

3. 2 断層帯の三次元的形状・断層帯周辺の地殻構造の解明のための調査観測

3. 2-1 断層帯の三次元的形状と地殻構造・物性の解明

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 断層帯の三次元的形状と地殻構造・物性の解明

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人九州大学	准教授	松本 聡
国立大学法人九州大学	教授	清水 洋
国立大学法人九州大学	准教授	松島 健

c) 業務の目的

人工地震探査データ、自然地震データ解析等によって得られる情報を総合的に解析し、警固断層の深さ 20km 程度までの深部断層形状を解明する。

d) 3 ヶ年の年次実施業務の要約

1) 平成 23 年度：

警固断層等を対象とした、各機関によって行われた地形・地質調査、地震探査結果を整理した。また、警固断層帯の近傍に機動的地震観測点を展開し、現在までの臨時観測を継続することで稠密地震観測を実施した。

2) 平成 24 年度：

警固断層帯の地震発生層（深さ 20 km 程度）までの断層形状と 3 次元不均質構造を明らかにするため、平成 23 年度におこなった、警固断層帯や 2005 年 3 月 20 日に発生した福岡県西方沖の地震などに関する既存の調査研究結果収集や警固断層帯およびその周辺域の地殻不均質構造と応力場の概要調査に基づき、警固断層帯の近傍に機動的地震観測点を展開し、稠密地震観測を実施した。これは同時に平成 25 年度実施予定の反射・散乱波解析に必要な自然地震データを得るための調査観測としても実施した。また、平成 25 年度の断層構造探査の事前調査を行って探査測線、仕様を検討した。

3) 平成 25 年度：

人工地震探査にて地震発生層までの構造把握を目標とした P 波反射法等地震探査を実施し、警固断層の詳細位置・形状を解明する。また、長測線人工地震探査記録を用いて、屈折波トモグラフィー解析を行い、断層周辺の地震波速度不均質構造を推定して、断層帯、震源断層との関係を考察する。

さらに、他のサブテーマで得られる情報をもとに、警固断層およびその周辺の浅部から地震発生層までの 3 次元構造を明らかにする。そのうえで、警固断層系のうち、すでに滑りを起こした北西部（福岡県西方沖地震断層、以下、地震断層と呼ぶ）から応力変化を受けた南東部の断層形状および周辺の構造解明と福岡県西方沖地震発生後に活動している警

固断層深部の地震活動の背景についての知見を得る。

(2) 平成 24 年度の成果

(a) 業務の要約

警固断層帯の地震発生層（深さ 20 km 程度）までの断層形状と 3 次元不均質構造を明らかにするため、平成 24 年度は、警固断層帯や 2005 年 3 月 20 日に発生した福岡県西方沖の地震などに関する既存の調査研究結果を収集した。一方、警固断層帯およびその周辺域の地震活動を調べ、福岡県西方沖地震発生以降の警固断層周辺では現在も微小地震が発生していることを確認した。また、平成 24 年度以降に実施する反射・散乱波解析に必要な自然地震データを得るため、警固断層帯の近傍に機動的地震観測点を展開し、現在までの臨時観測を継続することで稠密地震観測を実施した。

(b) 業務の実施方法

警固断層等を対象とした、各機関によって行われた地形・地質調査、地震探査結果など従来の研究成果を整理した。また、平成 25 年度以降に実施する反射・散乱波解析に必要な自然地震データを得るため、警固断層帯の近傍に機動的地震観測点を展開し、現在までの臨時観測を継続することで稠密地震観測を実施した。また、平成 25 年度実施予定の警固断層構造探査の事前調査を行った。

(c) 業務の成果

1) 従来の研究の整理

地形・地質調査に関しては他サブテーマによる報告に詳述されている。特にサブテーマ 2-3 における速度構造調査の結果、震源域の不均質構造が明らかになった。これらと現在蓄積中のデータ、23 年度にまとめられた従来の研究から得られる情報の総合的な比較検討を継続して行っている。

2) 機動的地震観測

福岡県西方沖地震発生後、セグメント境界における地震活動を詳細に調べることが、今後の警固断層における地震活動を考察する上で極めて重要であることから、博多湾内の能古島において機動的地震観測（地表）を 23 年度に開始したが、24 年度この地点を 50m 掘削し、ボアホール型地震計を設置した。また、博多湾周辺の臨時観測を継続することで湾を取り囲むように稠密地震観測網が完成した。図 1 に断層周辺の地震観測点分布を示す。

能古島観測点の設置により、品質の高い記録を得ることができた。これにより、地震断層と警固断層の間のセグメント境界で発生する地震の発震機構解がより高精度で求まった。この決定例について図 2 に示している。



図1 警固断層周辺の地震観測点分布。吹き出し中の数字はボーリング孔深度。

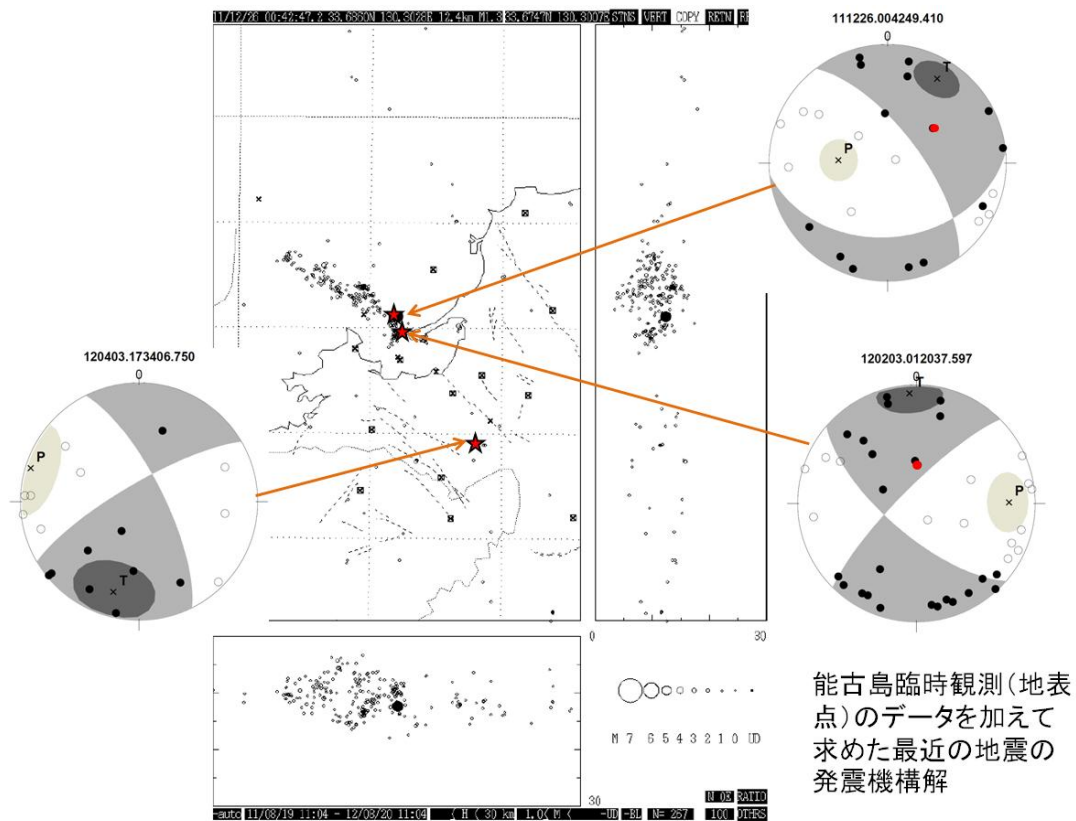


図2 能古島臨時地震観測点のデータを加え決定した、福岡県西方沖地震の余震および警固断層周辺の地震の発震機構解。震央位置をマップ上に★で示している。

3) 地殻不均質構造

警固断層周辺に展開されている地震観測点のデータから、2005年福岡県西方沖地震発生後の余震活動と警固断層周辺の地震記録に見られる波形の特徴を調査開始した。対象領域で観測された地震記録中にはいくつかの地殻内反射面による反射波が見出された。これにより、地震断層と警固断層の下部地殻にはいくつかの反射体が見られることが明らかになった。一つは地震発生層下部15-20kmであり、モホ面近傍からのものも見出された。この解析は自然地震を処理していることから、反射体はS波反射体である可能性が高い。図3には警固断層周辺で発生した自然地震の波形記録を示している。波形記録の得られた観測点位置は地図上に示している。図中、赤矢印で示した部分に反射波と思われる波相がみられることが分かる。さらに図4には図3で示した波形をNMO処理（時間軸を深さに変換する処理）した波形を示している。図中の矢印は図3で見られた反射波を示しており、この波相が深さ25km程度で反射されていると考えられることが分かる。そのほか15、20、30km付近にも反射波が見られることが明らかになった。

解析は現在も進行中であるが、25年度に実施する地殻構造探査では人工地震を用いるためP波に対する不均質構造をみることになる。自然地震によるS波、人工地震によるP波不均質構造を比較することによって、より実際に近い物性パラメータを推定できると期待できる。

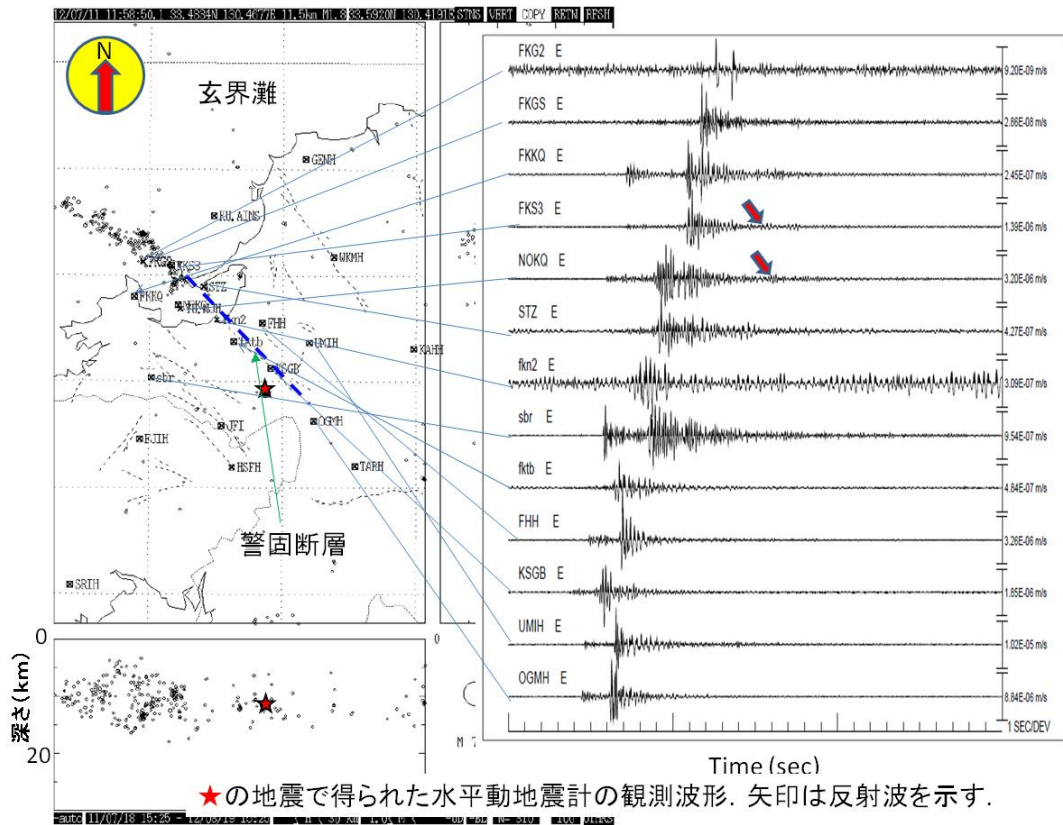


図3 警固断層周辺の地震活動と★で示された地震の観測波形例。

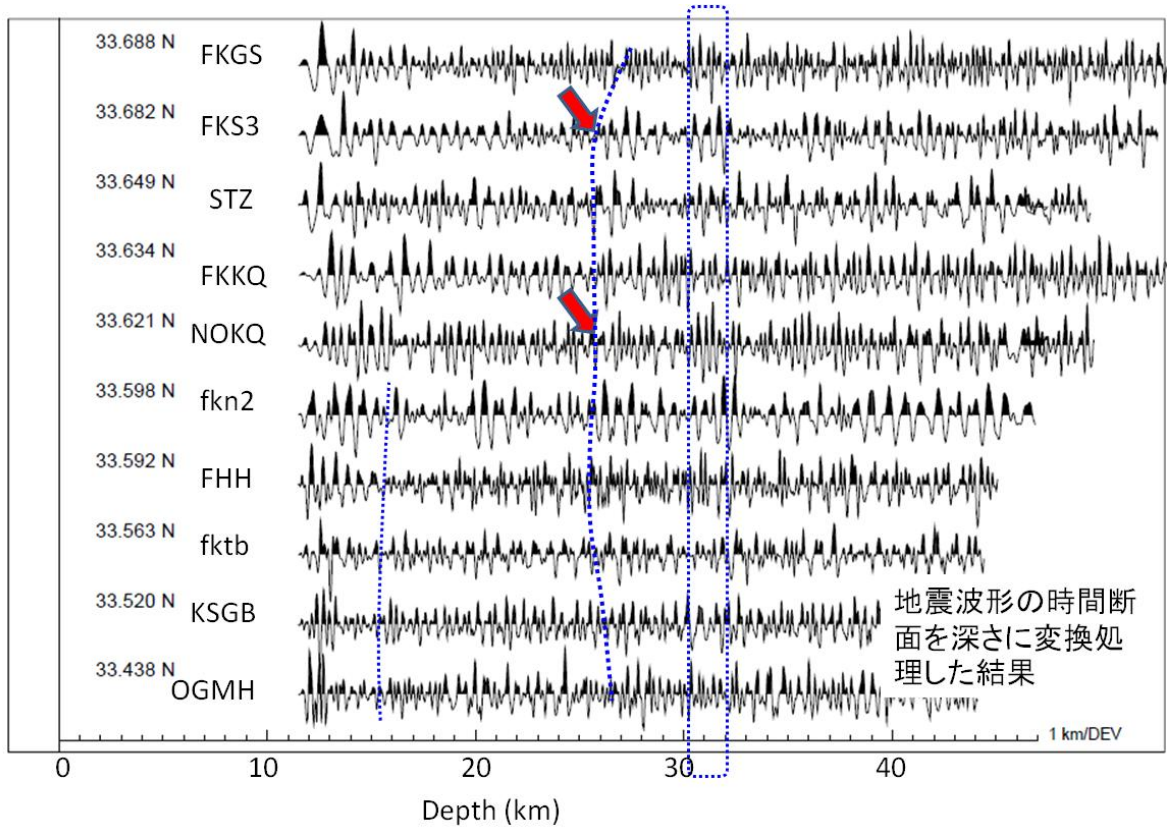


図4 図3で示した波形にNMO処理を施し、深さ軸に変換した記録。図中の矢印が反射波のうちの一つ。観測点の位置は図3に示している。

4) 警固断層構造探査の事前調査

平成 25 年実施予定の警固断層構造探査に向けて、適切な測線選定を行うための事前調査を行った。現地踏査等により、探査深度約 8 km とする深部探査測線と深度 1 km とする浅部探査測線を決定する資料が集められた。

(c) 結論ならびに今後の課題

機動的な地震観測点設置を行い、従来展開された地震観測点とともにデータの蓄積を開始した。地震波形を詳細に調査した結果、警固断層の深部において地殻内 S 波反射面が存在していることが明らかになった。この結果は断層の状態を把握する上で極めて重要である。サブテーマ 2-1 の目的を達成するためには、今後さらに自然地震の解析を進めることに加えて、25 年度に行われる構造探査の結果と合わせて断層周辺の詳細構造を推定することで、断層の状態を解明する必要がある。

一方では、観測データが増加することによってその処理を迅速に行うべく、効率的な処理プロセスの設計と処理のマンパワーの充実を図ることが極めて重要である。

3. 2-2 断層帯および周辺の基盤モデルと表層地盤モデルの高精度化

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 断層帯の三次元的形状・断層帯周辺の地殻構造の解明のための調査観測
(断層帯および周辺の基盤モデルと表層地盤モデルの高精度化)

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人九州大学	教授	渡邊 公一郎
国立大学法人九州大学	准教授	藤光 康宏
国立大学法人九州大学	助教	西島 潤

(c) 業務の目的

警固断層帯陸域南東部について、測定点を高密度に配置し、これまでより微小なグリッドサイズによる地形補正を行う重力探査を適用して地下深部における断層帯の位置や三次元的形状を明らかにする。また、調査地域の多数のボーリングデータを収集してデータベースを作成し、重力探査等の情報を加味した表層地盤モデルを作成する。

(d) 3ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成 23 年度：

警固断層帯陸域南東部を含む福岡市及びその周辺地域の既存重力データ収集とともに、福岡平野西部において高密度測点配置の重力探査を実施した。また、地盤モデル作成のための資料収集とデータ入力を行った。

2) 平成 24 年度：

福岡県春日市、大野城市、太宰府市、筑紫野市において、高密度測点配置の重力探査を実施した。また前年度に引き続き、データ空白域のボーリングデータ、基盤情報、地下水情報などの地盤情報の追加収集とデータ入力作業を進めるとともに、防災科研収集分データ（紙ベース数千件）から必要な情報の抽出を行った。

3) 平成 25 年度：

2年間の重力探査で不足している地域の重力探査を行うとともに、これらの結果と纏められたボーリングデータから地盤モデルを作成し、調査結果のまとめを行う。

(2) 平成 24 年度の成果

(a) 業務の要約

警固断層帯陸域南東部を含む福岡市及びその周辺地域の既存重力データを収集するとともに、春日市、大野城市、太宰府市、筑紫野市において高密度測点配置の重力探査を実施した。その結果、福岡市南区井尻から春日市にかけて約 5 km の西北西－東南東方向の重力異常の急傾斜が続いていることが判明した（図 1）。

また、警固断層帯周辺の地盤モデル化に必要と思われる既存のボーリング調査の報告書や地質関連資料及び文献について、警固断層帯を含む広域を対象に、公的機関を中心に情報を収集し、データベース化を行った。まだ空白域が存在するものの、平成 24 年度には約 13000 本のデータ収集・データベース化を行った。

(b) 業務の実施方法

重力調査については、既存重力データとして昨年度収集されていなかった森尻ほか(2002)より77点の重力データを追加した。昨年度までの調査で福岡市内において九州大学他の機関により2357点の重力測定が行われた。収集した重力データより重力異常図を作成したところ、警固断層付近に明瞭な重力の急傾斜が見られた。この急傾斜部分は福岡市南区野間付近で一旦見られなくなるが、井尻付近から春日市須玖北まで続いている。しかし、須玖北より南東には測定点が無いためこのような急傾斜部分が続いているかどうかは明確になっていない。またこの地域は、警固断層帯の活動による強震動予測を行う際に必要な基盤構造が不明瞭である。そこで、今年度はこの急傾斜の広がりをも明らかにするとともに、福岡市南東部の基盤構造を推定するために、春日市岡本から大野城市上大利にかけて及び筑紫野市において重力探査を実施した。

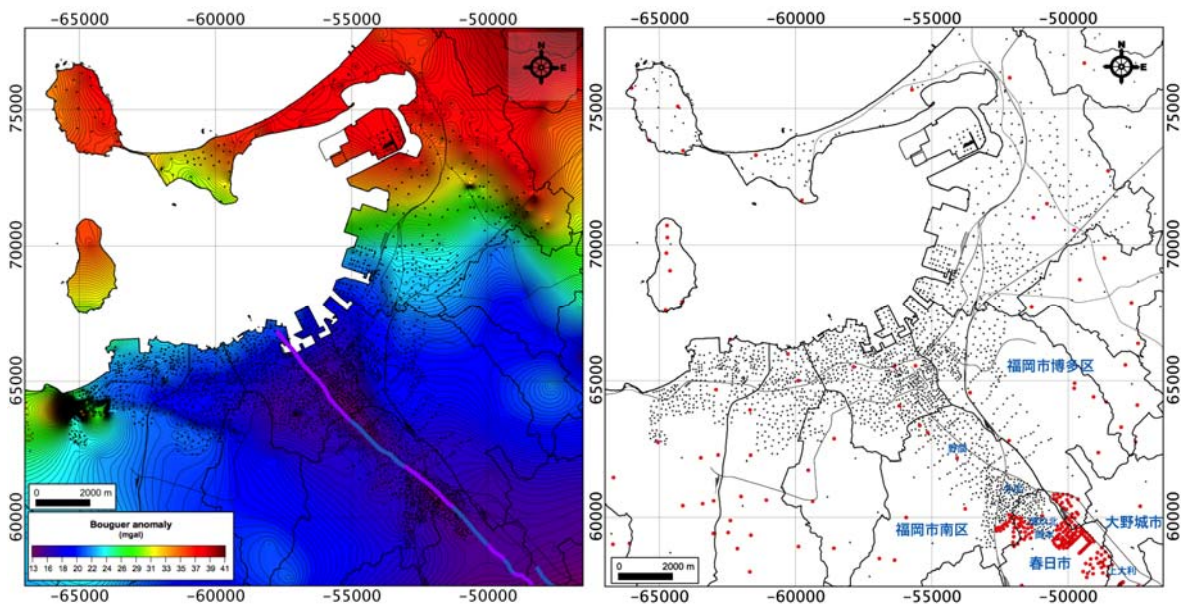


図1 既存重力データより得られた重力異常図(左)と測定点配置図(右)
測定点配置図中の赤丸が平成24年度の測定点。

使用した重力計はシントレックス社製CG-3+及びCG-5相対重力計で、測定点を数10 m～100 m程度の高密度な間隔で配置し、測定点の座標はGPSと携帯電話回線を利用したリアルタイムキネマティック(RTK)測量により決定した。

表層地盤モデルについては、警固断層帯周辺の地盤モデル化に必要と思われる既存のボーリング調査の報告書や地質関連資料及び文献について、警固断層帯を含む広域を対象に、公的機関を中心に情報を収集した。収集したデータは、ボーリングの位置情報(緯度・経度)、各ボーリングデータ情報(掘進長、孔口・地層境界の標高、構成岩相、N値など)を

一元化したフォーマットにしてデータベース化することで取りまとめると共に、GISを用いてマップ上に表現し、データの疎な部分を中心にさらに収集を進めた。これらには一部重複する情報も存在する。

(c) 業務の成果

重力調査については、今年度の調査で重力探査を実施した239点に、過去の測定データおよび地質調査所（現：産業技術総合研究所）測定データ（森尻ほか，2002）を加え、合計2673点の重力データを用いて器械高補正、地球潮汐補正、ドリフト補正、フリーエア補正、ブーゲー補正、地形補正を施すことにより重力異常図を作成した。その際、補正密度はMurata（1993）の方法を用いて 2.47 g/cm^3 と決定した。また、高密度に配置した測定点による高分解能な重力探査においては、従来の地形補正で用いられるグリッドサイズ（100 mオーダー）は粗すぎるため、より微小なグリッドサイズによる地形補正が必要になる。そこで西島（2009）の手法により、国土地理院基盤地図情報10 mメッシュの地形データを用いて地形補正を行った。

得られた重力異常図には、今回ターゲットにしている断層による重力異常のほかに深部構造を反映した長波長の重力異常が含まれるため、この長波長成分を2次曲面で近似し分離して、比較的浅部の地下構造を反映した残差図を作成した（図2）。また、今年度の調査対象地域の重力異常を詳しく見るために対象地域を拡大したものを図3に示す。

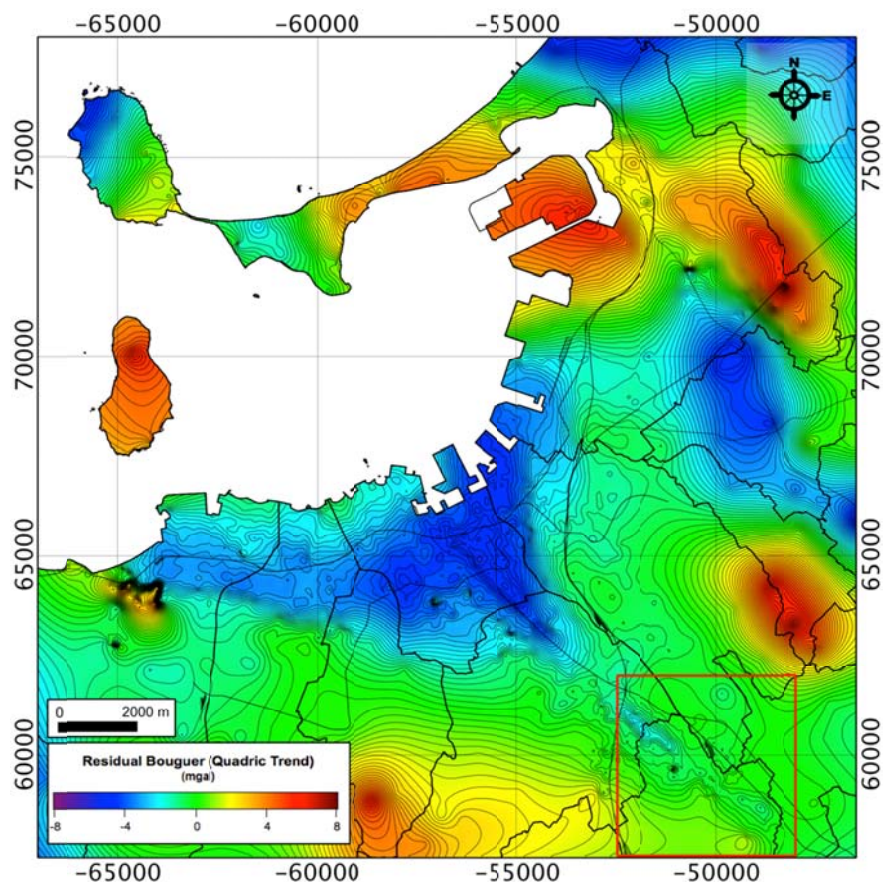


図2 2次傾向面残差図（赤枠は今年度の調査対象地域）

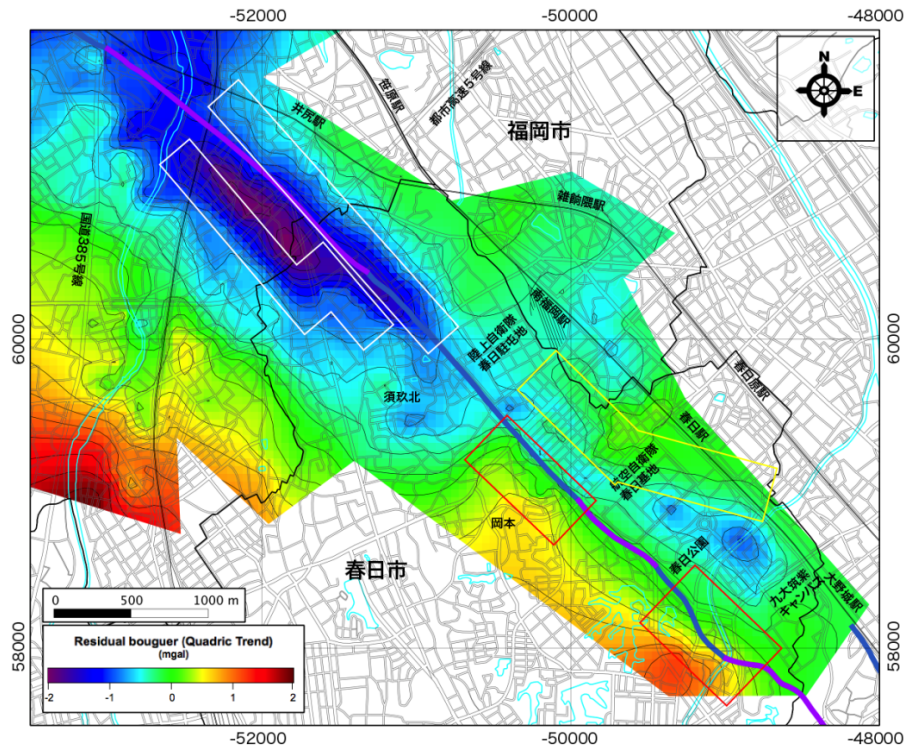


図3 2次傾向面残差図（対象地域を拡大）

白枠、赤枠、黄枠の範囲が南東方向の重力異常の急傾斜部。青線および紫線は活断層詳細デジタルマップ（中田・今泉, 2002）で示されている警固断層の推定位置。

2次傾向面残差図より、これまでの測定で明らかになっていた南区井尻から春日市須玖北にかけての約2 kmの北西－南東方向の重力異常の急傾斜（白枠）から南東方向に約1 km離れた春日市岡本付近及び春日公園の南西に重力異常の急傾斜（北東落ち）が存在することが判明した（図3の赤枠）。また、急傾斜部分の東側には南西落ち重力異常の急傾斜が存在し（黄枠）、春日公園を中心とした地域はこれらの急傾斜部分に囲まれた低重力異常域になっていることが明らかになった。このような凹地状の構造は天神付近、井尻付近にも見られ、それぞれの凹地の間には重力基盤が浅くなっている部分があり、3つの独立した凹地が存在することが、重力異常から推定される。また、これらの凹地の中心は南東に行くに従い少しずつ東にずれている。現在推定されている警固断層の位置（中田・今泉, 2002）と重力異常の急傾斜部分を比較すると、井尻付近では東側の南西落ちの急傾斜部分にはほぼ一致し、春日市岡本付近では西側の北東落ちの急傾斜部分に一致している。

表層地盤モデルについては、まだ空白域が存在するものの、平成24年度には約13000本の坑井についてデータ収集・データベース化ができた（図4）。昨年度にデータベース化を行った3000本のデータと併せて現在約16000本の坑井データがデータベース化され、任意の条件でのデータ取り出しが可能となった（図5）。本データベースで福岡市内はほぼカバーできるようになっているが、大野城市や筑紫野市ではデータの空白域が存在している。また、久留米市付近の坑井データも不足しており、今後これらの空白域を埋めていく必要がある。地盤モデル作成には、微動探査（単点・アレー）、反射法地震探査、検層、ボーリング、重力探査など、既存の地下構造情報（特に弾性波速度と密度）が必要となるため、風化層を含む基盤部等の物性情報の収集を行う必要がある。

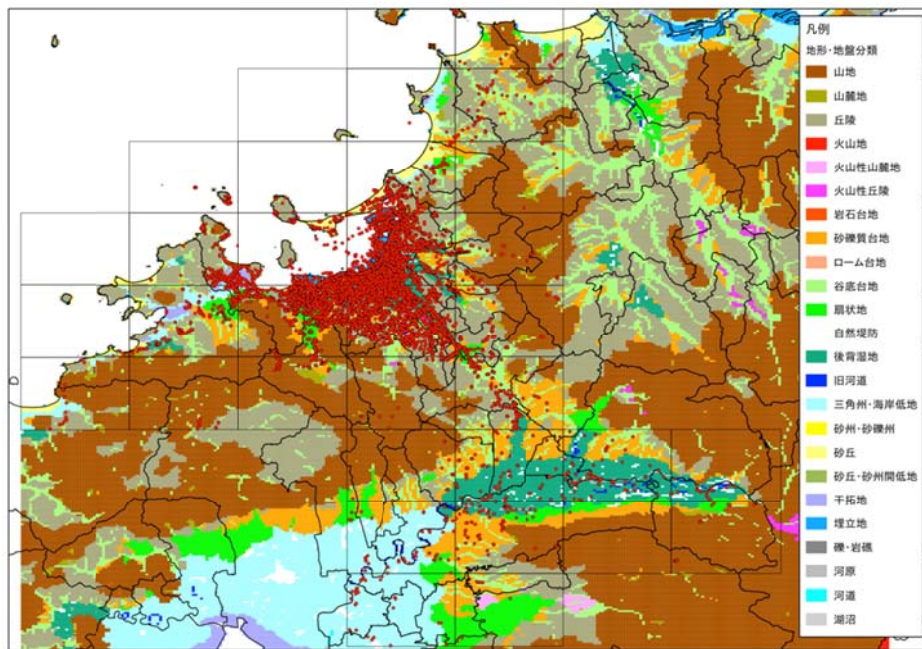


図4 平成24年度までにデータベース化した坑井の位置

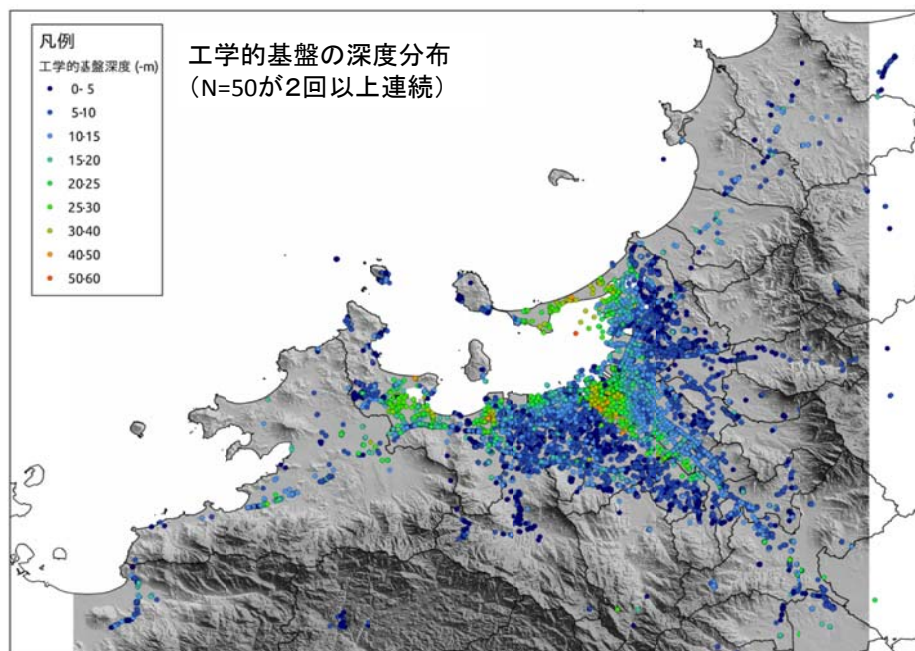


図5 データベースから抽出された工学的基盤の深度分布

(d) 結論ならびに今後の課題

重力調査については、今年度の調査で重力探査を実施した239点に既存の重力データを加え、これまでより微小なグリッドサイズによる地形補正を含む各種補正を施すことにより重力異常図を作成した。さらに重力異常図中の長波長成分を2次曲面で近似し分離して、2次傾向面残差図を作成した。2次傾向面残差図より、春日市岡本付近及び春日公園の南西に重力異常の急傾斜（北東落ち）が存在することが判明した。また、急傾斜部分の東側には南西落ち重力異常の急傾斜が存在し、春日公園を中心とした地域はこれらの急傾斜部分に囲まれた低重力異常域になっていることが明らかになった。ただし、さらに南東方向へ連続しているかどうかは今回の調査では不明であり、次年度測定を行う必要がある。次年度以降、重力データが十分に得られた地域については基盤深度の推定を試みる。

表層地盤モデルについては、平成24年度には約16000本の坑井についてデータ収集・データベース化ができたものの、まだ空白域があるため追加収集する必要がある。次年度の作業として、久留米市の坑井データ約700本の追加収集を行う。さらに、地盤モデル作成に必要な基盤部（風化層を含む）等の物性情報の収集を行う必要がある。これらのデータを合わせて基盤深度の解析を行う予定である。

(e) 引用文献

- 森尻理恵・広島俊男・駒澤正夫・牧野雅彦・村田泰章・名和一成・西島 潤・茂木 透，
福岡地域の重力異常について，地質調査研究報告，第53巻，第7/8号，573-594，2002.
- Murata, Y., Estimation of optimum average surficial density from gravity data: An objective Bayesian approach, J. Geophys. Res., 98, 12097-12109, 1993.
- 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，DVD-ROM 2枚，付図1葉，60p，2002.
- 西島 潤，50m メッシュ標高データを用いた地形補正プログラム，九大地熱・火山研究報告，第18号，35-38，2009.

3. 2-3 断層帯周辺の広域地殻構造とその時空間変化の把握

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 断層帯周辺の広域地殻構造とその時空間変化の把握

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人防災科学技術研究所		
地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	汐見 勝彦
同 地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	松原 誠
同 地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	浅野 陽一
同 地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	武田 哲也
同 地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	木村 尚紀
同 地震・火山防災研究ユニット	主任研究員	齊藤 竜彦
同 地震・火山防災研究ユニット	研究員	上野 友岳

(c) 業務の目的

警固断層帯およびその周辺域の地殻構造の全体像を把握するため、ボアホール型の定常地震観測点1点を警固断層帯付近に整備する。当該観測点および周辺の既存定常地震観測点等で得られた観測データを用いて地震波トモグラフィ等の解析を行い、断層帯周辺の大局的な三次元地震波速度構造の解明を行う。また、定常観測点で得られる雑微動の相関解析から断層近傍における地震波速度構造の時空間変化を検出することにより、断層における固着状態変化モニタリングの可能性について検討する。

(d) 3ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成23年度：

高分解能な三次元地震波速度構造や高精度な微小地震震源分布の把握のため、既存定常観測点が疎である福岡県小郡市にボアホール型地震計および傾斜計を各1式設置し、高精度かつ高品質の観測データ取得を開始した。観測データはオンラインで収集し、他の基盤的地震観測網データ等と併せて逐次的に処理するとともに、他のサブテーマ担当者への配信を行った。警固断層帯やその周辺域に位置する基盤的地震観測網等の定常観測点や過去の臨時機動地震観測点で記録された自然地震の走時データベースを作成し、それを用いて警固断層帯（南東部）を含む200km四方程度の範囲を対象とした地震波トモグラフィ解析を行うことにより、断層帯周辺の大局的な三次元地震波速度構造を求めた。また、平成24年度以降に実施するより詳細な構造解析と構造の時空間変化の把握に必要な地震波形データの蓄積を行った。

2) 平成24年度：

平成23年度に福岡県小郡市内に整備したボアホール型高感度地震観測施設（小郡三沢

高感度地震観測施設)の維持・運用を行った。本観測施設の観測データを既存定常観測点のデータと併せて処理することにより、微小地震の検知能力向上に努めた。さらに、依然として地震観測施設が不十分である警固断層帯(南東部)周辺の10か所に臨時機動地震観測点を設置し、観測を開始した。平成23年度に整備した自然地震の走時データベースに、過去に海域で実施された臨時機動観測の走時情報を追加し、地震波トモグラフィ解析を行うことにより、より詳細な広域三次元地震波速度構造を求めた。定常観測点で得られる雑微動の相関解析により断層帯周辺の応力状態や地下構造の時空間変化をモニタリングするためのシステム構築を行うため、過去データの相関関数のデータベース整備を行った。さらに、観測記録に含まれる地震波速度不連続面の検出とその特徴の把握を行った。オンラインで収集した観測データは、全てのデータを保存するとともに、他のサブテーマ担当者に逐次配信した。

3) 平成25年度:

平成23年度に整備した小郡三沢高感度地震観測施設の維持・運用を実施するとともに、平成24年度に設置した臨時機動観測点10点のメンテナンスおよび撤収作業を行う。これらの観測点の観測データを既存定常観測点のデータと併せて処理することにより、警固断層帯南東部周辺域の微小地震の検知能力や震源パラメータ決定精度を高める。また、平成24年度までに整備した自然地震の走時データベースに、これらの観測点で記録された走時情報を追加し、警固断層帯(南東部)を中心とする200km四方程度の範囲を対象とした地震波トモグラフィ解析を行う。定常観測点で得られる雑微動の相関解析により、断層周辺の応力状態や地下構造をモニタリングするためのシステム整備を行う。さらに、観測波形に含まれる反射波・変換波から地下構造の特徴を把握する。オンラインで収集した観測データは、全てのデータを保存するとともに、他のサブテーマ担当者に逐次配信する。

(2) 平成24年度の成果

(a) 業務の要約

平成23年度に整備した小郡三沢高感度地震観測施設の維持・運用を行った。観測データはオンラインで収集し、他の基盤的地震観測網データ等と併せて逐次的に処理するとともに、他のサブテーマ担当者への配信を行った。加えて、地震観測施設が不足している警固断層帯(南東部)周辺10か所に臨時機動地震観測点を設置し、オフライン観測を開始した。平成23年度に整備した自然地震の走時データベースに、九州大学等が2005年福岡県西方沖の地震後に玄界灘に展開した臨時機動観測による走時データを追加し、警固断層帯を中心とする200km四方程度の範囲を対象とした地震波トモグラフィ再解析を行うことにより、断層周辺の大局的な三次元地震波速度構造を求めた。定常観測点を対象とした雑微動の相関解析データベースを逐次構築するとともに、観測波形に含まれる反射波・変換波から地下構造の特徴の概略把握を行った。

(b) 業務の成果

1) 警固断層帯(南東部)周辺の地震活動把握

独立行政法人防災科学技術研究所(防災科研)では、「地震に関する基盤的調査観測計画」(平成9年8月29日、地震調査研究推進本部)に基づき、地震による災害の軽減に資

する地震調査研究の推進を基本目標として、高感度地震観測網（Hi-net）の整備を進めてきた（Okada et al., 2004）。しかし、本観測網は日本全国を対象としたものであり、警固断層帯（南東部）の詳細な地震活動や高精度な地下構造を把握するためには、十分な観測点の密度を有しているとは言えない。そこで、警固断層帯（南東部）周辺の詳細な震源分布や三次元地下構造を把握するため、平成 23 年度に福岡県小郡市内に新たな簡易型高感度地震観測施設（小郡三沢高感度地震観測施設。観測点コード：N. OGMH）を建設した。本観測施設で得られた観測データは、オンラインで防災科研ならびに九州大学に配信されている。

2012 年 4 月 1 日～2013 年 2 月 28 日に警固断層帯周辺部で発生した地震について、防災科研が求めた地震の震源分布ならびに主な地震の発震機構解を図 1 に示す。震源の決定には、N. OGMH 観測点（図 1 灰色の菱形）、防災科研 Hi-net 観測点（同白菱形）のほか、九州大学（同白四角）および気象庁（同白丸）の観測点の記録を用いた。図中、塗色された丸印が震源の位置を表しており、その大きさはマグニチュード、色は震源の深さに対応する。図 2 には、図 1 の点線枠内の領域を震源とする地震の M-T 図を示す。期間中、警固断層帯南東部周辺（図 1 の点線枠内）で 56 個の地震を検知した。2012 年 7 月～8 月には断層帯南東部の西側（図 1 赤丸）、2013 年 2 月には N. OGMH 観測点の南西（図 1 緑丸）でやや活発な地震活動が見られた。前者は北北西－南南東伸張あるいは北北東－南南西伸張の横ずれ

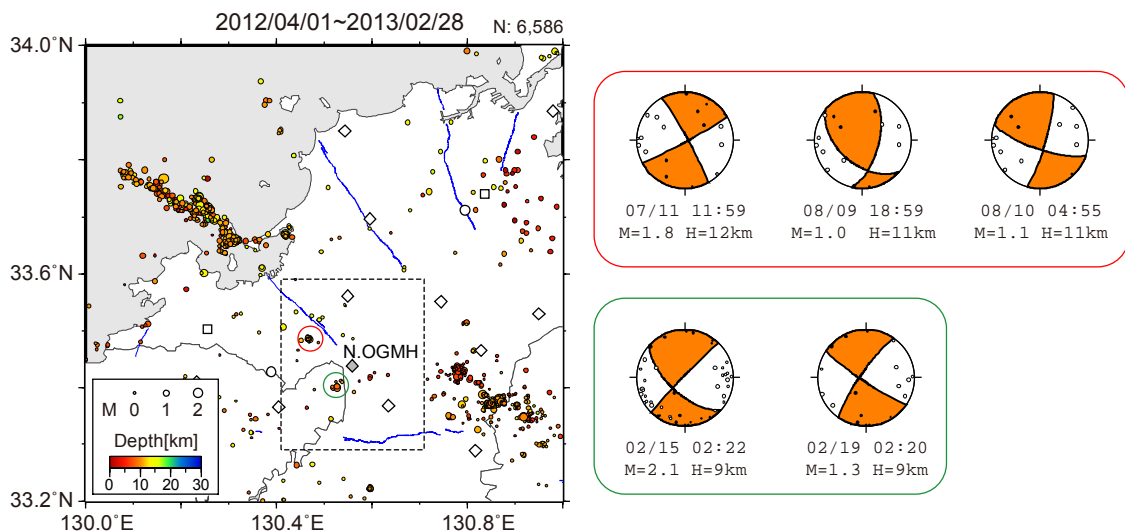


図 1 2012 年 4 月 1 日～2013 年 2 月 28 日の地震活動状況。右には、赤丸および緑丸で囲った範囲の主な地震の発震機構解をそれぞれ同色の四角枠内に示す。青線は活断層位置（中田・今泉編，2002）を表す。

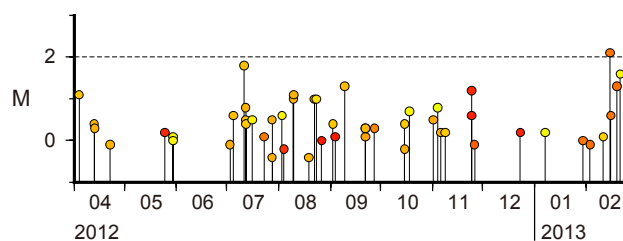


図 2 図 1 点線枠内で発生した地震の M-T 図

断層、後者は南北伸張の横ずれ断層であった。これらの地震を含む点線枠内の地震の頻度分布を図3に示す。イベント数が少ないものの、M0.3程度までは検知できていることが分かる。この値は、昨年度報告した周辺の定常観測点の雑微動レベルから推定された検知レベル（M0.2以上）とほぼ同等の結果となっている（文部科学省研究開発局・国立大学法人九州大学，2012）。なお、図3に示した頻度分布図から、グーテンベルグ・リヒター則の b 値は 0.93 と求められた。

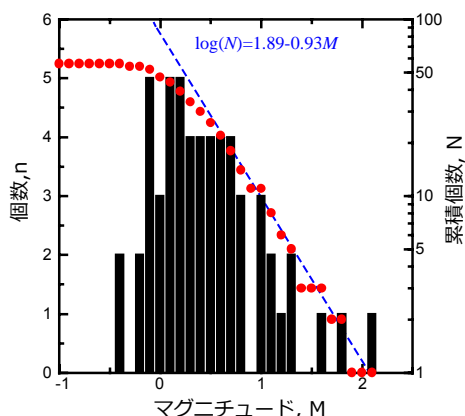


図3 図1点線枠内で発生した地震の頻度分布

2) 警固断層帯（南東部）周辺を対象とした臨時機動地震観測

a) 観測の目的と概要

平成 23 年度に警固断層帯（南東部）の詳細な地震活動や高精度な地下構造を把握することを目的として、新たな高感度地震観測施設（N. OGMH 観測点）を福岡県小郡市に建設した。しかし、当該地域周辺の地震活動は、図1に示す通り、非常に低調である。また、上部地殻の詳細な地下構造を把握するためには、現在の地震観測点の数は十分とは言えない。そこで、警固断層帯（南東部）の詳細な地下構造把握を実現するため、当該地域にオフラインの臨時機動地震観測点を 10 か所設置することとした。既存の基盤的地震観測網観測点や臨時機動観測点の不十分な地域を中心に現地を踏査し、できる限り等間隔となるように観測用地を選定した。選定に際して考慮した条件は以下の通りであるが、観測点の相対的な位置関係を最優先としたため、全ての条件を満たしていない観測用地も存在する。

- ・交通量および人の往来の少ないところ
- ・近くで振動を発生する工場が常時稼動していないところ
- ・観測期間中、大規模な工事が予定されていないところ
- ・その他、地震観測上のノイズとなる人工的な振動や電磁的ノイズ発生源がないところ
- ・地盤がしっかりしているところ
- ・雨水が流れ込んだり、貯まったりしないところ
- ・設置後の保守作業が容易にできるところ

図4ならびに表1に、選定した臨時機動地震観測点の位置をまとめる。

今年度は、用地選定・交渉ののちに、2012年12月16日～21日に地震観測のための機材を設置するとともに、2013年1月下旬および2月下旬の2回、データ回収および機器のメンテナンス作業を実施した。表2に、各観測点の設置日ならびにメンテナンス日を示す。



地図データ ©2013Google, ZENRIN

図4 臨時機動観測点の分布（赤菱形：KG01～KG10）。白菱形、ピンク色の菱形および白四角は既存の定常観測点位置を、橙丸は九州大学による臨時機動観測点の位置を表す。青線は警固断層帯（南東部）の概略位置（中田・今泉編，2002）を表す。

表1 臨時機動地震観測点の位置

観測点コード	緯度 (° N)	経度 (° E)	標高 (m)	所在地概略
KG01	33.483	130.396	156	那珂川町：西畑運動公園
KG02	33.461	130.430	66	那珂川町埋金
KG03	33.418	130.469	349	鳥栖市河内町
KG04	33.486	130.477	152	大野城市：牛頸ダム（トンネル内）
KG05	33.456	130.486	243	筑紫野市：山神ダム（トンネル内）
KG06	33.476	130.503	208	筑紫野市：筑紫野市総合公園
KG07	33.529	130.542	164	太宰府市：太宰府梅林アスレチックスポーツ公園
KG08	33.483	130.587	76	筑紫野市：山家スポーツ公園
KG09	33.558	130.621	98	飯塚市：山口茜の里公園
KG10	33.511	130.640	227	飯塚市：桑曲公民館

表2 観測点設置日およびメンテナンス作業日

	設置日	メンテナンス			設置日	メンテナンス	
		第1回	第2回			第1回	第2回
KG01	H24/12/17	H25/1/21	H25/2/27	KG06	H24/12/19	H25/1/21	H25/2/27
KG02	H24/12/17	H25/1/21	H25/2/27	KG07	H24/12/20	H25/1/21	H25/2/28
KG03	H24/12/19	H25/1/21	H25/2/28	KG08	H24/12/16	H25/1/22	H25/2/28
KG04	H24/12/18	H25/1/21	H25/2/27	KG09	H24/12/20	H25/1/22	H25/2/26
KG05	H24/12/18	H25/1/21	H25/2/27	KG10	H24/12/21	H25/1/22	H25/2/26

b) 観測装置の設置と観測波形の回収

臨時機動地震観測点には、固有周期 2Hz の 3 成分速度型地震計を使用した。

地震観測におけるノイズを低減させるためには、前述のとおり、地盤の良いところやノイズ発生源から可能な限り離れていることが望ましいが、観測用地の選定にあたっては、必ずしも地震観測にとって理想的な場所が選定できるとは限らない。そのような場合、地震計を埋設することにより、ノイズの低減をはかることが可能である。KG04 および KG05 の 2 点は、それぞれ、福岡県那珂県土整備事務所管理のトンネル内に地震計を設置させていただいた（写真1）。それ以外の 8 地点については、地権者の許可のもと、深さ 30cm 以上の穴を掘り、地震計を埋設した。地震計を埋設する場合は、その穴底に 1 辺 20cm 以上、



写真1 臨時機動観測点設置状況例
(KG04 ; 地震計地表設置)



写真2 KG08点における地震計設置状況



写真3 臨時機動観測点設置状況例
(KG08 ; 地震計埋設)



写真4 観測用ケース内部

厚さ 2.5cm 以上のコンクリート平板を水平に固定し、台座とした。地震計の N 方位が「真北」を向くように、また地震計付属の水準器等を用いて水平になるように配置し、地震計脚部を石膏で固定した（写真 2）。地震計を埋設する場合は、最後に、掘削土で埋め戻した（写真 3）。

観測データは 100Hz でサンプリングし、24bit の AD 変換性能を有するデータ収録装置に連続的に保存している。データ収録装置は、車載バッテリーで駆動させている。データ収録装置と地震計側センサーケーブルは、端子台を介して接続した。なお、時刻校正には、GPS 信号を用いており、GPS アンテナは天空が開けた場所に設置している。データ収録装置、バッテリー等は、観測用ケースに収納した（写真 4）。観測用ケースは、南京錠をかけたのち、平坦かつ風雨によって流されないような場所に設置した。さらに、ビニールシートで覆ったのち、その表面に防災科研が地震観測中であることを示す標識を貼った（写真 1、3）。

設置作業完了後、簡易型の GPS 受信機等を用いて、10m 以内の精度の観測点座標（緯度・経度）を測量した。標高は 25,000 分の 1 の地図上で概略値を読みとった（表 1）。

防災科研 Hi-net の震源カタログによると、平成 24 年度末現在でデータ回収が完了した期間（2012 年 12 月 16 日～2013 年 2 月 28 日）中に N. 0GMH 観測点で $1 \mu\text{m/s}$ ($=1 \times 10^{-6}\text{m/s}$) 以上の振幅を記録する地震は 65 個、 $5 \mu\text{m/s}$ 以上の振幅を記録する地震は 11 イベントあ

ったが、警固断層帯周辺部を含む九州北部地方を震源とする地震はほとんど観測されていない。観測波形例として、図5に2013年1月13日9時10分19秒ごろに福岡・佐賀県境付近で発生したM1.1の浅い地震（深さ14km）の記録を示す。ここで、臨時観測点（KG01～KG10）における記録を赤線で、それ以外のオンライン定常点の記録を黒線で示した。

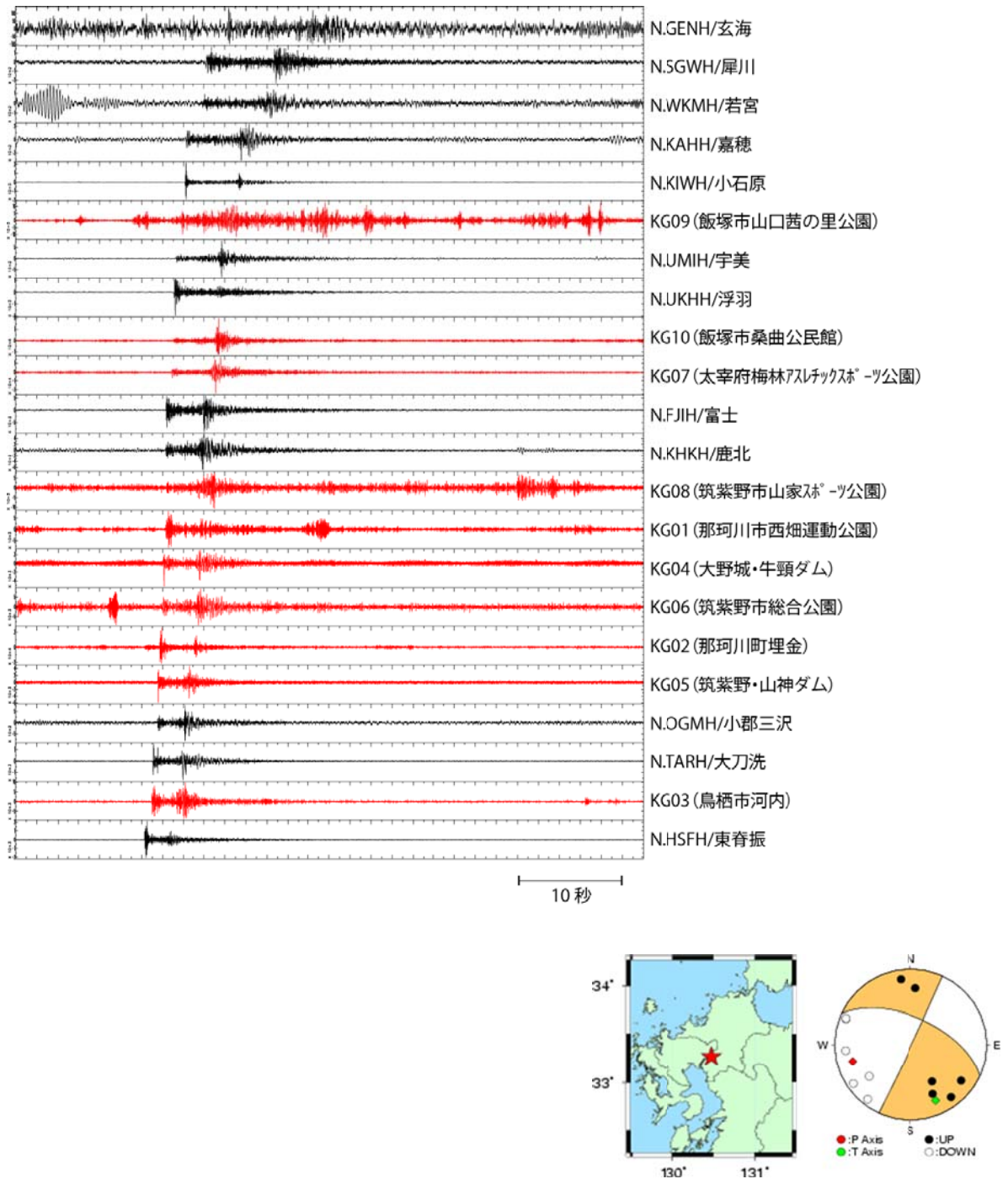


図5 臨時機動観測点ならびに周辺の防災科研 Hi-net 観測点で収録された地震記録（上下動成分）の例。震源距離順に並べた。震源は福岡・佐賀県境付近（地図内星印）で北北西－南南東方向に伸張軸を持つ横ずれ断層である。

3) 三次元地震波速度構造解析

a) 概要

平成 23 年度の解析においては、2005 年 5 月 1 日～2011 年 8 月 31 日に九州大学において読み取られた 35782 個の地震と 2000 年 10 月 1 日～2005 年 4 月 30 日に防災科研により読み取られた 19146 個の地震の中から抽出した地震の走時データを地震波トモグラフィ解析に適用し、2005 年福岡県西方沖の地震の余震列の南西側が低速度で北東側が高速度である構造を推定した。この明瞭な構造は海域下に推定されているが、平成 23 年度の解析では余震域直上の海底地震計の観測点を解析に使用していなかったため、その推定精度については再検討の余地が残されていた。一方、九州大学等により、福岡県西方沖の地震の直後に海底地震観測が実施された (Hori et al., 2006)。今年度は、余震域直上に設置された海底地震計のデータもあわせて解析に用いることにより、平成 23 年度の解析で見られた余震列を境界とする明瞭な構造の違いの信頼性をより明白にすることを目的とする。

b) データ・手法

九州大学等は、2005 年 3 月～4 月に、2005 年福岡県西方沖の地震の余震域周辺を対象とした海底地震観測を実施しており、2706 個の余震の震源決定には、この海底地震計のデータ (Hori et al., 2006) も利用した。まず、平成 23 年度に整備した走時データベースに、海底地震計で得られた走時データを追加した。そうして得られた新たなデータベースに対し、 $0.01^\circ \times 0.01^\circ \times 1\text{km}$ の各ブロックにおいて検出数が最大となる地震 9884 個を抽出し、トモグラフィ解析に用いた。解析に用いた地震の震源分布を図 6 に示す。

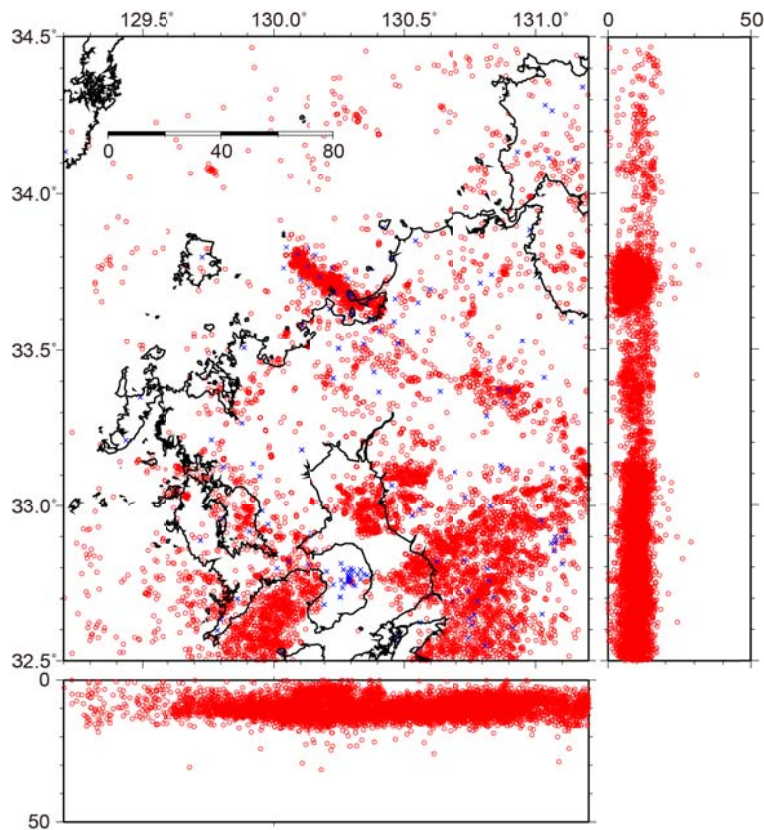


図 6 トモグラフィ解析に用いた地震の震源分布

解析には、Zhao et al. (1992)のトモグラフィ法にスムージングを導入し、観測点補正值も考慮する手法 (Matsubara et al., 2005, 2008) を用いた。トモグラフィ解析の解析領域は、解析に使用する波線数を考慮し、東経 $129.2^{\circ} \sim 131.2^{\circ}$ 、北緯 $32.5^{\circ} \sim 34.5^{\circ}$ とした。

チェッカーボードテストの結果を図7に示す。深さ方向においては 10km の分解能が確かめられた。全体としては深さ 30km 程度までは、水平方向に 0.2° (約 20km) の分解能がある。局所的には、深さ 20km 程度までは水平方向に 0.1° (約 10km) の分解能があることが明らかになった。

c) 結果

本解析により求められた観測点補正值を図8に示す。雲仙・九重など火山地帯のほか、福岡平野・熊本平野・筑紫平野・海ノ中道・島嶼部の観測点の補正值が比較的大きくなっている。海底観測点の補正值は、北部で大きく、南部で小さい値をとる。観測点補正值は、P波とS波のそれぞれについて求めたが、大小の傾向はほぼ同様であった。これらの結果は Uehira et al. (2006) と一致する。

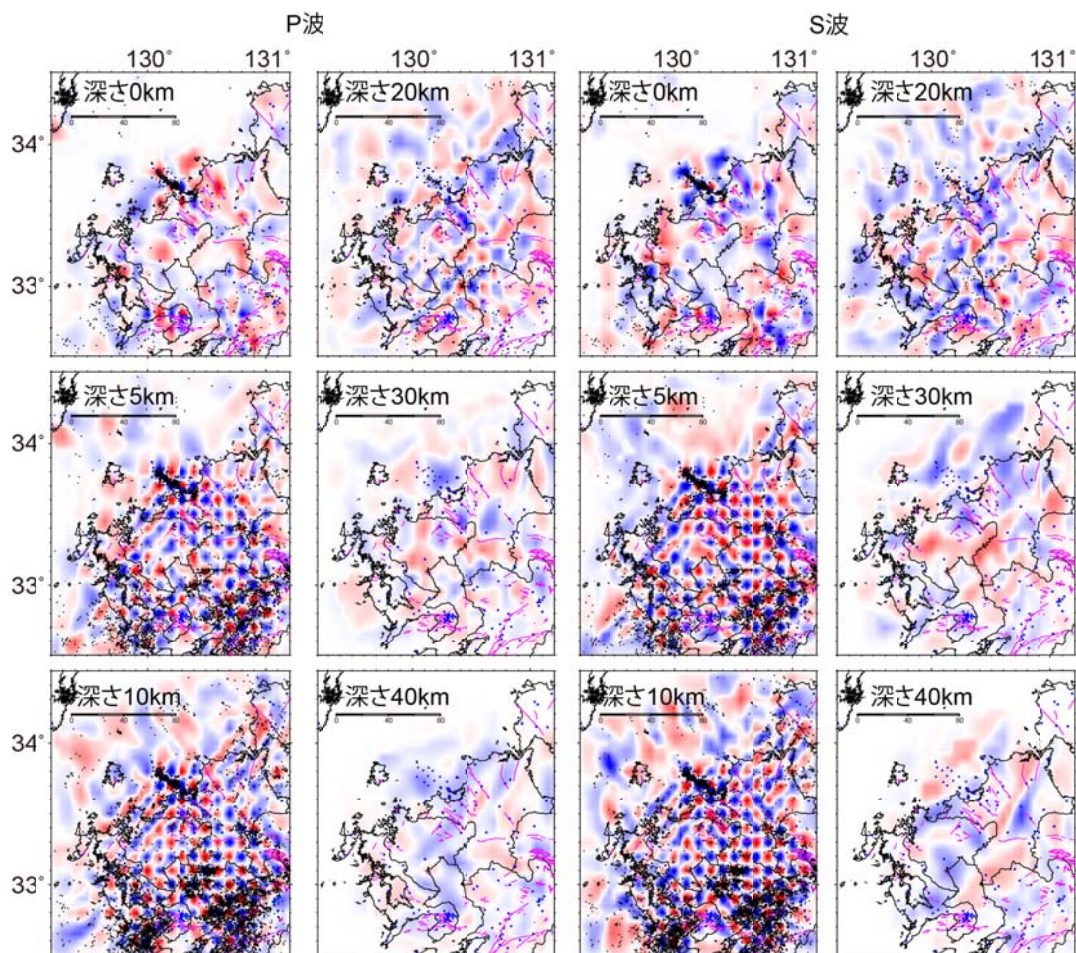


図7 (a) 水平分解能 10km 時のチェッカーボードテストの結果。点は解析に用いた地震のうち、それぞれの深さから ± 5 km 以内の震源分布を示す。青点は観測点分布を示す。

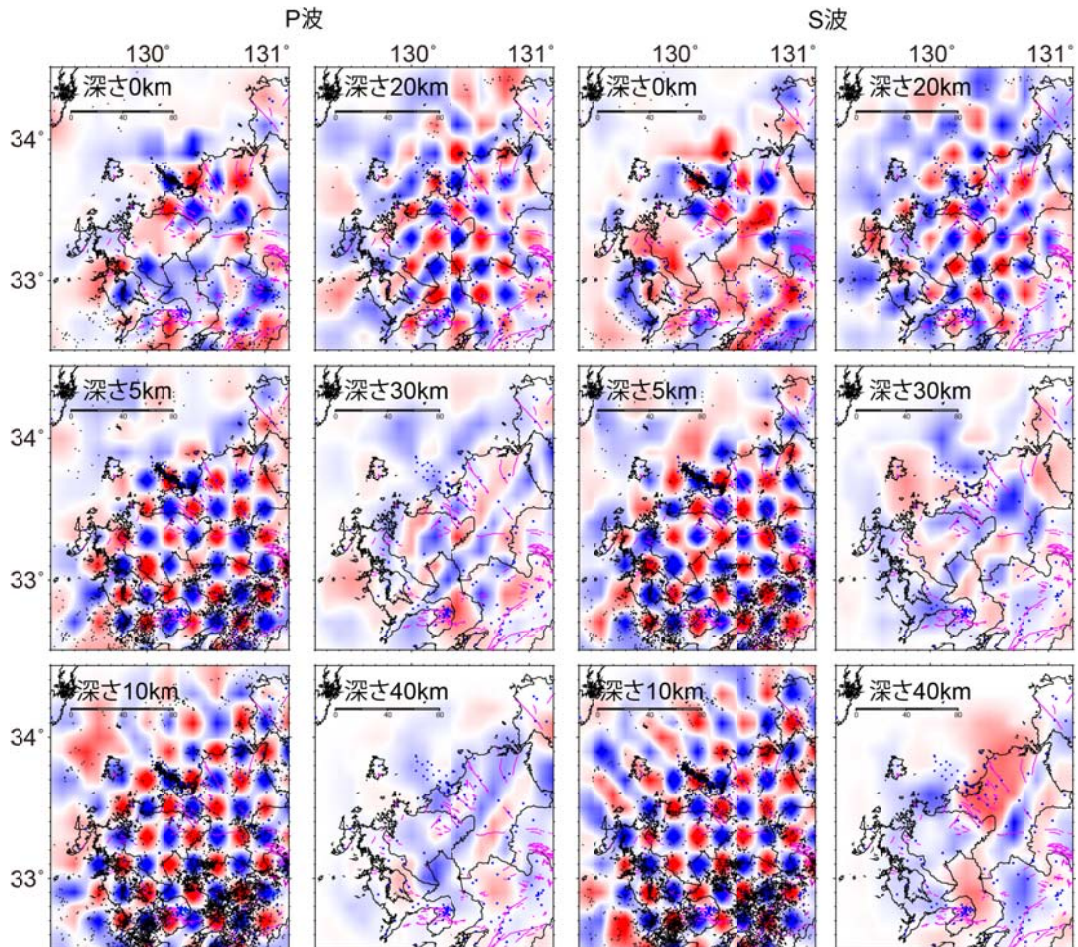


図 7 (b) 水平分解能 20km 時のチェッカーボードテストの結果。

水平分解能を 10km および 20km とした場合の水平断面図を図 9 および図 10 に示す。平成 23 年度は、玄界灘に敷設された海底地震計の走時データを用いず、三次元地震波速度構造を推定し、深さ 5～15km において、福岡県西方沖の地震の余震列を境として速度構造が明瞭に変化するという結果を得た(文部科学省研究開発局・国立大学法人九州大学, 2012)。今回、海底地震計による走時データを加味した解析を行ったが、余震列の南西側領域において P 波速度が低速度域であるのに対し、北東側が高速度域となっており、前回と同様の結果となった。深さ 5～10km における福岡県の陸域においては、活断層の分布する領域は高速度域となる傾向が見られる。S 波速度については、深さ 5～15km においては警固断層帯(北西部)延長・余震域に沿って高速度域が存在している。深さ 10km までは周囲は低速度域となっているが、深さ 15km では、P 波と同様に余震列の北東側が高速度、南東側が低速度になっている。速度のパターンは、Hori et al. (2006) と調和的である。余震列南西側の低速度域は低 V_p/V_s であり、この低 V_p/V_s 域は糸島半島まで続いている。九州北部の基盤は、福岡平野の下が主に第三紀始新世の堆積岩であり、福岡平野を囲む山地は主に中生代白亜紀の花崗岩で構成されている。糸島半島の基盤も花崗岩帯であり、低速度・低 V_p/V_s であることから、この花崗岩帯が玄界灘沖まで続いている可能性がある。

警固断層帯周辺以外の領域についても特徴的な構造が推定された。深さ 5～10km においては別府－島原地溝帯から諫早平野(大似田断層)にかけての領域では顕著な低速度領域

が分布している。この傾向はS波速度においても同様である。さらに、別府－島原地溝帯の低速度は深さ20kmまで広がっている。

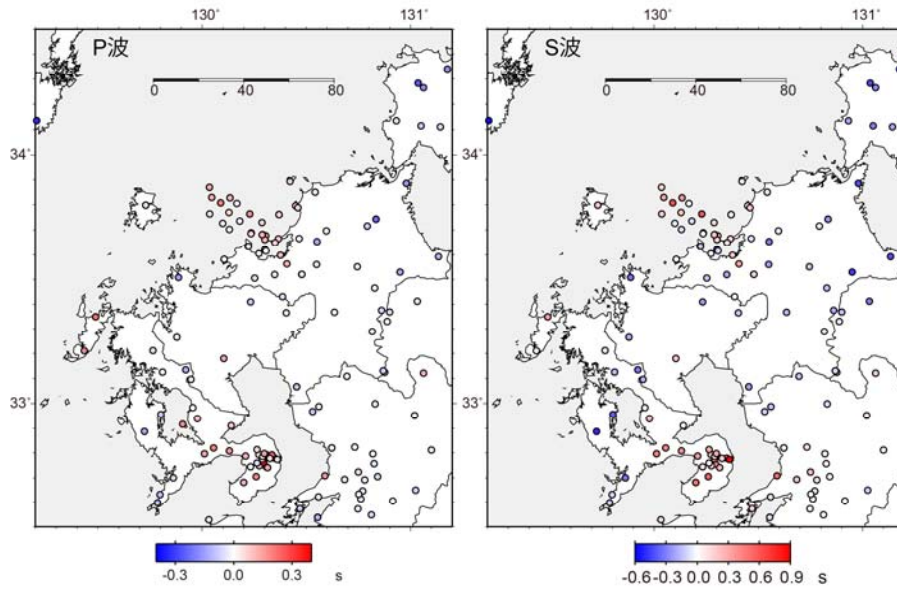


図8 本解析により求められた観測点補正值。左) P波、右) S波。

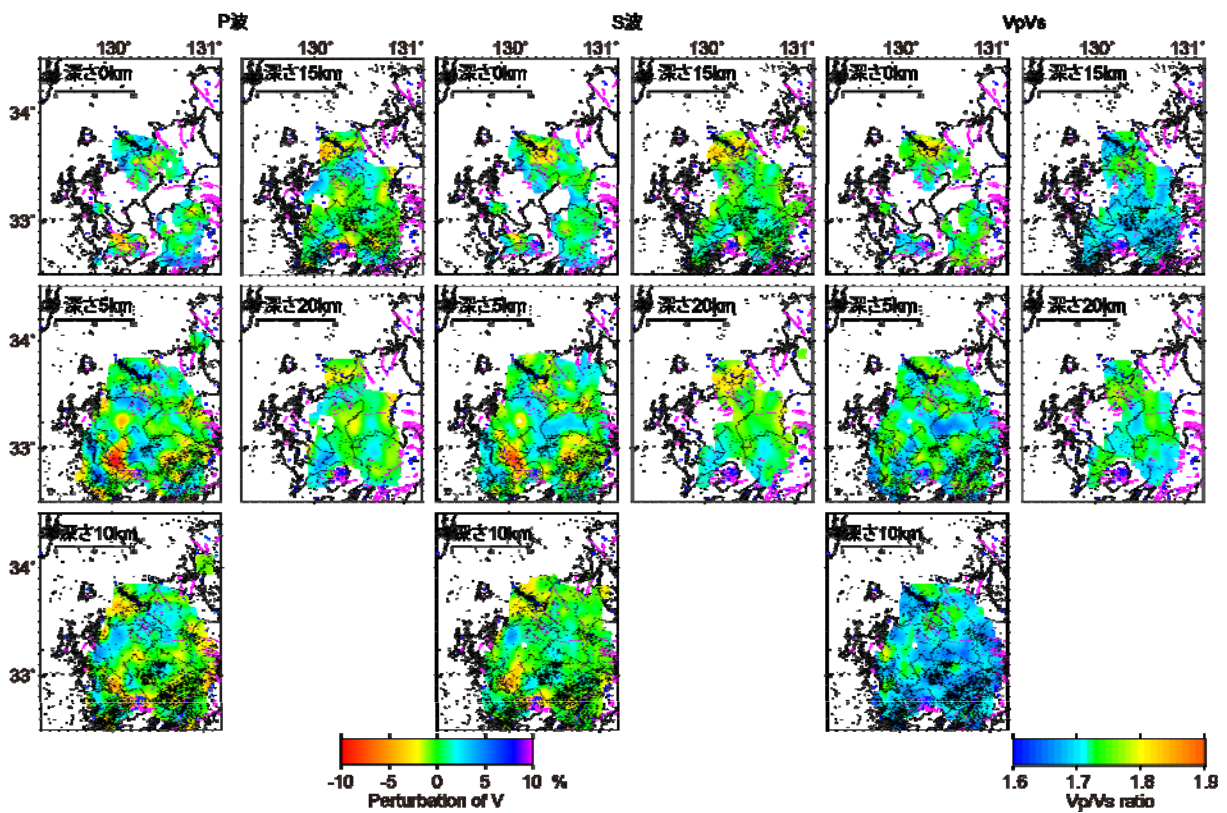


図9 水平分解能10km時のP波速度(左)、S波速度(中)および V_p/V_s (右)。

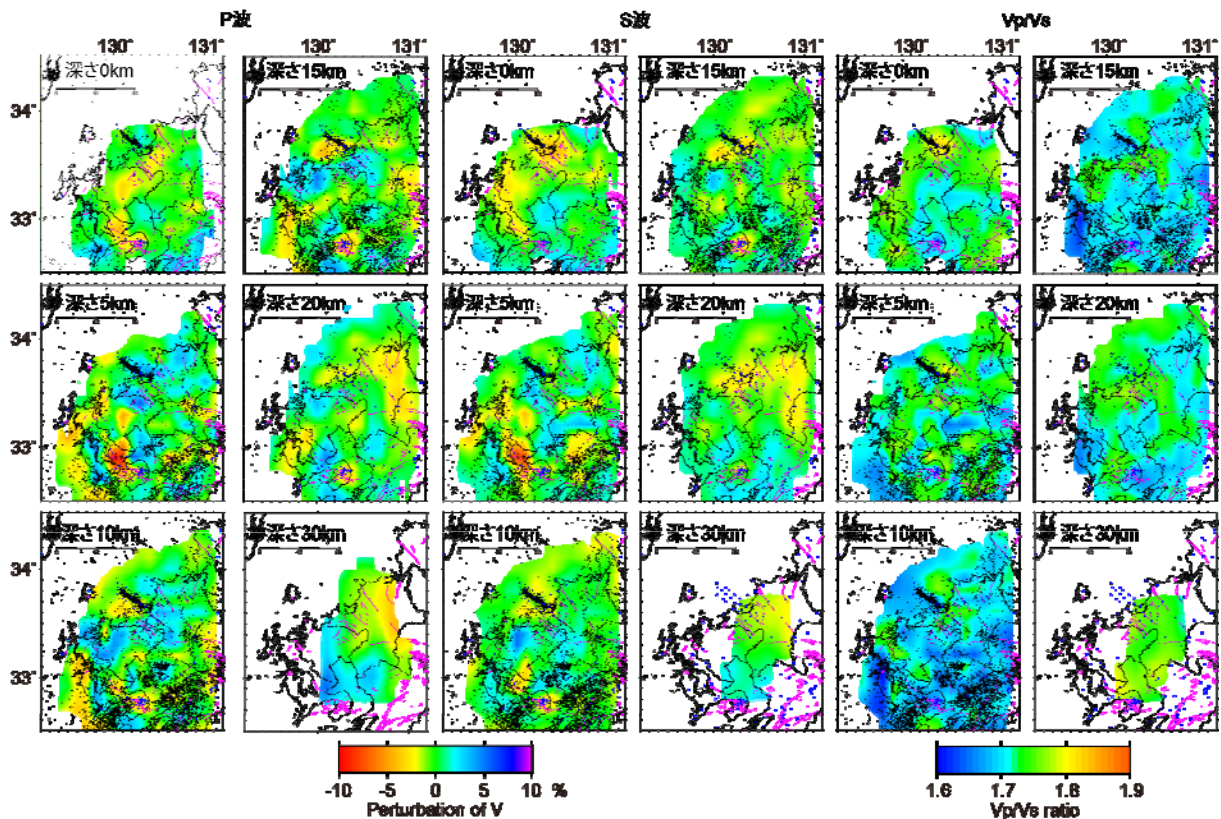


図 10 水平分解能 20km 時の P 波速度（左）、S 波速度（中）および V_p/V_s （右）。

4) 地震波干渉法解析

a) 概要

近年、地震観測点で記録される雑微動の相関関数が観測点下あるいは観測点間の地下構造の影響を強く受けていることが明らかになってきた。また、顕著な地震活動等を境として、観測点周辺の地震波速度構造のごくわずかな変化に起因して、相関関数にも変化が生じることが数多く報告されている（例えば、Wegler et al., 2009）。地震波速度が変化する理由について、未だ明確な結論が得られている訳ではないが、地震波速度の変化が地殻深部あるいは地殻全体で発生している場合、地殻の応力状態の変化と密接に関係していると考えられる。その場合、地震波干渉法解析により得られる自己あるいは相互相関関数を定常的にモニタリングし、その変化を追跡することで、地下の応力状態の変化を捉えることが出来る可能性がある。平成 24 年度は、防災科研 Hi-net および F-net 観測点における観測データを対象に雑微動相関関数のデータベース整備を行った。

b) 解析方法および結果

解析は、小郡三沢 (N. OGMH) 観測点のほか、警固断層帯周辺部に位置する防災科研 Hi-net の N. WKMH、N. KAHH、N. KIIH、N. UMIH、N. TARH、N. HSFH、N. FJIH 各観測点および防災科研 F-net の N. SBRF 観測点を対象とし、2007 年 8 月～2013 年 2 月のデータについて処理を行った。解析に用いた観測点の分布を図 11 に示す。解析には 3 成分の観測記録を使用し、各成分の自己相関関数のほか、それぞれの成分の相互相関係数を求めた。

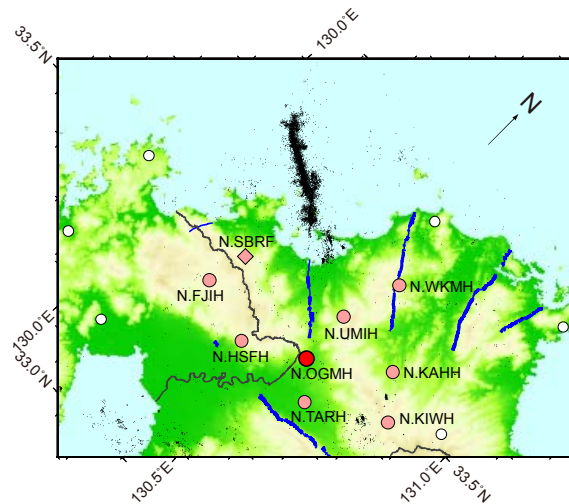


図 11 地震波干渉法解析およびレシーバ関数解析に用いた観測点

顕著な地震前後の速度構造の微小な変化は、特定の周波数帯域を対象とした雑微動の相関関数にのみ現れることがある。そこで、本解析では、0.5～1 Hz、1～2 Hz、2～4 Hz、4～8 Hz、8～16 Hz の各帯域における自己／相互相関関数を求めた。以下に、相関関数の計算の概略手順をまとめる。

まず、各観測点で得られた記録を成分ごとに 1 時間単位で切り出し、上記 5 種類の帯域を対象としたバターワース型の帯域通過フィルタを適用したのち、1 ビット化処理を施す。このように作成した各データに対し、データ開始点から 163.84 秒間 (16384 サンプル) のデータを抽出し、各成分の自己相関関数および成分間の相互相関関数を求める。1 時間分のデータに対し、8192 サンプルずつずらしつつ相関関数を計算し、得られた 42 通りの相関関数をスタックした結果を、その時間の相関関数とした。さらに、それらの結果を日単位でスタックし、その結果を当該日の相関関数とした。N. OGMH 観測点における 2012 年 3 月から 4 か月間の上下動成分自己相関解析の結果を一例として図 12 および図 13 に示す。日単位の自己相関関数 (図 12) は、高周波成分ほど、また、大きな経過時間になるほど、位相の到着時刻に周期的な変化が見えており、縞模様を形成している。1～2 Hz の結果 (図 12 右上) からは、この変化が約 1 週間ごとに発生していることが確認できることから、人間活動に伴うノイズ環境の変化を示している可能性がある。この影響は、図 13 に示す通り、1 週間単位で移動平均をとることにより軽減化されるが、例えば図 13 右下の 4～8 Hz で示されるように、高周波数帯域ではなお縞模様が残っており、その原因について今後の検討が必要である。

なお、2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震の影響についても検討を行ったが、本解析の対象とした観測点 (図 11) においては、顕著な特徴の変化を見出すことはできなかった。一例として、図 14 に N. TARH 観測点における 2011 年 1 月～2012 年 7 月までの自己相関関数 (2～4 Hz) の様子を示す。

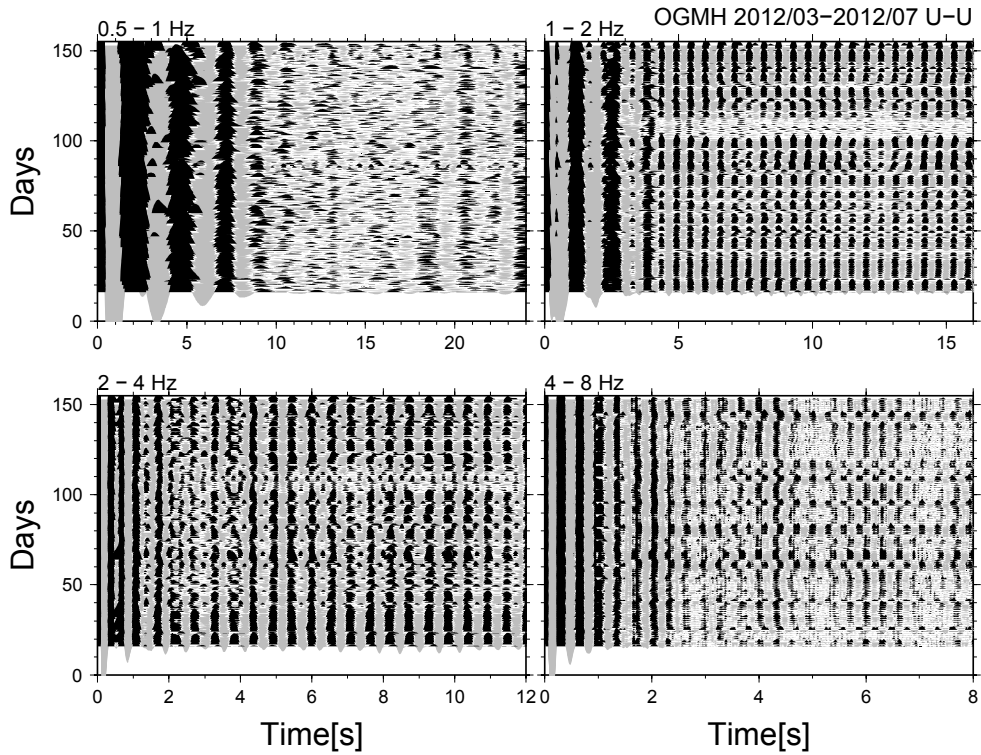


図 12 N. OGMH 観測点上下動成分の周波数帯域別、日別自己相関関数(2012年3月～7月)。1日ごとにスタックした結果を示す。縦軸は2012年3月1日からの経過日数を表す。

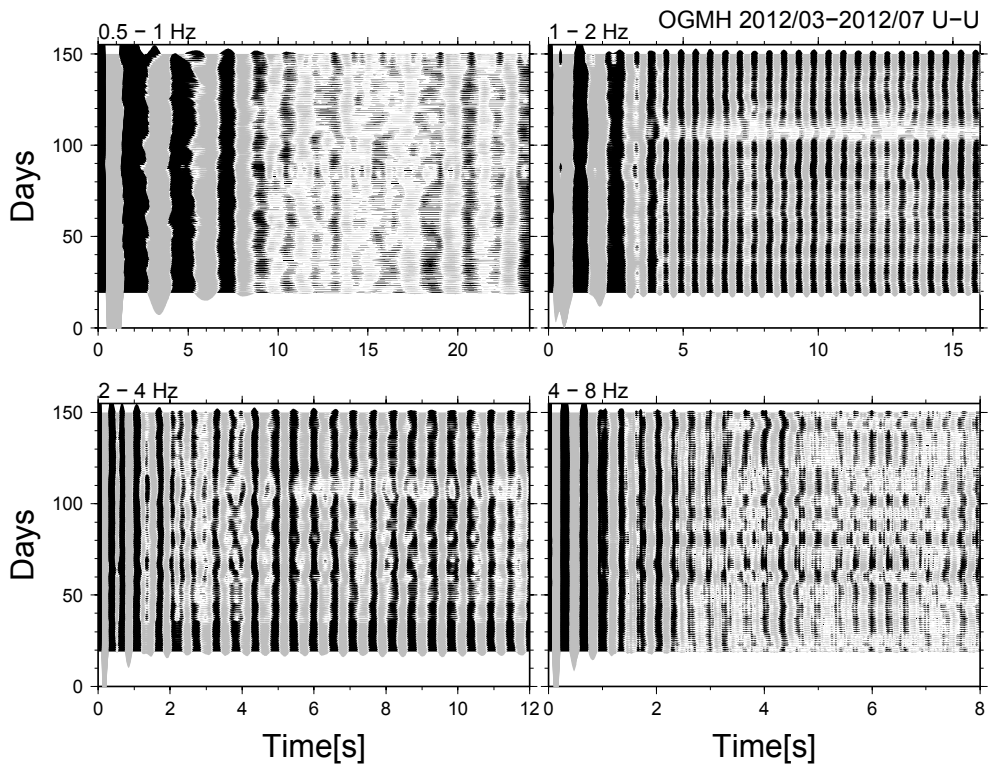


図 13 N. OGMH 観測点上下動成分の周波数帯域別自己相関関数(2012年3月～7月)。1週間ごとにスタックした結果を示す。縦軸は2012年3月1日からの経過日数を表す。

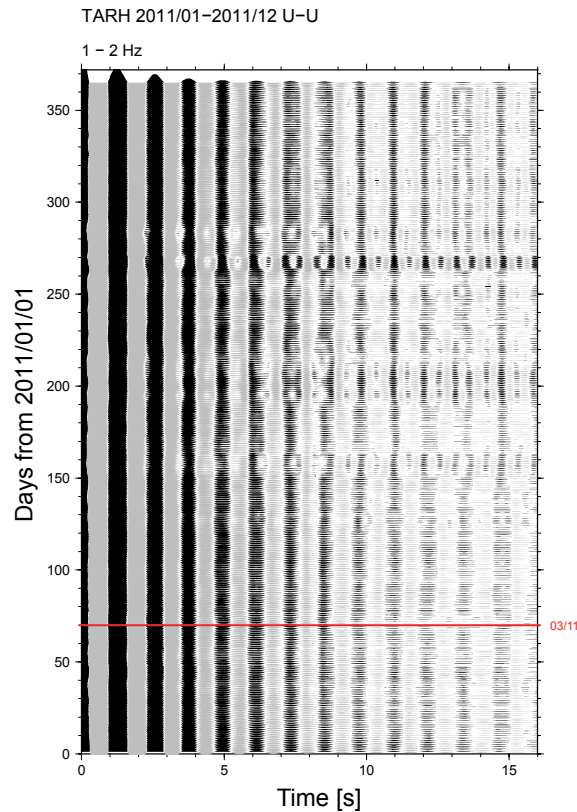


図 14 N. TARH 観測点上下動成分の自己相関関数（2011 年 1 月～2012 年 7 月）。1 週間ごとにスタックした結果を示す。縦軸は 2011 年 1 月 1 日からの経過日数を表す。赤線は、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生日を示す。

4) 変換波解析

a) 概要

地震計で観測される地震波や雑微動には、地中の地震波速度不連続面において、反射あるいは屈折して地震計に到達した信号が含まれる。そのような信号を抽出・解析することにより、地下の不連続面の位置や分布、不連続面の物性的特徴の把握が期待される。地震波干渉法により求められる相関関数から観測点下の地震波速度不連続面の位置や形状を求める研究も精力的に実施されているが（例えば、吉本・他、2010）、警固断層帯周辺においては、観測点密度が疎であるため、相関関数内に記録されている位相を反射波として解釈し、その位置や意味を解釈することは難しい。一方、地震による波形記録は雑微動よりも十分なエネルギーを有しており、弾性波が地震波速度不連続面を通過する際に反射・屈折した情報を抽出することが容易である。平成 24 年度は、N. OGMH 観測点およびその周辺の基盤的地震観測網観測点で収録された遠地地震記録からレーンバ関数を合成し、観測点下における地殻内の地震波速度不連続面の地域的特徴について定性的な検討を行った。

b) 解析方法および結果

地震波干渉法解析に用いた 9 観測点（図 11）を対象とした。2000 年 10 月～2012 年 11 月までに N. OGMH 観測点から距離 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ の範囲で発生したマグニチュード 5.5 以上の遠地地震の情報をアメリカ地質調査所（USGS）のカタログから抽出し、それらの地震による

各観測点の波形記録を切り出した。レシーバ関数の合成にあたっては、コーナー周波数 (f_c) が 1.0Hz、1.5Hz、2.0Hz の 3 種類の低域通過フィルタを適用し、Park and Levin (2000) の方法を採用した。N.0GMH 観測点における $f_c=1.5\text{Hz}$ および 2.0Hz の結果を図 15 に示す。図 15 の横軸は、直達 P 波到着からの経過時間、縦軸は地震波の到来方向を表す。Radial (動径方向) 成分の 0 秒の大きな正振幅の位相は直達 P 波に相当し、それに続く位相は、観測点下の地震波速度不連続面において S 波から P 波に変換した波に相当する。正の振幅 (青) は、地震波速度不連続面よりも深部が浅部よりも高速度、負の振幅 (赤) は低速度であることを意味する。また、等方媒質が成層構造をしている場合、Transverse 成分 (Radial 成分と直交する成分) はゼロとなるが、変換面が傾斜している場合や地下の媒質に異方性が含まれる場合、何らかの信号が現れる。

N.0GMH 観測点においては、短周期 ($f_c=2.0\text{Hz}$) においても安定したレシーバ関数が求められている。得られたレシーバ関数には、約 4 秒付近に顕著な正の振幅が認められる。この相は観測点下の深さ 30~35km 付近で励起したと考えられるので、モホ面に相当すると考えられる。また、この相は南南西方向で発生した地震時に若干早く到達する傾向が見えるので、小郡市周辺下のモホ面は、緩やかに北北東方向に傾斜している可能性が高い。また、経過時間 1 秒までにも、正の振幅が到来している。長周期のレシーバ関数では不明瞭であるが、短周期成分を見ることによって、観測点下の地表付近 (<10km) に西北西方向に傾斜すると思われる不連続面が存在すると判断できる。ただし、当該観測点は観測期間が 2012 年 3 月中旬から 8 か月程度に限られており、地震波到来方向に顕著な偏りが見られるため、今後のデータの追加が必要である。

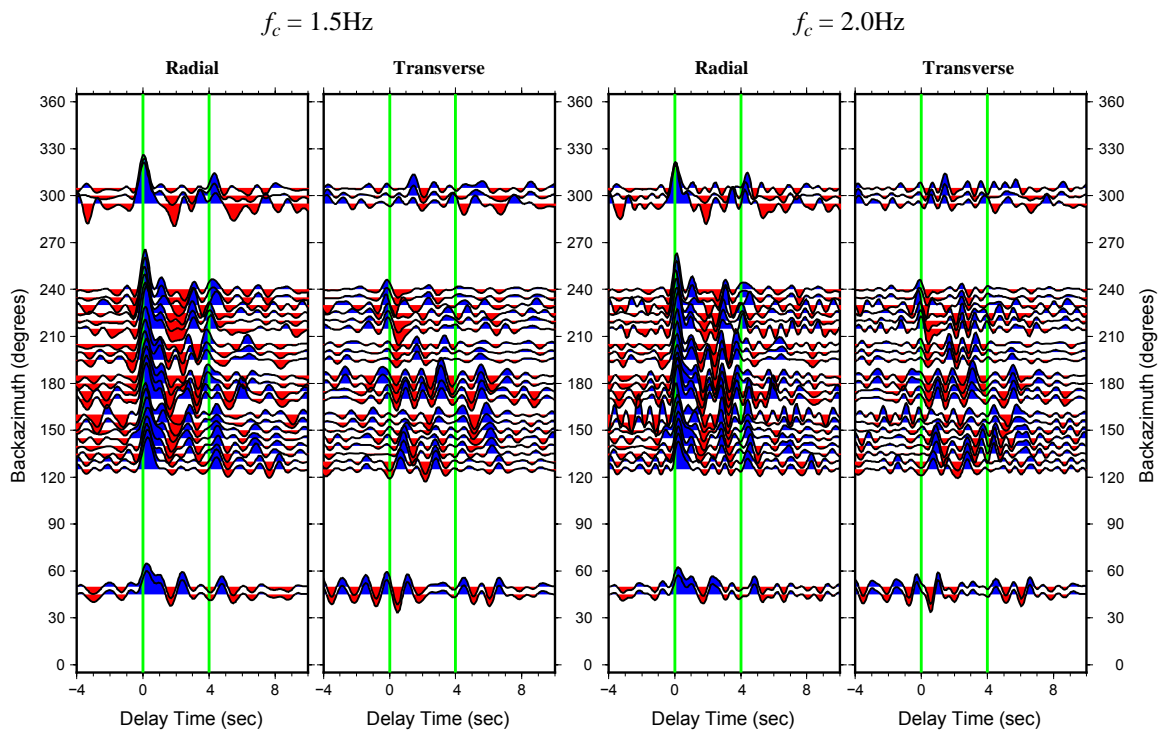


図 15 N.0GMH 観測点で得られたレシーバ関数。観測された遠地地震記録に対し、 $f_c=1.5\text{Hz}$ (左)、 2.0Hz (右) の低域通過フィルタを適用した。

図 16 に N.UMIH 観測点の結果 ($f_c=1.5\text{Hz}$) を示す。本観測点は、宇美断層帯（地震調査研究推進本部、2013）の近傍に位置している。N.0GMH 観測点同様、約 4 秒付近にモホ面起源と思われる明瞭な変換波位相が到達している。ただし、南南東方向（ $120^\circ \sim 180^\circ$ ）から到来する地震波に対して、位相はやや不明瞭になっている。同方位同時刻の transverse 成分レシーバ関数で顕著な振幅が観測されていることから、下部地殻に異方性媒質が存在する可能性が示唆される。また、1～4 秒の後続波位相が複雑であり、明瞭な変換波位相の地震波到来方向依存性を追跡することができない。これは、地殻内不連続面が非常に複雑であることを意味しており、宇美断層帯の構造と関係があるかもしれない。

図 17 には、断層帯東部の N.WKMh と西部の N.HSFH のレシーバ関数 ($f_c=1.5\text{Hz}$) を示す。西部の観測点ではほぼ平坦かつ明瞭なモホ面からの変換波位相が radial 成分レシーバ関数の約 4 秒付近に見られるが、東部の観測点では 4 秒付近の波の振幅が相対的に小さく、逆に transverse 成分レシーバ関数に顕著な位相が見えている。西部の観測点は脊振山系に位置し、東部の観測点は西山断層帯近傍に位置するが、これらの点の下部地殻の構造的特徴が大きく異なる可能性がある。

(c) 結論ならびに今後の課題

今年度は、小郡三沢高感度地震観測施設の運用を継続しつつ、地震観測施設が不足している警固断層帯(南東部)周辺に 10 か所の臨時機動地震観測点を設置し、観測を開始した。

昨年度整理した自然地震の走時データベースに、過去に九州大学が実施した海域における臨時機動観測の検測データを追加することにより、警固断層帯（北西部）の海域を含めた断層帯周辺のより詳細な広域三次元地震波速度構造を求めた。その結果、昨年度の解析

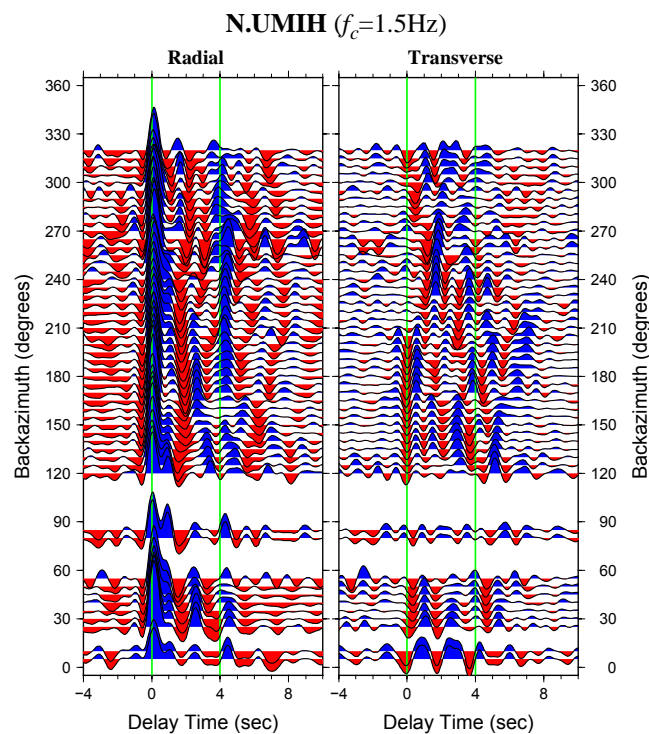


図 16 N.UMIH 観測点で得られたレシーバ関数。観測された遠地地震記録に対し、 $f_c=1.5\text{Hz}$ の低域通過フィルタを適用した。

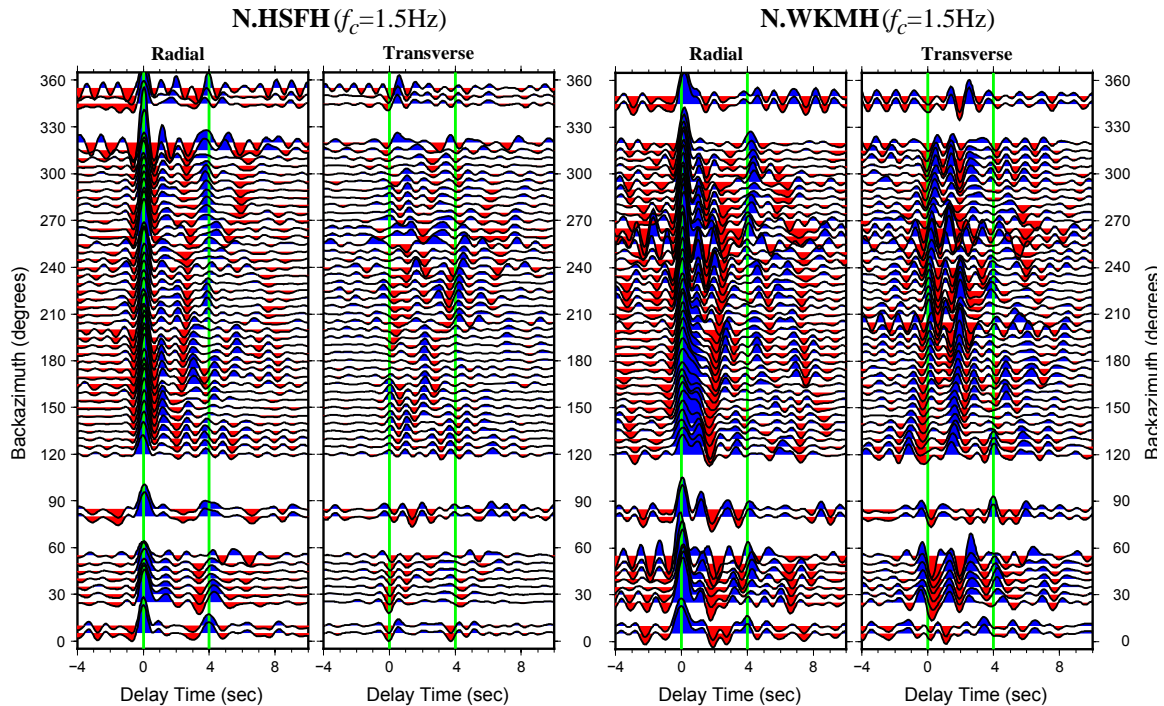


図 17 N.HSFH 観測点（左）および N.WKMH 観測点（右）で得られたレシーバ関数。観測された遠地地震記録に対し、 $f_c=1.5\text{Hz}$ の低域通過フィルタを適用した。

で得られた結果同様、警固断層帯（北西部）においては、2005 年福岡県西方沖の地震活動を境として速度構造に有意な違いが存在すること、断層帯南東部では中庸な速度構造が支配的であることが明らかになった。ただし、断層帯南東部については、平成 24 年度より、臨時機動観測を実施している。次年度は、これらの観測成果を取り込むことにより、速度構造の空間的変化について、より詳細な議論を行う必要がある。

定常観測点で得られる雑微動の相関解析により、断層帯周辺の応力状態や地下構造の時空間変化をモニタリングするためのシステム整備を継続して行うとともに、観測記録に含まれる地震波速度不連続面の検出とその特徴の把握を行った。本件に関しては、次年度以降も引き続き効率的・効果的な解析方法の構築を進める必要がある。さらに、本年度は、定常観測点で記録された遠地地震波形を用いて、各観測点周辺における地殻内不連続面の特徴について定性的な検討を行った。その結果、断層帯近傍の観測点では、地殻内に 1 つないし複数の不連続面が存在すること、モホ面は深さ 30~35km に位置するが、断層帯東部では不明瞭であるのに対し、西部の脊振山地では非常に明瞭であることが明らかになった。このような特徴は下部地殻の異方性が関与している可能性がある。警固断層帯およびその周辺の断層群における応力の状態を把握するためには、異方性の空間的変化等についても詳細な解析が必要と考えられる。

(d) 引用文献

Hori, M., S. Matsumoto, K. Uehira, T. Okada, T. Yamada, Y. Iio, M. Shinohara, H. Miyamachi, H. Takahashi, K. Nakahigashi, A. Watanabe, T. Matsushima, N. Matsuwo, T. Kanazawa, and H. Shimizu: Three-dimensional seismic velocity structure as

- determined by double difference tomography in and around the focal area of the 2005 west off Fukuoka Prefecture earthquake, *Earth Planets Space*, 58, 1621-1626, 2006.
- 地震調査研究推進本部：九州地域の活断層の長期評価（第一版），
<http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13feb_chi_kyushu/k_honbun.pdf>，（参照 2013-02-26），2013.
- Matsubara, M., H. Hayashi, K. Obara and K. Kasahara: Low-velocity oceanic crust at the top of the Philippine Sea and Pacific plates beneath the Kanto region, central Japan, imaged by seismic tomography, *J. Geophys. Res.*, 112, B12304, doi:10.1029/2005JB003673, 2005.
- Matsubara, M., K. Obara and K. Kasahara: Three-dimensional P- and S-wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, *Tectonophysics*, 454, 86-103, 2008.
- 文部科学省研究開発局・国立大学法人九州大学：警固断層帯（南東部）における重点的な調査観測 平成 23 年度成果報告書，170p，2012.
- 中田 高・今泉俊文編：活断層詳細デジタルマップ，東京大学出版会，68p，2002.
- Okada, Y., K. Kasahara, S. Hori, K. Obara, S. Sekiguchi, H. Fujiwara, and A. Yamamoto: Recent progress of seismic observation networks in Japan -Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net-, *Earth, Planets and Space*, 56, xv - xviii, 2004.
- Park, J., and V. Levin: Receiver functions from multiple-taper spectral correlation estimates, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 1507-1520, 2000.
- Uehira, K., T. Yamada, M. Shinohara, K. Nakahigashi, H. Miyamachi, Y. Iio, T. Okada, H. Takahashi, N. Matsuwo, K. Uchida, T. Kanazawa, and H. Shimizu, Precise aftershock distribution of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture Earthquake (Mj=7.0) using a dense onshore and offshore seismic network, *Earth Planets Space*, 58, this issue, 1605-1610, 2006.
- Wegler, U., H. Nakahara, C. Sens-Schonfelder, M. Korn, and K. Shiomi: Sudden drop of seismic velocity after the 2004 Mw 6.6 mid-Niigata earthquake, Japan, observed with Passive Image Interferometry, *J. Geophys. Res.*, 114, B06305, doi:10.1029/2008JB005869, 2009.
- 吉本和生・平田 直・笠原敬司・小原一成・佐藤比呂志・酒井慎一・鶴岡 弘・中川茂樹・木村尚紀・棚田俊收・明田川保・中原 恒・木下繁夫：地震波干渉法による東京湾北岸部の地震基盤構造の推定，日本地震学会 2010 年秋季大会，D22-06，2010.
- Zhao, D., A. Hasegawa, S. Horiuchi: Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath Northeastern Japan. *J. Geophys. Res.* 97, 19909-19928, 1992.