

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

(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

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人九州大学理学研究院	教授	清水 洋
国立大学法人九州大学理学研究院	准教授	松本 聡
国立大学法人九州大学理学研究院	准教授	松島 健
国立大学法人九州大学理学研究院	助教	相澤 広記
国立大学法人九州大学理学研究院	技術補佐員	石本 美鈴
国立大学法人九州大学理学研究院	技術補佐員	小鉢 由利子
国立大学法人京都大学理学研究科	教授	竹村 恵二
国立大学法人京都大学理学研究科	教授	福田 洋一
国立大学法人九州大学工学研究院	教授	渡邊 公一郎
国立大学法人九州大学工学研究院	教授	藤光 康宏
国立大学法人九州大学工学研究院	准教授	西島 潤
国立大学法人京都大学理学研究科	教授	大倉 敬宏
国立大学法人東京大学地震研究所	助教	石山 達也
国立大学法人京都大学理学研究科	教授	鍵山 恒臣
国立大学法人京都大学理学研究科	教授	大沢 信二
国立大学法人京都大学理学研究科	准教授	柴田 智郎
国立大学法人京都大学理学研究科	助教	宇津木 充
国立大学法人京都大学理学研究科	助教	佐藤 活志
公立大学法人大阪府立大学学術研究院第2学群	教授	伊藤 康人
国立大学法人富山大学大学院理工学研究部	准教授	楠本 成寿

(c) 業務の目的

別府－万年山断層帯（大分平野－由布院断層帯東部）の震源断層形状と周辺の地殻構造を解明することを業務の目的とする。

(d) 3ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成26年度：

本サブテーマは（2－1）深部構造調査（自然地震・MT比抵抗探査）、（2－2）浅部構造調査（反射法、重力、地震、GPS、ボーリングDB）、（2－3）水理構造調査（地下水調査及び比抵抗構造探査）、（2－4）応力変遷解析（地質解析、断層構造シミュレーションおよび小断層解析）の4つの調査観測を実施した。また、各研究に関する情報交換と議

論を行うために関係者間の打ち合わせ、サブテーマ会議を行った。

(2-1) 深部構造調査 (自然地震・MT 比抵抗探査)

国立大学法人九州大学大学院理学研究院は、サブ(2-1)を担当し、別府一万年山断層帯下の地震発生層(深さ 20km 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、自然地震データおよび断層帯地下深部情報の収集・解析を進めた。また、断層帯およびその周辺に臨時地震観測を設置するための調査を行い、整備した速度型地震計を用いて観測を開始した。また MT 法による比抵抗構造探査のための予備調査を実施した。さらに、広域の地震観測網も同時に用いることで地殻活動状況の把握を行った。

(2-2) 浅部構造 (反射法、重力、地震、GPS、ボーリング DB)

国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、既存の地球物理学的資料(反射法地震探査、重力調査など)の収集・整理を進めるとともに、既存データの再解析やデジタル化を実施した。また、断層帯周辺の地震活動や地殻変動の解析高度化のために、GPS および地震観測地点を増強する準備を整えた。さらに、断層帯構造の解明のための稠密重力調査を実施した。あわせて、盆地浅部における地盤構造の高度化に必要な地盤モデル構築に向けてボーリングデータベースを作成するため、既存ボーリングの情報収集整理を実施した。

(2-3) 水理構造調査 (地下水調査及び比抵抗構造探査)

国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、別府・由布院・大分平野等に存在する温泉掘削の情報を整理するとともに、水位観測や水質分析を追加して水理的解析を行った。また浅層の比抵抗探査を実施して、浅層地下構造との関連を明らかにする調査を開始した。

(2-4) 応力変遷解析 (地質解析、断層構造シミュレーションおよび小断層解析)

国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、野外携行データ記録システム等を活用した小断層解析による応力変化史の解析、および地質調査に基づく断層帯形成のプロセスの解明を進めるとともに、地殻内応力シミュレーション装置を用いた、三次元断層構造形成の解析を開始した。関連して、大分平野における砂脈の形成時の応力等の推定を実施した。

2) 平成 27 年度 :

本サブテーマは(2-1) 深部構造調査(自然地震・MT 比抵抗探査)、(2-2) 浅部構造調査(反射法、重力、地震、GPS、ボーリング DB)、(2-3) 水理構造調査(地下水調査及び比抵抗構造探査)、(2-4) 応力変遷解析(地質解析、断層構造シミュレーションおよび小断層解析)の 4 つの調査観測を実施した。また、各研究に関する情報交換と議論を行うために関係者間の打ち合わせ、サブテーマ会議を行った。

(2-1) 深部構造調査 (自然地震・MT 比抵抗探査)

国立大学法人九州大学大学院理学研究院は、別府一万年山断層帯下の地震発生層(深さ 20km 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、自然地震資料および断層帯地下深部情報の収集・解析を進めるとともに、断層帯およびその周辺に臨時地震観測点を設置するための調査、および臨時地震観測を継続実施した。また MT 法による比抵抗構造探査を実施した。探査では由布院断層を横切る測線に加え、周辺でも観測を行い、3 次元比抵抗構造を推定した。

(2-2) 浅部構造調査 (反射法、重力、地震、GPS、ボーリング DB)

国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、既存の地球物理学的資料（反射法地震探査、重力調査など）の収集・整理を進めるとともに、平成 26 年度実施の既存データの再解析やデジタル化を参照して、大分平野で東西方向の反射法地震探査を実施した。また、断層帯周辺の地震活動や地殻変動の解析高度化のために増強した、GPS および地震観測地点を合わせて、解析システムや収録システムを活用し解析を進めた。さらに、断層帯構造の解明のための稠密重力調査を継続実施した。あわせて、盆地浅部における地盤構造の高度化に必要な地盤モデル構築に向けてボーリングデータベースを作成するため、既存ボーリングの情報収集整理を継続実施した。

（2-3）水理構造調査（地下水調査及び比抵抗構造探査）

国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、別府・由布院・大分平野等に存在する温泉掘削の情報の整理を継続するとともに、水位観測や水質分析を追加して水理学的解析を継続実施した。さらに、フラックスメーターを活用して、平野域での分布調査を開始した。また浅層の比抵抗探査を実施して、浅層地下構造との関連を明らかにする調査を継続実施した。

（2-4）応力変遷解析（地質解析、断層構造シミュレーションおよび小断層解析）

国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、野外探査システム等を活用した小断層解析による応力変化史の解析および地質調査に基づく断層帯形成のプロセスの解明を進めるとともに、地殻内応力シミュレーション装置を用いた、三次元断層帯形成の解析を継続実施した。

3) 平成 28 年度：

平成 26 年度・27 年度も観測調査結果に加え、各サブテーマ（2-1、2-2、2-3、2-4）ごとに課題調査の追加観測を実施し、解析とまとめを進めた。特に震源断層モデルの構築のために各観測調査の精査を実施し、震源断層モデルの構築を行った。また、各解析データのデータアーカイブの作成を実施した。成果として別府一万年山断層帯（大分平野-由布院断層帯東部）の構造評価、震源断層形状モデルの提案、地殻構造モデルの提案を実施した。

（2-1）深部構造調査（自然地震・MT比抵抗探査）

平成 27 年度までの調査観測結果を踏まえて補完観測を実施すると共に、これまでの成果に基づき、別府一万年山断層帯（大分平野-由布院断層帯東部）の地殻構造と力学的背景についてまとめ、震源断層の断層パラメータ推定のための地震学的・地球電磁気学的情報の高精度化をはかった。

（2-2）浅部構造調査（反射法、重力、地震、GPS、ボーリング DB）

平成 26 年度・27 年度の観測調査結果に加え、サブテーマ 2-2 の課題調査の追加観測を実施し、解析とまとめを進めた。特に震源断層モデルの構築のために各観測調査の精査を実施し、震源断層モデルの構築を行った。また、各解析データのデータアーカイブの作成を実施した。成果として別府一万年山断層帯（大分平野-由布院断層帯東部）の構造評価、震源断層形状モデルの提案、地殻構造モデルの提案を進めた。

（2-3）水理構造調査（地下水調査及び比抵抗構造探査）

国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、別府・由布院・大分平野等に存在する温泉掘削の情報の整理を継続するとともに、水位観測や水質分析を追加して水理的解析を継続した。さらに、27年度購入のフラックスメーターを活用して、平野域での分布調査を進めた。また浅層の比抵抗探査を実施して、浅層地下構造との関連を明らかにする調査を継続した。

(2-4) 応力変遷解析(地質解析、断層構造シミュレーションおよび小断層解析)

国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、野外探査システム等を活用した小断層解析による応力変化史の解析および地質調査と年代測定および火山灰分析に基づく断層帯形成のプロセスの解明を進めるとともに、地殻内応力シミュレーション装置を用いた、三次元断層構造形成の解析を継続した。

以下、サブテーマ(2-1、2-2、2-3、2-4)ごとに業務の成果をまとめる。

3. 2 - 1 深部構造（自然地震・MT 比抵抗探査）

(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

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
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	松本 聡
国立大学法人九州大学	准教授	松島 健
国立大学法人九州大学	助教	相澤 広記

(c) 業務の目的

別府-万年山断層帯これまでの人工地震探査および重力探査結果に加えて、自然地震・MT比抵抗探査等による震源断層の推定、深部構造把握を目指す。

(d) 3 ヶ年の年次実施業務の要約

1) 平成 26 年度：

自然地震観測においては臨時地震観測点を展開し、この地域の構造及び力学的な背景を求めるためのデータ蓄積を開始した。また、比抵抗構造推定については本調査の前に人工ノイズの影響を評価するため予備調査を実施した。

2) 平成 27 年度：

自然地震によって震源断層域における地殻構造不均質の抽出と非弾性変形の検出を行った。また、約 60 観測点での電磁気探査により 3 次元比抵抗構造を推定した。

3) 平成 28 年度：

平成 27 年度までの調査観測結果を踏まえて補完観測を実施すると共に、これまでの成果に基づき、別府-万年山断層帯（大分平野-由布院断層帯東部）の地殻構造と力学的背景についてまとめ、震源断層の断層パラメータ推定のための地震学的・地球電磁気学的情報の高精度化をはかった。

(2) 平成 26～28 年度の成果

(a) 業務の要約

自然地震によるこの地域の調査においては、過去 20 年余の震源データを再解析し、地震発生層、応力場、非弾性ひずみの分布を明らかにした。別府-万年山断層帯では地震発生層深度が九州内陸の他地域に比べて浅く、脆性領域が薄いことが示された。これは GPS によるせん断ひずみの空間分布のうち、せん断ひずみの大きい領域と対応していることが明らかになった。また、地震活動から推定される応力場は、地形学的・地質学的に推定される活断層形成の応力場と整合的であり、正断層パターンが卓越している。非弾性ひずみは別府-万年山地域で $10^{-7}/\text{yr}$ のレートを示す。また、変形は活断層と

同様な方向で進んでいる。また、本研究で実施した地震観測データを中心に用い、断層帯下の不均質構造を推定した結果、断層帯南部や火山体近傍に強い散乱を示す不均質構造が存在することが明らかになった。

比抵抗構造に関しては、新たに100箇所で広帯域MT調査を行った。その結果、深さ2 kmまでの浅部において別府～大分市から九重山にかけて、低重力―低比抵抗な媒質で満たされた陥没構造の存在が明らかになった。深さ3 kmより深部では、地表断層の東西走行に対応する比抵抗構造は見られず、むしろ北東―南西走行の比抵抗構造が卓越していることが示唆された。3次元解析からは、(1) 鶴見岳、由布岳、伽藍岳に囲まれる部分に向かって深部から上昇する低比抵抗領域、(2) 大分市南部の低比抵抗領域がイメージされた。(1)、(2)とも北東―南西方向に伸びる形状をしており、現在の地震活動はその周辺で発生している。また、朝見川断層は、(2)の低比抵抗域の北縁に位置することが明らかになった。

(b) 業務の成果

自然地震による調査については、別府-万年山断層帯において臨時地震観測を実施して当該地域の地震データを収録するとともに、九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター（以後、地震火山センターと略記）によって蓄積されている地震データのうち、1993年から2013年7月までの震源および読み取り値を使って、九州内陸の浅発地震（30km以浅）の震源再決定を行った。再決定にはSaiga et al. (2010)およびHori et al. (2006)の3次元速度構造モデルを用いた。Matsumoto et al. (2016)はこれらの再決定震源40981個について、地震発生層下限・上限を示すパラメータであるD95、D5の深度を緯度・経度0.15度毎のグリッド毎に求めた。得られたD95、D5の分布を図3.2.1-1に示す。この図においては、地震発生層の深度が空間的に連続的に変化すると仮定してグリッドを補間し、地震活動のない領域でも表示している。そのため、図中の震源を示す●が分布していない領域では深度分布を正確に評価できず、深度の信頼度が低いことに留意が必要である。別府-万年山断層帯においては、D95が7-10kmとなっており、他地域に比べて地震発生層下限が浅くなっていることが明らかになった。また、発生層上限(D5)も同様に浅くなっている。これらは高いひずみ速度や低速度・低比抵抗構造から示唆されるように強度が低いために上限が浅くなっていることが原因と考えられる。

一方、九州内陸の地殻応力場については、Matsumoto et al. (2015)によってなされており、それらによると図3.2.1-2に示す通り、別府-万年山断層帯においてはほぼ南北伸長が卓越する正断層応力場が得られており、この地域に発達した活断層が形成されている応力場とほぼ一致しているが明らかになった。地震火山センターによって蓄積されている、2000年から2016年3月までの震源およびメカニズム解、防災科学技術研究所によるF-netモーメントテンソル解を用いて、九州における地震発生層の非弾性ひずみ検出を行った。九州全体を緯度経度0.15°ごとのグリッドで区切り、それぞれでの非弾性ひずみを計算した。解析期間13.6年でのひずみレートは大きいもので 10^{-7} /yrに達することが明らかになった。これはGNSSによって推定されているひずみ速度と同じオーダーになり、地震による変形も無視できないことを示した。別府-万年山地域

においてはこのひずみレートの大きい地域に対応する（図 3.2.1-3、Matsumoto et al., 2016 による）。また、得られた非弾性ひずみの方向は活断層のタイプと相関がある。このように、別府-万年山断層帯における地殻変形は活断層のほか、地震による変形が重要であることが示され、地殻ダイナミクスのモデル化には考慮しなければならないことが示唆された。

断層帯の深部構造に関しては、本研究において展開された臨時地震観測点および周辺の定常地震観測点で捉えられた自然地震のデータを用いて、別府-万年山断層帯直下の不均質構造を推定した。自然地震のS波到達時以降に見られる顕著な振幅の波群を走時と震源・観測点の位置から空間へ投影することで、散乱の強い部分を推定した（図 3.2.1-4）。得られた結果によると、断層帯そのものではなく、断層帯南部の下部地殻に強い不均質構造が分布することが示された。また、九重や阿蘇火山の直下には散乱の強い部分がイメージされた。そのほか、下部地殻や上部マントルにおいては強い散乱体がいくつも見られた。火山に関連した散乱体は地震波低速度域に対応するものもあり、マグマ供給系に関連している可能性がある。

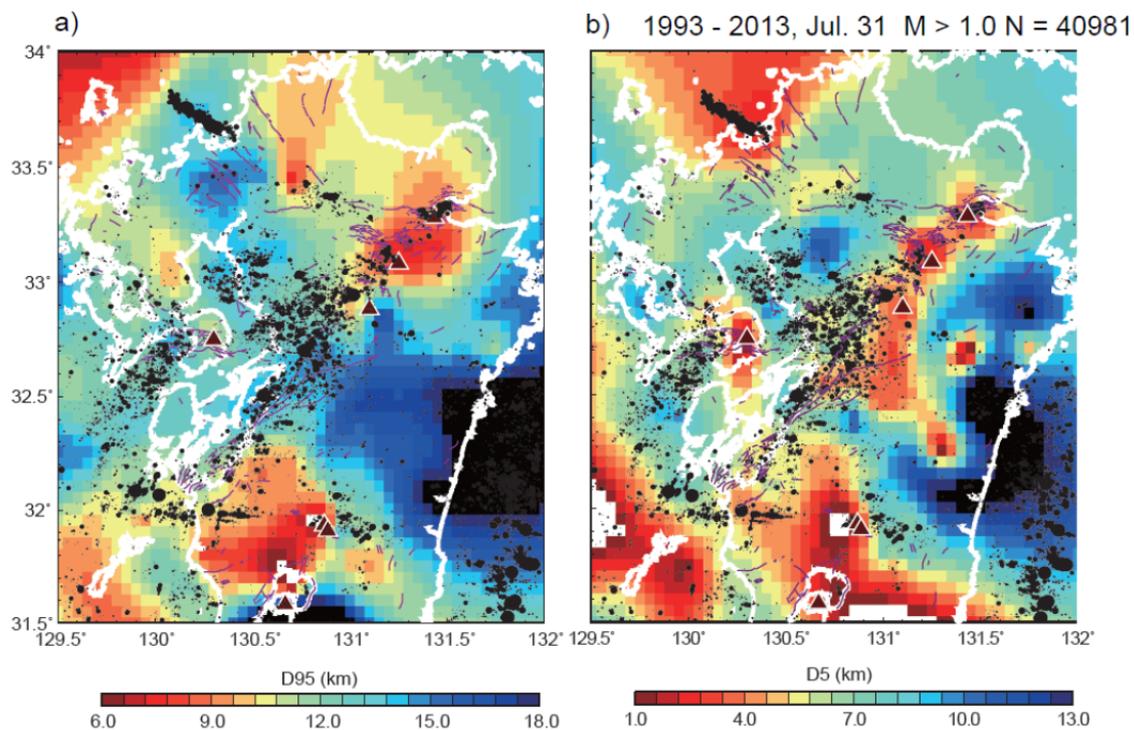


図 3.2.1-1. 地震発生層の下限 (D95: 左図)・上限 (D5: 右図) の分布 (Matsumoto et al., 2016 による)。

別府-万年山断層帯とその周辺地域では下限、上限とも深度が浅くなっている。

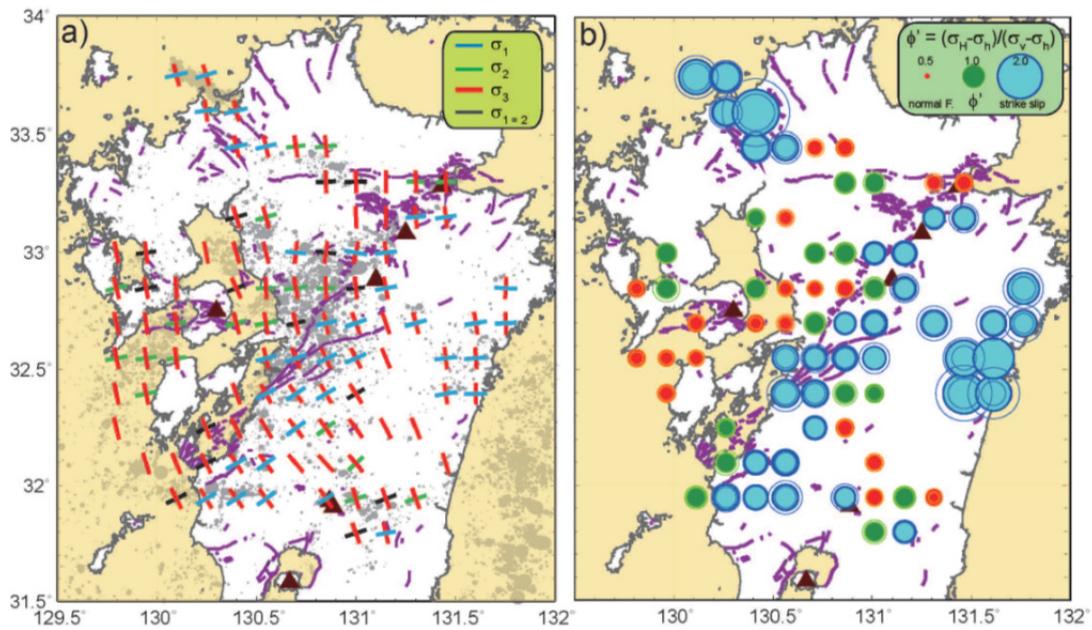


図 3.2.1-2. 微小地震から求めた地殻応力の主応力方位 (左) と応力比 (右) (Matsumoto et al. (2015))。別府万年山地域においては南北張力が卓越し、正断層的応力を示す。

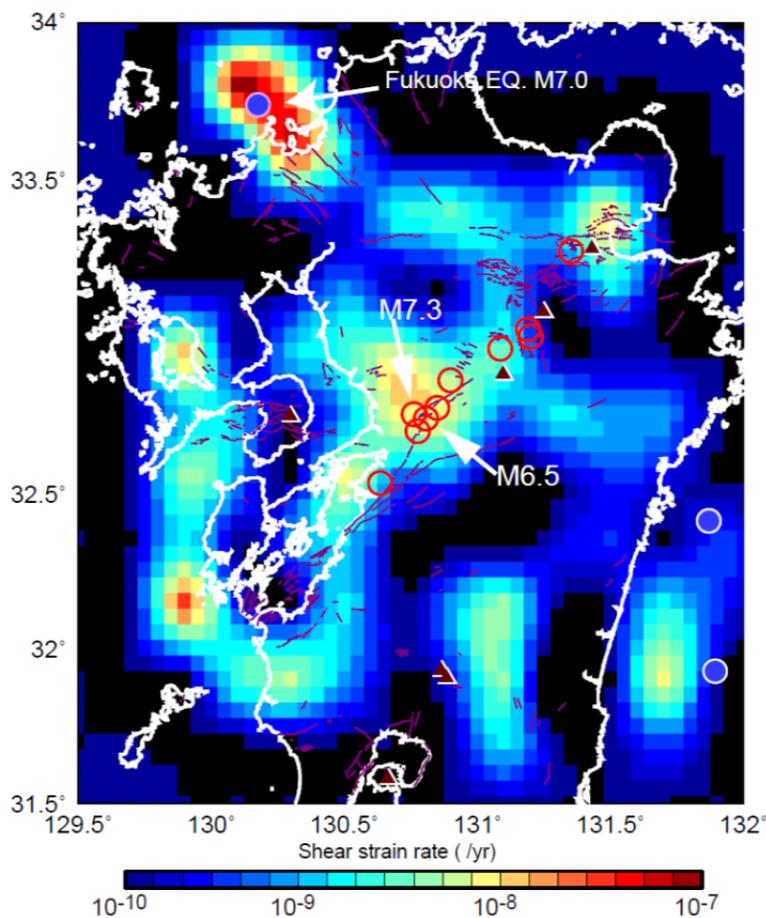


図 3.2.1-3 非弾性最大せん断ひずみ率の空間分布(Matsumoto et al., 2016 による)。赤丸は 2016 年 4 月以降に発生した M5.5 以上の地震の震央。

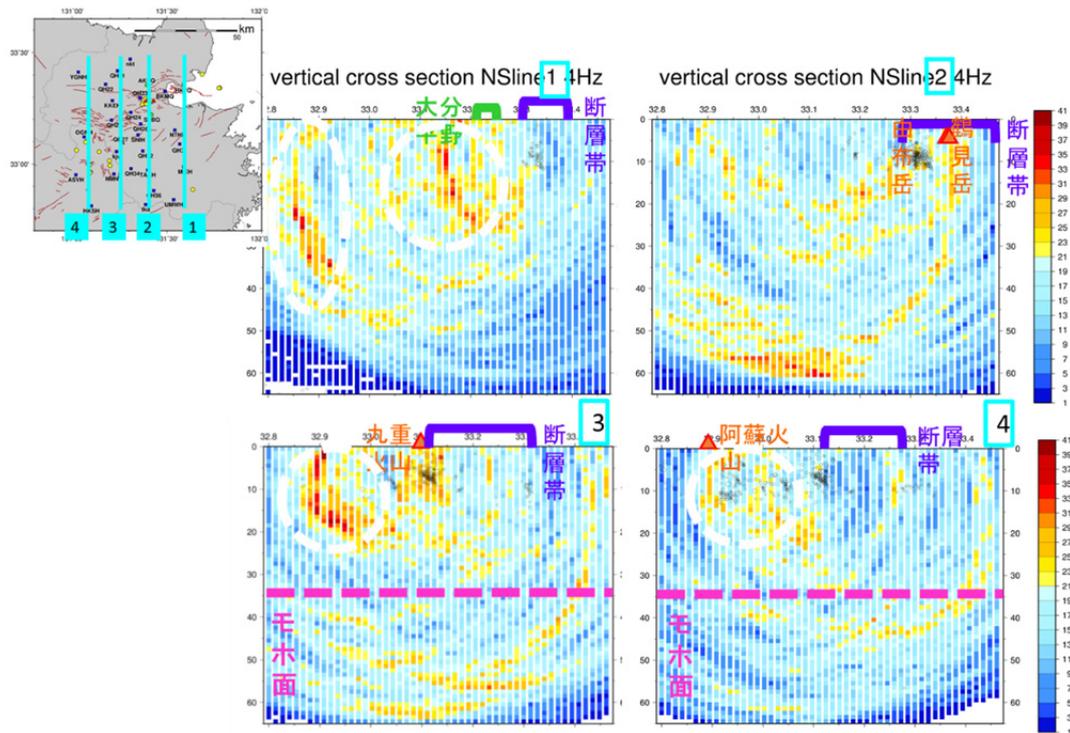


図 3.2.1-4. 得られた散乱体分布の南北鉛直断面図。

暖色系になるほど散乱強度が相対的に高い場所を示す。左上の挿入図に断面をとった位置を示す。

別府-万年山断層帯における比抵抗構造に関しては、広帯域 MT 観測を 2015 年 8 月から 10 月にかけて 73 点、2016 年 8 月から 9 月にかけて 27 点で行った。このうち 71 点は電場のみの観測とした (図 3.2.1-5)。32Hz サンプリングで連続データを、1024Hz サンプリングで深夜 1 時間のみの時系列データの取得を行い、周期 0.005~3000 秒の周波数応答関数を推定した。なお電場のみの観測点では近隣の磁場データを応答関数算出に使用した。1 観測点あたり約 2 週間の測定を行ったこと、観測期間中、地磁気活動が活発であったことにより、ほぼ全ての観測点、全ての周期帯で精度のよい応答関数を得られた。比抵抗構造の大局的な特徴を phase tensor (Caldwell, 2004) および平均的な見掛け比抵抗によって考察したところ、周期 1 秒より短周期は 1 次元、周期 10 秒より長周期では大局的な走行方向は、北東-南西方向であることが示唆された。さらに Phase tensor の形状、平均的な見掛け比抵抗とも、由布岳と伽藍岳を北東-南西方向に結ぶライン周辺で顕著に変化しており、このラインが比抵抗の構造境界になっている可能性が示唆された (図 3.2.1-6)。

周期 1 秒より短周期のデータに対応する浅部構造を、1 次元解析 (詳細は Aizawa et al., 2017 参照) により推定した結果、別府市-大分市から九重山にかけて低比抵抗-低重力な領域の存在が明らかになった (図 3.2.1-7)。この領域は四国から続く中央構造線の西部延長である大分-熊本構造線の活動によって形成されたハーフグラベン (1Ma 以前)、プリアパートベースン (1Ma 以降) と考えられており (e.g., 楠本・他, 1997; Itoh et al., 1998)、陥没構造を低比抵抗、低密度の媒質が満たしている領域と解釈できる。推定された比抵抗

構造を用いて、比抵抗値が $12.5 \Omega \text{ m}$ 以上の高比抵抗領域となる深度を基盤と仮定して基盤深度を推定した(図 3.2.1-8)。概ね 1 km 前後の基盤深度が推定されたが、九重山周辺、大分市周辺、由布岳一鶴見岳南部など一部の地域で 2 km より深い基盤深度が推定された。九重山周辺で基盤深度が深くなることはボーリング調査(笹田, 1987)によって求められた地質基盤と調和的である。基盤を覆う低比抵抗一低密度の媒質は地震動を増幅する効果があると考えられるが、本地域ではこれが特に厚くなっており、浅部構造を組み込んだ地震波シミュレーションが必要である。

広帯域 MT 観測で得られた周波数応答関数を用い、3次元比抵抗構造を推定した。91 点のデータを用い、陸上地形と海底地形を差分法による 3次元比抵抗インバージョンコード(Siripunvaraporn and Egbert, 2009)に組み込み、海水を $0.3 \Omega \text{ m}$ 、空気部分 $10^8 \Omega \text{ m}$ 、それ以外の部分を $100 \Omega \text{ m}$ とした初期モデルを用い計算を行った。入力として使用したパラメータはインピーダンステンソル 4 成分、地磁気変換関数 2 成分であり、インピーダンスに 10%の誤差、地磁気変換関数に 20%の誤差を与え 7 回の iteration を繰り返した結果、初期構造では 12.6 だった RMS は 3.1 に低下した。得られた比抵抗構造(図 3.2.1-9)は深さ 3 km 以深で北東一南西走向の構造が卓越し、地表断層の東西走向とは対応していない。顕著な特徴としては、活火山周辺では低比抵抗体が深部から浅部へ上昇している様子が得られ、その周辺で地震活動が活発である(図 3.2.1-10)。また大分市南部では深さ 7 km を中心として低比抵抗体がイメージングされ、朝見川断層はこの低比抵抗体の北縁に位置している。これまでの数多く行われてきた内陸地震発生帯の比抵抗構造研究により M6 を超える規模の地震は巨視的に見て低比抵抗体の周縁部で発生することが示されてきた (e. g, Yoshimura et al., 2007; Ichihara et al., 2014; Aizawa et al., 2017)。この経験則が本地域でも成立すると仮定すると、想定起震断層である朝見川断層は本地域の陸域に見られる断層の中では規模の大きな地震が起こりやすいと考えられる。また、由布院盆地周辺の地震活動域、別府市周辺の地震活動域の間には低比抵抗領域が存在するため(図 3.2.1-9~3.2.1-10)、由布院から別府にかけて一気に破壊される規模の地震は発生可能性が比較的低いと考えられる。

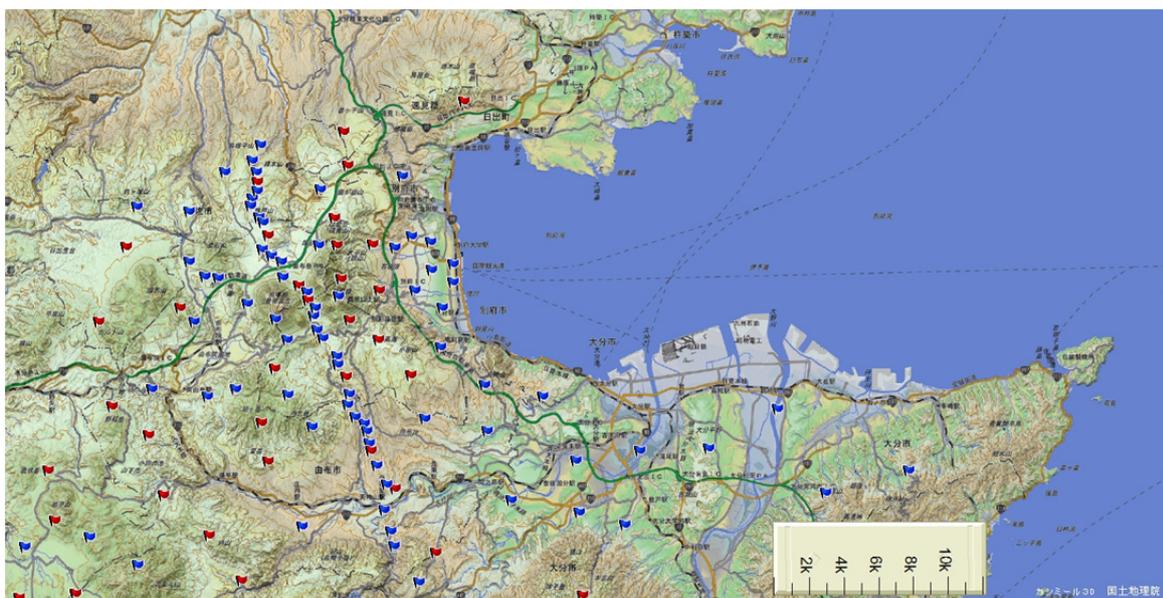


図 3.2.1-5. 広帯域 MT 観測点図。赤は電磁場 5 成分観測点、青は電場 2 成分観測点。

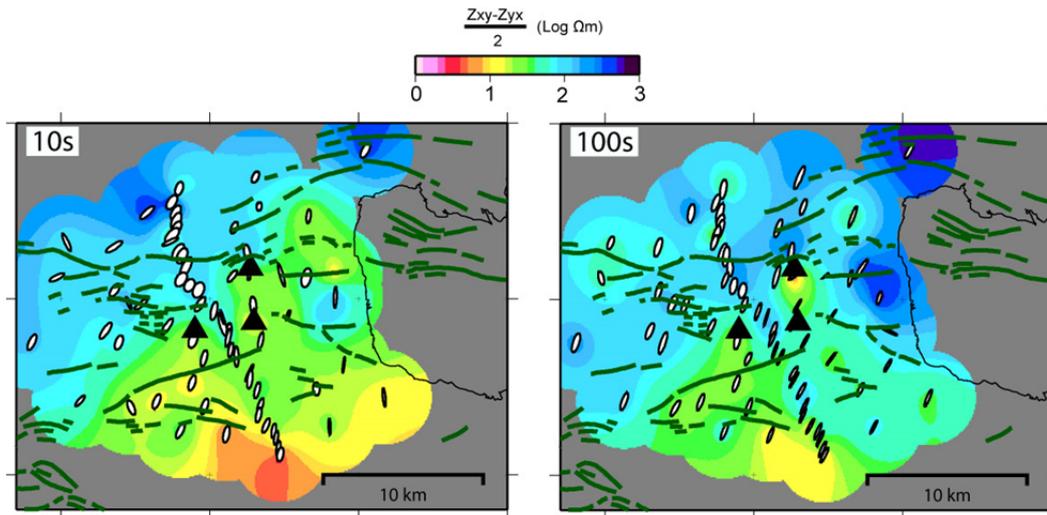


図 3.2.1-6. 周期 10 秒および 100 秒の Phase tensor (楕円) と平均的な見掛け比抵抗 ($(Z_{xy}-Z_{yx})/2$ から計算)。Phase tensor の長軸は概ね北東-南西方向であり大局的な比抵抗構造の走行が北東-南西方向であることを示唆している。

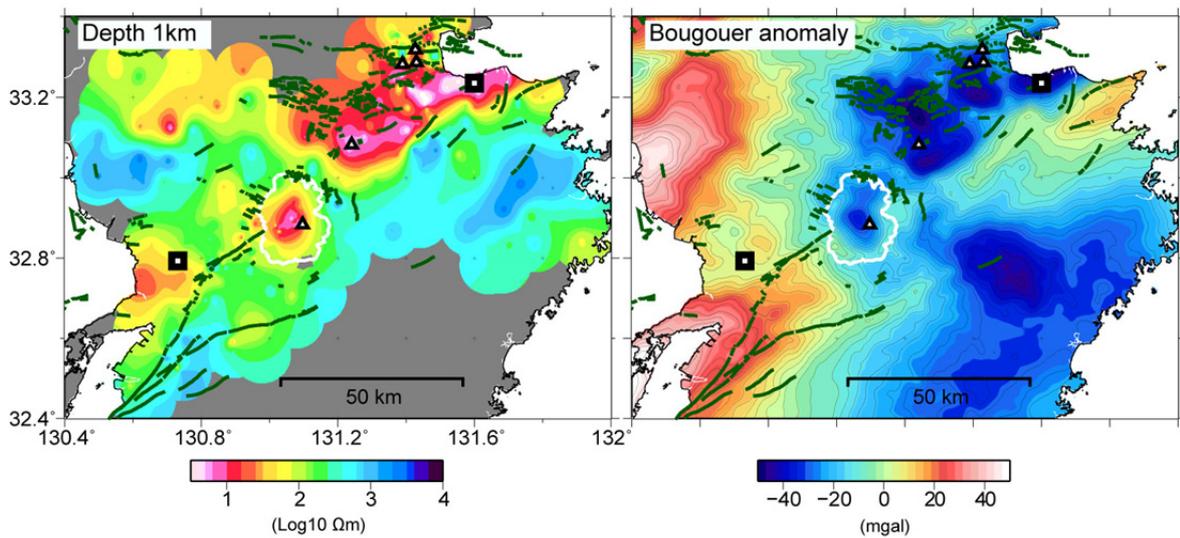


図 3.2.1-7. 深さ 1 km の比抵抗構造(左図)と仮定密度 2.63g/cm^3 を用いたブーゲー重力異常(右図)。

Aizawa et al., 2017 による広帯域 MT データに、およそ 100 点の未公表データを追加し作図した。別府-大分市から九重山にかけて低比抵抗、低重力な領域が存在している。

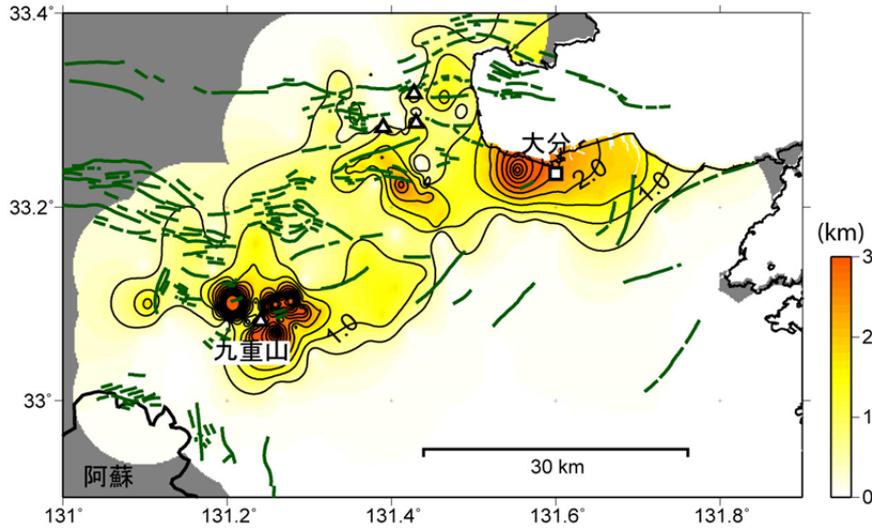


図 3.2.1-8. 比抵抗構造から推定した基盤深度。
比抵抗値が $12.5 \Omega \text{m}$ 以上の高比抵抗領域となる深度を基盤と仮定した。

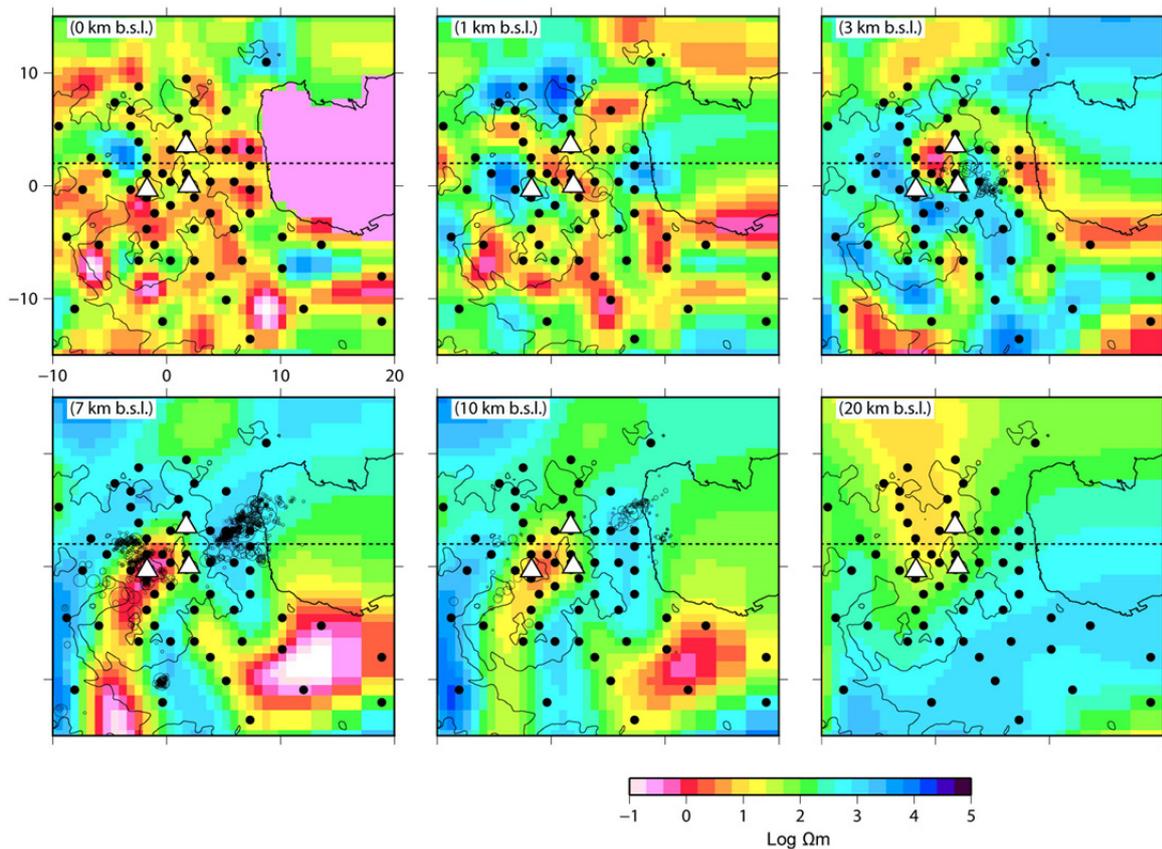


図 3.2.1-9. 3次元インバージョンにより推定された比抵抗構造。
海水準からの深さ断面をそれぞれ示す (b. s. l.: below sea level)。電場データと磁場データが離れた場所で取得されている効果は計算に組みこんでいない。

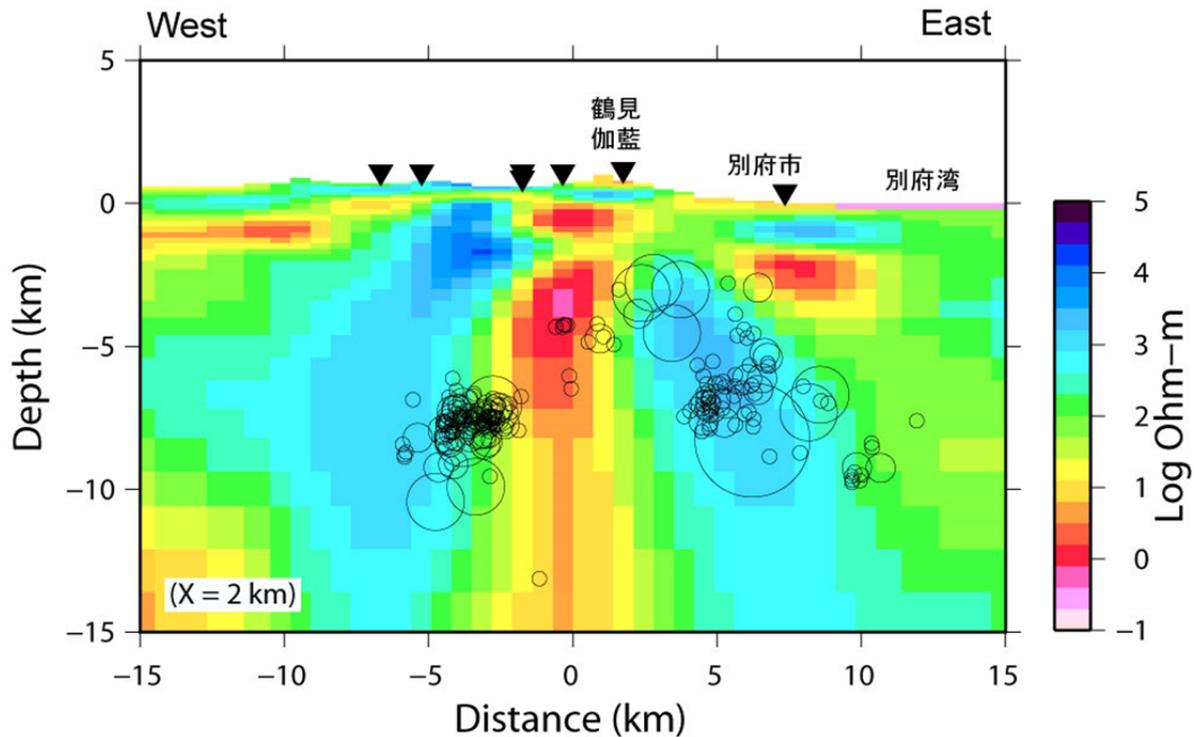


図 3.2.1-10. 図 3.2.1-9 の破線に沿った東西方向の比抵抗断面図。
1993 年～2016 年 4 月までの地震の震源を重ねて示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

本研究では、地震学的な調査と解析により、別府-万年山断層帯の地殻応力場とひずみ場、および深部地殻構造を明らかにした。その結果、同断層帯は、地殻の脆性領域が九州地域の平均的な厚さよりも薄く、高い変形率を示すことが明瞭に示された。また、当該地域および周辺域で発生する自然地震を用いた散乱波解析からは、火山体下の地殻深部から上部マントルにかけて、非常に強い不均質が存在することが示された。これらのことから、別府-万年山断層帯には応力が集中しやすく、地震発生ポテンシャルの高い地域であることが明らかになった。また、地震発生層の下限深度や応力分布から、別府-万年山断層帯（大分平野-由布院断層帯東部）において想定される震源断層の断層パラメータについて制約を与えることができた。

一方、比抵抗構造に関しては、深さ 2 km までの浅部において別府市-大分市から九重山にかけて、低重力-低比抵抗な媒質で満たされた陥没構造の存在が明らかになった。これにより別府-万年山断層帯は、この陥没構造の中に位置するため強震動予測には浅部構造を組み込んだ地震波シミュレーションが必要である。深さ 3 km より深部では、地表断層の東西走向に調和的な比抵抗構造は見られず、むしろ北東-南西走向に複数の低比抵抗体が伸びている構造が示唆された。3次元解析からは(1) 鶴見岳、由布岳、伽藍岳に囲まれる部分に向かって深部から上昇する低比抵抗領域、(2) 大分市南部の低比抵抗領域がイメージされた。(1)、(2)とも北東-南西方向に伸びる形状をしており、現在の地震活動はその周辺で発生している。朝見川断層は(2)の低比抵抗域の北縁に位置する。これまで数多く行われてきた内陸地震発生帯の比抵抗構造研究の結果が本地域でも成立すると仮定すると、想定起震断層である朝見川断層は本地域の陸域に見られる

断層の中では規模の大きな地震が起こりやすい構造と考えられる。また、由布院盆地と別府市の中間には低比抵抗領域が存在するため、由布院から別府にかけて一気に破壊される地震の発生確率は比較的低いと推定される。

(d) 引用文献

- Aizawa K, et al. (2017) Seismicity controlled by resistivity structure: the 2016 Kumamoto earthquakes, Kyushu Island, Japan, *Earth Planets Space* 69, doi:10.1186/s40623-016-0590-2.
- Caldwell, T.G., Bibby, H.M. and Brown, C., 2004. The magnetotelluric phase tensor. *Geophys. J. Int.*, 158(2).
- Hori, M., et al., 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.
- Ichihara H, Sakanaka S, Mishina M, Uyeshima M, Nishitani T, Ogawa Y, Yamaya Y, Mogi T, Amita K, Miura T (2014) A 3-D electrical resistivity model beneath the focal zone of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake (M 7.2), *Earth Planets Space* 66, doi:10.1186/1880-5981-66-50.
- Itoh Y, Takemura K, Kamata H (1998) History of basin formation and tectonic evolution at the termination of a large transcurrent fault system: deformation mode of central Kyushu, Japan, *Tectonophys.* 284(1-2): 135-150, doi:10.1016/s0040-1951(97)00167-4.
- Matsumoto, S., T. Nishimura, T. Ohkura, Inelastic strain rate in the seismogenic layer of Kyushu Island, Japan, *Earth, Planets and Space*, 68:207, DOI: 10.1186/s40623-016-0584-0, 2016.
- Matsumoto, S., S. Nakao, T. Ohkura, M. Miyazaki, H. Shimizu, Y. Abe, H. Inoue, M. Nakamoto, S. Yoshikawa, Y. Yamashita, Spatial heterogeneities of deviatoric stress inferred from the focal mechanisms and its relation to the shear zone in Kyushu, Japan, submitted to *Earth Planets Space*, 2015.
- Saiga, A., S. Matsumoto, K. Uehira, T. Matsushima, and H. Shimizu, Velocity structure in the crust beneath the Kyushu area, *Earth Planets Space*, 62, 449-462, doi: 10.6047/eps.2010.02.003, 2010.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., 2009. WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation. *Phys. Earth. Planet. Int.*, 173(3-4): 317-329.
- Yoshimura R, et al. (2008) Magnetotelluric observations around the focal region of the 2007 Noto Hanto Earthquake (M-j 6.9), Central Japan, *Earth Planets Space* 60(2): 117-122.
- 楠本 成寿, 竹村 恵二, 福田 洋一, 竹本 修三 (1997), 重力異常からみた九州中部地域東部の第四紀テクトニクス, *地学雑誌*, 106, 635-643.
- 笹田 政克 (1987), 豊肥地域の先第三紀基盤岩類, *地質調査所月報*, 38(7), 385-422.

3. 2 - 2 浅部構造（反射法地震探査・GPS および地震観測・重力調査・ボーリング DB）

(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

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人京都大学理学研究科	教授	竹村 惠二
国立大学法人京都大学理学研究科	教授	福田 洋一
国立大学法人九州大学工学研究院	教授	渡邊 公一郎
国立大学法人九州大学工学研究院	教授	藤光 康宏
国立大学法人九州大学工学研究院	准教授	西島 潤
国立大学法人京都大学理学研究科	教授	大倉 敬宏
国立大学法人東京大学地震研究所	助教	石山 達也
公立大学法人大阪府立大学学術研究院第2学群	教授	伊藤 康人
国立大学法人富山大学大学院理工学研究部	准教授	楠本 成寿

(c) 業務の目的

別府一万年山断層帯（大分平野ー由布院断層帯東部）の震源断層形状と周辺の地殻構造を解明することを業務の目的とする。特に、サブ2-2では反射法地震探査・重力探査等やボーリング等のデータ解析から、平野基盤形状の推定と断層との関係を探る。

(d) 3ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成26年度：

国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、既存の地球物理学的資料（反射法地震探査、重力調査など）の収集・整理を進めるとともに、既存データの再解析やデジタル化を実施した。また、断層帯周辺の地震活動や地殻変動の解析高度化のために、GPS および地震観測地点を増強する準備を整えた。さらに、断層帯構造の解明のための稠密重力調査を実施した。あわせて、盆地浅部における地盤構造の高度化に必要な地盤モデル構築に向けてボーリングデータベースを作成するため、既存ボーリングの情報収集整理を実施した。また考古学遺跡で発見された砂脈の調査を実施した。

2) 平成27年度：

国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、既存の地球物理学的資料（反射法地震探査、重力調査など）の収集・整理を進めるとともに、26年度実施の既存データの再解析やデジタル化を参照して、大分平野で東西方向の反射法地震探査を実施した。また、断層帯周辺の地震活動や地殻変動の解析高度化のために増強した、GPS および地震観測地点を合わせて、解析システムや収録システムを活用し解析を進めた。さらに、断層帯構造の解明のための稠密重力調査を継続し

た。あわせて、盆地浅部における地盤構造の高度化に必要な地盤モデル構築に向けてボーリングデータベースを作成するため、既存ボーリングの情報収集整理を継続した。

3) 平成 28 年度 :

平成 26 年度・27 年度の観測調査結果に加え、サブテーマ 2-2 の課題調査の追加観測を実施し、解析とまとめを進めた。特に震源断層モデルの構築のために各観測調査の精査を実施し、震源断層モデルの構築を行った。また、各解析データのデータアーカイブの作成を実施した。成果として別府-万年山断層帯（大分平野-由布院断層帯東部）の構造評価、震源断層形状モデルの提案、地殻構造モデルの提案を進めた。

(2) 平成 26～28 年度の成果

(a) 業務の要約

国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、既存の地球物理学的資料（反射法地震探査、重力調査など）の収集・整理を進めるとともに、特に反射法地震探査については、既存データの再解析やデジタル化を実施した。また、大分平野及び別府扇状地において新規の反射法地震探査データを取得し、別府-万年山断層帯の断層分布及び深部形状の把握と共に、別府湾及び周辺陸域における強震動予測の厳密化に向けた三次元構造モデル構築に資する基礎資料を提示した。さらに、断層帯周辺の地震活動や地殻変動の解析高度化のために、GPS および地震観測地点を増強し、解析システムや収録システムを活用し解析を進めた。また、断層帯構造の解明のための稠密重力調査を継続実施した。あわせて、盆地浅部における地盤構造の高度化に必要な地盤モデル構築に向けて、既存ボーリングの情報収集整理を進め、ボーリングデータベースを構築した。

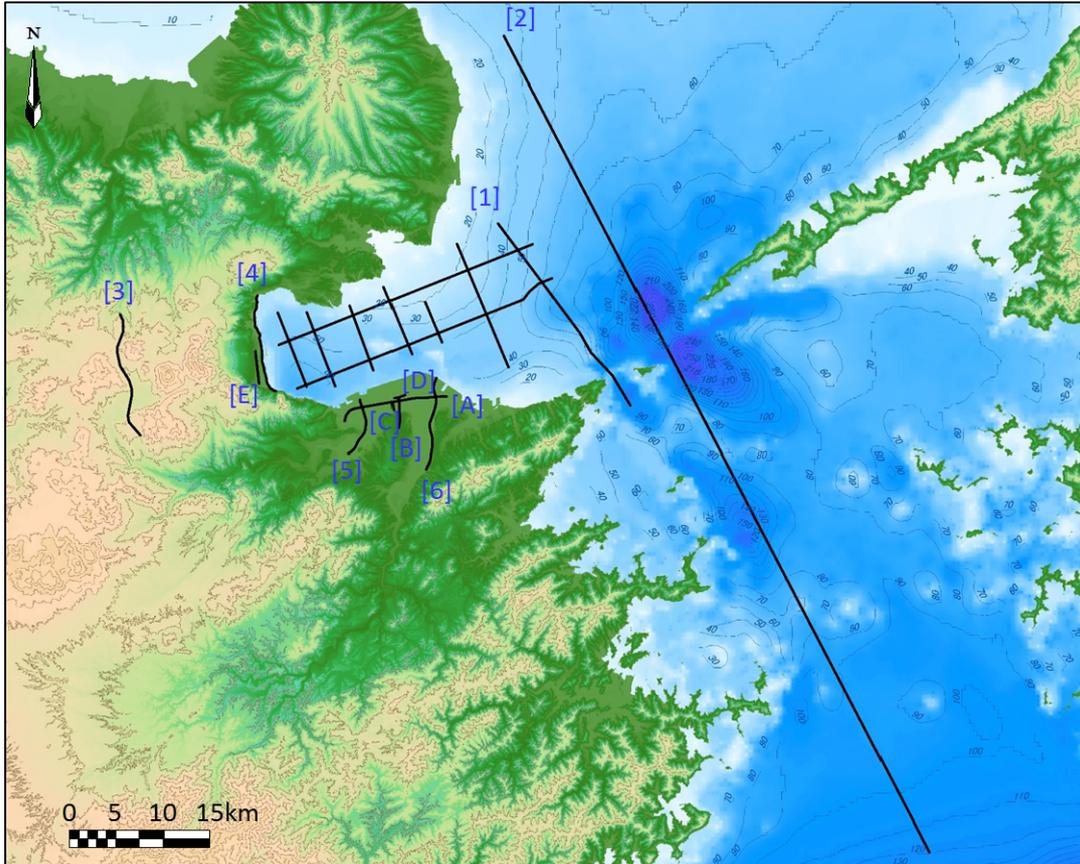
(b) 業務の成果

i) 反射法地震探査：既存資料の収集整理・再解析・デジタル化と新規データ取得

本業務では、別府湾及び周辺陸域において関係機関によって取得された既存データを解析対象測線として、最新の反射法地震探査データ解析技術を適用した。また、別府-万年山断層帯（大分平野-湯布院断層帯東部）の断層分布及び深部形状の把握、中央構造線断層帯との接合関係の解明、さらには、別府湾及び周辺陸域における三次元構造モデル構築に資する地下構造断面図の作成を目的として、大分平野及び別府扇状地において、新規の二次元地下構造探査データを取得した。

・評価対象測線

既存資料の収集整理・再解析・デジタル化に関わる業務では、別府湾及び周辺陸域において、計 6 調査の既存構造探査データが再解析の対象とされた。また、大分平野において 4 測線（主たる反射法測線は 2 測線）、別府扇状地において 1 測線の新規探査データが集積された。図 3.2.2-1 に評価対象測線に関わる広域図を示す。また、図 3.2.2-2 に別府湾周辺の拡大表示図を示す。



©ESRI-Japan, 日本海洋データセンターJ-EGGS500 より作成

図 3.2.2-1 評価対象調査測線広域図

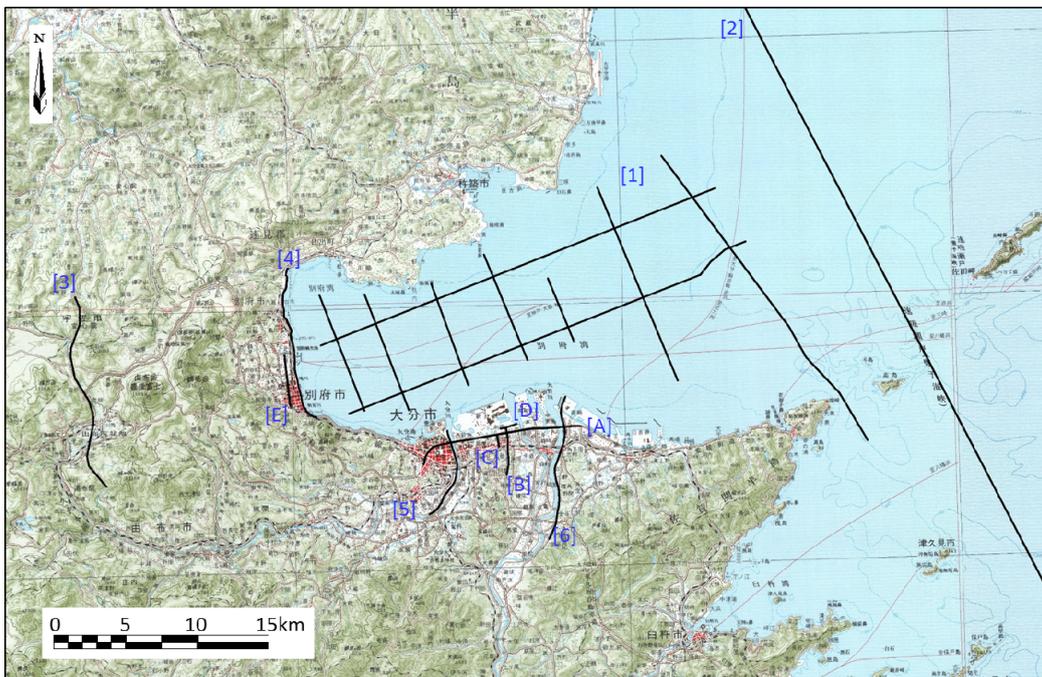


図 3.2.2-2 評価対象測線図

国土地理院発行 20 万分の 1 地勢図【中津・大分・松山・宇和島】に加筆

既存資料の収集整理・再解析・デジタル化に関しては、下記の6調査のデータが対象とされた。

- [1] 京都大学理学部 1988年度 別府湾地質構造探査(伊予灘地質構造探査を含む)
調査測線...10測線, 総測線長...142.5km
- [2] 京都大学理学部 1990年度 豊後水道地質構造探査
調査測線...1測線, 測線長...100km
- [3] 京都大学理学部 1994年度 由布院盆地バイプロサイス調査
調査測線...1測線, 測線長...18.8km
- [4] 京都大学理学部 1989年度 別府陸域バイプロサイス調査
調査測線...1測線, 測線長...11.0km
- [5] 大分県(文部科学省地震関係基礎調査) 1999年度 大分川左岸バイプロサイス調査
調査測線...1測線, 測線長...3.0km
- [6] 大分県(文部科学省地震関係基礎調査) 2001年度 大野川右岸バイプロサイス調査
調査測線...1測線, 測線長...5.4km

上記解析対象の内、大分川左岸バイプロサイス調査及び大野川右岸バイプロサイス調査に関しては、2007年度に(独)産業技術総合研究所によって各測線の南部延長位置において反射法地震探査データが取得されている。これらの探査測線は、大分川左岸で4.3km(豊肥本線鉄道橋-七瀬川合流点)、大野川右岸で5.3km(新殿-杵河内)であり、堆積平野の基本構造と主要断層群の詳細構造把握に資する目的で、解析対象に加えることとした。

上記の既存データ再解析に加えて、本業務では、大分平野及び別府扇状地において、下記の計5測線(総測線長21.2km)のデータが取得された。

- [A] 大分平野東西測線(12.2km)
- [B] 大分平野南北測線(3.4km)
- [C] 大分平野浅層反射法補助測線(0.8km)
- [D] 大分平野浅部屈折法測線(1.2km)
- [E] 別府扇状地南北測線(3.6km)

本調査業務では、大分地質図幅(吉岡・他(1997))及び別府地質図幅(星住他(1988))を主に参照し、地質概要及び伏在断層に関わる諸情報を総括し、地震探査データ解析に資する基礎資料とした。以下に、その概要を記述する。

大分平野は主として三角州及び後背湿地として形成され、自然堤防箇所を除いて、地形は平坦である。大分平野に位置する代表的な河川としては、大分川及び大野川であり、大分川は九重火山山麓に、大野川は阿蘇火山外輪山東麓に源流を持つ。両河川共に、広大な流域に第四紀火山が存在するため、火山岩礫を主体とする砕屑物の供給が多い。また、海岸線は比較的直線的であり、両河川の河口では三角洲が発達しているが、新日鐵住金製鉄所を中心とする大規模埋立地によって、旧海岸線は明瞭ではない。この旧海岸線の東部地域は、P波を著しく減衰させるピート層、泥炭層、浅層ガス混在層等の不飽和層の存在、未固結層が極端に深くなる堆積層の急激な層変化を伴う分布域に該当することが、千田・他(2004)によって指摘されている。

大分平野は別府-島原地溝の南縁に該当し、地域全体において東西走向の正断層が卓越する。南東部の三波川変成岩類からなる佐賀関山地と、後期鮮新世-前期更新世の碩南層群、前期-中期更新世の大分層群からなる丹生丘陵は、直線状の崖線で画されているが、これは佐賀関断層の西方延長に該当する。この丹生丘陵内には、碩南層群-大分層群を階段状に変位させる正断層が分布し、代表的な月ヶ平断層は丘陵高度に 10 ~ 30 m の標高変位が確認されている。大分川-大野川に画された鶴崎台地と大野川右岸の丹生台地の段丘面高度差を大野川断層とする指摘(千田、1974))があるが、低断層崖等の変位地形等は明確には確認されていない。一方、大分平野の別府湾岸地域では、首藤・日高(1971)が多数のボーリング資料と鬼界アカホヤ(K-Ah)火山灰層分布から、沖積低地下に伏在する別府湾南岸断層の存在を示唆した。吉岡・他(1997)は、K-Ah 層準に 10 m 以上の落差が認定できる箇所をトレースし、大分平野地下において完新統を変位させる可能性が高い断層群として、F1、F2、F3 及び F4 の 4 条の断層を示した。また、千田・他(2004)は、大分平野において実施された地方交付金による大分県活断層調査結果(1999 ~ 2003 年)を総括し、深部反射法地震探査(大分川、大野川)、浅層高分解能反射法探査(大分川、大野川、日岡、松原及び乙津川)及びボーリング調査結果から、大分層群及び碩南層群相当層中の北傾斜の不連続構造として、三佐断層及び志村断層を定義した。これらの断層群の走向は、東北東-西南西方向であり、三佐断層東部は旧海岸線沿いに存在する。三佐断層東方海域には大在沖断層群が存在するが、変位方向及び K-Ah 火山灰層の上下方向変位量が異なるため、その関係性については様々な議論がある。また、志村断層南側では、完新統が直接大分層群相当層を覆っているが、北側では、完新統の下位に晩氷期-最終間氷期の堆積物が厚く分布する。

別府市市街地の南麓山麓線に沿って朝見川断層が位置する。別府湾南岸地域には東西に軸を持つ水深 50 ~ 70 m の谷状凹地が存在するが、この南縁部を朝見川断層の海域延長部が通過する。この別府湾南岸断層は、大分市街地では府内断層として、大分川左岸の府内城址を西北西-東南東方向に通過し、大分川を越えて県立芸術会館付近まで延長していることが推測されている(千田・他 2003)。さらに、府内断層は、志村断層の西方延長上に位置し、別府湾南岸断層の主たる二条の断層系の内、南側に位置する同系列の断層トレースとして認定されている(地震調査研究推進本部(2005))。こうした別府湾南岸断層(三佐断層、府内-志村断層)に関しては、浅層反射法構造探査、浅層ボーリング、鬼界アカホヤ(K-Ah)火山灰層の同定を通じて、最新活動時期及び活動間隔が議論されている(地震調査研究推進本部、2005)。

大分平野における強震動予測の高精度化を図る上で、断層位置及び断層ジオメトリの把握と共に、基盤構造を含む地下構造モデルの構築が非常に重要な課題である。大分平野に分布する地質系統を概観すると、白亜紀三波川変成岩類、上部白亜系堆積岩類の大野川層群、及び第四紀火山岩-堆積岩類からなる。大分平野における基盤構造を規定する三波川変成岩類は、地表露頭が大野川以東の丹生台地及び佐賀関山地に分布し、北縁部は大分層群に不整合に被覆され、佐賀関山地から北西の大分平野地域へと、大野川層群下に潜り込むドーム状構造が推定されている(寺岡、1970)。従って、三波川変成岩類の出現深度は、北西方向に徐々に深くなる傾向を示す。上部白亜系大野川層群は、阿蘇南方から臼杵湾に至る臼杵-八代構造線の北側に広く分布する海成の堆積層であり、七瀬川南側の霊山山地に露頭(霊山層 R1 部層)が分布する(吉岡、1997)。この R1 部層は、淘汰が良好ではない固結した赤色礫岩から形成され、花崗岩、安山岩、チャート、石灰岩、片麻

岩、結晶片岩他の多様な礫種が認められる。

別府湾から島原半島にかけての九州中部においては、東北東-西南西方向に新第三紀以降の火山岩類が広く分布し、低重力異常域に該当する。調査地周辺は、この別府-島原地溝帯の東縁付近及び中央構造線の西端部に位置する。先新第三系基盤岩は、調査地周辺北側の国東半島周辺では領家変成岩類、南側の佐賀関半島周辺では三波川変成岩類及び大野川層群からなり、基盤深度は、既存の反射法地震探査や重力探査から、別府湾中央部で 4000 m 程度、陸域では大分川河口付近で 3000 m 程度に達し、由布院盆地周辺では 1800 ~ 2000 m 程度と推定されている。領家変成岩類は、泥質片麻岩、珪質片麻岩等からなり、片麻状構造はほぼ東西走向で、北または南に 30 ~ 80° 傾斜している。

新第三紀の火山岩類は、主に安山岩-デイサイト質の火砕岩および溶岩からなり、これらの活動時期は後期中新世である。後期鮮新世-更新世にかけては、主にシルト、砂、礫からなる河川成-海成堆積物を主体とし、火山砕屑物層を挟む未固結ないし半固結の堆積物（碩南層群及び大分層群）が広く分布する。更に、後期更新世の阿蘇火山の活動によって噴出した阿蘇-3 火砕流堆積物および阿蘇-4 火砕流堆積物（噴出は約 9 万年前）が、大分川流域に広く分布する。丘陵の頂部や主要河川沿いには、段丘堆積物および沖積層が分布する。調査地周辺の北縁及び南縁を含む地域は、ほぼ東西に伸びる別府-万年山断層帯の北東縁に位置し、別府湾海底下や別府湾-由布院盆地周辺の北縁及び南縁部には多数の活断層群が分布する。別府湾内では、別府湾断層帯（日出沖断層群、別府湾中央断層、杵築沖断層群他、多数の正断層からなる活断層帯）と称され、活断層が密集している。別府湾内における既存の浅層音波探査データからは、下位の反射面ほど断層による累積変位が大きく、断層運動の反復性が確認できる。こうした活断層群は、相対的に別府湾の北半分に集中して分布し、最新の活動時期は、西暦 1596 年の慶長豊後地震と推定されている。また、別府湾北縁では、別府地溝北縁断層帯と呼ばれる唐木山断層、鹿鳴越断層、軒ノ井断層などの東西走向で主として北側が隆起した断層が分布する。さらに、別府湾南縁では、別府地溝南縁断層帯（堀田-朝見川断層、府内断層他）が分布するが、別府湾内の活断層と対比すると、後期更新世以降の活動度はそれほど高くない。

本報告では、別府湾及び豊後水道地質構造調査データに関する再解析結果、大分平野・別府扇状地における既存・新規地震探査の評価結果を記述する。

・別府湾及び豊後水道地質構造調査データ再解析

① 対象測線及びデータ取得仕様概要

別府湾地質構造調査では、東北東-西南西方向の 2 測線及び、これらに直交する北北西-南南東方向の 7 測線の計 9 測線（測線長.. 138. 3km）が別府湾内に設定され、豊後水道地質構造調査は、国東半島東方沖合から別府湾口、豊予海峡（速吸瀬戸）を通り、豊後水道を南下し高知県宿毛湾沖合に至る 100. 2km の区間に設定された。本調査海域は全般的に多数の航行船舶による船舶ノイズが非常に高く、また、潮流の影響によるケーブル偏倚は最大 15 度に達した。また、別府湾構造探査データの最大オフセットは約 664m であり、最新技術によるデータ再解析を前提としても、深部構造抽出における速度解析精度の低下、走時差準拠型の多重反射波抑制処理の適用限界、さらには、

浅部急傾斜構造に関する受振範囲 (Aperture) の不足等の問題は否めなかった。表 3. 2. 2-1 に、別府湾及び豊後水道地質構造調査のデータ取得仕様一覧を示す。

表 3. 2. 2-1 別府湾及び豊後水道地質構造探査 データ取得仕様一覧。

		別府湾1989	豊後水道1990
震源	震源	Bolt 1500B	WGC Sleeve Array
	ガン容量及び圧力	(600cu.in.,1800psi)	(2250cu.in.,2000psi)
	ガン深度	7m	7m
	発震間隔	25m	26.33m
	Compressor	APS-F2-250	LMF 230-HD
海上受振	受振システム	AMG	LRS-16A Digital
	受振器	Hydrophone(P-38)	Hydrophone (LRS2510 WM2-36)
	ケーブル深度	10.0m	12.0m
	受振点間隔	25m	26.66m
	受振点(チャンネル数)	24	48
	Near-offset GAP	88.60m	217.68m
記録システム	サンプル間隔	2msec	2msec
	記録長	5sec	6sec
	探鉱機	TI DFS-V	LRS-16A
	Filter	8Hz(18dB/oct) - 128Hz(70dB/oct)	6Hz(18dB/oct) - 188Hz(156dB/oct)
	極性	Compression='Negative'	Compression='Negative'
	Format	SEGB	SEGD
測位システム	電波測量	Sercel SYLEDIS	Loran-C + NNSS
	航法システム	JX-7000A	WISDOM

② 標準データ再解析

本データ再解析において、データ解析フローを構築する際の主たる課題は、発震点内挿処理によるオフセット分布の均一化と共に、各種多重反射波の抑制・予測解析であった。以下に、その概略を記述する。

[1] 発震点内挿処理によるオフセット分布の均一化

共通受振点データを構築し、周波数-空間領域予測フィルターによって、反射面傾斜を考慮した発震点内挿処理を実施した。この内挿処理によって、各 CMP アンサンブル内のオフセット分布は均一化され、特に浅層部における解像度の向上に寄与した。

[2] 複合型多重反射波抑制処理

別府湾内の水深は 80m 以浅であり、周期 100m 以下の短周期多重反射波が卓越する。一方、豊後水道に関しては、速吸瀬戸(豊予海峡)を中心に水深が 200m を越える区間が存在し、長周期から短周期にかけて様々な多重反射波が混入している。本データ解析においては、こうした多重反射

波について三種類の抑制手法を複合化した処理を適用した。短周期多重反射波については、線型ラドン変換領域におけるデコンボリューション法を、中周期多重反射波については放物線ラドン変換法を、長周期多重反射波の推定についてはSRME(Surface-related Multiple Elimination)法(Verschuur (2006))を採用した。別府湾周辺の既存データについては、曳航ケーブル長が別府湾内に関して 665m、豊後水道に関して 1470m と限定され、データ取得仕様上、十分な抑制効果は期待できない。しかし、多重反射波を複合的に予測し、記録断面図に重複表示させることによって、解釈作業の最適化に資するデータの提示が可能となった(阿部・他 2013。図 3.2.2-3 に、複合型多重反射波抑制処理の基本概念図を示した。

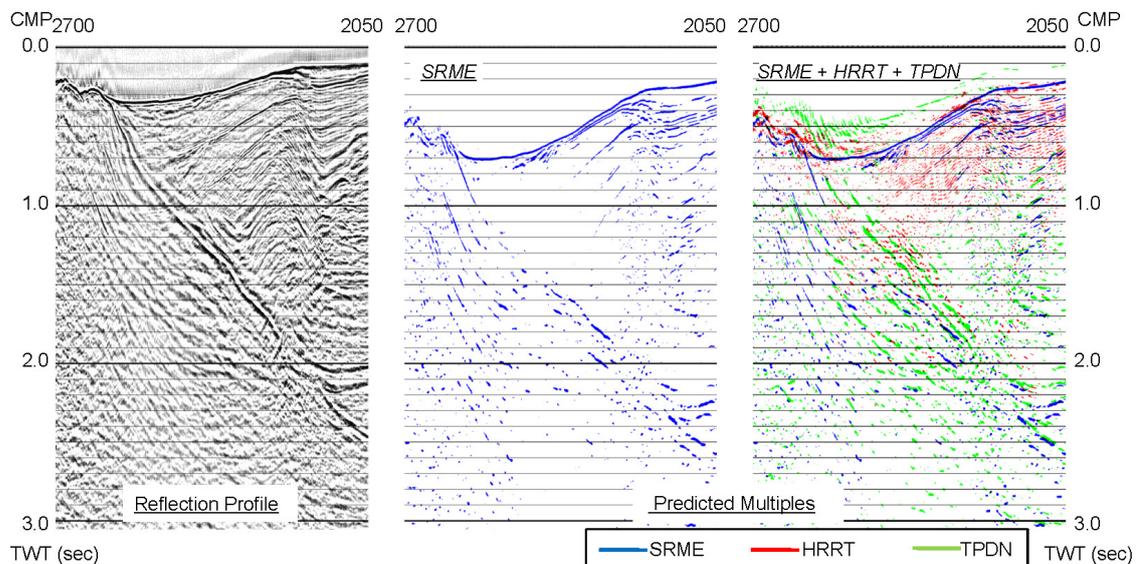
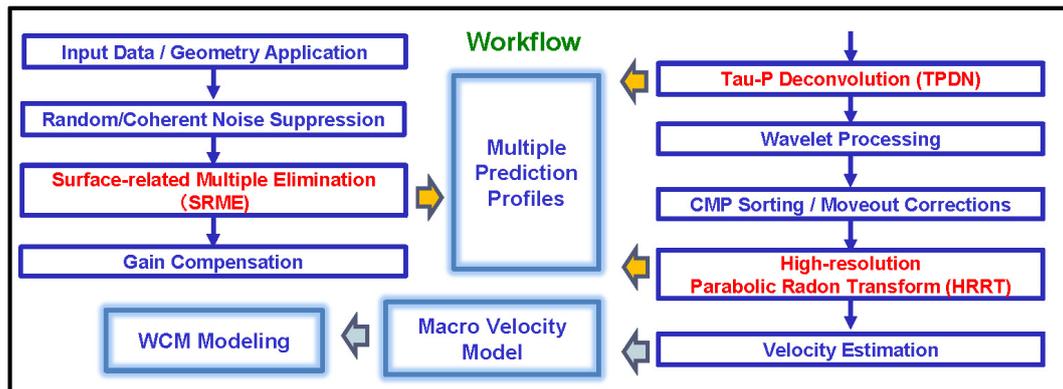


図 3.2.2-3 複合型多重反射波抑制処理手法のワークフロー(上)及び抽出された多重反射波抑制結果(下)。下図について、左は豊後水道データ(Line-J)に関する重合処理結果であり、中央はSRME法によって予測された多重反射波群、右は全手法によって予測された多重反射波群を示した。

③ 高精度イメージング解析

本解析では、標準データ解析において、残差静補正までの基本処理を適用したデータを入力として、MDRS(Multi-Dip Reflection Surface)法による高精度イメージング処理を実施した。本解析では、先ず、MDRS法の第一段階としCRS(Common Reflection Surface)法を適用した。CRS法

(Common reflection surface stack (Jager, 2001; Mann, 2007; Schleicher, 1993) は CMP に属するトレースだけではなく、その近傍の CMP を集約した 'Super gather' を重合処理することによって、従来の CMP 重合法と比べて飛躍的に高い重合数を得ることができる。また、反射点の異なるトレースの重合処理について、空間解像度の低下を回避するため、走時補正において、ゼロオフセットセクション上での反射波走時の傾きと曲率といった CMP 間の挙動要素を自動抽出し、複雑な地下構造への適用性が確保される。本調査地域である別府湾及び大分平野北部域には様々な東西走向の断層群が発達し、ゼロオフセット断面上で反射波が交差する状況（コンフリクティング・ディップ）が予想される。こうした状況に対応するため、第二段階として、高精度 CRS 解析として位置付けられる MDRS 法 (Aoki et al., 2010) を適用し、複数の交差する傾斜を持つ反射面に関わるイメージングの改善を実施した。MDRS 法の基本原理概念図を図 3.2.2-4 に示す。左上の基本概念図において、上段左側はコンフリクティング・ディップを含んだ CMP 重合記録を表している。上段右側は MDRS 重合記録を示しており、下段左側に示した MDRS サブセクション (range 1、2、3) の重ね合わせによって、S/N 比を改善しながらコンフリクティング・ディップのイメージングを達成することが可能である。MDRS 法では各定速度重合パネル上でゼロオフセット反射波の傾斜と曲率をスキャンし、得られた傾斜スペクトル上でセンブランスピークを検出した後に、これらのピーク値を降順に並べ替え、上位から数枚を選択加算し、MDRS 重合記録が得られる。

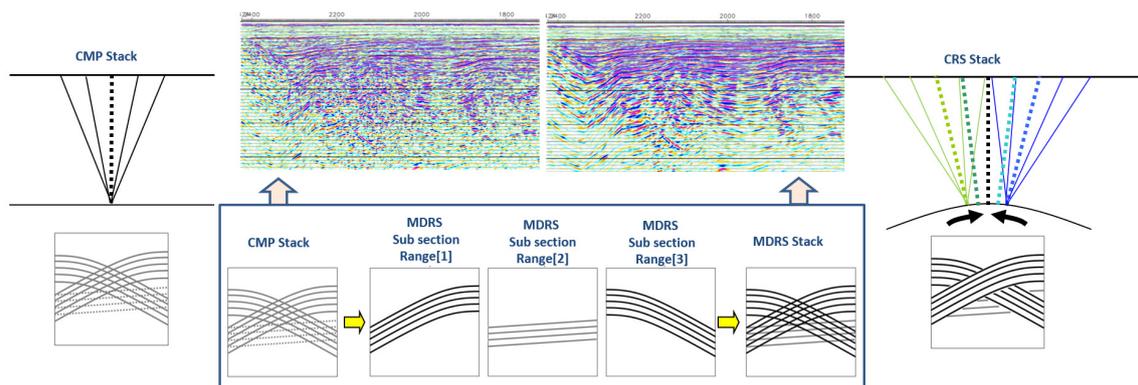


図 3.2.2-4 MDRS 解析に関わるデータ処理概念図

最終的に本解析において採用したデータ処理フローを図 3.2.2-5 に示す。

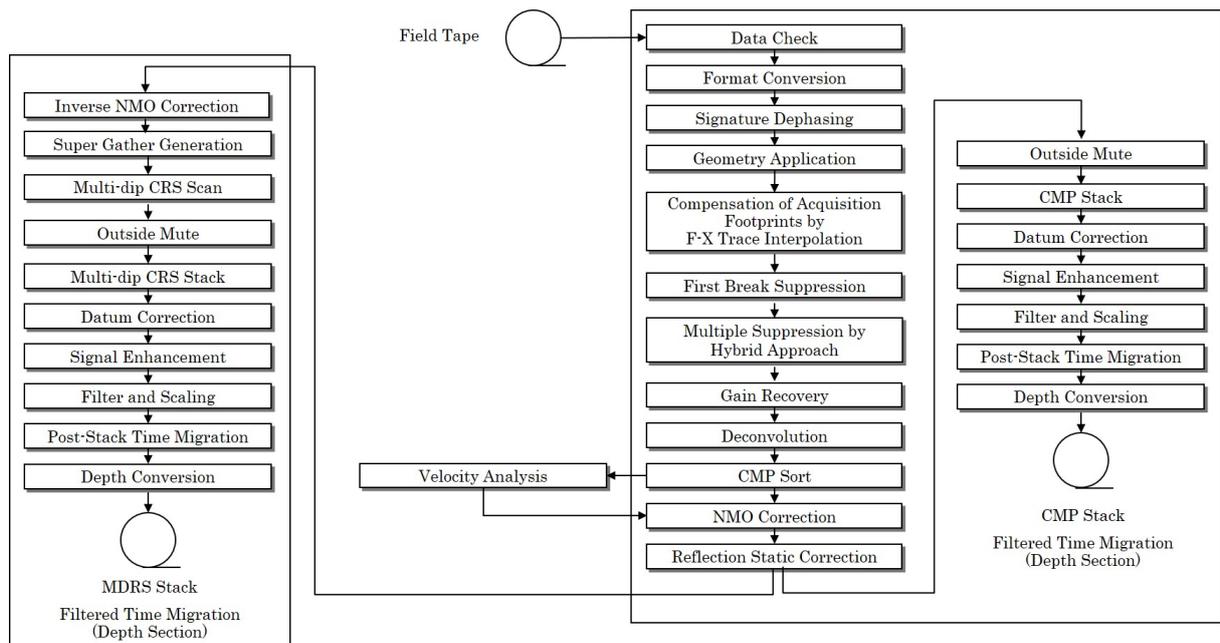


図 3. 2. 2-5 別府湾及び豊後水道地質構造調査データ処理フロー

④ データ再解析結果

本解析業務では、別府湾及び周辺陸域における既存反射法データについて、統一パラメータによる標準データ再解析を実施すると共に、微弱な深部反射波の抽出を前提とした高精度イメージング解析が適用された。別府-島原地溝帯北東端に位置する別府湾内の複雑な構造を把握する上で、非常に重要な解析技術要素は、第一に、複合型多重反射波抑制処理であった。従来の反射法断面図では、海底多重反射波を含む多様な' Surface-related' 型多重反射波、層間多重反射波及び屈折多重反射波によって、構造解釈が困難な場合が存在した。本解析では、複合型多重反射波抑制処理を通じて抽出された多重反射波トレースを発震記録あるいは重合記録に関して、カラー化表示させた重複図面を作成することによって、多重反射波の可視化が実現され、構造解釈上の強力な補助ツールとなることが確認された。第二の解析技術要素は、微弱な深部反射波抽出の観点から適用した' Multi-Dip' 型 CRS (MDRS) 処理であった。この MDRS 処理では、' Super Gather' を構築するアパチャー及び傾斜分割範囲に関して十分なパラメータテストが実施され、MDRS センブランスアトリビュートを参照した場合、抽出された深部反射波が十分に有意であることが確認された。

本再解析を通じて得られた重合時間断面図に関して、1989 年当時の解析結果との比較図面を図 3. 2. 2-6 に示す。再解析によって、領家帯及び三波川帯基盤岩相当の深部反射波列が抽出されると共に、浅部堆積層内の短波長不均質構造に伴う褶曲及び横ずれ成分を持つ断層群の把握に資する顕著な品質改善が図られた。

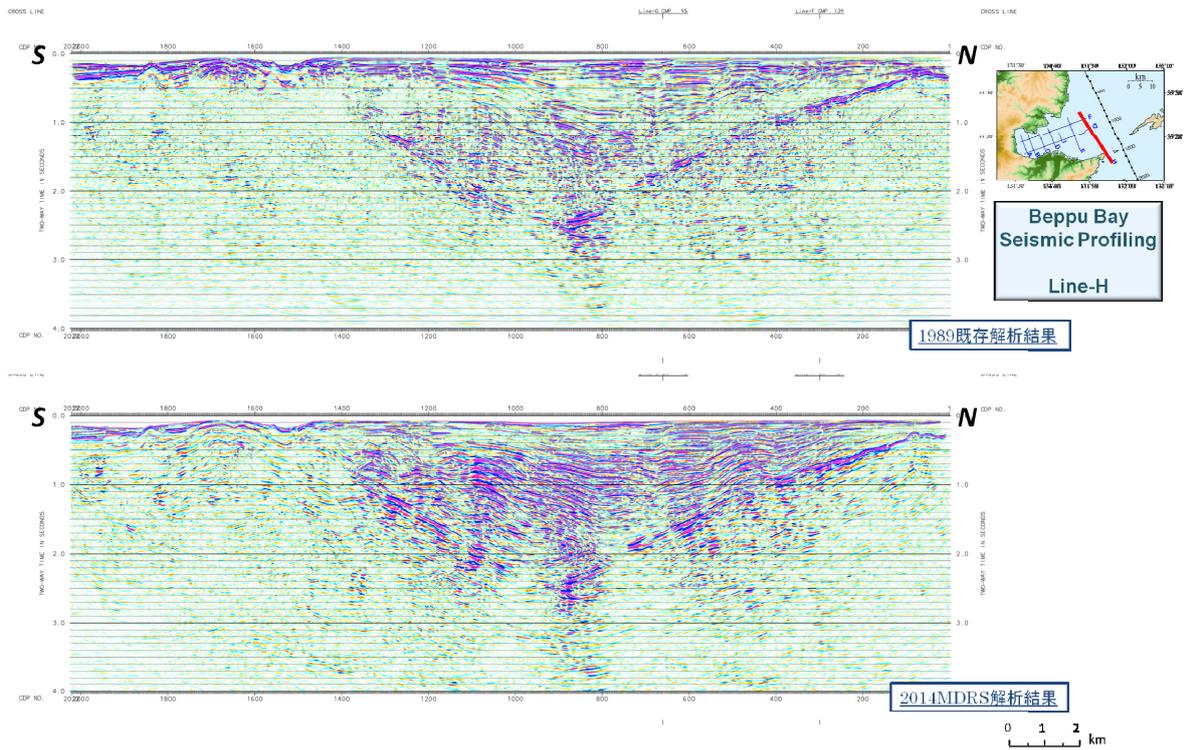


図 3.2.2-6 データ解析比較重合記録(Line-H) (上)旧解析(1989年) (下)再解析(2014年)

本解析では、多重反射抑制処理において抽出された多重反射予測トレースを発震記録あるいは重合記録に関して、カラー化表示させた重複図面を作成することによって、多重反射波の可視化が実現された。また、MDRS 解析を通じて推定された反射波指標であるセンブランス及び自動抽出された速度情報等が、付帯情報としてもたらされた(図 3.2.2-7)。

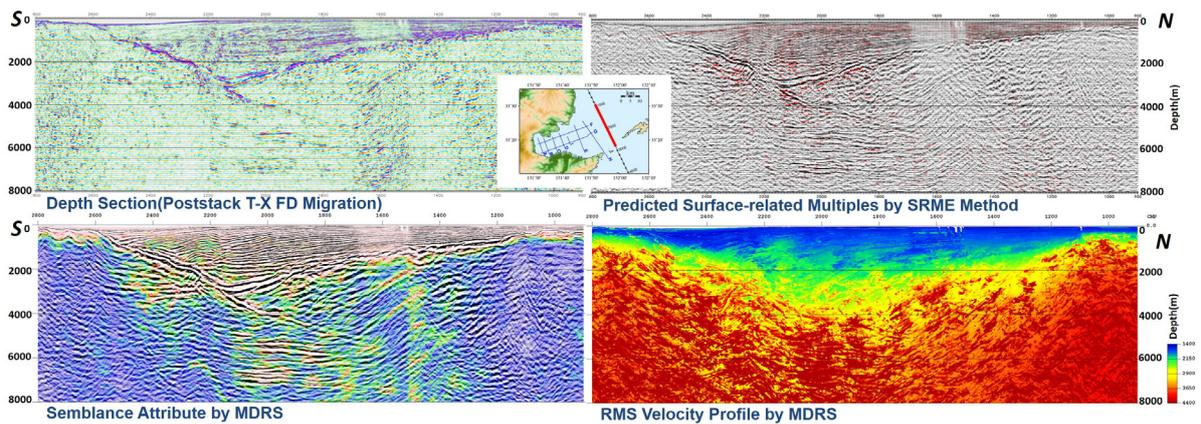


図 3.2.2-7 多重反射波抑制処理及び MDRS 解析に付随する各種情報
 (左上)深度断面図 (右上)抽出された多重反射波群(赤色)
 (左下)センブランス分布 (右下)自動抽出された重合速度分布

次に、別府湾及び豊後水道の全測線に関して、本業務の再解析を通じて得られた最終的な深度断面図を示す(図 3.2.2-8～図 3.2.2-14)。

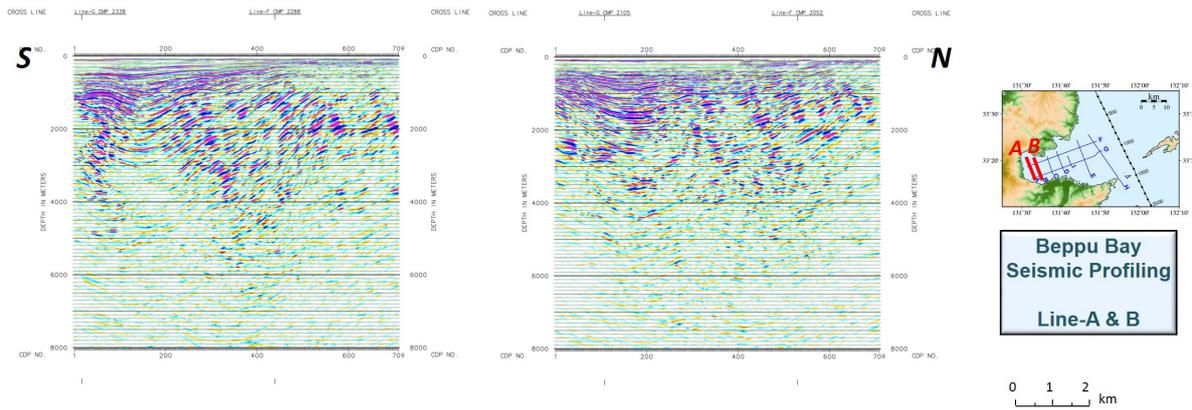


図 3.2.2-8 再解析による MDRS 処理深度断面図 (Line-A(左)及びLine-B(右))

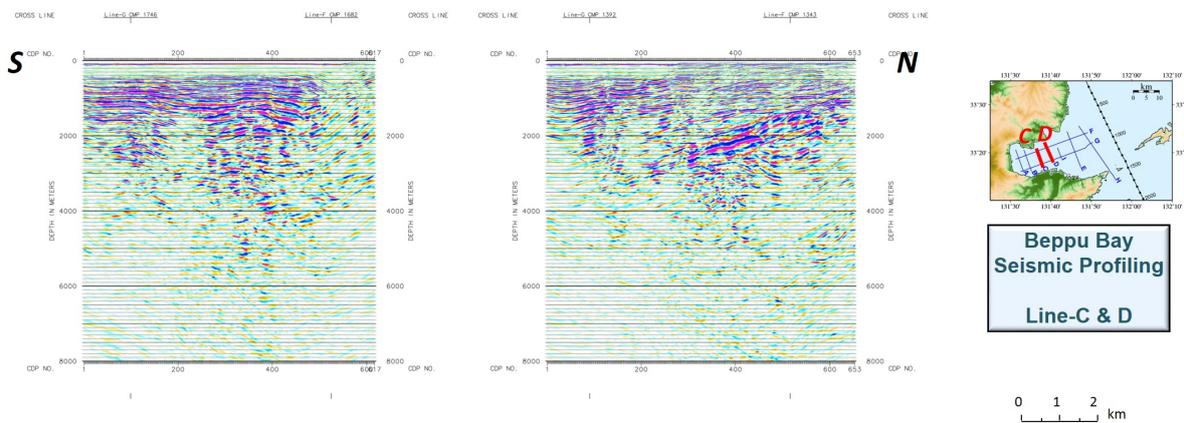


図 3.2.2-9 再解析による MDRS 処理深度断面図 (Line-C(左)及びLine-D(右))

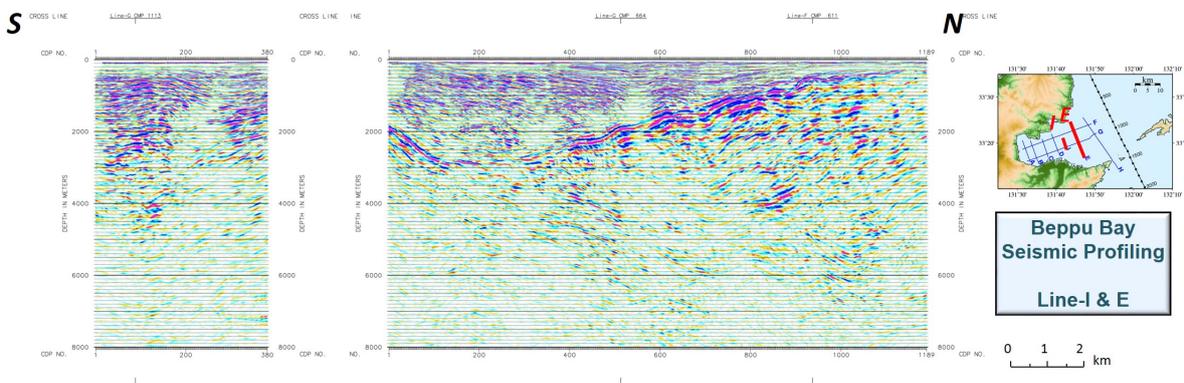


図 3.2.2-10 再解析による MDRS 処理深度断面図 (Line-I(左)及びLine-E(右))

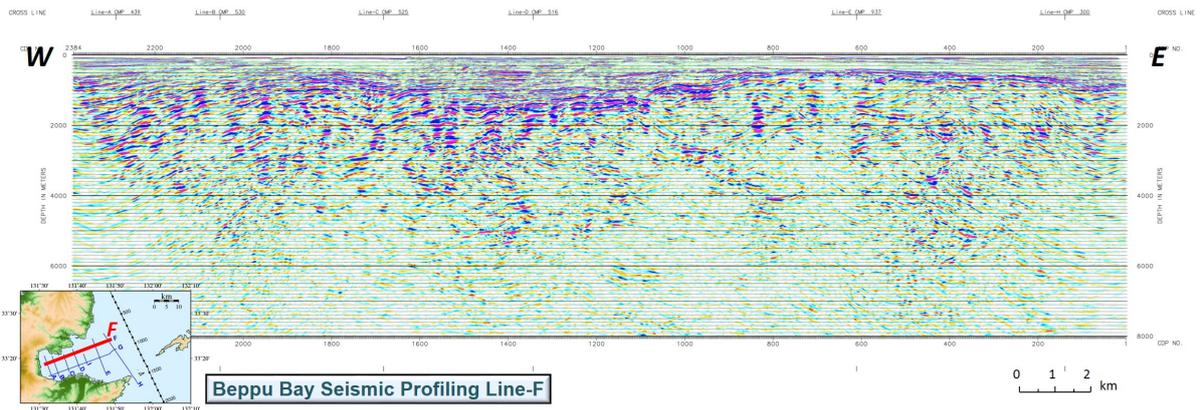


図 3. 2. 2-11 再解析による MDRS 処理深度断面図 (Line-F)

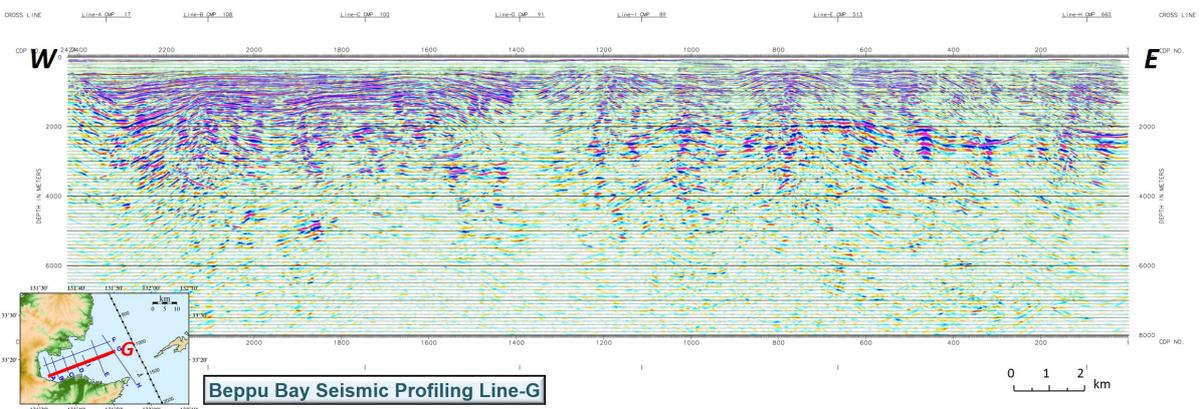


図 3. 2. 2-12 再解析による MDRS 処理深度断面図 (Line-G)

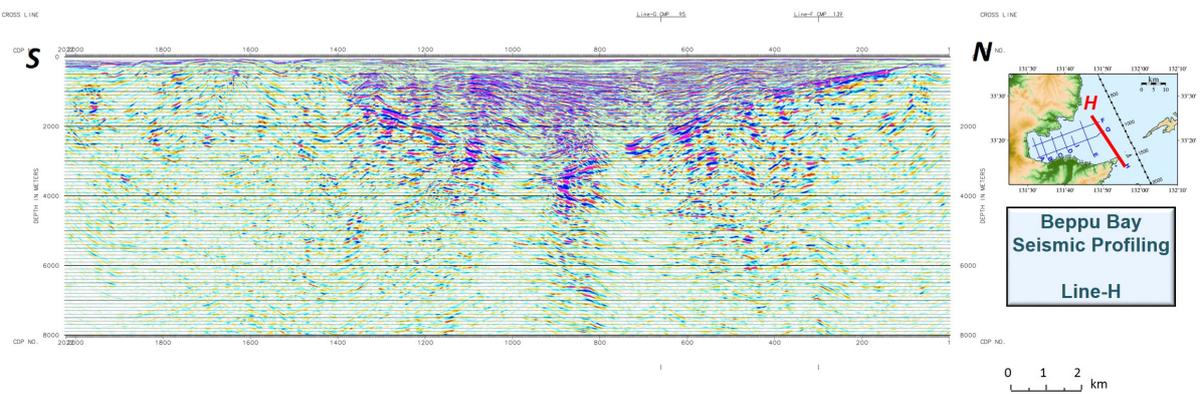


図 3. 2. 2-13 再解析による MDRS 処理深度断面図 (Line-H)

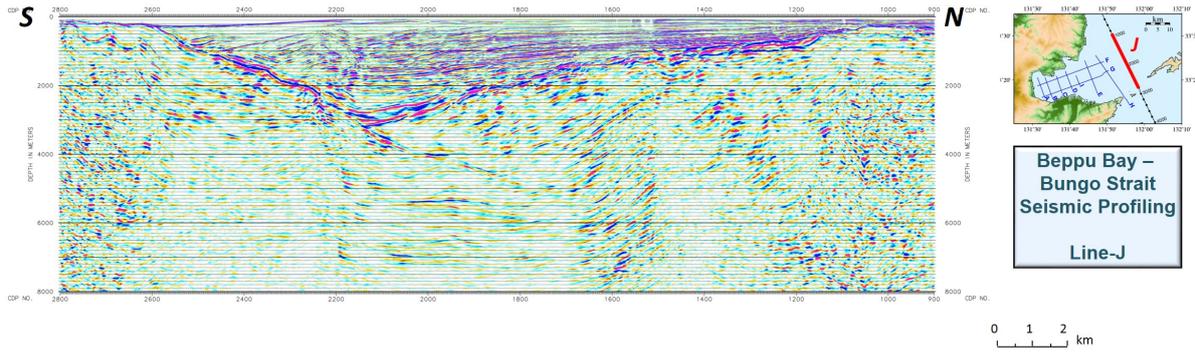


図 3.2.2-14 再解析による MDRS 処理深度断面図 (Line-J 中央部)

図 3.2.2-15 に別府湾周辺データに関する MDRS 重合深度記録に関する鳥瞰表示図を示す。今後、本再解析結果が、スケルトン解析等の反射パターン認識、多重反射波予測トレースの精査、さらには重力モデリングを通じて、中央構造線の構造把握、別府湾及び別府-島原地溝帯の形成過程に関わる統合解釈に帰結することが期待される。

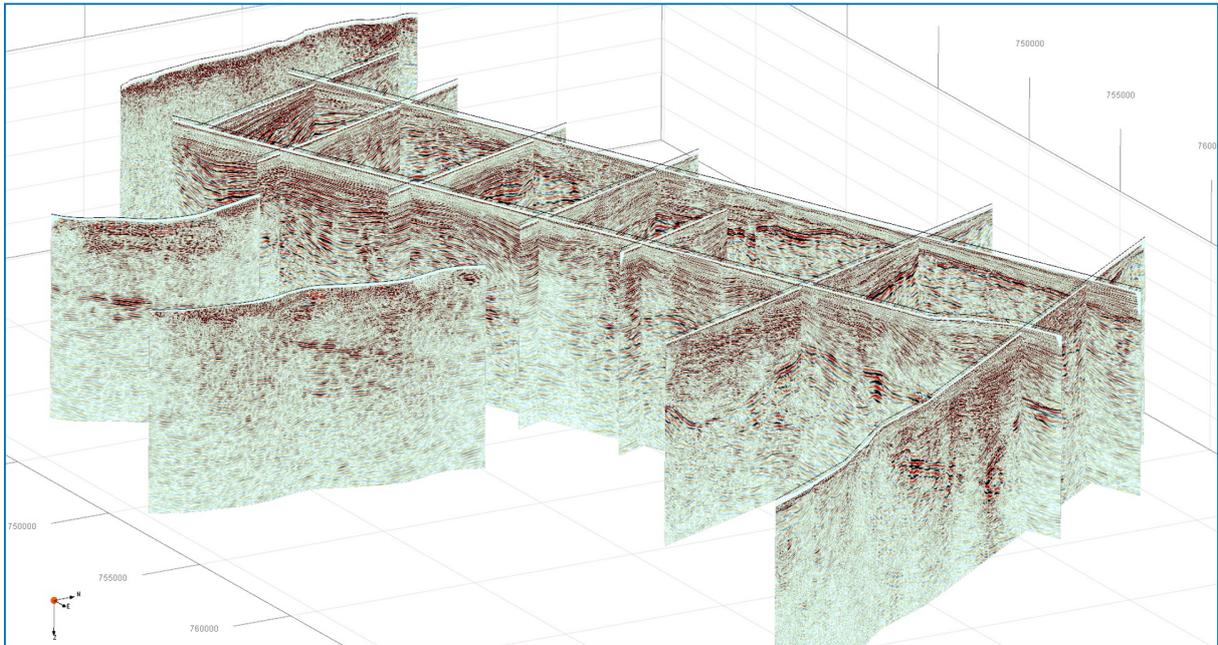


図 3.2.2-15 別府湾周辺データ再解析結果に関わる鳥瞰表示図

・大分平野・別府扇状地周辺における既存データ再解析・新規地震探査データ取得結果

本節では、大分平野・別府扇状地周辺における既存データ再解析・新規地震探査データの取得結果について記述する。図 3.2.2-16 に大分平野周辺、図 3.2.2-17 に別府扇状地周辺における既存測線及び新規地震探査測線の位置図を示す。

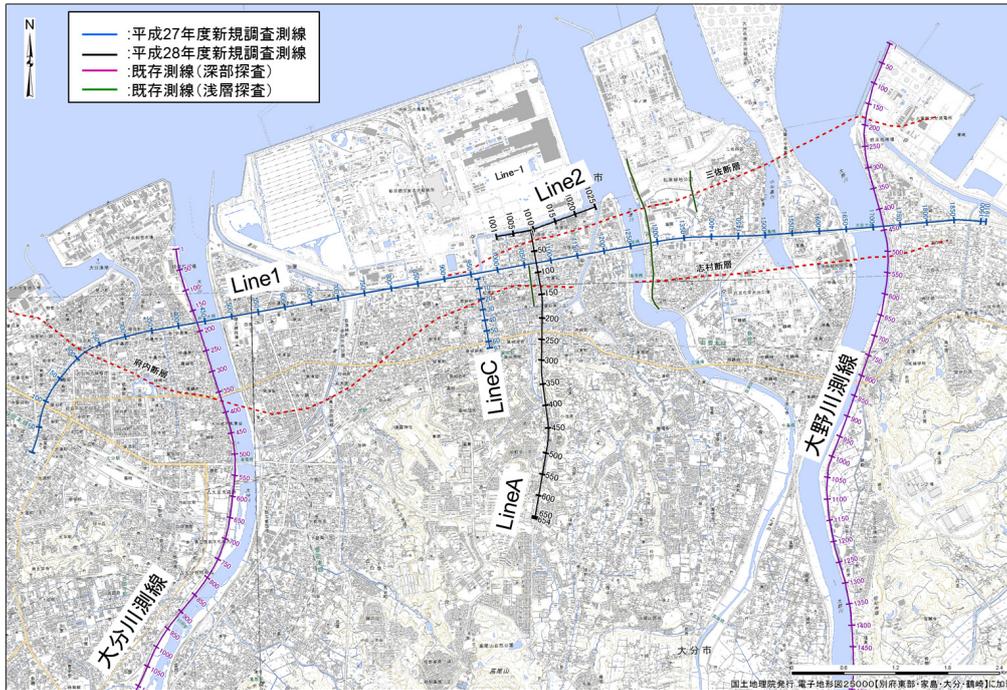


図 3.2.2-16 大分平野周辺における調査測線-既存測線位置図
(千田他(2004)及び地震調査推進本部(2005)を参照)。

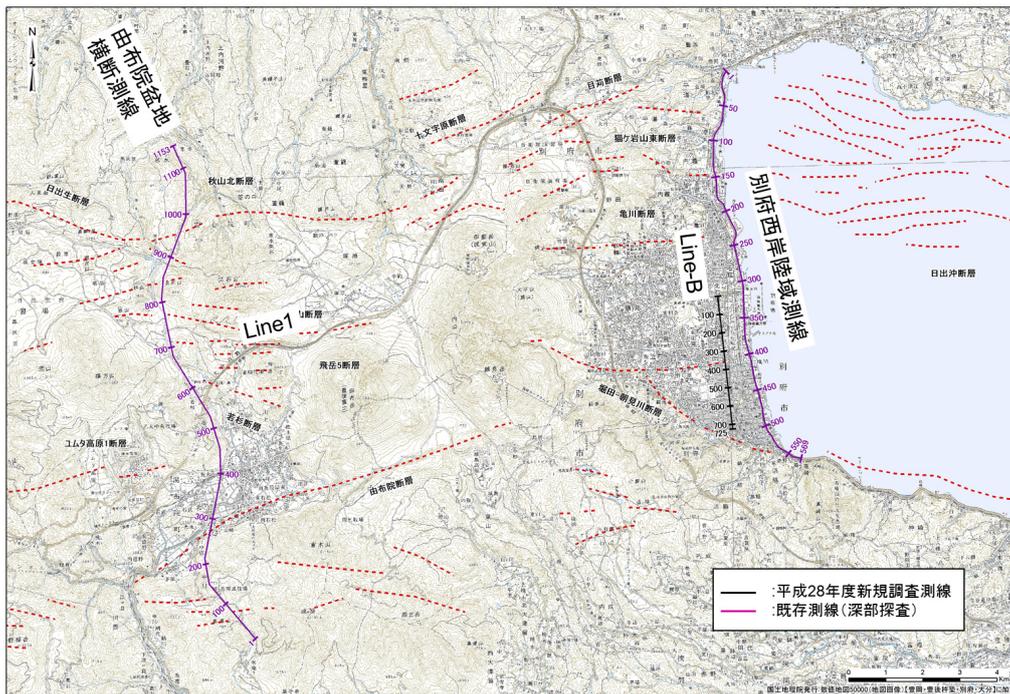


図 3.2.2-17 別府扇状地周辺における調査測線-既存測線位置図
(地震調査推進本部(2005)を参照)。

① 既存データ再解析に関する対象測線及びデータ取得仕様概要

既存データ再解析の対象測線としては、表 3.2.2-2 に示す 4 調査測線が選定された。

表 3. 2. 2-2 既存データ再解析対象測線に関するデータ取得仕様一覧

データ取得	2001年9月8日-9月15日(北部) 2007年3月1日-3月7日(南部)	1999年8月24日-8月29日(北部) 2007年3月7日-3月12日(南部)	1995年1月16日-2月2日	1990年1月8日-1月19日
調査実施機関	大分県(交付金調査)+(独)産業技術総合研究所		京都大学理学部	
調査測線	大野川測線	大分川測線	由布院盆地横断測線	別府西岸陸域測線
調査項目	反射法	反射法	反射法	反射法
測線エリア	大分県大分市		大分県由布市	大分県別府市
測線長	10.4km	7.1km	18.8km	11.2km
受振系				
受振点間隔	20m	20m	25m	20m
総受振点数	557点(含重複区間)	380点(含重複区間)	753点	569点
探鉱器	GDAPS-4A		GDAPS-3	DFS-V
受振器(10Hz)	SM-7		SM-7	SM-7
展開長	End-on Spread [3.0km]	Split-Spread[2.0km] +固定展開(北部)	Asymmetrical Split-Spread [6.25km]	End-on Spread [1.0km]
震源系				
震源	大型バイブレータ		大型バイブレータ	
バイブレータ台数	1台(標準)		3台(標準)	2台(標準)
スイープタイプ	Linear-Up sweep		Linear-Up sweep	
スイープ長	20-22sec	20sec	20sec	16sec
スイープ周波数	6-90Hz 8-90Hz	8-90Hz	8-50Hz	10-56Hz
バイブレータアレイ	-		-	
発震回数/VP	5回	5-10回	16回	15回
発震点間隔	10m	10m	50m	40m
発震点数	1078点	654点	227点	208点
記録系				
サンプリングレート	2msec		4msec	2msec
記録長	4sec		6sec	6sec
プリアンプゲイン	24dB		36dB	

大分平野における既存調査としては、1999年度に実施された大分県(文部科学省地震関係基礎調査交付金調査)による大分川左岸地下構造調査の南部延長部(豊肥鉄道鉄道橋-七瀬川合流点)、及び2001年度に実施された大分県(文部科学省地震関係基礎調査交付金調査)による大野川右岸地下構造調査の南部延長部(新殿-杵河内)において、(独)産業技術総合研究所によってバイブロサイス探査データが取得されている。両機関による構造探査データに関しては、約500mの重複区間が設定され、統合探査結果として反射法地震探査データ解析が可能であり、統合測線長は大分川左岸測線に関しては約7.1km、大野川右岸測線に関しては約10.4kmである。調査地域は、大分平野の市街地に位置し、大型バイブレータ1台による稠密発震点確保及びノイズ環境を考慮して、河川敷周辺に設定された。

由布院盆地横断測線に関しては、大分県旧湯布院町(現由布市)を中心として南北に延びる地域に位置する。測線東側には由布岳、飛岳、立石山が、西側には高尾山、福万山、高陣ヶ尾等の活動期の新しい火山が分布している。調査測線は、大型バイブレータ震源(3台)の発震点を最大限確保する観点から、別府-島原地溝帯南部に位置する旧町道中川-下湯平線、JR久大本線周辺の由布院盆地水田地域における旧町道、県道安心院-由布院線に沿って設定された。発震測線の屈曲度は比較的大きく、また測線内の高低差は比高変化にして250mに達する。

別府湾西岸測線は、大分県速見郡日出町より、国道10号線日向街道沿いに、別府市街南東端を経て大分市との境界に至る約11.2kmの測線であり、大型バイブレータ2台を用いて、展開長約960mの移動展開(北端発震)によってデータが取得された。国道10号線は非常に車両通行量が多く、大型車両に起因する顕著なノイズレベルを回避するための、発震作業は夜間に実施された。

② 新規地震探査測線及びデータ取得仕様概要

大分平野及び別府扇状地において、下記の計5測線(総測線長 21.2km)のデータが新規に取得された。表 3.2.2-3 に各測線のデータ取得仕様概要を示す。

表 3.2.2-3 新規構造探査測線に関するデータ取得仕様一覧

データ取得	2015年8月4日-8月12日			2016年10月18日-10月25日		
調査実施機関	京都大学理学部			京都大学理学部		
調査測線	2015大分平野地質構造調査 陸域測線			2016大分平野・別府扇状地地質構造調査 陸域測線		
測線名	Line-1		Line-C	Line-A	Line-2	Line-B
調査項目	反射法	屈折法	反射法	反射法	浅部屈折法	反射法
測線エリア	大分県大分市			大分県大分市		大分県別府市
測線長	12.2km		0.8km	3.4km	1.2km	3.6km
受振系						
受振点間隔	12.5m		25m	10m	50m	10m
総受振点数	883点		36点	323点	25点	332点
探鉱器	GSR+MS2000		GSR	GSR+RT2	RT-2	GSR
受振器(10Hz)	SM24-3S/GS-one		GS-one	SM24-3S/GS-one	SM24-3S	GS-one
展開長	Split-Spread [片側6.0km以上]	固定展開		固定展開		
震源系						
震源	中型バイブレータ			中型バイブレータ		
バイブレータ台数	2台(標準)			1台(標準)		
スイープタイプ	Linear-Up sweep/MD sweep		MD sweep	Linear-Up sweep		
スイープ長	17sec	20sec	17sec	16sec	16sec	16sec
スイープ周波数	Linear-Up sweep...8-80Hz MD sweep...6-80Hz		6-80Hz	8-100Hz	8-30Hz	8-100Hz
バイブレータアレイ	B-B			-		
発震回数/VP	2回	20回	2回	3-12回	10回	3-12回
発震点間隔	12.5m	500m	25m	10m	100m	10m
発震点数	690点	20点	28点	290点	13点	300点
記録系						
サンプリングレート	4msec			2msec		
記録長	6sec	12sec	6sec	6sec	12sec	6sec
プリアンプゲイン	GSR...30dB, MS2000...31dB		30dB	30dB		

この新規構造探査測線の内、主たる反射法測線である Line-1, Line-A 及び Line-B に関して、測線状況、調査内容及びデータ品質について、その概要を記述する。

[1] Line-1(大分平野東西横断測線)

大分市田室町交差点を起点として市道を東進し、大分市住吉町新川の交差点に至る 1.5km の Line-1 西端区間(府内断層を横断)は、市街化が進んだ住宅地域に位置し、教育施設及び病院が点在しているため、発震エネルギー調整及び受振器展開(地面等への受振機材固定)における保安対策を講じた。測線屈曲を伴う西部区間以外の測線区間は、大半が県道 22 号線大在大分港線(臨海産業道路)に位置し、大分市大住北 3 号線入口交差点が東端である。この臨海産業道路では、片側三車線を通行する車両ノイズが卓越し、基底ノイズレベルが極めて高い領域が全域に及んだ。また、調査測線近傍には商業店舗を中心とした中層ビルが散在しているため、発震点位置毎にバイブレータ発震出力の調整を綿密に実施した。本調査測線は、交通量の極めて多い臨海産業道路沿い及び住宅・商業店舗が密集する市街地に位置したため、全区間において独立型受振システムを採用した。こうした独立型受振システムは、従来の有線テレメトリー記録装置と比較

して可搬性に優れ、交通量の多い幹線道路、河川、標高差を伴う地形変化、ノイズレベル等の測線状況を考慮して、非常に自由度の高い受振点位置の設定が可能であった。Line-1 反射法データ取得では、測線西端の 1.5km 区間では、中型バイブレータ 1 台（制御出力 30%）による低エネルギー発震の制約があったが、往復走時 0.5-0.8 秒まで反射波列の把握が可能であった。また、臨海産業道路沿いでは、中型バイブレータ 2 台（制御出力 70%以上）による標準出力による発震点を確保したものの、極めて高い基底ノイズレベルに影響を受けると共に、新日鉄住金大分製鉄所の正門以東では、急激な速度低下(800-1200m/sec)領域が出現し、地表近傍における発震エネルギー減衰に伴うデータ品質低下域が顕著となった。この測線東部区間では、分散性表面波のレベルは低いものの、P 波を著しく減衰させるピート層、泥炭層及び浅層ガス混在層等の不飽和層分布に起因する品質低下によって、大分層群及び碩南層群相当の往復走時 0.5-1.0 秒までの反射波列が断片的に見出されたに止まった。図 3.2.2-18 に受振機材展開及び発震作業に関する現場写真を示す。



図 3.2.2-18 探査データ取得状況を示す現場写真

[2] Line-A(大分平野南北横断測線)

Line-A は、大分県大分市向原西地区を北端起点とし、市道向原南北線を南進し、大分市向原東日岡交差点を経て、県道 610 号松岡日岡線を南進し、測線南端の大分市法勝台地区に至る。本測線沿いには、家屋及び商業店舗が散在しているため、発震点位置毎にバイブレータ発震出力の調整を綿密に実施した。本測線では、車両通行ノイズが卓越しており、基底ノイズレベルが極めて高い領域が全域に及び、発震記録上で明瞭な反射波列を確認することは難しいものの、往復走時 0.5 秒まで反射波列の把握が可能であった（図 3.2.2-19）。

[3] Line-B(別府扇状地南北横断測線)

Line-Bは、測線北端の大分県別府市石垣地区を起点とし、県道645号亀川別府線を南進し、別府市田の湯町流川8丁目交差点を経て、市道朝見光町線を南進し、測線南端の別府市朝見地区に至る。本測線では、車両通行ノイズが卓越しており、基底ノイズレベルが極めて高く、約200m間隔で実施した高エネルギー発震の記録においても、屈折初動が確認可能なオフセット距離は約1.5km程度に限定された。但し、中型バイブレータ1台（制御出力30%）による低エネルギー発震の制約があったが、往復走時0.5-0.8秒まで反射波列の把握が可能であった（図3.2.2-20）。

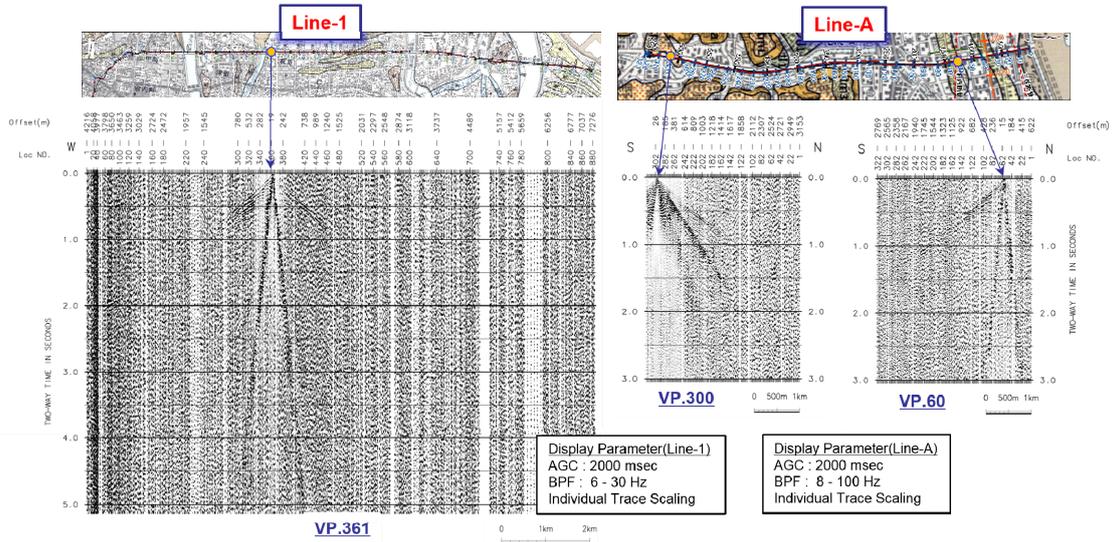


図3.2.2-19 発震記録例 右図がLine-A反射法記録、左図がLine-1反射法-屈折法記録

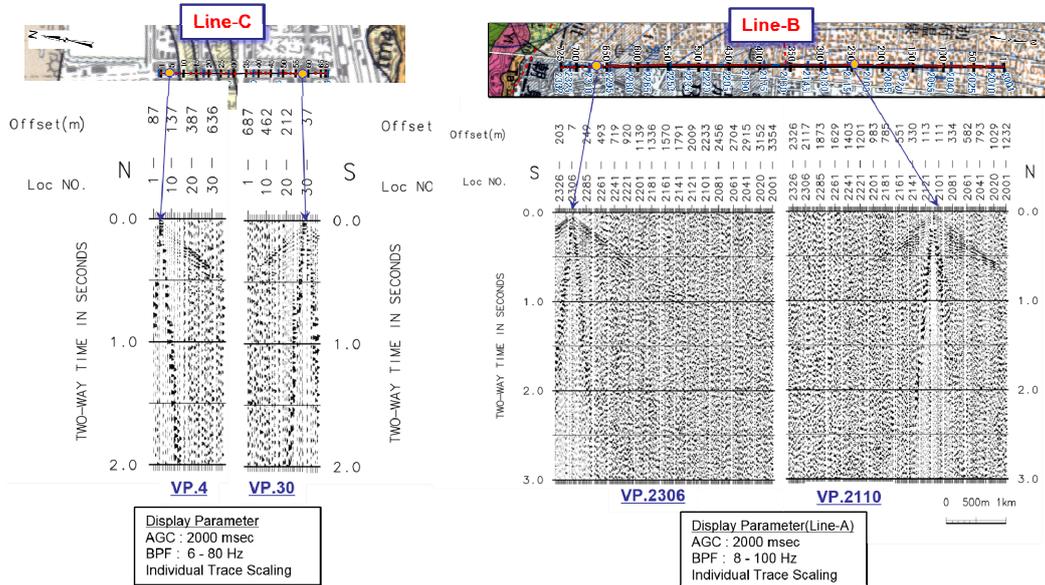


図3.2.2-20 発震記録例 右図がLine-C反射法記録、左図がLine-B反射法記録

③ 反射法データ解析

既存データ再解析及び新規データ解析に関しては、複合型ノイズ抑制処理、屈折波-反射波静補正、ウェーブレット処理、速度推定、MDRS解析及び重合後マイグレーションから構成されるデータ処理フローを採用した。図3.2.2-21に、反射法データ処理フローを示す。また、図3.2.2-22

には、Line-A に関する CMP の各種情報(重合数分布、オフセット距離分布、アジマス分布、標高分布及び CMP 偏倚分布)を測線情報確認の例として示した。

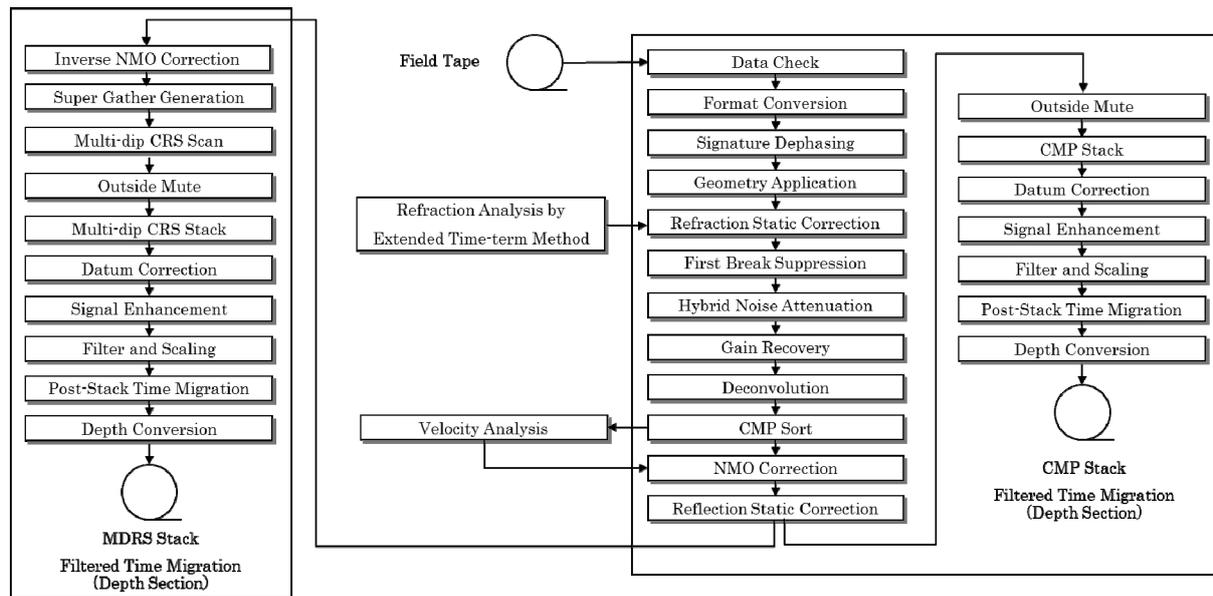


図 3. 2. 2-21 反射法データ処理フロー

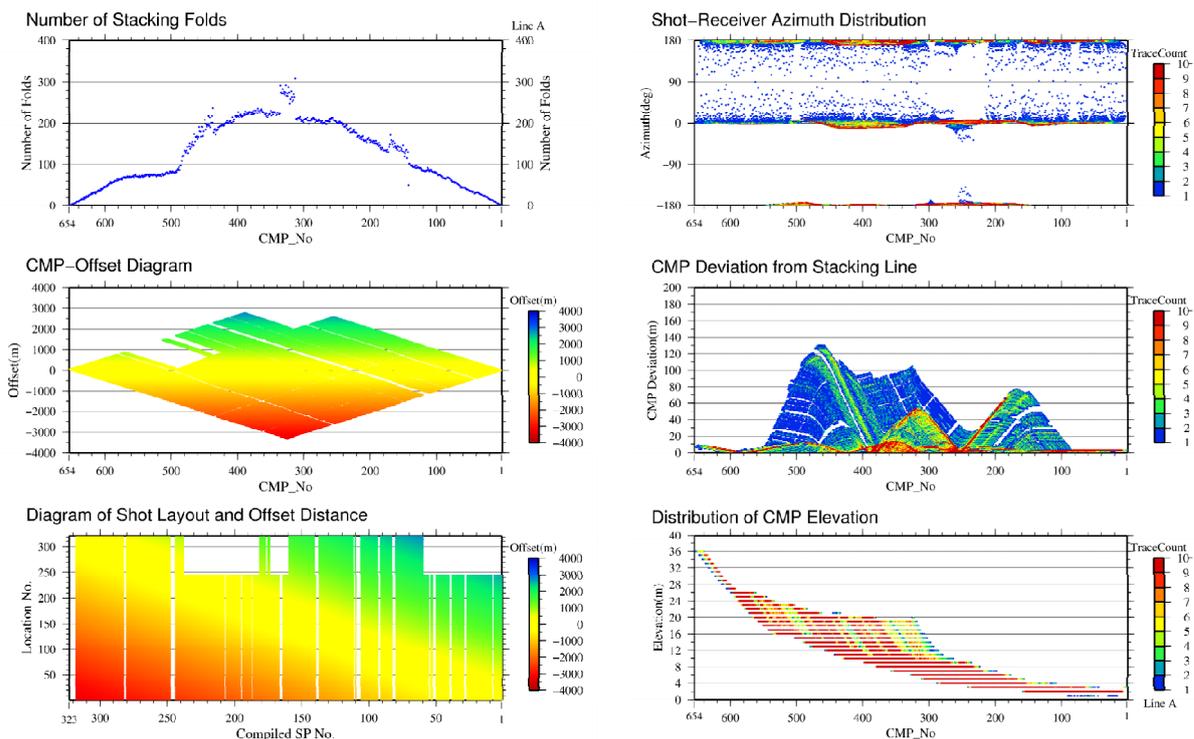


図 3. 2. 2-22 取得データに関わる CMP 各種ジオメトリー表示結果 (Line-A)

本データ再解析において、データ解析フローを構築する際の主たる課題は、多様なノイズを抑制する最適な複合型抑制処理の設計と共に、不均質表層構造に対応する広波長帯域の静補正適用であった。以下に、その概要を記述する。

[1] 各種ノイズに関する複合型抑制処理の適用

解析対象データには、分散性の強い表面波、音波、S波、側方反射波及び屈折多重反射波等のコヒーレントノイズ、ランダムノイズに加えて、地表近傍における後方散乱波等の非定常ノイズ、さらに、車両通行等に起因する強振幅一過性ノイズが混入した。こうしたノイズは過大振幅及び空間エイリアジングを伴うため、複層的な各種ノイズの特性を把握し、各種抑制処理手法を選択し、複合適用を図った。こうした各種ノイズの的確な抑制は、速度推定の精度向上、MDRS解析による微弱な反射波抽出、マイグレーション処理の解像度改善等に帰結する。従って、本解析では、各種ノイズの特性把握を通じて、最適な抑制手法の選択と複合化を実施した。表 3.2.2-4 に各種ノイズ抑制処理手法の一覧を示す。

表 3.2.2-4 各種ノイズ抑制処理手法一覧

分類	種類	適用対象ノイズ	特徴
予測型	F-X予測フィルター	ランダムノイズ	線形イベントを保持
エディット型	Data adaptive time-variant filter	局所的な強振幅ノイズ	コヒーレントノイズ(表面波など)も抑制可能 強振幅反射波を損傷する可能性
	F-Xエディット		連続性を持つ波の振幅を保存 ランダムな強振幅成分を抑制
走時差準拠型	F-Kフィルター	コヒーレントノイズ	不規則ジオメトリへの対応困難
	F-X速度フィルター		不規則ジオメトリへの対応可能
	線型ラドン変換法		
アレイフォーミング型	ビームステアリング法	コヒーレントノイズ ランダムノイズ	到来方向の調整で反射波の損傷低減

この複合型ノイズ抑制処理として、第一に、車両ノイズを含む比較的強振幅の一過性ノイズに対して、エディット型局所的強振幅ノイズ抑制処理を適用した。この処理手法では、細分化した時間ゲート毎に特定の周波数範囲での平均振幅が計算され、指定した閾値を超えるゲートに対して振幅のスケーリング調整が直接適用された。第二に、分散性の強い表面波及び比較的継続時間の長い屈折多重反射波の除去を目的に、線形ラドンフィルターを共通発震記録及び共通受振記録の両領域に対して適用した。さらに、ランダムノイズ抑制を目的として、周波数-空間領域において複素型予測フィルターを設計・適用した。

[2] 広波長帯域の静補正適用

大分平野東部臨海地域におけるピート層、泥炭層及び浅層ガス混在層等の地震波減衰を伴う不飽和表層が存在する地表条件下において、浅層速度構造の把握、さらには短波長から長波長までの広波長帯域における静補正值推定は、極めて重要な課題であった。本解析では、浅層速度構造の把握には、改良型タイムターム法及び屈折トモグラフィ解析を組み合わせた手法を精査し、精密な浅層速度構造を推定し、併せて、中長波長の静補正值を算出する必要があった。従って、中短波長静補正值の推定については、改良型タイムターム法の適用と共に、低 S/N データ品質に対応可能な' Global Optimization' 型の' Surface-consistent' 残差静補正解析を複合適用によって、反射波イメージングの向上を図った。陸域データ再解析に関しては、各種ノイズ抑制処理、屈折

波-反射波静補正、ウェーブレット処理、速度推定及びマイグレーション処理に関わる総ての処理ステップを見直した。

[3] 高精度イメージング解析

本解析では、標準データ解析において、残差静補正までの基本処理を適用したデータを入力として、MDRS (Multi-Dip Reflection Surface) 法による高精度イメージング処理を実施した。解析手法は、前述の海域データへの適用と同一である。

④ 屈折法データ解析

本業務では、大分平野で新規に取得した Line-1 及び Line-A, 別府扇状地で新規に取得した Line-B に関して、稠密反射法及び広角反射法データの屈折初動を入力として、図 3. 2. 2-23 に示す屈折波トモグラフィ解析を実施した。

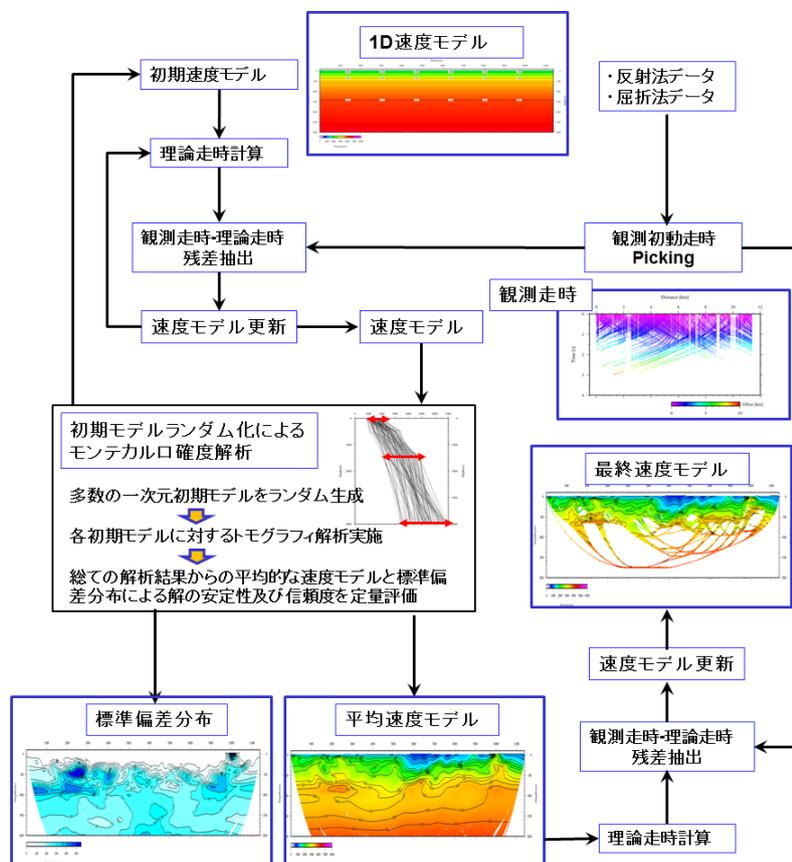


図 3. 2. 2-23 屈折トモグラフィ解析 処理フロー

今回、屈折トモグラフィ解析の結果に対する信頼性の評価を与える方法として初期モデルランダム化によるモンテカルロ型信頼性評価解析(白石他、2010 ; Zhang and Toksoz、1998)を採用した。この手法では、一定の条件化でランダムに生成した多数の初期モデルに対してトモグラフィ解析を実施し、すべての結果を平均化した速度分布およびその平均値からの偏倚を示す標準偏差分布が得られる。これらの情報は、トモグラフィ解析による最終速度構造モデル及びその確実度に関わる指標として用いられた。本解析では、初期モデルとして線形勾配を持つ一次元速度モデルを100個ランダムに生成した。図 3. 2. 2-24 に Line-1 及び Line-A に関する屈折法解析結果を示す。

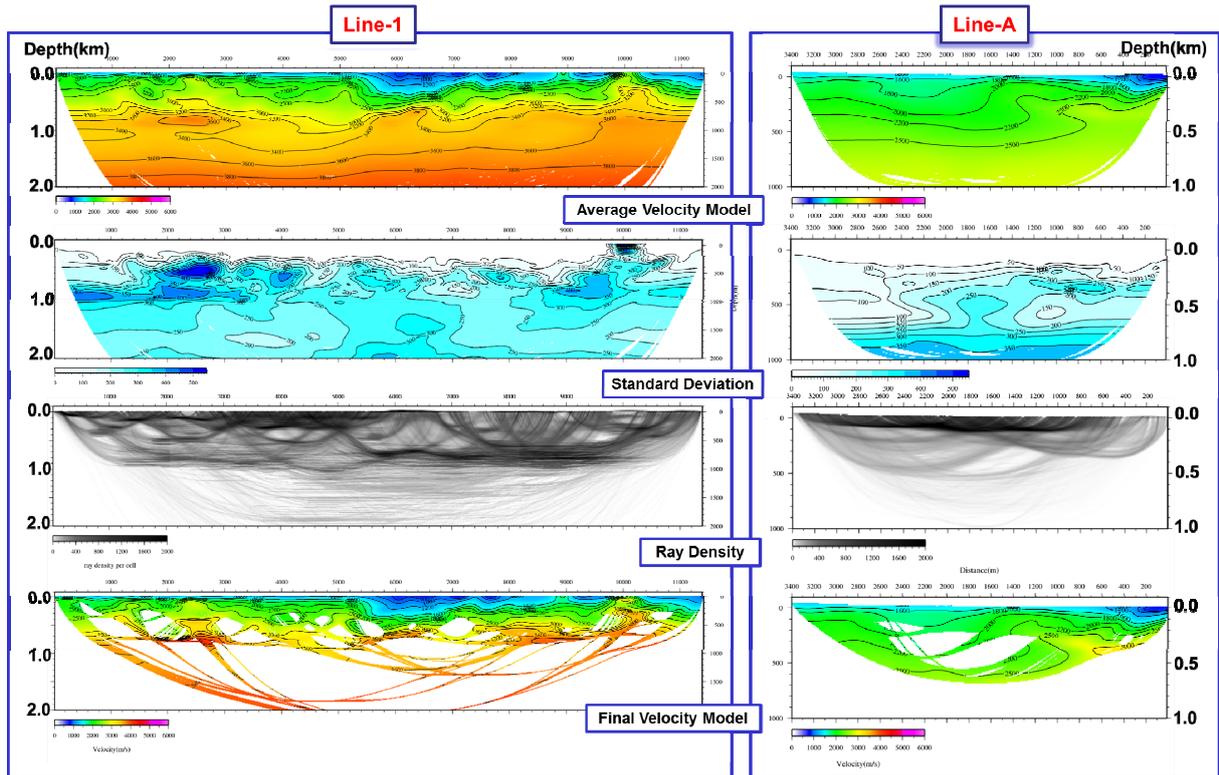


図 3.2.2-24 屈折トモグラフィ解析結果。上図から順に、100 個の初期モデルから得られた計算結果の平均速度分布、標準偏差分布、波線密度分布、そして、平均化速度モデルを初期モデルとする再解析結果である。左側に Line-1 に関する解析結果を、右側に Line-A に関する解析結果を示す。

⑤ データ処理結果

反射法及び屈折法データ処理を経て、最終的なデータ処理結果を得た。大分平野における既存データであるに大野川測線及び大分川測線に関わる再解析深度断面図を、各々図 3.2.2-25 及び図 3.2.2-26 に示す。また、新規取得データに関して、図 3.2.2-27 に MDRS 反射法解析を適用した Line-1 の深度断面図を示す。また、図 3.2.2-28 に、重合後マイグレーション処理深度記録 (MDRS 解析) に屈折トモグラフィ解析による最終深度速度構造を重複表示した。この図には、大分平野北部における温泉坑井の層序情報(森山・日高、1981、1986) ; 日高・森山、2000)に準拠した坑井地質層序図を記載した。さらに、Line-A 及び Line-B に関する MDRS 解析深度断面図及び屈折法解析結果を、図 3.2.2-29 及び図 3.2.2-30 に示す。

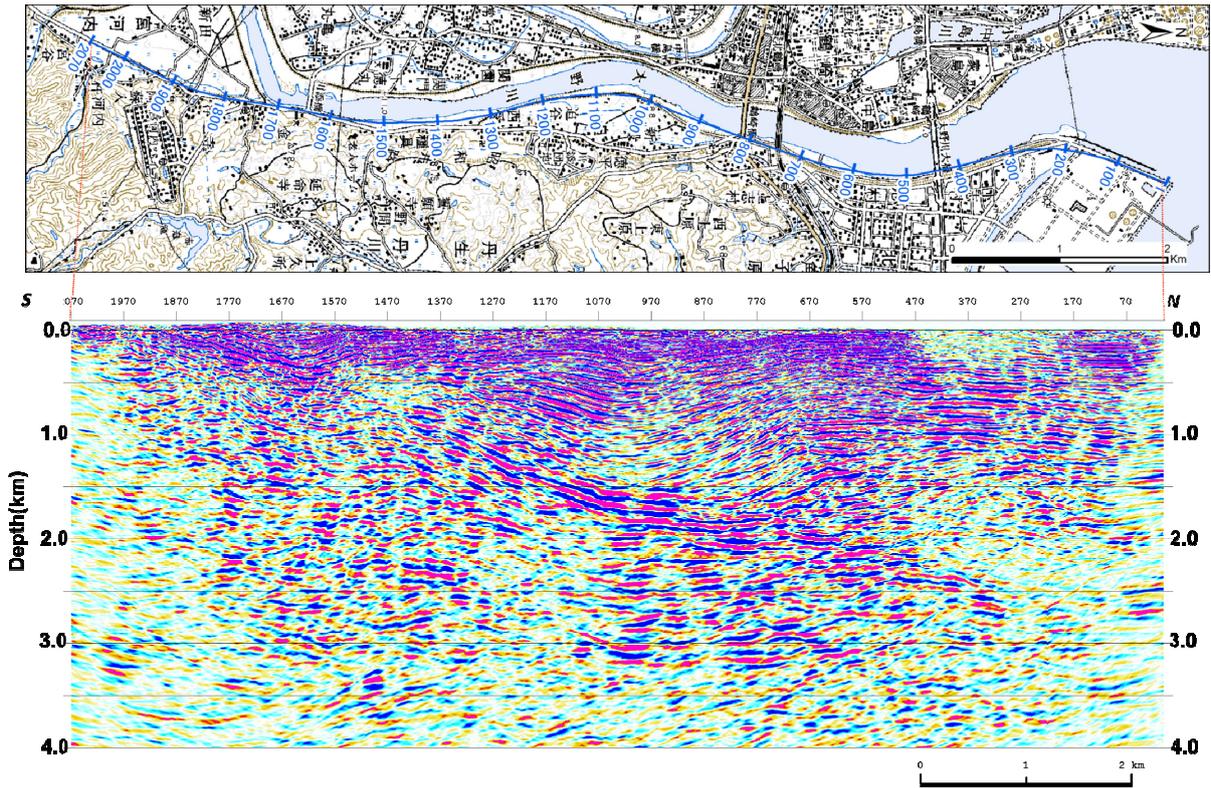


図 3.2.2-25 大野川測線 MDRS 解析深度断面図

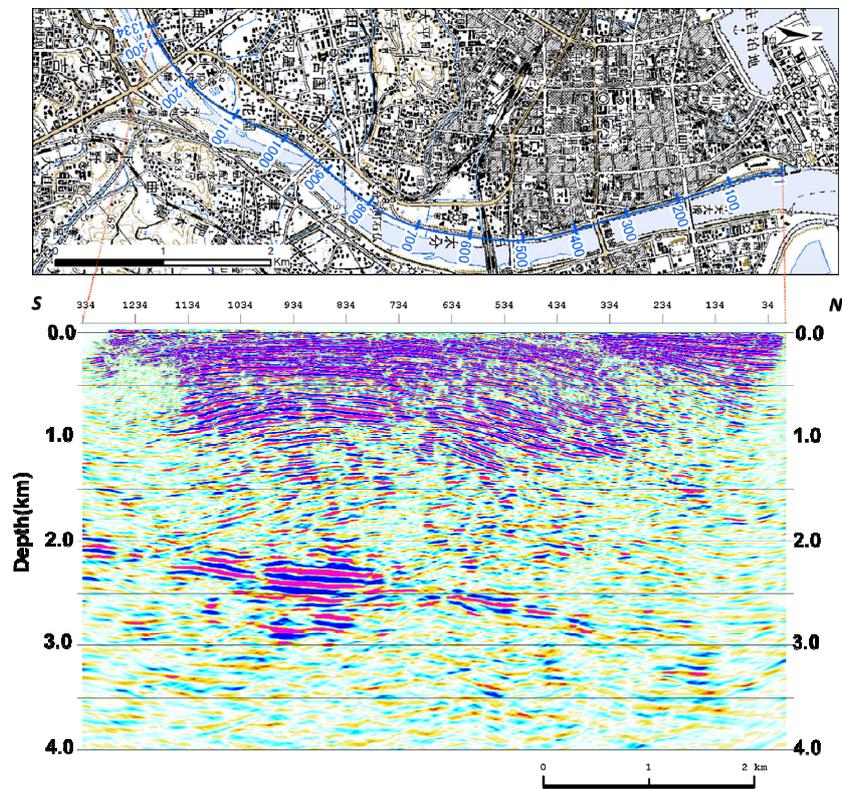


図 3.2.2-26 大分川測線 MDRS 解析深度断面図

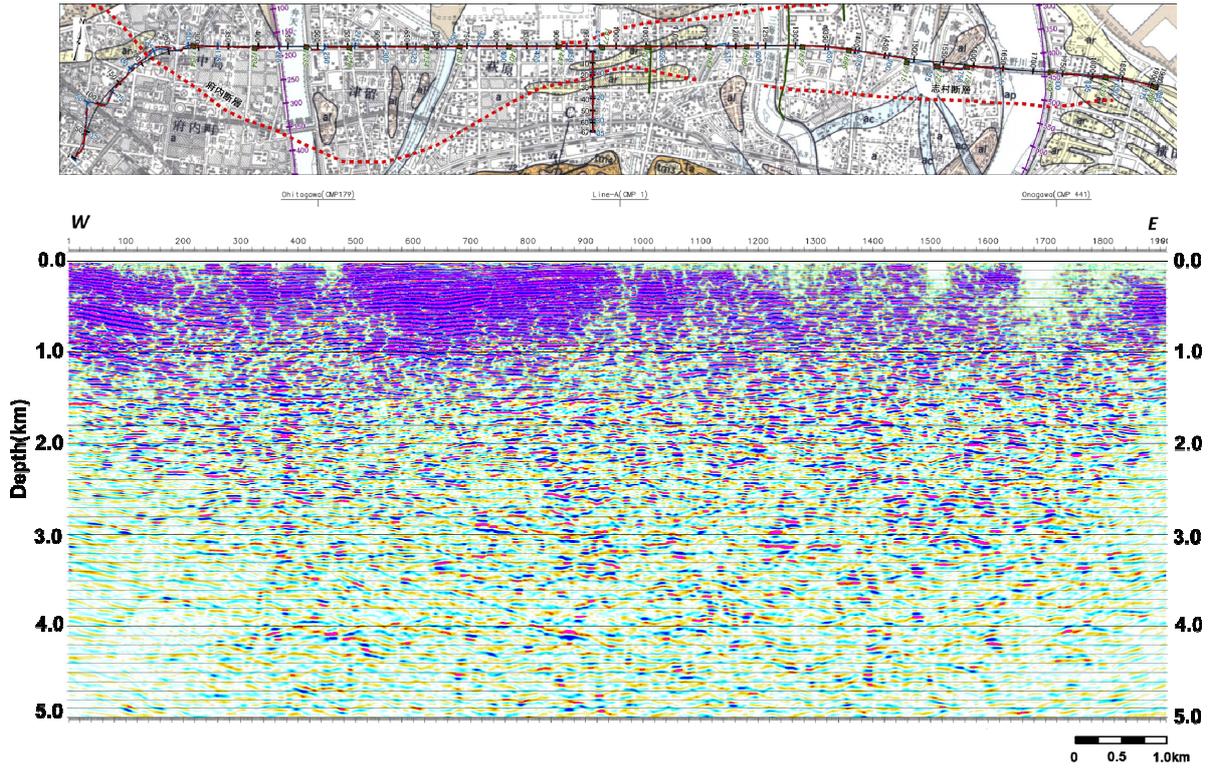


図 3.2.2-27 大分平野横断東西測線(Line-1) MDRS 解析深度断面図

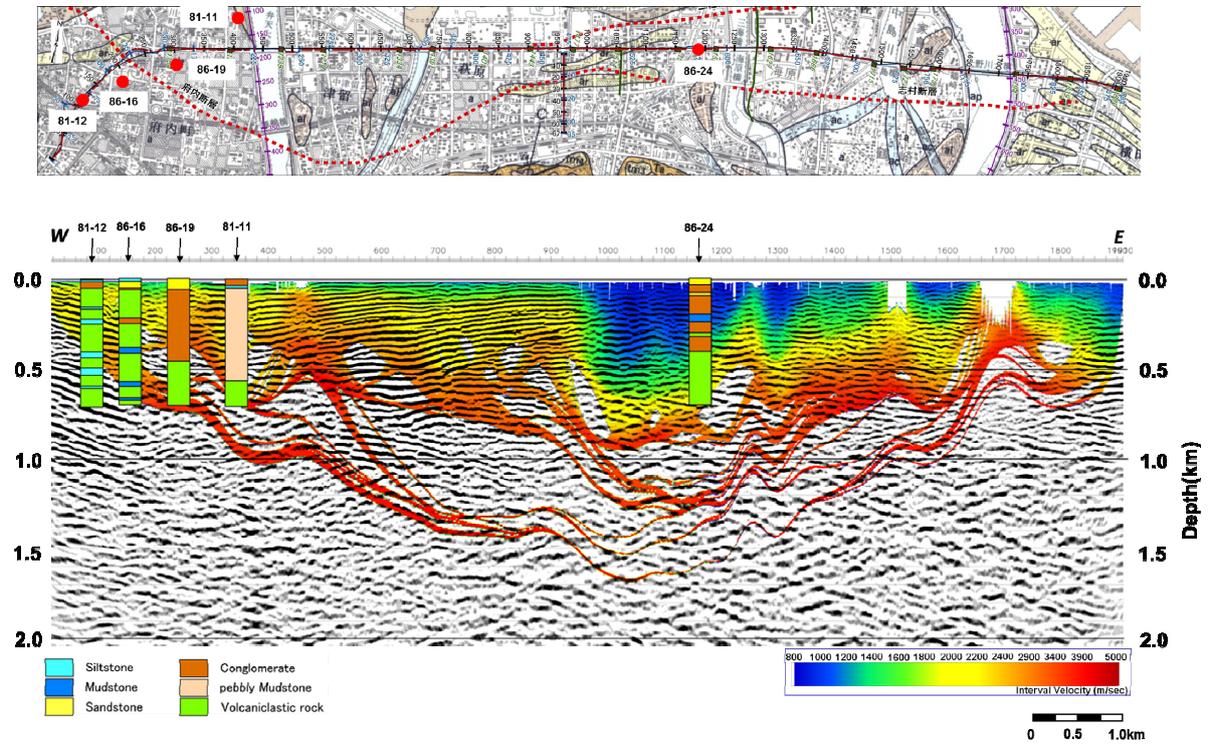


図 3.2.2-28 大分平野横断東西測線(Line-1) 反射法-屈折法解析結果_統合表示図。/森山・日高 (1981、1986)及び日高・森山 (2000)に準拠した温泉井地質層序図を併記。

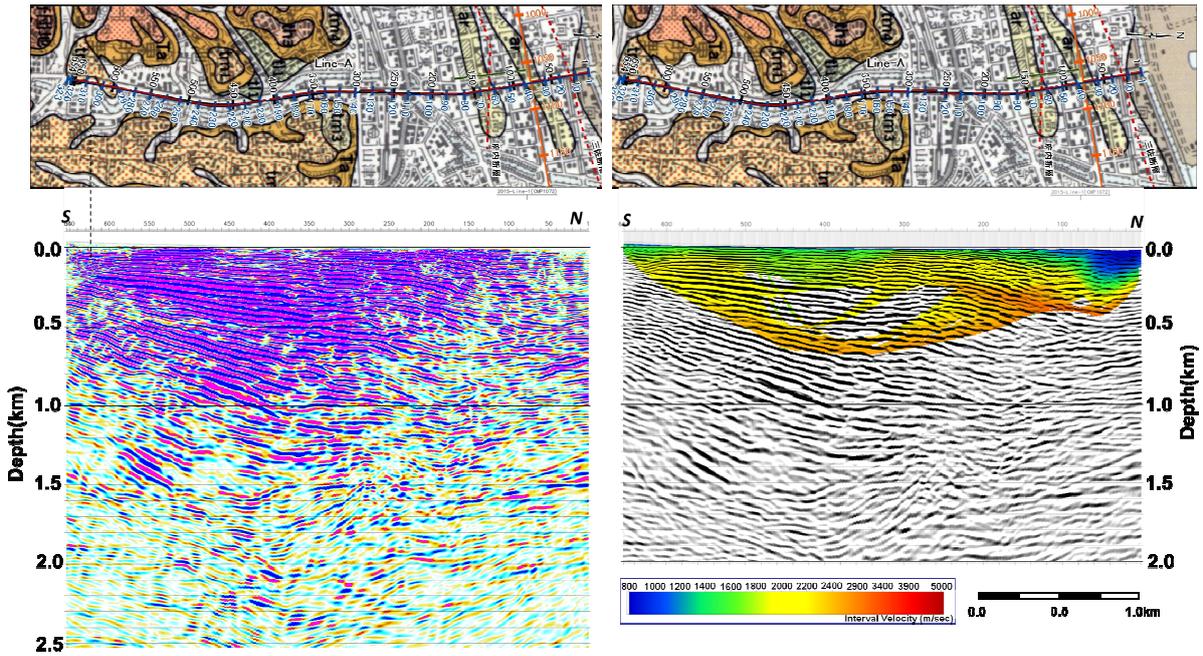


図 3.2.2-29 大分平野横断南北測線 (Line-A)
 (右)MDRS 解析深度断面図 (左) 反射法・屈折法解析結果_統合表示図

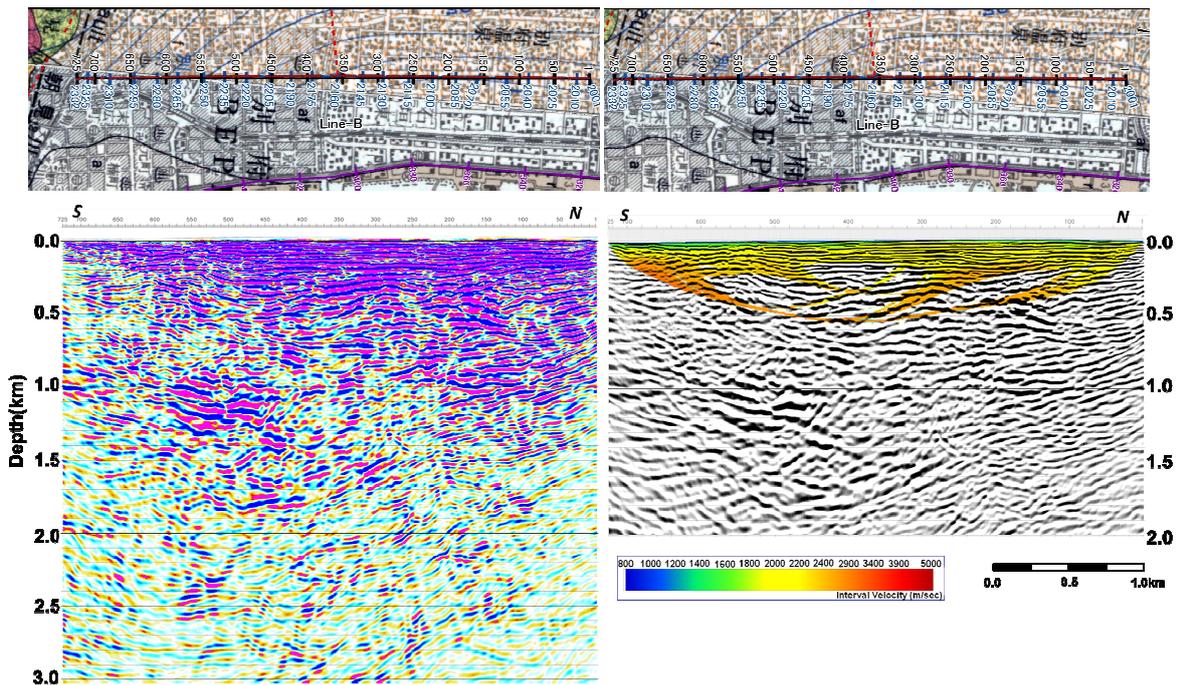


図 3.2.2-30 別府扇状地横断南北測線 (Line-B)
 (右)MDRS 解析深度断面図 (左) 反射法・屈折法解析結果_統合表示図

⑥ 大分平野及び別府扇状地に関するデータ解析結果総括

千田・他(2004)及び地震調査推進本部(2005)によると、大分平野北部の別府湾南岸地域においては、大分層群及び碩南層群相当層中の北傾斜の不連続構造として、東北東-西南西の走向を持つ

三佐断層、志村-府内断層からなる別府湾南岸断層が議論されている。東西測線Line-1において、府内断層はCDP. 220近傍を横断する。今回の解析結果からは、現在の府内断層は、反射パターン及び断層上盤側の相対的な高速度領域の存在として、初生的には北落ちの正断層がインバージョンしている形状を持つことが示唆された。また、同じく東西測線Line-1において、三佐断層はCDP. 950近傍で斜交し、反射パターンの不連続及び屈折トモグラフィによって推定された速度の急変箇所に該当する。しかし、府内断層及び三佐断層共に横ずれ成分が卓越しているため、二次元断面図の解釈に関する限界は否めない。Line-1及びLine-Aを参照すると、沖積層、段丘堆積物から大分層群最上部に至る堆積体は測線南部で薄化し、北部で厚化形状を示す'Downlap'する堆積体として認定される。この'Downlap'する部分はデルタ・フロントに該当することが推定される。Line-A全域では、深度1200 m程度まで非常に'Reflective'な特徴を示す一方、その下位では、相対的に反射波群の同定が困難である。これは、中型パイプリータ1台による震源エネルギー透過深度の制約と共に、碩南層群相当の層準では敷戸火砕流堆積物(前期更新統)の塑性流動が卓越し、'Chaotic'な反射パターンが生成された可能性がある。Line-A北端部(CMP. 1 - 90)では、急激な速度低下(800 -1200 m/sec)及び表層深度(800-100m)が増大する領域が出現し、Line-1の結果と整合し、地表近傍における発震エネルギー減衰に伴うデータ品質低下域が小中島川まで続くことが確認された。特に、乙津川左岸域でこの傾向が顕著であった。この要因としては、P波を著しく減衰させるピート層、泥炭層及び浅層ガス混在層等の不飽和層分布、未固結層自体の不均質変化等の影響が示唆されていた。図3. 2. 2-28に示す様に、エネルギー減衰及び速度低下区間は、礫層卓越領域に該当し、浅層ガスの集積を伴っていると考えられる。

別府扇状地全域では、深度1200m程度まで非常に'Reflective'な特徴を示す一方、その下位では、相対的に反射波群の同定が困難である。深度300m程度までの表層部には'Truncation'や'Channel'構造等を認定することができ、堆積構造が明瞭である。その下位にはマウンド状の形状を示唆する構造が確認でき、やや強振幅を伴うが、大分平野で確認された厚い堆積層は別府陸域では存在しないことが示唆される。

大分平野の堆積構造を規定する上で、白亜系大野川層群を堆積層に含めるか否かに議論がある。泥岩、砂岩及び礫層の交互層から成る大野川層群は、層相の側方不均質が顕著であり、淘汰が良好ではない固結度の高い多様な礫種から構成され(三郡変成岩由来を含む)、一方、三波川変成岩類は、佐賀関山地から北西の大分平野地域へと、大野川層群下に潜り込んでいる。Line-1西部及び大分川測線の1500m以深における'Chaotic'な反射パターンは、この白亜系大野川層群の可能性も示唆されていたが、本業務を通じて、温泉坑井層序情報を集積した結果、碩南層群内の敷戸火砕流堆積物(前期更新統)の塑性流動によって解釈が可能である結論に至った。大分平野における強震動予測の高精度化に向けた三次元速度構造モデルの構築では、断層位置及び断層ジオメトリの把握と共に、三波川変成岩による基盤構造の把握が重要な課題である。従って、大分平野において広域的に観測された稠密重力データを用いて、測定による三次元重力モデリング-インバージョンを実施することが望まれる。想定する地質構造モデルとしては、沖積層-大分層群-碩南層群で構成される上位堆積層、三波川変成岩類からなる基盤面に加えて、領家花崗岩類・白亜系大野川層群を定義し、その三次元的な層厚変化を推定することが必要である。尚、Line-A及び大野川測線における向斜構造が連続するならば、基盤上面の等深度面と褶曲軸との斜交関係は、基盤上

面がデコルマ断層となっていることを示唆している。さらに、別府湾及び大分平野においては、デコルマ断層を含む広域の'Wrench Tectonics'が地質構造形成を規定していると考えられる。

以上の様に、別府湾周辺地域において、既存地震探査データの最新技術による再処理に加えて、制御震源を用いた反射法・屈折法地震探査データを用いた統合解析によって、別府湾南岸断層の位置・形態及び地下構造を理解する上で重要な知見が提示できたものと考えられる。これは、稠密固定展開による反射法-屈折法統合データの取得を基本としたデータ取得仕様の決定に負う所が大きい。本調査では、全発震記録に関して固定展開によるデータ取得を実施した結果、反射法及び広角反射法と併せて、稠密発震記録を用いた'Turning Ray'トモグラフィ解析に資するデータを取得することができた。このトモグラフィ解析は初期モデルランダム化による誤差評価を含むものであり、反射法データとの統合解釈及び速度評価の高精度化に大きく寄与した。また、'Half-integer'発震を伴う完全な対称サンプリング及びスタックアレイの構築によるデータ取得を実現できたことは、市街地における高ノイズ環境において、CMP重合効果、空間エイリアジングの低減及び共通受振領域を含めたノイズ抑制処理の最適化が図り、浅部構造のイメージング向上に帰結したと考えられる。

図 3. 2. 2-31 に MDRS 重合深度記録に関する四方向からの鳥瞰表示図を示す。今後、本再解析結果が、各種の地震波アトリビュート表示、さらには三次元重力モデリング-インバージョンを通じて、別府湾南岸断層の基本ジオメトリー把握、大分平野速度構造モデルの構築、さらには、Itoh et al. (2014)等による最近の研究成果を参照し、別府湾及び別府-島原地溝の形成過程に関わる統合解釈が進展することを期待したい。

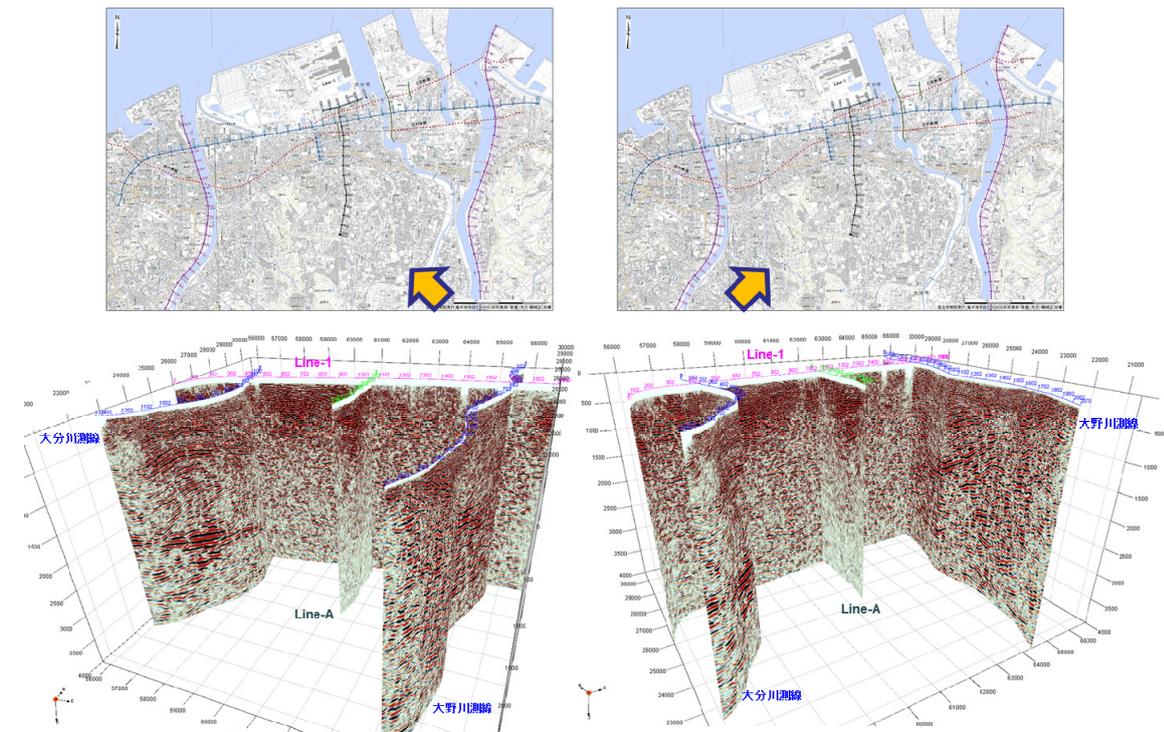


図 3. 2. 2-31 大分平野深部構造探査断面_鳥瞰表示図

ii) GPS および地震観測:熊本地震発生前の地震活動と鶴見岳火山との関係

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設は、別府地溝および周辺地域の地震活動とテクトニクスに関連などを研究するために、1993年に5ヶ所に独自の地震観測点を設置し観測を行ってきた。2008年4月以降は、上述の観測点に加え、九州大学、Hi-net、気象庁および火山研究センター（京大阿蘇）のデータの統合処理をおこなっている。図3.2.2-32には、2008年4月から2014年6月までの間に発生した地震の震央分布図および東西断面である。この図から、大分平野-由布院断層帯と別府湾-日出生断層帯に挟まれた別府地溝は周辺地域にくらべてサイズシシティが高いこと、また、大分平野-由布院断層帯東部の朝見川断層沿いではサイズシシティが低いことがわかる。また、地震発生層の厚さは（震源の下限の深さ）は伽藍岳および鶴見岳の下でもっとも薄く（浅く）なり、ここから東西にむけて深くなっていく。これらは古川・他（2000）が求めた1993年から2000年までの震源分布にも見られる特徴である。電磁気探査によると、震源の下限の浅い領域の比抵抗は低く（NEDO, 1989）、この領域の温度が高いことが示唆される。

また、Nagasaki et al. (2017)は、鶴見岳山頂熔岩中の角閃石の化学組成に対して角閃石温度圧力計を適用し、角閃石の

平衡温度圧力条件を見積もった。その結果、この熔岩中の角閃石は、およそ93-242MPa（およそ3.4~9kmの深さ）で平衡状態にあったことが明らかになった。この深さは、鶴見岳直下の地震空白域に対応し、この領域にマグマ溜まりが存在する可能性高い。図1には、1997年10月から2014年6月までの間に発生した、深部低周波地震の震源も示されている。これらの地震はマントル上部からのマフィックメルトの移動に対応するものであろう。

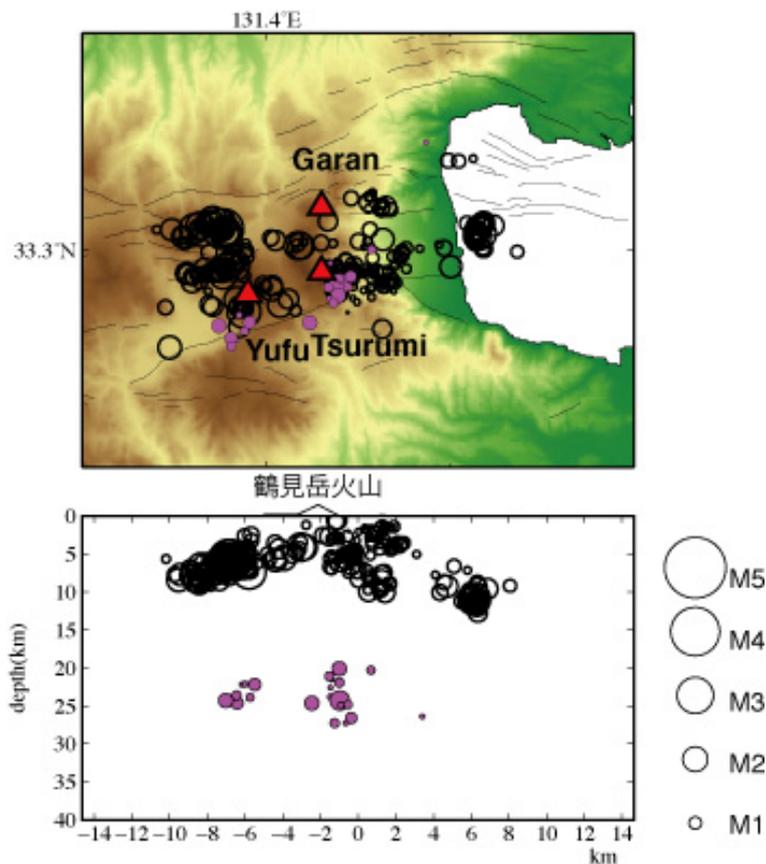


図 3.2.2-32 別府周辺で発生する地震の震央分布図および東西断面図。2008年4月から2014年6月までに発生した地震のP,S波到着時間を手動で再観測し、震源決定を行なった。また、●は1997年4月から2014年6月までの深部低周波地震（震源要素は気象庁による）。▲は活火山を表わす。

レシーバ関数法による地殻構造解析

我々は、九州地方のモホ面の深度分布を明らかにするために、九州地方に設置されている 120 点の地震観測点(京都大学、Hi-net、気象庁、九州大学、鹿児島大学)のデータを用いたレシーバ関数解析を行った。用いたのは、1996 年 8 月から 2010 年 5 月までの間に発生した遠地地震(マグニチュード 5.5 以上、震央距離 $30\sim 90^\circ$)の地震波形である。これらの波形に時間拡張型マルチテーパ(Shibutani et al., 2008)を適用してレシーバ関数(RF)を作成した。次に、作成した RF を Matsubara et al. (2008) が求めた 3 次元速度構造を用いて深さ領域に変換しスタックした。そして、緯度・経度 0.1 度毎に、スタックした RF からモホ面に対応するピークを自動的に読み取り、モホ面深度を決定した。

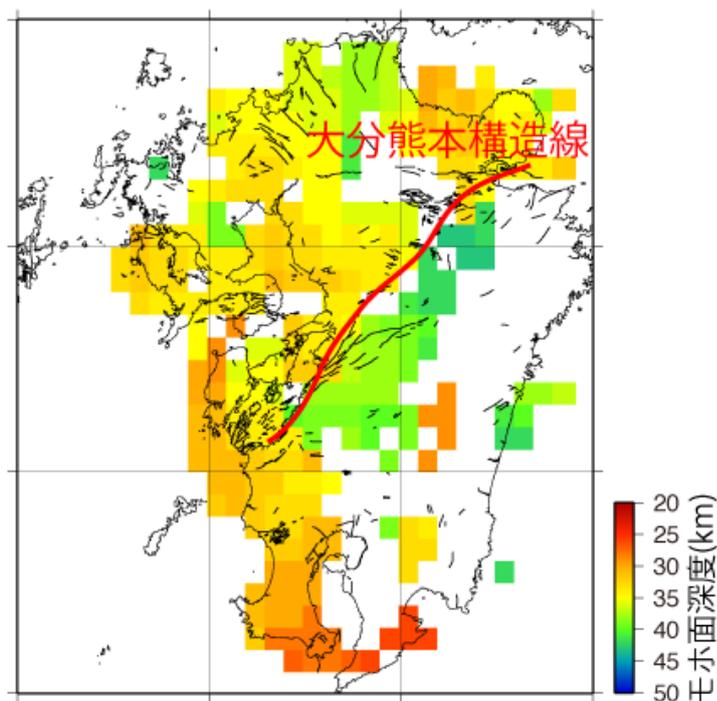


図 3. 2. 2-33 レシーバ関数解析によって求められたモホ面の深度分布

図 3. 2. 2-33 には上述の RF 解析から求められたモホ面深度が示されている。大分熊本構造線を境界としてモホ面の深度が大きく異なり、2016 年熊本地震を引き起こした日奈久断層帯や布田川断層帯はその境界近傍に位置している。一方、別府周辺地域のモホ面深度は 30km~35km であり、この領域においては、モホ面深度は大きくは変化していない。

iii) 重力探査

重力探査では、大分市内において大分駅前、高城駅前、鶴崎駅前を起点にして測定を実施した(図 3.2.2-34)。使用した重力計はシントレックス社製 CG-3+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た。各測定点の座標(緯度, 経度, 標高)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。重力基準値は国土地理院によって重力値が測定されている大分市中央町一等水準点 1935 (979541.04mgal) を使用した。重力異常図は 3 年間の重力測定データ 516 点に既存の重力点 93 点(産総研地質調査総合センター(編), 2013, Gravity research group in southwest Japan, 2001) を加え合計 609 点のデータに対して各種重力補正(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)を行い作成した(図 3.2.2-35)。重力異常図を作成する際の補正密度は Murata (1993) の方法を用いて 2450 kg/m^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)では粗すぎるため、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 50 m メッシュの地形データを用いて地形補正を行った。

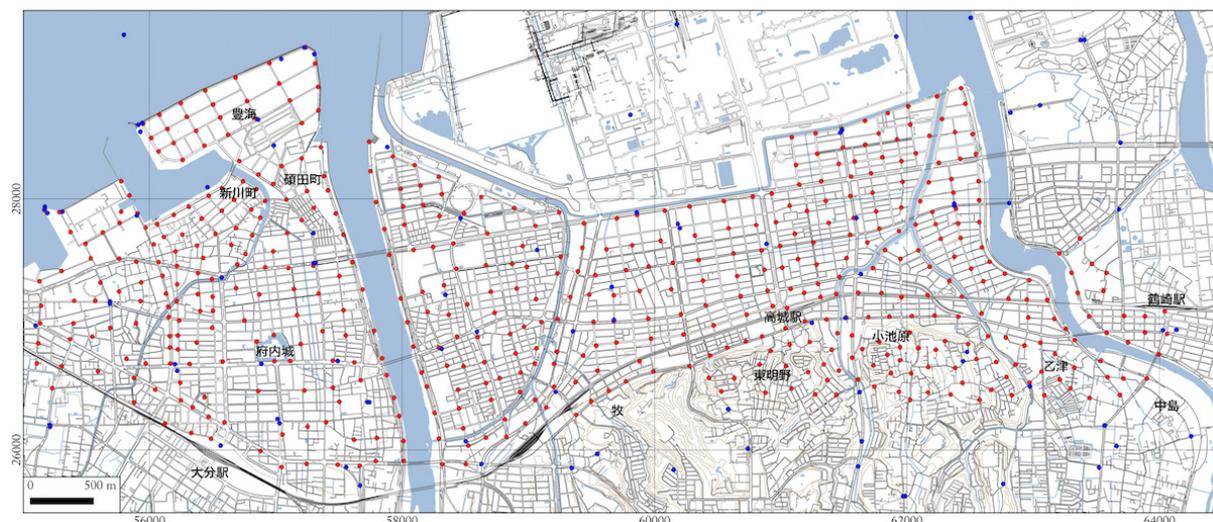


図 3.2.2-34 重力探査測定点配置図(赤点: 重力探査測定点 青点: 既存重力点)

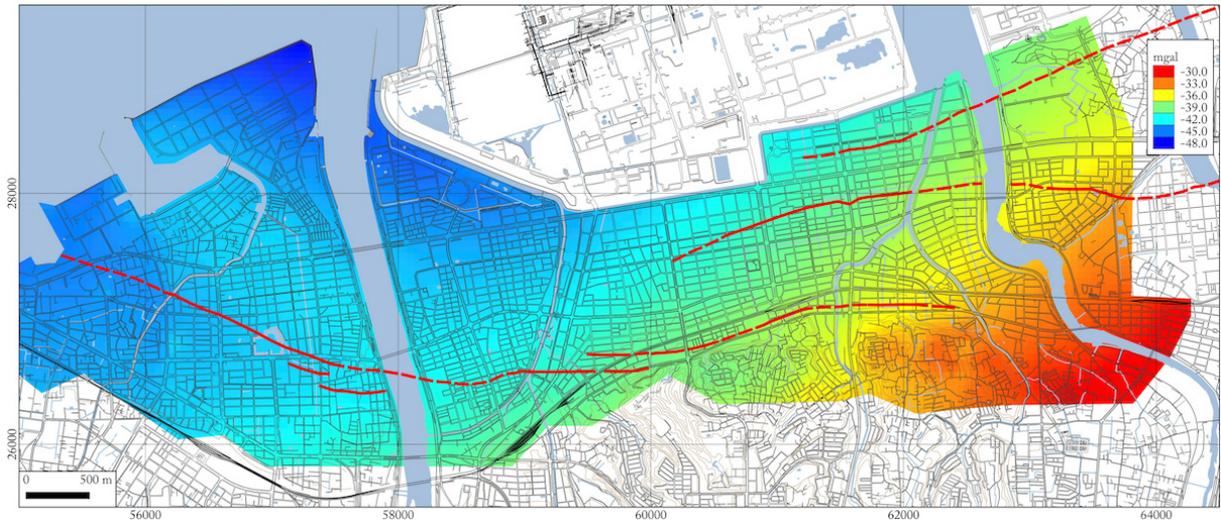


図 3.2.2-35 重力異常図（補正密度 2450kg/m^3 ）。断層位置（赤線）はサブテーマ 1 の調査結果。

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、スペクトル解析から長波長成分（波長 500m、250m）を取り出し比較・検討を行った。この結果、大分市牧付近に大分層群を反映したと考えられる高重力異常が見られることや、重力残差図の重力異常の急傾斜部が本地域に推定されている府内断層や他の断層位置と良い対応が見られることから、この長波長成分を上方接続（波長 250m）（図 3.2.2-36）で分離するとともに、表層のノイズを除去するバンドパスフィルター（上方接続残差）を施した。バンドパスフィルターには 2 つの異なる接続高度（0m および 250m）に上方接続したものの差を取った（図 3.2.2-37）。長波長成分は調査地域南東部（小池原から乙津付近）と北西部（豊海から新川町）に高重力異常が見られた。南東部の高重力異常については中島付近をピークに北西方向にやや急激に重力異常が低くなり（約 2mgal ）、原川以西で比較的傾斜が緩くなっている。この形状は大分層群が調査地域南東部で急激に北落ちし、原川以西で緩やかに北西に向かって深くなっている構造を反映しているものと考えられる。一方、北西部の高重力異常については局所的な基盤の盛り上がりが存在することが考えられる。

上方接続残差図を見ると、大分市新川町および碩田町を中心に北西方向の高重力異常が大分川（舞鶴町）付近まで続いているが、大分川の東側で急激に低異常に転じている。また、この高異常域の南西側には東春日町から府内城南を通り長浜町まで低重力異常が見られ。また、高異常域の北東側にも西新地付近に低重力異常が見られる。これらの高重力異常とその北東および南西側に見られる低重力異常は落差自体あまり大きくないものの（約 1.2mgal ）、急激に高重力異常から低重力異常に変化している。特に南西側の重力異常の急傾斜部については、本地域に推定されている府内断層の位置と非常に良く合っている。一方、大分川の東側は西新地に見られる低重力異常を除くとほぼ平坦であり、大分川の東側と西側で大きく構造が異なっていることが考えられ

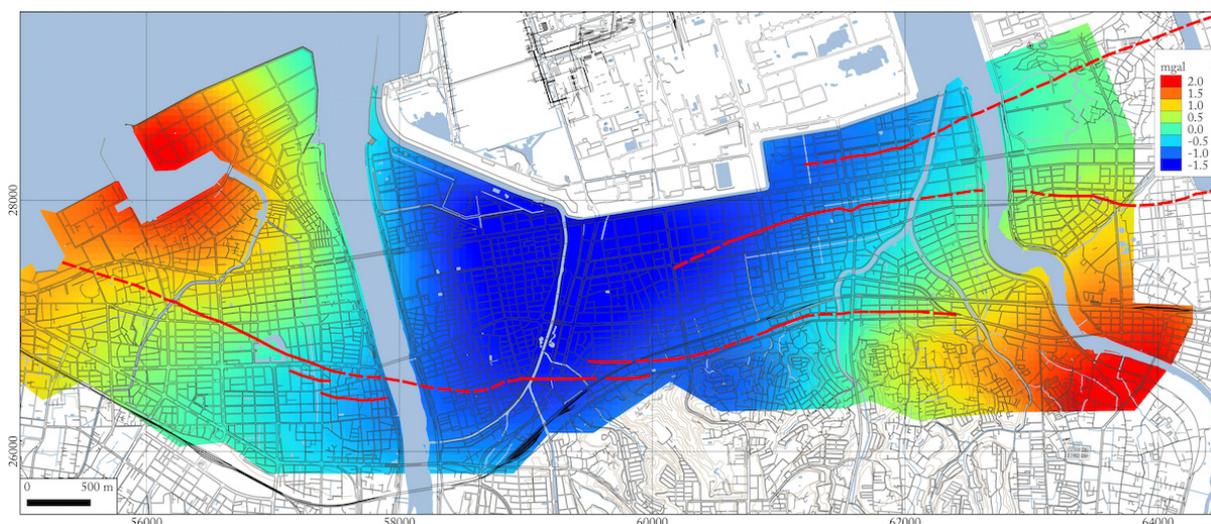


図 3.2.2-36 重力異常長波長成分（上方接続 250m）

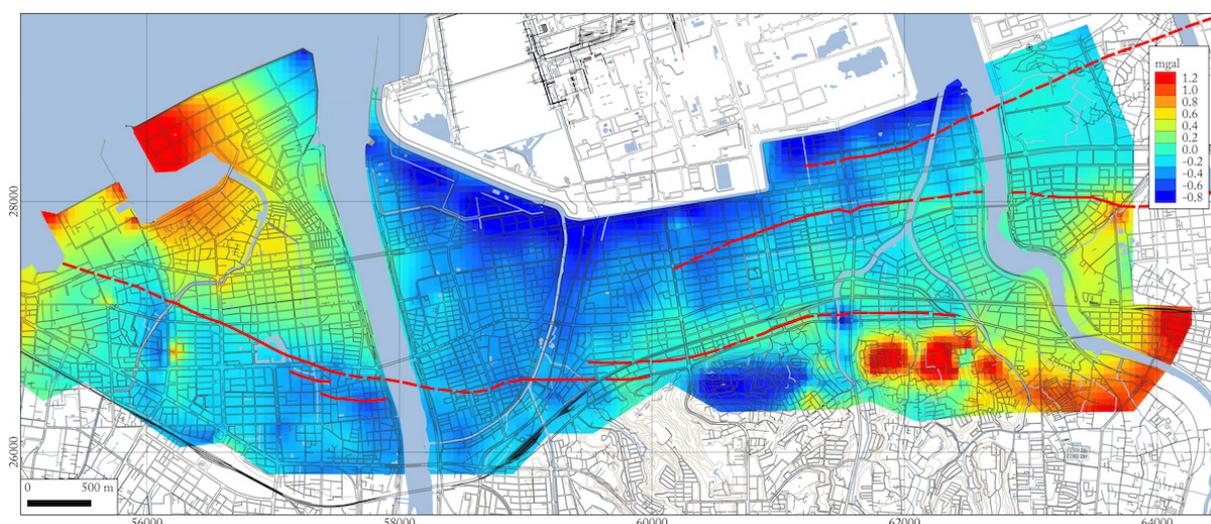


図 3.2.2-37 重力異常上方接続残差（0m-250m）図

る。また、調査地域東部に位置する小池原、千歳、乙津、皆春付近では、残差異常が東に向かって帯状に急激に高くなっている。小池原、千歳については丘陵地と一致しており、本地域の基盤が浅くなっていることを反映していると考えられる。一方、小池原、千歳と同様丘陵地に位置する高残差異常の西側（東明野、牧）には周辺に比べ約 1 mgal 程度低い残差異常域が見られる。この地域で特に密度が低くなるような地層は確認されておらず、解釈についてはボーリングデータや反射法地震探査の結果等との比較を行い検討する必要がある。

重力異常上方接続残差図より断層構造を反映する重力異常の急傾斜部分を抽出するために鉛直一次微分（図 3.2.2-38）および水平一次微分（図 3.2.2-39）の処理を行った。鉛直一次微分図は黒色と白色の境界部分に断層が位置し、水平一次微分は赤色から橙色の部分に断層が位置する。図 3.2.2-38、図 3.2.2-39 共にサブテーマ 1 の調査結果で推定されている府内断層のやや北側に断層構造を反映した重力急傾斜部分が位置している。また、府内断層東側延長部や三佐断層の北側にも断層線に対応した重力急傾斜部分が見られている。なお、志村断層については対応する重力異常の急傾斜部分は見られなかった。

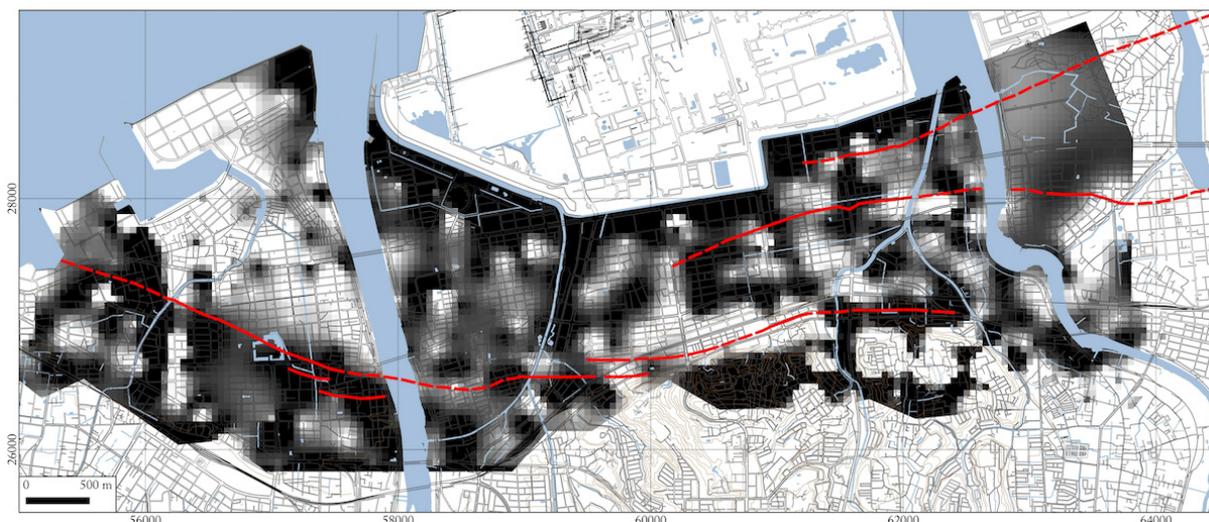


図 3.2.2-38 鉛直一次微分図

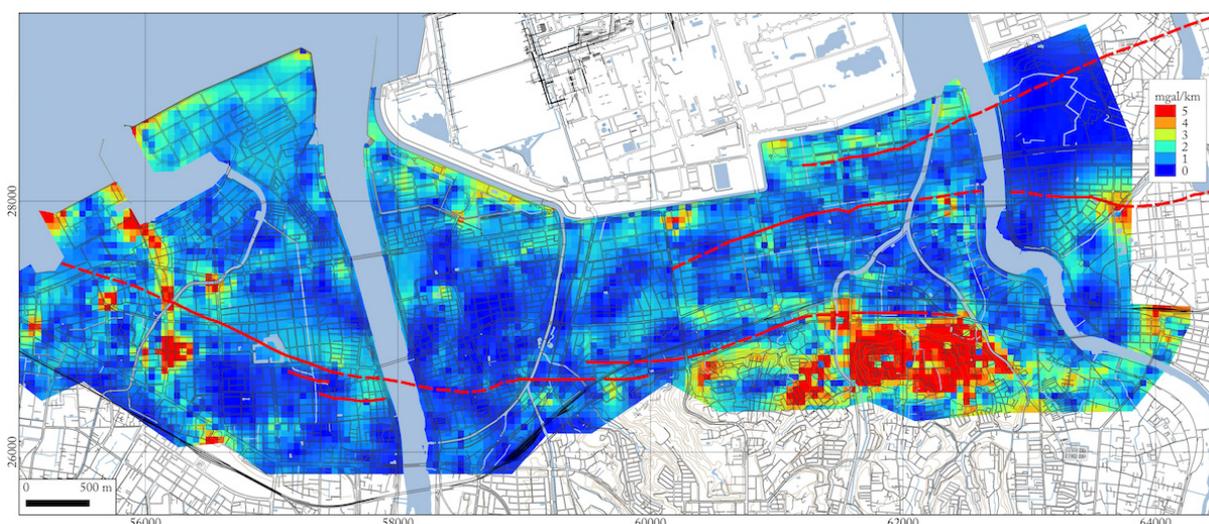


図 3.2.2-39 水平一次微分図

密度構造モデリング

本調査で得られた重力異常を用いて本地域の密度構造推定を行った。通常モデリングでは長波長成分を含んだトレンドを差し引いた残差異常で計算を行うが、重力異常上方接続残差異常で牧、東明野付近に見られた低重力異常の解釈が现阶段でできないため、本計算ではトレンドを差し引いていない重力異常で密度構造の推定を行った。計算に用いたインバージョンソフトは、カナダ Geosoft 社の VOXI Earth modeling (GEOSOFT, 2016) を使用した。本手法はクラウドサービスであるため、ユーザー側のコンピュータスペックに依存せず、大規模な 3 次元モデルを高速に計算することが可能である。

本解析では、地下を直方体セル (Voxel) に分割し、観測された重力異常を説明する最適な密度構造を探索する。解析範囲は東西方向に 8.8 km、南北方向に 3.3 km の範囲で、深度方向は地表から標高-2152 m までを解析範囲とした。メッシュ数は東西方向 89、南北方向 34、深度方向 21 となっている。メッシュサイズは水平方向 100 m、深度方向には 50 m × 2 ブロック、残りは深

くなると共にブロックサイズが大きくなる (54~215 m)。地表標高は SRTM3 秒メッシュ (メッシュサイズ約 90 m) からリサンプリングしたものを使用している。

本解析から得られた密度分布図 (標高-100 m, -300 m, -500 m, -700 m, -1000 m) を図 3.2.2-40~図 3.2.2-44 に示す。大きな特徴としては、重力異常上方接続残差異常で見られた北西部の高異常域に長軸が北西方向を向いた楕円状の高密度域が存在する。この高密度域は周辺との密度差は $150\sim 200\text{ kg/m}^3$ とあまり大きくないが、標高-200m ぐらいから現れ、モデル底部まで存在する。浅部ではこの高密度域の南西側に密度の急変部が見られる。この傾向は標高-500 m 以深で楕円状になり、標高-1000 m にかけて密度の急変部が見られる。この南西部の密度の急変部は府内断層の位置とほぼ一致しているが、高密度部分は南落ちしており、府内断層とは落ちの方向が逆になっている。また、東側の密度の急変部は、大分川と一致している。また、上方接続残差で見られていた南東部の高異常域は、幅 200 m 程度で密度差 $200\sim 300\text{ kg/m}^3$ の西南西-東北東方向の帯状の高密度が平行して並んでいる。この高密度域は標高-100 m から現れ、標高-1000 m 付近まで続いており、府内断層の延長部の断層線はこの高密度域の直上または縁に位置している。また、東明野や牧付近に見られた低残差異常は、この高密度帯の間に位置している。現段階でこのような帯状の構造を支持するデータは得られておらず、今後ボーリングデータや他の調査結果との比較が必要である。このほか三佐断層西端では標高-200 m から-500 m にかけて 100 kg/m^3 程度の密度の急変部が見られた。

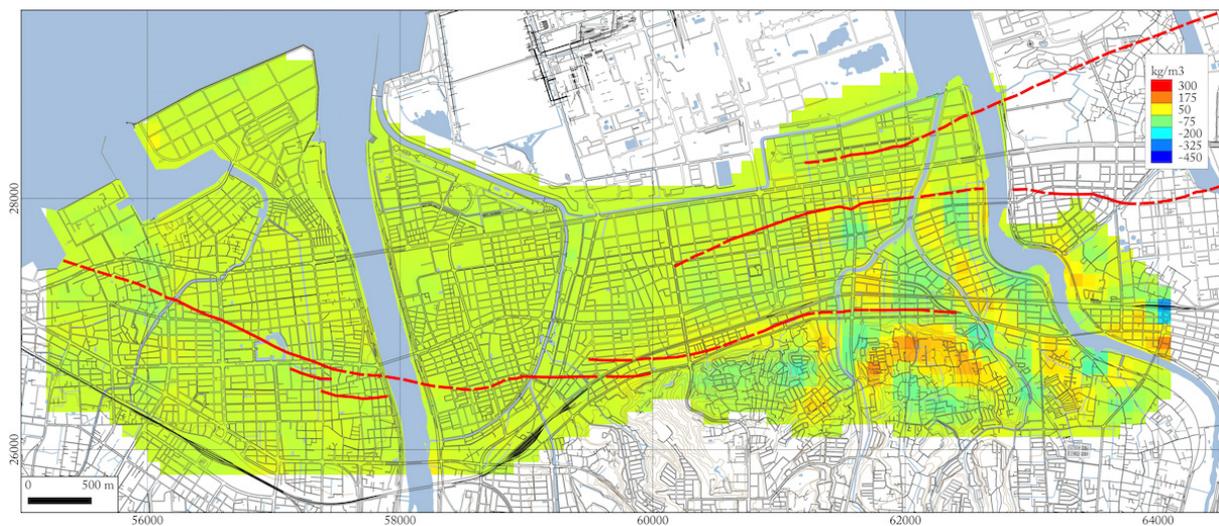


図 3.2.2-40 標高-100m の密度分布図

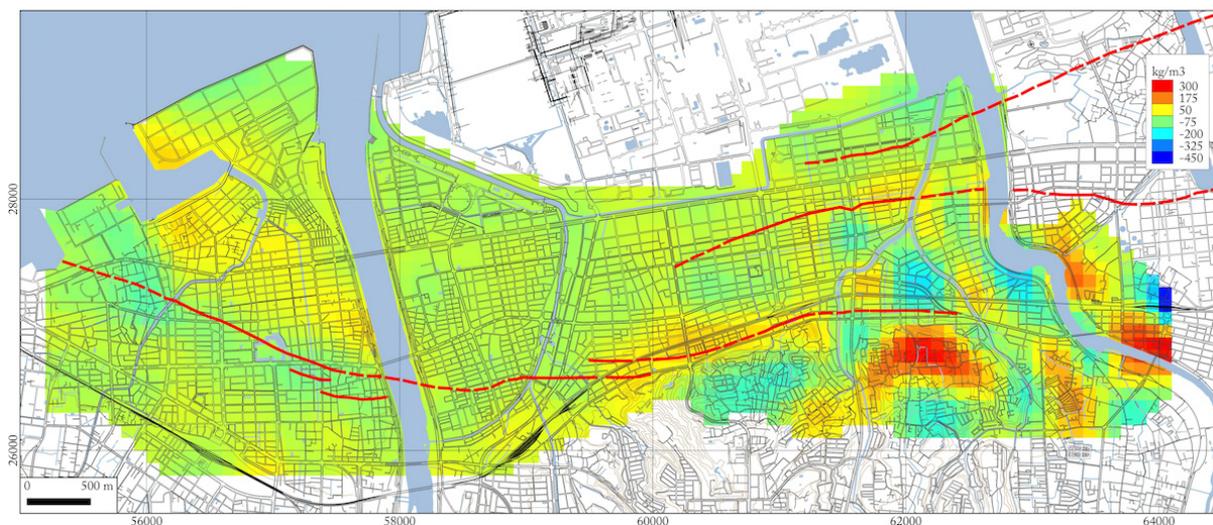


図 3.2.2-41 標高-300m の密度分布図

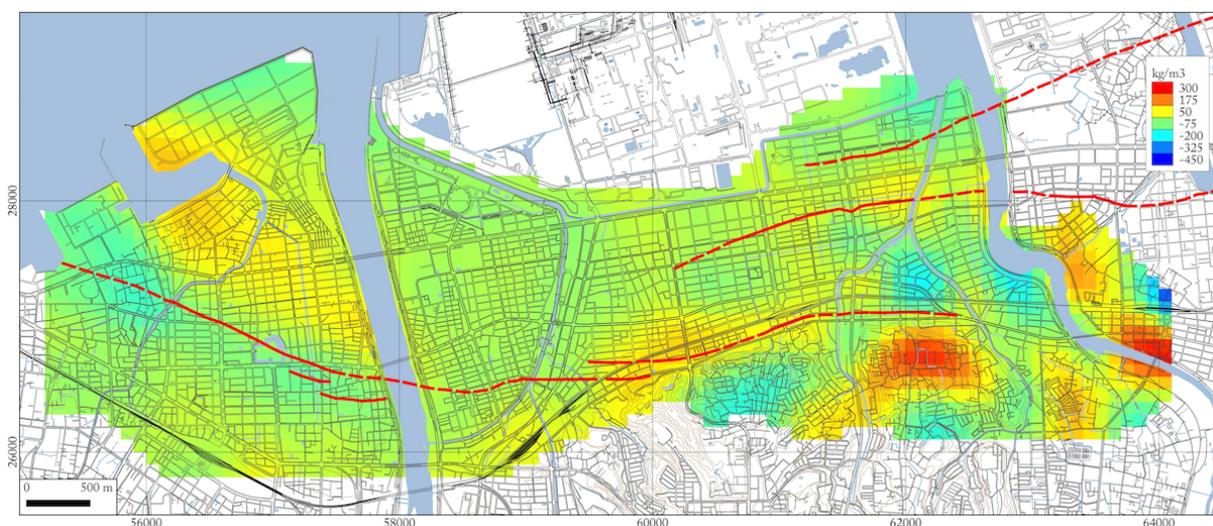


図 3.2.2-42 標高-500m の密度分布図

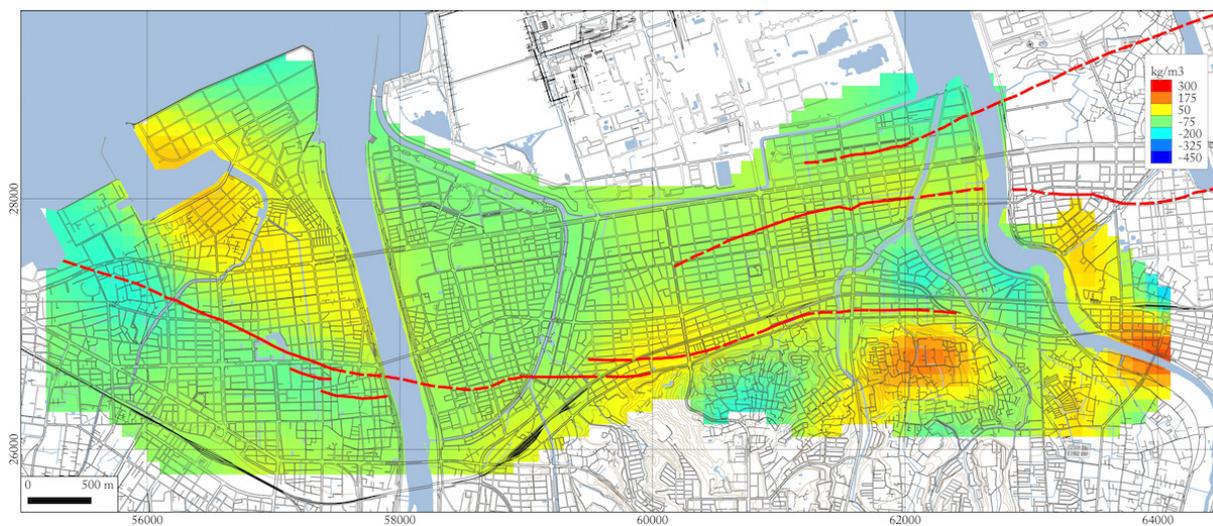


図 3.2.2-43 標高-700m の密度分布図

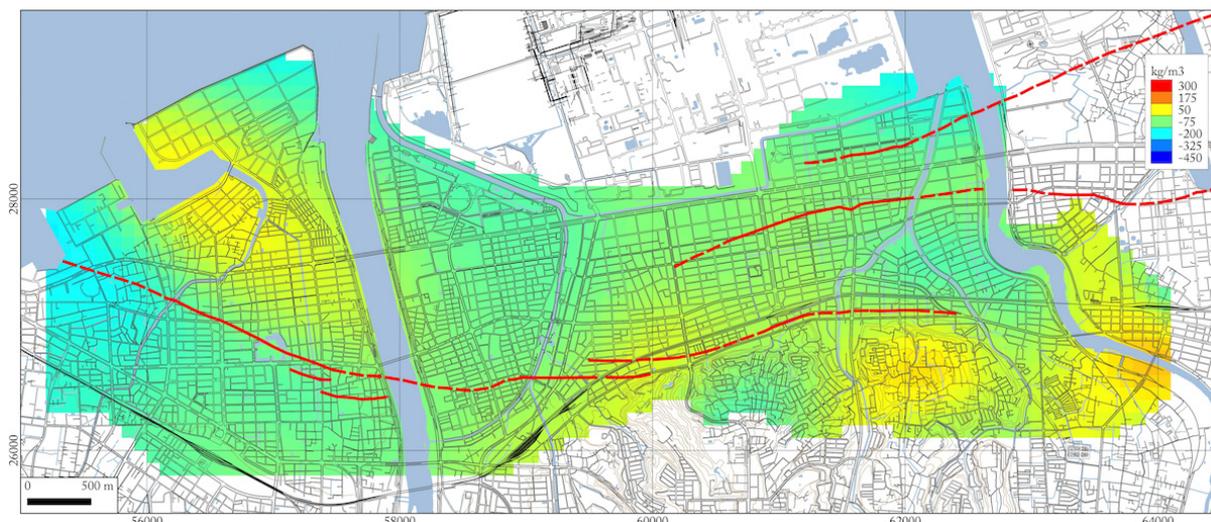


図 3.2.2-44 標高-1000m の密度分布図

結論と今後の課題

本調査で実施した重力探査 516 点に既存重力データ 93 点を加え合計 609 点で大分市中心部の重力異常図を作成した。重力異常に含まれる広域トレンドをバンドパスフィルター（上方接続残差）で除去し、上方接続残差図を作成した。残差異常図には大分川西側に北西方向の重力急傾斜部分が存在し、これまでに推定されている府内断層の位置とほぼ一致することが明らかになった。得られた重力異常から本地域の密度構造推定した結果、北西部の高異常域に長軸が北西方向を向いた楕円状の高密度域が推定され、その南西側の密度急変部はサブテーマ 1 の調査結果である府内断層の位置とほぼ一致した。ただし、高密度部分は南落ちしており、府内断層とは落ちの方向が逆になっている。また、東側の密度の急変部は、大分川と一致していること及び南東部の高異常域には、幅 200 m 程度で密度差 200～300 kg/m³ の西南西-東北東方向の帯状の高密度域が標高-100 m から-1000 m 付近まで平行して並んでいることが推定された。この高密度域は、府内断層の延長部の断層線はこの高密度域の直上または縁に位置していることが明らかになった。現段階でこのような帯状の構造を支持するデータは得られておらず、今後ボーリングデータや他の調査結果との比較が必要である。

iv) ボーリング情報の収集と DB 化

ボーリング情報の収集:

別府一万年山断層帯における地震動予測に利用する地盤モデル作成のために有用と思われるボーリング情報を収集した。収集したボーリング情報の内、位置が不明確なもの、柱状図記載が不鮮明なものを除く約 2600 本について、デジタル化（地盤情報データベース化）を行った。収集先は以下のとおりである。

公益社団法人地盤工学会九州支部 九州地盤情報共有データベース（第 2 版）

国土地盤情報検索サイト KuniJiban <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/>

大分県地震被害想

別府一万年山活断層調査

柱状図集（紙資料集）

ボーリング情報の DB 化:

収集したボーリング情報は種々の形式で保存されているため、共通フォーマットにしてデジタル化（地盤情報データベース化（諏訪 1991））を行った。入力項目は、以下に示すとおりである。

- 調査基礎データ …… 調査年月日、掘進長、孔口標高、孔口水位、位置座標など
- 柱状図データ …… 土質、岩相名、混入物、*N*値など

地盤情報データベースは、図 3.2.2-45 に示すようなデータ構造にモデル化しており、地盤調査のデータを「調査地域 → 調査地点 → 柱状図・検層（深度） → 試験」の順につなげている。このように各調査データを 4 つのグループに分類して、0～3 のランクで従属関係が定義されている。このデータベースは、階層構造で構築されているため今後情報の追加も可能である。本調査では、地盤モデル作成のため柱状図と *N* 値の入力を行った。地盤情報 DB への登録本数は、約 2600 本である。図 3.2.2-46 に登録したボーリング位置を示す。

図 3.2.2-47 と図 3.2.2-48 に地盤情報 DB に登録したボーリングの掘進長の分布とヒストグラムを示す。ボーリング掘進長の分布の内、約 8 割は掘進長が 30m 以内である。なお、既往の研究（首藤他 1971、千田 1987）において、埋立地の海岸付近では沖積層が深く堆積していることが知られており、ボーリングの掘進長が約 70m を超すボーリングも実施されている。

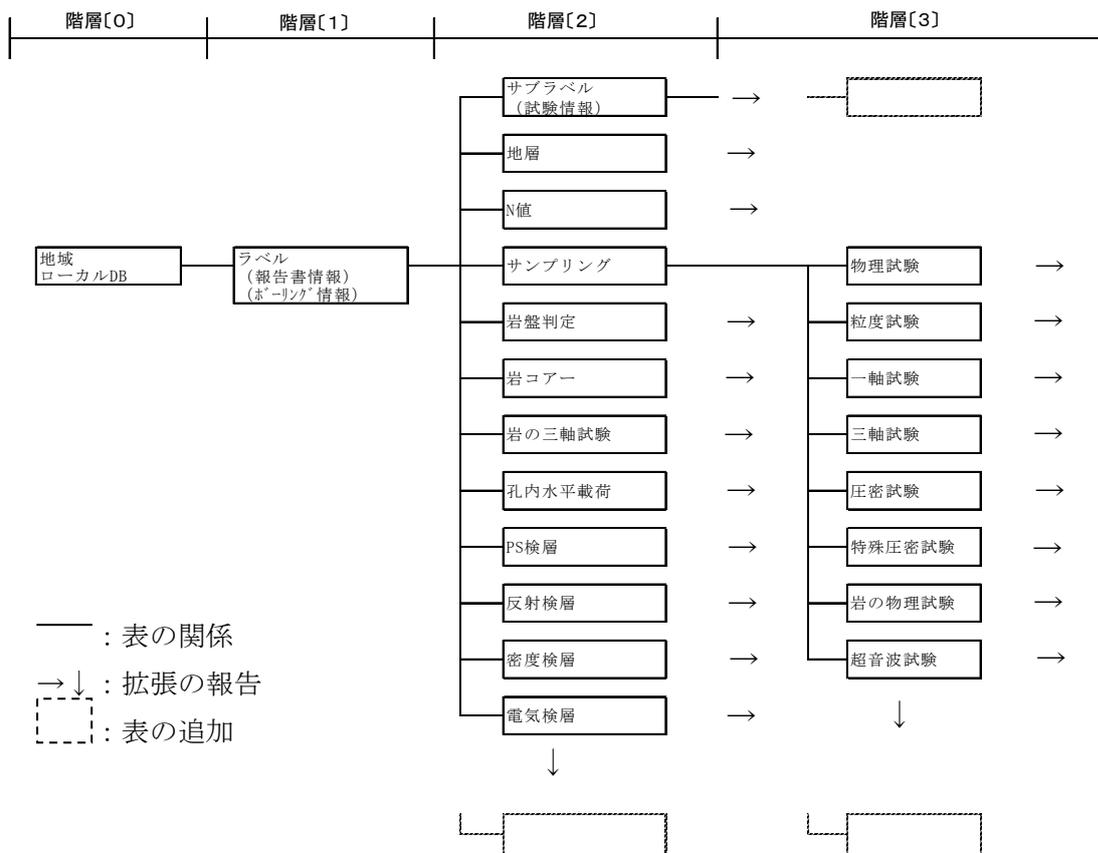


図 3.2.2-45 地盤情報データベースのデータ構造

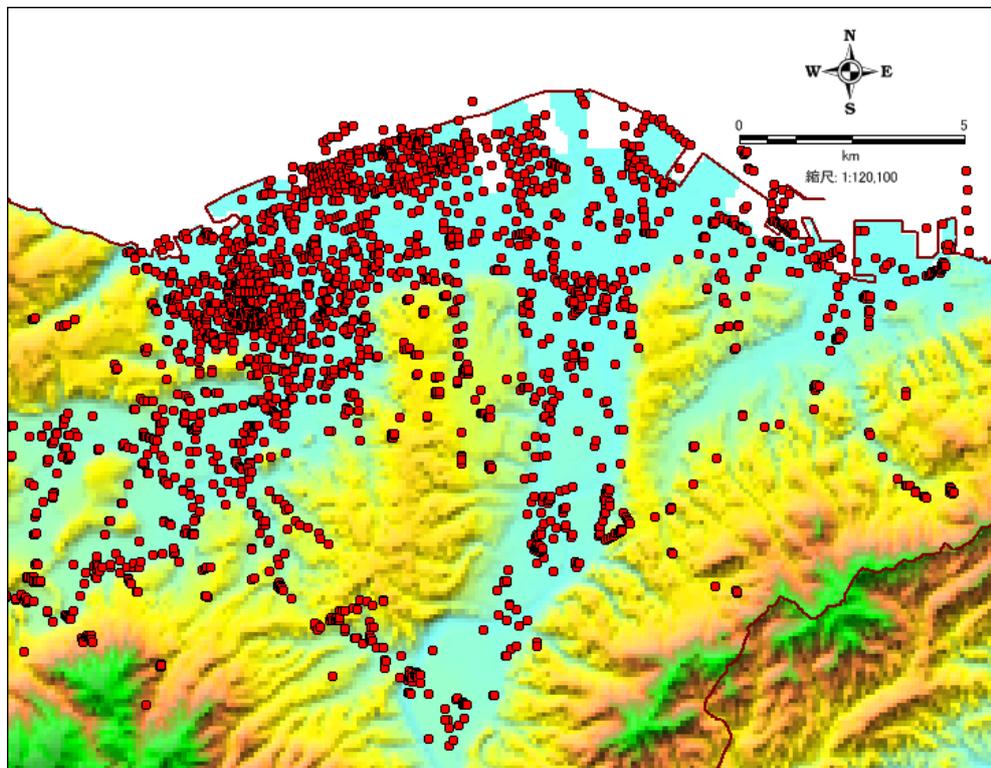


図 3.2.2-46 ボーリング位置

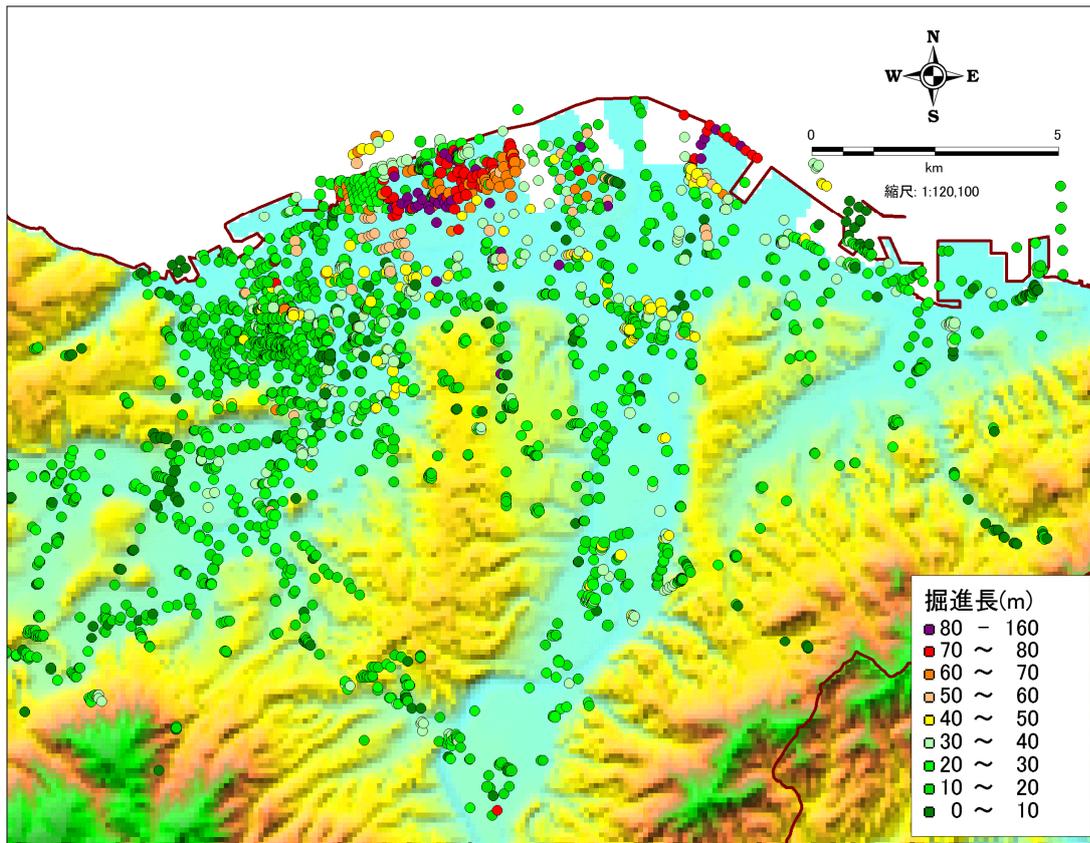


図 3.2.2-47 ボーリング掘進長の分布

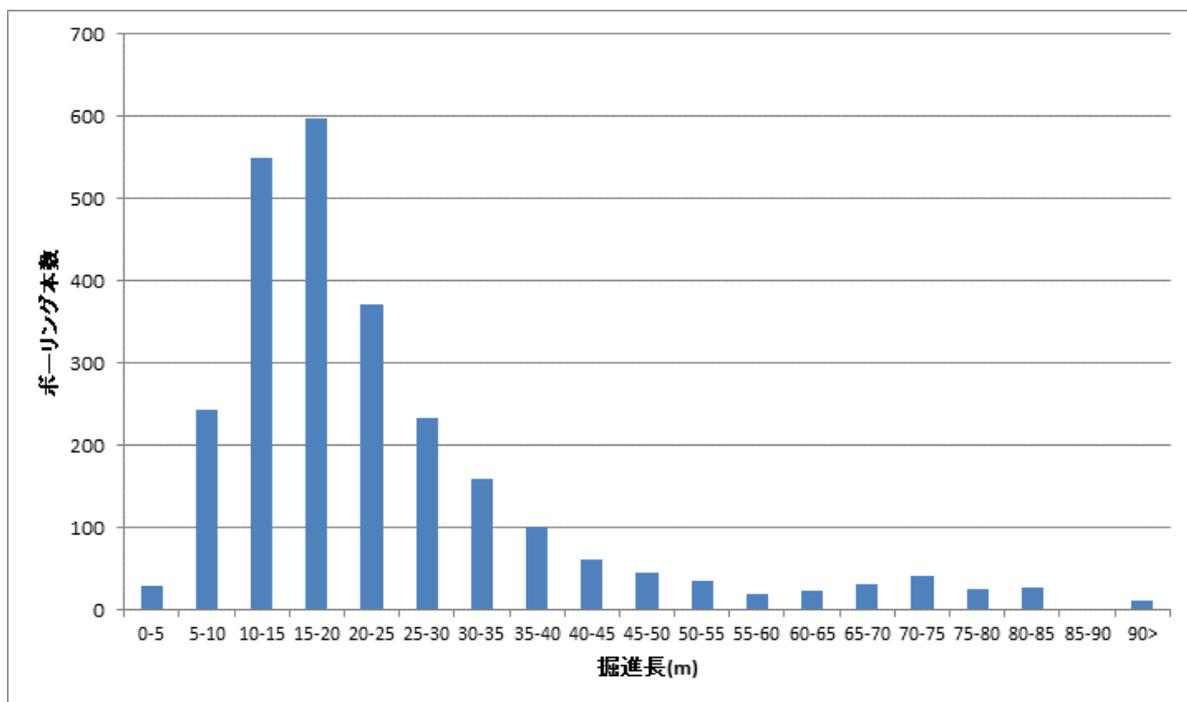


図 3.2.2-48 ボーリング掘進長のヒストグラム

ボーリングデータによる大分平野の地盤概況:

地層の同定

収集したボーリングデータの大部分は何らかの構造物などの施工・設計段階における調査ボーリングであり、柱状図と標準貫入試験結果である N 値が主となる。設計の必要に応じて、直近において不攪乱試料を採取し、物理試験や力学試験を実施する場合もあるが、大部分は柱状図と N 値からなる。このようなボーリングを工学ボーリングと呼ぶ。

一方、地質調査を主体としたボーリング調査は、理学的な堆積環境や構造探査（活断層調査）などの目的で実施され、基本オールコアボーリングを行い、各種堆積環境調査や年代測定などが実施される。これらを地質ボーリングと呼ぶ。

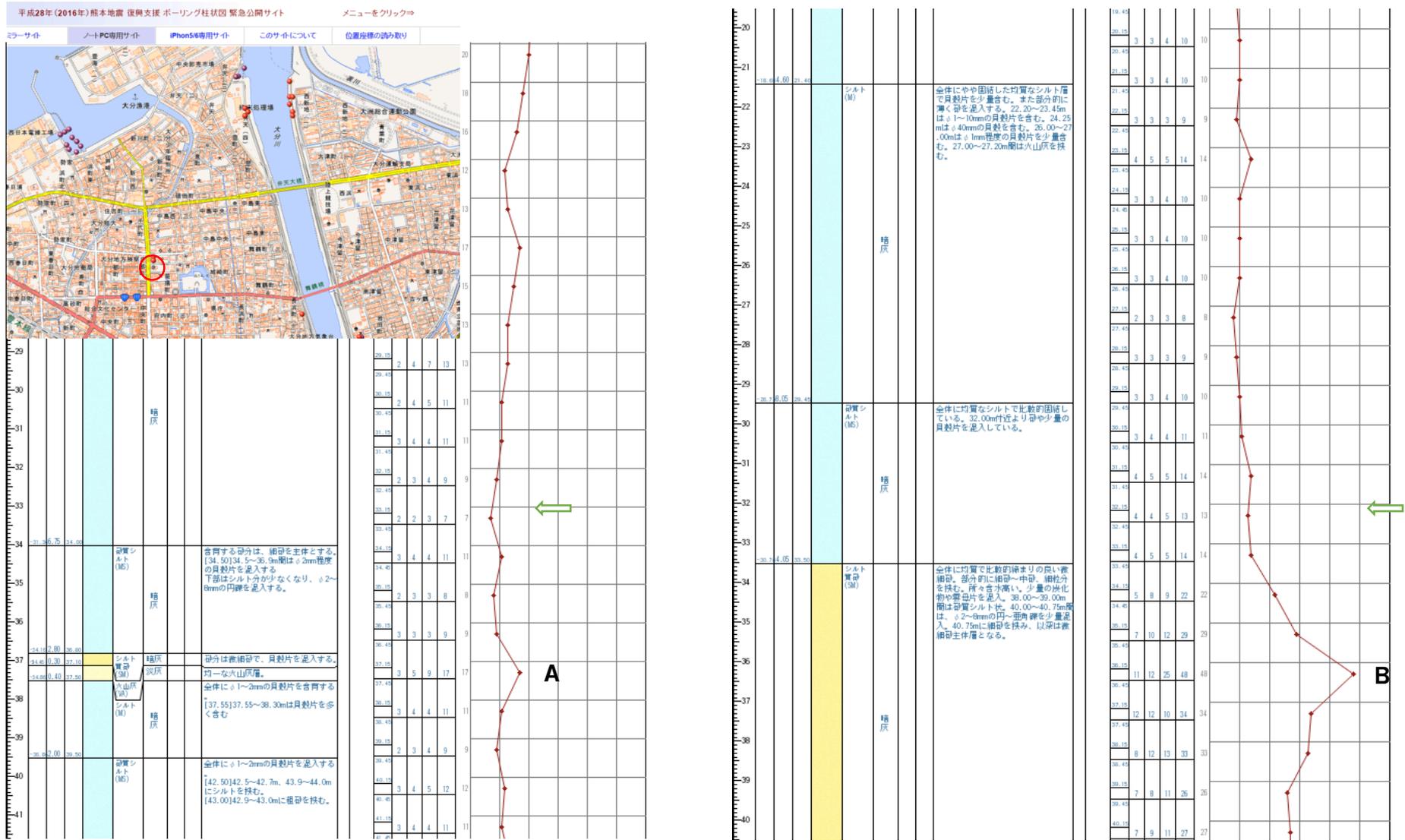
一般にボーリング調査の実施数は、工学ボーリングの方が地質ボーリングよりも圧倒的に多く、例えば、関西圏地盤情報データベースに登録されたボーリングの大部分がこれに該当し、今回収集したボーリング情報も工学ボーリングである。その中で、ボーリングの柱状図に書かれる記事（記載事項）は観察者の経験や知識によって大きく異なる。本検討地域である別府大分地域は火山噴出物（溶岩や火砕流）のようなものは少ないが、火山噴火に伴う大きなイベントによる火山灰層が記録されている地域である。

火山灰の降灰は、火口との距離や方位によって異なる。本検討地域は、九州の有数の火山（火口部）から十数 km から 100km 程度なので、例えば、アカホヤ火山灰の場合は 10～数 10cm 程度の層厚で大分平野地下に降灰している。しかし、火山灰は時間とともに変質し、固化しているものが多い。観察者によっては、ボーリング記事に、「砂」、「固結度の高い砂」、「硬質粘土」、「シルト質軟岩」、「固結砂質シルト」、および「岩」などの記載がおこなわれる場合がある。

一方、標準貫入試験結果の N 値を見ると、火山灰の周辺では、上下層と比べて少し N 値が高くなっている傾向がみられる。地質ボーリングで確認されるアカホヤ火山灰の出現深度を基に、その周辺の工学ボーリングを注意深く観察すると、前述のような記載の「砂」や「硬質シルト」などの記載とともに N 値の高い部分が確認され、アカホヤ火山灰層と同等層であると推測ができる。

この事例を図 3.2.2-49 に示す。当該場所は、県庁北西であり、10m 程度の離隔で 2 本のボーリングデータが存在する（図 3.2.2-49 位置図）。ボーリング記事 A には火山灰層の記載があるが、ボーリング記事 B にはなく、全体が砂層となっている。しかし、 N 値の高い部分がほぼ同深度にあることから、同様の火山灰層であると考えられる。

以上のようなことを考慮し、大分平野部において地層の同定を検討した。



全体の地層構成

N 値の深度方向の分布は、表層部の軟弱層（特に粘性土）は N 値が小さい傾向にあり、深度が深くなるとともに N 値は大きくなる傾向にある。特に N 値が 50 を越えるような地層が連続する場合、この付近が更新統の地層に相当すると考えられる。

一方、 N 値の小さい地層は完新統の地層と推定でき、概ね、 N 値の大きさに完新統と更新統の境界線を特定することができる。完新統の地層は、平地部や港湾部、河川デルタ部に分布し、粘性土は比較的水平和に連続する傾向がみられる。完新統（沖積層）の下端標高分布、層厚分布を図 3.2.2-50 と図 3.2.2-51 に示す。

全体に北部に向かって完新統（沖積層）の下端標高が低くなる傾向がみられる。南部の丘陵部では、急速に下面標高が高くなるが、丘陵の間に分布する河川デルタ地域では平野部から緩やかに内陸に標高を増す。標高分布（図 2.2-1）の状態から見ると、大きく 3 つの地域に分けられる可能性がある。一つは丘陵地に近傍にみられる薄層かつ標高の浅い地域。もう一つは平野部にみられる TP-20～-30m に分布する地域。最後に港湾・埋立地域で見られる TP-60～-80m に分布する地域である。これらの分布域は明瞭に区分されることから、これらの分布境界には何らかの構造がみられる可能性が高い。

完新統（沖積層）の層厚分布（図 3.2.2-51）を見ると、下端標高の分布と傾向は同様であるが、平野～河口部は層厚が 50m を越え、港湾部においては 90m 近くに達するものもあり、特に港湾・埋立部において層厚が厚い傾向がみられる。

アカホヤ相当層の上端標高分布を図 3.2.2-52 に示す。図中に示すようにアカホヤ火山灰層の分布標高からは、平野部ないにおいて、さらに数段に標高分布が異なる可能性がみられる。

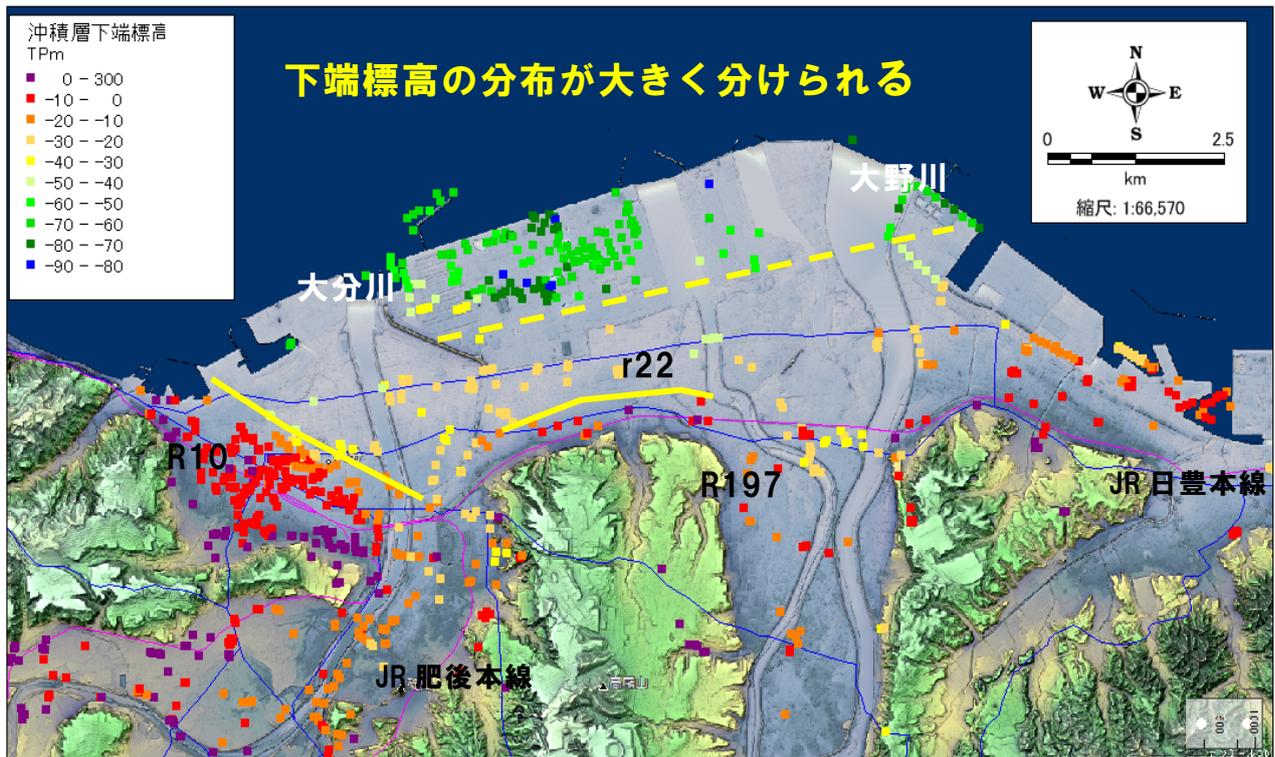


図 3. 2. 2-50 沖積層の下端標高分布

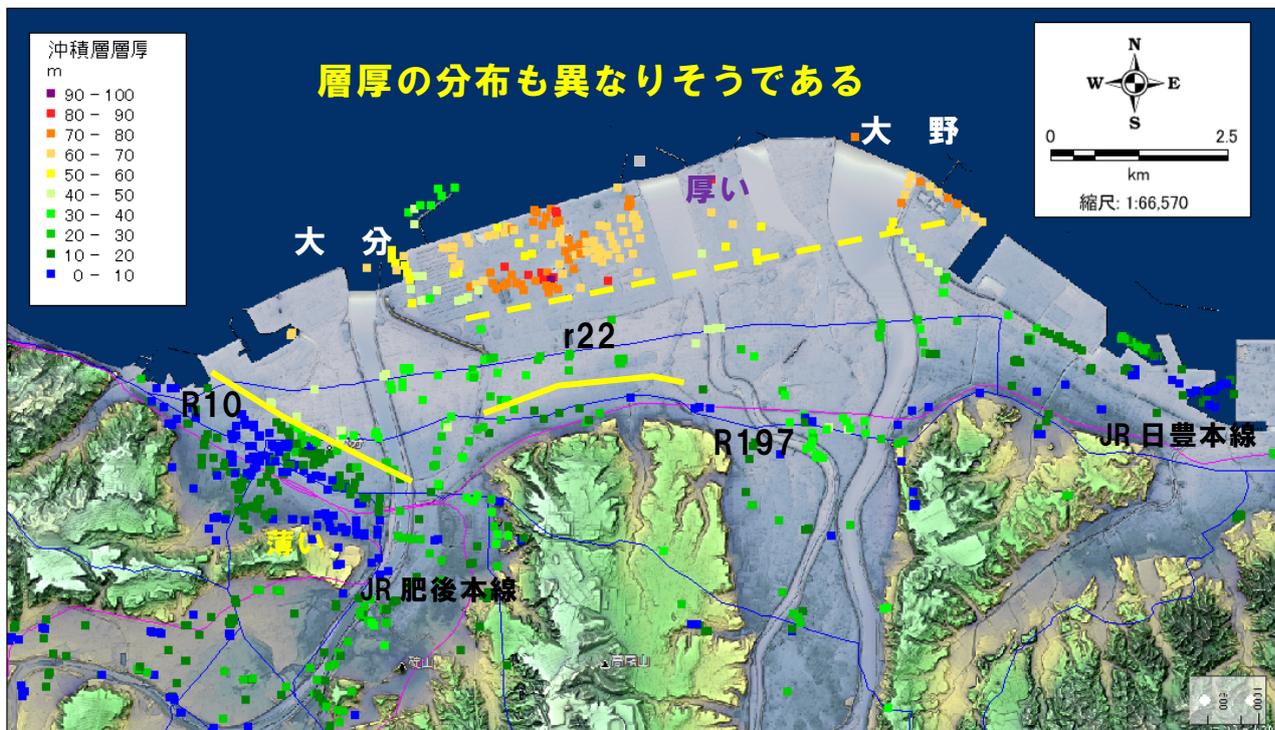


図 3. 2. 2-51 沖積層の層厚分布

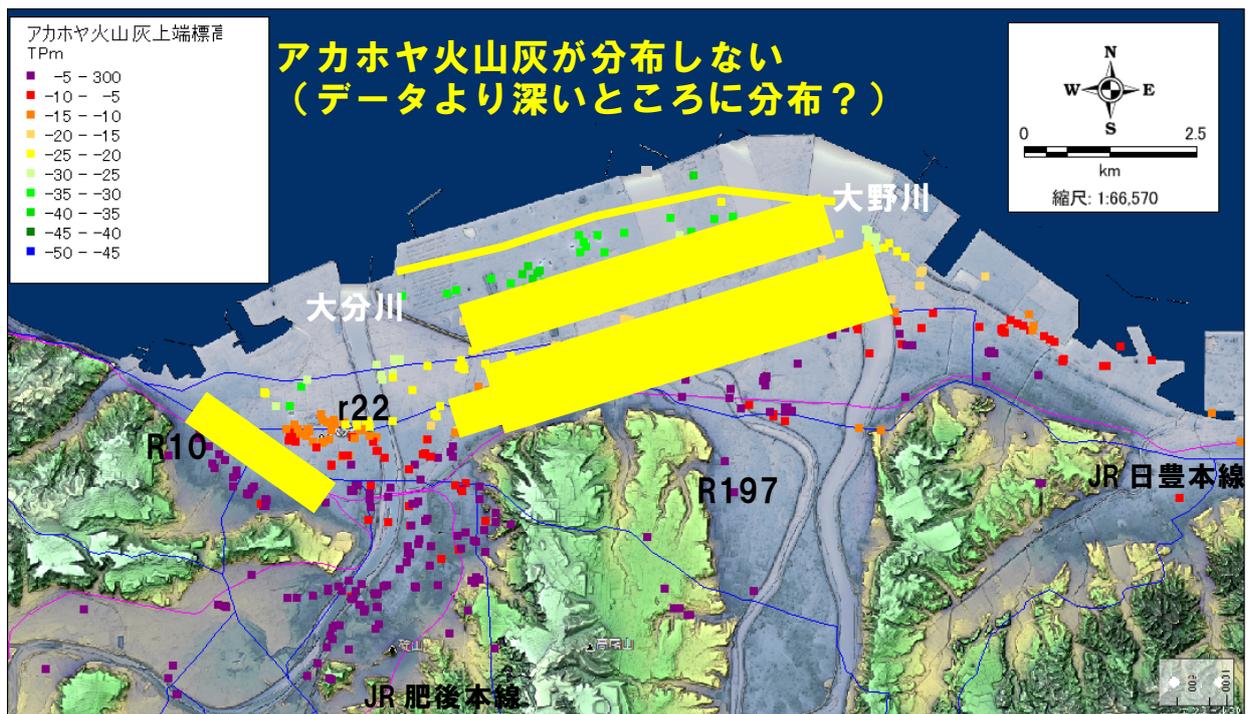


図 3. 2. 2-52 アカホヤ火山灰層の上端標高分布

構造的な地層の分布地域について

ボーリングデータから見られる地質構造の分布は、鉛直方向にみられる同等の地層のギャップあるいは標高分布の変化などが主なものである。これまでの上町断層や警固断層などの構造線の付近における地表の地盤特性について行った検討事例 (kitada et al., 2014) に従って、大分平野における構造分布についても検討した。

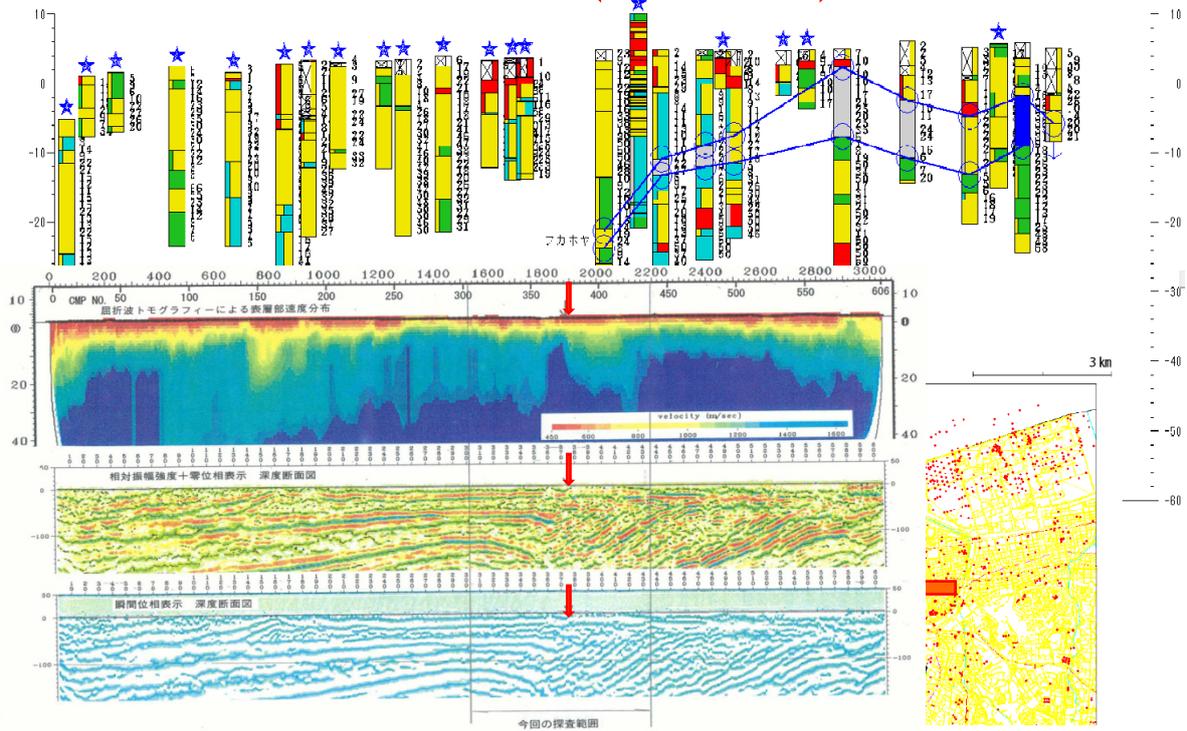
図 3.2.2-53(1) に大分川で実施された反射法探査 (大分県 2000) の測線に沿って抽出したボーリングデータ断面と反射断面を示す。地下 60m 以深で見られる構造は、府内断層通過付近で見られる構造である。ボーリングデータ断面を見ると、断層部において、アカホヤ火山灰層の分布標高が大きく変化していることがわかる。

大野川沿いにおいても同様の反射法探査が実施されており、(図 3.2.2-53(2)) に示すように測線に沿ったボーリング断面と反射測線を合わせて検討すると、三佐断層と志村断層の通過地点において、アカホヤ火山灰層の分布標高が急変することが確認される。

これらの結果を基に、大野川と大分川の間を南北の多数のボーリング断面図を作成し、同様の構造がみられるゾーンを検討し図示 (図 3.2.2-54) した。結果として、三佐断層の構造分布地域は、大分川と大野川の間では、臨海工業地域と県道 197 号の間 (特に、工業地域と国道 22 号の間の干渉帯) でのボーリングデータが疎であるために、変形のゾーンは広く見積もられ、県庁近くの地質郡列ボーリングが実施された場所のような細かな変形ポイントの抽出は難しい。

舞鶴橋から南に変形がみられる。

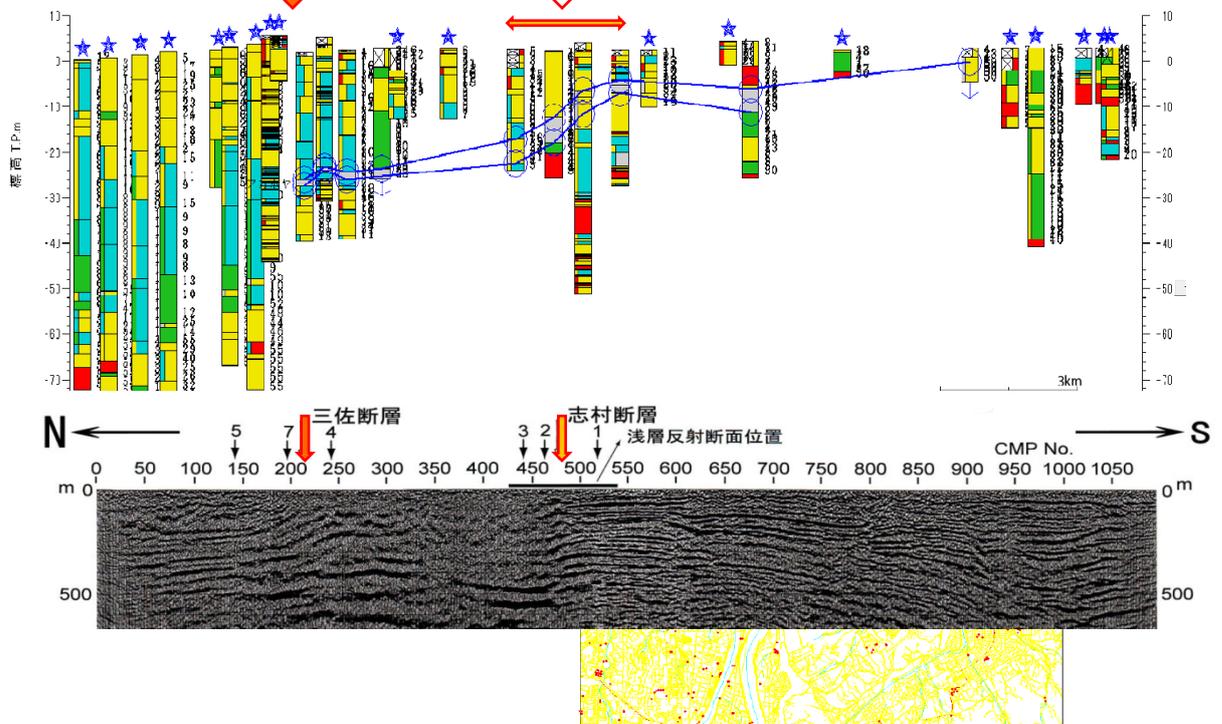
分布標高が幅をもって変化



(1) 大分川左岸

分布標高が急激に変化

分布標高が幅をもって変化



(2) 大野川右岸

図 3.2.2-53 反射法探査結果とボーリングの比較

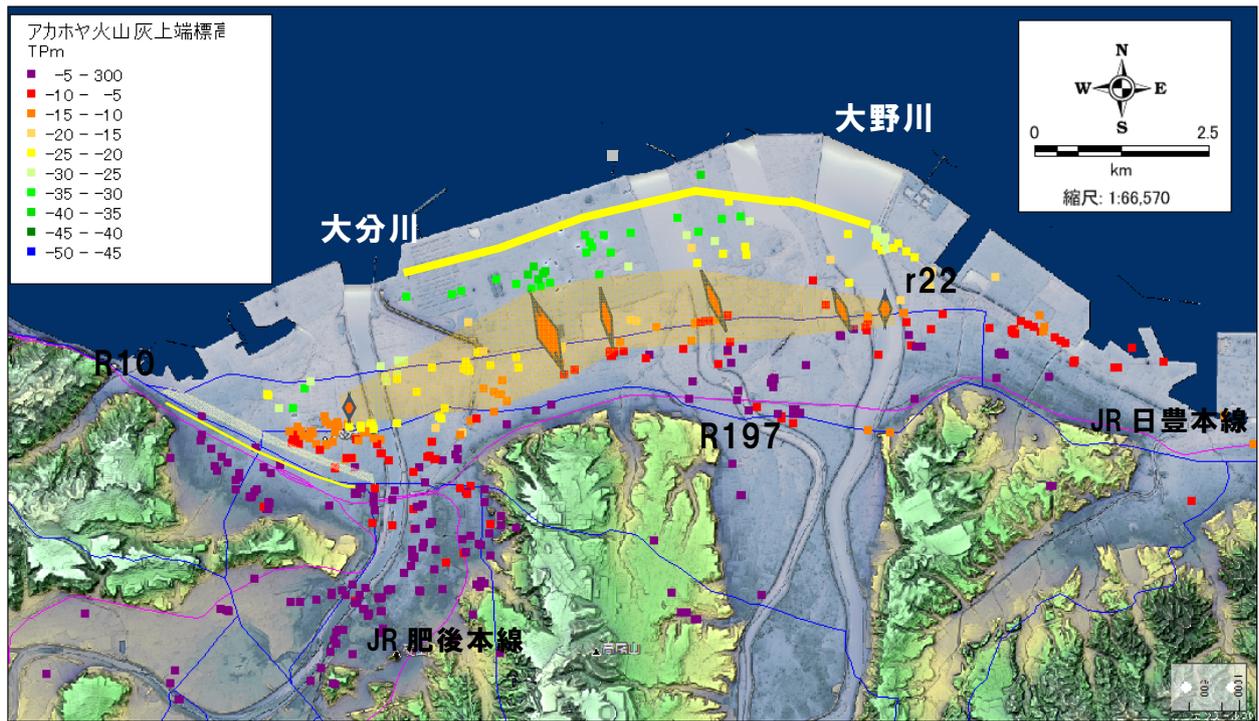


図 3. 2. 2-54 構造がみられるゾーン

v) 考古遺跡における砂脈の調査（竹村・熊原・佐藤）

2014年秋に大分市教育委員会による埋蔵文化財発掘調査で、大分市内で砂脈が多数発見された。砂脈が地震時の液状化である可能性があり、遺跡周辺で起こった揺れの記録として、今後の地震被害関連の情報として貴重な記録であり、表層地盤分布・地盤挙動等や形成年代を明らかにするために下記の調査を実施した。項目は、砂脈の平面分布の確認と分布測量調査（協力：広島大学・熊原康博）、砂脈の走向・傾斜を用いた応力解析（協力：京都大学・佐藤活志）、砂脈と供給砂層の粒度特性および液状化試験（協力：地域地盤環境研究所・北田奈緒子・濱田晃之）、炭素14年代測定（地球科学研究所）を実施した。

砂脈の平面分布の確認と分布測量調査

大分市教育委員会の協力で、砂脈の分布や断面の情報を得ることができた（図3.2.2-55）。



図 3.2.2-55 砂脈の分布状況

また、砂脈に切られている地層群の遺物から、室町時代後半から江戸時代初期に砂脈が生じたことが推定された。撮影した写真と地点位置からスクリーンショットによる合成画像を作成し、分布状態を確認できた（図3.2.2-56）。

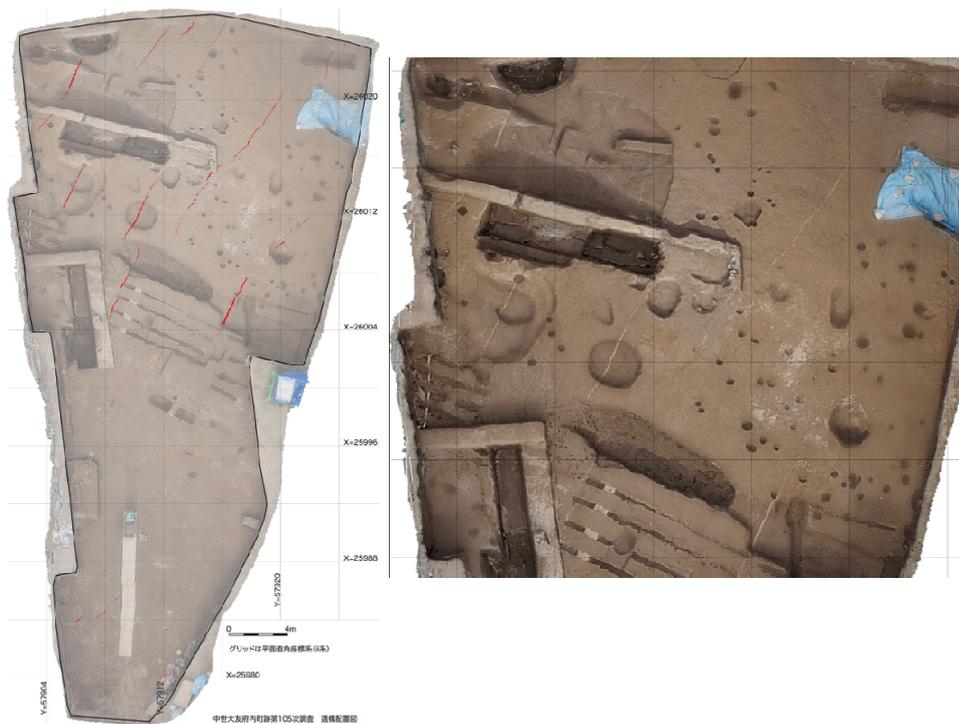
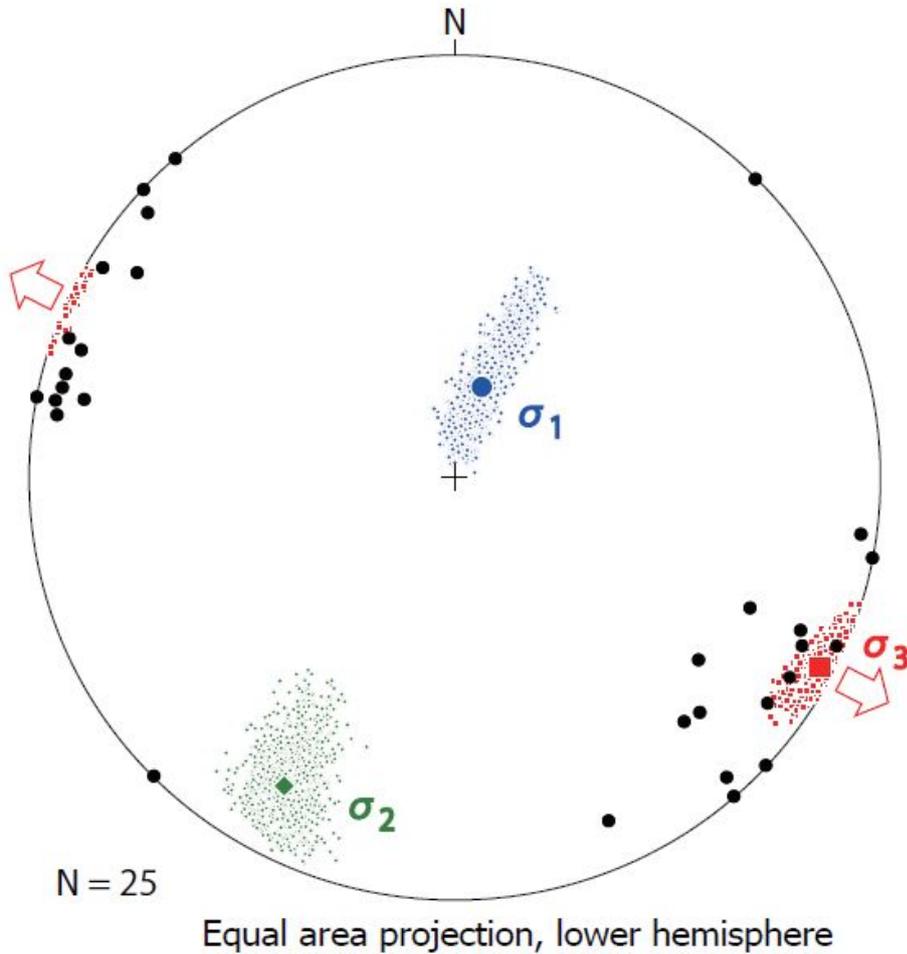


図 3.2.2-56 砂脈の分布状況

砂脈の走向・傾斜を用いた応力解析

砂脈の走向・傾斜から応力解析を実施した。正断層型応力の場合は脈の走向がブレ易く、横ずれ断層型応力の場合は傾斜角がブレ易いが、今回の結果は正断層型となった。また、駆動流体圧比（3つの主応力と流体圧の比）は約 0.16 と小さく、砂水が能動的に地層を割ったというより、割れ目を受動的に充填したと考えられる（図 3.2.2-57）。



応力解析 (Sato et al., 2013 の方法) により WNW-ESE 引張の正断層型応力が得られた. 黒丸は砂脈の極. 色付きの小さいシンボルは主応力軸の 95%信頼範囲 (ブートストラップ法).

図 3.2.2-57 砂脈により推定された応力分布

砂脈および供給砂層の粒度特性および液状化試験 (室内土質試験)

液状化評価のために、粒度特性を調査した。試料採取位置は図 3.2.2-58、図 3.2.2-59、図 3.2.2-60、図 3.2.2-61 に示される。原地盤・砂脈ともに、採取された試料の粒度特性は日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説 (2007) の「液状化の可能性あり」の範囲で、液状化しやすい粒度特性を有していることがわかった (図 3.2.2-62)。



中世大友府内町跡 第105-2次調査 地震痕跡サンプル採取位置図

図 3. 2. 2-58 砂試料採取位置 (1)

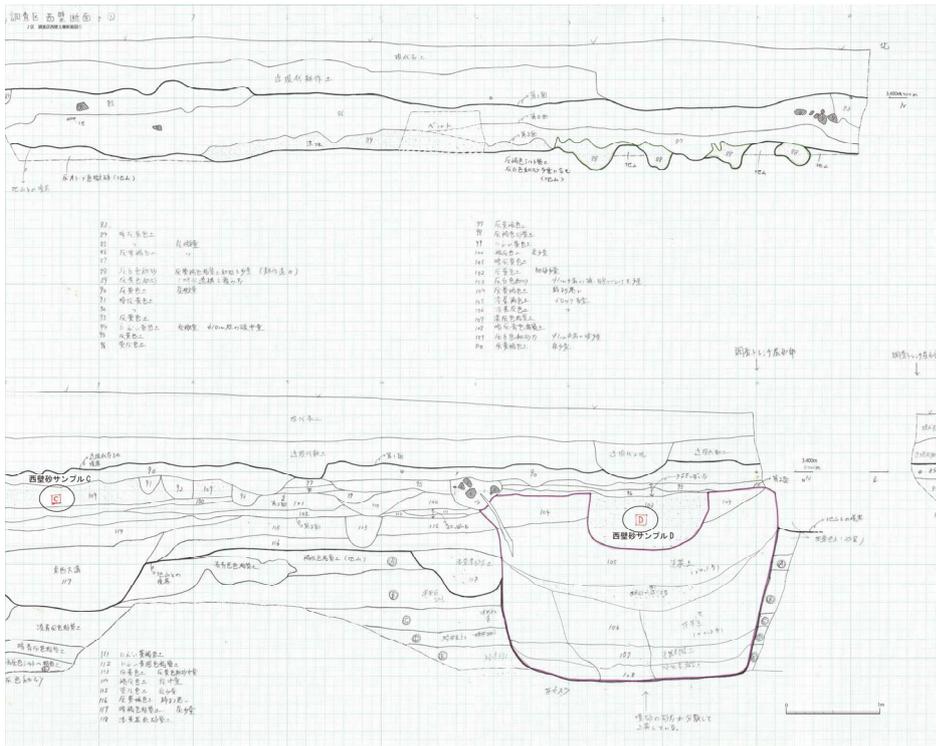


図 3.2.2-59 砂試料採取位置 (2)

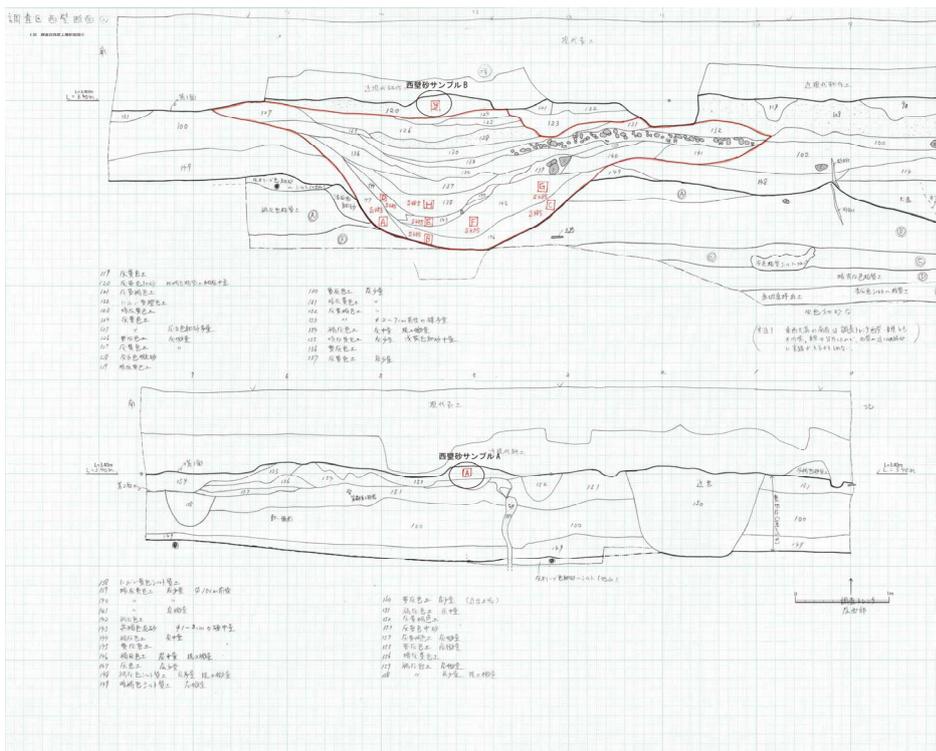


図 3.2.2-60 砂試料採取位置 (3)

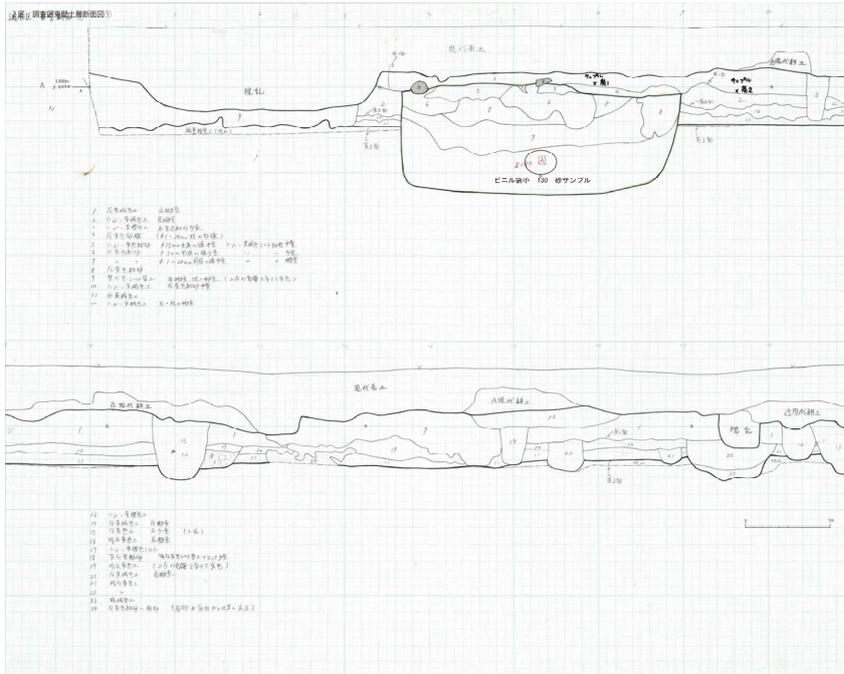


図 3.2.2-61 砂試料採取位置 (4)

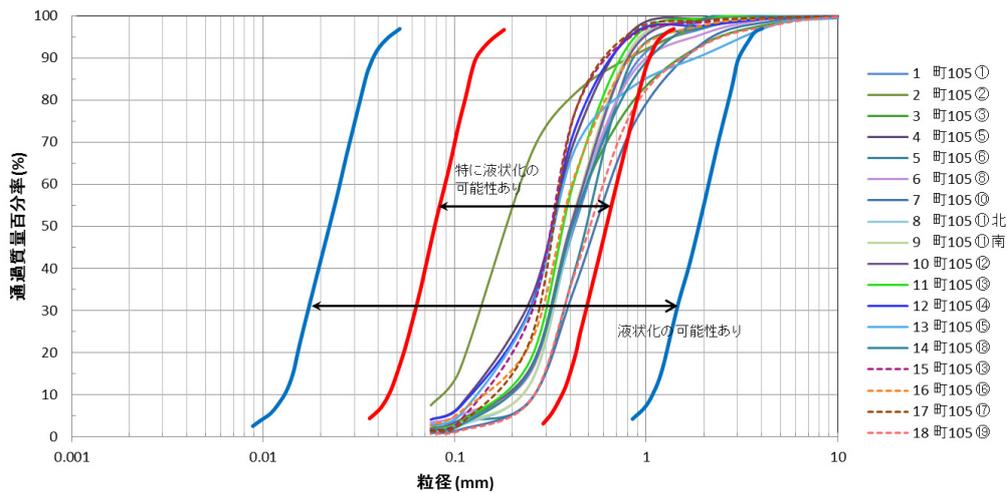


図 3.2.2-62 粒度分析結果

また、実施した繰返し非排水三軸試験による結果を用いて液化化安全率 F_L (液化化安全率 F_L が 1.0 を上回れば非液化化、1.0 以下となれば液化化と判断) を算出し、液化化の危険性について検討した。今回採取した試料は地下水位以下であったので、地下水位以下の深度 2~5m における液化化安全率 F_L を求めた。結果として、ほぼ全深度で液化化安全率 F_L は 1.0 未満となり、本砂層は液化化の可能性が高いことがわかった。

放射性炭素同位体年代測定:

砂脈に切られている地層と覆う地層から炭化物を採取し、11 試料について放射性炭素同位体年代測定を実施した (表 3.2.2-5)。砂脈によって切られている地層群は下位ほど年代が古く、層序学的な順序関係が成立している。下層で、AD250~400 の暦年較正年代が得られ、

切られている地層群の上部・最上部はAD1450～1640やAD1490～1655などの年代が得られ、この砂脈は室町時代後半以降江戸時代初期までの間に生じた可能性があることがわかった。この結果は、考古遺物の調査結果（室町時代から江戸時代）とも整合的である。

表 3. 2. 2-5 放射性炭素年代測定結果

試料番号	Material	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Conventional ^{14}C age		Calibrated ^{14}C age (AD) (2σ) (左列と右列の範囲)		Sample code BETA-
			(BP)	(+/- yr)	AD	AD	
S-415(1)	charred material	-22.6	260	30	1525	1553	405831
					1630	1665	
					1780	1795	
S-415(2)	charred material	-24.4	300	30	1490	1655	405832
S-415(3)	charred material	-27.5	460	30	1415	1455	405833
S-415(4)	charred material	-29.6	360	30	1450	1640	405834
S-415	charred material	-26.1	330	30	1465	1645	405835
Kasou	organic sediment	-25.8	1710	30	250	400	405836
SE Kita Sunmi 5	charred material	-27.1	350	30	1450	1640	405853
Ue Kitakabe Sumi3	charred material	-24.4	360	30	1450	1640	405855
Kitakabe Higashi Funsau Sumi 1,2	charred material	-27.0	510	30	1400	1440	405856
Higashi (jouten) Sumi 2	charred material	-24.9	480	30	1410	1450	405857
Higashi (Sarekiue) Sumi 2	charred material	-28.7	330	30	1465	1645	405658

まとめ

大分平野での大分市教育委員会が発掘した大友館跡遺跡で砂脈が多数発見された。地質学的・年代学的調査を実施し、液状化による可能性が高いと判断できた。また放射性炭素同位体年代測定の結果をもとに、砂脈が室町時代後期から江戸時代初期に形成されたことも明らかになった。今後は、別府湾周辺での液状化・砂脈などの地震痕跡の調査を継続し、その分布範囲や年代から、揺れの大きさの推定や時代の特定をすることが必要である。

(c) 結論ならびに今後の課題

反射法地震探査の既往データの再解析、および大分平野・別府扇状地域での新規探査が実施され、別府湾周辺の地下構造の把握が高度化できた。また周辺地域との地層対比等にも重要な成果が得られた。今後、反射法地震探査解析結果が、各種の地震波アトリビュート表示、さらには三次元重力モデリング-インバージョンを通じて、別府湾南岸断層の基本ジオメトリー把握、大分平野速度構造モデルの構築、さらには、Itoh et al. (2014) 等による最近の研究成果を参照し、別府湾及び別府-島原地溝の形成過程に関わる統合解釈が進展することを期待したい。

GPS および地震観測から、特に火山地域における地震発生層の深度分布があきらかにできたほか、広域のモホ面深度の分布形状もあきらかにできた。

本重点調査で実施した重力探査 516 点に既存重力データ 93 点を加え合計 609 点で大分市中心部の重力異常図を作成した。重力異常に含まれる広域トレンドをバンドパスフィルター（上方接続残差）で除去し、上方接続残差図を作成した。残差異常図には大分川西側に北西方向の重力急傾斜部分が存在し、これまでに推定されている府内断層の位置とほぼ一致することが明らかになった。得られた重力異常から本地域の密度構造推定した結果、北西部の高異常域に長軸が北西方向を向いた楕円状の高密度域が推定され、その南西側の密度急変部はサブテーマ 1 の調査結果である府内断層の位置とほぼ一致した。ただし、高密度部分は南落ちしており、府内断層とは落ちの方向が逆になっている。また、東側の密度

の急変部は、大分川と一致している。また、南東部の高異常域には、幅 200 m 程度で密度差 $200\sim 300\text{ kg/m}^3$ の西南西-東北東方向の帯状の高密度域が標高-100 m から-1000 m 付近まで平行して並んでいることが推定された。この高密度域は、府内断層の延長部の断層線はこの高密度域の直上または縁に位置していることが明らかになった。現段階でこのような帯状の構造を支持するデータは得られておらず、今後ボーリングデータや他の調査結果との比較が必要である。

別府-万年山断層帯における地震動予測に利用する地盤モデル作成のために有用と思われるボーリング情報を収集し、約 2600 本について、デジタル化（地盤情報データベース化）を行った。特に、アカホヤ火山灰層の上下限深度（標高）や沖積層基底の深度（標高）の分布があきらかにできた。これらの分布形態から府内断層や三佐断層等の変位量や平均変位速度の情報が得られた。

大友館跡遺跡で砂脈が多数発見され、地質学的・年代学的調査を実施し、液状化による可能性が高いと判断できた。放射性炭素同位体年代測定の結果をもとに、砂脈が室町時代後期から江戸時代初期に形成されたことも明らかになった。今後は、別府湾周辺での液状化・砂脈などの地震痕跡の調査を継続し、その分布範囲や年代から、揺れの大きさの推定や時代の特定をすることが必要である。

(d) 引用文献

i) 反射法探査解析

- 阿部進, 新色隆二, 猪野滋: 多重反射波の予測及び抑制処理の最適化, 物理探査学会春季大会論文集, 2013.
- Aoki, N., Narahara, S., Takahashi, A., and Nishiki, T.: Imaging of conflicting dipping events by the multi-dip reflection surfaces method, SEG Expanded Abstract, 2010.
- 千田 昇: 大分平野の地形発達と地殻変動, 地理学評論, 47-3, 1974.
- 千田 昇, 竹村恵二, 松田時彦, 島崎邦彦, 池田安隆, 岡村 眞, 水野清秀, 松山尚典, 首藤次男: 大分平野直下に伏在する府内断層の位置と最新活動時期, 活断層研究, 23, 92-108, 2003.
- 千田 昇, 竹村恵二, 松田時彦, 島崎邦彦, 池田安隆, 岡村 眞, 水野清秀, 松山尚典, 首藤次男: 大分平野東部に伏在する活断層, 活断層研究, 24, 185-198, 2004.
- Jager, R., Mann, J., Hocht, G. and Hubral, P.: Common-reflection-surface stack: Image and attributes, Geophysics, Vol. 66(1), pp. 97-109, 2001.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 別府-万年山断層帯の長期評価, 2005.
- 星住英夫, 小野晃司, 三村弘二, 野田徹郎: 地域地質研究報告 5万分の1地質図幅「別府」, 地質調査所, 1988.
- 日高稔, 森山善蔵: 大分市温泉の試錐資料による地下地質の研究, 大分県温泉調査研究会, 51号, 11-18, 2000.
- Itoh, Y., Kusumoto, S., and Takemura, K.: Evolutionary process of Beppu Bay in central Kyushu, Japan: a quantitative study of the basin-forming process controlled by plate convergence modes, Earth, Planets and Space, 66-74, 2014.
- Mann, J., Schleicher, J., and Hertweck, T.: CRS Stacking - A Simplified Explanation, In Extended abstracts, 69th Conf. Eur. Assn. Geosci. Eng. B044, 2007.
- 森山善蔵, 日高稔: 大分市の温泉地質, 大分県温泉調査研究会, 32号, 65-70, 1981.
- 森山善蔵, 日高稔: 大分市温泉の地質, 大分県温泉調査研究会, 37号, 38-49, 1986.
- Schleicher, J., Tygel, M., dan Hubral, P.: Parabolic and hyperbolic paraxial twopoint traveltimes in 3d media, Geophysical Prospecting, (41):495-5, 1993.
- 白石和也, 阿部進, 岩崎貴哉, 斎藤秀雄, 佐藤比呂志, 越谷信, 加藤直子, 新井隆太, 川中卓: 屈折初動走時トモグラフィ解析における初期モデルランダム化による解の信頼性評価, 物理探査, 63, 4, 345-356, 2010.
- 首藤次男, 日高稔: 大分地方の沖積層-特に別府湾の起源について-, 九大理研報(地質), 11, 87-104, 1971.
- 寺岡易司: 九州大野川盆地付近の白亜紀層, 地調報告, 237, 1970.
- 吉岡敏和, 星住英夫, 宮崎一博: 地域地質研究報告 5万分の1地質図幅「大分」, 地質調査所, 1997.
- Zhang, J., and Toksoz, M.N., Nonlinear refraction traveltome tomography, Geophysics, 63, No. 5, 1726-1737, 1998.

ii) GPS および地震観測

古川善紹・馬渡秀夫・黒田徹 (2000) 九州・別府地域での地震活動, 地震 2, 52, 487-490.
Matsubara, M., K. Obara and K. Kasahara, (2008), 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.
Nagasaki, S., H. Ishibashi, Y. Suwa, A. Yasuda, N. Hokanishi, T. Ohkura and K. Takemura (2017) Magma reservoir conditions beneath Tsurumi volcano, SW Japan: evidence from amphibole thermobarometry and seismicity, LITHOS, DOI:10.1016/j.lithos.2017.01.011
NEDO(1989) 昭和 63 年度全国地熱資源総合調査 (第 3 次) 広域熱水流動調査鶴見岳地域報告書要旨, pp 342
Shibutani, T., T. Ueno and K. Hirahara, (2008), Improvement in the extended-time multitaper receiver function estimation technique, Bull. Seismol. Soc. Am., 98(2), 812-816, doi:10.1785/0120070226.

iii) 重力探査

地質調査総合センター(編) 日本重力データベース DVD 版, 数値地質図 P-2, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2013.
GEOSOFTE Inc., “VOXI Earth Modeling”,
<http://www.geosoft.com/products/voxi-earth-modelling/> (accessed March 27, 2017).
Murata, Y., Estimation of optimum average surficial density from gravity data: An objective Bayesian approach, J. Geophys. Res., 98, 12097-12109, 1993.
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.
岡田篤正・池田安隆・中田 高・千田 昇・宇根 寛, 都市圏活断層図 大分, 国土地理院技術資料 D.1-No.375.
Gravity research group in southwest Japan, Gravity database of southwest Japan (CD-ROM), 2001.

iv) ボーリングデータベース

諏訪靖二・岩崎好規・福田光治・山本浩司 (1991) : 地盤工学データベースの構築とその利用, 地球環境と応用地質, 日本応用地質学会関西支部創立 20 周年記念論文集, pp.281-294
千田 昇 (1987) : 大分平野西部の完新世における地形発達, 地理評, Vol. 60, pp.466-480
首藤次男・日高 稔(1971) : 大分平野の沖積層, とくに別府湾の起源について, 九大理研報 (地質), 11 卷, 1 号, pp.87-104
Kitada, N. and M. Mimura : Subsurface flexure of Uemachi Fault and its characteristics in Osaka Plain, The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, JPN-103, 2015
大分県 (2000) : 平成 12 年度 地震関係基礎調査交付金 別府一万年山断層帯に関する調査 成果報告書

3. 2 - 3 水理構造（地下水解析・浅層比抵抗測定）

(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

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人京都大学理学研究科	教授	鍵山 恒臣
国立大学法人京都大学理学研究科	教授	大沢 信二
国立大学法人京都大学理学研究科	准教授	柴田 智郎
国立大学法人京都大学理学研究科	助教	宇津木 充

(c) 業務の目的

別府－万年山断層帯（大分平野－由布院断層帯東部）の震源断層形状と周辺の地殻構造を解明することを業務の目的とする。特に、サブテーマ2－3では水理構造調査（地下水位観測、温泉水データ解析など）や浅層比抵抗調査の解析から、平野基盤形状の推定と断層との関係を探る。

(d) 3ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成26年度：国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、別府・由布院・大分平野等に存在する温泉掘削の情報を整理するとともに、水位観測や水質分析を追加して水理的解析を行った。また浅層の比抵抗探査を実施して、浅層地下構造との関連を明らかにする調査を開始した。

2) 平成27年度：国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、別府・由布院・大分平野等に存在する温泉掘削の情報の整理を継続するとともに、水位観測や水質分析を追加して水理的解析を行った。さらに、フラックスメーターを活用して、平野域でのCO₂分布調査を開始した。また浅層の比抵抗探査を実施して、浅層地下構造との関連を明らかにする調査を継続実施した。

3) 平成28年度：国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、別府・由布院・大分平野等に存在する温泉掘削の情報の整理を継続するとともに、水位観測や水質分析を追加して水理的解析を継続した。さらに、27年度購入のフラックスメーターを活用して、平野域での分布調査を進めた。また浅層の比抵抗探査を実施して、浅層地下構造との関連を明らかにする調査を継続した。

(2) 平成26～28年度の成果

(a) 業務の要約

別府・由布院・大分平野等に存在する温泉掘削の情報の整理を継続するとともに、水位観測や水質分析を追加して水理的解析を継続実施した。さらに、フラックスメータ

一を活用して、平野域での分布調査を進めた。また、海域でのラドンガスの分布状況を調査し、地下からの湧出と経路に関する調査を実施した。浅層の比抵抗探査を実施して、浅層地下構造との関連を明らかにする調査を継続実施した。

(b) 業務の成果

(i) 地下水理構造調査（柴田）

サブテーマ 2-3 では、地下水理構造の調査から断層を推定することを目標とした。断層帯周辺における地下水の透水性に関する構造は、断層面に近い順から水を通しにくい粘土化した断層中心部、水を通しやすい破碎された岩石、破碎されていない岩石（母岩）の 3 つに区分できることが知られている（たとえば、Evans et al., 1997, Seront et al., 1998）。つまり、断層面に垂直方向では透水性は小さく、平行な方向では大きくなると考えられ、地層内を流れていた地下水は断層面で妨げられ、断層面に沿うように流れを変える。温泉の中には、断層などの割れ目を流動しているものがあり、地下深部から断層面に沿って上昇してきた熱水は地表部で温泉として湧出する、もしくは地下浅部にとどまり温泉帯水層を形成する。1960 年代になり、これまで温泉が湧出していなかった地域で温泉の開発が行われ、地下の温泉帯水層の存在が明らかになり、温泉水の流動や分布から地下水理構造に関するデータが得られるようになった。

本調査対象地域である別府-万年山断層帯（大分平野-由布院断層帯東部）には多数の活断層が発達しており、数多くの温泉が湧出している。断層に関係する温泉の中の 1 つに別府地域の温泉がある。別府地域には、南縁と北縁にそれぞれある堀田断層・朝見川断層と鉄輪断層・亀川断層があり、それらの断層に沿って温泉が湧出している (Allis & Yusa, 1989)。一方、別府温泉の東部、別府湾南岸に位置する大分平野では、自然に湧出している温泉は数少ないが、温泉開発により平野部や丘陵地帯で泉質の異なる温泉が確認され、起源の異なる複数の温泉帯水層が地下にある (北岡, 1987)。

そこで、本調査研究では、大分平野に存在する温泉情報の整理と別府地域の堀田断層・朝見川断層周辺から放出されるガスの測定、温泉水位の観測を実施し、断層の推定を試みた。

・大分平野の温泉データの整理・解析

大分平野には地表部で自然に温泉が湧出している場所は稀であるが、井戸を掘削することで多くの温泉が湧出している。これらの温泉データから、局所的に高温の温泉帯水層が存在し、鉛直方向に流動する構造があることが明らかになった (吉川・北岡, 1984; 北岡, 1987; 北岡・川野田, 1991)。そこで、大分市内の温泉の化学組成に基づき、温泉を分類し、断層と関連性について調べた。

平成 26 年度には、大分県がまとめた大分県温泉情報データベース 2014 (大分県, 2014) を使用し、大分市内にある温泉の 303 データのうち、171 データを整理し、アニオンインデックス (野田, 1987) という指標を用い、温泉を分類し、その分布から鉛直方向に流動する構造について調べた。このアニオンインデックスは温泉水中の主要陰イオン濃度から求め、地熱地域で見られる熱水の生成と流動機構を検討するために提案された指標である。

大分市内で掘削して得られた温泉には海水や化石海水が温泉化したものがあり、このよ

うな温泉は対象としていないため、適切に分類することができなかった。そこで平成 27 年度では、分類法を見直し、多変量解析の 1 つである主成分分析法を使用した。また、同データベースを精査し、化学組成の陽イオンと陰イオンの当量濃度の差が小さい 286 データを選び、使用した。

① 温泉井戸の湧出地

使用した大分県温泉情報データベース 2014（大分県，2014）では、温泉の湧出地（井戸の位置）が住所表記で記載されており、住所表記の区画内の位置が不明であることから、温泉台帳の井戸位置図を入手し、井戸の緯度・経度を求めた。

表 3.2.3-1 使用した温泉データ

No	緯度	経度	泉温 (℃)	掘削深度* (m)	Cl	HCO ₃	SO ₄ mg/kg*	Na	K	Mg	Ca
1	33.2388	131.5741	43.0	n.a.	8.2	427.1	n.d.	6.54	0.56	0.01	0.11
2	33.2406	131.5747	46.8	n.a.	8.9	340.4	0.05	5.70	0.27	n.d.	0.15
3	33.1650	131.5548	17.0	n.a.	2500.0	1897.0	0.10	80.08	1.10	13.03	7.00
4	33.2579	131.6693	33.0	n.a.	2094.0	1502.0	0.10	63.68	3.40	10.84	3.23
5	33.2469	131.5833	49.0	n.a.	8.9	620.2	0.07	9.19	0.85	n.d.	0.15
6	33.2493	131.6145	46.3	n.a.	1765.0	700.5	0.50	56.72	4.39	1.22	3.53
7	33.2381	131.6138	52.5	n.a.	345.6	775.5	0.01	19.97	1.82	0.02	0.38
8	33.2081	131.6292	47.4	750	757.0	465.0	0.07	29.01	1.09	0.07	0.49
9	33.2245	131.6274	46.6	500	13.8	110.0	0.12	2.78	0.20	0.02	0.05
10	33.2372	131.5962	58.0	700	219.0	814.0	0.08	21.14	2.56	0.04	0.41
11	33.2237	131.7003	43.7	780	1121.0	147.0	0.03	33.75	0.94	0.02	0.69
12	33.2404	131.5952	53.5	n.a.	31.4	681.0	0.05	12.35	1.47	0.02	0.29
13	33.2351	131.6316	52.2	730	785.0	24.2	0.25	21.31	1.55	0.01	0.34
14	33.2434	131.5951	50.8	750	25.9	588.0	0.03	12.18	0.72	0.01	0.14
15	33.1983	131.5999	42.7	600	778.0	926.0	0.02	35.84	0.68	0.46	0.70
16	33.2070	131.6027	51.8	700	2771.0	311.0	0.01	75.69	0.93	0.89	3.56
17	33.1979	131.6003	53.2	700	2452.0	2011.0	0.02	97.96	3.56	0.34	0.67
18	33.1667	131.5560	15.1	n.a.	2945.0	2663.0	0.02	96.35	1.69	18.02	4.68
19	33.2499	131.6664	51.3	600	4647.0	186.0	0.52	112.01	6.65	2.78	1.10
20	33.2425	131.6350	51.9	700	3295.0	111.0	1.96	85.69	3.56	0.14	6.04
21	33.2399	131.6859	49.4	800	1750.0	300.0	0.02	45.50	1.03	0.64	2.99
22	33.2301	131.6406	54.1	750	85.2	293.0	0.13	7.96	0.45	0.02	0.10
23	33.2464	131.6469	45.6	700	7849.0	175.0	3.81	177.99	10.05	5.58	27.05
24	33.2267	131.6202	52.0	700	614.0	319.0	0.15	22.53	1.60	0.02	0.49
25	33.2472	131.6571	43.9	700	1400.0	179.0	0.49	37.23	1.92	0.49	1.71
26	33.2360	131.6096	50.0	700	175.0	811.0	0.05	18.14	1.48	0.02	0.28
27	33.2317	131.6364	52.7	700	263.0	273.0	0.07	12.53	0.66	0.01	0.19
28	33.2418	131.6024	53.9	750	18.9	519.0	0.01	10.48	0.80	0.01	0.12
29	33.1964	131.6062	46.6	750	831.0	793.0	n.d.	37.97	0.28	0.63	0.82
30	33.2368	131.6001	53.3	700	19.5	538.0	0.03	12.35	1.03	0.01	0.23
31	33.2342	131.6048	54.3	700	140.0	911.0	0.06	17.18	1.90	0.04	0.36
32	33.2583	131.6693	45.6	700	3461.0	850.0	0.05	95.78	5.01	3.18	6.34
33	33.2380	131.6083	51.8	700	87.2	660.0	0.04	13.18	1.00	0.01	0.17
34	33.2438	131.5868	51.5	600	43.4	760.0	0.02	12.35	1.19	0.04	0.26
35	33.2100	131.6186	44.8	750	942.0	762.0	0.01	39.28	1.19	0.07	0.61
36	33.2574	131.6661	46.5	700	5647.0	402.0	0.20	149.15	7.98	2.39	8.88
37	33.2079	131.6144	43.1	700	186.0	901.0	0.01	20.10	0.90	0.08	0.32
38	33.2154	131.5912	46.4	604	3028.0	3650.0	0.06	75.64	10.84	37.11	12.82
39	33.2082	131.6367	46.8	800	379.0	476.0	0.01	18.66	0.60	0.12	0.36
40	33.2337	131.6079	54.3	700	206.0	892.0	0.03	19.88	2.02	0.02	0.23
41	33.2324	131.6100	46.7	700	14.8	625.0	0.03	10.83	0.81	0.02	0.12
42	33.2287	131.6275	55.4	700	49.9	308.0	0.02	6.57	0.46	0.02	0.10
43	33.2435	131.6076	50.5	850	116.0	278.0	0.17	8.53	0.42	0.01	0.10
44	33.2033	131.6860	38.6	800	20.5	607.0	0.00	8.74	0.35	0.59	0.39
45	33.2000	131.5887	44.1	600	1676.0	257.0	0.03	42.15	0.42	1.56	3.46
46	33.1818	131.5425	37.1	630	3018.0	2731.0	n.d.	89.39	5.47	22.71	10.38
47	33.2508	131.6217	49.3	700	1489.0	546.0	n.d.	47.54	2.76	0.94	1.42
48	33.2369	131.6520	45.5	800	133.0	334.0	0.02	9.74	0.62	0.02	0.14
49	33.2419	131.6061	48.6	700	38.7	534.0	0.02	10.48	1.24	0.05	0.17
50	33.2153	131.6230	45.7	670	88.6	711.0	n.d.	14.79	0.40	0.04	0.16
51	33.2303	131.6404	54.1	750	86.2	311.0	0.10	8.44	0.51	0.01	0.15
52	33.2298	131.6741	52.0	800	1244.0	606.0	0.05	39.67	2.71	0.08	1.14
53	33.2513	131.6709	53.1	700	6429.0	168.0	0.25	153.98	6.27	2.52	17.02
54	33.2558	131.6686	53.5	700	5512.0	331.0	n.d.	141.76	6.65	2.11	10.73
55	33.2562	131.6707	42.9	700	5219.0	368.0	n.d.	130.84	5.60	1.66	10.38
56	33.2435	131.6075	49.9	700	333.0	881.0	0.01	24.58	1.78	0.08	0.54
57	33.1951	131.5778	52.0	688	1336.0	2581.0	n.d.	68.77	1.40	4.33	2.30
58	33.2363	131.6047	45.9	700	38.3	361.0	0.03	7.22	0.34	0.02	0.10
59	33.2521	131.6677	53.6	700	5315.0	163.0	0.01	121.92	6.24	2.86	15.67
60	33.2216	131.6184	45.1	700	11.9	522.0	0.01	9.44	0.45	0.03	0.12
61	33.1944	131.6112	45.0	780	1097.0	564.0	n.d.	39.45	0.53	0.35	1.11
62	33.2067	131.6990	25.3	230	5.8	581.0	0.04	2.41	0.25	2.81	3.72
63	33.1874	131.5940	41.0	680	480.0	1756.0	0.00	40.54	1.07	1.20	1.03
64	33.2234	131.6772	51.2	800	587.0	285.0	0.02	21.05	0.79	0.02	0.23
65	33.2113	131.5951	46.8	700	5014.0	2573.0	0.23	123.79	15.14	28.06	11.58
66	33.2304	131.6006	43.8	689	7.2	288.0	0.05	5.31	0.40	0.09	0.06
67	33.2170	131.5928	56.0	700	1712.0	1247.0	3.66	64.05	7.42	2.69	1.98
68	33.2450	131.5847	56.3	800	159.0	891.0	0.01	17.14	2.16	0.07	0.41
69	33.2128	131.5744	51.6	700	2076.0	2378.0	n.d.	49.41	4.53	40.49	8.13
70	33.2155	131.5956	50.8	700	2989.0	1154.0	0.00	83.21	8.72	6.12	5.14
71	33.2431	131.6668	45.6	800	4704.0	221.0	4.83	90.39	7.95	11.36	27.95
72	33.1937	131.6002	31.4	400	320.0	968.0	0.00	19.70	0.71	1.53	2.68

*n.a.、a.f.およびn.d.は、それぞれ不明、自然湧出、測定限界以下を示す。

表 3.2.3-1 使用した温泉データ。

No	緯度	経度	泉温 (°C)	掘削深度* (m)	Cl	HCO ₃	SO ₄ mg/Kg*	Na	K	Mg	Ca
73	33.2155	131.6109	56.8	700	423.0	581.0	0.00	21.14	0.46	0.09	0.45
74	33.2392	131.6907	52.2	800	2954.0	226.0	0.00	82.95	0.73	1.58	5.84
75	33.1938	131.5673	44.6	710	1862.0	1451.0	n.d.	64.90	3.07	2.65	4.71
76	33.2118	131.6106	49.2	700	593.0	1061.0	n.d.	33.23	1.81	0.07	0.61
77	33.2005	131.6094	50.9	700	2638.0	373.0	n.d.	73.25	0.44	1.02	2.49
78	33.2367	131.6343	48.6	700	1870.0	205.0	0.76	46.63	4.07	0.21	3.83
79	33.1971	131.5419	46.1	800	8624.0	4421.0	n.d.	209.31	7.98	57.93	28.20
80	33.2293	131.6766	51.3	800	3205.0	205.0	0.26	75.69	5.83	1.06	7.64
81	33.2358	131.5965	49.4	700	43.0	769.0	0.02	12.14	1.76	0.04	0.29
82	33.2158	131.6034	45.3	700	49.2	649.0	0.01	12.96	0.99	0.06	0.20
83	33.2316	131.6815	47.5	800	4061.0	316.0	3.56	78.43	6.68	20.08	24.35
84	33.2573	131.7123	45.3	800	1230.0	714.0	0.00	44.98	2.94	0.18	0.61
85	33.2469	131.6609	30.8	270	620.0	209.0	n.d.	18.36	2.25	0.72	1.50
86	33.2343	131.6162	51.3	700	600.0	655.0	n.d.	27.23	2.34	n.d.	0.58
87	33.1879	131.6159	42.7	700	976.0	656.0	0.00	35.67	4.35	0.39	0.87
88	33.2311	131.6597	21.5	120	5.2	134.0	0.00	2.57	0.11	0.10	0.12
89	33.2296	131.6596	49.6	800	199.0	315.0	0.03	12.53	0.80	0.01	0.15
90	33.1929	131.6121	38.7	520	2.5	246.0	0.01	4.25	0.36	0.01	0.06
91	33.2118	131.5739	50.7	800	1713.0	1947.0	0.01	50.28	4.81	21.07	6.64
92	33.2164	131.6110	51.7	700	91.6	798.0	0.01	15.62	1.98	0.04	0.27
93	33.1760	131.6030	34.4	680	369.2	2161.0	0.01	43.40	0.66	1.15	1.04
94	33.2386	131.6961	45.4	800	3440.0	412.0	0.04	94.17	3.12	3.54	7.93
95	33.2418	131.6252	39.4	700	670.0	453.0	0.04	26.93	2.48	0.04	0.83
96	33.2088	131.6054	46.9	700	1394.0	697.0	0.04	48.02	2.97	0.45	1.48
97	33.2214	131.6035	53.0	750	174.0	681.0	0.01	14.53	2.07	0.04	0.12
98	33.2233	131.6064	49.4	800	104.0	563.0	n.d.	10.92	0.97	0.03	0.24
99	33.2167	131.6022	52.6	700	229.0	715.0	n.d.	16.57	1.33	0.07	0.29
100	33.2309	131.6047	46.2	700	14.4	435.0	0.07	7.96	0.88	0.01	0.19
101	33.2414	131.5889	56.2	800	272.0	1040.0	0.02	22.49	3.89	0.08	0.53
102	33.2313	131.6729	43.0	800	3230.0	182.0	0.35	77.43	5.58	3.51	10.43
103	33.2373	131.6825	48.9	800	1670.0	360.0	0.01	51.33	0.14	0.78	3.26
104	33.2444	131.6116	49.0	800	320.0	772.5	0.05	19.90	1.93	0.06	0.35
105	33.2146	131.6188	48.8	785	1159.0	637.6	0.03	40.10	1.96	0.02	0.53
106	33.2105	131.5994	48.5	700	188.0	658.8	0.04	15.47	1.30	0.06	0.18
107	33.2108	131.6098	39.9	700	896.0	497.5	0.02	34.87	0.68	0.28	0.89
108	33.2223	131.6435	47.7	885	304.0	587.4	0.03	18.37	1.39	0.03	0.22
109	33.2474	131.6313	49.5	700	1344.0	315.9	n.d.	39.20	2.71	0.24	1.21
110	33.2410	131.5912	49.5	800	76.7	724.0	0.26	13.04	1.58	0.10	0.41
111	33.2418	131.6024	55.0	700	24.4	643.5	0.04	10.57	2.02	n.d.	0.15
112	33.2312	131.5919	41.2	800	237.0	942.4	0.03	20.09	2.27	0.02	0.35
113	33.2164	131.6691	33.4	450	7.3	186.8	0.12	2.86	0.32	0.06	0.18
114	33.2205	131.6133	33.0	150	263.0	1040.0	0.02	14.40	2.11	2.82	3.59
115	33.2470	131.7245	46.0	830	3080.0	3270.0	0.29	128.32	6.55	4.75	1.08
116	33.1942	131.6217	45.8	800	1760.0	1030.0	0.02	69.60	1.63	0.13	1.08
117	33.2108	131.6289	42.7	800	212.0	799.0	0.02	19.10	0.83	0.03	0.29
118	33.2347	131.6320	53.3	700	392.0	247.0	0.10	15.01	0.76	n.d.	0.11
119	33.1667	131.5560	48.1	800	1750.0	295.0	0.01	53.07	0.40	0.83	4.27
120	33.2347	131.6320	54.3	700	400.0	284.3	0.17	14.40	0.86	n.d.	0.18
121	33.2177	131.6640	36.4	800	9.3	224.2	0.05	4.28	0.12	n.d.	0.12
122	33.2212	131.6801	48.1	700	336.0	408.3	0.03	16.14	0.85	n.d.	0.21
123	33.2359	131.6011	42.4	700	10.6	498.0	0.03	8.96	0.55	n.d.	0.14
124	33.2098	131.6887	39.3	800	668.0	3428.0	0.03	42.06	2.03	21.56	8.63
125	33.2442	131.5701	30.9	700	4.5	213.3	n.d.	3.11	0.30	0.24	0.19
126	33.2391	131.6904	50.2	800	3465.5	243.8	0.25	98.74	2.43	2.15	6.79
127	33.1921	131.5501	39.1	415	2127.5	2222.5	0.00	70.90	3.22	14.24	8.83
128	33.2402	131.5989	45.0	700	9.0	511.3	n.d.	8.35	0.78	n.d.	0.12
129	33.2419	131.6029	45.9	700	47.0	579.0	0.00	10.92	1.08	n.d.	0.11
130	33.2225	131.6306	49.4	700	11.8	270.9	0.01	5.12	0.37	n.d.	0.05
131	33.2352	131.6098	50.0	1300	568.0	713.0	0.38	26.88	1.63	0.03	0.36
132	33.2083	131.5506	45.4	750	2259.0	2311.0	0.02	54.89	1.62	29.21	12.58
133	33.2291	131.6126	49.7	700	91.4	594.3	0.01	11.83	1.10	0.02	0.16
134	33.1864	131.6020	30.4	450	275.0	916.0	n.d.	21.18	0.57	1.26	0.26
135	33.2346	131.7549	41.9	900	16800.0	12200.0	n.d.	569.82	7.31	34.15	9.88
136	33.2145	131.6497	46.6	a. f.	768.0	536.0	n.d.	28.71	0.62	0.10	0.29
137	33.2574	131.6661	37.3	700	2450.0	1440.0	n.d.	77.43	3.63	6.05	3.44
138	33.2216	131.6497	44.1	850	60.0	203.0	n.d.	6.87	0.47	n.d.	0.03
139	33.2164	131.5966	53.9	700	960.0	2025.0	n.d.	54.81	4.65	1.56	1.75
140	33.2421	131.6041	53.7	700	214.0	737.5	0.04	16.96	3.02	0.01	0.18
141	33.2339	131.6082	44.9	700	160.0	860.1	0.03	17.49	3.94	0.02	0.07
142	33.2219	131.6455	48.2	900	442.0	464.0	0.03	19.01	1.07	0.07	0.38
143	33.2335	131.6296	55.5	800	214.2	381.6	0.06	12.88	0.57	0.01	0.10
144	33.2128	131.5744	50.7	n. a.	2877.3	2537.8	n.d.	67.55	5.31	34.43	11.79

*n. a.、a. f.および n. d. は、それぞれ不明、自然湧出、測定限界以下を示す。

表 3.2.3-1 使用した温泉データ

No	緯度	経度	泉温 (℃)	掘削深度* (m)	Cl	HCO ₃	SO ₄ mg/kg*	Na	K	Mg	Ca
145	33.2128	131.5744	51.4	n.a.	2976.0	3758.5	n.d.	84.39	8.35	34.19	10.35
146	33.2128	131.5744	50.1	n.a.	2910.0	2930.0	n.d.	71.64	4.90	34.49	11.55
147	33.1760	131.6030	31.0	680	224.2	1315.5	0.01	25.11	0.20	0.56	0.58
148	33.1885	131.5705	36.3	n.a.	1093.4	2167.0	0.01	47.04	0.98	8.86	3.64
149	33.1885	131.5705	36.1	n.a.	981.8	2032.9	n.d.	44.50	1.15	8.62	4.63
150	33.1885	131.5705	35.9	a.f.	1062.2	1911.7	n.d.	46.22	0.83	9.02	0.95
151	33.2346	131.7549	42.0	a.f.	19722.3	5304.8	0.19	522.67	16.46	45.55	2.85
152	33.2462	131.5842	46.8	a.f.	22.8	384.9	0.02	6.72	0.72	n.d.	0.10
153	33.2346	131.7549	42.2	a.f.	20390.6	5277.8	n.d.	612.11	10.16	30.02	25.05
154	33.1884	131.5705	36.6	a.f.	1070.0	1951.1	n.d.	48.40	1.57	9.48	4.01
155	33.2462	131.5842	45.5	a.f.	19.7	386.3	0.02	7.01	0.69	n.d.	0.06
156	33.1884	131.5705	34.8	a.f.	901.3	1927.2	n.d.	42.32	0.92	8.55	3.07
157	33.2346	131.7549	42.1	a.f.	18189.3	5206.7	0.04	565.65	5.22	29.85	23.98
158	33.2462	131.5842	46.2	a.f.	16.7	392.8	0.03	7.27	0.71	0.02	0.09
159	33.2090	131.5616	51.8	a.f.	2751.2	3083.9	0.00	70.83	5.70	36.85	11.24
160	33.2216	131.6497	42.7	850	13.9	355.4	0.02	6.72	0.37	n.d.	0.05
161	33.2346	131.7549	42.0	a.f.	19327.6	5269.1	0.15	562.40	5.04	29.25	24.24
162	33.2462	131.5842	46.5	a.f.	17.9	400.4	0.02	7.20	0.70	0.02	0.09
163	33.2090	131.5616	50.5	a.f.	2711.5	3071.1	n.d.	69.97	5.48	38.24	12.06
164	33.2223	131.6435	42.7	900	422.1	539.0	0.04	20.41	1.45	0.02	0.27
165	33.2346	131.7549	41.7	a.f.	19450.0	5177.0	0.24	571.56	5.61	27.94	18.48
166	33.2462	131.5842	46.5	a.f.	18.8	401.2	0.02	7.25	0.70	0.02	0.09
167	33.2090	131.5616	50.8	a.f.	2722.0	3258.0	n.d.	69.07	5.52	38.27	11.14
168	33.2184	131.7207	40.0	a.f.	13690.0	7414.0	0.03	436.72	6.36	23.81	21.12
169	33.2282	131.7033	22.2	n.a.	8.5	139.0	0.07	0.82	0.13	1.32	0.85
170	33.2034	131.6861	35.6	800	6.8	338.0	0.01	3.93	0.30	0.89	0.65
171	33.1900	131.5869	41.8	700	446.0	2190.0	n.d.	45.24	0.41	0.63	0.75
172	33.2234	131.7071	48.0	1000	2460.0	496.0	0.04	70.03	2.58	0.55	3.70
173	33.2321	131.6115	42.1	700	16.3	569.0	0.02	10.05	0.76	0.03	0.20
174	33.2523	131.6253	48.4	700	318.0	635.0	n.d.	18.44	0.67	0.15	0.27
175	33.1868	131.5756	41.0	700	1770.0	2320.0	0.08	80.04	0.80	3.78	2.02
176	33.2460	131.6061	41.2	700	9940.0	173.0	11.95	203.13	18.01	4.24	67.37
177	33.2046	131.5439	45.6	800	7180.0	4010.0	0.15	189.21	8.85	47.89	9.93
178	33.2267	131.6202	47.9	n.a.	518.0	464.0	n.d.	20.75	1.72	0.07	0.69
179	33.1876	131.5948	41.4	680	470.0	1760.0	n.d.	37.45	0.73	1.55	1.43
180	33.2469	131.5799	51.1	700	74.0	941.0	n.d.	16.14	2.20	0.08	0.37
181	33.1981	131.6619	44.7	800	9450.0	168.0	n.d.	209.83	0.84	19.26	32.94
182	33.2243	131.5894	50.1	700	16.7	501.0	0.09	9.40	0.86	0.06	0.17
183	33.2090	131.5850	52.8	700	2830.0	3410.0	n.d.	80.91	8.29	26.91	10.13
184	33.2351	131.6028	49.9	700	135.0	886.0	n.d.	17.14	2.33	0.05	0.42
185	33.2347	131.6387	43.1	800	150.0	346.0	0.03	11.05	0.60	n.d.	0.18
186	33.2509	131.6672	47.4	700	4910.0	342.0	n.d.	112.66	6.60	6.17	16.97
187	33.2363	131.6047	41.2	700	14.3	525.0	0.04	9.35	0.85	0.02	0.18
188	33.2349	131.7552	42.4	900	20600.0	4750.0	n.d.	595.92	5.96	30.28	16.32
189	33.2360	131.6845	46.5	800	2260.0	268.0	n.d.	58.72	0.52	1.05	5.64
190	33.2403	131.6859	47.4	800	1830.0	281.0	n.d.	50.89	0.31	0.63	3.28
191	33.2302	131.6604	48.8	800	134.0	234.0	0.49	11.00	0.42	n.d.	0.14
192	33.2331	131.6610	47.9	800	127.0	538.0	n.d.	13.27	0.86	n.d.	0.14
193	33.2034	131.6861	36.3	800	6.9	491.0	0.01	6.05	0.30	0.73	0.55
194	33.2519	131.6678	53.1	700	5290.0	183.0	0.98	128.32	5.55	3.13	17.02
195	33.1865	131.5415	49.2	800	4640.0	998.0	0.05	129.19	7.70	0.67	5.29
196	33.2155	131.5956	54.2	700	17.3	574.0	0.41	122.66	9.28	7.90	2.13
197	33.2381	131.6138	47.7	600	369.0	644.0	0.02	22.10	2.05	0.03	0.37
198	33.2465	131.6058	48.2	n.a.	9220.0	227.0	8.31	201.39	18.11	2.31	58.89
199	33.2301	131.6406	45.9	750	247.0	304.0	0.21	12.27	0.78	0.01	0.31
200	33.2339	131.6112	54.8	700	440.0	742.0	0.01	24.23	2.03	0.02	0.47
201	33.2418	131.6252	38.2	n.a.	1060.0	304.0	0.00	31.54	3.04	0.04	1.25
202	33.2034	131.6861	25.7	800	7.0	225.0	0.06	2.03	0.27	0.99	0.77
203	33.2310	131.5964	45.9	689	17.4	597.0	0.04	10.70	1.21	0.02	0.25
204	33.2391	131.6381	46.8	800	1700.0	249.0	1.18	43.45	2.56	0.10	2.87
205	33.2155	131.6109	49.5	700	419.0	550.0	n.d.	22.40	0.30	0.09	0.46
206	33.2242	131.6192	51.1	700	93.1	501.0	0.00	11.35	0.71	0.02	0.20
207	33.2312	131.6040	45.6	700	12.7	494.0	0.04	8.26	0.77	0.01	0.20
208	33.2323	131.6692	45.1	800	521.0	666.0	n.d.	23.27	1.63	0.03	0.53
209	33.2414	131.6829	25.9	200	1250.0	611.0	0.24	37.41	0.72	4.10	2.34
210	33.2210	131.5681	50.8	800	370.0	1340.0	0.01	18.83	2.79	7.86	4.20
211	33.1932	131.5672	50.9	800	2060.0	790.0	0.03	70.03	0.92	0.94	2.41
212	33.2384	131.6477	51.7	800	122.0	327.0	0.27	9.79	0.43	n.d.	0.11
213	33.2457	131.5788	45.1	636	9.7	550.0	0.02	9.18	0.77	0.02	0.14
214	33.1946	131.6502	35.8	1000	194.0	1220.0	0.00	21.27	0.65	1.04	0.71
215	33.2442	131.5956	27.1	150	10.4	130.0	0.00	1.77	0.05	0.35	0.36
216	33.2456	131.6161	46.0	700	1770.0	409.0	n.d.	52.63	2.50	1.09	2.61

*n.a.、a.f.およびn.d.は、それぞれ不明、自然湧出、測定限界以下を示す。

表 3.2.3-1 使用した温泉データ。

No	緯度	経度	泉温 (°C)	掘削深度* (m)	Cl	HCO ₃	SO ₄ mg/kg*	Na	K	Mg	Ca
217	33.2184	131.7207	41.6	728	15100.0	7420.0	6.66	469.77	6.47	30.61	20.76
218	33.2493	131.5751	53.0	850	21.7	1090.0	0.01	17.49	1.67	0.04	0.26
219	33.2101	131.6889	37.4	800	439.0	2980.0	0.01	35.19	1.66	16.79	8.98
220	33.2493	131.5751	43.7	850	7.9	440.0	0.01	7.35	0.78	0.02	0.11
221	33.2378	131.5799	52.1	800	26.0	704.0	n.d.	10.35	1.27	0.02	0.26
222	33.2461	131.6059	23.5	200	1890.0	1190.0	n.d.	60.03	1.51	7.45	2.55
223	33.2404	131.5996	40.0	800	11.0	490.0	0.02	9.26	0.63	0.01	0.15
224	33.2309	131.6133	46.6	n.a.	90.1	810.0	0.02	15.05	1.42	0.02	0.01
225	33.2493	131.5751	40.2	n.a.	8.4	502.0	0.01	7.66	0.90	0.01	0.13
226	33.2216	131.6184	47.5	600	8.5	504.0	0.02	8.74	0.43	0.01	0.08
227	33.2418	131.6024	50.6	700	22.0	614.0	0.03	11.44	0.82	n.d.	0.16
228	33.1622	131.5453	31.3	800	6860.0	328.0	n.d.	162.25	0.49	7.29	27.70
229	33.2083	131.5506	42.3	500	2080.0	3320.0	0.00	62.20	2.33	32.59	14.67
230	33.1878	131.5948	40.2	700	417.0	1740.0	n.d.	37.28	0.79	0.97	1.38
231	33.2353	131.6170	50.1	700	1160.0	441.0	0.03	38.50	2.41	0.05	0.83
232	33.1498	131.5069	19.8	a.f.	6720.0	4140.0	n.d.	218.36	7.90	8.64	19.71
233	33.1828	131.5895	43.4	750	445.0	1080.0	0.05	28.40	0.24	0.46	1.08
234	33.2225	131.6306	49.1	700	14.7	309.0	0.03	6.48	0.45	n.d.	0.05
235	33.2363	131.5966	52.8	700	85.8	827.0	0.01	14.83	2.03	0.02	0.36
236	33.1865	131.5415	47.4	700	3650.0	2450.0	n.d.	119.62	9.39	5.47	10.08
237	33.2491	131.5741	46.5	1000	8.1	471.0	0.01	6.87	0.74	0.01	0.09
238	33.2291	131.6126	50.1	700	28.6	642.0	n.d.	11.79	1.12	n.d.	0.17
239	33.2518	131.6136	46.8	700	1190.0	914.0	n.d.	43.37	2.03	0.93	1.37
240	33.2444	131.5828	46.7	655	16.5	744.0	0.01	12.14	1.01	0.02	0.22
241	33.2109	131.6291	46.7	800	872.0	601.0	0.01	33.10	1.30	0.05	0.82
242	33.2116	131.5939	54.0	700	4490.0	3030.0	0.03	148.76	12.81	8.39	6.79
243	33.2054	131.6643	47.0	900	325.0	1110.0	n.d.	23.10	0.57	2.44	1.68
244	33.2460	131.7081	45.0	800	1770.0	396.0	n.d.	53.07	2.58	0.26	2.11
245	33.2264	131.6201	50.4	a.f.	321.0	434.0	0.04	15.83	1.31	0.02	0.50
246	33.2267	131.6202	54.3	700	753.0	561.0	0.03	28.19	2.11	0.03	0.85
247	33.2116	131.5939	52.5	700	4920.0	2840.0	0.06	134.84	12.69	23.45	12.08
248	33.2296	131.6596	48.9	800	177.0	290.0	0.27	12.31	0.48	n.d.	0.11
249	33.2405	131.5998	48.6	700	13.0	525.0	0.02	9.92	0.69	0.01	0.13
250	33.2321	131.6115	55.2	650	150.0	1010.0	0.00	18.10	1.75	0.02	0.35
251	33.2122	131.5693	53.0	800	2790.0	2280.0	0.44	70.90	6.85	30.94	7.09
252	33.1667	131.5560	51.8	800	2330.0	294.0	0.03	58.29	0.34	1.06	5.24
253	33.2382	131.6099	50.6	700	84.7	678.0	0.00	13.09	0.98	0.01	0.18
254	33.2464	131.6469	48.0	760	2490.0	174.0	0.72	61.33	3.50	1.47	4.12
255	33.2094	131.6893	35.9	500	187.0	2570.0	0.00	21.18	0.95	12.01	8.33
256	33.2088	131.6054	46.5	700	1200.0	795.0	0.01	39.15	2.54	1.50	1.90
257	33.1895	131.5867	40.3	700	476.0	2120.0	0.12	45.24	0.41	0.71	0.84
258	33.1776	131.5257	40.4	558	13900.0	4090.0	0.02	421.49	12.97	29.13	10.83
259	33.2523	131.6253	46.1	700	399.0	529.0	0.01	20.53	0.58	0.12	0.26
260	33.2339	131.6082	56.2	700	130.0	840.0	0.03	17.70	1.94	n.d.	0.22
261	33.2342	131.6048	53.2	700	134.0	885.0	0.02	17.31	1.86	n.d.	0.33
262	33.1982	131.6183	38.7	800	2730.0	288.0	0.02	80.91	0.30	0.20	1.05
263	33.1668	131.5559	15.0	a.f.	3740.0	2790.0	n.d.	117.88	1.64	20.16	10.53
264	33.2440	131.6107	51.3	700	356.0	1070.0	n.d.	24.53	1.93	0.08	0.55
265	33.2181	131.5968	51.1	700	1770.0	954.0	0.17	61.77	5.40	1.06	1.40
266	33.2234	131.7071	46.7	1000	1950.0	1330.0	n.d.	71.34	3.30	1.27	2.30
267	33.2334	131.6074	52.2	700	59.3	840.0	n.d.	13.83	1.48	0.02	0.20
268	33.2366	131.5967	54.5	700	23.9	330.0	0.07	4.87	0.57	0.07	0.13
269	33.2366	131.5967	44.3	700	27.2	350.0	0.07	5.57	0.67	0.07	0.13
270	33.2460	131.6061	42.0	700	11400.0	171.0	17.11	237.93	20.51	7.06	78.35
271	33.2347	131.6387	46.5	800	223.0	306.0	0.08	12.83	0.70	n.d.	0.19
272	33.2098	131.6292	51.1	800	3020.0	182.0	0.01	88.30	0.94	0.44	3.53
273	33.2217	131.6538	47.2	900	3300.0	224.0	0.05	9.57	0.44	0.01	0.08
274	33.2401	131.5951	52.8	1000	550.0	11.9	n.d.	12.48	1.74	0.05	0.33
275	33.2470	131.6532	40.0	700	1430.0	186.0	0.61	36.54	2.07	0.49	1.62
276	33.2278	131.6278	45.0	600	1156.0	463.0	0.85	13.92	1.07	0.37	1.26
277	33.2283	131.6150	52.3	600	89.9	769.0	n.d.	13.66	1.26	0.02	0.22
278	33.2082	131.6367	42.5	800	527.0	500.0	0.07	21.10	0.96	0.06	0.43
279	33.2128	131.5744	51.4	700	2950.0	2680.0	n.d.	69.38	4.86	33.66	9.53
280	33.2277	131.6321	48.6	n.a.	18.1	346.0	0.67	34.02	3.04	0.18	2.49
281	33.2088	131.6054	44.8	n.a.	998.5	722.2	0.00	40.11	2.28	0.23	1.01
282	33.2469	131.6609	29.2	n.a.	584.8	183.6	0.00	16.64	1.66	0.77	1.58
283	33.2431	131.6676	41.2	n.a.	3935.6	214.0	3.07	80.52	7.29	5.55	21.95
284	33.2470	131.6532	34.5	700	1361.4	226.5	0.21	39.77	2.09	0.49	1.55
285	33.1885	131.5705	35.8	n.a.	1127.1	1920.6	n.d.	46.73	1.10	9.46	4.19
286	33.1727	131.5237	26.8	108	4.1	162.5	0.65	1.21	0.08	1.18	0.97

n.a., a.f. および n.d. は、それぞれ不明、自然湧出、測定限界以下を示す。

② 地下の温度構造

掘削された温泉井戸の深度と湧出した温泉の温度から地温勾配を求めた。地温勾配は地下の温度構造を示す1つの指標で、地質を構成する岩石と熱の移動を反映している。熱の移動には、岩石の熱伝導と地下水流動に伴う運搬の2つの機構がある。熱伝導は構成する岩石の熱伝導率で決まり、地下水流動は地下水が移動することによって地下水自身を持っている温度（熱）が運搬される。一般に、熱伝導より地下水流動の方が熱移動の効率が高い。

地下の温度構造は、掘削された井戸の坑口から坑底まで連続的に温度を測定する温度検層を行うことで求められる。温度検層は掘削直後や井戸を利用している状態では、掘削中の泥水や汲み上げている温泉の影響を受け、真の地中の温度を示さないため、井戸掘削後十分な時間が経過した後で行われる。吉川・北岡（1984）、および北岡（1987）によれば、大分平野の温度検層の結果は、深さに対しほぼ直線的に温度が増加していることが報告されている。地温勾配（ λ ）は、深さに対する地温の上昇を示しており、地表付近の地温を平均気温に近い15°Cとすると、

$$\lambda = \frac{T_n - 15}{d_n} \quad (1)$$

で表される。ここで、 T_n は深度（ d_n ）における地中温度である。しかし、今回は温度検層による調査ではなく、データベースにある井戸の掘削深度（ d_w ）と湧出温度（ T_d ）を用いて、仮の地温勾配（ λ_p ）

$$\lambda_p = \frac{T_d - 15}{d_w} \quad (2)$$

を求めた（図 3.2.3-1）。温泉水は、掘削井戸内のスリットを通して、対象の帯水層から井戸内に入り、汲み揚げられる。井戸深度が深いと途中で温泉水は冷却されるため、その湧出温度は帯水層中にある時よりも低くなる。そのため、仮の地温勾配（ λ_p ）は、必ずしも地下の温度構造を正確に示すものではないが、おおよその目安として使用することができる。

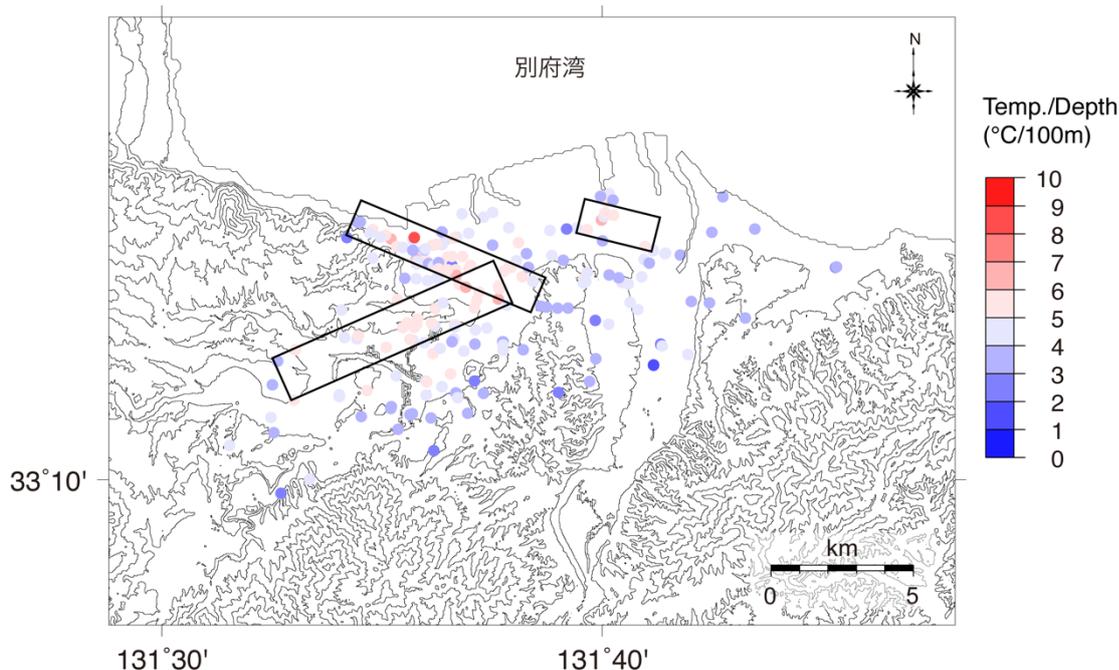


図 3.2.3-1 仮の地温勾配 (λ_p) で示した温泉の分布。地温勾配の高い地域は矩形で囲んだように、大分平野北西部の西北西～東南東に延びる方向、西南西～東北東に延びる方向、北東部の3カ所に位置する。

仮の地温勾配 (λ_p) は平野全体で一様な値を示すのではなく、地域により異なる。大分平野北西部の西北西～東南東に延びる方向、西南西～東北東に延びる方向、平野北東部の一群の3カ所は、明らかに周囲よりも高く、深部から高温流体が上昇するような水理学的構造があると考えられる (図 3.2.3-1)。

③ 温泉の分類

温泉水の主要7成分の塩化物イオン・炭酸水素イオン・硫酸イオン・ナトリウムイオン・カリウムイオン・マグネシウムイオン・カルシウムイオンを変数として主成分分析を行った。得られた第1及び第2主成分係数と寄与率を表 3.2.3-2 に示す。第1主成分 (PC1) 係数は塩化物イオン、第2主成分 (PC2) 係数は炭酸水素イオンの変数が高い。また、第1主成分係数の寄与率が93.4%と高く、第1主成分係数の影響が大きい。

第1主成分 (PC1) スコアと第2主成分 (PC2) スコアの関係を図 3.2.3-2 に示す。主成分スコアは各データの主成分係数に対する大きさを示す。この相関図より、温泉を次の5つ (G1、G2、G3、G4-1、G4-2) に分類する。G1 は第1主成分スコアが他よりも高いもの、G2 は第1主成分スコアと第2主成分スコアが比較的高いもの、G3 は第1主成分スコアが比較的高く第2主成分スコアが低いもの、G4 はそれ以外のものとする。また、G4 には全体の3分の2のデータが含まれているので、図 3.2.3-2b に示すような第1主成分スコアと $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比の関係から、第1主成分スコアが大きく、 $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比が低い G4-1 と、第1主成分スコアが小さく、 $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比が高い G4-2 との2に分けた。このように分類した温泉の分布を図 3.2.3-3 に示す。

表 3.2.3-2 第1主成分係数、第2主成分係数とその寄与率。

	第1主成分係数	第2主成分係数
塩化物イオン	0.963	-0.266
炭酸水素イオン	0.266	0.963
硫酸イオン	0.00011	-0.00049
ナトリウムイオン	0.029	0.0039
カリウムイオン	0.00056	-0.00023
マグネシウムイオン	0.0018	0.0045
カルシウムイオン	0.0015	-0.0023
寄与率 (%)	93.4	6.5

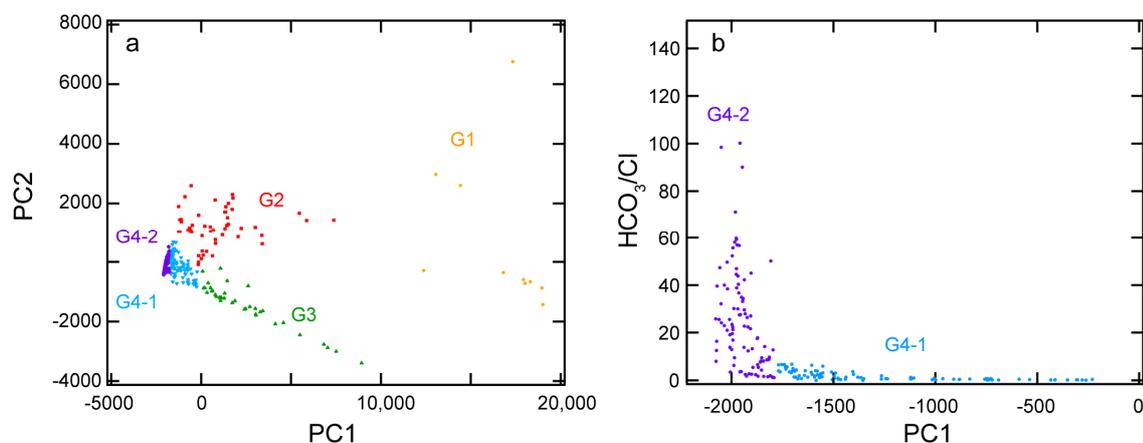


図 3.2.3-2 主成分分析の結果 (a) 第1主成分 (PC1) スコアと第2主成分 (PC2) スコアの関係、(b) 第1主成分 (PC1) スコアと $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比の関係を示す。

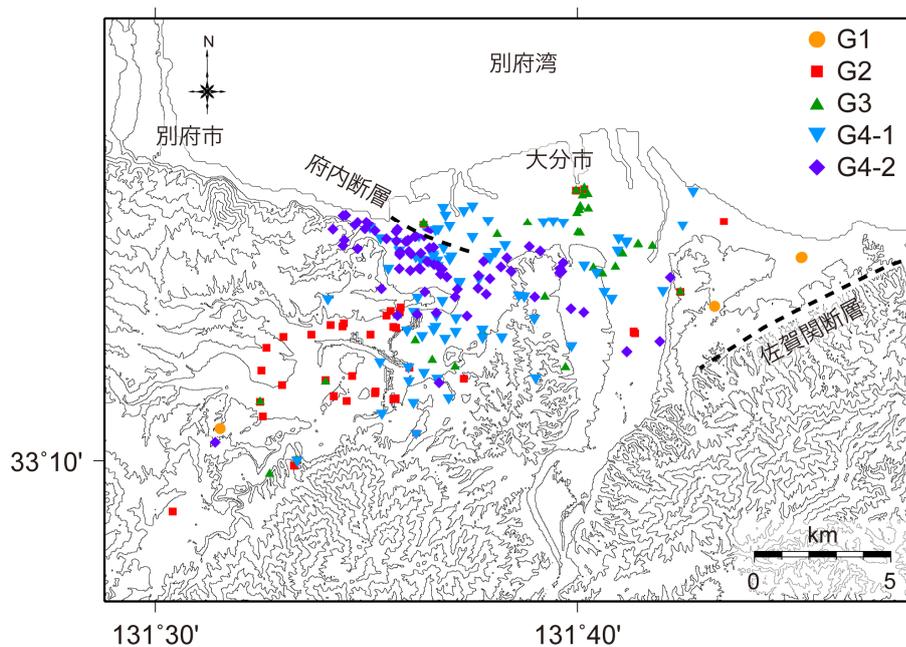


図 3.2.3-3 5つに分類した温泉の分布。

④ 温泉帯水層

温泉には、堆積層などの地層に貯留する層状温泉と岩盤の中の構造や割れ目に貯留する裂か状温泉がある。層状温泉の分布は、貯留層となる地層の形状によるが、一般的に水平方向に広がっているため、水平分布では等方的になる。一方、裂か状温泉の分布は、貯留している岩盤の構造や割れ目に支配されているため、割れ目に沿った方向を示す。そこで、温泉井戸の2井戸間の水平分布の角度を調べ、その分布から温泉帯水層を推定する。

2井戸間の角度分布は、その距離が短い場合には局所的な影響を、長い場合には広域的な影響を反映する。そこで、2井戸間での分布の歪度を調べ、その距離が5km以内のときが最も等方的になることから、各グループでの角度分布を調べた。その頻度をローズダイアグラムに示す(図3.2.3-4)。

G4-1に属する温泉は、等方的に広がっていることから層状温泉、G1~G3およびG4-2に属する温泉は、ある方向に卓越して分布していることから裂か状温泉と考えられる。特に、G4-2に属する温泉は東南東-西北西方向に分布しており、図3.2.3-3で見られるように府内断層と平行している。また、図3.2.3-1の地温勾配が高い場所とほぼ同じような位置にあることから、この断層を利用して温泉が上昇していると考えられる。大分平野では、別府地域のように断層沿いに上昇してきた温泉水が地表に湧出することはないが、伏在した断層沿いに温泉水が流動し、断層に起因した温泉帯水層を地下で形成していると考えられる。

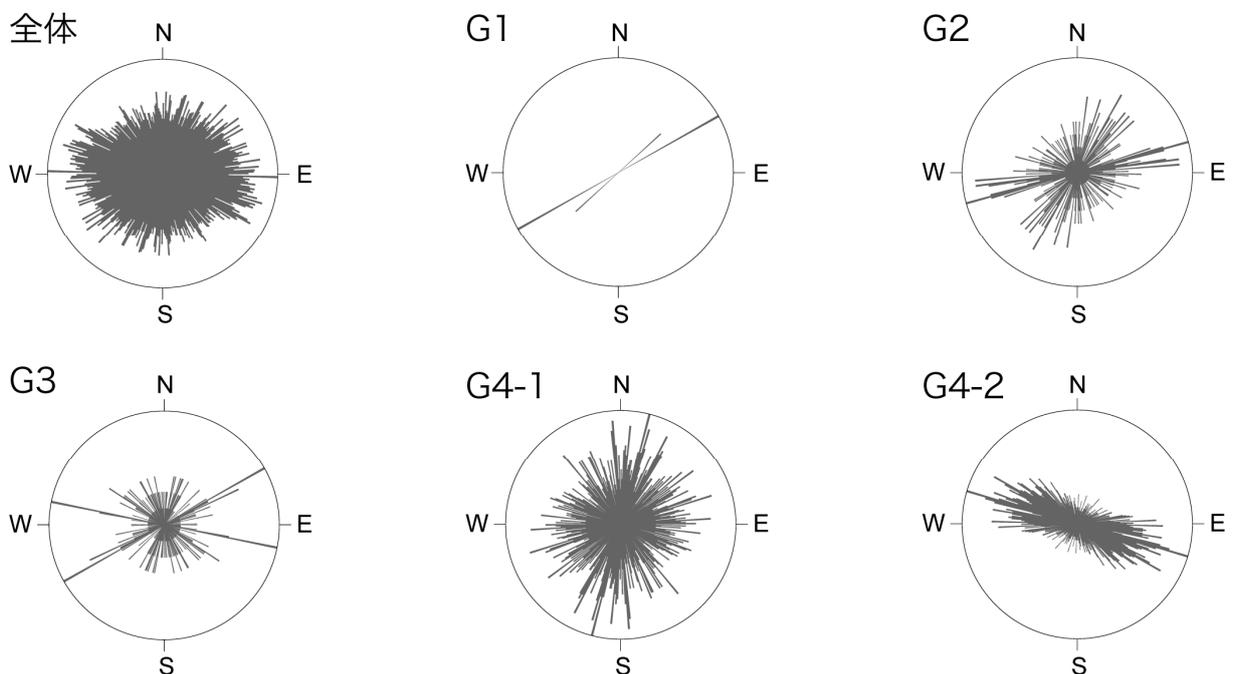


図 3.2.3-4 2温泉間の角度頻度分布。2温泉間の距離が5 km以下の温泉を抽出し、角度分布の頻度を、大分平野全体と5つに分類したグループごとにローズダイヤグラムにて示す。

・別府地域の温泉水位の観測

別府地域の温泉は、西側の鶴見岳・伽藍岳から供給される熱水流体が起源である。この

熱水流体は、南の朝見川断層と北の鉄輪断層の2つの断層に沿って、東側の海岸方向に流動している。そこで、この2つの断層における水の流動を調べるため、京都大学大学院地球熱学研究施設にある観測点1 (N33. 2837° ; E131. 4850°) と大分県農林水産研究指導センター農業研究部花きグループにある観測点2 (N33. 3140° ; E131. 4724°) の2つの井戸に、現地収録型の水位計 (ノースワン社製 Kadec21-MZPT-C) をそれぞれ設置し、2014年12月24日 (観測点1) および25日 (観測点2) から水位観測を行った (図3.2.3-5)。なお、観測点1は朝見川断層地域に、観測点2は鉄輪断層地域に位置している。測定したデータは標高表記に換算して図3.2.3-6に示す。

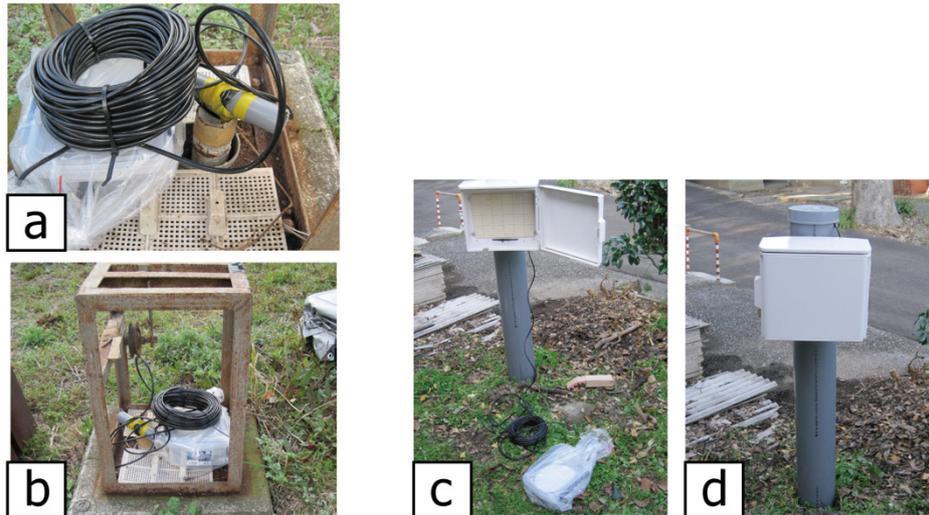


図3.2.3-5 水位計の設置の写真。写真のaとbは観測点1、cとdは観測点2である。

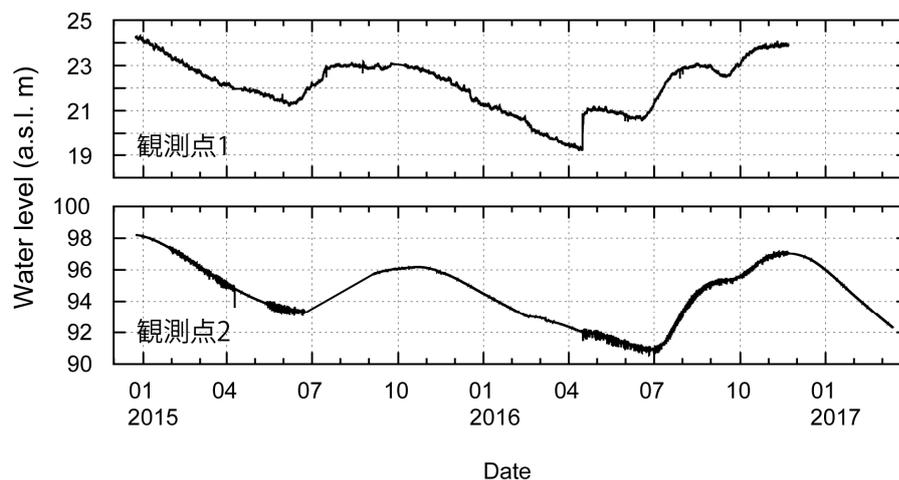


図3.2.3-6 観測した水位。鉄輪断層地域に位置する観測点2は、朝見川断層地域に位置する観測点1よりも水位が約75m高い。また、観測点1の水位は2016年4月16日の熊本地震の際に約1.5m水位上昇した。なお、観測点2で見られる高周波の変化は観測機器の不具合である。

観測された水位は、夏季には高く、冬季には低い年周期変化を示している。夏季と冬季

の水位差は、観測点1では約3m、観測点2では5mである。観測点2は観測点1よりも水位が約75m高い。このことから鉄輪断層と朝見川断層の2つの断層に沿って流動する温泉は、それぞれ異なる流動機構であることが示唆される。しかし、同じような年周期変化を示していることから、温泉の起源となる地下水の涵養機構は同じ流系と推測される。

・堀田断層・朝見川断層周辺から放出される二酸化炭素

断層や地溝帯は地球内部から放出される揮発性成分の経路となることが知られている。トルコの北アナトリア断層では、断層上で二酸化炭素の放出量とヘリウム同位体比($^3\text{He}/^4\text{He}$)が高くなっている(Dogan et al., 2009)。別府温泉地域は、北部の鉄輪断層と南部の堀田断層・朝見川断層に沿って高温流体が流動しており、地表部では、噴気などの地熱兆候が見られる(Allis and Yusa, 1989)。そこで、本調査対象地域である別府-万年山断層帯の一部分である堀田断層・朝見川断層沿いで単位時間・面積当たりには土壌から放出される二酸化炭素の放出量(フラックス値)を測定した。

① 調査方法

放出量の測定には、Accumulation chamber法(Chiodini et al., 1998)を採用し、イタリア West System 社製「Portable diffuse flux meter with LI-COR CO₂ detector」装置を用いた。この装置は、お椀型の容器に溜まった二酸化炭素の濃度変化を非分散型赤外分光(NDIR)装置で測定する。二酸化炭素は波長4.26 μm の赤外線を吸収する性質があり、その赤外線の吸収割合から濃度を算出している。

現地調査では、容器を地面との隙間がないようにかぶせ、地面から放出された二酸化炭素をお椀型の容器内に溜める。容器内には、ガス濃度に偏りがないように、測定時にはファンが回転し、攪拌する。容器内のガスは、シリコンチューブを通してポンプで分光装置に送られ、濃度を測定する。また、分光装置から排気されたガスは、再び容器内に戻すことで、容器内の二酸化炭素濃度の上昇量を正確に測定できるようにしている。土壌から放出されるガスには、水蒸気も含まれ、その赤外線吸収波長領域が二酸化炭素のものと重なるため、その影響を除くために過塩素酸マグネシウム($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$)を用いて除湿した。

測定期間は、2016年6月13~15日、8月18日~20日、22日、9月7日~11日の12日間に、堀田断層と朝見川断層を横切るように、西から東(山側から海側)にかけて、178点を行った。測定点の分布を図3.2.3-7に示す。

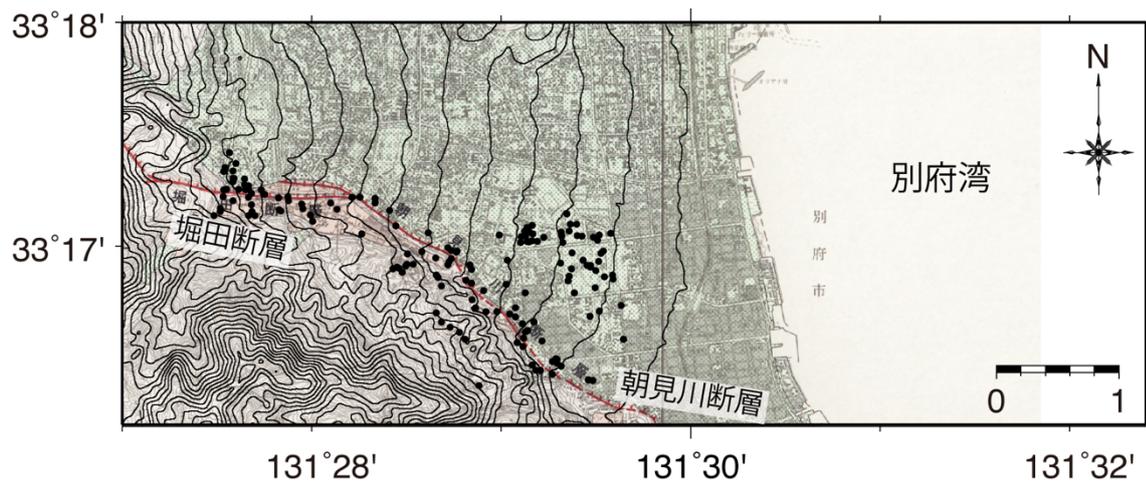


図 3.2.3-7. 二酸化炭素フラックスの調査地点（黒点）。千田・他（2000）で報告された堀田断層・朝見川断層（赤線）に加筆して示す。

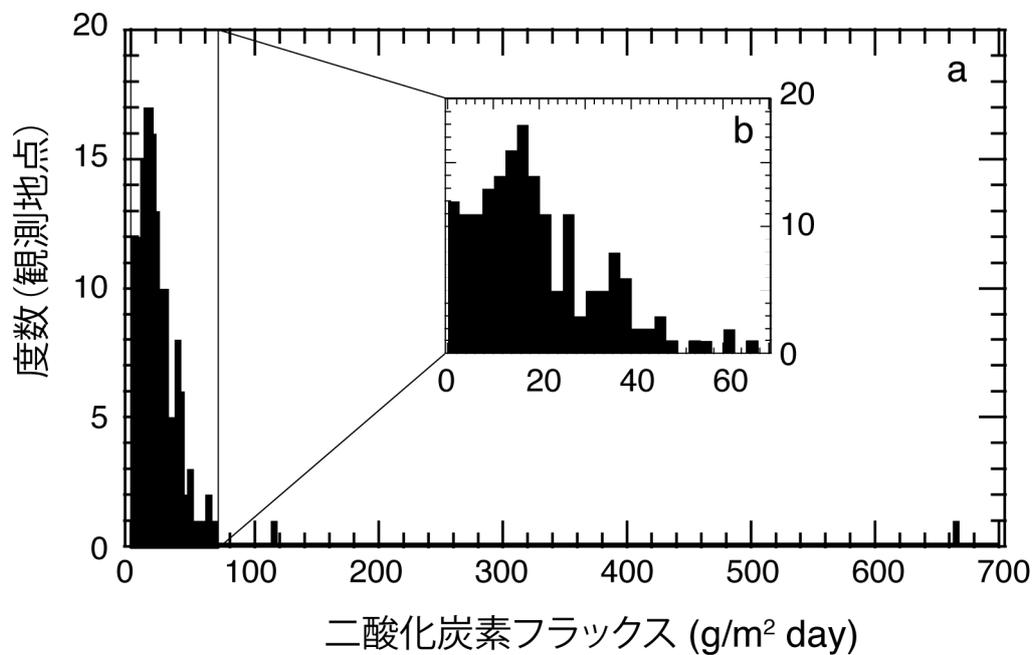


図 3.2.3-8. 178 観測地点の二酸化炭素フラックスの頻度分布。0～70 g/m²day の範囲を拡大して b に示す。

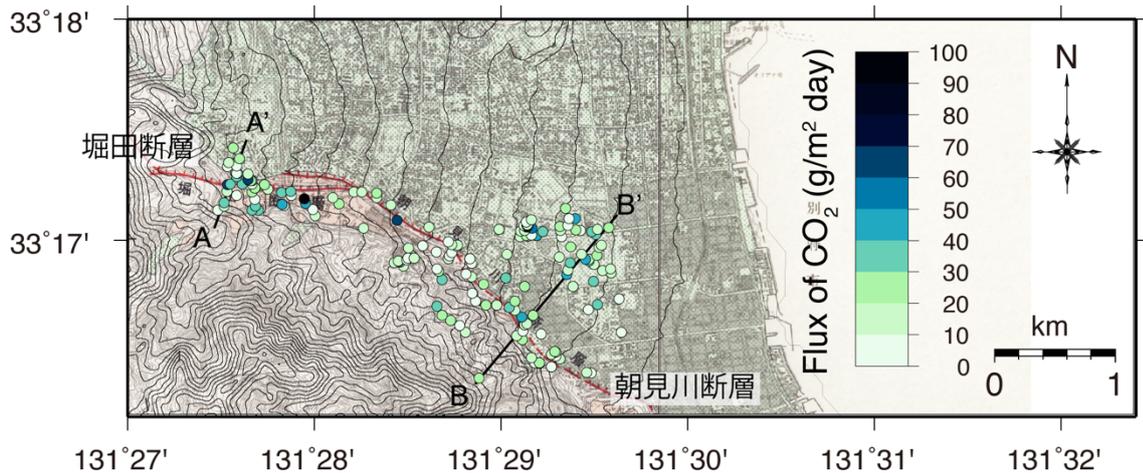


図 3.2.3-9. 二酸化炭素フラックスの結果を千田・他（2000）に加筆して示す。赤線は堀田断層・朝見川断層の位置を示す。

② 二酸化炭素のフラックス値

二酸化炭素のフラックス値は、場所により大きく異なり、 $0.068 \sim 660 \text{ g/m}^2\text{day}$ の範囲にあった。一般的に、生物活動で土壌から放出される二酸化炭素のフラックス値は約 $2.6 \text{ g/m}^2\text{day}$ 以下であり（Dogan et al., 2009）、本調査では 12 地点で見られた。これらを除く測定地点では、 $15 \sim 18$ と $35 \sim 38 \text{ g/m}^2\text{day}$ を中心に分布している（図 3.2.3-8）。堀田断層と朝見川断層に沿う地域では、 $30 \text{ g/m}^2\text{day}$ を超える値が見られ、一部は断層から離れ、北部を迂回するように、海側に広がっている（図 3.2.3-9）。

堀田断層と朝見川断層を横切るように、図 3.2.3-9 の AA' および BB' 側線上での二酸化炭素のフラックス値を図 3.2.3-10 に示す。堀田断層および朝見川断層上ではフラックス値が高く、断層を通過して二酸化炭素が地上へ上がってきていることが分かった。また、BB' 側線では断層から離れた場所でも高い値を示していることがあり、地下にフラックスを上昇させる構造が地下にあると考えられる。

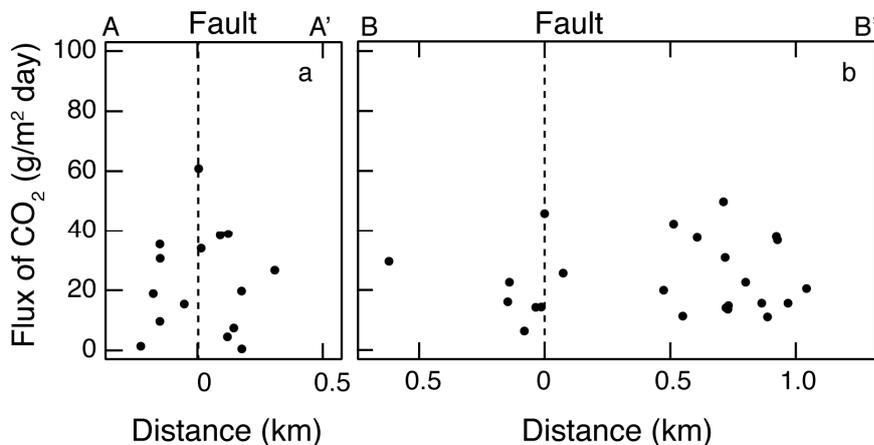


図 3.2.3-10. 図 3.2.3-9 で示した AA' (a) および BB' 側線 (b) での堀田断層・朝見川断層からの距離と二酸化炭素のフラックス値の関係。破線は断層を示し、その直上で高い値を示す。また、BB' 側線では断層から離れた場所でも高い値を示す。

なお、本研究を実施するにあたり、京都大学理学研究科大沢教授、三島技術職員から測定などにかかるご助言を、大分県からは温泉情報データベースを提供していただいた。記して謝意を示す。また、本章で使用した図の一部は GMT ソフトウェア (Wessel and Smith, 1998) を使用した。

(ii) 別府湾沿岸海域の表面海水ラドン濃度分布がもたらす地圏情報について：曳航型ラドン濃度観測による別府湾沿岸域の海底温泉湧出の検出 (大沢)

別府温泉は、鶴見火山の東方山麓に発達した火山扇状地に展開する典型的な火山性温泉である。その扇端部は別府湾に没し、火山と海に挟まれた傾斜地から湯けむりが立ち上る独特の景観を呈している。別府温泉は、鶴見火山の地下深部に存在するナトリウム-塩化物型の地熱水によって涵養されており、扇状地の北縁と南縁の境界をなす断層に沿って別府湾沿岸方向に流動している。この南北2つの流動系の末端沿岸部にはかつて天然の砂湯も存在したことから、地下熱水の一部は海底に湧出している(いた)ものと考えられる。野満・他(1941)はその海底温泉の存否を確かめるために昭和12~14年にかけて海洋学的調査を行ったが、残念ながら当時の観測装置をもってははっきりと海底温泉の湧出と断言できる証拠は得られていない。そこで、海底地下水湧出(Submarine Groundwater Discharge [略して、SGDと記述されることが多い。])を検出する有力な手段として近年注目を集めている曳航型ラドン濃度観測(例えば、Burnett et al., 2013)を別府温泉の沿岸域に導入して、海底温泉湧出の検出を試みた。なお、本観測研究は、総合地球環境学研究所(本田尚美・谷口真人)、福井県立大海洋生物資源臨海研究センター(杉本亮)、京都大学理学研究科附属地球熱学研究施設(大沢信二・三島壮智・岸田立)の3研究機関共同で実施した。

2013年7月30日・31日、2014年5月26日~30日、2016年6日~8日と10月24日~26日に、別府温泉の海岸部を含む別府湾奥部の沿岸域において広域曳航調査を実施した(図3.2.3-11)。海岸線に沿って水深10m以浅を小型船で低速で曳航し、船外に取り付けた水中ポンプによって海水をくみ上げ、船上へ汲み上げた海水を気液平衡装置(Durridge社製RAD-AQUA)に流し込み、海水中から気体へと平衡移動した ^{222}Rn を静電捕集型ラドンモニター(Durridge社製RAD7)に導入し、5分ないし10分間隔で測定した。また、水温・塩分は、汲み上げた海水の一部を小さなケースに流し入れ、ケース内に設置した水温・塩分計によって水温と塩分を1分間隔で測定した。移動する船舶の位置情報は、GPSによって記録した。なお、ラドンモニターRAD7はその場観測のできる事が最大の利点であるが、測定精度にやや難点があるため、共同研究機関の総合地球環境学研究所所有のRAD7台数に余裕のある場合は、3台のRAD7を気液平衡装置に並列に接続し、3台の平均値を測定デー

タとした（2014年の27日～30日のみRAD7 1台で実施）。



図 3.2.3-11：曳航ルート

図 3.2.3-12～図 3.2.3.15 に、曳航観測によって得られた水温、塩分、ラドン (^{222}Rn) 濃度のデータ頻度分布を表した。水温と塩分濃度の変動幅は、季節の影響を受けた上でのわずかな地点差が見られる程度であった。(2016年10月24日～26日の塩分濃度分布図に現れている低濃度のものは一級河川大分川の河口におけるデータである。) 一方、 ^{222}Rn 濃度は、広範囲の濃度分布を示し、大方は 2dpm/L 程度であるがそれを大きく超えるものも少なくなく 13dpm/L にもなる地点も存在した。なお、図 3.2.3-14 の 2014年5月26日～30日の ^{222}Rn 濃度分布図のうち、26日以外のデータは 1台のラドンモニター (RAD7) によるものであり、それらを除いた 3台の平均値だけを使って表した頻度分布図を図 3.2.3-15 に示した。この観測期間では 8dpm/L 以上のデータが無くなっていることから、RAD7 による ^{222}Rn 測定時の変動は極めて大きく、1台での観測では突発的に計測される高濃度値の影響を排除できないことに留意する必要があることがわかった。

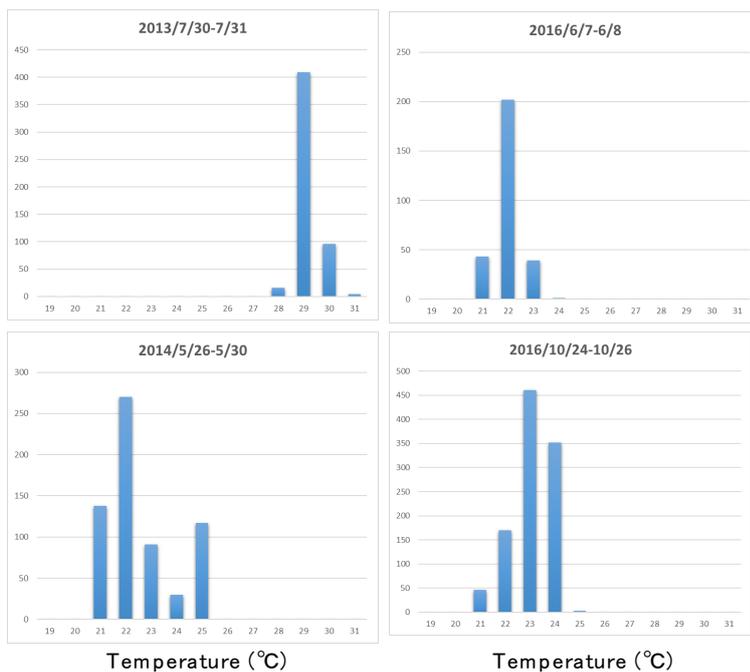


図 3. 2. 3-12 表層海水温データの頻度分布

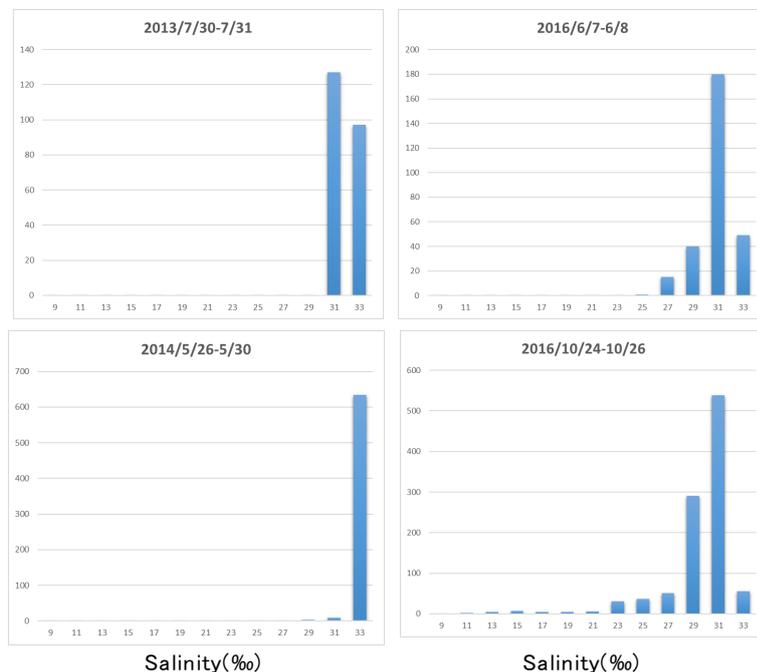


図 3. 2. 3-13 表層海水の塩分濃度データの頻度分布

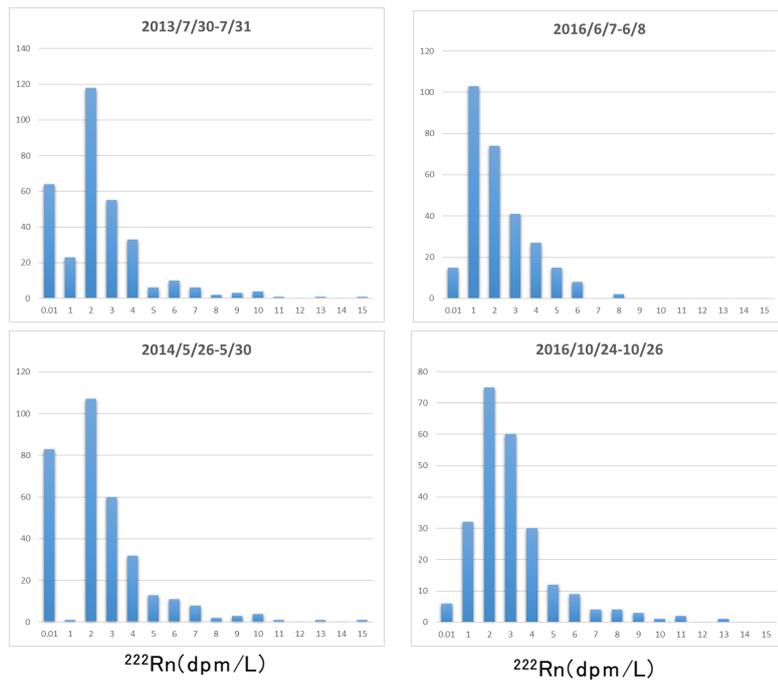


図 3. 2. 3-14 表層海水のラドン濃度データの頻度分布【全データ】

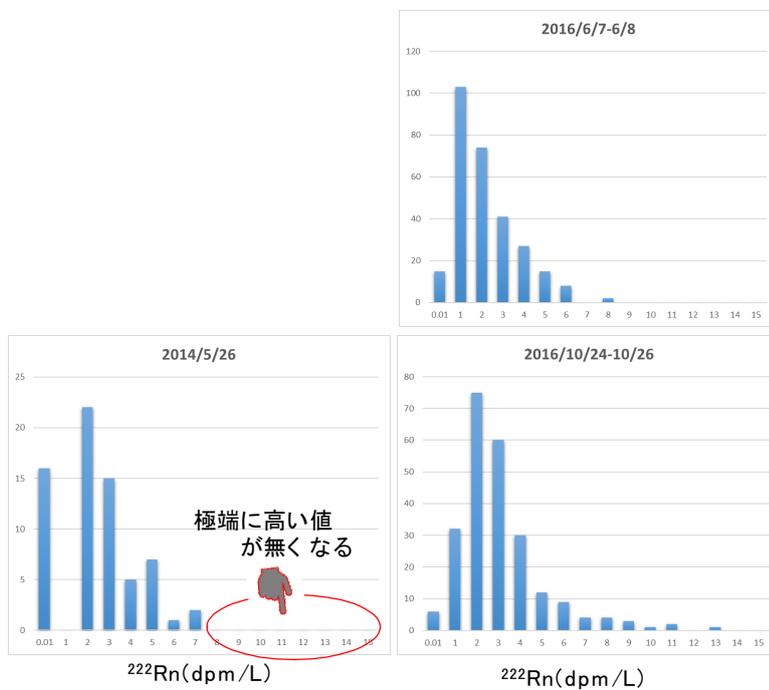


図 3. 2. 3-15 表層海水のラドン濃度データの頻度分布【3台の平均値】

一例として、2013年7月30日・31日に実施した日出町深江から高崎山麓の田浦海岸付近までの総延長25kmほどの区間の曳航観測で取得したラドン濃度(76点)の地理的分布を図3.2.3-16に示す(大沢・他、2016)。境川以南(図中のA)と亀川-関の江間(図中のB)で2dpm/Lを超える高い ^{222}Rn 濃度のエリアが検出され、境川以南の高濃度エリアは南部の地下熱水流動系(図3.1.3-17)に対応している。また、亀川-関の江間のそれは内竈地区の温泉水系からの海底湧出の存在を示唆しており、日出沖断層群や別府湾南岸断層群(千田・他、2002)(図3.1.3-18)との関係が暗示される。

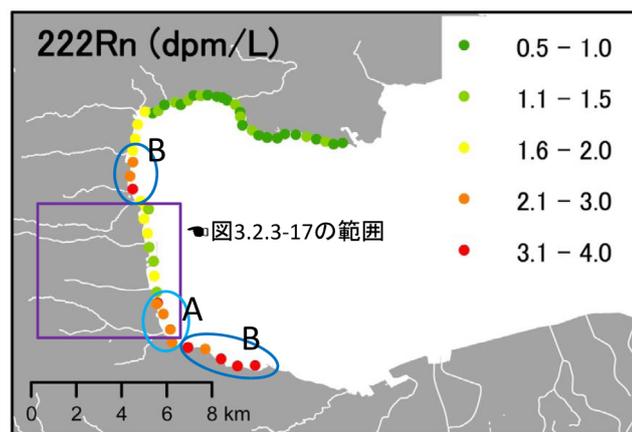


図 3. 2. 3-16 2013 年 7 月 30 日・31 日の別府湾沿岸域表層海水のラドン濃度分布

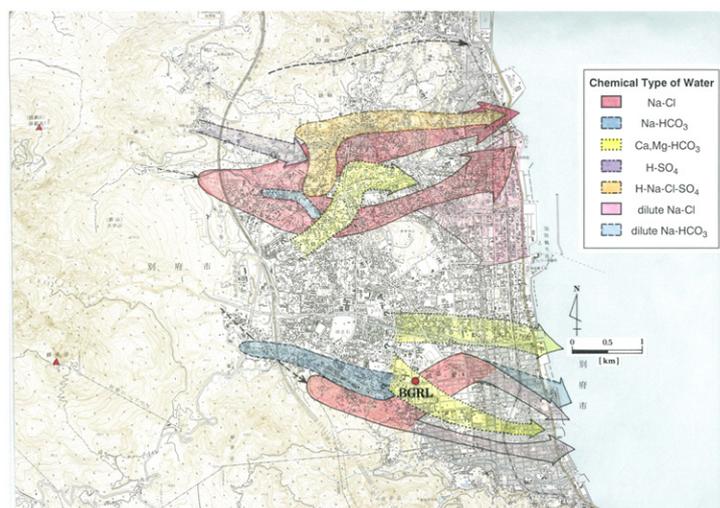


図 3. 2. 3-17 別府温泉地下の熱水流動経路
[大沢・他(1994)および大沢・由佐(1996)の掲載図をもとに作成]

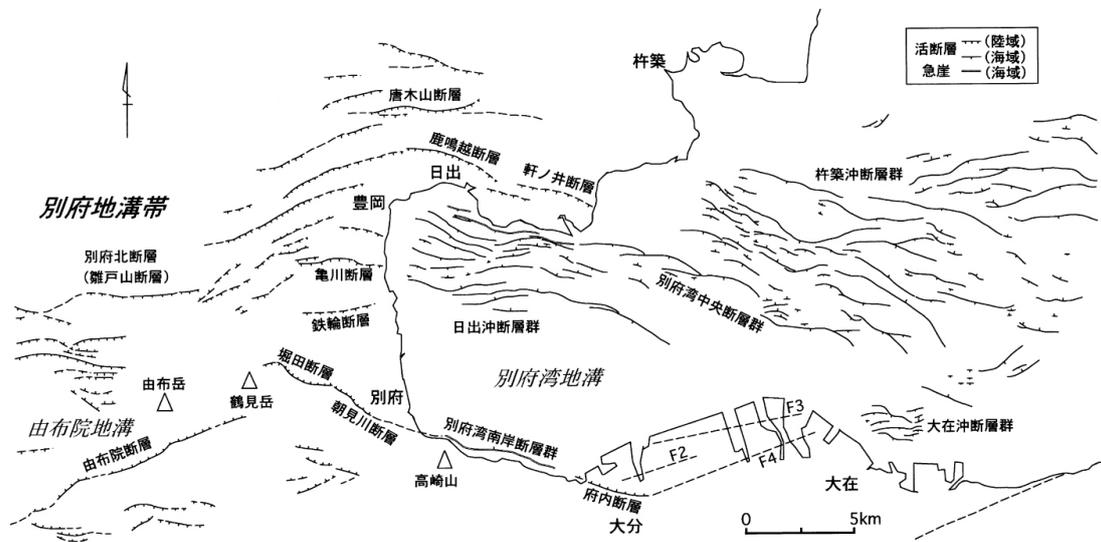


図 3.2.3-18 別府湾・沿岸地域の活断層分布
[千田・他 (2001)]

(iii) 比抵抗調査（電気伝導度調査）（鍵山）

・はじめに

VLF-MT は、周波数 20kHz 程度の人工的な電波によって誘導される電場の変化を測定することによって地表から数 10m～数 100m の深さまでの平均的な電気伝導度を測定する手法である。火山地域においては、熱水の広がりや推定する方法として使用されているが、断層においても断層面に沿って深部流体が上昇するなどが期待されている。中部九州には、鶴見岳・伽藍岳、由布岳、九重山などの活火山が点在しており、これらの火山周辺で表層電気伝導度調査が行われている。こうした火山周辺域を含む中部九州東部における広域表層電気伝導度分布を調査し、同地域の断層に関してどのような傾向が見られるかを検討した。以下に、広域の調査結果と大分市周辺域における調査結果を示す。

・中部九州東部における表層電気伝導度分布の調査結果

図 3. 2. 3-19 に同地域における表層電気伝導度分布を示す。測定データは、緯度、経度 1 分ごとにメッシュを切り、複数の測定点がメッシュ内に存在する場合は、平均値をそのメッシュ上の値としている。分布には以下に示すような特徴がある。1) 調査領域南部の臼杵八代地質構造線より南側では、 $30 \mu \text{ S/cm}$ 以下の低電気伝導度を示しており、同地域が古い固結した岩体からなることを示唆している。2) 臼杵八代構造線の北側では、3 本の比較的高い電気伝導度の帯状領域が見られる。1 つは、臼杵八代地質構造線の直北の臼杵市から阿蘇カルデラ東部に向かう北東-南西の線上配列、2 つ目は、大分-熊本構造線に沿って大分市西部から阿蘇カルデラ東部に向かう線上配列、3 つ目は、上記 2 本の線状配列の中間に見られる大分市東部から大野川に沿って旧三重町に延びる領域で、三重町において 1 本目の線状配列と合流している。3) 大分市西部から別府市にかけての別府湾沿いにきわめて高い電気伝導度領域が延びている。4) 大分-熊本構造線と別府湾日出生断層帯にはさまれた領域は豊肥火山地域と呼ばれている。この領域では鶴見・伽藍・由布岳、九重火山群などの活火山のほか、万年山、青野山などの Q1（前期更新世）以降に噴出した火山岩体において $50 \mu \text{ S/cm}$ 以下の低電気伝導度を示している。一方、5) これらの山体部どうしの間では、 $50 \mu \text{ S/cm}$ 以上、ところによっては $100 \mu \text{ S/cm}$ 以上の高い電気伝導度が見られる。たとえば、由布院断層から野上川に沿って西南西に延び小倉岳にいたる線状配列があげられる。この高電気伝導度域は、玖珠盆地を経て天ヶ瀬温泉にまで延びている。また、この東北東-西南西方向の線状配列とほぼ直交するように、由布院盆地を通り福万山の東および野稻岳の東にいたる北北西-南南東方向の領域、小倉岳を通り玖珠盆地北部および麻生鶴温泉にいたる北北西-南南東方向の領域において $100 \mu \text{ S/cm}$ 以上の高い電気伝導度が見られる。これらの高電気伝導度の線状配列の一部は（たとえば由布院断層を含む配列）既知の断層と一致しているが、多くの配列は比較的新しい噴出物や堆積物に覆われた領域にあるため、断層と認識されていないと思われる。

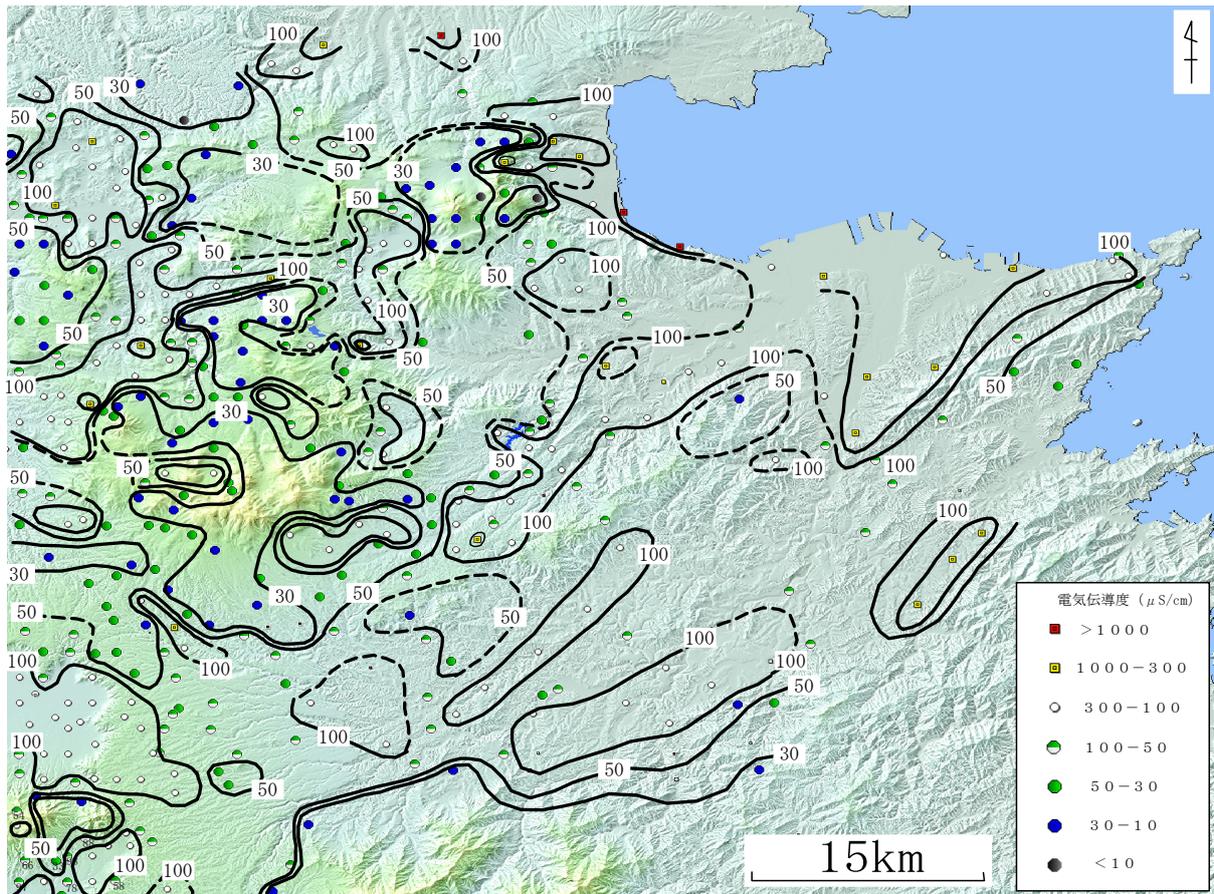


図 3.2.3-19 VLF-MT による中部九州東部における広域表層電気伝導度分布
(単位は $\mu\text{S/cm}$)。

1 分メッシュ内において平均を求めている。青○ : $30\ \mu\text{S/cm}$ 以下、緑○ : $30\sim 50\ \mu\text{S/cm}$ 、
下白上緑○ : $50\sim 100\ \mu\text{S/cm}$ 、白○ : $100\sim 300\ \mu\text{S/cm}$ 、黄色□ : $300\sim 1000\ \mu\text{S/cm}$ 、
赤□ : $1000\ \mu\text{S/cm}$ 以上。点線は任意性の大きい等値線を示す。
(地図は、国土地理院のウォッチーズおよびカシミールによる)

・大分市周辺における表層電気伝導度分布の調査結果

図 3.2.3-20 に大分市周辺における表層電気伝導度分布を示す。測定データは、緯度、
経度 30 秒ごとにメッシュを切り、複数の測定点がメッシュ内に存在する場合は、平均値
をそのメッシュ上の値としている。前節に示した 5 つの特徴のうち大分市周辺に
関係する事項をさらに検討すると下記のような結果が得られた。3) の大分市西部から別府市に
かけての別府湾沿いにきわめて高い電気伝導度領域が延びているとした特徴は、大分市西部
からさらに大分市東部にまで延びているように見える。この線状配列は、水理構造解析から
推定される方向と一致している。2) に示した特徴のうち、2 つ目の大分-熊本構造線
に沿う線上配列は、大分市西部(護国神社付近)から大分川、七瀬川に沿って、塚野鉱泉、
芹川ダム付近を経て阿蘇カルデラ東部に延びている。また、3 つ目の特徴とした大分市東
部から豊後大野市(旧三重町)に延びている高電気伝導度域は、大野川流域の新しい堆積
物に覆われた地域に対応しており、周辺の古い堆積層を切って低地となっている領域にあ
たると思われる。

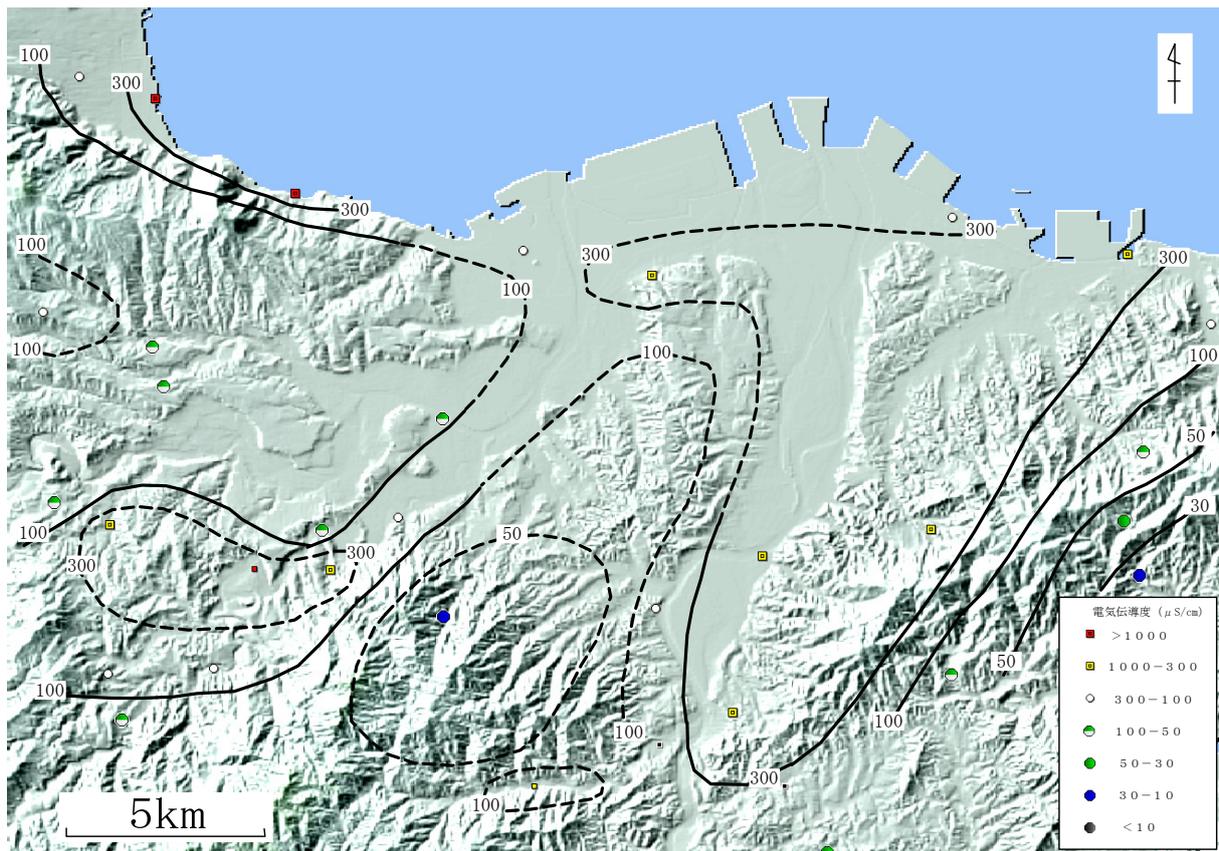


図 3.2.3-20 VLF-MT による大分市周辺における表層電気伝導度分布（単位は $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）。30 秒メッシュ内において平均を求めている。青○：30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下、緑○：30～50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、下白上緑○：50～100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、白○：100～300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、黄色□：300～1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、赤□：1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上。点線は任意性の大きい等値線を示す。（地図は、国土地理院のウォッチーズおよびカシミールによる）

(c) 結論ならびに今後の課題

地下水理構造調査：

大分県温泉情報データベース 2014 を利用し、大分平野にある温泉井戸の温泉データの位置や温度、化学組成などを整理した。温泉の化学組成データを用い、多変量解析の主成分分析を行い、5つのグループに分類した。また、源泉間距離が5 km以内の2源泉の確度分布を求め、佐賀関断層（東北東-西南西方向）や府内断層（東南東-西北西方向）に平行して線状に分布する温泉のグループがある。このことは断層沿いに発達した帯水層と関連していると考えられる。

水位観測を別府市の異なる2つの断層を対象として行った。2つの水位は約75m異なることから、2つの断層に関する温泉は、それぞれ異なる起源と流動機構であることが示唆される。また、2つの水位データが同じように低下傾向を示すことは、広域の水収支の特徴が反映されていると思われるが、今後の解析を期待したい。

別府地域の朝見川断層に沿って実施したCO₂フラックス測定では、堀田断層および朝見川断層上ではフラックス値が高く、断層を通過して二酸化炭素が地上へ上がってきているこ

とが分かった。また、BB' 側線では断層から離れた場所で高い値を示していることがあり、地下にフラックスを上昇させる構造が地下にあると考えられる。

ラドンフラックス：

境川以南と亀川-関の江間で 2dpm/L を超える高い ^{222}Rn 濃度のエリアが検出され、境川以南の高濃度エリアは南部の地下熱水流動系に対応している。また、亀川-関の江間のそれは内竈地区の温泉水系からの海底湧出の存在を示唆しており、日出沖断層群や別府湾南岸断層群との関係が暗示される。

浅層比抵抗調査：

別府-万年山断層帯東部に対応する高電気伝導度領域を見出すことができた。この領域は、地下水理構造において指摘されている 2 本の構造とも一致している。臼杵-八代構造線および大分-熊本構造線付近の電気伝導度分布からは、テクトニックな動きが 2 本の簡潔な構造線に沿った変動が起きているのではなく、いくつかのブロック境界（大野川や大分川、七瀬川などに沿う線）が存在したことを示唆する結果が得られた。

(d) 引用文献

(i) 水理構造

- Allis, R. G. and Yusa, Y. (1989) Fluid flow processes in the Beppu geothermal system, Japan. *Geothermics*, 18, 743-759.
- 千田 昇・池田 安隆・中田 高・岡田 篤正・宇根 寛 (2000) 1 : 25,000 都市圏活断層図「別府」. 国土地理院技術資料, D1-No. 375.
- Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco, B., and Marini, L. (1998) Soil CO_2 flux measurements in volcanic and geothermal areas, *Appl. Geochem.*, 13, 543-552, doi:10.1016/S0883-2927(97)00076-0.
- Dogan, T., Sumino, H., Nagao, K., Notsu, K., Tuncer, M.K., and Çelik, C. (2009) Adjacent releases of mantle helium and soil CO_2 from active faults: Observations from the Marmara region of the North Anatolian Fault zone, Turkey. *G3*, 10, Q11009.
- Evans J. P., Forster C. B., and Goddard J. V. (1997) Permeability of fault-related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zone. *Jour. Struct. Geol.*, 19, 1393-1404.
- 吉川恭三・北岡豪一 (1984) 大分市における温泉減の分布. 大分県温泉調査研究報告, 35, 7-15.
- 北岡豪一 (1987) 大分市における地温勾配と深層温泉源の分布. 大分県温泉調査研究報告, 38, 7-22.
- 北岡豪一・川野田実夫 (1991) 大分市温泉の化学成分の分布とその変化. 大分県温泉調査研究報告, 42, 1-10.
- 野田徹郎 (1987) 地熱活動の指標としてのアニオンインデックス. *日本地熱学会誌*, 9, 133-141.
- 大分県 (2014) 大分県温泉情報データベース 2014. 大分県

Seront S., Wong T.-F., Caine J.S., Forster C.B., Bruhn R.L., Fredrich J.T. (1998) Laboratory characterization of hydrological properties of a seismogenic normal fault system. *Jour. Strust. Geol.*, 20, 865-881.

Wessel, P., and Smith, W.H.F. (1998) New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. AGU* 79, 579.

(ii) ラドン観測

Burnett, W. C., Bokuniewicz, H., Huettel, M., Moore, W. S., Taniguchi, M. (2003) Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. *Biogeochemistry*, 66, 3-33.

千田 昇・松山尚典・下山正一・松田時彦・三島久尚 (2001) 別府地溝帯・別麻湾地溝を構成する亀川断層の最近の活動履歴, *活断層研究*, 20, 92-103.

野満隆治・瀬野錦藏・福本實・石井正己 (1941) 別府温泉の海底湧出と海洋學的要素に就いて. *地球物理*, 4, 307-360.

大沢信二・由佐悠紀・北岡豪一 (1994) 別府南部における温泉水の流動経路. *温泉科学*, 44, 199-208.

大沢信二・由佐悠紀 (1996) 温泉水の化学組成から推定される別府温泉北部地域の地下温泉水の流動経路. 『地熱流体流動過程と地下構造に関する研究』科学研究費補助金報告書

大沢信二・杉本亮・本田尚美・三島壮智・谷口真人 (2016) 曳航型ラドン濃度観測による別府湾沿岸域の海底温泉湧出の検. 2016年度日本陸水学会第81回大会講演要旨, 1C03

3. 2 - 4 応力変遷史（小断層解析・地質構造発達史・応力変遷シミュレーション）

(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

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人京都大学理学研究科	教授	竹村 惠二
国立大学法人京都大学理学研究科	助教	佐藤 活志
公立大学法人大阪府立大学学術研究院第2学群	教授	伊藤 康人
国立大学法人富山大学大学院理工学研究部	准教授	楠本 成寿

(c) 業務の目的

別府－万年山断層帯（大分平野－由布院断層帯東部）の震源断層形状と周辺の地殻構造を解明することを業務の目的とする。特に、サブテーマ2－4では応力変遷解析（地質解析、断層構造シミュレーションおよび小断層解析）から、平野基盤形状の推定と断層との関係を探る。

(d) 3ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成26年度：

国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、野外携行データ記録システム等を活用した小断層解析による応力変化史の解析および地質調査に基づく断層帯形成のプロセスの解明を進めるとともに、地殻内応力シミュレーション装置を用いた、三次元断層構造形成の解析を開始した。関連して、大分平野での砂脈の形成時の応力等の推定を実施した。

2) 平成27年度：

国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、野外探査システム等を活用した小断層解析による応力変化史の解析および地質調査に基づく断層帯形成のプロセスの解明を進めるとともに、地殻内応力シミュレーション装置を用いた、三次元断層構造形成の解析を継続実施した。

3) 平成28年度：

平成26年度・27年度の観測調査結果に加え、サブテーマ2－4の課題調査の追加観測を実施し、解析とまとめを進めた。特に震源断層モデルの構築のために各観測調査の精査を実施した。また、各解析データのデータアーカイブの作成を実施した。成果として別府－万年山断層帯（大分平野－由布院断層帯東部）の構造評価、震源断層形状モデルの提案、地殻構造モデルの提案を進めた。

(2) 平成 26～28 年度の成果

(a) 業務の要約

国立大学法人京都大学大学院理学研究科は、野外携行データ記録システム等を活用した小断層解析による応力変化史の解析および地質調査に基づく断層帯形成のプロセスの解明を進めるとともに、地殻内応力シミュレーション装置を用いた、三次元断層構造形成の解析を進めた。各解析データのデータアーカイブの作成を実施した。成果として別府一万年山断層帯（大分平野-由布院断層帯東部）の構造評価、震源断層形状モデルの提案、地殻構造モデルの提案を進めた。

(b) 業務の成果

(i) 別府湾周辺の第四紀の応力変遷史（佐藤）

・背景と目的

断層の変位方向や滑り易さは応力状態に強く依存する。活断層リスク評価のための基礎となる、長期間（100 万年スケール）の応力変遷史の解明を目的として、更新統碩南層群および大分層群の陸上露頭の地質調査と小断層解析を行った。

碩南層群の堆積盆については、右横ずれ断層運動に伴うプルアパート盆地であるとの見解がある（吉岡，1992；Itoh et al., 1998）。この説を検証するため、碩南層群判田層と基盤の大野川層群とを画する境界断層の滑り方向を観測した。

・小断層の観察手法と解析手法

露頭において小断層と条線（図 3.2.4-1）の方位を測定した。海食崖や採石場などの直接観察が難しい露頭ではマルチコプターによる空撮を行い、3次元形状を取得して小断層の方位を計測した（図 3.2.4-2）。

小断層から古応力状態を復元する手法として応力逆解析法（Sato, 2006）を用いた。しかしながら、この手法では応力をグラフから視認するため、最適応力の認定に任意性を伴うという問題がある。そこで、本研究では自動的に複数の応力を検出する手法を開発した。Hough 変換に基づく応力逆解析法（Sato, 2006）を小断層データに適用すると、5次元偏差応力空間（Sato and Yamaji, 2006）に適合度の分布が得られる。適合度のピークが最適応力を示すので、複数の5次元 Kent 分布を混合した確率分布モデルをピークに当てはめることで最適応力を自動的に検出した。混合する分布の数（応力の数）を特定するため、ベイズ情報量基準を用いた。

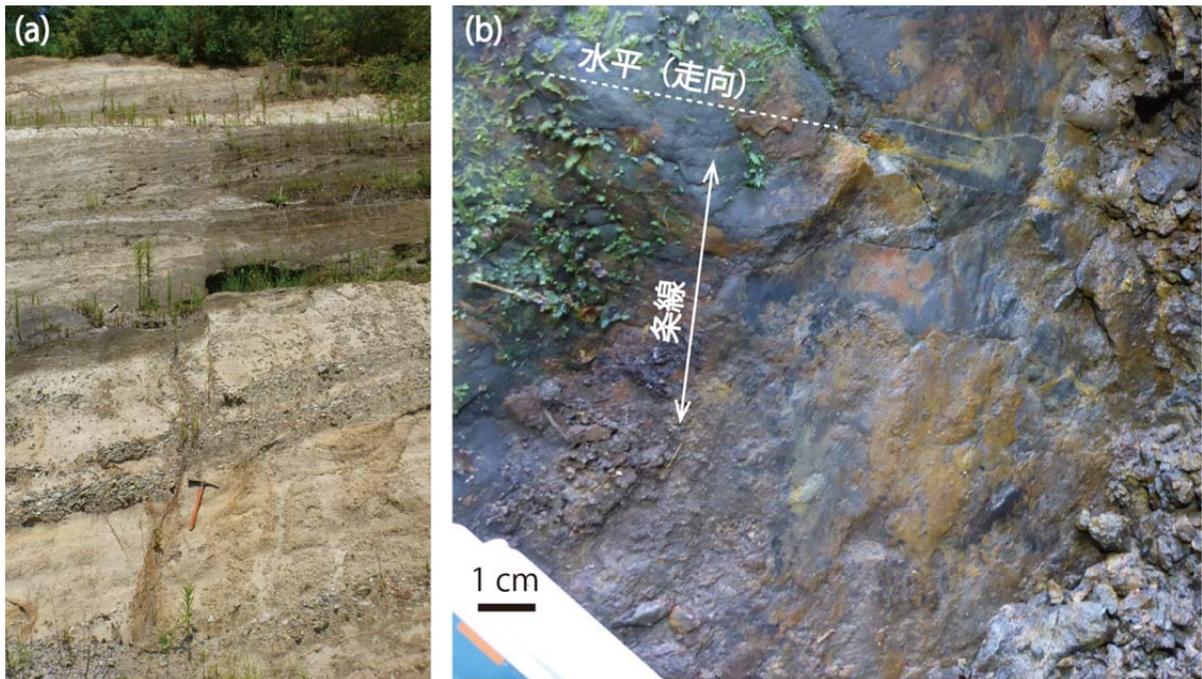


図 3.2.4-1. (a)大分層群片島層を切る小断層（大分市鶴崎台地）。ツルハシの長さは約70cm。(b)判田層と大野川層群の境界断層の断層面。条線は走向にほぼ直交し、傾斜方向滑りを示す。

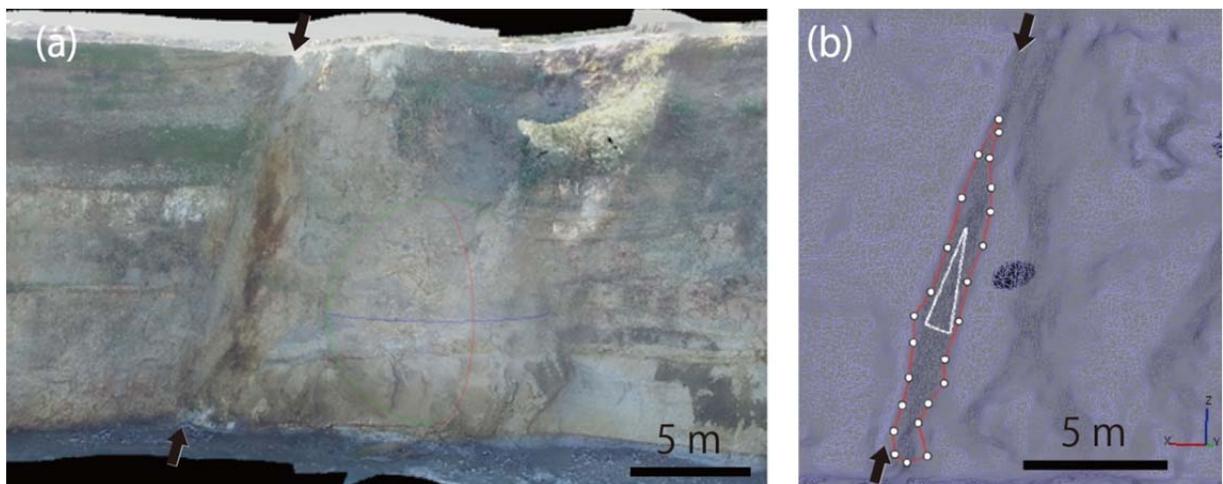


図 3.2.4-2. (a) 碩南層群熊野層を切る小断層（黒矢印）を空撮したオルソ画像（杵築市）。
(b) (a)の小断層の方位を測定するために断層面上に配置した参照点（白丸）。

・小断層解析結果

別府湾の北岸（図 3.2.4-3）および南岸（図 3.2.4-4）において、257 条の断層方位データを取得し解析した。小断層の多くは傾斜方向滑りの正断層であったが、斜め滑り断層、

横ずれ断層、逆断層も含まれる。

応力逆解析の結果を図 3.2.4-5 に示す。上位の大分層群からは北北東～北東引張の正断層型応力が検出された。また、下位の碩南層群からは、北岸と南岸のそれぞれで 2 種類の正断層型応力が検出された。北岸では北北東引張と北北西引張、南岸では北北東引張と東西引張である。応力比 ($\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$) は中程度から低いものが多く、三軸応力～軸性圧縮応力が多いことを示す。

碩南層群のみから検出された北北西引張応力は碩南層群の堆積期間中 (2.6 Ma? ～約 1 Ma) に、碩南・大分両層群から検出された北北東引張応力は大分層群の堆積開始 (約 1 Ma) 以降にはたらいた応力だと解釈できる。南岸地域の碩南層群のみで得られた東西引張応力は、局所的なものと考えられる。

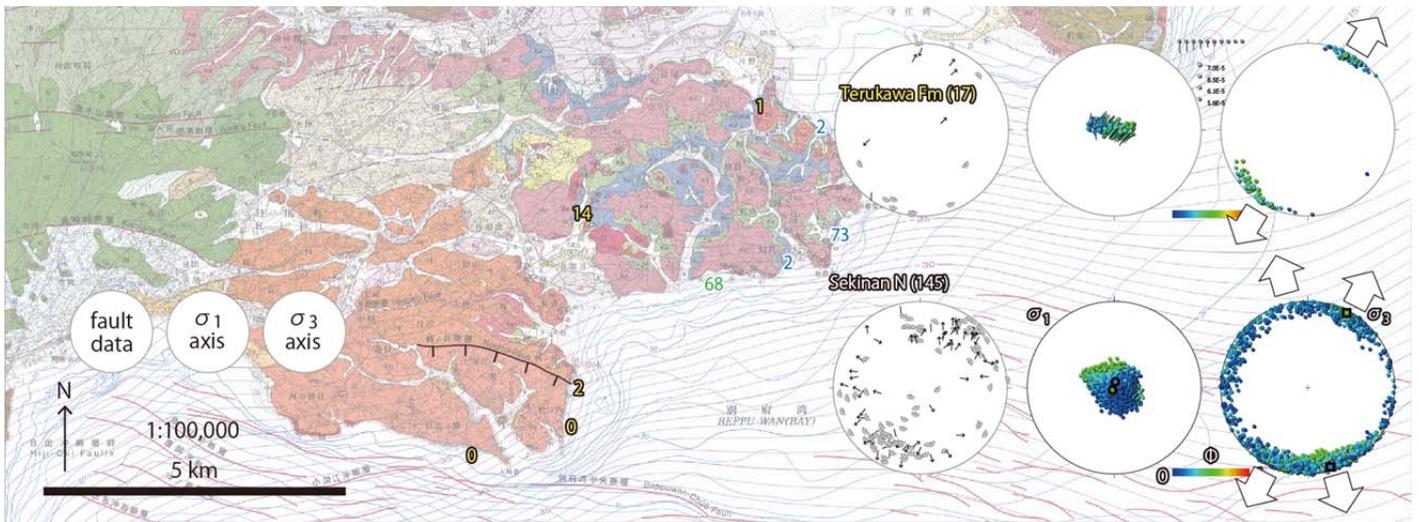


図 3.2.4-3 別府湾北岸地域 (杵築市周辺) の小断層方位データと応力解析結果。地図中の数字は、調査地点と小断層数を表す。3 つずつ組になったステレオ投影図 (下半球等積投影) の左列が断層面の極と滑り方向 (tangent-lineation diagram)、中列が最大圧縮主応力 (σ_1) 軸、右列が最小圧縮主応力 (σ_3) 軸を示す。主応力軸の図の色は応力比 (寒色が軸性圧縮、暖色が軸性引張) を示す。背景の地質図は石塚ほか (2005) による

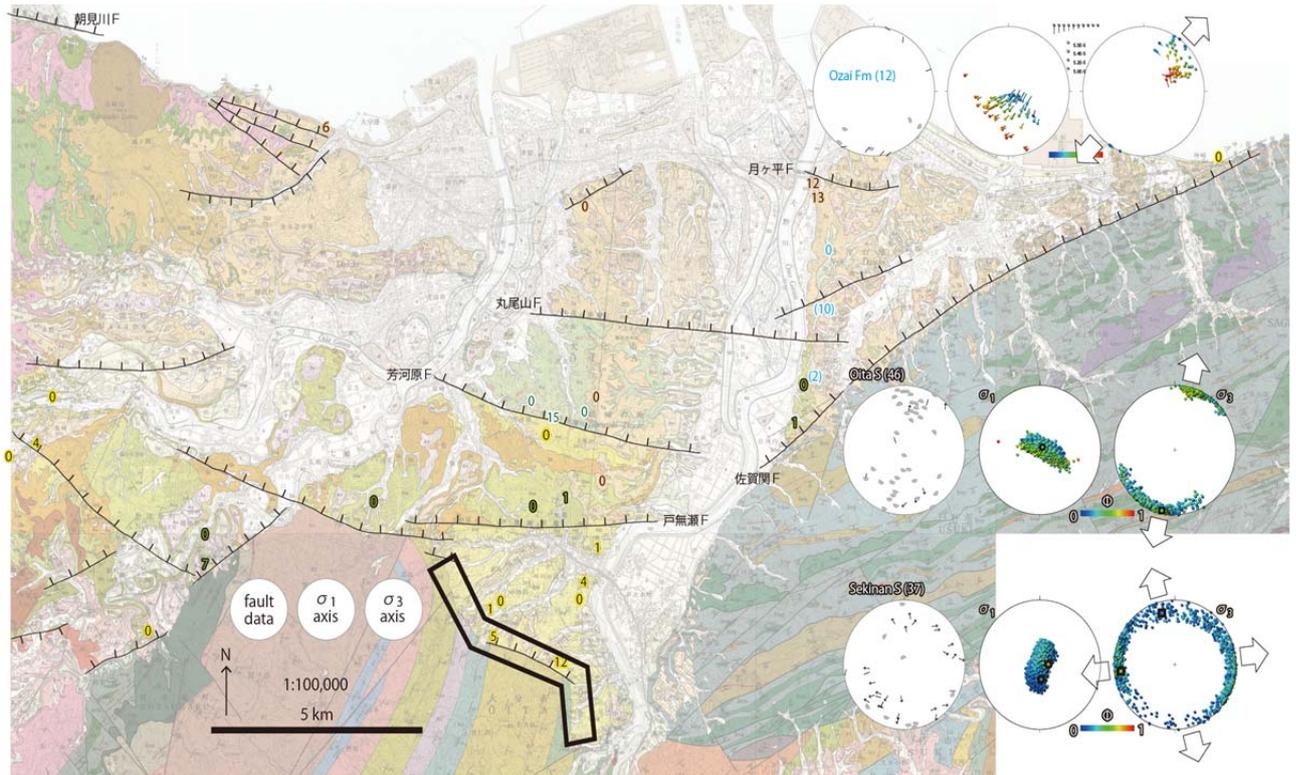


図 3.2.4-4. 別府湾南岸地域（大分市周辺）の小断層方位データと応力解析結果。表示方法は図 3.2.4-3 と同じ。黒太枠は判田層と大野川層群の境界断層（図 3.2.4-6）の観察範囲を示す。背景の地質図は寺岡ほか（1992）、宮崎・吉岡（1994）、吉岡ほか（1997）による。

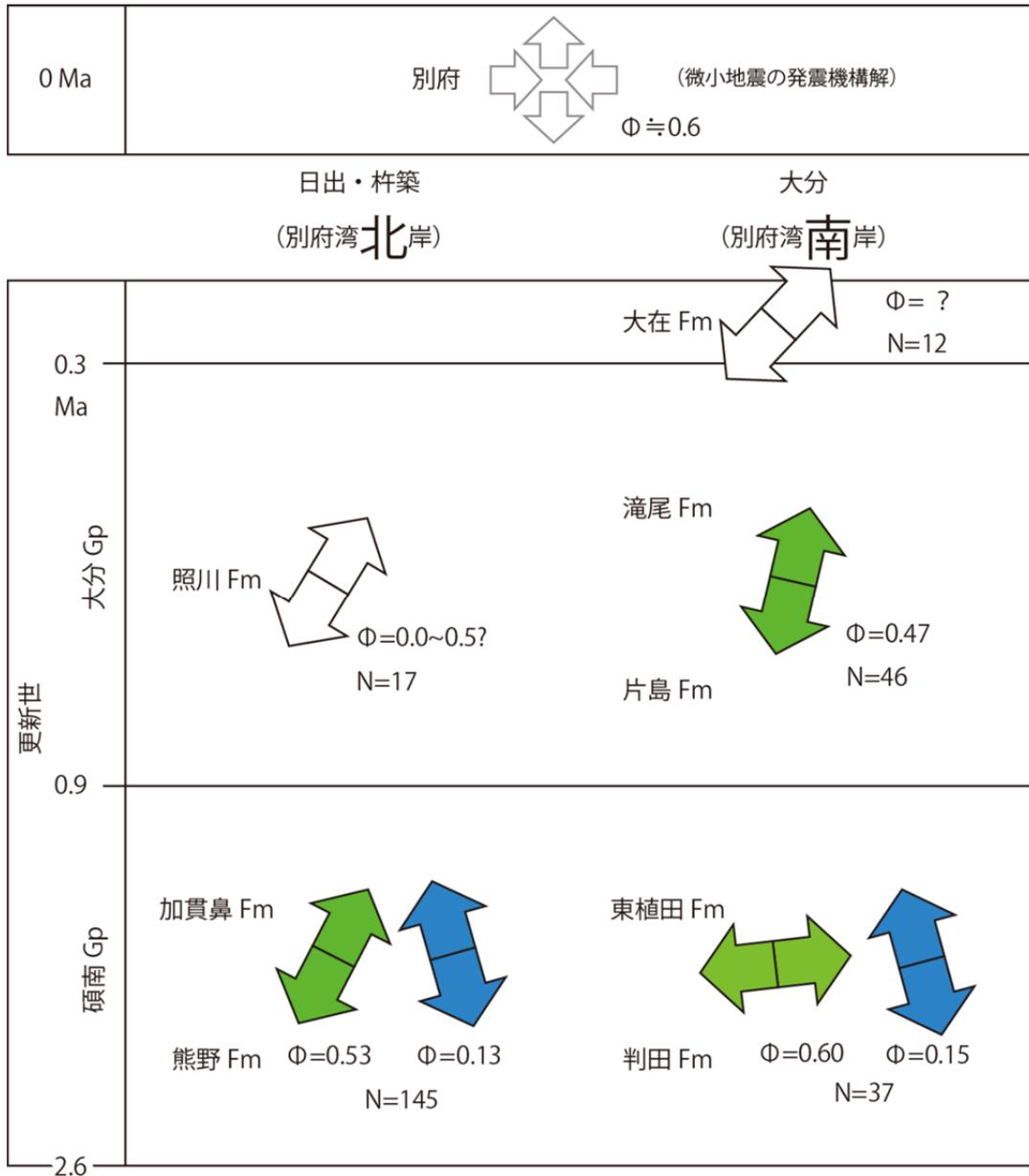


図 3.2.4-5. 各層群の小断層解析によって検出された引張応力の方向および応力比 ($\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$)。碩南層群からは 2 種類の応力、大分層群からは 1 種類の応力が得られた。現在 (0 Ma) の応力は、防災科学技術研究所が公開する高感度地震観測網 (Hi-net) による発震機構解の解析結果 (別府周辺)

・ 碩南層群判田層の堆積盆形成機構

碩南層群判田層とその基盤である大野川層群との境界断層の条線の方位を、10 数地点の露頭で測定した。その結果、傾斜方向滑りが卓越することが分かった（図 3.2.4-6）。

本調査の結果は、判田層の堆積盆が境界断層の右横ずれ運動に伴って形成されたという説（吉岡，1992）に否定的である。また、前述の小断層解析によって、碩南層群から正断層型応力のみが得られたことも、境界断層の横ずれ運動には不調和である。ただし、判田層の境界断層は大局的に北西走向であり、北東走向の中央構造線に対する引張性屈曲部（正断層形成場）に相当するので、中央構造線が右横ずれ運動を起こしていた（Itoh et al., 1998）との説は否定されない。

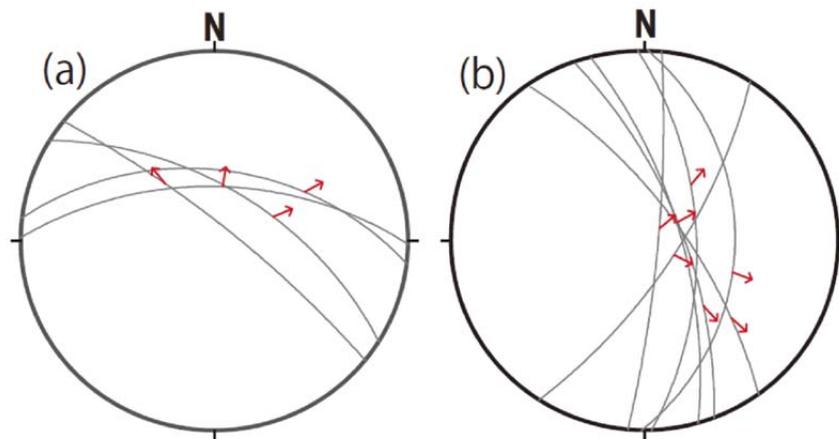


図 3.2.4-6. 判田層と大野川層群の境界断層の姿勢。位置を図 3.2.4-4 に示す。大円が断層面、赤矢印が滑り方向を示す。傾斜方向滑りが卓越する。(a) 西北西走向部。(b) 北北西走向部。下半球等積投影。

(ii) 地質構造発達史調査（伊藤・竹村）

佐多岬半島部分には、北側に大きな負の重力異常が知られ、第四紀層が佐多岬半島の北向き斜面に、北西方向の大きな傾斜をもって分布していることが知られている。その周辺の古期地層群（特に和泉層群）と鮮新・更新統群中層にどのような変形が被ってきたのかを明らかにすることは重要であり、その現地調査を実施した。多岬半島部分には、北側に大きな負の重力異常が知られ、第四紀層が佐多岬半島の北面に大きな傾斜をもって分布していることが知られている。基盤岩の和泉層群に、郡中層が不整合に重なることが確認された。郡中層の地質層序は、大きくふたつのユニットに区分された。下位ユニットは、泥（一部炭質）・シルト・砂礫の互層からなり、層厚は南側でおよそ 250m、北側でおよそ 180m 程度である。火山灰が 2 層確認された。年代測定結果等は別に示す。上部ユニットと下部ユニットの境界は礫層の急激な増加と変成岩礫の増加によって特徴づけられる。変成岩礫の量は、空間的・層序的に変わるが、砂岩礫が北方や上位に向かって増加する傾向がある。上部ユニットの中部は、植物片を多く含む砂シルト層が多く挟まれる。層厚はおよそ 270m 程度である（Itoh, 2015）。

本地域の地質層序や構造、基盤岩との関係、年代等から、今回の調査結果と従来の西南日本の構造発達史の考察を含めて、堆積盆地の変遷（Itoh et al., 2014）、後背地の削剥過程、本地域を含む範囲の時空間的な応力系の変遷が明らかになった。

時系列・空間的な構造発達史は下記のように 4 つの時代にまとめることができる。

・現在の応力場：0.3Ma 以後

広域応力場とローカルな応力場の課題（東西圧縮・中央構造線断層系の横ずれが卓越する）を明確に区分することが重要である。

この時期に別府地溝の形成が活発化（堀田・朝見川・府内断層系）、大分平野と丘陵の地形差が明確になる（志村断層から三佐断層の変位）。海成段丘の 30 万年以降の累積的変形（北西上がり南東下がり）がみられる。別府湾中央断層の西側の堆積が卓越する。

ドーム状火山を形成する活動中または活動後にこの状況が明確になった。

・大分層群までの時代：0.7Ma～0.3Ma まで

広域応力場とローカルな応力場の課題（東西圧縮・中央構造線断層系の横ずれが卓越する）を明確に区分することが重要である。

火山活動関連では 40–50 万年 輝石安山岩の活動、60 万年前由布川火砕流の活動（別府地溝内、別府地溝北部・南部にも分布）が注目される。大分平野地下と丘陵に分布する層厚の地層群（大分層群）が形成された。別府湾北岸日出地域にも分布している。大分層群と碩南層群を画する断層形成は重要な情報である。

・碩南層群の時代後半：0.7Ma～1.5Ma ころまで

広域応力場とローカルな応力場の課題（これ以後は東西圧縮・中央構造線断層系の横ずれが卓越する）を明確に区分することが重要である。

火山活動関連では猪牟田カルデラなどより西方に火山活動主体がある。庄内堆積盆地（埋没盆地）の形成時期（初期のプリアパート盆地）が対応する。

・ 碩南層群の時代前半：1.5Ma ころ以前（5-6Ma ころから）

広域応力場とローカルな応力場の課題は南北圧縮による変形を主に考えることができる。火山活動関連では大分県西部に活動領域は広い分布がみられる。豊肥火山地帯の西部端部が重要である。東西に連なる広い堆積盆地（伊予灘・別府湾・九重など）の形成がこの時期に起こった。

・テクトニクスの観点からみた想定震源断層の妥当性

サブ3で設定された想定震源断層の妥当性を、テクトニクスの観点から議論を行った。

Kusumoto et al. (1999) などでも言及されているように、現在の地形や地下構造、さらにそれらを反映した重力異常は、過去のテクトニックイベントの累積結果を反映している。特に構造的盆地や丘陵などは、断層運動によって引き起こされた地表変位の累積結果である。

将来発生が予想される地震の想定断層は、このような地下構造や活断層の活動履歴によって推定される。したがって想定された断層は、特段の応力場変化が生じていない限り、過去の断層運動と一定の連続性をもっていることが期待される。すなわち、想定される震源断層の設定がテクトニクスの観点からも正しければ、その運動により生じる地表面の変形パターンは、現在観測される地形と調和的になることが予想される。このような観点から、サブ3により提案された想定震源断層の過去からの連続性について評価し、モデルの妥当性について検証を行った。

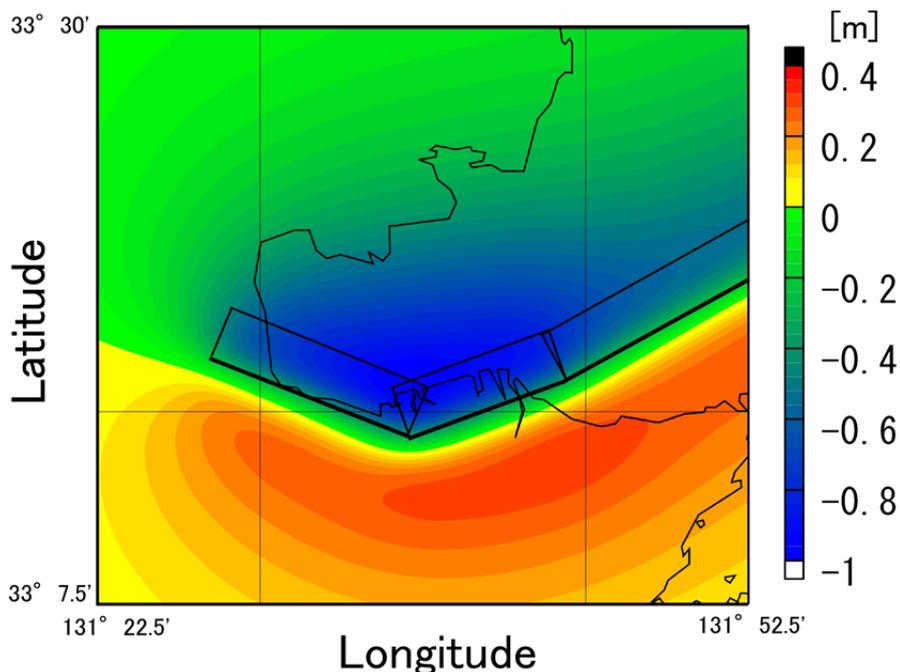


図 3.2.4-7. 朝見川断層、三佐断層、中央構造線の断層運動により生じる地表面変位分布。図中に示される矩形は、サブ3により想定された断層面を示す。矩形のうち、太線で示される線は、各断層、構造線の上端位置を示す。想定された断層の上端部は地下3kmに設定されており、地表に達していない。そのため、地表変位場の隆起から沈降に変わる部分は、断層上端部に一致していない。

図 3.2.4-7 は、サブ3により提案された朝見川断層、三佐断層、中央構造線が動いた際

に地表面に生じさせる上下変位を表す。断層変位の計算には、Okada (1985) による Dislocation 解を用いた。ここでは媒質のポアソン比を 0.25 と仮定している。また、断層パラメータは表 3.2.4-1 に示したとおりである。設定した断層パラメータは、サブ 3 により示されたものと同じであるが、中央構造線の断層長は、横ずれ変位の端点効果が出ないよう 100 km とした。それに伴い三佐断層東端部に中央構造線の原点を一致させ、その他のパラメータがサブ 3 と矛盾しないように再設定を行った。

表 3.2.4-1. 図 3.2.4-7 に示す地表変位を計算する際に採用した断層パラメータ。中央構造線の断層長以外はサブ 3 により提案されたパラメータを採用した。

	府内・朝見川・堀田断層	三佐断層	中央構造線
断層長 (km)	16	11	100
断層幅 (km)	18	18	18
断層モデル上端深度 (km)	3	3	3
断層モデル地表原点	北緯 33.2353° 東経 131.6164°	北緯 33.2674° 東経 131.7283°	北緯 33.2674° 東経 131.7283°
走向 (°)	291°	250°	61°
傾斜 (°)	75°	75°	105°
すべり角 (°)	-90°	-90°	-45°
平均すべり量 (m)	1.7	1.7	-1.7

いずれの断層も被りが 3km であり、断層上端部が地表に達していない。そのため、弾性変形の波長が長くなり、隆起から沈降となる境界が断層上端部に一致せず、断層位置より南側にシフトしている。しかしながら、計算により予測された地表変形パターンは、現在の基本的な地形と調和的であるため、今回設定された想定震源断層モデルはテクトニクスの観点からも妥当といえる。したがって、今後発生が予想される地震の断層モデルとしても十分にあり得るモデルであることがいえる。

・大分－熊本構造線の断層傾斜角分布の推定

2016 年 4 月 14 日から始まった一連の熊本地震は、中部九州を横断する大分－熊本構造線に沿って発生した(図 3.3.4-8)。大分－熊本構造線は、地質学的には新生代火山岩類と中古生層の境界(例えば、鎌田・小玉, 1993)となっており、地球物理学的には重力異常の

急勾配異常帯として知られている。またこの構造線を含む中部九州は、多くの活断層からなっており(例えば、活断層研究会, 1991)、阿蘇カルデラや豊肥火山地域(例えば、Kamata, 1989)といった火山やそれに関連した構造も存在する地域として知られている(図 3.2.4-8)。

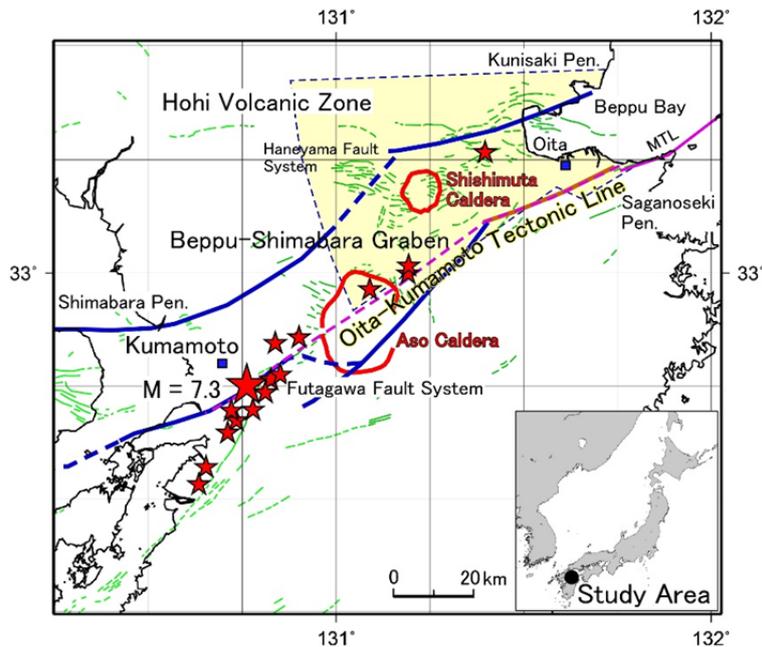


図 3.2.4-8. 解析領域の地学的背景の図。青線は別府－島原地溝の大よその境界を示す。緑の線は活断層の位置を示し、ピンクの線は中央構造線及び大分－熊本構造線の位置を示す。薄い黄色の領域は豊肥火山地域を示す。赤星は2016年4月14-19日の間に発生した、マグニチュードが5以上の地震の震央位置である。Kusumoto (2016)に加筆。

大分－熊本構造線は、中部九州のテクトニクスに大きな役割を果たしており、本プロジェクトのターゲットとなっている別府－万年山断層帯とも深い関係をもっている。そこで、大分－熊本構造線の構造の全体的な構造を知るために、その面的性質を直感的に捉えることが出来る重力異常(ブーゲー異常)を用いた解析を行った。

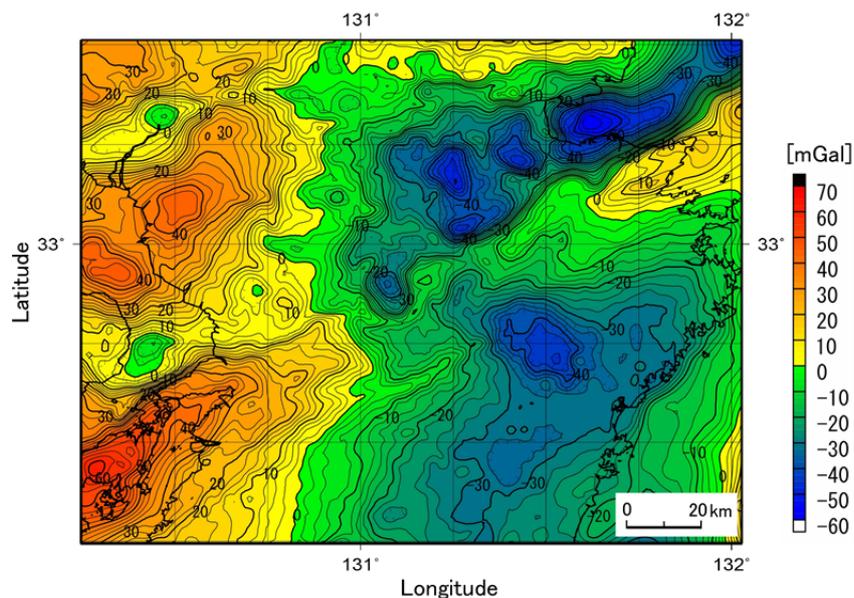


図 3.2.4-9. 1次傾向残差ブーゲー異常図。ブーゲー異常の一次傾向面は最小二乗法により推定され、オリジナルのブーゲー異常データから差し引かれている。ブーゲー密度は 2670 kg/m^3 が仮定されている。コンター間隔は 2.5 mGal 。Kusumoto (2016) に加筆。

図 3.2.4-9 は駒澤(2013)による中部九州の1次傾向残差ブーゲー異常図である。ブーゲー密度として、地殻の平均的な密度である 2670 kg/m^3 が仮定されたブーゲー異常データを使用している。図 3.2.4-8 と比較すると、中部九州東部は負の重力異常で特徴づけられ、その範囲は豊肥火山地域にほぼ一致する。また別府-島原地溝(例えば、松本, 1979)は、豊肥火山地域を含む低重力異常(周囲よりも低いブーゲー異常帯[負である必要はない])により特徴づけられている。

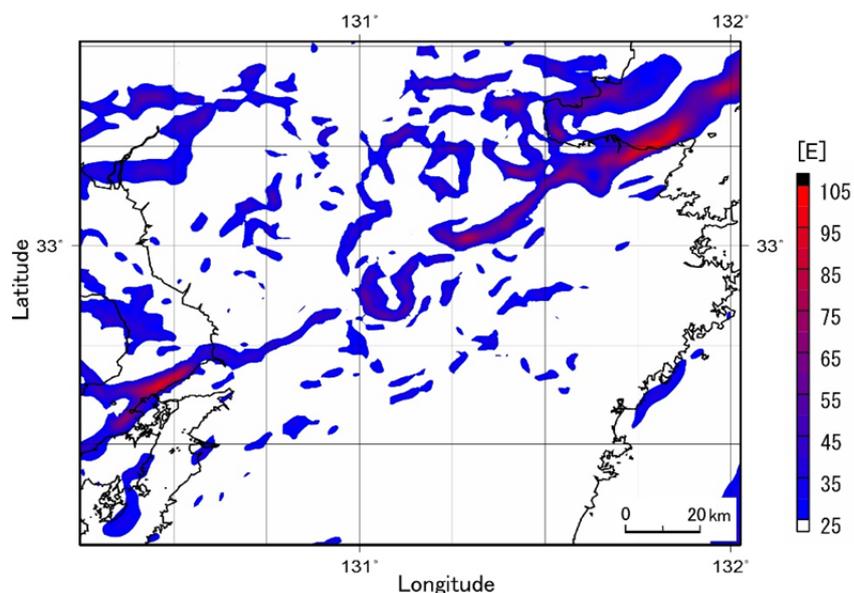


図 3.2.4-10. ブーゲー異常の水平勾配異常図。図 3.2.4-9 に示されるブーゲー異常図の水平勾配 ($HG = [g_{zx}^2 + g_{zy}^2]^{1/2}$) 図。25 E 以上の領域を表示している。ここで E はエトベスであり、重力偏差の単位である。1 E = 0.1 mGal/km 。Kusumoto (2016) に加筆。

図 3.2.4-10 はブーゲー異常の水平勾配異常図である。ブーゲー異常の水平勾配(HG)は、水平一次微分ともよばれ、以下のように定義される。

$$HG = \sqrt{\left(\frac{\partial g_z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g_z}{\partial y}\right)^2} = \sqrt{g_{zx}^2 + g_{zy}^2}$$

ここで g_z はブーゲー異常である。この方法は、ブーゲー異常の空間分布の急変帯の抽出に有効であり、断層位置推定等によく用いられる(例えば、工藤・河野, 1999)。

図 3.2.4-10 より、中央構造線、大分-熊本構造線、朝見川断層等のこの地域のテクトニクスに深い関わりをもつ断層や構造線、さらに猪牟田カルデラや阿蘇カルデラのカルデラリムを示唆する環状の急変帯をブーゲー異常の水平勾配異常帯は検出している。なお、ここで使用したブーゲー異常データベース(駒澤, 2013)では、海域と陸域のデータが 1 km メッシュで与えられているため、万年山断層帯など、細かい断層の密集した構造については検出できていない。

既述のように、図 3.2.4-10 に示されるブーゲー異常の水平勾配異常帯は、この地域の重要な断層や構造線にほぼ一致することから、Beiki (2013) および楠本(2015)の手法により、断層傾斜角の推定を行った(図 3.2.4-11)。

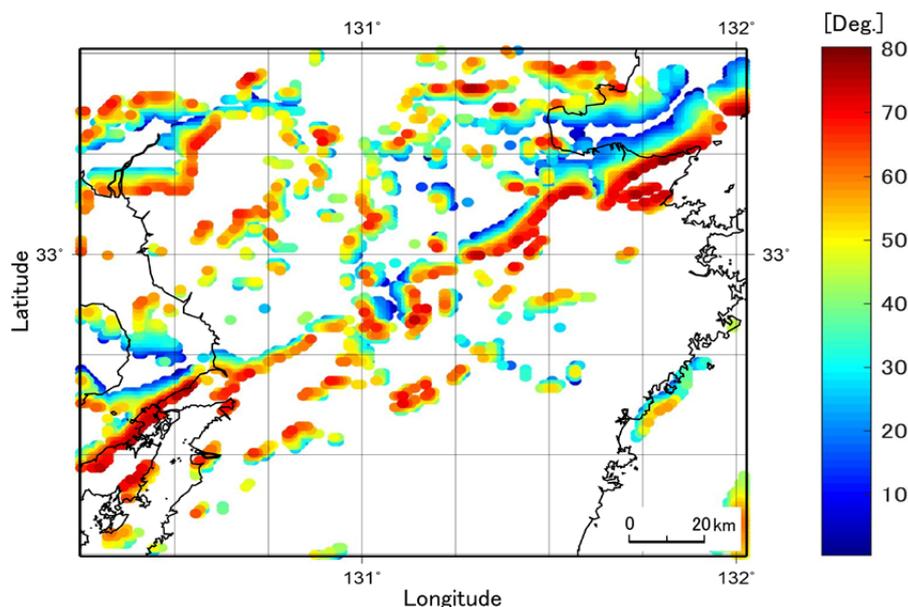


図 3.2.4-11. 重力偏差テンソルの最大固有ベクトルから推定された中部九州地域の構造境界の傾斜角分布。Kusumoto (2016)に加筆。

Beiki (2013) および楠本(2015)の手法とは、重力偏差テンソルの最大固有ベクトルの方向から断層傾斜角を推定する手法である。この地域では重力偏差探査が行われていないため、Mickus and Hinojosa (2001)の手法により、ブーゲー異常データからこの地域の重力偏差テンソルを求め、解析に用いた。Mickus and Hinojosa (2001)の手法とは、ブーゲー

異常をフーリエ領域で積分(重力ポテンシャル W に変換)と微分(1階微分で重力異常 $[g_x, g_y, g_z]$ に、2階微分で偏差テンソル $[g_{xx}, g_{xy}, g_{zx}, g_{yy}, g_{zy}, g_{zz}]$ に変換)を行うことで重力偏差テンソルを計算する手法である。

図 3.2.4-11 より、大分-熊本構造線は、概ね 55° から 70° に達する傾斜角をもった構造線であることが分かる。佐賀関半島の中央構造線では 80° に達する部分もある。全体的な傾向として、阿蘇カルデラより東側の部分では、東側ほど大分-熊本構造線の傾斜角が高角になる傾向がある。また、阿蘇カルデラより西側の部分では、西側ほど構造線の傾斜角が高角になる傾向がある。すなわち、構造線の両端部ほど中心部より高確になる傾向がみられた。大分-熊本構造線は、その中央部に阿蘇火山をもつため、火山や地下のマグマ溜まりの影響が断層傾斜角に与える影響が注目される。このような議論は、現段階では時期尚早ではあるが、地球科学的には興味深い事項である。今後、このような傾向が、他の断層や構造線にもみられることなのかどうかを調査していく必要があると思われる。

なお、先の熊本地震の震源となった布田川断層ではその傾斜角が約 60° と推定されている。これは、GNSS により観測された地殻変動を説明する断層傾斜角と調和的であった。

(c) 結論ならびに今後の課題

応力解析： 碩南層群のみから検出された北北西引張応力は碩南層群の堆積期間中 (2.6 Ma? ~ 約 1 Ma) に、碩南・大分両層群から検出された北北東引張応力は大分層群の堆積開始 (約 1 Ma) 以降にはたらいた応力だと解釈できる。南岸地域の碩南層群のみで得られた東西引張応力は、局所的なものと考えられる。

構造発達史： 時系列・空間的な構造発達史は下記のように4つの時代にまとめることができる。

(1) 現在の応力場：0.3Ma 以後の東西圧縮・中央構造線断層系の横ずれが卓越するテクトニクス、(2) 大分層群までの時代：0.7Ma~0.3Ma までの東西圧縮・中央構造線断層系の横ずれが卓越するテクトニクスと大規模火山活動、(3) 碩南層群の時代後半：0.7Ma~1.5Ma ころまでの東西圧縮・中央構造線断層系の横ずれが卓越するテクトニクスと大規模火砕流、(4) 碩南層群の時代前半：1.5Ma ころ以前 (5-6Ma ころから) の南北圧縮によるテクトニクス、火山活動関連では大分県西部に活動領域は広い分布がみられる。豊肥火山地帯の西部端部が重要である。東西に連なる広い堆積盆地 (伊予灘・別府湾・九重など) の形成がこの時期に起こった。

シミュレーション： サブ3により提案された想定震源断層の過去からの連続性について評価し、モデルの妥当性について検証を行った。計算により予測された地表変形パターンは、現在の基本的な地形と調和的であるため、今回設定された想定震源断層モデルはテクトニクスの観点からも妥当といえる。したがって、今後発生が予想される地震の断層モデルとしても十分にあり得るモデルであることがいえる。

(d) 引用文献

(i) 応力変遷史

- 石塚吉浩・水野清秀・松浦浩久・星住英夫, 2005, 豊後杵築地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 83p.
- Itoh, Y., Takemura, K. and Kamata, H., 1998, History of basin formation and tectonic evolution at the termination of a large transcurrent fault system: deformation mode of central Kyushu, Japan. *Tectonophysics*, 284, 135-150.
- 宮崎一博・吉岡敏和, 1994, 佐賀関地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 40p.
- Sato, K., 2006, Incorporation of incomplete fault-slip data into stress tensor inversion. *Tectonophysics*, 421, 319-330.
- Sato, K. and Yamaji, A., 2006, Embedding stress difference in parameter space for stress tensor inversion. *Journal of Structural Geology*, 28, 957-971.
- 寺岡易司・宮崎一博・星住英夫・吉岡敏和・酒井彰・小野晃司, 1992, 犬飼地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 129p.
- 吉岡敏和, 1992, 大分県, 碩南層群分布南縁部における横ずれ地質構造. *地質学雑誌*, 98, 53-55.
- 吉岡敏和・星住英夫・宮崎一博, 1997, 大分地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 65p.

(ii) 地質構造発達史 :

- Itoh, Y., Kusumoto, S. and Takemura, K., 2014, Evolutionary process of the Beppu Bay in central Kyushu, Japan: a quantitative study of basin-forming process under the control of plate convergence modes. *Earth, Planet and Space*, vol. 66.
- Itoh, Y., 2015, Gunchu Formation: An indicator of Active Tectonics on an Oblique Convergent Margin. LAMBERT Academic Publishing, 76P.
- Itoh, Y. 吉岡敏和・星住英夫・宮崎一博, 1997, 大分地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 65p

(iii) 応力シミュレーション :

- Kusumoto, S., Takemura, K., Fukuda, Y., Takemoto, S., 1999. The restoration of the depression structure at the eastern part of central Kyushu, Japan, by means of the dislocation modeling. *Tectonophysics* 302, 287-296.
- Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 75, 1135-1154.
- Beiki, M., 2013. TSVD analysis of Euler deconvolution to improve estimating magnetic source parameters: an example from the Asele area, Sweden. *Journal of Applied Geophysics*, 90, 82-91. doi:10.1016/j.jappgeo2013.01.002.

- 活断層研究会, 1991. 新編 日本の活断層—分布図と資料—, 東京大学出版会, 東京.
- Kamata, H., 1989. Volcanic and structural history of the Hoho volcanic zone, central Kyushu, Japan, *Bull. Volcanol.*, 51, 315-332.
- 鎌田浩毅・小玉一人, 1993. 火山構造的陥没地としての豊肥火山地域とその形成テクトニクス—西南日本弧・琉球弧会合部におけるフィリピン海プレートの斜め沈み込み開始が引き起こした3現象—, *地質学論集* 41, 129-148.
- 駒澤正夫, 2013. 日本重力データベース DVD 版 Digital Geoscience Map P-2. 独立行政法人 産業技術総合研究所, 地質調査総合センター, つくば.
- 工藤健・河野芳輝, 1999. 西南日本の重力異常勾配と地震活動との関連, *地震* 2, 52, 41-350.
- Kusumoto, S., 2016. Dip distribution of Oita-Kumamoto Tectonic Line located in central Kyushu, Japan, estimated by eigenvectors of gravity gradient tensor. *Earth, Planets and Space*. 68: doi: 10.1186/s40623-016-0529-7.
- 楠本成寿, 2015. 重力勾配テンソルの固有ベクトルを用いた断層あるいは構造境界の傾斜角の推定, *物理探査*, 68, 277-287.
- 松本征夫, 1979. 九州における火山活動と陥没構造に関する諸問題. *地質学論集*, 16, 127-139.
- Mickus, K. L., and Hinojosa, J. H., 2001. The complete gravity gradient tensor derived from the vertical component of gravity: a Fourier transform technique, *Jour. Appl. Geophys.*, 46, 159-174.