

修士論文

高知県沿岸に配置されたインフラサウンドセンサ群を
用いた音波源推定法の開発

Development of estimating method for sound sources by using a group of
infrasound sensors distributed along coastal line of Kochi Prefecture

報 告 者

学籍番号: 1217001

氏名: 藤本 将司

指 導 教 員

山本 真行 教授

令和 2 年 2 月 10 日

高知工科大学 大学院工学研究科 基盤工学専攻 電子・光システム工学コース

目次

1章	序論	
1.1	インフラサウンドとは	・ ・ ・ ・ 1
1.2	背景	・ ・ ・ ・ 1
1.3	目的	・ ・ ・ ・ 3
2章	波源位置推定、解析手法	
2.1	インフラサウンド観測網	・ ・ ・ ・ 4
2.1.1	インフラサウンドセンサについて	・ ・ ・ ・ 4
2.1.2	データ収録方法	・ ・ ・ ・ 5
2.2	インフラサウンドデータの解析方法	・ ・ ・ ・ 6
2.2.1	データの仕様	・ ・ ・ ・ 6
2.2.2	使用するデータセット	・ ・ ・ ・ 7
2.2.3	N型波形イベント自動検出ソフトウェア	・ ・ ・ ・ 7
2.2.4	相互相関処理	・ ・ ・ ・ 8
2.3	波源位置推定方法	・ ・ ・ ・ 8
2.3.1	音波到来方向探知	・ ・ ・ ・ 8
2.3.2	波源位置推定	・ ・ ・ ・ 9
2.4	解析手法	・ ・ ・ ・ 10
3章	結果と考察	
3.1	2018年3月10日の噴火イベント	・ ・ ・ ・ 12
3.2	ノイズレベルが大きい場合の波形データ	・ ・ ・ ・ 21
4章	結論	・ ・ ・ ・ 24

参考文献

謝辞

1 章 序論

1.1 インフラサウンドとは

インフラサウンドとは、人間の可聴周波数(一般に 20 Hz～20 kHz)の下限以下の音波、すなわち超低周波音のことを指す。音波の減衰には大別して 1)空間的なエネルギーの散逸による「幾何学的減衰」、2)音波の山と谷の気圧差による「非線形減衰」、3)空気の粘性に依存する「空気の粘性による減衰」の 3 種類の減衰があるが、インフラサウンドは超低周波であるため「空気の粘性による減衰」を受けにくい性質があり、長距離伝搬する特性を持つ。また地球大気中の粗密波としての音波は水平方向にはほぼ 0 Hz まで伝搬することができるが、鉛直方向には重力の影響を受けるため標準大気(15 °C, 1 atm)においては約 3.21 mHz までしか伝搬することができない。これがインフラサウンドの下限周波数であり音波遮断周波数と呼ばれる。これ以下の周波数の大気中の波動は大気重力波に分類される。

3.21 mHz	20 Hz	20 kHz	
大気重力波	インフラサウンド	可聴音	超音波

図 1.1 地球大気中粗密波の帯域別の名称

インフラサウンドの発生については、火山噴火、津波、隕石の大気圏突入、土砂崩れ、落雷といった様々な地球物理学的スケールの大規模な現象によって励起されることが知られている[1,2]。人類活動において、これらは自然災害をもたらす危険な現象であり、防災・減災の観点から遠隔地よりリモート観測できる技術としてもインフラサウンドは注目されている。2013 年 2 月にロシアのチェラビンスク上空に巨大な隕石が飛来・落下した際のインフラサウンドが世界各地で観測された例があり、地球上を 2 周したイベントも観測されている[3]。

1.2 背景

近年、国内のインフラサウンドに関する研究は 1980 年代に愛知教育大学の田平誠によって基礎が構築された。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)によって全球を 60 地点でモニタリングする観測網が構築されつつあり、現在も多地点観測が行われている。国内の CTBTO インフラサウンド観測点は千葉県いすみ市に IS30 があり、高性能なインフラサウンドセンサ 6 台でのアレイ観測が行われている。インフラサウンド観測において観測地点の多さは重要であるがインフラサウンドセンサは 1 台が非常に高価なため、国内での防災・減災を目的と考えたとき、理想的な密度での観測ができていないのが現状である。著者の所属する研究室では 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やこれまで確立されていなかったインフ

ラサウンドの解析手法について研究が行われてきた。西山(2007)によって、圧電素子を用いた低コストインフラサウンドセンサのプロトタイプが開発された[4]。これは膜面に圧電素子を接触させているため膜面の劣化が問題であった。その後、山田(2009)によって PSD(Position Sensitive Device)素子と半導体レーザを用いた非接触型センサが開発され、膜面の微小変動を渦電流の変化に変換し計測するセンサの可能性も検討された[5]。また、小松(2012)によって桜島の周囲 80 km 以内にインフラサウンドセンサ 3 台による三角形アレイを 2 地点に配置し多地点観測が行われ、桜島噴火時の空振を捉え、2 箇所の遠隔アレイによる方位角推定から半径 15 km 以内の精度で音波源位置を推定できた[6]。反町(2016)においては、観測データに対してスペクトル成分の急変動から N 型波形イベントを自動検出するソフトウェアが開発され、これまで蓄積されてきたデータを効率的に探索することができるようになった[7]。近年、本研究室での研究成果を生かし株式会社 SAYA との共同開発により、2015 年 2 月には、気温や加速度など複数パラメータを同時取得できる複合型インフラサウンドセンサの製品化に至っている。また開発されたセンサを高知県内 15 地点(図 1.2)をはじめ、大分、三重、愛知、静岡、千葉、茨城、岩手各県および北海道に設置し大規模な同時観測を行っており、現在も膨大なデータが蓄積されている。広域に分布した多数の観測地点の整備が実現したことによって波源やエネルギー等の高精度な解析が可能になり、地震学の領域で頻繁に使用されているグリッドサーチ法による波源位置推定も行われ、面的配置における波源位置推定法として有効であると結論づけられた(反町, 2018)[8]。



図 1.2 高知県沿岸のインフラサウンド観測地点

1.3 目的

本研究では、これまで開発されてきた解析アルゴリズムを取り入れ、高知県内に面的配置されているインフラサウンドセンサ群に対して有効な新方式の波源位置推定方法の開発および評価を行うことを目的とする。また波源位置推定の際、面的配置されたセンサを複数組み合わせることで音波到来方向の算出および波源位置の決定を行う。この時、センサの組み合わせによる検出精度の違いについても考察を行う。

2 章 波源位置推定、解析手法

2.1 インフラサウンド観測網

2.1.1 インフラサウンドセンサについて

インフラサウンド観測に用いられるセンサは、絶対圧を測る気圧計と、比較的周期の長い音圧の変動を観測できる大型マイクロフォンの 2 種類に分類される。本研究室で主に用いている絶対圧計は ParoScientific 製の Nano-Barometer(6000-16B)であり、低周波側は DC(0 Hz)に至るまで一様な周波数特性を持ち、位相特性にも優れている。ミトミ技研製のデータロガー NL-6000C と共に耐環境性を考慮した IP65 相当の防水ケースに入った形のナノロガーを屋外観測で用いることがあり、実際に 2018 年から行われているインターステラテクノロジー株式会社の観測ロケット MOMO を用いたロケット実験の際、本研究室のメンバーが打ち上げ音の地上観測を行った。大型マイクロフォンタイプのセンサは Chaparral Physics 製の Model2、Model25 があり、0.1 Hz から 200 Hz までの周波数特性を持ち、比較的高周波帯域のインフラサウンドに対し有効なセンサである。Model25 は本研究室においても多くの観測実績があり、開発センサの校正実験や、桜島噴火の多地点観測にも用いられたほか、2010 年の「はやぶさ」帰還観測にも用いられた(Yamamoto et al.,2010)。本研究室の成果をもとに株式会社 SAYA との共同開発により製品化された ADXII-INF01B/C は、大型膜面の変動を電磁誘導によって読み取っており、0.001 Hz から 6.25 Hz の周波数特性を有している。さらに、インフラサウンドの長周期微気圧変動以外にも環境パラメータ(加速度 3 成分、気温、気圧、環境騒音(RMS))の複合観測を行っており、1 章でも述べたように、現在、高知県沿岸および日本各地で本研究室が行っている観測にはこのセンサを設置・運用している。図 2.1 および図 2.2 に各センサの外観を示す。図 2.1 の左側は上が Model25、下が Model2 であり、右側がナノロガーである。図 2.2 は複合型センサの ADXII-INF01C である。



図 2.1 Chaparral 製センサ(左)およびナノロガー(右)



図 2.2 複合型センサ ADXII-INF01C

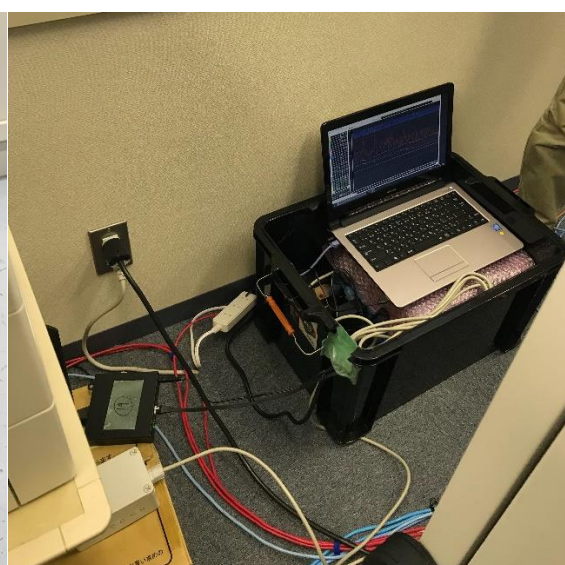


図 2.3 観測状況(東洋町)

2.1.2 データ収録方法

現在も高知県で稼働中の ADXII-INF01B/C はセンサ内部で A/D 変換を行い、誘導電流によって出力されたそのままの値(インフラサウンド DC)と DC に近い成分を取り除くようフィルタが掛けられた値(インフラサウンド AC)および各環境パラメータ、GPS 時刻、PC 時刻がイーサネットを介して PC へ送信され、専用ソフトウェアにより csv ファイルとして書き

出される。サンプリングレートは PC 側からのポーリング方式を用いているため一定ではなく、およそ 4Hz となっている。記録されたデータは観測点ごとに配置されている LTE ルーターを介して、約 15 分ごとに FTP(File Transfer Protocol)により専用のデータサーバへ送信される。また高知工科大学総合研究所インフラサウンド研究室の中津データセンター(大分県中津市)として観測協力者の金子氏によって観測データを準リアルタイムで描画する web ページも開設・運用されており、一部のデータが一般公開されているほか、関係者は日時を指定して各地点センサのデータを確認、一括ダウンロードすることができる(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)。図 2.3 は高知県東洋町内の観測地点の状況である。1 地点ごとに、インフラサウンドセンサ(ADXII-INF01B/C)、データ収録用 PC、UPS、データ転送用のルーター、時刻情報の確保のための GNSS(GPS)受信機が設置されている。

2.2 インフラサウンドデータの解析方法

2.2.1 データの仕様

ADXII-INF01B/C から出力される csv ファイルは 1 サンプルごとに 17 フィールドに分かれており、それぞれ、サンプリング時の PC 時刻の時分、秒、XYZ 各方向の加速度、可聴音域の騒音 RMS 値、気圧、GPS の 1PPS 信号、インフラサウンド DC、インフラサウンド AC、センサ温度、GPS 時刻の年、月、日、時、分、秒が記録される。表 2.1 に csv ファイルの一部を示す。

表 2.1 センサから出力された csv ファイルの 1 例

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	12:06	2.65	1.4811	1.2257	0.8172	23.9806	100.835	3839.996	-3591.95	-2285.13	43.3765	2018	7	20	3	6	27.265
2	12:06	26.768	1.3279	1.0214	0.715	23.5571	100.835	3839.996	-3969.2	-2562.38	43.369	2018	7	20	3	6	48.972
3	12:06	26.957	1.3789	0.9193	0.7661	23.3811	100.8318	3839.996	-3974.61	-2582.23	43.3754	2018	7	20	3	6	49.142
4	12:06	27.181	1.5322	1.1747	1.0725	23.4058	100.8254	3839.996	-3991.58	-2586.93	43.3737	2018	7	20	3	6	49.343
5	12:06	27.35	1.6343	1.4811	1.2768	23.3453	100.827	3455.99	-3989.77	-2570.68	43.3736	2018	7	20	3	6	49.495
6	12:06	27.566	1.6854	1.5322	1.2768	23.1391	100.835	3455.99	-3981.11	-2578.26	43.3762	2018	7	20	3	6	49.69
7	12:06	27.766	1.6343	1.3279	1.0725	22.9108	100.8397	3455.99	-3999.16	-2580.07	43.3739	2018	7	20	3	6	49.87
8	12:06	27.984	1.5832	1.0725	0.8682	22.7266	100.835	3455.99	-3979.3	-2575.74	43.3742	2018	7	20	3	6	50.066
9	12:06	28.157	1.5832	0.9704	0.8172	22.5313	100.8286	3455.99	-3976.42	-2567.07	43.3726	2018	7	20	3	6	50.222
10	12:06	28.366	1.6854	0.9704	0.8172	22.2811	100.8254	3839.996	-3969.56	-2563.1	43.37	2018	7	20	3	6	50.41

また、専用 web ページからダウンロードした csv ファイルは時刻と日付が 1 つのフィールドに纏められ、タイムスタンプ、地点ごとのセンサ番号、GPS 受信状況(符号)が追加され合計 14 フィールドになっている(表 2.2)。

表 2.2 専用 web ページからダウンロードした csv ファイルの 1 例

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	SensorNo	GpsFlag	SensorTin	SensorTin	GpsTime	GpsTime	AccX	AccY	AccZ	Noise	AirPress	InfDC	InfAC	Temp
2	1	0	00:00.2	1.52E+09	00:00.2	1.52E+09	12.6658	18.2327	17.5177	16.5802	109.8539	-54.2944	380.0609	20.7279
3	1	0	00:00.2	1.52E+09	00:00.2	1.52E+09	12.7169	18.6923	17.2623	16.4977	109.8523	-32.3456	402.0097	20.7266
4	1	0	00:00.9	1.52E+09	00:00.9	1.52E+09	12.9212	19.0498	16.9559	16.4592	109.8491	-30.0352	406.6305	20.7291
5	1	0	00:01.2	1.52E+09	00:01.2	1.52E+09	13.2276	19.1009	16.8537	16.4619	109.8539	-2.3104	430.8897	20.7317
6	1	0	00:01.4	1.52E+09	00:01.4	1.52E+09	13.5851	19.1009	16.9559	16.5087	109.8682	0	430.8897	20.7306
7	1	0	00:01.6	1.52E+09	00:01.6	1.52E+09	13.7894	19.1009	17.1091	16.5994	109.8778	-1.1552	422.8033	20.7302
8	1	0	00:01.8	1.52E+09	00:01.8	1.52E+09	13.8916	19.1009	17.4155	16.6929	109.8698	11.552	443.5969	20.7279
9	1	0	00:02.2	1.52E+09	00:02.2	1.52E+09	13.9426	19.0498	18.0284	16.7534	109.8539	-5.776	427.4241	20.7294
10	1	0	00:02.2	1.52E+09	00:02.2	1.52E+09	13.7894	19.1009	18.5902	16.7974	109.8395	10.3968	440.1313	20.7262

2.2.2 使用するデータセット

本研究で、波源位置、発生時刻が既に分かっているインフラサウンド波形として使用するデータセットは、2018 年 3 月から 6 月にかけて霧島の新燃岳が噴火した際の空振データである。この時期には比較的大規模な爆発的噴火が連続して起こり、火口付近の気象庁空振計の振幅が 200 Pa を超えるイベントが高知県でも数回観測された。今回は 100 Pa を超える比較的大規模なイベントについてピックアップし、解析を行った。用いた噴火イベントについて、噴火日時、振幅等、表 2.1 にまとめる。新燃岳からセンサ群の西端である高知県宿毛に設置してあるセンサまでは約 200 km あり、音速を 340 m/s と仮定するとおよそ 10 分で到達することになる。今回は、噴火時刻から高知県室戸市まで十分に届きうる時間範囲の各地点の csv データを上述の専用 web サイトからダウンロードし、それらを用いて解析を行う。

表 2.1 新燃岳噴火イベント

噴火日	噴火時刻 (JST)	振幅 [Pa]
2018 年 3 月 9 日	15:58	206.6
2018 年 3 月 10 日	1:54	272.4
	4:27	169.9
	10:15	140.4
	18:11	207.0
2018 年 6 月 22 日	9:09	122.5

2.2.3 N 型波形イベント自動検出ソフトウェア

反町(2016)によって開発された N 型波形イベント自動検出ソフトウェアは、インフラサウンドセンサの波形データ連続的にスキャンし火山や落雷のような突発的な爆発(衝撃波)によって発生する「N」のような形をした信号を自動検出する。時系列データを時間ブロックごとに FFT(Fast Fourier Transform)によって周波数領域に変換し全周波数成分の平均値を求めると、インパルスに発生する N 型波形イベントを含む時間ブロックは全周波数域で急激に値が上昇する。また時間ブロックごとの全周波数域平均値の配列(A)に対して任意のブロック数ごとに移動平均フィルタをかけ(B)、その値でもとの平均値を割る(A/B)ことで時間ブロック配列の急変動を検出する。割った値(C)が設定されたトリガー値を超えることでイベントの検出とする。本研究では、IDL(Interactive Data Language)上でソフトウェア化されていた N 型波形イベント自動検出ソフトウェアのアルゴリズムを、プログラム言語 Python で実装し、解析に用いる。先行研究においては、検出されたイベントを含みつつ、(B)よりも短い時定数の移動平均フィルタをかけた値(D)を(B)で割った値が 1 を超える範囲をイベント継続時間として用いていた。今回はイベント継続時間の範囲内でピークを求め、このピーク点(時刻)から FFT の際のデータ点数を足した点までをイベント波形として用いる。図 2.4 にイベント検出の例を示す。図 2.4 上段は波形データであり、下段の黒線は時間ブロックごとの周波数平均値(A)、赤線が移動平均をかけた値(B)である。FFT の点数は 256 点のため、

図 2.4 においてのイベント波形は event1 では 1 つ目のピーク点(黄緑の○)1698 から 256 点、event2 では 2 つ目のピーク点(緑の○)1864 から 256 点がイベント波形データとしてそれぞれ抽出される。またそれぞれのピーク点を各イベントの検出時刻とする。

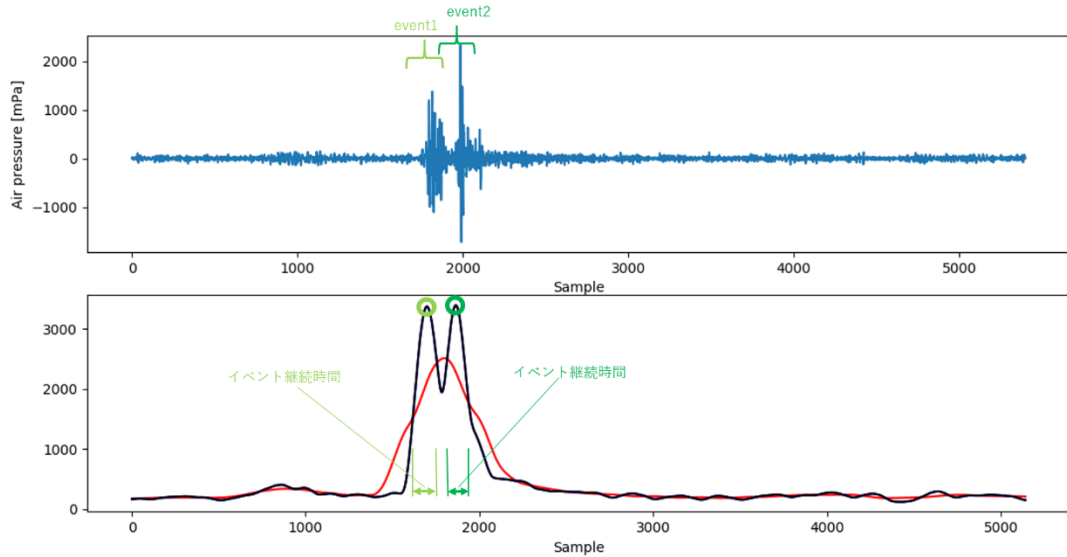


図 2.4 イベント検出の例

2.2.4 相互相関処理

通常 2 つの波形データに対して数学的類似度を求める際には相互相関処理が用いられる。本研究において、各地点のセンサで同一のイベントが観測されているかどうかの判断が必要である。前述の N 型波形イベント自動検出ソフトウェアのアルゴリズムを用いて基準となるセンサの波形からイベント波形の抽出を行い、別地点のデータに対して相関の窓をずらしながらイベント波形との相関係数を計算し、相関係数の最大値が得られた時刻をその地点での音波到来時刻とする。今回は Python の数値計算ライブラリ `numpy` の `corrcoef` 関数を用いて正規相互相関係数を求める。引数として指定した 2 つの配列に対して相関係数 R を 1 つ算出する。このとき、窓はセンサ間の距離および計算された音速の関係から、可能性のある時間範囲について移動させる。

2.3 波源位置推定方法

2.3.1 音波到来方向探知

音源がセンサ群から十分に距離が離れているとき音波の等位相面は平面と仮定できる。音波が三角形アレイに配置されたセンサ群に到達した時、センサ間の音波到来時刻に差が生じる。3 つのセンサが計測した波形データに対し N 型波形イベント自動検出アルゴリズムや相互相関処理をかけることによって、この時間差を算出する。図 2.5 のようにセンサが配置されているとき、センサ A から見たセンサ B、C の方位角をそれぞれ θ_1 、 θ_2 とし、AB 間の距離を d_1 、AC 間の距離を d_2 、センサ AB、AC それぞれの音波到来時間差を t_1 、 t_2 とする。音波の等位相面がセンサ B からセンサ A に到達する遅さ (slowness) を S_1 、センサ C から

センサ A に到達するときの遅さを S_2 とした時、その算出式は以下になる。これを用いて、式(3)、(4)によって音波到来方向 α と水平方向の音速 v を算出する。

$$S_1 = \frac{t_1}{d_1} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (1)$$

$$S_2 = \frac{t_2}{d_2} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{S_1 \cos(\theta_2) - S_2 \cos(\theta_1)}{S_2 \sin(\theta_1) - S_1 \sin(\theta_2)} \right) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot (3)$$

$$v = \frac{\cos(\alpha - \theta_1)}{S_1} = \frac{\cos(\alpha - \theta_2)}{S_2} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot (4)$$

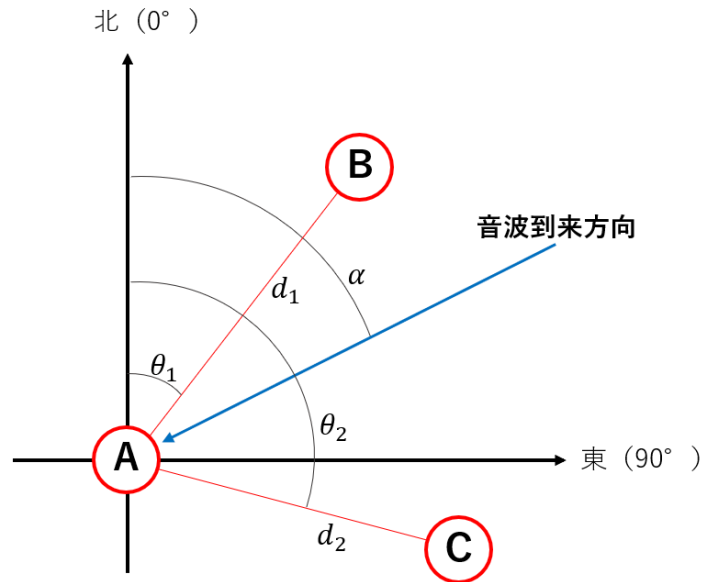


図 2.5 音波到来方向

2.3.2 波源位置推定

式(3)、(4)より得られた音波到来方向 α と音速 v を用いて波源位置の推定を行うが、ここで三角形アレイのセンサから離れた地点のセンサ D の情報を組み合わせる。式(3)で求めた音波到来方向(方位角) α で推定された線上に波源があると仮定し一定間隔で仮想的に波源を置き、式(4)より求めた音速 v と仮想波源および、各センサの位置情報を用いて波源位置を決定する。センサ A でのイベント検出時刻が T_1 、センサ D で相互相関から得られた音波到来時刻が T_4 であるとき、実際の波源からセンサ A、D に音波が到達する時間差は、 $T_4 - T_1$ となる。これに対し仮想音源からセンサ A、D に音波が到達する時間差を、仮想音源からそれぞれのセンサまでの距離を式(4)で得た音速 v で除した値の差から求める。この2つの値の差が限りなく0に近づいた地点を波源とする(図 2.6)。

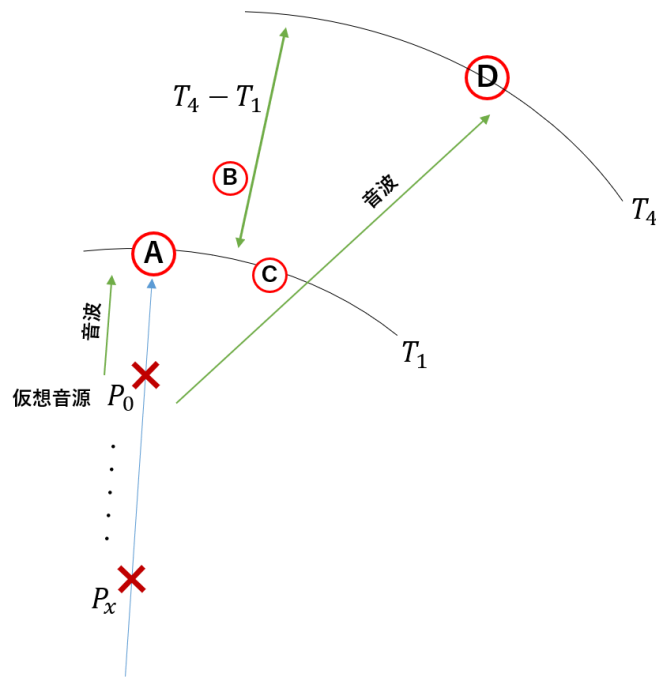


図 2.6 三角形アレイ配置センサ群(A,B,C)と 4 台目のセンサ(D)を用いた波源位置推定法

2.4 解析手法

csv ファイルの内、解析に用いるパラメータはインフラサウンド AC と GPS の時刻情報である。ADXII-INF01B/C から得られたデータはサンプリングレートが一定ではないため、csv ファイルの最初と最後の GPS 時刻をもとに 12 Hz にアップサンプリングした後、3 Hz にダウンサンプリングしてサンプリングレートを一定にしている。データの欠損があった場合、アップサンプリング時に直線補間により埋められる。ダウンサンプリングには、Python の Signal ライブラリの decimate 関数を用いて、エイリアシングの発生を避けるためのローパスフィルタも同時にかけられている。また、気温変化による気圧の変動や海洋運動によって発生する長周期微気圧変動(microbaroms)等の影響を防ぐため、0.5 Hz のハイパスフィルタをかけている。イベント抽出のためのデータ処理において、FFT の点数は 256 点、イベント検出のための移動平均は 383 点、トリガー値(N 型波形イベント検出用の閾値の倍数)は 1.5 とする。これらの値はデータによってノイズ状況等を加味しながら変更しなければならない。基準となるセンサから抽出したイベント波形 1 つにつき、上述の音波到来方向算出および波源位置推定を行う。図 2.7 のフローチャートにデータ読み込みから波源位置推定までの流れを示す。

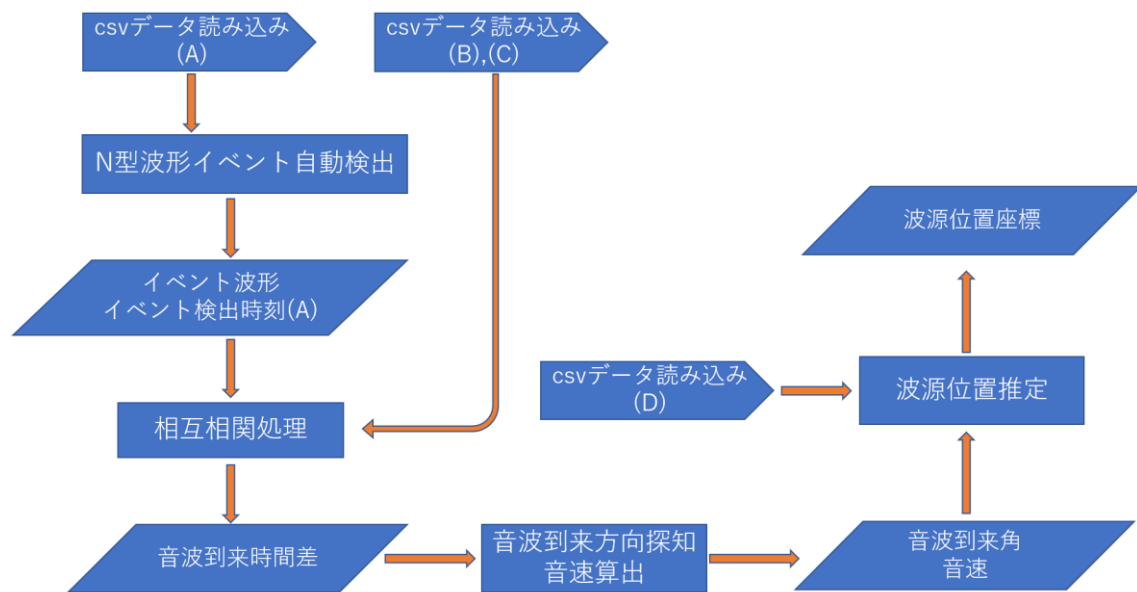


図 2.7 波源位置推定までのフローチャート

3 章 結果と考察

3.1 2018 年 3 月 10 日の噴火イベント

気象庁空振計の最大振幅において 20 Pa～274 Pa の噴火が複数回起こった 2018 年 3 月 10 日について、噴火時刻から 30 分間の csv ファイルを高知県内で稼働中の各観測点について専用 web ページから全てダウンロードし解析を行った。この日は比較的ノイズレベルが小さく、火山噴火イベントが明瞭に確認できる。図 3.1 に 3 月 10 日 4 時 27 分(JST、以下同じ)に新燃岳にて噴火が観測されてから 30 分間のフィルタ処理後のインフラサウンド波形、およびイベント抽出のための時間ブロックごとの振幅スペクトルの平均値(黒線)とこれに移動平均をかけた値(赤線)のグラフを示す。表 1 のように観測地点ごとに番号が振られており、図 3.1 に示した csv8 は足摺岬の 3 地点の内の 1 か所(足摺岬 1)のデータである。

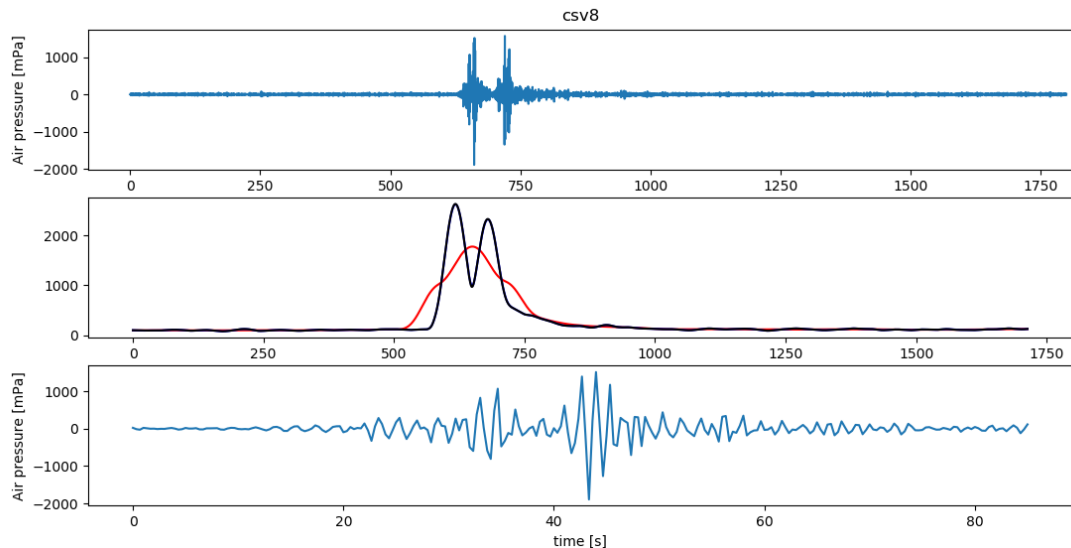


図 3.1 インフラサウンド波形、イベント検出処理およびイベント波形

表 3.1 地点番号と観測地点

csv00	高知工科大学	csv09	足摺岬 2
csv01	黒潮町浮鞭	csv10	足摺岬 3
csv02	黒潮町蜷川	csv11	土佐市宇佐
csv03	黒潮町上川口	csv12	高知市春野
csv04	黒潮町出口	csv13	南国市物部
csv05	黒潮町馬荷	csv14	安芸市西浜
csv07	土佐清水市宿毛	csv15	東洋町生見
csv08	足摺岬 1	csv16	室戸岬

図 3.1 の X 軸はデータの先頭時刻からの経過時間を示しており、この場合 2018/3/10 4:27:00

から 1800 秒間のデータである。中段は 2 章で述べたイベント検出処理の波形、下段は抽出されたイベント波形である。中段のデータ長は FFT の点数分(256)短くなっており、下段は上段の 617.667 秒(1853 点目)から 85.333 秒間(256 点)のデータとなっている。

本研究の手法では波源位置推定には少なくとも 4 台のセンサ情報が必要である。4 地点の選び方は、宿毛市、黒潮町 5 地点、土佐清水市足摺岬 3 地点に設置されているセンサから音波到来方向探知のための三角形アレイを組む 3 台(基準点 A、B および C)を選び、土佐市宇佐、高知市春野、南国市、安芸市、室戸市、東洋町の 6 地点から波源位置決定のための 1 台(D)を選ぶ。3 月 10 日 4 時 27 分に起こった噴火について 10 地点(黒潮町蜷川、黒潮町上川口、黒潮町馬荷、宿毛市、土佐清水市足摺岬 1、足摺岬 2、足摺岬 3；土佐市宇佐、高知市春野、室戸市)のセンサで噴火イベントらしき波形がグラフ上の目視で十分に見えている(図 3.2)。本イベントに対してはこの 10 地点の内 4 地点のデータを組み合わせて波源位置推定を行った。3 地点+1 地点になる組み合わせ 630 通りについて全てを試した場合の波源位置推定結果を図 3.3 に示す。計算の際、音波到来方向算出の結果、方位角が -110° から -160° の間であり、かつ算出された音速が 240 m/s から 400 m/s の組み合わせのみ波源位置推定の計算を行った。図 3.3 において赤色記号は波源である新燃岳火口を、青色記号によるプロットは推定されたそれぞれの波源である。また、図 3.3 において本当の波源に最も近いと推定された波源について、用いられた csv8 および csv12(春野)の波形データ(左上: csv8、右上: csv12)、csv12 とイベント波形の移動相関グラフ(右下)、計測された波形からイベント検出と相互相関によって得られたセンサ A、D 間の時間差と、仮想波源からの距離および算出された音速から計算したセンサ A、D までの時間差の差分(左下)を、図 3.4 にそれぞれ示す。

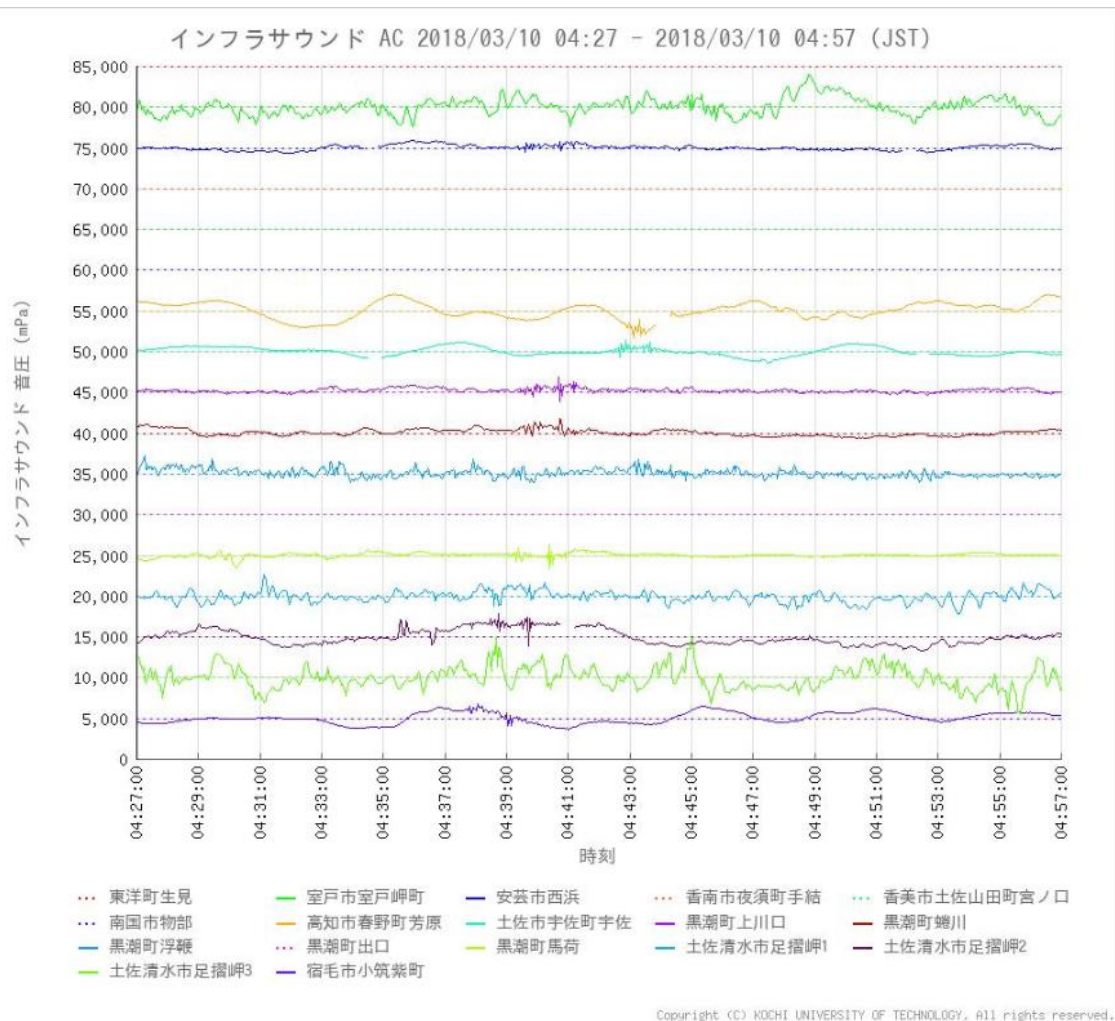


図 3.2 2018 年 3 月 10 日の噴火後 30 分の波形データ
(高知工科大学インフラサウンド観測ネットワークシステム)

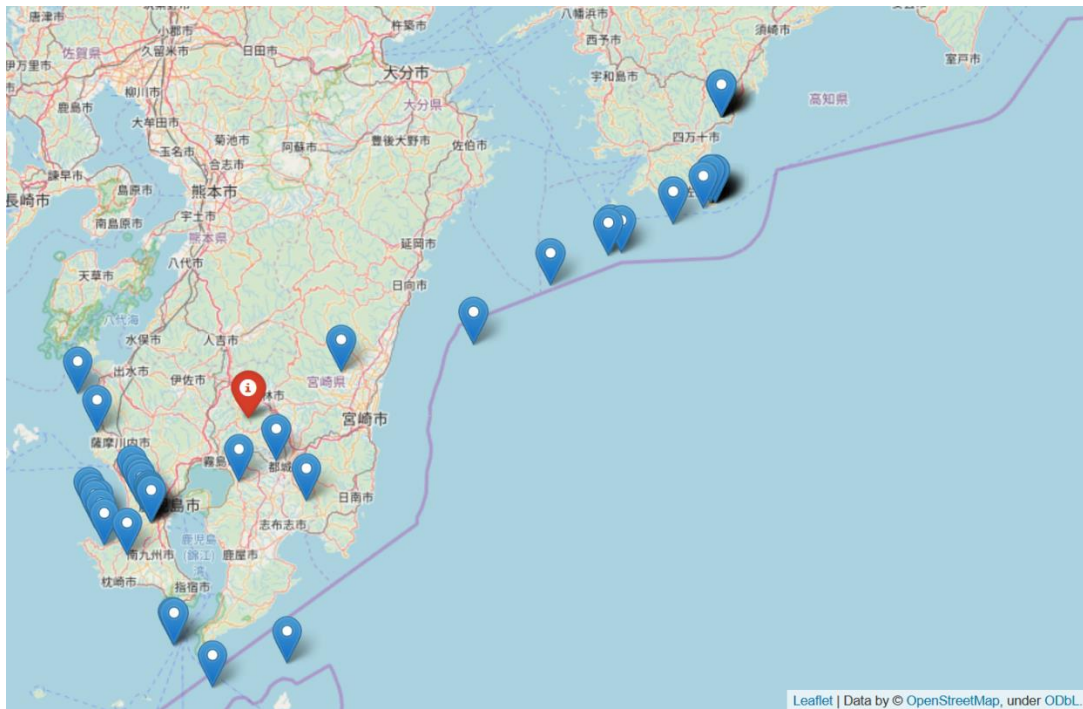


図 3.3 2018 年 3 月 10 日 4:27 の噴火イベントに対応する推定された波源位置の例

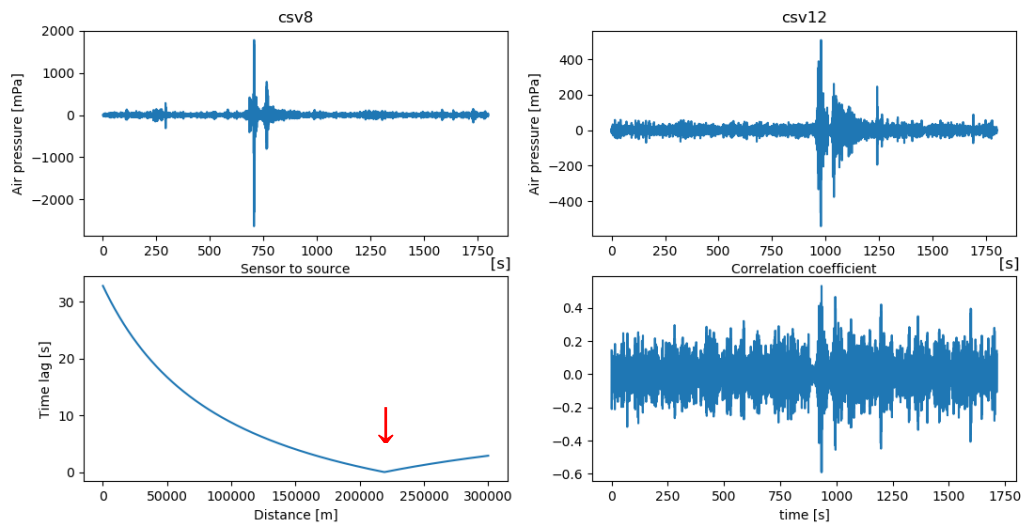


図 3.4 波形データと相関値および推定する波源までの距離

この時、csv8(足摺岬 1)を基準センサ A として、csv3(黒潮町上川口)をセンサ B、csv7(宿毛市)をセンサ C とする 1 辺約 30 km の三角形アレイ観測により音波到来方向を算出し、csv12(高知市春野)をセンサ D として波源位置推定を行った。この結果、波源である新燃岳火口から南南東方向の距離約 23 km の地点に波源が推定された。センサ A からこの地点までの距離は 219.2 km であり、センサ A から新燃岳火口までの距離 218.5 km と比べると距離的な誤差は 700 m であるが、センサ A から新燃岳火口を見た方位角は -112° 、推定された地点を見た方位角は -119° と、 7° の誤差がある。

図 3.4(左下)のグラフは、上述の計測された時間差と計算された時間差の差分を表しており、この値が 0 に限りなく近い値を取る点(赤矢印で示す)を求めるために絶対値を取っており、最小値の点がセンサ A から波源までの距離として現れる。この過程では、イベント検出時刻と相関のピーク点の時間差を本当の波源からの時間差として扱うが、相関のピークが別のノイズ波形との相関のほうに合致してしまうことで大幅に前後すると、図 3.4(左下)のグラフは横軸の範囲内に最小値を取ることがなく波源位置をセンサ A のごく近傍か、設定している走査範囲の最大距離に決定される。図 3.2 において波源位置の南西に並んでいる地点や高知県近傍にある地点がこの状態であると考えられる。

図 3.5 に相関値のピークがイベントから離れたところで得られた場合の結果を示す。図 3.5(右下)の相関係数のグラフにおいて、相関係数の最大値はおよそ 1150 秒に見られる(矢印)。この場合、図 3.5(左下)の時間差の差分が 0 を通ることはなく最小値が距離 0 の地点になる。この場合、基準となるセンサ A との距離 0 として推定されるが、タイムラグは 600 秒もあり棄却できる。

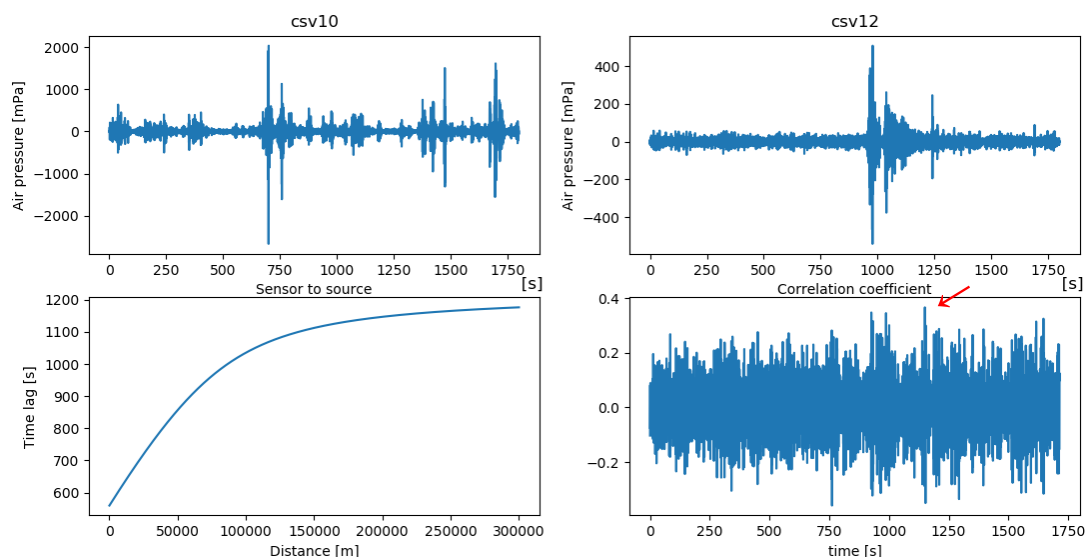


図 3.5 相関値のピークがイベント時刻から離れて現れた場合の波形

2018 年 3 月 10 日には 1 時 57 分と 10 時 15 分にも比較的振幅の大きな噴火が起こっている。同じく噴火のイベントが見えるデータを用いて波源位置推定を行った結果を図 3.6(1:57) および図 3.7(10:15)にそれぞれ示す。1 時 57 分の噴火については 630 通り、10 時 15 分の噴火については到来方向算出のための 3 地点の候補が 8 地点、および距離決定の D 地点の候補が 3 地点あり、1008 通りの組み合わせで行った。

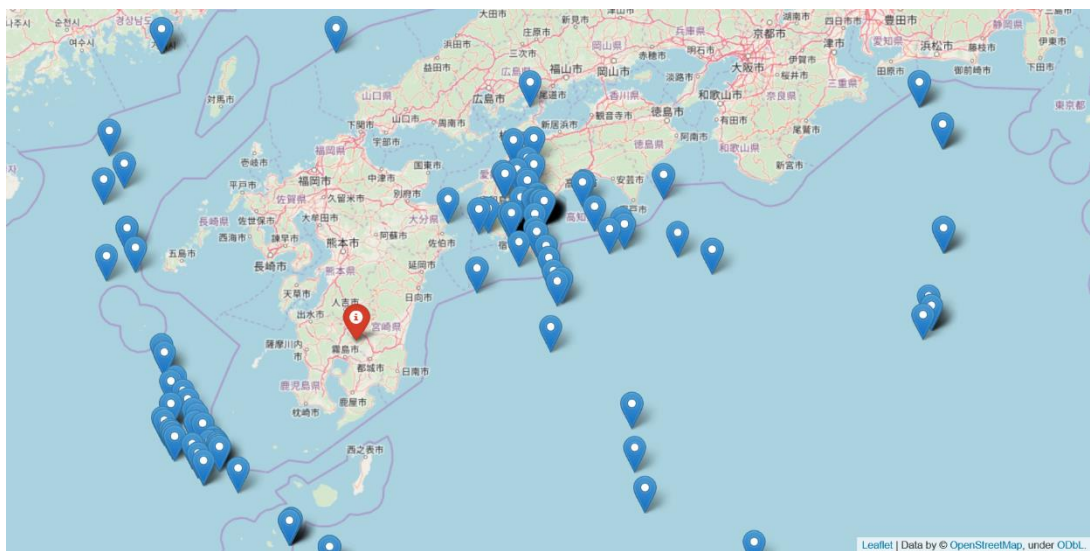


図 3.6 2018/3/10 1:57 の噴火イベントについての波源位置推定結果

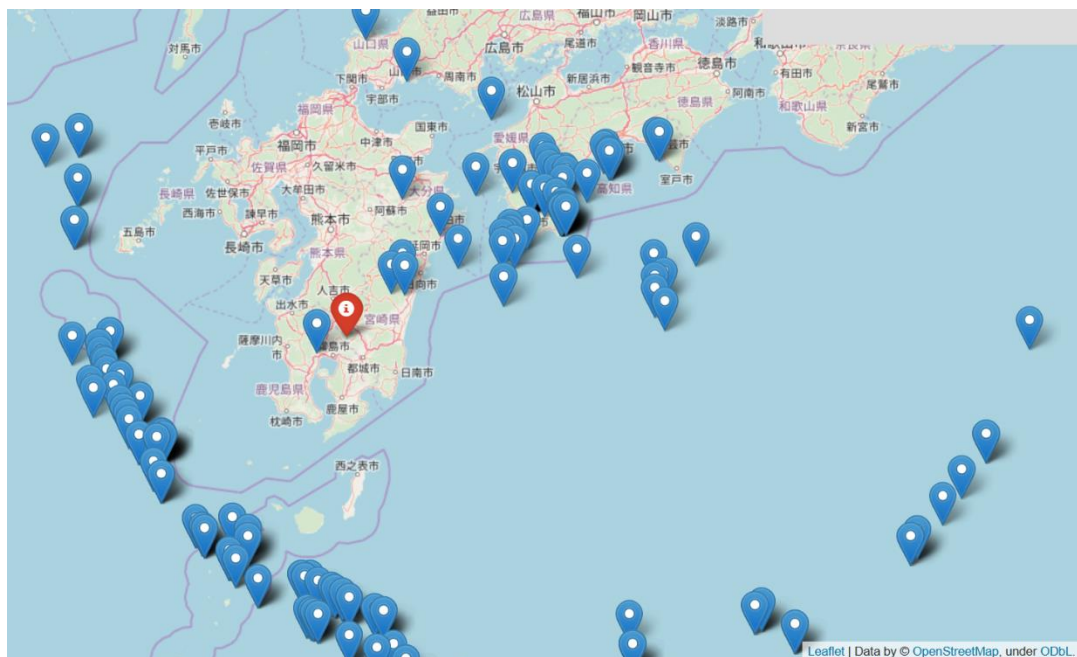


図 3.7 2018/3/10 10:15 の噴火イベントについての波源位置推定結果

3 月 10 日 18 時 11 分の噴火について波源位置推定を行った結果を図 3.8 に、拡大したものを図 3.9 にそれぞれ示す。このときのセンサの組み合わせは同じく 1008 通りで行い、波源から 85 km の範囲内に 14 箇所の波源が推定された。14 箇所の推定された波源について、用いられた 4 地点のセンサの組み合わせを表 3.2 に示す。

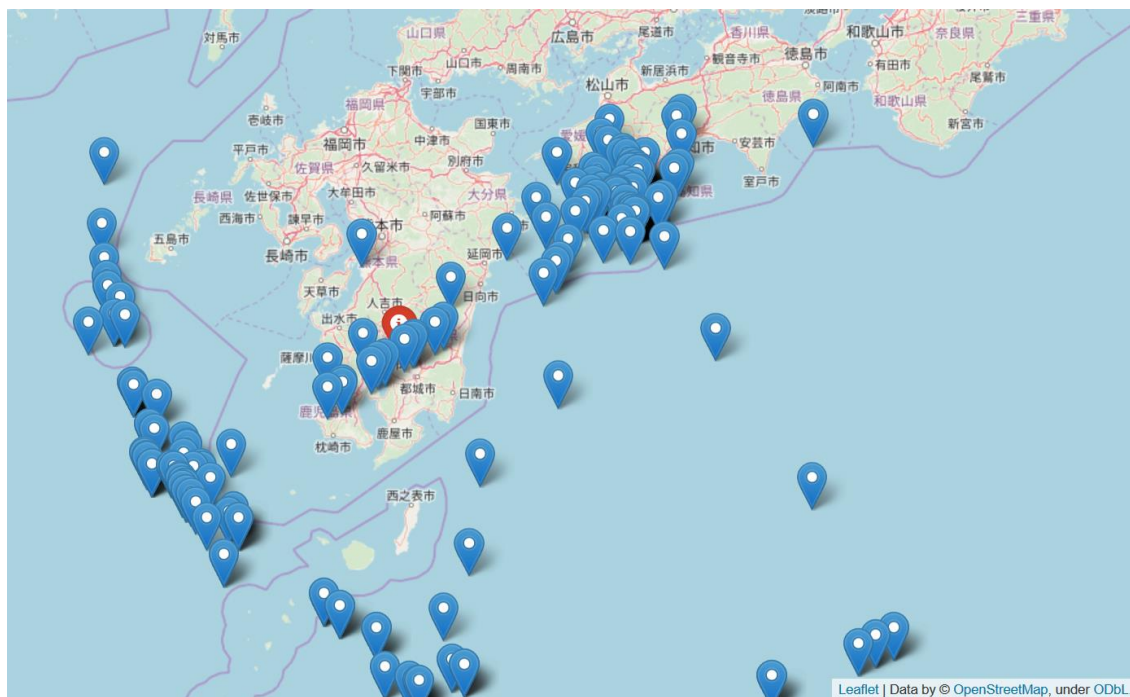


図 3.8 2018/3/10 18:11 の噴火イベントについての波源位置推定結果

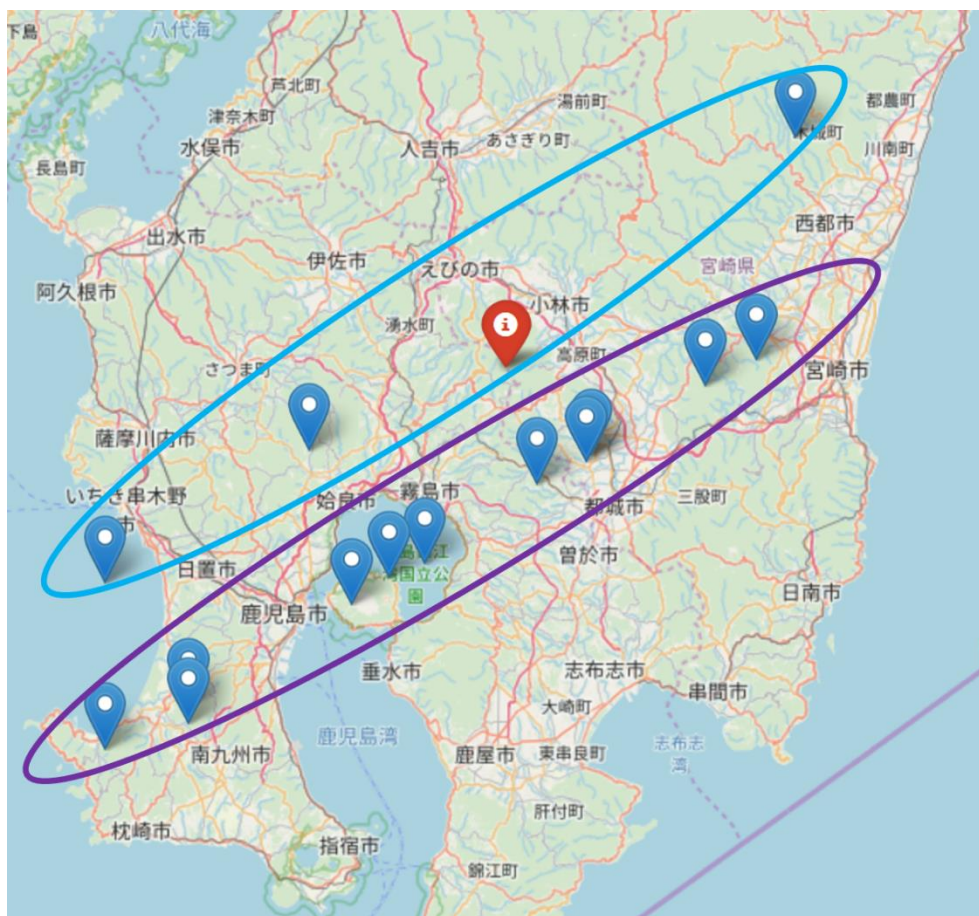


図 3.9 2018/3/10 18:11 の噴火イベントについての波源位置推定結果(拡大)

表 3.2 波源推定に用いられたセンサの組み合わせ

Sensor A	Sensor B	Sensor C	Sensor D
3	7	10	11
3	7	9	11
3	7	8	11
10	2	7	12
10	8	2	12
10	2	7	11
10	8	7	12
10	8	2	11
10	8	3	11
10	8	7	11
10	3	7	12
10	8	3	11
8	2	5	11
10	3	7	11

図 3.9 において北東-南西方向に一例に並んだ推定波源が 2 列見られる。上側(水色の丸)の 3 点の計算で基準センサ A として選ばれた地点はすべて csv3(黒潮町上川口)であり、下側(紫の丸)の列は 1 点を除いて csv10(足摺 3)であった。csv8 も足摺岬に設置されているセンサであるため下側の列はすべて足摺岬が基準センサ A となっている。上側の 3 点は方位角の誤差が小さく、下側の 11 点は距離算出の誤差が小さいことが分かる。

この時の音波到来方向算出のためのセンサ 3 台で作られる三角形アレイ選択の様子を図 3.10 に示す。

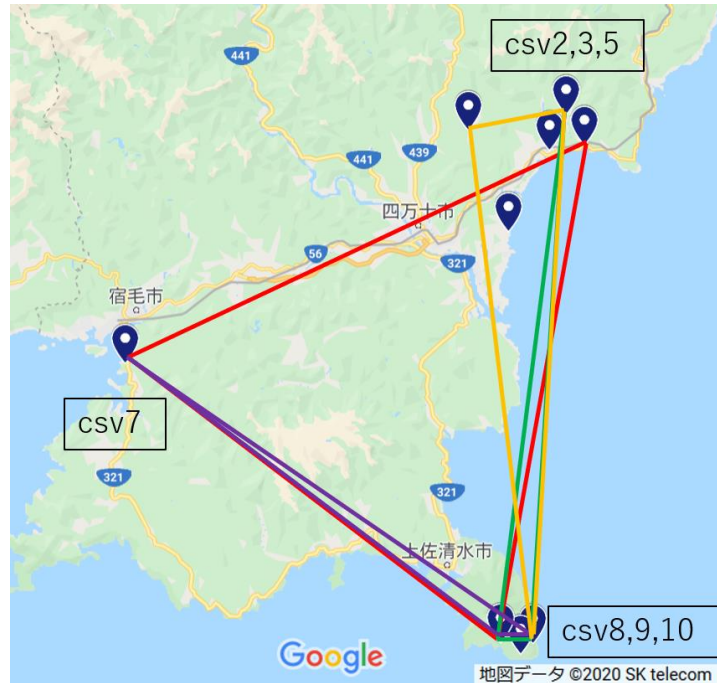


図 3.10 センサ 3 台で作られる三角形アレイ

推定された波源の内、上側の 3 点(図 3.9 の水色枠)の計算に用いられた組み合わせは、すべて 1 辺約 30 km のアレイ(図 3.10 の赤色の三角形)である。対して下側の列の 11 点(同、紫色枠)の内、7 点は扁平な三角形(図 3.10 の黄、緑、紫)の組み合わせである。音波到来方向算出において算出される方位角は基準センサからの方位角が得られる。csv3 を基準とした三角形アレイから推定された波源は方位角 -119.2° から -120.1° の間にあり、実際の csv3 から波源までの方位角 -122.14° に対して $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ の誤差である。csv10 を基準とした時に推定された波源は -119.1° から -119.6° の間にあり、実際の csv10 から波源までの方位角 -115.2° に対しておよそ 4° の誤差がある。以上より、音波到来方向の精度は、扁平な三角形アレイよりも宿毛、足摺岬、黒潮町から各 1 地点ずつ選ばれる三角形アレイの方が良いと考えられる。

次に、基準センサ A と波源、およびセンサ D との位置関係を図 3.11 に示す。

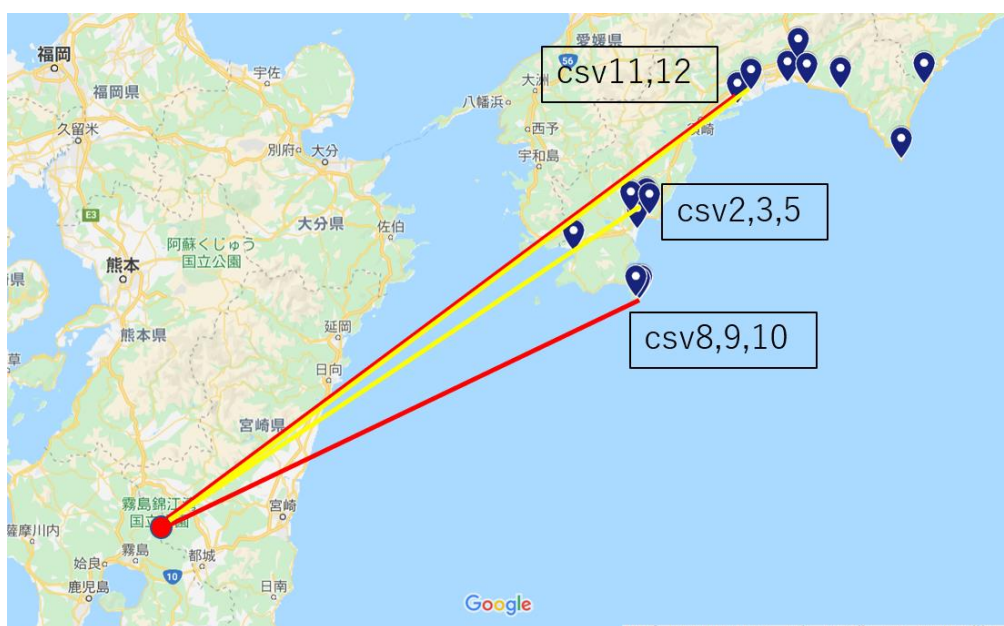


図 3.11 センサ A—波源—センサ D の位置関係

センサ A として用いられた csv3 と csv10 および csv8、波源位置、センサ D として用いられた csv11 および csv12、これら 3 地点から成る角度の違いを表しており、推定された波源の内、上側の 3 点(図 3.9 の水色枠)は黄色、下側の 11 点(同、紫色枠)は赤色で表される。csv3-波源-csv12 で作られる角度(黄)は 4.02° 、csv10-波源-csv12 で作られる角度(赤)は 11.22° であった。波源推定結果より、 4.02° で行われた波源推定で得られた結果が 3 点に対し、 11.22° の角で得られた結果が 11 点あることより、音波到来方向の算出の後、距離決定の処理で精度を得るためにはセンサ A-波源-センサ D で作られる角度がある程度必要と考えられる。

2018 年 9 月には大分県別府市(京都大学 地球熱学研究施設内)に 2019 年 2 月には同中津市(高知工科大学 総合研究所 インフラサウンド研究室 中津データセンター内)に、それぞれセンサーを設置しており、今後、大きな空振を伴う火山噴火が新燃岳で発生した際にはこれを検証できると期待される。

3.2 ノイズレベルが大きい場合の波形データ

観測環境や観測日の気象条件によっては、音波観測のノイズレベルが大きくなり、これまでの解析で用いていたパラメータではイベント検出や相関値のピークがうまく得られないことがある。2018 年 3 月 9 日に新燃岳で起こった振幅 200 Pa(気象庁空振計)を超える大規模な噴火でも別の地点と良い相関が得られることは少なかった。また、N 型波形イベント自動検出アルゴリズムにおいても検出されづらく注意が必要である。図 3.12 に 3 月 9 日 15 時 58 分の噴火から 30 分間の csv14(安芸市)における波形データおよびイベント検出処理結果を示す。

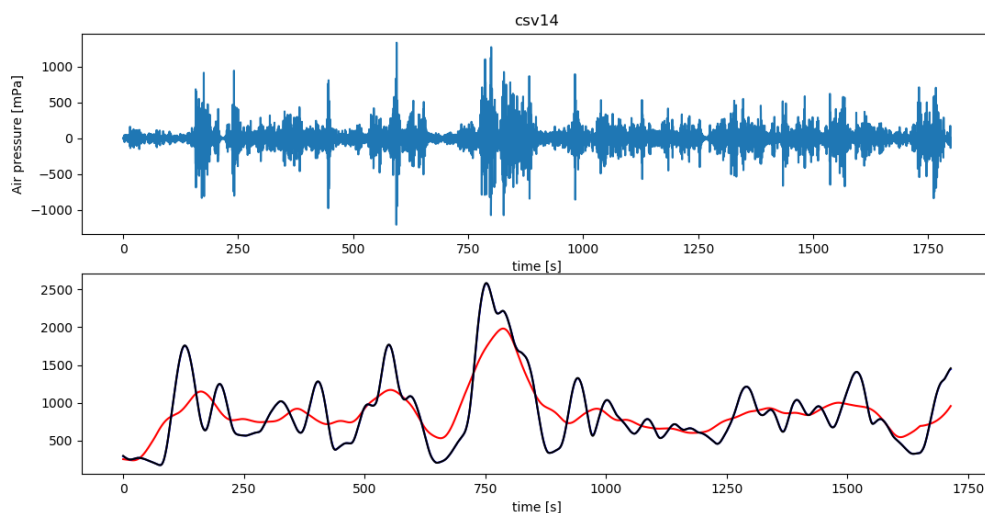


図 3.12 3 月 9 日 15:58 の火山噴火による空振データ

図 3.12 のようなインパルスな波形が多く含まれているとき、N 型波形イベント自動検出アルゴリズムを適用するとそのほとんどをイベントとして検出する。一方で 750 秒から 90 秒間のような長い揺れがあるところこのアルゴリズムでは検出されない。その場合、移動平均フィルタ(赤線)を長くとか、トリガー値を下げるしかない。ただし余分な信号もイベントとして検出されるので注意が必要である。

3 月 9 日 15:58 の噴火時イベントについて、csv8(足摺岬 1)をセンサ A、csv7(宿毛)をセンサ B、csv5(黒潮町馬荷)をセンサ C として、csv8 で抽出されたイベントと csv7、csv5 それぞれの相関を求めた。csv8 で抽出されるイベントは複数あるが、時間から判断して噴火の信号と思われるものを 1 つ選ぶ。図 3.13 に波形データから抜き出したイベント波形、図 3.14 にセンサ B のインフラサウンドデータとセンサ A-B の相関係数配列、およびセンサ C のインフラサウンドデータとセンサ A-C の相関係数配列をそれぞれ示す。

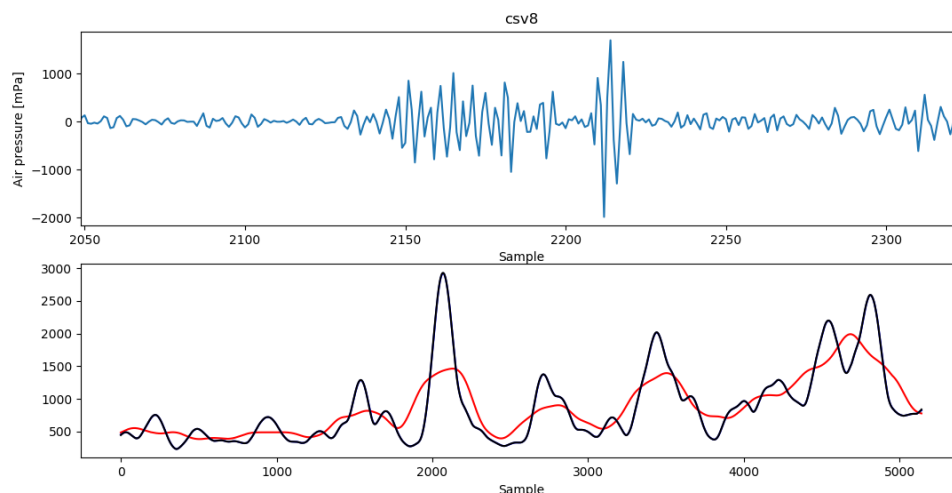


図 3.13 csv8 から抽出されたイベント

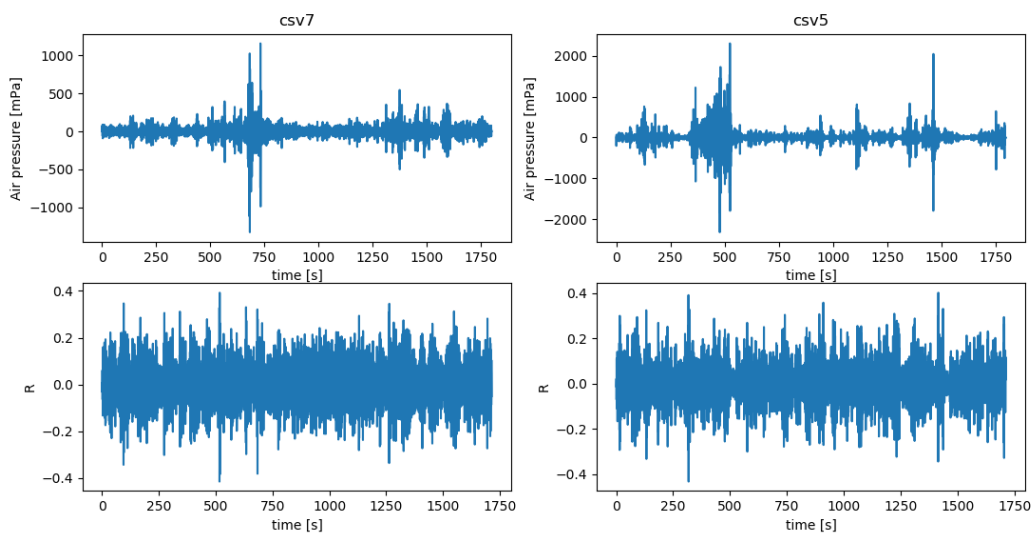


図 3.14 csv7、csv5 における相関

イベント波形とセンサ B、C それぞれの相関係数配列ではどちらもノイズ成分のところにピークが得られてしまったため、波源位置は推定できなかった。このようなデータが波源位置推定のための 4 台の内に 1 つでも含まれると、各センサに音波が到達した時刻が正確に得られず、今回のアルゴリズムのみでは波源推定には至らなかった。ノイズ成分が大きいデータに対しては、イベント波形のデータ長を長くするなど、別の処理や工夫が必要であり、本手法に基づいて自動処理を行うには課題が残る。

4 章 結論

本研究は、高知県沿岸部に面的に配置されたインフラサウンドセンサ群を用いた新方式の波源位置推定法の提案と自動処理プログラム開発を目的として実施した。

南九州にある霧島新燃岳の火山噴火によるインフラサウンドは 200 km 以上も離れた高知県内に設置されたセンサ群まで伝搬し、このうちノイズ成分に埋もれないセンサにて観測された。これらのデータを用いた自動解析により遠隔の大規模事象(イベント)についての防災情報を取得するため、本研究では新しい波源位置推定法を提案した。

本研究で新たに提案した波源位置推定アルゴリズムは、波源、三角形アレイセンサ群、4 地点目のセンサがある程度の見込み角を持つ場合でないと精度の良い波源位置推定ができない。今回、波源が既知である新燃岳噴火時の複数の空振イベントについて高知県内の複数の観測地点で同時観測されたデータを用いて解析を行ったが、九州南部にある新燃岳の波源に対して、津波防災を主目的として高知県内に東西方向に長い配置で面的に並べられたセンサ群との位置関係が上述の角度条件を満たさず、自動処理としては困難な例が多くなった。その中で 2018/3/9 18:11 の噴火イベントに対してある程度精度の良い波源推定を行うことができ、適切な条件下での提案手法の有用性をある程度示すことができたと共に、解析に用いるセンサ数を増やせる条件の有利性を検証できた。

謝辞

本研究を進める上で指導教員としていつも丁寧な指導をしてくださった山本真行教授、副査を引く受けて下さった岩下亮教授、田上周路准教授に感謝いたします。センサネットワークの構築・運用に尽力して下さった金子光弘様、センサの設置に協力して下さった皆様に感謝申し上げます。研究の相談や雑談に付き合ってくださいました研究室の皆様に感謝申し上げます。

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 巻 8 号, 428-433, 2007.
- [2] 田平誠, 火山噴火によって発生するインフラサウンドについて, *日本音響学会誌* 48 巻 10 号, 1992.
- [3] Alexis Le Pichon, Lars Ceranna, Christoph Pilger, Pierrick Mialle, David Brown, Pascal Herry, Nicolas Brachet, The 2013 Russian fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors, *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, 3732-3737, 2013.
- [4] 西山好則, 新方式インフラサウンドセンサの開発, 高知工科大学 平成 18 年度 卒業研究報告, 2007.
- [5] 山田龍樹, インフラサウンドによる微小気圧変動の検出方式の検討と空振計の開発, 高知工科大学 平成 20 年度 卒業研究報告, 2009.
- [6] 小松孝康, インフラサウンド多地点アレイ観測システムの構築と音波源位置の推定, 高知工科大学 大学院工学研究科 平成 23 年度 特別研究報告, 2012.
- [7] 反町玲聖, インフラサウンド N 型波形イベント自動検出ソフトウェアの開発, 高知工科大学 平成 27 年度 卒業研究報告, 2016.
- [8] 反町玲聖, インフラサウンドセンサの面的配置における波源位置推定方法の最適化, 高知工科大学 平成 27 年度 卒業研究報告, 2018.