

### 3. 2 断層帯周辺の地殻活動の現状把握調査

#### (1) 業務の内容

(a) 業務題目 断層帯周辺の地殻活動の現状把握調査

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門	主任研究員	吉見 雅行
国立研究開発法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門	上級主任研究員	内出 崇彦
国立研究開発法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門	研究員	二宮 啓
国立研究開発法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門	副部門長	今西 和俊
国立研究開発法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門	主任研究員	大上 隆史
国立研究開発法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門	研究グループ長	大坪 誠
国立研究開発法人産業技術総合研究所地質情報研究部門	上級主任研究員	宮川 歩夢

(c) 業務の目的

森本・富樫断層帯および周辺における震源メカニズム解析に基づく応力場情報を取得する。深部断層形状に関して、サブテーマ1. 1、1. 2と連携するとともに、微動調査等で情報を得る。これらを踏まえて、当該断層帯の断層活動様式（震源断層のすべり方向）を推定する。

(d) 3 ヶ年の年次実施業務の要約

1) 令和4年度：

森本・富樫断層帯周辺の既往定常観測網を補完するよう配置した臨時高感度地震観測網（11 観測点）を構築・維持し、連続観測データの蓄積を開始した。観測データを用いた自動震源処理および雑微動解析を試行した。また、森本・富樫断層帯周辺の応力場に関する既往研究情報を収集・整理した。

2) 令和5年度：

臨時高感度地震観測網(MTKV-net)の維持および臨時稠密地震観測網(MTMT-net)の構築を実施し、連続観測データを蓄積した。深層学習モデル等を用いた自動処理により、臨時高感度地震観測網(MTKV-net)のデータと定常地震観測網データから地震を検出した。27 個の地震の震源メカニズムを決定し、応力場を推定した。連続データの雑微動解析により、森本・富樫断層帯周辺の表面波の抽出を検討した。既

往の深部断層形状と広域応力場を考慮して、断層のすべりやすさ解析を試行した。

3) 令和6年度：

臨時高感度地震観測網の維持・保守・データ回収を実施し、年度内に観測網を撤収した。当該観測網データと既往地震観測データを用いて震源メカニズムを引き続き決定し、当該断層帯周辺の応力場を推定した。雑微動解析等を継続して実施し、断層帯周辺の3次元基盤速度構造を推定した。サブテーマ1で推定される深部断層形状を考慮した断層のすべりやすさ解析およびすべり方向計算を実施し、断層の活動様式を推定し、サブテーマ3.2に提供した。

## (2) 令和6年度の成果

### (a) 業務の要約

臨時高感度地震観測網 (MTKV-net) および臨時稠密地震観測網 (MTMT-net) の観測を2024年12月まで継続し、それぞれ約2年3ヶ月間および約1年4ヶ月間の連続観測データを蓄積したうえで撤収・原状回復した。深層学習モデル等を用いた自動処理により、臨時高感度地震観測網 (MTKV-net) と定常地震観測網データから地震を検出、震源を決定した。森本・富樫断層帯周辺域で29個の地震の震源メカニズムを決定し、応力場を推定した。本事業による臨時観測網の連続地震データの雑微動解析による群速度と位相速度を用いて、森本・富樫断層帯周辺の3次元S波速度構造モデルを推定した。当サブテーマによる応力場とサブテーマ1の深部断層形状を用いて、森本・富樫断層帯のすべりやすさおよび断層活動様式を推定した。

### (b) 業務の成果

#### 1) 微小地震観測による応力場推定

##### a) 森本・富樫断層帯周辺における臨時高感度地震観測

##### i) 臨時高感度地震観測網 (MTKV-net) の維持・撤収

活断層で将来発生する地震の発生様式を理解・評価するためには、地下の断層形状に加え、断層帯周辺に作用する応力場の情報が必要である。日本列島のほぼ全領域の応力場は、地震観測データを用いた発震機構の大量解析により推定されており (Uchide et al., 2022)、現在では0.2度メッシュの地殻応力場データが公開されている (産総研地殻応力場データベース; 内出・他, 2022)。しかし、森本・富樫断層帯周辺など地震活動が低調な場所では、発震機構データが少ないため、応力情報の信頼度は高いとは言えない。断層周辺での稠密な地震観測が重要である (例えば、Katsumata et al., 2015; 今西・他, 2016)。

本事業では、2022年9月に森本・富樫断層帯周辺に11点の臨時高感度地震観測網 (MTKV-net) を構築した (図1、表1)。これらの観測点はすべてオフライン (通信設備無し) であるため、定期的なデータ回収とメンテナンスが必要である。本観測網の維持のため、本年度は2024年4月と8月にデータ回収と保守作業を実施した。途中、SDカードのエラーにより、2観測点では4ヶ月間の欠測 (MTKV03: 2024/4/10 19:24~2024/8/6 11:10、MTKV11: 2024/4/9 12:34~2024/8/5 12:50) が生じた。総じて、メンテナンスにより観測点網の良

好な維持および連続データ回収が行えた。2024年12月上旬に全観測点を撤収し、使用土地の原状回復を行った。

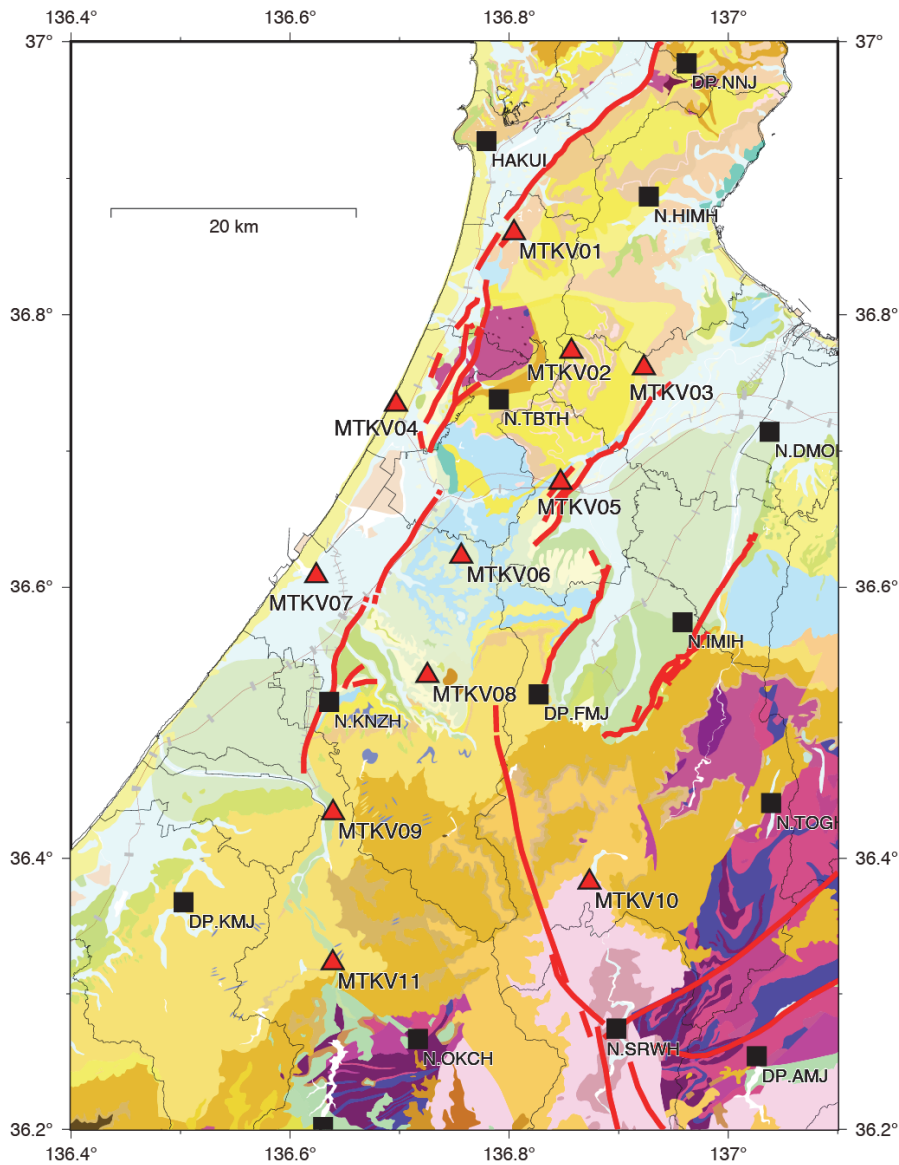


図1 本事業による臨時高感度地震観測網（MTKV-net）の配置図。赤三角はMTKV-net観測点、黒四角は既往高感度地震観測点（Hi-net、気象庁、大学観測点）。基図は20万分の1日本シームレス地質図V2（産総研地質調査総合センター）、活断層位置は産総研活断層データベース、鉄道路線および行政界は国土数値情報による。

表 1 森本・富樫断層帯周辺における臨時高感度地震観測点一覧 (MTKV-net)

コード	観測点名称	緯度	経度	標高 m	観測開始日	撤収日時
MTKV01	宝達志水町スポーツセンター	N36. 86001	E136. 80441	25	2022/9/14	2025/12/3 9:46
MTKV02	高岡市沢川集会所	N36. 77334	E136. 85677	332	2022/9/17	2025/12/3 15:10
MTKV03	高岡市埋蔵文化財センター	N36. 76139	E136. 92304	38	2022/9/14	2025/12/3 12:15
MTKV04	かほく市七塚中央公園	N36. 73634 (N36. 73451)	E136. 69844 (E136. 69668)	35 (24)	2022/11/22移動 (2022/9/12)	2025/12/2 15:36
MTKV05	小矢部市南谷公民館	N36. 67704	E136. 84703	51	2022/9/13	2025/12/4 9:23
MTKV06	金沢市旧朝日小学校	N36. 62285	E136. 75634	161	2022/9/13	2025/12/4 11:40
MTKV07	金沢市戸水公園	N36. 60846	E136. 62383	2	2022/9/15	2025/12/2 13:06
MTKV08	金沢市俵公民館	N36. 53437	E136. 72531	224	2022/9/15	2025/12/5 14:30
TMKV09	石川県林業試験場	N36. 43352	E136. 63927	146	2022/8/25	2025/12/5 12:26
MTKV10	南砺市上平グラウンド	N36. 38232	E136. 87323	334	2022/9/16	2025/12/4 14:33
MTKV11	白山市鳥越農村公園	N36. 32289	E136. 63890	256	2022/9/16	2025/12/5 10:45

ii) 森本・富樫断層帯における臨時稠密地震観測網 (MTMT-net) の維持・撤収

森本・富樫断層帯周辺の地震活動は低調であるため、発震機構解をより多く求めるには規模の小さい地震の極性データを収集する必要がある。また、断層上盤の地盤速度構造をより良く拘束するためにも、稠密な観測網が望ましい。2023年7月に構築した臨時稠密地震観測網 (MTMT-net、図2、表2) は、主に森本・富樫断層帯の上盤を中心に25点の上下動1成分地震計からなる観測網である。本観測網の維持と定期的なデータ回収のため、本年度は2024年4月と7月に保守作業 (乾電池交換と清掃) およびデータ回収を実施した。また、2024年12月中旬に観測点を撤収した。こうした作業により、観測網はほぼ良好に維持されるとともに、全地点の原状回復を行うことができた。

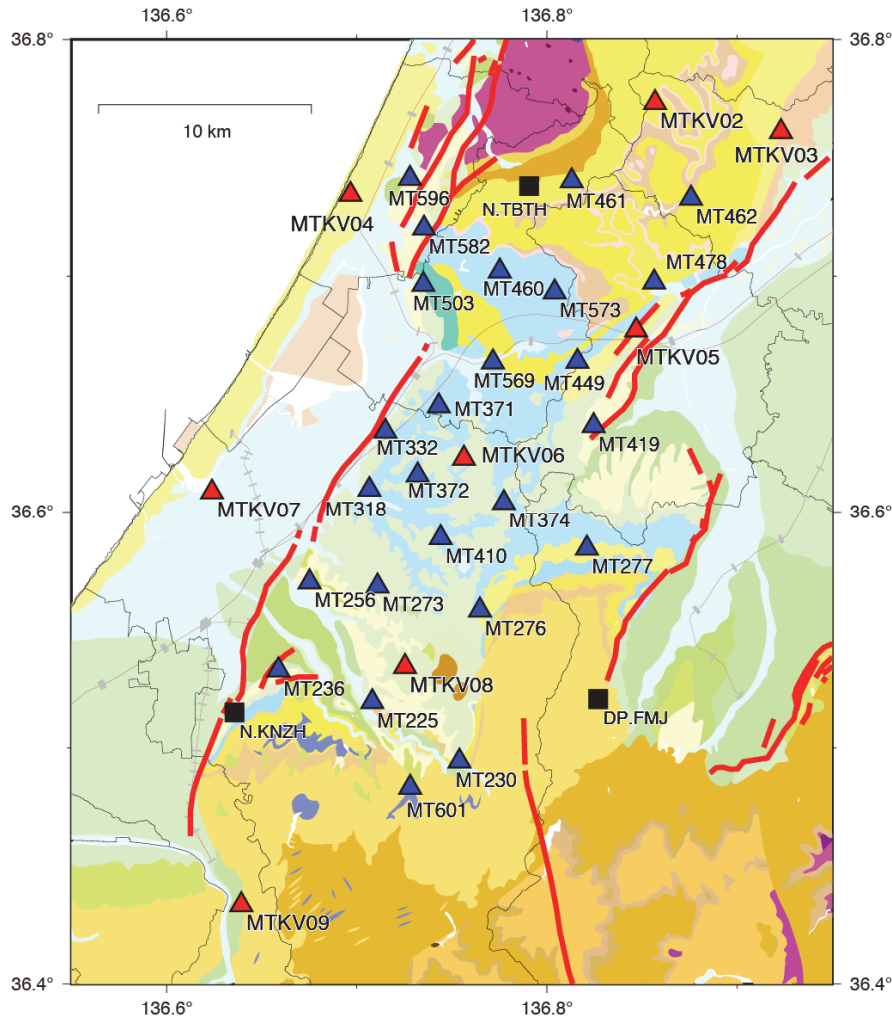


図2 本事業による臨時稠密地震観測網 (MTMT-net) の配置図。青三角はMTMT-net観測点、赤三角はMTKV-net観測点、黒四角は既往高感度地震観測点 (Hi-net、気象庁、大学観測点)。基図は20万分の1日本シームレス地質図V2 (産総研地質調査総合センター)、活断層位置は産総研活断層データベース、鉄道路線および行政界は国土数値情報による。

表2 臨時稠密地震観測網 (MTMT-net) 観測点諸元

コード	地点名	緯度	経度	観測開始日時	終了日時
MT225	恩善寺	36.519447	136.708163	2023/7/8 14:00	2024/12/15 9:33
MT230	光明寺	36.494285	136.753972	2023/7/8 15:00	2024/12/15 9:00
MT236	大乘寺	36.532889	136.658850	2023/7/8 16:30	2024/12/15 10:19
MT256	覚林寺	36.570132	136.675188	2023/7/9 10:00	2024/12/15 10:38
MT273	宇宙寺	36.568360	136.710949	2023/7/9 11:30	2024/12/15 10:50
MT276	本泉寺	36.558234	136.764796	2023/7/9 12:00	2024/12/15 11:16
MT277	称念寺	36.584391	136.820978	2023/7/9 14:00	2024/12/15 11:30
MT318	本教寺	36.609632	136.706609	2023/7/9 15:30	2024/12/14 14:35

MT332	波自加彌 神社	36.63425	136.71505	2023/7/10 10:30	2024/12/14 14:11
MT371	少彦名神 社	36.64500	136.74313	2023/7/10 11:15	2024/12/14 13:56
MT372	水分神社	36.61677	136.73201	2023/7/10 12:10	2024/12/14 14:43
MT374	熊野神社 (竹又)	36.60403	136.77738	2023/7/10 13:30	2024/12/15 11:41
MT410	宝乗寺	36.58888	136.74414	2023/7/10 14:30	2024/12/15 12:03
MT419	本叡寺	36.63669	136.82455	2023/7/10 15:30	2024/12/14 10:20
MT449	俱利迦羅 不動寺	36.66385	136.81601	2023/7/10 17:10	2024/12/14 9:59
MT460	光楽寺	36.70208	136.77519	2023/7/11 10:15	2024/12/14 13:25
MT461	円通寺	36.74019	136.81305	2023/7/11 11:10	2024/12/14 11:27
MT462	西照寺	36.73282	136.87574	2023/7/11 13:30	2024/12/14 9:11
MT478	報恩寺	36.69739	136.85638	2023/7/11 14:30	2024/12/14 9:42
MT503	養楽寺	36.69637	136.73500	2023/7/11 16:00	2024/12/14 12:43
MT569	教願寺	36.66362	136.77162	2023/7/11 17:30	2024/12/14 13:00
MT573	笠野神社	36.69320	136.80408	2023/7/12 10:15	2024/12/14 11:01
MT582	高峯山正 覚寺	36.72020	136.73534	2023/7/12 11:20	2024/12/14 12:03
MT596	本立寺	36.74123	136.72796	2023/7/12 13:30	2024/12/14 11:43
MT601	駒帰町	36.48321	136.72808	2023/7/12 15:30	2024/12/15 9:21

b) 深層学習モデル等を用いた地震波形データ自動処理による地震の検出

地震波形データの自動処理により、地震を検出し、その震源位置を同定した。解析するデータとしては、一昨年度本事業で構築したMTKV-netで得られたものに加え、周辺にある国立研究開発法人 防災科学技術研究所の高感度地震観測網 (Hi-net)、気象庁の地震観測網、京都大学防災研究所による地震観測網の観測点で得られたものを使用した。使用した観測点の位置を図3に示す。なお、2023年7月以降の期間についてはMTMT-netデータも含めた震源決定を試みたが、震源の決まらない地震が出るなど結果が不安定になったため、最終的にはMTMT-netのデータは用いなかった。

まず、PhaseNetモデル (Zhu and Beroza, 2019) を日本のデータによる学習させたNaoi et al. (2024)の学習済みモデルを使用して、各観測点における連続地震波形データから地震を検出し、P波及びS波の到達時刻を読み取った。次に、Gamma (Zhu et al., 2022) を使用して、異なる観測点の間のP波及びS波の読み取り値を同一地震のものであるとして結び付ける、いわゆるphase associationを実施した。最後に、速度構造としてJMA2001モデル (上野・他, 2002) を仮定し、hypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987) により震源位置を決定した。

図4に検出された地震の位置を赤色丸印で示す。比較のため、気象庁一元化処理震源カタログに掲載されている地震の位置を青色×印で示す。いずれも、2022年9月13日から2024年12月5日までの期間に発生した地震を図示している。図中の黄枠の範囲にある地震は、気象庁カタログでは396個であったのに対し、本事業による検出結果はおよそ3倍の1174個であった。

図5に、得られた震源の3次元分布を断面図で示す。森本・富樫断層帯と直接対応するような東南東傾斜の面を明瞭に見ることはできなかった。そのような地震が非常に少ないことがその原因として考えられる。なお、領域の北部では深さ6～25 km程度の地震が多く、南部では0～18 km程度の地震が多い。

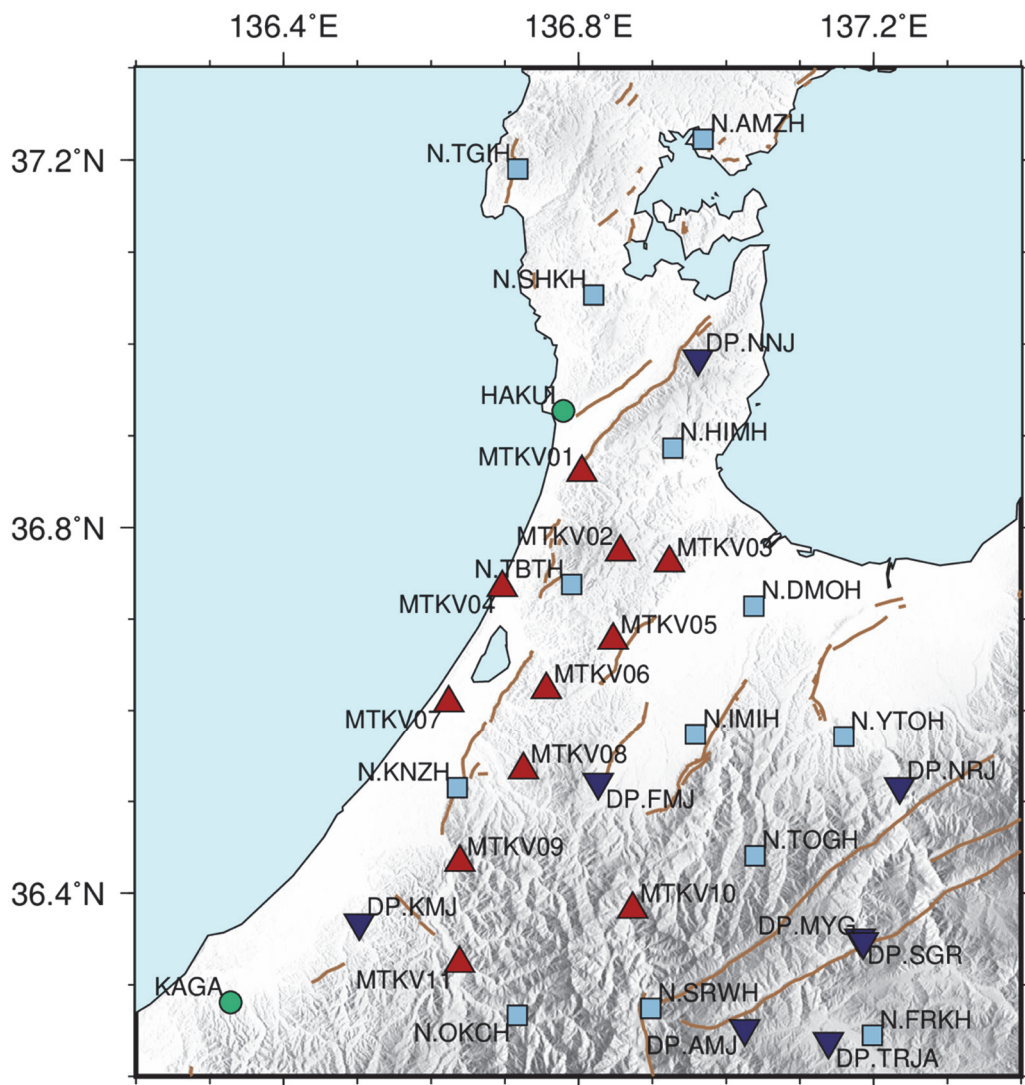


図3 深層学習を用いた地震検出・検測を行う際に使用した観測点の位置。赤色三角形がMTKV-net、水色四角形が国立研究開発法人 防災科学技術研究所の高感度地震観測網(Hi-net)、緑色丸印が気象庁による地震観測網、青色下三角形が京都大学防災研究所による地震観測網の観測点の位置をそれぞれ示す。

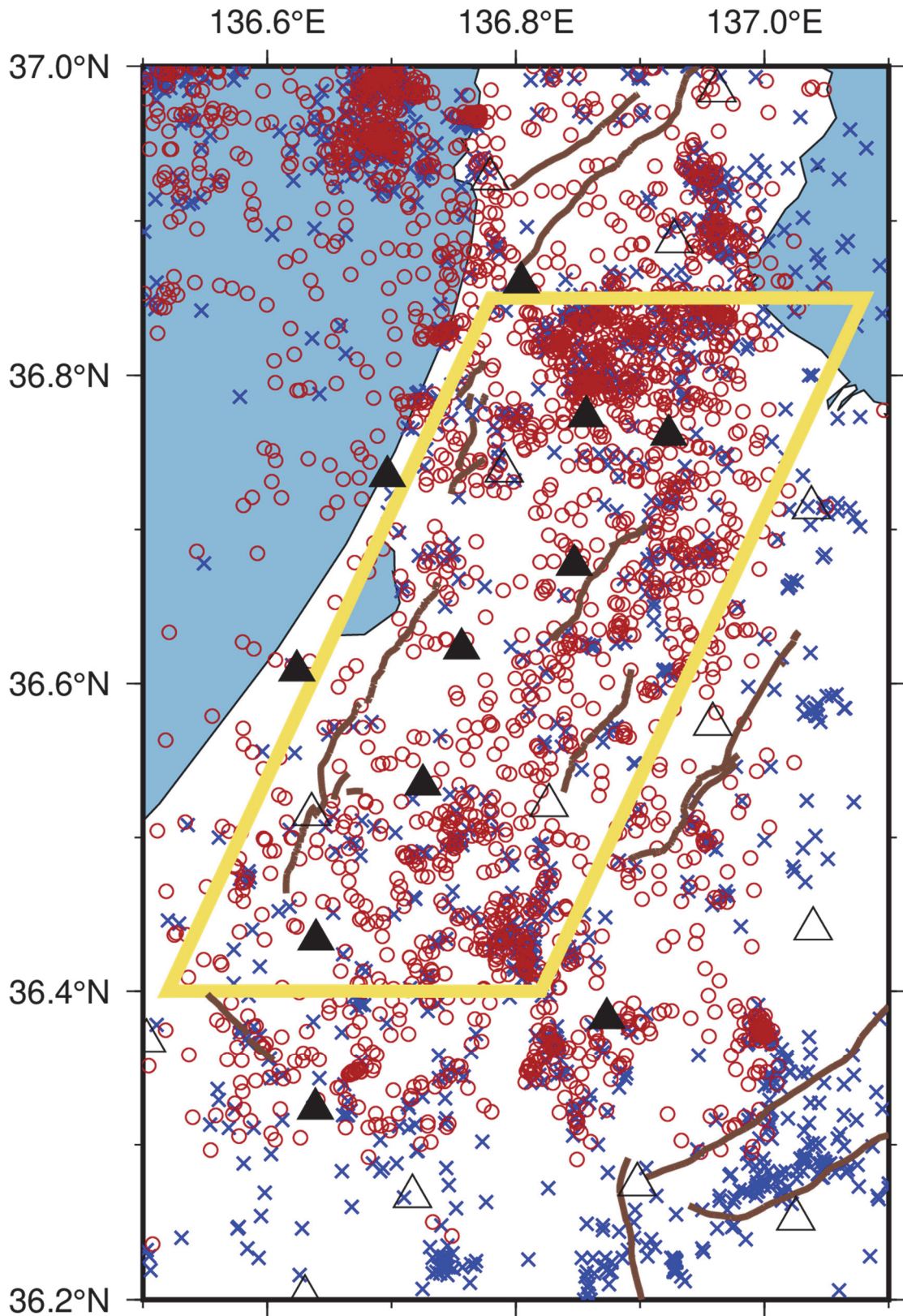


図4 深層学習を用いて検出・検測された地震（赤色丸印）と気象庁一元化処理震源カタログに掲載されている地震（青色×印）。いずれも、2022年9月13日から2024年12月5日までの期間に発生した地震を図示している。黒色三角形はMTKV-netの観測点、白抜き三角形はHi-net、気象庁、京都大学防災研究所による定常地震観測点の位置をそれぞれ示す。



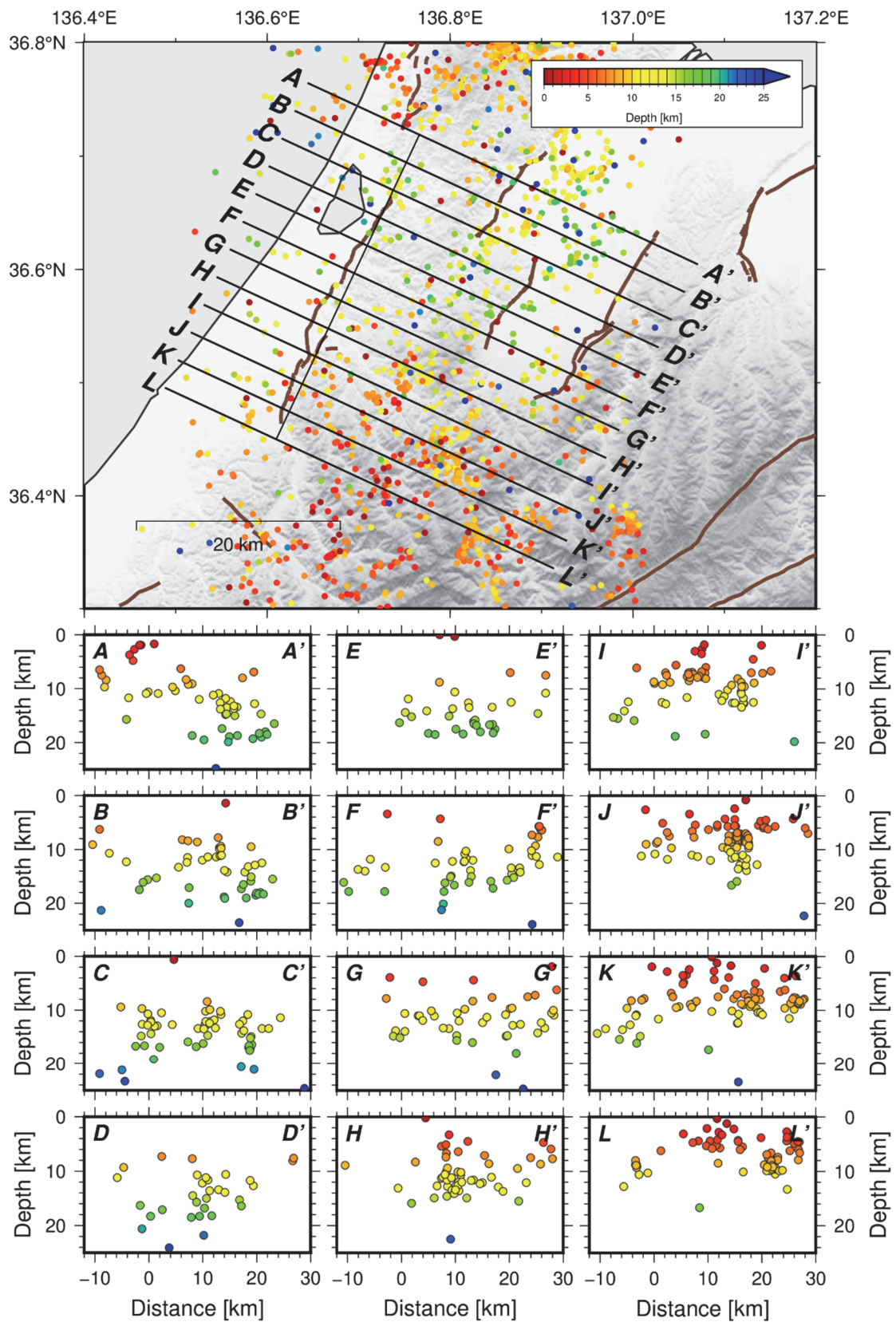


図5 深層学習を用いて検出・検測された地震の3次元分布を示す断面図。色は震源の深さを示す。

#### c) メカニズム解の推定

検出した地震に対して、P波初動極性を手動検出し、SKHASH (Skoumal et al., 2024 ; Hardebeck and Shearer, 2002) により震源メカニズム解の推定を試みた。P波初動極性の個数が十分で無い地震が多く、解を一意に決定することが困難であった。そこで、P波初動の押し引きデータに加えてP波とS波の振幅の比も同時に使うことで、この問題点を克服することにした。

実際の解析においてはP波初動の押し引きデータが7個以上あるM1.0以上の地震に対して上記手法を適用し、メカニズム解を推定した。SKHASHでは得られたメカニズム解の品質を良い方から順にAからDまでのランクで示しているが、Aランクが14個、Bランクが9個、Cランクが6個、Dランクが3個という結果であった。Cランク以上の29個の推定結果の空間分布を図6に示す。断層のタイプは逆断層型と横ずれ断層型のいずれのものも見られた。図7にP軸方位、図8にT軸方位の空間分布を示す。北西-南東方向にP軸を持つ逆断層型が多く、当該地域の広域応力場 (Uchide et al., 2022) と調和的であるが、枠内の北西部に当たる河北湖付近では横ずれ断層が卓越し、枠内の南西部では逆断層が卓越するなど、地域的な偏りも見られる。

#### d) 応力場の推定

本研究で推定したメカニズム解にUchide et al. (2022) の応力テンソルインバージョン法を適用し、応力場の推定を行った。図9に推定結果を示す。最適解は、北西-南東方向に圧縮軸を持つ横ずれ断層場を示す。圧縮軸方位は森本-富樫断層帯の走向に直交しており、逆断層と考えられる同断層帯を動かしやすい応力場であると言える。推定誤差を考慮して得られた10000通りの主応力軸の方向の分布(詳しくは項目3参照)も図9に示しているが、 $\sigma_2$ と $\sigma_3$ 方位の分布は広く、重なっている部分も大きい。これはメカニズム解の特徴からも予想されたことであるが、横ずれ断層型と逆断層型の地震が混在していることに起因する。なお、空間的な不均質を考慮した応力インバージョンについては、十分な個数の震源メカニズム解が得られていないことから、実施困難であった。

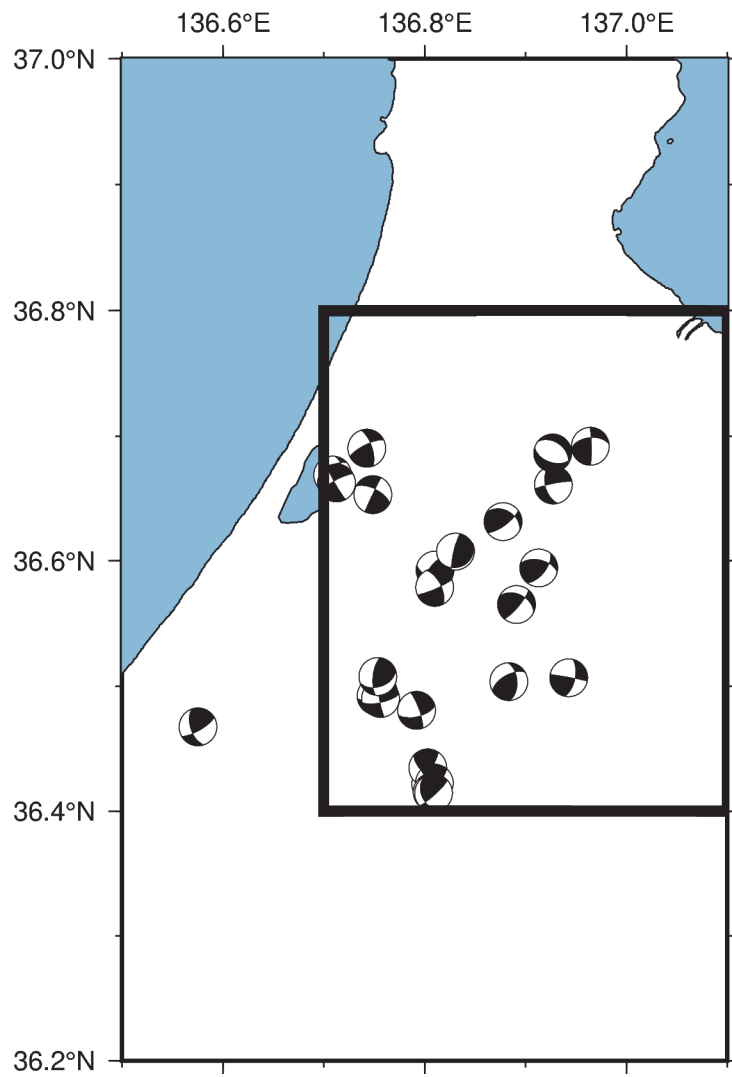


図6 推定された震源メカニズム解

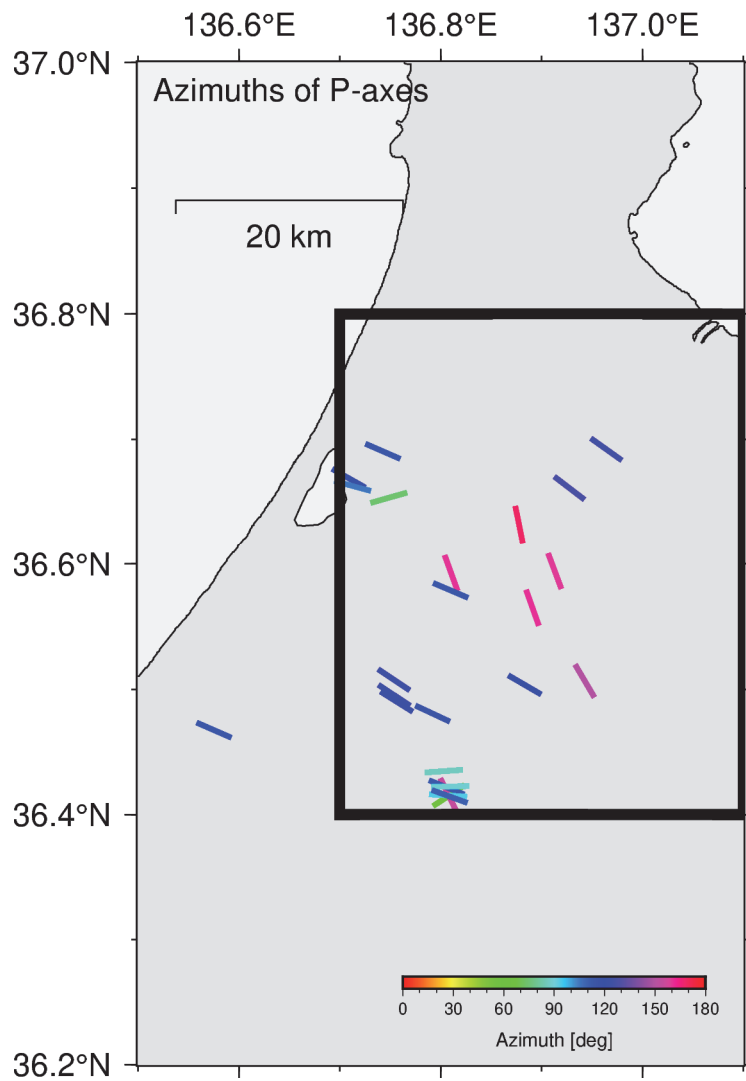


図7 得られた震源メカニズム解のP軸方位。傾き (plunge) が30度以下のみ描画。

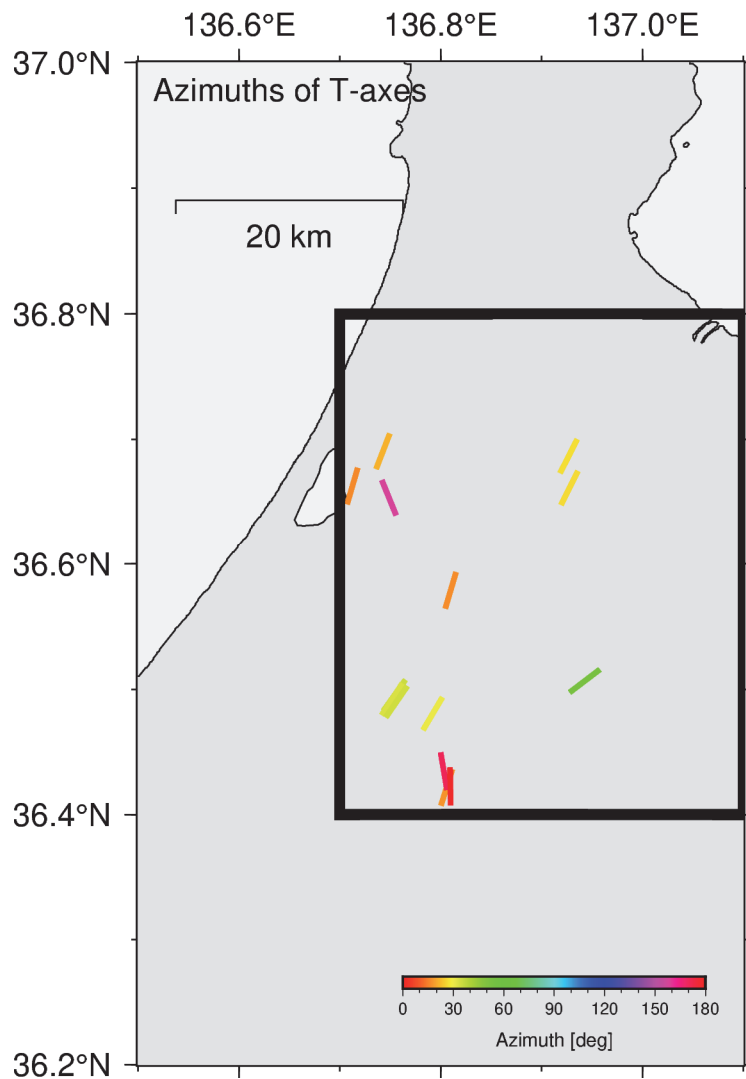


図8 得られた震源メカニズム解のT軸方位。傾き (plunge) が30度以下のみ描画。

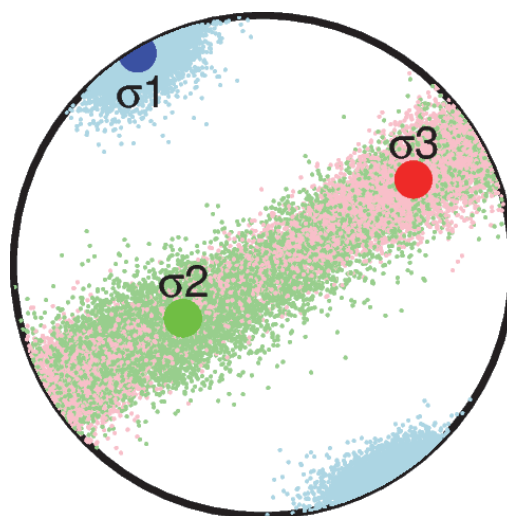


図9 応力テンソルインバージョン結果。最適解を丸印で示す。薄い色の小さい丸で、応力テンソルの推定誤差を考慮した場合のばらつきを示す。

## 2) 雑微動を用いた表面波解析

本事業で設置した高感度臨時地震観測網（MTKV-net：図 10 の赤色）、稠密地震観測網（MTMT-net：図 10 の緑色）とサブ 3-2 による臨時地震（強震）観測（MTSV と MTSM：図 10 の青色）及び周辺の定常地震観測点である防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net：図 10 の白色）、気象庁（図 10 のマゼンタ色）、京都大学（図 10 の黄色）で得られた連続地震観測データのうち、地震を含まない期間の振動（雑微動）を用いて表面波解析を行なった。本解析では、最も観測点数の多い MTMT-net が上下動 1 成分のみであるため、全点で上下動 1 成分を使用した。データの期間は 2023 年 7 月 10 日から 2024 年 12 月 30 日である。各観測点においてデータに欠損がある場合、欠損を含む日付のデータは使用しないものとした。雑微動データに対して、地震波干渉法および SPAC 法を適用し、2 観測点間を伝播する表面波の群速度および位相速度を推定した。さらに、推定した 2 観測点間の位相速度分散曲線をもとにトモグラフィ解析により位相速度マップを推定した。最後に、推定した位相速度マップをもとにインバージョン解析を行い、森本・富樫断層帯周辺の広域 3 次元 S 波速度構造を推定した。

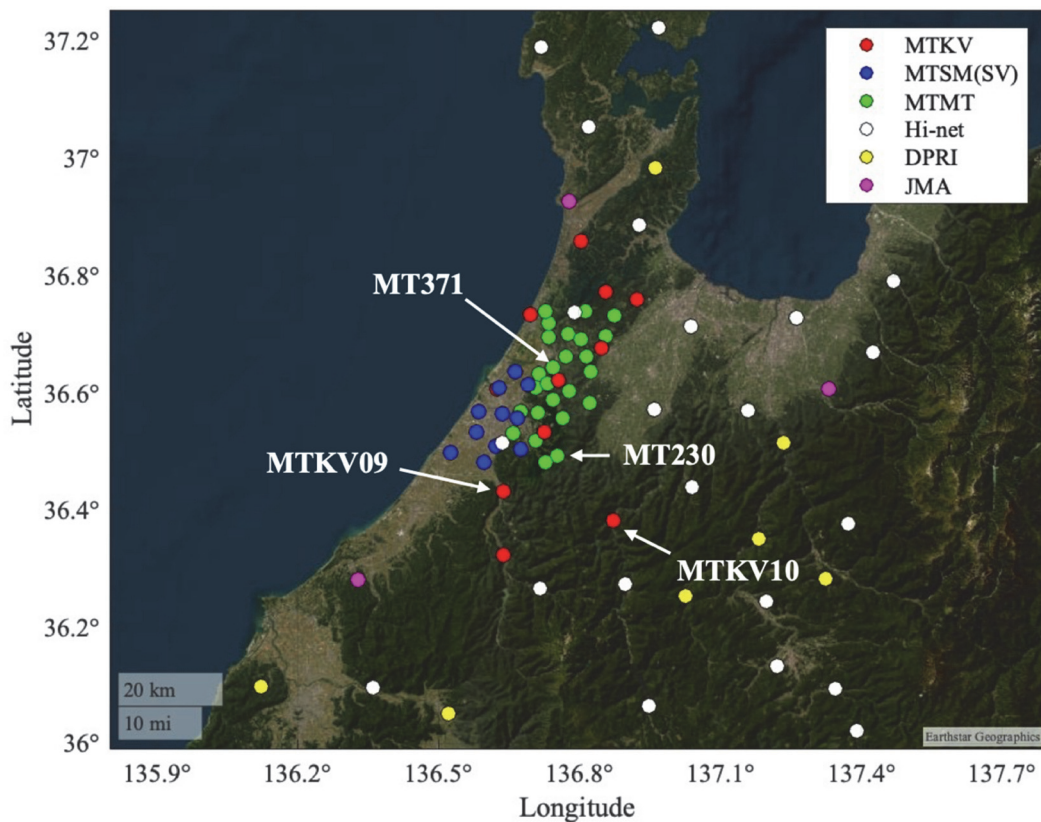


図 10 本解析で使用した観測点分布。観測網ごとに異なる色でプロットしている。白い矢印で示す観測点（MTKV09、MTKV10、MT230、MT371）は結果の例示に使用する観測点である。

本解析では、使用した地震計に加速度計および速度計が含まれていたため、加速度データについては応答補正を行った後、数値積分により速度データへ変換した。レスポンスを

補正した各観測点のデータに対して、1日分のデータを50%ずつオーバーラップさせながら20分間のセグメントに分割し、平均値とトレンドを除去してから、セグメントの両端に10%のテーパをかけた。自然地震の影響を取り除くため、各セグメントの二乗平均振幅（MS振幅）が1日のMS振幅の2倍以上となるセグメントを除外した。

前処理を行ったデータに対して地震波干渉法を適用した。地震波干渉法は、異なる2地点で観測された雑微動の相互相関関数を計算することで、一方を仮想的な震源、他方を受振器とみなして、観測点間のグリーン関数を抽出する方法である。理論では単純な波動場を仮定しているものの（Lobkis and Weaver, 2001）、この方法により観測点間のグリーン関数が抽出可能であることが実データにより示されている（Shapiro and Campillo, 2004）。特に、実体波よりも減衰しにくい表面波が強調されやすく、時間領域で表面波の伝播の様子を可視化できる。本解析では、ノイズ成分を低減するために、0.3 km/s から 4.0 km/s の速度フィルタを適用した（図 11）。

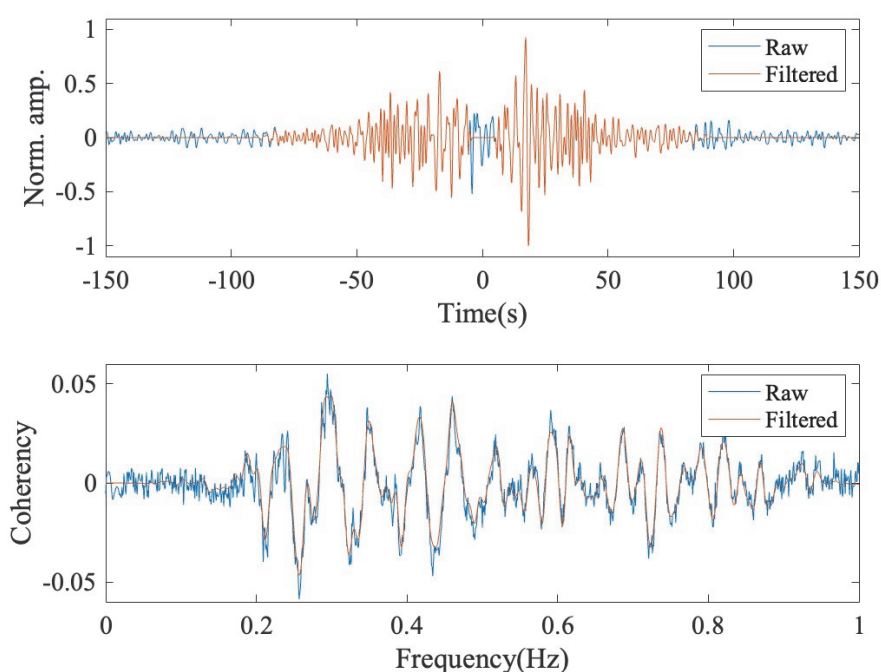


図 11 地震波干渉法の結果例（MTKV09 と MT371 のペア）。（上段）地震波干渉法で得られた時間領域の相互相関関数。（下段）周波数領域の相互相関関数（正規化したクロススペクトルの実部：複素コヒーレンシーの実部）。青線と赤線は速度フィルタの適用前と適用後を示す。

まず初めに、相互相関関数に狭帯域のバンドパスフィルタを適用し、時間領域で包絡線の到達時間を読み取る（Bensen et al., 2007）ことで、群速度の分散曲線を推定した。本解析では、中心周波数から $\pm 0.05$  Hz のバンドパスフィルタを適用し、0.15 Hz から 0.9 Hz において、0.002 Hz 間隔で群速度を推定した（図 12, 13）。各観測点ペアにおいて、使用する周波数範囲は群速度の周波数方向の連続性や包絡線の振幅等を考慮して、マニュアルで設定した。

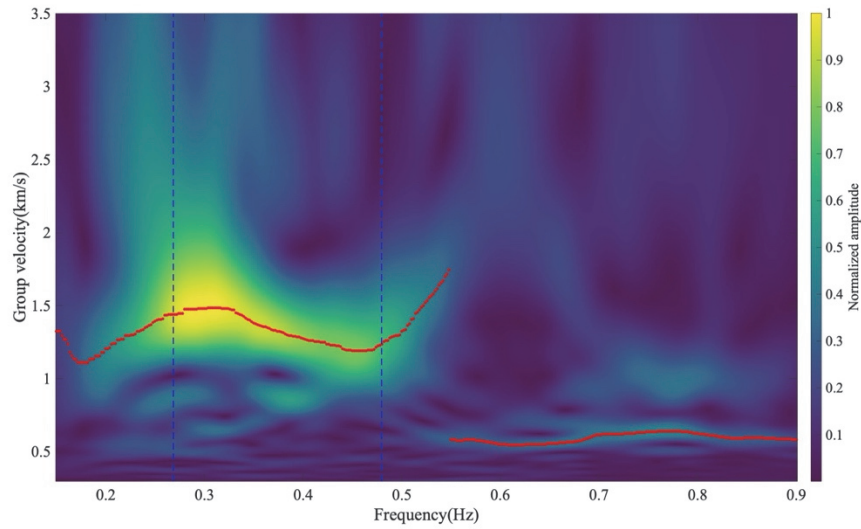


図 12 群速度の推定結果例 (MTKV09 と MT371 のペア)。赤線は各周波数において相互相関関数の包絡線が最大となる速度を示す。青色の破線は 3 次元 S 波速度構造の検証に使用した周波数範囲を示す。

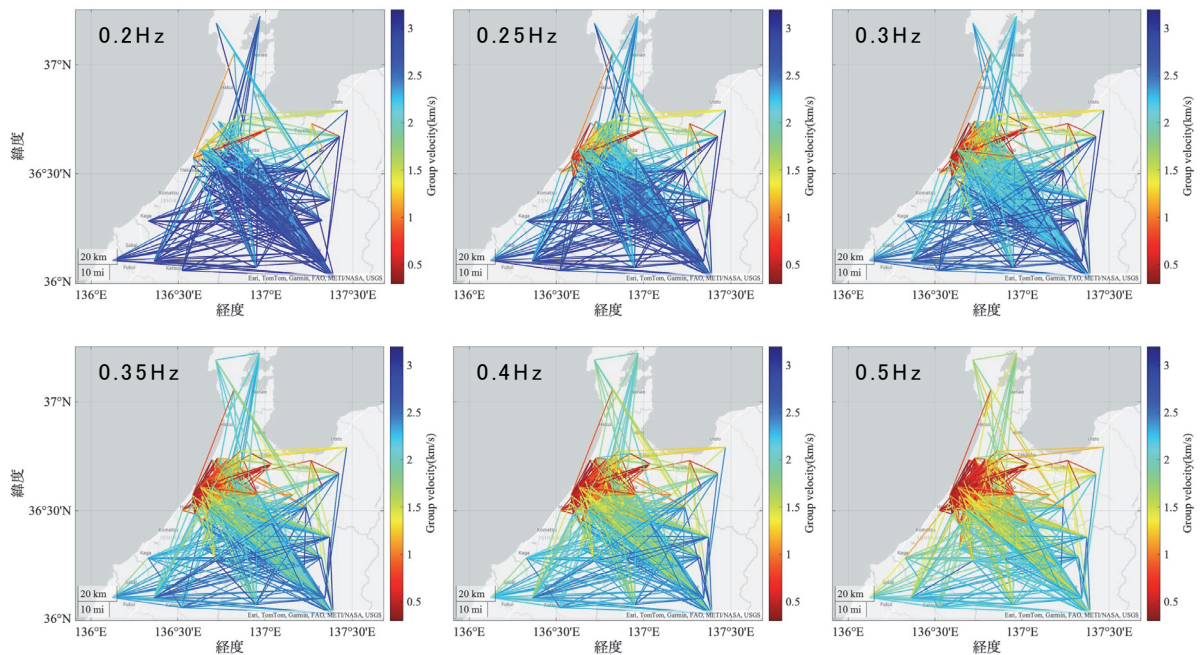


図 13 推定した群速度を示す。観測点ペアを結ぶ直線を推定した群速度で色付けしている。各パネルの左上に対応する周波数を記載している。

次に、周波数領域において、雑微動の相互相関関数とベッセル関数で表される理論値の二乗平均平方根誤差 (RMSE) が最小となる位相速度の分散曲線を推定した (Aki, 1957)。本解析では、Takagi and Nishida (2022)を参考に、位相速度を 1 次元 S 波速度構造の関数



として定義し、相互相関関数とベッセル関数で表される理論値の誤差が最小となる1次元S波速度構造から、2観測点間の分散曲線を推定する。1次元S波速度構造は、最下層の厚さを無限とする4層構造を仮定し、初期モデルとして地震調査研究推進本部の全国1次地下構造モデル(暫定版)(Koketsu et al., 2008、地震調査研究推進本部, 2012)を使用した。理論分散曲線の計算はComputer program in seismology(CPS; Herrmann, 2013)を使用した。最適解は共分散行列適応進化戦略(CMA-ES; Hansen and Ostermeier, 2001)により推定した。各観測点ペアにおいて、使用する周波数範囲はRMSEや相互相関関数の振幅等を考慮して、マニュアルで設定した。全ての観測点ペアにおいて、位相速度の分散曲線を推定した(図14、15)。

得られた2観測点間の位相速度分散曲線のうち、使用する周波数範囲が0.05 Hz以上のもののみを使って、0.18 Hzから0.55 Hzにおいて0.004 Hz間隔で位相速度トモグラフィ(Ekström, 2014)を適用し、0.03°間隔グリッドの位相速度マップを推定した(図16)。トモグラフィ解析は観測点間を伝播する波の走時情報を利用し、全ての観測点ペアで得られた走時情報を最もよく説明する位相速度分布を最小二乗法で推定する。本解析では、隣接する東西南北のグリッドが滑らかな解になるような平滑化パラメータを使用した。

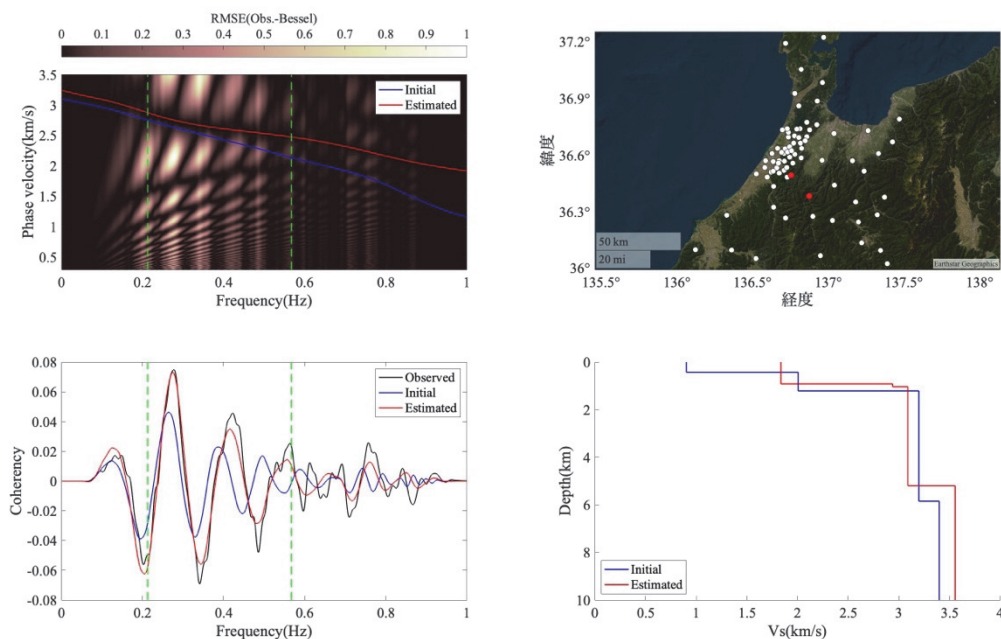


図14 位相速度の推定結果例(MTKV10とMT230)。(左上)背景の色は各周波数、各位相速度における理論値と観測値のRMSEを示す。青線と赤線はそれぞれ、初期モデルと最適解における位相速度の分散曲線を示す。緑色の破線は使用する周波数範囲を示す。(左下)黒線と青線、赤線はそれぞれ、観測値と初期モデル、最適解における理論値を示す。緑色の破線は使用する周波数範囲を示す。(右上)使用した観測点ペアの位置を示す。(右下)1次元S波速度構造の初期モデルと最適解のモデルを示す。

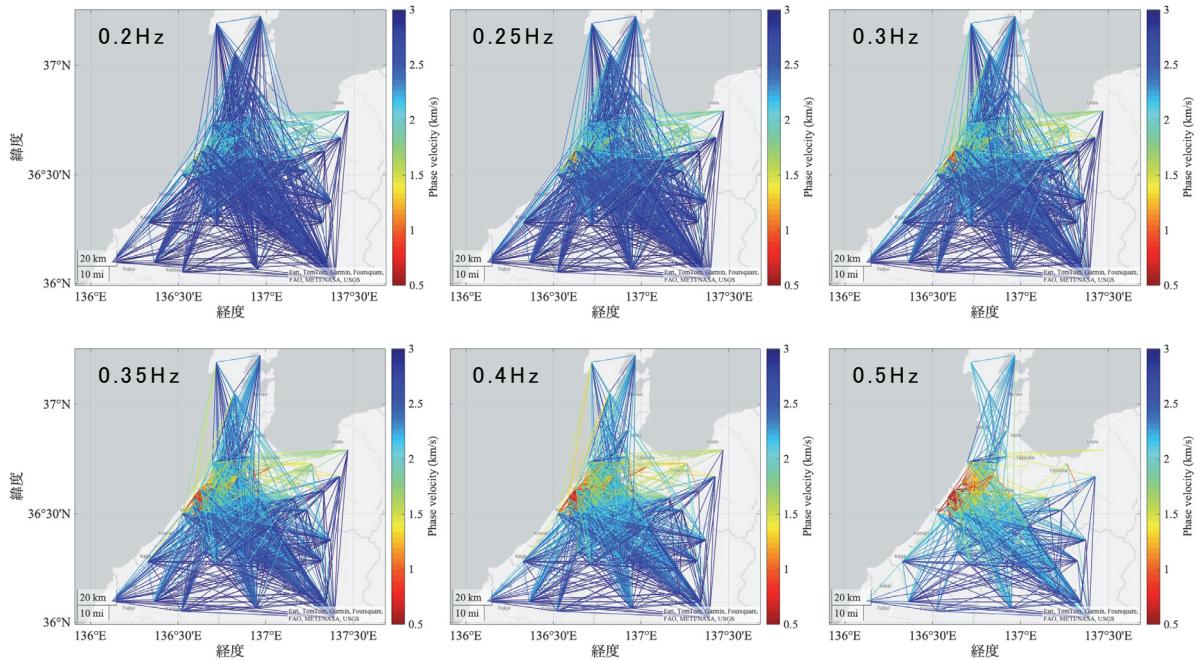


図 15 推定した位相速度。観測点ペアを結ぶ直線を推定した位相速度で色付けしている。各パネルの左上に対応する周波数を記載している。

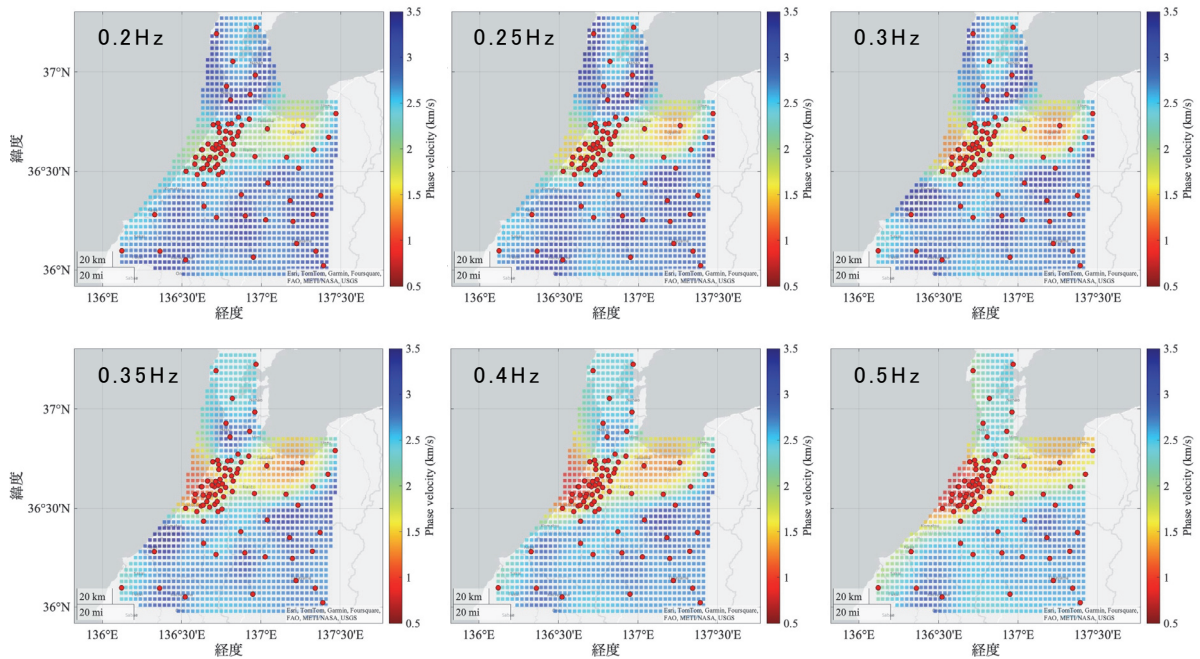


図 16 推定した位相速度マップ。赤色の丸は観測点を示す。各パネルの左上に対応する周波数を記載している。

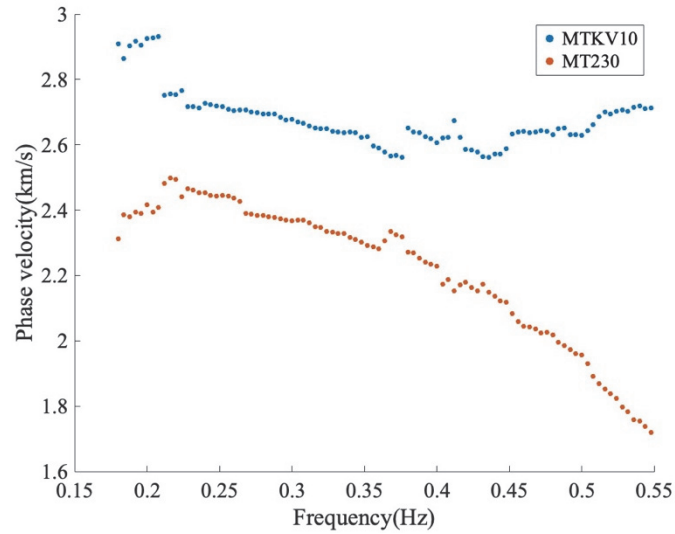


図 17 周波数ごとの位相速度トモグラフィで求めた位相速度の例（観測点 MTKV10 および MT230 の位置するグリッド）。

位相速度トモグラフィにより、各グリッドにおける 0.18 Hz から 0.55 Hz の位相速度を周波数ごとに推定し、これをもとに各グリッドの分散曲線を作成した（図 17）。3次元 S 波速度構造の推定には、最下層の厚さを無限とする 3層構造を仮定し、初期モデルとして表 3 に示すモデルを用いた。各グリッドの分散曲線を用いて、ノルム最小の制約を加えた非線形最小二乗法を適用し、3次元 S 波速度構造を推定した（図 18、19）。本解析では、ノルム最小の条件に加えて、隣接する東西南北のグリッドが滑らかな解になるような平滑化パラメータを使用した。位相速度に対する S 波速度および層厚の感度カーネルは CPS (Herrmann, 2013) を用いて計算し、これをヤコビアン行列として非線形最小二乗法に用いた。

表 3 3次元 S 波速度構造の初期モデル

	S 波速度 (km/s)	層厚 (km)
1 層目	1.0	0.5
2 層目	2.0	1.0
3 層目	3.0	-

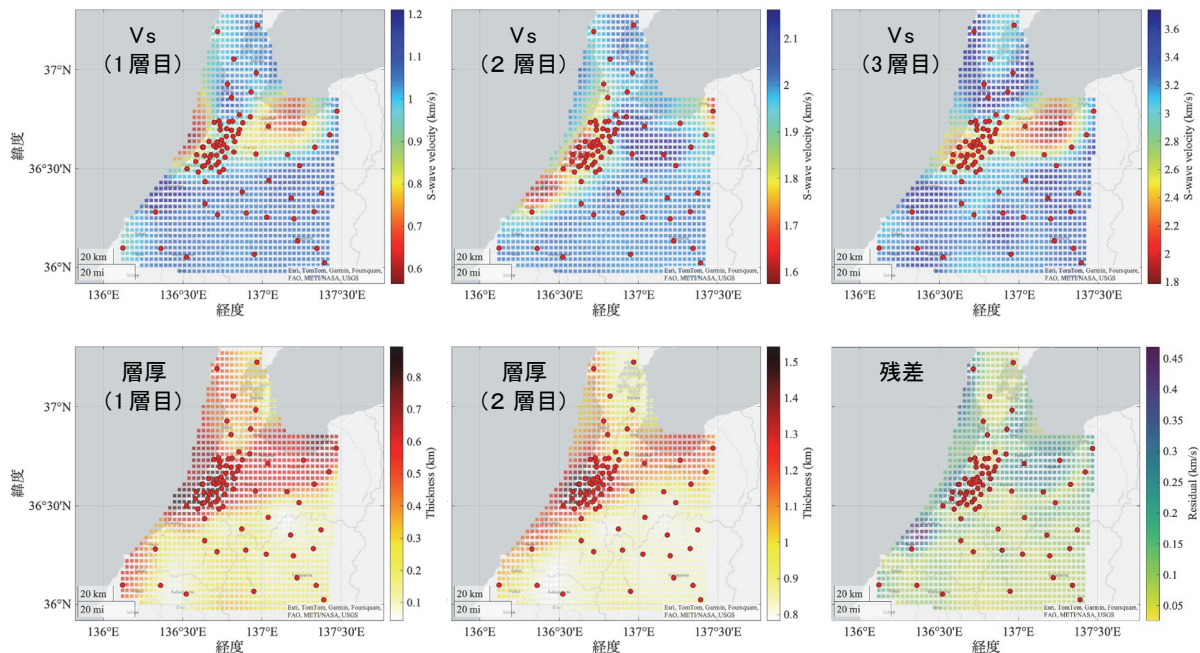


図 18 推定した 3 次元 S 波速度構造。各パネル左上には、表示している物理量の名称を記載している。各グリッドの残差は、推定された 3 次元 S 波速度構造から計算した分散曲線と、トモグラフィ解析によって得られた分散曲線との各周波数における位相速度の絶対誤差の総和とした。

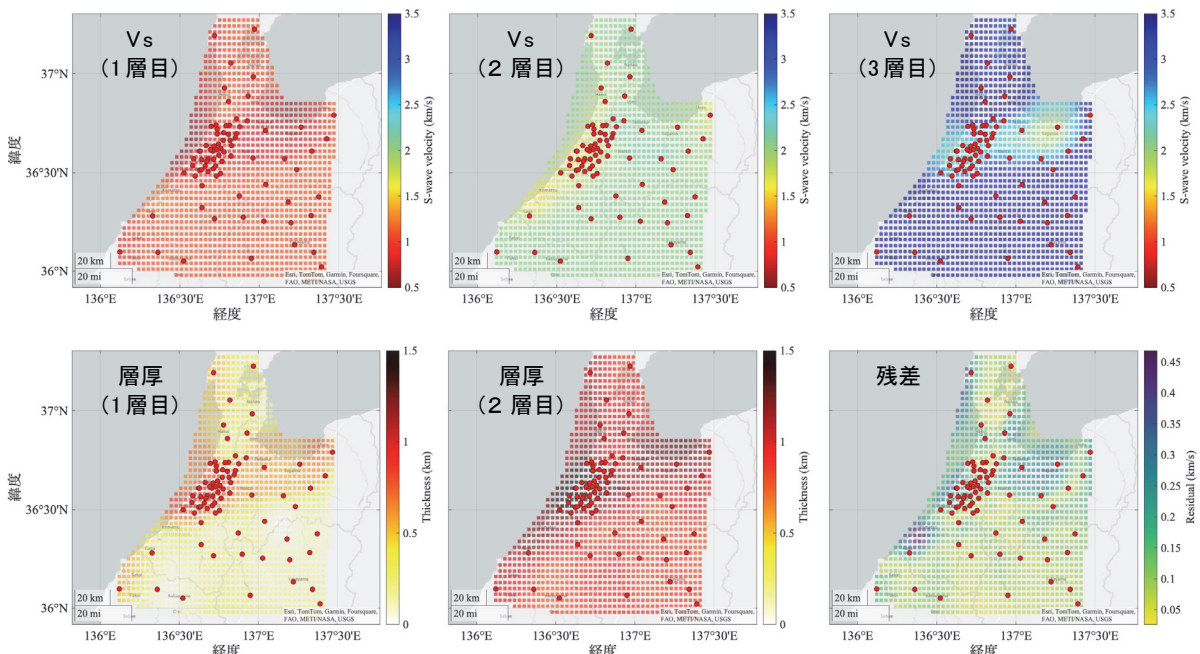


図 19 図 18 を物理量ごとにカースケールを固定して表示。

得られた 3 次元 S 波速度構造において、1 層目は金沢平野から砺波平野周辺にかけて 0.7 km/s 程度の低速度域が厚く分布している。一方それ以外の地域では 1 層目の層厚は 0.1 km 以下であった。2 層目は金沢平野周辺で 1.6 km/s 程度の低速度域が厚さ 1.5 km 程

度分布している。金沢平野以外では速度 2 km/s 程度の層が厚さ 1 km 程度分布している。3 層目はほとんどの範囲で地震基盤相当の速い (3.0 km/s 以上) S 波速度となっているが、金沢平野と砺波平野周辺では、地震基盤に相当する層の存在を明瞭に捉えることはできなかった。

最後に、推定した 3 次元 S 波速度構造の妥当性を評価するために、以下の比較を行った。まず、全国 1 次地下構造モデル (暫定版) (Koketsu et al., 2008、地震調査研究推進本部, 2012) および本解析で推定した 3 次元 S 波速度構造を用いて、2 観測点ペア間の群速度および位相速度を計算した。次に、これらの計算値と、実際に推定された 2 観測点ペア間の群速度および位相速度との残差を比較した (図 20-24)。全ての周波数において、計算値と観測値の残差の絶対値の平均は位相速度と群速度ともに、全国 1 次地下構造モデル (暫定版) よりも推定した 3 次元 S 波速度構造の方が小さくなった。

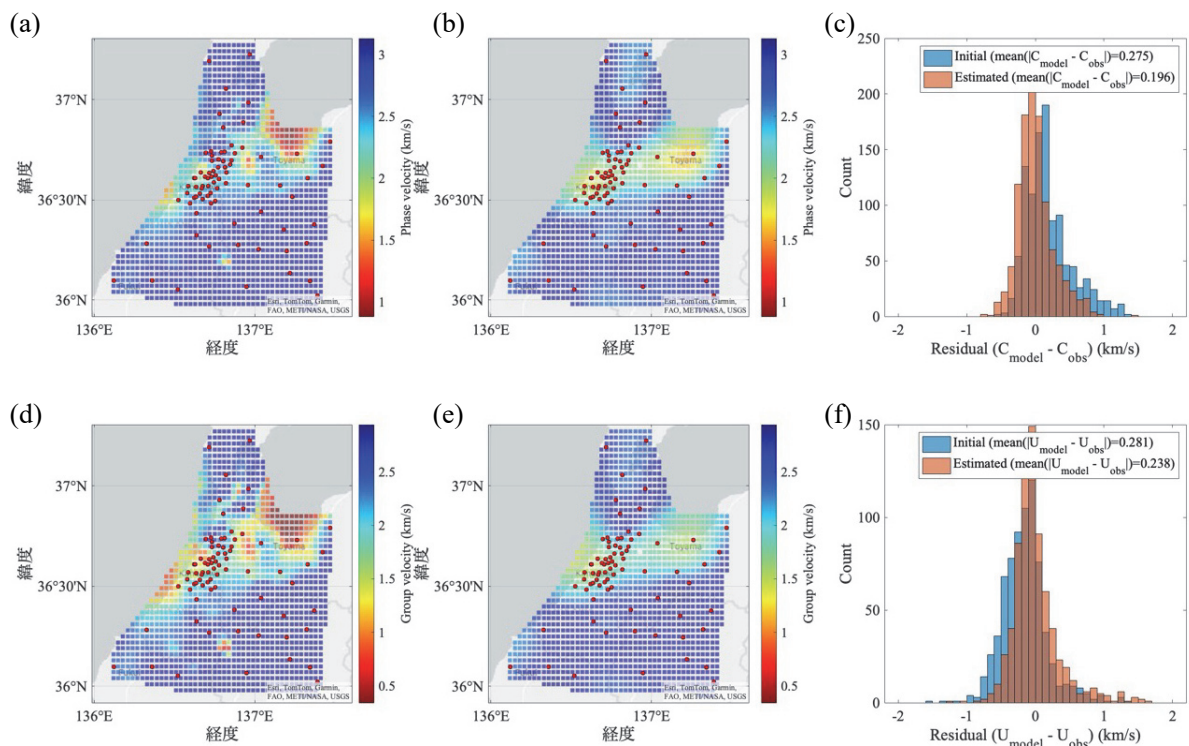


図 20 0.2 Hz におけるモデルと観測値の比較。(a) 全国 1 次地下構造モデル (暫定版) を用いて計算した各グリッドの位相速度。(b) 推定した 3 次元 S 波速度構造を用いて計算した各グリッドの位相速度。(c) 2 観測点ペア間の位相速度の計算値と観測値の残差のヒストグラム。凡例に全ての残差の絶対値の平均を示す。(d) 全国 1 次地下構造モデル (暫定版) を用いて計算した各グリッドの群速度。(e) 推定した 3 次元 S 波速度構造を用いて計算した各グリッドの群速度。(f) 2 観測点ペア間の群速度の計算値と観測値の残差のヒストグラム。凡例に全ての残差の絶対値の平均を示す。

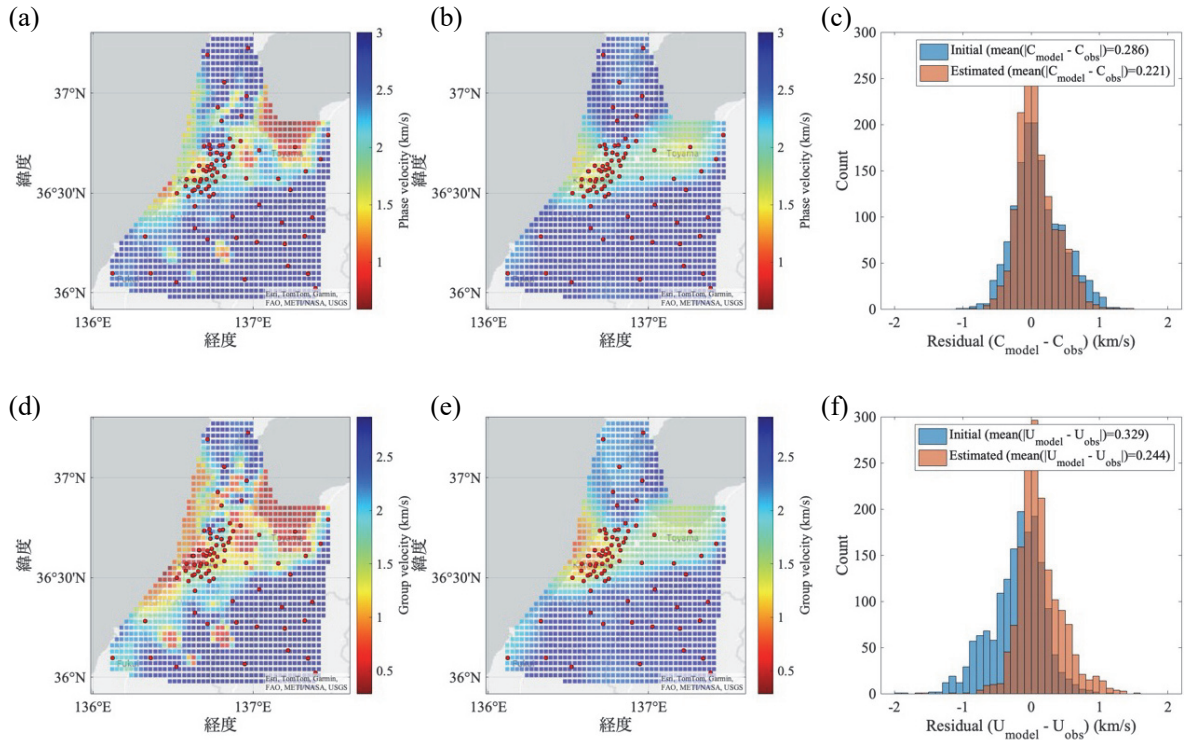


図 21 0.3 Hz におけるモデルと観測値の比較。各パネルの説明は図 20 参照。

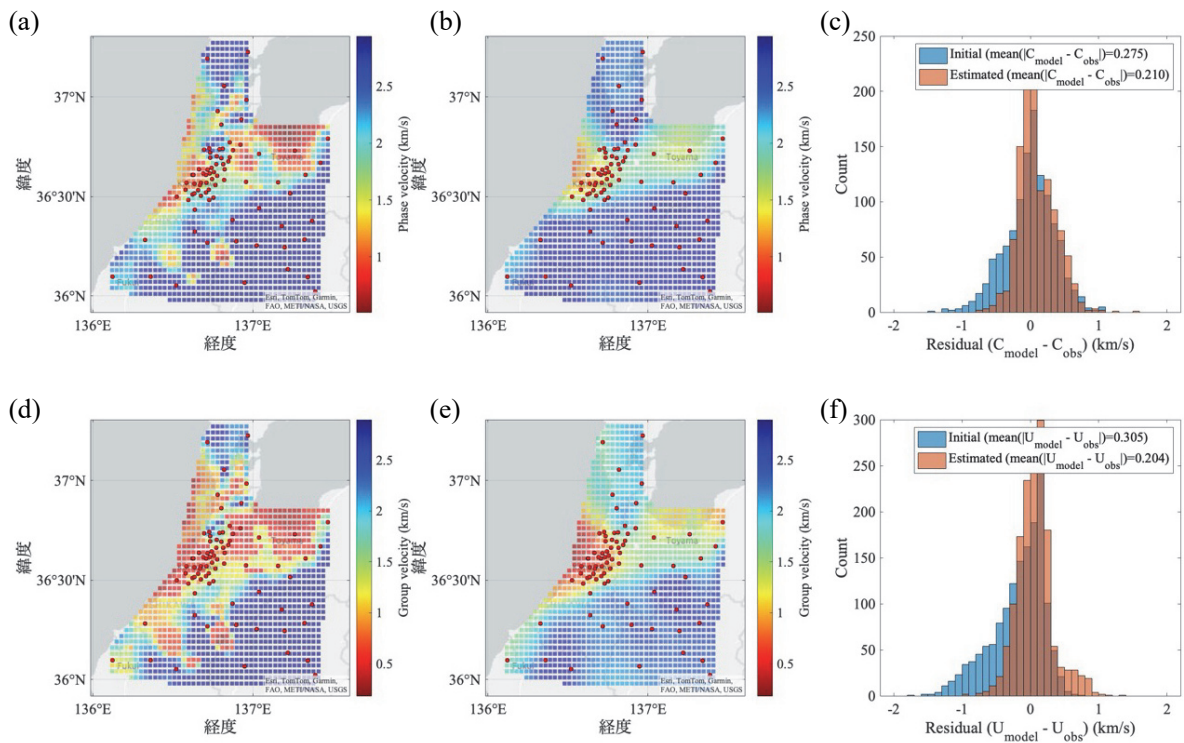


図 22 0.4 Hz におけるモデルと観測値の比較。各パネルの説明は図 20 参照。

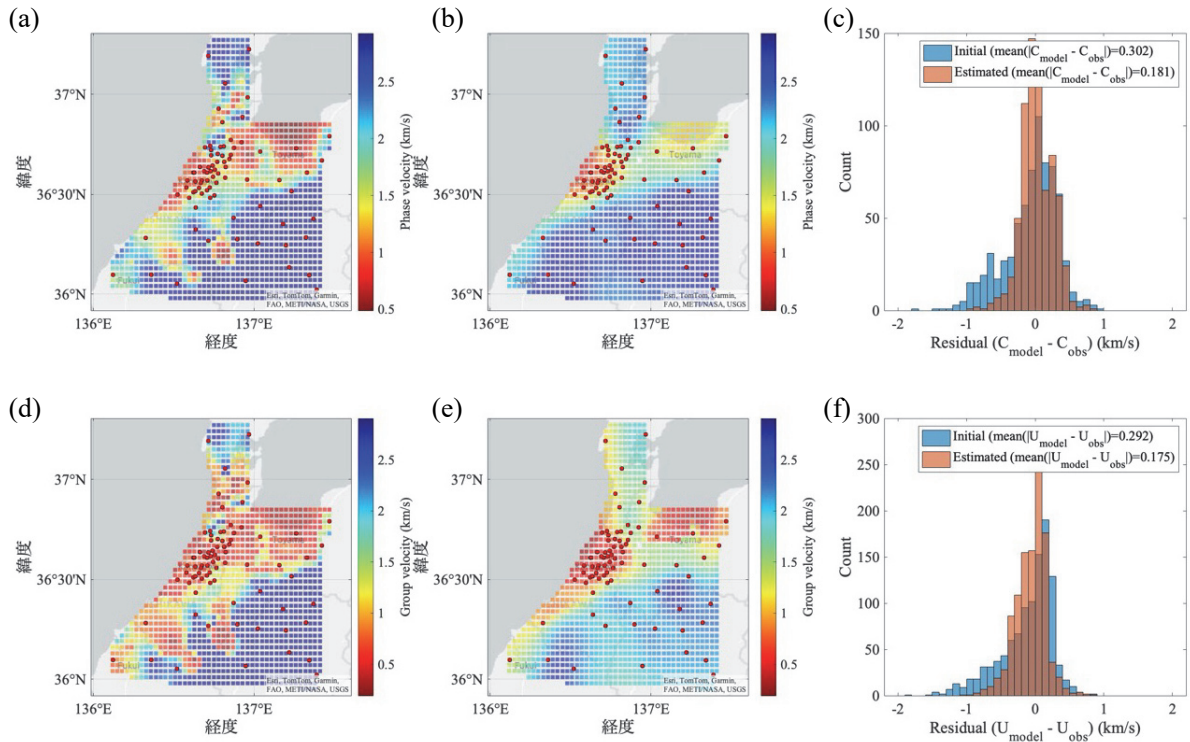


図 23 0.5 Hz におけるモデルと観測値の比較。各パネルの説明は図 20 参照。

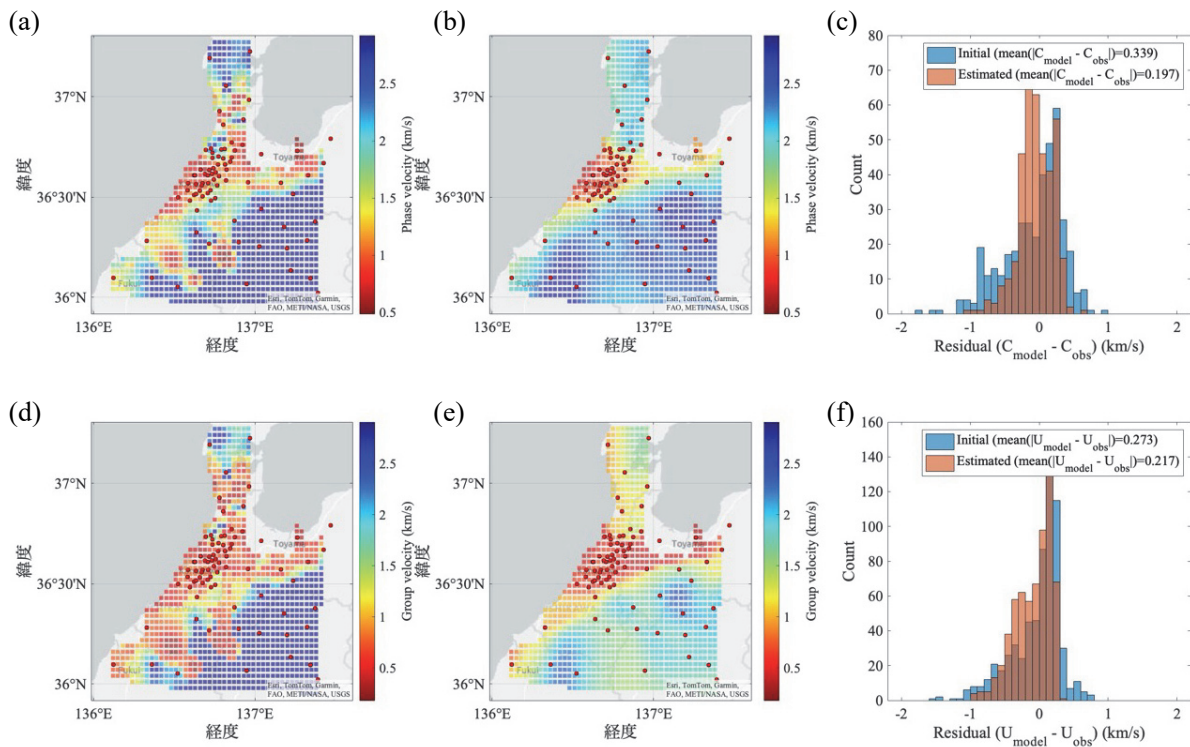


図 24 0.6 Hz におけるモデルと観測値の比較。各パネルの説明は図 20 参照。

### 3) 断層形状と応力場に基づく断層のすべりやすさ・活動様式（すべり方向）解析

地殻内に存在する断層とその周辺の応力場から、力学的な断層のすべりやすさを解析することが可能である。例えば、Morris et al. (1996)は断層面に作用する応力を計算することで、断層の活動性を評価する手法として、slip tendency (以下、ST) を導入した。具体的には、 $\tau$  をせん断応力、 $\sigma_n$  を垂直応力とすると、3次元的な Mohr-クーロン理論に基づいて、 $\tau_s = \tau / \sigma_n$  の式で算出される値を ST とする。この ST の大きさによって断層の活動性の大きさを表現することが可能になる (Morris et al., 1996)。ここでは、ST の表現には  $\tau_s$  の最大値で規格化されたものを用いる ( $0 \leq ST \leq 1$ )。また、地殻応力に対する断層の理論すべり方向を計算することで、断層の活動様式を推定することができる。

ST の計算および理論すべり方向の計算を行うためには、断層面の姿勢（走向・傾斜）と、地殻応力のうち主応力軸の角度と応力比が必要である。そこで、今年度はサブテーマ 1 により推定された森本・富樫断層帯の断層モデルと、本サブテーマにより推定された森本・富樫断層帯周辺の応力場を入力とし、断層のすべりやすさとして ST を計算した。断層モデルとして、森本断層、富樫断層、それらを合わせて一つの断層面とする一枚断層モデルの 3 ケースについて計算を行った (表 4 ; 図 25)。応力場として、最適な解として得られた応力 (ベストフィット応力) について計算した (図 26)。なお、断層面の物性として摩擦係数に一般的な岩石の摩擦係数 (0.6) を与えた。計算された ST の値はいずれの断層モデルも 0.7 程度を示すことから、森本・富樫断層は周辺の応力場に対して力学的にすべりやすい断層として活動していることがわかる (表 5 ; 図 27)。これは、東北地方の活断層に対して ST を計算した結果、多くの活断層が 0.6 を超える ST 値を示したこと (Miyakawa and Otsubo, 2015) と整合的である。

表 4 断層モデルごとの断層面の姿勢（走向・傾斜）

	走向 (°) ※ <sup>1</sup>	傾斜 (°) ※ <sup>2</sup>
森本断層	28	50
富樫断層	22	50
1 枚断層モデル	26	50

※ 1 走向は北から時計回りに表現。

※ 2 傾斜は走向に向かって右手に水平から下向きで表現。



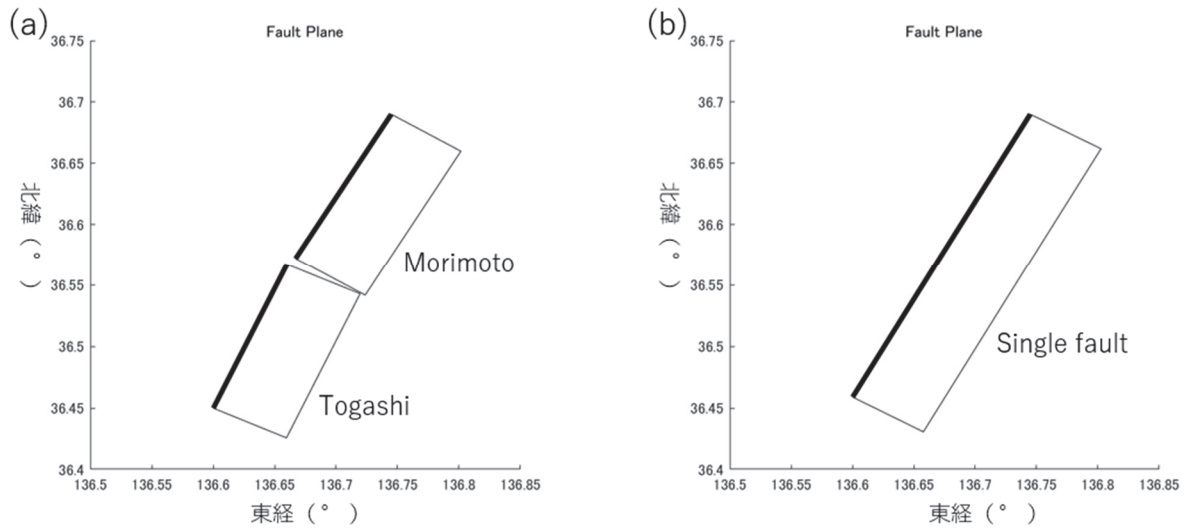


図 25 解析をおこなった森本・富樫断層および 1 枚断層モデルの地表位置および断層面の投影図。(a) 森本断層 (Morimoto) および富樫断層 (Togashi)。(b) 1 枚断層モデル。

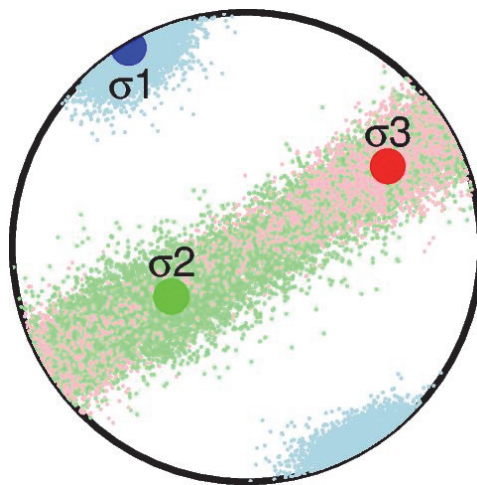


図 26 (図 9 を再掲しキャプションを追加) 森本・富樫断層を含む地域の地殻応力場。最大圧縮主応力軸 ( $\sigma_1$ ) を青、中間圧縮主応力軸 ( $\sigma_2$ ) を緑、最小圧縮主応力軸 ( $\sigma_3$ ) を赤で表す。色が濃く大きいマーカーは最適な主応力軸の向きを表す。色が薄く小さいマーカーは推定誤差に基づいてサンプリングした 10000 パターンの主応力軸の向きを表す。

表 5 断層モデルごとの最適応力に対するすべりやすさ (ST 値) およびすべり方向

最適応力に対する ST 値 最適応力に対するすべり方向 (°) ※1

森本断層	0.70	90.14
富樫断層	0.70	80.55
1 枚断層モデル	0.70	86.94

※1 すべり方向は水平から上向き反時計回りに表現。

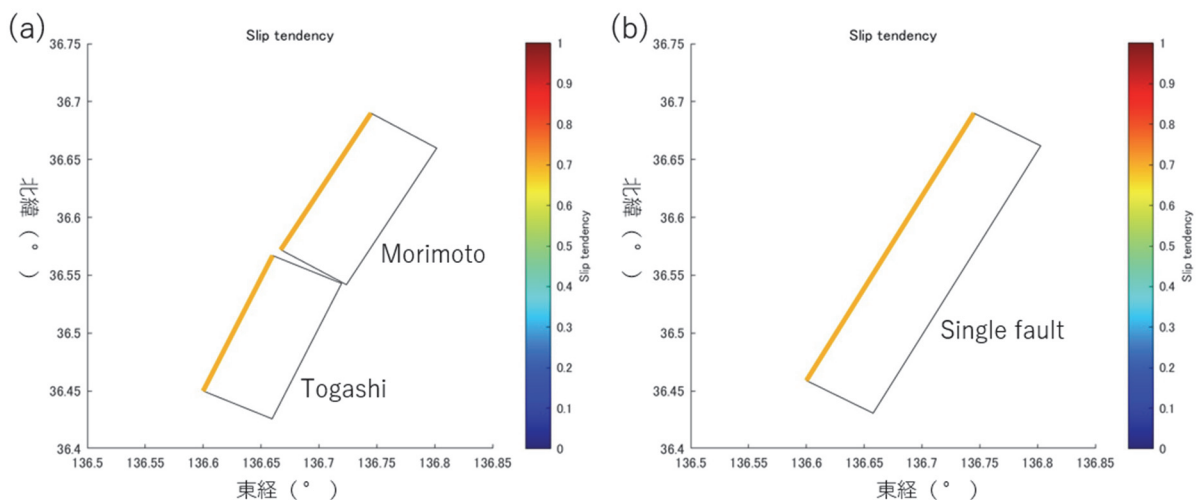


図 27 計算された断層のすべりやすさ。各断層の ST の値を地表断層線の色で示す。ここでは、ST は断層面に作用するせん断応力 ( $\tau_s$ ) の最大値で規格化され ( $0 \leq ST \leq 1$ )、値が大きいほど力学的にすべりやすいことを意味する。(a) 森本断層 (Morimoto) および富樫断層 (Togashi)。 (b) 1 枚断層モデル。

次に、地殻応力に対する断層の理論すべり方向を計算した。理論すべり方向は地殻応力の断層面に対する最大せん断応力方向として計算した(表 5 ; 図 28)。いずれも逆断層成分が卓越し、森本断層はほぼ純粋な逆断層、富樫断層・一枚断層モデルはわずかに左横ずれ成分を含む逆断層となった。

以上のことから、森本・富樫断層帯は、地殻応力に対して力学的にすべりやすい断層が活動しており、また、その運動センスは逆断層が卓越することが確認できた。

地震のメカニズム解から推定される応力場には不確実性が伴う。入力する応力が異なるとすべりやすさ (ST) とすべり方向が変化する。それらは、応力場の不確実性に伴うすべりやすさすべり方向の振れ幅として評価する必要がある。そこで、推定誤差に基づいてサンプリングした 10000 パターンの応力場 (図 26) に対して ST 値とすべり方向を計算し、その振れ幅を確認した(表 6 ; 図 29 ; 図 30)。すべりやすさは 3 つの断層モデルいずれも、

概ね 0.65 を中央値とし、0.54 から 0.74 の範囲が主な結果となった。すべり方向は 3 つの断層モデルで多少異なるものの、概ね純粋な逆断層からやや左横ずれ成分を持つ方向を中央値とし、多くは左横ずれ成分を持つ逆断層運動と、わずかに右横ずれ成分を持つ逆断層運動の範囲のすべり方向を示す。

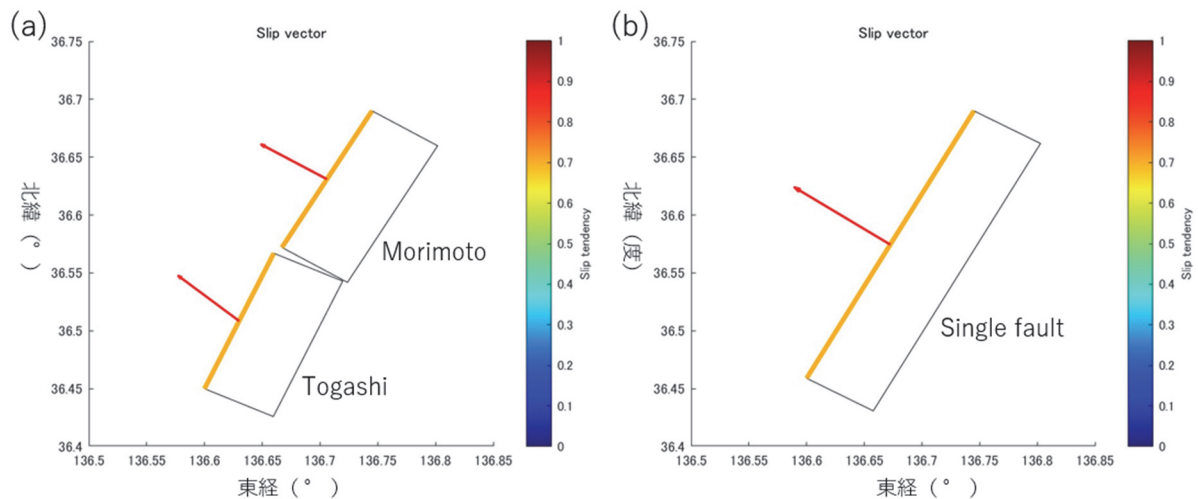


図 28 計算された断層の滑理論すべり方向。断層上盤の運動方向を矢印の向きで示す。各断層の ST の値を地表断層線の色で示す。矢印の色で逆断層性の運動（赤）、正断層性の運動（青）を示す。ただし、今回解析した断層群は全て逆断層性の運動を示した。地表断層線と上盤運動方向（矢印）の向きにより、横ずれ成分の大きさを読み取る。(a) 森本断層（Morimoto）および富樫断層（Togashi）。(b) 1 枚断層モデル。

表 6 10000 パターンの応力に基づくすべりやすさ（ST 値）およびすべり方向。

	ST 値		すべり方向 <sup>※1</sup>	
	中央値	振れ幅 <sup>※2</sup>	中央値 (°)	振れ幅 (°) <sup>※2</sup>
森本断層	0.65	0.55-0.74	89.97	79.87-99.97
富樫断層	0.64	0.54-0.74	80.47	70.43-90.46
1 枚断層モデル	0.64	0.55-0.74	86.74	76.77-96.84

※1 すべり方向は水平から上向き反時計回りに表現

※2 振れ幅は下位 25%および上位 25%を除いた値の範囲とする。

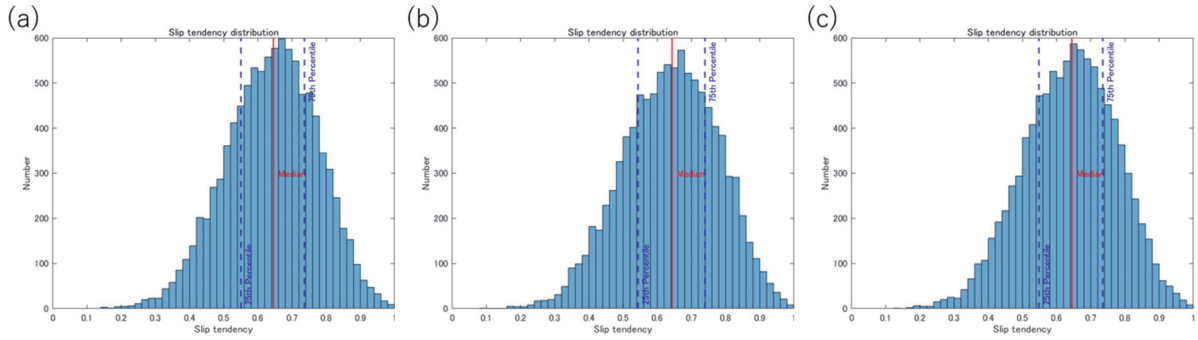


図 29 10000 パターンの応力に対して ST 値を計算した結果。赤実線は中央値を、青破線は下位 25% および上位 25% の分布を表す。(a) 森本断層、(b) 富樫断層、(c) 1 枚断層モデルの結果を表す。

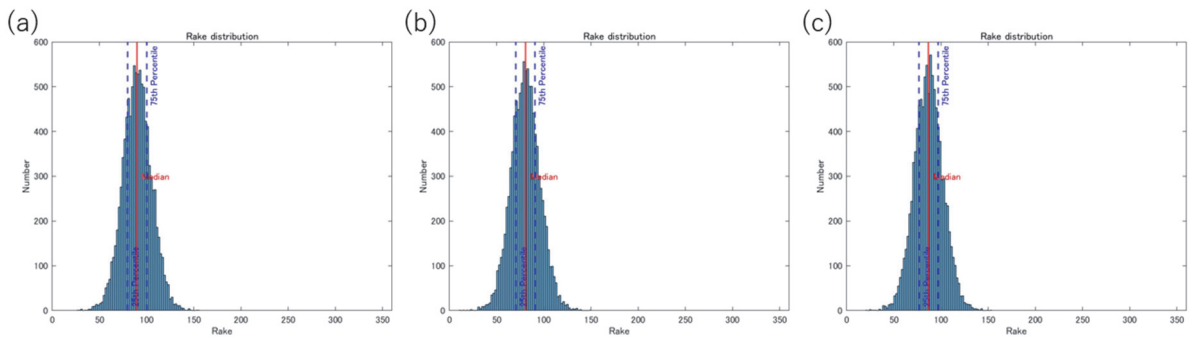


図 30 10000 パターンの応力に対してすべり方向(rake)を計算した結果。(a) 森本断層、(b) 富樫断層、(c) 1 枚断層モデルの結果を表す。0° および 360° は純粋な左横ずれ、90° は純粋な逆断層、180° は純粋な右横ずれ、270° は純粋な正断層運動を意味する。赤実線は中央値を、青破線は下位 25% および上位 25% の分布を表す。

### (c) 結論

森本・富樫断層帯周辺に構築した臨時高感度地震観測網 (MTKV-net)、および、当該断層帯の主に上盤に構築した臨時稠密地震観測網 (MTMT-net) の保守・データ回収を実施した。MTKV-net は合計約 2 年 3 ヶ月間、MTMT-net は約 1 年 4 ヶ月間の連続地震観測データを取得した。両観測網の全観測点を 2024 年 12 月に撤収し、原状回復した。

MTKV-net 観測データと周辺の定常観測点のデータを用い、深層学習モデル等を用いた自動処理により、地震を検出し震源を決定した。これにより森本・富樫断層帯周辺で、気象庁一元化震源の約 3 倍の地震を検出できた。次に、P 波初動特性を手動検出し、P 波と S 波の振幅比も用いて C ランク以上の品質を持つ 29 個の地震の震源メカニズムを決定した。断層のタイプは逆断層型と横ずれ断層型のいずれのものも見られた。さらに、応力テンソルインバージョンにより、応力場を推定した。森本—富樫断層帯の走向に直交する圧縮方位を持つ、同断層帯を動かしやすい応力場が得られた。

本事業で構築された臨時地震観測網（MTKV-net、MTMT-net、およびサブテーマ3による臨時観測網）および既存の定常地震観測網の連続地震データを用いて表面波解析を実施した。地震波干渉法およびSPAC法を適用し、2観測点間を伝播する表面波の群速度および位相速度を推定した。推定した2観測点間の位相速度分散曲線をもとに、周波数ごとの位相速度マップを推定した。位相速度マップをもとにインバージョン解析を行い、3層構造としての森本・富樫断層帯周辺の広域3次元S波速度構造を推定した。その結果、金沢平野から砺波平野にかけては表層に0.7 km/s程度の低S波速度層が厚く分布し、2層目では金沢平野周辺では1.6 km/s程度の層が約1.5 kmの厚さで分布する構造が得られた。最下層の3層目のS波速度は、金沢平野および砺波平野を除く多くの範囲で地震基盤に相当する3.0 km/s以上の値が得られた。当該3次元S波速度構造の妥当性を検証するために、群速度と位相速度を指標として全国1次地下構造モデル（暫定版）と比較した。その結果、推定した広域3次元S波速度モデルは、全ての周波数帯において、群速度と位相速度の観測値をよく説明することが示された。

本事業で推定した応力場情報とサブテーマ1により推定された森本・富樫断層帯の断層形状を用いて、slip tendency (ST) および断層活動様式を推定した。応力場の最適解に対しては、森本・富樫断層帯は力学的にすべりやすい断層であり、その運動センスは逆断層が卓越することが確認できた。また、応力場の不確実性を考慮した際にも、この特性は概ね変わらないことが確認できた。

謝辞：気象庁一元化震源カタログを使用いたしました。地震波形解析においては、防災科学技術研究所 Hi-net、気象庁、東京大学地震研究所、京都大学防災研究所の定常観測網のデータを利用しました。一部の図はGeneric Mapping Tools (Wessel and Smith, 1991) で作成しました。臨時稠密地震観測網 (MTMT-net) の観測に際しては、多くの寺院および神社（石川県神社庁）および金沢市駒帰町の方々にご協力いただきました。

#### (d) 引用文献

- Aki, K., Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, 415-456, 1957.
- Bensen, G. D., M. H. Ritzwoller, M. P. Barmin, A. L. Levshin, F. Lin, M. P. Moschetti, N. M. Shapiro, and Y. Yang, Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, *Geophys. J. Int.*, 169(3), 1239-1260, 2007.
- Ekström, G., Love and Rayleigh phase-velocity maps, 5-40s, of the western and central USA from USArray data. *Earth and Planetary Science Letters*, 402(C), 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.022>, 2014.
- Hansen, N., and A. Ostermeier, Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies. *Evol. Comput.* 9, 159-195, 2001.
- Hardebeck, J. L., and P. M. Shearer, A new method for determining first-motion focal mechanisms, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6), 2264-2276, 2002. doi: 10.1785/0120010200

- Herrmann, R. B., Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research, *Seismol. Res. Lett.*, 84(6), 1081-1088, 2013.
- Hirata, N., and M. Matsu'ura, Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet Inter.*, 47, 50-61, 1987. doi: 10.1016/0031-9201(87)90066-5
- 今西和俊・内出崇彦・松下レイケン, 臨時地震観測による山梨県北東部の微小地震の発震機構解と応力場, *活断層・古地震研究報告*, 16, 53-77, 2016.
- 地震調査研究推進本部, 全国1次地下構造モデル(暫定版), [https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic\\_hazard\\_map/lpshm/12\\_choshuki\\_dat/](https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/12_choshuki_dat/), 2012.
- Katsumata, K., M. Kosuga, H. Katao, T. Yamada, A. Kato, and the Research Group for the Joint Seismic Observations at the Nobi Area, Focal mechanisms and stress field in the Nobi fault area, central Japan, *Earth Planets and Space*, 67, 99, doi: 10.1186/s40623-015-0275-2, 2015.
- Koketsu, K., H. Miyake, H. Fujiwara, and T. Hashimoto, 2008, Progress towards a Japan integrated velocity structure model and long-period ground motion hazard map, *Proc. 14WCEE*, Paper No.S10-038.
- Lobkis, O. I. and R. L. Weaver, On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(6), 3011- 3017, 2001.
- Miyakawa, A., and M. Otsubo, Applicability of slip tendency for understanding long-term fault activity: a case study of active faults in northeastern Japan, *Journal of JSCE*, 3, 105-114, 2015.
- Morris, A., D. A. Ferril, D. B. Henderson, Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, 24, 275-278, 1996.
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, NIED Hinet, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019. doi: 10.17598/NIED.0003.
- Naoi, M., K. Tamaribuchi, K. Shimojo, S. Katoh, and S. Ohyanagi, Neural phase picker trained on the Japan meteorological agency unified earthquake catalog. *Earth, Planets and Space*, 76, 150, 2024. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02091-8>
- 産業技術総合研究所, 地殻応力場データベース, <https://gbank.gsj.jp/crstress/usage.html>
- 産業技術総合研究所, 活断層データベース, <https://gbank.gsj.jp/activefault/database.html>
- 産総研地質調査総合センター, 20万分の1日本シームレス地質図V2, <https://gbank.gsj.jp/seamless/>
- Shapiro, N. M. and M. Campillo, Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L07614,

2004.

Skoumal, R. J., J. L. Hardebeck, and P. M. Shearer, SKHASH: A Python Package for Computing Earthquake Focal Mechanisms. *Seismological Research Letters*, 95(4), 2519–2526, 2024. <https://doi.org/10.1785/0220230329>

Takagi, R. and K. Nishida, Multimode dispersion measurement of surface waves extracted by multicomponent ambient noise cross-correlation functions, *Geophys. J. Int.*, 231, 1196–1220, 2022.

Uchide, T., T. Shiina, and K. Imanishi, Stress map of Japan: Detailed nationwide crustal stress field inferred from focal mechanism solutions of numerous microearthquakes, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2022JB024036, 2022. doi: 10.1029/2022JB024036

内出崇彦・椎名高裕・今西和俊, 日本全国内陸部の地殻内応力マップと微小地震の発震機構階のデジタルデータ, 地質調査総合センター研究資料集, no. 738, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2022.

上野寛・畠山信一・明田川保・舟崎淳・浜田信生, 気象庁の震源決定法の改善—浅部速度構造と重み関数の改良—, *検震時報*, 65, 123–134, 2002.

Wessel, P. and W. H. F. Smith, Free soft-ware helps map and display data, *EOS Trans.*, AGU, 72, 441, 1991.

Zhu, W., and G. C. Beroza, PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method, *Geophysical Journal International*, 216(1), 2019. doi: 10.1093/gji/ggy423

Zhu, W., I. W. McBrearty, S. M. Mousavi, W. L. Ellsworth, and G. C. Beroza, Earthquake Phase Association Using a Bayesian Gaussian Mixture Model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(5), 2022. e2021JB023249. <https://doi.org/10.1029/2021JB023249>

### (3) 令和4～6年度の成果

#### (a) 業務の要約

森本・富樫断層帯周辺に3成分地震計からなる臨時高感度地震観測網（MTKV-net）を、断層帯の主に上盤側に1成分地震計からなる臨時稠密地震観測網（MTMT-net）をそれぞれ構築し、約2年3ヶ月間および約1年4ヶ月間の連続観測データを蓄積した。深層学習モデル等を用いた自動処理により、MTKV-netと定常地震観測網データから地震を検出、震源を決定した。森本・富樫断層帯周辺域で29個の地震の震源メカニズムを決定し、応力場を推定した。本事業による臨時観測網の連続地震データの雑微動解析による群速度と位相速度を用いて、森本・富樫断層帯周辺の3次元S波速度構造モデルを推定した。当サブテーマによる応力場とサブテーマ1の深部断層形状を用いて、森本・富樫断層帯のすべりやすさおよび断層活動様式を推定した。

#### (b) 業務の成果

##### 1) 微小地震観測による応力場推定

##### a) 森本・富樫断層帯周辺における臨時高感度地震観測

##### i) 臨時高感度地震観測網（MTKV-net）

活断層で将来発生する地震の発生様式を理解・評価するためには、地下の断層形状に加え、断層帯周辺に作用する応力場の情報が必要である。日本列島のほぼ全領域の応力場は、地震観測データを用いた発震機構の大量解析により推定されており（Uchide et al., 2022）、現在では0.2度メッシュの地殻応力場データが公開されている（産総研地殻応力場データベース；内出・他，2022）。しかし、森本・富樫断層帯周辺など地震活動が低調な場所では、発震機構データが少ないため、応力情報の信頼度は高いとは言えない。断層帯周辺の稠密な地震観測が重要である（例えば、Katsumata et al., 2015；今西・他，2016）。

本事業の対象である森本・富樫断層帯周辺は、地震活動が低調である。本地域の既存の高感度地震観測網（Hi-net、大学観測点、気象庁）の観測点間隔は20 km程度であるが、これを10 km程度の密度に高めるよう観測点を配置した。本事業における臨時高感度地震観測網（MTKV-net）および既存の高感度地震観測点分布を図31に、MTKV-net観測点の諸元を表7に示す。高感度地震観測点は観測ノイズ低減の観点から岩盤露頭サイトに構築するのが望ましいが、本観測網では既往観測点の空白域にバランス良く観測点を配置することを優先した。この観点で設定した地域のなかで、なるべく幹線道路から離れた公民館や公園等の公共施設を観測点に選定した。山間部集落の多くは谷筋にあり、必ずしも堅固な地盤を選定できたわけではない。なお、かほく市七塚中央公園に設置したMTKV04観測点は、初期の設置場所では隣接工場からと見られるノイズが継続して観測されたため、約2ヶ月後に公園内の別地点に移動しセンサも交換した。

観測点の構築にあたっては、令和元年度～3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の臨時地震観測に用いられた高感度地震計（近計システム社製速度型センサー KVS-300、固有周波数2 Hz）を用いた（文部科学省研究開発局・京都大学防災研究所，2022）。これを低電力消費データロガー（白山工業製LS-8800：うち6台を本事業にて新規購入）に接続してデータを収録し、SDカード内のデータを現地回収するオフライ



ン観測とした。電源には密閉型鉛蓄電池を用い、ソーラーパネルにて常時充電するシステムとした（MTKV-09観測点はAC電源駆動）。当該地域は積雪地域であり、冬季はソーラーパネルでは充電できないことが予想されたため、各観測点に100 Ahのリン酸鉄リチウムイオン蓄電池を追加した。さらに、豪雪地帯に位置する6観測点についてはソーラーパネル等の破損に備え、合掌型の屋根でソーラーパネルおよび観測装置を覆った。

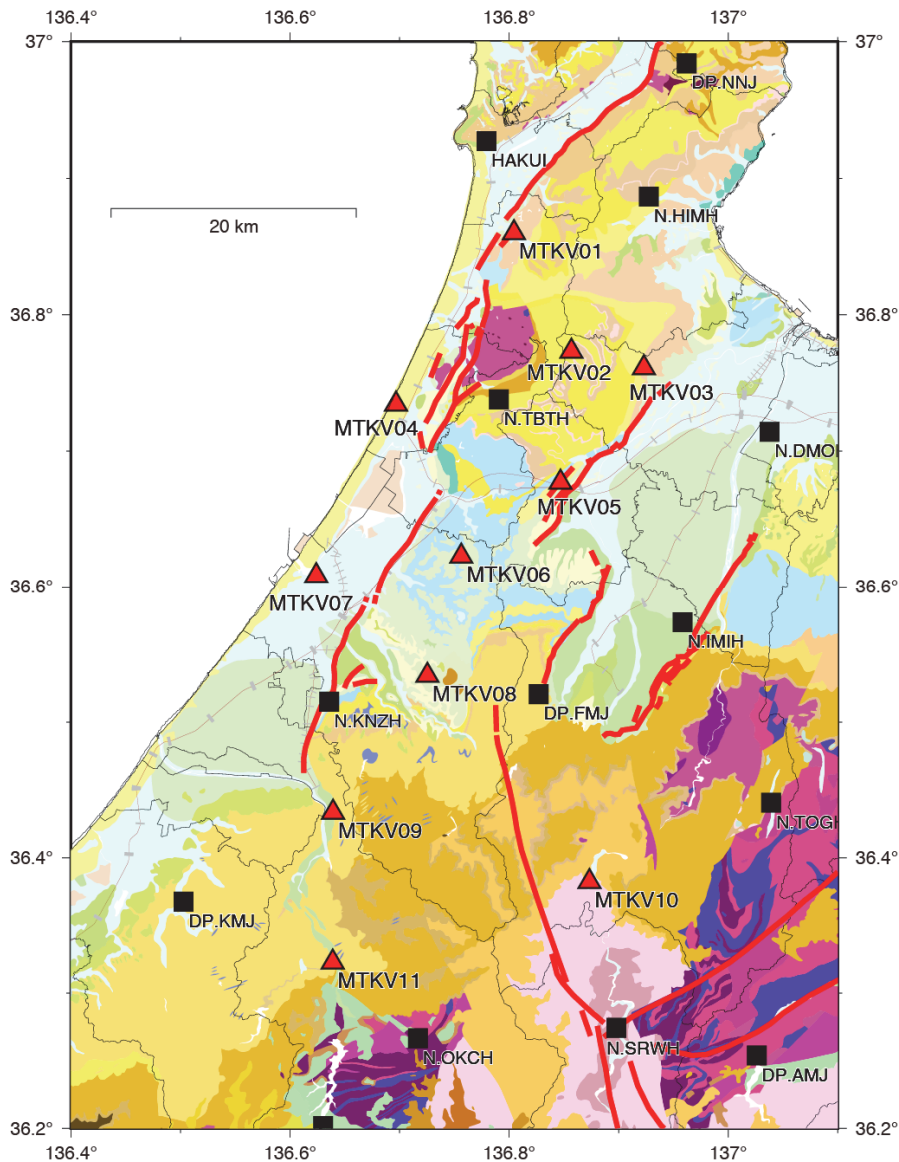


図31 本事業による臨時高感度地震観測網（MTKV-net）の配置図。赤三角はMTKV-net観測点、黒四角は既往高感度地震観測点（Hi-net、気象庁、大学観測点）。基図は20万分の1日本シームレス地質図V2（産総研地質調査総合センター）、活断層位置は産総研活断層データベース、鉄道路線および行政界は国土数値情報による。

表7 森本・富樫断層帯周辺における臨時高感度地震観測点一覧 (MTKV-net)

コード	観測点名称	緯度	経度	標高m	観測開始日	撤収日時	備考
MTKV01	宝達志水町スポーツセンター	N36. 86001	E136. 80441	25	2022/09/14	2025/12/3 9:46	豪雪、舗装
MTKV02	高岡市沢川集会所	N36. 77334	E136. 85677	332	2022/09/17	2025/12/3 15:10	豪雪
MTKV03	高岡市埋蔵文化財センター	N36. 76139	E136. 92304	38	2022/09/14	2025/12/3 12:15	
MTKV04	かほく市七塚中央公園	N36. 73634 N36. 73451	E136. 69844 E136. 69668	35 24	2022/11/22 (2022/09/12)	2025/12/2 15:36	移設・センサ交換
MTKV05	小矢部市南谷公民館	N36. 67704	E136. 84703	51	2022/09/13	2025/12/4 9:23	舗装
MTKV06	金沢市旧朝日小学校	N36. 62285	E136. 75634	161	2022/09/13	2025/12/4 11:40	豪雪
MTKV07	金沢市戸水公園	N36. 60846	E136. 62383	2	2022/09/15	2025/12/2 13:06	
MTKV08	金沢市俵公民館	N36. 53437	E136. 72531	224	2022/09/15	2025/12/5 14:30	豪雪
TMKV09	石川県林業試験場	N36. 43352	E136. 63927	146	2022/08/25	2025/12/5 12:26	AC電源
MTKV10	南砺市上平グラウンド	N36. 38232	E136. 87323	334	2022/09/16	2025/12/4 14:33	豪雪
MTKV11	白山市鳥越農村公園	N36. 32289	E136. 63890	256	2022/09/16	2025/12/5 10:45	豪雪

観測点の作成方法は次の通りである（図32）。まず、ソーラーパネルでバッテリーを充電する必要性から、観測点には陽当たりの良い場所で、盛土でない場所を選定した。地震計の設置にあたっては、地表面が舗装されている地点（MTKV01、MTKV05、MTKV09）では地震計の支持ネジ先端部と舗装面を強力接着剤で固定した。地表面が土壌の場所では、地面から20cm程度掘削して表土を取り除き、穴に防水用ビニール袋および石版を敷いた上で周囲に釘を打ち、これらを速硬セメントで固定した後、石版に強力接着剤で地震計を固定した。地震計の方位はスマートフォンおよび方位磁石を用いて真北に設定した。地震計をハンドホールで覆い、雨水の浸入や虫などの侵入を避けるためコーキング材で隙間を塞いだ。データロガーおよびバッテリーをコンテナボックスに収納し、これらをソーラーパネル付き架台の中段棚に収め、架台の脚をペグ等で地面に固定した。観測装置の周囲に高さ1m程度の防護ネットを張り、観測点の視認性を高めるとともに、ネット地際まで留め金で固定し動物の侵入対策とした。

冬季の積雪対策として、積雪による充電不能に備えるため、AC電源駆動のMTKV09を除くすべての観測点に100 Ahの蓄電池を追加し、データロガーの2系統目の電源として接続した。さらに、豪雪が見込まれる6地点（表7）では、1.5～3m程度の単管パイプを脇に立てGPS

アンテナを固定し、積雪下でも時刻校正が行われるようにした。また、観測点保護のため、単管パイプおよびコンクリート養生用合板（コンパネ）を用いて、合掌造り構造の雪除け防護屋根を組み立てた。この際、積雪に耐えられる強度を確保するために、単管クランプや結束バンドで十分に固定したほか、強風対策のため防護屋根の脚部を鉄棒にて固定した。

この積雪対策は、2022年度は2回に分けて実施した。まず、11月中旬に現地にすべての部材を運び込んで全体を組み立て、防護屋根のうちソーラーパネルを覆う部分だけを取り外した（図33）。12月下旬に、ソーラーパネルもコンパネ製防護屋根で覆った。これはソーラーパネルで蓄電池を充電できる期間を延ばし、冬季の観測を確実なものにするためである。2回目の作業時には、MTKV02、MTKV10、MTKV11の積雪深は80 cmを超えていたが、観測点へのアクセスおよび防護屋根の設置は予定通り実施できた（図34）。2022年度は2 m近い積雪となった場所もあったが、雪の重みで防護ネットの木製支柱が傾く等の軽微な損傷はあったものの、観測に影響を与えるような重大な損傷は発生しなかった。融雪の進んだ3月上旬に再びソーラーパネル部分の防護屋根を撤去し、ソーラーパネルでの充電を再開した。ソーラーパネル部分を覆っていたコンパネは、非積雪期には合掌造りの防護用筐体に固定しておき、2023年度の積雪期に再度雪除けとして使用した。2023年7月時点での全観測点の写真を図35に示す。

2024年1月1日に発生した令和6年能登半島地震では、観測点周辺は最大で震度5強の揺れに見舞われた。特に揺れの強かったMTKV07以北の観測点について、1月後半に外観点検を行った。金沢平野内の観測点であるMTKV07（戸水公園）では、隣接するバス会社の駐車場に液状化と見られる不陸が発生していたものの、MTKV07観測点には不陸等の異常は発生していなかった。このほかの観測点でも、外観上の異常は確認されなかった。

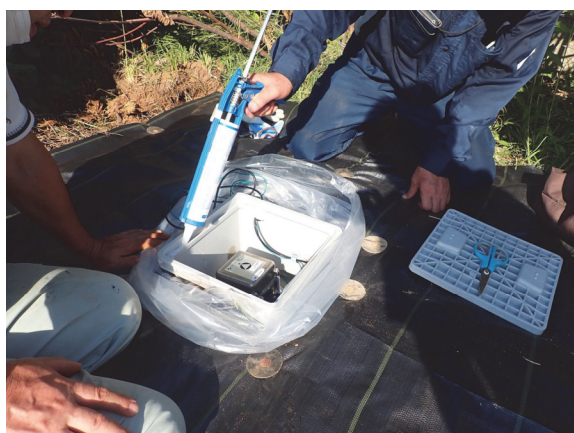
2022年9月の観測点設置から2024年12月の撤去まで、約4ヶ月に1度の頻度で保守作業・データ回収を行った。SDカードの書き込み異常に起因する欠測（MTKV03：2023/3/27 23:54-2023/4/11 12:50および2024/4/10 19:24~2023/8/6 11:10）、MTKV11：2023/4/8 11:35-2023/4/10 13:40および2024/4/9 12:34~2024/8/5 12:50）が生じたものの、バッテリー枯渇や破損等による欠測は生じず、約2年3ヶ月間の連続データを蓄積できた。



a : 20 cm 程度の穴を掘る



b : 石版・モルタルで土台を作る



c : 地震計を固定し周囲を防水加工



d : ソーラーパネル付架台を固定



e : 機器箱を架台に固定



f : 周囲に防護ネットを施し完成

図32 観測点設置の様子 (MTKV04 移設前)。



図33 積雪対策 1 回目完了時の様子（ソーラーパネル部分の屋根は外している：MTKV02）



a：雪に埋もれた MTKV11 観測点



b：防護屋根の追加設置作業の様子



c：防護屋根設置完了後の様子

図34 積雪対策 2 回目の様子（MTKV11）。



a : MTKV01 観測点



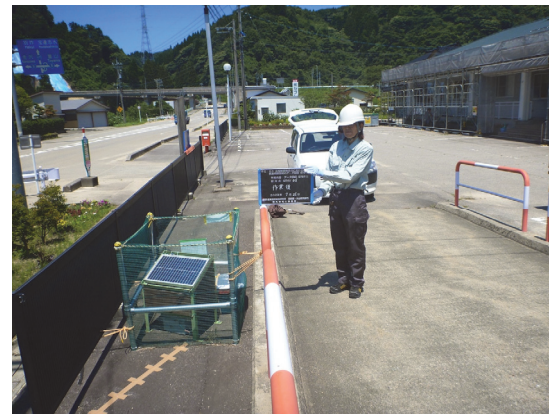
b : MTKV02 観測点



c : MTKV03 観測点



d : MTKV04 観測点



e : MTKV05 観測点

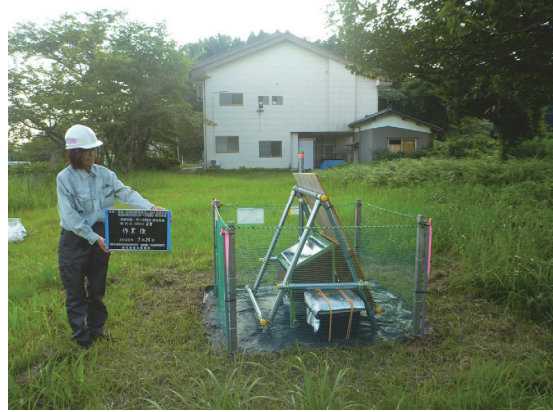


f : MTKV06 観測点

図35 MTKV-net観測点の外観 (MTKV01~MTKV06観測点)



g : MTKV07 観測点



h : MTKV08 観測点



i : MTKV09 観測点



j : MTKV10 観測点



k : MTKV11 観測点

図35 (続き) MTKV-net観測点の外観 (MTKV07~MTKV11観測点)

ii) 森本・富樫断層帯における臨時稠密地震観測網 (MTMT-net)

森本・富樫断層帯周辺の地震活動は低調であるため、発震機構解をより多く求めるには規模の小さい地震の極性データを収集する必要がある。また、断層上盤の地盤速度構造をより良く拘束するためにも、稠密な観測網が望ましい。2023年7月に、森本・富樫断層帯の上盤を中心に25点の上下動1成分地震計を配置し、臨時稠密地震観測網 (MTMT-net) を構築した (図36、表8)。使用機材は、0.1満点ロガー (松本・他, 2018) と固有周期4.5Hzの上下動成分ジオフォンである (図37)。この機材は省電力性に優れており、単1乾電池48本で1年間の測定が可能である。図38に全25観測点の外観を示す。2023年7月から2024年12月の撤収までの約1年4ヶ月間、およそ4ヶ月に一度の頻度で保守作業 (乾電池交換と清掃) とデータ回収を実施した。2024年12月中旬に観測点を撤収し原状回復した。これにより、約1年4ヶ月間の連続観測データ (サンプリング周波数100 Hz) を蓄積した。

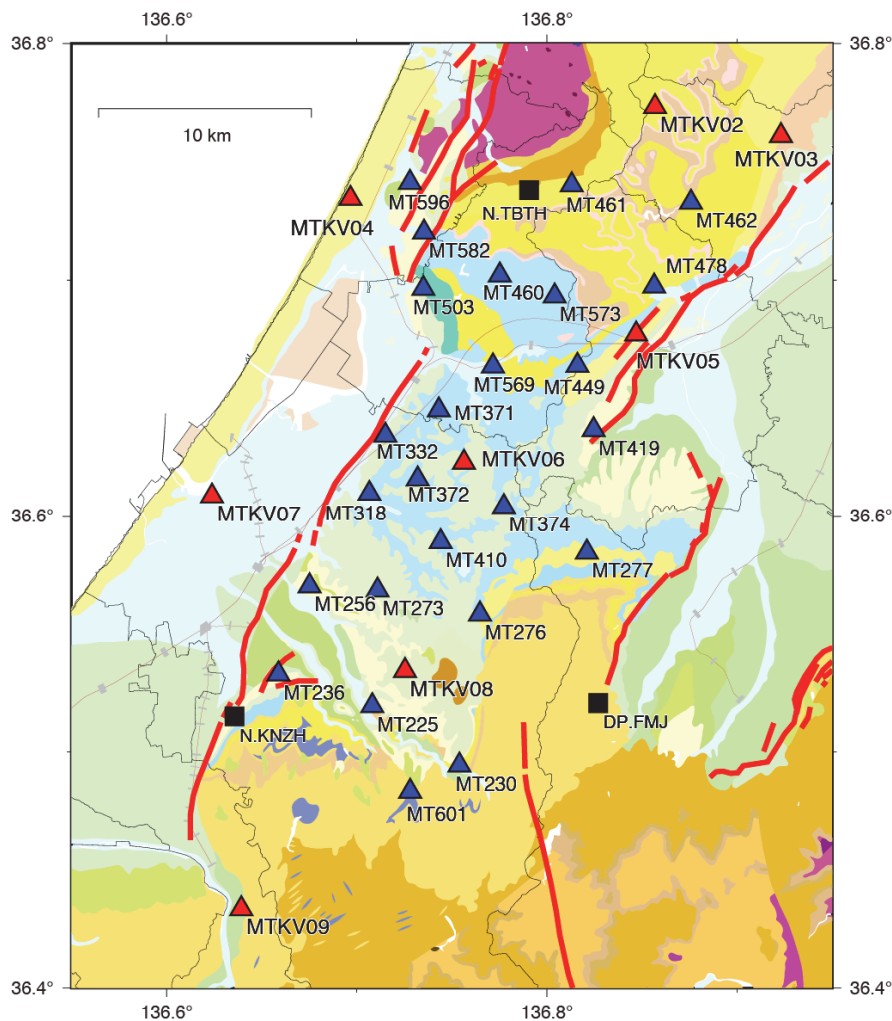


図36 本事業による臨時稠密地震観測網 (MTMT-net) の配置図。青三角はMTMT-net観測点、赤三角はMTKV-net観測点、黒四角は既往高感度地震観測点 (Hi-net、気象庁、大学観測点)。基図は20万分の1日本シームレス地質図V2 (産総研地質調査総合センター)、活断層位置は産総研活断層データベース、鉄道路線および行政界は国土数値情報による。



表8 臨時稠密地震観測網 (MTMT-net) 観測点諸元

コード	地点名等	緯度	経度	観測開始日時	終了日時
MT225	恩善寺	36.519447	136.708163	2023/07/08 14:00	2024/12/15 9:33
MT230	光明寺	36.494285	136.753972	2023/07/08 15:00	2024/12/15 9:00
MT236	大乘寺	36.532889	136.658850	2023/07/08 16:30	2024/12/15 10:19
MT256	覚林寺	36.570132	136.675188	2023/07/09 10:00	2024/12/15 10:38
MT273	宇宙寺	36.568360	136.710949	2023/07/09 11:30	2024/12/15 10:50
MT276	本泉寺	36.558234	136.764796	2023/07/09 12:00	2024/12/15 11:16
MT277	称念寺	36.584391	136.820978	2023/07/09 14:00	2024/12/15 11:30
MT318	本教寺	36.609632	136.706609	2023/07/09 15:30	2024/12/14 14:35
MT332	波自加彌 神社	36.63425	136.71505	2023/07/10 10:30	2024/12/14 14:11
MT371	少彦名神 社	36.64500	136.74313	2023/07/10 11:15	2024/12/14 13:56
MT372	水分神社	36.61677	136.73201	2023/07/10 12:10	2024/12/14 14:43
MT374	熊野神社 (竹又)	36.60403	136.77738	2023/07/10 13:30	2024/12/15 11:41
MT410	宝乗寺	36.58888	136.74414	2023/07/10 14:30	2024/12/15 12:03
MT419	本叡寺	36.63669	136.82455	2023/07/10 15:30	2024/12/14 10:20
MT449	俱利迦羅 不動寺	36.66385	136.81601	2023/07/10 17:10	2024/12/14 9:59
MT460	光楽寺	36.70208	136.77519	2023/07/11 10:15	2024/12/14 13:25
MT461	円通寺	36.74019	136.81305	2023/07/11 11:10	2024/12/14 11:27
MT462	西照寺	36.73282	136.87574	2023/07/11 13:30	2024/12/14 9:11
MT478	報恩寺	36.69739	136.85638	2023/07/11 14:30	2024/12/14 9:42
MT503	養楽寺	36.69637	136.73500	2023/07/11 16:00	2024/12/14 12:43
MT569	教願寺	36.66362	136.77162	2023/07/11 17:30	2024/12/14 13:00
MT573	笠野神社	36.69320	136.80408	2023/07/12 10:15	2024/12/14 11:01
MT582	高峯山正 覚寺	36.72020	136.73534	2023/07/12 11:20	2024/12/14 12:03
MT596	本立寺	36.74123	136.72796	2023/07/12 13:30	2024/12/14 11:43
MT601	駒埴町	36.48321	136.72808	2023/07/12 15:30	2024/12/15 9:21



図37 MTMT観測点の構成 (MT276観測点)



図38 MTMT-net観測点の外観 (MT225~MT332観測点)



j : MT371 観測点



k : MT372 観測点



l : MT374 観測点



m : MT410 観測点



n : MT419 観測点



o : MT449 観測点



p : MT460 観測点



q : MT461 観測点



r : MT462 観測点



s : MT478 観測点



t : MT503 観測点



u : MT569 観測点

図38 (続き) MTMT-net観測点の外観 (MT371~MT569観測点)



図38 (続き) MTMT-net観測点の外観 (MT573～MT601観測点)

b) 深層学習モデル等を用いた地震波形データ自動処理による地震の検出

地震波形データの自動処理により、地震を検出し、その震源位置を同定した。解析するデータとしては、一昨年度本事業で構築したMTKV-netで得られたものに加え、周辺にある国立研究開発法人 防災科学技術研究所の高感度地震観測網 (Hi-net)、気象庁の地震観測網、京都大学防災研究所による地震観測網の観測点で得られたものを使用した。使用した観測点の位置は図39に示す。

まず、PhaseNetモデル (Zhu and Beroza, 2019) を日本のデータによる学習させたNaoi et al. (2024)の学習済みモデルを使用して、各観測点における連続地震波形データから地震を検出し、P波及びS波の到達時刻を読み取った。次に、GAMMA (Zhu et al., 2022) を使用して、異なる観測点の間のP波及びS波の読み取り値を同一地震のものであるとして結び付ける、いわゆるphase associationを実施した。最後に、速度構造としてJMA2001モデル (上野・他, 2002) を仮定し、hypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987) により震源位置を決定した。

図40に検出された地震の位置を赤色丸印で示す。比較のため、気象庁一元化処理震源カタログで掲載されている地震の位置を青色×印で示す。いずれも、2022年9月13日から2024年12月5日までの期間に発生した地震を図示している。図中の黄枠の範囲にある地震は、気象庁カタログでは396個であったのに対し、本事業による検出結果はおおよそ3倍の1174個であった。

図41に、得られた震源の3次元分布を断面図で示す。森本・富樫断層帯と直接対応するような東南東傾斜の面を明瞭に見ることはできなかった。そのような地震が非常に少ない

ことがその原因として考えられる。なお、領域の北部では深さ6～25 km程度の地震が多く、南部では0～18 km程度の地震が多い。

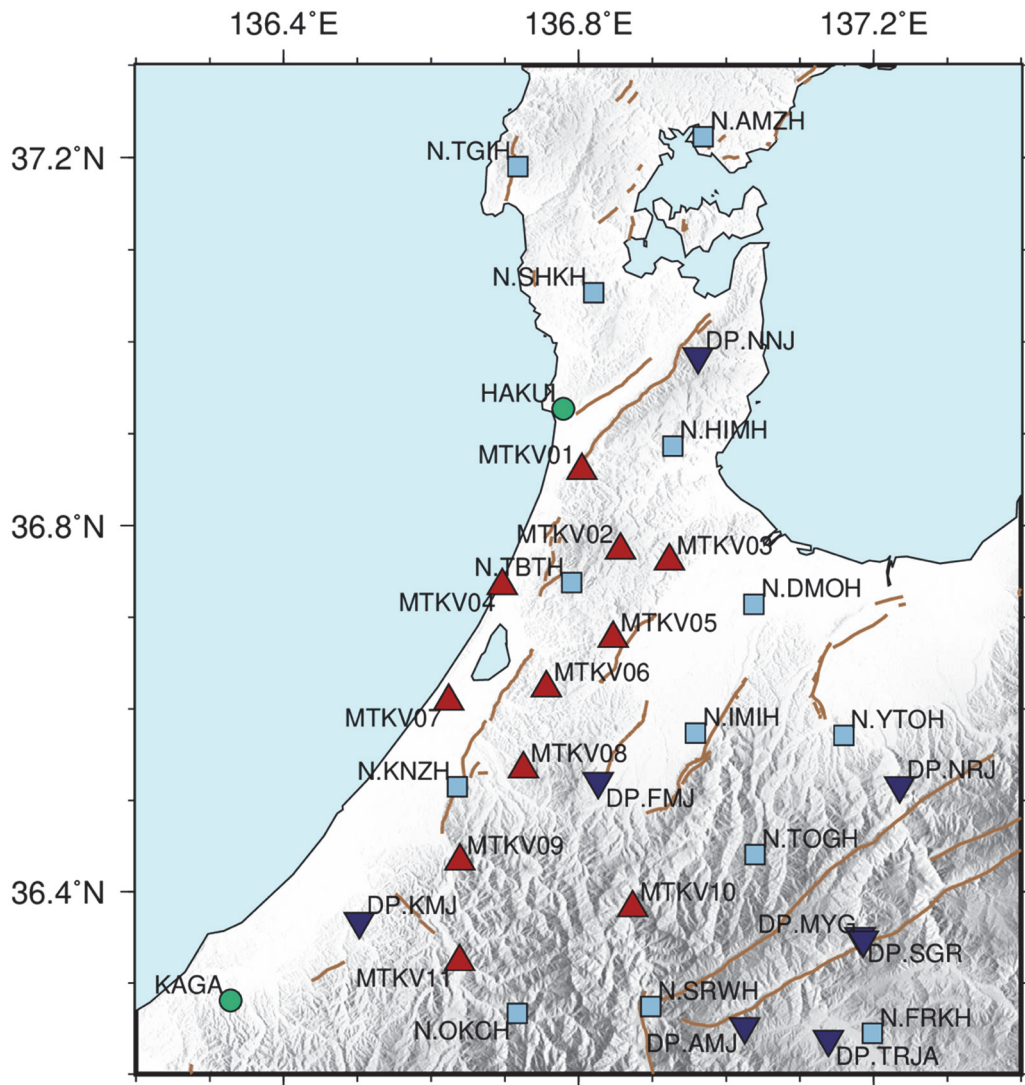


図39 深層学習を用いた地震検出・検出を行う際に使用した観測点の位置。赤色三角形がMTKV-net、水色四角形が国立研究開発法人 防災科学技術研究所の高感度地震観測網 (Hi-net)、緑色丸印が気象庁による地震観測網、青色下三角形が京都大学防災研究所による地震観測網の観測点の位置をそれぞれ示す。

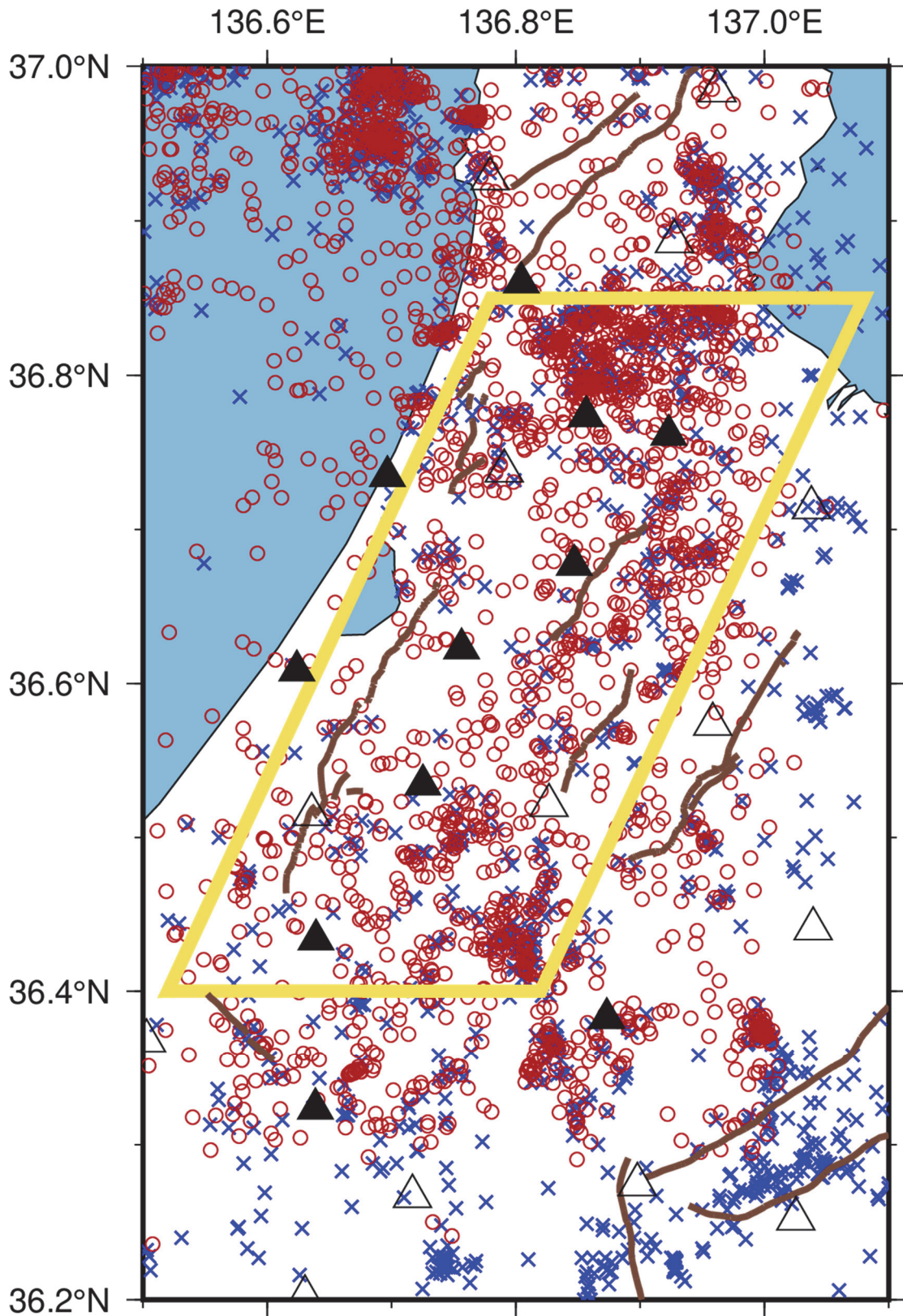


図40 深層学習を用いて検出・検測された地震（赤色丸印）と気象庁一元化処理震源カタログに掲載されている地震（青色×印）。いずれも、2022年9月13日から2024年12月5日までの期間に発生した地震を図示している。黒色三角形はMTKV-netの観測点、白抜き三角形はHi-net、気象庁、京都大学防災研究所による定常地震観測点の位置をそれぞれ示す。

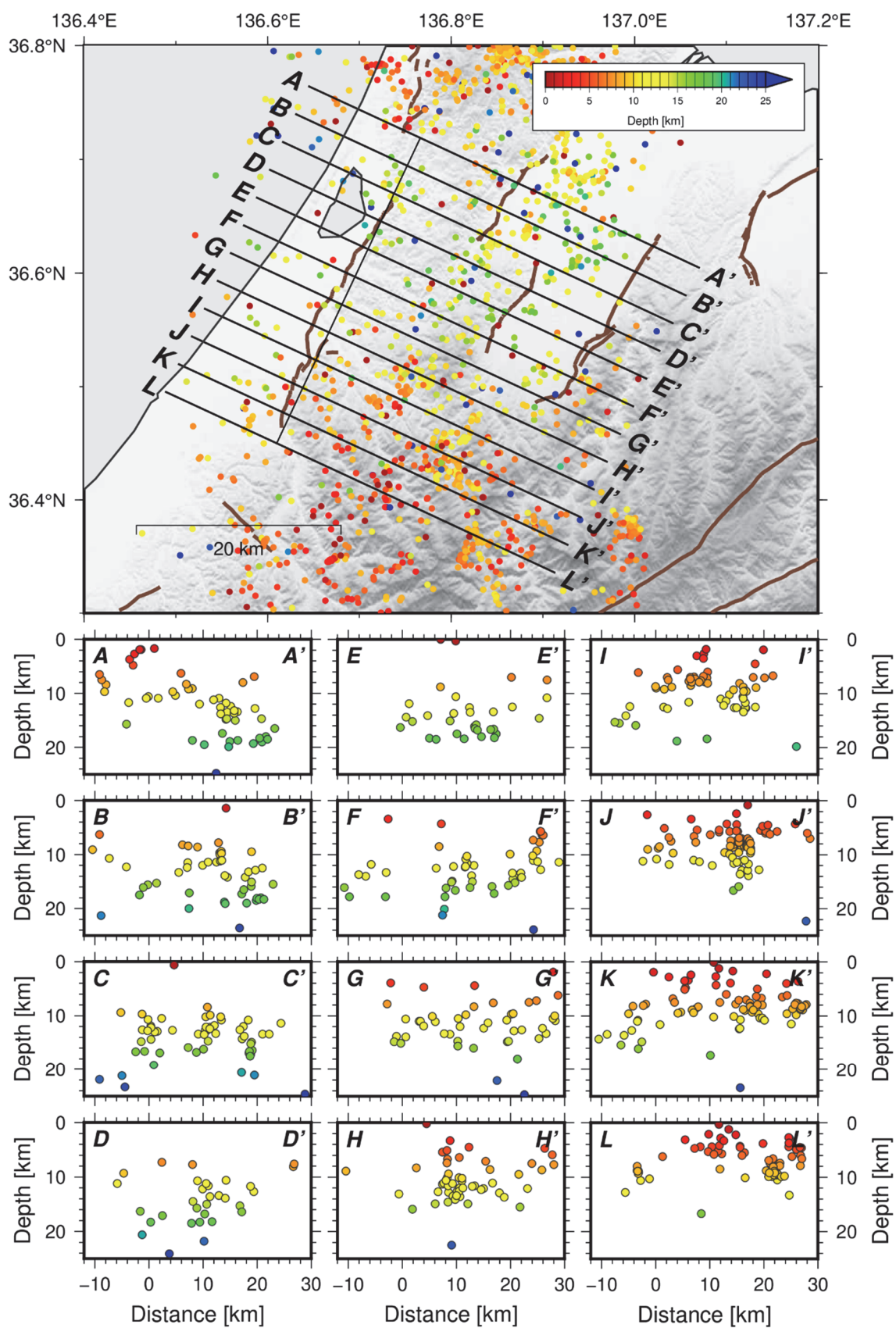


図41 深層学習を用いて検出・検測された地震の3次元分布を示す断面図。色は震源の深さを示す。

#### c) メカニズム解の推定

検出した地震に対して、P波初動極性を手動検出し、SKHASH (Skoumal et al., 2024 ; Hardebeck and Shearer, 2002) により震源メカニズム解の推定を試みた。P波初動極性の個数が十分で無い地震が多く、解を一意に決定することが困難であった。そこで、P波初動の押し引きデータに加えてP波とS波の振幅の比も同時に使うことで、この問題点を克服することにした。

実際の解析においてはP波初動の押し引きデータが7個以上あるM1.0以上の地震に対して上記手法を適用し、メカニズム解を推定した。SKHASHでは得られたメカニズム解の品質を良い方から順にAからDまでのランクで示しているが、Aランクが14個、Bランクが9個、Cランクが6個、Dランクが3個という結果であった。Cランク以上の29個の推定結果の空間分布を図42に示す。断層のタイプは逆断層型と横ずれ断層型のいずれのものも見られた。図43にP軸方位、図44にT軸方位の空間分布を示す。北西-南東方向にP軸を持つ逆断層型が多く、当該地域の広域応力場 (Uchide et al., 2022) と調和的であるが、枠内の北西部に当たる河北湖付近では横ずれ断層が卓越し、枠内の南西部では逆断層が卓越するなど、地域的な偏りも見られる。

#### d) 応力場の推定

本研究で推定したメカニズム解にUchide et al. (2022) の応力テンソルインバージョン法を適用し、応力場の推定を行った。図45に推定結果を示す。最適解は、北西-南東方向に圧縮軸を持つ横ずれ断層場を示す。圧縮軸方位は森本-富樫断層帯の走向に直交しており、同断層帯を動かしやすい応力場であると言える。推定誤差を考慮して得られた10000通りの主応力軸の方向の分布詳細は項目3) 参照) も図45に示しているが、 $\sigma_2$ と $\sigma_3$ 方位の分布は広く、重なっている部分も大きい。これはメカニズム解の特徴からも予想されたことであるが、横ずれ断層型と逆断層型の地震が混在していることに起因する。なお、空間的な不均質を考慮した応力インバージョンについては、十分な個数の震源メカニズム解が得られていないことから、実施困難であった。



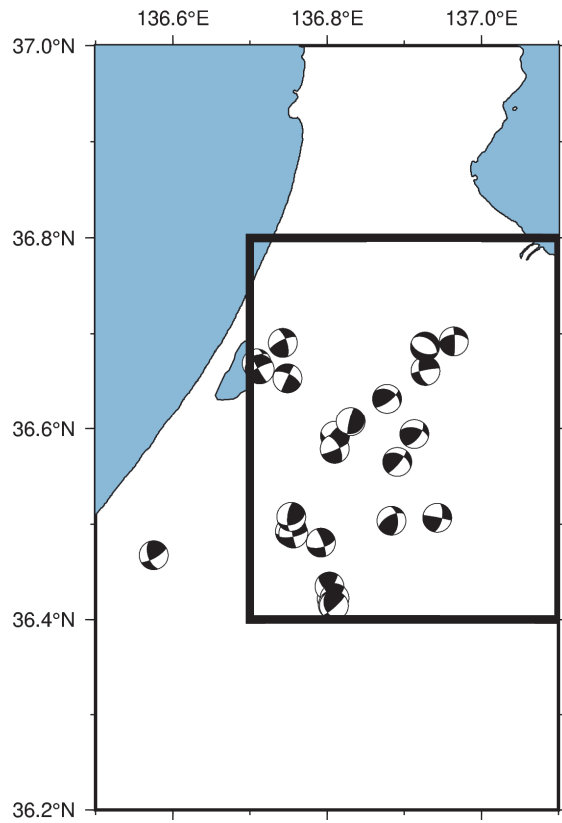


図42 推定された震源メカニズム解

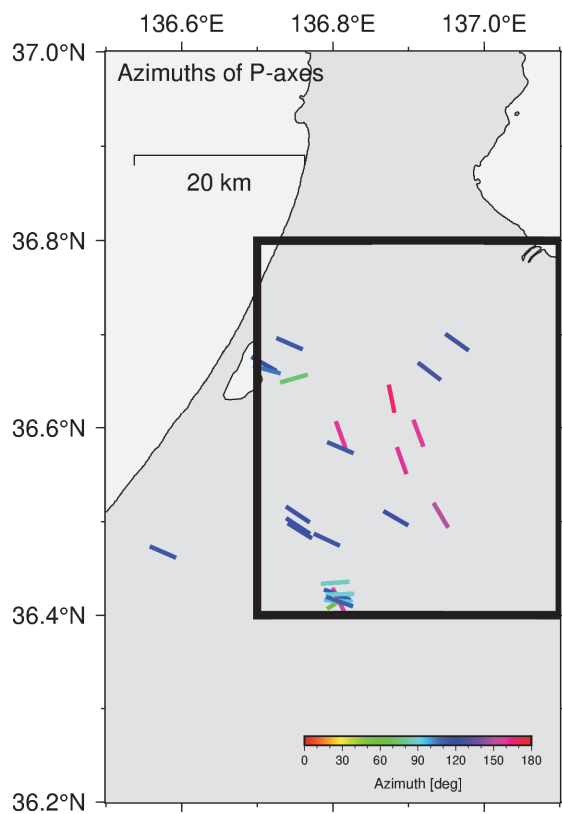


図43 得られた震源メカニズム解のP軸方位。傾き (plunge) が30度以下のみ描画。

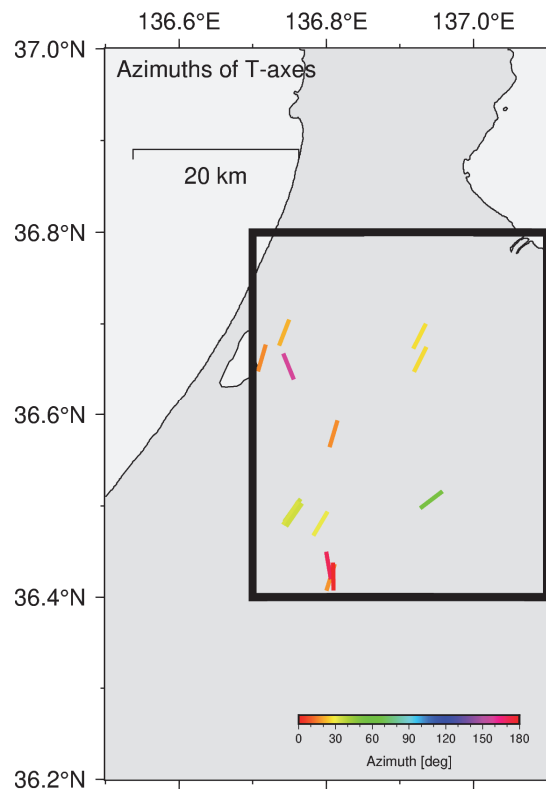


図44 得られた震源メカニズム解のT軸方位。傾き (plunge) が30度以下のみ描画。

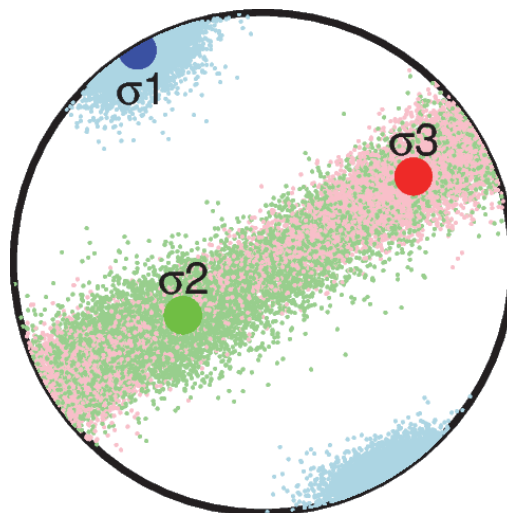


図45 応力テンソルインバージョン結果。最適解を丸印で示す。薄い色の小さい丸で、応力テンソルの推定誤差を考慮した場合のばらつきを示す。

## 2) 雑微動を用いた表面波解析

### i) MTKV-net で観測された 3 成分の地震動連続記録への地震波干渉法の適用

地震波干渉法は、異なる 2 地点で観測された雑微動の相互相関関数を計算することで、一方を仮想的な震源、他方を受振器とする疑似的な地震動データを合成する方法である。理論では単純な波動場を仮定しているものの（例えば、Lobkis and Weaver, 2001）、地震波干渉法により観測点間のグリーン関数が抽出可能であることが様々な実データに対して示されている（例えば、Shapiro and Campillo, 2004）。グリーン関数から求まる表面波の群速度や位相速度を用いると、媒質の S 波速度構造も推定可能である（例えば、Shapiro et al., 2005）。ただし、雑微動から地震波干渉法で安定したグリーン関数を求めるには、重合によるノイズ低減が必要であるため、長期間の連続データの確保が不可欠である。

本事業による臨時高感度地震観測網（MTKV-net）で観測した 3 成分の地震動連続記録（2022 年 10 月 1 日から 2023 年 11 月 30 日）に地震波干渉法を適用した。解析方法は大阪平野の連続雑微動記録への地震波干渉法適用事例である Asano et al. (2017) を参考にし、以下に示す通りとした。

- (1) 連続記録から、10 分間ずつ、区間の半分が重なるように（5 分ずつずらしながら）切り出す。この際、欠損を含む区間のデータは使用しない。
- (2) 基線補正を行う。
- (3) 帯域幅 0.1~2.0 Hz のバンドパスフィルタを施す。
- (4) ウィンドウ幅を 10 秒とする Running Absolute Mean 法 (Bensen et al., 2007) を実施し、振幅値を時間領域で正規化する。これにより、自然地震の影響が取り除かれる。
- (5) 波形の両端に、周期 2 秒のコサインテーパーを施す。
- (6) クロススペクトルにより、相互相関関数を計算する。
- (7) このようにして得られた各区間の相互相関関数を時間領域で重合して得られた関数を、観測点間の相互相関関数と見なす。

図 46~図 48 に、全観測点、全成分間（55 ペア、9 成分）の相互相関関数（2022 年 10 月 1 日から 2023 年 11 月 30 日までのデータを使用。ただし、MTKV04 は、2022 年 11 月 22 日の移設以降のデータを使用）を示す。各パネルの上に、相互相関関数の成分と周波数帯域を、右上に利用データの期間を、右に相互相関関数に対応する観測点ペアを、それぞれ示す。このうち、「相互相関関数の成分」は、例えば「R-R Comp.」は RR 成分を表す。各パネルの縦軸は観測点間距離を、横軸は時間を、それぞれ表す。横軸方向は、例えば観測点ペアが「MTKV01-MTKV11」の場合、正側は MTKV01 から MTKV11 への、負側は MTKV11 から MTKV01 への伝播を示す。図 46 は周波数帯域 0.1—2.0 Hz、図 47 と図 48 はそれぞれ 0.15—0.5 Hz、0.5—1.0 Hz のバンドパスフィルタを適用した結果を表す。

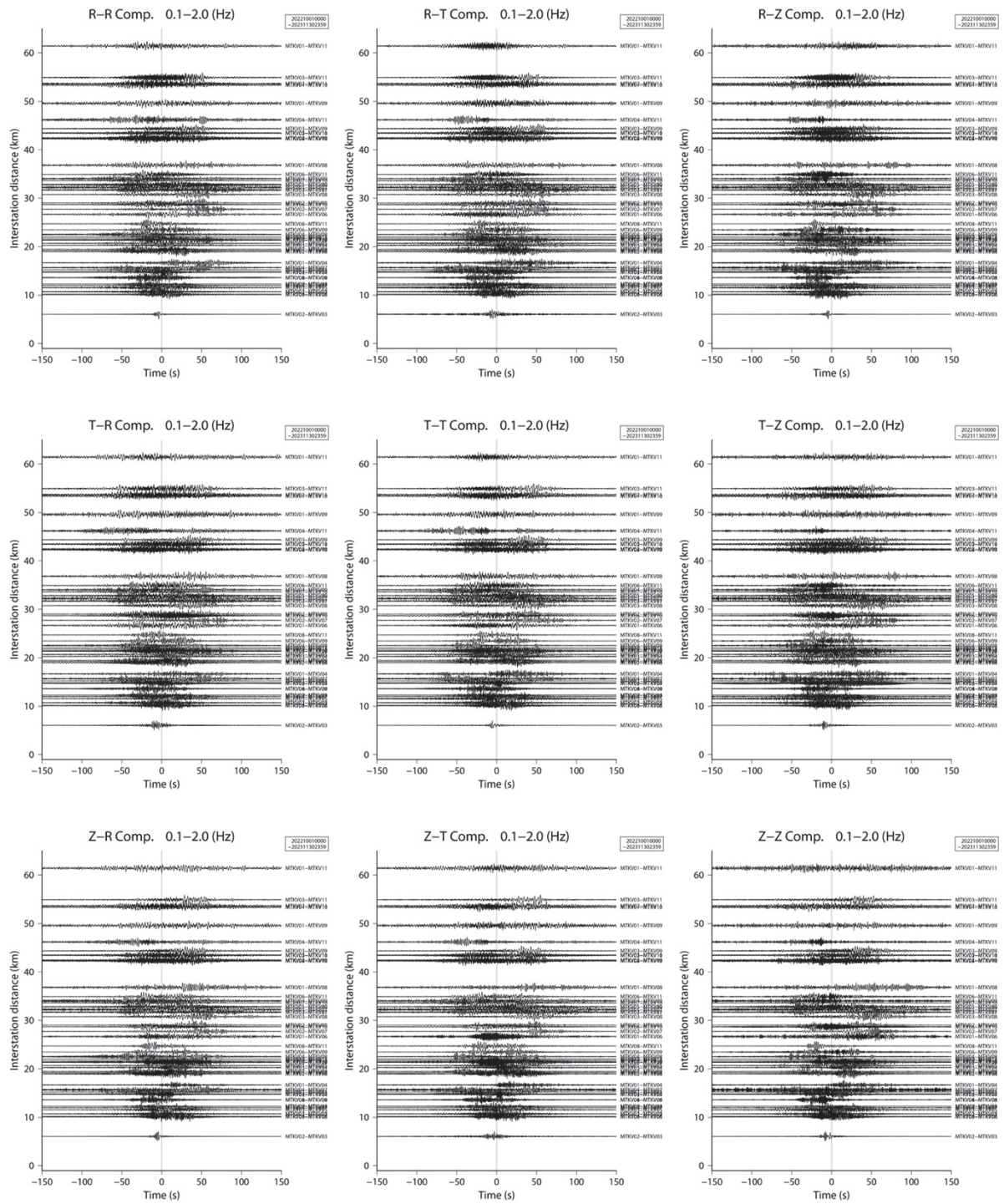


図 46 地震波干渉法によって得られた全観測点、全成分間の相互相関関数（2022 年 10 月 1 日から 2023 年 11 月 30 日のデータを利用、周波数帯域は 0.1–2.0 Hz）。各パネルの上に相互相関関数の成分と周波数帯域を、右上に利用データの期間を、右に観測点ペアを、それぞれ示す。縦軸は観測点間距離、横軸は時間を表す。

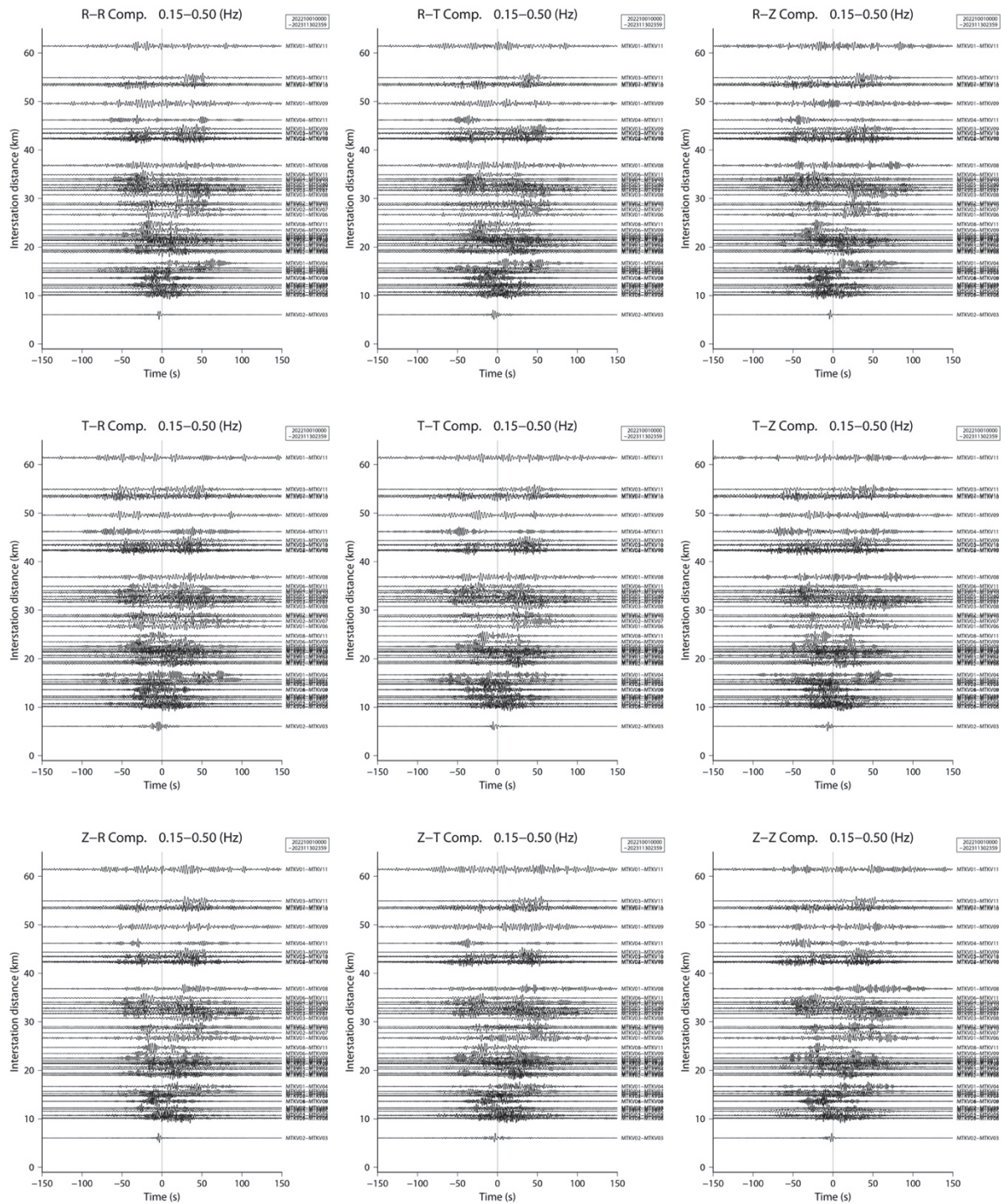


図 47 地震波干渉法によって得られた全観測点、全成分間の相互相関関数（2022 年 10 月 1 日から 2023 年 11 月 30 日のデータを利用、周波数帯域は 0.15—0.5 Hz）。各パネルの上に相互相関関数の成分と周波数帯域を、右上に利用データの期間を、右に観測点ペアを、それぞれ示す。縦軸は観測点間距離、横軸は時間を表す。

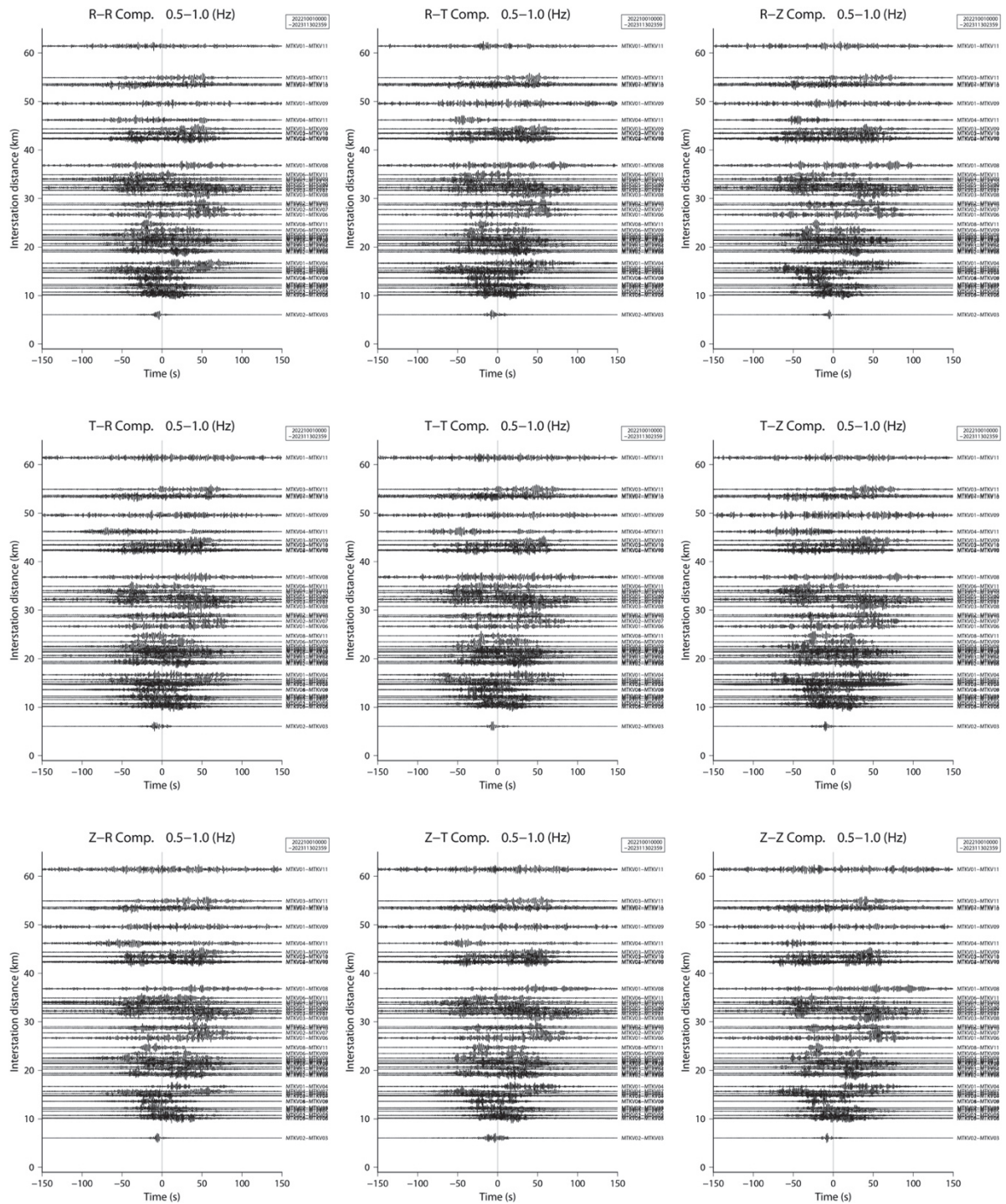


図 48 地震波干渉法によって得られた全観測点、全成分間の相互相関関数（2022 年 10 月 1 日から 2023 年 11 月 30 日のデータを利用、周波数帯域は 0.5—1.0 Hz）。各パネルの上に相互相関関数の成分と周波数帯域を、右上に利用データの期間を、右に観測点ペアを、それぞれ示す。縦軸は観測点間距離、横軸は時間を表す。

ii) 臨時地震観測網および定常観測網の連続地震データを用いた表面波解析と3次元S波速度構造の推定

本事業で設置した高感度臨時地震観測網（MTKV-net：図49の赤色）、稠密地震観測網（MTMT-net：図49の緑色）とサブ3-2による臨時地震（強震）観測（MTSVとMTSM：図49の青色）及び周辺の定常地震観測点である防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net：図49の白色）、気象庁（図49のマゼンタ色）、京都大学（図49の黄色）で得られた連続地震観測データのうち、地震を含まない期間の振動（雑微動）を用いて表面波解析を行なった。本解析では、最も観測点数の多いMTMT-netが上下動1成分のみであるため、全点で上下動1成分のみを使用した。データの期間は2023年7月10日から2024年12月30日である。各観測点においてデータに欠損がある場合、欠損を含む日付のデータは使用しないものとした。雑微動データに対して、地震波干渉法およびSPAC法を適用し、2観測点間を伝播する表面波の群速度および位相速度を推定した。さらに、推定した2観測点間の位相速度分散曲線をもとにトモグラフィ解析により位相速度マップを推定した。最後に、推定した位相速度マップをもとにインバージョン解析を行い、森本・富樫断層帯周辺の広域3次元S波速度構造を推定した。

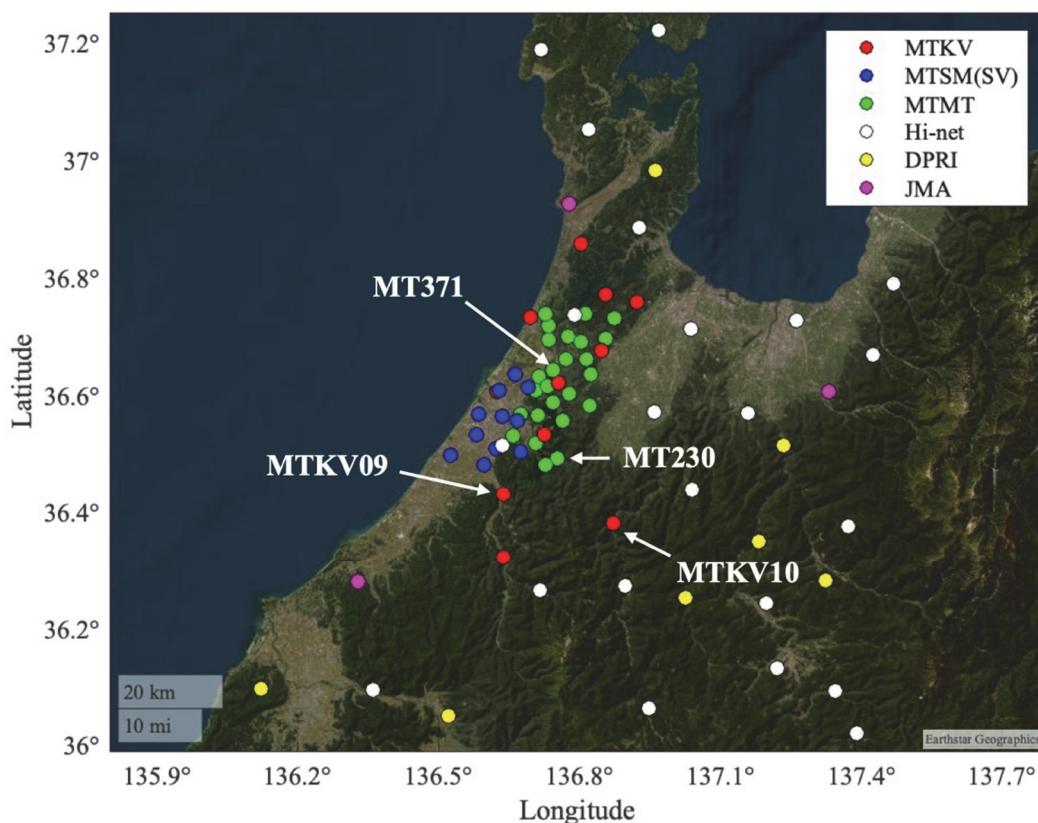


図49 本解析で使用した観測点分布。観測網ごとに異なる色でプロットした。白い矢印で示す観測点（MTKV09、MTKV10、MT230、MT371）は結果の例示に使用する観測点。

本解析では、使用した地震計に加速度計および速度計が含まれていたため、加速度データについては応答補正を行った後、数値積分により速度データへ変換した。レスポンスを

補正した各観測点のデータに対して、1日分のデータを50%ずつオーバーラップさせながら20分間のセグメントに分割し、平均値とトレンドを除去してから、セグメントの両端に10%のテーパをかけた。自然地震の影響を取り除くため、各セグメントの二乗平均振幅（MS振幅）が1日のMS振幅の2倍以上となるセグメントを除外した。

前処理を行ったデータに対して地震波干渉法を適用した。地震波干渉法は、異なる2地点で観測された雑微動の相互相関関数を計算することで、一方を仮想的な震源、他方を受振器とみなして、観測点間のグリーン関数を抽出する方法である。理論では単純な波動場を仮定しているものの（Lobkis and Weaver, 2001）、この方法により観測点間のグリーン関数が抽出可能であることが実データにより示されている（Shapiro and Campillo, 2004）。特に、実体波よりも減衰しにくい表面波が強調されやすく、時間領域で表面波の伝播の様子を可視化できる。本解析では、ノイズ成分を低減するために、0.3 km/s から 4.0 km/s の速度フィルタを適用した（図 50）。

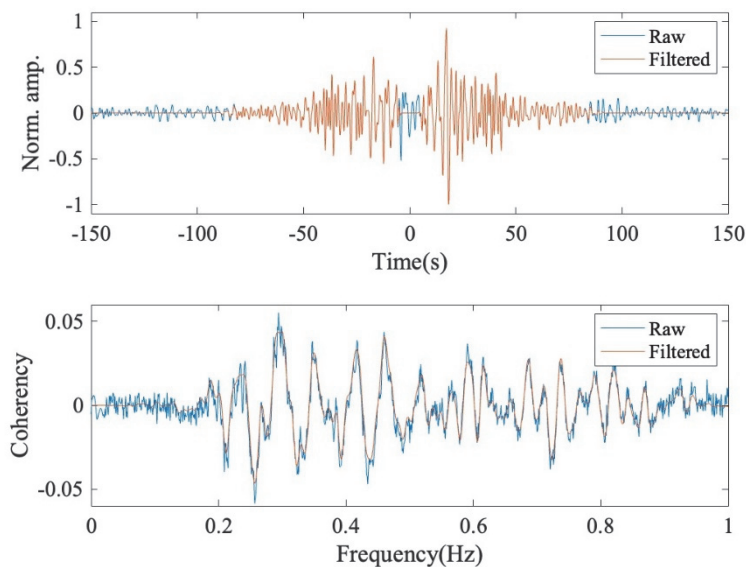


図 50 地震波干渉法の結果例（MTKV09 と MT371 のペア）。（上段）地震波干渉法で得られた時間領域の相互相関関数。（下段）周波数領域の相互相関関数（正規化したクロススペクトルの実部：複素コヒーレンシーの実部）。青線と赤線は速度フィルタの適用前と適用後を示す。

まず初めに、相互相関関数に狭帯域のバンドパスフィルタを適用し、時間領域で包絡線の到達時間を読み取る（Bensen et al. 2007）ことで、群速度の分散曲線を推定した。本解析では、中心周波数から $\pm 0.05$  Hz のバンドパスフィルタを適用し、0.15 Hz から 0.9 Hz において、0.002 Hz 間隔で群速度を推定した（図 51, 52）。各観測点ペアにおいて、使用する周波数範囲は群速度の周波数方向の連続性や包絡線の振幅等を考慮して、マニュアルで設定した。



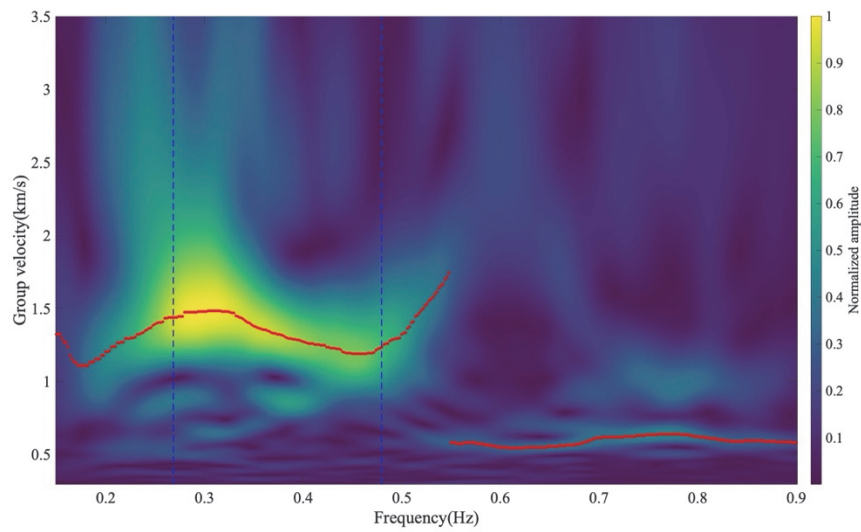


図 51 群速度の推定結果例 (MTKV09 と MT371 のペア)。赤線は各周波数において相互相関関数の包絡線が最大となる速度を示す。青色の破線は 3 次元 S 波速度構造の検証に使用した周波数範囲を示す。

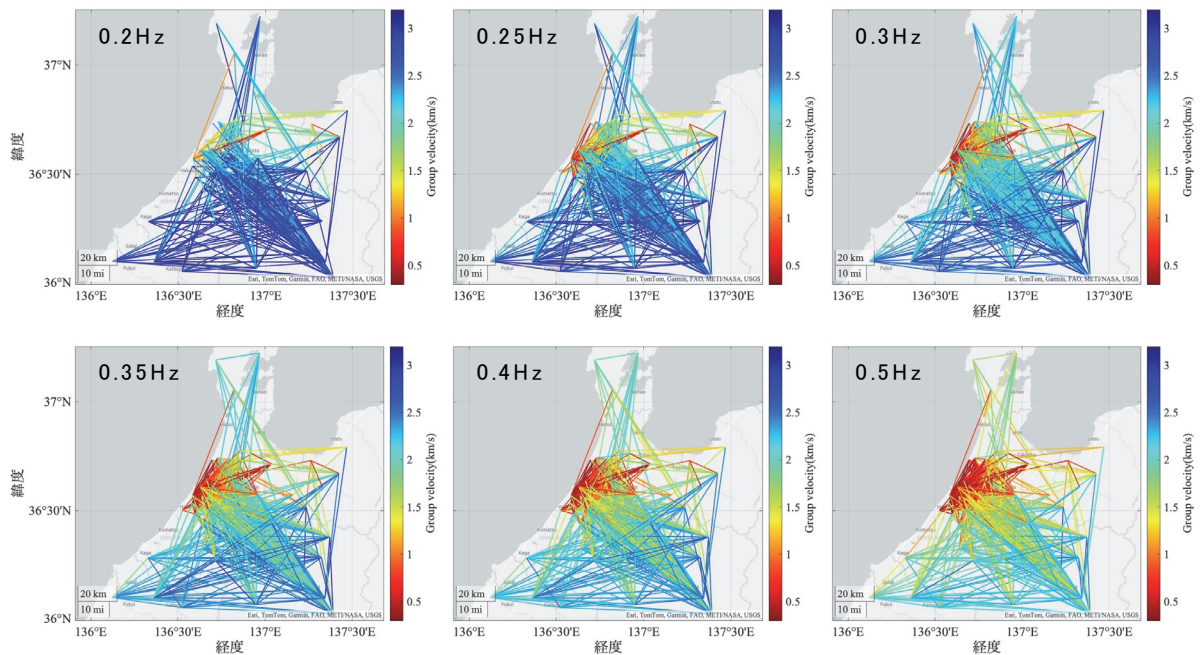


図 52 推定した群速度を示す。観測点ペアを結ぶ直線を推定した群速度で色付けしている。各パネルの左上に対応する周波数を記載している。

次に、周波数領域において、雑微動の相互相関関数とベッセル関数で表される理論値の二乗平均平方根誤差 (RMSE) が最小となる位相速度の分散曲線を推定した (Aki, 1957)。本解析では、Takagi and Nishida (2022)を参考に、位相速度を 1 次元 S 波速度構造の関数として定義し、相互相関関数とベッセル関数で表される理論値の誤差が最小となる 1 次元 S 波速度構造から、2 観測点間の分散曲線を推定する。1 次元 S 波速度構造は、最下層の

厚さを無限とする4層構造を仮定し、初期モデルとして地震調査研究推進本部の全国1次地下構造モデル(暫定版)(Koketsu et al., 2008、地震調査研究推進本部, 2012)を使用した。理論分散曲線の計算はComputer program in seismology(CPS; Herrmann, 2013)を使用した。最適解は共分散行列適応進化戦略(CMA-ES; Hansen and Ostermeier, 2001)により推定した。各観測点ペアにおいて、使用する周波数範囲はRMSEや相互相関関数の振幅等を考慮して、マニュアルで設定した。全ての観測点ペアにおいて、位相速度の分散曲線を推定した(図53、54)。

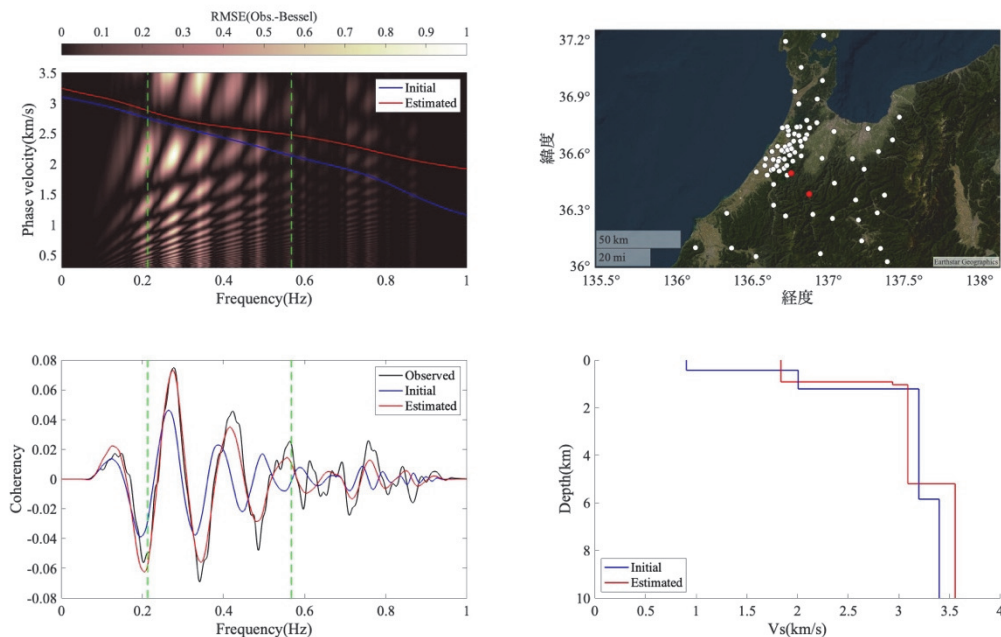


図 53 位相速度の推定結果例 (MT230 と MTKV10)。(左上)背景の色は各周波数、各位相速度における理論値と観測値の RMSE を示す。青線と赤線はそれぞれ、初期モデルと最適解における位相速度の分散曲線を示す。緑色の破線は使用する周波数範囲を示す。(左下)黒線と青線、赤線はそれぞれ、観測値と初期モデル、最適解における理論値を示す。緑色の破線は使用する周波数範囲を示す。(右上)観測点ペアの位置(赤丸)を示す。(右下)1次元S波速度構造の初期モデルと最適解のモデルを示す。

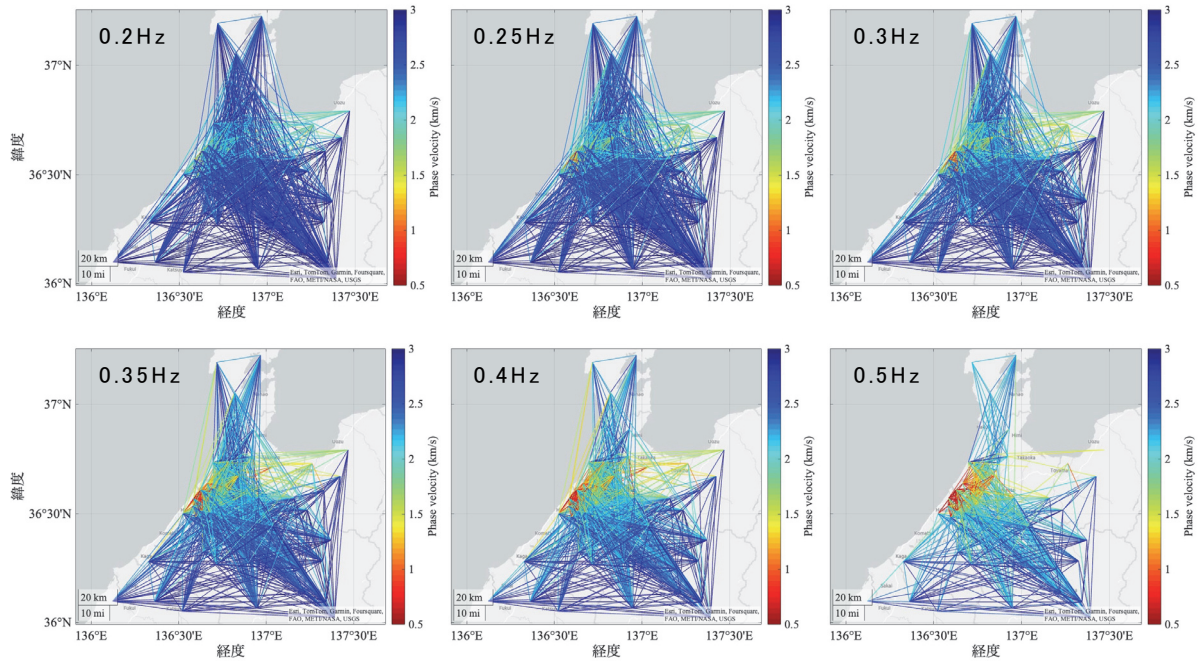


図 54 推定した位相速度。観測点ペアを結ぶ直線を推定した位相速度で色付けしている。各パネルの左上に対応する周波数を記載。

得られた 2 観測点間の位相速度分散曲線のうち、使用する周波数範囲が 0.05 Hz 以上のもののみを使って、0.18 Hz から 0.55 Hz において 0.004 Hz 間隔で位相速度トモグラフィ (Ekström, 2014) を適用し、0.03° 間隔グリッドの位相速度マップを推定した (図 55)。トモグラフィ解析は観測点間を伝播する波の走時情報を利用し、全ての観測点ペアで得られた走時情報を最もよく説明する位相速度分布を最小二乗法で推定する。本解析では、隣接する東西南北のグリッドが滑らかな解になるような平滑化パラメータを使用した。

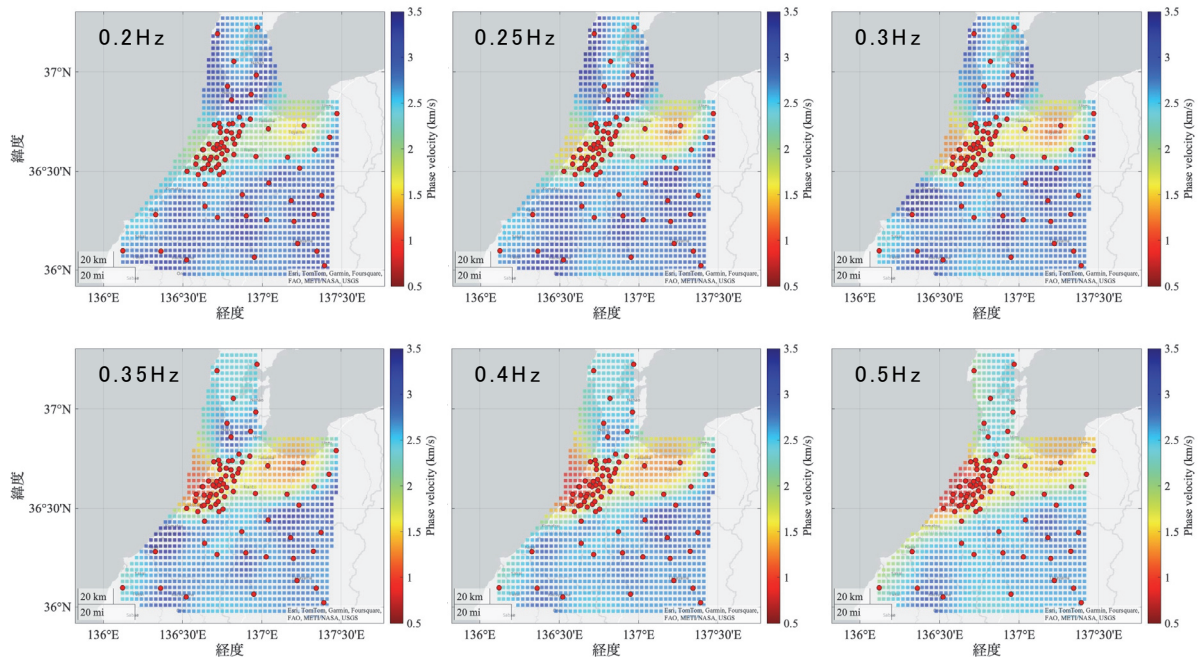


図 55 推定した位相速度マップ。赤色の丸は観測点を示す。各パネルの左上に対応する周波数を記載している。

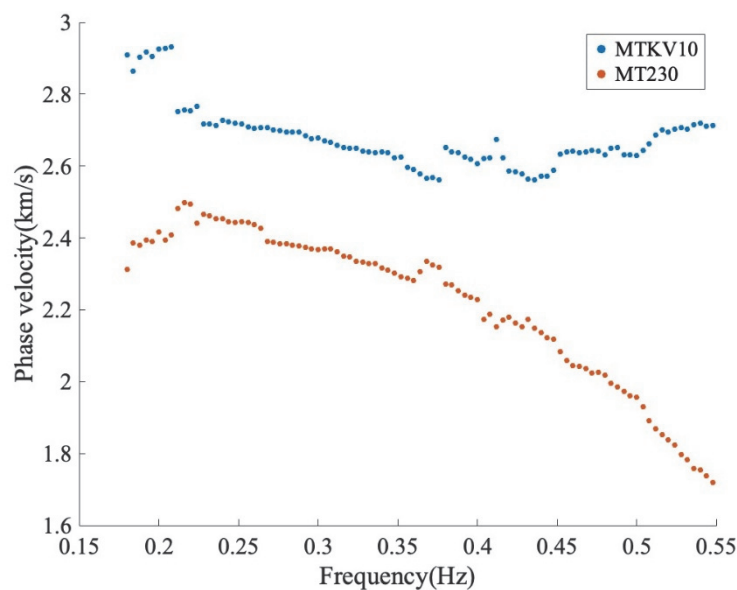


図 56 周波数ごとの位相速度トモグラフィで求めた位相速度の例（観測点 MTKV10 および MT230 の位置するグリッド）。

位相速度トモグラフィにより、各グリッドにおける 0.18 Hz から 0.55 Hz の位相速度を周波数ごとに推定し、これをもとに各グリッドの分散曲線を作成した（図 56）。3次元S波速度構造の推定には、最下層の厚さを無限とする3層構造を仮定し、初期モデルとして表9に示すモデルを用いた。各グリッドの分散曲線を用いて、ノルム最小の制約を加えた

非線形最小二乗法を適用し、3次元S波速度構造を推定した(図57,58)。本解析では、ノルム最小の条件に加えて、隣接する東西南北のグリッドが滑らかな解になるような平滑化パラメータを使用した。位相速度に対するS波速度および層厚の感度カーネルはCPS(Herrmann, 2013)を用いて計算し、これをヤコビアン行列として非線形最小二乗法に用いた。

表9 3次元S波速度構造の初期モデル

	S波速度 (km/s)	層厚 (km)
1層目	1.0	0.5
2層目	2.0	1.0
3層目	3.0	-

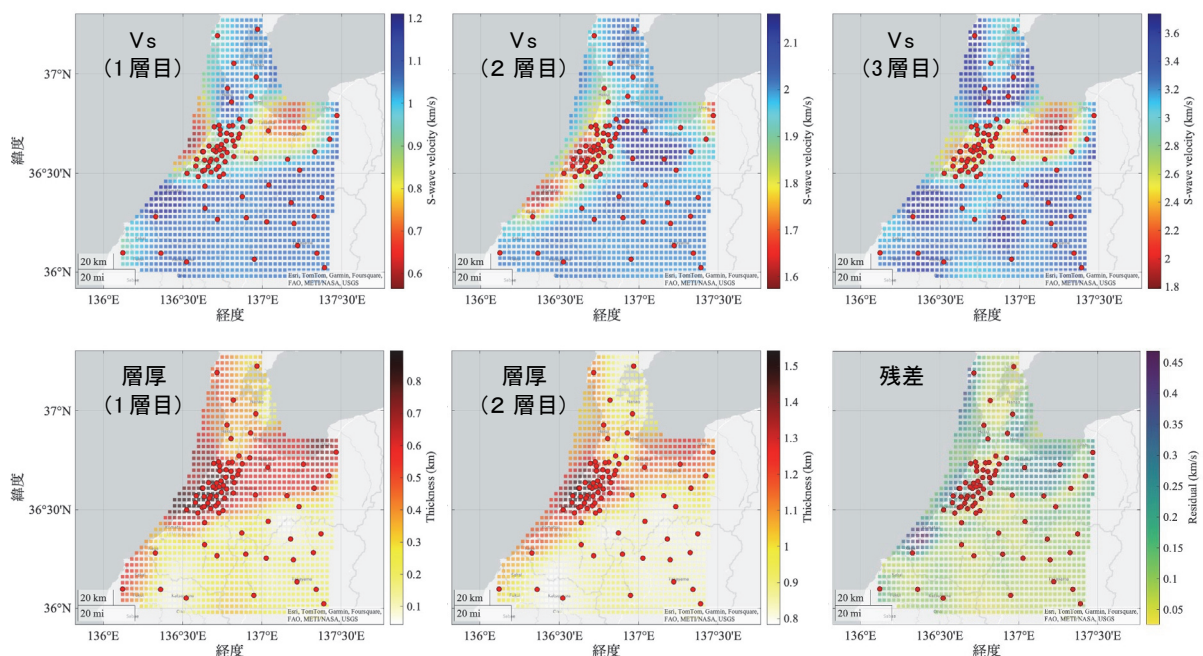


図57 推定した3次元S波速度構造。各パネル左上には、表示している物理量の名称を記載している。各グリッドの残差は、推定された3次元S波速度構造から計算した分散曲線と、トモグラフィ解析によって得られた分散曲線との各周波数における位相速度の絶対誤差の総和とした。

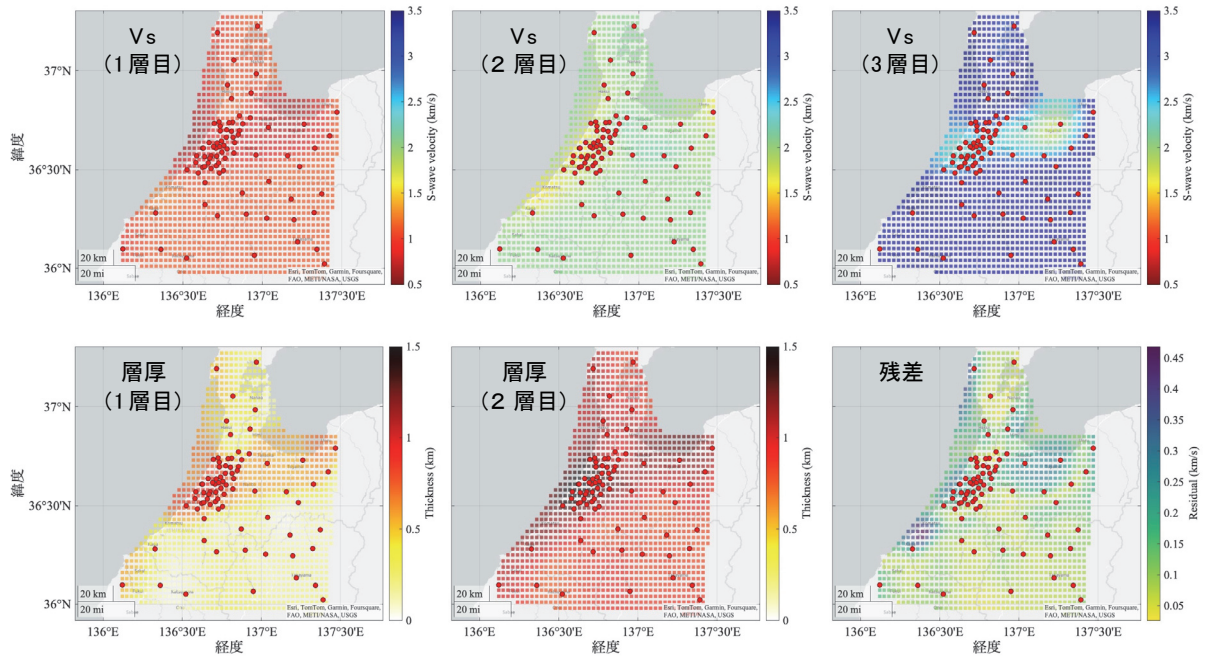


図 58 図 57 を物理量ごとにカースケールを固定して表示。

得られた 3 次元 S 波速度構造において、1 層目は金沢平野から砺波平野周辺にかけて 0.7 km/s 程度の低速度域が厚く分布している。一方、それ以外の地域では 1 層目の層厚は 0.1 km 以下であった。2 層目は金沢平野周辺で 1.6 km/s 程度の低速度域が厚さ 1.5 km 程度分布している。金沢平野以外では速度 2 km/s 程度の層が厚さ 1 km 程度分布している。3 層目はほとんどの範囲で地震基盤相当の速い (3.0 km/s 以上) S 波速度となっているが、金沢平野と砺波平野周辺では、地震基盤に相当する層の存在を明瞭に捉えることはできなかった。

最後に、推定した 3 次元 S 波速度構造の妥当性を評価するために、以下の比較を行った。まず、地震調査研究推進本部による全国 1 次地下構造モデル (暫定版) (Koketsu et al., 2008、地震調査研究推進本部, 2012) および本解析で推定した 3 次元 S 波速度構造を用いて、2 観測点ペア間の群速度および位相速度を計算した。次に、これらの計算値と、実際に推定された 2 観測点ペア間の群速度および位相速度との残差を比較した (図 59-63)。全ての周波数において、計算値と観測値の残差の絶対値の平均は位相速度と群速度ともに、全国 1 次地下構造モデル (暫定版) よりも推定した 3 次元 S 波速度構造の方が小さくなった。

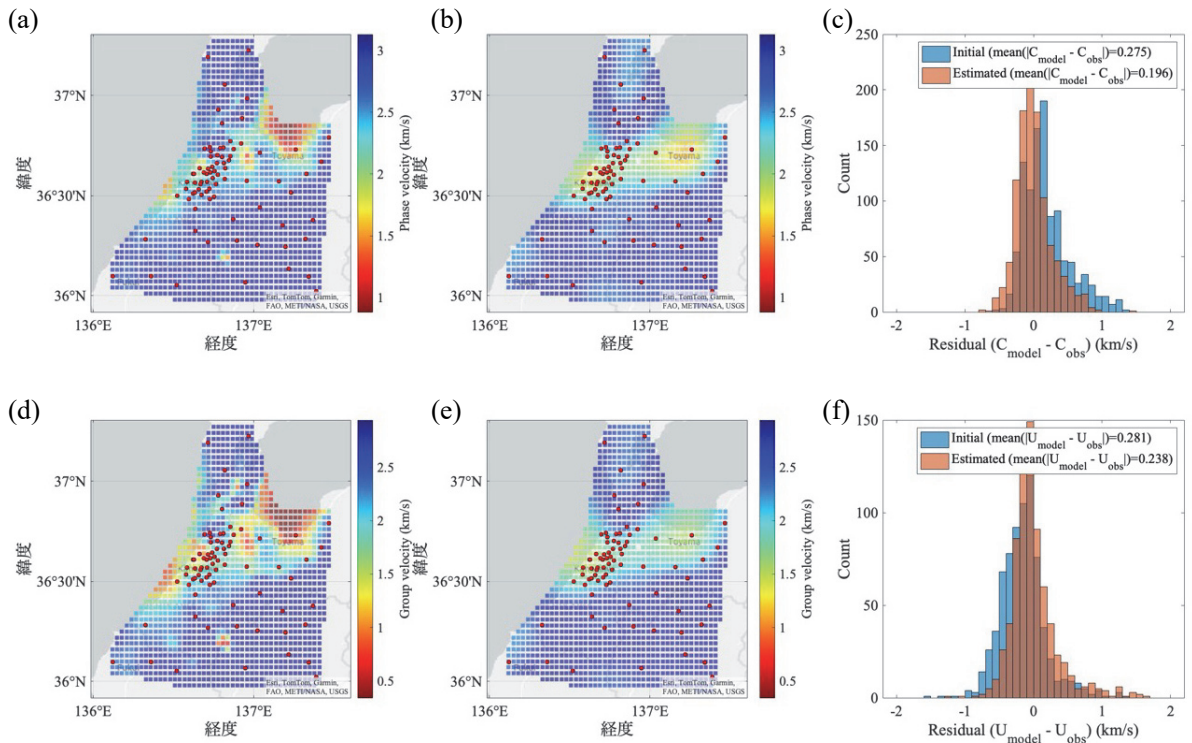


図 59 0.2 Hz におけるモデルと観測値の比較。(a) 全国 1 次地下構造モデル (暫定版) を用いて計算した各グリッドの位相速度。(b) 推定した 3 次元 S 波速度構造を用いて計算した各グリッドの位相速度。(c) 2 観測点ペア間の位相速度の計算値と観測値の残差のヒストグラム。凡例に全ての残差の絶対値の平均を示す。(d) 全国 1 次地下構造モデル (暫定版) を用いて計算した各グリッドの群速度。(e) 推定した 3 次元 S 波速度構造を用いて計算した各グリッドの群速度。(f) 2 観測点ペア間の群速度の計算値と観測値の残差のヒストグラム。凡例に全ての残差の絶対値の平均を示す。

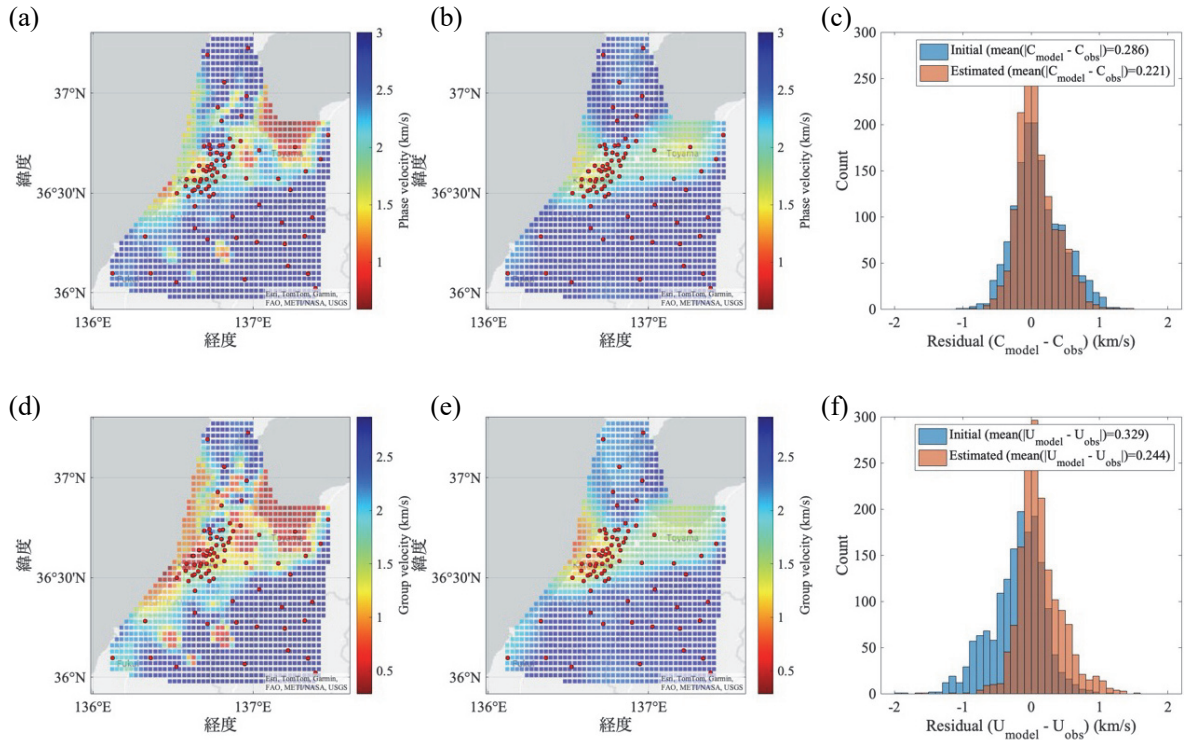


図 60 0.3 Hz におけるモデルと観測値の比較。各パネルの説明は図 59 参照。

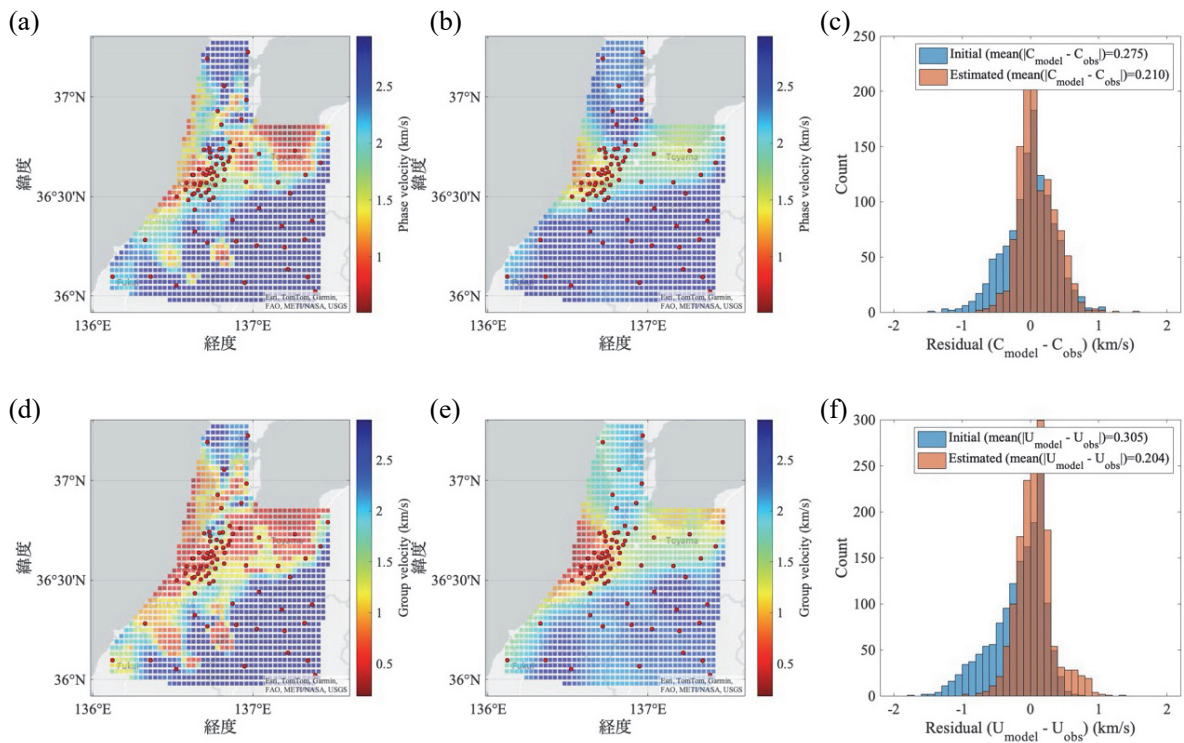


図 61 0.4 Hz におけるモデルと観測値の比較。各パネルの説明は図 59 参照。



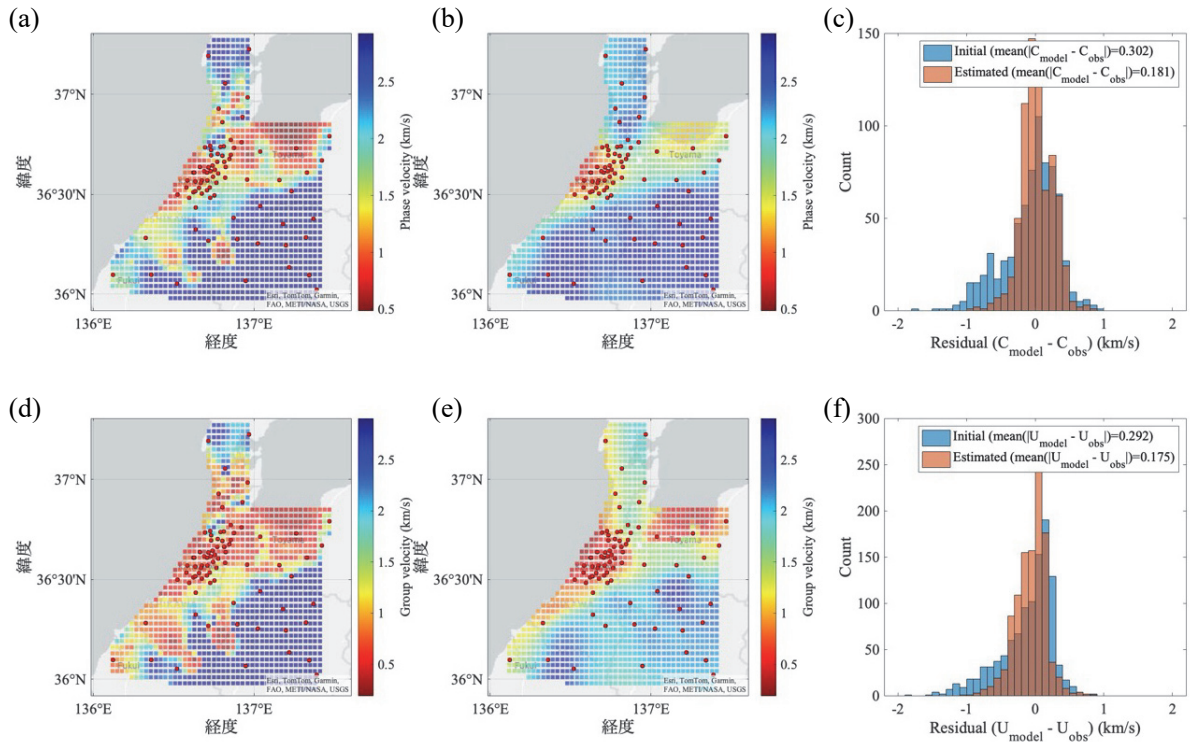


図 62 0.5 Hz におけるモデルと観測値の比較。各パネルの説明は図 59 参照。

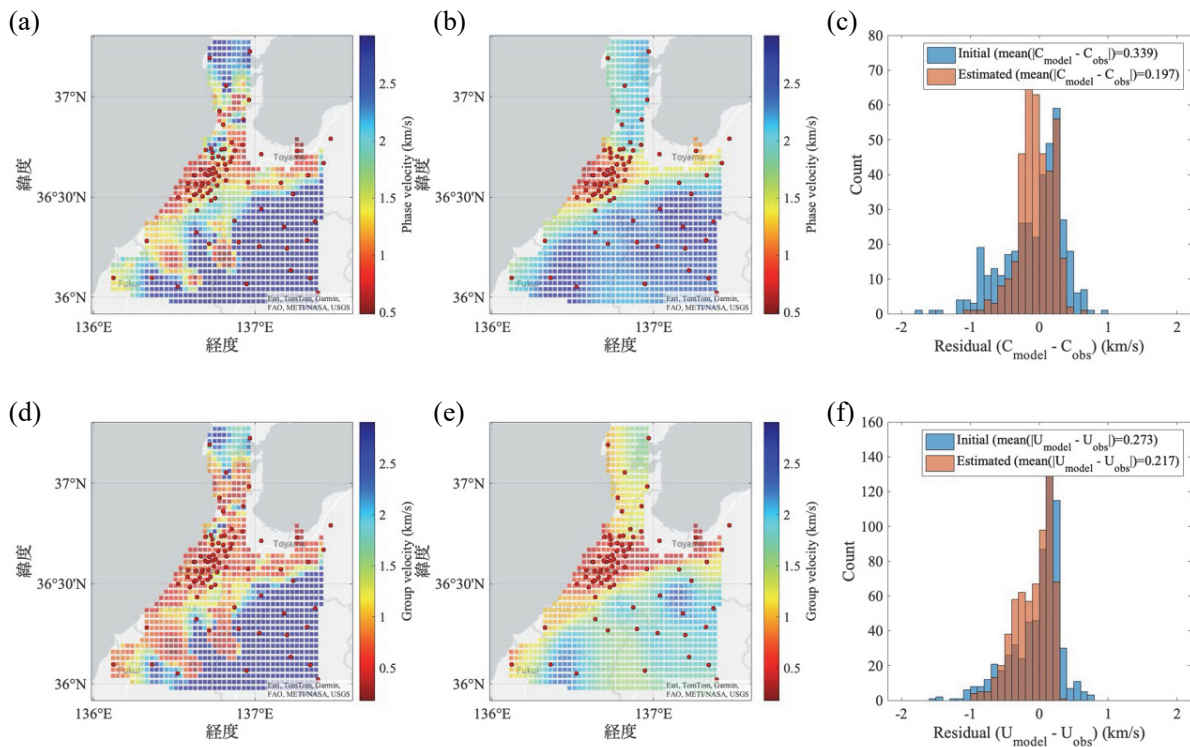


図 63 0.6 Hz におけるモデルと観測値の比較。各パネルの説明は図 59 参照。

### 3) 断層形状と応力場に基づく断層のすべりやすさ・活動様式（すべり方向）解析

森本・富樫断層断層帯およびその周辺の活断層群に対して、すべりやすさとそのすべり方向を評価した。令和5年度は既往の断層形状と広域応力場を入力とし、断層のすべりやすさとして slip tendency（以下、ST）（Morris et al., 1996）を計算した。既往の断層形状データとして、産業技術総合研究所が公開する「活断層データベース」から、森本・富樫断層帯を含む周辺地域の活断層群の走向・傾斜を利用した（図64）。また、広域応力場として Uchide et al. (2022)による、当該地域の発震機構解から応力逆解法により求められた応力情報（主応力軸の角度と応力比）を利用した（図65）。計算されたSTの値は全体的に0.5を超える高いST値を示していることから、森本・富樫断層およびその周辺の活断層は、広域応力場に対して力学的にすべりやすい断層として活動していることがわかる（図66）。その中でも特に、森本・富樫断層および近傍の断層群（野寺活動セグメント、石動断層、法林寺活動セグメント）は非常に高いST値を示すことから、広域応力場によって駆動されやすい断層が活断層となっていることが明らかである。次に、地殻応力に対する断層の理論すべり方向を計算した。理論すべり方向は地殻応力の断層面に対する最大せん断応力方向として計算した。この結果、解析を行った地域の北部（北緯約36.4°以北）では逆断層運動、南部（北緯約36.4°以南）では左横ずれ運動が卓越することが明らかとなった（図66）。これらの運動方向はいずれも、「活断層データベース」にまとめられている各断層の運動センスと調和的であった。

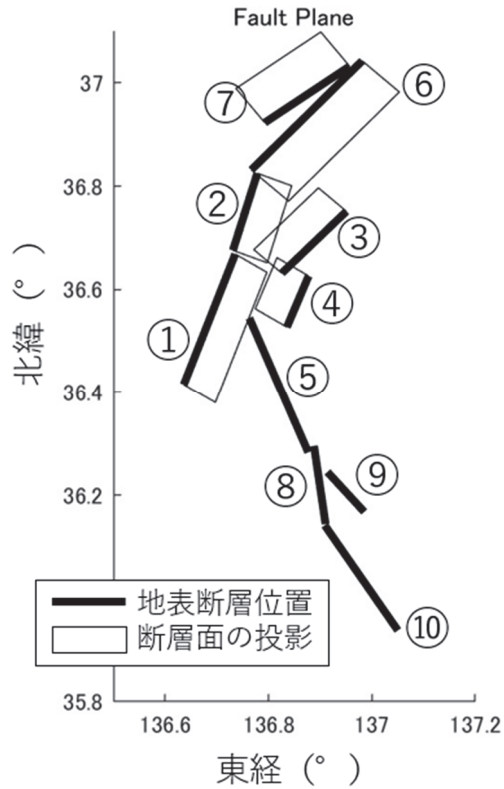


図 64 解析をおこなった森本・富樫断層および周辺の活断層の地表位置および断層面の投影図。断層の走向・傾斜および端点位置は産総研活断層データベースによる。断層面に付され番号に対応する断層・活動セグメント名：① 森本・富樫断層（金沢平野東縁起震断層）、② 野寺活動セグメント、③ 石動起震断層、④ 法林寺活動セグメント、⑤ 庄川起震断層、⑥ 石動山活動セグメント、⑦ 邑知瀧起震断層、⑧ 御母衣活動セグメント、⑨ 森茂活動セグメント、⑩ 三尾河活動セグメント

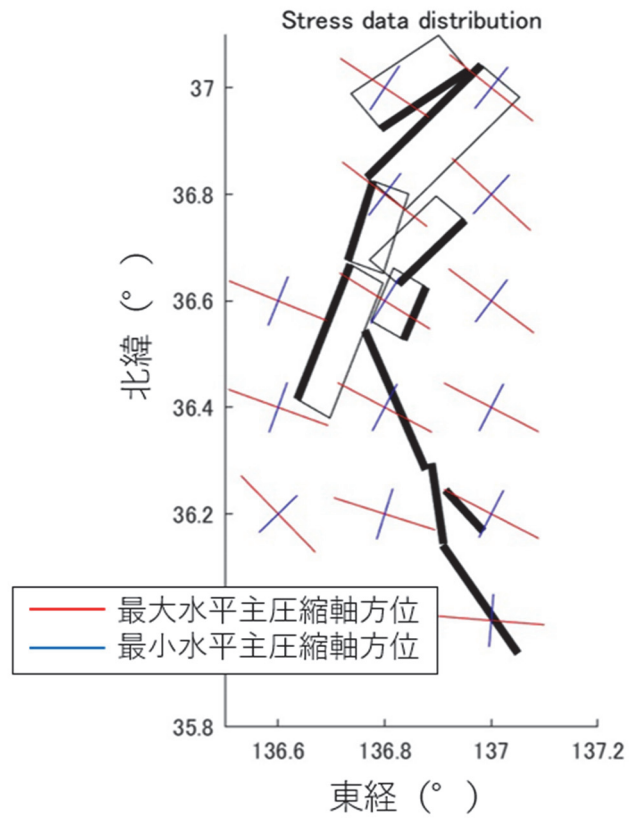


図 65 森本・富樫断層および周辺活断層を含む地域の地殻応力場。応力場の情報は Uchide et al. (2022)による。

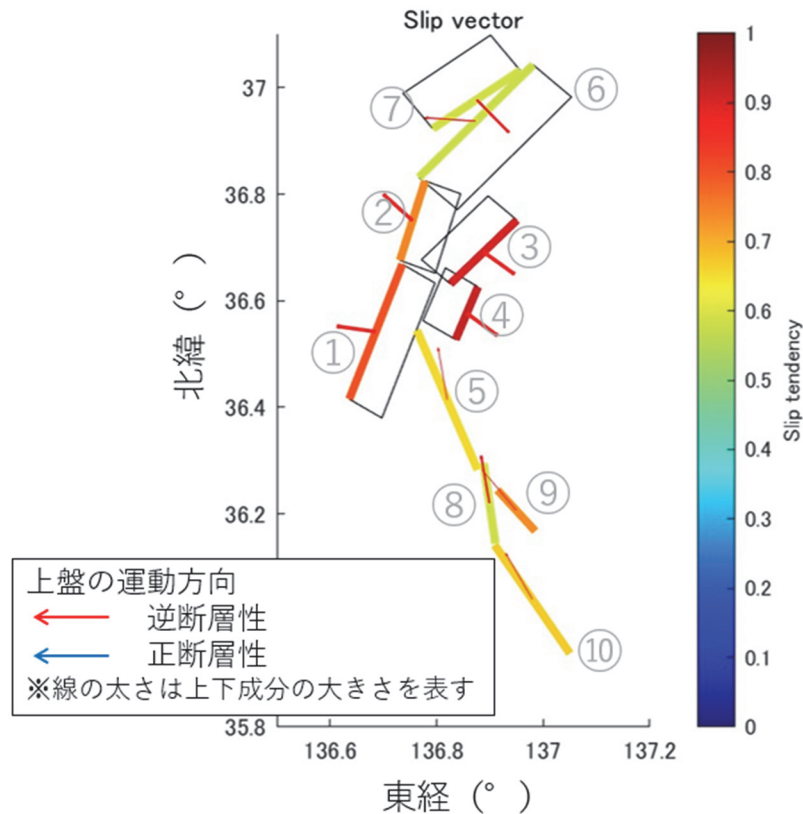


図 66 計算された断層のすべりやすさ (ST) および滑理論すべり方向。各断層の ST の値を地表断層線の色で示し、断層上盤の運動方向を矢印の向きで示す。ここでは、ST は断層面に作用するせん断応力 ( $\tau_s$ ) の最大値で規格化され ( $0 \leq ST \leq 1$ )、値が大きいほど力学的にすべりやすいことを意味する。矢印の色で逆断層性の運動 (赤)、正断層性の運動 (青) を示す。ただし、今回解析した断層群は全て逆断層性の運動を示した。地表断層線と上盤運動方向 (矢印) の向きにより、横ずれ成分の大きさを読み取る。断層面に付され番号に対応する断層・活動セグメント名は図 64 に同じ。

令和 6 年度はサブテーマ 1 により推定された森本・富樫断層帯の断層モデルと、本サブテーマにより推定された森本・富樫断層帯周辺の応力場を入力とし、断層のすべりやすさとして ST とすべり方向 (rake) を計算した。断層モデルとして、森本断層、富樫断層、それらを合わせて一つの断層面とする一枚断層モデルの 3 ケースについて計算を行った (表 10)。応力場として、最適な解として得られた応力 (ベストフィット応力) を用いた (図 67)。計算された ST の値はいずれの断層モデルも 0.7 程度の ST の値を示すことから、森本・富樫断層は検討した 3 つのモデルいずれも周辺の応力場に対して力学的にすべりやすい断層として活動していることがわかる (表 11 ; 図 68)。

次に、地殻応力に対する断層の理論すべり方向を計算した。理論すべり方向は地殻応力の断層面に対する最大せん断応力方向として計算した (表 11 ; 図 68)。いずれも逆断層成分が卓越し、森本断層はほぼ純粋な逆断層、富樫断層・一枚断層モデルはわずかに左横ずれ成分を含む結果となった。以上のことから、森本・富樫断層帯は、地殻応力に対して力学

的にすべりやすい断層が活動しており、また、その運動センスもほぼ純粋な逆断層であることが確認できた。さらに、地震のメカニズム解から推定される応力場には不確実性が伴う。入力する応力が異なるとすべりやすさ (ST) もすべり方向も変化する。そこで、推定誤差に基づいてサンプリングした 10000 パターンの応力 (図 67) に対して ST 値とすべり方向を計算し、その取り得る範囲を確認した (表 12 ; 図 69 ; 図 70)。すべりやすさは 3 つの断層モデルいずれも、概ね 0.65 を中央値とし、0.54 から 0.74 の範囲が主な結果となった。すべり方向は 3 つの断層モデルで多少異なるものの、概ね純粋な逆断層からやや左横ずれ成分を持つ方向を中央値とし、多くは左横ずれ成分を持つ逆断層運動から、わずかに右横ずれ成分を持つ逆断層運動の範囲でのすべり方向を示す。

表 10 断層モデルごとの断層面の姿勢 (走向・傾斜)

	走向 (°) ※ <sup>1</sup>	傾斜 (°) ※ <sup>2</sup>
森本断層	28	50
富樫断層	22	50
1 枚断層モデル	26	50

※ 1 走向は北から時計回りに表現。

※ 2 傾斜は走向に向かって右手に水平からの角度で表現。

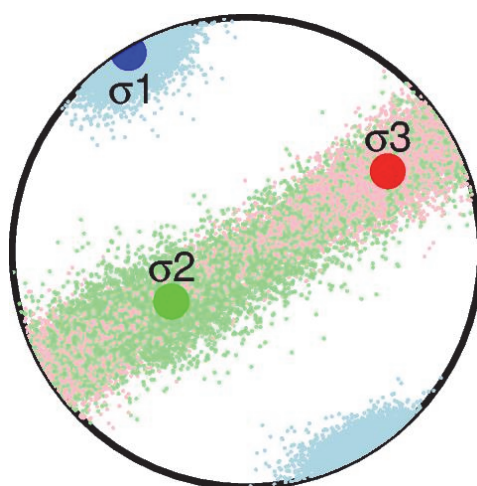


図 67 森本・富樫断層を含む地域の地殻応力場。最大圧縮主応力軸 ( $\sigma_1$ ) を青、中間圧縮主応力軸 ( $\sigma_2$ ) を緑、最小圧縮主応力軸 ( $\sigma_3$ ) を赤で表す。色が濃く大きいマーカーは最適な主応力軸の向きを表す。色が薄く小さいマーカーは推定誤差に基づいてサンプリングした 10000 パターンの主応力軸の向きを表す。

表 11 断層モデルごとの最適応力に対するすべりやすさ (ST 値) およびすべり方向。

最適応力に対する ST 値 最適応力に対するすべり方向 (°) ※1

森本断層	0.70	90.14
富樫断層	0.70	80.55
1 枚断層モデル	0.70	86.94

※1 すべり方向は水平から上向き反時計回りに表現。

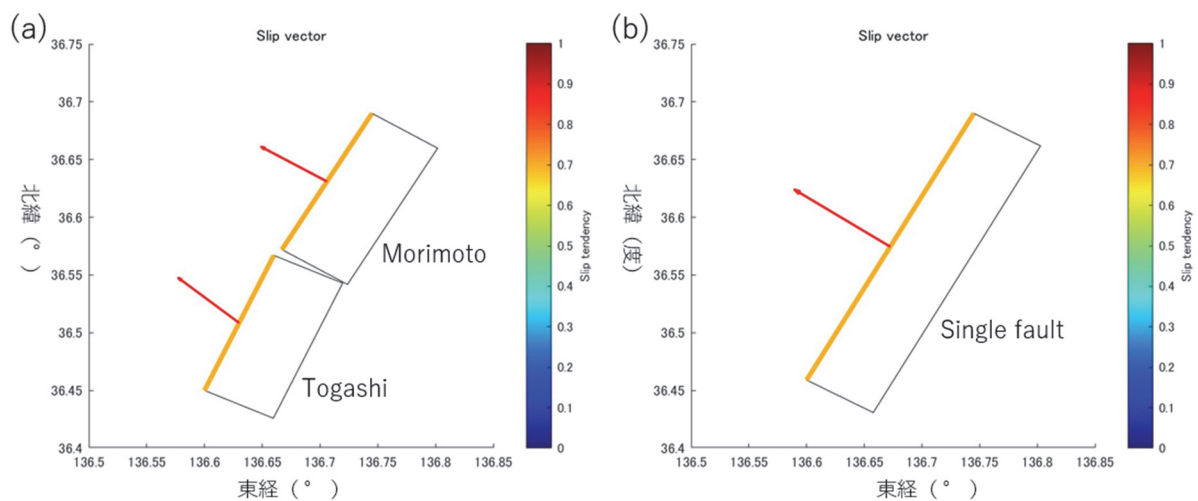


図 68 計算された断層の滑理論すべり方向。断層上盤の運動方向を矢印の向きで示す。各断層の ST の値を地表断層線の色で示す。矢印の色で逆断層性の運動 (赤)、正断層性の運動 (青) を示す。ただし、今回解析した断層群は全て逆断層性の運動を示した。地表断層線と上盤運動方向 (矢印) の向きにより、横ずれ成分の大きさを読み取る。(a) 森本断層 (Morimoto) および富樫断層 (Togashi)。(b) 1 枚断層モデル。

表 12 10000 パターンの応力に基づくすべりやすさ (ST 値) およびすべり方向。

	ST 値		すべり方向 <sup>※1</sup>	
	中央値	振れ幅 <sup>※2</sup>	中央値 (°)	振れ幅 (°) <sup>※2</sup>
森本断層	0.65	0.55-0.74	89.97	79.87-99.97
富樫断層	0.64	0.54-0.74	80.47	70.43-90.46
1 枚断層モデル	0.64	0.55-0.74	86.74	76.77-96.84

※1 すべり方向は水平から上向き反時計回りに表現

※2 振れ幅は下位 25%および上位 25%を除いた値の範囲とする。

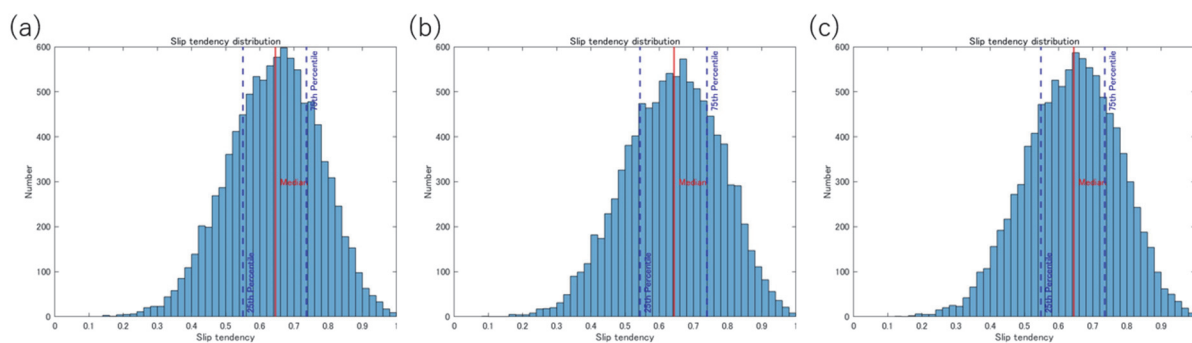


図 69 10000 パターンの応力に対して ST 値を計算した結果。赤実線は中央値を、青破線は下位 25%および上位 25%の分布を表す。(a) 森本断層、(b) 富樫断層、(c) 1 枚断層モデルの結果を表す。

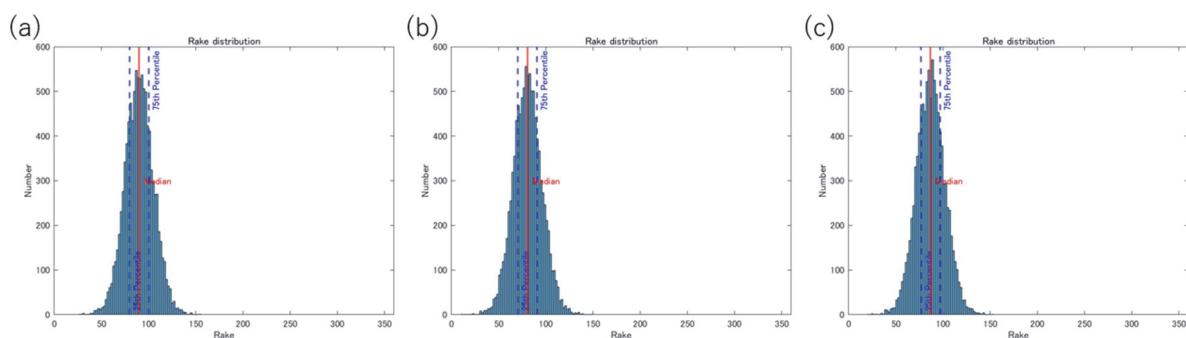


図 70 10000 パターンの応力に対してすべり方向(rake)を計算した結果。(a) 森本断層、(b) 富樫断層、(c) 1 枚断層モデルの結果を表す。0° および 360° は純粋な左横ずれ、90° は純粋な逆断層、180° は純粋な右横ずれ、270° は純粋な正断層運動を意味する。赤実線は中央値を、青破線は下位 25%および上位 25%の分布を表す。



(c) 結論ならびに今後の課題

森本・富樫断層帯周辺に 11 点の 3 成分地震計からなる臨時高感度地震観測網(MTKV-net)を 2022 年 9 月に構築し、さらに当断層帯の主に上盤に 25 点の 1 成分地震計からなる臨時稠密地震観測網(MTMT-net)を 2023 年 7 月に構築した。これら観測網で 2024 年 12 月まで観測し、MTKV-net では約 2 年 3 ヶ月間、MTMT-net では約 1 年 4 ヶ月間の連続地震観測データを取得した。

MTKV-net 観測データと周辺の定常観測点のデータを用い、深層学習モデル等を用いた自動処理により、地震を検出し震源を決定した。これにより森本・富樫断層帯周辺で、気象庁一元化震源の約 3 倍の地震を検出した。P 波初動特性を手動検出し、P 波と S 波の振幅比も用いて C ランク以上の品質を持つ 29 個の地震の震源メカニズムを決定した。断層のタイプは逆断層型と横ずれ断層型のいずれのものも見られた。さらに、応力テンソルインバージョンにより、応力場を推定したところ、森本・富樫断層帯の走向に直交する圧縮方位を持つ同断層帯を動かしやすい応力場が得られた。応力場推定に不可欠な震源メカニズムの決定には多点での地震データが必要であり、本事業の臨時地震観測は極めて有用であった。

本事業で構築された臨時地震観測網(MTKV-net、MTMT-net、サブテーマ 3 による臨時観測網)および既存の定常地震観測網の連続地震データを用いて表面波解析を実施した。地震波干渉法および SPAC 法を適用し、2 観測点間を伝播する表面波の群速度および位相速度を推定した。推定した 2 観測点間の位相速度分散曲線をもとに、周波数ごとの位相速度マップを推定した。位相速度マップをもとにインバージョン解析を行い、3 層構造としての森本・富樫断層帯周辺の広域 3 次元 S 波速度構造を推定した。その結果、金沢平野から砺波平野にかけては表層に 0.7 km/s 程度の低 S 波速度層が厚く分布し、2 層目では金沢平野周辺では 1.6 km/s 程度の層が約 1.5 km の厚さで分布する構造が得られた。最下層の 3 層目の S 波速度は、金沢平野および砺波平野を除く多くの範囲で地震基盤に相当する 3.0 km/s 以上の値が得られた。当該 3 次元 S 波速度構造の妥当性を検証するために、群速度と位相速度を指標として全国 1 次地下構造モデル(暫定版)と比較した。その結果、推定した広域 3 次元 S 波速度モデルは、全ての周波数帯において、群速度と位相速度の観測値をよく説明することが示された。

本事業で推定した応力場情報とサブテーマ 1 により推定された森本・富樫断層帯の断層形状を用いて、slip tendency (ST) および断層活動様式を推定した。応力場の最適解に対しては、森本・富樫断層帯は力学的にすべりやすい断層であり、その運動センスは逆断層が卓越することが確認できた。また、応力場の不確実性を考慮した際にも、この特性は概ね変わらないことが確認できた。

本サブテーマでは、森本・富樫断層帯周辺に構築した臨時地震観測網による連続地震データを使用し、本断層帯の地殻活動の現状把握を目的とした取り組みを実施した。近年発展が目覚ましい深層学習モデルを用いた地震検出による地震カタログの高度化、P 波と S 波振幅比も用いた震源メカニズムの決定、震源メカニズムからの応力場の推定を行い、当該断層帯の地殻活動に関する知見は増大した。しかし、本断層帯周辺の地震活動は 2024 年能登半島地震以降にやや増加したものの依然として低調であるゆえに、稠密な臨時地震観測をもってしても震源メカニズムを決定できた地震数は 29 にとどまり、応力場の空間分

布の推定にまでは至らなかった。地震活動の低調な活断層帯は日本中に数多く存在する。このような活断層帯に対する応力場推定には、本事業で実施したような2年間強程度の観測では足りず、より稠密な地震観測を長期間実施する必要がある。

一方、1年間以上にわたる臨時観測データと定常観測データを用いた表面波解析に基づき、断層帯を含む広域において地震基盤相当を含む3次元S波速度構造を推定することができた。使用した観測点の密度分布に偏りがあり、地震計特性（観測機材）も観測網によって異なるものであったが、適切な補正と解析により、広域の推定を可能としたものである。観測機材の異なる複数の臨時地震観測網データを統合できる意義は大きい。なお、得られた3次元S波速度構造は、あくまでも観測データから推定した位相速度と群速度を真として推定したものであるため、構造の検証にはボーリングデータや実体波の走時など他の情報を使用することが望ましい。こうした情報が広域に得られることは稀である。広域の速度構造の検証にも、まだ課題が残されている。

謝辞：気象庁一元化震源カタログを使用いたしました。走時解析と波形解析においては、防災科学技術研究所 Hi-net、気象庁、東京大学地震研究所、京都大学防災研究所の定常観測網のデータを利用しました。一部の図はGeneric Mapping Tools (Wessel and Smith, 1991) で作成しました。臨時稠密地震観測網 (MTMT-net) の構築に際しては、多くの寺院および神社 (石川県神社庁) および金沢市駒形町の方々にご協力いただきました。

#### (d) 引用文献

- Aki, K., Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, 415-456, 1957.
- Asano, K., T. Iwata, H. Sekiguchi, K. Somei, K. Miyakoshi, S. Aoi, and T. Kunugi, Surface wave group velocity in the Osaka sedimentary basin, Japan, estimated using ambient noise cross-correlation functions, *Earth Planets Space*, 69, 108, 2017. doi: 10.1186/s40623-017-0694-3
- Bensen, G. D., M. H. Ritzwoller, M. P. Barmin, A. L. Levshin, F. Lin, M. P. Moschetti, N. M. Shapiro, and Y. Yang, Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, *Geophys. J. Int.*, 169(3), 1239-1260, 2007.
- Ekström, G., Love and Rayleigh phase-velocity maps, 5-40s, of the western and central USA from USArray data. *Earth and Planetary Science Letters*, 402(C), 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.022>, 2014.
- Hansen, N., and A. Ostermeier, Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies. *Evol. Comput.* 9, 159-195, 2001.
- Hardebeck, J. L., and P. M. Shearer, A new method for determining first-motion focal mechanisms, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6), 2264-2276, 2002. doi: 10.1785/0120010200
- Herrmann, R. B., Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research, *Seismol. Res. Lett.*, 84(6), 1081-1088, 2013.

- Hirata, N., and M. Matsu'ura, Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet Inter.*, 47, 50-61, 1987. doi: 10.1016/0031-9201(87)90066-5
- 今西和俊・内出崇彦・松下レイケン, 臨時地震観測による山梨県北東部の微小地震の発震機構解と応力場, *活断層・古地震研究報告*, 16, 53-77, 2016.
- 地震調査研究推進本部, 全国1次地下構造モデル(暫定版), [https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic\\_hazard\\_map/lpshm/12\\_choshuki\\_dat/](https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/12_choshuki_dat/), 2012.
- Katsumata, K., M. Kosuga, H. Katao, T. Yamada, A. Kato, and the Research Group for the Joint Seismic Observations at the Nobi Area, Focal mechanisms and stress field in the Nobi fault area, central Japan, *Earth Planets and Space*, 67, 99, doi: 10.1186/s40623-015-0275-2, 2015.
- Koketsu, K., H. Miyake, H. Fujiwara, and T. Hashimoto, 2008, Progress towards a Japan integrated velocity structure model and long-period ground motion hazard map, *Proc. 14WCEE*, Paper No. S10-038.
- 国土交通省国土数値情報ダウンロードサイト, <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N02-2022.html>
- Lobkis, O. I. and R. L. Weaver, On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(6), 3011- 3017, 2001.
- 松本 聡・飯尾能久・酒井慎一・加藤愛太郎, 0.1 満点地震観測による, 地殻活動の可視化に向けて, *可視化情報*, Vol. 38, No. 149, 7-10, 2018.
- 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, [https://www.jishin.go.jp/database/project\\_report/nara\\_juten/nara\\_juten-r03/](https://www.jishin.go.jp/database/project_report/nara_juten/nara_juten-r03/), 2022.
- Morris, A., D. A. Ferril, D. B. Henderson, Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, 24, 275-278, 1996.
- Naoi, M., K. Tamaribuchi, K. Shimojo, S. Katoh, and S. Ohyanagi, Neural phase picker trained on the Japan meteorological agency unified earthquake catalog. *Earth, Planets and Space*, 76, 150, 2024. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02091-8>
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, NIED Hi-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019. doi: 10.17598/NIED.0003.
- 産業技術総合研究所, 地殻応力場データベース, <https://gbank.gsj.jp/crstress/usage.html>
- 産業技術総合研究所, 活断層データベース, <https://gbank.gsj.jp/activefault/database.html>
- 産総研地質調査総合センター, 20万分の1日本シームレス地質図V2, <https://gbank.gsj.jp/seamless/>

- Shapiro, N. M. and M. Campillo, Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L07614, 2004.
- Shapiro, N. M., M. Campillo, L. Stehly, and M. H. Ritzwoller, High-Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise, *Science*, 307(5715), 1615-1618, 2005.
- Skoumal, R. J., J. L. Hardebeck, and P. M. Shearer, SKHASH: A Python Package for Computing Earthquake Focal Mechanisms. *Seismological Research Letters*, 95(4), 2519-2526, 2024. <https://doi.org/10.1785/0220230329>
- Takagi, R. and K. Nishida, Multimode dispersion measurement of surface waves extracted by multicomponent ambient noise cross-correlation functions, *Geophys. J. Int.*, 231, 1196-1220, 2022.
- Uchide, T., T. Shiina, and K. Imanishi, Stress map of Japan: Detailed nationwide crustal stress field inferred from focal mechanism solutions of numerous microearthquakes, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, e2022JB024036, 2022. doi: 10.1029/2022JB024036
- 内出崇彦・椎名高裕・今西和俊, 日本全国内陸部の地殻内応力マップと微小地震の発震機構階のデジタルデータ, 地質調査総合センター研究資料集, no. 738, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2022.
- 上野寛・畠山信一・明田川保・舟崎淳・浜田信生, 気象庁の震源決定法の改善ー浅部速度構造と重み関数の改良ー, 検震時報, 65, 123-134, 2002.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, Free soft-ware helps map and display data, *EOS Trans.*, AGU, 72, 441, 1991.
- Zhu, W., and G. C. Beroza, PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method, *Geophysical Journal International*, 216(1), 2019. doi: 10.1093/gji/ggy423
- Zhu, W., I. W. McBrearty, S. M. Mousavi, W. L. Ellsworth, and G. C. Beroza, Earthquake Phase Association Using a Bayesian Gaussian Mixture Model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(5), 2022. e2021JB023249. <https://doi.org/10.1029/2021JB023249>