

## 始良カルデラにおける長期連続反射法第 2 回目基礎実験

### The Second Fundamental Experiment for the Time-lapse Seismic Volcano Monitoring of Aira Caldera

筒井智樹・味喜大介・為栗 健・井口正人

Tomoki TSUTSUI, Daisuke MIKI, Takeshi TAMEGURI, and Masato IGUCHI

#### Synopsis

The second experiment for the Time-lapse Seismic Volcano Monitoring is reported. The experiment was performed on December 2022 after two years gap from the previous experiment in 2020 in order to inspect reproducibility of seismic source. The source device has identical specifications with that of the previous experiment. Two shooting parameter sets, same tow depth and same clearance were done with same operating pressure and same chamber size with those of the previous experiment because there was different water level in the experiment 2022 by 0.5 m higher than that of the experiment 2020. The observed seismogram showed some difference which smaller air wave, rich high frequency component, and some earlier arrivals in the later part. Temperature difference around the shot point can affect air wave amplitude and high frequency rich source waveform can cause earlier arrival. Such source effect can be reduced with using deconvolution processing which uses NFH seismogram.

**キーワード:** 始良カルデラ, 火山活動監視, 人工地震, 地下構造

**Keywords:** Aira Caldera, volcano monitoring, seismic surveys, subsurface structure.

#### 1. はじめに

始良カルデラの地下深部における地下構造変化の検出手法を検討することを目的として、令和 4 年度は長期連続反射法探査の基礎実験を実施した。長期連続反射法探査は人工地震波を地下に放射することによって始良カルデラの地下深部で生ずる地震反射波をとらえ、その地震反射波の振幅・走時等の変化を継続的に長期間追跡することによって始良カルデラの火山活動に伴うマグマの変化を知ることを狙っている。火山活動に伴う地震反射波の変化に関する先行研究例としては、Tsutsui et al. (2016)が桜島の火山活動に伴う地震反射強度の変化を検出するとともにその変化が地下のマグマの状態変化で説明できることをすでに報告している。

火山活動監視のために人工地震によって地下構造の変化を検出するためには、地震波の発生から記録の取得に至るまでの条件を極力制御下におくことが

必要である。特に地震記録の質を左右する振源波形は観測の時期に依らず常に一定のものであることが強く要請される。本稿では筒井ら(2021b)の実験から 1 年以上の間隔をおいて実施されたエアガン発振の観測波形の再現性の確認について述べる。

#### 2. 第2回目実験

本稿で述べる発振実験の基本的な観測点配置は 2020 年に実施された筒井ら(2021b)と同一である。以降では筒井ら(2021b)の実験を 2020 年実験、今回の実験を 2022 年実験と称する。Fig. 1 に始良カルデラの中での発振点と受振点の位置を示す。始良カルデラの北西側に位置する始良市住吉池に発振点を設けて人工的に地震波を発生し、始良カルデラ西部の地下を通過してきた地震波を桜島に設けた地震観測点で捉えることにする。発振点と受振点に挟まれる地域の地下には筒井ら(2021a)が指摘した S 波反射面と為栗

ら(2022)が指摘した深さ15 kmを中心とするS波低速度領域が存在しており、この地域を通過してきた地震波の観測記録に含まれる特徴的な構造の応答の火山活動に伴う変化を検出することが期待される。

発振実験で振源装置として用いるエアガンが発生する振源波形は供給する空気圧、エアガン深度、チャンバーサイズなどの発振条件に依存することが知られている（たとえばWei et al. 2018; Watson et al. 2019; Liu et al. 2021）。したがってエアガンを振源として用いて定常的な振源波形の発生を期待するのであれば、発振条件を可能な限り同一にする必要がある。

Table 1に、2022年実験の実験条件を2020年実験（筒井ら,2021b）の発振条件BAA2020と対比して示す。制御可能な実験条件のうち、2020年実験との対比を意識して制御したものはChamber size, Operation Pressure, Tow depth, Positionであった。今後の実験の継続を考慮して振源装置個体の入れ替えは容認せざるを得なかった。また同様な理由によりHose lengthは最適なものを選ぶことにした。さらに住吉池は本来の灌漑のために水位が管理されているので、2022年実験は2020年実験より水位が0.5m高い状態で発振作業を実施せざるを得なかった。Liu et al. (2021)によればエアガンの発振作業を行う貯水池の水位の差は人工地震波形の卓越周波数に反映されるという報告があることから、2022年実験では水面からエアガン中心までの深さ(Tow depth)が2020年実験(BAA2020)

と等しくなる場合を実験名BAA2022として、水底からエアガン中心までの距離(クリアランス距離)がBAA2020と等しくなる場合を実験名BAC2022として実施した(Fig. 2b)。

Table 1. Shooting parameter

| Code                             | BAA 2022         | BAC 2022    | BAA 2020    |
|----------------------------------|------------------|-------------|-------------|
| Unit                             | Kyoto Univ.      | Kyoto Univ. | Rental      |
| Chamber size (cui)               | 1050             | 1050        | 1050        |
| Hose length (m)                  | 40               | 40          | 180         |
| Operation pressure (psi)         | 2000             | 2000        | 2000        |
| Tow depth (m)                    | 10.0             | 10.5        | 10.0        |
| Reservoir level (m)              | 7.7              | 7.7         | 7.2         |
| Position (m)                     | 0.89 N           | 0.89 N      | 0.0         |
| Shots                            | 307+268          | 317         | 49          |
| Weather                          | Cloudy to sleety | Snow        | Fine/cloudy |
| Daily average temperature (°C)   | 6.5, 4.6         | 0.7         | 9.7         |
| Average correlation with BAA2020 | 0.794            | 0.812       | 1.0         |

Table 2. Position of the shot points

|               | 緯度 (度)       | 経度 (度)        | x (m)       | y (m)      | z (m)  |
|---------------|--------------|---------------|-------------|------------|--------|
| 2022          | 31.771956885 | 130.590209518 | -136095.424 | -38814.190 | 73.758 |
| 2020          | 31.771948903 | 130.590209180 | -136096.308 | -38814.225 | 73.324 |
| [2022]-[2020] | 0.000007982  | 0.000000338   | 0.885       | 0.035      | 0.433  |

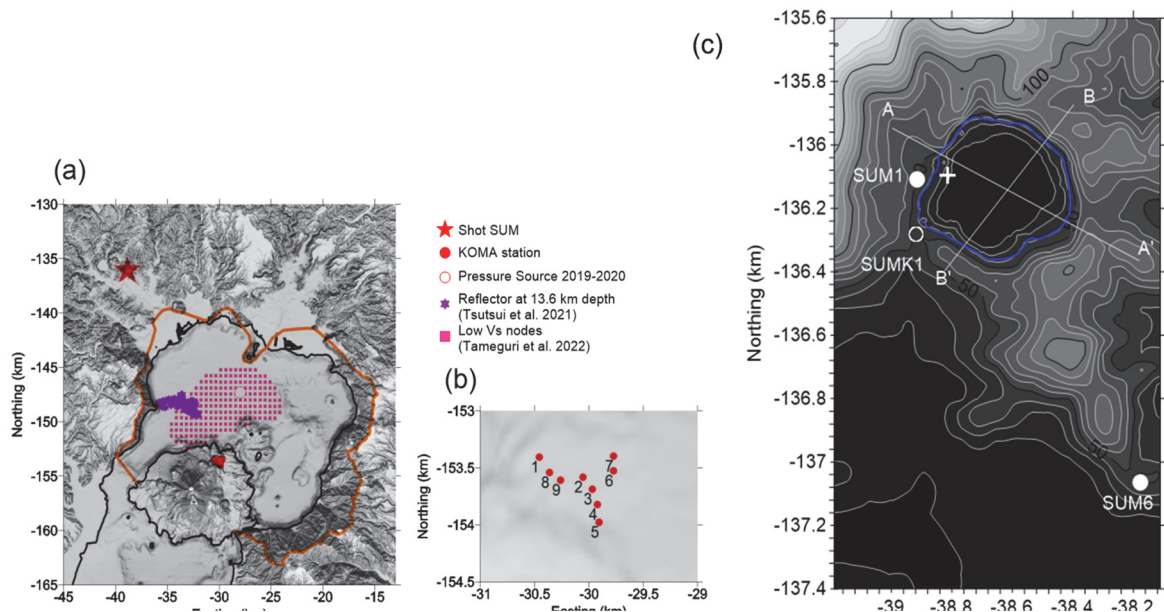


Fig. 1. (a) Aira Caldera, and seismic source and stations. A low S-wave velocity region (Tameguri et al., 2022) and S-wave reflector (Tsutsui et al., 2021) are indicated. (b) A close-up around Lake Sumiyoshi-ike. Seismic source and proximal seismic stations are indicated. Map data are GSI(2000) and Marine Information Research Center, Japan Hydrographic Association. (2002).

エアガンを懸架するポンツーン的位置をFig. 2aに示し、発振作業時の様子をFig. 3に示す。今回の実験(2022)のポンツーン中央位置座標をTable 2に示す。ここでは平面上に投影したエアガン配置の中心位置をポンツーン中心位置と称することにする。ポンツーン中央の測位値はKAMOを基準とするPPK解析で求めたものの観測期間中の平均を示している。今回の実験では令和2年度実験のポンツーン中央位置を目標に、それから2 m以内の精度での設置を目指した。2022年実験におけるポンツーン中心位置は2020年実験のそれにくらべて南方約0.9mの位置であった。エアガン装置全体のサイズ(長さ1m, 幅1.2 m, 高さ2m程度)を考慮すると2022年実験でも同一地点での発振が実現されていると見なせる。

また振源近傍観測点は筒井ら(2021b)が実施した観測網のうち、重要な観測点(SUM1, SUMK1, SUM6)を再設置してデータ取得を行った(Fig. 1c)。観測点SUM1はポンツーンから102 mの陸上における3成分速度計観測とし、観測点SUMK1はポンツーンから170mの陸上における3成分加速度計観測、観測点SUM6はポンツーンから1150mの陸上における3成分速度計観測とした。

2022年実験は2020年実験と異なる気象条件下で実施された。気象庁(2023a)によれば2022年実験は寒冷前線通過後の発達した冬型の気圧配置のもとで観測が実施されており、冬型気圧配置に遷移する直前の比較的穏やかな気象条件のもとで実施された2020年実験より背景雑音レベルが高い条件下のデータ取得

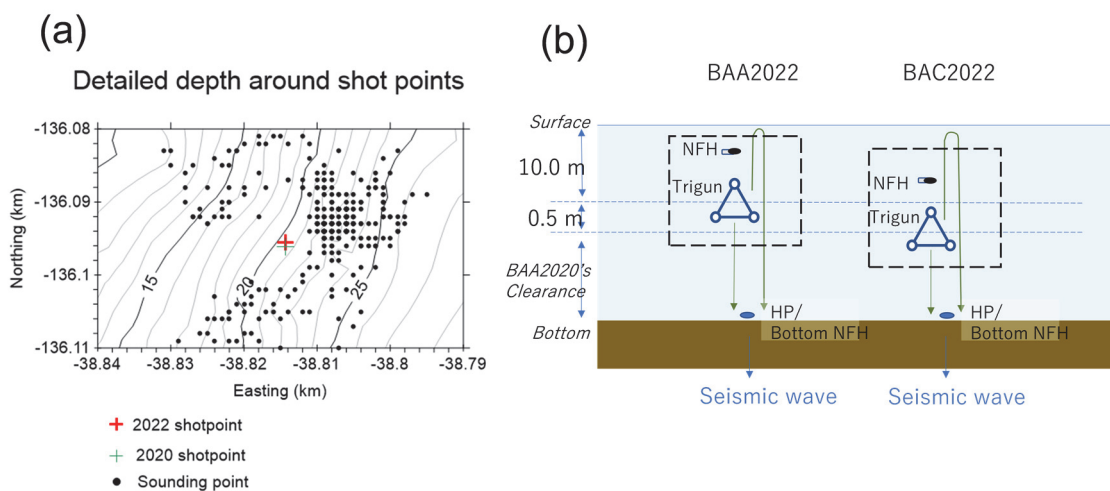


Fig. 2 The shot points. (a) Close-up around the shot points with detailed water depth. (b) shooting parameters in the experiment 2022.



Fig. 3. The shot point in 2022 in far side and the high-pressure air compressor in near side

であった。また日平均気温も両実験で異なっていた。住吉池に最も近い気象庁AMeDAS溝辺観測点で比較すると2020年実験時が日平均気温9.7℃，2022実験BAA2020実施時で日平均気温6.5～4.6℃であった（気象庁，2023b）。発振期間中には桜島の中腹までの冠雪が見られたうえ，発振作業最終日には住吉池現地で降雪が確認された。

Fig. 4に背景雑音の推移を示す。Fig.4aはBAA2022の実験時の背景ノイズレベルを示す。BAA2022は寒冷前線通過からその翌日にかけて行われた実験であるが，2020年実験時の背景ノイズレベル（Fig. 4c；平

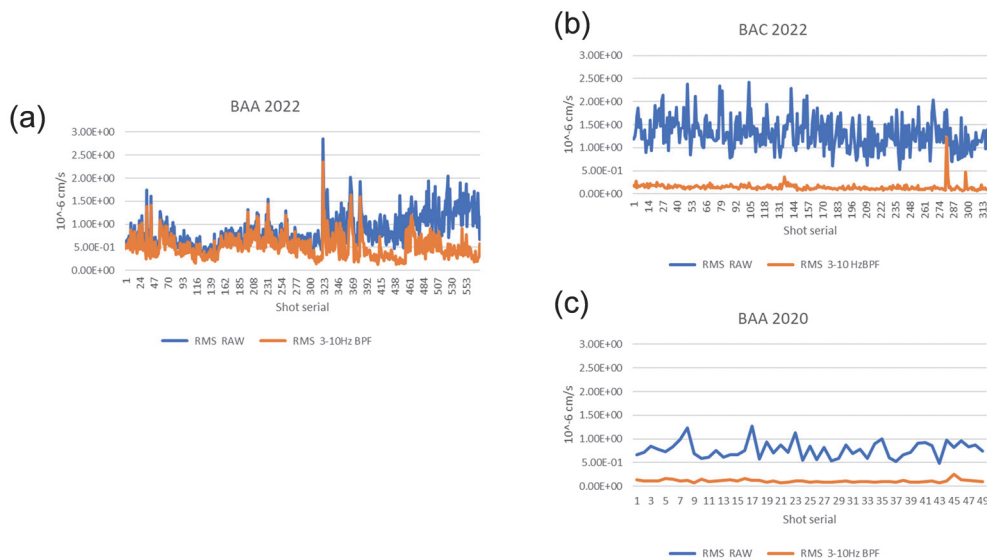


Fig. 4. Background noise. (a) The shooting BAA2022, (b) the shooting BAC2022, and (c) the shooting BAA2020.

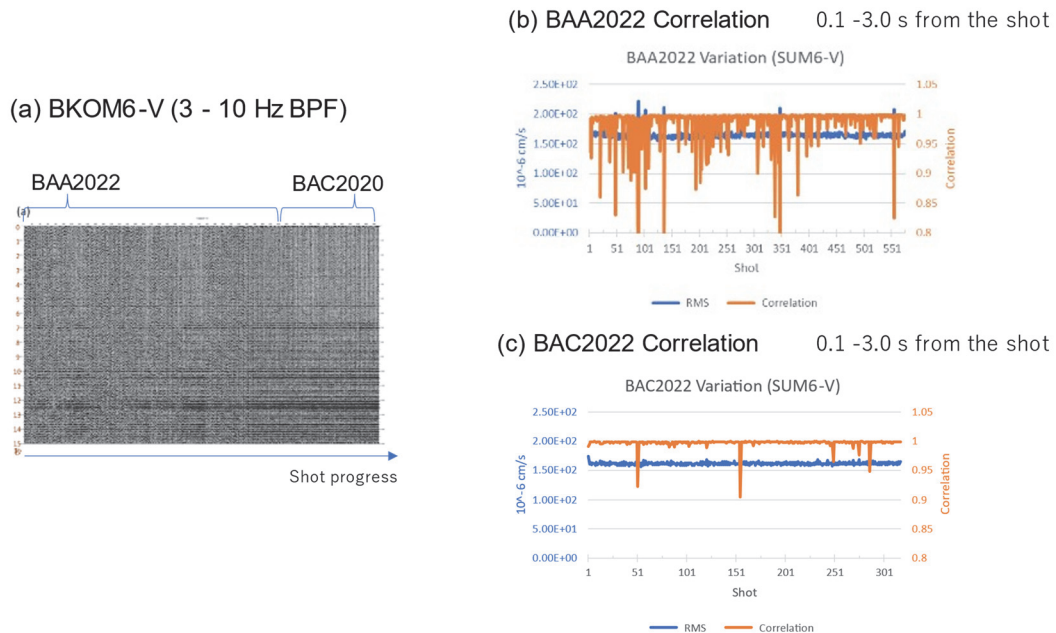


Fig. 5. Development of waveform during the shootings. (a) Band-pass filtered (3-10 Hz) velocity seismograms in the station BKOM6 vertical component at 19.6 km away, (b) correlation in the shooting BAA2022, and (c) correlation in the shooting BAC2022

均 $1.09 \times 10^{-7}$  cm/s) の約5倍のレベル(平均 $5.22 \times 10^{-7}$  cm/s)であった。BAA2022は12月16, 17日の2日間にかけて発振を行い、全帯域のノイズレベルに対する3-10Hzの帯域のノイズレベルとの比は初日(Shot 1-307)と2日目(Shot 308-268)では異なる傾向を示していた。BAC2022では寒冷前線通過の翌々日(18日)に実施されており、先述のBAA2022より背景ノイズレベルが小さく平均 $1.45 \times 10^{-7}$  cm/sで、長期連続反射法で注目する3-10 Hzの帯域のノイズレベルはBAA2020の場合と同等のレベルになっていた。

### 3. 結果

Fig. 5aに19.4 km離れた桜島側の観測点BKOM6上下動成分で観測期間中に得られた波形の推移を示す。左から右に発振作業の進行を示し、BAA2020による波形とBAC2022による波形とを同一パネル上に並べて示す。BAA2022の発振作業開始初期はS/N比が良くないが、発振の進行とともに明瞭な波形になっていることが示される。一方BAC2022による発振は比較的安定したS/N比を示している。本実験は新たに調達したエアガン本体の初の処女使用であったために、最初に実施されたBAA2022の初期の発振ではエアガン装置が本来の性能を発揮していなかった可能性もある。

BAA2022の重合結果に対する個々の発振の相関係数の推移をFig. 5bに示す。Fig. 5bでは相関係数とFig. 4aの3-10Hz BPF処理結果のノイズレベルとが不明瞭に逆相関する傾向がうかがわれるが、発振の進行とともに相関係数が定常的に大きな値をとるようになることが示されている。

BAC2022についても同様に計算した結果の推移をFig. 5cに示す。Fig. 5cでは相関係数が安定して大きな値を示しており、Fig. 5aで観察された良好なS/N比を反映している。

Fig. 6aには振源近傍のNFH (エアガン中心の上方2.1m) で観測された水中発振波形、Fig. 6bには最近接陸上観測点SUM1 (振源距離102m) で観測された上下動波形(Fig. 7a, 7d)のスペクトルを2020年実験のそれと重ねて示す。Fig. 6aではBAA2022とBAA2020とをピーク振幅で正規化したものを重ねて示す。水中における気体の圧力解放による振動は、最初に圧力解放と同時に衝撃相Scが現れ、それに引き続く気体の流出によってバブル相bが現れることが知られている(Urick, 1967)。BAA2022は衝撃相Scの到来時刻はBAA2020と一致するが、BAA2022では衝撃相Scのバックシュート部分以降の振幅がBAA2020より相対的に大きいことが示される。さらに衝撃相Scに続くバブル相b1 - b3ではBAA2022のほうがBAA2020のそれ

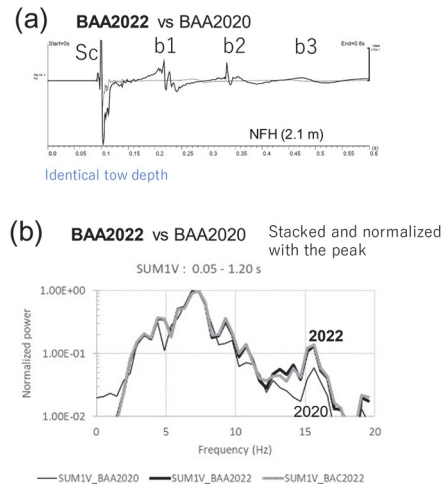


Fig. 6. Source seismograms in 2022 with that in 2020. (a) Seismograms in the tri-gun NFH (Near-Field Hydrophone), and (b) power spectrum in the land station SUM-1 vertical component.

より0.1秒早く到来している。

Fig. 6bにはBAA2022とBAC2022で得られた最近接陸上観測点SUM1の上下動成分のパワースペクトルをBAA2020のそれと重ねて示す。両者は相対的な周波数成分の構成を比較するために、7Hz付近のピーク値で正規化してある。BAA2022とBAC2022とでは周波数成分の構成は一致しているが、12 Hz以上の帯域でBAA2022およびBAC2022がともにBAA2020より大きな値を示していることが注目される。

Fig. 7にBAA2022およびBAC2022による陸上観測点における観測波形をBAA2020と比較して示す。Fig. 7(a)と(d)では2022年実験のほうが空振相Aのピーク間振幅が小さいことと、後続相arの到来が20 ms早いという差が示されている。空振相Aのピーク間振幅が小さいことは振源距離がより大きいSUM6観測点 (b, e) でも明瞭に認められる。(b), および(e)では空振相Aの周囲の走時が異なることと、2022年観測のほうが空振相Aの振幅が小さいことが示されている。振源から19.4 km離れたBKOM6観測点では空振相の到来は波形表示の枠外であるが、(c)および(f)では矢印に示されるところが共通して2020年より20 msほど早く到来している位相が認められる。さらに(g)ではBKOM6観測点におけるBAA2022とBAC2022の観測波形を重ねて示す、両者はよく一致しており相関係数は0.961を示す。

このことから2022年実験ではTow depthの0.5 mの

差あるいはクリアランスの0.5mの差は目立って大きな波形の差異を生まないことが示された。しかしながら2020年実験との比較では2022年実験の発振波形の方が若干高周波数成分に富むことと、空振相の振幅が明らかに小さいこと、2020年実験より20msほど早着する後続相が存在するなどの差があることが示された。

Fig. 8には陸上観測点において注目される到来相の振動軌跡を示す。Fig. 8aは陸上観測点SUM1のA相とar相、Fig. 8bおよび8cは陸上観測点BKOM6における粒子軌跡を示す。

Fig. 8aは振源距離102mの観測点SUM1における粒子軌跡であるが到来時刻0.3秒から0.4秒間のA相と到来時刻1秒から0.3秒間のar相を示す。A相は2020年実験と振幅が一致するA1相と2022年実験の方が振幅が小さいA2相とにさらに分けられる。A1相の到来はエアガン発振点で発生した空振の到来時刻と一致している。A1相は南落ちに傾いた東西面内でレトログレード回転運動をするレイリー波的振動様式を示し、この振動様式はIchihara et al. (2012)が指摘する空振結合相の特徴を示している。A1相はその到来時刻からエアガン発振点で発生する空振であることは間違いなく、2022年と2020年とでその軌跡はよく一致している。一方A2相はA1相より0.2秒遅れて表れるよう

に見える。またA2相は南北面内で回転する振動様式を示す。A2相が南からやってくるとするとその振動様式はレトログレードと見なせるので、Ichihara et al. (2012)が指摘する空振結合相の特徴と合致する。A2相では2022年のほうが相対的な上下動振幅が小さい傾向がある。ar相は東西面内の振動が卓越する傾向があり、その面内で前半と後半の振動方向が90度切り替わる特徴がある。振動様式の切り替わりは2022年と2020年とともに観察される傾向があり、両者の差異は明瞭でない。

Fig. 8bおよび8cは振源距離約19kmの陸上観測点BKOM3における粒子軌跡を示す。Fig. 8bは2022年と2020年とで走時の差が認められない到来相群の粒子軌跡を示す。Fig. 8bでは両者の粒子軌跡は良い一致を示している。Fig. 8cは2022年のほうが早着する位相群の粒子軌跡を示す。Fig. 8cでも両者の粒子軌跡は良い一致を示しており、新たな入射波が早着しているのではないことを示している。このことは2022年の観測の早着相は振源から発生しており、伝播経路上の反射応答の変化によるものではないことを示している。

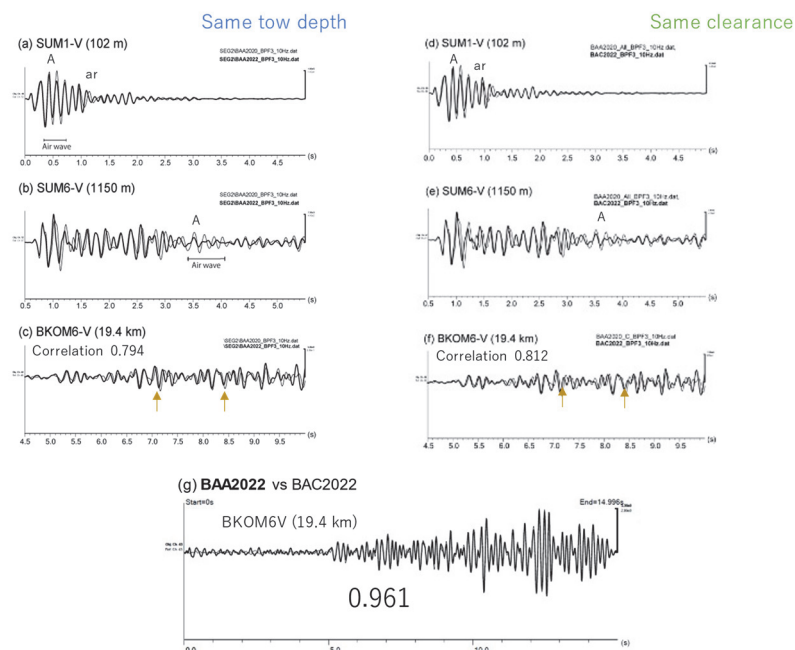


Fig. 7. Vertical velocity seismograms. (a) The shootings BAA2022 and BAA2020 at SUM1, (b) the shootings BAA2022 and BAA2020 at SUM6, (c) the shootings BAA2022 and BAA2020 at BKOM6. (d) The shootings BAC2022 and BAA2020 at SUM1, (e) the shootings BAC2022 and BAA2020 at SUM6, and (f) the shootings BAC2022 and BAA2020 at BKOM6. (g) The shootings BAC2022 and BAA2022 at BKOM6 are shown.

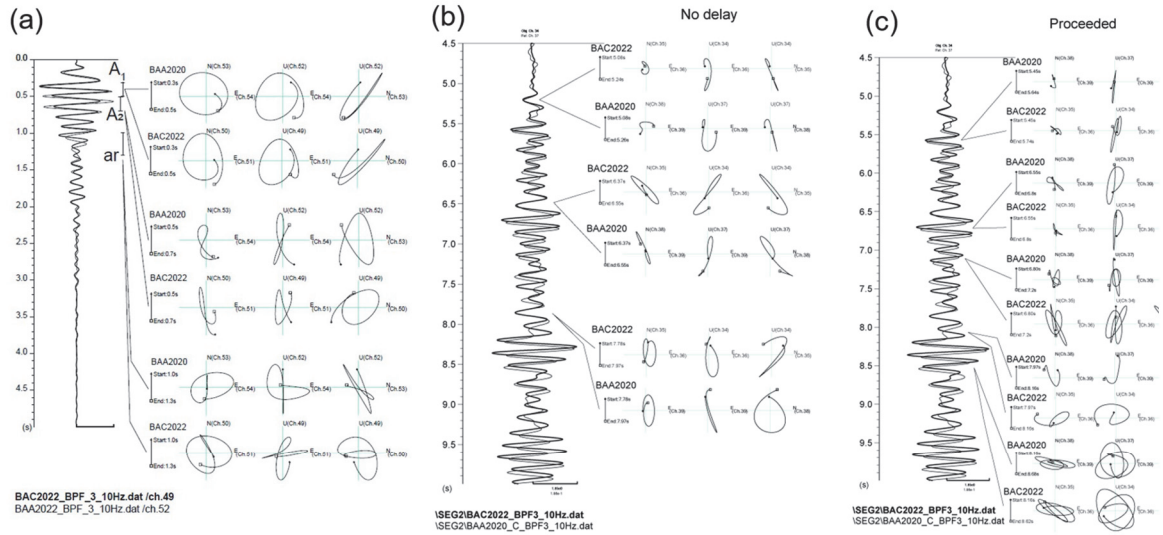


Fig. 8. Hodograms. (a) The arrivals A1, A2 and ar at the station SUM1, about 102 m from the shot point. (b) The punctual arrivals at the station BKOM6, about 19 km away from the shot point. (c) The early arrivals in the experiment 2020 at the station BKOM6

観測波形の周波数成分の差はエアガンの個体差に由来する可能性が高いと考えられる。空振振幅の差はエアガンの個体差と局地的な気象条件の差が原因である可能性が考えられる。また、約20 ms早着する位相についてはLiu et al.(2020)が指摘するように振源波形の周波数成分の差と関係があると考えられる。

このように条件を可能な限り制御した状態において発振作業でも、エアガン個体の入れ替えや気象条件に起因すると思われる振源波形の変異が認められる。したがって、実際に地下構造に与えられる振源波形を管理しその変化の影響を取り除くことが、地下構造変化を検出する上で重要であることがあらためて確認された。

## 5. 振源効果の除去

発振作業時に可能な限り発振条件を制御しても、それ以外の制御不可能な要因によって振源波形に差異が生ずることがある。そのために地震記録の比較の前に振源波形の影響を取り除くデコンボリューション処理を施す必要がある。

デコンボリューション処理は観測波形に対して、振源波形から導いた逆フィルターを作用させる処理である。逆フィルターを導くための振源波形(以下、等価振源波形と称する)の選択はデコンボリューション結果に大きな影響を与える。振源近傍エアガン直上のハイドロフォン(Near-Field Hydrophone; NFH)と発振点に近接した陸上観測点(SUM1, 振源距離102 m)の速度波形とのそれぞれを振源波形と等価な

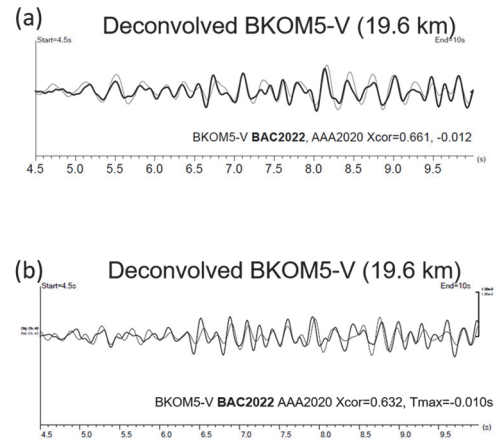


Fig. 9. Deconvolved waveform of the shooting BAC2022 in BKOM5. Decovolved wave form of the shooting AAA2020 is underlain. (a) Using NFH as a source seismogram. (b) Using SUM1-V as a source seismogram.

ものとして扱った観測点BKOM5(振源距離19.6 km)におけるデコンボリューション結果をFig. 9に示す。デコンボリューション結果を2020年実験の異なるチャンパーサイズの振源か観測波形が得られた発振条件AAA2020(筒井ら, 2021b)のデコンボリューション結果と比較した。Fig. 9aはNFH波形記録のバブル相b3の終了までを等価振源波形として用いてデコンボリューション処理を行ったものを示し、Fig. 9bは観測点SUM1の上下動成分の総積算振幅の99%までを用いた結果を示す。Fig. 9aでバブル相b3を用いた

Table 3. Results of the deconvolutions with different seismograms. (a) NFH, b) SUM1.

(a) NFH

|                             | AAA2020<br>2550 cui, 10 m | BAA2020<br>1050 cui, 10 m | BAA2022<br>1050 cui, 10m |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| BAC2022<br>1050 cui, 10.5 m | 0.661                     | 0.585                     | 0.998                    |
| BAA2022<br>1050 cui, 10 m   | 0.644                     | 0.570                     | 1.000                    |

(b) SUM1

|                             | AAA2020<br>2550 cui, 10 m | BAA2020<br>1050 cui, 10 m | BAA2022<br>1050 cui, 10 m |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| BAC2022<br>1050 cui, 10.5 m | 0.632                     | 0.613                     | 0.712                     |
| BAA2022<br>1050 cui, 10 m   | 0.642                     | 0.556                     | 1.000                     |

結果が最適である理由を付録に示す。本稿ではスペクトル領域での除算でデコンボリューションを実現したが、いずれも安定化のために等価振源波形には1%のランダムノイズ添加を行っている。Fig. 9aはbよりも安定した結果を示していることが示されている。さらにTable 3にはFig. 9に示した以外のデコンボリューション結果の相関係数も整理して示す。Table 3aはFig. 9aと同様に等価振源波形としてNFHを用いた例を、Table 3bはFig. 9bと同様に等価振源波形として観測点SUM1の上下動を用いた場合を示す。Table 3aの相関値の平均は0.692であるのに、Table 3bの相関値の平均は0.631であった。以上のことから、等価振源波形としてNFH波形を用いたほうが良いデコンボリューション結果が得られることが示された。

## 5. まとめ

人工地震の反復観測を用いた火山監視手法の検討を目的に、同一地点における発振作業を行い、同一地点による観測を実施した。今回報告する実験は筒井ら(2021b)の実験の発振条件のうち最適であると判断されたチャンバーサイズのエアガンを用いて、制御可能な条件であるエアガン動作圧、エアガン深度を再現して実施された。今回の実験で得られた観測波形からは、筒井ら(2021b)の前の観測波形との差が以下のように認められた。2022年実験の発振波形の方が若干高周波数成分に富むことと、空振相の振幅が明らかに小さいこと、2020年実験より20msほど

早着する後続相が存在する。周波数成分の差異はエアガン個体差によって発生した可能性がある。空振振幅の差は発振点周辺の気象条件の影響と考えられ、早着する後続相は発振点とその極近傍で発生していると考えられる。なお0.5 mのTow depth差およびクリアランス距離差による観測記録の差異はわずかであった。

さらに振源効果の除去ではハイドロフォン直近のNFH波形を用いたデコンボリューションのほうが良い結果を与えることが示された。

## 謝 辞

本実験の経費は京都大学が受託した原子力規制庁令和4年度原子力施設等防災対策等委託費によるものである。本実験を実施するにあたり、下記の関係機関・地元住民の皆様のご高配を賜りました。住吉池の属する県立藺牟田池自然公園特別地区における発振行為に関して鹿児島県環境林務部自然保護課自然公園係から許可をいただいた。住吉池キャンプ村の利用に関して始良市企画部観光商工課観光係には許可をいただきました。始良市農林水産部耕地課耕地管理係には住吉池とその近隣に関するお世話をいただきました。住吉池の水面利用に関しては始良市三叉土地改良区にはご厚情とご承諾をいただきました。住吉地区自治会には予備観測および本観測の実施に関してご理解とご協力を賜りました。また観測機器の設置に関して高免町自治会および同住民の皆

様には多大なるご協力を賜った。また、国交省大隅河川工事事務所には古河良川砂防指定地内の通行、観測行為、一部の観測点の占有に関してご理解とご承諾をいただいた。また(株)ジオシスには準備を含む発振作業の全てと一部観測データの取得整理にあたっていただいた。ここに記して感謝します。

## 参考文献

- 気象庁 (2023a): 日々の天気図, <https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html> (2023/8/29アクセス).
- 気象庁 (2023b): 過去の気象データ検索, <https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php> (2023/8/29アクセス).
- 国土地理院 (2000) 50m メッシュ 数値地図 NIPPON-III.
- 財団法人日本水路協会 (2002) 海の基本図, 財団法人日本水路協会 海洋情報研究センター.
- 為栗 健・八木原 寛・筒井智樹・井口正人(2022): 始良カルデラ下の3次元地震波速度構造の高分解能化の試み, 火山, 第67巻 1号, 69 - 76, <https://doi.org/10.18940/kazan.67.1.69>.
- 筒井智樹・為栗 健・井口正人 (2021a): 人工地震記録による始良カルデラ西部の地殻内S波地震反射面の推定, 火山, 66巻, 2号, 71-81, [https://doi.org/10.18940/kazan66.2\\_71](https://doi.org/10.18940/kazan66.2_71).
- 筒井智樹・為栗 健・味喜大介・井口正人・篠原雅尚 (2021b): 始良カルデラにおける長期連続反射法基礎実験, 京都大学防災研年報 64号B, 86-100.
- Ichihara, M., Takeo, M., Yokoo, A., Oikawa, J., and Ohminato, T. (2012): Monitoring volcanic activity using correlation patterns between infrasound and ground motion. *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, L04304, doi:10.1029/2011GL050542.
- Liu, C., Yang, H., Wang, B., Yang, J. (2021): Impacts of Reservoir Water Level Fluctuation on Measuring Seasonal Seismic Travel Time Changes in the Binchuan Basin, Yunnan, China, *Remote Sensing*, 13, 2421.
- Tsutsui, T., Iguchi, M., Tameguri, T., Nakamichi, H. (2016): Structural evolution beneath Sakurajima Volcano, Japan, revealed through rounds of controlled seismic experiments.", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 315, 1-14, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.02.008, 2016.
- Urlick, R. J. (1967): Principles of underwater sound, McGraw-Hill Inc., 414pp.
- Watson, L. M., Werpers, J., and Dunham, E. M. (2019):

What controls the initial peak of an air-gun source signature?, *GEOPHYSICS*, Vol. 84, 2, P27-P45, doi:10.1190/GEO2018-0298-1.

Wei C., Qin, M., Zhang, Y., Zou, R., Wang, L., Guo, X., Liu, X., Wang, Y., and Sun, D. (2018): Airgun excitation Experiments at Different placement depths in the Qilian Mountain of Gansu Province, China, *Seismological Research Letters*, 89, 3, 974-982, doi: 10.1785/0220170253.

## 付 録

### 等価振源波形の切り出し長さでデコンボリューション結果

本文中5章でふれているデコンボリューションの際の最適な等価振源波形の選択はFig. A1に示す複数のデコンボリューション試行を通してその処理結果が2020年実験とのよく一致するもの(Fig. A1c)を選んだ。

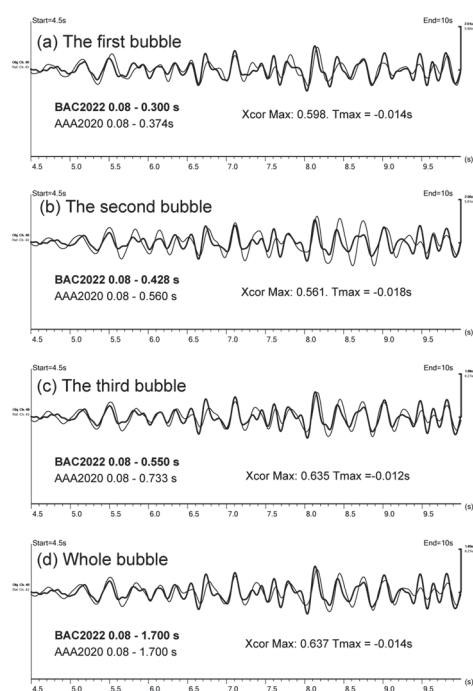


Fig. A1. Result of the deconvolution trials for varying length of equivalent source seismogram from NFH.

(論文受理日：2023年8月31日)