

修士論文

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

構築および気象影響評価

Construction of automatic detection system for Infrasound events using multiple
observations and evaluation of weather impacts

報告者

学籍番号: 1245050

氏名: 山本 大誠

指導教員

山本真行 教授

令和4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 エネルギー工学コース

目次

第1章 序論.....	1
1.1 インフラサウンド.....	1
1.2 背景.....	1
1.3目的.....	4
第2章 手法.....	5
2.1 観測システム.....	5
2.1.1インフラサウンドセンサINF04.....	5
2.1.2 インフラサウンドセンサINF01.....	9
2.1.3気象観測.....	10
2.2 イベント検出方法.....	12
2.2.1 自動検出システムの流れ.....	12
2.2.2 閾値検出.....	13
2.2.3 3地点検出.....	14
2.3 位置算出.....	14
2.3.1 音速.....	14
2.3.2 TOA法.....	15
2.4 エネルギー推定.....	16
2.5 気象影響評価.....	16
第3章 結果.....	17
3.1 インフラサウンドイベント検出.....	17
3.1.1 閾値検出.....	17
3.1.2 3地点検出.....	18
3.2 落雷位置推定.....	21
3.2.1 2021年9月3日.....	21
3.3 エネルギー推定.....	23
3.4 気象影響評価.....	24
3.4.1 風との比較.....	24
3.4.2 雨との比較.....	24
3.5 トンガの噴火によるインフラサウンド.....	26
第4章 考察.....	28

4.1 イベント検出	28
4.1.1 閾値検出.....	28
4.1.2 3地点検出.....	28
4.2 位置推定	29
4.3 エネルギー推定.....	29
4.4 気象影響	30
4.5 トンガの噴火によるインフラサウンド.....	31
第5章 結論	32
謝辞	33
参考文献.....	34
付録	35

第1章 序論

1.1 インフラサウンド

インフラサウンドとは人間の可聴下限である周波数20 Hz以下の低周波の音波のことである。インフラサウンドは火山の噴火や、雷、津波、土砂崩れ、ロケット発射等の地球物理学的イベントにより発生し、圧力変化として大気中を音速で伝搬する。音波は水平方向には限りなく0に近い周波数まで伝搬するが、垂直方向には重力の影響を受け15 °Cの等温大気下では周波数3.21 mHz以下の音波は伝搬することがない。このインフラサウンドの下限周波数を音波遮断周波数と呼び、それ以下の周波数の音波は大気重力波と呼ばれる。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。インフラサウンドの特徴として20 Hz以下の低周波の為、空気の粘性による減衰の影響を受けにくく、長距離伝搬する特徴があり、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や核実験等を監視する手段としても注目されている [1]。

インフラサウンド、可聴音、超音波の境界は、人間の耳で聴こえるかどうかによる分類であるが、大気重力波は自然現象としての物理的な分類である。

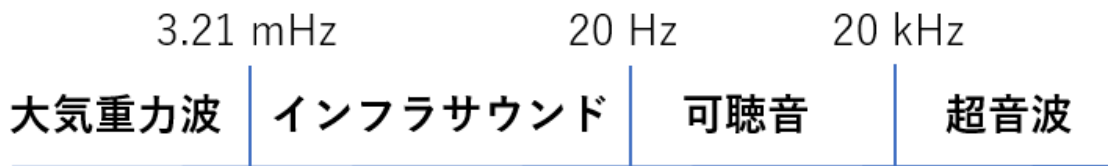


図1- 1. 圧力波の分類

1.2 背景

日本国内のインフラサウンドに関する研究は、1世紀以上の歴史があり、近年では1980年代に愛知教育大学(当時)の田平誠氏によって基礎が構築されてきた。また世界的には国際条約に基づく核実験検知網として包括的核実験 禁止機関 CTBTO(Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization)によって世界中60地点でモニタリングする観測網が構築されている。日本国内のCTBTOの観測地点は千葉県いすみ市にあり、高性能な6台のインフラサウンドセンサによるアレイ観測が行われている。インフラサウンド観測ではセンサの値段が高価なため国内におけるインフラサウンド観測点は限られている。筆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(山本研究室; 以降、本研究室)では、2005年から、インフラサウンドに関する研究に取り組んでおり、多地点観測に向けて低コストインフラサウンドセンサの開発、および観測データの解析ソフトウェアの開発などを行ってきた。現在主立って使用しているインフラサウンドセンサは2015年2月に株式会社サヤとの共同開発され

た津波の観測を主目的としたセンサ(サヤ製 ADXⅡ-INF01; 以下INF01)を本研究室では運用している(2.1.2章参照)。2022年2月現在、図1- 2のように高知県内の15カ所および県外15カ所の計30カ所への設置が完了しており、装置トラブルがない限りは連続で稼働している。また、2019年度に新たに株式会社サヤと共同開発された低コストインフラサウンドセンサADXⅢ-INF04LE(以下INF04)(2.1.1章参照)を30台導入した。従来のINF01センサは津波や火山の噴火によるインフラサウンドである主に0.1 Hz以下を観測するために開発され使用されてきた。一方で、INF04は、0.1 Hz以上の人間の可聴域に近いインフラサウンドを観測対象として設計された。0.1 Hz以上のインフラサウンドの対象としては津波や火山噴火より小規模の雷鳴や、土砂崩れなどが挙げられる。このように大規模自然現象の観測に強いINF01と、やや小規模の自然現象観測に強いINF04を組み合わせることで、包括的かつ広域での地域防災に役立つと考えられている。

インフラサウンドの研究では観測したデータを全て確認するのは困難であり、イベントの確認には主に電磁波や光学観測による自然現象の観測から音波の到達時刻の計算を行い、インフラサウンドデータを確認し、研究が行われている。またこれまでのインフラサウンド観測から風速や雨量等の気象条件が計測に影響を与えることが確認されている [2] [3]。図1- 3に過去に観測された局地的大雨と思われるINF01によるインフラサウンド波形を示す。土佐清水市足摺岬3のみ大きく変動しており、気象庁のアメダスの過去の観測データ [4]によると約 2km離れた観測点、高知清水で10:30に10分間に12.5 mmの降水が発生していたことが分かる。インフラサウンド観測では風や雨による変動はノイズと見做され、これまでに詳細な研究は行われていない。

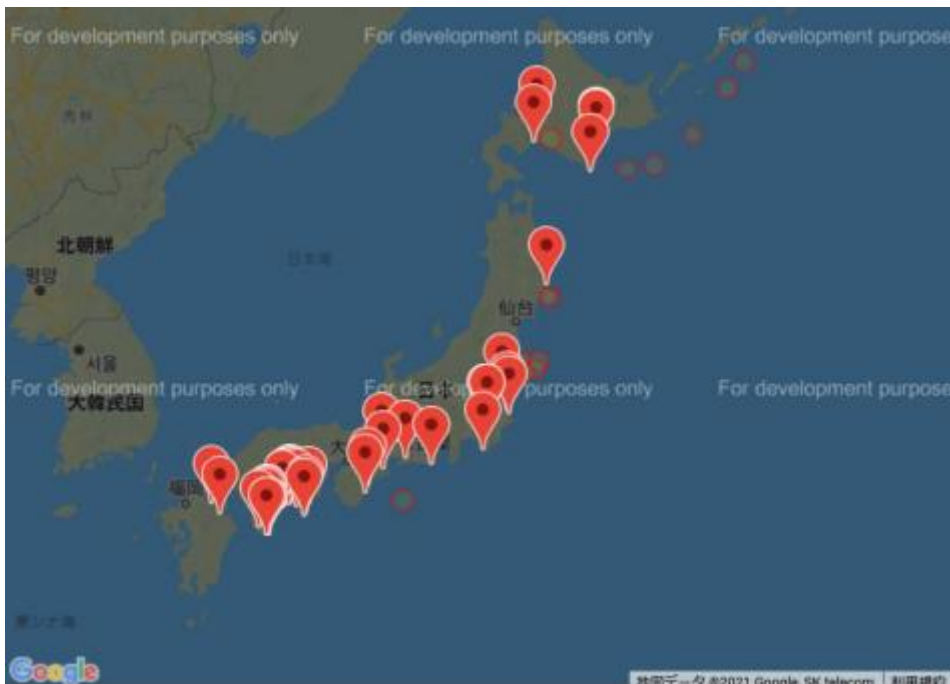


図1- 2. 高知工科大学インフラサウンド観測ネットワーク配置図

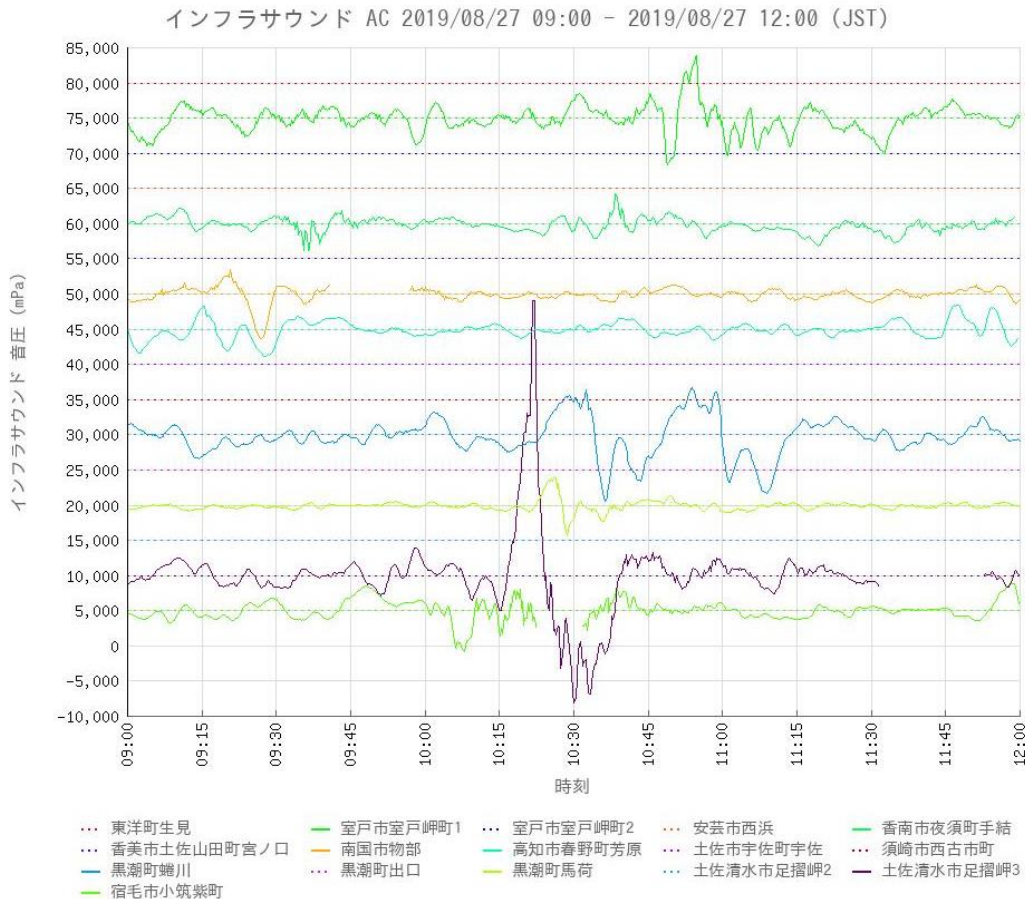


図1- 3. 過去の極端気象によるインフラサウンド波形

一般的に、雷の活動分布と豪雨発生域には相関があることが知られている。雷により発生したインフラサウンドの解析を行うことで、地域性のある気象メカニズムの解明や、洪水などの豪雨被害の予測に有効であると考えられている。現在、フィリピンにおいて集中豪雨と台風を高精度で監視するためのシステム構築を行う共同プロジェクトSATREPS/ULATが進んでおり、本研究室もこれに参画している [4]。このシステムは、雷放電データの発生位置分布やエネルギー等を取得するために、気象レーダー、電磁波計測、インフラサウンド計測装置などの観測手法を複合させたシステムである(図1- 4)。雷観測において最も一般的なリモートセンシング手法は、電磁波の磁界成分の変化を観測する手法である。しかし、この手法では雷の電流値を求めることは出来るものの、空気の絶縁破壊の抵抗を測定することができないため、エネルギー量を求めることができない。この雷のエネルギー推定の問題は雷によって励起されるインフラサウンドの音圧を積分することで解決できると考えられており、雷のインフラサウンド観測は重要な手法であると考えられる。

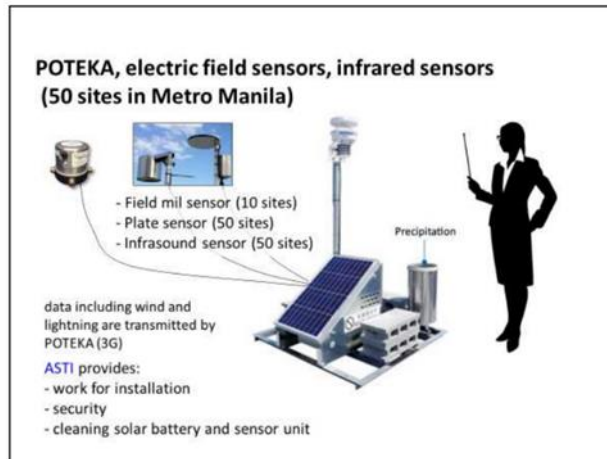


図1- 4. POTEKA観測システム [5]

1.3目的

本研究では、新たに共同開発した低コストインフラサウンドセンサを用いて、特定のエリアに複数台のINF04センサを設置する。閾値を用いたインフラサウンドイベントの自動検出のシステム構築を行い、検出したイベントについて位置推定、エネルギー算出を行う。また新たにインフラサウンドセンサと気象センサを同地点に置くことにより気象条件がインフラサウンド観測にどのような影響を与えるのかを調査することを目標とする。

第2章 手法

2.1 観測システム

2.1.1 インフラサウンドセンサINF04

本研究で使用するインフラサウンドセンサ(図2- 1)は、2019年度末に導入したサヤ製INF04を用いる。INF04は観測したデータを専用のバイナリ形式にてLANもしくはRS232C経由で出力し、これに接続されたWindowsパソコン上の専用ソフトウェア(MultiLoggerX3jp.exe)ではこれをASCII変換しcsv形式データファイルとして保存する。表2-1は出力データのサンプルである。14のフィールドに分かれており、左から加速度計のx軸、y軸、z軸、インフラサウンドHF(High Hrequency)、電源電圧、GNSSの1PPS信号、インフラサウンドLF(Low Frequency)、温度、年、月、日、時、分、秒の順で記録されている。通常はヘッダーを無効化して運用している。同データファイルは4096行のデータを1つのcsvファイルとし保存している。1日のファイルサイズが約750 MBとなっており、今回使用したノート型PC(表2-2)では外付けSSD 500 GBを用い、およそ600日間連続稼働することができる。

INF04は2種類の方式でインフラサウンドを計測する。1つは、静電容量式差圧計を用いた方式(以下HF方式で、0.1 Hzから1000 Hzを計測することができる。INF04はサンプリング周波数を0.9137 Hzから20 kHzまで設定することができるが、100 Hz以上に設定するとPCとの連携動作が不安定になるため、今回はサンプリング周波数を100 Hzとした。そのためナイキストの原理により、本研究ではHF方式の計測範囲は0.1 Hzから50 Hzとなる。もう1つの方式は、高精度気圧計(絶対圧計)を用いた方式(以下LF方式)で、0.1 Hz以下を計測することができる。ただし、INF01センサの精密絶対圧気圧計ほどの精度はない。INF04はRS232C接続でGNSS受信情報信号を入力することができ、csvファイルにGNSS時刻を記録できる。GNSS時刻を記録することにより、センサ同士の時刻同期を行う。図2- 2はINF04の設置状況である。コンテナボックス内にINF04、GPSアンテナ、データ収録用のB5サイズノートパソコン、停電時用のUPSを収納している。図2- 3にINF04の設置点を示す。また表2-3にINF04の運用履歴を示す。INF04は雷、土砂崩れを観測対象としている。雷鳴インフラサウンドの先行研究 [6] [7]で距離減衰により落雷地点から15 km以上離すと雷鳴の観測は難しいという結果が得られたため、今回の設置地点は1辺15km以内のアレイを複数設置した。



図2- 1. INF04外観

表2-1. INF04計測データサンプル

加速度X(Gal)	加速度Y(Gal)	加速度Z(Gal)	インフラサウンドHF(mPa)	電源電圧(V)	1PPS(GPS)	インフラサウンドLF (hPa)	温度	年	月	日時	分	秒	
20.3969	1.6854	0	-319.8253	11.7827	3455.9902	1002.6719	52.76	2021	10	6	15	21	41.001
21.3108	0.7661	0.0511	-302.4788	11.7842	3455.9902	1002.6719	52.76	2021	10	6	15	21	41.011
21.4123	0.6639	0.0511	-319.8253	11.7732	3455.9902	1002.6724	52.76	2021	10	6	15	21	41.021
19.94	0.715	0	-293.8056	11.7902	3455.9902	1002.6729	52.76	2021	10	6	15	21	41.031
20.3969	0.6639	0	-328.4985	11.7759	3455.9902	1002.6729	52.76	2021	10	6	15	21	41.041

表2-2. 観測PCスペック

	Mouse computer m-Book C100SN-S5	ASUS W202
OS	Windwos 10 Pro 64bit	Windwos 10 Pro 64bit
CPU	Intel Celeron N4100 @ 1.10 GHz	Intel Celeron N3350
HDD	500 GB	64GB
Memory	8 GB	4 GB
外付けSSD	500GB	500GB



図2- 2. INF04観測装置全容

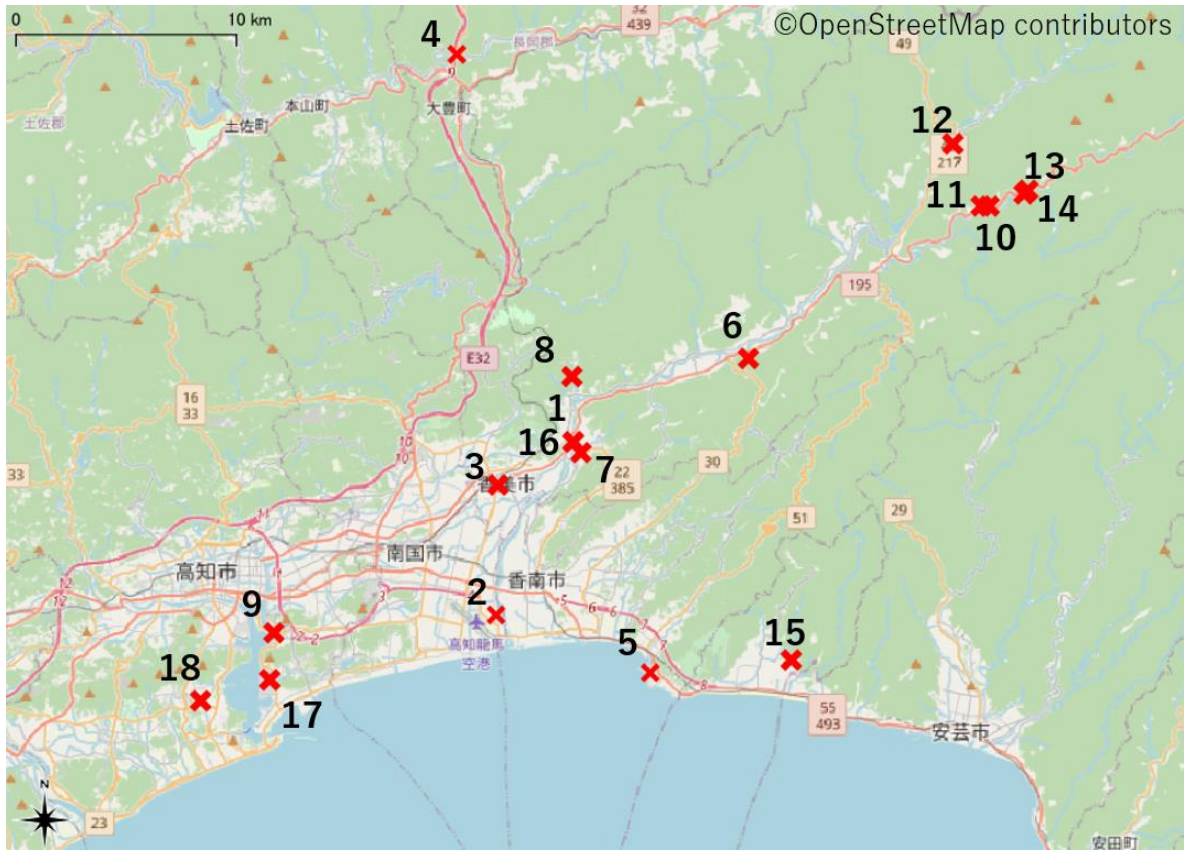


図2- 3. INF04設置地点名

表2-3. INF04運用履歴

番号	設置地点名	運用開始日
1	A151	2019年6月24日
2	高知高専	2019年12月20日
3	土佐山田	2019年12月22日
4	大豊	2019年12月24日
5	香南学園	2020年1月15日
6	香美市青少年自然の家	2020年1月29日
7	香美市防災倉庫	2020年7月16日
8	佐岡	2020年7月22日
9	JA高知	2020年8月31日
10	根木屋	2021年5月31日
11	小浜物産直売所	2021年5月31日
12	五王堂分屯所	2021年5月31日
13	岡ノ内公会堂	2021年6月2日
14	岡ノ内分屯所	2021年6月2日
15	芸西天文台	2021年6月17日
16	高知工科大学観測小屋	2021年9月6日
17	千松園	2021年10月26日
18	高知市立横浜新町小学校	2021年12月27日

2.1.2 インフラサウンドセンサINF01

これまで当研究室で使用されてきたインフラサウンドセンサ(図2- 4)は、SAYA製ADX II -INF01Cである。INF01の高知県内の設置状況(2020年2月時点)を図2- 5に示す。INF01は観測したデータをバイナリ形式で、LAN経由で出力し、INF04と同様にWindows上の専用ソフトウェア(MultiLoggerX3jp.exe)で、csv形式で保存される。表2-4にINF01のデータサンプルを示す14のフィールドに分かれており、左からセンサNo、GNSS(GPS)フラグ、センサ時刻、センサタイムスタンプ、GNSS(GPS)時刻、GNSS(GPS)タイムスタンプ、加速度計x、y、z、可聴音域の騒音RMS値、気圧、インフラサウンドDC、インフラサウンドAC、気温となっている。インフラサウンドDCとACの違いはデジタルフィルタによる低域カットを行うACと行わないDCとなっている。

INF01は電磁誘導式の差圧形センサで、インフラサウンドの振幅に比例する周波数偏移を元に出力している。22 bitの分解能を持ち、134.2 dBのレンジを持つ。計測範囲は0.001~6.25 Hzまでの帯域を収集することができる。

INF01にもINF04同様にGPS信号を入力することができ、株式会社SAYA製作のGPSユニットを使用し、GNSS(GPS)時刻を記録している。



図2- 4. SAYA製 ADX II -INF01Cインフラサウンドセンサの外観

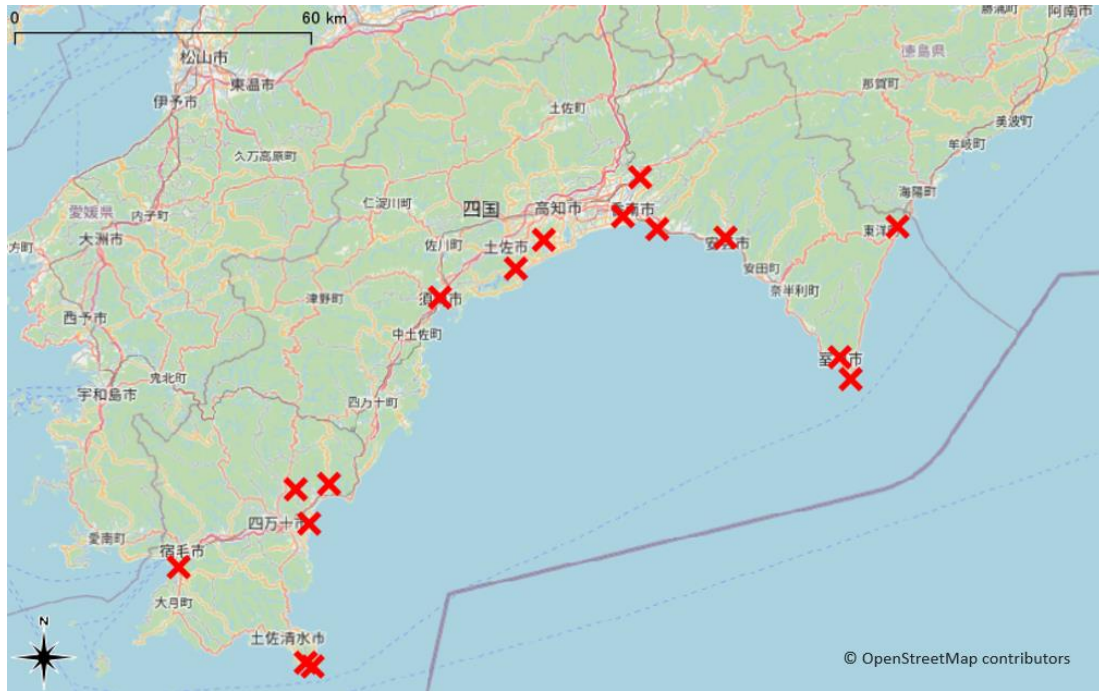


図2- 5. 高知県内のINF01の設置状況(2022年2月現在)



表2-4. INF01計測csvデータファイルの例

SensorNo	GpsFlag	SensorTime	SensorTimeStamp	GpsTime	GpsTimeStamp	AccX	AccY	AccZ	Noise	AirPress	InfDC	InfAC	Temp
10	1	00:01.5	1566864002	00:00.1	1566864000	1.4811	0.3575	0.715	15.0044	101.4772	4794.8028	-1083.3612	41.2031
10	1	00:01.7	1566864002	00:00.3	1566864000	1.4811	0.3575	0.6129	15.0099	101.4788	4795.1638	-1078.6682	41.2005
10	1	00:01.9	1566864002	00:00.5	1566864001	1.5322	0.3575	0.6129	15.0731	101.4709	4789.0268	-1087.3322	41.2008
10	1	00:02.1	1566864002	00:00.7	1566864001	1.5832	0.3575	0.6639	15.1611	101.4645	4792.2758	-1084.8052	41.2024
10	1	00:07.0	1566864007	00:05.1	1566864005	1.5832	0.4086	0.715	15.1804	101.4677	4780.3628	-1097.8012	41.202
10	1	00:07.3	1566864007	00:05.4	1566864005	1.4811	0.4596	0.8172	15.1364	101.4756	4769.8938	-1099.2452	41.2013
10	1	00:07.5	1566864008	00:05.6	1566864006	1.43	0.5107	1.0725	15.2546	101.482	4760.1468	-1098.1622	41.1996
10	1	00:07.7	1566864008	00:05.7	1566864006	1.4811	0.6129	1.3279	15.6424	101.482	4745.3458	-1140.3992	41.2005

2.1.3 気象観測

気象観測センサとして、Onset社製の気象観測装置を用いて風速と雨量の観測を行う。風速計、雨量計の仕様を表2-5に示す。風速計と雨量計は同社のHOBO USBマイクロステーションで1分間隔にロギングを行う。データの回収にはWindowsのソフトウェア、HOBOWareで回収を行うことができ、回収のタイミングでロガー側の時刻がPC時刻と同期される。ロガーの時刻精度は±5秒/月であり、月に1度PC時刻(NTPサーバーで補正)と同期を行った。

表2-5. 気象観測センサ仕様 [8] [9]

	風速計		雨量計
品番	S-WSB-M003		S-RGB-M002
計測範囲	0～76 m/sec		0～127 mm/hr
精度	±1.1 m/sec		±1.0%
分解能	0.5 m/sec		0.2 mm
始動閾値	≤1 m/sec		0.2 mm
動作環境	-40～75 °C		0～50 °C
計測値定義	平均値風速	瞬間風速	ロギング期間内にマス(0.2 mm)の転倒回数の合計値
	ロギング期間内の3秒ごとの計測値の平均	ロギング期間内の3秒の瞬間最大風速	
外観			

気象観測センサは高知工科大学敷地内の教育研究棟Aの南側に位置する観測小屋に設置を行った。設置状況を図2- 6に示す。風速計は地表から約3mの地点に設置した。



図2- 6. 気象観測センサ設置状況

2.2 イベント検出方法

2.2.1 自動検出システムの流れ

図2- 7に自動検出システムの流れを示す。将来的には図2- 7のような流れを想定しているが、現在は枠で囲んでいる4つのプログラムをそれぞれ実行し、検出を行っている。

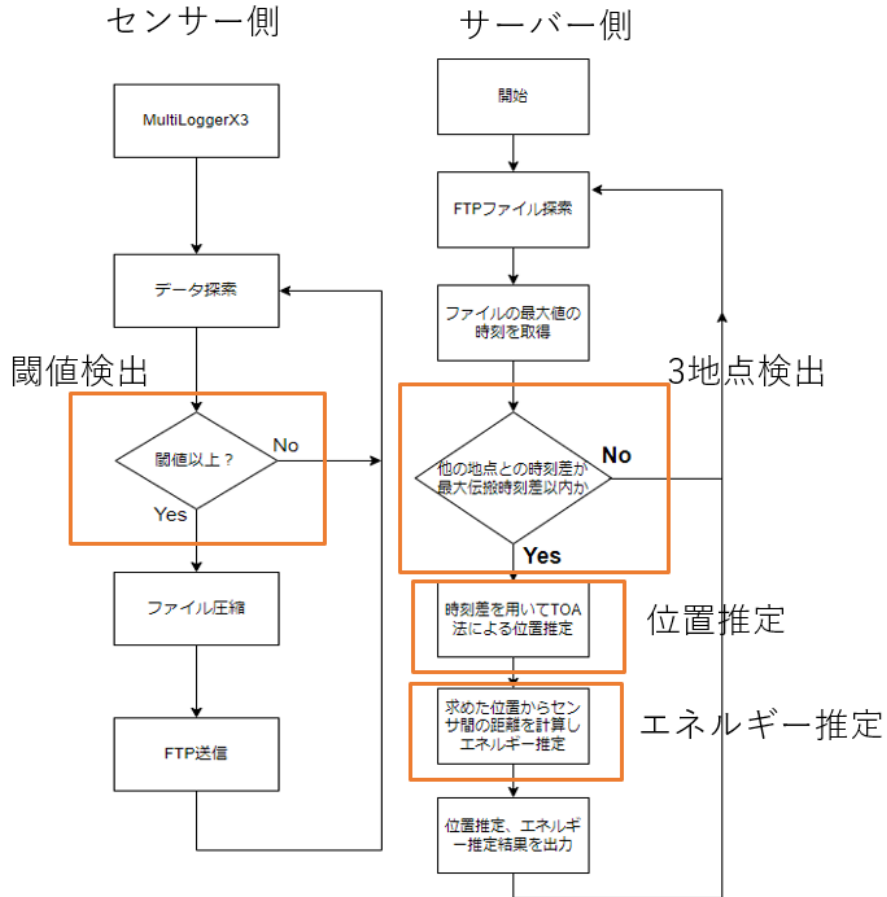


図2- 7. 自動検出システムフローチャート

2.2.2 閾値検出

インフラサウンドイベントの検出方法として閾値を用いたイベント検出を行った。現在ロガーソフトウェアMultiLoggerX3は4096サンプルごとにファイルを出力しており、サンプリング周波数は100 Hzである為図2- 8に示すような40.96秒に1つのファイルが出力される。40.96秒の1つのファイルから最大値、最小値を抽出し、それが閾値を超えていた場合、イベントとしてみなし矢印で示す最大、最小値の時刻を抽出する。

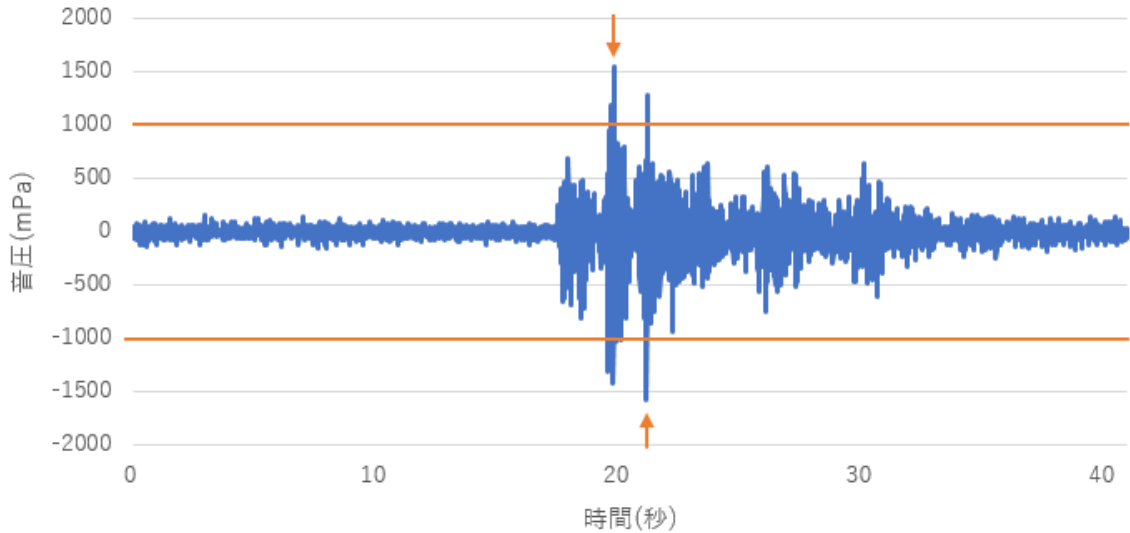


図2- 8. 閾値検出の例

2.2.3 3地点検出

閾値を用いた検出方法では扉の開け閉めや風によるノイズなどのローカルなイベントでも検出されてしまう。異なる2地点で検出されたインフラサウドのイベントが同一のものである場合、センサ間の到達時刻差 t_d が最大になる場合は、2点間の直線上をインフラサウドが音速で伝搬した場合である。すなわち、 t_d が両地点間の距離 D を音速 c で割ったもの(D/c)よりも小さいことが必要条件である。そこで閾値を用いて抽出した時刻を用いて他の地点との時刻差を用いることで広範囲で発生したイベントかどうかを判断した。図2-9に示すようにイベントの伝搬距離差は $D1$ 、 $D2$ で表され、それぞれに音速を掛けると時刻差となる。この時刻差の最大値はイベント2のような観測点同士を結んだ直線状にイベントがある場合であり、この最大時刻差以内であるかを判断し、イベント検出を行う。

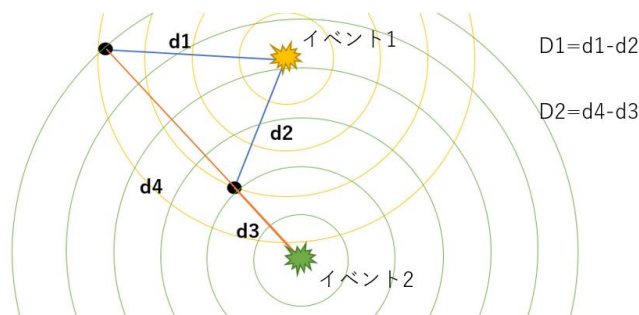


図2-9. 三地点検出

2.3 位置算出

2.3.1 音速

今回の観測対象の1つである雷鳴とは、雷の放電現象が発生した際に、軌跡に沿って大気が加熱され、急激に膨張が起こった際に発生する衝撃波である。雷鳴の周波数スペクトルは、4 Hz未満から125 Hzまでの範囲でピークを持っていることがわかっている [10]。

本研究において音速は式(2-1)に示す1気圧の乾燥空気における近似式を用いる。気温は気象庁のアメダスの観測結果を用いる。

$$v = 331.5 + 0.61T \dots \dots \dots (2-1)$$

2.3.2 TOA法

TOA(Time of Arrival)方式を用いて位置算出を行う。TOA方式とは、3地点以上の位置が既知のセンサがそれぞれ計測した音波の到達時間差を用いて位置推定を行う方法である。図2- 10に示すように、地点Aと地点Bにおける到達時刻差から双曲線を描くことができ、同様に地点Aと地点Cでも時刻差から双曲線を描くことによって、交点が波源として求まる。

$$t \cdot \text{音速} = \left| \sqrt{(Mx_1 - x)^2 + (My_1 - y)^2} - \sqrt{(Mx_2 - x)^2 + (My_2 - y)^2} \right| \dots \dots \dots (2-2)$$

t : 到達時間差 x, y : 落雷地点 Mx, My : センサ位置

到達時間差に音速を掛けると、各センサから落雷地点の距離の差が得られる。式(2-2)と対応する2か所のセンサ位置の組に対して、それぞれ双曲線が描かれ交点が求まる。

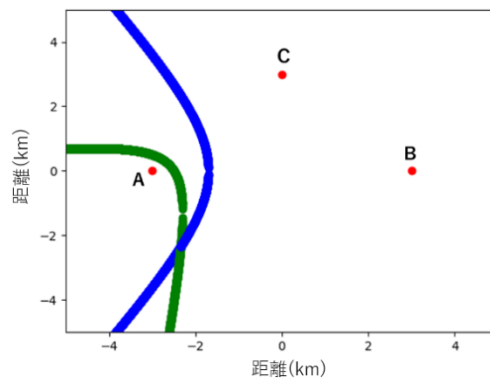


図2- 10. TOA法

2.4 エネルギー推定

音圧によるエネルギーは式(2-3)に表す音の強さIを時間と空間で積分することで求まる。

$$E = \int I(t) dS dt \dots\dots\dots(2-3)$$

E:エネルギー(J) I: 音の強さ (W/m²)

音の強さIは、

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \dots\dots\dots(2-4)$$

p: 音圧(Pa) ρ: 空気密度(kg/m³) c: 音速(m/s)

で求めることが出来る。pは音圧、ρは空気密度、cは音速を表す。

式(2-4)よりエネルギーEは

$$E = \int \frac{p^2(t)}{\rho c} dS dt \dots\dots\dots(2-5)$$

で表される。時間に依存しない関数を外に出すと、

$$E = \frac{4\pi r^2}{\rho c} \int p(t)^2 dt \dots\dots\dots(2-6)$$

r: センサと音源の距離(m)

となる。雷鳴の音源を点音源と考え、球状に音が広がっていると仮定すると空間積分はTOA法で求めた位置を用い、 $4\pi r^2$ で表される。音速は式(2-1)より求めることが出来る。音圧は観測値であり、空気密度は

$$\rho = \frac{P}{R(T+273.15)} \dots\dots\dots(2-7)$$

P: 気圧(hPa) R: 乾燥空気の気体定数(2.87) T: 温度(°C)

で表される。Pは気圧、Rは乾燥空気の気体定数、Tは温度である。これによりエネルギーを求めることが出来る。

2.5 気象影響評価

本学協の屋外観測小屋にてINF04と図2- 6の風速計、雨量計の同時観測を行う。また、本学に設置しているINF01や近隣に設置している他のインフラサウンドセンサと同時刻の比較を行うことによって、局地的大雨によってもたらされたものなのか、そうでないのか判断を行う。

第3章 結果

3.1 インフラサウンドイベント検出

3.1.1 閾値検出

閾値検出では人の出入りが少なく、観測期間の長い2地点について示す。図3- 1に香美市防災倉庫の月別の閾値検出結果を示す。閾値250 mPaの場合月による程度の差はあるが毎月1000件を超えるイベントを検出し、月平均では4000件を超えるイベントが見られた。閾値500 mPaの場合は250 mPaと同様な季節変化が見られた。1000、2000 mPaの場合は2021年の3月、8月、12月がほかの月に比べ検出数が多くなる結果となった。

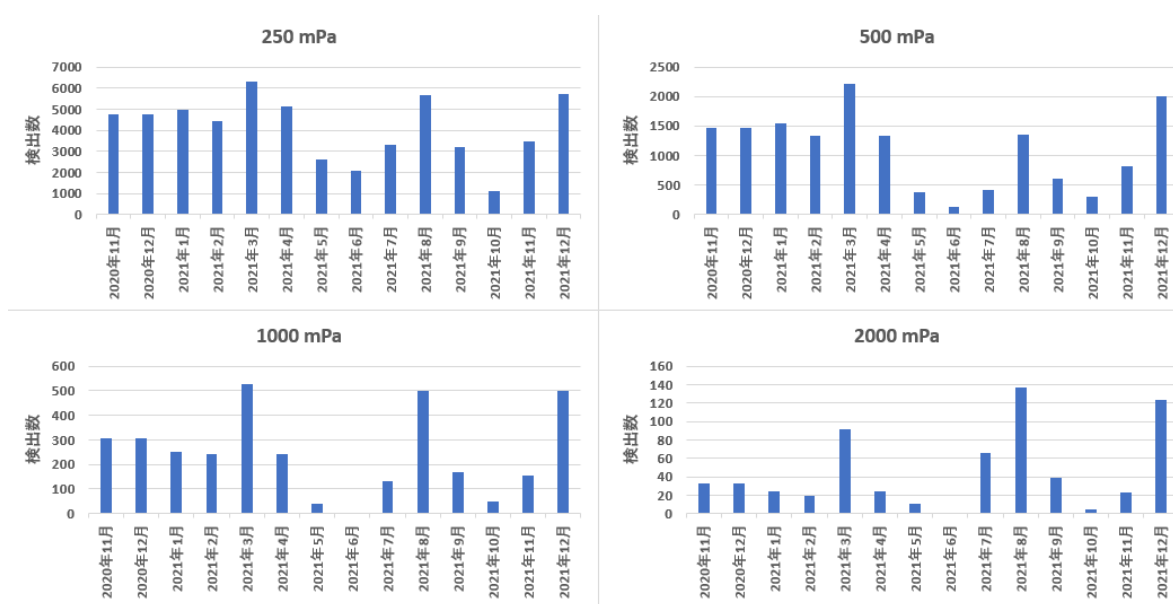


図3- 1. 月別閾値によるイベント検出数(香美市防災倉庫)

図3- 2に佐岡の月別の閾値検出結果を示す。2021年の3月、4月は観測装置の不良によりデータを取得できず検出数が0となっている。2020、2021年共に7月から10月にかけて検出数が多くなる結果となった。

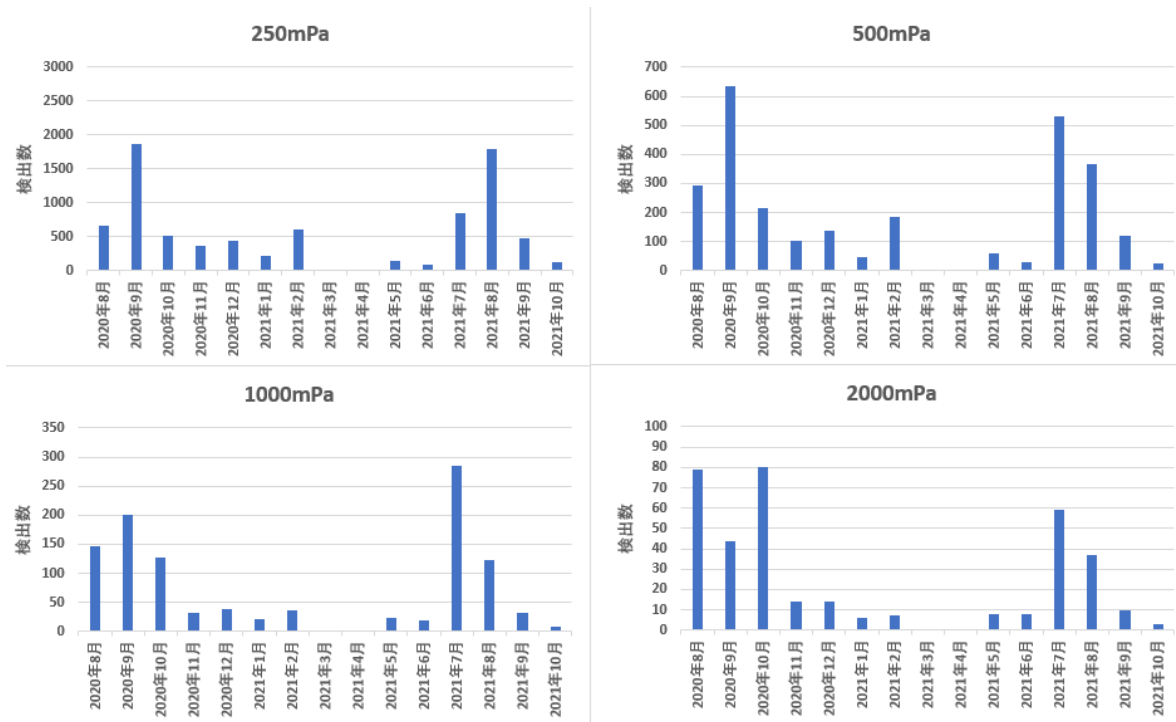


図3- 2. 月別閾値によるイベント検出数(佐岡)

3.1.2 3地点検出

3地点抽出を行った。エリアの選定は、運用期間が長い点や、センサ間の距離が大きくなるにつれ最大到達時刻差が大きくなり、検出精度が甘くなってしまうと考えられる為、大きく距離が離れていないエリアを選択した。例えば3.4 km離れた地点の最大到達時刻差は10秒ほどになるが、13.6 km離れた地点では40秒になり、同一のイベント以外も偶然検出してしまう可能性が高くなると考えられる。今回は最大距離差が3.4 kmの狭いエリアと12.7 kmの広いエリアの2つで検出を行った。最大到達時刻差の計算には音速を用いるが今回は気温を0°C固定とし、式(2-1)より音速は331.5 m/sとして検出を行った。

図3- 3に示す狭いエリアにて3地点検出を行った結果を表3-1に示す。また今回の時刻差を取得した箇所は最大値の時刻とした。検出期間は2020年10月24日から2021年10月12日までの(2021年3月22日から5月6日を除く)308日間となる。

閾値250 mPaの場合185件、500 mPaでは46件、1000 mPaでは11件、2000 mPaでは1件の検出となった。1000 mPaで検出を行った11件の観測結果を付録1に残す。

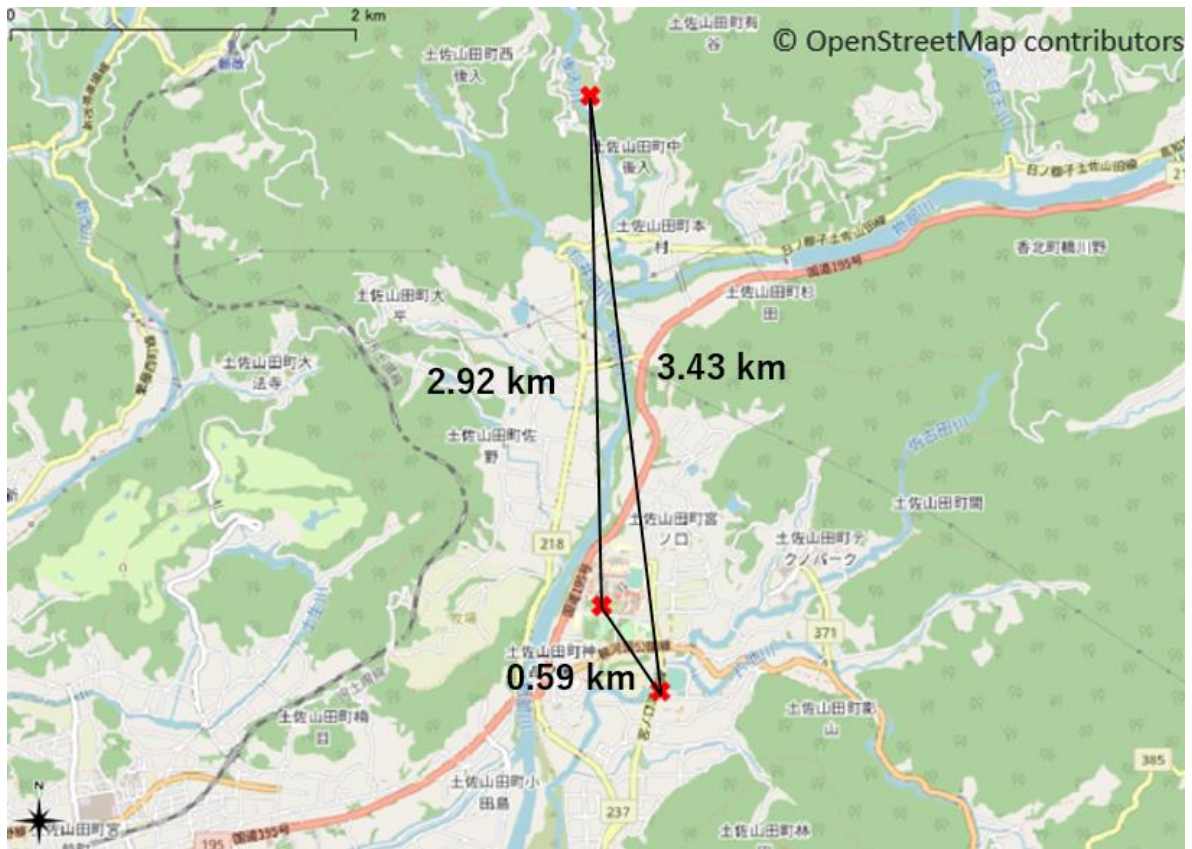


図3- 3. 狭いエリアによる3地点検出地点

表3- 1. 狭いエリアによる3地点検出結果

閾値(mPa)	250	500	1000	2000
高知工科大学	75168	17200	5563	1255
防災倉庫	39751	10077	2258	429
佐岡	8766	2938	1151	375
3地点検出	185	46	11	1

図3- 4に示す広いエリアにて3地点検出を行った結果を表3-2に示す。検出期間は2020年7月22日から2021年12月31日までの(2020年8月5日から2021年8月4日を除く)162日間となる。検出結果を表3-2に示す。閾値250 mPaの場合394件、500 mPaでは77件、1000 mPaでは7件、2000 mPaでは0件の検出となった。

狭いエリアと広いエリアの比較では観測期間がずれている為単純には比較できないが500 mPa以下の閾値では検出数が半分程度の観測期間にもかかわらず増大している。1000 mPa以上の検出数では変化は見られない。

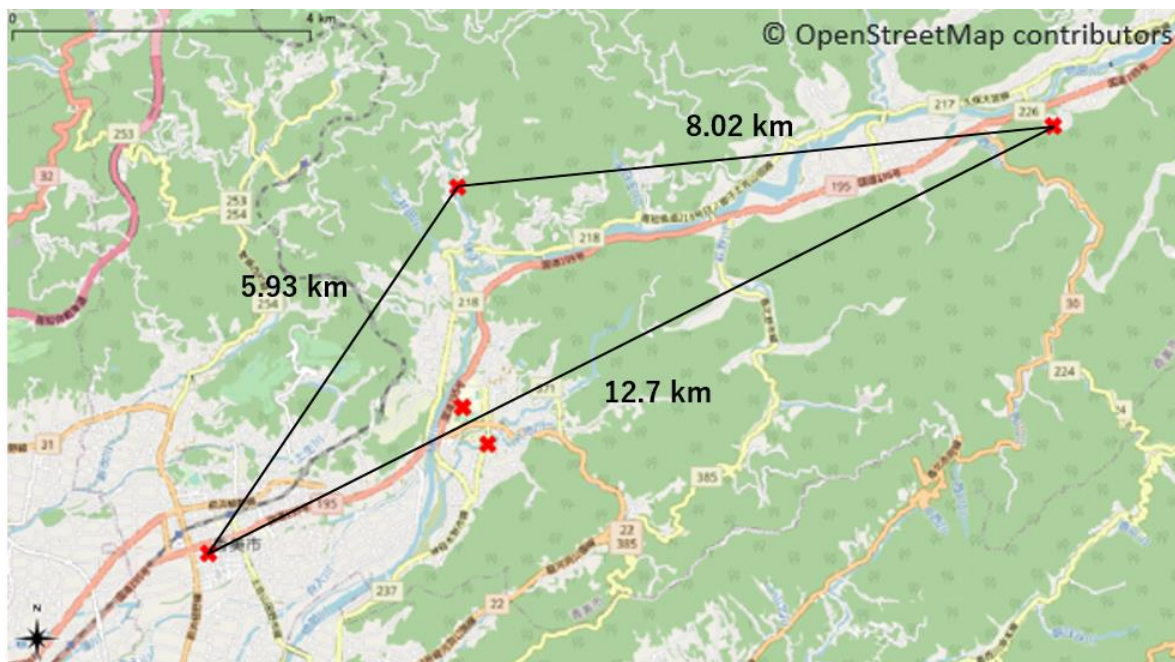


図3- 4. 広いエリアによる3地点検出地点

表3- 2. 広いエリアによる3地点検出結果

閾値(mPa)	250	500	1000	2000
土佐山田	9185	3903	1730	729
青少年自然の家	10854	2173	86	238
佐岡	2815	654	252	92
3地点検出	394	77	7	0

3.2 落雷位置推定

3.2.1 2021年9月3日

狭いエリアによる1000 mPaの閾値で検出した2021年9月3日のイベントについて位置推定を行った。9月3日の7:30から8:30のイベント検出は以下に示す閾値1000 mPaの1例のみであった。図3- 5、図3- 6、図3- 7に高知工科大学、佐岡、香美市防災倉庫の2021年9月3日7時37分からの約40秒間の観測結果を示す。矢印はオレンジ色が最大値の時刻、灰色が微分した際の最大値の時刻であり、2つのパターンで位置推定を行った。

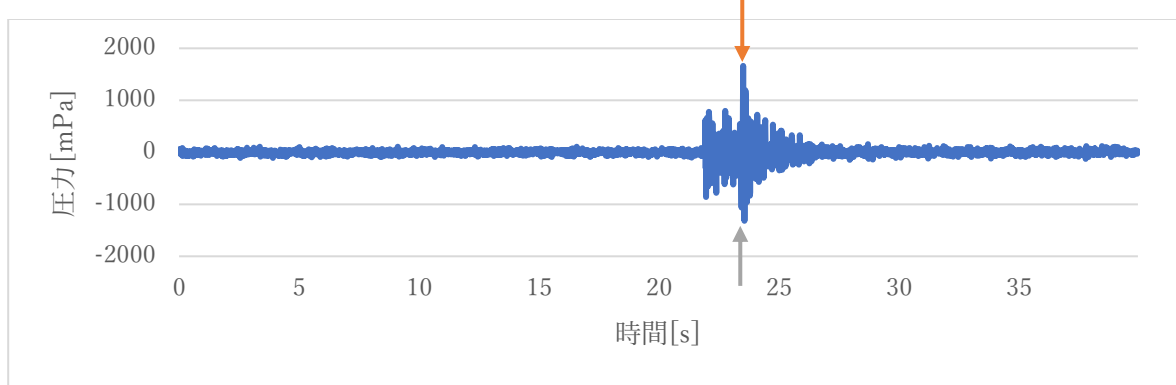


図3- 5. 高知工科大学のインフラサウンドHFの観測結果(2021年9月3日7:37から)

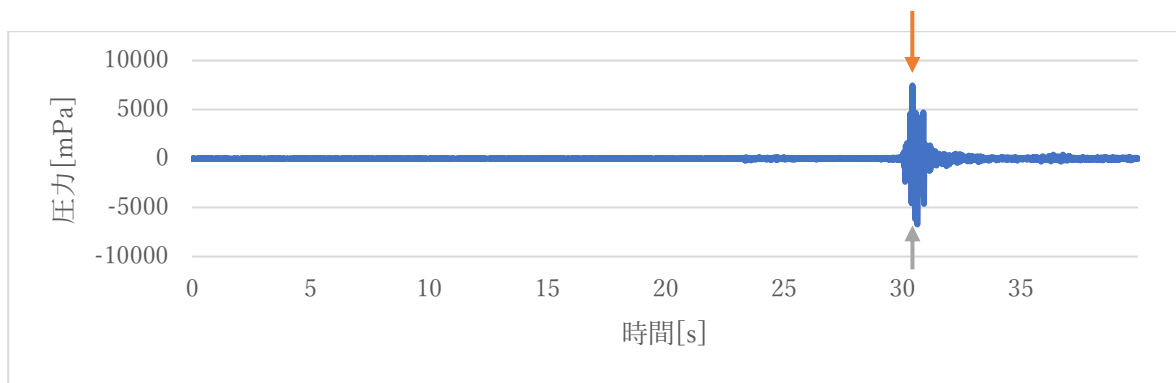


図3- 6. 佐岡のインフラサウンドHFの観測結果(2021年9月3日7:37から)

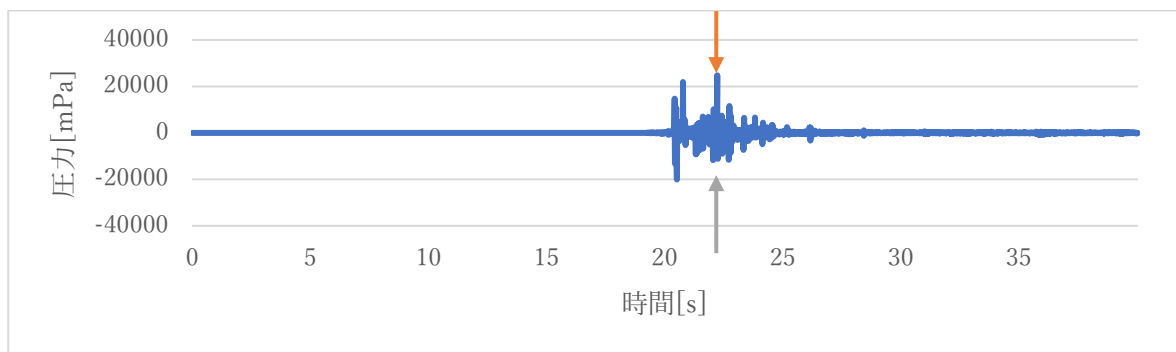


図3- 7. 香美市防災倉庫のインフラサウンドHFの観測結果(2021年9月3日7:37から)

また電磁波観測により落雷位置を報告している株式会社フランクリンジャパンの落雷報告書を表3-3に示す。6番の7時37分14秒に発生した-75 kAの落雷が該当時間に相当する。

表3-3. フランクリンジャパン落雷報告書

番号	日付	時間	緯度(°)	経度(°)	電流値(kA)
1	2021/09/03	07:30:53	33.543	133.815	-13
2	2021/09/03	07:32:15	33.566	133.756	-106
3	2021/09/03	07:32:15	33.543	133.782	-9
4	2021/09/03	07:34:57	33.658	133.774	-23
5	2021/09/03	07:37:14	33.563	133.777	25
6	2021/09/03	07:37:14	33.599	133.732	-74
7	2021/09/03	07:41:19	33.632	133.799	-96
8	2021/09/03	07:41:19	33.606	133.803	-9
9	2021/09/03	07:41:19	33.606	133.803	-15
10	2021/09/03	07:42:47	33.601	133.713	-21
11	2021/09/03	07:42:47	33.590	133.737	-8
12	2021/09/03	07:42:47	33.600	133.713	-9
13	2021/09/03	07:42:47	33.602	133.708	-9
14	2021/09/03	07:44:16	33.628	133.817	-20
15	2021/09/03	07:45:06	33.555	133.786	-12
16	2021/09/03	07:46:46	33.571	133.819	-39
17	2021/09/03	07:46:46	33.626	133.747	-6
18	2021/09/03	07:46:46	33.572	133.787	12
19	2021/09/03	07:46:46	33.571	133.819	-18
20	2021/09/03	07:46:46	33.570	133.820	-74
21	2021/09/03	07:46:46	33.572	133.820	-11
22	2021/09/03	07:46:46	33.571	133.820	-36
23	2021/09/03	07:46:46	33.571	133.819	-49
24	2021/09/03	07:46:46	33.571	133.819	-12
25	2021/09/03	07:46:46	33.570	133.820	-12
26	2021/09/03	07:50:14	33.572	133.781	7
27	2021/09/03	07:50:54	33.570	133.798	-14
28	2021/09/03	07:51:16	33.587	133.774	-12
29	2021/09/03	07:51:16	33.587	133.775	-25

図3- 8に落雷位置推定を行った結果を示す。気象庁ごめんの7:40の観測データより気温は24.8 °Cであった [4]。星印が落雷報告書による落雷位置、オレンジ色のバツ印が最大値の時刻による位置推定、灰色のバツ印が微分した際の最大値による位置推定結果となる。

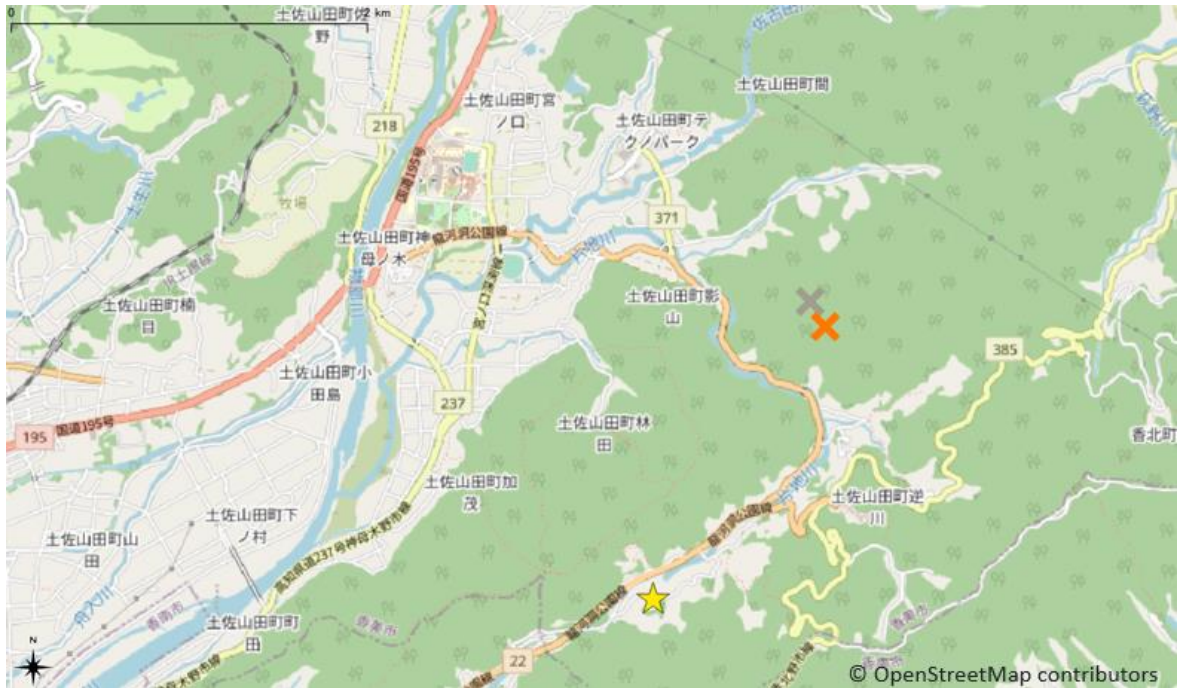


図3- 8. 落雷推定位置(星印:フランクリンジャパンの落雷位置、バツ印:位置推定結果)

3.3 エネルギー推定

表3-4に先ほど行った位置推定結果からエネルギー推定を行った結果を示す。最も落雷推定値から近かった香美市防災倉庫では23741 MJ、2番目に近い高知工科大学では65 MJ、佐岡では4577 MJ、土佐山田では421 MJ、香北青少年自然の家では686 MJとなった。

表3-4. エネルギー推定結果

	香美市防災倉庫	高知工科大学	佐岡	土佐山田	香北青少年自然の家
距離(km)	1.66	2.11	4.15	5.54	7.45
音圧面積(Pa・s)	16716	690	2936	667	633
エネルギー(MJ)	23741	65	4577	421	686

3.4 気象影響評価

3.4.1 風との比較

図3- 9に8分間の観測データの観測小屋のインフラサウンドHFの最大値と最大瞬間風速の関係を箱ひげ図で示す。ひげの範囲は下限が第一四分位範囲から平均値の1.5倍を引いたもので、上限が第三四分位範囲から平均値の1.5倍を足したものになる。観測期間は2021年9月6日から2021年12月1日までで、風速計が故障していた10月11日から27日や気象庁の観測地点高知の観測結果 [4]より雷鳴が発生していた日時は除いている。最大瞬間風速が大きくなるにつれて音圧も高くなっていることが分かる。最大瞬間風速3 m/sで平均最大値は338 mPaとなり、4 m/sで534 mPa、5.5 m/sで1086 mPaとなった。

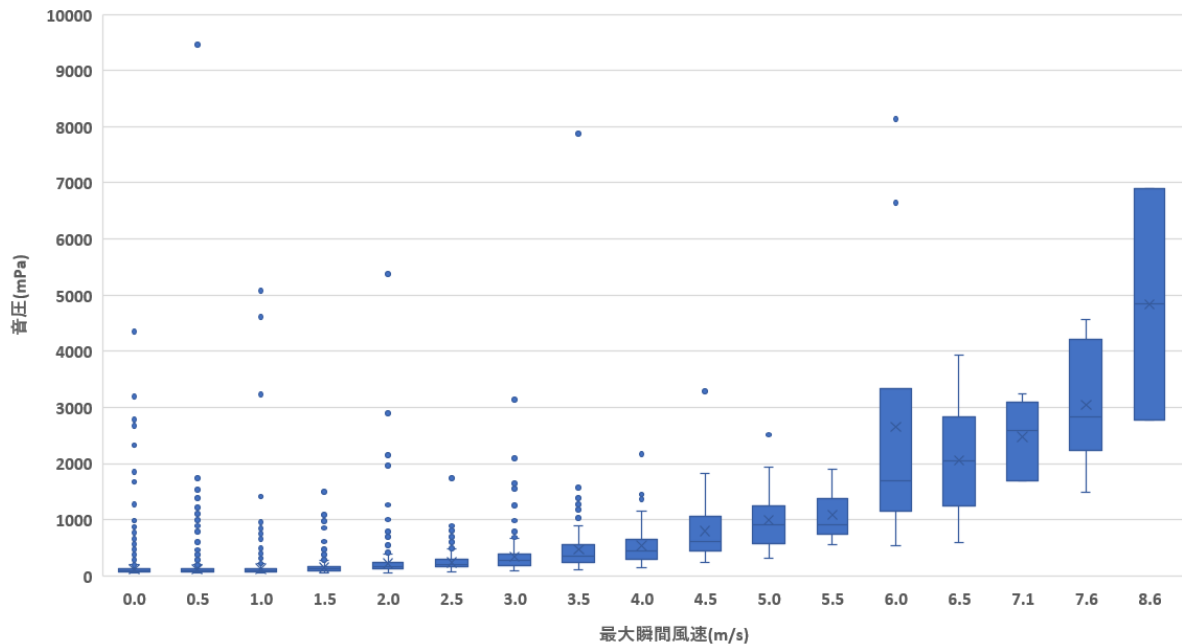


図3- 9. 観測小屋のインフラサウンドHFの最大値と最大瞬間風速との関係

3.4.2 雨との比較

図3- 10に2021年11月30日の20:00ごろに発生した局地的大雨時のインフラサウンドLF(~0.1 Hz)と降水量の関係を示す。局地的大雨が始まった前後に気象観測と距離の離れていない高知工科大学や香美市防災倉庫が減少し始めていることが分かる。また気象観測地点から南西に約4 km離れている土佐山田でも数分前に先の2地点と同様に2 hPa程度の減少が見れているが北東に約9km離れている香北青少年自然の家では他の3地点のような変化は見られなかった。

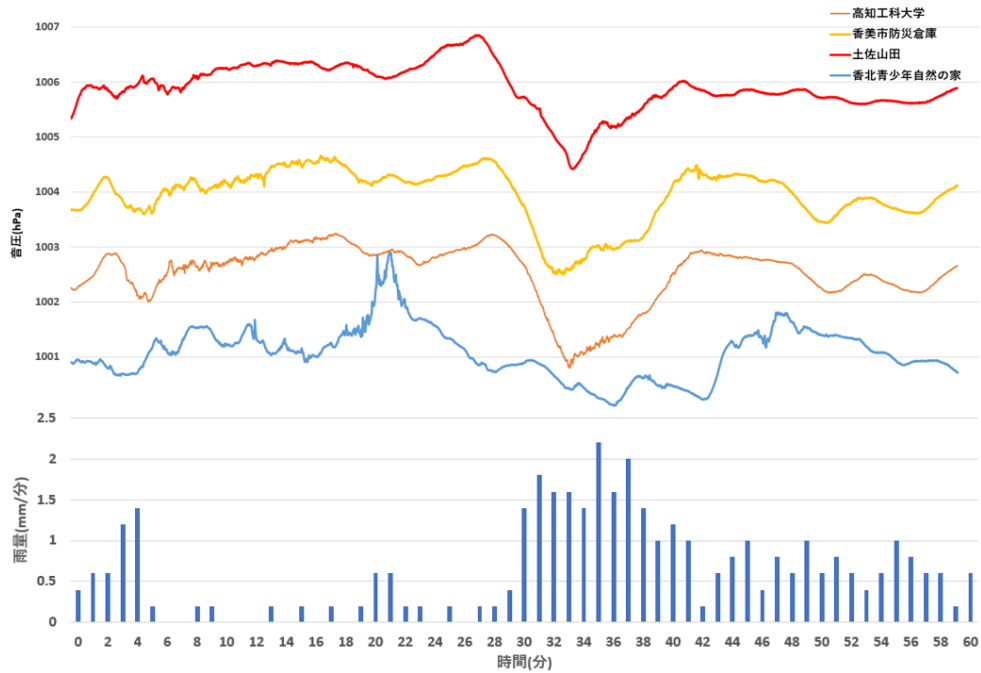


図3- 10. 局地的大雨時のインフラサウンドLFと降水量の関係

図3- 11に低周波帯に帯域を持つ高知工科大学のINF01の観測結果を示す。INF01の観測結果同様に局地的大雨があった高知工科大学において降水が始まったのと同時刻で音圧が減少し始めていることが分かる。また23 km離れた高知市春野町では同時刻において同様の変化は見る事が出来なかった。

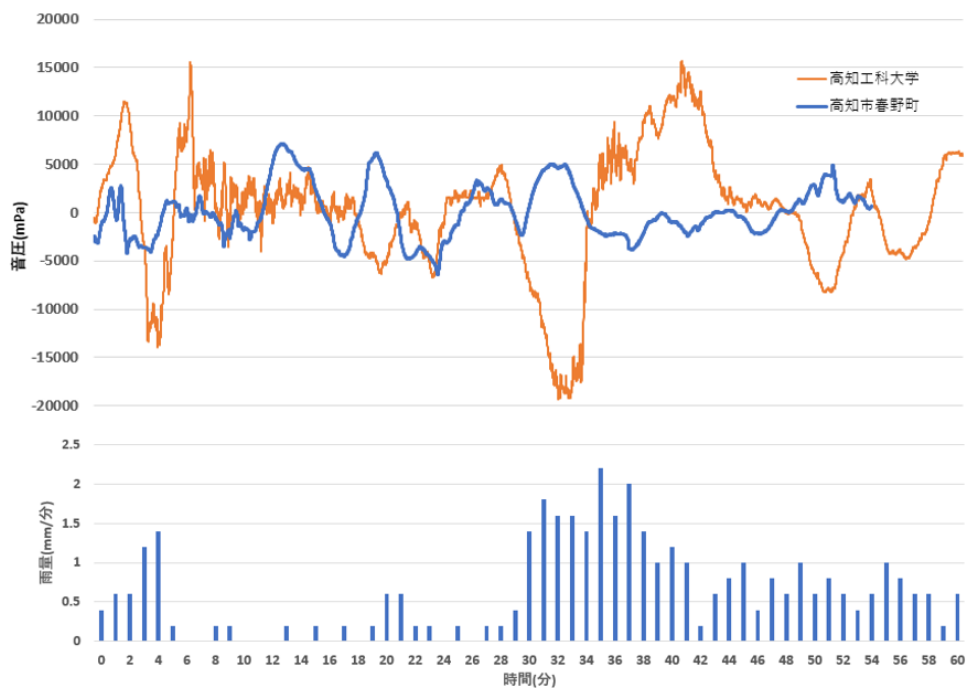


図3- 11. 局地大雨時の高知工科大学のと高知市春野のINF01ACと降水量の関係

3.5 トンガの噴火によるインフラサウンド

図3- 12にトンガの噴火によるINF04のLF帯の観測結果を示す。日本時間2021年1月15日13時頃に噴火したトンガの海底火山フンガ・トンガ フンガ・ハアパイによるインフラサウンドを観測することが出来た。LF帯は20:30頃から上昇を始め、20:42頃にピークを迎えその後も変動し続けた。13:00に発生し、20:30に到達した場合フンガ・トンガから高知工科大学まで約8085 kmの為、音波の速度が一定であった場合LF帯の速度は約299 m/sとなった。図3- 13、図3- 14にノイズの少なかった佐岡のHF帯の観測結果を示す。HF帯では20:55頃から反応が始まり、21:30頃に通常のノイズレベルに戻った後、23:20頃に再度反応があったことが分かる。

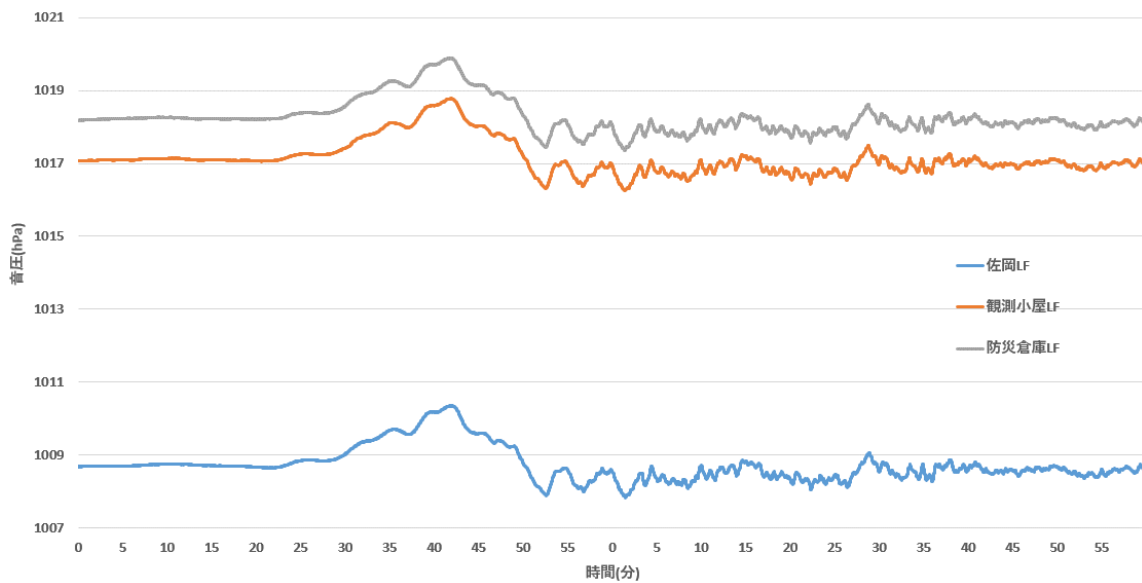


図3- 12. トンガの噴火によるインフラサウンドLF帯(20:00～22:00)

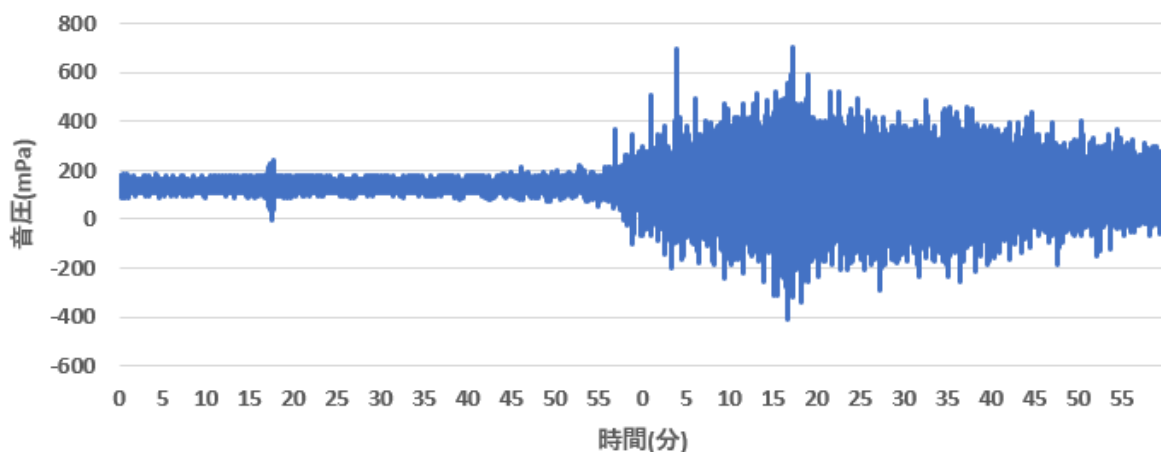


図3- 13. トンガの噴火によるインフラサウンドHF帯(20:00～22:00)観測点佐岡

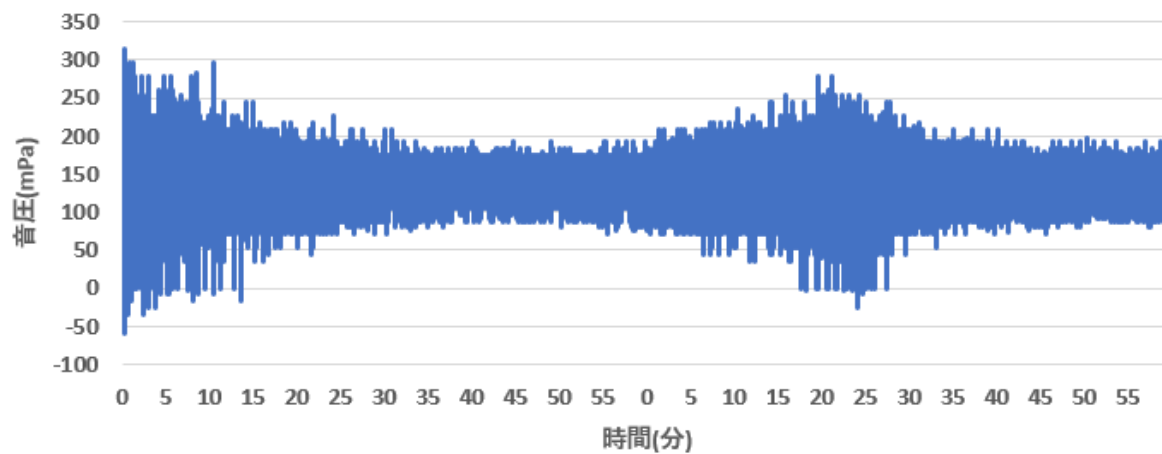


図3- 14. トンガの噴火によるインフラサウンドHF帯(22:00～24:00)

第4章 考察

4.1 イベント検出

4.1.1 閾値検出

閾値検出では、2地点の観測地点の結果を月別に示した。閾値250、500 mPaにおいて大きく結果が異なるのは、2地点の地理的要因だと考えられる。香美市防災倉庫は川沿いの県道脇の建物に設置されている為、低い閾値ではノイズによる検出が増えたものだと考えられる。また検出件数が少なかった佐岡は山間部の古民家に設置されており、林道とも距離が離れておりノイズとなる要因が少ないため検出件数が少なかったものだと考えられる。また香美市防災倉庫は通気性を高めるために通気口が大きく取られたプレハブ小屋であり、それも大きな要因の一つであると考えられる。7月から10月の夏場において検出件数が多くなるのは雷鳴によるものだと考えられる。香美市防災倉庫において閾値2000 mPaの場合、2021年3月、12月は雷鳴以外の要因で検出数が増えていると考えられる。3月は、特定の数日に検出数が増加しており、いずれの日も気象庁御免の観測データによると瞬間最大風速は15 m/sを超えている [4]。12月については2021年12月8日に検出数が83件あり、気象庁御免の観測データによると当日は平均風速5.9 m/s、最大瞬間風速22.2 m/sと非常に風の強い日であった [4]。

4.1.2 3地点検出

3地点検出を狭いエリアと広いエリアの2つのエリアについて行った。500 mPa以下の閾値では3.4節より風によるノイズで閾値を超えてしまう為、最大伝搬時刻差が長くなる広いエリアでは誤検知が増えて3地点検出数が増えてしまったと考えられる。

また表3-3の電磁波観測による落雷報告書に示すように2021年9月3日7:30から8:30には複数の落雷が発生しており、そのうち本システムで同時検出できたものは1例のみであった。表3-3の観測より理論到達時刻を計算し、プロットしたものを図4-1に示す。香美市防災倉庫では複数の雷鳴と思われる波形を観測していることが分かる。しかし今回の3地点検出で検出したイベントは1例のみであった。雷は発生する際に複数の枝に分かれ、それぞれが雷鳴を発生させ、観測点に近い放電路から順次音が到達するため観測波形は観測位置によって異なる結果になる [11]と考えられる。そこで最大伝搬時刻差にイベントの継続時間として時間猶予を5秒、10秒と与え3地点検出した結果を表4-1に示す。2021年9月3日8:00の風速は1 m/s以下であり、3.4.1節より250 mPaの閾値を超える可能性は低いと考えられ、今回の検出の殆どが雷鳴のものと思われる。250、500 mPaでは時間猶予を5秒与えると殆どの雷鳴を3地点検出を行うことが出来た為、3地点検出を行う際には最大伝搬時刻差にイベントの継続時間を加えることで雷鳴に対しては有効であると考えられる。

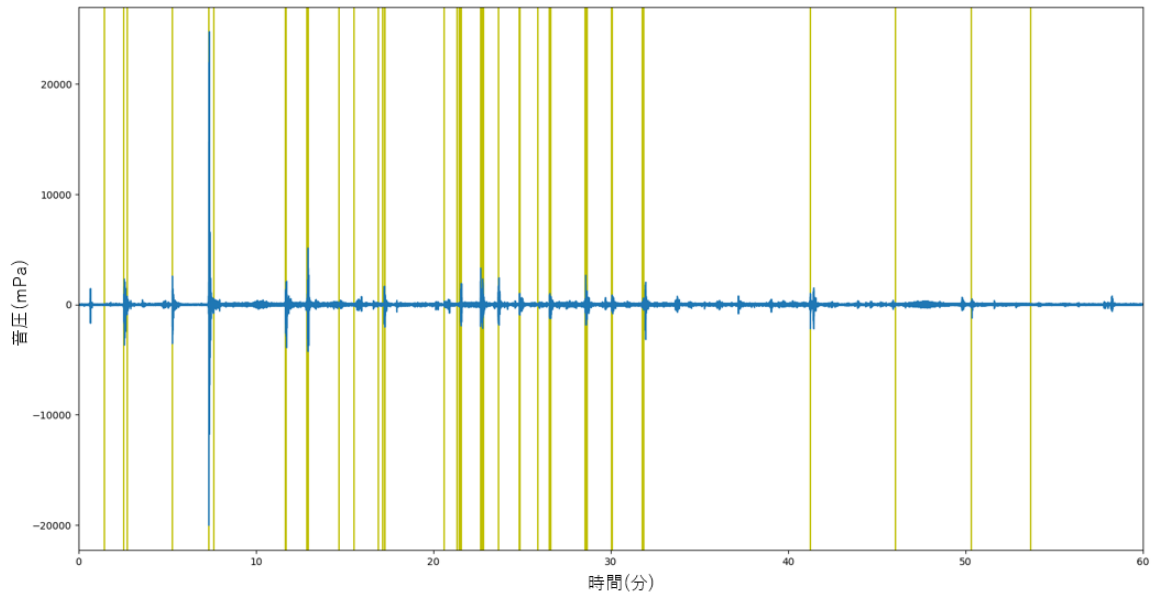


図4- 1. 香美市防災倉庫のインフラサウンドHFと雷鳴の理論到達時間(2021年9月3日7:30から8:30)

表4-1. 狭いエリアによる2021年9月3日7:30から8:30の3地点検出結果

閾値(mPa)	250			500			1000		
高知工科大学	6			2			1		
防災倉庫	30			10			5		
佐岡	53			24			15		
時間猶予(秒)	0	5	10	0	5	10	0	5	10
3地点検出	1	5	5	1	2	2	1	1	1

4.2 位置推定

位置推定では、1例について推定を行ったがフランクリンジャパンの落雷報告書とおおよそ1700 m離れた地点となった。フランクリンジャパンの落雷位置の平均位置誤差は300 m以下となっているので位置推定の手法については時刻差の取り方や位置推定手法を見直す必要があると考えられる。

4.3 エネルギー推定

エネルギー推定では、閾値検出と同じように観測点による建物の違いが結果に大きく表れた。最も高い値となった香美市防災倉庫は通気口が大きく取られた建物の為、最も建物によるフィルタの影響が少ない観測点であると考えられる。他の4点を高い順に並べると、佐岡(木造)、香北青少年自然の家(コンクリートブロック造)、土佐山田(鉄筋コンクリート造)、高知工科大学(鉄筋コンクリート造)となっている。香北青少年自然の家の観測地点は備蓄倉庫となっており、開口部にシャッターが取り付けられて

おり、防音は低くなっていると考えられ、建物のフィルタによる影響が大きいと考えられる。今後複数の雷鳴インフラサウンドのエネルギー推定のデータを蓄積することが出来れば建物によるフィルタの影響を調べることも可能であると考えられる。また地点ごとの建物によるフィルタを数値化することができれば地点ごとに閾値を設定し、より精度の良いイベント検出を行うことが可能であると考えられる。

4.4 気象影響

風速とインフラサウンドの関係では最大瞬間風速とインフラサウンドの音圧にどの程度の変化があるのか分かった。図4- 2に最大瞬間風速とインフラサウンドHFの8分間の観測データから2の乗算分のデータ点数を抜き出し、高速フーリエ変換を行い最も成分の多い周波数を示す。8分間の観測データから後半16秒を切り取っている。風速が2.5 m/sを超えると風速によるノイズが周辺環境のノイズより大きくなり、低い周波数にピークを持っていることが分かる。今回のような閾値を用いたイベント検出では風速によるノイズが閾値に大きく影響されるため風速を考慮したシステムの開発を行うか、ハイパスフィルタ等の信号処理を用いて風によるノイズを除去することが必要だと考えられる。

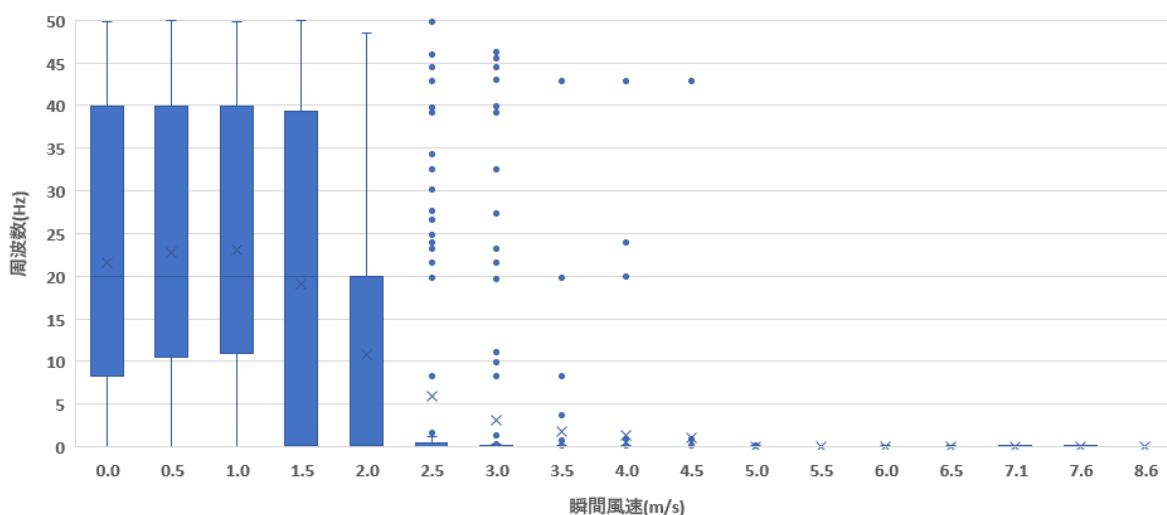


図4- 2. 最大瞬間風速と最大周波数

雨量とインフラサウンドの関係では今回2021年9月から2022年1月までの5ヵ月間の同時観測を行ったが局地的大雨によるインフラサウンドの変化は最も雨量の多かった2021年11月30日の1例のみの確認となった。今後も雨量計とインフラサウンドの同時観測を行い、観測例を増やし比較することが必要だと考えられる。

4.5 トンガの噴火によるインフラサウンド

2021年1月15日に発生したトンガ噴火によるインフラサウンドを本研究室で運用しているINF04でも観測することが出来た。INF04は雷や土砂崩れのような高い周波数帯を観測対象としており、遠方の火山の大規模噴火のような低い周波数帯は感度が低いですが、今回のような振幅の大きい場合は観測することが出来た。LF帯、HF帯による観測時刻の違いはLF帯のような低い周波数で波長が100 kmオーダーとなる大気重力波(ここではラム波成分)のモードとなるため大気中を這うように平均音速で到来するため、音波モードを捉えたHF帯に比べ伝搬時間が短くなったと考えられる [12]。HF帯のような高い周波数帯では高度の高い大気を伝搬するため、伝搬経路が長くなり、LF帯に比べ到達時刻が遅くなると考えられる。

第5章 結論

本研究は、2019年度に本研究室で新たに導入し運用を始めたINF04を用いてイベント検出を行った。イベント検出の手法としてまず閾値を用いてイベント時刻の抽出を行った。しかし1地点で閾値を用いたイベント検出では扉の開け締めや風によるノイズもイベントとして検出してしまふ。そこで複数の観測点を用いてイベント時刻差を計算し、一定時間以内であれば広範囲で発生したイベントと見なし検出を行った。308日間の観測データ中からイベント検出の結果、閾値1000 mPaの場合各地点で数千件ほどイベントが検出された。イベント時刻差を用いて検出を行った結果数千件のイベントが11件の検出となった。TOA法を用いて位置推定を行い、エネルギー推定を行った結果、建物によるフィルタの影響が大きく、建物ごとによるフィルタの数値化を行うことができれば閾値の設定やエネルギー量の推定結果を向上できると考えられる。

またこれまで詳細な調査が行われていなかったインフラサウンドと気象観測を同時観測から、気象条件が与える影響について評価した。風速とインフラサウンドの関係では風速が5 m/sほどになると今回用いた閾値1000 mPaを超える結果となった。雨量との関係では局地的大雨によるインフラサウンドの変化を1例だけだが観測することが出来た。今後も同時観測を続け、他の観測例と比較することが必要だと思われる。

謝辞

本研究を行うにあたり、いつも丁寧かつ的確なご指導ご鞭撻をくださった、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八田章光教授、田上周路准教授に心から感謝申し上げます。

本研究の観測機器設置を行うにあたり、設置を許諾して下さり長期間の設置を継続させて頂いている各施設関係者様に心より感謝申し上げます。また関係各所に対しての契約や相談など観測機器設置にご助力くださった本学 研究支援課 五百蔵恵子氏、高橋時恵氏に感謝申し上げます。

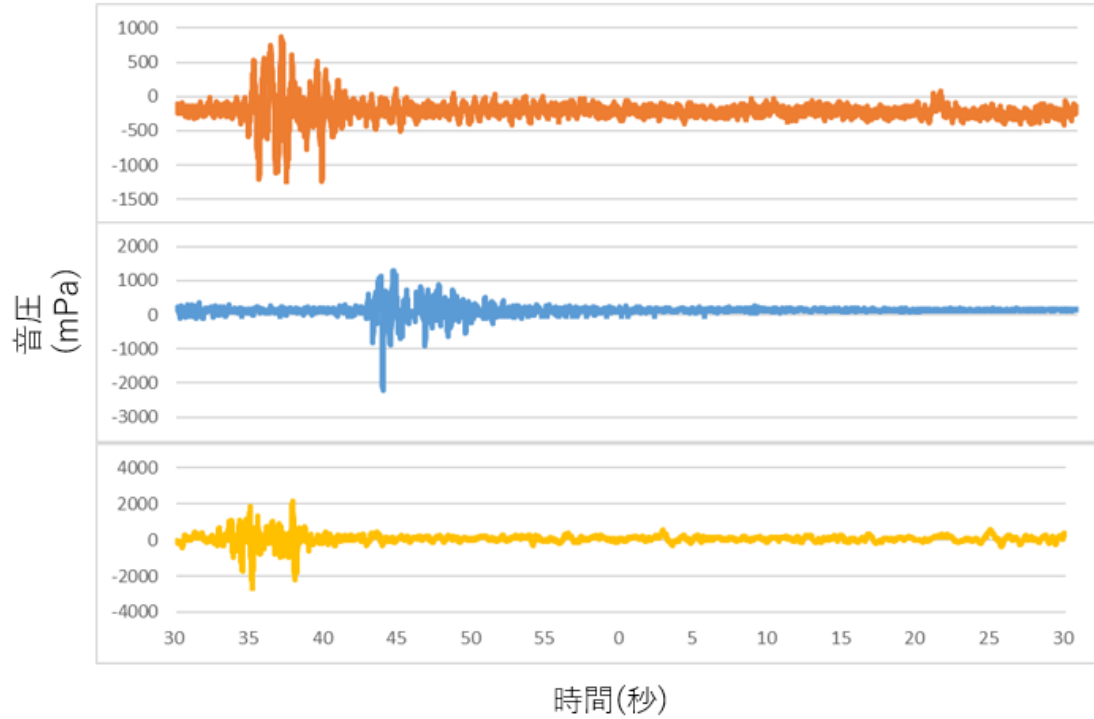
最後に、論文執筆にあたってアドバイスをくださった西川泰弘助教、同じ研究室のメンバーとしてともに研究に取り組み、アドバイスを頂いた同輩の皆様、ならびに山本研究室の皆様心より感謝します。

参考文献

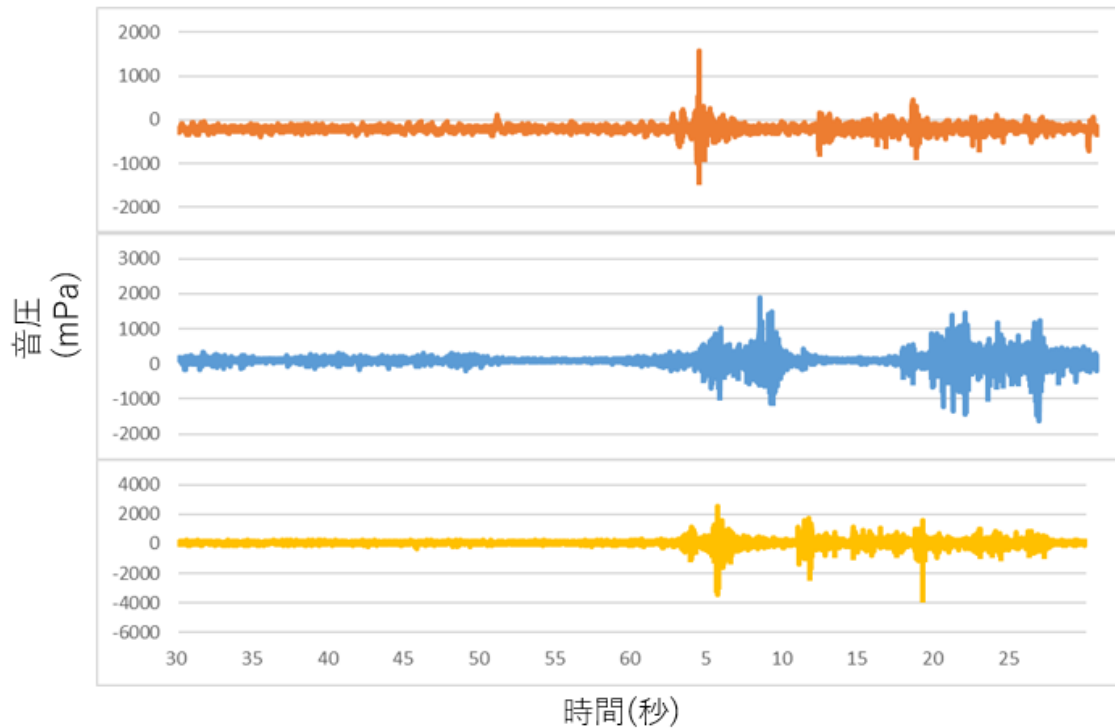
- [1] 田平誠, “インフラサウンドの計測と伝搬,” 日本音響学会誌 63 卷 8 号, 428-433, 2007.
- [2] 山本真行, “複合型インフラサウンドセンサー面的展開による津波防災情報伝達ネットワークの構築,” 公益財団法人 セコム科学技術復興財団 研究報告書, 2020.
- [3] Y. Ishihara, M.-Y. Yamamoto, T. Murayama, T. Matsushima, M. Kanao, Long-Term Variations in Infrasound Signals Observed at Syowa Station, Antarctica:2008-2014, *Inframatics*, 2017, 3, 1-10, 2017.
- [4] 気象庁, “過去の気象データ検索,” <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>, 2022/2/18 閲覧.
- [5] 高橋幸弘, “フィリピンにおける極端気象の監視・情報提供システムの開発,” 2017.
- [6] 齋藤耕, “電磁界アンテナおよびインフラサウンドセンサを用いた雷位置探知システムの構築,” 平成29年度 高知工科大学 修士論文, 2018.
- [7] 山本大誠, “雷鳴インフラサウンドの多地点観測によるエネルギー推定の試み,” 2019年度 高知工科大学 卒業研究, 2020.
- [8] パシコ貿易株式会社, “風速センサー Onset社 気象観測用スマートセンサー,” <https://www.pacico.co.jp/archives/1250>, 2022年2月18日閲覧.
- [9] パシコ貿易株式会社, “雨量センサー Onset社 気象観測用スマートセンサー,” <https://www.pacico.co.jp/archives/1236>, 2022年2月18日 閲覧.
- [10] T. Farges, “Characteristics of infrasound from lightning and sprites near thunderstorm area,” *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 115, A00E31, 2010.
- [11] 勝. 若松, 憲. 堀井, “雷放電路の音響観測法,” 日本音響学会 誌 49卷 7 号, 1993.
- [12] H. Saito, T. Yamamoto, K. Nakajima, K. Kuramoto, M.-Y. Yamamoto, “Identification of the infrasound signals emitted by explosive eruption of Mt. Shinmoedake by three-dimensional ray tracing,” *Journal of the Acoustical Society of America* 149, 591, 2021.

付録

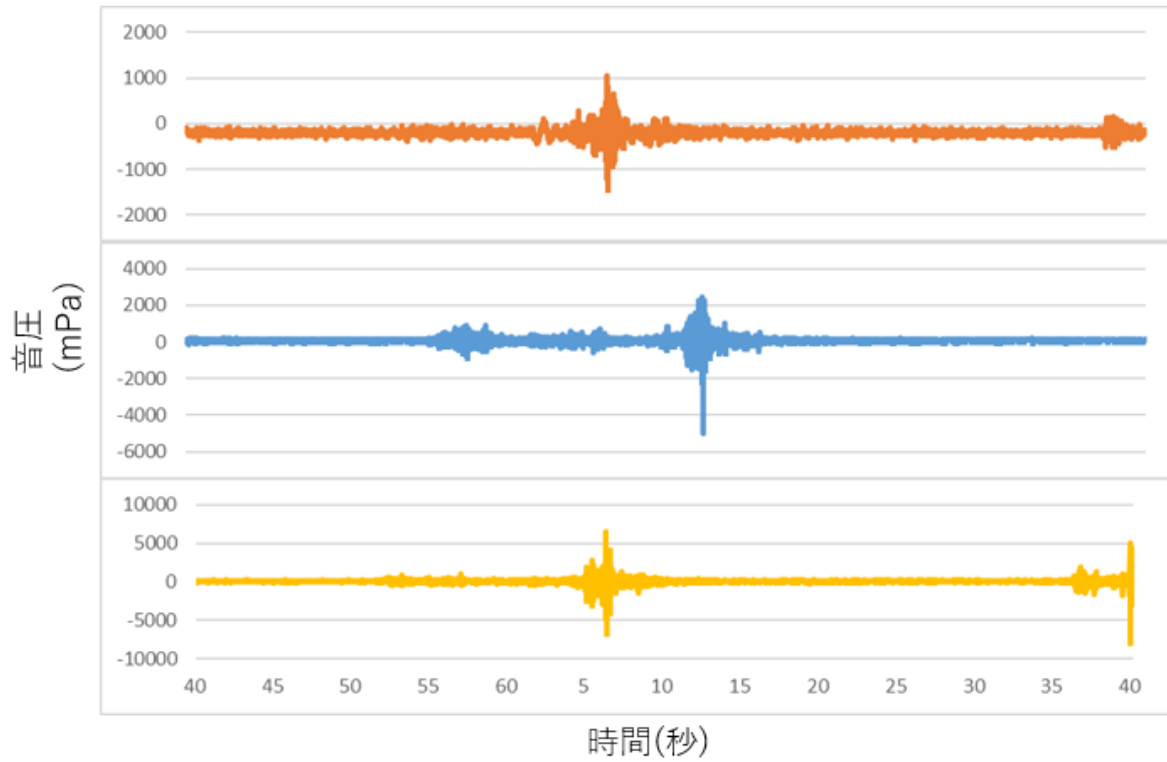
3地点検出を閾値1000 mPaで行い、検出した11件のイベントについて記載する。オレンジ色が高知工科大学、青色が佐岡、黄色が香美市防災倉庫を示す。



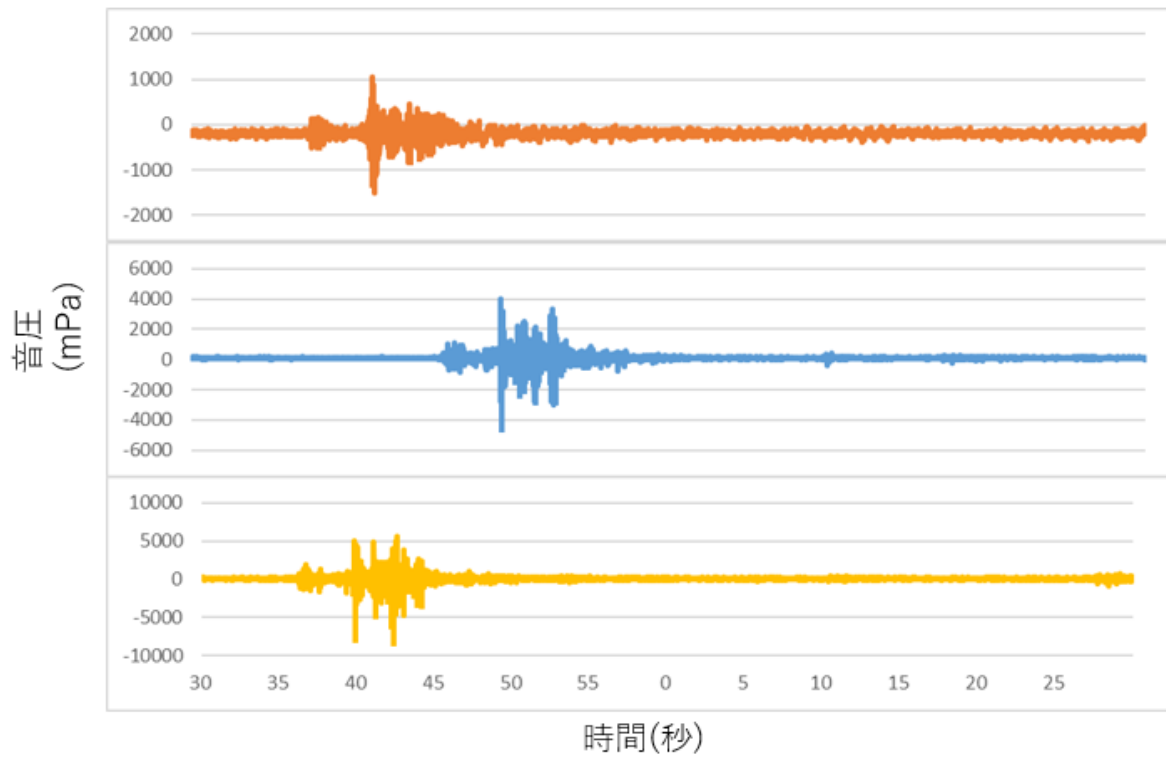
図F 1. 検出イベント1(2021年2月8日12時6分30秒から)



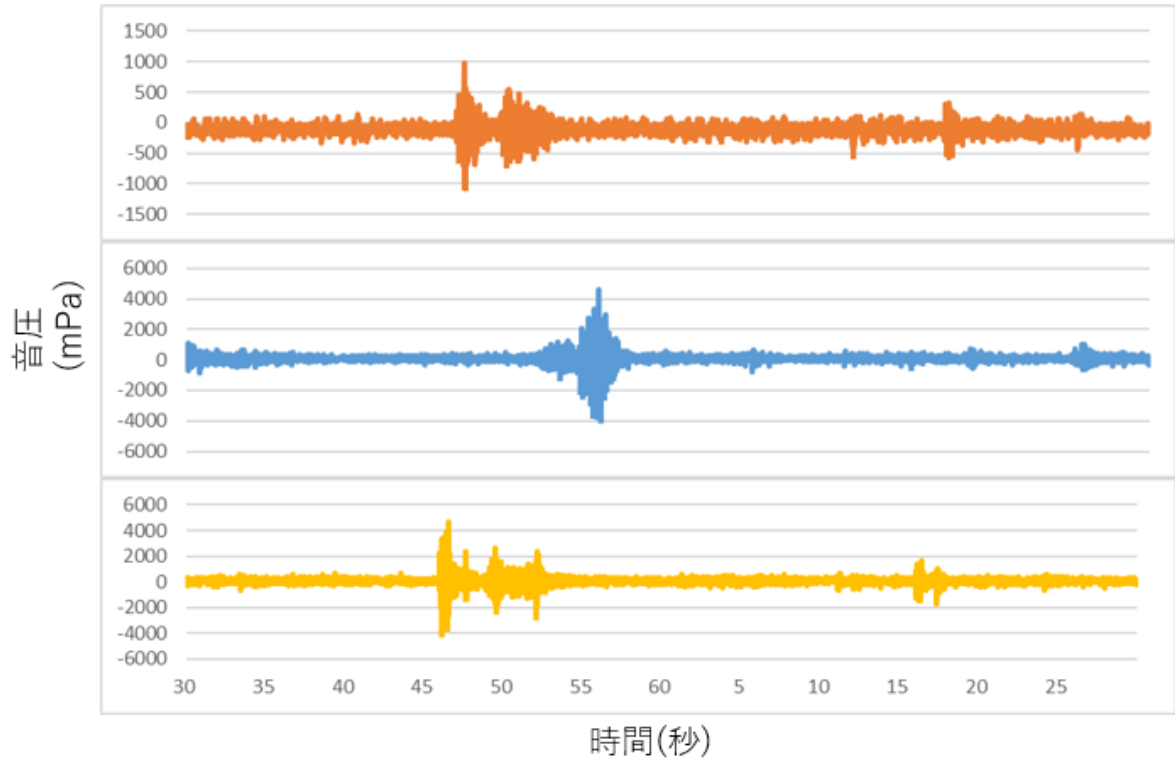
図F 2. 検出イベント2(2021年7月12日15時28分30秒から)



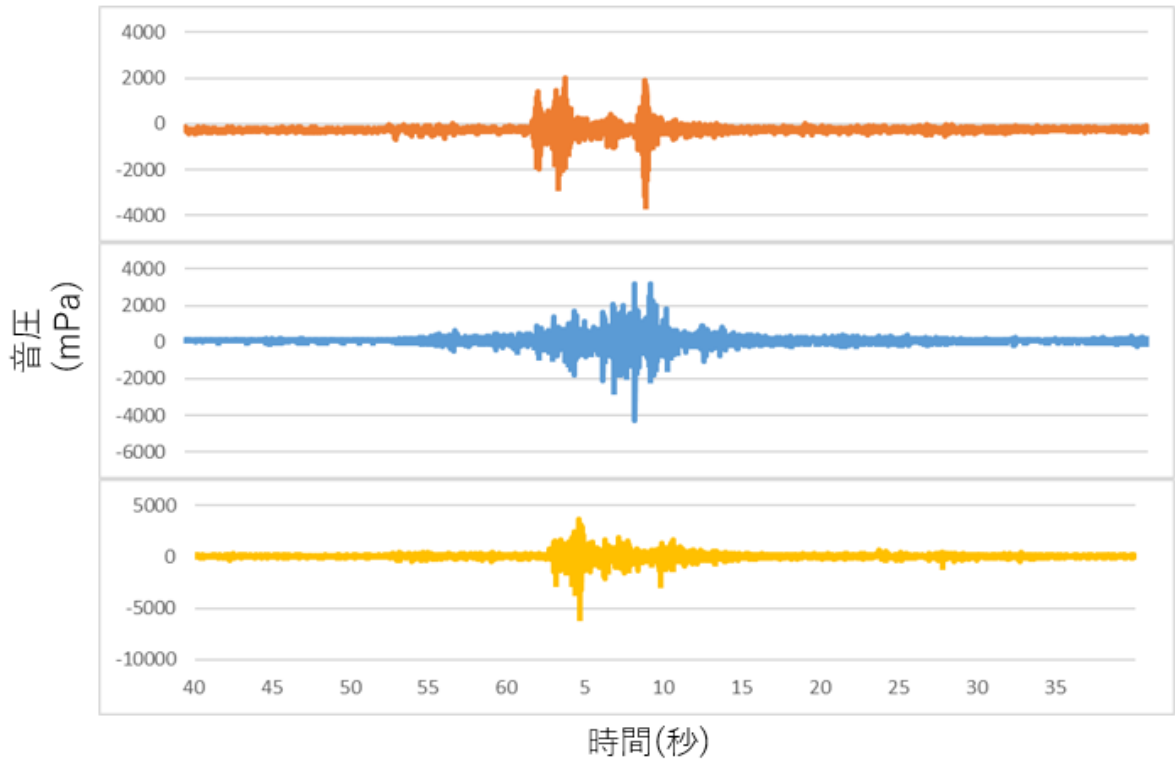
図F 3. 検出イベント3(2021年7月12日15時39分40秒から)



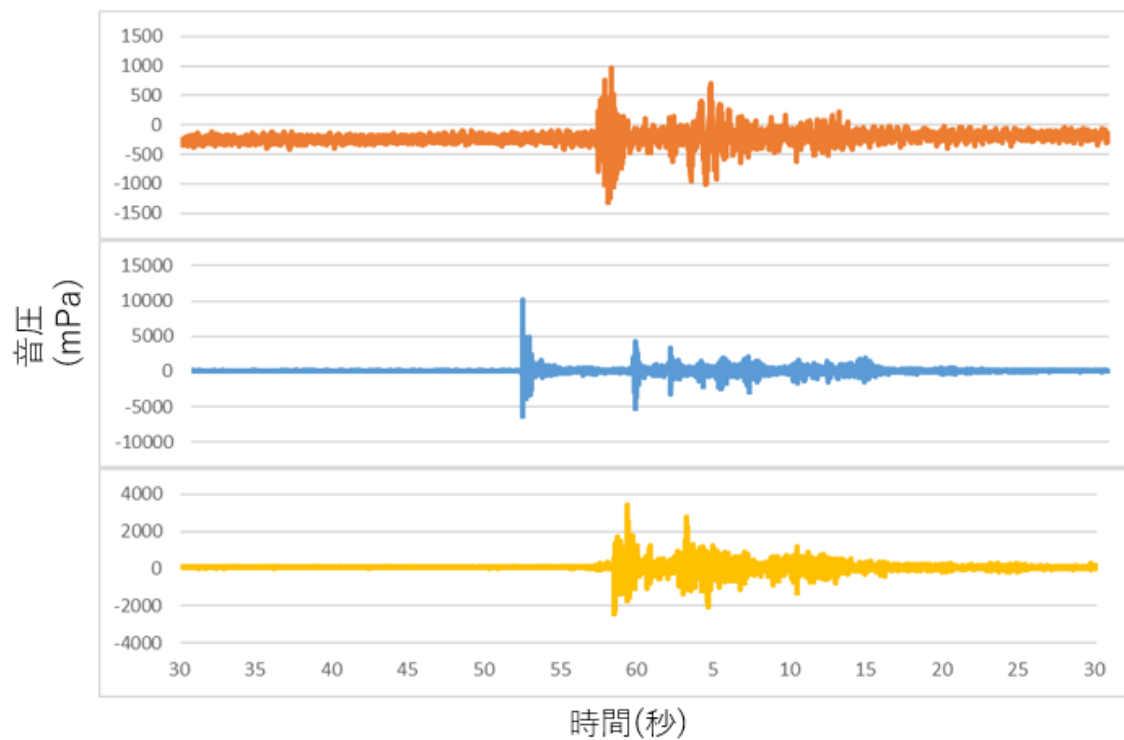
図F 4. 検出イベント4(2021年7月12日15時40分30秒から)



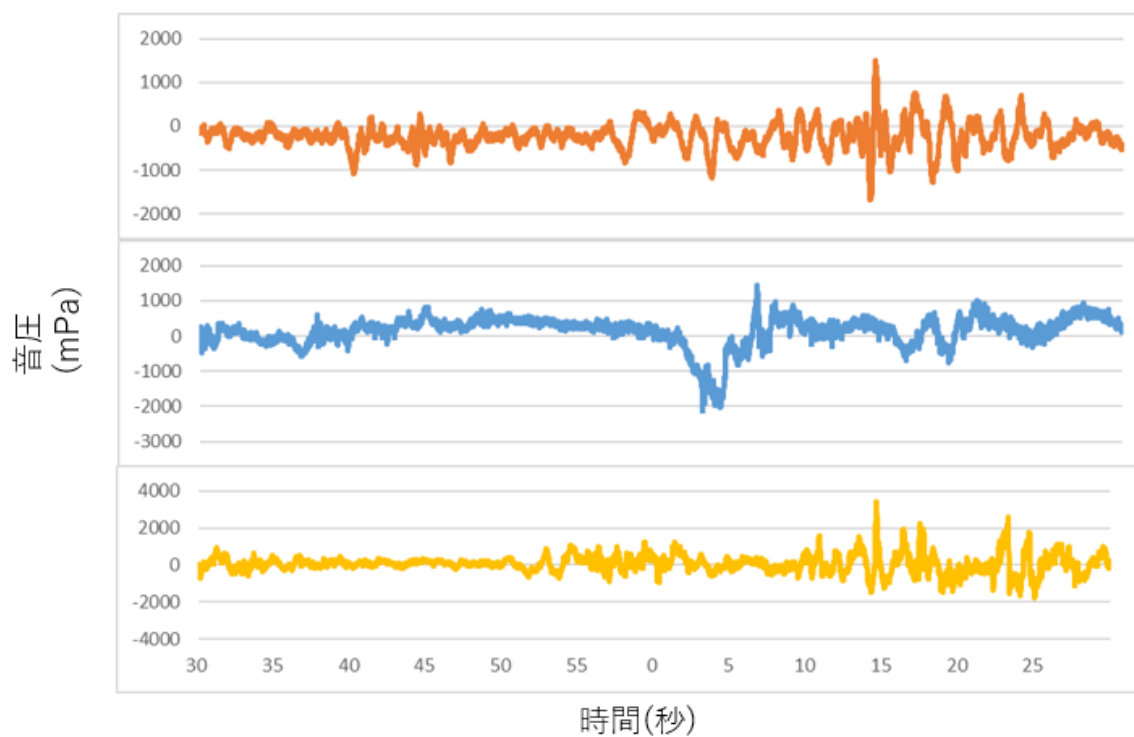
図F 5. 検出イベント5(2021年7月14日14時1分30秒から)



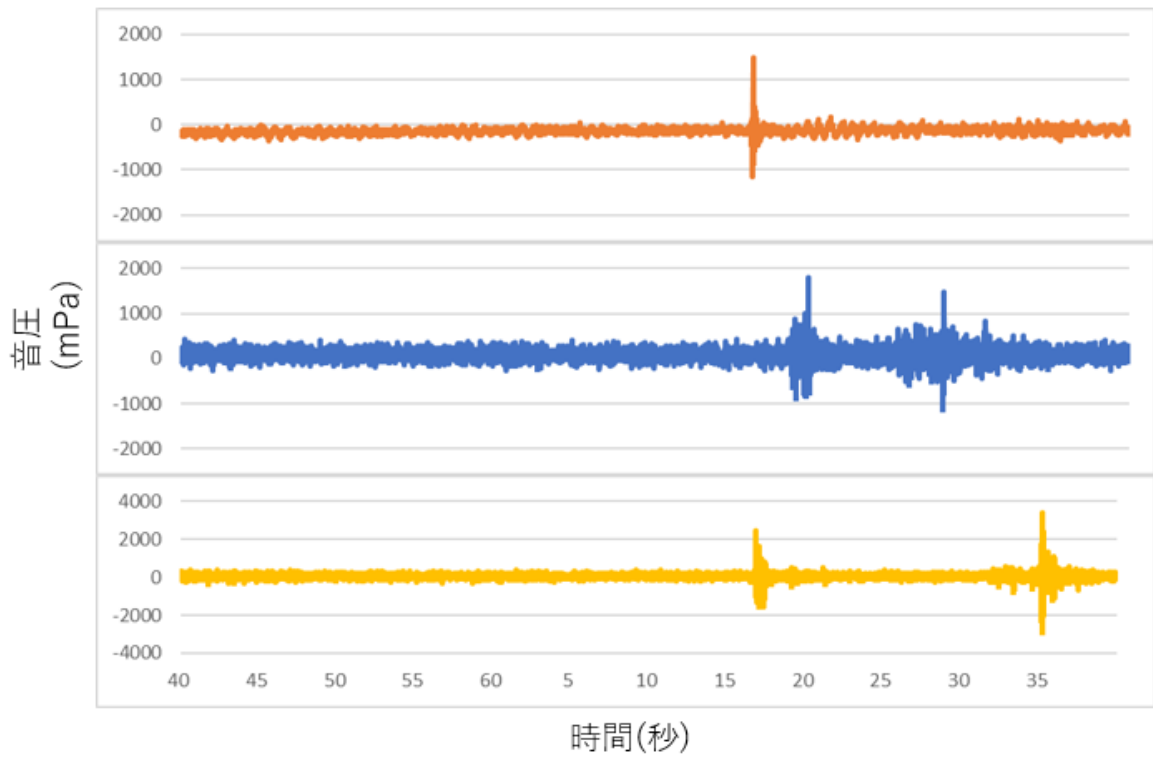
図F 6. 検出イベント6(2021年7月14日14時37分40秒から)



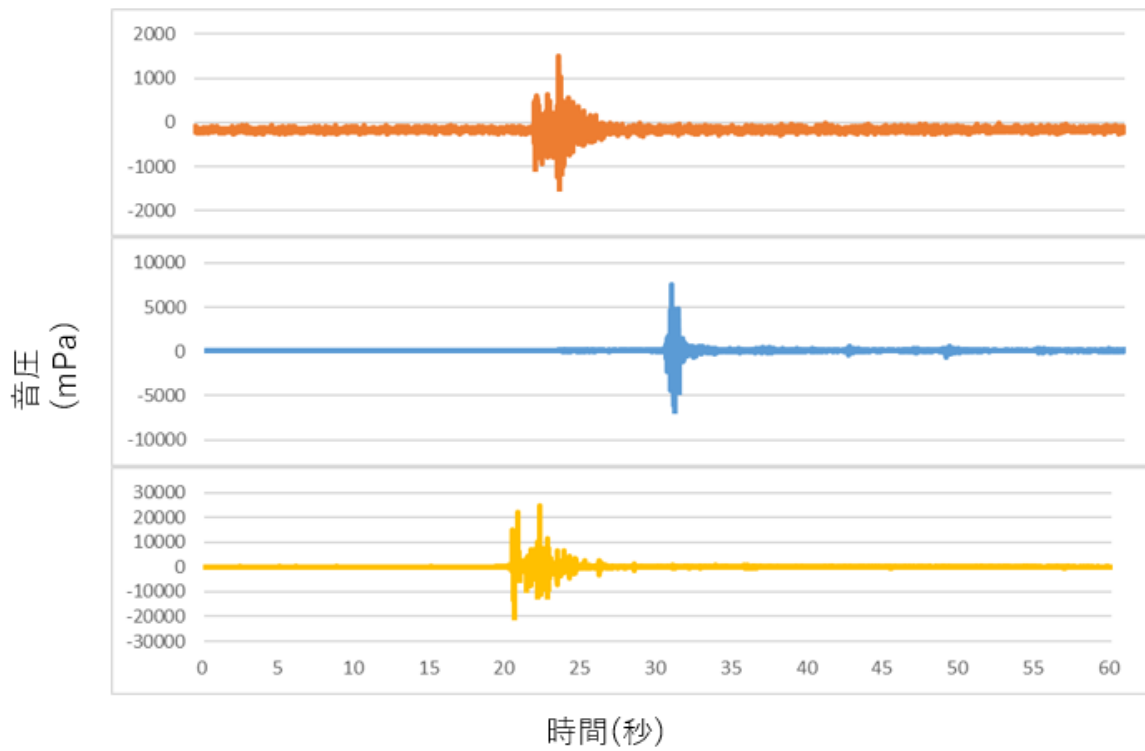
図F 7. 検出イベント7(2021年7月15日10時31分30秒から)



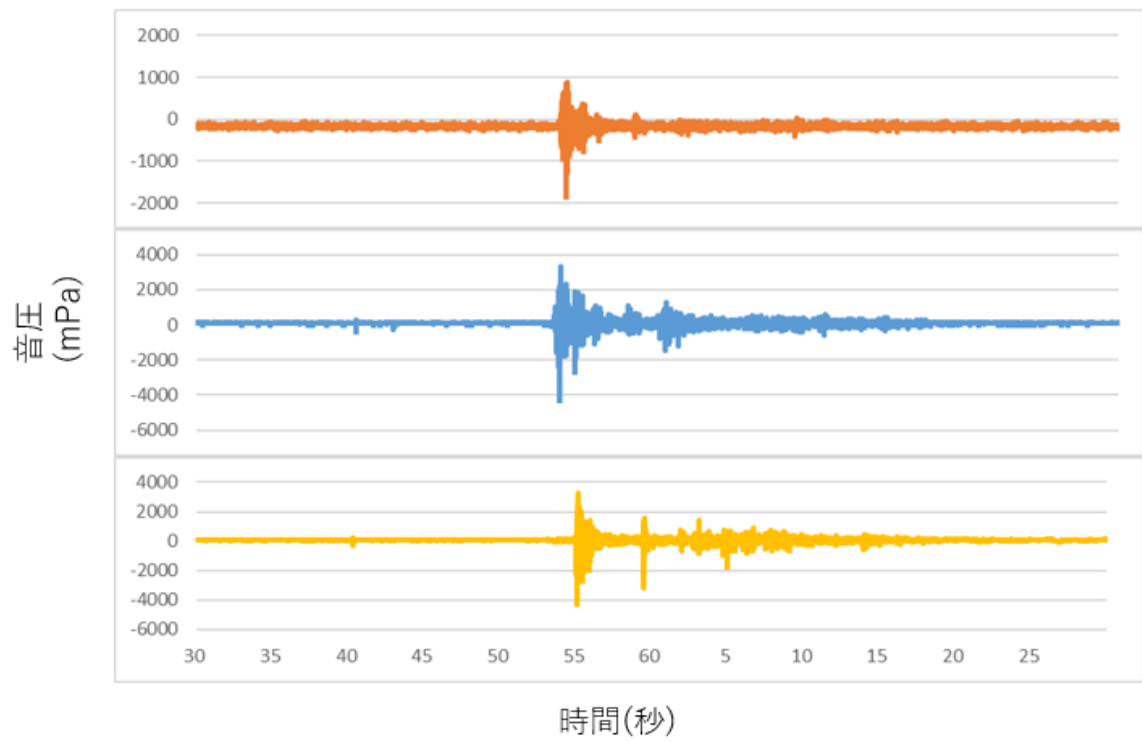
図F 8. 検出イベント8(2021年8月13日10時57分30秒から)



図F 9. 検出イベント9(2021年8月19日14時26分40秒から)



図F 10. 検出イベント10(2021年9月3日7時37分0秒から)



図F 11. 検出イベント11(2021年9月3日21時6分30秒から)