

黒神観測室構内における水槽内エアガン発振実験

—長期連続反射法基礎実験（第3回目）—

Third Phase of the Pilot Experiments of Time-Lapse Seismic Volcano Monitoring

筒井智樹・加藤政史⁽¹⁾・澤田壮一郎⁽²⁾・井口正人⁽³⁾

Tomoki TSUTSUI, Masafumi KATO⁽¹⁾, Soichiro SAWADA⁽²⁾ and Masato IGUCHI⁽³⁾

(1) 地球科学総合研究所

(2) ジオシス

(3) 鹿児島市

(1) JGI

(2) GEOSYS

(3) Kagoshima City

Synopsis

A seismic experiment with using an airgun pit is reported. The seismic experiment was one of a series of the pilot experiments for Time-lapse Seismic Volcano Monitoring (TSVM), which includes airgun blasting in a pit which is constructed in pumice layers in Sakurajima, south Kyushu. TSVM aims active monitoring of magma or volcanic fluid movement with using controlled source seismic method. The funnel shaped airgun pit with 10 meters depth and 2.5 meters diameter was provided with heavily reinforced concrete. Seismograms were obtained in the range up to about six and half kilometers. Seismograms were significantly different from those from reservoir shootings, even in near field. Relative body wave efficiency and the final state of the pit are presented.

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

火山防災研究センターでは始良カルデラの地下深部における地下構造変化の検出を目的とした長期連続反射法地震探査の構築に 2019 年から取り組んでいる。本稿では 2023 年に実施した第 3 回目の長期連続反射法探査の基礎実験について報告する。

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が狙っている。

これまで筒井ら(2021; 2023)は長期連続反射法の実

験として、振源装置に波形再現性の高いエアガンを採用し既存の農業用貯水池を利用して実際に発振実験を反復して実施した。筒井らの実験では 1050 cui, エアガン深度 (Tow depth) 10 m, 動作圧 2000 psi のエアガンを発振することによって、始良カルデラをはさんだ振源距離 20 km の地点で後続相まで含めて十分な品質の記録を得ることができること、単一観測ラウンド内ばかりでなく 2 年おきの観測ラウンド間での高い波形再現性が得られることを明らかにした。これらのことから、エアガン振源は始良カルデラの地下構造に対して十分な大きさのエネルギーをもった人工地震波の発生が可能で、かつ地下構造に入力される振源波形の再現性が確保されるという基礎的な条件を満足できることが示された。また、筒井ら(2021)は振源近傍で取得された波形を用いて振源効果除去が可能であることを明らかにした。

また筒井ら(2021; 2023)が基礎実験を実施してゆく中で問題点も明らかになった。既存の貯水池を反復利用した場合、水門などの貯水池設備への影響が懸念されること、もともとの貯水池の管理目的とは別に発振波形維持を目的とした貯水池水位管理が不可能であることや、貯水池近隣への騒音など社会的な問題が表面化し、高頻度化には障壁となることが判った。

専用の発振水槽を手に入れることが出来れば上で述

べた問題点のうち 2 つは完全に解消できると考えられた。そこで 2023 年度には試験発振水槽を建造してエアガンの発振を実施し、連続的な陸上発振が可能な発振水槽の設計に関する情報および試験発振水槽を用いた発振の振源特性を把握することを狙った。

2. 試験発振水槽

試験発振水槽は京都大学防災研究所附属火山防災研究センター黒神観測室構内に建造した。以降では黒神試験発振水槽 (または試験発振水槽), 略称を KURP と呼ぶことにする (Fig. 1)。

試験発振水槽内に満たされた水中のエアガン発振では狭小空間の中で最大 13.8 MPa の高压空気を解放するため、試験発振水槽の壁には十分な強度を与える必要がある。資源探査の分野で陸上において垂直地震探査(VSP)を行う場合に水槽を用いたエアガン発振が行われることが多いが、エアガン発振水槽に関してその諸元が公開されている例は少ないために手探りで設計を行う必要があった。発振によって水槽内壁に作用する応力の推定を次のように行った。

竹内(1969)によれば円筒内の過剰圧 P によって薄肉円筒壁面の周方向に生ずる引っ張り応力 σ_{θ} は下式で算出することができて、工学分野でフープ応力と呼

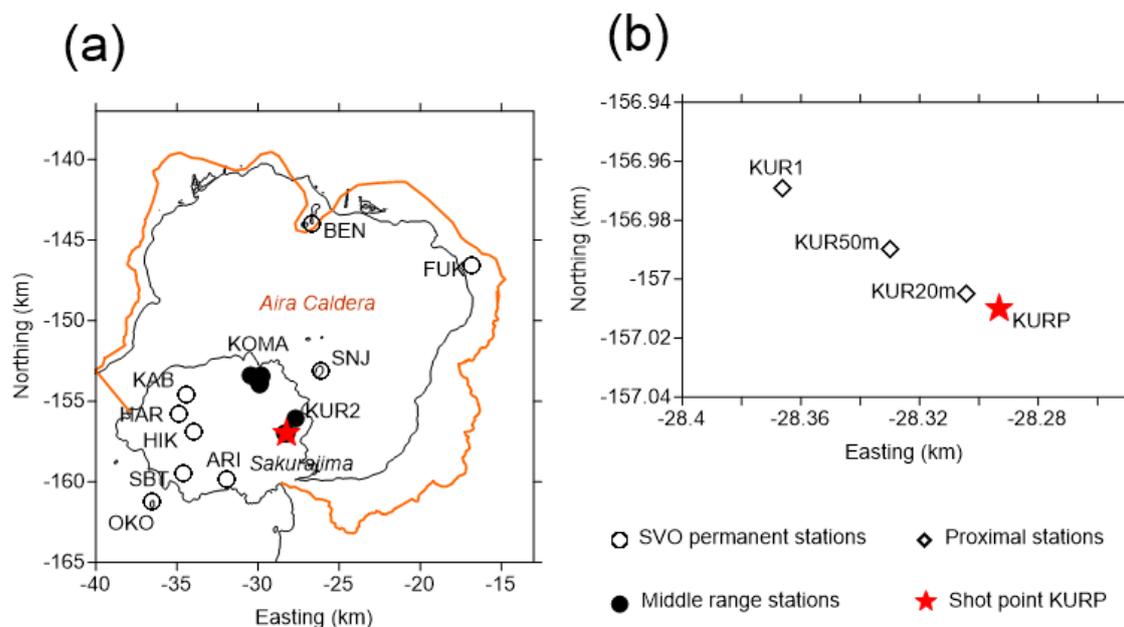


Fig. 1 The test seismic pit KURP and a seismic network. a) KURP, the permanent (open circles) and the temporary stations (solid circles) in Aira Caldera. b) the local network. Coordinate system is based on the domestic UTM system whose origin is 33.00000° N, 東 131.00000° E.

ばれている。ここに R_1 は内壁半径, R_2 は外壁半径(内壁半径+壁厚)とする。

$$\sigma_{\theta} = \frac{(R_1^2 + R_2^2)}{(R_2^2 - R_1^2)} P$$

ここでエアガンの発振の衝撃圧は筒井ら(2021; 2023)によって測定が行われており $0.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}$ であった。円筒の内半径を 1.25 m , 円筒の外半径を 1.55 m とすれば円筒壁に作用する過剰圧は 0.68 MPa で, それによって生ずる引っ張り応力は 2.5 MPa である。

一般にコンクリートの圧縮強度は 21 から 24 MPa とされているが, 引っ張り強度はその $1/10$ 以下である。エアガン発振に伴う引っ張り応力に持ちこたえるためには鉄筋による補強が必要である。直径 16 mm の鉄筋(引っ張り強度 440 MPa , JIS G 3112 規格)を用いた場合, 少なくとも 9 cm 間隔で鉄筋を並べる必要がある。

以上の計算を勘案して試験発振水槽の設計がなされた。全体図を Fig. 2 に示す。

試験発振水槽の全体形状は漏斗形である。発振後の気泡の上昇にともなう一時的な水位上昇により溢水を防止することと, 湛水用水源までの距離を考慮して水容積を最小限にすることを狙って漏斗形の形状を策定した。試験発振水槽底はその縁から 9.7 m の深さにあり, 直径 2.5 m の円筒形の壁で囲まれている。水槽

底から 6.25 m 高以上では水槽内壁は倒立円錐面となって広がり, 試験発振水槽の縁で直径 10 m となる形状にした。先述の強度計算を考慮して試験発振水槽の水槽内壁は直径 16 mm の鉄筋を 9 cm 間隔の格子状に組んだ厚さ 30 cm の鉄筋コンクリートとした。

工程の概略を Table 1 に示す。掘削工事に着手し掘削が 5 m に達したのは工事着手 1 週間後で, 予定深度の 10 m に達したのは工事着手 9 日後のことであった。

黒神観測室構内は全面的にボラ(未固結軽石層)主体の地層(8 m 深まで 10 cm 貫入 N 値: $2 \sim 20$, 中央値 10)で構成されているため, 法面傾斜角を 45 度に抑えねばならず最終的に口径 26 m 底径 6 m の倒立円錐台形で約 3000 m^3 を掘削した。

掘削が予定深度に達すると掘削法面には桜島火山の活動に伴って堆積した噴出物からなる地層の露頭が現れた (Fig. 3)。地表から 3 m 深までは黒神観測室敷地造成時の盛り土と火山灰性土壌を挟在する桜島火山由来の軽石層(大正軽石, 安永軽石, 文明軽石; 小林ら, 2013)が卓越した「ボラ」と呼ばれる未固結土質で, それ以深はボラの中に安山岩質溶岩塊が混在していた。安山岩質溶岩塊はその出現層序と古地磁気解析より天平宝字噴火の際に噴出した溶岩流の最上部であろうと考えられる(味喜, 1999; 宇都ら, 1999)。また掘削法面からの湧水は認められなかったことから, 地層全体は地下水に不飽和であり地下水面は掘削深度より深いと考えられる。これらの地層の詳細な地質学的記載は稿をあらためて筒井ら(2025)に述べる。

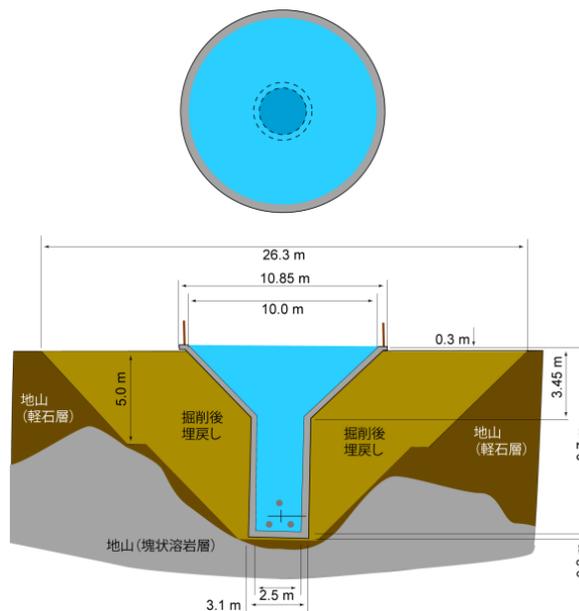


Fig. 2 The test seismic pit KURP.

掘削が予定深度に達した後，着手後 13 日目より発振水槽本体の建造が始まった．発振水槽本体の建造は呼び強度 24 MPa のコンクリートを用いて，下地コンクリート打ち，鉄筋組み，型枠配置，コンクリート打設，型枠外し，発振水槽周囲埋め戻し転圧，コンクリート接合面清掃，のサイクルが 5 回くりかえされた．

Table 1 The construction work

Start – 10th day	Excavation work
13th～83th day	Construction work
85th～86th day	Filling water



Fig. 3 The excavation for KURP. Looking west.



Fig. 4 The test seismic pit KURP. a) Filled state before the experiment. b) Under the operation with a pontoon.

全てのコンクリート打設が完了した後にステップの取り付けが行われた。水槽内観察の目印としてマーカーペイントを水槽底から 0.7 m 高に東西南北の 4 箇所と、エアガンに最も接近したジョイントである 1.8 m 高に施した。さらに水位判別の目安としてステップにも付番を施した。最終的に試験発振水槽ができあがったのは着手後 83 日目であった。その後湛水作業が 2 日間にかけて 4 t 散水車 2 台のピストン輸送で行われ、着手後 86 日目の午後 5 時には総水量 177 m³ の湛水が

完了した (Fig. 4)。発振実験は最下段のコンクリート打設開始から 63 日後に実施された。

試験発振水槽の周囲には防護用のフェンス枠を設置したが、保安度を高めるために実験中には野生動物の転落および不用意な立ち入りを避けるための防護網を側面に巡らした。さらに実験終了後には鳥類の転落を防ぐためフェンス上端を覆うような防護網も追加設置した。

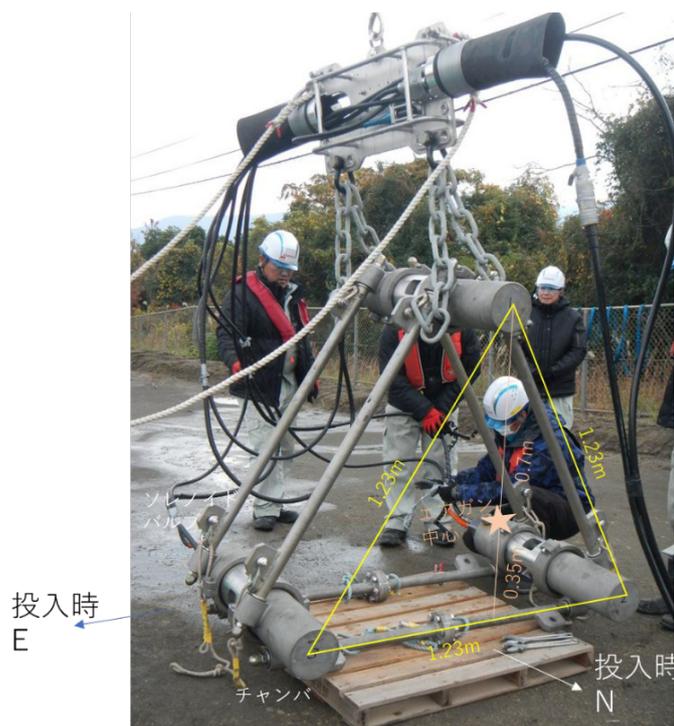


Fig. 5 The airgun array. The airgun array comprises three units of Model 1500LL with chamber size of 350 cui. Each unit was assembled at the ends of 1.23 m triangle frame.



Fig. 6 Two bomb pallets with 19.6 MPa 200m³

3. 発振実験

3. 1 振源装置

試験発振には筒井ら(2023)の実験と同じ個体の1500LL型エアガン(Teledyne BOLT社製)350 cui×3を、水槽底から1mの位置に懸架して用いた(Fig. 5).

エアガン装置はチャンバ容量350 cuiの1500LL型エアガン単体を1辺1.23mの正三角形の頂点になるように組み合わせたエアガンアレイである。また、エアガン上方1.5 mにはエアガン発振を監視するための近接ハイドロフォン(以下でNFHと称する)が組み付けられている。

エアガン投入と懸架には25 tラフタークレーンを用い、水槽内での位置決めは底面のそれぞれ東西南北に設けたアンカーに通したロープを用いた。作業用の足

場として筒井ら(2021;2023)で用いた6 m四方のポンツーン足場を用いた。なお、この足場で作業可能な最低水位は水槽底から8.9 m高であった。

また今回のエアガンの作動には、あらかじめ用意した高圧窒素ガスを19.6 MPa(284 psi)で充填したポンペを複数組み合わせ一組200m³のポンベカードルとしたものを2個用いた。ポンベカードルをFig. 6に示す。ポンベカードルのガス取りだし口につけたレギュレーターでエアガンへの供給圧を設定した。

なお、エアガンのチャンバ容量の表現には慣例的にcui(cubic inches)、圧力表現にはpsi(pounds per square inches)という単位が用いられており、1 cui=0.01638706×10⁻³ m³、1 psi=6.895×10⁻³ MPaである。以降ではそのままcuiをチャンバ容量の単位、psiを作動圧の単位として用いることにする。



Fig. 7 Level sensor (Model MJ-WL11-20, serial:F20061805. Diameter: 28 mm), and the guide pipe model VP30 at the top left.

Table 2 Shot time. All time stamp at Dec. 20 2023.

- | | |
|--|---|
| • 50 cui(5.7L), 800 psi(5.52 MPa) | • 350 cui(5.7L), 1500 psi(10.2 MPa) |
| • 13:42:12.650 | • 15:23:26.838 |
| • 13:47:46.786 | • 15:24:42.362 |
| • 14:35:49.850 | • 15:26:20.010 |
| • 14:37:48.166 | • 15:27:56.114 |
| • 14:41:18.186 | • 15:29:03.010 |
| • 14:42:52.578 | • 15:30:12.198 |
| • 350cui X2 (11.4L), 800 psi(5.52 MPa) | • 350 cui X2(11.4L), 1500 psi(10.2 MPa) |
| • 15:02:08.290 | • 15:32:01.426 |
| • 15:03:53.666 | • 15:38:16.862 |
| • 350 cui X3(17L), 800 psi(5.52 MPa) | • 350 cui X3(17L), 1500 psi(10.2 MPa) |
| • 15:09:20.234 | • 15:41:43.918 |
| • 15:11:31.858 | • 15:47:11.486 |
| | • 15:59:50.202 |

本実験では水位監視によって漏水を検知し、間接的に壁面状態把握を行うことにした。水位監視には水位センサー (SATOTECH 社製 MJ-WL11) をデジタルパネルメータ (渡辺電機工業株式会社製 WPMZ-1-3BX-XE-X00) と組み合わせた(Fig. 7)。センサーは内径 30mm の塩化ビニールパイプをガイドとして試験発振水槽のステップに固定し、湛水完了以降水位監視を行った。

3. 2 発振実験とその観測

エアガン発振による人工地震記録の取得を Fig. 1 に示す展開で行った。以降では試験水槽から距離 5 km 以上を遠方観測、距離 100 m 以上 5 km 以内の観測点群 (KUR2, BKOM1~7) を中距離観測(Fig. 1a)、距離 100 m 以内に展開した観測点群を近傍観測 (Fig. 1b) と称することにす。発振内容とその発振時刻とを Table 2 に整理する。

遠方観測ではエアガン発振に伴う人工地震波形の到達距離の検証観測を目的として、京都大学防災研究所の常設観測点の短周期地震計 (固有周波数 1 Hz, 減衰定数 1.0) によって得られたデータを用いた。京都大学防災研究所では桜島島内に 8 点、桜島から 50 km 以内に 8 点の常設観測点を展開している (Fig. 1a)。

中距離観測ではエアガン発振に伴う人工地震波形の記録と過去の実験との波形比較とを目的として、試験発振水槽を起点として 0.05 ~ 4 km の距離に展開

された高免孔中地震計アレイと黒神観測室構内孔中地震計観測点 BKUR(火山防災研究センターKUR 観測点)、1.15 km 地点 (KUR2 黒神小学校) がこれに相当する。高免孔中地震計アレイは筒井ら(2021)にその詳細が述べられている。

近傍観測には試験発振水槽内部と試験発振水槽から 100 m 以内の距離に観測点を展開した。水槽内部ではエアガン発振にともなう水中圧力時刻歴と衝撃圧の測定を目的としたハイドロフォン観測、地表では放射波形の測定を目的とした地表地震観測および騒音レベル測定を目的とした低周波マイクロフォン観測を行った。

近傍観測で用いたシステムを発振制御システムとともに Fig. 8 に示す。

まず遠方の京都大学防災研究所火山防災研究センターの常設観測点で得られた観測記録について述べる。本実験でもっともエネルギー放射の大きかった 1500 psi 三重連発振 (1050 cui) の 1 回分の観測波形と、本実験の 20 回全ての発振で得られた観測記録を重ねたうえにフィルター処理を施した波形とを Fig. 9 に示す。

Fig. 9 a, b いずれの場合も振源距離 6.55 km の KAB 観測点では上下動成分の 4 秒付近に初動を認めることができる。また(b)では重合の上フィルター処理をすることで S/N 比改善の効果が認められる。しかしそれ以遠の鹿児島湾を挟んだ対岸の観測点 BEN や FUK では発振による波の到来を見いだすことはできなかった。

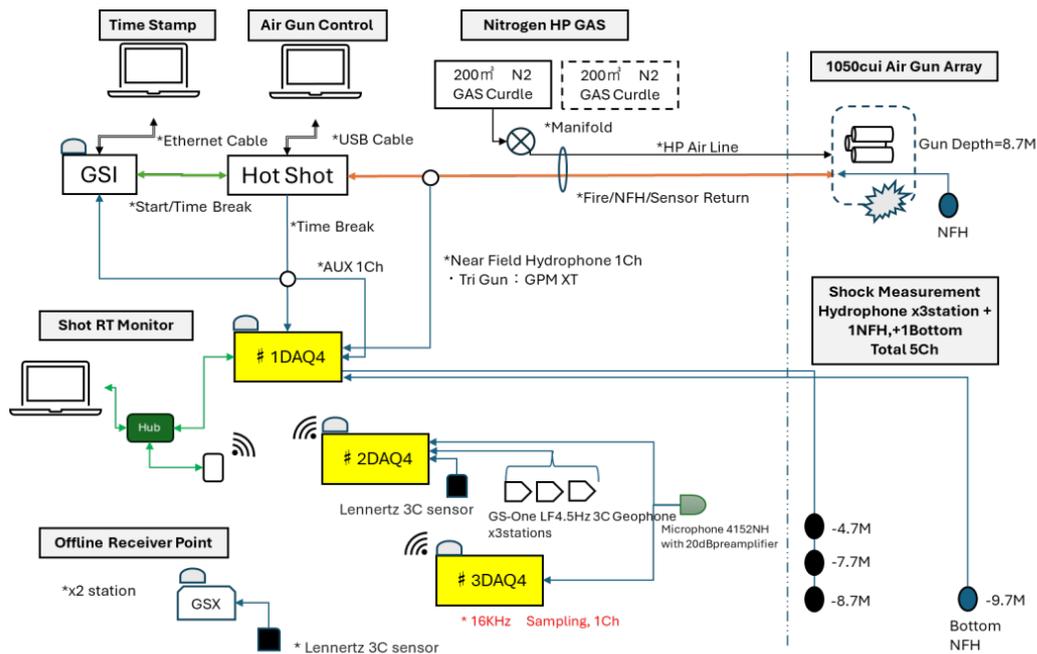


Fig. 8 Shooting system with the local seismic network system.

過去に黒神観測室構内で行われた深度 10 m における 20 kg 発破の観測 (筒井他, 2010; 2011; 2013; 2014) では振源距離 6 km までは初動が確認できていることから, 本実験による 1500 psi 350 cui×3 をはじめとする 20 回

の発振の重合結果は, S/N 比の点からは 20 kg のダイナマイト発破と同等であることが示された.

つぎに中距離観測波形例を Fig. 10 に示す. 中距離観測には振源距離 50 m から 5 km 以内の地表観測および

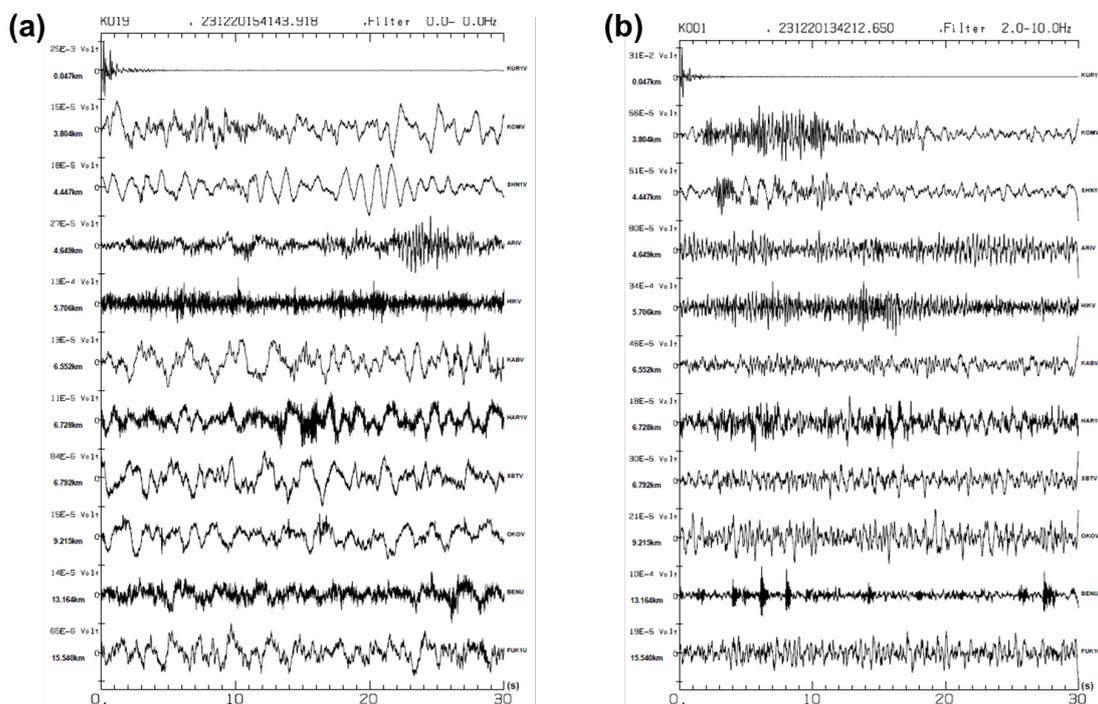


Fig. 9 Far field vertical seismograms. a) On a tripe (full volume) shooting at 1500 psi. (b) Filtered 2 – 10 Hz and full stacked seismograms. Each seismogram was normalized with its maximum. Distances are shown at the left end. Shot mark is at 0 second.

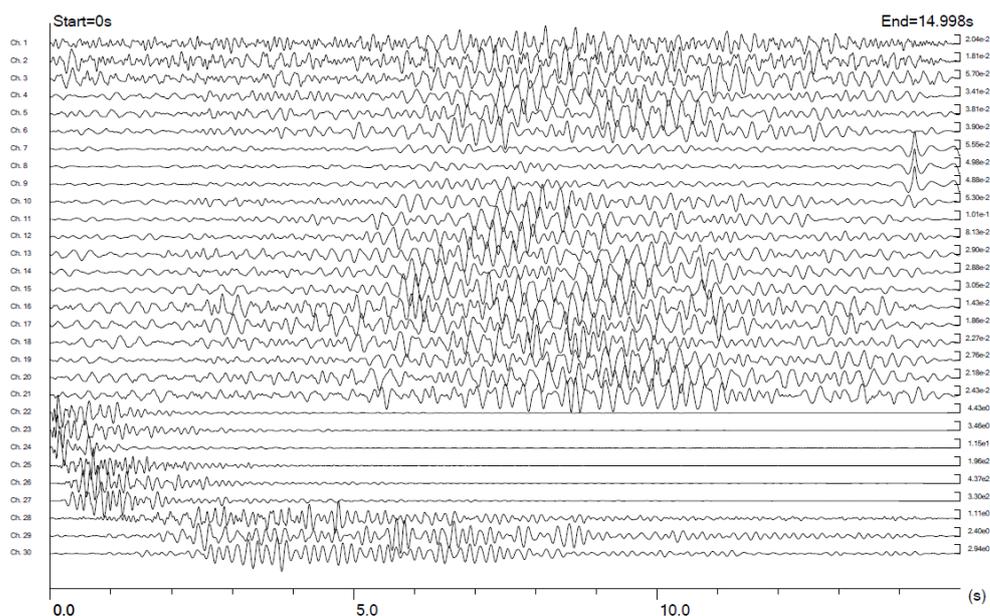


Fig. 10 Filtered middle range three components seismogram sets for full volume and 1500 psi. 4 – 15 Hz band pass filter was applied. Aligned order from the top ; stations BKOM1-7 at approx. 3.8 km, station KUR in the borehole, station KUR1 at 90 m, station KUR2 at 1.15 km. Each seismogram was normalized with its maximum. Shot mark is at 0 second.

孔中観測 (筒井ら, 2021) が含まれる。近傍観測記録と異なり、以降の中距離観測記録および長距離観測記録では発振時刻を 0 秒としている。90 m 地点の地震計 (Ch. 25 - 27) で得られた初動到来時刻は 0.173 秒、1.15 km 地点 (Ch. 28 - 30) では 0.842 秒、3.8 km 離れた高免アレイ BKOM3 観測点 (Ch. 7 - 9) では 2.43 秒であった。

近傍観測波形例を Fig. 11 に示す。発振時刻は 0.1 秒として表示している。近傍観測はエアガン直近から振源距離 100 m 以内の観測波形を含み、チャンネル割り当てを下表に示す。エアガンソレノイド信号 (Ch. 1)、水槽内圧力波形 (Ch. 2, ch.9 - 12)、近傍地表波形 (Ch. 3 - 5: 50 m 地点, Ch. 6 - 8: 20 m 地点, Ch. 13 - 18: 90 m 地点)、低周波マイクロフォン波形が順番に含まれる。低周波マイクロフォン (Ch. 19) は 90 m 地点に設置され、音波到来時刻は 0.384 秒 (走時 0.284 秒) であった。90m 地点の地震計 (Ch. 13 - 15, Ch. 16 - 18) で得られた初動到来時刻は音波に先行する 0.273 秒 (走時 0.173 秒) であった。

さらに中距離観測の記録を用いた検討の結果を紹介する。発振水槽から 90 m の観測点 KUR1 において得

られた記録の代表例を Fig. 12 に示す。さらに Fig. 13 はエアガンの周囲に十分な空間が確保されている住吉池における 2000 psi, 10.5 m 深における発振による波形 (筒井ら, 2023) を示す。Fig. 13 に示す貯水池における発振波形では振動継続時間が約 3 秒であるのに対して、Fig. 12 の波形はいずれも振動継続時間が約 5 秒と長いうえにより周期の短い成分が目立つ。

さらにエアガン構成が異なる水槽発振の Fig. 12a ~ c ではいずれも主要動が約 5 秒の継続時間をしめしており、波形の継続時間に大きな差異は認められない。エアガン構成が異なってもその周囲の空間形状は変化していないことから、振動継続時間の伸長はエアガン近傍の水槽壁の存在が強く影響していると考えられる。

波形継続時間伸長部分に到来している波の振動様式を Fig. 14 に示す。到来時刻によって波の振動様式が変化しているため、初動付近は約 0.1 秒長の時間窓を複数とって振動様式を検討した。

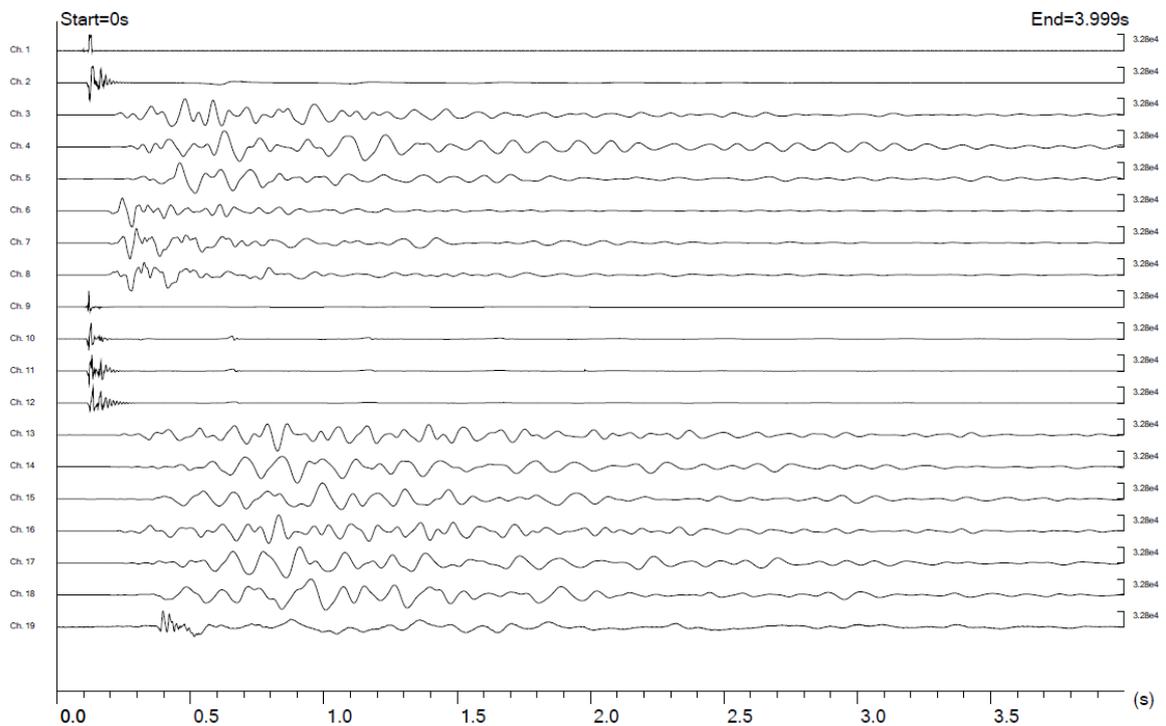


Fig. 11 Local range seismograms for the fill volume and 1500 psi shooting. Alignment order from the top; Solenoid valve signal, near-field hydrophone (NFH), 50 m station set (three component), 20 m station set (three component), auxiliary near field hydrophones 1 - 4, 90 m station set (three component), another 90 m station set (three component), and Low frequency microphone. Each seismogram was normalized with its maximum. Shot mark is at 0.1 s.

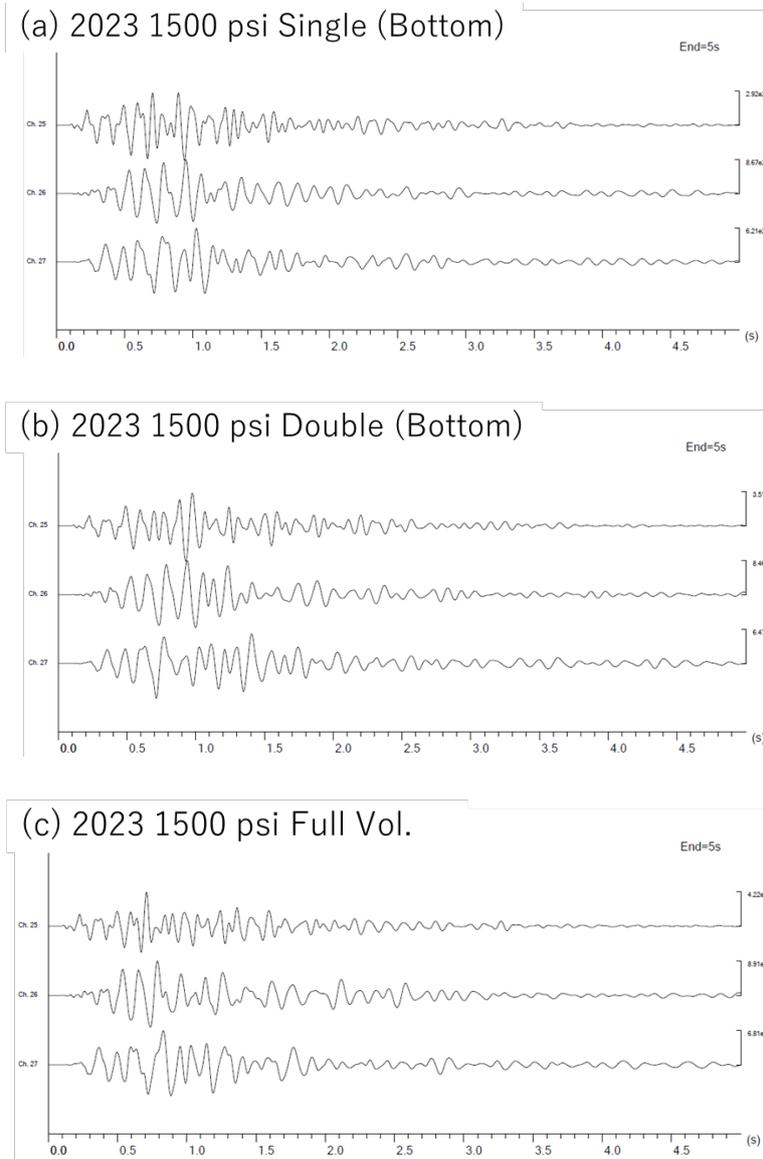


Fig. 12 Three component seismograms at 90 m station (KUR1) on 1500 psi pit shooting. a) single volume shooting. b) double volume shooting. c) full (triple) volume shooting. Vertical, NS, EW components are aligned from the top in each panel.

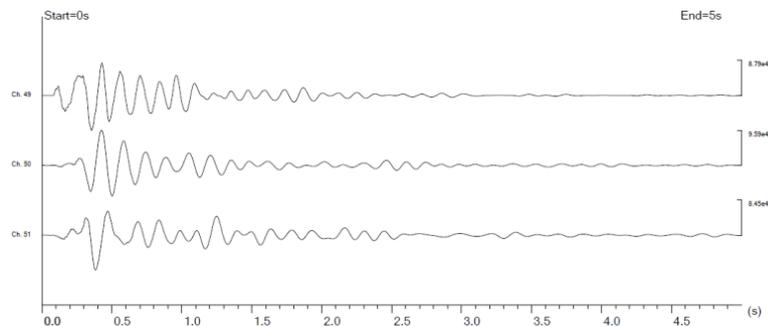


Fig. 13 Three component seismograms at 102 m station SUM1 on reservoir shooting with full volume and 2000 psi shooting (Tsutsui et al., 2023). Alignment order

Fig. 14 において区間 0.18 - 0.25 秒の区間(a)では上下成分の振幅が卓越し、明らかに P 波の到来を示している。0.25 秒付近では水平動が卓越するようになるが、この直後の 0.284 秒には音波が到来する。区間(b)の 0.33 秒以降は水平動成分が卓越し S 波動的な振動が継続する傾向がある。さらに区間(e)に示される 0.9 秒付近では振源方向に垂直に振動する S 波動的あるいはラブ波

的な振動様式が見受けられる。すなわち KUR1 (90 m) 地点では P 波が明瞭であるのは初動の直後だけで、音波到来直前以降で水平動が卓越する振動が卓越している。このことから水平動成分が卓越する到来相が波形継続時間の伸長に寄与していることが示唆される。

継続時間の伸長は振源距離が大きくなると一層顕著である。1.15 km 地点 (KUR2) で観測された波形を振

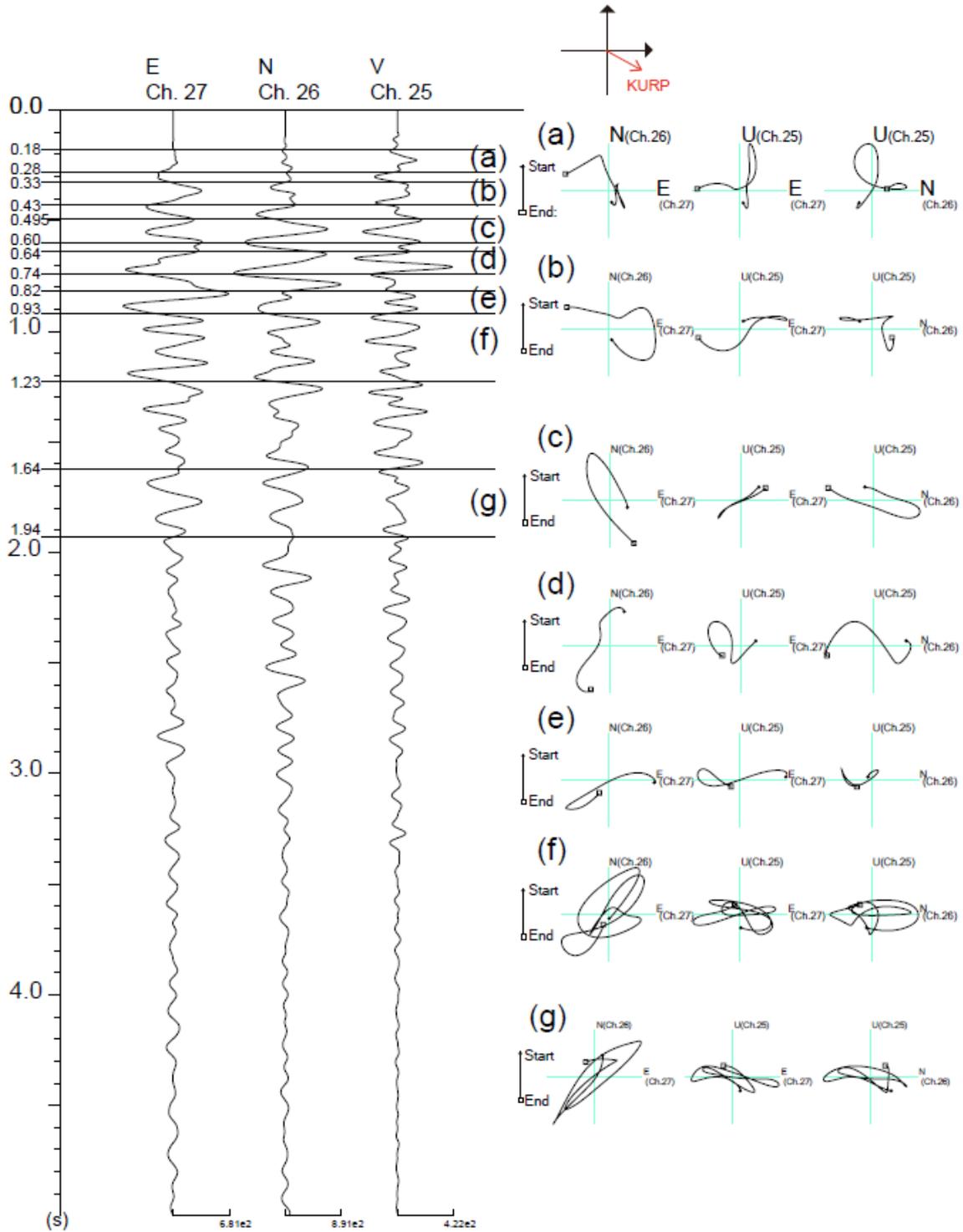


Fig. 14 Three component seismograms and instantaneous ground motions at 90 m station KUR1.

動軌跡とともに Fig. 15 に示す。

1.15 km 地点における初動到来時刻は 0.842 秒付近であるが、上下動成分だけでは初動の確認が困難である。

この地点では Fig. 15 の区間(a)に示されるように初動から約 0.2 秒間は上下動の振動が卓越するが、それ以降は区間(c)に示されるように水平動も動く複雑な振動様式を示す。その後の区間(d)で 1.3 秒付近から回

転運動をする振動様式を示し、ひきつづく 1.6 秒付近から水平動が卓越する S 波的な振動様式に移行する。さらに区間(j)に示されるように 5 秒以降は水平動が卓越する。このことからこの地点における振動継続時間の伸長は S 波など遅い到来相による寄与が大きいと考えられる。さらに遠方の 3.7 km 地点(観測点 BKOM3)における振動様式は初動到来時刻 2.43 秒から時刻 5.4

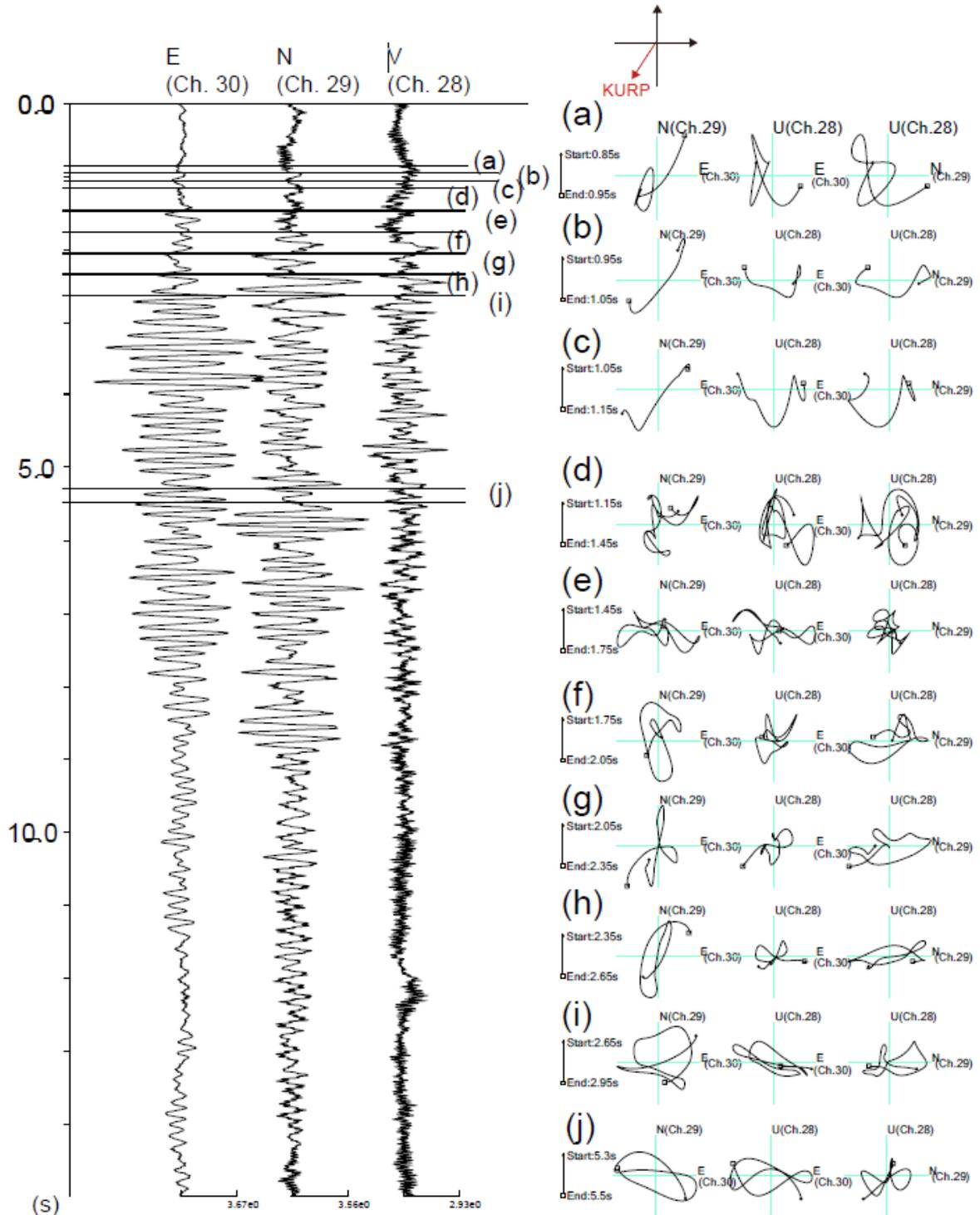


Fig. 15 Three component seismograms and instantaneous ground motions at 1.15 km station (KUR2).

秒までは上下動卓越のパターンを示し、時刻 5.4 秒以降で水平動成分の振動が顕著である。このことから今回の観測水槽における発振では P 波より S 波または表面波が強く発生していたことがうかがわれ、距離が大きくなると水平動成分の振幅が顕著になることから相対的に S 波の発生効率が高かったと解釈される。以上のことは本実験において遠方で観測された波形は、こ

れまでの実験のそれより S 波等速度が遅い成分の発達が顕著であることを示している。

次に得られた記録の振幅と周波数成分について比較する。Fig. 16 に振源距離 90 m 付近における水槽内発振に依って得られた上下動記録と貯水池内発振によって 102 m 地点で得られた上下動記録 (筒井ら, 2023) とを同じスケールで重ねて示す。貯水池内発振の波形振

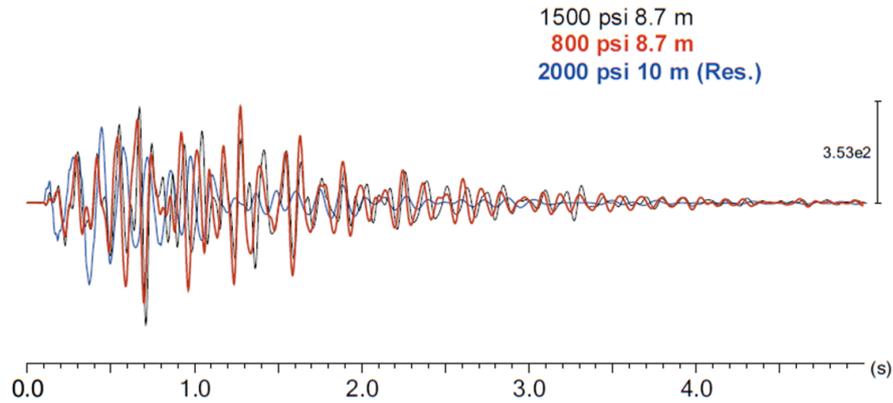


Fig. 16 Vertical seismograms at approximately 100 m. a) one shot equivalent vertical seismogram at 102 m station (SUM1) in the reservoir experiment (after tsutsui et al., 2023), b) a vertical seismogram at 90 m station (KUR1) from a pit shooting.

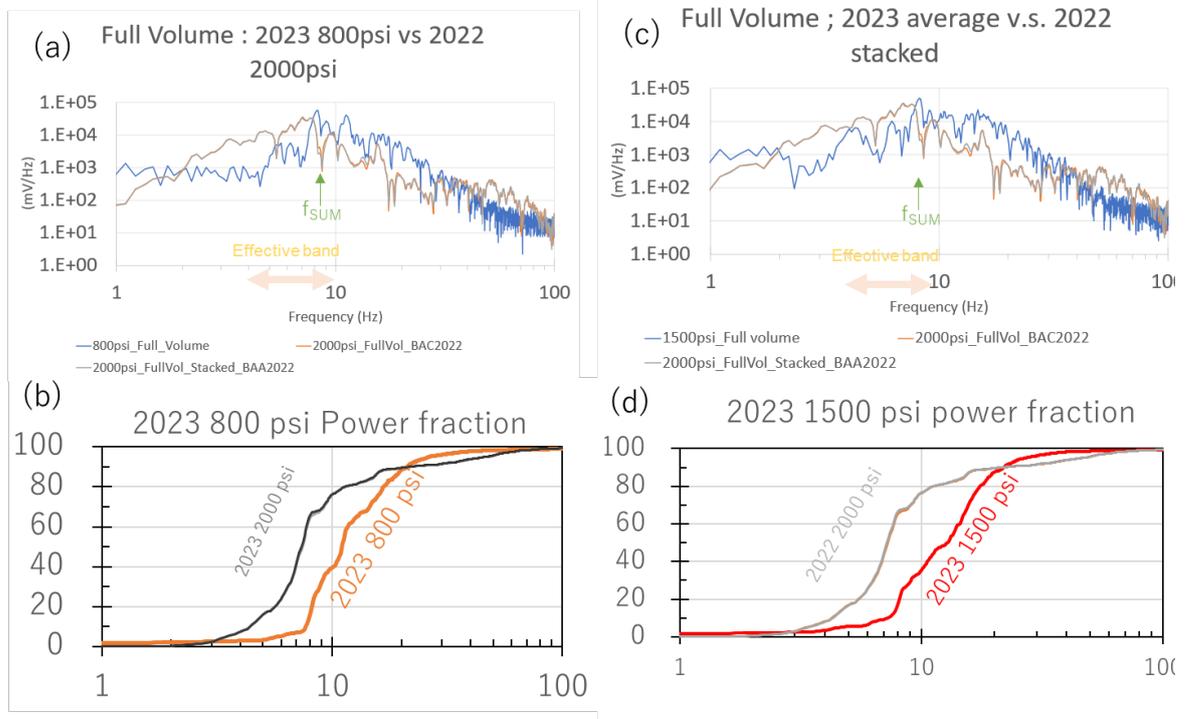


Fig. 17 Frequency components of the pit shooting at KURP and the reservoir shooting. a) Amplitude spectrum of 800 psi (5.5 MPa) shooting. b) accumulated spectrum of the panel a, c) Amplitude spectrum of 1500 psi (10.4 MPa), d) accumulated spectrum of the panel c. “2023 2000 psi” is a single shot equivalent of the reservoir shooting after Tsutsui et al. (2023).

幅は単一発振に換算してある。

Fig. 14 の粒子軌跡の観察より 0 から 0.5 秒の区間は P 波が卓越していると考えられるが、この区間では明らかに水槽内発振の観測振幅のほうが貯水池発振のそれより小さい。さらにこの区間の水槽内発振波形は作動圧が異なっても振幅の差が顕著ではないことが注目される。

つぎに水槽内発振と貯水池発振の両方の周波数成分の比較を Fig. 17 に示す。

Fig. 17 では水槽内発振のほうが貯水池発振よりも卓越周波数が高くなる傾向と、水槽内発振では作動圧が低くなると卓越周波数成分の帯域幅が狭くなる傾向が見受けられる。この傾向は先述の生波形の観察結果の特徴を反映している。作動圧が低くなると卓越周波

数成分の帯域幅が狭くなる現象は先述の貯水池発振の際にも認められたことであるので振源装置のもつ一般的な傾向であると考えられる。卓越周波数が高くなる傾向は発振水槽の狭小空間の影響であると考えられる。

90~100 m 地点で実体波が卓越すると考えられる 0~0.5 s の区間で前項同様に振幅スペクトル総和を計算したものを Table 3 に示す。0~20 Hz の帯域の振幅スペクトル値総和比を計算すると水槽内発振(800 psi (5.5 MPa))の振幅スペクトル総和は貯水池発振(2000 psi (6.9 MPa))のその 0.68 倍である。さらに重要と思われる 1~10 Hz の帯域では水槽内発振(800 psi (5.5 MPa))の振幅スペクトル総和は貯水池発振(2000 psi (13.8 MPa))との振幅スペクトル総和の 0.44 倍であった。

なお、同じ水槽 KURP 内で異なる作動圧に対しては

Table 3 Total amplitude spectra in the window 0 - 0.5 s. The same sensor model with conversion factor of 400 V(m/s) are used in the observations. The case of 2000 psi is derived after Tsutsui et al. (2023) .

作動圧	0-20 Hz ($\times 10^4$ V/Hz)	1-10 Hz ($\times 10^4$ V/Hz)
800 psi (5.5 MPa)	3.61	1.9
1500 psi (10.35 MPa)	3.42	1.9
2000 psi (13.8 MPa)	5.27	4.3
(On reservoir shooting)		

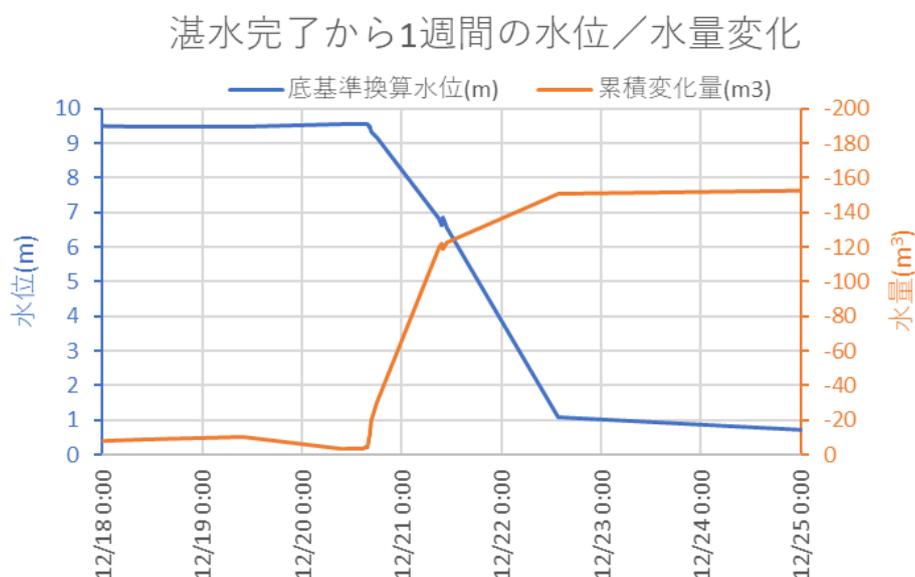


Fig. 18 Water level history during a week after 18 Dec. 2023.

同帯域で $[800 \text{ psi}]/[1500 \text{ psi}] = 0.94$ であった。これは筒井他(2021)が報告した作動圧と放射エネルギーとの正の相関関係とは異なる傾向を示している。これは後述するように 1500 psi (10.35 MPa)発振時に漏水が始まった状況であったことから、エアガンが放出するエネルギーの相当量が水槽内壁の破壊と漏水の水流駆動に分配された可能性があると考えられる。したがって Fig. 16 - 17 は建造された水槽の発振許容能力の上限が 800 psi (5.5 MPa) 発振であることを示しているのかもしれない。

3. 3 試験発振水槽のふるまい

湛水完了後の 12/18 から 1 週間 (実験期間を含む) の水位と水量の累積変化量を Fig. 18 に示す。試験発振水槽への湛水は 12/15 の午後 5 時に完了した。12/20 の発振実験の前は水量変化率がおおむね $10^{-1} \text{ m}^3/\text{hour}$ であったものが、発振実験終了後には $3 \sim 8 \text{ m}^3/\text{hour}$ に変化している。

急速な水位低下は 12/20 実験終了後の 17 時台にはじめて認知され、翌 21 日 9 時始業時に発振作業不可能な水位 (6.9m 高) まで低下していることが確認された。この時点で実験に必要な水位までに要求される補水量 97 m^3 が 1 日分給水能力 $64 \text{ m}^3/\text{day}$ を超え、当日中に発振作業が可能な水位に復することができないと判断されたために、発振実験を終了した。

12/20 以降の急激な水位減少は後述のように発振作

業による試験発振水槽内壁面の亀裂発生に伴うものである。さらに、12/20 の発振実験中の水位変化の詳細を Fig. 19 に示す。

Fig. 19 に示されるように、15:30 までに終了した 1500 psi (5.52 MPa) の 350 cui 発振までは顕著な水位変化が認められないが、15:30 以降に実施された 1500 psi (5.52 MPa) の 350 cui \times 2 発振以降では顕著な水位減少が認められる。従って試験発振水槽は少なくとも 800 psi (5.52 MPa) 350 cui \times 3 発振には耐えたと推察される。

発振作業終了後担当者が試験発振水槽内に降下し水槽内壁の亀裂を調べた結果を Table 4 に示す。また確認された亀裂の本数の分布を Fig. 20(a)に示す。

発生した亀裂は垂直走向のものが卓越していた。亀裂が 20 本以上見られたのは底から 1.8m 高 (縁から 7.9m 深) までで、それより上では亀裂本数が減少する。一方、水平方向の亀裂はエアガン中心深度 (深度 9m) 付近に 2 箇所、エアガン近傍のジョイント部に 1 箇所見られるだけであった。水槽内壁の剥離は微小なもの以外認められなかった。なお、水槽底への降下の際に二酸化炭素濃度を計測したが、12/22 は水面上で 0.03 Vol%, 12/25 は水面上で 0.04 Vol%, 1/12 は水面上で 0.02 Vol%で安全に問題なしと判断した。

発振実験終了 2 日後に上方から試験発振水槽の底をのぞき込んだ写真を Fig. 21 に示す。試験発振水槽の四方 (およそ東西南北) の底にはそれぞれアンカーが設けられ、エアガン固定用ロープが取り付けられている。

12/20発振中の水位／水量変化

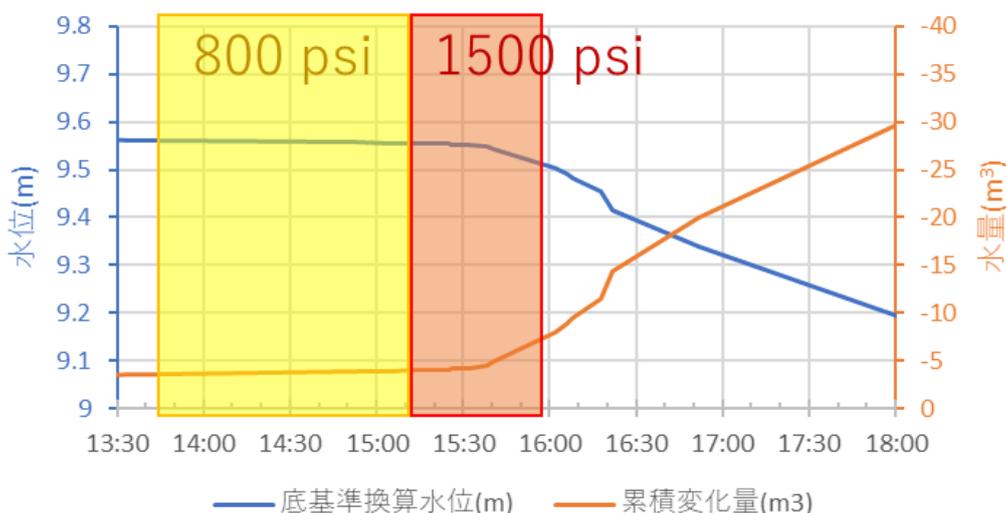


Fig. 19 Water level history during the operation.

これらのロープを以降ではNロープ、Sロープ、Eロープ、Wロープと称し、方位位置の目安とすることにする。ロープの太さは12mm、隣接するロープの間の壁面に沿った距離はそれぞれ約1.96mである。

Fig. 21 に示されるように水槽内壁に顕著なへこみや大規模な剥離等の変形は認められない。試験発振水槽内部に降下した際にエアガン中心深度の約2m上方(3m高付近)のステップ周辺でハンマーによる打撃聴音を行ったが、コンクリート表層の浮きや鉄筋の破断を思わせる打撃音(空洞音)は認められなかった。

底から0.65m高の水槽内壁写真をFig. 22に整理して示す。写真中の亀裂には次の命名規則に沿ったコード番号を表示している。

- ・半角文字で深さコード+周回コード+通し番号を記載したものとする。
- ・深さコードは底からの高さをcm単位で記載する。例として3.9mならば390。
- ・周回コードは時計回りか反時計回りの区別。時計回りならN、反時計回りならSの文字。
- 通し番号はWロープから離れる順に付番。

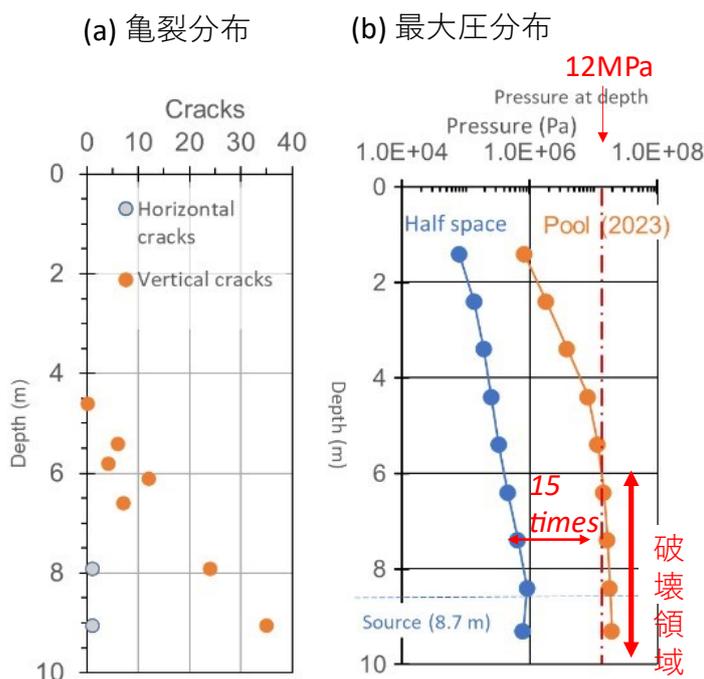


Fig. 20 Crack distribution and maximum pressure distribution. (a) Mapped cracks. Orange circles are vertical cracks and gray circles are horizontal cracks. (b) Maximum pressure distribution derived from the numerical simulation.

Table. 4 Crack distribution.

縁からの 深さ	底からの 高さ(m)	垂直亀裂本数					合計本数	水平亀裂 数
		W-N	N-E	W-S	S-E			
4.6	5.1					0		
5.4	4.3	1	2	3		6		
5.8	3.9	3		1		4		
6.1	3.6	4	2	2	4	12		
6.6	3.1	4	2	1	0	7		
7.9	1.8	8	5	6	5	24	1	
9.05	0.65	8	9	8	10	35	1	

・通し番号は垂直方向亀裂ならば3桁の数字，水平方向亀裂ならばH+2桁の数字を与える。

垂直走向の亀裂がエアガン中心深度付近に一番多く分布しており，水平方向の亀裂は同じくエアガン中心深度付近にしか見られなかった。垂直方向の一番長い亀裂は底から4.3 mの高さにまで達している。エアガン発振による衝撃はエアガン本体から4.3-1 m（エアガン中心深度）=3.3 m 離れれば水槽内壁の引っ張り強度を超えていなかったことが推察される。また，ステップの取り付けが緩んでいる箇所が複数認められた。ステップ2（0.7 m 高）, 5（1.5 m 高）, 6（1.9 m 高）, 7（2.3 m 高）の4箇所である。なお，底から4.7 m 高, 5.1 m 高では目視で亀裂を認めなかった。以上の観察から底から4.3 m 高以上には亀裂が及んでいないと判断された。12/25 から17日間経過した1/12に再度行った水槽内観察では水位が0.3 m 低下し0.61 m 高であった。1/12時点では水面下の0.61 m 高以下の壁面および底面の調査はできなかった。

このことから，エアガン発振時に水槽内壁に作用した過剰圧（おそらく衝撃相；Urlick, 1967）によって，壁面に周方向の大きな引張り力が発生し大きな歪みを生じてコンクリートを破壊したものと推察される。また水槽内壁にくぼみなどの変形や大きな崩壊を認めることがなかったことから内部の鉄筋は破断に至っていないことが推察される。このことからエアガン発振にもなう近接効果（衝撃相）のおよぶ範囲はエアガン中心から約3 m 程度であることを示していると推察される。また水槽内壁にはエアガン中心深度付近でも大規模な剥離は見いだせなかった。

なお水槽周囲の地山が空隙の多い降下軽石層からなることを考慮すると，降水量の少ない時期でも水槽内に約0.6 m ほどの水位が残ることは，底盤には深刻なダメージが及んでいないことを示唆している。

4. 考察

試験発振水槽を用いて行った3回目の基礎実験では，予想より強い水槽内圧力の存在と水槽から放射される地震波の継続時間が貯水池発振の場合(筒井ら, 2021; 2023)より長くなることが判った。

この現象は発振装置極近傍の空間的な特性が強く影響していると考えられる。今回の実験条件とこれまで行われた基礎実験（筒井ら, 2021; 2023）の条件とをTable 5に整理する。



Fig. 21 Down view of the pit. (a) E-N-W wall, (b) E-S-W wall.

試験発振水槽と既往の実験で用いた住吉池の大きな違いはエアガン周囲の空間である。エアガンクラスタのサイズは1.5 m 四方であるのに対して、試験発振水槽 KURP は直径2.5 m で、住吉池は直径550 m である。KURP では直径に対してエアガンクラスタサイズが1/1.67の比率に、住吉池ではその比率が1/367になり、

Table 5. Shooting environments.

	KURP	The reservoir (SUM)
Diameter	2.5 m	550 m
Bottom depth	9.7 m	20 m

試験発振水槽の直径がエアガンクラスタサイズと同規模である。また、水深に関してはエアガン深度 (Tow depth) を10 m とすると、住吉池では発振点水深の50%付近、KURP では発振点水深の90%付近にエアガンを位置させることとなり、このパラメータも振源の特性に影響する可能性がある。

試験発振水槽内におけるエアガン発振による水槽内壁面圧力の特徴と水槽から放射されて水槽外で観測される地震波の特徴を明らかにするために、全成分を計算の対象とする差分法を用いて Table 6 の仕様で数値的に観測波形のシミュレーションを行った。

水槽外観測波形のシミュレーションに必要な構造モ

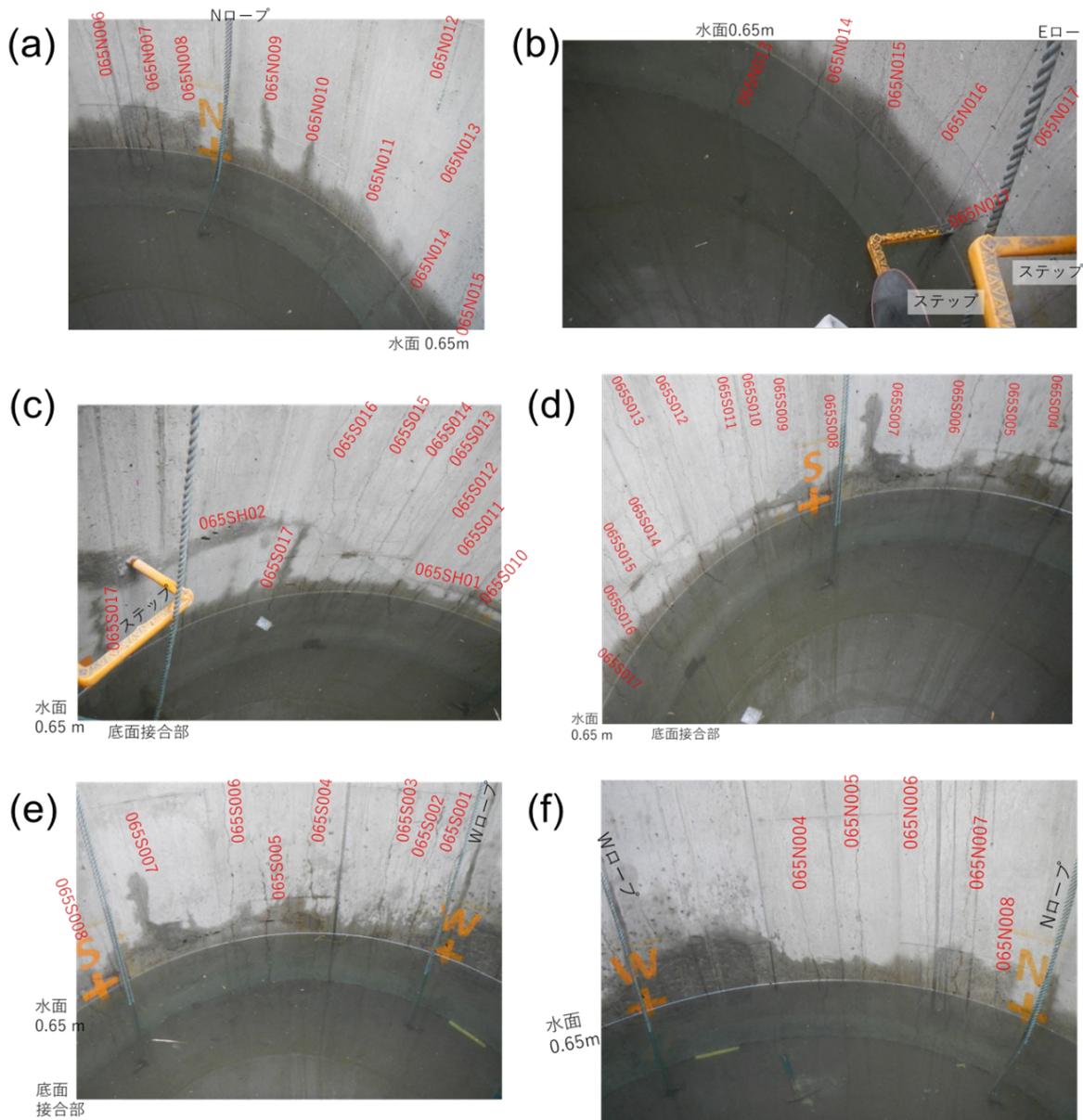


Fig. 22 Examples of the cracks around 0.65 m high from the bottom. (a) N-NE wall, (b) NE-E wall, (c) E-SE wall, (d) SE-S wall, (e) S-W wall, (f) W-N wall.

デルは、黒神観測室構内で秋田大学国際資源学部が行った屈折法地震探査（筒井ら, 2025）によって推定された P 波速度構造をもとにして構築した(Fig. 23). 筒井らが実施した 2 本の屈折法測線の一つは試験発振水槽付近を横断している.

また掘削時の観察から発振水槽をとりまく軽石層は水に不飽和であったことから密度を 300~400 kg/m³ に設定した. 水槽内の音響インピーダンスは 1.5 × 10⁶ kg/(m²s), 水槽外の軽石層の音響インピーダンスは 1.36 × 10⁵ kg/(m²s)とした. 以上のことを総合して Fig. 24 に示す試験発振水槽シミュレーション地震波速度構造モ

デルを与えて以降の波形合成計算に用いた.

Table 6 Setting of the numerical simulations

Method	Time domain finite difference (TDFD)
Grid arrangement	Staggard grid
Spatial discretizing accuracy	4th order
Temporal discretizing accuracy	Second order
Grid spacing	0.1 m
X grids (Absorbing boundary included)	1520 (152 m)
Y grids (Absorbing boundary included)	1520 (152 m)
Z grids (Bottom absorbing boundary included)	720 (72 m)
Absorbing grids for a plane	100
Time step	1.0 E-5 s
Steps	101001 steps (-0.01~1.0 s)
Source generator application	Nucleus+

黒神観測室構内地震波速度

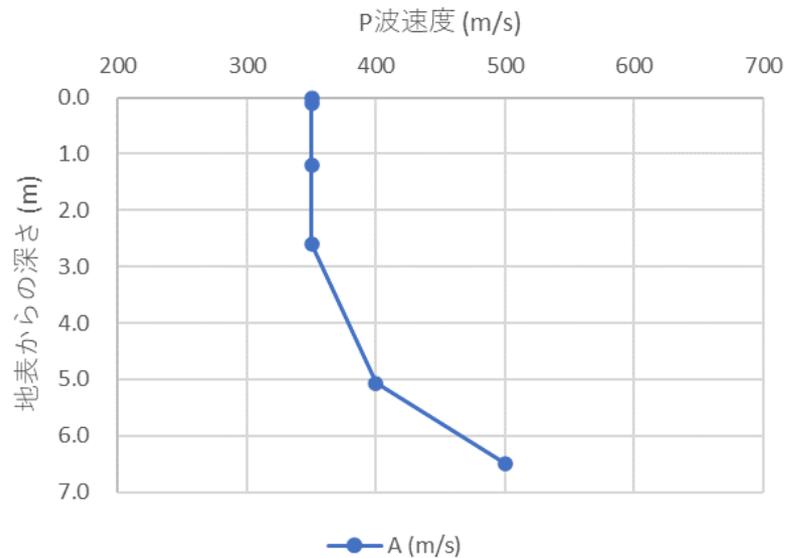


Fig. 23 The P-wave velocity profile for KUR based on Tsutsui et al. (2025).

シミュレーションによって得られた水槽内壁における最大圧力分布を Fig. 20b に示す. Fig. 20b では発振水槽の狭小空間でのエアガン発振ではエアガン近傍の衝

撃圧が半無限媒質での発振のその 15 倍に達することが明らかになり、発振水槽内壁は半無限媒質内発振の場合の 15 倍以上の圧力にさらされていたことにな

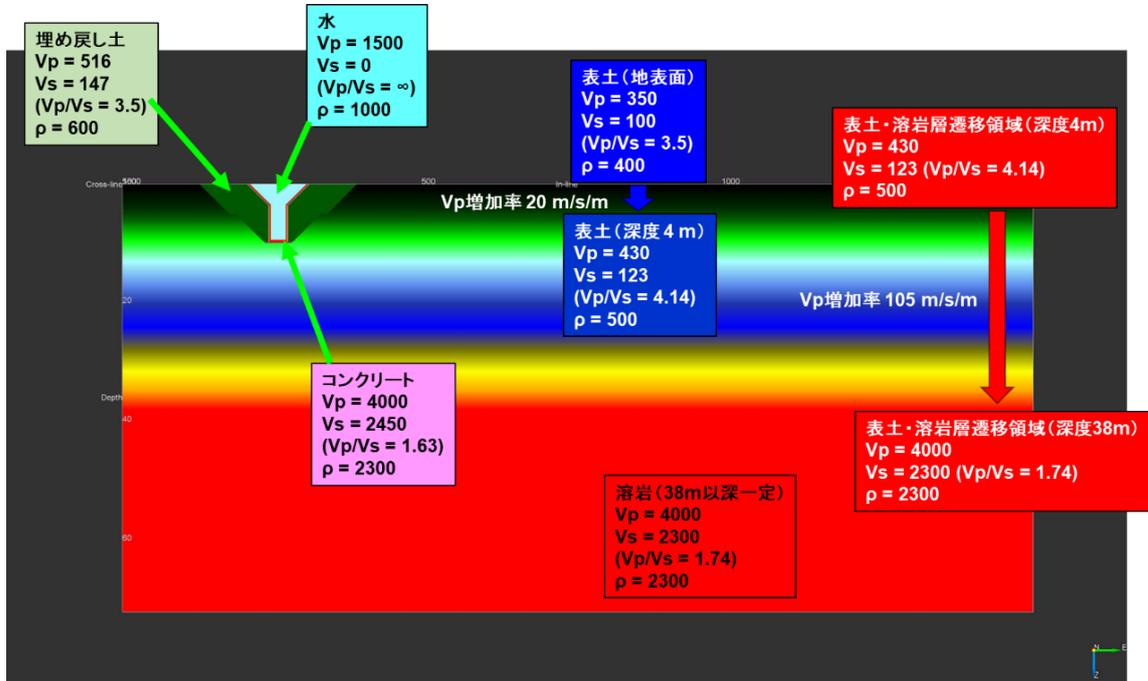


Fig. 24 The structure model of the site KUR for the numerical synthesis of the waveforms.

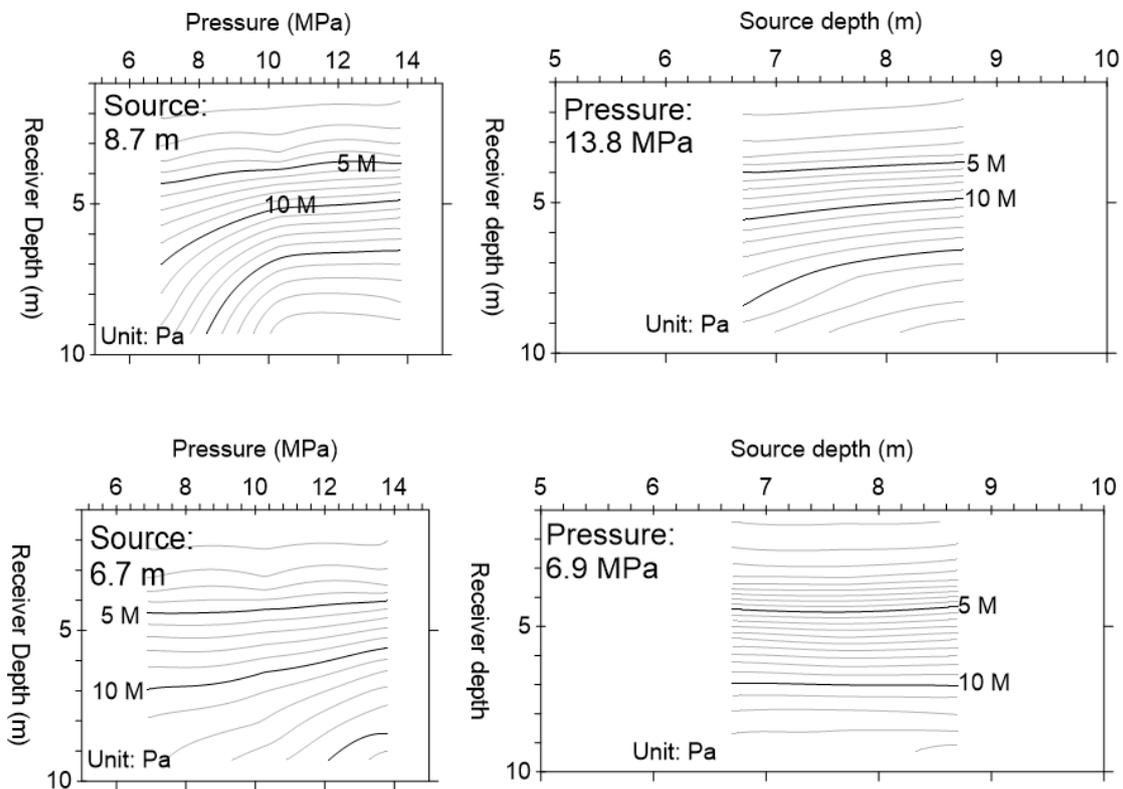


Fig. 25 The maximum pressure distributions for tow depth and for operating pressure in the shootings.

る。また内壁圧力分布は深さとともに単調に増大し、深さ 5 m 付近で 10 MPa を超した後、それ以深では 12 MPa ぐらいの値をとり深さ依存性が目立たなくなる。この圧力分布は 5 m 以浅では水槽の断面形状の変化を反映していると考えられるが、5 m 以深で深さ依存性がはっきりしなくなることは共鳴現象の存在をうかがわせるものである。水槽内壁面の亀裂分布 (Fig. 20a) と比較すると、亀裂の多発は 13.6 MPa 動作時に水槽内壁圧力が 12 MPa (10 MPa 動作時の 8.8 MPa) を超える深さであることが示された。

なお水槽内壁の最大圧のエアガン深度依存性と動作圧依存性を Fig. 25 に示す。

次に波動場の空間分布を検討する。発振から 40 ms 経過後の上下成分加速度の空間分布 (スナップショット) を Fig. 26 に示す。Fig. 26a はモデルに与えた振源波形を示し、赤矢印はスナップショット時刻を示す。b および c は発振によって生じた波動場の空間分布を示す。両者を比較すると下方に進行する波面の振幅は Fig. 26b より c のほうが明瞭である。Fig. 26b の最大の特徴は傾斜した波面を持ち側方に放射される波動場が非常に明瞭なことである。側方に放射される波面は垂直ではなく傾斜していることから、斜め上方に放射さ

れている波であろうと考えられる。また Fig. 26b では与えた発振水槽の縦断面が明瞭に認識できる (大きな加速度を示している) ことから、発振後に大きなエネルギーが発振水槽内に残留することを示している。

発振水槽内の大きなエネルギーの残留はより遅い時刻のスナップショットでも明瞭に確認できる。Fig. 27 は発振から 90 ms 経過後のスナップショットを示す。

Fig. 27b では発振から 90 ms 経過しても発振水槽の輪郭が明瞭に認められることから、この時点でも依然として大きなエネルギーが発振水槽内に残留していることが示されている。また Fig. 27c では主要な波面が領域から走り去った様子が示されているのに対して、b では依然として発振水槽の近傍の表面付近に大きな振幅を持つ波が発達していることも特徴である。表面付近に大きな振幅をもつ波は垂直方向の振幅分布パターンは複雑であるが、その特徴から表面波であろうと考えられる。

発振水槽内における大きなエネルギーの残留は発振水槽中の水層と水槽外側の降下軽石層との音響インピーダンスの差に由来すると推定される。発振水槽内部の水の音響インピーダンスと水槽周囲の軽石層のそれが約 15 倍異なるために、水槽内部で発生させた 1 回

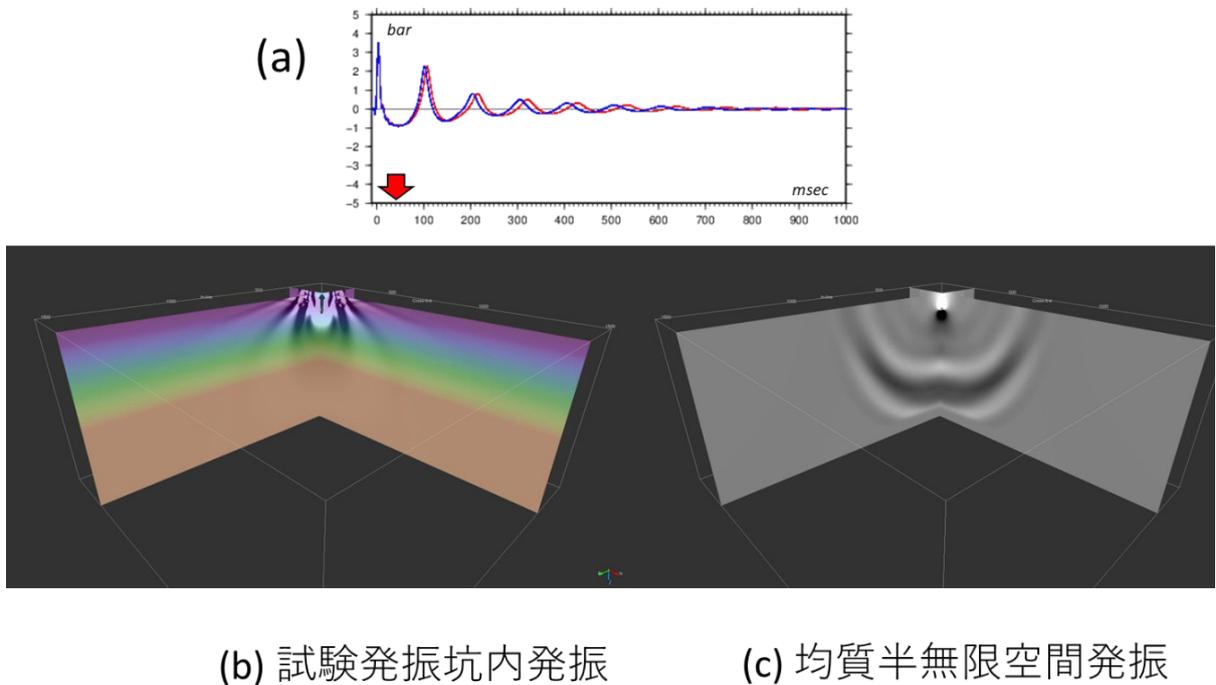


Fig. 26 The snapshot of the vertical ground velocity at 40 ms after the shot at 8.7 m depth with 2000 psi. Denser color indicates larger velocity. (a) Near field pressure history, (b) The pit shooting. (c) half space shooting (the reservoir shooting equivalent).

の発振パルスに対して水槽外側に約6%程度のエネルギーしか伝わらず残りの94%は発振水槽内に残留してしまうのである。これが水槽内における過大な最大圧力をもたらしていると考えられる。さらに発振水槽内に残留するエネルギーは水槽内壁における反射を重ねながら時間をかけて水槽外側にエネルギーを伝えることによって散逸してゆくことになり、これが波形継続時間の伸長をもたらしていると考えられる。

このことから黒神観測室構内は試験発振水槽に不向きな弾性的性質をもつ地層を有していたと結論される。発振水槽内とのインピーダンスコントラストがより小さい地層であれば発振水槽外へのエネルギー伝達効率が高くなり、水槽内の最大圧力はより小さくできるうえに水槽外側へ効率よく地震波を放出できる発振水槽になると考えられる。

以上のことから新規発振水槽を建造する場合には、口径は最小でも6mが必要である。さらに発振水槽はその内壁を靱性の高い鋼板とし、漏水対策が必要であろうと考えられる。さらに漏斗形の縦断面が建造時の工程を難しくしていたことを考慮すると発振水槽縦断面形状はより単純な形状を選択すべきである。

さらに発振水槽中の共鳴を小さくするためには、発振水槽内外のインピーダンスコントラストが小さくで

きる地層を発振水槽建造地にえらぶべきであると考えられる。たとえば凝灰岩層を立地として選んだとすればその音響インピーダンスは概ね $4 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ であるので、凝灰岩層中の水槽における発振であったら1回で25%のエネルギーが出て行くことになり、軽石層の4倍程度の利きが期待できることになるうえ、内壁面の最大圧力も半無限水中の4倍程度で済む可能性がある。

5. まとめ

長期連続反射法の基礎実験の一環として試験発振水槽を建造し、その中における発振実験を行った。さらに試験発振水槽をモデル化したシミュレーションを行い、試験発振水槽における発振時の地震波発生について検討を行った。

建造した試験発振水槽は深さ9.7m、底直径2.5m、水槽口直径10mの漏斗形の縦断面をもち、直径16mm鉄筋を9cm間隔で組み合わせた厚さ30cmの鉄筋コンクリート造壁とした。この試験発振水槽の水槽口から深さ8.7mにエアガンを置き、作動圧800psiおよび1500psiを組み合わせて発振作業を行った。

発振作業から得られた観測波形は既往の実験のそれより高い周波数成分に富み、長い継続時間が認められ

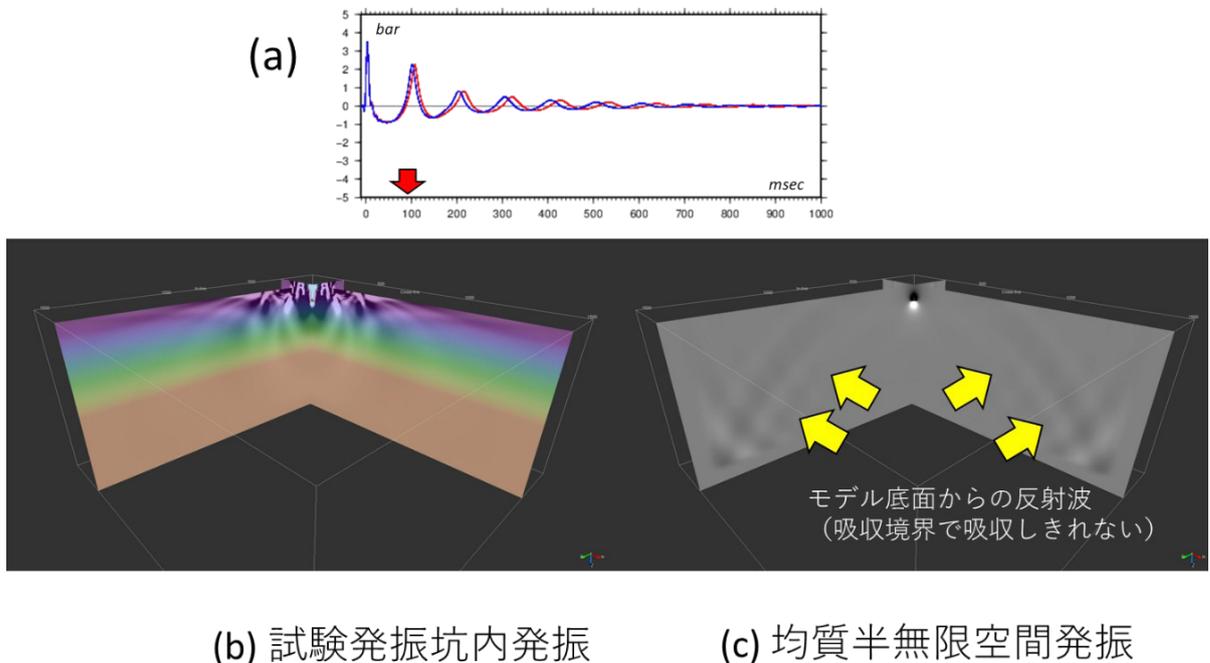


Fig. 27 The snapshot of the vertical ground velocity at 90 ms after the shot at 8.7 m depth with 2000 psi. Denser color indicates larger velocity. (a) Near field pressure history, (b) The pit shooting, (c) half space shooting (the reservoir shooting equivalent). Yellow arrows in (c) indicate artifact reflections.

る傾向が見られた。全ての観測波形を重合した結果では振源距離 6.55 km 地点まで発振波形が認められ、20 kg ダイナマイトと同等の S/N が提供されたが、観測波形の伸長部分では水平動成分の振動が卓越しているとともに伝播速度の遅い波で構成されていた。振源距離の大きい観測点ほど観測波形の継続時間は伸長する傾向があった。観測記録では振源距離にかかわらず走時の遅い水平動成分が顕著であることから、今回の試験発振水槽発振では当初期待された下方に放射される P 波そのものよりも表面波等の発生が顕著であった。

合計 20 回の発振作業を実施したのちに水槽内壁調査を行った。水槽内壁には垂直走向の亀裂が卓越して発生しており、エアガン設置位置にのみ水平方向の亀裂が見いだされた。エアガンから 3.3 m 以上の距離では水槽内壁損傷が生じていないことが確認された。このことからエアガン発振にともなう近接効果はエアガン中心から約 3 m の範囲内にとどまると推察され、水位観測結果から亀裂は動作圧 1500 psi 発振時に生じたと考えられる。

一方黒神観測室構内の地下の軽石層中に設置した発振水槽におけるエアガン発振の波形シミュレーションからは、発振水槽水中の最大圧力が半無限水中におけるその 15 倍に達すること、発振エネルギーの大部分は水槽内の共鳴と表面波に分配される傾向があり、発振水槽から下方に放射されるエネルギーは半無限水中における発振より相対的に小さくなること、あきらかになった。またこのエネルギー分配は今回建造した発振水槽から外側にエネルギーが出て行きにくいことを示すものである。すなわち発振水槽中の水層の音響インピーダンスが発振水槽周囲の軽石層のその約 15 倍に達することによって、1 回の発振パルスに対して外側に約 6% 程度のエネルギーしか伝わらず残りの 94% は発振水槽内に残留してしまうのである。これが水槽内における過大な最大圧力をもたらしていると考えられる。さらに発振水槽内に残留するエネルギーは水槽内壁における反射を重ねながら時間をかけて周囲にエネルギーを伝えることによって散逸してゆくことになり、これが波形継続時間の伸長をもたらしていると考えられる。

このことから黒神観測室構内は発振水槽内とのインピーダンスコントラストが大きく、試験発振水槽に不向きな弾性的性質をもつ地層を有していたと結論される。

以上のことから新規発振水槽を建造する場合にはその口径は最小でも 6 m が必要である。発振水槽の内壁に靱性の高い鋼板を用いることに加えて漏水対策も必要であろうと考えられる。さらに発振水槽縦断面形状および横断面形状はより単純な形状を選択するべきであるとする。さらに発振水槽中の共鳴を小さくするために発振水槽内外のインピーダンスコントラストを小さくできる地層を発振水槽建造地にえらぶべきであるとする。

謝辞

本研究の経費は令和 5 年度原子力規制庁原子力施設等防災対策等委託費（火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究）を用いて実施した。株式会社ジオシスの皆様にはエアガン発振・観測作業全般にわたりお世話になった。また水槽の建造は株式会社村山組が実務と施工を担当した。黒神観測室構内の水槽位置の測量も同社が行った。また中域観測の観測点 KUR2 の設置にあたり鹿児島市立黒神小学校 校長 富永章文氏には学校敷地の利用にあたり便宜を図っていただいた。また振源波形の到達距離の評価には京都大学防災研究所火山防災研究センターの教職員が維持する常設観測点を利用した。最後に実験の実施にあたり黒神地域の地元住民の皆様のご理解とご協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 宇都浩三・味喜大介・内海茂・石原和弘 (1999): 桜島火山ボーリングコアの K-Ar 年代と古地磁気測定。京都大学防災研究所年報, 42, pp. 27-34.
- 小林哲夫・味喜大介・佐々木 寿・井口正人・山元孝広・宇都浩三 (2013): 桜島火山地質図 (第 2 版)。産業技術総合研究所地質調査総合センター。
- 竹内 均 (1969): 大学演習弾性論, 裳華房, 198pp.
- 筒井智樹・井口正人・為栗 健・他 33 名 (2010): 桜島火山における反復地震探査 (一回目), 京都大学防災研究所年報, 53B, pp. 241-259.
- 筒井智樹・井口正人・為栗 健・他 33 名 (2011): 桜島火山における反復地震探査 (2010 年観測), 京都大学防災研究所年報, 54B, pp. 195-208.
- 筒井智樹・井口正人・為栗 健・他 35 名 (2013): 桜島

- 火山における反復地震探査 (2012 年観測), 京都大学防災研究所年報, 56B, pp. 207-220.
- 筒井智樹・井口正人・中道治久・為栗 健・他 45 名 (2014): 桜島火山における反復地震探査 (2013 年観測), 京都大学防災研究所年報, 57B, pp. 138-149.
- 筒井智樹・木尾竜也・多田悠也・菅原瑠一・中道治久・下司信夫・棚田嘉博・小林哲夫 (2025): 京都大学防災研究所黒神観測室構内の表層構造, 京都大学防災研究所年報, 68B, 投稿中.
- 筒井智樹・為栗 健・味喜大介・井口正人・篠原雅尚 (2021): 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, 64B, pp. 86-100.
- 筒井智樹・味喜大介・為栗 健・井口正人 (2023): 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, 京都大学防災研究所年報, 66B, pp. 87-95.
- 味喜大介 (1999): 古地磁気方位・強度測定による桜島の溶岩流の年代推定. 火山, 44, pp. 111-122.
- Urlick, R. J. (1967) Principles of underwater sound, McGraw-hill Inc., 414pp.

(論文受理日 : 2025 年 8 月 29 日)