

フィリピン海プレートの歴史と日本列島の形成

鎌田 浩毅*

1. はじめに

フィリピン海は西太平洋の中では最大規模の縁海であり、過去30年間地質学的・地球物理学的に最も研究と探査の進んだ地域である(図1)。日本列島はフィリピン海の北西縁にあり、日本島弧に関する過去約100年間のめざましい研究成果が、フィリピン海の誕生と歴史及び地下構造に関する解明に果たしてきた役割は大きい。フィリピン海は地球科学的にはフィリピン海プレートと呼ばれる堅い岩盤の上のっている。プレートとは太平洋東部にある中央海嶺で生産され、ベルトコンベアーのように東西に移動してゆく厚さ100 km以上の岩石圏を指す。フィリピン海プレートは日本列島の下に年約4 cmのスピードで潜り込んでいる。特に、西南日本に潜り込むプレートは、100～150年に一度マグニチュード8クラスの巨大地震(南海地震)を引き起こすことから、その運動は防災上極めて重要視されている。同時に、フィリピン海プレートの沈み込みは、西南日本と琉球列島に第四紀

(約160万年以降の時代)に火山噴火を起こしていることでも、地球科学上興味深い現象をもたらしている。

筆者はこれまで通産省地質調査所において18年間ほど火山学と地球変動学(テクトニクスと呼ばれる)の研究を行い、1997年から京都大学に移籍し研究と教育にたずさわっている。本稿ではこれまで筆者の行ってきたフィリピン海プレートに関するテクトニクス研究を基に、1998年から開始したフィリピンの火山とテクトニクスの調査によって得られたフィリピン海プレートの歴史と日本列島の形成に関する新知見を解説する。特に、地殻変動現象が最も良く現れている西南日本弧・琉球弧の会合部にあたる九州地域を例に取り、6 Ma(Maは百万年前)と2 Maの2つの時期に普遍的に起きた変動現象とその意義に焦点を当てて論ずる。

九州地域は西南日本弧と琉球弧の会合部にあたり、日本列島の中でも特異な地質現象が見られる地域である(図2)。特にこの地域は、構造運動のみならず主として鮮新世以降に活発な火山活動が平行して起きており、これらの複合現象は会合部のテクトニクスを理解する上で極めて重要である。例えば、西南日本弧・琉球弧会合部に形成された豊肥火山地域では、約600万年間にわたりほぼ連続的な構造運動を伴う火山活動が見られ、その変化を詳細に調べることは、この地域のテクトニクスの変化を知るためにも有効である(鎌田, 1996)。九州直下では15 Ma以降にフィリピン海プレートが沈み込み運動を断続しており、その運動変化は会合部のテクトニクスを支配する原動力の要素の一つと考えられる。この地域の構造運動と火山活動の時間的な変化を解析した結果、6 Maと2 Maの2つの時期に、複数の事象で同時代性をもつ共通の変化が認められた(Kamata and Kodama, 1994, 1999)。本稿では最初に、フィリピン海プレート沈み込みとの関連づけて、6 Maと2 Maの広域にわた

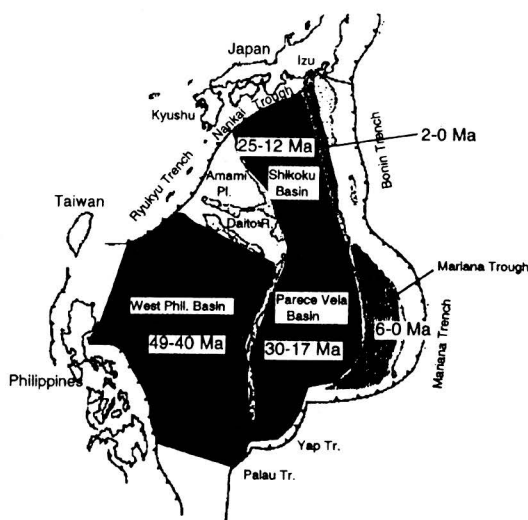


図1 日本島弧とフィリピン島弧に隣接するフィリピン海プレートの境界と年代(Seno, 1999による). Maは百万年を表す単位.

*京都大学 総合人間学部 教授 〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町

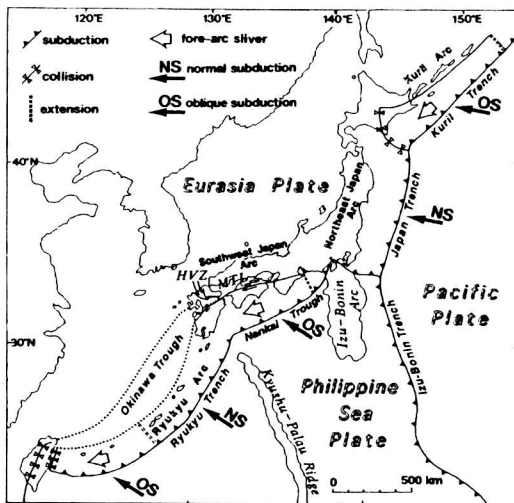


図2 日本島弧周辺のプレート境界とテクトニクス. HVZ: 豊肥火山地域, MTL: 中央構造線. 細い黒矢印: 断層の横ずれ方向, 太い黒矢印: フィリピン海プレート及び太平洋プレートの沈み込み方向. 白抜き矢印: 南海スライバーの移動方向, OS: 斜め沈み込み, NS: 垂直沈み込み. 本図は、日本列島のプレート境界とテクトニクスを示している。HVZは豊肥火山地域、MTLは中央構造線を指す。細い黒矢印は断層の横ずれ方向、太い黒矢印はフィリピン海プレート及び太平洋プレートの沈み込み方向を示す。白抜き矢印は南海スライバーの移動方向を示す。OSは斜め沈み込み、NSは垂直沈み込みを示す。本図は、日本列島のプレート境界とテクトニクスを示している。

2. フィリピン海盆の発展史

地理的にフィリピン海は大きく、西フィリピン海盆、四国-パレスヴェラ海盆、マリアナトラフの3つに分けられ、この順番に形成されたことが地質学的に明らかにされている(図1)。西フィリピン海盆は古第三紀(約6~2千万年前の時代)に出来始め、新第三紀(約2千万年前~6百万年前の時代)以降に、背弧海盆として形成された四国-パレスヴェラ海盆及びマリアナトラフとは異なる。西フィリピン海盆の成因に関しては、クラ-太平洋プレート上に発生したトランスフォーム断層が、太平洋プレートの運動方向が西向きに変化した43 Maに、沈み込み帯に転化し、海盆としてトラップされたという考えが最初に出された(Uyeda and Ben-Avraham, 1972; Matsuda, 1972)。この他に、西フィリピン海盆が沈み込みによって背弧海盆として開いたとする考えも、それ以後複数出されている(Karig, 1975; Seno and Maruyama, 1984; Lewis et al., 1982)。西フィリピン海盆の海洋底の年代は、深

海掘削プロジェクトによって得られた海洋底基盤玄武岩の放射年代と基盤直下の堆積物の化石年代から、始新世中期(49~42 Ma)と考えられている。

四国-パレスヴェラ海盆とマリアナトラフに関しては、フィリピン海プレートが西に向かい間欠的に移動した結果、背弧海盆として開いたものであるとする考え方(海溝固定説)があるが、西フィリピン海盆と四国-パレスヴェラ海盆は、海溝が時計回りに回転しながら後退して開いたとする考え方(海溝後退説)も出されている(Matsuda, 1978; Seno and Maruyama, 1984)。また、マリアナトラフは、約6 Maに拡大を開始した(Hussong and Uyada, 1982)と考えられている。

次節からは、フィリピン海プレートの沈み込み運動に伴う複数の地質現象が明らかにされている西南日本弧・中部九州地域を例に取り、火山活動と構造運動について論ずる。

3. 中部九州の火山活動と構造運動

中部九州は西南日本弧と琉球弧の会合部にあたり、日本列島の中でも伸張応力場における地質現象が見られる特異な地域である。中部九州の大分-熊本構造線の北側では、新生代の火山岩が広く分布し、これまで“別府-島原地溝”と呼ばれてきた(松本, 1979; 等)。1980年代に入りこの地域の火山活動史と構造発達史の研究が進み、鮮新世初期以降に大規模な火山性グラベンが発達していたことが明らかにされ(鎌田, 1985a,b; 等)“豊肥火山地域”と呼ばれた(Kamata, 1989b)。なお、別府湾から阿蘇火山までの豊肥火山地域と、雲仙火山を含む島原地溝とは、従来別府-島原地溝に一括されることが多かったが、両者は異なる構造発達史と火山活動史をたどっており、また両者の火山噴出物の岩石化学的性質も異なること(Nakada and Kamata, 1991)から、本報告では別府-島原地溝の名称は用いず、豊肥火山地域と島原地域と別個に分けて呼ぶ。一般に、大規模なグラベンの形成と大量の火山岩の噴出がほぼ同時に起きた地域は、火山構造性陥没地(volcano-tectonic depression)と呼称されており(例えば Williams, 1941)、豊肥火山地域はその典型例である。

豊肥火山地域内の火山活動に関して、鎌田 (1985a,b) は、地質調査結果・火山岩の放射年代測定結果・坑井データから、(1) 中部九州の火山活動は鮮新世初期に始まり、(2) 火山活動は初期から現在に至るまで活動規模を単調に減少し、その結果 (3) 火山岩分布域が中心部 (九重火山周辺) に向けて縮小したことを指摘した。さらに Kamata (1989b) は、豊肥火山地域の火山活動は、島原地域の火山活動とは別個の火山活動史と構造発達史をもつものであることを明らかにし、この火山活動域を“豊肥火山地域 (Hohi volcanic zone)”と命名した。豊肥火山地域を構成する火山岩の大部分は、松山 - 伊万里構造線、小倉 - 田川断層帯の南方延長線、大分 - 熊本構造線の3本の構造線の内側 (図3) に分布する。また火山岩分布域内には東西方向の正断層群が密に発達している。その後の研究により、豊肥火山地域と島原地域の火山岩の化学組成は、海洋プレート沈み込みの関与の有無という点で異なることが明らかとなり (中田・鎌田, 1988; Nakada and Kamata, 1991)、これらの結果は Kamata

(1989b) の主張を支持している。

一方、豊肥火山地域は、南北伸張応力場において東西に延びるグラーベン地域に形成されているため、Eguchi and Uyeda (1983)、木村 (1983)、多田 (1985) 等は、この地域が沖縄トラフの北方延長部に発達したリフト・バレーであるというモデルを提出した。これに対し、Kamata (1989b) 及び Nakada and Kamata (1991) は、地質構造発達史及び火山岩の化学組成から、上記のモデルの可能性が極めて低いことを指摘し、豊肥火山地域は沖縄トラフとは独立した火山構造性陥没地であると考えた。その後、鎌田 (1992, 1993) は、中部九州の地質構造の形成時期を検討し、豊肥火山地域の形成には、大分 - 熊本構造線沿いの右横ずれ断層運動が大きく寄与していることを明らかにした。

4. 豊肥火山地域の火山活動の開始時期

豊肥火山地域の火山岩類は各岩体の分布が孤立し側方変化が著しく、また連続性の良い鍵層が存在しない。従って、1970年代までの研究で

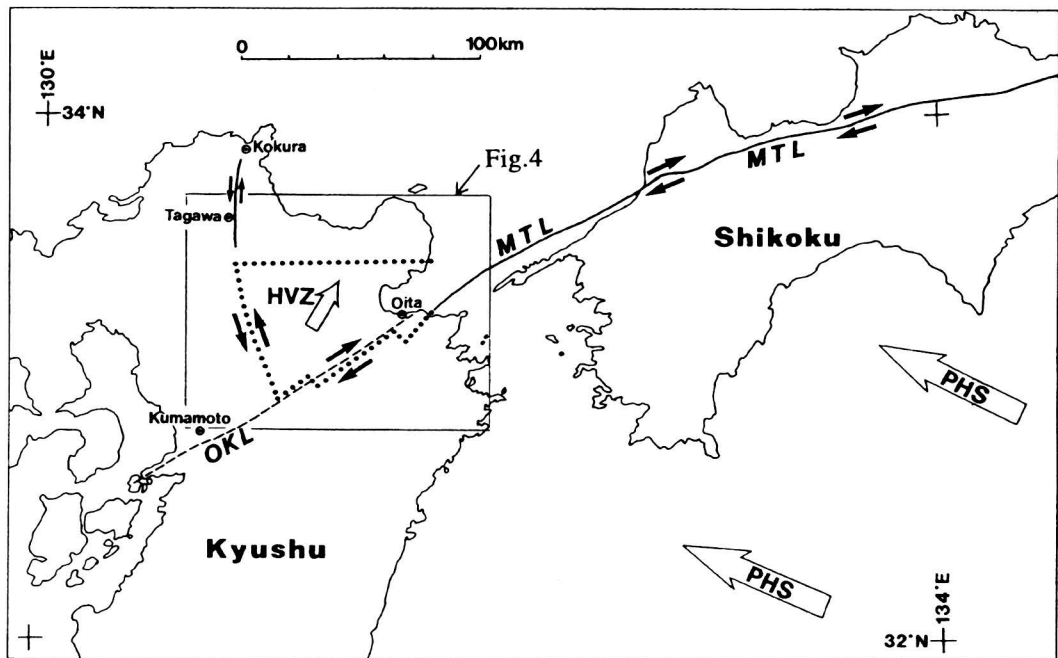


図3 九州及び四国周辺の構造線と断層。点線で囲った地域は豊肥火山地域 (HVZ) の範囲。MTL: 中央構造線。OKL: 大分 - 熊本構造線。黒矢印: 断層の横ずれ方向 (今畑 - 自家断層, 布田川断層, 日奈久断層)。PHS を付した矢印: 約 1.5Ma 以降のフィリピン海プレートの沈み込み方向。

は、主として岩相の類似性に基づいて火山岩の層序をたてて年代を推定していた。例えば、宇佐層群・鯛生層群等の緑色変質した変朽安山岩を含む火山岩の噴出時代は、東北地方のグリーンタフの年代から類推し、中期中新世(約 15-12 Ma)と考えられていた(松本, 1963; 等)。1980年代に入り火山岩の放射年代と自然残留磁化方位のデータが豊富に得られるようになり、従来の地質層序と年代論に修正が加えられた。渡辺・林(1983)、鎌田・村岡(1984)、鎌田(1985a)は、日向神溶岩・筑紫溶岩・万年山溶岩などの広域溶岩名で従来一括されていたものが、それぞれ層序及び噴出年代の異なる複数の溶岩に区分されることを示した。また鎌田(1985b)及び鎌田・渡辺(1985)は、豊肥火山地域の火山岩の K-Ar 放射年代が全て 6 Ma より若いことから、同地域の火山活動は鮮新世初期に始まったと考えた。さらに鎌田(1985b)は、宇佐層群及び鯛生層群中の変質を受けた安山岩の K-Ar 年代値(4 個)が、変質を受けていない安山岩溶岩の K-Ar 年代値(39

個)の形成する帯状配列と調和的な値(5~4 Ma)を示し、変質試料の年代値が、未変質試料のそれと比べてかけ離れて新しい年代を示すことのないことを指摘した。この原因は、溶岩の噴出後変質を受けるまでの時間が噴出から現在までの時間と比較して十分短かく、宇佐層群及び鯛生層群中の火山岩の多くが噴出年代(6~5 Ma)直後の自変質を被ったためと考えられている。

これまで中部九州では、6 Ma より古い火山岩の放射年代値が数例報告されているが、大部分の火山岩の放射年代値は 6 Ma より新しい。また、後述するように豊肥火山地域の火山活動は 6~5 Ma に急激に立ち上がりピークを迎え、それ以後は単調に活動が減衰する。これらの事実から鎌田・小玉(1993)は、豊肥火山地域の最下部に 6 Ma 以前の火山活動が若干あったとしても、豊肥火山地域の火山噴出物の 9 割以上は 6 Ma 以降に噴出し、活動初期にあたる約 5 Ma に豊肥火山地域の火山活動の最盛期があったことには変わりがないと考えた。

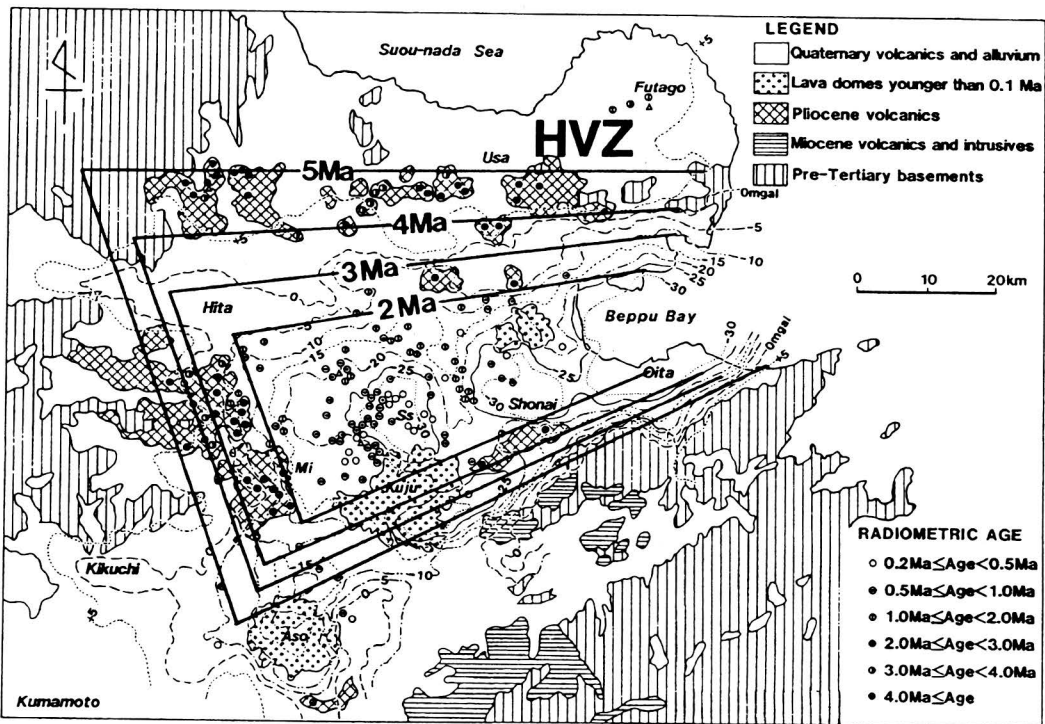


図4 豊肥火山地域の火山岩分布と放射年代値。実線：豊肥火山地域(HVZ)の1 Ma ごとの火山活動の限界域。

5. 火山構造的陥没地の形成

豊肥火山地域には -30 mgal に及ぶ広域の重力負異常がみられ、重力負異常域の形状は北縁・西縁・南縁を直線状に仕切られた箱型を呈する (図4)。また、等重力線の密な急傾斜部は、先第三紀基盤岩と鮮新世以降の火山岩との境界にはほぼ一致し、全体として負重力異常域は東西に延びている。このことは、この陥没帯がその西・南・及び北縁を断層で仕切られ、東西に延びたグララーベンをなしていることを示唆する。坑井データ及び重力基盤深度の解析から、豊肥火山地域内では先第三紀基盤岩が平均して約 2.5 km 陥没していることが判明している。

豊肥火山地域では総計 > 5,000 km³ の火山岩が噴出し、それらは東西約 70 km、南北約 40 km の範囲のグララーベン中に埋積された。豊肥火山地域の地表の火山岩の放射年代値はいずれも 6 Ma より若く、内側ほど新しい帯状配列を示す (図4)。また豊肥火山地域中央部で掘削された坑井コアの火山岩の放射年代値は、4 Ma より若く上位ほど新しい。坑井コアの観察結果 (玉生, 1985) は、グララーベン中には厚い堆積岩が存在せず、陥没部分は比較的短期間のうちに火山岩により埋積されたことを示す。豊肥火山地域内の 1 Ma ごとの火山岩分布域と噴出量はいずれも 5 Ma 以降には単調減少し (図5)、火山活動が約 5

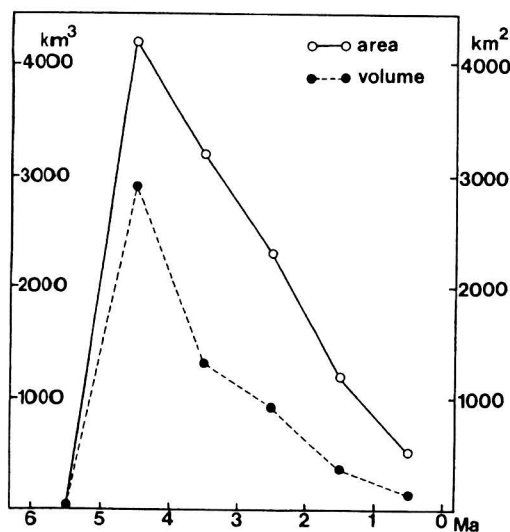


図5 豊肥火山地域の噴出体積量 (破線) と火山活動域の面積 (実線) の時間的变化。

Ma をピークとして時代が下るに連れ減衰したことを示唆している。放射年代値の帯状配列はグララーベンが複数回の断層活動により形成され、火山活動の規模の縮小に伴って、後期のより小さな陥没帯ほどグララーベン中央部に形成され、これに伴い噴出した火山岩類が陥没部分を補填するように埋積したと解釈される。以上の事実から、豊肥火山地域は約 6 Ma に始まり約 5 Ma に最盛期をもつ火山活動の引き起こした火山構造的陥没地と捉えることができる。

豊肥火山地域は東西に延びた単一のグララーベンから成るが、その平面形態及び重力異常構造には若干の非対称性が認められる (図6)。豊肥火山地域の南北断面は、グララーベンの底面が南縁部で深く北縁部で浅いという非対称な陥没形態 (半地溝状構造) を示す (図7の B 及び C)。また、豊肥火山地域の西縁は北北西 - 南南東の走向を持つ重力急傾斜部として認識され (図6の網部)、これは小倉 - 田川断層帯の南方延長部 (図3) に相当する。豊肥火山地域はその西縁部では約 60 km の南北幅を有するが、東に向かってグララーベンの幅が狭くなり別府湾に収束する。別府湾の重力負異常値は豊肥火山地域の中央部

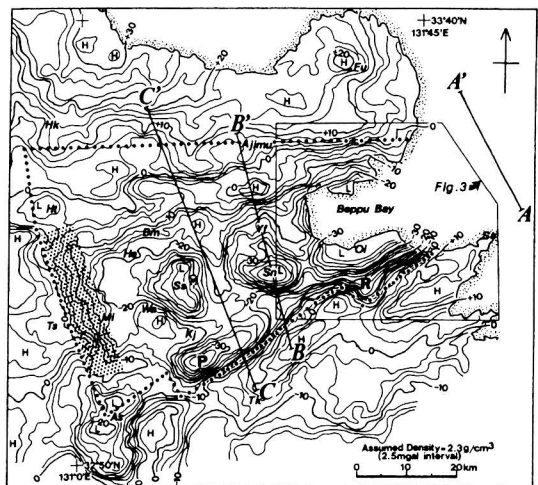


図6 豊肥火山地域のブーゲー重力異常と断面図の位置。点線は豊肥火山地域の範囲。ブーゲー重力異常 (単位 mgal) は、駒澤・鎌田 (1985) による ($\rho = 2.3 \text{ g/cm}^3$)。H: 高重力異常部, L: 低重力異常部。網部は豊肥火山地域西縁の重力急傾斜部。P 及び R: 重力急傾斜部の屈曲地点。A-A', B-B', C-C' は図7の断面の位置を示す。

と同等の - 30 mgal 以下を示し、豊肥火山地域の陥没量の最も大きい部分が東方で、そのまま海中に没した様子を呈している(図6)。別府湾で得られた反射法地震探査データと重力異常データは、豊肥火山地域と相似形の基盤構造、即ち、先第三紀基盤岩が南側により深く陥没した半地溝状構造を示す(図7のA)。別府湾には大規模火砕流の噴出源がなく、また豊肥火山地域内の火山活動の収束域からも外れているため、別府湾はカルデラ等の火山性陥没によって形成されたとは考え難い。別府湾では豊肥火山地域内の火山性堆積物の供給が途絶えたにも拘らず、豊肥火山地域中軸部で特徴的な東西走向の正断層による陥没運動が完新世に至るまで継続したために、ほぼ東西方向に延びた湾入部と、豊肥火山地域の中心部に匹敵する重力負異常を形成したと解釈されている。

6. 大規模な右横ずれ断層運動

大分-熊本構造線は、中部九州の新生代火山岩分布域と、その南側の中・古生界分布域の境界付近に位置し、四国以東の中央構造線の西方延長あるいはその分岐断層のひとつと考えられている(図8)。大分市南部にみられる東北東-西南西走向で北落ちの重力急傾斜部(図6のRの

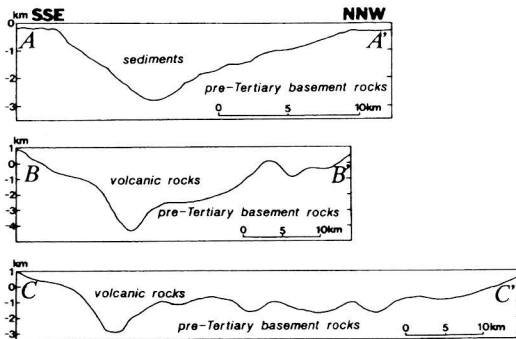


図7 別府湾周辺地域の海上の反射法地震探査による先第三紀基盤岩の深度断面(A-A'断面)と、重力異常から求めた豊肥火山地域の先第三紀基盤岩の深度断面(B-B', C-C'断面)。重力基盤岩深度は、先第三紀基盤岩と鮮-更新世火山岩との密度差 $\Delta \rho = 0.3 \text{ g/cm}^3$ により作成。縦軸は海拔標高を示し、縦横比はいずれの断面も2対1である。断面線の位置は図6に示す。

東部)の南縁は、陸上部で確認された中央構造線(三波川変成岩と第四系との境界)に一致する。さらに、中央構造線の東方延長は、佐賀関半島北部の海域の反射法断面において基盤岩の急上昇部として明瞭に認められている(由佐ほか, 1992)。このように中央構造線は、大分市南部(陸域)から佐賀関半島北部(海域)まで連続して追跡できる。大分-熊本構造線上には今畑-白家断層と布田川-日奈久断層系(図8)が存在し、これらはいずれも右横ずれを示す活断層と考えられている(千田・池田, 1991; 渡辺, 1984; 岡田・千田, 1991; 等)。

大分-熊本構造線の右横ずれ運動の開始時期は、豊肥火山地域南縁の重力負異常域の配置から読み取ることができる。大分-熊本構造線上には、東北東方向の長辺をもつ長方形の重力負異常域(図6のP)と、北落ちの重力急傾斜部の鍵型の屈曲部(図6のR)とが認められる。屈曲部R付近の碩南層群の構造は、右横ずれ運動に伴って形成された堆積盆の特徴を示す(吉岡, 1992)。Rの形状は重力急傾斜部Pの南西端と相似形であり、等重力線の延びの方向(東北東)と右屈曲の形状が一致する。よって、両者は同一の構造運動により形成されたと考えられる。これらの事実から、大分-熊本構造線沿いのP及びRは、同構造線の右横ずれ運動に起因する基盤岩のプル・アパート構造を反映していると考えられる。鎌田(1992)は、重力負異常域Pで示される幅7 km・長さ20 kmのrhomboidal tectonic voidsの長辺が右横ずれ運動の累積を示すものと考え、これまでに求められている中央構造線上の第四紀の右横ずれ平均変位速度(0.8 ~ 4 m/千年)を外挿することにより、大分-熊本構造線が5 m.y.以上の期間をかけて形成されたと推定した。このことは、現在小規模の横ずれ活断層群として確認される大分-熊本構造線上の右横ずれ運動が5 Maまでさかのぼることを意味する。

豊肥火山地域のもつ半地溝状構造の成因は、豊肥火山地域南縁において大分-熊本構造線が、豊肥火山地域の活動期間中に右横ずれ運動を継続したためと考えられている。即ち、豊肥火山地域は大分-熊本構造線沿いの横ずれ断層をグラベン南縁の弱線として利用し、南側により

深く傾斜した半地溝状構造を形成したものと推定される。おそらく豊肥火山地域の形成には大量のマグマの噴出による陥没運動だけでなく、右横ずれ断層に伴うプル・アパート構造運動が関与していたのであろう。

7. フィリピン海プレートの日本島弧に対する沈み込み運動

西南日本弧・琉球弧会合部における中新世以降の火成活動は、これまで、フィリピン海プレートの沈み込みと関連づけて考えられてきた。例えば、15～12 Maの間には九州・パラオ海嶺と伊豆・ボニン島弧の間で形成された熱い縁海が北向きに沈み込んだ結果、西南日本弧には島弧では特異な瀬戸内火山活動が約13 Maに生じ、外帯花崗岩類を約14 Maに貫入させた。その後12～6 Maの間には、海洋プレートの沈み込みに伴う火山岩が噴出していないので、フィリピン海プレートの沈み込みは停止していたらしい(Uto, 1989)。5 Ma以降に活発に噴出した豊肥火山地域

内の火山岩が、海洋プレートの沈み込みを伴う島弧に典型的な化学組成を示すこと、及び豊肥火山地域では火山活動の立ち上がりから現在に至るまで火山活動が縮小しながらも継続していたことの2点は、フィリピン海プレートの沈み込みが約5 Ma以降現在まで継続していたことを強く示唆する。

フィリピン海プレートの北西方向への沈み込み開始時期に関して、Matsubara and Seno (1980)は潜り込むスラブの長さと同プレートの収斂速度から、フィリピン海プレート少なくとも5 Ma以前から現在まで沈み込みを継続していると考えた。Niitsuma and Akiba (1985)は、西南日本の上部中新統・鮮新統と深海海段面下の堆積物の類似性から、フィリピン海プレートが7～6 Maに沈み込みを開始し、少なくとも3 Maまでその運動方向を変えなかったと推定した。Seno and Maruyama(1984)は、フィリピン海プレートは西南日本弧に対して、約17 Maには北北西方向に6 cm/年の速度で、また約4 Maには西北西方向に

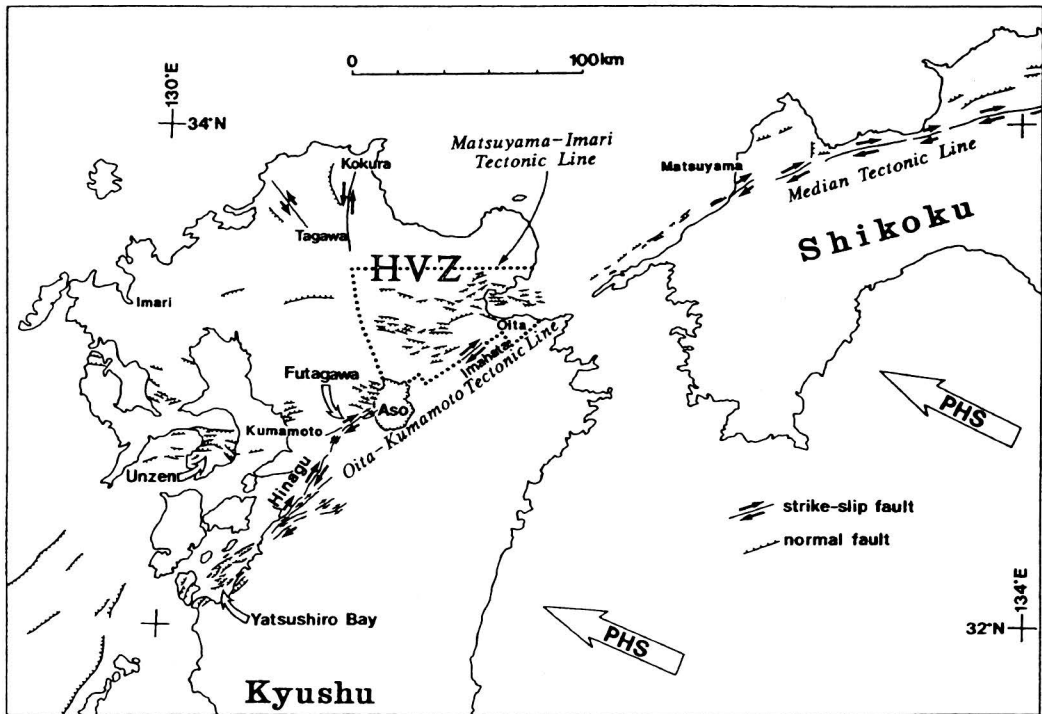


図8 九州及び四国周辺の構造線と断層。点線で囲った地域は豊肥火山地域(HVZ)の範囲。毛羽印は正断層の位置と落ちの向きを示す。黒矢印：断層の横ずれ方向(今畑-白家断層, 布田川断層, 日奈久断層)。PHSを付した矢印:約1.5 Ma以降のフィリピン海プレートの沈み込み方向。

4 cm/年の速度で沈み込んでいたと結論した。彼らは、北向きの沈み込みにより発生した瀬戸内火山活動が11 Maには終了していたこと、及び南海トラフの南でタービダイトが5~4 Maに堆積したことの2点から、北西方向の沈み込みは、約5 Ma以前のある期間には停止しており、その後沈み込みを開始したと考えた。Sugiyama (1992) は、西南日本外縁隆起-前弧海盆帯の地質構造の形成時期を検討した結果、南海トラフでは5 Ma頃にフィリピン海プレートの斜め沈み込みが始まり、中央構造線の右横ずれ運動が開始されたと考えた。Uto (1989) は、山陰・中国地域の火山活動の時空分布から、約10~5 Maの間には西南日本弧に対するフィリピン海プレートの沈み込みが休止しており、その後沈み込みを開始したと結論した。また Notsu et al. (1990) は、西南日本弧の火山岩の Sr 同位体比が、島弧に沿って顕著な変化を示すことを指摘し、5 Ma以降の西南日本弧は、フィリピン海プレートが定常的に沈み込む前の、いわば沈み込み初期の状態にあることを示唆した。Nakada and Kamata (1991) は、豊肥火山地域では6~5 Maから海洋プレートの沈み込みに伴う玄武岩が噴出し、年代の若い玄武岩ほど沈み込みスラブがマントル・ウェッジを汚染する割合が高くなることから、6~5 Maの少し前からフィリピン海プレートの沈み込みが開始されたと考えた。これらの事実を総合すると、フィリピン海プレートの北西方向への沈み込みは6 Ma頃に再開し、現在まで継続していると結論される。

8. 中部九州における6 Maの変動現象

以上のように、中部九州は、日本列島の中でも伸張応力場における地質現象が見られる特異な地域である。その要点は、(1) 豊肥火山地域 (図4) は火山構造的陥没地 (volcano-tectonic depression) の典型例であり、豊肥火山地域では総計 $>5,000 \text{ km}^3$ の火山岩が噴出し、それらは東西約70 km、南北約40 kmの範囲の地溝中に埋積された。また、(2) 豊肥火山地域の形成様式としては、(a) 豊肥火山地域の火山活動は鮮新世初期に始まり、(b) 火山活動は初期から現在に至るまで活動規模を単調に減少し、その結果、(c) 火山

岩分布域が中心部(九重火山周辺)に向けて縮小した。地球物理学的には、(3) 豊肥火山地域には -30 mgal に及ぶ広域の重力負異常がみられ(駒澤・鎌田, 1985)、重力負異常域の形状は北縁・西縁・南縁を直線状に仕切られた箱型を呈する。負重力異常域は全体として東西に延び、陥没帯がその縁辺部を断層で境され、東西に伸張した地溝をなしていることを示唆する。坑井データ及び重力基盤深度の解析からは、豊肥火山地域内では先第三紀基盤岩が平均して約2.5 km 陥没している(図7)。

年代学的には、(4) 豊肥火山地域の地表の火山岩の放射年代値はいずれも6 Maより若く、内側ほど新しい帯状配列を示す。豊肥火山地域内の1 Maごとの火山岩分布域と噴出量はいずれも単調減少し、火山活動が約5 Maをピークとして時代が下るに連れ減衰したことを示す。放射年代値の帯状配列からは、地溝が複数回の断層活動により形成され、火山活動の規模の縮小に伴って、後期のより小さな陥没帯ほど地溝中央部に形成され、これに伴い噴出した火山岩類が陥没部分を補填するように埋積したと解釈される。このように、豊肥火山地域は約6 Maに急激に始まり、5 Ma頃に最盛期をもつ火山活動の引き起こした火山構造的陥没地である。

構造地質学的には、(5) 豊肥火山地域の地溝の成因は、豊肥火山地域南縁において大分-熊本構造線が、豊肥火山地域の活動期間中に右横ずれ運動を継続したためと考えられる(図3)。即ち、豊肥火山地域は大分-熊本構造線沿いの横ずれ断層を地溝南縁の弱線として利用し、南側により深く傾斜した半地溝状構造を形成したと推定される。おそらく豊肥火山地域の形成には大量のマグマの噴出による陥没運動だけでなく、右横ずれ断層に伴うプル・アパート構造運動が関与していたのであろう。

フィリピン海プレートの運動の関連としては、(6) 豊肥火山地域の形成と大分-熊本構造線の右横ずれ断層運動は、それぞれフィリピン海プレートの沈み込み開始を原動力として引き起こされた現象と考えられる。フィリピン海プレートは琉球弧北部に対してはほぼ垂直に沈み込んでいるが、西南日本弧に対して斜めに沈み込ん

でいる(図2)。大分-熊本構造線の右横ずれ運動に伴って、豊肥火山地域ではブル・アパート構造運動が起こり、半地溝状の大規模な陥没が約6 Ma から始まった。陥没地域では、島弧性の安山岩溶岩を主体とする大規模な割れ目噴火が起こり、火山構造的陥没地を形成した(表1)。また、右横ずれ運動に伴って地溝が南北に開きながら豊肥火山地域が相対的に北東方向へ押し出され、この地域に東西走向の正断層群が雁行状に発達したと考えられる(図8)。

これまでに知られているフィリピン海プレート運動の時間変化の事実を総合すると、フィリピン海プレートの北西方向への沈み込みは6 Ma 頃に再開し、現在まで継続していると結論される。約6 Ma のプレート沈み込み開始直後に、豊肥火山地域で最も激しい島弧性の火成活動が起こったことは、プレート沈み込みが不活発と考えられていた時期(10 ~ 6 Ma)の西南日本弧・琉球弧の直下で、フィリピン海プレートが同化・消滅することがなく、極めて遅い沈み込み速度をもちながらもプレートが存在していたことを示唆する。おそらく約6 Ma に、プレートの沈み込み速度が現在の速度(4 cm/年)に近い速度にまで急激に増加し、この作用により地上では大規模な地溝が形成されたと推定される。

9. 西南日本弧・琉球弧会合部の6 Ma 付近のテクトニクス

豊肥火山地域の形成と大分-熊本構造線の右横ずれ断層運動は、それぞれフィリピン海プレートの沈み込み開始を原動力として引き起こされた現象と考えられる(図9)。フィリピン海プレートは琉球弧北部に対してはほぼ垂直に沈み込んでいる(図2のNS)が、西南日本弧に対して斜めに沈み込んでいる(図2のOS)。Kamata and Kodama(1994)は、このような島弧会合部におけるプレートの沈み込み様式の違いが、6 Ma 以降の中部九州のテクトニクスの基本的枠組みを形成した主因であると考え、上記の現象を統一的に説明するテクトニック・モデルを提案した。

(1) 西南日本弧に対して斜めに沈み込んだフィリピン海プレートは、上盤プレート(前弧南海スライバー; 図2)との間に強いカップリングをおこしたため、中央構造線及び大分-熊本構造線が、約5 Ma から右横ずれ断層運動を始めた。

(2) 大分-熊本構造線の右横ずれ運動に伴って、豊肥火山地域ではブル・アパート構造運動が起こり、半地溝状の大規模な陥没が約6 Ma から始まった。陥没地域では、島弧性の安山岩溶岩を主体とする大規模な割れ目噴火が起こり、火

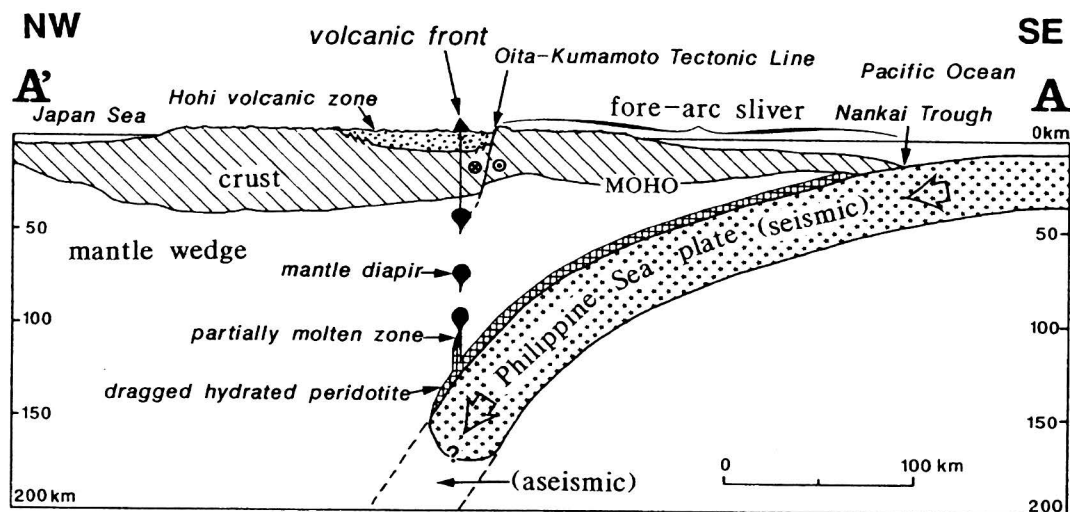


図9 西南日本弧とフィリピン海プレートの断面.

山構造的陥没地を形成した。また、右横ずれ運動に伴ってグラーベンが南北に開きながら豊肥火山地域が相対的に北東方向へ押し出され、この地域に東西走向の正断層群が雁行状に発達した。

なお、約 6 Ma の沈み込み開始直後に豊肥火山地域で最も激しい島弧性の火成活動が起こったことは、プレート沈み込みが不活発と考えられていた時期 (10 ~ 6 Ma) の西南日本弧・琉球弧の直下で、フィリピン海プレートが同化・消滅することがなく、沈み込み速度が極めて遅いながらもプレートが存在していたことを示唆する。即ち、約 6 Ma にプレートの沈み込み速度が、現在の速度 (4 cm/年) に近い速度にまで急激に増加し、この作用により地上では大規模なグラーベンが形成されたと推定される。このグラーベンはマグマ生産量の最も大きい火山フロント上 (120 km 深発地震面上) に位置しており、大量に噴出した島弧性の火山岩により陥没部が埋積されている。西南日本弧と琉球弧の会合部において、プル・アパート性のグラーベンが殆ど火山岩のみによって埋積された (即ち、火山構造的陥没地となった) 原因は、中部九州では火山フロントが島弧会合部を横切る (図 10) という状況にあったためであろう。

10. 西南日本弧・琉球弧会合部における 2 Ma 付近の火成活動

西南日本弧・琉球弧会合部付近の九州及び中国地方における火山活動と構造運動の解析から、第四紀初頭以降に、独立した現象上でさまざまな変化が起きていることが明らかになった。以下では、これらの現象を大きく火山活動と構造運動に大別して記述する。2 Ma 以降に見られる火山活動の転換現象は、(1) 火山フロント上の火山配列の出現、(2) 火山岩の化学組成の変化、(3) 火山堆積物の噴火様式の変化、の 3 点である。

火山フロントとは火山岩分布の海溝寄りの配列線を意味し、一般に海溝とほぼ平行に並ぶ。中部九州及び中国地域の火山フロントの出現年代を、各火山体において活動最初期に噴出した火山岩の放射年代から求めたところ、ほぼ 1.5 Ma 以降に揃うことが判明した (図 10)。また、

南九州に関しても火山岩の年代をコンパイルした結果、同様の 1.5 Ma が得られた。従って、西南日本弧と琉球弧北部の火山フロントは、いずれも同時期の約 1.5 Ma に両島弧を縦断し形成されている。

Kamata(1989b) は、豊肥火山地域周辺の火山岩の化学組成をコンパイルし、約 1.6 Ma 以降に豊肥火山地域内の火山岩の K 組成がそれ以前に比べて高くなることを指摘した (表 1)。その後、Nakada and Kamata (1991) は、豊肥火山地域の火山岩のソレアイト/カルクアルカリ比が、時代が下るにつれて高くなることを指摘した。また、北西九州玄武岩と豊肥火山地域内の玄武岩の微量元素組成の比較から、中部九州の 2 Ma 以降の火山岩にナイオビウム異常が顕著に認められることが判明した。これらの現象は、マントルソース

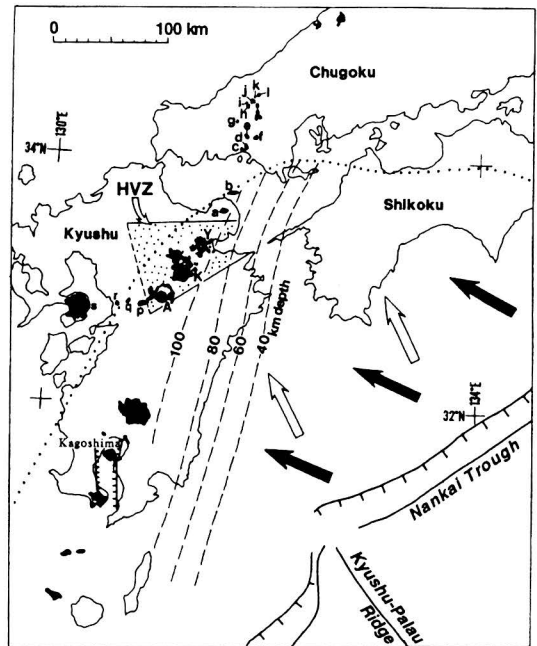


図 10 九州から中国地方にかけて火山フロントを構成する第四紀火山岩の分布とフィリピン海プレートの運動方向の変化。黒色部：約 1.5 Ma 以降の火山岩分布域。網目部：豊肥火山地域 (HVZ) の活動範囲。白矢印：フィリピン海プレートの 6 Ma から 1.5 Ma までの沈み込み方向。黒矢印：フィリピン海プレートの 1.5 Ma から現在までの沈み込み方向。破線：深発地震面の深度。点線：深発地震面の限界域。

からの部分融解の程度が減少しつつ、沈み込みスラブからの汚染物質が付加されたことで説明される。このように、約 2 Ma を境として、火山岩の化学組成に変化が確認される (表 1)。

豊肥火山地域には多数の大規模火砕流堆積物が分布する。これらの産状の時間変化を見ると、マグマ体積で 10 km³ を越す大規模火砕流は 2 Ma 以降にのみ噴出している (図 11)。一方、2 Ma 以前の火山岩の産状では火砕流堆積物の占める割合が小さく、代わりに溶岩の占める割合が圧倒的に高いという特徴が見られる (Kamata et al., 1988)。豊肥火山地域は 6 Ma 以降連続してほぼ南北伸張場にあるが、地溝の平均拡大速度は時間とともに単調減少の傾向にある。このことから高橋 (1995) は、地溝の平均拡大速度即ち水平地殻歪速度の減少により、地殻中にマグマが蓄積され易くなったこととカルデラの出現との間に相関があると考えた。つまり、地上の平均拡大速度が大きい 2 Ma 以前には、マグマは溶岩としてほぼ連続的に流出してしまうため大規模火砕流のマグマ溜まりを形成できない。これに対して 2 Ma 以降では、マグマの生産と流出がほぼ釣り合い、カルデラを形成するような大量のマグマの滞留が可能となったと推定される。2 Ma 以前の中部九州の火山活動は、割れ目噴火によって流出した大量の安山岩質の溶岩流によって特徴づけられる (表 1)。

これに対し 2 Ma 以降には、数戸火砕流 (1.3 Ma)・耶馬溪火砕流 (1.0 Ma)・由布川火砕流 (0.6 Ma)・阿蘇火砕流 (0.3 ~ 0.1 Ma) の大規模火砕流の噴出が確認されている (図 11)。

11. 約 2 Ma を境とする構造運動の変化

2 Ma 以降に見られる構造運動の転換現象は、(1) 中央構造線の右横ずれ運動の活発化、(2) 中部九州の陥没盆地形成場の移動、(3) 南九州の地殻の回転、(4) 沖縄トラフ北縁部と鹿児島地溝でのリフティング、の 4 点である。

鎌田 (1992) は重力異常や地震探査の結果から、中央構造線は九州において大分 - 熊本構造線に

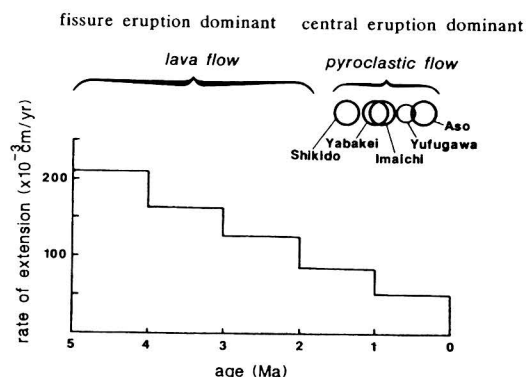


図 11 豊肥火山地域における南北に伸張する地溝の平均拡大速度の時間変化とカルデラを作る大規模火砕流の出現との関係。

表 1 中部九州の火山活動と構造運動の時期的変化

地質時代	第三紀 (鮮新世)	第四紀 (更新世)	
年代	6 ~ 1.5 Ma	1.5 ~ 0.7 Ma	0.7 Ma
火山岩の噴出率	大	中	小
火山体	大規模の溶岩台地	小規模の溶岩台地	溶岩ドームと成層火山体
火山の配列方向	東西	北東 - 南西	北東 - 南西
噴出形態	割れ目噴火	中心噴火	中心噴火
応力場	強い伸張応力場	伸張応力場	伸張応力場及び局所的な圧縮応力場
大規模火砕流堆積物	不明	数戸、耶馬溪、今市	由布川、阿蘇
K ₂ O 量 (重量%)	低	高	高
火山岩の化学組成	カルクアルカリ	カルクアルカリ + ソレアイト	カルクアルカリ + ソレアイト

連続することを明らかにした。大分市南西方の大分-熊本構造線上には今畑-白家断層(図8)が存在し、同断層は右横ずれを示す活断層である。また、大分-熊本構造線の南西部には右横ずれを示す布田川-日奈久断層系があり(図8)、その一部も活断層である。このように大分-熊本構造線沿いでは、第四紀の右横ずれ運動が確認されている。近畿地方における中央構造線が右横ずれ運動を開始した時期は、大阪平野で外帯からの水系が中央構造線により分断された時期から、約2.5 Ma以降で、おそらく2 Ma頃からと推定されている。その後中央構造線の活動は第四紀初頭頃から活発化し、1 Ma以降には明らかに右横ずれ運動が卓越している。従って、中央構造線の九州への延長と考えられる大分-熊本構造線においても、約2 Ma以降右横ずれ運動が起きていと推定される。

豊肥火山地域には、久住・庄内・別府湾・猪牟田の4つの低重力異常域がある(駒澤・鎌田, 1985)。このうち久住・庄内・別府湾は構造性盆地からなり、猪牟田は大規模火砕流である耶馬溪火砕流と今市火砕流を噴出したカルデラである(Kamata, 1989a; 鎌田ほか, 1994)。坑井コア等の解析から、これらの構造性盆地は5 Ma、1.5 Ma、0.7 Maに、上記の順で北東方向へ堆積盆を

移動したことが判明した(Itoh et al., 1998)。このうち庄内盆地はpull-apart basinの構造をもち、更新世初期(2~1.5 Ma)の中央構造線の右横ずれ運動に伴い形成されたものである。

南九州の中新世以降の堆積物の既存の古地磁気方位は、すべて約30°西向きに偏角で特徴づけられる。近年これらの西偏時期が特定され、約2 Ma以降に半時計回りの地殻の回転運動が起きたことが明らかとなった(Kodama et al., 1995)。古地磁気方位データから、南九州のうち回転を受けた東半分は3つのブロックに区分され、

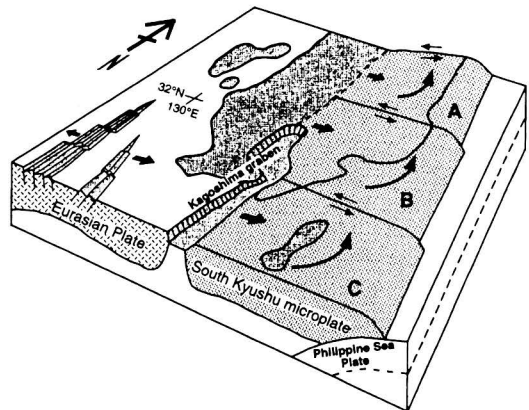


図12 古地磁気方位の時間変化から導かれた約2Ma以降の南九州の半時計回りの地殻回転(Kodama et al., 1995に一部加筆)。

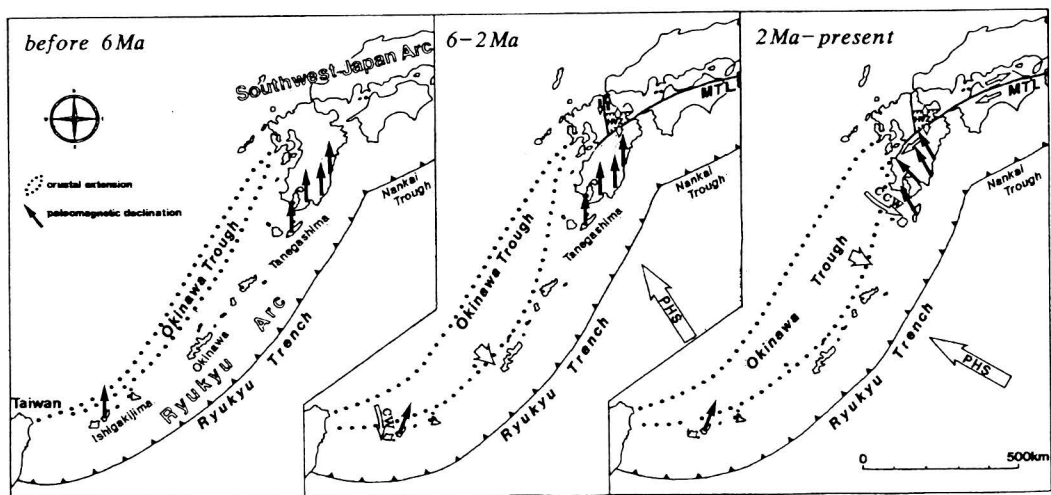


図13 西南日本弧-琉球弧周辺地域の6 Ma及び2 Maの地質構造の変化。黒矢印:古地磁気方位(CW, 時計回りの回転; CCW, 反時計回りの回転)。細い白矢印:断層の横ずれ方向。PHSを付した太い白矢印:フィリピン海プレートの沈み込み方向。点線で囲まれた地域は沖縄トラフの地殻の拡大域を示す。

この地域の西縁は南北伸張の鹿児島地溝で境される(図12)。おそらく沖縄トラフ北縁部と鹿児島地溝のリフティングが、南九州の地殻の回転運動と何らかの関係があったものと推定される(図13)。また、回転した南九州地塊の東端にあたる宮崎平野と日南海岸付近では、第四紀後期に非地震性の隆起が認められる。この原因は、南九州の反時計回り回転によって宮崎地域が圧縮されたためと推定されている。これまでに得られた琉球弧南部及び北部の古地磁気方位の時間的変化は、沖縄トラフの拡大による琉球弧南部の6 Ma以降の時計回りの回転と、琉球弧北部の2 Ma以降の反時計回りの回転によって説明される(図13)。

12. フィリピン海プレートの沈み込み運動との対応

西南日本弧・琉球弧会合部における中新世以降の火成活動は、これまで、フィリピン海プレートの沈み込みと関連づけて考えられてきた。例えば、15～12 Maの間には九州・パラオ海嶺と伊豆・ボニン島弧の間で形成された熱い縁海が北向きに沈み込んだ結果、西南日本弧では外帯花崗岩類を約14 Maに貫入させ、島弧に特異的な瀬戸内火山活動を約13 Maに生じた。その後11～6 Maの間には、海洋プレートの沈み込み

に伴う火山岩が噴出していないので、フィリピン海プレートの沈み込みは停止していたと推定される(宇都, 1995)。約6 Ma以降は、フィリピン海プレートの沈み込みは現在に至るまで継続していた。このことは、豊肥火山地域では火山活動の開始した約6 Maから現在に至るまで火山活動が連続し、これらの火山岩が海洋プレートの沈み込みを伴う島弧に典型的な化学組成を示すことから支持される。また、豊肥火山地域では5 Maから海洋プレートの沈み込みに伴う玄武岩が噴出し、年代の若い玄武岩ほど沈み込みスラブがマントル・ウェッジを汚染する割合が高くなることから、5 Maの少し前からフィリピン海プレートの沈み込みが開始されたと考えて矛盾がない。これらの事実を総合すると、フィリピン海プレートの北西方向への沈み込みは6 Ma頃に再開し、現在まで継続していると結論される(図14)。

6 Maの北西方向への沈み込み再開は、西南日本弧・琉球弧会合部に見られる構造運動にとどまらず、同時代に起きたフィリピン海全体にわたる広域地質構造の形成とも成因的な関連をもつと推定される。例えば、後期中新世以降に活動し4～3 Maまでの左横ずれ運動が確認されているフィリピン断層(Barrier et al., 1991; 図15)や、約6 Maに拡大を開始したマリアナトラフ(Hus-

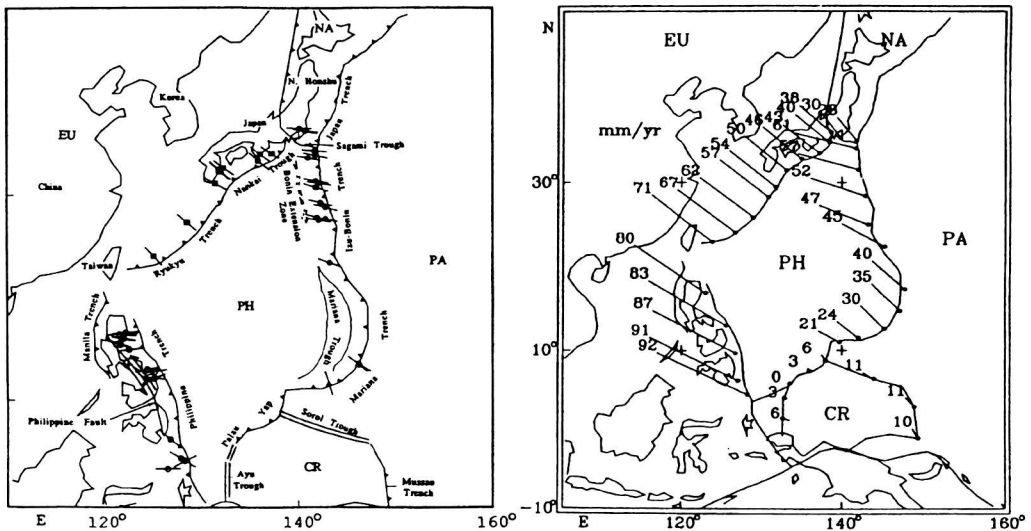


図14 フィリピン海プレートの境界におけるプレート間地震のスリップベクトル(上図)と、フィリピン海プレートのプレート相対運動(単位mm/年)(下図)。Seno et al. (1993)による。

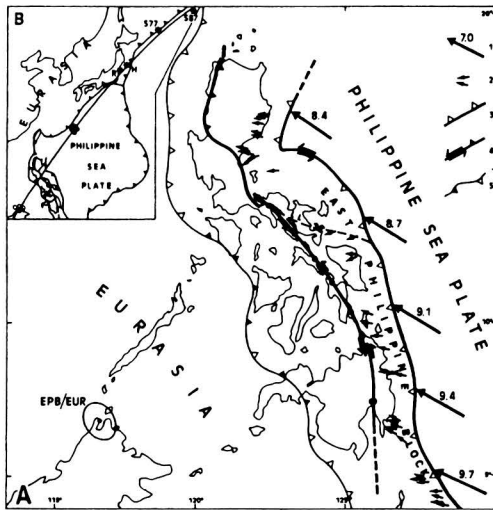


図 15 フィリピン島弧周辺のプレート境界と横ずれ断層 (フィリピン断層系). 1; フィリピン海プレート/ユーラシアプレートの相対速度 (単位 cm/年). 2; スリップベクトル. 3; フィリピン・トレンチとルソン・トラフ. 4; フィリピン断層系. 5; 現在でも活動的な沈み込み帯と衝突帯. Barrier et al. (1991) による.

song and Uyada, 1982) との成因的関連が考えられる。これらについては、フィリピンの火山及びテクトニクスの調査終了後、稿を改めて論ずる。

2 Ma 以降の構造運動の原因に関しては、フィリピン海プレートもしくはアムールプレートの運動方向の変化に、その原動力を求める考え方が提起されている。フィリピン海プレートは 6 Ma の沈み込み再開の後、1.5 Ma に北北西から西北西に沈み込み方向を変化させた (図 10 の白矢印から黒矢印への転換; Seno, 1985)。この時期には日本海東縁部において圧縮場が認められており、これに整合的な構造運動がアムールプレートの東進によっても解釈されている (例えば、石橋, 1995)。しかし、これまでに述べたような 2 Ma に同時性が見られる火山活動の転換現象を考慮すると、フィリピン海プレートの沈み込み方向の西偏転換の方が、2 Ma に広域にわたるテクトニクス転換に対して、より影響力が大きかったと考えられる。

このように、西南日本弧・琉球弧会合部では、鮮新世以降の広範囲にわたる事象について、6

Ma と 2 Ma 頃にそれぞれ同時代性をもつ重要な転換事件が認められた。これらは複数の独立した現象に関する火山活動及び構造運動についての顕著な転換であり、広域にわたるテクトニクスの転換があったと考えられる。6 Ma と 2 Ma の転換事件は、いずれも島弧性の火山活動と密接に関連していることから、その原因をフィリピン海プレートの沈み込み運動の変化に求める仮説 (Kamata and Kodama, 1994, 1999) が、現時点では最も説得力があると考えられる。

参考文献

- Barrier, E., Huchon, P. and Aurelio, M. (1991) Philippine fault: a key for Philippine kinematics. *Geology*, 19, 32-35.
- 千田昇・池田安隆 (1991) 陸上活断層図と資料, 101 大分. 活断層研究会編「新編日本の活断層」, 東大出版会, 350-357.
- Eguchi, T. and Uyeda, S. (1983) Seismotectonics of the Okinawa Trough and Ryukyu Arc. *Memoir Geol. Soc. China*, 5, 1-27.
- Hussong, D.M. and Uyada, S. (1982) tectonic processes and the history of the Mariana Arc: a synthesis of the results of deep sea drilling project Leg 60, DSDP Initial Rep., 60, 909-929.
- 石橋克彦 (1995) The 1995 Kobe, Japan, earthquake (M7.2) in the Amurian Plate Eastern Margin Mobile Belt and its implication to the regional seismic activity. *地質ニュース*, 490, 14-21.
- Itoh, Y., Takemura, K., and Kamata, H. (1998) Migratory rhomboidal basins around a termination of large transcurrent faults: deformation mode of central Kyushu, Japan. *Tectonophysics*, 284, 135-150.
- 鎌田浩毅 (1985a) 熊本県宮原西方の火山岩類の層序と噴出年代 - 九州中北部の火山活動の時代と分布. *地質学雑誌*, 91, 289-303.
- 鎌田浩毅 (1985b) 九州中北部における火山活動の推移と地質構造. *地質調査所報告*, No.264, 33-64.
- 鎌田浩毅 (1986) 0.7Ma を境とする火山岩の変化とテクトニクス - 中部九州の火山構造性陥没地における例. *月刊地球*, 8, 768-771.
- Kamata, H. (1989a) Shishimuta caldera, the buried source of the Yabakei pyroclastic flow in the Hohi volcanic zone, Japan. *Bull. Volcanol.*, 51, 41-50.
- Kamata, H. (1989b) Volcanic and structural history of the Hohi volcanic zone, central Kyushu, Japan. *Bull. Volcanol.*, 51, 315-332.
- 鎌田浩毅 (1992) 中央構造線の西方延長としての大分 - 熊本構造線の右横ずれ運動とフィリピン海プレートの右斜め沈み込み. *地質学論集*, No.40, 53-63.
- 鎌田浩毅 (1993) 別府湾およびその周辺地域の深部地下構造とその成因. *地質学雑誌*, 99, 39-46.

- 鎌田浩毅 (1996) 火山地質学の現状と今後の課題. 火山 (40周年特集号), 40, S17-S26.
- Kamata, H. (1998) Quaternary volcanic front at the junction of the Southwest Japan Arc and the Ryukyu Arc. *J. Asian Earth Sciences*, 16, 67-75.
- 鎌田浩毅・星住英夫・小屋口剛博 (1988) 中部九州-中国地方西部の火山フロントの形成年代. 月刊地球, 10, 568-574.
- 鎌田浩毅・小玉一人 (1993) 火山構造性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, No.41, p.129-148.
- 鎌田浩毅・村岡洋文 (1984) 大分県安心院の安山岩溶岩の K-Ar 年代. 地質学雑誌, 90, 125-128.
- 鎌田浩毅・渡辺公一郎 (1985) 九州中北部に分布する火山岩の K-Ar 年代とフィッション・トラック年代の比較検討-火山構造性陥没地の形成開始年代. 岩鉱, 80, 263-271.
- Kamata, H. and Kodama, K. (1994) Tectonics of an arc-arc junction: an example from Kyushu Island at the junction of the Southwest Japan Arc and the Ryukyu Arc. *Tectonophysics*, 233, 69-81.
- Kamata, H. and Kodama, K. (1999) Volcanic history and tectonics of the Southwest Japan Arc and the Ryukyu Arc since 2 Ma. *The Island Arc*, 8, 393-403.
- Kamata, H., Uto, K. and Uchiumi, S. (1988) Geochronology and evolution of the post-Shishimuta caldera activity around the Waitasan area in the Hoho volcanic zone, Kyushu, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, ser. 2, 33, 305-320.
- 鎌田浩毅・檀原 徹・林田 明・星住英夫・山下 透 (1994) 中部九州の今市火砕流堆積物と類似火砕流堆積物との対比及び噴出源の推定. 地質学雑誌, 100, 279-291.
- Karig, D.E. (1975) Basin genesis in the Philippine Sea. The results of deep sea drilling project Leg 31, DSDP Initial Rep., 31, 857-879.
- 木村政昭 (1983) 沖縄トラフの陥没構造形成に関する考察. 地質学論集, No.22, 141-157.
- 駒澤正夫・鎌田浩毅 (1985) 豊肥地域の重力基盤構造. 地質調査所月報, No.264, 305-333.
- Kodama, K., Tashiro, H. and Takeuchi, T. (1995) Quaternary counterclockwise rotation of south Kyushu, southwest Japan. *Geology*, 23, 823-826.
- Lewis, S.D., Hayes, D.E. and Mrozowski, C.L. (1982) *Geology and Tectonics of the Luzon-Marianas Region*, ed. by G.R. Balce and A.S. Zanoria, 31-51.
- Matsubara, Y. and Seno, T. (1980) Paleogeographic reconstruction of the Philippine Sea at 5 m.y.B.P. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 51, 406-414.
- Matsuda, T. (1973) The Median Tectonic Line as an active strike-slip fault system. In "Median Tectonic Line", Tokai Univ. Press, 239-251.
- Matsuda, T. (1978) Collision tectonics of the Fossa Magna, Japan. *J. Phys Earth*, 26, Supple., S409-S421.
- 松本征夫 (1963) 北中部九州における後期新生代の火山活動. 九大生産研報, No.34, 1-10.
- 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, No.16, 127-139.
- 中田節也・鎌田浩毅 (1988) 島原半島南部に分布する玄武岩・安山岩類の成因関係. 火山, 2集, 33, 273-289.
- Nakada, S. and Kamata, H. (1991) Temporal change in chemistry of magma source under Central Kyusyu, Southwest Japan: Progressive contamination of mantle wedge. *Bull. Volcanol.*, 53, 182-194.
- Niitsuma, N. and Akiba, F. (1985) Neogene tectonic evolution and plate subduction in the Japanese Island Arcs. In Nasu, N. et al. eds. "Formation of active ocean margins", Terra Sci. Pub., Tokyo, 75-108.
- Notsu, K., Arakawa, Y. and Kobayashi, T. (1990) Strontium isotopic characteristics of arc volcanic rocks at the initial stage of subduction in western Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 40, 181-196.
- 岡田篤正・千田昇 (1991) 陸上活断層図と資料, 106 八代. 活断層研究会編「新編日本の活断層」, 東大出版会, 370-373.
- Seno T. (1985) Northern Honshu microplate hypothesis and tectonics in the surrounding region. *J. Geodetic Soc. Japan*, 31, 106-123.
- Seno, T. (1999) Why does the Philippine Sea plate move as it does?, *Proceedings of Comparative Studies of Island-Arc Seismicity and Volcanism in the Western Pacific Region*, 1-13.
- Seno, T. and Maruyama, S. (1984) Paleogeographic reconstruction and origin of the Philippine Sea. *Tectonophysics*, 102, 53-84.
- Seno, T., Stein, S. and Gripp, A.E. (1993) A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geological data. *J. Geophys. Res.*, 98, 17941-17948.
- Sugiyama, Y. (1992) The Cenozoic tectonic history of the forearc region of southwest Japan, based mainly on the data obtained from the Shizuoka district. *Bull. Geol. Surv. Japan*, 43, 91-112.
- 多田亮 (1985) 沖縄トラフの拡大と九州地方の地殻変動 (2). 地震, 2輯, 38, 1-12.
- 高橋正樹 (1995) 大規模珪長質火山活動と地殻歪速度. 火山, 40, 33-42.
- 玉生志郎 (1985) 豊肥地熱地域の層序と地質構造-主に坑井データに基づいて-. 地質調査所報告, No.264, 115-142.
- Uto, K. (1989) Neogene volcanism of Southwest Japan: Its time and space based on K-Ar dating. Ph.D. Thesis, Univ. Tokyo, 1-184.
- 宇都浩三 (1995) 火山40周年特集号, 40, S27-S46 (1995). Uyeda, S. and Ben-Avraham, Z. (1972) Origin and development of the Philippine Sea. *Nature Phys. Sci.*, 240, 176-178.
- 渡辺一徳 (1984) 熊本県阿蘇カルデラ西方地域の活断層群とその意義. 熊本大教育紀要, No.33, 35-47.
- 渡辺公一郎・林 正雄 (1983) 中部九州のいわゆる日向

神溶岩のフィッシュン・トラック年代. 岩鉱, 78, 65-69.

Williams, H.(1941) Calderas and their origin. California Univ. Dept.Geol. Sci. Bull., 25, No.6, 239-346.

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.

[英文要旨]

Geological history of the Philippine Sea plate and its tectonic significance on the formation of the Japanese Island Arc

Hiroki Kamata

*School of Earth Sciences, Faculty of Integrated Human Studies,
Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan*

The Philippine Sea plate is one of the largest microplates in the western Pacific Ocean. Significant tectonic events occurred distinctly at 6 Ma and 2 Ma, respectively, at the junction of the Southwest Japan Arc and the Ryukyu Arc in the northern part of the Philippine Sea plate. The 6 Ma events included (1) dextral-fault displacement along the Median Tectonic Line, (2) formation of the rectangular Hohi volcanic zone, and (3) clockwise crustal rotation on the southern Ryukyu Arc. The integrated tectonic model explains these features in terms of subduction of the Philippine Sea plate, which resumed at around 6 Ma after a halt of more than 5 m.y. Oblique subduction of the Philippine Sea plate beneath the Southwest Japan Arc detached a fore-arc sliver that was displaced along the major fault of the Median Tectonic Line north of Nankai Trough. A volcano-tectonic depression, the Hohi volcanic zone, was formed by a pull-apart structure in the western margin of the Median Tectonic Line. By contrast, normal subduction of the Philippine Sea plate under the Ryukyu Arc caused back-arc spreading, observed as crustal extension in the southern Okinawa Trough. Remarkable changes in volcanism and tectonism have occurred in a synchronous manner since 2 Ma. The subduction-related volcanism started at about 1.5 Ma, forming a NE-SW trending volcanic front, preceded by significant changes in whole-rock chemistry and mode of eruptions. The Median Tectonic Line has intensified its dextral motion since 2 Ma accompanied by formation of rhomboidal basins in Central Kyushu. Crustal rotation and incipient rifting in South Kyushu and northern Okinawa Trough took place during the past 2 m.y. as well. The commencement age of these events coincides with that of the transition to westward convergence direction of the Philippine Sea plate. The shift in subduction direction probably led to an increase of fluid component contamination from subducted oceanic slab, which produced island-arc type volcanism along the volcanic front. Accelerated trench retreat along Ryukyu Trench may have caused rifting and crustal rotation in northern Ryukyu Arc. The two tectonic episodes observed on the northern part of the Philippine Sea plate at 6 Ma and 2 Ma may possibly be correlated to the unknown synchronous relevant events on the Philippine Archipelago, such as the initiation of the activity of the Philippine Fault Zone.