

# 卒業研究報告書

気象の変化に対応したインフラサウンド波形の  
計測波形について

---

## 報告者

学籍番号: 1240009

氏名: 市野 駿

---

## 指導教員

山本 真行 教授

---

令和6年2月16日

高知工科大学 システム工学群 航空宇宙工学専攻

第一章	序論.....	1
1.1	研究背景.....	1
1.2	目的.....	1
第二章	インフラサウンドセンサについて.....	2
第三章	手順.....	4
3.1	波源の特定.....	4
3.1.1	気象庁   突風事例一覧 (jma. go. jp).....	4
3.1.2	気象庁   過去の気象データ検索 (jma. go. jp) .....	5
3.1.3	あなたの生活情報   過去の雷観測 (kakutyoutakaki. com) .....	6
3.1.4	過去の天気(気象衛星・2021年06月) - 日本気象協会 tenki. jp.....	7
3.2	波形の確認.....	8
第四章	観測結果.....	9
4.1	突風の影響が大きいと考えられる事例.....	9
4.1.1	2023年7月12日 行方市の事例 (17:00~18:00) .....	9
4.1.2	2021年11月30日 尾鷲市・熊野市の事例 (23:00~24:00) .....	11
4.1.3	2021年9月26日 尾鷲の事例 (0:20~1:10) .....	13
4.1.4	2021年8月23日 室戸岬の事例 (6:40~7:40) .....	15
4.2	豪雨の影響が大きいと考えられる事例.....	19
4.2.1	2019年6月27日 室戸岬の事例 (22:00~23:00) .....	19
4.3	落雷の影響が大きいと考えられる事例.....	21
4.3.1	2021年8月19日 足摺岬の事例 (3:00 から 4:30) .....	21
4.3.2	2022年8月31日 黒潮町 馬荷の事例 (16:30~16:40) .....	23
4.4	複数のイベントが連続している事例.....	25
4.4.1	2023年6月2日 安芸市の事例 (8:00~10:00) .....	25
4.4.2	2023年6月2日 鹿嶋の事例 (16:30~18:30) .....	27
第五章	考察.....	30
5.1	観測結果からわかること.....	30
5.2	周波数に対する検証.....	30
第六章	結論.....	33
謝辞.....		34
参考文献.....		35

# 第一章 序論

## 1.1 研究背景

インフラサウンドとは、人間の可聴下限よりも低周波の圧力波であり、特に 20 Hz 以下の音波のことを指す。電磁波を波長で分類した場合、可視光線の下限周波数以下を赤外線 (infrared) と呼ぶが、それと同様に可聴下限以下の周波数の音をインフラサウンド (infra-sound) と呼ぶ。これら波長の長い音波は減衰の影響を受けづらく、距離が離れた状態であっても観測が可能である。

インフラサウンドの発生要因は多岐にわたり、火山の噴火・落雷・突風・海洋波浪・氷雪・土砂崩れ・雪崩・落雷や雲間放電・地震やそれに伴う津波などの自然現象などが波源として考えられる。自然現象だけでなく、工場騒音や風力発電・自動車交通などの比較的小規模なものから、核実験や化学爆発・人工物の超音速飛行や大気圏再突入時の衝撃波などの大規模なものまで、人工的な波源も多数存在する。

また、近年では CBTTO (Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organization) によって国際核実験探知網の整備・運用に関して核実験のような人工的爆発現象の実施及び規模の推定のためにインフラサウンドが注目されている背景もある。その過程において、観測された波形が人工的な事象を波源とするものなのか、それとも地球物理学上の自然現象によるものなのかを推定し、分類を行う必要がある。ここで、自然現象を波源とする波形を同定することができれば、災害の発生の検知や規模の推定を行うことができるとも考えられ研究が進められている。

## 1.2 目的

筆者は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) に所属している。以降は本研究室と呼称する。

本研究室では 2024 年 2 月現在、日本全国 31 か所に津波観測を主目的としたインフラサウンド用のセンサを設置しており、機器のトラブルがない限り常に各地点で観測が続けられている。各地点のセンサで観測された波形が本研究室の専用サーバーに送信され、準リアルタイムで確認できる状態にある。また、これらのセンサを設置し始めた 2016 年 8 月の計 5 台から現在の計 31 台まで順次拡充しており、過去 5～7 年分の観測データについて記録があり確認が可能な状態にある。

研究室に蓄積されたデータ群を用いて突風・落雷・豪雨の三種類のイベントを注視し、それらの特徴や類似点・共通点や相違点を見つけることが本研究の目的である。

## 第二章 インフラサウンドセンサについて

本研究室では、株式会社 SAYA と共同開発したインフラサウンドセンサ SAYA 製 ADXIII-INF01LE(以下 INF01)を、主な観測対象を津波によるインフラサウンドとして全国 31 か所に設置している。その他にも全国インフラサウンド観測コンソーシアムという団体を構成する全国の各研究機関・大学がインフラサウンド観測や、他の計測の参照情報を目的としてセンサを設置している。センサの位置は以下の図 2-1 に示した通りである。

さらに、本研究室では 2019 年に新たに株式会社 SAYA と共同で低コストインフラサウンドセンサ IDXIII-INF04LE(以下 INF04)の開発を行った。INF01 は膜面式であり、主に津波の周波数帯である 0.1Hz 以下を観測するために開発された。それと比較して INF04 はマイクロホン式であり、低コスト・小型化のほかに周波数 0.1Hz 以上の人間の可聴域に近い帯域のインフラサウンドも観測することが可能である。それぞれの外観は図 2-2 と図 2-3 に示す。

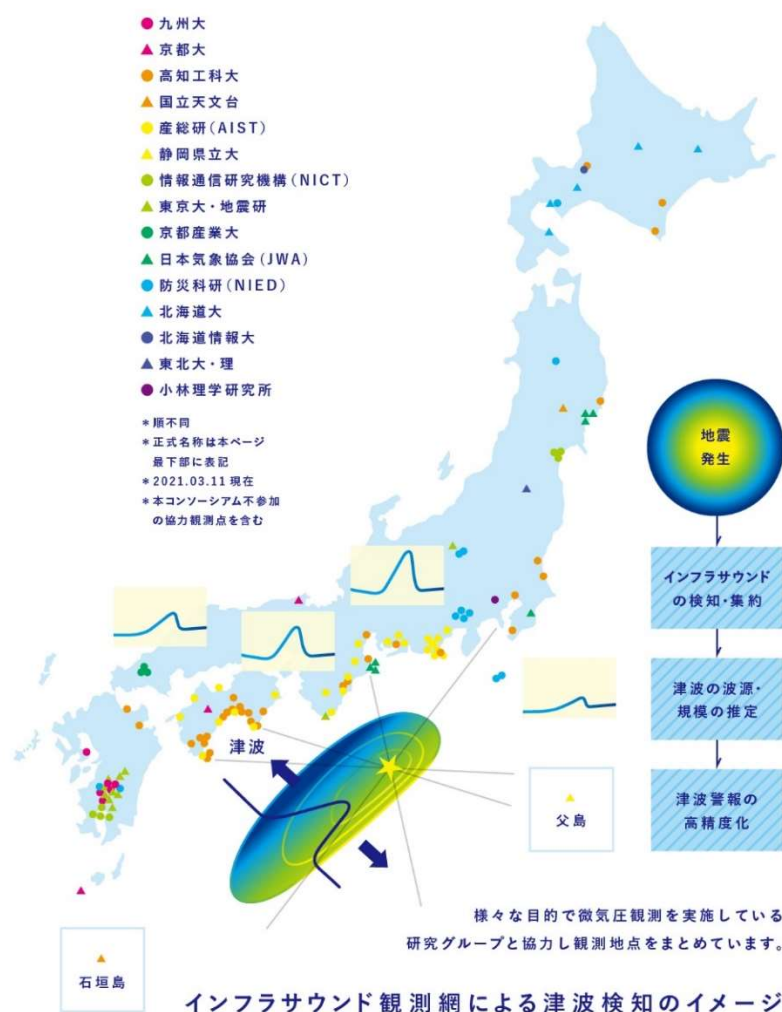


図 2-1 全国インフラサウンド観測コンソーシアム リーフレットより引用



図 2 - 2 SAYA 製インフラサウンドセンサ ADXIII-INF01LE

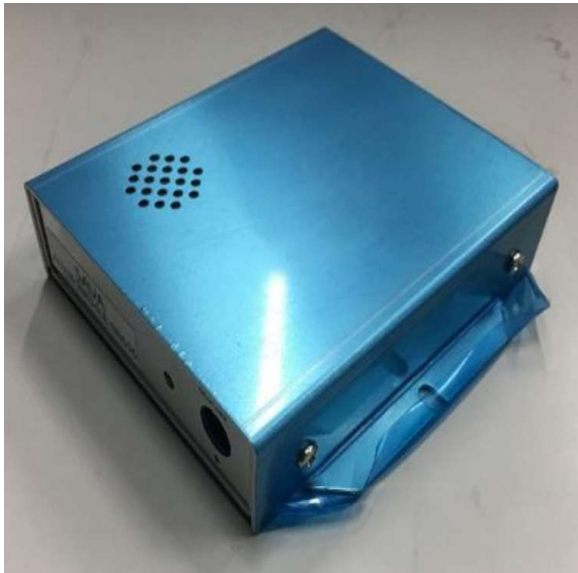


図 2 - 2 SAYA 製インフラサウンドセンサ ADXIII-INF04LE

## 第三章 手順

### 3.1 波源の特定

本研究室では過去 5～7 年間にわたり、全国各地でインフラサウンド波形の観測を行ってきた。第三章でも述べた通りその蓄積されたデータ量は膨大な量である。大量のデータから何らかのイベントによる波形を抽出するにはそれらが観測されていると思われる時刻・地域の観測点の目星をつける必要がある。

観測を行ってきた研究者個人がデータを参照して当該地域で経験した極端気象などの際に記録を行った例もあるが、それだけではイベントの裏付けとしては十分ではない。そのため裏付けとなる記録を別途確認する必要がある。本研究では、そのために気象庁が記録し公開しているオープンデータや、それを利用した有志によるウェブサイトを用いた。詳細は以下の通りである。

#### 3.1.1 気象庁 | 突風事例一覧 (jma.go.jp)

1961 年以降の竜巻・ダウンバースト等による被害が発生した事例を把握し、記録が残されている。本研究において重要な期間である 2007 年以降に発生した突風事例についてはすべて収録されている。ウェブサイト上での閲覧のほかに、CSV ファイルにまとめたデータのダウンロードもできる。

事例は図 3-1 のように表示される。この中からインフラサウンドセンサが設置してある地域に比較的近い場所で発生したイベントを確認し、日時と風速の記録を各イベントごとに確認、抽出する。

検案件数 : 2751件 

現象区別 ▲	発生日時 ▲	発生場所 ▲	日本版改良藤田スケール※		主な被害状況				
			F/JEF ▲	風速 ▲	死者	負傷者	住家全壊	住家半壊	
竜巻	2024年01月24日 11時40分頃	青森県つがる市	1	約50m/s	調査中	調査中	調査中	調査中	詳細 ▲
不明 (その他)	2023年12月22日 13時30分頃	福井県坂井市	1	約40m/s	調査中	調査中	調査中	調査中	詳細 ▲
不明 (その他)	2023年12月21日 15時10分頃	石川県羽咋市	0	約30m/s	調査中	調査中	調査中	調査中	詳細 ▲
不明 (その他)	2023年11月28日 18時20分頃	新潟県糸魚川市	0	約35m/s	0	0	0	0	地図 ▲
不明 (その他)	2023年11月18日 11時15分頃	香川県観音寺市	0	約30m/s	0	0	0	0	地図 ▲
竜巻	2023年11月01日 23時30分頃	秋田県秋田市	0	約35m/s	調査中	調査中	調査中	調査中	詳細 ▲
不明 (その他)	2023年11月01日 19時00分頃	北海道沙流郡平取町	0	約35m/s	調査中	調査中	調査中	調査中	詳細 ▲
竜巻	2023年10月27日 08時45分	長崎県 (海上)	不明	不明	0	0	0	0	地図 ▲
竜巻	2023年10月21日 15時20分頃	富山県黒部市	1	約40m/s	0	0	0	0	地図 ▲
不明 (その他)	2023年10月20日 04時00分頃	青森県西津軽郡深浦町	1	約40m/s	0	0	0	0	地図 ▲
竜巻	2023年10月15日 07時06分	愛媛県 (海上)	不明	不明	0	0	0	0	地図 ▲
不明 (その他)	2023年10月15日 02時00分頃	島根県出雲市	1	約50m/s	0	0	0	0	地図 ▲
竜巻	2023年10月05日 10時20分頃	富山県黒部市	0	約30m/s	調査中	調査中	調査中	調査中	詳細 ▲

※ 2016年3月までは藤田スケール (F)、2016年4月以降は日本版改良藤田スケール (JEF) です。

図 3 - 1 ウェブサイト上に示された突風の事例一覧の様子

### 3.1.2 気象庁 | 過去の気象データ検索 (jma.go.jp)

日本全国の気象台・測候所・気象観測所・特別地域気象観測所・アメダス観測所・南極昭和基地の過去の観測データを確認できる。

突風・豪雨のイベント2種と落雷のものに分けて異なるアプローチを行った。

まず突風・豪雨の2種に対しては、事前に発生したことが確認できているイベントに対して確認を行うために用いた。確認できたイベントに対し、県・地域・日付を入力し、10分ごとの値を表示する。気象庁アメダスの観測点の各観測地点の機材運用状況にもよるが、時刻ごとに気圧・降水量・気温・湿度・風向・風速などの情報が表示できる。ここから各イベント当時の風速・降水量などの確認を行った。

前年 前月 前日 翌日 翌月 翌年

日ごとの値 1時間ごとの値 10分ごとの値

尾鷲(三重県) 2021年11月30日(10分ごとの値)

時分	気圧(hPa)		降水量(mm)	気温(°C)	相対湿度(%)	風向・風速(m/s)				日照時間(分)
	現地	海面				平均	風向	最大瞬間	風向	
00:10	1025.2	1027.3	--	9.3	88	1.5	北西	2.5	西	
00:20	1025.1	1027.2	--	9.0	90	1.2	西南西	1.7	西北西	
00:30	1025.0	1027.1	--	9.3	90	2.3	西	2.9	西	
00:40	1024.9	1027.0	--	9.5	88	1.8	西	2.4	西	
00:50	1024.8	1026.9	--	9.1	91	1.1	南西	1.7	西南西	
01:00	1024.7	1026.8	--	9.2	90	1.3	西南西	1.8	西南西	
01:10	1024.4	1026.5	--	9.1	90	1.7	西	2.3	西	
01:20	1024.5	1026.6	--	9.2	90	2.3	西	3.8	西南西	
01:30	1024.4	1026.5	--	9.2	88	2.3	西南西	4.0	西南西	
01:40	1024.4	1026.5	--	8.8	92	0.3	西	1.1	西南西	
01:50	1024.3	1026.4	--	8.9	91	1.6	西南西	2.6	西南西	
02:00	1024.3	1026.4	--	8.9	90	2.3	西南西	2.9	西	
02:10	1024.2	1026.3	--	9.1	89	2.1	西	2.8	西	
02:20	1024.2	1026.3	--	8.7	90	1.5	西南西	2.4	西南西	
02:30	1024.0	1026.1	--	8.6	90	2.3	西	3.3	西	
02:40	1024.0	1026.1	--	8.7	89	1.9	西南西	3.2	西南西	

図3-2 10分ごとに示された過去の天候の様子

落雷のイベントに対しては、落雷が発生している期間を確認するために用いた。「過去の気象データ・ダウンロード」欄から地点・項目を選び「特定の期間を複数年分表示する」を選択する。地域は本研究室で設置したセンサが多数設置されている高知県に限定し、期間は発生した総数が多いと考えられる8月と9月のものについて2021年から2023年の3年間に絞った。

これらをCSVファイルとしてダウンロードし、落雷が発生していると考えられる日時を絞り込む。重要になるのが「天気」の欄で数値が15のものが落雷にあたる。そこから大まかに落雷が発生した日時が確認できる。図3.3では2021/8/7の18:00台と19:00台の各一時間の範囲内で気象庁基準による天候が雷であることが確認できる。

また、突風発生時での雨・雷などを含む他イベントの情報や、そのイベントがインフラサウンド波形に影響しているかの有無についても過去の気象データから参照した。

	高知	高知	高知	高知	高知	高知	高知
	高知	高知	高知	高知	高知	高知	高知
年月日時	天気	天気	天気	降水量(mr	降水量(mr	降水量(mr	降水量(mn
		品質情報	均質番号		現象なし情	品質情報	均質番号
2021/8/7 14:00	2	8	1	0	1	8	1
2021/8/7 15:00	2	8	1	0	1	8	1
2021/8/7 16:00	2	8	1	0	1	8	1
2021/8/7 17:00	2	8	1	0	1	8	1
2021/8/7 18:00	15	8	1	0	1	8	1
2021/8/7 19:00	15	8	1	0.5	0	8	1
2021/8/7 20:00	10	8	1	0	0	8	1
2021/8/7 21:00	10	8	1	0	0	8	1
2021/8/7 22:00	10	8	1	0.5	0	8	1
2021/8/7 23:00	10	8	1	0	0	8	1

図3 - 3 ダウンロードした CSV ファイルで確認できる天候の様子

### 3.1.3 あなたの生活情報 | 過去の雷観測 (kakutyoutakaki.com)

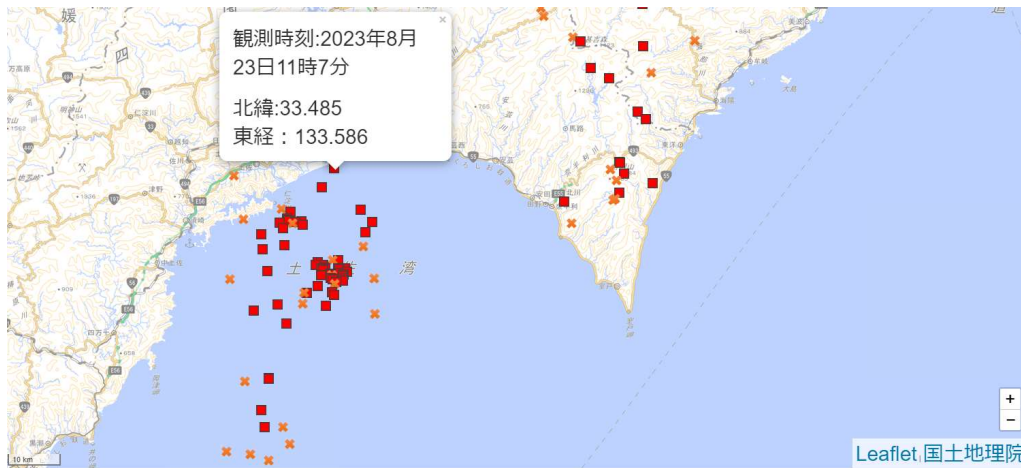
このウェブサイトは、気象庁が運用している雷観測システム LIDEN(LIghtning DEtection Network system)で観測されたものを表示している。

LIDEN は全国 30 か所の空港に設置されている雷に伴って発生する電磁波を受信する「検知局」と東京にある「中央処理局」によって構成される。雷から放射された電磁波を検知局のアンテナで受信し、信号から得られる波形と受信時刻を「中央処理局」へと送信する。中央処理局では各地から送られた情報をもとに雷の種類（雲間放電・対地放電）及び発生位置を算出する。これらの情報を地図上に表示しているのが本ウェブサイトである。

3.1.2 項で「過去の気象データ」の一覧から得た大まかな時刻から、発生した落雷の時刻を分単位で特定するために用いる。

図3 - 4 表示するする日時を指定する





2時間以内・・・✕: 雲間放電 ■: 落雷

図 3- 5 実際に表示される画面の様子。選択することで細かな発生時間・位置も確認できる

### 3. 1. 4 過去の天気(気象衛星・2021年06月) - 日本気象協会 tenki.jp

3. 1. 1 節で使用した気象庁の「過去の気象データ」と同様に用いることができる。ただし、細かい10分毎などの細かいデータは見られないが、降水量・風速だけでなく当時の天気も同時に表示することができる。また、気象衛星からの画像を見ることがもできる。

今回は気象庁のデータのみではわかりづらい台風の発生状況などの確認を行った。



図 3 - 6 過去の気象の表示方法。ここから各地域を選択



図 3 - 7 表示される衛星写真の様子

### 3.2 波形の確認

3.1 節で説明した手順の通りに各イベントの日時を判定した後、本研究室で構築した観測システムを用いてそれぞれに対応する波形を確認する。確認は Excel を用いてグラフを作成し行う。

## 第四章 観測結果

本章では、突風・豪雨・落雷の各イベントからそれぞれ複数例を抽出し、実際に観測で得られたデータ例を以下に示す。

### 4.1 突風の影響が大きいと考えられる事例

#### 4.1.1 2023年7月12日 行方市の事例 (17:00~18:00)

茨城県鹿嶋市のセンサで確認された波形を図4-1に示す。設置場所は図4-2に示した緯度・経度の位置である。当時の鹿嶋市の天候については表4-1の通りである。降水・落雷の情報はどちらも無く、風速も3m/sであり天候は比較的穏やかであったことが読み取れる。

しかし、鹿嶋市から西北西に20kmほど離れた行方市で17:20ごろに風速約35m/sのダウンバーストの発生が確認された。このダウンバーストが発生した範囲は幅約180m・距離約300mほどであり、突風そのものは鹿嶋市のセンサには届いていないと考えられる。

図4-2に縦線で17:20の時刻に印をつけた。20kmを音速でインフラサウンドが到来すると、約60sかかる。17:22前後から、センサの波形は-60000mPaから60000mPaまで周期10分ほどの正弦波のような形を描きながら上昇している。その後の17:30から17:35にかけての高い周波数成分については原因の特定には至らず、不明なままである。

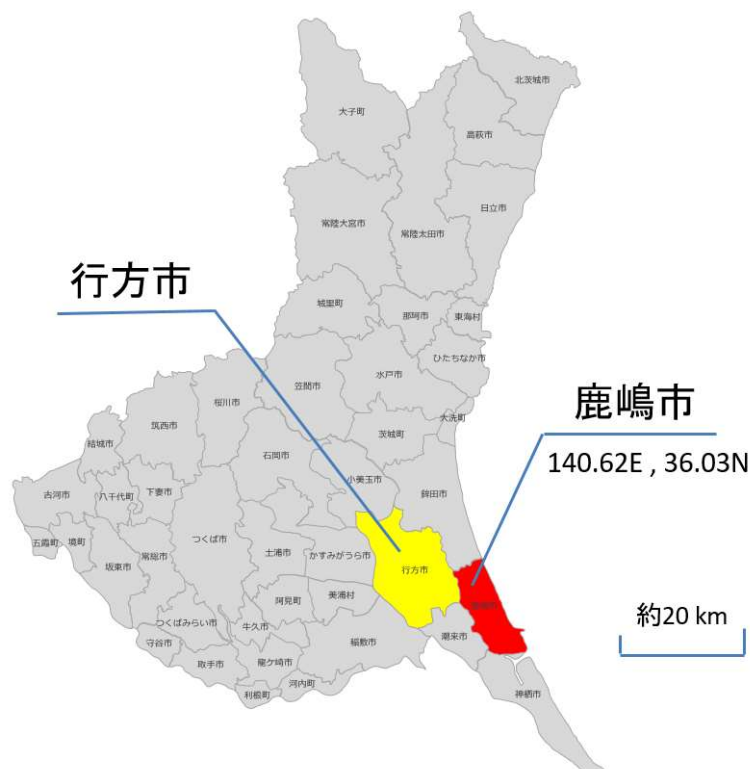


図4-2 行方市と鹿嶋市の位置関係(地図は PowerPoint で作るデザイン[7]から引用)

表 4 - 1 当時の鹿嶋市の天候状況(気象庁データ[2]により作成、以下同じ)

時刻	降水量(mm)	平均風速(m/s)	風向	最大瞬間風速(m/s)	風向
17:00	0	1.6	東	3.6	東
17:10	0	1.7	東北東	3	東北東
17:20	0	2.1	東北東	3.8	東北東
17:30	0	2	東北東	3.5	東
17:40	0	1.8	東北東	3	東北東
17:50	0	1.8	東北東	3.4	東北東
18:00	0	1.6	東北東	2.5	東北東
落雷情報	無し				
17:20頃	行方市	約35m/s			

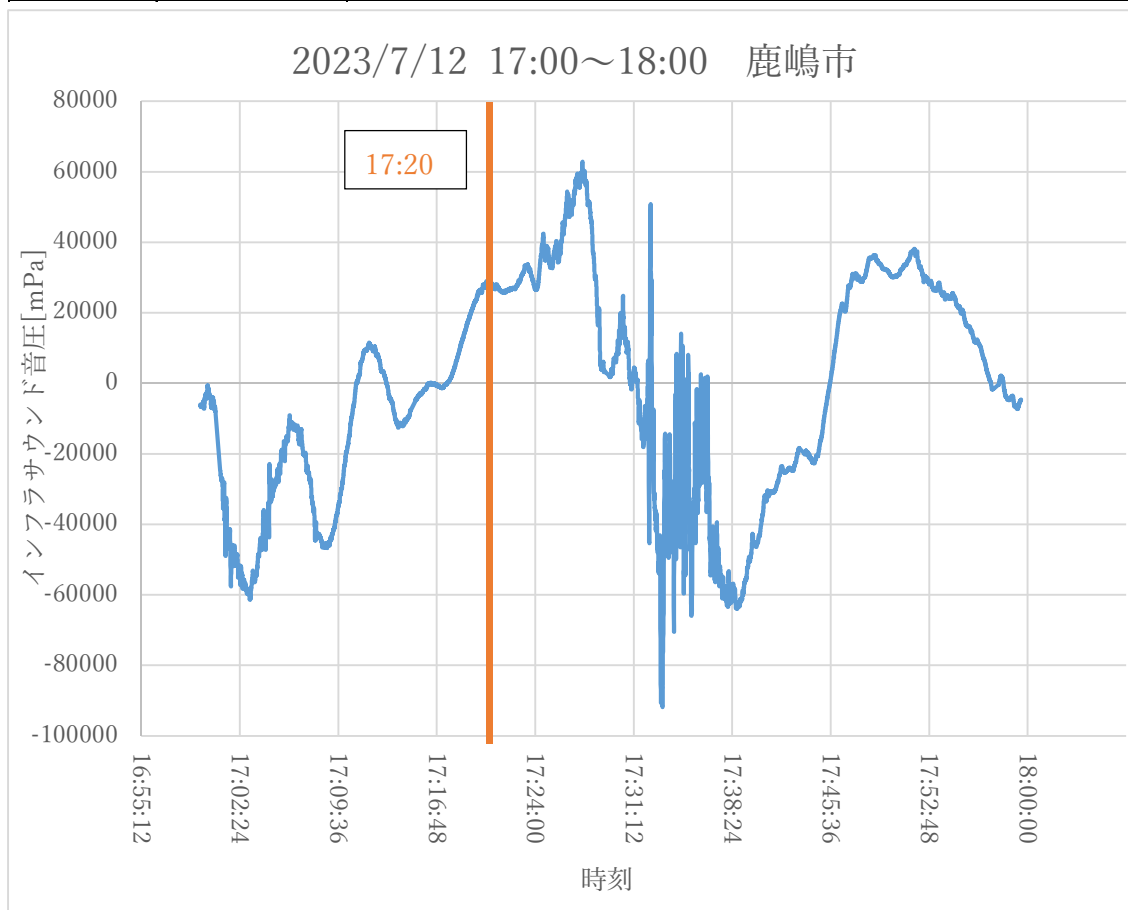


図 4 - 1 17:00~18:00 の間で確認されたインフラサウンド波形

#### 4.1.2 2021年11月30日 尾鷲市・熊野市の事例(23:00~24:00)

熊野と尾鷲はともに三重県の南部に隣り合って位置している。二つのセンサの設置位置は図4-3に示した通りである。

両地点ともに落雷については発生していない。熊野は、10分間降水量は1.5 mm以下でほぼ変化がないが瞬間最大風速は常に11 m/sから16 m/sの間の高い水準で推移している。その一方で、尾鷲では最大瞬間風速は23:50前後が19.8 m/sと最も高く、23:20時点で15.8 m/sである。平均風速は23:50が7.2 m/sと最も高く、他は高くとも5 m/s程度である。尾鷲の降水量については、23:30から23:40にかけて弱い雨が観測されている。その周辺で振幅が大きくなっているように見えるが、これらは風による影響が大きいと考えられる。

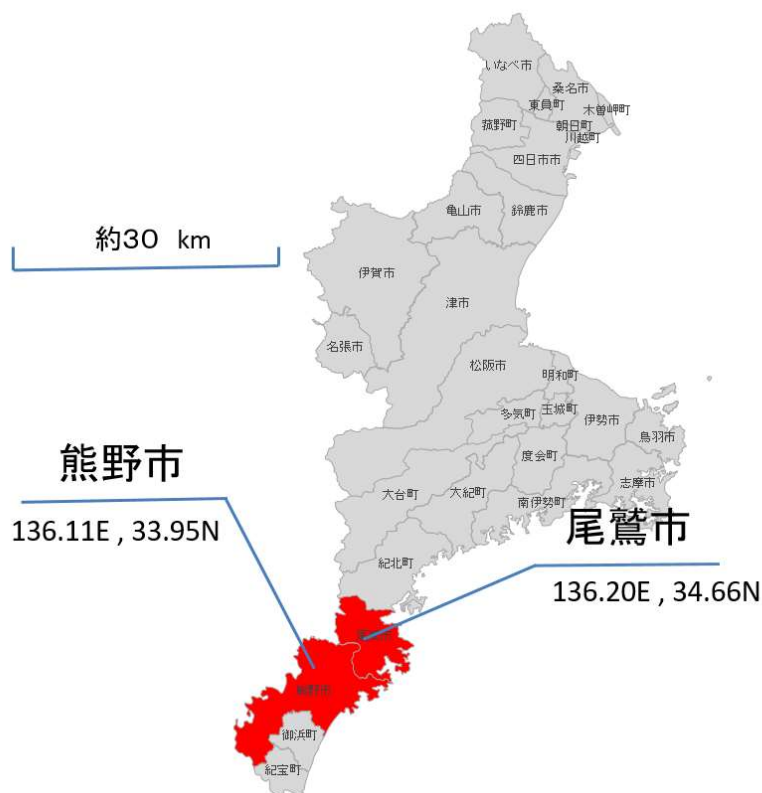


図4-3 尾鷲市と熊野市の位置関係

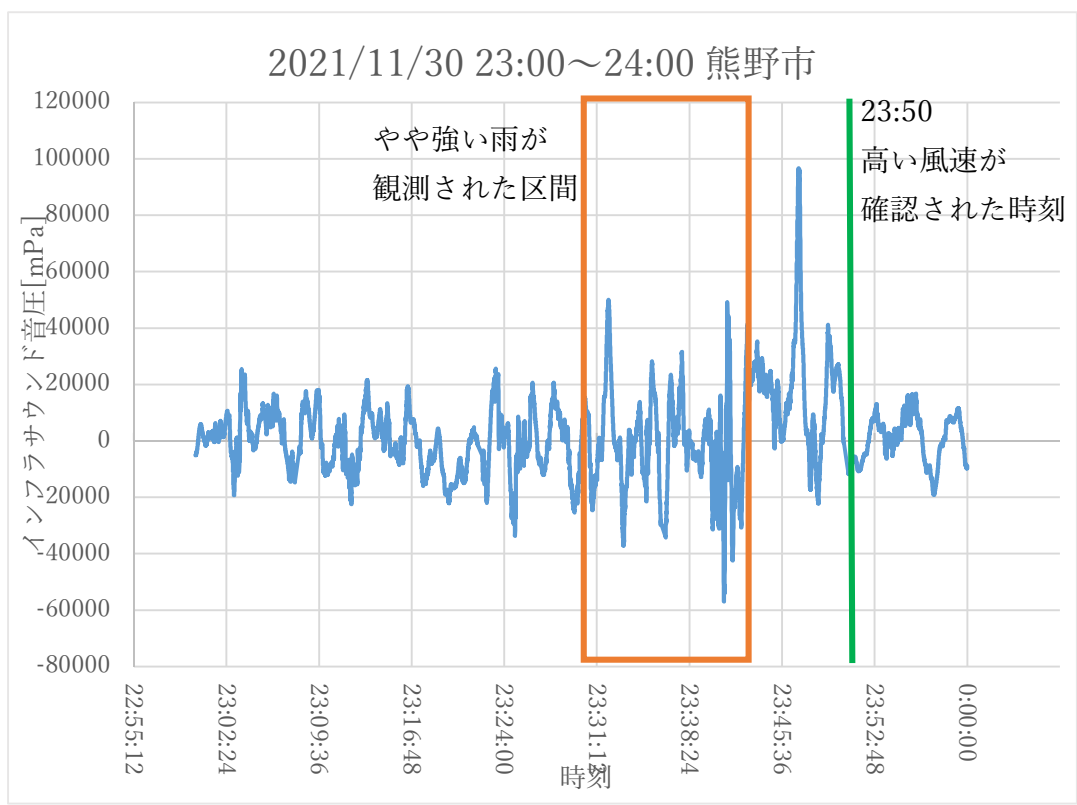


図 4-4 熊野市で観測されたインフラサウンド波形

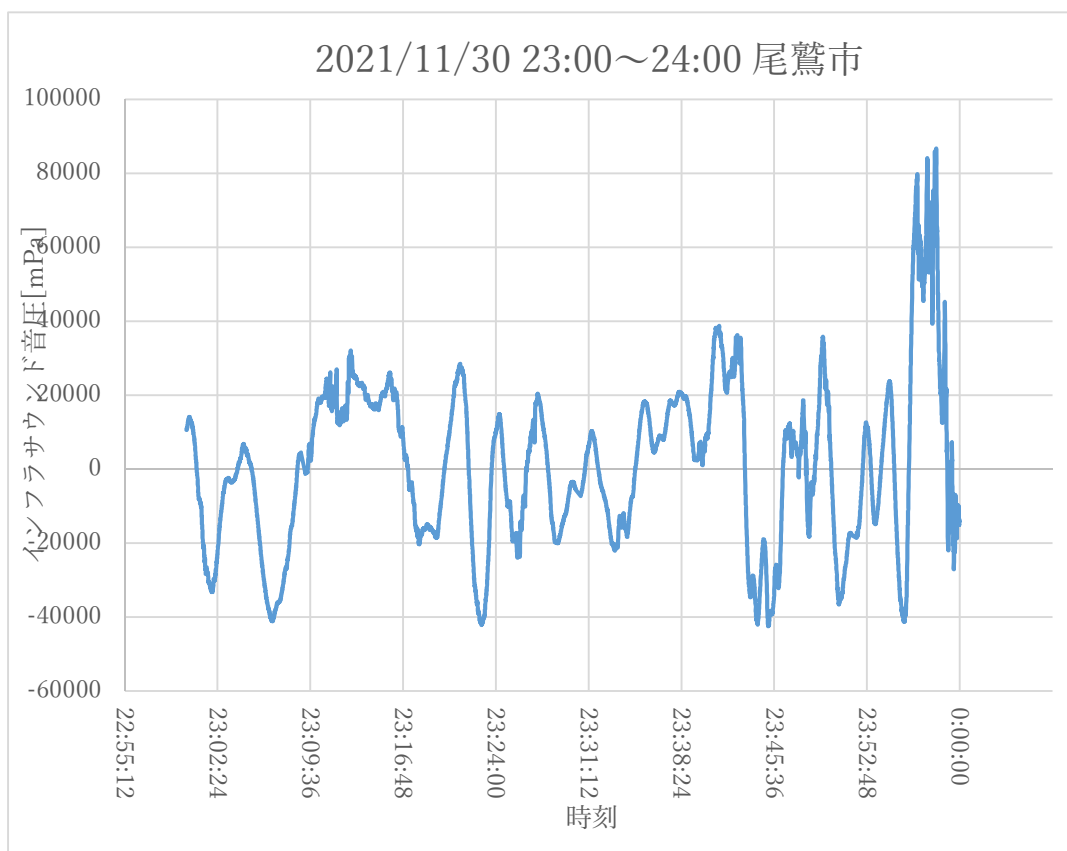


図 4-5 尾鷲市で観測されたインフラサウンド波形

表 4-2 当時の気象状況 (a)熊野 (b)尾鷲

(a)

時刻	降水量(mm)	平均風速(m/s)	風向	最大瞬間風速(m/s)	風向
23:00	0	5	東	11.5	東北東
23:10	0.5	5.1	東	12.5	東北東
23:20	0.5	5.6	東	17.7	南東
23:30	1.5	5.7	東	12.5	東南東
23:40	0.5	5.8	東	16.1	東南東
23:50	1.5	6.6	東	15.6	東
0:00	0.5	6.3	東	14.3	東北東
落雷情報	無し				

(b)

時刻	降水量(mm)	平均風速(m/s)	風向	最大瞬間風速(m/s)	風向
23:00	1.5	5.2	南	11.3	南
23:10	1	3.3	東	7.4	北
23:20	1.5	3.6	南	15.8	南
23:30	3.5	3.3	北東	9.1	南西
23:40	4.5	4.2	西	9.3	西南西
23:50	4	7.2	南南西	19.8	南南西
0:00	3	5.6	南南東	18.1	南
落雷情報	無し				

#### 4.1.3 2021年9月26日 尾鷲の事例(0:20~1:10)

インフラサウンドセンサの設置場所については4.1.2項の通りである。

当時の気象状況は、0:20 ごろに最大瞬間風速 14.5 m/s を記録したが、これは図 4-6 のグラフのインフラサウンド観測記録には欠測があり、0:21 頃までデータが入っていない。その他には、0:40 頃に最大瞬間風速 11.4 m/s、平均風速 6.4 m/s を記録し、同時に降水量 6.4 mm と少量の降水を記録した。落雷については確認できなかった。0:40 を示す縦線をグラフの中に記入した。その約 5 分前、0:35 頃に 0 mPa から 20000 mPa 前後で推移していたグラフが約 -50000 mPa まで下がり、再度 20000 mPa まで上昇している。その後は -15000 mPa から 20000 mPa あたりを推移している。

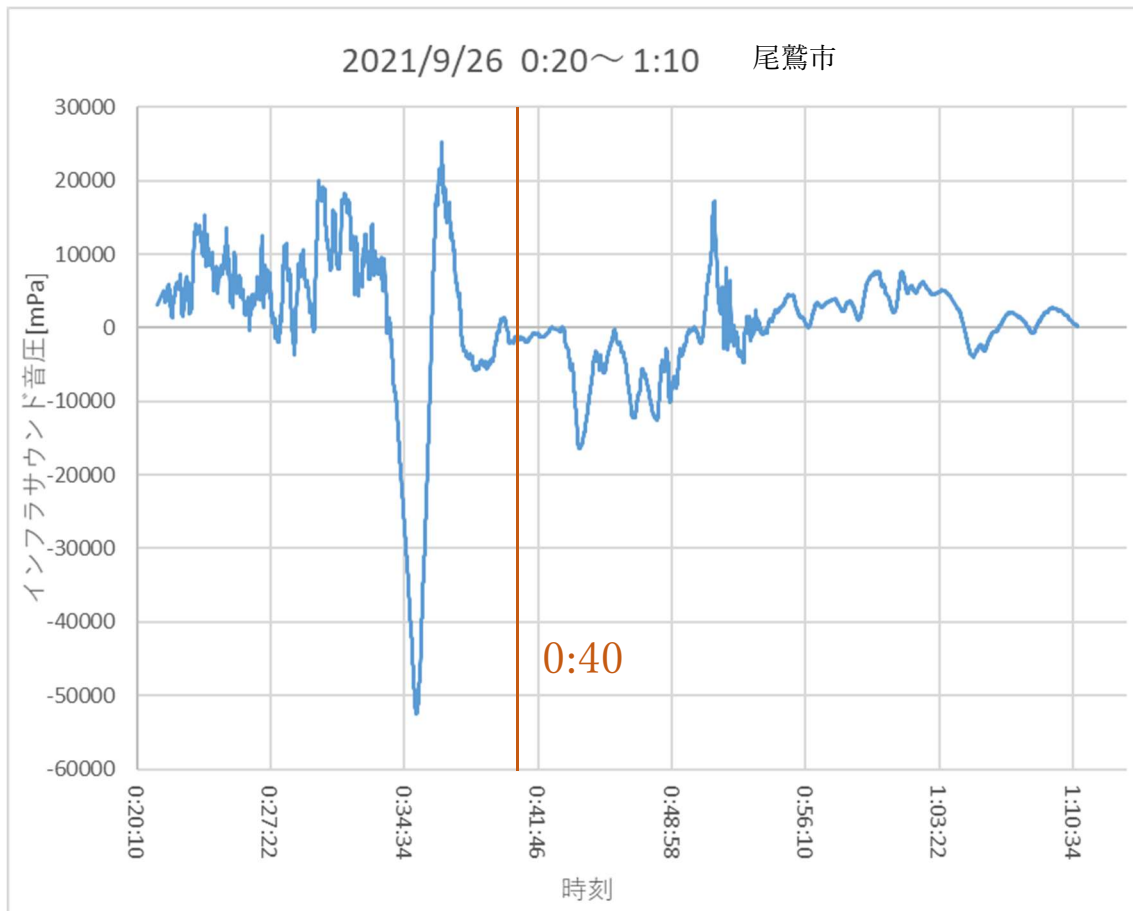


図 4 - 6 尾鷲で観測されたインフラサウンド波形

表 4 - 3 当時の尾鷲の気象状況

時刻	降水量(mm)	平均風速(m/s)	風向	最大瞬間風速(m/s)	風向
0:20	0	7.7	東南東	14.5	東南東
0:30	0.5	6	東南東	9.7	東
0:40	6.5	6.4	南	11.4	南東
0:50	0.5	3.4	南	6.8	東南東
1:00	0.5	2.8	南南東	5.8	南南東
1:10	0	2.1	西北西	3.8	北西
落雷情報	無し				



#### 4.1.4 2021年 8月23日 室戸岬の事例 (6:40~7:40)

室戸岬には2台のセンサが設置されている。設置場所は以下の図4-7に示した通りである。

当時の天候は、雷は確認されておらず7:20までは降水は確認できなかった。しかし7:30を境に最大瞬間風速が25 m/sを超えるなど大きく変化している。センサ1では気象が変化する25分前から、センサ2では15分前からインフラサウンドの波形に大きな変化がみられる。センサ1は-60000mPaから30000mPa程度で振れ幅は90000mPa、センサ2は-50000mPaから75000mPaで振れ幅は12500mPaの変化である。

室戸のセンサ1とセンサ2の位置関係は図4-8のようになっている。気象庁の特別地域観測所の位置も示した。センサ1は特別地域観測所とほぼ同じ位置で、センサ2はそこから北北西に5kmほどの位置にある。同一のイベントを波源とするインフラサウンドの波形が2地点に到達し、それぞれ観測したのであれば波形が変化する時刻の差は5kmを音速で伝わると考えれば15秒程度の差に収まるはずである。波源が1つだと考えるのであれば「インフラサウンド信号は天候の変化の15分前に訪れた」と考えてもいいだろう。

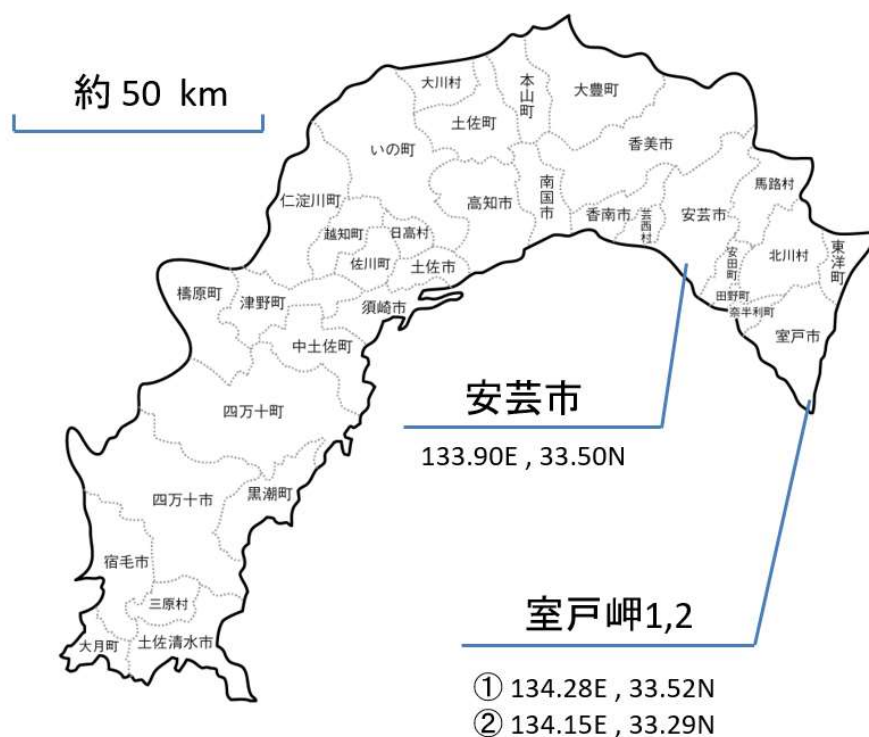


図4-7 室戸岬・安芸市のセンサの設置状況

表 4 - 4 室戸岬の気候状況

時刻	降水量(mm)	平均風速(m/s)	風向	最大瞬間風速(m/s)	風向
6:40	0	10	南南東	10.8	南南東
6:50	0	9.5	南南東	10.4	南南東
7:00	0	9	南南東	10.6	南南東
7:10	0	8.9	南南東	10.6	南南東
7:20	0	10	南南東	11.1	南南東
7:30	2.5	14.5	南南西	26.9	西南西
7:40	2.5	17.9	西	23.4	西
落雷情報	無し				

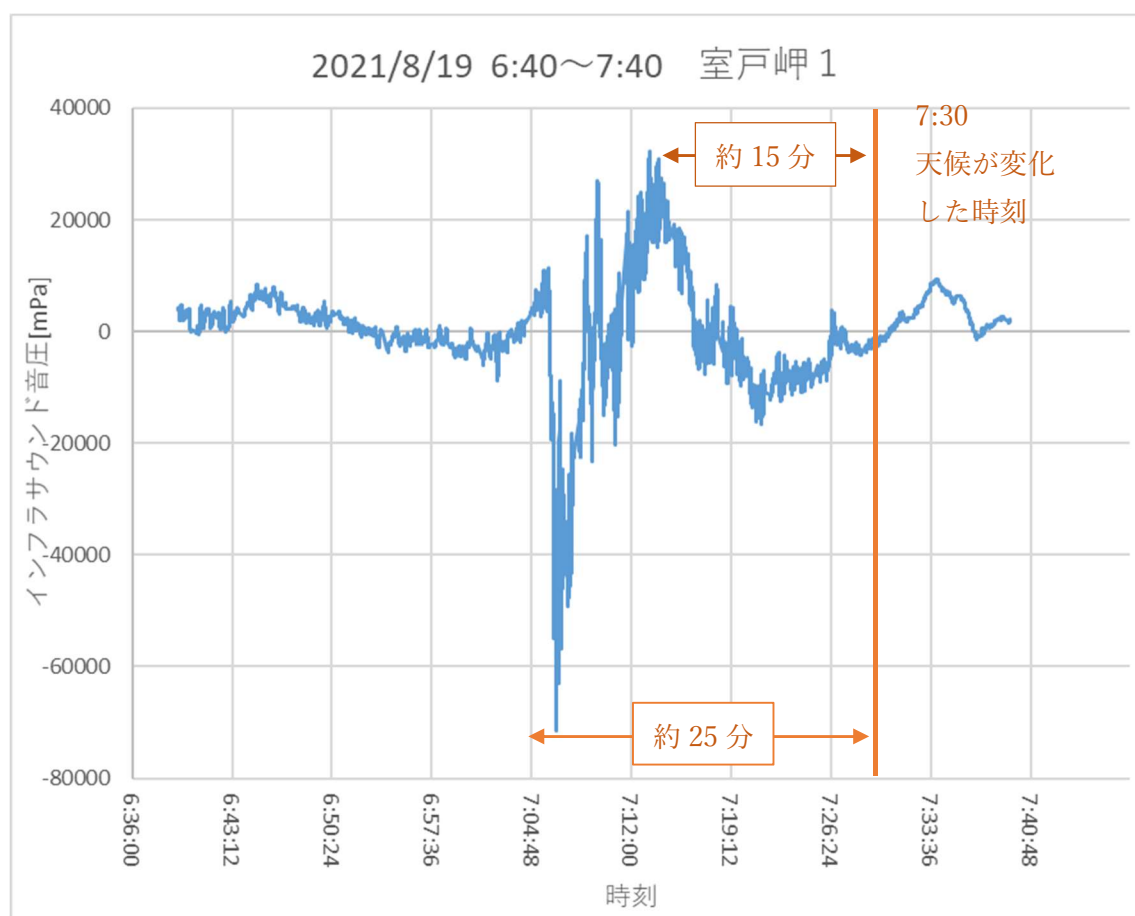


図 4 - 9 センサ 1 で観測されたインフラサウンド波形

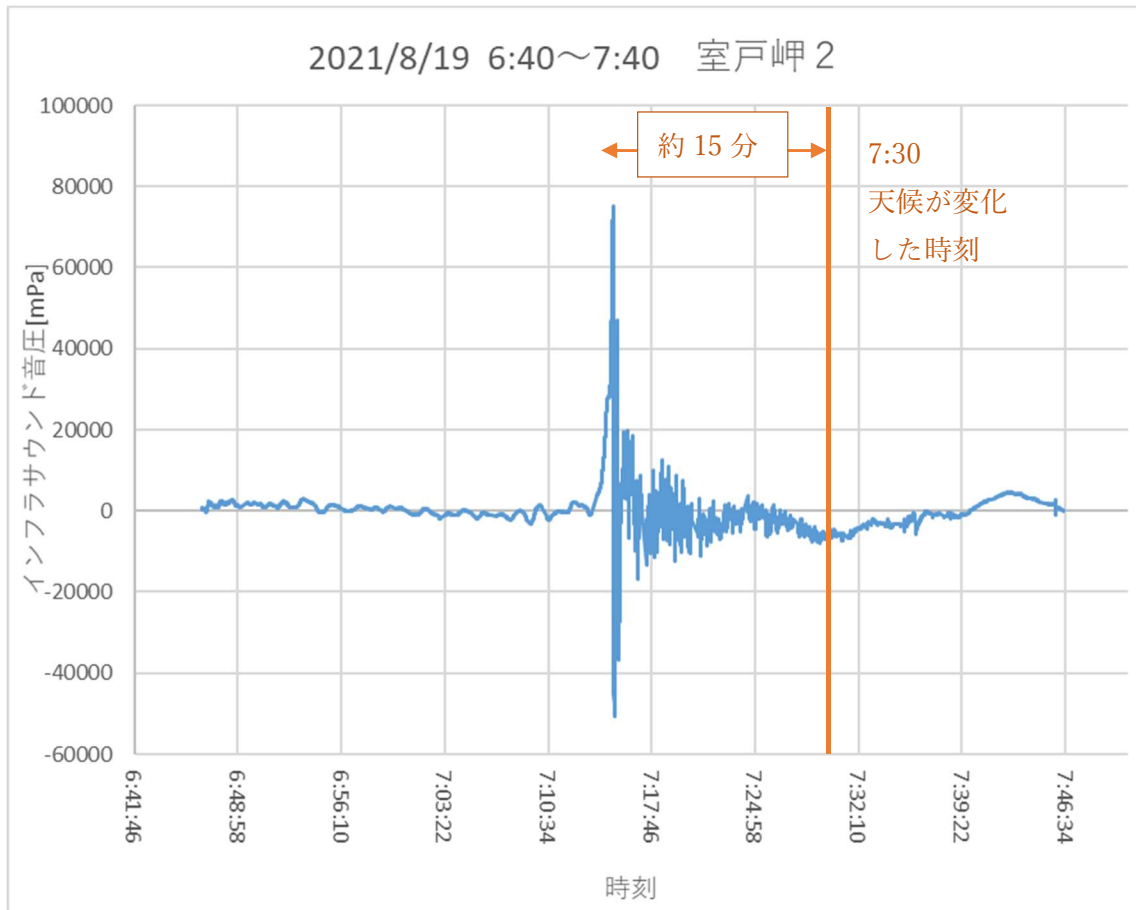


図 4 - 10 センサ 2 で観測されたインフラサウンド波形



図 4 - 8 センサ 2 台と観測所の位置関係

また、本イベントについて同日同時刻に安芸市のインフラサウンドセンサでも大きな変化が観測された(図 4-11)。

当時の気候状況は7:40 付近で 13 mm の非常に激しい雨が観測された。その他は風速に関しても穏やかで特に変化は見られず、落雷も観測されていない。室戸の気候と条件が大きく異なるのは風速のみであると考えられる。

波形に関して、室戸で観測されたものと同様に、気象が大きく変化する 7:40 の約 20 分前にインフラサウンド音圧が大きく上昇していることが確認できる。ただし、室戸の波形とは異なり、非常になだらかな変化である。

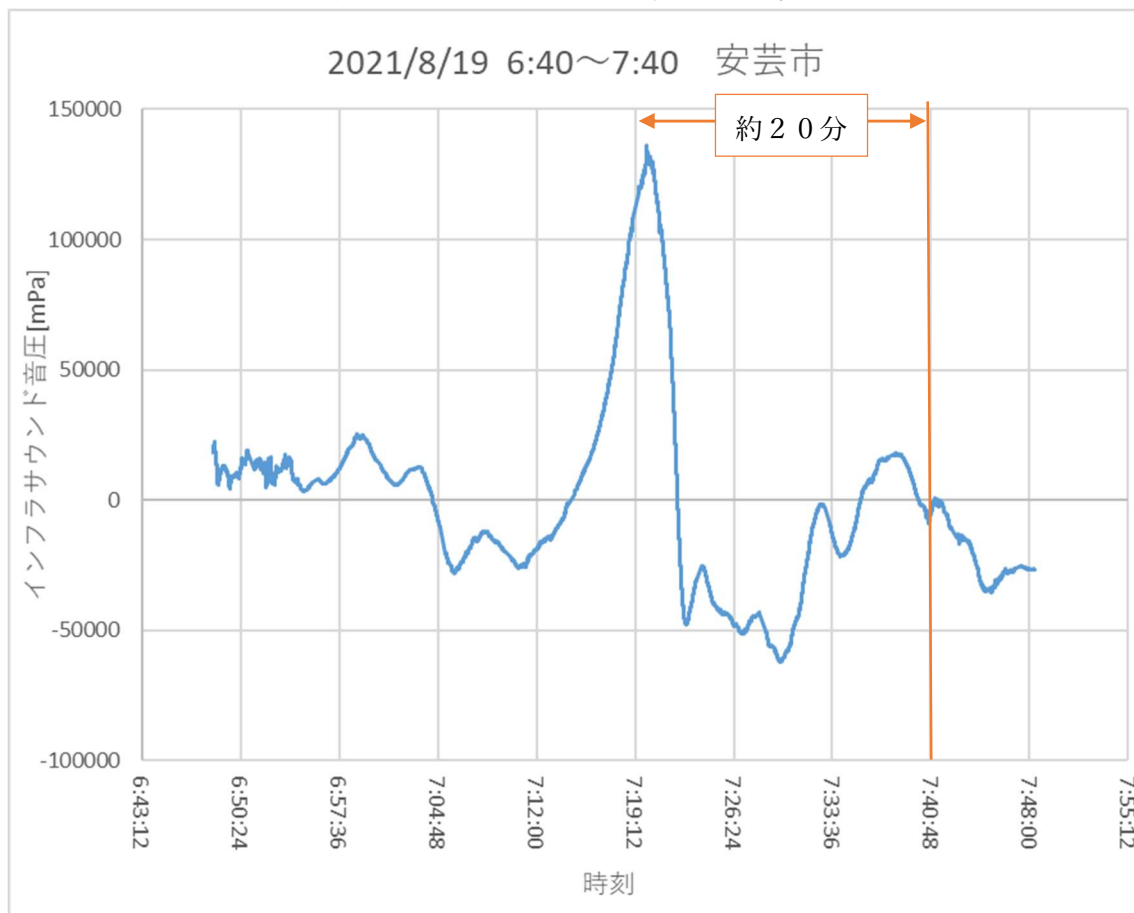


図 4 - 11 安芸市で観測されたインフラサウンド波形

表 4 - 5 安芸市の気象状況

時刻	降水量(mm)	平均風速(m/s)	風向	最大瞬間風速(m/s)	風向
6:50	0	3.8	西北西	7.6	北西
7:00	0	3.7	北北東	9	北東
7:10	0	2.3	北東	5.9	北
7:20	0	2.5	北	4.6	北
7:30	0	1.9	北東	4.5	北東
7:40	13	2.5	西南西	4.5	西
7:50	0	1.7	南	6.3	西南西
落雷情報	無し				

## 4.2 豪雨の影響が大きいと考えられる事例

### 4.2.1 2019年6月27日 室戸岬の事例 (22:00~23:00)

インフラサウンドセンサの設置場所については 4.1.3 項の図 4-8 に示した通りであるが、センサ 1 は正常に働いていたもののセンサ 2 はデータの取得を行えておらず、欠測であった。そのため今回のデータはセンサ 1 の物のみを図 4-12 に示す。

当時の天候は表 4-6 に示した。平均風速が最大でも 5 m/s、最大瞬間風速が 10.1 m/s と 4.1 節に示したの物と比較して小さいと言える。また落雷に関する情報は確認できなかった。22:30 頃を中心に降水量が 12.5 mm まで上がっており、22:20 から 22:40 までは降水が確認され、それ以外は降水量 0 であった。10 分間降水量 12 mm は、もし降り続ければ 1 時間降水量 74 mm の猛烈な雨である。

グラフ上に 22:30 頃を示す線を書き込んだ。特別地域観測所で降水が確認された 22:30 から約 15 分前にインフラサウンドセンサが反応しているように見える。これは 4.1.3 項の事例と似ているが、グラフの最小値が約-3000 mPa、最大値が約 3000 mPa 程度であり、振れ幅は 6000 mPa とあまり大きくない変化であることは明確に異なる点である。また、周波数も高い成分は少なく見え、比較的なだらかな変化をしている。

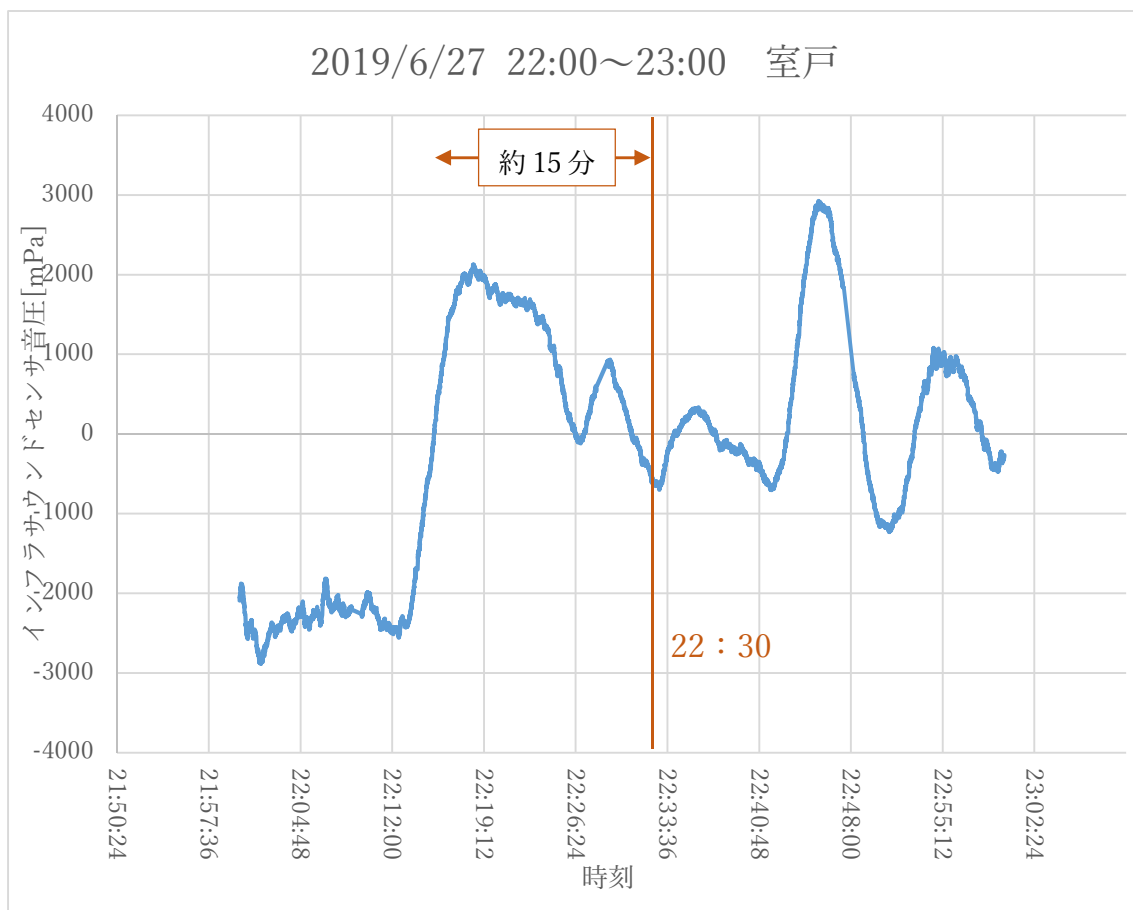


図 4 - 12 室戸で観測されたインフラサウンド波形

表 4 - 6 室戸の当時の気象状況

時刻	降水量(mm)	平均風速(m/s)	風向	最大瞬間風速(m/s)	風向
22:00	0	1.3	北東	3	北東
22:10	0	1.9	北東	3.9	北東
22:20	2.5	2	東北東	3.9	北東
22:30	12.5	5.3	西南西	9	西
22:40	1.5	4.6	西北西	10.3	西南西
22:50	0	3.8	西北西	7.4	西北西
23:00	0	3.1	西北西	6.7	西北西
落雷情報	無し				

### 4.3 落雷の影響が大きいと考えられる事例

#### 4.3.1 2021年8月19日 足摺岬の事例(3:00 から 4:30)

当時の天候は、降水は無かった。最大瞬間風速は 10 m/s と速い瞬間もあるが、図 4-12 に示した二つのグラフはそれぞれ 3:55~4:00 の値を示しているためノイズとして混じる心配はないと考える。また、平均風速は 3.7 m/s ほどと平凡な数値である(表 4-7)。

2 台のセンサの大まかな位置は図 4-14 中に示した。二つのセンサの位置は約 3 km 離れている。図 4-14 内の赤い四角は 3:00 から 4:00 の間に発生した落雷の位置を示している。

今回は、ほぼ同時刻に発生している②と③は互いに干渉してしまい判別が難しいこと、①はセンサ 2 の観測値が 3:55~3:56 に一部欠損し、センサ 3 の観測値も 3:59 頃から途切れてしまっており細かな検証は行いにくい状態であった。

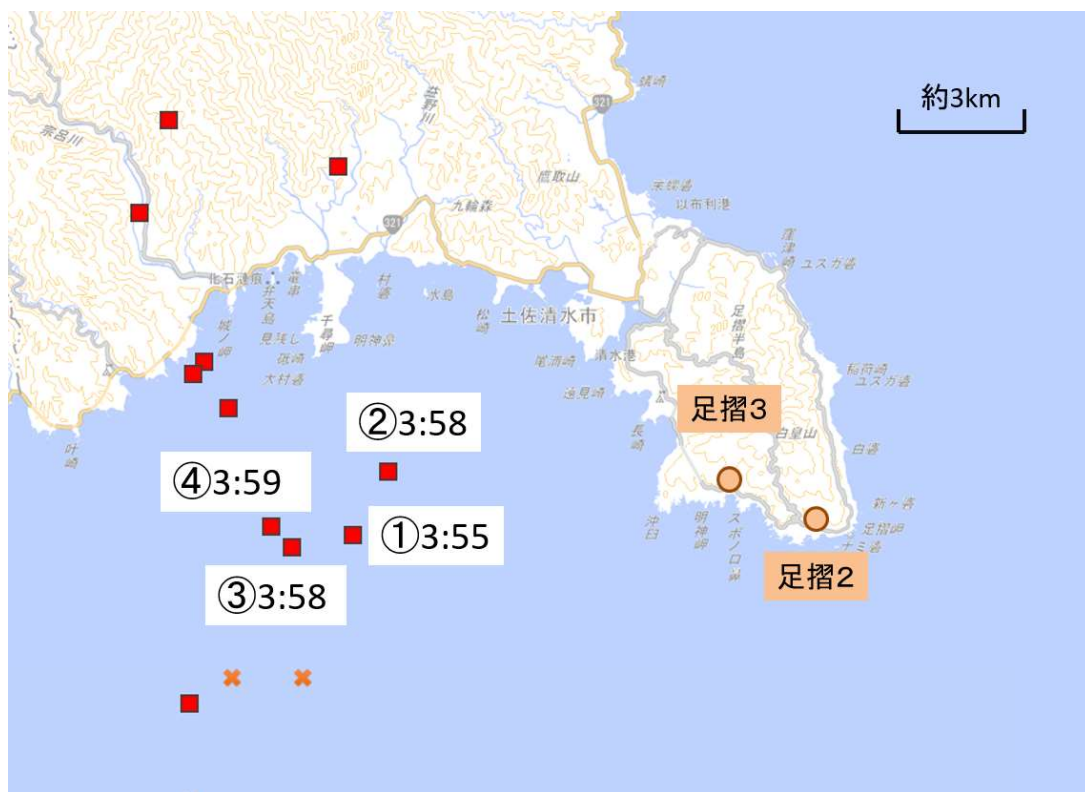


図 4-14 足摺岬で発生した落雷とセンサの設置状況

表 4-7 当時の気象状況

時刻	降水量(mm)	平均風速(m/s)	風向	最大瞬間風速(m/s)	風向
3:40	0	3.7	南	9.9	南
3:50	0	3.6	南南西	6.6	南南西
4:00	0	3.7	南	9.4	南

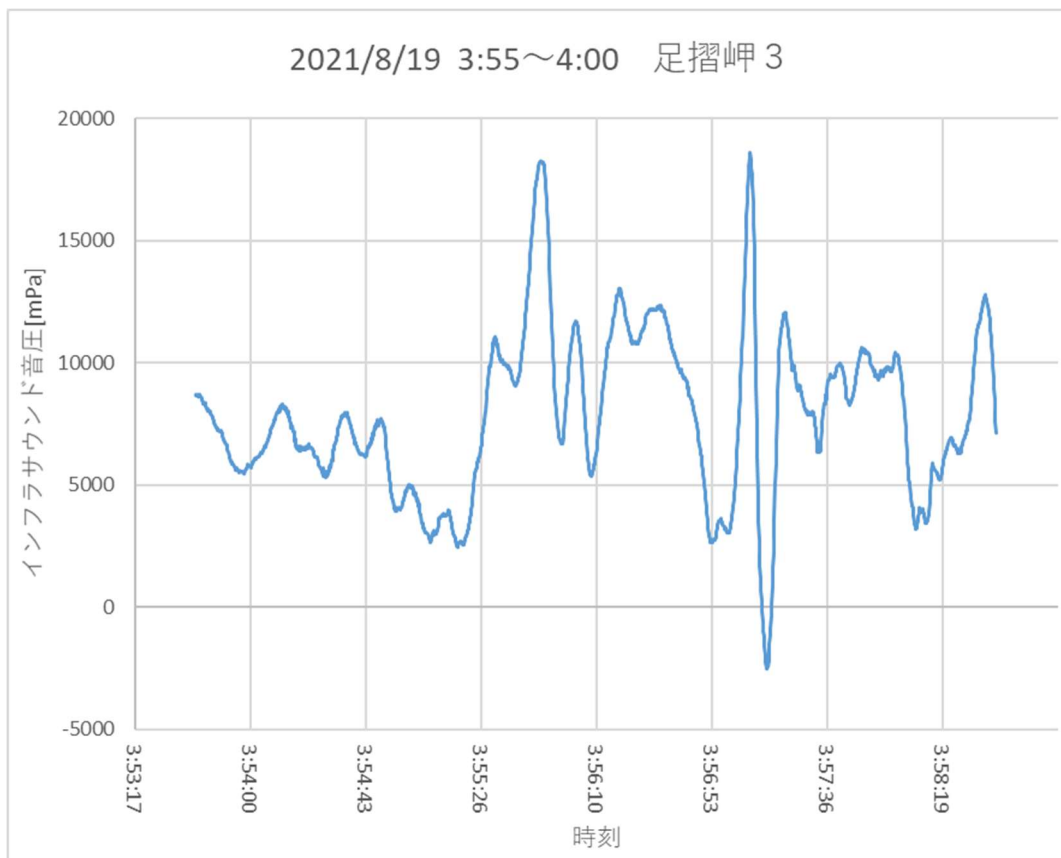
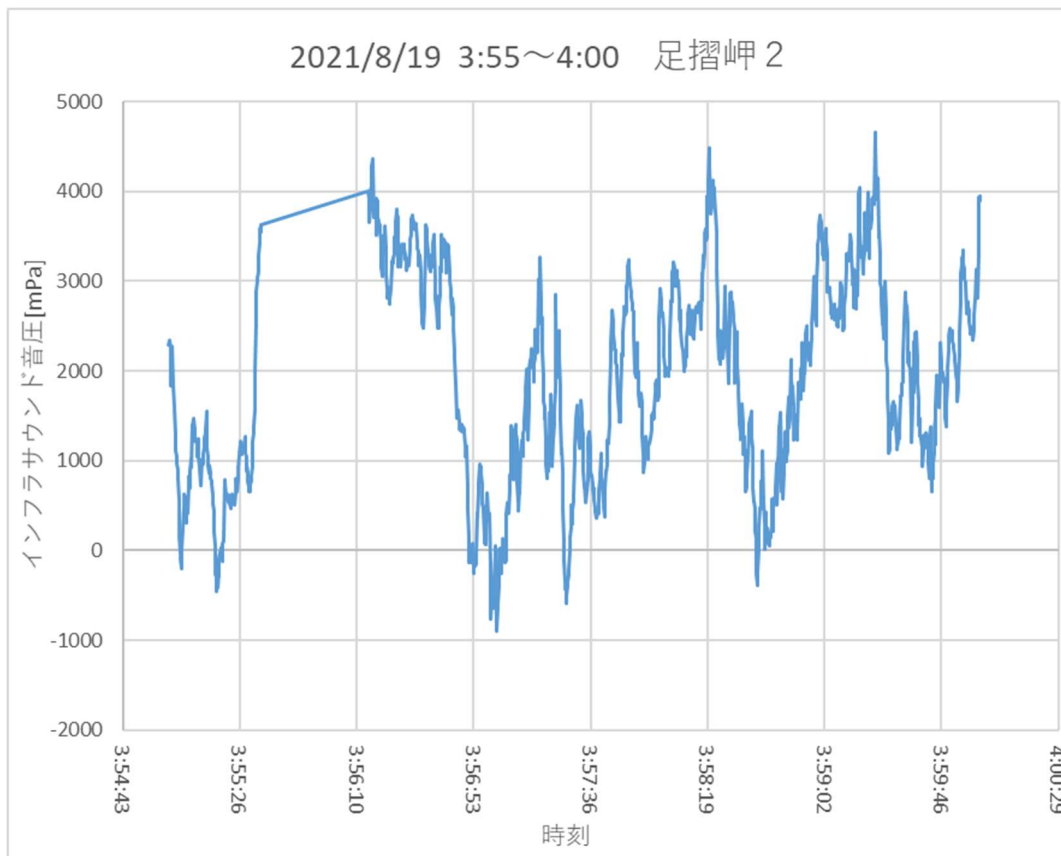


図4-13 足摺岬センサ1, 2それぞれのインフラサウンド波形



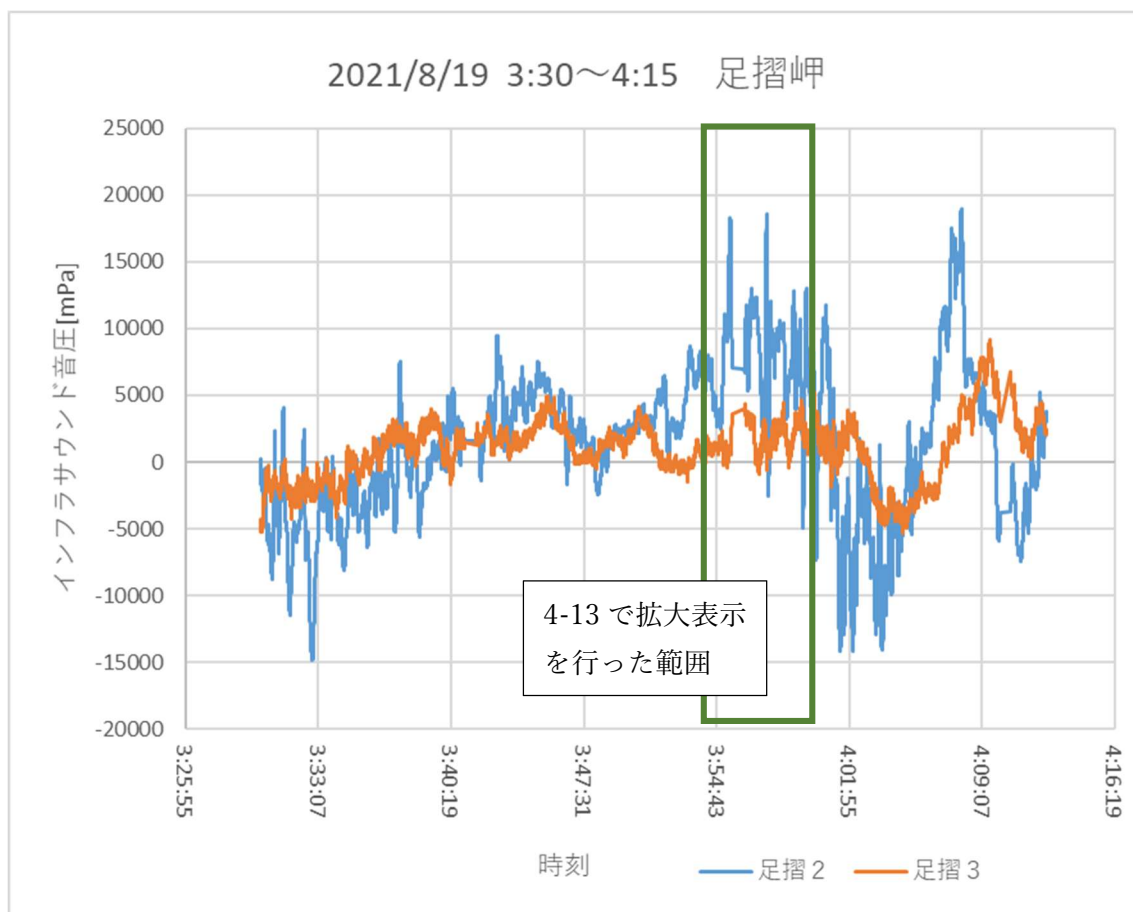


図 4-14 拡大表示した部分を含む 45 分間の波形

拡大表示を行った前後の波形は図 4-14 のようになっている。インフラサウンド波形はセンサ 2 よりもセンサ 3 のほうが変化は大きい。センサ 2 は-5000 mPa から 5000 mPa ほどの変化、センサ 3 は-15000 mPa から 20000 mPa ほどと比較的大きな変化をしている。少なくともセンサ 2 は強風の影響を受けている可能性がある。

#### 4.3.2 2022 年 8 月 31 日 黒潮町 馬荷の事例 (16:30~16:40)

当時の天候は降水量・風速ともに変化なく、観測中は常に穏やかであった。

図 4-15 は 16:30 から 16:40 の間のインフラサウンド波形[mPa]と可聴域の音量[dBPSL]を示したものである。センサの位置は図 4-16 中に示した通りである。

図○は 15:00 から 16:00 までの間に発生した落雷・雲間放電を示したものである。図中の■は落雷・×は雲間放電を示す。センサが波形を拾える時間に発生した落雷・雲間放電にはそれぞれ発生した時間を書き込んだ。図中で確認された落雷はすべてセンサから 2 km 以内で発生しており、発生から到達までの時間差は最大でも 7 秒ほどである。

グラフ内にそれぞれ落雷が発生した時刻を示した。

16:31 の直後に 40 から 60dB SPL であった可聴域音量が 108dB SPL まで一気に上昇し、元の値まで戻っている。108dB SPL はおよそジェット機に並ぶほどの大きさの

音であり、この時刻に 16:31 代に発生した落雷の音波が届いたのだろうと考えられる。それと同時にインフラサウンドの波形も 3000 から-4000 まで大きく値を落としている。これを踏まえて見てみると、16:33 頃も落雷の影響を受けて同様の動きをしているように見える。しかし、16:35 頃は画面内のどこにも落雷は発生しておらず、何かを波源としているのかは判断できなかった。

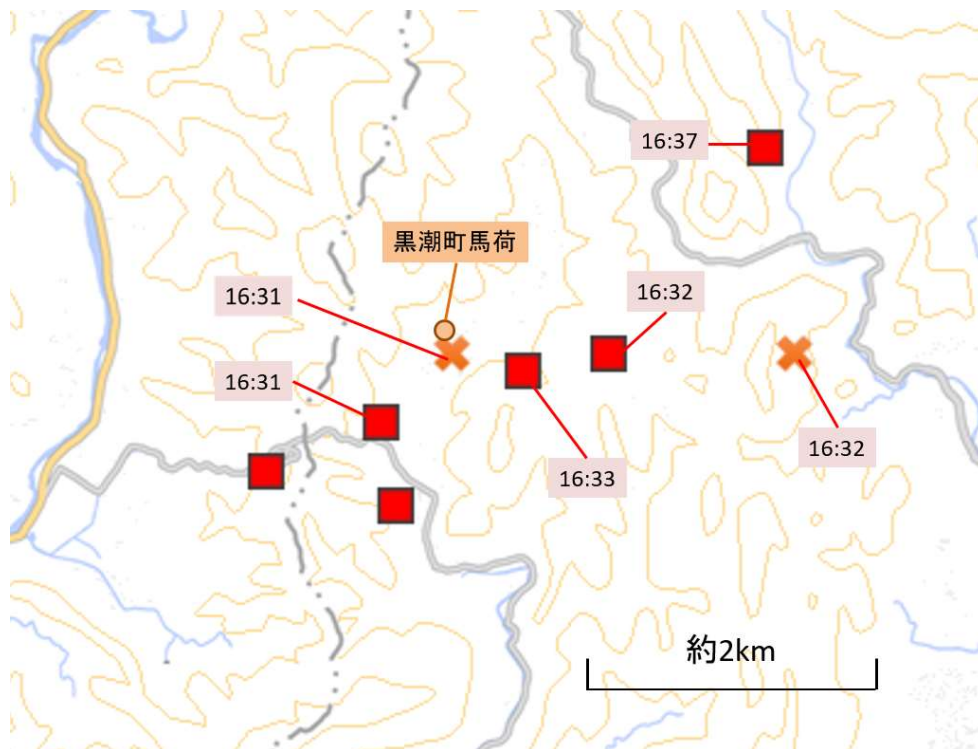


図 4 - 16 発生した落雷とセンサの設置状況を示す

表 4 - 8 当時の気象状況

時刻	降水量(mm)	平均風速(m/s)	風向	最大瞬間風速(m/s)	風向
18:20	0	0		0.9	北西
18:30	0	0.3	北	1.2	北
18:40	0	0		0	南東
18:50	0	0.6	北北東	1.6	北北東

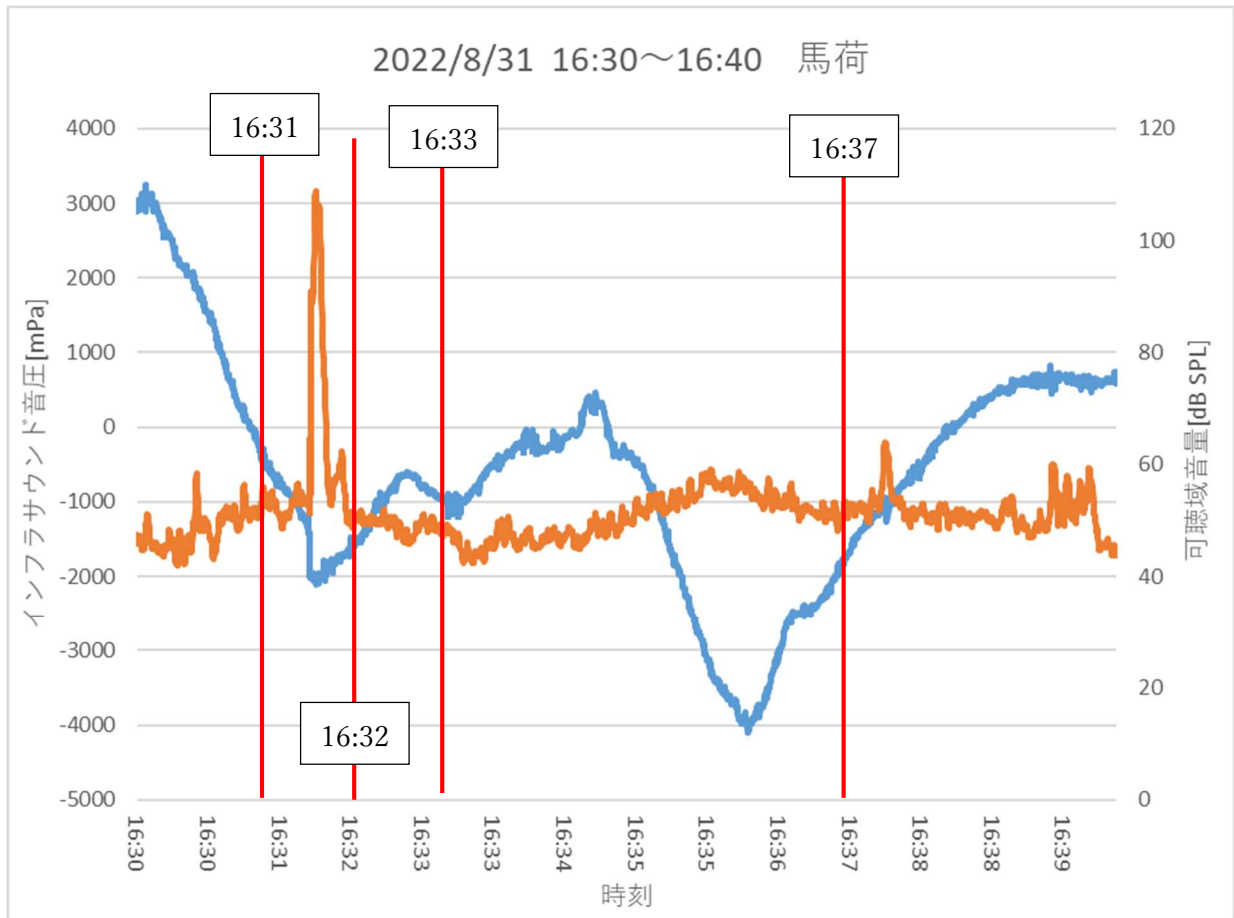


図 4-15 可聴音とインフラサウンドの波形を示す（青がインフラサウンド、赤が可聴音）

#### 4.4 複数のイベントが連続している事例

##### 4.4.1 2023年6月2日 安芸市の事例（8:00～10:00）

図 4-17 は 8:00 から 10:00 の二時間に観測されたインフラサウンド波形を示す。当時の気象は 9:30 から 9:40 の間で大きく変化していた。

9:30 以前は降水量が最大でも 3.5 mm 程度とそこまで多くないが平均風速は 8 m/s から 10 m/s 程度、最大瞬間風速であれば最低でも 14.8 m/s、最大では 19.4 m/s と非常に強い風の水準になっている。また、10 分間降水量はそれほど高くなく 1 mm から 3.5 mm ほどである。

一方で 9:40 以降は、高かった風速は低くなり平均風速では 2.3 m/s から 4.2 m/s、最大瞬間風速でも 5.3 m/s から 7.3 m/s と急に低くなっている。加えて、10 分間降水量は 20 mm と猛烈な集中豪雨が降ったとがわかる。

激しく気象が変化した 9:30 を示す縦線を図 4-17 の中に記した。インフラサウンドの波形はそこから約 40 分前、8:50 から 9:10 頃にかけて大きな変化を見せている。それ以前では高い周波数で 20000 から 40000 を推移していた波形が徐々に周波数を落とし、振幅も 40000 から 60000 と大きくなっていることが読みとれる。

表 4-9 当時の気象状況

時刻	降水量(mm)	平均風速(m/s)	風向	最大瞬間風速(m/s)	風向
8:00	1.5	9	南東	16.6	南東
8:10	1.5	8.4	南東	16.8	南東
8:20	1.5	9.4	南東	19.4	南南東
8:30	1.5	9.7	南東	16.8	南南東
8:40	1	9.4	南東	17.3	東南東
8:50	2	9.6	南東	16.8	南東
9:00	3.5	9.8	南東	17.3	南東
9:10	3	9.2	南東	18.3	南南東
9:20	2	9.8	南東	15.3	南東
9:30	8	6.5	南南西	14.8	南東
9:40	20.5	2.3	南南西	5.3	南西
9:50	19.5	2.8	南	7.3	南
10:00	6.5	4.2	南南東	7.1	南南東
落雷情報	無し				

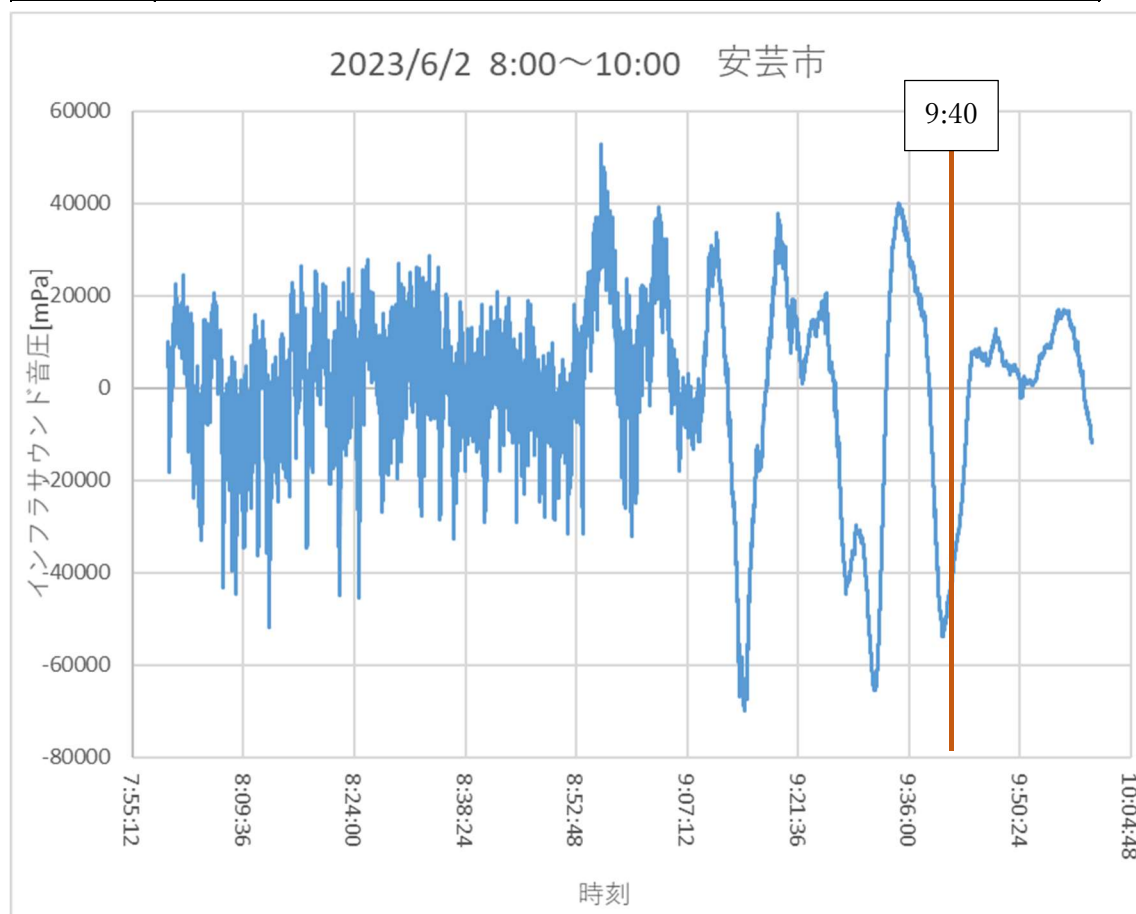


図 4-17 安芸市で確認されたインフラサウンド波形

#### 4.4.2 2023年6月2日 鹿嶋の事例 (16:30~18:30)

図4-18は16:30から18:30の二時間に茨城県鹿嶋市で観測されたインフラサウンド波形を示す。表4-10から当時の気候は17:20以前と17:30以降で大きく変化していることが読み取れる。17:20以前では降水はほぼ無く、17:20に4 mm降ったのみである。その一方で平均風速は5.3 m/sから7.3 m/sと比較的速く、最大瞬間風速は11.6 m/sから15.9 m/sまでと、こちらも強い風であることを示している。

17:30以降は降水量14 mmの激しい雨が観測され、その後しばらくの間は6.5 mm前後を推移した。その一方で風速は下がり、最大瞬間風速でも5 m/s前後を推移するようになった。いずれの時刻でも現地で落雷の発生は確認されていない。

図4-18に気象の変化があった17:30を示す縦線を記した。そこから20分前の17:10頃には300,000 mPaまで大きく上昇し、その前後で波形の形が異なるように見える。図4-18では小さいため前半と後半をそれぞれ図4-19と図4-20に記した。

4.4.1項の結果を踏まえて見ると、それと同様に強風が確認できる前半では周波数が高く、後半では周波数は低くなっていることがわかる。振幅に関しては大きな変化は無く、前半では最小で-30000 mPa最大で30000 mPa、後半では最小で-40000 mPa最大で40000 mPaと、わずかに後半のほうが大きかった。

表4-10 当時の気象状況

時刻	降水量(mm)	平均風速(m/s)	風向	最大瞬間風速(m/s)	風向
16:30	0	5.7	南	11.6	南南西
16:40	0	6.4	南	14.3	南南西
16:50	0	7.2	南	15.3	南
17:00	0	7.3	南	15.9	南
17:10	0	6.8	南	15.9	南
17:20	4	5.3	西南西	14.3	南
17:30	14	3.8	西南西	9.9	西南西
17:40	6.5	1.6	南南西	4.9	西南西
17:50	6.5	2.1	南西	4.9	南
18:00	3.5	1.1	南西	3.2	西南西
18:10	2	2	南	5.3	南
18:20	0.5	2.1	南	4.7	南
18:30	0	1.9	南	4.5	
落雷情報	無し				

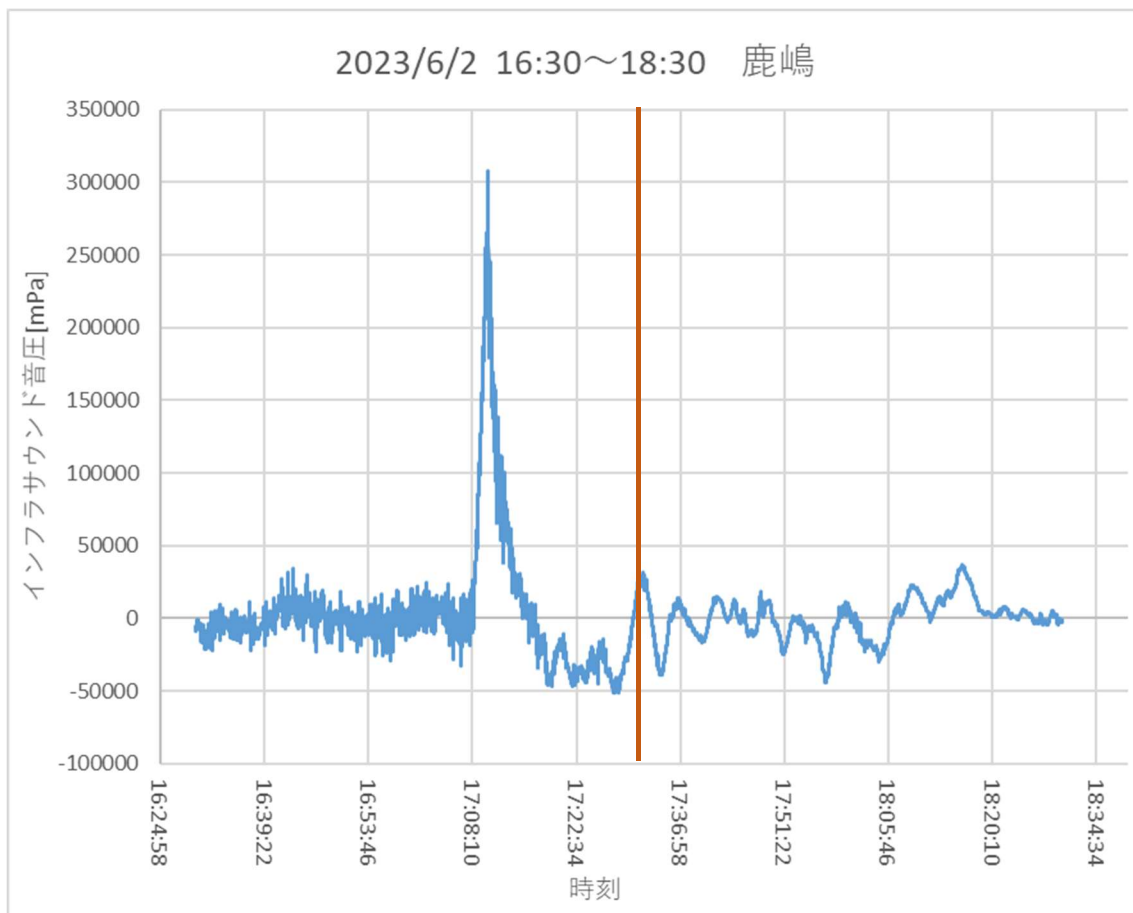


図 4 - 2 鹿嶋市で観測された波形

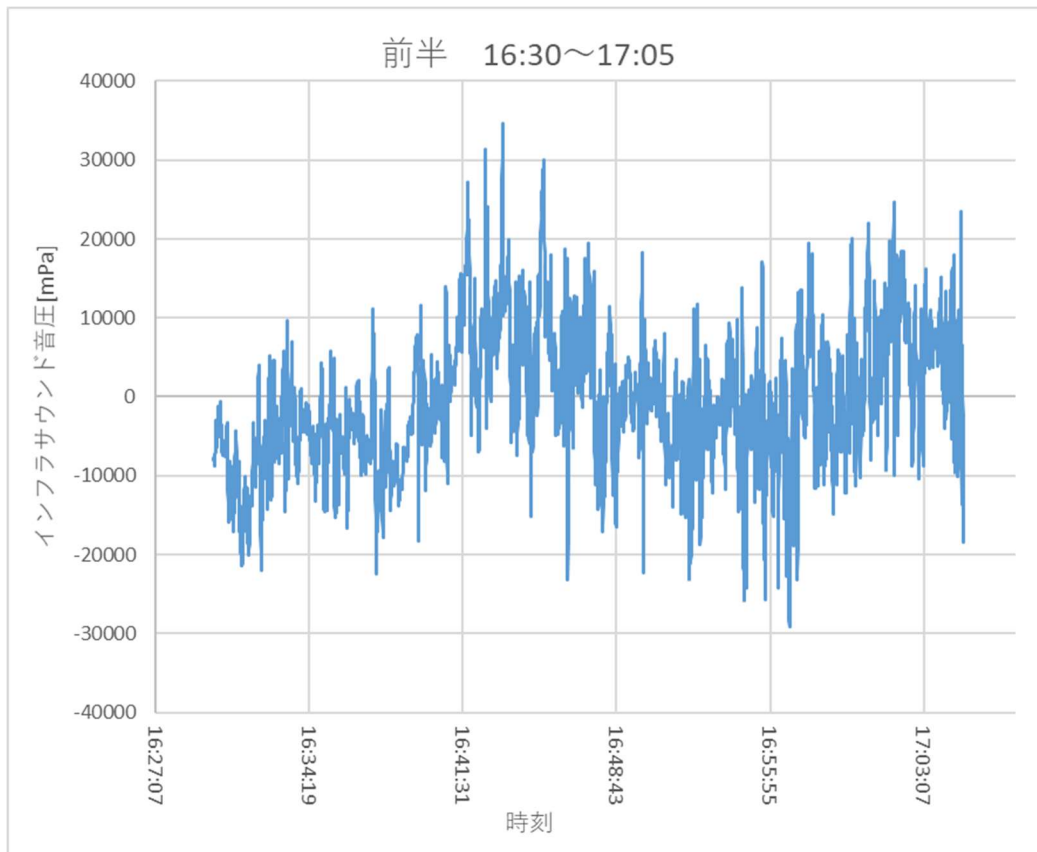


図 4 - 3 前半部分の拡大表示

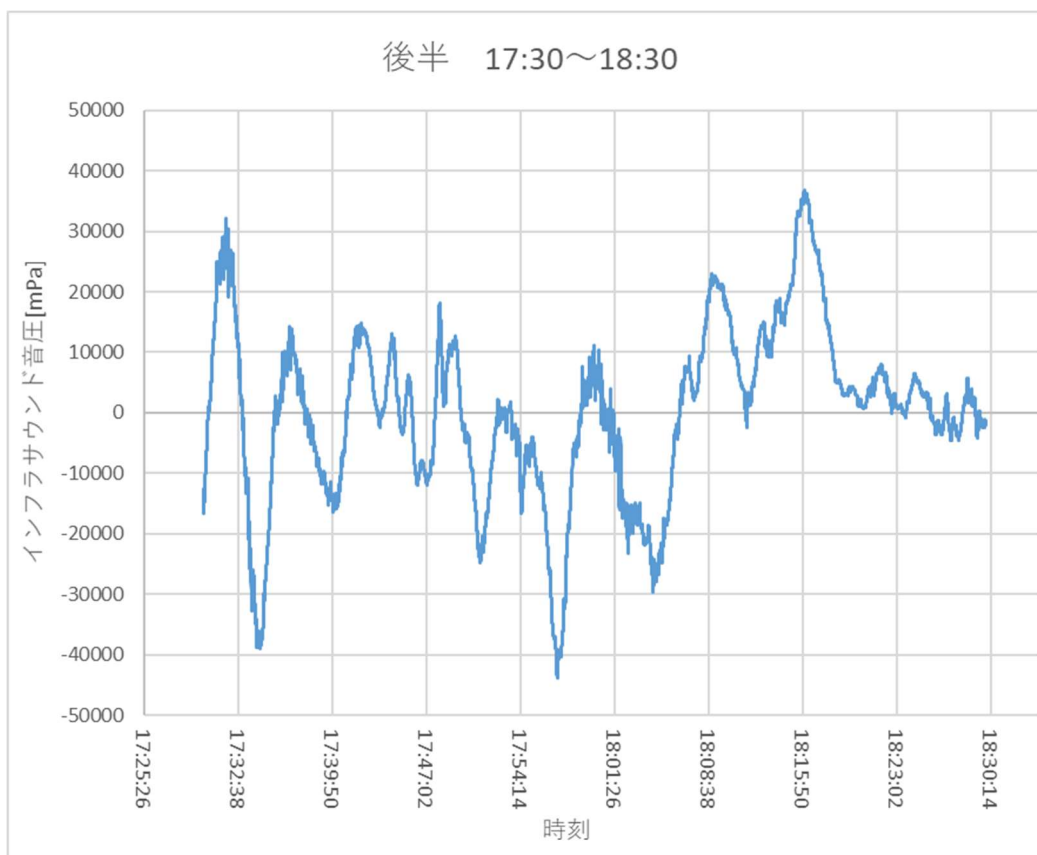


図 4 - 4 後半部分の拡大表示

## 第五章 考察

### 5.1 観測結果からわかること

第4章の観測結果によって得られた仮説は、

①豪雨・突風の両者に対して、天候が大きく変化する場合、約15分から30分程度前もってインフラサウンドの波形に変化がみられること

②特に4.4節より、豪雨の際のインフラサウンド波形は突風の際の波形に比べて周波数が低い傾向にあること

以上の二つである。①の検証には膨大な量のサンプルが必要になるため今回の論文において詳しい検証までは行えない。そのため②の周波数に対しての検証を行った。

### 5.2 周波数に対する検証

今回は周波数に対する検証のため、Excelを用いたFFT(高速フーリエ変換)を行って周波数解析を行う。フーリエ変換とは時間関数に含まれる正弦波の振幅を周波数ごとに求めることで、周波数の関数として表すものである。

ExcelのFFTは数値データの個数が4096以下の2の累乗でなければならない。今回の検証はデータの個数が多く、10000個を超えることも多かった。そのため数値5つごとに平均をとり、それを代表値とすることでデータ数の圧縮を行った。また、センサのサンプリング周波数が5 Hzであったため、同時に圧縮後のサンプリング周波数が1 Hzとなることにも注意する。

#### 2023年 6月2日 鹿嶋の事例

4.4.2節で示した波形を用いて確認を行う。

4.4.2節内で、17:30前後で周波数が変化したと述べた。そのため前半を16:30～17:05、後半を17:35～18:10としてそれぞれでFFTを行った。大まかな範囲は図5-1の中に示す。

前半と後半のFFT後のグラフ図5-1と図5-2は、大まかな形そのものは似ている。しかし前半は後半部分に加えて0 Hz付近での振幅が小さく6000ほどであるが、後半では8000ほどの値を持つ。また、0.04 Hz以降の振幅を比べると、前半では高いときは1000ほどの振幅を持っていたが、後半ではほとんど見られない。

この二つから後半部分と比較して、前半部分は高い周波数成分を多く含むことが確認できた。



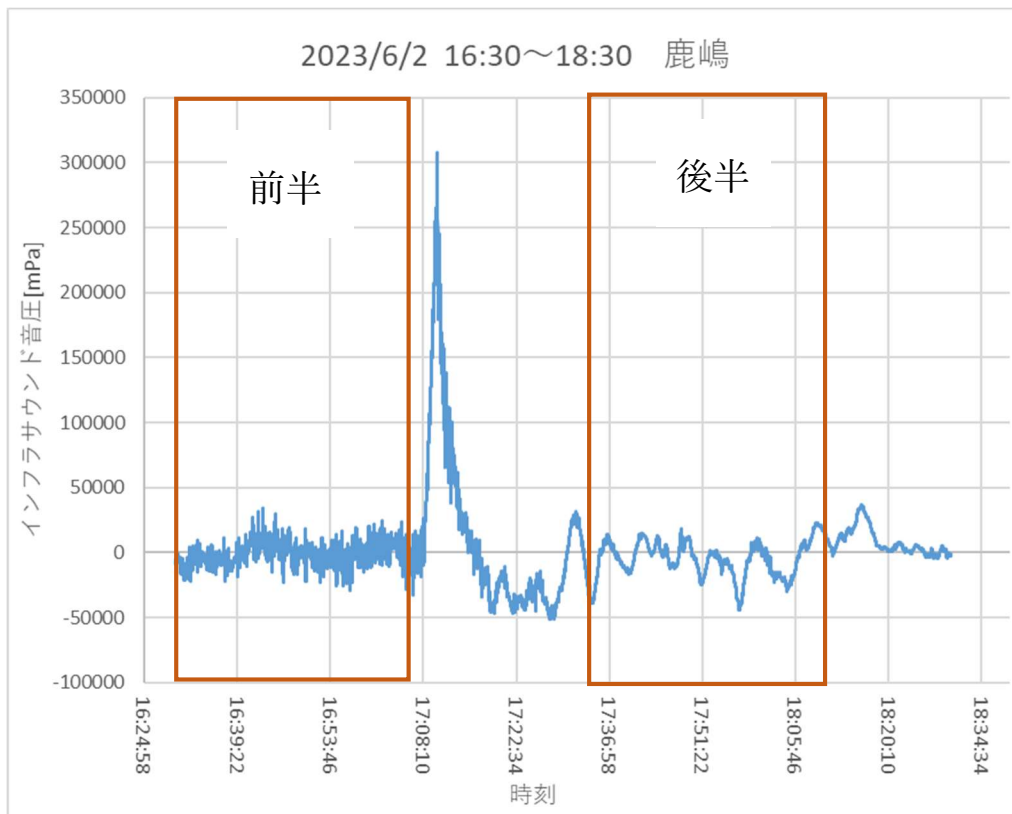


図 5-1 鹿嶋市の 4.4.2 で示した波形

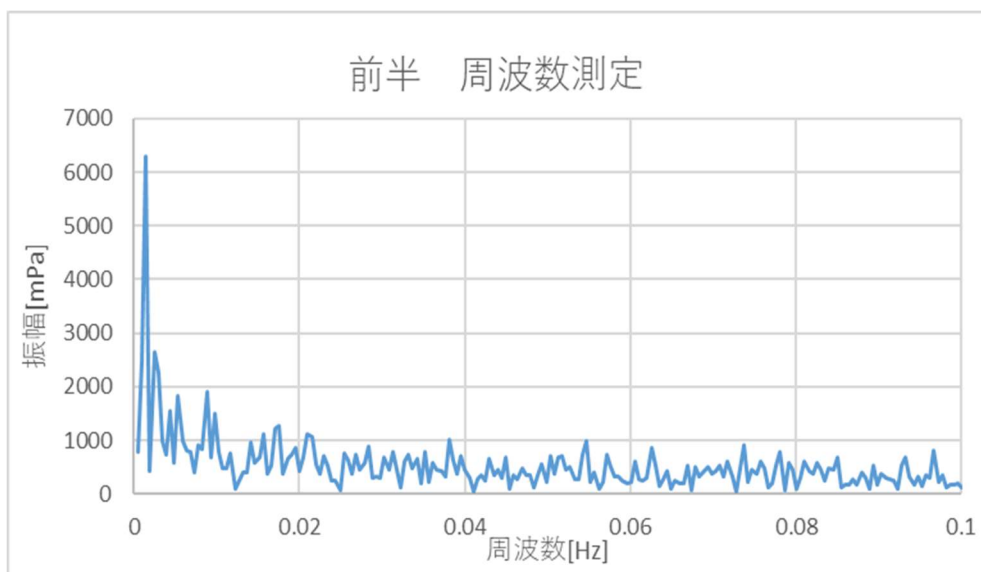


図 5-2 前半部分の FFT 結果

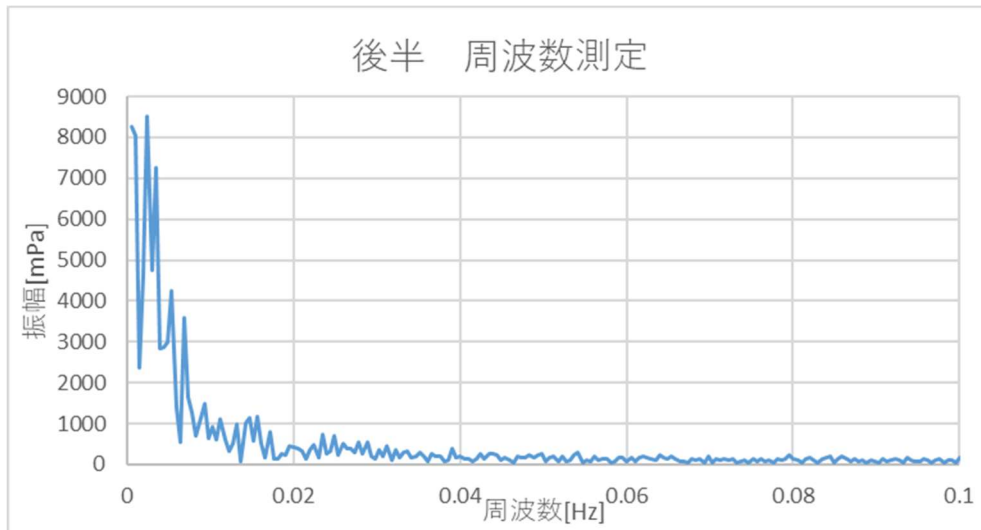


図 5-3 後半部分の FFT 結果

今回の入手できた波形サンプルでは強風と同時に雨が降り出す、豪雨が発生してもすぐに止んでしまうなど、継続的な波形を必要とする FFT を適用するには難しいものが多かった。これからもサンプル数の確保が課題となるだろう。

## 第六章 結論

本研究ではインフラサウンド波形の気象による変化を確認することを目的として、豪雨・落雷・突風の3種類のイベントに絞って、それぞれのイベントの気象状況と波形を抽出し、それぞれ9例が集まった。

その結果、①豪雨・突風の両者に対して、天候が大きく変化する場合、約15分から30分程度前もってインフラサウンドの波形に変化がみられること②豪雨の際のインフラサウンド波形は突風の際の波形に比べて周波数が低い傾向にあること、以上の二つが得られた。

ただし、豪雨・落雷・突風それぞれの事象について良好なサンプル数が大きく不足しているため、ここで拙速に結論を出すべきではない。少ないサンプル数のみで結論を出そうとすれば、どうしても筆者の恣意的・主観的な意見が含まれてしまい、客観的な結果を得ることは困難である。

サンプルの収集方法は筆者の主観によって突風・豪雨・落雷の3つに絞り、筆者の主観によって波形を切り貼りし、研究室で議論しつつ考察を行った。ただ今回の研究において主観による選択を多く含むものの、計9つの事例を紹介できたこと、なるべく客観的なサンプル収集のための手段を示せたことは1つの成果である。

## 謝辞

本研究および論文の作成にあたって、ご指導いただきました高知工科大学 システム工学群 山本 真行 教授に心より感謝いたします。

また、宇宙地球探査システム研究室に所属している皆様にも心から感謝いたします。

本研究において必要不可欠であったインフラサウンドセンサの開発を行った株式会社 SAYA や、観測環境を整えていただいた関係者の方々にも感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 気象庁 | 突風事例一覧 (jma.go.jp), 2024年2月16日閲覧  
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/list.html>
- [2] 気象庁 | 過去の気象データ検索 (jma.go.jp), 2024年2月16日閲覧  
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- [3] あなたの生活情報 | 過去の雷観測 (kakutyoutakaki.com), 2024年2月16日閲覧  
<https://weather.kakutyoutakaki.com/thander/index.php>
- [4] 過去の天気-日本気象協会 tenki.jp, 2024年2月16日閲覧  
<https://tenki.jp/past/2021/06/satellite/>
- [5] 全国インフラサウンド観測コンソーシアム リーフレット
- [6] 山本真行, ” 国内外のインフラサウンド研究の現状” 月間地球, 2012年10月号(通巻397号), pp554-559
- [7] 蓮見佑太, ” インフラサウンド観測データを用いた下級爆発位置の決定とエネルギー推定”, 令和5年高知工科大卒業研究報告書
- [8] PowerPointで作るデザイン | パワポでデザイン (power-point-design.com), 2024年2月16日閲覧  
<https://power-point-design.com/ppt-design/>
- [9] 高知県の白地図イラスト無料素材集 (県庁所在地・市町村名あり) (chizu-seisaku.com), 2024年2月16日閲覧  
<https://www.chizu-seisaku.com/shirochizu/shirochizu-j-kochi/>