3. 研究報告

3.1 活断層の活動区間を正確に把握するための詳細位置・形状等の調査及び断層活動履歴や平均変位速度の解明のための調査観測

(1)業務の内容

(a)業務題目 活断層の活動区間を正確に把握するための詳細位置・形状等の調査及 び断層活動履歴や平均変位速度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大学院理学研究科	教授	竹村 惠二
国立大学法人京都大学大学院理学研究科	准教授	堤 浩之
国立大学法人大分大学	名誉教授	千田 昇
国立大学法人広島大学大学院教育学研究科	准教授	熊原 康博
大分県立先哲史料館	主幹研究員	櫻井 成昭
私立大学法人福岡大学	研究員	中西 利典
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	助教	下山 正一
公立大学法人大阪市立大学大学院理学研究科	准教授	原口 強
国立大学法人北海道大学大学院環境科学院	准教授	山本 正伸
国立研究開発法人産業技術総合研究所	首席研究員	池原 研
国立大学法人愛媛大学	准教授	加 三千宣
電力中央研究所	研究員	木村 治夫

(c) 業務の目的

別府一万年山断層帯(大分平野-由布院断層帯東部)の地表での詳細な断層位置と分布形 状、および変位量分布を把握するため、詳細な変動地形学的調査・海域地形調査を断層帯域 で実施するとともに、既存の地形・地質学的調査結果、既存反射法地震探査等の成果を整理 し、断層の地表位置、分布、浅部形状等に基づく変動地形・活構造の分布を明らかにする。 構成する各断層の最新活動時期を限定するとともに、地震発生の長期予測に資する複数回の 断層活動履歴を新たに復元するための古地震調査を実施する。さらに、既存の地形・地質情 報の再検討および新規取得により、平均変位速度を推定する。

- (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、平成26年度は、調査領域を陸域(1-1)、海域(1-2)、伏在平野部(1-3)に分けて調査を実施した。まず、 既存の地形・地質情報・歴史資料の収集・整理を行った。別府-万年山断層帯(大 分平野-由布院断層帯東部)の詳細な位置や分布を明らかにするために、既存の陸 域・海域・伏在平野部の調査情報を整理し、陸域では、空中写真判読、地表踏査お よびデジタル地形解析等による数値標高モデルの作成と活断層分布調査を進めた。 海域では、海底地形調査および音波探査を実施して、位置や分布を検討した。伏在 平野部では、ボーリングデータ等の既存の資料および本観測研究以前に収集・保管 されている堆積物試料を用いた解析を進めた。また断層帯を構成する個々の活断層 の複数回の活動時期を明らかにするために、古地震調査適地を選定し、ボーリング 掘削調査を行った。あわせて関連の試料分析(火山灰分析・年代測定等)を行った。 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 テーマ会議を実施した。なお、調査にあたっては、ボーリング候補となる地点につ いて事前に情報を可能な限り入手するとともに、調査の実施方法等について十分な 検討を行い、適切にスケジュール管理を行った。

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、平成27年度も、調査領域を陸域(1 -1)、海域(1-2)、伏在平野部(1-3)に分けて調査を実施した。まず、 既存の地形・地質情報・歴史資料の収集・整理を継続・実施した。別府-万年山断層帯 (大分平野-由布院断層帯東部)の詳細な位置や分布を明らかにするために、既存 の陸域・海域・伏在平野部の調査情報を整理し、陸域では、空中写真判読・地表踏 査により、海域では、海底地形調査および音波探査を実施して、位置や分布を検討 した。海域では、海底地形調査および音波探査の解析作業を継続し、位置や分布を 明らかにする情報を整理した。また、湾内での堆積物採取を実施し、地震時イベン ト堆積物の分析・解析を実施し、活動履歴の高度化が図られた。伏在平野部では、 ボーリングデータ等の既存の資料および本観測研究以前に収集・保管されている堆 積物試料および新規試料を用いた解析を進めた。また断層帯を構成する個々の活断 層の複数回の活動時期を明らかにするために、古地震調査適地を選定し、ボーリン グ掘削調査・トレンチ調査等を行った。あわせてサブテーマ1関連の試料分析(火 山灰分析・年代測定等)を行った。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。なお、調査にあたっては、 トレンチ・ボーリング候補となる地点について事前に情報を可能な限り入手すると ともに、調査の実施方法等について十分な検討を行い、適切にスケジュール管理を 行った。

3) 平成 28 年度:

別府-万年山断層帯(大分平野-由布院断層帯東部)の古地震調査(トレンチ、 ボーリング等)として試料分析と変位速度の整理を26年度・27年度調査結果を踏ま えて、実施した。陸域・海域・伏在平野部を統合した断層帯の活動時期、地震時変 位量、平均変位速度、断層帯の地下層序の高度化を行った。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。 なお、調査にあたっては、トレンチ・ボーリング候補となる地点について事前に情 報を可能な限り入手するとともに、調査の実施方法等について十分な検討を行い、 適切にスケジュール管理を行った。

(2) 平成 26~28 年度の成果

(a) 業務の要約

地表での詳細な断層位置と分布形状および変位量分布、また断層の活動履歴等を把握する ため、陸域では空中写真および伽藍岳東方のピット調査など詳細な変動地形学的調査と歴史 資料調査の実施、海域では詳細海底地形調査および堆積物採取によるイベント層の形成年代 等の詳細調査の実施、大分平野・別府海岸部の伏在断層地域については推定される断層場所 において沖積層全体の堆積物採取や断層を挟んだ群列ボーリング等を実施した。また、既存 の地形・地質学的調査結果、既存音波探査や地震探査等の成果もあわせて整理し、断層の地 表位置、分布、浅部形状等に基づく変動地形・活構造の分布等をまとめた。結果として、最 新活動時期を限定するとともに、地震発生の長期予測に資する複数回の断層活動履歴を新た に復元することができた。

(b) 業務の成果 (3ヶ年をまとめて記載)

1) 陸域の調査(サブ1-1)

a) 別府-万年山断層帯の陸域の活断層(千田・熊原・竹村)

別府-万年山断層帯の活断層(図 3.1.1、図 3.1.2)の再検討を既存の活断層資料に基づき、ピット調査、変動地形学的調査、既存の反射法地震探査、ボーリング資料調査などにより行った。とくに大分平野-由布院断層帯東部については詳細に調査を行った。



図 3.1.1 別府-万年山断層帯東部の活断層分布(地震調査委員会、2005)



図 3.1.2 別府-万年山断層帯西部の活断層分布(地震調査委員会、2005)

i)大分平野の活断層

大分県(2001)は、大分平野で府内断層、志村断層、三佐断層の存在を明らかにし、志 村断層は府内断層に連続するように考えた。さらに、大分平野での反射法地震探査で、 府内断層は春日神社北端部から府内城、舞鶴橋南方から芸術会館を通り牧駅まで延長す ること、千代町では北落ちの低断層崖が見られ、ボーリング資料から K-Ah 火山灰が 7~ 8m 変位していることが明らかにされた(大分県,2001)。今回の調査で、府内断層の牧 駅以東の低断層崖を詳細に調べた結果、府内断層の東方延長が明らかになった。すなわ ち府内断層は志村断層へ連続するのではなく、牧駅北方から牧上町まで続き、雁行して 牧から城東中学校、高城駅南を通り、山津町の桃園小学校北方まで北落ち(変位量 1~ 2m)で、長さ 7.3 kmにわたって連続する。この府内断層の延長部の北落ち変位に対して, 河川や海域による浸食は認められないことから,府内断層の活動が鶴崎台地北端の崖麓 を画したと考えられる(図 3.1.3)。今回の調査では府内断層、志村断層、三佐断層は 全体として右ずれによる右雁行配置をなし、大分-熊本構造線の大分での端点をなすと考 えられる。さらに東方へは別府湾から豊予海峡北方へ北東-南西に続く海底活断層を通り、 四国の中央構造線断層帯へ連続すると考えられる。

大分県(2001)によると、府内断層のこれまでの活動時期は2300年前、5600年前頃、 6700~7300年前の3回が知られているが、最新の活動が更に新しい時期に発生した可能 性を指摘できる。すなわち三佐断層の活動は300~1000年前、1600年前、3500年前、3800 ~4100年前、5600年前頃(大分県、2002)、志村断層は1000年前より前の活動が認め られており(大分県、2002)、三つの断層が中央構造線断層帯の活動に連動する可能性 が大きい。これらの活動が別府湾断層帯の活動とも連動すれば、府内断層の1596年豊後 慶長地震時の活動も推定することが可能である。



図 3.1.3 大分平野の活断層

ii)豊岡地域の活断層

豊岡地域の活断層は、池田(1979)、千田(1979)、活断層研究会(1980、1991)、 九州活構造研究会(1989)、国土地理院(2000a、b)などにより示されている。 地震調 査委員会(2005)は別府-万年山断層帯の活断層分布を示したが、これはそれまでの 活 断層分布とは異なり、豊岡・日出地域の活断層が除かれている。千田(1992)はこれら の活断層を含めて別府湾地溝として別府-万年山断層帯東部の位置づけを行った。中部九 州における活断層による地溝分布(千田、1979、1992)は中央構造線西端部の活動性 を示すものと考えられる。

豊岡地域の活断層の分布を図 3.1.4 に示した。十文字原断層トレンチの南に短い北落 ちの断層が新しく見いだされた。さらに伽藍岳北断層が東方へ湯山まで延長することが わかり、この断層の活動を知るためピット調査を行った。ピット内での移動土塊の崩落 と撹乱層の形成が K-Ah 層とその上位の褐色ローム層の間の時期である可能性が高く、自 然露頭の断層との関係からもこの断層の活動によると考えるのが合理的であろう。この 伽藍岳北断層は、九州活構造研究会(1989)で示された短い伽藍岳北東断層の延長部に あたるようであるが、九州活構造研究会(1989)の伽藍岳北東断層より連続性がよく伽 藍岳北斜面部を通過することから、これを伽藍岳北断層と再命名した。東端は別府市湯 山で、走向はN80°Eの南落ち変位をもつ4kmの長さの断層で、西端は鬼箕山北方である。 唐木山断層、伽藍岳北断層などで谷の右ずれ変位がみられ、この地域の断層が右ずれの 動きの中で活動している可能性を示している。

9



図 3.1.4 豊岡地域の活断層分布

iii) 別府地域の活断層

別府地域の活断層の中で堀田-朝見川断層は雁行・分岐など複雑な分布形を示すことが わかった。断層活動による崩壊の地形も加わっているものと考えられ、活動により大き な被害が生じる可能性を示している。また、堀田-朝見川断層西端部では鶴見岳北東方に 延びる部分と鶴見岳東方で由布院断層方向へ向かうことを示すような曲線部が認められ る。その西方へは鶴見岳山頂の溶岩(星住・他、1988)のため連続が途切れるが、堀田-朝見川断層と由布院断層が同時に活動する可能性を示唆している。別府地域の南部を限 る堀田-朝見川断層による K-Ah 火山灰の変位量は 20m 程度であり、大きな変位量を示す (大分県、2001)。これらは大分平野の府内断層・志村断層・三佐断層とともに中央構 造線が陸上を通過する断層群の1つであるように見える。

亀川断層の最新の活動は図 3.1.5 に示すように 1A'層と 1B層の間で、2020-3400 年 BPの時期である。この時期は別府湾活断層の1つである豊岡沖断層の最新活動時期である 2250 年 BPと重なる。1596 年の慶長豊後地震との関係は読み取れないが、陸域と海域の同時的な活動が解ける可能性もある(千田・他、2001)。



図 3.1.5 亀川断層のトレンチ写真(千田・他、2001)

前述のように伽藍岳北断層は、九州活構造研究会(1989)の伽藍岳北断層より連続性 がよく伽藍岳北斜面部を通過することからこれを伽藍岳北断層と再命名した。伽藍岳北 斜面を侵食する谷を連続して右ずれ変位させる(図3.1.6)。本調査ではこの断層でピ ット調査を行った。その報告は平成27年度の成果報告書に掲載している。調査結果は断 層の落ち側に岩屑なだれ堆積物があり、その上面の変位量はピット内で4.5m以上、尾根 部から計ると10m程度で、最新活動時期はK-Ah火山灰以後と考えられる。また、ピット 東方にある右ずれ変位をする谷の左岸部に断層露頭があり、この断層露頭とピットは連 続していることから伽藍岳北断層の最新の活動はピット内の岩屑なだれ発生後のK-Ah 火山灰降下以後の時期と考えることに無理はないようである。



図 3.1.6 別府地域の活断層分布

iv) 由布院盆地付近の活断層

由布院盆地付近の活断層は、主として北部の雛戸山断層と日出生断層と南部の由布院 断層で限られる由布院地溝を構成する地域に見られる。大分県(2001)は、この地域で 秋山断層、坂山断層、若杉断層、由布院断層などでトレンチ調査をした。各断層の最新 活動時期については、秋山断層は1800年 BP以後、坂山断層は4400年 BP以後、若杉断 層は K-Ah以後、由布院断層は2000年 BP以後などと考えられている。このうち由布院断 層の活動間隔は1000年オーダーで、最も活動間隔が短く、由布院地溝形成に大きな意味 を持っていることがわかる。 2016年4月16日 M=7.3の熊本地震による大分、由布院、別府地域の活断層の活動性 を調べたが、別府-万年山断層帯を構成する断層が地表部まで変位させる活動はなかった。 由布院盆地では、盆地南縁を限る13.5kmの長さで、250mの北落ち変位を示す由布院断 層の活動が大きな意味を持ち、熊本地震を発生させた布田川断層と同様な活動をなす可 能性が考えられる(図3.1.7)。

熊本地震と同様の地震が今後東方で発生すれば由布院断層と別府地域の堀田-朝見川 断層が主要な動きを示す可能性がある。由布院盆地における熊本地震による構造物の損 傷は大分自動車道・並柳橋の主桁の横ずれと支承の破壊であった。この損傷の地点が飛 岳断層群の飛岳1断層と飛岳2断層の通過地点とほとんど一致することから2つの断層 の動きが関係するようである。また由布院断層の分岐する断層の終端部に当たる川南の 宇奈岐日女神社の石塔などが右横ずれによる回転の可能性があり、由布院断層が右横ず れ断層である可能性を示した。



図 3.1.7 由布院盆地付近の活断層

v) 崩平山付近の活断層

大分県(2004)の活断層調査で、崩平山を中心とする水分断層、熊の墓断層、須久保 撓曲、高柳断層が調査された(図 3.1.8)。いずれも新しい時期に活動していることが わかった。水分断層の最新活動時期は1,500~3,800年前で、活動間隔は10,000年前後 である。1回の変位量は上下方向で10~30cmであることから横ずれの活動が示唆される (大分県、2004)。熊の墓断層は崩平山断層群の北部にあり、南落ちの断層である。熊 の墓断層の最新活動時期は1,500年前以後であり、歴史時代に活動した可能性があり、 活動間隔は3,500~5,000年で、1回の上下変位量は1m程度ないしそれ以上である(大 分県、2004)。千町無田盆地南縁を限る須久保撓曲は長さ3.4kmの北落ちの撓曲を示す 断層で、今回の調査で、西方へは筌ノロI断層に連続することがわかった。須久保撓曲 の上下方向の平均変位速度は、飯田火砕流堆積物の変位量からは 0.31m/1,000 年以上、 湖底堆積物の変位量からは 0.38m/1,000 年である。最新活動時期は 1,000 年前より後で、 歴史時代の可能性がある。活動間隔は過去11,000年間に3回の活動が生じたことから、 5,000~6,000年と推定される。須久保撓曲は、盆地形成の新しい活動として撓曲運動を 示していることがわかった(大分県、2004)。高柳断層(池田、1979)は須久保撓曲の 南東を右雁行して東方へ 2.5km 連続する北落ち断層で、最新活動時期は 700 年前より後 で歴史時代と推定されている。活動間隔は4,300~5,000年以上である。須久保撓曲と高 柳断層は少なくとも新しい方から2回の断層活動はほぼ同時期に生じた可能性があり、 一連の断層と考えられる(大分県、2004)。



図 3.1.8 崩平山付近の活断層

vi) 万年山地域の活断層

万年山地域の活断層は、活断層研究会(1980、1991)、九州活構造研究会(1989)、 国土地理院(2000c)などに示されており、今回の空中写真判読でも大きな変更は認めら れない(図 3.1.9)。



図 3.1.9 万年山地域の活断層

b)伽藍岳北断層ピット調査(熊原・千田・竹村)

平成27年度の陸域調査では、平成26年度調査で対象とした伽藍岳北断層について、 1970年代に国土地理院が撮影した縮尺約2万分の1、1948年に米軍が撮影した縮尺約 1.5万分の1空中写真を用いて、活断層のトレース及び変位様式を再検討・確認した。 それらの情報と現地踏査で確認した地点(図3.1.10)でピット調査を実施した。



図 3.1.10 別府平野周辺の活断層分布とピット調査地点



図 3.1.11 ピット調査と逆向き断層崖の現地写真



図 3.1.12 ピット調査周辺の詳細地形図

伽藍岳北断層の活動履歴を明らかにするため、本調査では、伽藍岳北東の逆向き断層 崖の基部でピット調査を行った(図 3.1.11, 3.1.12)。調査地点での盆地面と断層崖の 頂部との高度差は、7.0~7.5mである。ピットは3箇所掘削したが、断層構造が認めら れたピットはNo.2ピットのみであった。また断層崖を横切る河谷の右岸で、未固結堆積 物中に断層構造が認められる自然露頭も確認できた。

No.2ピット壁面では、断層上盤側に堆積した地層および、断層崖から崩落とみられる 地層(移動土塊および混濁層)が認められた。地層の区分は、東壁面(図 3.1.13、3.1.14) の方が西壁面(図 3.1.15、3.1.16)よりも細分化することが可能であるため、東壁面の 層序区分を規準として記載する。以下では、上位の地層から1層とし、簡潔に層序の記 載を行う。

1層:黒色~赤紫灰色表土(黒ボク土)

2 層: 軽石質火山灰

3層:黒色有機質土(黒ボク土)

4 層:灰色火山灰

5層:褐色ローム層。含有物の違いにより3層に細分できる。5a層は明褐色礫混ローム層、5b層は褐色スコリア混ローム層、5c層は褐色ローム層

6層:撹乱層

7 層:移動土塊

8層:鬼界-アカホヤ火山灰(K-Ah、7,300年前噴出、(町田・新井, 2003))

9層:暗灰色有機質

10 層:明灰色火山灰

11 層:暗灰色~黒褐色の有機質土壌。含有物の違いにより3層に細分できる。11a 層は 暗灰色有機質土層、11b 層は黒褐色角礫混有機質土層、11c 層は黒褐色軽石混有機質土層 12 層:灰緑色火山灰。

13層:岩屑なだれ堆積物

断層構造は、東壁面(図 3.1.13)では、トレンチ北側の 13 層と7層の間に認められ、 西壁面(図 3.1.15)では、13 層と6層の間に認められる。断層の走向・傾斜は N85°W/65S であり、断層面に沿って、断層面に平行なシルト層が細長く分布する。なお、これより 地表に向かっては、13 層と5b層との境界は平滑な面であるが、5b層が断層変位を受け たものか、あるいは13層を不整合に覆ったものかは判別できなかった。横ずれ変位を示 す構造は認められなかった。

次に7層の移動土塊の成因について検討する。東壁面や北壁面に認められる移動土塊 は、もともとピットの位置よりも高いところにあった岩屑なだれ堆積物である。何らか の原因により、断層面に沿って土塊と撹乱層が滑落するとともに回転して横倒しになり、 6、8~12層に変形を与えたと推定される。6層は、層相から11層起源の有機質土壌 であると考えられるが、8、10、12層の火山灰がパッチ状に混入する。移動土塊の割れ 目等にも充填して堆積している。土塊(7層)の移動によって撹乱されたと見られる。 9層は K-Ah の下位にあるにも関わらず、上部の K-Ah がパッチ状に入り込んでいること



図 3.1.13 ピット No.2の東壁面のスケッチ



図 3.1.14 ピット No.2の東壁面のモザイク写真

は、滑落の衝撃の大きさを示していると見られる。西壁面では、K-Ahが見かけ上異常に 厚く堆積している。東壁面で認められる K-Ahの層厚が 20~25cm であるのに対して、西 壁面で認められる K-Ahの層厚は 40~60cm に及ぶ。これは K-Ah が移動土塊の押出しによ り折り畳まれた結果、堆積当時の層厚よりも約2倍の厚さになったと解釈される。 9層 は 6層の押し出しに伴って上方に曲げられており、K-Ah が地層中に散在している。一 方、両壁面とも 5c 層には目立った変形は認められない。なお、西壁面の 5b 層と 5c 層の 境界は垂直となっており、断層変位を受けている可能性もあるが、5c 層中に明瞭な剪断 面が認められないことから、断層変位ではないと判断した。

西壁面では、5c層は8層や9層の変形を覆う傾斜不整合となっていることから、移動 土塊の崩落は、6層と5c層の間である可能性が高い。このような崩落現象は、必ずしも 強い地震や断層運動だけによって生じるものではないが、高さ約2.5m、東西幅2.5m以 上、南北幅2m程度という非常に大きな土塊が断層面に沿って滑落したということを考え ると、この断層の活動によって土塊の滑落が生じたと考えるのが合理的であろう。

ピット底では、13層の岩屑なだれ堆積物の上面が認められる。下盤側にあたる断層崖 の頂部は岩屑なだれ堆積物からなるため、上盤側の岩屑なだれ堆積物の上面と断層崖の 頂部の比高は約11mとなる。下盤側には少なくとも1m程度のローム層が堆積している と予想されるため、実際の比高は10m程度と推定される。この比高は、岩屑なだれ堆積 物の堆積以降に生じた総変位量といえる。

自然露頭は幅 4.5m、高さ 1m で、ほぼ断層走向に直交した向き(N10°W)の壁面である (図 3.1.17)。露頭の位置は、断層崖基部よりも 5m 程度北側に位置するが、ピット No.2 でも崖の基部よりも 7m 程度北側を通過していたことと整合的である。ここでは、大きく 6層に区分することができる。ピット調査の地層とは必ずしも類似した地層とはいえな いため新たにローマ数字の地層番号とした。

I層:黒色/暗紫灰色の黒ぼく土

II 層:明褐色礫軽石混ローム

III 層:褐色礫混ローム

IV 層:暗褐色有機質土質礫混じりローム

V層:暗褐色礫質シルト。

VI層:岩屑なだれ堆積物

本露頭では、ピット調査と同様の層相をもつ岩屑なだれ堆積物が南に向かって、その 分布がたたれることから、断層であるといえ、不明瞭ながら露頭下部で傾斜 50°Sの断 層面が認められる。また、少なくとも IV 層までは断層変位を受けていると見られるが、 III 層については不明確である。また I 層、II 層は断層を覆って堆積しているといえ、 断層変位を受けていない地層とみられる。



図 3.1.15 ピット No.2の西壁面のスケッチ



図 3.1.16 ピット No.2 の西壁面のモザイク写真







図 3.1.17 自然露頭のスケッチと写真

まとめ

伽藍岳北断層のピット調査により、以下のことを明らかにした。

1) ピットの壁面から、少なくとも岩屑なだれ堆積物を変位させる南側低下の正断層 が認められた。

2) ピットの壁面から、断層の活動に伴う土塊の崩落と考えられる構造が認められた。

3) この土塊の崩落に伴い、K-Ahテフラの純層が変形を受けていることから、降下年 代である 7,300 年以降に発生しており、断層の活動も 7,300 年以降に生じた可能性が高 い。

c) 歴史資料調查 (櫻井)

慶長元年(1596)に発生した「慶長豊後地震」に関する古文書・記録類や絵図につい て、大分県および愛媛県等で所在確認調査を行った。あわせて、イエズス会士ルイス・ フロイスが著したものをフランチェスコ・メルカーティがイタリア語に翻訳した

『TRATTATO D' ALCUNI PRODIGII OCCORSI L' ANNO M.D. XCVI. NEL GIAPPONE』 (1599 年 にローマで出版された版、大分県立先哲史料館蔵)の内、豊後の項のみ翻刻し、日本語

に訳した。したがって、原典からの翻訳ではないことに留意されたい。また、由布市湯 布院などで現地調査を実施した。

業務の成果として3つの点にわけて述べる。

i) 2 つの地震

歴史資料の調査より、文禄5年(10月に慶長元年となる、以下慶長元年で表記を統一 する)閏7月、豊後国は2度大きな地震に襲われたことが確認された。

最初は9日に発生した地震である。豊後国国東郡鶴川(大分県国東市国東町)の桜八 幡宮の宮司・豪泉は、同宮に納められていた「大般若経」巻424の最後に、以下のよう に記している(図 3.1.18)。

文禄五年丙申閏七月九日大地震仕、豊後興浜悉ク海ニ成、人畜ニニ千余死ス、前代 未聞条書付申候畢、亦者興ノ浜計ニー万人死ト云々

つまり、地震によって興浜(沖浜)が海となり、多くの人が亡くなったというのであ る。

また、豊後国大分郡(大分市)の柞原八幡宮の記録「由原宮年代略記」には、9日の 戌刻(午後10時頃)に起きた地震で拝殿・回廊・諸末社などが倒壊したと記される。あ るいは、当時豊後国沖浜を治めていた柴山勘兵衛は、9日の地震とその後の津波で屋敷 が流され、今津留(大分市)に流れ着いた。翌10日に沖浜へ戻ると、津波で海になって いない所もあり、山の方へ逃げた者は無事であったという(「柴山勘兵衛記」)。

一方、豊後国と海を隔てた伊予国も、地震に襲われた。伊予国伊予郡保免(愛媛県松山市)の薬師寺所蔵の「大般若経」に次のような記述がある。

文禄五丙申潤七月九日ニ大ニ地振候て国中迷惑仕候 伊予国では「国中迷惑」の状況にあり、こうした9日の地震は京都でも体感され、たと えば『言経卿記』には「戌刻地動」などと記される。

前で触れたように、文禄5年は10月に改元されていることをふまえると、興導寺や薬師寺の大般若経に「文禄五年」と記されていることは、これらが地震からほど遠くない時期の記述である。こうした同時代の記録から、閏7月9日の地震で、豊後国の別府湾では南岸の沖浜が海没したように大きな被害がもたらされ、伊予国でも地震による被害があったことが確認できた。

2度目の地震は12日である。薩摩から京都へ向かう近衛信尹に随行した玄与は、立ち 寄った豊後国海部郡佐賀関(大分県大分市佐賀関)の様子を書き残している。

夫よりさかの関迄、御着被成候、去七月十二日之地震之時、かみの関と申浦里ハ、 大波にひかれて家かまともなし

12日に津波があり、そのために別府湾に面した「かみの関」が大きな被害にあったというのである。閏7月12日の地震は、他に『豊府聞書』などに記されている。こうした記録によれば、12日の地震は哺時(15時~17時)に発生したと記録されている。

ところで、前で触れた「由原宮年代略記」は、本文で閏7月9日に地震が起きたと記 すが、注記があり「板行ニハ十二日とアリ」と記される、また、『豊府聞書』も「十二 日或ハ九日」と記している。こうした9日と12日という日付の混在は、後世に編纂され た記録で特に顕著であるが、2つの地震が近接しているため、後の記録などにおける日 付の混在という状況が生み出された。

しかし、9日と12日の地震の発生時刻が異なることは、少なくとも2度大きな地震が 発生したことを示している。後世、「地震の記憶」が語られ整理される中で、9日の地 震発生を記した興導寺や薬師寺の大般若経や柞原八幡宮の日記のように、いわば限られ た人々が目にする記録ではなく、後世に編纂された地誌が12日と記述したことから、よ り広く目にする記録の日付で理解されるようになったといえよう。

ii)由布院の被害

「イエズス会士の報告」(大分県立先哲史料館蔵)をみると、以下のような記述がある。 A 地震と津波で、沖の浜は大きな被害をうけ、陸地が海になった。

B 大野川河口も、津波の被害をうけた。

C 由布院でも山が崩れ、大きな被害がでた。

いずれも直接に日付を特定できないが、Aは同時代史料といえる興導寺大般若経(図 3.1.18)に「豊後興浜悉ク海ニ成」の記述から、少なくとも閏7月9日の地震による出来事と 考えられる。そのなかで、由布院の被害については、若宮八幡宮(由布市湯布院町乙丸) の石碑(安政6年<1859>建立)には、次のような記述がある。

慶長元年丙申年七月一日、以往地大震連日連夜、同七日夜風雨暴烈、椿山鳴動数回、 終圻山崩、麓之馬場・八川之両村流亡、村墟唯見土石積如山、人畜之逢其災害者不可枚 挙

このように、由布院では、連日連夜の地震そして雨で、閏7月7日(原文では「七月」 となっているが、本事業では「閏七月」と判断した)に山崩を起こしたと語り継がれた ようである。あるいは、由布院盆地の中央部にあった興禅院(豊後国速見郡石松)は、 「慶長元年、地震山崩の災に遭い、寺院湮滅」と語られた(『豊後国志』など)。

「豊後国速見郡御検地帳」(熊本大学附属図書館)によれば、由布院をはじめ、豊後 国速見郡のうち、浜脇・南石垣・別府・立石(別府市)の5つの村では、「先年大地震 ニ永荒罷成候」の耕地などがあった。

つまり、慶長元年閏7月の地震は、別府湾沿岸だけでなく、現在の別府市南部や由布 市湯布院町で大きな被害をもたらしたのである。ただし、由布院などに被害をもたらし た地震の発生時期は決して明確でなく、興禅院は閏7月12日の山崩れで破壊されたとの 言い伝えもある。実際、由布院盆地東部には、山などの土が崩れたことを意味する「津 江」が地名となっている。

同時代の古文書や記録は確認できていないが、後世の公的記録や石碑などから、イエ ズス会の報告という、宣教師の報告に記された被害を跡付けることができた。その意味 で、宣教師報告も重要な歴史情報となることが、改めて確認できた。

iii)豊後国の「滅地」

地震より 50 年ほど経過した後に幕府が編集した『豊後国郷帳』には、速見郡の 48828 石余りのうち約6%にあたる 2938 石分、豊後国全体の 357300 石余のうち、0.9%の 3179 石分の土地が地震のため「滅地」となったとある。「滅地」という言葉は、類例が多く ない言葉であるが、まさに地震で陸地が海に没したことを示す言葉である。

今回の調査観測で、大分市沖および別府市沖で岩屑なだれが確認されており、慶長元 年閏7月の2つの地震は、陸地が海になった。このようにみると、人間が記録した「滅 地」という言葉は、こうした現象を捉えたものといえる。享和4年(1804)に完成した 『豊後国志』附図では、大分市沿岸部は慶長元年の地震で陸地が海になった地があると 記され、別府湾南岸が複雑な海岸線であったことがわかる(図3.1.19)。また、16世紀 後半の豊後国府内を描いた「府内古図」も複雑な海岸線とともに、沖浜が確認できる(図 3.1.20)。慶長元年の地震は複雑な海岸線と沿岸部を海没させた地震であった。

ただし、陸地が海になること、このことは当事者および同時代の人々以外には理解が 難しいことであったかもしれない。その結果、地震後100年ほど後から、地震によって 瓜生島が沈んだと語られるようになった。これは地震によって移住した人々を中心に、 かつての居住地のことを語る際に創出された「語られた歴史」と位置付けられよう。

また、別府湾南岸における岩屑なだれは、別府湾北岸にも被害をもたらしたことが推 測される。イエズス会の報告で、別府湾北岸の日出などで津波の被害があったとする記 述は、こうした現象を示しているのであろう。

以上、様々な歴史資料を検討した時、慶長元年閏7月9日と12日という、近接した日 と地域での2度の地震により、別府湾沿岸および速見郡南部では大きな被害がもたらさ れたことが確認できた。人々の記録における日付の混在は、ひとつにいずれの地震によ る被害を重視したのかに基づくのであろう。慶長元年の地震は、近接した日と地域で大 規模な地震が複数回発生した事例ということができる。

図 3.1.18 大般若経(興導寺) 慶長元年閏7月9日に発生した地震で、豊後国沖浜が海没したことを記したもの。地震 後近い時期に記された記録。



図 3.1.19 「豊後国志」の附図(大分県立先哲史料館)。 囲みの部分に「此辺旧陸地、慶長元年地震之災悉海トナル」とある。



図 3.1.20 府内古図(複製・大分県立先哲史料館、部分) 16世紀末の豊後府内を描いた絵図の写。大分市沿岸部の地形が複雑であったことがわ かる。 2) 海域の調査(サブ1-2) (原口・加・池原・山本・山田・竹村)

海域では、海底地形調査および音波探査を実施して、位置や分布を検討した。また、 湾内での堆積物採取を実施し、地震時イベント堆積物の分析・解析を実施し、活動履歴 の高度化が図られた。地下探査としては、以下の再解析と調査を実施した。①深部構造 を対象とした既存のエアガン探査データ(図3.1.21)の再解析、②ブーマー探査(図 3.1.22)、③極表層部を対象とした卓越周波数 10KHz を主体とした音波探査(図3.1.23) である。



図 3.1.21 深部構造を対象とした既存のエアガン探査測線(再解析測線)



図 3.1.22 ブーマー探査測線



図 3.1.23 卓越周波数 10KHz を主体とした音波探査測線

音波探査で判明した別府湾南岸沿いの表層部の流山地形や変位を確認するため、マル チナロービームによる詳細地形計測(図 3.1.24)を平成 27・28 年度に実施した。



図 3.1.24 マルチナロービームによる詳細地形計測範囲

堆積物記録から、イベント情報を読み解くためにピストンコアリングによる堆積物 採取を平成27年度に実施した(図3.1.25)。



図 3.1.25 ピストンコアリング位置と流山地形確認のための音波探査測線

a) 大在沖海底地形の3Dイメージとブーマー探査結果(原口) 大在沖海底地形の3Dイメージとブーマー探査結果を図3.1.26に示す。



図 3.1.26 ブーマー探査結果および大分市大在沖の海底地形の 3D イメージ

海底地形部分を詳細に見るとほぼ NW-SE 方向に直線的な崖地形(図 3.1.27)が連続する。



図 3.1.27 海底面上で NW-SE 方向に連続する直線的な崖地形(大分市大在沖の海底 地形)

崖地形の断面(図 3.1.28~3.1.33)をみると、崖の高さは最大4mに達する。





図 3.1.29 崖地形の地形断面 b-b'







崖地形は北西方向で変位が小さくなり北西方向で消滅する。ブーマー音波探査測線 12-bpにおいても変位は見らない(図 3.1.32)。



図 3.1.32 別府湾中央断層と大在沖の変位地形



一方音波探査断面をみると、別府湾中央断層では断層変位が明瞭(図 3.1.33)である。

図 3.1.33 別府湾南岸沿いの地形急変部(高崎山から大分区間)

この部分の地表変位はそれぞれ約1m程度(図3.1.34、図3.1.35)と計測される。



図 3.1.34 別府湾中央断層沿いの海底地形変位(測線 11-bp)



大在沖で確認された変位地形は別府湾中央断層とは直接は連続しないが、平面形状は ほぼ同じ走向で約1.2km程度右ステップしている。さらに地表変位量は最大4mに達す ることから、別府湾中央断層の活動と同時に変位したと推定される。 b)音波探査データの3次元可視化および各種3次元データの重ね合わせ(原口) 別府湾海域で取得された音波探査波形データと同時に実施取得された GPS 測量記録 から、デジタル波形処理プログラムを用いて、整合した距離-深度断面図へ変換した。
図 3.1.36 に音波探査記録の収録状況の作成フロー、図3.1.37 に発受振 NO. (Ping)
-深度断面図、距離-深度断面図の作成例を示す。



図 3.1.36 音波探査解析フロー図



図 3.1.37 発受振 No. (Ping) -深度断面図(上)および距離-深度断面図(下) 作 成例。測線位置を右上に示す。

処理した断面図は、パネルダイヤグラム法による全測線の3次元可視化データを構築し、上記の海底地形データとの重ね合わせを行った。

使用した 3 次元可視化プログラムは QPS 社製の Fledermaus である。

図 3.1.38~図 3.1.40 に別府沖、高崎山沖、大分川沖 3 次元可視化データ表示例を 示す。



図 3.1.38 別府沖の鳥瞰図(北東から南西へ俯瞰) 地理院地図の標準地図、1mメッシュ海底地形図、音波探査断面のパネルダイヤグラム を重ね合わせている。



図 3.1.39 高崎山沖の鳥瞰図(北西から南東へ俯瞰) 地理院地図の標準地図、1mメッシュ海底地形図、音波探査断面のパネルダイヤグラム を重ね合わせている。



図 3.1.40 大分川沖の鳥瞰図(北西から南東へ俯瞰) 地理院地図の標準地図、1mメッシュ海底地形図、音波探査断面のパネルダイヤグラム を重ね合わせている。
c) ピストンコア堆積物解析結果 (加・池原・山本・山田・原口・竹村)

別府湾北部から南東部にかけての正断層群における地震の活動時期や頻度は、断層両 側で得られた海底コアの火山灰層間の厚さ¹⁴C年代から求められる活動履歴・変位速度・ 単位変位量から推定されてきた(石辺・島崎, 2005; 地震予知研究協議会, 2002)。こう した研究から、K-Ah 火山噴火以降の過去 7300 年の間に 5 回の地震イベントがあったこ とが報告されてきた(地震予知研究協議会,2002)。従来の方法では、イベント発生時 期について、断層両側で対比可能な層の間の厚さが変化しない層の¹⁴C年代を測定するこ とで推定してきたが、そもそも発生時期に対応するイベント層準が on-fault 域において イベント層として堆積物中で認識できないこと、海洋試料の年代にはバラツキが大きい ことやローカルリザーバー年代が不明で暦年補正がなされていなかったためにその年代 に不確定性が大きいという問題があった。別府湾湾奥の最深部堆積物(コア試料の採取 場所を図 3.1.41 に示す) には、数 mm から数十 cm の厚さを持つ高密度層が多数認められ る(Kuwae et al., 2013) (図 3.1.42)。こうした高密度層の一部は地震あるいは津波に よって沿岸域の粗粒堆積物が海底斜面上を混濁流によって最深部にもたらされたタービ ダイト層であると考えられ、地震発生イベントとして堆積物中に認識できる可能性があ る。さらに、最近の¹⁴C ウィグルマッチ年代決定 (wiggle match dating)法の進展によ って、従来の単試料の暦年補正による年代エラーよりも数分の1程度の精度で年代を制 約できるようになったことや(Blaauw et al., 2003)、¹⁴C ウィグルマッチ年代決定法を 用いることで、これまで海洋試料において暦年補正に不可欠であったローカルリザーバ ーと堆積層の年代を同時に推定する方法も開発されてきた(Kuwae et al., 2013)(図 3.1.43)。こうした新しい手法を最深部堆積物のイベント層に適用することによって、 地震イベントの発生時期や発生間隔を従来よりも高精度で推定できる可能性がある。こ れまで、過去 2900 年に相当する 10m 級のピストンコア試料により、1cm 以上の厚さを持 つタービダイト層を19枚認定し、そのうち3枚は10cm以上の厚さを持つタービダイト 層が狭在することがわかった。これは規模の大きい地震性タービダイト層の可能性が高 いと考えられる。後に詳しく述べるが、最上位の厚いタービダイト層は、¹⁴C ウィグルマ ッチ年代決定法により慶長・豊後地震時のタービダイト層であることがわかった(Kuwae et al., 2013)。その他、火山灰層 2 枚を除く 17 枚が比較的小規模の地震、津波、洪水 等によるイベント堆積物である可能性がある。これらのイベント層の存在は、on-fault で見落とされていたイベントを検出できる可能性がある。

現在から 2800 年前までの期間については上記のように別府湾最深部におけるイベン ト層の研究から規模の大きい地震性タービダイトと見られる層準と年代が明らかになっ てきた。しかし、それ以前については、もっと長尺の柱状試料がなかったために明らか でなかった。そこで、サブテーマ1-2では過去 7300 年間の地震イベントの発生時期や 発生間隔を明らかにするために、最深部で 20m 級のピストンコア試料を採取し、イベン ト層序の確立と海底コア試料の年代測定を行った。ここでは、得られたイベントの年代 について、これまで on-fault で認められてきた 5 つの断層活動時期との関係について述 べる。



図 3.1.41 別府湾海底地形。等深線上の数字はmを示す。



図 3.1.42 別府湾柱状堆積物の写真、CT イメージ、帯磁率(一目盛りが 20 × 10-5 SI units)。コア間の線は、対比可能なタービダイト層を示し、番号はその ID (Kuwae et al., 2013)。







図 3.1.43 ¹⁴C wiggle matching 法の計算ステップと別府湾堆積物の区間1における MARINE04標準曲線(実線)と各試料の年代のwiggle matchingの例(Kuwae et al., 2013). Case 1 と Case 2 は、堆積速度の異なる二つの暦年-深度モデルにおけるマッチングを示 す。Case 2 が MARINE04標準曲線上に最もフィットする最適モデルを示す。+が区間中の 各年代試料の 14C 年代と暦年代の平均値、あるいは暦年と深度の平均値。A は堆積速度 (yr/cm)で、b は平行移動項。WSS は年代エラーで荷重をかけた最小二乗和。詳細は、 (Blaauw et al., 2003)を参照。

i) 試料の採取海域

2015 年 7 月 8 日、別府湾最深部 (水深 72m) の北緯 33°16′23.97″、東経 131°32′11.76″の2地点で20m級ピストンコア試料を採取した(図 3.1.44)。それぞ れの ID を BP15-1 及び BP15-2 とした。これらの試料は、Kuwae et al. (2013) でイベン ト層が記載された 2009 年採取の一連のコア (BP09 シリーズのコア試料) 採取地点の近 傍で採取された。また、この地点では後に述べる 2010 年に採取された BG10 シリーズの グラビティーコア試料も近傍で採取されている。



図 3.1.44 2015 年度コア試料採取地点

ii) 年代測定及びコア試料の年代モデル

本研究では、BP15-1、BP15-2のコア試料で採取された二枚貝(ツキガイモドキ)を 用いて¹⁴C年代を測定した。測定は、Woods Hole 海洋研究所の Natural Ocean Sciences Accelerator Mass Spectrometry Facility (NOSAMS) に依頼した。BP15シリーズの年代・ 深度モデルは、Ev17まではBP09シリーズでウィグルマッチ年代決定法で得られたイベ ント層の年代 (Kuwae et al., 2013)を用い、それより以深については今回 BP15シリー ズで測定された¹⁴C年代を用いた。較正暦年代は、得られた¹⁴C年代とKuwae et al. (2013) によって与えられたローカルリザーバー年代 (Δ R=135±20年)を用いて、MARINE04デ ータセットに基づく Calib5.0.1 ソフトウェア (Stuiver et al., 2005)によって求めた。 現在の較正データセットは MARINE13 (Reimer et al., 2013)までグレードアップされ ているが、別府湾ではこれまで MARINE04データセットによって算出されてきたので、混 乱をさけるためここでも MARINE04 データセットを用いた。

iii) 結果

BP15 シリーズのコア試料とイベント層

BP15-1 及び BP15-2 のコアセクションの写真とイベント層 ID を図 3.1.45 及び図
3.1.46 に示す。また、両コア試料の CT 画像、色データを図 3.1.47 に示す。全長は BP15-1 が 2124.8cm、BP15-2 が 2076.9cm である。空隙を除いたコア長は、BP15-1 が 2092.2cm、
BP15-2 が 2061.7cm である。岩相、帯磁率、CT 画像、色データを基に認定した複数のコ

ア間で対比できるイベント層を表 3.1.1、表 3.1.2に示し、対比可能なイベント層を図 3.1.48に示す。BP09シリーズと対比できるイベント層は、BP15-1で40枚、BP15-2で 33枚あった。また、新たにBP15-1とBP15-2の間で対比できるイベント層は、29枚あっ た。BP09シリーズでの解析方法(Kuwae et al., 2013; Yamada et al., 2016)を踏襲 し、1cm以上の厚さを持つものをメジャーイベント層、1cm以下の厚さのものをマイナ ーイベント層と呼ぶことにする。BP15-1、BP15-2では、BP09シリーズで認められたEvent 3から Event 18までのメジャーイベント層が認められた. Event 0から Event 2までの メジャーイベント層は認められなかったのは、コア採取時に失われたものと考えられる. BP15シリーズの Event 18の下位には、Event 19から Event 35までの新たに17枚のメ ジャーイベント層が見つかった。基底に黒色の砂層があるタービダイト層は、Event 15、 Event 21、Event 22、Event 28であった(表 3.1.3)。基底あるいは全体に褐色の砂 層があるタービダイト層は、Event 3、Event 5、Event 23、Event 24、Event 27、Event 29、Event 34であった(表 3.1.3)。



図 3.1.45 BP15-1 コア試料の各セクションの写真 (セクション 15-1-5-M1 がコアのト ップ) とイベント層 ID



図 3.1.45 続き



図 3.1.45 続き



図 3.1.46 BP15-2 コア試料の各セクションの写真(セクション 15-2-5-M1 がコアのト ップ) とイベント層 ID



図 3.1.46 続き



図 3.1.46 続き



図 3.1.47 BP15-1 及び BP15-2 コア試料の写真及び CT 画像、色データ及び帯磁率(MS) を示す。また層相や物性データに基づく、各コア間の主要な対比線を赤線で示す。青枠 は、コアリング時の影響で乱れが生じた可能性があるので、分析時に注意が必要である。



図 3.1.48 各イベント層のコア間対比(実線はメジャーイベント、破線はマイナーイベント)

表 3.1.1 コア間対比が可能なイベント層と共通深度(BP15-1)

BP15-1									
Section	Event_nam e	Section depth	Section depth	Thickness	Raw depth	Void-free depth	Void /Event-free Depth	Com posite depth	Age*
		Top (cm)	Bottom (cm)	(cm)	Eventbottom (cm)	Eventbottom (cm)			(calyrBP)
15-1-5-M 1	15-1-Ev3	0	23.4	23.4	23.4	0.0	0.0	109.7	344
15-1-5-1	15-1-4-1	7	7	1>	33.6	33.6	10.2	118.5	383
15-1-5-1	15-1-4-2	10.6	10.6	1>	37.2	37.2	13.8	122.3	399
15-1-5-1	15-1-Ev4	21.4	25	3.6	51.6	51.6	24.6	130 7	435
15-1-5-1	15-1-5-3	58.6	58.6	1>	85.2	85.2	58.2	158 /	555
15 1 5 1 15 1 5 9	15 1 5 5	70.0	00.0	46.6	146 5	144.1	70.0	171.7	610
15-1-5-1, 15-1-5-2	15-1-EV5	/3.3	22.3	40.0	140.0	144.1	72.9	1/1./	013
15-1-5-2	15-1-6-1	37.1	37.1	D	161.3	158.9	87.7	191.1	682
15-1-5-2	15-1-Ev6	51	59	8	183.2	180.8	101.6	204.2	725
15-1-5-2	15-1-7-1	68.9	68.9	1>	193.1	190.7	111.5	213.8	757
15-1-5-2	15-1-7-2	93.9	93.9	1>	218.1	215.7	136.5	243.9	857
15-1-5-3	15-1-Ev7	7.9	24.1	16.2	249.1	246.7	151.3	249.4	875
15-1-5-3	15-1-8-1	93.9	93.9	1>	318.9	316.5	221.1	331.8	1149
15-1-5-4	15-1-8-2	26.4	26.4	1>	350.6	348.2	252.8	364.6	1258
15-1-5-4	15-1-Ev8	49.3	49.8	0.5	374.0	371.6	275.7	385.8	1328
15-1-5-4	15-1-Ev9	63.2	65.2	2	389.4	387.0	289.1	401.3	1380
15-1-5-4	15_1_Ev10	2.00	6.69	-	202.1	200.7	201.0	402.2	1202
15 1 5 4	15-1-Ev11	70.6	71.2	0.0	205.4	202.0	201.0	402.3	1200
15-1-5-4	15-1-2011	70.0	71.2	0.0	395.4	393.0	293.0	404.3	1390
15-1-5-4	15-1-EV12	/4.5	/5.2	0.7	399.4	397.0	296.9	406.3	1397
15-1-5-4	15-1-13-1	100.9	100.9	1>	425.1	422.7	322.6	432.1	1482
15-1-4-M 1	15-1-13-2	3.5	3.5	1>	438.4	436.0	335.8	447.6	1534
15-1-4-M 1	15-1-Ev13	9.5	10.6	1.1	445.5	443.1	341.8	450.0	1542
15-1-4-1	15-1-14-1	4.6	4.6	1>	450.9	448.5	347.2	455.8	1561
15-1-4-1	15-1-14-2	12.5	12.5	1>	458.8	456.4	355.1	466.3	1596
15-1-4-1	15-1-14-3	16.4	16.4	1>	462.7	460.3	359.0	474.0	1621
15-1-4-1	15-1-14-4	25.6	25.6	1>	471.9	469.5	368.2	484.0	1655
15-1-4-1	15-1-Ev14	36.8	45.3	8.5	491.6	489.2	379.4	493.0	1685
15-1-4-1	15-1-15-2	77.1	77.1	1>	523 4	521.0	411.2	523 7	1787
15-1-4-1	15-1-15-3	82	82	15	528.3	525.0	416.1	526.0	1707
15 1 4 1	15 1 15 5	00.4	00.4	12	520.5	525.3	410.1	520.5	1051
15-1-4-1	15-1-15-4	33.4	99.4	1/	545.7	J4J.J	400.0	545.0 EE1.0	1001
15-1-4-2	15-1-EV15	3.7	20.4	22.1	572.0	505.4	437.7	551.0	10//
15-1-4-2	15-1-16-1	33.5	33.5	12	5/9./	572.5	444.8	556.9	1916
15-1-4-2	15-1-Ev16	76.4	85.3	8.9	631.5	624.3	487.7	589.5	2046
15-1-4-2	15-1-17-1	90.5	90.5	1>	636.7	629.5	492.9	594.0	2064
15-1-4-4	15-1-17-2	12.2	12.2	1>	758.5	745.4	608.8	702.3	2496
15-1-4-4	15-1-17-3	25.9	25.9	1>	772.2	759.1	622.5	715.6	2549
15-1-4-4	15-1-Ev17	43.9	45.9	2	792.2	779.1	640.5	726.3	2591
15-1-4-4	15-1-Ev18	52.2	57.8	5.6	804.1	791.0	646.8	733.8	2626
15-1-4-4	15-1-Ev19	68.3	69.7	1.4	816.0	802.9	657.3	743.9	2673
15-1-3-1	15-1-20-1	51.9	51.9	1>	915.1	899.8	754.2	843.9	3126
15-1-3-1	15-1-20-2	66.5	66.5	1>	929 7	914.4	768.8	859.6	3185
15-1-3-1	15-1-20-3	83.0	83.0	15	047.1	031.8	786.2	877.0	3251
15-1-2-1	15-1-20-4	00.5	00.5	15	061.7	046.4	900.9	011.0	2206
15-1-5-1	15-1-20-4	90.0	90.J	12	901.7	940.4	000.0	091.0	3300
15-1-3-2	15-1-20-5	14.1	14.1	12	977.3	902.0	010.4	907.2	3305
15-1-3-3	15-1-20-6	9.1	9.1	12	10/2.7	1057.4	911.8	1002.6	3694
15-1-3-3	15-1-20-7	49	49	1>	1112.6	1097.3	951.7	1042.5	3831
15-1-3-4	15-1-Ev20	55	57.3	2.3	1220.8	1205.5	1057.6	1148.4	4277
15-1-3-4	15-1-Ev21	57.6	63.6	6	1227.1	1211.8	1057.9	1148.7	4278
15-1-2-1	15-1-22-1	17.2	17.2	1>	1300.9	1285.6	1131.7	1222.5	4674
15-1-2-1	15-1-22-2	85.4	85.4	1>	1369.1	1353.8	1199.9	1290.7	5156
15-1-2-2	15-1-Ev22	15.4	22.2	6.8	1406.6	1391.3	1230.6	1321.4	5321
15-1-2-2	15-1-23-1	29	29	1>	1413.4	1398.1	1237.4	1328.2	5358
15-1-2-2	15-1-Ev23	51.1	55.9	4.8	1440.3	1425.0	1259.5	1350.3	5477
15-1-2-2	15-1-Ev24	82.3	83.7	1.4	1468 1	1452.8	1285.9	1376 7	5678
15-1-2-2	15-1-Ev25	06	97.6	1.6	1482.0	1466.7	1208.0	1380.0	5778
16 1 2 2	15 1 26 1	22 5	07.0 02.E	1.0	1500 5	1400.7	1200.2	1415 5	E004
15-1-2-5	15-1-20-1	23.3	23.5	1/	1508.5	1493.2	1324.7	1415.5	5994
10-1-2-3	10-1-EV20	56	57.9	1.9	1542.9	1527.6	1357.2	1448.0	6246
10-1-2-3	10-1-EV2/	63	65.1	2.1	1550.1	1534.8	1362.3	1453.1	6280
15-1-2-3, 15-1-2-4	15-1-Ev28	98.3	6.3	7.6	1591.4	1574.9	1394.8	1485.6	6500
15-1-2-4	15-1-29-1	32.8	32.8	1>	1617.9	1601.4	1421.3	1512.1	6679
15-1-2-4	15-1-Ev29	62	64	2	1649.1	1632.6	1450.5	1541.3	6876
15-1-2-4	15-1-Ev30	91.8	92.9	1.1	1678.0	1661.5	1478.3	1569.1	7064
15-1-1-M 2	15-1-Ev31	12.5	13.2	0.7	1699.3	1682.8	1498.9	1589.7	7203
15-1-1-M 1	15-1-Ev32	6.2	8.1	1.9	1707.4	1690.9	1505.1	1595.9	7245
15-1-1-M 1	15-1-Ev33	10	18.5	8.5	1717.8	1701.3	1507.0	1597.8	7257
15-1-1-M 1	15-1-Ev34	23.4	28.9	5.5	1728.2	1711.7	1511.9	1602.7	7291

 $\ast\,\tt W$ igg le m atching-based event date for BP09 cores

表 3.1.2 コア間対比が可能なイベント層と共通深度(BP15-2)

	BP15-2									
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Section	Event_nam	(Section depth	Section depth	Thickness	Raw depth	Void-free depth	Void/Event-free Depth	Com posite depth	Age*
1616261345045045023118518315151524152422222210406456751123390151515151515151131123114122122122122122122122122122122122122123113114114122123114115115115116115	15-2-5-1	15-2-Ev3	TOP (CIII)	20 D	(CIII) 7 20.7		22 1	0.0	109.7	(caryrbr) 344
16-2-+1 15-2-42 28.2 10 44.6 44.6 17.5 12.2 1007 15-2-5-1 15-2-64 35.9 74.1 74.1 10 155.5 65.5 40.9 150.4 555 15-2-5-1 15-2-64 45.5 37.6 45.5 156.7 151.6 76.5.8 171.1 65.8 171.1 65.8 171.1 65.8 171.1 65.8 171.1 65.8 171.1 65.8 171.1 65.8 171.1 65.8 171.1 65.8 171.1 65.8 171.1 65.8 171.1 65.8 171.1 65.8 172.4 172.4 172.4 172.5 174.1 172.3 374.1 172.3 374.1 173.1 37	15-2-5-1	15-2-4-1	23.6	23.6	3 1>	45.0	45.0	2.9	118.5	383
16-26-1 15-26-4 15-26-4 15-26-4 15-26-4 15-26-4 15-26-4 15-26-4 15-26-4 15-26-4 15-26-4 15-26-4 15-26-4 15-26-4 15-26-4 15-26-4 15-26-4 15-26-4 16-26-4 16-26-4 15-26-4	15-2-5-1	15-2-4-2	28.2	28.2	2 1>	49.6	49.6	7.5	122.3	399
162-6-4 162-6-4 162-4	15-2-5-1	15-2-Ev4	36.9	40.4	3.5	61.8	61.8	16.2	130.7	435
15-2-6+1 15-2-6+2 15-2-6+3 15-2-6+4 1914 142.7 167.8 167.8 7.7 191. 60.2 15-2-5-2 15-2-6+4 66.2 7.2.6 6.4 191.7 191.7 94.2 204.2 725 15-2-5-4 15-2-6+4 66.2 7.2.6 6.4 191.7 191.7 94.2 204.2 725 15-2-5-4 15-2-6+0 7.5.8 8.5.8 7.7 35.7 7.7 35.8 128.2 15-2-5-4 15-2-6+0 7.5.9 7.6.4 0.9 394.8 394.8 286.4 40.2.3 1383 15-2-5-4 15-2-6+0 7.5.9 7.6.4 0.9 394.3 394.8 286.4 40.2.3 1383 15-2-6+1 15-2-6+0 7.5.9 7.6.4 0.9 394.3 394.8 286.4 40.2.3 1383 15-2-6+1 15-2-6+1 7.2 7.8 8.6.4 140.30 403.0 20.4.3 1383 15-2-4+1 15-2-1-3 7.7 7.7 7.9 441.6 444.9.9 338.4 40.6.5	15-2-5-1	15-2-5-3	74.1	74.1	1>	95.5	95.5	49.9	158.4	555
15-2-2 15-2-4-1 48.7 191.4 142.7 167.8 167.8 76.7 19.4 2042 725 15-2-5-3 15-2-5-4	15-2-5-1, 15-2-5-2	15-2-Ev5	45.5	37.6	6 45.5	156.7	156.7	65.6	171.7	613
15-2-52 15-2-67:0 16.62 7.6 6.4 191.7 191.7 194.2 202.4 204.2 204.25 140.7 249.4 875 15-2-5-4 15-2-64 <t< td=""><td>15-2-5-2</td><td>15-2-6-1</td><td>48.7</td><td>191.4</td><td>142.7</td><td>167.8</td><td>167.8</td><td>76.7</td><td>191.1</td><td>682</td></t<>	15-2-5-2	15-2-6-1	48.7	191.4	142.7	167.8	167.8	76.7	191.1	682
15-2-5-3 15-2-5-4 15-2-6-1 15-2-6-1 15-2-1-1 <td< td=""><td>15-2-5-2</td><td>15-2-Ev6</td><td>66.2</td><td>72.6</td><td>6.4</td><td>191.7</td><td>191.7</td><td>94.2</td><td>204.2</td><td>725</td></td<>	15-2-5-2	15-2-Ev6	66.2	72.6	6.4	191.7	191.7	94.2	204.2	725
15-2-5-4 15-2+5-4 <td< td=""><td>15-2-5-3</td><td>15-2-Ev7</td><td>19.6</td><td>23.9</td><td>4.3</td><td>242.5</td><td>242.5</td><td>140.7</td><td>249.4</td><td>875</td></td<>	15-2-5-3	15-2-Ev7	19.6	23.9	4.3	242.5	242.5	140.7	249.4	875
	15-2-5-4	15-2-8-1	5.8	5.8	8 1>	324.2	324.2	222.4	331.8	1149
	15-2-5-4	15-2-8-2	35.7	35.7	1>	354.1	354.1	252.3	364.6	1258
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-5-4	15-2-Ev8	57.1	58.3	3 1.2	376.7	376.7	273.7	385.8	1328
1 = 2 - 5 - 4 $ 1 = 5 - 2 - 4 $ $ 1 = 5 - 2 - 5 - 3 $ $ 9 - 6 - 5 - 6 $ $ 1 = 5 - 2 - 4 $ $ 1 = 5 - 2 - 4 - 1 $ $ 1 = 5 - 4 - 4 $ $ 1 = 5 - 2 - 5 - 3 $ $ 9 - 5 - 6 $ $ 1 = 5 - 2 - 4 - 1 $ $ 1 = 5 - 4 - 4$	15-2-5-4	15-2-Ev9	70.9	73.4	2.5	391.8	391.8	286.3	401.3	1380
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	15-2-5-4	15-2-Ev10	/5.5	/6.4	0.9	394.8	394.8	288.4	402.3	1383
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-5-4	15-2-EVII	/8.2	/8.5	9 U./	397.3	i 397.3	290.2	404.3	1390
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-5-4 15-2-4-M 1	15-2-EVIZ	60	04.0) I.0	403.0	403.0	294.3	400.3	1402
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	15-2-4-1	15-2-13-1	0.8	· 0.8	, 12 1 15	429.	429.3	320.0	432.1	1402
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	15-2-4-1	15-2-Ev13	1.7	1.1) 28	441.0	441.0	338.4	447.0	1542
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	15-2-4-1	15-2-14-1	14.4	. 144	, 2.0 I 1>	443.3	4454.3	342.8	455.8	1561
15-2-4-115-2-4-115-2-4-115-2-15-290.790.71>530.6530.6408.9523.7178715-2-4-115-2-15-395.695.61>535.5535.5413.8526.9179715-2-4-115-2-15-395.695.61>535.5535.5413.8526.9179715-2-4-215-2-15-411.111.11>549.6549.6422.9551.0187715-2-4-215-2-16-138.638.61>577.1577.1440.0556.9191615-2-4-215-2-17-191.891.81>630.3603.3488.8694.0206415-2-4-415-2-17-317.117.1174.2742.2600.7702.3249615-2-4-415-2-17-317.117.11>755.1776.5632.8726.3254915-2-4-415-2-17-317.117.11>755.1776.5632.8726.3254915-2-4-415-2-17-363.338.52.2776.5776.5632.8726.3254915-2-4-415-2-17-363.763.71>90.790.9960.4743.9267315-2-4-415-2-17-363.763.71>90.7780.7640.3733.8262615-2-4-415-2-1763.763.71>90.7780.7640.3733.8262615-2-4-415-2-2-163.763.71	15-2-4-1	15-2-14-2	23.6	23.6	5 1>	463.5	463.5	352.0	466.3	1596
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-4-1	15-2-Ev14	49.7	59.9) 10.2	499.8	499.8	378.1	493.0	1685
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-4-1	15-2-15-2	90.7	90.7	1>	530.6	530.6	408.9	523.7	1787
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-4-1	15-2-15-3	95.6	95.6	6 1>	535.5	535.5	413.8	526.9	1797
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-4-2	15-2-15-4	11.1	11.1	1>	549.6	549.6	427.9	543.0	1851
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-4-2	15-2-Ev15	15.2	30.6	6 15.4	569.1	569.1	432.0	551.0	1877
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-4-2	15-2-16-1	38.6	38.6	6 1>	577.1	577.1	440.0	556.9	1916
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-4-2	15-2-Ev16	80.3	84.7	4.4	623.2	623.2	481.7	589.5	2046
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-4-2	15-2-17-1	91.8	91.8	3 1>	630.3	630.3	488.8	594.0	2064
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-4-4	15-2-17-2	4.2	4.2	2 1>	742.2	742.2	600.7	702.3	2496
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-4-4	15-2-17-3	17.1	17.1	1>	755.1	755.1	613.6	715.6	2549
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-4-4	15-2-Ev17	36.3	38.5	5 2.2	776.5	776.5	632.8	726.3	2591
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-4-4	15-2-Ev18	46	52.7	6.7	790.7	790.7	640.3	733.8	2626
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-4-4	15-2-Ev19	62.8	63.9) 1.1	801.9	801.9	650.4	743.9	2673
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-3-1	15-2-20-1	63./	63.	1>	903.1	901.9	/50.4	843.9	3126
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-3-1	15-2-20-2	/9.4	/9.4	i 12 : 15	919.4	917.0	/00.1	809.0	3180
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	15-2-3-1	15-2-20-3	97.0	97.0) 1/ S 1\	937.0	935.7	704.2	0/7.0	3231
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	15-2-3-2	15-2-20-4	12.0	12.0) 12	933.2	951.4	820.5	007.2	3366
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	15-2-3-3	15-2-20-6	23 0	. 33.2	- 12 - 15	1064 4	1062.6	911.1	1002.6	3694
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	15-2-3-3	15-2-20-7	63.9	63.9) 1>	1104.4	1102.6	951.1	1042.5	3831
15-2-3-4 15-2-Ev21 81.8 88.1 6.3 1228.3 1226.5 1067.4 1148.7 4278 15-2-2-1 15-2-22-1 48.3 48.3 1> 1305.1 1303.3 1144.2 1222.5 4674 15-2-2-2 15-2-22-2 22.3 22.3 1> 1378.6 1376.8 1217.7 1290.7 5156 15-2-2-2 15-2-Ev22 53.3 62.5 9.2 1418.8 1417.0 1248.7 1321.4 5321 15-2-2-2 15-2-2-3-1 69.5 69.5 1> 1425.8 1424.0 1255.7 1328.2 5358 15-2-2-2 15-2-Ev23 91.3 97.8 6.5 1454.1 1452.3 1277.6 1350.3 5477	15-2-3-4	15-2-Ev20	80.5	81.8	3 1.3	1222.0	1220.2	1067.4	1148.4	4277
15-2-2-1 15-2-22-1 48.3 48.3 1> 1305.1 1303.3 1144.2 1222.5 4674 15-2-2-2 15-2-22-2 22.3 22.3 1> 1378.6 1376.8 1217.7 1290.7 5156 15-2-2-2 15-2-Ev22 53.3 62.5 9.2 1418.8 1417.0 1248.7 1321.4 5321 15-2-2-2 15-2-2-3-1 69.5 69.5 1> 1425.8 1424.0 1255.7 1328.2 5358 15-2-2-2 15-2-Ev23 91.3 97.8 6.5 1454.1 1452.3 1277.6 1350.3 5477	15-2-3-4	15-2-Ev21	81.8	88.1	6.3	1228.3	1226.5	1067.4	1148.7	4278
15-2-2-2 15-2-22-2 22.3 22.3 1> 1378.6 1376.8 1217.7 1290.7 5156 15-2-2-2 15-2-Ev22 53.3 62.5 9.2 1418.8 1417.0 1248.7 1321.4 5321 15-2-2-2 15-2-23-1 69.5 69.5 1> 1425.8 1424.0 1255.7 1328.2 5358 15-2-2-2 15-2-Ev23 91.3 97.8 6.5 1454.1 1452.3 1277.6 1350.3 5477	15-2-2-1	15-2-22-1	48.3	48.3	3 1>	1305.1	1303.3	1144.2	1222.5	4674
15-2-2-2 15-2-Ev22 53.3 62.5 9.2 1418.8 1417.0 1248.7 1321.4 5321 15-2-2-2 15-2-23-1 69.5 69.5 1> 1425.8 1424.0 1255.7 1328.2 5358 15-2-2-2 15-2-Ev23 91.3 97.8 6.5 1454.1 1452.3 1277.6 1350.3 5477	15-2-2-2	15-2-22-2	22.3	22.3	3 1>	1378.6	1376.8	1217.7	1290.7	5156
15-2-2-2 15-2-23-1 69.5 69.5 1> 1425.8 1424.0 1255.7 1328.2 5358 15-2-2-2 15-2-Ev23 91.3 97.8 6.5 1454.1 1452.3 1277.6 1350.3 5477	15-2-2-2	15-2-Ev22	53.3	62.5	5 9.2	1418.8	1417.0	1248.7	1321.4	5321
15-2-2-2 15-2-Ev23 91.3 97.8 6.5 1454.1 1452.3 1277.6 1350.3 5477	15-2-2-2	15-2-23-1	69.5	69.5	5 1>	1425.8	1424.0	1255.7	1328.2	5358
	15-2-2-2	15-2-Ev23	91.3	97.8	6.5	1454.1	1452.3	1277.6	1350.3	5477
15-2-2-3 15-2-Ev24 27.2 29.7 2.5 1484.2 1482.4 1305.1 1376.7 5678	15-2-2-3	15-2-Ev24	27.2	29.7	2.5	1484.2	1482.4	1305.1	1376.7	5678
15-2-2-3 15-2-E v25 42.1 43.4 1.3 1497.9 1496.1 1317.5 1389.0 5778	15-2-2-3	15-2-Ev25	42.1	43.4	1.3	1497.9	1496.1	1317.5	1389.0	5778
15-2-2-3 15-2-26-1 73.9 73.9 1> 1528.4 1526.6 1348.0 1415.5 5994	15-2-2-3	15-2-26-1	73.9	73.9) 1>	1528.4	1526.6	1348.0	1415.5	5994
15-2-2-4 15-2-Ev26 10.7 12.4 1.7 1567.5 1565.7 1385.4 1448.0 6246	15-2-2-4	15-2-Ev26	10.7	12.4	1.7	1567.5	1565.7	1385.4	1448.0	6246
15-2-2-4 15-2-Ev27 16.5 18.5 2 1573.6 1571.8 1389.5 1453.1 6280	15-2-2-4	15-2-Ev27	16.5	18.5	5 2	1573.6	1571.8	1389.5	1453.1	6280
15-2-2-4 15-2-E-128 51.8 57.8 6 1612.9 1611.1 1422.8 1485.6 6500	15-2-2-4	15-2-Ev28	51.8	57.8	6	1612.9	1611.1	1422.8	1485.6	6500
15-2-2-4 15-2-29-1 84.5 84.5 1> 1639.6 1637.8 1449.5 1512.1 6679	15-2-2-4	15-2-29-1	84.5	84.5	p 1>	1639.6	1637.8	1449.5	1512.1	6679
15-2-1-11 15-2-1-129 4.3 6./ 2.4 1672.1 1670.3 1479.6 1541.3 6876	15-2-1-M 1	15-2-Ev29	4.3	6.7	2.4	1672.1	1670.3	1479.6	1541.3	6876
10-2-1-1 10-2-1-30 14.2 15 0.8 1699.1 1697.3 1505.8 1569.1 7054	10-2-1-1	15-2-Ev30	14.2	15	0.8	1699.1	1697.3	1505.8	1569.1	/064
10^{-}	15-2-1-1	15-2-EV31	35	30.0	י ו.b פ ויי	1720.1	1/18.9	1525.8	1505./	7203
102 1 102 102 100 100 100 100 100 100 10	15-2-1-1	15-2-E v32	40.0 // 0 0	40.0 2 75.1	נ.ז י ניסנ	1750.5	17//.0	1033.1	1595.9	7240
15-2-1-1 15-2-Fy34 811 887 76 1772 8 1757 6 15411 1607 7201	15-2-1-1	15-2-Ev24	40.0 81.1	, 70.1 22 T	, 20.3 I 76	1739.2	1744.0	15/11	16027	7201
15-2-1-1,15-2-1-2,15-2-1-2,15-2-1-3,5 90,5 6,2 9,7 1783.8 1768.6 1542.5 1604.1 7300	15-2-1-1, 15-2-1-2	15-2-Ev35	90.5	i 6.2	2 9.7	1783.8	1768.6	1542.5	1604.1	7300

BP15-1	Event_nam e	BP15-2		Event thic	kness (cm)		Color, lithology
Section		Section	Event_nam	BP15-1	BP15-2	BP 09 series	
	BP09Ev0		BP09Ev0			1	G ray
	BP09 Ev1		BP09 Ev1			4	Brown ish black, basal sand
	BP09Ev2		BP09Ev2			1-2	Black, brow n ish black, brow n ish gray
15-1-5-M 1	15-1-Ev3	15-2-5-1	15-2-Ev3	23.4	20.7		Brown ish black, olive black, basal san d
15-1-5-1	15-1-Ev4	15-2-5-1	15-2-Ev4	3.6	3.5		Brownish gray
15-1-5-1, 15-1-5-2	15-1-Ev5	15-2-5-1, 15-2-5-2	15-2-Ev5	46.6	45.5		Black, olive black, brow nish black, basal sand
15-1-5-2	15-1-Ev6	15-2-5-2	15-2-Ev6	8	6.4		0 live b lack
15-1-5-3	15-1-Ev7	15-2-5-3	15-2-Ev7	16.2	4.3		Brown ish gray, yellow ish gray
15-1-5-4	15-1-Ev8	15-2-5-4	15-2-Ev8	0.5	1.2		Brown ish black
15-1-5-4	15-1-Ev9	15-2-5-4	15-2-Ev9	2	2.5		Brown ish black
15-1-5-4	15-1-Ev10	15-2-5-4	15-2-Ev10	0.9	0.9		Brown ish black
15-1-5-4	15-1-Ev11	15-2-5-4	15-2-Ev11	0.6	0.7		B lack
15-1-5-4	15-1-Ev12	15-2-5-4	15-2-Ev12	0.7	1.6		Brown ish black
15-1-4-M 1	15-1-Ev13	15-2-4-1	15-2-Ev13	1.1	2.8		B lack
15-1-4-1	15-1-Ev14	15-2-4-1	15-2-Ev14	8.5	10.2		Brown ish gray, brown ish black
15-1-4-2	15-1-Ev15	15-2-4-2	15-2-Ev15	22.7	15.4		Black, olive black, basal sand
15-1-4-2	15-1-Ev16	15-2-4-2	15-2-Ev16	8.9	4.4		0 live b lack
15-1-4-4	15-1-Ev17	15-2-4-4	15-2-Ev17	2	2.2		Yellow ish gray
15-1-4-4	15-1-Ev18	15-2-4-4	15-2-Ev18	5.6	6.7		G ray
15-1-4-4	15-1-Ev19	15-2-4-4	15-2-Ev19	1.4	1.1		G ray
15-1-3-4	15-1-Ev20	15-2-3-4	15-2-Ev20	2.3	1.3		Brown ish black, brown ish gray
15-1-3-4	15-1-Ev21	15-2-3-4	15-2-Ev21	6	6.3		0 live black, gray, basal san d
15-1-2-2	15-1-Ev22	15-2-2-2	15-2-Ev22	6.8	9.2		Black, gray, basal sand
15-1-2-2	15-1-Ev23	15-2-2-2	15-2-Ev23	4.8	6.5		Yellow ish gray, basal sand
15-1-2-2	15-1-Ev24	15-2-2-3	15-2-Ev24	1.4	2.5		Brown ish black, gray, basal sand
15-1-2-2	15-1-Ev25	15-2-2-3	15-2-Ev25	1.6	1.3		B lack
15-1-2-3	15-1-Ev26	15-2-2-4	15-2-Ev26	1.9	1.7		Brown ish black
15-1-2-3	15-1-Ev27	15-2-2-4	15-2-Ev27	2.1	2		Black, brown ish black, basal sand
15-1-2-3, 15-1-2-4	15-1-Ev28	15-2-2-4	15-2-Ev28	7.6	6		Gray, basalsand
15-1-2-4	15-1-Ev29	15-2-1-M 1	15-2-Ev29	2	2.4		Brown ish black, basal san d
15-1-2-4	15-1-Ev30	15-2-1-1	15-2-Ev30	1.1	0.8		G ray
15-1-1-M 2	15-1-Ev31	15-2-1-1	15-2-Ev31	0.7	1.6		0 live b lack
15-1-1-M 1	15-1-Ev32	15-2-1-1	15-2-Ev32	1.9	1.3		Brown ish black
15-1-1-M 1	15-1-Ev33	15-2-1-1	15-2-Ev33	8.5	14.5		Brown ish black, brown ish gray, sand
15-1-1-M 1	15-1-Ev34	15-2-1-1	15-2-Ev34	5.5	7.6		Brown ish black, grayish ye llow, sand
		15-2-1-1, 15-2-1-2	15-2-Ev35		9.7		Yellow ish gray

表 3.1.3 BP15-1、BP15-2、BP09 シリーズのメジャーイベント層の層厚と色

BP15 シリーズの共通深度

別府湾最深部コア試料には、各コア試料の深度にイベント層序に基づく共通深度を与 える方法が用いられている(Kuwae et al., 2013)。共通深度(以下、event/void-free composite core depth、単位は cm ccd) とは、コア間で共通して認められるイベント層 で区切られるある区間を代表する標準コアを定め、連続的に合成した統一深度である。 イベント層の厚さと空隙がコア間で異なるので、共通深度にはそれらを除いた深度とし た。得られた共通深度は、明瞭に同定できるイベント層のコア間対比によって別府湾最 深部のどの地点のコア試料でも、同時間面を示す共通深度を与えることができる。それ によって、地点の異なる各コア試料のイベント層や分析値を共通深度上で相互比較がで き、一本のコア試料では数が限られる二枚貝の¹⁴C年代を共通深度上で年代コントロール を多数入れることができるという利点がある。こうすることにより、高解像度・高精度 年代決定が可能である。共通深度作成には、海底から Evo(深度 82cm ccd) までは BG10-3-1 (図 3.1.49) を、Ev0~Ev17(深度 721.3cm ccd) までは BP09-3 を、Ev17~Ev15-2-20-2 (深度 859.6cm ccd) までは BP15-2 を、Ev15-1-20-2~Ev34 (深度 1602.7cm ccd) まで は BP15-1 を標準コアとした(図 3.1.50)。図 3.1.50 には描いていないが、Ev5の直下 ではコア間対比により BP09-3 でイベント層厚が BP09-5 より 6.3cm 薄くなっており、こ れが混濁流により削剥を受けたためであると考え、 Ev5 直下の 6.3 cm のみ BP09-5 を標 準コアとした。Ev17より下は 10m ピストンコア試料である BP09 シリーズでは見ること ができないため、BP15シリーズを標準コアとした。BP15シリーズで標準コア試料が2本 にまたがる理由は、BP15-1の試料の Ev17から Ev15-2-20-2の間には空隙が3つあり、 さらにコアセクション(4m毎に切った試料)間での試料の伸びがあること、BP15-2の Ev34から Ev35 間は Ev35 (K-Ah 火山灰層に対比される) 付近の層準にコア採取時の乱れ があるからである。標準コア以外のコアについても、対比可能なイベント層間の厚さの 比を用いて、その間の各種分析値の層準の共通深度を求めた。



図 3.1.49 BG10 シリーズの CT 画像とイベント層対比



図 3.1.50 共通深度を設定した標準コア。共通深度は、イベント及び空隙の厚さを除いている (event/void-free composite core depth)。

年代測定結果と年代モデル

BP15 シリーズの二枚貝の¹⁴C年代と深度を表 3.1.4 に示す。得られた試料の暦年と 共通深度を、図 3.1.51 に示す。Event 3 から Event 17 の間で新たに測定した年代は、 ウィグルマッチ年代決定法で得られた年代モデルと調和的であった。得られた年代モデ ルから堆積速度を計算した(図 3.1.52)。表層から深度 12.02m ccd (4505 cal BP)ま での堆積速度は 0.24~0.30 cm/yr、それ位深は 0.12~0.19 cm/yr を示し、深度 12.02m ccd を境に堆積速度が速くなることがわかった。得られた Age-composite core depth モデ ルから、すべてのメジャーイベント層及びマイナーイベント層の年代を求め、表 3.1.1、 表 3.1.2 に示した。また、Age-composite core depth モデル上にイベント層の年代と共 通深度をプロットしたものを図 3.1.53 に示した。

表 3.1.4 ¹⁴C 年代測定結果

Sam ple ID	Raw core depth (cm)	Void/event-free depth(cm)	Composite core depth (cm.) Type	Age	Age Err	calBP (mid point)	2σerr	Receipt ID
15-1-5-3, 83-85	308	210.1	318.8 M ollusc	1,690	15	1,122	86	140985
15-1-4-1, 9.4-11.1	455.6	352.3	462.6 M ollusc	2,190	15	1,619	83	140078
15-1-4-1, 69-70	515.2	403.2	516.0 Mollusc	2,310	15	1,773	80	140336
15-1-4-1, 89.9-92.7	536.2	424.5	534.7 M ollusc	2,350	20	1,806	89	140986
15-1-3-1, 40-43	903.1	742.8	832.1 Mollusc	3,390	25	3,083	119	134031
15-1-3-2, 57-59.5	1020.1	859.1	949.9 Mollusc	3,760	20	3,526	91	140075
15-1-3-2,62-65**	1025.1	865.2	956.0 M ollusc	3,820	20	3,590	97	140076
15-1-3-2,65-68	1028.1	867.8	958.6 Mollusc	3,790	20	3,557	98	140077
15-1-3-3, 38-40*	1101.6	940.7	1031.5 M ollusc	3,970	20	3,783	97	134032
15-1-2-1, 38-40	1321.6	1146.4	1237.2 M ollusc	4,710	20	4,773	83	140074
15-1-2-3, 47	1531.9	1347.6	1438.4 M ollusc	5,890	20	6,181	85	134035
15-2-5-3, 25-27	244	142.2	250.9 M ollusc	1,410	20	819	81	140984
15-2-2-1, 29.4-31.5	1284.7	1123.5	1202.6 M ollusc	4,500	20	4,505	95	140987
15-2-2-1, 55-57	1310.3	1147.8	1225.8 M ollusc	4,640	20	4,702	106	134033
15-2-2-1, 81-84	1336.4	1175.5	1251.5 M ollusc	4,780	20	4,879	73	140988
15-2-2-2, 17-20	1373.1	1212.3	1285.7 M ollusc	4,960	20	5,129	126	134034
15-2-2-3, 6-8	1460.5	1282.7	1355.2 M ollusc	5,260	20	5,503	72	140989
15-2-1-3, 96-98**	1973.5	1732.2	1793.8 M ollusc	5,670	30	5931	100	134036

*CT画像で未確認 **年代の逆転を示す試料。

年代測定結果と年代モデル



図 3.1.51 二枚貝試料の暦年と共通深度。実線は暦年-共通深度モデル



図 3.1.52 別府湾最深部標準コア試料の過去 7300 年間の堆積速度



図 3.1.53 メジャーイベント層の発生時期

iv) **考察**

メジャーイベント層の年代

最初に述べたように、イベント層は豪雨や地震・津波などのイベントの情報を持つと 考えられ、再来間隔などの貴重な情報が別府湾から得られることが期待される。以下に 述べるように、10cmを超えるタービダイト層は大規模な海底斜面崩壊によって形成され た可能性があり、地震イベントである可能性が高い。Kuwae et al. (2013)で ID が付与 されたメジャーイベント層のうち、Event 3、Event 5、Event 15 がそれに相当し、¹⁴C ウィグルマッチ年代決定法によって、Event 3の年代は344 cal. BP となり、このイベ ント層の年代は慶長・豊後地震の年代に近いことがわかった。Event 5、 Event 15 につ いても、on-fault における断層活動履歴を照らし合わせると断層活動の年代と良く一致 する(Yamada et al., 2016). 2015年の調査から、別府湾沿岸部では、海底斜面崩壊で 形成されたと見られる海底斜面の凹凸や流山が多数認められるが、こうした斜面崩壊が 最深部の厚いイベント層形成の原因であった可能性がある。慶長・豊後地震では、かつ て存在していた陸(砂州)の一部(瓜生島として知られる)が突如海に沈んだという伝 承があるが、その痕跡が海底の流山やタービダイト層として残っているとしても不思議 ではない。年代モデルに基づくと、Event 5 は 613 cal. BP、Event 15 は 1877 cal. BP と推定され、260年から1260年の間隔で厚いタービダイト層が形成されていることにな る。一方、Event 15 以深では、10cm を超えるタービダイト層は Event 33 のみであった。

Event 19から Event 22までは、メジャーイベント層が少なく、イベントの空白期間 が認められ、Event 19より上位と Event 22より下位に、イベント層が多数認められる 期間があるようである。このように、メジャーイベントの頻度に注目すると、3つのゾ ーンに分けられる。こうした空白期間は、地震イベントが少なかったことを意味するの かについて、今後検討する必要があるだろう。タービダイトの堆積場の変化やデルタフ ロント前進の停滞のような地形的環境変化によって、比較的規模の大きい地震でもマイ ナーイベント層として記録される可能性を否定できないからである。また、大規模な地 震で形成されると考えられる厚さ 10cm を超えるイベント層も、こうした周辺の環境変化 によって 10cm 以下の厚さのタービダイト層として記録されているかもしれない。Event 21より下位は、それより上位に比べて堆積速度が遅く、なんらかの環境の変化を示唆し ている。

メジャーイベント層と海底活断層の活動時期との関係

なお、on-fault で認められてきた(1)500~1000 yr BP (0~615 cal. BP、 MARINE04 で Δ R=135±20 yr (Kuwae et al., 2013)で計算.以下同様)、(2)1900~2500 yr BP (1000 ~2340 cal. BP)、(3)4000~4500 yr BP (3540~4820 cal. BP)、(4)5000~5400 yr BP (4880~5850 cal. BP)、(5)5400~6700 yr BP (4820~7680 cal BP)の断層活動時期(石 辺・島崎, 2005;地震予知研究協議会, 2002)に対応するイベントは、それぞれ、(1)Event 0~Event 5、(2)Event 8~Event15、(3)Event 20及びEvent 21、(4)Event 22、(5)Event 22からEvent 34までのイベント層が候補に入る。このうち、海底活断層調査から複数 地点で得られた主要な断層活動時期にあたる(1)にはEvent 3とEvent 5、(2)にはEvent 15、(5)にはEvent 33と年代が一致し、厚さ10cm以上のメジャーイベント層の年代が別 府湾における主要活断層発生期と一致した。この結果に従えば、別府湾最深部で認めら れたこれらの厚いタービダイト層は、別府湾の主要な断層活動と関連して形成された可 能性がある。

v)まとめと課題

20m 級ピストンコア試料の岩相記載と各種分析から、これまで不明であった 2800 年前 から 7300 年前の別府湾最深部のイベント層の存在が明らかとなった。これにより、過去 7300 年間をカバーするイベント層序が確立された。厚さ 10cm を超えるイベント層は、 この期間で4枚認められた。これら4枚のタービダイト層の年代は、海底活断層調査か ら複数地点で得られた3つの主要な断層活動時期(石辺・島崎, 2005; 地震予知研究協議 会, 2002)と一致した。大規模な混濁流は断層活動による大規模な海底斜面崩壊によって 起こりうるので、今回の結果は極めて整合的であると考えられる。今回の解析の新たな 知見として、7256 cal. BP に起こった Event 33 が別府湾周辺の主要な地震イベントの候 補であると考えられた。

別府湾に注ぐ大分川・大野川前面、高崎山前面、別府市前面の海底地形には、大規模 な地震と関連付けられる斜面崩壊地形や流山のような海底地形が多数存在することが重 点的な調査観測により明らかになってきた。今後イベント層の鉱物組成や集水域・別府 湾表層堆積物の特徴を詳細に調べ、明らかにすることにより、イベント層の供給源を特 定できる可能性がある。また、Event 5 にみられる 2 つ帯磁率のピーク(二つの級化構造のセット)(Kuwae et al., 2013)に示唆されるように、一枚のイベント層の中にも連続した複数のイベントが見えるイベント層もあり、これが複数の供給源からの混濁流がわずかな時間差で堆積したものであるとすれば、それぞれの起源域の特定がイベントの特性やどの断層が動いたか等を理解することにつながる可能性がある。

上述した厚さ10㎝を越えるイベント層以外のイベント層の中にも地震イベントが存在 するかもしれないが、混濁流の発生原因は地震だけではなく、洪水等の様々な発生原因 が考えられる。現状では混濁流の発生原因は地震だけではなく、洪水等の様々な発生原 因が考えられる。各イベントの中から地震イベントであると特定するのは困難を伴うが、 上述のような各イベント層の鉱物・化学組成等の詳細な分析や発生場所の検討が、最終 的には地震イベントの特定や地震活動履歴の解明に役立てられるかもしれない。たとえ ば、イベント層の詳細な characterization は重要である。有機物だけでなく、例えば最 近津波堆積物でやられてきている遺伝子解析とか、ITRAX の無機化学も含めて実施する ことにより、「地震」と特定することは困難でも、明らかな洪水を排除することはでき ると考えられる。また、今回熊本地震対応で実施したような大きなイベント発生直後の 調査である。これを上記の characterization と合わせることで、解釈はかなり向上する と考えられる。さらに調査の方からみると、今回の海底地形詳細調査で見つけたような 崩壊地形の場所で崩壊堆積物を貫くところまでの「海上掘削」コア採取は崩壊を起こす ようなイベント(大分川デルタ前面を除けば、ほとんどは地震と考えてよいのでは?) の時期の特定に貢献できると考えられる。イベントの年代精度については、Event 15 より 下位の年代は、年代制約が少ないために¹⁴C ウィグルマッチ年代決定法による高精度な年代 決定ができていない。イベントの発生時期と発生頻度をより高精度で求めていくためには、 さらに多数の年代値を入れ、¹⁴C ウィグルマッチ年代決定法による年代決定を行う必要があ るだろう。

謝辞:別府湾堆積物研究グループのメンバーと各研究室の大学生・大学院生には、サン プリング後のコア試料の分割や定例会議での有意義なコメントを頂いた。ここに感謝の 意を表します。本研究のコア解析の一部は、高知大学海洋コア総合研究センターの全国 共同利用(採択番号:15A035, 15B058)によった。

66

d) 2016 年 4 月 16 日の別府・由布院における震度 6 弱の揺れの別府湾堆積物への影響(池 原・竹村・原口)

別府湾湾奥の海底堆積物コアには明瞭な侵食面から始まり、上方細粒化する"イベン ト層"が挟在する (Kuwae et al., 2013; Yamada et al., 2016) 。ほとんどの"イベン ト層"は細粒タービダイトの構造をもち、混濁流からの堆積したものである。混濁流の 発生原因としては、地震による海底地すべり、地震動に伴う表層堆積物の懸濁、津波、 過剰堆積、暴風時の大波、河川洪水流の水域への流入、火山活動、地球外物質の衝突な どが上げられる (中嶋, 2000; Goldfinger et al., 2012; Pickering and Hiscott, 2016). 最近、三陸沖の海底の継続観測から2011年東北沖地震の余震(Mw 7.3)により海底表層 堆積物の巻き上がり現象が観察され(Oguri et al., 2016)、また、地震性タービダイ トが最表層部の海底堆積物の再移動起源であることが指摘されている(Ikehara et al., 2016; McHugh et al., 2016; Moernaut et al., in press)。地震動に対する海底斜面 の応答は、地震動の大きさ、斜面の傾斜、構成する堆積物の粒度や粒子組成などによっ て場所によって変わると考えられる。したがって、強い地震動により対象とする海域の 海底表層で何が起こるかを確認することは、"イベント層"の成因の理解に重要な情報 となる。別府湾周辺では、2016年4月16日熊本地震の際に誘発された由布院付近を震 源とする地震により、由布院や別府市で震度6弱を観測した。上述のように東北沖地震 の M7.3 の余震で海底表面で巻き上がり現象が確認されたことから、震度6弱の地震で別 府湾内に擾乱が起こるか否かを確認することは、別府湾奥コアの"イベント層"から過 去の地震を読み解く際に重要な基礎データになる。そこで別府湾内において、表層堆積 物コアの採取を試みた。

i) 試料採取地点と方法

表層コア試料は別府湾でこれまで海底コア試料あるいは表層堆積物試料が採取されて いる地点を候補地点として複数選択した。試料の採取は HR 型式採泥器を用い、地点で実 施した。結果として、別府市沖の 15-3、高崎山沖の st.5、大分川河口沖の 15-7 の 3 地 点で表層コア試料を採取できた。採取されたコア試料は、乱れないように十分な注意の 上で京都大学地球熱学研究施設に輸送し、冷蔵保管した。冷蔵保管された試料は、深度 方向に半割後、断面写真撮影、肉眼記載と軟 X 線構造解析用のスラブ試料とコア最表層

(深度 0-0.7cm:15-3 surface) とその下位の通常時の堆積物(深度 1-2cm:15-3 sub-surface)部分から鉱物組成用試料を採取した。スラブ試料は、茨城県つくば市の産業技術総合研究所において軟 X線発生装置(ソフロン SRO-i503-2)とNaIシンチレータ 式デジタル X線画像センサー(RFシステム NX-04SN)を用いて、軟 X線透過画像を取得した。また、鉱物組成分析は北海道大学大学院地球環境科学院所有の X線回折装置(マックサイエンス社 MX Labo型(モノクロメータ付))を用いて、CuK a 管球、40kV、20mAで、2-40°20の範囲を4°20/分の条件で測定し、得られたプロファイルを0.34°20 窓幅のガウシアンフィルタで平滑化し、バックグラウンド除去後、各鉱物の主要ピーク 高を評価することで含有鉱物の相対量を求めた。 ii)結果と考察

3地点から採取された試料のうち、2地点(15-7及び St.5)の堆積物は生物擾乱の発達したシルト質泥であり、別府湾奥コアの葉理の発達した珪藻質粘土とは異なった。したがって、この2地点は湾奥部と堆積環境が異なり、湾奥コアの"イベント層"の評価には使えない。一方、残りの湾奥コア採取地点の近傍から採取された 15-3 は、葉理の発達した珪藻質粘土からなり、堆積環境は同じであると考えられる。

15-3 コアは最表層まで珪藻質の葉理が認められ、湾奥コアの"イベント層"に粗粒層、 上方細粒化する塊状の泥、基底の明瞭な侵食面などは確認できない(図 3.1.54 A, B)。 湾奥コアの"イベント層"は粗粒層から塊状の泥まで石英/長石比、灰長石/曹長石比 がともに低いという特徴を持っている(入野・池原,未公表データ)。X線回折分析結 果は最表層(15-3 surface)、表層下(15-3 subsurface)の試料とも、石英/長石比、灰長 石/曹長石比とも別府湾表層堆積物の範囲に入る(図 3.1.54 C)。以上の結果は、一連 の熊本地震時で由布院・別府市で体験した震度6弱の揺れでは、別府湾湾奥部に"イベ ント層"を形成しなかったことが明らかとなった。

今回の結果は、別府湾において震度6弱の揺れでは"イベント層"は絶対に形成され ない、と言い切れるものではない。しかし、2016年4月16日熊本地震の際に誘発され た由布院付近を震源とする地震により生じた由布院や別府市での震度6弱の揺れでは "イベント層"が形成されなかったという事実は重要である。一方、別府-万年山断層系

の活動である慶長豊後地震に年代的に対応する"イベント層"は湾奥コアからすでに報 告されており、その層厚は30cmと厚い(Yamada et al., 2016)。以上のことは、別府-万 年山断層系の大きな活動では別府湾湾奥部に厚い"イベント堆積物"を堆積させうるが、 今回の規模のような近傍の内陸断層の活動では厚い"イベント層"は形成されにくいこ とを示している。別府湾湾奥部における"イベント層"の形成には別府-万年山断層系の 他に、南海地震やそれに伴う津波、大型洪水に伴う急激かつ大量な陸起源土砂の別府湾 への供給が考えられる。別府湾湾奥コア中の"イベント層"から別府-万年山断層系の活 動を抽出し、湾奥コアから別府-万年山断層系の活動履歴をより正確に把握するためには、 大型出水(洪水)や南海地震などの直後に別府湾湾奥でそれに関係した堆積物の形成が 起こったかどうか、そして、どのような堆積物が形成されたかという事実データの蓄積 が重要である。



図 3.1.54 別府湾表層コア 15-3 の特徴。A: コア断面写真、B: 軟 X 線透過画像、C: XRD 分析から求めた鉱物組成。

3) 伏在部の調査 (サブ 1-3)

別府扇状地南東部および大分平野西部に伏在する別府-万年山断層帯(図 3.1.55)の 最新活動時期を解明し、将来の地震発生を長期予測するために古地震の発生間隔および 平均変位速度といった活動履歴を評価するために、平成 26 年度に別府扇状地で 2 本と同 27~28 年度に大分平野で 8 本のボーリングコア掘削を実施して、それらで得られた堆積 物試料を分析した(文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科, 2015-2016; Nakanishi et al., 2017)。また、同活断層群周辺で得られている既存のボーリングコア 2 試料の分析を追加して、断層活動の履歴復元に関する解釈の信頼性を高めた(中西・他, 2015)。さらに、平成 28 年度に大分平野西部において断層近傍の極浅層(深さ 5 m 程度 まで)の地下構造を可視化するために、地中レーダ探査を実施した。



図 3.1.55 調査地域の地形と活断層。A:別府-大分地域の標高段彩図(国土地理院の 数値地図を基にしてカシミールで作成)と活断層(地震調査推進本部、2005)。B:別府 扇状地の地形分類と活断層。地形分類は国土地理院(2011)、活断層の分布は千田・他 (2001)および岡田・他(2001)による。C:大分平野の地形分類図と活断層。地形分類 は国土地理院(2011)、活断層の分布は岡田・他(2001)および地震調査推進本部(2005) による。

結果の概要:別府扇状地南部の朝見川断層周辺の浜脇〜朝見地区で2本のボーリング調査を実施すると共に、それらの周辺の2本の既存試料を追加分析した。その結果、上位から人工盛土、現世河川〜砂丘堆積物、塩性湿地〜浅海底堆積物、網状河川堆積物を認定した(文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科,2015;中西・他,2015)。その中で浜脇地区において 600 cal BP 以前に形成された氾濫原堆積物が現海面下 3~4 m

に埋没していることを認定して、同時期以降に沈降イベントがあったと推定した。この 時期には西暦 1596 年の慶長豊後地震時に同地域において甚大な被害が報告されている。 それ以前の沈降イベントを示唆する現象として朝見地区において 1900 cal BP頃に堆積速 度の急増を認定した。両イベントが共に朝見川断層の活動によるものならば、同断層の 活動間隔は 1500 年程度となる。最後に、浜脇地区の朝見川断層を挟んだ地質地形断面の 鬼界アカホヤ火山灰層の標高差に基づいて、5.2 mm/yr 程度の平均上下変位速度を推定し た。

一方、大分平野西部の府内断層周辺において8本のボーリング調査と2測線の地中レ ーダ探査を実施して、上位から人工盛土、デルタプレーン、デルタフロント、プロデル タ、エスチュアリー、網状河川流路の堆積物を認定した(文部科学省研究開発局・京都 大学大学院理学研究科, 2016; Nakanishi et al., 2017)。府内断層の低下側におけるデル タプレーン堆積物の上部には 400 cal BP 頃に形成された厚さ数 10 cm の泥層が標高-0.5 ~1.0 mに連続的に分布する。この泥層は断層の上昇側には連続せず、800 cal BP頃に形 成された泥層が分布する。断層の上昇側の泥層の珪藻化石群集組成は、断層の上昇側よ りも海の影響を強く受けている。これらを根拠に800~400 cal BPの間に地表変位があり、 その古地震イベントは西暦 1596 年の慶長豊後地震に相当する可能性を指摘した。一方、 同地域のデルタフロント堆積物の上部にあたる標高-4~-8 m において 2000~2200 cal BP の植物片を含んだ厚さ 2~4 m の泥層もボーリング調査と地中レーダ探査で確認した。こ の泥層の上面は断層を挟んで3~4 m程度標高差があり、上位にある断層の上昇側の泥 層の珪藻化石群集の方が低下側よりも塩水の影響が大きかった。したがって、2000 cal BP 以降に少なくても3~4 mの上下変位を生じさせた古地震が推定できる。以上をまとめ ると府内断層の古地震の再来間隔は少なくても 1200 年程度であると考えられる。最後に 大分市中島西地区周辺において府内断層を挟んで、海水準上昇期の内湾泥層に挟在する 鬼界アカホヤ火山灰層が 20m、約 18000 年前の沖積層基底礫層の上面が 47m上下方向 に分布深度が違っていることを根拠にして、同断層の平均上下変位速度を 2.6~2.7 mm/yr と推定した。

a) 珪藻化石の群集組成解析および放射性炭素年代測定

珪藻群集組成解析:

別府地域のYMP、BHM、HMP コア(表 3.1.5)の各6層準および大分地域のKUO1コ アの18層準とOFC19と20コアの各4層準から採取した細粒部においてパリノ・サーヴ ェイ株式会社に依頼して珪藻化石の群集組成を解析した。分析手順は概ね以下の手順で 実施された。半裁面から採取した半乾燥試料3gをビーカーに採取して乾燥させた後、 重量を測定した。その後、10%H₂O₂と1規定HCl水溶液で洗浄した後、中性になるまで 上澄み液を廃棄した。残渣をカバーガラスに滴下して乾燥させた後、プリュウラックス 封入剤を用いてプレパラートを作成した。それらを油浸 600~1000 倍で検鏡して 200 個 体以上の珪藻化石を同定・計数した。珪藻の同定と種の生態は Round *et al.* (1990) など を参考にした。

Core	Latitude, N	Longitude, E	Altitude, m	Depth, m
YMP	33° 16'10"	131° 30'06"	5.37	0-22
HBP	33° 16'05"	131° 30'35"	3.86	0-20
BHM	33° 16'10"	131 [°] 30'32"	2.30	0-20
HMP1	33 ° 16'08"	131 [°] 30'40"	4.50	0-10
HMP2	33 ° 16'08"	131 ° 30'40"	4.67	9-30
HMP3	33 ° 16'08"	131 ° 30'40"	4.67	0-9

表 3.1.5 別府地域のボーリングコア掘削地点の位置と深度。

放射性炭素年代測定:

地層の形成年代を詳しく検討するために加速器質量分析(AMS)法による放射性炭素 年代測定を韓国地質資源研究院(KIGAM)と地球科学研究所(BETA)で合計 99 試料に おいて実施した。半裁したコア試料の表面の中で、コア境界以外で変形構造がみられな い層準において植物片と貝殻を採取した。それらを目開き2mmのステンレス製の篩を 用いて水洗した。壊れやすい薄い貝殻や植物片、合弁の貝殻は種類別に超音波洗浄をし て秤量した後、保存状態のよいものを選定した。植物片は一年毎に更新される葉や小枝 などの中で保存状態のよいものを優先し、貝殻片は深度ごとで特徴的に産出する優先種 を選定した。合計83試料は蒸留水と超音波洗浄機で丁寧に洗った後、植物片と貝殻片に 分けて以下の手順で処理した。一規定の塩酸および水酸化ナトリウム水溶液によって酸 ―アルカリ―酸の順で 60℃のヒーター内で溶出分がなくなるまで繰り返し反応させて表 面の汚染を除去した。一方、貝殻片は濃度のうすい塩酸と過酸化水素の水溶液によって 重さが 80%程度になるまで反応させて表面の汚染を除去した。化学処理が終わった試料 は KIGAM の元素分析計によって燃焼させて、自動還元処理装置(Hong et al., 2010a)を 用いて二酸化炭素を取り出してグラファイトを精製した。アメリカ国立標準技術研究所 のシュウ酸 OX II と国際原子力機構の標準試料(C1、C7、C8)、阿蘇4 火砕流の埋没材 (大分県教育委員会, 2009) も同様に処理してグラファイトを精製した。これらの炭素 同位体比を KIGAM の AMS システム(Hong et al., 2010b)を用いて測定して年代値を算 出した。その際の同位体分別補正には AMS で測定された δ^{13} C 値を用いた。残りの 16 試 料は BETA に測定を依頼した。年代値を暦年較正する際には Calib7.10(Stuiver and Reimer, 1993) および INTCAL13(Reimer et al., 2013)を用いた。

b) 別府扇状地でのボーリング調査の概要

別府扇状地南東端にあたる別府市浜脇地区の埋立地で正味 30 m 長の HMP1-3 コア、そ こから約 900 m 西方の朝見川の上流側で 20 m 長の YMP コアを掘削して(表 3.1.5;図 3.1.55B)、岩相、岩相境界の特徴、堆積構造、粒度、構成粒子の支持様式、含有物、色 調、珪藻化石群集組成を検討した(文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科, 2015)。これらの掘削地点の間の砂丘では各 20 m 長の BHM および HBP コアが掘削され ており(表 3.1.5; 中西・他, 2015)、それらの珪藻化石群集組成を追加解析した。合計 29 試料の珪藻化石の分析結果(図 3.1.56)を踏まえて堆積環境を再検討して、この地域 の沖積層を上位から人工盛土、現世河川~砂丘堆積物、塩性湿地~浅海底堆積物、網状 河川堆積物に区分した(図 3.1.57)。これらの堆積物から採取した植物片合計 38 試料 から得られた加速器質量分析法による放射性炭素年代値(表 3.1.6)を基に、堆積物の 形成年代を推定した(図 3.1.58)。以上のデータを基にして朝見川断層の最新活動時期 および活動間隔、平均変位速度を解釈した根拠を以下に述べる。



図 3.1.56 朝見川断層の低下側の珪藻化石群集組成。Mar.は海生、Bra.は汽水生、Fre. は淡水生種をそれぞれ示す。



図 3.1.57 朝見川断層の低下側の堆積システム。



図 3.1.58 朝見川断層の低下側の堆積曲線

		Depth		Elevation		s13 C	Conven	tional	Calibra	ted	Sample code
	Medium	Тор	Bottom	Medium		0 1	¹⁴ C age		¹⁴ C age		B: BETA,
Core	(m)	(m)	(m)	(m)	Material	(‰)	(BP)	(+/- yr)	(cal BP)	(+/- yr)	N: NIES- TERAA K: KGM-OTg
НМР	6.425	6.40	6.45	-1.925	Wood, plant fragments	-26.7	540	30	570	60	B-405852
НМР	12.695	12.69	12.70	-8.025	Leaf, seed	-29.5	1760	30	1650	80	B-404975
НМР	14.055	14.05	14.06	-9.385	Plant fragments	-27.0	2020	30	1970	70	B-404976
НМР	17.855	17.85	17.86	-13.185	Leaves	-28.4	2630	30	2760	20	B-404977
НМР	19.775	19.77	19.78	-15.105	Woods, leaf, twig	-27.8	3170	30	3400	50	B-404978
НМР	22.525	22.52	22.53	-17.855	Leaves, twigs	-29.2	4470	30	5130	160	B-404979
НМР	26.10	26.09	26.11	-21.43	Twigs, woods	-27.6	5950	30	6780	80	B-404980
НМР	29.96	29.95	29.97	-25.29	Twigs	-14.6	7460	30	8280	90	B-404981
YMP	4.585	4.58	4.59	0.785	Leaves	-28.9	910	30	830	90	B-404662
YMP	5.21	5.20	5.22	0.16	Plant fragment	-27.9	1195	31	1160	80	K-170040
YMP	5.765	5.76	5.77	-0.395	Leaves	-28.5	1840	30	1790	80	B-404663

表 3.1.6	別府地域で行	得られた放射	性炭素年代值。	*は中西・催	也 (2015)	より引用
---------	--------	--------	---------	--------	----------	------

YMP	7.405	7.40	7.41	-2.035	Twigs, leaves	-28.0	1860	30	1800	80	B-404664
YMP	7.84	-	-	-2.47	Twig	-27.3	1914	31	1840	100	K-170041
YMP	7.915	7.91	7.92	-2.545	Twig	-28.2	2060	32	2030	90	K-170042
YMP	8.49	-	-	-3.12	Wood	-27.2	2196	31	2230	80	K-170043
YMP	9.99	9.98	10.00	-4.62	Twigs	-29.9	3940	30	4420	80	B-404665
YMP	11.24	11.23	11.25	-5.87	Plant fragment	-28.2	6157	37	7060	100	K-170044
YMP	11.855	11.85	11.86	-6.485	Wood fragments	-26.0	6780	30	7210	50	B-404669
YMP	12.125	12.12	12.13	-6.755	Plant fragment	-25.8	6178	39	7060	110	K-170045
YMP	14.585	14.57	14.60	-9.215	Plant fragments	-27.4	6250	30	7630	50	B-404666
YMP	15.82	15.80	15.84	-10.45	Plant fragments	-27.7	6680	30	7550	40	B-404667
YMP	18.91	18.90	18.92	-13.54	Leaves	-30.9	7550	30	8630	30	B-404668
НВР	1.56	1.55	1.56	0.73	Charcoal	-28.5	340	30	390	90	N-b060206a05*
HBP	10.61	10.59	10.62	-6.74	Plant fragments	-28.0	6090	40	6980	180	N-b060206a06*
HBP	13.65	13.64	13.65	-9.78	Wood	-29.5	6420	50	7350	80	N-b060206a09*
HBP	13.79	13.77	13.80	-9.92	Plant fragment	-29.6	6520	50	7440	110	N-b060206a10*
HBP	16.08	16.07	16.09	-12.21	Plant fragments	-29.5	7030	50	7860	100	N-b060206a11*
HBP	16.29	16.27	16.30	-12.42	Plant fragments	-29.2	7190	70	8020	150	N-b060206a12*
НВР	17.68	17.65	17.70	-13.81	Plant fragments	-28.4	7620	50	8450	90	N-b060206a15*
НВР	18.41	18.38	18.43	-14.54	Plant fragments	-28.6	7680	50	8480	80	N-b060206a16*
BHM	3.79	-	-	-1.49	Charcoal	-27.2	7070	50	7880	90	N-b060206a17*
BHM	5.20	-	-	-2.90	Plant fragments	-25.4	550	30	580	60	N-b060206a18*
BHM	6.62	6.60	6.63	-4.32	Plant fragments	-30.8	1800	40	1720	100	N-b060206a21*
BHM	9.95	9.92	9.98	-7.65	Plant fragments	-29.7	2660	40	2800	50	N-b060206a22*
BHM	15.48	15.45	15.50	-13.18	Plant fragments	-30.5	3940	40	4380	130	N-b060206a23*
внм	16.76	16.75	16.76	-14.46	Leaves	-29.4	4470	40	5130	160	N-b060206a24*
BHM	17.44	17.42	17.45	-15.14	Leaves	-33.4	4740	50	5460	130	N-b060206a27*
BHM	19.16	19.14	19.18	-16.86	Leaves	-27.6	6220	50	7130	130	N-b060206a28*

i) 朝見川断層の最新活動時期

別府市浜脇地区で採取された BHM コアの深度 4.45~6.87 m の植物片を多く含んだ砂 泥互層には逆級化構造が認められる。この層準で採取した泥層には淡水生珪藻が 80%以 上含まれ、海生や汽水生種は認められなかった。一方、深度 5.20 m で採取した植物片は 580±60 cal BP、深度 6.60~6.63 m の植物片は 1720±100 cal BP の年代値を示す(中西・他, 2015)。以上の砂泥互層は、自然堤防帯における氾濫原洪水堆積物の示相堆積構造とし た逆級化(増田・伊勢屋, 1985)が認められ、深度 5.50~6.25 mには Hantzschia amphioxys (Ehr.) Grunow や Nitzschia amphibia Grunow などの淡水生珪藻が 80%以上確認された。こ の含有率は埋立直前の浅海堆積物の珪藻化石群集(HMP コアの深度 5.73m)の淡水生珪 藻(70%未満)よりも高く、海生~汽水生の珪藻化石の含有率も明らかに少ない(図 3.1.56)。したがって、この砂泥互層は陸上で形成されたと考えられるが、現在は海面 下 2~4 m に分布している。このような大規模な相対的海水準の変化は日本沿岸で 580±60 cal BP 以降に報告されていない(田辺・他, 2016)ので、地域的な地殻変動を反映して いると考えられ、調査地点付近で大きな被害をもたらした歴史地震記録として西暦 1596 年の慶長豊後地震(宇佐美・他, 2013)が挙げられる。なお、この砂泥互層は、海生珪 藻を 20%程度含む砂層に覆われるので、580±60 cal BP 以降に海の影響が強い堆積環境へ と急変したことが示唆される。

ii) 朝見川断層による古地震の再来間隔

掃流粒子が卓越する扇状地性の沿岸堆積物からなる別府地域(図3.1.57)では、微化 石による堆積環境推定に適した泥層や、堆積年代の指標となる植物片や貝殻片の含有度 が共に低くて、複数回分の古地震イベントを高精度に解析することは困難であった。そ の中で朝見地区から得たYMPコアの深度5.76~7.84mの堆積速度は41.5mm/yrであり、 その上下の層準の0.8~1.2mm/yrよりも40倍程度も大きいことを明らかにした。この層 準の堆積年代は1800 cal BP頃 BETA-404663、404664、KIGAM-OTg170041)であり、別 府湾北部の豊岡沖断層を挟んで得られたボーリングコアの堆積速度の変化に基づいて推 定された1900 cal BP頃の古地震イベント(Nakamura et al., 1997)の年代と年代測定の誤 差範囲で一致する。なお、先述した Nakamura et al. (1997)の古地震年代は海生生物遺体の 測定値に基づいているので、両堆積年代の同時性を詳しく検討するためには当時の海洋 リザーバー効果の検討が必要である。この年代に朝見川断層が活動してYMPコア掘削地 点で急激な埋積が起こったと仮定すると、先述した慶長豊後地震までの経過年代は1500 年程度になる。

iii) 朝見川断層の平均変位速度

別府扇状地の末端部で朝見川断層を横断する地質・地形断面図を作成すると図 3.1.59 になる。上位から盛り土、河川層、海成層、鬼界アカホヤ火山灰層、下部の河川層、乙 原溶岩と、下位の対比基準ほど朝見川断層の上下変位を大きく受けていると考えられる。 この内、断層の低下側の HBP および HMP 両コアで認定した 7300 cal BP の鬼界アカホヤ 火山灰層の降下層準と断層の隆起側の段丘化した浜田川沿いの平坦面を基準にすると 5.2 mm/yr 程度の平均上下変位速度が推定できる(図 3.1.59)。この値は浜脇地区から約 4.6 km 西方で千田(1995)が同火山灰層を基準に推定した 5.5 mm/yr と同程度になる。


図 3.1.59 朝見川断層を横断する地質地形断面図。HMP コアの掘削地点は断層崖からの 距離を基に断面測線に投影した。

c) 大分平野でのボーリング調査の概要

大分平野北西部の大分市中島西地区で 70 m 長の KUO-1 コアを掘削した(文部科学省 研究開発局・京都大学大学院理学研究科, 2016; Nakanishi et al., 2017; 図 3.1.55C)。こ の掘削地点は府内断層の沈下側にあたり、砂丘と沖積低地の境界部に位置している(国 土地理院, 2010)。同コアの岩相、岩相境界の特徴、堆積構造、粒度、構成粒子の支持 様式、含有物、色調、貝化石と珪藻化石群集組成を検討して、上位から人工盛土、デル タプレーン、デルタフロント、プロデルタ、エスチュアリー、網状河川流路の堆積物を 認定した(Nakanishi et al., 2017; 図 3.1.60)。一方、同地点の約 500 m 南東の府内城に おいて群列ボーリング調査を実施して、10~20 m 長の OFC14~20 の7本のコア試料を採 取して上記と同様の解析をおこなった(表 3.1.7)。同測線では千田・他(2003)によ って群列ボーリング調査が既に実施されているが、今回は府内断層の最新の活動履歴を 詳しく検討することを調査目的とした。これらの内で KUO-1 から 18 試料と OFC19-20 コアから各 4 試料の珪藻化石の群集組成を検討した(図 3.1.61)。一方、KUO-1 から 56 個、OFC14及び 17、19-20 コアから合計 21 個の放射性炭素年代値を測定して(表 3.1.8)、 堆積物の形成年代を推定した(図 3.1.62~図 3.1.63)。以上のデータを基にして府内断 層の最新活動時期および活動間隔、平均変位速度を解釈した根拠を以下に述べる。



図 3.1.60 府内断層を挟んだ沖積層の分布と同断層の平均上下変位速度。



図 3.1.61 府内断層を挟んだ珪藻化石群集組成。Mar.は海生、Bra.は汽水生、Fre.は淡水 生種をそれぞれ示す。



図 3.1.62 KUO1 コアの堆積曲線。海洋リザーバー効果を判別しやすくするために暦年 較正前の年代値を陸源試料と海洋試料を色分けして示す。白抜きの年代値は層序関係と 矛盾があるために堆積曲線を解釈する際に除外した。



図 3.1.63 OFC14、17、19-20 コアの堆積曲線。OFC19 コアは植物片と貝殻の放射性炭素年代値を色分けして示した。

Core	Latitude, N	Longitude, E	Altitude, m	Depth, m
KUO1	33 ° 14'33.9"	131 [°] 36'26.6"	2.38	0-70
OFC14	33°14'25.0"	131°36'45.7"	3.50	0-10
OFC15	33°14'25.3"	131°36'45.6"	3.54	0-10
OFC16	33°14'25.4"	131°36'45.5"	3.58	0-10
OFC17	33°14'25.6"	131°36'45.5"	3.60	0-10
OFC18	33°14'25.1"	131°36'45.6"	3.42	0-10
OFC19	33°14'25.8"	131°36'45.4"	3.58	0-20
OFC20	33°14'24.6"	131°36'45.8"	3.75	0-10

表 3.1.7 大分地域のボーリングコア掘削地点の位置と深度。

表 3.1.8 大分地域で得られた放射性炭素年代値。*は Nakanishi et al. (2017) より引用。

		Depth			Elevation		\$130	Conventional ¹⁴ C		Sample
Core	Core	Medium	Тор	Bottom	Medium	Material	0 1	age		code
		(m)	(m)	(m)	(m)		(‰)	(BP)	(+/- yr)	KGM-Otg-
	KUO1	2.44	2.42	2.46	-0.06	Wood	-29.3	80	30	160166*
	KUO1	2.86	2.84	2.87	-0.48	Plant fragments	-24.8	390	30	160167-1
	KUO1	4.97	4.96	4.98	-2.59	Plant fragment	-30.4	2270	30	160168*

KUO1	5.325	5.32	5.33	-2.95	Plant fragment	-28.5	2070	30	160169*
KUO1	12.77	12.75	12.79	-10.39	Plant fragment	-33.7	5390	50	160170*
KUO1	12.77	12.75	12.79	-10.39	Shell fragments	-12.3	5240	40	160153*
KUO1	13.365	13.35	13.38	-10.99	Shell fragments	0.1	5250	40	160154*
KUO1	17.18	-	-	-14.80	Wood	-23.5	5280	40	160171*
KUO1	18.565	18.56	18.57	-16.19	Seed	-27.6	5100	40	160172*
KUO1	18.80	-	-	-16.42	Wood	-28.9	5130	40	160173*
KUO1	22.72	-	-	-20.34	Wood	-27.0	5280	40	160174*
KUO1	23.82	23.81	23.83	-21.44	Shell	-1.7	5870	40	160155*
KUO1	23.85	-	-	-21.47	Plant fragment	-29.0	5330	40	160175*
KUO1	25.30	25.29	25.31	-22.92	Seed, plant fragment	-28.0	5280	40	160176*
KUO1	26.385	26.37	26.40	-24.01	Shell	-31.9	5400	40	160177*
KUO1	26.385	26.37	26.40	-24.01	Shell	-1.0	5680	40	160156*
KUO1	27.50	-	-	-25.12	Gastropod	0.4	5760	40	160157*
KUO1	28.835	28.83	28.84	-26.46	Plant fragment	-28.9	5490	40	160178*
KUO1	30.905	30.90	30.91	-28.53	Plant fragment	-28.8	5630	40	160179*
KUO1	32.56	-	-	-30.18	Plant fragment	-28.9	5800	40	160180*
KUO1	32.795	32.79	32.80	-30.42	Jointed shell	-1.0	6160	40	160158*
KUO1	34.785	34.78	34.79	-32.41	Plant fragment	-29.8	6020	40	160181*
KUO1	35.65	-	-	-33.27	Plant fragment	-26.5	6130	40	160182*
KUO1	37.96	-	-	-35.58	Wood	-32.0	6320	40	160183*
KUO1	39.475	39.47	39.48	-37.10	Shell	0.2	8130	40	160159*
KUO1	39.515	39.51	39.52	-37.14	Plant fragment	-27.6	7910	40	160184*
KUO1	43.41	43.40	43.42	-41.03	Plant fragment	-27.6	8380	40	160185*
KUO1	43.595	43.59	43.60	-41.22	Shell	-32.4	8150	50	160186*
KUO1	43.595	43.59	43.60	-41.22	Shell	-1.7	8420	50	160160*
KUO1	45.395	45.39	45.40	-43.02	Shell	-1.2	8920	50	160161*
KUO1	46.03	-	-	-43.65	Plant fragment	-26.6	8710	40	160187*
KUO1	48.34	48.33	48.35	-45.96	Shell	-2.1	9360	50	160162*
KUO1	48.58	48.57	48.59	-46.20	Plant fragment	-28.4	8780	50	160188*
KUO1	49.35	-	-	-46.97	Shell	0.6	9510	50	160163*
KUO1	50.17	-	-	-47.79	Wood	-25.5	9250	50	160189*
KUO1	50.92	50.91	50.93	-48.54	Plant fragment	-27.0	9290	50	170016
KUO1	50.92	50.91	50.93	-48.54	Shell	-1.7	9640	40	170050
KUO1	50.30	-	-	-47.92	Plant fragment	-27.6	9260	60	160190*
KUO1	52.33	-	-	-49.95	Shell	-1.3	9710	50	160164*
KUO1	52.51	52.50	52.52	-50.13	Plant fragment	-25.1	9740	60	160191*
						-	_		

KUO1	54.31	-	-	-51.93	Shell	-0.6	9930	50	160165*
KUO1	55.12	55.11	55.13	-52.74	Plant fragments	-26.6	9640	50	170020
KUO1	55.12	55.11	55.13	-52.74	Shell	-1.8	9960	40	170051
KUO1	56.10	-	-	-53.72	Wood	-26.5	9600	50	160192*
KUO1	57.71	57.70	57.72	-55.33	Plant fragments	-29.0	9710	50	170021
KUO1	58.885	58.87	58.90	-56.51	Plant fragments	-27.7	9800	50	170022
KUO1	58.885	58.87	58.90	-56.51	Shell	-1.6	10350	40	170052
KUO1	59.72	-	-	-57.34	Gastropod	-3.4	10310	40	170053
KUO1	59.81	59.80	59.82	-57.43	Plant fragments	-28.3	9980	50	170023
KUO1	61.71	61.70	61.72	-59.33	Plant fragment	-29.2	10030	50	170024
KUO1	61.71	61.70	61.72	-59.33	Bivalve	-3.6	10530	40	170054
KUO1	61.735	61.73	61.74	-59.36	Leaves	-30.0	10030	50	170025
KUO1	64.125	64.12	64.13	-61.75	Wood	-27.1	10090	50	170026
KUO1	66.02	-	-	-63.64	Plant fragment	-27.5	10430	60	160193*
KUO1	66.92	66.90	66.94	-64.54	Plant fragment	-29.6	10390	50	170027
OFC14	2.32	2.31	2.33	1.18	Plant fragment	-26.1	350	30	170001
OFC14	6.44	6.43	6.45	-2.94	Plant fragment	-30.4	1520	40	170002
OFC14	7.855	7.85	7.86	-4.36	Leaf, twig, wood	-23.0	2200	30	170003
OFC14	8.35	8.34	8.36	-4.85	Leaf, twig, wood	-27.4	2350	30	170004
OFC17	7.81	7.80	7.82	-4.41	Plant fragment	-19.8	2130	30	170005
OFC17	8.465	8.46	8.47	-5.07	Leaf, twig, seed	-29.5	2040	30	170006
OFC17	9.11	9.10	9.12	-5.71	Plant fragment	-28.2	2720	30	170007
OFC17	9.635	9.62	9.65	-6.24	Plant fragment	-27.9	2210	30	170008
OFC19	2.635	2.63	2.64	0.96	Wood	-27.2	380	30	170009
OFC19	7.775	7.77	7.78	-4.19	Leaf	-24.7	2040	30	170010
OFC19	8.365	8.36	8.37	-4.78	Twig	-26.7	2110	30	170011
OFC19	12.585	12.58	12.59	-9.00	Wood	-28.7	4500	30	170012
OFC19	13.775	13.76	13.79	-10.19	Shell fragments	-0.6	5240	30	170046
OFC19	14.235	14.22	14.25	-10.65	Plant fragment	-25.2	4870	40	170013
OFC19	14.235	14.22	14.25	-10.65	Bivalve	-1.0	5050	30	170047
OFC19	17.315	17.30	17.33	-13.73	Plant fragment	-31.3	5700	40	170014
OFC19	17.78	17.77	17.79	-14.19	Shell fragments	-1.9	6360	30	170048
OFC19	18.235	18.22	18.25	-14.65	Shell fragment	-5.8	6600	30	170049
OFC20	2.59	2.58	2.60	0.71	Plant fragments	-25.0	850	30	170015
OFC20	4.96	4.95	4.97	-1.66	Plant fragments	-28.7	2110	30	170016
OFC20	6.215	6.21	6.22	-2.92	Plant fragments	-26.7	2210	30	170017

i) 府内断層の最新活動時期

府内断層の最新活動時期を詳しく検討するために同断層を挟んでボーリングの解析結 果を対比した(図3.1.64)。その結果、同断層の低下側では400 cal BP(350~300 BP) 頃の植物片(KIGAM-OTg160167-1、170001、170009)を含んだ厚さ数10 cmの泥層が標 高-0.5~1.0 mに連続的に分布することが確認された。一方、断層の上昇側のOFC20 コア の標高0.7 mにも泥層が認められるが、そこから採取された植物片は800 cal BP(850 BP) 頃の値(KIGAM-OTg170015)を示した(図3.1.63~図3.1.64)。低下側の泥層には淡 水生の珪藻化石が60~80%程度含まれるが、上昇側には40%しか淡水生種は含まれず、 汽水生種が卓越する(図3.1.61)。このように府内断層を挟んで異なる泥層がほぼ同じ 標高に分布しており、こうした構造が形成されたのは800~400 cal BPの間と考えられる。 また、断層の上昇側の泥層がより深い堆積環境の珪藻化石群集組成を示すので、800 cal BP以降に断層活動によって持ち上げられたことが示唆される。したがって府内断層にお いても西暦1596年の慶長豊後地震によって地表面に変位が生じた可能性がある。



図 3.1.64 府内断層を挟んだ地質断面。既存のコア情報は千田・他(2003)に基づく。

ii) 府内断層による古地震の再来間隔

図 3.1.64 のように 2000~2200 cal BP(2000~2200 BP)の植物片(KIGAM-OTg160169、 170003、170006、170008、170010-11、170016-17)を含んだ厚さ 2~4 mの泥層が標高-4 ~-8 mに連続的に分布している。この泥層も珪藻化石群集組成が断層を挟んで異なって おり、低下側では淡水生種が 60~80%程度含まれるが、上昇側には淡水生種は 50%程度 しか含まれず、汽水生種が多く含まれる(図 3.1.61)。図 3.1.63~3.1.64 のように OFC19 および 20 コアの標高-4~-8 mの泥層の上面標高は 3~4 m 異なっており、両者の珪藻化 石群集組成は上位にある OFC20 コアの方が海水の影響が大きい(図 3.1.61)。このよう に 2000 cal BP 以降に少なくても 3~4 m の上下変位を生じさせた古地震が推定できる。 この変位量は後述する地中レーダ探査によって可視化された地質解釈に基づくと、最上部の泥層の 800~400 cal BP の間に生じた標高差よりも大きいと考えられる。そのため、府内断層の古地震の再来間隔は少なくても 1200 年程度であると推定される。なお、図3.1.61 の KUO1 コアの深度 0~25 m および 50~70 m の珪藻化石群集組成の変化や、図3.1.62 の同コアの深度 40~50 m の堆積速度の変化も複数回分の古地震イベントを反映している可能性があるので、今後詳しく検討したい。

iii) 府内断層の平均変位速度

図 3.1.60 のように府内断層を挟んで、海水準上昇期の内湾泥層に挟在する鬼界アカホ ヤ火山灰層が 20 m、約 18000 年前の沖積層基底礫層の上面が 47 m 上下方向に分布深度 が違っている。これらが府内断層の上下方向のズレを記録したものであると仮定すると 2.6~2.7 mm/yr の平均上下変位速度が推定できる(Nakanishi et al., 2017)。この値は千田・ 他(2003) が府内断層を挟んだボーリングコアや反射法地震探査で対比した鬼界アカホ ヤ火山灰層の標高差から算出した 2.2~2.5 mm/yr の平均上下変位速度と調和的である。

d) 府内断層近傍の極浅層地質構造

先述した KUO1 コア掘削地点から約 100 m 西方の千代町測線(OCY-01) および OFC 群列ボーリング調査測線から約 50 m 東方の府内測線(OFN-01) において、府内断層の 地表トレース(文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科, 2015) とできるだけ 直交するように地中レーダ探査を実施した(図 3.1.65AB)。これらの2 測線での地中レ ーダ探査プロファイル測定に加え、地中電磁波速度の推定を目的として、ワイドアング ル測定も行った(例えば、物理探査学会、 1998)。ワイドアングル測定地点は OCY-01 測線、OFN-01 測線ともに府内断層の上盤側と下盤側に各 1 地点を設定した。





図 3.1.65 A:千代町および B:府内城周辺における地中レーダ探査測線図。測線の横 に記した数字は測線北端からの距離(単位 m)を示す。図中の赤破線は断層の推定位置 (文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科,2015)を示す。相対低下側にケバ を付している。基図には地理院地図(http://maps.gsi.go.jp)を用いた。

i) データ取得

地中レーダ探査データ取得における主な仕様を表 3.1.9 に示す。データ取得はプロフ アイル測定法(例えば、物理探査学会,1998)およびワイドアングル測定法(例えば、物 理探査学会,1998)によって行った。地中レーダ探査で用いた測定システムはカナダ Sensors & Software 社の pulseEKKO PRO であり、送受信アンテナは同社製の中心周波数 50 MHz 用のものを用いた。

電磁波送受信作業は、千代町地点は 2016 年 5 月 13 日に、府内城地点は 2016 年 5 月 14 日に行った。プロファイル測定でのアンテナの移動はカナダ Sensors & Software 社の SmartCart システム(図 3.1.66)を用いて行い、カートに搭載されている距離計に連動し て 0.4 m 移動するごとに自動的に送受信を行い、データが記録された。取得データの記 録ファイルフォーマットは dt1 形式である。ワイドアングル測定の各測定点では、送信 アンテナと受信アンテナの中間点が共通反射点となるようにして、アンテナ間隔を 0.1 m ずつ離していき、送受信作業を行った(図 3.1.67~図 3.1.68)。それぞれ、オフセット (送信アンテナと受信アンテナの間隔)を 0.2 m から 0.1 m きざみで大きくし、最大 81 トレース(アンテナ間隔 8.2 m)から成るデータセットを各測定点で得た。また、探査測 線の標高計測のために、レベル測量を行った。 表 3.1.9 千代町地点および府内城地点における地中レーダ探査データ取得の際の主な 仕様。

Line	OCY-01	OFN-01			
Instruments	pulseEKKO PRO	pulseEKKO PRO			
	(Sensors & Software Inc.)	(Sensors & Software Inc.)			
Frequency	50 MHz	50 MHz			
No. of scan-points	568	656			
Scan-point interval	0.4 m	0.4 m			
Tx-Rx*	1.0 m	1.0 m			
No. of scans / 1 scan-point	64	64			
No. of samples	250	250			
Sampling intervals	1.6 ns	1.6 ns			
Recording length	398.4 ns	398.4 ns			

* Tx-Rx: offset between transmitter and receiver in GPR profiling.



図 3.1.66 プロファイル測定作業の様子。カートを押して 0.4 m 進むごとに距離計に連動してレーダ送受信が行われ、データが記録される。



図 3.1.67 ワイドアングル測定作業の様子。送信アンテナと受信アンテナを最も近づけ ている状態。



図 3.1.68 ワイドアングル測定作業の様子。このように送信アンテナと受信アンテナの 距離を変えて計測したデータセットから、地下の電磁波速度構造を推定する。

ii) データ処理

探査のデータ処理は、米国 Parallel Geoscience 社製の反射法地震探査データ処理システ ム SPW ver. 2 を用いて行った。データ処理の流れを図 3.1.69 に示す。このような各種の フィルター処理や振幅回復・調整処理を施し、地中レーダ探査断面を得た。また、ワイ ドアングル測定で得られた CMP (common mid-point) アンサンブルデータから地中電磁 波の多層速度構造を推定し、normal move-out 処理、マイグレーション処理、深度変換処 理の際にその速度構造を用いた。これらのデータ処理作業により、マイグレーション処 理を適用した深度変換断面を得た。さらにこれらの断面について、測量データを用いて、 地表面の形状による補正を施し、最終的な探査結果断面を得た。



図 3.1.69 千代町地点および府内城地点で取得した地中レーダ探査データに施したデー タ処理作業の流れ図。

iii) 探査結果

大分市千代町地点における府内断層の地中レーダ探査の結果得られたマイグレーショ ン深度変換断面を図 3.1.70 に示し、その断面に約 100 m 東方で得た KUO1 コアの柱状図 と堆積相の解釈を投影した(図 3.1.71)。これらの断面は相対振幅カラー表示であり、 各断面は深度方向に 5 倍の強調が施されている。地表面の勾配変化と反射断面の連続性 から、府内断層は測線距離 160 付近に伏在していると考えられる。また、ボーリング調 査で同断層の最新活動時期を解釈したデルタプレーン相の標高+1~-1 m において、測線 距離 10~20、50~100、130~150 に北傾斜の反射断面が断続的に認められる。これらは 府内断層の最新活動による地盤低下によってできた堆積空間が陸側から海側へと前進し ながら埋積されたことを反映していると推定される。一方、デルタフロント相でも北傾 斜の反射面が卓越しており、デルタの前進を反映していると考えられる。



図 3.1.70 千代町地点での地中レーダ探査の深度変換断面。深度方向に5倍強調。



図 3.1.71 千代町地点での地中レーダ探査結果の地質学的解釈。深度方向に5倍強調。

次に、大分県大分市府内城地点における府内断層の地中レーダ探査の結果得られたマ イグレーション深度変換断面を図3.1.72に示し、その断面に約50m西方で得たOFC14、 19-20コアの柱状図と堆積相の解釈を投影した(図3.1.73)。地表面の勾配変化と反射 断面の連続性から、府内断層は測線距離180付近に伏在していると考えられる。この断 面においてもデルタプレーン相の標高+1~-1m、測線距離140~160において北傾斜の反 射断面が断続的に認められる。これらも OCY-01 断面でみられたように府内断層の最新活 動による地盤低下によってできた堆積空間が陸側から海側へと前進しながら埋積された ことを反映していると推定される。一方、デルタフロント相の標高-3~-8m、測線距離 120~180でも不明瞭ながら北傾斜の反射面がみられる。この反射面は先述した二回前の 古地震イベントを示す泥層が連続することを反映していると考えられる。



図 3.1.72 府内城地点での地中レーダ探査の深度変換断面。深度方向に5倍強調。



図 3.1.73 府内城地点での地中レーダ探査結果の地質学的解釈。深度方向に5倍強調。

なお、本重点の成果や既往情報の成果のうち、地理的位置情報が必要となる情報(活断層 位置、トレンチ・ボーリング位置、海域探査測線とデータ、反射法探査データ、重力データ、 ボーリングによる構造分布など)を統一的に俯瞰できる情報整理を実施した。

ここでは、既往データおよび本調査観測のデータ群を一元的に可視化し、調査観測結果 の情報を共有できるデータアーカイブを構築した。データ形式はGoogle EarthのKML、KMZ 形式とした。各調査地点、探査測線等のベクトルデータについては、調査観測結果をGoog le Earthのウィンドウ上で確認し、関連する図集データを属性情報として添付した。 以下に、使用したデータの一覧を示し、図3.1.74~図3.1.77にGoogle Earthによる総合デ ータアーカイブの表示例を示す。

【使用データー覧】

1)既往調査・研究データ

- ・ 地震調査研究推進本部:別府-万年山断層帯の長期評価, http://www.jishin.go.jp/ evaluation/long_term_evaluation/major_active_fault/#808
- 大分県:活断層調査データ, http://www.pref.oita.jp/soshiki/13555/ katsudansou-kettuka.html
- ・ 四国電力:伊方発電所 地盤(敷地周辺の地形・地質構造)について、https://www. nsr.go.jp/data/000100933.pdf

・ 七山 太・池田倫治・大塚一広・三浦健一郎・金山清一・小林修二・長谷川 正・杉山 雄一・佃 栄吉,伊予灘~佐賀関沖MTL活断層系の広域イメージングトセグメント区分」, 活断層・古地震研究報告,2,141-152,2002

2) 本調査観測データ(別府湾-万年山断層帯陸域)

- ・ 国土地理院:基盤地図情報数値標高モデル10mメッシュ
- ・ 空中写真判読による活断層分布図
- · 陸域反射法探查
- ・ 重力探査 (ブーゲ異常図)
- GPR (Ground Penetrating Radar;地中レーダー) 探査
- ・ 陸域群列ボーリング調査
- 3) 本調査観測データ(別府湾海域)
- ・ 海底地形測量(ナローマルチビーム測深システム)
- ・ 海域反射法探査(エアガン)
- ・ マルチチャンネル方式 (ブーマー) 音波探査
- シングルチャンネル(サブボトムプロファイラー)音波探査
- ・ 海底堆積物調査 (ピストンコアコアリング方式)
- ・ 海底堆積物調査 (グラビティコアリング方式)



図3.1.74 総合データアーカイブの表示例① 活断層判読図、重力探査結果、大分県活断層調査地点(ポイント)を表示している。 Google Earthを使用している。



図3.1.75 総合データアーカイブの表示例②

四国電力(緑)の反射法探査、七山・他(2002)(黄)の音波探査および本調査・解析 の反射法探査(ピンク)の測線を表示している。各測線はクリックすると断面が表示される。



図3.1.76 総合データアーカイブの表示例③

基盤地図情報数値標高モデルによる地形表現図、本調査・解析の反射法探査測線、海底 堆積物調査地点、陸域ボーリング調査地点を表示している。



図3.1.77 総合データアーカイブの表示例④

基盤地図情報数値標高モデルによる地形表現図、陸域ボーリング調査地点(赤丸)、GP R探査測線(青線)、重力探査結果を表示している。ボーリング調査地点をクリックすると 調査結果の図表が表示される。

(c) 結論ならびに今後の課題

別府-万年山断層帯(大分平野-由布院断層帯東部)の詳細な位置や分布を明らかに するために、陸域では、空中写真判読・地表踏査により、全域の活断層分布図を作成し、 位置や分布を明らかにする情報をまとめ、各地域の分布の特徴を整理できた。歴史資料 調査では、文禄5年(10月に慶長元年となる、以下慶長元年で表記を統一する) 閏7月 に発生した、「慶長豊後地震」に関する、大分県内外の古文書・記録類を収集し地震に 関する基本情報の整理を行った。これまでの調査で、地震の日付も閏7月9日あるいは 12日、両者の併記などと、記録によって混在する状況が確認され、被害地域については 速見郡南部(大分県別府市・由布市湯布院町)に及び、後世の公的記録では、耕地など が地震発生より 50 年後でも復興できない所があること、およそ土地が失われたこと(史 料では「滅地」と表現される)が確認された。このような古文書・記録類の記載をふま え、「慶長豊後地震」を人々はどのように記録したのか、あるいは記憶していったのか という視点に留意すると、「慶長豊後地震」に関わる人々の記録の情報整理は、発生日 付が異なる複数の地震を1つの地震と捉えるなど、「地震の記憶」を語り継ぐ中でさまざま な「歴史」が語られた。その理由としては、慶長元年閏七月に豊後周辺では、近接した日付 に複数回大規模な地震が発生したためである。そして、慶長豊後地震は過去の災害の具体相 を探る上で、「語られた歴史」としての伝承を情報として利活用すべきタイプと位置付けら れよう。海域の調査では、地下構造探査として、深部構造を対象とした既存のエアガン 探査データの再解析、ブーマー探査、極表層部を対象とした卓越周波数 10KHz を主体と した音波探査結果のまとめを実施できた。27 年度採取の 20m級のピストンコア堆積物解 析により、鬼界-アカホヤ火山灰層準以降の約 7300 年間に 34 層のイベント層を認定し たが、3000年~6000年前程度の期間では、相対的にイベント層の頻度が少ないことが明 らかになった。さらに、4月16日の一連の熊本地震時の由布院を震源とする地震時に由 布院・別府で震度6弱を観測した地震による影響を見積もるために表層採泥を実施し、 その影響がほとんど確認できないことを明らかにできた。伏在部の調査では、別府扇状 地南部の朝見川断層周辺の浜脇〜朝見地区でボーリング調査の成果を整理し、浜脇地区 において 600 cal BP 以前に形成された氾濫原堆積物が地表下 3~4 m に埋没しているこ とを認定して、同時期以降に沈降イベントがあったと推定した。この時期には西暦 1596 年の慶長豊後地震に同地域おいて甚大な被害が報告されている。それ以前の沈降イベン トを示唆する現象として朝見地区において 1900 cal BP 頃に堆積速度の急増を認定した。 両イベントが共に朝見川断層の活動によるものならば、同断層の活動間隔は 1500 年程度 となる。最後に、浜脇地区の朝見川断層を挟んだ地質地形断面の鬼界アカホヤ火山灰層 の標高差に基づいて、5.2 mm/yr 程度の平均上下変位速度を推定した。大分平野西部の 府内断層周辺においてボーリング調査と地中レーダ探査を実施して、府内断層の低下側 に 400 cal BP 頃に形成された厚さ数 10 cm の泥層が標高-0.5~1.0 mに連続的に分布す ることが明らかになった。この泥層は断層の上昇側には連続せず、800 cal BP 頃に形成 された泥層が分布する。断層を挟んだ両泥層の珪藻化石群集組成は、断層の上昇側の泥 層の方が海の影響を強く受けていた。これらを根拠に 800~400 cal BP の間に地表変位 があり、その古地震イベントは西暦 1596 年の慶長豊後地震に相当する可能性を指摘した。 また同地域の標高-4~-8 m において 2000~2200 cal BP の植物片を含んだ厚さ 2~4 m の泥層も確認した。この泥層の上面は断層を挟んで 3~4 m程度標高差があり、上位に ある断層の上昇側の泥層の珪藻化石群集の方が低下側よりも塩水の影響が大きかった。 したがって、2000 cal BP 以降に少なくても 3~4 mの上下変位を生じさせた古地震が推 定できる。以上をまとめると府内断層の古地震の再来間隔は少なくても 1200 年程度であ ると考えられる。大分市中島西地区周辺において府内断層を挟んで、海水準上昇期の内 湾泥層に挟在する鬼界アカホヤ火山灰層が 20 m、約 18000 年前の沖積層基底礫層の上面 が 47 m 上下方向に分布深度が違っていることを根拠にして、同断層の長期的な平均上下 変位速度を 2.6~2.7 mm/yr と推定した。陸域、伏在部および海域の活動履歴の別府一万 年山断層帯全域にわたる時空間分布を図 3.1.78 にまとめた。また、全域の各調査結果等 を統合アーカイブとして整理した。



図 3.1.78 別府一万年山断層帯の断層活動の時空間分布(赤字で「本報告」と書かれた 年代値が今回の調査結果に基づくもの)

以上のように、サブ1が担当した「活断層の活動区間を正確に把握するための詳細位 置・形状等の調査及び断層活動履歴や平均変位速度の解明のための調査観測」について 一定の成果が得られた。特に、従来は明らかにされていなかった府内断層の最新活動と 1596 年歴史地震(慶長豊後地震)との関連が大きいことが明らかになった。この成果に は、サブ2の浅層地盤構造調査によるボーリングデータの整理や大友遺跡での砂脈の情 報も大きな貢献となった。今回の調査では、陸域・海域・伏在断層部の調査法を駆使し て調査を進めたこと、歴史資料の詳細な調査と自然科学的調査との緊密な連携が非常に 役にたった。今後の課題としては、正断層での陸域トレンチの実施方法の検討、海域で の調査法の検討と調査範囲や堆積物調査の充実、伏在平野部での調査法の検討と調査範 囲や堆積物調査の充実で、今回の成果にさらに確実な「活断層の活動区間を正確に把握 するための詳細位置・形状等の調査及び断層活動履歴や平均変位速度の解明のための調 査観測」が実施できると考えられる。

(d) 引用文献

1)陸域調査(1-1)

- 千田 昇(1979):中部九州の新期地殻変動-とくに第四紀火山岩分布地域における活断 層について-. 岩手大学教育学部研究年報, 39, 37-75.
- 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・別府湾地 溝を構成する亀川断層の最近の活動履歴.活断層研究,20号,92-103.
- 池田安隆(1979):大分県中部火山地域の活断層系.地理学評論,52,10-29.
- 地震調査委員会(2005):「別府-万年山断層帯の評価」73p.
- 活断層研究会(1980):「日本の活断層-分布図と資料」363p.
- 活断層研究会(1991):「新編日本の活断層−分布図と資料」437p.
- 国土地理院(2000a):1:25,000 都市圈活断層図「大分」
- 国土地理院(2000b):1:25,000 都市圈活断層図「別府」
- 国土地理院(2000c):1:25,000 都市圈活断層図「森」
- 九州活構造研究会(1989):「九州の活構造」553p.
- 文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科(2016):「別府-万年山断層帯(大 分平野-由布院断層帯東部)における重点的な調査観測」平成27年度成果報告書. 325p.
- 大分県(2001):平成12年度地震関係基礎調査交付金「別府-万年山断層帯に関する調査成果報告書[海上調査編], [極浅層反射法探査・ボーリング調査・総合解析編]」 58p, 171p.
- 大分県(2002): 平成13年度地震関係基礎調査交付金「別府-万年山断層帯に関する調 査成果報告書[反射法弾性波探査・ボーリング調査編], [海上調査編], [反射法 弾性波探査(深部・浅部)編], [ボーリング調査・総合解析編]」62p, 65p, 45p, 85p.
- 2) 海域調査 (1-2)
- (1-2 c))
- Blaauw, M., Heuvelink, G.B.M., Mauquoy, D., van der Plicht, J. and van Geel, B. (2003) A numerical approach to 14C wiggle-match dating of organic deposits: best fits and confidence intervals. Quat. Sci. Rev., 22, 1485-1500.
- Kuwae, M., Yamamoto, M., Ikehara, K., Irino, T., Takemura, K., Sagawa, T., Sakamoto, T., Ikehara, M. and Takeoka, H. (2013) Stratigraphy and wiggle-matching-based age-depth model of late Holocene marine sediments in Beppu Bay, southwest Japan. J. Asian Earth Sci., 69, 133–148.
- Yamada, K., Takemura, K., Kuwae, M., Ikehara, K. and Yamamoto, M. (2016) Basin filling related to the Philippine Sea Plate motion in Beppu Bay, southwest Japan. Journal of Asian Earth Sciences, 117, 13-22.
- 石辺岳男・島崎邦彦(2005)1596 年慶長豊後地震に伴う津波の波源推定. 歴史地震, 20, 119-131.

地震予知研究協議会(2002)地震予知のための新たな観測研究報告. 平成13年度年次 報告, 27-28.

 $(1-2 \ d))$

- Goldfinger, C., Hans Nelson, C., Morey, A., Johnson, J.E., Gutierrez-Pastor, J., Eriksson, A.T., Karabanov, E., Patton, J., Gracia, E., Enkin, R., Dallimore, A., Dunhill, G., Vallier, T., 2012. Turbidite event history: Methods and implications for Holocene paleoseismicity of the Cascadia Subduction Zone. U.S. Geol. Surv. Prof. Papers, 1661-F, 184p.
- Ikehara, K., Kanamatsu, T., Nagahashi, Y., Strasser, M., Fink, H., Usami, K., Irino, T., Wefer, G., 2016. Documenting large earthquakes similar to the 2011 Tohoku-oki earthquake from sediments in the Japan Trench over the past 1,500 years. Earth and Planetary Science Letters, 445, 48-56.
- Kuwae, M., Yamamoto, M., Ikehara, K., Irino, T., Takemura, K., Sagawa, T., Sakamoto, T., Ikehara, M., Takeoka, H., 2013. Stratigraphy and wiggle-matching-based age-depth model of late Holocene marine sediments in Beppu Bay, southwest Japan. Journal of Asian Earth Sciences, 69, 133-148.
- McHugh, C. M., Kanamatsu, T., Seeber, L., Bopp, R., Cormier, M.-H., Usami, K., 2016. Remobilization of surficial slope sediment triggered by the A.D. 2011 Mw 9 Tohoku-Oki earthquake and tsunami along the Japan Trench. Geology, 44, 391-394.
- Moernaut, J., Van Daele, M., Strasser, M., Clare, M.A., Heirman, K., Viel, M., Cardenas, J., Kilian, R., de Guevara, B.L., Pino, M., Urrutia, R., De Batist, M., 2015. Lacustrine turbidites produced by surficial slope sediment remobilization: A mechanism for continuous and sensitive turbidite paleoseismic records. Marine Geology, doi:10.1016/j.margeo.2015.10.009 (in press).
- 中嶋 健,2000.タービディティー・カーレントの発生機構-タービダイトを用いた海域 地震発生間隔評価手法の確立に向けて-.地質調査所月報,51,79-87.
- Oguri, K., Furushima, Y., Toyofuku, T., Kasaya, T., Wakita, M., Watanabe, S., Fujikura, K., Kitazato, H., 2016. Long-term monitoring of bottom environments of the continental slope off Otsuchi Bay, northeastern Japan. Journal of Oceanography, 72, 151-166.
- Pickering, K.T., Hiscott, R.N., 2016. Deep Marine Systems: Processes, Deposits, Environments, Tectonics and Sedimentation. Wiley, West Sussex, 657p.
- Yamada, K., Takemura, K., Kuwae, M., Ikehara, K., Yamamoto, M., 2016. Basin filling related to the Philippine Sea Plate motion in Beppu Bay, southwest Japan. Journal of Asian Earth Sciences, 117, 13-22.

3)伏在部調查(1-3)

千田 昇(1987)大分平野西部の完新世における地形発達.地理学評論,60(7),466-480.

- 千田 昇・池田安隆・中田 高・岡田篤正・宇根 寛(2001)2万5千分の1都市圏活断 層図「別府」:国土地理院.
- 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(2003)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,23,93-108.
- 国土地理院(2011)土地条件調查解説書「大分地区」:20p.
- 物理探査学会(1998)物理探査ハンドブック,物理探査学会,1336p.
- 地震調査推進本部(2005)別府-万年山断層帯の長期評価:

<u>http://www.jishin.go.jp/main/chousa/05mar_beppu/index.htm, 19.1MB</u>. 増田富士雄・伊勢屋ふじこ(1985)"逆グレーディング構造": 自然堤防帯における氾濫

原洪水堆積物の示相堆積構造:堆積学研究会報特集号,108-116. 文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科(2015)別府-万年山断層帯(大分

平野-由布院断層帯東部)における重点的な調査観測 平成26年度成果報告書,235p. 文部科学省研究開発局・京都大学大学院理学研究科(2016)別府-万年山断層帯(大分

平野-由布院断層帯東部)における重点的な調査観測 平成 27 年度成果報告書, 325p. Nakamura, T., Okamoto, M., Shimazaki, K., Nakata, T., Chida, N., Suzuki, Y.,

- Okuno, M., Ikeda, A. (1997) AMS 14C chronological study of Holocene activities in active faults in Japan. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **123**, 454-469.
- 中西利典・竹村恵二・松山尚典・齋藤武士・柴田康行・香月興太(2015)別府市浜脇地 区のボーリングコア試料から認定した朝見川断層の完新世における活動,地形,36(3), 159-171.
- Nakanishi, T., Takemura K., Matsuyama H., Shimoyama S., Hong W., Okuno M. (2017) Activity of the Funai fault and radiocarbon age offsets between shell and plant pairs from the latest Pleistocene to Holocene sediments under the Oita Plain, western Japan. *Radiocarbon*, In review.
- 岡田篤正・池田安隆・中田 高・千田 昇・宇根 寛(2001)2万5千分の1都市圏活断 層図「大分」:国土地理院.
- 田辺 晋・堀 和明・百原 新・中島 礼(2016)利根川低地における「弥生の小海退」 の検証:地質学雑誌, 122(4), 135-153.
- 宇佐美龍夫・石井 寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子(2013)『日本被害地震総覧 599-2012』:東京大学出版会,56-57.