



強震記録の自己相関関数を用いた 京都・奈良盆地深部地盤構造モデルの検証

浅野公之¹⁾, 関口春子²⁾, 岩田知孝³⁾

1) 正会員 京都大学防災研究所, 教授 博士(理学)

E-mail: k-asano@sms.dpri.kyoto-u.ac.jp

2) 京都大学防災研究所, 准教授 博士(理学)

E-mail: sekiguchi.haruko.6u@kyoto-u.ac.jp

3) 京都大学, 名誉教授 理学博士

E-mail: iwata.tomotaka.r32@kyoto-u.jp

要 約

強震動予測の高精度化には, 三次元地盤構造モデルの高度化が不可欠である. 地震記録を用いた地下構造探査手法として, 自己相関関数を用いる手法が国内外で利用されている. 本研究では, 京都・奈良盆地の強震・震度観測点の強震波形記録を収集し, それらのTransverse成分の自己相関関数を計算することで得られる盆地基盤面での反射SH波の往復走時を用いて, 既存の深部地盤構造モデルの検証並びにモデル改善が必要な箇所の検討を行った. 京都・奈良盆地の多くの地点では, 観測往復走時と理論往復走時の差異は20%以内であるが, 山科盆地と京都盆地の境界付近の狭窄部や基盤形状急変部などでは顕著な差異がみられ, より詳細な調査が必要と考えられる地点も見出された.

キーワード: 自己相関関数, 深部地盤構造モデル, 強震記録, 京都盆地, 奈良盆地

1. はじめに

震源断層を特定した地震に対する強震動予測の高精度化には, 対象地域の三次元地盤構造モデルの高度化が不可欠である. 三次元地盤構造モデルは, 反射法・屈折法地震探査, 微動探査, 重力探査, ボーリング探査等による各種の物理探査結果や地質情報, 地震記録のH/Vスペクトル比等に基づいて作成される¹⁾. そして, 作成した三次元地盤構造モデルは, 例えば, 地震観測記録が得られている地点での地震動のシミュレーション等を行い, 計算波形と観測波形を比較し, 振幅や顕著な位相, 増幅特性や卓越周期等が再現できているかを確認する必要がある¹⁾.

本研究では, 特に京都府南部の京都盆地から奈良県の奈良盆地にかけての深部地盤構造モデルを対象に, 地震観測記録の分析に基づいて深部地盤構造モデルの検証を行う. 京都盆地や奈良盆地は, 新第三紀鮮新世から第四紀にかけて形成された堆積盆地で, 丹波帯の堆積岩(京都盆地)及び領家変成岩・花崗岩類(奈良盆地)を基盤とし, 主として大阪層群以降の堆積物によって埋積されている²⁾. 盆地基盤の深さは, 京都盆地と奈良盆地いずれも, 最深部で約700 mである^{3), 4)}. 京都盆地や奈良盆地においても, 物理探査や地質情報に基づいて, 深部地盤構造モデルの作成が継続的に行われてきた⁵⁾⁻⁷⁾. そのなかで,

2019～2021年度に実施された「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」では、新たに4測線での反射法地震探査、多数の微動アレイ探査や単点微動観測、深層ボーリング資料の収集などが行われ、京都盆地から奈良盆地にかけての3次元深部地盤構造モデルが改訂された⁸⁾。

近年、深部地盤構造モデルの検証や修正のための手法の1つとして、強震波形記録の自己相関関数が積極的に活用されつつある^{9)~12)}。例えば、Chimoto and Yamanaka¹⁰⁾は、関東平野の下総地域を対象に、多数の強震波形記録の自己相関関数を線型スタックし、基盤面や堆積層内の速度境界からの反射波を検出することで、既存の深部地盤構造モデルの検証と修正を試みている。本研究では、京都及び奈良盆地内の既存強震・震度観測点における強震波形記録の自己相関関数を解析することで得られる反射波の走時情報を用いて、京都及び奈良盆地の深部地盤構造モデルの検証を試みた。

2. 強震波形記録

本研究の解析に使用するため、京都盆地及び奈良盆地に位置する既存の強震観測点・震度観測点で観測された強震波形記録を収集した。内訳は、国立研究開発法人防災科学技術研究所強震観測網¹³⁾K-NETのうち4観測点、KiK-netのうち2観測点、気象庁計測震度計のうち3観測点、京都府震度情報ネットワークのうち京都盆地以南の16観測点、奈良県震度情報ネットワークシステムのうち奈良盆地内の24観測点、京都市震度情報ネットワークシステムのうち山間部を除く17観測点（廃止済み6点を含む）、関西地震観測研究協議会¹⁴⁾の6観測点（廃止済み2観測点を含む）、京都大学防災研究所の8観測点である。解析対象とした記録の期間などを表1にまとめ、各観測点の位置を図1の地図に示す。なお、自治体震度情報ネットワークの観測点コードは記録の整理をする上で著者らが独自に付したもので公式のものではない。

2017年3月9日に奈良市半田開町から同市西紀寺町に移設されたEC4、2020年7月18日に綴喜郡宇治田原町荒木から同町立川へ移設されたKYTP34、2021年3月24日に京都市北区紫竹から同区大宮西脇台町に移設されたKYTC01、2021年7月1日に大和高田市大中（旧）から大和高田市大中へ移設されたNARP02の計

表1 解析に使用した強震観測記録の概要

観測網	観測点数	記録を使用した期間
防災科学技術研究所 K-NET	4	1996年5月～2023年5月
防災科学技術研究所 KiK-net	2	KYTH07: 2004年4月～2023年5月 KYTH08: 2006年11月～2023年5月
気象庁 計測震度計	3	57B: 1996年4月～2023年5月 EAF, EC4: 1996年10月～2023年5月
京都府震度情報ネットワークシステム	16	2011年2月～2022年12月
奈良県震度情報ネットワークシステム	24	2010年12月～2022年12月
京都市震度情報ネットワークシステム	17	運用中観測点: 2009年3月～2023年5月 廃止済観測点: 2009年3月～2021年12月
関西地震観測研究協議会	6	IHS: 1996年9月～2021年12月 KYU: 1995年5月～2009年7月（廃止） KTR: 2009年8月～2021年12月 KTG: 1997年6月～2021年12月 NRS: 1997年6月～2010年6月（廃止） NRO: 2010年6月～2021年12月
京都大学防災研究所	8	TKB: 2003年12月～2023年6月 TNN, SNB: 2001年12月～2018年7月 FKK, KTB: 2001年12月～2018年12月 OYB: 2001年12月～2020年12月 OGR: 2011年11月～2022年12月 SHD: 2014年5月～2023年5月

4観測点については、移設前後の観測点を区別して取り扱った。このほか、同一敷地内でのごく短距離での移設が行われたKYTP13（城陽市寺田），KYTP30（木津川市山城町上狛），NARP06（桜井市粟殿）については、深部地盤構造の違いは小さいと仮定し、移設前後の記録を区別せずに取り扱った。したがって、本研究の解析対象の観測点は合計84観測点である。

付録の表A1に、各観測点で解析に使用した強震波形記録の記録数、マグニチュード、震源深さ及び震央距離の範囲、back-azimuth別の記録数をまとめた。個々の地震のマグニチュード、震源深さ、震央距離、back-azimuthは気象庁による震源情報より得た。対象地域周辺では、全ての方位で均質に地震が発生しているわけではないため、back-azimuth別の記録数にはばらつきがあるものの、ここでは、3節で述べる条件を満足した記録は全て使用するという方針で解析を実施した。ただし、解析に際しては、観測波形を目視で点検し、トリガー記録にS波部分が含まれていない記録や、S/Nが不良である記録は除外した。

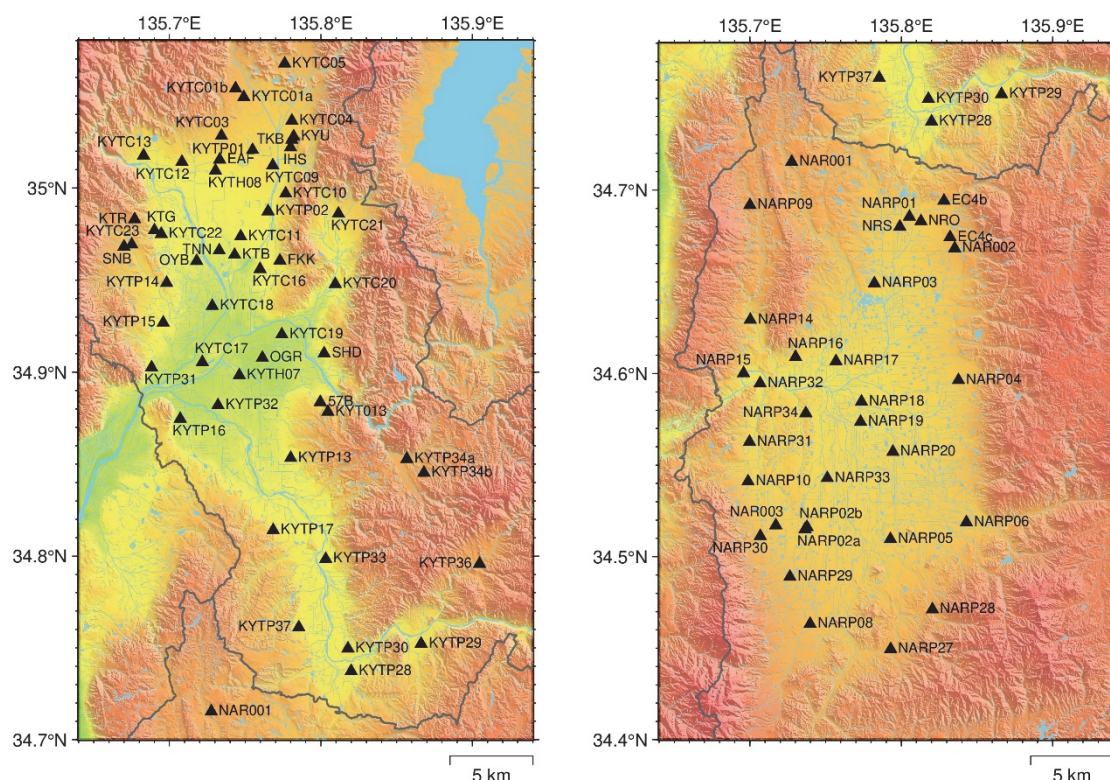


図1 使用した強震・震度観測点（左：京都盆地～木津川低地，右：奈良盆地）

3. 解析手法

まず、個々のイベントの水平動成分の強震波形記録を気象庁による震源情報を用いて座標変換し、Transverse成分を得た後、S波及びその後続動部分を含む解析区間を抽出する。多数の強震波形記録について、目視でS波のオンセットを読み取ることは作業負荷がかなり大きい。これを軽減するため、JMA2001速度構造モデル¹⁵⁾に基づいて計算した震源から観測点までの理論S波走時を参照して、解析区間を抽出する方法が提案された¹⁶⁾。JMA2001速度構造モデルの最浅部のS波速度は2.84 km/sであり、堆積盆地のようなS波速度の小さな速度層を含まないため、堆積盆地内の強震観測点での理論走時は観測走時よりも小さいことが期待される。例として、図2にNARP01（奈良市二条大路南）にて、観測波形から目視で読み取ったS波の観測走時とJMA2001速度構造モデルによる理論走時の差を示す。また、京都盆地と奈良盆地の堆積層厚は最深部で約700 m（前述）であるので、主として大阪層群からなる堆積層の平均S波速度を約700 m/sと仮定すると、地表と盆地基盤面間をほぼ鉛直に伝播するS波の往復走時は約2秒となる。このため、解析区間の先頭時刻を理論S波到着時刻の1秒前として余裕を持たせるとともに、解析区間長を10.24秒とすることで、直達S波及びその反射波を解析区間内に適切に含めるように記録から抽出

することができる。また、後述の通り、Fourier変換を用いて自己相関関数を計算することから、スペクトルの漏れを防ぐため、抽出した解析区間の先頭及び末尾の各0.5秒間にcosine型のtaperを適用した。なお、他の地域に本研究と同様な解析区間抽出方法を適用する際は、S波速度が基盤岩よりも遅い堆積層を含む堆積盆地・平野の観測点であれば概ね問題ないと考えられるが、解析区間長については、検討対象の堆積盆地・平野での堆積層厚やS波速度に応じて、反射波による位相を含むことができるように適切に設定する必要がある。

次に、抽出した時刻歴波形をFourier変換し、複素Fourierスペクトル $d(f_k)$ を得て、以下の式(1)により、スペクトルホワイトニングを行う¹⁷⁾。

$$\hat{d}(f_k) = d(f_k) / \left[\frac{1}{2N+1} \sum_{j=k-N}^{j=k+N} |d(f_j)| \right] \quad (1)$$

スペクトルホワイトニングを行う際の周波数帯幅 $2N\Delta f$ (Δf はFourierスペクトルの周波数刻み)は、0.5 Hz, 1 Hz, 2 Hzのうちから、反射波相に対応する信号が明瞭に得られるように、目視で観測点毎に適切な値を選択した。その後、周波数領域で自己相関関数を計算し、Fourier逆変換により時間領域に戻し、Chebyshev型の漸化式帯域通過フィルタ¹⁸⁾を適用した。フィルタの帯域は、下限周波数 f_L を0.5 Hzに固定し、上限周波数 f_H は1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz, 5 Hz, 8 Hzのうちから、観測点毎に最適な値を選択した。

最後に、Phase Weighted Stack法 (PWS) ¹⁹⁾により、全ての記録の自己相関関数をスタックした。スタックする自己相関関数を選択する条件として、京都盆地や大阪盆地を模した数値実験から、震央距離 L と震源深さ D の比 L/D が7以下の地震の強震波形記録から得た自己相関関数のみを使用することが提案されている¹¹⁾。また、各地震の震源から観測点への入射角をJMA2001速度構造モデルによって計算し、入射角50度以内かつ L/D が7以下の記録のみスタックした。なお、京都盆地や奈良盆地では、堆積層と基盤岩のS波速度コントラストが約3~4倍と大きいため、堆積層／基盤岩境界にある程度入射角をもって入射した波でも、堆積層内ではほぼ鉛直に伝播する(図3)。地表に入射した直達SH波が自由表面で反射して下降し、堆積層／基盤岩境界で上向きに反射して、地表に再度入射する反射SH波に対応する相を読み取り、直達SH波との到着時刻差を求めた。読み取りにあたっては、直下の構造を水平成層として近似できる場合には、直達SH波と反射SH波の符号は互いに異なることから、対応する自己相関関数に見られる負のピークを反射SH波に対応する相として読み取った。堆積層内をSH波が鉛直伝播すると仮定するとき、反射SH波と直達SH波の到着時刻差 T_{2S} は、層厚 H 、平均S波速度 V_S の堆積層内でのS波の往復走時に対応する。

$$T_{2S} = 2H / V_S \quad (2)$$

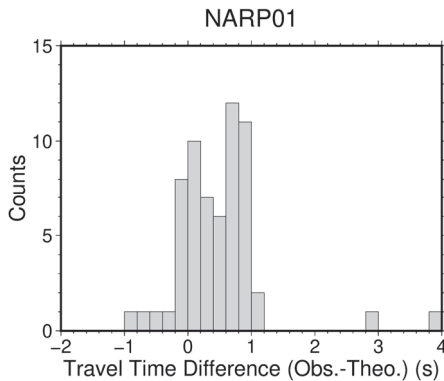


図2 NARP01での観測S波走時と理論S波走時の比較

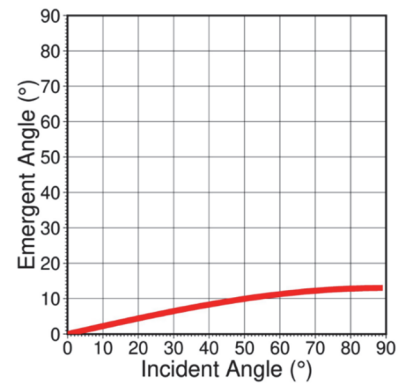


図3 堆積層／基盤岩境界での入射角と射出角の関係 (堆積層 $V_S = 0.7$ km/s, 基盤岩 $V_S = 3.1$ km/s)

なお、実際のSH波の伝播は、厳密な鉛直伝播（入射角0度）ではない．研究対象地域では、図3に示すように、入射角50度未満の場合の射出角は10度未満と予想されるため、堆積層内をS波が伝播する距離の違いは最大で約1.5%程度である．基盤深度が最も深い地点（KYTH07やNARP01など）でも、厚さ700mの堆積層を射出角10度で伝播した場合の伝播距離の違いは約10mとなり、反射波の往復走時の違いは最大で約0.03秒程度となる．解析に使用している波形の周波数帯域も踏まえると、入射角による走時の違いを個々の記録の自己相関関数から見出すことは困難であるため、以降の解析及び議論では鉛直入射を仮定した．

図4にKYTH07（KiK-net久御山）及びNARP01（奈良市二条大路南）での解析例を示す（観測点位置は図1の地図に示す）．図中の自己相関関数の時刻0の振幅は、上述の帯域通過フィルタの上限周波数の2倍の逆数の長さ $1/(2f_H)$ をもつcosine型のtaperでミュートし、全体の振幅は最大値により正規化されている．自己相関関数の時間軸上で時刻0が直達波の到着時刻に対応し、負のピークを持つ相の到着時刻が T_{2S} に対応する．図4（左）の例では2.0秒、図4（右）の例では1.8秒である．PWSによって良好な自己相関関数が得られた．図4に例示した以外の観測点も含め、入射角に依存する顕著な傾向は確認できなかった．

図5は各記録の逆方位角順に自己相関関数を並べた図である．図5（左）は、図4（左）と同じKYTH07であり、京都盆地の中心部に近いこの観測点では逆方位角に依存した自己相関関数の系統的な変化は認められず、基盤形状の不整形等が自己相関関数に与える影響は大きくないと判断した．図5（右）は、KTB（上鳥羽小学校）であり、観測点に対し南からの地震（逆方位角が180度周辺）に比べ、北からの地震（逆方位角が0度付近）では、反射波の到着時刻が0.1秒程度早い傾向があるようにも見える．この付近では、京都盆地の基盤深度が北から南に向かって深くなることから反射法地震探査（堀川－巨椋池測線）で報告されており²⁰⁾、ごくわずかな走時差ではあるが、反射波走時に影響した可能性も考えられる．

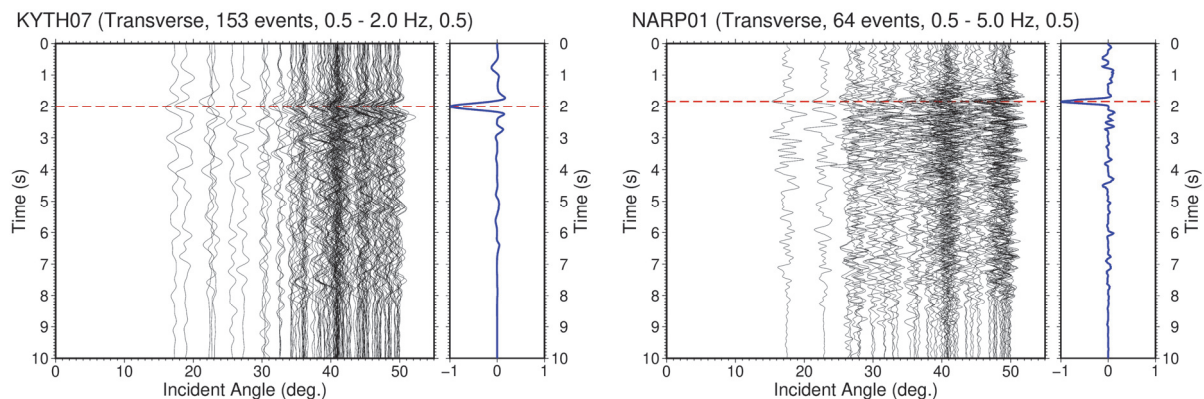


図4 自己相関関数の例（左：KYTH07，右：NARP01）．それぞれ、左図が入射角順に並べた各イベント波形の自己相関関数、右図がPWSによるスタック結果．赤破線は T_{2S} に対応する．

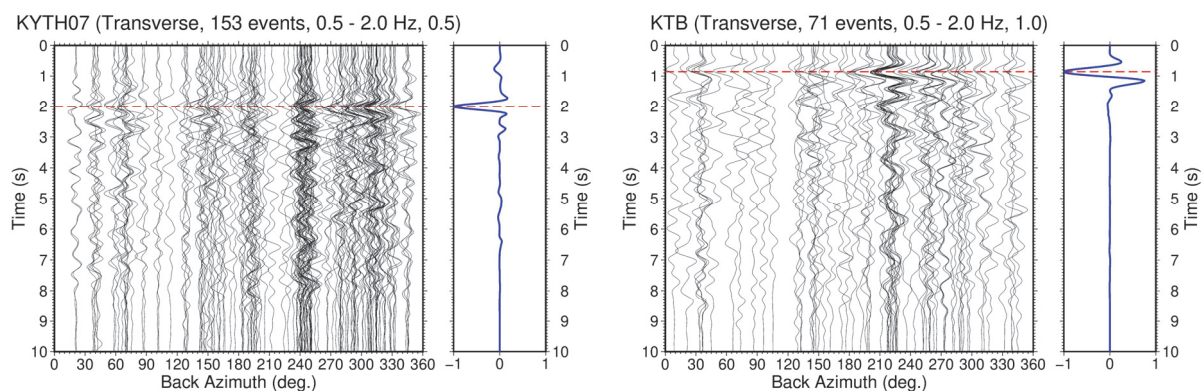
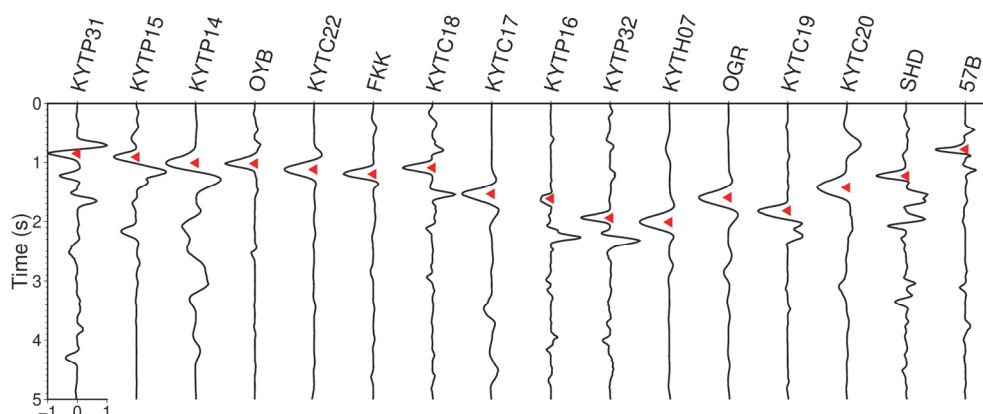


図5 自己相関関数の例（左：KYTH07，右：KTB）．それぞれ、左図が逆方位角順に並べた各イベント波形の自己相関関数、右図がPWSによるスタック結果．赤破線は T_{2S} に対応する．

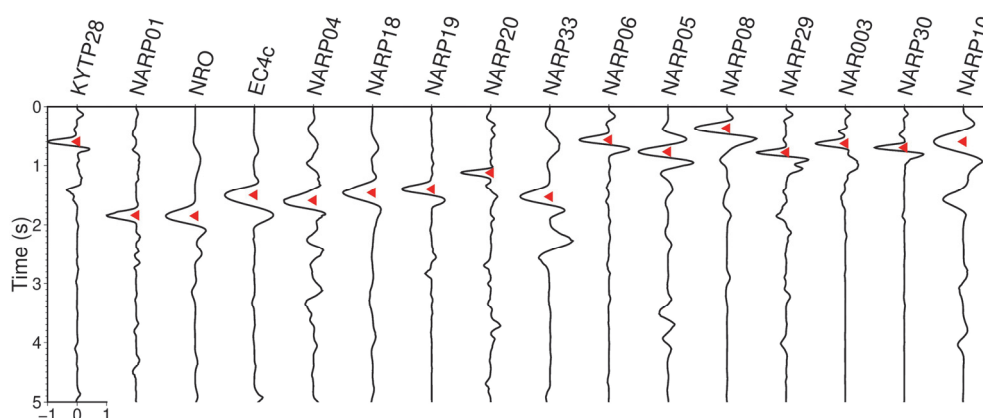
4. PWSにより得られた自己相関関数

図6 (a)は、京都盆地南部の観測点に対して、PWSにより得られた自己相関関数の例である。観測点によって帯域通過フィルタの帯域が異なるため、みかけのパルス幅は観測点毎に異なっている。同図中に、自己相関関数から読み取った T_{2s} の時刻を赤三角印で示した。同図中の左側の7観測点（KYTP31からKYTC18）が宇治川断層よりも北に位置する観測点、右側の9観測点（KYTC17からKYTP13）が宇治川断層より南に位置する観測点である。京都盆地では、宇治川断層（図7中の赤実線）を境に北側で基盤深度が浅く、南側で深い特徴がある³⁾。宇治川断層以北の観測点での T_{2s} は0.9~1.2秒であるのに対し、宇治川断層以南のKYTC17（京都市伏見区淀）からKYTC19（京都市伏見区向島）にかけては1.5~2.0秒であり、盆地構造の傾向と対応している。盆地東端部に近いSHD（京都大学宇治構内）や57B（宇治市宇治琵琶）での T_{2s} は0.8~1.2秒と相対的に短く、基盤深度が浅くなる傾向を確認することができる。

図6(b)は、奈良盆地の観測点に対して、PWSにより得られた自己相関関数の例であり、概ね北から南に向かって並べた。平城山丘陵を挟んで京都府側に位置するKYTP28（木津川市木津）での T_{2s} は0.6秒である。奈良盆地北部（NARP01からNARP33）の T_{2s} は1.1~2.0秒、奈良盆地南部（NARP06からNARP10）の T_{2s} は0.4~0.8秒である。これらは奈良盆地の基盤深度が北部で相対的に深いことと対応している。



(a) 京都盆地南部



(b) 奈良盆地

図6 PWSにより得られた自己相関関数の例（赤い三角印は読み取った T_{2s} を表す）

図6に示したとおり、多くの観測点では、特徴的な負のピークを有する自己相関関数が得られた。一方で、図6(a)のKYTP14（向日市寺戸町）、KYTP15（長岡京市開田）、KYTP16（八幡市八幡）、KYTP31（大山崎町円明寺）、KYTP32（井手町井手）、図6(b)のNARP05（橿原市八木町）、NARP06（桜井市栗殿）、NARP08（御所市役所）、NARP30（葛城市長尾）、NARP33（広陵町南郷）などのように、負の

ピークだけでなく、正の大きな振幅をもつピークが見られる観測点もあった。そのような傾向を有する観測点は、京都盆地や奈良盆地の端部に近い観測点のほか、京都盆地北部の基盤深度の浅い地域に分布する傾向が見られた。これらが盆地端部の不整形構造や直達波の直後にコヒーレントに現れる表面波の影響²¹⁾なのか、それ以外の解析上の問題なのか、個別の原因は解明できていない。これには、二次元または三次元構造を仮定した数値実験による検討等も必要であると考えられ、今後の課題としたい。また、今回のデータセットには、使用可能なデータ数が30未満の観測点も含まれているが、これらの観測点の自己相関関数は、フィルタの帯域などを工夫したとしても、反射波に相当する負のピーク以外の部分のノイズが比較的目立つ傾向にあったことから、良好な自己相関関数を得るには十分な数の記録が必要であり、継続的な強震観測が重要であることは言うまでもない。なお、他の地域を対象とした強震波形記録の自己相関関数解析では、多重反射波が認定できる事例も報告されている¹⁰⁾が、今回の解析結果では、顕著な多重反射波は見えなかった。

各観測点で得られた自己相関関数から T_{2S} を読み取り、地図上にプロットした結果が図7である。また、各観測点での T_{2S} の値をS波往復走時として、付録の表A1に記載した。図6の個々の自己相関関数から得られた空間的な傾向を地図上で確認することができる。 T_{2S} が特に大きい地域は、京都盆地南部の宇治川以南に広がる旧巨椋池周辺や奈良盆地最北部の奈良市周辺であり、いずれも T_{2S} が1.5~2.0秒となっている。大阪層群を主体とする堆積層の平均S波速度を0.7 km/sと仮定すると、堆積層厚約500~700 mに対応し、既往の地質学的知見とも矛盾しない。

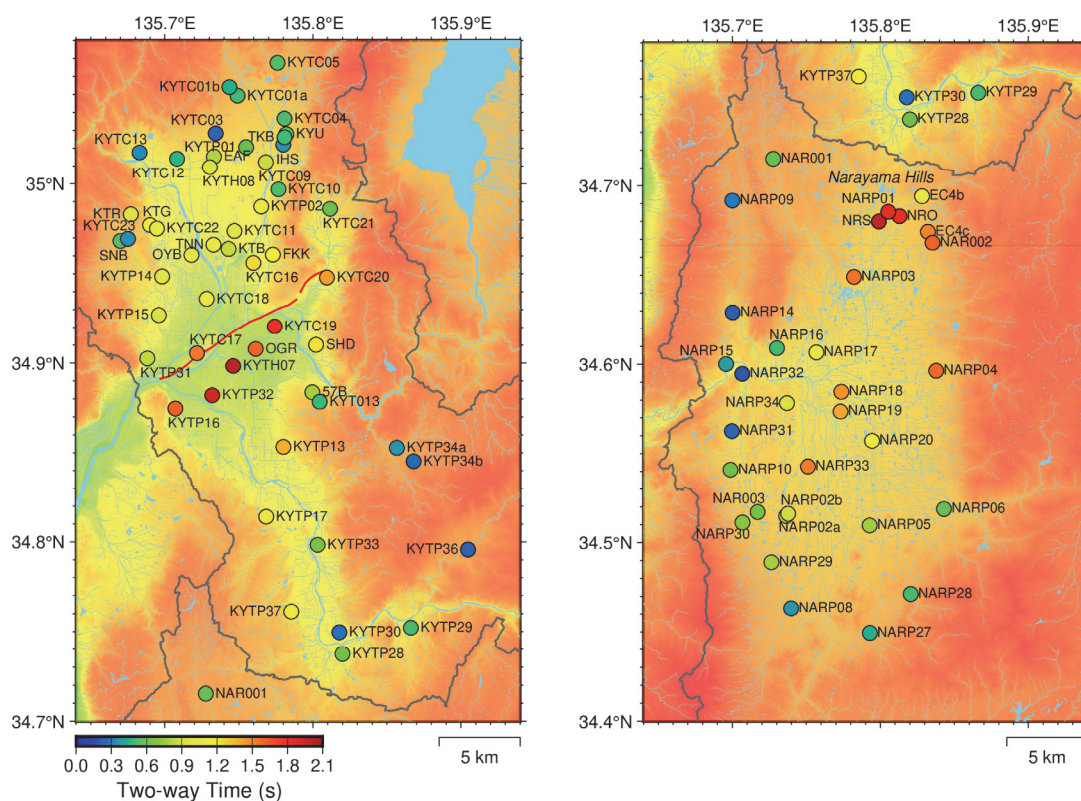


図7 S波往復走時の分布（左：京都盆地～木津川低地，右：奈良盆地）。図中の赤線は宇治川断層。

5. 既存の深部地盤構造モデルとの比較

強震波形記録の自己相関関数から得られたS波往復走時と、既存の深部地盤構造モデルから計算される理論往復走時を比較することで、深部地盤構造モデルの検証を試みた。ここでは、「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」で新たに作成された京都盆地から奈良盆地にかけての深部地盤構造モデル⁸⁾（以下、奈良重点モデル）を対象とした（図8）。この深部地盤構造モデルは三次元速度構造モデ

ルであり、堆積層内のP波及びS波速度は、堆積年代と深さの関数として与えられている⁷⁾。また、モデルの最小S波速度は350 m/sである。全国レベルの地盤構造モデルである国立研究開発法人防災科学技術研究所の地震ハザードステーション (J-SHIS) 深部地盤構造モデルV2²²⁾ (以下、J-SHIS V2モデル) は、堆積層を均質な多数の速度層による成層構造で表現している。一方、奈良重点モデルは、関西地域における既往のモデル作成経験^{7), 23)}を参考に、まず、鍵層の深度分布 (基盤岩上面深度分布及び堆積層内の同時面深度分布) をモデル化することで三次元堆積年代構造モデルを作り、次に、堆積年代と深さの関数として、地震波速度と密度をグリッド毎に得て、三次元速度構造モデルを得るという方針で作成された。また、新規に奈良盆地や京都盆地で実施された反射法地震探査、ボーリング掘削による地質調査、PS検層、VSP探査、微動探査 (アレイ、単点) に加え、既往の地震探査データ、重力探査データ、深層ボーリング資料、地質図等の収集が行われ、多数の調査データがモデル作成に取り入れられており⁸⁾、本研究実施時点で最新の深部地盤構造モデルである。本検討では、各観測点の直下の速度構造を一次元構造として抽出し、堆積層内でのS波の鉛直伝播を仮定して、S波の理論往復走時を計算した。

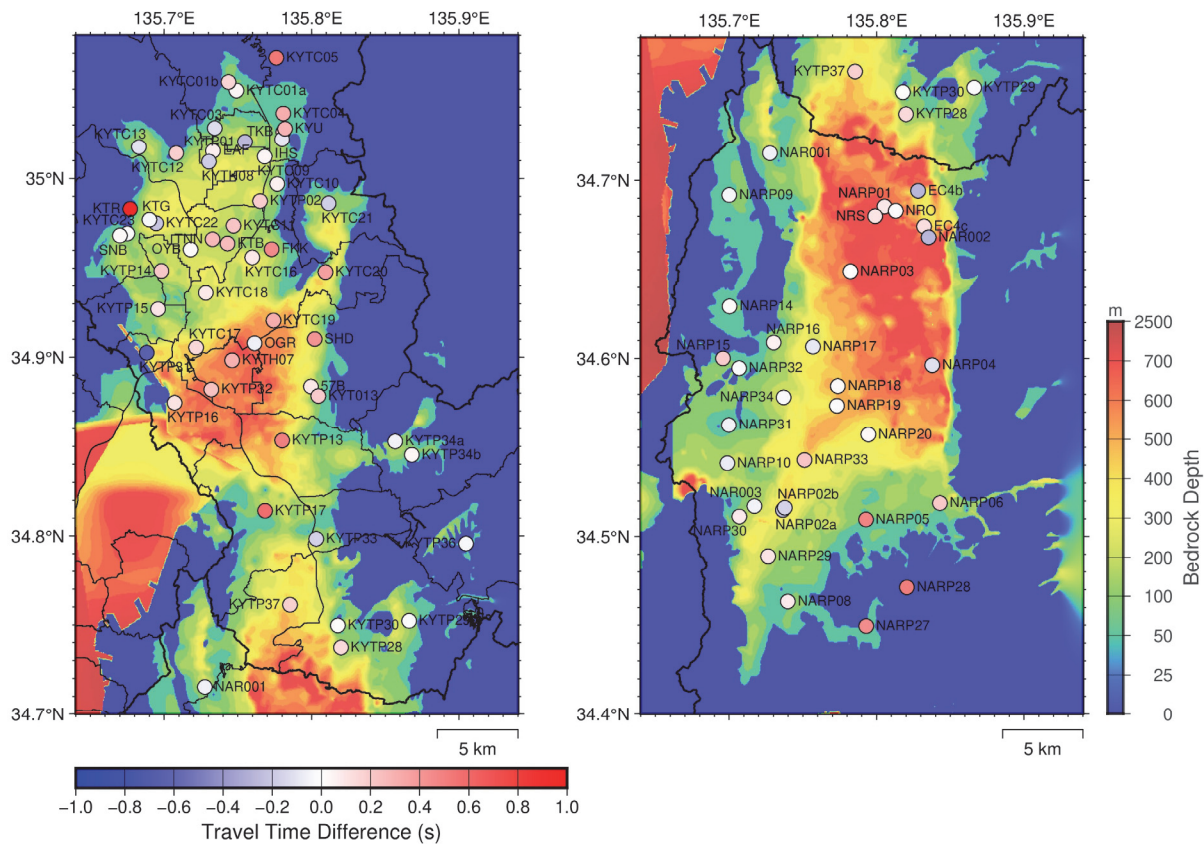


図8 S波往復走時の分布 (左：京都盆地～木津川低地, 右：奈良盆地)

往復走時差 (観測往復走時－理論往復走時) を図8の地図上にプロットした。奈良重点モデルによる理論往復走時は、多くの観測点で観測往復走時を概ね説明していることが分かる。京都盆地では、FKK (京都市伏見区深草), KYTC20 (京都市伏見区醍醐), SHD (京都大学宇治構内), KYTP13 (城陽市寺田) など、盆地の縁部付近で、往復走時差が相対的に大きな地点がいくつか見られた。例えば、山科盆地と京都盆地の境界付近の狭窄部に位置するKYTC20では、観測往復走時が1.4秒、理論往復走時が1.1秒であった。仮に堆積層の平均S波速度を保ったまま修正すると、堆積層厚を320 mから420 mに修正する必要がある。また、深部地盤構造モデルに含まれていない沖積層等の低速度層 (S波速度350 m/s未満) が往復走時に及ぼす影響については、京都盆地で沖積層厚の最も厚い盆地南部の巨椋池周辺 (KYTH07やKYTP32の周辺) での沖積層厚が約15～20 mである^{8), 24)}ことから、沖積層等の平均S波速度を200 m/sと仮

定すると、最大で約0.1秒である。図8でKYTH07などでの走時差にはその影響も含まれている。奈良盆地では、盆地中央部を中心に広い領域で理論往復走時は観測往復走時によく一致しているものの、盆地南東部等、これまでに地下構造が十分には調査されていないと考えられる地域で差異が見られた。これらの地域での深部地盤構造モデルの改善は今後の課題である。

図9（左）に、個々の観測点の観測往復走時と理論往復走時の関係を示した。大多数の観測点が $\pm 20\%$ の範囲（図中の点線）内に含まれていることが確認できた。比較のため、図9（右）に、J-SHIS V2モデル²²⁾の場合の比較結果も示した。なお、対象地域内での両モデルの最小S波速度は同じである。2012年に公開されたJ-SHIS V2モデルに比べ、奈良重点モデルでは観測往復走時の再現性が改善されており、調査データを充実させたことで、地盤構造モデルが改善されていることを確認できた。

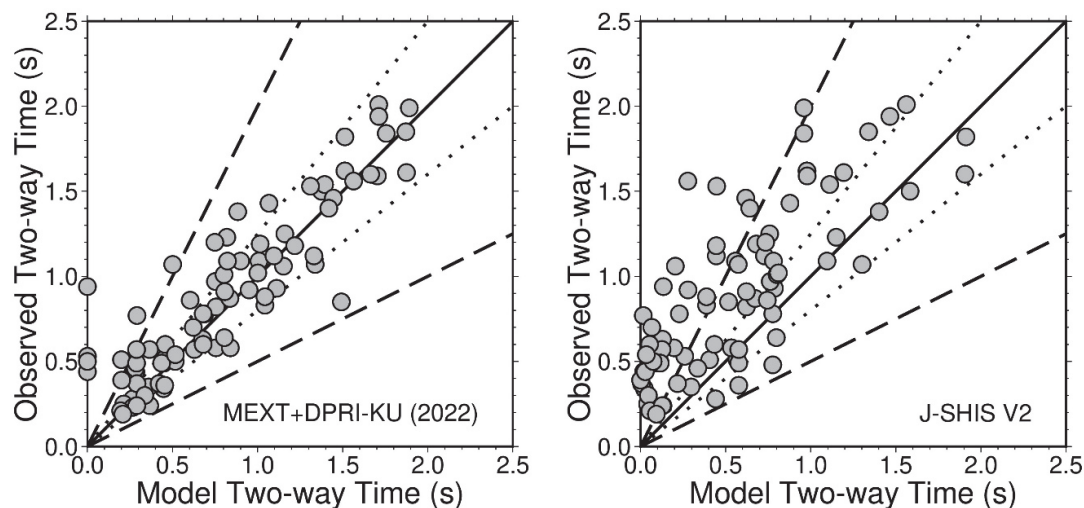


図9 S波の理論往復走時と観測往復走時の比較（左：奈良重点モデル，右：J-SHIS V2モデル）

6. まとめ

京都盆地から奈良盆地にかけての強震・震度観測点で得られた強震波形記録のTransverse成分に対し、自己相関関数を計算し、Phase Weighted Stack法でスタックすることで、地表と盆地基盤面間の堆積層内を伝播するSH波反射波の往復走時を求めた。両盆地で観測往復走時 T_{2S} が最も大きい観測点は、京都盆地南部の宇治川以南に広がる旧巨椋池周辺や奈良盆地最北部の奈良市周辺の観測点であり、いずれも T_{2S} が1.5~2.0秒であった。これらは、堆積層厚が約500~700 mであることに対応し、既往の知見と整合的な結果である。地表と基盤面間を伝播するS波反射波の往復走時の再現性に着目すると、奈良重点モデルによる理論往復走時は、既往のJ-SHIS V2モデルに比べて、観測往復走時との対応が改善されていることを確認できた。京都・奈良盆地の多くの地点では、観測往復走時と理論往復走時の差異は20%以内であった。一方で、奈良盆地の南東部などのほか、山科盆地と京都盆地の境界付近の狭窄部や基盤形状急変部などでは顕著な差異がみられ、地盤構造に関するより詳細な調査が必要と考えられる地点もあった。

謝 辞

国立研究開発法人防災科学技術研究所、気象庁、京都府、奈良県、京都市、関西地震観測研究協議会、京都大学防災研究所の強震波形記録を使用しました。震源情報は気象庁・文部科学省が協力して処理した結果を参照しました。本研究で使用した深部地盤構造モデルは、文部科学省科学技術基礎調査等委託事業「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」⁸⁾の成果物です。図の作成にはGeneric Mapping Tools Ver.6.4²⁵⁾を使用しました。本研究は、科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）基盤研究(C) 20K04084及び文部科学省による「災害軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」による助成を受けました。2名の匿名査読者による査読意見により、本稿を改善することができました。以上、記して感謝申し上げます。

付 録

表A1 各観測点で解析に使用した強震記録の概要及び推定したS波往復走時

コード	観測点	記録数	M _{JMA} 範囲	深さ 範囲 (km)	震央距離 範囲 (km)	back-azimuth 別記録数								S波 往復走時 (s)
						0 ～ 45	45 ～ 90	90 ～ 135	135 ～ 180	180 ～ 225	225 ～ 270	270 ～ 315	315 ～ 360	
KYT013	K-NET 宇治	117	2.9 ～ 7.4	7 ～ 78	9 ～ 384	7	9	7	15	16	27	30	6	0.48
NAR001	K-NET 生駒	131	2.7 ～ 7.4	9 ～ 145	4 ～ 434	3	15	13	15	35	4	4	42	0.57
NAR002	K-NET 奈良	94	3.3 ～ 8.1	9 ～ 682	10 ～ 884	1	12	13	13	36	4	3	12	1.61
NAR003	K-NET 大和高田	87	2.8 ～ 7.4	8 ～ 145	6 ～ 425	1	10	17	14	32	9	3	1	0.63
KYTH07	KiK-net 久御山	153	2.6 ～ 7.4	7 ～ 494	6 ～ 811	7	12	7	18	19	35	38	17	2.01
KYTH08	KiK-net 京都	113	2.6 ～ 6.8	6 ～ 333	5 ～ 740	5	8	3	5	37	22	27	6	0.93
57B	宇治市宇治琵琶	33	3.4 ～ 8.1	8 ～ 682	13 ～ 906	1	3	0	6	6	9	6	2	0.78
EAF	京都市中京区西ノ京	42	3.4 ～ 8.1	8 ～ 682	5 ～ 922	1	4	1	6	14	9	4	3	0.82
EC4b	奈良市半田開町	17	3.8 ～ 8.1	12 ～ 682	8 ～ 887	0	2	1	4	8	1	1	0	1.07
EC4c	奈良市西紀寺町	7	3.9 ～ 6.1	12 ～ 45	27 ～ 129	0	1	0	0	3	0	1	2	1.50
KYTP01	京都市上京区藪ノ内町	91	2.5 ～ 8.1	6 ～ 682	6 ～ 921	4	11	1	4	22	18	25	6	0.58
KYTP02	京都市下京区河原町塩小路	104	2.5 ～ 8.1	6 ～ 682	4 ～ 918	6	6	3	4	26	24	31	4	1.09
KYTP13	城陽市寺田	26	3.3 ～ 6.5	10 ～ 78	6 ～ 381	0	1	1	2	4	9	7	2	1.38
KYTP14	向日市寺戸町	77	2.5 ～ 8.1	6 ～ 682	3 ～ 917	1	2	1	4	29	13	20	7	1.01
KYTP15	長岡京市開田	109	2.3 ～ 8.1	6 ～ 682	3 ～ 916	5	2	0	6	35	22	18	21	0.91
KYTP16	八幡市八幡	43	2.8 ～ 8.1	8 ～ 682	3 ～ 910	1	0	0	5	3	20	5	9	1.62
KYTP17	京田辺市田辺	54	2.8 ～ 6.5	10 ～ 78	6 ～ 378	0	3	1	5	14	1	25	5	1.07
KYTP28	木津川市木津	45	2.7 ～ 8.1	9 ～ 682	3 ～ 892	0	8	1	4	8	1	20	3	0.60
KYTP29	木津川市加茂町里	51	2.6 ～ 8.1	9 ～ 682	5 ～ 891	2	8	5	5	17	3	11	0	0.50
KYTP30	木津川市山城町上狛	36	2.8 ～ 6.5	9 ～ 78	13 ～ 380	1	1	3	2	8	1	18	2	0.28
KYTP31	大山崎町円明寺	137	2.2 ～ 8.1	6 ～ 682	4 ～ 914	5	7	1	9	31	39	24	21	0.85
KYTP32	久御山町田井	72	2.8 ～ 8.1	8 ～ 682	4 ～ 910	1	2	0	6	7	30	13	13	1.94
KYTP33	井手町井手	86	2.6 ～ 8.1	9 ～ 682	4 ～ 898	2	8	5	9	21	1	36	4	0.64
KYTP34a	宇治田原町荒木	65	2.6 ～ 8.1	9 ～ 682	11 ～ 901	5	5	2	6	13	16	17	1	0.37
KYTP34b	宇治田原町立川	13	2.6 ～ 5.1	9 ～ 67	10 ～ 177	0	2	1	2	2	1	4	1	0.25
KYTP36	和束町釜塚	54	2.6 ～ 6.5	9 ～ 78	4 ～ 389	2	7	5	8	19	4	9	0	0.23
KYTP37	精華町南稲八妻	73	2.8 ～ 8.1	9 ～ 682	2 ～ 896	3	10	3	4	14	1	33	5	1.19
NARP01	奈良市二条大路南	64	2.5 ～ 8.1	7 ～ 682	5 ～ 888	1	10	4	6	20	3	6	14	1.84
NARP02a	大和高田市大中 (旧)	33	2.6 ～ 8.1	9 ～ 682	12 ～ 875	0	2	3	5	18	4	1	0	0.83
NARP02b	大和高田市大中	2	3.3 ～ 3.9	14 ～ 59	18 ～ 48	0	0	0	0	1	1	0	0	0.88
NARP03	大和郡山市北郡山町	20	3.0 ～ 6.2	11 ～ 78	10 ～ 374	0	0	0	1	4	1	0	14	1.56
NARP04	天理市川原城町	45	3.4 ～ 8.1	9 ～ 682	14 ～ 878	2	6	2	9	23	2	0	1	1.59
NARP05	橿原市八木町	27	2.6 ～ 6.5	9 ～ 78	10 ～ 371	0	3	1	6	14	3	0	0	0.77
NARP06	桜井市栗殿	17	3.9 ～ 6.5	29 ～ 78	11 ～ 376	0	3	1	2	9	2	0	0	0.57
NARP08	御所市役所	52	2.6 ～ 6.5	9 ～ 78	7 ～ 365	2	4	6	3	28	4	4	1	0.37
NARP09	生駒市東新町	57	2.5 ～ 6.5	5 ～ 78	6 ～ 368	1	5	1	4	18	2	0	26	0.30
NARP10	香芝市本町	47	2.8 ～ 8.1	10 ～ 682	3 ～ 880	1	4	4	6	24	7	1	0	0.60
NARP14	平群町吉新	46	2.7 ～ 6.5	5 ～ 78	1 ～ 366	2	5	0	3	18	5	0	13	0.21
NARP15	三郷町勢野西	16	3.3 ～ 6.5	12 ～ 78	16 ～ 365	1	2	0	3	4	2	0	4	0.39
NARP16	斑鳩町法隆寺西	46	2.7 ～ 6.5	5 ～ 78	4 ～ 368	1	3	2	5	22	6	0	7	0.49

NARP17	安堵町東安堵	46	2.7 ~ 8.1	5 ~ 682	5 ~ 883	1	7	0	6	21	2	1	8	1.06
NARP18	川西町結崎	46	2.7 ~ 8.1	5 ~ 682	8 ~ 880	1	6	3	7	21	3	0	5	1.46
NARP19	三宅町伴堂	48	3.2 ~ 8.1	12 ~ 682	17 ~ 879	1	4	3	7	25	7	0	1	1.40
NARP20	田原本町役場	39	3.5 ~ 8.1	12 ~ 682	15 ~ 876	0	5	1	6	24	3	0	0	1.12
NARP27	高取町観覚寺	79	2.6 ~ 6.5	9 ~ 78	4 ~ 370	3	8	21	6	33	3	3	2	0.44
NARP28	明日香村岡	29	2.6 ~ 6.5	9 ~ 78	5 ~ 373	0	1	6	5	13	3	1	0	0.50
NARP29	葛城市柿本	50	2.6 ~ 8.1	9 ~ 682	4 ~ 873	1	4	8	4	25	4	3	1	0.78
NARP30	葛城市長尾	43	2.6 ~ 8.1	9 ~ 682	2 ~ 876	1	3	6	4	24	4	1	0	0.70
NARP31	上牧町上牧	19	3.3 ~ 6.5	12 ~ 78	16 ~ 364	1	1	1	3	7	4	0	2	0.24
NARP32	王寺町王寺	30	3.6 ~ 6.5	12 ~ 78	17 ~ 366	1	3	0	3	18	2	0	3	0.19
NARP33	広陵町南郷	39	2.8 ~ 8.1	11 ~ 682	4 ~ 877	1	4	1	3	22	7	1	0	1.53
NARP34	河合町池部	37	2.7 ~ 8.1	5 ~ 682	7 ~ 881	1	1	0	6	22	3	0	4	0.92
KYTC01a	京都市北区紫竹	125	1.5 ~ 6.1	6 ~ 58	2 ~ 153	8	18	4	1	16	23	30	25	0.49
KYTC01b	京都市北区大宮西脇台町	26	2.0 ~ 4.4	8 ~ 15	8 ~ 23	0	0	0	0	2	15	9	0	0.44
KYTC03	京都市上京区今出川御前	78	2.2 ~ 6.1	6 ~ 58	7 ~ 156	3	3	1	1	21	20	20	9	0.24
KYTC04	京都市左京区田中	114	1.9 ~ 6.5	6 ~ 58	5 ~ 198	3	11	3	2	34	21	28	12	0.51
KYTC05	京都市左京区岩倉	54	2.3 ~ 6.1	6 ~ 51	4 ~ 139	4	9	4	1	4	14	10	8	0.53
KYTC09	京都市中京区河原町御池	166	1.8 ~ 6.5	5 ~ 67	5 ~ 196	11	9	1	3	72	32	30	8	0.87
KYTC10	京都市東山区清水	33	2.6 ~ 6.5	10 ~ 58	8 ~ 194	3	0	3	2	11	5	8	1	0.51
KYTC11	京都市南区西九条	139	1.2 ~ 6.5	5 ~ 78	2 ~ 382	5	0	3	3	42	41	36	9	0.97
KYTC12	京都市右京区太秦	93	1.8 ~ 6.1	6 ~ 58	0 ~ 132	2	2	2	2	28	16	26	15	0.46
KYTC13	京都市右京区嵯峨	102	1.9 ~ 6.1	6 ~ 58	4 ~ 132	10	2	1	5	22	18	29	15	0.34
KYTC16	京都市伏見区竹田	93	1.5 ~ 8.1	6 ~ 682	1 ~ 915	6	0	4	5	14	29	31	4	1.25
KYTC17	京都市伏見区淀	98	1.9 ~ 6.5	6 ~ 78	3 ~ 377	3	4	0	4	9	43	27	8	1.54
KYTC18	京都市伏見区久我	120	1.3 ~ 8.1	6 ~ 682	2 ~ 915	2	1	0	7	34	41	27	8	1.09
KYTC19	京都市伏見区向島	170	1.9 ~ 6.5	6 ~ 78	7 ~ 383	4	9	1	5	14	85	39	13	1.82
KYTC20	京都市伏見区醍醐	92	2.0 ~ 6.5	6 ~ 78	8 ~ 387	4	5	3	3	10	34	32	1	1.43
KYTC21	京都市山科区西野	96	2.0 ~ 6.5	6 ~ 58	5 ~ 192	13	8	5	2	6	26	31	5	0.58
KYTC22	京都市西京区樫原	110	2.2 ~ 6.5	6 ~ 78	0 ~ 378	1	4	3	3	34	20	33	12	1.12
KYTC23	京都市西京区大枝	238	1.5 ~ 6.5	6 ~ 78	1 ~ 376	7	12	2	12	116	47	30	12	0.35
IHS	京大総人	1003	0.3 ~ 8.3	6 ~ 682	3 ~ 2586	49	83	88	158	355	155	79	36	0.36
KYU	京大工学部	219	1.6 ~ 7.6	6 ~ 633	2 ~ 2484	19	41	19	35	18	36	23	28	0.57
KTR	京大桂	949	0.3 ~ 8.3	5 ~ 682	2 ~ 2594	39	44	74	140	451	91	66	44	0.94
KTG	京都樫原	1215	0.3 ~ 8.3	4 ~ 682	1 ~ 2594	57	91	102	185	493	124	101	62	1.18
NRS	奈良四条	100	2.6 ~ 7.6	12 ~ 633	6 ~ 1662	3	11	19	27	18	8	1	13	1.99
NRO	奈良大宮	605	0.3 ~ 8.3	7 ~ 682	6 ~ 2618	24	57	73	82	123	29	102	115	1.85
TKB	京大時計台	117	2.7 ~ 8.1	6 ~ 682	3 ~ 921	5	14	7	17	23	20	24	7	0.49
FKK	深草幼稚園	103	2.5 ~ 8.1	7 ~ 682	5 ~ 1021	9	5	7	15	12	24	24	7	1.20
KTB	上鳥羽小学校	71	2.7 ~ 7.4	7 ~ 589	2 ~ 1019	6	4	5	9	15	14	13	5	0.86
TNN	塔南高校	54	3.0 ~ 7.4	7 ~ 589	1 ~ 1019	4	2	6	6	14	7	9	6	1.09
OYB	大藪小学校	103	1.8 ~ 8.1	5 ~ 682	1 ~ 1019	6	7	5	15	30	17	14	9	1.02
SNB	新林小学校	134	2.2 ~ 8.1	7 ~ 682	2 ~ 1017	6	8	8	18	26	30	24	14	0.54
OGR	巨椋池	71	2.6 ~ 6.5	8 ~ 603	8 ~ 890	2	6	3	4	12	23	17	4	1.60
SHD	京大防災研	482	1.2 ~ 8.1	6 ~ 682	4 ~ 1905	19	27	24	53	55	206	68	30	1.23

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：地下構造モデル作成の考え方，2017.
- 2) 市原実・編：大阪層群，創元社，340 pp.，1993.
- 3) 関西地盤情報活用協議会地盤研究委員会：新関西地盤—京都盆地—，関西地盤情報活用協議会，196 pp.，2002.
- 4) KG-NET・関西圏地盤研究会，関西地質調査業協会：新関西地盤—奈良盆地—，KG-NET・関西圏地盤研究会，253 pp.，2018.
- 5) 藤原広行，河合伸一，青井真，切刀卓，石井透，早川譲，森川信之，小林京子，大井昌弘，先名重樹，奥村直子：琵琶湖西岸断層帯の地震を想定した地震動予測地図作成手法の検討，防災科学技術研究所資料，No. 281，151 pp.，2005.
- 6) Iwata, T., Kagawa, T., Petukhin, A. and Ohnishi, Y.: Basin and crustal velocity structure models for the simulation of strong ground motions in the Kinki area, Japan, *Journal of Seismology*, Vol. 12, No. 2, pp. 223–234, 2007.
- 7) 関口春子，浅野公之，岩田知孝：奈良盆地の3次元速度構造モデルの構築と検証，*地質学雑誌*，Vol. 125, No. 10, pp. 715–730, 2019.
- 8) 文部科学省研究開発局，国立大学法人京都大学防災研究所：奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測令和元～3年度成果報告書，564 pp.，2022.
- 9) 渡辺哲史，加藤研一：地表の地震動の自己相関関数の逆解析に基づく傾斜基盤構造の増幅特性の推定，*日本地震工学会論文集*，Vol. 16, No. 1, pp. 19–31, 2016.
- 10) Chimoto, K. and Yamanaka, H.: Tuning S-wave Velocity Structure of Deep Sedimentary Layers in the Shimousa Region of the Kanto Basin, Japan, Using Autocorrelation of Strong-Motion Records, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 110, No. 6, pp. 2882–2891, 2020.
- 11) Fukutome, S., Asano, K., Iwata, T. and Sekiguchi, H.: Estimation of Basin Basement Depth Using Autocorrelations of Strong Motion Waveform Data in the Osaka and Kyoto Basins, Japan, *Proceedings of the 6th IASPEI / IAEE International Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, paper no. GS2-P11, 2021.
- 12) Nakagawa, N., Takai, N. and Shigefuji, M.: Examination of one-dimensional S-wave velocity structure using strong-motion data for high-seismic-intensity area during the 2018 Hokkaido Eastern Iwate earthquake, *Earth, Planets and Space*, Vol. 75, 42, doi: 10.1186/s40623-023-01802-x, 2023.
- 13) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004, 2019.
- 14) 赤澤隆士，荒木正之，鷹野澄，澤田純男，林康裕，堀家正則：近畿地方における高精度リアルタイム連続強震観測網の構築，*日本地震工学会論文集*，Vol. 13, No. 4, pp. 55–67, 2013.
- 15) 上野寛，畠山信一，明田川保，舟崎淳，浜田信生：気象庁の震源決定手法の改善—浅部速度構造と重み関数の改良—，*験震時報*，Vol. 65, pp. 123–134, 2002.
- 16) 緒方夢頭，浅野公之，岩田知孝：熊本県地域の強震記録のS波自己相関関数を用いた堆積層—基盤岩速度境界面の検出，*日本地球惑星科学連合2023年大会予稿集*，SSS09-20, 2023.
- 17) Phạm, T.-S. and Tkalčić, H.: On the Feasibility and Use of Tele-seismic *P* wave Coda Autocorrelation for Mapping Shallow Seismic Discontinuities, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, Vol. 122, No. 5, pp. 3776–3791, 2017.
- 18) 斎藤正徳：漸化式デジタル・フィルターの自動設計，*物理探鉱*，Vol. 31, No. 4, pp. 240–263, 1978.
- 19) Schimmel, M. and Paulssen, H.: Noise Reduction and Detection of Weak, Coherent Signals through Phase-weighted Stacks, *Geophysical Journal International*, Vol. 130, No. 2, pp. 497–505, 1997.
- 20) 京都市：平成10年度地震関係基礎調査交付金「京都盆地の地下構造に関する調査」成果報告書（概要版），33 pp.，1999.
- 21) 白川智香子，岩田知孝：京大宇治構内に設置されたボアホール地震アレイ記録を用いた京都盆地南東部の地盤震動特性，*京都大学防災研究所年報*，No. 50B, pp. 251–258, 2007.
- 22) 藤原広行，河合伸一，青井真，森川信之，先名重樹，東宏樹，大井昌弘，はお憲生，長谷川信介，

- 前田宜浩, 岩城麻子, 若松加寿江, 井元政二郎, 奥村俊彦, 松山尚典, 成田章: 東日本大震災を踏まえた地震ハザード評価の改良に向けた検討, 防災科学技術研究所研究資料, No. 379, 349 pp., 2012.
- 23) 堀川晴央, 水野清秀, 石山達也, 佐竹健治, 関口春子, 加瀬祐子, 杉山雄一, 横田裕, 末廣匡基, 横倉隆伸, 岩淵洋, 北田奈緒子, Arben Pitarka: 断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の3次元地盤構造モデル, 活断層・古地震研究報告, No. 3, pp. 225–259, 2003.
- 24) 浅野公之, 岩田知孝, 濱田晃之, 吉田邦一, 染井一寛, 関口春子: ボーリングデータベース解析と微動アレイ観測による京都盆地～奈良盆地の浅部地盤速度構造モデルの作成, 日本地震学会2022年度秋季大会講演予稿集, S16-03, 2022.
- 25) Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F. and Tian, D.: The Generic Mapping Tools Version 6, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 20, No. 11, pp. 5556–5564, 2019.

(受理: 2024年3月29日)

(掲載決定: 2024年8月13日)

Validation of Deep Velocity Structure Model in the Kyoto and Nara Basins

Using Autocorrelation Functions of Strong Motion Records

ASANO Kimiyuki¹⁾, SEKIGUCHI Haruko²⁾ and IWATA Tomotaka³⁾

1) Member, Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Sc.

2) Associate Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Sc.

3) Professor Emeritus, Kyoto University, Dr. Sc.

ABSTRACT

Two-way travel time information obtained from autocorrelation function analyses of strong motion waveform data can be used to test and improve velocity structure models of sedimentary basins. The waveform data from strong motion stations in the Kyoto and Nara basins were analyzed in this study. The two-way travel time of SH-wave was estimated from the stacked autocorrelation function for each station, and it was compared with the theoretical two-way travel time of deep velocity structure model for the studied areas to check the performance of the present velocity structure model.

Keywords: Autocorrelation function, Deep velocity structure model, Strong motion record, Kyoto Basin, Nara Basin