

修士論文

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

Development of a small infrasound data logger
for multipoint array observation

報告者

学籍番号: 1235114

氏名: 井上 祐一郎

指導教員

山本 真行 教授

令和3年2月15日

高知工科大学 電子・光工学コース

目次

第 1 章 序論	1
1.1 インフラサウンドとは.....	1
1.2 背景.....	1
1.3 目的.....	3
第 2 章 開発したデータロガーとその他アプリケーション群	4
2.1 データロガーについて.....	4
2.2 小型インフラサウンドセンサ ADXIII-INF04LE.....	5
2.3 開発したロガー.....	6
2.4 試験運用.....	10
2.4.1 研究室内試験運用.....	10
2.4.2 スヴァールバル諸島試験運用.....	11
2.4.3 MOMO5 号機試験運用.....	13
2.4.4 RaSK 燃焼実験試験運用.....	13
2.4.5 HAYABUSA2 帰還時の本運用.....	14
2.5 その他アプリケーション.....	17
2.5.1 WIN to CSV Convert.....	17
2.5.2 INF04LE 計測データ JSON 出力.....	17
2.5.3 INF04LE 出力バイナリファイル CSV 変換.....	18
第 3 章 運用実験の結果	19
3.1 研究室内試験運用.....	19
3.1.1 長期観測実験.....	19
3.1.2 バッテリー連続観測実験.....	19
3.1.3 同地点同時観測実験.....	19
3.2 スヴァールバル諸島試験運用.....	21
3.3 MOMO5 号機試験運用.....	22
3.4 RaSK 燃焼実験試験運用.....	23
3.5 HAYABUSA2 帰還時の本運用.....	25
第 4 章 考察	27
4.1 試験運用観測実験についての考察と改善点.....	27
4.1.1 研究室内試験運用.....	27
4.1.2 スヴァールバル諸島試験運用.....	27
4.1.3 MOMO5 号機試験運用.....	27
4.1.4 RaSK 燃焼実験試験運用.....	28
4.1.5 HAYABUSA2 帰還時の本運用.....	28
4.2 未実装の機能.....	30
第 5 章 結論	31
謝辞.....	32
参考文献.....	33

第1章 序論

1.1 インフラサウンドとは

一般に人間の可聴域は 20 Hz から 20 kHz と考えられており、20 Hz 以下の低周波域の音波(圧力波)をインフラサウンドと呼ぶ。音波圧力波は地球大気中を水平方向には限りなく 0 に近い周波数まで伝搬可能であるが、鉛直方向には重力の影響を受ける。このため 15 °C の等温大気条件下では周波数 0.00321 Hz 以下の波動は伝搬できない、これがインフラサウンドの周波数下限で「音波遮断周波数」と呼ばれている。

図 1.1 に大気重力波、インフラサウンド、可聴音、超音波の周波数による分類を示す。

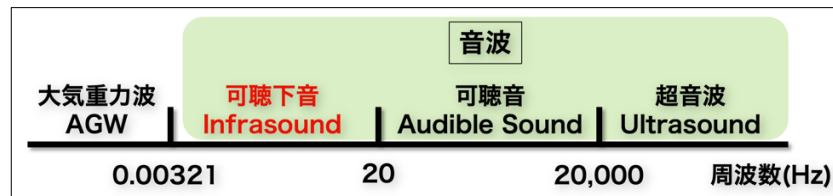


図 1.1 圧力波の分類

音波の減衰には空間的にエネルギーが広がることによる「幾何学的減衰」、音波の急激な振幅変動による「非線形減衰」、大気の粘性による「空気の粘性による減衰」の 3 種類が存在する。インフラサウンドは、周波数が上がればその 2 乗に比例して大きくなる「空気の粘性による減衰」の影響を受けにくいいため長距離伝搬できる特性がある。

波動の波長がキロメートルサイズにもなるインフラサウンドは、火山噴火や地震、津波、土砂崩れ、隕石の飛来などスケールの大きい様々な地球物理学的イベントに起因し発生することが知られている。これらのイベントは災害に繋がることも多い。実際に 2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震によって発生した巨大津波を起因とするインフラサウンドも観測されている[1]。

インフラサウンドは地球物理学的イベントに起因することが多いため、近年これらをリモートセンシングする手段として、また、核実験などを監視する手段として注目されている[2]。

1.2 背景

国内におけるインフラサウンドに関する研究は 1 世紀以上の歴史を有し、近年では 1980 年代に愛知教育大学(当時)の田平誠氏による観測によりアレイ状にセンサを組み合わせる計測・解析手法の礎が築かれた。世界規模では国際条約に基づく世界的な核実験監視網が CTBTO (Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organization) により築かれ、全地球上で 60 点のアレイ観測網構築が進行中である。日本国内では CTBTO インフラサウンド観測網の 1 地点が千葉県いすみ市にあり、6 台のセンサアレイにより連続観測されている。近年、種々の目的でインフラサウンドを計測するグループが増加傾向にあるが、インフラサウンドセンサの価格が高価であるため、国内におけるインフラサウンド観測地点は未だ限られている。日本国内に約 100 地点存在するインフラサウンドセンサは、これまで各々の研究機関にて運用、データの管理がなされてきた。2019 年末、研究機関同士の横の繋がりを作るべく「全国インフラサウンド観測コンソーシアム」の設立が決まり、全国規模のリモートセンシング体制の構築を目指している。

著者の所属する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では、2005 年からインフラサウンドに関する研究が行われてきた。株式会社サヤ(SAYA)との共同開発により、安価かつ高性能な新方式インフラサウンドセンサの製品化にも成功し、加速度や気圧、騒音計などを備えた複合型センサの入手が容易になった。複合型センサが開発されたことにより、当研究室ではこれまでにないスケールで日本各地にセンサの配置が可能となったため、図 1.2 のように 2017 年の高知県内沿岸計 15 地点への整備を皮切りに 2020 年末現在までに全国 30 箇所に整備し、高知工科大学インフラサウンド観測ネットワーク[3]において高知県内に設置したセンサによる観測データの一部を公開している。

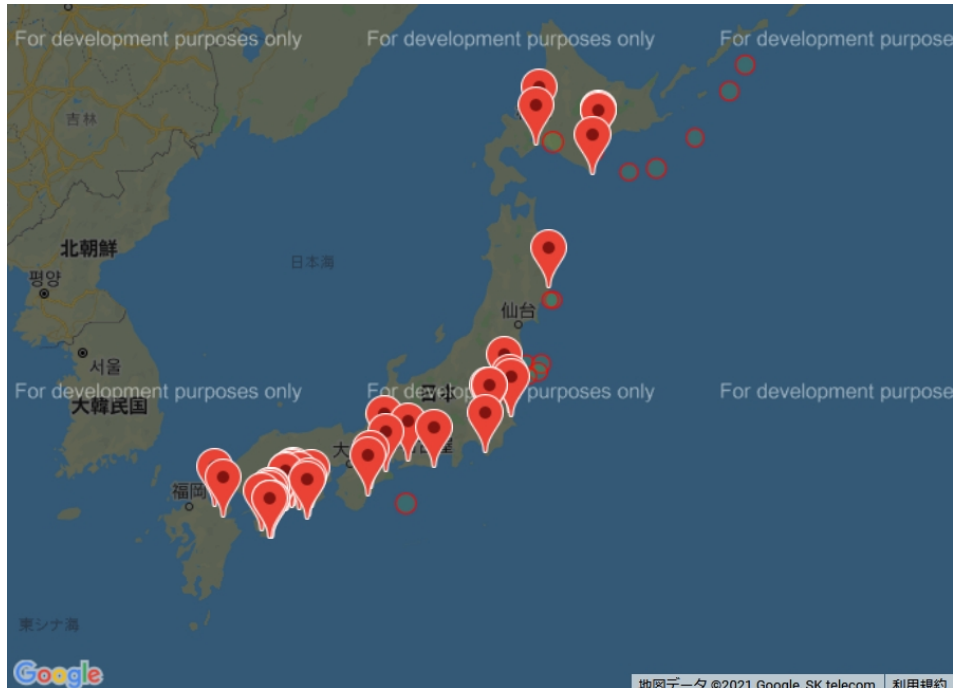


図 1.2 高知工科大学インフラサウンド観測ネットワーク配置図

インフラサウンド解析を進める中で、遠距離を伝わる音波は直接、直線的に伝わっているわけではないということが従来の多くの研究から判明しており[4]、高層大気中を伝搬する音波の性質を知る必要が出てきた。気球到達高度(約 30~50 km)より高い場所の直接観測は観測ロケットを用いる必要があるため、観測ロケット MOMO シリーズ(インターステラテクノロジズ株式会社)を用いた音波観測を行うこととなった。2018 年にロケットに搭載するために小型・軽量化されたインフラサウンドセンサを株式会社サヤと共同開発し、その小型化技術を活かし、従来の主に津波をターゲットとした複合型センサ(INF01 型)に対してはやや性能が劣るが、小型かつ省電力なセンサ(INF04 型)が開発された。小型センサは複合型センサほどの精度(低周波特性)はないが、観測対象の違いや、設置方法により意味のあるデータが得られる。この小型センサはセンサ単独では小さく省電力なもの、図 1.3 のようにロガーは複合型センサと共用であるため、これまではノート PC 等を用いて PC 上のアプリケーションでロギングしておりセンサが小型であるという利点を活かし切れていない。

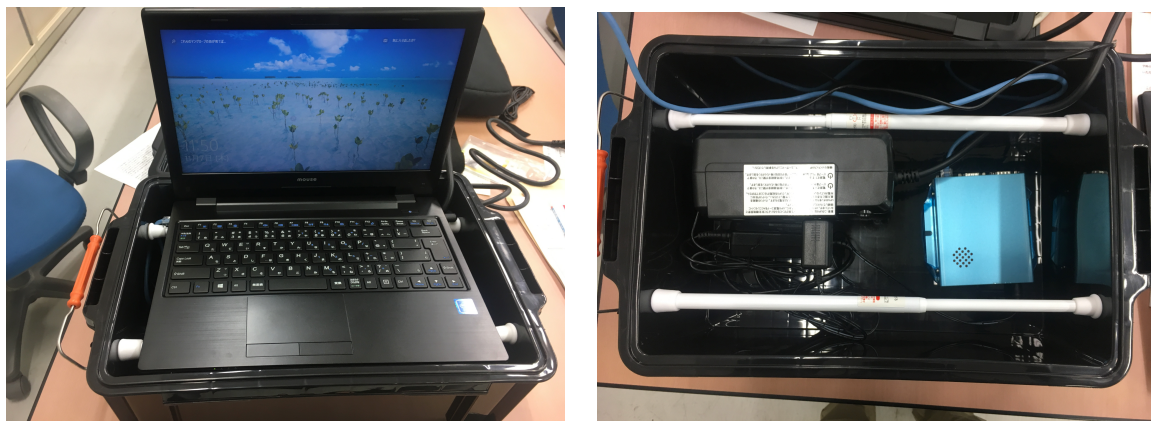


図 1.3 小型センサ観測の様子

近年、技術の進歩や、特に MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術を採用したセンサの超小型化・低価格化により、身の回りの物をセンシングし、データを蓄積するという IoT(Internet of Things)が行われている。マイコンよりも高性能な Linux を用いたロガー技術も成熟してきており、地球物理学の分野でも、Armadillo を用いたインフラサウンドセンサ用ロガーや、RaspberryPi を用いた地震計なども登場している [5]。

1.3 目的

本研究では、小型インフラサウンドセンサ(SAYA 製 ADXⅢ-INF04LE) に特化し、その計測データを記録可能な、低価格かつ、省電力なデータロガーを開発することにより観測ロケット MOMO シリーズや HAYABUSA2 カプセルの地球帰還といった臨時観測イベント時にセンサの大量配備と比較的短期間の同時連続運用を可能とし、科学的に有意なデータ取得を行うことを目的とする。

また、臨時観測用データロガー開発を行うことによって得た知見を元に、より長期にメンテナンスフリーで稼働可能な恒常設置型データロガーの開発を行い、将来的に日本各地へ密な配備を行うことにより土砂災害や津波といった自然災害に起因するインフラサウンド解析のためのデータ蓄積を目的とする。

第2章 開発したデータロガーとその他アプリケーション群

2.1 データロガーについて

データロガーは、センサより取得した計測データを記録する装置の総称である。筆者の所属研究室ではインフラサウンドや雷などの計測データを取得するために複数種類のデータロガーを所有している。

図 2.1 は白山工業株式会社が開発・販売している LS-8800 であり、アナログ入力を持つロガーである。超低消費電力かつ小型なロガーであり、所属する研究室では Chaparral Physics 製のインフラサウンドセンサ(Model 25)等の計測データを記録するために用いている。GPS による UTC タイムスタンプを与えつつ記録でき、データの出力形式は地震形データに標準的に用いられる WIN 形式となっている[6]。



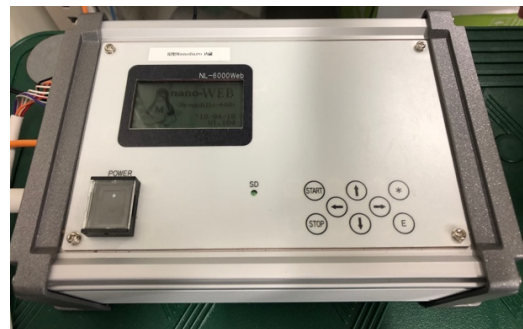
<https://www.hakusan.co.jp/products/keisoku/ls8800.html>

図 2.1 LS-8800

図 2.2 は東邦マーカンタイル株式会社が開発・販売しているナノロガーである。ナノロガーはインフラサウンドセンサとして用いている ParoScientific 製ナノバロメータ(Model 6000-16B)が取得する絶対気圧情報を含むインフラサウンド計測データを記録するロガーである。GPS による UTC タイムスタンプが付加された気圧データを SD メモリカードへ記録する。20 桁×4 行の LCD 表示器を採用しており、ロガーの状況を特別な操作を行わずに確認することが可能である。2 種類のロガーがあり、(a)ナノロガーは IP65 相当の防水ケースに収められており、乾電池を用いたバッテリー計測が可能であり、(b)ナノロガーWEB は、防水機能はないものの、計測データを Ethernet 経由で出力可能であるため、遠隔観測が可能である。



(a) ナノロガー(NL-6000)



(b) ナノロガーWEB(NL-6000web)

図 2.2 ナノロガー

図 2.3 は株式会社サヤ製のインフラサウンドセンサ用ロガーアプリケーション MultiLoggerX3 の画面の 1 例である。Windows 専用 GUI アプリケーションであり、センサ設定を GUI から行うことができ、収集されたデータは CSV 形式で出力される。また、FTP 転送機能を備えているため、遠隔地観測が可能である[7]。

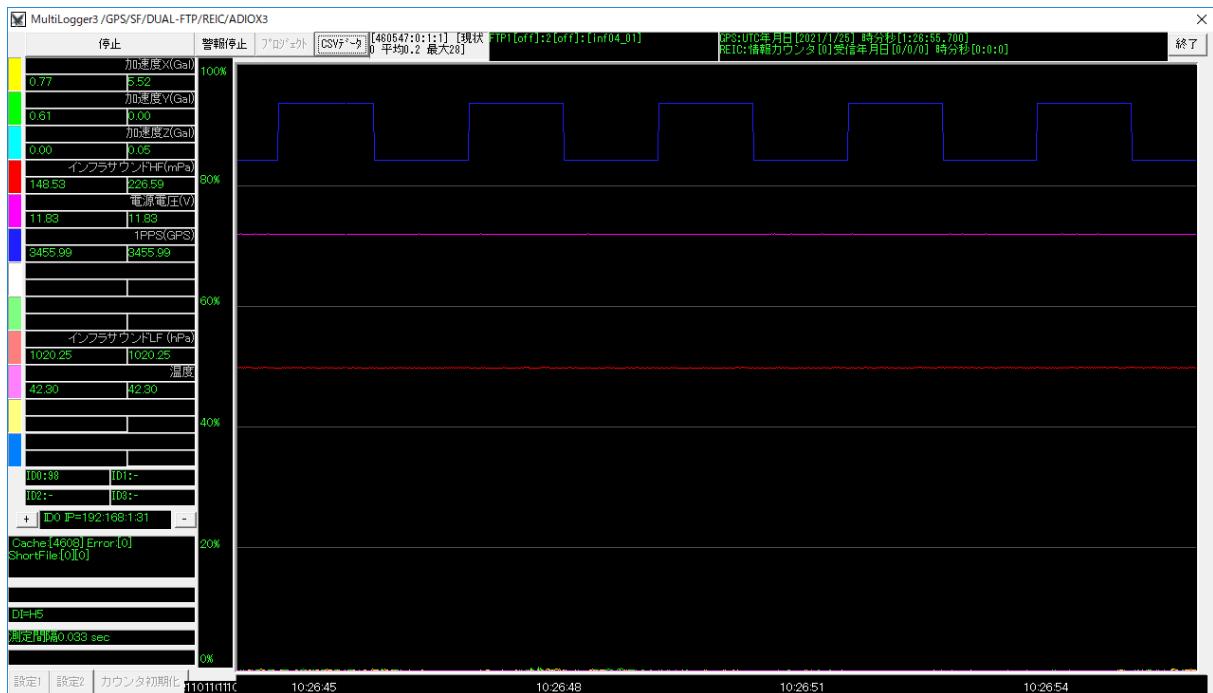


図 2.3 Multi LoggerX3 GUI

図 2.4 は株式会社数理設計研究所が開発している Raspberry Pi Compute Module 3+を用いた汎用ロガーである。このロガーはシリアルポートを持っており、このポートにセンサを接続することによってデータを収集、記録することが可能である。また、このロガーには MAD-SS という省電力長距離通信可能な無線通信機器が搭載されており、過酷環境での遠隔観測や震災時の遠隔観測を可能にしている。



(a) 側面



(b) 上面

図 2.4 数理設計研究所ロガー(IFS-LOG2020)

2.2 小型インフラサウンドセンサ ADXIII-INF04LE

図 2.5 は株式会社サヤが販売しているインフラサウンドセンサ ADXIII-INF04LE(以下、INF04LE)である。インフラサウンドセンサシリーズにおける位置づけは設置スペースが限られている場合、過大入力(128 dB=50.2 Pa、HF のみ)が必要なく、高周波側も広帯域(1000 Hz~DC)でセンシングしたい用途であり、高域側(HF)と低域側(LF)の 2 ウェイ構成で問題なく(両者は 0.1~0.02 Hz にてクロスオーバーする)、マルチセンサーと ETHERNET インターフェースが必要な場合に最適となっている[8]。

Ethernet/RS232C のインターフェースをもち、インフラサウンド(HF・LF)の他に 3 軸 MEMS 加速度、電源電圧、GPS 時刻、GPS の 1PPS パルスのデータ、温度を同時計測可能であり、リングバッファを用いることにより 700 Hz の高速データ収集が可能である。表 2.1 に仕様をまとめる。



図 2.5 ADXIII-INF04LE

表 2.1 ADXIII-INF04LE 仕様

搭載センサ	加速度(振動)x3ch(XYZ)、汎用アナログ入力x2ch、インフラサウンド(LF+HF)、温度センサ
通信方式	有線LAN(Ethernet)
寸法	W115.9xD113.6xH28.9mm、シャーシ寸法、コネクタ突起含まず
電源電圧	DC9V~18V
消費電力	2.16W (GPS含まず、TCP、代表値)
周囲温度	-10~60°C (動作時) -55~125°C (保存時)
湿度	10~90%RH(動作時：結露なきこと)

2.3 開発したロガー

開発したロガーシステムは INF04LE が取得する各種データを Ethernet 接続した Raspberry Pi に記録するものである。ソフトウェアは Go 言語により実装を行っており、クロスコンパイルを用いることにより、Ethernet 接続可能搭載しているコンピュータで動作する[9]。そのため、急な臨時観測を行う場面でも手元のコンピュータに対応したコンパイル済みファイルを用意していれば観測可能である。

図 2.6 はプログラムのファイル構造である。細かな処理、関数をまとめたファイルを用意することにより、他のアプリケーションへの流用可能な設計を行なった。

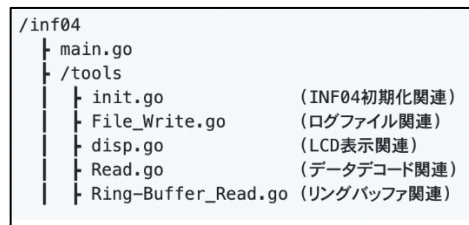


図 2.6 プログラムファイル構造

図 2.7 はロガーメインのプログラムのフローチャートである。ロガーアプリケーションが起動すると各種の初期設定を行い、INF04LE と接続を行う。正常に接続された後、記録を行うループに入る。それぞれのサブルーチンは Go 言語の並列処理 goroutine を用いて独立して動作する。

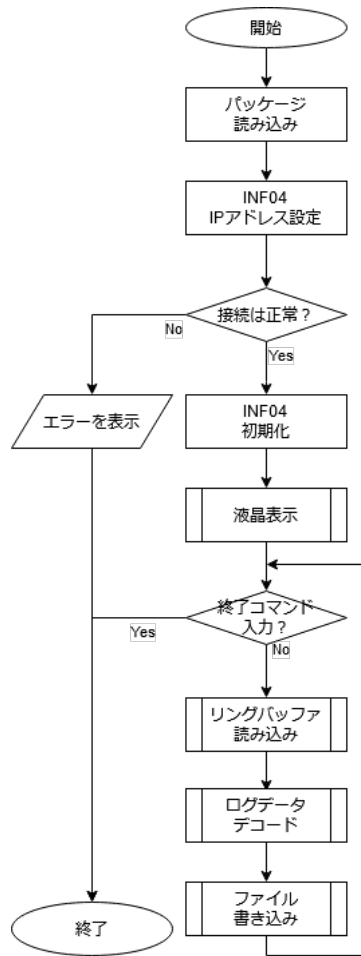


図 2.7 ロガープログラムフローチャート

本研究室で運用している他のインフラサウンドセンサ(Model-25 など)のサンプリング周波数が 100 Hz であるため、サンプリング周波数はプログラム内で 100 Hz に設定しており、INF04LE 初期化時にサンプリング周波数設定を行う 2 進数のコマンドを送信する。データの取得は図 2.6 リングバッファ読み込みサブルーチン内で行っている。リングバッファ読み込みサブルーチンでは INF04LE のリングバッファレジスタにアクセスするコマンドを INF04LE に送信している。リングバッファを取得するタイミングはリングバッファ切り替え確認レジスタを読むコマンドを 100 ミリ秒ごとに送信し、リングバッファの切り替えを検知するとリングバッファ読み込みコマンドを送信し、それぞれ 1400, 1400, 1294, 14 byte に分割されて送られてくる計測データを結合し保存する。この生バイナリデータをファイルに書き出す。リングバッファは 1 サンプル 32 byte が 128 サンプル分まとめられ、代表 GPS 時刻が格納された補助データ 12 byte を加え、1 バッファあたり 4108 byte である。図 2.8 にリングバッファの構造を示す。

表 2.2 は INF04LE のバイナリデータをデコードする際に用いる変換表である。図 2.8 に従い各要素のバイト列を読み出し結合を行なった後、表に従い物理量に変換を行う。変換を行なったものを CSV 形式のファイルとして書き出す。

表 2.2 INF04LE 物理量変換表

ADXIII-INF04LE	変換前	変換後	単位
加速度XYZ	0 - 65535	0 - 3347	gal
インフラサウンドHF	0 - 65535	±71050	mPa
電圧電源	0 - 65535	0 - 16384	mV
1PPS	0 - 65535	0 - 4095	mV
インフラサウンドLF	0 - 4294967294	0 - 1048575.9995	hPa
温度	0 - 4294967294	0 - 42949672.94	°C

https://www.saya-net.com/_userdata/adiox3regmap.pdf

	BIT0	BIT1	BIT2	BIT3	BIT4	BIT5	BIT6	BIT7
BYTE0	AIO-Bit0(LSB)	AIO-Bit1	AIO-Bit2	AIO-Bit3	AIO-Bit4	AIO-Bit5	AIO-Bit6	AIO-Bit7
BYTE1	AIO-Bit8	AIO-Bit9	AIO-Bit10	AIO-Bit11	AIO-Bit12	AIO-Bit13	AIO-Bit14	AIO-Bit15(MSB)
BYTE2	CTC0-Bit0(LSB)	CTC0-Bit1	CTC0-Bit2	CTC0-Bit3	CTC0-Bit4	CTC0-Bit5	CTC0-Bit6	CTC0-Bit7
BYTE3	CTC0-Bit8	CTC0-Bit9	CTC0-Bit10	CTC0-Bit11	CTC0-Bit12	CTC0-Bit13	CTC0-Bit14	CTC0-Bit15
BYTE4	A11-Bit0(LSB)	A11-Bit1	A11-Bit2	A11-Bit3	A11-Bit4	A11-Bit5	A11-Bit6	A11-Bit7
BYTE5	A11-Bit8	A11-Bit9	A11-Bit10	A11-Bit11	A11-Bit12	A11-Bit13	A11-Bit14	A11-Bit15(MSB)
BYTE6	CTC0-Bit16	CTC0-Bit17	CTC0-Bit18	CTC0-Bit19	CTC0-Bit20	CTC0-Bit21	CTC0-Bit22	CTC0-Bit23
BYTE7	CTC0-Bit24	CTC0-Bit25	CTC0-Bit26	CTC0-Bit27	CTC0-Bit28	CTC0-Bit29	CTC0-Bit30	CTC0-Bit31(MSB)
BYTE8	A12-Bit0(LSB)	A12-Bit1	A12-Bit2	A12-Bit3	A12-Bit4	A12-Bit5	A12-Bit6	A12-Bit7
BYTE9	A12-Bit8	A12-Bit9	A12-Bit10	A12-Bit11	A12-Bit12	A12-Bit13	A12-Bit14	A12-Bit15(MSB)
BYTE10	CTC1-Bit0(LSB)	CTC1-Bit1	CTC1-Bit2	CTC1-Bit3	CTC1-Bit4	CTC1-Bit5	CTC1-Bit6	CTC1-Bit7
BYTE11	CTC1-Bit8	CTC1-Bit9	CTC1-Bit10	CTC1-Bit11	CTC1-Bit12	CTC1-Bit13	CTC1-Bit14	CTC1-Bit15
BYTE12	A13-Bit0(LSB)	A13-Bit1	A13-Bit2	A13-Bit3	A13-Bit4	A13-Bit5	A13-Bit6	A13-Bit7
BYTE13	A13-Bit8	A13-Bit9	A13-Bit10	A13-Bit11	A13-Bit12	A13-Bit13	A13-Bit14	A13-Bit15(MSB)
BYTE14	CTC1-Bit16	CTC1-Bit17	CTC1-Bit18	CTC1-Bit19	CTC1-Bit20	CTC1-Bit21	CTC1-Bit22	CTC1-Bit23
BYTE15	CTC1-Bit24	CTC1-Bit25	CTC1-Bit26	CTC1-Bit27	CTC1-Bit28	CTC1-Bit29	CTC1-Bit30	CTC1-Bit31(MSB)
BYTE16	A14-Bit0(LSB)	A14-Bit1	A14-Bit2	A14-Bit3	A14-Bit4	A14-Bit5	A14-Bit6	A14-Bit7
BYTE17	A14-Bit8	A14-Bit9	A14-Bit10	A14-Bit11	A14-Bit12	A14-Bit13	A14-Bit14	A14-Bit15(MSB)
BYTE18	CTC2-Bit0(LSB)	CTC2-Bit1	CTC2-Bit2	CTC2-Bit3	CTC2-Bit4	CTC2-Bit5	CTC2-Bit6	CTC2-Bit7
BYTE19	CTC2-Bit8	CTC2-Bit9	CTC2-Bit10	CTC2-Bit11	CTC2-Bit12	CTC2-Bit13	CTC2-Bit14	CTC2-Bit15
BYTE20	A15-Bit0(LSB)	A15-Bit1	A15-Bit2	A15-Bit3	A15-Bit4	A15-Bit5	A15-Bit6	A15-Bit7
BYTE21	A15-Bit8	A15-Bit9	A15-Bit10	A15-Bit11	A15-Bit12	A15-Bit13	A15-Bit14	A15-Bit15(MSB)
BYTE22	CTC2-Bit16	CTC2-Bit17	CTC2-Bit18	CTC2-Bit19	CTC2-Bit20	CTC2-Bit21	CTC2-Bit22	CTC2-Bit23
BYTE23	CTC2-Bit24	CTC2-Bit25	CTC2-Bit26	CTC2-Bit27	CTC2-Bit28	CTC2-Bit29	CTC2-Bit30	CTC2-Bit31(MSB)
BYTE24	A16-Bit0(LSB)	A16-Bit1	A16-Bit2	A16-Bit3	A16-Bit4	A16-Bit5	A16-Bit6	A16-Bit7
BYTE25	A16-Bit8	A16-Bit9	A16-Bit10	A16-Bit11	A16-Bit12	A16-Bit13	A16-Bit14	A16-Bit15(MSB)
BYTE26	CTC3-Bit0(LSB)	CTC3-Bit1	CTC3-Bit2	CTC3-Bit3	CTC3-Bit4	CTC3-Bit5	CTC3-Bit6	CTC3-Bit7
BYTE27	CTC3-Bit8	CTC3-Bit9	CTC3-Bit10	CTC3-Bit11	CTC3-Bit12	CTC3-Bit13	CTC3-Bit14	CTC3-Bit15
BYTE28	A17-Bit0(LSB)	A17-Bit1	A17-Bit2	A17-Bit3	A17-Bit4	A17-Bit5	A17-Bit6	A17-Bit7
BYTE29	A17-Bit8	A17-Bit9	A17-Bit10	A17-Bit11	A17-Bit12	A17-Bit13	A17-Bit14	A17-Bit15(MSB)
BYTE30	CTC3-Bit16	CTC3-Bit17	CTC3-Bit18	CTC3-Bit19	CTC3-Bit20	CTC3-Bit21	CTC3-Bit22	CTC3-Bit23
BYTE31	CTC3-Bit24	CTC3-Bit25	CTC3-Bit26	CTC3-Bit27	CTC3-Bit28	CTC3-Bit29	CTC3-Bit30	CTC3-Bit31(MSB)
	↑この32Byteのチャンネルブロックを128サンプル順次繰り返す。							
BYTE4095	CTC3-Bit24	CTC3-Bit25	CTC3-Bit26	CTC3-Bit27	CTC3-Bit28	CTC3-Bit29	CTC3-Bit30	CTC3-Bit31(MSB)
	最後に以下の12ByteでGPSと温度データ、DIデータを付加します。							
BYTE4096	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
BYTE4097	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15
BYTE4098	D16	D17	D18	D19	D20	D21	D22	D23
BYTE4099	D24	D25	D26	D27	D28	D29	D30	D31
BYTE4100	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
BYTE4101	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15
BYTE4102	D16	D17	D18	D19	D20	D21	D22	D23
BYTE4103	D24	D25	D26	D27	D28	D29	D30	D31
BYTE4104	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
BYTE4105	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15
BYTE4106	D16	D17	D18	D19	D20	D21	D22	D23
BYTE4107	D24	D25	D26	D27	D28	D29	D30	D31

https://www.saya-net.com/_userdata/adiox3regmap.pdf

図 2.8 リングバッファマップ

ハードウェアについては、ロガーアプリケーションは上述の通り様々なコンピュータで動作するが、メインボードの選定は低価格かつ、省電力なデータロガーの開発を目的としているため、ARM プロセッサを搭載したシングルボードコンピュータである Raspberry Pi を用いることにした。本研究の開発に用いた OS は標準的 Linux コマンドが利用可能な Raspberry Pi OS である。

ロガーの現在状況を把握できるよう、8桁2行のI2C接続小型キャラクタLCD(AQM0802A)を搭載した。表 2.3 にまとめた通り、LCD はロガーアプリケーションが起動している状態であれば常になんらかの表示を行う。図 2.9 はロガーLCD 表示の1例である。

表 2.3 ロガーLCD 表示一覧

起動待ち	"Please Waiting"
GPS接続	"GPS = OK" or "GPS = NO"
記録開始	"Logging Start"
記録中	"Logging ..."
エラー	"Error"



図 2.9 LCD 表示の一例

図 2.10 はロガーのブロック図である。ロガーは直流 9~18 V を入力することで動作を開始する。これは INF04LE の電源電圧に依存している。Raspberry Pi へは DC-DC コンバータ変換を行なった後、直流 5 V を供給する。Raspberry Pi Zero には RJ45(LAN/Ethernet)ポートが無いいため、USB 端子にネットワークインタフェースを接続し、INF04LE との接続を行う。

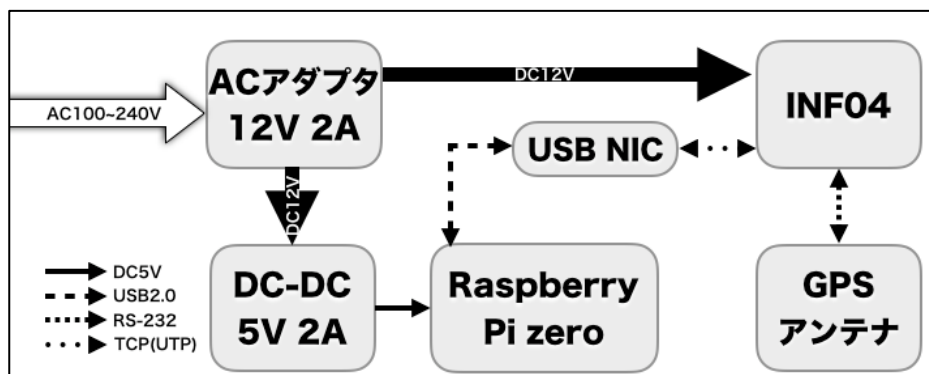


図 2.10 ロガーシステムのブロック図

INF04LE から送信される生のバイナリデータ(YMMDDhhmm.bin)、デコードを行った CSV 形式データ(YMMDDhhmm.csv)を 1 時間ファイルとしてそれぞれ出力する。出力形式はプログラム内部変数の書き換えを行うことにより、選択可能である。ファイルの切れ目は Raspberry Pi 内の時計に同期した毎時 0 分 0 秒である。なんらかの事情により途中で記録を停止してもファイルにはその時点までの観測データが記録される。同じ 1 時間幅の中で記録を再開すると同ファイルに続けて記録される。図 2.11 はログデータがファイルとしてどのように保存されるかのディレクトリ構造を示している。1日記録を行うと 24 個の csv ファイルと 24 個のバイナリファイルが並列して出力される。

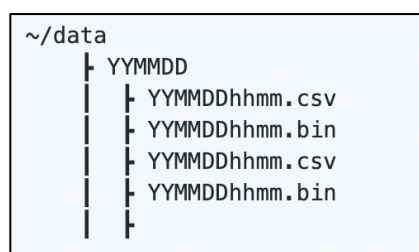


図 2.11 ログデータファイルのディレクトリ構造

CSV 形式のカラム順は`PC_Time, GPS_Time, Acceleration_X, Y, Z, InfraSound_HF, Supply_Voltage, 1PPS, InfraSound_LF, Temperature`の通りである。PC_Time は Raspberry Pi 内時刻を Unix ミリ秒で格納している。GPS_Time は INF04LE に接続された GPS から取得された時刻を Unix ミリ秒形式で格納している。その他の順番は MultiLoggerX3 から出力される csv ファイルに準じている。図 2.12 は出力される csv ファイルの 1 例である。

```

1 1572927679498,1572927679500,1.9474,0.7895,0.3158,-0.4601,15589.3333,3839.9375,1009.2512,41.0100
2 1572927679508,1572927679510,1.3158,0.0000,0.1579,-0.4609,15586.6667,3839.9375,1009.2512,41.0100
3 1572927679518,1572927679520,0.2105,0.4211,0.2632,-0.4604,15588.0000,3839.9375,1009.2510,41.0000
4 1572927679528,1572927679530,0.1053,0.1579,0.2632,-0.4607,15587.0000,3839.9375,1009.2507,40.9900
5 1572927679538,1572927679540,0.8421,1.4211,0.1579,-0.4606,15578.6667,3839.9375,1009.2505,40.9800
6 1572927679548,1572927679550,0.7895,1.4737,0.1579,-0.4604,15584.0000,3839.9375,1009.2505,40.9800
7 1572927679558,1572927679560,0.5789,0.7368,0.2632,-0.4607,15580.0000,3839.9375,1009.2507,40.9900
8 1572927679568,1572927679570,1.5789,0.2632,0.2105,-0.4604,15581.3333,3839.9375,1009.2507,40.9900
9 1572927679578,1572927679580,2.1579,0.9474,0.1579,-0.4609,15584.0000,3839.9375,1009.2507,40.9900
10 1572927679588,1572927679590,0.9474,0.9474,0.2632,-0.4606,15584.0000,3839.9375,1009.2510,41.0000
11 1572927679598,1572927679600,1.0000,1.6842,0.3684,-0.4604,15590.0000,3839.9375,1009.2510,41.0000

```

図 2.12 出力される csv ファイルの一例

開発したロガーは電源投入後約 1 分で自動ログを開始する。1 時間に 1 度ウォッチドッグスクリプトが動作し、何らかのエラーによってアプリケーションが強制終了した場合でも再度ログを開始する機能を備えている。このウォッチドッグは OS 上の crontab によってスケジュール管理しスクリプトを実行するため、間隔は任意に変更可能である。本ロガーからログデータを取得するには、適当な PC と Raspberry Pi を LAN 接続し、scp(非推奨)や、sftp、rsync コマンドを用いてデータをダウンロードする必要がある。

2.4 試験運用

2.4.1 研究室内試験運用

(a) 長期観測実験

試作ロガーアプリケーションが完成した段階で、研究室内の iMac にてアプリケーションを動作させ連続観測を行った。ロガーアプリケーションの観測開始日は 2019 年 12 月 17 日であった。この時に動作させたアプリケーションは INF04LE と Ethernet 接続を行い、計測されたバイナリデータを取得し、デコードを行い記録するだけのシンプルなものである。この試験運用の狙いは将来的に長期定点観測を行うことを見据え、例えば月や年の切り替わり等のタイミングでエラーによって観測が停止しないかを最小構成のアプリケーションで確認することである。図 2.13 は研究室内インフラサウンド観測の様子である。



図 2.13 研究室内観測の様子

(b) バッテリー連続観測実験

観測環境がバッテリー駆動となることを見据え、実際に動作させるロガー一式をバッテリーに接続し観測を行い、連続観測可能時間を計測した。実験には Suaoki 製モバイルバッテリー G100(3.7 V, 27000 mAh)、自動車用小型バッテリー(12 V, 32 Ah)、自動車用大型バッテリー(12 V, 125 Ah)を用いた。図 2.14 は実験に用いたバッテリーである。



図 2.14 実験に用いたバッテリー

(c) 同地点同時観測実験

INF04LE が後発のインフラサウンドセンサであるため、同地点で同イベントを並行観測し、個々のセンサー特性(バラつき)を確認する実験を 2020 年 8 月 12 日から 2020 年 9 月 15 日まで行なった。

本実験では図 2.15 に示すようにプラスチック製の簡易容器に収めた INF04LE、Raspberry Pi 3Model B、GPS モジュールを 5 セット用意し、キャンパス内(屋外)の観測小屋内に設置した。



図 2.15 同時観測の様子

2.4.2 スヴァールバル諸島試験運用

北極圏ノルウェー領スヴァールバル諸島にて、初めてとなる観測対象が明確な試験運用を 2019 年 11 月 16 日から 2019 年 12 月 8 日まで行った。図 2.16 は観測の様子である。本試験運用は、筆者の所属する研究室の学生 1 名が観測ロケットを用いた国際共同研究として宇宙花火実験を行うため、ノルウェー領スヴァールバル諸島(北緯約 79°)へ出張する機会があったため、観測ロケットの発射音の観測、また高緯度地域であるためオーロラ起因のインフラサウンドの検出を期待して観測を依頼した。



図 2.16 スヴァールバル諸島での観測の様子

海外出張の限られた手荷物サイズに収まる小さいロガー開発を行なった。将来的に防水機能を持たせるためにタカチ電機工業の防水ケースの中から最も体積が小さくなるギリギリのケースを選定した。また、

開発者である筆者が現地で作業を行えないため、メンテナンスフリーなロガー開発を目標とした。本ロガーを開発する際に crontab を用いたロガーアプリケーションの自動起動機能を実装した。なお、ロケット運用や科学観測等のため電波を発してはいけない地域での観測であったため、Wi-Fi、Bluetooth プロセスをオフに設定した。

防水ケース(SPCM131810T)に INF04LE、Raspberry Pi、電源などを納めるため、3DCAD(Fusion360)を用いて固定具の設計を行なった。図 2.17 は設計した図面である。図面にに基づき厚さ 2 mm のアルミ板に切断、穴あけ、やすりがけなどの金属加工を行なった。図 2.18 は金属加工を行なったアルミ板である。加工を行なったアルミ板に INF04LE、Raspberry Pi Zero、GPS モジュール、その他基板を組み付け、防水ケースに収めた完成品が図 2.19 である。

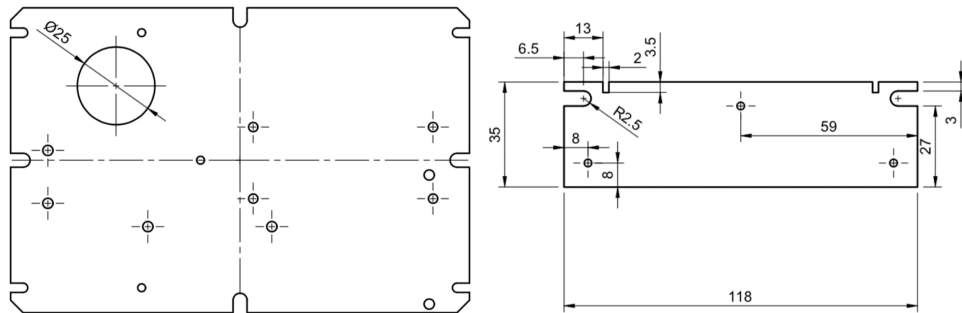


図 2.17 スヴァールバル諸島観測用ロガー加工図面(一部)

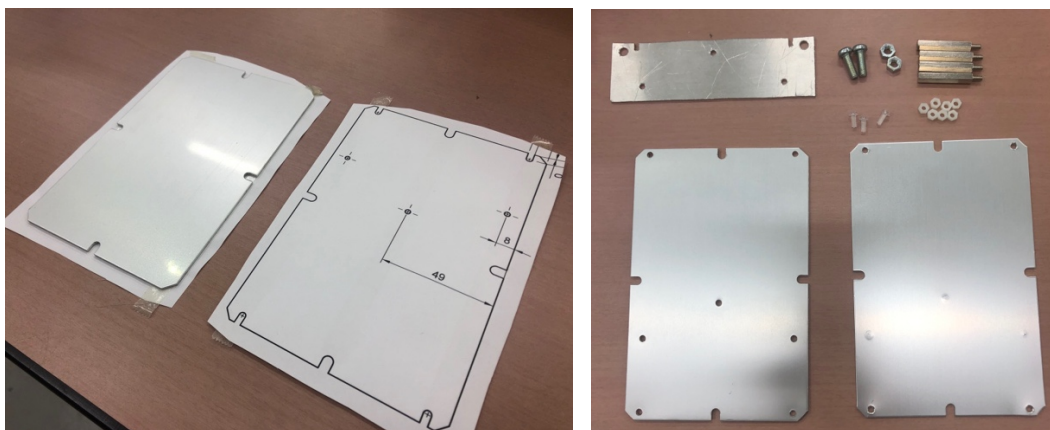


図 2.18 加工を行なったアルミ板



図 2.19 完成したロガー

2.4.3 MOMO5 号機試験運用

本研究室ではインターステラテクノロジズ株式会社が 2020 年 6 月 14 日 5 時 15 分 0 秒に北海道大樹町で実施した観測ロケット「えんとつ町のプペル MOMO5 号機」打ち上げの地上観測実験を行なった[10]。

本実験では開発したロガーと INF04LE のセットを計 7 台用意しロケット発射音、ロケットが音速を超えた時に発生する衝撃波を捉えることにより、大気中を伝搬する音波の特性を明らかにすることを目的とした。

十字型にセンサを設置することにより、環境ノイズがほぼ等しく、位相差が見やすい計測データを得ることができるため、音源位置推定の誤差が小さくなることを期待した[11]。図 2.20 はセンサ配置図である。

本実験に用いたロガーは Raspberry Pi 容量問題解決のため 1 日の終わりに ZIP 圧縮ファイル化するスクリプトを追加したことにより、長期に渡ってデータ保存を可能とした。



図 2.20 MOMO5 地上観測点[11]

2.4.4 RaSK 燃焼実験試験運用

2020 年 12 月の HAYABUSA2 地球帰還時のインフラサウンド観測へ向けたロガー開発を行う中でエラー処理などの実証実験として 2020 年 8 月 25 日、高知工科大学グラウンドにて行われた学生団体 RaSK によるハイブリッドロケットエンジンの燃焼実験の観測を行なった[12]。このとき用いた試作ロガーは初めてリアルタイムクロック(RTC)モジュールの実装を行なったバージョンである。Raspberry Pi は内部クロックを外部電源に頼っており、電源を切断すると内部時計が止まってしまう。インターネット環境がある場所で Raspberry Pi を利用するのであれば、起動時に Network Time Protocol (NTP)を用いて時刻を合わせる事が可能であるが、屋外のへき地などインターネットの無い環境で観測を行うことも多いため PC 時刻のずれが問題であった。そこで本バージョンでは I2C 接続可能な RTC モジュール(DS3231)を実装し、crontab を用いて Raspberry Pi 起動時に正確な時刻を取得可能とした。

開発したロガーと INF04LE のセットが 4 台、INF04LE と PC(MultiLoggerX3)のセットが 1 台、およびナノロガー1 台を図 2.21 のように配置し観測した。図内の赤い星印が燃焼実験の場所を示しており、黄色の丸印地点「いっぱい」に 3 種類のセンサを並べ、その他の 3 地点(「射点」、「野良」、「漁港」)に開発したロガーをそれぞれ配置した。図 2.22 は観測の様子である。

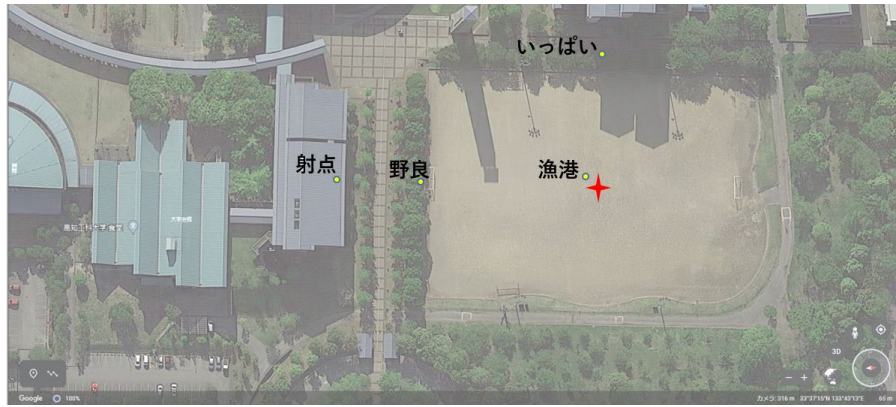


図 2.21 センサ配置図

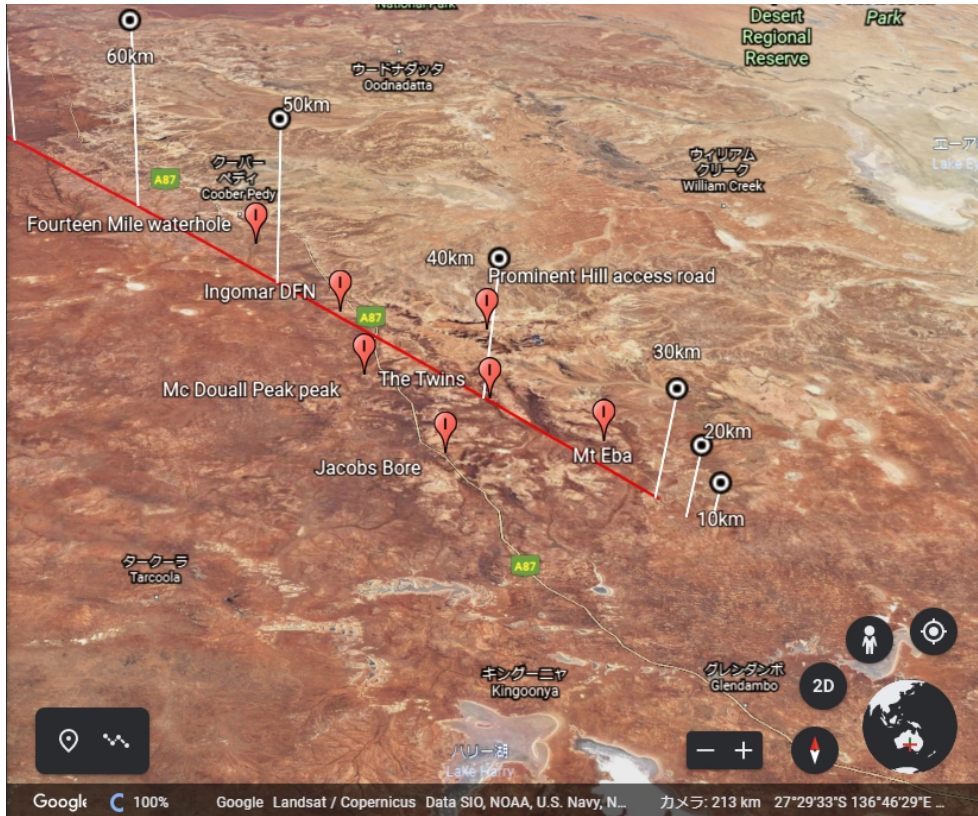


図 2.22 観測風景

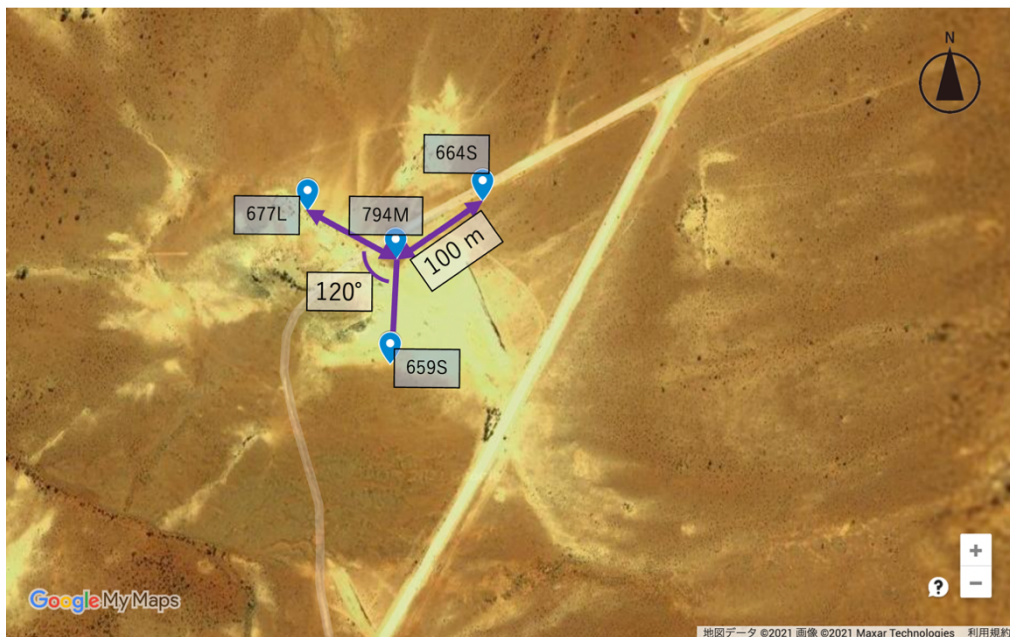
2.4.5 HAYABUSA2 帰還時の本運用

2020年12月6日2時28分頃(JST)に宇宙航空研究開発機構(JAXA)はオーストラリア南部のウーメラ砂漠へHAYABUSA2の再突入カプセルを着陸させた。このHAYABUSA2地球帰還時に、本研究において筆者が開発したロガーが21台および数理設計研究所ロガー(IFS-LOG2020)が7台の計28台のロガーとINF04LEセンサを用い、合計28台のセンサ群を用いた大規模なアレイ観測を実施した。また、較正の為に本研究室で観測実績のあるナノロガーを2台用意した。

本実験はJAXAが公募するHAYABUSA2サンプルリターンカプセル観測研究に選定された「はやぶさ2地球帰還時の衝撃波による微気圧波及び励起地震動の精密観測と軌道決定」の中で行われた[13]。実験の概要は図2.23のようにカプセル通過予想軌道下の7地点に開発したロガーシステムを3台ずつ、数理設計研究所ロガーシステムを1台ずつ配置し計4台でアレイを組むように並べることで、カプセルの大気圏突入時に発生する衝撃波を捉え、解析を行うというものである。HAYABUSA初号機の地球帰還時、圧力波から軌道を求める方法としてセンサを図2.24のような3角形が出来る形で配置するアレイ観測が用いられ成果を上げた[14]。そのため今回も7地点で100m規模の基線長をもつアレイ観測を行なった。図2.25はオーストラリア現地での観測の様子である。真夏の砂漠で太陽から保護するため、木の板をバッテリーに固定し、バッテリーを真昼の太陽方向である北側となるように設置した。



© JAXA, 高知工科大学, Curtin 大学, 日本大学, 茨城大学
 図 2.23 センサ配置地点



©JAXA, 高知工科大学, Curtin 大学, 日本大学, 茨城大学
 図 2.24 アレイ観測



©JAXA, 高知工科大学, Curtin 大学, 日本大学, 茨城大学

図 2.25 オーストラリアでの観測の様子

COVID-19の影響により、筆者の所属する研究室の関係者は現地での観測を行えなかったため、学外の協力者であるオーストラリア・カーティン大学(パース)の研究者に観測を依頼した。そのため、本運用で用いるロガーとしては、電源を入れるだけで観測が可能となり、ロガーが停止しても自動復帰する仕様が求められた。また、ロガーの英文マニュアルも求められた。ロガーの要件として、外部電源 AC100~240 V を取ることが可能である点、野生動物による衝撃・ケーブル切断対策を行う点、輸送の関係上規格化されている必要がある点が与えられた。

図 2.26 は本実験に向けて開発したロガーである。INF04LE、INF04LE 純正 GPS モジュール、各種基板を 2.0×133×400 mm のアルミ板に固定し、アイリスオーヤマ製バックルコンテナ(BL-13)に収めた。バッテリーを除くロガーボックス全体の大きさは BL-13 寸法である幅約 45×奥行約 29.5×高さ約 15.8 cm である。ロガーボックスから出るケーブル類は外部バッテリーに接続した AC アダプタから出力される直流 12 V のみである。また、GPS モジュールもロガーボックス内に収めた。これらは野生動物対策である。本ロガーには、読み込み回数、書き込み回数、動作温度を考慮し、産業用 SD カードを用いた。

図 2.27 は研究室内でのロガー量産後の動作試験の様子である。



図 2.26 HAYABUSA2 帰還観測用ロガー(KUT-INF04S)



図 2.27 ロガー動作試験の様子

2.5 その他アプリケーション

2.5.1 WIN to CSV Convert

筆者の所属研究室で用いる既製品インフラサウンド計測用データロガーであるナノロガーは、日本国内の地震計データの記録に用いられている WIN 形式というバイナリ形式でデータが格納された可変長圧縮ファイルを出力する。この WIN 形式のファイルから人が理解し易い文字列への変換を容易に行えるツールが求められていた。

図 2.28 は研究室内限定で公開した「WIN to CSV 変換 web ページ」の画面である。実装は Go 言語を用いて行なっている。操作方法はまず、研究室 LAN に接続し、研究室内データサーバの専用 IP アドレスへ web ブラウザから接続する。ページ内の「ファイルを選択」ボタンを押し、変換を行いたい WIN 形式ファイルを PC 上で選択する。分割された連続した WIN 形式ファイルは複数選択が可能である。次にアップロード開始ボタンを押すことにより、同サーバへファイルのアップロードが開始される。ファイルを受け取ったサーバは WIN 形式のデータを CSV 形式に変換し、接続元 PC へファイルを送信する。

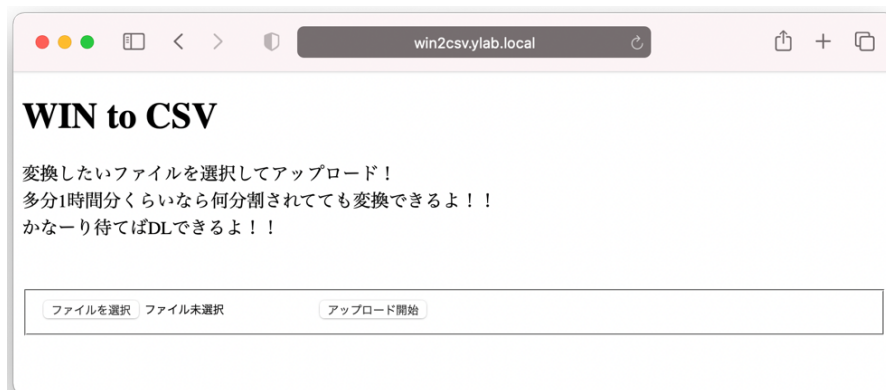


図 2.28 WIN to CSV 画面

2.5.2 INF04LE 計測データ JSON 出力

INF04LE の速報値を準リアルタイムで視認するために、JSON レスポンスを返すプログラムを実装したバージョンのロガープログラムも開発した。ロガーを起動したコンピュータに対し、http GET リクエストを送信

すると JSON 形式で INF04LE のその時点での最新の計測データが返ってくる。これを IT インフラストラクチャ監視ツール Zabbix[15]から読み込んだものが図 2.29 である。JSON 出力機能を追加することによってグラフ描画などは外部のツールを用いることが可能になった。高知県内の臨時観測などでも活用されたが、オーストラリアのウーメラ砂漠ではインターネット環境がなく、使われなかった。

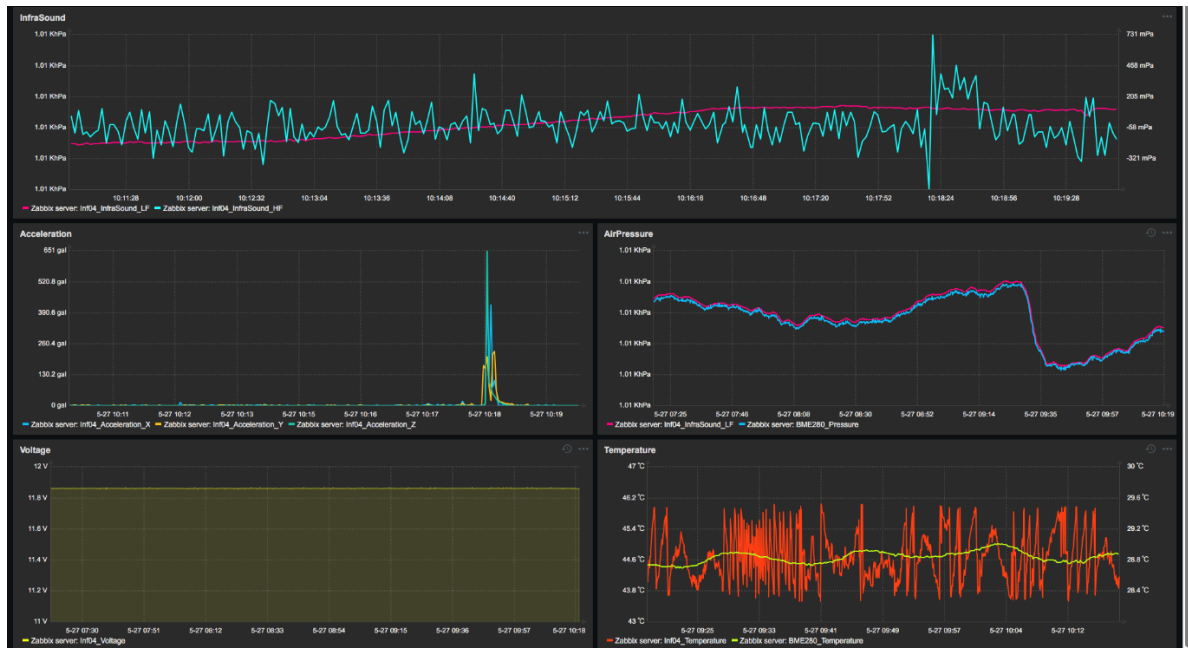


図 2.29 Zabbix による INF04LE データの表示

2.5.3 INF04LE 出力バイナリファイル CSV 変換

INF04LE のシリアル通信デバッグを見据えて、図 2.30 に示すように、バイナリ生データを CSV 形式のファイルに変換するアプリケーションを開発した。本アプリケーションは Go 言語で開発を行った。変換を行いたいバイナリファイルをアプリケーションにドラッグ&ドロップすると同ディレクトリに CSV ファイルが生成される。

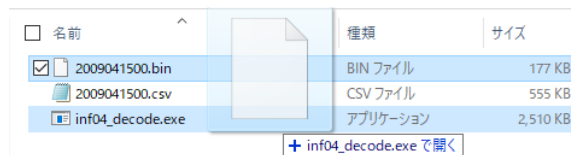


図 2.30 INF04LE CSV 変換操作(Windows)

第3章 運用実験の結果

3.1 研究室内試験運用

3.1.1 長期観測実験

図 3.1 は長期観測を行なった結果である。ピンク線が左軸インフラサウンド LF、水色線が右軸インフラサウンド HF である。図内黄色帯に示す範囲はログが取れていなかった。黄色帯の左側は 2019 年 12 月 17 日から 2020 年 3 月 17 日までの 3 ヶ月、右側は 2020 年 3 月 19 日から同年 6 月 19 日まで 3 ヶ月連続観測を行うことが出来た。黄色帯の範囲はロガーアプリケーションのバージョンアップメンテナンスを行なったため、観測を停止していた期間であり、特段の問題なく長期運用試験を達成できた。

本実験で取得した計測データは計約 120 GB であった。

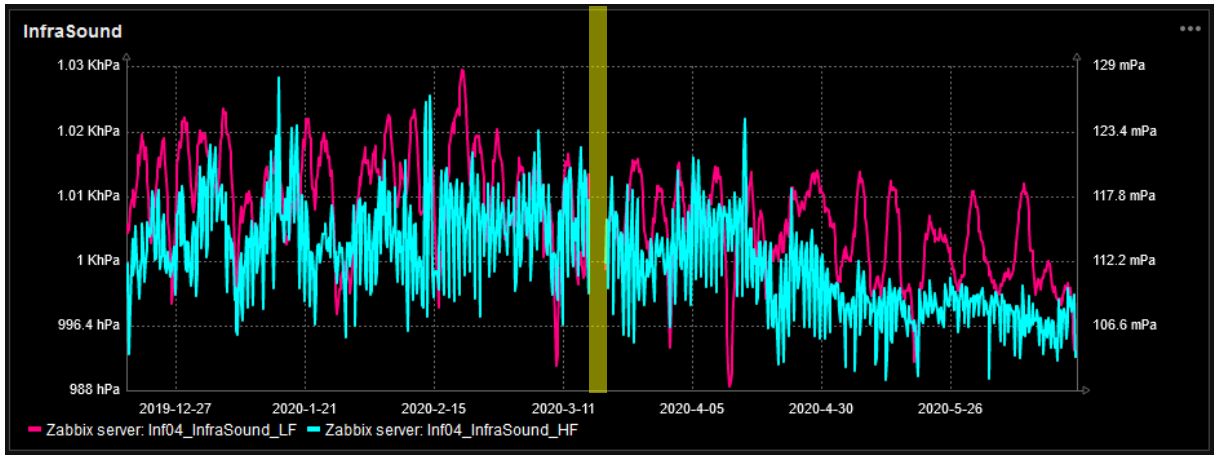


図 3.1 長期観測の結果

3.1.2 バッテリー連続観測実験

表 3.1 はバッテリーの連続観測時間を表にまとめたものである。G100 はモバイルバッテリーであるため、電源は自動で出力が停止されていた。自動車用バッテリー 2 種類は電源コントローラなどを中継せず、直接ロガーシステムを接続したため、電源電圧を確認しながら実験を行なった。モバイルバッテリーである G100 では 19 時間の観測を行うことができた。12 V、32 Ah バッテリーでは電源電圧が 10.4 V を示したタイミングでログを停止させた。観測時間の結果は 113 時間であった。12 V、120 Ah のバッテリーでは電源電圧が 10.0 V を示したタイミングでログを停止させた。観測時間の結果は 339 時間であった。

表 3.1 バッテリー連続観測時間

バッテリー	開始時刻	終了時刻	時間	開始時電圧 [V]	終了時電圧[V]
G100	2020/08/10 18:20	2020/08/11 13:47	19		
12 V 32 Ah	2020/09/04 20:10	2020/09/09 13:46	113	13.3	10.4
12 V 125 Ah	2020/09/09 21:57	2020/09/24 01:49	339	12.9	10.0

3.1.3 同地点同時観測実験

図 3.2 は同地点同時観測データのファイル群である。5 台分のロガー(No.70,71,72,73,74)のデータを約 1 ヶ月分確認することができた。本観測実験中に大きなイベントは発生しておらず、特徴的なインフラサウンド波形を得ることは出来なかった。図 3.3 は今回の実験で得られたインフラサウンド HF の一部である。図内で赤くハイライトした箇所でも上下に大きく振れる反応が見られたが、これが何によって発生した波形であるかは不明である。No.70、No.73 ではオフセットがかかっているのが見られた。

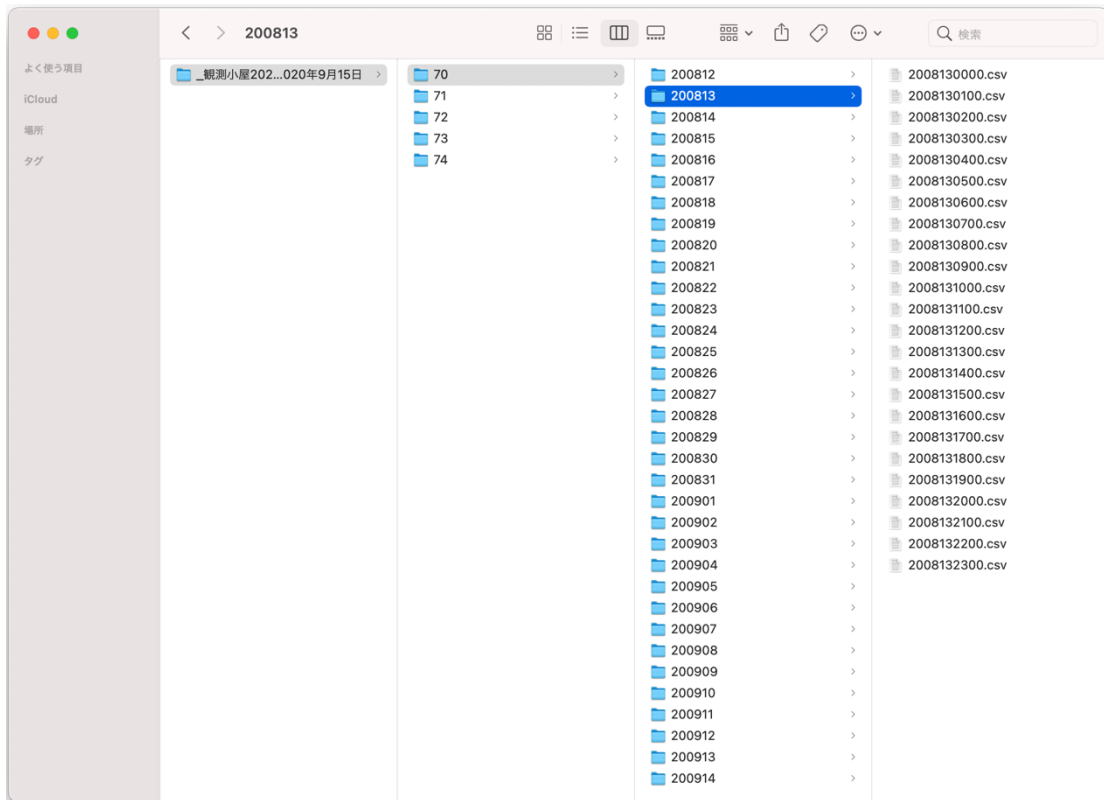


図 3.2 同地点同時観測データのファイル群

観測小屋 (2020/8/12 15:00:00 – 2020/8/12 16:00:00 [UTC])

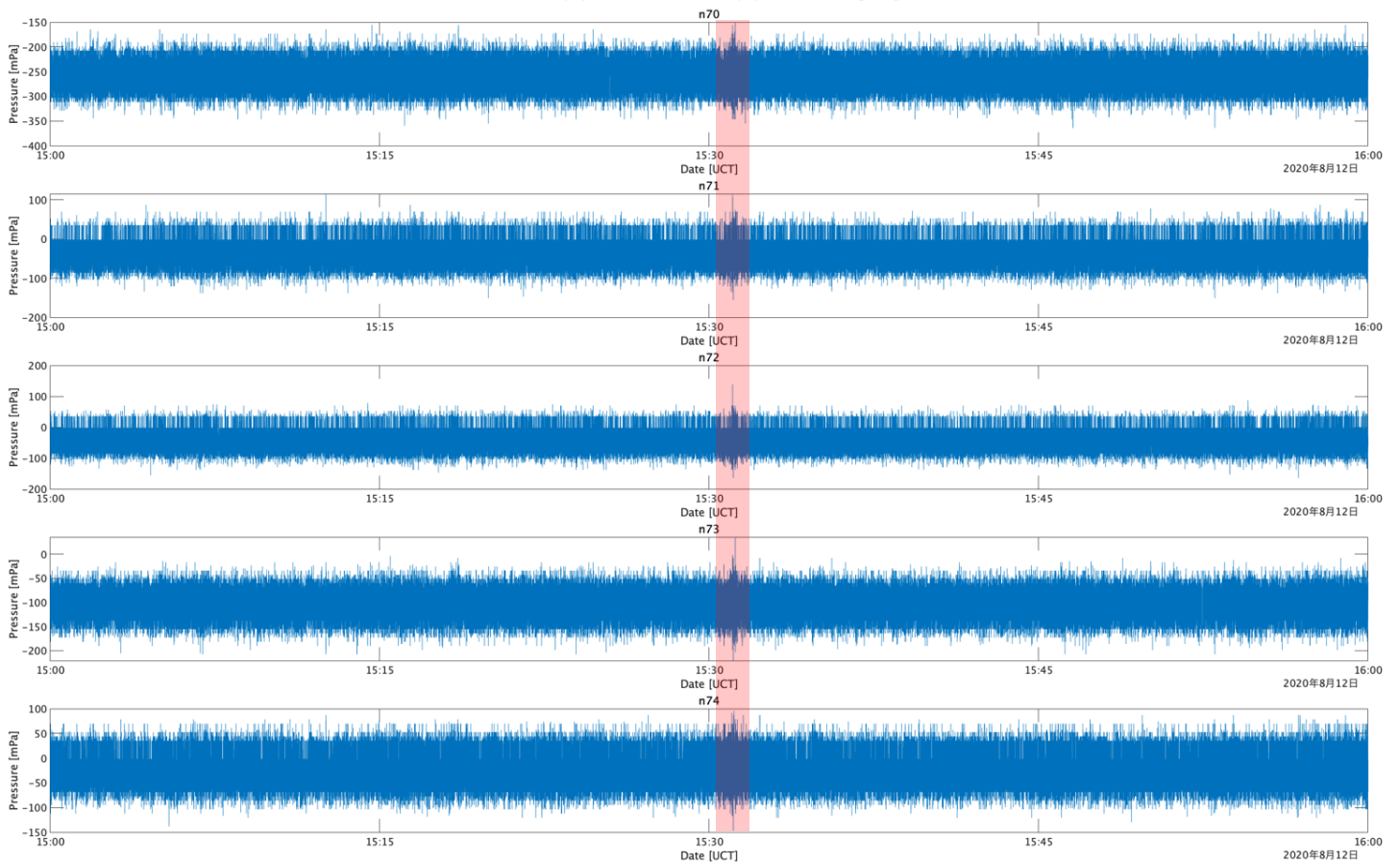


図 3.3 同地点同時観測の計測データ(一部)

3.2 スヴァールバル諸島試験運用

図 3.4 はスヴァールバル諸島で計測したインフラサウンドデータのファイル群である。計 16 日分のデータを記録した。図 3.5 は観測ロケット発射時のインフラサウンド波形の比較である。赤くハイライトした範囲がロケット発射のタイミングである。1 番目のグラフ KHO,LYR インフラサウンド HF では鋭い波形が 2 つ見える。2 番目のグラフ Rabben, NYA インフラサウンド HF では 1 つの波形が見える。3 番目のグラフは Rabben, NYA インフラサウンド LF の計測データに 0.1~20 Hz の帯域通過フィルタをかけたものである。4 番目のグラフはナノロガー(ナノバロ)の計測データに 0.1~20 Hz の帯域通過フィルタをかけたものである。図 3.6 は図 3.5 のうちナノロガーと Rabben, NYA(LF・HF)について拡大したものである。高精度絶対圧計であるナノバロでのデータは明瞭な波形であるが、INF04LE の LF 側(絶対圧計)では波形が鈍っている。また、INF04LE HF 側(差圧計)では高周波成分をより多く含んだ波形が見られた。

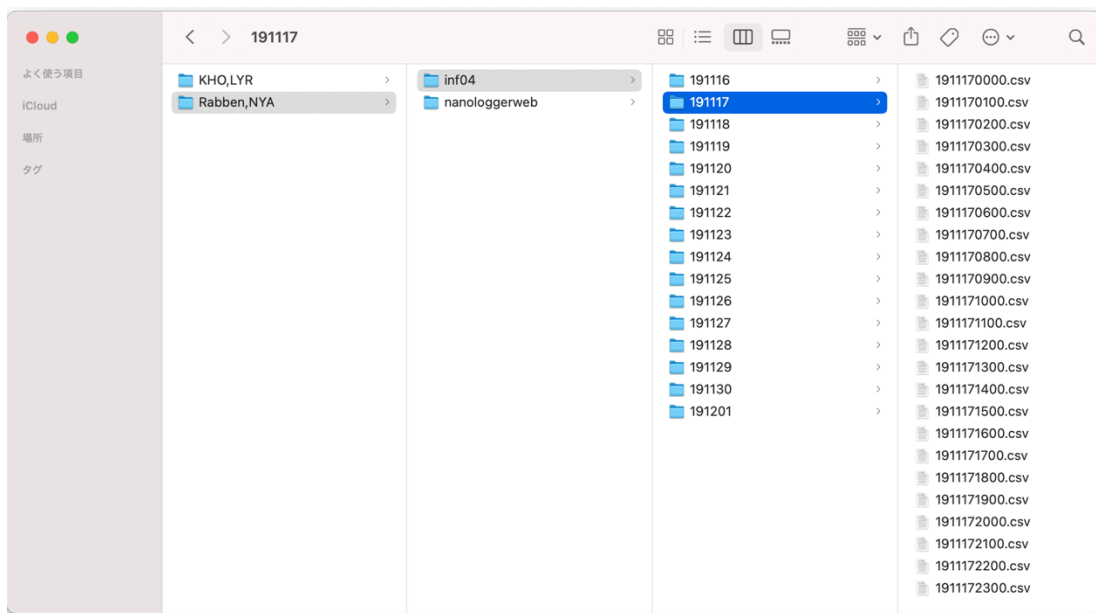


図 3.4 スヴァールバル諸島観測データのファイル群

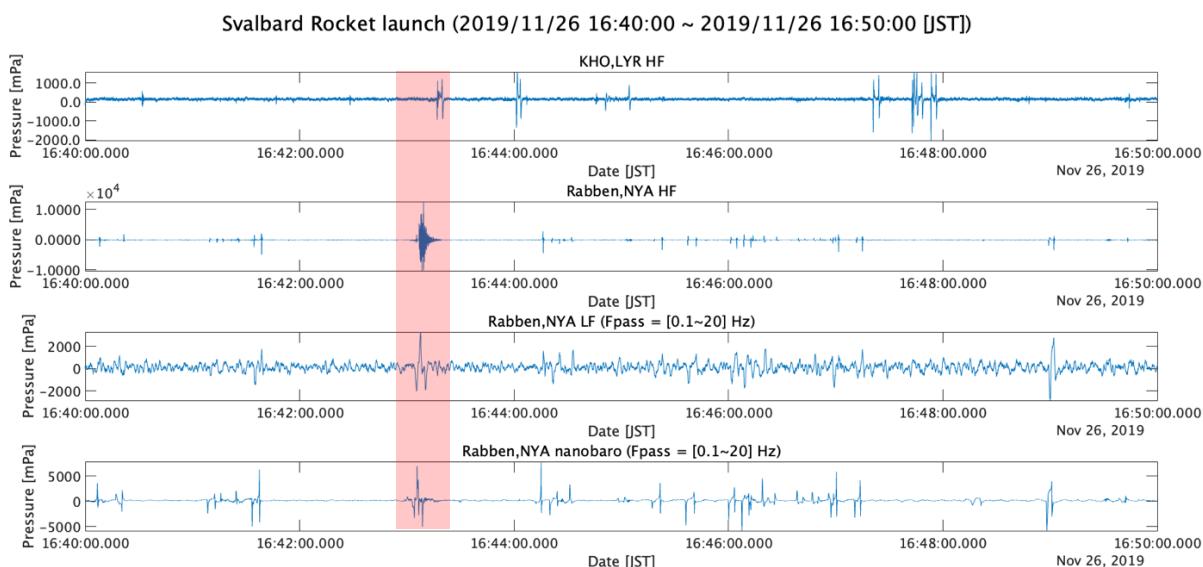


図 3.5 スヴァールバル諸島観測ロケット発射音

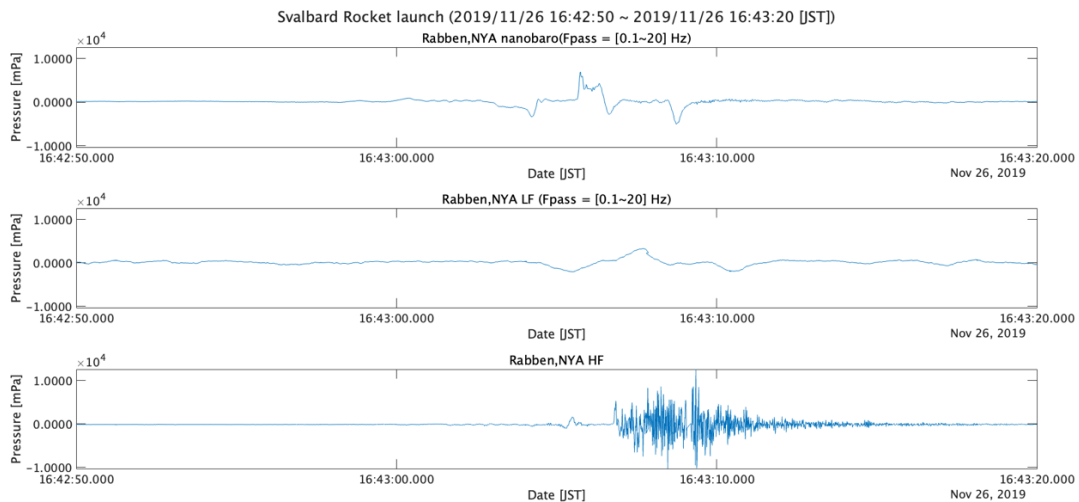


図 3.6 スヴァールバル諸島観測ロケット発射音(拡大)

3.3 MOMO5 号機試験運用

図 3.7 は MOMO5 で計測したインフラサウンドデータのファイル群である。取得日のディレクトリと ZIP 圧縮されたファイルが確認できる。今回の実験ではデータを損失しないように安全を期して圧縮前のファイルも残しているが、圧縮を行うタイミングで消去することも可能である。ディレクトリ名は Raspberry Pi 時刻から命名しているため大きくずれている。図 3.8 はファイルサイズの一例である。圧縮前では 875.2 MB あったが圧縮後では 148.1 MB になった。

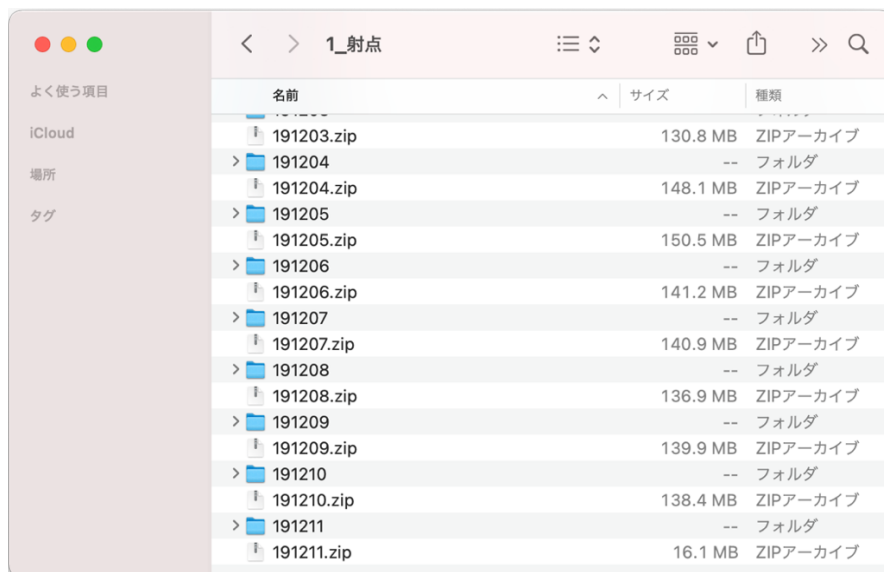


図 3.7 MOMO5 観測データのファイル群



図 3.8 圧縮前後のファイルサイズ

図 3.9 は本実験で得られたロケット発射音の一部である。発射音は発射シーケンス開始時刻である 5 時 15 分 0 秒丁度から反応があり、5 時 15 分 3.770 秒から激しく反応が見られた[11]。また、赤丸で示すように記録上の時刻が進んでいるような事象が見受けられた。図 3.10 は本実験で得た計測データから求めたロケット発射音の波源位置推定の結果である[11]。

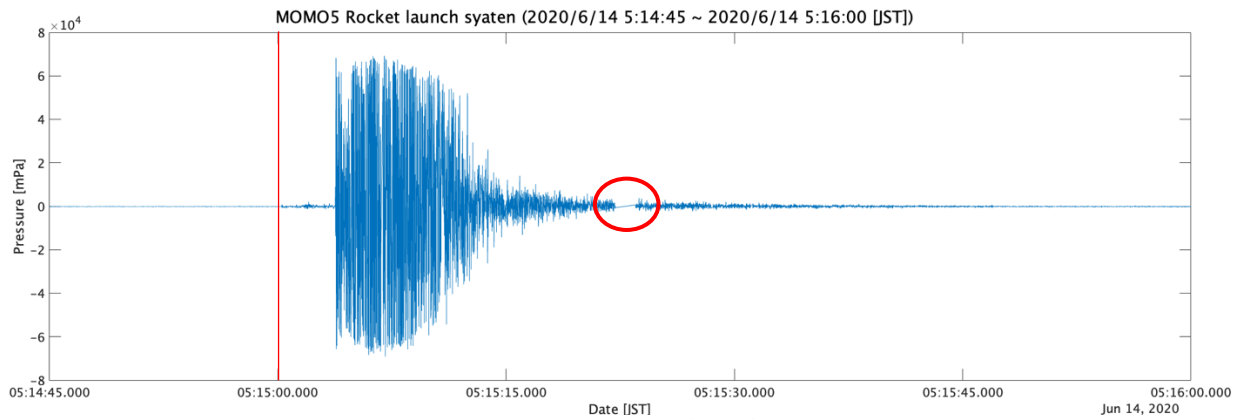


図 3.9 MOMO5 ロケット発射音(射点)

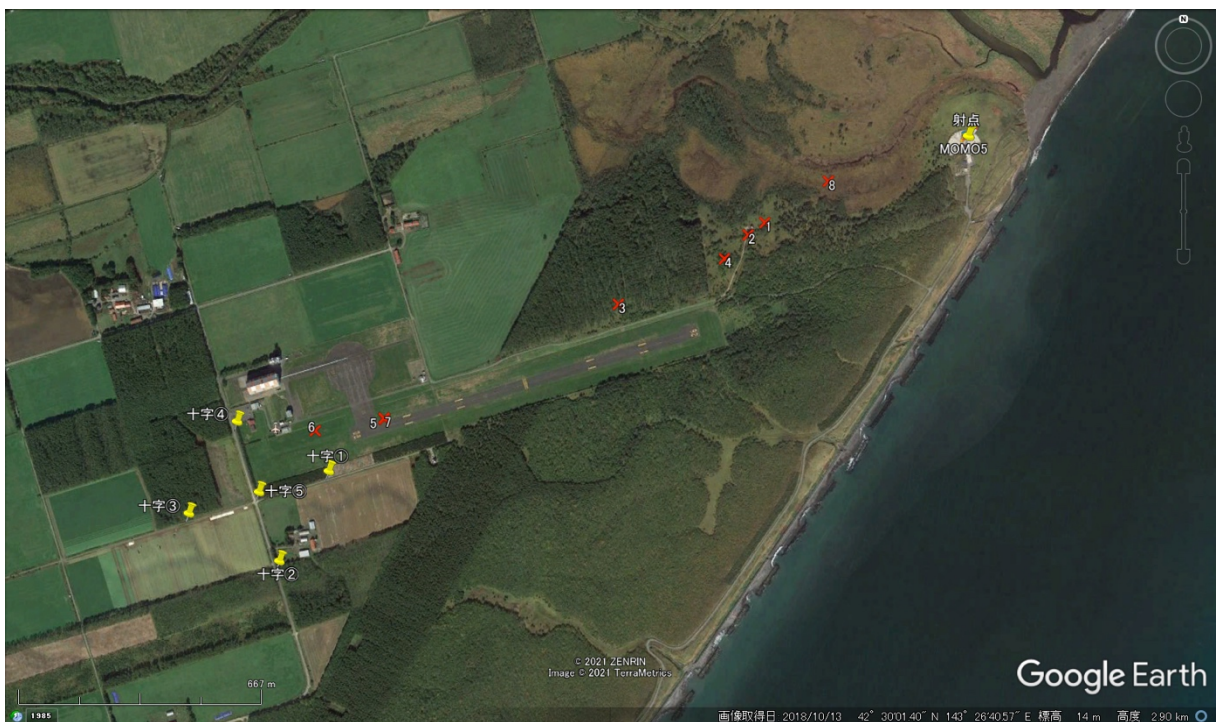


図 3.10 MOMO5 ロケット発射音波源位置推定の結果

[11]

3.4 RaSK 燃焼実験試験運用

図 3.11 は本実験で得られたロケットエンジン燃焼音である。最も燃焼地点に近い gyoko の圧力が大きい。図 3.12 は図 3.11 を拡大したものである。図内で黄色ハイライトされたタイミングから音を捉え始めている。また、図内の赤丸で示す箇所で「時刻が戻る」という事象(問題点)が見受けられた。図 3.13 は今回取得した地点 ippai の CSV データの中身である。1 行目が PC 時刻、2 行目が GPS 時刻である。今回のデータでは PC 時刻が GPS 時刻より約 6000 秒早い時刻を示している。

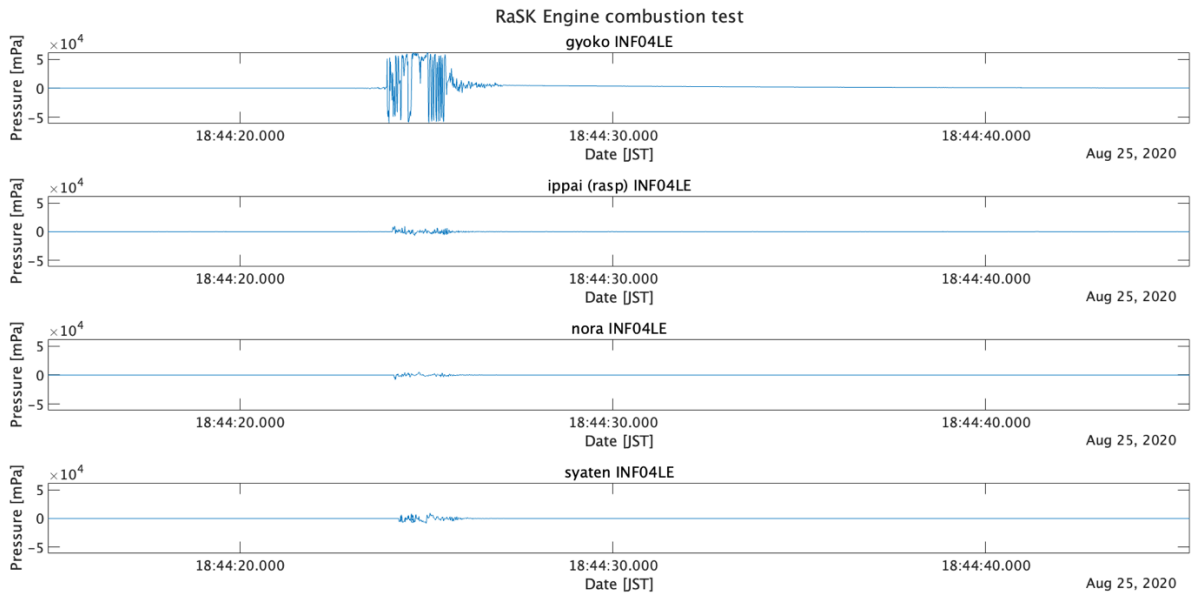


図 3.11 RaSK ロケットエンジン燃焼音

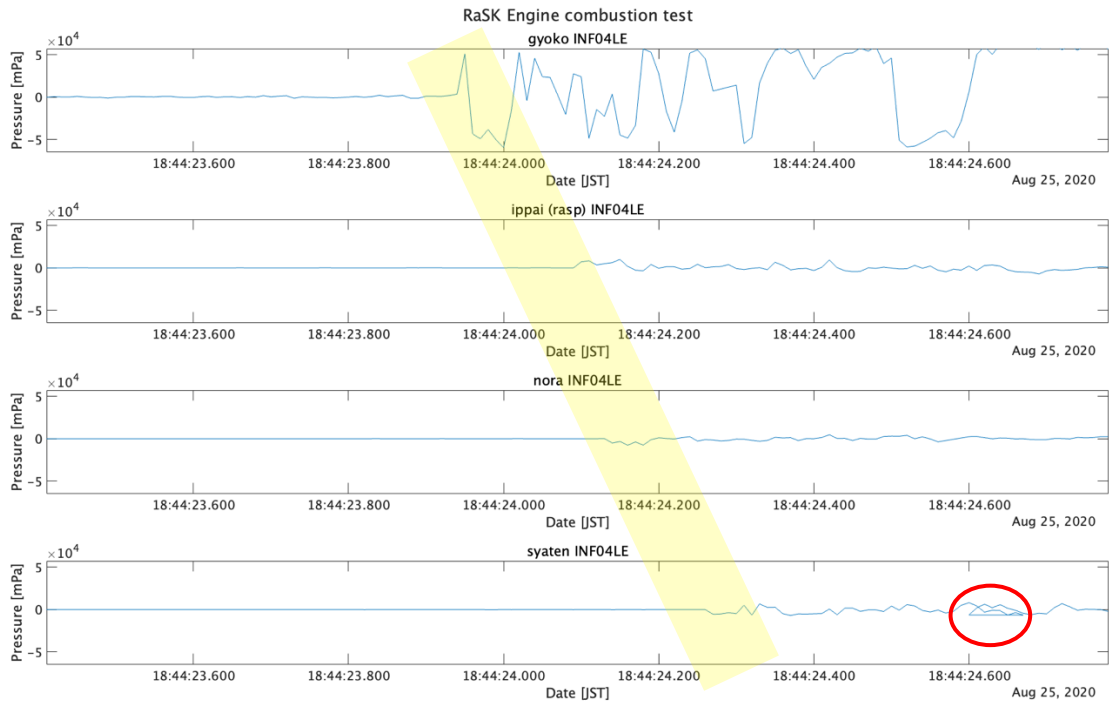


図 3.12 RaSK ロケットエンジン燃焼音(拡大)

1	1598342400662	1598348315200	0.5620	0.0000	0.0000	-51.5389	11901.7264	3455.9375	10050451.6587	68.4100
2	1598342400672	1598348315210	0.6130	0.4598	0.0000	-51.5389	11894.7260	3839.9375	10050451.6587	68.4100
3	1598342400682	1598348315220	0.0000	1.6859	0.1533	-29.8560	11850.7233	3839.9375	10050451.6587	68.4100
4	1598342400692	1598348315230	1.4815	1.7369	0.1022	-55.8755	11878.7250	3839.9375	10050449.2173	68.4000
5	1598342400702	1598348315240	0.0511	1.9413	0.0000	-68.8853	11897.7261	3839.9375	10050449.2173	68.4000
6	1598342400712	1598348315250	0.6641	1.5326	0.0000	-60.2121	11898.7262	3839.9375	10050449.2173	68.4000
7	1598342400722	1598348315260	0.2554	0.1533	0.1022	-60.2121	11904.2265	3839.9375	10050451.6587	68.4100
8	1598342400732	1598348315270	0.8685	3.1163	0.1022	-51.5389	11903.7265	3839.9375	10050451.6587	68.4100

図 3.13 地点 ippai の CSV データ

3.5 HAYABUSA2 帰還時の本運用

本運用では設置した開発ロガー21台中20台(95.2%)が正常に動作し、計測データを得ることができた。表3.2は観測地点と設置センサのシリアル番号と計測データをまとめたものである。開発したロガーシステムで20例のHAYABUSA2帰還カプセルが超音速で大気圏に再突入(リエントリ)した際に発生させた衝撃波と思われるN型波形を明瞭に得ることが出来た。欠損した1例(SN680)のSDカード全データをimgファイルとして取得し、手元のRaspberry Piで起動させようと試みたが起動ログの表示はされなかった。図3.14はHAYABUSA2帰還カプセルから発生したとみられるインフラサウンド(HF)の一部である。この図は7地点の各観測点について1例ずつをN型波形の到達順に並べている。図3.15は地点McDouall Peakのアレイ構成要素4点それぞれにおけるインフラサウンド波形である。N型波形の圧力の差が最も大きかったのはMcDouall PeakのSN664であった。表3.内の時刻はUTCである。N型波形の到達時刻の差については、各地点内では320ミリ秒以内であった。地点毎の到達時刻では最も早かったMount Ebaと最も遅かったFourteen Mile Waterholeとの間で約30秒の差があった。図3.15の赤丸で示すような時刻が戻るといふ事象が多数見受けられた。取得したGPS時刻とRaspberry Pi時刻のずれが13例発生していた。較正用に2地点に配置したナノロガーは運用スケジュールの策定が十分でなく、リエントリの数時間前に電池切れとなり、記録されていなかった。

表 3.2 観測地点と得られたデータまとめ

観測地点	シリアル番号	N型波形	最大値 [mPa]	最小値 [mPa]	波形到達時刻 hh:mm:ss.SSS	INF04LE 時刻戻り	Raspberry Pi 時刻ズレ[時間]	備考
Fourteen_Mile_Waterhole	SN658	<input checked="" type="checkbox"/>	1,370.86	-1,031.61	17:32:05.160	<input type="checkbox"/>		
	SN669	<input checked="" type="checkbox"/>	1,284.13	-910.18	17:32:05.160	<input type="checkbox"/>		
	SN672	<input checked="" type="checkbox"/>	1,340.50	-1,118.34	17:32:05.080	<input type="checkbox"/>	3.752973056	
	SN795	<input checked="" type="checkbox"/>	833.12	-1,317.82	17:32:05.050	<input checked="" type="checkbox"/>		数理設計
McDouall_Peak	SN659	<input checked="" type="checkbox"/>	2,682.67	-2,349.93	17:31:50.740	<input type="checkbox"/>		
	SN664	<input checked="" type="checkbox"/>	3,712.61	-3,251.93	17:31:50.520	<input type="checkbox"/>	-0.9624197222	
	SN667	<input checked="" type="checkbox"/>	3,608.53	-2,766.24	17:31:50.670	<input type="checkbox"/>	3.497485833	
	SN794	<input checked="" type="checkbox"/>	2,897.33	-2,731.54	17:31:50.670	<input type="checkbox"/>		数理設計
Prominent_Hill	SN656	<input checked="" type="checkbox"/>	1,995.33	-1,747.14	17:32:03.180	<input type="checkbox"/>		
	SN661	<input checked="" type="checkbox"/>	2,706.52	-2,497.37	17:32:03.180	<input checked="" type="checkbox"/>		
	SN675	<input checked="" type="checkbox"/>	2,411.64	-1,816.53	17:32:03.890	<input type="checkbox"/>	5.517325833	
	SN683	<input checked="" type="checkbox"/>	2,030.02	-2,046.37	17:32:03.060	<input checked="" type="checkbox"/>		数理設計
Ingomar_DFN	SN667	<input checked="" type="checkbox"/>	1,986.65	-1,855.56	17:31:47.960	<input checked="" type="checkbox"/>		
	SN673	<input checked="" type="checkbox"/>	2,047.37	-1,595.36	17:31:48.020	<input checked="" type="checkbox"/>	1.652471944	
	SN681	<input checked="" type="checkbox"/>	2,324.91	-1,820.86	17:31:47.830	<input type="checkbox"/>	-1.459435278	
	SN673	<input checked="" type="checkbox"/>	2,359.60	-977.87	17:31:47.950	<input type="checkbox"/>		数理設計
The_Twins	SN660	<input checked="" type="checkbox"/>	2,749.89	-2,844.30	17:31:34.970	<input type="checkbox"/>		
	SN666	<input checked="" type="checkbox"/>	2,151.44	-2,822.61	17:31:34.970	<input type="checkbox"/>	12.14479556	
	SN680	欠損				<input type="checkbox"/>		
	SN791	<input checked="" type="checkbox"/>	3,565.17	-2,861.64	17:31:34.950	<input checked="" type="checkbox"/>		数理設計
Mount_Eba	SN668	<input checked="" type="checkbox"/>	2,036.36	-2,367.27	17:31:34.450	<input checked="" type="checkbox"/>	-0.4986691667	
	SN670	<input checked="" type="checkbox"/>	1,804.52	-2,566.75	17:31:34.360	<input checked="" type="checkbox"/>	1.983728333	
	SN679	<input checked="" type="checkbox"/>	1,709.11	-1,907.59	17:31:34.490	<input checked="" type="checkbox"/>	9.709388611	
	SN684	<input checked="" type="checkbox"/>	2,177.46	-1,907.59	17:31:34.430	<input checked="" type="checkbox"/>		数理設計
Jacobs_Bore	SN662	<input checked="" type="checkbox"/>	2,359.60	-2,202.48	17:31:59.370	<input type="checkbox"/>	3.865890278	
	SN671	<input checked="" type="checkbox"/>	2,362.74	-2,115.75	17:31:59.690	<input type="checkbox"/>	4.925216389	
	SN674	<input checked="" type="checkbox"/>	2,658.83	-3,078.47	17:31:59.370	<input type="checkbox"/>	5.754394722	
	SN792	<input checked="" type="checkbox"/>	2,507.04	-2,670.83	17:31:59.420	<input type="checkbox"/>		数理設計

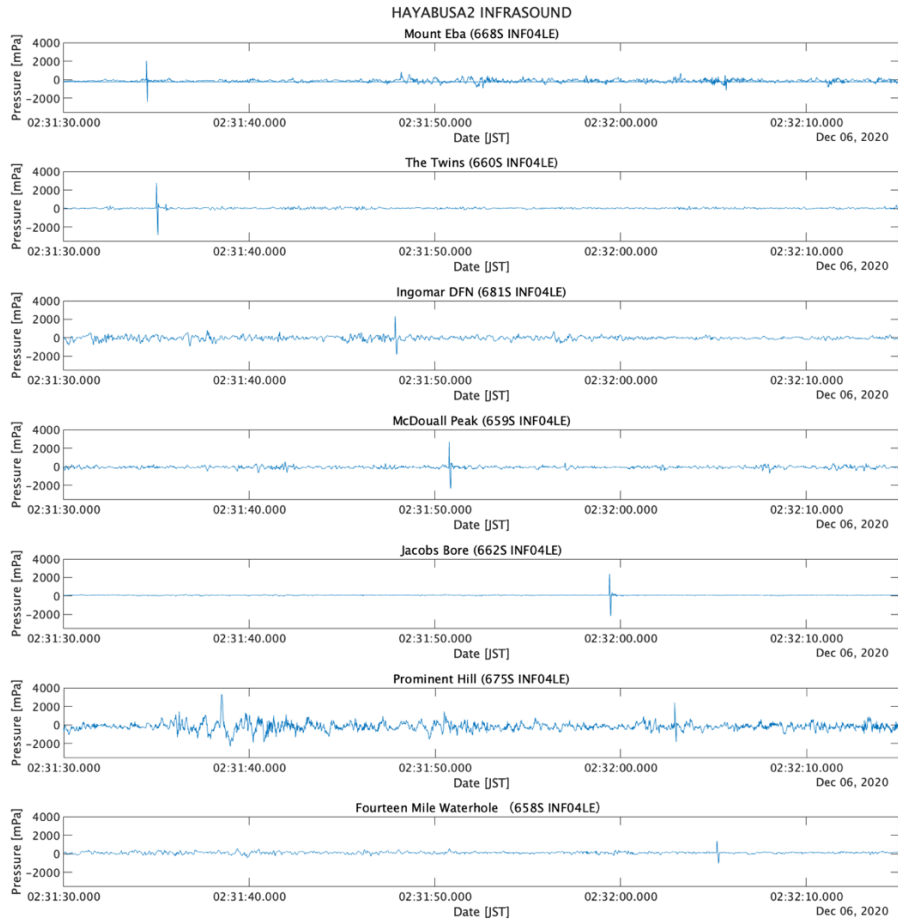


図 3.14 HAYABUSA2 帰還カプセルから発生し 7 地点で検出されたインフラサウンド(一部)



図 3.15 地点 McDouall Peak のアレイ各点におけるインフラサウンド波形

第4章 考察

4.1 試験運用観測実験についての考察と改善点

4.1.1 研究室内試験運用

(a) 長期観測実験

本観測実験では、月、年をまたぐ場合を含めてエラーが発生せず、長期的にログが止まることがない堅牢性が証明された。本実験のデータは約 120 GB であった。これは GPS 時刻を含まない 1 時間ファイルが約 28 MB、1 日ファイルが約 680 MB、であり、約 180 日の観測であるため正しいが、これだけの大きさのデータを保存できたのは iMac での運用であったためであり、SD カードのみで運用を行う RaspBerry Pi では長期観測を行うことは難しいと考えられる。外部に大容量補助記憶装置を追加する、保存ファイルの圧縮を行う、などの対処により RaspBerry Pi でも長期観測を行うことを可能にできると推測する。

(b) バッテリー連続観測実験

本実験では小型のモバイルバッテリーと大小の自動車用バッテリーを用いてどの程度の時間観測が可能であるかを確認した。モバイルバッテリーでは約 19 時間の観測が行えた。このことから、単発な観測対象が明確な時刻で音を発する場合はモバイルバッテリーを用いる観測で問題がないと言える。大小の自動車用バッテリーでは 12 V, 32 Ah のもので 113 時間、12 V, 125 Ah のもので 339 時間連続観測が可能であった。バッテリー容量が 3.9 倍異なるが、観測時間が 3 倍である点についてはバッテリーの時間率が異なることが要因ではないかと考える。小さいバッテリーは日本国内で流通しているバッテリーであり、5 時間率表記であった。大きいバッテリーに時間率の表記はなかったが、海外から輸入したバッテリーであり、おそらくドイツ工業規格で定められた 20 時間率を用いた容量表記がされているのではないかと推測する。

また、本実験では筆者がバッテリー電圧を確認しつつ進めていたが、ロガー全体の入力電圧を確認し、一定電圧を下回ると自動でシャットダウンを行うコントローラ機能を追加すべきであることがわかった。

(c) 同地点同時観測実験

本実験では約 1 ヶ月の間観測を行なったが、特徴的なイベントを観測することはできなかったため、今後も同じような実験を行う必要がある。センサのオフセットについては手作業で製造を行なっているため発生しているものと思われる。

4.1.2 スヴァールバル諸島試験運用

本実験ではオーロラ起因のインフラサウンドの可能性を研究している当研究室の同輩が本データまで扱っていないため、オーロラとの関連について述べることはできない。

ロケット発射音らしい波形を捉えたのは Rabben, NYA に設置した INF04LE とナノバロだけであった。KHO,LYR INF04LE で得られたデータについては観測条件として密閉された室内にあり、また、室内への出入りが多かった(ドアの開閉に伴う圧力変動が記録されている)のではないかと推測する。Rabben, NYA のデータについて、INF04LE(LF)とナノバロのデータを比較すると同じ反応を示すことは理解できる。波形の違いはセンサ精度(低周波特性)の違いであると推測する。この実験から RaspBerry Pi を用いた INF04LE 用ロガーは寒冷地でも問題なく動作することが判明した。

4.1.3 MOMO5 号機試験運用

本実験では開発したロガーで得た INF04LE の計測データから波源位置推定を行うことができたが、十分な精度であったとは言えない、これはセンサ、ロガーが原因ではなく、「十字」の 5 台のセンサ設置位置が近すぎることが主因ではないかと推測する[11]。

本実験では RaspBerry Pi 上時刻で 1 日が終わると自動でディレクトリを圧縮するスクリプトが動作することが確認できた。また、ファイルサイズが 875.2 MB から 148.1 MB となり、圧縮率は約 16.9%であった。本実験で INF04LE 自体の記録上の時刻が進むという現象が発生した。この件については 4.1.5 項で考察する。

4.1.4 RaSK 燃焼実験試験運用

本実験で得られた計測データはこれまでの実験から概ね正しいものであるとして解析は行なっていない。だが、本実験で INF04LE 自体の時刻が戻るという現象が発生した。この件については 4.1.5 項で考察する。データロガーとしては、RTC モジュールを追加したにもかかわらず PC 時刻がずれているという問題は改善していなかった。これは Raspberry Pi が RTC モジュールから時刻を取得し、時刻を上書きする際に権限がなかったことが原因だと判明した。実験後に当該部分を改修した。

4.1.5 HAYABUSA2 帰還時の本運用

28 台中のデータが欠損した 1 台について、2020 年 1 月現在手元にロガーが返却されていないため想像の範囲を超えないが、思い当たる点としては温度差による Raspberry Pi 本体の故障と、それに伴い起動デバイス(SD カード)が破損した可能性、外的な衝撃によって SD カードが外れかけた状態で読み書きを行なった事により起動デバイスが破損した可能性が上げられる。南半球の夏季に砂漠に設置されたロガーは最高温度 45°C の過酷環境に晒されたほか、ダートの道を何 10 km も走破しなければ観測地点にたどり着けない状態であった。また、現地の観測協力者(Curtin 大学)から、データ欠損した該当ロガーのみ日除け木板の方向が正確に北を向いておらず、ロガーセットを守るはずのバッテリーの方向がロガーセットと逆になった結果、直射日光が黒いロガー箱へ直接当たることとなり、加熱によって不具合が発生したのではないかと情報を得た。さらにこの地点のみ設置面がコンクリートであり、より太陽光を反射する環境であったことも要因としてあげられる。熱に対するの対策として、ロガー箱に空冷用ファンを追加し、INF04LE のボード温度を監視し、一定温度になるとファンを回転させる対策が考えられるが、圧力波を観測しているため、観測に影響を与えないよう慎重に行う必要があると考える。ロガー箱自体を遮熱塗料などでコーティングを行うことも効果的ではないかと考える。



©JAXA, 高知工科大学, Curtin 大学, 日本大学, 茨城大学

図 4.1 データ欠損したロガーセットの設置状況

INF04LE の時刻戻りについては、この事象は筆者が開発したロガー、数理設計製ロガーともに見られたため、センサ本体(付属 GPS モジュール)の不具合の可能性が高い。図 4.2 は研究室内実験で INF04LE の 1 時間計測ファイルのサンプル間 GPS 時刻差を取りグラフ化したものである。100 Hz サンプリングであるため、本来の時刻差は 10 ミリ秒であるべきなのに対し、30,130,230 ミリ秒時間が進んでいるパターンと 70,170,270 ミリ秒時間が戻るパターンが見られた。この時刻戻りについては同時に取得している 1PPS を参照し、0 を決めることによって補正できると考える。図 4.3 はインフラサウンド(HF)と GPS の 1PPS をグラフにしたものである。図内赤丸に示す箇所で時刻戻りが発生している。赤色矢印と黄色矢印の範囲を比較すると赤丸に示した時刻戻り分だけ赤色矢印が短い。そのため、GPS 時刻上の時刻進み・

戻りが発生した場合は GPS 時刻を無視して順に 10 ミリ秒を加算・減算することによって解決するのではないかと推測できる。

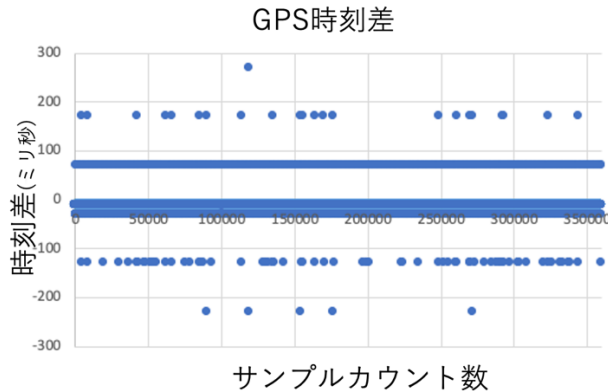


図 4.2 サンプル間の GPS 時刻差

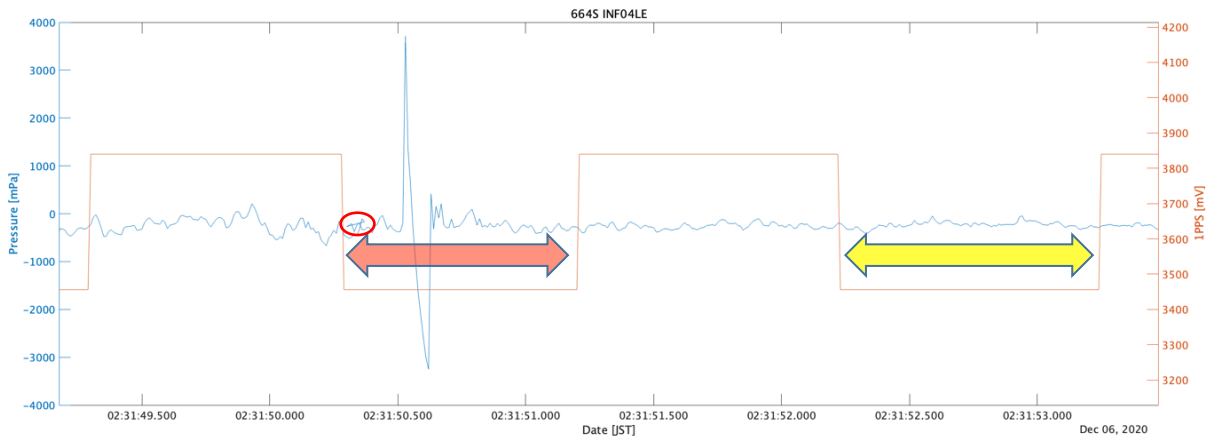


図 4.3 時刻ずれ箇所のインフラサウンド(HF)と 1PPS

Raspberry Pi の時刻がずれる問題については RTC モジュールが外れていた、Raspberry Pi から RTC への時刻取得に失敗していたことが考えられる。だが、3 例で時刻が進んでいた点については説明できない。考えられる可能性は RTC モジュールの動作確認を複数回行なっておらず、初期不良を見抜けなかった点である。

同地点で観測を行なった、開発したロガーの波形と数理設計研究所製ロガーの波形を見比べると同じ傾向、同じ反応、同じ時間軸のデータを得ることが出来ている。このことから、今回開発したロガーは問題なく INF04LE から取得したデータを保存することが出来たと言える。

INF04LE で得られた計測データが科学的に有意であると現段階で言い切ることはできない。これは時刻戻りが発生している点、較正用センサであるナノロガーの計測データが取得できなかった点が原因である。前者については INF04LE 開発者への問い合わせと確認実験、後者については今後、本実験の観測に用いたロガーセットとナノロガーの同地点同時観測を行い、鳥追いピストルや打ち上げ花火・雷鳴などの N 型鋭い波形を検出し較正を行う実験を行う必要があると考えられる。

本実験の N 型波形の到達順は図 4.4 のようになった。図 4.5 は 2003 年関東火球(大流星)が引き起こした衝撃波音を励起地震動として捉えたものである[17]。関東火球を見ると、軌道直下の線を中心に下流側から遡るように双曲線状に波形が到達していることがわかる。本実験の結果も同様の傾向を示している。McDouall Peak における 100 m アレイ観測においても N 型波形到達時刻は上述の時刻戻りを加味しても順番は 664S が最初、次に 667L と 794M が同時、659S が最後であった。これも 2003 年関東火球と同じ傾向を示している。



© JAXA, 高知工科大学, Curtin 大学, 日本大学, 茨城大学

図 4.4 N 型波形の到着順

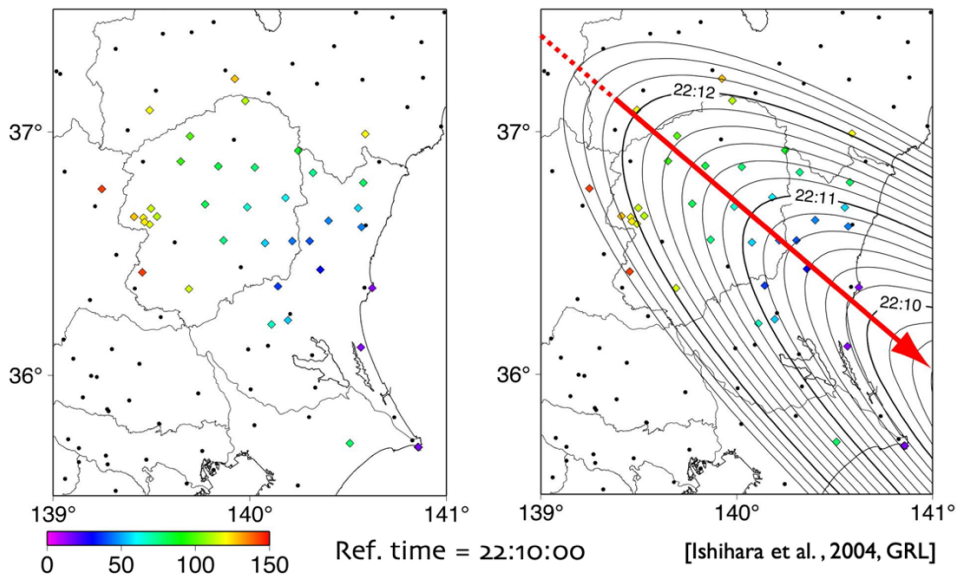


図 4.5 2003 年関東火球起因の励起地震動

4.2 未実装の機能

本研究で未実装に終わった機能として、RTC モジュールの不具合、INF04LE の時刻戻り補正、設定ファイル(ini ファイル)からタイムゾーンやディレクトリ名などの設定を読み込む機能、電源監視機能、ボード温度監視機能が上げられる。また、INF04LE が Ethernet 接続可能であるという利点を活かしてきれていない。その特徴を活かすには INF04LE を含むロガーセットに LTE ルータを接続し、データの転送などを行うべきである。遠隔監視を行うにはデータの圧縮などを行うべきである。データの圧縮は必要なデータのみを抽出する方法と、インフラサウンド波形、スペクトルを容量の小さい画像データ(png 形式など)として出力し、保存する方法などが考えられる。

第5章 結論

本研究では INF04LE に特化した低価格かつ省電力なデータロガーを開発することができた。また、開発したロガーを用いて様々な観測実験による試験運用を行い、ロガーをアップデートしていった。HAYABUSA2 カプセル地球帰還では量産したロガー21台中高温条件にさらされたと考えられる1台を除く計20台(95.2%)でデータ取得を行うことができ、ロガーとしての堅牢性を確かめることができた。だが、比較対象のロガーでデータを取得することができなかつたため、科学的に有意なデータとするには別のイベントを用いた比較データの取得が必要である。臨時観測を行うロガーに必要と思われる電源や温度監視などの一部の機能を実装することはできなかった。

ロガーを開発する上で得た安定稼働の知見を活かし、メンテナンスフリーで長期間のデータ保存が可能な恒常設置型データロガーアプリケーションを開発することができた。このアプリケーションを用いたロガーシステムを日本各地に配備することにより、日本のインフラサウンド研究ならびに防災応用に貢献することができると思う。

謝辞

本研究を行うにあたり、いつも丁寧かつ適切なご指導をくださった、高知工科大学システム工学群山本真行教授、副査を引き受けてくださった綿森道夫准教授、星野孝総准教授に感謝いたします。

宇宙航空研究開発機構の皆さまには HAYABUSA2 カプセル帰還実験において、公募の共同研究(地上観測)提案として採択された後、共同研究契約を締結させて頂き、その共同研究の一環として HAYABUSA2 プロジェクトが進めるカプセル回収ミッションに高知工科大学として参画できました。世界的な COVID-19 の影響下で JAXA 以外の国内参加機関の研究者がオーストラリアへ入国できず現場に入れない事情から観測を全面委託する形で実現した、本共同研究に必須の情報を HAYABUSA2 プロジェクトよりご提供いただいた点に心から感謝いたします。現地観測、データの収集、簡易整約を進めていただいた豪州 Curtin 大学の Ellie Sansom 氏、Hadrien Devillepoix 氏を始めとする観測チームメンバーの方々および共同研究チームの国内外の研究者の皆様には深く感謝いたします。

観測ロケット MOMO シリーズの開発・運用を行うインターステラテクノロジズ株式会社のみなさまには北海道大樹町での観測運用の補助をしていただいたことに感謝いたします。

今回開発したロガーのログ保存対象である INF04LE の開発・製造を行い、センサに関する質問への回答、バグ修正にも迅速に対応くださった株式会社 SAYA の横田昭寛氏に感謝申し上げます。また、本ロガーを開発するにあたり、技術的な知見を教示いただいた数理設計研究所の矢澤正人氏、京都産業大学コンピュータ理工学部の瀬川典久准教授にも感謝申し上げます。

北極圏スヴァールバル諸島まで開発したロガーを運び、観測を行なって下さった同輩の渡邊氏、研究の相談を聞いて下さり、精神的な支えであった大畑氏、佐藤氏、永松氏、MOMO ロケットの現地観測に北海道まで出向いて下さった谷氏、水野氏、ロケットエンジン燃焼実験の観測に快く対応して下さった学生団体 RsSK、加工場や工具などを貸していただいた同ロボット倶楽部、および開発ロガー21 台の手作業による量産を手伝って下さったその他の研究室メンバーの方々に深く感謝します。

参考文献

- [1] Arai, Nobuo; Iwakuni, Makiko; Watada, Shingo; Imanishi, Yuichi; Murayama, Takahiko; Nogami, Mami, Atmospheric boundarywaves excited by thetsunami generation related to the 2011 great Tohoku–Oki earthquake, *Geophysical ResearchLetters*, **38**, L00G18, 2011.
- [2] 田平誠, インフラサウンドの計測と伝搬, *日本音響学会誌*, **63**, 428–433, 2007.
- [3] 高知工科大学 総合研究所 インフラサウンド研究室, 高知工科大学インフラサウンド観測ネットワークシステム, <http://infrasound.kochi-tech.ac.jp/infrasound/>, 2021年2月3日閲覧.
- [4] Hiroaki Saito, Tetsuo Yamamoto, Kensuke Nakajima, Kiyoshi Kuramoto, Masa-yuki Yamamoto, Identification of the infrasound signals emitted by explosive eruption of Mt. Shinmoedake by three-dimensional ray tracing, *J. Acoust. Soc. Am.*, **149** (1), 2021.
- [5] Raspberry Shake, S.A., Raspberry Shake, <https://raspberrysshake.org>, 2021年2月3日閲覧.
- [6] Hakusan Corporation, 低消費電力データ収録装置 LS8800, <https://www.hakusan.co.jp/products/keisoku/ls8800.html>, 2021年2月3日閲覧.
- [7] SAYA Inc., MultiLoggerX3, <https://www.saya-net.com/products/ml3.html>, 2021年2月3日閲覧.
- [8] SAYA Inc., Infrasound Sensor ADXⅢ-INF04LE, <https://www.saya-net.com/products/inf04.html>, 2021年2月3日閲覧.
- [9] Google, Installing Go from source, <https://golang.org/doc/install/source#environment>, 2021年2月3日閲覧.
- [10] インターステラテクノロジズ株式会社, 観測ロケット「えんとつ町のプペル MOMO5 号機」打上げの結果について, <http://www.istellartech.com/7hbym/wp-content/uploads/2020/06/d1db3cdf9f6d98cad79b276454879ce3.pdf>, 2021年2月3日閲覧.
- [11] 水野和樹, インフラサウンド十字型アレイ観測によるMOMO5ロケット打ち上げ時の音源位置推定と方位計測, *令和2年度高知工科大学卒業研究報告書*, 2021.
- [12] 高知工科大学 Rocket and Sat(satellite) community of KUT, #2020 加太 SE 昨日燃焼試験を行い、無事燃やすことができました!, https://twitter.com/RaSK_kut/status/1298279540100198400, 2021年2月3日閲覧.
- [13] はやぶさ2プロジェクト, HAYABUSA2 サンプルリターンカプセル観測研究テーマ公募の結果について, http://www.isas.jaxa.jp/researchers/info/files/20201002_HY2.pdf, 2021年2月3日閲覧.
- [14] Masa-yuki Yamamoto, Yoshiaki Ishihara, Yoshihiro Hiramatsu, Kazuki Kitamura, Masayoshi Ueda, Yasuo Shiba, Muneyoshi Furumoto, Kazuhisa Fujita, Detection of Acoustic/Infrasonic/Seismic Waves Generated by Hypersonic Re-Entry of the HAYABUSA Capsule and Fragmented Parts of the Spacecraft, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **63**, 971–978, 2011.
- [15] Zabbix LLC., Zabbix, <https://www.zabbix.com/>, 2021年2月3日閲覧.
- [16] Yoshiaki Ishihara, Muneyoshi Furumoto, Shin'ichi Sakai, Shin'ya Tsukada, The 2003 Kanto large bolide's trajectory determined from shockwaves recorded by a seismic network and images taken by a video camera, *Geophysical Research Letters*, **31**, 2004.