

(1) 実施機関名：

立命館大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）アナログ実験による表層地盤の強震動応答のモデル化

（英文）Modeling strong motion response of shallow subsurface ground through analog experiments

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震の災害誘因の事前評価手法の高度化

ウ. 地震動に起因する斜面変動・地盤変状の事前評価手法

(5) 本課題の5か年の到達目標：

地盤の応答特性（地震波速度，ピーク周波数など）は強震動によって変化することがあり，数ヶ月～数年という長期間をかけて回復するような粘弾性的ふるまいを示すケースについても報告されている．一方，2016年4月に発生した熊本地震は顕著な例であるが，数分～数週間という短期間のうちに同じ場所で繰り返し強震動が観測される事例も知られている．強震動を短期間のうちに繰り返し経験する場合，2回目以降の地盤の応答特性は，直前の強震動により変化した地盤特性の影響を強く受ける．強震動による地盤の応答特性変化とその回復過程は，地表約100 m以浅の表層地盤の粘弾性的性質に起因すると考えられているものの，未だモデル化には至っていない．繰り返し強震動が作用した場合に，その前後，および経時的に表層地盤の応答特性がどのように変化するかについて定量モデルを作成することは，適切な地震動を予測するうえで重要である．

また表層地盤は，空隙を多く含む強い不均質を持つ媒質であり，高周波数帯の波を考える場合には，この不均質は無視することができない．弱い不均質を持つ媒質に対しては，ランダム媒質を仮定した定量的なモデル化がなされており，波動場を計算できるシミュレーション＝コードも公開され，広く利用されている．一方，空隙のような強い不均質を持つ媒質に対しては，弾性的な応答に限った場合においても，波動の伝播を適切に評価できる手法がなく，新たな手法の開発が求められている．実験室においても，鉋物不均質などの弱い不均質を含む場合においては詳細な計測例があるものの，高空隙率媒質の詳細な弾性波計測は，散乱による減衰が強くなることなど高度な技術を要することもあり，実施事例は少なく，波動場計算の手法が構築されたとしても，どの程度実際の波動場をうまく近似できているかを評価できる状況にない．

本研究は，主として実験・計測を通じて，上記の課題に取り組むものである．

(6) 本課題の5か年計画の概要：

【模擬表層地盤に対する繰り返し強震動入力試験】強震動の強さ・特徴的な周波数・継続時間・発生間隔などの入力の特性，および地盤の空隙率などのシステムの特性をさまざまに変化させながら，強震動を繰り返し入力した場合に，地盤応答特性がどのように変化するかを実験的に明らかにし，定量的なモデル化を目指す．

まず，模擬的な砂層地盤を作成し，地盤内に応答測定用の加速度計アレイを構築する（R6年

度)．応答特性は、地盤を変形させない程度の微弱な『モニタリング用の弾性波』を断続的に地盤に与え、透過させることによって計測する(R6-R7年度)．次に、1度の強震動が与えられた場合に地盤の応答特性がどのように変化するかを調べる．強震動は模擬砂層地盤の下に設置する振動台を振動させることによって平面波的に与える．強震動入力前後、およびその後の経時的な透過弾性波のピーク周波数の変化、複素インピーダンスの時間変化などを推定することにより、強震動応答の特徴を定量的に評価する(R7-R9年度)．さらに、1度の強震動が与えられた場合と同様の方法で、繰り返し強震動が与えられた場合の地盤応答特性の粘弾性変化を調べ、1度の強震動が与えられた場合の結果との時間依存性の違いについて検討する(R8-R10年度)．模擬砂層地盤の素材については、制御が容易なシリコンが混ぜ合わされた砂から開始し、計測技術を確立したのちに(R6-R8年度)、含水量や空隙率の異なる砂層を作成して試験を継続する(R8-R10年度)．これらの試験を通じて、強震動が入力された場合に、地盤応答特性がどのように変化するかを実験的に明らかにする(R9-R10年度)．

【高空隙率の媒質に対する透過弾性波計測試験】弾性波速度が数km/s程度のセメントモルタル、1 km/s弱の石膏に、数100 m/s程度の空隙など含ませることでモデル媒質を作成する(R6-R7年度)．必要に応じて高空隙率の凝灰岩などの天然の岩石も活用する．弾性波速度と入力周波数を変えることにより波数に幅を持たせ、また空隙サイズを変えることにより特徴的な不均質スケールに幅を持たせる．波長で規格化された不均質スケールと伝播距離の関係において、実際の表層地盤の模擬として適切な範囲で媒質と入力周波数を変化させる(R6-R8年度)．挙動が単純な等価均質媒質から計測を開始させ(R6-R7年度)、弱い不均質を持つ媒質、波線理論が適用できる成層構造媒質など、既存の枠組みで定量的な説明が可能なモデルへと変化させ、最後に空隙を多く含む強い不均質を持つ媒質へとモデル媒質を発展させる(R8-R9年度)．計測によって得られた記録を解析し、強い不均質を持つ媒質に対する弾性波の透過特性を明らかにする(R8-R10年度)．

(7) 令和7年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

【模擬表層地盤に対する繰り返し強震動入力試験】

R6年度に開発した実験・計測システムを使用し、強震動により模擬表層地盤を伝播する弾性波の応答特性がどのように変化するかについて調べた．基盤から表層へ振動が伝播する過程を再現するため、200 mmL × 200 mmW × 300 mmHのアクリル容器内に二層構造を持つ模擬地盤を構築した．下層に工学基盤を模した厚さ90 mmのセメントモルタル層を、上層には表層地盤を模した層を作製した．本実験装置では、強震動発生用の振動発生器に取り付けたステージ台に模擬地盤を固定し、水平方向に加振することでS波を平面波として模擬地盤に入射する．強震動に用いる波形として250-1000 Hzの対数スイープ信号を採用した．フィードバック制御に一部課題を残しながらも、少なくとも $\pm 10 \text{ m/s}^2$ に達する加振が可能であることを確認した．また、模擬地盤には不可逆な変形を与えないような微弱な弾性波(以下、モニタリング波)を断続的に放射することができる．モニタリング波には、0.5秒間に1 kHzから50 kHzまで変化する線形スイープ信号を採用し、1.2秒間隔で繰り返し印加した．模擬地盤内には複数の加速度計(AC)を異なる深度に埋設した．模擬地盤を透過するモニタリング波は各加速度計で受感され204.8 kspsで連続収録された．

解析の結果、20 kHz以下の帯域において比較的安定した信号が確認された．14-19 kHzの帯域における平均位相変化に注目すると、強震動の入力に伴い位相が即時的に変化するcoseismicな変化が確認された．これは強震動によって地盤の剛性が瞬間的に変化したことを示唆している．しかしながら、その後の期間においては、1 rad程度の日周変動が見られた．模擬地盤の熱膨張・収縮が位相の日周変化に影響を与えていることが考えられた．そこで、環境温度変化の低減を試みたところ、周期的変動は試み前の半分である0.5 rad程度まで抑制された．さらに、模擬地盤付近に温度計を取り付け、温度をモニタリングしたところ、各加速度記録の位相変化と温度変化との間に強い相関が認められた(図1)．強震動による回復過程を定量化するためには、この温度依存性を可能な限り排除するか、定量化する必要があることが明らかになった．

【異方性不均質媒質のS波スプリッティング(フィールド)】

地下構造探査や岩盤の安定性評価において重要な指標となる、異方性媒質における弾性波の振る舞いについて調べた．弾性波が地盤中の不均質構造に入射すると、不均質の形状や密度の差異の異方性に応じてS波スプリッティング現象が発生することが知られている．R7年度は、地熱地域に分布する既存の亀裂帯を対象として、微小地震観測データを用いた解析を実施した．その結果、入力される波の

周波数帯によって、不均質構造の卓越方向が異なる傾向が確認された。このことから、地盤中の不均質構造は周波数依存的な特性を有しており、不均質を含む地盤の時空間的な広がりをより正確に把握するためには、複数の周波数帯域を並行して解析に利用することが有効であると示唆された。

【異方性不均質媒質のS波スプリッティング（実験室）】

岩石内部の亀裂が弾性波に与える影響を実験室レベルで詳細に検証した。従来の知見では、S波スプリッティングを評価する実験において、亀裂の正確な位置や形状を完全に制御した状態でその応答を評価した例は極めて限定的であった。そこで、細粒安山岩の中に扁平な楕円体状の亀裂がある試料を直径40mmの供試体に整形し（図2）、この試料に対し、S波型圧電素子を用いて様々な角度から弾性波を透過させる回転透過試験を実施し、P波・S波の速度変化およびS波スプリッティング（速いS波の振動方向と到達時間差）の解析をおこなった。その結果、P波速度には人工亀裂の向きに応じた角度依存性が確認されたが、一方でS波速度については顕著な異方性が見られないという対照的な結果となった。さらに詳細なS波スプリッティング解析の結果、推定された速いS波の振動方向は、巨視的な亀裂の向きとは必ずしも一致しなかった。

この結果は、単一の大きな亀裂が存在する場合であっても、弾性波の伝播特性においてはその亀裂自体の影響より、岩石が本来持っている微小クラックの集合や、構成鉱物の配向による異方性が支配的になる可能性を示唆している。

【高空隙率の媒質に対する透過弾性波計測試験】

モデル媒質として適切な材料について検討を進めた。モルタルや石膏の場合、意図しない空隙の発生による不均質が弾性波透過に及ぼす影響を無視することができないことが明らかになり、材料を再検討することとなった。このため、本テーマの進捗はやや遅れを持つこととなったが、他テーマでの進捗が十分であり、課題全体としては特に進捗に問題ない。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

表層地盤が強震動に及ぼす影響に関する知見を増やすことができれば、強震動予測の精緻化など災害軽減に資するものとなる。強震動入力試験については装置が稼働したので、温度依存性の問題を解決後、本格的なデータ取得が期待される。また、高い空隙率を持つ媒質に対する弾性波の伝播特性は表層地盤の弾性的性質の理解に貢献し、より現実的なグリーン関数を得ることにつながるものと期待される。

(8) 令和7年度の成果に関連の深いもので、令和7年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

Morimoto K., N. Yoshimitsu, and K. Okamoto, 2025, Utilization of Shear-wave splitting to monitor the underground heterogeneity in the Oku-Aizu geothermal field, Japan, AGU Fall Meeting 2025, S31E-0246 (Poster)

Morimoto, K. and N. Yoshimitsu, 2025, Detecting characteristics of subsurface cracks in geothermal fields by using shear-wave splitting, NSFC-JSPS International Forum on Artificial Intelligence and Geophysics

森本光貴・吉光奈奈・川方裕則, 2025, 細粒岩石中の亀裂形態が透過弾性波の速度・位相異方性に与える影響, 資源・素材学会 2025年度秋期大会, 1110-19-07 (Oral)

森本光貴・吉光奈奈・岡本京祐, 2025, 奥会津地熱地帯でのS波スプリッティングを用いた地下亀裂のモニタリング, 日本地球惑星科学連合2025年大会, SSS09-07 (Oral)

中山雅之・榎吉拓哉・川方裕則, 2025, 円筒形モルタル試料中の空隙が透過弾性波に与える影響, 日本地球惑星科学連合2025年大会, S-SS09

- 中山雅之・川方裕則・土井一生, 2025, Changes in slowness before and after rainfall detected by an active seismic array monitoring test using chirp signals on a slope, 日本地球惑星科学連合2025年大会, HDS07-P17
- 市部悠斗・川方裕則・佐脇泰典, 2025, 3次元数値シミュレーションを用いたレシーバ関数解析によるフィリピン海スラブ検出感度の定量評価, 日本地震学会2025年度秋季大会, P01-06
- Ichibe, Y., H. Kawakata, and Y. Sawaki, 2025, Quantitative evaluation of the detection sensitivity in receiver function analyses for the Philippine Sea Slab in the Nankai subduction zone using 3D numerical simulations, AGU Fall Meeting 2025, S51E-0159 (Poster)

(9) 令和7年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 令和8年度実施計画の概要：

【模擬表層地盤に対する繰り返し強震動入力試験】R7年度に明らかになった弾性波速度の温度依存性の影響について、定量評価を進め、強震動印加による影響と切り分けられるようにする。一度の強震動が与えられた場合に地盤の応答特性がどのように変化するかを調べる。強震動は模擬砂層地盤の下に設置する振動台を振動させることによって平面波的に与える。強震動入力前後、およびその後の経時的な透過弾性波のピーク周波数の変化、複素インピーダンスの時間変化などを推定することにより、強震動応答の特徴を定量的に評価する。

【高空隙率の媒質に対する透過弾性波計測試験】再検討したモデル媒質を作成し、モデル媒質に対する弾性波透過試験を実施する。弾性波速度と入力周波数を変えることにより波数に幅を持たせ、また空隙サイズを変えることにより特徴的な不均質スケールに幅を持たせる。波長で規格化された不均質スケールと伝播距離の関係において、実際の表層地盤の模擬として適切な範囲で媒質と入力周波数を変化させる。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

川方 裕則（立命館大学総合科学技術研究機構）

他機関との共同研究の有無：有

土井 一生（京都大学防災研究所）、中山 雅之（京都大学防災研究所）、吉光 奈奈（京都大学大学院工学研究科）、平野 史朗（弘前大学大学院理工学研究科）

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：立命館大学研究部BKCリサーチオフィス

電話：077-561-2815

e-mail：ml-b-kanri@ml.ritsumei.ac.jp

URL：http://www.ritsumei.ac.jp/research/center/sci/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：川方 裕則

所属：立命館大学総合科学技術研究機構

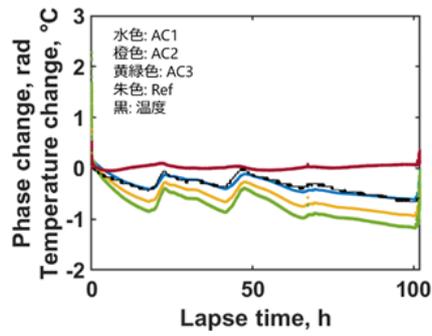


図1. 工学基盤を模擬したセメントモルタル層直上に貼り付けた加速度計 (Ref) および模擬地盤中の各ACの位相変化と温度計で計測された温度変化。
 模擬地盤に埋設した加速度計 (ACs 1-3) の位相は、模擬地盤付近に設置した温度計で記録された温度と良く対応して変化していることが分かる。

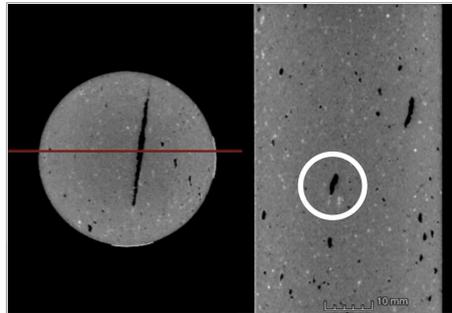


図2. 細粒安山岩の中に扁平な楕円体状の亀裂がある直径40mmの円筒供試体のX線CT像の例。
 左の赤線の断面が右側に示されており、扁平な楕円体状の亀裂が白丸で示されている。