

2.3.3. 詳細な地下構造及び副断層の 3 次元的な形状把握のための調査

2.3.3.1. 調査箇所の選定

調査箇所は本事業で実施した出ノロトレンチおよび小園トレンチに加えて、既往関連事業において実施された福原トレンチの計 3 箇所とした。実施する物理探査は地中レーダ探査とし、複数の周波数にて合計 84 測線実施した（表 2.3.3）。

表 2.3.3 調査測線一覧

調査位置	測線数				小計
	主測線			直交測線	
	25MHz	50MHz	100MHz	50MHz	
出ノロトレンチ	11	11	-	3	25
小園トレンチ	8	23	4	-	35
福原トレンチ	10	10	-	4	24
合計	28	44	4	7	84

2.3.3.2. 探査結果

(1) 出ノ口地区

出ノ口地区ではトレンチ調査位置周辺において 2m 毎の測線間隔でトレンチと並行方向（断層直交方向）に 25MHz および 50MHz のアンテナを用いて地中レーダ探査を行い、併せて設定した測線と斜交する方向（トレンチで確認されたチャネル構造に直交する方向）の追加探査を実施した。調査内容を以下より示す。

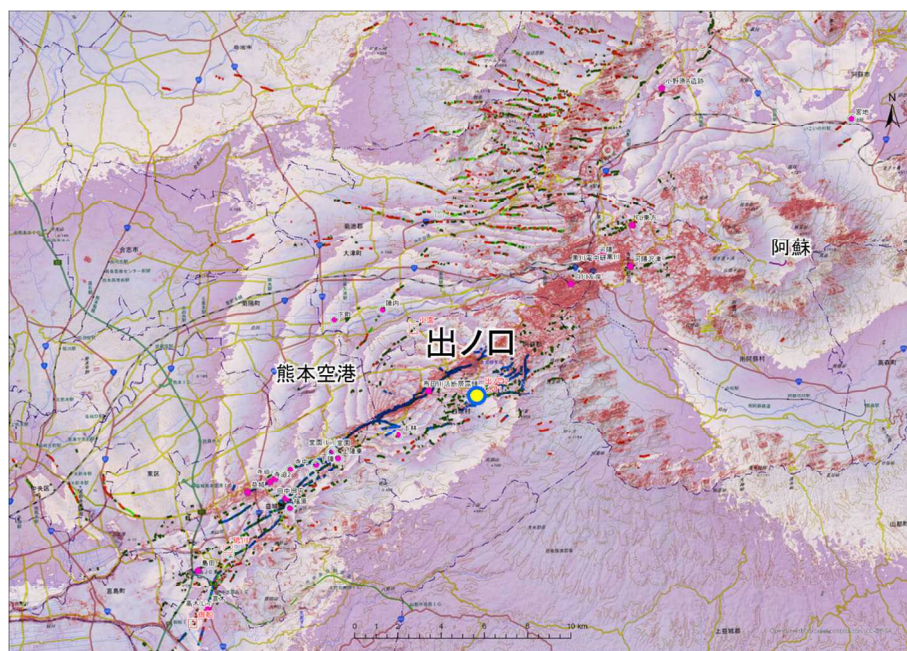


図 2.3.142 調査位置図（出ノ口）（再掲）

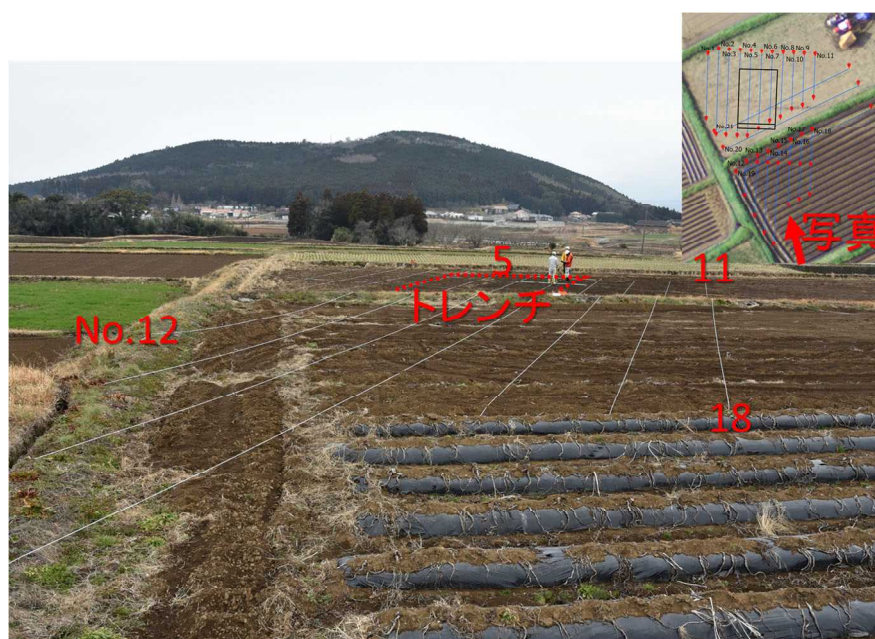


図 2.3.143 現地状況（出ノ口 詳細調査）

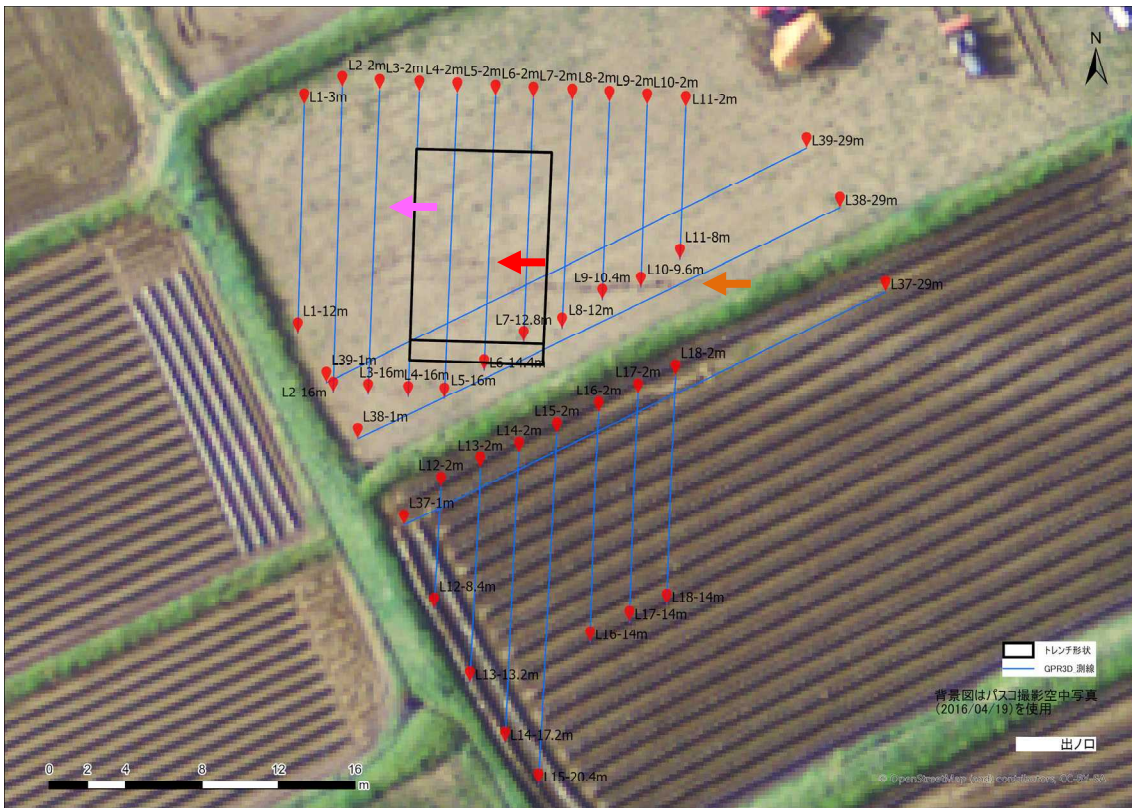


図 2.3.144 探査測線（出ノ口 詳細調査）

※パスコ撮影空中写真（2016/04/19）



図 2.3.145 出ノ口地区 探査結果 (50MHz)

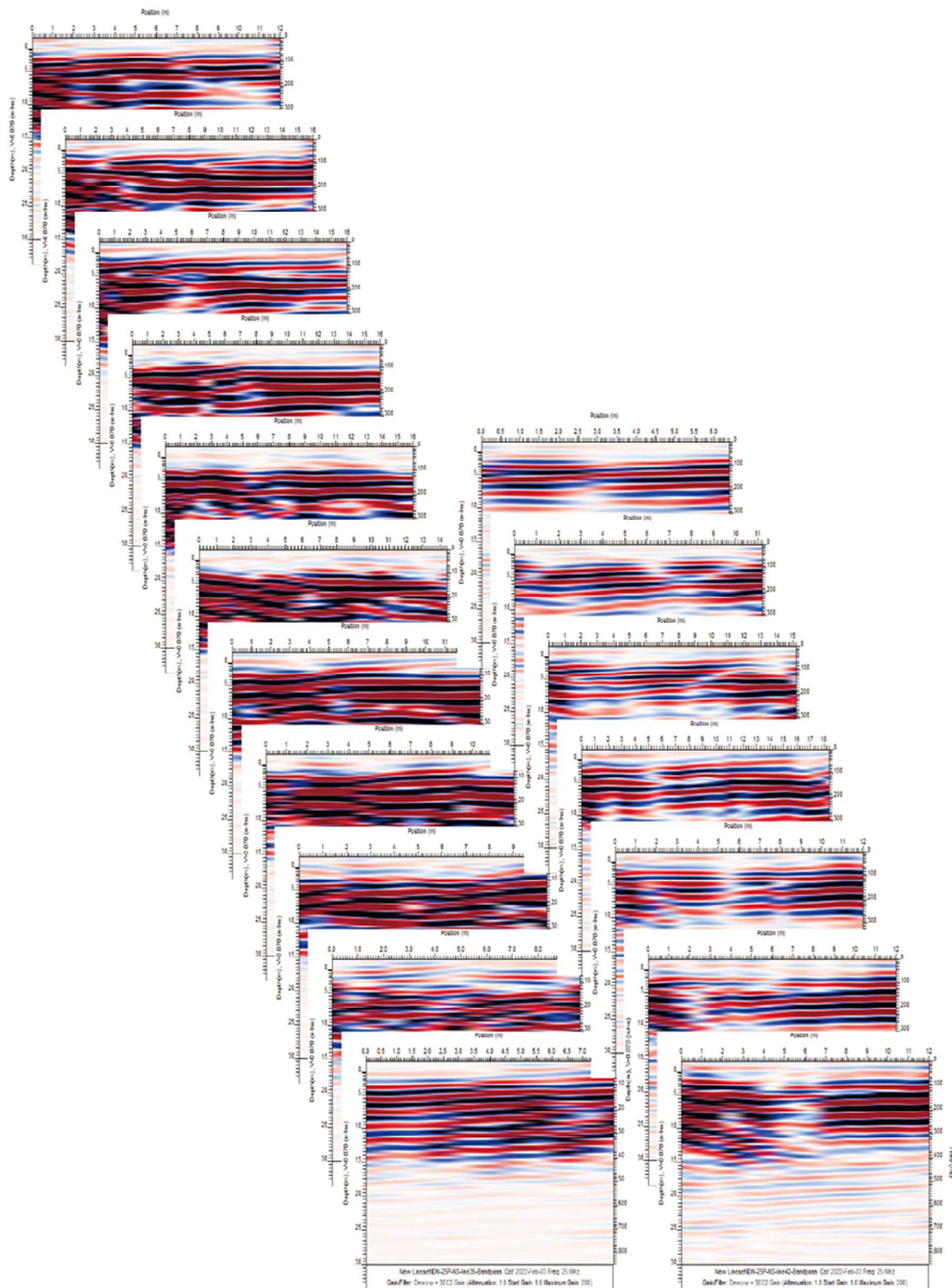


図 2.3.146 出ノ口地区 探査結果 (25MHz)

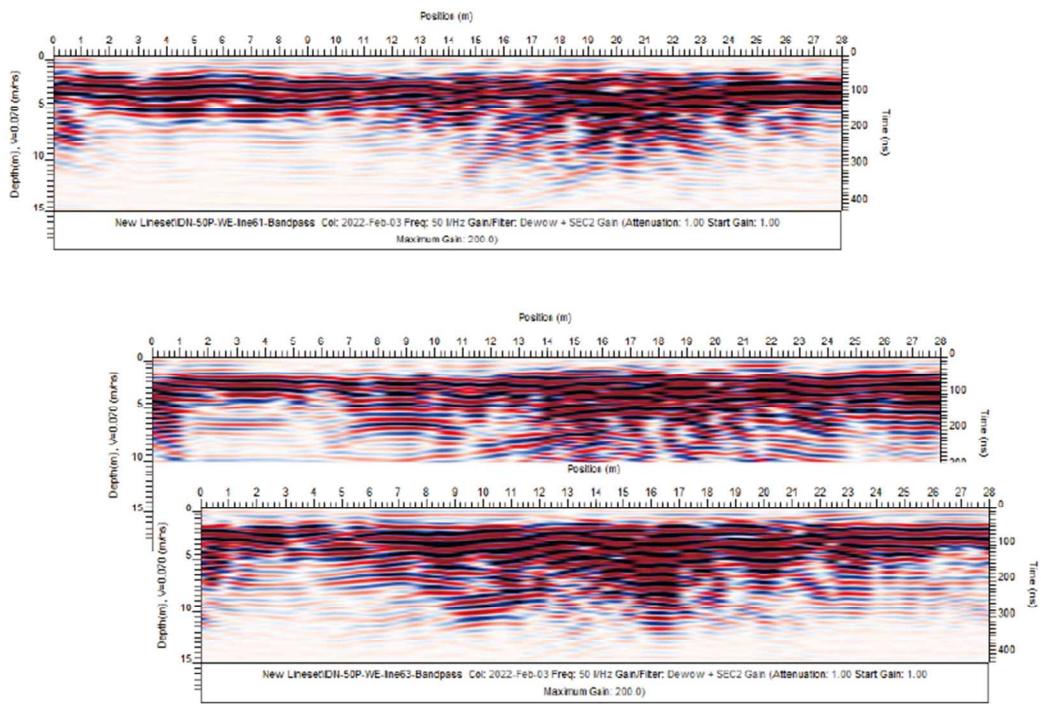
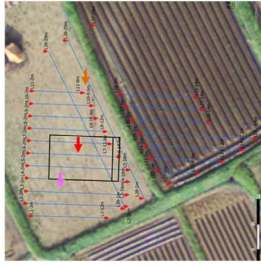
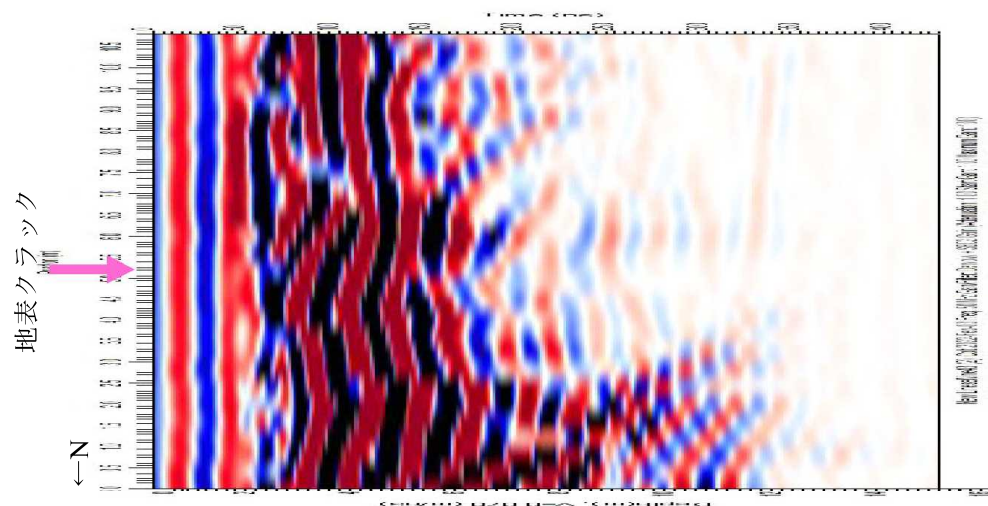
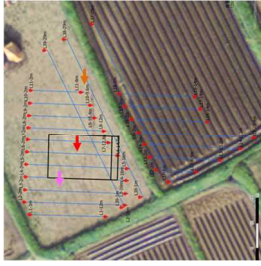
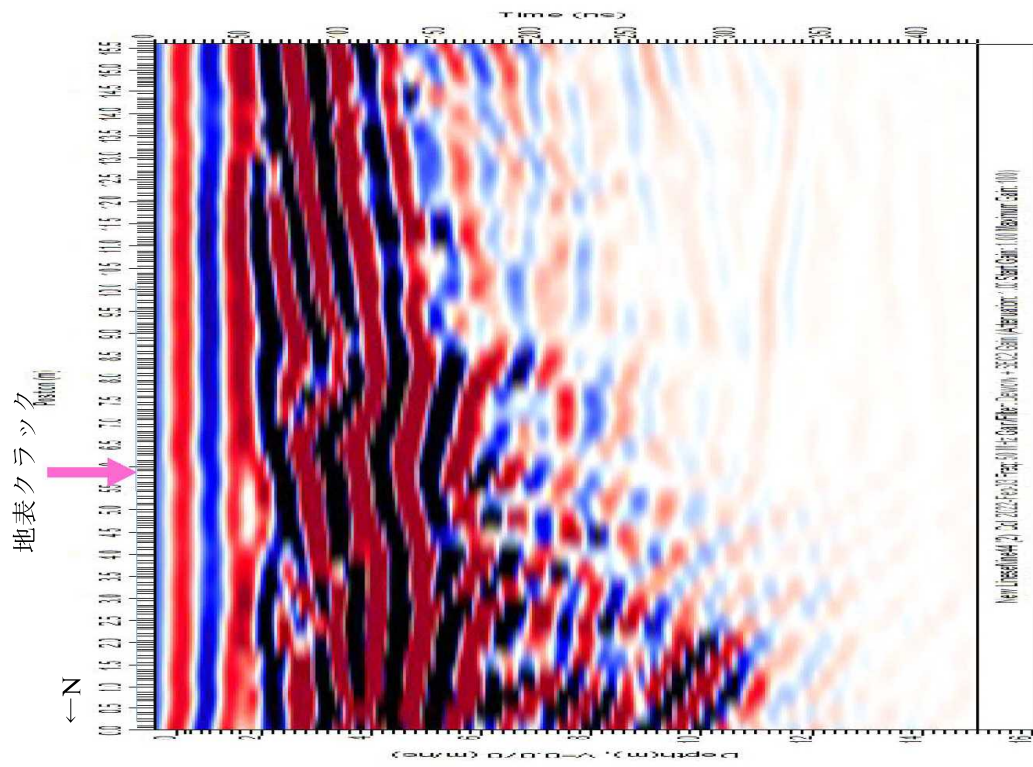


图 2.3.147 出ノ口地区 探查結果 (50MHz) 直交方向測線



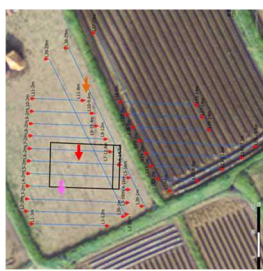
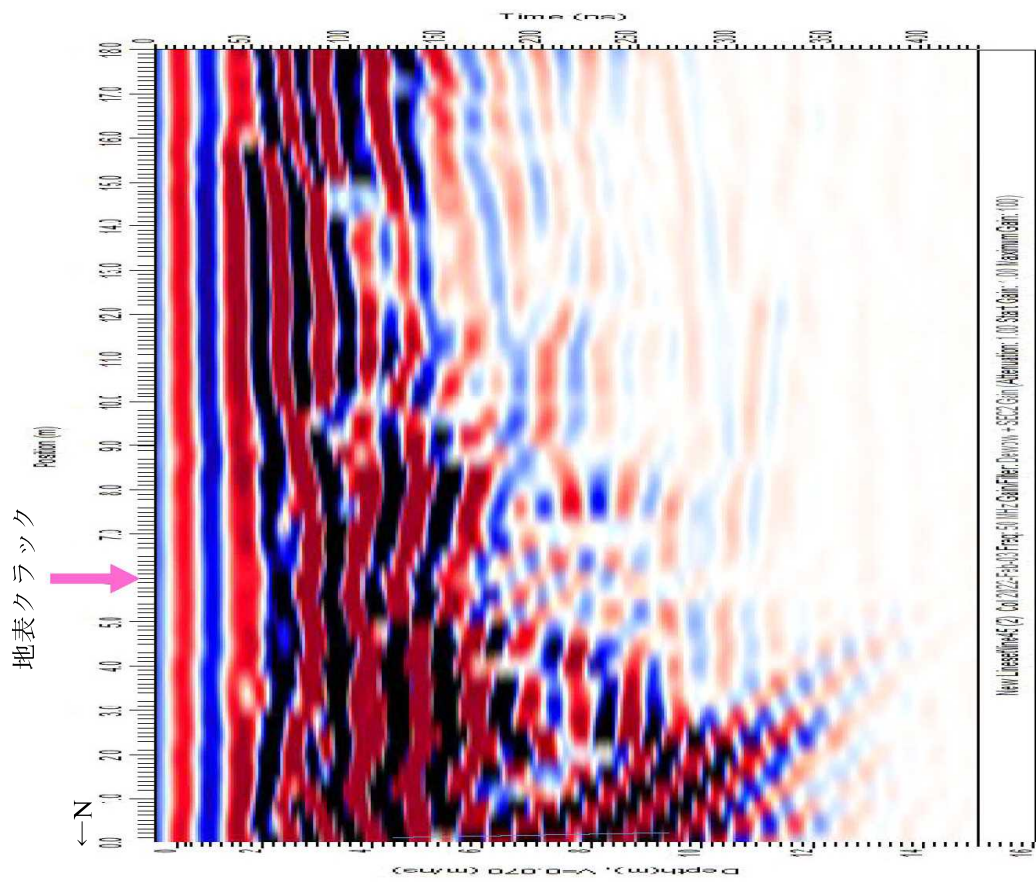
位置図 (GPR 探査結果中のクランクの色と対応)

図 2.3.148 出ノ口地区 探査結果 (50MHz) L1



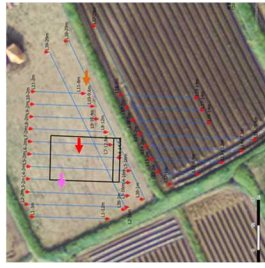
位置図 (GPR 探査結果中のクラックの色と対応)

図 2.3.149 出ノ口地区 探査結果 (50MHz) L2



位置図 (GPR 探査結果中のクラックの色と対応)

図 2.3.150 出ノ口地区 探査結果 (50MHz) L3



位置図 (GPR 探査結果中のクラックの色と対応)

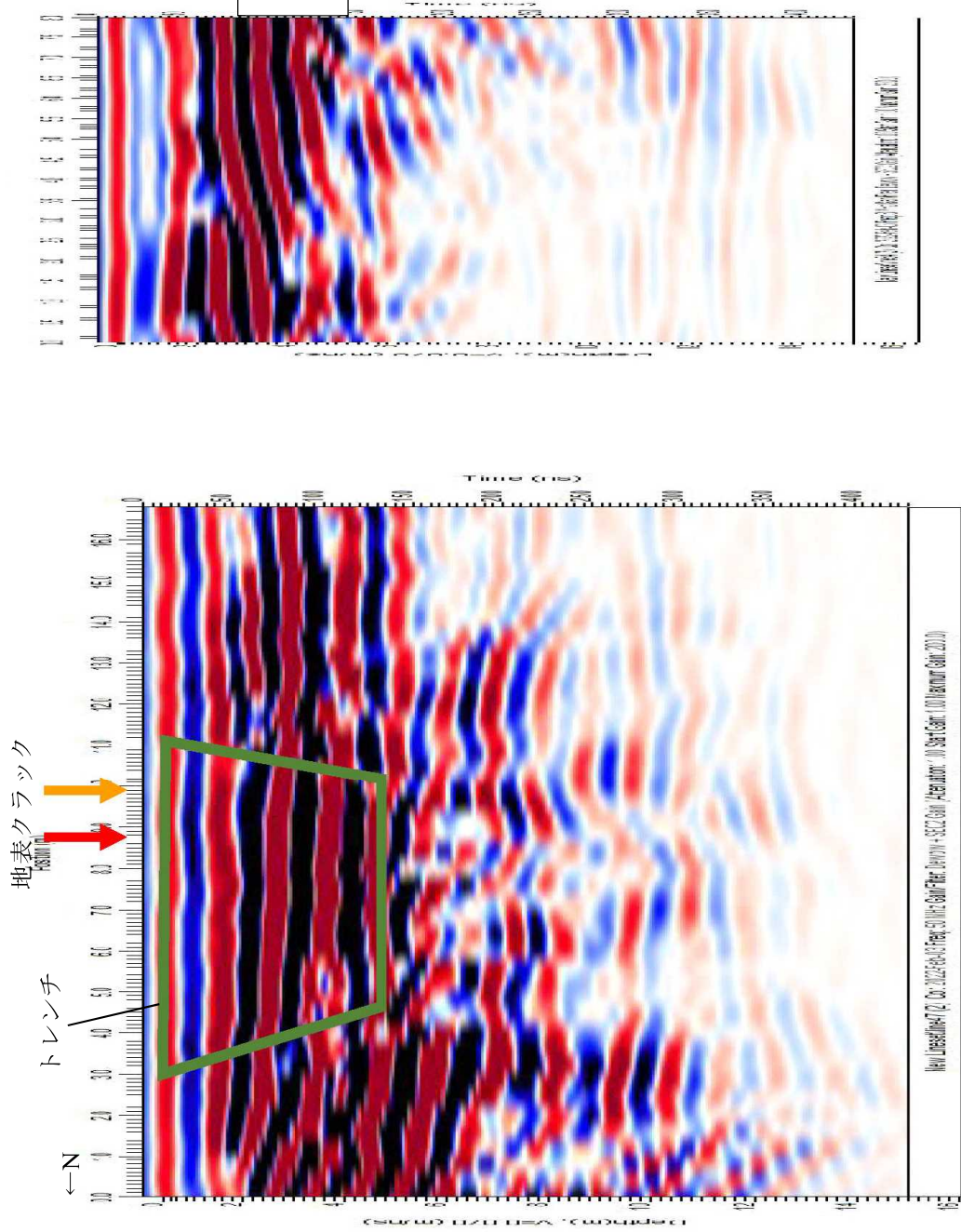
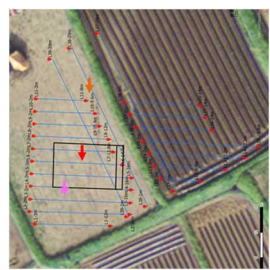
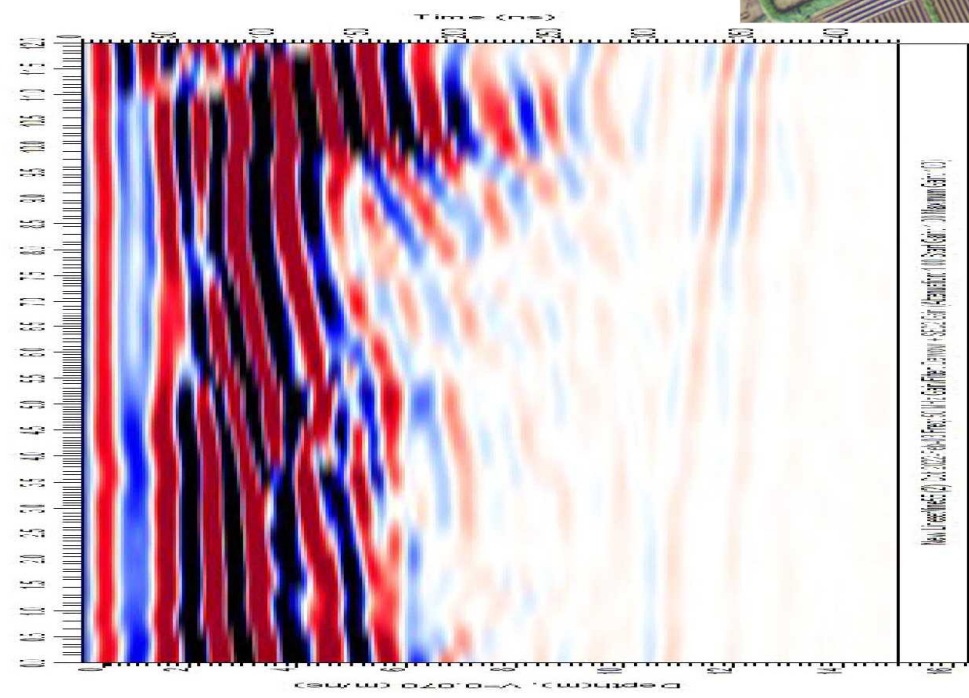
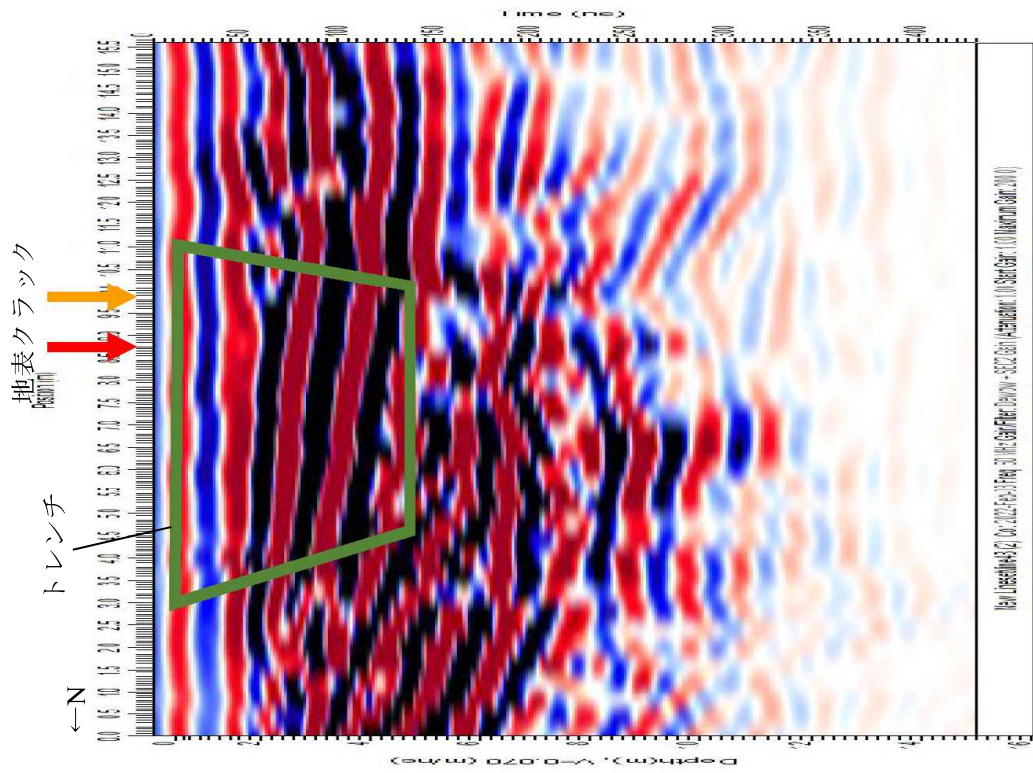
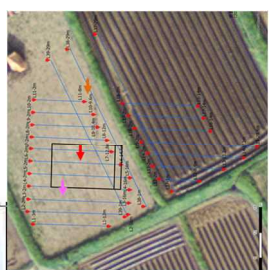
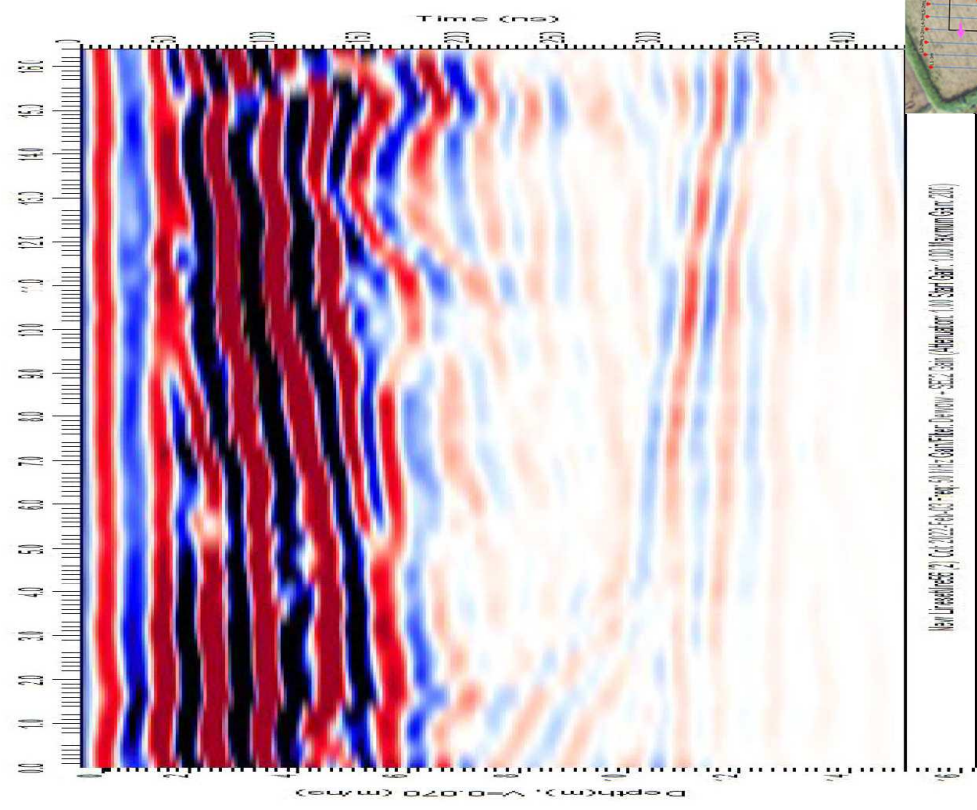
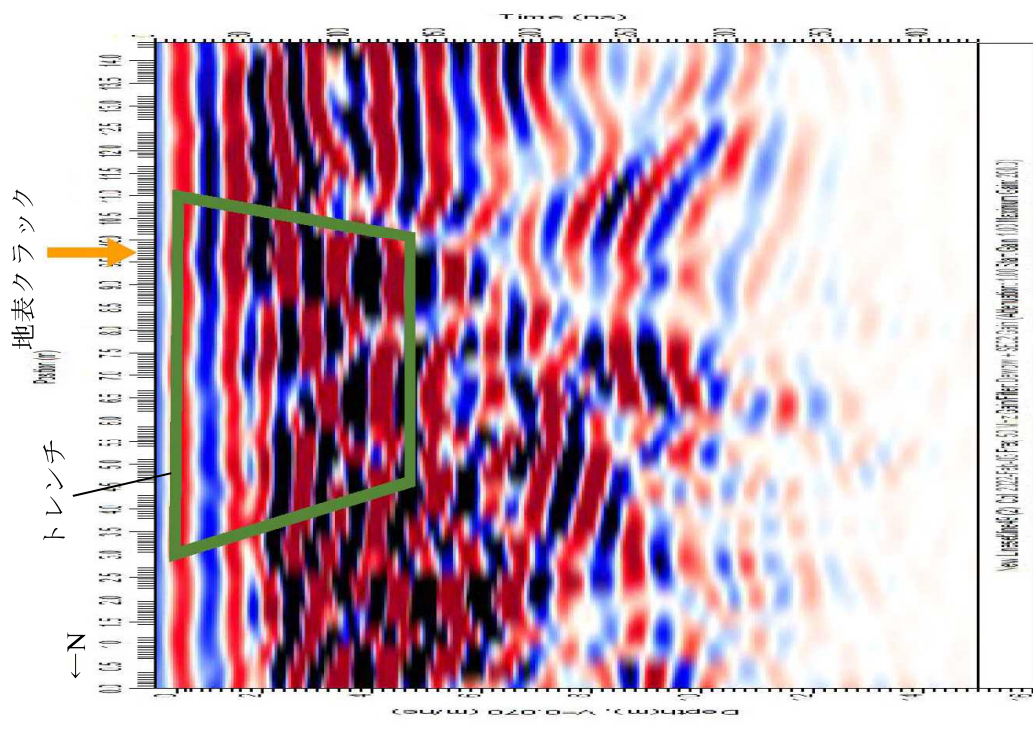


図 2.3.152 出ノ口地区 探査結果 (50MHz) L5-12



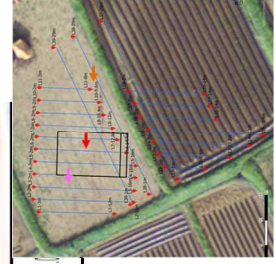
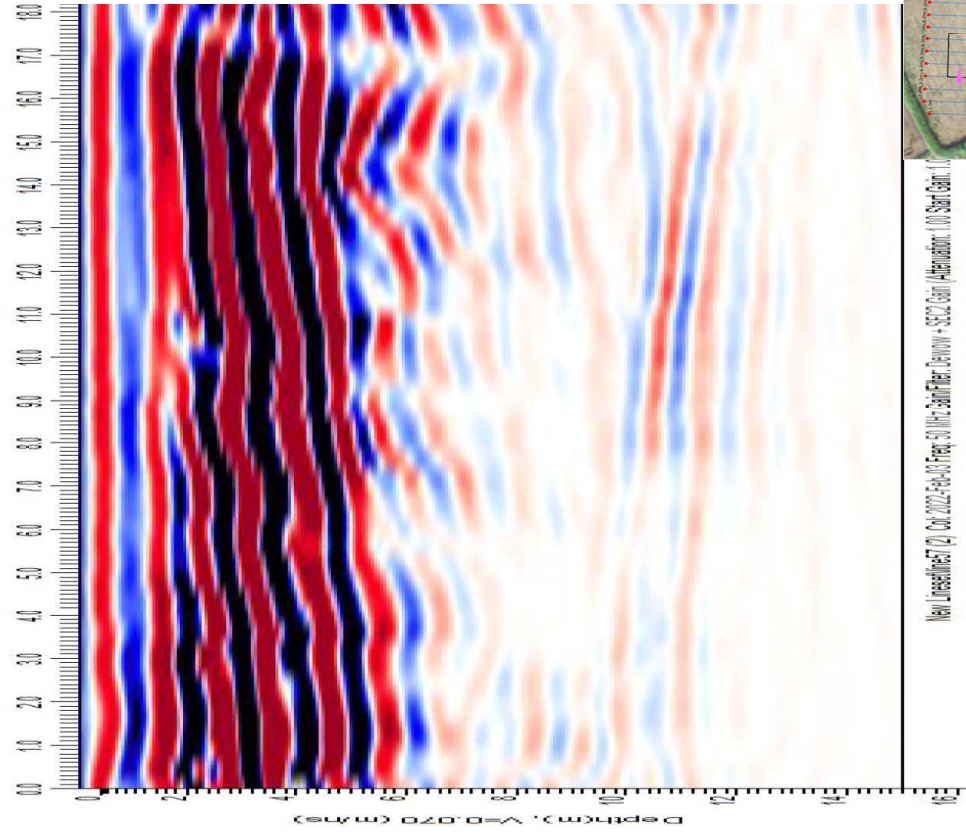
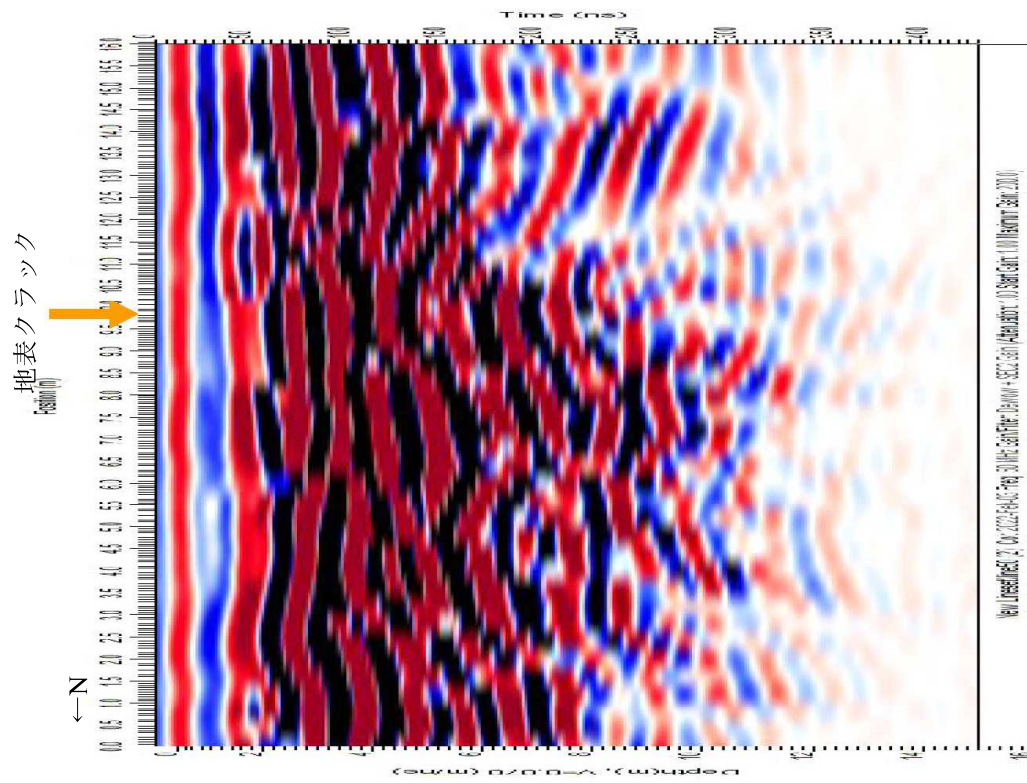
位置図 (GPR 探査結果中のクラックの色と対応)

図 2.3.153 出口地区 探査結果 (50MHz) L6-13



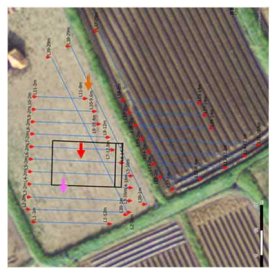
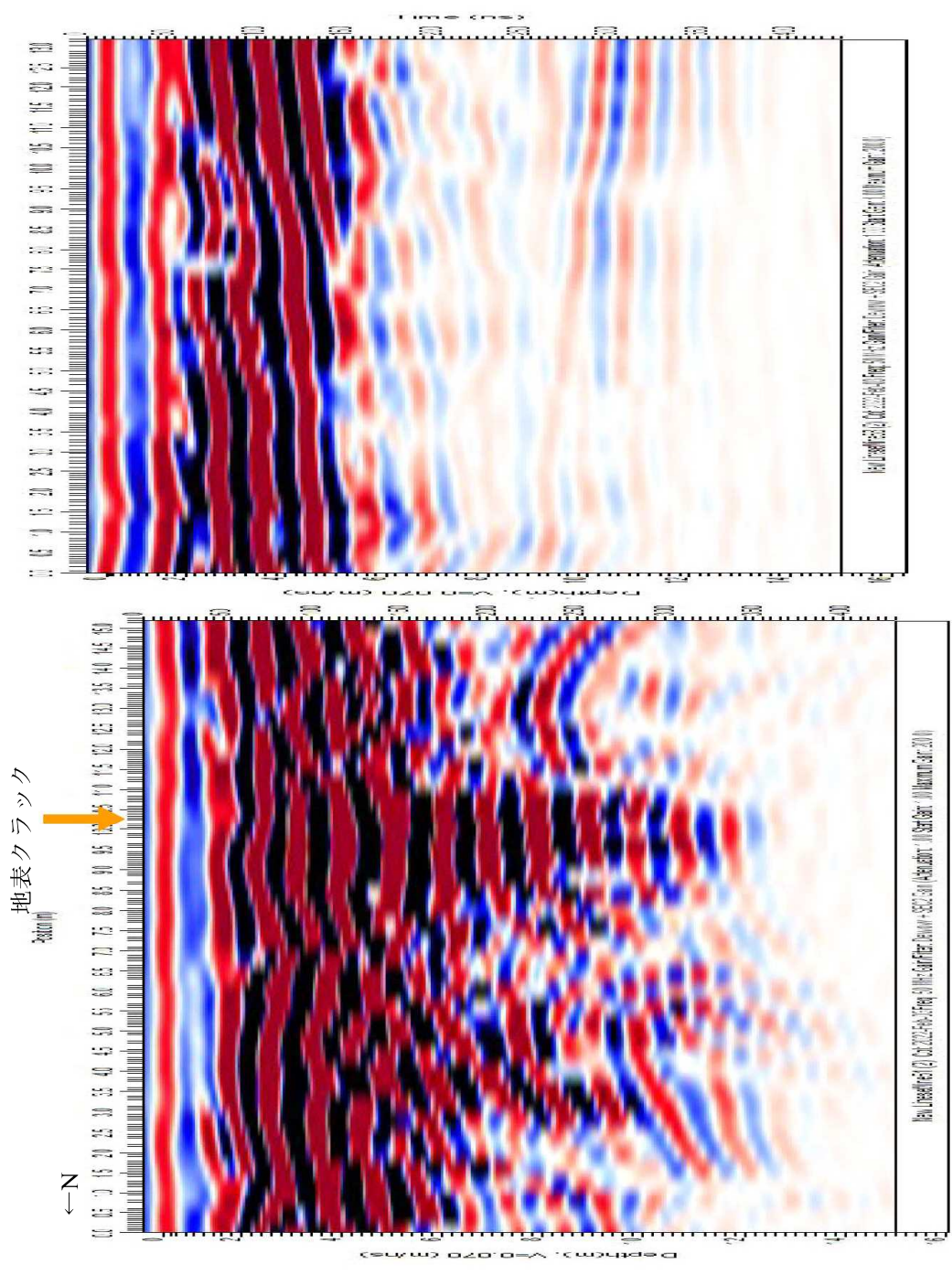
位置図 (GPR 探査結果中のクラックの色と対応)

図 2.3.154 出ノ口地区 探査結果 (50MHz) L7-14



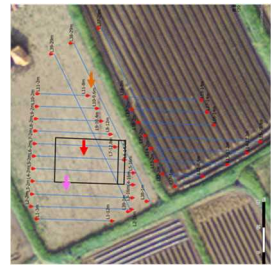
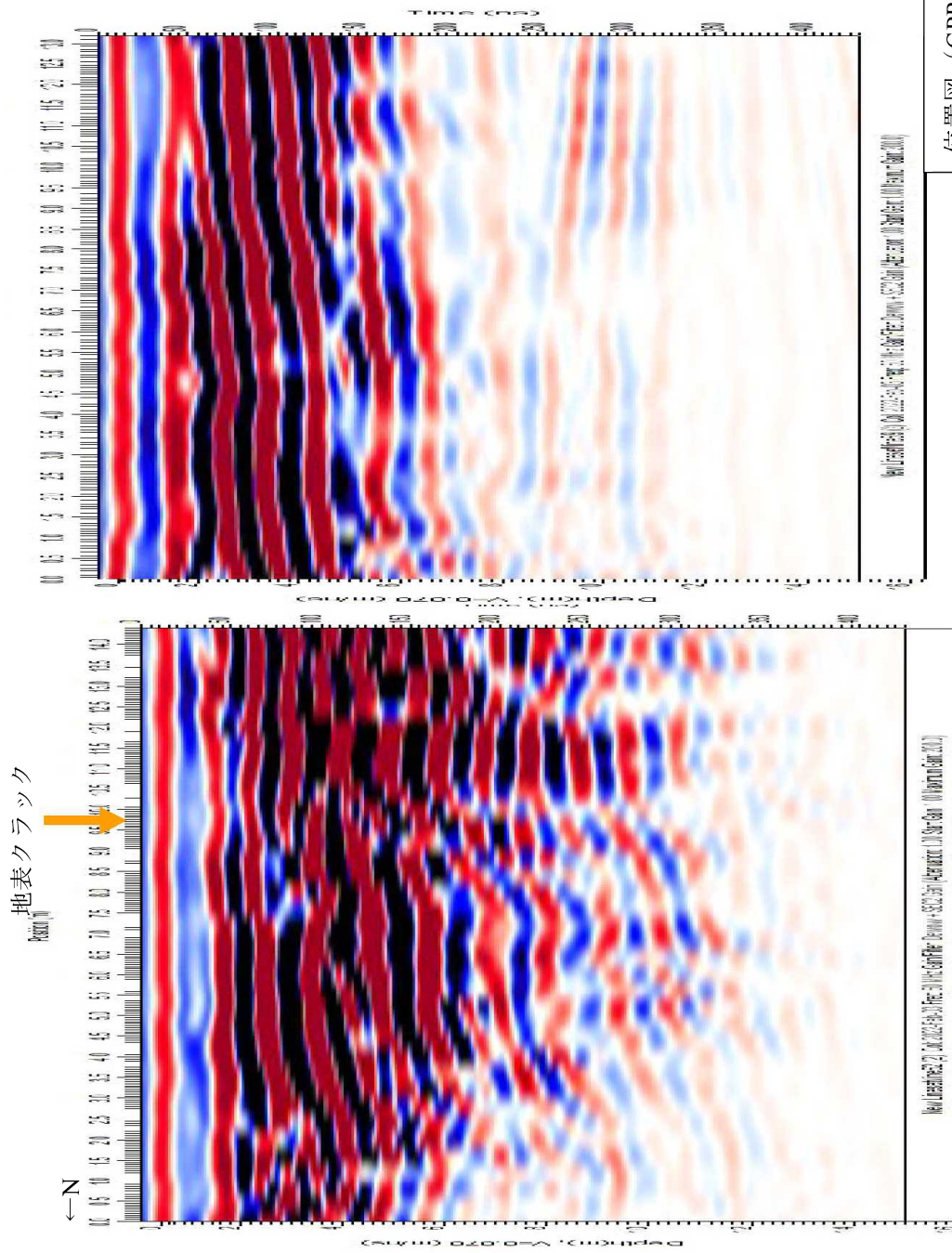
位置図 (GPR 探査結果中のクラックの色と対応)

図 2.3.155 出ノ口地区 探査結果 (50MHz) L8-15



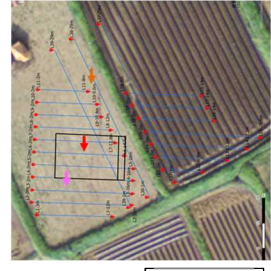
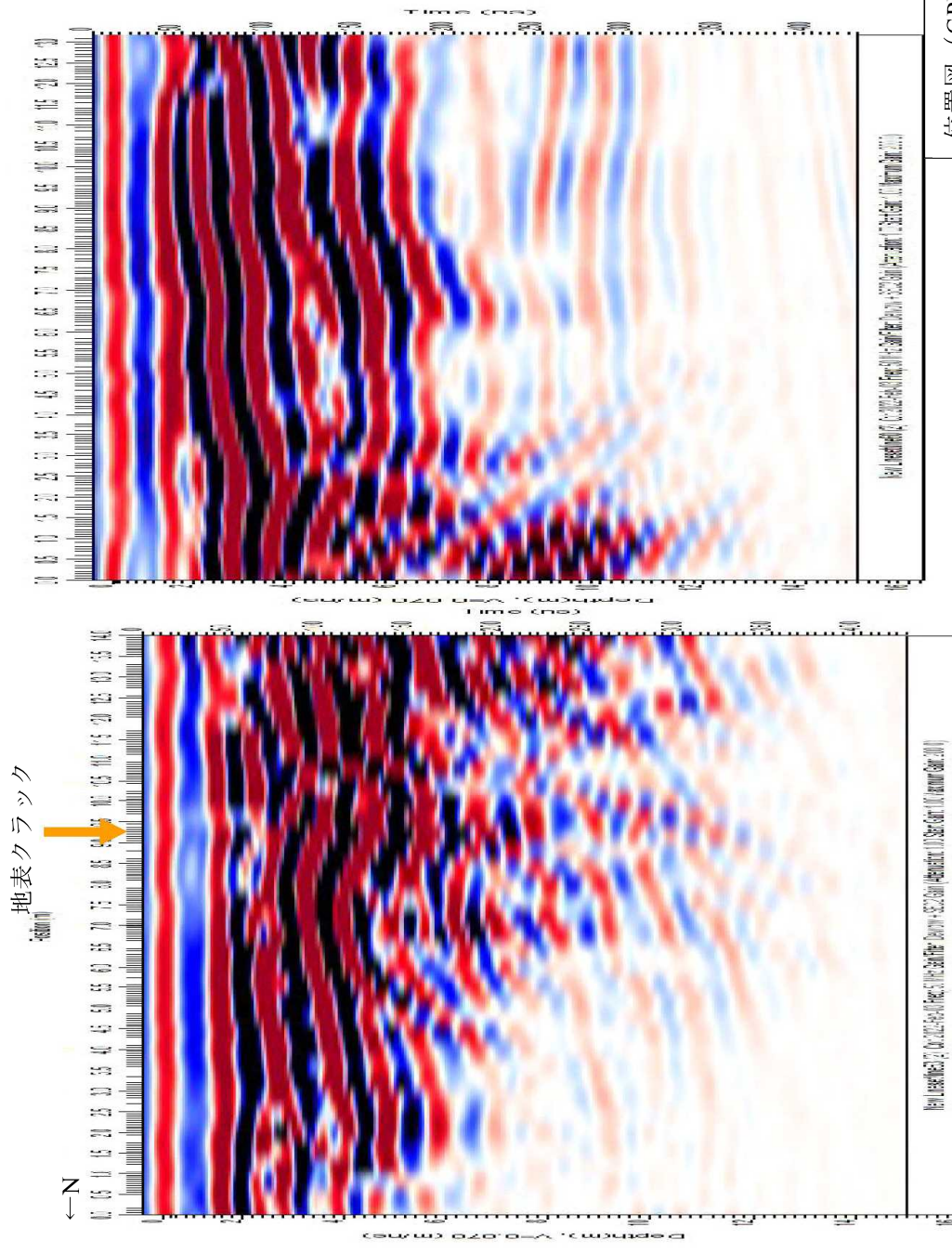
位置図 (GPR 探査結果中のクランクの色と対応)

図 2.3.156 出ノ口地区 探査結果 (50MHz) L9-16



位置図 (GPR 探査結果中のクラックの色と対応)

図 2.3.157 出ノ口地区 探査結果 (50MHz) L10-17



位置図 (GPR 探査結果中のクラックの色と対応)

図 2.3.158 出ノ口地区 探査結果 (50MHz) L11-18

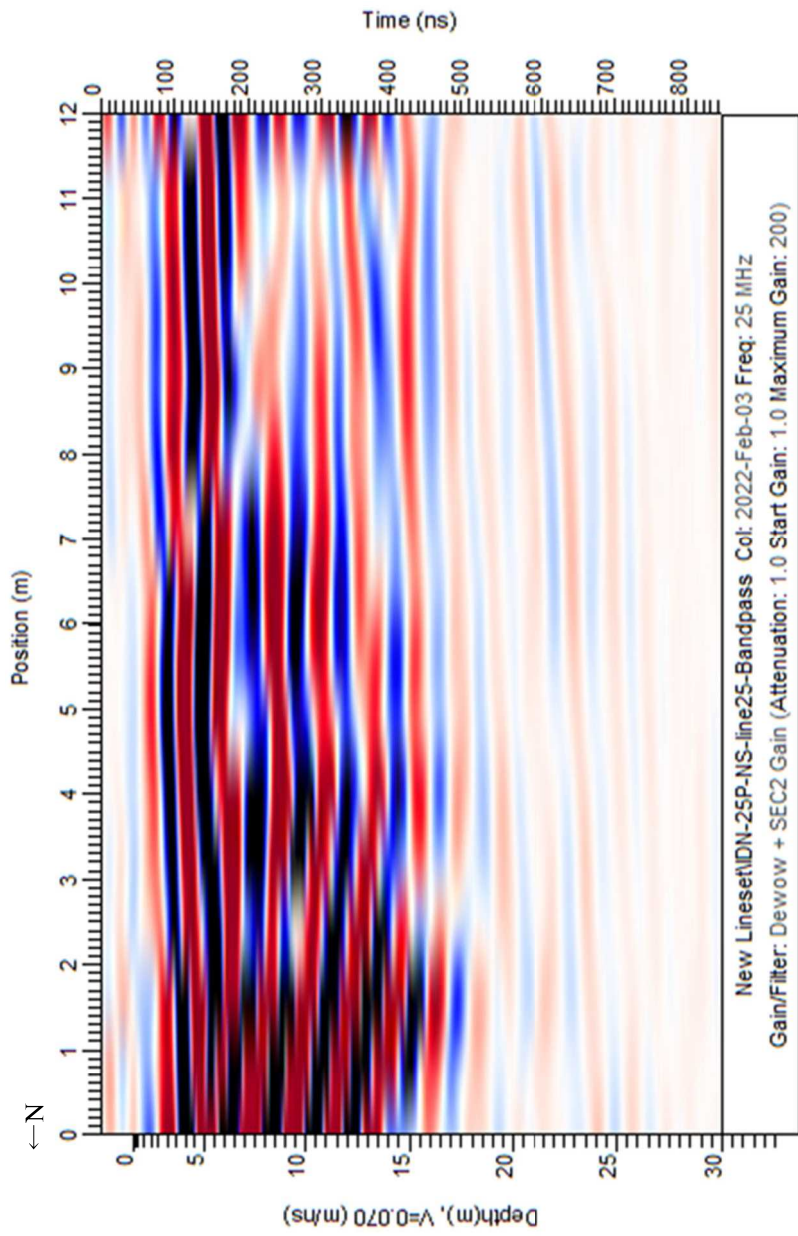


图 2.3.159 出ノ口地区 探查結果 (25MHz) L1

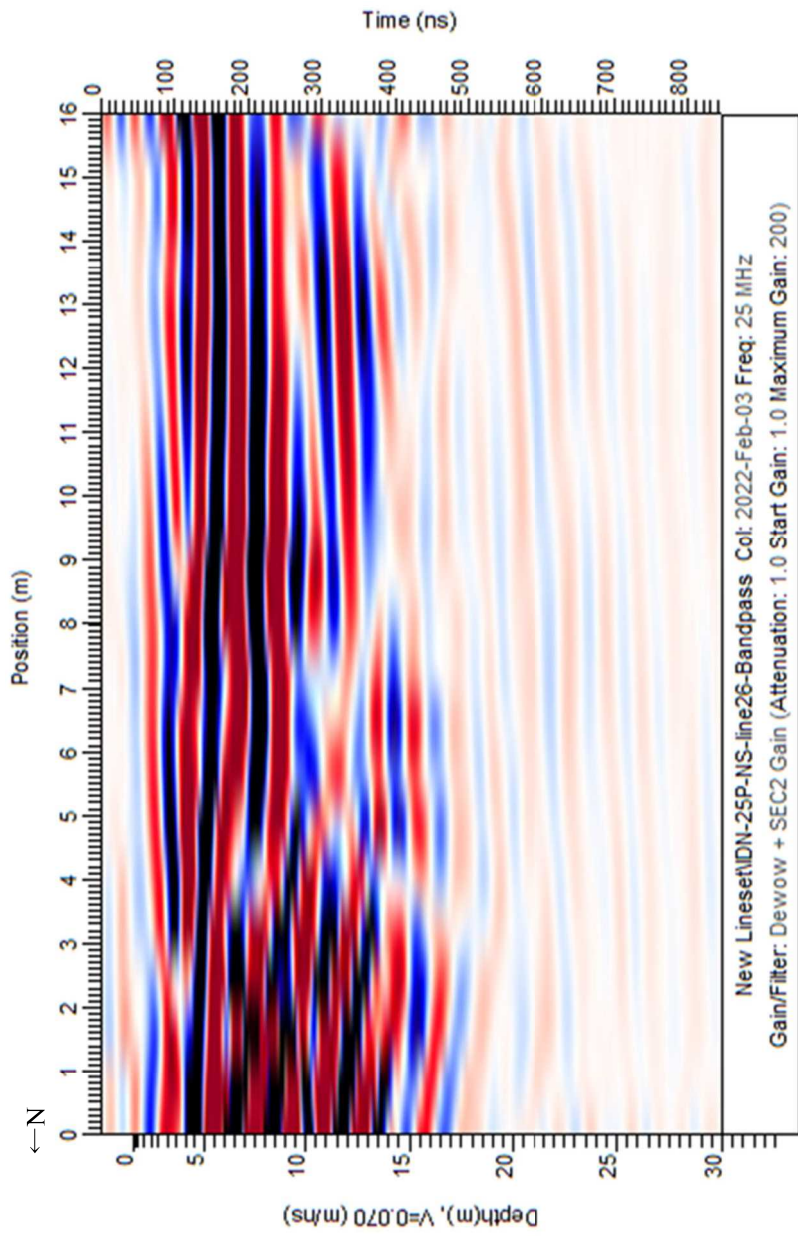


图 2.3.160 出ノ口地区 探查結果 (25MHz) L2

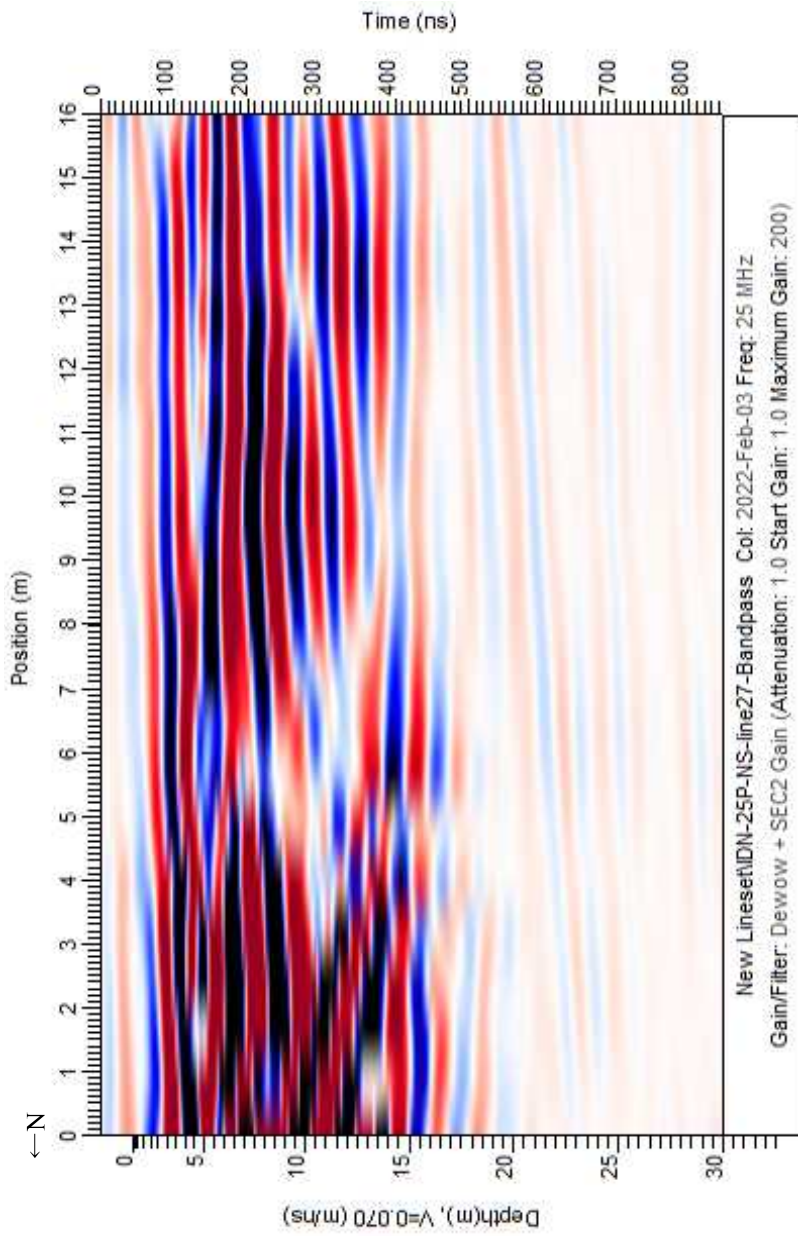


图 2.3.161 出ノ口地区 探查結果 (25MHz) L3

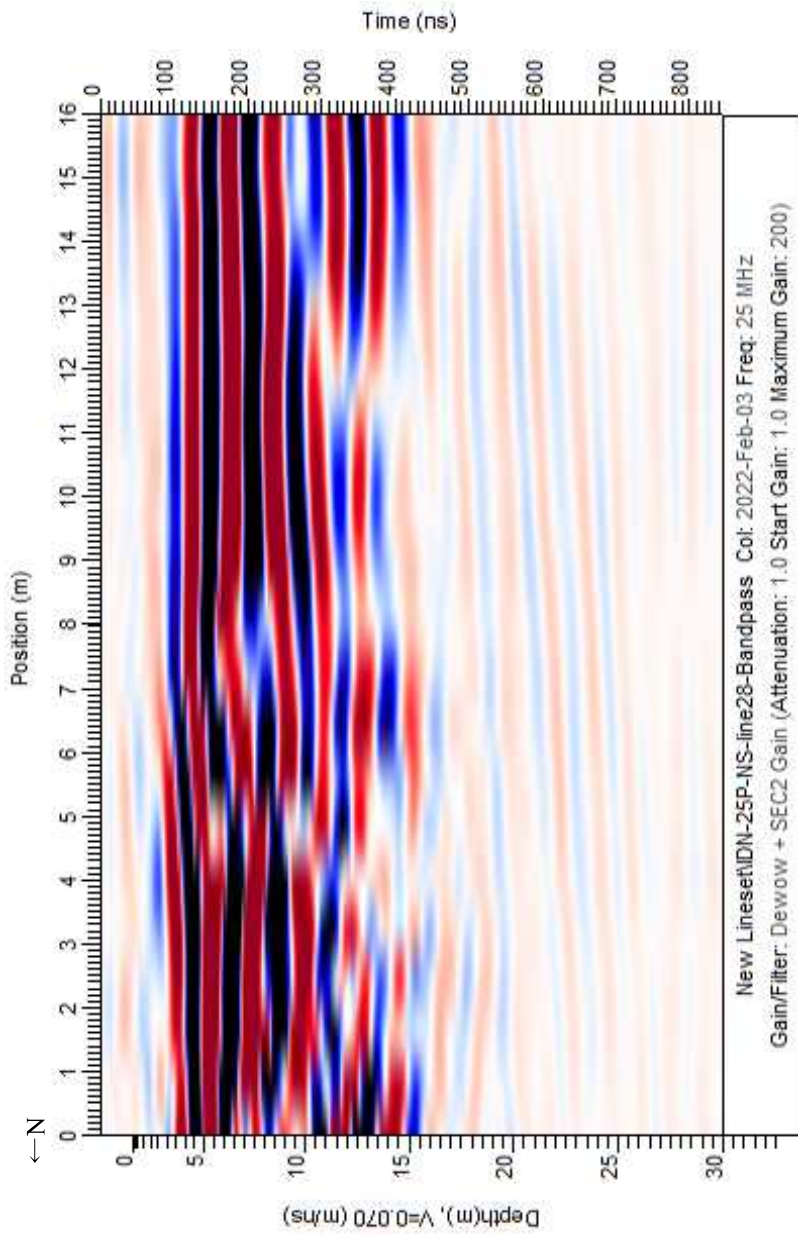


图 2.3.162 出ノ口地区 探查結果 (25MHz) L4

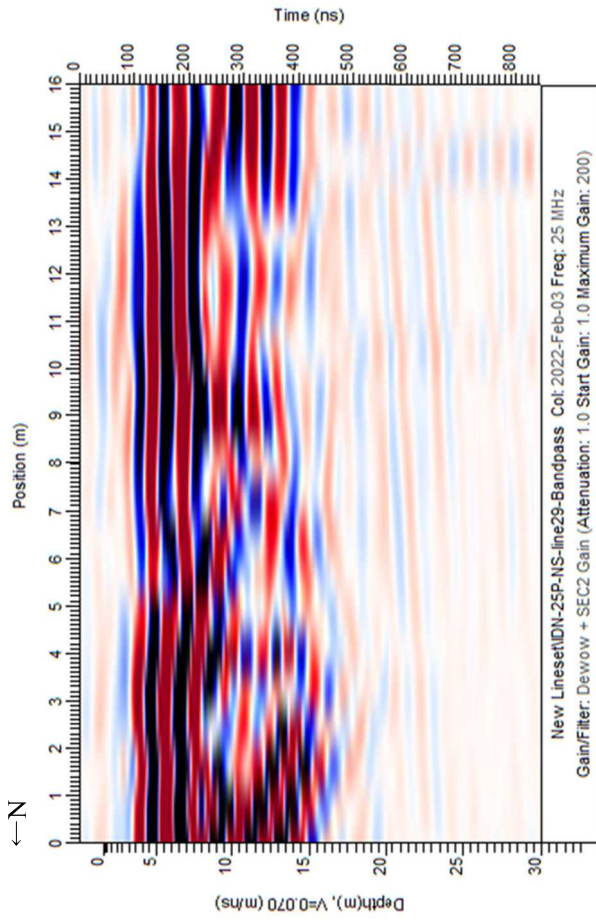
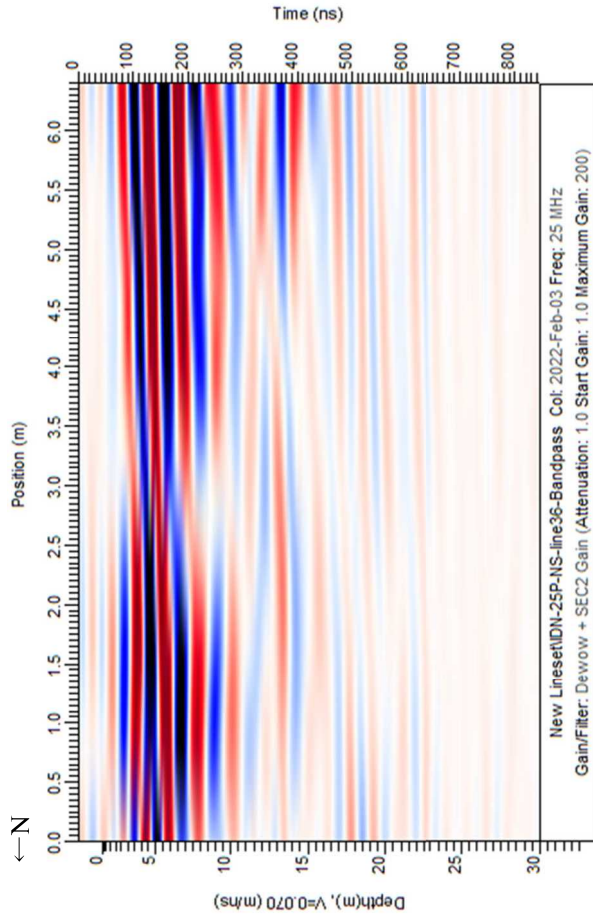


図 2.3.163 出ノ口地区 探査結果 (25MHz) L5-12

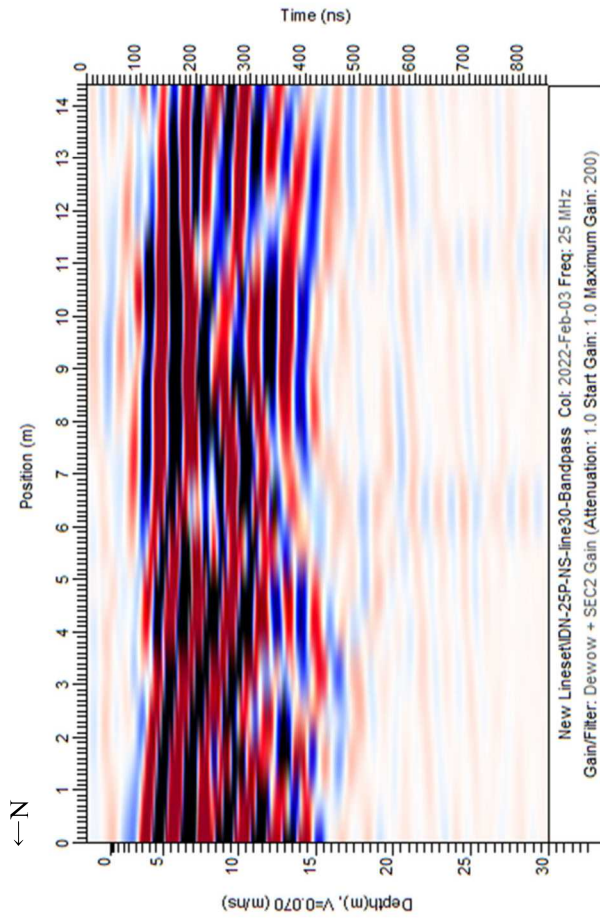
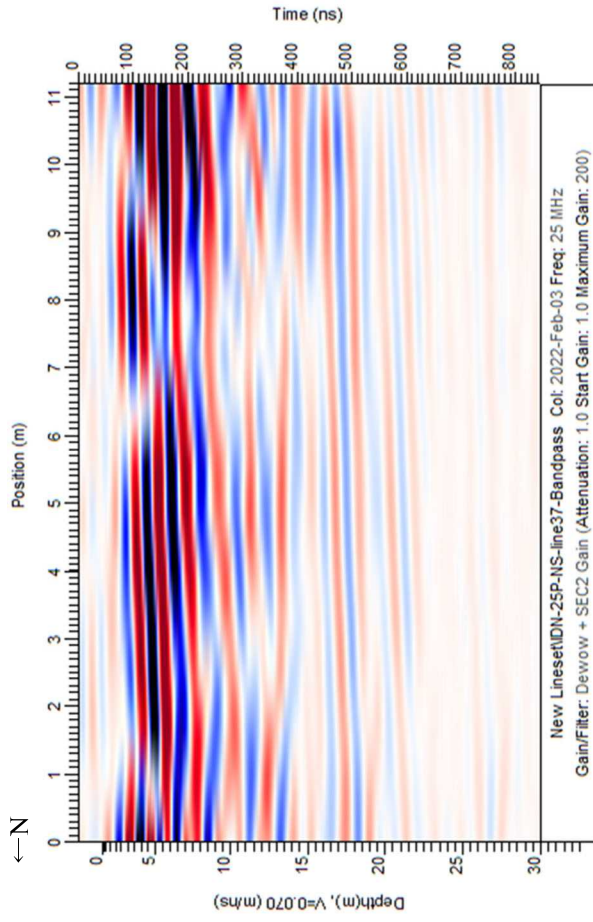


图 2.3.164 出ノ口地区 探查結果 (25MHz) L6-13

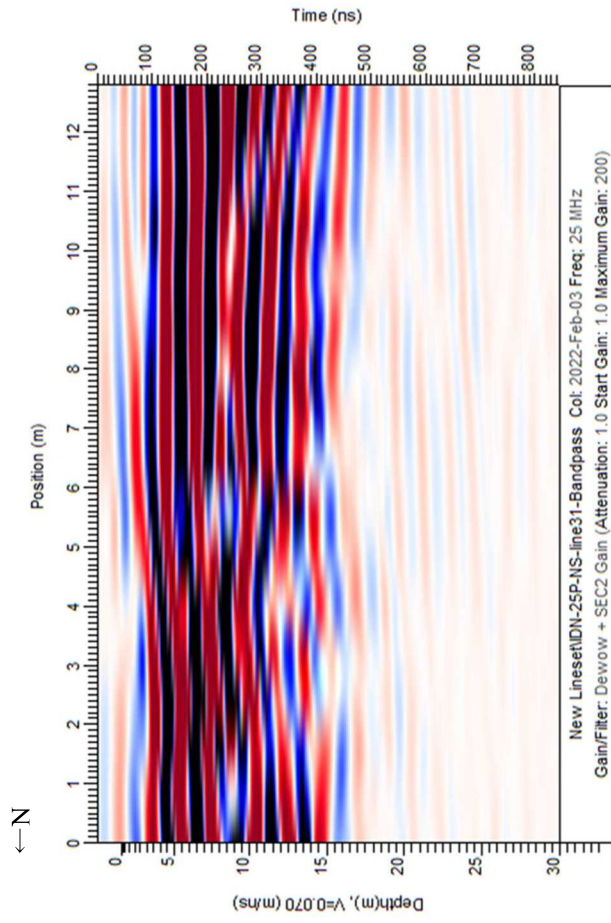
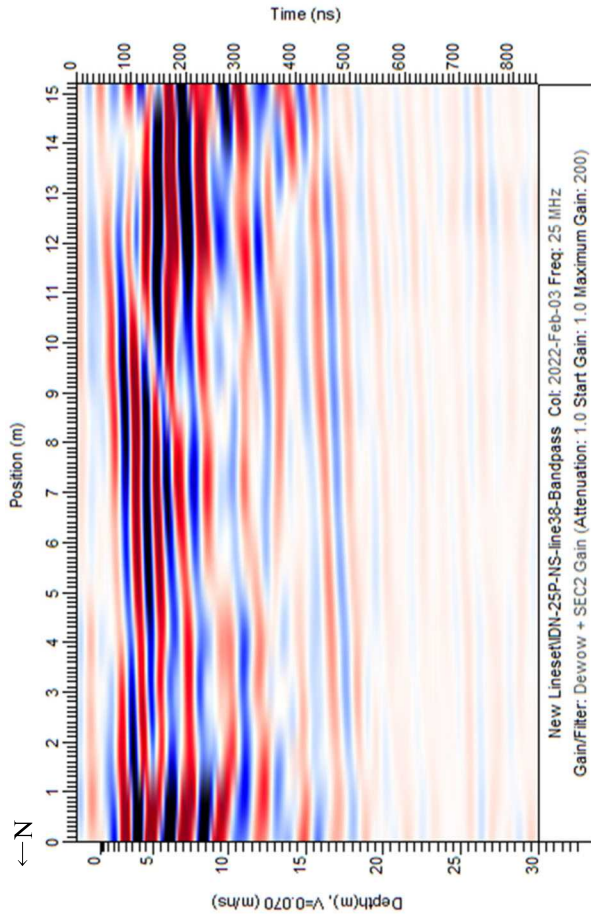


图 2.3.165 出ノ口地区 探查結果 (25MHz) L7-14

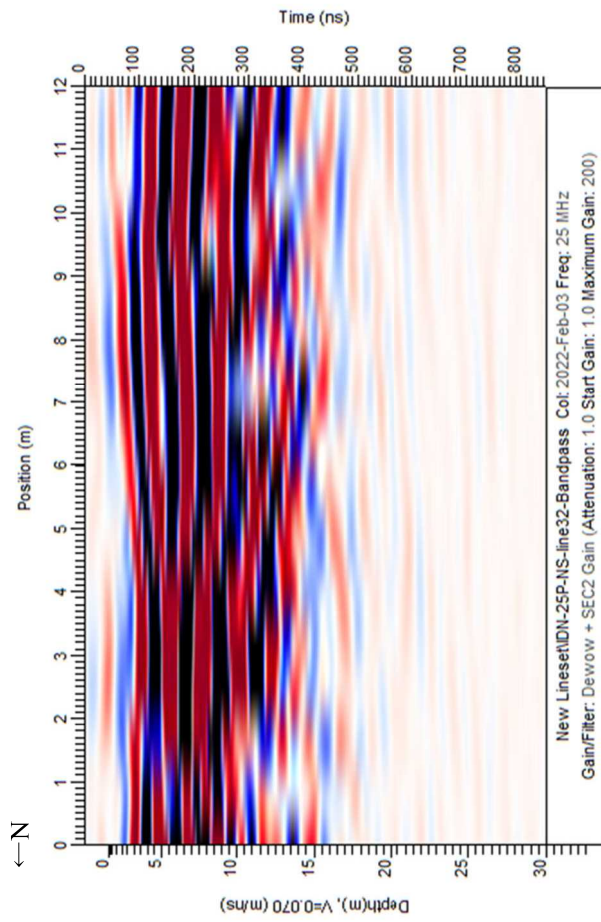
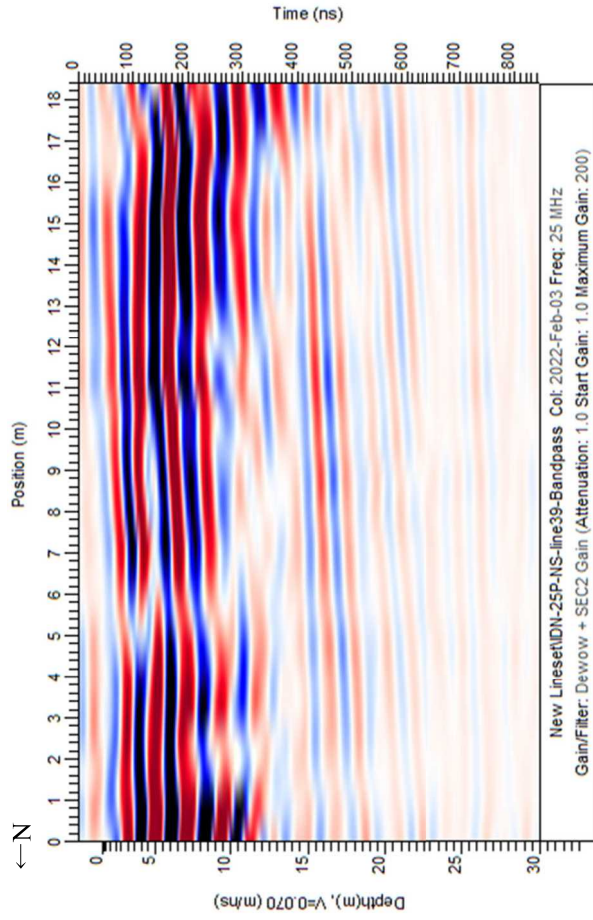


图 2.3.166 出ノ口地区 探查結果 (25MHz) L8-15

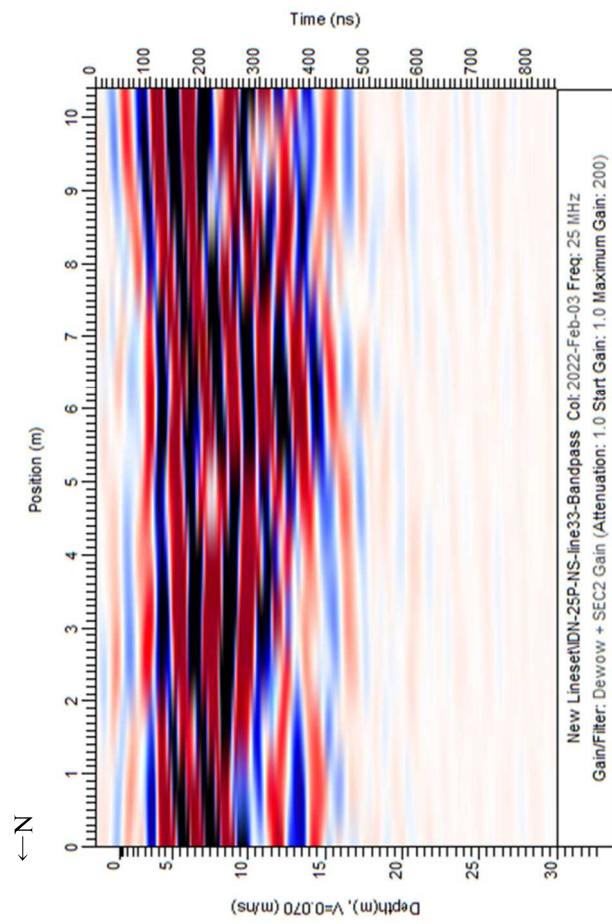
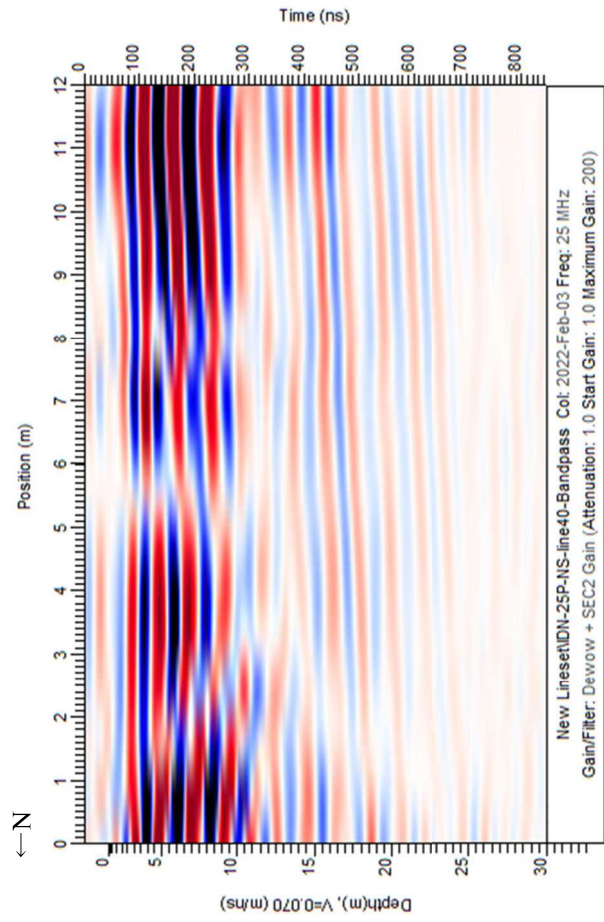


图 2.3.167 出ノ口地区 探查结果 (25MHz) L9-16

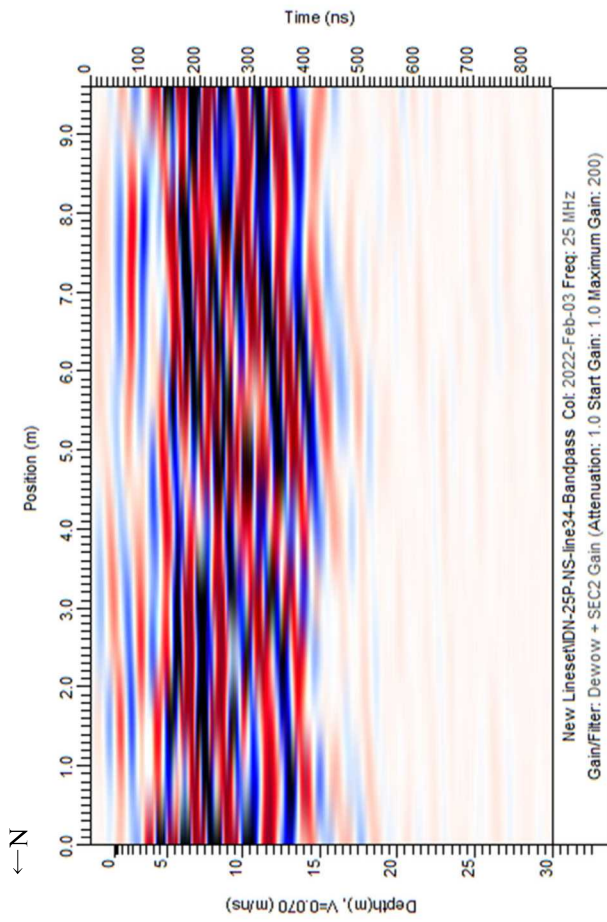
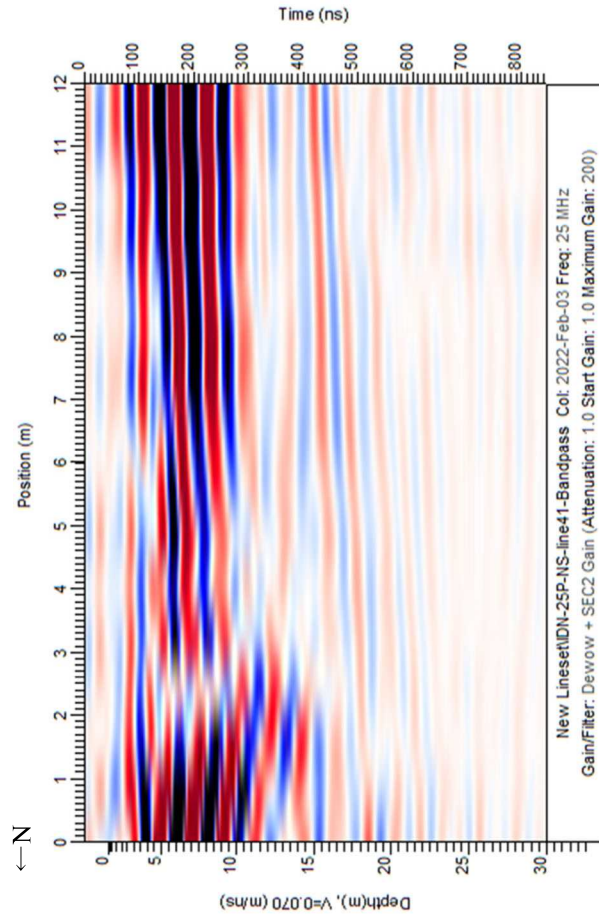


図 2.3.168 出ノ口地区 探査結果 (25MHz) L10-17

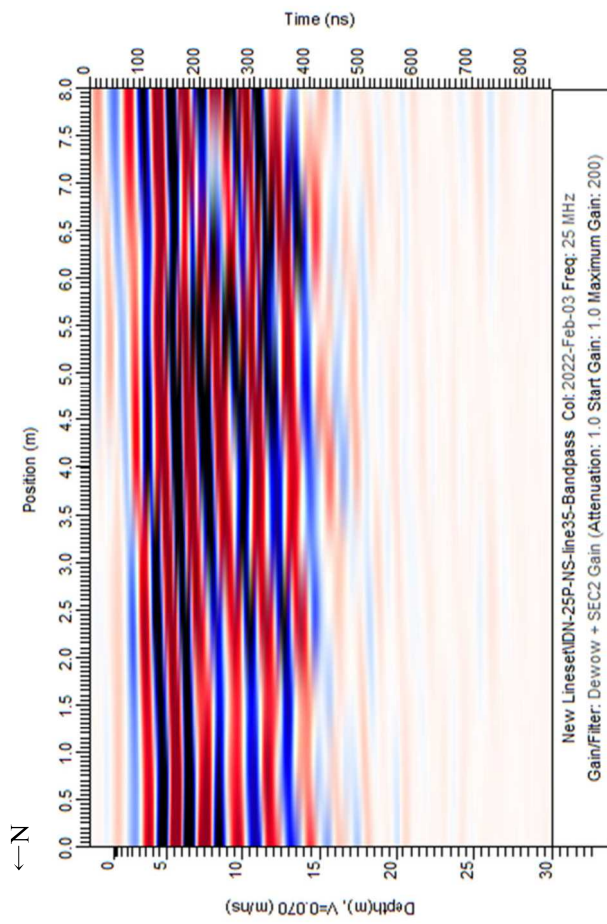
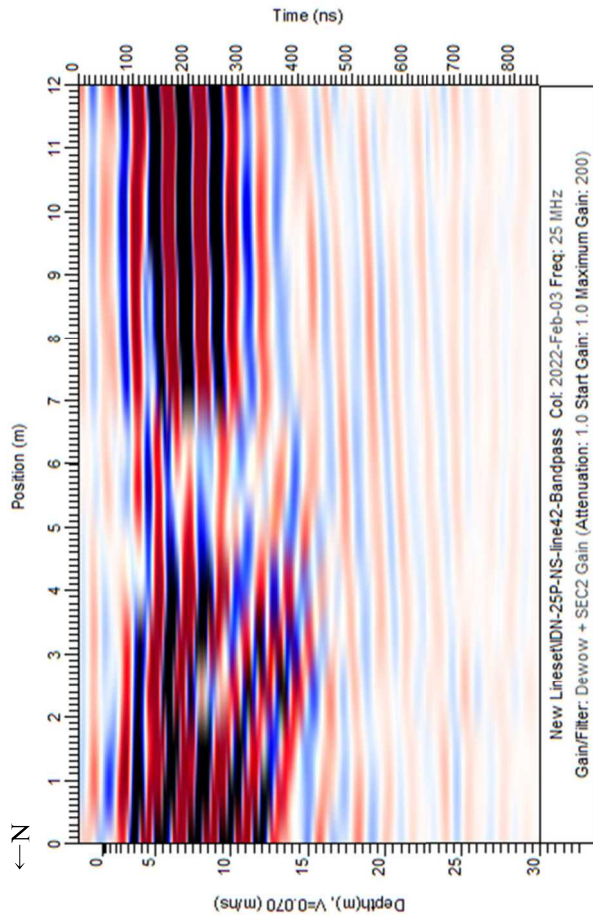


図 2.3.169 出ノ口地区 探査結果 (25MHz) L11-18

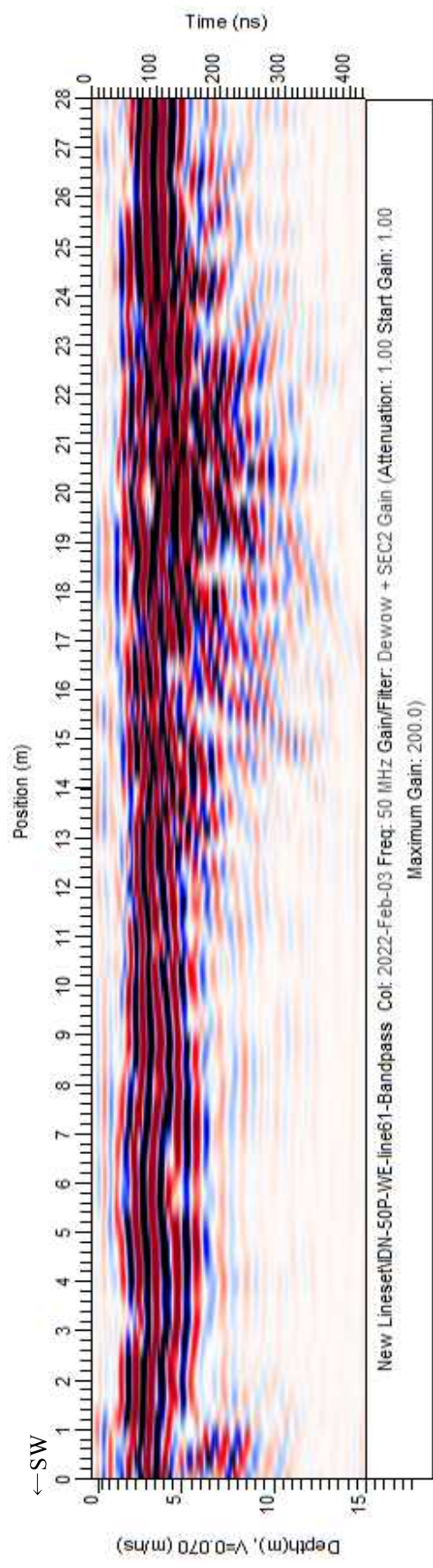


図 2.3.170 出ノ口地区 探査結果 (50MHz) 交差方向測線 : L37

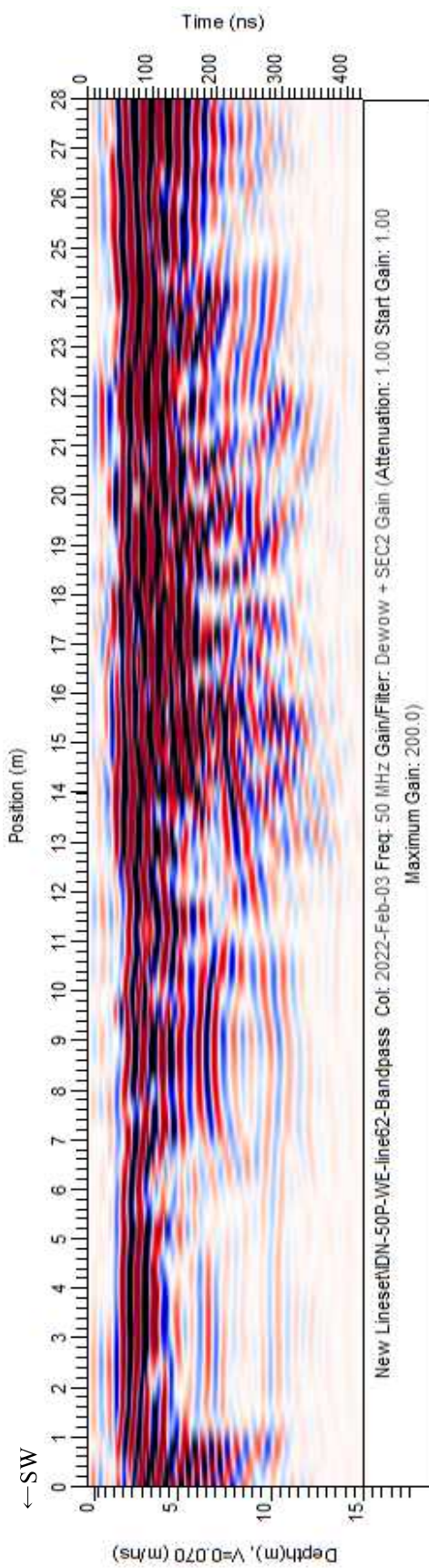


图 2.3.171 出ノ口地区 探查結果 (50MHz) 交差方向測線 : L38

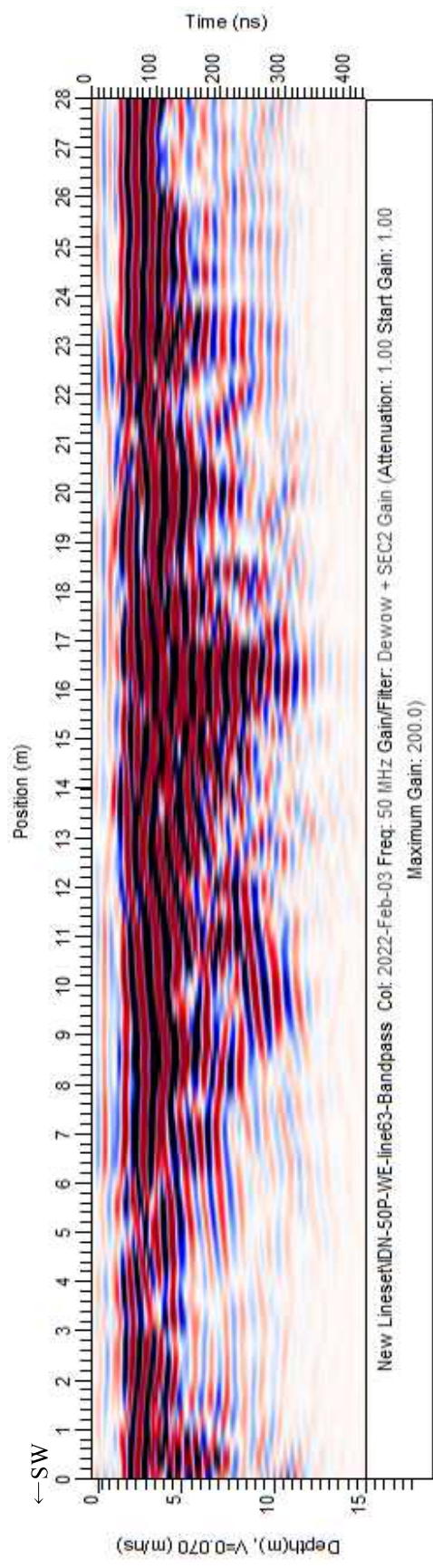


図 2.3.172 出ノ口地区 探査結果 (50MHz) 交差方向測線 : L39

(2) 小園地区

小園地区ではトレンチ調査位置周辺において2m 毎の測線間隔でトレンチと並行方向（断層直交方向）に 25MHz あるいは 50MHz のアンテナを用いて地中レーダ探査を行い、一部で 100MHz のアンテナを用いて追加探査を実施した。調査内容を以下より示す。

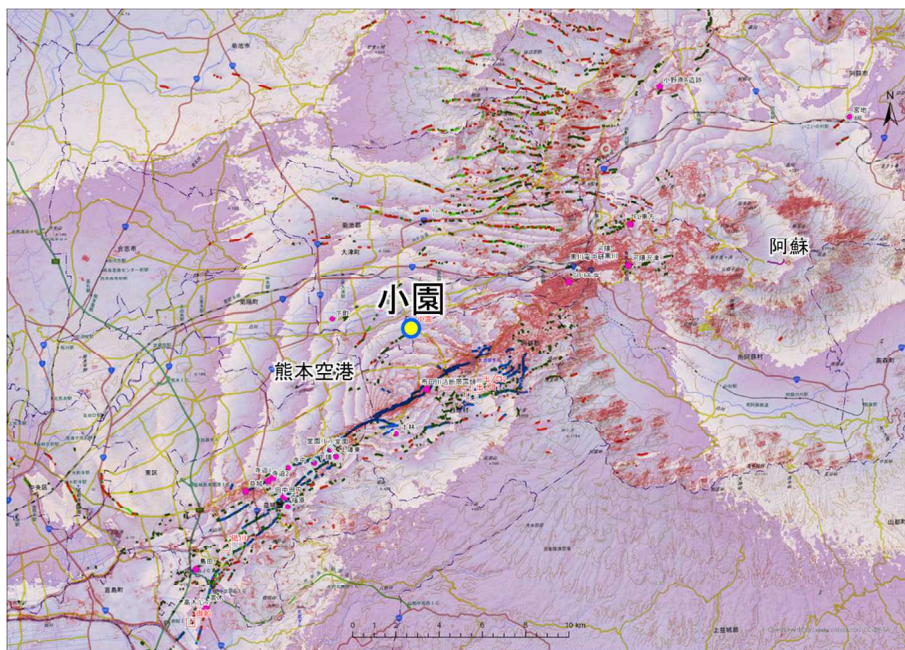


図 2.3.173 調査位置図（小園）（再掲）



図 2.3.174 現地状況（小園 詳細調査：測線間隔 2m の状況）



図 2.3.175 探査測線（小園 詳細調査）

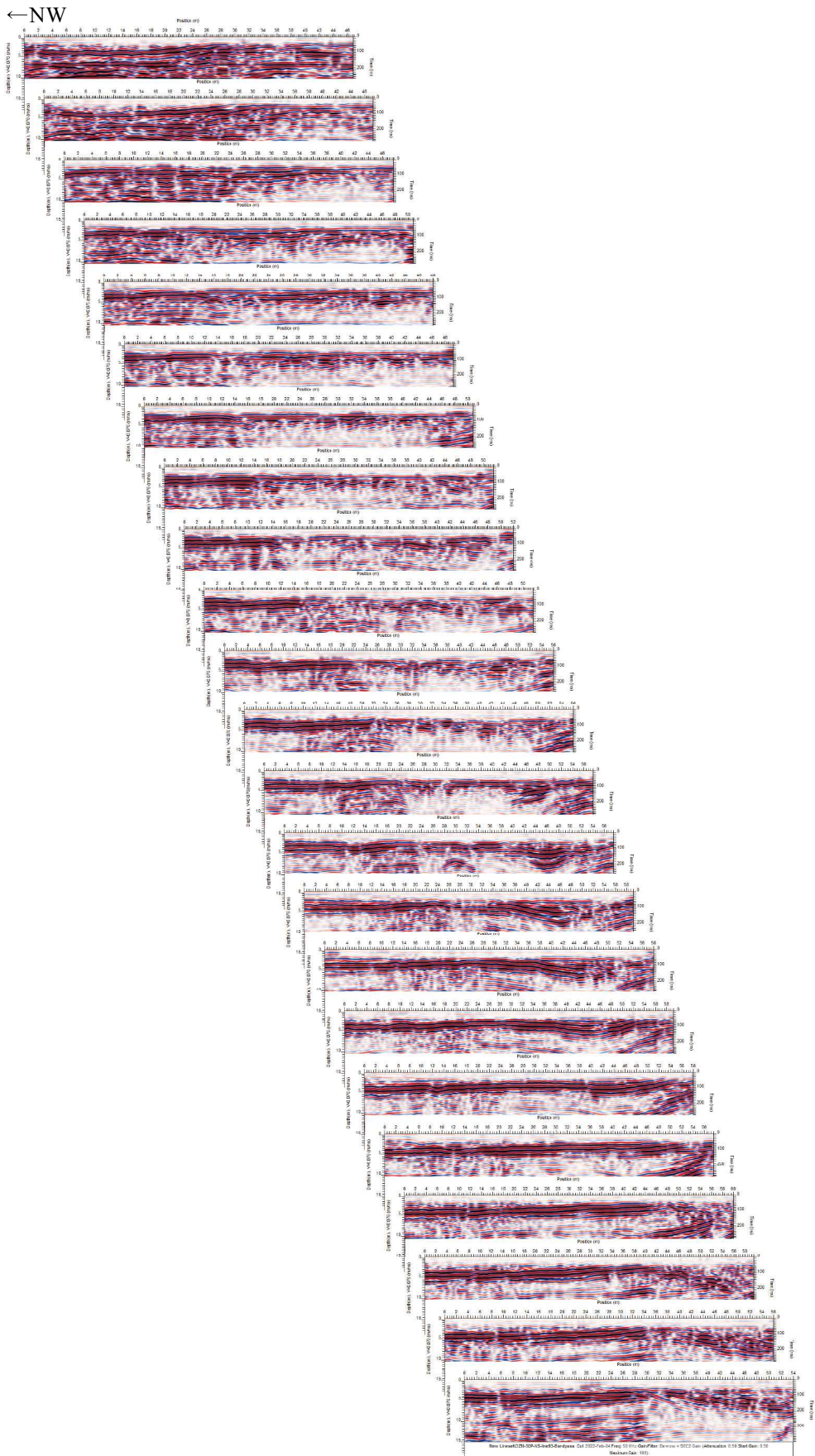


図 2.3.176 小園地区 探査結果 (50MHz)

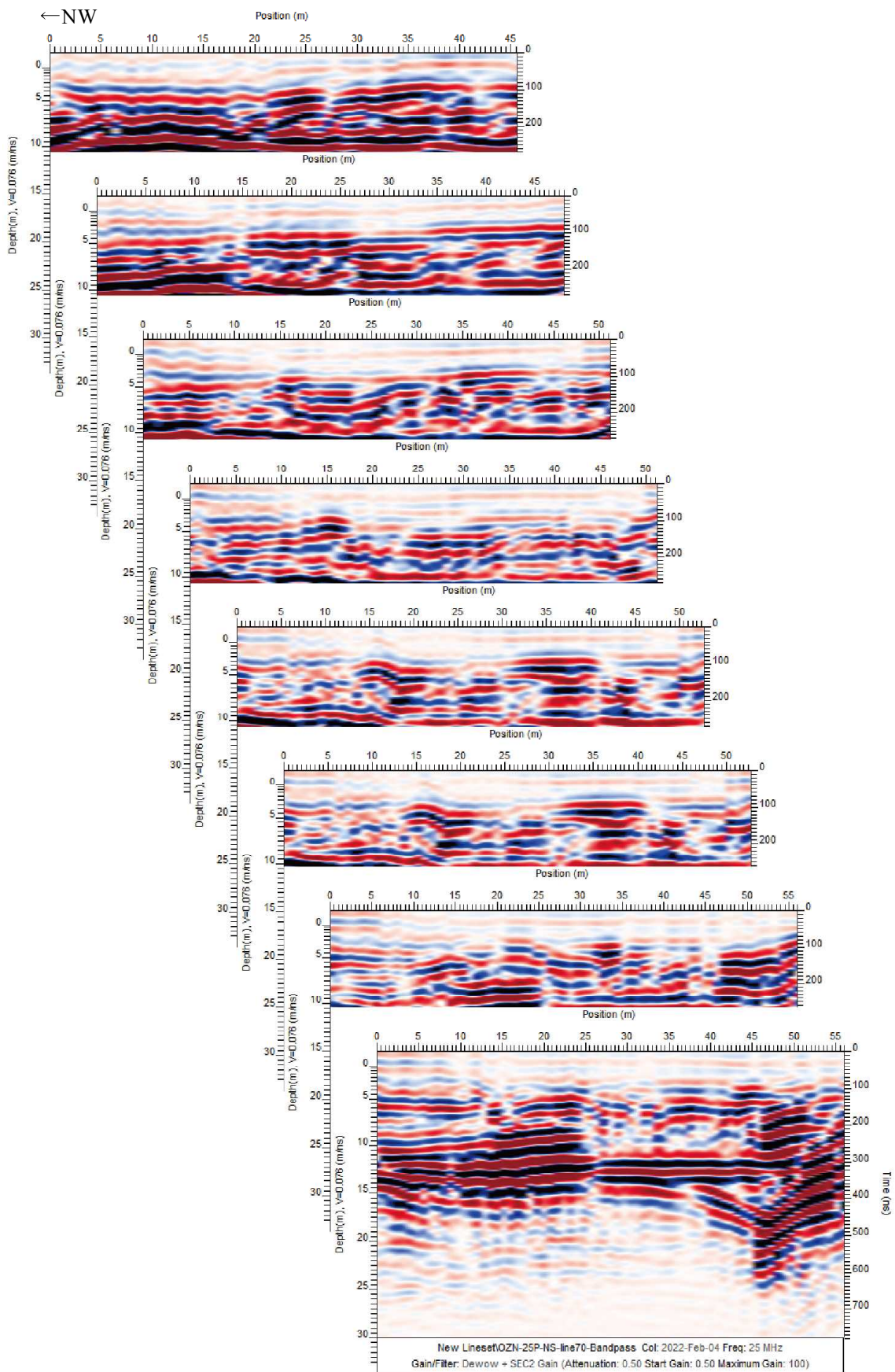


图 2.3.177 小園地区 探查結果 (25MHz)

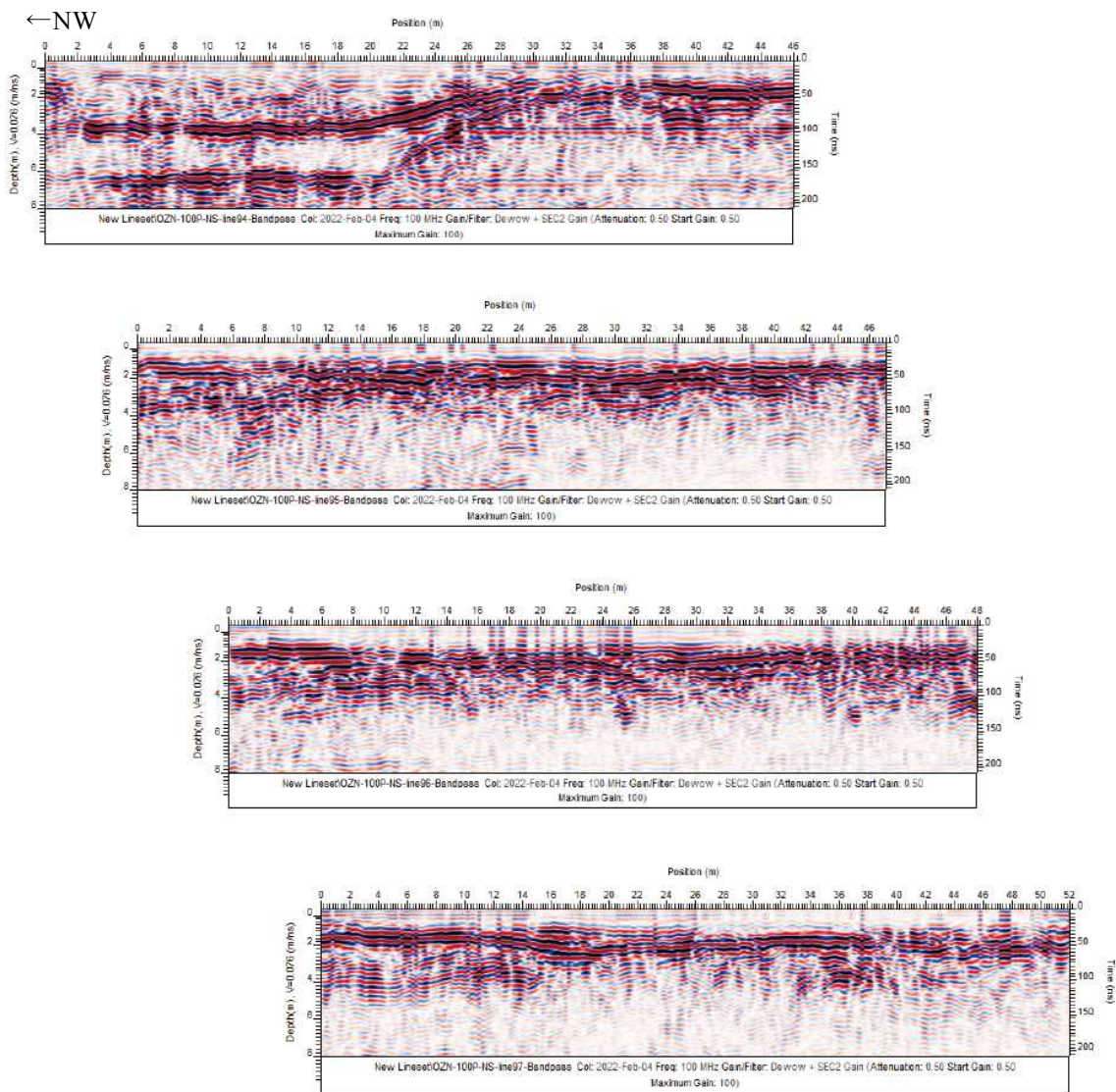


图 2.3.178 小園地区 探查結果 (100MHz)

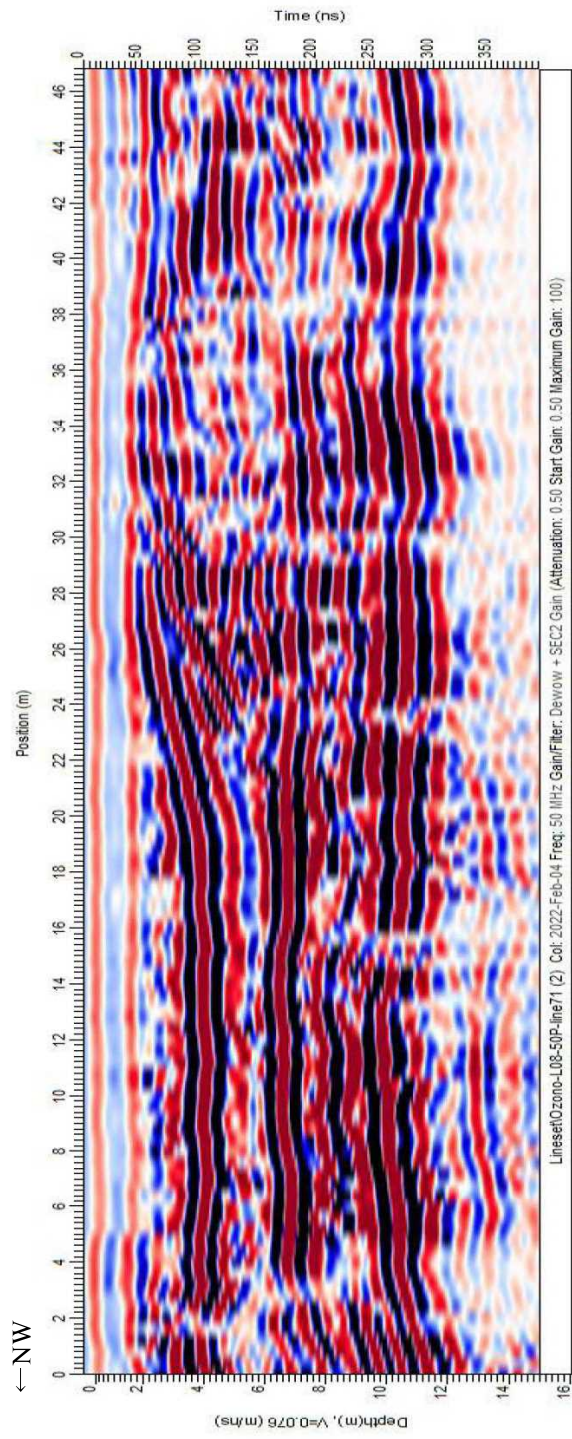


图 2.3.179 小園地区 探查結果 (50MHz) L1

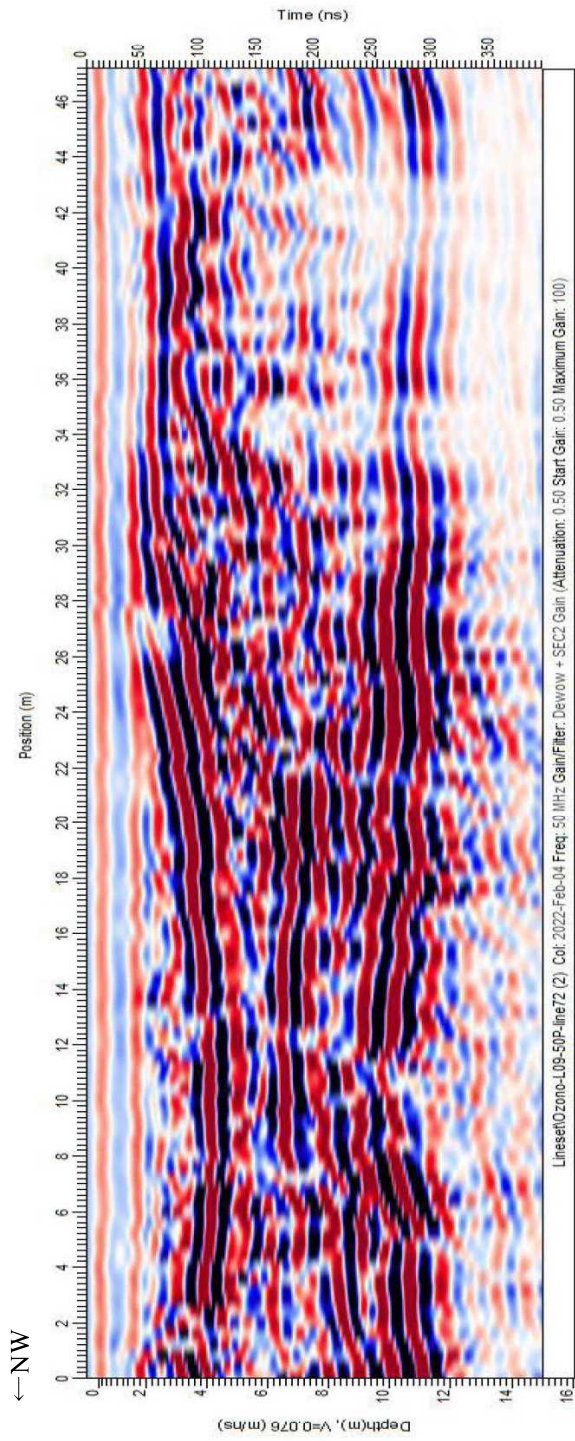


图 2.3.180 小園地区 探查結果 (50MHz) L2

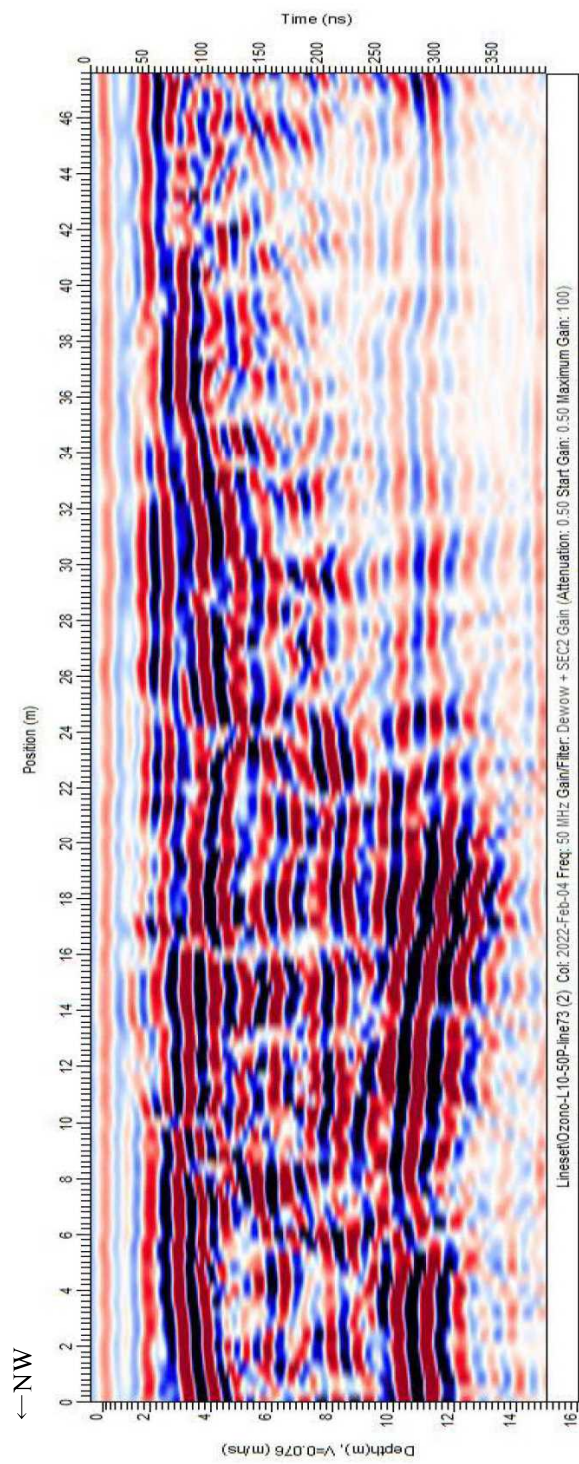


图 2.3.181 小園地区 探查結果 (50MHz) L3

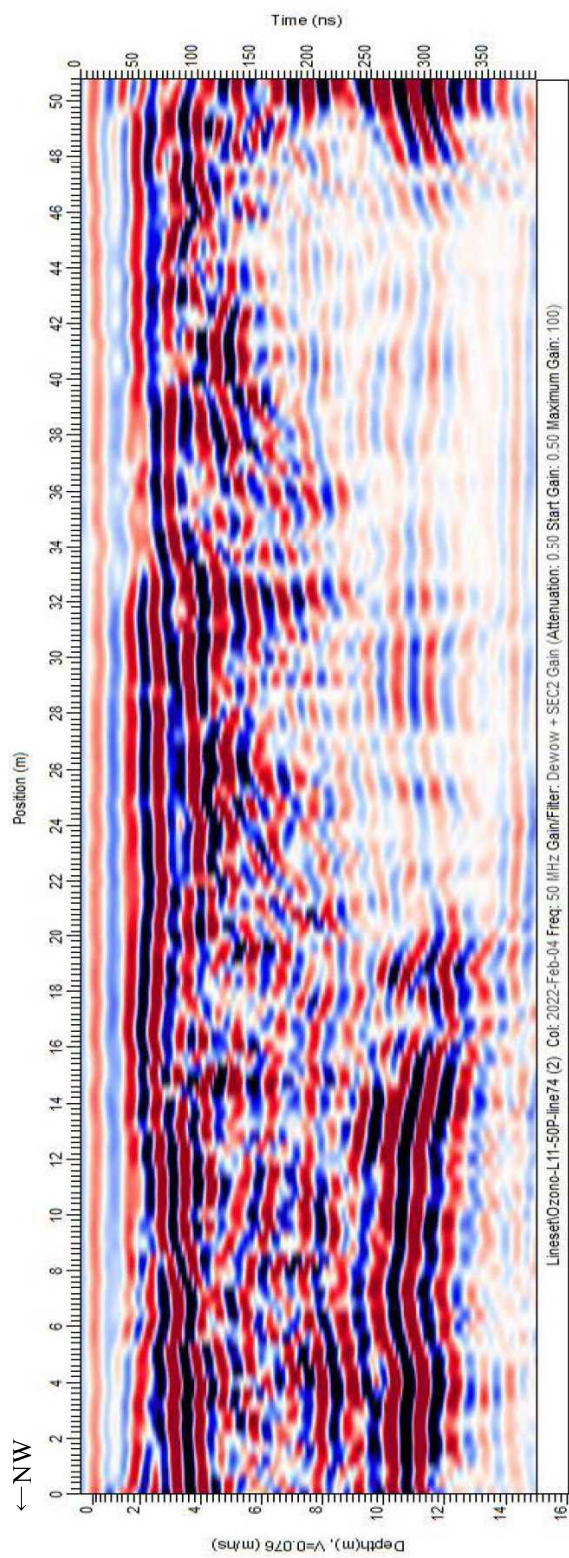


图 2.3.182 小園地区 探查結果 (50MHz) L4

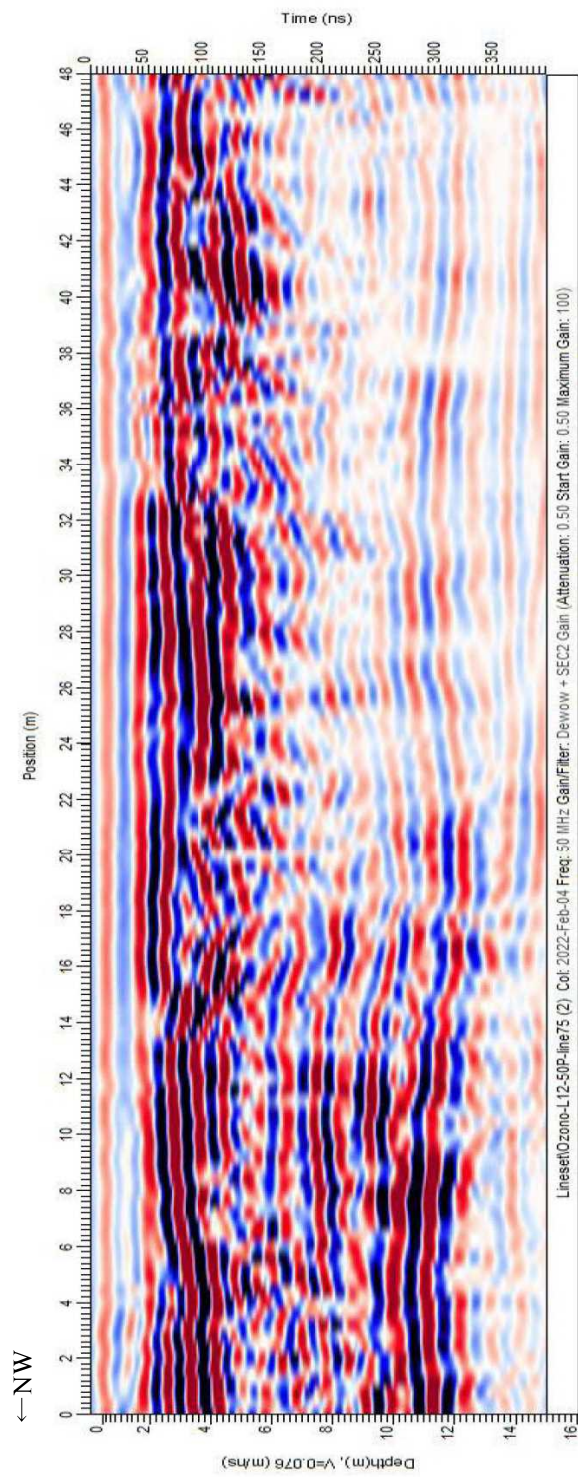


图 2.3.183 小園地区 探查結果 (50MHz) L5

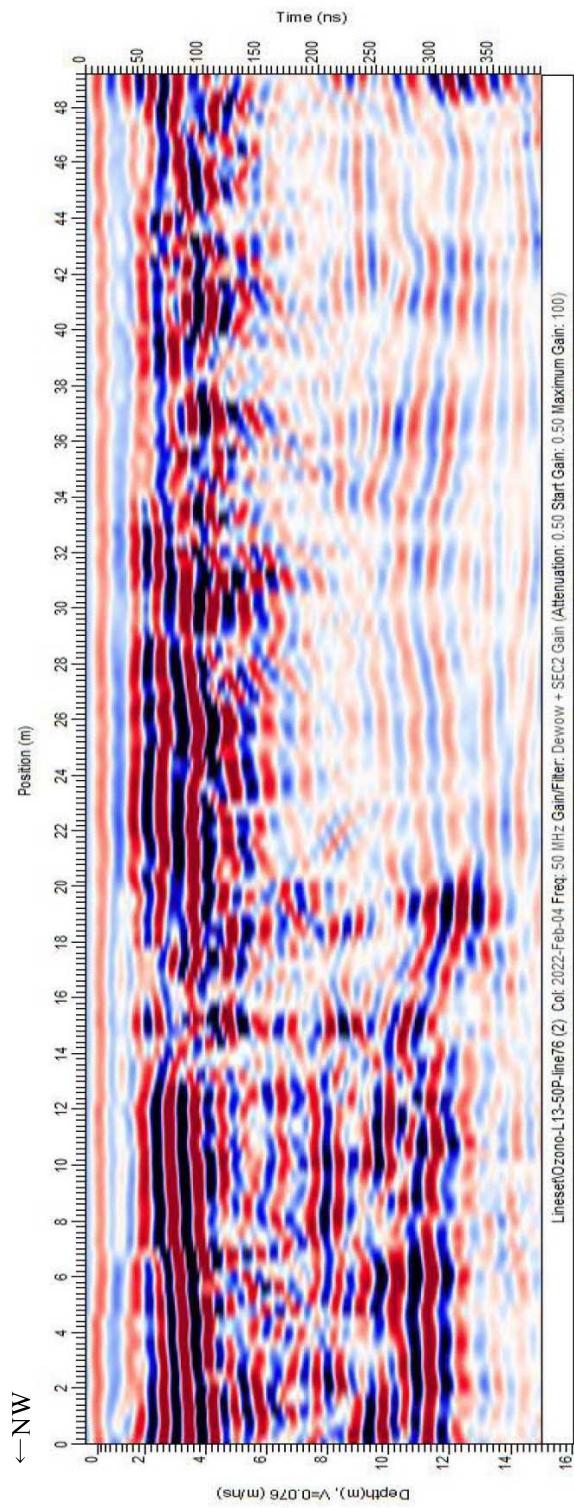


图 2.3.184 小園地区 探查結果 (50MHz) L6

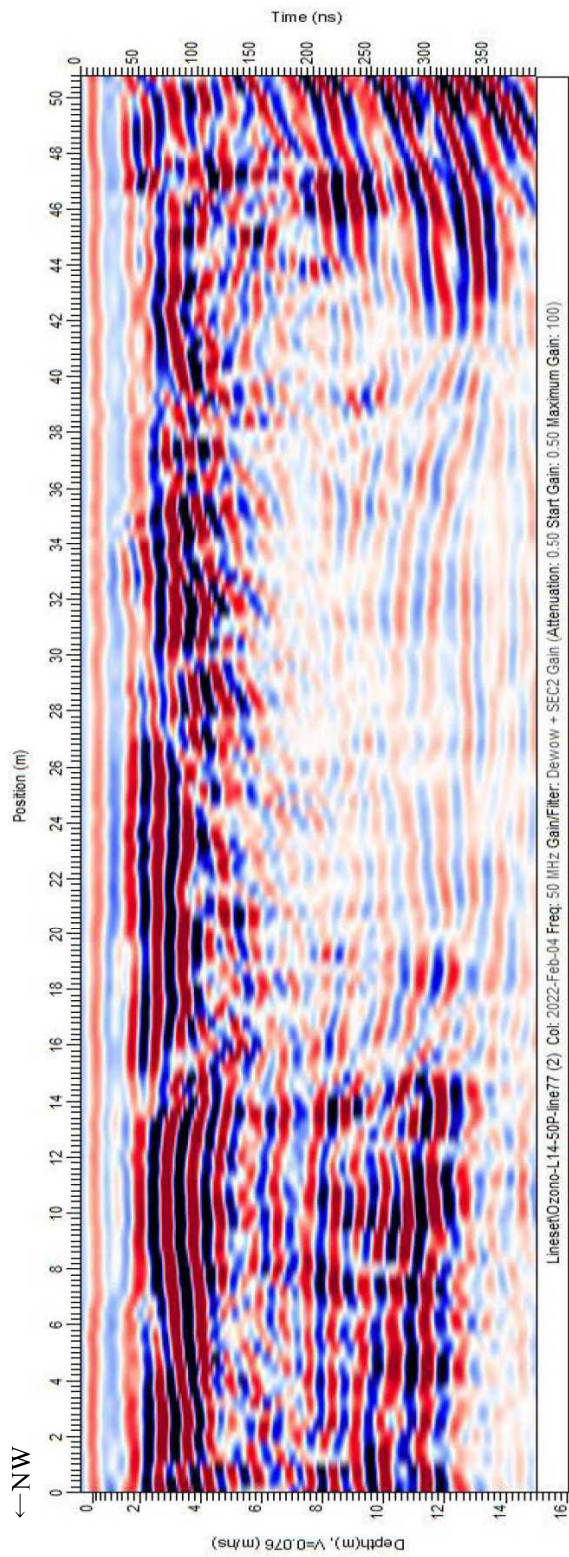


图 2.3.185 小園地区 探查結果 (50MHz) L7

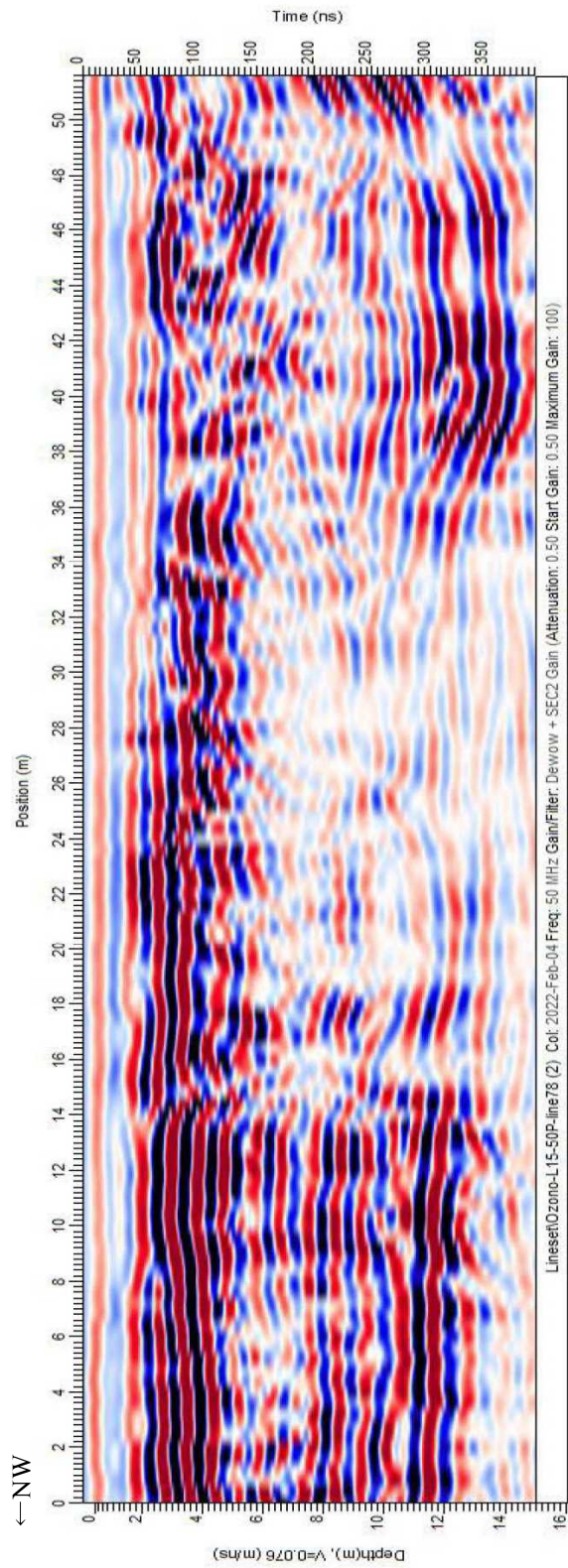


图 2.3.186 小園地区 探查結果 (50MHz) L8

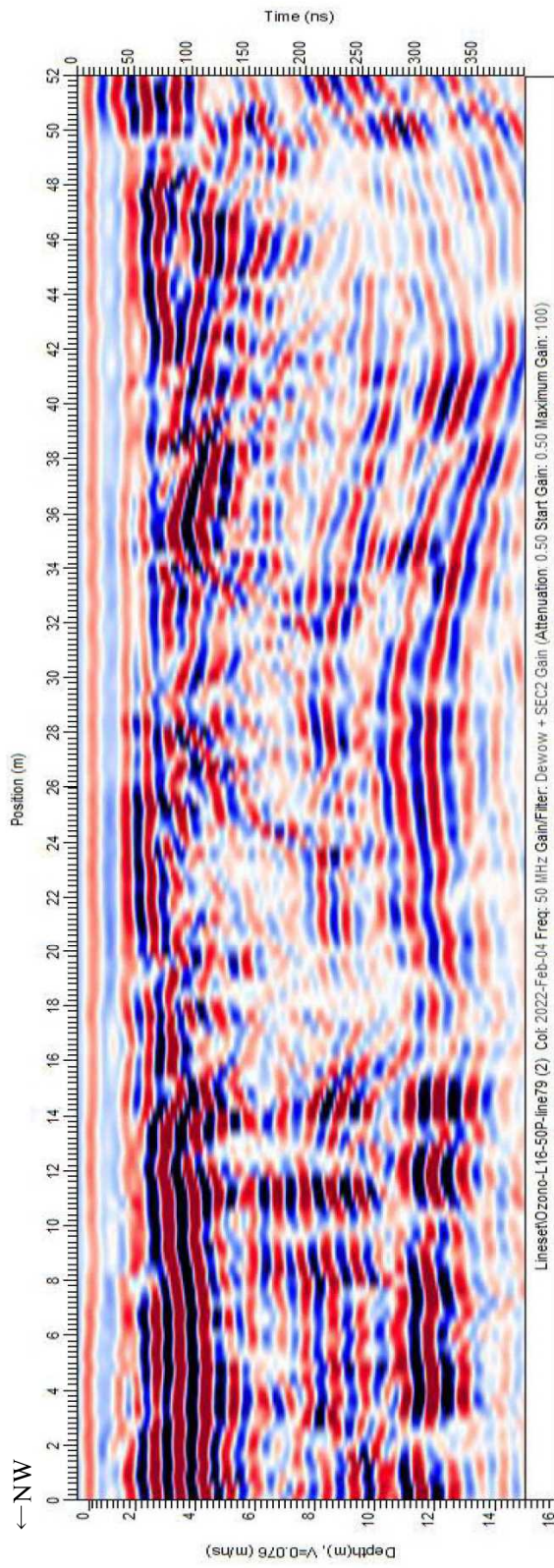


图 2.3.187 小園地区 探查結果 (50MHz) L9

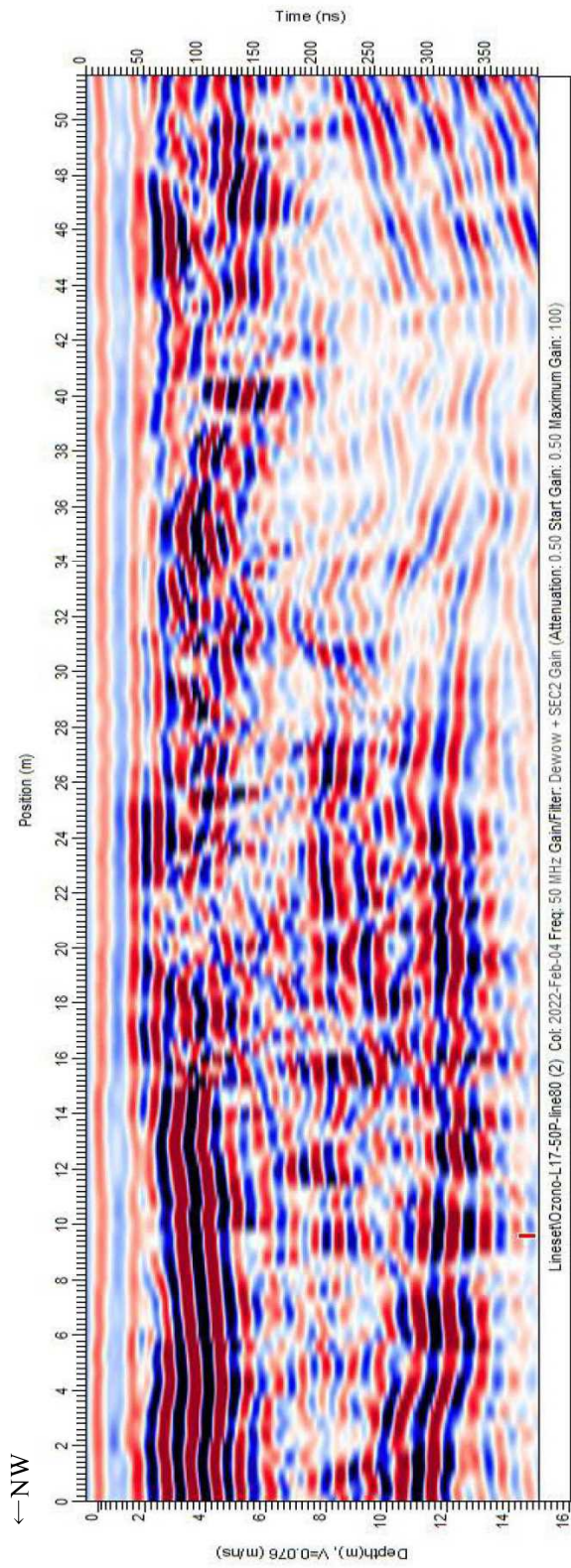


图 2.3.188 小園地区 探查結果 (50MHz) L10

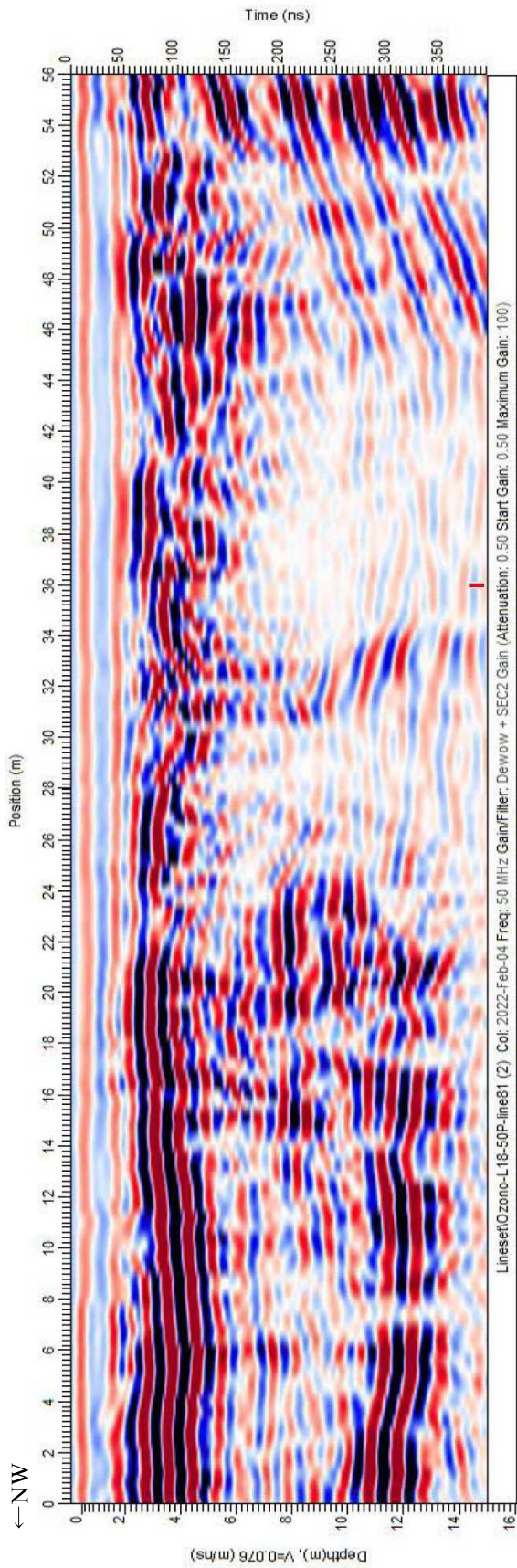


图 2.3.189 小園地区 探查結果 (50MHz) L11

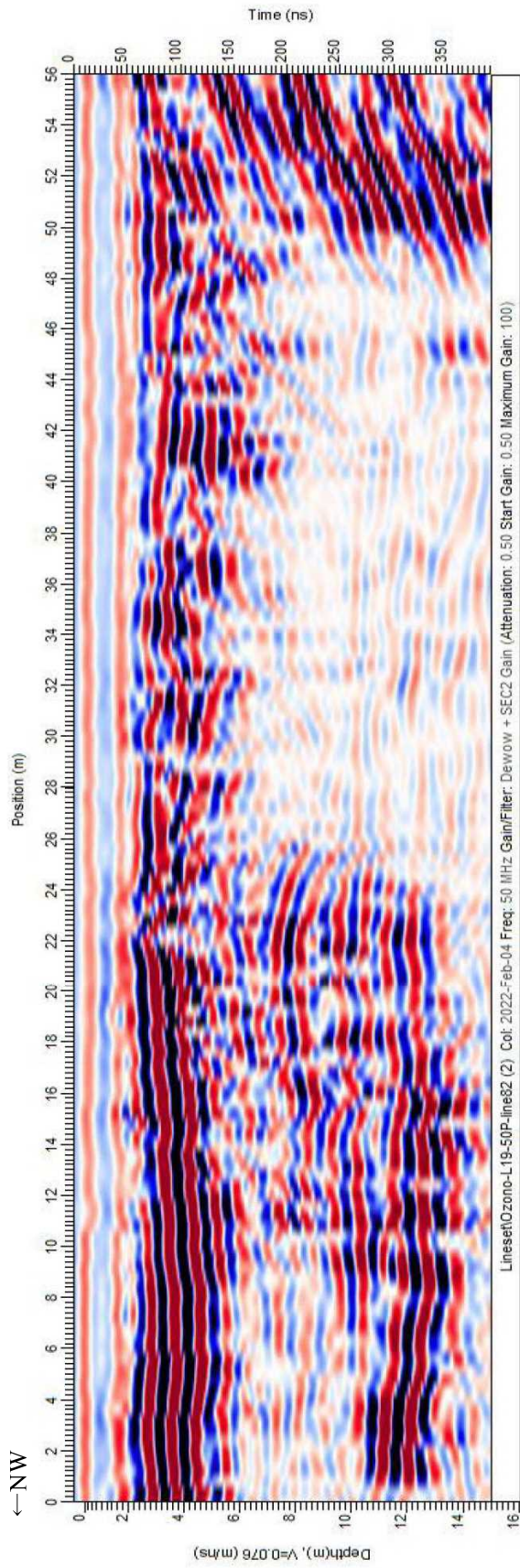


图 2.3.190 小園地区 探查結果 (50MHz) L12

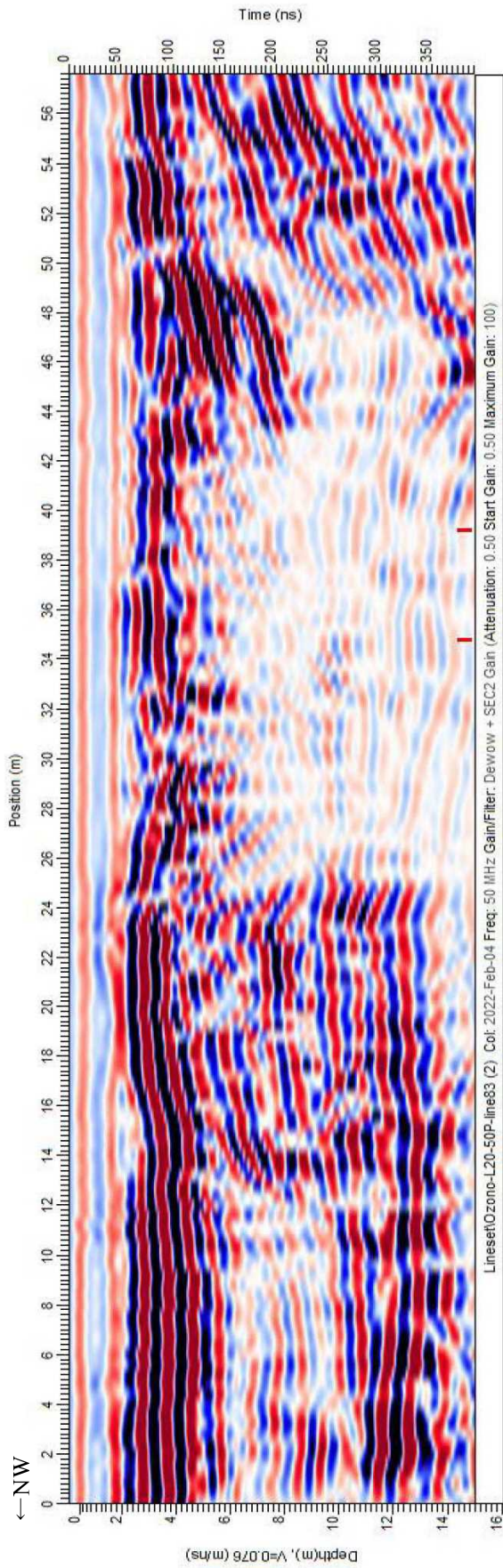


图 2.3.191 小園地区 探查結果 (50MHz) L13

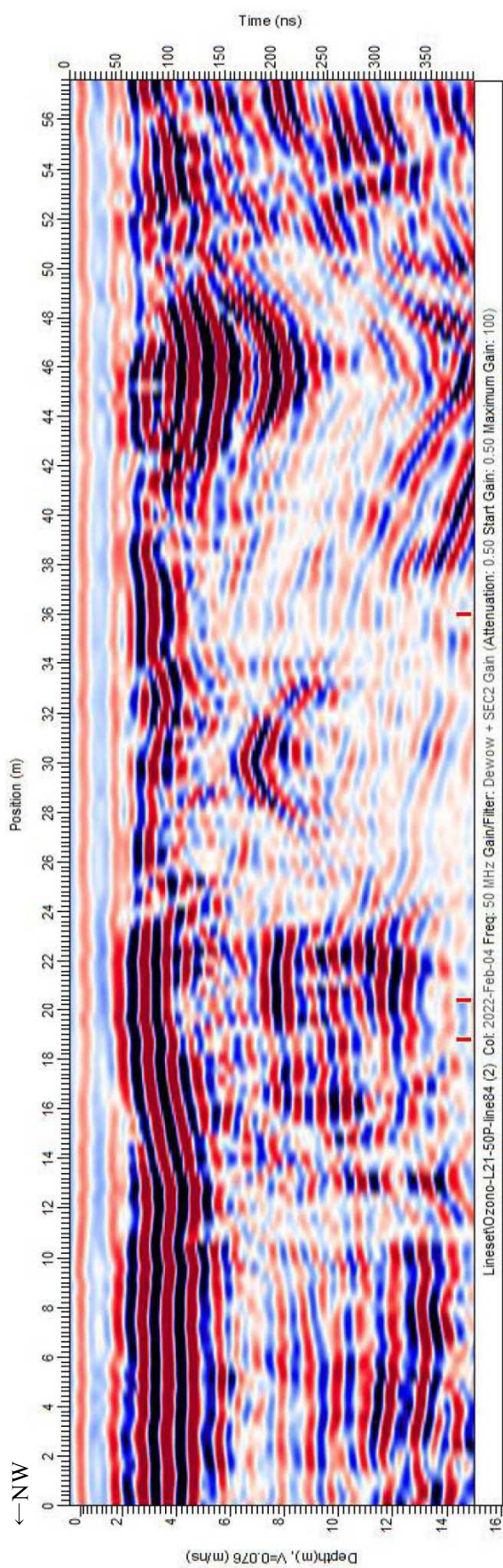


图 2.3.192 小園地区 探查結果 (50MHz) L14

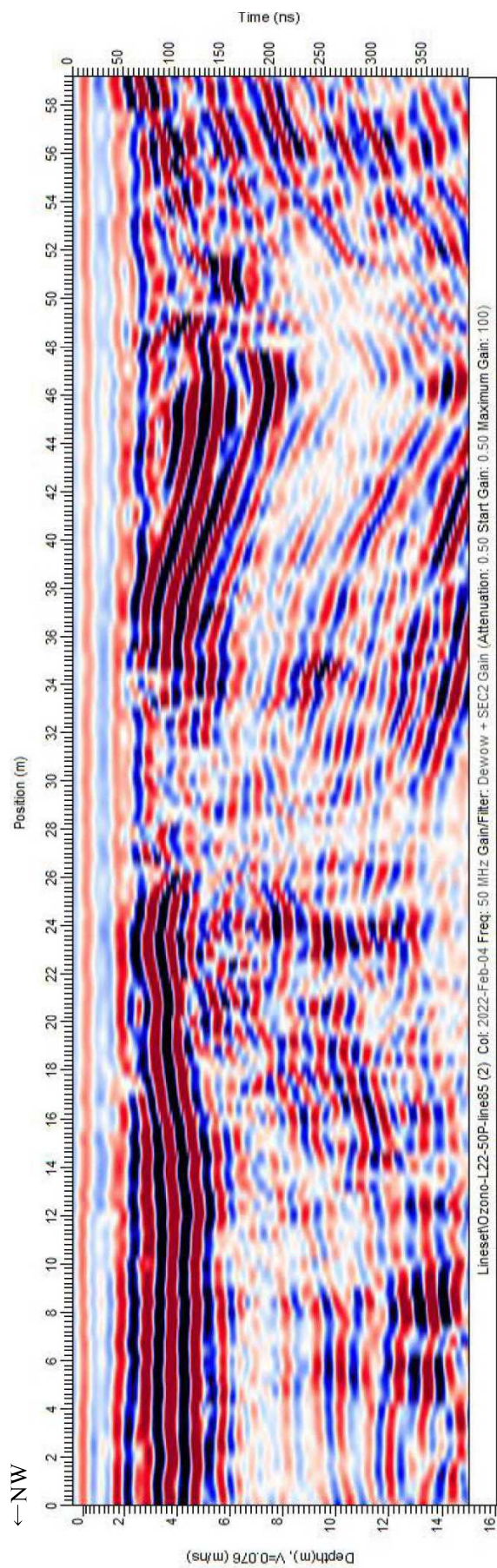


图 2.3.193 小園地区 探查結果 (50MHz) L15

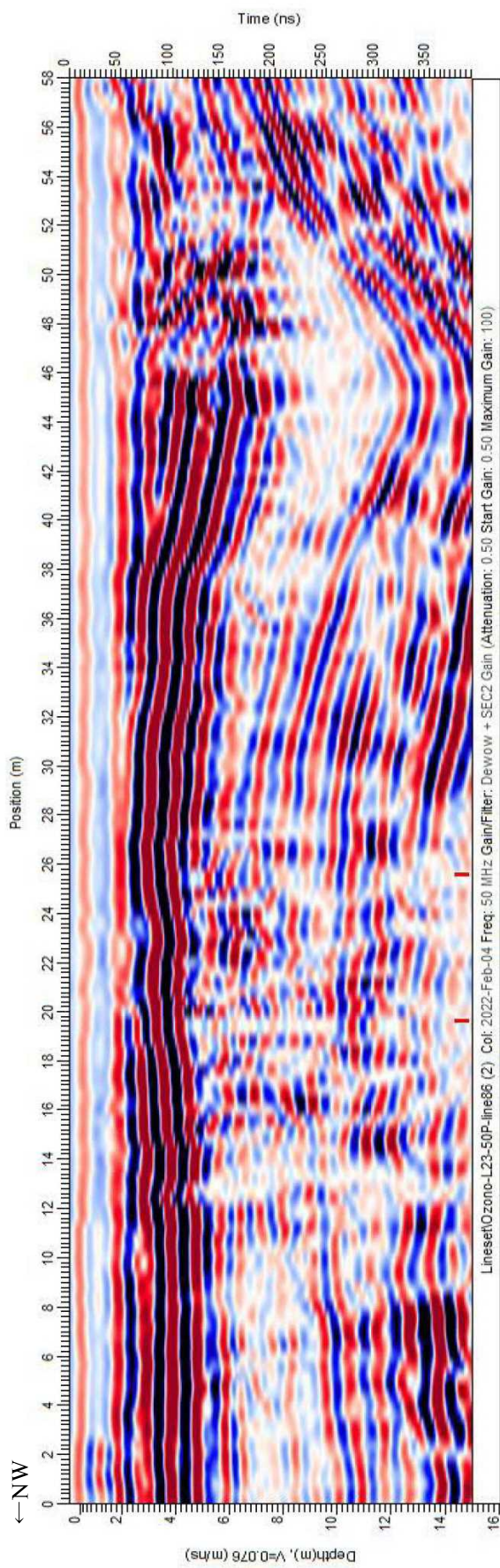


图 2.3.194 小園地区 探查結果 (50MHz) L16

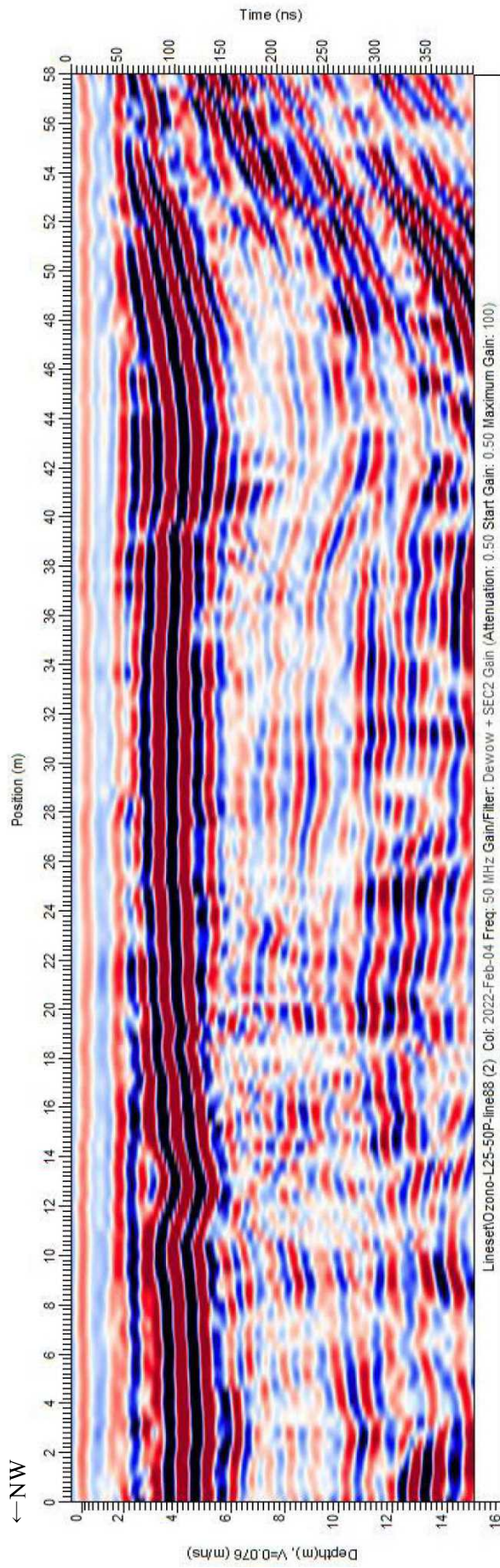


图 2.3.196 小園地区 探查結果 (50MHz) L18

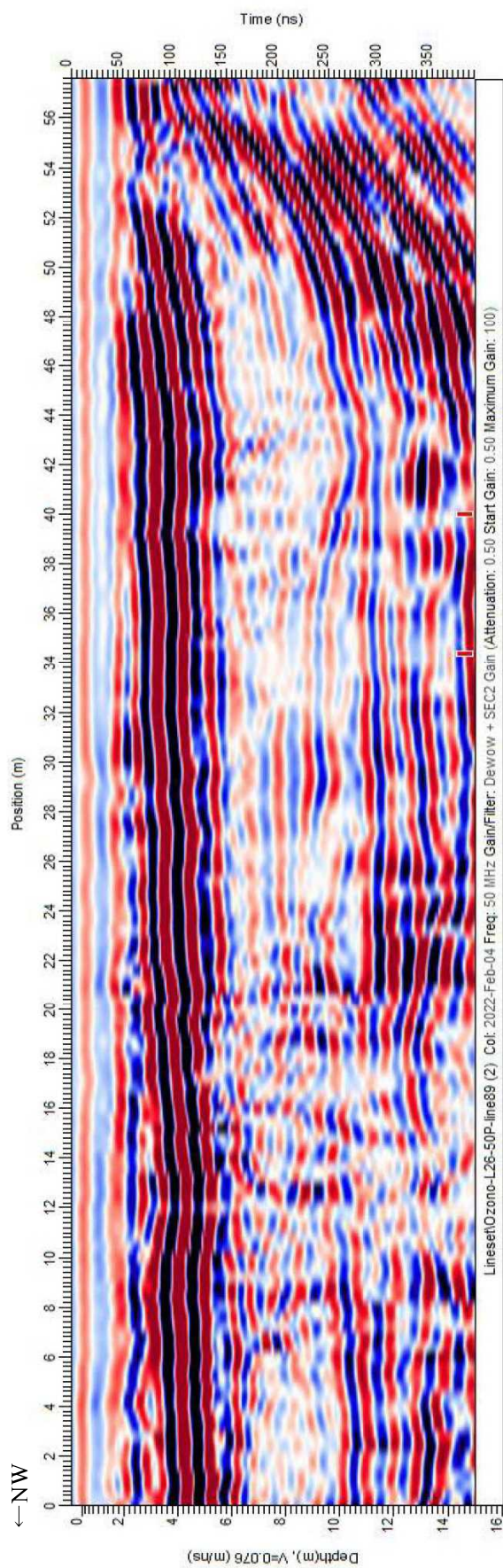


图 2.3.197 小園地区 探查結果 (50MHz) L19

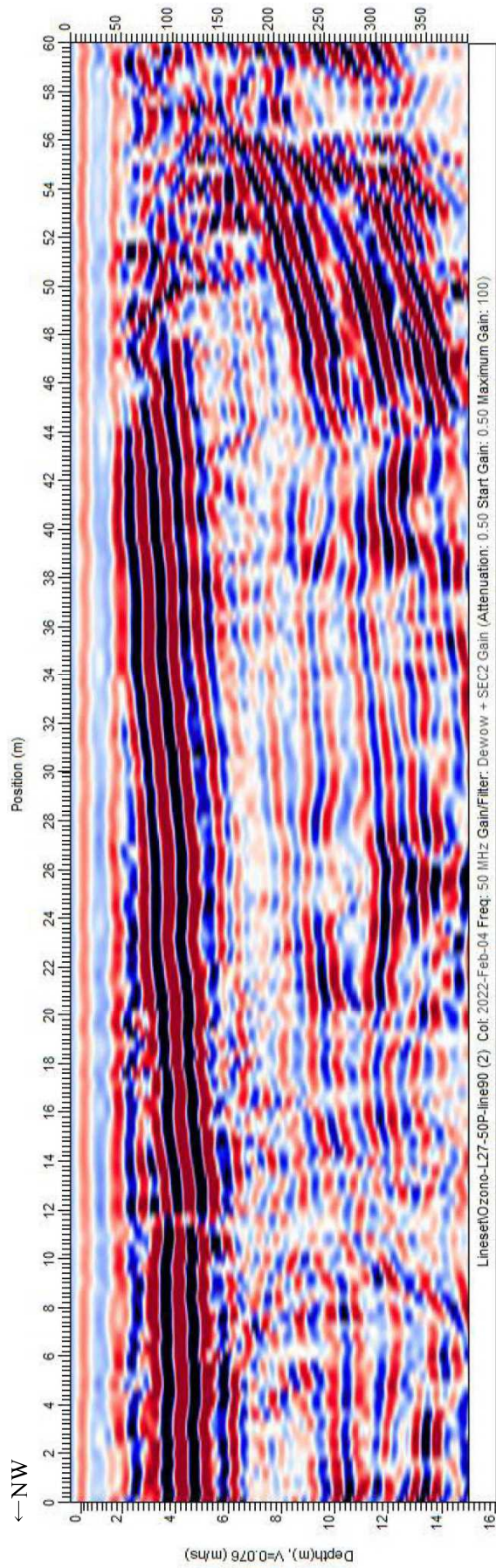


图 2.3.198 小園地区 探查結果 (50MHz) L20

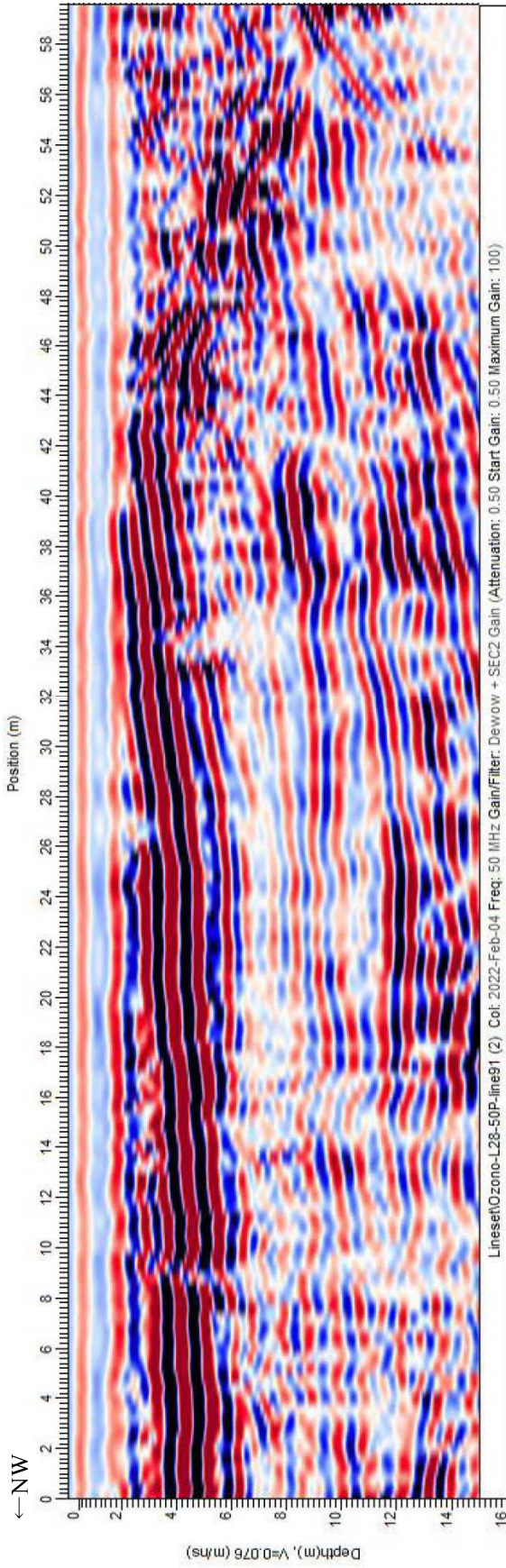


图 2.3.199 小園地区 探查結果 (50MHz) L21

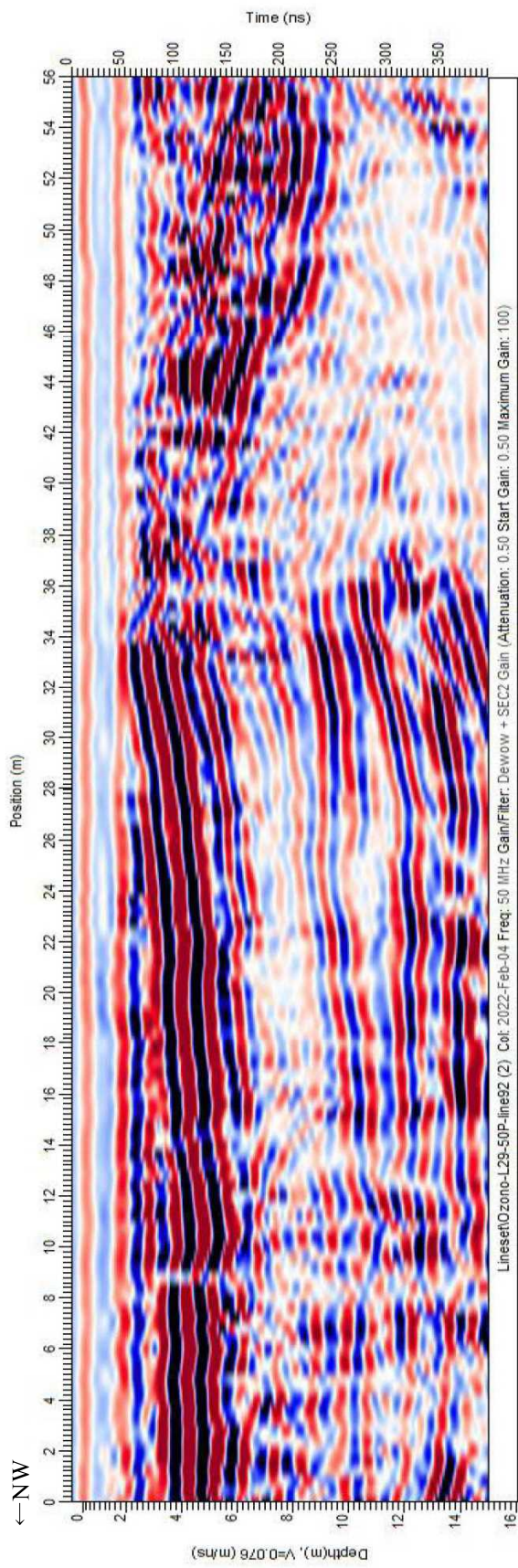


图 2.3.200 小園地区 探查結果 (50MHz) L22

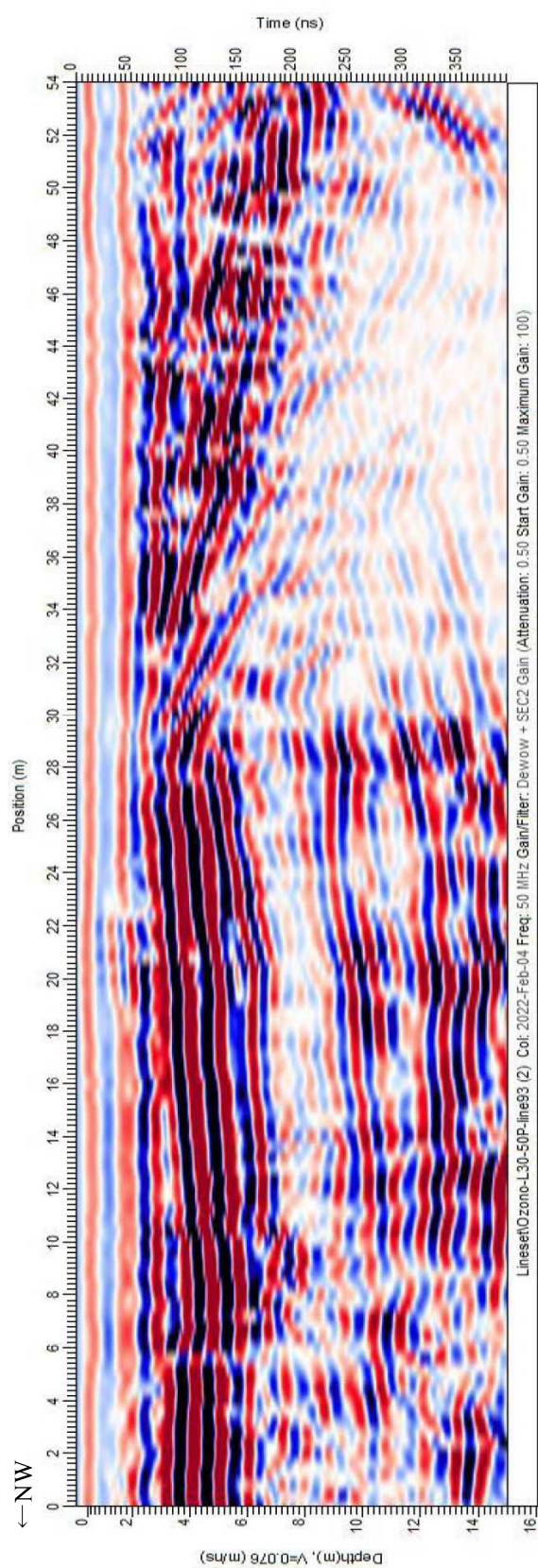


图 2.3.201 小園地区 探查結果 (50MHz) L23

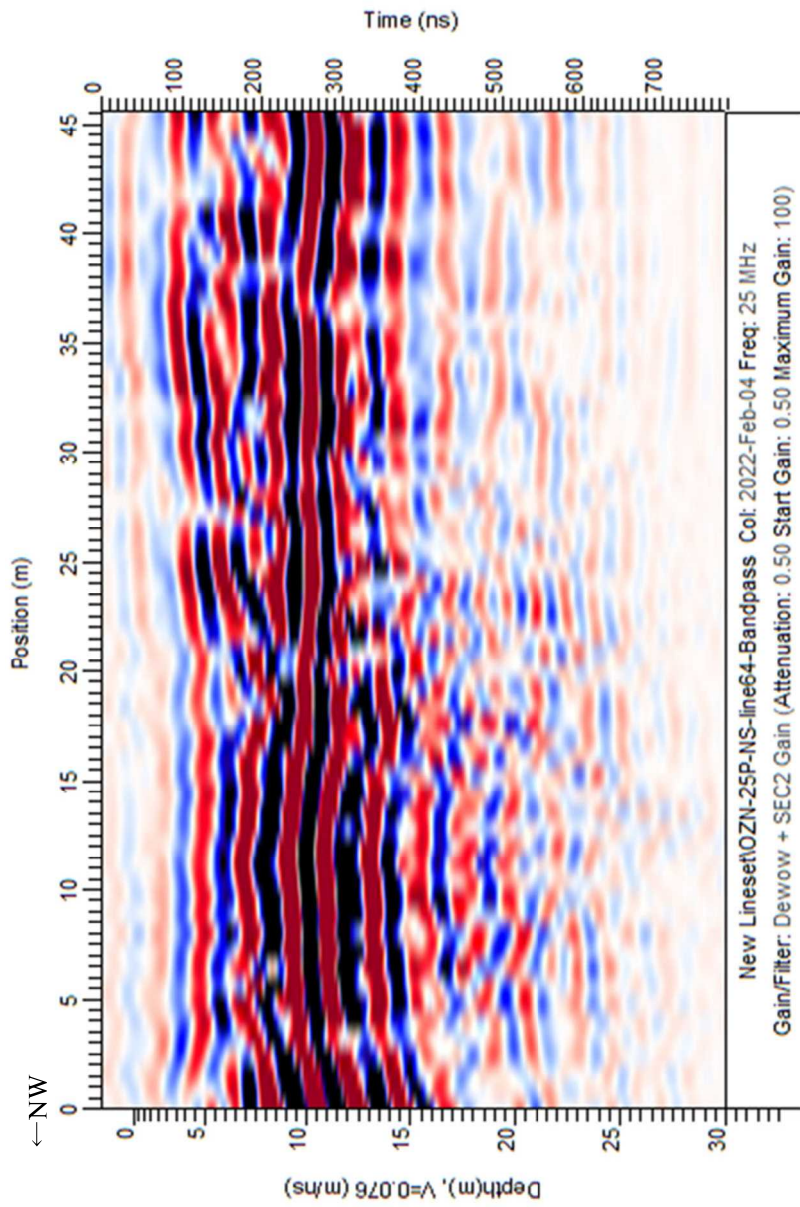


图 2.3.202 小園地区 探查結果 (25MHz) L1

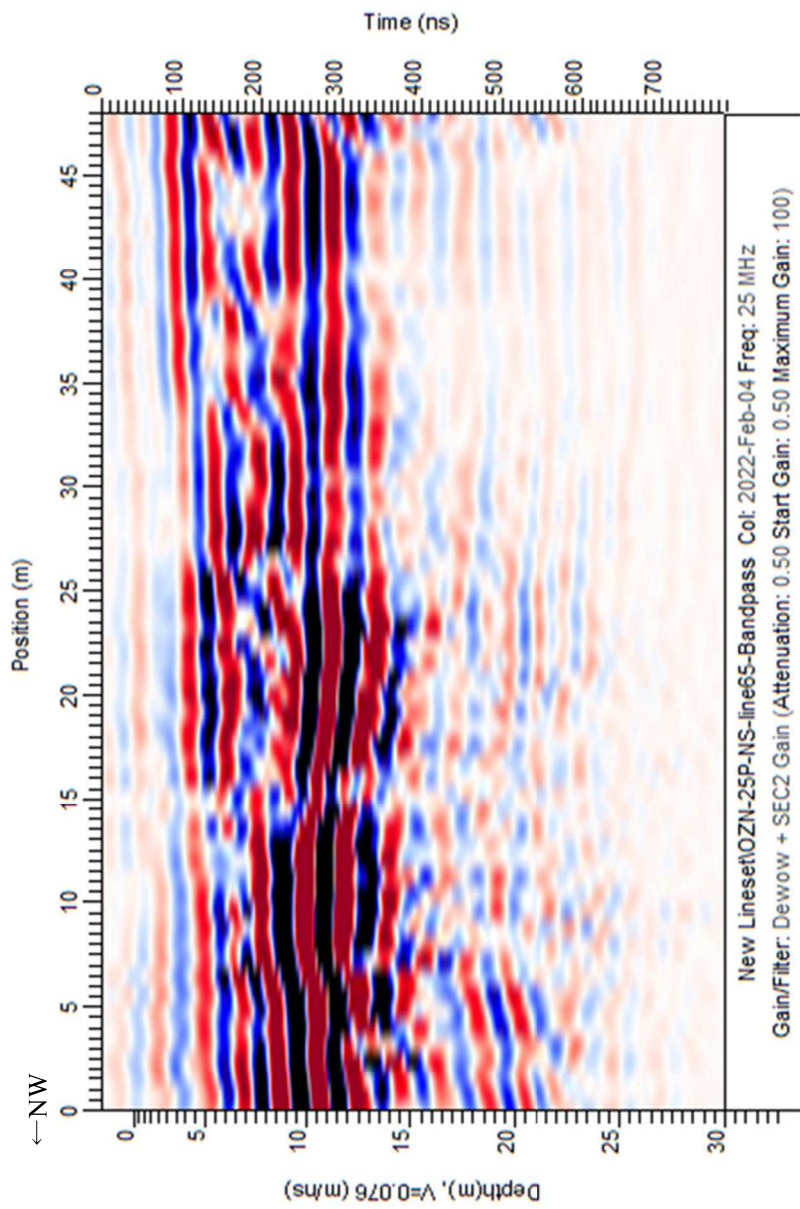


图 2.3.203 小園地区 探查結果 (25MHz) L3

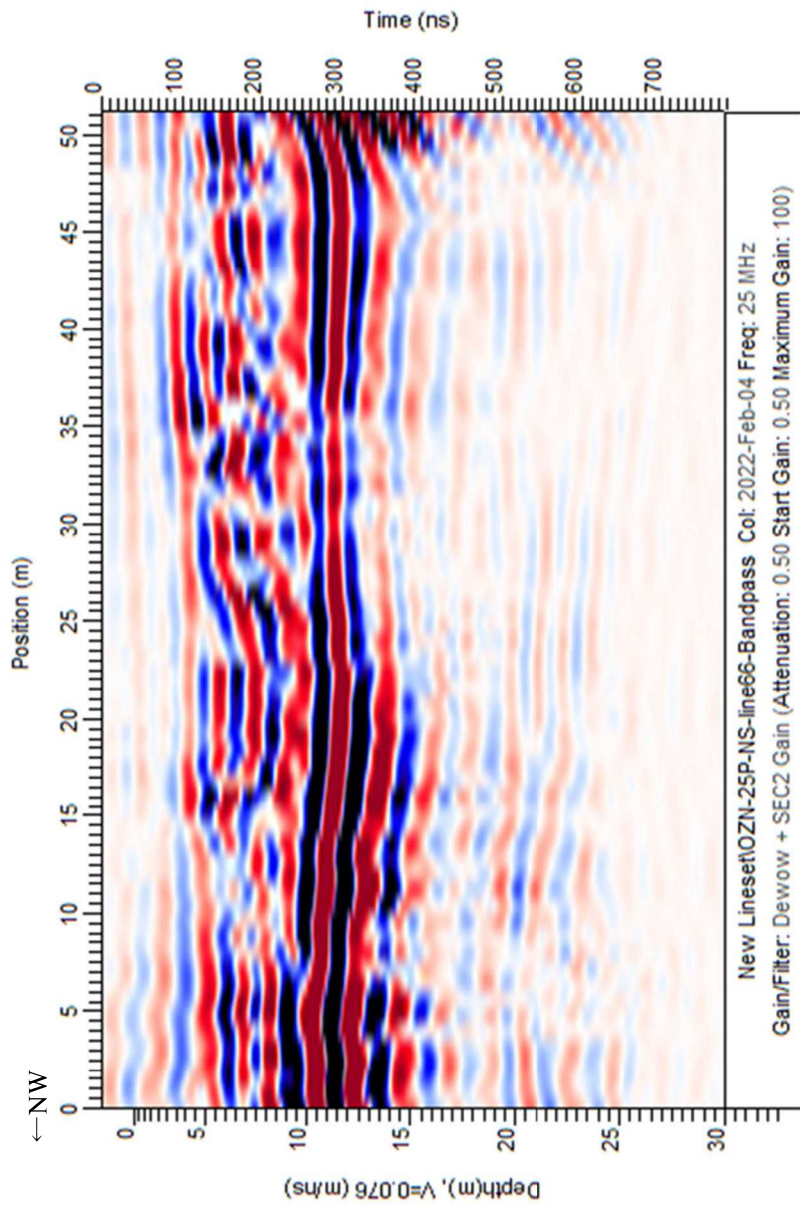


图 2.3.204 小園地区 探查結果 (25MHz) L5

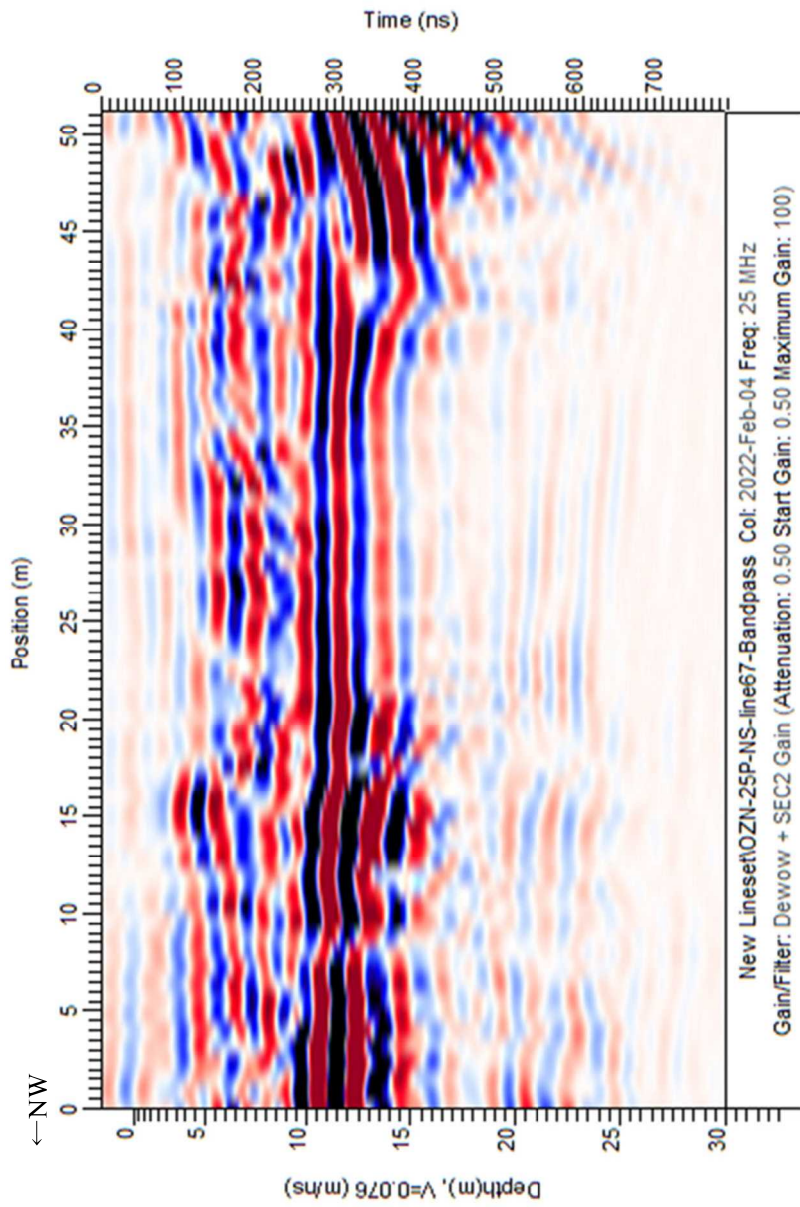


图 2.3.205 小園地区 探查結果 (25MHz) L7

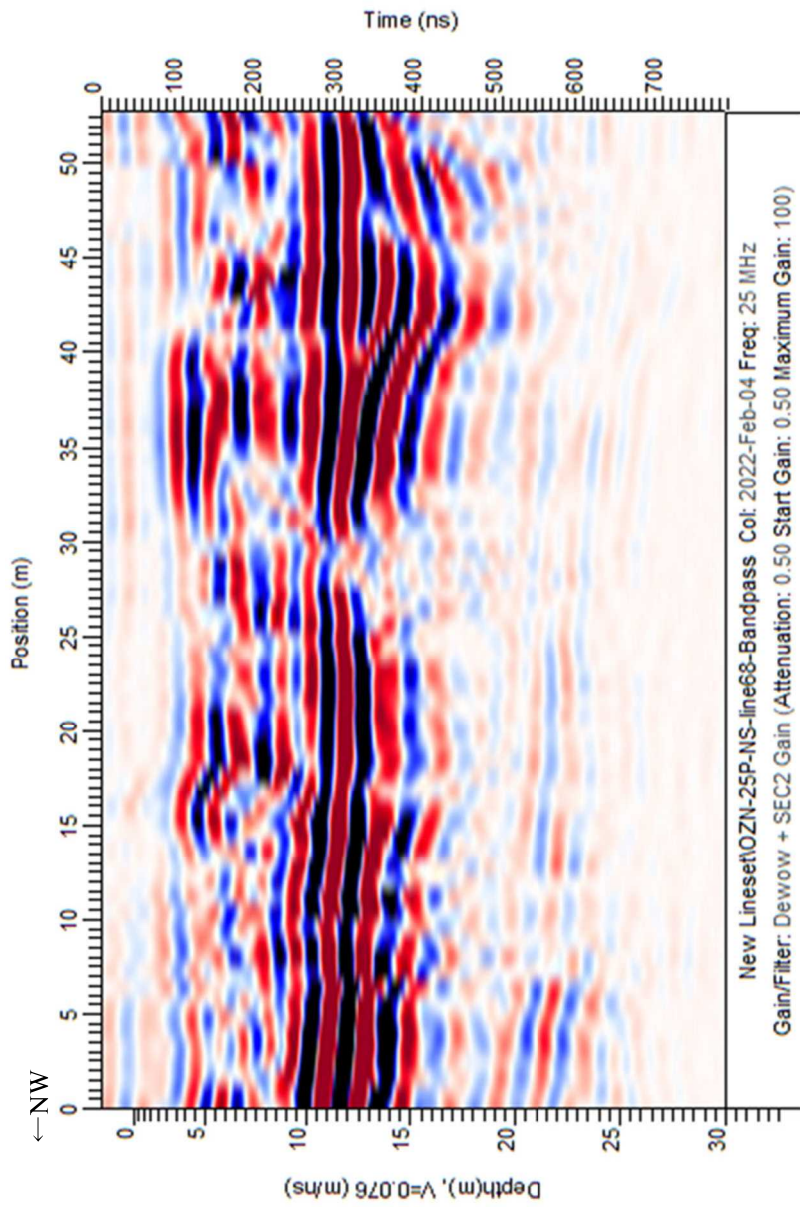


图 2.3.206 小園地区 探查結果 (25MHz) L9

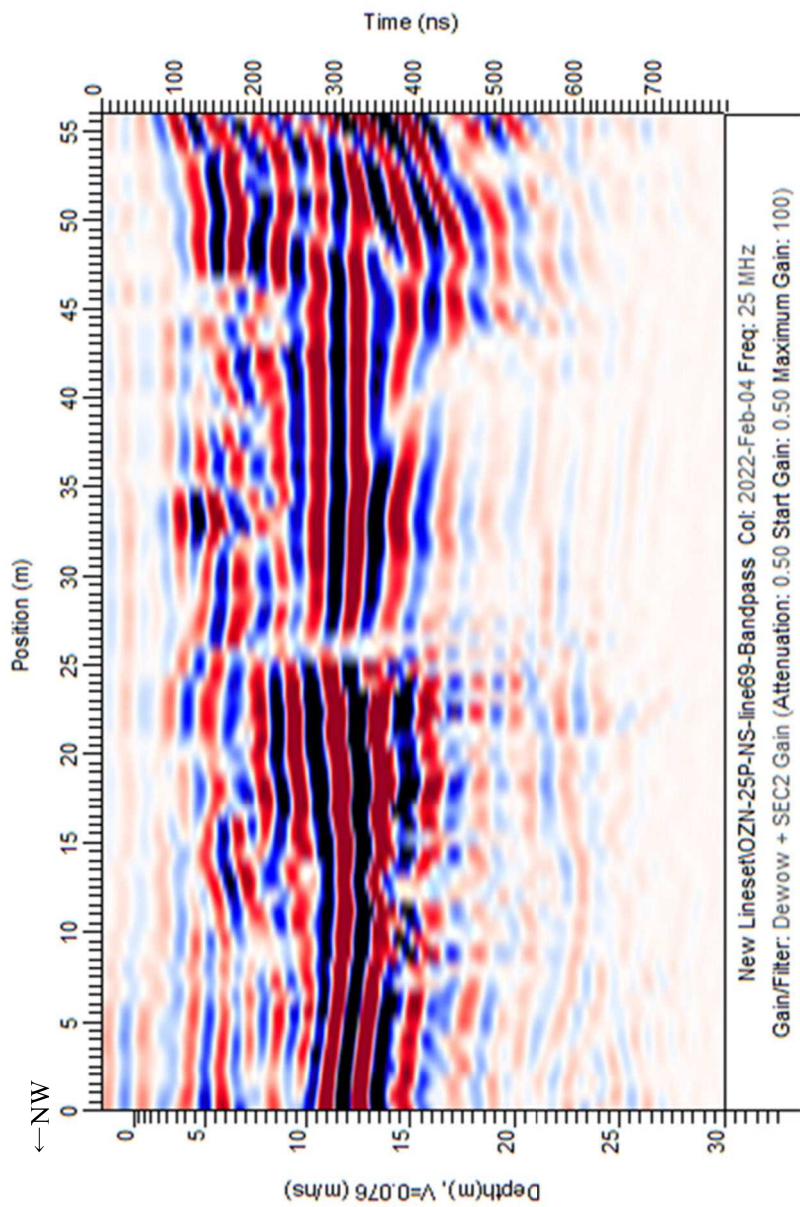


图 2.3.207 小園地区 探查結果 (25MHz) L11

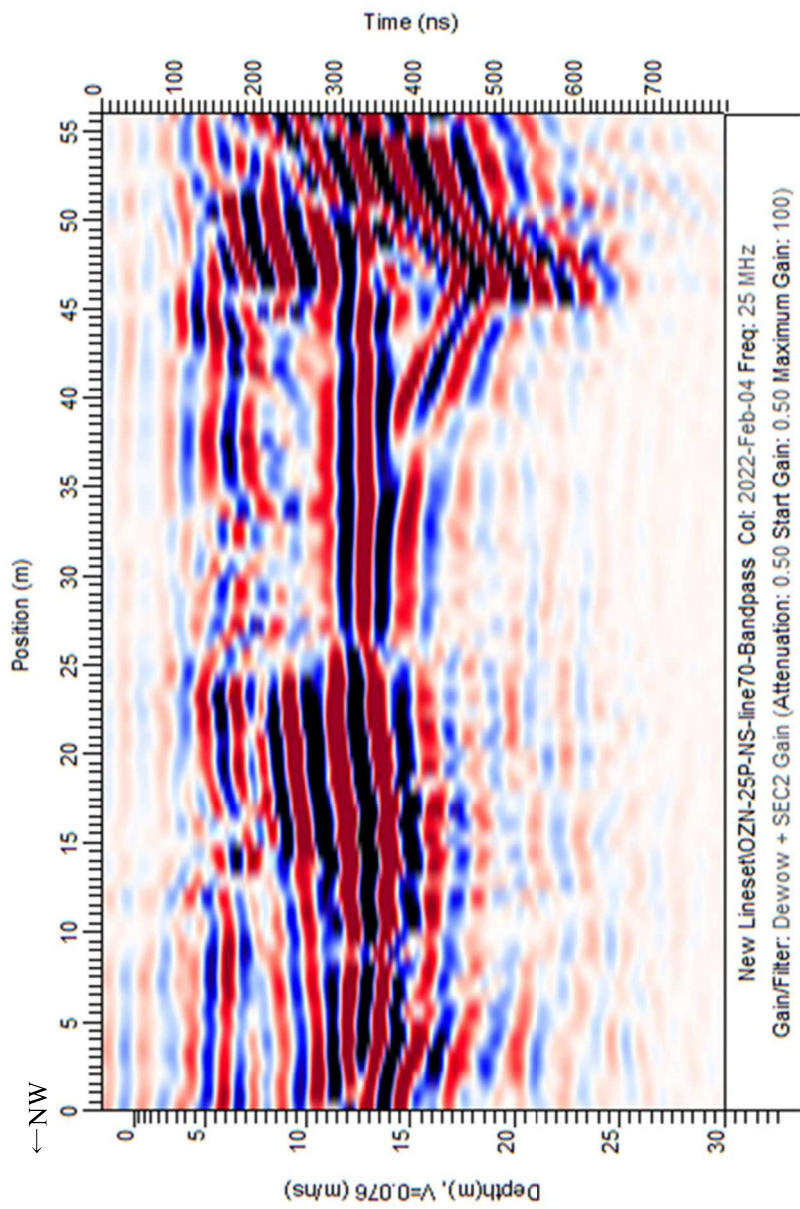


图 2.3.208 小園地区 探查結果 (25MHz) L13

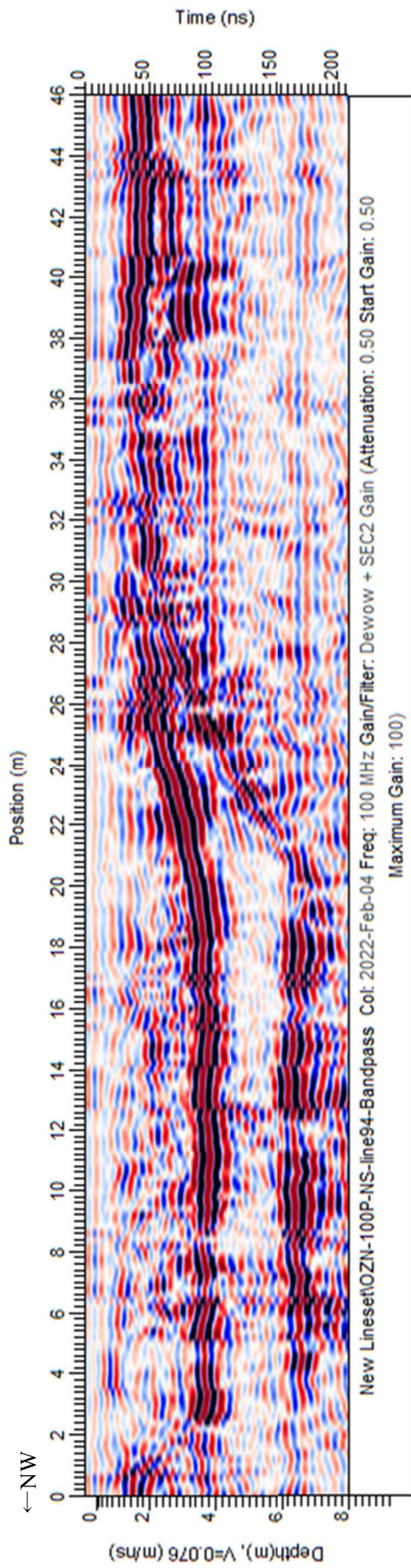


图 2.3.209 小園地区 探查結果 (100MHz) L1

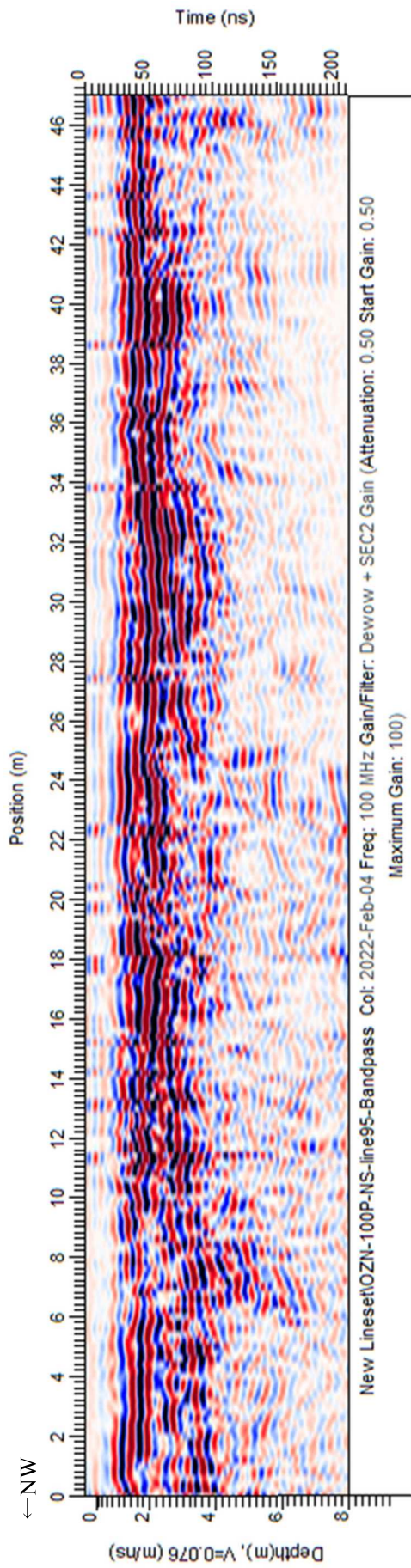


图 2.3.210 小園地区 探查結果 (50MHz) L3

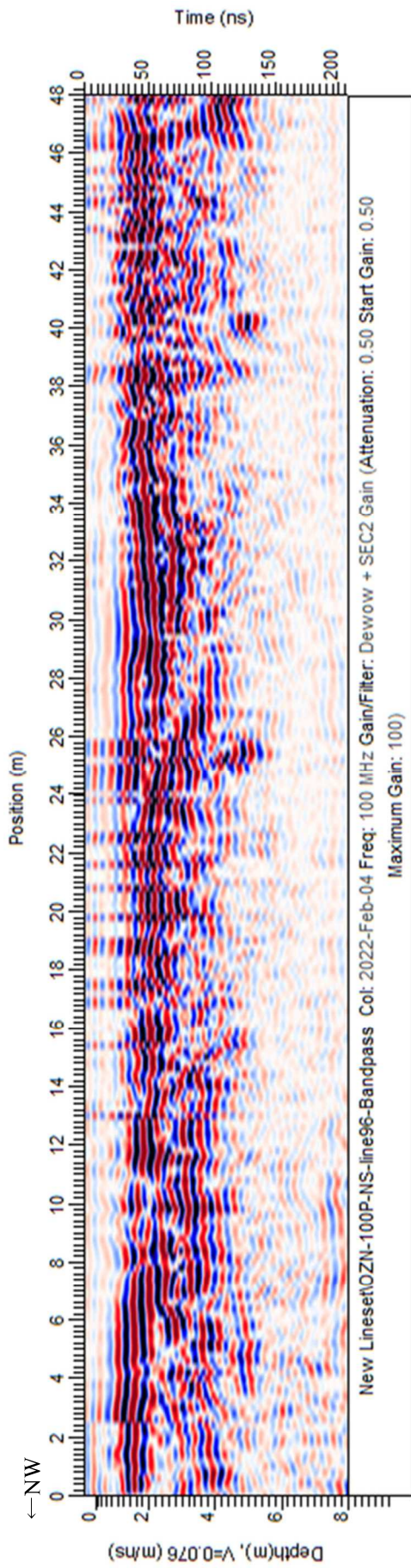


图 2.3.211 小園地区 探查結果 (50MHz) L5

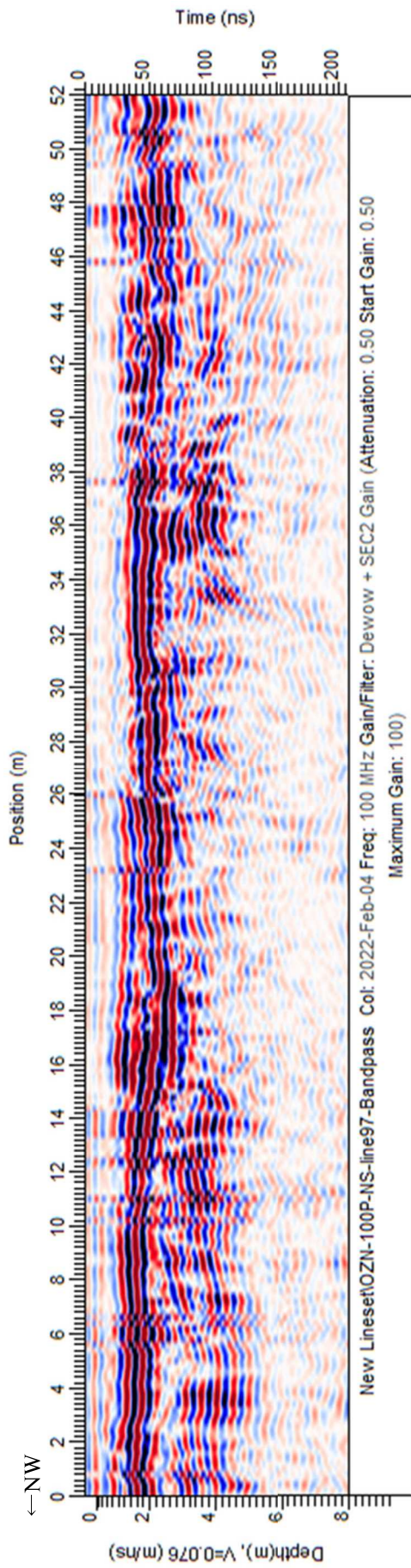


图 2.3.212 小園地区 探查結果 (50MHz) L9

(3) 福原地区

福原地区では既往トレンチ調査位置周辺において 2m 毎の測線間隔でトレンチと並行方向（断層直交方向）に 25MHz および 50MHz のアンテナを用いて地中レーダ探査を行い、併せて設定した測線と直交する方向（断層の両側：測線位置 11.60m、14.00m、18.00m、20.40m）の追加探査を実施した。調査内容を以下より示す。

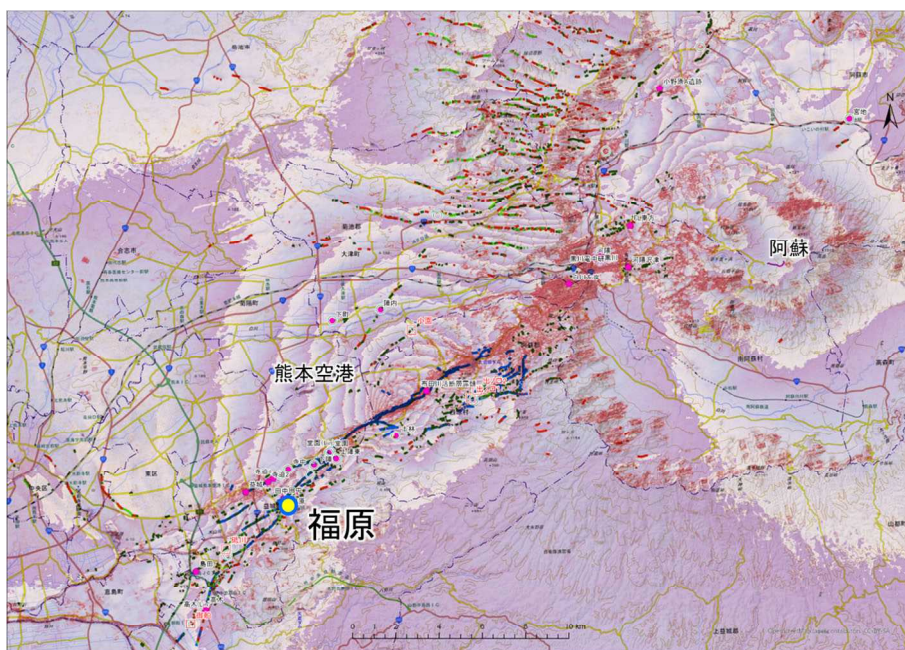


図 2.3.213 調査位置図（福原）（再掲）



図 2.3.214 現地状況（福原 詳細調査）

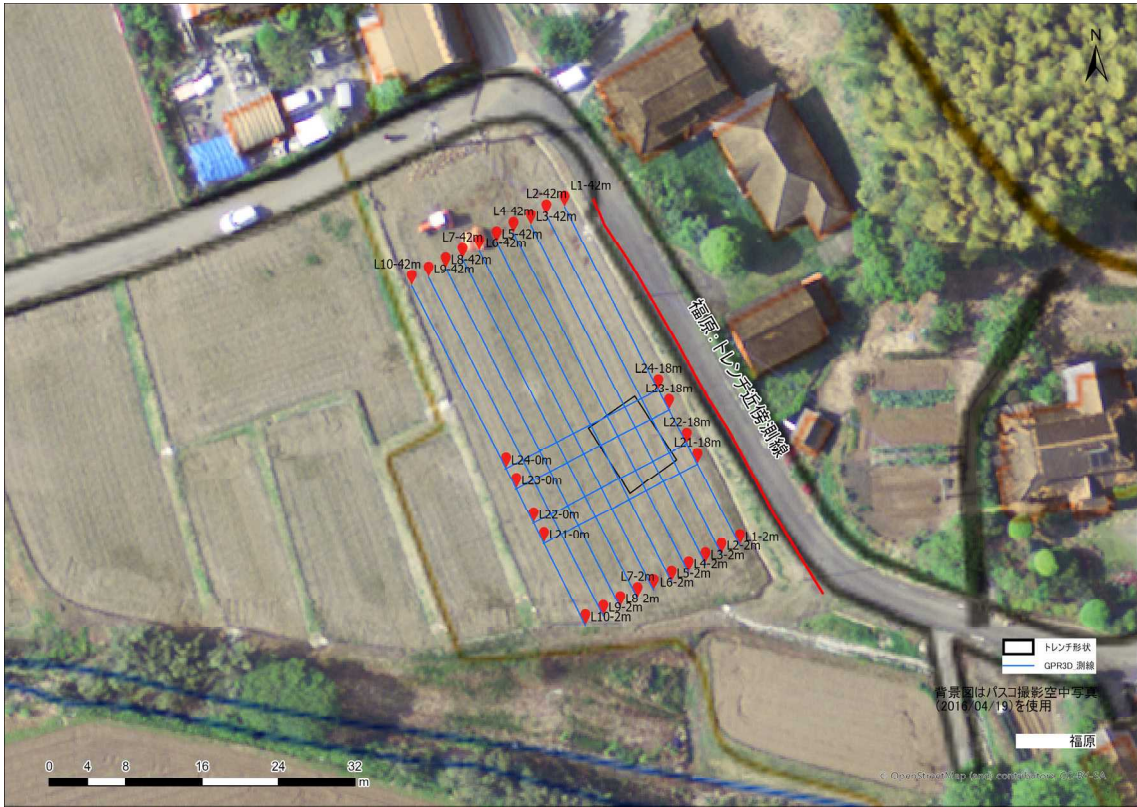


図 2.3.215 探査測線（福原 詳細調査）

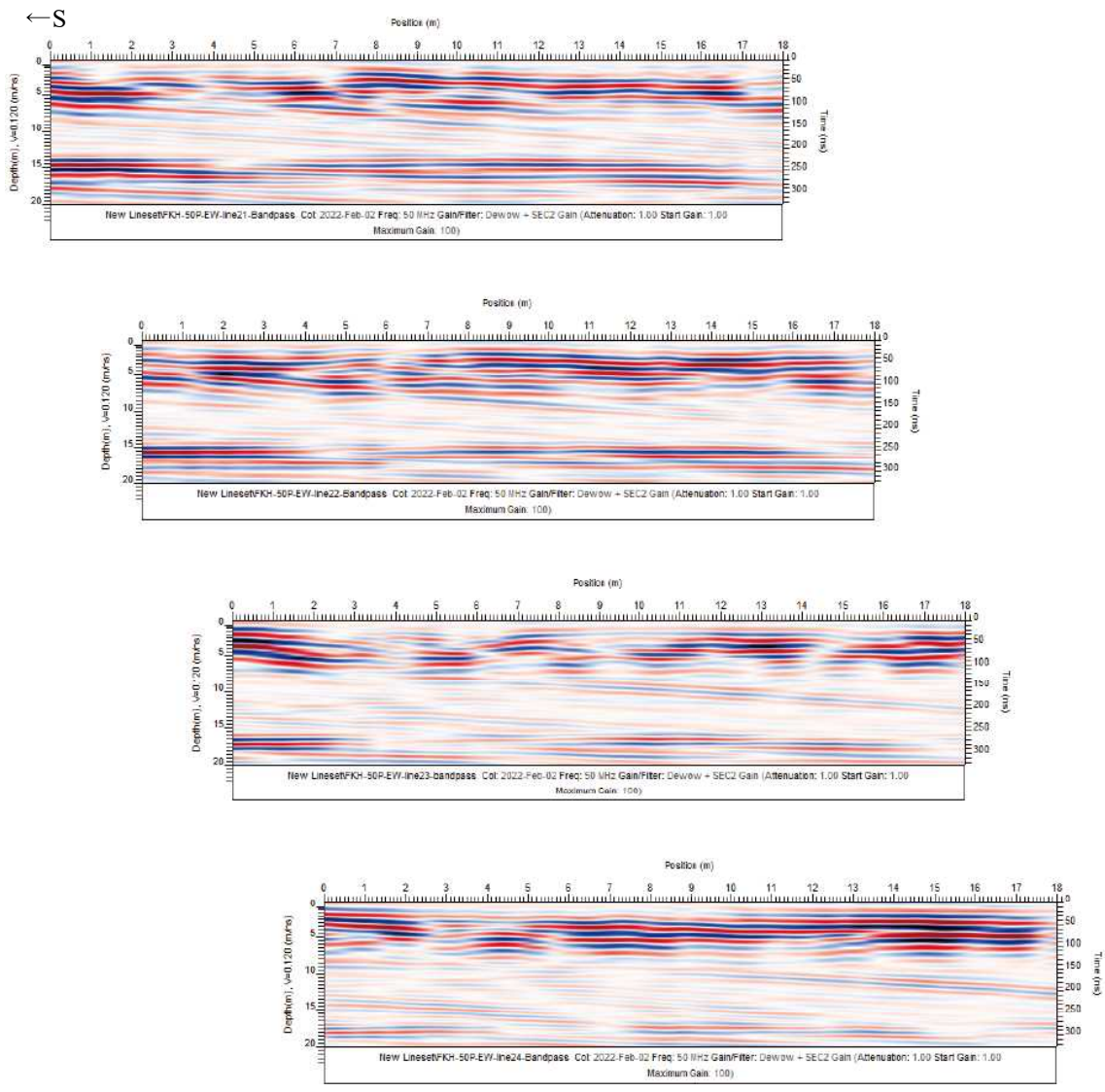


图 2.3.218 福原地区 探查結果 (50MHz) 直交方向測線

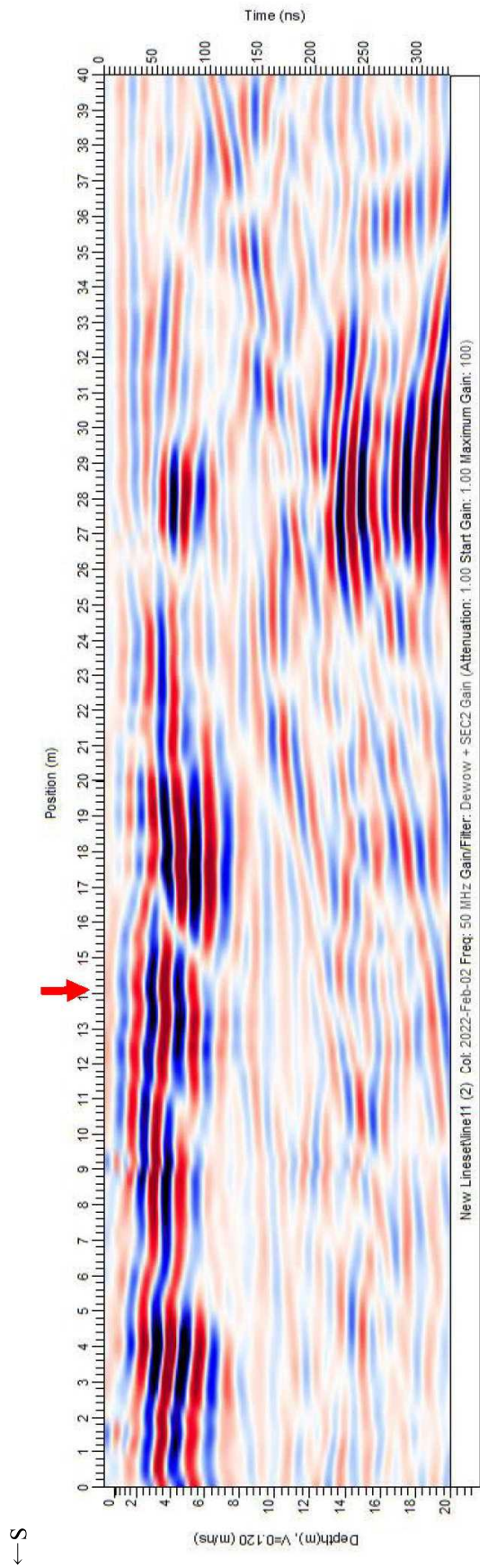


図 2.3.219 福原地区 探査結果 (50MHz) L1 (赤矢印：断層位置、緑線：トレンチ形状)

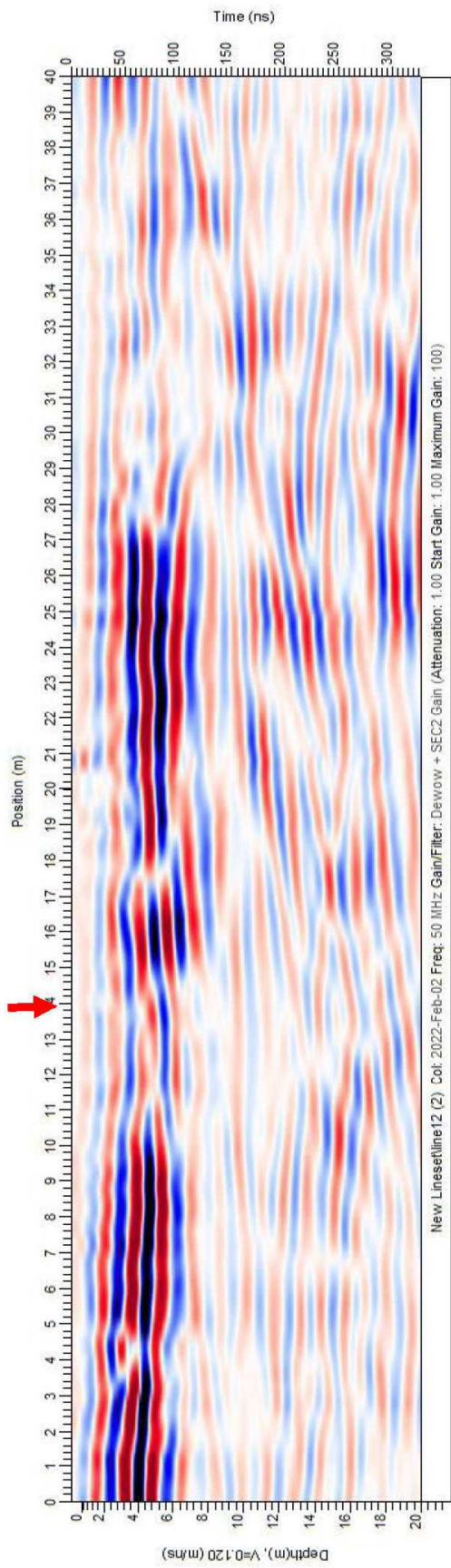


図 2.3.220 福原地区 探査結果 (50MHz) L2 (赤矢印：断層位置、緑線：トレンチ形状)

←S

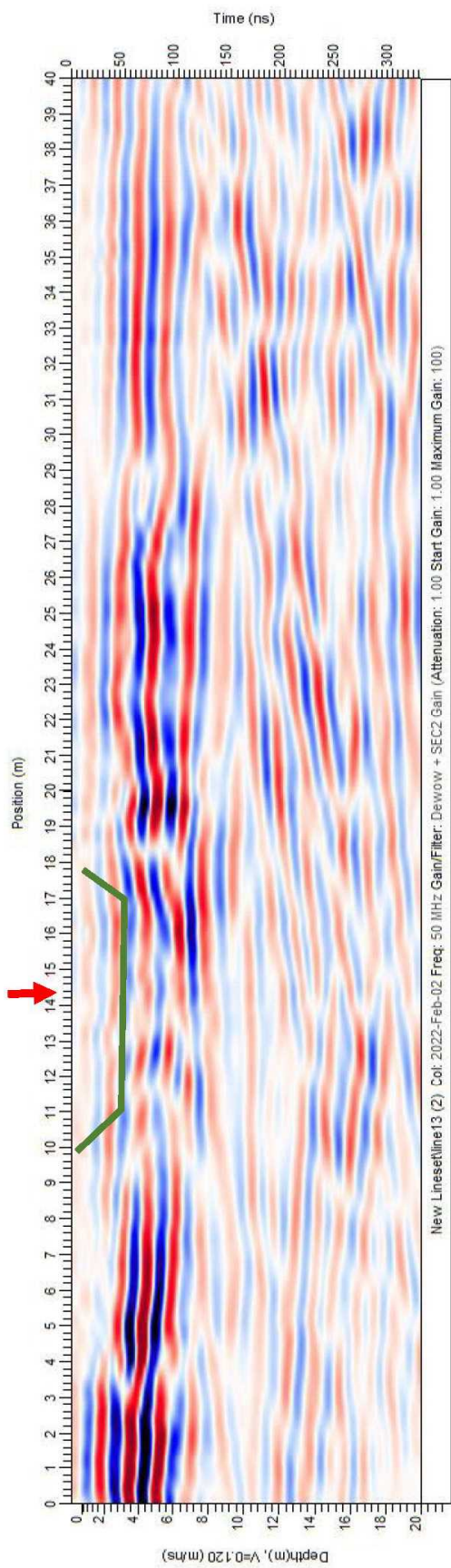


図 2.3.221 福原地区 探査結果 (50MHz) L3 (赤矢印: 断層位置、緑線: トレンチ形状)

←S

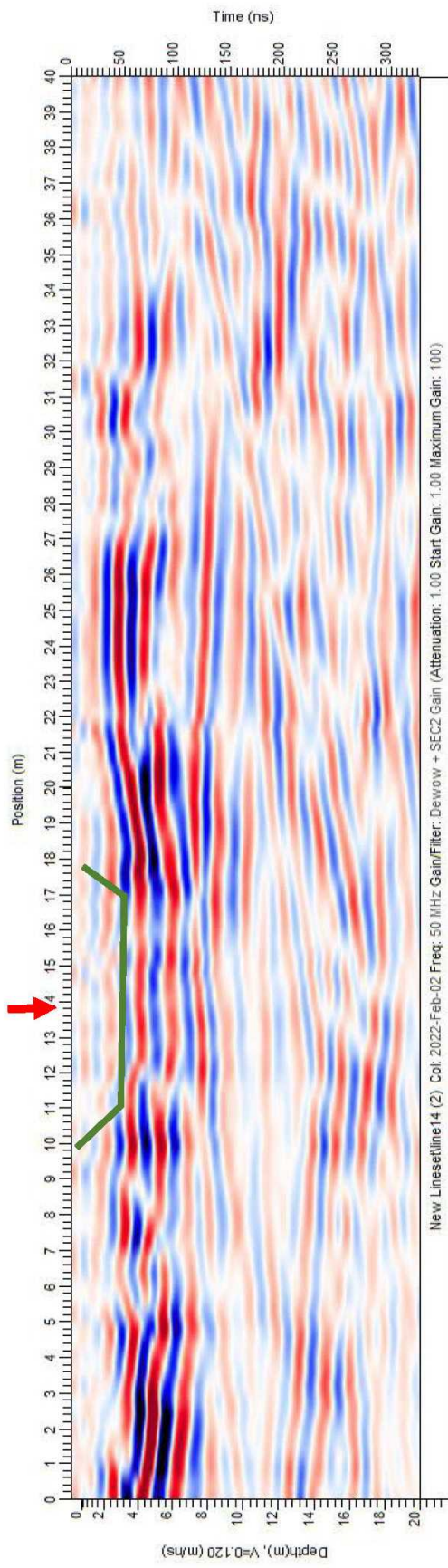


図 2.3.222 福原地区 探査結果 (50MHz) L4 (赤矢印: 断層位置、緑線: トレンチ形状)

←S

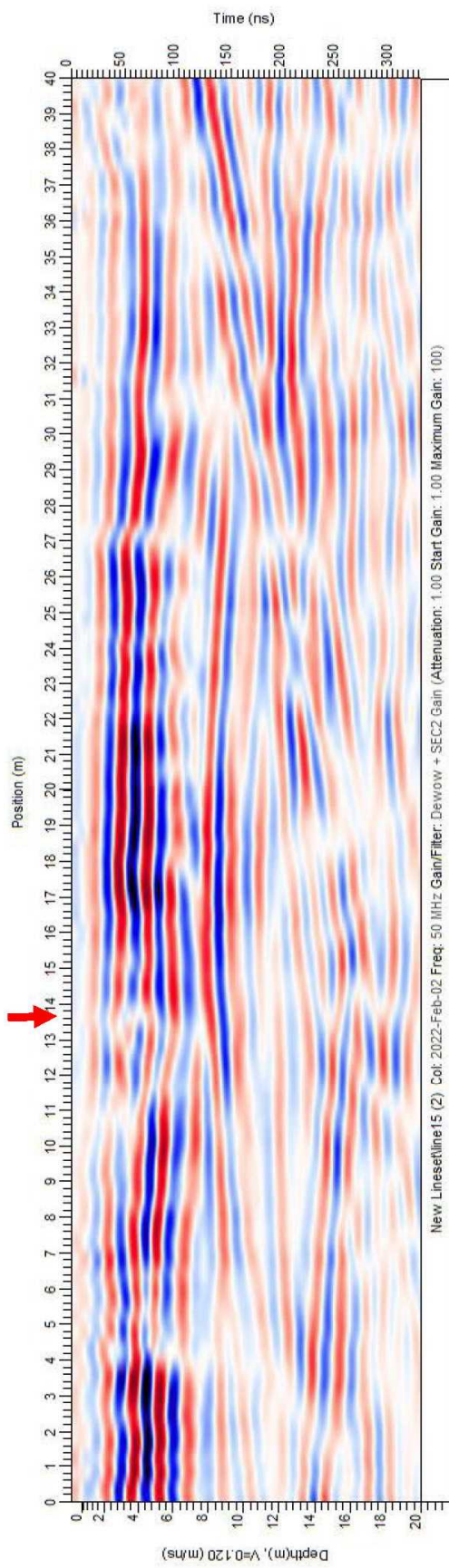


図 2.3.2.23 福原地区 探査結果 (50MHz) L5 (赤矢印: 断層位置、緑線: トレンチ形状)

←S

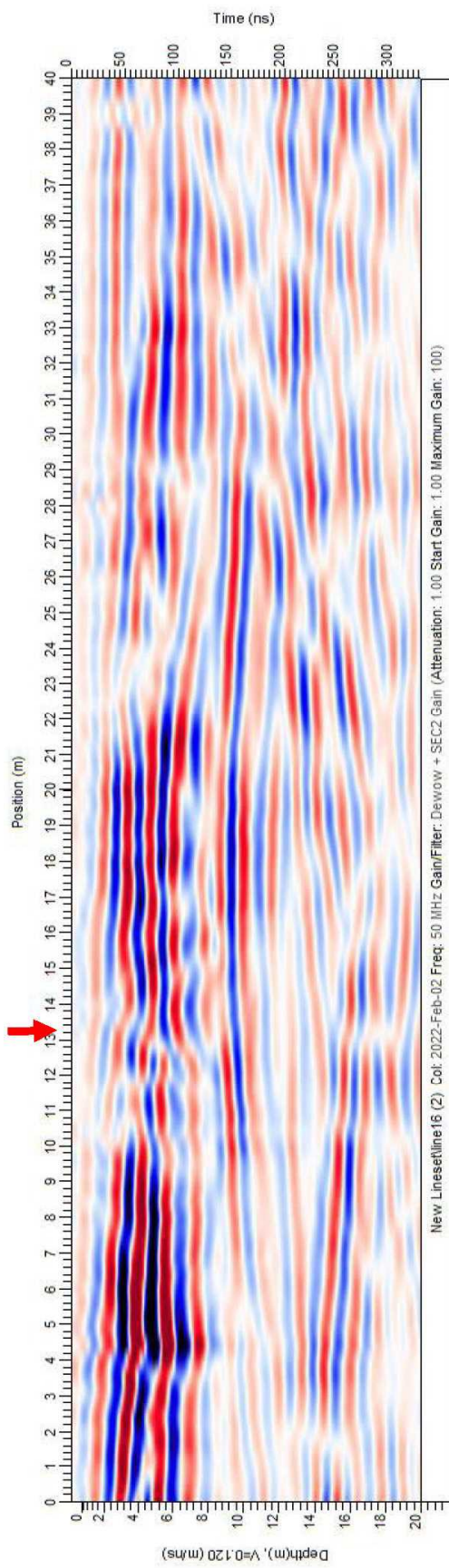


図 2.3.224 福原地区 探査結果 (50MHz) L6 (赤矢印: 断層位置、緑線: トレンチ形状)

←S

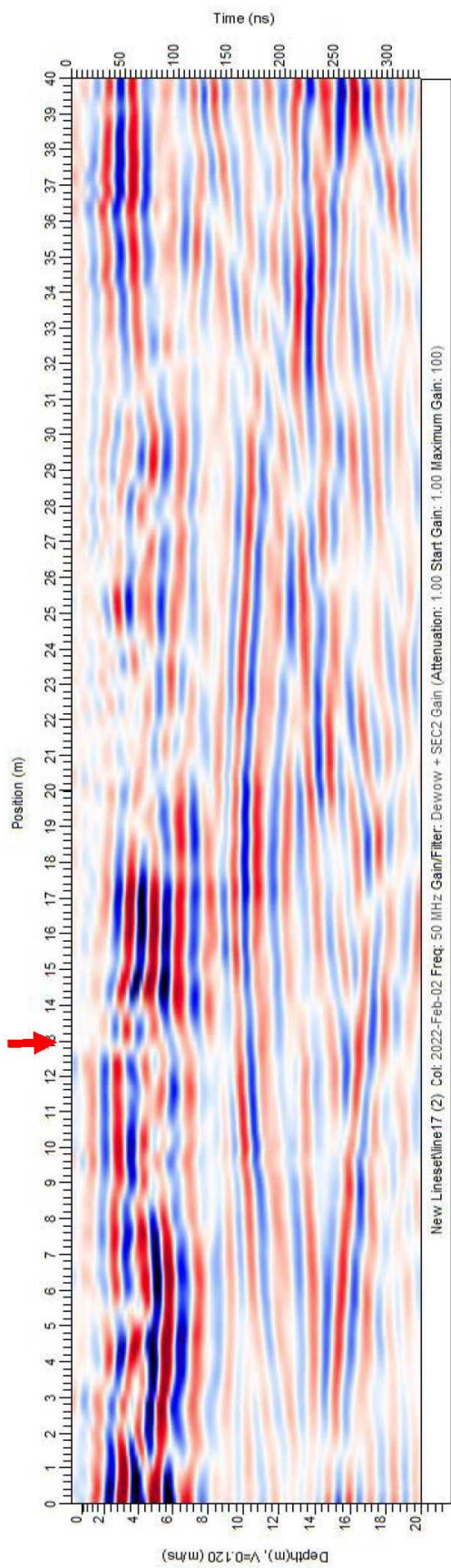


図 2.3.225 福原地区 探査結果 (50MHz) L7 (赤矢印: 断層位置、緑線: トレンチ形状)

←S

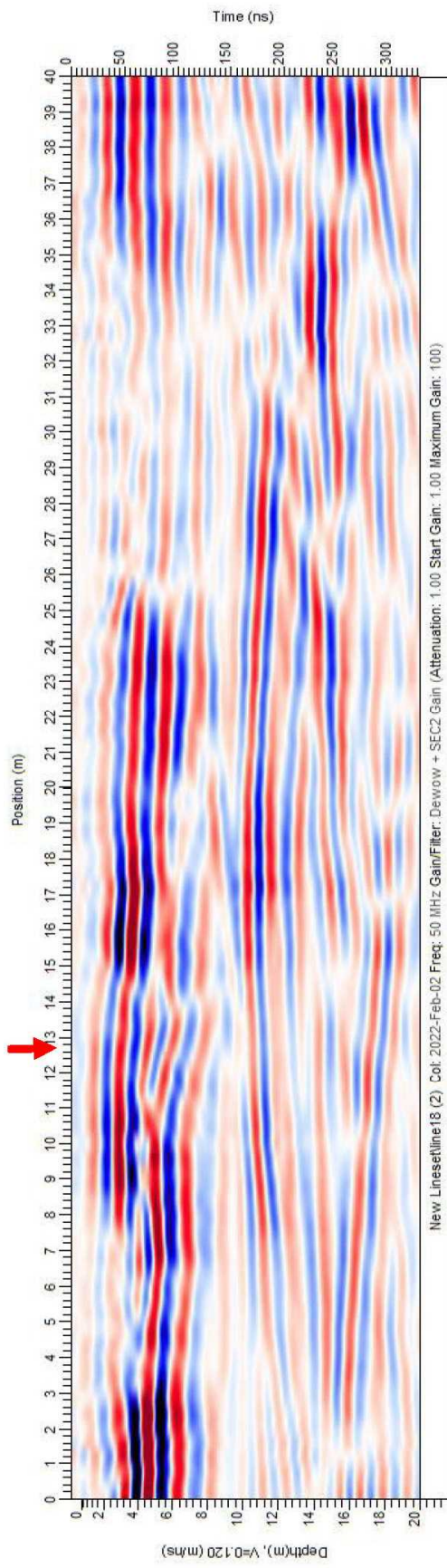


図 2.3.226 福原地区 探査結果 (50MHz) L8 (赤矢印: 断層位置、緑線: トレンチ形状)

←S

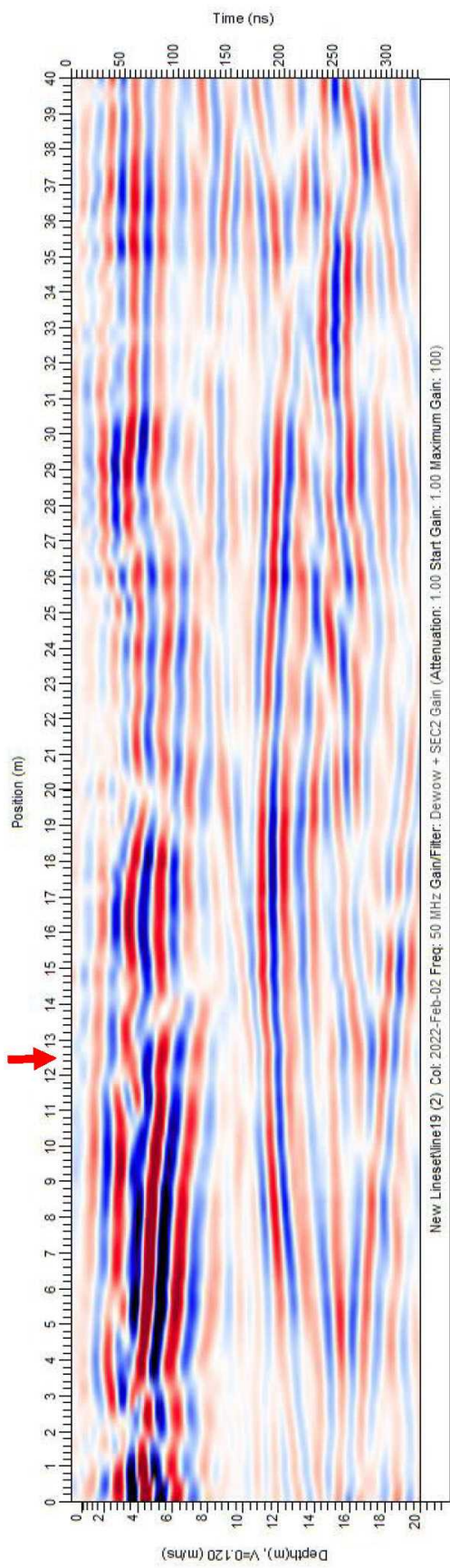


図 2.3.227 福原地区 探査結果 (50MHz) L9 (赤矢印: 断層位置、緑線: トレンチ形状)

←S

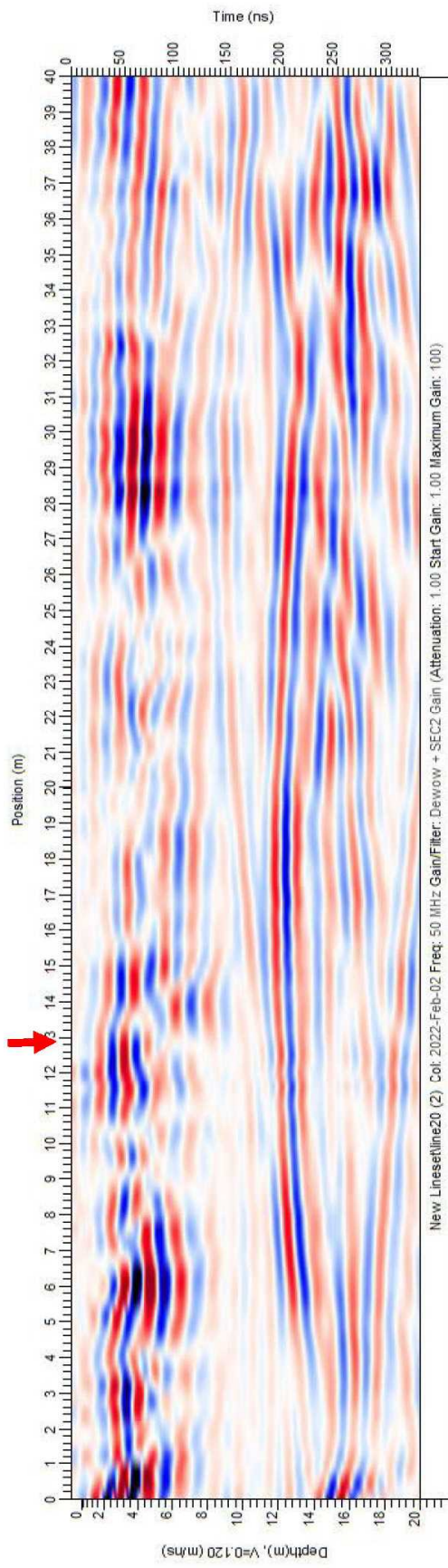


図 2.3.228 福原地区 探査結果 (50MHz) L10 (赤矢印：断層位置、緑線：トレンチ形状)

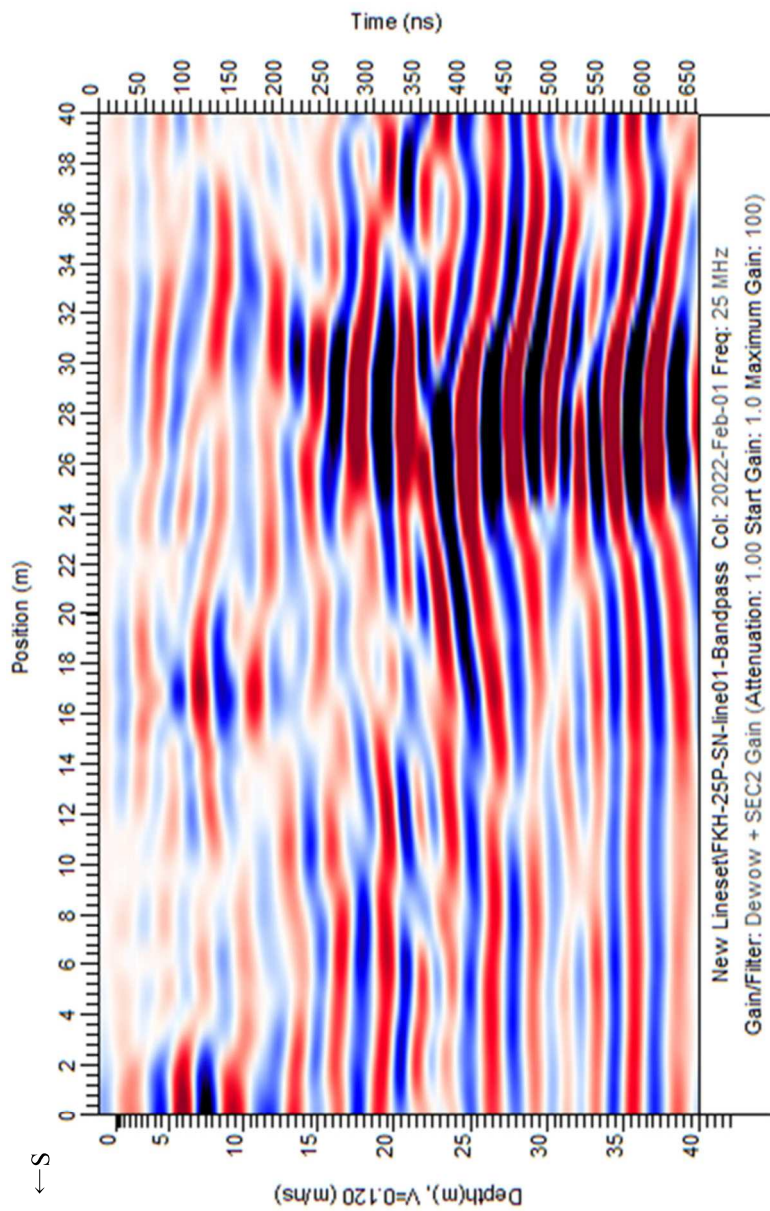


图 2.3.229 福原地区 探查結果 (25MHz) L1

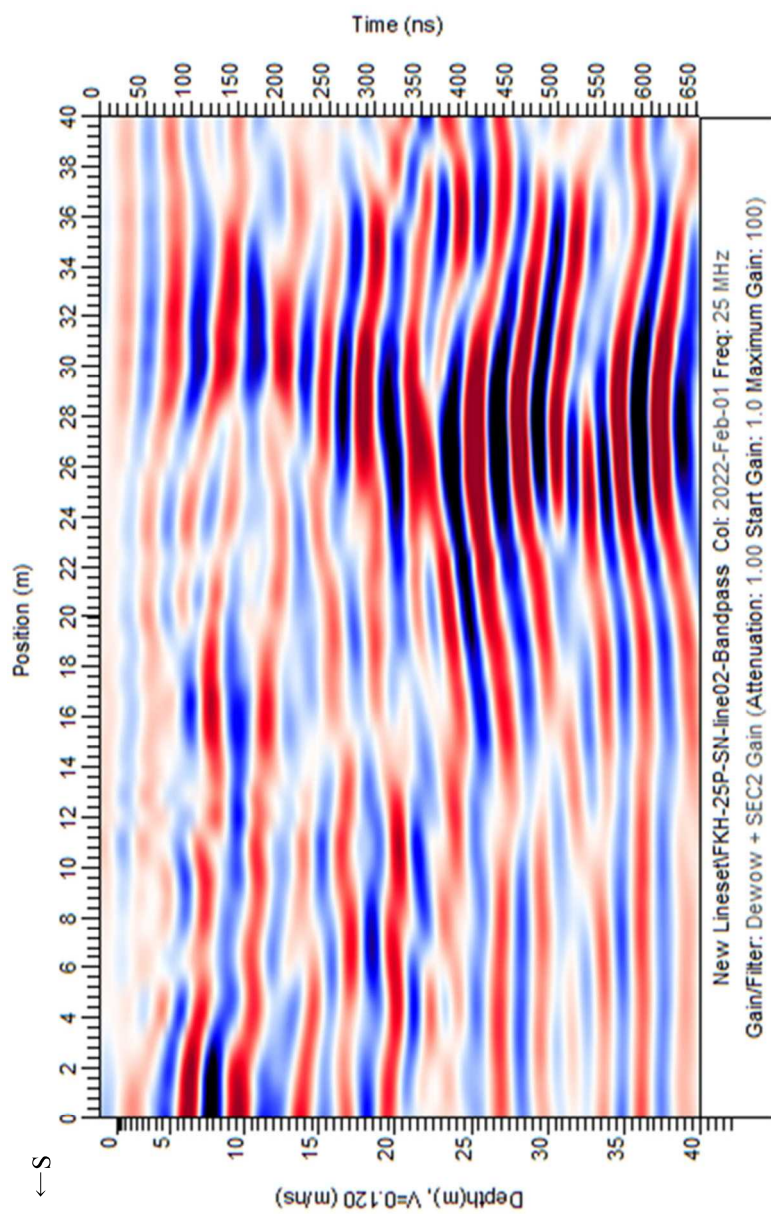


图 2.3.230 福原地区 探查結果 (25MHz) L2

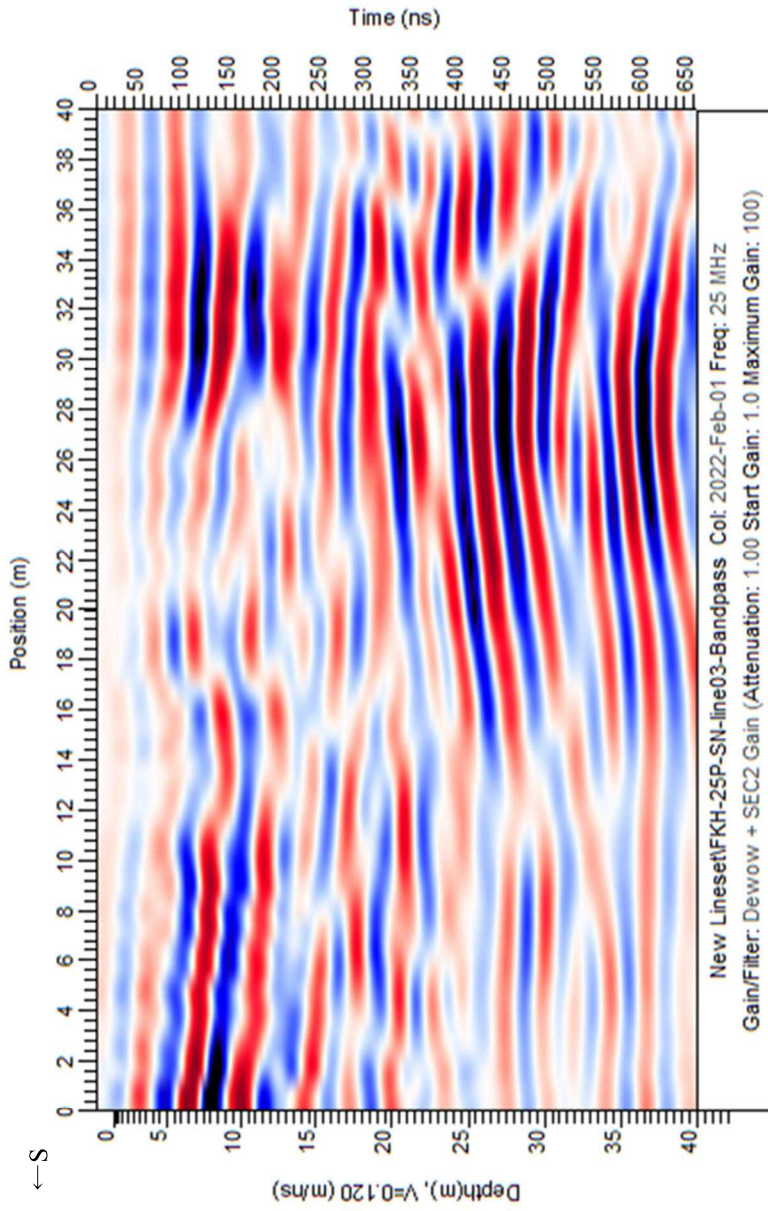


图 2.3.231 福原地区 探查結果 (25MHz) L3

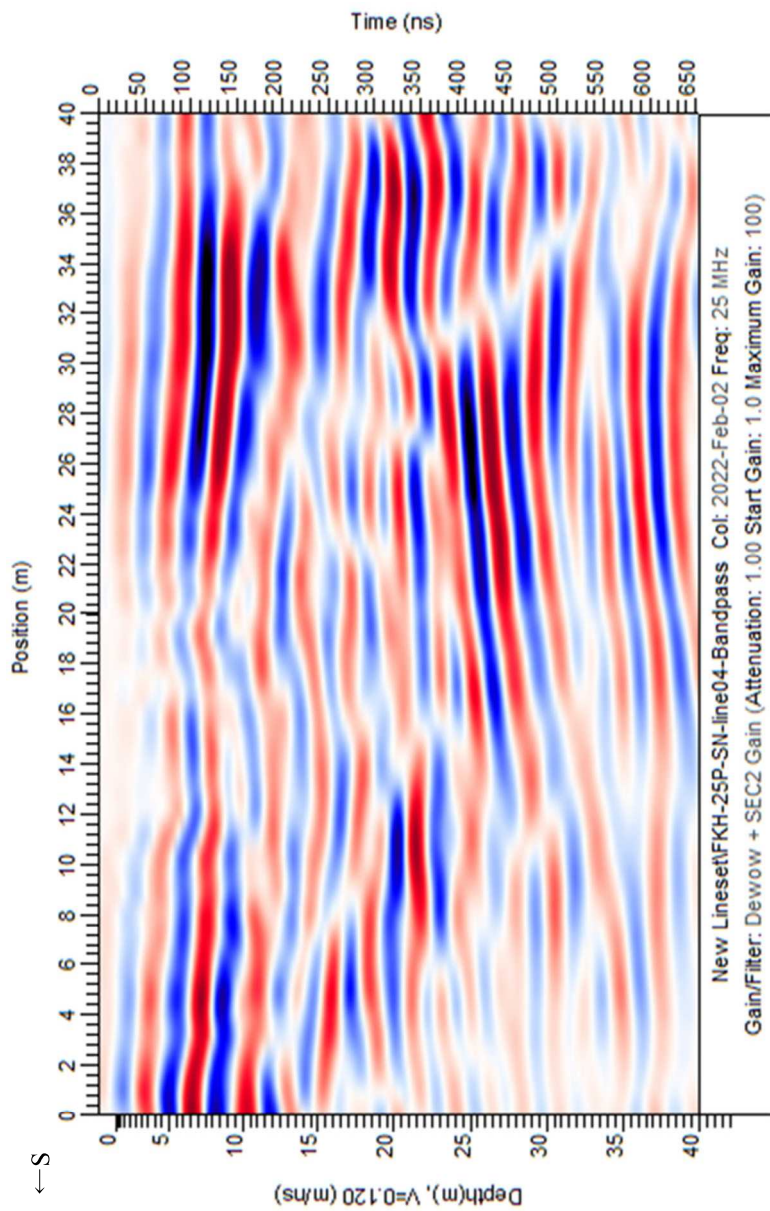


图 2.3.232 福原地区 探查結果 (25MHz) L4

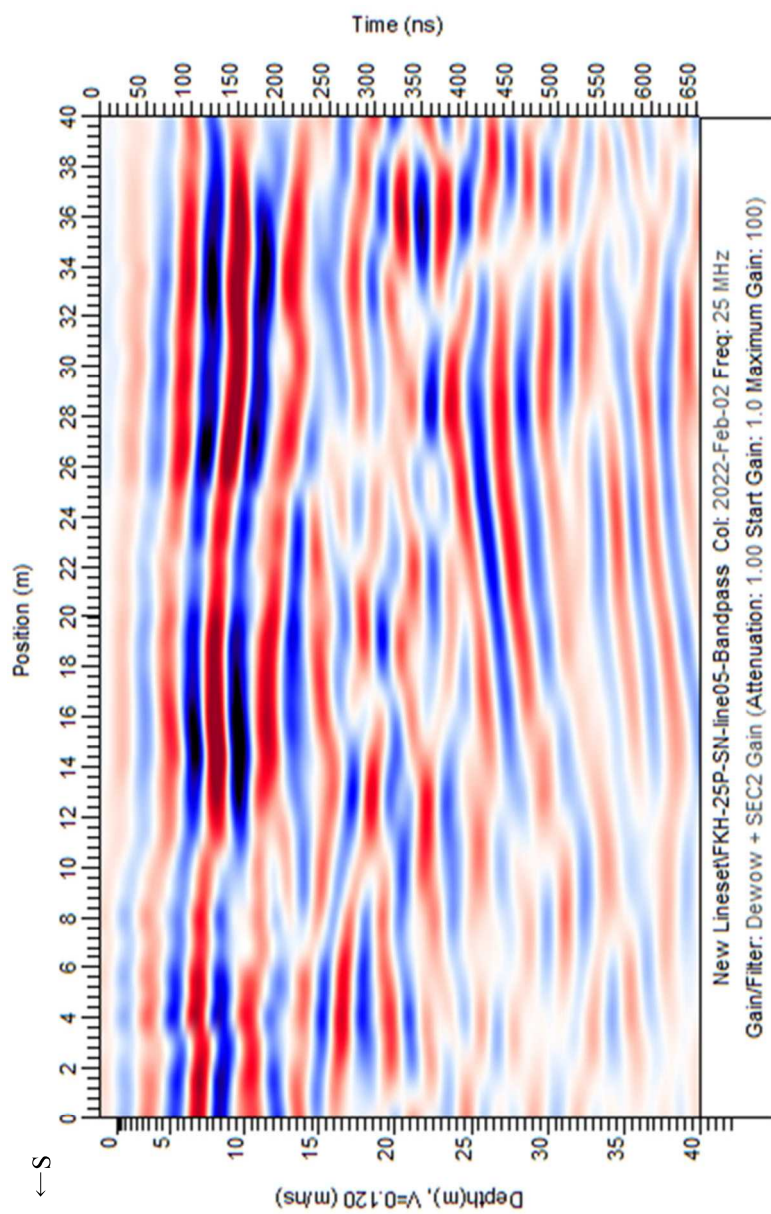


图 2.3.233 福原地区 探查結果 (25MHz) L5

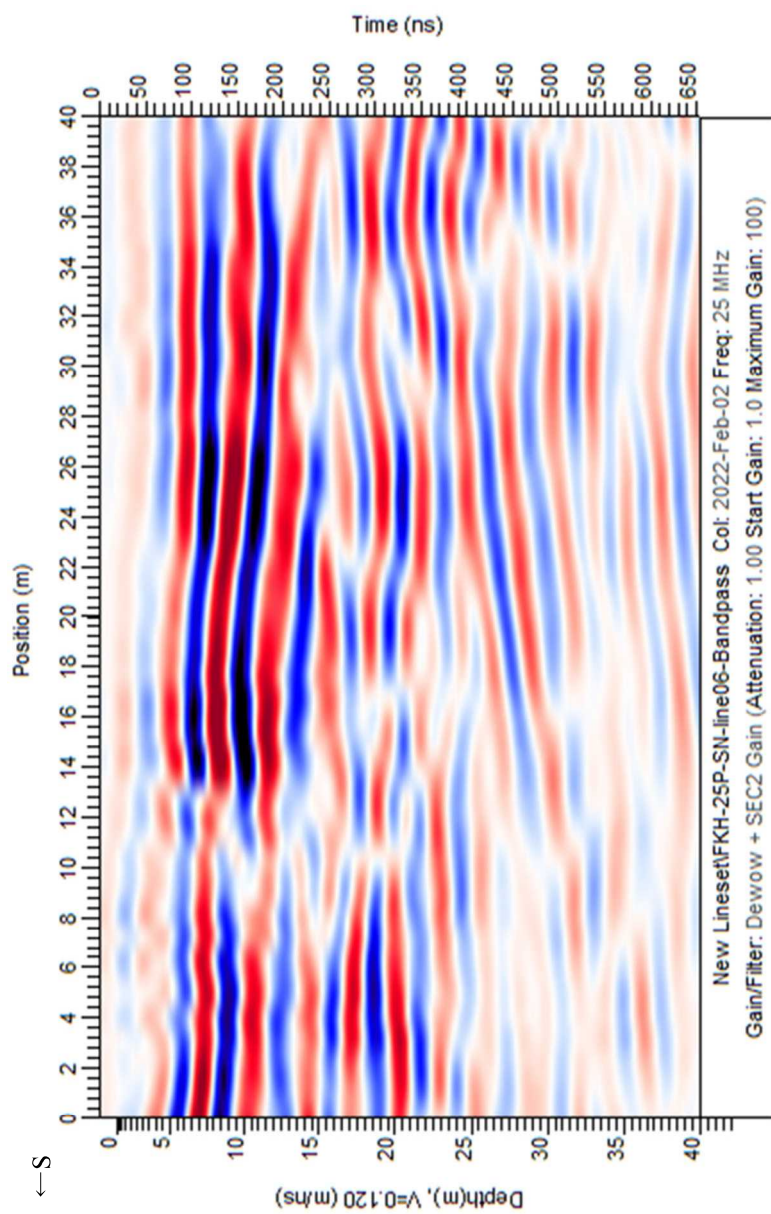


图 2.3.234 福原地区 探查結果 (25MHz) L6

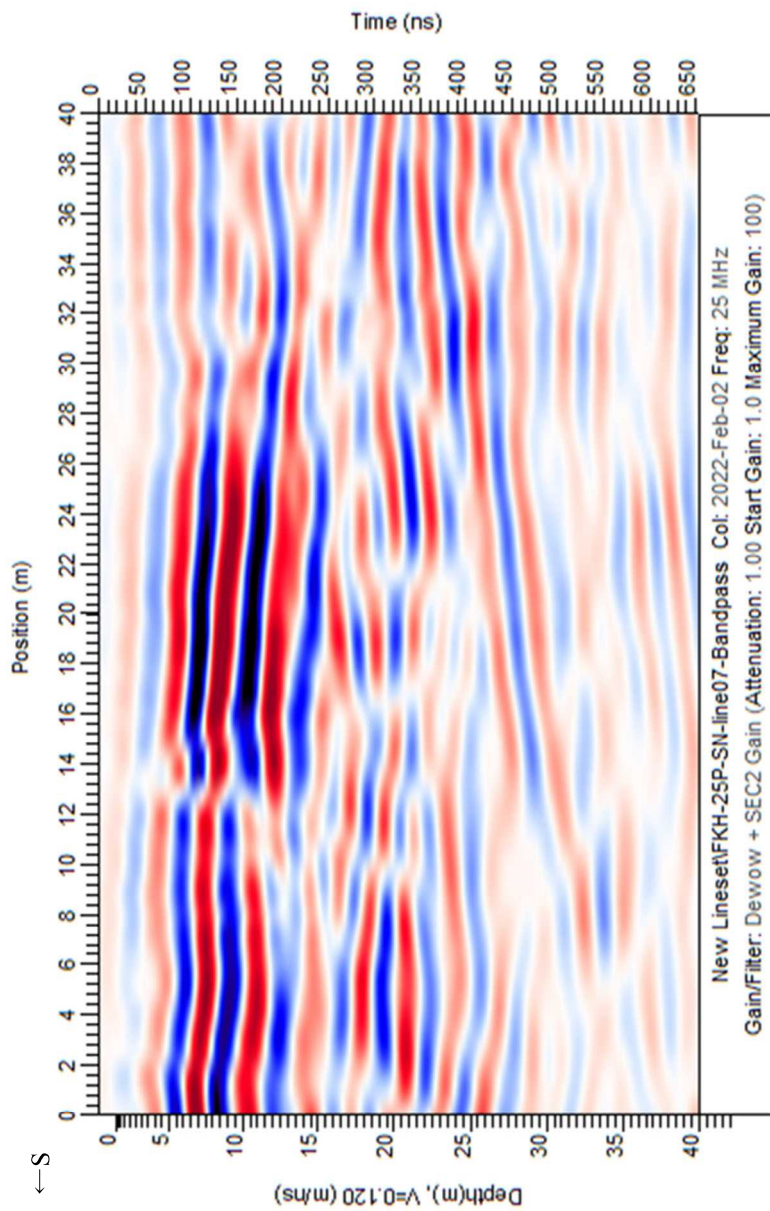


图 2.3.235 福原地区 探查結果 (25MHz) L7

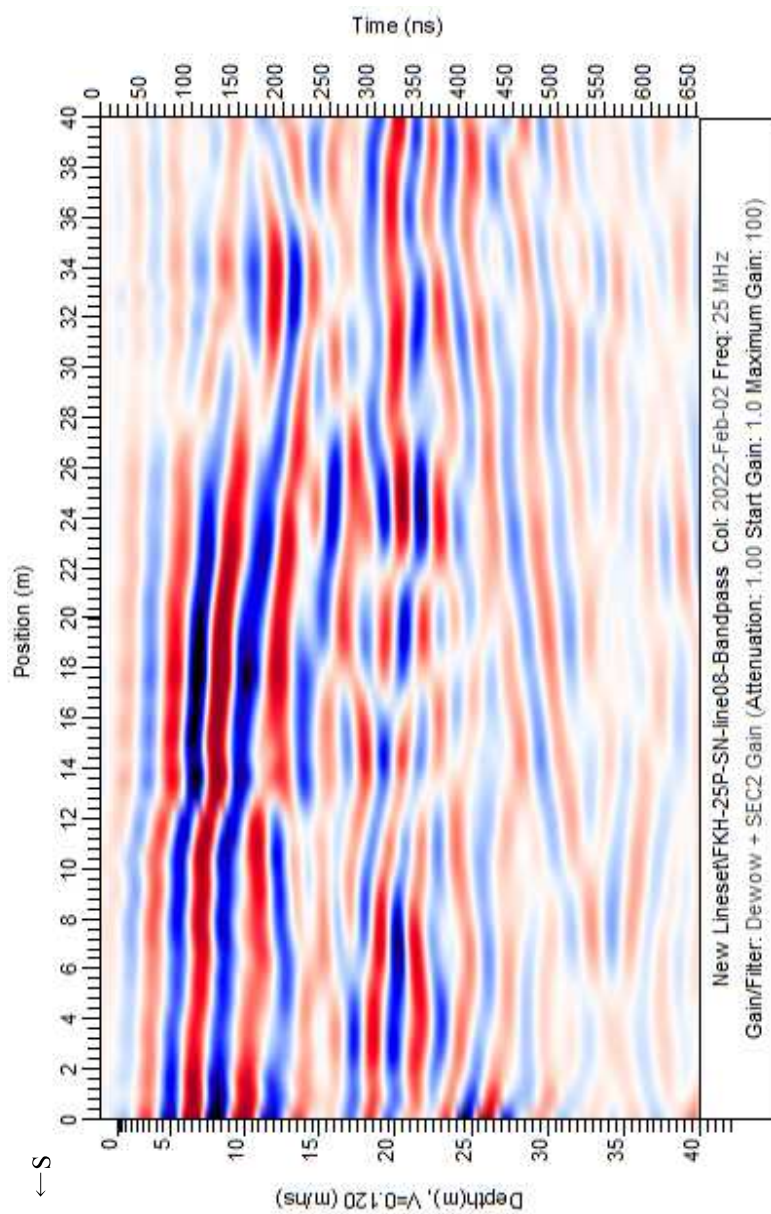


图 2.3.236 福原地区 探查結果 (25MHz) L8

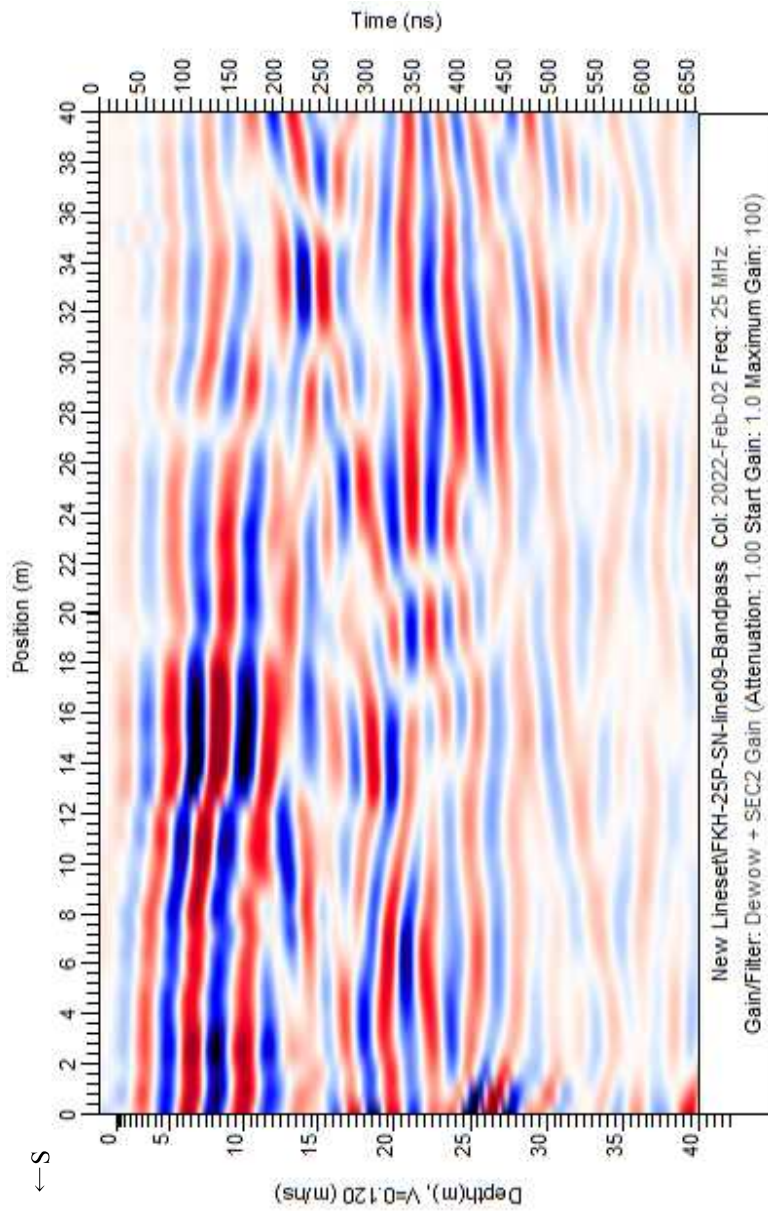


图 2.3.237 福原地区 探查結果 (25MHz) L9

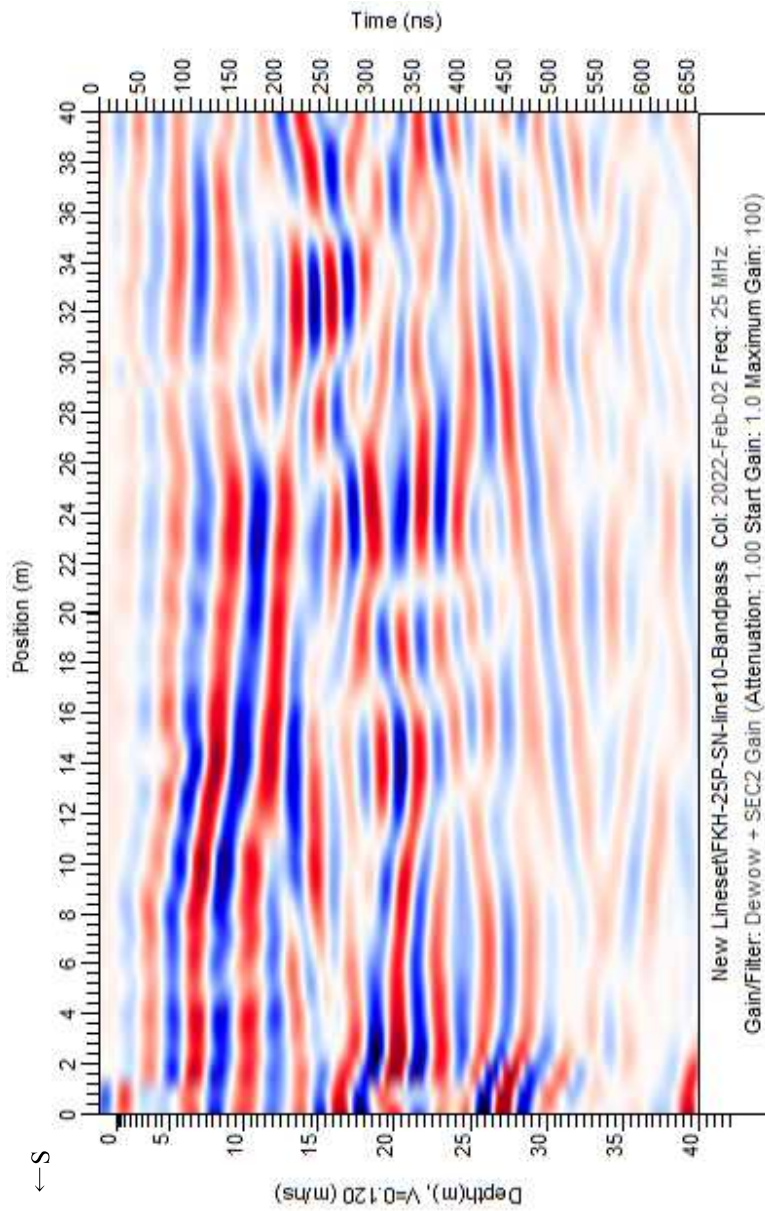


图 2.3.238 福原地区 探查結果 (25MHz) L10

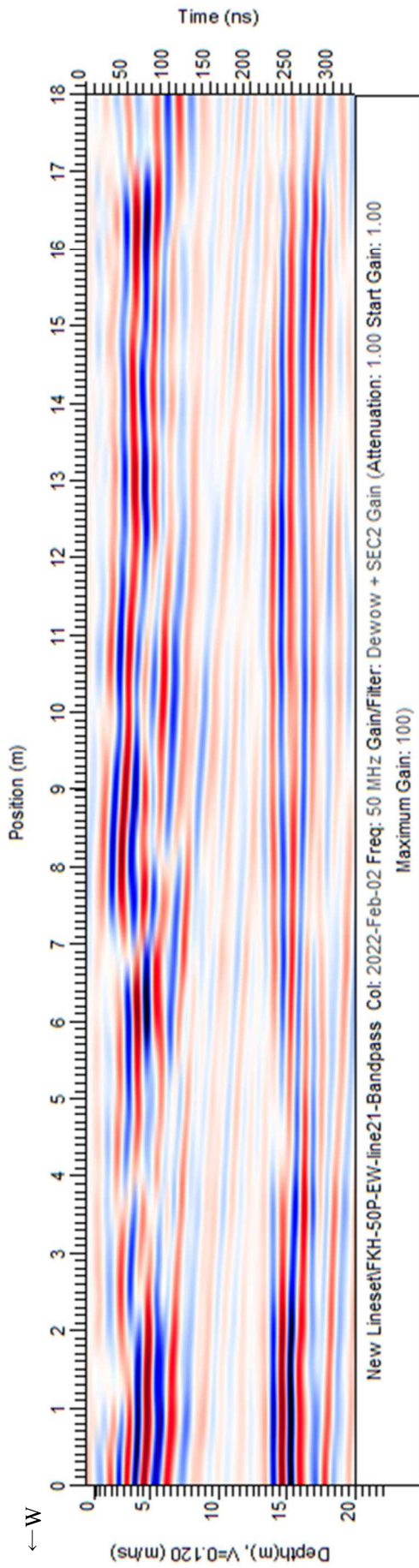


图 2.3.239 福原地区 探查結果 (50MHz) L24

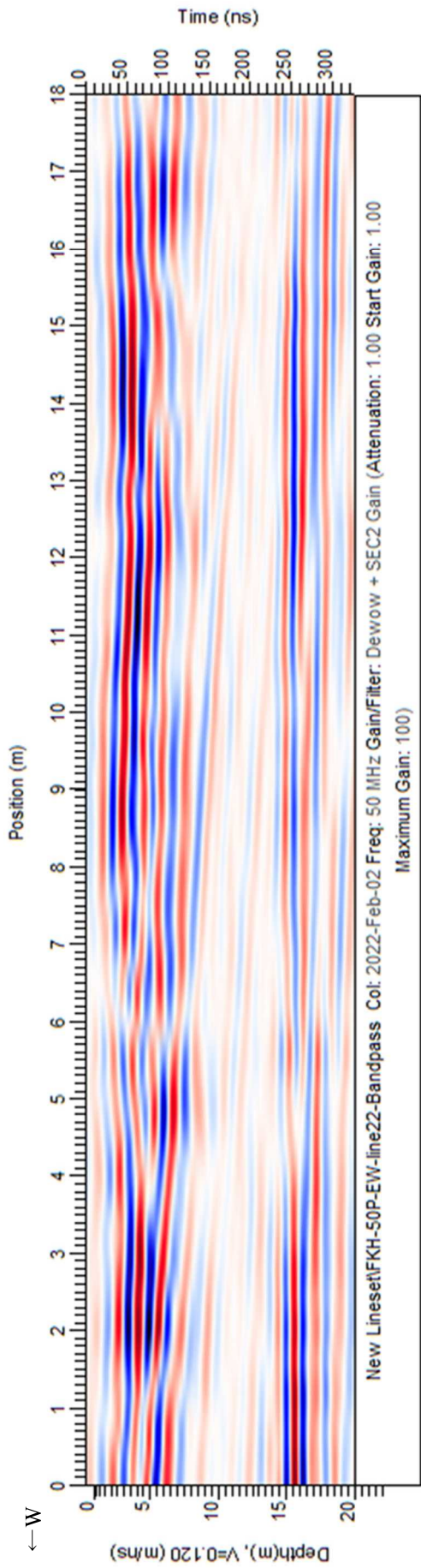


图 2.3.240 福原地区 探查結果 (50MHz) L23

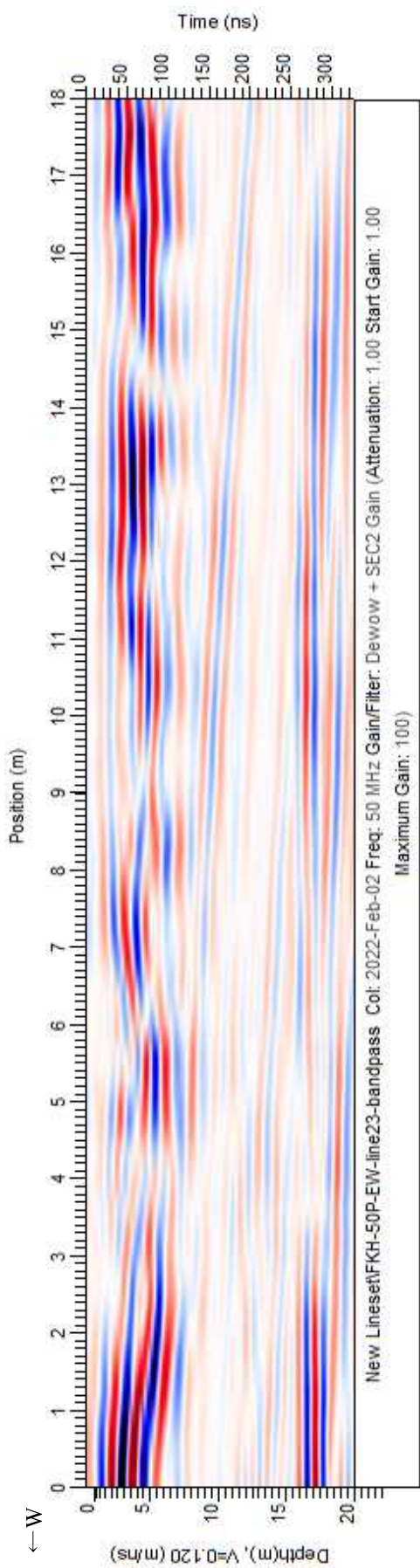


图 2.3.241 福原地区 探查結果 (50MHz) L22

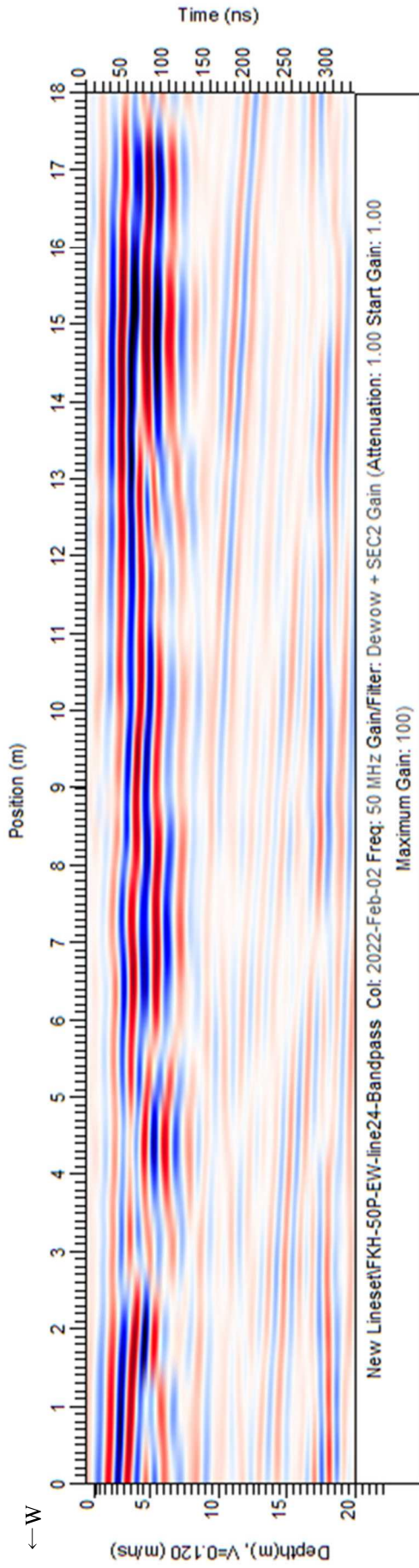


图 2.3.242 福原地区 探查結果 (50MHz) L21

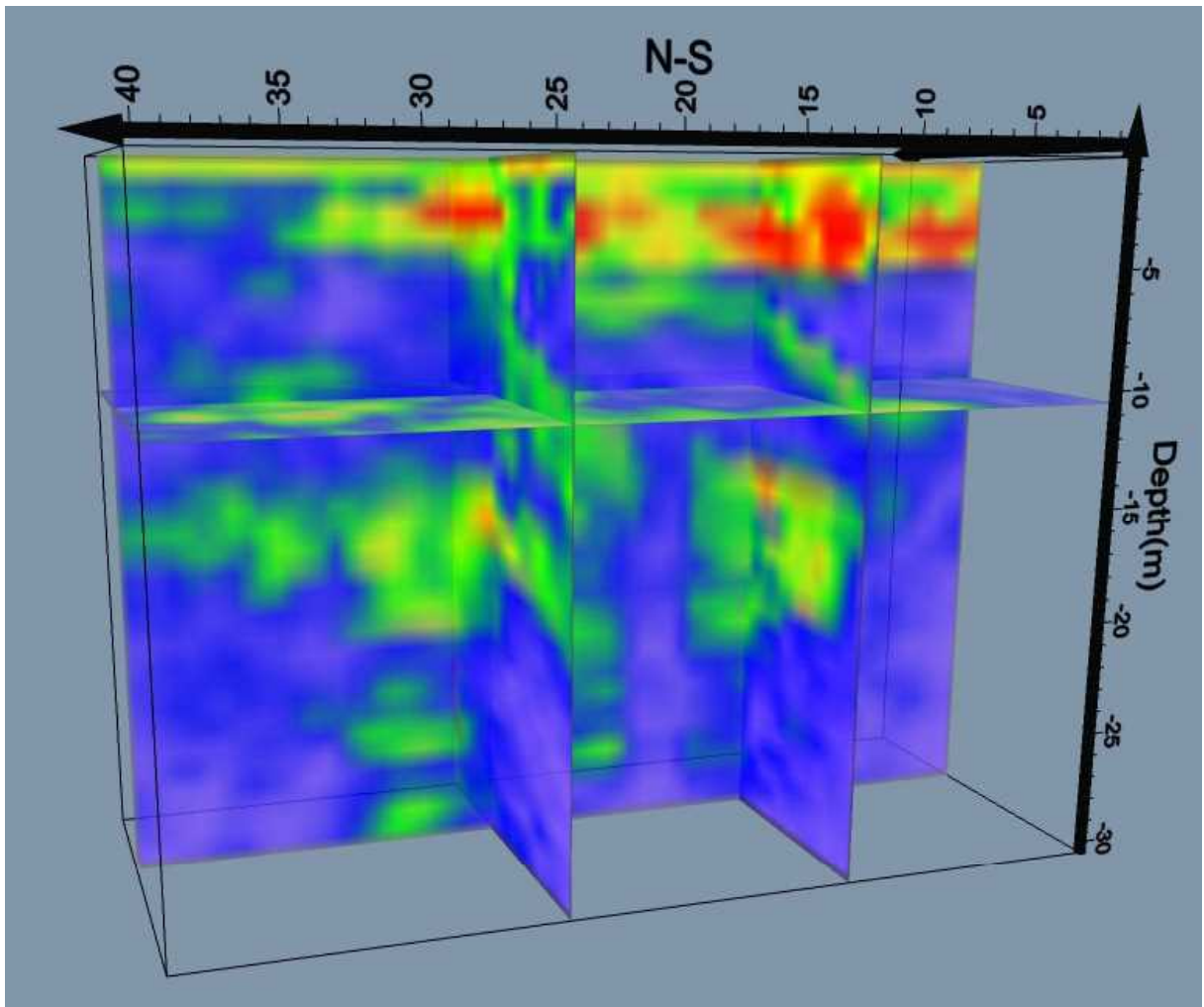


図 2.3.243 福原地区 3次元解析断面

三次元解析結果断面は福原地区のメッシュで実施した GPR 探査結果をパネルダイアグラムで表示したものである。

2.3.4. 検討結果

2016年熊本地震時に地表での変状、もしくはLC-InSARによって位相不連続が確認された箇所では浅部地下構造を検討するために表面波探査を実施した。得られた浅部S波速度構造からは、断層構造を示唆するような明瞭なS波速度のコントラストはみられなかった。しかしながら、LC-InSARの位相不連続や地表で変状が確認された多くの箇所で側方にS波速度構造が変化している（低速度層が厚くなる）傾向がみられた。したがって、地震時に副断層に相当するような変状を呈する場所は、地下に不均質構造を有する可能性が考えられる。一方、S波速度構造に側方変化がみとめられなかった地点もあったが、表面波探査ではとらえることができないスケールの不均質構造があるのか、それとも明瞭な不均質構造はみられないものの副断層が発生しているのかは今回の限られた結果からは考察することは困難であった。前節の地中レーダ探査をはじめとした浅部地下構造調査結果の蓄積が必要である。

今回実施した地中レーダ探査では、地上構造物や地下埋設物の反射の影響があり、良好な記録が得られていない断面もあるが、取得したほとんどの探査断面に反射の不連続や反射強度の違いが確認された。反射の不連続が確認された範囲は、地震時に変状が確認された箇所、LC-InSARの位相不連続や画像マッチング境界と概ね一致している。ただし、地中レーダ探査で検出される反射形状とLC-InSARや画像マッチング、現地踏査およびトレンチ調査から得られるデータの解像度は違うため、確実に地震時の変位・変状であるかどうかは検討が必要である。

また、地中レーダ探査から得られた明瞭な反射面の境界から、地層の分布形態を把握可能であることが明らかとなった。今後は取得したデータについて、3次元解析をさらに実施し、地下浅部での断層分布や累積変位量などを検討することが必要である。

これらのことから、表面波探査および地中レーダ探査において比較的規模の大きな構造（たとえば、小園トレンチにおける下に凸の盆地状の構造など）は確認できた一方で、横ずれが卓越した断層の性状や微小変位については識別が困難であった。

2.4. 参考文献

本章における参考文献一覧を以下に示す。

- 1) 古澤 明 (1995) 火山ガラスの屈折率測定および形態分類とその統計的な解析に基づく手フラの識別, 地質学雑誌, 101, p123-133.
- 2) 古澤 明 (2003) 洞爺火山灰降下以降の岩手火山のテフラの識別, 地質学雑誌, 109, p1-19.
- 3) Geometrics (2019) SeisImager/SW Manual.
- 4) 林 宏一・鈴木晴彦・奈藤秀樹 (2001) 人工振源を用いた表面波探査の開発とその土木地質調査への適用, 応用地質技術年報, 応用地質, 21, p. 9-39
- 5) 岩佐佳哉・熊原康博・後藤秀昭・細矢卓志・竹内峻・後藤拓実・住谷侑也・西口颯真 (2020) 布田川断層帯と日奈久断層帯の境界部の活動履歴—熊本県御船町高木における 2016 年地震断層のトレンチ調査—, 日本活断層学会 2020 年秋季学術大会講演予稿集
- 6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「布田川断層帯・日奈久断層帯の評価(一部改訂)」, http://jishin.go.jp/main/chousa/13feb_chi_kyushu/k_11.pdf, 2013.
- 7) 小荒井 衛・岡谷 隆基 (2011) いわき市周辺における地震災害の現地調査(2回目)の報告, 国土地理院地理地殻活動研究センター, 16pp.
- 8) 国土交通省 (2017) 熊本地震からの益城町の市街地復興に向けた安全対策のあり方等に関する報告書 最終報告, 126pp (令和元年 7 月に最終報告の一部を修正) http://www.mlit.go.jp/report/press/toshi08_hh_000034.html
- 9) 国土交通省, 被災地域境界基本三角測量, <http://www.chiseki.go.jp/plan/hisaikyokai/kumamoto/index.html>
- 10) 熊原康博・岡田真介・楮原京子・金田平太郎・後藤秀昭・堤 浩之, (2017) 1:25,000 活断層図 布田川・日奈久断層帯とその周辺「熊本 改訂版」
- 11) Lin A., P. Chen, T. Satsukawa, K. Sado, N. Takahashi, and S. Hirata (2017), Millennium Recurrence Interval of Morphogenic Earthquakes on the Seismogenic Fault Zone That Triggered the 2016 Mw 7.1 Kumamoto Earthquake, Southwest Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 107, No. 6, pp. 2687–2702
- 12) 丸山 正・吉見 雅行・斎藤 英二・斎藤 勝 (2015) 2011 年福島県浜通りの地震で活動した井戸沢断層西側トレース北セグメントおよび東側トレースの古地震調査, 活断層・古地震研究報告, No.15, p1-24.
- 13) 町田 洋・新井房夫 (2003) 新編火山灰アトラス〔日本列島とその周辺〕, 336p. 東京大学出版会.
- 14) 三浦みなみ (2017) 高精度表面波探査を用いた地盤の安定性評価に関する研究, 神戸大学博士論文
- 15) 文部科学省研究開発局・国立大学法人九州大学 (2017) 平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査平成 28 年度成果報告書, 270pp, 地震調査研究推進本部,

https://www.jishin.go.jp/database/project_report/kumamoto_sogochousa-h28/ 2018/3/12 確認

- 16) 小俣 雅志・郡谷 順英・三五大輔 (2016) 干渉 SAR を使用した新たな地表地震断層検出方法, 日本活断層学会 2016 年秋季学術大会講演予稿集
- 17) 小俣雅志・郡谷順英・三五大輔・渋谷典幸・谷口薫 (2017a) LC-InSAR 解析によって抽出される平成 28 年熊本地震の微小な地表変状, 日本活断層学会 2017 年秋季学術大会講演予稿集
- 18) 小俣 雅志・三五大輔・郡谷 順英・谷口 薫 (2017b) 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震において新たな干渉 SAR 解析によって見出された地表変状, JpGU-AGU Joint Meeting 2017 SSS12-11
- 19) パスコ(2021),「断層変位評価に係る調査」, 令和 2 年度原子力規制庁委託成果報告書.
- 20) Paula, R. J., A. N. E. William, B. Edouard, B. Alex, G. Paul, B. R. Christopher, B. Martin, C. Hai, L. R. Edwards, F. Michael, G. M. Pieter, G. P. Thomas, H. Irka, H. J. Timothy, H. G. Alan, H. A. Konrad, K. Bernd, M. W. Sturt, M. Raimund, P. G. Jonathan, P. Charlotte, P. Johannes, R. W. Ron, R. A. David, E. M. Scott, S. R. John, T. M. S. Christian, W. Lukas, A. Florian, B. Ulf, C. Manuela, F. M. Simon, F-S. Alexandra, F. Ronny, K. Peter, K. Sabrina, M. Fusa, O. Jesper, R. Frederick, M. Sakamoto, S. Adam, and T. Sahra (2020), The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP), Radiocarbon 62, 4, pp.725-757
- 21) 三五大輔・小俣雅志・郡谷順英 (2016) 干渉 SAR 解析と地形表現図とを組み合わせた新たな地表断層抽出手法の研究, 日本リモートセンシング学会 第 61 回 (平成 28 年度秋季) 学術講演会論文集, 147-148
- 22) Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y. et al. Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan. Earth Planets Space 68, 191 (2016).
- 23) Stuiver, M., & Polach, H. A. (1977). Discussion: Reporting of ^{14}C data. Radiocarbon, 19(3), 355-363.
- 24) 高田 英樹 (1989) 阿蘇火山中央火口丘群のテフラ概報, 熊本地学会誌, 90, 8-11.
- 25) 遠田晋次・鳥井真之・奥野 充・今野明咲香・小野大輝・高橋直也 (2019) 熊本地震地表地震断層の阿蘇カルデラ内の完新世活動履歴—南阿蘇村黒川地区トレンチ調査一, 活断層研究, 51, 13-25, 2019
- 26) Tsuji, Takeshi, Tor Arne Johansen, Bent Ole Ruud, Tatsunori Ikeda, and Toshifumi Matsuoka (2012) Surface-wave analysis for identifying unfrozen zones in subglacial sediments, GEOPHYSICS, 77, 3, p. EN17- EN27
- 27) 堤 浩之・遠田 晋次 (2012) 2011 年 4 月 11 日に発生した福島県浜通りの地震の地震断層と活動履歴, 地質学雑誌, 118, 559-570.
- 28) 堤 浩之・遠田 晋次・後藤 秀昭・熊原 康博・石村 大輔・五味 雅宏・高橋 直也・谷口 薫・小俣 雅志・郡谷 順英・浅野 公之・岩田 知孝 (2018) 熊本県益城町寺中における 2016 年熊本地震断層のトレンチ調査, 活断層研究 49, P.31-39.

- 29) 上田 圭一・宮脇 理一郎・家村 克敏・横山 俊高・宮脇 明子 (2017) 2016 年熊本地震時に出現した 2 系統の地表地震断層群の活動履歴：益城町寺迫および下陳における都連著調査結果 (序報) 日本地質学会第 124 年学術大会講演要旨, p253.
- 30) 上田 圭一・宮脇 理一郎・家村 克敏・横山 俊高・宮脇 明子 (2018) 2016 年熊本地震時に出現した 2 系統の地表地震断層群の活動履歴：益城町および南阿蘇村におけるトレンチ調査 (序報) 日本地球科学連合 2018 年大会 S-SS08

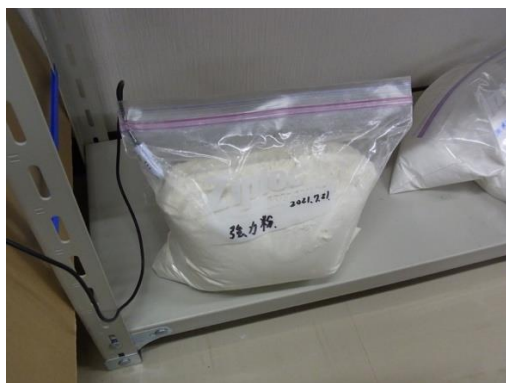
3章 断層変位に関する室内模擬実験

3.1. 模擬地盤の物性

パスコ(2021)で取りまとめられている室内模擬実験では、粒径が細かな材料を用いると微細な断層構造が観察できるとされるが、小麦粉のような粉体は、湿度や締め固め具合によって強度が異なる可能性が指摘されている(Guan, 2010 など)。また、同じ材料でも実験時の拘束圧によっても材料の強度が変わり、形成される断層形状が異なる可能性がある(例えば Schöpferetal., 2007)。模擬地盤の作成については、圧密を行わず単純に作成する方法(ゆる詰と呼ぶ)と、押し固めながら作成する方法(密詰と呼ぶ)が考えられる。できるだけ強度の強い地盤材料を対象とした実験を行うために、密詰の模擬地盤を作成することとした。

3.1.1. 温度湿度状態

小麦粉のような粉体は含水率によって強度が異なる可能性があるため、実験期間中は実験室の温度・湿度のモニタリングを行った(図 3.1.1.1)。実験期間中の温度・湿度を図 3.1.1.2 に示す。夏場は湿度が高く、冬場は湿度が低い。実験実施の際にはエアコンを使用しているため大きな温度・湿度変化がみられる。ここで示す湿度は相対湿度であるため、温度により大きく変化する。容積絶対湿度を求めると夏場はおよそ $15\text{g}/\text{m}^3$ 程度、冬場で $7\text{g}/\text{m}^3$ となる。エアコンによる温度変化でも $5\text{g}/\text{m}^3$ 程度の変動がみられる。季節変化と夏場の日中変化と同程度の湿度変化があることがわかった。



(a) センサー



(b) 記録計

図 3.1.1.1 温度・湿度の記録

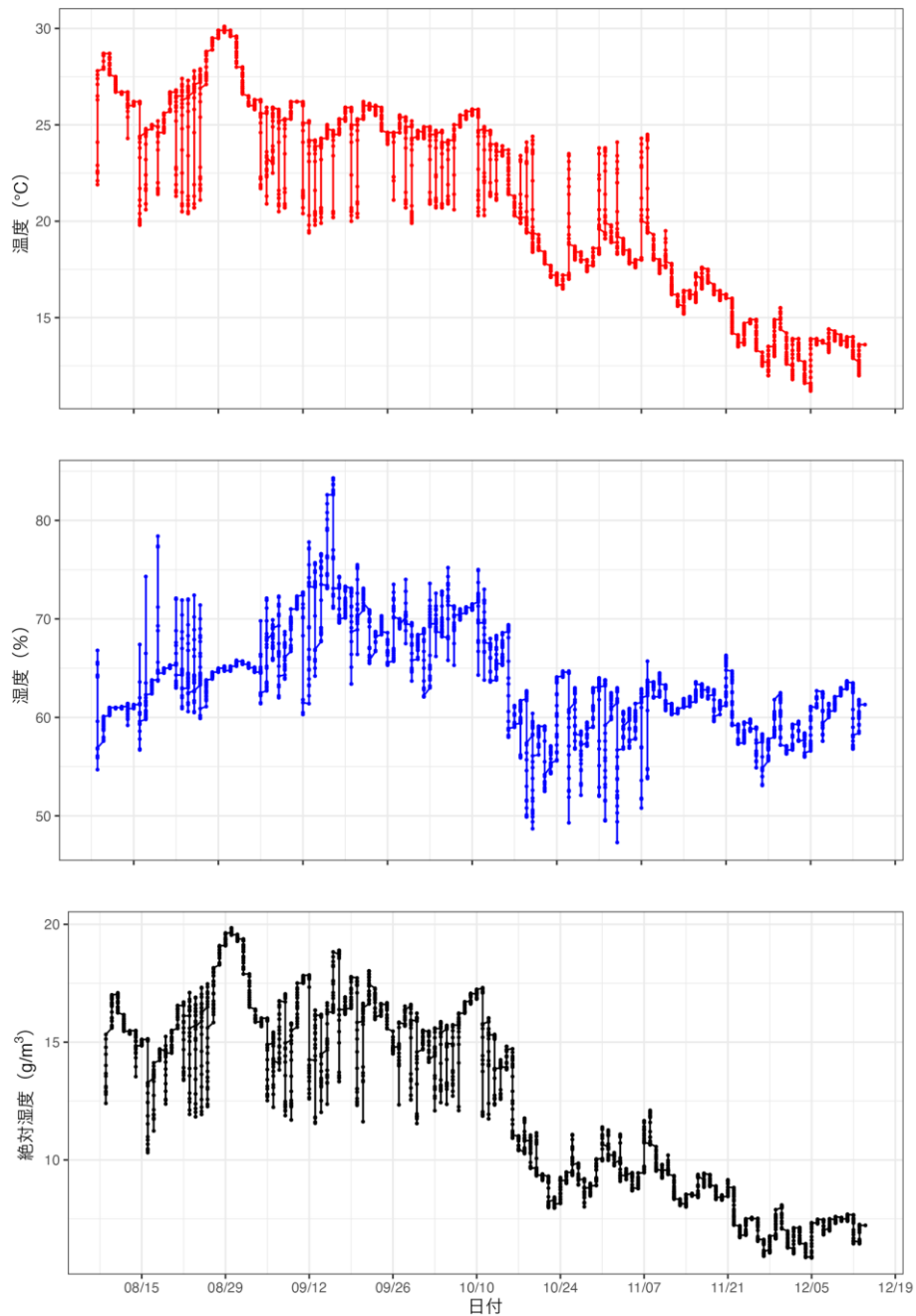
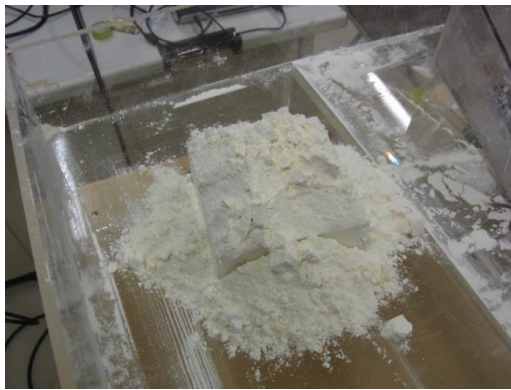


図 3.1.1.2 実験室の温度・湿度グラフ。赤実線が温度、青実線が湿度、黒実線が絶対湿度を示す。

3.1.2. 模擬地盤の物性試験

図 3.1.2.1 に示す流れで小麦粉の密詰のかさ密度を計測した（表 3.1.2.1）。参考までに押し固めを行わないゆる詰のかさ密度も計測した。



(a) 容器充填



(b) すり切り



(c) 密詰（この後、すり切り）



(d) 重量測定

図 3.1.2.1 かさ密度の測定

表 3.1.2.1 かさ密度測定結果

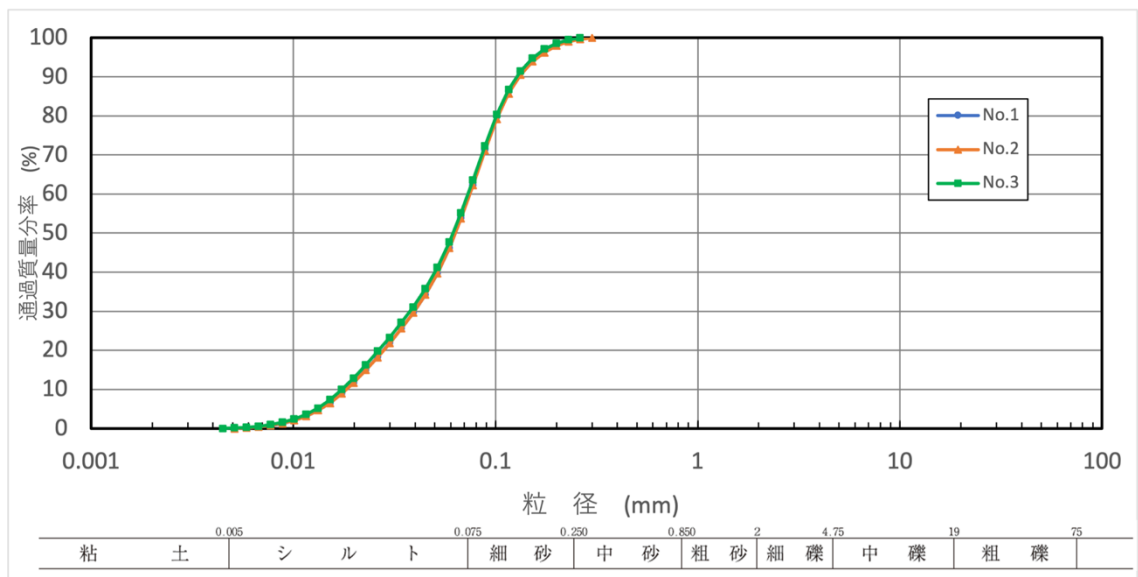
(a) ゆる詰		(b) 密詰	
重量 (g)	密度 (g/cm^3)	重量 (g)	密度 (g/cm^3)
84.7	0.50	134.6	0.80
86.7	0.52	135.4	0.80
91.4	0.54	135.3	0.80
88.1	0.52	135.9	0.81
87.1	0.52	134.4	0.80
平均	0.52	平均	0.80

次章の数値解析や実験結果を実地盤スケールに換算する際、模擬地盤の物理特性や力学特性が必要となる。パスコ (2021)では、断層破碎帯を対象として力学試験や物理試験を実施している。パスコ (2021)での試験内容を参考に、地盤工学会による各種基準（地盤工学会, 2020）の中から、基本的な物理試験と静的な強度試験を実施した。実施した試験を表 3.1.2.2 に示す。

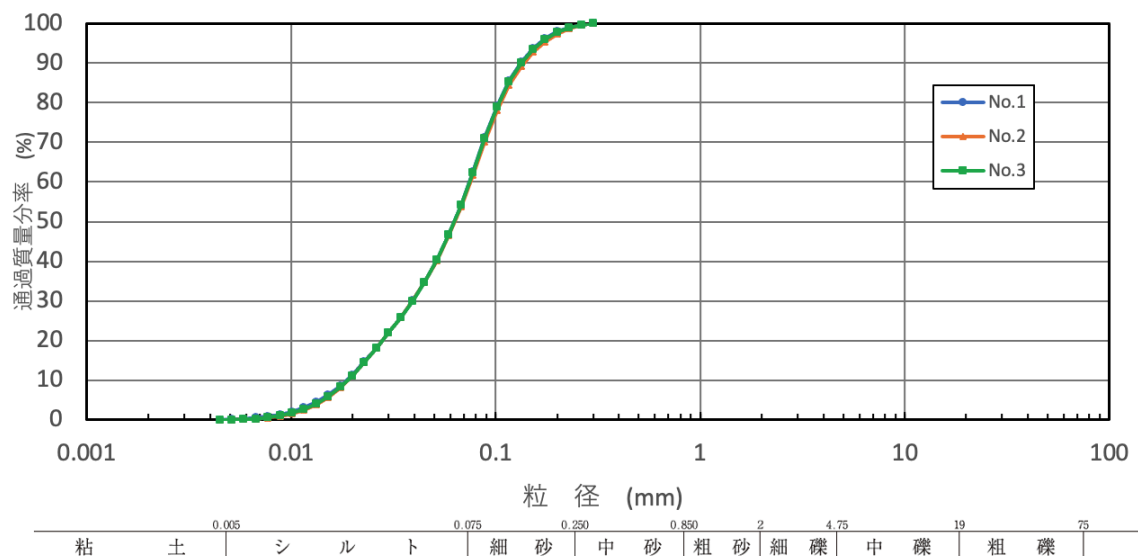
表 3.1.2.2 試験項目

項目	試験内容
土粒子	土粒子の密度試験(JISA1202:2020)
含水比	土の含水比試験 (JISA1203:2020)
粒度	土の粒度試験 (JISA1204:2020)
静的強度	土の圧密排水 (CD) 三軸圧縮試験 (JGS0524-2020)

含水率によって小麦粉の強度が異なる可能性を考慮して、各試験は開封直後の小麦粉と開封後 4 ヶ月経過した小麦粉を対象として実施し、時間経過による試料の物性の変化を検討した。粒度試験結果、三軸試験結果と試験状況をそれぞれ図 3.1.2.2、図 3.1.2.3、図 3.1.2.4、図 3.1.2.5 に示す。各試験から得られた結果を表 3.1.2.3 に示す。粒度分布に大きな違いはみられない。含水比は若干大きくなっている。強度は土質試験で計測される測定レンジに対して、模擬地盤材料の強度が小さいために、正確に求められていない。そこで粉体層の一面せん断試験を実施した。

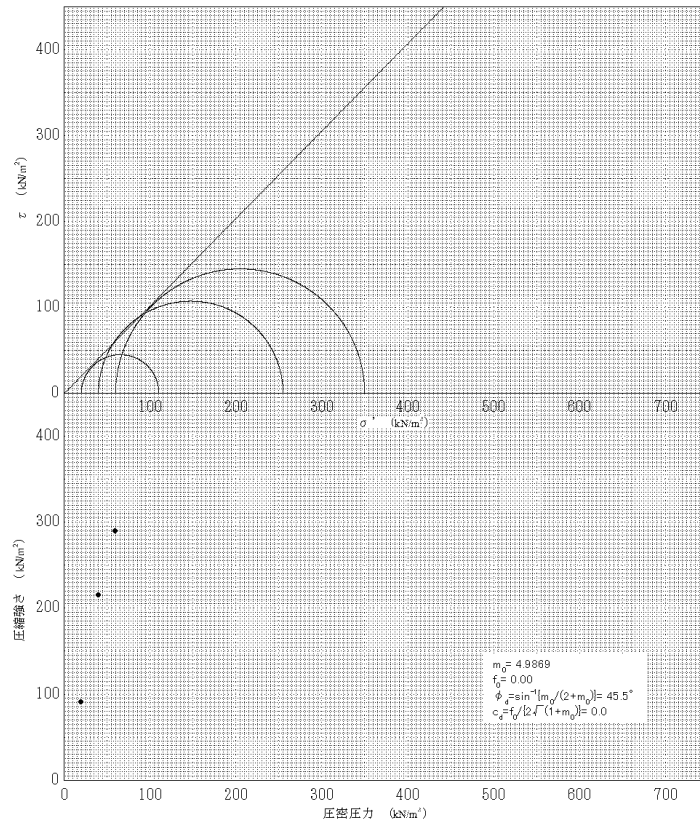


(a) 開封直後の試料

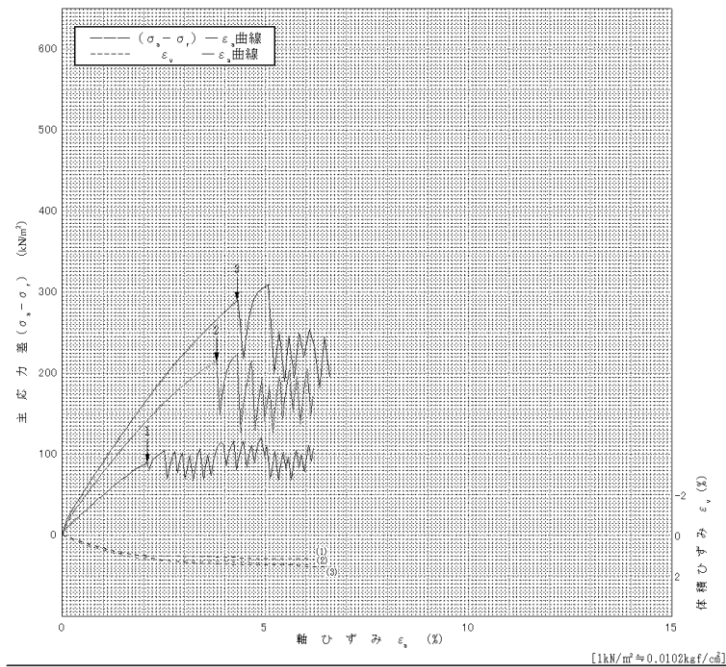


(b) 開封後の4ヶ月の試料

図 3.1.2.2 粒度試験結果。分析試料を No.1 から No.3 の3つの試料に分けて分析を行った。

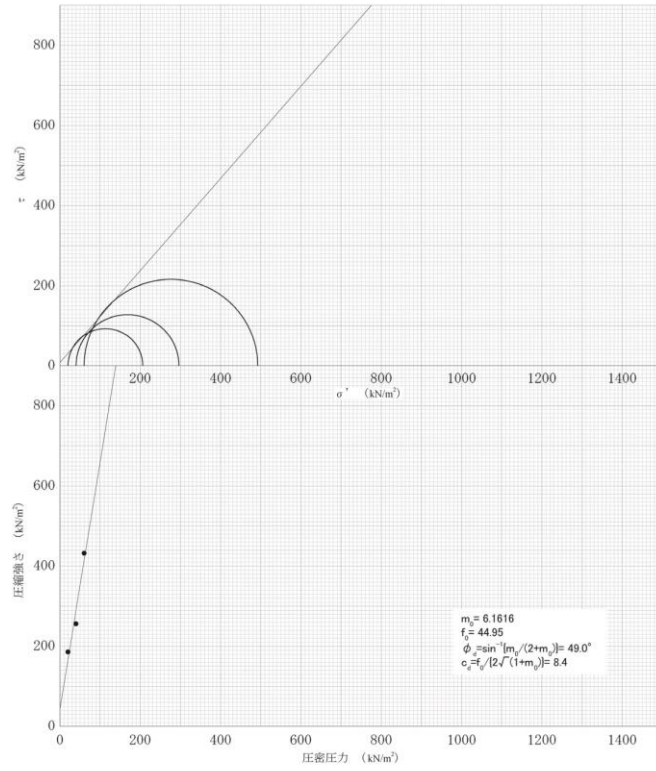


(a) 応力-せん断強さ曲線

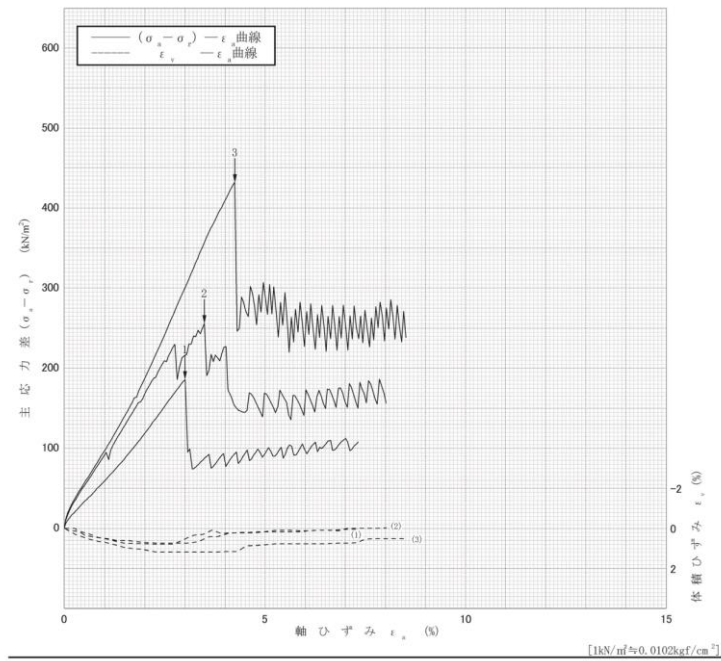


(b) 応力-ひずみ曲線

図 3.1.2.3 三軸試験結果。開封直後の試料。



(a) 応力-せん断強さ曲線



(b) 応力-ひずみ曲線

図 3.1.2.4 三軸試験結果。開封後 4 ヶ月後の試料の結果。

表 3.1.2.3 物性値一覧

試料	含水比	土粒子密度 (g/cm ³)	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kPa)
開封直後	13.0	1.56	45.5	0
4ヶ月後	15.1	1.56	49	8.4

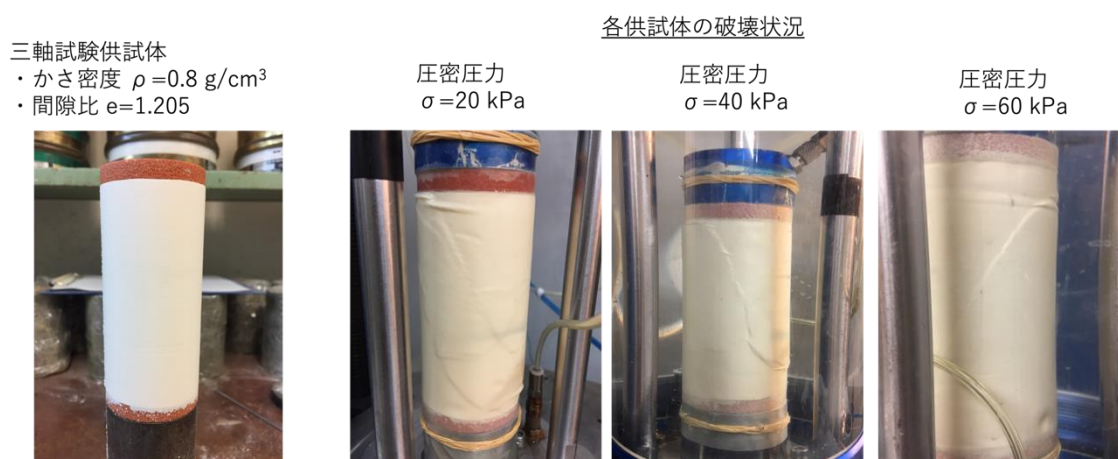


図 3.1.2.5 三軸試験状況

粉体層の一面せん断試験装置の概要を図 3.1.2.6 に示す。最初に鉛直方向に目標荷重をかけることで試料のかさ密度を調整する。試験結果を表 3.1.2.4 に示す。Sample-B-T が開封直後、Sample-A-T が開封後 4 ヶ月後の試料を示す。表 3.1.2.5 に得られた物性値を示す。室内模擬実験の模擬地盤相当のかさ密度 (0.8 g/cm^3) の粉体層一面せん断試験結果では時間経過による強度増加も考えられるが、異なる目標荷重による他のかさ密度では必ずしも Sample-A-T の方で粘着力が増加しているものばかりではない。したがって今回はばらつきの範囲内と考えかさ密度 0.8 g/cm^3 の Sample-B-T ・ Sample-A-T の両者の値を平均して用いることとした。

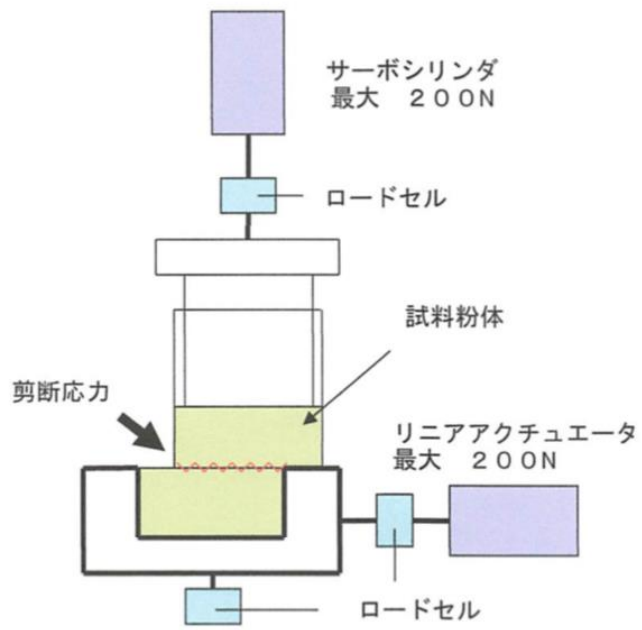


図 3.1.2.6 粉体層の一面せん断試験装置

表 3.1.2.4 粉体層の一面せん断試験結果

サンプル名	目標荷重 (N)	a (PYL)	b (PYL)	粉体層厚み (mm)	かさ密度 (g/cm ³)	内部摩擦角 (°)	せん断付着応力 (kPa)	単軸崩壊応力 (kPa)	限界状態垂直荷重 (N)	限界状態せん断力 (N)	限界状態垂直応力 (kPa)	限界状態せん断応力 (kPa)	最大主応力 (kPa)	流動性指数 FI (m)
CJ01-Sample-A-T	10	0.54	1.52	14.33	0.72	28.2	1.5	5.1	5.1	5.2	3.5	3.6	7.8	0.72
	20	0.52	1.91	13.79	0.75	27.5	1.9	6.3	10.0	8.1	6.9	5.6	14.9	0.86
	40	0.58	2.85	13.42	0.77	30.2	2.8	9.9	21.7	16.0	14.9	11.0	28.8	1.31
	60	0.66	2.81	12.97	0.80	33.4	2.8	10.4	29.9	23.3	20.6	16.1	45.3	1.34
CJ01-Sample-B-T	10	0.66	1.52	14.24	0.73	33.4	1.5	5.7	4.9	4.4	3.3	3.1	6.3	0.80
	20	0.60	1.92	13.77	0.75	30.9	1.9	6.8	8.9	8.0	6.1	5.5	14.1	0.92
	40	0.69	1.63	13.20	0.78	34.6	1.6	6.2	19.6	15.8	13.5	10.9	33.1	0.81
	60	0.72	2.11	12.95	0.80	35.7	2.1	8.2	28.0	21.7	19.3	15.0	39.6	1.05

表 3.1.2.5 物性値一覧

試料	含水比	土粒子密度 (g/cm ³)	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kPa)
開封直後	13.0	1.56	35.7	2.1
4ヶ月後	15.1	1.56	33.4	2.8

3.1.3. 相似則について

1g 場での断層変位アナログ実験を行った上田・他 (2005)、Sasnett (2013)では、ともに内部摩擦角 (ϕ) は等しく、粘着力 (c) と密度 (ρ) ・重力加速度 (g) ・長さ (L) の積の相似比が等しいと考えている(式 3.1.3.1)。

$$\frac{c_m}{c_n} = \frac{\rho_m g_m L_m}{\rho_n g_n L_n} \dots \dots \dots \text{(式 3.1.3.1)}$$

添字の m、n はそれぞれモデルと実地盤系であることを示す。
(式 3.1.3.1) より、

$$\frac{L_m}{L_n} = \frac{c_m}{c_n} \div \left(\frac{\rho_m g_m}{\rho_n g_n} \right) \dots \dots \dots \text{(式 3.1.3.2)}$$

1g 場での実験を考えた場合、 $g_m/g_n=1$ より、対象とする実地盤 (堆積岩を想定、密度 2.8g/cm³、粘着力 50MPa とする) および模擬地盤の粘着力と密度より長さに関する相似比を導くことができる。密詰のかさ密度 0.8g/cm³ および表 3.1.2.5 の粘着力から長さに関する相似比は 1.72×10^{-4} と求められた。

3.1.4. 模擬地盤の物性のまとめ

数値解析や実験結果を実地盤スケールに換算する際、模擬地盤の物理特性や力学特性が必要となる。小麦粉のような粉体は含水率によって強度が異なる可能性を考慮して、各試験は開封直後の小麦粉と開封後 4 ヶ月経過した小麦粉を対象として実施し、時間経過による試料の物性の変化を検討した。室内模擬実験の模擬地盤相当のかさ密度の粉体層一面せん断試験結果では、開封後 4 ヶ月経過した小麦粉の粘着力が大きくなっており、時間経過による強度増加も考えられるが、異なる目標荷重による他のかさ密度では必ずしも開封後 4 ヶ月経過した小麦粉の試験結果の方が増加しているものばかりではなかった。したがって今回はばらつきの範囲内と考え、平均した値を用いることとした。得られた強度から今回の実験の長さに関する相似則をまとめた。

3.2. 縦ずれ断層室内模擬実験

3.2.1. 実験装置

縦ずれ断層の実験装置は構造計画研究所 (2019)で使された装置を参考に、逆断層、正断層ともに実験可能なように工夫して作成した。実験装置を図 3.2.1.1 に示す。変位計測に用いたセンサーは、鉛直精度は $5\mu\text{m}$ 、水平精度は 0.1mm 、撮影範囲は $10\times 15\text{cm}$ である。

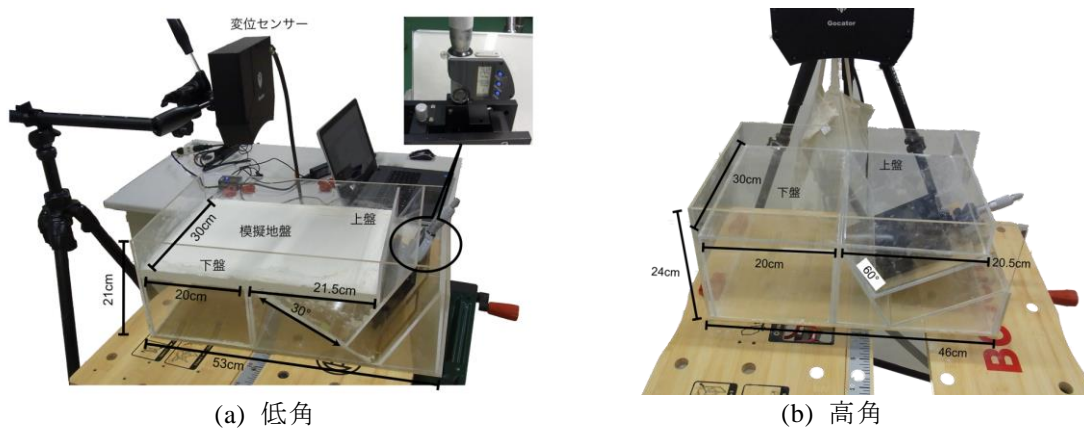
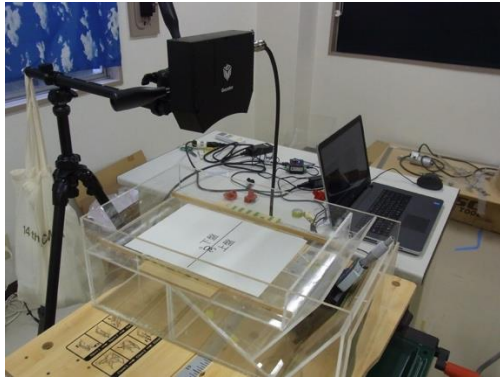


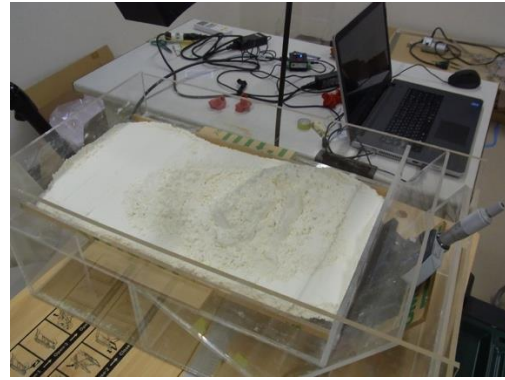
図 3.2.1.1 縦ずれ断層室内模型実験装置

3.2.2. 実験方法

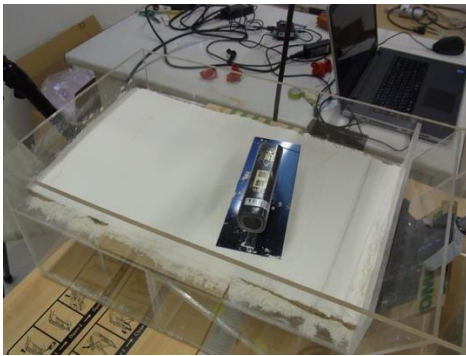
実験の流れを図 3.2.2.1 に示す。



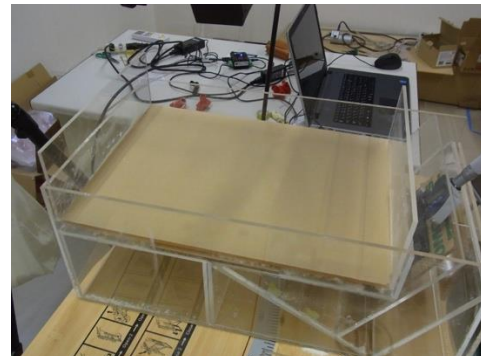
(a) 模擬地盤の作成準備



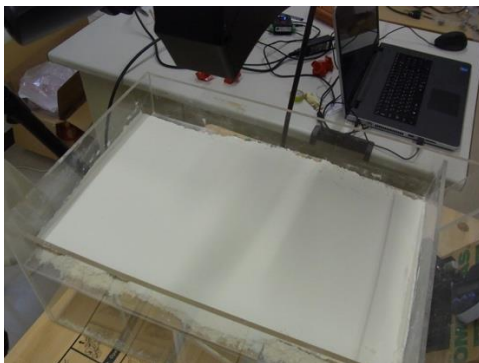
(b) 模擬地盤の作成



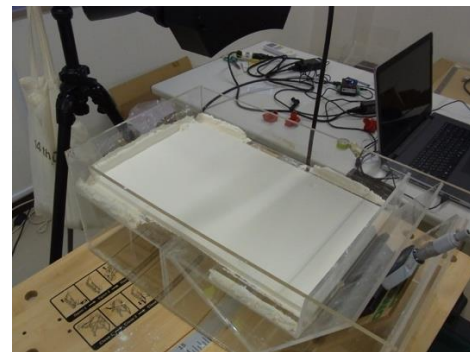
(c) 表面整形



(d) 密詰



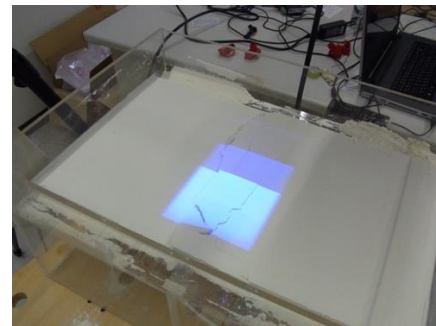
(e) 密詰後の表面



(f) すり切りによる表面の整形



(c) 変位を与える



(c) 変位計測

図 3.2.2.1 実験の流れ

与える断層変位は、実験初期では小さな変位量による構造形成をみるため、細かい変位刻みになるよう、0mm、0.5mm、1mm、2mm、3mm、5mm、8mmとした。鉛直変位量がおおよそ4mm程度になるよう、30°の実験では8mm、60°の実験では5mmまでとした。

3.2.3. 実験結果

本節では実験結果について記述・整理を行うが、本プロジェクトのメインの目的が副断層に関連した知見の整理である、そこで、室内模擬実験でみられる断層構造の解釈についてここで述べておく。図 3.2.3.1 に示すように基本的に1章での定義に従うが、表 3.2.3.1 の区分名称を用いた。

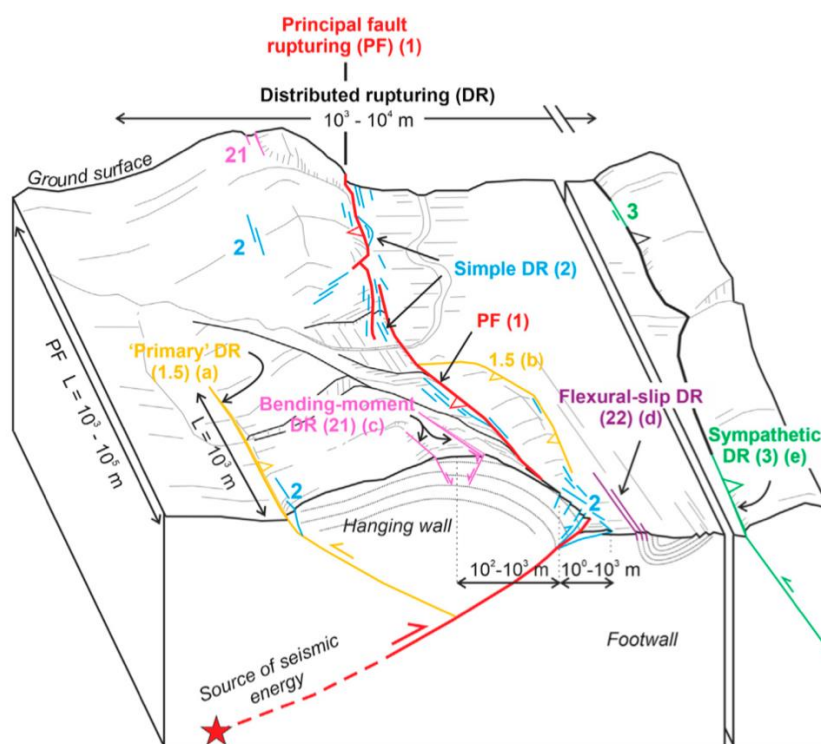


図 3.2.3.1 室内模擬実験解釈における主断層・副断層の概念図 (Nurminen et al., 2020)

表 3.2.3.1 室内模擬実験解釈における主断層・副断層の説明

区分 (ランク)	説明	模擬実験結果との対応
主断層 (1)	震源断層活動に対応	基底断層の延長
副断層 (2)	主断層以外	短い断層、小さな変位量
分岐断層 (1.5)	主断層とは対応しないが、比較的長い断層長	比較的長い断層、大きな変位量

3.2.3.1. 低角(30)逆断層

(1) 1回目試行結果

低角 (30°) の場合の逆断層室内模擬実験の1回目の結果について述べる。変位は 0mm (図 3.2.3.1.1) から 0.5mm (図 3.2.3.1.2)、1mm (図 3.2.3.1.3)、2mm (図 3.2.3.1.4)、3mm (図 3.2.3.1.5)、5mm (図 3.2.3.1.6)、8mm (図 3.2.3.1.7) まで与えた。0.5mm (図 3.2.3.1.2) の変位時点で縦軸 20mm から 40mm の範囲で断層に落差が生じている。この断層の下盤側に横軸 20mm から 40mm の間に短い断層が生じている。1mm (図 3.2.3.1.3) の変位ではこの短い断層にも明瞭な落差がみられる。2mm (図 3.2.3.1.4) の変位では、最初に発生した断層と短い断層に沿った落差が明瞭となる。一方、最初に発生した断層と短い断層との間の落差は基底断層の断層変位の増加により目立たなくなる。3mm (図 3.2.3.1.5) の変位では、縦軸 -60mm 付近でも断層が発生している。5mm (図 3.2.3.1.6)、8mm (図 3.2.3.1.7) と変位量が大きくなるに従って、縦軸 20mm から 40mm、-60mm 付近の断層の落差が大きくなっている様子がみられる。

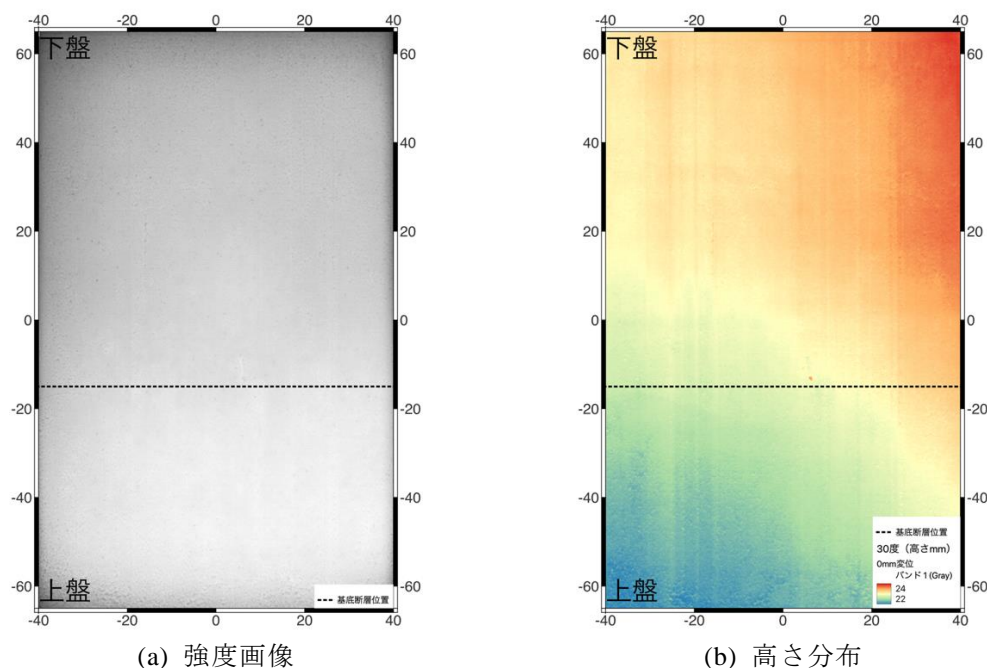
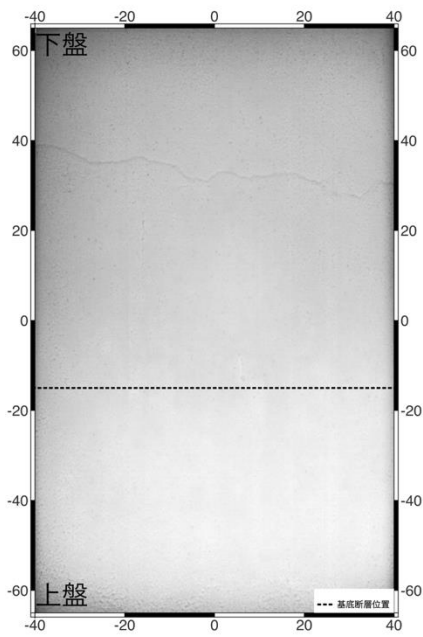
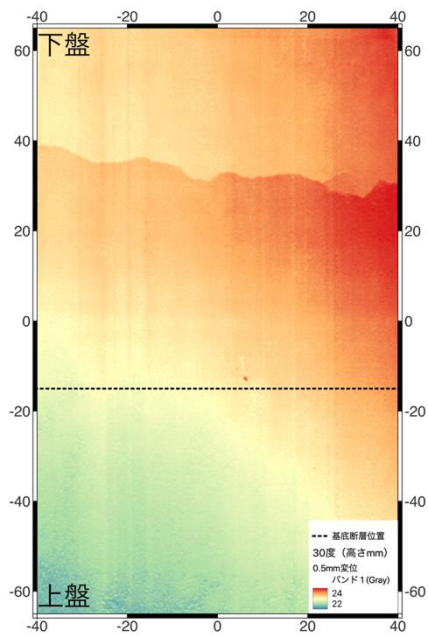


図 3.2.3.1.1 初期 (変形前)

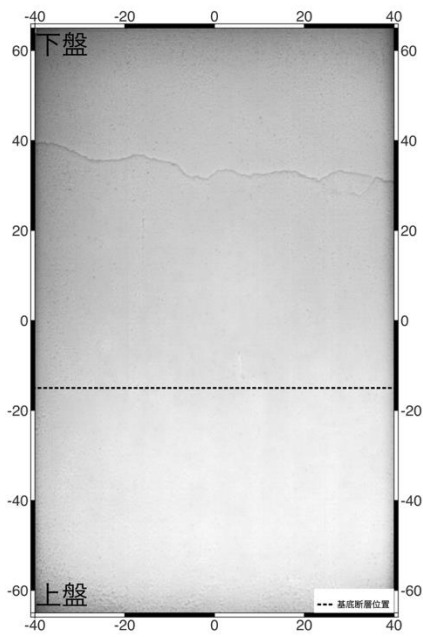


(a) 強度画像

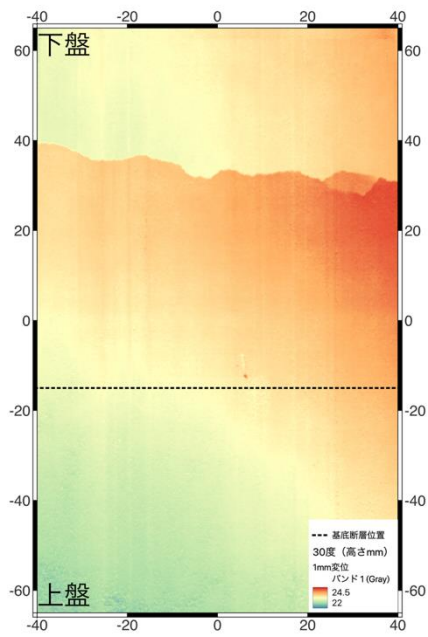


(b) 高さ分布

図 3.2.3.1.2 0.5mm 変位

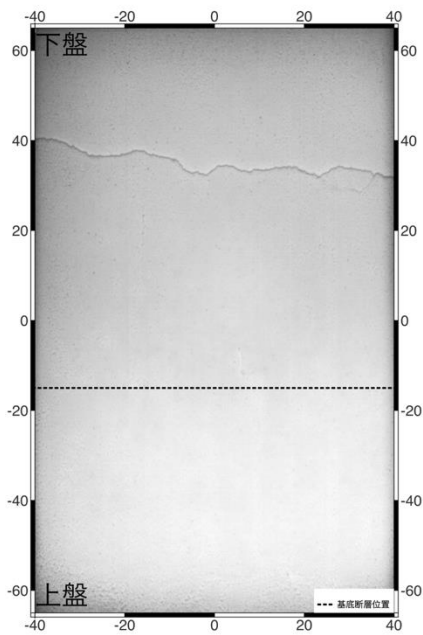


(a) 強度画像

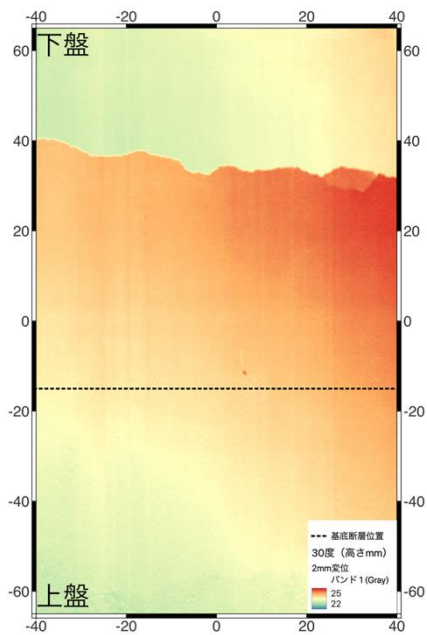


(b) 高さ分布

図 3.2.3.1.3 1mm 変位

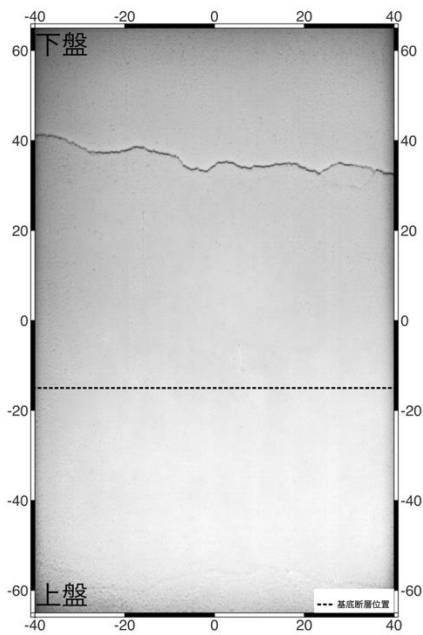


(a) 強度画像

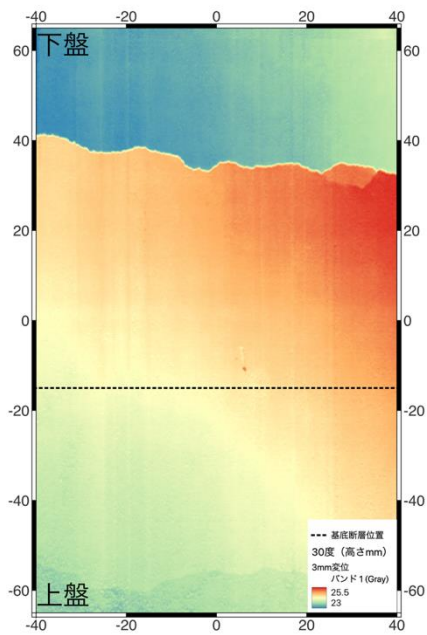


(b) 高さ分布

図 3.2.3.1.4 2mm 変位



(a) 強度画像



(b) 高さ分布

図 3.2.3.1.5 3mm 変位

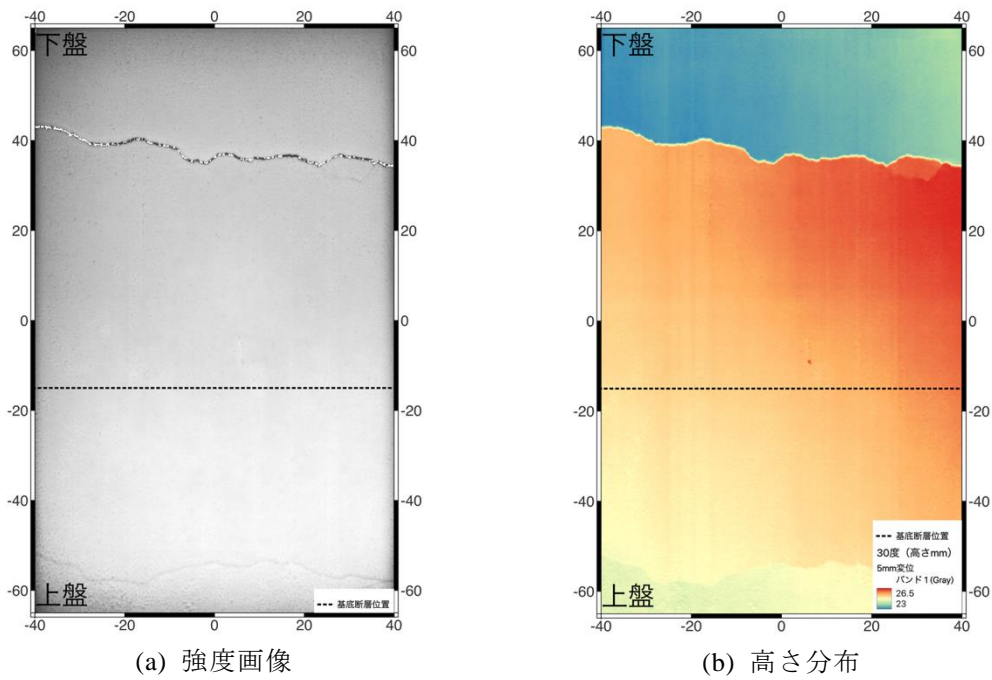


図 3.2.3.1.6 5mm 変位

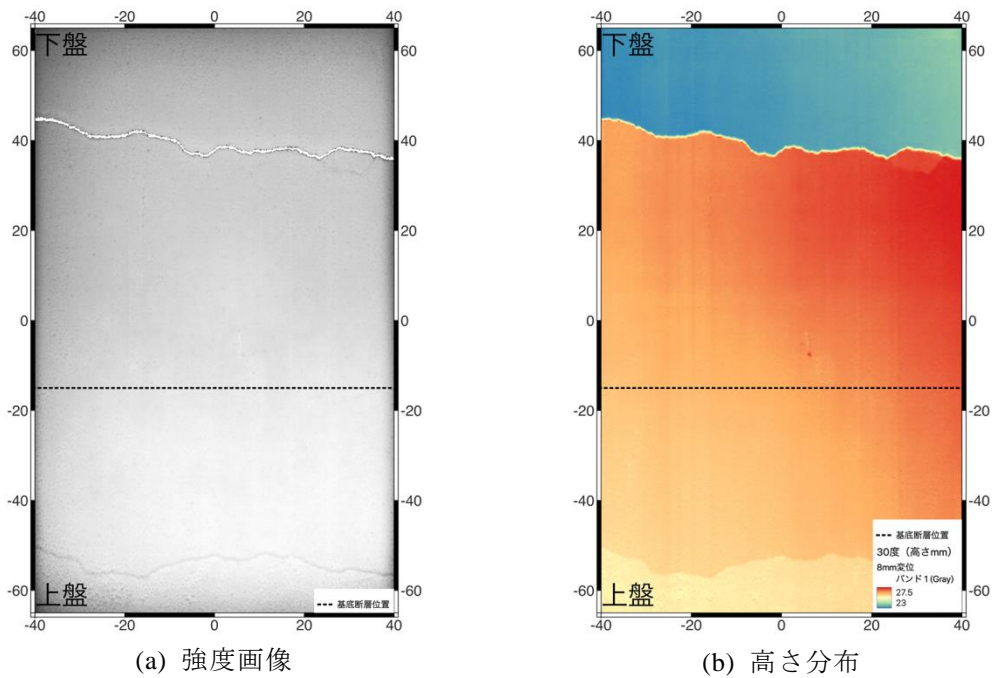


図 3.2.3.1.7 8mm 変位

一連の実験で形成された断層変位がどのように発達しているかを断面で検討を行った。検討した断面位置を図 3.2.3.1.8 に示す。横軸-25mm と 30mm における断面を図 3.2.3.1.9 および図 3.2.3.1.10 に示す。短い断層が確認されなかった図 3.2.3.1.9 では横軸 50mm 付近の主断層が基底断層における変位の増大に伴い、断層落差が大きくなっている様子がみられる。基底断層での変位が 3mm を超えるあたりから横軸-50mm の上盤側で断層変位が発生し

ており、主断層変位同様、基底断層における変位の増大に伴い、断層落差が大きくなっている。これに対して図 3.2.3.1.10 では、基底断層での変位が 0.5mm までは横軸 50mm よりも上盤側で大きな断層変位が発生しているが、基底断層変位が 1mm 以降は、横軸 50mm 付近の断層変位が大きくなり、最初に出現した断層変位は大きくなっていないようにみえる。すなわちこの断面位置での断層変位は、最初に発生した主断層変位が、その後より下盤側に移動して成長した様子がみられる。したがって、横軸 50mm 付近の断層が主断層と考えられる。短い断層は初期段階では主断層で、主断層が下盤側に移動した後の変位はみられない。ここでは古い断層と呼ぶ。横軸-50mm 付近の上盤側の変位は図 3.2.3.1.9 と同様であり、主断層と同等の長さであるため分岐断層と考えられる。発生した断層位置のばらつきをみるために、8mm の時の断面図を図 3.2.3.11 に示す。横軸のグリッド間隔は 2mm であることから、各断層の出現位置は 6mm から 8mm 程度はばらついている様子がみられる。

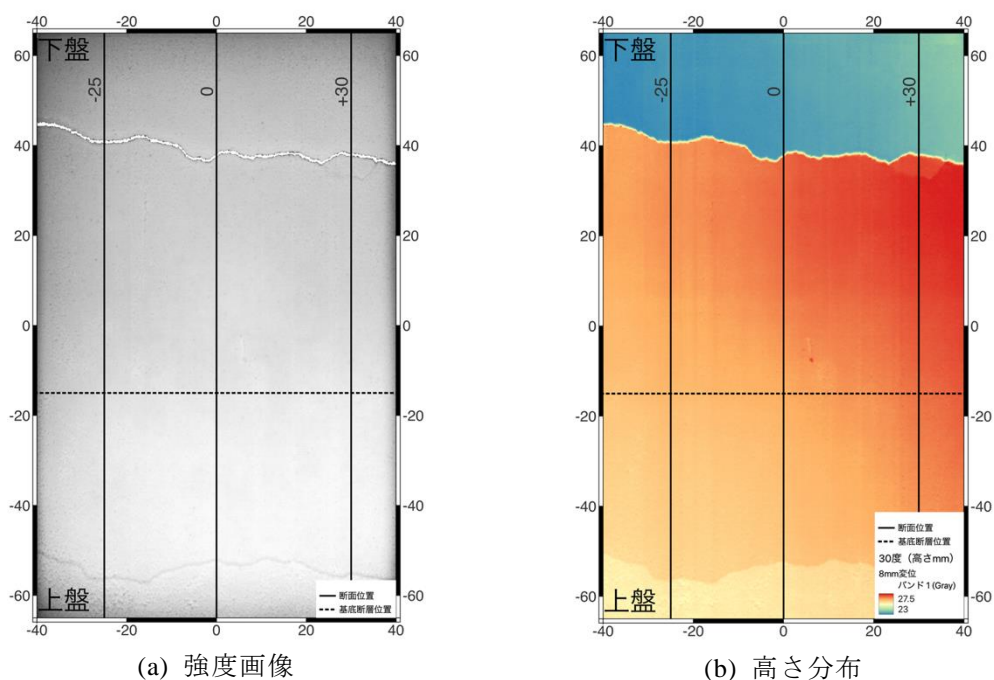


図 3.2.3.1.8 断面位置図

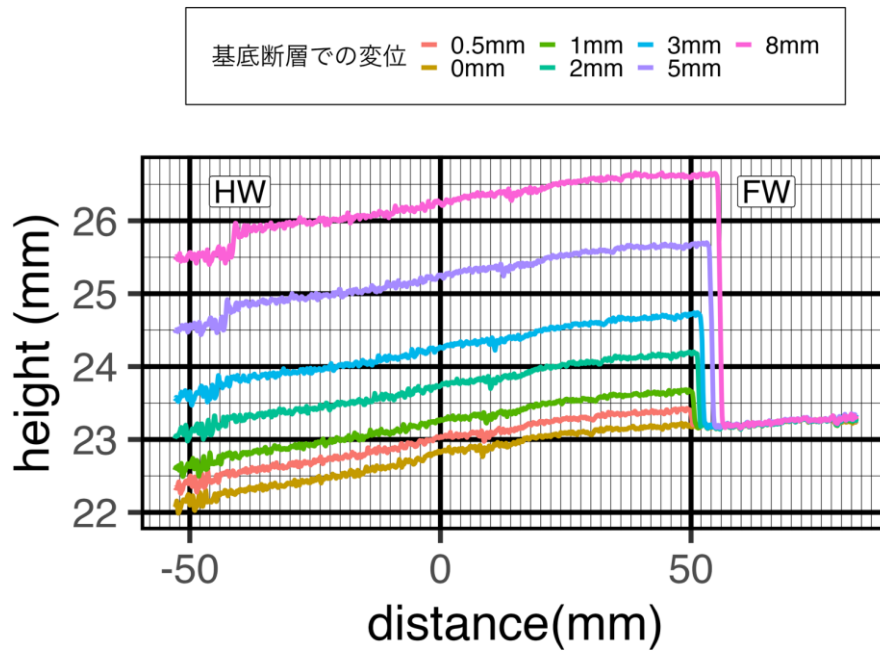


図 3.2.3.1.9 横軸-25mm に沿った断面図。グラフの横軸のグリッド線は 2mm 間隔。基底断層は 0mm の位置にシフトしている。HW : 上盤, FW : 下盤。

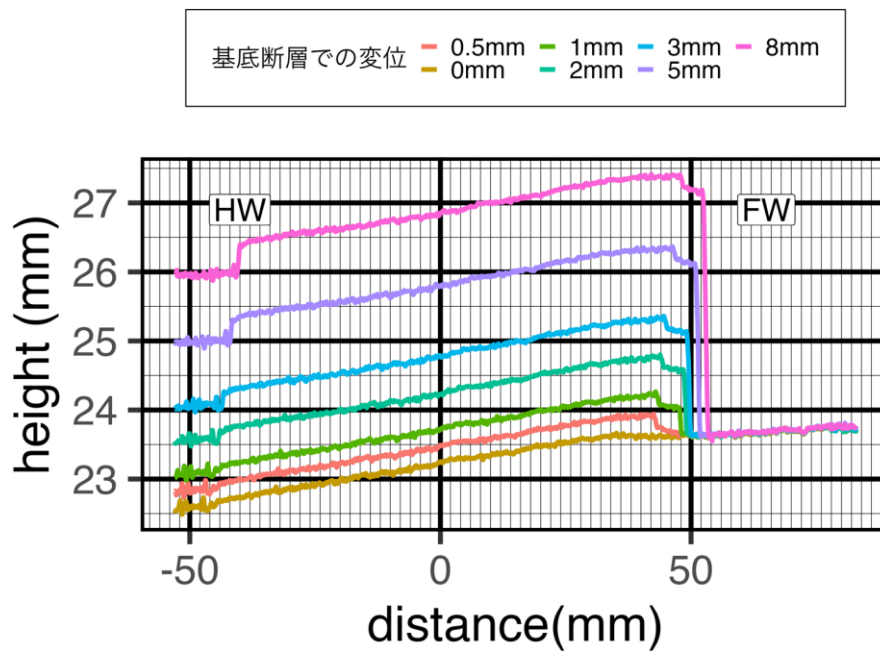


図 3.2.3.1.10 横軸 30mm に沿った断面図。グラフの横軸のグリッド線は 2mm 間隔。基底断層は 0mm の位置にシフトしている。HW : 上盤, FW : 下盤。

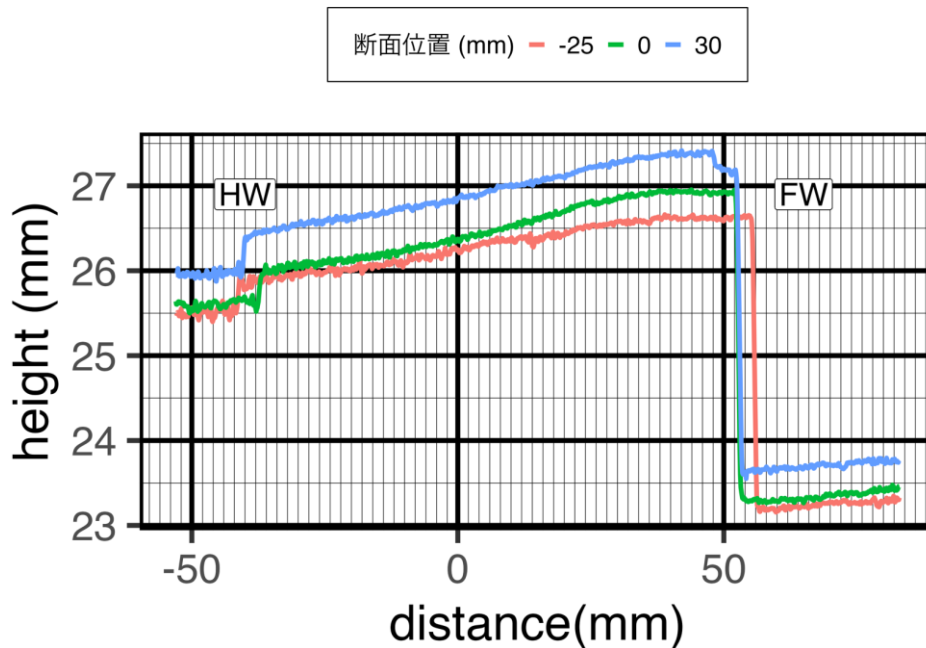


図 3.2.3.11 複数の断面位置の断面図。基底断層変位が 8mm の時の断面。基底断層は 0mm の位置にシフトしている。HW : 上盤, FW : 下盤。

(2) 2 回目試行結果

低角 (30°) の場合の逆断層室内模擬実験の 2 回目の結果について述べる。変位は 1 回目の試行と同様に、0mm (図 3.2.3.1.12) から 0.5mm (図 3.2.3.1.13)、1mm (図 3.2.3.1.14)、2mm (図 3.2.3.1.15)、3mm (図 3.2.3.1.16)、5mm (図 3.2.3.1.17)、8mm (図 3.2.3.1.18) まで与えた。0.5mm (図 3.2.3.1.13) の変位時点で縦軸 20mm から 40mm の範囲に断層が生じている。1mm (図 3.2.3.1.14) の変位では 0.5mm の変位で発生した断層の落差が大きくなっている。2mm (図 3.2.3.1.15) の変位では、横軸 -40mm から -20mm で縦軸が 40mm 付近に新たな断層が発生している。さらに上盤側の縦軸 -60mm から -40mm 付近にかけても断層が発生している。最初に発生した断層と小規模な断層に沿った高さ変化が明瞭となる。3mm (図 3.2.3.1.16) の変位では、縦軸 -60mm 付近でも断層が発生している。5mm (図 3.2.3.1.17)、8mm (図 3.2.3.1.18) では縦軸 0mm 付近にも断層が発生している。

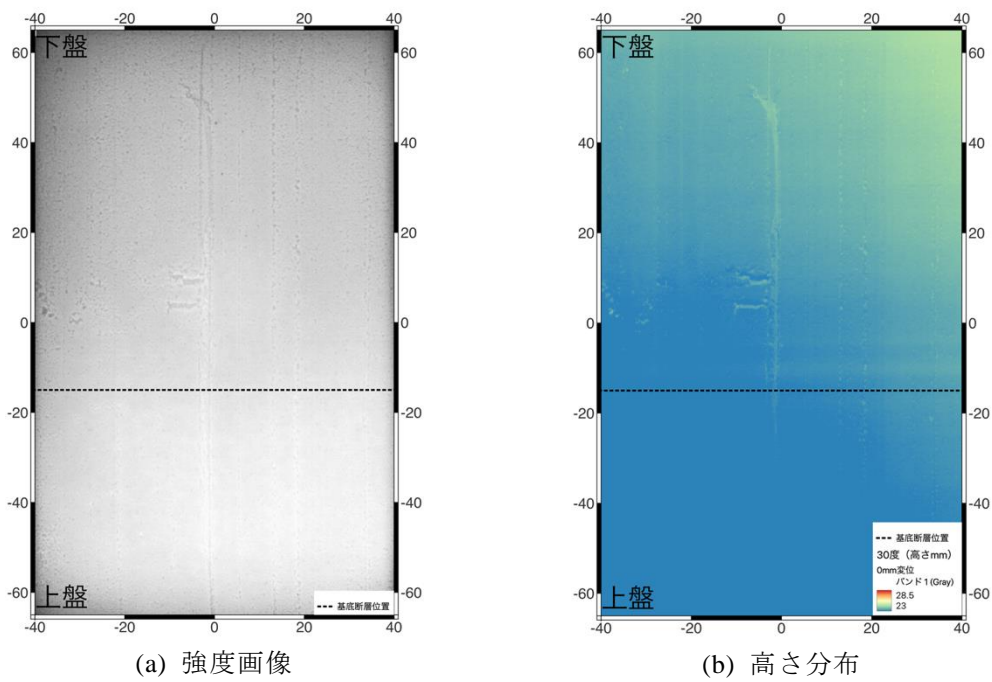


図 3.2.3.1.12 初期 (変形前)

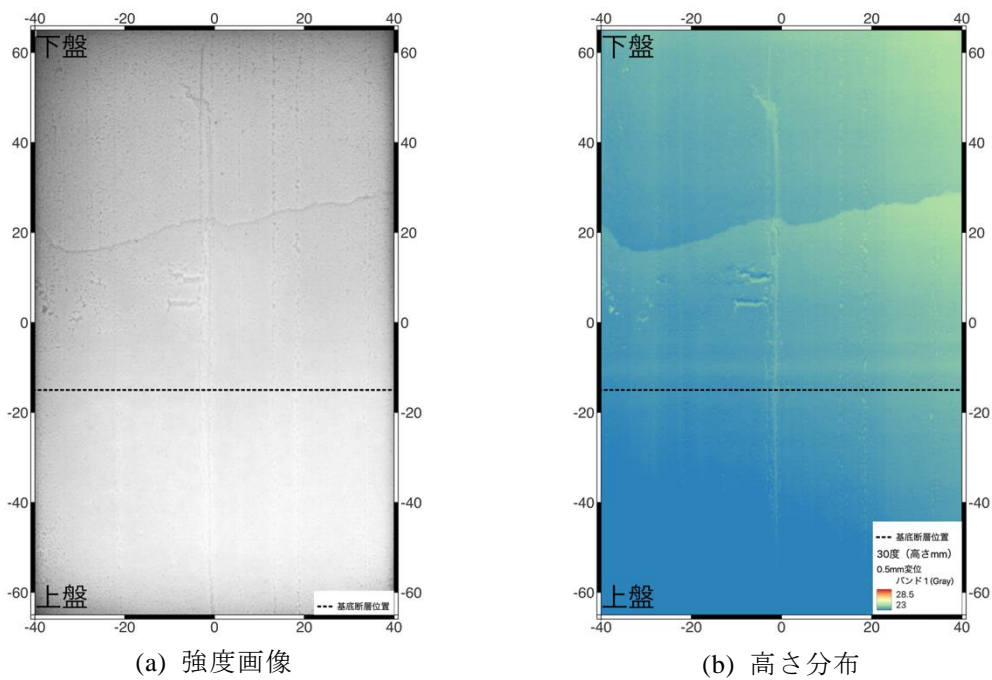


図 3.2.3.1.13 0.5mm 変位

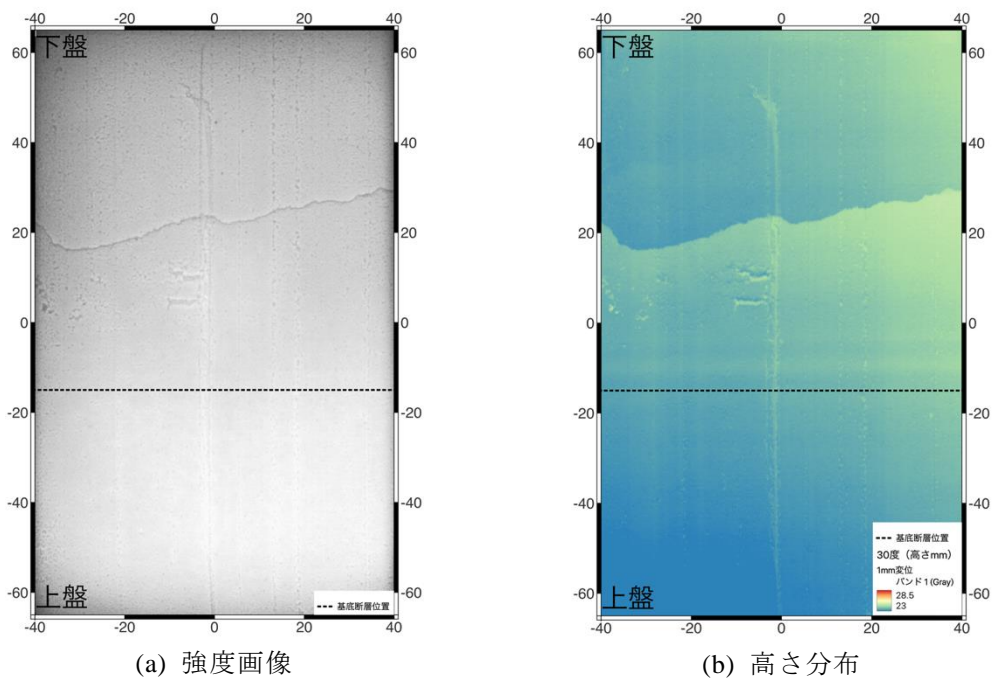


図 3.2.3.1.14 1mm 変位

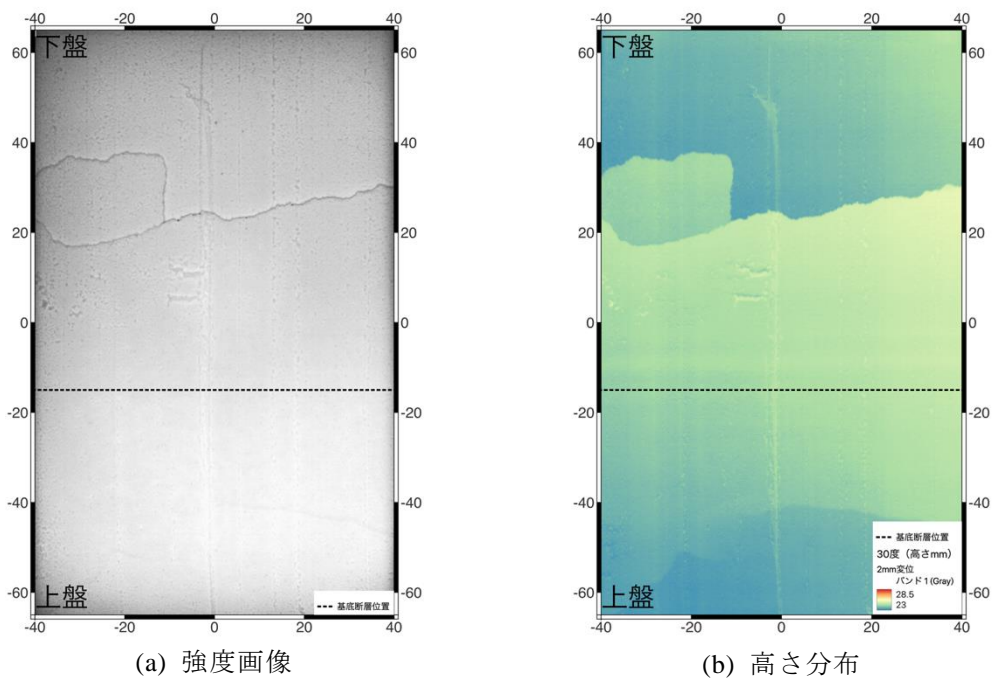
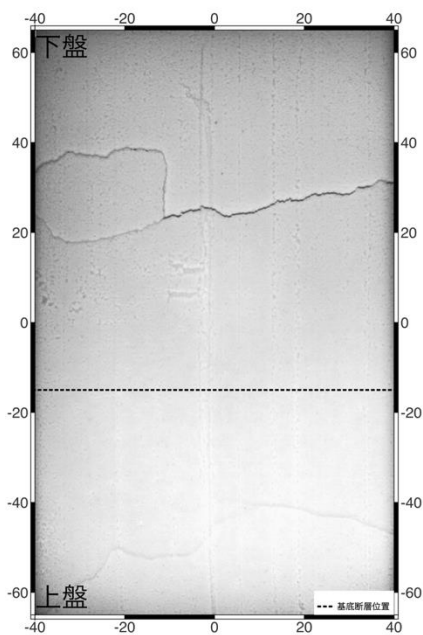
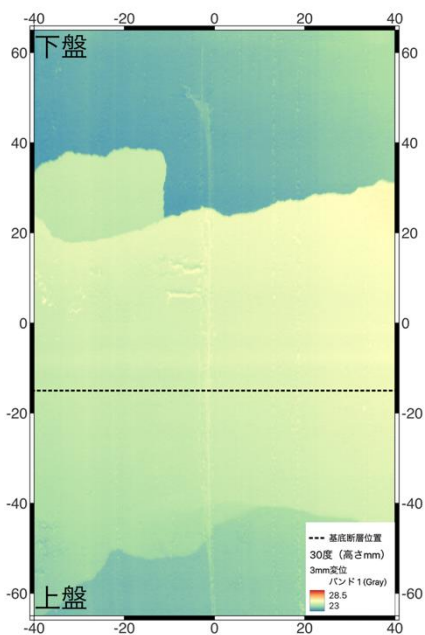


図 3.2.3.1.15 2mm 変位

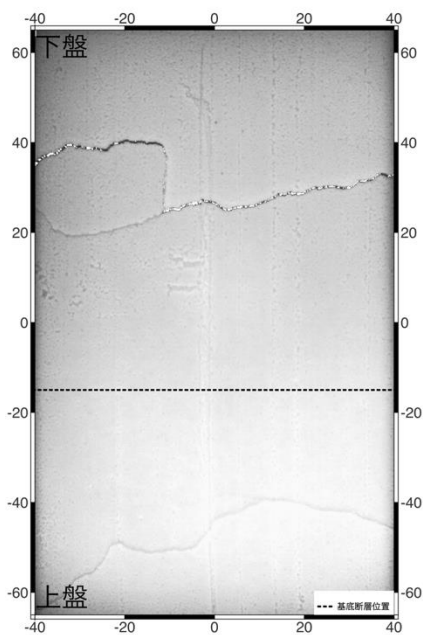


(a) 強度画像

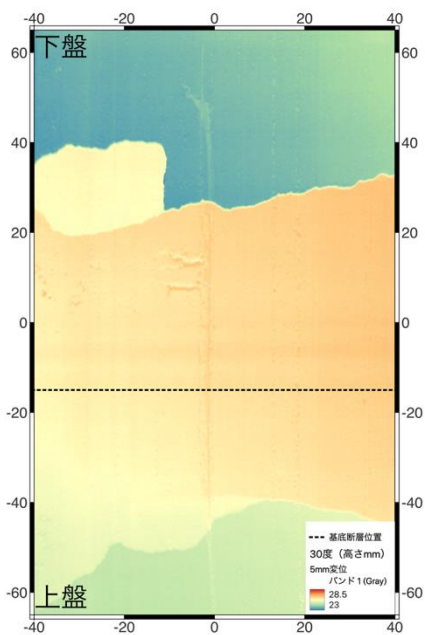


(b) 高さ分布

図 3.2.3.1.16 3mm 変位



(a) 強度画像



(b) 高さ分布

図 3.2.3.1.17 5mm 変位

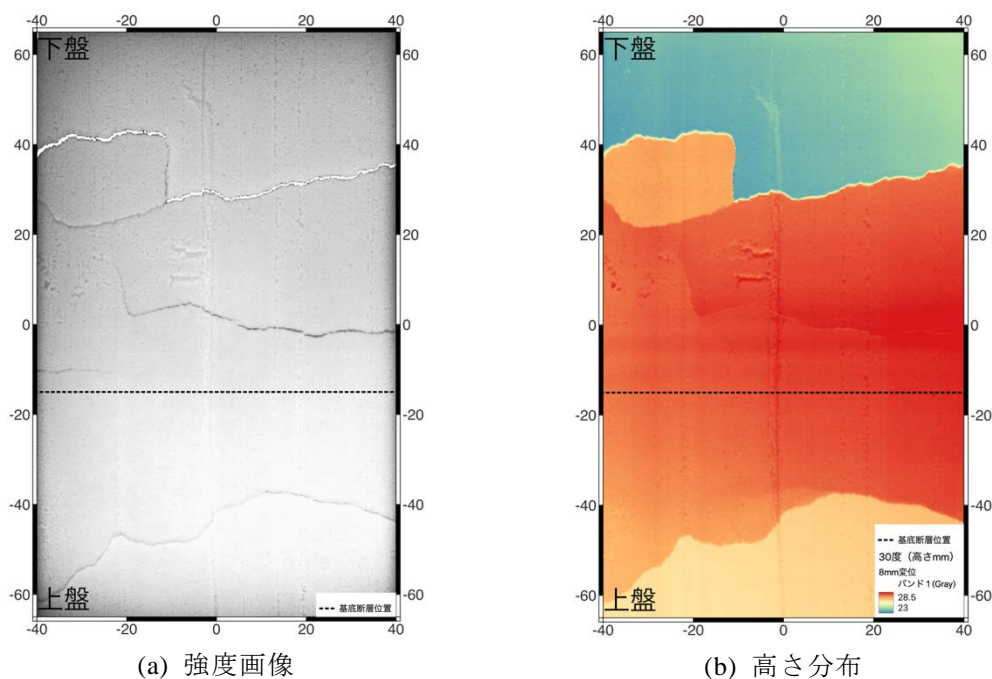


図 3.2.3.1.18 8mm 変位

一連の実験で形成された断層変位がどのように発達しているかを断面で検討を行った。検討した断面位置を図 3.2.3.1.19 に示す。横軸-25mm と 30mm における断面を図 3.2.3.1.20 および図 3.2.3.1.21 に示す。複数の断層が確認されなかった図 3.2.3.1.21 では横軸 50mm 付近の断層が基底断層における変位の増大に伴い、断層落差が大きくなっている様子がみられる。基底断層での変位が 3mm を超えるあたりから横軸-40mm の上盤側で断層変位が発生しており、主断層変位同様、基底断層における変位の増大に伴い、断層落差が大きくなっている。これに対して、図 3.2.3.1.20 では、基底断層での変位が 1mm までは横軸 50mm よりも上盤側で大きな断層変位が発生しており、基底断層変位が 1mm の時に、横軸 50mm 付近に新たな断層を伴い、それ以降は、横軸 50mm 付近の断層変位が大きくなり、最初に出現した断層変位は大きくなっていないように見える。すなわちこの断面位置での断層変位は、最初に発生した断層変位が、その後より前面に移動して成長した様子がみられる。したがって、横軸 50mm 付近の断層が主断層と考えられる。短い断層は初期段階では主断層で、主断層が下盤側に移動した後の変位はみられず、古い断層と解釈される。横軸-40mm 付近の上盤側の変位は図 3.2.3.1.20 と同様であり、主断層と同等の長さであるため、分岐断層と考えられる。発生した断層位置のばらつきをみるために、8mm の時の断面図を図 3.2.3.1.22 に示す。横軸のグリッド間隔は 2mm であることから、各断層の出現位置は 10mm から 12mm 程度はばらついている様子がみられる。

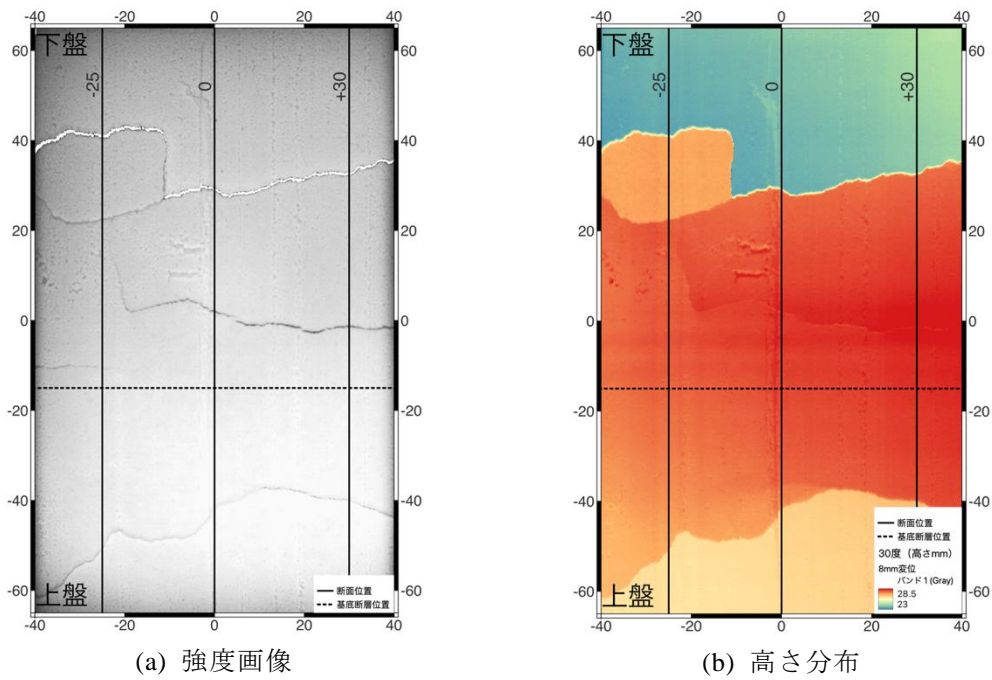


図 3.2.3.1.19 断面位置図

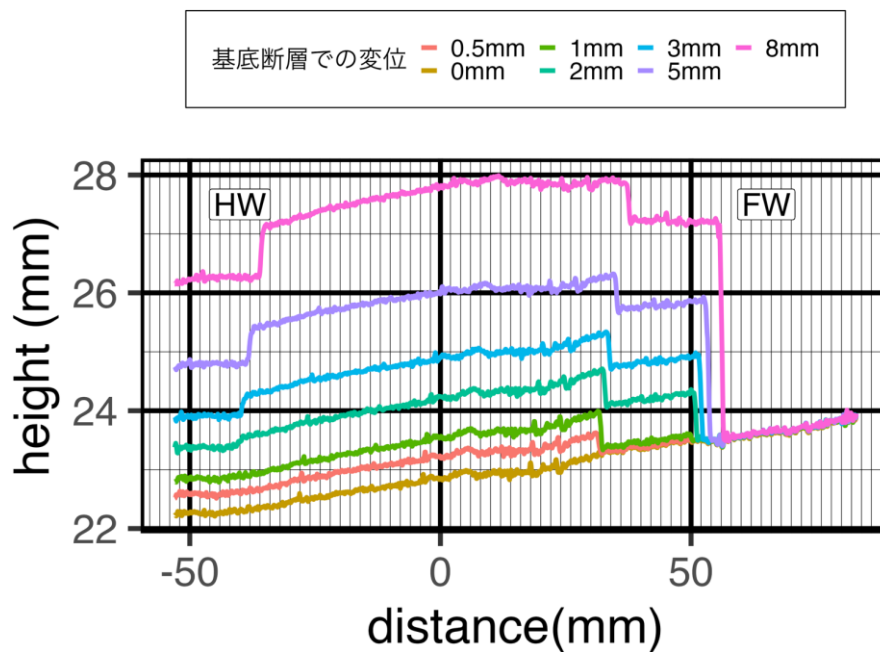


図 3.2.3.1.20 横軸-25mm に沿った断面図。グラフの横軸のグリッド線は 2mm 間隔。基底断層は 0mm の位置にシフトしている。HW : 上盤, FW : 下盤。

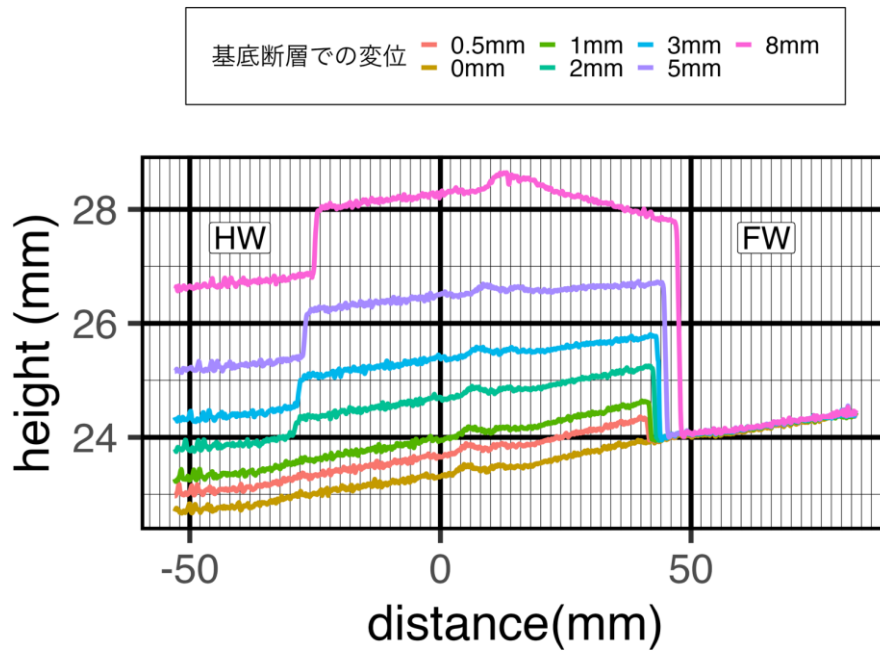


図 3.2.3.1.21 横軸 30mm に沿った断面図。グラフの横軸のグリッド線は 2mm 間隔。基底断層は 0mm の位置にシフトしている。HW : 上盤, FW : 下盤。

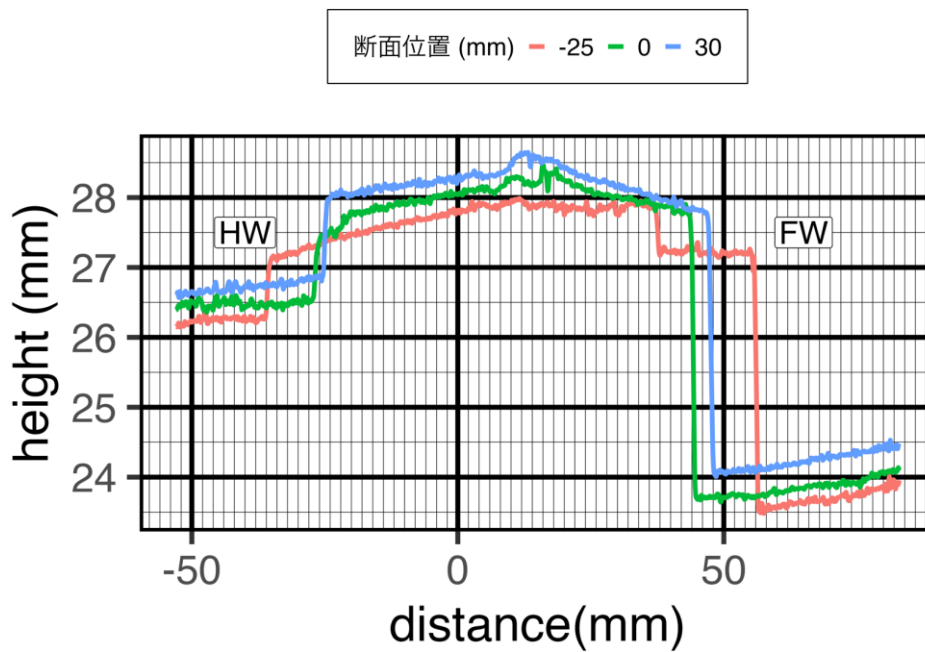


図 3.2.3.1.22 複数の断面位置の断面図。基底断層変位が 8mm の時の断面。基底断層は 0mm の位置にシフトしている。HW : 上盤, FW : 下盤。

3.2.3.2. 高角(60°)逆断層

(1) 1回目試行結果

高角(60°)の場合の逆断層室内模擬実験の1回目の結果について述べる。変位は0mm(図 3.2.3.2.1)から0.5mm(図 3.2.3.2.2)、1mm(図 3.2.3.2.3)、2mm(図 3.2.3.2.4)、3mm(図 3.2.3.2.5)、5mm(図 3.2.3.2.6)まで与えた。0.5mm(図 3.2.3.2.2)の変位時点で縦軸40mmから60mmの範囲に断層による落差が生じている。2mm(図 3.2.3.2.4)の変位では、基底断層位置に断層が発生している。3mm(図 3.2.3.2.5)の変位では、横軸20mmから40mmの範囲で最初発生した断層の上盤側で断層が発生している。5mm(図 3.2.3.2.6)の変位ではすでに発生した断層の間に多くの断層が発生、複雑に分布している。このような断層は他の試行ではみられなかったため、主断層・副断層としての整理には用いなかった。

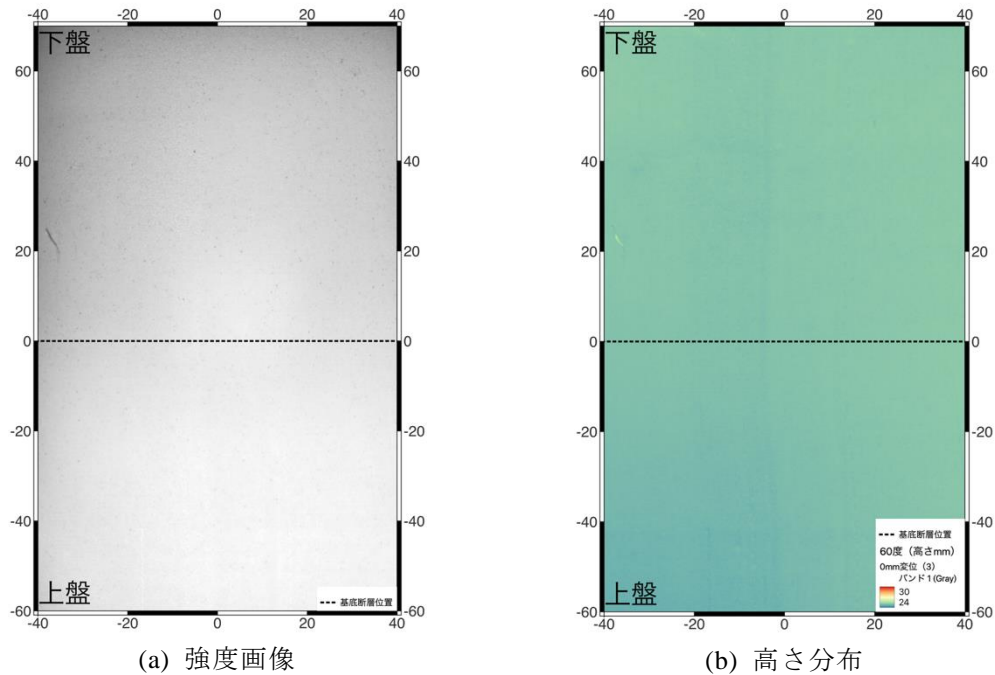
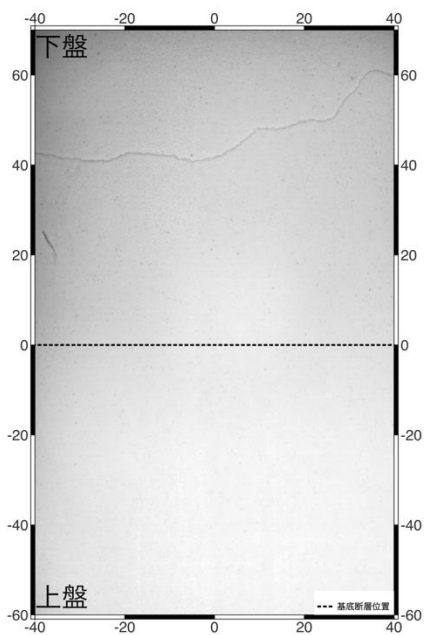
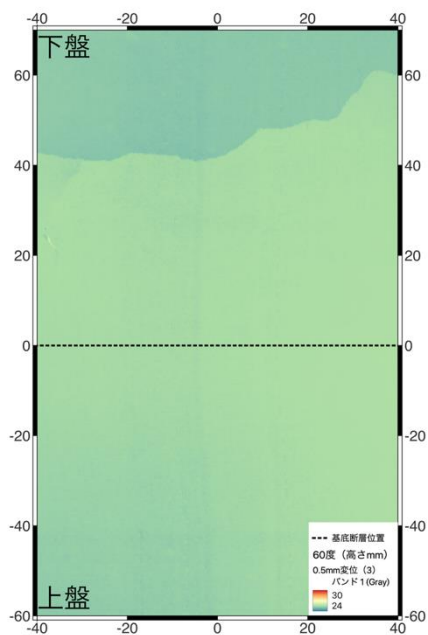


図 3.2.3.2.1 初期(変形前)

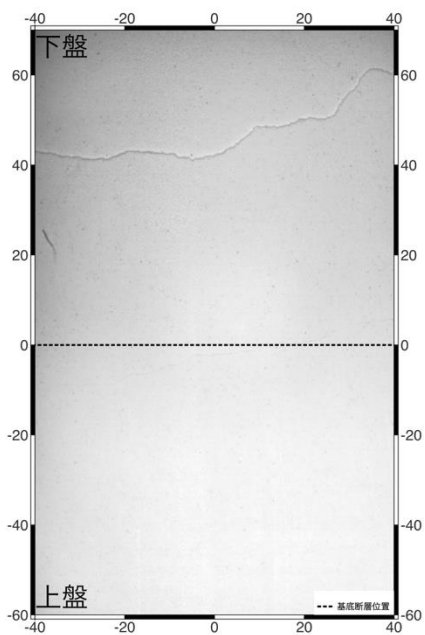


(a) 強度画像

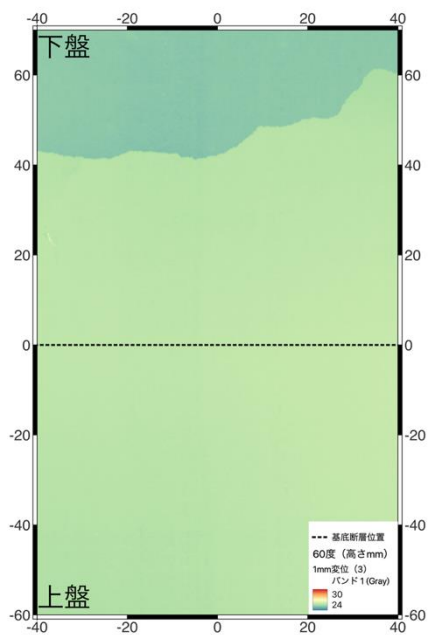


(b) 高さ分布

図 3.2.3.2.2 0.5mm 変位

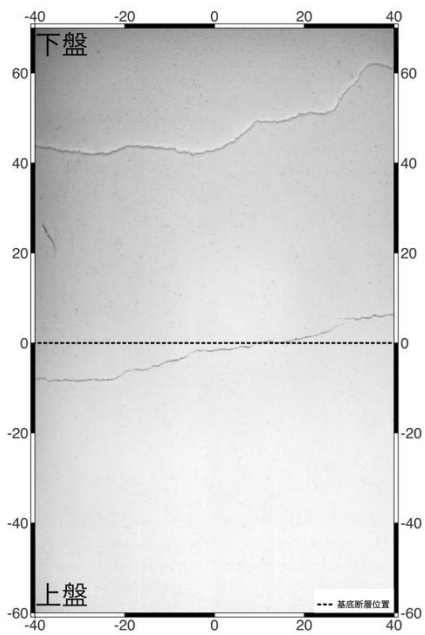


(a) 強度画像

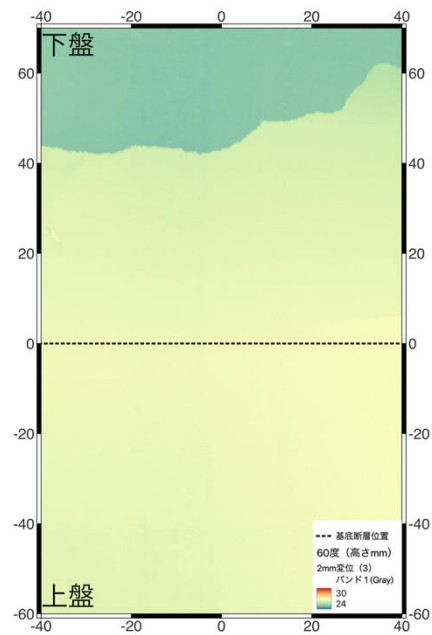


(b) 高さ分布

図 3.2.3.2.3 1mm 変位

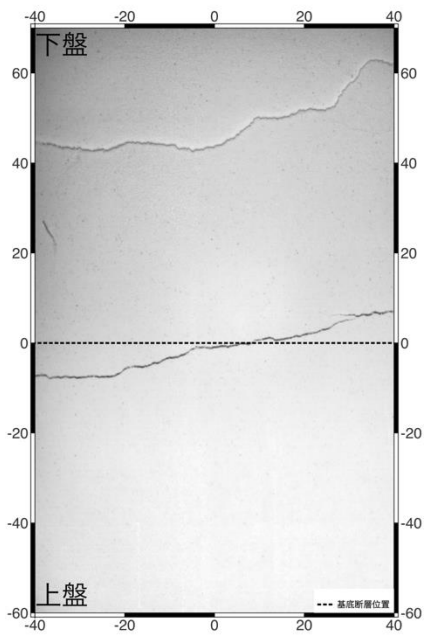


(a) 強度画像

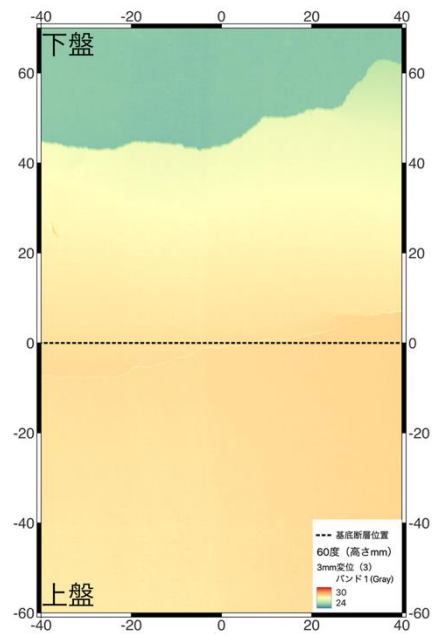


(b) 高さ分布

図 3.2.3.2.4 2mm 変位



(a) 強度画像



(b) 高さ分布

図 3.2.3.2.5 3mm 変位

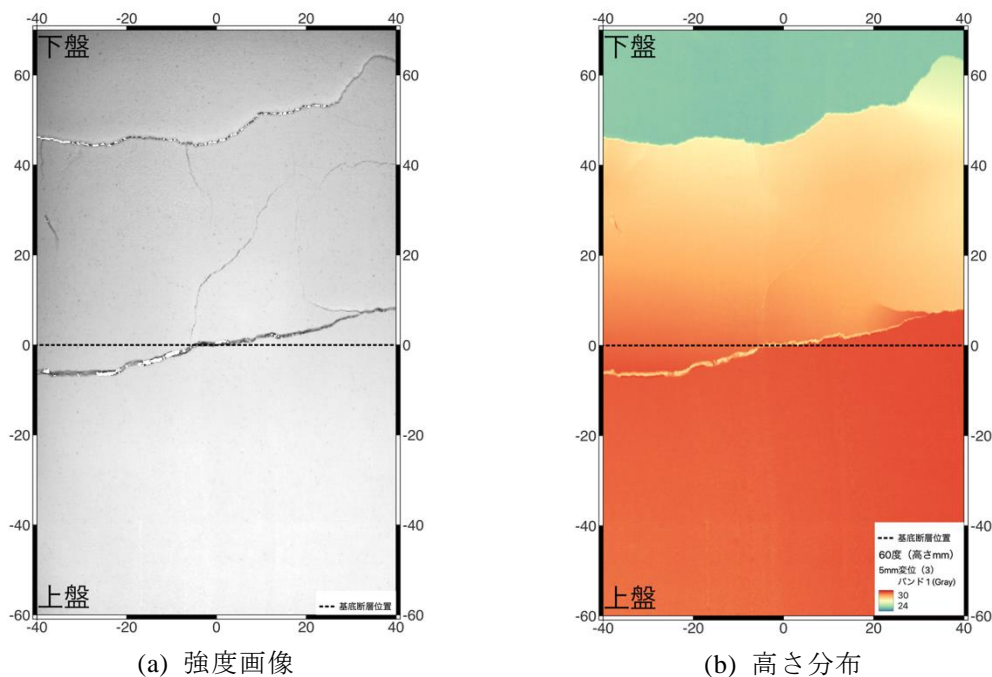


図 3.2.3.2.6 5mm 変位

一連の実験で形成された断層変位がどのように発達しているかを断面で検討を行った。検討した断面位置を図 3.2.3.2.7 に示す。横軸-25mm と 35mm における断面を図 3.2.3.2.8 および図 3.2.3.2.9 に示す。最初に発生した断層近傍で複数の断層が確認されない図 3.2.3.2.8 では横軸 40mm 付近の主断層が基底断層における変位の増大に伴い、断層落差が大きくなっている様子がみられる。基底断層での変位が 2mm を超えるあたりから横軸 0mm の上盤側で断層変位が発生しており、横軸 40mm 付近の断層変位同様、基底断層における変位の増大に伴い、断層落差が大きくなっている。図 3.2.3.2.9 では、主断層は横軸 60mm 付近に発生しており、基底断層での変位が 1mm を超えるあたりから、横軸 40mm 付近で傾斜変換点が生じる。また、基底断層での変位が 2mm を超えるあたりから横軸 0mm 付近で断層変位が発生しており、基底断層変位の増大とともに断層変位が大きくなっているが、図 3.2.3.2.8 とは逆のセンスとなっている。したがって、横軸 40mm から 60mm 付近の落差の大きな断層が主断層と考えられる。短い断層は副断層と解釈されるが、鉛直落差はみられない。基底断層直上の断層は分岐断層と考えられるが、場所により変位のセンスが逆転している。発生した断層位置のばらつきをみるために、基底断層の変位量が 5mm の時の断面図を図 3.2.3.2.10 に示す。横軸のグリッド間隔は 2mm であることから、各断層の出現位置は 20mm 程度ばらついている様子がみられる。

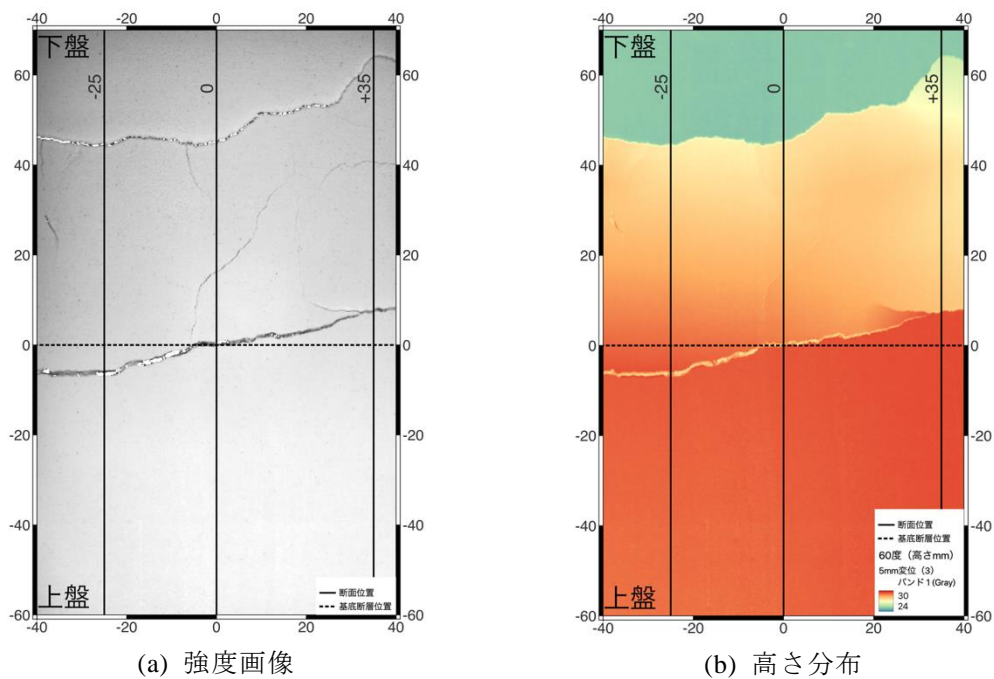


図 3.2.3.2.7 断面位置図

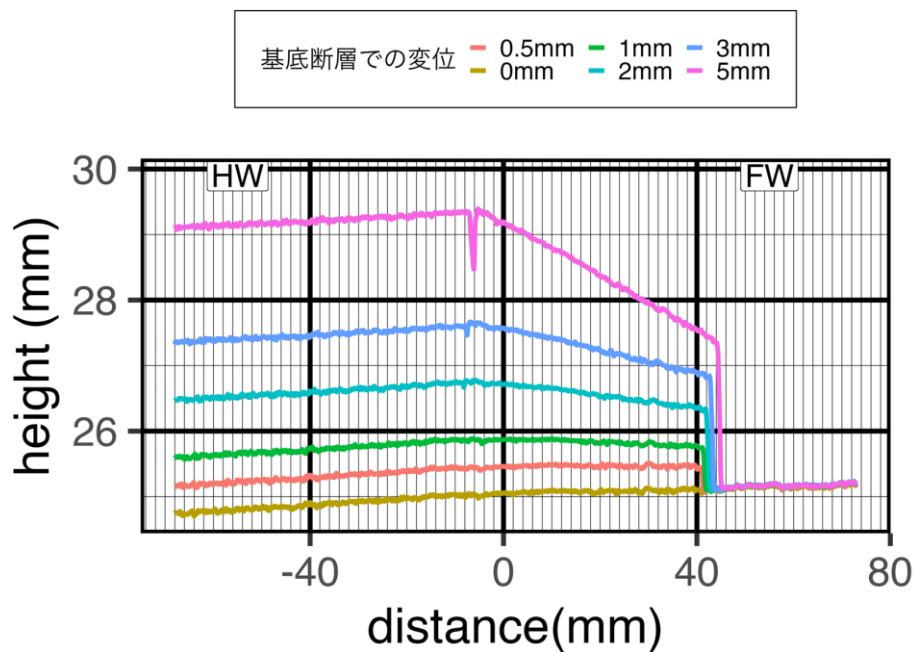


図 3.2.3.2.8 横軸-25mmにおける断面図。グラフの横軸のグリッド線は2mm間隔。基底断層は0mmの位置。HW：上盤，FW：下盤。

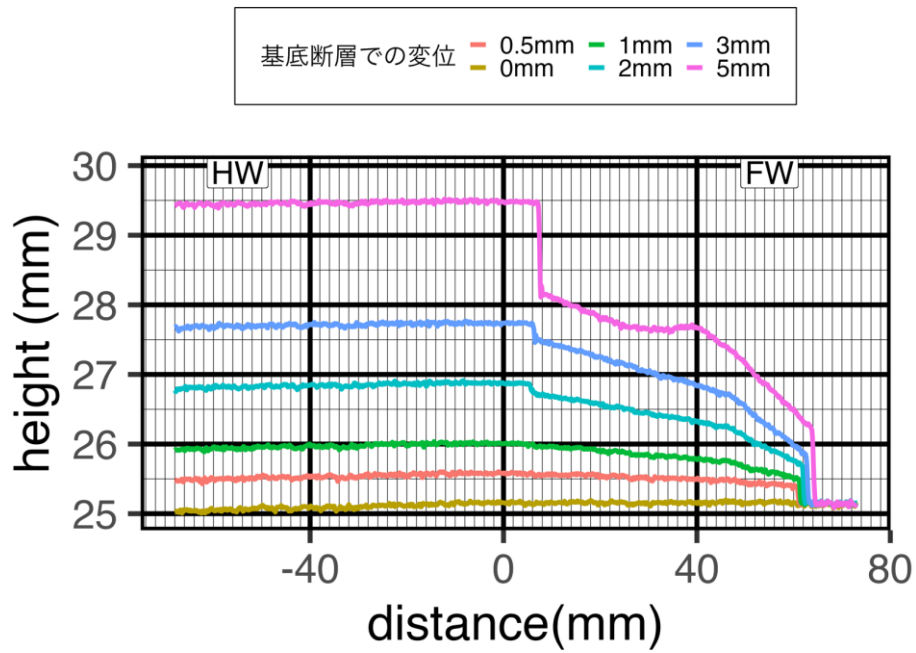


図 3.2.3.2.9 横軸 35mm における断面図。グラフの横軸のグリッド線は 2mm 間隔。基底断層は 0mm の位置。HW : 上盤, FW : 下盤。

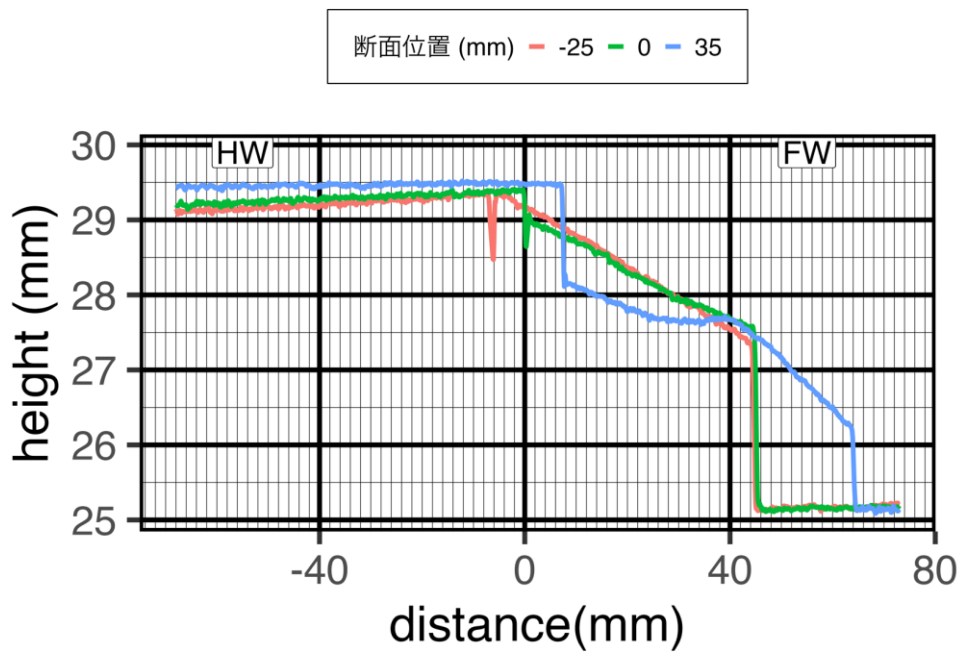


図 3.2.3.2.10 複数の断面位置の断面図。基底断層変位が 5mm の時の断面。基底断層は 0mm の位置。HW : 上盤, FW : 下盤。

(2) 2回目試行結果

高角（ 60° ）の場合の逆断層室内模擬実験の2回目の結果について述べる。変位は0mm（図 3.2.3.2.11）から0.5mm（図 3.2.3.2.12）、1mm（図 3.2.3.2.13）、2mm（図 3.2.3.2.14）、3mm（図 3.2.3.2.15）、5mm（図 3.2.3.2.16）まで与えた。0.5mm（図 3.2.3.2.12）の変位時点で縦軸40mmから60mmの範囲に断層による落差が生じている。2mm（図 3.2.3.2.14）の変位では、基底断層位置に断層が発生している、3mm（図 3.2.3.2.15）の変位では、横軸20mmから40mmの範囲で最初発生した断層の上盤側で断層が発生している。

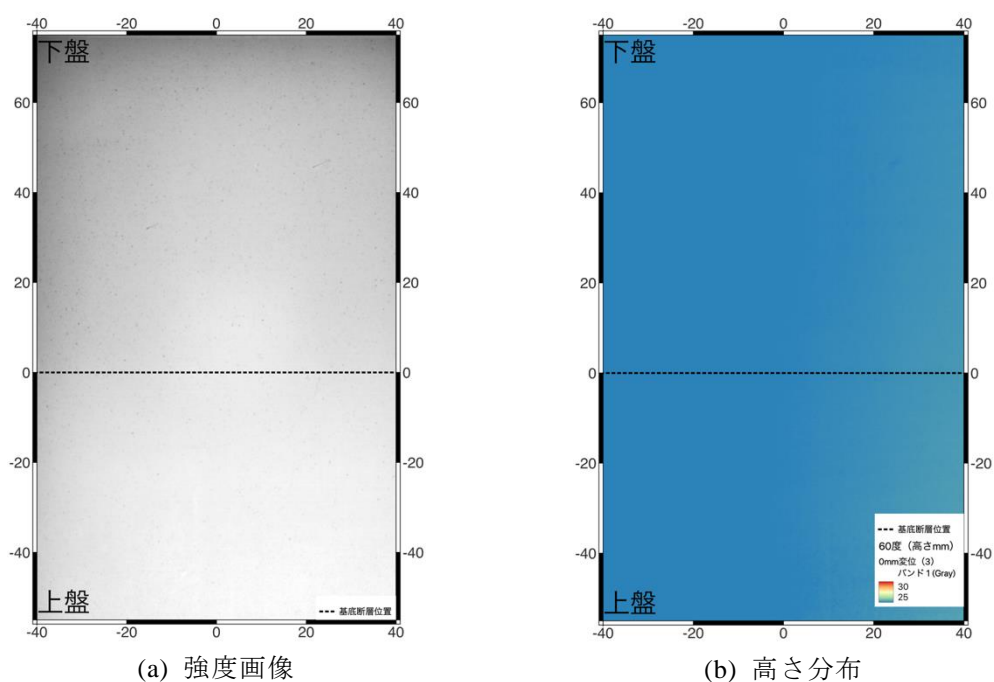


図 3.2.3.2.11 初期（変形前）

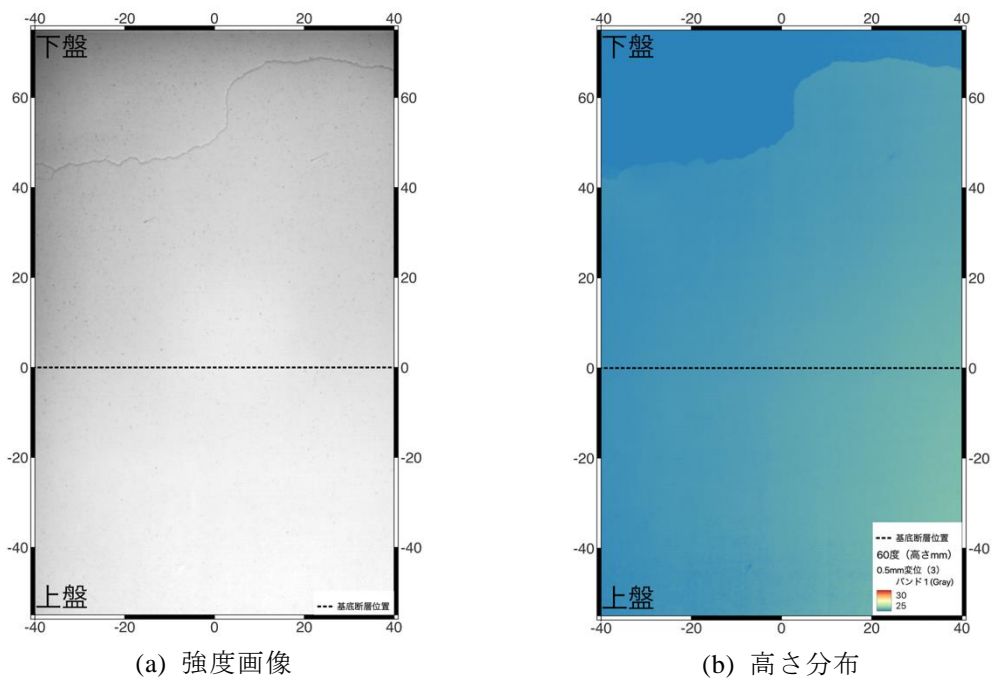


図 3.2.3.2.12 0.5mm 変位

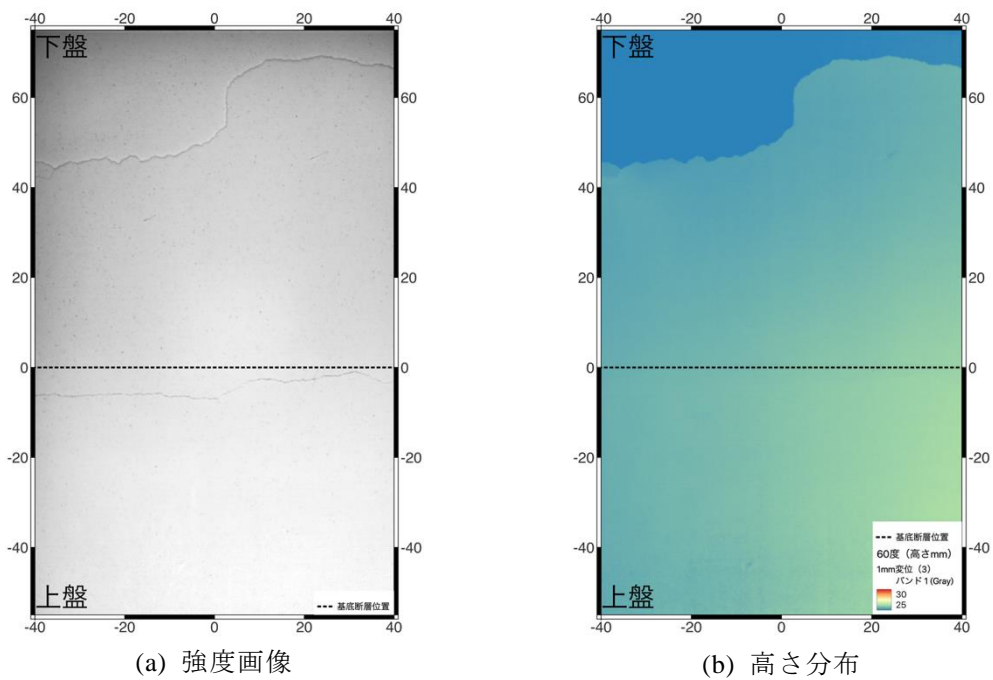


図 3.2.3.2.13 1mm 変位

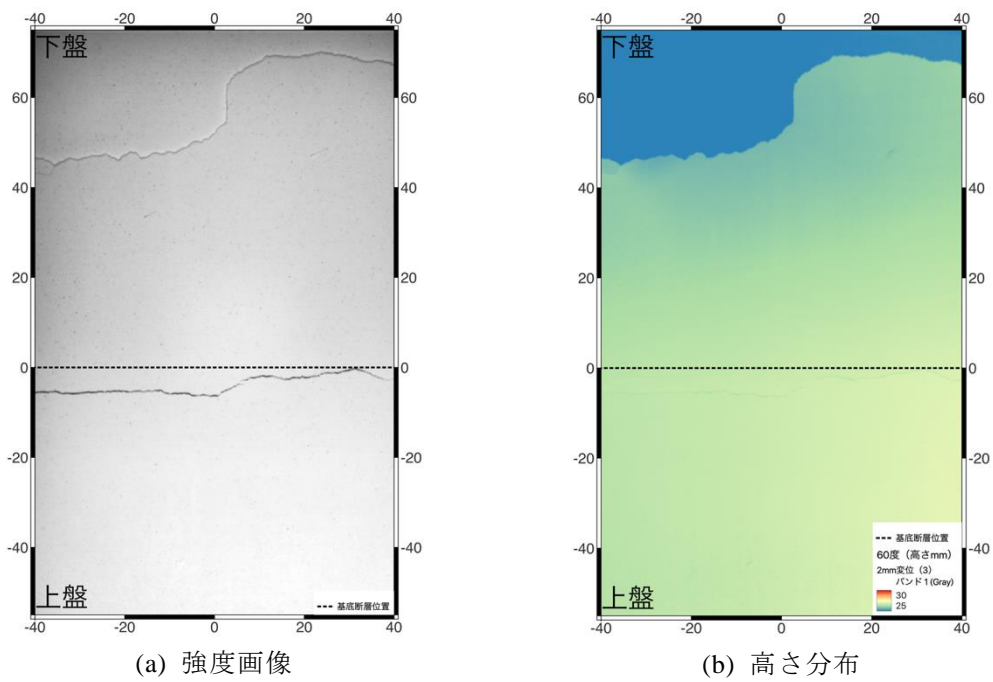


図 3.2.3.2.14 2mm 変位

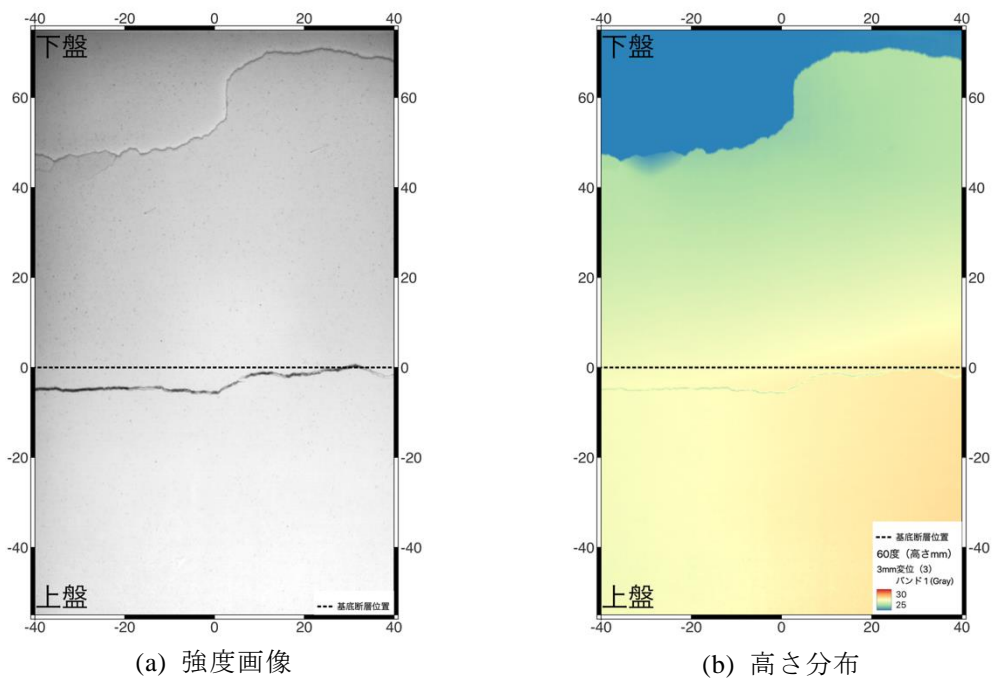


図 3.2.3.2.15 3mm 変位

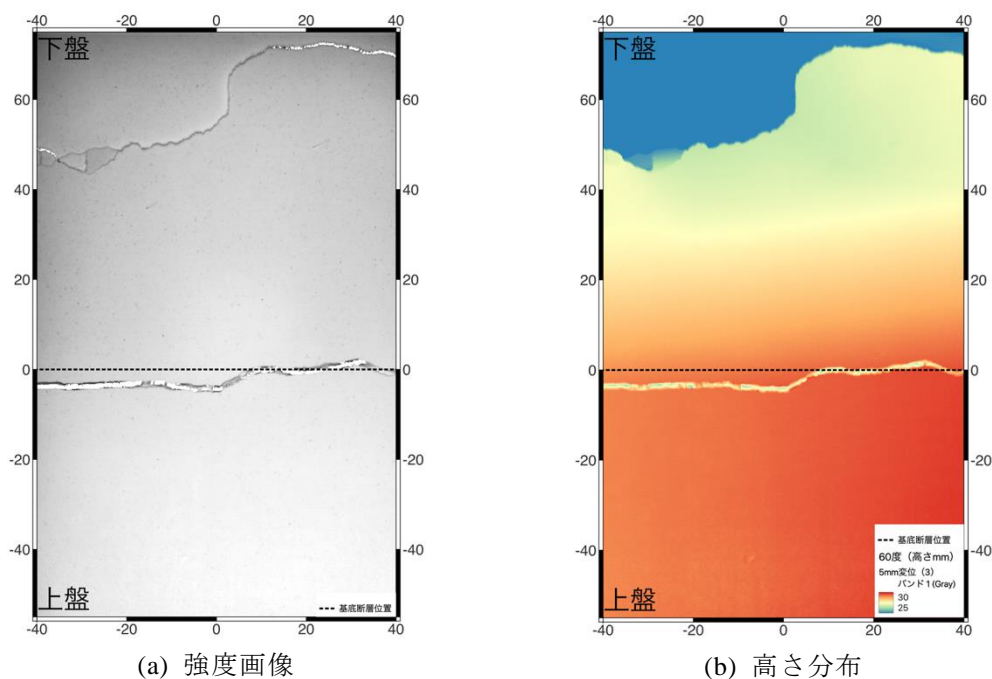


図 3.2.3.2.16 5mm 変位

一連の実験で形成された断層変位がどのように発達しているかを断面で検討を行った。検討した断面位置を図 3.2.3.2.17 に示す。横軸-25mm と 30mm における断面を図 3.2.3.2.18 および図 3.2.3.2.19 に示す。副断層が確認されない図 3.2.3.2.18 では横軸 40mm 付近の主断層が基底断層における変位の増大に伴い、断層落差が大きくなっている様子がみられる。基底断層での変位が 2mm を超えるあたりから横軸 0mm の上盤側で断層変位が発生しており、主断層変位同様、基底断層における変位の増大に伴い、断層落差が大きくなっている。図 3.2.3.2.19 では、主断層は横軸 60mm 付近に発生しており、基底断層での変位が 1mm を超えるあたりから、横軸 40mm 付近で傾斜変換点が生じる。また、基底断層での変位が 2mm を超えるあたりから横軸 0mm 付近で断層変位が発生しており、基底断層変位の増大とともに断層変位が大きくなっているが、図 3.2.3.2.18 とは逆のセンスとなっている。発生した断層位置のばらつきをみるために、基底断層の変位量が 5mm の時の断面図を図 3.2.3.2.20 に示す。横軸のグリッド間隔は 2mm であることから、各断層の出現位置は 20mm 程度ばらついている様子がみられる。

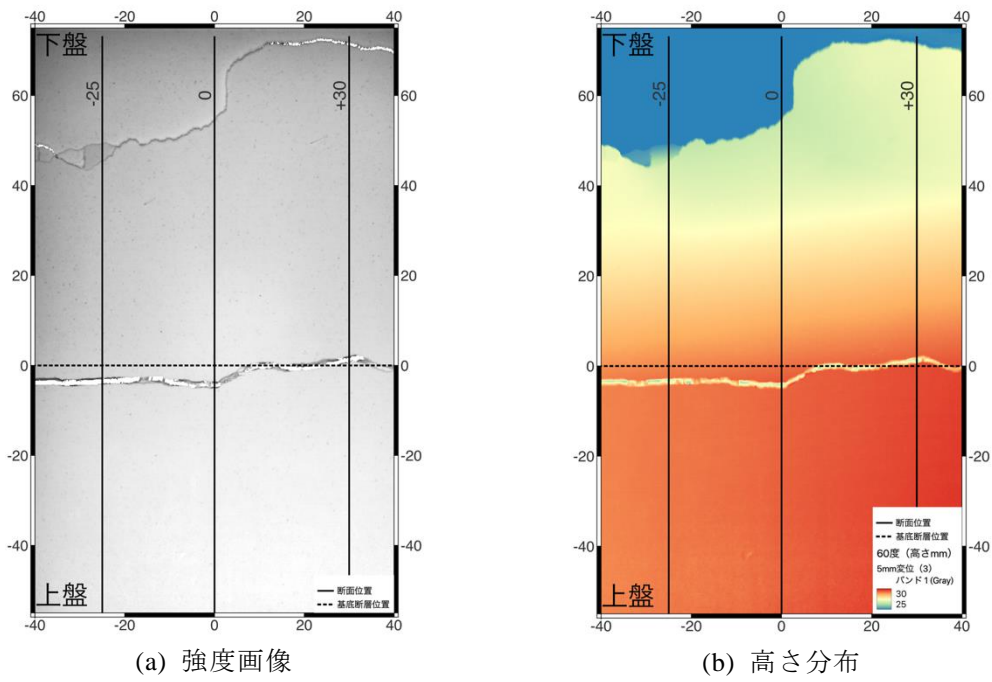


図 3.2.3.2.17 断面位置図

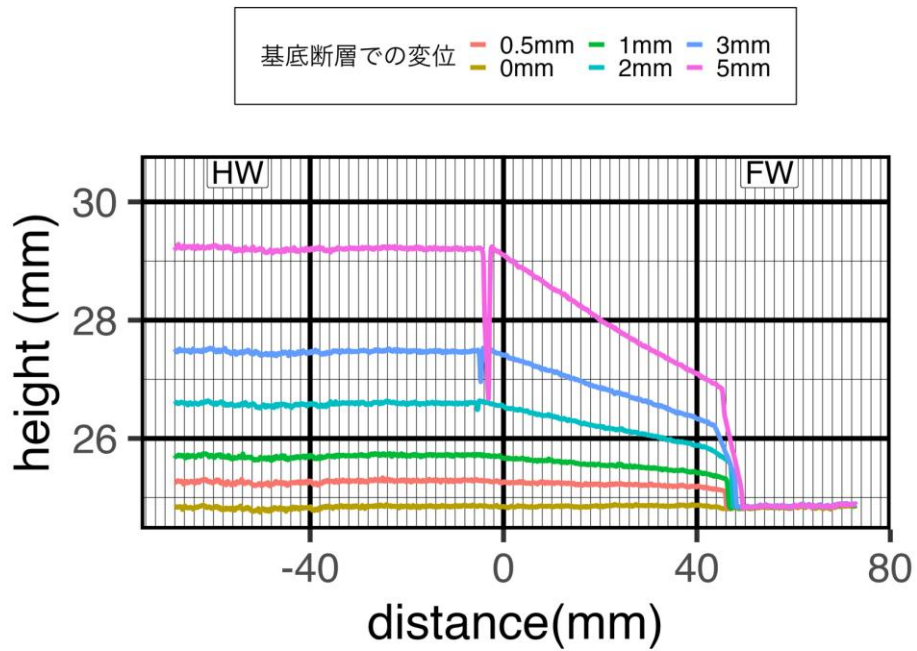


図 3.2.3.2.18 横軸-25mmにおける断面図。グラフの横軸のグリッド線は2mm間隔。基底断層は0mmの位置。HW：上盤，FW：下盤。

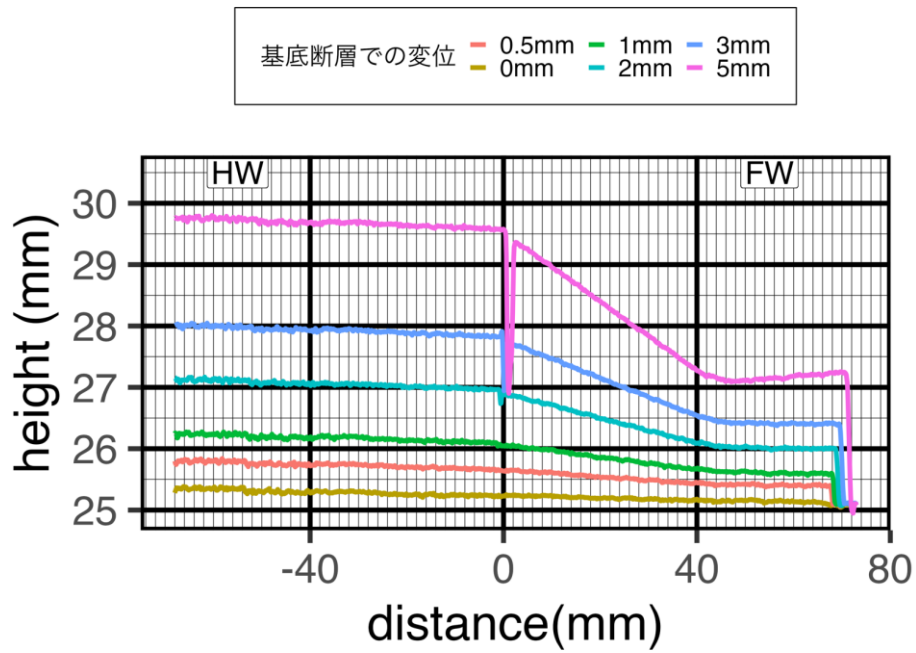


図 3.2.3.2.19 横軸 30mm における断面図。グラフの横軸のグリッド線は 2mm 間隔。基底断層は 0mm の位置。HW : 上盤, FW : 下盤。

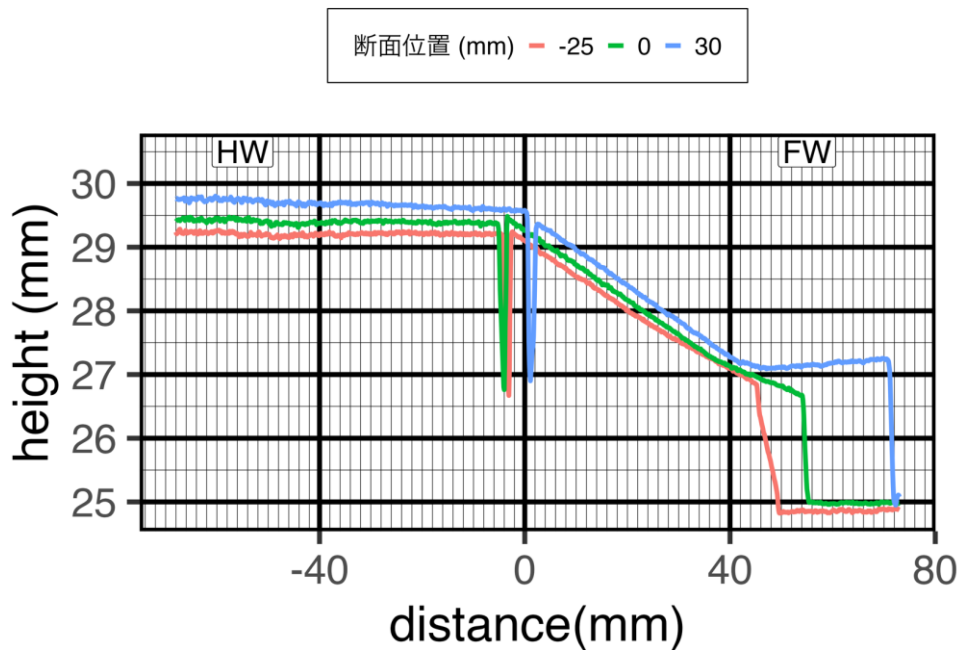


図 3.2.3.2.20 複数の断面位置の断面図。基底断層変位が 5mm の時の断面。基底断層は 0mm の位置。HW : 上盤, FW : 下盤。

3.2.3.3. 低角(30°)正断層

(1) 1回目試行結果

低角(30°)の場合の正断層室内模擬実験は1回のみを試行である。変位は0mm(図3.2.3.3.1)から0.5mm(図3.2.3.3.2)、1mm(図3.2.3.3.3)、2mm(図3.2.3.3.4)、3mm(図3.2.3.3.5)、5mm(図3.2.3.3.6)、8mm(図3.2.3.3.7)まで与えた。逆断層と異なり、基底断層の変位が0.5mm(図3.2.3.3.2)の時には断層は発生していない。1mmの変位(図3.2.3.3.3)で基底断層周辺に2条の断層が発生する。2mmの変位(図3.2.3.3.4)で1mmの時に形成された断層の間に主断層に相当する明瞭な断層変位が生じる。また、基底断層直上付近に横軸20mmから40mmの別の断層もみられる。この断層は1mmの変位(図3.2.3.3.3)で生じた断層同様、鉛直落差があまり大きくないため、高さ分布では認識できない。3mmの変位(図3.2.3.3.5)でこれらの断層変位が大きくなるが、5mmの変位(図3.2.3.3.6)で主断層の組み合わせが異なる。1mmで発生した断層変位(図3.2.3.3.3)はほぼ変化がみられない。

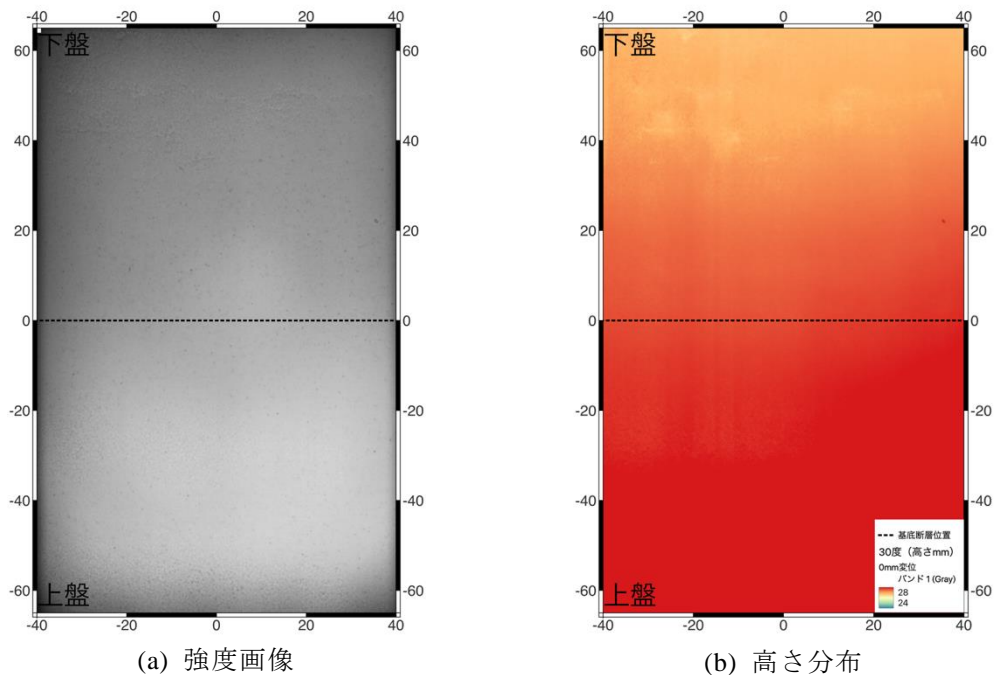


図 3.2.3.3.1 初期(変形前)

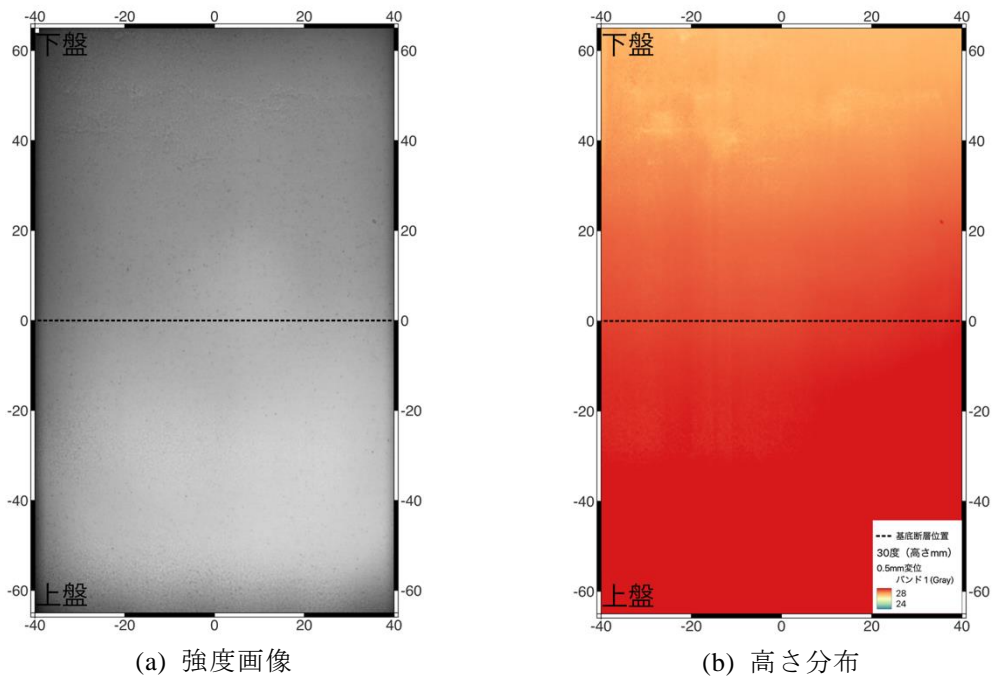


図 3.2.3.3.2 0.5mm 変位

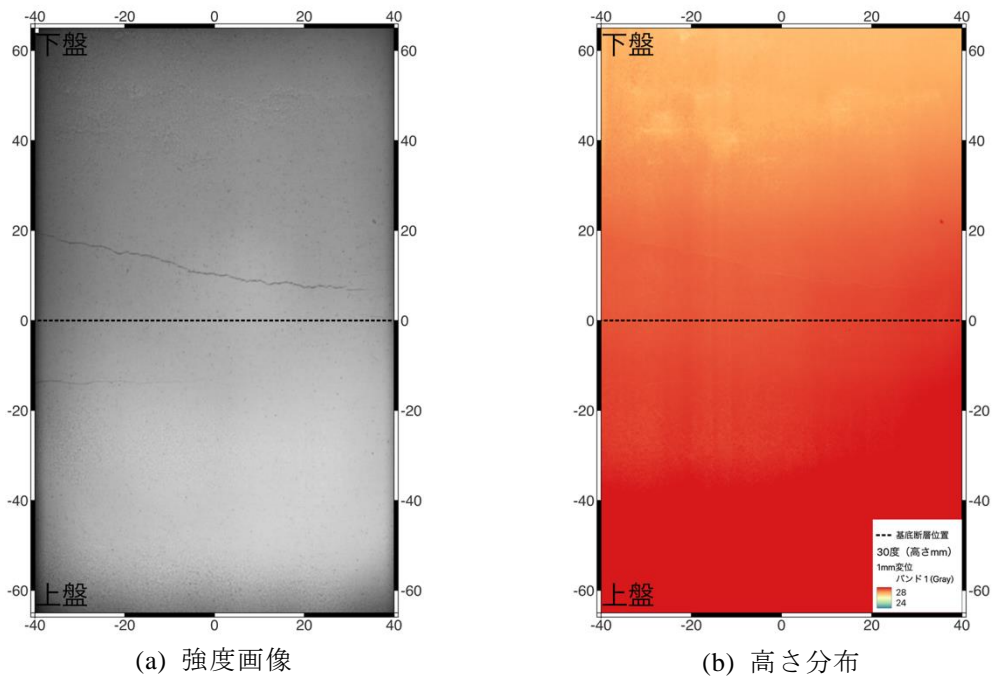
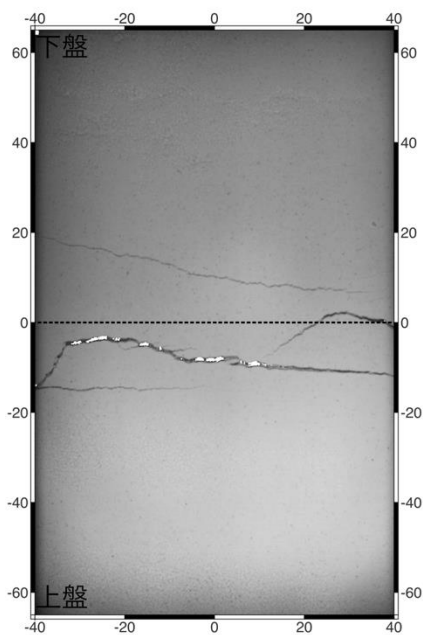
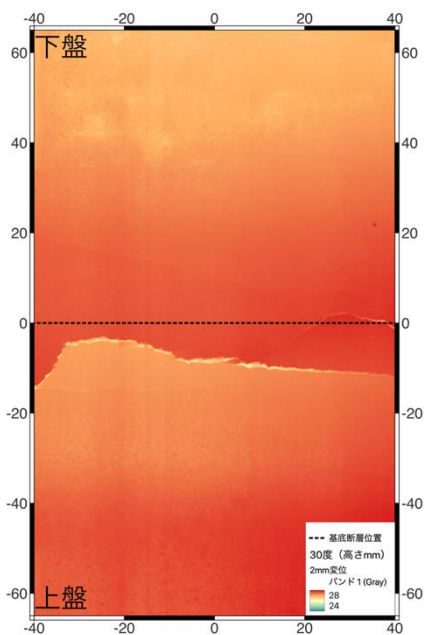


図 3.2.3.3.3 1mm 変位

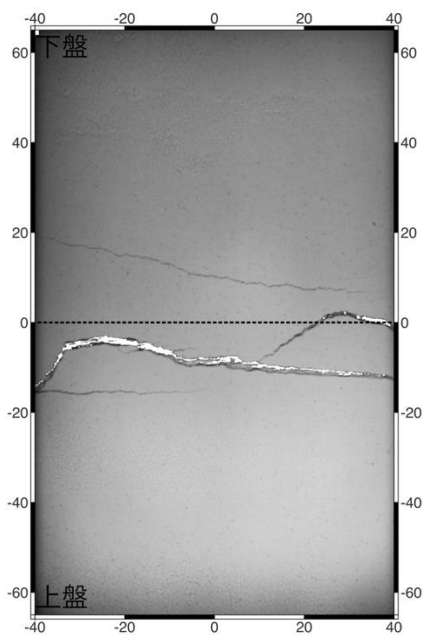


(a) 強度画像

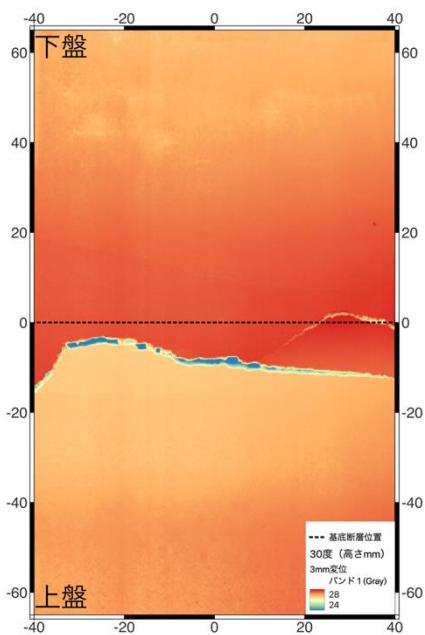


(b) 高さ分布

図 3.2.3.3.4 2mm 変位



(a) 強度画像



(b) 高さ分布

図 3.2.3.3.5 3mm 変位

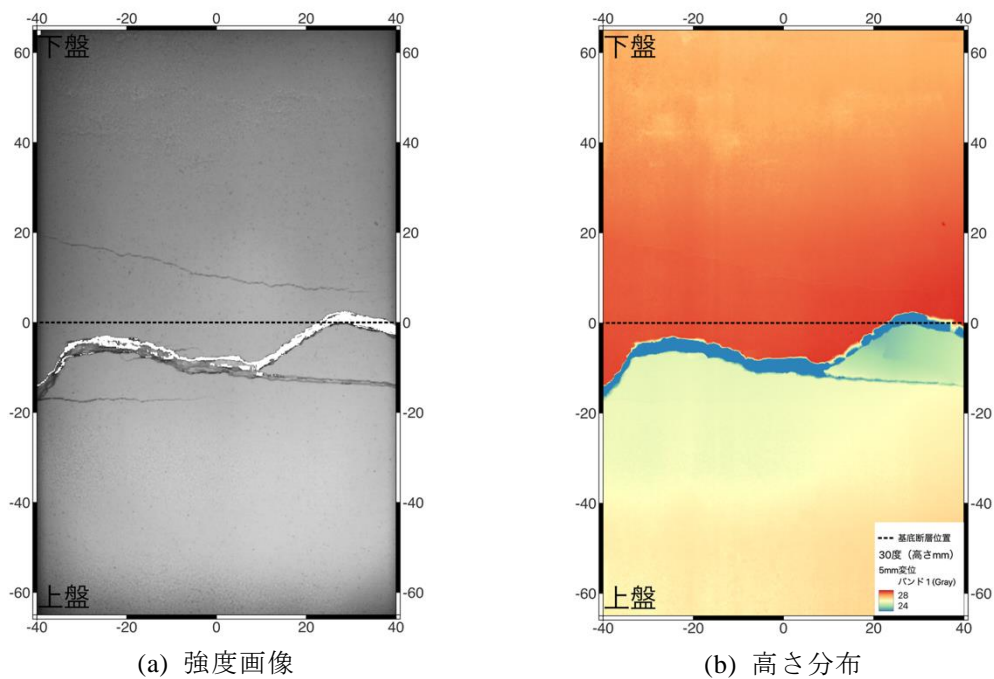


図 3.2.3.3.6 5mm 変位

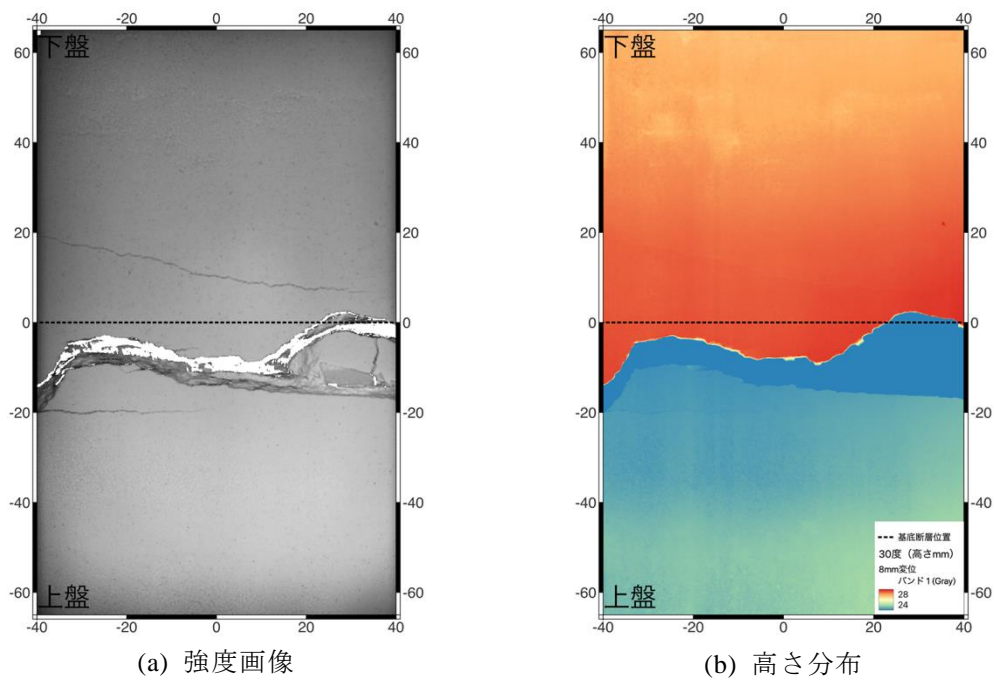


図 3.2.3.3.7 8mm 変位

一連の実験で形成された断層変位がどのように発達しているかを断面で検討を行った。検討した断面位置を図 3.2.3.3.8 に示す。横軸-25mm と 30mm における断面を図 3.2.3.3.9 および図 3.2.3.3.10 に示す。図 3.2.3.3.9 では横軸 0mm 付近の主断層が基底断層における変位の増大に伴い、断層落差が大きくなっている様子がみられる。最初に発生した断層の落差は

確認できない。これに対して、図 3.2.3.3.10 では、横軸 0mm よりも上盤側で落差が大きくなっていたのが、5mm の変位で横軸 0mm の落差が大きくなっている。すなわちこの断面位置での断層変位は、最初に発生した主断層変位が、その後より前面に移動して成長した様子がみられ、主断層と分岐断層が入れかわったと考えられる。発生した断層位置のばらつきをみるために、8mm の時の断面図を図 3.2.3.3.11 に示す。横軸のグリッド間隔は 2mm であることから、各断層の出現位置は 20mm から 30mm 程度はばらついている様子がみられる。

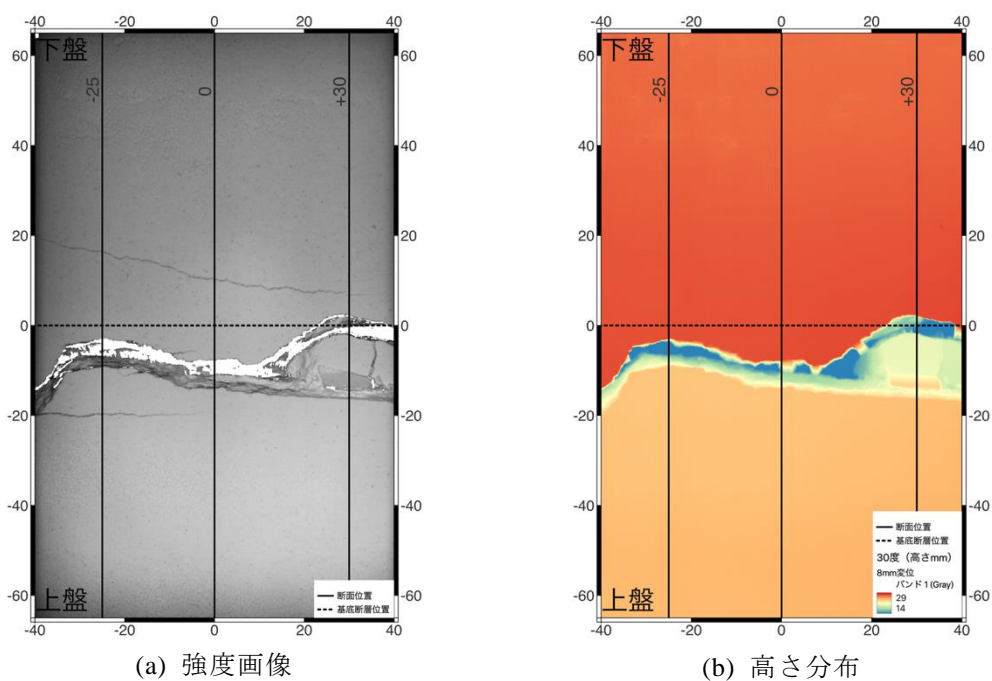


図 3.2.3.3.8 断面位置図

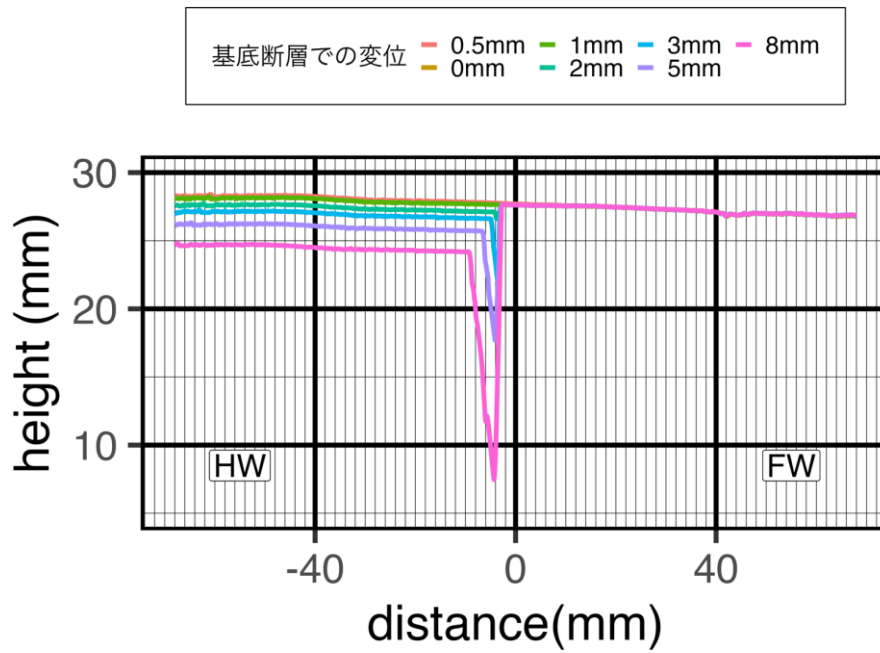


図 3.2.3.3.9 横軸-25mm に沿った断面図。グラフの横軸のグリッド線は 2mm 間隔。基底断層は 0mm の位置。HW : 上盤, FW : 下盤。

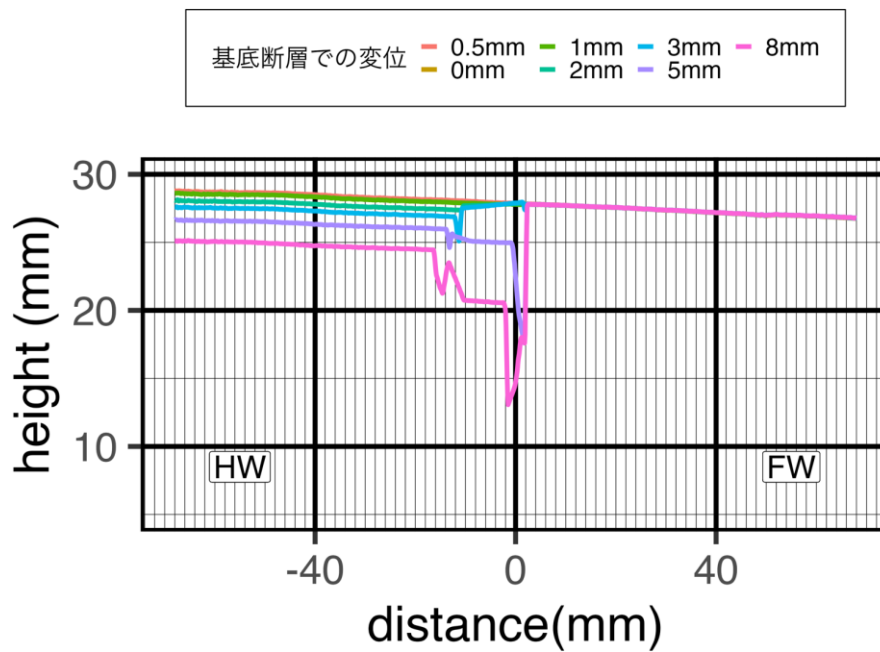


図 3.2.3.3.10 横軸 30mm に沿った断面図。グラフの横軸のグリッド線は 2mm 間隔。基底断層は 0mm の位置。HW : 上盤, FW : 下盤。

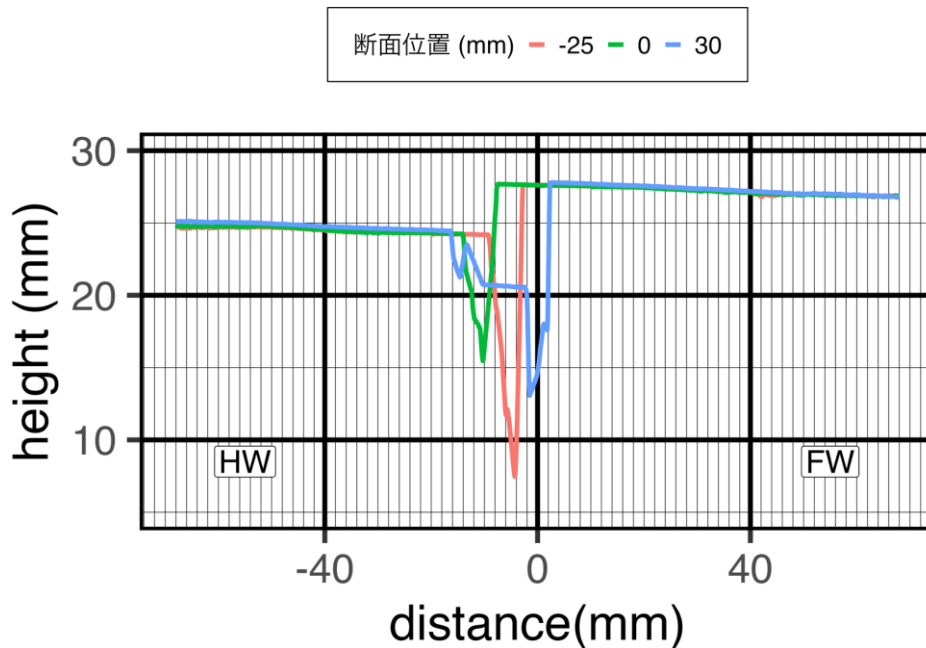
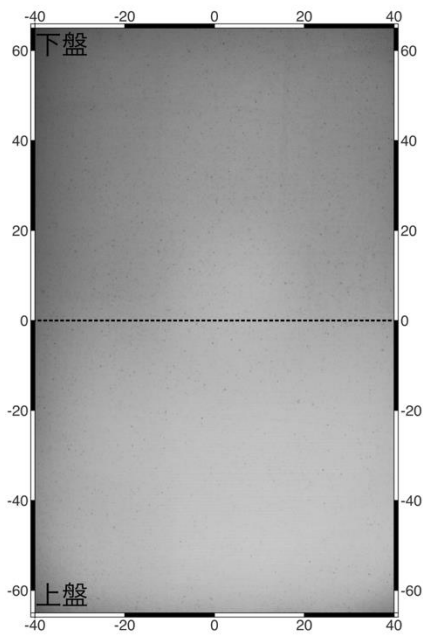


図 3.2.3.3.11 複数の断面位置の断面図。基底断層変位が 8mm の時の断面。基底断層は 0mm の位置。HW : 上盤, FW : 下盤。

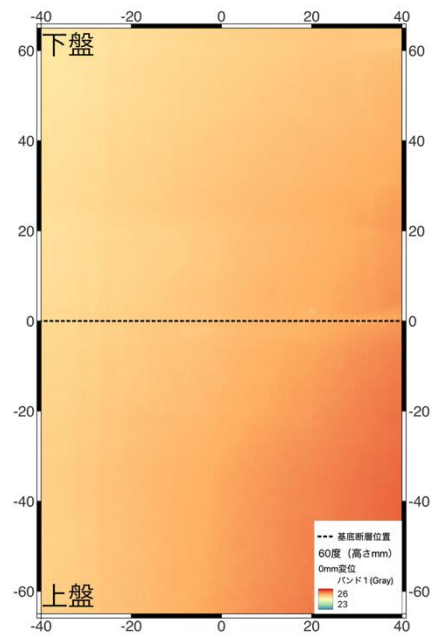
3.2.3.4. 高角 (60) 正断層

(1) 1 回目試行結果

高角 (60°) の場合の正断層室内模擬実験は 1 回のみ試行である。変位は 0mm (図 3.2.3.4.1) から 0.5mm (図 3.2.3.4.2)、1mm (図 3.2.3.4.3)、2mm (図 3.2.3.4.4)、3mm (図 3.2.3.4.5)、5mm (図 3.2.3.4.6) まで与えた。逆断層と異なり、0.5mm の変位 (図 3.2.3.4.2) では断層は発生せず、1mm の変位 (図 3.2.3.4.3) で基底断層よりも下盤側に断層が発生している。2mm の変位 (図 3.2.3.4.4) で縦軸 0mm 付近の基底断層直上に断層が発生する。1mm の時 (図 3.2.3.4.3) に発生した変位は 2mm の変位 (図 3.2.3.4.4) まで断層変位が増加しているが、それ以降は変位していない。また、大部分は高さ分布では確認できない。これは鉛直落差があまり大きくないためである。3mm の変位 (図 3.2.3.4.5) 以降に縦軸 -30mm 付近の上盤側に別の断層が発生している。5mm (図 3.2.3.4.6) の変位で横軸 30mm 付近の上盤側に基底断層と直交方向に断層が発生しているが、開口成分が大きいため、高さ分布では明瞭にあらわれていない。

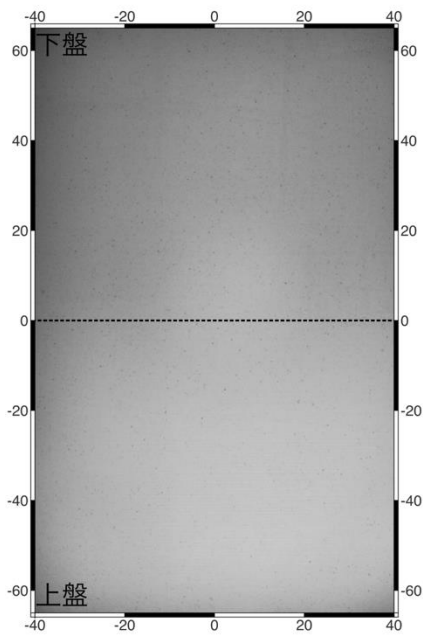


(a) 強度画像

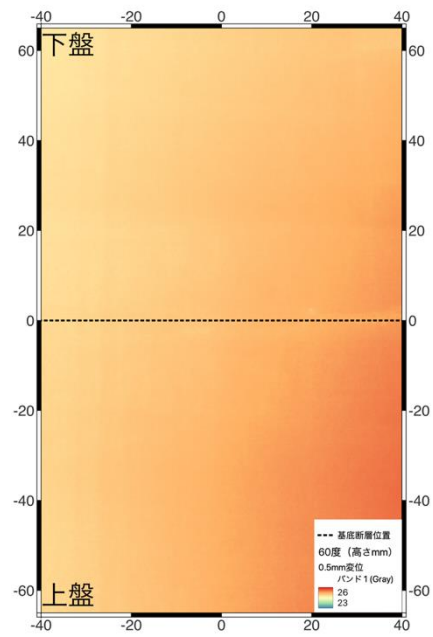


(b) 高さ分布

図 3.2.3.4.1 初期 (変形前)

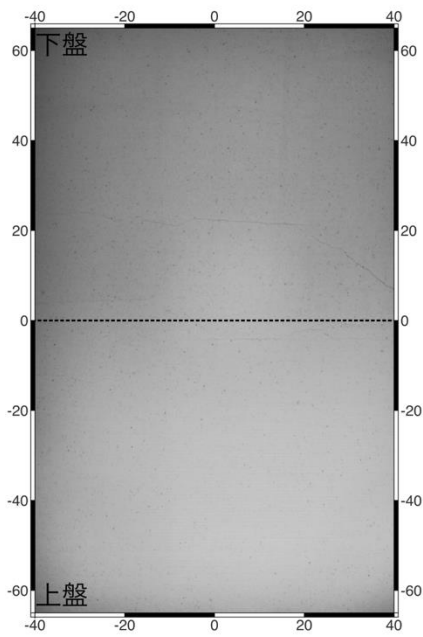


(a) 強度画像

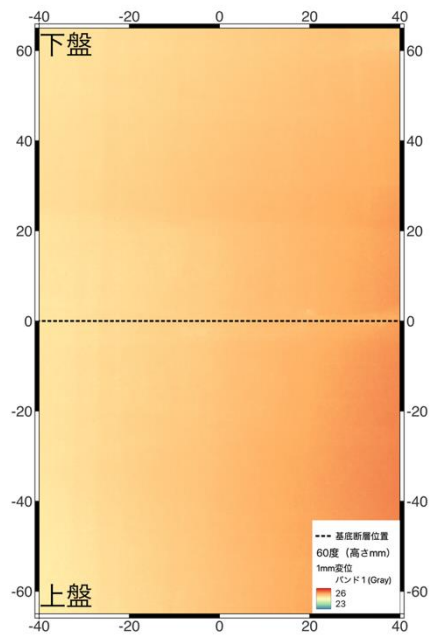


(b) 高さ分布

図 3.2.3.4.2 0.5mm 変位

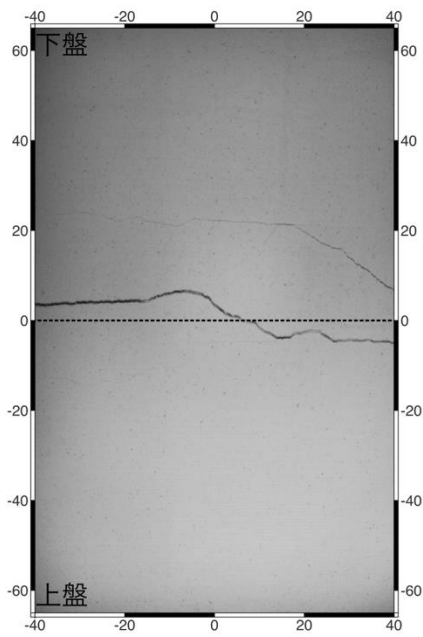


(a) 強度画像

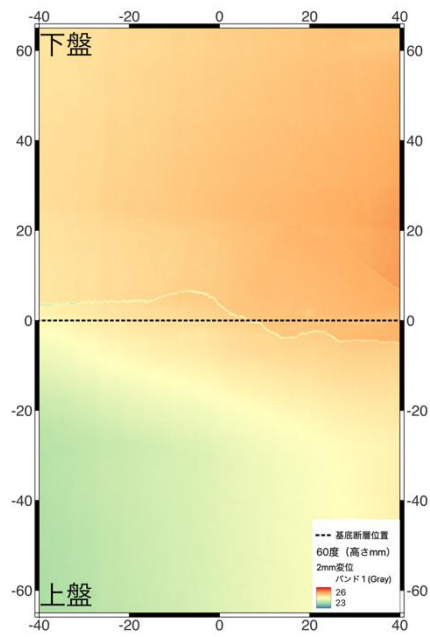


(b) 高さ分布

図 3.2.3.4.3 1mm 変位



(a) 強度画像



(b) 高さ分布

図 3.2.3.4.4 2mm 変位

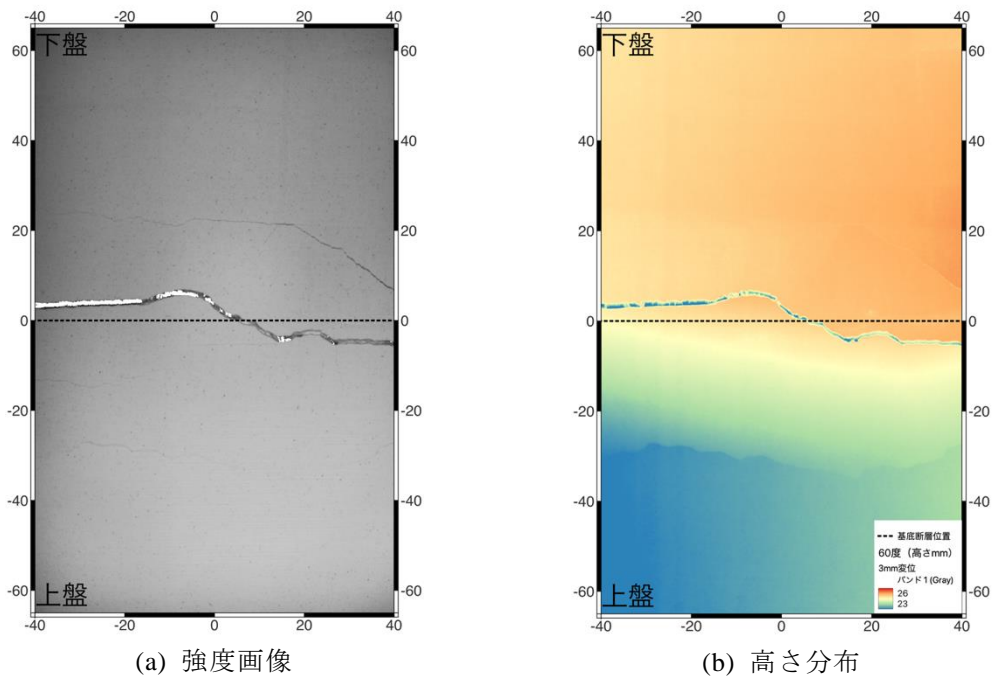


図 3.2.3.4.5 3mm 変位

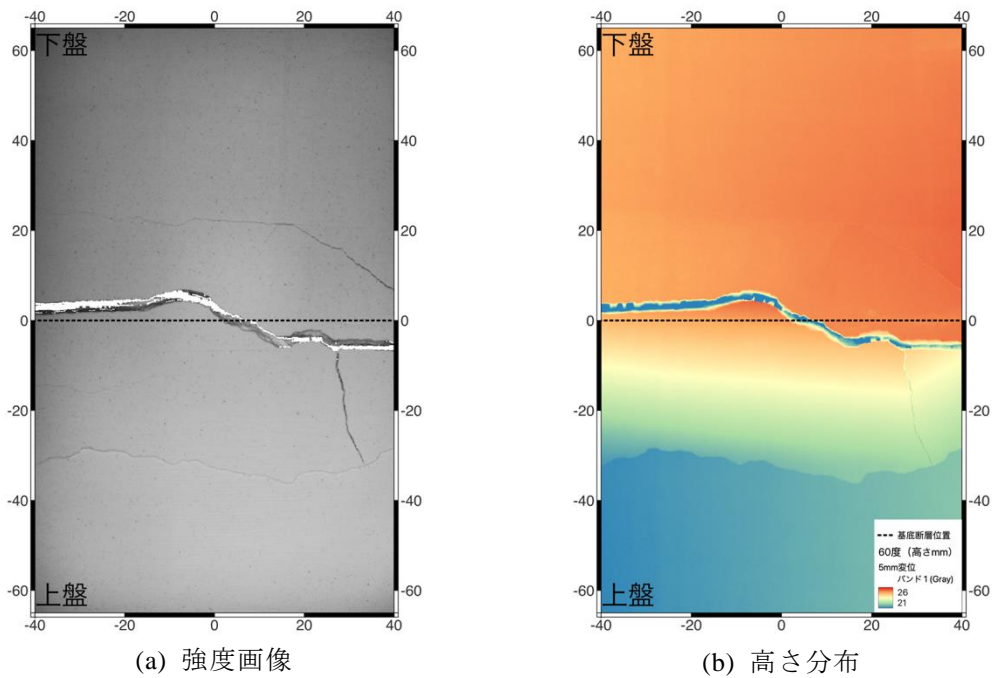


図 3.2.3.4.6 5mm 変位

一連の実験で形成された断層変位がどのように発達しているかを断面で検討を行った。検討した断面位置を図 3.2.3.4.7 に示す。横軸-25mm と 30mm における断面を図 3.2.3.4.7 および図 3.2.3.4.9 に示す。図 3.2.3.4.9 では横軸 0mm 付近の主断層が基底断層における変位の増大に伴い、断層落差が大きくなっている様子がみられる。最初に発生した断層の落差は

2mmの変位までしか確認できない。これに対して、図 3.2.3.4.8 では、横軸 0mm 付近で発生した変位が開口している様子がみられ、3mmの変位から横軸-30 付近で断層落差が発生している。すなわち、最初に発生した断層は途中まで副断層として活動し、それ以降は活動しない古い断層となる。主断層よりも上盤側に分岐断層が発生する。しかし、この断層は上盤ブロックの倒れこみによるものと考えられる。発生した断層位置のばらつきをみるために、5mmの時の断面図を図 3.2.3.4.10 に示す、横軸のグリッド間隔は 2mm であることから、各断層の出現位置は 10mm 程度ばらついている様子がみられる。

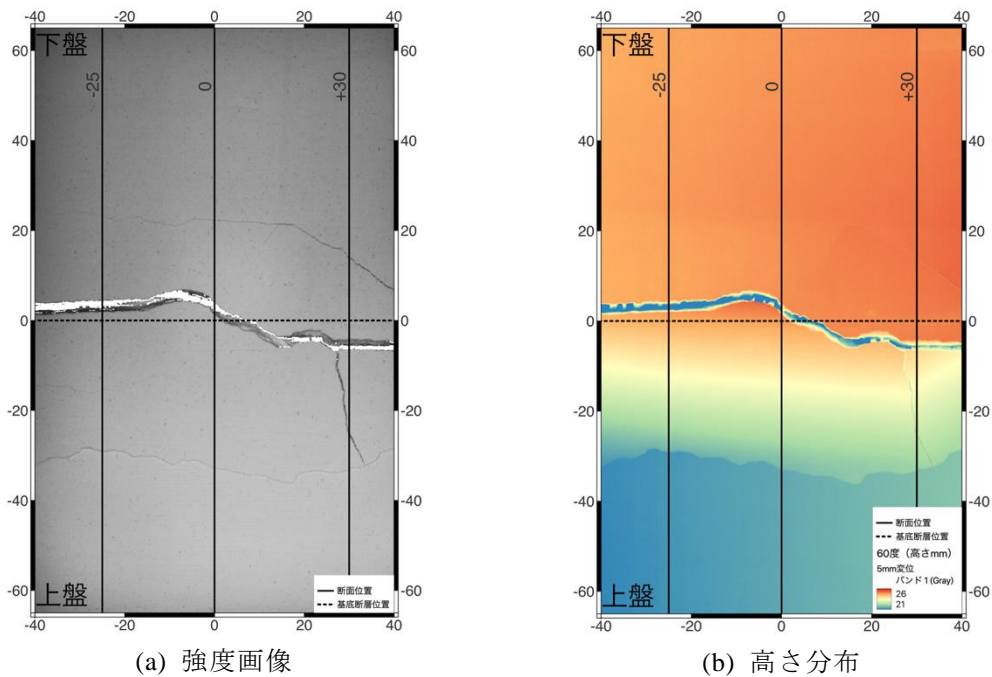


図 3.2.3.4.7 断面位置図

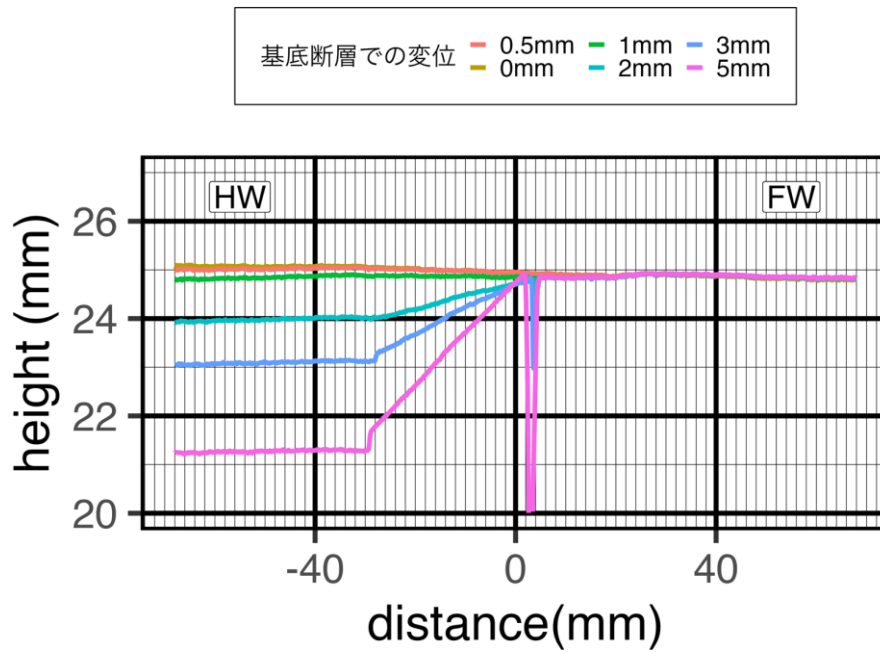


図 3.2.3.4.8 横軸-25mm に沿った断面図。グラフの横軸のグリッド線は 2mm 間隔。基底断層は 0mm の位置。HW : 上盤, FW : 下盤。

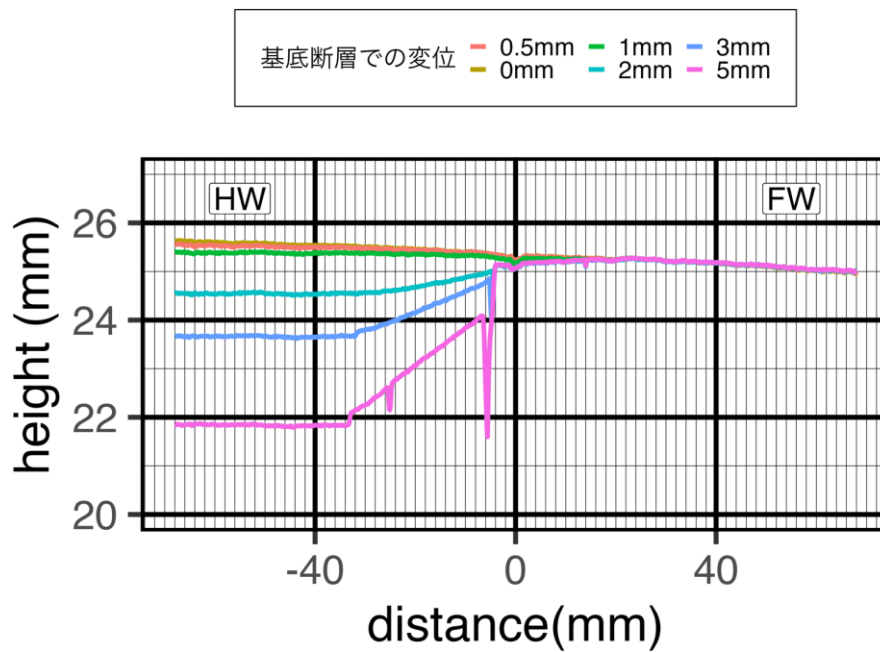


図 3.2.3.4.9 横軸 30mm に沿った断面図。グラフの横軸のグリッド線は 2mm 間隔。基底断層は 0mm の位置。HW : 上盤, FW : 下盤。

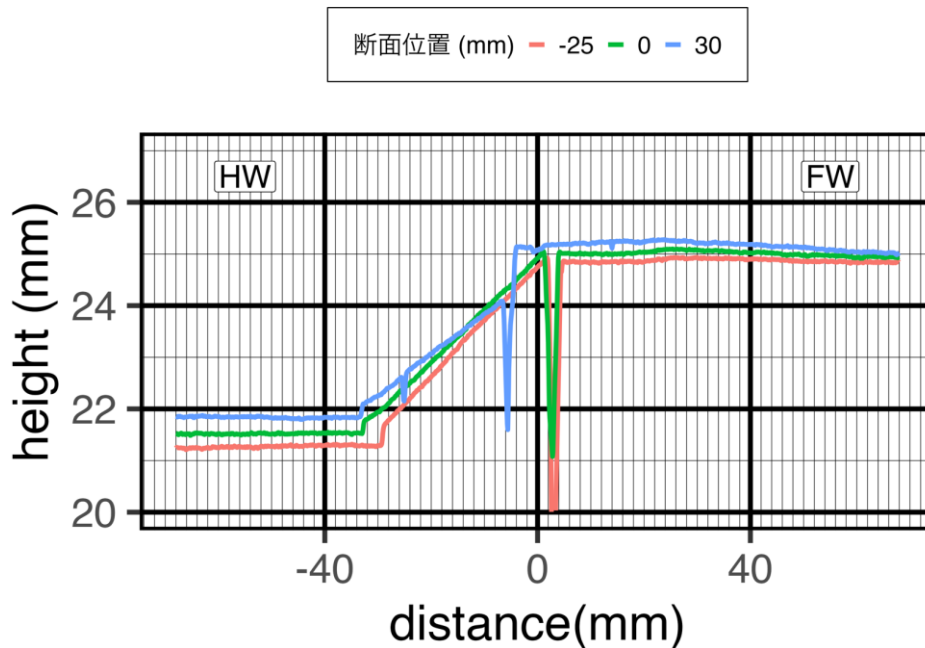


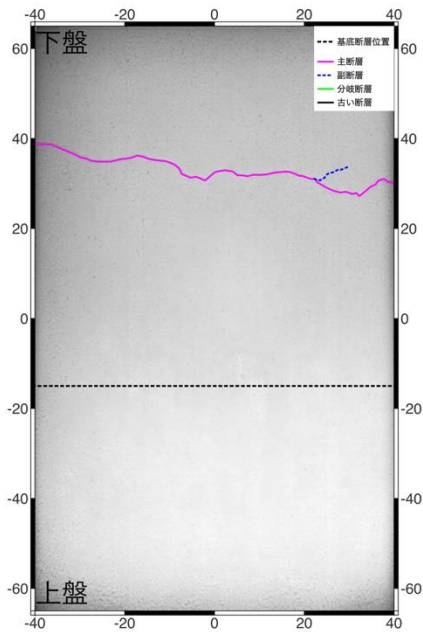
図 3.2.3.4.10 複数の断面位置の断面図。基底断層変位が 5mm の時の断面。基底断層は 0mm の位置。HW : 上盤, FW : 下盤。

3.2.4. 縦ずれ室内模擬実験まとめ

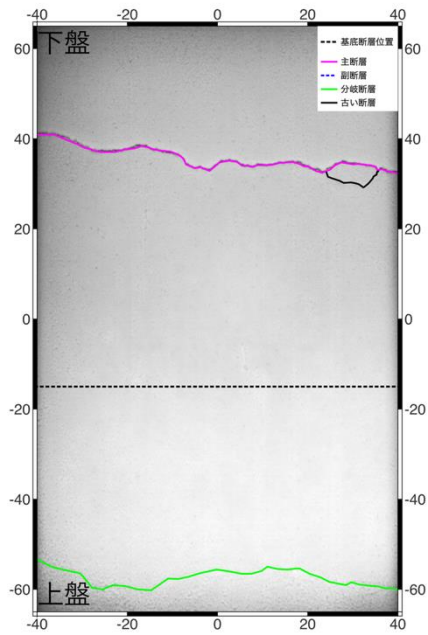
前節で取りまとめた主断層、副断層解釈図を図 3.2.4.1 から図 3.2.4.3 に示す。センサーで計測した範囲内だけでも主断層しか発生していない部分や副断層を伴う区間がみられ、複雑な断層分布のようすが得られた。低角逆断層で上盤側に形成される分岐断層は FEM の数値シミュレーションでは地盤強度が強くないと出現しないとされる (Lin et al., 2007)。

逆断層の実験に関しては、現実の逆断層で形成される断層崖 (図 3.2.4.4) と類似した形状も確認できた。正断層は基底断層の傾斜角に影響されず、高角な断層が形成された。2011 年・2016 年に浜通り地震震源域の南部で発生した正断層イベントのトレンチでも同様な構造が報告されている (図 3.2.4.5)。

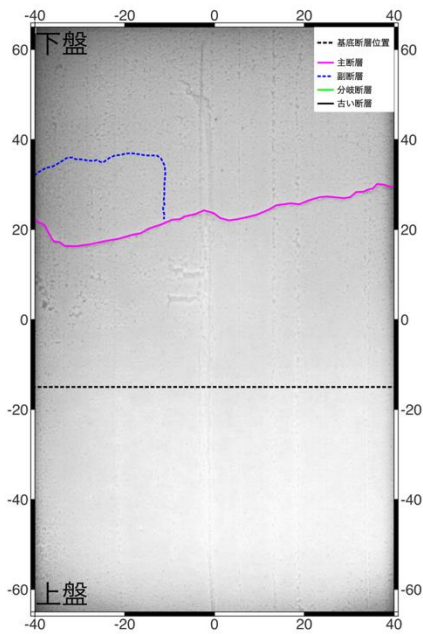
実験時に側面から観察ができた断層構造とその解釈を図 3.2.4.6、図 3.2.4.7 に示す。逆断層では浅い部分でより低角化している様子がみられる。正断層では上盤側に湾曲している様子がみられる。低角正断層模型実験後、次の実験のために変位を 0 に戻した際、戻しすぎて逆に逆断層成分を模擬地盤に与えて形成された主断層・副断層を図 3.2.4.8 に示す。低角逆断層模型実験の結果に相当するが、この図にみられる副断層は今回の一連の低角逆断層実験結果ではあまりみられなかった。正断層形成時の不均質構造の影響と思われる。



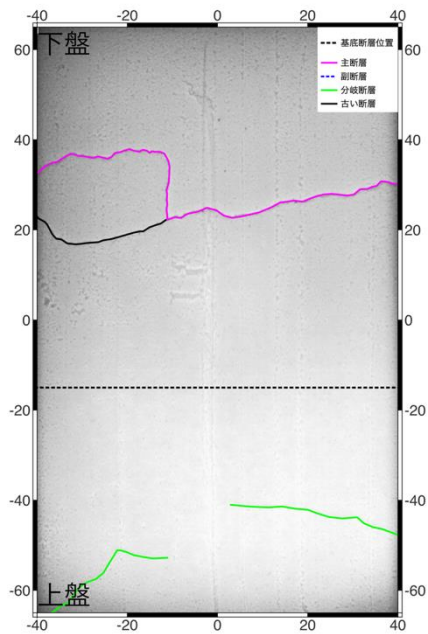
(a) 0.5mm 変位



(b) 3mm 変位

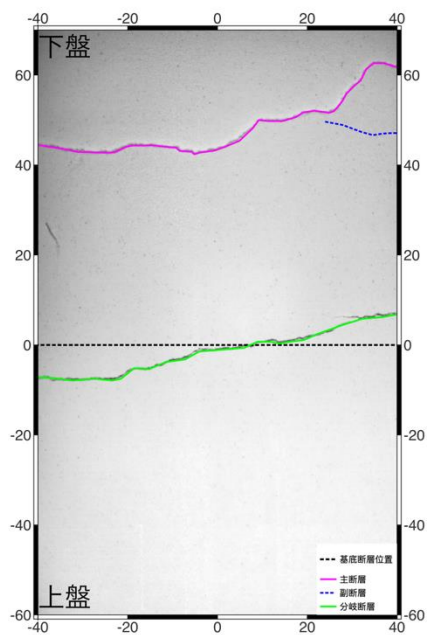


(c) 1mm 変位

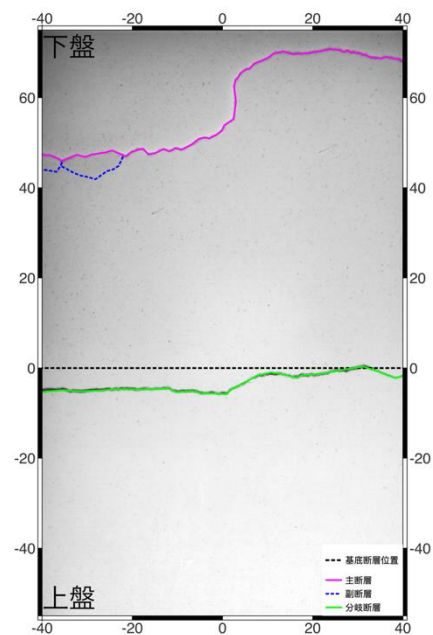


(d) 2mm 変位

図 3.2.4.1 低角逆断層模型実験で形成された主断層・副断層（上：1回目、下：2回目）

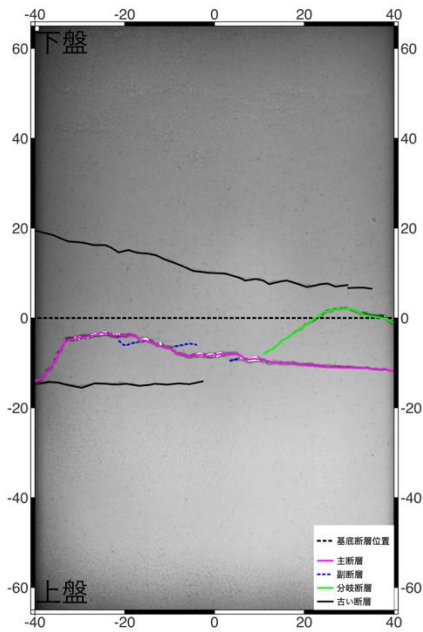


(a) 3mm 変位 (1 回目)

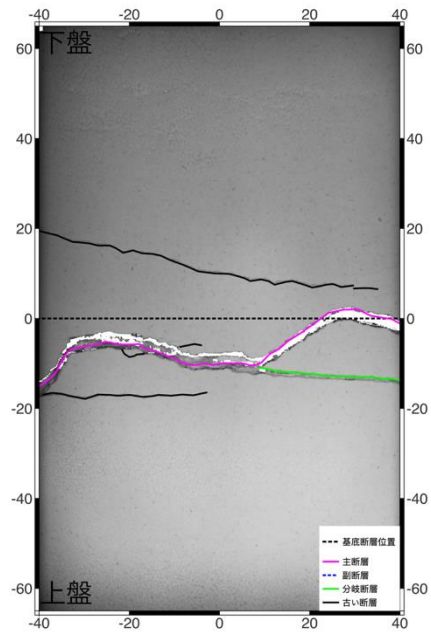


(b) 3mm 変位 (2 回目)

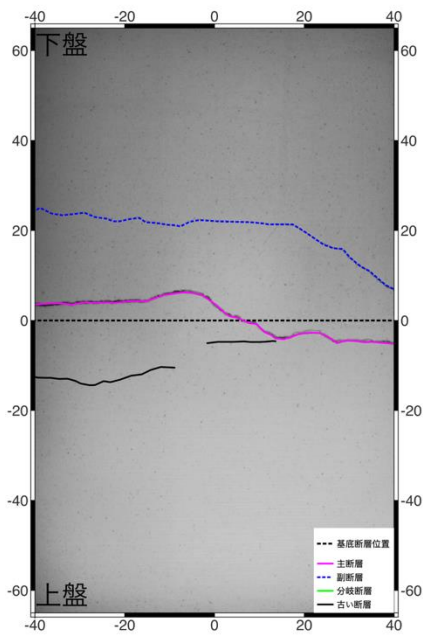
図 3.2.4.2 高角逆断層模型実験で形成された主断層・副断層



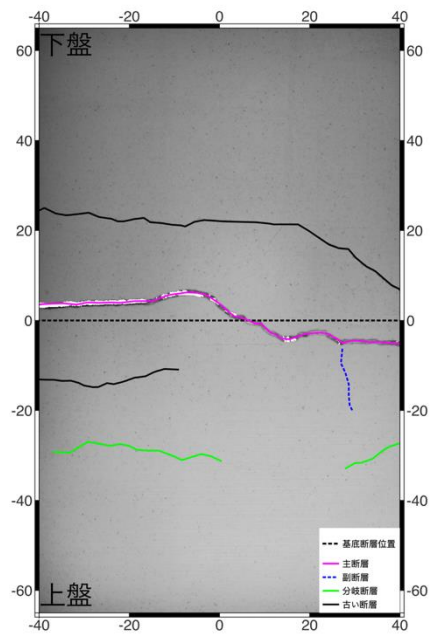
(a) 低角 2mm 変位



(b) 低角 5mm 変位



(c) 高角 2mm 変位



(d) 高角 3mm 変位

図 3.2.4.3 正断層模型実験で形成された主断層・副断層

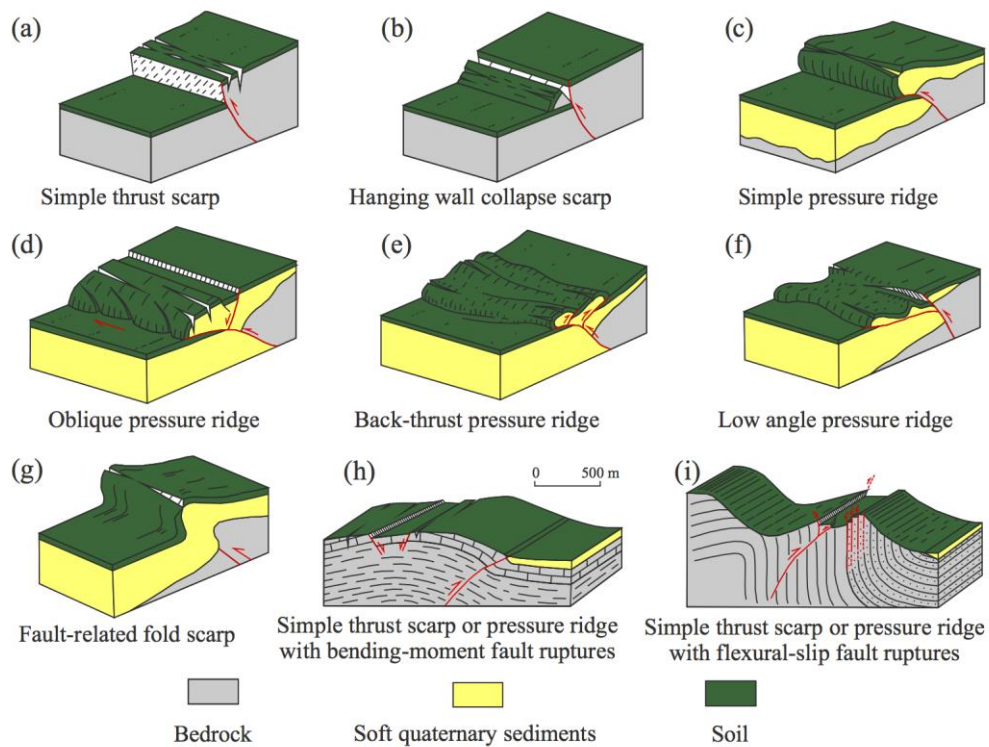


図 3.2.4.4 逆断層で形成される断層崖 (Boncio et al., 2017)

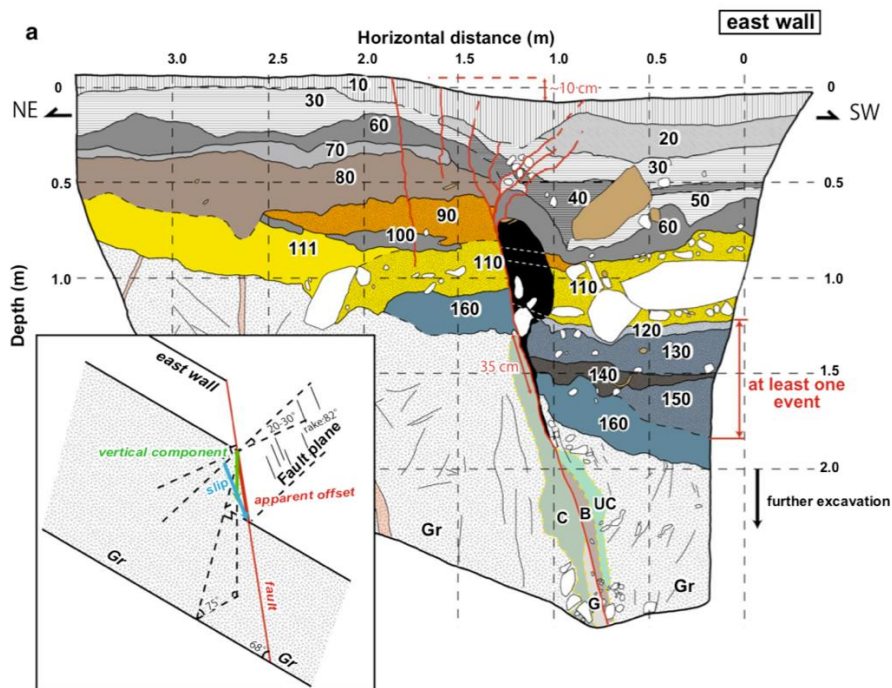
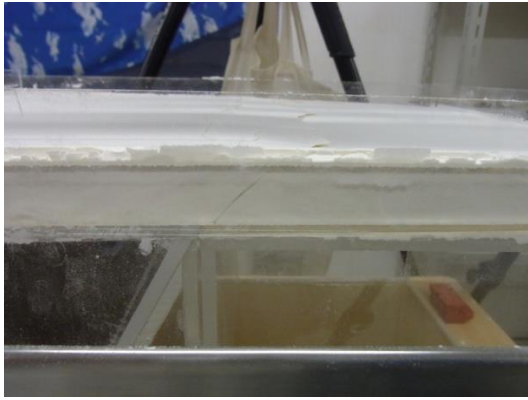
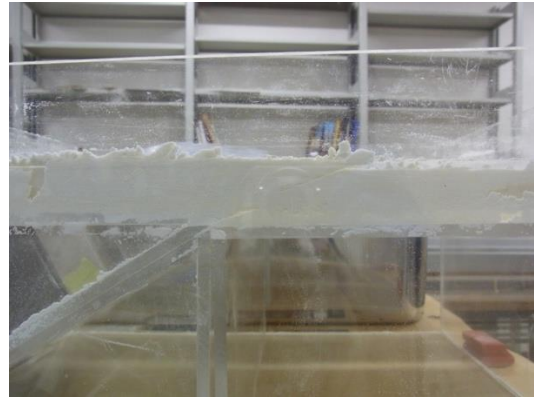


図 3.2.4.5 正断層イベントのトレンチ観察結果 (Komura et al., 2019)



(a) 逆断層 (60°)、5mm 変位。



(b) 逆断層 (30°)、8mm 変位。

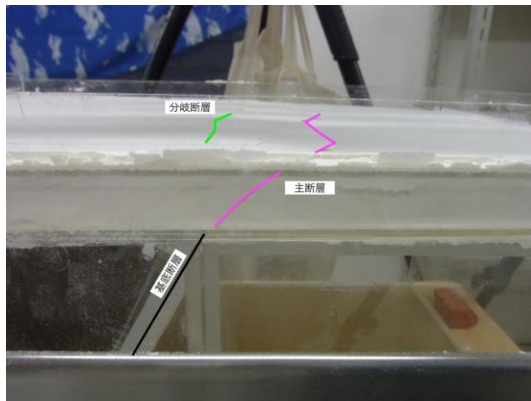


(c) 正断層 (60°)、5mm 変位。

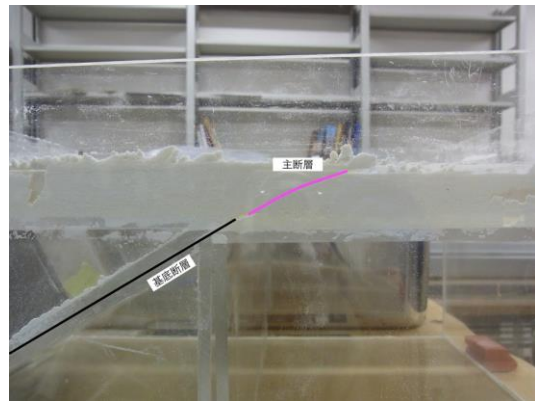


(d) 正断層 (30°)、8mm 変位。

図 3.2.4.6 実験装置側面で観察された断層構造



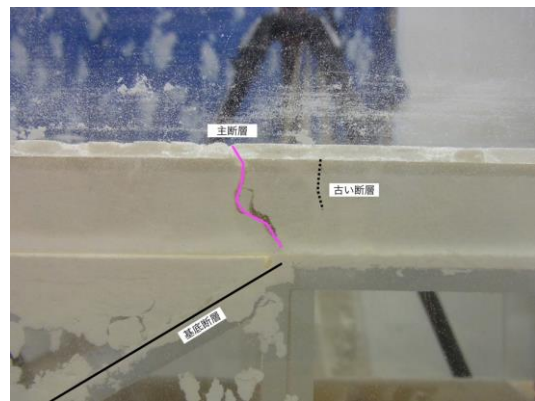
(a) 逆断層 (60°)、5mm 変位。



(b) 逆断層 (30°)、8mm 変位。



(c) 正断層 (60°)、5mm 変位。

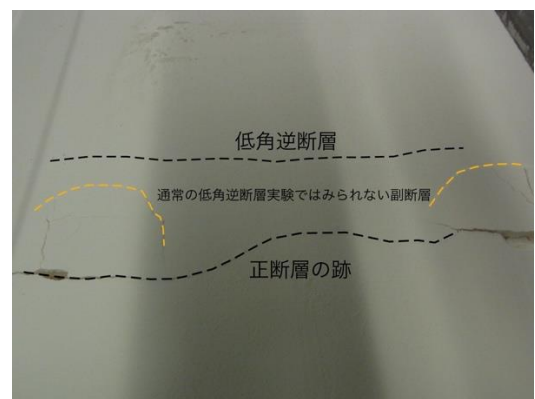


(d) 正断層 (30°)、8mm 変位。

図 3.2.4.7 実験装置側面で観察された断層構造 (解釈入り)



(a) 形成された断層構造



(b) 解釈

図 3.2.4.8 低角正断層模型実験終了後、与えた断層変位を戻しすぎて形成された低角逆断層による主断層・副断層

得られた副断層のうち、変位が明瞭に観察できる点を選び、これらの中から図 3.2.4.9 から図 3.2.4.11 に示す地点にて、主断層から離隔距離と変位量を読み取り整理を行った。離隔距離は物性試験から得られた相似則に基づいた。変位量は副断層で読み取った鉛直変位量

を基底断層で与えた鉛直変位量で正規化を行った。確率論的断層変位ハザードモデルの断層変位距離減衰式のうち最大変位量で正規化を行ったデータに相当する。このようにして得られた室内模擬実験の副断層と確率論モデルで整理されているデータとを比較した図を図 3.2.4.12 に示す。確率論モデルは国内外の逆断層の副断層変位データについて、最大変位で正規化したものを示している（構造計画研究所, 2019）。参考までに正断層の結果も示している。逆断層データに着目すると、観測データのばらつきは大きいですが、実験で得られたデータはそのばらつきの中に分布しており、整合的な結果となった。

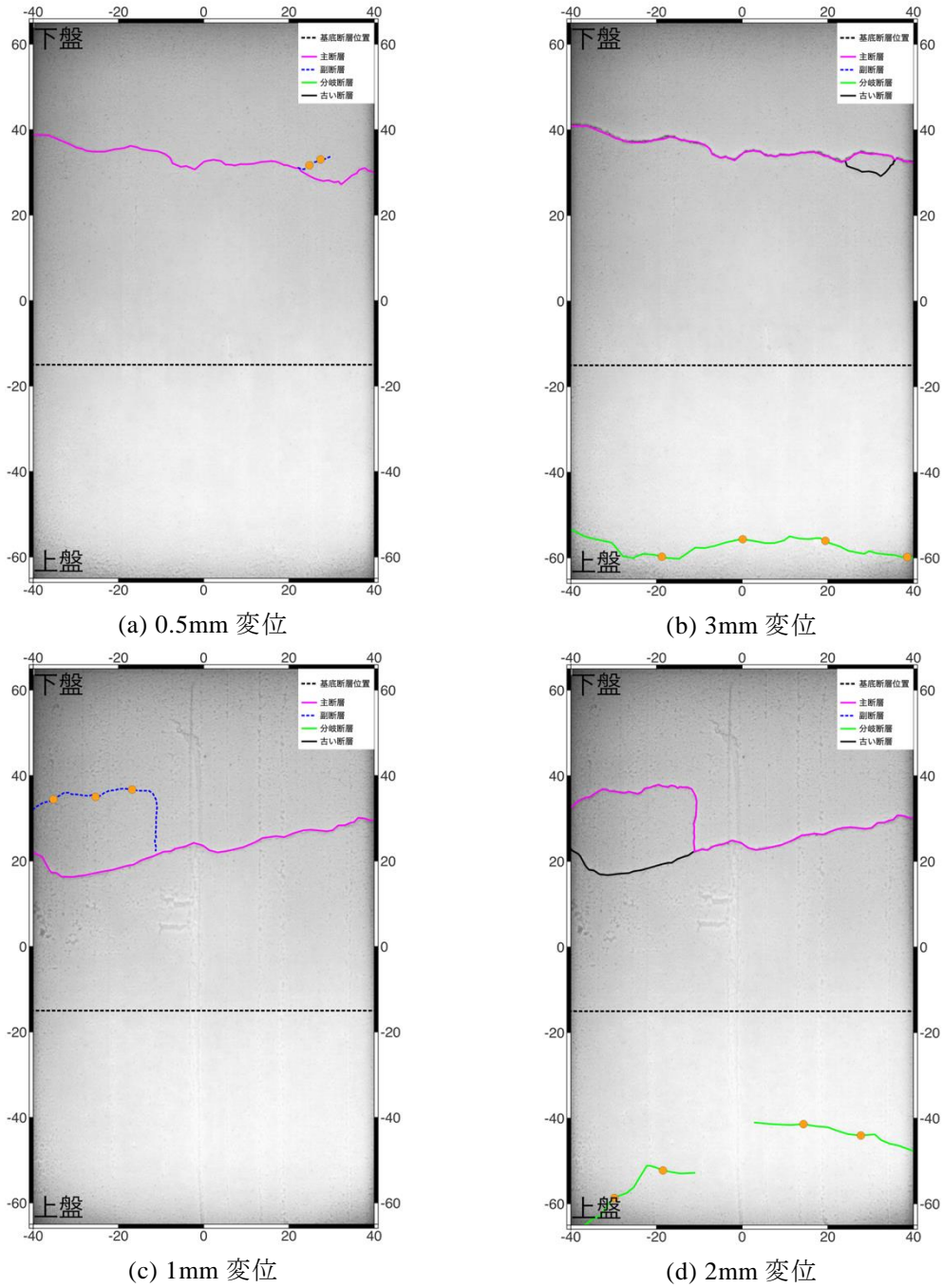
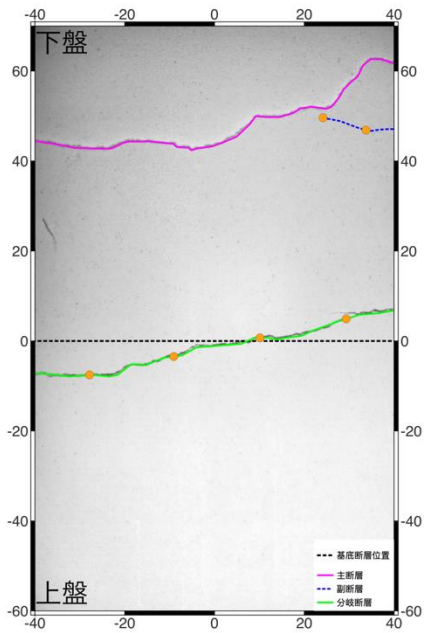
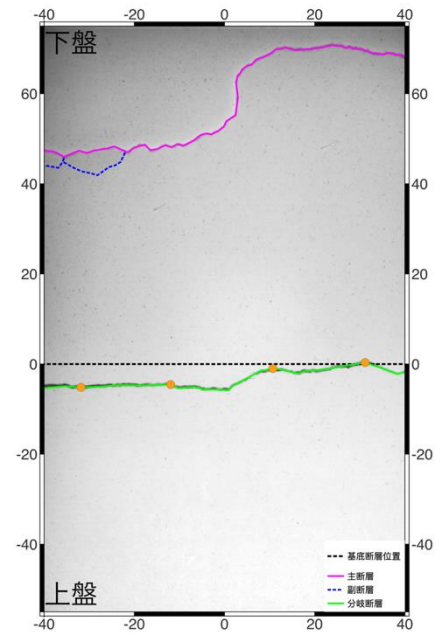


図 3.2.4.9 低角逆断層模型実験で形成された主断層・副断層（上：1回目、下：2回目）。丸印が変位を読み取った地点。

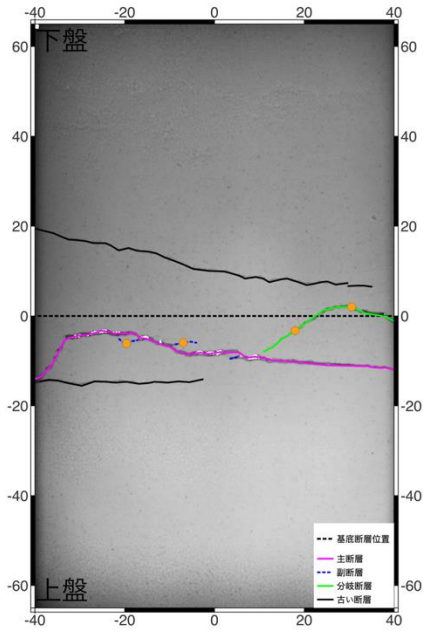


(a) 3mm 変位 (1 回目)

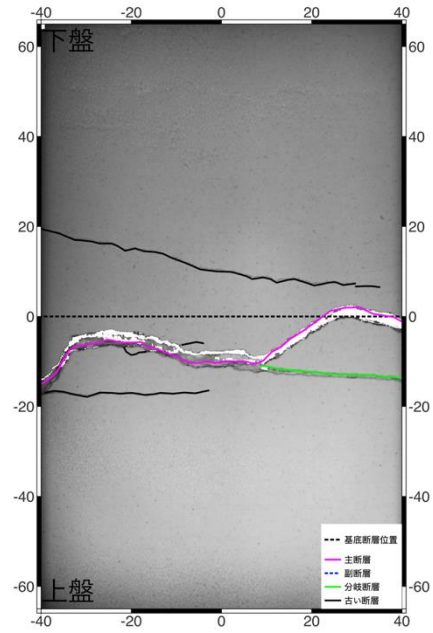


(b) 3mm 変位 (1 回目)

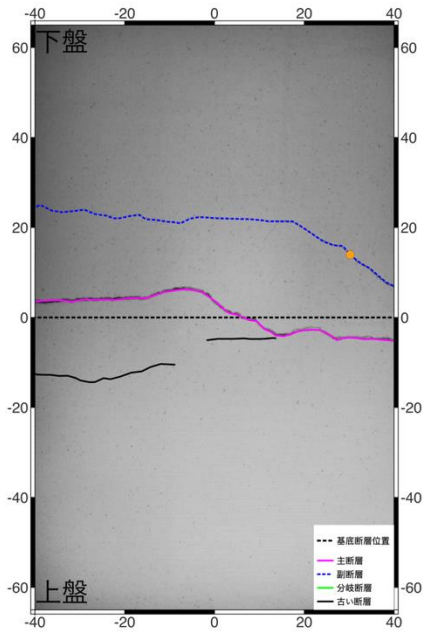
図 3.2.4.10 高角逆断層模型実験で形成された主断層・副断層。丸印が変位を読み取った地点。



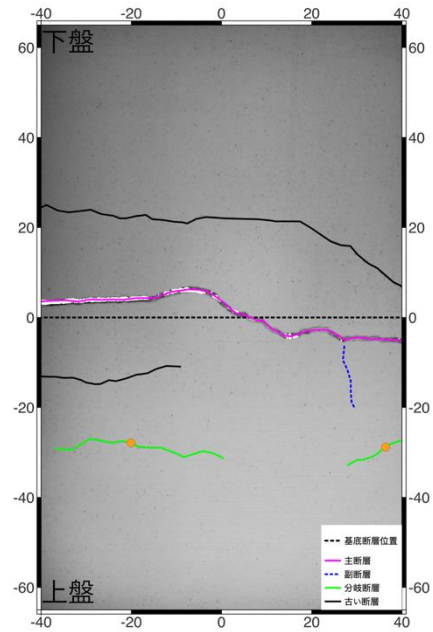
(a) 低角 2mm 変位



(b) 低角 5mm 変位 (データなし)



(c) 高角 2mm 変位



(d) 高角 3mm 変位

図 3.2.4.11 正断層模型実験で形成された主断層・副断層。丸印が変位を読み取った地点。

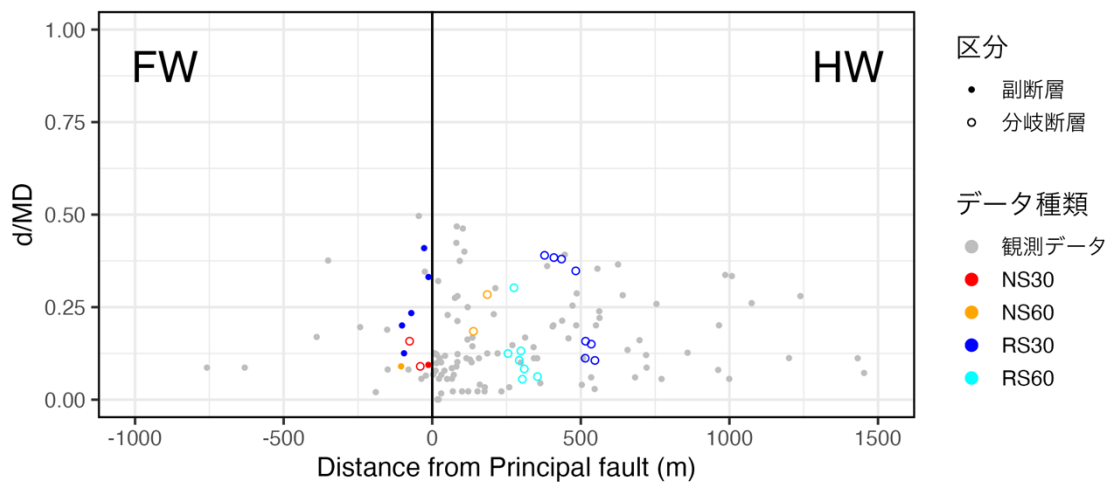


図 3.2.4.12 室内模擬実験により得られた副断層と既往の確率論モデルで整理された副断層データ(構造計画研究所, 2019)との比較。凡例の NS は正断層、RS は逆断層、数字は断層傾斜角度 (°) を示す。HW : 上盤, FW : 下盤。

小麦粉を模擬地盤として、模擬地盤底面の断層傾斜角度が高角 (60°)、低角 (30°) の逆断層・正断層の実験が可能な装置を用いて室内模擬実験を行った。模擬地盤底面の断層の延長を主断層、主断層以外を副断層として形成された断層構造の整理を行った。副断層は規模が小さい(断層長が短い断層や変位量が小さい)断層を副断層、規模の大きい断層を分岐断層と細分しても検討を行った。逆断層の場合、低角の実験結果の方が副断層の分布範囲が広い傾向にあった。主断層の地表到達位置は低角ではおよそ模擬地盤底面の断層延長上であるが、高角の場合は模擬地盤中で低角度となり、より下盤側に出現する傾向にあった。一方、正断層では模擬地盤底面の断層傾斜角度によらず、基底断層のほぼ直上付近に主断層が出現する傾向にあった。また、高角の方が副断層の分布が広い傾向となった。逆断層・正断層にかかわらず、主断層・副断層・分岐断層ともに発生位置や変位量には実際の地表地震断層同様にばらつきがみられた。模擬地盤底面の断層に変位を与えると分岐断層は主断層とともに断層変位が大きくなるが、副断層は一旦形成された後は、断層変位が発生しない断層があった。また、模擬地盤底面の断層に変位の増大により副断層や分岐断層だった断層が主断層となる断層も観察された。室内模擬実験で得られた逆断層の副断層データを既往の確率論的断層変位ハザード解析で整理されている実際に観察された副断層データとの比較を行った。ばらつきは大きいものの両者は整合的な関係を示した。

3.3. 横ずれ断層室内模擬実験

3.3.1. 実験装置

実験に用いた装置を図 3.3.1.1 に示す。変位計測に用いたセンサーは、鉛直精度は $5\mu\text{m}$ 、水平精度は 0.1mm 、撮影範囲は $10\times 15\text{cm}$ である。

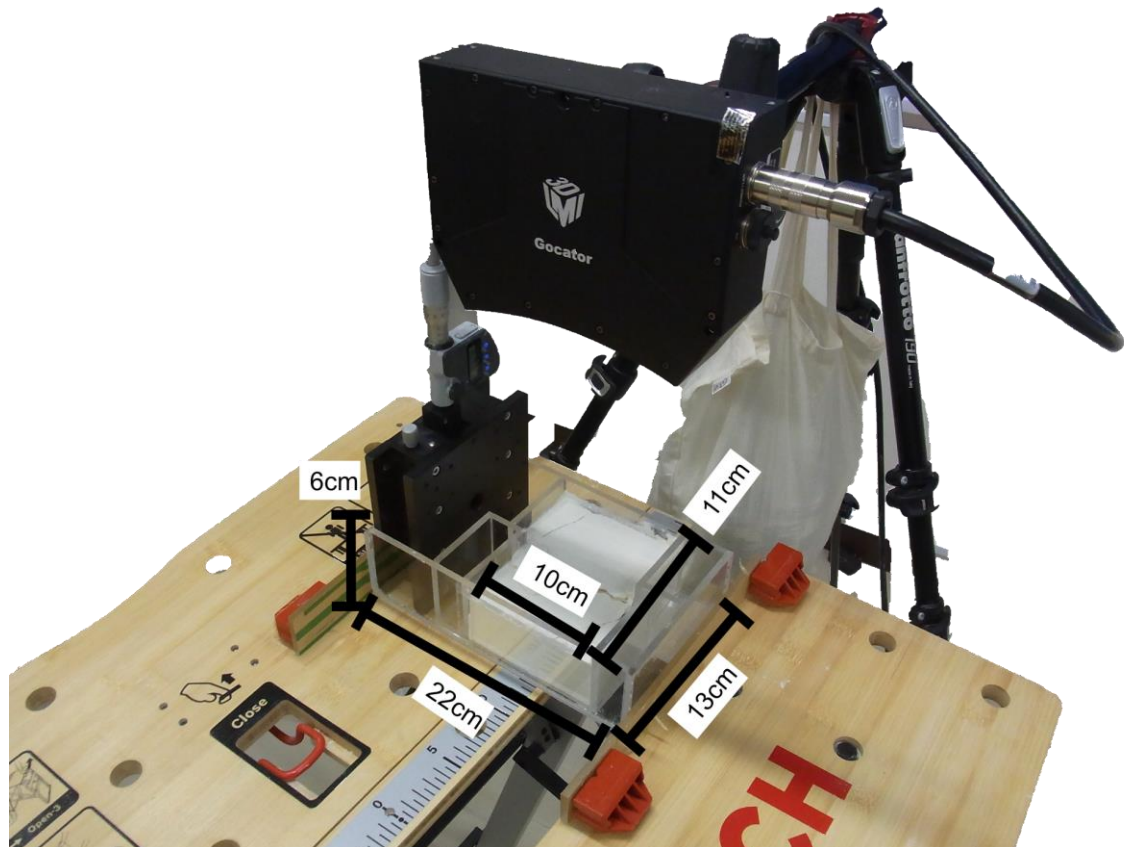


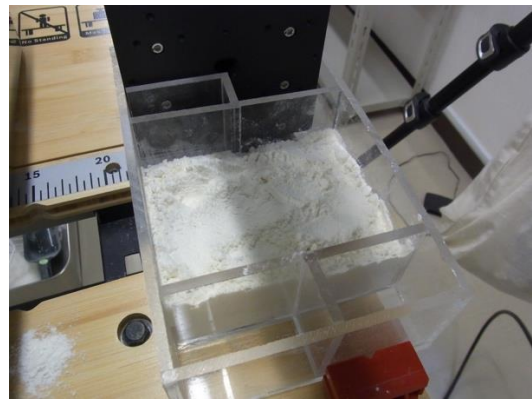
図 3.3.1.1 横ずれ室内模擬実験装置

3.3.2. 実験方法

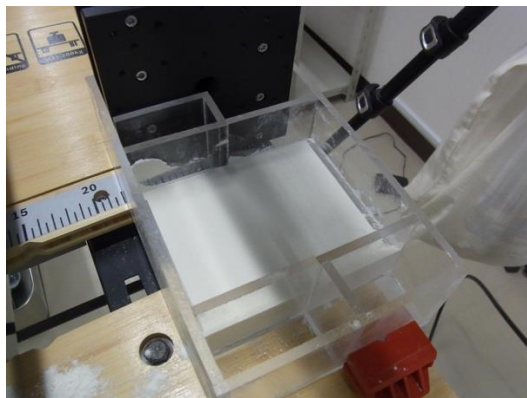
横ずれ断層の室内模擬実験の流れを図 3.3.2.1 に示す。縦ずれ断層の実験同様、密詰の状態を基本とした。



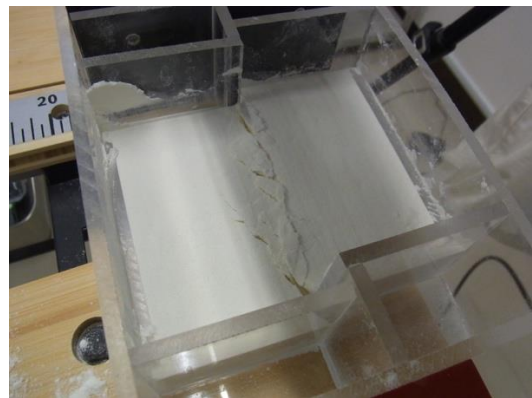
(a) 模擬地盤の作成準備



(b) 模擬地盤の敷き詰



(c) 表面整形



(d) 実験後に生じたせん断帯構造

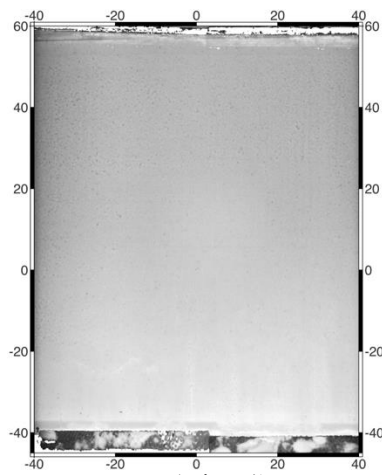
図 3.3.2.1 横ずれ断層実験の流れ

3.3.3. 実験結果

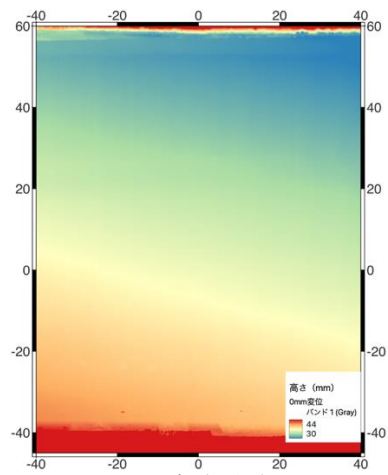
3.3.3.1. 模擬地盤層厚 4cm

(1) 1回目試行結果

横ずれ断層室内模擬実験の1回目の結果について述べる。変位は0mm (図 3.3.3.1.1) から1mm (図 3.3.3.1.2)、2mm (図 3.3.3.1.3)、3mm (図 3.3.3.1.4)、5mm (図 3.3.3.1.5)、8mm (図 3.3.3.1.6)、10mm (図 3.3.3.1.7) まで与えた。横軸0mmが基底断層の位置になるが、1mmの変位 (図 3.3.3.1.2) でリーデルせん断断層に相当する断層が発生している。2mmの変位 (図 3.3.3.1.3) で、基底断層に沿った断層が形成される。より基底断層の変位が大きくなるとこれらの断層変位が大きくなる他、より複雑な断層が発達している。

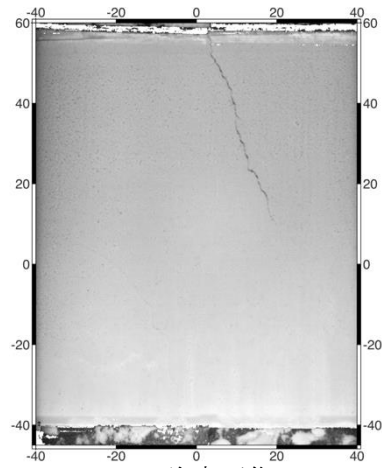


(a) 強度画像

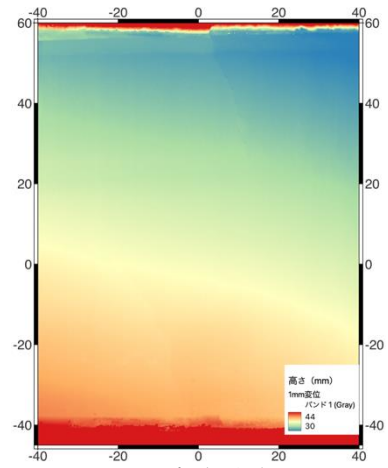


(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.1 初期 (変形前)

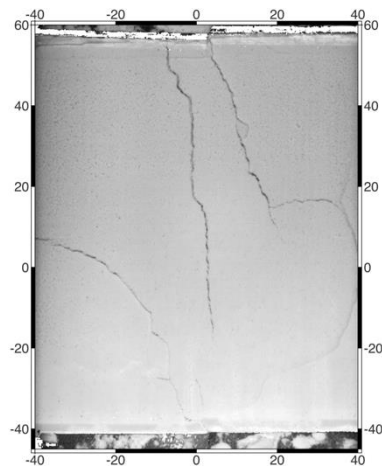


(a) 強度画像

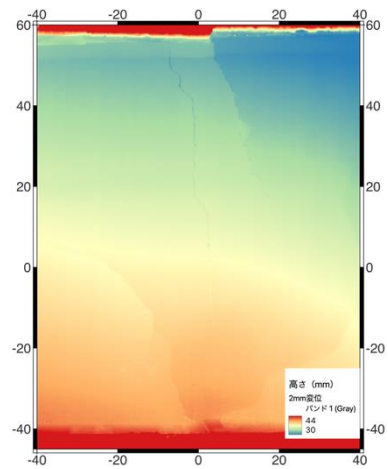


(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.2 1mm 変位



(a) 強度画像



(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.3 2mm 変位

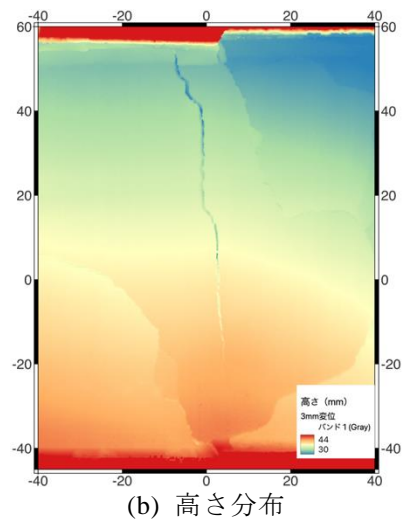
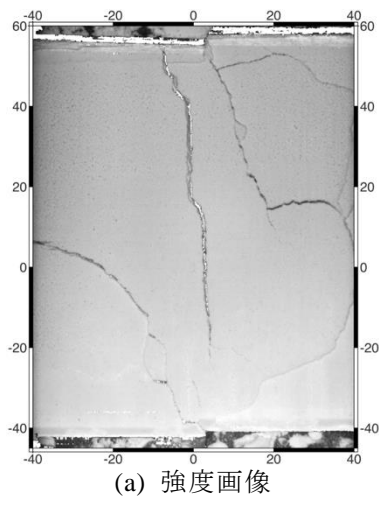


図 3.3.3.1.4 3mm 変位

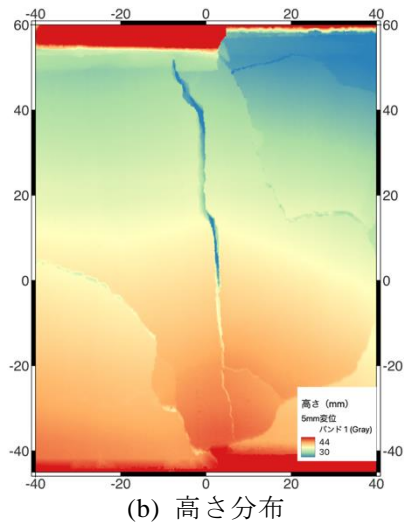
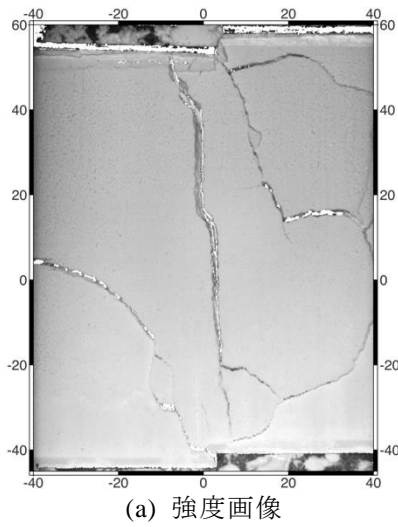


図 3.3.3.1.5 5mm 変位

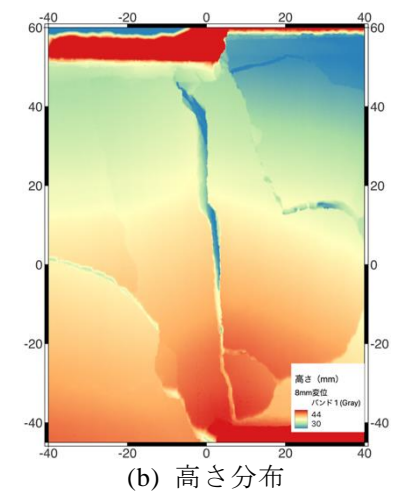
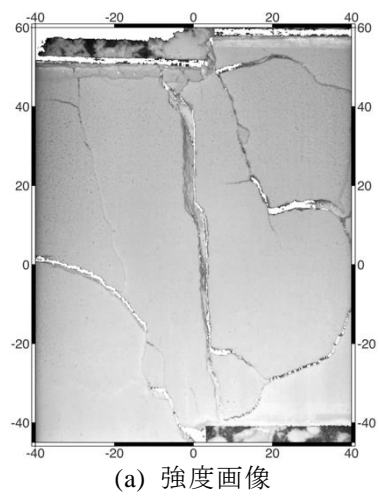


図 3.3.3.1.6 8mm 変位

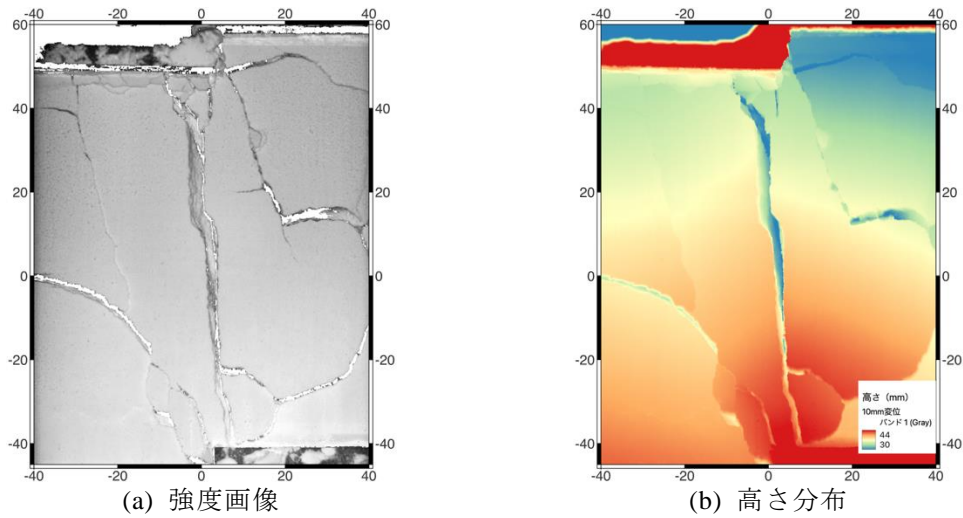


図 3.3.3.1.7 10mm 変位

(2) 2 回目試行結果

横ずれ断層室内模擬実験の 2 回目の結果について述べる。変位は 0mm (図 3.3.3.1.8) から 1mm (図 3.3.3.1.9)、2mm (図 3.3.3.1.10)、3mm (図 3.3.3.1.11)、5mm (図 3.3.3.1.12)、8mm (図 3.3.3.1.13)、10mm (図 3.3.3.1.14) まで与えた。横軸 0mm が基底断層の位置になるが、1 回目と同様に、1mm の変位 (図 3.3.3.1.9) でリーデルセン断層に相当する断層が発生している。2mm の変位 (図 3.3.3.1.10) で、基底断層に沿った断層が形成される。より基底断層の変位が大きくなるとこれらの断層変位が大きくなる他、より複雑な断層が発達している。

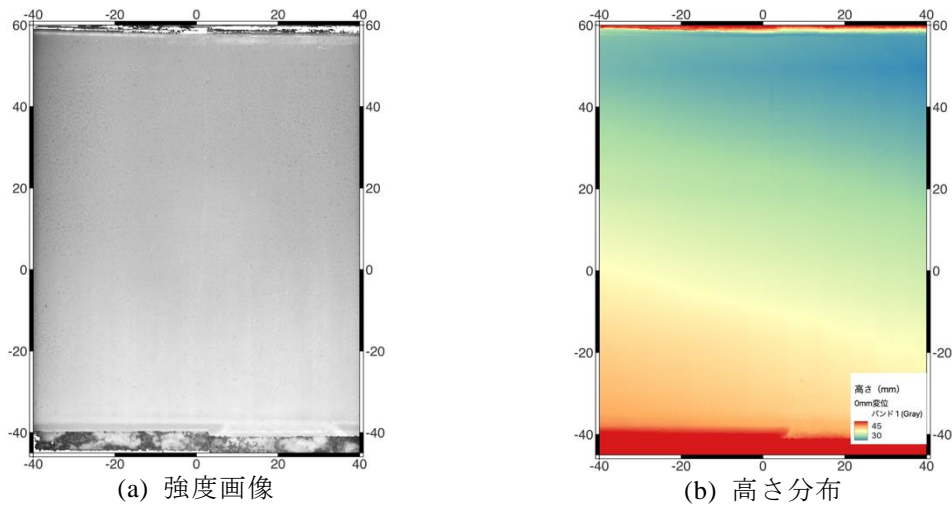
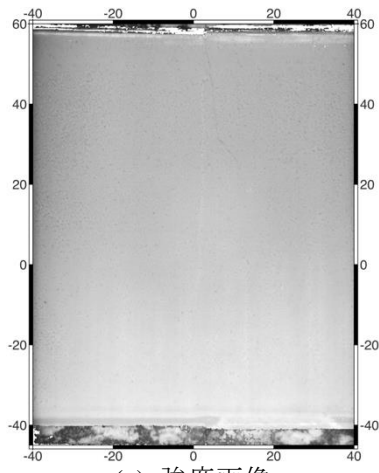
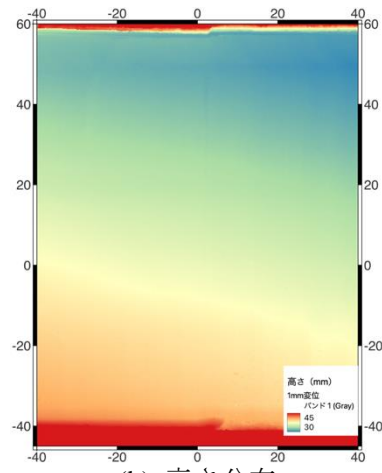


図 3.3.3.1.8 初期 (変形前)

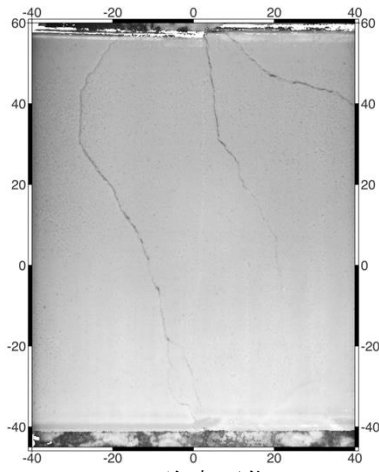


(a) 強度画像

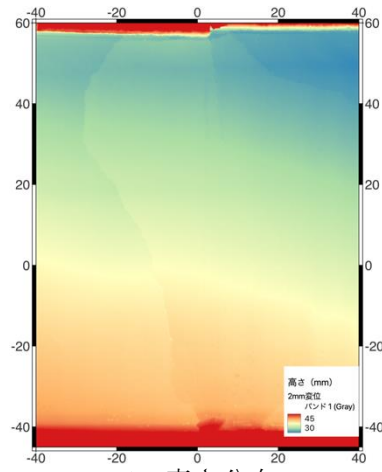


(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.9 1mm 変位

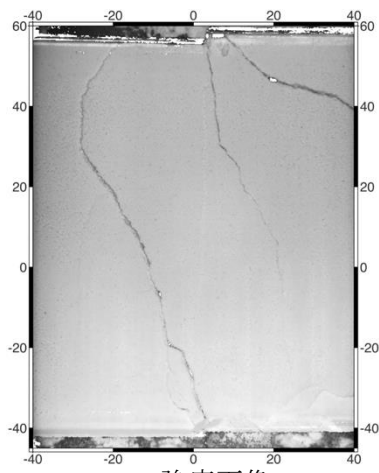


(a) 強度画像

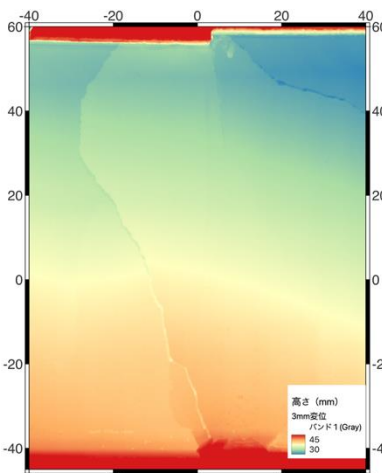


(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.10 2mm 変位



(a) 強度画像



(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.11 3mm 変位

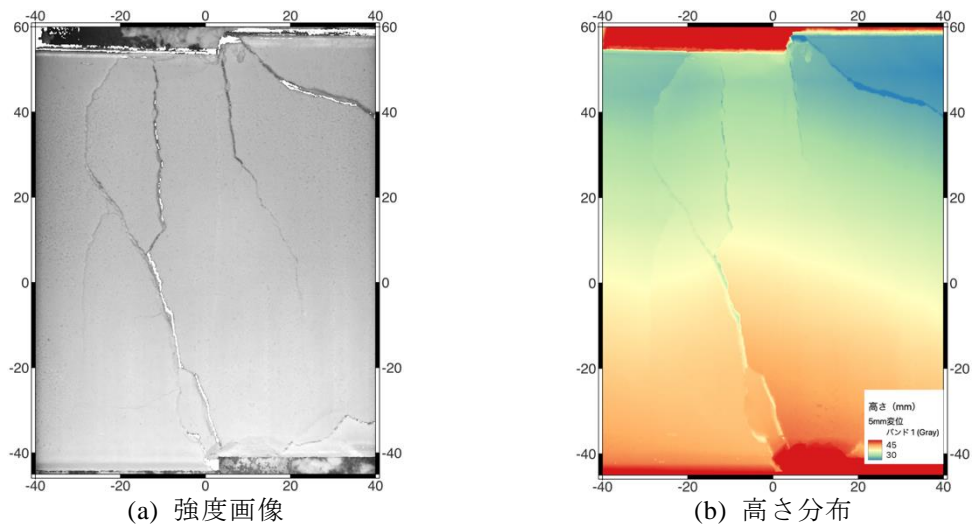


図 3.3.3.1.12 5mm 変位

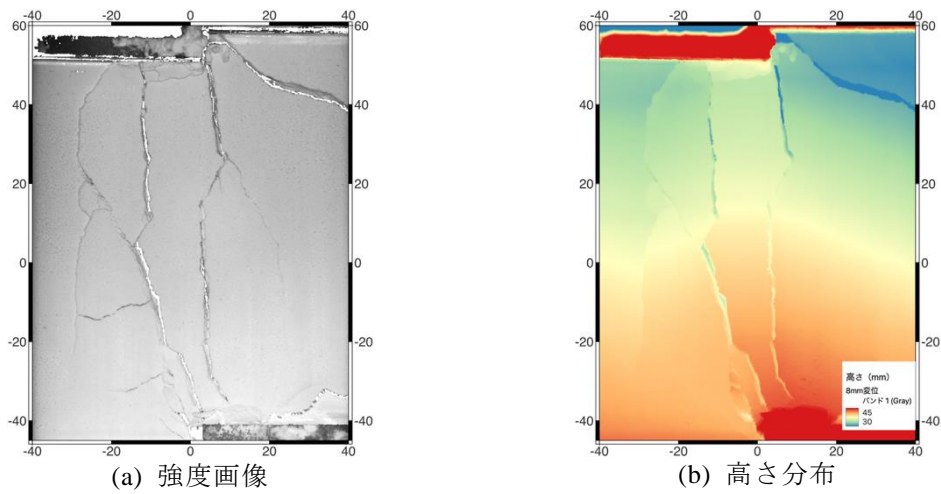


図 3.3.3.1.13 8mm 変位

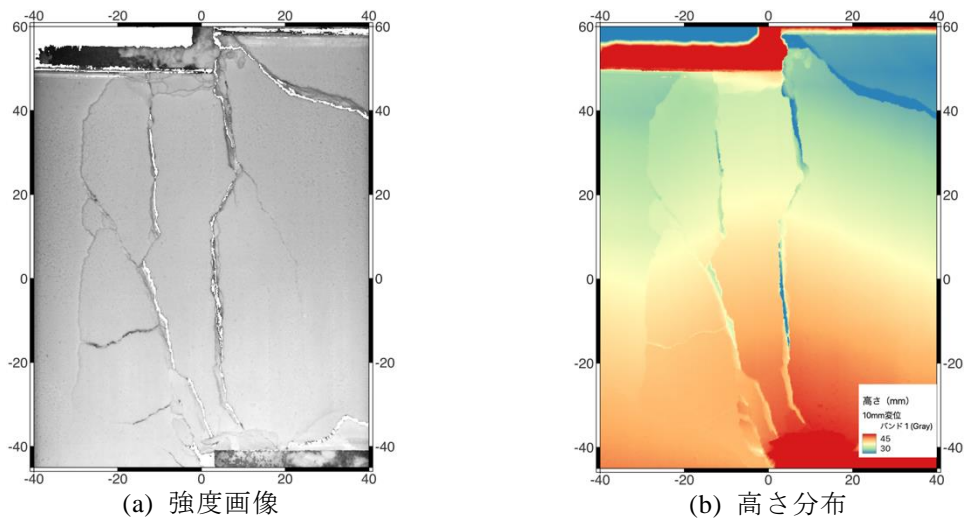


図 3.3.3.1.14 10mm 変位

3.3.3.1. 模擬地盤層厚 2cm

(1) 1 回目試行結果

横ずれ断層室内模擬実験の 1 回目の結果について述べる。変位は 0mm (図 3.3.3.1.1) から 1mm (図 3.3.3.1.2)、2mm (図 3.3.3.1.3)、3mm (図 3.3.3.1.4)、5mm (図 3.3.3.1.5)、8mm (図 3.3.3.1.6)、10mm (図 3.3.3.1.7) まで与えた。横軸 0mm が基底断層の位置になるが、層厚 4cm の時と同様に、1mm の変位 (図 3.3.3.1.2) でリーデルせん断断層に相当する断層が発生している。ただし、形成されるせん断断層帯の幅は狭くなっている。2mm の変位 (図 3.3.3.1.3) で、基底断層に沿った断層が形成される。より基底断層の変位が大きくなるとこれらの断層変位が大きくなる他、より複雑な断層が発達している。

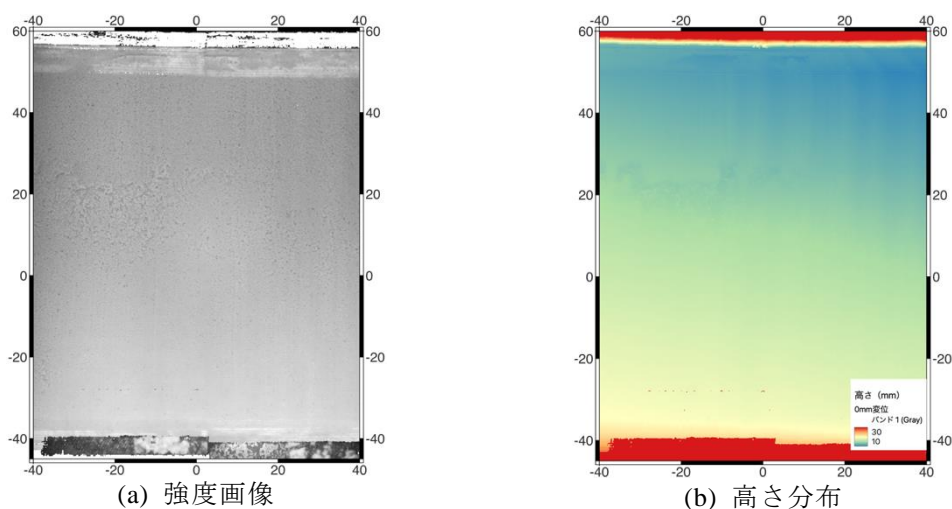


図 3.3.3.1.1 初期 (変形前)

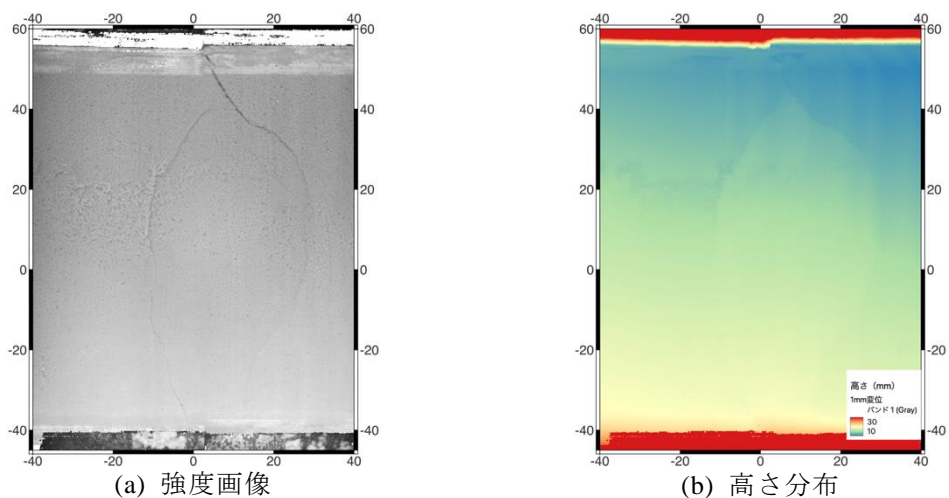
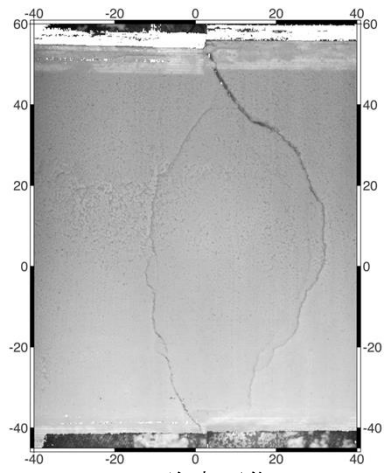
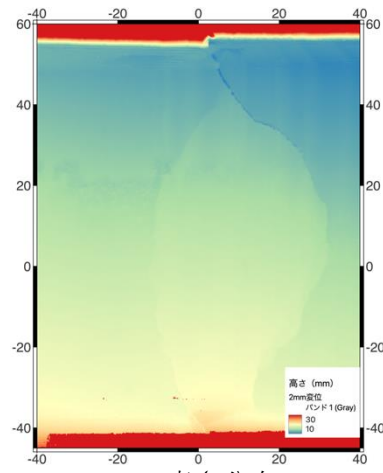


図 3.3.3.1.2 1mm 変位

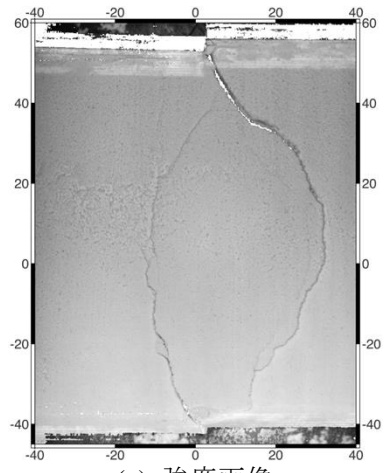


(a) 強度画像

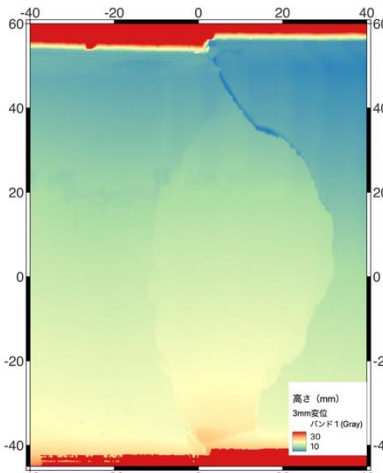


(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.3 2mm 変位

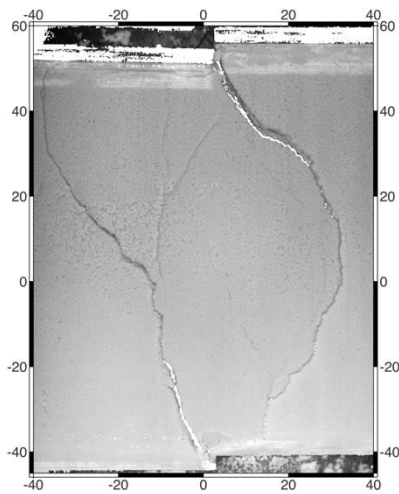


(a) 強度画像

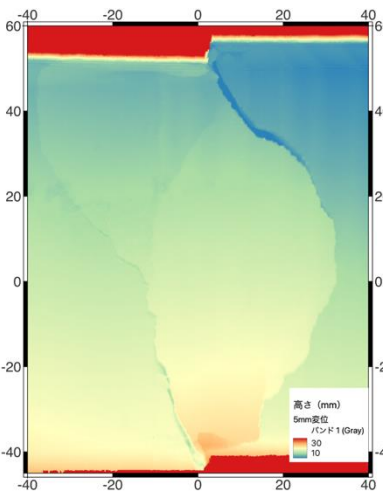


(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.4 3mm 変位



(a) 強度画像



(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.5 5mm 変位

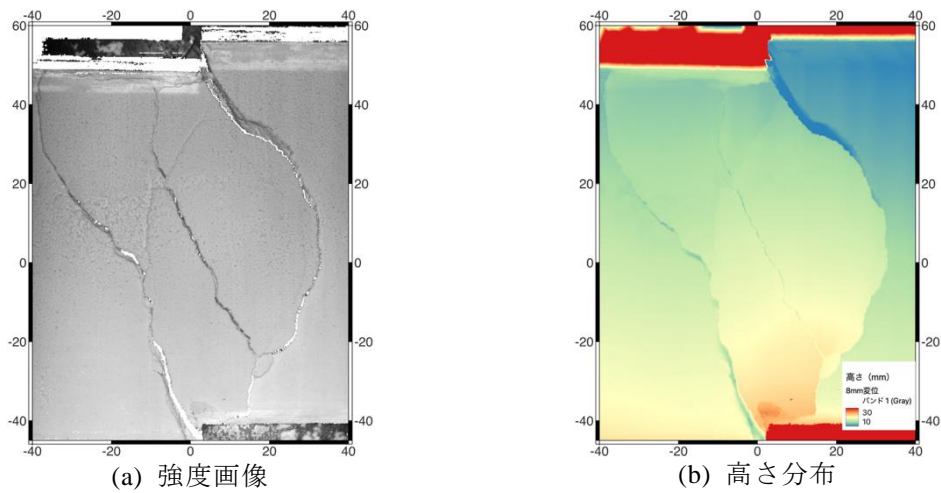


図 3.3.3.1.6 8mm 変位

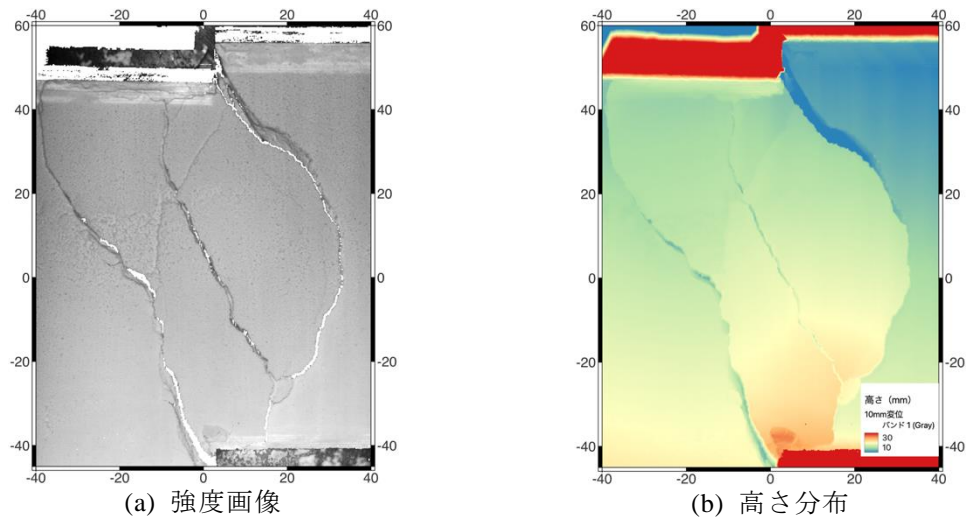
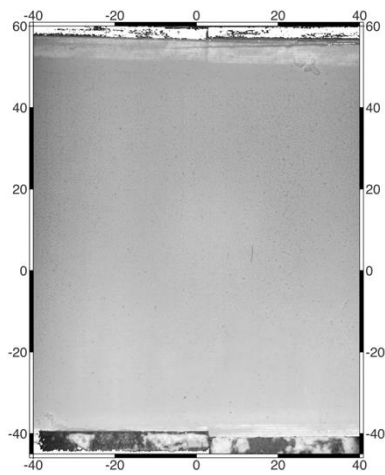


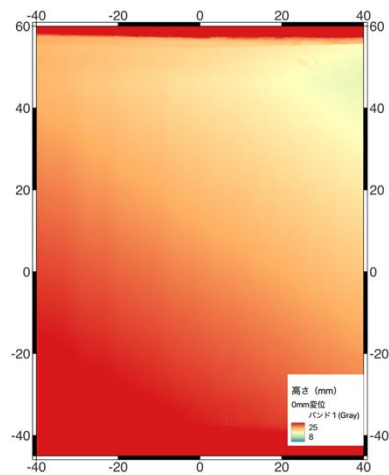
図 3.3.3.1.7 10mm 変位

(2) 2回目試行結果

横ずれ断層室内模擬実験の2回目の結果について述べる。変位は0mm (図 3.3.3.1.8) から1mm (図 3.3.3.1.9)、2mm (図 3.3.3.1.10)、3mm (図 3.3.3.1.11)、5mm (図 3.3.3.1.12)、8mm (図 3.3.3.1.13)、10mm (図 3.3.3.1.14) まで与えた。横軸0mmが基底断層の位置になるが、1回目と同様に、1mmの変位 (図 3.3.3.1.9) でリーデルセン断層に相当する断層が発生している。2mmの変位 (図 3.3.3.1.10) で、基底断層に沿った断層が形成される。より基底断層の変位が大きくなるとこれらの断層変位が大きくなる他、より複雑な断層が発達している。

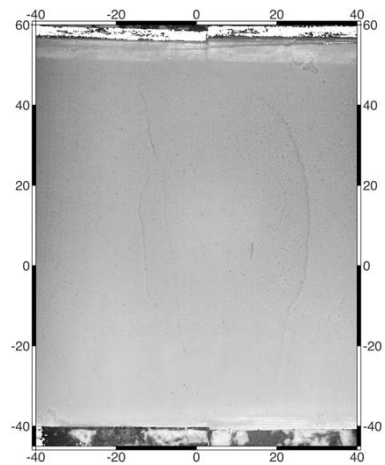


(a) 強度画像

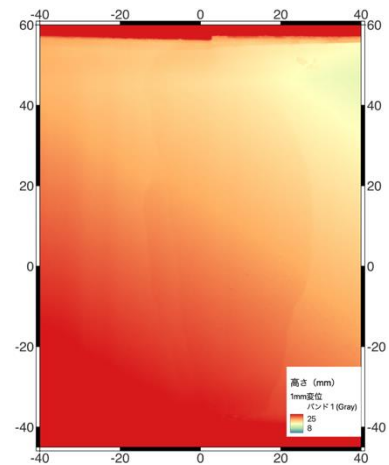


(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.8 初期 (変形前)

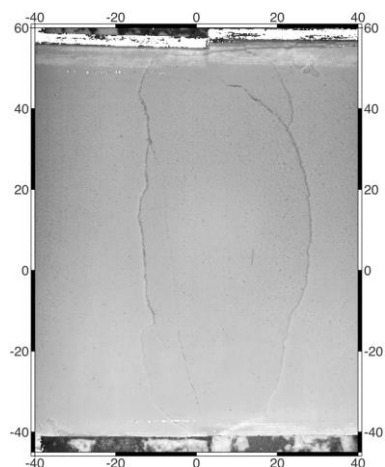


(a) 強度画像

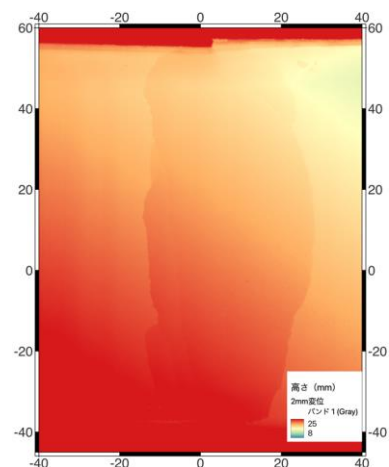


(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.9 1mm 変位

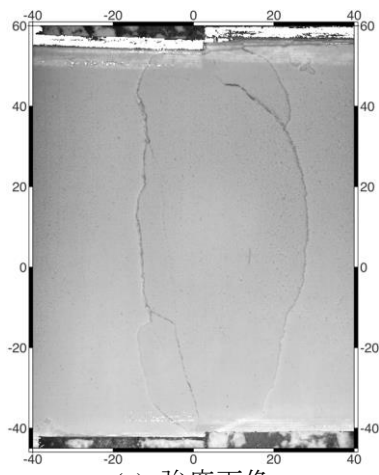


(a) 強度画像

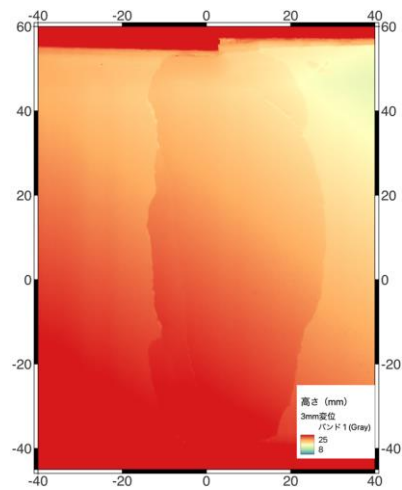


(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.10 2mm 変位

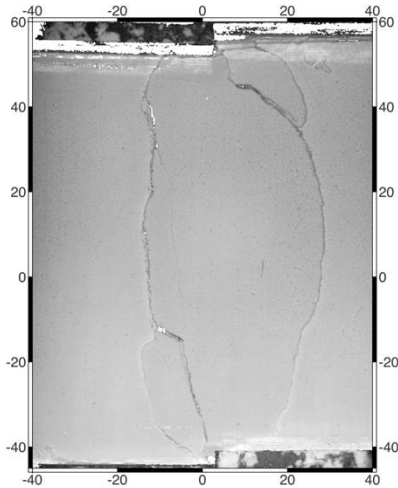


(a) 強度画像

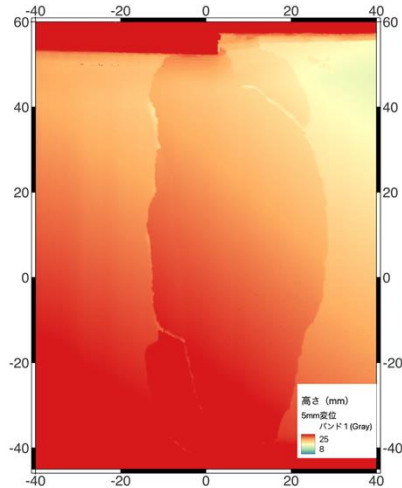


(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.11 3mm 変位

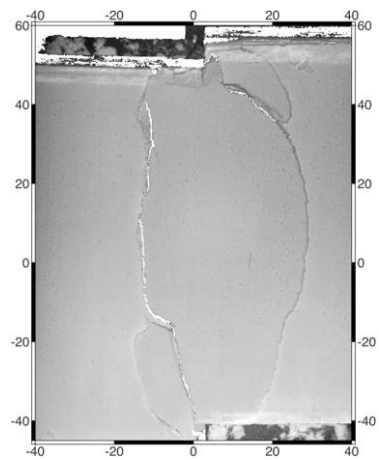


(a) 強度画像

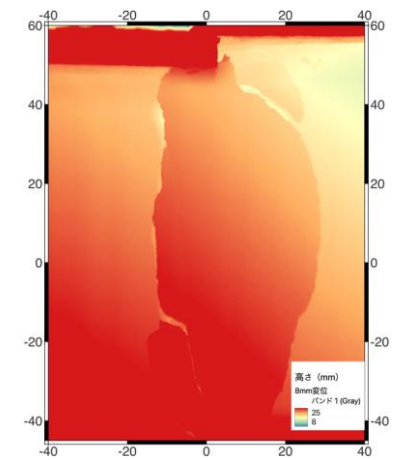


(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.12 5mm 変位



(a) 強度画像



(b) 高さ分布

図 3.3.3.1.13 8mm 変位

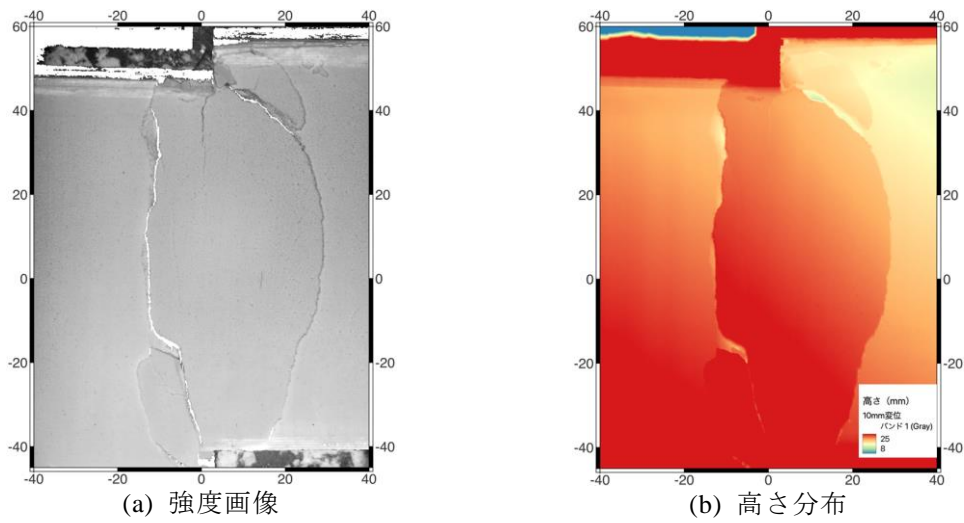
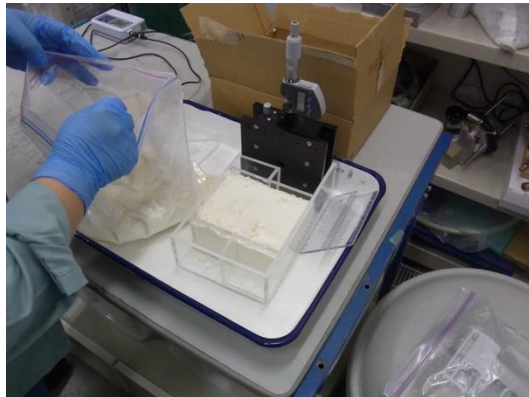


図 3.3.3.1.14 10mm 変位

3.3.4. X線 CT 撮影による内部せん断構造

3.3.4.1. 実験方法

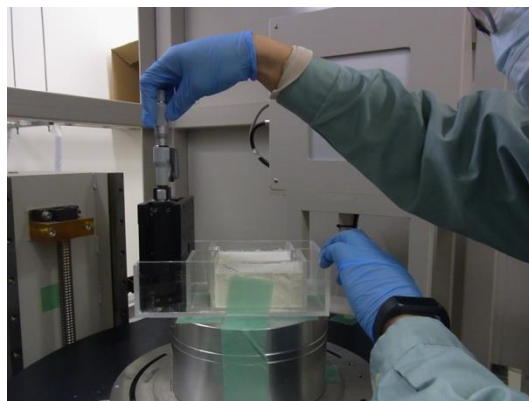
横ずれ断層室内模擬実験で形成されるせん断断層構造が模擬地盤内部でどのような分布をしているのかを検討するために X 線 CT 撮影を行った。撮影の流れを図 3.3.4.1.1 に示す。撮影は模擬地盤層厚 4cm で、10mm の変位を与えた後、撮影を行った。密詰とゆる詰の状態での実験結果の検討を行った。



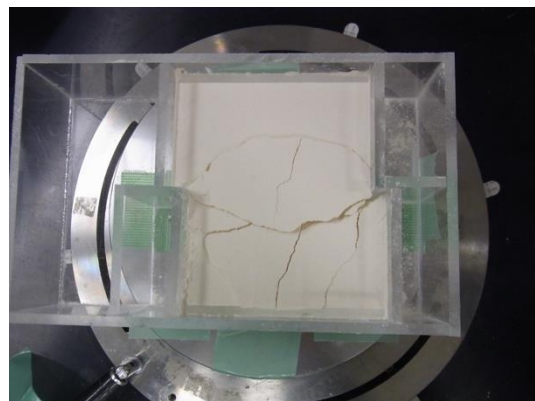
(a) 模擬地盤の準備



(b) 撮影台へのセット



(c) 変位を与える



(d) 実験後に生じたせん断帯構造

図 3.3.4.1.1 X線 CT 撮影の流れ

3.3.4.2. X線 CT による内部構造

X線 CT 撮影による模擬地盤内部に形成された断層構造を図 3.3.4.2.1 および図 3.3.4.2.2 に示す。密詰の結果(図 3.3.4.2.1)では、表面に出現した各断層は模擬地盤底面の基底断層に収斂するように見える。また、底面から横ずれ断層にみられるフラワーストラクチャーを形成している。内部でも複雑な断層構造が発達しているのがわかる。これに対してゆる詰の結果(図 3.3.4.2.2)では基底断層から浅部までほぼ1条の断層となっており、表面付近でフラワーストラクチャーを形成している。参考として、ゆる詰の実験結果を図 3.3.4.2.3 に示すが、密詰の結果(図 3.3.4.2.4)よりも短いせん断断層が形成されているのがわかる。X線 CT では内部でもより複雑な断層が発達しているのがわかる。更に、密詰とは異なり白いパッチ状になった領域が多く確認できる。これは局所的に粉体が固まっており密度が高くなっているためと思われる。ゆる詰の状態だと、内部の不均質性がより高くなっており、これらの境界に規制されているような断層もみられる。

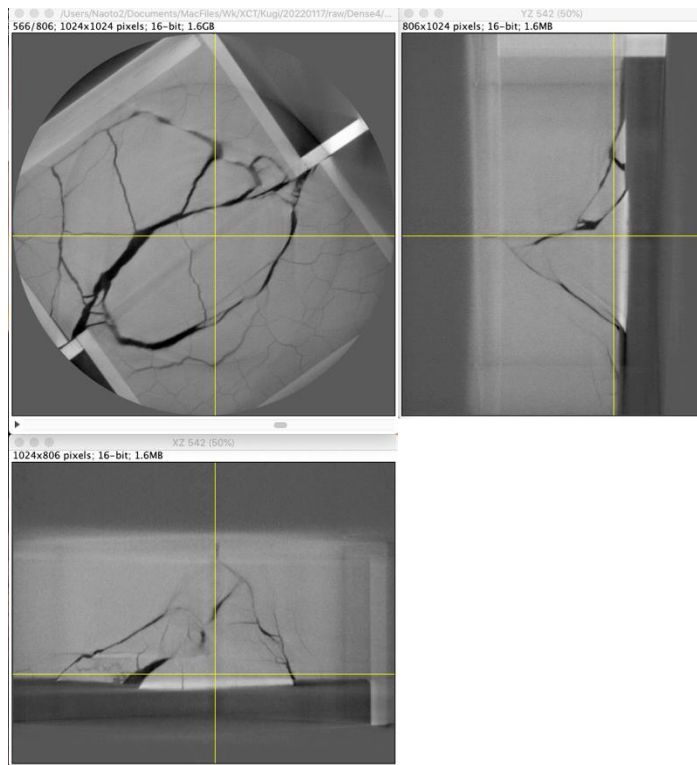


図 3.3.4.2.1 密詰試料（層厚 4cm, 10mm 変位）の内部構造

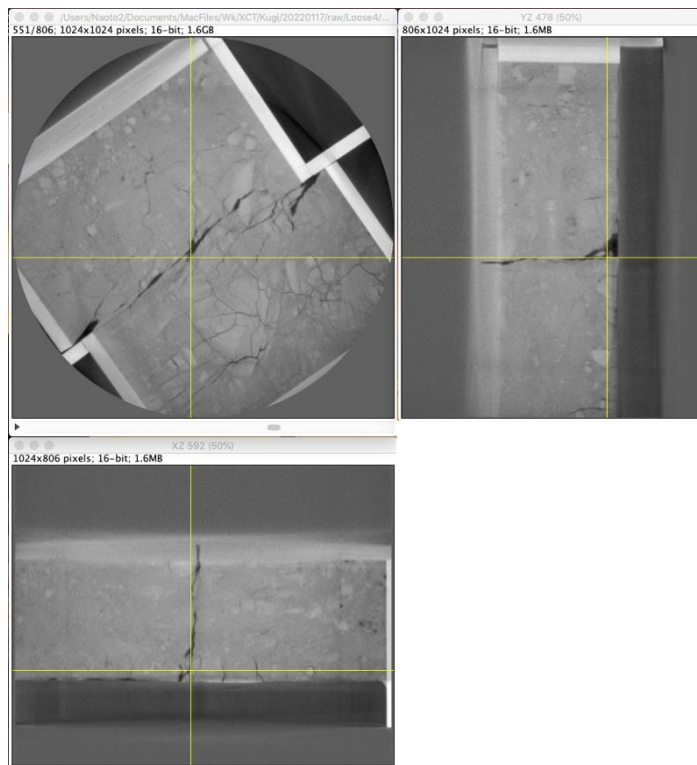
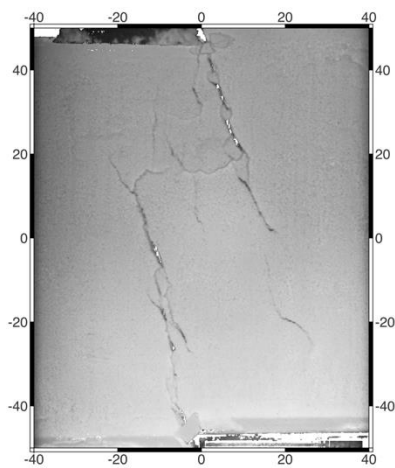
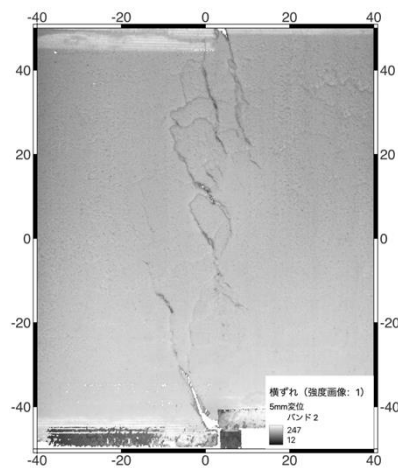


図 3.3.4.2.2 ゆる詰試料（層厚 4cm, 10mm 変位）の内部構造

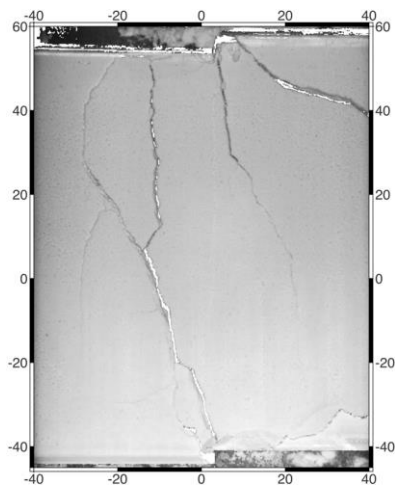


(a) 層厚 4cm、5mm 変位

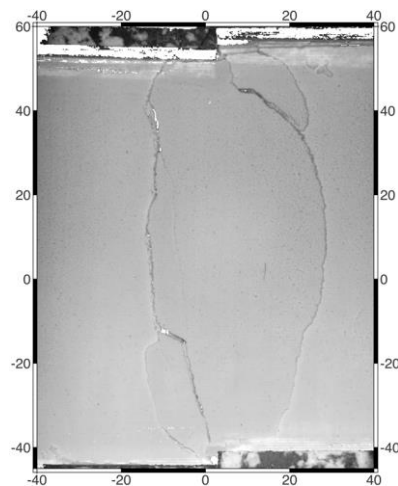


(b) 層厚 2cm、5mm 変位

図 3.3.4.2.3 ゆる詰実験結果



(a) 層厚 4cm、5mm 変位



(b) 層厚 2cm、5mm 変位

図 3.3.4.2.4 密詰実験結果

3.3.5. 横ずれ室内模擬実験まとめ

横ずれ断層に関して、小麦粉を模擬地盤とし層厚を変えた室内模擬実験を行った。模擬地盤底面の断層変位量の増加にともない、せん断断層が発達していく様子が確認された。今回の実験条件では、層厚が厚くなると形成されるせん断断層帯の幅が広がる傾向にあった。さらに、内部に発達する断層構造を把握するために X 線 CT 撮影を行った。表面では幅のあるせん断断層帯は地下では模擬地盤底面の断層に収斂の様子が確認された。密詰の結果は、上田 (2009) による模擬岩盤における乾燥砂地盤の横ずれ断層形状と類似しており、密詰はどちらかというとも擬岩盤の実験結果に近い形状と思われる(図 3.3.5.1)。

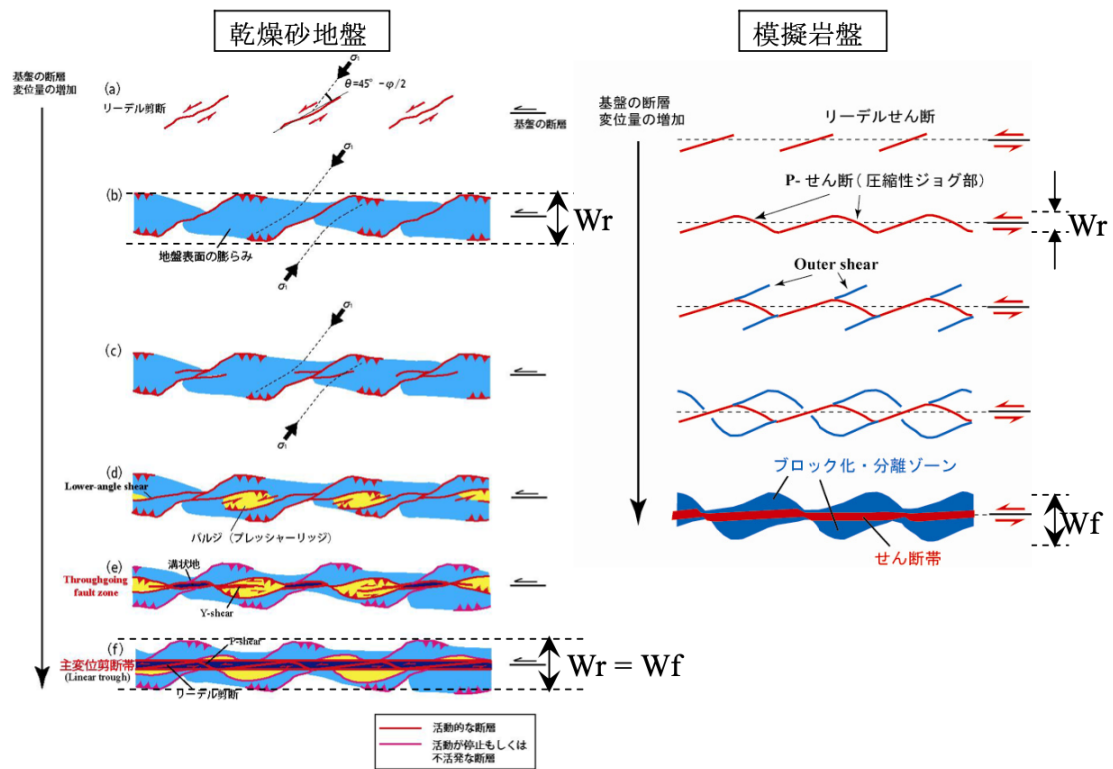


図 3.3.5.1 乾燥砂地盤および模擬岩盤に形成されるせん断断層構造 (上田, 2009)

3.4. 断層変位に関する室内模擬実験のまとめ

数値解析や実験結果を実地盤スケールに換算する際、模擬地盤の物理特性や力学特性が必要となる。小麦粉のような粉体は含水率によって強度が異なる可能性を考慮して、各試験は保存期間の異なる小麦粉を対象として実施し、時間経過による試料の物性の変化を検討した。得られた小麦粉の粘着力から長さに関する相似比をまとめた。

小麦粉を模擬地盤として、模擬地盤底面の断層傾斜角度が高角（ 60° ）、低角（ 30° ）の逆断層・正断層の実験が可能な装置を用いて室内模擬実験を行った。模擬地盤底面の断層の延長を主断層、主断層以外を副断層として形成された断層構造の整理を行った。副断層は規模が小さい（断層長が短い断層や変位量が小さい）断層を副断層、規模の大きい断層を分岐断層と細分しても検討を行った。逆断層の場合、低角の実験結果の方が副断層の分布範囲が広い傾向にあった。主断層の地表到達位置は低角ではおよそ模擬地盤底面の基底断層延長上であるが、高角の場合は模擬地盤中で低角度となり、より下盤側に出現する傾向にあった。一方、正断層では模擬地盤底面の断層傾斜角度によらず、ほぼ基底断層の直上付近に主断層が出現する傾向にあった。また、高角の方が副断層の分布が広い傾向となった。逆断層・正断層にかかわらず、主断層・副断層・分岐断層ともに発生位置や変位量には実際の地表地震断層同様にばらつきがみられた。模擬地盤底面の断層に変位を与えると分岐断層は主断層とともに断層変位が大きくなるが、副断層は一旦形成された後は、断層変位が発生しない断層があった。また、模擬地盤底面の断層に変位の増大により副断層や分岐断層だった断層が主断層となる断層も観察された。室内模擬実験で得られた逆断層の副断層データを既往の確率論的断層変位ハザード解析で整理されている実際に観察された副断層データとの比較を行った。ばらつきは大きいものの両者は整合的な関係を示した。

横ずれ断層に関しても、小麦粉を模擬地盤とし層厚を変えた室内模擬実験を行った。模擬地盤底面の断層変位量の増加にともない、せん断断層が発達していく様子が確認された。今回の実験条件では、層厚が厚くなると形成されるせん断断層帯の幅が広がる傾向にあった。さらに、模擬地盤内部に発達する断層構造を把握するために X 線 CT 撮影を行った。表面では幅のあるせん断断層帯は地下では模擬地盤底面の基底断層に収斂の様子が確認された。

上述の知見は限られた室内模擬実験によるため、より多くの実験結果を蓄積して整理することが重要と思われる。より多くのデータの蓄積により、断層出現位置や断層変位量のばらつきまで評価できる可能性がある。水平変位量や模擬地盤作成時の応力状態の把握は、実験結果の解釈や数値解析との比較に有効であると思われる。これらの計測は今後の課題である。

3.5. 参考文献

- 1) Boncio, P., F. Liberi, M. Caldarella, and F. C. Nurminen (2017), Width of surface rupture zone for thrust earth- quakes. Implications for earthquake fault zoning., Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, Vol. 2017, 1–22.
- 2) 地盤工学会 (2020), 地盤材料試験の方法と解説[第一回改訂版].

- 3) 構造計画研究所 (2019), 「断層変位評価に係る知見の整備」, 平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書.
- 4) パスコ(2021), 「断層変位評価に係る調査」, 令和 2 年度原子力規制庁委託成果報告書.
- 5) Guan, Wei (2010), Effect of compaction on strength and arching of cohesive material in storage bins, Mater Thesis, University of Manitoba, 50p.
- 6) Komura, Keitaro, Kotaro Aiyama, Takahiro Nagata, Hiroshi P. Sato, Akihiro Yamada, and Yasuhira Aoyagi (2019), Surface rupture and characteristics of a fault associated with the 2011 and 2016 earthquakes in the southern Abukuma Mountains, northeastern Japan, triggered by the Tohoku-Oki earthquake, Earth, Planets and Space, Vol. 71, No. 1, 106.
- 7) Lin, Ming-Lang, Chun-Fu Chung, Fu-Shu Jeng, and Ta-Chun Yao (2007), The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels, Engineering Geology, Vol. 92, No. 3, 110 - 132.
- 8) Nurminen, Fiia, Paolo Boncio, Francesco Visini, Bruno Pace, Alessandro Valentini, Stéphane Baize, and Oona Scotti (2020), Probability of Occurrence and Displacement Regression of Distributed Surface Rupturing for Reverse Earthquakes, Frontiers in Earth Science, Vol. 8, 456.
- 9) SASNETT, PERI JORDAN (2013), ANALOGUE MODELLING OF STRIKE-SLIP SURFACE RUPTURES: IMPLICATIONS FOR GREENDALE FAULT MECHANICS AND PALEOSEISMOLOGY, Master's thesis, University of Canterbury.
- 10) Schöpfer, Martin P. J., Conrad Childs, and John J. Walsh (2007), Two-dimensional distinct element modeling of the structure and growth of normal faults in multilayer sequences: 2. Impact of confining pressure and strength contrast on fault zone geometry and growth, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 112, No. B10.
- 11) 上田圭一 (2009), 横ずれ断層の変位に伴う岩盤の 3 次元変形過程-ヘリカル X 線 CT を用いた断層変位実験による検討-, 電力中央研究所報告, N08039.
- 12) 上田圭一・井上大榮・鳥越祐司 (2005), 2004 年新潟県中越地震震源域における上部新生界の変形機構模型実験による基礎的検討, 地震第 2 輯, 58, 3, 309-327.

4章 断層変位に関する数値解析

本章では、縦ずれ断層の基盤から表層まで至る破壊過程に着目して実施した数値解析について述べる。解析対象は実施した室内模擬実験で得られた成果の内、縦ずれ断層型のものとし、現象が2次元的事象であることから2次元体系の解析モデルを用いた。解析手法としては粒状体集合の大変形問題を取り扱える個別要素法(DEM)を採用し、大きな付着力を持つ微細粉体層の変状過程の再現を試みた。

なお、過年度事業の検討において、個別要素法による断層変位実験の再現解析には幾つかの課題事項があり、主なものとして粒状体特性としてのダイレイタンスが特に2次元体系において大きいこと、大変形ひずみの鈍りのない評価が難しいこと等が挙げられている。そこで、本検討では事前にこれらの課題事項を解消するための検討を実施し、再現解析内容の報告の前にその内容について述べる。

4.1. 事前検討について

4.1.1. 周期境界を適用した解析モデル

縦ずれ断層を対象とする場合、現象が2次元的事象であるため2次元解析モデルを使用することで解析規模の抑制が可能である。このことは、計算分解能を高める上で有利であり、本検討における数値解析も2次元体系の解析モデルとする。しかし、粒々の一つ一つを個別要素として個々の接触点挙動を解析する個別要素法において、2次元モデルでは円筒状の要素を採用することになるため、以下のような問題点があり実現象に比べてダイレイタンスの影響が大きい。

- 1)面外方向の自由度を持たないため変形自体が生じ難い。
- 2)上記よりせん断変形時に生じる要素の乗り上げと落ち込みによる嵩の変化量が大きい。
- 3)円筒要素を用いるため間隙率が小さくなり、正のダイレイタンスが生じやすい。

そこで、本検討では個別要素として円筒要素ではなく、3次元解析と同様に球要素を採用する。また、面外方向の変位も考慮し、この方向を極薄い幅でモデル化して、面外両端を周期境界として結ぶことで2次元体系の解析に3次元解析と同様の変形特性を考慮し、ダイレイタンスを抑制するモデル化を考えた。周期境界を用いた断層変位による地盤変状を対象とした事例として、横ずれ断層変位を想定した竿本ほか(2005)や谷山(2008)の研究事例があり、これらが解析領域を狭めることで計算規模の抑制を意図して周期境界を用いているのに対し、本事業では2次元体系の解析モデルの高度化のために面外方向の周期境界を利用した。

図4.1.1に2次元体系において面外周期境界を適用した解析モデルのイメージ図を示す。本章における全ての個別要素法解析において、このような極薄い面外周期境界を考慮した解析モデルを採用している。

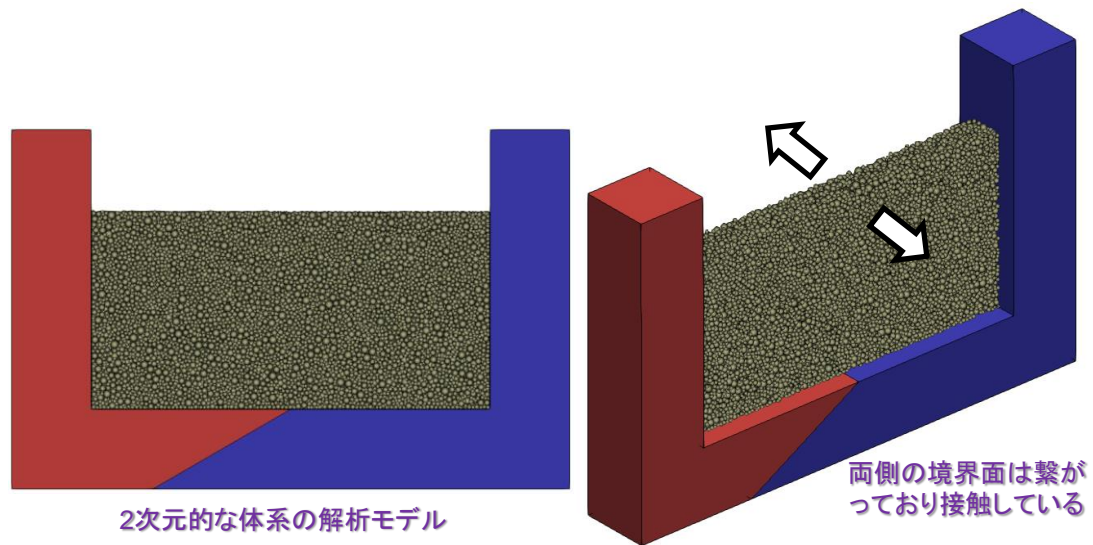


図 4.1.1 2次元体系に面外周期境界を適用した解析モデル

4.1.2. 粒径分布の影響の検討

粒状体集合がせん断変形時に嵩を変化させる原因は、局所的な骨格が変化する際に生じる乗り上げと滑落の影響であり、いわゆるダイレイタンスの大小は粒径分布によるところが大きい。粒径分布が広い条件、すなわち均等係数が大きい場合、大径粒子の周りには小径粒子が多く存在し、骨格が変動する際に流動して嵩の変化を抑制すると考えられるが、粒径分布が狭い条件では乗り上げと滑落による嵩の変化が大きく生じてしまう。また、均等係数が 1.0 に近い条件では最密構造となり易く、正のダイレイタンスが大きく生じると考えられる。自然に存在する地盤や粉体材料の均等係数はある程度大きいため、純せん断変形を生じさせても嵩の変化はあまり大きくないが、個別要素法による数値解析では計算規模や効率の観点から均等係数を大きくすることは難しく、解析精度と計算効率の兼ね合いから現実的なモデル化を行う上での検討を行っておくことが重要である。そこで、室内模型実験の再現解析の実施に先立って、粒度の条件とダイレイタンスの関係を確認した。

4.1.2.1. 事前検討の要素シミュレーションモデル

一面せん断試験の要素シミュレーションを対象に、個別要素法モデルの粒径分布を変えた際の影響を確認した。粒径分布は以下のモデル式より設定した。

$$D = \frac{D_{50}}{10} 10^c \dots\dots\dots (式 4.1.1)$$

$$c = \left(1 + a \frac{R-0.5}{|R-0.5|} (|R-0.5|)^b\right) \dots\dots\dots (式 4.1.2)$$

ここで、 D は粒径であり添え字の数字は通過質量百分率を意味する。 c は平均粒径に対する対数粒径比であり、 R は通過質量分率、 a は粒径調整パラメータ、 b は曲率調整パラメータ（対数粒径比の曲線のべき乗数）である。

平均粒径 D_{50} を 1.5mm とし、対数粒径比を 1 次式および 3 次式とした場合の 2 通りの条件に対し、それぞれ粒径分布幅が異なる 5 種類の解析モデルを作成し、均等係数 U_c と曲率係数 U'_c を整理した。均等係数が大きく曲率係数が 1~3 程度の範囲に収まっている粒径分布に対して、一般に粒度が良い（工学的な性質が良い）と言える。

$$U_c = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots \dots \dots \text{(式 4.1.3)}$$

$$U'_c = \frac{D_{30} \cdot D_{30}}{D_{10} \cdot D_{60}} \dots \dots \dots \text{(式 4.1.4)}$$

対数粒径比を 1 次式とした粒径分布モデルの条件を表 4.1.1 に、粒径加積曲線を図 4.1.2 に示す。また、対数粒径比を 3 次式とした粒径分布モデルの条件を表 4.1.2 に、粒径加積曲線を図 4.1.3 に示す。

表 4.1.1 対数粒径比を 1 次式でモデル化した粒径分布モデル (b=1.0)

b=1 モデル	パラメータ a	D_{100} [mm]	D_0 [mm]	D_{100}/D_{10}	均等係数	曲率係数
model1	0.125	1.732	1.299	1.296	1.155	0.972
model2	0.250	2.000	1.125	1.679	1.334	0.944
model3	0.500	2.667	0.844	2.818	1.778	0.891
model4	0.750	3.557	0.633	4.732	2.371	0.841
model5	1.000	4.743	0.474	7.943	3.162	0.794

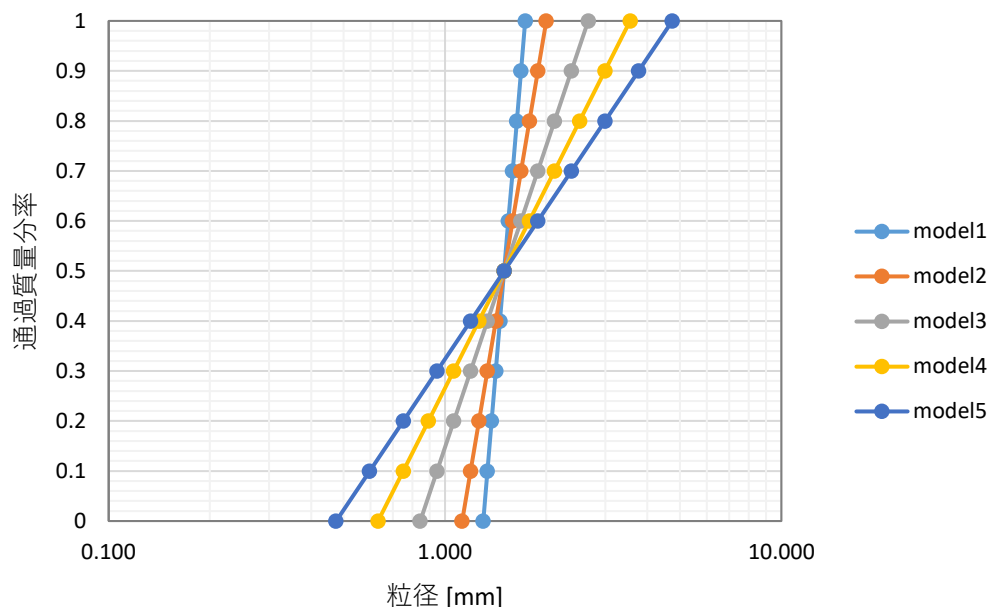


図 4.1.2 対数粒径比を 1 次式でモデル化した粒径分布モデル (b=1.0) の粒径加積曲線

表 4.1.2 対数粒径比を 3 次式でモデル化した粒径分布モデル (b=3.0)

b=3 モデル	パラメータ a	D ₁₀₀ [mm]	D ₀ [mm]	D ₁₀₀ /D ₁₀	均等係数	曲率係数
model1	0.500	1.732	1.299	1.243	1.078	1.056
model2	1.000	2.000	1.125	1.545	1.161	1.114
model3	2.000	2.667	0.844	2.388	1.349	1.242
model4	3.000	3.557	0.633	3.690	1.567	1.384
model5	4.000	4.743	0.474	5.702	1.820	1.542

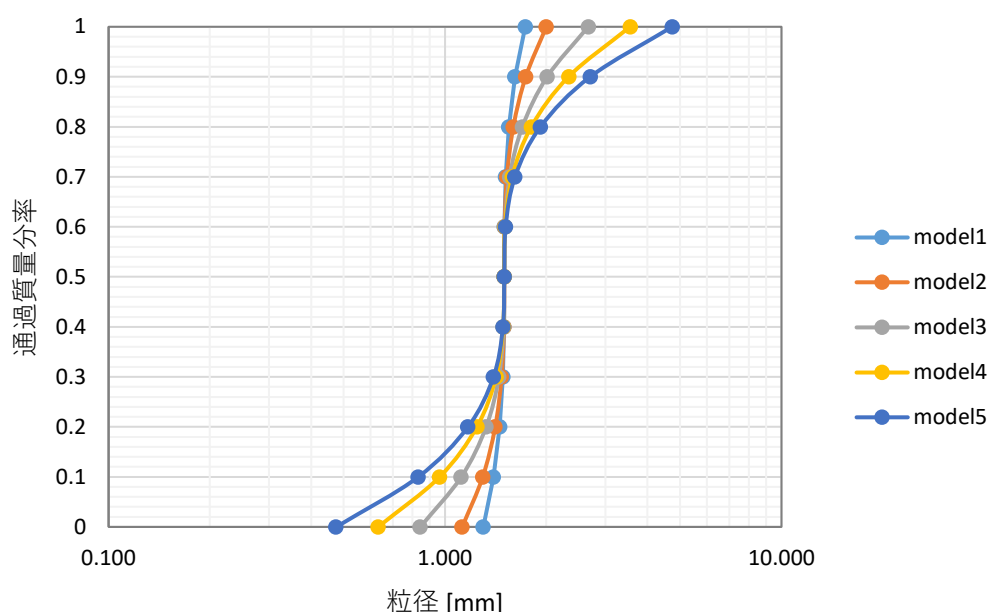


図 4.1.3 対数粒径比を 3 次式でモデル化した粒径分布モデル (b=3.0) の粒径加積曲線

対数粒径比を 1 次式とした条件では、5 種類の全てのモデルで曲率係数が 1.0 未満であり、粒度としては悪いモデルに相当する。また、粒径を 10 階級で個別要素法モデルを作成する場合、最大粒径と最小粒径の比率 D_{100}/D_{10} が大きいほど総粒子数は増加し、更に計算効率が低下するために不経済となる。一方で、対数粒径比を 3 次式でモデル化した条件では、曲率係数は 1.0~1.5 程度となり、粒度は均等係数の大きいモデルほど良く、また D_{100}/D_{10} も 1 次式のモデルと比べると計算効率の良いモデル化となっている。

直径 60mm、厚さ 20mm の円筒供試体を想定し、2 次元体系の奥行幅の小さい一面せん断試験の要素シミュレーションモデルを作成した。初期間隙率が 0.4 となるように粒子充填を行い、初期圧密過程で 100kPa の上載荷重を載荷した。

図 4.1.4 に対数粒径比を 1 次式とした条件の圧密過程完了時における解析モデル図、図 4.1.5 に対数粒径比を 3 次式とした条件の解析モデル図を示す。

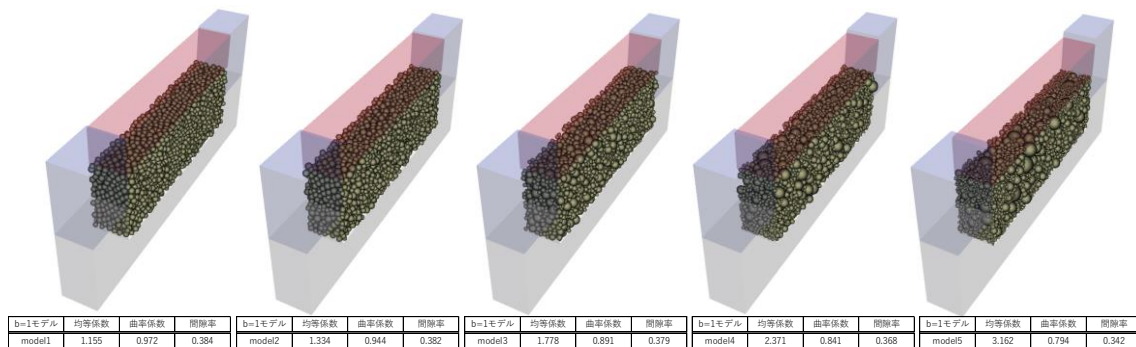


図 4.1.4 対数粒径比を 1 次式でモデル化した粒径分布モデル (b=1.0) の解析モデル

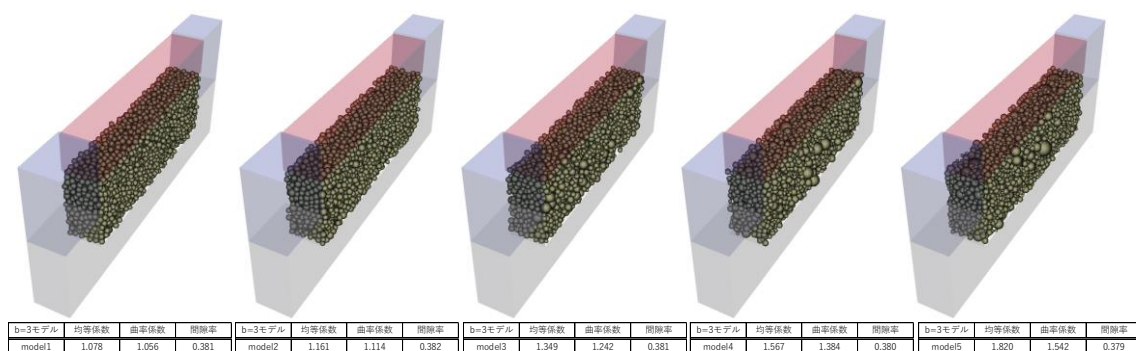


図 4.1.5 対数粒径比を 3 次式でモデル化した粒径分布モデル (b=3.0) の解析モデル

この検討では粒径分布がダイレイタンスーに与える影響のみを検討し、供試体の強度には着目していないため、個別要素法解析におけるパラメータは任意に設定し、全ケースで表 4.1.3 に示す条件を使用した。

表 4.1.3 事前検討における DEM 解析パラメータ

パラメータ	設定値
基準法線剛性	1.0×10^7 [N/m]
基準接線剛性	2.5×10^6 [N/m]
減衰定数	0.05
粒子間摩擦角	45.0 [deg.]
転がり摩擦角	21.8 [deg.]
土粒子密度	2.6 [g/cm ³]

4.1.2.2. 解析結果

対数粒径比を1次式とした均等係数の異なる5ケースの解析結果より、図4.1.6に体積ひずみと変位の関係を示し、図4.1.7に内部摩擦角と変位の関係を示す。また、図4.1.8に均等係数が最小のケースのせん断前とせん断過程終了時の変形の様子を示し、図4.1.9に均等係数が最大のケースの結果を示す。

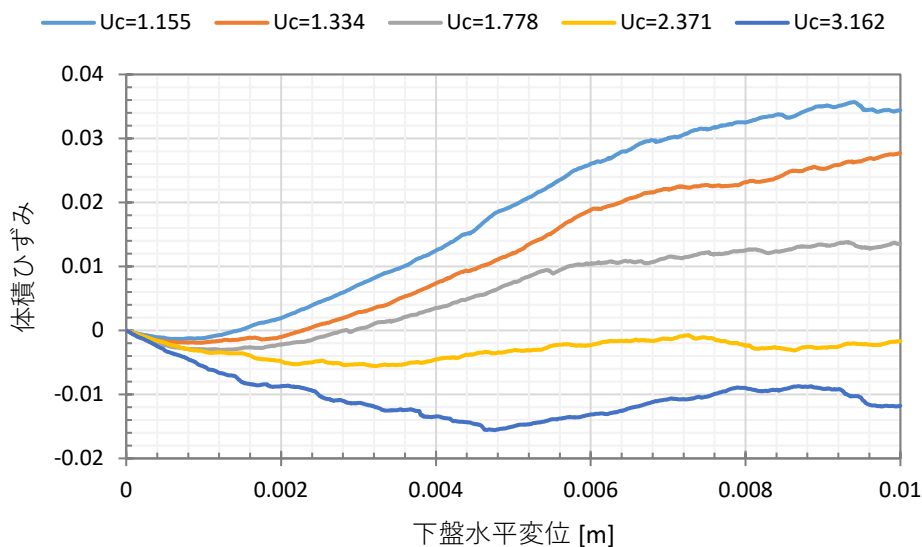


図 4.1.6 対数粒径比を1次式でモデル化した条件の体積ひずみの履歴

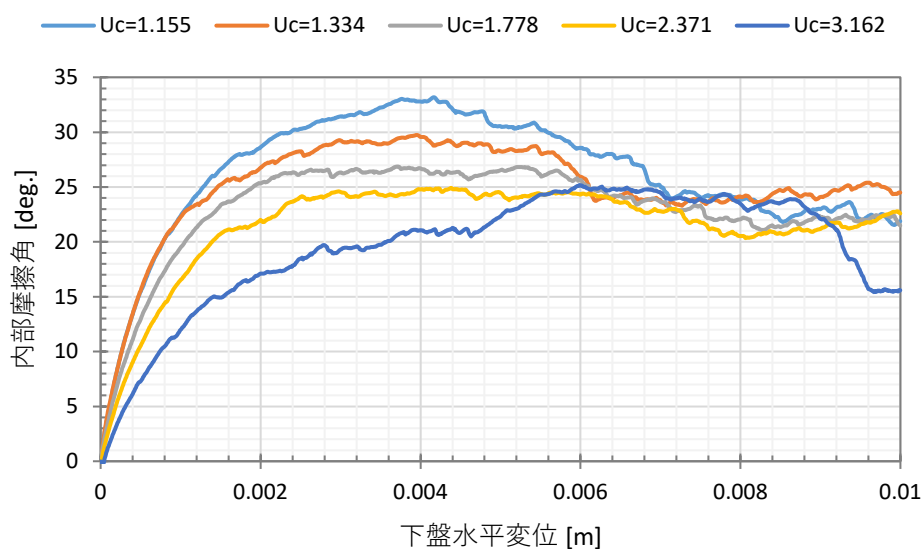


図 4.1.7 対数粒径比を1次式でモデル化した条件の内部摩擦角の履歴

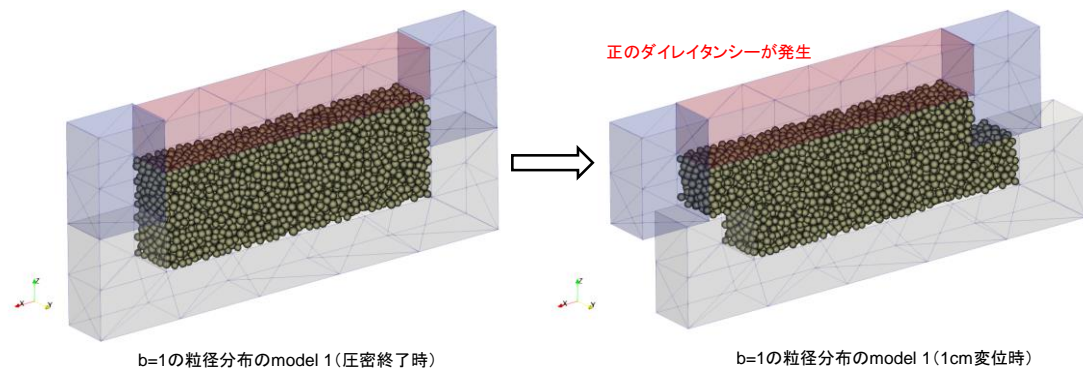


図 4.1.8 対数粒径比を 1 次式でモデル化した条件の均等係数最小ケースの変形の様子

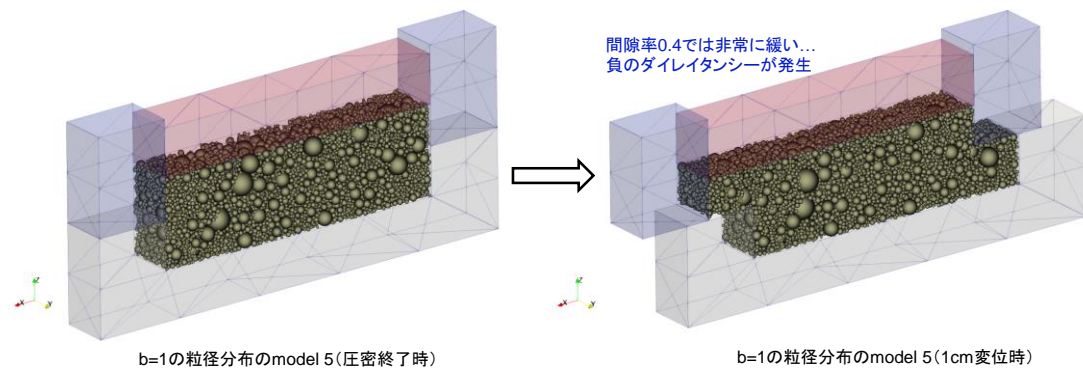


図 4.1.9 対数粒径比を 1 次式でモデル化した条件の均等係数最大ケースの変形の様子

対数粒径比を 1 次式でモデル化した解析モデルは圧密終了時の間隙率の差が大きく、ケース間で強度が大きくことなることが確認できる。また、均等係数の小さいケースは最密構造に近く、正のダイレイタンスーが顕著である。一方で、均等係数が大きいケースはより多くの粒子充填が可能となり、相対密度が小さいためか間隙率は小さいものの負のダイレイタンスーが発生する傾向がある。ダイレイタンスーを抑制する観点からは均等係数が大きい方が好ましいが、初期間隙率時に相対密度が大きくも小さくもないことが重要であると考えられる。

対数粒径比を3次式とした均等係数の異なる5ケースの解析結果より、図4.1.10に体積ひずみと変位の関係を示し、図4.1.11に内部摩擦角と変位の関係を示す。また、図4.1.12に均等係数が最小のケースのせん断前とせん断過程終了時の変形の様子を示し、図4.1.13に均等係数が最大のケースの結果を示す。

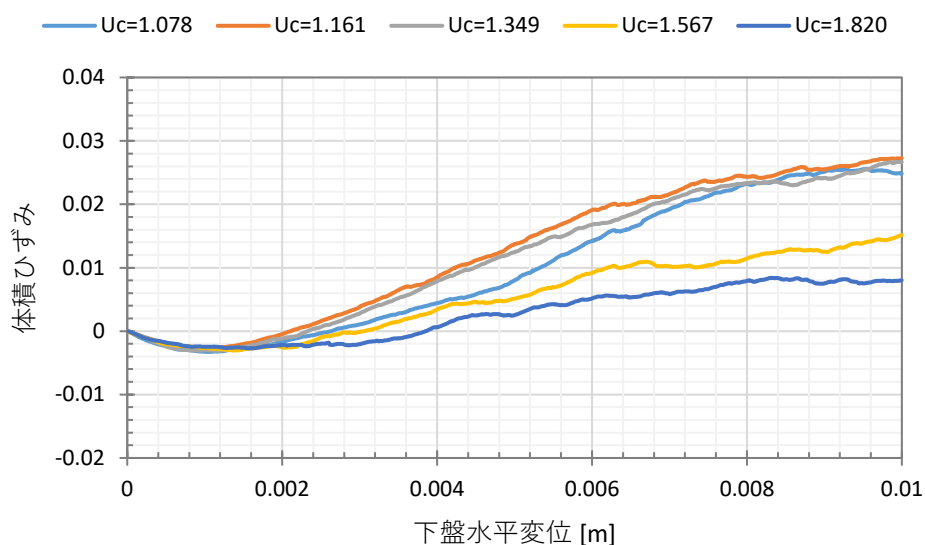


図 4.1.10 対数粒径比を3次式でモデル化した条件の体積ひずみの履歴

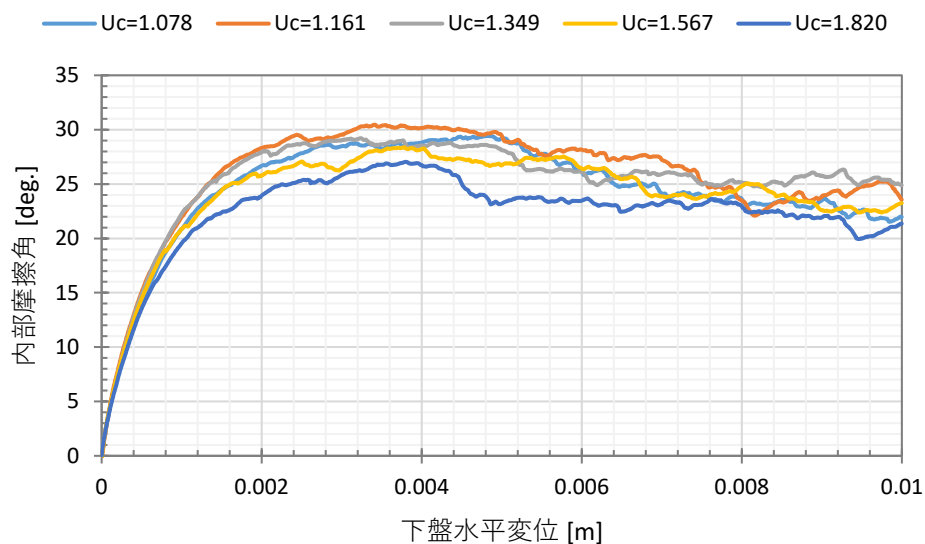


図 4.1.11 対数粒径比を3次式でモデル化した条件の内部摩擦角の履歴

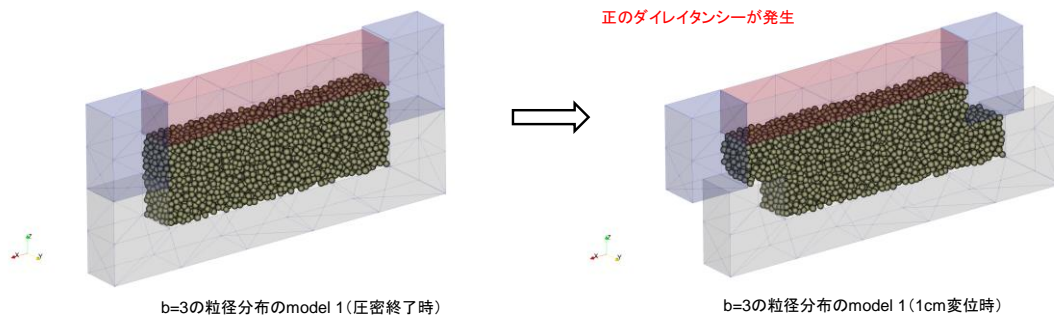


図 4.1.12 対数粒径比を 3 次式でモデル化した条件の均等係数最小ケースの変形の様子

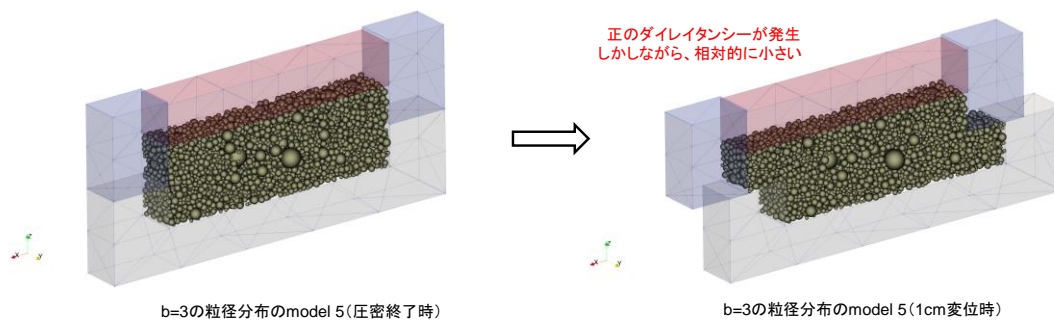


図 4.1.13 対数粒径比を 3 次式でモデル化した条件の均等係数最大ケースの変形の様子

対数粒径比を 3 次式でモデル化した解析モデルは、平均粒径と粒径差が小さい粒子が多く含まれるため、圧密終了時の間隙率の差が小さく、ケース間で強度は概ね同程度である。また、全ケースで正のダイレイタンスが生じており、均等係数が大きくなるほど抑制される関係が確認できる。初期間隙率時における相対密度が重要であると考えられるが、間隙率 0.4 程度は乾燥砂などでは一般的な条件であり、粒状体モデルのダイレイタンスを抑制する上で均等係数 2.0、曲率係数 1.5 程度が目安になると考えられる。

4.1.2.3. 粒径分布の影響検討のまとめ

一面せん断試験の要素シミュレーション時に生じる体積変化量と粒径分布の影響を確認し、以下の結論を得た。

- 1) 均等係数が大きいほどダイレイタンスは抑制される傾向にあるが、初期相対密度が適切な範囲である必要がある。
- 2) 対数粒径比を 1 次式で仮定した曲率係数の小さい粒径分布では上記の初期相対密度の影響が顕著であり、計算効率の観点からもあまり好ましいモデル化ではない。
- 3) 曲率係数が 1 を少し超える粒径分布では圧密終了後の間隙率の変化がケース間で小さく、強度特性が安定しており、また計算効率の観点からも好ましい。
- 4) 初期間隙率 0.4 程度の一般的な粒状体集合を想定する場合、均等係数 2 程度、曲率係数 1.5 程度のモデル化を行うことでダイレイタンスは抑制される。

4.1.3. 鈍りの小さい大変形ひずみの評価方法の検討

断層変位の数値解析において、個別要素法のような個々の粒子間接触をモデル化するメッシュフリー解析手法であっても、開口が直接確認できるほどの変形が見られるかどうかは材料強度特性や計算分解能により条件次第である。従って、せん断ひずみ分布を評価することでせん断帯の進展を確認することが有効となる。しかし、メッシュフリー解析における大変形問題では初期の近傍接触関係と関係なく流動が生じる変形領域まで対象とするため、現象の進行段階毎に評価点近傍の変位分布からこれを評価する必要がある。

個別要素法は個々の要素接触を直接モデル化する手法であり、応力やひずみのような連続体諸量は体積平均量として評価することが一般的であり、竿本ほか(2005)や谷山(2008)などの事例がある。応力や微小変形ひずみは要素近傍の接触相手との相互作用や相対変位の分布から直接体積平均量を計算することも可能であるが、上述のように大変形ひずみを評価する場合、解析領域を要素径より大きな格子で分割し、変位などを体積平均して格子の差分計算によって評価する方法が一般的である。このような格子平均を計算する方法は簡便で確実であるが、格子平均量から計算を行うために鈍りが生じる問題がある。従って、高い分解能がなければ微細な破壊進展の構造を捉えることは難しい。そこで、鈍りの小さい大変形ひずみの評価方法についての検討を行った。

4.1.3.1. 一般に用いられる大変形ひずみの評価方法

大変形ひずみの評価方法として一般に用いられるものの計算事例を以下に示す。図4.1.14に個別要素法解析結果より格子平均の変位分布を計算し、ひずみを計算して個別要素に内挿し直し、最大せん断ひずみ分布を描画したものを示す。

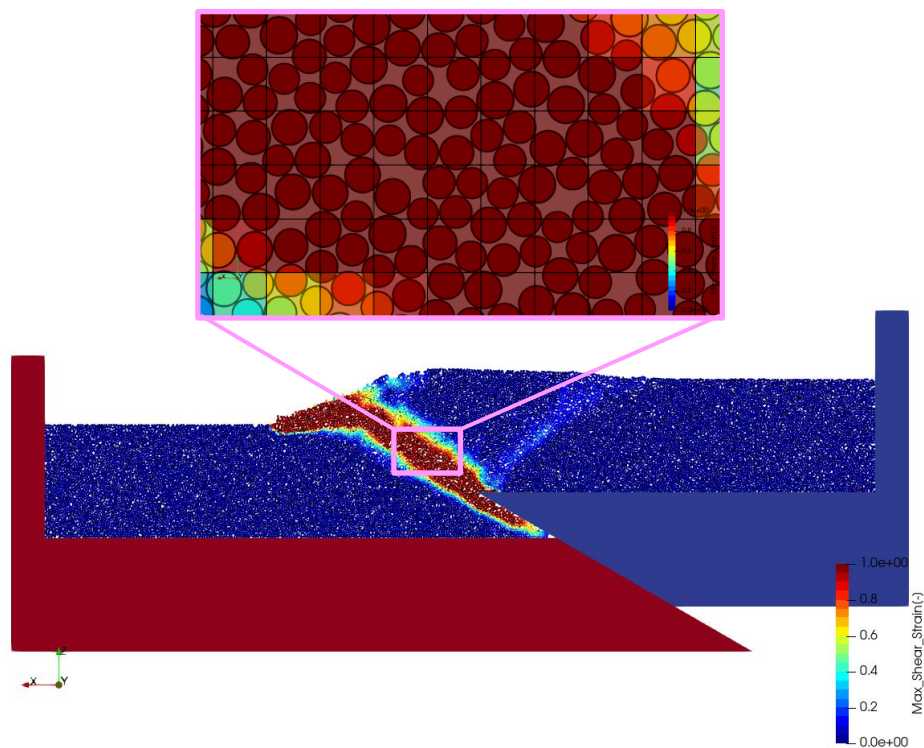


図 4.1.14 解析結果より格子平均変位から差分計算した最大せん断ひずみ分布の例

前述の通り、格子平均変位を使用する方法では鈍りが生じるため微細な破壊進展の評価には課題がある。この他のひずみの評価方法として解析結果から有限要素メッシュを作成する方法が考えられ、この方法であれば鈍りが生じることはない。個別要素法解析結果から有限要素メッシュを作成する方法としては Delaunay 要素分割を用いる方法が一般的であり、三角形や四面体要素を生成することで面積座標ないし体積座標を内挿関数とする定ひずみ要素としての計算が可能となる。

図 4.1.15 にオープンソースプログラムの Paraview のフィルター機能を用いて、個別要素法解析結果に対して Delaunay 分割を行い、大変形ひずみを計算して描画した例を示す。この手法には平均計算による鈍りの発生がないが、ロバスト性や適用可能な計算規模等に問題があり、特に 3 次元解析において運用上の問題があると考えられる。

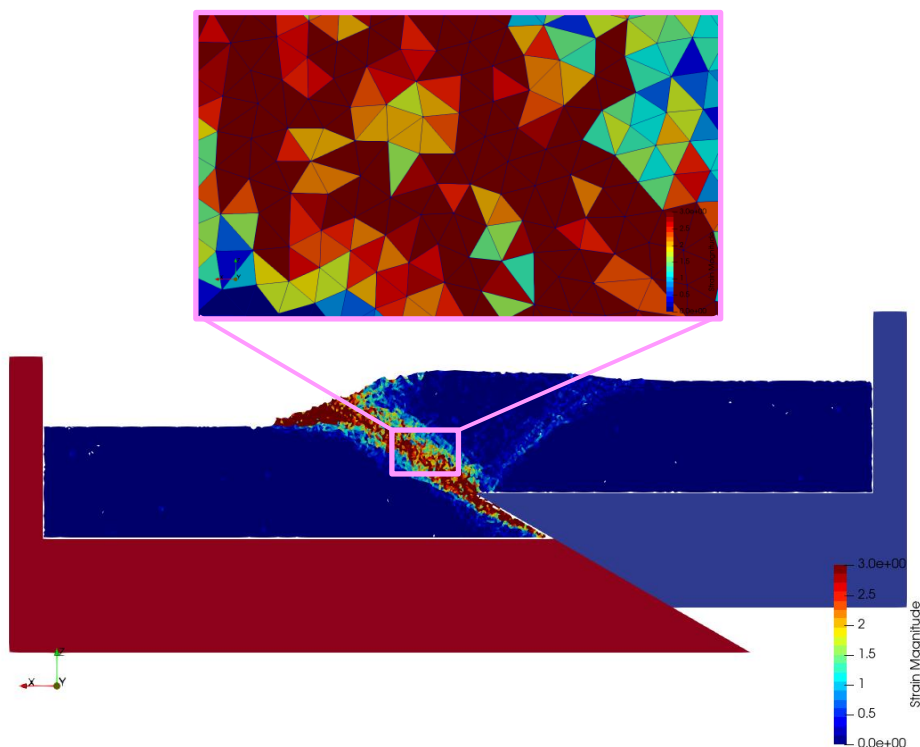


図 4.1.15 解析結果より三角形網を生成し三角形要素として計算したひずみ量分布の例

4.1.3.2. メッシュフリー法などに見られる評価方法

運動方程式の離散化に解析メッシュを用いないメッシュフリー法には多くの手法があり、応力ひずみを評価する微小領域単位で構成関係に基づく計算を行う。個別要素法は特定の接続関係を想定しない解析手法であり、メッシュフリー法の一種と考えられるが、個々の接触関係を考慮して連続体近似を仮定しないため、ここで考えるメッシュフリー法とは別のものである。代表的なものとして粒子法があり、例えば代表的な手法である SPH 法では一定の影響半径範囲に対して高次の内挿関数を用いた離散化を行う。このような手法は評価範囲で内挿関数を用いる点で有限要素法などと同じであるが、特定の接続関係を仮定せず近

傍の計算点を入れ替えながら計算を行うことが可能である。SPH 法では何れの評価点においても同じ内挿関数を使用することが一般的であるが、評価点周りの任意個数の計算点間で構成関係が成立する係数分布（内挿関数）を評価点毎に計算するような手法も多い。評価点毎の内挿関数の作成方法としては最小二乗法などが良く用いられ、個別要素法の大変形ひずみの評価方法としても使用可能である。

Cardozo & Allmendinger (2009)は変位と位置と変形勾配の関係から個別要素法の大変形ひずみを評価する方法を提案している。例えば、2次元問題において n 点の間の変位 u と位置 x と変形勾配 g の関係は以下の式で与えられる（左添え字は構成点番号で右添え字は方向を意味する）。

$$\begin{bmatrix} {}^1u_1 \\ {}^1u_2 \\ {}^2u_1 \\ {}^2u_2 \\ \dots \\ \dots \\ {}^nu_1 \\ {}^nu_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & {}^1x_1 & {}^1x_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & {}^1x_1 & {}^1x_2 \\ 1 & 0 & {}^2x_1 & {}^2x_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & {}^2x_1 & {}^2x_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & {}^nx_1 & {}^nx_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & {}^nx_1 & {}^nx_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ g_{11} \\ g_{12} \\ g_{21} \\ g_{22} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (式 4.1.5)$$

$$u_i = t_i + g_{ij}x_j \dots\dots\dots (式 4.1.6)$$

$$g_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \dots\dots\dots (式 4.1.7)$$

構成点数が2次元問題では3点、3次元問題では4点の場合に正方行列となり、一意に変形勾配が計算でき、三角形や四面体の一次要素（定ひずみ要素）に相当する計算となる。構成点を接触要素と考えると構成点数はより多くなり、長方形行列となると一意に求めることは出来なくなるが、最小二乗法等のアルゴリズムを適用することで変形勾配を計算可能である。着目要素の変形勾配が得られると例えば Euler-Almansi ひずみは次式から計算できる。

$$e_{ij} = \frac{1}{2} [g_{ij} + g_{ji} - g_{ki}g_{kj}] \dots\dots\dots (式 4.1.8)$$

上記の手法を用いて個別要素法の解析結果から計算した最大せん断ひずみ分布の例を図 4.1.16 に示す。

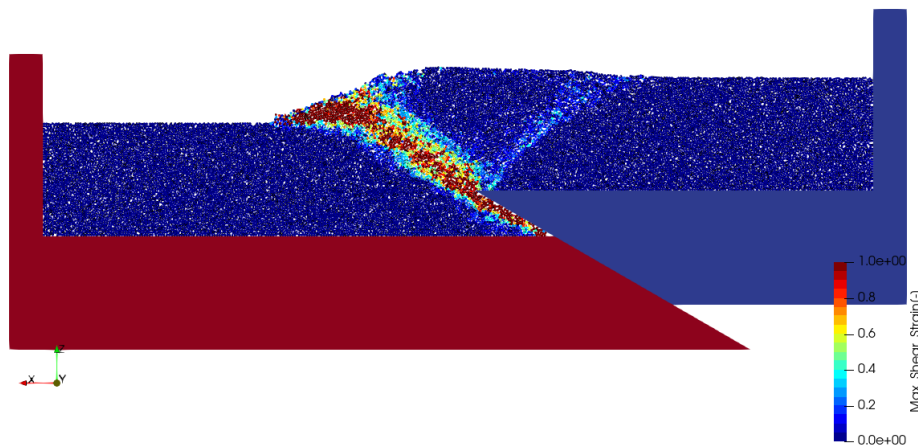


図 4.1.16 解析結果より接触点変位から最小二乗法で計算した最大せん断ひずみ分布の例

4.1.3.3. 大変形ひずみの評価方法検討のまとめ

鈍りの小さい大変形ひずみの評価方法を検討し、以下の成果を得た。

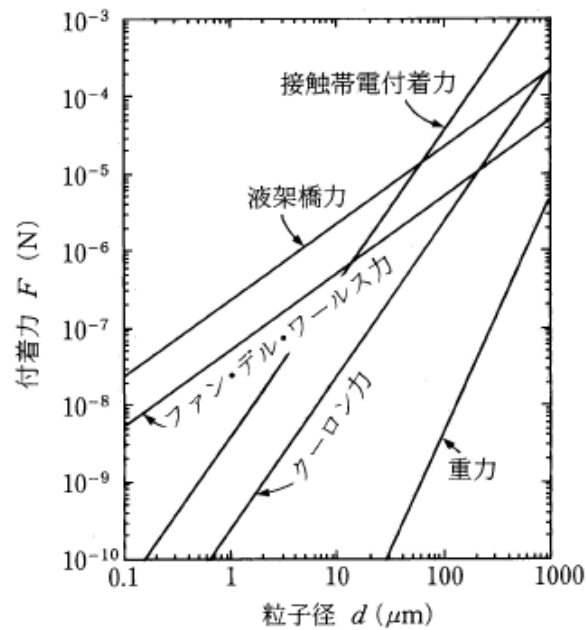
- 1) 一般に用いられる格子平均変位を使用するひずみ評価方法は簡便で確実であるが鈍りを生じる問題があり、分解能の観点から不利である。
- 2) 上記手法に対し、**Delaunay** 分割を利用して三角形族一次要素の内挿関数から鈍りのないひずみの評価方法を示した。しかし、ロバスト性や計算効率に問題があると考えられる。
- 3) 上記手法に対し、要素分割を行うのではなくメッシュフリー法の考えを適用することで鈍りの抑制と計算効率の向上を達成できる。
- 4) 接触要素間の変位と位置と変形勾配の関係から大変形ひずみを計算する方法があり、鈍りの小さい大変形ひずみを高速に計算可能である。

4.2. 室内模擬実験の再現解析

実施した室内模擬実験の内、縦ずれ断層変位を想定した実験ケースを対象に、個別要素法による再現解析を行った。個別要素法解析における強度パラメータは供試体材料である小麦粉のせん断試験結果を参照し、要素シミュレーションを行うことで設定する。なお、小麦粉は微細な粉体材料であり、粒子間に大きな付着力が生じているものであり、これを考慮することが重要と考えられる。そこで、付着力として粒径相似を考慮した van der Waals 力を導入して要素シミュレーションおよび模擬実験の再現解析を行った。

4.2.1. 微細粒子の付着力のモデル化

礫材のように粒径と質量が大きい粒状体に作用する力としては重力のように粒径の 3 乗に比例する物体力が支配的である。一方で、粒径が小さい粉体材料になると物体力の影響は非常に小さくなり、van der Waals 力などの付着力の影響が支配的となる。このことは、物体に貼りついた微細粒子が重力落下しないことなどからもよく分かる。図 4.2.1 に増田 (1997) の各種付着力と重力を計算した比較例を示す。



$$\begin{aligned}
 A &= 10^{-19} \text{ J (in Air)} \\
 z_0 &= 0.4 \text{ nm} \\
 \gamma &= 0.072 \text{ N/m} \\
 \rho_p &= 10^3 \text{ kg/m}^3 \\
 g &= 9.8 \text{ m/s}^2 \\
 \sigma_1 &= \sigma_2 = 26.5 \text{ } \mu\text{C/m}^2 \\
 \epsilon_0 &= 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \\
 V_c &= 0.3 \text{ V}
 \end{aligned}$$

図 4.2.1 付着力の比較 [増田 (1997)]

van der Waals 力は原子や分子間に生じる引力であり、静電気力や液架橋力と異なり物体間に無条件で生じている作用であり、粉体間に働く付着力の代表的なものである。小麦粉のような微細粒子は重力の影響が小さいため、van der Waals 力が粒子間の骨格構造を支配している力と考えられる。この引力は表面間距離の 2 乗に反比例し、粒径に比例するものであり、次式で示される。

$$F_v = -\frac{A}{12z^2}d \dots\dots\dots (式 4.2.1)$$

$$d = \frac{D_i D_j}{D_i + D_j} \dots\dots\dots (式 4.2.2)$$

ここで、 F_v は van der Waals 力、 A は物質によって異なる Hamaker 定数であり 10^{-19} [J]のオーダーを持つ。 d は粒子間の粒径を調和平均した換算粒子径、 z は表面間距離である。 z には斥力との釣り合いから下限があり、気相中の付着では約 0.4nm とされている。なお、表面には凹凸があり接触表面が完全に噛み合うことはなく、粗さの平均値 b を考慮する必要がある。

$$F_v = -\frac{A}{12(z+b)^2}d \dots\dots\dots (式 4.2.3)$$

酒井ほか (2010) では気体流動層中の微細粉体の挙動の個別要素法解析に van der Waals 力を考慮し、粒径に関する相似 (粗視化モデル) を適用している。粗視化は実際の微細粒子群を束ねて大きな粒径を持つ代表粒子 (個別要素) でモデル化し、計算規模を抑制する手法であり数値解析上で考慮する相似則のことである。粉体工学分野では実粒径の微細粒子と粗視化モデル間で動的挙動が等価になるように配慮し、運動エネルギーが等しくなるように相似則を適用している。断層変位の数値解析では準静的な現象を対象としているため、このような動的挙動に関する相似則を満たす必要はないと考えられるが、粉体層の強度を支配する van der Waals 力については重要であり、この引力のモデル化については酒井ほか (2010) の粗視化モデルを適用した。詳細は参考文献を参照されたいが、換算粒径 d を粗視化モデルの DEM 粒径とする場合、相似比の 3 乗の引力を考慮するというものである。

4.2.2. 強度パラメータ同定のための要素シミュレーション

本事業では断層変位による表層地盤変状を対象としており、数値解析は準静的な変形解析を行って大変形後の残留変位を評価するものである。従って、静的な強度評価が重要であり、個別要素法解析における強度パラメータは要素試験結果に基づいて設定する。個別要素法解析では、接触剛性や減衰も設定する必要があるが、これらは準静的な载荷過程ではあまり関係がないため、結果に影響が生じない程度に十分短周期であれば問題はない。強度パラメータとしては粒子間摩擦角や転がり摩擦角、拘束圧に依存しない粒子間のせん断強度としての粘着力や、引張強度に相当する固着力などがある。粒子間の摩擦角は供試体の内部摩擦角と相関が大きく、粒子間の粘着力や固着力、付着力などは供試体の粘着力と相関が大きい。本検討では粒子間の摩擦角と転がり摩擦角および付着力のみを考慮して一面せん断試験の解析を行い、要素試験結果として得られている内部摩擦角と粘着力との合わせこみを行った。

4.2.2.1. 要素試験に基づく目標強度

室内模擬実験で用いた供試体材料の小麦粉は、開封後の経過時間による湿気具合の違いで2種類の供試体を作成し、拘束圧を4条件変えて内部摩擦角とせん断付着応力（粘着力）が取得されている。この内、最も拘束圧が大きい条件では嵩密度が 0.8g/cm^3 となっており、拘束圧としては約 20kPa に相当する。室内模擬実験においても模擬地盤の締め固め時の上載圧は同程であり、圧密過程終了後の嵩密度が 0.8g/cm^3 である要素試験2ケースの算術平均を解析で想定し、表4.2.1に示す値を目標強度とした。

表 4.2.1 要素試験結果に基づく諸条件

粒子密度	1.559 g/cm^3
嵩密度	0.800 g/cm^3
含水比	13.2 %
間隙率	54.6 %
内部摩擦角	34.6°
粘着力	2.45 kPa

なお、供試体材料の小麦粉の平均粒径 D_{50} は $62\mu\text{m}$ であり、重力より van der Waals 力のような付着力の方が大きい材料である。van der Waals 力の Hamaker 定数は不明であるが、粘着力よりある程度推定可能である。平均粒径の2乗を支配面積と考え、粘着力 2.45kPa を乗じると粒子間に働く作用引力は $9.42\mu\text{N}$ であり、図4.2.1の計算例より少し大きいと同程度の値であることが確認できる。(式4.2.3)の z を 0.4nm 、 b を 0 とすると Hamaker 定数は $2.92 \times 10^{-19}\text{J}$ と計算できる。

4.2.2.2. 要素シミュレーションの解析モデル

小麦粉などの実材料の粒子形状は球形ではなく、ある程度扁平で複雑な形状をしているため間隙率は完全な球形を仮定した場合に比べて大きくなる。個別要素法解析では計算効率の観点から球形要素を使用することが多く、粒子形状が強度特性に与える影響は転がり摩擦などで考慮する。なお、球形要素を用いて粒径分布を再現すると実粉体に比べて接触点数が少なくなるが、付着力を考慮すると疎な骨格構造として成立可能である。

表4.2.1に示される通り、対象材料の間隙率は54.6%もあり、これをモデル化すると粒子間は非常に疎な配位構造となる。本検討では、当初このような疎な構造のモデル化を行い、要素シミュレーションを実施して強度パラメータを取得したが、接触点数が少ない条件では摩擦角等を極端に大きくする必要があり、室内模擬実験の解析などに適用すると妥当な結果とならないことを確認している。そこで、本検討では球形要素を用いても疎な配位のモデル化とならないように配慮し、事前に実施した粒度とダイレイタンスの抑制効果の検討時と同じ初期間隙率として40%を設定し、嵩密度が同じになるように粒子密度を設定した。そして、均等係数が2.0、曲率係数が1.5程度となる粒径分布を指向し、(式4.1.2)のパラメータを $a=4$ 、 $b=3$ とし、実粒径の約8倍の大きさを想定して平均粒径 0.5mm の解析モデルを作成した。図4.2.2に実験供試体材料と解析モデルの粒径分布の比較グラフを示し、表4.2.2に均等係数と曲率係数の比較を示す。

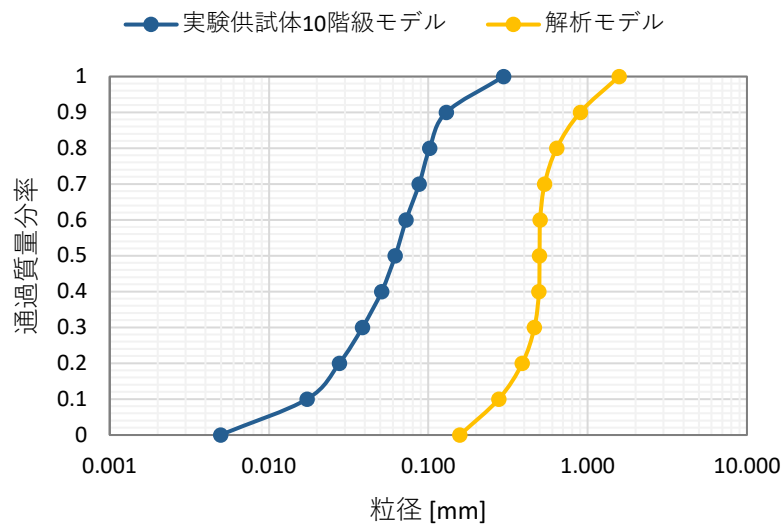


図 4.2.2 実験供試体材料と解析モデルの粒径分布の比較

表 4.2.2 実験供試体材料と解析モデルの均等係数と曲率係数の比較

	供試体材料	解析モデル
均等係数	4.178	1.820
曲率係数	1.184	1.542

一面せん断試験の解析モデルは、一般的な供試体の 1/2 寸法を想定し、面外を周期境界とした 2 次元体系のモデルとして幅 30mm、厚さ 10mm の容器形状内に初期間隙率が 40% となるように充填して作成した。周期境界を考慮した面外方向の奥行は最大粒径の 2 倍となるように設定している。図 4.2.3 に作成した解析モデルを示す。図中の供試体上面の载荷版に対して荷重制御を行い、圧密過程で一定の拘束圧を発生させた後、下部容器に強制変位を与えて反力からせん断強度を算定する。

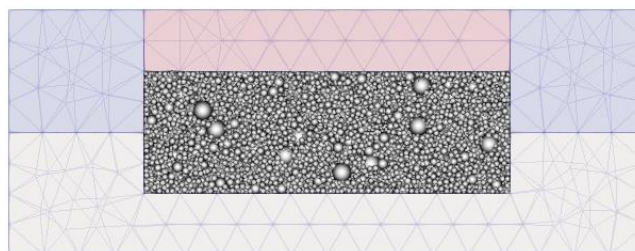


図 4.2.3 一面せん断試験の解析モデル

4.2.2.3. 要素シミュレーション結果

要素シミュレーション結果より、圧密過程終了時とせん断過程終了時における供試体内部変状の例を図 4.2.4 に、応力比 (τ/σ) と変位の関係を図 4.2.5 に、体積ひずみと変位の関係を図 4.2.6 に示し、最終的に得られた強度特性を図 4.2.7 に示す。

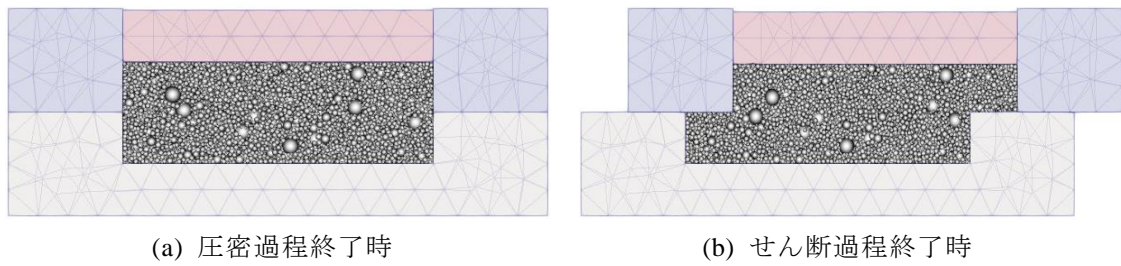


図 4.2.4 一面せん断試験の解析結果より内部変状の様子（拘束圧 20kPa）

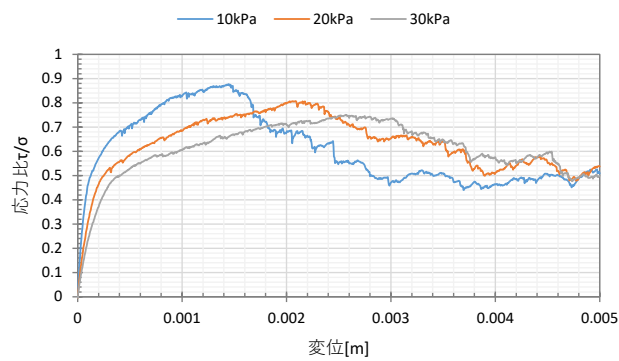


図 4.2.5 一面せん断試験の解析結果より応力比と変位の関係

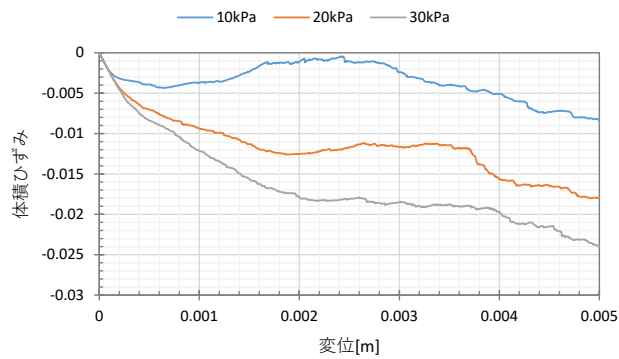


図 4.2.6 一面せん断試験の解析結果より体積ひずみと変位の関係

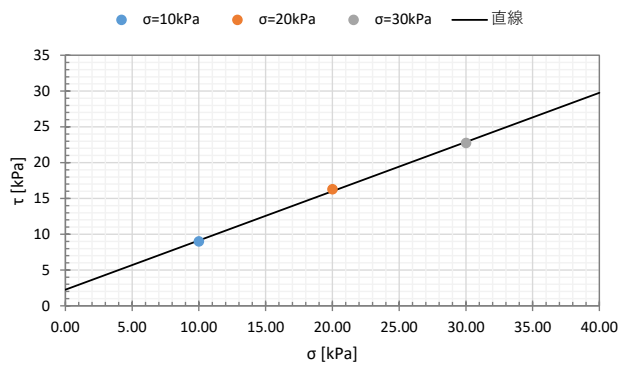


図 4.2.7 一面せん断試験の解析結果より拘束圧と強度の関係

要素シミュレーション結果に基づき、最終的に設定を行った解析パラメータを表 4.2.3 に示す。Hamaker 定数は実験供試体材料の粘着力と平均粒径から算定を行った値より大きい
が、これは粗視化による粒径相似を考慮した設定値であり、粒径相似比が約 8 倍であるこ
を考慮すると小さい値である。粉体材料の粒子形状および表面形状は複雑であり、表面の粗
さとして 6.5nm を考慮した条件に相当し、この条件の表面粗さは粒径の 0.01%である。な
お、土粒子密度は嵩密度が 0.8g/cm³ となるように設定した値である。

表 4.2.3 要素シミュレーションに基づき設定した DEM 解析パラメータ

パラメータ	設定値
基準法線剛性	4.0×10^6 [N/m]
基準接線剛性	1.0×10^6 [N/m]
減衰定数	0.05
粒子間摩擦角	23.0 [deg.]
転がり摩擦角	19.0 [deg.]
Hamaker 定数	5.1×10^{-19} [J]
土粒子密度	1.180[g/cm ³]

4.2.3. 縦ずれ断層模型の解析モデル

個別要素法による再現解析では、本事業で実施した断層角 30 度と 60 度の縦ずれ断層模型を使用した室内模擬実験を対象とし、逆断層変位と正断層変位を想定して計 4 ケースの数値解析を実施した。解析モデルの作成条件と設定パラメータは要素シミュレーションと同条件とし、ケース毎の層厚の違いを考慮して作成した各モデルの解析結果を整理した。

4.2.3.1. モデル化範囲

数値解析において計算分解能は重要であり、特に粉体内部のせん断帯の発達過程の計算精度は厚さ方向の分割によるところが大きいと考えられる。一方で、本検討ではダイレイタンスの抑制を意図して広い粒径分布の解析モデルを想定しており、計算効率の観点からは厳しい条件となっている。そこで、解析のモデル化領域は本来、模型寸法の通りとするべきであるが、影響の小さい範囲でモデル化範囲の再検討を行い、解析モデルの縮小による計算規模の抑制を図った。

実験供試体材料の小麦粉は付着力が大きく、十分に締め固められた条件であれば自立可能な強度を発現する。そのため、変状の様相としては亀裂が進展していくようなものであり、変形が局所的であることからモデル化範囲は模型の断層基底から両側に 80mm の範囲とした。実際の試験装置の内寸幅は 415mm あるが、実験結果の整理を行っている範囲は狭く、モデル化範囲はこの範囲とほぼ同じである。

4.2.3.2. 解析ケースと解析モデル

解析ケースは上述の通り、断層角度と変位方向の違いにより計 4 ケースである。室内模擬実験では模擬地盤の層厚が実施ケース毎に異なり、また模型内の位置によって多少のばらつきが存在する。解析では実験ケース間や模型内のばらつきを考慮してケース毎に平均層厚のモデルを作成した。表 4.2.4 に解析ケースの一覧を示し、解析モデルを図 4.2.8 から図 4.2.11 に示す。なお、Case 60n のみ最終的な断層変位は 5mm の条件となっている。

表 4.2.4 解析ケースの一覧

ケース名	断層変位	断層角度	模擬地盤層厚
Case 30n	逆断層 8 mm	30 度	24 mm
Case 60n	逆断層 5 mm	60 度	24 mm
Case 30p	正断層 8 mm	30 度	26 mm
Case 60p	正断層 8 mm	60 度	26 mm

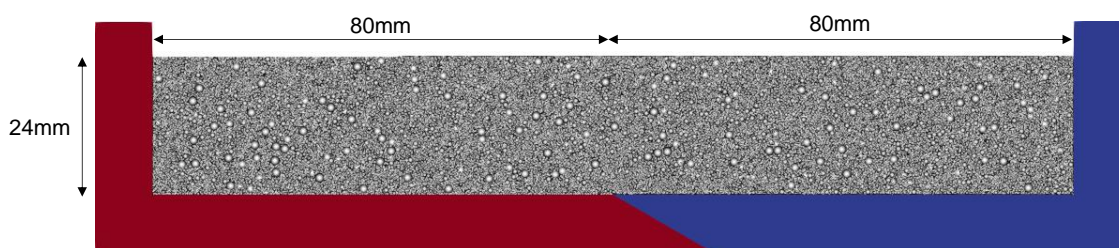


図 4.2.8 Case 30n の解析モデル

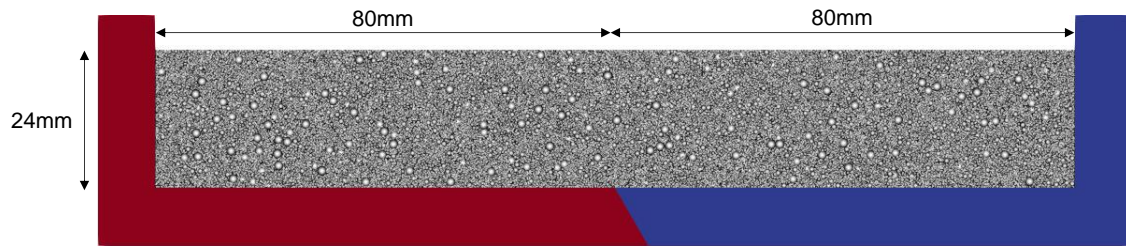


図 4.2.9 Case 60n の解析モデル

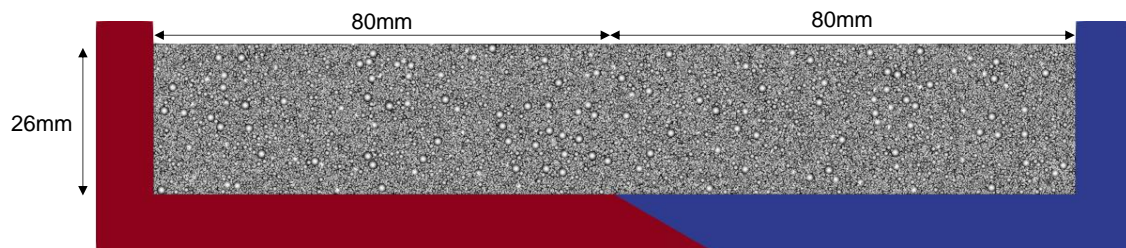


図 4.2.10 Case 30p の解析モデル

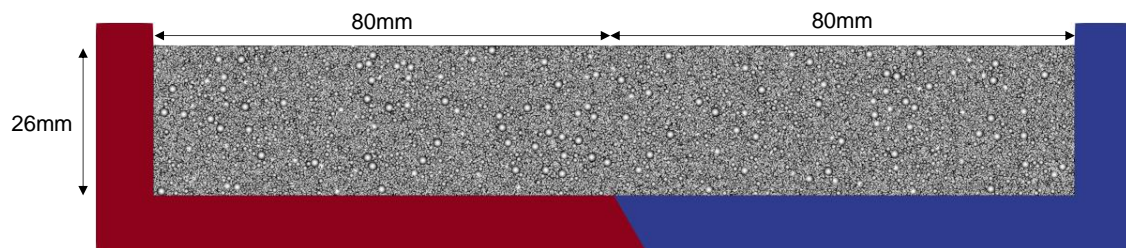


図 4.2.11 Case 60p の解析モデル

4.2.4. 再現解析結果

個別要素法による室内模擬実験の再現解析の結果をケース毎に整理した。地盤変状の程度を把握する上でせん断ひずみの評価は重要であり、Cardozo & Allmendinger (2009)を参考にして事前検討の成果として導入した鈍りの小さい大変形ひずみの算定方法を使用している。

4.2.4.1. 各ケースの結果

各ケースの変位段階毎の変状と最大せん断ひずみの分布を図 4.2.12 から図 4.2.15 に示す。

Case 30n では断層変位の小さい段階で断層傾斜に近い角度でせん断帯が発達し、表層まで至るせん断帯が形成されている。また、主断層の形成角度とほぼ同じ角度で反対側にバックスラストが確認でき、断層変位が大きい段階になるとより浅部にもバックスラストが生じている。断層角度の小さいケースでは水平変位成分が大きく、強い圧縮場となるために内部摩擦角に依存する破壊が生じ易いと考えられる。

Case 60n においても同様に小さい変位段階で表層まで至るせん断帯が進展し、この傾斜は断層角度より小さく、また表層付近で屈曲して角度が小さくなる傾向が認められる。この原因は摩擦力に拘束圧依存性があるため、表層に近づくと骨格構造が軟化するためと考えられる。高角度ケースは変位の鉛直成分が大きいため、低角度ケースに比べて純せん断的な変状を示し、せん断ひずみの分布は局所化している。

Case 30p では小さな変位段階で引張破壊による亀裂が生じており、模擬地盤底面の断層の基底からほぼ真上まで開口するような破壊形態となっている。微細粒子間に働く付着力をモデル化しているため、開口して以降も断面は崩壊することなく自立している。ほぼ純引張のような現象となっており、せん断ひずみ量が他ケースに比べて小さい。

Case 60p においても 30 度ケースと同様に引張破壊による亀裂が生じている。低角度ケースに比べると水平変位成分が小さいため、正断層ケース同士で比較するとせん断ひずみ量は大きくなっている。なお、断層の基底から真上に亀裂が進展し開口する傾向は同じである。

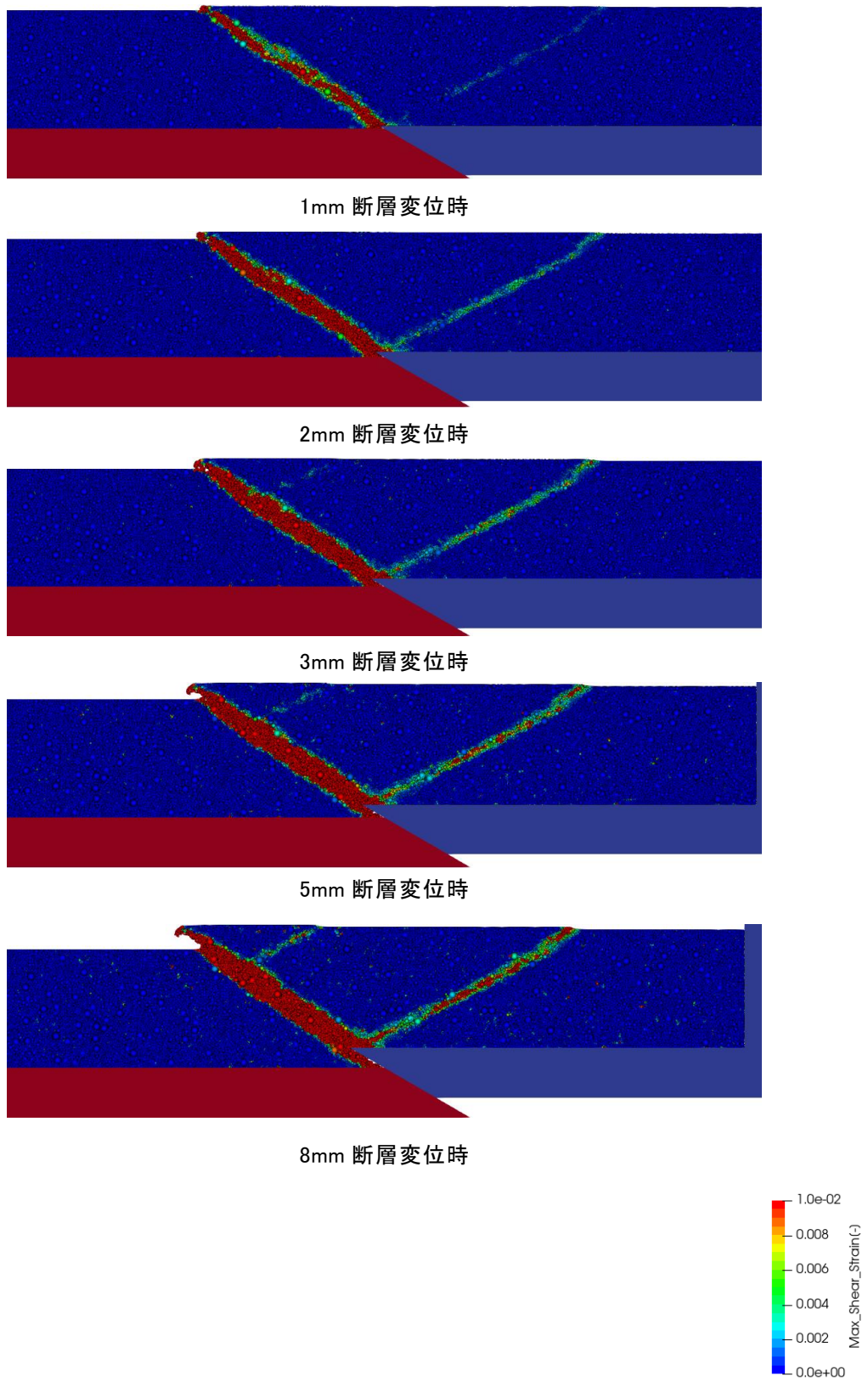


図 4.2.12 Case 30n の各段階における変状と最大せん断ひずみ分布図

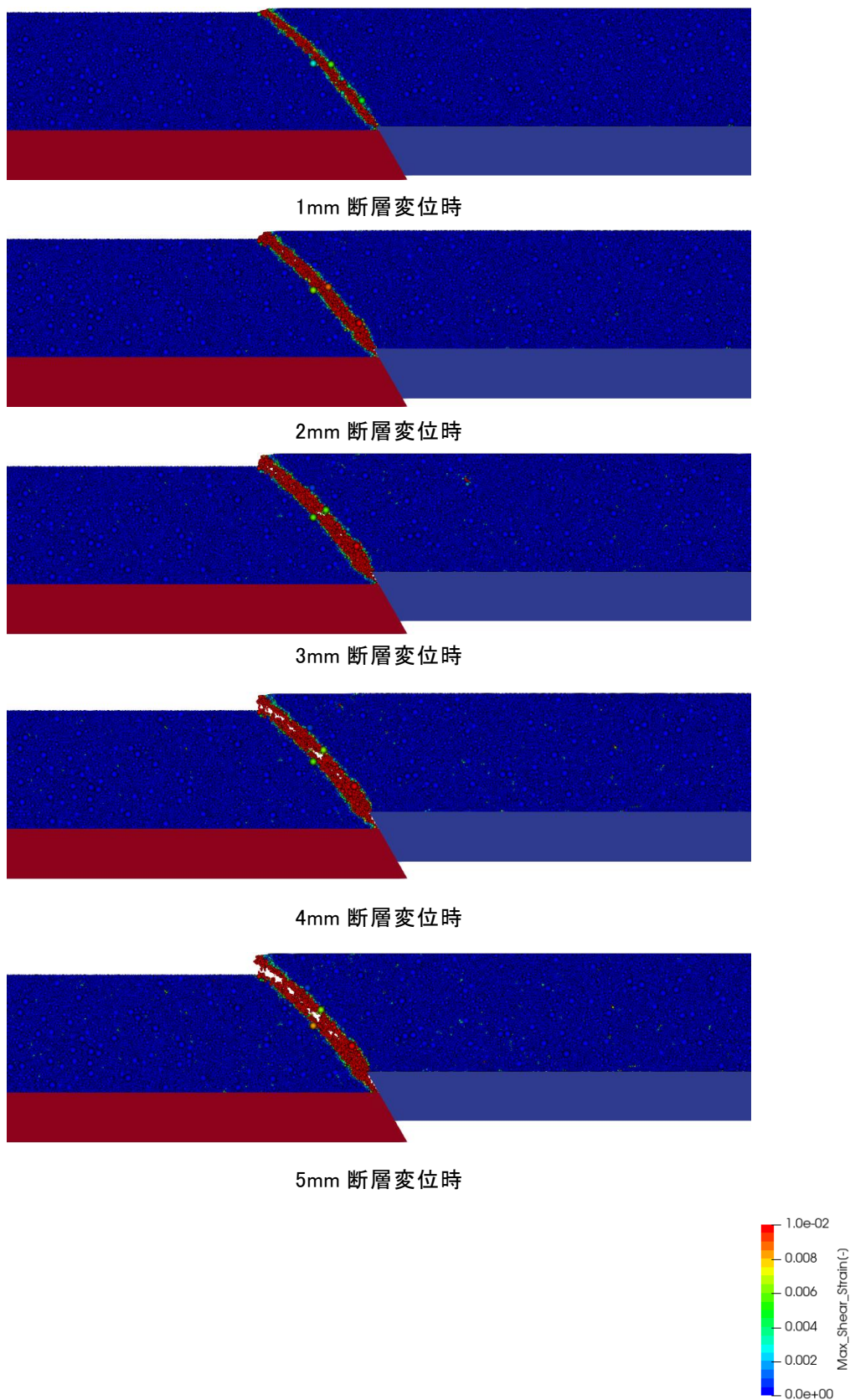


図 4.2.13 Case 60n の各段階における変状と最大せん断ひずみ分布図

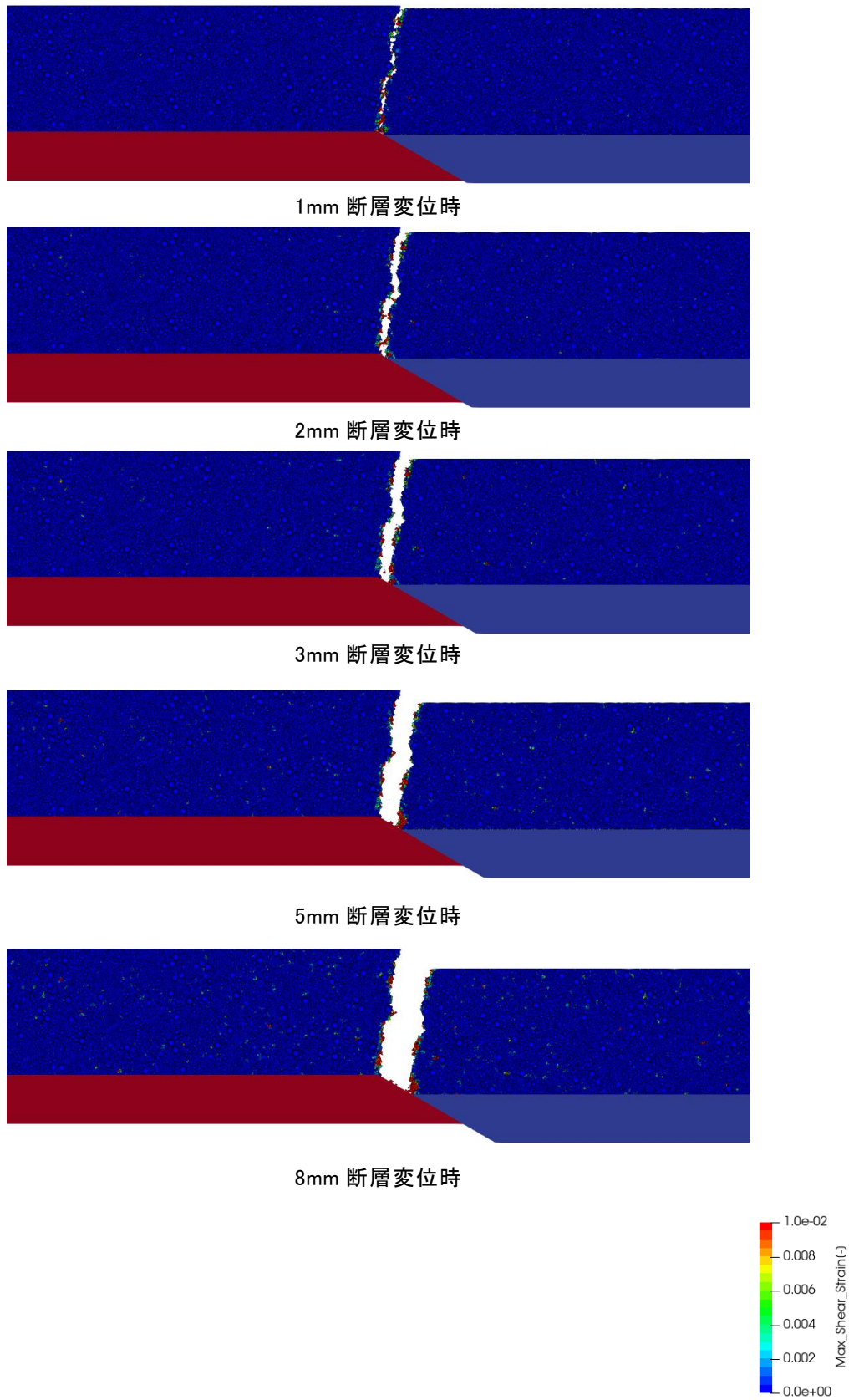


図 4.2.14 Case 30p 各段階における変状と最大せん断ひずみ分布図

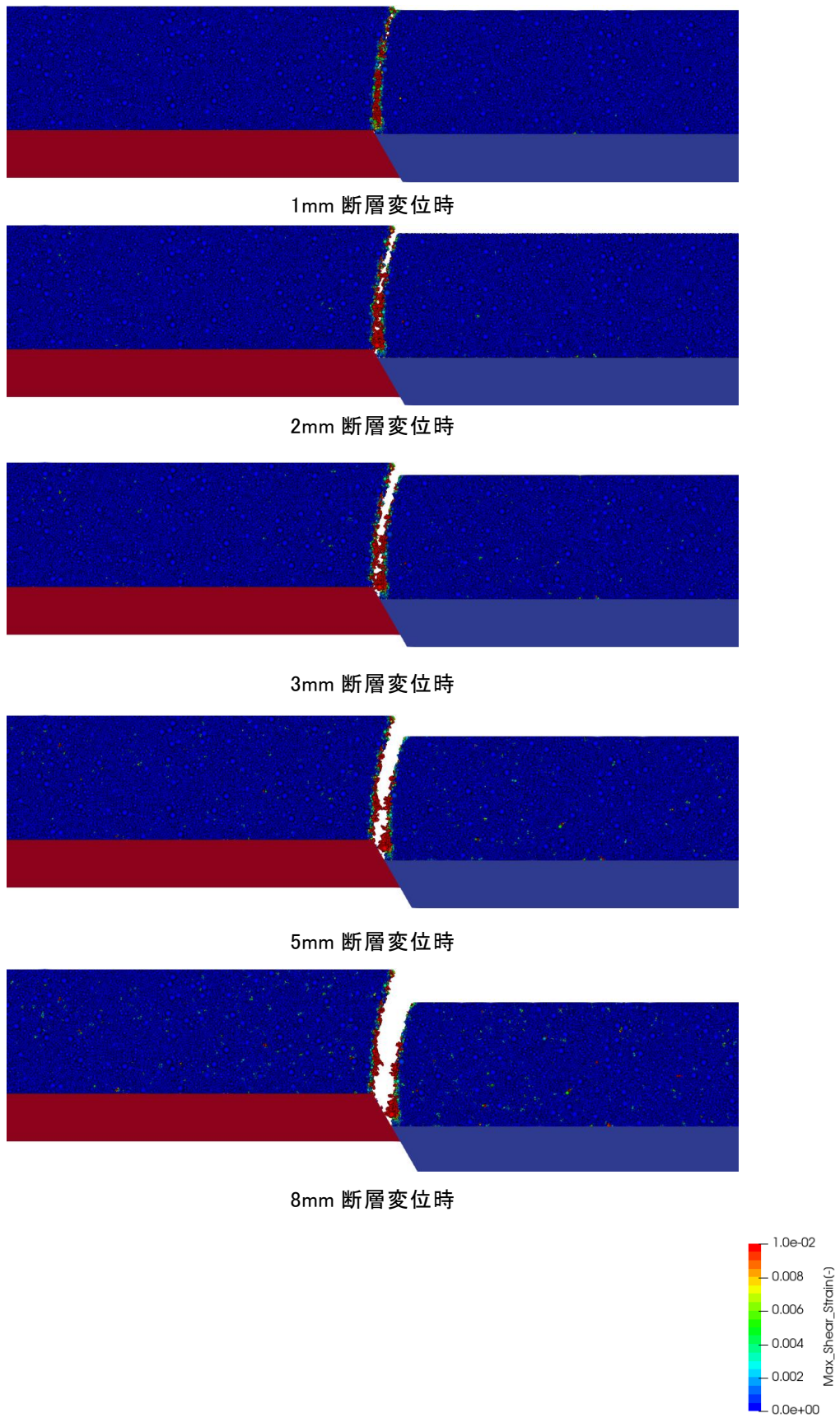


図 4.2.15 Case 60p の各段階における変状と最大せん断ひずみ分布図

4.2.4.2. 室内模擬実験結果との比較

室内模擬実験では模型上部から撮影で点群データを取得しており、表面形状のみであるが断層変位の各段階に対応する高さ分布を整理している。縦ずれ断層変位は 2 次元的な現象であるが、実験で用いる模擬地盤には 3 次元的な不均質や位置によって実験装置による拘束効果があり、2 次元体系を想定した数値解析結果との直接の比較は難しい。本検討では実験結果の表面高さデータより、初期段階の高さを解析結果に合わせ、解析結果の各変位段階に対応する変状図と比較を行った。

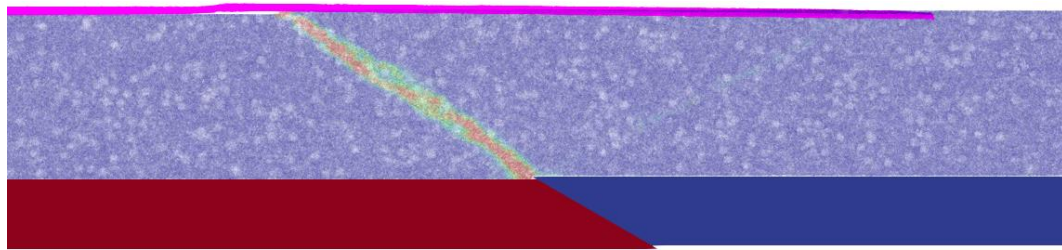
各ケースの変位段階毎の変状と最大せん断ひずみの分布図を半透明とし、実験結果の表面形状を示す点群をマゼンタ色で重ねて描画して、図 4.2.16 から図 4.2.19 に示す。

Case 30n と室内模擬実験結果の比較では、形成される主断層の傾斜は実験結果の方がやや小さい結果となっている。大まかな変状形態としては整合的であるが、微細粉体の強度は締固め具合に大きく依存するため、内部摩擦角に少し違いが生じている可能性がある。

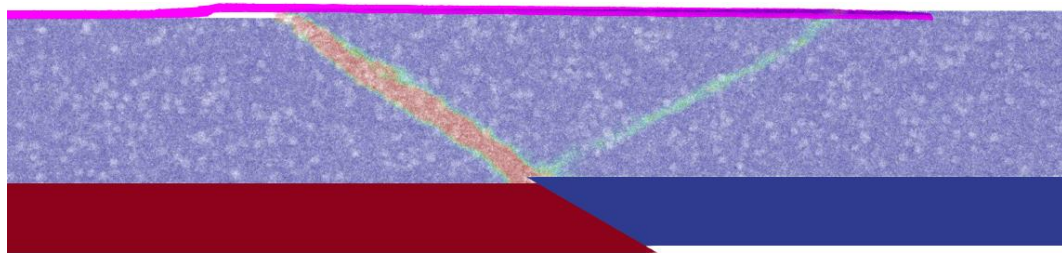
Case 60n と室内模擬実験結果の比較では、30 度ケースより更に実験結果の方が主断層の傾斜が小さい傾向にある。これは底部から発達するせん断帯が表層で屈曲する影響だけでなく、底部から浅い角度で破壊が進展していると考えられる。なお、本事業の数値解析の試行ケースの中には同様に浅い角度でせん断帯が発達した事例もあり、僅かな強度の違いや 3 次元的な拘束効果の影響が大きいと考えられる。

Case 30p と室内模擬実験結果の比較では、ともに断層の基底からほぼ真上に亀裂が進展して開口していることが確認できる。3 次元的な変状を示す実験結果に多様な開口パターンが見られるが、これらの断面の中には解析結果と非常に整合的に開口した割れ目が見られる。2 次元体系の数値解析では引張破壊により生じる開口は単純であるが、3 次元的な影響を考慮すると複雑な変状過程が再現されるものと考えられる。

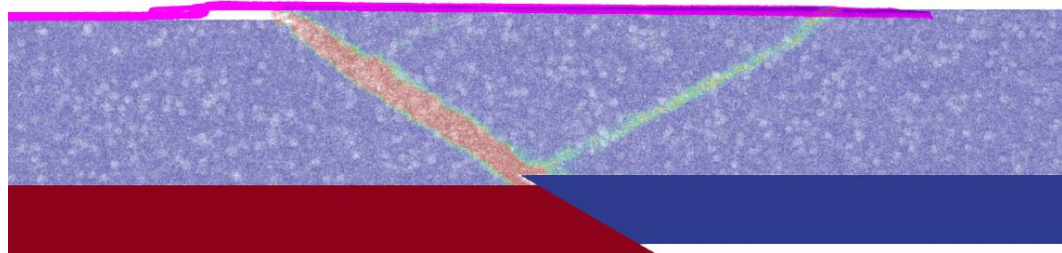
Case 60p と室内模擬実験結果の比較においても、30 度ケースと同様に実験と解析で似たような開口パターンが認められる。ただし、実験では容器の拘束効果があるためか部分的にもたれかかるような複雑な破壊形態が見られる。なお、断層の基底から真上に亀裂が進展し開口する傾向は実験と解析で整合的である。



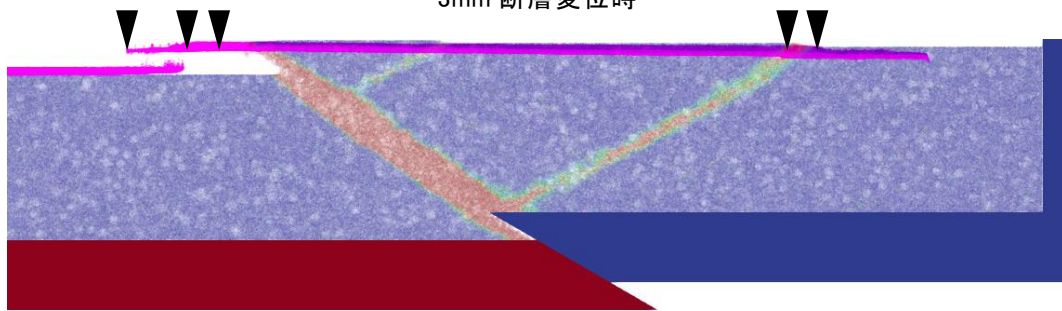
1mm 断層変位時



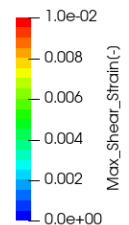
2mm 断層変位時



3mm 断層変位時



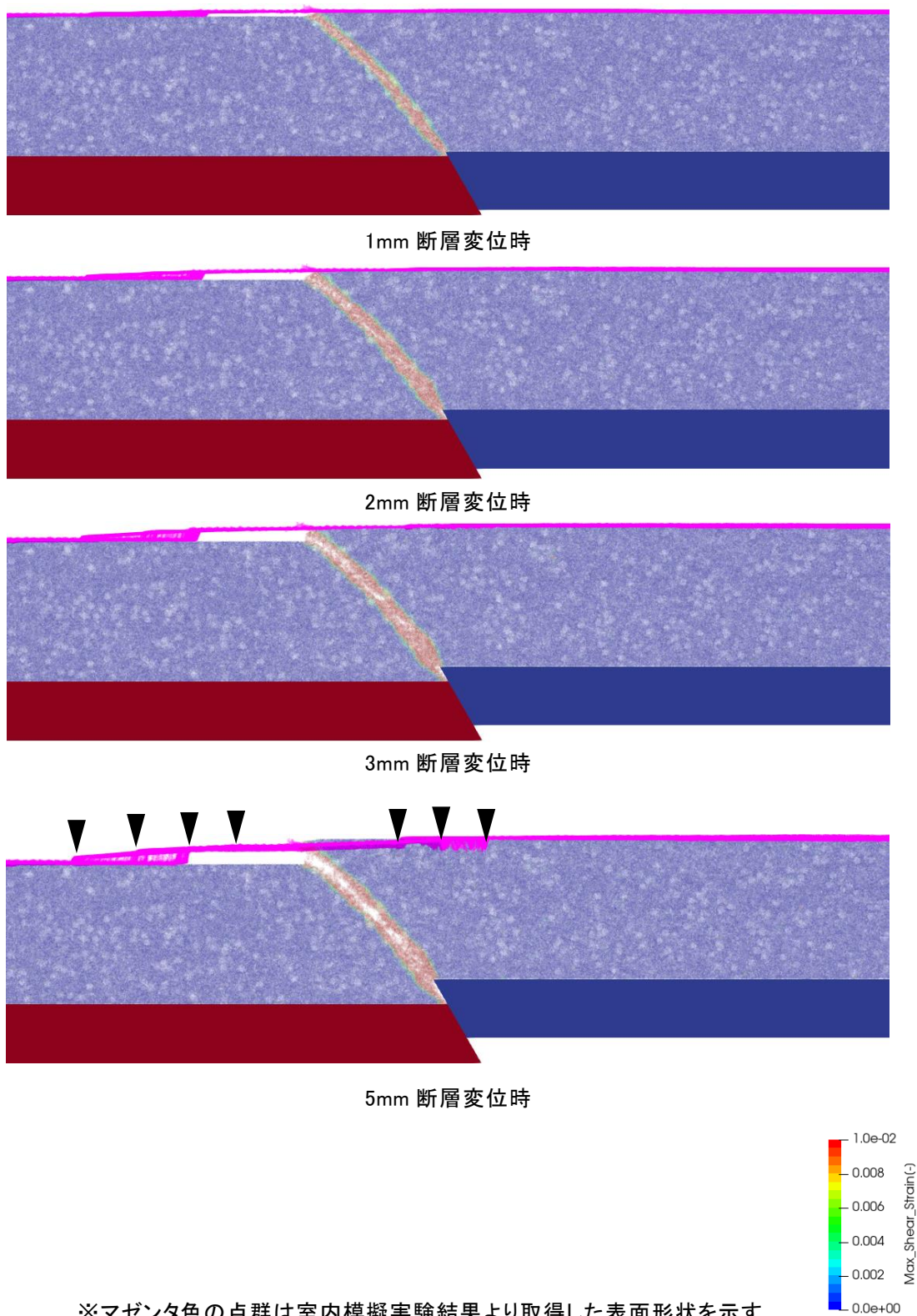
8mm 断層変位時



※マゼンタ色の点群は室内模擬実験結果より取得した表面形状を示す。

▼ は最終断層変位段階までに見られた主な開口位置を示す。

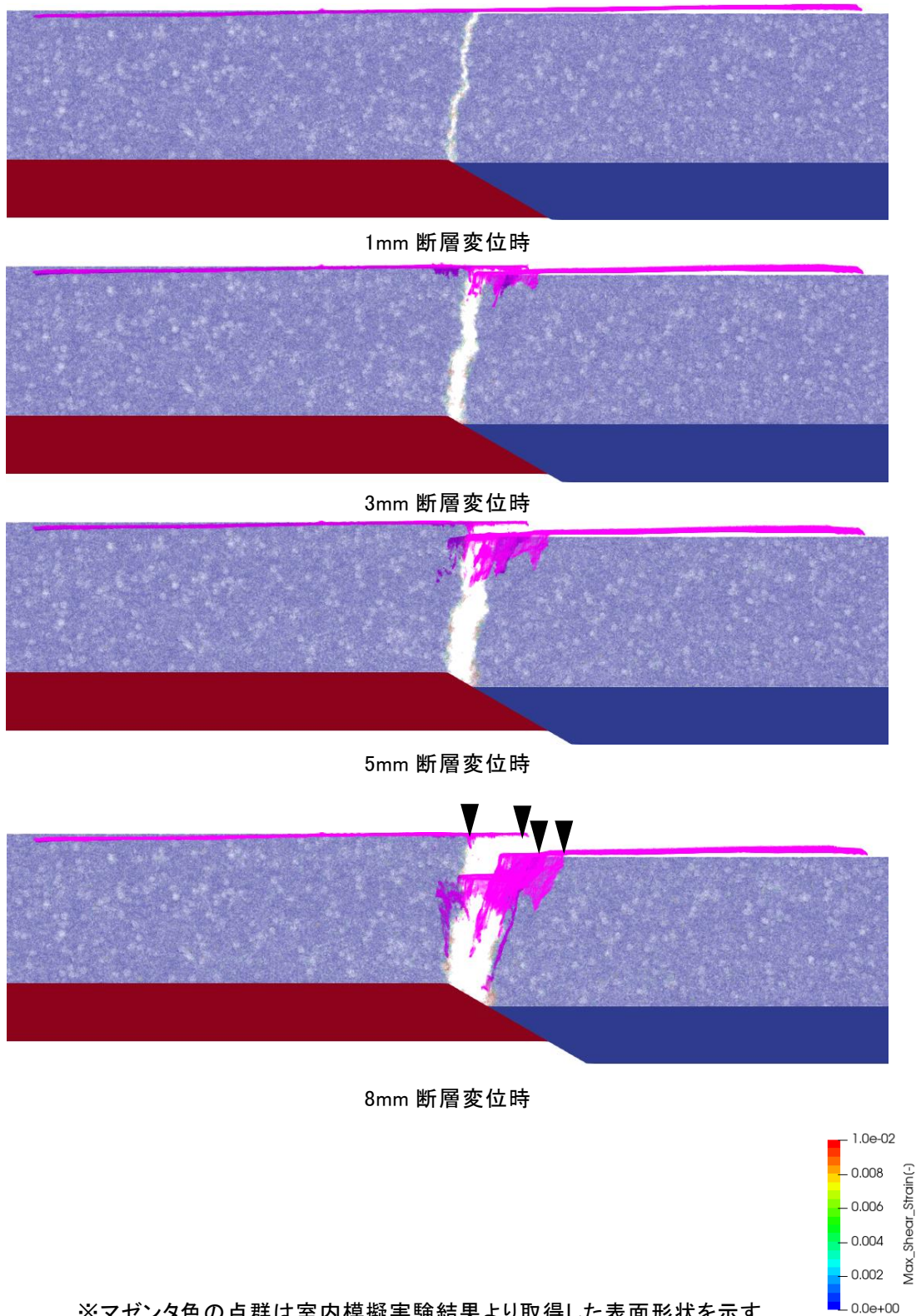
図 4.2.16 Case 30n の各段階における変状と実験結果の表面形状の比較



※マゼンタ色の点群は室内模擬実験結果より取得した表面形状を示す。

▼ は最終断層変位段階までに見られた主な開口位置を示す。

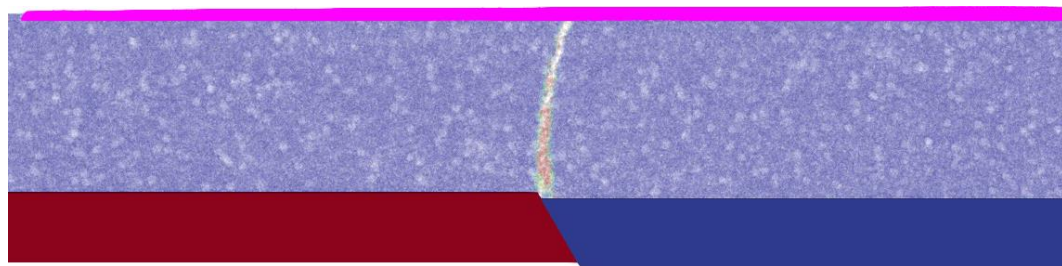
図 4.2.17 Case 60n の各段階における変状と実験結果の表面形状の比較



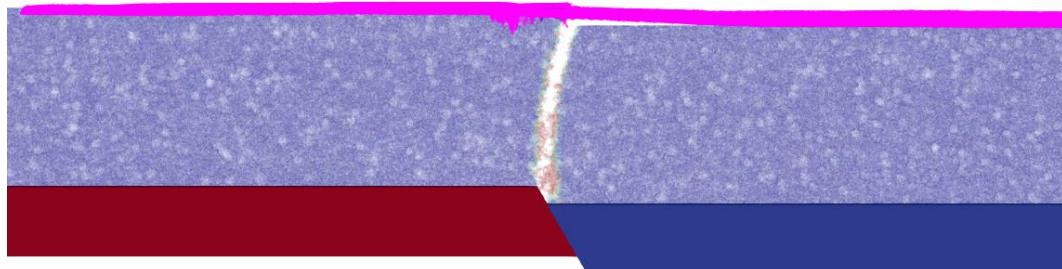
※マゼンタ色の点群は室内模擬実験結果より取得した表面形状を示す。

▼ は最終断層変位段階までに見られた主な開口位置を示す。

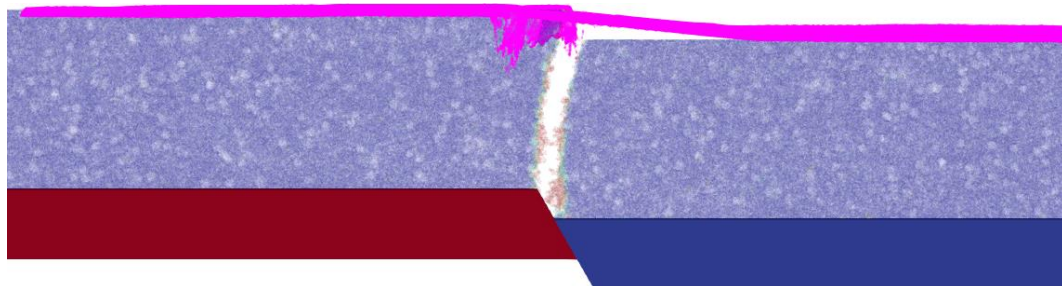
図 4.2.18 Case 30p の各段階における変状と実験結果の表面形状の比較



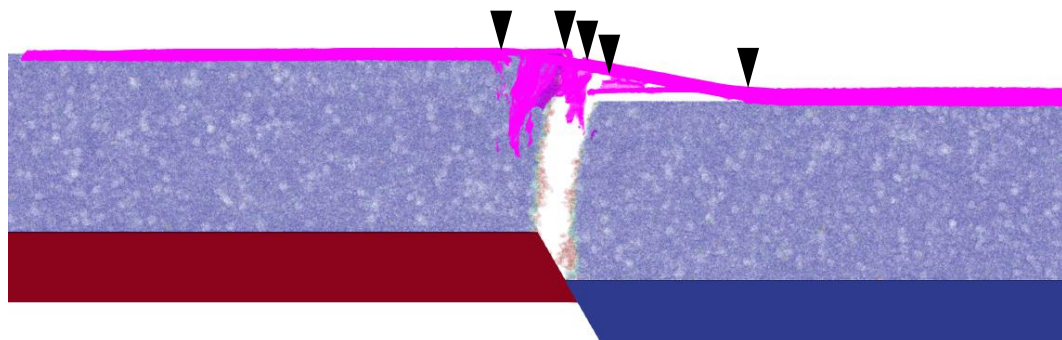
1mm 断層変位時



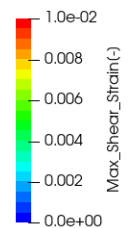
3mm 断層変位時



5mm 断層変位時



8mm 断層変位時



※マゼンタ色の点群は室内模擬実験結果より取得した表面形状を示す。

▼ は最終断層変位段階までに見られた主な開口位置を示す。

図 4.2.19 Case 60p の各段階における変状と実験結果の表面形状の比較

4.3. 断層変位に関する数値解析のまとめ

本章では、本事業で実施した室内模擬実験の内、縦ずれ断層を対象としたケースの再現解析を行った。解析手法として個別要素法を採用し、過年度事業における既往検討からダイレイタンスの影響が大きいことが考えられたため、面外方向の変形も考慮するなどの解析上の工夫を行った。また、再現解析の実施前にダイレイタンスの抑制のために粒度分布の影響を確認する検討や、鈍りの小さい大変形ひずみを考慮するための手法の検討を実施した。

縦ずれ断層変位を想定した 2 次元体系の個別要素法解析を実施する上で、噛み合った粒状体骨格がせん断変形時にずれを生じて現れる嵩の変化、いわゆるダイレイタンスの影響を抑制するための事前検討を行い、得られた成果を以下に示す。

- ◆ 2 次元解析でダイレイタンスが大きくなる要因は面外自由度を考慮しないために変形し難く、せん断変形時には嵩の変化が大きくなることや、円筒要素を用いるために間隙率が小さいことに起因して正のダイレイタンスが大きいたことが原因である。そのため、面外方向に極薄い奥行と変形自由度を考慮し、面外を周期境界として球要素を用いることで 2 次元体系を対象としたダイレイタンスを抑制した解析が可能である。
- ◆ 粒径の分布幅が狭く均等係数が著しく小さい条件では、粒状体は最密充填構造を形成し易く、そのためダイレイタンスが大きくなる。なお、一般に地盤材料として性質の良い粒度条件として、均等係数と曲率係数の目安があり、これらの条件を変動させて一面せん断試験の要素シミュレーションを実施し、均等係数で 2.0 程度、曲率係数で 1.5 程度あればダイレイタンスが抑制されることを確認した。
- ◆ 断層変位による破壊過程では大きなひずみが生じるため、空間を格子分割して含まれる要素の平均変位を用いたひずみ評価手法が有効であるが、平均計算による鈍りを生じるため極めて高い分解能が必要となる問題がある。そこで、メッシュフリー法などで見られるような最小二乗法のアルゴリズムを採用し、評価点近傍の変位分布から変形勾配を計算し、平均計算を行わない大変形ひずみの評価方法を使用することで鈍りの小さいひずみ評価が可能となった。

室内模擬実験の再現解析では、小麦粉の微細粒子が持つ付着力を再現するため van der Waals 力を考慮し、強度特性は一面せん断試験の結果を再現するようにして設定した。縦ずれ断層変位として逆断層と正断層変位を想定し、合計 4 ケースの解析を実施し、再現解析結果から得られた成果を以下に示す。

- ◆ 微細粒子間に働く力としては重力などより付着力の方が大きく、粉体粒径の粗視化と van der Waals 力を考慮することで粉体層が自立可能な強度を発現させることも可能である。また、非常に疎な粉体層骨格をモデル化することも可能であるが、少ない接触点で摩擦角を再現するには極端に大きな摩擦係数の採用が必要であり、破壊過

程のシミュレーションを行う上ではダイレイタンスが抑制可能な範囲である程度密なモデル化を行う方が妥当な結果となる。

- ◆ 逆断層変位を想定したケースでは、断層角度が低角度である場合にはそのままの傾斜で表層まで破壊が進展する傾向にある。また、バックスラストが見られる。一方で、高角度である場合、表層に至るまでにせん断帯が屈曲して低角度化する傾向が見られる。これは、摩擦力に拘束圧依存性があるため、鉛直変位成分が大きい条件で見られる現象と考えられる。
- ◆ 逆断層実験の高角度ケースでは解析結果に比べて更に低角度化し、遠方に表層変位が生じる部分が見られるが、これは締固めの不均質性などにより浅い角度で破壊が生じた断面が含まれるためと考えられる。解析検討においても僅かな締固めの違いにより、2方向にひび割れが進展するなどの事例が見られ、3次元的不均質が複雑な破壊進展に影響を与えていると考えられる。
- ◆ 正断層を想定したケースでは、小さな変位段階で引張破壊が一斉に生じるため、低角度ケースも高角度ケースも模擬地盤底面の断層位置からほぼ真上に進展するような亀裂が生じて開口する。このような亀裂の進展は室内模擬実験結果でも見られ、断面によっては実験と解析は整合的な結果となっている。一方で、室内模擬実験では3次元的不均質や拘束効果があるため、複雑な破壊現象も現れている。
- ◆ 微細な粉体の付着特性を適切にモデル化することで粉体層の破壊進展過程は精度良く解析可能である。実験結果に見られる複雑な表層破壊の再現には3次元的不均質や拘束効果の考慮が必要であり、3次元体系の数値解析を実施することによりある程度再現可能になると考えられる。なお、実地盤条件の強度特性は粉体材料とは異なるものであるが、同様に適切なモデル化を行うことで数値解析の適用が可能である。

4.4. 参考文献

- 1) N. Cardozo, R. W. Allmendinger (2009), SSPX: A program to compute strain from displacement/velocity data : Computers & Geosciences 35, pp.1343-1357.
- 2) 構造計画研究所 (2019), 平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費 (断層変位評価に係る知見の整備)事業報告書,平成 31 年 3 月.
- 3) 竿本 英貴, 吉見 雅行, 国松 直 (2005), 横ずれ断層運動に伴うせん断帯発達過程に関する DEM シミュレーション, 土木学会地震工学論文集, 28 巻, pp.179-185.
- 4) 酒井 幹夫, 山田 祥徳, 茂渡 悠介 (2010), 付着力を考慮した DEM 粗視化モデルによる流動層の数値解析, 粉体工学会誌, Vol.47, pp.522-530.
- 5) 谷山 尚 (2008), 横ずれ断層によって表層地盤に形成されるせん断帯-DEM による解析-, 土木学会論文集 C, Vol.64 No.3, pp.485-494.
- 6) 増田 弘昭 (1997), 粉体粒子の付着力・凝集力, 電子写真学会誌, Vol.36, No.3, pp.169-174.

5章 まとめ

5.1. 副断層に関する調査

5.1.1. 地表変状発生位置の定量的な抽出方法の検討

地震時の微小な地表地震断層を捉える方法として、過年度事業において干渉 SAR 解析のうち LC-InSAR 図や光学衛星データを用いた画像マッチング解析を行い微小な変位の抽出を行ってきた。その結果、LC-InSAR 図と画像マッチングを組み合わせることで、微小な副断層変位から大きな主断層変位までを確認することができることがわかってきている。一方で、現在の LC-InSAR 図は、定性的な目視判読によってラインデータとして表現されていることや、光学衛星画像データを用いた画像マッチングでの変位計測の精度が 60cm 程度であり、微小な変位を検出することができないことが課題であった。そこで、本事業では 2016 年熊本地震を対象として、定量的な LC-InSAR 図の作成及び画像マッチング解析の高精度化を行った。定量的な LC-InSAR 図の作成において、位相差の空間的ばらつきに着目した解析を実施することで既往トレンチ調査箇所での微小な変位が抽出できることを確認した。ただし、変位抽出結果には地表変位以外の変状も含まれており、今後も抽出方法の高精度化が必要である。画像マッチング解析の高精度化として、高解像度の空中写真（解像度 20cm）を用いて解析・精度検証を行った。空中写真の画像マッチング解析と三角測量成果との比較検討の結果、20cm 程度の精度で変位量図を作成することができることが判明した。また現地観測による変位箇所データとの比較結果でも、おおむね変位箇所を抽出できることを確認した。今回の画像マッチングを実施した空中写真の撮影範囲は 2016 年熊本地震により生じた変動範囲全体をカバーできていないため、この地震による微小変位の全体像を捉えるためには、本事業で実施した画像マッチング実施範囲の北東側等、より広域の画像マッチング解析を実施する必要がある。

本事業で検討した微小変位検出手法の性能を以下のように整理した。LC-InSAR 図では cm 単位の微小な変位を把握することができるが、変位勾配が大きい（狭域での変位量が大きい）と変位発生位置の把握は困難である。一方、画像マッチング解析では、変位勾配が小さくても変位発生位置の把握はできるが、cm 単位の微小な変位の把握は困難であることがわかった。以上の 2 手法を組み合わせることで地表変位発生位置の把握を行うことが重要である。

5.1.2. 表層付近の副断層の性状や活動履歴の検討

測地学的情報を用いた変動地形学的解析により地表変状発生位置を定量的に抽出した。抽出結果より地中レーダ探査を 16 地区（26 測線）、表面波探査を 7 地区（7 測線）で実施し、副断層トレンチ調査地点 2 箇所を選定した。出ノ口地区および小園地区におけるトレンチ調査の結果、いずれのトレンチにおいても熊本地震に先行する断層活動イベントを確認できた。

出ノ口トレンチでは熊本地震を含めて 3 回の断層活動イベントが識別された。熊本地震に先行するイベントは、イベントⅡが 1,289 cal.BP 以降、イベントⅢが 7.3 ka cal.BP 以降、1,879 cal.BP 以前、イベントⅣが 11,202 cal.BP 以降、9,909 cal.BP 以前の活動である。これら

の活動年代は布田川断層本体の活動年代とも整合的であり、断層本体と同時に活動している可能性がある。

小園トレンチでは 15,925 cal.BP 以降、最低でも 2 回の熊本地震に先行する断層活動イベントが識別された。小園トレンチは人工改変により表層が削剥されているため時間分解能が低く、活動履歴を細かく分離することができなかった。

熊本地震における過年度事業及び本事業における副断層位置でのトレンチの結果、布田川断層本体と同時期に活動したと解釈可能な断層活動イベントが概ね確認できている。しかしながら、副断層の活動イベントとして確認された時期には布田川断層本体のイベントの認定がないケース、あるいは布田川断層本体でのイベントがあるにもかかわらず、副断層のトレンチ内で断層活動イベントが確認できないケースも存在する。今後は、確認できた断層活動イベントの主断層と副断層の断層活動イベントの時間的な関連性の検討に加えて、断層活動イベントによって生じた変位量の大きさの違いと、その空間分布について着目した検討を進めていく必要がある。

5.1.3. 調査地点の地下構造及び副断層の 3 次元的な形状の検討

副断層のトレンチ調査候補地点および既往トレンチ調査地点において、地中レーダ探査及び表面波探査を実施し、地下構造および副断層の構造検討を実施したのに加えて、トレンチ調査を実施した出ノロ地点、小園地点および過年度においてトレンチ調査を実施した福原地点の 3 地区で格子状に地中レーダ探査を実施し、3 次元的な形状の検討を行った。

表面波探査から得られた浅部 S 波速度構造からは、断層構造を示唆するような明瞭な速度コントラストはみられなかった。しかしながら、LC-InSAR の位相不連続や地表で変状が確認された個所では S 波速度構造が側方に不連続となっている個所がみられた。したがって、地震時に副断層に相当するような変状を呈する場所は、地下に不連続構造あるいは変形構造を有する可能性が考えられる。地中レーダ探査から得られた反射面からは、地下構造のうち地層の分布形態について把握可能であることが明らかとなった。これらのことから、表面波探査および地中レーダ探査において比較的規模の大きな構造は確認できた一方で、横ずれが卓越した断層の性状や微小変位については識別が困難であった。今後、複数の探査測線から 3 次元的な構造の形状を推定する事例を増やし、探査時及び形状推定時の留意点、イメージングの工夫などについて検討を進めていく必要がある。

5.2. 断層変位に関する室内模擬実験

5.2.1. 模擬地盤の物性

数値解析や実験結果を実地盤スケールに換算する際、模擬地盤の物理特性や力学特性が必要となる。小麦粉のような粉体は含水率によって強度が異なる可能性を考慮して、各試験は保存期間の異なる小麦粉を対象として実施し、時間経過による試料の物性の変化を検討した。得られた小麦粉の粘着力から長さに関する相似比をまとめた。

5.2.2. 縦ずれ断層室内模擬実験

小麦粉を模擬地盤として、模擬地盤底面の断層傾斜角度が高角（ 60° ）、低角（ 30° ）の逆断層・正断層の実験が可能な装置を用いて室内模擬実験を行った。模擬地盤底面の断層の延長を主断層、主断層以外を副断層として形成された断層構造の整理を行った。副断層は規模が小さい（断層長が短い断層や変位量が小さい）断層を副断層、規模の大きい断層を分岐断層と細分しても検討を行った。逆断層の場合、低角の実験結果の方が副断層の分布範囲が広い傾向にあった。主断層の地表到達位置は低角ではおよそ模擬地盤底面の基底断層延長上であるが、高角の場合は模擬地盤中で低角度となり、より下盤側に出現する傾向にあった。一方、正断層では模擬地盤底面の断層傾斜角度によらず、ほぼ基底断層の直上付近に主断層が出現する傾向にあった。また、高角の方が副断層の分布が広い傾向となった。逆断層・正断層にかかわらず、主断層・副断層・分岐断層ともに発生位置や変位量には実際の地表地震断層同様にばらつきがみられた。模擬地盤底面の断層に変位を与えると分岐断層は主断層とともに断層変位が大きくなるが、副断層は一旦形成された後は、断層変位が発生しない断層があった。また、模擬地盤底面の断層に変位の増大により副断層や分岐断層だった断層が主断層となる断層も観察された。室内模擬実験で得られた逆断層の副断層データを既往の確率論的断層変位ハザード解析で整理されている実際に観察された副断層データとの比較を行った。ばらつきは大きいものの両者は整合的な関係を示した。

5.2.3. 横ずれ断層室内模擬実験

横ずれ断層に関しても、小麦粉を模擬地盤とし層厚を変えた室内模擬実験を行った。模擬地盤底面の断層変位量の増加にともない、せん断断層が発達していく様子が確認された。今回の実験条件では、層厚が厚くなると形成されるせん断断層帯の幅が広がる傾向にあった。さらに、模擬地盤内部に発達する断層構造を把握するために X 線 CT 撮影を行った。表面では幅のあるせん断断層帯は地下では模擬地盤底面の基底断層に収斂する様子が確認された。

5.2.4. 今後の課題

5.2.2 や 5.2.3 の知見は限られた室内模擬実験によるため、より多くの実験結果を蓄積して整理することが重要と思われる。より多くのデータの蓄積により、断層出現位置や断層変位量のばらつきまで評価できる可能性がある。水平変位量や模擬地盤作成時の応力状態の把握は、実験結果の解釈や数値解析との比較に有効であると思われる。これらの計測は今後の課題である。

5.3. 断層変位に関する数値解析

本事業で実施した室内模擬実験の内、縦ずれ断層を対象としたケースの再現解析を行った。解析手法として個別要素法を採用し、過年度事業における既往検討からダイレイタンスの影響が大きいことが考えられたため、面外方向の変形も考慮するなどの解析上の工夫を行った。また、再現解析の実施前にダイレイタンスの抑制のために粒度分布の影響を確認する検討や、鈍りの小さい大変形ひずみを考慮するための手法の検討を実施した。

5.3.1. 事前検討

縦ずれ断層変位を想定した 2 次元体系の個別要素法解析を実施する上で、噛み合った粒状体骨格がせん断変形時にずれを生じて現れる嵩の変化、いわゆるダイレイタンスの影響を抑制するための事前検討を行った。

2 次元解析でダイレイタンスが大きくなる要因は面外自由度を考慮しないために変形し難く、せん断変形時には嵩の変化が大きくなることや、円筒要素を用いるために間隙率が小さいことに起因して正のダイレイタンスが大きいたことが原因である。そのため、面外方向に極薄い奥行と変形自由度を考慮し、面外を周期境界として球要素を用いることで 2 次元体系を対象としたダイレイタンスを抑制した解析が可能である。

粒径の分布幅が狭く均等係数が著しく小さい条件では、粒状体は最密充填構造を形成し易く、そのためダイレイタンスが大きくなる。なお、一般に地盤材料として性質の良い粒度条件として、均等係数と曲率係数の目安があり、これらの条件を変動させて一面せん断試験の要素シミュレーションを実施し、均等係数で 2.0 程度、曲率係数で 1.5 程度あればダイレイタンスが抑制されることを確認した。

断層変位による破壊過程では大きなひずみが生じるため、空間を格子分割して含まれる要素の平均変位を用いたひずみ評価手法が有効であるが、平均計算による鈍りを生じるため極めて高い分解能が必要となる問題がある。そこで、メッシュフリー法などで見られるような最小二乗法のアルゴリズムを採用し、評価点近傍の変位分布から変形勾配を計算し、平均計算を行わない大変形ひずみの評価方法を使用することで鈍りの小さいひずみ評価が可能となった。

5.3.2. 室内模擬実験の再現解析

室内模擬実験の再現解析では、小麦粉の微細粒子が持つ付着力を再現するため van der Waals 力を考慮し、強度特性は一面せん断試験の結果を再現するようにして設定した。縦ずれ断層変位として逆断層と正断層変位を想定し、合計 4 ケースの解析を実施した。

微細粒子間に働く力としては重力などより付着力の方が大きく、粉体粒径の粗視化と van der Waals 力を考慮することで粉体層が自立可能な強度を発現させることも可能である。また、非常に疎な粉体層骨格をモデル化することも可能であるが、少ない接触点で摩擦角を再現するには極端に大きな摩擦係数の採用が必要であり、破壊過程のシミュレーションを行う上ではダイレイタンスが抑制可能な範囲である程度密なモデル化を行う方が妥当な結果となる。

逆断層変位を想定したケースでは、断層角度が低角度である場合にはそのままの傾斜で表層まで破壊が進展する傾向にある。また、バックスラストが見られる。一方で、高角度である場合、表層に至るまでにせん断帯が屈曲して低角度化する傾向が見られる。これは、摩擦力に拘束圧依存性があるため、鉛直変位成分が大きい条件で見られる現象と考えられる。

逆断層実験の高角度ケースでは解析結果に比べて更に低角度化し、遠方に表層変位が生じる部分が見られるが、これは締固めの不均質性などにより浅い角度で破壊が生じた断面が含まれるためと考えられる。解析検討においても僅かな締固めの違いにより、2 方向にひ

び割れが進展するなどの事例が見られ、3次元的な不均質が複雑な破壊進展に影響を与えていると考えられる。

正断層を想定したケースでは、小さな変位段階で引張破壊が一斉に生じるため、低角度ケースも高角度ケースも模擬地盤底面の断層位置からほぼ真上に進展するような亀裂が生じて開口する。このような亀裂の進展は室内模擬実験結果でも見られ、断面によっては実験と解析は整合的な結果となっている。一方で、室内模擬実験では3次元的な不均質や拘束効果があるため、複雑な破壊現象も現れている。

微細な粉体の付着特性を適切にモデル化することで粉体層の破壊進展過程は精度良く解析可能である。実験結果に見られる複雑な表層破壊の再現には3次元的な不均質や拘束効果の考慮が必要であり、3次元体系の数値解析を実施することによりある程度再現可能になると考えられる。なお、実地盤条件の強度特性は粉体材料とは異なるものであるが、同様に適切なモデル化を行うことで数値解析の適用が可能である。