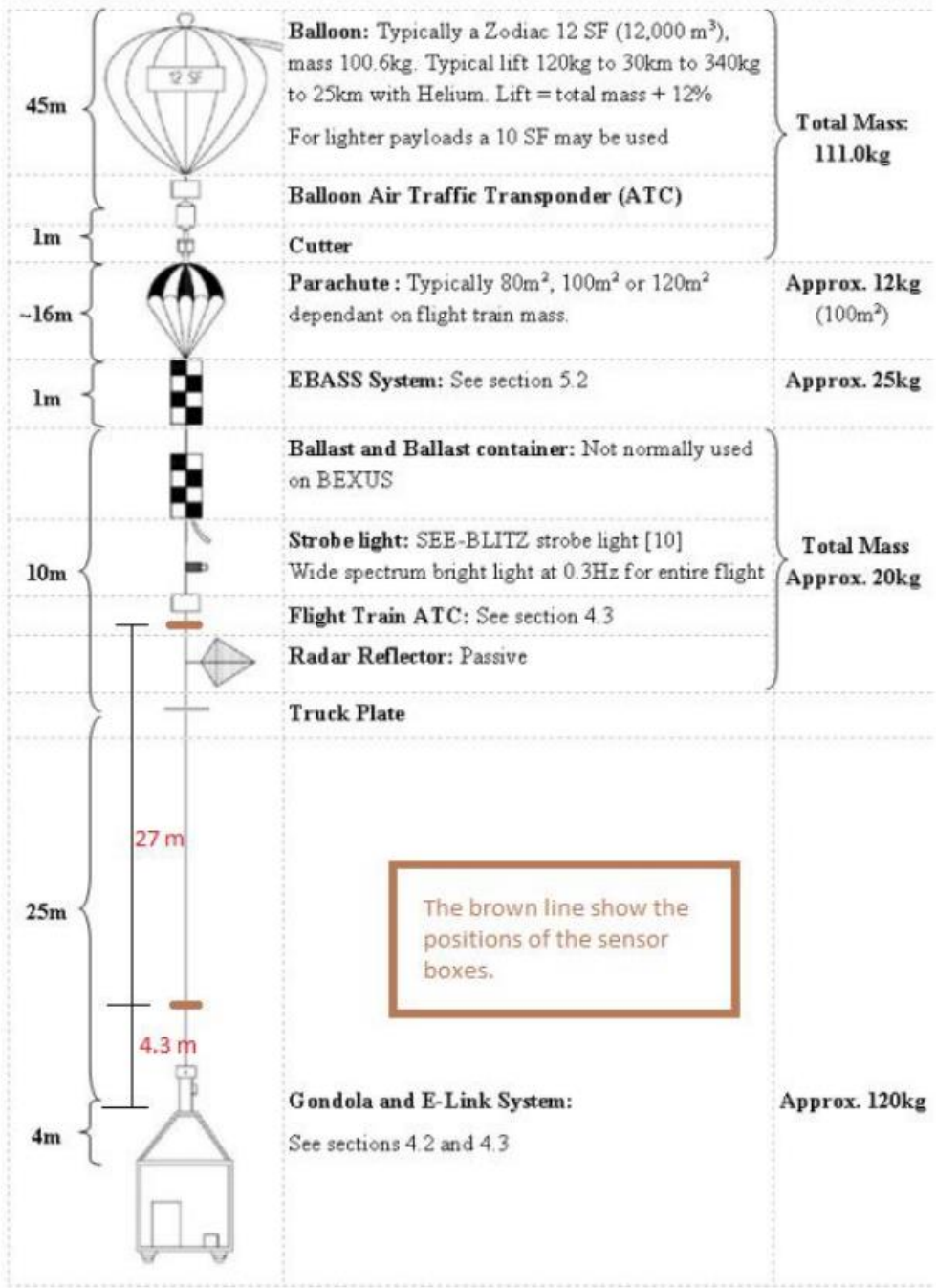


図 17. 大気球配置図[4]

図 17 に示された最下部がゴンドラとなっており、このゴンドラ内に各チームのセンサーを搭載する。これらのセンサーは EXIST チームが設計や事前実験を行っており、詳細を付録に示す。

EXIST チームではゴンドラ内に電源ユニットとデータロガーを設置し、ゴンドラより上方 4.3 m、27 m の二か所にセンサーBOX を設置した。

実験計画としては 130 kg のゴンドラを浮上させ、対流圏上層に存在するジェット気流に乗せ成層圏までの音波を観測する。観測したデータは BEXUS 大気球の専用テレメトリにより地上基地局へ無線通信で伝送され、地上で記録されるほか各 BOX 内の SD カードにも保存される。EXIST チームはコンデンサマイクを搭載した 2 つの独立した観測用 BOX を製作し、図 14 のゴンドラ上部の茶色の線で示された 2 か所に設置し観測を行った。下側センサーBOX 内部の写真を図 18 に示す。

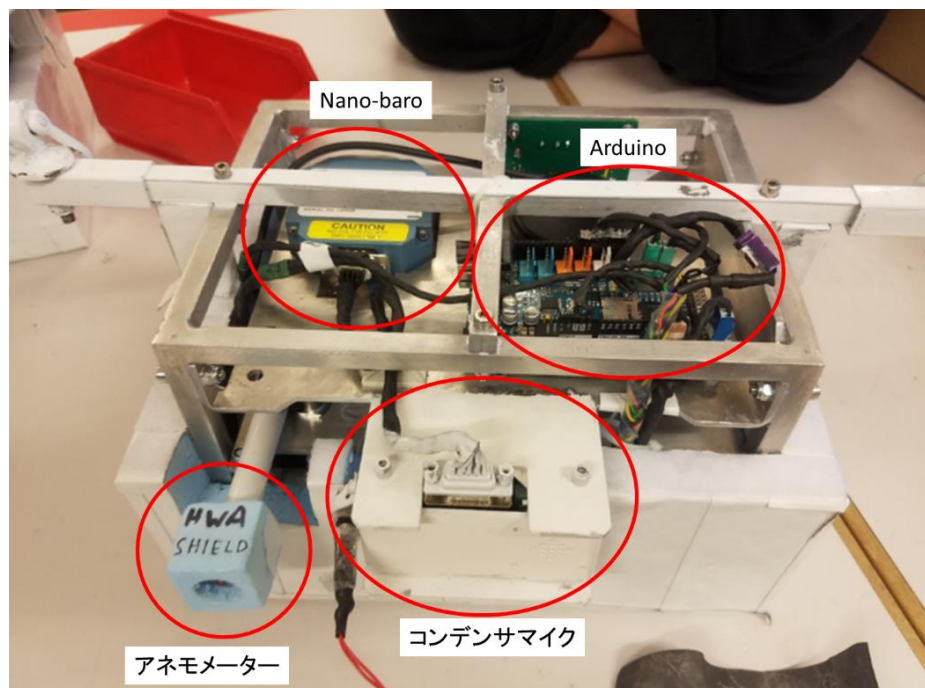


図 18 センサーBOX 搭載機器

センサーBOX には図 18 のように各種機器が配置され、見えていない場所に高度計、Arduino マイコン周辺にもう一台のコンデンサマイクが搭載されている。

音波源として小型の風船を 3 個設置し、内部の空気圧を少しずつ変えた状態として、高度上昇による気圧変化により破裂させる実験を行った。設置場所は各センサーBOX の上部と中間である。

観測データとしては、残念ながら装置トラブルが発生し、BOX1(下側)は打ち上げとほぼ同時に、BOX2(上側)は高度 12 km 付近においてデータが途絶した。トラブルの原因としては打ち上げ直前に降った雪が解けた水分による可能性が考えられるが詳細は不明である。

大気球が移動した経路の予想図を図 19 に示す。赤丸で示す点が放球地点であり、3 本の線はそ

それぞれの放球時刻による経路を示す。当日の打ち上げは予測に近い経路で飛行した。

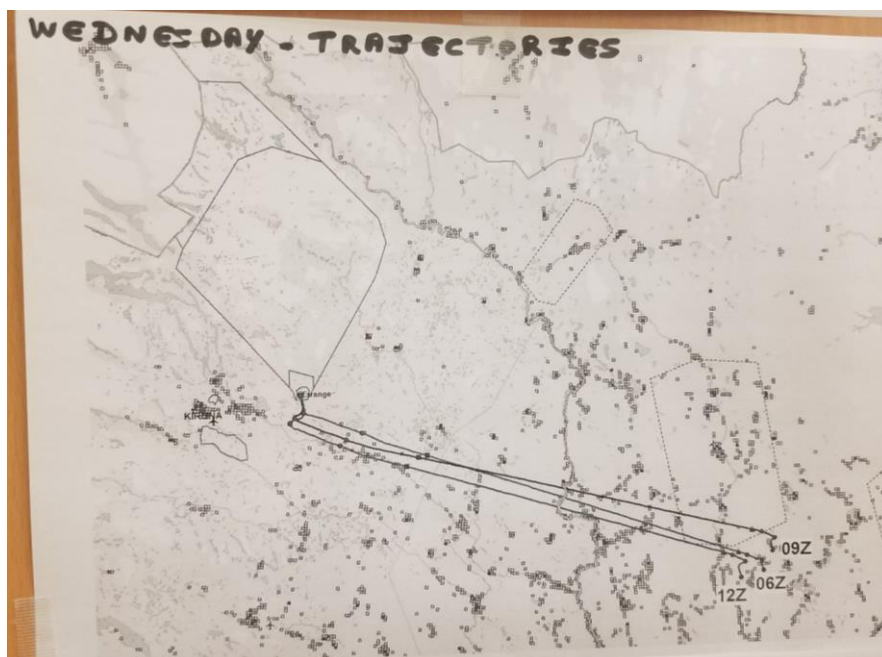


図 19. 大気球の放球後経路予想図

BEXUS プロジェクトで使用した大気球の写真を図 20 に示す。



図 20. 大気球

3.3.2 地上実験

2017 年 10 月に行った大気球を用いた実験と並行して、同実験で搭載したコンデンサマイクと同型の製品を用い、地上での同時観測を行った。ESRANGE 敷地内に静穏な環境を三か所選定し、許可を得て設置した。図 21 に示すように電池駆動の地上観測用マイクを用意し、図 22 に示すように設置した。

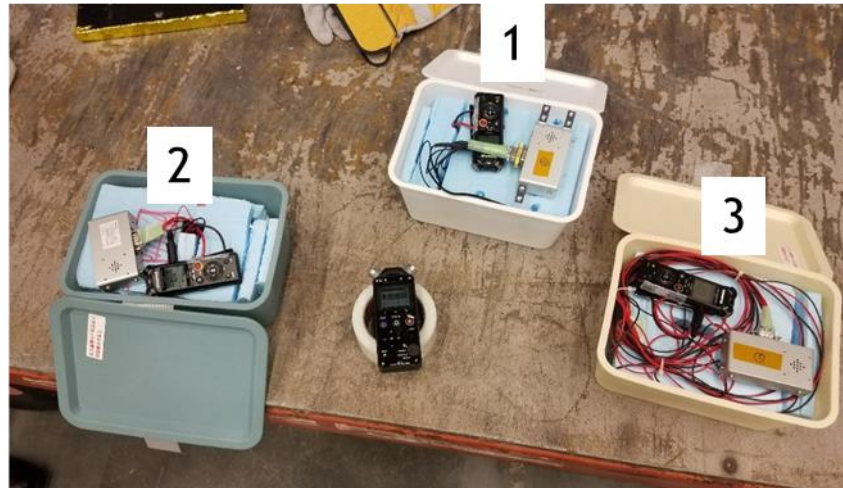


図 21. 地上観測用マイク

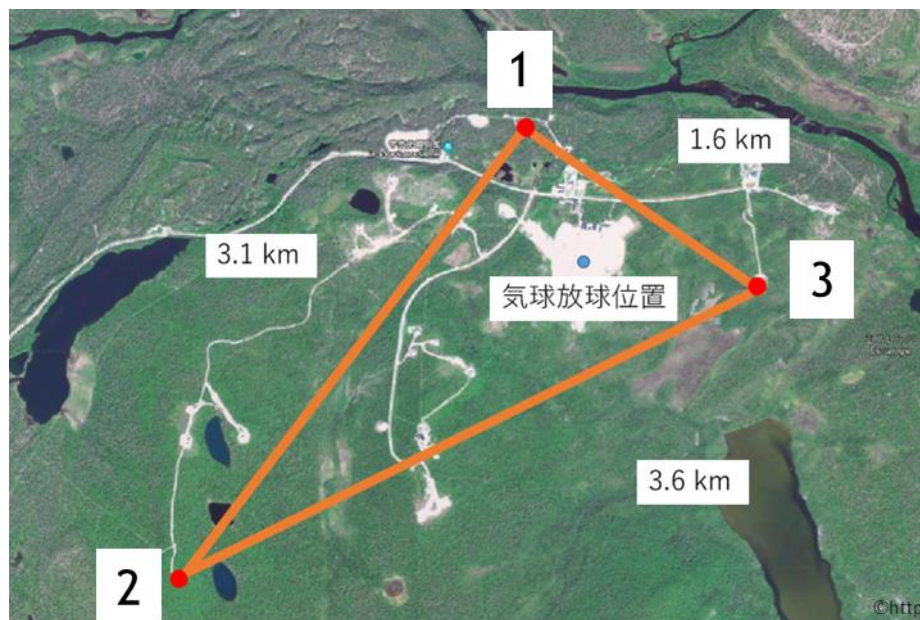


図 22. 地上マイク配置

地上観測に用いたマイクシステムに使用した機器は OLYMPUS 製 LINEAR PCM RECORDER LS-P2 をデータロガーとし、44.1 kHz でサンプリングした。LS-P2 にコンデンサマイクを接続し観測した。その写真を図 23 に示す。なお、電池容量を増やすための電池 BOX を追加する解像を施している。

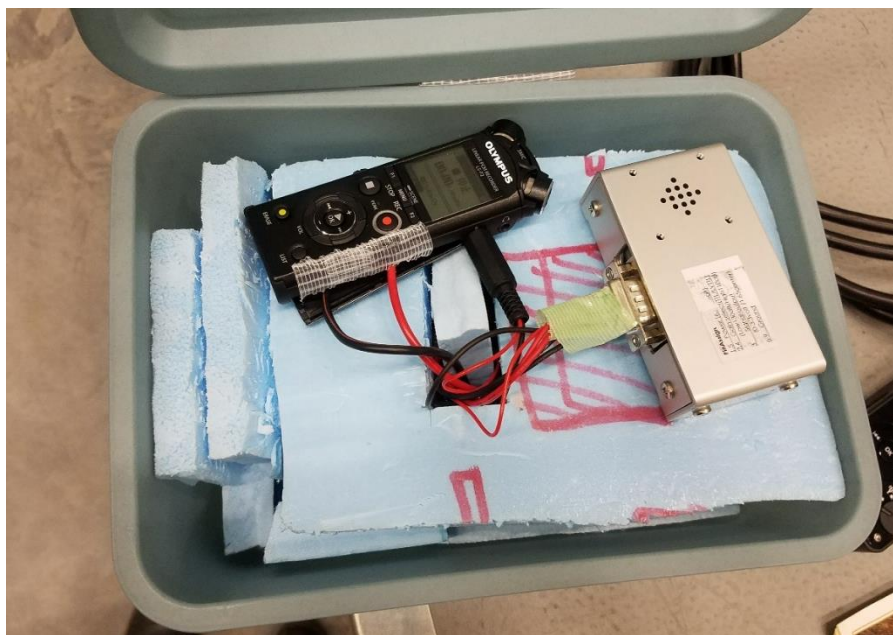


図 23. 地上観測用マイク

第4章 解析結果

4.1 JAXA での音波伝搬実験の解析

4.1.1 音速の導出

音速は温度などの条件により変化するが、その理論値を算出することができる。本実験では温度、圧力、大気組成が地球大気とは大きく異なるが、組成が変わっても 1 mol あたりの気体定数としては

$$R = 8.314 \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{K} \cdot \text{mol}} \right] \dots\dots\dots (3)$$

を用いて計算できる。また、火星地表大気の大気組成は二酸化炭素約 95 %、窒素約 3 %、アルゴン約 2 %で構成されているが、今回の実験におけるチャンバー内の大気組成は二酸化炭素を 100 %としたため、平均分子量 44.01 を用いた。

以上の条件から音速の式である式(1)より理論値を導出する。

実験値から音速を導出する方法としては、

$$c = \frac{x}{T_0} [\text{m/s}]$$

x: 距離(波長)[m]、T₀: 周期[s]

より求める。ここで定在波を用いた実際の測定値は半波長の値となるため x/2[m]となる。

定在波の測定方法として、チャンバー内部の位置ごとに測定した音波の振幅を測定し横軸をチャンバー内部の位置、縦軸を振幅としたグラフから、定在波の半波長を目視で判断した。

解析したデータの一例として、空気、二酸化炭素アルゴンをそれぞれ 7 hPa の圧力条件で真空チャンバーに封入し、100 Hz の音波を出力した場合の定在波の計測例を図 24、図 25、図 26 にそれぞれ示す。真空チャンバー内の位置ごとに取得した音波信号の振幅を計算し、横軸に真空チャンバー内でのアームの移動距離を、縦軸に信号の振幅をプロットした。横軸は正の最大値が開閉扉側、負の最大値が奥側を表す。

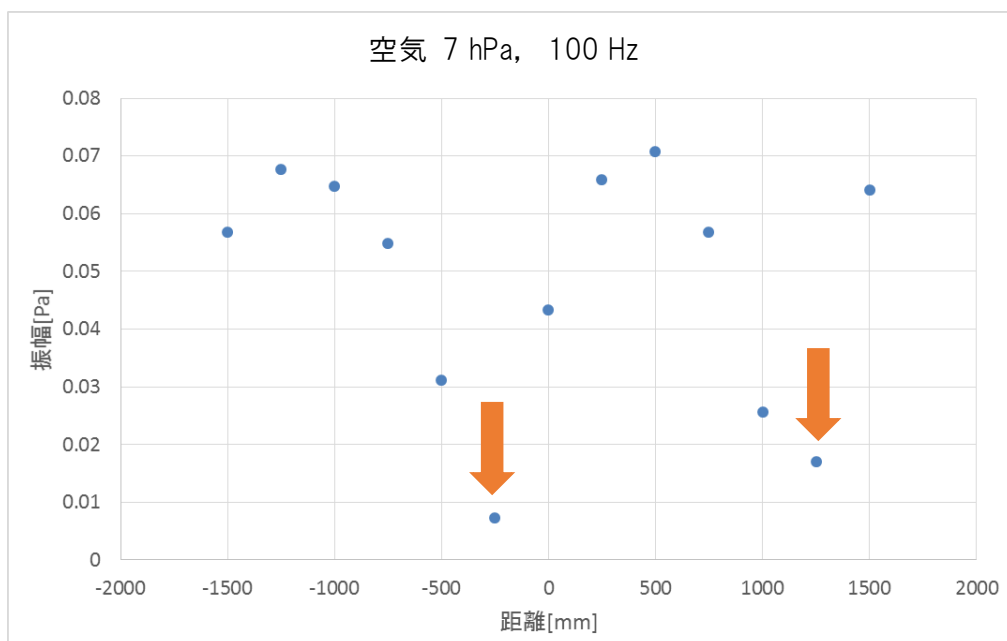


図 24 空気 7 hPa, 100 Hz の定在波

図 24 の条件では音速の理論値は 346.6 m/s であり、実験値は 300 m/s となった。

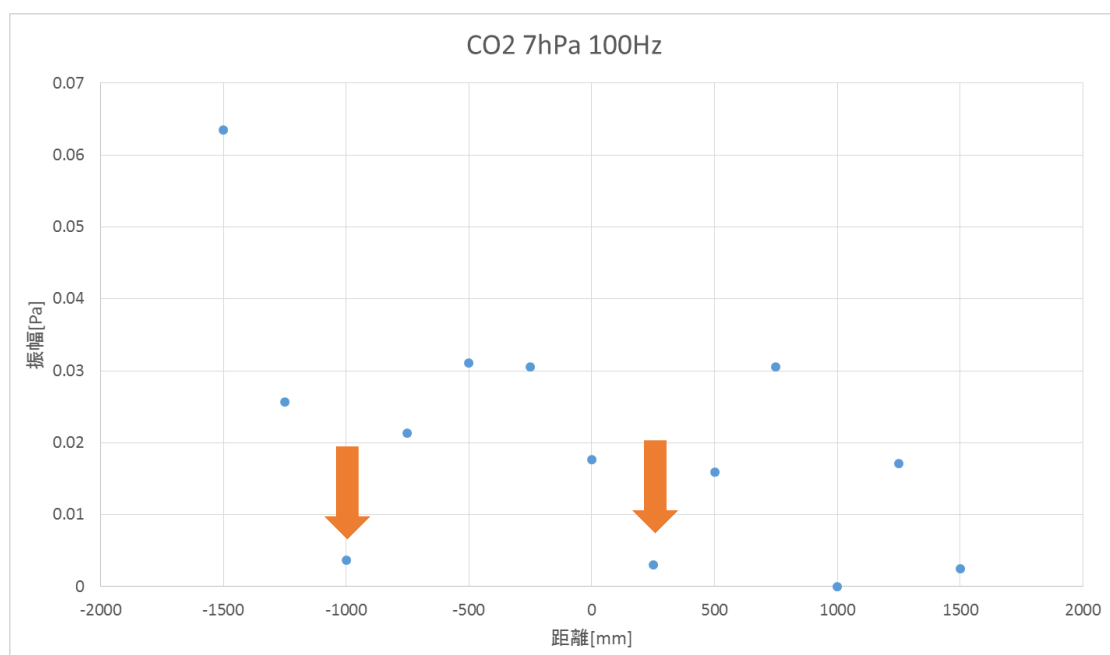


図 25. CO₂ 7 hPa, 100 Hz の定在波

図 25 の条件では音速の理論値は 269.6 m/s であり、実験値は 250 m/s となった。

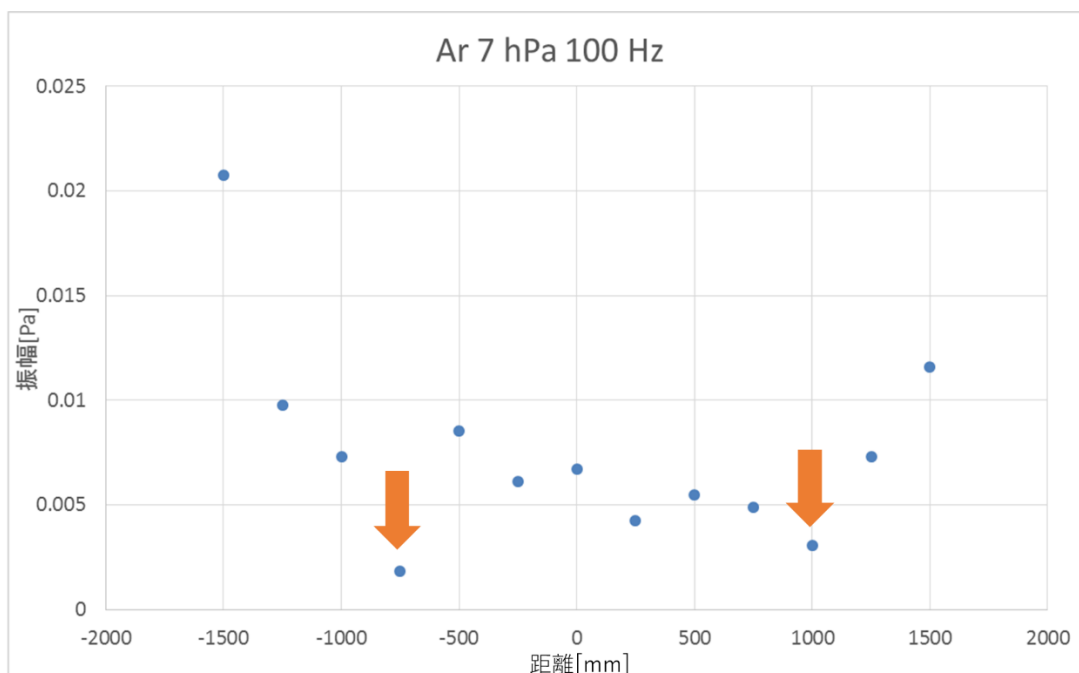


図 26. Ar 7 hPa, 100 Hz の定在波

図 26 の条件では音速の理論値は 322.0 m/s であり、実験値は 350 m/s となった。
これらの結果から、理論値と実験値を比較したもの表 6 に示す。

表 6 音速データ

CO ₂	70 Hz	100 Hz	108 Hz	理論値
7 hPa	210.0 m/s	250.0 m/s	324.0 m/s	269.6 m/s
Ar	70 Hz	100 Hz	108 Hz	理論値
7 hPa	280.0 m/s	350.0 m/s	270.0 m/s	322.0 m/s
70 hPa	350.0 m/s	400.0 m/s	216.0 m/s	322.0 m/s
空気	70 Hz	95 Hz	100 Hz	理論値
7 hPa	350.0 m/s	285.0 m/s	300.0 m/s	346.6 m/s
70 hPa	350.0 m/s	332.5 m/s	300.0 m/s	346.6 m/s

4.2 気球観測に向けた JAXA での音波伝搬実験の解析

4.2.1 音速の導出

改良型マイクを使用して計測を行い、位置ごとに計測した信号波形に FFT をかけ、パワースペクトルの最大値をプロットし多項式近似により近似した結果の一部を図 27、28、29 に示す。

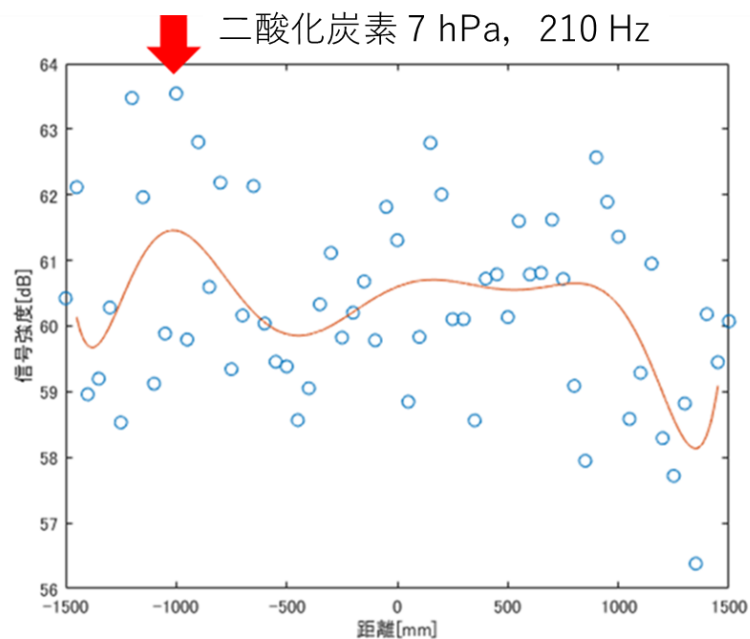


図 27. 二酸化炭素 7 hPa, 210 Hz の定在波

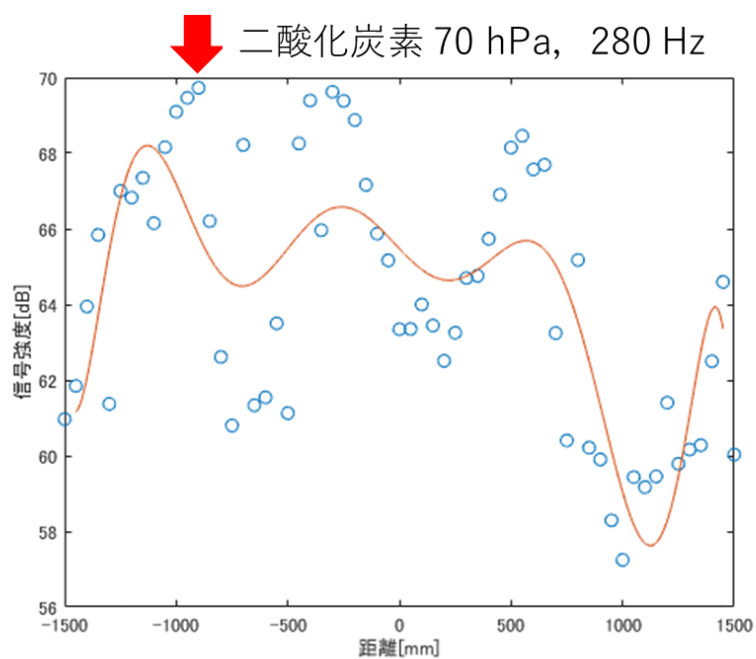


図 28. 二酸化炭素 70 hPa, 280 Hz の定在波

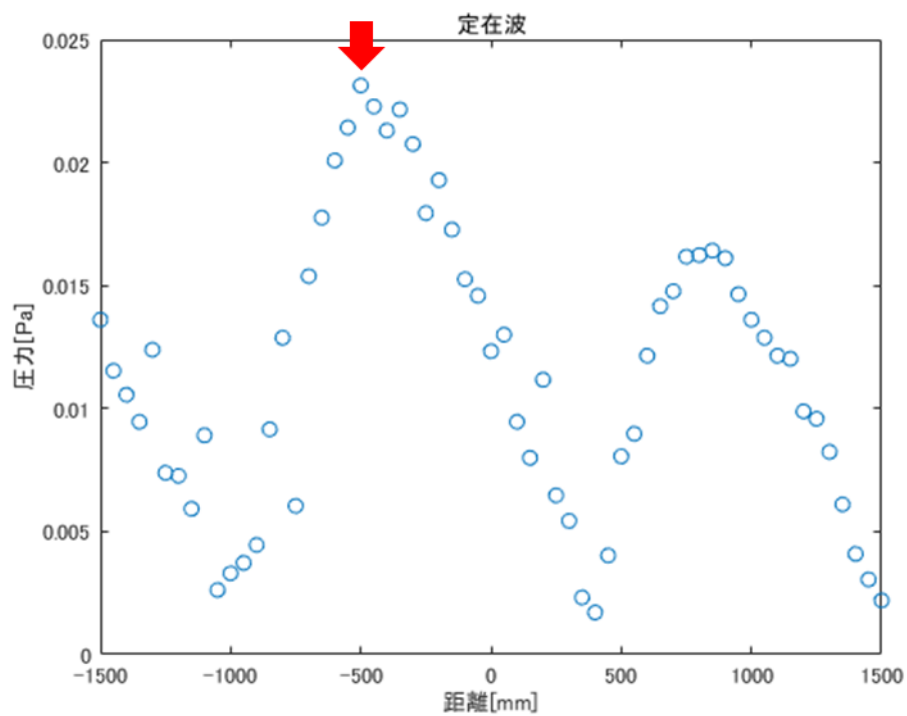


図 29. 空気 70 hPa, 145 Hz の定在波

これら各定在波の中で、図 27、28、29 に赤矢印で示した振幅が一番大きい位置における測定信号をそれぞれ FFT した周波数特性を図 30、31、32 に示す。

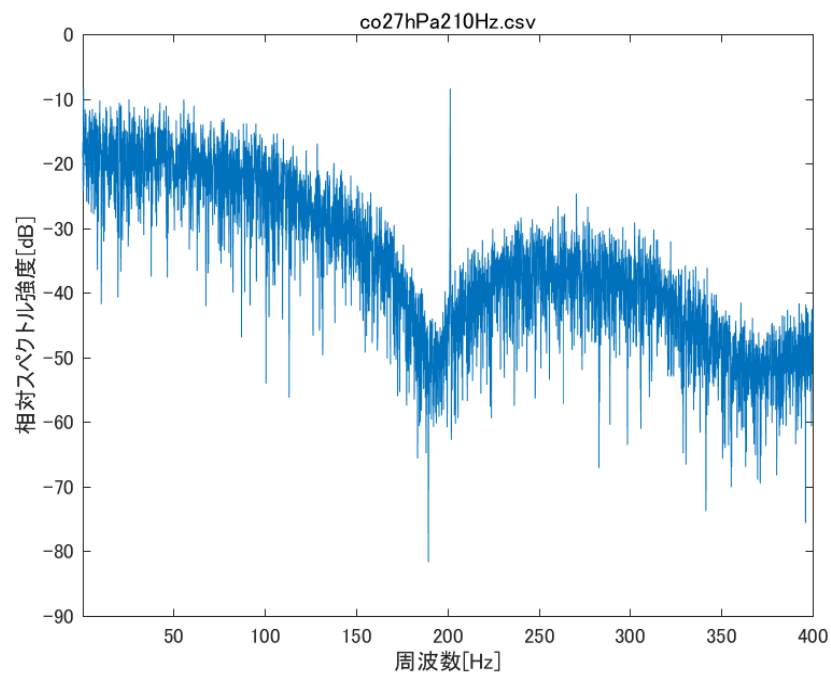


図 30. 二酸化炭素 7 hPa, 210 Hz の定在波

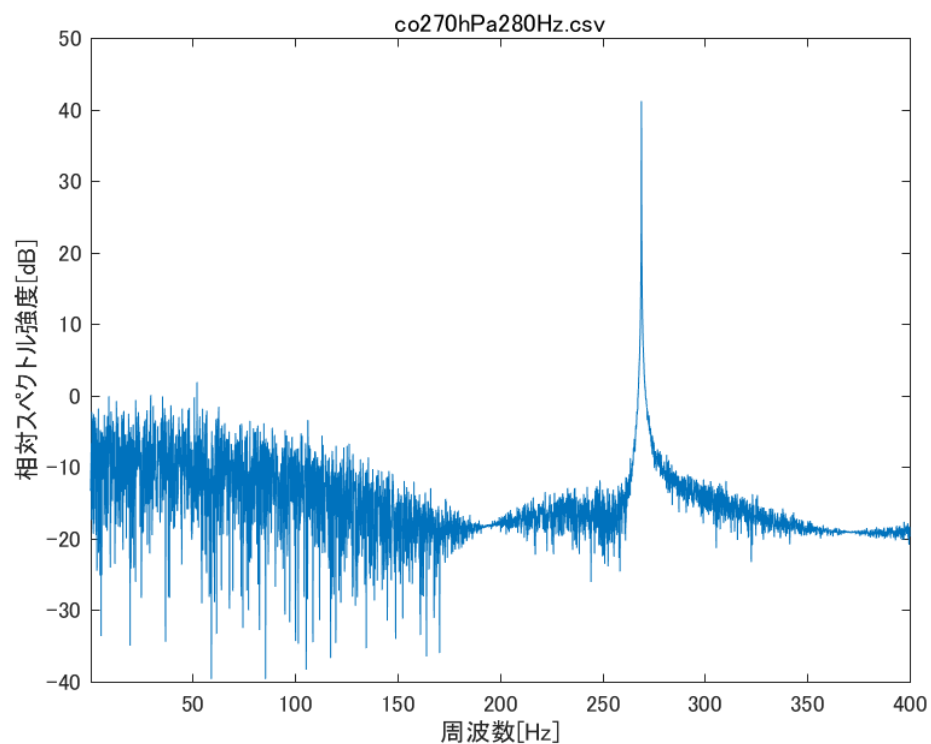


図 31. 二酸化炭素 70 hPa, 280 Hz の定在波

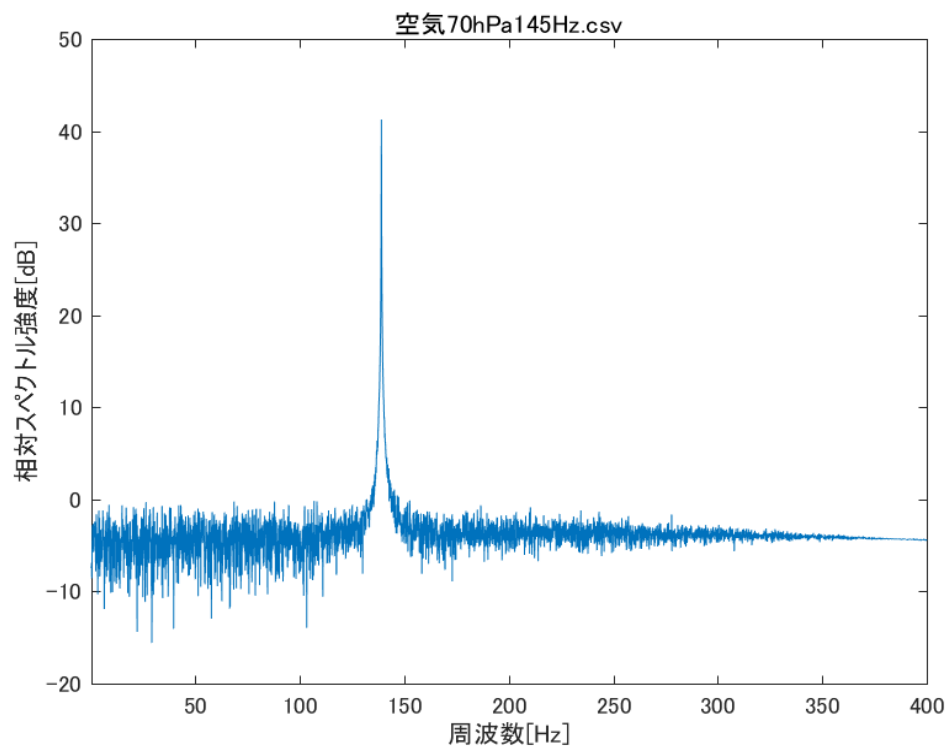


図 32. 空気 70 hPa, 145 Hz の定在波

4.2.2 振動・回転がマイクに及ぼす影響の評価

コンデンサマイクをチャンバー内の可動アームに吊るし、台の上に静止させた状態からアームを動かし、その反動でマイクを振り子運動をさせたときの計測信号をFFTした結果を大気圧、70 hPa、7 hPa の順に図 33、34、35 に示す。このときの封入成分は空気である。

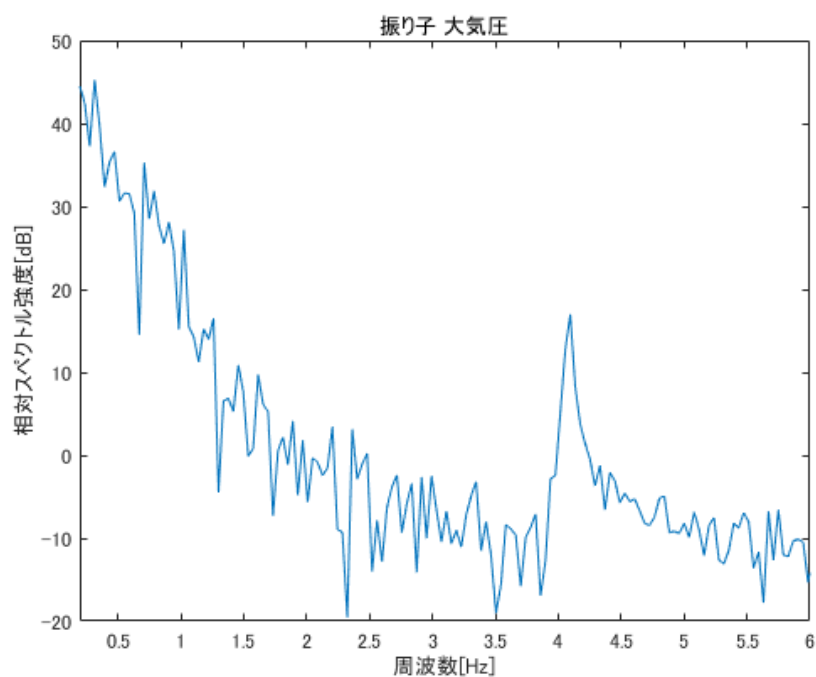


図 33. 大気圧における振り子運動

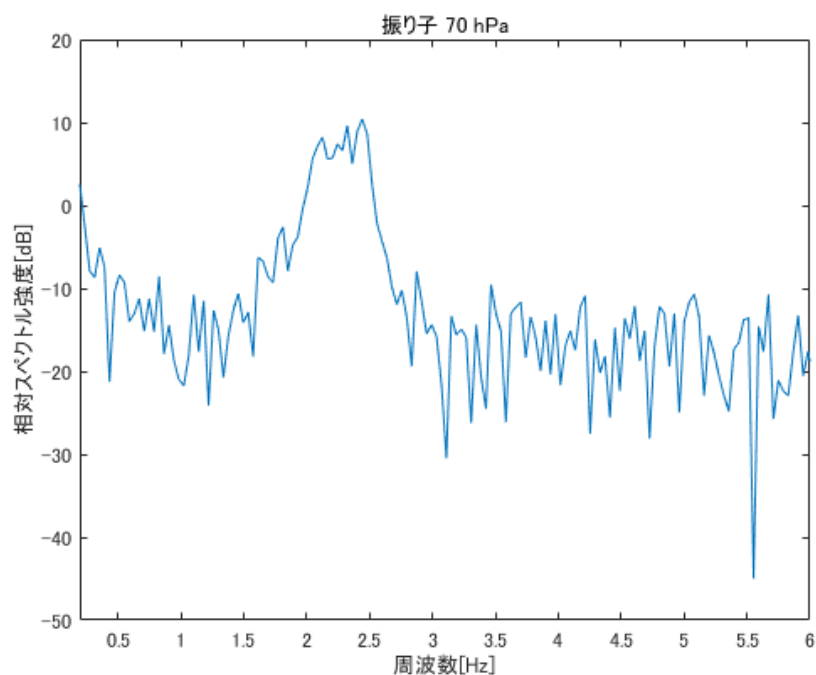


図 34. 70 hPa における振り子運動

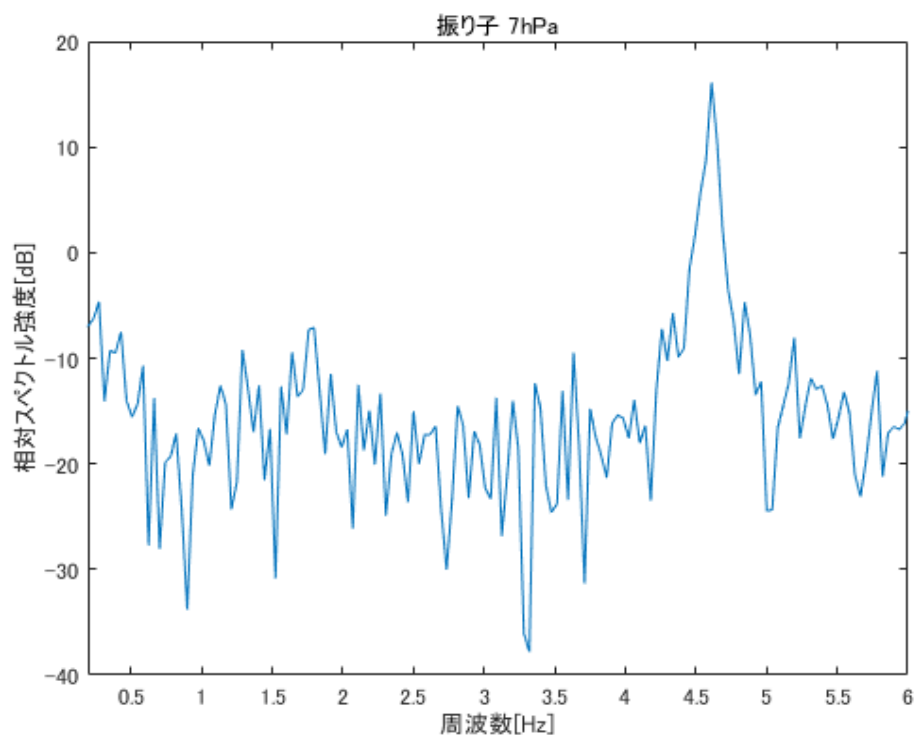


図 35. 7 hPa における振り子運動

吊るした紐の長さ l は 77 mm であり、ビデオカメラで記録した映像から、約 0.5~0.6 秒の周期でマイクが揺れたことが分かっている。これは l と重力加速度 g から

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

で計算できる。周期の理論値は 0.57 秒となり、振り子運動の周期に対してほぼ同一の値が得られた。周波数特性は約 1.75 Hz となる。

次に、チャンバー外部からリモートコントロール可能な回転台の上にコンデンサマイクを設置し、約 13 秒間で 5 回転させ計測を行った。その時の信号を大気圧、70 hPa、7 hPa の順に図 36、37、38 にそれぞれ示す。

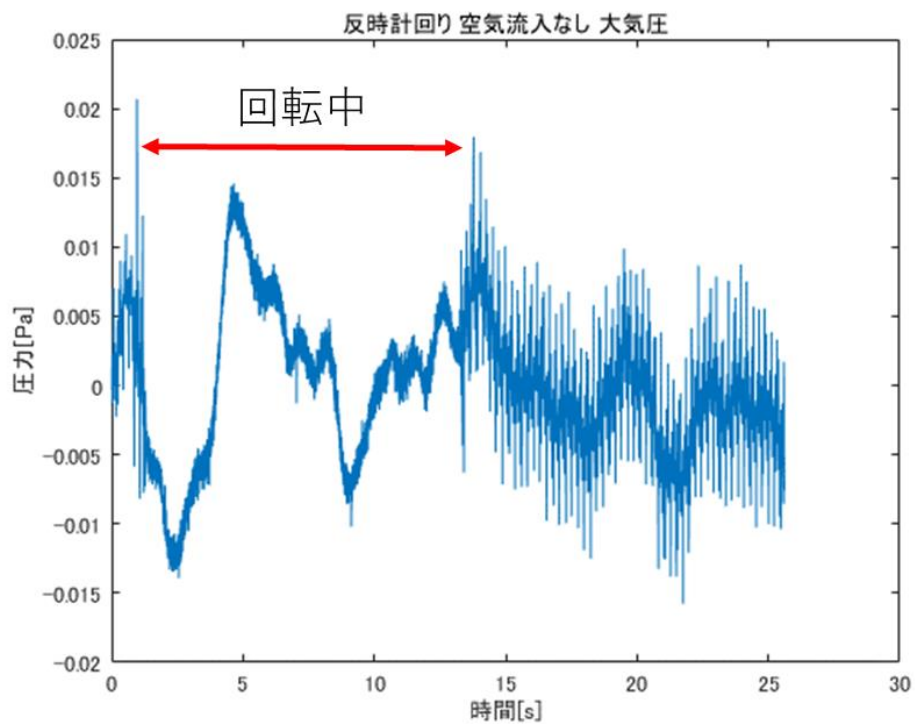


図 36. 大気圧における回転運動

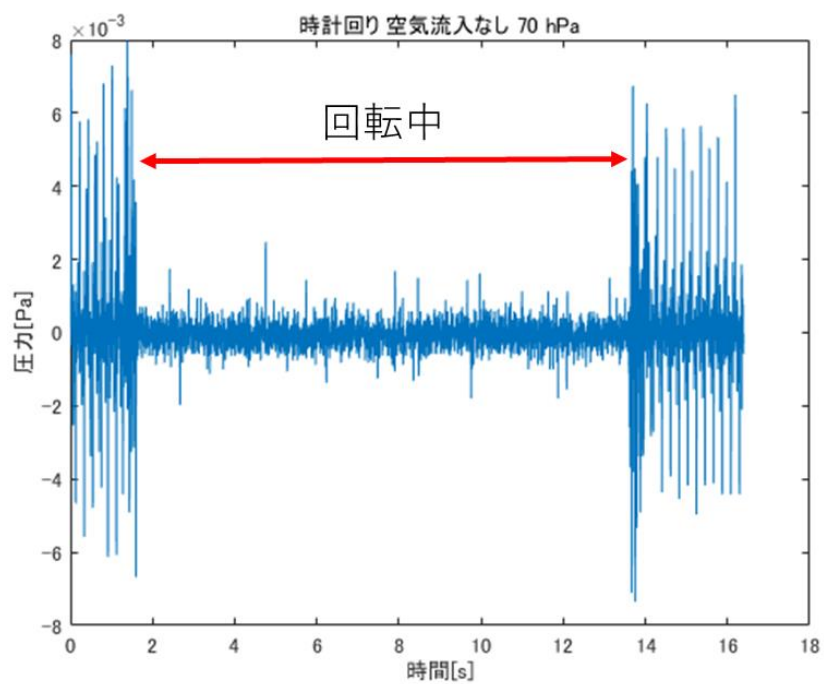


図 37. 70 hPa における回転運動

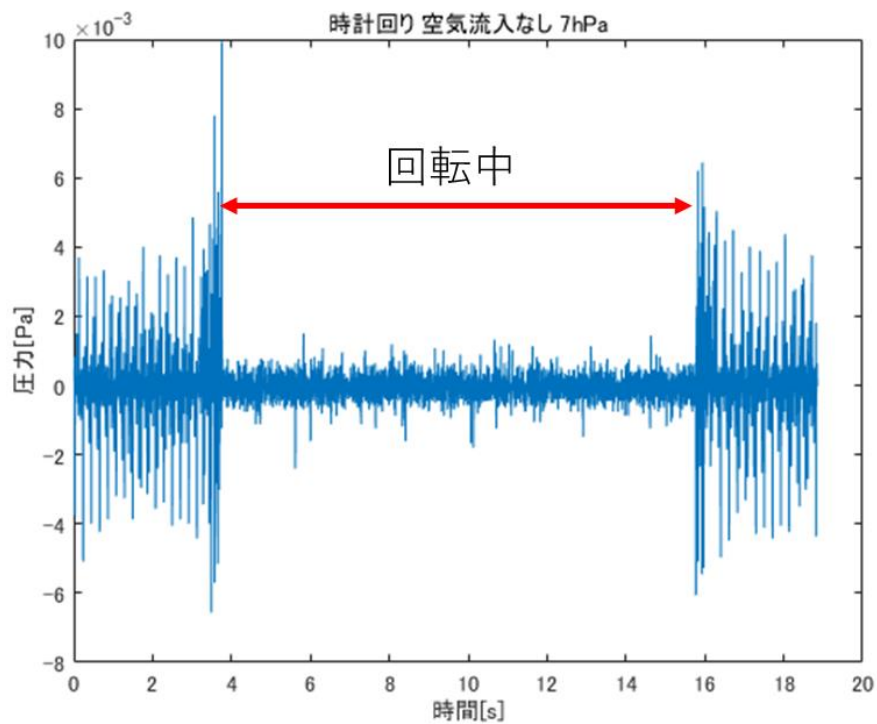


図 38. 7 hPa における回転運動

回転運動と同時にチャンバー付属のバルブから空気を流入させた場合の実験も行った。このときの解析結果を図 39、40、41 にそれぞれ示す。

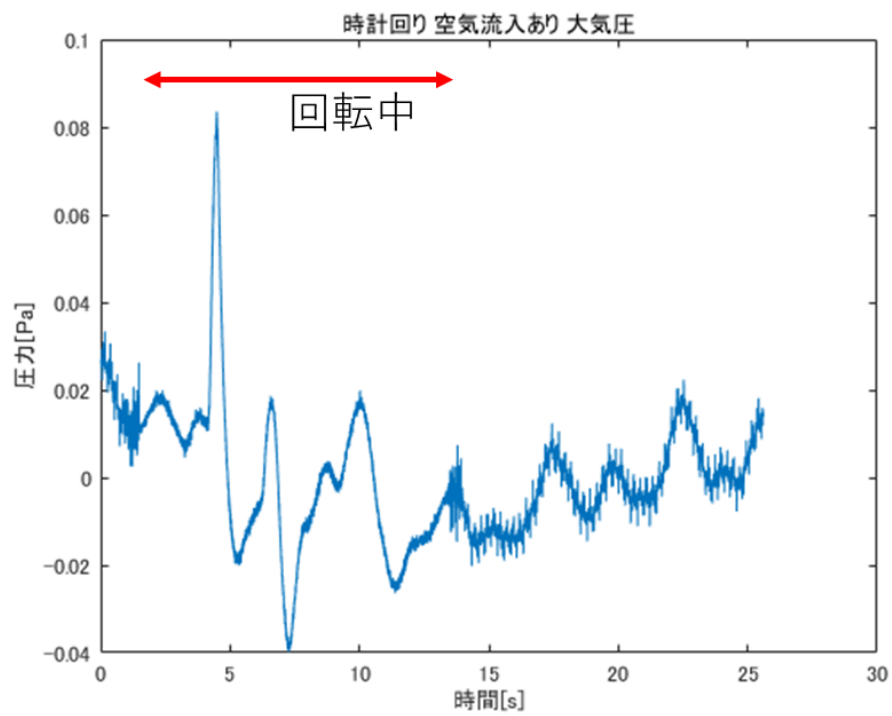


図 39. 大気圧における回転運動とガス流入

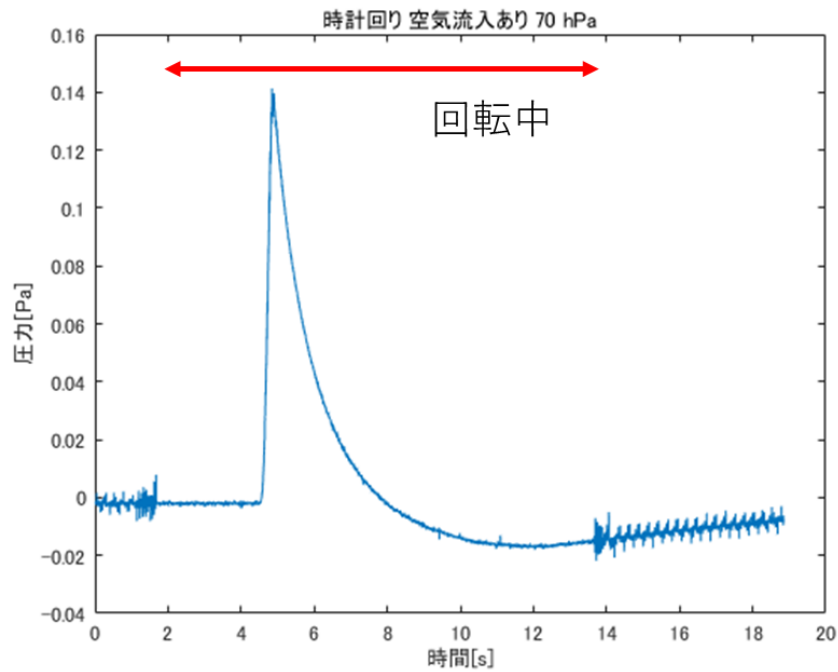


図 40. 70 hPa における回転運動とガス流入

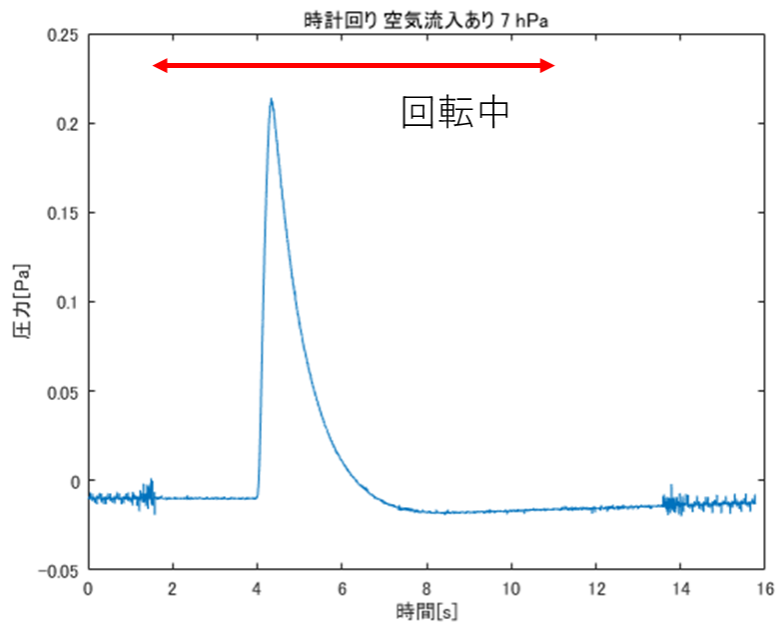


図 41. 7 hPa における回転運動とガス流入

さらに別のアクティブ実験として真空チャンバー内に約 50 cm×約 30 cm 厚さ約 20 mm の硬質プラスチックの板を 2 枚設置し、アームの可動部の運動により 1 枚ずつ押し倒したときの圧力応答を図 42、43 に示す。矢印は板が倒された時刻を示す。

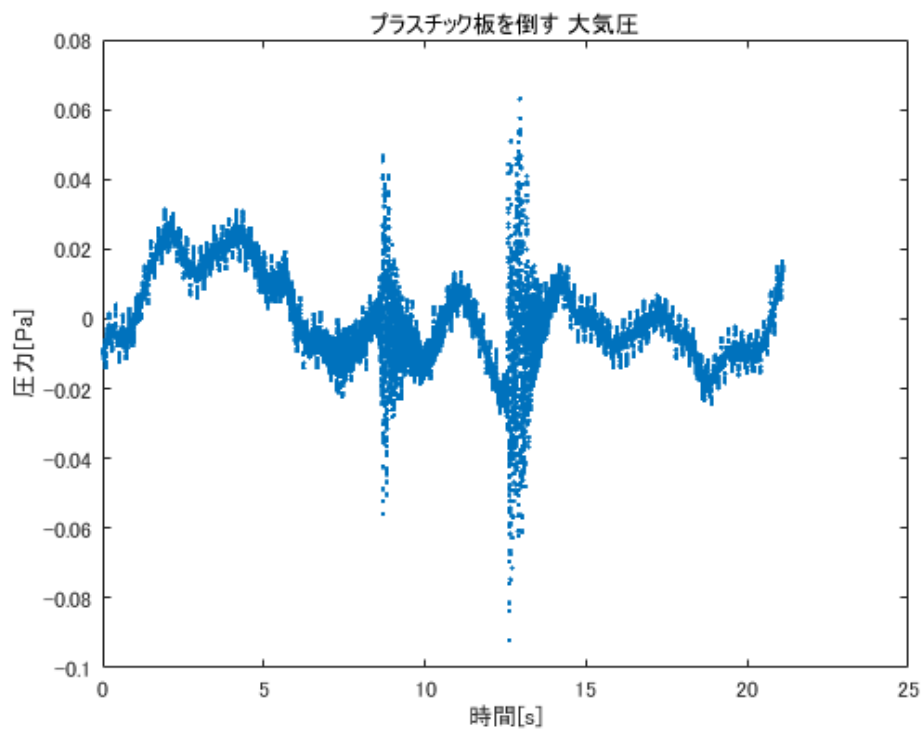


図 42. 大気圧におけるプラスチック板 2 枚が順に倒れた時の圧力応答

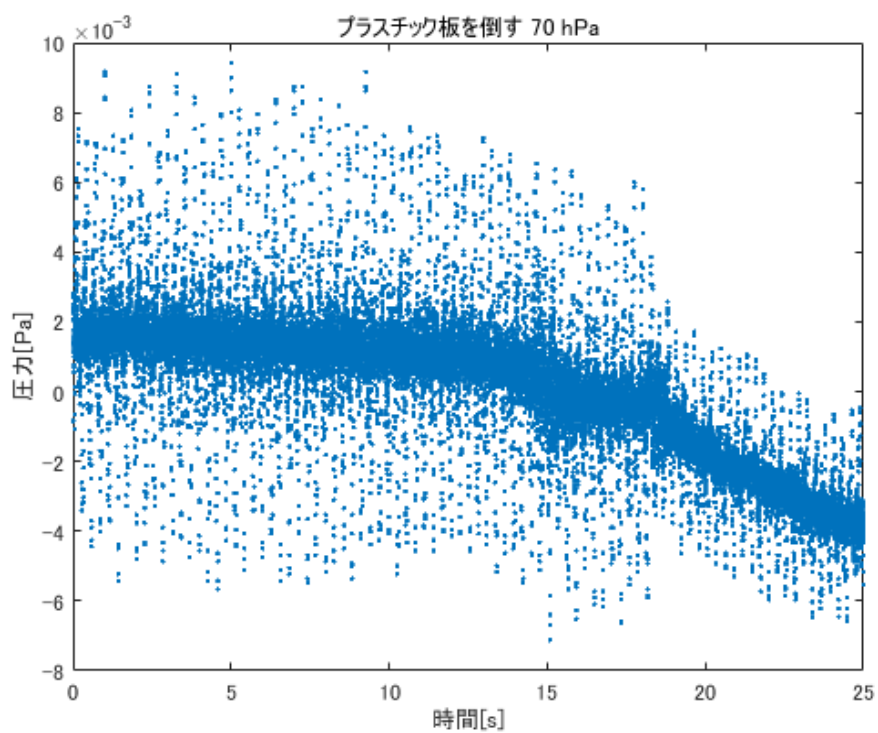


図 43. 70 hPa におけるプラスチック板 2 枚が順に倒れた時の圧力応答

4.3 気球実験の解析

4.3.1 音波伝搬特性

大気球に搭載したセンサーBOX のうち上側に搭載した BOX2 の解析データを信号波形、高度の順に図 44、45 に示す。大気球に搭載したマイクの振り子運動の周期は高度 10 km で重力加速度が $9.77[\text{m/s}^2]$ となるため 6.37 秒となる。

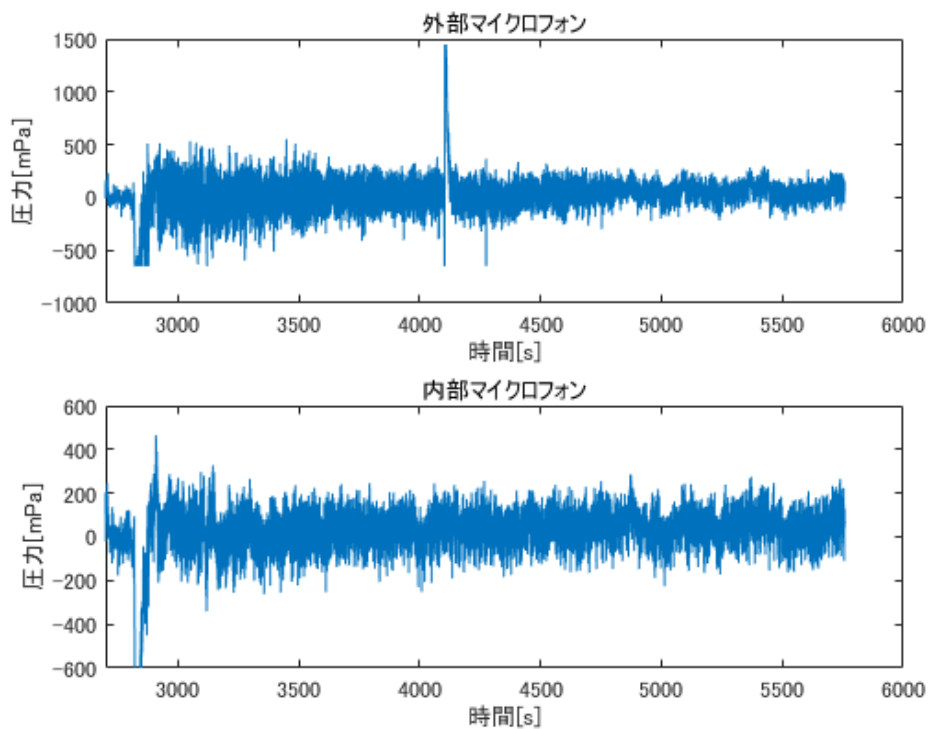


図 44. 信号波形

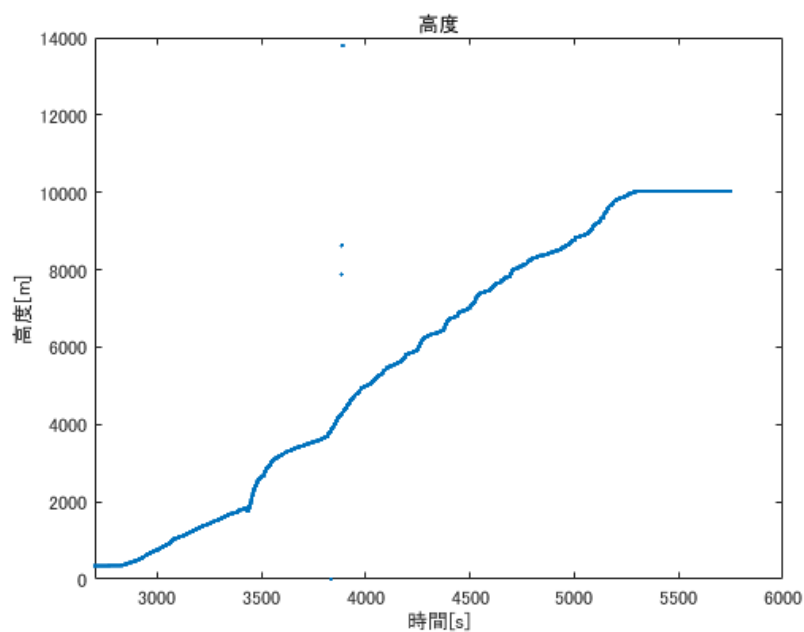


図 45. 高度

図 44 は上側が BOX 側面に配置したマイク、下側が BOX 内部に配置したマイクの信号で打ち上げ前から信号途絶までの信号波形である。信号が途絶した高度は 10 km 付近である。

小型の風船が破裂したと考えられる時間の信号波形 (4050~4200 秒)のデータを図 46 に示す。

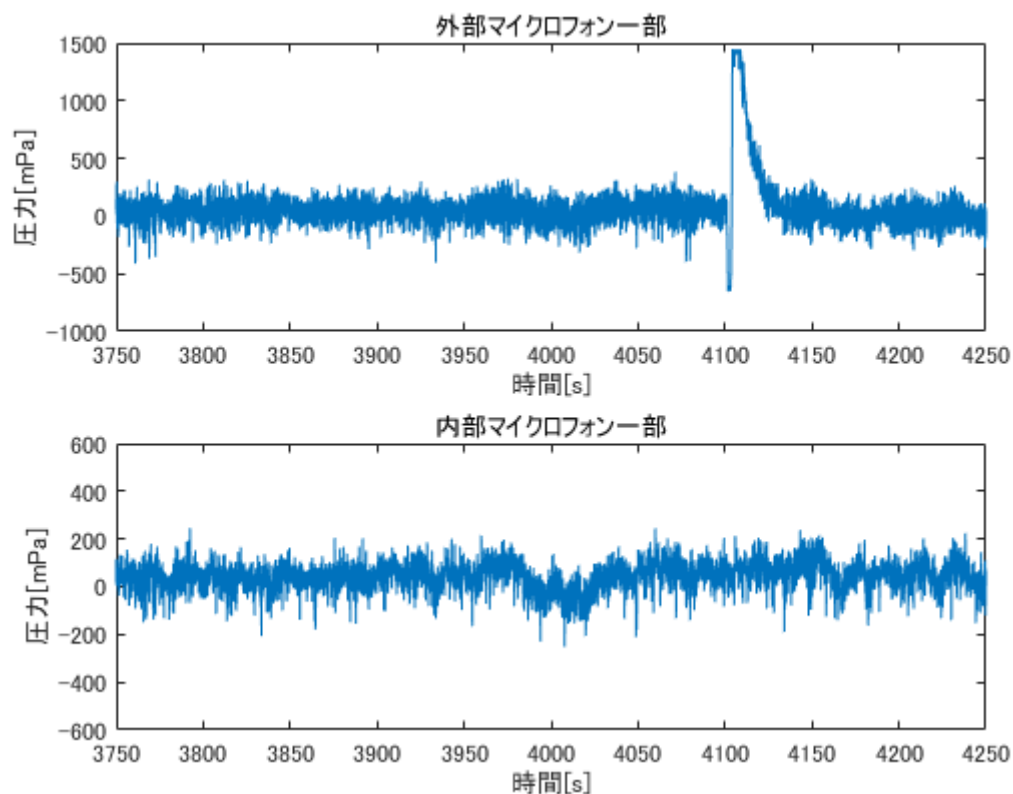


図 46. 信号波形の一部分

BEXUS チームによって事前に風船を破裂させる地上実験が行われた。この時、センサーBOX と風船の距離が 5 m 離れた場所で風船を破裂させた時の信号波形を図 47 に示す[5]。

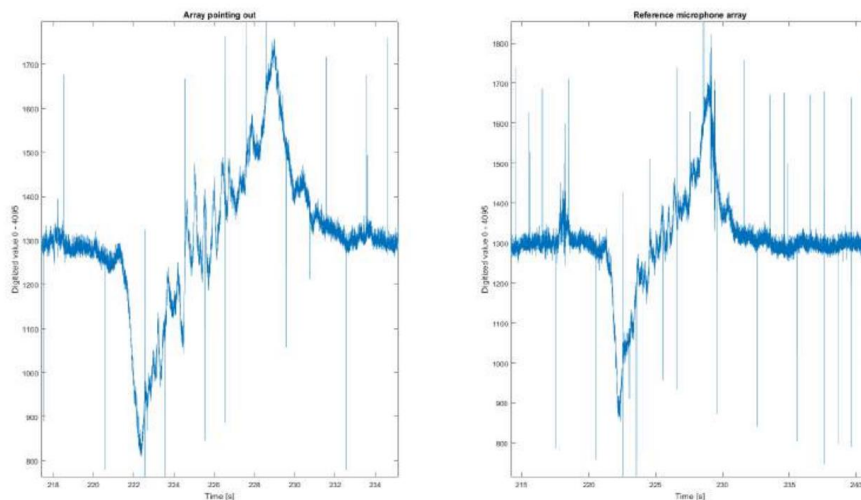


図 47. 事前に行われた風船の破裂音

図 47 は左側が外部、右側が内部に設置したマイクの信号波形であり、周期は 12 秒程度である。

4.3.2 地上実験

気球飛翔中の地上インフラサウンド観測として、スウェーデン宇宙物理研究所(IRF)の観測結果を引用して紹介する。(Kero, 2017, 私信)10 月 18 日、11 時半以降に ESRANGE より南方にあるバルト海のゴットランド島東方より波源不明のイベントが検出された。イベントの位置推定データを図 48 に示す。地上に設置したマイクに一番近い観測点はキルナ(K)である。図 54 のデータは IRF の Johan Kero 氏によるものである。

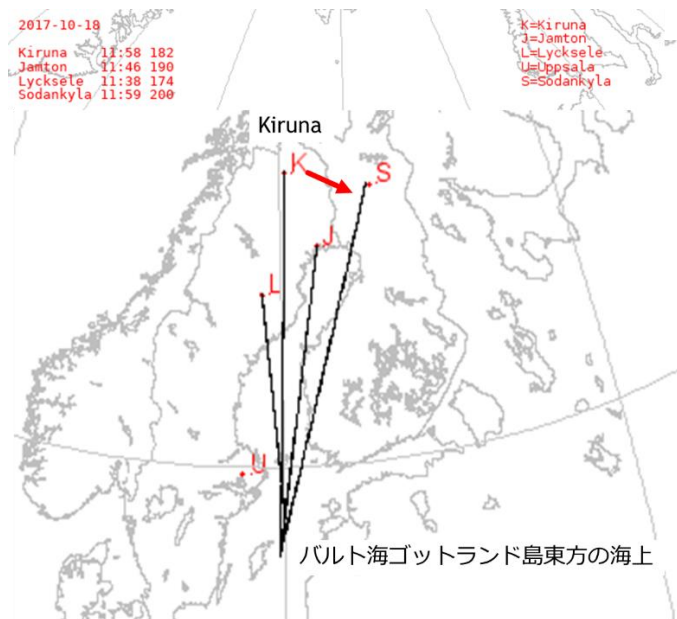


図 48. イベントの位置推定

イベントによるキルナへの音波の到来時刻や方位角を示したものを図 49 に示す。

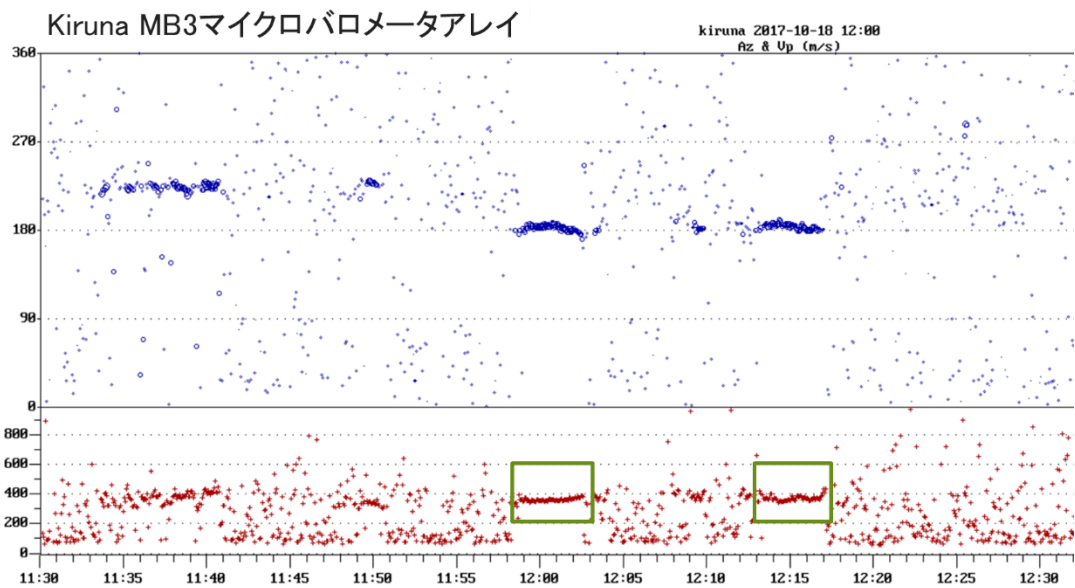


図 49. イベント到来時刻と方位角

図 54 は横軸が時間、縦軸(下)が音速、縦軸(上)が方位角を表している。また、イベントから発生する音波を見ているため、約 340 m/s をほぼ横一線にプロットされた点がイベントである。イベントは 12 時 0 分付近と 12 時 15 分付近に 4 分ほどの音波が到来している。このイベントは気球放球中に到来している。ESRANGE の地上設置マイクによるイベントの観測結果を設置個所 1、2、3 の順に図 50、51、52 に示す。

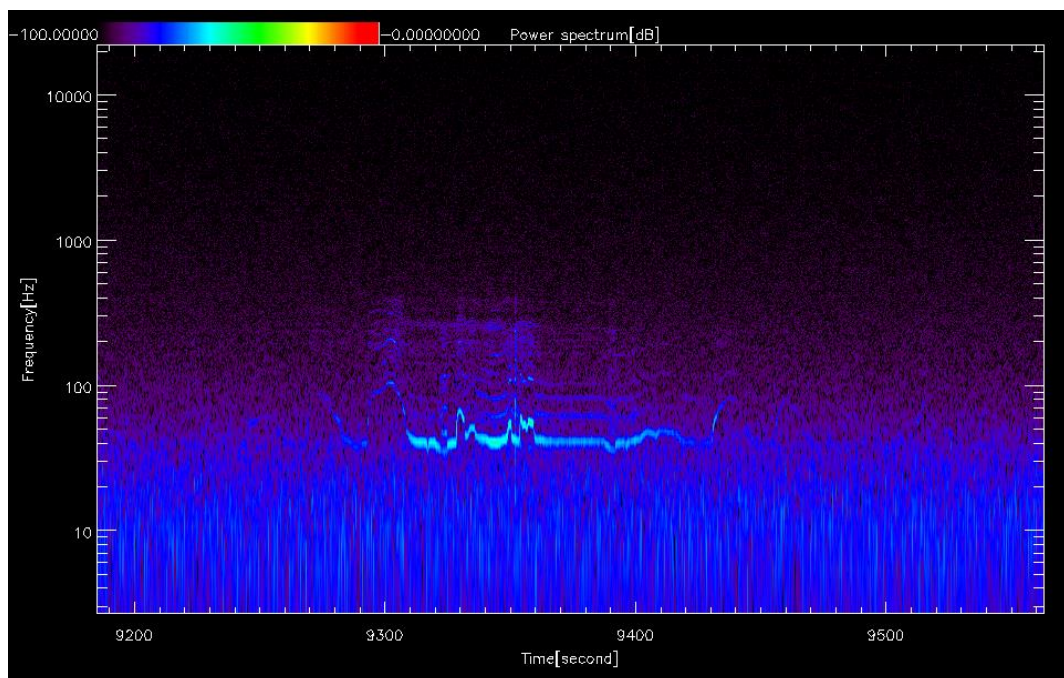


図 50. 地上観測 1

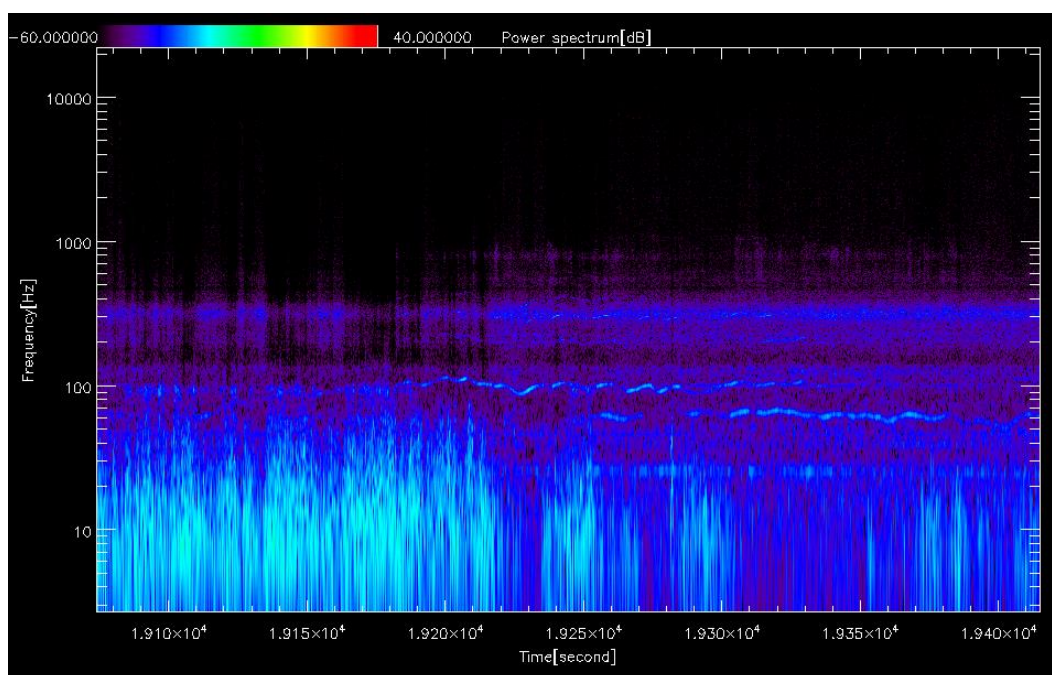


図 51. 地上観測 2

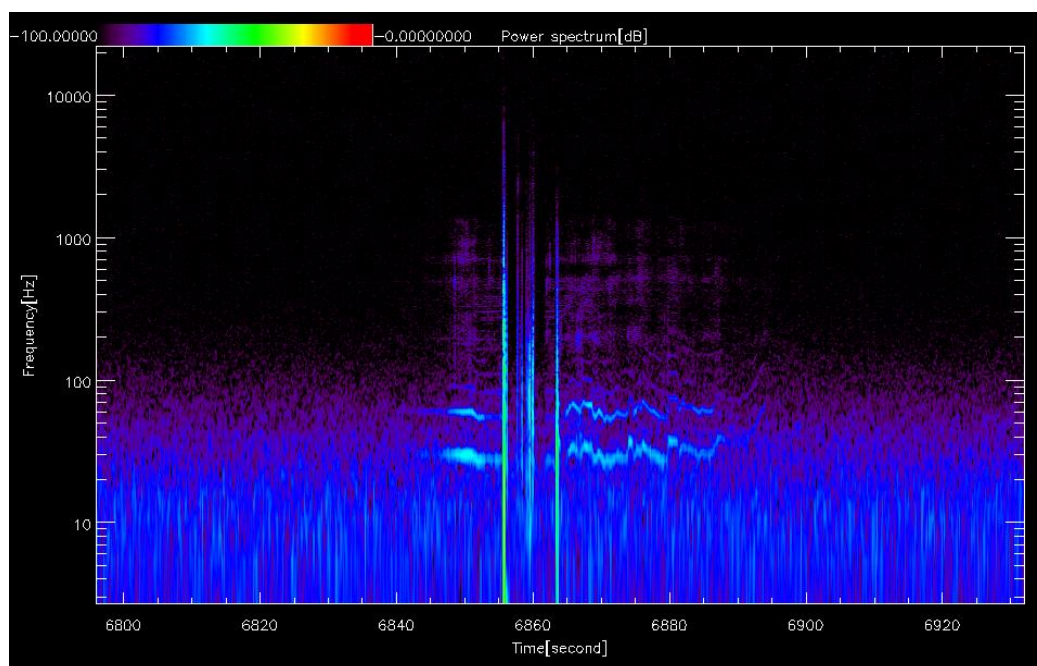


図 52. 地上観測 3

地上観測を行った際に発生した音源不明のイベントの取得時間は、図 49 の到来時間とほぼ一致する時間で到来していることが分かった。

図 51 の観測装置はアンプゲイン切り替え用端子の誤接触により 20 dB 大きく記録されている。

また、同イベントは放球したマイクでの観測にも成功しており、到来時間もほぼ一致する結果が得られた。その結果を図 53 に、さらにそれぞれ拡大したものを図 54、55 に示す。

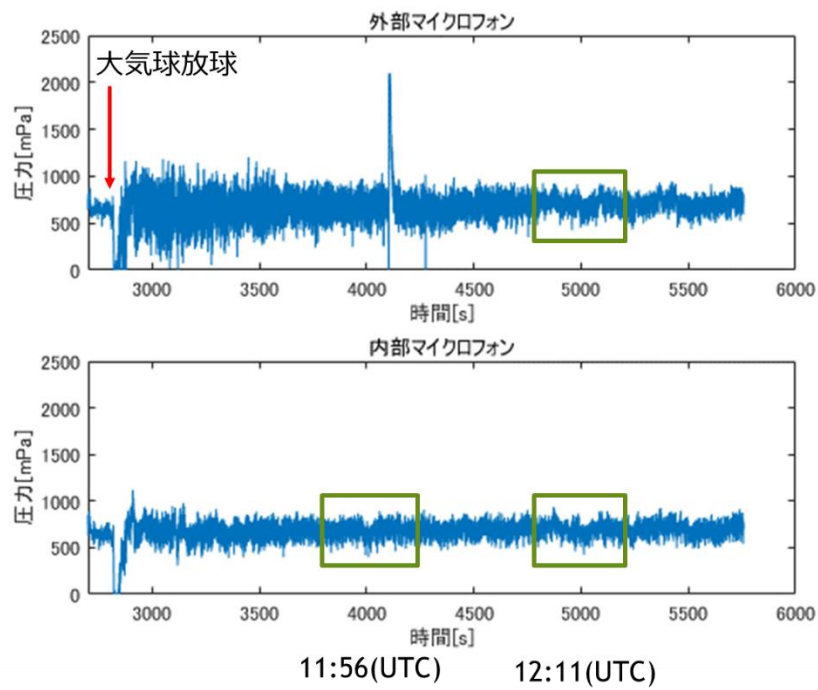


図 53. 内外マイクの信号

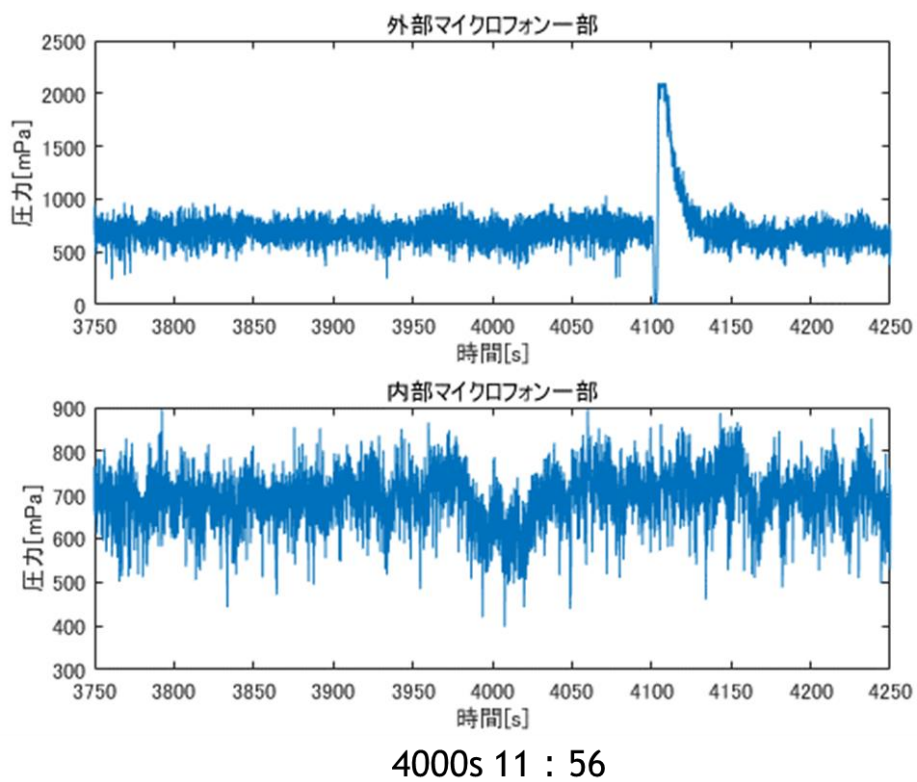


図 54. イベント結果(1 回目)

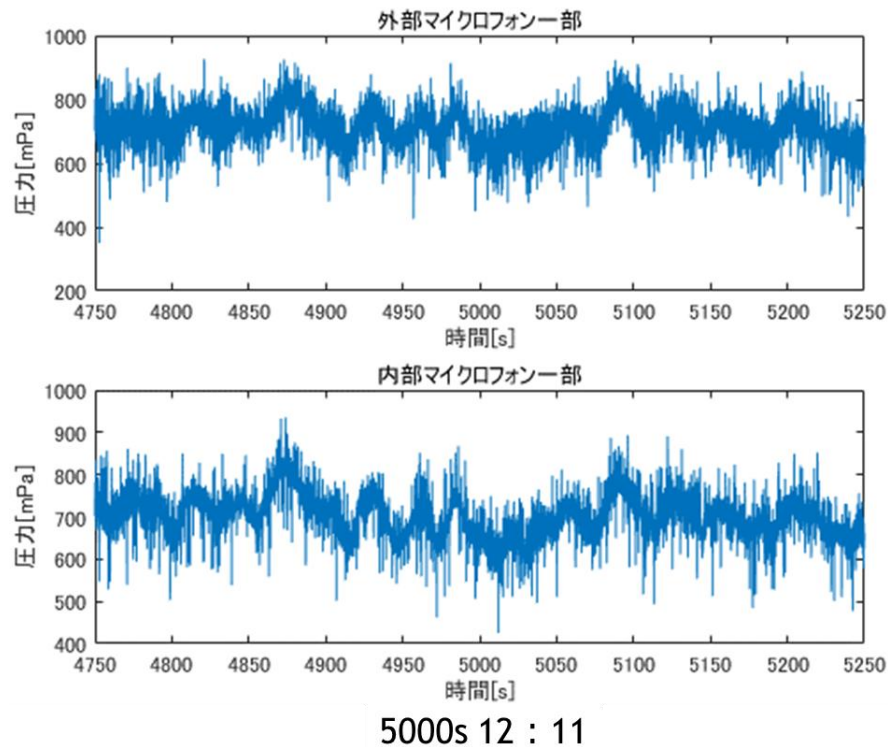


図 55. イベント結果(2 回目)

第5章 考察

3.1 節に示した 2016 年 10 月の実験では、定在波が大きな影響を与える想定をしていなかったため、定在波についての空間分布の測定は補助的な実験とした。このためデータ取得の分布は荒かったが、表 6 に示した通り、同じ大気組成で発生し、かつ定在波の位置が変わるデータを平均化することにより平均値として得た各条件下での音速の値は、実験値と理論値の差がおおよそ 1～2 割程度の精度で計測することができた。そのため、測定点を増やすことでさらに理論値に近い値が得られると考えたが、3.2 節に示した 2017 年 6 月の実験では、詳細な空間分布を計測したにもかかわらず低圧下では定在波がほぼ見られなかった。このとき大気圧条件では定在波が見られることから 3.1 節の実験と 3.2 節で使用したマイクの型式が違うことが原因であると考えた。3.1 節で使ったマイクのアレイ配置による模擬的な膜面は 30 mm×55 mm であり、3.2 節で使ったマイクの模擬的な膜面は 10 mm×10 mm となり、面積は 1/16.5 倍の大きさになるため低周波側の特性が悪くなり受音されづらかった可能性が考えられる。低圧下では圧力変動を伝える分子の数が減ることに加え、3.2 節で使ったマイクにはマイク上部に 3 層の物理的なフィルターを通し、16 個のマイクアレイを均一な距離に空気路でつなぐ方式を採用していた。この方式は大気圧下においては低周波特性を向上させることが実測されている。しかし、3.2 節の結果は、低圧時には分子の数が少なくなる結果、疎密波としてのエネルギー伝達が悪くなることが影響するなどして定在波が見えないほどに音波が大きく減衰してしまった可能性が考えられる。そのため、改良型コンデンサマイクでは低圧下での観測に不向きである可能性が考えられたが、図 27 および図 30 に示すように定在波

が測定できない場合でも波形の観測は可能であると考え。また、3.1 節と3.2 節の実験では、同条件下で行ったときの定在波を表すデータを比較すると図 55、図 56 のようになる。

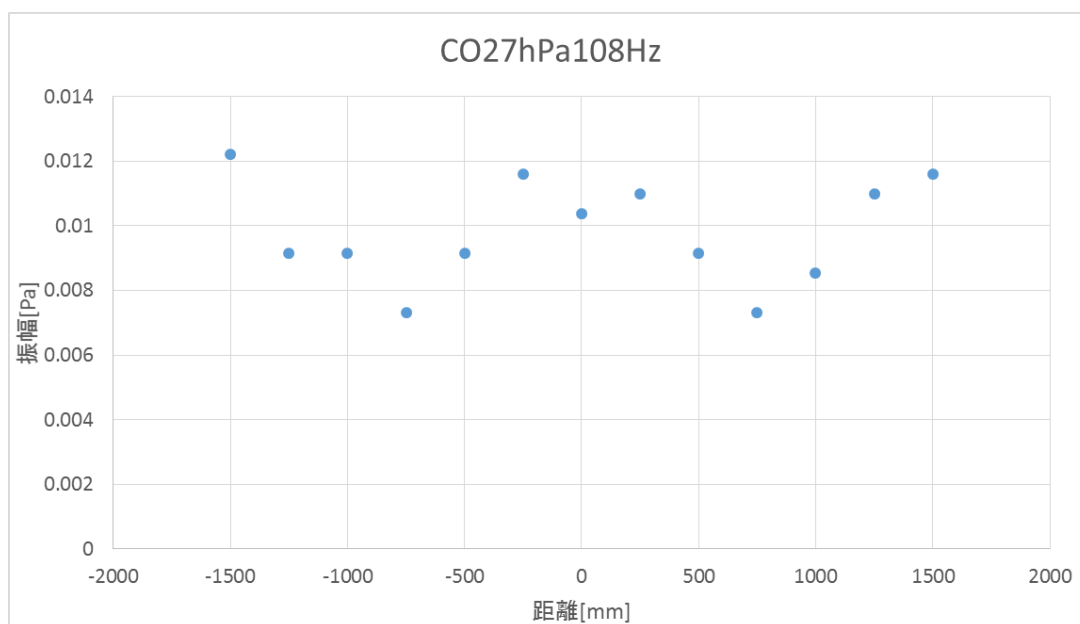


図 55. 3.1 節 CO₂, 7 hPa 108 Hz の定在波

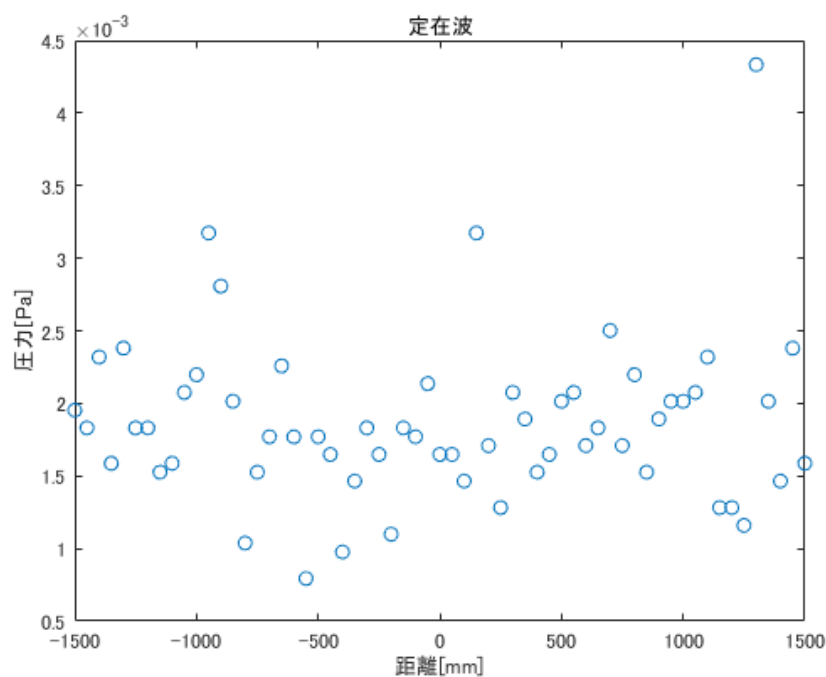


図 56. 3.2 節 CO₂, 7 hPa 108 Hz の定在波

振幅の音圧を比較すると3.2 節で用いたマイクは3.1 節で用いたマイクの約 1/4 の振幅になっていることが分かる。このため、3.2 節の実験では定在波に近いグラフを描けたが、理論値と大きく離れた値となるため音速の値を導出しても信頼性が低くなる。定在波の腹の部分から外れた場所

ではどちらの信号も同程度の振幅となるため、チャンバー内のスピーカーが同じ位置に設置できず、長手方向以外の定在波の発生位置にずれが生じたことが原因と考えられる。よって火星模擬大気中の特性として音速は 3.1 節の実験結果を信用することとした。

マイクを回転台に乗せ回転運動をした時に回転させている時間だけ信号レベルが小さくなった。この状態でガスを流入するとききれいな信号が得られることから、回転により膜面が常に大気に対し加速度により押されることで膜面の可動範囲が制限されていると考えられる。また、図 38 および図 39 の回転時と停止時を周波数領域で比較したものを図 57 に示す。

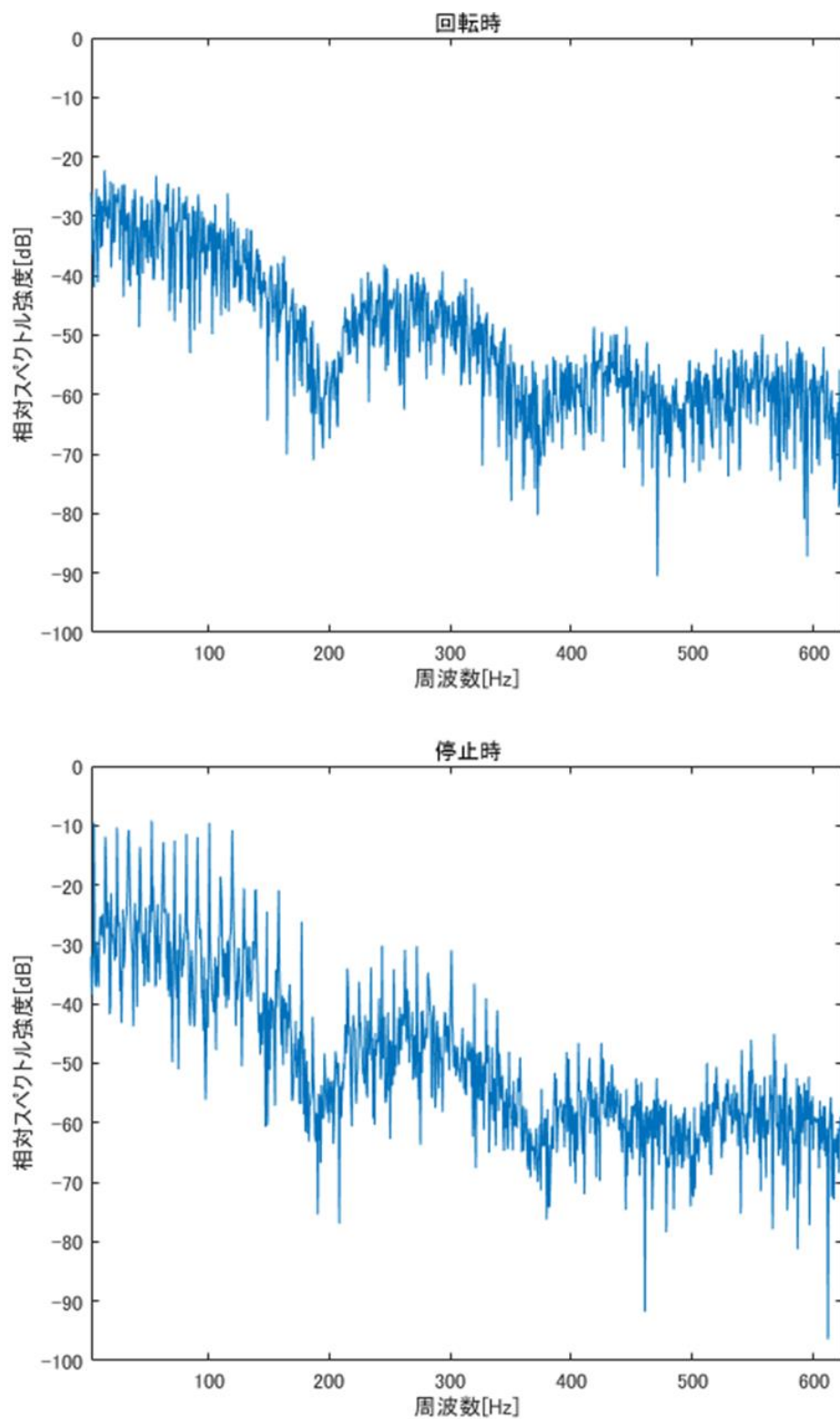


図 57. 回転時と停止時のスペクトル

回転中の波形をみると主な周波数帯はそのままにノイズが取り除かれたようなスペクトルとなった。

この結果より、回転自体が大きな振幅の低周波を生み、同じ場所に高周波が到来しても、低周波の音圧に飲み込まれ高周波への応答が鈍くなる結果、ローパスフィルタに近い役割を果たす可能性が考えられる。他の可能性として、回転台に用いられていたステッピングモーターのノイズが停止時と回転時で異なることが挙げられる。

振り子運動を測定すると、マイクが約 0.5 秒の振動で振れ、周波数では 2 Hz を示すことがビデオ映像から確認できた。70 hPa では 2 Hz にピークを得たが、圧力以外同条件で実験を行ったにもかかわらず、大気圧と 7 hPa の条件においては 4 Hz のピークのためのスペクトルが確認された原因は不明である。

真空チャンバー内のアームを用いてプラスチックの板を 2 枚順番に倒したとき、大気圧下では板によってできた圧力変動が測定できた。70 hPa におけるデータには強いノイズと思われる信号が含まれていたため、定量的に判断することは難しいが、大気圧時と似た時間差で信号が強く密になっていることが確認できる。

4.2 節に記した 2017 年 10 月に行われた大気球を用いた実験では、BOX 外部に設置したマイクの信号波形は高度とともに振幅が減衰していることがわかる。図 40 の上側に示された飽和するほど大きく N 型の波形が出ている部分は小型の風船が破裂した音であり、飽和の原因は事前実験では 5 m 離れた場所で破裂させたのに対し気球実験ではセンサー BOX 近傍に取り付けられたためであると考えられる。また、内部のマイクが破裂音を観測できていないのは密封度の高い容器により圧力波が到達しなかったためであると考ええる。この N 型波形から 50 秒後の 1450 秒付近の振幅は小型の風船の破裂による振動の影響であると考えられる。その近傍に 4130~4190 秒付近の周期 70 秒にわたる波形がみられるが、0.014 Hz 程度の信号となり、FFT 解析では DC 成分と混在したためマイクアレイによるデータでは周波数特性は確認できなかった。また、図 44 の上の図から高度上昇による大気圧の変動に伴う音波伝搬の減衰が確認できた。高度の上昇による音波の減衰を 125 m 上昇するごとに振幅をプロットし、フィッティングしたものを図 58 に示す。

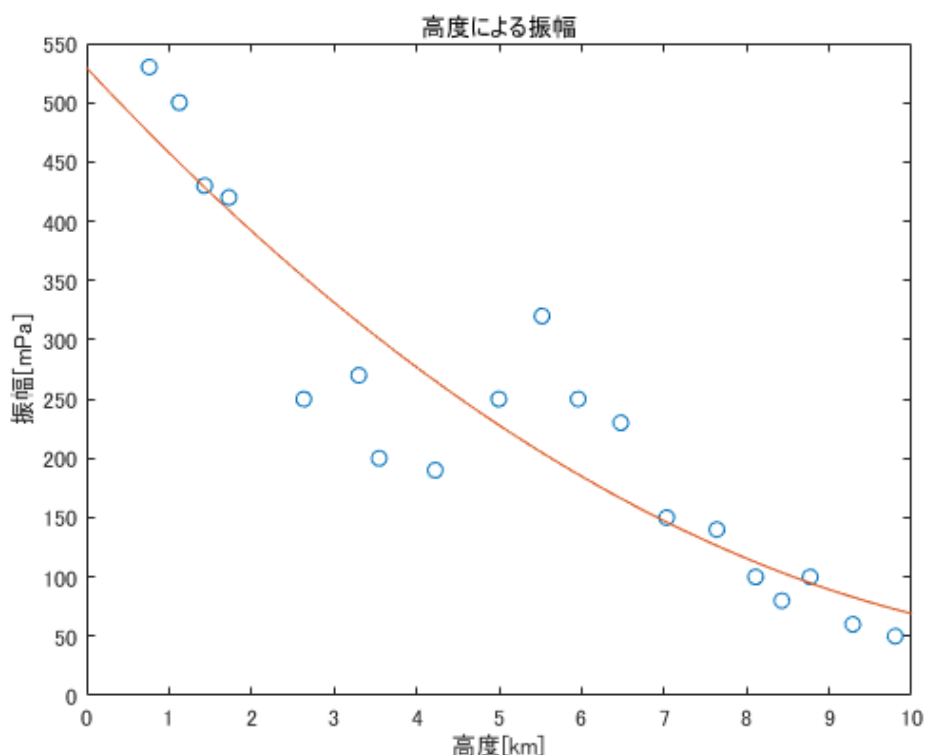


図 58. 高度による音波減衰

高度 10 km 地点に対し、0.7 km 地点では振幅レベルが 10.6 倍となり、高度上昇に伴う減衰の傾向を確認できた。図 43 の外部と内部のマイクそれぞれで同時に取得されている波形と図 44 の地上で風船を破裂させた事前実験の波形を比較すると周期では約 8 秒の差があるが波形の形状は相関が高いように見えるため、風船の破裂、または破裂に伴う運動による波形であると考えられる。

また、地上の MB3 マイクロバロメータにて気球実験中に検出された 2 回のイベントは、11 時 59 分から 12 時 3 分(UTC)、12 時 13 分から 12 時 17 分(UTC)の各 240 秒のイベントとして観測されており、一方、気球に搭載したマイクでは 11 時 56 分から 100 秒、12 時 11 分から 230 秒程度のイベントとして観測されている。この時間差は上空であることと気球が南東に移動していたため、その距離と伝搬経路による到達時間差で説明できる。また、気球搭載マイクは BOX の内部では信号が見え、外部では信号が見えないという現象が起きている。これは内部に設置したマイクが密閉されているため高周波成分が減衰し低周波の音波を取得できたためであると考えられる。また、図 50、51、52 より地上では 40 Hz 付近に 100 秒程度の信号が見えることが分かる。MB3 マイクロバロメータによるデータでは強度や周波数は読み取れないがこの結果から 240 秒のうち中央付近の 100 秒が強い信号が出ていることが分かる。そのため 1 回目のイベントは気球搭載のマイクで 100 秒程度の振幅が得られたと考えられる。

第6章 結論

本研究では、火星表層大気での音波観測に向けて、複数のコンデンサマイク素子によるアレイ型マイクを開発し、苛酷環境下での動作実証実験を進めてきた。先行研究ではチャンバー内の圧力を 7 hPa、温度を-15℃から-120℃に設定した時の受音特性を検証した。その条件ではコンデンサマイクと MEMS マイクの受音特性を比較するとコンデンサマイクが高い S/N 比を示した。また、0.1 Hz の圧力変動を与えるとコンデンサマイクのみ周波数特性が得られた。この結果より、本実験ではコンデンサマイクを使用し実験、検証を行った。

コンデンサマイクのブレッドボードモデルを改良し、真空チャンバーを用いた火星表層大気模擬環境下および地球対流圏～成層圏下部における動作実験を行い、それぞれの実験で動作を確認することができた。気球用に工夫したマイクにより小型化することで搭載の幅は広がったが JAXA での実験結果から低圧条件下において観測できる音波の振幅が小さくなることが分かった。しかし、周波数特性の取得は可能であるため将来的には火星地表面における自然現象の観測は可能であると考ええる。膜面の大きさやアレイの配置方法の検討、空気路構造の吟味、容器を含めた物理的な構造の検証が必要である。

大気球を用いた成層圏下部 12000 m までのマイクによる音波観測に成功し、上空に行くにつれてノイズ成分が減少する様子が確認できた。また、スウェーデン IRF の地上インフラサウンド観測網で得られた原因不明の 2 例のイベント検出が地上と上空の 2 種 5 台のセンサーで観測できた。外部機関のインフラサウンドセンサ群と同じ時間帯で観測されたことより、小型コンデンサマイクでの境界面の無い火星地表面に近い待機状態での観測は可能であり、火星での運用は可能であると考ええる。ただし、上空 30 km 程度までのデータは取得できておらず火星と同程度の条件を試すには、今後の追実験が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり、指導教員でありいつも丁寧なご指導、ご鞭撻を下さいました高知工科大学 システム工学群 山本真行 教授に心から感謝申し上げます。副査として有益なコメントを頂きました八田章光教授、小林弘和准教授に感謝いたします。

マイク BBM 及び A/D 変換ボードを製造・提供いただいた株式会社サヤ 横田昭寛 氏、ISAS/JAXA 共同利用申請により大型サイエンススペースチャンバーのマシントimeを頂いた阿部琢美 准教授に感謝申し上げます。BEXUS/EXIST 実験チーム代表 Robert Persson 氏をはじめチームの方々及び ESA、IRF でお世話になりました関係者の皆様に感謝申し上げます。

本研究室で共に研究に取り組んだ学部生、大学院生の皆様ならびに斉藤大晶 助教には多くのアドバイスをして頂いたことに感謝いたします。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 藤津裕亮, 火星大気中音波検出器開発のための過酷環境試験下マイク動作特性の解析, 高知工科大学 2015 年度卒業研究報告, 2016
- [2] 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, 高知工科大学 2014 年度卒業研究報告, 2013
- [3] Kasper Wikman, EXPERIMENT OF INFRASOUND IN THE STRATOSPHERE Distributed data guide, November. 2017.
- [4] Robert Persson, David Skanberg, Hannah Petersson, Jakob Ostberg, Jonas Blidnert, Kasper Wikman, Lucas Svensson, Max Nilsson, Mohd Bilal, Sandra Nilsson, Sarah Zayouna, Vincent Still, Yared Woldu, Student Experiment Documentation, June, 2017.
- [5] Robert Persson, David Skanberg, Hannah Petersson, Jakob Ostberg, Jonas Blidnert, Kasper Wikman, Lucas Svensson, Max Nilsson, Mohd Bilal, Sandra Nilsson, Sarah Zayouna, Vincent Still, Yared Woldu, Student Experiment Documentation (Examination of Infrasound in the Stratosphere and Troposphere), January, 2018
- [6] 平塚市博物館 火星の大気と気候
http://www.hirahaku.jp/hakubutsukan_archive/tenmon/00000025/72.html, 2015 年 12 月参照
- [7] 宇宙技術開発株式会社 続く火星探査レース
<http://www.sed.co.jp/tokusyu/mars.html>, 2015 年 12 月参照。
- [8] 株式会社サヤ, MULTIFUNCTION-I/O-X2 ADX II 42FE-250K-ETHERNET USER MANUAL, 2015.
- [9] 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, サイエンススペースチャンバー仕様書
- [10] 千葉工業大学 惑星探査研究センター(PERC), 火星環境模擬スペースチャンバ仕様ボード
- [11] 山田晃 音響工学 第 10 章 超音波応用(医用診断),
<http://web.tuat.ac.jp/~yamada/onkyo/chap10/chap10.html>, 2018 年 2 月参照
- [12] 千秋博紀, 大野宗祐, 乙部直人, 山本真行, 仲吉真人, はしもとじょーじ, 梅谷和弘, 池原光介, 藤津裕亮, 火星環境模擬チャンバーを用いた探査機器の耐環境試験 Environment test of onboard hardware using Mars Environmental Simulation Chamber at Planetary Exploration Research Center(PERC), 千葉工業大学研究報告 第 63 号, 2016

付録

BEXUS/EXIST センサー詳細[5]

センサーBOX のブロック図を図 59 に示す

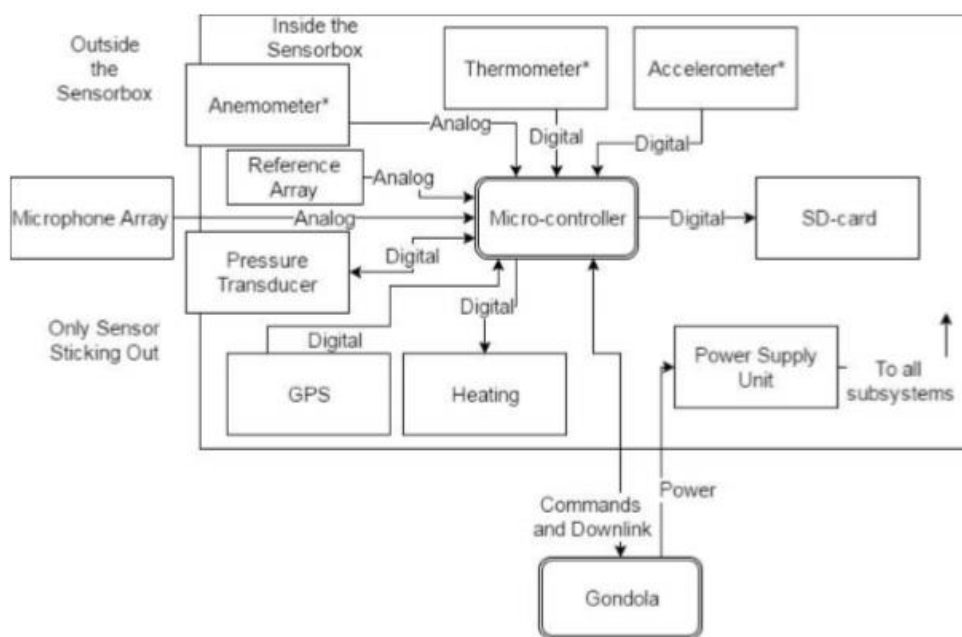


図 59. センサーBOX ブロック図

図 59 は Arduino を中心にそれぞれ加速度計、温度計、風速計、コンデンサマイク×2、圧力計、GPS、SD カードが接続されている。

EXIST チームはこれらの機器の動作を事前実験により評価している。

事前実験の内容は各センサーの動作実験と統合後の動作実験、低圧下での駆動実験(0.025 atm)、振動実験(5 Hz)、荷重実験(40 kg)、1 時間の稼働実験が行われ、BEXUS 基準にてそれぞれの課題を達成した。

データのサンプリングレートは、コンデンサマイクが 1 kHz、圧力計と風速計が 100 Hz、高度計が 10 Hz サンプリングとなっている。