

修士論文

電力未整備地域での観測を目的とした

省電力インフラサウンドデータロガーの開発

Development of a Low-Power Infrasound Data Logger for

Observations in Electrically Undeveloped Area

報告者

学籍番号:1275054

氏名:濱島 岳

指導教員

山本 真行

令和7年2月18日

高知工科大学大学院工学研究科 基盤工学専攻 電子・光工学コース

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.1.1 インフラサウンドについて	1
1.1.2 インフラサウンド観測システムの課題	1
1.1.3 小型インフラサウンドセンサ INF03S	2
1.1.4 STA/LTA 法	3
1.2 目的	3
第2章 開発したデータロガーと実装したシステム	4
2.1 インフラサウンド記録装置	4
2.2 開発したロガー機器の概要	7
2.2.1 ハードウェアの概要	7
2.2.2 時刻同期	8
2.2.3 LPWA (Low-Power-Wide-Area network)	10
2.2.4 データ概要	11
2.2.5 STA/LTA 法を用いたイベント検出	11
2.2.6 ソフトウェアの概要	13
第3章 機器の試験評価	15
3.1 消費電力の比較	15
3.2 LPWA を用いた無線通信	15
3.3 STA/LTA 法を用いた雷鳴インフラサウンド検出	20
3.4 RaSK 燃焼実験試験運用	24
3.5 南極での運用試験	27
3.5.1 南極で発生するクラックのインフラサウンド観測	27
3.5.2 南極運用中における問題	28
3.5.3 昭和基地周辺での STA/LTA 法と LPWA を用いた観測	29
第4章 考察	31
4.1 消費電力の比較	31
4.2 LPWA を用いた無線通信	31
4.3 STA/LTA 法を用いたイベント検出	31
4.4 INF04 と製作したロガーシステムの時間のずれ	32
4.5 南極でのクラック観測	33
第5章 結論	34
謝辞	35
参考文献	36

第1章 序論

1.1 背景

1.1.1 インフラサウンドについて

インフラサウンド(超低周波音波)とは人間の最低可聴域といわれる周波数 20 Hz よりさらに下の周波数で伝搬する音波のことである(図 1.1)。この音は津波や土砂崩れなどの自然災害や、流星など宇宙からの飛翔物体によって発生することが知られており、低周波であるため空気の粘性による減衰を受けにくく長距離を音速で伝搬するという特徴を持つ。2022 年 1 月 15 日に南太平洋・トンガで発生した火山島の噴火によるインフラサウンドを日本に設置しているインフラサウンドセンサで明瞭に観測できたことから、規模によっては数千 km を伝搬することがわかる[1]。

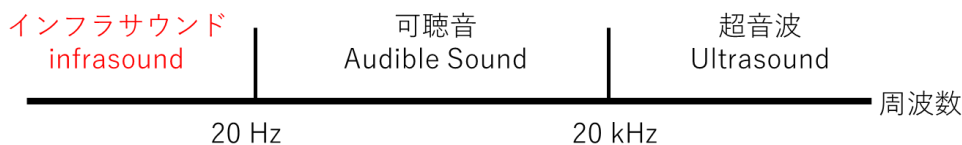


図 1.1 インフラサウンドと周波数の関係

高知工科大学システム工学群宇宙地球探査システム研究室(山本研究室)では長距離を音速で伝搬するという特性から、津波情報の早期検出と伝達による減災や宇宙探査機のサンプルリターンカプセルの軌道計算、波源エネルギー推定といった分野で活用してきた[1][2]。インフラサウンドはそれぞれの事象で発生する周波数が異なっており、津波はインフラサウンドの周波数帯の中でも低周波帯であり、流星や雷、雪崩などは比較的高い周波数帯であることが知られている(表 1.1)。

表 1.1 現象ごとの伝搬距離と周波数特性

現象	現象からの距離	特性周波数帯
津波	M7.5~M9クラス海底地震の震源から数1000 km	0.01~0.001 Hz
扉の開閉	数m	~1 Hz
雪崩	数 km	~1 Hz
雷	数 km	~3 Hz
発電用風車	1 km以内	2~4 Hz
火山噴火	火口から数10~数100 km	~4 Hz

1.1.2 インフラサウンド観測システムの課題

我々の研究室では先行研究により独自でインフラサウンドを観測するセンサや、観測データを解析するソフトウェアの基礎開発を行ってきた。現在は株式会社 SAYA と

共同で開発したインフラサウンドセンサ (INF シリーズ) を主に使用しており、用途に応じて使い分けている (表 1.2)。しかし、津波などで使われる ADXⅢ-INF01LE (以下 INF01) や雷などで使われる ADXⅢ-INF04LE (以下 INF04) は共通して記録装置にノート PC を使用するため、電力供給が安定して行える地点でしか観測できず、大量に運搬するのにもコストがかかるという欠点がある。また、商用電源を使用する関係上落雷などによる停電により電源の安定的な供給に問題が発生することから、頻繁に現地に赴きノート PC が正常に動作しているかの確認を行わなければならない、観測網の拡大という面でも限界がある。最近では雪崩や南極における氷震の検出にも当研究室のインフラサウンドセンサは用いられており、電力供給が満足にできない地点でも長く稼働することが求められている。

表 1.2 観測対象ごとの使用するインフラサウンドセンサ

型式	サイズ [mm]	重量 [g]	観測対象
INF01LE	208×225×238	5800	津波
INF03	88×48×24	121	雪崩 雷 流星
INF04LE	128×115×29	256	

1.1.3 小型インフラサウンドセンサ INF03S

INF03S (図 1.2、図 1.3) は気球・ロケットなどに搭載することを想定して株式会社 SAYA と共同で開発したセンサである。膜厚式のインフラサウンドセンサ (INF01) とは異なり、小型のマイクを面上にアレイ配置し上部にピンホールを開けたプリント基板を3層配置することで他のインフラサウンドセンサと比べて軽量・小型化・低消費電力化を実現している。信号はアナログ信号を出力するようになっており、低消費電力ロガー機器を用いることで、太陽電池などを用いた長期運用も可能である。

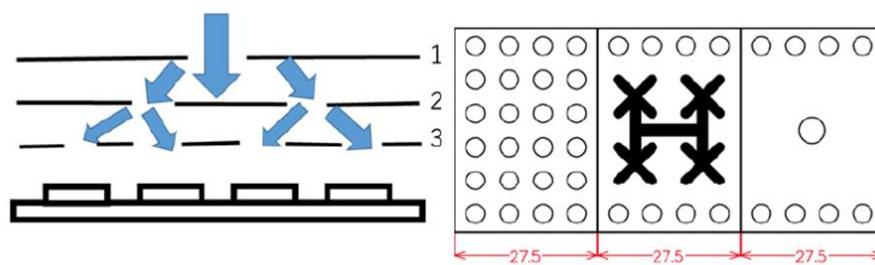


図 1.2 INF03S のマイク付近の構造[3]

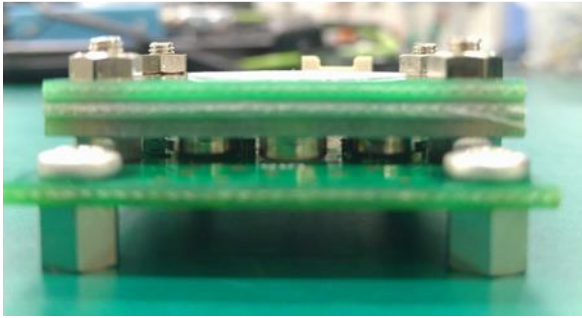


図 1.3 INF03S の外観

1.1.4 STA/LTA 法

STA/LTA 法とは地震学で用いられるイベント検出手法である。この手法は観測したデータの短時間平均と長時間平均の比を用いてトリガーをかけることで、強振動だけでなく弱振動も検出する方法である。この手法はレベルトリガー方式とは異なり背景ノイズに追従して長時間平均が変化することからレベルトリガー方式のようにノイズを考慮しながらの閾値の設定をする必要がなく安定的にデータの検出を行うことができる。

当研究室ではイベント検出機能を備えた低消費電力インフラサウンド記録装置を用いることで長期間の観測を試みようとしており、先行研究[4]では STA/LTA 法を用いたインフラサウンド記録装置の開発を行っている。このように STA/LTA 法はインフラサウンドでの応用に期待されているが、実際の自然現象を観測するには至っておらず、この手法を用いたデータ検出の有用性はまだ実証できたとは言えない。本研究では先行研究[4]をもとに実際に自然現象の観測を行う。

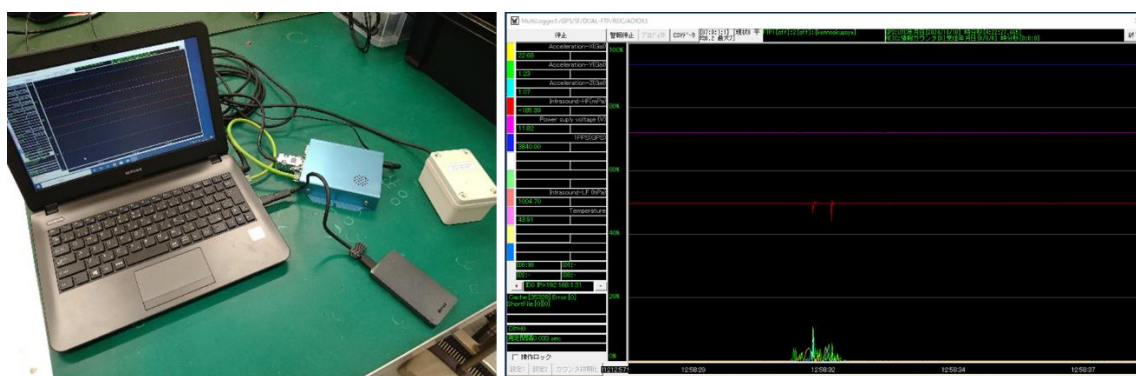
1.2 目的

土砂崩れや流星観測に用いるインフラサウンド観測装置に小型インフラサウンドセンサ INF03S を用いることで、今までよりも低電力で稼働するロガーシステムの開発をハードウェア、ソフトウェアの双方から試み、その実証実験を行う。また、新規性として地震学で用いられる STA/LTA 法をインフラサウンドに適用し、実際に自然現象のイベントを検出することで低消費電力化と安定的なイベント検出手法の確立を試みる。他にも雪崩などが発生する危険地域や南極などの頻繁に観測地点に赴けない地域での観測を想定し、LPWA (Low-Power-Wide-Area network) を用いた長距離無線通信を行うことで、インフラサウンド観測網の拡大に貢献することを目的とする。

第2章 開発したデータロガーと実装したシステム

2.1 インフラサウンド記録装置

第1章でも述べた通り、INF01・INF04 を用いたインフラサウンド観測においては主にノート PC を用いている。株式会社 SAYA が開発したインフラサウンド用ロガーアプリケーション MultiLoggerX3 は、INF シリーズのセンサとノート PC を Ethernet 接続することでデータの記録を可能にしている。データは GPS からの時刻、3軸 MEMS センサからの加速度、温度、インフラサウンドの高周波・低周波から構成されており、データはノート PC 内のメモリ(長期観測の場合は外付けの HDD を使用)に CSV 形式で保存される(図 2.1)。基本的に商用電源による運用を想定しており、室内や電力インフラが整っている施設の周辺に設置する。



1	20.1938	9.0397	6.4861	-1204.4945	11.7902	3839.9961	1004.5793	28.0400	2024	10	9	8	26	27.829
2	20.8031	9.0397	6.4351	-1213.1678	11.8042	3839.9961	1004.5793	28.0400	2024	10	9	8	26	27.839
3	22.5800	7.3544	6.5883	-1213.1678	11.8042	3839.9961	1004.5789	28.0400	2024	10	9	8	26	27.849
4	26.8954	4.2390	6.5372	-1213.1678	11.7962	3839.9961	1004.5784	28.0400	2024	10	9	8	26	27.859
5	26.5908	1.9918	6.4861	-1213.1678	11.7982	3839.9961	1004.5784	28.0300	2024	10	9	8	26	27.869
6	27.8092	2.1450	6.5883	-1213.1678	11.7947	3839.9961	1004.5781	28.0300	2024	10	9	8	26	27.879
7	27.8600	0.7150	6.5883	-1204.4945	11.7922	3839.9961	1004.5781	28.0400	2024	10	9	8	26	27.889
8	26.4385	1.7364	6.5372	-1204.4945	11.7922	3839.9961	1004.5781	28.0500	2024	10	9	8	26	27.899
9	26.4385	2.5536	6.4861	-1213.1678	11.7972	3839.9961	1004.5781	28.0500	2024	10	9	8	26	27.909

図 2.1 ノート PC と MultiLoggerX3 を用いたロガーシステム

先行研究[5]で開発した Raspberry Pi を用いた記録装置では、小型インフラサウンドセンサ INF04 をノート PC と同じように Ethernet で接続し記録することができる。これによりノート PC よりも小型な低消費電力ロガーシステムを実現している。データは Raspberry Pi に搭載されている microSD に保存され、出力形式は選択可能になっている。

2020 年 12 月 6 日に宇宙航空研究開発機構(JAXA)が着陸させた HAYABUSA2 の再突入カプセルでは、合計21台を着陸地点であるオーストラリア南部のウーメラ砂漠周辺に設置し、大規模なアレイ観測を行った実績がある。



©JAXA, 高知工科大学, Curtin 大学, 日本大学, 茨城大学

図 2.2 Raspberry Pi を用いたロガーシステム[上]と HAYABUSA2 の観測様子[下][5]

先行研究[6]で開発した Arduino を用いた気球搭載用インフラサウンド記録装置では、小型インフラサウンドセンサマイクの INF03S を用いている。MCU と microSD を用いての記録を行っており、ノート PC や Raspberry Pi を用いた記録装置よりも消費電力が削減されている。また、専用のパッケージを製作しコンパクトにすることで搭載スペースが限られている機器にも実装できるように設計されている。しかし、ロガー側に GPS は搭載していないため、センサ側に GPS が搭載されない場合には正確な時刻は記録できない。

2023 年に STRATOVISION 社が開発した滑空回収型小型気球を用いた実験では上空でのインフラサウンドの観測に成功しており、他にも福岡大学が提供したガスセンサーからのデータも記録している。

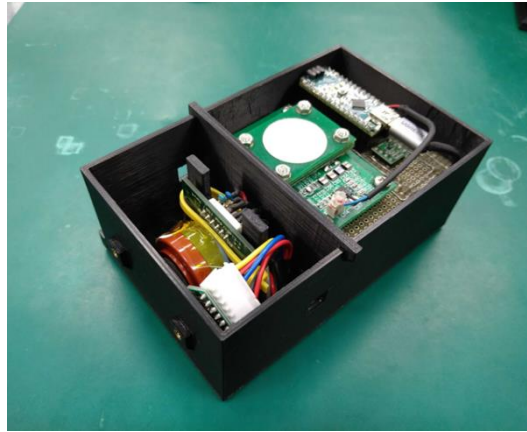


図 2.3 気球観測用インフラサウンドロガーシステム[6]

先行研究[4]で開発した ATMEGA4809-PF を用いたイベント検出用インフラサウンド記録装置では、気球観測用と同様に INF03S を用いている。この装置は使用したマイコンの動作周波数を下げ、2.2.5 節で述べる STA/LTA 法を用いたイベント検出により気球搭載用インフラサウンド記録装置よりも低電力化を実現している。データは EEPROM に記録しており、マイコン経由でデータの取り出しを行えるようになっている。

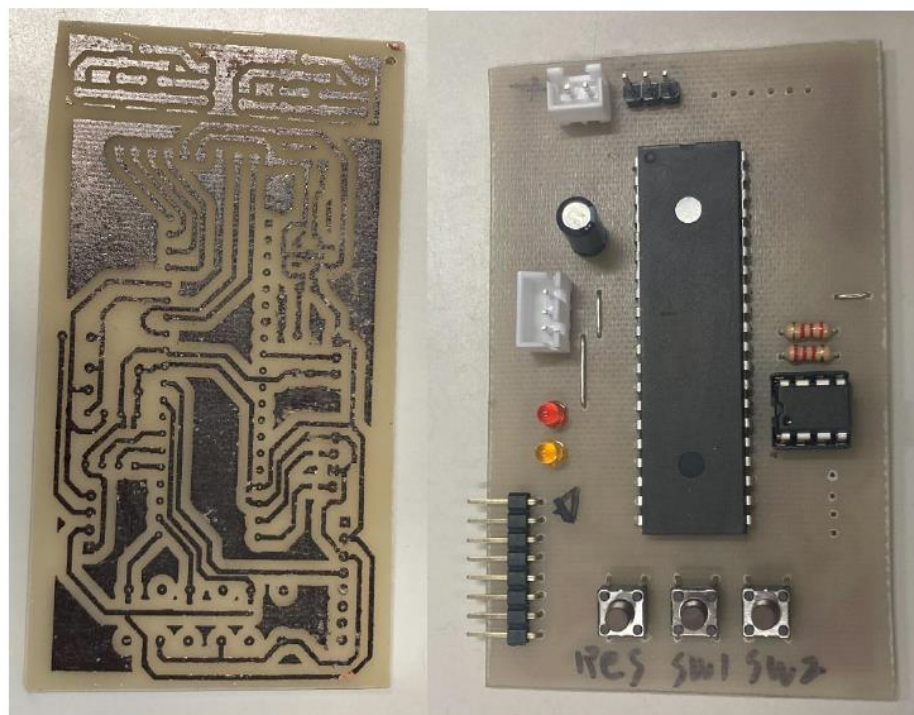


図 2.4 ATMEGA4809-PF を用いたイベント検出用インフラサウンドロガーシステム[4]

2.2 開発したロガー機器の概要

2.2.1 ハードウェアの概要

雪崩や土砂崩れを観測する場合、電力が安定的に供給できない山岳や雪山での観測を想定する必要がある。このことから開発するロガー機器はなるべく低消費電力で、1次電池を用いた場合でも長時間稼働するように設計した。

今回使用するMCU(Micro Controller Unit)はST マイクロエレクトロニクス株式会社が開発した超低消費電力MCUのSTM32L476RGT6を使用する。このMCUは同社が開発したSTM32用統合開発環境であるSTM32CubeIDEを用いることにより動作周波数を容易に変更できる点や、豊富な周辺回路が備わっていることから採用した。

また、電源の降圧には電力変換効率が高いスイッチングレギュレータM78SAR033-0.5(MINIMAX TECHNOLOGY社製)を使用することで、電力損失をなるべく低く抑えるようにしている。今回の記録装置は今まで使用してきたINF01・INF04と同様にロガー側でGPSを用いた時刻同期を行い、インフラサウンドを記録していく。他にもLPWAを用いた遠隔でのデータ取得を想定しているため、LPWAの通信モジュールを実装する。これら実装したものはトランジスタ(MOSFET)を用いて必要な状況にのみ稼働するようにし、なるべく消費電力を抑えるようにしている。機器構成と外観は図2.5と図2.6にそれぞれ示す。

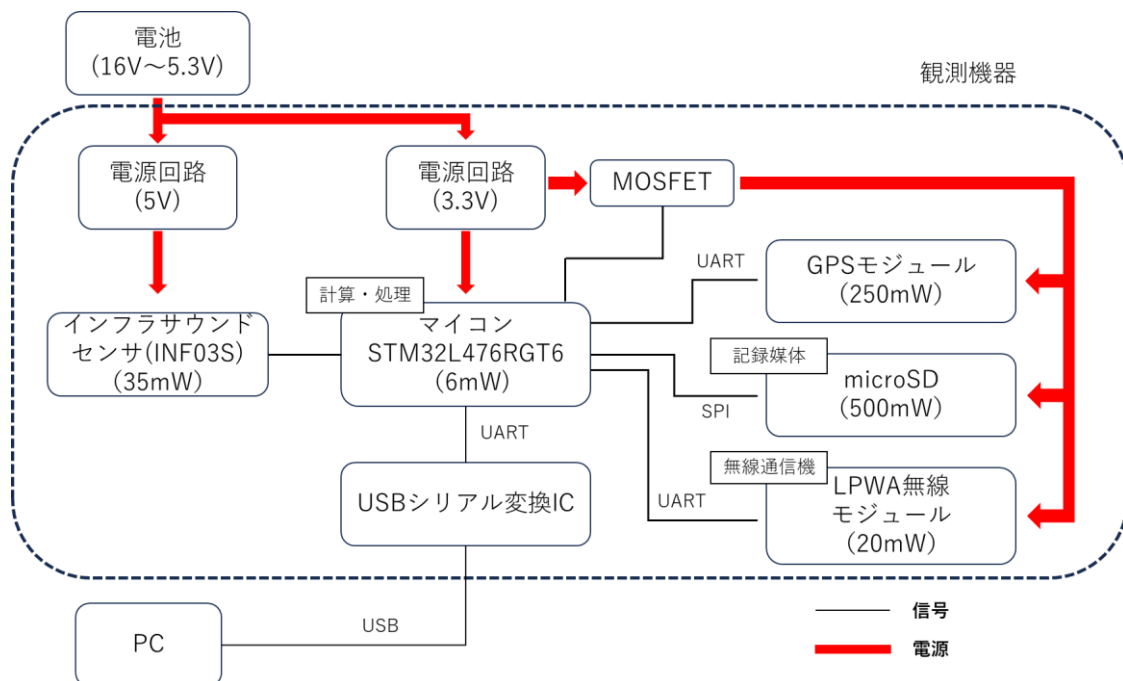


図 2.5 製作したロガーシステムの機器構成図

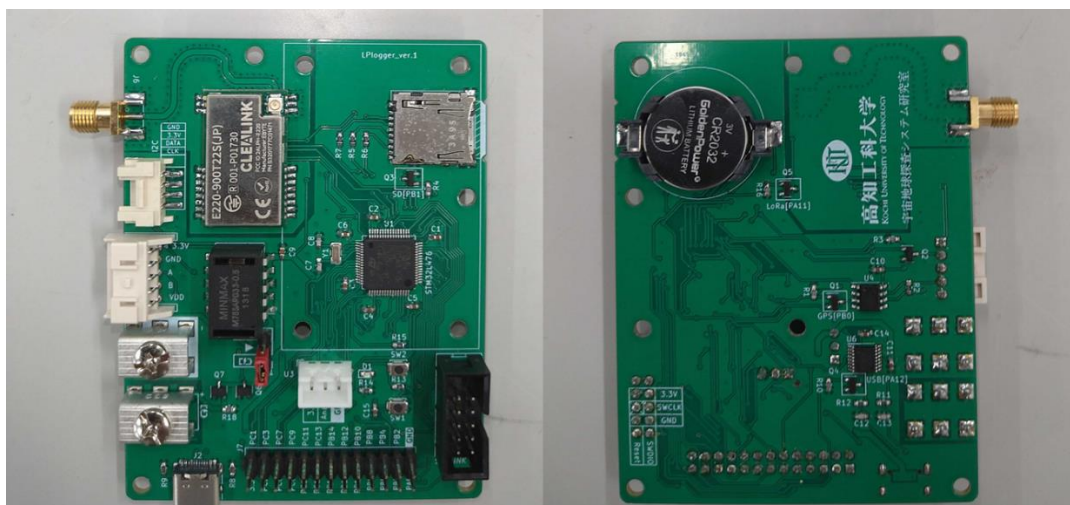


図 2.6 製作したインフラサウンドロガー機の外観

2.2.2 時刻同期

インフラサウンドを用いた観測は基本的にセンサをアレイで設置し、対象から伝搬される音波の到達時刻の差から音源地点を特定するため、記録する時刻の正確さは重要である。GPS を常に使用し続けた場合、常に約 250 mW の電力を消費し続けるため、図 2.7 と図 2.8 で示す水晶発振子を用いた RTC 回路を併用した時刻の記録を行う。使用する水晶は時計などのクロック元でよく使われている 32.768 kHz を用いており、精度は ± 20 ppm のものを使用した[7]。

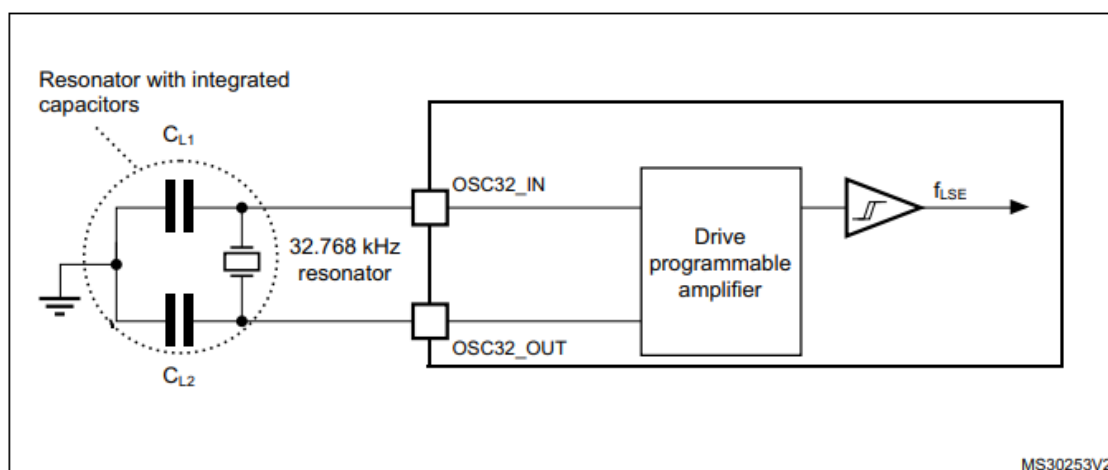


図 2.7 STM32 に搭載されている RTC 回路の概要[7]

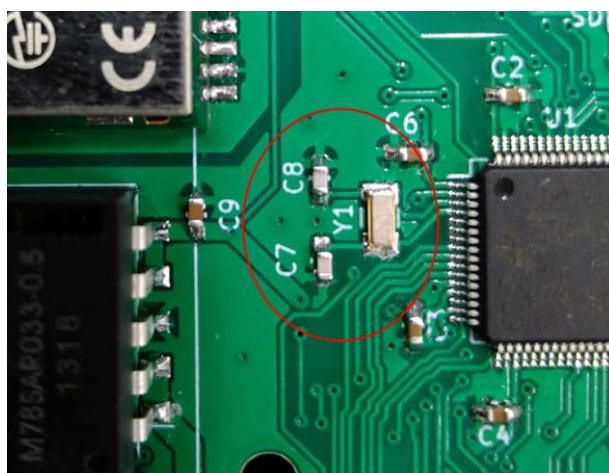


図 2.8 RTC 回路の水晶発振子と負荷容量

今回使用する水晶発振子は精度が ± 20 ppm なので、一日で約 1.78 秒ずれる可能性がある。したがって GPS と RTC 回路の同期を1日4回行うことで時刻の精度を保つ。同期の際、GPS からは図 2.9 のような NMEA センテンス (NMEA0183) が送られてくるため、このデータ列を分解するコードを C 言語で作成した。分解において用いるデータは主に \$GPRMC、\$ GPGSA、\$GPGGA で、特に \$GPRMC に年月日や時刻などのデータが含まれており、データを分解した後 RTC と同期する仕組みになっている。

```
$GPRMC,100301.000,A,3337.2150,N,13343.1180,E,0.24,233.69,160124,,A*6A
$GPVTG,233.69,T,,M,0.24,N,0.45,K,A*37
$GPZDA,100301.000,16,01,2024,,*57
$GPGGA,100302.000,3337.2150,N,13343.1181,E,1,5,3.57,59.7,M,31.6,M,,*6A
$GPGLL,3337.2150,N,13343.1181,E,100302.000,A,A*54
$GPGSA,A,3,17,07,14,22,30,,,,,,,,,3.70,3.57,0.98*01
$GPGSV,4,1,13,02,71,021,25,21,56,036,27,08,41,067,24,14,40,315,42*74
$GPGSV,4,2,13,30,32,264,38,03,32,152,,07,30,227,36,17,21,287,38*75
$GPGSV,4,3,13,22,20,316,25,40,08,258,,10,02,032,,194,,*70
$GPGSV,4,4,13,195,,*46
```

図 2.9 GPS 受信機から送られてくる NMEA データの例

インフラサウンド観測における時刻精度はセンサの設置地点の間隔によっては 0.1 秒単位での正確さが求められる。今回製作した機器は 500 m ～ 数 km 間隔での設置を想定しているため、誤差の許容範囲を 180 m 程度とし、最低でも 0.5 秒以内の精度を持った記録装置の開発を試みた。図 2.10(右上)のように GPS 機器には 1pps と呼ばれる 1 Hz ごとにパルス波が出力されるアナログ信号ラインがある。1pps は時刻誤差が $\pm 1\mu$ 秒以内であるため、この信号の立ち上がりトリガーとして NMEA を分解し、RTC と同期させるソフトウェアを開発することで、なるべくミリ秒単位での誤差が発生しない

ようにしている。NMEA の分解と RTC の同期に関するフローチャートを図 2.10 に示す。

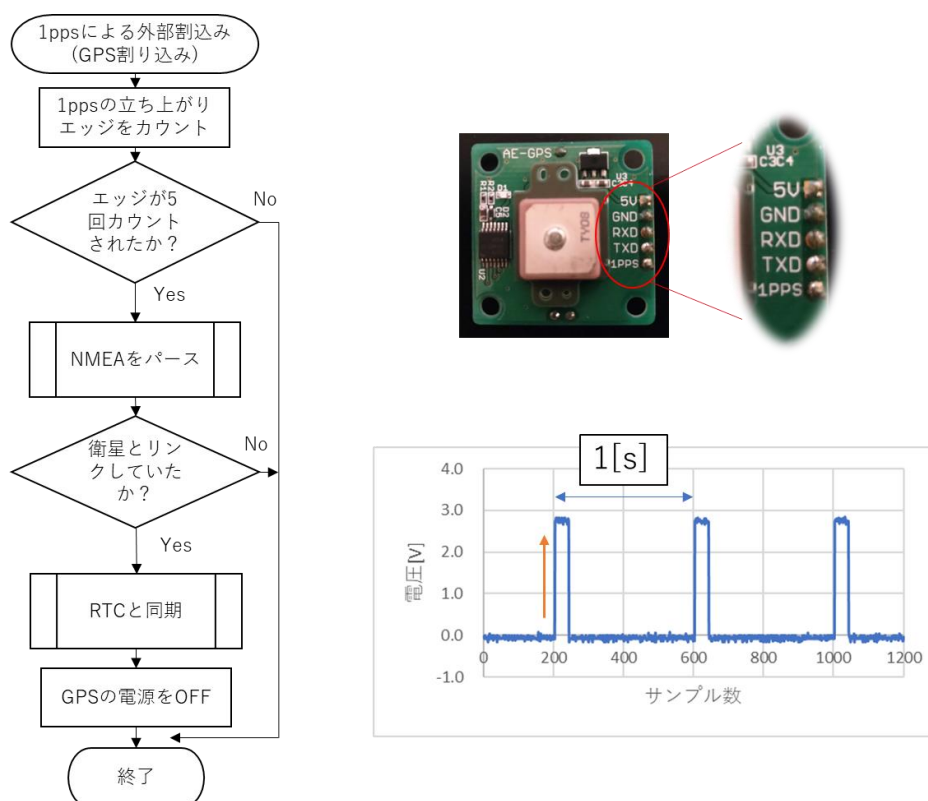


図 2.10 NMEA を分解するフローチャート(左)と 1pps の波形(右)

2.2.3 LPWA (Low-Power-Wide-Area network)

雪崩や土砂崩れなどが発生しやすい地点に記録装置を置くことを想定すると、メンテナンスが頻繁に行えない可能性が高い。そのため長距離を通信可能で尚且つ消費電力が低い、LPWA の通信規格のひとつである LoRa を用いた長距離無線通信を行えるようにすることで遠隔でのデータ送受信を可能にしている。今回は株式会社クリアリンクテクノロジーが提供している LoRa モジュールの E220-900T2S(JP)を使用する。このモジュールはプライベート LoRa であるため通信量によって料金が発生するというものではない。また、LPWA は基本的に 920 MHz 帯で空中線電力も 1 W 以下であるため、無線免許などを必要としないことから誰でも使用することができ、観測網を広げていくことも比較的容易である。

このモジュールを使用するにあたり、ゲインが 3 dBi の LoRa 用アンテナを使用している。使用する LoRa モジュールのアンテナ端子は SMA コネクタとなっておりインピーダンスは 50 Ω であるため、モジュール端子とアンテナ間の伝送経路の特性インピーダンスも 50 Ω にし、反射波の発生を防ぐ必要がある。今回はプリント基板の配線や材質によって設計されるコプレーナ線路を用いたインピーダンス整合を行う。各種パラメータ

ーは Avago 社のシミュレーションソフトである、AppCAD を用いたシミュレーションを行い、その結果をプリント基板で配線する際に使用した。AppCAD のシミュレーション結果から信号線を 1.00 mm、GND ベタと信号線の幅は 0.20 mm にした(図 2.11)。

基板厚	1.6mm
基板材	FR-4
銅箔厚	35um
伝送経路の太さ	1mm
伝送経路とGNDベタの距離	0.2mm

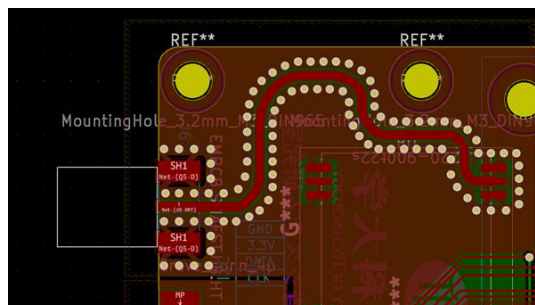


図 2.11 コプレーナ線路を設計する上での各種パラメーターと実際に製作した配線

2.2.4 データ概要

インフラサウンドは周波数 20 Hz までの音波であるため、アナログの信号として出力される INF03S を使用する場合、ナイキスト周波数からサンプリング周波数は 40 Hz 以上にしなければならない。従って1秒間に40回のインフラサウンドデータと、取得したタイミングの時刻を記録する仕様とした(図 2.12)。データは microSD に保存されるが、消費電力を抑えるため書き込み時にのみ電源が入るように設定しており、CSV 形式で保存する。

2024,09,21_03,11,30,95.csv	Microsoft Excel CS...	15,883 KB
2024,09,21_06,34,39,92.csv	Microsoft Excel CS...	1,967 KB
2024,09,21_07,01,12,70.csv	Microsoft Excel CS...	9,432 KB

```
2024,06,18,10,12,23,84,-4715.69
2024,06,18,10,12,23,86,-4657.11
2024,06,18,10,12,23,88,-4715.69
2024,06,18,10,12,23,91,-4715.69
2024,06,18,10,12,23,93,-4715.69
2024,06,18,10,12,23,96,-4657.11
```

図 2.12 データの保存結果。左より、年、月、日、時、分、秒、秒の小数点以下 2 桁

2.2.5 STA/LTA 法を用いたイベント検出

図 2.12 で表したデータセットを 40 Hz 間隔ですべて保存し続けた場合、microSD の消費電力によって稼働時間が短くなってしまう。そこで本研究ではイベントが発生したときのみデータを記録することで、microSD に消費される電力を少なくし、より長時間の稼働を実現できるよう試みた。当研究室の過去の研究では閾値を用いたトリガー検出

において主に観測データをそのまま用いてきた。しかし、この場合閾値を超えなかったイベントはデータとして認識されないという問題点があった。そこで先行研究[4]ではインフラサウンドのイベント検出を地震学で用いられる STA/LTA 法を使うことによってこの問題を解決しようとした。

STA/LTA 法は、データの短時間平均 STA (Short-Time-Average) と長時間平均 LTA (Long-Time-Average) の比をイベントトリガーとして用いる方法である(式 2-1、2-2)(図 2.13)。今回もこの方式を採用し、記録機器で自動的にイベント検出を行う。

$$STA = \frac{1}{\alpha} \sum_{i=k-\alpha}^k |y_i - y_{i-1}| \quad (2-1)$$

$$LTA = \frac{1}{\beta} \sum_{i=k-\beta}^k |y_i - y_{i-1}| \quad (2-2)$$

STA: データ変化量の短時間平均、 LTA: データ変化量の長時間平均、
 α : STA のサンプル数、 β : LTA のサンプル数、
 y : インフラサウンド計測値[mPa]

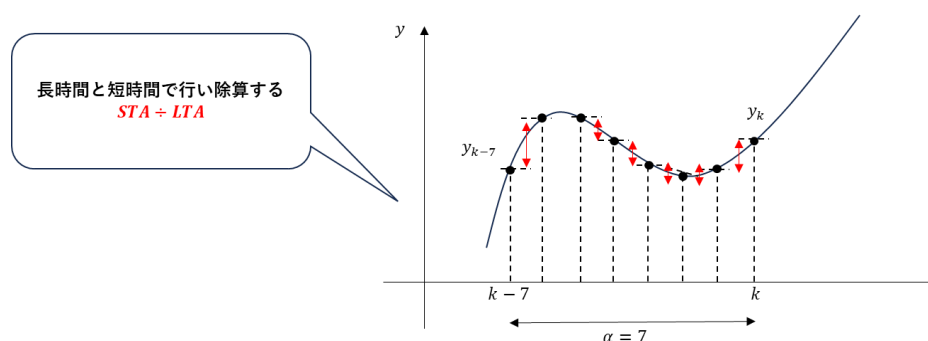


図 2.13 STA/LTA 法のイメージ図

図 2.14 は 2023 年 1 月 30 日に石川県金沢市で取得した雷によるインフラサウンドと実際に STA/LTA の計算を行った結果である。このデータは LTA 平均時間を 5 秒に固定しながら STA の平均時間を変化させ、STA と LTA の比の値がどのように変化するかを示したグラフで、STA の時間が長くなればなるほど、STA/LTA の立ち上がりが増えていくことがわかる。この手法はこの立ち上がりをトリガーとして用いるため、検出可能なイベントは STA と LTA の平均時間とトリガーの閾値をどこに設定するか依存することがわかる。

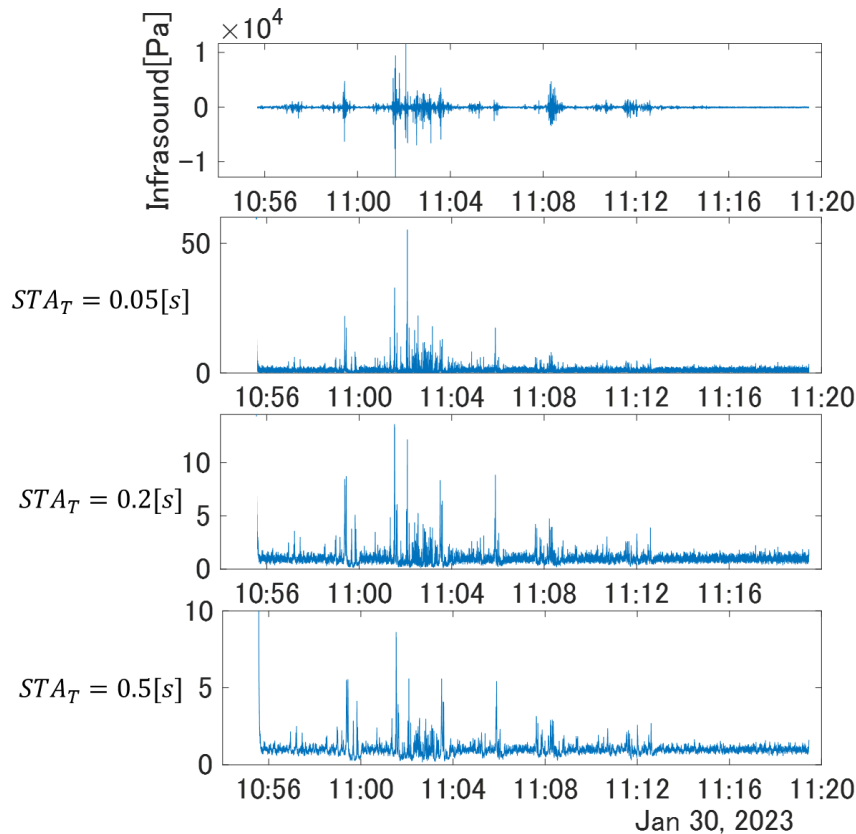


図 2.14 雷鳴のインフラサウンドと STA の平均化時間を変化させた STA/LTA の変化

本研究では平均時間の決め方に関して Amadej Tmkoczy 氏の論文を参考にした [8]。この論文によると、STA の平均時間は検出したいイベントが持つ周波数の数周期分より長く設定し、LTA の平均時間はノイズ周波数の数周期分より長く設定する必要があり、STA の平均時間を短くするほど、スパイク状に近い波形に反応するようになると記載されている。

2.2.6 ソフトウェアの概要

以上の 2.2.2～2.2.4 項の内容を含めたソフトウェア概要を図 2.15 のフローチャートに示す。この観測機器は長時間の運用を想定しているためウォッチドッグシステムを実装しており、所定の動作を 30 秒間の間に行わなかった場合はリセットが入るようにしている。これによりソフトウェアに何らかの問題が生じてスタックした場合はリセット処理がされ、始めからフローチャートに示した処理が実行されるようになっている。

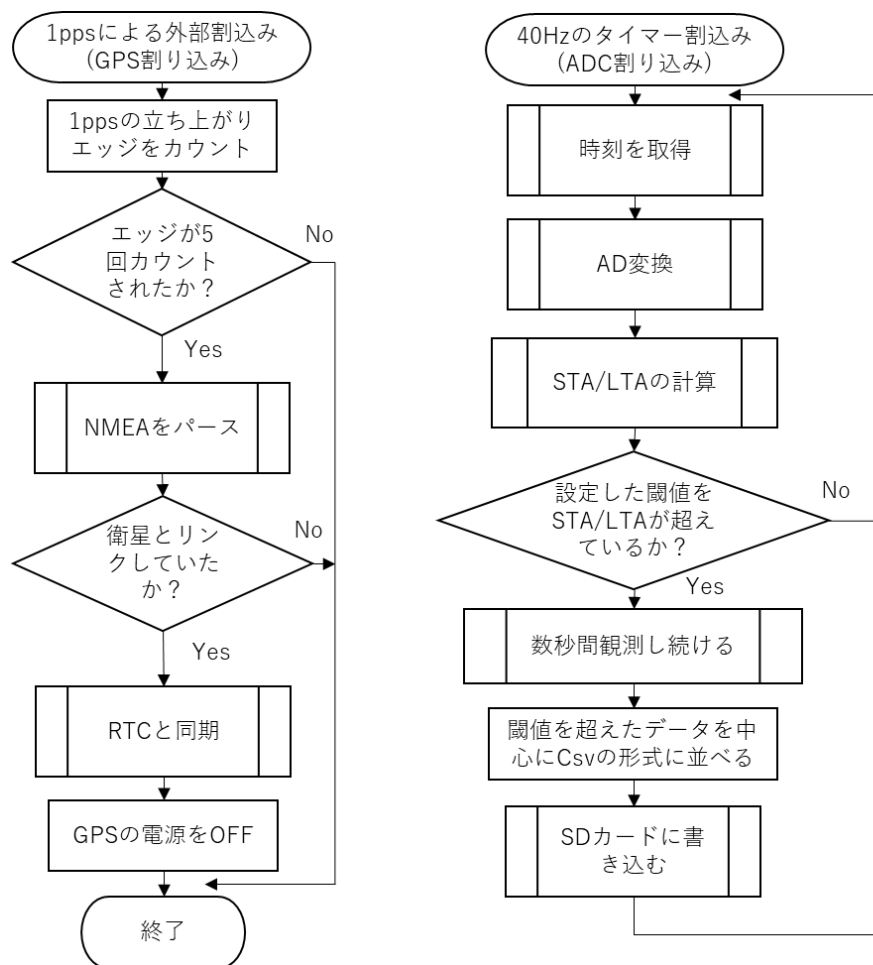


図 2.15 STA/LTA 法を用いたロガーシステムのフローチャート

第3章 機器の試験評価

3.1 消費電力の比較

製作した機器の消費電力を計測し、今までのインフラサウンド記録装置との比較を行った。表 3.1 は今回製作したロガー装置の消費電力である。この表から STA/LTA 法を用いたイベント検出モードでは連続観測モードの時より半分以下の消費電力で稼働できることが分かる。

表 3.1 製作したロガーシステムの各種状態における消費電力

状態	消費電力[W]
GPS稼働時	160 m
LPWA使用時	120 m
連続観測モード（計測＋データ記録）	100 m
イベント検出モード（計測のみ）	35 m

他のインフラサウンドロガーシステムとの比較は表 3.2 のようになる。

表 3.2 他のインフラサウンドロガーシステムの消費電力

	消費電力[W]
INF01 LE	3.5 rms + 10 (PC)
INF03	60 m + 10 (PC)
INF04 LE	60 m + 10 (PC)
Raspberry Pi Logger	4.4
気球用観測装置	0.7

連続観測の場合でも他のインフラサウンドロガーシステムより低電力で稼働することを確認できた。

3.2 LPWA を用いた無線通信

製作した機器がどの程度の通信性能があるか実際に高知工科大学香美キャンパスを中心に実験を行った。高知工科大学香美キャンパスの大学寮(約 40 m)の屋上にアンテナと製作した機材を設置することで送信機としてどの程度通信が可能か、発生するパケットロス調べた。受信機は ESP32-WROOM-32 (Espressif Systems 社製;以下 ESP32)と LoRa モジュールをブレッドボード上で組み上げたものを使用した。送信機は商用電源で稼働し続けるようにしている(図 3.1) (図 3.2)。



図 3.1 通信実験に用いた機材



図 2.2 LPWA のアンテナ設置状況と設置地点(南南西方向を望む)

送信機は1パケット 64 バイトのデータを 4 パケット連続で送る仕様となっており、数十秒おきに転送速度を高速(62,500 bps)・中速(10,750 bps)・低速(1,758 bps)に変化させる。観測者は受信機を持ちながら移動することでデータの伝送可能距離や伝送速度によるデータの到達距離の違いを調べる。そのため受信機にはパソコンと接続することでどれだけパケットロスが発生したかをターミナルに表示するソフトを実装した(図 3.3)。



図 3.3 データ受信の様子

これらの装置の基本情報を用いて電波伝搬シミュレーションを行った。本研究ではフリーソフトである Radio Mobile を使用する。このソフトウェアは地形データや送受信機の各種パラメーターを入れることでシミュレーションができるソフトである。今回は高知工科大学香美キャンパスを中心としたエリアでシミュレーションを行い、どの地点でのデータの伝送が可能か予測する。入力した各種パラメーターは表 3.3 で示したものを使用し、シミュレーションの結果は図 3.4 のようになった。

表 3.3 電波伝搬シミュレーションに使用した各種パラメーター

標高 + 設置高度	103.4[m]
大気屈折率	301[N-Units]
大地の誘電率	0.005[S/m]
大地の比誘電率	15
使用周波数	920[MHz]
送信電力	0.02[W]
受信感度	0.071[uV]
アンテナ利得	3[dBi]

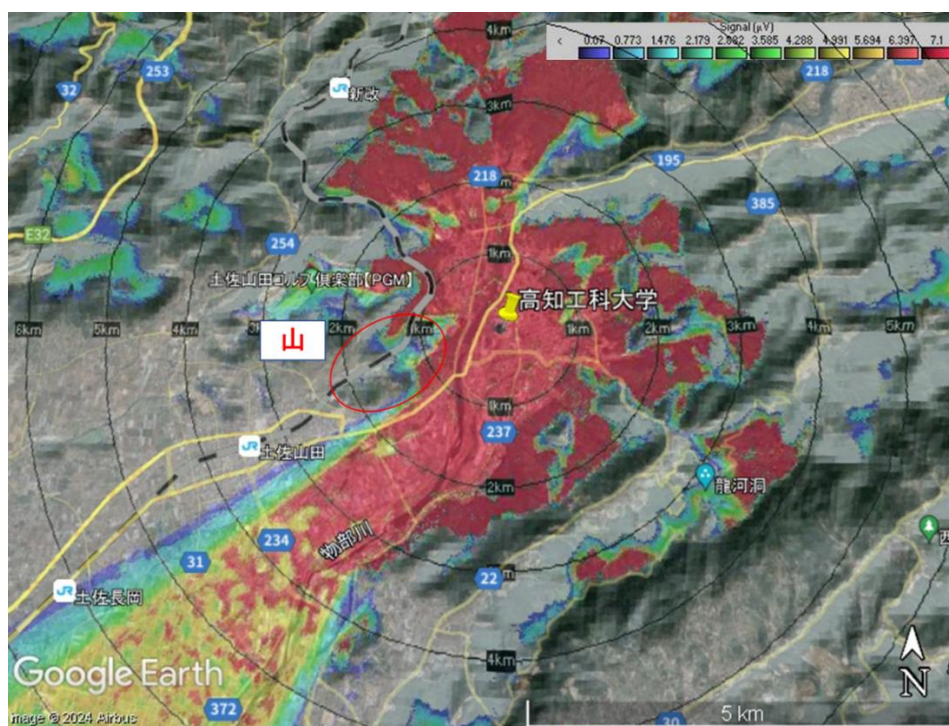


図 3.4 高知工科大学香美キャンパスを中心としたシミュレーションの結果
[地図データは Google Earth より]

図 3.4 のシミュレーション結果から地形の影響が大きいことがわかる。特に土佐山田ゴルフ倶楽部方面の山によって電波が遮られるのに対し、障害物がない物部川方面には 4 km～5 km まで届くことが予想される。このシミュレーション結果をもとに実測実験を行った。特に電波が届きにくいと予想される土佐山田駅から高知工科大学近辺の間と物部川下流方面のポイント計 10 箇所を実測した。

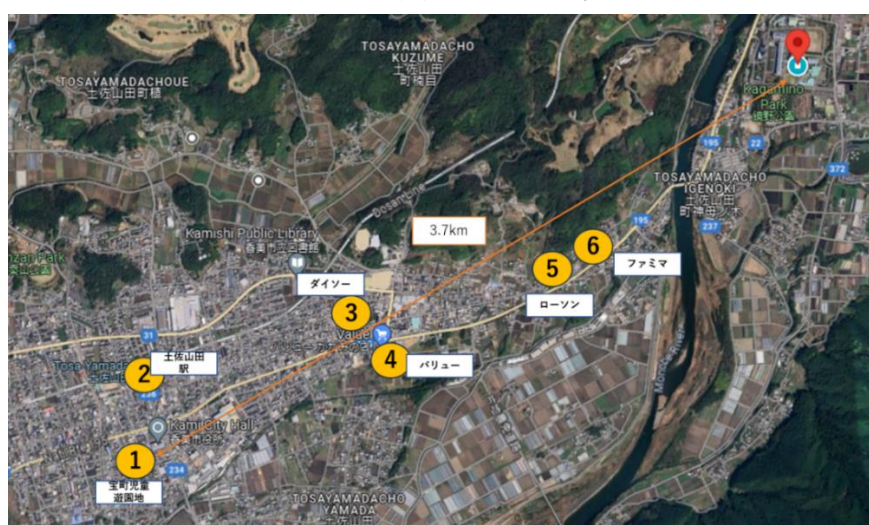


図 3.5 高知工科大学香美キャンパスから土佐山田駅方面の観測地点
[地図データは Google Map より]

表 3.4 土佐山田駅方面の各地点における通信距離と伝送速度別のパケットロス

	送信地点との距離[km]	パケットロス[%]		
		62,500bps	10,750bps	1,758bps
1	3.7	100	100	100
2	3.54	100	100	100
3	2.67	100	100	100
4	2.49	100	100	100
5	1.48	100	25	0
6	1.24	0	0	0

図 3.5 は土佐山田駅から高知工科大学香美キャンパス間の観測地点を示したもので、最も距離が離れている宝町児童遊園地では送信機から約 3.7 km ほど離れている。それぞれの観測地点でのパケットロスとデータ転送速度の関係を示したものは表 3.4 のようになった。この表とシミュレーションの結果から観測地点1から5の間の地点では地形の影響でデータの受信ができていないということが分かる。

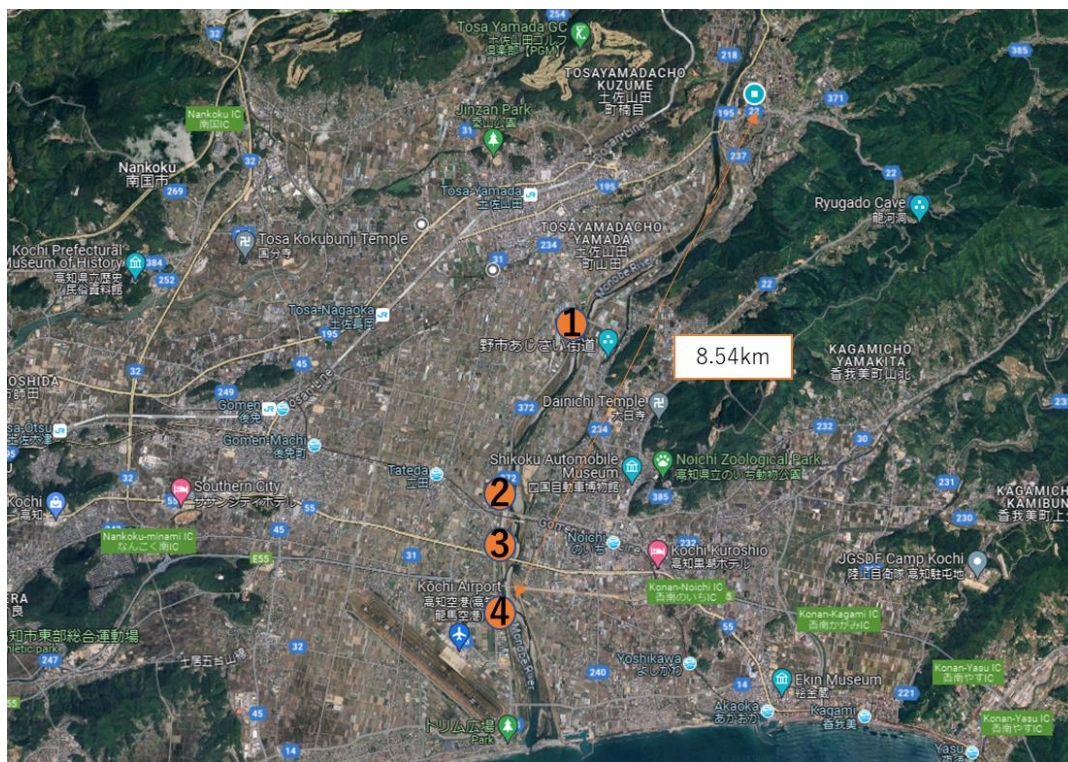


図 3.6 高知工科大学香美キャンパスから物部川方面における観測地点
[地図データは Google Map より]

表 3.5 物部川方面の各地点における通信距離と伝送速度別のパケットロス

	送信地点との距離[km]	パケットロス[%]		
		62,500bps	10,750bps	1,758bps
1	4.06	0	0	0
2	6.96	0	0	0
3	7.53	100	75	0
4	8.54	100	100	100

図 3.6 は高知工科大学から物部川方面間の観測点を示したものである。表 3.5 の結果によると土佐山田駅から高知工科大学香美キャンパス間とは違い、障害物が少ないためパケットロスなしに 5 km 以上の送信が可能であることが分かった。また、伝送速度が低いほど長距離を伝搬するという LPWA 通信の特性も地点3および表 3.4 の地点 5 で確認することができた。

3.3 STA/LTA 法を用いた雷鳴インフラサウンド検出

2.2.5 項でも述べた STA/LTA 法を用いて高知工科大学香美キャンパス周辺で発生する梅雨時期の雷鳴を検出する。STA と LTA の平均化時間は 2023 年1月の石川県金沢市で検出した雷鳴のインフラサウンドデータを参考にした。実際に金沢市で検出した雷のインフラサウンドの周波数特性を図 3.7 に示す。

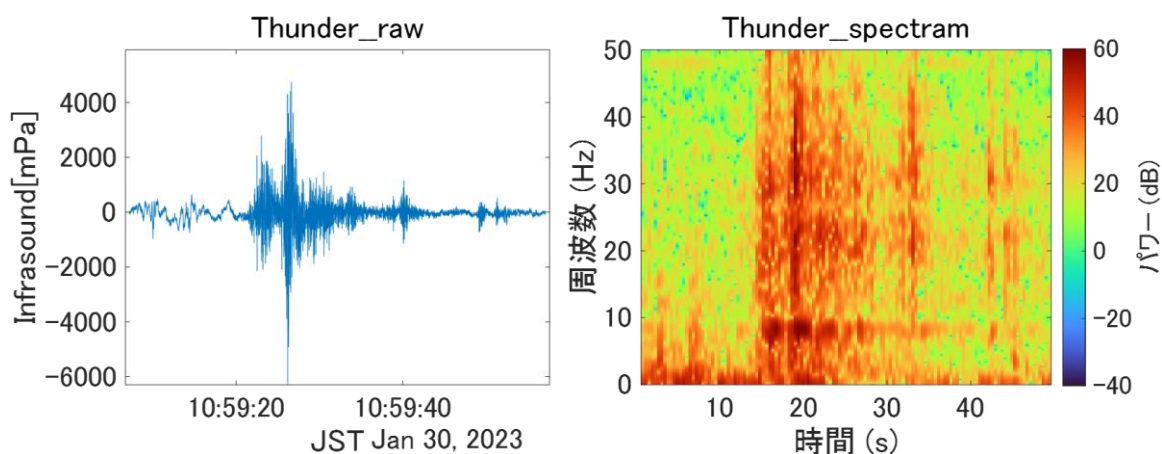


図 3.7 INF04 で過去に観測した雷鳴イベントのスペクトログラム

図 3.7 から雷鳴の周波数は 8 Hz 周辺にピークが見られるためこの周波数帯が検出できるように平均化時間を設定した。今回はイベント周期の4倍である 0.5 秒を STA の

平均化時間として設定している。LTA の平均化時間はノイズとして常に 0.5 Hz 程度のノイズが現れていることから、ノイズ周期の4倍である 8 秒を LTA の平均化時間としている（式 3-1、式 3-2）。

以上の定めた値を製作した機器に組み込み雷鳴インフラサウンドの検出を試みる。高知工科大学香美キャンパスにある観測小屋において 2024 年6月6日～9月21日にかけて開発機材を長期間稼働させた。比較用の連続観測は INF04 を用いて行い可聴音の記録できるボイスレコーダーも設置することで雷鳴が発生したかの確認を行った（図 3.8）。ボイスレコーダーはダミー電池と DCDC コンバータ回路を用いて INF04 のデータ記録用に使用しているノート PC から電源を確保した。

$$t_{STA} = \frac{1}{8[Hz]} \times 4 = 0.5[s] \quad (\text{式 3-1})$$

$$t_{LTA} = \frac{1}{0.5[Hz]} \times 4 = 8[s] \quad (\text{式 3-2})$$

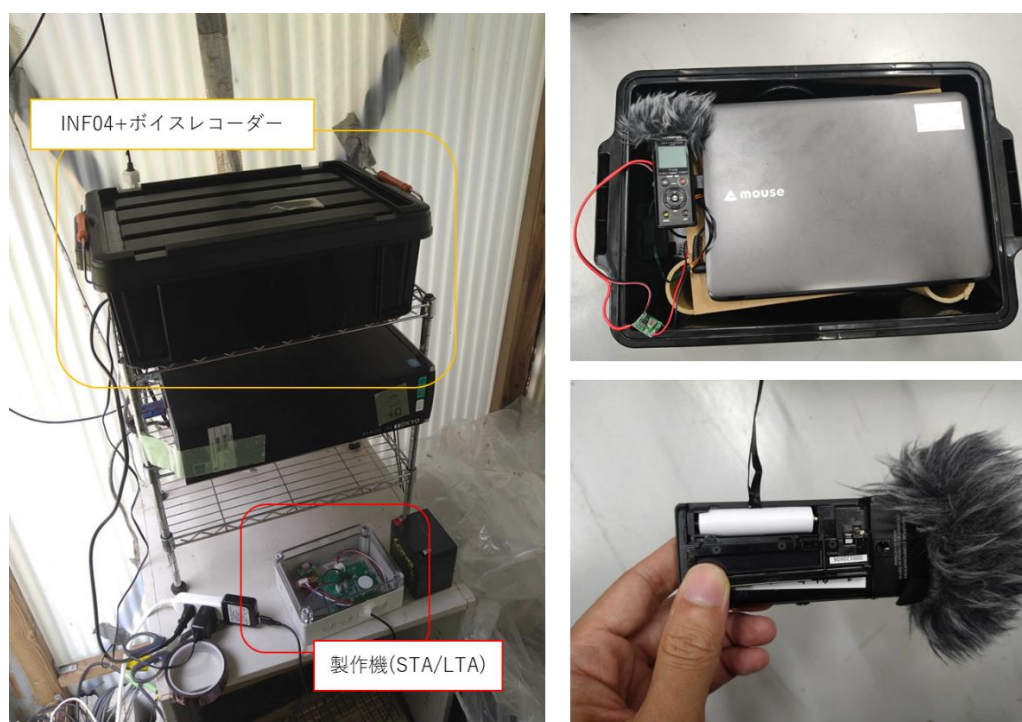


図 3.8 長期観測の様子

長期観測を行った結果6月6日～9月21日の計 107 日間に検出できたイベント数は計 675 サンプルだった。一日に約6サンプル程度検出していることになる。その中でも、2024 年7月10日に観測されたデータは断続的に雷が発生していたことと、非常に大きな雷鳴イベントを観測できたことから、本論文では 2024 年 7 月 10 日～11 日にか

けてのデータをもとに考察を行う。図 3.9 は連続観測させていた INF04 の 2024 年 7 月 10 日～11 日の 1 日分のデータである。

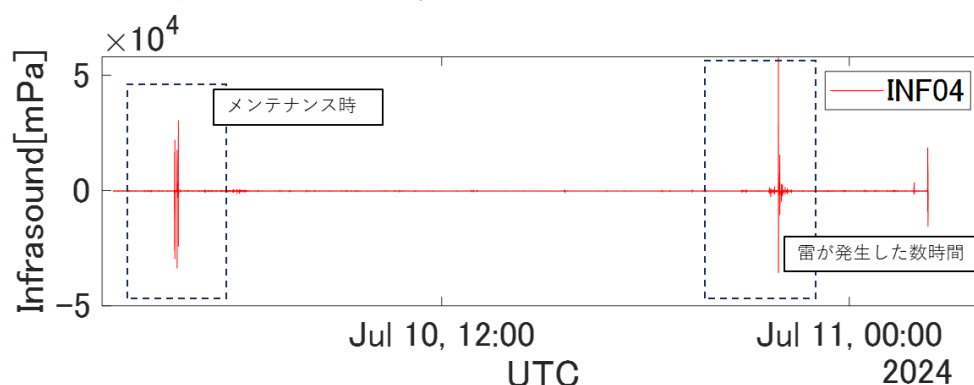


図 3.9 高知工科大学香美キャンパスで取得した 2024 年 7 月 10 日～7 月 11 日にかけてのインフラサウンドデータ

図 3.9 から大きなイベントが 2 つ見られる。最初に発生しているイベントは筆者がメンテナンスのため観測地点を訪れたときの音である。この周辺には観測小屋の扉の開閉によって発生した音や、ボイスレコーダーの交換によって発生したインパルス信号のインフラサウンド成分が記録されている。次に発生している大きなイベントは雷鳴に含まれるインフラサウンドのイベントであり、大きさの異なるいくつかのイベントが観測されている。雷鳴が発生していた周辺を拡大したものを図 3.10 に示す。

図 3.10 の区間で INF04 とボイスレコーダーから雷であると確認できたイベントと製作したロガーシステムが記録できたイベントを表 3.6 にまとめた。

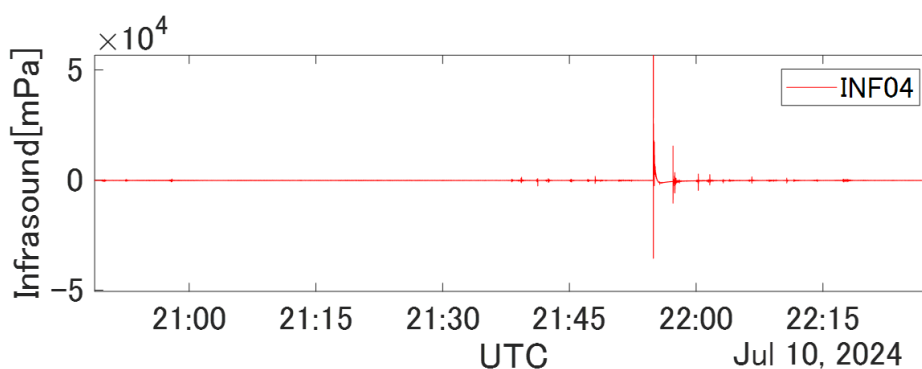


図 3.10 ボイスレコーダーから雷鳴の発生を確認できた時間帯のインフラサウンド波形

表 3.6 雷によるインフラサウンドが発生した時刻と製作機のイベント検出結果

雷鳴によって発生したイベント時刻 UTC[h:m:s]	製作機がイベントを検出できたかどうか
19:15:18	×
20:49:35	×
20:52:28	○
20:57:42	×
21:38:09	○
21:39:14	○
21:41:05	○
21:42:08	×
21:45:03	○
21:47:11	○
21:47:58	○
21:54:51	○
21:57:11	○
22:00:10	○
22:01:32	○
22:03:08	○
22:03:52	×
22:06:30	○
22:08:35	×
22:09:08	×
22:10:38	○
22:11:32	×
22:17:21	○

2024 年7月10日において雷のイベントとして確認できたものは計23サンプルで、製作したロガーシステムが記録できたのは計15サンプルという結果となり雷鳴イベントの検出率は 65 %程度となった。

実際に検出できたイベントをいくつか図 3.11 に示す。INF04 と製作機が検出したデータに約2秒のずれがあるが、これは観測時点の開発状況では時刻同期を行うソフトウェアに問題があったためである。図 3.12 は製作したロガーシステムで検出できなかったイベントの前後数10秒間の波形をいくつか示したものである。

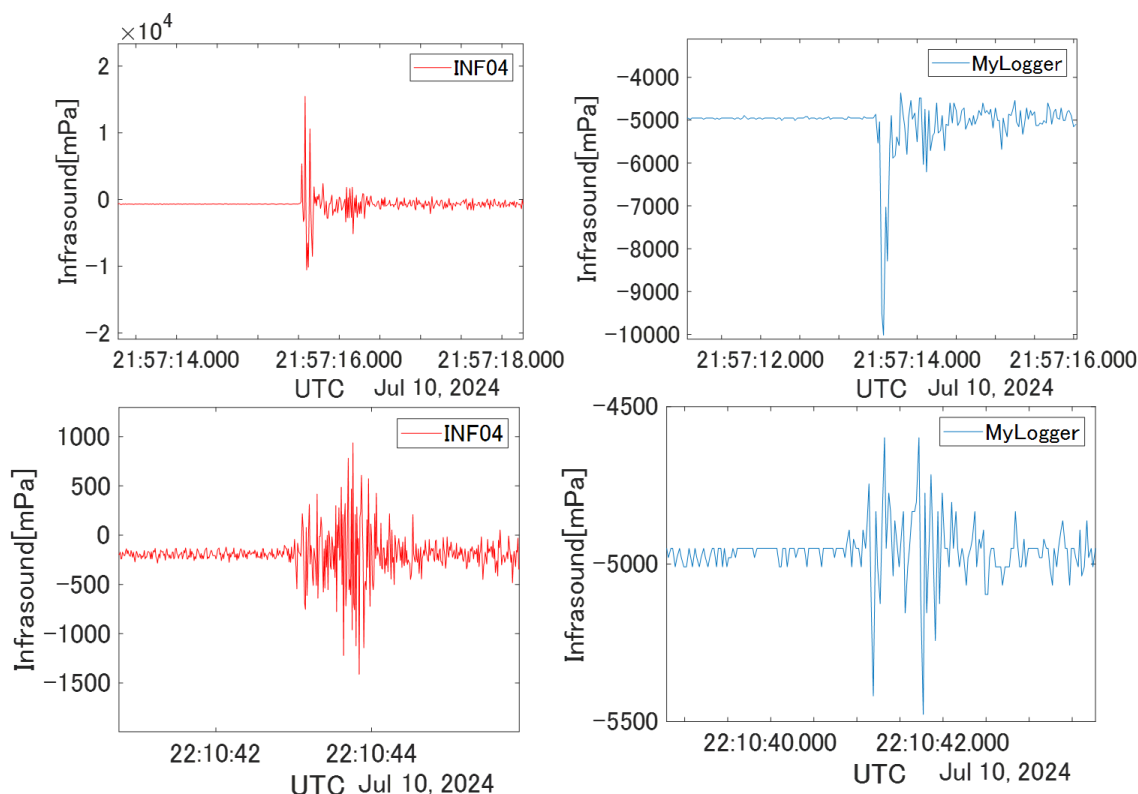


図 3.11 INF04(左)と製作したロッジャーシステム(右)の観測した雷のインフラサウンド

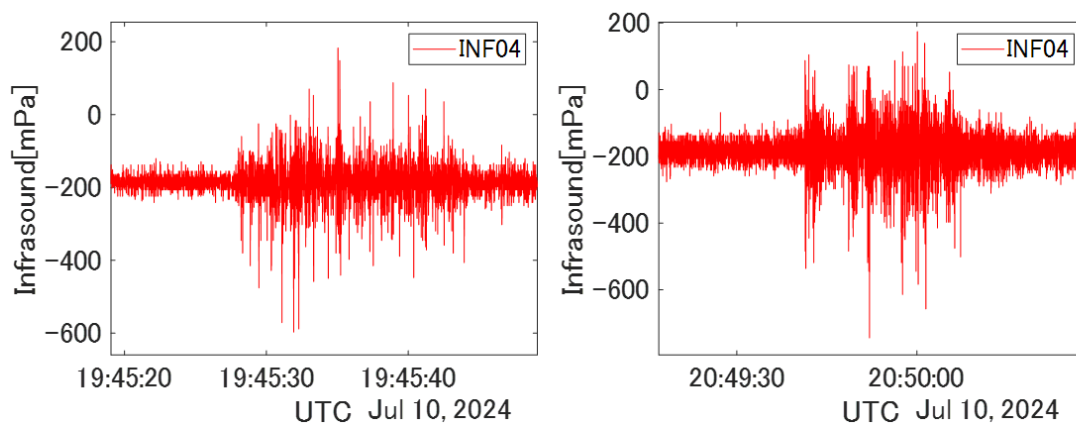


図 3.12 イベント検出できなかった雷鳴インフラサウンド

3.4 RaSK 燃焼実験試験運用

2024 年 9 月 21 日～22 日にかけて高知工科大学香美キャンパスのグラウンドにて学生団体 RaSK により行われたハイブリットロケットエンジンの燃焼実験の観測を行った。この観測では先行研究[5]から得られたデータをもとにした STA/LTA 法でのイベント検出と、南極での氷震観測で用いられる予定の音圧ゲインを 20 dB 上げた INF03S インフラサウンドセンサの動作試験を行った。他の観測機材は雷鳴検出に用

いたものと同じものを使用し、エンジンの噴射口から約 50 m 後方に機材を設置した（図 3.13、図 3.14）。STA/LTA の燃焼実験時の平均化時間の値は雷鳴検出の時と同様に過去のデータの周波数特性を調べ、STA を 0.25 秒、LTA を 8 秒とした。



図 3.13 燃焼試験を行ったハイブリッドエンジン(左)とエンジンと観測地点の距離(右)



図 3.14 燃焼実験で使用した観測機器

得られたデータは図 3.15 のようになった。連続観測で観測されたデータと STA/LTA 法で検出されたデータは燃焼が成功した 16 時 15 分 11 秒のイベントとしてほぼ同時刻に保存されていた。

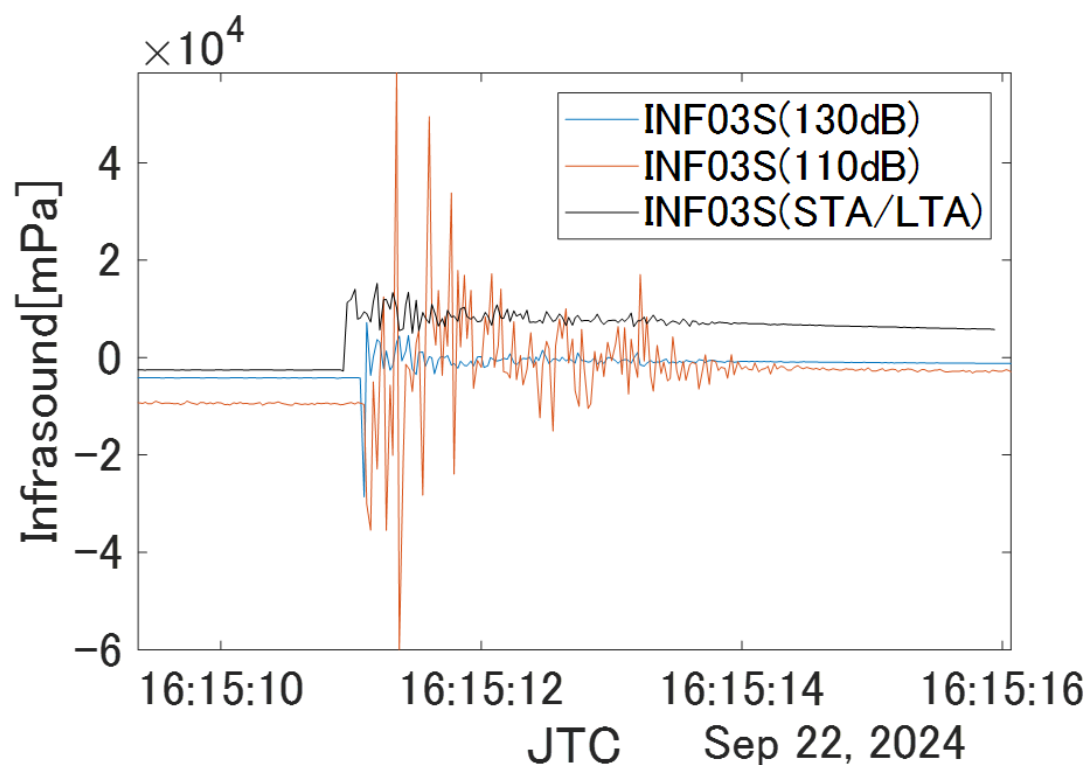


図 3.15 製作した各種ログーで検出した燃焼時のインフラサウンド

製作したログーシステムと INF04 のデータの比較を行った結果、雷鳴の時と同様に約2秒のずれが生じていた(図 3.16)。

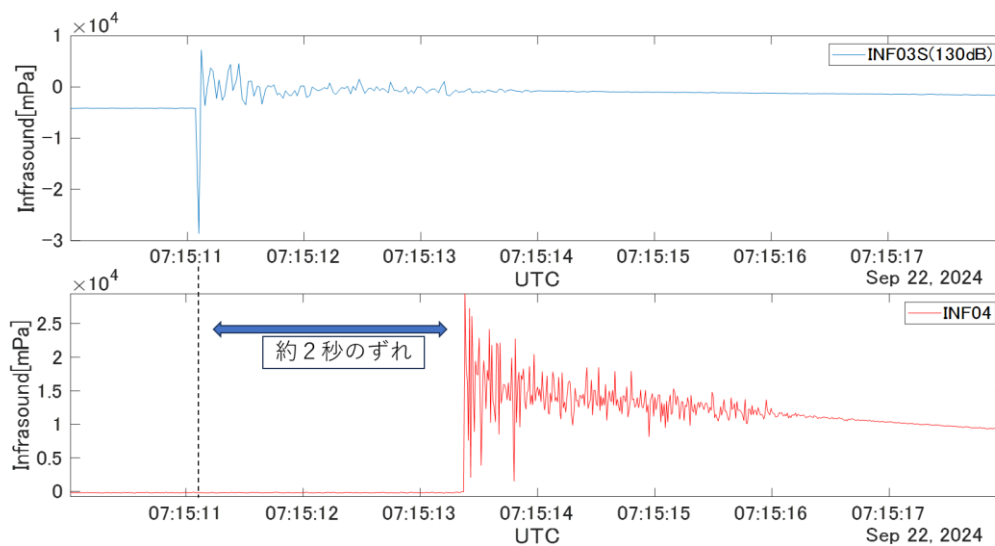


図 3.16 製作したログーと INF04 の比較

3.5 南極での運用試験

3.5.1 南極で発生するクラックのインフラサウンド観測

著者は第66次南極地域観測隊(JARE66)に夏隊の同行者学生として参加した。同行者課題として本研究で製作したロガーシステムを用いた氷震の多地点観測を実施した。

南極では海氷下の潮の満ち引きによって海氷の氷が割れるクラックと呼ばれる現象が発生する。クラックは発生するとき弾性波発生する他、周辺の大気を揺らし、低周波音波となって空气中を伝搬すると考えられている[9]。本論文では 2025 年 1 月 6 日から 1 月 13 日までの期間に昭和基地周辺の各地点で製作したインフラサウンド観測システムと JAXA 宇宙科学研究所が開発した地震計を運用し、クラックによって発生するインフラサウンドの観測を試みた(図 3.17)。地震波が表層を伝わる速度は一般的に数 km/s といわれている。これは音速の 10 倍以上であり、地震計とインフラサウンドセンサの同時観測を行った場合地震波が先に観測点に到達し、のちにインフラサウンドが到達する。この性質を利用することによりクラック由来のインフラサウンドかどうかを判断する。

観測地点は昭和基地北側にある海氷の北の浦上で行い、観測ポイントをそれぞれ PC、PN、PW とした。観測点 PC には地震計とインフラサウンド観測装置を設置し、その他の PN、PW にはインフラサウンド観測装置のみ設置した。これらの観測点は 400 ～ 700m 程度の間隔でアレイ観測網を構築している。図 3.18 は設置した地点を衛星写真にプロットしたものである。なお、今回のインフラサウンド観測システムは単1アルカリ電池を 4 本用いて稼働させた。



図 3.17 北の浦で地震計とインフラサウンド観測装置を設置する様子

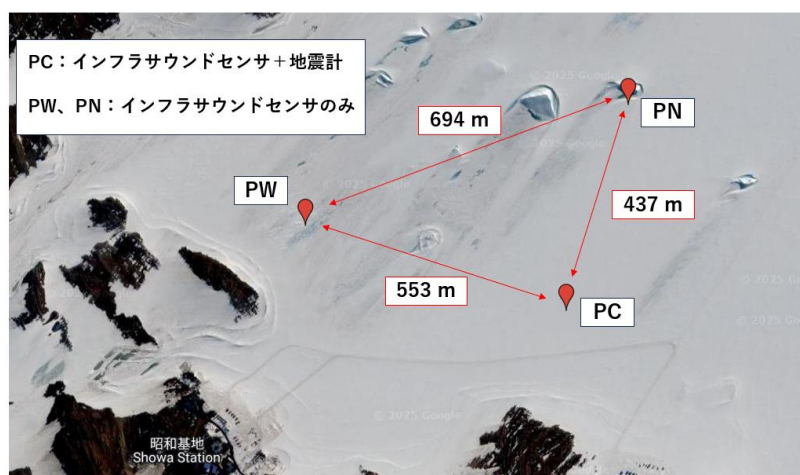


図 3.18 北の浦での観測地点 [地図データは Google Map より]

この観測から得られたデータの中でクラックによるイベントの可能性がある区間を図 3.19 に示す。図のインフラサウンドデータは 0.1 Hz～8 Hz のバンドパスフィルタの処理を行っている。

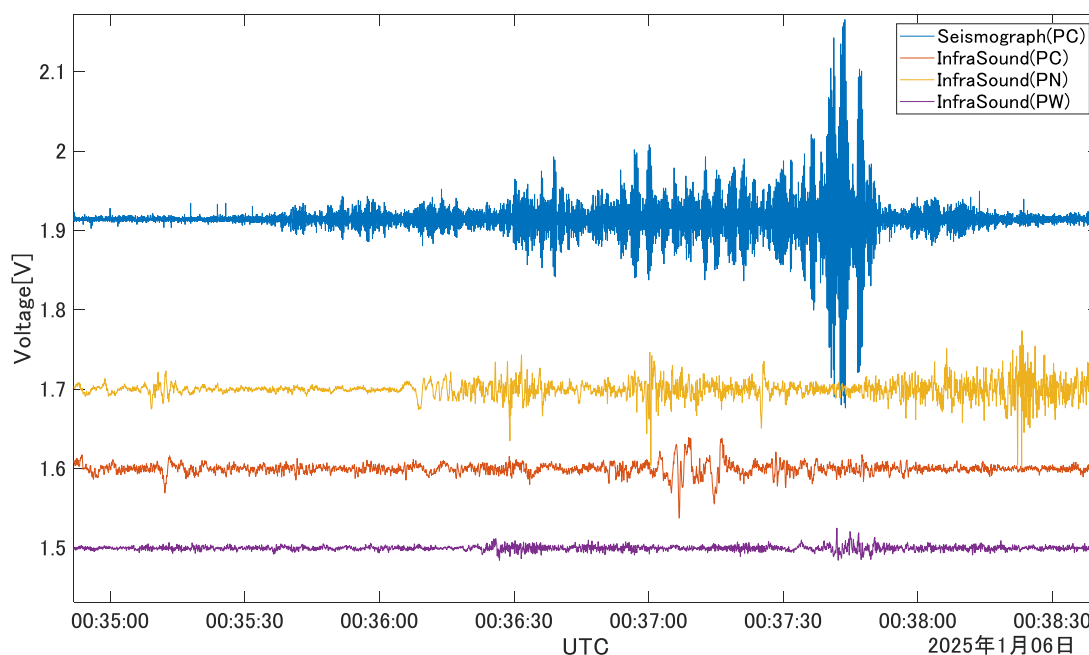


図 3.19 2025 年 1 月 6 日 00:35:00(UTC)ごろのデータ

3.5.2 南極運用中における問題

北の浦での運用中、ノイズによって機器が正常に動作しないという問題が PW に設置した機材で発生した。電源回路として使用しているスイッチングレギュレータからも、コイル鳴きのような現象が確認でき、この状態の場合機器がうまく動作しなかった。図 3.20 はその状態のときオシロスコープで計測した電源ラインの電圧信号である。一定

周期で波形の立下りが見られ、これが要因となり正常な動作ができなかったと考えられる。



図 3.20 正常動作しなかったときの電源ラインの電圧波形

3.5.3 昭和基地周辺での STA/LTA 法と LPWA を用いた観測

北の浦での海氷上のインフラサウンド観測のほかに、昭和基地周辺での STA/LTA 法と LPWA を用いた観測を行った。機器構成は 3.3 項で述べたものと同様なものを用いており、受信機のアンテナを基本観測棟の屋上に設置した。送信機には 3.4 項に記載した STA/LTA 法を組み込んだものを用い、昭和基地周辺でテストを行った後、見晴らし岩付近に設置し、実際に遠隔での低電力インフラサウンド観測が可能かどうかを検証した(図 3.21)。アンテナは昭和基地での通信テストの結果から地面から 5 cm 程度の高さに設置し(図 3.22)、STA のウィンドウ長を 1 秒、LTA のウィンドウ長を 10 秒としている。送信機がイベントを検出した場合イベントの前後 10 秒間のデータ(14 kByte)が送信される。検証期間は 2025 年1月 27 日から 2 月1日までとし、この期間で 647 イベントが検出され、受信機側でも同様に 647 のイベントデータが保存されていた。

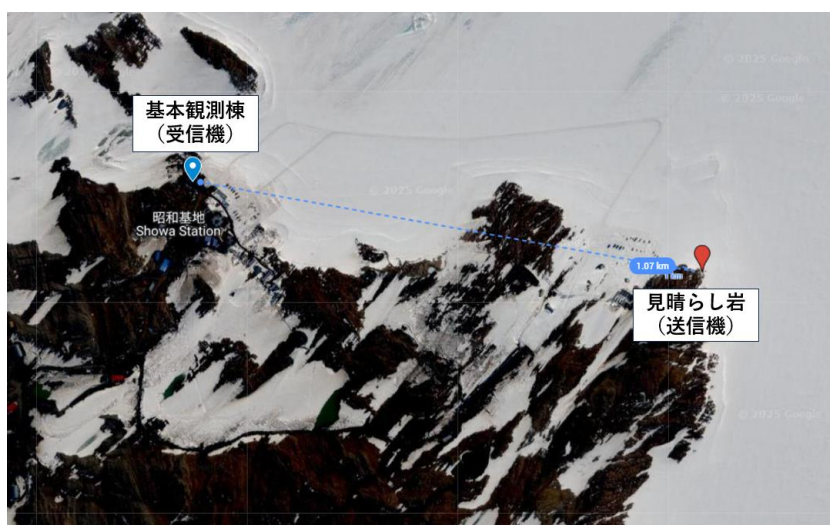


図 3.21 昭和基地周辺での受信機と送信機の設置地点 [地図データは Google Map より]

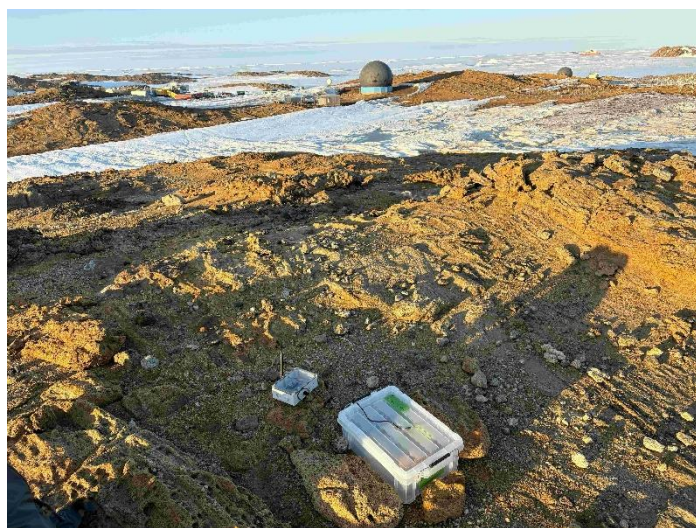


図 3.22 通信テストを行っている様子

第4章 考察

4.1 消費電力の比較

今回製作したロガーシステムは他のインフラサウンド観測システムと比較して消費電力が低く1次電池での運用でも長時間稼働することが期待できる。特に単1アルカリ電池×8本のような電源容量が大きいものを使用すれば計算上20日程度は稼働することが期待できることから、砂漠などでの観測が多いサンプルリターンカプセルなどの数週間程度の臨時観測を電力インフラが整っていない地域で行える。また、太陽電池などの環境電池を併用した運用を行えば、更に長期的に稼働することができると考えられ、雪崩や土砂崩れなどが発生しやすい地域において電源の有無は気にすることなくインフラサウンドセンサをある程度の間隔で臨時設置し観測することができる。

4.2 LPWA を用いた無線通信

今回の結果から、高知工科大学香美キャンパスの大学寮程度の高さを確保し、かつ見晴らしの良い地点を選択に見通しを確保できれば数kmのデータ送受信が可能であるが、山や谷などの入り組んだ地形の場合は設置地点を考慮する必要があるため、山岳の頂上付近に装置や中継器を設置する必要があると考える。また、データの送信速度が低いため情報の取得に時間がかかることからデータ圧縮の必要がある。その他にも、プライベートLoRaを使用しているためデータの衝突が起きた場合の処理を実装する必要がある。

4.3 STA/LTA 法を用いたイベント検出

今回の観測結果からイベントの検出においてSTA/LTA法を用いた検出では約65%程度の検出結果となった。図4.1は検出できたイベントと検出できなかったイベントのスペクトルを表したものである。図4.1から雷鳴によって発生したイベントは8~50Hzの周波数成分を含んだイベントであると確認できるが、検出に成功したイベントの方が失敗したイベント(遠雷と考えられる)よりも強くその性質を持っていることが分かる。このことから今回設定で観測した周波数特性をある程度強く示すイベントであれば観測することができると考えられる。

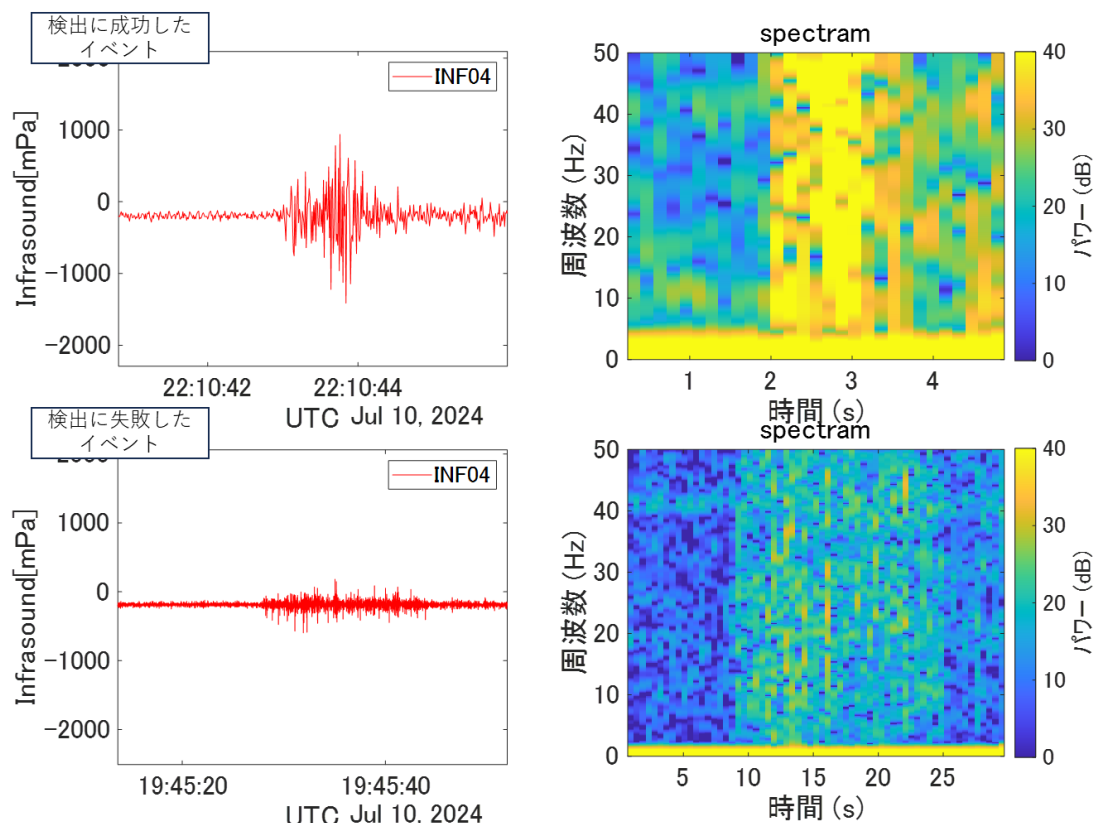


図 4.1 検出に成功したイベント(上)と失敗したイベント(下)のスペクトル

STA/LTA 法は複雑な演算を行わないため、計算を行う機器のスペックがある程度低くても問題なく使用できると考えられる。しかし、欠点としてイベントの周波数特性を知らなければ平均化時間を決めることができないので、これまで観測されたことのない現象では使用することは困難である。また、観測対象のイベントが特定の周波数特性を持たない場合も同様にこの手法を用いることはできないが、雷や雪崩などのインフラサウンドにおいてはより適切な平均化時間を設定することで応用可能であると考えられる。

4.4 INF04 と製作したロガーシステムの時間のずれ

製作したロガーシステムに何らかの問題がある場合、時刻が早まっているため RTC 回路に何かしらの不具合があり、時刻が正確に記録されていない可能性がある。また、INF04 に問題がある場合はノート PC がビジー状態になったことが原因でソフトウェアの処理が追い付かないという可能性が考えられ、今後は他のインフラサウンドセンサと比較することにより、原因の特定をする必要がある。

4.5 南極でのクラック観測

今回の観測ではインフラサウンドを昭和基地周辺の海氷上でアレイ観測を行い、同時刻の3地点データを取得することに成功した。また、従来の INF03S よりも増幅率を10 倍上げたものを使用し、クラックによって発生した可能性のある信号を取得できた。しかし、ノイズによる不具合により機器が正常に動作しないことがあったため、ノイズ原因の特定を行う必要があり、長期間における観測においてはより堅牢なシステム構成が必要であると考えられる。

第5章 結論

本研究では低消費電力アナログ出力インフラサウンドセンサである INF03S を用いたロガーシステムを考案・開発することで、従来使用していた他のインフラサウンドロガーシステムよりも省電力で運用することが可能となった。このことにより電力インフラが未整備の地点でも使用することができ今後の多地点インフラサウンド観測網の確立や全国展開にも貢献できると考えられる。しかし、ノイズによる動作不具合も見られ長期の運用を目的とした運用においては改良が必要である。

LPWA の通信においてもシミュレーションを通してデータ送信距離を調べた結果数 km のデータ送信が可能であることから防災など活用に期待できる。しかし、複数の機材を用いてネットワークを構築するにはデータ送受信のプロセスを考える必要があり、データの伝送速度も遅いことからデータ圧縮用のソフトウェアを開発する必要がある。

イベント検出においては先行研究[4]で考察されてきた STA/LTA 法を観測機材に搭載し、実際のイベントを検出することができたため、この手法を用いたイベント検出はある程度観測には有用であると確かめることができた。今後はより多くのイベントを取得し、最適な平均化時間を調べることで誤検出をある程度防ぐことができると考えられる。

謝辞

本研究をすすめるにあたり、多大なご支援とご指導をくださいました指導教員である高知工科大学 システム工学群 山本真行教授、同研究室の西川泰弘特任助教、及び機器の製作においてアドバイスをくださった同システム工学群野田聡人准教授に感謝申し上げます。

機器の運用試験において協力していただいた高知工科大学 学生団体 RaSK の皆様、南極地域観測隊(JARE)において私の研究をサポートしてくださった JARE 隊員の立命館大学 佐伯和人教授、同じく JARE 同行者の立命館大学の谷口亮太氏に感謝申し上げます。JARE 同行者としての南極での活動は、国立極地研究所ならびに JARE 隊員の皆様、観測船「しらせ」運航の自衛隊の皆様のサポートによるものです。ありがとうございました。

また、第66次南極地域観測隊にて萌芽研究課題「南極観測用ペネトレータの開発と白瀬氷河および周辺域での集中観測」の一環として参加させていただきました。ありがとうございました。同テーマ代表(PI)の JAXA 宇宙科学研究所 田中智教授ならびにメンバーの皆様に感謝申し上げます。

最後に、学部1年生のころから大変お世話になっており、本研究でも多くのアドバイスをくださいました所属研究室 博士後期課程1年の山本耕大氏、研究室においてともに切磋琢磨した蓮見裕太氏に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Yasuhiro Nishikawa, “Modeling of 3D trajectory of Hayabusa2 re-entry based on acoustic observations”, February 2022.
- [2] 山本大誠, “多地点観測を用いたインフラサウンドイベント自動検出システムの構築および気象評価”, 2021 年度 高知工科大学 修士論文, 2022.
- [3] 藤津裕亮, “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”, 2017 年度 高知工科大学 修士論文, 2018.
- [4] 米沢一輝, “マイコンを用いたインフラサウンドイベント判断および自動記録システムの製作, 2023 年度 高知工科大学 卒業論文, 2024.
- [5] 井上裕一郎, “多地点アレイ観測のための小型インフラサウンドデータロガーの開発”, 2020 年度 高知工科大学 修士論文, 2021.
- [6] 渡辺瑠斗, “滑空回収型小型気球への搭載を目的とした防水軽量型マルチデータロガーBOX の開発”, 2023 年度 高知工科大学 卒業論文, 2024.
- [7] STMicroelectronics, “Datasheet-STM32L476xx-Ultra-low-power Arm<Sup>”, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l476je.pdf>, 2024/10/27 閲覧
- [8] Amadej Trnkoczy, “Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm”, 2009.
- [9] Yoshiaki Ishihara, “Infrasound observations at Syowa Station, East Antarctica: Implications for detecting the surface environmental variations in the polar regions”, 2015.