

### 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	副研究部門長	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	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・富樫断層帯周辺の応力場に関する既往研究情報を収集・整理した。そのうえで、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高感度臨時地震観測網（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。

2) 令和5年度：

高感度臨時地震観測網の維持・保守・データ回収を実施する。地震活動の状況に応じて高感度地震観測の追加を検討する。当該地震観測網データと既往地震観測網データを用いて震源メカニズムを決定する。雑微動解析等により、断層帯周辺の基盤速度構造を検討する。既往の深部断層形状と広域応力場を考慮した断層のすべりやすさ解析を試行する。

### 3) 令和6年度：

高感度臨時地震観測網の維持・保守・データ回収を実施し、年度内に観測網を撤収する。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する。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する。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滑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に提供する。

## (2) 令和4年度の成果

### (a) 業務の要約

森本・富樫断層帯周辺の応力場の既往研究情報を収集した。そのうえで、森本・富樫断層帯周辺に、11点の観測点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、積雪期対応、地震データの蓄積を行った。11月までに取得された約2ヶ月間のデータを用いて、深層学習を活用した地震検出の試行、および、雑微動解析による表面波の抽出試行を実施した。

### (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)の構築

森本・富樫断層帯など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。日本列島の応力場は、古くは活構造、地震の発震機構、原位置応力測定結果等を元に推定されてきた(松田・他, 1978; 塚原・小林, 1991)が、近年では発震機構データの充実をうけて応力場の情報が精緻化されてきた(例えば、Terakawa and Matsu'ura, 2010; Yukutake et al., 2015)。さらに、機械学習に基づく発震機構の大量解析により、日本列島のほぼ全領域の応力場が推定され(Uchide et al., 2022)、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; 中井, 2007; 内出・他, 2022)。こうした状況下ではあるが、地震活動が低調な場所については、応力場推定の元となるデータが少なく、依然として応力場の情報の信頼度は高いとは言えない。定常観測点に臨時地震観測点を追加して発震機構データを増やすことが重要である(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1に、MTKV-net観測点の諸元を表1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。

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，2020，2021，2022）。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）。なお、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。そこで、積雪に備え、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。

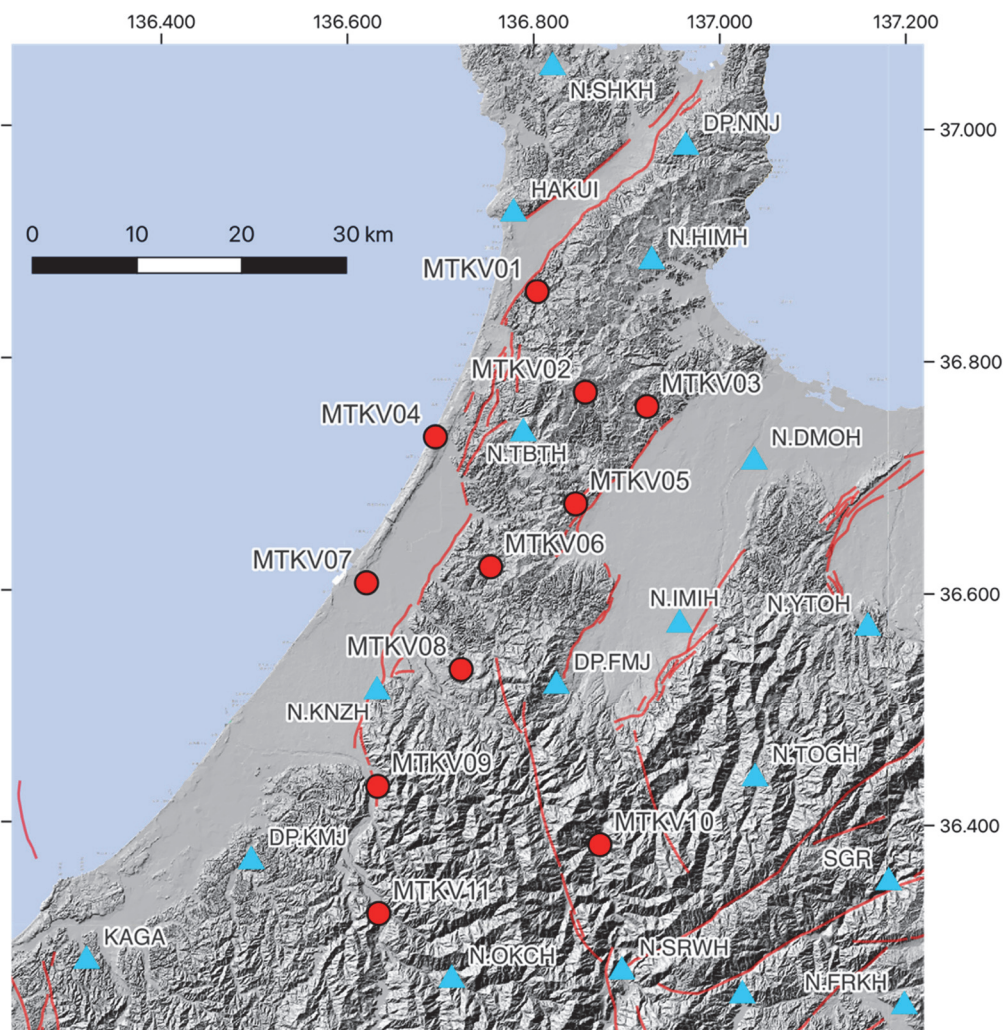


図1 本事業で構築した臨時高感度地震観測網（MTKV-net）の配置図。赤丸はMTKV-net観測点、水色三角は既往高感度地震観測点（Hi-net、気象庁、大学観測点）。基図は国土地理院の陰影起伏図、活断層線は産総研活断層DB（産業技術総合研究所）による。

観測点の作成方法は次の通りである（図2）。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。

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	備考
MTKV01	宝達志水町スポーツセンター	N36.86001	E136.80441	25	2022/09/14	豪雪、舗装
MTKV02	高岡市沢川（さわごう）集会所	N36.77334	E136.85677	332	2022/09/17	豪雪
MTKV03	高岡市埋蔵文化財センター	N36.76139	E136.92304	38	2022/09/14	
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)	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	舗装
MTKV06	金沢市旧朝日小学校	N36.62285	E136.75634	161	2022/09/13	豪雪
MTKV07	金沢市戸水公園	N36.60846	E136.62383	2	2022/09/15	
MTKV08	金沢市俵公民館	N36.53437	E136.72531	224	2022/09/15	豪雪
TMKV09	石川県林業試験場	N36.43352	E136.63927	146	2022/08/25	AC電源、コンクリート
MTKV10	南砺市上平グラウンド	N36.38232	E136.87323	334	2022/09/16	豪雪
MTKV11	白山市鳥越農村公園	N36.32289	E136.63890	256	2022/09/16	豪雪

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1）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3）。12月下旬に、ソーラーパネルも防護屋根で覆った。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。実際、12月15日まで積雪はほとんど無かった。2回目の作業時（12月26日および27日）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



図2 観測点設置の様子（MTKV04 移設前）。





図3 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4 積雪対策2回目の様子（MTKV11）。

施できた（図4）。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。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。次年度以降も積雪対策を引き続き実施する予定である。

ii) 臨時高感度地震観測網（MTKV-net）で得られた観測波形データ

臨時高感度地震観測網（MTKV-net）で得られた地震波形の例を図5～図7に示す。ここでは、以下の3つの地震を取り上げる。

- Event 1：2022年9月18日6時28分にMTKV-netが分布する地域の中央部で発生
- Event 2：2022年10月11日5時23分にMTKV-netが分布する地域の南部で発生
- Event 3：2022年11月20日3時56分にMTKV-netが分布する地域の北部で発生

いずれの地震についても、震源に近い観測点ではP波やS波が明瞭である。図5～図7では、地震波形は概ね北から南の順に並んでいるが、Event 1は図5の中段、Event 2は図6の下段、Event 3は図7の上段で、より明瞭な地震波形が観測されている。なお、MTKV04ではノイズが大きいが、表1に示す通り、2022年11月22日に移設およびセンサー交換して対処した。

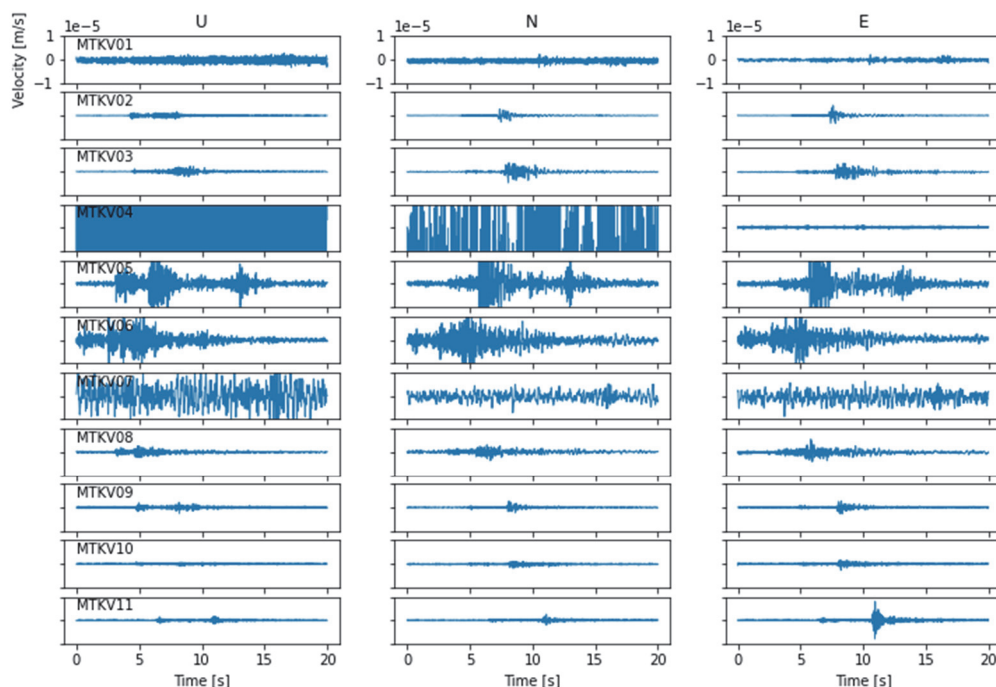


図5 MTKV-netで観測されたEvent 1（2022年9月18日6時28分発生）の地震波形データ。いずれも地動速度を記録したものである。

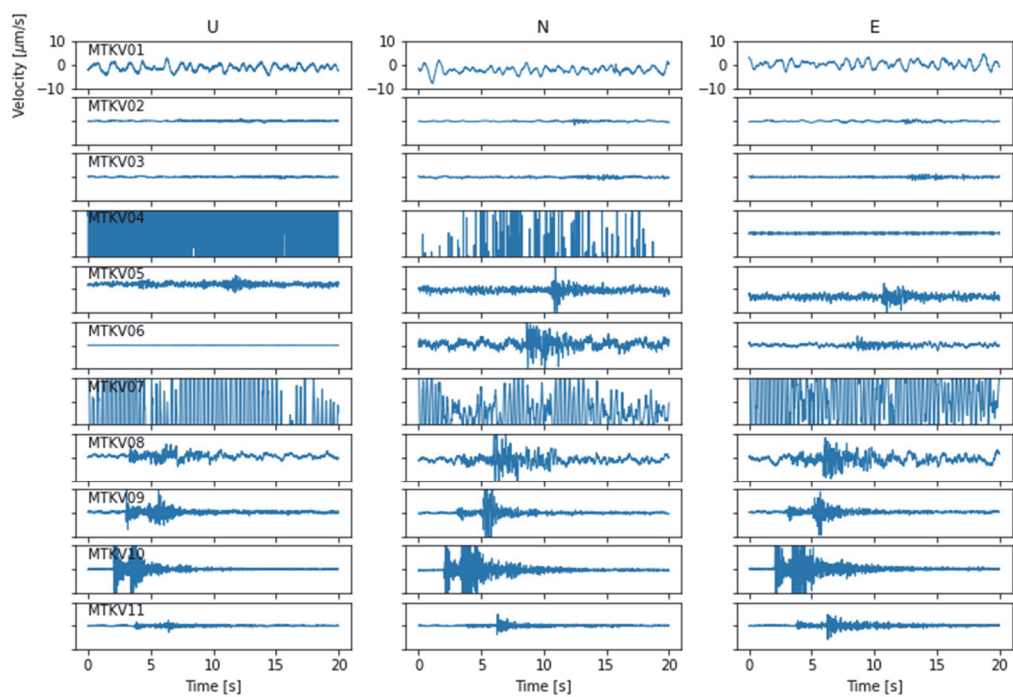


図6 MTKV-netで観測されたEvent 2 (2022年10月11日5時23分発生) の地震波形データ。

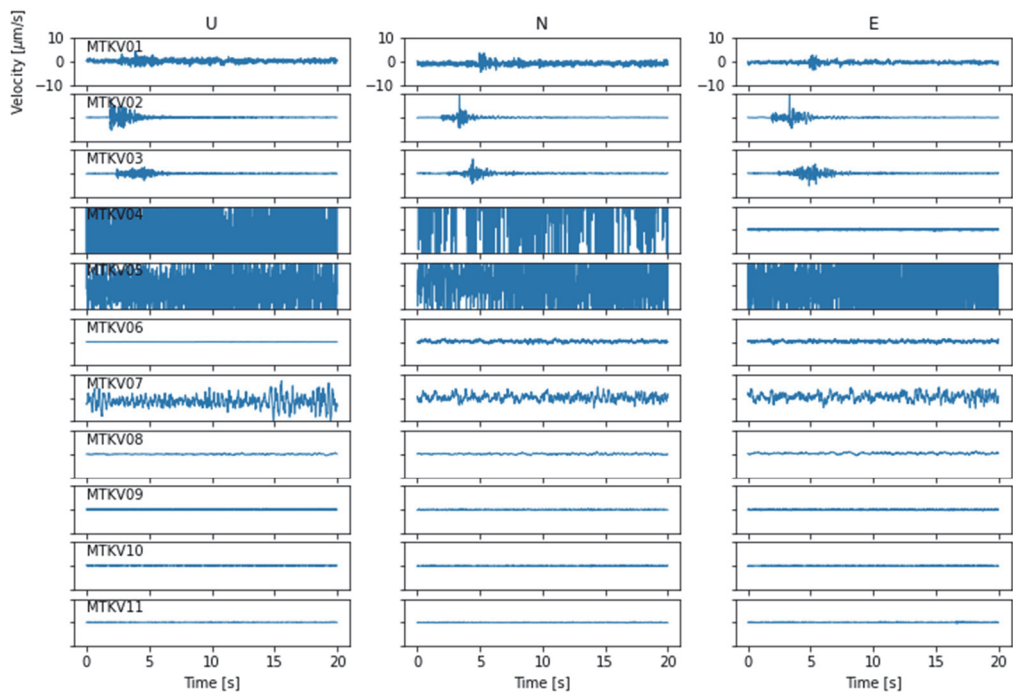


図7 MTKV-netで観測されたEvent 3 (2022年11月20日3時56分発生) の地震波形データ。

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、MTKV-netで得られたデータに加え、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データを使用した。使用した観測点の位置は図8に示す。

まず、EQTransformer (Mousavi et al., 2020) 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、REAL (Zhang et al., 2019) 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、hypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987) を使用して、震源位置を決定した。

図9に検出された地震の位置を赤色丸印で示す。比較するため、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17日から2022年11月20日までの期間に発生した地震を図示している。図中の黒枠の範囲にある地震は、本事業による検出結果でも気象庁カタログでも19個であった。多くの地震は共通しているが、一部の地震は本事業でのみ検出され、また他の一部の地震は気象庁カタログにのみ掲載されている。

図10～図12に、Event 1、Event 2、Event 3におけるP波・S波到達時刻の検出結果を示す。検出がなされた地震波形データについては、概ね良好な検出が行われているように見える。低周波数のノイズが支配的になっているようなデータでも、高周波数のシグナルを読み取っている様子が見られる (例えば、Event 2のN. HIMH観測点とMTKV02観測点 (図11))。

今後、地震検出と地震波検出の結果を精査し、日本のデータを使った深層学習モデルの追加的な学習 (転移学習など) によって地震検出・検出の精度が向上するかどうか検討する。また、検出された地震の分布や震源メカニズム解を調べる。



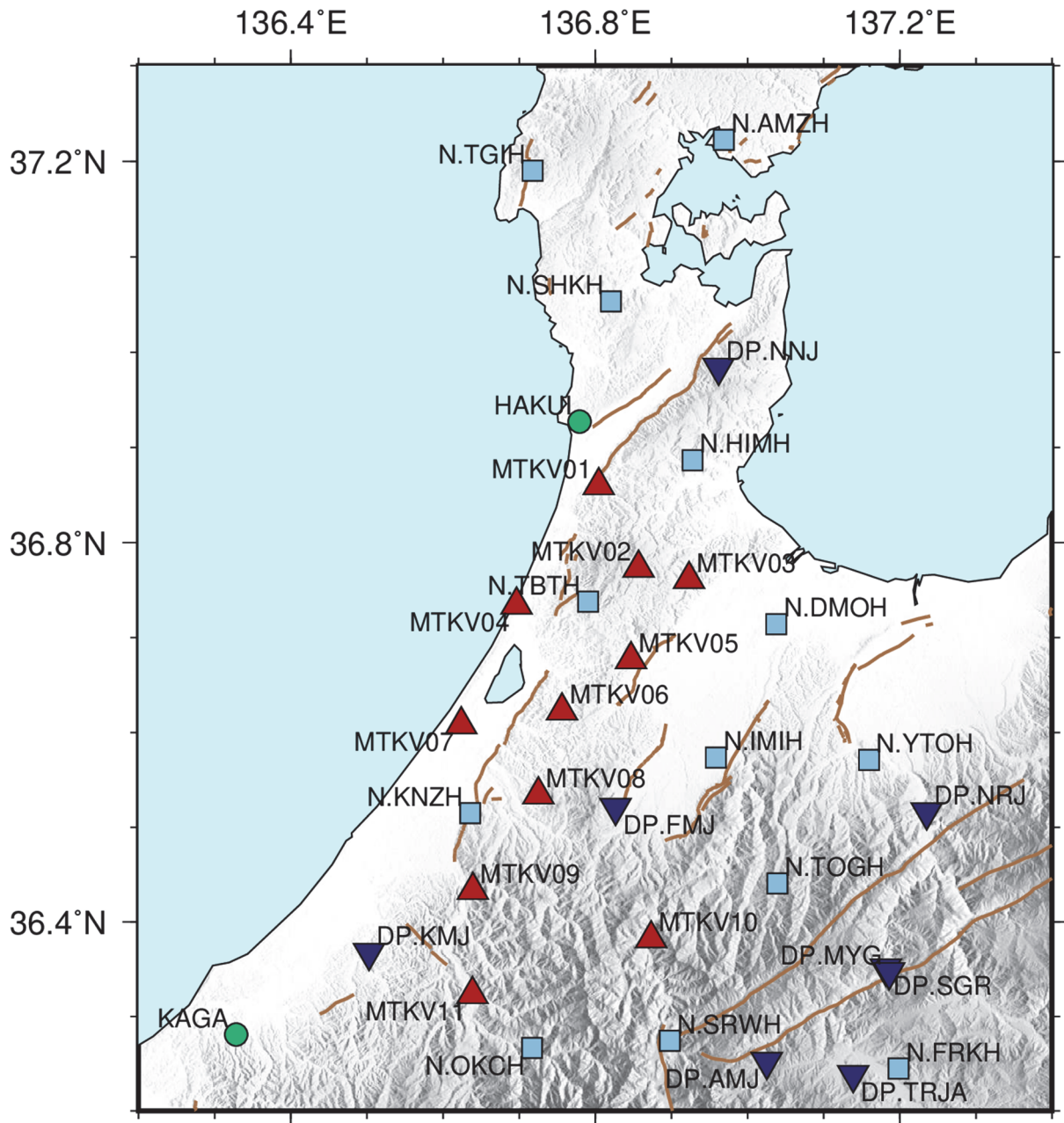


図8 深層学習を用いた地震検出・検出を行う際に使用した観測点の位置。赤色三角形が MTKV-net、水色四角形が国立研究開発法人 防災科学技術研究所の高感度地震観測網 (Hi-net)、緑色丸印が気象庁による地震観測網、青色下三角形が京都大学防災研究所による地震観測網の観測点の位置をそれぞれ示す。



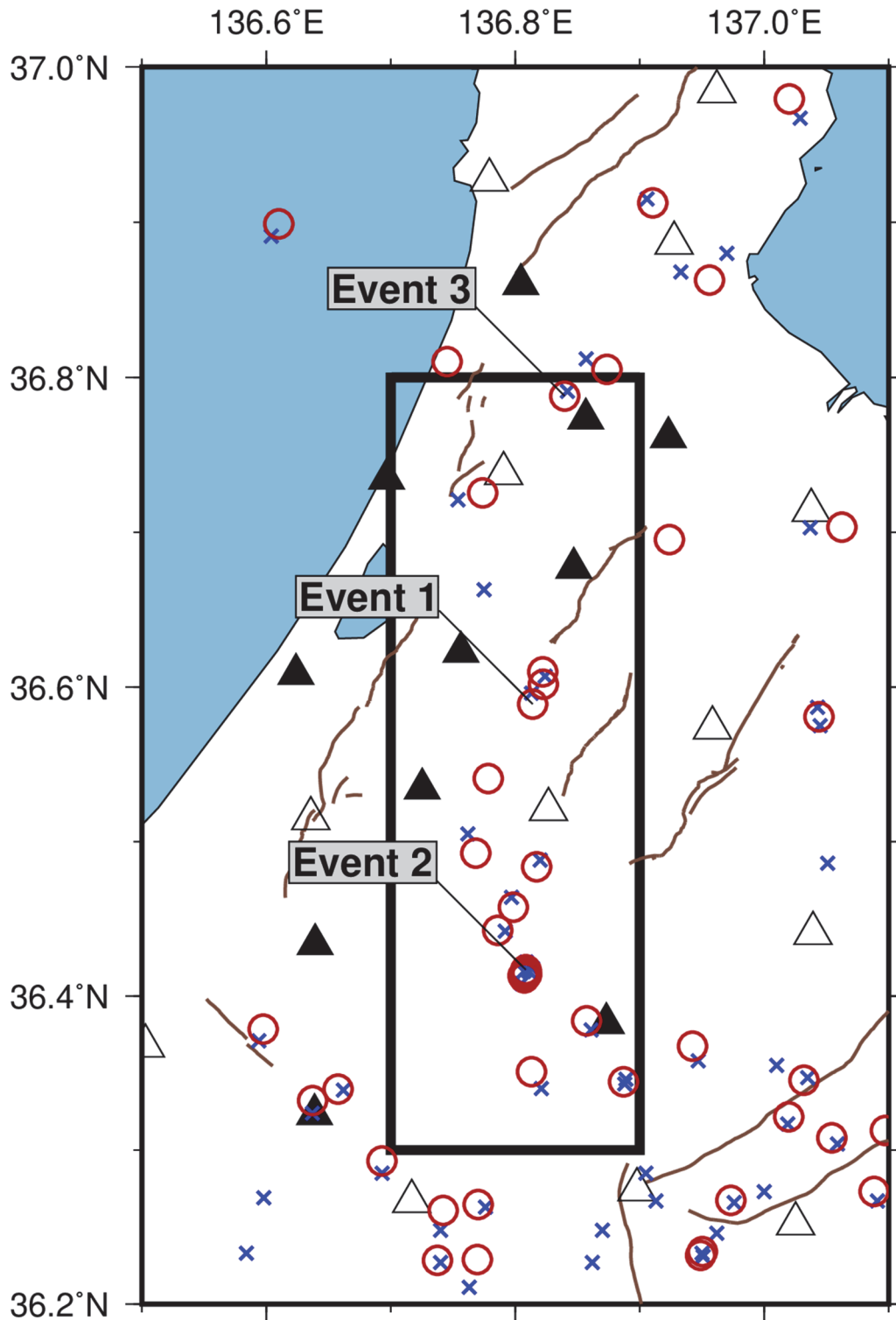


図9 深層学習を用いて検出・検測された地震（赤色丸印）と気象庁一元化処理震源カタログに掲載されている地震（青色×印）。いずれも、2022年9月17日から2022年11月20日までの期間に発生した地震を図示している。黒色三角形はMTKV-netの観測点、白抜き三角形はHi-net、気象庁、京都大学防災研究所による定常地震観測点の位置をそれぞれ示す。

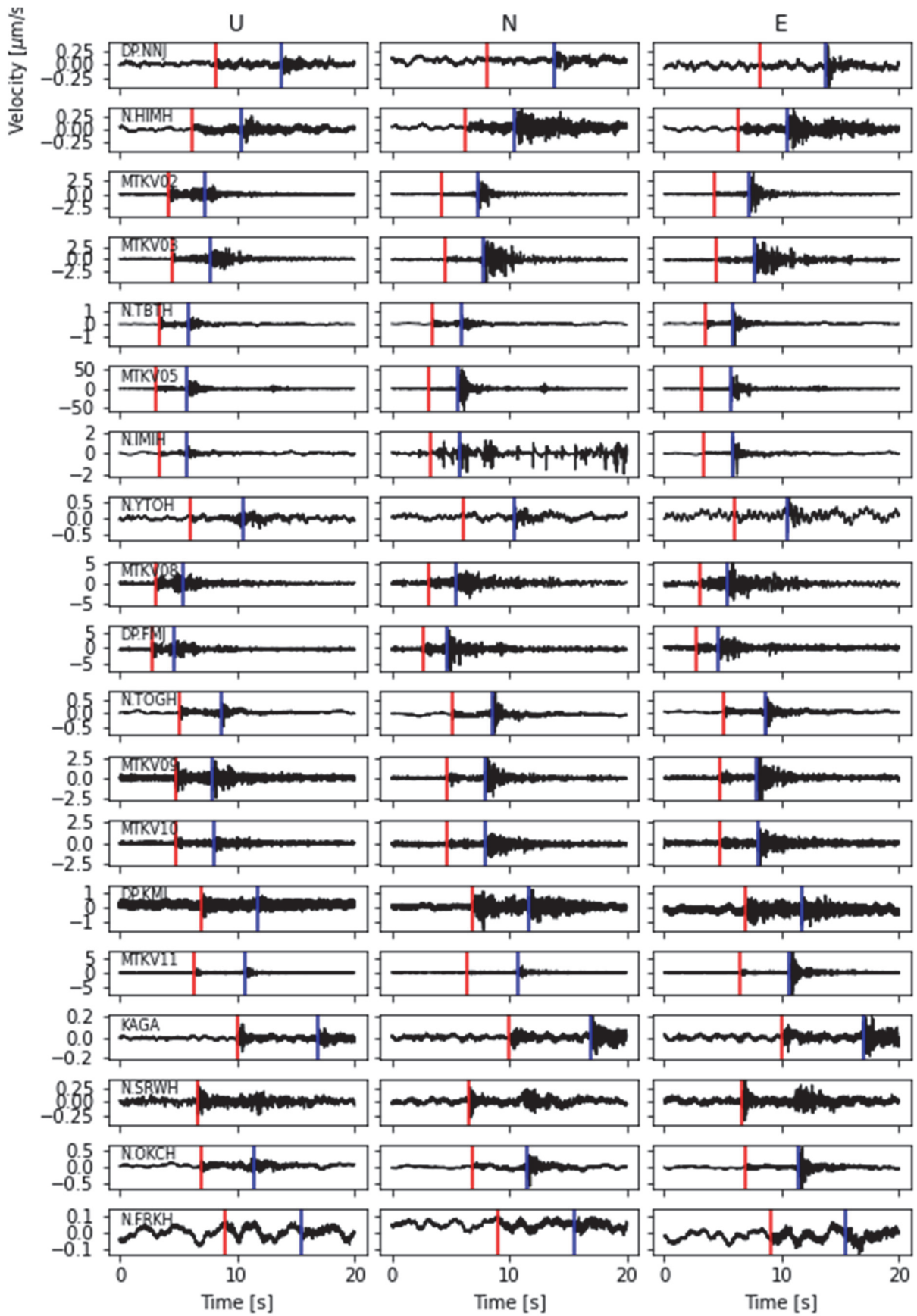


図10 Event 1 (2022年9月18日6時28分発生) の地震波形データ (左から順に、上下動、東西動、南北動) と検測結果。赤色と青色の縦線がそれぞれP波とS波の検測結果を示す。

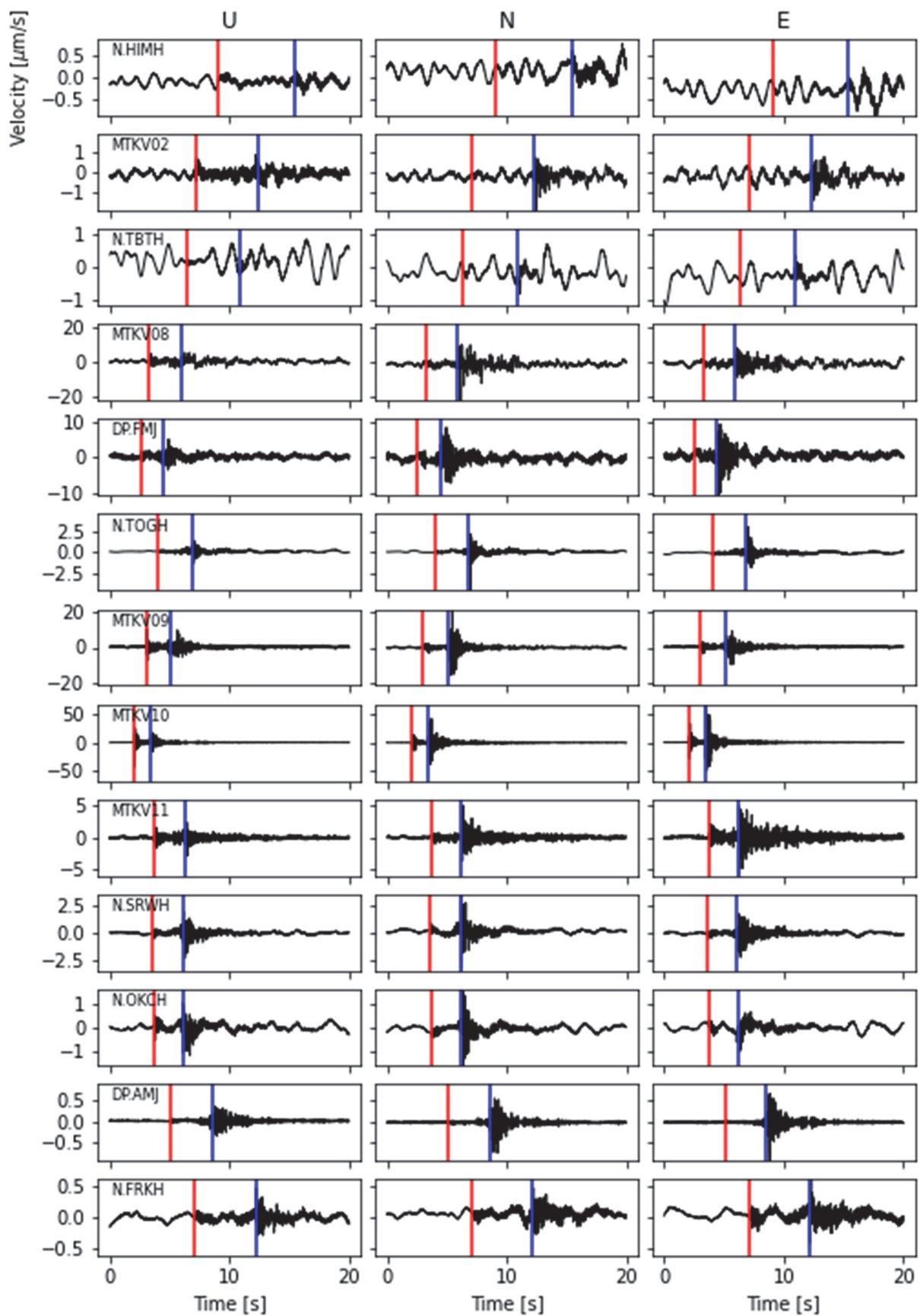


図11 Event 2 (2022年10月11日5時23分発生) の地震波形データ (左から順に、上下動、東西動、南北動) と検測結果。赤色と青色の縦線がそれぞれP波とS波の検測結果を示す。

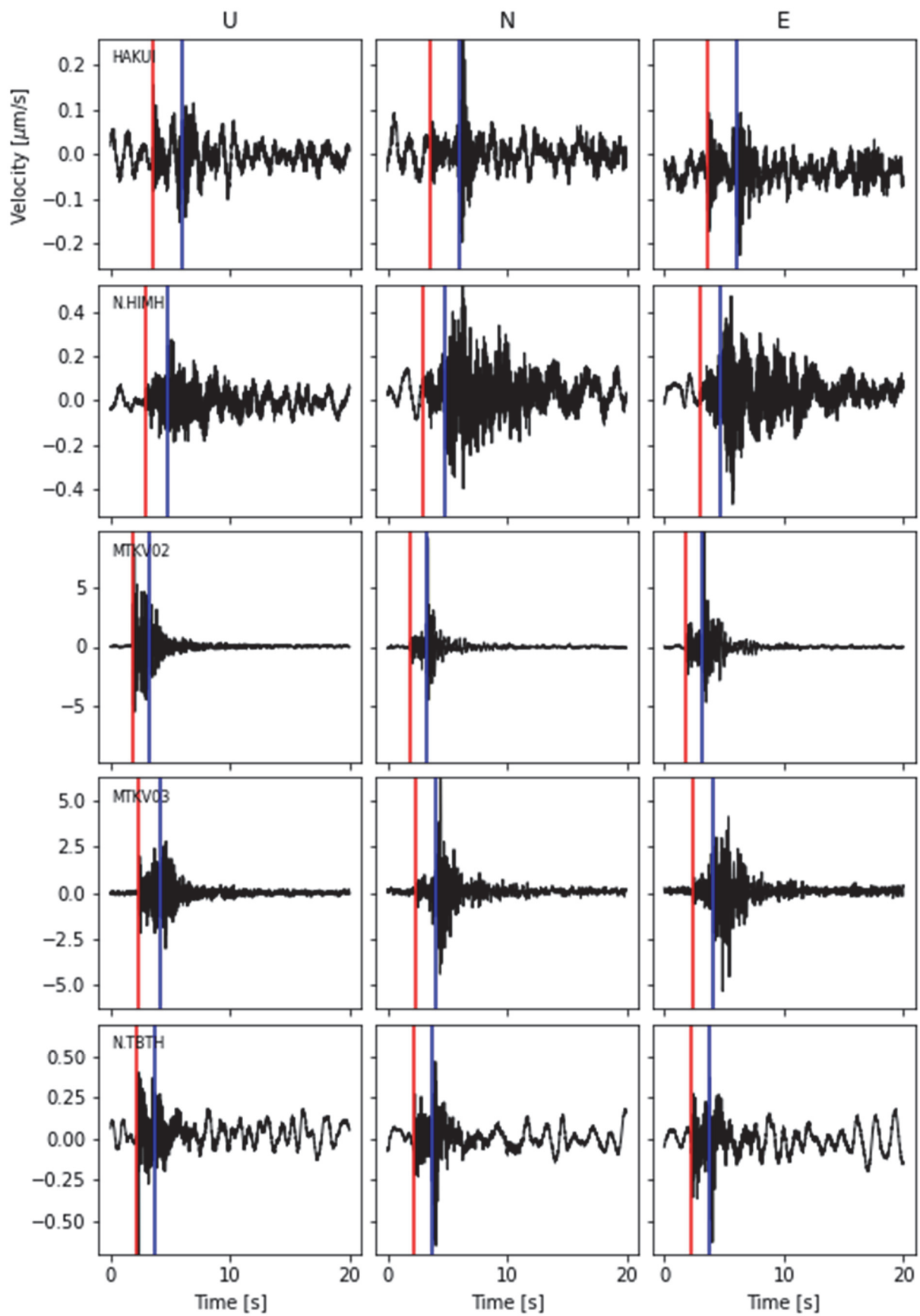


図12 Event 3 (2022年11月20日3時56分発生) の地震波形データ (左から順に、上下動、東西動、南北動) と検測結果。赤色と青色の縦線がそれぞれP波とS波の検測結果を示す。

c) 雑微動を用いた表面波解析

本事業で設置した臨時高感度地震観測網（MTKV-net）とサブ3. 2による臨時地震（強震）観測（MTSV と MTSM）及び周辺の定常地震観測点（京都大学、防災科研 Hi-net、防災科研 F-net）で得られた観測記録のうち、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。図 13 に各観測点の配置を示す。

本解析では、鉛直 1 成分と水平 2 成分の計 3 成分を使用した。観測点ごとに使用したデータの期間は表 2 の通りである。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。

表 2 観測点ごとの使用したデータの期間

観測点	使用したデータの期間
MTKV-net	2022 年 9 月 20 日～2022 年 11 月 20 日
MTSV・MTSM（サブ 3-2 で構築）	2022 年 10 月 1 日～2023 年 1 月 31 日
京都大学	2022 年 9 月 20 日～2023 年 1 月 31 日
Hi-net	2022 年 9 月 20 日～2023 年 1 月 31 日
F-net	2022 年 9 月 20 日～2023 年 1 月 31 日

加速度計と速度計が混在しているため、速度計のデータは中央差分によって加速度に変換した。1 日分のデータごとに地震計のレスポンス補正を施し、50%ずつオーバーラップさせながら 10 分間のセグメントに分割した。セグメントごとに平均値とトレンドを除去してから、両端に 10%のテーパーをかけた。自然地震を取り除くため、各セグメントの二乗平均振幅が 1 日の二乗平均振幅の 1.5 倍以上となるセグメントを除外した。残ったセグメントデータに地震波干渉法を適用して観測点ペア間を伝播する表面波を抽出した。

地震波干渉法は、異なる 2 地点の地震計が無数の震源で囲まれている場合、観測されたデータの相互相関関数を計算することで、一方を仮想的な震源、他方を受振器として観測された疑似的な地震動データを合成する方法である。地震波干渉法は、単純な波動場を仮定しているが（例えば、Lobkis and Weaver, 2001）、様々な現実の地震動への適用事例により（例えば、Shapiro and Campillo, 2004）、相互相関関数から観測点間のグリーン関数が抽出可能であることが示されている。地震観測網や地震計アレイで観測されたデータを利用し、表面波の群速度や位相速度を抽出する研究が盛んであり、これらの情報を用いて地下の S 波速度構造が推定されている（例えば、Shapiro et al., 2005）。

本解析においては観測記録を周波数領域に変換した上で、振幅成分で正規化したコヒーレンシーをとることで相互相関関数を計算した。さらに、得られた相互相関関数にバンドパスフィルターを適用して、再度時間領域に変換することで観測点間を伝播する表面波を抽出した。図 14 に結果を示す。縦軸は観測点間距離、横軸は時間である。



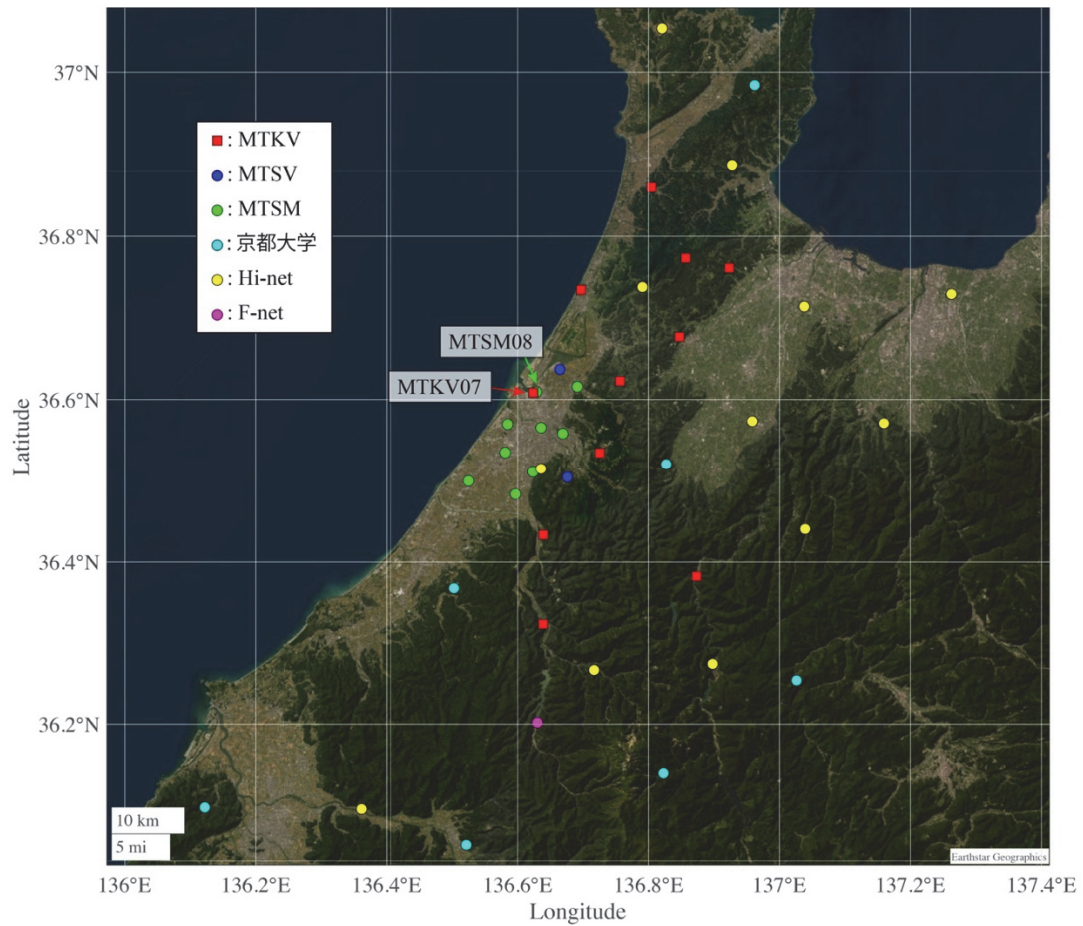


図13 本解析で使用した観測点分布。観測網ごとに異なる色でプロットしている。

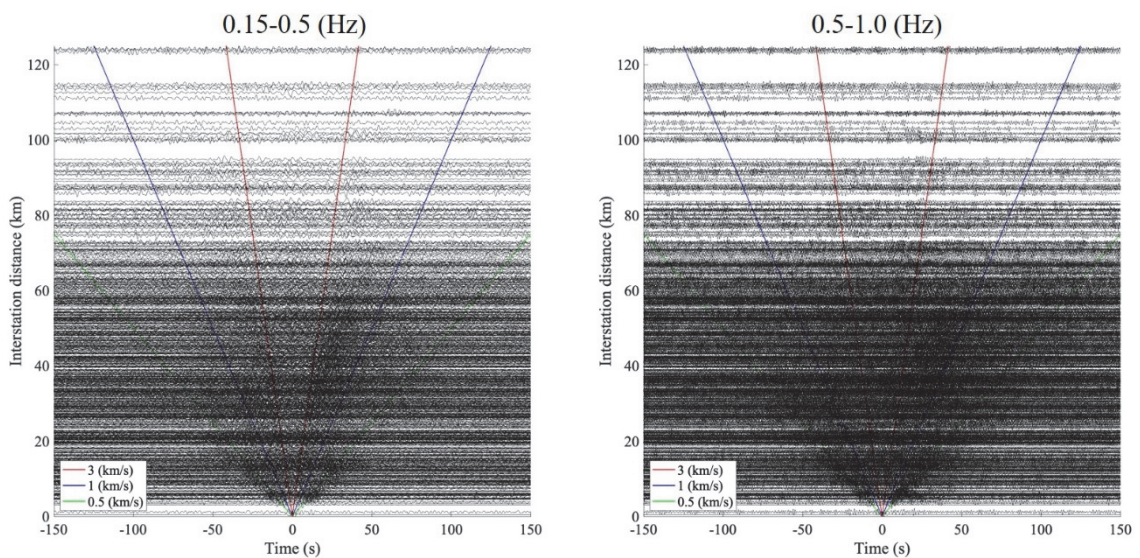


図14 地震波干渉法によって得られたZZ成分の相互相関関数。左は0.15~0.5 Hz、右は0.5~1.0 Hzのバンドパスフィルターを適用した結果を表す。縦軸は観測点間距離、横軸は時間を表す。赤、青、緑の実線はそれぞれ3.0, 1.0, 0.5 km/sの伝播速度を示す。



観測点ペアが多いため、図 14 では波の伝播が見えにくい。そこで 3 km ごとにビンニングスタックを行った。ビンニングスタックは観測点間距離が近い相互相関関数を足し合わせることである。ビンニングスタックした相互相関関数を図 15 に示す。0.15~0.5 Hz において 3 km/s 程度の明瞭な波の伝播が確認できる。0.5~1.0 Hz においては ZZ 成分で 2.5 km/s 程度の波の伝播が確認できる。

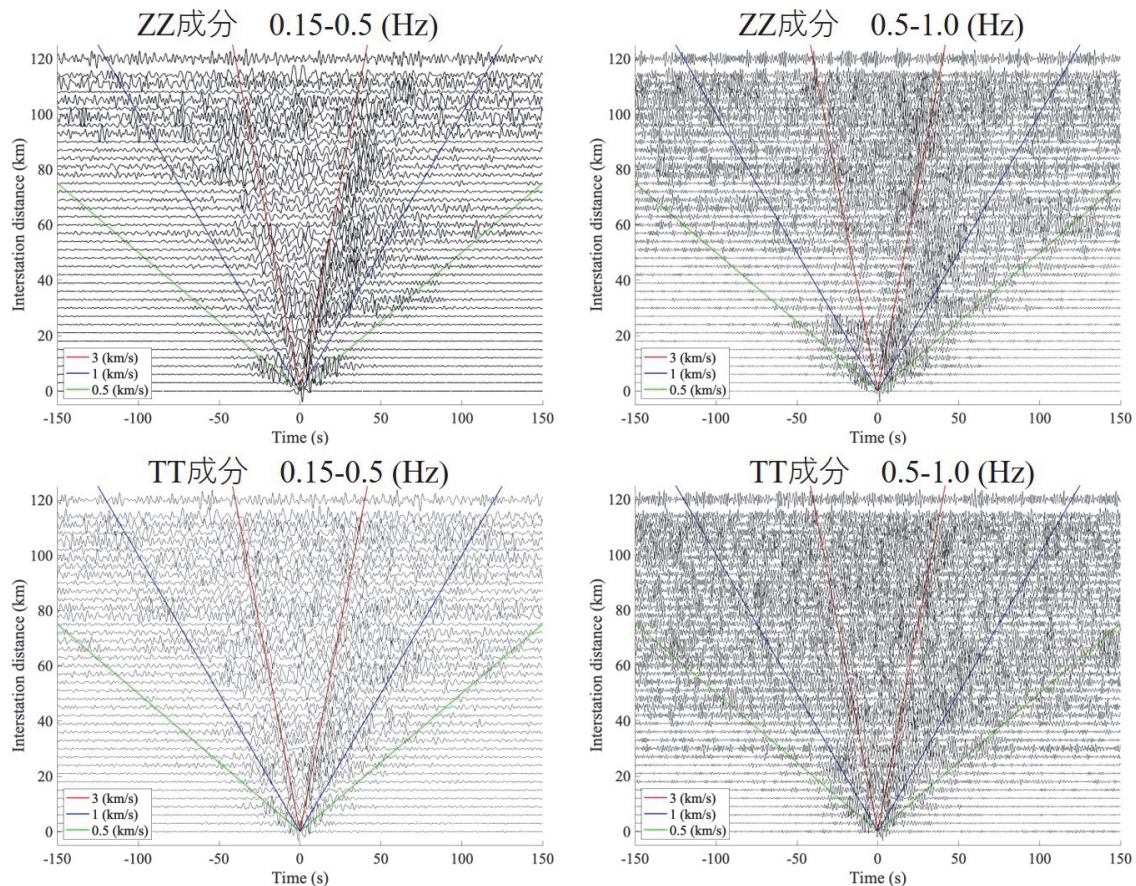


図 15 ビンニングスタックした相互相関関数。各パネルの上に相互相関関数の成分と周波数帯域を示している。縦軸は観測点間距離、横軸は時間を表す。赤、青、緑の実線はそれぞれ 3.0, 1.0, 0.5 km/s の伝播速度を示す。

最後に、今回設置した MTKV-net とサブ 3. 2 による臨時地震観測が同様に雑微動を計測できているか確認するために、隣接している観測点 (MTKV07 と MTSM08) を起点とした相互相関関数の比較を行った (図 16)。ZZ 成分と TT 成分ともほぼ同じ波形が得られており、今回設置した MTKV-net とサブ 3. 2 による臨時地震観測が同程度の水準で雑微動を計測できていると考えられる。また、観測点間距離が 20 km 以下では 0.5 km/s 程度の伝播速度であることがわかる。これは堆積層の伝播速度を反映していると考えられる。観測点間距離が大きくなるとシグナルが不明瞭になることがわかる。これは観測点間距離が長いと表面波が減衰するため、短い期間では十分なシグナルを抽出できないからだと考えられる。今後観測データが増えることで長距離のペアにおいても表面波を抽出することが期待される。

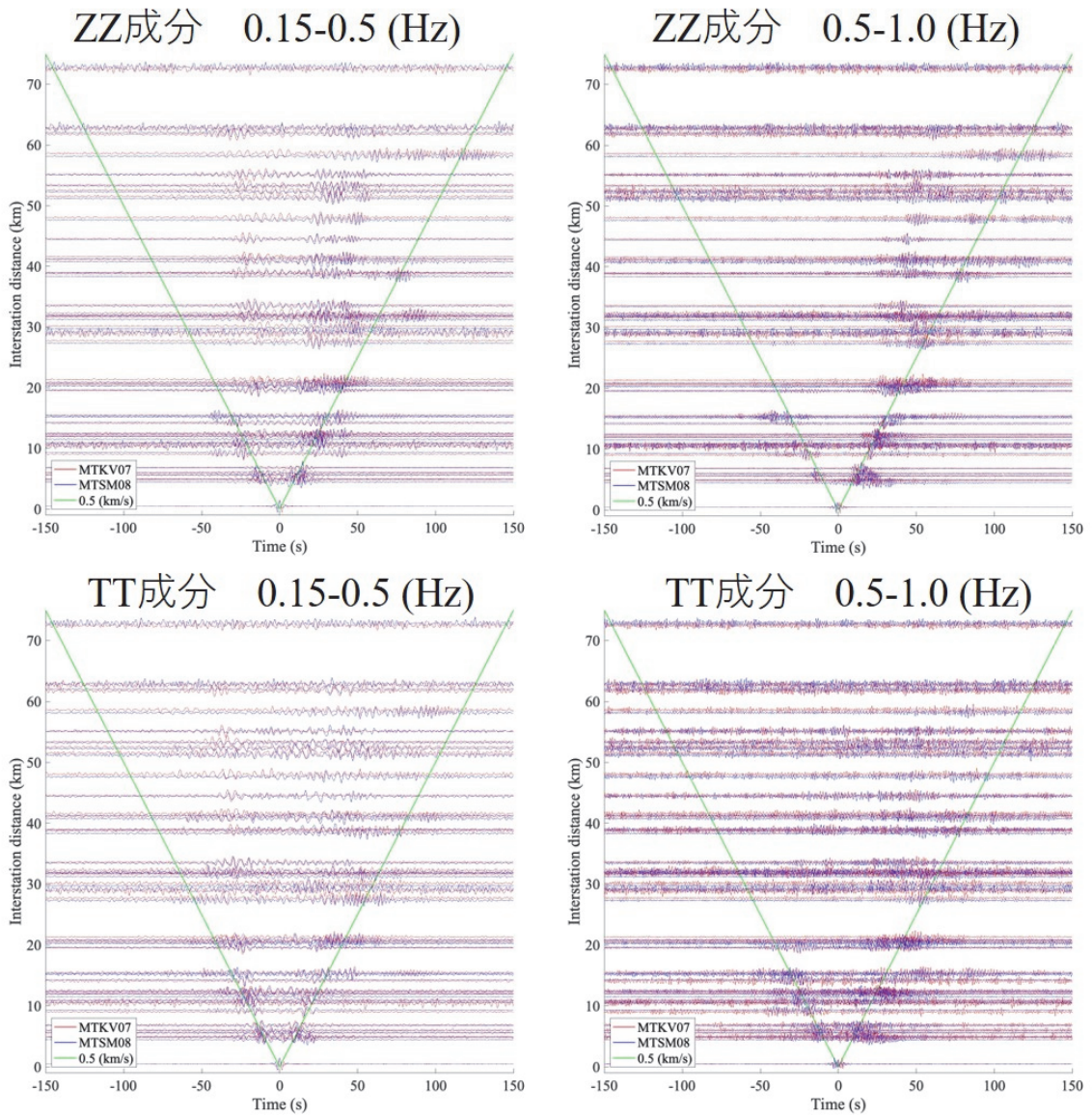


図 16 MTKV07 と MTSM08 を起点とした相互相関関数の比較。赤と青の実線はそれぞれ MTKV07 と MTSM08 を起点とした相互相関関数を示す。各パネルの上に相互相関関数の成分と周波数帯域を示している。縦軸は観測点間距離、横軸は時間を表す。緑の実線は 0.5 km/s の伝播速度を示す。



2) 森本・富樫断層帯周辺における既往応力情報の収集・整理

a) 全国内陸部ストレスマップによる応力場の概観

全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022) から森本・富樫断層帯とその周辺の地域を抜き出して、応力場を概観した。図17に水平主圧縮軸の方位を示す。当該地域では、水平主圧縮軸は概ね南東-北西方向を向いており、森本・富樫断層帯の地表断層はそれにほぼ直交する方向を向いている。図18には、応力軸の方向をいわゆるビーチボール形式で描画したものを示す。当該地域の応力場は、逆断層を発生させやすいような場になっていることがわかる。

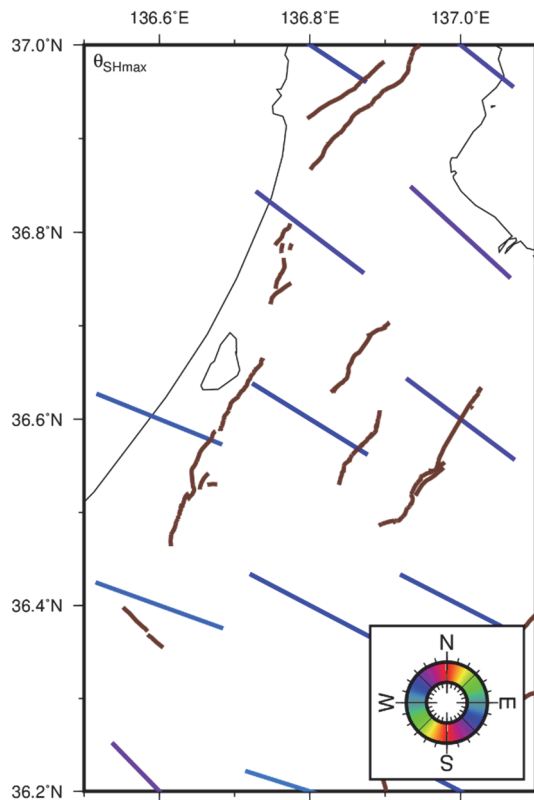


図17 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022) による水平主圧縮軸方位の分布。緯度、経度ともに0.2度ごとに応力軸方位が推定されている。棒の向きと色がいずれも水平主圧縮軸方位を示している。茶色線は中田・今泉 (2002) による地表活断層の位置を示す。

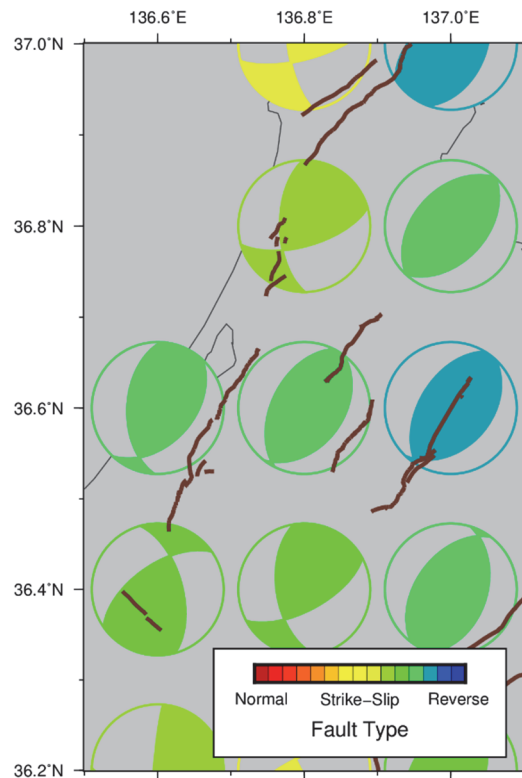


図18 全国内陸部ストレスマップ (Uchide et al., 2022) による応力軸の方向をいわゆるビーチボール形式で示した。色は断層タイプ (Shearer et al., 2006) に応じてつけた。茶色線は中田・今泉 (2002) による地表活断層の位置を示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

森本・富樫断層帯周辺に、既往高感度地震観測網を補完するよう、11点の観測点からなる臨時高感度地震観測網 (MTKV-net) を2022年9月に構築した。積雪期対応、連続地震観測データの蓄積を行った。これにより、これまで約20 km 間隔であった観測点密度が約10 km 程度に高まった。ただし、観測網の構築範囲が広い (南北約50 km、東西約20 km) ため、森本・富樫断層帯周辺で発生する微小地震の明瞭な波形が記録されるのは、MTKV-netのうち数カ所にとどまることがある。地震活動が低調な当該地域においては、微小地震の発震機構の信頼性向上が重要であり、観測点密度をさらに高めることが課題とも言える。

2022年11月までの約2ヶ月間のMTKV-netデータおよび同期間の既往地震観測網の連続地震観測データを用いて、深層学習を活用した地震検出を試行した。使用した学習モデルは海外の地震データから構築されたものであるが、森本・富樫断層帯周辺において気象庁カタログと同数の地震を検知できた。今後は、観測データの蓄積に応じて地震検出と地震波検出を引き続き実施するとともに、結果の精査、ならびに日本のデータを使った転移学習などによる地震検出・検出の精度向上の検討が課題である。

森本・富樫断層帯周辺の連続観測データ (MTKV-net、サブ3-2の加賀平野内連続観測データ、および既往地震観測網データ) を用いて、当地域における雑微動解析による表面波の抽出試行を実施した。その結果、地震基盤に対応すると考えられる伝播速度3 km/s 程度

の波群の伝播、加賀平野内の堆積層に対応すると考えられる伝播速度 0.5 km/s 程度の波群の伝播を確認することができた。今後はより長期間のデータを用いた解析および速度構造の推定が課題である。

森本・富樫断層帯周辺の応力場の既往情報として、全国内陸部ストレスマップの情報を収集した。当該地域では水平圧縮軸は概ね南東―北西方向であり、森本・富樫断層帯に逆断層運動を発生させやすい場であることが確認された。今後は、発震機構解の蓄積による地殻応力場の精緻化、ならびに、深部断層形状と組み合わせた断層すべり方向解析が課題である。

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。雑微動解析においては、防災科学技術研究所のHi-netおよびF-net、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。

#### (d) 引用文献

Hirata, N., & Matsu'ura, M., 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.

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.

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.

松田時彦・中村一明・杉村 新, 第3章 活断層とネオテクトニクス-地殻変動の累積-, 笠原慶一・杉村 新編, 岩波講座 地球科学 10 変動する地球 I -現在および第四紀-, 岩波書店, 東京, 89-157, 1978.

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 令和元年度成果報告書, [https://www.jishin.go.jp/database/project\\_report/nara\\_juten/nara\\_juten-r01/](https://www.jishin.go.jp/database/project_report/nara_juten/nara_juten-r01/), 2020.

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2年度成果報告書, [https://www.jishin.go.jp/database/project\\_report/nara\\_juten/nara\\_juten-r02/](https://www.jishin.go.jp/database/project_report/nara_juten/nara_juten-r02/), 2021.

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.

- Mousavi, S. M., Ellsworth, W. L., Zhu, W., Chuang, L. Y., & Beroza, G. C., Earthquake transformer - an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking, *Nature Comm.*, 11, 3952, 2020. doi: 10.1038/s41467-020-17591-w
- 中井未里, 地殻応力場データベース 検索機能と地図描画機能を充実させたデータベース, 産総研TODAY, 82号, 2007.
- 中田 高・今泉俊文, 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 2002.
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, NIED F-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019. doi:10.17598/NIED.0005
- 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/databas e.html>
- 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., Campillo, M., Stehly, L. and M. H. Ritzwoller, High-Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise, *Science*, 307(5715), 1615-1618, 2005.
- Shearer, P. M., Prieto, G. A., & Hauksson, E., Comprehensive analysis of earthquake source spectra in southern California, *J. Geophys. Res.*, 111, B06303, 2006. doi: 10.1029/2005JB003979
- Terakawa, T. and M. Matsu'ura, The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events, *Tectonics*, 29, TC6008, doi:10.1029/2009TC002626, 1-14, 2010.
- 塚原弘昭・小林洋二, 中・西部日本の地殻応力, *地震 第2輯*, 第44巻, 221-231, 1991.
- Uchide, T., Shiina, T., & Imanishi, K., 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解のデジタルデータ, 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.
- Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J., & Wobbe, F., Generic Mapping Tools: Improved Version Released. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 94, 409-410, 2013. doi:10.1002/2013E0450001



- Yukutake, Y., T. Takeda, and A. Yoshida, The applicability of frictional reactivation theory to active faults in Japan based on slip tendency analysis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 411, 188-198, 2015.
- Zhang, M., Ellsworth, W. L., & Beroza, G. C., Rapid Earthquake Association and Location, *Seismol. Res. Lett.*, 90, 2276-2284, 2019. doi: 10.1785/0220190052

