

独立行政法人 産業技術総合研究所  
第23回地質調査総合センターシンポジウム

# 日本列島の長期的地質変動の 予測に向けた取り組みと今後の課題

—数十万年の過去を解明し、将来を予測する技術・知見・モデル—

2015年1月16日（金）

秋葉原ダイビル コンベンションホール

主 催



独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター



# 日本列島の長期的地質変動の 予測に向けた取り組みと今後の課題

—数十万年の過去を解明し、将来を予測する技術・知見・モデル—

## 開催趣旨

数十万年スケールでの地質変動の将来活動評価・予測は、原子力発電所の安全審査（活断層評価）や放射性廃棄物の安全規制（処分場の長期安定性評価）等において、社会的にも何らかの対応が必要な課題の一つとなっている。また、2011年東北地方太平洋沖地震では、内陸での誘発地震の発生や三陸地域に代表される太平洋沿岸部の沈降など、東北地域の地殻変動について大きな関心が寄せられている。

地震・断層、火山・マグマ活動や、深部流体・熱水活動等は互いに影響・関連しており、日本列島の長期的な地質構造発達史の観点での検討・解明を進める必要がある。本シンポジウムでは、各種の地質変動に対する、過去から現在までの履歴の解明と、それに基づく傾向・特徴の抽出、また、将来予測につながる地質学的モデル構築に対する取り組みや代表的な成果を報告すると共に、今後の課題について議論したい。

日 時：2015年1月16日（金曜日）13時00分～18時10分

会 場：東京秋葉原ダイビル 2F 秋葉原コンベンションホール  
（東京都千代田区外神田 1-18-13）

主 催：独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター

## プログラム

13:00 開会

13:00~13:10 開会挨拶

佃 栄吉(産総研理事, 地質調査総合センター代表)

13:10~13:55 後期新生代、東北日本弧の火成活動史

吉田武義(東北大学大学院理学研究科)

東北日本弧における後期新生代の火成活動史をレビューし、特に島弧火山活動期における構造発達史と火成活動との関係をまとめ、東北日本弧における火山活動様式、マグマ供給系、噴出物量、そしてマグマ組成の時代的変遷を論じる。

13:55~14:25 マグマ含水量分布からみたマグマ活動位置の評価

宮城磯治(活断層・火山研究部門)

火山出現可能性を考えるため、マグマ含水量の推定手段を開発し、東北日本弧に応用したところ、含水量は前弧側から背弧側に向けて減少する地理的分布をもつことが判明した。

14:25~14:55 スラブ起源深部流体

-その分布、成因と地震活動との関連について-

風早康平・高橋正明・尾山洋一・安原正也(活断層・火山研究部門)

長谷川 昭(東北大学名誉教授)

西南日本及び東北日本弧の地下水中に含まれるスラブ起源水の検出法を示し、その分布原因について示す。また、スラブ起源水の地殻内での役割について、地震活動等との関係を考察する。

14:55~15:30 ポスター発表コアタイム

(ホワイエにて開催)

15:30~16:15 プレート運動からみた日本列島の地殻変動

高橋雅紀(地質情報研究部門)

復元された過去 2500 万年間のプレート運動の枠組みの中で、日本列島の地殻変動を再現することにより、第四紀(およそ過去 300 万年間)の東西短縮テクトニクスがきわめて特異な地殻変動であることを示す。

16:15～16:45 日本列島の応力場解析と長期の断層活動性評価

大坪 誠(活断層・火山研究部門)

長期における断層再活動性の評価手法および日本列島における断層再活動性について示し、その成因や構造地質学的特徴に関する情報を整理する。また、現在の地殻応力場や各種地質学的・地球物理学的情報との比較検討結果をふまえて、断層再活動性の将来予測のために必要になる知見やアプローチについて示す。

16:45～17:30 超巨大地震と日本列島の造山運動

池田安隆(東京大学大学院理学系研究科)

日本の歴史上おそらく最大規模となった 2011 年の東北地方太平洋沖地震すらも、地質学的時間スケールで見れば、天変地異ではなくてごく普通の自然現象である。本講演では、地質学的な時間スケールでみた東北地方太平洋沖地震の特徴を紹介する。

17:30～18:00 総合討論

司会 渡部芳夫(深部地質環境研究コア 代表)

18:00～18:10 閉会挨拶

桑原保人(活断層・火山研究部門 部門長)

## ポスター発表

(コアタイム : 14:55~15:30)

### <火山・マグマ・熱水活動>

- P1 第四紀火山データベースの活用事例 -西南日本に分布する火山の時空分布-  
西来邦章・伊藤順一(活断層・火山研究部門)

長期的な視点で火山活動を理解するうえで有効な「第四紀噴火・貫入活動データベース」を紹介する。また、その活用事例として西南日本の第四紀火山の分布を示し、長期的な火山活動場の時間的空間的変遷について示す。

- P2 Southwest Japan intra-plate monogenic volcanism: a case study of San-in Pliocene volcanic centers. (西南日本のプレート内単成火山活動 : 山陰地域の鮮新世火山活動中心の例)

Ngyuen Hoang・伊藤順一・宮城磯治・西来邦章(活断層・火山研究部門)

「第四紀噴火・貫入活動データベース」の更新により、従来把握されていなかった第四紀火山が広く分布することとなった山陰地域を対象として、同位体地球化学によるマグマ成因検討を行った結果、従来のモデルを用いて解釈しても問題ないことが明らかになったことを示す。

- P3 日本列島におけるマンテル起源ヘリウムの分布とその原因

堀口桂香・風早康平・塚本斉・森川徳敏・大和田道子  
仲間純子(活断層・火山研究部門)

日本列島におけるヘリウム同位体比の分布をとりまとめた。その結果と、地球物理学および地質学的研究結果とを比較検討し、日本列島の各地域における深部起源流体の分布とその原因について考察する。

- P4 瀬戸内地域における塩水の年代分布と海面変化の影響

戸崎裕貴・森川徳敏・風早康平・佐藤 努・高橋 浩・安原正也  
大和田道子・高橋正明・稲村明彦(活断層・火山研究部門)

海面変化が地下水系に及ぼす影響を解明することを目的とし、瀬戸内海沿岸地域を対象に検討を行った。地下水中の放射性塩素同位体 ( $^{36}\text{Cl}$ ) を用いて塩水の年代(地下水中の海水成分の年代)を推定し、過去の海面変化の影響の実態把握を試みた結果を示す。

### <断層活動>

- P5 応力からみる断層活動性の時間変化

宮川歩夢(地質情報研究部門)・大坪 誠(活断層・火山研究部門)

長期的な断層の活動性を評価するためには断層の置かれる応力場の変化も想定した評価が必要になる。そこで、東北地方太平洋沖地震発生後のいわき地域での応力変化にもとづいて、湯ノ岳断層および井戸沢断層の活動性の時間変化について発表する。

**P6 断層ガウジを用いた断層活動性評価手法 -研究の動機, 試案と適用事例-**

宮下由香里・間中光雄・伊藤順一(活断層・火山研究部門)

断層破碎帯および断層破碎物質から直接断層活動性を評価するための手法開発研究を行ってきた。これまでに、断層の再活動ポテンシャルと断層ガウジの色調を軸とする評価試案を提案した。この試案を山口県岩国断層帯の評価に適用した結果、矛盾しないことが明らかとなった。

**P7 断層ガウジを用いた断層活動性評価手法**

**-化学分析値の活動性指標としての活用-**

間中光雄・宮下由香里・伊藤順一(活断層・火山研究部門)

低活動性断層の活動周期とその断層に存在する断層岩の鉱物学および化学的特徴を明らかにするために、断層岩の粉末 X 線回折分析、逐次選択抽出試験および色調測定を行い、断層岩中の粘土鉱物、鉄含量および色調の明度と活動周期の相関について議論する。

**<地殻変動>**

**P8 宇宙線生成核種を用いた侵食速度の推定**

城谷和代(活断層・火山研究部門)

長期の侵食速度の推定法として、宇宙線生成核種によるこれまでの取り組みについて紹介する。効率化を目指した従来手法の改良点や、山地尾根や斜面等の様々な地形環境での当手法の適用事例について紹介する。

**P9 海成段丘堆積物の堆積相とルミネッセンス年代による隆起速度評価**

田村 亨・伊藤一充(地質情報研究部門)

地殻隆起速度の適切な評価と予測に関して、従来手法の問題点を見直し、その改善策として、海成段丘堆積物の堆積相解析とルミネッセンス年代測定を組み合わせた方法を提案する。さらには、この方法を青森県上北平野の海成段丘群に適用した結果について報告する。

## 目 次

### 【講演】

01	後期新生代、東北日本弧の火成活動史 . . . . .	2
02	マグマ含水量分布からみたマグマ活動位置の評価 . . . . .	6
03	スラブ起源深部流体 -その分布、成因と地震活動との関連について- . . . . .	10
04	プレート運動からみた日本列島の地殻変動 . . . . .	14
05	日本列島の応力場解析と長期の断層活動性評価 . . . . .	16
06	超巨大地震と日本列島の造山運動 . . . . .	20

### 【ポスター】

P1	第四紀火山データベースの活用事例 -西南日本に分布する火山の時空分布- . . . . .	26
P2	Southwest Japan intra-plate monogenic volcanism: a case study of San-in Pliocene volcanic centers. . . . .	27
P3	日本列島におけるマントル起源ヘリウムの分布とその原因 . . . . .	28
P4	瀬戸内地域における塩水の年代分布と海面変化の影響 . . . . .	29
P5	応力からみる断層活動性の時間変化 . . . . .	30
P6	断層ガウジを用いた断層活動性評価手法 -研究の動機, 試案と適用事例- . . . . .	31
P7	断層ガウジを用いた断層活動性評価手法 -化学分析値の活動性指標としての活用- . . . . .	32
P8	宇宙線生成核種を用いた侵食速度の推定 . . . . .	33
P9	海成段丘堆積物の堆積相と ルミネッセンス年代による隆起速度評価 . . . . .	34

# 【 講 演 】



## 01

## 後期新生代、東北日本弧の火成活動史

吉田武義（東北大学大学院 理学研究科 地学専攻）

## 1. はじめに

東北日本弧は、古くて冷たいプレートの沈み込みに伴って形成された島弧海溝系の一つである。後期新生代に、ユーラシア大陸東縁部に位置する陸弧において、日本海盆や大和海盆などの背弧海盆が発達し、現在の東北日本弧が形成された。そこでの火成活動は、周囲のプレートとの相互作用や、広域応力場の変遷、堆積盆の隆起・沈降などの構造発達史と密接に関連しており（吉田, 2009）、マグマの活動様式や、組成、総噴出量、マグマ供給系の構造などの時代的変遷に基づいて、以下の 1-3 のサブステージに区分できる（Yoshida et al., 2014）。

## A. 陸弧火山活動期（66-21 Ma）

- (1) 珪長質火成活動期（66-49 Ma）
- (2) 活動休止期（49-35 Ma）
- (3) 大陸性リフト期（35-27 Ma）
- (4) 大陸縁火山活動期（27-21 Ma）

## B. 背弧海盆火山活動期（21-13.5 Ma）

- (5) 大和海盆拡大期（21-17 Ma）
- (6) 北部本州（青沢）リフト期（17-15 Ma）
- (7) 北部本州（黒鉦）リフト期（15-13.5 Ma）

## C. 島弧火山活動期（13.5-0 Ma）

- (8) 海洋性島弧—ニュートル期（13.5-10 Ma）
- (9) 海洋性島弧—弱圧縮期（10-8 Ma）
- (10) 主期カルデラ火山弧期（8-5.3 Ma）
- (11) 後期カルデラ火山弧期（5.3-3.5 Ma）
- (12) 強圧縮場への遷移期（3.5-1.7~1.0 Ma）
- (13) 強圧縮型火山弧期（1.7~1.0-0 Ma）

## 2. マグマ組成と噴出量の時代的変遷

後期新生代、東北日本弧では、一貫して沈み込み帯火成活動が継続しているが、その性質は、陸弧期から、背弧海盆期、そして島弧期へと系統的に変化している。東北日本弧においてマグマの組成が示す時代的変遷は、その分離深度の変化を通して、マントルやその上に重なる地殻の温度構造や起源物質の配置と関係していると考えられ、各活動ステージでは、それぞれ、特有のマグマ組成の広域変化パターンを示している（吉田ほか, 1995）。陸弧と島弧期では、背弧側へと単調にアルカリが増加して、陸弧期には火山フロントで高アルカリソレイトが、島弧期には低アルカリソレイトが活動している。それに対して、背弧海盆拡大期には、

低アルカリソレイトが縁海東縁部で活動し、前弧側と背弧側の両方へアルカリが増加している。背弧海盆拡大期のリフト活動軸部は、時間とともに背弧側から火山フロント側へと前進しながら、玄武岩に対する流紋岩の活動比率が増加している（Yamada & Yoshida, 2011）。マグマの噴出量は、マントルや地殻の熱構造とともに応力場の状態に大きく左右され、広域応力場が背弧海盆期から島弧期へと、引張場からニュートルな場に変化するのに伴い、マグマ噴出量が急激に減少している（Yamada & Yoshida, 2011）。このとき、背弧側に火山活動の軸部があるリフト火山活動から、火山フロントから背弧側へと単調にアルカリが増加する通常の島弧で認められる火山活動へと変化している。さらに東北日本がニュートルな応力場から強い圧縮応力場に変化するとともに、火山活動は少量の玄武岩と珪長質のカルデラ火山活動を主とするバイモーダルな活動から、カルクアルカリ安山岩を主とする成層火山主体の活動へと変化している（守屋, 1983 ; Sato, 1994）。カルデラ火山の多くは 1Ma 前後に活動を終えているが、脊梁山脈沿いの安山岩質成層火山の多くは、1.5Ma 前後に活動を開始し、0.6~0.5Ma 以降、強い東西性圧縮応力場の下で、噴出率がそれまでの 2 倍以上に増加している（梅田ほか, 1999 ; Kimura & Yoshida, 2006 ; Accella et al., 2008）。

## 3. 島弧火山活動期

東北日本弧における 13.5Ma 以降の島弧火山活動期における活動様式の変化は、地殻内応力場の変動と密接に関連し、それはプレート運動に規制されていると考えられる。中嶋ほか（2000）は、中期中新世初期に背弧側での急速な沈降があった後に、奥羽脊梁地域で 3 回の隆起活動があったと論じている。背弧側での沈降とニュートルな応力場で特徴づけられる初期の海洋性島弧期に続き、12-9Ma には海域での珪長質火山活動が開始する（Yamada & Yoshida, 2011）。その後、背弧側で出羽丘陵を除いて沈降が停止し、火山フロントは次第に後退して、脊梁域が上昇・浅海化しはじめる（佐藤, 1992）。約 10Ma 前後に火山フロント側で海退があり（鹿野ほか, 1991）、これ以降、ニュートル〜弱圧縮応力場となる。12-9Ma に脊梁地域を隆起させた圧縮イベント（Nakajima et al., 2006）は、日高山脈の急激な上昇時期（宮坂ほか, 1986）と良く対応してお

り、太平洋プレートの斜め沈み込みに伴う千島前弧スリバーの東北日本弧への衝突 (Kimura, 1986) による可能性が高い (Accocella et al., 2008)。

初期の海洋性島弧期には、比較的ランダムに広域に分布していた火山活動域が 8Ma 以降になると活動域が集中し、南北に延びる火山フロント域に対して、背弧側では枝状に東西に分布する傾向が現れる (Kondo et al., 1998; 2004)。この枝状の火山分布については、Tamura et al. (2002) によりホットフィンガーと命名され、ウェッジマンタル内での小規模対流に起因する温度構造ならびにその時間発展による説明がなされている (Honda & Yoshida, 2005 ; Yoshida et al., 2014)。

珪長質火山活動は、初期には堆積物中への凝灰岩の挟みとして現れ、仙台西方などでは 7Ma 頃に陸上でのカルデラ形成が始まる。7~5Ma には、脊梁域に多数の大規模陥没カルデラが生じるが、5.5Ma 前後に活動の一つのピークが認められる。引張場から弱圧縮性応力場への転換は、リフト活動に伴いマンタルから上昇し、地殻下部等に滞留していたマグマを集積・上昇させ、カルデラ形成に必要な、地下浅所での岩床形成~ラコリス成長 (Aizawa et al., 2006) をもたらしたと推定される。また、さらに続いた水平最大主応力軸の NE-SW 方向から ENE-WSW 方向への回転 (Sato, 1994) が、複数の岩脈・断層系の発達などを通して、大量の大規模陥没カルデラの形成を促した可能性が高い (Accocella et al., 2008)。この期の特徴は、火山フロント側でのバイモーダルな火山活動であり、ここではカルデラ形成を伴う大規模珪長質火砕流の活動に、三滝玄武岩や黒鼻山玄武岩といった極端に  $K_2O$  に乏しいソレイトの活動が伴う。おそらくこの時期、火山フロント側最上部マンタルの温度はその前後に比べ最も高かったと思われる (吉田ほか, 1999)。5.5Ma 前後での多数のカルデラ形成後、海溝側では中新・鮮新境界で竜の口海進が起こるが、このとき一旦カルデラ形成が下火となり、その後再び脊梁軸部で大規模陥没カルデラが生じている。約 4Ma でのプレート運動方向の変化により、東北日本弧には強い水平圧縮応力が加わり (Pollitz, 1986)、背弧側で 3.4~2.4Ma、火山フロント側では 1Ma 以降、東北日本弧は中間的応力場から強い水平圧縮応力場に転換し、構造運動が脊梁部でのマグマ性の緩やかな隆起運動から、地殻の座屈褶曲や逆断層による地殻の短縮変形を伴った変動に変わり、全域での隆起とブロック化が進み、複数の隆起山地と沈降堆積盆地の列からなる現在の東北日本弧の地形的特徴が形づくられた (Awata & Kakimi, 1985 ; 佐藤, 1992 ; 佐藤ほか, 2004)。多くのカルデラは 3.5Ma 前後の年代を

示すが、これは背弧側から地殻の短縮運動が始まった時期に相当する。活発なカルデラ形成活動は 3.5Ma 前後以降、前期更新世を通じて継続し、1Ma 前後にその活動がほぼ停止する。

#### 4. カルデラ火山活動

東北日本弧、島弧火山活動期の 8~1Ma に、中間~弱圧縮応力下での脊梁地域の広域隆起・陸化に伴って、多数の陥没カルデラが生じている (伊藤ほか, 1989 ; 山元, 1992 ; Sato, 1994 ; 吉田ほか, 1999 ; Yoshida, 2001)。これらの 2 回に及ぶカルデラ火山活動期には、珪長質火山活動が脊梁山地の構造的軸部に集中して起こり、ニュートラルから弱い圧縮応力場のもとで、脊梁地域の緩やかな隆起を伴いながら、80 を超えるカルデラを生じている。これらは、おもにピストンシリンダー型の大規模陥没カルデラからなる (山元, 1992) が、小型のものにはじょうご型に分類されるものもある。これらは、脊梁山地およびそこから派生する隆起域での大規模な曲隆運動に伴って生じた (Sato, 1994) もので、当時これらの隆起部の地殻浅所に、カルデラの直径に匹敵する多数の大規模な珪長質ラコリス状マグマ溜り~深成岩体群が形成された (Yamada, 1988 ; Aizawa et al., 2006) ことを示唆している。そのような大規模な珪長質マグマ溜りの存在は、地殻内部の温度構造に影響すると思われる。実際に、鬼首地域では、カルデラの下部に高温の深成岩体の存在が推定されている (Yamada, 1988)。吉田ほか (1999) は、後期新生代カルデラと白亜紀北上花崗岩体のサイズ分布を比較し、両者が類似していることを示している。カルデラ活動は、10Ma 前後の海底火山活動期に、すでに一部が始まっているが、脊梁域の隆起が大量のカルデラ形成と同期していることから、後期中新世に起こった東北脊梁域の広域隆起は、白亜紀花崗岩類の活動に匹敵する大量の珪長質マグマの地殻上部への移動によるものと思われる。

東北日本弧における現在の温度構造や地震活動に最も関係しているのは、後期新生代に大量に活動したカルデラの形成に関わった伏在する深成岩体群の分布である。泉温の高温域の分布 (矢野ほか, 1999) は、後期新生代カルデラ群の分布域とよく対応しており、カルデラ下にカルデラを形成したマグマ溜りから固結したばかりの高温の深成岩体が伏在していることを強く示唆している (Yoshida, 2001 ; 吉田ほか, 2005)。島弧における地殻内部の温度構造は、島弧火成活動の変遷と密接に関係しており、そのような地殻内部での不均質性は、さまざまな地震学的観測手段により観測する

ことが可能である。東北本州弧陸域で観測される多くの地震学的・熱的データは、第四紀成層火山の分布よりも大規模陥没カルデラの分布とより密接な関連を示す(吉田ほか, 2005)。例えば、鬼首地域では地殻内地震波低速域の分布や震源分布、そして地殻内地震のメカニズムがピストン・シリンダー型カルデラの構造と密接に関連している(海野ほか, 1998)。さらに、鬼首地域での地殻全域にわたる地震波トモグラフィによるP波およびS波速度構造の研究から、鬼首地域では深部の部分熔融域と、それに続く浅部の流体飽和域から構成されるマグマ流体供給系が存在することが明らかとなっている(Nakajima & Hasegawa, 2003)。

### 5. 安山岩質成層火山活動

第四紀に入ると東西性の強い水平圧縮応力場の下で、1~0.7Ma以降、4列(青麻一恐、脊梁、森吉、鳥海)の火山列が出現する(中川ほか, 1986; 伴ほか, 1992)。特に、火山フロントをなし、低カリウムで特徴づけられる青麻一恐火山列の火山は、しばしば後期中新世~鮮新世に形成されたカルデラ火山の縁部に位置し、それらの活動の余韻とみることできる。例えば、陸奥燧岳は菓研カルデラの東北縁、恐山火山はその南東縁、七時雨火山は荒屋カルデラの東北縁、七ツ森火山は七ツ森カルデラの形成後に生じた溶岩ドーム群であり、安達火山は深野カルデラの東縁、そして青麻火山もその下部にカルデラを敷いている可能性が指摘されている(戸谷・伴, 2001)。後期中新世~鮮新世に活動した脊梁近傍のカルデラの多くは、低アルカリソレイトの活動と密接に関連する(吉田ほか, 1999, 2005; 安井・山元, 2000)のに対し、第四紀の脊梁火山列を特徴づけるマグマは、第四紀火山列の中では最も高温を示す(中川ほか, 1986)ものの、低アルカリソレイトよりも一般に温度の低いカルクアルカリ安山岩質マグマを主とする(伴ほか, 1992)。従って、火山フロント域では、後期中新世~鮮新世にはカルデラ火山に伴い高温の低アルカリソレイトが活動していたのが、地殻内温度の低下(Yamaji, 1994)と共に火山フロントの後退とマグマ温度の低下が進行し(伴ほか, 1992; Yoshida et al., 2014)、現在のようなカルクアルカリ安山岩を主とする4列の火山列が形成されたと推定される。

### 文 献

Accocella, V., Yoshida, T., Yamada, R. & Funicello, F. (2008) Structural control on late Miocene to Quaternary volcanism in the NE Honshu arc, Japan. *Tectonics*, 27:TC5008 doi:10.1029/2008TC002296.

- Aizawa, K., Accocella, V. & Yoshida, T. (2006) How the development of magma chambers affects collapse calderas: insights from an overview. In: Troise, C., De Natale, G. & Kilburn, C.R.J. (eds) *Mechanisms of Activity and Unrest at Large Calderas*. Geological Society, London, Special Publications, 269, 65-81.
- Awata, Y. & Kakimi, T. (1985) Quaternary tectonics and damaging earthquakes in northeast Honshu, Japan. *Eartuq. Pred. Res.*, 3, 231-251.
- 伴 雅雄・大場与志男・石川賢一・高岡宣雄 (1992) 青麻一恐火山列、陸奥燧岳、恐山、七時雨および青麻火山の K-Ar 年代—東北日本弧第四紀火山の帯状配列の成立時期—。 *岩鉱*, 87, 39-49.
- Honda, S. & Yoshida, T. (2005) Application of the model of small-scale convection under the island arc to the NE Honshu subduction zone. *Geochem. Geophys. Geosystem*, 6, Q01002, doi:10.1029/2004GC000785.
- 伊藤谷生・歌田 実・奥山俊一 (1989) 東北日本脊梁地域に分布する中新世後期~鮮新世のカルデラ群について。 *地質学論集*, 32, 409-429.
- 鹿野和彦・加藤碩一・柳沢幸夫・吉田史郎 (1991) 日本の新生界層序と地史。114p, *地質調査所報告*, 第274号。
- Kimura, G. (1986) Oblique subduction and collision: Forearc tectonics of the Kuril arc. *Geology*, 14, 404-407.
- Kimura, J-I. & Yoshida, T. (2006) Contributions of slab fluid, wedge mantle, and crust to the origin of Quaternary lavas in the NE Japan arc. *J. Petrol.*, 47, 2185-2232.
- Kondo, H., Kaneko, K. & Tanaka, K. (1998) Characterization of spetial and temporal distribution of volcanoes since 14 Ma in the Northeast Japan arc. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 43, 173-180.
- Kondo, H., Tanaka, K., Mizouchi, Y & Ninomiya, A. (2004) Long-term changes in distribution and chemistry of middle Miocene to Quaternary volcanism in the Chokai-Kurikoma area across the Northeast Japan Arc. *Island Arc*, 13, 18-46.
- 宮坂省吾・保柳康一・渡辺 寧・松井 愈 (1986) 礫岩組成から見た中央北海道の後期新生代山地形成史。 *地団研専報*, 31, 385-294.
- 守屋以智雄 (1983) 日本の火山地形。東大出版会, pp135.
- 中川光弘・霜鳥 洋・吉田武義 (1986) 青麻一恐火山列: 東北日本弧火山フロント。 *岩鉱*, 81, 471-478.
- Nakajima, J. & Hasegawa, A. (2003) Tomographic



- imaging of seismic velocity structure in and around the Onikobe volcanic area, northeastern Japan: implications for fluid distribution. *Jour. Volc. Geotherm. Res.*, **127**, 1-18.
- 中嶋 健・檀原 徹・鎮西清高 (2000) 岩手県湯田盆地の堆積盆発達史—新生代後期における奥羽山脈中軸部の地質構造発達史に関連して. *地質学雑誌*, **106**, 93-111.
- Nakajima, T., Danhara, T., Iwano, H. & Chinzei, K. (2006) Uplift of the Ou Backbone Range in Northeast Japan at around 10 Ma and its implication for the tectonic evolution of the eastern margin of Asia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **241**, 28-48.
- Pollitz, F.R. (1986) Pliocene change in Pacific plate motion. *Nature*, **320**, 738-741.
- 佐藤比呂志 (1992) 東北日本中部地域の後期新生代テクトニクス. *地質調査所月報*, **43**, 119-139.
- Sato, H. (1994) The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan. *Jour. Geophys. Res.*, **99**, B11, 22261-22274.
- 佐藤比呂志・吉田武義・岩崎貴哉・佐藤時幸・池田安隆・海野徳仁 (2004) 後期新生代における東北日本中部背弧域の地殻構造発達—最近の地殻構造探査を中心として—. *石油技術協会誌*, **69**, 145-154.
- Tamura, Y., Tatsumi, Y., Zhao, D., Kido, Y. & Shukuno, H. (2002) Hot fingers in the mantle wedge: New insights into magma genesis in subduction zones. *EPSL*, **197**, 105-116.
- 戸谷成寿・伴 雅雄 (2001) 東北日本弧, 青麻火山の形成史と主成分化学組成. *岩石鉱物科学*, **30**, 105-116.
- 梅田浩司・林 信太郎・伴 雅雄・佐々木 実・大場 司・赤石和幸 (1999) 東北日本, 火山フロント付近の 2.0Ma 以降の火山活動とテクトニクスの推移. *火山*, **44**, 233-249.
- 海野徳仁・松澤 暢・堀 修一郎・中村綾子・山本 明・長谷川 昭・吉田武義 (1998) 1996 年 8 月 11 日宮城県鬼首付近に発生した地震について. *地震第 2 輯*, **51**, 253-264.
- Yamada, E. (1988) Geologic development of the Onikobe caldera, northeast Japan, with special reference to its hydrothermal system. *Rept. Geol. Surv. Japan*, **268**, 61-190.
- Yamada, R. & Yoshida, T. (2011) Relationships between Kuroko volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits, felsic volcanism, and island arc development in the northeast Honshu arc, Japan. *Mineral Deposita*, <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-011-0362-7>.
- Yamaji, A. (1994) Thermal history of the NE Japan frontal arc since the Late Miocene inferred from vitrinite reflectance. *Geopisica. Int.*, **33**, 45-51.
- 山元孝広 (1992) 会津地域の後期中新世—更新世カルデラ火山群. *地質学雑誌*, **98**, 21-38.
- 矢野雄策・田中明子・高橋正明・大久保泰邦・笹田政克・梅田浩司・中司 昇 (1999) 日本列島地温勾配図. 地質調査所.
- 安井光大・山元正継 (2000) 東北日本弧, 稲庭岳地域の火山層序と K-Ar 年代—著しく K<sub>2</sub>O に乏しいマグマの活動時期. *岩石鉱物科学*, **29**, 74-84.
- Yoshida, T. (2001) The evolution of arc magmatism in the NE Honshu arc, Japan. *Tohoku Geophys. Jour.*, **36**, 131-149.
- 吉田武義 (2009) 東北本州弧における後期新生代の火成活動史. *地球科学*, **63**, 269-288.
- 吉田武義・相澤幸治・長橋良隆・佐藤比呂志・大口健志・木村純一・大平寛人 (1999) 東北本州弧, 島弧火山活動期の地史と後期新生代カルデラ群の形成. *月刊地球*, 号外 **27**, 123-129.
- 吉田武義・中島淳一・長谷川 昭・佐藤比呂志・長橋良隆・木村純一・田中明子・Prima, O.D.A.・大口健志 (2005) 後期新生代, 東北本州弧における火成活動史と地殻・マントル構造. *第四紀研究*, **44**, 195-216.
- 吉田武義・大口健志・阿部智彦 (1995) 新生代東北本州弧の地殻・マントル構造とマグマ起源物質の変遷. *地質学論集*, **44**, 263-308.
- Yoshida, T., Kimura, J-I, Yamada, R., Accella, V., Sato, H., Zhao, D., Nakajima, J., Hasegawa, A., Okada, T., Honda, S., Ishikawa, M., Prima, O.D.R., Kudo, T., Shibasaki, B., Tanaka, A. & Imaizumi, T. (2014) Evolution of late Cenozoic magmatism and the crust-mantle structure in the NE Japan Arc. In: Gomez-Tuena, A., Straub, S.M. & Zellmer, G.F. (eds) *Orogenic Andesites and Crustal Growth*. Geological Society, London, Special Publication, 385, <http://dx.doi.org/10.1144/SP385.15>.

# 02 マグマ含水量分布からみたマグマ活動位置の評価

宮城磯治（活断層・火山研究部門 マグマ活動研究グループ）

## 1. 研究の位置付け

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業においては、処分場が現在の火山の影響を受けない程度離れている事だけでなく、将来の数万～数十万年にわたりその場所で新たな火山が生じる可能性についても、十分評価する必要がある。

火山とは、マントルや地殻が何らかの条件の下で溶融することによって生成したマグマが地表に現れる現象である。将来の火山出現可能性を考えるためには、その場所でマグマが生じやすいか否か、すなわち地下の構成物が溶融し易い状況にあるか否かに関する知識が役に立つ。マントルは通常の地温勾配・地圧の条件では融けない（例えば Kushiro et al, 1968）。それにもかかわらず火山が生じるという事実は、(1)より深部の物質が上昇（減圧）し融点が降下すること、(2)揮発性物質などの融点降下物質が添加すること、あるいは(3)他のマグマ等の熱による温度の上昇が生じること、といったプロセスが、マントルや地殻内で起きていることを示している（図 1）。沈み込み帯のマグマから放出される揮発性物質の成分としては水が圧倒的に多く、二酸化炭素が次ぐ。水はマントルのリキダス温度を大幅に低下させる効果を持つため（例えば Kushiro et al, 1968）、火山の発生や活動の理解にとって水の量を把握することは本質的である。そこで本研究では、我が国の地下におけるマグマ水の量と空間分布を把握することを、地層処分事業における火山噴火災害の可能性を排除するうえで重要な基礎情報と位置付けた。

## 2. マグマに含まれる水の量の推定法

マグマは、アルミノ硅酸塩溶融体（=メルト）と結晶と気泡等の混合物である。マグマ水は、地下深くのマグマ中において、溶解平衡にしたがってメルトに溶けるか、あるいは過飽和となって気泡として析出するか、含水鉱物（角閃石、黒雲母など）の中に取り込まれて存在する。これらのうち気泡は、噴火時に火山ガスとして即座に抜け出てしまう。メルトに溶け込んでいる水はそれよりは抜けにくい、噴火時の減圧により水の溶解度が減少するに従って、時間とともにマグマから抜け出してしまふ（図 2）。含水鉱物中の水も地表付近で鉱物の安定条件が変化するため、時間とともに抜け出してしまふ。マグマ水の量を推定するには、以上の 3 つの相（メルト、気泡、含水鉱物）に含まれ

る水の量を全て足し合わせる必要がある。このうち含水鉱物中の水の量は、鉱物の含有量と化学量論数から推定できる。結晶も気泡も含まないマグマにおいては、メルトの含水量はマグマの含水量と等しい。しかしながら沈み込み帯の火山のメルト含水量はマグマ溜まりの深さ（例えば地下 10 km）で水に飽和するほど（気泡を生じるほど）多量である、という事例が数多く示されるようになった。これは近年の分析技術の進歩により、直径数～数百  $\mu\text{m}$  の局所分析が可能になり、噴火前のメルトの含水量を保持していると考えられる「斑晶ガラス包有物」の含水量分析値が豊富に報告されるようになった成果である（例えば Miyagi and Yurimoto, 1995）。マグマの含水量を知るうえで、マグマ水の飽和は困ったことである。斑晶ガラス包有物の含水量は、マグマの気泡量が分からないならば、マグマ水の最低値を与えるに過ぎない。気泡は熱力学的に純相とみなせるので、それがどれだけ過剰に存在するかを、主化学組成分析結果から知ることは困難である。

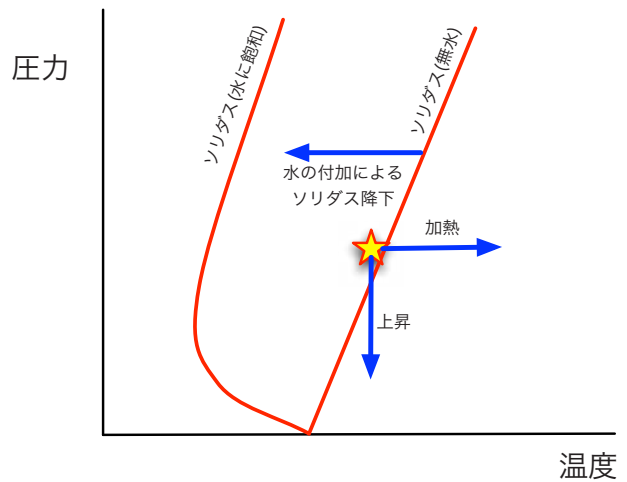


図 1 マグマの発生に対する、マントルの上昇、加熱、水の付加の概念図。星印の温度・圧力条件にあるマントルが加熱(右に移動)、または上昇(下に移動)すると、マントルはソリダス温度(溶融温度)を越えるため、マグマが発生する。あるいは、マントルの温度・圧力がおなじであっても、水の付加によってマントルのソリダスが低下(左に移動)した場合には、マグマが発生する。

H<sub>2</sub>O saturation and degassing of magma

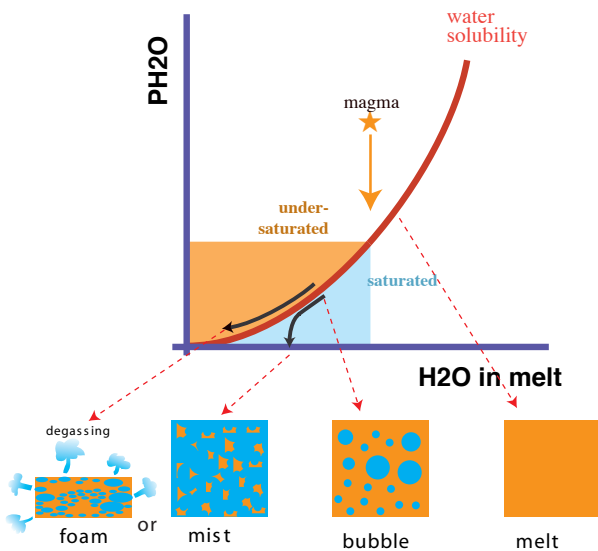


図2 マグマの減圧に伴うマグマ水の析出と散逸，星印の含水量・圧力状態にあるマグマが上昇(下に移動)すると，飽和含水量曲線を越えるため，マグマ中に気泡が発生する。気泡量はマグマの上昇とともに増加するが，それらの抜けかたは噴火様式によって大きく異なる。

そこでこの問題の解決を期待して，火山岩に含まれる含水鉱物の水素同位体比を用いるマグマ含水量計の基礎を考案した。この手法は，上で述べたマグマ中の含水相(メルト，気泡，含水鉱物)の間の，水素同位体比と水の量比に関する，単純な質量保存にもとづいている。

$$\delta T = XAW \times \delta AW + XDW \times \delta DW + XMW \times \delta MW \quad \text{式 1}$$

ここで $\delta T$ はマグマの全岩水素同位体比， $\delta AW$ は過飽和な水の水素同位体比， $\delta DW$ はメルトに溶存する水の水素同位体， $\delta MW$ は含水鉱物の水素同位体比である。含水鉱物の含水量 (wt.%) は角閃石で2wt.%，黒雲母で4wt.%程度であり，一般に火山岩はこれらの含水斑晶を数~10 (wt.%) 程度しか含まないから，含水鉱物中に存在する水の量は0.4 (wt.%) 以下と考えてよい。全岩含水量が数wt.%以上のマグマを考える限りにおいては，MWの水は無視できるほど少ない。その場合，AWの量 (wt.) は，全岩含水量を1と置いたときに「AW=1-DW」であるから，マグマの全岩水素同位体比 $\delta T$ は，含水鉱物の $\delta D$ 値とAW量 (wt.) の関数として記述できる (式 2)。

$$\delta T = (1 - XAW)(\delta MW - 15) + XAW(\delta MW + 15) \quad \text{式 2}$$

$$X_{AW} = -\frac{1}{30} \delta_{MW} + \frac{15 + \delta_T}{30} \quad \text{式 3}$$

式2をXAWについて整理すれば式3になる。 $\delta T$ が一定ならば，含水鉱物の水素同位体比 ( $\delta MW$ ) が低いほど，式3から見積られるマグマの過飽和水量 (XAW) は多くなる。式3により求まる過飽和水の量比 (XAW) と，マグマ水のマスバランス (式1) とから，マグマの全岩含水量 (T) は式4のように表現できる。これが，水素同位体比を用いたマグマの全岩含水量推定法である。

$$T = \frac{30X_D C_D}{15 - \delta_T + \delta_{MW}} \quad \text{式 4}$$

式4を用いてマグマの全岩含水量を求めるために必要なパラメータは，含水鉱物の水素同位体比測定値 ( $\delta MW$ )，マグマのメルト量比 (XD)，メルトの含水量 (CD) そしてマグマの全岩水素同位体比 ( $\delta T$ ) である。含水鉱物の水素同位体比 ( $\delta MW$ ) は，Miyagi and Matsubaya (2003) の示標で試料を選別すれば，測定可能である。マグマのメルト量 (XD) は火山岩の化学分析値に対してMELTS (Ghiorso and Sack, 1995) を適用することで推定できる (但し，温度・圧力の情報を別途与える必要がある)。メルトの含水量 (CD) は，斑晶ガラス包有物の含水量を直接分析することによって得られるが，マグマが水に飽和した条件では，メルトの飽和溶解度と圧力とから求めることも可能である。式4に与えるべき定数のうち最も不確実なものは，マグマの全岩含水量 ( $\delta T$ ) である。 $\delta T$ は地球内部の水の循環システムを理解するうえで重要な，第一級の研究課題となるパラメータのひとつでもある。更に，マグマの全岩含水量の地域分布の把握も必要になるが，これら簡単に解ける問題ではなく，別課題として時間をかけて取り組むべきものである。マグマの全岩水素同位体比 $\delta T$ を-80~-20‰まで振った際の，含水鉱物の水素同位体比 $\delta MW$ と過飽和水量比XAWの関係は図3のとおりである。ここで $\delta T$ を仮定すると (例えば50‰)， $\delta MW$ の値からXAWを求めることができる。

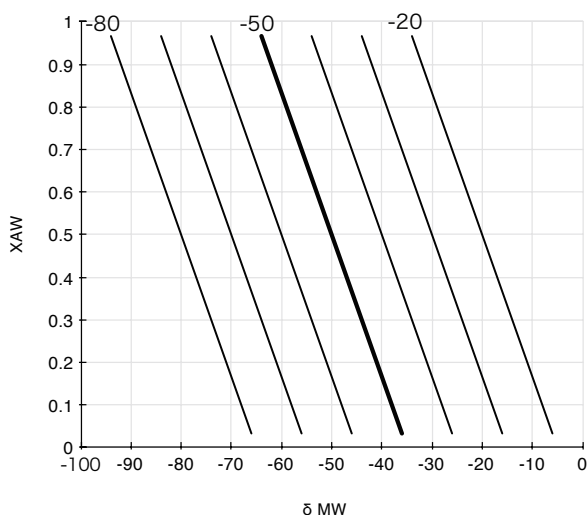


図 3 マグマの過飽和水量率 (XAW) と角閃石の水素同位体比と全岩マグマ δ D 値の関係

### 3. 結果と考察

北海道の羊蹄, 喜茂別, 濁川カルデラ, 銭亀, 東北日本弧の恐山, 七時雨火山, 寒風山, 一目瀧, 肘折カルデラ, 鳴子カルデラ, 鬼首カルデラ, 安達火山, 中部日本の榛名山, 妙高山, 西南日本の大山, そして姫島の噴出物から含水鉱物を分離し, 水素同位体比 δMW を測定した (結果の一部: 図4) .

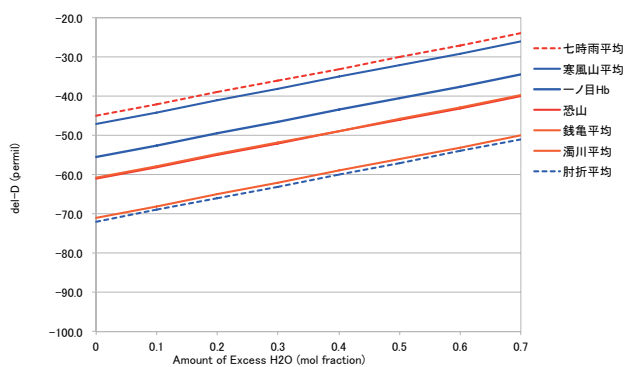


図 4 角閃石斑晶の水素同位体比から推定される過飽和水量比 (XAW) とマグマの全岩水素同位体比の関係

角閃石斑晶の水素同位体比分析値は, 図4のXAWが0.5のところを示され, 右上がりの線となって表現される (XAWが0.5のときに, 角閃石斑晶の水素同位体比とマグマの全岩水素同位体比が等しくなるため(図3)). この斜め線と-50‰の交点から, 過飽和水の分率XAWが読みとれる (図4) . そのうえで, 別途推定したマグマのメルト量XDとメルト含水量CDを式4に与えることにより, 全岩含水量を得た. 全岩含水量は, 結晶分

化作用の影響を受ける. そこでマグマ中の化学的挙動が比較的水と似ているカリウムで, 水の量を規格化した (全岩含水量を全岩K<sub>2</sub>O量で割った) . カリウムで規格化された含水量は, 前弧の側火山で高く, 背弧側で低い傾向を示した (表1) .

表 1 東北日本弧の火山岩の全岩含水量推定値の例

	背弧側火山			前弧側火山		
	肘折	寒風	銭亀	安達	濁川	七時雨
全岩 H <sub>2</sub> O 推定値 (wt.%)	2.5	0.4	8(?)	8-10	8	2-8
全岩 K <sub>2</sub> O 量 (wt.%)	1.75	1.6	0.7	1	1.5	0.45
全岩 H <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O (重量比)	1.4	0.2-5	11-12	8-10	5.3	4-18

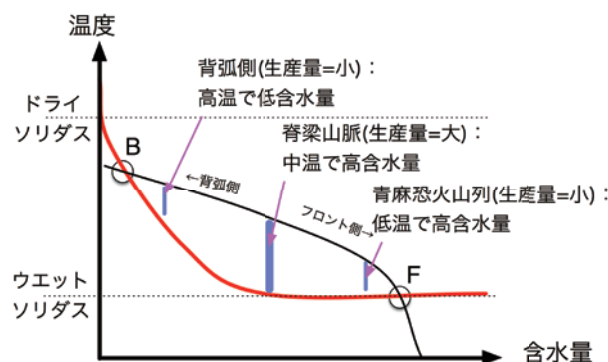


図 5 マントルの水量と温度を考慮した, 東北日本弧のマグマ生成量の空間分布に関する概念図

本研究で求めたマグマ含水量の分布を用いて, 東北日本弧のマグマ活動位置に関する解釈を, 概念図として描いた (図5) . マントルの温度は背弧側 (図5左側) が高く, 前弧側 (図5右側) が低いとした. その場合マントルの溶融率の空間分布は, 図中の赤線の上位にある黒線の差として示されることになる (青い縦棒の長さ) . これらのそれぞれは東北日本弧の火山の分帯に対応し, 含水量の多い方すなわち前弧域に位置するのが青麻恐火山列で, 含水量が減少する側 (背弧側) にむけて, 脊梁火山列 (那須帯), 背弧火山列 (鳥海帯) に対比される. F点よりも前弧側では, マントルの含水量 (あるいは水の流量) は大きい, 温度が低い (あるいは水の流量) は小さいが, 温度が低いためにマントルは少量しか融けない. すなわち, F点 (赤と黒の交差) よりも前弧では, ウエットソリダスという明瞭な物性境界の存在によって, マントルは



水が過剰に存在しても溶融できず、マグマが発生しない。すなわち、このマグマの発生限界が、地表において明瞭な火山フロントとして認められると思われる。一方、中央の脊梁山脈においては、マンツルの含水量は大きく、前弧側の青麻恐火山列よりも温度が高いため、マンツルは大量に溶融できる。そのため、脊梁山地はマグマの生産量が大きく、その分、多数の火山が出現する。さらに背弧側になると、ここではマンツルの温度は高いが、含水量が少ないためにマンツルの溶融量が低下する。このために脊梁よりも噴出規模の小さな鳥海あるいは森吉火山列が形作られたのだと思われる。マンツル溶融温度は水の減少とともに徐々に高温となり、B点よりも背弧側ではマンツルの温度が溶融温度よりも低くなる為、含水作用に起因するマンツルの部分溶融が生じない領域が出現することになる。

#### 4. まとめ

本研究は従来の斑晶ガラス包有物分析だけからは推定困難だったマグマの「全岩含水量」を、角閃石の水素同位体比にもとづいて推定する手法を開発した。この手法を東北日本弧の幾つかの火山に応用したところ、東北日本弧の横断方向で全岩含水量に変化がある可能性が明らかになった。マグマ溜まりにおける結晶分化作用の影響を除くために全岩含水量を全岩 $K_2O$ 量で規格化した値は、前弧の側火山で高く、背弧側で低い傾向が認められた。この観察事実の下では、東北日本弧のマグマ活動の地域分布は、含水量の空間分布、マンツルの溶融温度の空間分布、マンツルの温度分布、という3つの兼ね合いにより生じる、と解釈される。

現時点においては本研究には、様々な未解決課題が残されている。例えば角閃石斑晶の水素同位体比から過飽和水の分率を求める式4に与える定数のうち、マグマの全岩含水量 ( $\delta T$ ) を $-50\%$ と与えた根拠は貧弱である。 $\delta T$ に地域分布が存在するか否かの検討も不足している。これらの問題を解くためには、観測事例を増やし、 $\delta T$ をどう置いたときに最も矛盾が少なくなるかを検討することが有効だと思われる。また式4に与えるメルトの含水量 (CD) とマグマのメルト量比 (XD) を求めるには、噴出物について詳細な化学分析(全岩、鉱物、斑晶ガラス包有物)と微細組織の観察を行ない、マグマ溜まりの温度や圧力などといった岩石学的データの取得を、個々の火山について、丁寧に行なう必要

がある。本講演で示した事例のなかで、十分な岩石学的研究がなされたと筆者が感じているのは、肘折火山の事例だけである。日本におけるマグマ水量の空間分布マップを作成し、マンツルの融け易さを判断するための示標を具体的に把握するためには、以外の火山についても詳細な岩石学的データを取得することが急務である。

#### 謝 辞

本研究は原子力安全・保安院（現 原子力規制委員会 原子力規制庁）「平成23年度地層処分に係る地質評価手法等の整備」および「平成24年度地層処分に係る地質評価手法等の整備」として実施した。

#### 文 献

- Ghiorso, M. S. and Sack, R. O. (1995). Chemical mass transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **119**: 197–212.
- Kushiro, I., Syono, Y., and Akimoto, S. (1968). Melting of a peridotite nodule at high pressures and high water pressures. *Geophys. Res. Lett.*, **73 (18)**: 6023–6029.
- Miyagi, I. and Matsubaya, O. (2003). Hydrogen isotopic composition of hornblende and biotite phenocrysts from Japanese island arc volcanoes: evaluation of alteration process of the hydrogen isotopic ratios by degassing and re-equilibration. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **126**: 157–168.
- Miyagi, I. and Yurimoto, H. (1995). Water content of melt inclusions in phenocrysts using secondary ion mass spectrometer. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **40**: 349–355.



## 03

## スラブ起源深部流体

## -その分布、成因と地震活動との関連について-

風早康平・高橋正明・尾山洋一・安原正也（活断層・火山研究部門 深部流体研究グループ）  
長谷川 昭（東北大学 名誉教授）

## 1. はじめに

日本列島は、海洋プレートの沈み込み帯に位置し、プレートに含まれる含水鉱物や間隙水の脱水により、マントルや地殻に水が供給される場となっている。近年、地震観測網等の整備により、地震波の三次元速度構造等が明らかになり、地殻やマントル内での流体の不均質分布が明らかになった。鉱物—熱水間の相平衡に関する実験岩石学的成果により、プレートの鉱物種や脱水プロセスも論じることが可能となり（例えば、Hacker 2008）、沈み込み帯における水循環モデルも構築されている（Iwamori, 1998）。また、2002 年鳥取県西部地震、2004 年中越地震、2007 年中越沖地震、2007 年能登半島地震、2008 年岩手・宮城内陸地震に共通する特徴として、地殻内深部流体の関与が示唆されている（例えば、Ohmi et al., 2004）。西南日本（特に近畿地方）においては、非火山性深部低周波地震が多く発生しており（高橋・宮村, 2009）、これらも地殻下部の深部流体活動が原因であると考えられている（たとえば、長谷川他, 2008）。このような場所（たとえば、有馬温泉：神戸市、石仏：大阪府）には非常に高い塩濃度の非火山性湧水が存在し、その特徴は、水の酸素同位体比が非常に高い、CO<sub>2</sub>を多量に含む、そして塩濃度が海水の 2 倍以上に達する等であり、海水由来の塩水ではなく、地下深部から上昇してきたと考えられた（Matsubaya et al., 1973；西村他, 2006）。非火山地域に湧出するにもかかわらずマグマ起源水と同様の特徴を持っている有馬温泉は、沈み込んだフィリピン海プレート（スラブ）の脱水作用により放出された熱水ではないかと考えられている（西村他, 2006；Kusuda et al., 2014）。また、網田他(2005)は大分平野で見つかる有馬型塩水の微量成分の特徴により、スラブの脱水起源の熱水であるとしている。天水以外に由来する水の成因や起源の解明は、変動帯における深部熱水の循環や地殻内での役割を考える上で大変重要である。

産総研では、2000 年より全国の深層地下水、温泉水の調査を実施しており、その水の主成分化学組成や各種安定同位体比の分析結果を集積している（高橋他, 2011）。現在、ほぼ全国をカバーし、各種成分の空間分布や成因等を検討できるようになった（風早他, 2014）。本講演では、これらのデータを元に、1) スラブ起源熱水の指標、2) 西南日本及び東北日本弧におけるスラブ

起源熱水上昇域の分布・成因、そして 3) 地震活動との関連及び固体地球内部の水循環システムについて考察する。

## 2. スラブ起源熱水の指標

リチウム(Li)は地下深部の高温環境で容易に流体相に濃集し、その後、温度が下がっても沈殿しない特徴があるため、深部熱水の指標として有効である（Nishio et al., 2010）。風早他(2014)は、有馬型温泉水をはじめとした水の酸素同位体比がマグマ水方向にシフトした水は Li/Cl 比が高く、海水方向に向かう水の Li/Cl 比が低いことを示し、Li/Cl（重量比）が 0.001 より高いものをスラブ起源水（マグマ水も広義のスラブ起源水）の混入を受けた水の指標とした。たとえば、有馬型温泉水の Li/Cl 比は海水より数百倍高い値を示し、大きな違いを示すことから非常に有効な指標である。Li 濃度ではなく Li/Cl 比とすることにより、通常の希薄な地下水による希釈を受けても本来の値を保つことが期待されるため、地下水に混入したスラブ起源成分の検出にも有効である。

## 3. スラブ起源水の広域分布

西南日本弧及び東北日本弧における Li/Cl 比の広域分布を図 1 及び 2 に示す。Li/Cl 重量比が 0.001 より大きい地点（●）がスラブ起源水を含んだ深層地下水、温泉水である。西南日本弧では、山陰地域において第四紀火山周辺に分布し、兵庫県南部（有馬・高槻構造線～山崎断層）及び大阪府南部に顕著にみられる。また、愛媛県及び紀伊半島では中央構造線に沿って分布する特徴がある（風早他, 2014）。東北日本弧では、スラブ起源水は火山フロント上及びその背弧側で見つかる特徴があり、西南日本弧でみられる前弧側には存在しない特徴がある。また、スラブ起源水の分布は、Tamura et al.(2002)によるホットフィンガーマントルのエリアに一致するため（図 2）、東北日本弧のスラブ起源水はマグマからもたらされた熱水であると考えられる。また、スラブ起源水の混入を受けた地下水が、断層や火山周辺で見つかることから、上昇経路は断層のような亀裂系を水みちとしていると考えられる。

西南日本弧におけるスラブ起源水の分布特徴は、第四紀火山周辺のみならず、四国—近畿地方の前弧側に

広く及んでいるため、沈み込み帯の特徴に起因していると考えられる。図 1 に西南日本弧の固体地球内部の水循環モデルを示す。西南日本弧ではフィリピン海プレートの沈み込みが浅い角度であり、また、フィリピン海プレート自体が若く薄いため高温であり、マントル内の比較的浅所で脱水反応が起きる。さらに、ウェッジマントルの対流が限定されており、スラブから脱水した水は対流によってマントル深部に引きずり込まれることなく上昇しうる(片山他, 2010)。このモデルは前弧側においても広域的なスラブ起源水の上昇が起きている観測結果とよく整合する。

一方、東北日本弧では、前弧側にはスラブ起源水の上昇がほとんど見られないという特徴がある(図 2)。東北日本弧では、厚い太平洋プレートが沈み込んでおり、西南日本弧と比較して低温である。スラブに含まれる含水鉱物の脱水反応は、比較的深所で起こり、生じた熱水流体は直上のマントルを蛇紋岩化し、マントル対流によりさらに深所に運搬される(長谷川他, 2008)。蛇紋岩の脱水作用で生じた熱水流体がマントルを部分的に熔融しマグマができる。このモデルは、東北日本弧の前弧側に、有馬型熱水流体が存在しないことをよく説明できる。

#### 4. 地震活動との関係

図 3 に日本列島における深部低周波 (DLF) 地震の分布と微小地震の D90 値を示す。西南日本弧では、外帯に沿ってプレート境界で生じている DLF 地震帯があるが、スロースリップに起因すると考えられている。山陰地方の第四紀火山近傍、兵庫県南部～大阪府及び中央構造線の南側においても広い範囲にわたり地殻下部を震源とする DLF 地震クラスターがあり、その活動場所と Li/Cl 指標によるスラブ起源水の分布範囲は整合的である。また、東北日本弧においても、DLF 地震クラスターは主に第四紀火山近傍で発生し、スラブ起源水の分布と調和的である。DLF 地震が深部の熱水活動であるとした考え(例えば、Ohmi et al., 2004)を強く支持する。

西南日本及び東北日本弧のいずれにおいても、D90 値が小さい地域(浅所に微小地震活動がある地域)は、スラブ起源水の分布、すなわち上昇場とよく一致する。中国地方の中央部、東北日本の前弧側等において、スラブ起源水がみられない地域があることも重要である。これらの地域は、DLF 地震活動がないことに加えて、D90 値も大きな値を示し、地殻内で地震活動が不活発な場である。以上より、DLF 地震活動に加えて微小地震活動もスラブ熱水の上昇と関連すると考えられる。

#### 5. 課題

今回とり扱ったスラブ起源深部流体は、有馬型熱水やマグマ水の源になると考えられるスラブ内の含水鉱物等の脱水により供給される水である。実際には、沈み込み帯では、海洋プレート上面の堆積物中に存在する大量の間隙水が沈み込むため、その水を起源とする深部流体も存在する。この水は比較的浅部かつ低温で放出されうるため、Li/Cl 指標や酸素同位体シフト等で判別することはむずかしいであろう。Togo et al.(2014)は、温泉水に含まれる放射性のヨウ素同位体比、塩素同位体比等の情報を用いて、福島県いわき市の温泉水が太平洋プレートの間隙水に由来する可能性を指摘した。この水は同位体的には海水と似ているが塩濃度が低い特徴があり続成作用に関連する水と考えられる。同様の特徴を持つ塩水は、西南日本弧の太平洋側にも存在しており(大沢他, 2010)、フィリピン海プレートの沈み込みに関連する間隙水由来の水の可能性もある。

本研究は、平成 18 年度東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測点整備プロジェクト、及び、文部科学省科研費新学術領域「地殻流体」(領域番号:2108)により採取した地下水試料について、原子力規制委員会原子力規制庁「平成 25 年度地層処分に係る地質評価手法等の整備(地質関連情報の整備)」において実施した分析値を加えたものである。

#### 文献

- 網田和宏・大沢信二・杜建国・山田誠(2005)大分平野の深部に賦存される有馬型熱水の起源. *温泉科学*, **55**, 64-77.
- Hacker, B. R. (2008) H<sub>2</sub>O subduction beyond arcs. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**, Q03001, doi:10.1029/2007GC001707.
- 長谷川昭・中島淳一・北佐枝子・辻優介・新居恭平・岡田知己・松澤暢・趙大鵬(2008)地震波でみた東北日本沈み込み帯の水の循環, *地学雑誌*, **117**, 59-75.
- Iwamori, H. (1998)Transportation of H<sub>2</sub>O and melting in subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **160**, 65-80.
- 片山郁夫・平内健一・中島淳一(2010)日本列島下での沈み込みプロセスの多様性, *地学雑誌*, **119**, 205-223.
- 風早康平・高橋 正明・安原正也・西尾嘉朗・稲村明彦・森川徳敏・佐藤努・高橋浩・北岡豪一・大沢信二・尾山洋一・大和田道子・塚本斉・堀口桂香・戸崎裕貴・切田司(2014)西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴, *日本水文科学会誌*, **44**, 3-16.



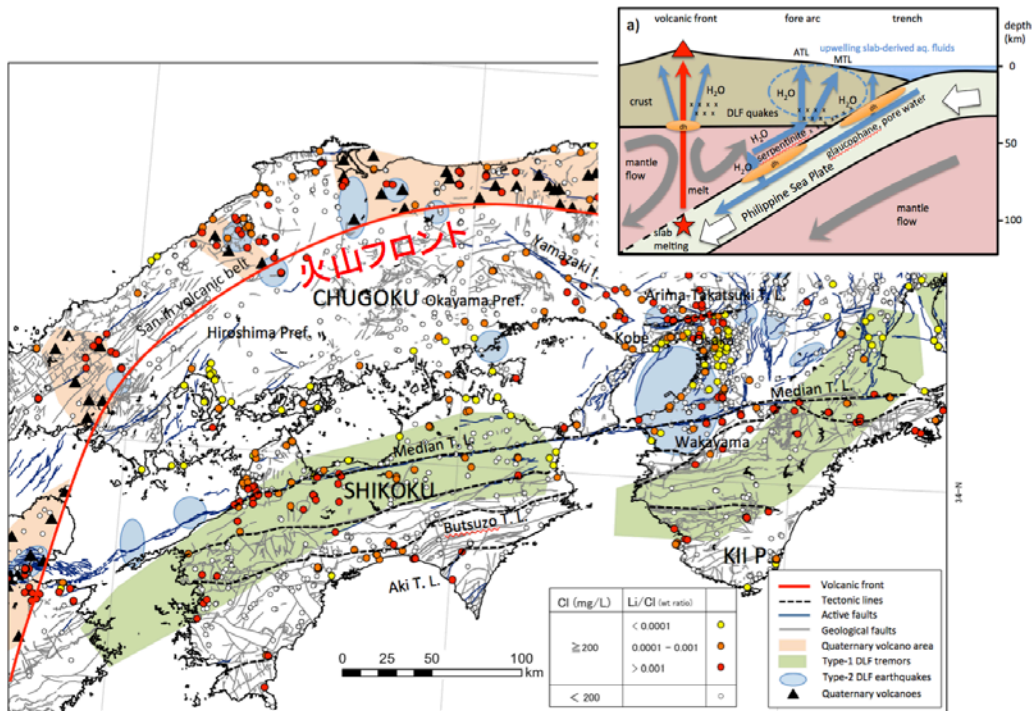


図 1 西南日本弧におけるスラブ起源水の分布（風早他, 2014 を改変）と島弧システムの水循環モデル（片山他, 2010 を改変）。詳細は本文参照。

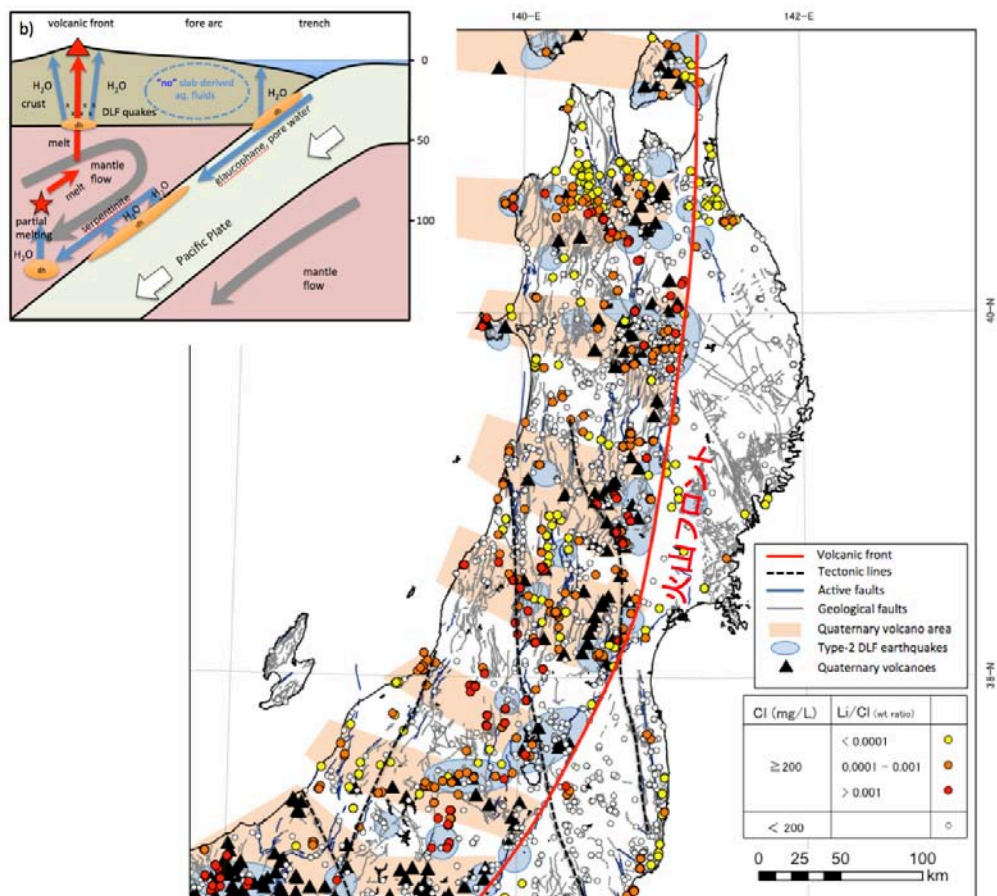


図 2 東北日本弧におけるスラブ起源水の分布（Kazahaya et al., in prep）と島弧システムの水循環モデル（長谷川他, 2008 を改変）。詳細は本文参照

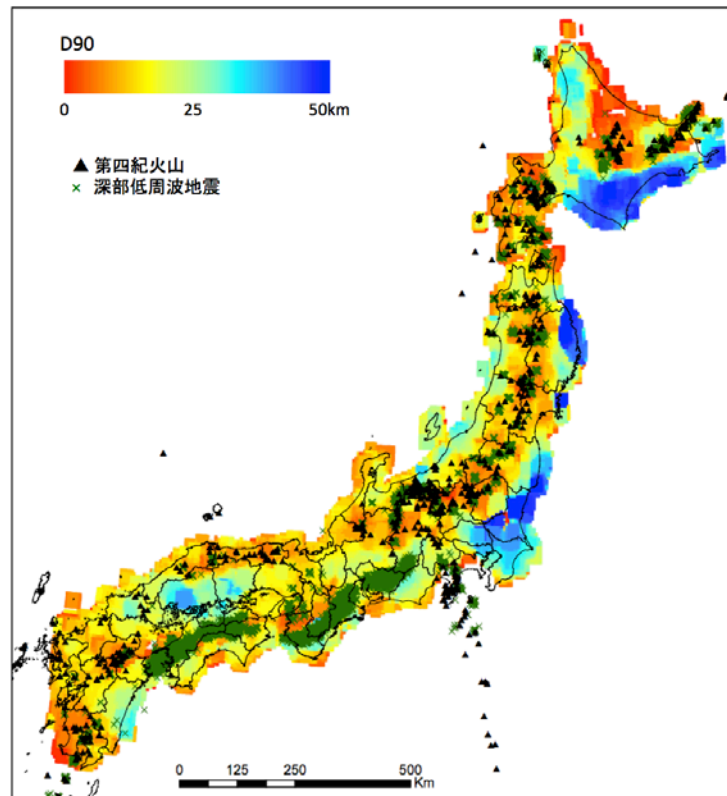


図 3. 微小地震の深度 (D90) の分布 (Omuralieva et al., 2012) と深部低周波地震の分布 (気象庁一元化震源による)。

- Kusuda C., Iwamori H., Nakamura H., Kazahaya K., Morikawa N. (2014) Arima hot spring waters as a deep-seated brine from subducting slab, *Earth Planet Space*, (in press)
- Matsubaya, O., Sakai, H., Kusachi, I. Satake, H. (1973) Hydrogen and oxygen isotopic ratios and major element chemistry of Japanese thermal water systems, *Geochem. J.*, **7**, 123-151.
- 西村進・桂郁雄・西田潤一 (2006) 有馬温泉の地質構造, *温泉科学*, **56**, 3-15.
- Nishio Y., Okamura K., Tanimizu M., Ishikawa T. Sano, Y. (2010) Lithium and strontium isotopic systematics of waters around Ontake volcano, Japan: Implications for deep-seated fluids and earthquake swarms. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **297**, 567-576.
- Ohmi S., Hirose I., Mori J. (2004) Deep low-frequency earthquakes near the downward extension of the seismogenic fault of the 2000 Western Tottori earthquake. *Earth Planets Space*, **56**, 1185-1189.
- Omuralieva A. M., Hasegawa A., Matsuzawa T., Nakajima J., Okada T. (2012) Lateral variation of the cutoff depth of shallow earthquakes beneath the Japan Islands and its implications for seismogenesis. *Tectonophys.*, **518**, 93-105.
- 大沢信二・網田和宏・山田誠・風早康平 (2010) 宮崎平野の大深度温泉井から流出する地熱流体の地化学特性と起源. *温泉科学*, **59**, 295-319.
- 高橋浩晃・宮村淳一 (2009) 日本列島における深部低周波地震の発生状況. *北海道大学地球物理学研究報告*, **72**, 177-190.
- 高橋正明・風早康平・安原正也・塚本斉・佐藤努・高橋浩・森川徳敏・大和田道子・尾山洋一・芝原暁彦・稲村明彦・鈴木秀和・半田宙子・仲間純子・松尾京子・竹内久子・切田司・大丸純 (2011) 深層地下水データベース, *地質調査総合センター研究資料集*, no.532, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Tamura Y., Tatsumi Y., Zhao D., Kido Y., Shukuno H. (2002) Hot fingers in the mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.* **197**, 105-116.
- Togo Y., Kazahaya K., Tosaki Y., Morikawa N., Matsuzaki H., Takahashi M., Sato T. (2014) Groundwater in Joban and Hamadori areas, southern Tohoku, Japan, possibly originated from subducted sediments. *Earth Planets Space*, **66**, 131.



# 04

## プレート運動からみた日本列島の地殻変動

高橋雅紀（地質情報研究部門 地球変動史研究グループ）

### 1. はじめに

現在の日本列島は、大陸プレートに太平洋プレートが沈み込む東北日本と、フィリピン海プレートが沈み込む西南日本に大別される。一方、伊豆諸島はフィリピン海プレートに太平洋プレートが沈み込むことによって成長を続ける火山列島である。地質学的には、東北日本は島弧、南西諸島は陸弧と位置づけられ、日本海拡大時期に海洋底拡大に移行しなかった西南日本も陸弧といえる。一方、海洋プレート縁に成長する伊豆諸島は海洋性島弧とされる。それぞれの地域の地殻変動(テクトニクス)は、関係する2つのプレートの相対運動によって引き起こされていると推定される。

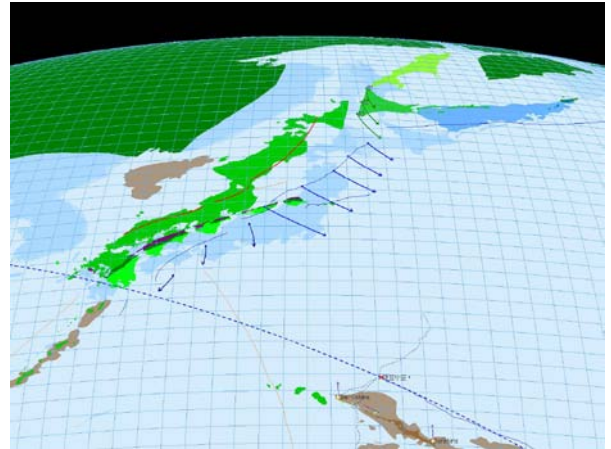
日本列島の 10 万年オーダーの将来を予測するためには、その一桁時間スケールの大きい現象に基づいて考察する必要がある。すなわち、少なくとも過去 100 万年間の現象から、これからの 10 万年間を推定しなければならない。一方、1000 万年を超える地質学的時間スケールで日本列島の形成過程を振り返ると、過去 100 万年間の地殻変動は非常に特異な事象であったことがわかる。

本講演では、日本列島周辺の過去 2500 万年間のプレート運動と地殻変動を再現し、第四紀、すなわち最近の 300 万年間の東西短縮テクトニクスが非常に特殊な時期であったことを示す。その視点に立脚し、今後 10 万年間の予測を評価したい。

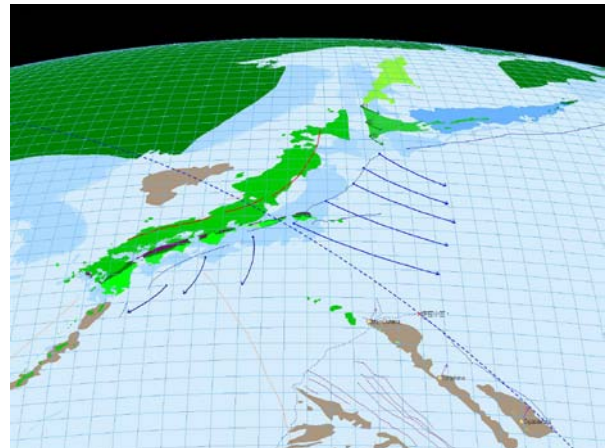
### 2. 2500～1500 万年前の海洋底拡大

数億年に及ぶ日本列島の成り立ちの大部分は、海洋プレートが沈み込む大陸プレート縁であった。ところが一度だけ背弧拡大(海洋底拡大)が成功して、日本列島は大陸から離脱した。それが前期中新世の日本海の拡大である。日本海の拡大開始時期は不明瞭であるが、終了時期は 1500 万年前である。すなわち、日本列島として成立したのは、たかだか 1500 万年前である。

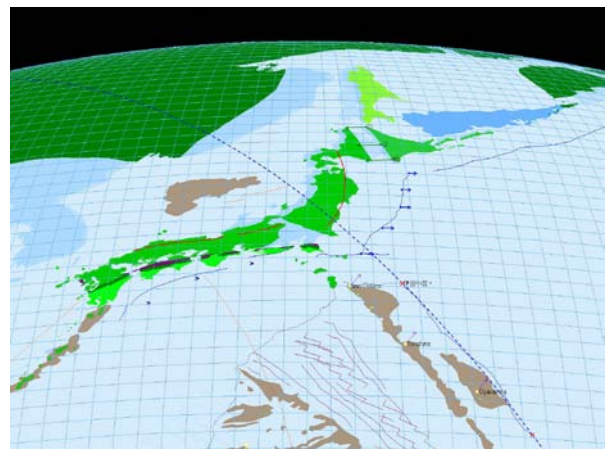
西南日本の南に広がる四国海盆は、日本海の拡大に先立ってリフトから海洋底拡大へと移行した。拡大時期は 2500～1500 万年前である。したがって、四国海盆の拡大に追随するように日本海も拡大し、1500 万年前に同時に拡大を終了した。北海道の東方の千島海盆も、この時期に拡大したと推定される。



2500 万年前：四国海盆の拡大開始.



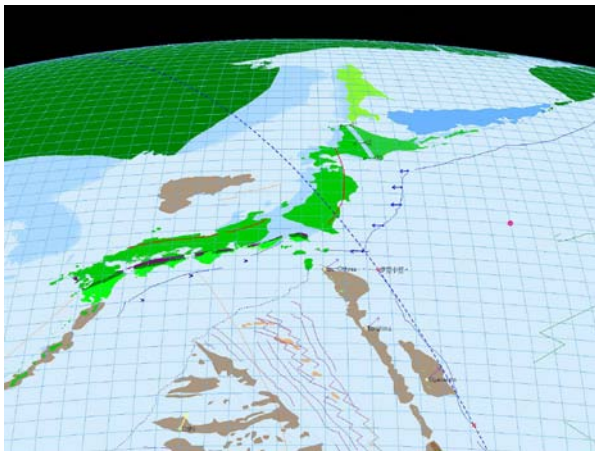
2000 万年前：日本海の拡大.



1500 万年前：背弧海盆の拡大終了.

### 3. 1500 万年前以降の伊豆弧の衝突

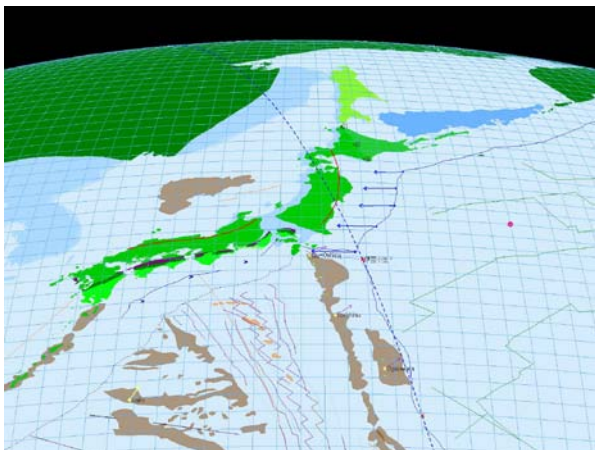
1500～300 万年の東北日本は、大部分が中立的な応力場の元で水没し、広い範囲で海成層が堆積した。西南日本も比較的静穏であったが、拡大直後の四国海盆が沈み込んだため、沈降量は東北日本に比べて軽微であったと推定される。この間、フィリピン海プレート運動によって伊豆弧が本州中央部(南部フォッサマグナ)に衝突し続け、赤石山地と関東山地の基盤岩類(西南日本外帯)の屈曲構造が形成された。同様の衝突現象は北海道中軸部(日高山脈)でも生じていたと推定される。日高山脈の衝突はユーラシアプレートと北アメリカプレートの相対運動による。



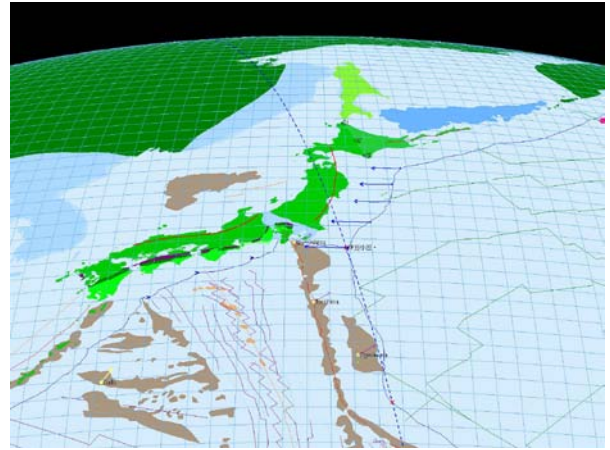
900 万年前：伊豆弧の衝突。

### 4. 300 万年前以降の東西短縮テクトニクス

300 万年になると日本列島は突然強い東西圧縮応力場となり、東北日本では南北方向の逆断層が、西南日本では北東-南西方向の右横ずれ断層と北西-南東方向の左横ずれ断層からなる共役の断層が活動し始めた。その結果、隆起山地と山間盆地が成長し、地形的起伏を成長させながら本州の陸域は広がっていった。



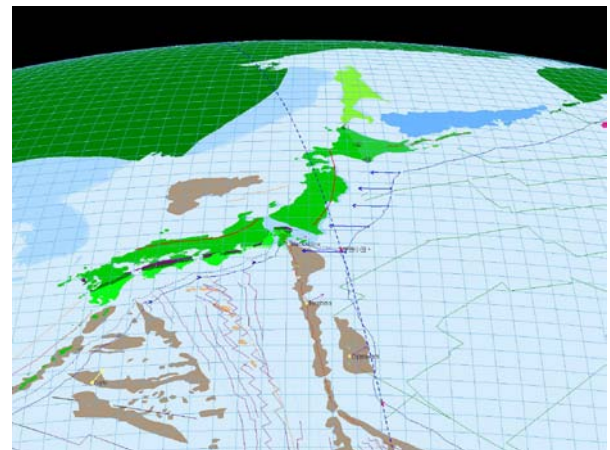
300 万年前：東西短縮テクトニクスの開始。



現在。

### 5. 地質学的将来

このように、2500 万年間の日本列島の地殻変動を振り返ると、2500～1500 万年前の伸張テクトニクス、衝突帯を除く 1500～300 万年前の中立的テクトニクス、そして 300 万年前以降の短縮テクトニクスに三分することができる。300 万年前から続く東西短縮テクトニクスが数万から数十万年スケールで転換するとする可能性を示す積極的根拠は見当たらないので、少なくとも今後 10 万年程度は現在のテクトニックな枠組み(東西短縮テクトニクス)が継続すると予想される。



100 万年後：短縮テクトニクスの継続。

図は日本列島の形成過程の復元動画のスナップショット。東北日本と西南日本には、日本海拡大前の火山フロントを示した。円弧状の青矢印は移動ベクトルを、青破線は伊豆-小笠原海溝を示す。1500 万年前以降に伊豆弧が南部フォッサマグナで本州に衝突し続け、西南日本外帯の直線的な帯状配列が湾曲した。



# 05

## 日本列島の応力場解析と長期の断層活動性評価

大坪 誠 (活断層・火山研究部門 長期地質変動研究グループ)

### 1. はじめに

数万年を超える長期における自然事象の将来予測には様々な不確実性を伴うと考えられ、個々の地質関連事象の活動時期・活動様式・規模などの変動幅の評価が課題となる (梅田ほか, 2013; 大坪ほか, 印刷中).

本発表では、長期における断層再活動性の評価手法および日本列島における断層再活動性について示し、その成因や構造地質学的特徴に関する情報を整理する。また、現在の地殻応力場や各種地質学的・地球物理学的情報との比較検討結果をふまえて、断層再活動性の将来予測のために必要になる知見やアプローチについて示す。

### 2. 日本列島の応力場の設定

断層活動を含む地殻の変形発達の主たる源は地殻応力であり、地殻応力場の空間不均一性や各空間での特徴の理解が必要である。本発表では、各地の応力情報が地震データなどによって既知の場合での各地の応力テンソルの非類似度 (Stress difference, Orife and Lisle, 2003) を用いた応力不均一性マッピング (Otsubo et al., 2013) を例に示す (図 1)。

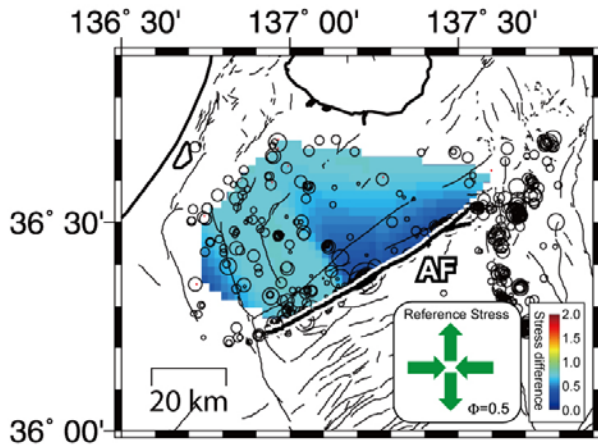


図 1. 岐阜県跡津川断層 (AF) 周辺の地下 8~20 km 応力の不均一性マップ (大坪ほか, 2013). 活断層である跡津川断層周辺での地震データ (Katsunata et al., 2010) を用いて明らかになった応力に対して、最大圧縮応力  $\sigma_1$  と跡津川断層の断層面の角度が  $30^\circ$  となるような横ずれ断層応力を基準応力として設定した結果。より寒色の領域が基準応力に近い応力 (跡津川断層が相対的にすべりやすい応力) となる。

### 3. 長期の断層活動性で考慮すべき事象

断層活動性の評価において抽出すべき個別の事象、また長期の活動性評価に向けて排除しきれない不確実性のある個別の事象を、社会基盤に影響をもたらす断層活動 (地表付近に数 10 cm 以上の断層変位をもたらす) として、活断層の主断層の活動、主断層からの派生断層の形成、地質断層の再活動、以上の 3 つに整理した (大坪ほか, 印刷中)。

第四紀に活動した活断層の存在が明らかとなった地域では、主断層沿いのずれ破壊による影響が考慮すべきリスクとなる。これまでに明らかになった日本列島の活断層の分布には偏在性が認められ、それら活断層のタイプや活動性には地域性が認められる (活断層研究会編, 1991; 中田・今泉編, 2002)。

活断層活動時における主断層からの派生断層の形成は、サイトで活断層を回避した場合でも、地下深部の主断層から新たな断層が分岐して生成されることによる影響がリスクとして考えられる。派生断層の発生・成長の一例として、逆断層活動としては、堆積層が基盤の上に厚く載っている地域では派生断層の活動に伴う断層関連褶曲の発達が挙げられる。Fault bend fold や Fault propagate fold が断層関連褶曲の代表例である (例えば, Twiss and Moores, 1992)。

第四紀に活動した記録があり、繰り返し活動する可能性のある断層として認定されている活断層以外の断層を、地質断層と呼ぶ (大坪ほか, 印刷中)。地質断層であっても、将来再活動した場合には活断層と同程度の影響のリスクがあることを考慮する必要がある。

### 4. 長期の断層活動性で考慮すべき変動幅 (不確実性)

産業技術総合研究所深部地質環境研究コア編 (2012) は、「地質断層の再活動」予測の対象として、周辺の地震によって誘発される地震活動、プレート境界部での巨大地震による応力場の変化によって活動する断層、広域応力場の変化によって再活動する断層、の三つに整理している。

上記の事象に対して長期の将来予測を行うためには、現時点で整理可能な知見から次の 2 つの要因を留意する必要がある (図 2; 大坪・宮川, 2014)。第一に、過去の事象からの外挿条件の変化を要因 A する。すなわち断層活動を引き起こす環境条件、および断層自身の条件

(パラメータ) の変化である。前者は、対象とする断層が活動しやすい応力に変化する可能性 (要因A1) , および断層周囲の地質構造および地質構成岩体の長期的変化による断層が活動する可能性 (要因A2) である。後者は、対象とする断層の摩擦強度や破砕帯の発達等の変化に伴って断層が活動する可能性 (要因A3) である。第二に、既存の過去の事象の外挿からは推測できない新規の事象, すなわち、外挿期間が十分ではないため推測できない新規事象を要因Bとする。それらの要因に対する活動性評価にはスリップテンデンス (Morris et al., 1996; 本シンポジウム宮川・大坪発表) を用いた力学ベースでの検討が有効である。

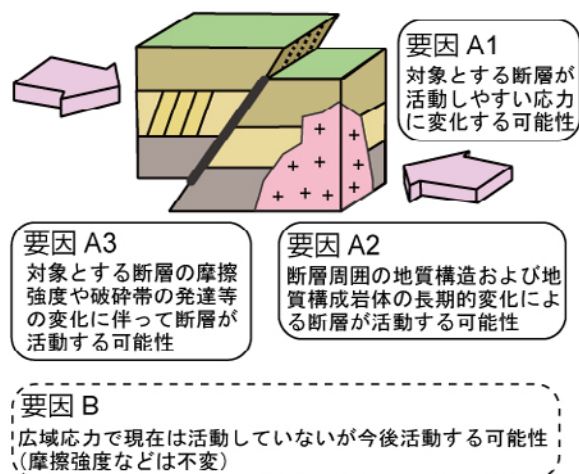


図 2. 長期の断層活動性の将来予測を行う際に留意すべき要因 (大坪・宮川, 2014) .

本発表では、地質断層の再活動性評価に関する今後取り組むべき課題として、(1) 空間分解能・空間スケール、(2) 時間スケール、(3) 時間分解能、(4) 広域応力場の変化、(5) 断層の摩擦強度や破砕帯発達の時間変化、およびそれらの岩体変形ポテンシャルへの影響の5つに整理する。

(1) 空間分解能・空間スケールに関して、マグニチュード3以下の微小地震を用いた応力場の詳細な空間不均一性把握は有効である。ただし、地震活動が低調な地域では、必要に応じて臨時観測を行うなどの対応が必要である。応力変化に関しては、プレート境界型の大規模地震を想定しており、比較的小規模な内陸型の地震に伴い誘発される断層の再活動性についての評価は、より広域・高分解能な応力評価とともに別途

行う必要がある。また、断層帯の周りでは、岩体強度の空間変化が認められる (例えば, Gudmundsson et al., 2010) . 岩体強度の空間変化が、どの程度がどの範囲まで断層活動ポテンシャルに寄与するのかを検討することが必要である。

(2) 時間スケールに関して、地殻応力の大局的な空間変化を捉えることは可能である。ただし、1000年～10万年スケールの応力変化は、測地学および地質学的な証拠が残らない時間スケールであるためにその推定が困難であり、今後も引き続き検討が必要である。

(3) 時間分解能に関して、個々の断層に関して、現在の応力場のもとでの全国一律の方法による相対評価が可能である。個々の対象となる断層において、現在の応力状態がプレートテクトニクスの枠組みで、断層が再活動するまでのどの状態であるのかを理解するためには現地での知見では不十分である。そのために、個々の断層に関して、より高い時間分解能での検討が、対応するメカニズム抽出と合わせて必要である。

(4) 広域応力場の変化に関して、広域応力場の大規模な変化 (例えばプレート沈み込み方向の変化によるもの) による断層再活動性については別途、広域応力場変化の可能性 (発生要因等) とその変化量について含めた形での検討が必要になる。評価期間において広域応力場の変化の可能性が小さい場合は、複数の自然事象間の連関、変形場の移動、などを考慮して評価する必要がある。

(5) 断層の摩擦強度や破砕帯発達の時間変化、およびそれらの岩体変形ポテンシャルへの影響に関して、1回の地震発生サイクルでの断層活動時における断層の摩擦強度や破砕帯発達に関する知見を整理することは可能である (例えば, Di Toro et al., 2011) . ただし、長期においては、これらは時間とともに変化し、それらが結果的に断層活動を促進・抑制させることが考えられる。そのためこの影響に関する時間を考慮した検討が必要である。最近、断層破砕帯の組織が摩擦強度に影響を与える報告が出つつある (例えば, 大橋, 2014) . 応力場の変化による断層運動方向の変化に伴う摩擦強度変化や、その際の評価で取り扱うべき時間スケールを把握する必要がある。

## 謝 辞

本発表の一部は、原子力規制委員会原子力規制庁 (旧



原子力安全・保安院)「平成 24 年度地層処分に係る地質評価手法等の整備」および旧独立行政法人原子力安全基盤機構「平成 25 年度 地質・気候関連事象の将来予測における不確実性の検討」として実施した成果である。

## 文 献

- Di Toro, G., Han R., Hirose, T., De Paola, N., Nielsen, S., Mizoguchi, K., Ferri, F., Cocco, M., Shimamoto, T. (2011) Fault lubrication during earthquakes. *Nature*, **471**, 494-498.
- Gudmundsson, A, Simmenes, T.H, Larsen, B., Philipp, S.L. (2010) Effects of internal structure and local stresses on fracture propagation, deflection, and arrest in fault zones. *J. Struct. Geol.*, **32**, 1643-1655.
- 活断層研究会編 (1991) 新編日本の活断層：分布図と資料. 東京大学出版会, 437p.
- Katsumata, K., Kosuga, M., Katao, H., The Japanese University Group of Joint Seismic Observations at NKTZ (2010) Focal mechanisms and stress field in the Atotsugawa fault area, central Honshu, Japan. *Earth, Planets and Space*, **62**, 367-380.
- Morris, A., Ferrill, D.A., Henderson, D.B. (1996) Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, **24**, 275-278.
- 中田 高・今泉俊文編 (2002) 活断層詳細デジタルマップ. 東京大学出版会, 60p.
- 大橋聖和 (2014) 長期的な物質・組織変化による断層強度変遷. 日本地質学会第 121 年学術大会講演要旨, R13-O-12.
- Orife, T., Lisle, R.J. (2003) Numerical processing of paleostress results. *J. Struct. Geol.* vol. **25**, p. 949-957.
- 大坪 誠・宮川歩夢・塚本 齊・山元孝広・渡部芳夫 (印刷中) 地層処分の長期安全を評価する際の断層活動における不確実性. *地質学雑誌*.
- 大坪 誠・宮川歩夢 (2014) 断層活動における地質学的時間スケールで考慮すべき稀頻度事象と将来予測での不確実性. 日本地質学会第 121 年学術大会講演要旨, R24-O-2.
- Otsubo, M., Miyakawa, A., Kubo, A. (2013) Spatial stress heterogeneity imaging by using difference between reduced stress tensors detected from earthquake focal mechanisms. *Proc. the 6th International Symposium on In-situ Rock Stress (RS2013)*, 1123-1128.
- 大坪 誠・宮川歩夢・久保篤規 (2013) 地殻応力の空間的不均一性を把握する試み：地震のメカニズム解から推定される応力テンソルの非類似度に基づく地殻応力マッピング. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会予稿集, SCG68-P02.
- 産業技術総合研究所深部地質環境研究コア編 (2012) 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—立地要件への適合性とその根拠となる調査結果の妥当性—. *地質調査総合センター研究資料集*, **556**, 112p.
- Twiss, R., Moores, E. (1992) *Structural Geology*. W. H. Freeman, New York, 532p.
- 梅田浩司・谷川晋一, 安江健一 (2013) 地殻変動の一樣継続性と将来予測—地層処分の安全評価の視点から—. *地学雑誌*, **122**, 385-397.



## 06

## 超巨大地震と日本列島の造山運動

池田安隆 (東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻)

## 1. 弾性歪と非弾性歪

沈み込み型造山帯においては、プレート境界面の固着に伴い地震間に地殻歪みが蓄積する。そのうちの弾性歪みのみがプレート間地震に伴う急速なすべりによって解放され、残る非弾性歪が永久変形となって蓄積される。近年の測地観測技術と観測網（とくに GPS）の発達によって、現在進行しつつある地殻変形を高精度で面的に捉えることが可能になった。しかし、測地観測データの蓄積はたかだか 100 年に過ぎないので、我々がそれから得た地殻変動像は造山帯における歪みの蓄積／解放の一サイクルの中でほんのスナップショットにすぎない。さらに重大な問題は、弾性歪みと非弾性歪みを測地データの中から（実用的な精度で）分離する地球物理学的方法が無いことであり、そのことが東北日本において超巨大地震の発生にいたる弾性歪みの蓄積を見過ごした主要な理由の一つである。

しかし、非弾性変形（岩石破壊を含む）は造山運動そのものであり、地質学的時間スケールで蓄積すると大変形となるから観測可能である（図 1）。したがって、地形・地質学的方法で観測した非弾性変形の変位を用いれば、測地学的観測データから現在進行しつつある弾性変形の蓄積を分離することが可能である。超巨大地震の発生にいたる弾性歪みの蓄積過程を真に理解するためには、地質学的データと思考法とが必要である。

## 2. 完全歪解放地震とは？

島弧に蓄積された弾性歪みを有効に解放するには、固着面全体を深部から地表まで一気に破壊することが必要である（このような地震を完全歪解放地震と呼んでおこう）。破壊領域の長さ  $L$  が十分に大きいとき（固着域の幅の 2~3 倍以上のとき）、断層面上でのすべり量は飽和値に達して完全歪解放が実現する（たとえば、Matsuura and Sato, 1997）。断層面の強度が一定だと仮定すると、すべり量の飽和値  $D_{\max}$  は固着面の（傾斜方向の幅  $W$  に比例するはずであるから、最大地震のモーメント解放量は、

$$\max M_o = \mu D_{\max} WL \propto W^2 L$$

となり、固着面の幅の 2 乗に比例して増加するが、

長さに対しては線形にしか増えない。つまり、完全歪解放地震は、それが複数セグメントにわたって連動したとしても、モーメント解放の総量は、個々のセグメントで単独に起こった地震のモーメント解放量を単純に足し合わせただけにしかない（このような地震を「単純連動型地震」と呼ぶことにする；池田ほか, 2012; Ikeda, 2014）。したがって、最大地震の大きさを予測する上で最も重要なパラメータは固着領域の幅である（池田ほか, 2012）。

Fujii and Matsuura (2000) の経験則によれば、 $W \sim 100$  km（南海トラフ程度）の沈み込み帯では、 $L$  が 200~300 km を越えるとすべり量は飽和する；その場合の飽和値は  $D_{\max} = 5$  m であるから、たとえ南海トラフの全長  $L = 700$  km におよぶ長大な連動破壊（単純連動型地震）が生じたとしてもその規模は  $M_w 8.7$  程度である。水準測量データによれば、1946 年南道海地震 ( $L \sim 300$  km) および 1964 年東南海地震 ( $L \sim 200$  km) にもなると、地震間の変動を打ち消すようなセンスの隆起・沈降が生じている (Yoshikawa et al., 1964; 吉川, 1968; Fukahata et al., 1996)；これは、震源域より深い領域は地震間に固着していないこと、およびこれら 2 つの地震が完全歪解放地震と見なしうる事を示す（池田ほか, 2012; 震源域のサイズは異なるが、変動のパターンは図 3A に近似する）。琉球海溝やマリアナ海溝は、GPS による測地変動のパターン (Sagiya et al., 2000; Kato et al., 2003) から見ると南海トラフより更にカップリング領域の幅が狭いと予想される。従って、これら 2 つの沈み込み帯で仮に数百 km を超える長さの連動破壊が起こったとしても、すべり量・マグニチュードともに南海トラフの場合よりずっと小さいであろう（池田ほか, 2012）。

一方、日本海溝のように  $W = 200 \sim 300$  km に及ぶ幅広い固着域があると、(2011 年東北地震のように)  $L \sim 500$  km まですべり量は飽和せず、 $M_w 9.0$  の超巨大地震が発生する。2011 年東北地震は、幅広く固着した沈み込み帯で発生した完全歪解放地震と見なすことができる。日本海溝北部から千島海溝では、2011 年 3 月 11 日地震の震源域と同じく、広いカップリング領域と長期にわた

る弾性歪みの蓄積が認められる (図 3B). したがって、この領域では依然として Mw 9 クラスの超巨大地震が発生する可能性がある (Ikeda, 2014; 池田ほか, 2012).

完全歪解放地震の特筆すべき特徴は、破壊が自由表面 (=海底) まで達して、そこが開放端になるということにある (Ikeda, 2014). そのために、最大すべり量が自由表面で生じる (たとえば, Wu et al., 1991; Rudnicki and Wu, 1995). それは半無限媒質の自由表面における境界条件を如何にして実現するかを考えれば自明である. 同様な理由から、完全歪解放地震の最大すべり量は、破壊が地表まで達しない (破壊面の up-dip 側に固定端がある) 地震のすべり量の 2 倍以上になる (Rudnicki and Wu, 1995). その結果、海溝付近での地表変形が大きくなって巨大な津波を引き起こす事になるであろう (Geist and Dmowska, 1999). 2011 年東北地震とは、まさにこのような完全歪解放地震であり、その物理的本質は単純である.

次ぎに重要なことは、このような完全歪解放地震の再来間隔を予測することである. この目的のために津波堆積物の調査は有効である (例えば, Minoura and Nakaya, 1991; 平川ほか, 2000, など). しかし、津波堆積物の情報のみから、震源域の広がり地震の規模を推定することは一般に難しい. そこで重要になるのは、問題とする古地震が海岸部の隆起・沈降を伴ったか否かということにある. 地震間に起こった大きな歪みを完全に打ち消すような変動が地震時 (および地震後の余効変動として) 起こることが完全歪解放イベントの特徴であるから (Ikeda, 2012; 池田ほか, 2012; 図 3), 海岸 (とくに微小な海水準変化に敏感に反応して変化する干潟環境) における古海水準復元がこのようなイベントを判定する決め手となる (Atwater, 1987; Atwater et al., 1992, 2004; Cisternas et al., 2005; Shennan and Hamilton, 2006; Sawai et al., 2004).

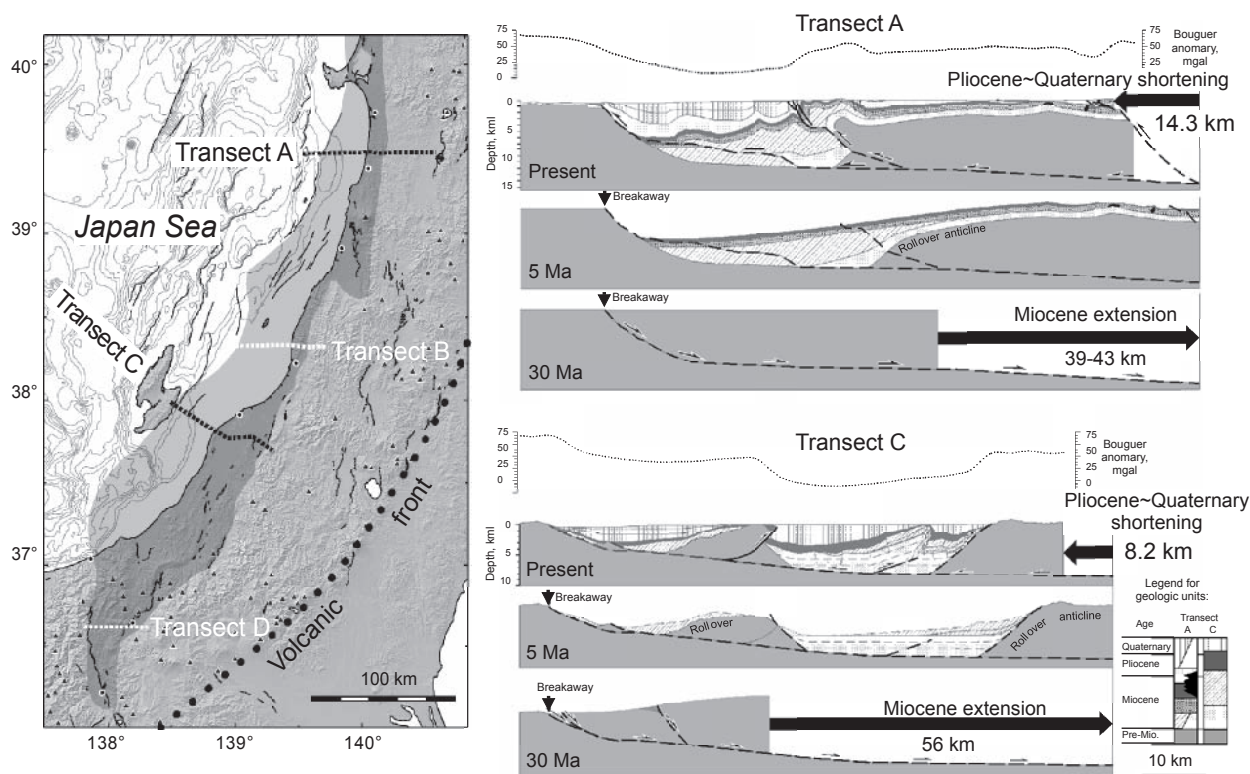


図 1. 東北日本弧における強変形領域 (羽越-フォッサマグナ堆積盆; 影の領域) とそれを横切る代表的な地質断面 (右図). Okada & Ikeda (2012) を改変. 断面 A と C を図 2 に示す. 各断面図は上から、ブーゲ重力異常、現在の地質構造、中新世末の地質構造 (鮮新世～現在までに起こった短縮変形を引き戻した状態)、およびリフティング前の地質構造 (さらに、中新世前期～中期に起こった引張変形を引き戻した状態). このような方法で推定した鮮新世以降の水平短縮速度は、東北日本弧全体として 3~5 mm/yr 程度であり、(2011 年東北地震前に) 測地的に観測されていた水平短縮速度より一桁小さい.



### 3. 測地学的歪速度と地質学的歪速度の矛盾

東北日本弧においては、測地学的観測で検出された水平短縮歪み速度が地質学的に観測される歪み速度よりおよそ一桁大きい。GPS 観測の結果によれば東北日本弧の陸域は 30~50 mm/yr 程度の速度で水平短縮している（歪速度にして  $10^{-7}$  strain/yr のオーダー）。一方、地質学的に観測される水平短縮速度は 3~5 mm/yr（歪速度にして  $10^{-8}$  strain/yr のオーダー）過ぎない。

同様の不一致は垂直変動速度についても存在する。太平洋岸では過去約 80 年間の験潮観測によって 10 mm/yr にも達する急速な沈降が観測される一方で（図 2）、第四紀後期の旧汀線高度は緩慢な（0.1~0.4 mm/yr）隆起を示す。これは過去少

なくとも 100 年間にわたって急速に蓄積してきた地殻歪みの大部分（~90%）が弾性歪みであることを意味している。このように急速な弾性歪みの蓄積は、プレート境界面が固着していることによって起こるから、この固着部分がすべることで解消されるはずである。過去 100 年間に日本海溝では Mw 7~8 級のプレート境界型地震が多数起っているが、これらの地震は破壊領域のサイズが固着領域の幅に比べて小さいので、弾性歪みの解放に寄与していない（図 2）。したがって、プレート境界の固着面全体がすべる巨大歪み解放イベントが存在するはずであり、2011 年東北地方太平洋沖地震はこのような固着解放イベントであると考えられる。

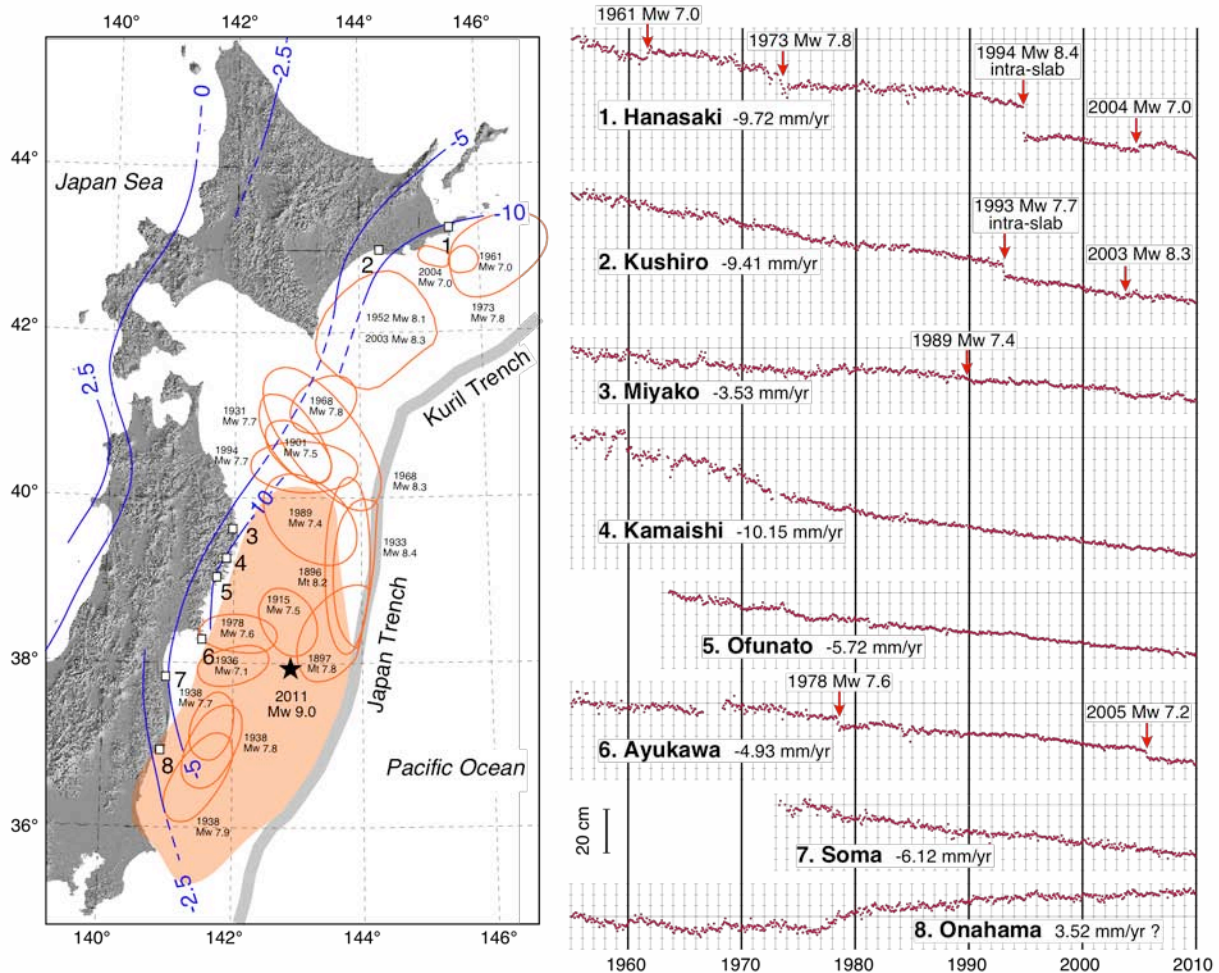


図 2. [左図] 東北日本弧における最近の垂直変動とプレート境界地震の震源域（池田ほか，2012; Ikeda, 2014）。青色の等値線は、1955-1981 年の期間における験潮観測から求めた隆起速度（単位：mm/yr）（Kato, 1983 による）。橙色線で囲んだ領域は、1896 年以降に起こった Mw 7.0 以上の地震の震源域。橙色で塗色した領域は 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域。[右図] 太平洋岸における過去 55 年間の上下変動（国土地理院，2010 による）。各験潮所の位置は左図参照。赤矢印は各験潮所の近くで起こった Mw 7.0 以上のプレート境界地震（1993 年根室沖地震と 1994 年釧路沖地震を除く）。

#### 4. 東北日本沈み込み帯の固着解放過程

地震前の地殻変動から推定すると、東北日本沈み込み帯の固着領域は異常に深く（深度～100 km まで；図 3B）、これは後述のように他の沈み込み帯ではみられない特徴である。2011 年の地震時には、この幅広い固着領域の浅部（深さ～50 km まで）のみがすべった；割れ残った深部固着域では今後数十年（？）にわたって余効すべりがおこり、それに伴って太平洋岸の隆起がおこるらしい（図 3B）。

#### 5. 超巨大地震発生場の類型

東北日本沈み込み帯に存在するこのような深部固着域（深さ 50-100 km）は、他の超巨大地震発生帯には存在しない可能性が高い。1960 年チリ地震 (Mw 9.5)、1964 年アラスカ地震 (Mw 9.2)、および 1700 年カスカディア地震 (Mw 9.0) の破壊領域は深さ 40～50 km 程度までであり、その陸側末端の位置はほぼ海岸線に一致する。これらの地域では、地震に伴って海岸沈降が生じた。地質学的データから明らかになった地震間の動きは隆起であり、地震時の沈降を完全にキャンセルする変動が地震間に生じていたことが分かった。このような変動のパターンは、上記地域において深部固着域が存在しないことを示している（図 3A）。一方、東北日本太平洋岸では地震間に急速な沈降が生じており、それは海岸線よりさらに内陸側深くまで及ぶ深部固着域が存在することに起因している。何故東北日本弧（だけ）に深部固着域が存在するのかは分からない。しかし、日本海溝に沈み込んでいる西太平洋のプレートは極めて古く従って低温であるから、このように深い固着域が存在するのは熱的な原因による可能性が高いと考えられる。

#### 文 献\*

池田安隆・岡田真介・田力正好（2012）東北日本島弧—海溝系における長期的歪み蓄積過程と超巨大歪み解放イベント。地質学雑誌, 118, 294-312.

Ikeda, Y. (2014) Strain buildup in the Northeast Japan orogen with implications for gigantic subduction earthquakes. *Episodes* (in press).

\* 完全な文献リストは、上記レビュー論文参照。

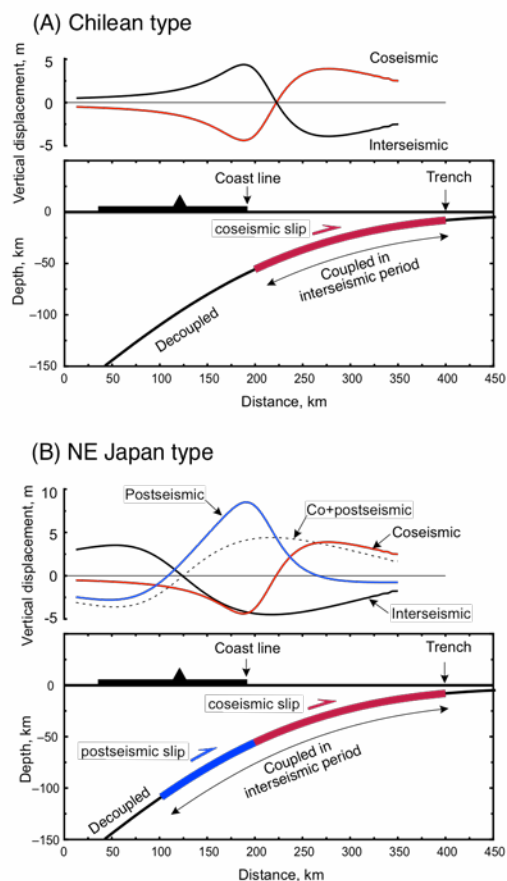


図 3. 超巨大地震発生場の類型 (Ikeda, 2014; 池田ほか, 2012). (A) (B) 両図とも、下図は海溝に直交する断面。沈み込み帯の形状は東北日本を横切る断面の形状で代表させてある。上図は地震時（赤実線）、地震直後（青実線）、および地震間（黒実線）の垂直変位量を示す。(A) チリ型。1960 年チリ地震 (Mw 9.5)、1700 年カスカディア地震 (Mw 9.0)、および 1964 年アラスカ (Mw 9.2) 地震がこのタイプに属する。このタイプの地震発生場では、地震間の固着領域と地震時の破壊領域（下図の赤太実線）とが一致するので、地震間変動のパターンと地震時変動のパターンとがほぼ正反対の関係にある。(B) 東北日本型。今のところこのタイプの地震発生場は 2011 年東北地震 (Mw 9.0) の例しか知られていない。地震時に破壊する領域（下図の赤太実線）よりさらに深部に固着領域（青太実線）があることを特徴とする。深部固着域は地震直後（おそらく数十年間）に余効すべりをおこして固着を解放する。地震時の変動パターンはチリ型沈み込み帯と変わらないが、海岸部が地震間に沈降することおよび地震直後に急速な隆起が起こることとでチリ型と区別できる。



## 【 ポスター発表 】



# P1

## 第四紀火山データベースの活用事例

### —西南日本に分布する火山の時空分布—

西来邦章（活断層・火山研究部門 長期地質変動研究グループ）

伊藤順一（活断層・火山研究部門）

#### 1. はじめに

火山の寿命は数十万年あることから、過去 1 万年間に活動した活火山のみならず、過去 1 万年以内の活動履歴のない第四紀火山に対してもその活動史を正確に理解しておくことは、長期的な視点での噴火活動、あるいは火山活動場の変遷を理解する上で重要である。一方、火山は地下深部から上昇するマグマが地表に到達することによって形成される。特に、火山体の地下で蓄積されるマグマ溜まりは、長期間にわたり熱やマグマから揮発性成分を放出し、それらの多くは地下水の流動を通して周辺に広がっていく。そのため、長期的な火山活動史を理解することは、マグマが地下環境へ与える影響を評価する有用なツールにもなる。産業技術総合研究所地質調査総合センターでは、第四紀火山及び火成岩体に対する地質情報を最新の研究成果を用いて一元的に整理した複数のデータベースを公開している（中野ほか、2013；西来ほか、2013 など）。本発表では、H26 年 10 月に正式公開を始めた「第四紀噴火・貫入活動データベース」を基に、その活用事例として西南日本の第四紀火山の時空分布について紹介する。

#### 2. 第四紀噴火・貫入活動データベース

本データベースは、“第四紀”に活動した火山、および“第四紀”に貫入・固結し、その後の隆起・侵食作用によって地表に露出した貫入岩体をインターネット経由で検索・閲覧可能としたもので、利用者からの要求パラメータを受け取り、それに対する応答を汎用的なデータ形式で返信する。本データベースでは、「活動年代」や「任意の基準位置からの距離」などから火山を検索し、取得した結果を利用することで、利用者は検索結果のリストを作成し、火山からの影響範囲の検討などを行うことができる。

#### 3. 西南日本に分布する第四紀火山の時空間変遷

西南日本地域については、133 の第四紀火山・岩体が採録されている。これら第四紀火山・岩体を活動時期別に検索した結果を図 1 に示す。この地域では、第四紀を通じて日本海側で火山が形成されているが、活動時期別にみても、島根県西部には第

四紀を通じて火山活動が認められない地域、山口県東部には 100 万年前以降に多くの火山が形成された地域が認められる。さらに、鳥取県中部を詳細にみると、100 万年前以前は西北西—東南東方向に火山体が配列した三朝火山が活動したが、それ以降には火山活動場が西へ移動し、同方向に火山体が配列した蒜山・大山火山が活動した。大局的にみると、西南日本の火山分布は基盤の地質構造と調和的であり、個々の火山の配列はそれらに規制されている可能性が考えられる。

#### 謝 辞

本研究の一部は、原子力規制委員会原子力規制庁（旧原子力安全・保安院）「平成24年度地層処分に係る地質評価手法等の整備」として実施した成果である。

#### 文 献

- 中野俊・西来邦章・宝田晋治・星住英夫・石塚吉浩・伊藤順一・川邊禎久・及川輝樹・古川竜太・下司信夫・石塚治・山元孝広・岸本清行（2013）、日本の火山（第3版）. 200 万分の 1 地質編集図, no.11, 地質調査総合センター。  
西来邦章・伊藤順一・上野龍之・内藤一樹・塚本斉（2013）第四紀噴火・貫入活動データベース。地質情報データベース, 地質調査総合センター。  
<https://gbank.gsj.jp/quaternary/>

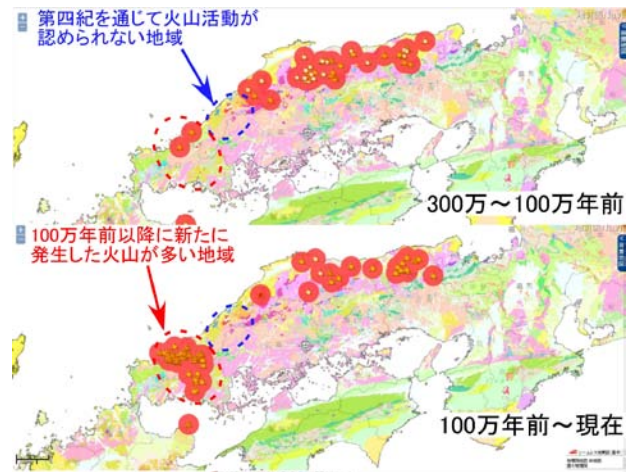


図 1. 活動時期別に検索した西南日本の第四紀火山の分布. 火山の中心から半径 15 km を赤色で表示.

P2

## Southwest Japan intra-plate monogenic volcanism: Case study of San-in Pliocene-Quaternary volcanic centers

Hoang Nguyen, Jun'ichi Itoh, Isoji Miyagi, Kuniaki Nishiki

(Institute of Earthquake and Volcano Geology, AIST)

Monogenic volcanism occurs in the San-in area in 4 major stages associated with the Japan Sea opening and the subduction re-initiation of the West Philippine Sea plate (Uto et al., 1994; Kimura et al., 2003; after Tamaki et al., 1992; Taira, 2001). The eruptive stages include pre-opening (>20 Ma), syn-opening (20–12 Ma?), post-opening (12–4 Ma?) and arc-related (4–0 Ma).

Samples with ages ranging from ca. 5.3 to 1 Ma were collected in Tottori Nanbu, Kurayoshi, Sakane, Wakasa, Mihirayama and several other localities to analyze for geochemical and Sr–Nd–Pb isotopic data. The samples are phyrhic basalt, basaltic andesite, andesite, dacite and rhyolite. Except for a few basaltic samples falling in the alkaline field, most of samples follow the normal tholeiitic trend (Cox et al., 1979). Some samples from the Tottori Nanbu and Kurayoshi areas having high MgO and SiO<sub>2</sub>, high Sr/Y (45–110) plot in the adakite field, although different from field defined by Setouchi high-Mg andesite (Shimoda et al., 1998). The study samples exhibit high LILE/HFSE ratios (for example, Ba/Nb), high (relative) Pb and Sr contents, the features vastly attributed to the involvement of arc-related (crust-) hydrous fluids in the mantle source. Their <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios are high (0.7045–0.707) and ε<sub>Nd</sub> are relatively low, between 2 and 3, accompanied by relatively high ratios of <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb (18.2–18.4) and <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb (38.34–38.65), suggesting involvement of crustally enriched source in the magma formation. Correlation between the isotopic and trace elemental compositions reveals a combined effect of fractional crystallization (FC) and assimilation-fractional crystallization (AFC) in the formation and evolution of San-in volcanics.

The Northern Kyushu (SW Japan) intraplate monogenic volcanics including south Hirado 15 Ma tholeiites, Ikitsuki–Hirado 7–9 Ma, Iki-jima 8–1.3 Ma and Gotoshima 1–0.1 Ma alkaline basalts (Hoang and Uto, 2003; Hoang et al., 2013; Uto and Tatsumi, 1996; Uto et al., 2004) located west of San-in, are taken for regional comparison. In difference from the San-in magmas the northern Kyushu are mostly basalts. Except for older basalts from south Hirado and Ikitsuki–Hirado which show geochemical and isotopic

characteristics comparable to the San-in lavas, the younger northern Kyushu basalts, including most of the Iki-jima samples, are distinct from the San-in in that they have lower SiO<sub>2</sub> and higher FeO\* and TiO<sub>2</sub>, their trace element patterns, showing high LILE (Ba, Rb, Sr...), high HFSE (such as Nb, Ta, Zr, Hf...) and high rare earths, are oceanic island basalt (OIB)-like; their Sr, Nd and (especially) Pb isotopic compositions are characteristically more depleted. These geochemical and isotopic features observed in the young northern Kyushu basalts are consistent with being derived from a deep, asthenospheric source as compared with the San-in lavas.

The difference between San-in and young (<7 Ma?) northern Kyushu monogenic intraplate magmas thus reflects the difference in depths of magma generation. The San-in basalts, showing high SiO<sub>2</sub>, low FeO\* and TiO<sub>2</sub>, high LILE/HFSE ratios and variable enrichment of Sr, Nd and Pb isotopes may reflect melts being generated in a shallow, crustally contaminated mantle, introduced, for example, by Cretaceous Pacific subduction (e.g., Uto et al., 1994). This mechanism has also been explained for the formation of 15Ma south Hirado and 7–9 Ma Ikitsuki – Hirado melts. In contrast, the younger northern Kyushu basalts, exhibiting OIB-like geochemistry, low <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb (17.7–18.2), relatively low <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr (0.7035–0.7045) termed as Indian Ocean asthenosphere-like isotopic signature is believed to present throughout the eastern Asian mantle, may reflect being derived from deeper, more fertile and enriched asthenospheric sources (Hoang and Uto, 2003; Hoang et al., 2013; Uto et al., 2004). This research project has been conducted as the regulatory supporting research funded by the Secretariat of Nuclear Regulation Authority (Secretariat of NRA), Japan.

### References

- Hoang & Uto (2003) *Chem. Geol.*; Hoang et al. (2013) *J. Geodyna.*; Kimura et al. (2003) *Island Arc.*; Shimoda et al. (1998) *Earth. Planet. Sci. Lett.*; Tamaki et al. (1992) *Proc. ODP.*; Taira (2001) *Ann. Rev. Earth. Planet. Sci.*; Uto et al. (2004) *Tectonophys.*; Uto et al. (1994) *Geochem. J.*; Uto & Tatsumi (1996) *Island Arc.*

## P3 日本列島におけるマンテル起源ヘリウムの分布とその原因

堀口桂香<sup>1</sup>, 風早康平<sup>1</sup>, 塚本齊<sup>2</sup>, 森川徳敏<sup>1</sup>, 大和田道子<sup>1</sup>, 仲間純子<sup>1</sup>

1 : 活断層・火山研究部門 深部流体研究グループ,

2 : 活断層・火山研究部門 長期地質変動研究グループ

### 1. はじめに

ヘリウム同位体比は、マンテルと地殻で明瞭に異なることから、日本のような沈み込み帯に分布する流体の起源を知るためのよい指標となる。日本列島における深部起源流体のヘリウム同位体比の分布は、東北日本弧と西南日本弧とで明瞭な違いがみられる。Sano and Nakajima (2008) は、日本列島下のプレートの形状や流体の上昇経路がヘリウム同位体比の分布に深く関係すると考えている。実際、東北日本弧の地下では古く冷たい太平洋プレートが北アメリカプレートへ約 8-9cm/年の速度で沈み込むのに対し、西南日本弧では若く温かいフィリピン海プレートがユーラシアプレートへ約 4.0-6.5cm/年の速度で沈み込む等の違いがある。本発表では、日本列島におけるヘリウム同位体比の分布をまとめ、地球物理学および地質学的研究結果と比較検討し、日本列島における深部起源流体の分布とその原因について考察する。

### 2. ヘリウム同位体比分布の特徴と考察

東北日本弧におけるヘリウム同位体比分布は、前弧域の火山フロントより東側の地域では、地殻起源ヘリウムが卓越した低ヘリウム同位体比を示すのに対し、背弧域の火山フロントから西側の地域では、マンテル起源ヘリウムの混合比が高くなる傾向がみられる(例えば、Sano and Wakita, 1985; Horiguchi et al., 2010)。近年の稠密なヘリウム同位体データの収集により、マンテル起源ヘリウムを多く含む高ヘリウム同位体比域と、地殻起源ヘリウムが卓越した低ヘリウム同位体比域の境界が明瞭になりつつある。このヘリウム同位体比分布域の違いは、地下のマンテルにおけるヘリウム同位体比の違い、あるいは地殻における放射壊変起源ヘリウムの生成率の違い等によることが考えられる。加えてその分布を詳細にみると、高ヘリウム同位体比域は、スラブ起源流体の特徴を示すLi/Cl比分布域や、断層・構造線や火山の分布と概ね相関がみられた。これは、マンテル起源ヘリウムが、スラブ起源流体に伴い、断層などを水みちとして地表へと運ばれていることを示唆する。

他方、西南日本弧におけるヘリウム同位体比分布は、東北日本弧とは全く異なり、前弧域の非火山地帯

においても高ヘリウム同位体比域が分布している。特に、兵庫県有馬地域および紀伊半島では、極めて高いヘリウム同位体比の分布がみられる。この前弧側に現れる高ヘリウム同位体比の起源や分布については、これまで多くの研究者らにより議論されてきた(例えば、Sano and Nakajima, 2008)。Sano and Nakajima (2008) は、近畿地方のヘリウム同位体比異常域はフィリピン海プレートの割れ目を通過してマンテル起源ヘリウムが運ばれているとし、その割れ目は四国海盆の過去の拡大海嶺と関係するというモデルを提案している。また、西南日本弧では沈み込んだスラブ起源の流体がマンテルを通過して上昇していると考えられており(風早ほか, 2014)、フィリピン海プレートの水循環(片山ほか, 2010)が大きく影響していることも考えられる。西南日本弧のマンテル起源ヘリウムの分布原因については、未だ不明なところが多く、地殻流体の分布との関係なども含めて今後の重要な研究課題である。

### 謝 辞

本研究は原子力規制委員会原子力規制庁「平成 26 年度地層処分安全審査に向けた評価手法等の整備委託費(地質関連情報の整備)事業」として実施している。

### 文 献

- 片山郁夫ほか(2010) 日本列島下での沈み込みプロセスの多様性. *地学雑誌*, **119(2)**, 205-223.
- 風早康平ほか(2014) 西南日本におけるスラブ起源流体の分布と特徴. *日本水文科学会誌*, **44(1)**, 3-16.
- Horiguchi, K. et al. (2010) Geographical distribution of helium isotope ratios in northeastern Japan. *Island Arc*, **19**, 60-70.
- Sano, Y. and Wakita, H. (1985) Geographical distribution of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism. *J. Geophys. Res.*, **90**, 8729-8741.
- Sano, Y. and Nakajima, J. (2008) Geographical distribution of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios and seismic tomography in Japan. *Geochem. J.*, **42**, 51-60.



# P4

## 瀬戸内地域における塩水の年代分布と海面変化の影響

戸崎裕貴・森川徳敏・風早康平・佐藤 努・高橋 浩

安原正也・大和田道子・高橋正明・稲村明彦

(活断層・火山研究部門 深部流体研究グループ)

### 1. はじめに

日本列島では、超長期的な海面変化に伴い、深層地下水流動に大きな変化が生じているものと考えられる。本研究では、海面変化が地下水系に及ぼす影響を解明することを目的とし、瀬戸内海沿岸地域を対象に検討を行った。地下水中の放射性塩素同位体 ( $^{36}\text{Cl}$ ) を用いて塩水の年代 (地下水中の海水成分の年代) を推定し、過去の海面変化の影響の実態把握を試みた。

### 2. 結果と考察

瀬戸内海沿岸地域における深層地下水試料の中から、酸素・水素安定同位体比や  $\text{Li}/\text{Cl}$  比を指標として海水起源の塩水を抽出し、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  比の分析を実施した。

瀬戸内海における現在の海底地形から、氷期には、瀬戸内海西部では太平洋に向かう大規模な谷地形が形成されるのに対し、瀬戸内海東部では広域的に盆地が形成されるという対照的な特徴が見られる。これに基づき、結晶質岩主体の瀬戸内地域を 2 つに区分し、堆積岩からなる大阪平野を加えた 3 地域について  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  比の特徴を比較した (図 1)。

瀬戸内地域西部では、深層地下水の  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  比は海水に近い低い値 ( $<2 \times 10^{-15}$ ) を示しているのに対し、瀬戸内地域東部では最大で  $30 \times 10^{-15}$  までの高い値を示している地点が過半数を占める。一方、大阪平野では、1 試料を除いて  $4\text{--}30 \times 10^{-15}$  と高い値を示している。

次に、これらの  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  比から塩水の年代分布を求めた (図 2)。年代計算のための  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  放射平衡値と

しては、瀬戸内地域では瀬戸内花崗岩類、大阪平野では大阪層群の値 (森川・戸崎, 2013) を用いた。瀬戸内地域西部では、概ね 2 万年以下の若い年代を示しているが、瀬戸内地域東部では、数十万年以上の古い年代を示している地点が顕著である。一方、大阪平野では、数十万年以上の非常に古い年代を示している。

これは、瀬戸内海西部では氷期に大規模な流動系が形成されるため、最終氷期に古い海水成分が置換され、その後の海進時に新しい海水が侵入しやすかったものと考えられる。瀬戸内地域東部では、古い海水が盆地内に停滞しやすいため、その後の海水侵入の影響は限定的であったと考えられる。一方、堆積岩地域では海面変化の影響を受けにくい可能性がある。このように、海面変化が地下水系に与える影響は、地形的要因・地質条件によって異なることが示唆された。

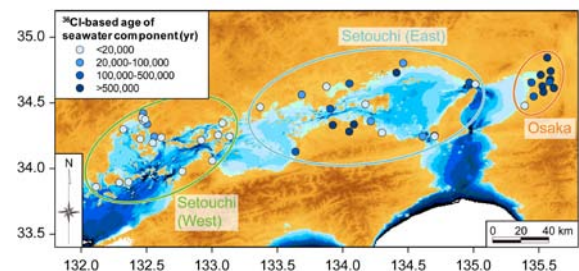


図 2. 瀬戸内海沿岸地域における塩水の年代分布。地形の青色系は氷期に陸化する海域 (-100 m) を示す。

### 謝 辞

本研究の一部は、原子力安全・保安院 (現 原子力規制委員会原子力規制庁) 「平成23年度地層処分に係る地質評価手法等の整備」および「平成24年度地層処分に係る地質評価手法等の整備」として実施した。

### 文 献

森川徳敏・戸崎裕貴 (2013) 非常に古い地下水年代測定のための日本列島の帯水層岩石を対象にしたヘリウム同位体生成速度および放射性塩素同位体放射平衡値データ集。地質調査総合センター研究資料集, no. 582, 地質調査総合センター, 21p.

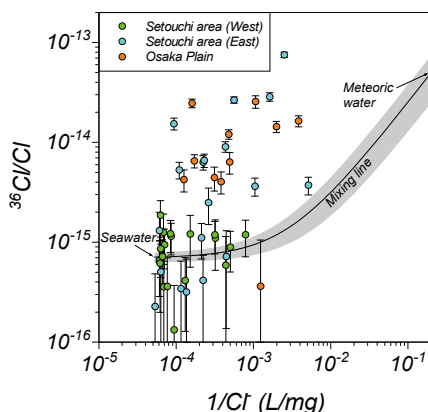


図 1. 瀬戸内海沿岸地域における地下水の  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  比と  $\text{Cl}$  濃度との関係。海水と天水との混合線も示した。

## P5

## 応力からみる断層活動性の時間変化

宮川歩夢 (地質情報研究部門 地質地殻活動研究グループ)  
大坪 誠 (活断層・火山研究部門 長期地質変動研究グループ)

## 1. はじめに

現在、断層の活動性を予測する一つの考え方として、活断層評価が挙げられる。活断層とは一般に、最近の地質時代に繰り返し活動し、将来も活動することが推定される断層 (活断層研究会 編, 1991) と考えられている。そのため、過去の断層の活動履歴を調べることで、将来の活動性を評価することができると考えられる。一方で、地質学的には断層は必ずしも同じ運動 (活動) を続けるとは限らず、インバージョンテクトニクス (例えば、佐藤, 1996) のように、異なる状況 (応力場) において異なる運動をすることが知られている。つまり、長期的な断層の活動性を評価するためには断層の置かれる応力場の変化も想定した評価が必要になる。また、応力場の変化は、長期的に生じる変化だけでなく、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震のような巨大地震の後にも生じることが知られている (Hasegawa et al., 2012)。そこで、本発表では東北地方太平洋沖地震発生後のいわき地域での応力変化にもとづいて、湯ノ岳断層および井戸沢断層の活動性の時間変化について発表する。

## 2. いわき地域の応力変化と断層活動性の推定

東北地方いわき地域での、東北地方太平洋沖地震発生前の応力場と (Imanishi et al., 2012)、東北地方太平洋沖地震発生直後から、2011 年 4 月 11 日の福島県浜通り地震発生直前の応力場が (Otsubo et al., 2013) 推定されている。また、福島県浜通り地震時に活動した湯ノ岳断層および井戸沢断層の深部形状が、Fukushima et al. (2013) により推定されている。以上の応力および断層形状をもとに、各断層面に作用する応力を計算し、断層の活動性を表す slip tendency (Morris et al., 1996) を計算した。

## 3. 断層活動性の時間変化

計算された slip tendency から、東北地方太平洋沖地震の前後で、湯ノ岳断層および井戸沢断層の活動性の変化が明らかになった。東北地方太平洋沖地震前の応力場では、湯ノ岳断層および井戸沢断層はいずれも低い slip tendency の値を示し、活動性が低かったと推定される。一方、東北地方太平洋沖地震後

の応力場では、湯ノ岳断層および井戸沢断層はいずれも高い slip tendency の値を示し、活動性が高かったと推定される。

## 謝 辞

断層面の形状として、Fukushima et al. (2013) のデータを使用した。また、本研究の解析は一部原子力規制委員会原子力規制庁「平成 26 年度地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備委託費 (地質関連情報の整備) 事業」として作成したプログラムを用いた。

## 文 献

- 活断層研究会編 (1991) 新編 日本の活断層: 分布図と資料. 東大出版会, 4p.
- 佐藤比呂志 (1996) 日本列島のインバージョンテクトニクス. *活断層研究*, **15**, 128–132.
- Hasegawa, A., Yoshida, K., Asano, Y., Okada, T., Iinuma, T., Ito, Y. (2012) Change in stress field after the 2011 great Tohoku-Oki earthquake. *EPSL*, **355**, 231-243.
- Imanishi, K., Ando, R., Kuwahara, Y. (2012) Unusual shallow normal-faulting earthquake sequence in compressional northeast Japan activated after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. *GSL*, **39**, L09306.
- Otsubo, M., Shigematsu, N., Imanishi, K., Ando, R., Takahashi, M., Azuma, T. (2013) Temporal slip change based on curved slickenlines on fault scarps along Itozawa fault caused by 2011 Iwaki earthquake, northeast Japan. *Tectonophysics*, **608**, 970-979.
- Fukushima, Y., Takada, Y., Hashimoto, M. (2013) Complex ruptures of the 11 April 2011 Mw 6.6 Iwaki earthquake triggered by the 11 March 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake, Japan. *BSSA*, **103**, 1572-1583.
- Morris, A., Ferrill, D., Henderson, D. (1996) Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, **24**, 275-278.

## P6

## 断層ガウジを用いた断層活動性評価手法

## -研究の動機、試案と適用事例-

宮下由香里（活断層・火山研究部門 活断層評価研究グループ）

間中光雄（活断層・火山研究部門 長期地質変動研究グループ）

伊藤順一（活断層・火山研究部門）

## 1. はじめに

変動地形が不明瞭な地域や、比較的新しい時代（1 万年以前以降）の堆積物が分布しない地域、最新活動時期以降の堆積物に埋積されている地域に分布する活断層については、その活動時期や活動間隔を知ることはもちろん、活断層であるか否かの判断さえも難しい場合が多い。産総研深部地質環境研究コアおよび旧活断層・地震研究センターは、2000 年鳥取県西部地震以降、断層破碎帯あるいは断層破碎物質から、直接断層の活動性を評価する手法開発を試みてきた。本研究では、とくに、従来の活断層調査では評価が難しい、活動間隔が数万年オーダーの活断層評価をターゲットとした。

研究手法としては、トレンチ調査等によって、活動時期が分かっている断層面から採取した断層ガウジについて、1) 分光測色計を用いた定量的な測色、2) 粉末 X 線回折分析による構成鉱物の同定、3) 逐次選択抽出分析による水溶性鉱物種の同定・推定を行い、断層活動性と断層岩の鉱物・化学的特徴との関連性について検討した。この過程で出てきた問題点、例えば、熱水変質鉱物とオリジナルな断層ガウジ構成鉱物とを区別すること、粉末 X 線回折分析では同定されない微量な粘土鉱物を同定すること等についても、ひとつひとつ問題点を克服してきた。その結果、断層破碎帯および断層岩の分布様式と基盤岩中の断層ガウジの鉱物・化学的特性に基づいて、活断層の活動性を評価する手法を提案した（産総研深部地質環境研究コア、2012）。

## 2. 活動性評価試案

産総研深部地質環境研究コア（2012）で示した断層活動性評価手法に基づき、Miyashita et al. (2012) は、評価試案の概念を提示した（図 1）。この評価試案は、大きく二つの評価軸から構成される。

一つ目の軸は、断層の再活動ポテンシャルである。

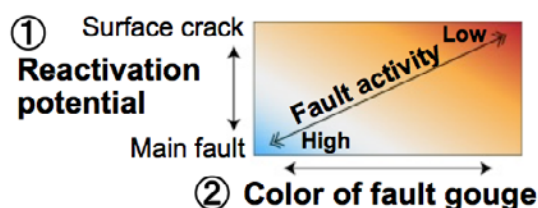


図 1. 断層破碎物質を用いた断層活動性評価試案

ここでは、観察している断層面あるいは断層破碎帯が、どのような性質・連続性を持った断層であるのかを判断する。すなわち、震源域から連続する主断層であるのか、分岐断層であるのか、地表のみに分布する亀裂であるのか等について、地形地質調査等から判定する。二つ目の軸は、断層ガウジの色調とした。断層ガウジの色調は、断層ガウジを構成する鉱物化学組成を反映した結果である（例えば、間中ほか、2012）。

## 3. 試案の適用事例

上述した手法からなる試案を、山口県岩国断層帯の評価に適用した。その結果、断層ガウジの鉱物化学組成と色調には、断層の活動周期との相関が認められ、試案を支持する結果が得られ得た（Miyashita, 2014, 間中ほか、本シンポジウム）。本手法は、観察事実に基づく帰納的な方法である。今後は、研究事例を蓄積すると同時に、メカニズムについても検討を行い、手法の確立を目指したい。

## 文 献

間中光雄・福土圭介・宮下由香里・伊藤順一・渡部芳夫・小林健太・亀井淳志（2012）2000 年鳥取県西部地震の余震域と非余震域に分布する断層ガウジの比較。地質雑、118, 459-475。

Miyashita, Y., Manaka, M., Itoh, J., Kobayashi, K., Kamei, A. & Fukushi, K. (2012) A new method for evaluating fault activity based on fault gouge properties. *Abstracts Volume of 34<sup>th</sup> International Geological Congress*. 29.3#411

産業技術総合研究所深部地質環境研究コア（2012）技術資料 2012 Appendix 断層ガウジの岩石鉱物学的特徴に基づく断層の活動性評価。 [https://unit.aist.go.jp/dgcore/research/document2012/技術資料\\_2012\\_断層の活動性評価手法.html](https://unit.aist.go.jp/dgcore/research/document2012/技術資料_2012_断層の活動性評価手法.html)

Miyashita, Y. (2014) Correlation between fault activity and fault gouge color: toward the development of a new method for evaluating fault activity. *Proceeding of the 5th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology*, 48-50, 2014.



## P7

## 断層ガウジを用いた断層活動性評価手法

## -化学分析値の活動性指標としての活用-

間中光雄（活断層・火山研究部門 長期地質変動研究グループ）

宮下由香里（活断層・火山研究部門 活断層評価研究グループ）

伊藤順一（活断層・火山研究部門）

## 1. はじめに

産総研深部地質環境研究コアでは、変動地形が不明瞭な場合においても基盤岩の断層破碎物質から直接断層の活動性を評価する手法開発を目標とする地層処分安全規制支援研究を実施している。具体的には、低活動性断層の活動度と断層岩性状の特徴を明らかにするために、断層岩の粉末 X 線回折分析、逐次選択抽出試験および色調測定を行い、断層活動性と断層岩の鉱物学的および化学的特徴との関連性についてまとめ、またこれらのデータを基に、断層岩形成に伴う岩石または鉱物反応に関して、理論的な裏付けを得るための検討を行っている(宮下ほか, 2011a, b; 間中ほか, 2012)。これらの検討を踏まえて、最終的には色調測定を断層やリニアメントの活動性に対する定性的な評価手法の一つとしようとするものである。

## 2. 分析試料

試料はトレンチ調査や地質調査で採取した断層ガウジであり、2000 年鳥取県西部地震の余震域と非余震域に分布する断層ガウジ、山口県岩国断層帯の大河内断層の来巻、熊毛断層の下長野、大竹断層の甘木、甘木峠断層の野口からの断層ガウジである。また、これらの活断層の活動周期はつぎのように推定され、活動周期を短い順に示すと、甘木(7700 年)、来巻(16400 年)、余震域(21000 年)、下長野(32000 年)、野口(35000 年)、野口(橙色ガウジ)(40000 年)、非余震(43000 年)となる。

## 3. 結果と議論

断層の活動周期とその断層に存在する断層ガウジ中の粘土鉱物の関係から、ハロイサイトのピーク強度と活動周期は正の相関が認められるが、活動周期とスメクタイトおよび緑泥石、イライトのピーク強度は負の相関が認められる。このことから、活動周期に依存した断層ガウジの生成環境が推定される。断層の活動周期と断層ガウジの各抽出フラクションからの鉄溶出量の関係から、活動周期に対する各抽出による鉄の溶出量は負の相関を示し、とりわけ HCl 抽出の鉄溶出量の相関は強かった。また、鉄の総溶出量も活動周期に対して強い負の相関を示した。これは、地表環境における水-鉱物相互作用の長期の進行を示唆している。断層

の活動周期と断層ガウジの色調の関係から、断層の活動周期に対する断層ガウジの L\*値は正の強い相関が認められるが、活動周期に対する断層ガウジの a\*値と b\*値はともに負の相関が認められる。このことは、活動周期が長期化すると、地表環境における長期間の水-鉱物相互作用により断層ガウジから鉄等を溶出させ、有色鉱物の除去により断層ガウジの色調は白色化することが推察され、現場での肉眼観察とも調和する。

上記から、断層の活動周期の推定法として、①野外での断層ガウジの色調測定、②XRD分析による断層ガウジ中の粘土鉱物の同定、③逐次選択抽出分析による鉄等の定量を有効な方法と考える。なお、①の色調測定の結果は断層ガウジの鉱物組成と化学組成を反映しているため、野外での色調測定時、断層の活動周期の推定が可能となることが期待される。本研究結果は、断層ガウジの物質科学的特徴を指標とすることで、地形的に不明瞭な断層の活動性評価の定性的な指標となり得ることを示し、地形的に不明瞭な断層の活動性を評価する方法の一つとして、断層ガウジの物質科学的特徴を得るための手法が有効であることを示唆する。なお、本研究は原子力安全・保安院(現原子力規制委員会原子力規制庁)「平成24年度地層処分に係る地質評価手法等の整備」として実施した。

## 文 献

- 宮下由香里・小林健太・亀井淳志・伊藤順一・間中光雄・福士圭介 (2011a) 断層破碎物質を用いた断層活動性評価手法の開発 (1): 鳥取県西部地域における断層岩の産状. *日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集*, SS032-P01.
- 宮下由香里・小林健太・伊藤順一・間中光雄・福士圭介・亀井淳志・渡部芳夫 (2011b) 物質科学的手法による断層活動性評価手法の開発一鳥取県西部地域における研究事例一. *日本地質学会第 118 年学術大会講演要旨*, T16-O-3.
- 間中光雄・福士圭介・宮下由香里・伊藤順一・渡部芳夫・小林健太・亀井淳志 (2012) 2000 年鳥取県西部地震の余震域と非余震域に分布する断層ガウジの比較. *地質雑*, **118**, 459-475.

## P8

## 宇宙線生成核種を用いた侵食速度の推定

城谷和代（活断層・火山研究部門 長期地質変動研究グループ）

## 1. はじめに

地表面の侵食は、処分場の地上接近や地中の水理環境変化へ影響を与えることから、地層処分事業における地質環境の安定性評価で考慮される地質事象の一つである。十分な安定性の確保には、処分地閉鎖後の長期（10<sup>5</sup>年以上）の侵食作用の影響評価（河川の下刻の進行等）が必要とされている。本研究では、宇宙線生成核種を用いて、本邦地質における長期の侵食速度評価手法の開発に取り組んでいる（城谷，2014）。

## 2. 宇宙線生成核種による地表面侵食速度の推定

地中（地表から数メートル以内）に到達した二次宇宙線と造岩鉱物中の特定の元素との相互作用により宇宙線生成核種が生成する（Gosse and Phillips, 2001）。地表面が露出し、宇宙線被ばくを受けた期間に従って、鉱物中に核種が蓄積する一方で、生成した核種は、侵食によって地表面から除去される。従って、蓄積した核種量から、地表面の露出期間や侵食速度を直接推定することが可能となる。宇宙線生成核種のうち、長半減期を持つ <sup>10</sup>Be や <sup>26</sup>Al は、長期(10<sup>4</sup>-10<sup>6</sup>年)の地形発達の情報を得る上で、有用な核種である。

## 3. 施設整備・手法改良

一般に、<sup>10</sup>Be や <sup>26</sup>Al の濃度を求める場合、石英鉱物中のそれらが対象となる。天然の試料から石英鉱物を精製する際には、主に(1)石英鉱物の表面部分に吸着した、大気起源の <sup>10</sup>Be を完全に除去すること、(2)<sup>26</sup>Al の測定妨害となる長石を除去することが必要となる。また、石英鉱物から Be を抽出する際には、加速器による同位体比分析の観点から、大気中の <sup>10</sup>B (<sup>10</sup>Be と同重体) の試料への混入を避けることが必須である。

本研究では、石英鉱物の精製を効率的に行うための大型恒温超音波洗浄装置の導入を行うと共に、従来の手法を改良し、より多くの試料を容易に、かつ同時に処理可能なシステムを開発した。また、作業時の <sup>10</sup>B の混入源の調査や、試料の大気暴露時間の短縮等を検討した上で、前処理専用実験施設を産総研内に構築した。現在、試料作成に支障のない <sup>10</sup>B の低バックグラウンド条件を達成し、侵食の影響により核種濃度が低いと予想される本邦の試料に対しても、良質な核種濃度データの取得が可能となった。

## 4. 適用事例

本研究では、核種濃度の深度分布による尾根の侵食速度の推定を、準平原（阿武隈山地）を対象に実施し、その有用性と 20-30% の誤差(1σ)をもつ精度で侵食速度の推定が可能であることを確認した（例えば Shiroya et al., 2010）。また流域出口に運搬堆積した石英試料を用いて、山地斜面の平均的な侵食速度の推定を多雨地域の屋久島で実施し、地質・地形特性、地殻変動、気候条件等の影響について考察した。その結果、降水量との相関関係は明瞭ではなく、むしろ斜面侵食は岩盤の強度に支配されていることを確認した。

現在、本邦における長期の侵食速度のデータが徐々に蓄積されつつある。試料の採取方法を使い分けることで、尾根の侵食、山地斜面の侵食、河川の下刻等、様々な地形環境で、手法の適用が期待できる。

## 謝 辞

本研究には原子力規制委員会原子力規制庁「平成 25 年度地層処分に係る地質評価手法等の整備（地質関連情報の整備）」および「平成 26 年度地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備委託費（地質関連情報の整備）事業」の成果を用いている。実験室整備・野外調査等の際には深部地質環境研究コア関係者に協力いただいた。

## 文 献

- Gosse, J.C. and Phillips, F.M. (2001) Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *QSR*, **20**, 1475-1560.
- 城谷和代 (2014) 地質環境の長期安定性評価手法開発にむけた宇宙線生成核種の利用. *地形*, **35-2**, 187-197.
- Shiroya, K., et al. (2010) Quantitative determination of long-term erosion rates of weathered granitic soil surfaces in western Abukuma, Japan using cosmogenic <sup>10</sup>Be and <sup>26</sup>Al depth profile, *G&J*, **44**, e23-e27.



## P9 海岸段丘堆積物の堆積相とルミネッセンス年代による隆起速度評価

田村 亨・伊藤一充（地質情報研究部門 海洋環境地質研究グループ）

### 1. はじめに

深部地質環境の 10 万年スケールの長期的な評価には、地殻隆起速度の適切な評価と予測が必要である。ここでは従来の手法に基づく地殻隆起評価の問題点を見直し、その改善策として、海成段丘堆積物の堆積相解析とルミネッセンス年代測定を組み合わせた方法を提案する。さらには、この方法を青森県上北平野の海成段丘群に適用した結果について報告する。

### 2. 従来の海成段丘評価の問題点と改善

10 万年におよぶ長期において過去の隆起速度を評価するには、地質・地形記録を解釈することが必要である。従来の手法は、海成段丘の分布に基づいている。現在の沖積平野に見られる海面付近の平坦面は、長期間の隆起を経て海面よりも高い位置に持ち上がり段丘化する。最近数十万年間の氷期-間氷期の気候変動サイクルにおける高海面期は、過去 1 万年間の後氷期、間氷期と呼ばれる約 12 万 5 千年前 (Marine Isotope Stage: MIS 5e), 24 万年前 (MIS 7), 34 万年前 (MIS 9), 42 万年前 (MIS 11) にも存在したことが知られている。そうした高海面期に隆起域で形成された海成段丘面の標高が、段丘面形成時からの隆起の総量となる。また、隆起量を期間で割ることにより、隆起速度も求められる。

ただし、従来の方法には、1) 段丘面の対比と広域火山灰による年代決定、2) 段丘面の高度による過去の基準面（海水面）の設定、に問題がある。

まず、火山灰の分布に基づく段丘の年代決定は、露頭単位での火山灰層の保存に強く依存し、関東地方以外では MIS 5e の面にしか適用できない。年代的根拠が乏しい古い段丘面は、やや主観的に認定されてきた。例えば、MIS 5e の面からはほぼ等間隔の高度差で分布する 2 面は、その高度を根拠に MIS 7, MIS 9 に対比される。これは結果的には正しくても、そもそもこのように定常的な隆起速度を仮定して認定した段丘を根拠に行う隆起速度の評価は論理循環を伴う。

次に、海成段丘面の高度は、段丘面地下の海成堆積物の上に、風成堆積物などが累積したもので、形成当時の海面高度とは異なる。段丘面の高度を過去の海水面とすると、隆起量を過大に見積もることになり、複数の段丘面により長期的な侵食速度とその変動を評価する場合、取り除くべき不確定要素である。

### 3. 海成段丘の堆積相とルミネッセンス年代

上記の問題点だが、1) についてはルミネッセンス年代測定による段丘構成層の直接年代、2) については堆

積相解析による過去の海面指標の認定と標高の定量により、改善が可能である。

ルミネッセンス年代測定は、鉱物粒子から発せられるルミネッセンスの強度に基づく手法であり、過去数十万年間の地層に対して、普遍的に用いることができる唯一の絶対年代測定法である。最近、pIRIR 法と呼ばれる新手法の適用により、10 万年前以前の古い段丘堆積物の信頼できる年代測定が可能になった。

堆積相解析は、特に目新しい手法ではないが、年代測定との組み合わせにより、MIS 7 および MIS 9 の海成段丘堆積物特に有効である。日本列島の隆起域の大半は、波浪卓越型の地層が分布し、海面の指標になる堆積構造が発達する。こうした海面指標を認定し、さらにその高度を高精度 GPS で測量することで、過去の海面の高度を $\pm 1$  m 程度の誤差で求めることができる。

### 4. 青森県上北平野への適用

この堆積相解析とルミネッセンス年代測定を組み合わせた評価手法を、上北平野の後期更新世海成段丘堆積物に適用した。火山灰層から MIS 5e の段丘面である高館面の構成層では、海成堆積物の最上部で  $126 \pm 6$  ka (単位 (ka) : 千年前)、陸成層下部で  $73 \pm 3$  ka が得られた。MIS 5e の高海面期における海成層の堆積、続いて海面が低下し段丘が陸化した後の陸成層の堆積と整合している。同様の手法で、MIS 9 に対比されている七百面構成層では、海成層上部の 2 試料で  $340 \pm 19$  ka,  $325 \pm 31$  ka が得られ、陸成層では下位より、 $277 \pm 26$  ka,  $198 \pm 8$  ka,  $110 \pm 5$  ka,  $84 \pm 3$  ka が得られた。陸成層の下から 2 番目の試料は、 $230 \pm 50$  ka のフィッシュントラック年代が得られている火山灰層直下のレス堆積物から採取された。このように上北平野ではルミネッセンス年代測定が有効であることが確かめられた。

海面指標の高度から隆起速度を評価すると、高館面構成層では過去 12 万 5 千年で  $0.18$  m/千年、七百面構成層では過去 34 万年において  $0.15$  m/千年である。これらはほぼ一定の隆起速度と考えると良い。今後は、間氷期の海面高度における多様性の考慮や、同様の手法による隆起速度の空間的な多様性の検討が課題である。

### 謝 辞

本研究には原子力規制委員会原子力規制庁「平成 25 年度地層処分に係る地質評価手法等の整備（地質関連情報の整備）」および「平成 26 年度地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備委託費（地質関連情報の整備）事業」の成果を用いている。



---

地質調査総合センター研究資料集, no. 610

日本列島の長期的地質変動の予測に向けた取り組みと今後の課題  
-数十万年の過去を解明し, 将来を予測する技術・知見・モデル-  
(第23回地質調査総合センターシンポジウム)

編集・発行  
独立行政法人 産業技術総合研究所

地質調査総合センター

〒305-8567 茨城県つくば市東1丁目1-1 つくば中央第7  
<http://www.gsj.jp/>

発行日  
平成27年1月16日

