

九州の火山・地熱活動の時空変化とフィリピン海プレート・スラブの沈み込みの関係 -電子地球科学情報を利用した簡易モデル化-シミュレーションによる検討-

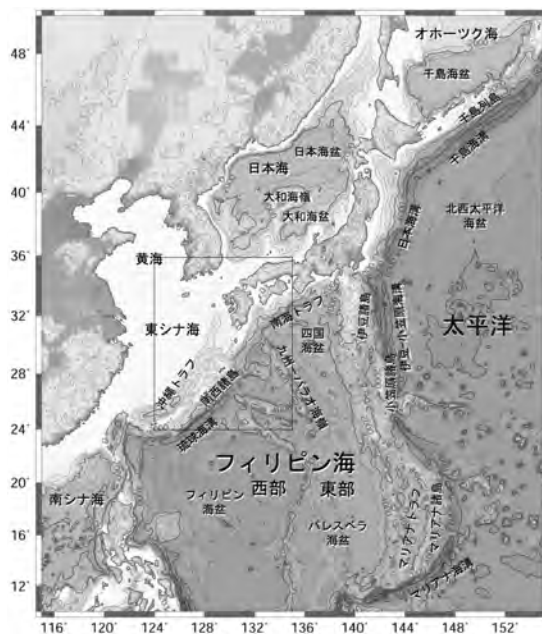
茂野 博¹⁾

1. はじめに

琉球弧と西南日本弧との会合部に位置する九州は、陸域の新第三紀後期～第四紀の火山活動および地熱活動(温泉, 熱水性鉱床などを含む)が非常に活発な地域であり, 西日本の中では特異的である. 気象庁の選定(2003年)によれば, 活火山については全国108火山(データ不足の海底火山などを除く)の中で九州には19火山(沖縄の2火山を含める)が, 特に活動度の高いランクAの全国13火山については九州には5火山も分布している. また環境省の統計(2006年度)によれば, 温泉については都道府県別の源泉総数・高温源泉数・総湧出量について大分県が3項目とも1位であり, 鹿児島県・熊本県も各々上位の5位以内に入っている. 地熱発電利用については, 現在稼働中の発電所数・容量ともに日本の半分近く(約10ヶ所・約220MWe)を九州が占めており, さらに多数の開発有望地域が九州に分布している(例えば, 地質調査総合センター, 2002).

このような九州の火山・地熱活動について, プレートテクトニクス的な立場から総合的に理解することは重要である. 近年このような観点から, 火山活動について Kamata and Kodama (1999), 鎌田ほか(2004)などが, また浅熱水性金鉱床の生成活動について渡辺(2004), Watanabe (2005)などが, 各々の時空変化とその原因について検討を加えている. 索引として第1図に, 日本周辺の広域地形図と本説の主要な検討対象範囲を示す. なお, 本説では以下に九州本島と周辺の島々(概略的に経度132.0°E以西, 緯度29.5°N以北)を合わせて琉球弧の北部と見なして, 「九州地域」と呼ぶ.

琉球弧と西南日本弧に対して, 新第三紀後期～第四紀(概略6Ma以降)にフィリピン海(海洋)プレート・スラブが南東方向から沈み込んでおり, 両弧とその周辺地域の地震活動・地殻変動と火山・地熱活動の基本的な原因になっていると考えられている. しかし, 両弧域とフィリピン海プレートの構成・相互関係およびその時空変化は大変複雑で, 上記の様々な現象の



第1図 日本周辺の広域地形図. 四角の領域(経度124°～135°E, 緯度24°～36°N)は, 第2図などの範囲を示す. 陸上・海底地形は, 米国地球物理学データセンター(NGDC)公開の標高メッシュデータETOPO5を用いて, GMT(the Generic Mapping Tools)により作図した.

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 九州, 琉球弧, 沖縄トラフ, フィリピン海プレート, 火山, 地熱, 時空変化, モデル化, 数値シミュレーション, プレートテクトニクス

総合的な理解は非常に難しい。なお、本説では琉球弧と西南日本弧とはユーラシア(大陸)プレートの一部(縁辺部)を構成していると想定し、複雑で議論の多いマイクロプレート(アムールプレートなど)については基本的に考えない。

近年、日本においても高品質の地球科学情報の電子公開が進み、その重層的・統合的な処理-表示が比較的容易に可能となってきた(例えば、地質調査総合センター, 2007)。これを利用して茂野(2008a)は、海洋プレートスラブの斜め沈み込みの簡易的な数理(幾何学・運動学的)モデル化-数値シミュレーション手法を考案し、フィリピン海プレート北縁部の南海トラフ域-近畿地方および相模トラフ域-関東地方に適用して、地域ごとに特異的な深部震源分布・地熱異常分布の原因についての検討を進めた(茂野, 2008b, 2008c)。

今回、上記の手法をフィリピン海プレートスラブと琉球弧-西南日本弧の会合域に拡張的・発展的に適用して、九州地域の火山・地熱活動のよりよい理解に向けた検討を行った。すなわち、現在の深部震源分布のみならず、新第三紀後期~第四紀の火山活動分布の時空変化を説明するために、プレートの沈み込み線の移動(沖繩トラフの拡大による琉球弧~琉球海溝域の南東方向への移動)を含めて、より動的な簡易モデル化-数値シミュレーションを試行した。本説ではその概要を紹介する。

2. 琉球弧-九州地域の電子地球科学情報の表示

琉球弧とその周辺(経度124~135°E, 緯度24~36°N)について、今回作成した各種の電子地球科学図を整理・編集して第2図の4つの平面図に示す。これらは、(A) 標高・水深と第四紀火山、(B) ブーゲー重力異常と地温勾配、(C) 磁気異常と地殻熱流量、(D) 活断層と沖繩トラフ域の第四紀地溝・火山である。次に第3図には、上記の範囲について深部震源(ここでは、概略的に島弧地殻よりも下位で発生した深度30km以深の震源を指す; 基本的に低温スラブの分布に対応していると考えられる)の分布を、深度範囲別の4つの平面図に示す。

上記の各種データについて、第4図に琉球弧域に沿って簡易的な重合断面図表示を行った。さらに第5

図には、九州地域における火山活動の時空分布(新第三紀中期~第四紀)を4平面図に分けて示した。

第2図~第5図の作成に使用した電子地球科学情報を、第1表に整理して示す。第2図(D)の沖繩トラフ域の第四紀地溝・火山の分布は、日本の地質「九州地方」編集委員会 編(1992, p.240)の図の該当部分を簡易的に電子画像化した。本説で特に重要性が高い第5図については、これまでに報告された放射年代測定データを新たに編集して作成することが望ましいが作業負担が大きいため、やや古い信頼性が高く電子処理し易い地質調査所(1995)のメッシュ形式データを用いて、火成岩類の生成年代・岩種・分布の再編処理によって作成した。

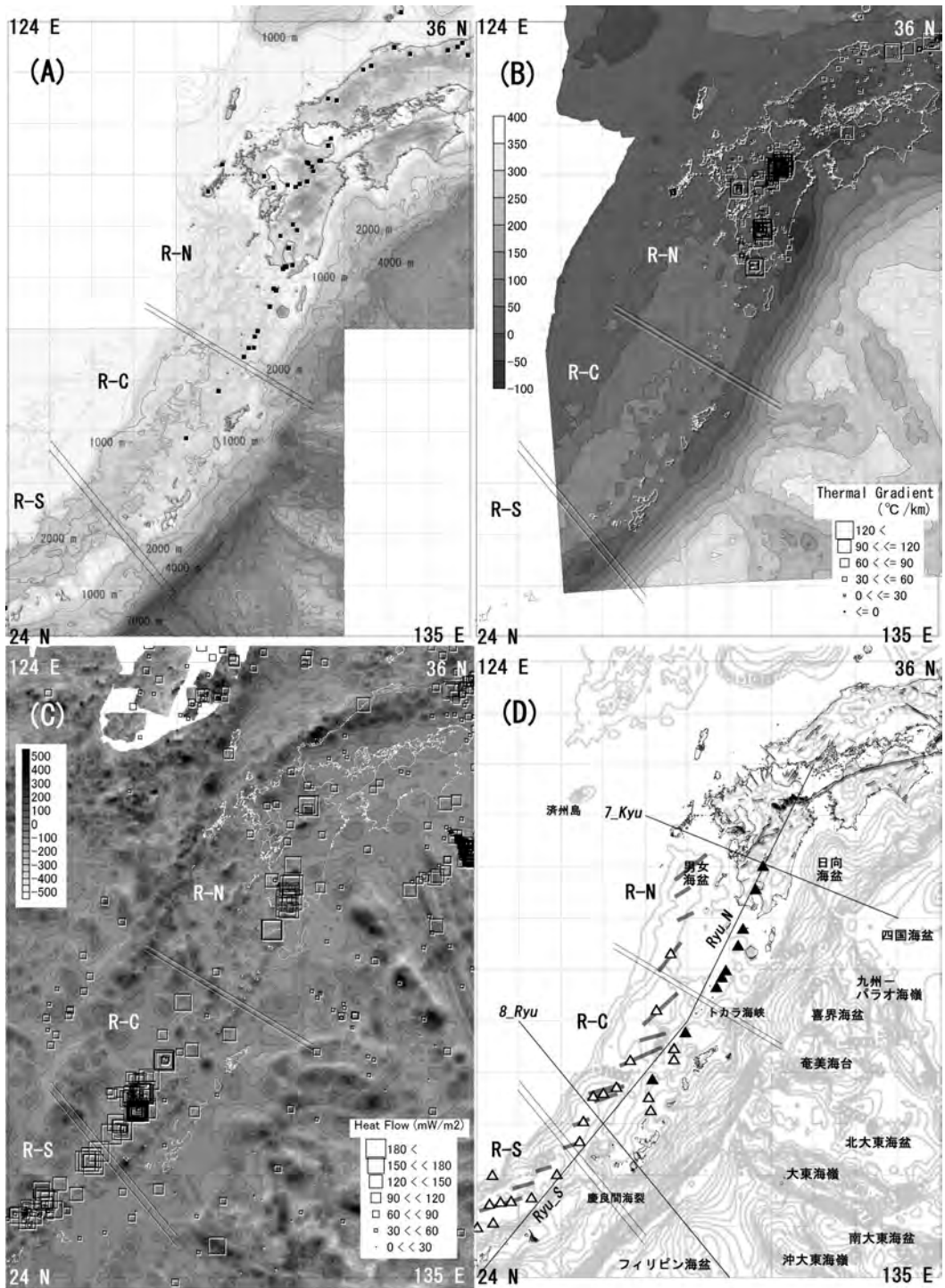
以上の作図処理は、基本的に地質調査総合センター(2007)、茂野(2008b)の手法によって行った。経度-緯度の直交座標系による各原図の縮尺は、第2図・第3図では250万分の1、第4図では200万分の1、第5図では100万分の1(各々A2判縦72dpi印刷)となっている。

なお、茂野(2005)、地質調査総合センター(2007)、茂野(2008a, 2008b)などは、同様の各種の地球科学図を九州地域(第5図と同一範囲)、日本全国などについて示しており、必要に応じて参照されたい。また、第2図~第5図の一部に相当する上質カラー図版が、日本列島の地質編集委員会 編(1996)などに示されている。

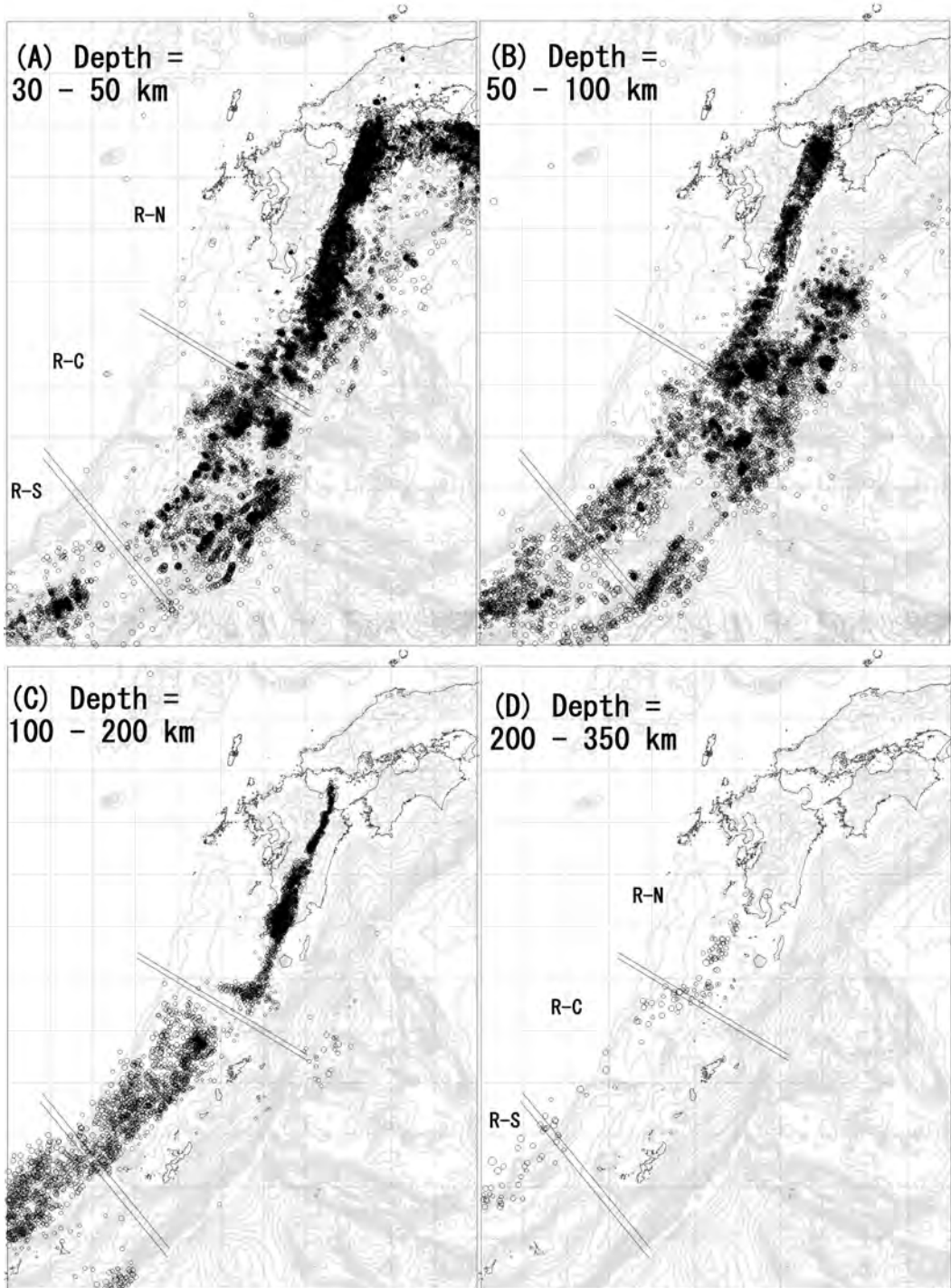
3. 琉球弧-九州地域の概要と特異性

九州地域とその周辺の地球科学的な概要と特異性について、以下に3.1 地形・基盤地質、3.2 深部震源分布、3.3 火山活動、3.4 地熱活動の順に述べる。

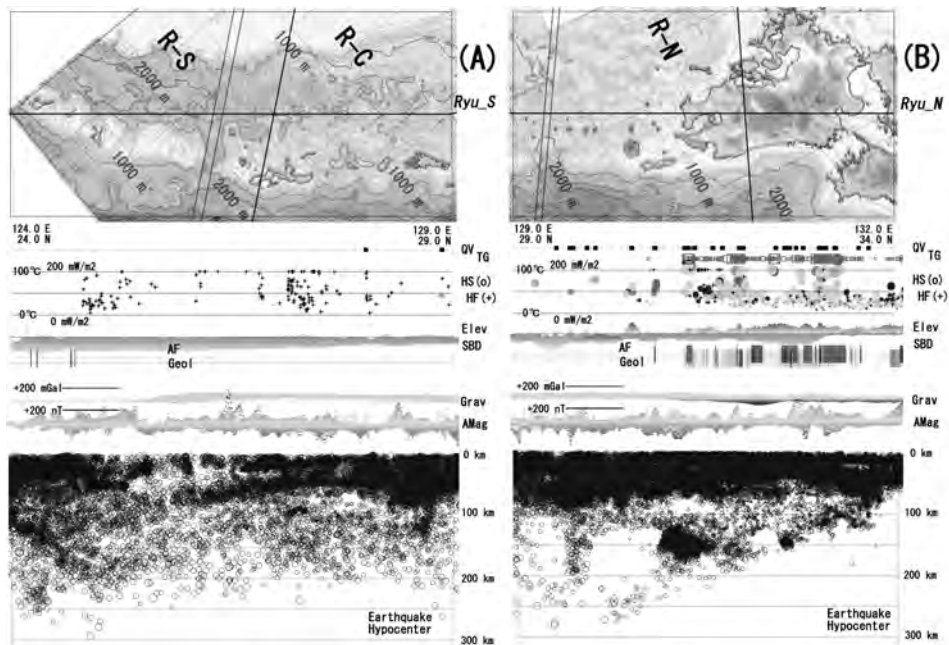
九州地域は琉球弧と西南日本弧の会合部に位置するため、以下項目ごとに(1) 琉球弧、(2) 西南日本弧、(3) 九州地域の順に述べる。(1)の琉球弧の記述では琉球弧全域を対象とするが、中部を中心に述べる。南部については九州地域からかなり遠く離れ、また台湾・南シナ海・フィリピン諸島などが関係する複雑なテクトニクスのある(例えば、瀬野, 1994)ため、後の論述を分かり易くする目的で簡略化した。3つにセグメント化している(2)の西南日本弧(茂野, 2008a)については、西部の中国四国帯を主対象とする。本説では、(3)の九州地域は、3つにセグメント化(プロ



第2図 琉球弧とその周辺の各種電子地球科学情報の重合平面図。(A) 標高 (Elev)・水深 (SBD)・第四紀火山 (QV, ■), (B) ブーゲー重力異常 (仮定密度, 2.67 g/cm³) (Grav)・地温勾配 (TG, □), (C) 磁気異常 (AMag)・地殻熱流量 (HF, □), (D) 活断層 (AF)と沖縄トラフ域 (緯度24°~32°N)の第四紀地溝・火山(—,「中央地溝」;△, 海底火山;▲陸上火山;本文参照)の平面分布を示す。各図には琉球弧の北部 (R-N)・中部 (R-C)・南部 (R-S)の概略の境界線を入れた。作図に使用した電子データについては第1表を, (D)の背景地図は第1図を参照。



第3図 琉球弧とその周辺の深度範囲別の深部震源の平面分布図. 震源データは気象庁(2006)の1998～2005年の8年間のデータファイルを使用した. 背景地図は第1図を, 琉球弧の区分は第2図を参照.



第4図 琉球弧に沿ったSSW-NNE方向の連続的な2断面線における各種電子地球科学情報の重合表示。断面線の位置は第2図(D)を参照。使用したデータは第1表を参照。各データの刈り幅(片側)は、震源分布について約300km、地形・水深などについては約100kmと非常に広いことに注意。

第1表 使用した電子地球科学情報の一覧表(地質調査総合センター(2007)・茂野(2008a)に追加した)。

項目(略号)	出典および備考
第四紀火山(QV)	地質調査所(2000a)日本の新生代火山岩の分布と産状 Ver. 1.0. 数値地質図, G-4.
地温勾配(TG)	地質調査総合センター(2004)日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース。数値地質図, P-5.
温泉温度(HS)	地質調査総合センター(2005a)日本温泉・鉱泉分布図及び一覧(第2版)(CD-ROM版)。数値地質図, GT-2.
熱流量(HF)	地質調査総合センター(2004)日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース。数値地質図, P-5.
標高(Elev)	国土地理院(1997)数値地図250mメッシュ(標高)(CD-ROM版)。
水深(SBD)	日本海洋データセンター(—)500mメッシュ水深データ(J-EGG500)。(WWWダウンロードによる)
活断層(AF)	中田 高・今泉俊文編(2002)活断層詳細デジタルマップ(DVD2枚)。東大出版会。(製品シリアル番号:DAFM0345)
同上	地質調査総合センター(2005b)全国主要活断層活動確率地図。構造図, no. 14. (電子数値データは未公表。) (第7図の2断面図には不使用。)
地質(Geol)	地質調査所(1995)100万分の1日本地質図第3版, CD-ROM版。数値地質図, G-1.
重力異常(Grav)	地質調査所(2000b)日本重力CD-ROM。数値地質図, P-2。(仮定密度, 2.67 g/cm ³)
磁気異常(AMag)	Geological Survey of Japan(1996)Magnetic anomaly map of East Asia 1:4,000,000, CD-ROM version. DGM P-1.
震源(EQHC)	気象庁(2006)平成17年地震年報(CD-ROM)。
地殻変動(GPS)	国土地理院(—)地殻変動分布データ。(WWWダウンロードによる)

ック化)している(1)の琉球弧の北部セグメント(茂野(2008a)参照;第2図参照)として取り扱い、検討の対象地域として必要に応じて記述を独立させた。

なお、九州地域と琉球弧に関する従来の非常に多数の幅広い地理学・地質学・地球科学的な研究については、例えば町田ほか編(2001)、日本の地質「九州地方」編集委員会編(1992)などによって取りま

められている。特に琉球弧域については国際的な調査・研究も進められてきた(例えば、Letouzey and Kimura, 1986; Sibuet *et al.*, 1987)が、最近荒井・西村(2007)などが地質ニュースの特集号として琉球弧域の地球科学の現状を整理・紹介している。また、琉球弧域の震源分布については、例えばShiono *et al.* (1980)、宇津(1999)、角田・後藤(2002)などによ

て整理・検討されている。

3.1 地形・基盤地質

(1) 琉球弧は、北東の九州本島と南西の台湾本島を結ぶ長さ約1200kmのNE-SW方向に延びる島弧で、南東方向に張り出している(第2図(A)参照)。南東方向のフィリピン海の海洋底と北西方向の東シナ海の大陸棚とに挟まれた琉球海溝-南西諸島-沖縄トラフを含めた島弧系(前弧-島弧-背弧)の幅は、概略300~400kmである。琉球弧は上記の両端部を除いて中小規模の島々の連なりからなり、トカラ海峡と慶良間海裂とを境に北部・中部・南部の3つにセグメント化している。琉球弧の地下には大陸性地殻が存在しており、地下浅部には主に新第三紀~第四紀の堆積岩類(碎屑岩から石灰岩へと卓越相が変化)が分布するが、その下位には南部では西南日本弧内帯の三郡変成帯・美濃帯に、中部-北部では同外帯の秩父帯・四万十帯に対比される古生代~古第三紀の基盤岩類が分布している。

琉球弧について特に興味深い点は、背弧海盆にあたる大規模な沖縄トラフの存在である。沖縄トラフは南部で最も深い(最大深度2300m程度)が、中部(深度約2000~1000m)を越えて、広域的に北部(深度1000m以浅;男女海盆からさらに五島列島周辺など)へも繋がっており、その幅はむしろ北部の方が広い(第2図(A)・(D))。その生成開始年代については中新世まで遡るが、第四紀に急激に拡大が進んだらしい(例えば、井上, 2007)。沖縄トラフ域では、高ブーゲー重力異常が広く分布しており(第2図(B))、深部からマントル物質が上昇して大陸性地殻がある程度薄化していると考えられている。沖縄トラフの北西側(東シナ海の大陸棚縁辺部)には、NE-SW方向に延びる台湾-六道褶曲帯、尖閣-五島隆起帯などと呼ばれる地域があり、明瞭な空中磁気異常帯となっている(第2図(C))。

(2) 西南日本弧は、東のフォッサマグナと西の関門海峡-豊後水道の間に分布するENE-WSW方向に延びる長さ約800kmの島弧である。その西部セグメントである中国四国帯では、その南のフィリピン海と北の日本海とに挟まれた南海トラフ-四国地方-瀬戸内海-中国地方-隠岐諸島を結ぶ島弧系(前弧-島弧-背弧)の幅は、400km程度である。中国四国帯は陸域が広く、北から内帯として飛騨、三郡、領家の3

変成帯など、外帯として三波川変成帯、秩父帯、四万十帯などが島弧に沿って分布し、古生界~古第三系の基盤を持つ相対的に安定的な島弧系となっている。しかし、内帯-外帯の境界部には大規模な右横ずれの活断層である中央構造線が、特異的に分布している(第2図(D))。

(3) 九州地域は、琉球弧と西南日本弧との会合部に位置しているため、複雑な地域となっている。本説では独自に非常に簡略化し、北から時計回りに北部(N)、東部(E)、南部(S)、南西部(R)、西部(W)、中央部(C)の6ブロックに分けて(第5図(A)の第四紀火山岩類分布の概略の境界線を参照)述べる。

北部(N)と南部(S)は、各々上記(2)の西南日本弧西部の内帯と外帯にほぼ対応する地域で、南部(S)の北縁線はほぼ中央構造線の延長部に該当する。東部(E)と中央部(C)は、北部(N)と南部(S)とに挟まれた概略ENE-WSW方向に延びる地域(佃(1992, 1993)の瀬戸内剪断帯の延長部にほぼ相当する)で、新第三紀後期~第四紀に一部地溝帯化して火山・地熱活動が活発である。南西部(R)は、上記の東部(E)・中央部(C)と南西方向の沖縄トラフとを繋ぐ主に海域の地域である。西部(W)は、地形・地質構造がNNE-SSW方向に延びる特異な地域で、古い基盤岩類である長崎変成岩類なども分布している。西部(W)は、顕著なりアス式海岸域となっており、南西部(R)から北方に広がった沖縄トラフの延長域の性格を持つ。

3.2 深部震源分布

(1) 琉球弧域の深部震源分布(第3図)は、全域的に最大深度が150~300kmに達しているが、大局的に3つにセグメント化していると見ることができる(茂野(2008a)参照)。これは、上述した地形分布とも明瞭に相関しており、トカラ海峡と慶良間海裂が3セグメントの2境界にあたる。特に北部と中部のセグメント化は、深度100km以深の震源分布に不連続性が顕著で、北部では震源分布面が非常に急傾斜になっている(第3図(C)・(D))。従って深部震源分布の範囲は、北部では海溝域(~一部その東方)から第四紀火山フロント域までであるのに対して、中部-南部では背弧域(沖縄トラフ~一部その西方)まで広がっている。この中部-南部で深部震源の最大深度が300km程度であるにもかかわらず、対応するように第四紀の

背弧海盆(沖縄トラフ)が顕著に広がるという現象は、日本列島内のみならず世界的にも特異的である。

(2) 西南日本弧の西部では、琉球弧に比較して震源分布の最大深度が非常に浅く50km程度に留まっている(第3図)。なお、これは概略的に西南日本弧を通じた現象である(茂野(2008a)を参照)。

(3) 九州地域の深部震源分布については、すでに(1)の琉球弧北部セグメントとして概要を述べた。

3.3 火山活動

(1) 琉球弧域では、2つの第四紀の火山列(帯)が概略的にNE-SW方向に分布している(琉球弧域南部の北縁の尖閣列島の火山列は除外して考える)。一つ目は島弧に分布するもので、北部では陸上-島嶼(トカラ列島)の火山列であるが、中部-南部では海底火山列となっている(第2図(A); 沖縄鳥島などの例外あり)。二つ目は、沖縄トラフ(背弧海盆)に分布するより広がったもの(「中央地溝」と呼ばれる小地溝群に伴われる場合が多い)である(第2図(D)参照)。基本的に、上記の一つ目は非アルカリ岩系に属するもの(主に安山岩)で島弧火山活動により生成し、二つ目は玄武岩と流紋岩が共存(バイモーダル)する 경우가多く(例えば、下司・石塚, 2007)背弧火山活動により生成したと推測される。両者の分布は、琉球弧域の南部ほど接近し一体化する傾向にあるように見える。琉球弧中部-南部の主に海域の新第三紀後期の火山活動については不明な点も多く、ここでは省略する。

(2) 西南日本弧の西部では、日本海沿い(背弧域)に新第三紀後期~第四紀火山が分布している(第2図(A))。その多くはアルカリ岩系の単成火山であるが、例外的に大山は大規模な複成火山である。

(3) 九州地域については、第5図に多様な火山岩類の分布を生成年代・岩種・地域によって区分表示した。その概要は以下のように整理される。

第5図(C)の新第三紀後期(後期中新世後期~鮮新世)については、概略的に3地域に火山岩類の分布が集中している。1) 鹿児島県西部(薩摩半島とその南西の諸島)には、非アルカリ岩系の苦鉄質岩類(主に安山岩)が分布し、2) 大分県-福岡県の県境部についても、同様の岩石が広く分布しており、基本的に島弧火山活動域であったと考えられる。3) 上記の2地域と三角形を作るように、長崎県-佐賀県には非アルカリ岩系の苦鉄質岩類(主に安山岩)に加えて、

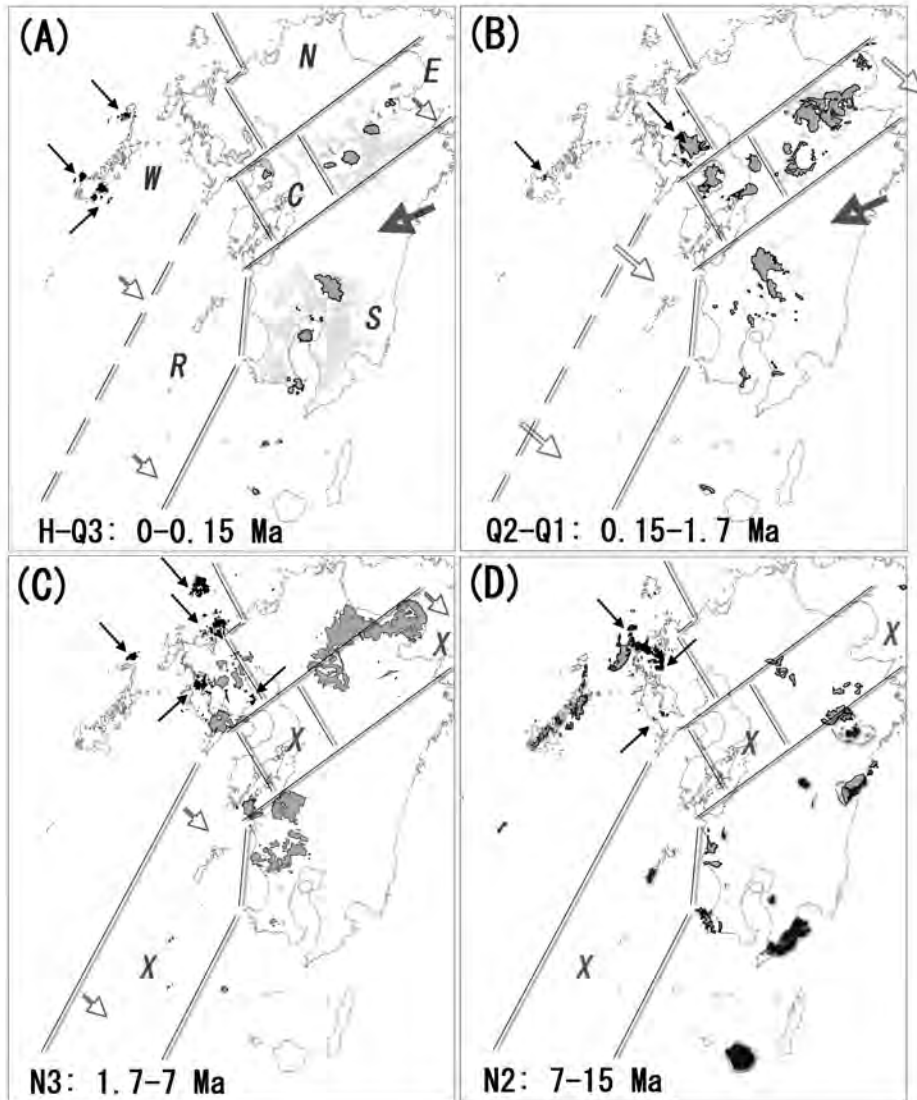
アルカリ岩系の苦鉄質岩類(主に玄武岩)が分布しており、島弧火山活動と背弧火山活動とが併存する地域であったと考えられる。これらの分布は、新第三紀中期(中期中新世中期~後期中新世前期)の火山岩類-深成岩類の分布(第5図(D))とは関連が薄い場合が多い。しかし、上記3)のアルカリ岩系については関連性が強く、島弧火山活動に比較して背弧火山活動が長期間継続する傾向(Uto and Tatsumi, 1996)が強いことを示している。

第5図(B)・(A)の第四紀(更新世~完新世)についても、新第三紀後期(第5図(C))と同様に概略的に3地域に火山岩類の分布が集中しているが、分布域・活動特性の時空変化が認められる。1) 鹿児島県西部の非アルカリ岩系の苦鉄質岩類の分布は東方に移動し、特に後期更新世~完新世には鹿児島湾沿いの地溝帯~トカラ列島に集中するとともに、大規模に火砕流が噴出し大型カルデラ群を形成している(Sブロック)。2) 大分県-福岡県の県境部の非アルカリ岩系の苦鉄質岩類の分布は南東方向に移動するが、南西方向にも延びて上記3)の非アルカリ岩系とアルカリ岩系の併存域に繋がり、九州中央部をENE-WSW方向に横断する地溝帯域に広がる。後期更新世~完新世では1)の地域と同様に火山活動が中軸部に集中し、阿蘇火山では繰り返し大規模に火砕流が噴出し大型カルデラを形成している(Eブロック)。3) 長崎県-佐賀県の火山岩分布は、上述したように更新世には2)の分布と繋がる傾向を見せる。しかし、後期更新世~完新世には非アルカリ岩系の苦鉄質岩類(主に安山岩)の分布は雲仙火山のみとなり(Cブロック)、五島列島にアルカリ岩系の苦鉄質岩類(主に玄武岩)の分布が移動する(Wブロック)。

以上のように、九州地域では新第三紀後期~第四紀に、島弧-背弧火山活動の分布に大きな時空変化が生じている。

3.4 地熱活動

(1) 琉球弧域の中部-南部について特に注目される点は、沖縄トラフ域に広く分布している特異的に高い地殻熱流量である(第2図(C); 沖縄トラフ域の北部については測定データに乏しい)。同地域では、現世の海底熱水系-熱水性鉱床の分布も伊是名地域など10地域ほどで報告されている(例えば、原口・児玉, 2007)。陸域については、温泉の分布が少なく地



第5図 九州地域における新第三紀中期～第四紀の火山岩類の分布。火山岩類の分布・生成年代・岩種は、地質調査所(1995)の電子データを用いて再編した。4つの小図は、(D) 中期中新世中期～後期中新世前期、(C) 後期中新世後期～鮮新世、(B) 前期更新世～中期更新世、(A) 後期更新世～完新世である。岩種は、黒色(黒矢印付)がアルカリ岩系(主に苦鉄質)、灰色(黒縁線付)が非アルカリ岩系(主に苦鉄質)である。(D)の濃灰色(影付)は深成岩類(主に珪長質)を示し、(C)～(A)の淡灰色は火砕流堆積物などを示す。各図には九州地域を概略的に6分割した地域ブロックの境界線を示した。地域ブロックに付帯する英字記号、矢印などについては本文参照。

温勾配データにも乏しい。

(2) 西南日本弧の西部については、高温温泉(80℃以上)の分布に乏しい。新第三紀後期～第四紀の火山活動が存在する日本海沿い(背弧域)に、若干高温温泉が存在する程度である。また、全域的に

地温勾配が低い傾向が明らかである(第2図(B))。

(3) 九州地域は、上記(1)・(2)とは異なり以下のように陸域の地熱活動が活発である。まず第四紀の高温熱水系-温泉が、上記3.3(3)の火山活動に対応して広く分布している(例えば、地質調査総合センター

(2002, 2007)を参照). 地温勾配・地殻熱流量についても、同様に島弧火山活動に対応して高異常分布が認められる(第2図(B)・(C)). また新第三紀後期～第四紀の浅熱水性金鉱床についても、上記地域(第5図(A)のS・Eブロック)に多数の分布が報告されている(例えば、Watanabe(2005)を参照).

4. 九州地域とその周辺の簡易的な時空変化モデル

上記3.に概説した九州地域の様々な特異性の原因は、基本的に南東方向から沈み込むフィリピン海プレートスラブおよび琉球弧・西南日本弧(各々周辺を含む)とその下位の上部マントルの相互作用(時空変化する)にあると考えられる。多くの未解決の問題があり様々な議論が行われているが、各種の文献を参考に非常に単純化して、以下の4.1～4.5に概略13Ma以降5つの時期に分けて、対象地域の時空変化の整理・モデル化を試みた(4.1～4.5では、段落毎に括弧付き番号を与えて記述や引用を分かり易くした)。今回の整理・モデル化に係わる様々な問題点については、後述の6.2の考察を参照されたい。なお、該当地域のフィリピン海プレートスラブの相対運動(固定的(不動的)な九州北部・東シナ海大陸棚に対して)は、概略6Ma以降は定常的・均一的(NW方向に4 cm/yearの速度)であったと仮定している。

4.1 13Ma頃～6Ma頃の間

(1) 13Ma頃に、日本海の形成と西南日本弧・東北日本弧の現在位置への配置がほぼ終了し、前サイクルのフィリピン海プレートスラブの沈み込みによって西南日本弧～九州地域の外帯に深成岩類が貫入するとともに、深部高温マントル物質の上昇(島弧火山活動を引き起こすスラブの沈み込み深度100～200km程度よりも深い200～600km程度からの上昇を想定;以下同様)によって背弧側の日本海沿い～九州西部域にアルカリ岩系の火山岩類が噴出した(第5図(D)参照)。

(2) この頃には、恐らく台湾-^{しんじ}宍道褶曲帯が現在の位置で活動的であり、その南東方の現在沖縄トラフの位置には琉球弧の原型が分布し、琉球海溝も現在よりもかなり北西側に位置していたと想定される。なお、台湾-^{しんじ}宍道褶曲帯と琉球弧の原型の間には、現

在よりも狭く沖縄トラフの原型がすでに存在していたと想定される。琉球弧の原型の北部に当たる九州地域では、第5図(D)の3つのXブロック(第5図(A)のE・C・Rブロックに相当)は、各々現在よりも幅がかなり狭かったと想定される。

(3) その後、長期間琉球弧-西南日本弧へのフィリピン海プレートスラブの沈み込みはほぼ停止していた。しかし、背弧側の九州西部域の深部高温マントル物質の上昇とアルカリ岩系の火山岩類の噴出は継続したと推測される(第5図(D)・(C)参照)。

4.2 6Ma頃

(1) 6Ma頃に、琉球弧-西南日本弧下への新たな南東方向からのフィリピン海プレートスラブの沈み込み(現サイクル)が、開始したと考えられる。この時点で、前サイクルに沈み込んだスラブの残部が、琉球弧下では存在していた(沈み込み線からの長さ160km程度)のに対して、西南日本弧下ではほとんど存在していなかった(同0km程度)と想定される(なお、これを両弧下への現サイクルの沈み込み開始時期の違いとしてモデル化する可能性(茂野, 2008a)などもあるが、ここでは採用しない)。

(2) 上記4.1(3)の背弧側の九州西部域の深部マントル物質上昇とアルカリ岩系火山岩類の噴出については引き続き継続したと推測される(第5図(C))。

4.3 4～3Ma頃

(1) 4～3Ma頃に、琉球弧域下へ沈み込むフィリピン海プレートスラブの先端部の深度が概略100kmに達し、その上位のマントルウェッジでマグマが生成・上昇して島弧火山活動が開始した。その位置は、九州地域では3.3(3)の新第三紀後期の1)・2)(恐らく3)も)の非アルカリ岩系苦鉄質岩類の分布地域(第5図(C))にあたり、第四紀の島弧火山活動(第5図(B)・(A))よりも北西側の地域であった。

(2) 琉球弧域の中部(-南部)でも、同様に島弧火山活動(海底あるいは陸上)を生じた。この地域では、スラブ深度が浅いにもかかわらず非常に特異な環境によって、背弧の深部マントル物質の上昇(背弧火山活動)も生じて沖縄トラフ(地溝帯)が拡大を始めた。この沖縄トラフの拡大は九州地域にも延びて、第5図(C)の3つのXブロック(第5図(A)のE・C・Rブロックに相当)の北西縁部にも広がったと想定される(第

5図(C)の白い3つの小矢印を参照)。

(3)九州地域の西部(第5図(A)のWブロック)における3.4(3)の新第三紀後期のアルカリ岩系の苦鉄質岩類の火山活動については、上記4.1(3)からの古い活動が継続し続けた可能性、琉球弧の背弧の延長部にあたり新たな深部マントル物質の上昇によって発生した可能性、あるいは両者の複合の可能性がある。また、同地域に併存する非アルカリ岩系の火山活動は、前述した島弧系とこの背弧系の両マグマ活動が複雑に絡み合って生じた可能性がある。

(4)琉球弧域では、南東方向からのフィリピン海プレートの沈み込みによって、沈み込むスラブは発散—セグメント化する傾向を持っている(茂野, 2008a)。上記の島弧—背弧火山活動と沖縄トラフの拡大に伴われて、沈み込むスラブと琉球弧域の地殻(リソスフェア)は南東方向に漸次移動(同時に沈み込み線の位置も移動)し、北部・中部・南部へのセグメント化も進行していったと考えられる。

4.4 2~1Ma頃

(1)2~1Ma頃には、西南日本弧に対して斜めに沈み込むフィリピン海プレートのスラブの先端部が四国の地下に達し、プレートの斜め沈み込みの影響を受けて中央構造線に沿った西南日本弧外帯(~前弧域)の右横ずれ運動が生じるようになった。なお、中央構造線は中生代からの形成—発達史を持ち、西南日本弧西部の内帯・外帯の非活動的なブロック境界として予め存在していたと考えられている。

(2)琉球弧域では、上記4.3に引き続きフィリピン海プレートの沈み込みによって、島弧—背弧火山活動と沖縄トラフの拡大に伴われて、沈み込むスラブと琉球弧域の地殻は南東方向に漸次移動(同時に沈み込み線の位置も移動)し、北部・中部・南部へのセグメント化も強化されたと考えられる。琉球弧北部域では、分岐的に沖縄トラフの北~北西方向の延長部である九州西方海域(第5図(A)のWブロック)と北東方向の延長部である九州地域中央部—東部(第5図(A)のR・C・Eブロック;第5図(B)の白色矢印参照)の両地域でトラフ・地溝帯の拡大(全体として琉球弧南部—中部域よりも広く浅い)が生じ、沈み込む琉球弧北部域のセグメントスラブと九州地域南部(第5図(A)のSブロック)の地殻とは南東方向に漸次移動していったと考えられる。

(3)しかし、上述した(1)・(2)の2島弧の相対運動によって、2島弧の会合部の九州地域では複雑な現象を生じることとなった。すなわち、琉球弧北部域のセグメントスラブとその上位の九州地域南部の地殻はSE方向へ移動するのに対して、西南日本弧の前弧地殻(前弧スラバー)はWSW方向へ移動するために両地殻の衝突を生じ、九州地域中南部はWSW方向へ押し出された(第5図(B)の灰色大矢印参照)。これによって、同地域の地殻のSE方向への移動は停滞することとなり、その下位の琉球弧北部のセグメントスラブの上部の移動も停滞した(カップリング効果)。従って、スラブ下部(スラブ上部のNW側に分布しSE方向へと移動を続ける)とスラブ上部の水平距離は接近し、琉球弧北部のセグメントスラブの沈み込み傾斜角度は漸次増大することとなった。

(4)上述した琉球弧北部の地殻とセグメントスラブ上部の移動の停滞およびスラブの沈み込み傾斜角度の増大は、マントルウェッジでのマグマの生成—上昇域を南東方向に移動させた。これにより、九州地域の南部・東部(S・Eブロック)の島弧火山活動は南東方向へ、第5図の(C)から(B)の位置に移動した。同様に、西部(Wブロック)の島弧火山活動も南東方向へ移動し中央部(Cブロック)へも広がったと見ることができる。この東部内と西部から中央部への島弧火山活動の移動は、上述した(2)の沖縄トラフの北東方向の延長部として九州中央部で形成されたENE—WSW方向の地溝帯内に納まる形(第5図(B)参照)となっており、深部高温マントル物質の上昇の影響も受けていると考えられる。

(5)これに対して琉球弧中部(—南部)域では、フィリピン海プレート—スラブの沈み込みが継続してスラブの最深部は深くなっていったが、西南日本弧の前弧スラバーの衝突の影響は及ばず、スラブの急傾斜化は発生しなかった。上記4.3の概略4~3Ma頃の状況を継続する形で島弧—背弧のマグマ生成—火山活動が広がり、沖縄トラフが次第に拡大するとともに、島弧—前弧域が南東方向へ移動していった。

4.5 0.2Ma頃以降

(1)概略0.2Ma以降にも、基本的には4.4で述べた2~1Ma頃の状況が引き続いている。琉球弧の北部域と中部(—南部)域の特性の違いは、より明瞭化した。

(2) 九州地域では、琉球弧北部のセグメントスラブの沈み込み傾斜角度が4.4 (3)・(4)からさらに急になったために、島弧のマグマ生成・上昇-火山活動が狭い範囲に集中することとなった。その結果、3.3 (3)で述べたように火山活動が鹿児島湾の地溝帯-トカラ列島および阿蘇火山に集中して、大規模な火砕流を噴出し大形カルデラ群を形成した(第5図(A)のS・Eブロック)。

(3) 一方、九州地域の西方では深部マントル物質の上昇が新たに活発化し始めた。これには、4.4 (3)から継続している琉球弧北部のセグメントスラブ上部の西方への相対運動(西南日本弧の前弧スラバーの右横ずれ運動に起因し、スラブの急傾斜化を伴う)が、深部マントル物質の上昇を西方に押し出していることが原因となっている可能性がある。五島列島のアルカリ岩系の新しい火山活動はこの結果と考えられる(第5図(A)のWブロック)。なお、さらに西方の韓国済州島に第四紀に多量に噴出しているアルカリ玄武岩の活動も、これに関連する可能性が指摘される。

(4) これに対して、琉球弧の中部(-南部)域ではセグメントスラブの急傾斜化は発生せずに、4.3 (4)~4.4 (5)の概略4~1Maの状況が続く形で一体的な島弧-背弧火山活動が広がり、沖縄トラフが次第に拡大・深化するとともに、セグメント化した島弧-前弧域が全体的に南東方向へ移動している。

5. 九州地域とその周辺のプレート-スラブ運動の簡易シミュレーション

上記4.の簡易モデルに沿って、フィリピン海プレート-スラブの沈み込みの経時変化について幾何学・運動学的な簡易数値シミュレーションを行った。簡易シミュレーションの方法は、基本的に茂野(2008a)に基づいている。現在の日本列島周辺域の概括的なシミュレーションが、琉球弧を含めてすでに茂野(2008a)によって試みられている。今回これを基礎として、若干発展的に動的な(プレート沈み込み線の移動などを含めた)検討を行った。

基本的に茂野(2008a)では、現在の深部震源分布の観測データにスラブ分布のシミュレーション結果が整合するように、代表沈み込み点群について各地点の見掛けの沈み込み方向(海溝・トラフに直交する方

向)、見掛けの沈み込み傾斜角度、沈み込みの継続時間(2段階過程で $\theta p1 \cdot \theta d1 \cdot \text{Time1} + \theta p2 \cdot \theta d2 \cdot \text{Time2}$)の6パラメータ値を調整した。今回は、さらに新第三紀後期~第四紀火山活動の分布域についてもスラブの分布(時空変化する)のシミュレーション結果が整合するように、代表沈み込み点群の沈み込み線の各位置(Lon・Lat)をパラメータに加えた(合計8パラメータ)。フィリピン海プレートの移動速度・方向(VA・ θA)については、茂野(2008a)と同様に一定と仮定した。

上記4.の簡易モデルでは、基本的に沖縄トラフの拡大によって概略4~3Maから、フィリピン海プレート-スラブの沈み込み線の位置が南東方向に漸次移動していると想定した。今回、この変化を簡易的に処理し、現在(~0Ma)の状況とともに、これを基礎に特に重要な約300万年前(~3Ma)の状況について、簡易シミュレーションを実施した。今回の主要対象である九州地域の中で、東部・中央部(第5図(A)のE・Cブロック)については地溝帯が生成し複雑な環境にある。そのため、今回はより単純な南部(同Sブロック)を中心に検討を加えた。

第2表(A)・(B)に、上記2時点の簡易数値シミュレーションに使用したフィリピン海プレート-スラブの代表沈み込み点群のパラメータ値を一覧表にして示す。基本的な仮定として、九州北部域と東シナ海の大陸棚域は検討期間を通じて固定域とした。この固定域を基準として、フィリピン海プレートの移動はNW方向に4cm/yearの相対速度で、期間を通じて均一的・定常的と仮定した。

琉球弧下に沈み込む代表点(no.1~9)のフィリピン海プレート-スラブの沈み込み継続時間には、概略6Ma以降の現沈み込みサイクルの継続時間に、前サイクルの沈み込みで残留したスラブの長さに対応する時間(400万年分)が加わっている。なお、現在(~0Ma)の処理では、第2表(B)の地点no.8・9のパラメータ値を茂野(2008a)の値から一部変更し、スラブの沈み込み継続期間が一定(1000万年間)となるように調整した。

現在に比較して確実なデータに乏しい~3Ma時の処理では、プレートの沈み込み線の位置、スラブの沈み込みの見掛けの傾斜角度などを、~0Maの設定値から4.の簡易モデルに沿って妥当性が高い方向に調整した。具体的には琉球弧(主に北部・中部)域と西

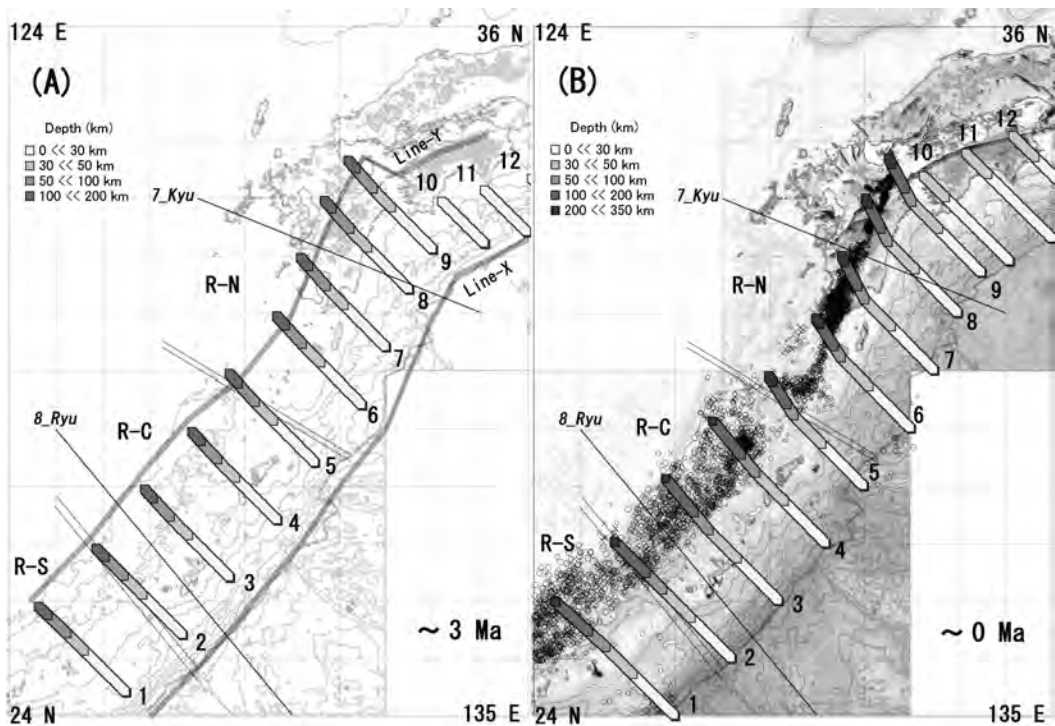
第2表(A) 中期鮮新世(～3Ma)に琉球弧とその周辺の下へ沈み込むフィリピン海プレートスラブ上の代表移動点群のシミュレーション用パラメータ値一覧表.

R3Ma	VA	θA	Lon	Lat	θp1	θd1	Time1	θp2	θd2	Time2
No	cm/y	deg	deg	deg	deg	deg	My	deg	deg	My
1	4.0	45	126.5	24.4	42	15	4.0	42	45	7.0
2	4.0	45	127.7	25.4	45	15	4.0	45	45	7.0
3	4.0	45	128.7	26.4	51	15	4.0	51	45	7.0
4	4.0	45	129.7	27.4	51	15	4.0	51	45	7.0
5	4.0	45	130.5	28.4	51	15	4.0	51	45	7.0
6	4.0	45	131.5	29.4	51	15	4.0	51	45	7.0
7	4.0	45	132.0	30.4	54	15	4.0	54	45	7.0
8	4.0	45	132.5	31.4	54	15	4.0	54	45	7.0
9	4.0	45	133.0	32.1	54	15	4.0	54	45	7.0
10	4.0	45	134.1	32.2	30	10	3.0	30	10	3.0
11	4.0	45	135.0	32.4	30	10	3.0	30	10	3.0
12	4.0	45	136.0	32.6	30	10	3.0	30	10	3.0

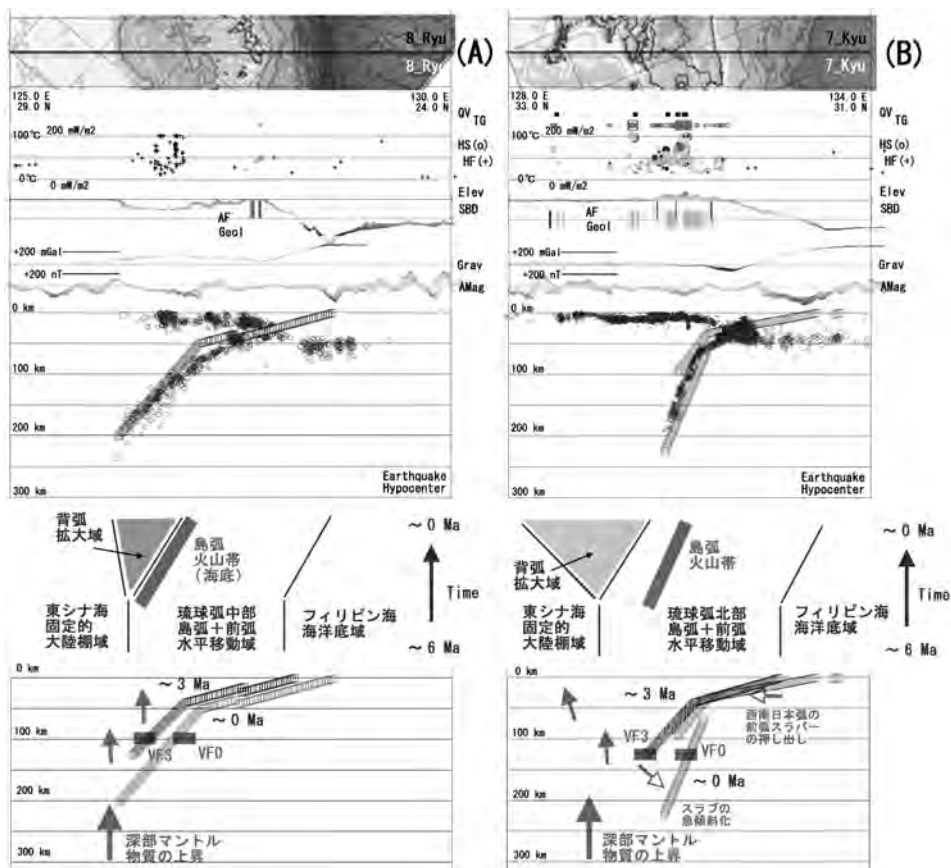
第2表(B) 完新世(～0Ma)に琉球弧とその周辺の下へ沈み込むフィリピン海プレートスラブ上の代表移動点群のシミュレーション用パラメータ値一覧表.

R0Ma	VA	θA	Lon	Lat	θp1	θd1	Time1	θp2	θd2	Time2
No	cm/y	deg	deg	deg	deg	deg	My	deg	deg	My
1	4.0	45	127.0	24.0	40	15	5.0	40	50	10.0
2	4.0	45	128.2	25.0	45	15	5.0	45	50	10.0
3	4.0	45	129.2	26.0	55	15	5.0	55	50	10.0
4	4.0	45	130.2	27.0	55	15	5.0	55	50	10.0
5	4.0	45	131.0	28.0	55	15	5.0	55	65	10.0
6	4.0	45	132.0	29.0	55	15	5.0	55	65	10.0
7	4.0	45	132.5	30.0	60	15	5.0	60	65	10.0
8	4.0	45	133.0	31.0	60	15	5.0	60	65	10.0
9	4.0	45	133.5	31.7	60	15	5.0	60	65	10.0
10	4.0	45	134.1	31.9	30	10	4.0	30	10	6.0
11	4.0	45	135.0	32.3	30	10	4.0	30	10	6.0
12	4.0	45	136.0	32.6	30	10	4.0	30	10	6.0

No. 8およびNo. 9のパラメータ値は、茂野(2008a)に修正を加えた.



第6図 琉球弧とその周辺の下へ沈み込むフィリピン海プレートスラブ上の代表移動点群についての簡易数値シミュレーション結果(平面図). (A)～3Ma, (B)～0Maの結果を示す. 背景の陸海地形は現在のもの、(A)については1000m間隔の等水深度線とともに、比較のために(B)のシミュレーション結果から沈み込み線(Line-X)とスラブの先端位置を結ぶ線(Line-Y)を示した. 一方、(B)については標高・水深・活断層の分布に深部震源分布(深度100～200km, ○; 同200～350km, ×)を加えた(電子データは第1表参照). 計算には、簡易的なプレートスラブ沈み込みのシミュレータ(SSSS)(茂野, 2008a)を用いた. 計算に使用した点群のパラメータ値(経時変化を含む)は第2表(A)・(B)を参照. 第7図の2断面線の位置とともに、琉球弧の3区分の概略の境界線を示した. 詳しくは本文参照.



第7図 琉球弧を横断する2断面線 (A)・(B)における火山・震源などの分布と簡易数値シミュレーションによって計算されたスラブの分布の時間変化。断面線の位置は第6図を参照 (茂野 (2008a)の第10図(2)の8・7と同一)。 (A)・(B)ともに、各種の電子地球科学情報(第1表参照)に加えて、震源分布とともに下部に~0Ma, 最下部に~3Maおよび~0Maのスラブの分布のシミュレーション結果を示し、両者の間に概略的な説明図を入れた。最下部の黒矢印は~0Maの深部マントル物質の上昇を示し、VF3・VF0は~3Maと~0Maの島弧火山フロントの概略の位置に対応する。詳しくは本文参照。

南日本弧の西部域について以下のように仮定した。

(1) 3Ma頃の琉球弧域の仮定: 1) フィリピン海プレートスラブの沈み込みの長さがまだ280km程度と短く、スラブ先端部分の沈み込みの傾斜角度は中位 ($\theta d2 = 45^\circ$) である。2) 沖縄トラフはまだ開き始めの時期であり、沈み込み線(当時の琉球海溝)の位置は現在よりも約65km北西方向にあった。3) スラブの先端部の深度が約100kmに達し、島弧火山活動が開始した。

(2) その後(概略3Ma以降)の琉球弧域の仮定: 1) 沖縄トラフの拡大によって琉球弧の島弧-前弧域は南

東方向に~2cm/yearの速度で移動した。これによって、フィリピン海プレートの沈み込み線(当時の琉球海溝)の位置は、ほぼ同様に移動した。2) フィリピン海プレートの沈み込みの継続に伴って、スラブの沈み込みの傾斜角度 ($\theta d2$) が琉球弧の北部域では概略3Ma以降漸次急傾斜化したが、琉球弧の中部(-南部)域ではあまり変化しなかった。3) スラブの先端部の深度が100kmを大きく越えて、島弧火山活動とともに背弧火山活動が発生・継続した。

(3) 概略3Maの西南日本弧西部域の仮定: 1) フィリピン海プレートスラブの沈み込みの長さがまだ120

km程度と短く、沈み込みの傾斜角度($\theta d2$)は 10° 程度と小さい。2)スラブの沈み込み線(南海トラフ)の位置は現在とほぼ同様であった。

(4)その後(概略3Ma以降)の西南日本弧西部域の仮定:1)フィリピン海プレートの沈み込みは継続したが、スラブの沈み込みの傾斜角度($\theta d2$)はほとんど変化しなかった。2)スラブの沈み込み線(南海トラフ)の位置は大きくは変化しなかった。

今回の2時点の簡易シミュレーションの結果を、第6図(A)・(B)に平面図にして示す。さらに、第7図(A)には琉球弧中部域の(沖縄島を通る)NW-SE方向の断面線、第7図(B)には琉球弧北部域の九州南部の(霧島火山・五島福江島を通る)WNW-ESE方向の断面線について、各々上記2時点の簡易シミュレーション結果を概略的な説明とともに重合的に簡易垂直断面図にして示す。なお、第6図(A)・第7図(A)・(B)では、現在の海岸線、水深などが表示されており、概略3Maの状況は大きく異なっていたことに注意する必要がある。

6. 考察

6.1 全体的な考察

第6図・第7図に示した5.の簡易的なシミュレーション結果は、3.に述べた琉球弧-九州地域の概要と特異性(特に火山活動の時空分布;第5図参照)にかなり調和的になっている。このことは、4.に述べたフィリピン海プレート-スラブ運動を軸とした簡易的な時空変化モデルが、ある程度高い妥当性を持っていることを示している。

九州地域について特に強調される結果として、フィリピン海プレートの琉球弧北部セグメントスラブの沈み込み傾斜角度が、概略2Ma以降に急激に増大した可能性が高いことが挙げられる。この急傾斜化によって、九州南部域(第7図(B)参照;第5図(A)のSブロック)では島弧火山活動が東方に移動するとともに、概略0.2Ma以降に鹿児島地溝-トカラ列島域に集中して大規模な火砕流を噴出し大型カルデラ群を形成した。また、同時に九州西部域(第5図(A)のWブロック)の深部高温マントル物質の上昇が西方へ押し出され、沖縄トラフの北西方向の延長部(五島列島-韓国済州島)に背弧火山活動が移動した。この島弧火山活動と背弧火山活動の分離も一因となって、琉球

弧北部域の沖縄トラフは分岐してより幅広くなる傾向を強め、沈降量が小さく(水深が浅く)留まったと推定される。

上記の九州南部域では、概略3Ma以降の島弧火山活動は琉球弧の背弧拡大域(第5図(A)のRブロック)よりも東方で開始-継続した。これに対して、九州東部・中央部域(第5図(A)のE・Cブロック)では、概略3Ma以降の島弧火山活動は地溝帯(沖縄トラフの北東方向の延長部)の形成-拡大とともにその中を南東方へ移動した(従って、背弧火山活動の性格を合わせ持つと考えられる)。以上のように島弧会合部にあたる九州地域は複雑な環境にあり、第5図に示したように新第三紀後期-第四紀の火山活動は特性が異なる地域ブロックを形成することとなった。

一方、琉球弧中部域では、概略3Ma以降のフィリピン海プレート-スラブの沈み込みは、その傾斜角度がそれほど増加することなく継続し、島弧火山活動(マントルウェッジでのマグマ生成-上昇による)と背弧火山活動(深部高温マントル物質の上昇に伴う)が時空的にかなり一体的に経過したと推測される。同時に、琉球弧中部域の沖縄トラフは沈降が大きく水深が深くなるとともに拡大し、琉球弧の島弧-前弧域(沈み込み線を含む)を南東方向に移動させていったと推定される(第7図(A)参照)。

6.2 様々な問題点についての考察

上記6.1では全体的な考察として、主要な結果について概括的なとりまとめを行った。しかし、従来から議論されているように、琉球弧-九州地域の新第三紀後期-第四紀の時空変化については数多くの未解明の問題点がある。これらの問題点と今回の簡易モデル化-数値シミュレーションの仮定や結果との関係について、以下に9項目に分けて簡単に述べる。

(1)九州中央部の地溝帯の生成機構の問題:今回の検討の中で直接的に大きな問題として、九州地域の中央部をENE-WSW方向に伸びる火山活動が活発な地溝帯(第5図(A)のE・Cブロック)の生成機構のモデル化がある。これについては、すでに様々な概念モデルが提出されている。多田(1993)などは沖縄トラフの北東延長部として南北方向の引張応力場で生成したと推定し、佃(1992, 1993)などは西南日本弧前弧域の右横ずれ運動によって生成した中央構造線の北側の剪断断裂帯であると考え、鎌田・小玉

(1993)などは特に豊肥地域(第5図(A)のEブロックの中心部)について火山構造的陥没地(プル・アパート構造運動も寄与)である可能性を指摘し、Watanabe(2005)などは九州-パラオ海嶺の沈み込みの影響を考慮している。この地域は非常に複雑であり、様々な原因が時空変化しつつ複合的に寄与している可能性がある。

本説では、基本的にこの地域を沖縄トラフの北東方向の分岐延長部と仮定して、モデルおよびシミュレーションを単純化した。

(2) 琉球弧北部のスラブ急傾斜化の機構の問題：琉球弧北部域の地形、深部震源分布、火山活動などの特異性は、セグメント化した琉球弧北部のスラブの沈み込み角度が概略2Ma以降に急傾斜化したことが大きな原因となっているということが、6.1で述べたように本説の主要な結論である。この急傾斜化の機構については、1) 該当地域に沈み込むプレート(喜界海盆地)が相対的に古く高密度でスラブが急傾斜化し易い(Watanabe, 2005)、2) 該当地域の上部マントル物質が高温・低粘性などの特性を持つ(Shiono *et al.*, 1980)、3) アムールプレートの運動などによって該当の地域・深度にマントル物質の東方への流れがある、などの可能性も考えられる。

本説では、フィリピン海プレート-スラブの斜め沈み込みによって生じた西南日本弧の前弧域の右横ずれ運動が、九州中南部の地殻とともにその下位の琉球弧北部に沈み込むセグメントスラブの上端部をWSW方向に押し出すことを、基本的に上記の急傾斜化の機構として想定した。このモデルは必ずしも決定的ではなく、いくつかの機構が複合的に働いている可能性もあり、今後の検討が必要である。

(3) フィリピン海プレートの運動の定常性・均一性の問題：フィリピン海プレートは、主に太平洋プレート-スラブの沈み込みによって概略50Ma以降に段階的に成長していった縁海プレートで、周辺の大小のプレートの運動によって時空的に複雑な影響を受けており、第四紀にもプレートの内部・外部に新しい背弧海盆が成長しているなど不均一性が高い。従って、フィリピン海プレート-スラブの運動は、上記の概略6Ma以降の比較的短い期間にも速度・方向を継続的あるいは突発的に、また全域的あるいは局地的に変化させた可能性がある。瀬野(1994)などは、フィリピン海プレートの運動の複雑な時空変化と不均一性に

ついて議論しており、Kamata and Kodama(1999)、Watanabe(2005)などは九州地域の火山活動の時空変化について、プレート運動の方向・速度の経時変化を主要原因に挙げている。

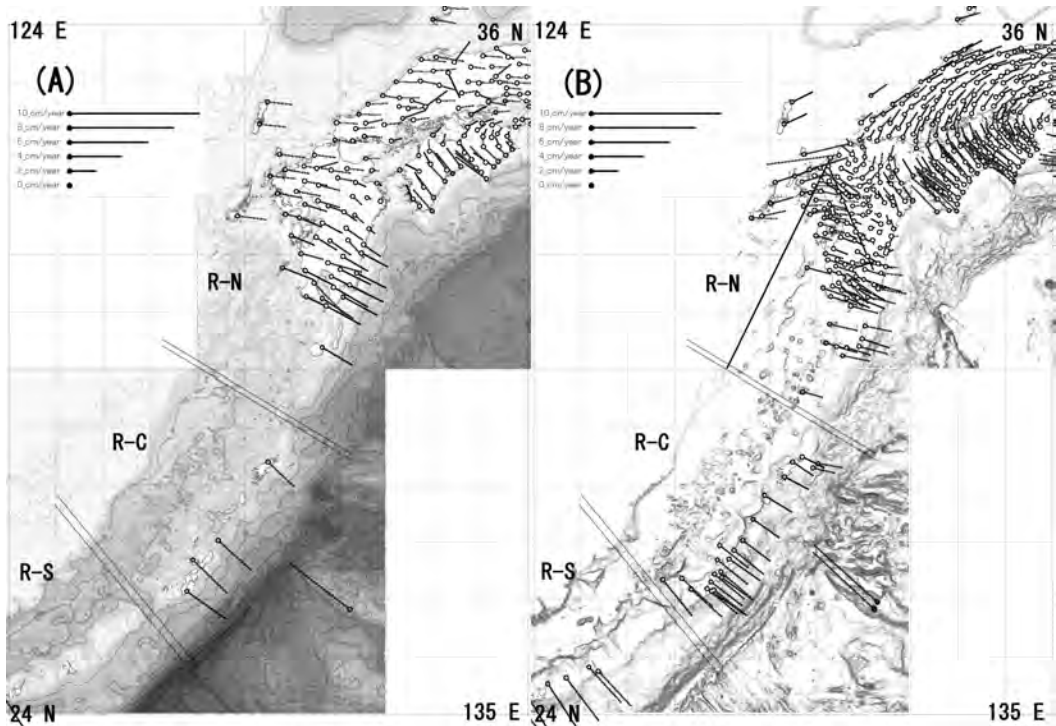
しかし、今回の検討ではプレート運動の時空変化と不均一性については、まだ不明な点が多いためモデルを非常に複雑にすると考えて、概略6Ma以降単純に定常的・均一的なプレート運動を仮定した。なお、今回のフィリピン海プレートの相対運動の仮定は、固定域とした九州北部域と東シナ海の大陸棚域に対してはNW方向に4cm/yearであるが、沖縄トラフのSE方向への拡大(~65km/300万年)によって琉球弧の島弧(九州南部を含む)~前弧域に対してはNW方向に~6cm/yearとなっていることに注意されたい。

(4) 現在のフィリピン海プレートの運動と火山活動の年代の問題：現在のフィリピン海プレートの運動についても、現状では必ずしも一致した見解は得られていない(琉球弧-西南日本弧へ相対的にNNW~WNWの進行方向、3~8cm/year程度の速度)。参考として第8図に示した大東島のGPS水平地殻変動がこれに対応するとすれば、NW方向に概略7cm/year(基準は日本列島の平均変動値)となる。

しかし、速度についてはこれを単純に平均速度として今回の簡易シミュレーションを行えば、琉球弧-九州地域における島弧火山活動の開始時期が今回の検討結果よりも遅い時期(概略2Ma;震源分布から見積もられたスラブの沈み込み全長は一定なので)となり、これまでに報告されている火山岩類の放射年代測定結果との不一致が非常に大きくなる。従って、今回はフィリピン海プレートの運動について、茂野(2008a)と同様に検討期間を通じてNW方向に4cm/yearと設定した。

なお、九州地域東部(第5図(A)のEブロック)では、6Ma頃にも大規模な火山活動が推定されており(例えば、鎌田ほか, 2004)、今回の検討結果(概略4~3Ma)でも不一致が問題として残る。また、6Ma頃の放射年代値は、九州地域南部(第5図(A)のSブロック;特に南薩地域)の火山岩・熱水性変質岩など(Izawa and Watanabe, 2001)や琉球弧中部の火山岩など(下司・石塚, 2007)についても散見される。従って、この問題についても今後の検討が必要である。

(5) 沖縄トラフの生成機構の問題：今回の検討を巡って非常に重要な基礎的な問題として、沖縄トラフ



第8図 琉球弧とその周辺のGPS地殻変動(水平)の時系列変化(平面分布図)。GPS地殻変動データは国土地理院(WWW)による。(A)1996年4月から約9年間の年平均値,(B)2004年4月から2005年3月20日福岡県西方沖地震の期間を含むを示す(変動の基準は各期間の日本全国の平均値)。九州地域に注目すると,(A)では全域的に琉球弧北部の動きとしてESE方向に水平運動をする傾向にあり,例外的に大分県南部などがほぼ静止域化している(右横ずれ運動をする西南日本弧西部の前弧域と琉球弧との衝突による)。一方,(B)では福岡県西方沖地震に関係した大きな地殻変動のほかにも(A)から明瞭な変化が認められ,静止域が宮崎県全域~熊本県東部へと移動している。このような非正常性は,南海トラフ~琉球海溝域で大規模地震が発生した場合などには,より顕著に現れるであろう。なお,背景地図は(A)が第2図(A)の水深図で,(B)はそのデータを簡易処理した1kmメッシュの水深傾斜図である。データの原典は第1表を参照。

の生成機構がある。沖縄トラフ域では,フィリピン海プレートスラブの沈み込みによる震源分布の最大深度が約300kmとそれほど深くはないにもかかわらず,特に琉球弧中部-南部域で背弧海盆が顕著に発達している。これは,世界的に稀な例である。

この原因として,1)地殻を構成する物質の特殊性(東シナ海の大陸棚堆積物が非常に厚く発達するため,島弧マグマ-火山活動が地殻の部分熔融-薄化の連鎖を引き起こしている),2)上部マントルの特殊性(前サイクルのプレートスラブ沈み込みなどの影響で深部高温マントル物質の上昇が継続していた場で,現サイクルの沈み込みによるマントルウェッジでのマグマ生成-島弧火山活動に誘発されて背弧火山活動が活

発化している)などの可能性が考えられる。今回,この問題については明示的には取り扱わなかった。

(6) 沖縄トラフの形成時期の問題:上記(3)~(5)との関連が深い問題として,沖縄トラフの形成年代がある。沖縄トラフの形成は中新世に始まった可能性が高い。しかし,第四紀に沖縄トラフの成長が顕著に進行したという考え方が,一般的に受け入れられている(例えば,井上,2007)。今回の検討結果は,沖縄トラフの大部分は概略3Ma以降に形成された可能性が高いということをサポートするが,それ以前に沖縄トラフの原型や形成活動が存在したという考え方を否定するものではない。

第8図に示したGPS水平地殻変動は,琉球弧(3セ

グメント化)がESE~SSE方向に2~4cm/year程度の速度で移動(基準は日本列島の平均変動値)していることを示しており、今回仮定したように東シナ海大陸棚域が固定的(上記基準値に近い)であれば、現在の沖縄トラフの幅(5.の簡易シミュレーションでは概略3Ma以降にフィリピン海プレートの沈み込み線がSE方向へ~65km移動)を十分説明できる。しかし、東シナ海大陸棚域の状況については不確定であり、より広範囲・長期間のデータからこの問題を検討する必要がある(従来よりアムール、揚子、沖縄などのマイクロプレートの中に西南日本弧・琉球弧を位置付ける議論がある)。なお、琉球弧域について、GPSを用いた現在の地殻変動と古地磁気を用いた第三紀以降のテクトニクスの研究の現状が、小田(2007)によって紹介されている。

(7)その他の顕著な問題:本説では重点的には(あるいは全く)取り上げなかったが、琉球弧域について注目されてきた現象として、1)琉球弧域の北部から南部へ向かって沖縄トラフの深度が大きくなり、またトラフの拡大速度も大きくなっていること、2)沖縄トラフ(特に南部-中部)内に「中央地溝」群(トラフの走向と斜行して雁行配列する傾向にあり、内部に火山体を伴う場合が多い)が多数形成されていること、3)琉球弧北部・中部・南部のセグメント境界であるトカラ海峡と慶良間海裂で、島弧に直交する大規模な左横ずれ運動を生じていること、4)琉球弧南部と琉球弧北部(特に九州南部)の両ブロックで中新世~第四紀間に回転運動を生じている(前者は時計回り、後者は反時計回り)こと、5)琉球弧-西南日本弧の会合部近傍へ九州-パラオ海嶺(その南西には奄美海台なども分布)が衝突していること、6)深部震源分布ではトカラ海峡域の深度120~200kmなどに空白域が認められること、7)同じく琉球弧と西南日本弧の接合域(伊予灘周辺)では、琉球弧の深部震源分布(深度30~50km)が西南日本弧の下へと張り出していること、8)同じく琉球弧北部の北東端部では深部震源の最深部の深度が概略150kmと顕著に浅くなっていることなどがある。

また、琉球弧下と西南日本弧下のフィリピン海プレートスラブの沈み込み長さの大きな相違についても、その原因について疑問が残る。今回の検討は非常に簡易的・概括的なものであり、残念ながらこれらの問題についてモデルに取り入れる(あるいはモデル

との関係を議論する)ことはしなかった(できなかった場合もある)が、今後の改良されたモデル化検討の中で取り扱われる必要がある。

(8)雲仙・阿蘇・九重などの活火山の特異性の問題:第3図(C)と第5図(A)の比較で明らかのように、九州地域のC・Eブロックの雲仙・阿蘇・九重の3つの複成活火山は急傾斜する深部震源分布面(深度100~200km)上ではなく、その西方の深部震源が分布しない地域に位置している(由布・鶴見火山はほぼ深部震源分布面上に分布)。これらの活火山の活動は、4.で述べたように九州中央部のENE-WSW方向の地溝帯の深部から上昇する高温マントル物質によって、ある程度支援されている可能性がある。

しかし、特に第四紀後期に大規模な火砕流噴出-カルデラ生成活動を繰り返した阿蘇火山については、そのみで説明することは困難に思われる。今回の検討結果は、本地域下に沈み込むフィリピン海プレートスラブが概略2Ma以降に沈み込みの傾斜角度を急激に増加させたことを示している。従って、概略0.3Ma以降の阿蘇火山の大規模な活動は、この傾斜角度の増大に伴って概略2Ma以降に地下で発生したマグマ生成-上昇の集中化(現在はすでに東方へ通過済み)の結果である可能性が指摘される。この推論を未来に延長すれば、阿蘇火山の北東方向に位置する九重火山および由布・鶴見火山に、将来的に大規模な火砕流噴出-カルデラ生成を伴う火山活動が生じる可能性が指摘されよう。1.で述べた日本で最も活発な大分県(特に最大の別府地域)の温泉活動も、これに関連している可能性がある。

なお、上記の阿蘇火山と九州南部の霧島火山との間には第四紀火山活動の空白域が存在している(第5図(A))。この原因については、標高・重力異常分布(第2図)に示されるように、西南日本弧の前弧スラバーの西進-衝突によってこの地域では地殻の厚化を生じており、地下深部からのマグマの上昇、地表への噴出が困難となっている可能性が指摘される。

(9)高温熱水系活動の問題:本説では、誌面の都合もあり火山活動を中心に述べたが、最後に地熱活動について若干述べる。

基本的に九州地域の新第三紀後期~第四紀の高温熱水系活動は、3.3で述べた島弧マグマ-火山活動を熱源としており、特に九州地域の南部・東部に多数の高温熱水系が発達し、浅熱水性金鉱床なども生成

した。

しかし、高温熱水系の発達のためには地下の加熱機構・温度環境とともに流体の透水・貯留環境条件が重要であり、高温熱水系の分布は火山活動域とその周辺でも一部に限られる。さらに、浅熱水性金鉱床の生成については、マグマや周辺の各種岩石中に微量に存在する金の地熱流体中への取り込み・移動、濃集・沈殿過程が必要であり、その分布はそれ以上に制約される。

なお、基本的に陸域の高温熱水系の生成環境には、直接的に高温のマグマ起源流体が寄与する場合、降水起源地下水の深部熱伝導高温域への対流による場合などがある。安山岩質の火山系のマグマ—その固結岩体が関係する場合、前者は火山活動の最盛期に生成し、その分布は火山活動時の広域テクトニクスの影響を受ける傾向が強いのに対して、後者は火山活動の後期～末期に生成し、過去に生成した地質構造にも規制される可能性が高い(例えば、茂野・阿部, 1986; 茂野, 1992)。

一方、琉球弧—九州地域には、海底の高温熱水系活動が鹿児島地溝—トカラ列島の島弧火山活動や沖縄トラフの島弧—背弧火山活動に伴われて多数存在する。海底高温熱水系ではマグマ起源流体のほか、海水—続成水が大きく寄与することとなるが、その特性や分布は陸域の熱水系とは異なる生成環境(水深に依存した水圧・沸点上昇など)の影響も受ける。これらの熱水系の一部では、各種の熱水性鉱床が生成しており今後の開発が期待されている(例えば、原口・児玉, 2007)。

このような多様な高温熱水系活動は、火山活動に比較して地殻浅部の環境の影響をより強く受ける傾向にある。従って、高温熱水系活動の理解には、本説のような広域的な視点に加えて、個々の地域の局地的な視点からの検討が非常に重要であり、琉球弧—九州地域の様々な熱水系活動についても別の取りまとめが必要である。

上述した(1)～(9)のように、フィリピン海プレート—スラブ、琉球弧、西南日本弧、沖縄トラフ、琉球海溝およびその周辺のプレート(—スラブ)、島弧域、海域、また地震活動、地殻変動、火山活動、地熱活動などを巡っては様々な未解明の点があり、またそれらが相互に複雑に関係しているため、総合的な理解は容易ではない。特に、地質時代を遡るほど信頼性の高い

データは乏しくなる傾向が強いととも、複雑なプレート運動に伴われて現在の位置が過去の現象発生の位置から大きく変化している可能性があるため、推定の不確定性は高くなる。今回の検討は非常に単純化した簡易的なモデル化と数値シミュレーションに基づくものであるが、九州地域の火山・地熱活動の時空変化とその原因の理解のみならず、上記のより広域的～局地的な地域・現象の理解にも寄与する機会があれば幸いである。

7. おわりに

本説は、筆者が「地理・地球科学情報システム(GIS)を利用した地熱資源の評価(アセスメント)の研究」に引き続いて進めている一連の継承—発展的な研究の中で、公開電子地球科学情報の簡易統合的処理手法とプレートテクトニクスに基づく簡易モデル化—数値シミュレーション手法との応用研究の一例を取りまとめたものである。本説で使用した手法の基礎は地質調査総合センター(2007)、茂野(2008a)によって、他の応用例については茂野(2008b, 2008c)によって紹介されているので、必要に応じて参照願いたい。今回は上記の手法をさらに発展させて、時空変化が大きな環境を対象とした検討事例を紹介した。

本説の結果が、直接的に琉球弧—九州地域の火山・地熱活動、およびその関連現象の理解に寄与する機会があれば幸いである。また、今回の公開電子地球科学情報とその処理システム、およびプレート—スラブの運動の簡易的なモデル化—数値シミュレーション手法が、他の地域の理解(今回のように時空変化が大きな場合を含めて)に向けての参考となれば幸いである。

なお、今回の研究に伴って編集・処理した電子情報、処理のために作成・改良したプログラムなどについては、茂野(2008a, 2008b, 2008c)などの場合のものと合わせて、2010年度末を目標に電子公開化(CD-ROM出版)の予定である。その機会に、地質調査総合センター(2007)の不備な部分の改良点などについても、公開化したい。

本説の取りまとめに当たっては多数の多様な文献を閲覧したが、対象とした地域が非常に広くまた現象も複雑多様なため様々なデータや考え方があり、必ずしも十分には検討・理解・引用できなかった。本説

の不十分な点については、試行的な検討の紹介としてご容赦願いたい。

謝辞：従来より様々な議論をしていただいている福岡大学理学部の田口幸洋氏には、今回の九州地域の検討について取り掛かりとなる貴重な示唆をいただくとともに、原稿について多数の貴重な指摘をいただいた。産業技術総合研究所・地質情報研究部門の須藤 茂氏、同北海道センターの中川 充氏（共に地質調査総合センター所属）にも、原稿について重要な指摘をいただいた。記して厚く感謝します。

文献（本文中に非引用で、図作成に使用した電子情報は第1表を参照）

- 荒井晃作・西村 昭 (2007)：沖縄海域の調査に向けて - 特集号のはじめに -。地質ニュース, no.633, 10.
- 地質調査所 (1995)：100 万分の1日本地質図第3版, CD-ROM 版, 数値地質図, G-1.
- 地質調査総合センター (2002)：東北・九州地熱資源図 (CD-ROM 版), 数値地質図, GT-1.
- 地質調査総合センター (2007)：九州-大分-豊肥地域の地熱データ処理集「地理情報システム (GIS) を利用した地熱資源の評価の研究 (2001-2005 年度)」のまとめと簡易統合的処理データ・プログラム集 (CD-ROM), 数値地質図, GT-3.
- 下司信夫・石塚 治 (2007)：琉球弧の火山活動, 地質ニュース, no.634, 6-9.
- 原口 悟・児玉敬義 (2007)：沖縄トラフの海底熱水鉱床, 地質ニュース, no.634, 10-14.
- 井上卓彦 (2007)：東シナ海における地質構造発達史 - 研究レビュー -, 地質ニュース, no.633, 37-44.
- Izawa, E. and Watanabe, K. (2001)：Overview of epithermal gold mineralization in Kyushu, Japan. *Society of Economic Geologists Gudebook Series*, **34**, 11-15.
- 角田寿喜・後藤和彦 (2002)：九州-南西諸島北部域の地震活動とテクトニクス, 地震 第2輯, **55**, 317-336.
- 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, 129-148.
- Kamata, H. and Kodama, K. (1999)：Volcanic history and tectonics of the Southwest Japan Arc. *The Island Arc*, **8**, 393-403.
- 鎌田浩毅・小沢潤子・田上高広 (2004)：フィリピン弧・琉球弧・西南日本弧に共通するテクトニクスの変化, 月刊 地球, **26**, 356-363.
- Letouzey, J. and Kimura, M. (1986)：The Okinawa trough: Genesis of a back-arc basin developing along a continental margin. *Tectonophysics*, **125**, 209-230.
- 町田 洋・太田陽子・河名俊男・森脇 広・長岡信治 編 (2001)：日本の地形7 九州・南西諸島, 東大出版会, 355p.
- 日本の地質「九州地方」編集委員会 編 (1992)：日本の地質9 九州地方, 共立出版, 371p.
- 日本列島の地質編集委員会 編 (1996)：コンピュータグラフィックス日本列島の地質 (CD-ROM 付), 丸善, 139p.
- 小田啓邦 (2007)：GPS・古地磁気からみた沖縄トラフ・琉球弧のテクトニクス, 地質ニュース, no.633, 31-36.
- 瀬野徹三 (1994)：台湾付近のテクトニクス, 地震 第2輯, **46**, 461-477.
- 茂野 博・阿部喜久男 (1986)：別府-九重-阿蘇-熊本-雲仙地域の熱水系 - (1) 火山性温泉, 噴気地分布の規則性から推論される熱水系モデル -, 地調月報, **37**, 159-181.
- 茂野 博 (1992)：熱水系の深部環境を地球化学データから予測する, 地質ニュース, no.457, 16-33.
- 茂野 博 (2005)：九州地方を例とした「地球科学アトラス」の自作：電子地球科学情報の簡易的な統合利用に向けて, 地質ニュース, no.616, 44-57.
- 茂野 博 (2008a)：海洋プレート-スラブの斜め沈み込みの簡易数値モデルと数値シミュレーション - 電子地球科学情報の統合解析による近畿地方の高温温泉の検討 (1) -, 地質ニュース, no.646, 6-21.
- 茂野 博 (2008b)：プレートテクトニクスに基づく湯の峰・有馬温泉の生成環境のモデル化 - 電子地球科学情報の統合解析による近畿地方の高温温泉の検討 (2) -, 地質ニュース, no.647, 25-38.
- 茂野 博 (2008c)：相模トラフ域-関東平野におけるフィリピン海プレート-スラブの沈み込み - 公開電子地球科学情報を利用した簡易モデル化-数値シミュレーションによる検討 -, 地質ニュース, no.648, 20-33.
- Shiono, K., Mikumo, T. and Ishikawa, Y. (1980)：Tectonics of the Kyushu-Ryukyu arc as evidenced from seismicity and focal mechanism of shallow to intermediate-depth earthquakes. *Jour. Phys. Earth*, **28**, 17-43.
- Sibuet, J.-C., Letouzey, J., Barbier, F., Charvet, J., Foucher, J.-P., Hilde, T. W. C., Kimura, M., Ling-Yun, C., Marsset, B., Muller, C. and Stephan, J.-F. (1987)：Back arc extension in the Okinawa Trough. *Jour. Geophys. Res.*, **92**, 14041-14063.
- 多田 堯 (1993)：九州中部地方の地殻変動とテクトニクス - 別府-島原地溝の分裂拡大 -, 地質学論集, no.41, 1-12.
- 佃 栄吉 (1992)：西南日本弧のアクティブテクトニクス - 前弧スリバーの西進運動にともなう変形像 -, 地質学論集, no.40, 235-250.
- 佃 栄吉 (1993)：中部九州は本当に南北に開いているか? 地質学論集, no.41, 149-161.
- Uto, K. and Tatsumi, Y. (1996)：Quaternary volcanism of the Japanese Islands. *The Island Arc*, **5**, 250-261.
- 宇津徳治 (1999)：地震活動総説, 東大出版会, 876p.
- 渡辺 寧 (2004)：生きている九州-浅熱水性金鉱床生成区の変遷, 地質ニュース, no.599, 31-39.
- Watanabe, Y. (2005)：Late Cenozoic evolution of epithermal gold metallogenic provinces in Kyushu, Japan. *Mineralium Deposita*, **40**, 307-323.

SHIGENO Hiroshi (2009)：Relation between spatial-temporal changes of volcanic and geothermal activities in Kyushu, Japan, and subduction of Philippine Sea plate-slab: Simplified modeling and simulation using electronic earth-sciences information.

< 受付：2008年9月16日 >