

我が国における火山の発生メカニズム等について (事務局が収集した情報とその理解)

(第2回火山の発生メカニズム等に関する意見聴取会合 資料2-1からの修正)

令和4年4月28日

原子力規制庁 研究炉等審査部門

1. 本会合の進め方

原子力規制委員会は、今後の概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項(考慮事項)の検討を行い、提示する*1。これに先立ち、我が国における火山の発生メカニズムの特徴、その地域性、新たな火山の発生に関して、文献から得た知見に基づく事務局の整理に対し、専門的なご意見を頂きたい。

我が国における火山の発生メカニズム及びその地域性

- 現在の科学的知見に照らして、妥当な内容であるか
- 明確に否定する学説や科学的知見があるか
- 例外的な事象として報告されているものはないか
- 整理結果に付け加えておくべき留意点等はないか

将来的な火山の発生に関する既往知見及び研究の動向

- どのような研究が行われているのか
- 留意すべき点として、どのようなことが考えられるか

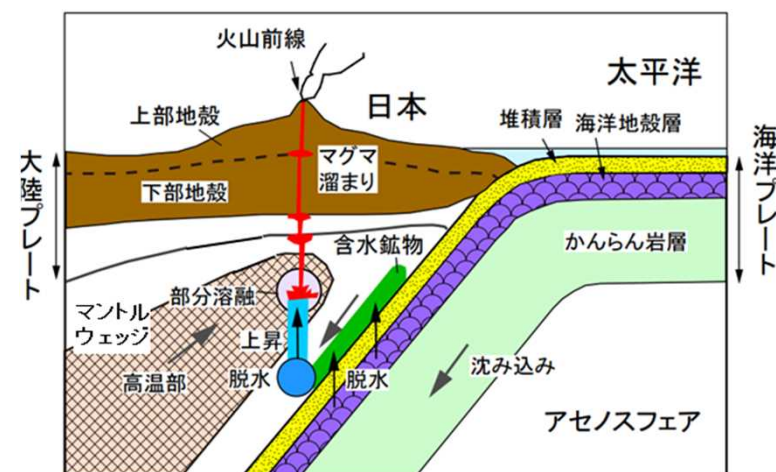
2. 事務局が収集した情報

3

我が国におけるマグマの発生から火山噴火に至るまでのメカニズム

プレートの沈み込み帯である我が国における基本的なマグマの発生から火山噴火に至るまでのメカニズム*2

1. 沈み込むスラブ表面とマントル物質との間に粘性カップリングがあることにより、スラブ直上の物質がスラブの沈み込み方向に引きずり込まれ、その隙間を埋めるように高温で低粘性の物質が深部から上昇する*3(マントル上昇流)。
2. プレートの沈み込みに伴う温度、圧力の上昇により含水鉱物は脱水分解し、高温の楔型マントル(マントルウェッジ)に水を放出する。
3. 放出された水はカンラン岩の融点を下げ、マントルウェッジ内の**高温部**でメルトが生成される。
4. メルトはマントル上昇流によりモホ面*直下まで運ばれる。
5. モホ面直下に蓄積したメルトは結晶分化を起こしながら地殻内に貫入し、マグマ溜まりを形成する。
6. マグマ溜まりから供給されたマグマが地表に到達し、火山噴火を引き起こす。



プレートの沈み込みとマグマの発生*4

*モホ面:モホロビッチ不連続面の略称であり、地殻とマントルの境界をいう。

*2 中島(2016), 火山, 61 (1), 23-36

*3 McKenzie (1969), Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 18, 1-32.

*4 佐野ら(2018), 月刊地球, 40 (4), 199-209

2. 事務局が収集した情報 我が国における火山の分布



日本列島における火山フロントの位置
(巽, 2011^{*5}に加筆)

沈み込み帯に形成された火山は、海溝から一定の距離離れた場所に火山が最も集中し、さらに陸側に向かって火山は徐々に少なくなっていく^{*6}。
⇒火山の分布の海溝側の端を結んだラインが「火山フロント^{*}」^{*7}。

火山フロントより
海溝側を「前弧域」^{*6}
上記の反対側を「背弧域」^{*6}

※原文では「火山帯のフロント」とされている

*5 巽(2011); 地球の中心で何が起きているのか 地殻変動のダイナミズムと謎

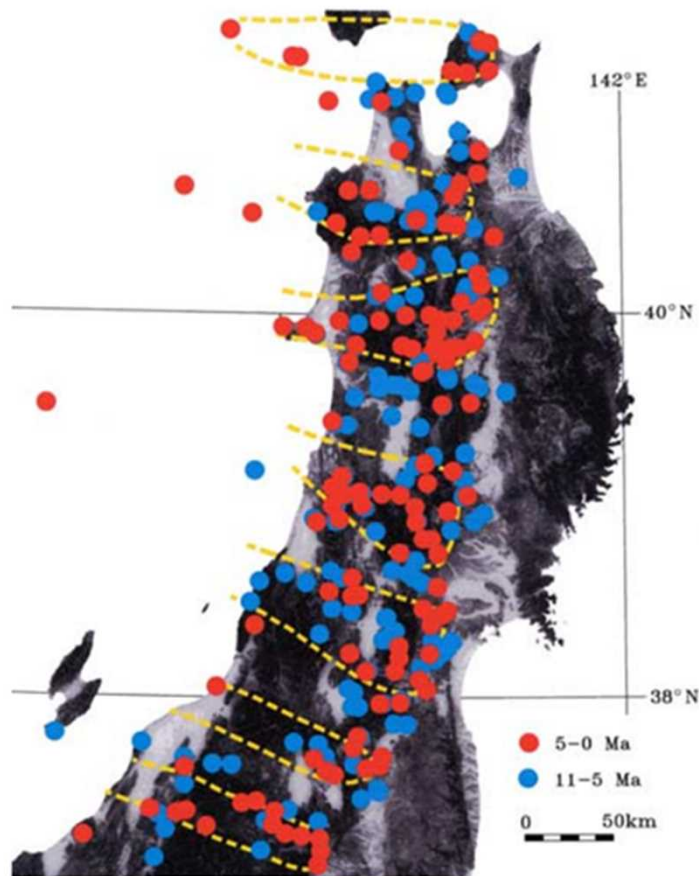
*6 高橋(2017); GSJ地質ニュース Vol. 6 No. 5

*7 杉村(1959), 火山, 4(2), 77-103.

2. 事務局が収集した情報

我が国における火山の地域性－東北地方(1/2)－

5



東北日本における過去から現在における火山の位置*8

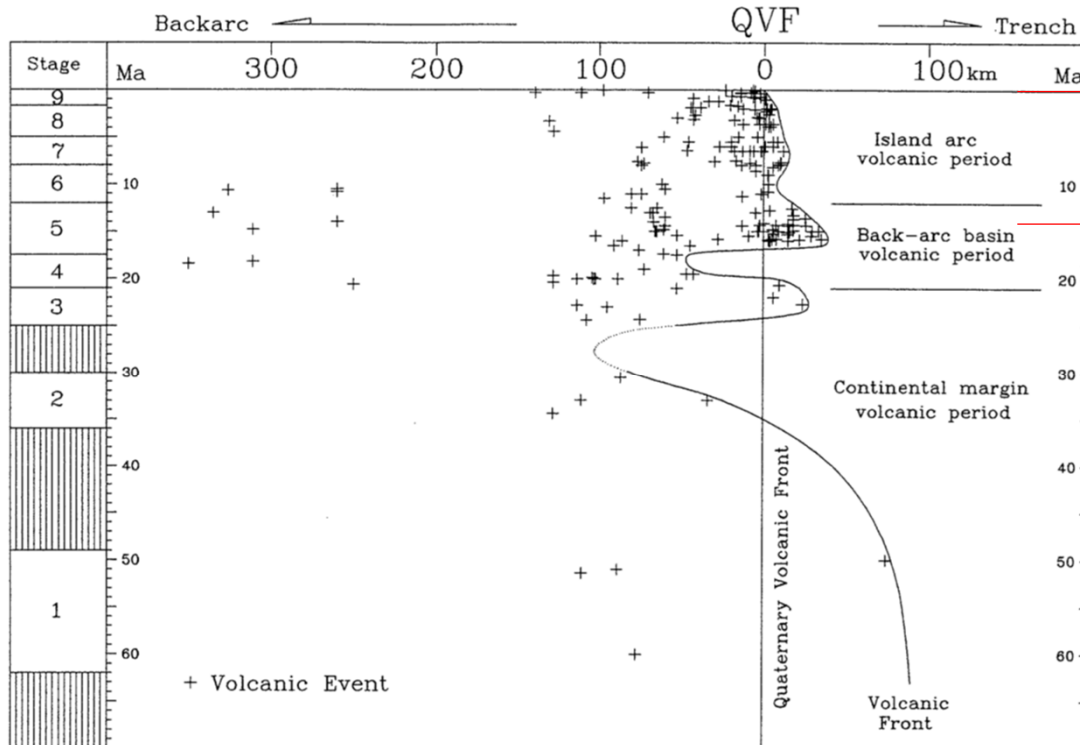
- 東北地方の火山の分布については、ホットフィンガー*9という考え方が提唱されている。この考え方に基づけば、最近5 Ma*の火山活動はホットフィンガーの分布(左図の破線)とよく一致するが、それより以前は、ホットフィンガーから外れた地域でも火山活動がみられる。また、見方によっては、フィンガーが入れ替わっているようにも見える*8。
- 火山位置の変遷をシミュレーションした結果も報告*8されているが、その範囲はある程度大きな範囲であり、特定の位置での火山噴火を再現できるものではないと考えられる。

※Ma: Mega annumの略で、100万年前を表す。

*8 Honda and Yoshida (2005), *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **6** (1), 1-22.

*9 Tamura et al. (2002), *Earth and Planetary Science Letters*, **197** (1-2), 105-116.

2. 事務局が収集した情報 我が国における火山の地域性－東北地方(2/2)－



火山フロントは西方
(背弧域)へ移動

日本列島の移動
や高温のアセノ
スフェアの上昇
等による火山フ
ロントの移動*10

東北地方における火山フロントの位置の変遷*10

- 日本列島が形成されたとされている時期(約1400万年前)以降において、**東北地方の火山フロントは大局的には背弧側(西方)へ移動している。**

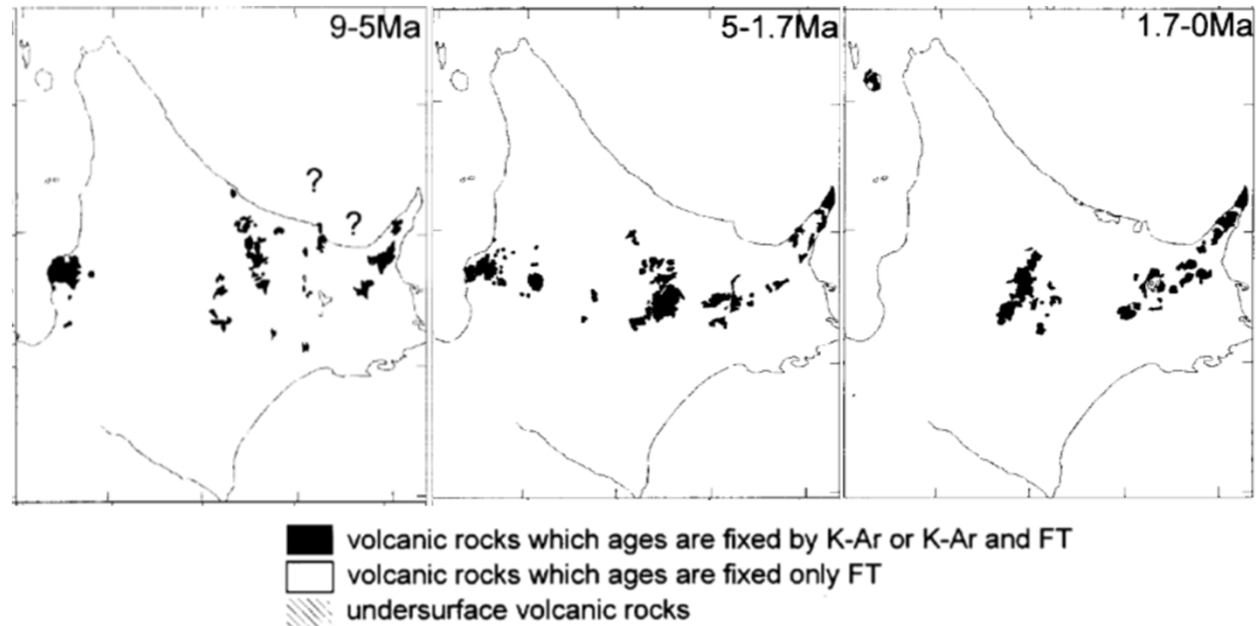
※本会合第1回目において、吉田ら(1995)以降にも、上記の大局的傾向を裏付ける更なるデータが得られているとの指摘があった(例えば、現在の火山フロントよりも東方に位置する栃木県茂木地域では16.7 Ma, 17.7 Ma, 18.6 Maの放射年代値が報告されている*11, 12)。

*10 吉田ら(1995), 地質学論集, **44**, 263-308.; *11 高橋・星(1995), 地質学雑誌, **101**(10), 821-824.

*12 星・高橋(1996), 地質学雑誌, **102**(7), 573-590.

2. 事務局が収集した情報 我が国における火山の地域性－北海道－

7



北海道中央部～東部における火山位置の変化*13

- 9-1.7 Ma: 太平洋プレートの千島弧に対する斜め沈み込みによる島弧火山活動*13
- 1.7-0 Ma: 太平洋プレートの千島弧に対する直交に近い沈み込みによる火山活動*13



数100万年以上の長期にわたり火山活動が連続して起こった地域はなく、火山活動の移動が頻繁に認められる*13。

*13 広瀬・中川 (1999), 地質学雑誌, 105 (4), 247-265.

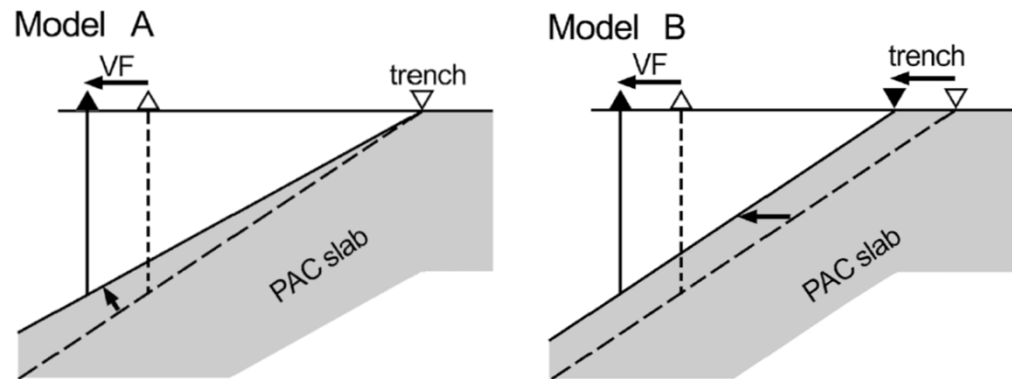
2. 事務局が収集した情報

我が国における火山の地域性－伊豆・小笠原－

- 太平洋プレートの沈み込みにより形成された伊豆-小笠原弧の火山フロントは、4 Ma頃まで、現在の火山フロントの東方40 kmに位置し、それ以降、西方へ移動して現在の火山フロントの位置に至る*14。
- フィリピン海プレートの進行方向の変遷*14
 - ✓ 4 Ma以前が北北西方向
 - ✓ 4-2 Maが移行期
 - ✓ 2 Ma以降が北西方向



火山フロントの西方への移動はフィリピン海プレートの運動方向の転換を反映したものと考えられる*14。



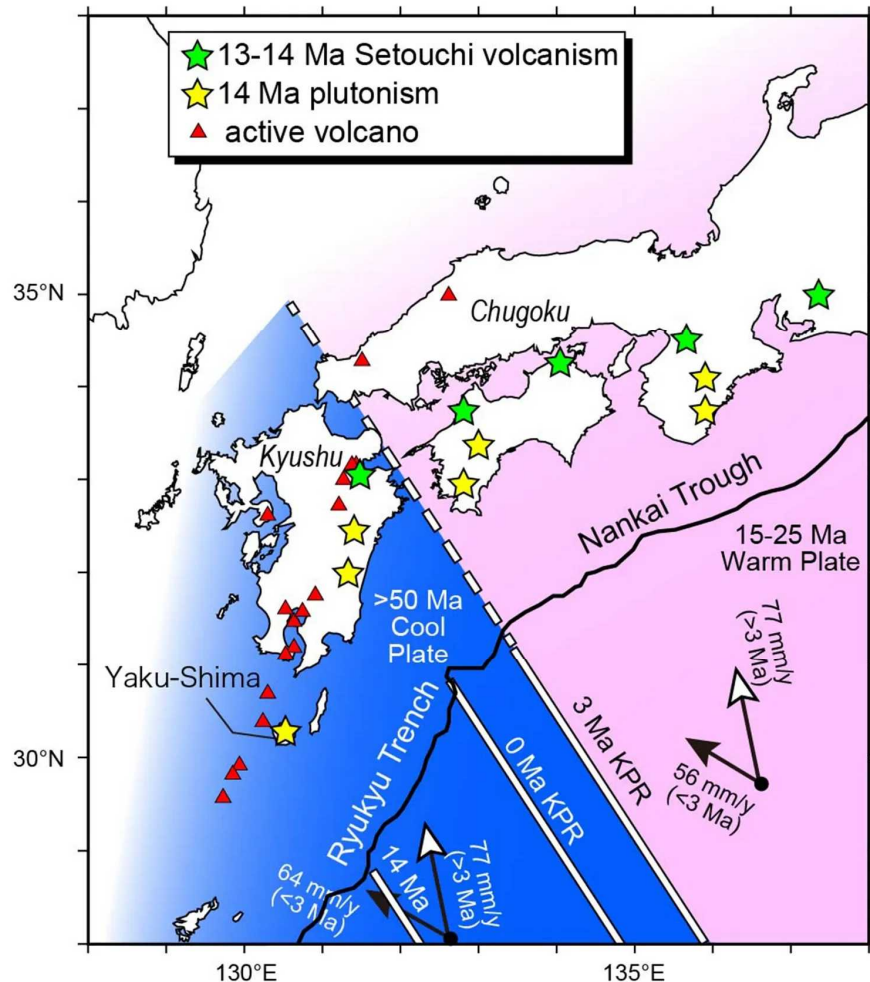
本地域における火山フロントの移動原因の可能性*14
(左図:スラブの沈み込みの角度が変化、右図:海溝位置が変化)

*14 森ら (2012), 岩石鉱物科学, 41(3), 67-86.

2. 事務局が収集した情報

我が国における火山の地域性－中国・九州(1/2)－

9



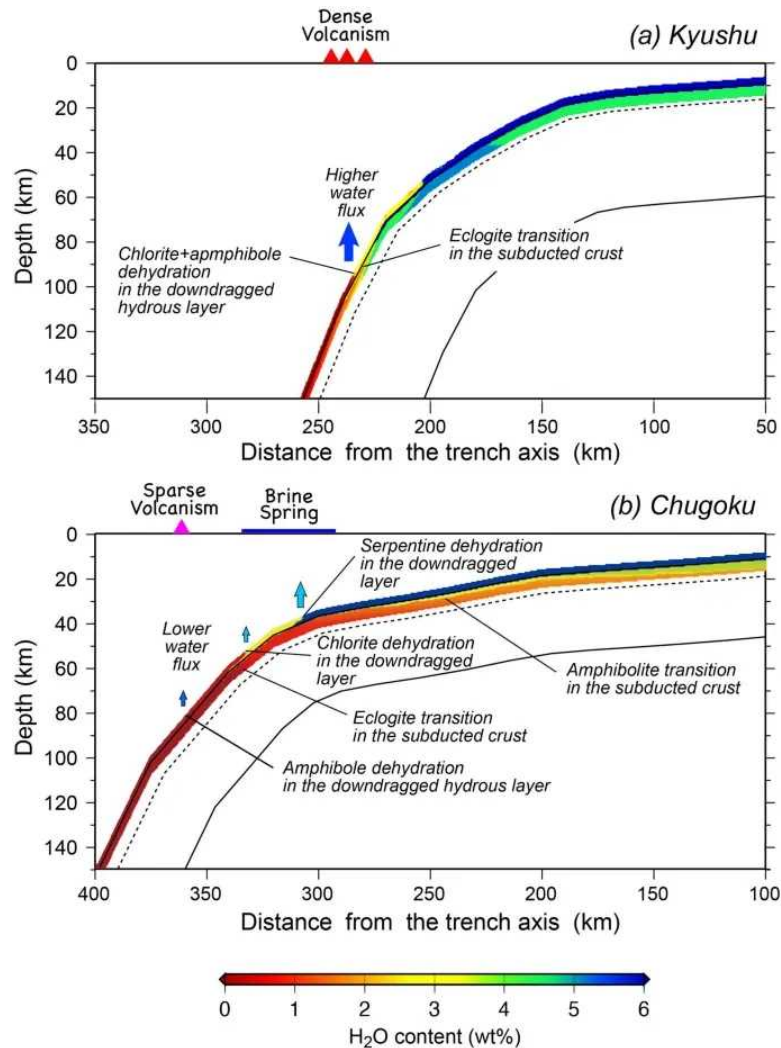
九州地方及び中国地方の火山分布とプレートの沈み込み*15

- 九州地方と中国地方はフィリピン海プレートが沈み込む地域である*15。
- 火山の分布は九州地方では密であり、中国地方では粗である。
- 九州地方に沈み込んでいるプレートは50 Maより古く、冷えたプレートであることに対して、中国地方に沈み込んでいるプレートは15-25 Maとより若く、温かいプレートである*15。

*15 Tatsumi et al. (2020), Nature, Scientific Reports, 10:15005

2. 事務局が収集した情報

我が国における火山の地域性ー中国・九州(2/2)ー



プレートの沈み込みと脱水と水の放出に関するシミュレーション*15

- 九州地方では、深度100 km程度で水の放出(緑泥石と角閃石の脱水)が起こっており、それを起因としてマグマが生成されていると考えられる*15,16。
- 一方、中国地方では、深度40 km程度(蛇紋石の脱水)、深度50 km程度(緑泥石の脱水)で水の放出が起こっているが、それを起因として、水に富んだ深部流体が生成されていると考えられる*15, 16。
- 中国地方では、マグマが生成するための深度に至る前にスラブの水分が失われることで、マグマの生成量が少なくなり、火山の数も少ないものと考えられる*15。一方、日本海側には単成火山が存在し*17、マグマの生成はマンツルの部分溶融によるものと考えられる*17, 18, 19。

*15 Tatsumi et al. (2020), Nature, Scientific Reports, 10:15005.

*16 Peacock and Wang (1999), Science, 286 (5441), 937-939.

*17 西村 (2016), 温泉科学, 66 (2), 124-136.

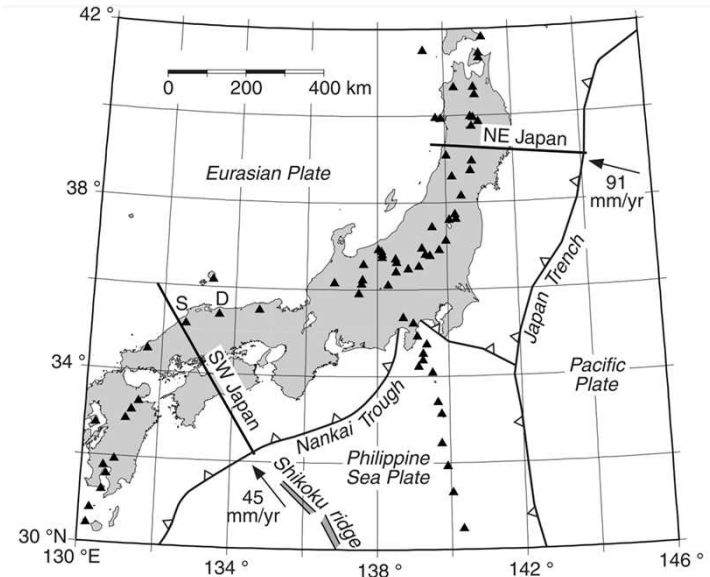
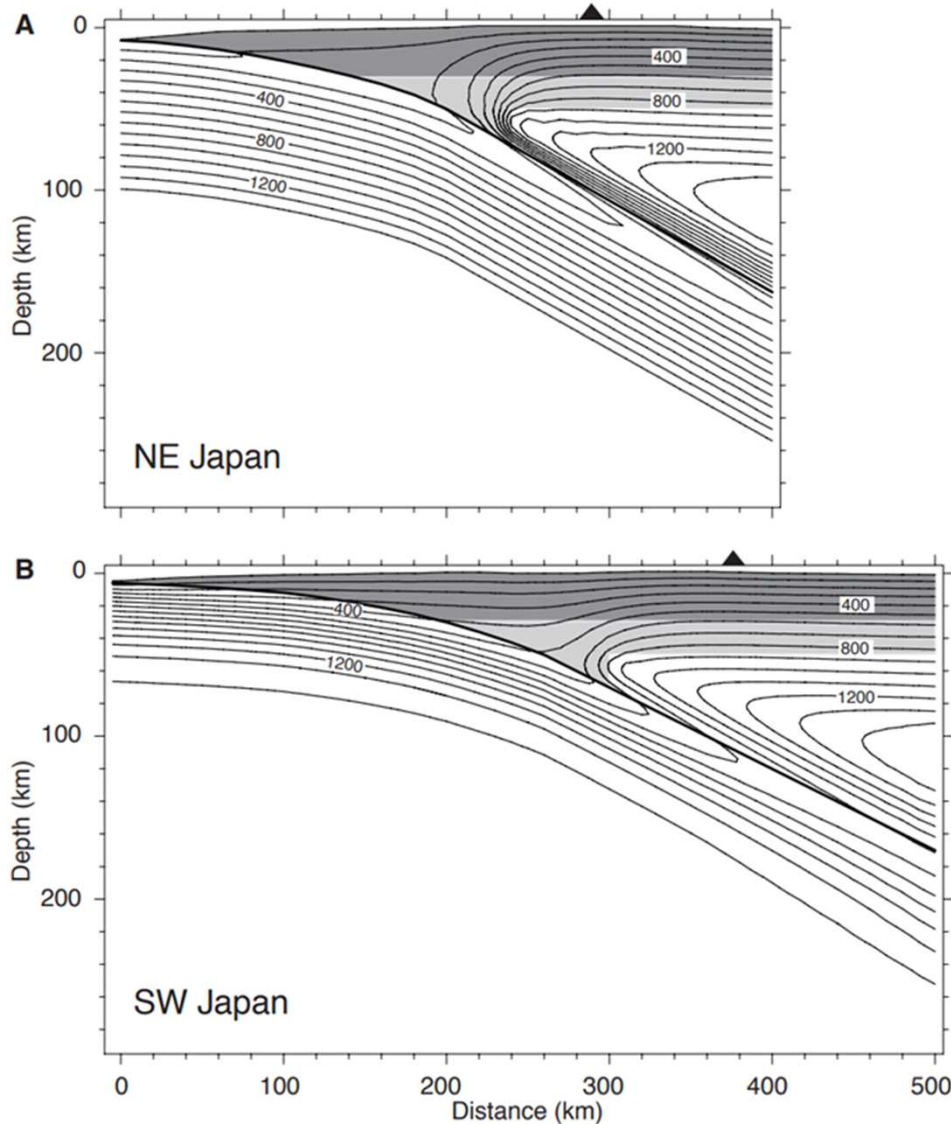
*18 Iwamori (1992), Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 97, 10983-10995.

*19 片山ら (2010), 地学雑誌, 119 (2), 205-223.

2. 事務局が収集した情報

プレートの沈み込み温度に関する東北日本と西南日本の比較

11



- 15-50 Maのフィリピン海プレートと比べ、130 Maの太平洋プレートは古く、冷えたプレート*15, 16。
- 左図の例では、深度50 kmにおけるスラブ／マントル境界の温度は、東北日本では200°C、西南日本では500°C*16。

*15 Tatsumi et al. (2020), Nature, Scientific Reports, 10:15005

*16 Peacock and Wang (1999), Science, 286 (5441), 937-939.

2. 事務局が収集した情報 マグマ溜まりから地表等へのマグマの移動

- マグマ溜まりから供給されたマグマが地表へ到達するには、上部地殻における応力の状態や岩盤特性などが影響すると考えられる*20。
- 第四紀火山の中心及び個別火山体(側火山等)*の分布に基づく、97.7%の火山で、火山中心から半径15 kmの範囲内に個別火山体が収まっているという報告がある*21。
- 一方、15 kmの範囲を超えるような地中でのマグマの移動が観測された事例(例えば、2000年の三宅島火山の噴火に伴う事象*22-24)も報告されているが、このようなマグマの移動は、上記のような火口の移動も含めて、広域応力場と局所応力場の組合せが影響することが示唆されている*25, 26。

※個々の第四紀火山は、一般的に、主火道とそれから分岐した複数の火道を持ち、それにより形成される複数の側火山などの個別火山体によって構成されている。

*20 高橋 (1994), 地学雑誌, **103** (5), 447-463.

*21 経済産業省資源エネルギー庁 (2017), 「科学的特性マップ」の説明資料

*22 津久井ら (2005), 火山地質図 12 三宅島火山, 産業技術総合研究所地質調査総合センター

*23 Nishimura et al. (2001), Geophysical Research Letters, **28** (19), 3745-3748.

*24 酒井ら (2001), 地学雑誌, **110** (2), 145-155.

*25 三浦ら (2006), 電力中央研究所報告, N05024

*26 土志田ら (2006), 電力中央研究所報告, N05026

2. 事務局が収集した情報 プレート運動の継続性

- 太平洋プレートの運動はおよそ43 Maの天皇海山列の屈曲以降は一定している^{*27}。
- フィリピン海プレートの過去の運動は、プレート上にホットスポットが存在しないため、解明されていない^{*28}。
- 3 Ma程度から開始されたと考えられる東北日本の東西収縮^{*29}については、フィリピン海プレートの運動の方向が変化したことが原因とする報告^{*30}がある。
- 日本列島のネオテクトニクスの枠組みにおいて多くの地域で地殻変動の方向や速度が一定になったのは数十万年前以降^{*31}との報告もあるが、これは地域的なものであり、大局的なプレート運動はより長期的に安定的と考えられる。



日本列島周辺のプレート運動は3 Ma程度から現在までほぼ一定と考えられる。

*27 Harada and Hamano (2000), AGU Geophysical Monograph Series.

*28 高橋 (2006), 地学雑誌, **115** (1), 116-123.

*29 Sato (1994), Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **99** (B11), 22261-22274.

*30 Takahashi (2017), Bulletin of the Geological Survey of Japan, **58** (4), 155-161.

*31 梅田ら (2013), 地学雑誌, **122** (3), 385-397.

2. 事務局が収集した情報

基本的なマグマの発生メカニズムに対する例外的事例

- 背弧海盆の拡大時(例えば、14 Ma以前の日本海の拡大時)には、高温のアセノスフェア※が地表付近に上昇^{*32}し、これが前弧域側に流れ込むことにより、太平洋スラブのような冷えたスラブを溶融し、多様な成分のマグマが発生^{*33, 34}して火山が発生した事例があるとされている(例えば、現在の福島県阿武隈山地に産する火山岩^{*33})。
- 海山が沈み込む場では、海山由来のスラブ流体が発生し、これがマントルと反応することにより、マグマが発生するため、通常では火山活動が起こらないと考えられる前弧域で火山が発生した事例があるとされている(例えば、カムチャッカ)^{*35}。
- 西南日本の紀伊半島においては高いヘリウム同位体比(³He/⁴He)が測定されており^{*36}、この地域の深度30-60 kmにおいて低速度領域が存在することが地震波トモグラフィによって確認されている^{*37}ことから、フィリピン海スラブの下からのマントル上昇流によって³Heが運ばれていることが示唆されている^{*37}。

※固いリソスフェア(プレート)の下に分布する柔らかく、比較的流動性に富んだ層

*32 Hirai et al. (2018), *Geology*, **46** (4), 371-374.

*33 Yamamoto and Hoang (2009), *Lithos*, **112** (3-4), 575-590.

*34 Ishizuka et al. (2010), *Earth and Planetary Science Letters*, **294**, 111-122.

*35 Nishizawa et al. (2017), *Nature, Scientific Reports*, **7**, 11515.

*36 Sano and Wakita (1985), *Journal of Geophysical Research*, **90** (B10), 8729-8741.

*37 Nakajima and Hasegawa (2007), *Earth and Planetary Science Letters*, **254**, 90-105.

3. 事務局の整理(御意見を踏まえた再整理)

(マグマの発生から火山噴火に至るまでのメカニズムとその地域性について)

15

- プレートの沈み込み帯である我が国における基本的なマグマの発生から噴火に至るまでのメカニズムは、スラブから高温のマントルウェッジへの水の放出によりメルトが生成し、モホ面直下に蓄積したメルトは結晶分化を起こしながら地殻内に貫入し、マグマ溜まりの形成した後、火山噴火に至る(p.3の1.~6.)。
- 東北日本(ここでは関東以北から北海道までを含む範囲を指す)に沈み込んでいる太平洋プレートは古いプレートであり、プレート自体が冷えていることに加え、当該地域では背弧海盆の拡大時に見られるような高温のアセノスフェアの地表付近への上昇が生じていないため、当該沈み込み域においては、p13に挙げた例外的な事象が指摘されているものの、基本的に、マントルウェッジ内の高温部の上昇と水の供給による融点低下という状況が整った場合に、マグマが発生する。
- 西南日本におけるフィリピン海プレートの沈み込み域におけるマグマの発生メカニズムも基本的には太平洋プレートの沈み込み域と同様であるが、中国地方に沈み込んでいるプレートはプレート自体の温度が高いため、十分な水の供給がない条件であっても、沈み込んだプレートそのものの部分溶融(スラブメルティング)によってマグマが発生する場合もある。

3. 事務局の整理(御意見を踏まえた再整理)

(マグマの発生から火山噴火に至るまでのメカニズムとその地域性について)

16

(前のページからの続き)

- このように、プレート境界に位置する日本列島において、マグマの発生は、プレートの特性や運動と深い関係がある。
- なお、マグマ溜まりから供給されたマグマが地表へ到達する(p.3の6.)には、上部地殻における応力の状態や岩盤特性などが影響すると考えられる。
- 2000年の三宅島火山の噴火のように地中でマグマが大きく動いた事例はあるが、このようなマグマの移動や側火山の火口の移動は、広域応力場と局所応力場の組合せが影響することが示唆されている。

3. 事務局の整理(御意見を踏まえた再整理) (プレート運動の継続性と今後のマグマの発生の傾向について)

- 日本列島が形成されたとされている時期(約1400万年前)以前において生じたとされている背弧海盆の拡大のようなプレート運動の大きな変化が生じると、プレートの沈み込み域でのマンテルウェッジの対流の状態が大きく変化すること等によって、火山の発生の傾向が大きく変化することが考えられる。
- 一方、プレート運動の大きな変化はその始まりから終息までに100万年～1000万年以上の期間を要したとされていることから^{*38, 39, 40}、仮にそのような変化が現在始まったとしても、例えば今後10万年程度のうちに現在のプレート運動が大きく変化することは想定し難い。
- すなわち、プレートの特性や運動と深い関係があるマグマの発生の傾向が今後10万年程度の間に変化することは想定し難い。
- これらを明確に否定する学説や科学的知見は見当たらない。

*38 Jolivet et al. (1994), Journal of Geophysical Research, **99** (B11), 22,237-22,259.

*39 Kimura and Tamaki (1986), Tectonics, **5** (3), 289-401.

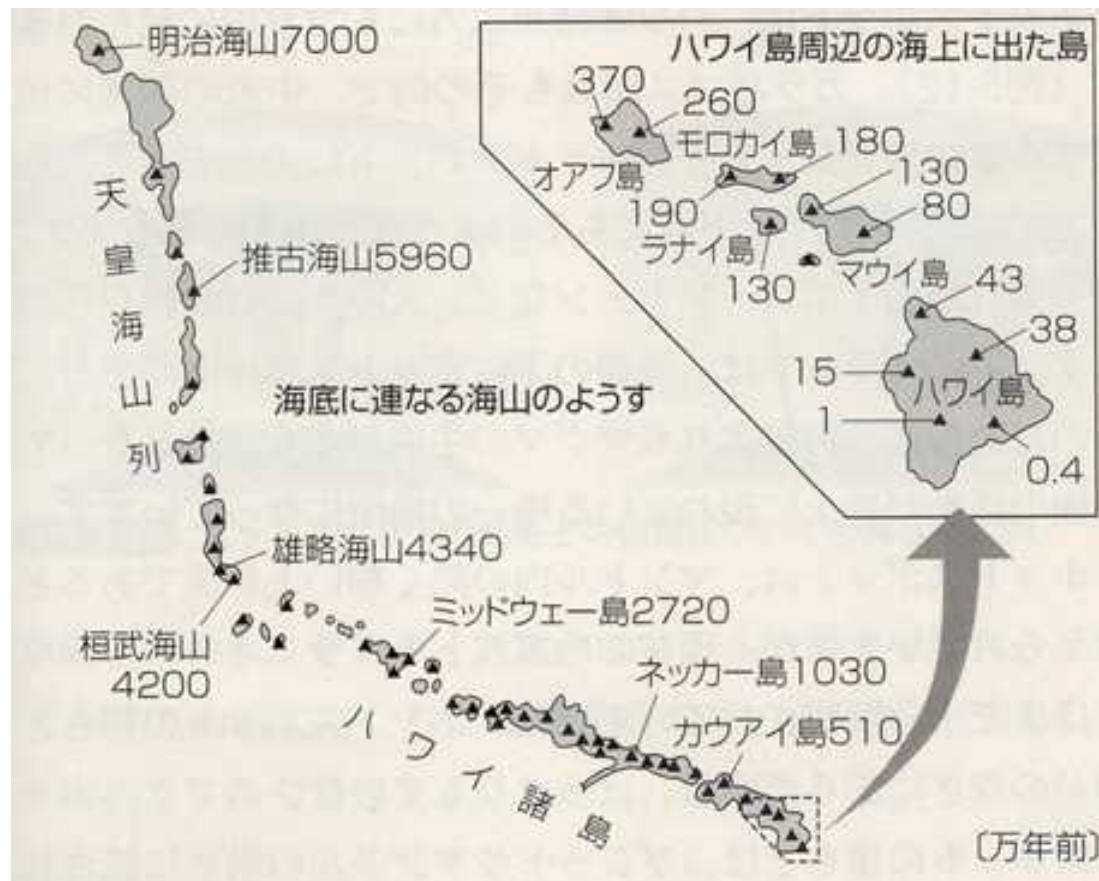
*40 Seno and Maruyama (1984), Tectonophysics, **102**, 53-84.

3. 事務局の整理(御意見を踏まえた再整理) (新たな火山発生の蓋然性について)

- 前述のプレート運動の継続性と今後のマグマの発生の傾向を踏まえると、現在マグマの発生条件が成立していないと考えられる地域では、今後10万年程度の期間において火山が発生する蓋然性は極めて低いと考えられる。該当地域の例としては、東北日本(ここでは関東以北から北海道までを含む範囲を指す)の前弧域が挙げられる。
- 現時点においてマグマの発生条件の成立を否定できない地域について新たな火山の発生の蓋然性を評価する場合には、マントルウェッジの対流や沈み込む海洋プレートの特性等を加味した評価モデル等の構築によって評価することが考えられるが、研究段階であり、現時点においては確立された評価方法は見当たらない。

參考資料

天皇海山列の屈曲



ハワイ諸島と天皇海山列の
火山活動時期
(木村・大木 (2013)^{*41}、
鎌田 (2004)^{*42} 及び Clague and
Dalrymple (1987)^{*43} を改変)

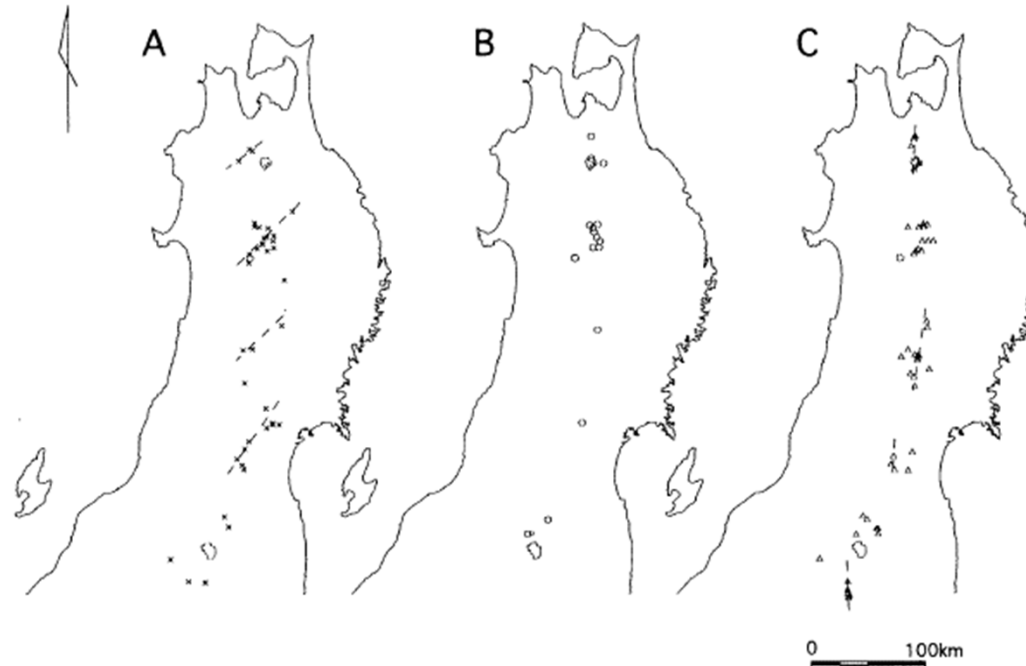
※およそ43 Ma頃に太平洋プレートの移動方向が北北西から西北西に変わったと推察

*41 木村・大木 (2013), 図解・プレートテクトニクス入門.

*42 鎌田 (2004), 地球は火山がつくった 地球科学入門.

*43 Clague and Dalrymple (1987), United States Geological Survey, Professional Paper, **1350**, 5-54.

東北日本の中央部における第四紀火山の分布の推移



各時代 (A : 2.0Ma-1.0Ma、B : 1.0Ma-0.6Ma、
C : 0.6Ma以降) における火山の噴出中心の分布*44

※2.0Ma以降の噴出中心は1.0Ma-0.6Ma頃を境に、北東-南西ないしは東北東-西南西から南北方向に配列が変化したと考えられる。

※火山フロントに相当する東縁(海溝側)の噴出中心の分布をみると、東北日本の火山フロントは1.0Ma-0.6Ma頃を境に10~20km程度、海溝側に移動したことがわかる。

*44 梅田ら (1999), 火山, 44 (5), 233-249.