

2023年1月19日滋賀県守山・草津付近の爆発音の震源推定

Source Estimation of the Explosion around Moriyama and Kusatsu, Shiga Prefecture, on January 19, 2023

山田真澄

Masumi YAMADA

Synopsis

We investigated an explosive sound with an unknown origin that occurred near Moriyama and Kusatsu in Shiga Prefecture, Japan, just after 15:00 on January 19, 2023. From the local testimonies and the signals recorded in the seismic waveforms, this explosive sound occurred at around 15:03 in the vicinity of Kusatsu City and was observed as far as 20 km to the east-northeast. It is difficult to identify an object that generated the shock wave from the seismic waveform record.

キーワード: 爆発音, 衝撃波, ソニックブーム, 震源推定, 火球, 戦闘機

Keywords: explosive sound, shock wave, sonic boom, source estimation, fireball, aircraft

1. はじめに

2023年1月19日15時過ぎ, 滋賀県守山・草津付近で原因のわからない爆発音の観測報告があった(NHK滋賀 NEWS WEB, 2023; NHKおうみ発630, 2023; 京都新聞, 2023). 爆発音は草津市や守山市の広範囲で観測され, 警察署や市役所に問い合わせがあった. 警察や消防がパトロールしたが, 火災などの被害は確認されず, 原因や発生場所は分からなかった. 我々は, 爆発音の証言を収集し, 地震計のデータを解析して, 爆発音の場所や原因の推定を試みた.

2. データ

2.1 爆発音の証言

爆発音の音や振動は, 草津市や守山市を中心に広範囲で観測されている. 衝撃音が聞こえた範囲を確認するために, 観測の証言を収集した. まず, Twitterに投稿されたツイートの投稿時刻と内容から, およその場所と時間を把握した. また, 地元の市役所や警察署, 消防局に問い合わせを行い, 衝撃音の聞こえた範囲を調べた.

爆発音の証言が確認された範囲と, その中で特に

証言が多い地域をFig. 1に示す. 爆発音の証言が多い地域は, 琵琶湖の南西側, 草津市から守山市, 野洲市にかけて, 西南西から東北東の方角に幅2-3kmの帯状に広がっている. また, Twitterの投稿から, 最も早いツイートは15時3分10秒であることが分かった. このことから, 音が聞こえた時刻は15時3分ぐらいであると推定される.

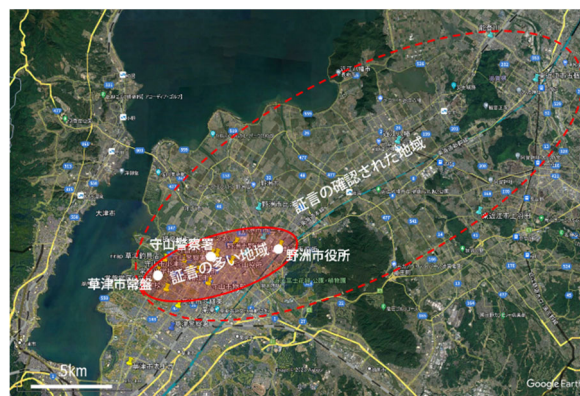


Fig. 1 Area of the observation of the explosive sound

2.2 地震波形記録

爆発音の証言のあった場所を中心として、半径100kmぐらいの地域の該当時刻の地震波形記録を調べた。使用したのは、Hi-net高感度地震観測網、F-net広帯域地震観測網、気象庁の地震津波検知網、京都大学・名古屋大学の地震観測網、産業技術総合研究所の地震観測網である。

草津周辺(25km以内)の観測点では何も信号が見つからなかったが、草津から40kmほど東北東にある多賀周辺の観測点(Fig. 2の赤い三角印で示した点)で、爆発音に関係すると思われる信号が見つかった。琵琶湖湖岸から多賀方面の間には観測点がないため、草津と多賀を結ぶ青い点線の範囲に信号が到達したと推定される。

S/Nが最も良いEIGENJの地震波形記録をFig. 3に示す。一番上が元々の速度波形上下動成分、二段目がこの波形に2-8Hzでバンドパスフィルタをかけたものである。一番下は、一番上の波形のスペクトグラムを示す。この波形の主な周波数成分は2-8Hzであることが分かる。これは、過去に火球などで観測されたソニックブームの波形と同じ周波数帯である(Yamada and Mori, 2012; Yamada 2021)。バンドパスフィルタをかけた速度波形は、888-895秒に振幅の小さい波が現れ、895秒で0.5秒ほどの大きなパルスが確認できる。その後は10秒ほど振幅の小さい後続波が見える。これも衝撃波の地震波形の特徴と一致している。衝撃波の波面が地震計に到達するとき、非常に大きなパルス状の波として記録される。空中を伝わる波の速度は、地中を伝わる波よりも10倍程度遅いため、地震計に到達する前に大気―地表のカップリングが起こると、音波は地震波となり、衝撃波よりも早く到達する。このような波が大きなパルスよりも前に記録されたと考えられる。後続波についても、衝撃波の波面通過後に周辺で発生したカップリングによって生成された地震動と考えることができる。

信号が確認された4つの観測点(図2の赤い三角印で示したHi-netのN.TAGH, F-netのN.TGAF, 気象庁のEIGENJ, 名古屋大学のNU.UGKC)の上下動速度波形をFig. 4に示す。波形はDC成分を除去し、4次の2-8Hzのバターワースフィルタをかけた。草津市常盤(35.06N, 135.95E)周辺の観測証言が多かったため、そこを震源と仮定して距離の順に並べた。この信号の見かけ速度(水平方向の速度)は0.35 km/sで、音速とほぼ一致する。これは、信号が地中ではなく空中を伝わってきたことを示す。また、震源時刻は15時2分53秒頃であることが分かった。

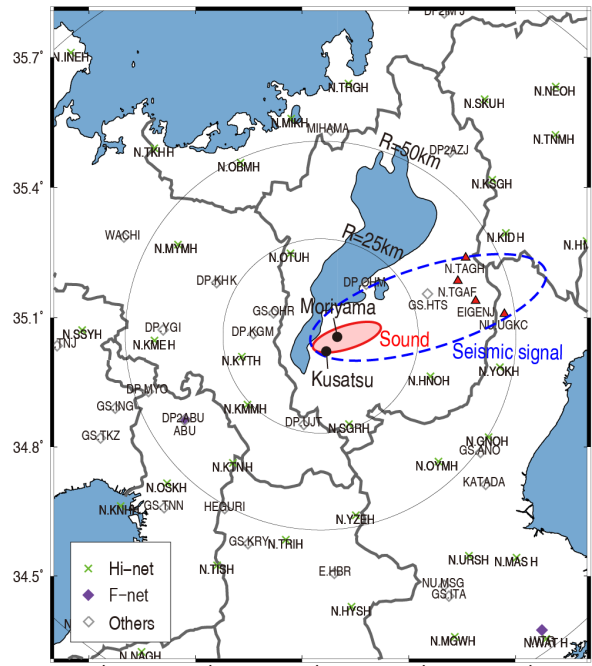


Fig. 2 Area of the observation of the explosive sound

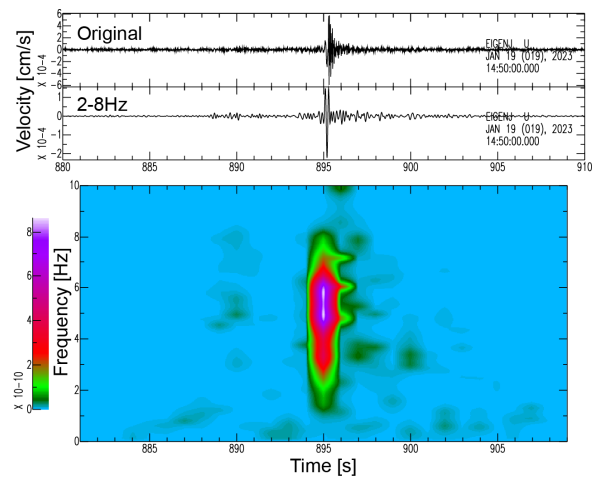


Fig. 3 Waveforms and spectrograms at the EIGENJ station (origin time is 14:50)

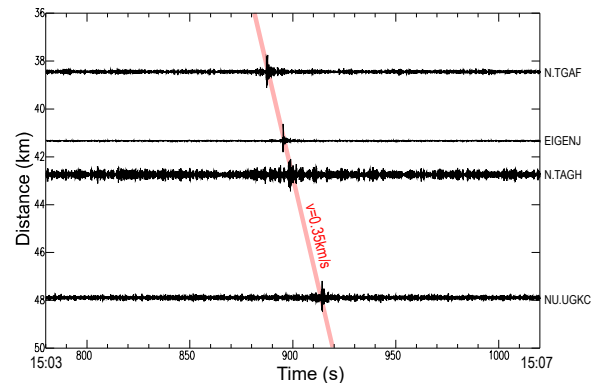


Fig. 4 Seismic waveforms (2-8Hz) at 15:03-15:07.

3. 解析結果

3.1 爆発音の場所と時刻の推定

爆発音の証言の分析から、この音が大きく聞こえた地域は琵琶湖の南西側、草津市から守山市、野洲市にかけて、西南西から東北東の方角に幅2-3kmの帯状に広がっている(Fig.1)。また、音が聞こえたという報告は、草津市から東北東の方角に20kmの範囲に帯状に広がっていた。音が聞こえた時刻は15時3分ぐらいであると推定される。

地震波形データには、草津から40kmほど東北東にある多賀周辺の4つの観測点に爆発音と思われる信号が記録されていた(Fig.2)。信号のある観測点数が4点と限られているため、信号の移動方向などを推定することは困難であるが、草津市周辺を中心とする点震源から音速で伝わってきたと仮定すると、矛盾なく説明できる。震源からの距離と信号の到達時刻から推定される震源時刻は、15時2分53秒頃である。

伝播速度が音速と一致するため、この信号は地震などの地中を伝わってきたのではなく、空中を伝わっている。また、信号が空中から伝わってくるため、地表の観測点(EIGENJ, NU.UGKC)は振幅が大きく、地中の観測点(N.TAGH, N.TAGF)は振幅が小さくなっている。

3.2 爆発音震源の軌道の推定

爆発音の震源は、15時3分頃、草津市周辺と考えられる。また、爆発音の観測された範囲は、草津市から東北東へ強い指向性を示している。これは、草津市で発生した爆発音が風などで東北東へ流れたか、震源自体が東北東へ移動し、観測範囲に影響を与えた可能性が考えられる。気象庁のアメダスの気象データを確認すると、2023年1月19日15時の大津では、平均風向は東北東、平均風速は1.1mであった。これは爆発音の観測範囲とは真逆の方向であり、風が観測範囲に影響を与えた可能性は低い。

信号が多数の地震観測点で記録されている場合は、到達時刻の違いから物体の移動速度や移動方向、入射角などの情報を抽出することができる。しかしながら、今回の現象は信号を捉えた地震計が4点しかないため、移動方向を推測することは困難である。

3.3 爆発音の原因の推定

今回の爆発音は、音だけではなく強い振動も観測されていることから、単純な「大きな音」ではなく、強い圧力変化を伴う衝撃波であったと推測される。衝撃波は、物体が音速よりも早く移動することで発生する圧力波の一種で、遠方でも轟くような大音響(ソニックブーム)として観測される。衝撃音が観測さ

れた場所で、何らかの物体が超音速で移動し、衝撃波を発生させたと推測される。この圧力波が空中を音速で伝わって広い範囲に伝播し、「爆発音」として人々に観測されたと考えられる。

このような衝撃波を出す原因として、火球や音速を超えて飛行する戦闘機などが考えられる。他にも、火山の噴火や化学工場の爆発などでソニックブームが観測された事例もあるが、琵琶湖東岸のような人口密集地で大規模爆発が発見されない事は考えにくいので、今回は検討しない。

地震波形の記録のみから、衝撃波が火球か戦闘機によるものかを区別することは難しい。火球と戦闘機で最も大きく異なるのは運動速度である。火球は20 km/s前後の非常に高速で移動するのに対し、戦闘機はマッハ2~3程度(1 km/s以下)である。この違いは衝撃波の到達パターンに最もよく現れる。Tatum (1999)によれば、衝撃波の到達パターンは運動軌道の仰角 θ と、運動速度 v と音速 c から決定される円錐形の頂点の角度 $\beta = \arcsin(c/v)$ によって決まる(Fig. 5参照)。 $\beta > \theta$ の場合、到達パターンは双曲線となり、 $\beta < \theta$ の場合は楕円となる。通常、戦闘機は運動速度 v が小さく(つまり、 β が大きく)、仰角も小さいため、 $\beta > \theta$ となり双曲線状の到達パターンを示す。火球は運動速度が速いので、楕円状の到達パターンになることが多い。ただし、今回のように観測点数が極めて少なく狭い範囲に限定されている場合には、衝撃波の到達パターンを知ることは困難である。

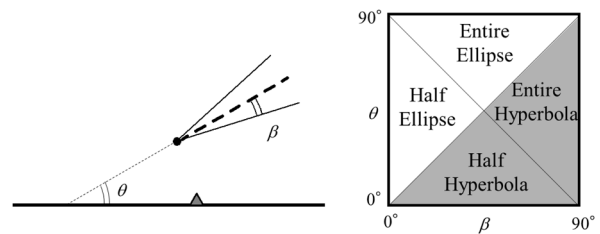


Fig. 5 Sonic boom arrival patterns based on the trajectory of the supersonic object

Yamada (2021)は、過去に観測された火球と戦闘機の衝撃波の波形の比較を行っている。複数の戦闘機が飛行している場合には、衝撃波が複数記録されるので火球と区別することができる。ただし、戦闘機が単独の場合には、火球の波形と極めて類似しており、判別は難しい。

地震計以外の情報では、火球の発光現象が軌道推定によく利用される。天文家などが全点カメラで連続観測を行っており、夜間の場合は動画から正確に軌道を推定することができる。今回は、日中の現象であったため、カメラには捉えられておらず、発光現象の目視情報もなかった。

なお、同日午後3時頃、航空自衛隊那覇基地の第9航空団に所属するF15戦闘機1機が、滋賀県南部を西から東へ飛んでいたということである(読売新聞オンライン, 2023; NHKおうみ発630, 2023)。この戦闘機は、定期整備を行うために福岡県の築城基地を経由して県営名古屋空港に向かっていった。航空管制を受けて飛行しており、高度は4000メートル以上だったという。航空幕僚監部広報室によると、この機のパイロットは那覇基地の聞き取りに対し、「音速を超えた飛行はしていない」と証言したという。

4. 過去の爆発音の地震波形

Yamada (2021)では、2010年から2021年までの主要な火球の衝撃波と、戦闘機による2019年の2回の衝撃波の地震波形の分析をしている。Yamada (2021)で分析した火球は、日本流星研究会火球データベース(日本流星研究会, 2023)とSonotaCo.JPの流星談話室(SonotaCo.JP, 2023)を使用してリストアップした。その中で、爆発音が聞こえたという証言があるものを中心に地震波形を解析している。

本節では、インターネットの掲示板やTwitterなどで爆発音が聞こえたという証言があり、かつ上記の火球リストに掲載されていない(火球特有の発光現象が見られなかったり、天候や時間帯などの観測条件が悪く目視できなかつたりした)ものについて紹介する。

なお、本節で示される地震波形は、特に明記していない限り上下動速度波形で、2-8Hzでバンドパスフィルタをかけたものを示している。また、観測点の場所と信号の到達時刻からインバージョンを行い(Yamada and Mori, 2012; Yamada 2021)、震源の場所と予測される到達時刻を地図に示している。

4.1 2006年4月6日 21時50分頃 山口県沖

2006年4月6日21時50分頃、山口県沖から音速で伝わる信号の地震波形をFig. 6に示す。この信号は、東京大学地震研究所小原一成博士が連続波形を見て発見したということである(小原博士私信)。インターネットにおける観測証言は発見できなかったため、爆発音があったかどうかは不明である。他の衝撃波の波形に比べて、立ち上がりが穏やかで継続時間が長い(1分程度)特徴がある。震源は山口県沖と推定され、仰角が大きく信号の到達パターンはほぼ同心円に近い(Fig. 7)。信号が観測された範囲は、山口沖から東～南東の方向へ広がっており、200km程度の遠方まで信号が観測された。

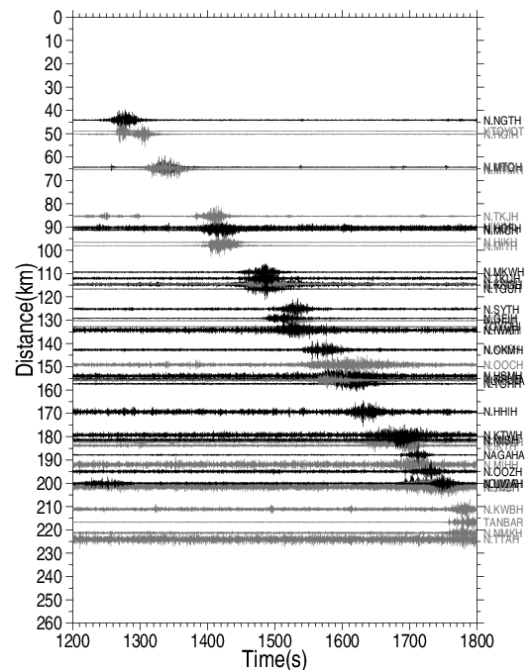


Fig. 6 Seismic waveform (2-8Hz) on April 6, 2006. The origin time is 21:30.

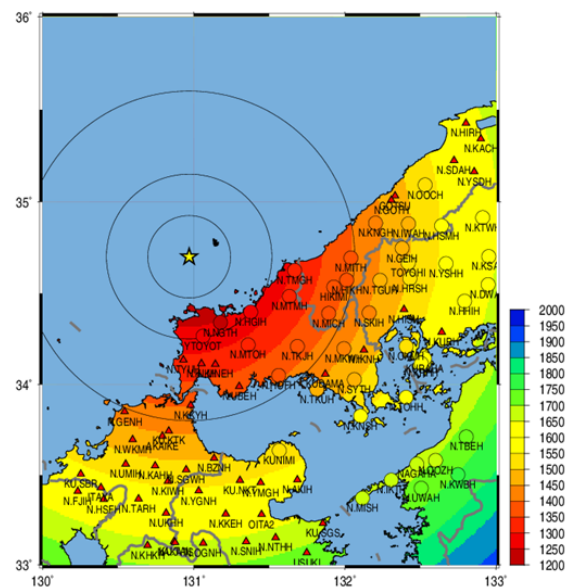


Fig. 7 Map of arrival times of the shock wave on April 6, 2006. The origin time is 21:30.

4.2 2007年11月27日 14時30分頃 能登半島沖

2007年11月27日14時30分頃、能登半島で爆発音があった。読売新聞オンライン(2007)によれば、窓ガラスが振動するほどの大きな爆発音が聞こえ、約1分置いてもう1度響いたそうである。市役所や消防署などには、住民から「地震か」などの問い合わせが約50件あったということである。また、航空自衛隊小松基地によると、当時能登半島の北西約60~80キロの空域でF15戦闘機4機が超音速で訓練していた。

この時の地震波形をFig. 8.に示す。証言の通り、約1分の間隔でほぼ同じ形の信号が記録されている。震源は能登半島沖北西約70kmと推定され、仰角が大きく到達パターンはほぼ同心円に近い(Fig. 9). 信号の観測された範囲は南東に広がっている。このように複数のパケットが存在する信号は、戦闘機による衝撃波の可能性が高い。

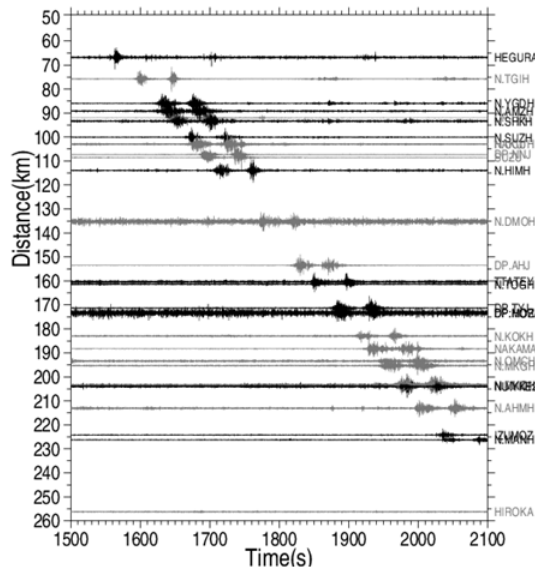


Fig. 8 Seismic waveform (2-8Hz) on November 27, 2007. The origin time is 14:00.

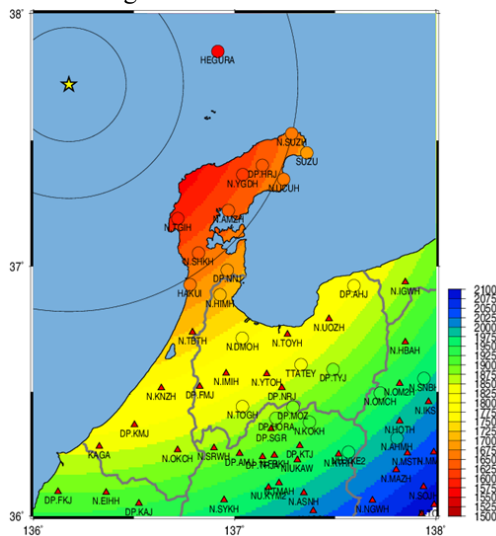


Fig. 9 Map of arrival times of the shock wave on November 27, 2007. The origin time is 14:00.

4.3 2014年11月7日 16時47分頃 佐渡

2014年11月7日16時頃、佐渡市で爆発音があった(宏観亭見聞録, 2014; J-CASTニュース, 2014; これが知りたかった!, 2014). 自衛隊のレーダーがある佐渡分屯基地によれば、衝撃音や揺れにつながるような航空はしていないということであった(J-CASTニュース, 2014). 記事によって、15時47分と16時47分の2つの時間が書かれているため、15時45~59分と16時45~59分の2つの時間帯の地震記録を調べた。

Fig.10に15時45~59分の2-8Hz上下動速度波形を示す。この時間帯には爆発音の信号は見当たらない。Fig.11に16時48~50分の1Hz以上の上下動速度波形を示す。16時48分頃に信号が見られるが、これは衝撃波よりも周波数が高く見かけ速度が速い(~3km/s)ので、微小地震と考えられる。もし、記事の爆発音の発生時刻が16時47分であれば、これは微小地震によるものと考えられる。

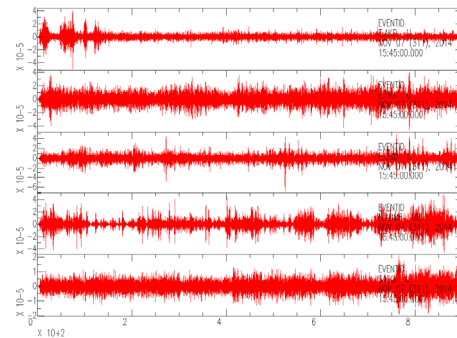


Fig. 10 Seismic waveform (2-8Hz) at 15:45-15:59.

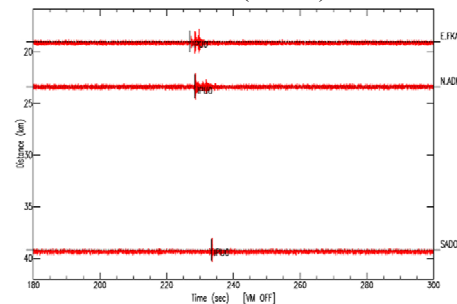


Fig. 11 Seismic waveform (>1Hz) at 16:48-16:50.

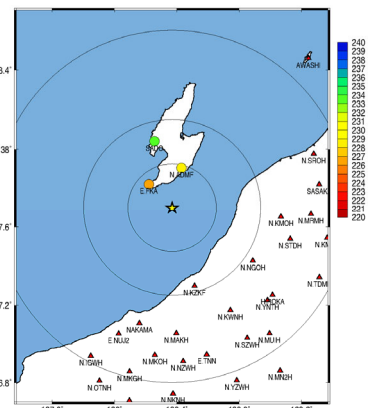


Fig. 12 Map of arrival times on November 7, 2014. The origin time is 16:45.

4.4 2019年10月23・24日 19時40分頃 函館

2019年10月23日19時40分頃およびその翌日24日のほぼ同時刻に、函館周辺で爆発音があった(浅井屋まにあ本舗, 2019; ニュース速報Japan, 2019; 函館災害情報Twitter, 2019). この2つのイベントは、Yamada (2021)で解析を行っている. このイベントの特徴は、信号の到達パターンが双曲線状であること(Fig.13, 14)と、地震波形記録に複数のパケットが見られることである(Fig. 15). 連続した2日のほぼ同時刻に火球が観測されることは考えにくく、また三沢市防災メール配信システムからも自衛隊の自衛隊による夜間飛行訓練がアナウンスされていた(三沢市防災メール配信システム2019a, 2019b)ので、この信号は戦闘機によるものと推測される.

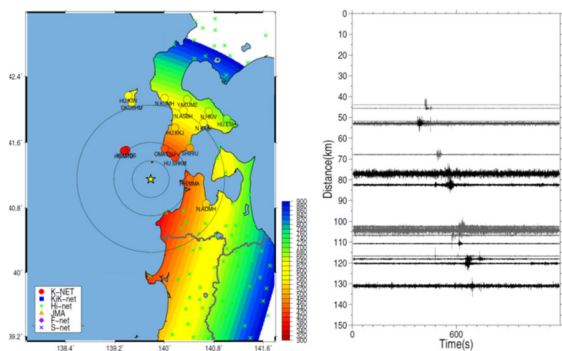


Fig. 13 Map of arrival times and seismic waveform on October 23, 2019. The origin time is 19:30.

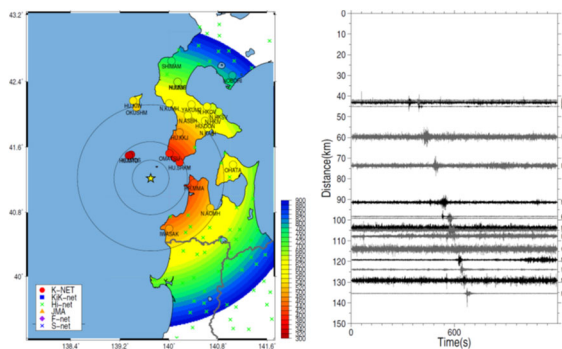


Fig. 14 Map of arrival times and seismic waveform on October 24, 2019. The origin time is 19:30.

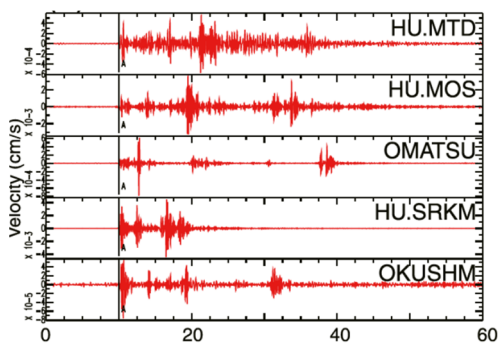


Fig. 15 Seismic waveform on October 23, 2019.

4.5 2021年4月26日 20時00分頃 札幌

2021年4月22日20時00分頃、札幌周辺で爆発音の報告が多数あった(北海道ニュースUHB, 2021). Fig. 16に示すように、この地震波形の特徴は、震源近傍の2-3点では鋭いパルス状の波形となり、距離が遠くなると立ち上がり穏やかな30秒ほどの紡錘形となる. 仰角が大きく到達パターンはほぼ同心円に近い(Fig. 17). 信号が観測された範囲は、札幌から南南東へ帯状に広がっていて、150km以上遠方まで観測されている. Yamada (2021)では、推定された震源の高度が高いこと、地震波形の振幅が大きいこと、地震波形のパケットが1つであることから、火球の可能性が高いと結論付けている. しかし、震源の場所や時間を考えると、この爆発音の原因には再検討を要するかもしれない.

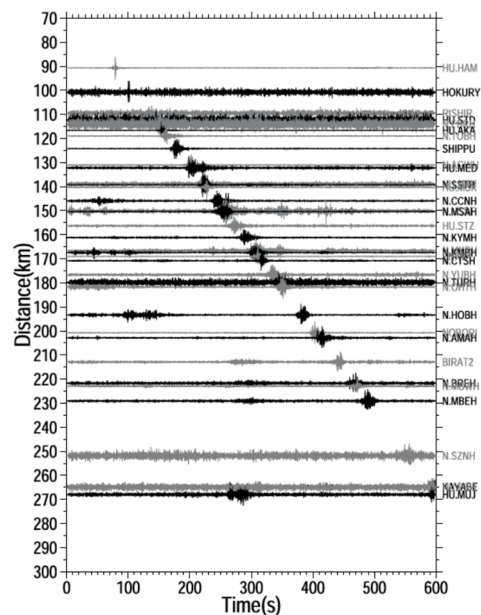


Fig. 16 Seismic waveform (2-8Hz) on April 26, 2021. The origin time is 20:00.

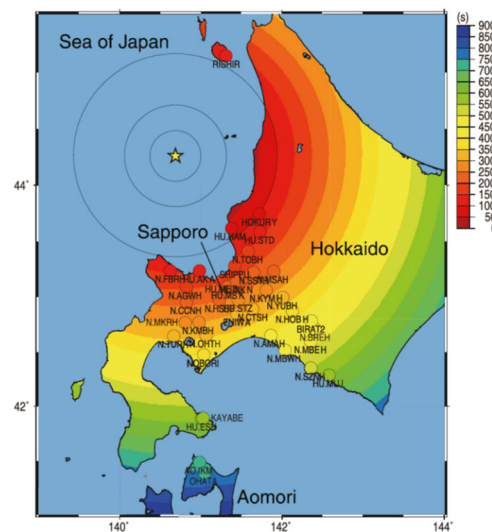


Fig. 17 Map of arrival times of the shock wave on April 26, 2021. The origin time is 20:00.

4.6 2022年2月17日 16時10分頃 久留米

2022年2月17日16時10分頃、久留米市東部の広範囲で爆発音が聞こえた(西日本新聞, 2022). 発生源となる事故や災害は確認されておらず、原因は不明であった. 航空自衛隊築城基地によると、F2戦闘機2機がこの時間帯に久留米市上空の高度6.4kmを飛行した可能性があるが、「衝撃音が発生するような速度ではなかった」ということである. Twitterには、同時刻に撮影された2本の飛行機雲の写真がアップロードされていた(ハラケンTwitter, 2022).

久留米市の北の太刀洗町の観測点で最も早く信号を記録しており、そこから音速で伝わってきたと仮定すると矛盾なく説明できる(Fig. 18). 衝撃波の信号が観測されたのはFig. 19に示した5点であり、久留米市から北東に向かって50kmほどの範囲に分布する.

なお、同日17時30分にも福岡県福智町赤池を中心に5つの観測点で衝撃波とみられる信号が観測されている. この場所は、上述の築城基地から20kmほど西側に位置している.

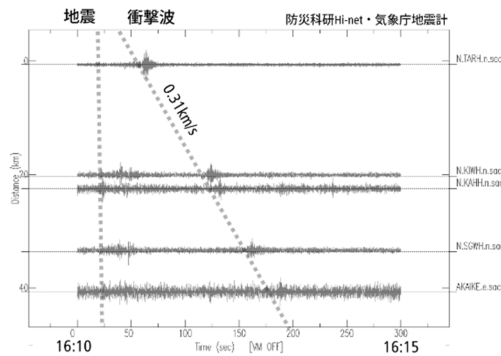


Fig. 18 Seismic waveform (2-8Hz) on February 17, 2022. The origin time is 16:10.

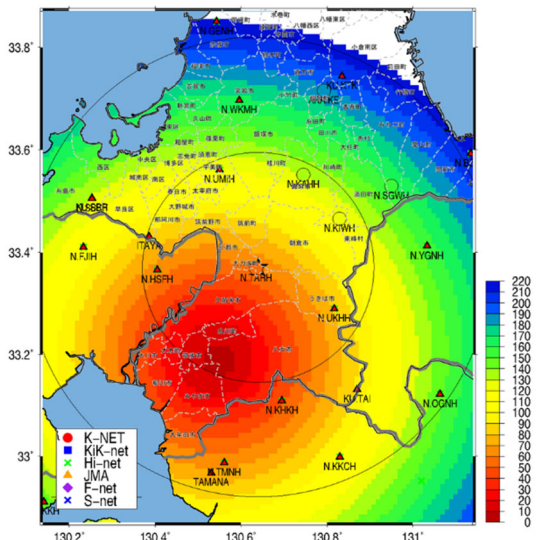


Fig. 19 Map of arrival times of the shock wave on February 17, 2022. The origin time is 16:10.

4.7 2022年8月24日 19時30分頃 名寄

2022年8月24日19時30分頃、北海道名寄周辺において爆発音と振動があった(なよろ市天文台きたすばるTwitter, 2022). Fig. 20に示すように、震源近傍の2-3点では鋭いパルス状の地震波形となり、距離が遠くなると立ち上がりが穏やかな30秒ほどの紡錘形となる. 仰角が大きく到達パターンはほぼ同心円に近い(Fig. 21). 信号が観測された範囲は、焼尻島から東北東の方向へ130kmほどの範囲に広がっている.

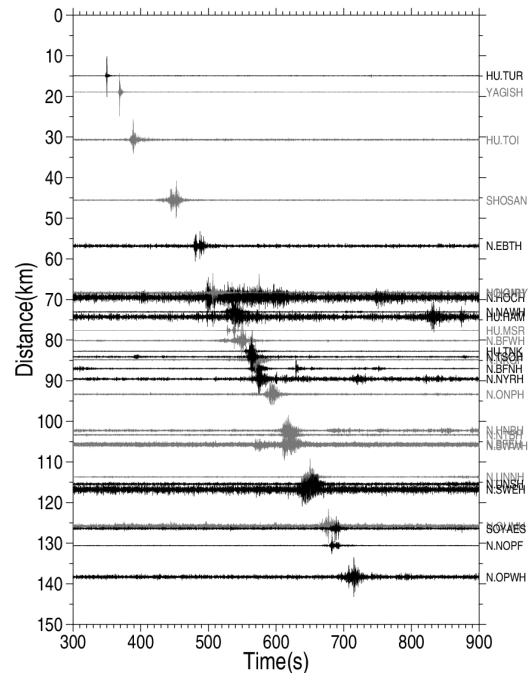


Fig. 20 Seismic waveform (2-8Hz) on August 24, 2022. The origin time is 19:30.

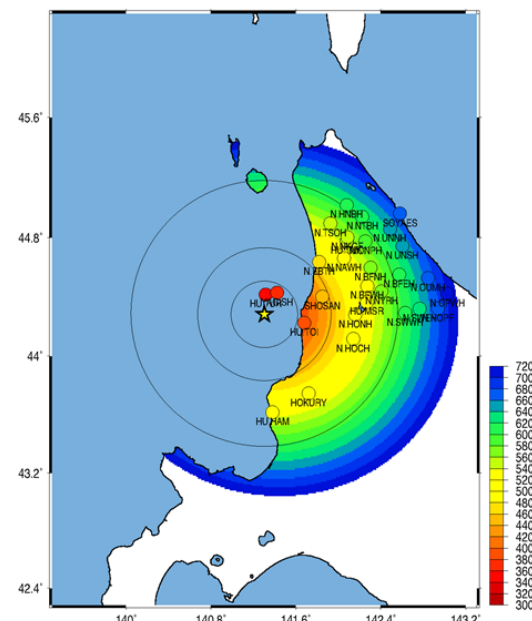


Fig. 21 Map of arrival times of the shock wave on August 24, 2022. The origin time is 19:30.

4.8 2022年11月9日 16時10分頃 能登半島沖

2022年11月9日16時10分過ぎ、新潟地方で原因の分からない爆発音があった(のぼせエブリィ, 2022; 情報速報ドットコム, 2022). 新潟日報(2022)によれば、住民から揺れの原因についての問い合わせが、新潟県危機管理防災局に複数寄せられたとのことである。県が新潟地方気象台に確認したところ、新潟市で地震の観測は無いとのことであった。Fig. 22に示すように、100秒ほどの間隔を空けて2つの信号が地震波形に記録されている。到達時刻が最も早いのは石川県輪島市の舳倉島の気象庁観測点(HEGURA)で、15時59分頃である。衝撃波の震源は、舳倉島の西方で、信号は佐渡島から東側(新潟県の北部)にかけて観測されている(Fig. 23)。このように複数のパケットが存在する信号は、戦闘機による衝撃波の可能性が高い。

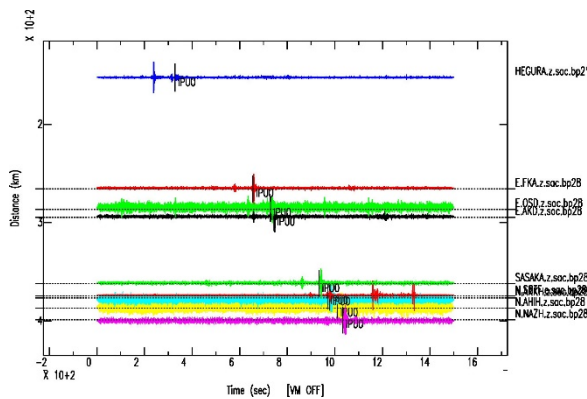


Fig. 22 Seismic waveform (2-8Hz) on November 9, 2022. The origin time is 15:55.

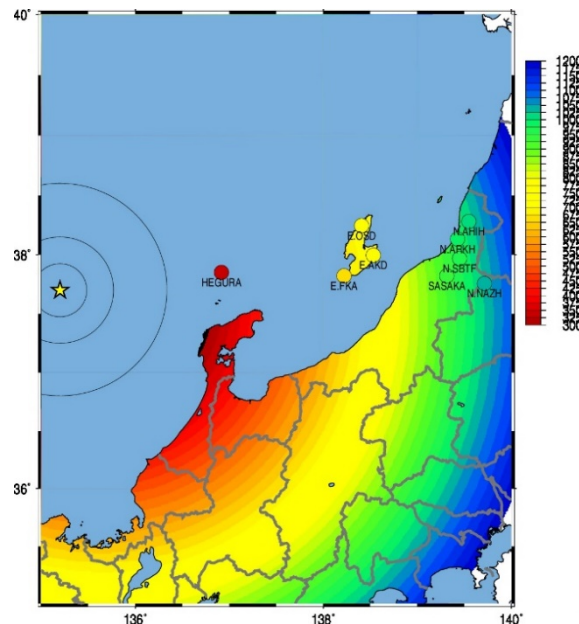


Fig. 23 Map of arrival times of the shock wave on November 9, 2022. The origin time is 15:55.

5. まとめ

2023年1月19日15時過ぎに滋賀県守山・草津付近で発生した、原因の分からない爆発音について調査・分析を行った。観測の証言と地震波形に記録されていた信号から、この爆発音は15時3分頃、草津市周辺で発生したことが分かった。観測証言は、東北東へ20kmほど遠方まで広がっていた。また、草津から40kmほど東北東にある多賀周辺の4つの観測点に爆発音と思われる信号が記録されていた。

この爆発音は、遠方まで伝わっていることから、単純な「大きな音」ではなく、物体が音速よりも早く移動することで発生する衝撃波であると考えられる。物体の移動方向や物体の速度などは推定できなかった。同日午後3時頃、F15戦闘機1機が、滋賀県南部を西から東へ飛んでいたということが明らかになっているが、音速を超えた飛行はしていないということである。この衝撃波を生成した物体の特定は、地震波形記録からだけでは困難である。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所、気象庁、全国の大学の地震観測ネットワークによって記録されたデータを利用しました。東京大学地震研究所小原一成博士と防災科学技術研究所松澤孝紀博士には、過去の衝撃波の観測事例について情報を提供していただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 浅井屋まにあ本舗(2019):【怪奇現象】函館市内の謎の爆発音事件、原因は米軍機?
https://asaiyamaniamania.com/hakodate_bakuhatsumon/ (2023年7月31日閲覧)
- 京都新聞 (2023): 滋賀で謎の爆発音、通報相次ぐ「建物揺れた」 警察がパトロールも原因不明
<https://www.kyoto-np.co.jp/articles/-/958133> (2023年7月31日閲覧)
- 宏観亭見聞録 (2014): 原因不明の大きな音と振動 — 新潟県佐渡市
http://macroanomaly.blogspot.com/2014/11/blog-post_9.html (2023年7月31日閲覧)
- これが知りたかった!(2014): 佐渡で爆音の原因・真相は? 世界が騒然! 衝撃ファイル
<https://www.koregasiritai.com/sado-bakuhatsumon/> (2023年7月31日閲覧)
- 情報速報ドットコム(2022): 新潟市で謎の振動報告

- が相次ぐ！県や市に問い合わせ多数，原因は不明
気象台「地震の観測はない」
<https://johosokuhou.com/2022/11/09/62800/> (2023年7月31日閲覧)
- なよろ市天文台きたすばるTwitter (@kitasubaru)(2022):
<https://twitter.com/kitasubaru/status/1562657662335995905> (2023年7月31日閲覧)
- 新潟日報(2022): 「地震？」新潟中央区などで謎の揺れ、問い合わせ相次ぐ 2022/11/10 9:50配信
<https://www.niigata-nippo.co.jp/articles/-/136554> (2023年7月31日閲覧)
- 西日本新聞(2022): 久留米，夕方の爆発音は何だった？ 広範囲から通報相次ぐも原因不明 2022/2/18 5:55配信
<https://www.nishinippon.co.jp/item/n/878355/> (2023年7月31日閲覧)
- 日本流星研究会(2023): 火球データベース(抜粋)<http://www.5e.biglobe.ne.jp/~shibaya/NMS/database.htm> (2023年7月31日閲覧)
- ニュース速報Japan (2019): 函館市や北斗市で原因不明の爆発音と衝撃 2日連続で発生し心配の声多数
<https://breaking-news.jp/2019/10/24/051533> (2023年7月31日閲覧)
- のぼせエブリイ(2022): 新潟の謎の振動や音の正体は何？揺れの原因は飛行機？隕石？
<https://urlaubswelt-fuertventura.com/niigata-nazonosindo/> (2023年7月31日閲覧)
- 函館災害情報Twitter (@hakodate119)(2019):
<https://twitter.com/hakodate119/status/1186965103016497154> (2023年7月31日閲覧)
- ハラケンTwitter(@Haraken_B) (2022):
https://twitter.com/Haraken_B/status/1494210379521556483 (2023年7月31日閲覧)
- 北海道ニュースUHB(2021): 夜空に響いた「謎の爆発音」 隕石火球説で決着と思いきや…新たに浮上した可能性と"国防上の問題"とは (21/05/15 10:00)
https://www.youtube.com/watch?v=dTaQkqvymeY&ab_channel=%E5%8C%97%E6%B5%B7%E9%81%93%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%83%BC%E3%82%B9UHB (2023年7月31日閲覧)
- 三沢市防災メール配信システム (2019a): 自衛隊による夜間飛行訓練について 2019/10/23 16:46
<https://www.bousai-misawa.jp/misawaPub/subcategoryEntryDetail.do?mailContentCd=20019> (2023年7月31日閲覧)
- 三沢市防災メール配信システム (2019b): 自衛隊による夜間飛行訓練について 2019/10/24 16:45
<https://www.bousai-misawa.jp/misawaPub/subcategoryEntryDetail.do?mailContentCd=20027> (2023年7月31日閲覧)
- 読売新聞オンライン(2007): 「地震か」石川・輪島で騒動…実は戦闘機の衝撃波 : 社会 : YOMIURI ONLINE(読売新聞)
<https://www.yomiuri.co.jp/national/news/20071127i515.htm> (2023年7月31日リンク切れ)
- 読売新聞オンライン(2023): 1月の爆発音 原因は
<https://www.yomiuri.co.jp/local/shiga/news/20230206-OYTNT50043/> (2023年7月31日閲覧)
- J-CASTニュース(2014): 佐渡市で爆発音と振動の通報相次ぐ 原因不明, 「謎の怪奇現象」なのか
<https://www.j-cast.com/2014/11/10220498.html> (2023年7月31日閲覧)
- NHKおうみ発630 (2023): 謎の"爆発音" その正体とは・・・
<https://www.nhk.jp/p/ts/8RG6LZ736N/blog/bl/pdVzWyQwed/bp/p0xBjrOBEO/> (2023年7月31日閲覧)
- NHK滋賀 NEWS WEB(2023): 守山や草津で爆発音のような音 通報相次ぐも原因不明
<https://www3.nhk.or.jp/inews/otsu/20230119/2060012429.html> (2023年7月31日閲覧)
- SonotaCo.JP (2023). SonotaCo Network Japan Forum 流星談話室 (Meteors)
<http://sonotaco.jp/forum/viewforum.php?f=3> (2023年7月31日閲覧)
- Tatum, J. B. (1999): Fireballs: interpretation of airblast data. Meteoritics and Planetary Science 34: 571-585.
- Yamada, M. (2021): Determining the source of the explosive sound heard in Hokkaido, Japan, on April 26, 2021. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 126(12), <https://doi.org/10.1029/2021JB023076>
- Yamada, M. and J. Mori (2012). Trajectory of the August 7, 2010 Biwako Fireball Determined from Seismic Recordings. Earth, Planet and Space, 64(1), pp.27-35, <https://doi.org/10.5047/eps.2011.08.021>

(論文受理日 : 2023年8月31日)