

奨励研究助成実施報告書

助成実施年度	2021 年度
研究課題（タイトル）	強震記録の自己相関関数解析による 3 次元地下構造点群データ構築 手法の開発
研究者名※	中川 尚郁
所属組織※	北海道大学大学院 工学院 建築都市空間デザイン専攻 都市防災 学研究室
研究種別	奨励研究
研究分野	その他
助成金額	80 万円
発表論文等	日本建築学会大術講演梗概集 2023 年 9 月

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

（ ）は、報告書提出時所属先。

大林財団 2021 年度研究助成実施報告書

所属機関名 北海道大学 大学院工学院
申請者氏名 中川尚郁

研究課題	強震記録の自己相関関数解析による 3 次元地下構造点群データ構築手法の開発
(概要) ※最大 10 行まで 本研究では、近年行われている都市のデジタルアーカイブ化や、インフラストラクチャーの維持管理のために取り入れられている 3 次元点群データに、地下構造の情報を取り入れることを目標としている。構造物を設計するうえで、将来、入力される強震動は重要な情報源である。特に強震動の S 波部分や後続波を精度良く予測するためには、地下構造の層境界面深さや形状、各層の S 波速度や密度を把握することが必要不可欠である。本研究の主題は、従来の単一強震観測点における強震動記録の自己相関関数解析に、層境界面の傾斜構造の推定を導入することである。テストフィールドは、複雑な地下構造を有し、2018 年北海道胆振東部地震で余震記録が蓄積されている勇払平野とする。さらに、仮想地下構造点群データを用いた 3 次元有限差分法による数値シミュレーションにより、自己相関関数の形状と傾斜構造の関係を把握し、実記録の自己相関関数から傾斜構造を推定する。	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
近年、都市や重要文化財のデジタルアーカイブ化、インフラストラクチャーの維持管理のために 3 次元点群データの取得が取り組まれている。また、2021 年の静岡県熱海市で発生した土石流では被害確認に点群データの活用がなされており、発生前後の斜面状態の変化を把握するためや、発生要因の情報を入手するために重要視されてきている。本研究では、来たる大地震の強震動を精度良く予測するために、2000 年代初頭から構築が試みられている地下構造モデルを、深部から浅部までの 3 次元に点群データとして構築する手法の開発を試みる。強震動を予測するためには、震源モデル、伝播経路特性、地下構造モデルを評価する必要がある。地下構造モデルにおいて、現在、国立機関等により公開されているモデルは、長周期帯域に関しては精度良い地震動予測が実施されつつあるが、短周期帯域を左右する浅部のモデルが構築されているとは言い難い。浅部地下構造を推定することで、短周期帯域の強震動予測に貢献できる。さらに、盆地端部の構造を含む層境界面の傾斜情報を推定することにより、S 波の後続波を精度良く予測することに繋がる。傾斜情報を含めた浅部までの 3 次元地下構造点群データを構築すれば、震源から地表までを一貫した 3 次元地下構造点群データを取得でき、長周期から短周期までの広帯域や後続部分を考慮した強震動予測の高精度化に繋がる。さらに、コンピュータの性能が向上している現代において、BIM に移行しつつある構造・意匠・設備設計と、3 次元地下構造点群データを直接連動可能とすることで、統合性の高い設計手法が災害大国である日本において提案できる。	

2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究の目標である強震記録の自己相関関数（以降：ACF）解析による 3 次元地下構造点群データ構築の手法を開発するために、シミュレーションによる数値実験と、テストフィールド上の 4 つの観測点（図 1 の K-NET 鷗川；HKD126，臨時強震観測点；HUE01, HUE04, HUE05）を対象に、以下の項目を行った。

- 【A】 シミュレーションを用いて、強震記録の自己相関関数が、地下構造の層境界面の傾斜（以降：傾斜構造）による影響があるかを定性的に把握
- 【B】 実際に観測された強震記録に ACF 解析を適用するために、記録と地下構造データの収集
- 【C】 実際に観測された強震記録の ACF から、層境界面の傾斜情報を得られるかの把握

項目【A】

強震記録の ACF が傾斜構造による影響を受けるかを確認するために、仮想 3 次元点群データで傾斜構造モデルを作成した後、3 次元有限差分法（以降：3D FDM）により強震記録を計算し、ACF 解析を適用した。観測点と仮想モデルを図 2 に示す。観測点は傾斜構造の影響を把握するために緯度方向に 0.01° 刻みに配置し、速度構造に関しては、1.3-2.7 km/s の層境界面を水平成層構造とし、地震基盤面相当の 3.4 km/s の層を cosine 型の曲線とした。尚、緯度方向は各観測点に対する傾斜構造の影響を把握するために、複数の観測点を設置した。3D FEM の計算には、OpenSWPC⁽¹⁾を用い、グリッドサイズを $50 \times 50 \times 50$ m³ で、グリッド数は $550 \times 200 \times 700$ (経度方向，緯度方向，深さ方向)とし、吸収境界に観測点と震源に入らないように留意した。震源は点震源とし、震源時間関数を Kupper 型，ライズタイムを 0.1 秒，震源深さを 26 km，震源座標を観測点と同緯度，走向・傾斜角・すべり各を順に $204 \cdot 32 \cdot 13^\circ$ とし，経度は表 1 に示す。結果の一例として，図 3 に No. 1 の震源を用いた場合の Transverse 方向の加速度波形とその ACF, 0.5-2.0 Hz のバンドパスフィルターを施した ACF を示す。震源から観測点が離れる程，初動部分が遅れていることが確認できる。後続のシグナルは，層境界面による反射を表しており，18 秒以降のシグナルは傾斜部分を表している。これらの加速度波形の ACF（図 3 右）は，フィルターの有無に関係せずに 1.5, 3.0, 5.0 秒付近にシグナルが現れており，6.0-9.0 秒ではシグナルの位置が変化しながら現れる。また，フィルターを施すことにより，シグナルの明瞭

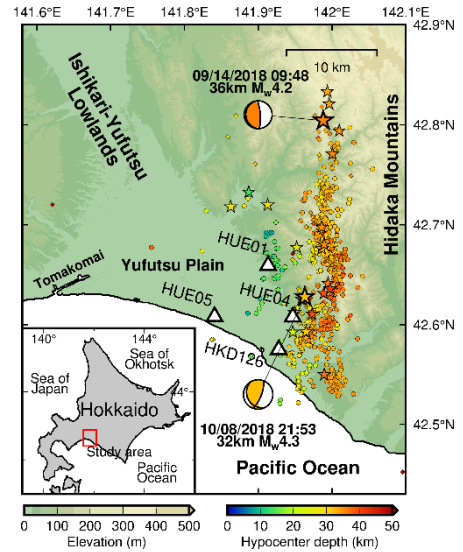


図 1 テストフィールド上の観測点と震源位置

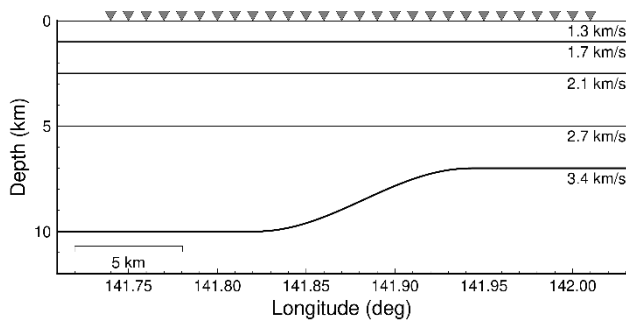


図 2 仮想モデルの断面図と観測点(逆三角形)

表 1 震源位置

No.	Long.	No.	Long.
1	141.74	6	141.83
2	141.76	7	141.86
3	141.78	8	141.89
4	141.80	9	141.94
5	141.82	10	141.98

性が向上することが確認できる．これらのシグナルの位置（以降：反射波走時）から構造を推定する．条件として，5 層の S 波速度と最表層の層厚が既知であるとし，全ての観測点に鉛直下方入射と仮定する．図 4 に各震源と各観測点の推定結果を示す．平行成層部分に関して，屈折により地震動の入射が垂直に近づいたことにより上層側の方は誤差が小さい．傾斜構造部分に関して，深い方よりも浅い方の誤差が小さく，特に震源位置が 141.94° より大きい場合には精度良く推定されている．また，どの震源位置においても， 141.94° の傾斜構造の推定精度は高い． 141.94° 未満における推定された傾斜構造は過小評価されている．この要因を確認するため，スナップショットを用いて確認した．図 5 にスナップショットの一例を示す．使用した記録は **Transverse** 方向であるため，S 波部分（スナップショットの緑）に着目すると，地表に入射した波が地表面で全反射し，15 秒付近では傾斜構造部分で反射される．傾斜構造の影響により， 141.83° 付近では反射波が早く到達し，浅く推定されたと言える．一方， 141.93° 付近における傾斜構造の反射波は，鉛直方向に近い反射が生じたため，推定精度が向上したと考えられる．

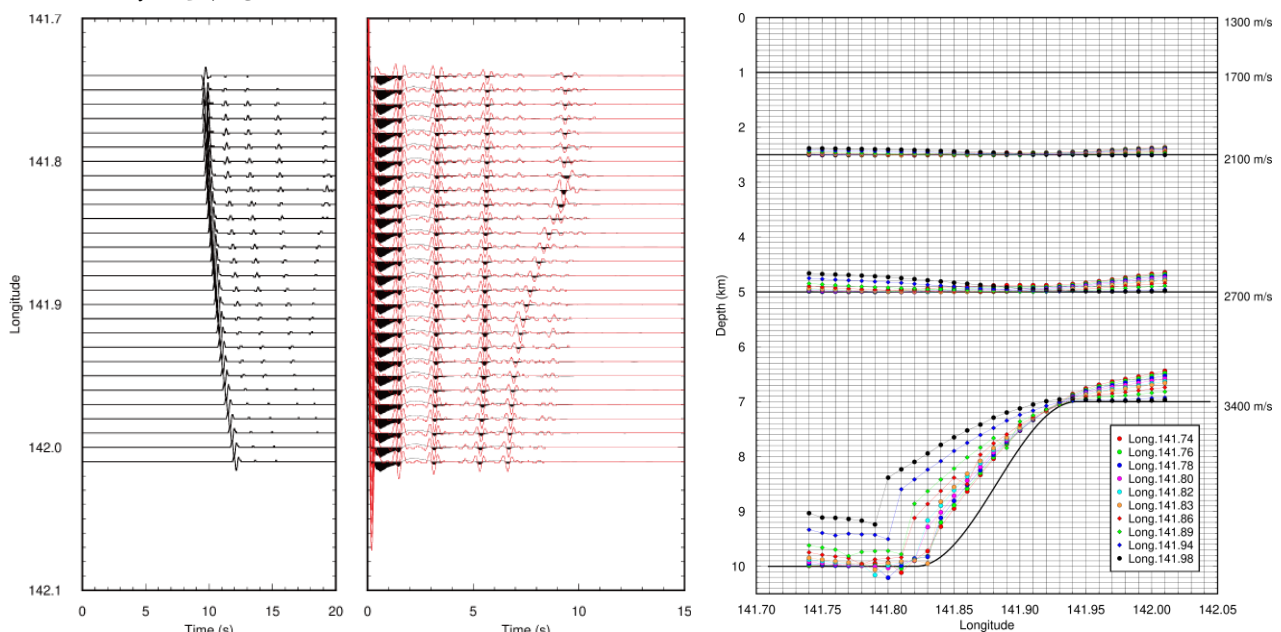


図 3 計算波形(左)とその ACF・フィルター ACF(右) 図 4 各観測点と各震源における構造の推定結果



図 5 スナップショットの一例，緑が S 波，赤が P 波を示す．

項目【B】

実際の強震記録に適用するために，強震記録と地下構造データの収集を行う．HKD126 は防災科学技術研究所⁽²⁾からダウンロードした記録を使用し，臨時強震観測点 HUE01, HUE04, HUE05 は連続記録の中から，Katsumata *et al.* (2019)⁽³⁾で推定された震源情報を元に，S 波部分を含むように 60 秒間

の記録を切り出した。収集した記録数と観測期間を表 2 にまとめる。さらに、データ管理を行いやすくするために、震源の緯度経度と深さ、各観測点の最大加速度、震源距離、震央距離、見かけの入射角（震央距離/震源深さ）、方位角をまとめたテーブルを作成した。地下構造データは、国立機関で公開されている J-SHIS V2⁽⁴⁾と JIVSM⁽⁵⁾を収集した、さらに、微動アレイ探査と表面波探査で推定された位相速度を用いて、遺伝的アルゴリズム(以降:GA)⁽⁶⁾を用いて逆解析で推定された浅部を含む HKD126 と HUE04 の構造⁽⁷⁾を収集した。HUE01 と HUE05 の工学的基盤以浅の速度構造を得るために、微動アレイ探査と表面波探査を実施して得られた位相速度⁽⁸⁾を収集し、GA により構造を得た。探査によって得られた位相速度と構造を図 6 にまとめる。

表 2 観測点情報と記録数, 観測期間

code	Latitude	Longitude	Altitude	Events	Observed Period
HUE01	N42.6593°	E141.9135°	22 m	554	2018/9/10-2018/10/15
HUE04	N42.6077°	E141.9470°	24 m	895	2018/9/9-2018/12/9
HUE05	N42.6081°	E141.8409°	3 m	618	2018/9/10-2018/11/26
HKD126	N42.5750°	E141.9279°	7 m	272	-

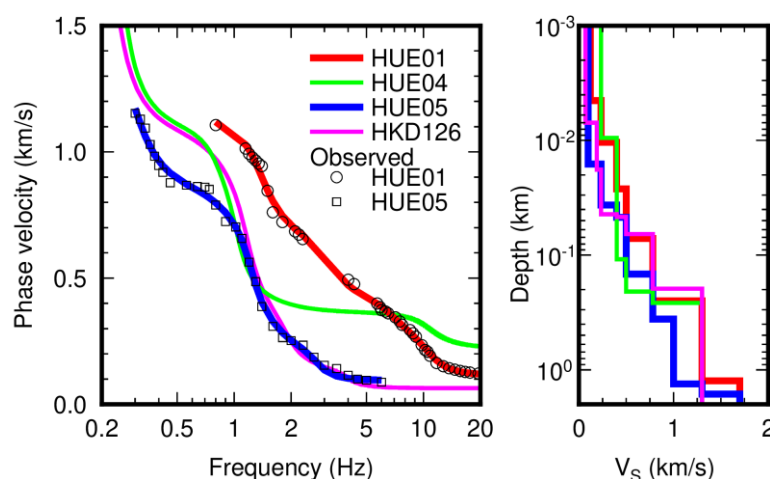


図 6 位相速度(左)と S 波速度構造(右)

丸と四角形は GA で用いた位相速度

項目【C】

各強震観測点で観測された強震記録の ACF が、傾斜構造による影響を受けるかを把握するために、震源分布ごとに ACF 解析を適用した。実際の強震記録には、周囲の環境によるノイズの影響を受けるため、はじめに強震記録から S 波が把握できる地震を選別した。また、本解析ではノイズを低減させるため、ACF にスタックを適用し、よりノイズの影響を低減させる Phase-weighted stack (以降: PWS)⁽⁹⁾も適用した。まず、傾斜構造の影響の有無を簡便に把握するために、地震数の多い HUE04 において、見かけの入射角が 30° 未満の強震記録を用いて、観測点から震央に対する方位角順に各強震記録の ACF を並べる(図 7)。1 秒付近に共通の谷が見られ、東から南側にかけて谷の形状が若干変化することが分かる。4 秒付近や 5.5 秒付近では、1 秒付近に比べて谷の明瞭さが欠けるが、谷の変化が見られる。項目【A】で確認した浅部の反射波走時はあまり変化しないことに対応していることが分かる。

また、深部側に相当する 4 秒以降の反射波走時の変化から、層境界面の傾斜していることが考えられる。また、図 7 左に示す全ての ACF に対してスタックと PWS を行った場合、浅部側の層境界に起因する谷は明瞭であるが、深部側に起因する谷は明瞭さに欠けることが分かる。特に PWS では、シグナルがほとんど見られない。傾斜構造の可能性を確認するために、震源深さ(30-35 km)と方位角(0-45° ; 北から北東)を固定し、震央距離ごとに PWS ACF を並べる(図 8)。浅部側に相当する 1, 1.6 秒付近の谷の反射波走時はあまり変化しないが、4.0, 5.5 秒付近の反射波走時は大きく変化していることが分かり、項目【A】と同様の傾向であると考えられる。

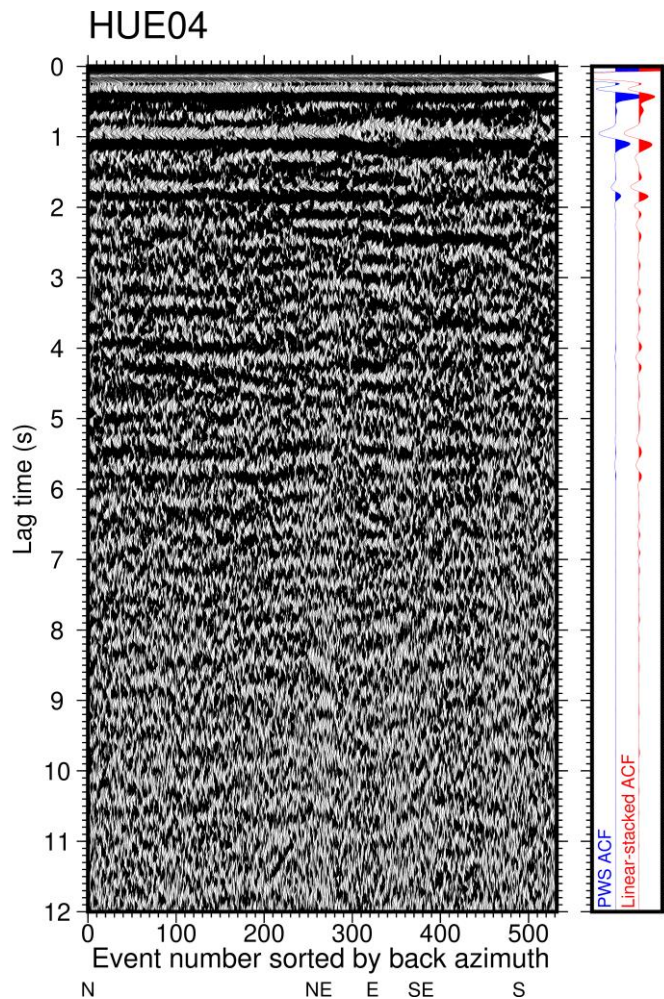


図 7 方位角順に並べた各強震記録の ACF(左)とそのスタックと PWS ACF(右)

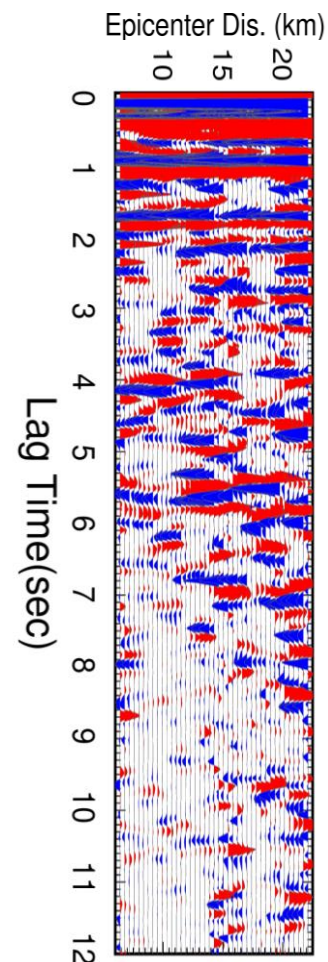


図 8 震央距離順の PWS ACF

参考文献

- (1) Maeda T, Takemura S, Furumura T (2017) OpenSWPC: an open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media. *Earth, Planets and Space* 69 (1):102. doi:10.1186/s40623-017-0687-2
- (2) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019) NIED K-NET, KiK-net. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Tsukuba. doi: [https:// doi.org/10.17598/nied.0004](https://doi.org/10.17598/nied.0004)
- (3) Katsumata K, Ichiiyanagi M, Ohzono M, Aoyama H, Tanaka R, Takada M, Yamaguchi T, Okada K, Takahashi H, Sakai S, Matsumoto S, Okada T, Matsuzawa T, Hirano S, Terakawa T, Horikawa S, Kosuga M, Katao H, Iio Y, Nagaoka A, Tsumura N, Ueno T, The Group for the Aftershock Observations of the 2018 Hokkaido Eastern Iwate Earthquake (2019) The 2018 Hokkaido Eastern Iwate earthquake (MJMA = 6.7) was triggered by a strike-slip faulting in a stepover segment: insights from the aftershock distribution and the focal mechanism

solution of the main shock. Earth Planets Space 71:53. doi: <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1032-8>

- (4) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019) J-SHIS Japan seismic hazard information station. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Tsukuba. doi: <https://doi.org/10.17598/nied.0010>
- (5) Koketsu K, Miyake H, Suzuki H (2012) Japan integrated velocity structure model version 1. In: Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering, Lisbon, 24–28 September 2012
- (6) 山中・石田：遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析，日本建築学会構造系論文集，第 468 号，pp 9-17, 1995.
- (7) Takai N, Shigefuji M, Horita J, Nomoto S, Maeda T, Ichiyanagi M, Takahashi H, Yamanaka H, Chimoto K, Tsuno S, Korenaga M, Yamada N (2019) Cause of destructive strong ground motion within 1–2 s in Mukawa town during the 2018 Mw 6.6 Hokkaido eastern Iburi earthquake. Earth Planets Space 71:67. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1044-4>
- (8) 中川・他：2018 年北海道胆振東部地震の臨時強震観測点における微動アレイ探索と自己相関関数解析による S 波速度構造の推定，日本建築学会 大会学術講演梗概集，pp.71-72, 2022.
- (9) Schimmel M, Paulssen H (1997) Noise reduction and detection of weak, coherent signals through phase-weighted stacks. Geophys J Int 130:497–505. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb05664.x>

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究では，ACF 解析により 3 次元地下構造点群データを構築するに向けて，以下の成果を出した．

- ①. 上述した 4 観測点における ACF 解析を用いた 1 次元地下構造の推定
- ②. ACF 解析による傾斜構造の検出
- ③. 数値シミュレーションによる傾斜構造の検討

項目①，②

ACF 解析は，初期構造を用いて，反射波走時と各層の速度から層厚をチューニングする解析である．そのため，浅部地下構造の情報も必要であり，既往の構造を参照，または実際に微動アレイ探索と表面波探索を実施して，観測点直下の 1 次元地下構造を推定した．次に，全観測点に対し，ACF 解析を実施し，傾斜構造による ACF の変化を把握した．使用する記録の条件は，各観測点に対して，見かけの入射角が 30° 未満で，目視で S 波部分が確認できる記録を使用した．ただし，HKD126 は記録数が少ないため，全地震を使用した．尚，パラメータに関しては試行錯誤で検討し，平滑化に用いたバンド幅は 1.0 Hz，フィルター範囲は HUE01 と HUE04 で 1.8-4.2，HUE05 と HKD126 で 0.5-2.0 Hz とした．既往の ACF 解析に関する研究では，対象地域とする地域の地下構造が比較的平坦であったため，ACF の反射波走時に変化が現れなかったが，本研究のテストフィールドでは，ACF の反射波走時に変化が現れた．図 9 に方位角 1° 刻みで ±10° 以内に 5 地震以上ある場合に PWS を実施した結果を示す．PWS ACF においても，方位角によって反射波走時が変化していることが分かる．例えば，HUE01 の反射波走時 6 秒付近において，方位角 50-90° 付近の見かけの入射角に大きな差はないが，青で示されている谷の位置が変化しており，傾斜構造の影響が伺える．傾斜構造を推定するためには，最初に観測点直下の 1 次元構造を推定する必要があるため，見かけの入射角が小さく，鉛直下方入射に近い地震を用いて構造を推定する．使用する強震記録は，HUE01 で 110 地震(方位角 45-100°)，HUE04 で 129 地震(方位角 40-130°)，HUE05 で 29 地震(方位角 80-105°)，HKD126 で 60 地震(方位角 0-35°) とした．PWS ACF と既往の構造を用いて計算した理論 ACF を図 10 に示す．4 秒より前に対応する浅部構造は，微動アレイ探索と表面波探索の結果を参照するとして，今回の推定対象外とした．対象とする 4 秒以降の反射波走時は，既往の構造の理論走時(Two-way travel time)と合致していない．

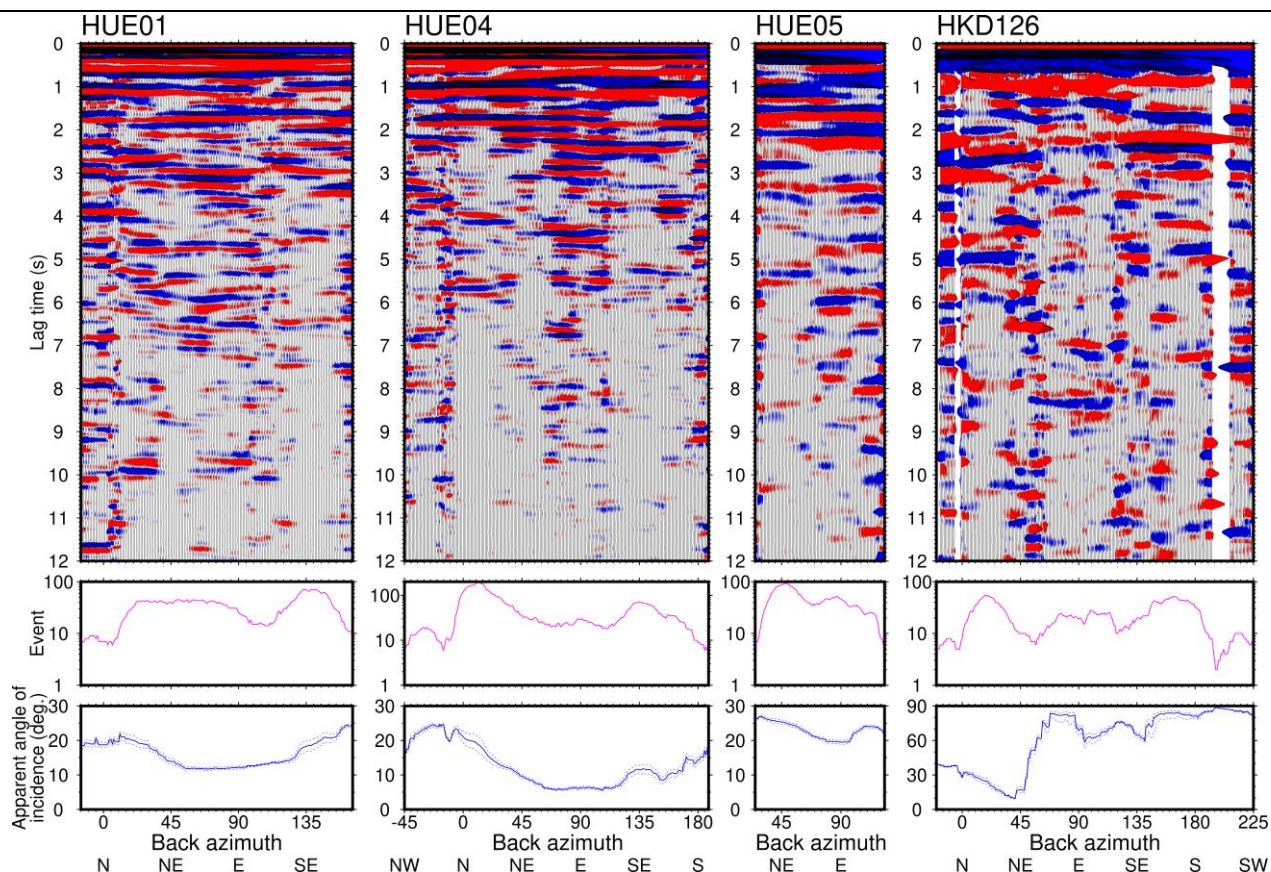


図 9 各観測点における方位角順の PWS ACF(上), 記録数(中央), 見かけの入射角(下)

赤は正の振幅, 青は負の振幅を表す.

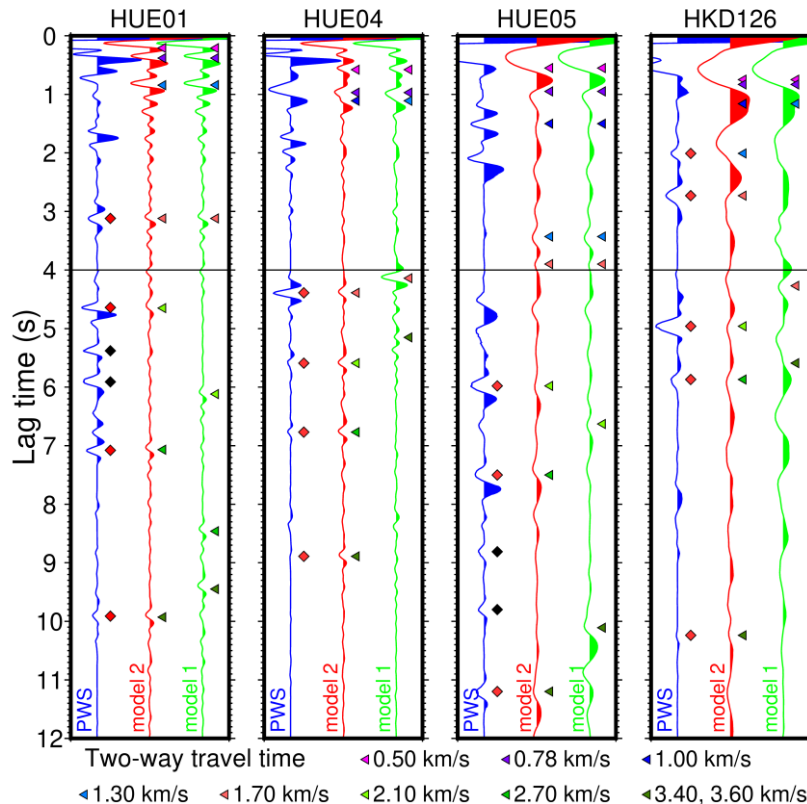


図 10 PWS と理論 ACF. model 1, 2 は順に探査で推定した構造, ACF 解析で推定した構造を示す. シグナルを明瞭にするため, 4 秒以降の PWS ACF は定数倍している. 赤い菱形は, 推定時に参照した反射波走時である.

また、谷の反射波走時の数と理論 ACF の反射波の谷の数が合致していないため、HKD126 と HUE04 では、J-SHIS V2 の速度値を挿入して、PWS ACF に理論 ACF が合うように構造を推定した。推定した構造を用いた理論 ACF(図 10 赤)の理論走時と PWS ACF の反射波走時は合致した。ACF の概形から、平野部側の観測点 HUE05 と HKD126 では、表層の軟弱地盤の減衰を評価できていないと考えられる。

次に推定した構造の妥当性を検討するために、各観測点直下の構造を水平多層構造と仮定して、離散化波数法によるシミュレーションを実施した。一例として、2018 年 9 月 14 日の余震記録(図 1)の結果を図 11 に示す。尚、震源時間関数はパルス幅 0.55 秒のベル型とし、発震時刻の誤差をなくすために、HUE04 の観測波形と理論波形の S 波初動が合致するようにずらしている。S 波初動時刻は model 1 に比べ model 2 で大きく改善したことが分かる。同様に、初動発震機構解が発表されている 28 地震(図 1 星印)に対し、HUE04 に対する観測走時と理論走時を図 12 に示す。他の記録に対しても走時が改善されており、ACF 解析によって推定された構造は、探査によって推定された構造よりも妥当性があると考えられる。HUE05 の観測走時差に対し、理論走時差に変化がない箇所に関して、HUE04 と HUE05 の間の地下構造に傾斜があると考えており、3D FDM で検討している。

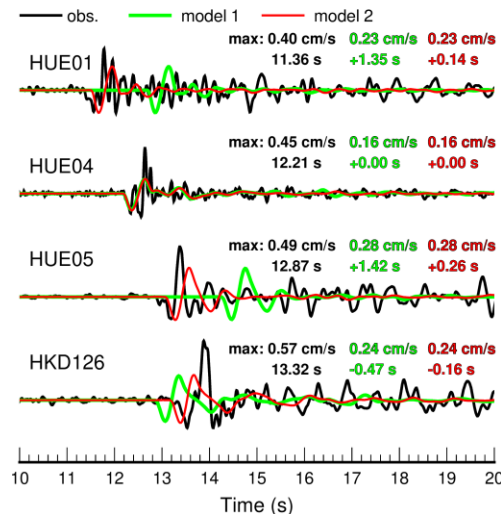


図 11 離散化波数法による理論計算と観測記録

数字は最大速度と観測と理論の S 波初動の誤差を表す。

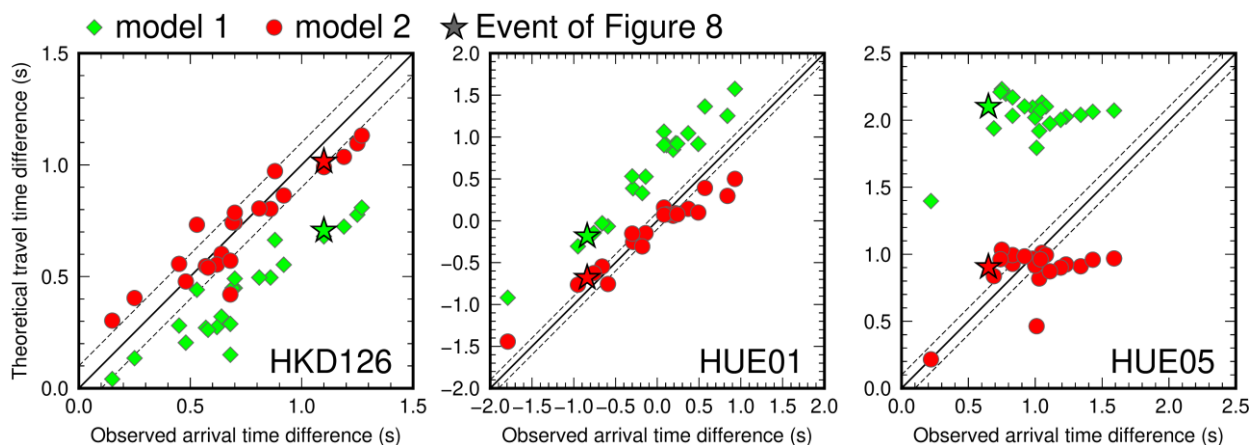


図 12 HUE04 を基準とした観測走時差と理論走時差

星印は図 11 の波形を表す。

項目③

傾斜構造の推定に向けて、3D FDM を用いて、正解の構造が分かる中で、ACF の概形に対する傾斜構造による影響を把握する。はじめに、水平成層構造と 2.5 次元の傾斜構造(図 2)を用いて、複数の観測点と震源位置で数値実験を実行した。傾斜構造の端部より外側の震源とその真上の観測点の記録を使用した ACF 解析の推定精度は高い。一方、傾斜構造東端部を除き、傾斜構造の真上、あるいは傾斜構造を挟んで震源と反対側における推定結果のほとんどが浅く推定されている。傾斜構造の真上にある観測点と傾斜構造の東端部よりも東側にある観測点の推定結果は、震源位置と反転している。例えば、図 4 において、 141.74° と 141.98° の震源を用いて推定された 141.90° と 142.02° の地下構造は反転している。浅部側の水平多層構造に関しては、震源から離れるほど浅く推定されるが、より浅部の推定精度に関しては、屈折により層境界に入射する地震動の波線が鉛直方向に近づくため、推定誤差が小さくなる。図 8, 9 の浅部側と深部側に相当する反射波走時の谷を比べると、浅部側でより安定していることが確認でき、観測記録からも同様な結果が得られることが分かる。今後は、用いる仮想構造モデルの種類や震源深さ等の検討も行い、傾斜構造の推定に繋げる。

項目①, ②は成果【1】、【2】で投稿した。項目③に関しては、【3】に相当する 11 月にある第 16 回日本地震工学シンポジウムと【4】に相当する 2024 年の国際会議(WCEE)で発表予定であり、論文投稿予定である。

成果物

- 【1】 Nakagawa N, Takai N, Shigefuji M: Examination of one-dimensional S-wave velocity structure using strong-motion data for high-seismic-intensity area during the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake. *Earth, Planets and Space*, 75:42, 2023. doi: <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01802-x>, (2023 年 3 月受理, 謝辞あり)
- 【2】 中川 尚郁, 高井 伸雄, 重藤 迪子: 2018 年北海道胆振東部地震の余震記録を用いた自己相関関数解析による S 波速度構造の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2023 年 9 月発表 (謝辞あり)
- 【3】 中川 尚郁, 高井 伸雄, 重藤 迪子: 勇払平野東部における強震記録の自己相関関数を用いた傾斜基盤構造の推定に関する検討, 第 16 回日本地震工学シンポジウム (投稿中)
- 【4】 Nakagawa N, Takai N, Shigefuji M: Investigation of Influence on Autocorrelation Function of Strong-motion Records by Inclined Bedrock ,World Conference of Earthquake Engineering 2024 (投稿中)

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

今後の課題として、以下のことを実施する。

- ・ ACF の反射波走時のばらつきと震源位置の関係から傾斜構造の推定
現状までの成果で、観測記録と数値実験により、傾斜構造が ACF の反射波走時に影響を与えることが判明したため、傾斜構造の推定手法を構築し、3 次元地下構造点群データの構築へと繋げる。
- ・ 高周波数のシミュレーション結果を用いて、詳細なパラメータの検討

現在の PC のスペックにおいて、テストフィールドを踏まえた数値実験では 4 Hz が限界であるため、今後、増設予定であるメモリーを使用し、より高周波数側の計算を実行し、フィルターのパラメータスタディを行う。この結果を踏まえて、より明瞭な反射波走時を検出できるフィルター範囲を決定する。

- ・ 高サンプリングの強震記録を用いた ACF 解析による極浅部の構造が推定
自身の研究室のプロジェクトの一つである「寒冷地における表層地盤の季節変動」で行われている 1000 Hz の強震観測に対し、ACF 解析で極浅部の構造が推定できるかを検証する。本プロジェクトでは、地面を掘削し、砂で埋め戻して作成された人工地盤に水位計と温度計が備え付けられており、季節による変動が物理量で判断できる。季節変動による表層地盤への影響が ACF 解析で判断できるのかを確認し、3 次元地下構造点群データの可能性の幅を広げる。

以上の課題を解決し、BIM に資する 3 次元地下構造点群データとの連携性を熟考し、フレームワーク構築の可能性を考察してまとめとする。