

2-7 自然災害の早期検出に向けたインフラサウンド観測

2-7 *Infrasound Monitoring for Early Detection of Upcoming Natural Disaster*

西村 竜一

NISHIMURA Ryouichi

多くの自然災害が、地震や集中豪雨等の突発的に発生する大きな自然現象を契機として起きている。こうした自然現象の発生をいち早く検知し、その発生場所や時刻、規模を迅速に把握できれば、住民の避難や救助の初動対応に大きく貢献できる。本稿では、その実現に資する信号のひとつとして人の耳では聞き取ることができない超低周波の音である“インフラサウンド”に着目している。インフラサウンドは、可聴音と同様の伝搬特性を持つため、大気中を音速に近い速度で伝搬し、夜間や多少遮へい物がある環境でも影響を受けにくい。そのため、レーダーやカメラのような既存センサを補完する新たな情報源として期待されている。本稿では、インフラサウンドの特性について概説した後、観測装置の開発、実際の自然現象の観測・解析事例、さらに防災・減災への応用に向けた今後の展望について紹介する。

Many natural disasters are caused by a strong event suddenly happens in the nature. It would be helpful for evacuations and rescue operations if one could quickly detect the occurrence of such event, and know of its information such as position, time, and scale. Therefore, we have been investigating infrasound to achieve this purpose. Infrasound is a sound inaudible to human ears because its frequency is too low to perceive. However, it has basically the same characteristics as usual sound. It travels at the speed of sound and is resilient to darkness and obstacles. Hence, it is expected that it can play a complimentary role with other sensors like radar and camera. The first part of this paper is devoted to the fundamental characteristics of infrasound. And then, development of infrasound measurement systems, data analysis obtained at actual natural events, and its future applications to disaster mitigation are discussed.

1 まえがき

日本は、地震や津波、火山など多くの自然災害が発生する国の1つである。加えて、地球温暖化の影響による豪雨や干ばつ、熱波など日常生活に著しい影響を及ぼす異常気象の発生も全世界的に増えている。人類がこれまでに経験した発生頻度に照らして稀なために“異常”気象と呼ばれるが、現在の地球環境においては必然的に発生している現象の可能性もある。最近では、異常気象ではなく極端気象と表現される機会も増えている。この状況を看過することはできず、適切に対処する技術を構築しなければ、甚大な損害を被ることになる。昨今、防災庁の発足や防災気象情報の変更など、自然災害への対応強化が進められている。より多くの情報を利用可能にすることは、これらの取組とも整合するものである。

インフラサウンド(超低周波音)とは、図1に示すように人には聞こえないとても低い周波数の音のことである [1]。2011年の東日本大震災では、東日本の太平洋沿岸は大きな津波に襲われた。このとき、津波が沿岸に到達するよりも先に、大きな気圧変動が観測されていることが後になって判明した [2]。これは、津波の元

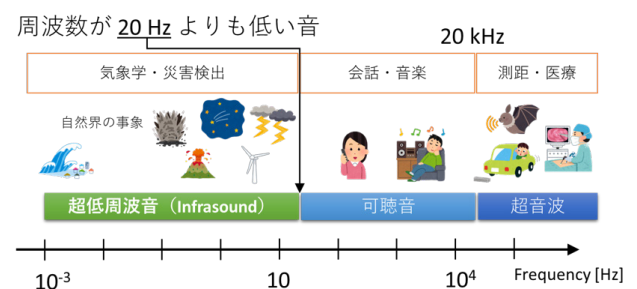


図1 インフラサウンドとは

となる海面隆起を起源として、大気中にインフラサウンドが発生し、それが大気中を伝搬したものと考えられている。津波に限らず、火山の爆発的噴火や雪崩、竜巻や雷、火球などでも発生することが知られている(図1)。災害関連情報を遠隔から取得できる波動であるにもかかわらず、地震波やレーダーのように防災に活用されていないのが現状である。

原因としては、インフラサウンドの周波数帯域の観測に適したセンサがあまりないこと、そのため観測データも少なく科学的知見が乏しいこと、そのことによる信頼性の低さが防災への応用を躊躇^{ちゅうちゅう}させるという悪い連鎖を引き起こしていると考えられる。ボトルネックがひとつであれば、それを解決すればよい。しかし、そうではないため、全体を総合的に引き上げていく必要がある。このことから、NICTでは適切なセンサを用いたインフラサウンド観測装置の開発から、観測網の拡充とデータ取得およびそのデータの公開、さらに観測データを解析して災害関連情報を推定する信号処理の研究開発まで総合的に携わり、その有効性を実際に発生した大きな自然現象を対象に実証してきた。

2 インフラサウンド

2.1 インフラサウンドとは

インフラサウンドの大気中での伝搬は、下記に示す運動方程式とエネルギー保存則に支配される [3]。

【運動方程式】

$$\bar{\rho} \frac{\partial u_x}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

$$\bar{\rho} \frac{\partial u_y}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad (2)$$

$$\bar{\rho} \frac{\partial u_z}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} - g\rho' \quad (3)$$

【エネルギー保存則】

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -K \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + g\bar{\rho}u_z \quad (4)$$

ここで、 u_x, u_y, u_z は、それぞれの軸方向の粒子速度を、 p はインフラサウンドの音圧を、 $\bar{\rho}$ は大気密度を、 ρ' はインフラサウンドによる大気密度の変動成分を、 g は重力加速度を表している。また、 K は体積弾性率を表しており $\bar{\rho}c^2$ に一致する。ここで、 c は音速である。大気密度も温度も大気中の高度とともに変化するため、式 (1) ~ (4) 中の $\bar{\rho}$ も K も高度の関数である。

運動方程式は、高校物理で習う力学の式(質量×加速度=力)と本質的に同じものである。密度は単位空間あたりの質量であり、粒子速度の時間変化は加速度であり、圧力とは単位面積に掛かる力である。したがって、左辺は質量×加速度であり、右辺は力を表している。これをそれぞれの軸方向で考えたものが式 (1) ~ (3) に相当する。密度を持つ大気に対して重力加速度が下向きに常に作用しているため、式 (3) の z 軸(上下)方向においてその効果を考慮する項が右辺の最後に追加されている。式 (4) は、エネルギーが保存するという基本的な物理現象を大気中の音の伝搬に対して表現したものである。実際には、上記の式も風による影響や大気の粘性を無視しており、実空間でのインフラサウンドの伝搬の忠実な再現には、より複雑な式が必要になる [4][5]。

上記の式を基に計算機シミュレーションを行った結果が図2(a)である。これは、水平方向に2,000 km、垂直方向に500 kmの空間を考え、500 m四方の地面(海面)が図2(b)に示すような時間変化で最大1 m上昇することで発生したインフラサウンドが、音源位置から離れるにつれて地上でどのような波形で観測されるかを求めたものである。音源からの距離が数百km離れても振幅変化が残っていることから、低い周波数

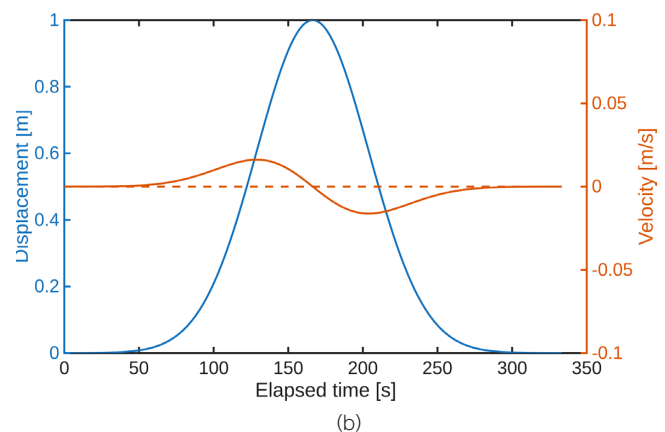
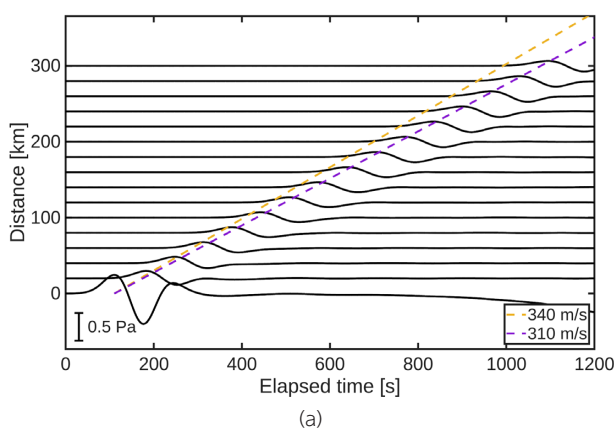


図2 計算機シミュレーションにより予測したインフラサウンド観測波形の距離と到来時間の関係 (a) および駆動信号の時間波形と変化速度 (b)

は遠くまで信号が届いていることがわかる。また、図中の点線は、その速度で信号が伝搬した時に、最大振幅が現れるはずの時刻を示している。この図から、この波の伝搬速度が、音速として一般的に言われる340 m/sよりもやや遅い310 m/s程度であることがわかる。

このようにインフラサウンドは、信号の発生源から遠く離れた地点まで信号が伝搬することから、インフラサウンドを多点で観測することで災害を引き起こす可能性のある事象の発生を遠方から検知し、その規模と場所を信号の大きさと到来時間差から推定することで避難や救助活動の助けになることが期待される。

3 インフラサウンドの観測

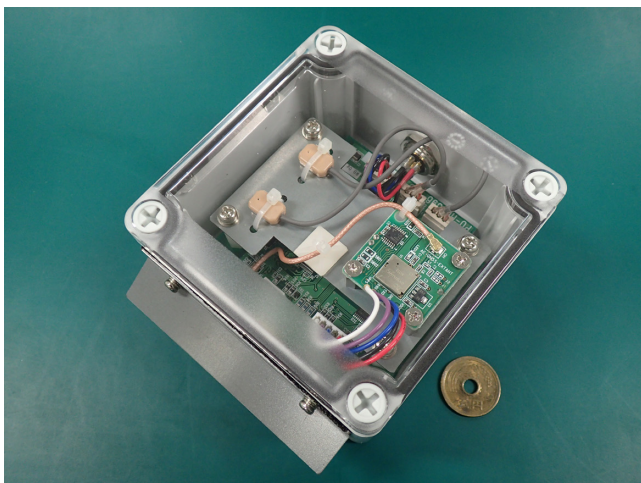
3.1 観測装置

通常の音響マイクロホンは、人の可聴音よりも低い周波数では感度が低下する。そもそもどこまでもフラットな特性を有するマイクロホンは、単体では構造的に作成困難であることに加え、呼気による気圧変化等に反応することで雑音を重畳させないための特性である。一方、気圧センサは、元来、静圧を計測することを目的としているため、周波数が高くなると一般的に内部雑音が大きくなる。そのため、インフラサウンドの周波数は、マイクロホンで計測するには周波数が低く、気圧センサで計測するには周波数が高い、という状態になる。一部の高性能なセンサは、広い計測可能な周波数帯域を有している。例えば、Paroscientific, Inc. の水晶振動式微気圧計Model 6000-16Bは、サンプリング周波数100 Hzでの観測が可能である。しかし、当該装置の本来の用途とは異なる使用になり、必要以上に高額な装置を利用することになる。これが、

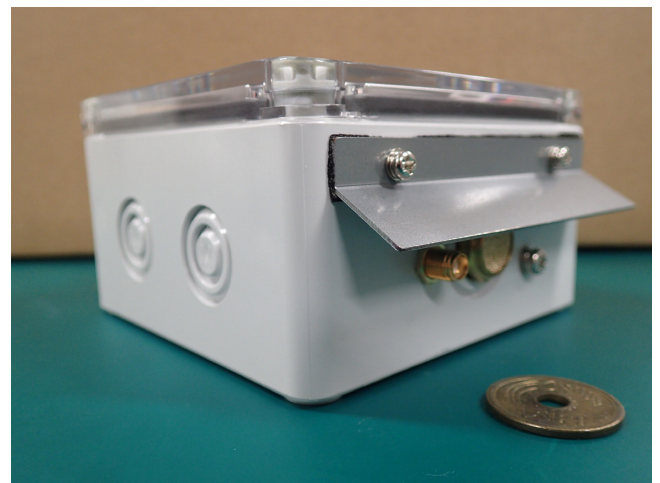
コスト面での非効率を招き、多地点観測の実現の妨げとなる。

この課題を解決するため、私はMEMSセンサ技術の発展に着目し、インフラサウンド観測を目的とした観測装置の開発に取り組んできた。MEMSセンサは、自動運転やアシスト機能の実現のために外界の情報収集を可能とする小型・省電力で信頼性も高いセンサが必要となり、優れた製品が安価に利用できるようになった。ドローンやロボット分野では自律制御が不可欠であり、そのためのセンサ技術は発展が続いている。その結果、現在のMEMS気圧センサの感度は、ある程度大きなイベントに伴って発生するインフラサウンドを十分に観測できるものである。

加えて、観測可能な周波数帯域を拡張するため、複合型の観測装置を開発した。これは、信号処理により異なるセンサを組み合わせることで、インフラサウンド観測で対象とする周波数帯域全体にわたってフラットな特性を実現するものである [6]。この装置には、補聴器用のマイクロホンの構造を工夫することで観測可能な周波数レンジを低い周波数側へシフトさせた小型超低周波数用マイクが搭載されている [7]。これだけでは、観測可能な下限周波数が0.1 Hz付近に留まるため、津波の際に発生する数mHzの周波数成分で構成されるラム波 (水平方向にのみ伝わる特殊な音波の一種) は観測できない。そこで、その帯域を得意とする気圧センサとの複合利用によるフュージョンセンシングを実現している。図3 (a) の上面写真では内部に小型の超低周波マイクロホン (肌色の部品) が2つ見える。これらは異なる感度を有しており、観測可能な周波数帯を補完するだけでなく、観測可能な振幅幅 (ダイナミックレンジ) の拡大にも貢献している。MEMS気圧センサは上面から撮影した図3 (a) からは見えない下



(a)



(b)

図3 複合型インフラサウンド観測装置

2 フェーズ1 自然災害に対する予測・検知

層に設置されている。GPSモジュールとマイコンも搭載されており、タイプスタンプ付きの観測データがRS-232Cによるシリアル通信を介して出力される。

そのほか、内部雑音の弱点を低減したMEMS気圧センサのみで構成されたインフラサウンド観測装置は、数年前から国内メーカーが製造販売しており(図4)、関心のある方は誰でも入手可能である[8]。

3.2 インフラサウンド観測網による観測事例

自然現象由来のインフラサウンドが観測される可能性を高めるため、国内の複数地点に観測装置を配備して常時観測を実施している。また、いくつかの観測地点におけるデータは、日本気象協会のWebサイト「インフラサウンド・モニタリング・ネットワーク」を通



図4 国内メーカーによるインフラサウンド観測装置

して一般公開を行うとともに、オープンデータ化により研究目的での利用を可能にしている(図5)。ここでは、これまでにインフラサウンドが観測されたイベントとともに、観測データの解析結果について紹介する。
【トンガ海底火山噴火】

2022年1月15日に日本からおよそ8,000 km離れた太平洋で海底火山が噴火した。その時に発生したインフラサウンドは7時間以上かけて大気中を伝搬し、日本の複数地点で観測された。図6左の3つのグラフは、東京都の4地点および宮城県と鹿児島県のそれぞれ5地点で観測されたインフラサウンドの波形である。背景にある大気圧変動も重畳して観測されているため、右上がりの傾向が見られている。青の点線で示した大きな気圧変化はインフラサウンドの到来に起因するものであり、観測地域に依らずに類似した波形であるが、到達時間が観測地域ごとにも観測地点ごとにも少しずつ異なる。この到来時間差を基にして、インフラサウンドの到来方向と伝搬速度を信号処理により推定可能である[9]。推定結果を示したのが右下のグラフであり、計算機シミュレーションで見られたように速度がおよそ310 m/sで伝搬していることがわかる。また、東京、宮城、鹿児島のそれぞれの地域で推定された到来方向を方位線で示した右上の図から、噴火した火山の方向ともおおむね整合していることが見て取れる。

【能登半島地震】

2024年1月1日に発生した能登半島地震では、「イン

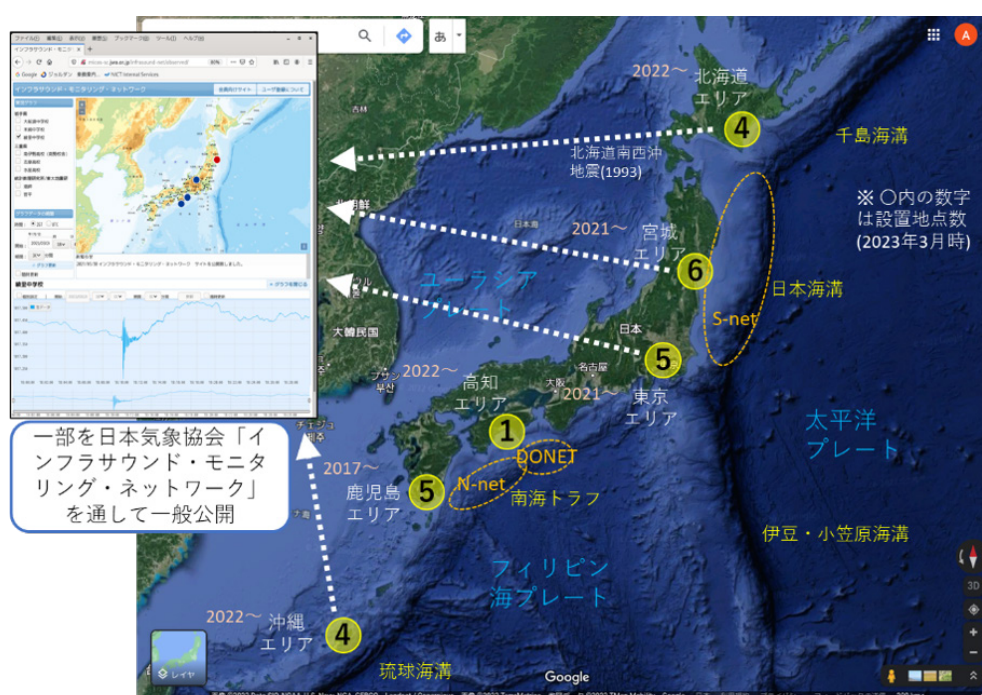


図5 NICTが観測装置を設置している地点の分布

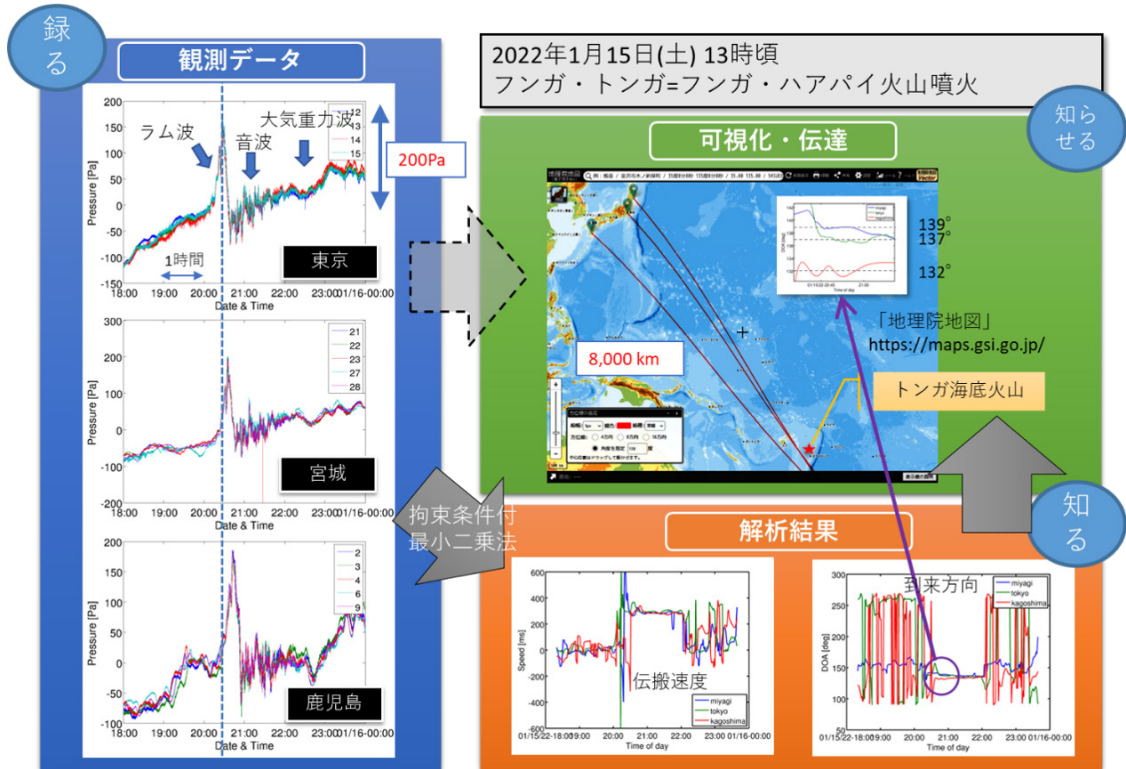


図6 トンガ海底火山噴火時の観測波形と解析結果

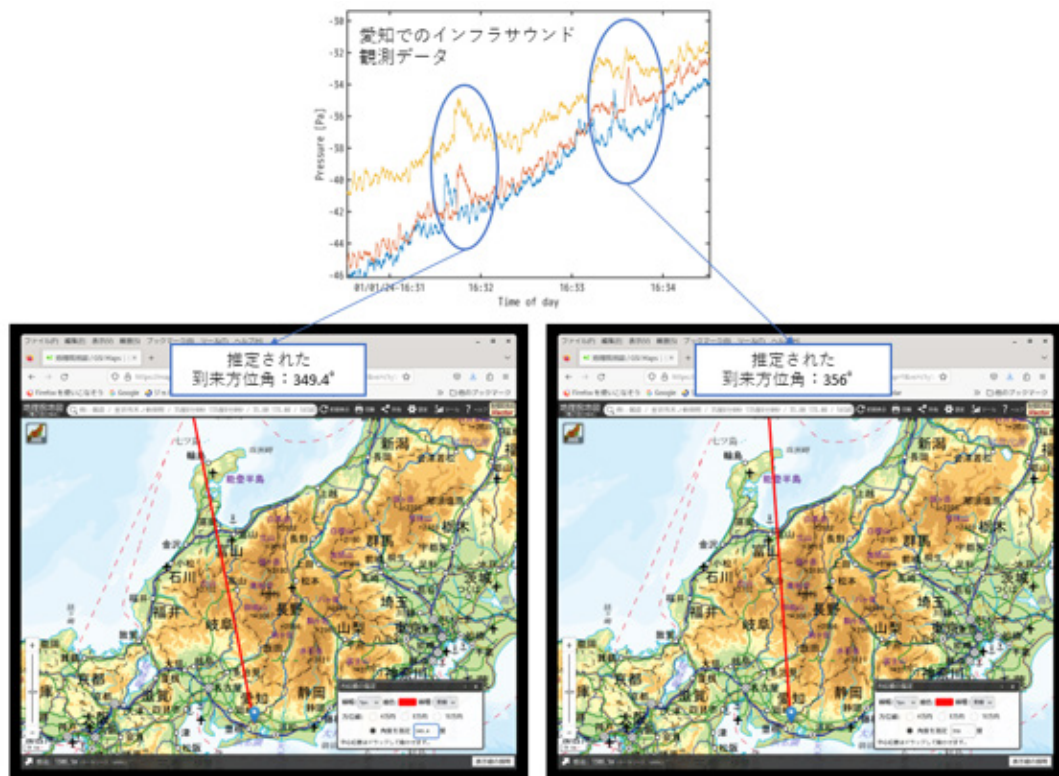


図7 能登半島地震の際の観測波形と解析結果

「インフラサウンド・モニタリング・ネットワーク」で公開されている日本気象協会が愛知県豊橋市の3地点に設置していた観測装置のデータでインフラサウンドが観測されていた [10]。図7上の3色の線がそれぞれの観測

地点で観測された信号である。気圧センサで観測しており、グラフを通して右上がりなのは、観測地点における気圧が上昇していることに起因している。10～20秒程度の少し大きな気圧変化が2回出現し、それが3つ

の観測地点で少しずつ異なる時間に発生している。したがって、これが大気中を伝搬して到来したインフラサウンドだということがわかる。音の伝搬速度は温度で変化するため、当時の周辺の気温を基に計算し、その各観測地点の位置関係から音の到来方向を推定することができる。推定した結果が、図中に示した赤い方位線である。これらのインフラサウンドが、能登半島の方向から到来していることがわかる。

このように、インフラサウンドによる防災関連情報の取得が可能であることを示す事例が増えている。津波に限らず、雪崩や火球など、他の自然現象に対して適用した結果が様々な研究者により学会等で報告されている。これらの有用性を示す事例を積み上げることが、信頼性の向上に繋がるものと考えている。

4 むすび

Hi-netやK-NET、KiK-netは、国立研究開発法人防災科学技術研究所が整備・運用する地震計の観測網である。インターネット上で観測状況を閲覧することもでき、地震が発生した後の地震波の広がりを非専門家でも見て感じることができる[11]。地震だけでなく、火山観測を目的としたV-Netもある。残念ながら、インフラサウンドに対する同様の「Infrasound (IS) -Net」とでも言うべき網羅的な観測網は、現時点では国内には整備されておらず、NICTをはじめとした研究機関・大学等が個別に観測装置を設置しているのみである。インフラサウンド観測を通じて火山噴火や雪崩、土砂くずれを対象とした監視を行う場合には、山間域に観測装置群を配備するのが効果的である。一方、津波検出を考えると、到来が懸念される地域の海寄りに整備することが検出までの時間短縮の面で有利となる。どこに観測装置を配置するかは、住民が避難の必要性を判断する材料となる情報をいち早く提供する上で考慮すべき条件となる。

今後、多くの地点でインフラサウンドの観測および観測データに基づく解析が行われ、自然災害の早期検出およびそれによる被害の軽減が実現できることを期待している。未曾有の自然現象の発生に対しては、大量データに基づく学習が必要となるAI技術が有効な場面は、限定的となるかもしれない。その時、信用できるのは自然観測において目であり耳となるセンサ群で取得したデータそのものである。より多くの情報を利用可能にしておくことは、レジリエントな防災・減災技術の実現につながる。

謝辞

インフラサウンド大気伝搬の計算機シミュレーション実装に際し議論いただいた同志社大学の土屋隆生教授に感謝する。

【参考文献】

- 1 A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne (Eds.), "Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies," Springer, 2010.
- 2 N. Arai, M. Iwakuni, S. Watada, Y. Imanishi, T. Murayama, and M. Nogami, "Atmospheric boundary waves excited by the tsunami generation related to the 2011 Great Tohoku-Oki Earthquake," *Geophys. Res. Lett.*, vol.38, no.7, 2011.
- 3 S. Watada, "Radiation of acoustic and gravity waves and propagation of boundary waves in the stratified fluid from a time-varying bottom boundary," *J. Fluid Mech.*, vol.627, pp.361-377, 2009.
- 4 C. de Groot-Hedlin, M. A. H. Hedlin, and K. Walker, "Finite difference synthesis of infrasound propagation through a windy, viscous atmosphere: Application to a bolide explosion detected by seismic networks," *Geophys. J. Int.*, vol.185, pp.305-320, 2011.
- 5 J. W. Bishop, P. Blom, and D. Fee, "Finite-frequency modeling of regional tropospheric infrasound using realistic atmospheres and terrain," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.155, no.1, pp.128-144, 2024.
- 6 R. Nishimura and K. Takizawa, "Fusion sensing for infrasound measurement: Mixing filter design with deep unfolding," *IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol.E109-A, no.5, pp.1001-1009, 2026.
- 7 伊藤 平, 森川 昌登, 西村 竜一, "補聴器用マイクロホンに応用した小型超低周波マイクロホン," 日本音響学会講演論文集, pp.311-312, Sept. 2023.
- 8 R. Nishimura and K. Takizawa, "Simultaneous estimation of direction of arrival and sound speed using a non-uniform sensor array," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp.1-5, 2023.
- 9 大井 拓磨, "最新の微気圧計の開発と防災技術," 計測技術, no.6, 2026.
- 10 西村 竜一, 鈴木 陽一, 滝沢 賢一, "能登半島地震後に観測されたインフラサウンドの到来方向および伝搬速度推定," Abstract of Japan Geoscience Union Meeting 2024, no.MTT38-01, 2024.
- 11 防災科学研究所, 長周期地震動モニタ <https://www.lmoni.bosai.go.jp/>



西村 竜一 (にしむら りょういち)

レジリエントICT研究センター
サステナブルICTシステム研究室
副室長
博士(情報科学)
音響信号処理、インフラサウンド
【受賞歴】

2022年 日本音響学会論文賞佐藤賞

2001年 日本バーチャルリアリティ学会論文賞