

修士論文

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

Optimization method to estimate wave source positions for
widely distributed infrasound sensors

報告者

学籍番号: 1205068

氏名: 反町 玲聖

指導教員

山本 真行 教授

平成30年2月12日

目次

1章	序	1
1.1	インフラサウンドについて	1
1.2	背景	1
1.3	目的	1
2章	インフラサウンド波源の推定手法	3
2.1	インフラサウンドの観測手法	3
2.1.1	インフラサウンドセンサについて	3
2.1.2	データ収録方法	4
2.2	インフラサウンドデータの解析方法	4
2.2.1	到来方向探知による波源位置推定について	4
2.2.2	先行研究における波源位置推定	6
2.2.3	グリッドサーチ法について	6
2.2.4	先行研究のデータセットを用いた波源位置推定	8
2.3	高知県沿岸におけるセンサのインフラサウンド解析システムの開発	10
2.3.1	面的配置におけるインフラサウンド観測網	10
2.3.2	面的配置におけるイベント検出、波源位置推定について	11
3章	結果と考察	13
3.1	先行研究のデータセットを用いた波源位置推定結果と考察	13
3.2	高知県沿岸におけるセンサの面的配置による波源位置推定結果と考察	21
3.3	先行研究の結果との比較	26
3.4	高知県沿岸におけるセンサの解析アルゴリズムの評価	27
4章	結論	28
	参考文献	29
	謝辞	30

1章 序

1.1 インフラサウンドについて

インフラサウンドは周波数 20 [Hz]以下の音波と定義されており、一般にヒトの可聴域は 20 [Hz]から 20 [kHz]とされているため、ヒトの耳では聞くことが出来ない超低周波音のことを指す。音波は水平方向には限りなく 0 に近い周波数まで伝搬できるが、鉛直方向には重力の影響を受け 15 [°C]の等温大気中では周波数 3.21 [mHz]以下の音波は伝搬出来ず、事実上周波数に下限が存在する[1]。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波は大気重力波に分類される。インフラサウンドは基本的には音波の性質を示すが、特筆すべき点として長距離伝搬することがあげられる。音波の減衰には空間的なエネルギーの散逸による「幾何学的減衰」と音波の振幅に依存する「非線形減衰」、大気の粘性に依存する「空気の粘性による減衰」の 3 種類が存在するが、超低周波音であるインフラサウンドは周波数の 2 乗に比例して強くなる「空気の粘性による減衰」の影響を受けにくく長距離伝搬できる特徴を有す[1]。



図 1.1 音波の分類

図 1.1 は大気重力波、インフラサウンド、可聴域、超音波の周波数による分類を示す。インフラサウンドは、火山の噴火や隕石の飛来、落雷、土砂崩れ、津波など種々の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おり、これらイベントは災害に繋がることも多い。2013 年 2 月にロシアのチェラビンスクにおいて巨大な隕石が飛来した際、隕石の大気圏突入による衝撃波イベントに伴うインフラサウンドが世界各国で観測され、地球上を 2 周した波動も観測されている[2]。2011 年の東北沖地震により発生した津波によって励起された長周期のインフラサウンド波形は微気圧計によって地球上の広域で観測されている[3]。インフラサウンドは地球物理学的イベントに起因するため、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[4]。

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、古くは京都大学における 1910 年代からの研究があるが[5]、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。国際条約に基づく世界的な核実験検知網として CTBTO(Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organization)により地球上に 60 点の観測網構築が進んでいる。国内における CTBTO 観測網は千葉県いすみ市の 1 地点において 6 台のインフラサウンドセンサによるアレイ観測が連続運用されている。しかしセンサが高価なため国内におけるインフラサウンドの観測地点は限られており、本分野の研究の発展および地球科学的現象の知見

を得るために理想的な密度での観測はなされていないのが現状である。著者の所属する高知工科大学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、西山(2007)によって圧電素子を用いた低価格なセンサの開発が行われた[6]。山田(2009)より低価格で高性能な膜面を用いたセンサの開発をすすめ PSD(Position Sensitive Device)と半導体レーザーを用いた非接触の光学式センサの開発が行われ膜面の位置を渦電流により計測するセンサの可能性が検討された[7]。また、小松(2012)によって三角アレイ配置のセンサを多地点に設置する多地点アレイ観測が行われ、桜島火山の噴火による空振を観測し、半径 15 [km]の精度で音波源位置を推定することに成功している[8]。南極大陸においては、2008年から国立極地研究所や JARE(南極地域観測隊)と共同して昭和基地および Lützow-Holm Bay 周辺でインフラサウンドの観測を行っており、随時データが蓄積されている(Murayama et al., 2017) [9]。反町(2016)によって、これら蓄積されたインフラサウンドデータの中からスペクトル成分の変動検出により 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莫大なデータの中から N 型波形イベントがセンサに到達したと考えられる時刻を効率的に確認できるようになった[10]。最近では、本研究室で行われてきた基礎研究成果を生かし安価かつ高性能な新方式インフラサウンドセンサを企業と共同開発により製品化に成功し、センサの入手や改良が容易となった。MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)型加速度センサなどを搭載した複合型センサが開発されこれまでにない大規模なスケールで日本各地にセンサを地震計観測網の様に配置する面的配置が可能となりつつあり、2017年にはその先駆けとして高知県沿岸に新たに 15 台の新型センサを整備した。そのためこれまでに行われてきた三角形アレイ観測に代わる新たな観測・解析手法が必要なフェーズとなっている。

1.3 目的

本研究では、従来の観測手法であるインフラサウンドセンサの三角形アレイ配置を用いた到来方向探知による波源位置推定法に代わって、センサの面的配置に特化した観測・解析システムを構築し、その妥当性について評価を行う。また災害時におけるアラートの発令を行う際必要となる準リアルタイム処理に繋げることを視野に入れ、イベントの自動検出から波源位置推定までを自動で行うシステムの開発を目的とする。

2章 インフラサウンド波源の推定手法

2.1 インフラサウンドの観測手法

2.1.1 インフラサウンドセンサについて

インフラサウンドの観測には相対的な気圧変化を観測することの出来る、低周波感度に優れたマイクロフォンを用いる場合と、絶対的な気圧を観測することのできる、高分解能、高サンプリングレートな気圧計を用いる場合がある。前者には、主に大型のコンデンサマイクロフォンであり、本研究室においても長年にわたって使われておきた。小松(2012)においても、Chaparral Physics 製の Model 2 および Model 25 を用いた観測が行われた。Model 25 の周波数特性は 0.1 [Hz] から 200 [Hz] の間に緩やかなカットオフが存在し比較的高周波領域のインフラサウンドに特化している。これに対して絶対圧計は本研究室においてに ParoScientific 製の Nano-Baro(6000-16B) が使われ DC に至るまで一様な周波数感度特性を持ち位相特性にも優れている。各センサの写真を図 2.1 に示す。しかし、これらのセンサは外国製のため高価であり多地点に大量のセンサを配置するのが難しい。近年では、本研究室において研究されてきた大型膜面を用いたインフラサウンドセンサを株式会社 SAYA との共同開発により 1 [mHz] までの低周波を高感度で観測出来かつ、気温、気圧、加速度といった複数の環境パラメータを取得できる複合型センサ ADXII-INF01B/C の製品化を実現している。複合型センサを図 2.2 に示す。図 2.1 の左上が Chaparral Physics 製の Model 25、左下が Model 2、右側が ParoScientific 製の Nano-Baro(6000-16B) および、ミトミ技研製 LN-6000C データロガーである。また、図 2.2 の左が ADXII-INF01B であり、右が ADXII-INF01C である。



図 2.1 本研究室で活用されてきたインフラサウンドセン



図 2.2 株式会社 SAYA と共同開発した複合型インフラサウンドセンサ

2.1.2 データ収録方法

本研究室における観測でインフラサウンドのデータを収録する際にはパソコンやデータロガーが用いられる。Chaparral Physics 製のセンサを用いる場合は、アナログの電圧値により信号が出力されるため電圧値をサンプリングし SD カード等に記録する専用のデータロガー(白山工業製 LS-8800 など)を用いる場合と AD 変換ボードで電圧値を量子化しパソコンでロギングソフトウェアにより記録する方法がある。ParoScientific 製の Nano-Baro を用いて観測する際は、センサからシリアル信号として観測データが出力されるため、RS232C もしくは RS485 インターフェースによりパソコンで記録するか、図 2.1 の右側に示す専用のデータロガー(ミトミ技研製 LN-6000C)を用いて SD カードに記録される。今回、本研究室で高知県沿岸に配備を進めている ADXII-IFN01B/C の場合はセンサ内部で AD 変換されフィルタリングされた信号がイーサネットによってパソコンの専用ソフトウェアにより順次記録され、ファイル記録されたデータが FTP(File Transfer Protocol)によって逐次、専用のデータサーバに送信される。

2.2 インフラサウンドの解析方法

複数地点で観測され、記録されたインフラサウンドのデータは統合解析に回される。反町(2016)によって開発されたインフラサウンド N 型波形自動検出ソフトウェアは観測データを 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が、移動平均フィルタで平滑化された値と比較され、設定した倍数のトリガー値をこえたものをインフラサウンドにおけるイベントとしてピックアップするものである[10]。また、多地点での観測データの正規相互相関処理によってイベントを検出し、音波の到達時間差の算出が行われる。

2.2.1 到来方向探知による波源位置推定について

三角形アレイ配置によるセンサ群によって観測された波形データは、相互相関処理やピークサーチなどによってセンサに音波が到達した時間差が算出される。この時間差とアレ

イ配置の形状から音波がセンサに到来したときの北を基準とした方位角 α を式(1)で、音波の水平方向到来速度 v を式(2)でそれぞれ、算出することが出来る。図 2.3 におけるセンサ A とセンサ B との距離を d_1 、センサ A とセンサ C との距離を d_2 とし、センサ A を基準にした時のセンサ B の方位角を θ_1 、センサ C の方位角を θ_2 として、センサ A に対するセンサ B の音波が到達した時間差を t_1 、センサ C の時間差を t_2 とし、センサ B からセンサ A に音波の等位相面が到達する時の遅さ (slowness) を S_1 、センサ C からセンサ A に等位相面が到達する時の遅さを S_2 すると算出式(1)、(2)は以下のようなになる。[1]

$$S_1 = \frac{t_1}{d_1}$$

$$S_2 = \frac{t_2}{d_2}$$

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

$$v = \frac{\cos(\alpha - \theta_1)}{S_1} = \frac{\cos(\alpha - \theta_2)}{S_2} \dots (2)$$

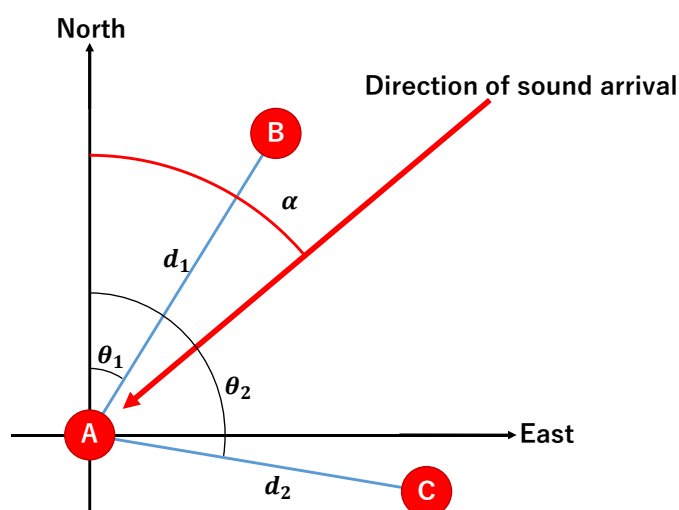


図 2.3 到来方向探知におけるセンサと音波の関係[8]

このため、音波の到来方向を探知するための三角形アレイ配置によるセンサを 2 地点以上に展開することで音波の到来方向が交叉する点を求め、音波源位置と推定することが出来る。到来方向探知を行う上で式(1)および式(2)は音波の等位相面が完全な平面であることが前提となっているため、三角形アレイのスケールに対し音波源位置が十分に無限遠と仮定できる程度に遠い必要がある。また、高精度で音波源位置を推定するためには一つのセンサアレイによって求めた音波の到来方向が、他のセンサアレイで求めた到来方向に対してある程度垂直に近い角度で交叉する必要がある。

2.2.2 先行研究における波源位置推定

小松(2012)によって桜島火山周辺で多地点アレイ観測が行われた。観測地点は3地点存在し、錦江湾高校と宮崎大学において三角形アレイとして、それぞれ3台のセンサが配置され、鹿児島高専においてはセンサ1台を設置し、計7台のインフラサウンドセンサによる観測が行われた。観測は2011年11月15日から2012年1月17日までの約2カ月間行われ、大規模なイベント3例を含む多数の桜島火山の噴火を観測している。大規模な3例のイベントについて錦江湾高校のアレイで求めた音波の到来方位角の平均と宮崎大学のアレイで求めた到来方位角の平均の交点から図2.4の青い円で示された半径15 [km]の円内に桜島火山の火口が収まり、半径15 [km]の精度で音波源位置の推定に成功している[8]。この時、噴火イベントの波形は人間の目視によって確認し、その時刻範囲の自動相関処理により各アレイでの音波の到達時刻差を算出している。

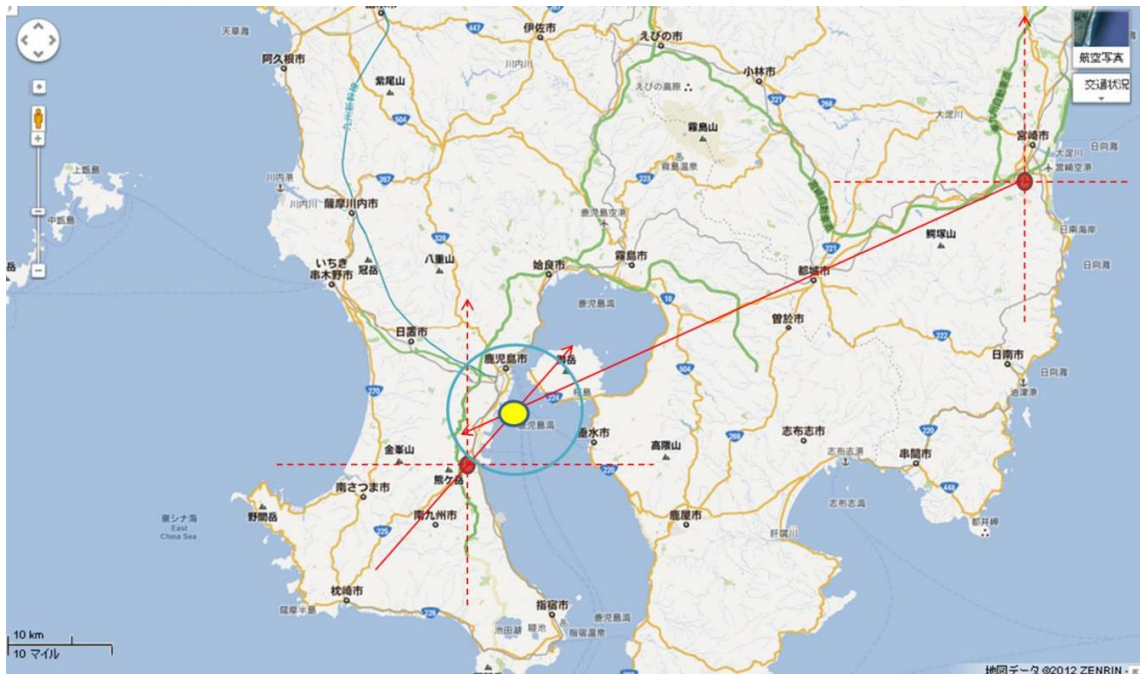


図 2.4 小松(2012)における到来方向探知による波源位置推定[8]

2.2.3 グリッドサーチ法について

著者は本研究において面的に配置されたインフラサウンドセンサを用いた波源位置推定方法にグリッドサーチ法を提案する。波源位置推定におけるグリッドサーチ法は地震学の領域で頻繁に使われる解析方法である[11]。波源位置を走査される領域をあらかじめ決めておき領域を適当な大きさのグリッドに分割し任意のグリッドに波源位置を仮定した際、各地点に配置されたセンサまでの波の伝搬時間を計算し、その時間差が実際に各センサで波動を検出した時間差と比較した際の誤差が最も小さくなる座標を計算し、波源位置とする波源位置推定方法である。誤差($error$ [second])の計算には緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料[11]を参考にし、式(3)に示すように仮定した波源位置からセンサに

音波が到達するのに要する時間を実際にセンサでイベント波形を観測した時刻から減算し、センサごとのその時刻差を全ての組み合わせで足し合わせるアルゴリズムを用いた。これを全てのグリッドに対して計算する。 N はセンサの台数、 i, j は共にセンサ番号であり、 $T_r(i)$ はセンサ i において実際にイベントの音波を観測した時刻、 $T_a(i)$ は計算によって求めた伝搬に要する時間である。

$$error = \sum_{i=0}^{N-2} \left\{ \sum_{j=i+1}^{N-1} abs|(T_r(i) - T_a(i)) - (T_r(j) - T_a(j))| \right\} \dots (3)$$

(3)式に示す計算は、 N が大きくなるにつれ莫大な計算コストが必要になり、また計算上は音速の仮定を必要とするが、最低 3 台のセンサで同時にイベントを検出することが出来れば波源位置を推定することが可能であり、また同時にイベント検出したセンサの台数が多数存在しても、それに応じた最適解を出すことが出来る手法であるため、センサ台数に制限がないというメリットがある。今回は、南極大陸のような極地における波源位置推定を可能とするため、地球を直径 $40000/\pi$ [km]の真球とし、仮定した波源位置からセンサまでの距離の計算を極座標上で行った。二点間の距離 d [m]の計算には図 2.5 から求めた式(4)を用いた。ここで θ_1, θ_2 は緯度、 ϕ_1, ϕ_2 は経度である。

$$d = \frac{40000000 \times \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(\cos \phi_1 * \cos \theta_1 - \cos \phi_2 * \cos \theta_2)^2 + (\sin \phi_1 * \cos \theta_1 - \sin \phi_2 * \cos \theta_2)^2 + (\sin \theta_1 - \sin \theta_2)^2}}{2} \right)}{\pi} \dots (4)$$

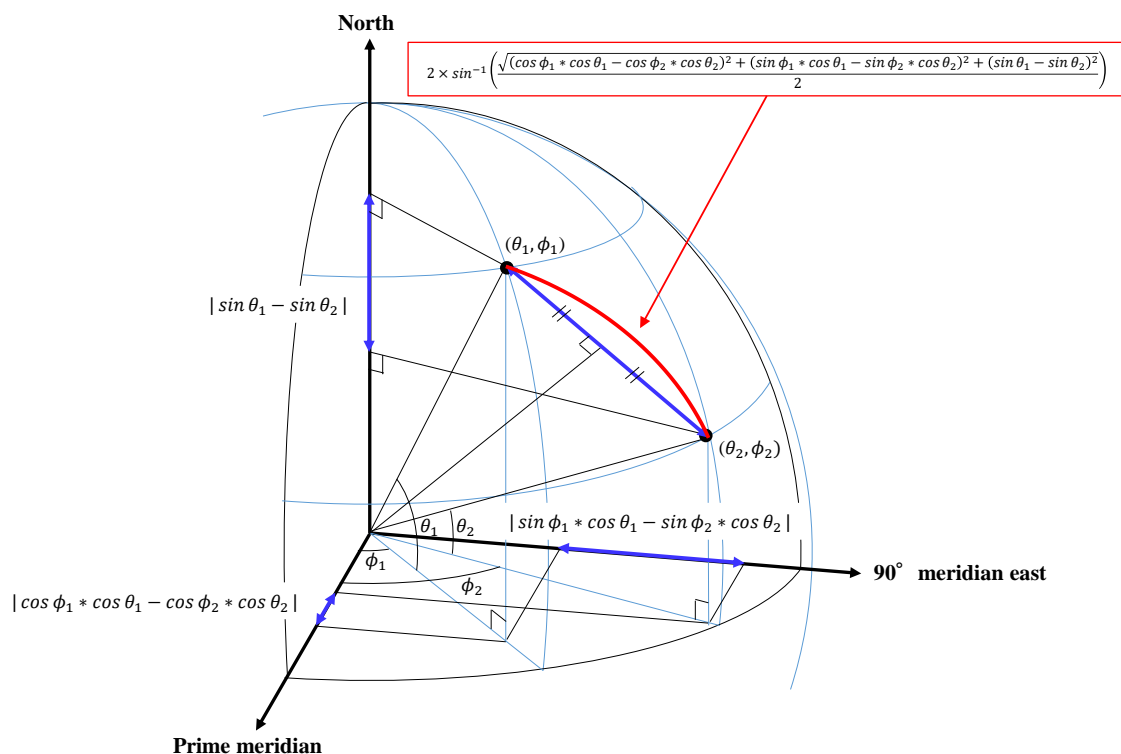


図 2.5 球面上の 2 点間の距離

2.2.4 先行研究のデータセットを用いた波源位置推定

センサの面的配置における波源位置推定方法にグリッドサーチ法が有効か検証を行うため、小松(2012)により観測された 2011 年 11 月 15 日から 2012 年 1 月 17 日までの過去に波源位置推定に成功しているインフラサウンドのデータセットを用いた。この時用いたデータは、グリッドサーチを行う際のセンサの重みが 1 点に集中しないよう、錦江湾高校、宮崎大学のアレイからセンサ 1 台ずつと鹿児島高専の 1 台の合計 3 台のデータを選び解析を行った。先行研究においては、目視によりイベントの検出が行われたが、今回は、システムの自動化を視野に入れ、反町(2016)の開発した N 型波形イベント自動検出ソフトウェアを改良し、錦江湾高校のデータからイベントの自動検出を行った。同ソフトウェアによる解析上の改良点として、イベントを検出するための可変トリガーの基準となる移動平均フィルタを通した値とは別に、イベントの継続時間を調べるための時定数のやや短い移動平均フィルタをかけ、この値が可変トリガーのための平滑波形を上回った範囲を、このイベントの開始時刻および終了時刻としている。また、このイベントの開始時刻から終了時刻までを相互相関処理を行う窓区間とした。N 型波形イベント自動検出ソフトウェアで設定した各パラメータについては、可変トリガーの基準となる移動平均フィルタの長さを 123 点、継続時間を調べるための移動平均のフィルタ長を 11 点として、トリガー値(倍数)は 7.5、FFT の点数を 1024、窓をオーバーラップさせる数は 2、用いた窓関数は hanning とした。この時のトリガー

一値はやや厳しめの値である。

イベントの自動検出には桜島火山から比較的近い距離にある錦江湾高校のセンサアレイの内1台を用いた。イベントの自動検出により約2カ月分のデータセット内に58例のイベントが自動検出され、そのうち明らかに観測装置の異常と考えられる波形の時間範囲を含むイベントを目視で除外した55例を用いて相互相関処理を行った。相互相関の窓を移動させる幅は音速で錦江湾高校から各センサに十分に伝搬できる時間範囲として、錦江湾高校と鹿児島高専間で ± 125 [second]、錦江湾高校と宮崎大学間で ± 300 [second]で走査し、得られた相関値のピークの時間からセンサに音波が到達した時間差を求めた。グリッドサーチを行う際は、実スケールで 0.770556 [deg] $\times 1.81476$ [deg]の領域を 749×1766 のグリッドに分割し計算した。またこの時、音速を 336.19 [m/s]と仮定しグリッドサーチを行った。これは気温 7.5 [°C]における理想気体の音速である。イベントの検出から波源位置推定までの流れを図2.6のフローチャートに示す。

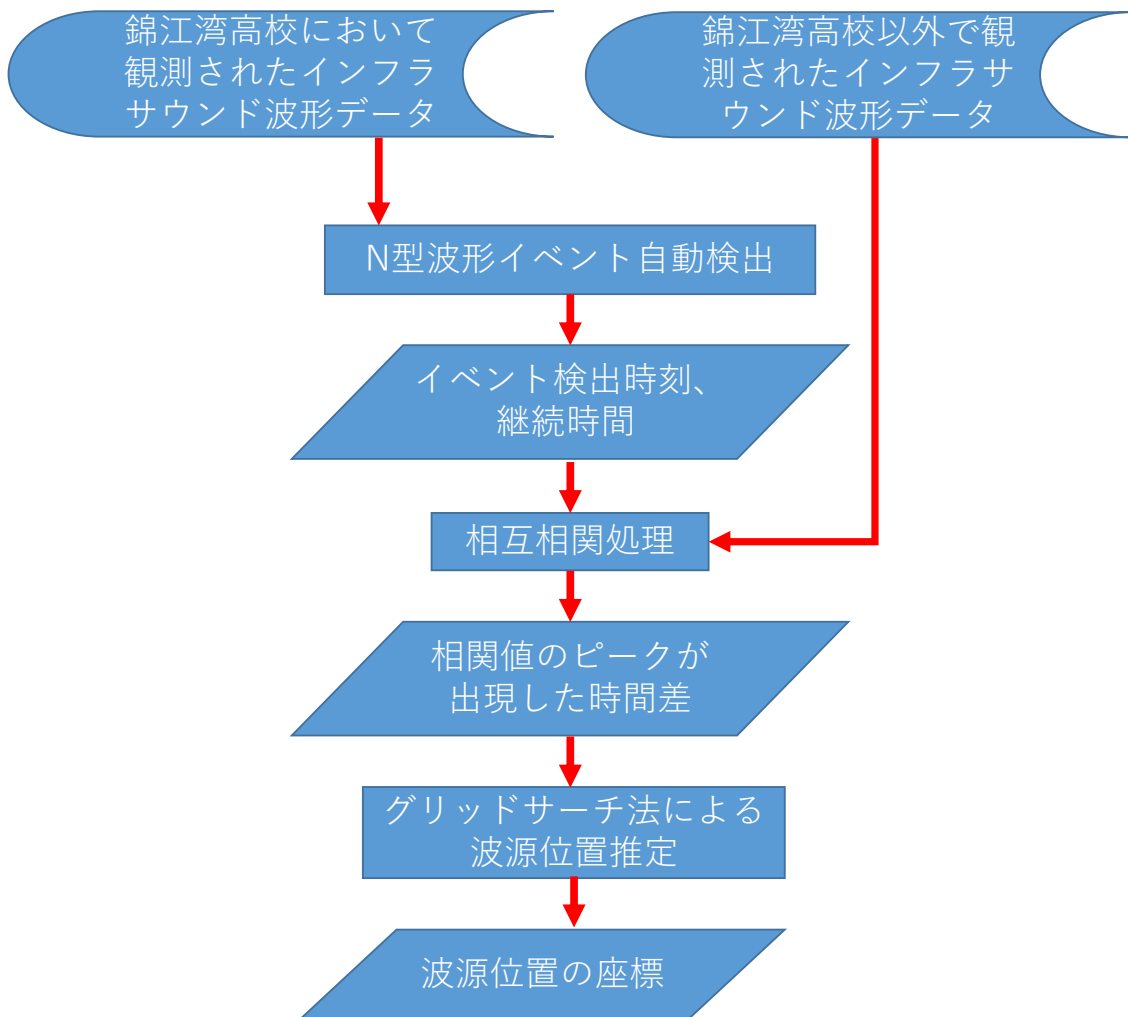


図 2.6 イベントの検出から波源位置推定までの流れ

2.3 高知県沿岸におけるセンサのインフラサウンド解析システムの開発

2.3.1 面的配置におけるインフラサウンド観測網

筆者の所属する研究室において2017年11月に高知県沿岸で新たに10台の新型複合型インフラサウンドセンサ(ADXII-INF01C)を導入し、これまで高知県幡多郡黒潮町に5台が配備されていたインフラサウンドセンサ(ADXII-INF01B)と合わせ計15台のセンサによる面的観測網が構築された。2018年2月現在、この観測網によって現地で観測されたインフラサウンドを含む観測データは逐次、固定回線とモバイル回線を用いた、インターネットを介して専用データサーバ上に収集され、本研究室においてもダウンロードすることが可能となっている。図2.7は高知県沿岸に配備されている複合型インフラサウンドセンサの配置を示している。ラベル名は各センサを区別するため便宜上割り振った。図2.8に観測の様子を示す。

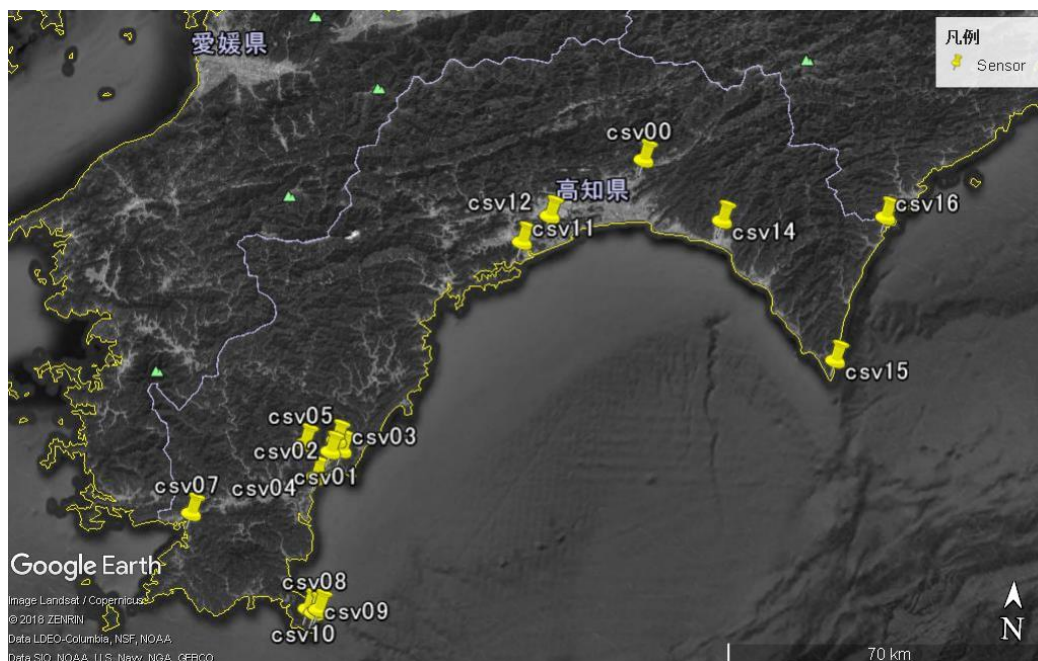


図 2.7 複合型インフラサウンドセンサによる観測点

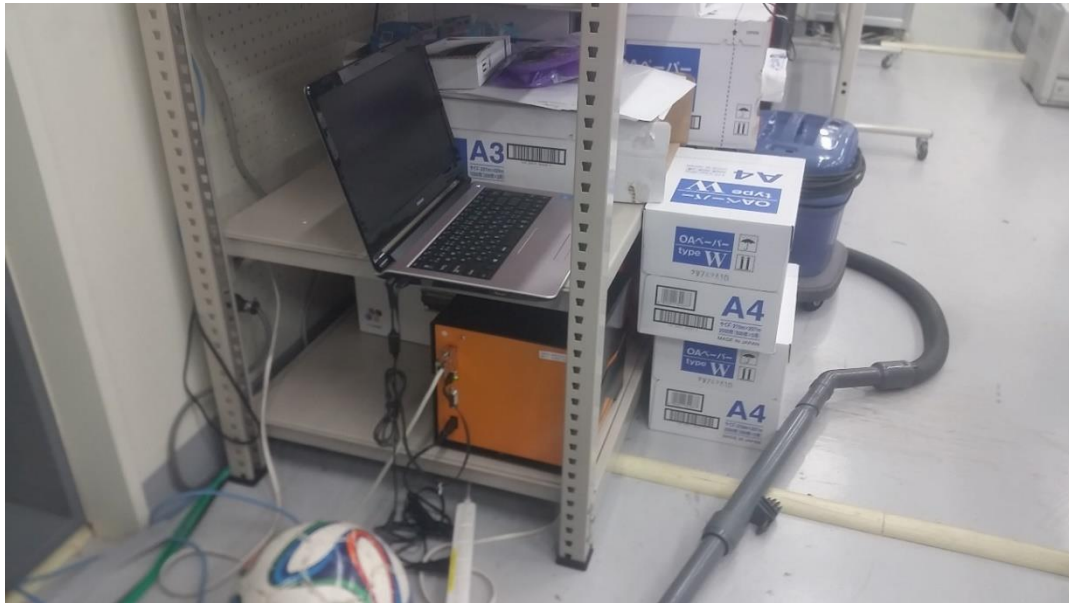


図 2.8 高知工科大学 A151 におけるインフラサウンド観測の様子

図 2.8 に示されているように各観測点ではインフラサウンドセンサとロギングを行うノートパソコンが対となっており、時刻精度を確保するための GPS 受信機と観測データを転送するためのネットワークが備わっている。

2.3.2 面的配置におけるイベント検出、波源位置推定について

観測データは、おおよそ 250 [ms]の周期でサンプリングされており、4096 サンプルごとに csv 形式のテキスト(ASCII)ファイルとして記録されている。ファイルはサンプリングごとに 17 のフィールドに分かれており、サンプリングしたときのパソコンの時刻の時分、秒、加速度計の x 軸、y 軸、z 軸、可聴域の騒音 RMS 値、気圧、汎用アナログ入力値(未使用)、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、秒の順で記録されている。今回はイベント検出、波源位置推定を行うための解析に、観測されたインフラサウンドデータに周期 1000 秒以下(周波数 0.001 [Hz] 以上)を通すハイパスフィルタに掛けたインフラサウンド AC のデータを使用した。また、サンプリング周期が一定ではなく 800 [ms]以下の微小ゆらぎが含まれているため、GPS 時刻をもとに観測データを一度 10 [Hz]まで直線補間によりアップサンプリングしたのち、ナイキスト周波数を一樣にするため、1 [Hz]までダウンサンプリングを行った。この時のアンチエイリアシングフィルタはコサイン窓で打ち切った 201 次の FIR フィルタで設計した。

データの解析アルゴリズムは CTBTO で用いられている PMCC (Progressive Multi Channel Correlation)アルゴリズム[9]を参考に本研究にて構築した。イベントを自動検出する際、データのサンプリングレートが低く、またイベントが N 型波形ではない可能性があるため、今回は N 型波形イベント自動検出ソフトウェアを使用せず、イベントの検出の基準となるセ

ンサを決め複数地点で観測された波形同士を相互相関処理によって相関値のピークを求め、値が 95 [%]以上かつ窓を移動させた範囲において 50 [%]以下の相関値が含まれていることを条件とし、この条件が 2 地点以上で得られた場合をイベント検出とした。相互相関を行う窓の幅は試験的に 1200 [second]と 60 [second]の 2 パターンで行い、それぞれ窓が 50 [%]ずつオーバーラップするようにずらしながら窓をとった。また、相互相関を行う相手の波形において窓を ± 400 [second]の範囲で移動させピークを探した。波源位置を推定する際には、この相互相関処理で求めた相関値のピークが出た時間差を用いて、グリッドサーチ法によって求めた。この時音速は 340 [m/s]と仮定した。

3章 結果と考察

3.1 先行研究のデータセットを用いた波源位置推定結果と考察

イベントの自動検出の結果、小松(2012)によって観測された約2カ月間のインフラサウンドの波形データから図3.1に示すように58例のイベントが自動検出された。のうち3例は明らかに観測機器の異常と考えられるものや相互相関を行う相手のセンサでデータの欠損が見られた。観測機器の異常と考えられる波形を図3.2に示す。自動検出された結果からこれら異常なものを除いた桜島火山の噴火を含む55例のイベントの錦江湾高校におけるイベントの検出時刻、推定された波源位置、錦江湾高校に対する鹿児島高専と宮崎大学のイベント到達時間差を表1に、推定された波源位置を地図上にプロットしたものを図3.3、に桜島火山の火口の周辺の拡大を図3.4に示す。

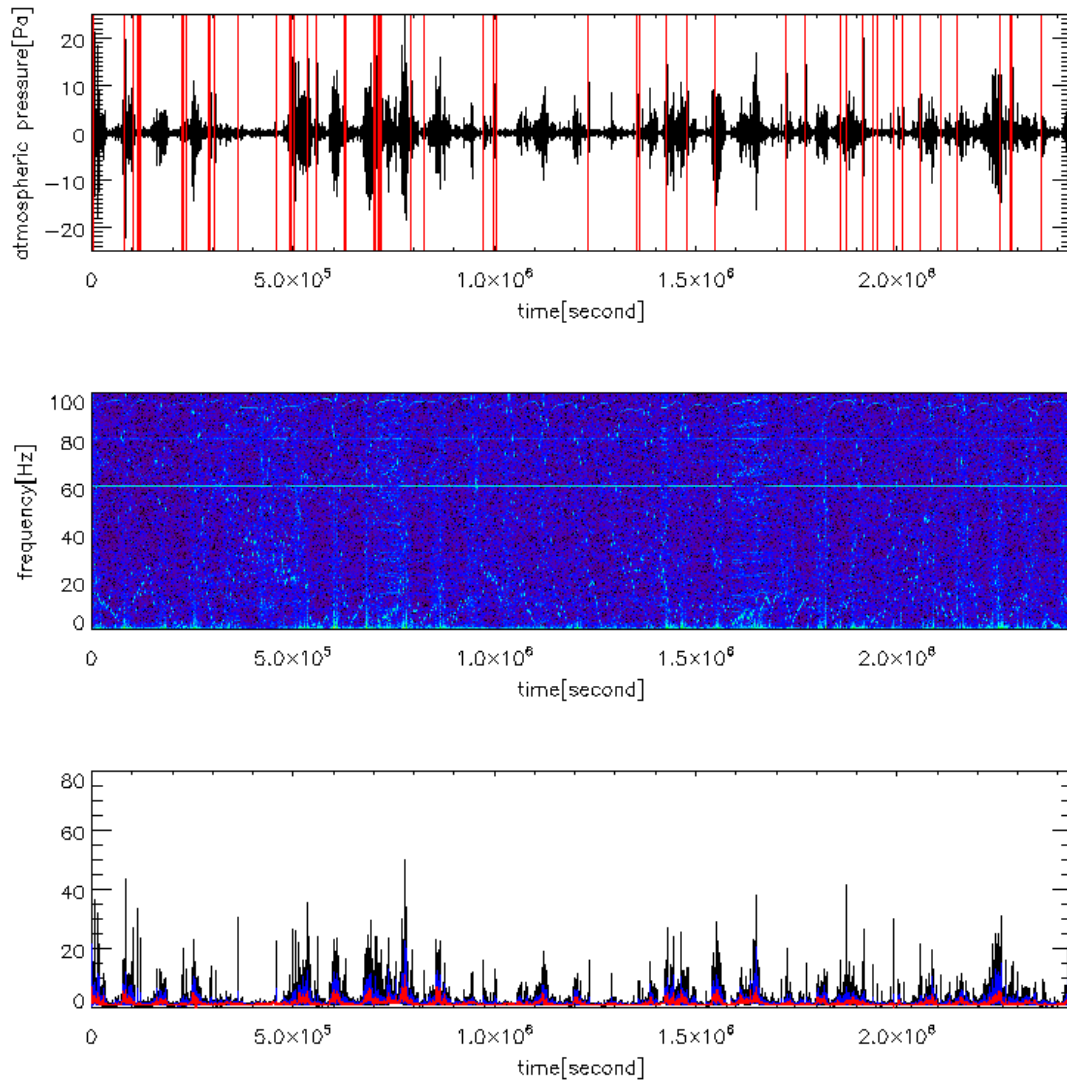


図 3.1 N型波形自動検出ソフトウェアによるイベント検出結果

図 3.1、3.2 の上段のパネルが観測されたインフラサウンドの振幅であり、図 3.1 の赤い線が引かれた部分はイベントが検出された時刻である。中段のパネルがスペクトログラムであり、下段のパネルの黒い線が全周波数成分の平均、赤い線がその 123 点分の移動平均、青い線が 11 点の移動平均による平滑値を示している。

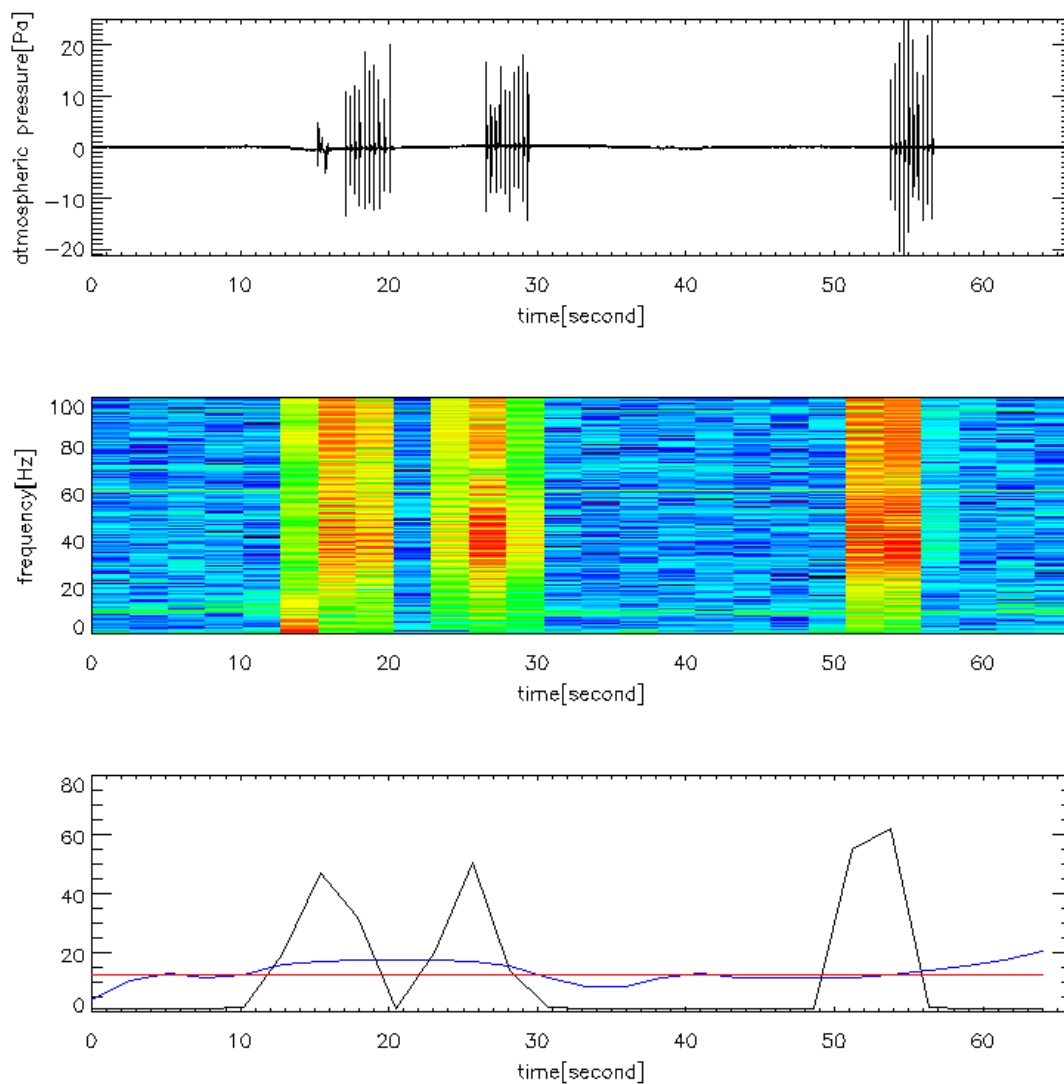


図 3.2 観測機器の異常と考えられる波形

表 3.1 自動検出されたイベント

錦江湾高校における イベントの検出時刻	推定された波源位置		相関値のピークの時間差 [second]	
	緯度 [deg]	経度 [deg]	錦江湾高校-鹿児島高専	錦江湾高校-宮崎大学
2011:12:17 17:34:12	31.585925	130.65078	-8.885	167.685
2011:12:17 21:03:32	31.583870	130.65489	-9.035	166.555
2011:12:17 22:09:12	31.584898	130.65386	-9.035	166.820
2011:12:17 22:47:28	31.528390	130.76277	-9.370	131.640
2011:12:19 03:21:23	31.569486	130.67749	-7.910	161.215
2011:12:19 04:36:26	31.593117	130.63742	-8.750	170.865
2011:12:19 06:15:36	31.587980	130.64564	-8.290	169.230
2011:12:19 06:28:49	31.640378	130.12680	-8.175	255.660
2011:12:19 22:16:47	31.740036	131.86620	-9.030	-264.390
2011:12:19 23:22:24	31.592089	130.64050	-9.090	169.830
2011:12:20 02:34:40	31.591062	130.64359	-9.710	168.785
2011:12:20 18:18:42	31.585925	130.65386	-9.770	166.515
2011:12:21 20:29:26	31.585925	130.65283	-9.535	166.735
2011:12:22 06:01:13	31.584898	130.64975	-7.895	168.680
2011:12:22 07:13:12	31.577706	130.65489	-5.640	168.830
2011:12:22 09:12:55	31.571541	130.67133	-7.385	163.155
2011:12:22 09:32:07	31.570514	130.67235	-7.155	163.030
2011:12:22 18:44:52	31.675310	130.35591	-8.970	236.005
2011:12:23 00:28:20	31.585925	130.64667	-7.665	169.340
2011:12:23 00:37:25	31.570514	130.67544	-7.755	161.770
2011:12:23 19:40:53	31.592089	130.63948	-8.975	170.200
2011:12:23 20:33:27	31.591062	130.64256	-9.185	169.540
2011:12:24 16:15:50	31.699967	130.51927	-28.435	181.680
2011:12:24 17:36:25	31.579760	130.66516	-9.740	163.380
2011:12:24 19:05:44	31.253044	131.44599	-9.185	-81.325
2011:12:24 19:44:20	31.496540	130.80592	-5.670	117.470
2011:12:24 20:09:23	31.572569	130.66824	-6.970	164.245
2011:12:24 20:44:12	31.253044	130.77510	120.775	163.455
2011:12:25 17:57:48	31.337292	131.15010	-8.790	-5.710
2011:12:26 02:35:49	31.253044	131.75524	-9.155	-144.270
2011:12:27 19:00:21	31.573596	130.66927	-7.705	163.450
2011:12:28 02:53:49	31.344484	131.86518	-7.050	-179.840
2011:12:28 04:23:48	31.507842	131.21791	-45.510	-81.535
2011:12:30 19:54:24	31.561267	130.66722	-0.325	168.830
2012:01:01 05:53:06	31.563322	130.65592	1.910	173.395
2012:01:01 07:15:45	31.557157	130.66413	2.420	171.575
2012:01:02 02:00:42	31.565377	130.66413	-1.505	169.115
2012:01:02 16:17:17	31.723598	130.67749	-103.945	172.785
2012:01:03 11:37:10	31.312634	131.86620	117.845	-172.725
2012:01:05 12:48:56	31.546883	130.65592	10.450	179.250
2012:01:06 01:55:37	31.543801	130.65489	12.200	180.565
2012:01:07 01:31:11	31.535582	130.66311	14.030	179.340
2012:01:07 05:41:38	31.544829	130.64872	13.820	183.145
2012:01:07 17:28:19	31.540719	130.65694	13.345	180.680
2012:01:07 23:54:40	31.541746	130.65694	12.760	180.165
2012:01:08 03:12:41	31.539691	130.65386	14.715	182.500
2012:01:08 14:16:40	31.253044	131.36997	67.885	-60.495
2012:01:08 21:08:39	31.558185	130.69907	-7.830	154.625
2012:01:09 08:59:18	31.559212	130.68777	-5.410	159.560
2012:01:09 23:05:59	31.561267	130.68468	-5.520	160.700
2012:01:10 10:16:47	31.544829	130.69701	-0.575	159.775
2012:01:11 16:21:38	31.640378	130.12680	46.685	243.790
2012:01:11 23:21:20	31.548938	130.68982	-0.620	162.195
2012:01:12 00:24:16	31.783188	131.86620	-0.750	-270.665
2012:01:12 21:02:23	31.549966	130.68571	-0.060	163.710

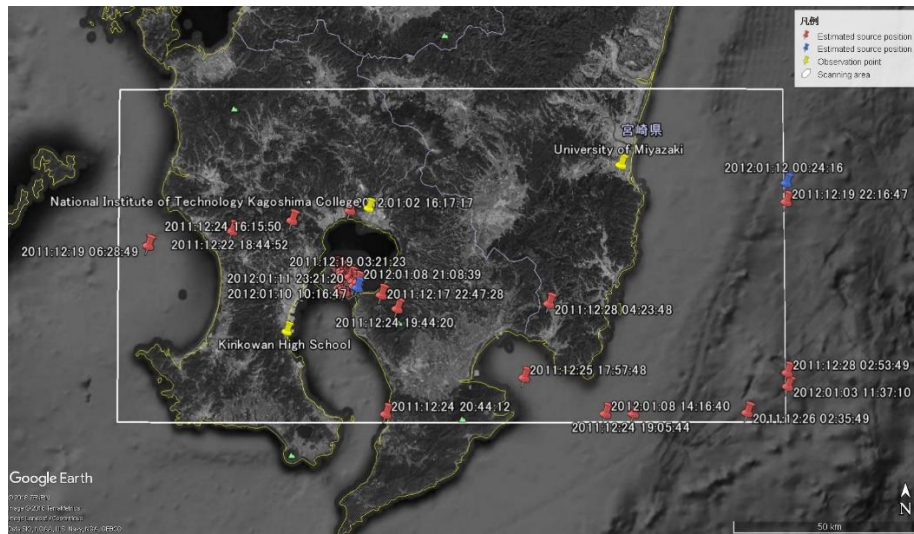


図 3.3 自動検出された波源位置

図 3.3、図 3.4 において 2011 年 11 月 15 日から 2012 年 1 月 17 日までの 3 台のセンサによる観測データから検出された波源位置を赤色のピンで、小松(2012)によって波源位置が推定されたイベントと同一のものを青色のピンで、インフラサウンドの観測地点を黄色のピンで、グリッドサーチを行った領域を白い枠線で Google Earth 上にプロットしたものである。また、推定された波源位置のピンに付けられているラベルは、錦江湾高校に置かれたセンサがイベントを検出した時刻である。

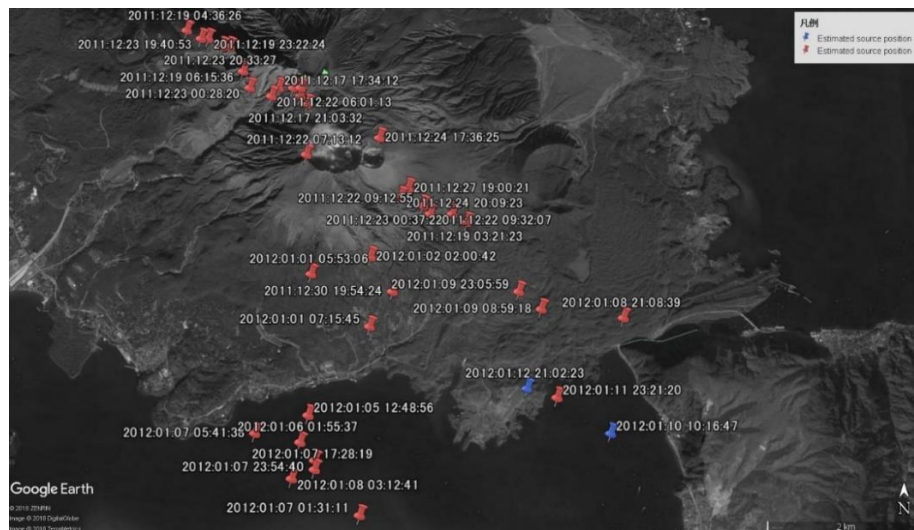


図 3.4 桜島火山火口周辺に検出されたイベント

図 3.4 は桜島火山の火口周辺を拡大したものであり、火口周辺に推定された波源位置を示す。青色で示されたピンが小松(2012)によって波源位置が推定されたイベントと同一のものである。

波源位置推定結果の図 3.3、図 3.4 から音波源位置は桜島火山火口周辺に多く推定されていることが分かる。また、図 3.4 の範囲に 55 例のイベントの内 38 例が存在し、小松(2012)で波源位置推定に用いられたイベント 3 例の内 2 例も含まれている。仮定した音速(336.19 [m/s])において桜島火山火口から錦江湾高校を基準としたときの伝搬時間の差は鹿児島高専で-9.03 [second]、宮崎大学で 164.44 [second]であり、表 3.1 に示されている時間差に極めて近いものが多く存在している。推定されたイベントの中には桜島火山火口から半径 1 [km]以内に推定されたものも存在しているが、イベントによっては極めて遠くグリッドサーチを行う領域の側面(図 3.3 の白枠上)に音波源位置が推定された例もあった。このイベントは錦江湾高校で観測されたデータのみで N 波形自動検出ソフトウェアを用いて自動検出されたイベントであるため桜島火山の噴火イベント以外を含んでいる可能性がある。桜島火山火口から近い位置に波源位置が推定されたイベントのグリッドサーチによる誤差の分布を図 3.5 に示す。

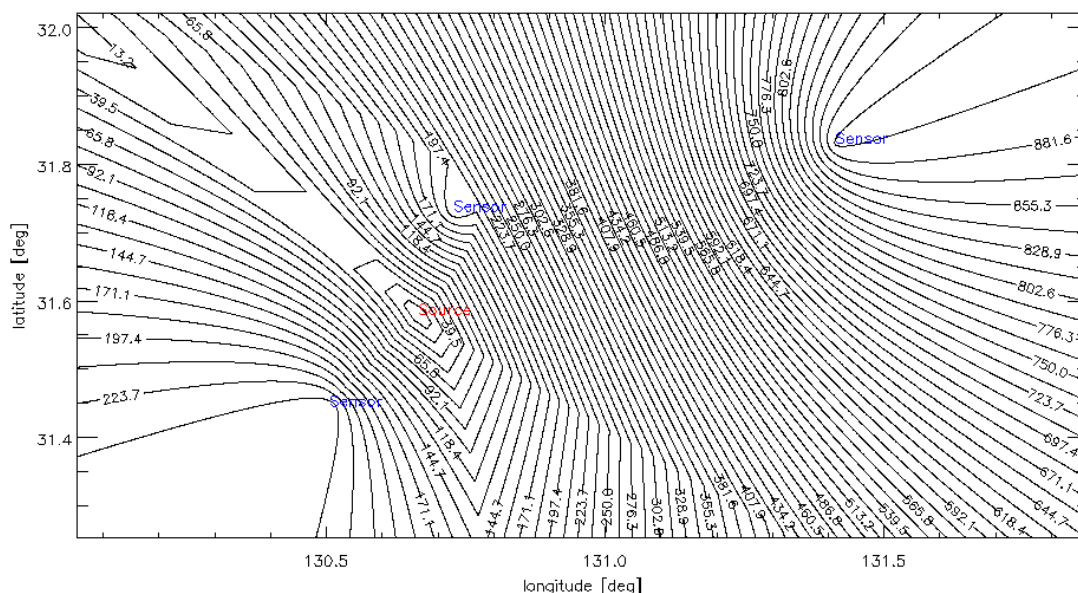


図 3.5 火口の近くに波源位置が推定されたイベントの誤差分布の 1 例

図 3.5 は 2011 年 12 月 24 日 17 時 36 分 25 秒に錦江湾高校で検出されたイベントのグリッドサーチによる波源位置推定を行った際式(3)で求められた誤差の分布を示す。等高線で示されたの値が 0 に近いほど音波源位置である可能性が高くなる。図中に赤字で記された Source は、推定された音波源位置であり、青字で記された Sensor はインフラサウンドセンサの置かれた各観測地点である。

図 3.5 のグリッドサーチ法による誤差(error)の分布から、波源が推定された Source の位置の誤差が 0 [second]に近く高精度で波源位置が推定された可能性が高いことが分かる。このイベント波形の相互相関値の分布を図 3.6、図 3.7 それぞれに示す。

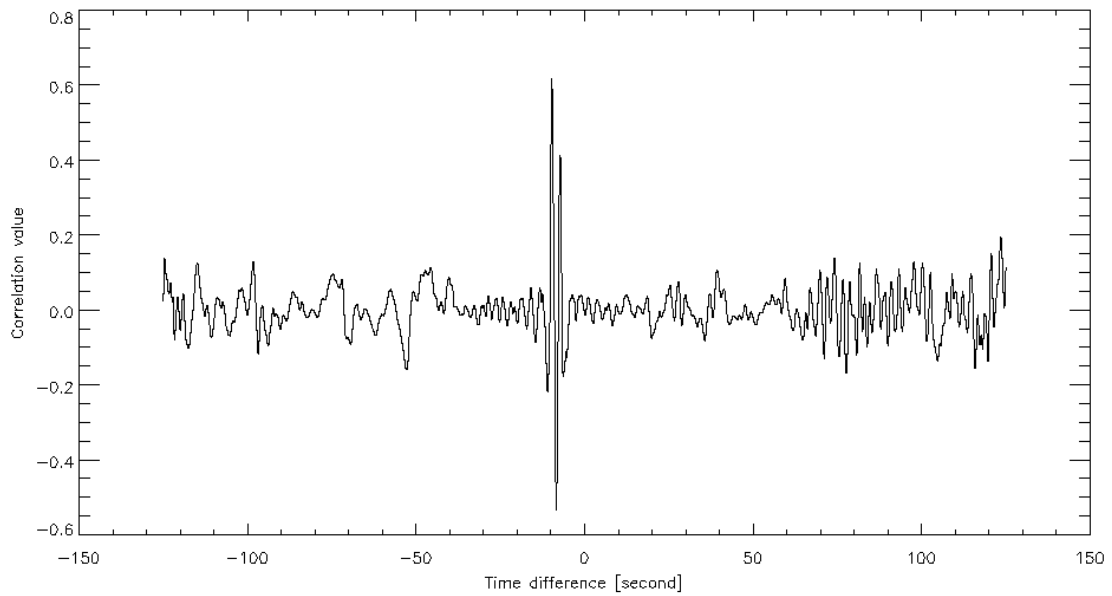


図 3.6 錦江湾高校と鹿児島高専による移動相関

図 3.6 は 2011 年 12 月 24 日 17 時 36 分 25 秒に錦江湾高校で検出されたイベントの鹿児島高専で観測された波形との相互相関による相関値の分布を示す。

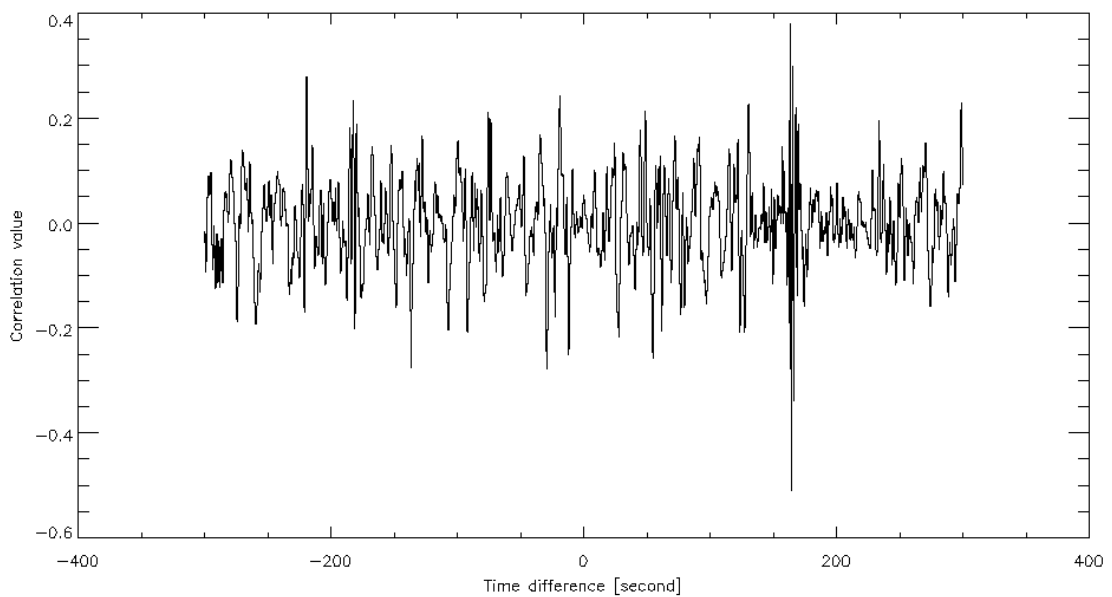


図 3.7 錦江湾高校と宮崎大学による移動相関

図 3.7 は 2011 年 12 月 24 日 17 時 36 分 25 秒に錦江湾高校で検出されたイベントの宮崎大学で観測された波形との相互相関による相関値の分布を示す。

図 3.6、図 3.7 から相関値のピークを明確に読み取ることが出来る。また、桜島火山から比較的距離の近い錦江湾高校と鹿児島高専との最大相関値が高く、宮崎大学に対してはやや値が低いことが読み取れる。これは波源から各センサに音波が伝搬する際の距離に差があるため、波形の変質が一様では無いことが原因と考えられる。そのため、面的配置を行う上でセンサ間の距離を長く取ることが出来ない制約があると考えられる。

小松(2012)によって波源位置推定に使われたイベント 3 例の内、桜島火山から遠い場所にグリッドサーチによって波源位置推定された 1 例である 2012 年 1 月 12 日 0 時 24 分 16 秒に錦江湾高校で検出されたイベントのグリッドサーチによる誤差の分布を図 3.8 に示す。

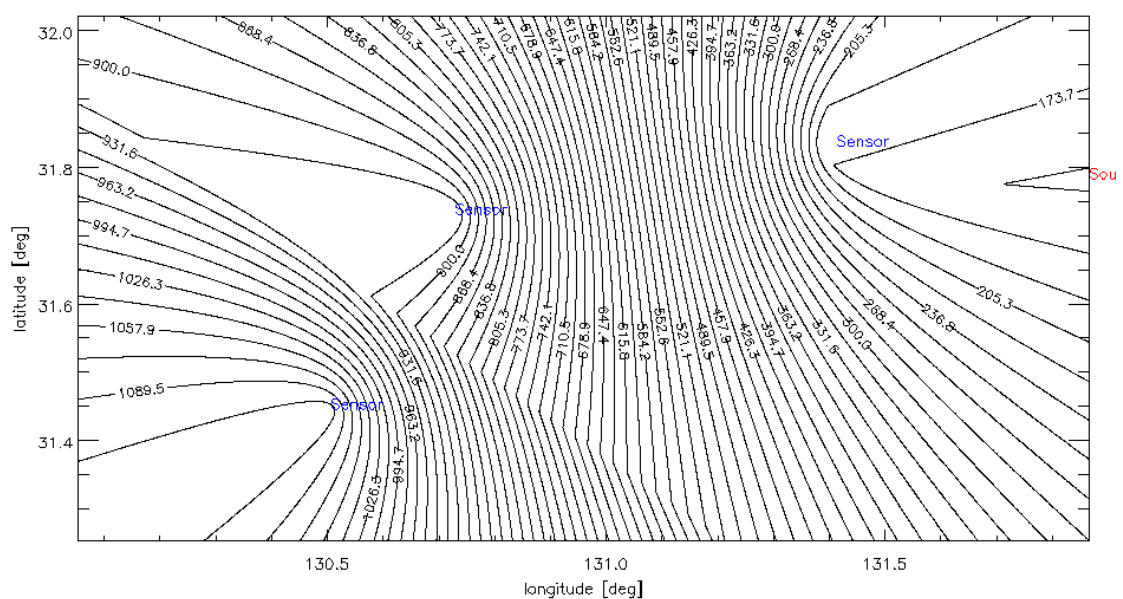


図 3.8 桜島火山から遠い場所に推定されたイベントの誤差分布

図 3.8 は 2012 年 1 月 12 日 0 時 24 分 16 秒に錦江湾高校で検出されたイベントのグリッドサーチによる誤差の分布を示す。

図 3.8 から波源位置がグリッドサーチを行った領域(図の右端枠上)外に推定されたことが分かる。また、最小誤差が図 3.5 に比べると大きいことが分かる。このイベントの相互相関値の分布を図 3.9、図 3.10 にそれぞれ示す。

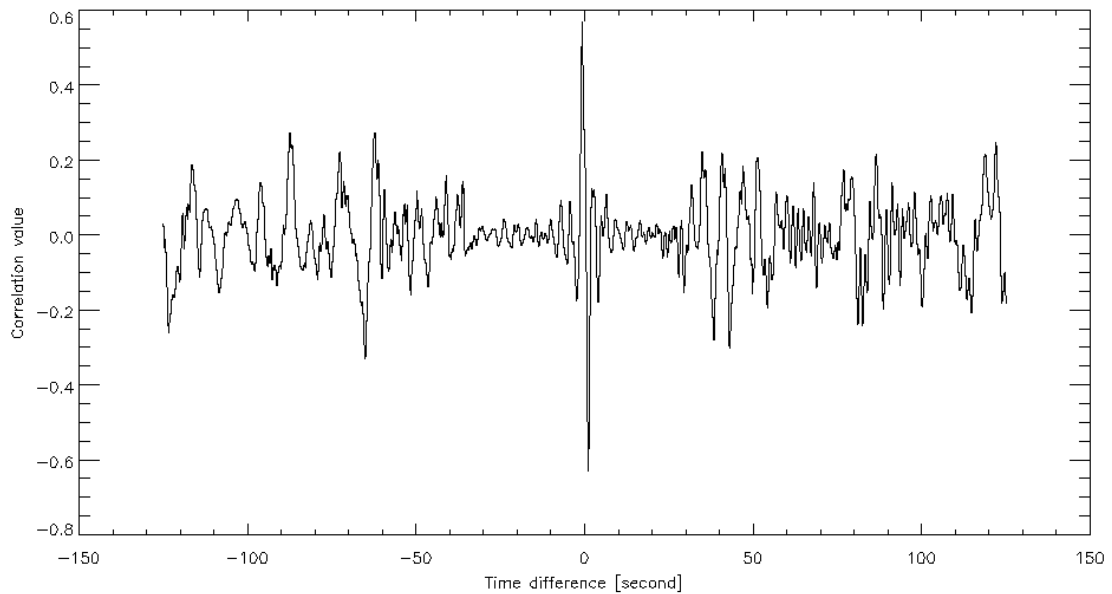


図 3.9 錦江湾高校と鹿児島高専による相互相関

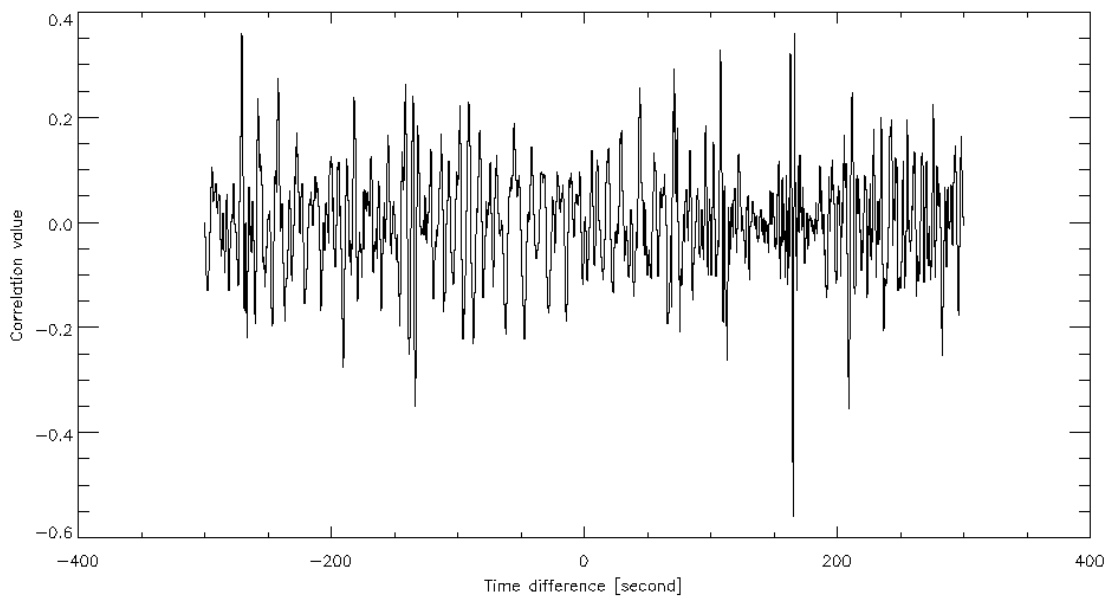


図 3.10 錦江湾高校と宮崎大学による相互相関

図 3.9 に示す錦江湾高校と鹿児島高専の相関値はピークが明瞭に確認できるが、図 3.6 の例に比べるとやや値が小さい。図 3.10 の宮崎大学との相関値は図 3.7 と同じ程度の時間差にピークが見えているがスパイク成分が多く見えており自動で検出することは難しく、時間差-270 秒付近の別のスパイクを自動検出したため波源位置推定が妥当でない結果となった。

3.2 高知県沿岸におけるセンサの面的配置による波源位置推定結果と考察

図 2.7 に示すセンサ csv01 を基準に 1200 秒の窓幅で窓を 50 パーセントずつずらしながら 2017 年 10 月 31 日 15 時 20 分から 12 月 1 日 16 時 0 分までの約一月分の解析を行った。その結果、明確に音波源位置の推定が行われたと考えられるイベントは存在しなかった。しかし、何らかの波動の相関が捕らえられたと考えられる相互相関値の分布が黒潮町の 5 点で得られた。黒潮町におけるセンサ配置を図 3.11 に、相互相関値の分布を図 3.12 に示す。



図 3.11 黒潮町におけるインフラサウンドセンサの配置

図 3.11 は高知県幡多郡黒潮町に配備されているインフラサウンドセンサの配置を示している。ラベル名は各センサを区別するため便宜上割り振った。

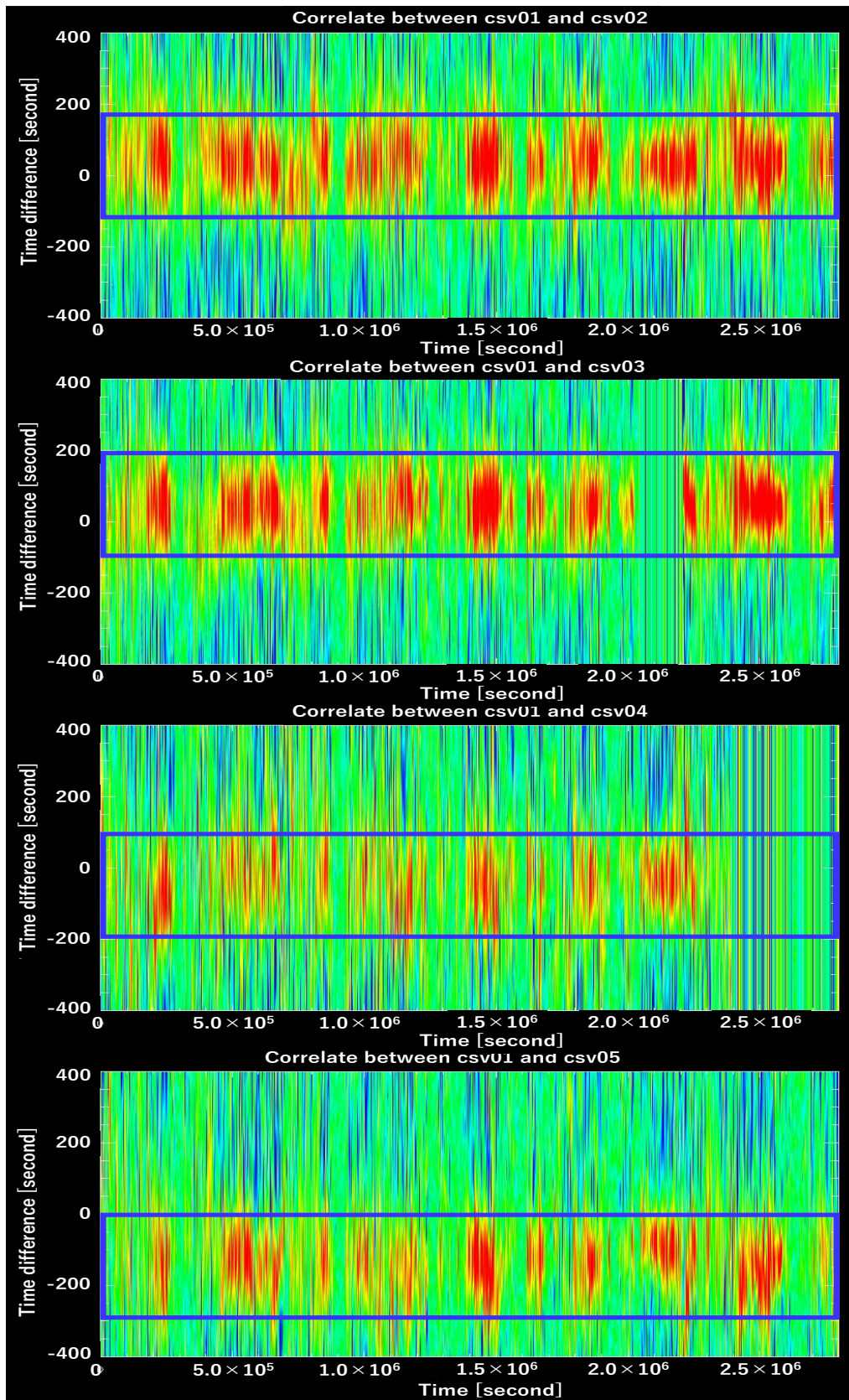


図 3.12 csv01 センサと 4 箇所のセンサによる相互相関の分布

図 3.12 は黒潮町に設置された各インフラサウンドセンサ(csv02～csv05)の csv01 センサに対する相互相関値の約一月分の分布を示しており、暖色になるほど相関値が1に近くなり、寒色になるほど相関値が-1に近い。グラフの縦軸は相互相関の窓をずらした秒数を示し、正の値が csv01 に対しての遅れ位相を示す。また横軸が観測時刻であり 2017 年 10 月 31 日 15 時 20 分からの経過秒数を示している。

図 3.12 の青い枠線で囲まれた部分からセンサ csv01 に対して csv02、csv03、csv04、csv05 に明確な相関があることが分かる。また図 3.12 の最下段の csv05 との相関値のピークがおおよそ-150[second]前後であり、センサ csv01 と csv05 間の距離がおおよそ 5.8 [km]であることから水平に音波が伝搬したとしても音速が 40 [m/s]となり現実的ではない。このことから相関が得られた圧力場は音波ではなく、(突)風による動圧と考えられる。また、気象庁で公開されているアメダス観測点のうち csv01～csv05 の 5 地点に最も近い高知県幡多郡黒潮町佐賀のデータ(図 3.13)によると 2017 年 11 月は西の風向が多い[12]。このことは、図 3.12 のセンサ csv01 に対する csv04、csv05 が進み位相に相関が出ていることから納得できる。

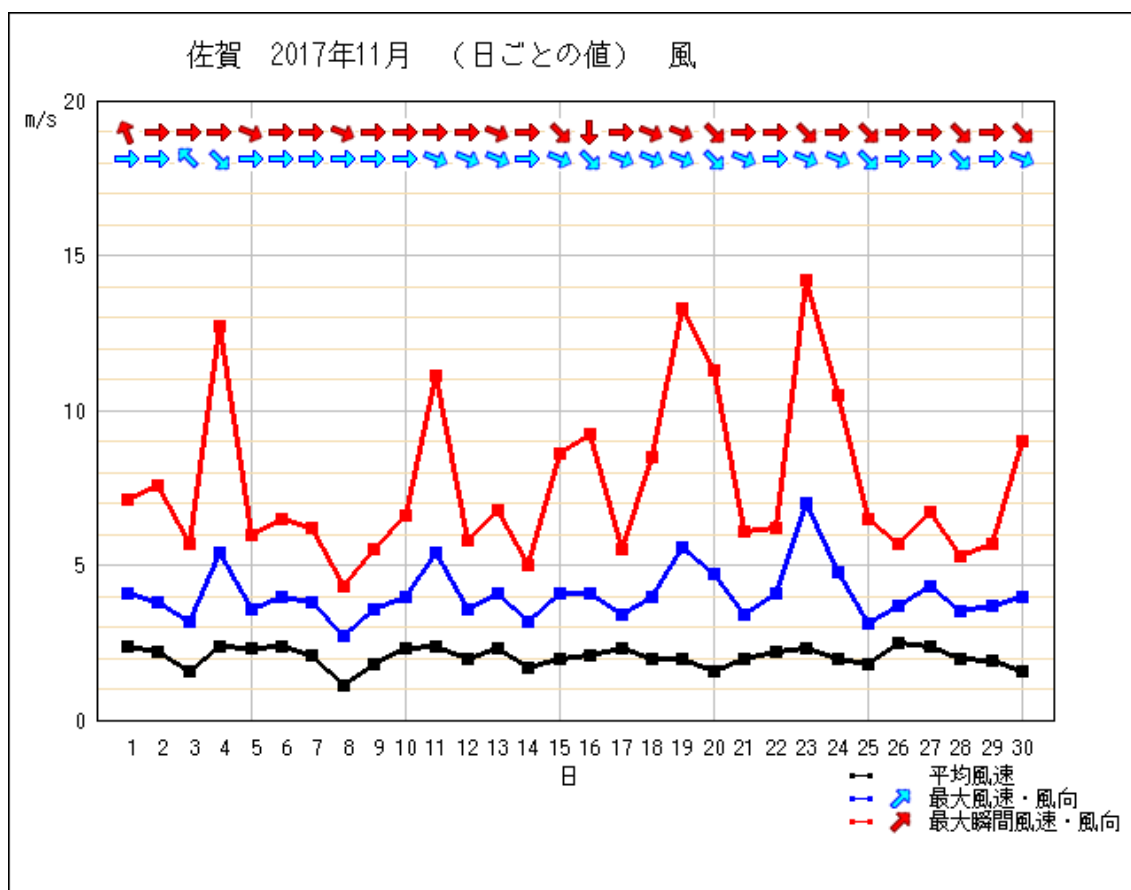


図 3.13 高知県幡多郡黒潮町佐賀における気象庁の公開する風向、風速(気象庁参照[12])

次に、図 2.7 に示すセンサ csv11 を基準として 60 [second] の窓幅で窓を 50 [%] ずつづらしながら 2017 年 10 月 31 日から約 80 日分の解析を行った。この時、センサの周波数感度特性の下限の周期より窓の幅が小さいため、信号の低周波成分による相関値の増大を防ぐため、0.03 [Hz] のハイパスフィルタをかけたのち相互相関を行った。その結果、117597 例のイベントが検出され、波源位置推定された。またこの数は窓を 50 [%] ずつ移行させるごとに相関値のピークの確認を行っているため単一のイベントが 30 秒ごとに数回にわたり検出されているものも含んでいる。2017 年 10 月 31 日(UTC) に推定された波源位置を図 3.14 に示す。

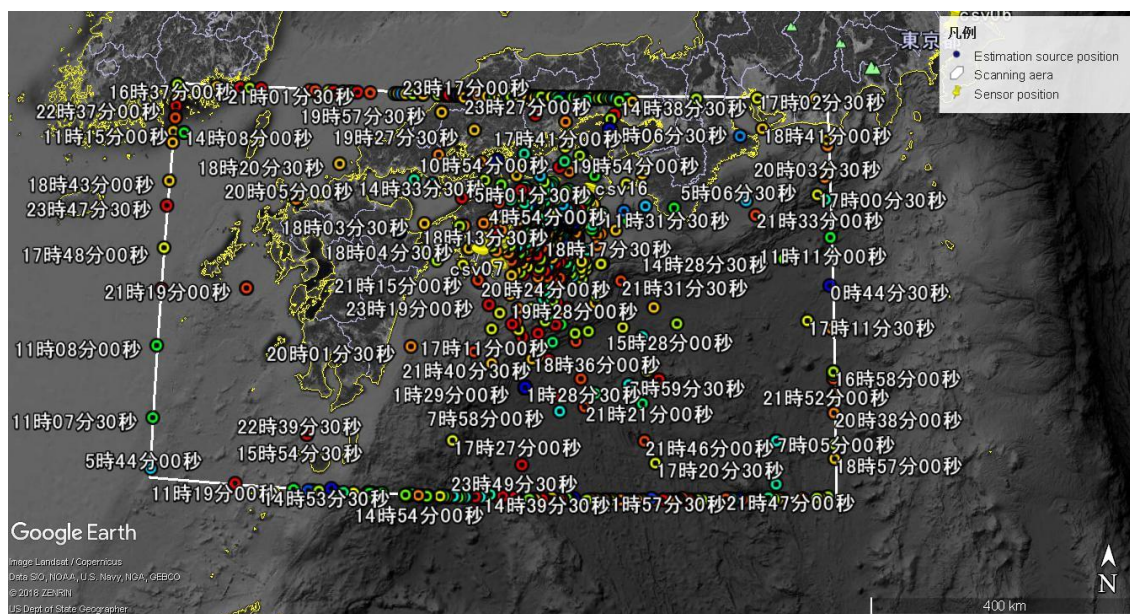


図 3.14 2017 年 10 月 31 日(UTC) に推定された波源位置

図 3.14 は 10 月 31 日(UTC) に高知県沿岸で観測されたインフラサウンドデータから推定された波源位置を Google earth 上にプロットしたものである。ログデータのファイルサイズの問題で 2017 年 10 月 31 日から約 80 日分の波源位置推定結果をプロットすることは出来なかった。黄色いピンのマークで示された点がセンサの座標であり、丸いポインターで示された点が推定された波源位置である。また、白い枠線で示された範囲はグリッドサーチ法により走査された範囲であり、ラベルはイベントが発生した時刻ではなくセンサ csv11 に音波が到達した際の時刻(UTC)である。

解析の結果多数の波源位置が推定されたが、検出数が多く検出されたイベントの確認が難しいため、何らかの地球物理学的イベントの波源位置が推定されたと確証のある事例を見つけるには至っていない。

波源位置推定されたイベントの中に 2017 年 10 月 31 日 5 時 1 分から 4 分 30 秒に渡って移動したとみられる音波源が検出されたが、波形データを参照したところデータの欠損部分であったことが分かった。推定された波源位置を Google Earth 上にプロットしたものを図 3.15 に示す。また 2017 年 10 月 31 日 5 時の相互相関を図 3.16、3.17 に示す。

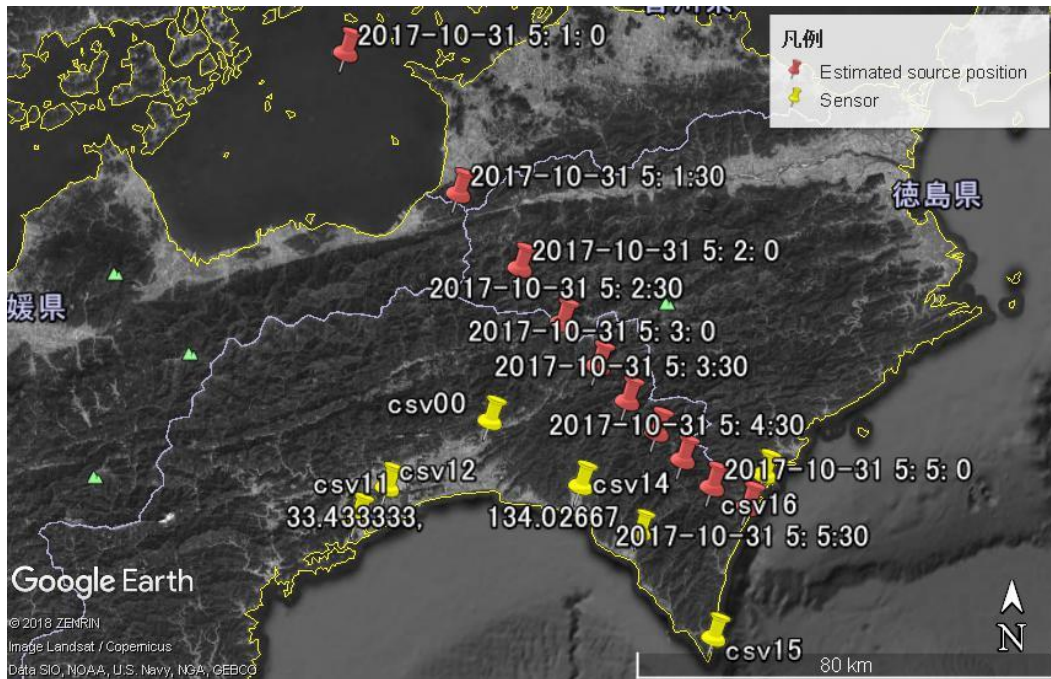


図 3.15 移動する音波源位置

図 3.15 において推定された移動する波源の位置を赤色のマーカーでそれぞれ示す。またラベルはイベントが発生した時刻ではなくセンサ土佐市 (csv11)に音波が到達した際の時刻である。

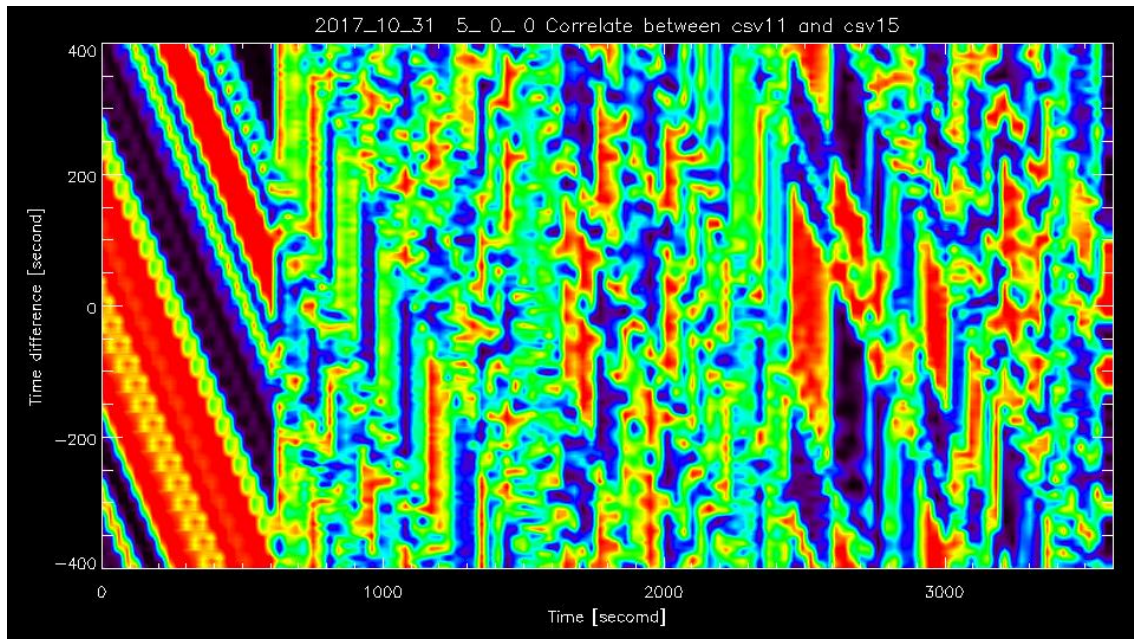


図 3.16 土佐市(csv11)で観測された波形に対する室戸市(csv15)の相互相関

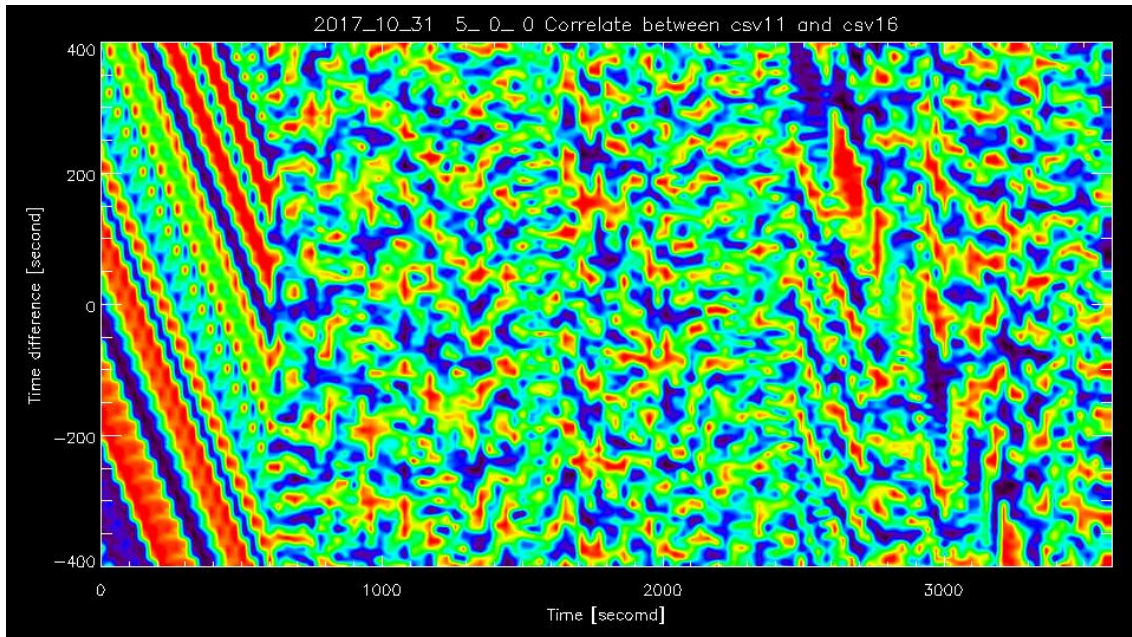


図 3.17 土佐市(csv11)で観測された波形に対する東洋町(csv16)の相互相関

図 3.15、3.16 は土佐市(図 3.14 における csv11)に対する相互相関値の分布を示しており、暖色になるほど相関値が 1 に近くなり、寒色になるほど相関値が-1 に近い。グラフの縦軸は相互相関の窓をずらした秒数を示し、正の値が csv11 に対しての遅れ位相を示す。また横軸が観測時刻であり 2017 年 10 月 31 日 5 時から一時間分の経過秒数を示している。図 3.16 が土佐市(csv11)で観測されたデータに対する室戸市(csv15)の相互相関の分布であり図 3.17 が土佐市(csv11)で観測されたデータに対する東洋町(csv16)の相関分布である。図 3.15 に示された、波源位置は図 3.16、3.17 の横軸において 30 秒から 330 秒の範囲である。

今回解析を行ったアルゴリズムでは、データの欠損があった際、欠損部分を直線補間するため、波形データにハイパスフィルタをかけた時のフィルタ関数が波形に現れ、同フィルタをかけた他地点で観測された波形と高い相関が表れたと考えられる。

3.3 先行研究の結果との比較

小松(2012)による音波の到来方向探知による波源位置の推定結果に対して、今回のイベント自動検出およびグリッドサーチ法を用いた波源位置の推定結果を比較する。小松(2012)によって波源位置推定に用いられた 3 例のイベントのうち本研究では 2 例のイベントについて桜島火山から半径 6 [km]の円内に位置推定することに成功した。小松(2012)により錦江湾高校と宮崎大学の三角形アレイからの到来方向探知によって推定された波源位置が半径 15 [km]円内であるのに対しピンポイントで波源位置が推定されたと言える。これは、到来方向探知を行う場合は当時のセンサの三角形アレイ配置は間隔が数 10 [m]程度しかなく、また 2 地点の位置と音波源位置との相性が悪く角度条件が悪かったためと考察されており[8]、このことから本手法では音波源に対するセンサの配置条件が緩和されたと言える。また、到来

方向探知に用いた 3 例のイベントが全て同一の波源によるものという情報を必要としているのに対し、イベント単位で波源位置を推定することが出来た点も有為であると言える。しかし、3 例の内 1 例は桜島火山から遠い位置に推定された。これは図 3.10 から推測されるように、システムが別のイベントやノイズを誤認してしまったためと考えられる。こうした問題は三角形アレイによる到来方向探知よりも相互相関処理の窓を動かす幅を多く取らなければならない面的配置による波源位置推定の欠点と言える。

3.4 高知県沿岸におけるセンサの解析アルゴリズムの評価

高知県沿岸に配置された 15 台のインフラサウンドセンサを用いて解析を行った場合、相互相関を行う窓幅を 60 [second] に設定しても 80 日分のデータを解析するのに約 10 日間の時間を要することが分かり、システムをリアルタイム化した場合のリアルタイム性は確保できるが蓄積したデータを解析する上で、現在のアルゴリズムでは莫大な時間が必要であることが分かった。また、波源位置推定結果、多数のイベントが検出されたが、数が膨大であるため波源となるイベントの発生要因の確認が取れた例が存在せず、また誤検知と考えられる波源位置も多く推定されているため、データをインポートする際の観測データのエラーや欠落に対する対処、相互相関を行う際の窓幅やハイパスフィルタのカットオフ周波数などのパラメータ、イベントの検出方法等に多くの課題が残されている。このため現状インフラサウンドの観測データから統計的解析を行うに至っていない。

4章 結論

本研究では、高知県内に面的配置されたインフラサウンドセンサによるデータ解析のための手法としてグリッドサーチ法の適用を試みた。今回解析に用いたグリッドサーチ法はインフラサウンドセンサの面的配置における音波原位置推定に有効と結論づける。しかし、グリッドサーチによって波源位置を推定する際に長時間窓を移動させる相互相関が必要となるため、各センサにおけるイベント波形の到達時間差を自動で得るには難しく、イベントの検出から波源位置推定までをすべて自動化するにはまだ課題が多い。また、高知県沿岸に配置された複合型インフラサウンドデータの解析アルゴリズムにおいては、地球物理学的イベント明確に波源位置が推定されたと言える例を確認するに至っておらず波源位置の推定の検証や位置精度の検証を行うことが出来なかった。

参考文献

- [1] 田平誠, インフラサウンドの世界,
http://www.senior.aichi-edu.ac.jp/mtahira/IFS/IFS_top.htm, 2018/01/11 参照.
- [2] 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.
- [3] Nobuo Arai, Makiko Iwakuni, Shingo Watada, Yuichi Imanishi, Takahiko Murayama, and Mami Nogami, Atmospheric boundary waves excited by the tsunami generation related to the 2011 great Tohoku-Oki earthquake, *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L00G18, 2011.
- [4] 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.
- [5] 山元龍三郎, 竹本修三, 1-1 志田順先生の足跡を追って(1. 帝国大学時代の京大地球物理学研究), *京大地球物理学研究の百年(II)*, 2:2-5, 2010.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Takahiko Murayama, Masaki Kano, Masa-Yuki Yamamoto, Yoshiaki Ishihara, Infrasound Signals and Their Source Location Inferred from Array Deployment in the Lützow-Holm Bay Region, East Antarctica: January-June 2015, *International Journal of Geosciences*, 181-188, 2017.
- [10] 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.
- [11] 気象庁地震火山部, 緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料,
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eww/data/nc/katsuyou/reference.pdf>, 2018/01/29 参照.

[12] 気象庁, 気象庁 | 過去の気象データ検索,
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/daily_a1.php?prec_no=74&block_no=1233&year=2017&month=11&day=&view=g_wsp#main, 2018/02/04 参照.

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、八田章光教授に感謝いたします。研究の方向性や手法についてディスカッションして下さった齊藤大晶助教、研究の相談やアドバイスを下さった、吉永氏、齋藤氏、藤津氏、藤本氏、安河内氏、平塚氏、Mario Batubara 氏、その他研究室のメンバーに感謝します。研究で用いたセンサを開発・製造し、質問に答えて下さった株式会社 SAYA の横田昭寛様、研究に関してご指導くださった国立極地研究所の金尾政紀様、研究データの提供をして下さった日本気象協会の村山貴彦様、センサーネットワーク構築に尽力して下さった黒潮町在住の金子光広様、センサの設置に協力して頂いた方々に心から感謝申し上げます。

皆様方の協力をなくして、本研究の発展は実現しなかったと感じております。改めて感謝申し上げます。