

第33回 研究報告会

十和田火山のカルデラ形成期における
マグマ変遷の検討

令和5年1月23日

原子力規制庁
長官官房技術基盤グループ
地震・津波研究部門

佐藤 勇輝

本研究は国立大学法人東北大学との共同研究「カルデラ噴火及び非カルデラ噴火の比較研究（令和元年度～令和3年度）」の成果の一部である。



スライド中の赤枠内の図表は論文等公表前のデータを含むため公開できません。



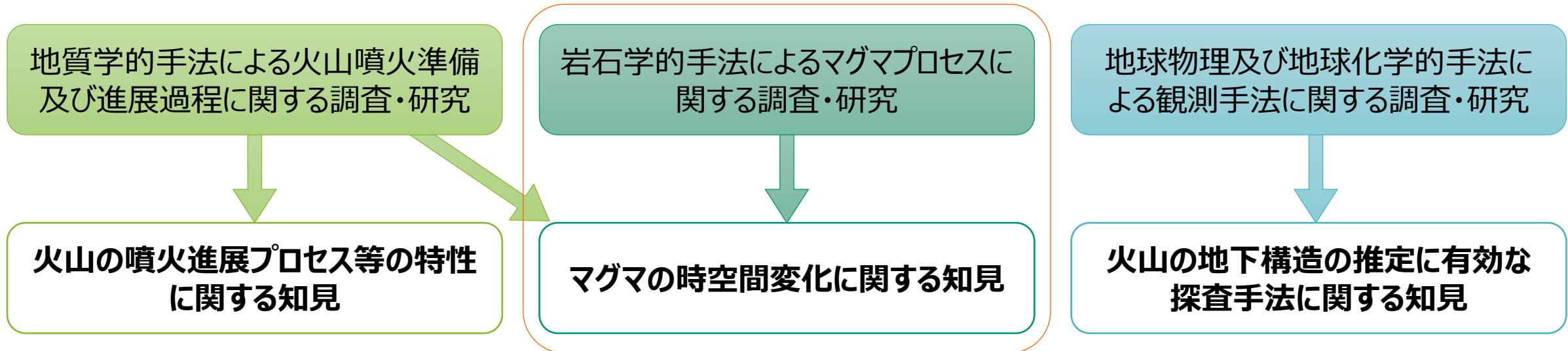
目次

- ✓ 背景
 - 安全研究
 - 研究対象
- ✓ 目的
- ✓ 手法
 - 野外調査
 - 化学分析
- ✓ 結果
 - 全岩化学組成
 - 鉱物化学組成
- ✓ 考察
- ✓ 結論
- ✓ 今後の課題



背景：安全研究

安全研究プロジェクト「大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る研究」（令和元年度～令和5年度）



- 過去の巨大噴火に至るまでの準備・開始プロセスについての知見を蓄積し、過去のカルデラ火山の長期的な活動を評価する
- マグマ・火山活動に関するデータを蓄積し、火山活動を捕らえる観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方を検討する

複数のカルデラ火山を対象に本研究を継続することによって巨大噴火に至る共通の事象を抽出し推定される火山活動シナリオを可能な限り合理的に評価できるようにすることを目指す



背景：安全研究

安全研究プロジェクトが巨大噴火をターゲットとする理由

- 原子力発電所の火山影響評価において、巨大噴火を経験した火山については、**現在の活動状況が巨大噴火が差し迫った状態ではないことを評価**しているが、巨大噴火は非常に低頻度の現象であることに加え、地下の状態を可視化することには困難が伴うことから、巨大噴火発生時の火山の状態に関する知見は国内外を問わず非常に限られており、評価には不確実性が伴う。
- さらに、施設の安全には継続的改善が求められていることから、国内外の火山研究の最新動向や最新知見を収集するとともに、得られた研究成果を踏まえて巨大噴火のプロセスに関する知見の拡充を図ることが重要である。

※ なお、原子力規制委員会による巨大噴火の定義は、原子力発電所の火山影響評価ガイドにおいて「地下のマグマが一気に地上に噴出し、大量の火砕流となるような噴火であり、その規模として噴出物の量が数10km³程度を超えるようなもの」としている



コラム：岩石学の基礎知識

地質学 (Geology)

地層の新旧・性質・年代等から
地球の様々な活動の履歴を論じる

地球物理学 (Geophysics)

地球の様々な現象や構造等を
物理学的手法を用いて論じる

火山学 (Volcanology)

火山を対象とした総合的な学問分野

岩石学 (Petrology)

岩石の化学組成や構造等から
岩石の成因や生成過程を論じる

データ駆動科学
古文書学, etc.

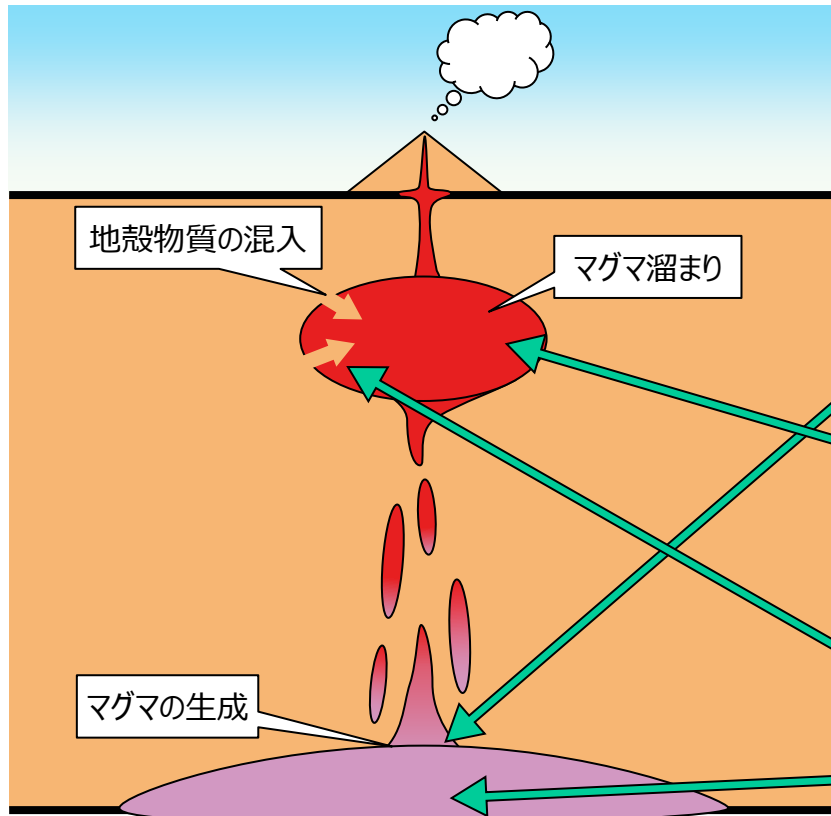
地球化学 (Geochemistry)

地球を構成する様々な物質を
化学的手法を用いて論じる



コラム：岩石学の基礎知識

- 火山研究において岩石学ができることは、過去の噴火における噴出物の調査、観察、分析を通してマグマ生成のメカニズムや当時のマグマ溜まりの状態（例えば深さや温度）を明らかにすること
- 地質学的な研究手法（層序や年代）と組み合わせることによって、噴火の準備・進展プロセスや地下のマグマ溜まりで起こった経時的な変化を明らかにすることができる



代表的な岩石学的手法

全岩化学組成分析：岩石試料まるごとの成分（化学組成）の分析

- 主要元素：火成作用全般、マグマ分化の評価等
- 微量元素：マグマ生成時の状態の評価等

鉱物化学組成分析：岩石を構成する個々の鉱物の化学組成の分析

- マグマ溜まりの状態の評価
- マグマ分化の評価

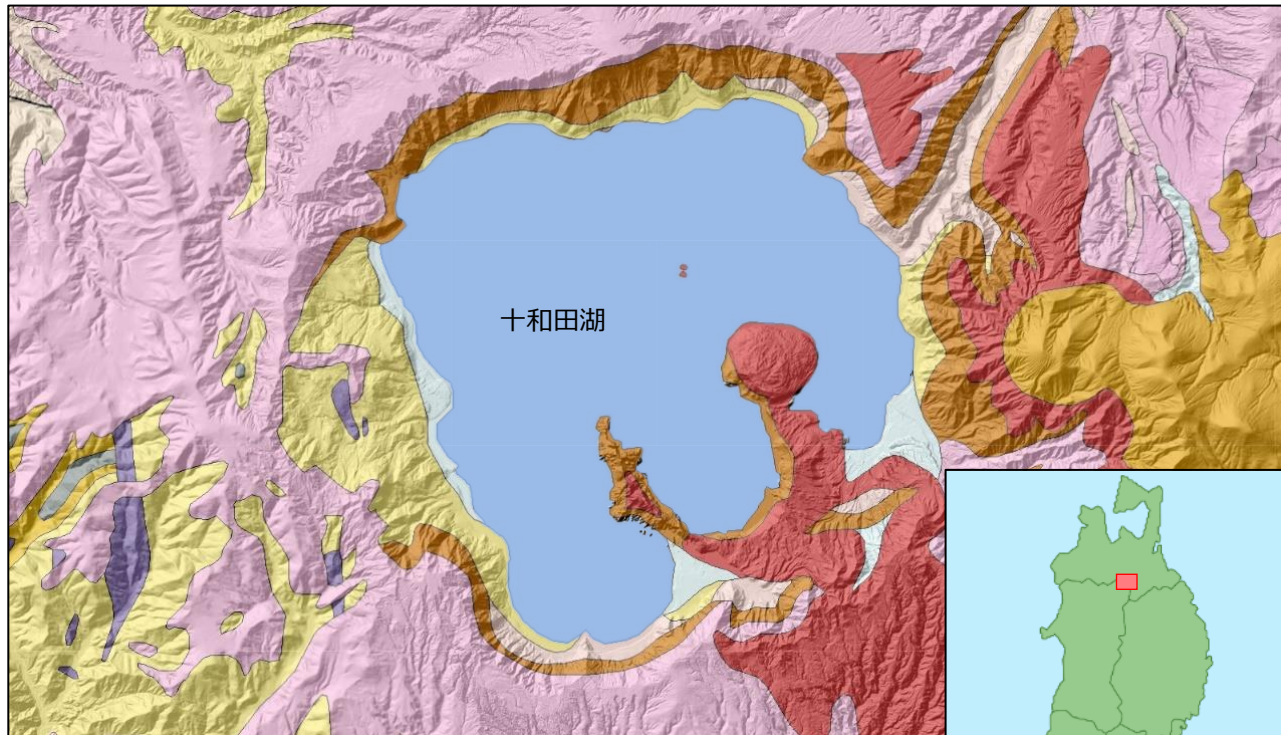
同位体比分析：岩石・鉱物の同位体比の分析

- 地殻物質混入の評価
- マグマの原岩の評価



背景：研究対象


十和田火山について



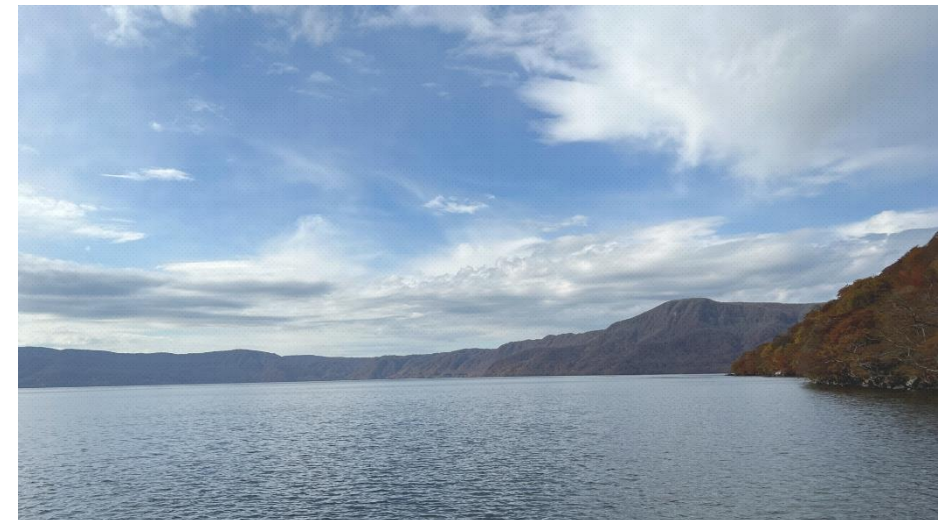
地質図：シームレス地質図V2（地質調査総合センター）
<https://gbank.gsj.jp/geonavi/>

背景地図及び小縮尺図：地理院地図（国土地理院）
<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>

水域（十和田湖）のみ著者着色

 巨大噴火に伴う大規模火砕流堆積物
（新生代第四紀後期更新世後期）

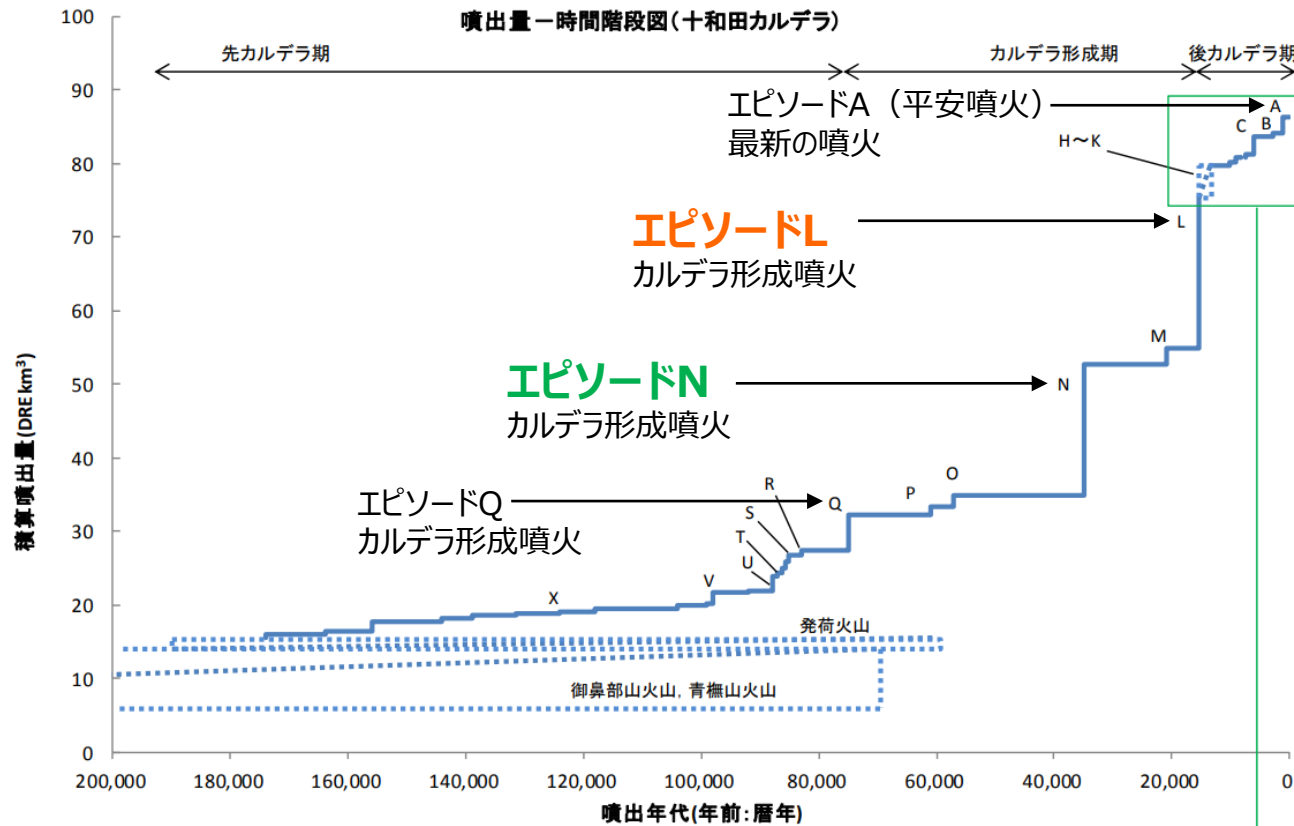
- 青森・秋田県境に位置する**活火山**
（最新の噴火は915年の平安噴火）
- 令和4年3月から気象庁による噴火警戒レベルの運用が開始（現在は噴火警戒レベル1）
- 令和3年からは日本原燃株式会社による再処理施設及び廃棄物管理施設に係る火山モニタリングも開始





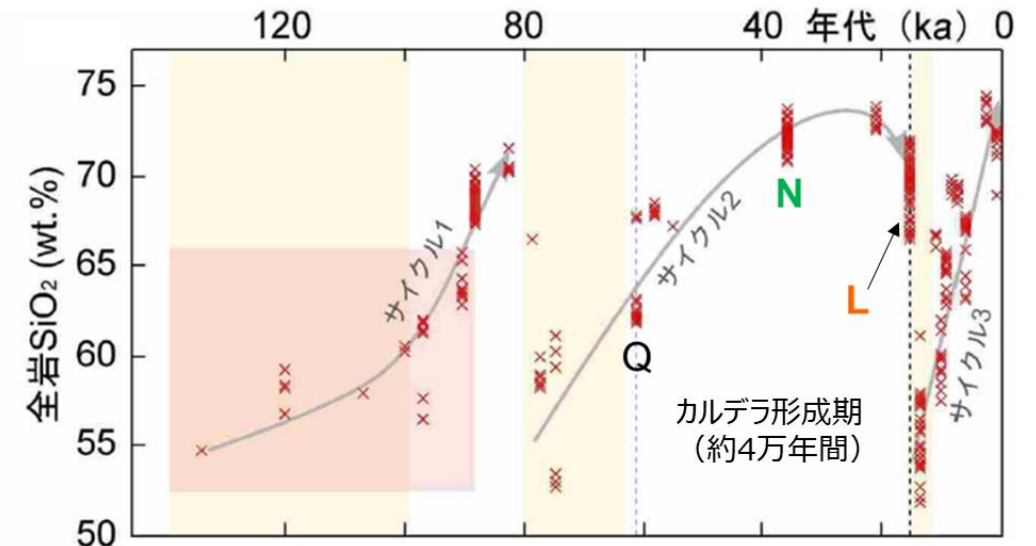
背景：研究対象

十和田火山の活動史



十和田火山における噴出量-時間階段図
山元 (2015) を一部改変

- 約6万年前から約1万5千年前の間に巨大噴火（カルデラ形成噴火）を繰り返す
- 現在までの火成活動は3つのサイクルに区分され、カルデラ形成噴火を繰り返した約4万年間は2つ目のサイクルの活動と見なされている

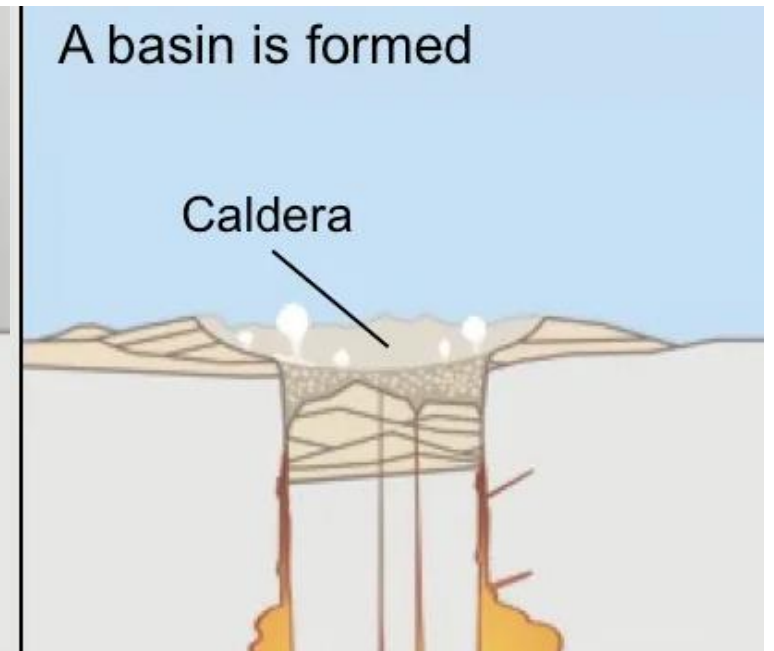
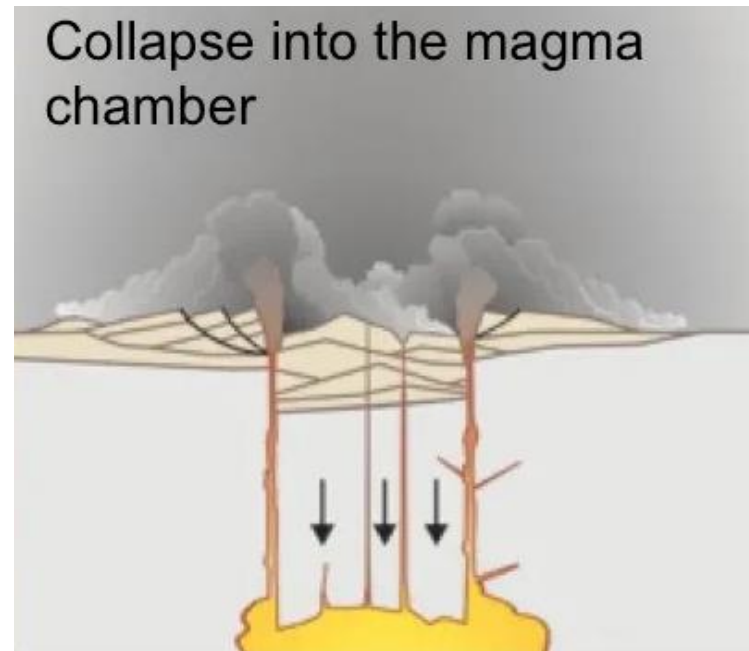
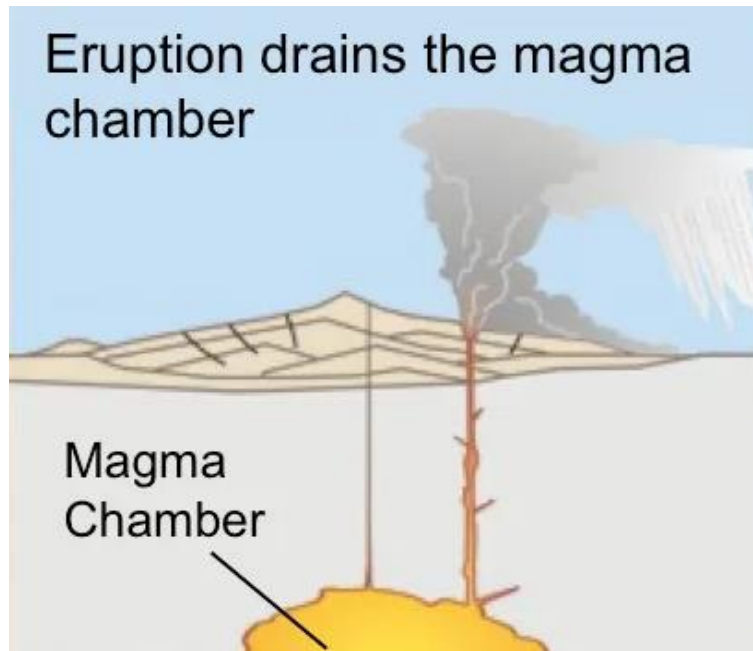


十和田火山における全岩SiO₂量の時代変化
産業技術総合研究所 (2019) を一部改変



コラム:カルデラ形成噴火とは

- 一般的なマグマ噴火※¹とは、地下のマグマ溜まり中のマグマの一部※²が内圧であふれ出したもの
- カルデラ形成噴火とは、地下の巨大なマグマ溜まり中のマグマが、地盤の陥没を伴って一斉に噴き出したもの



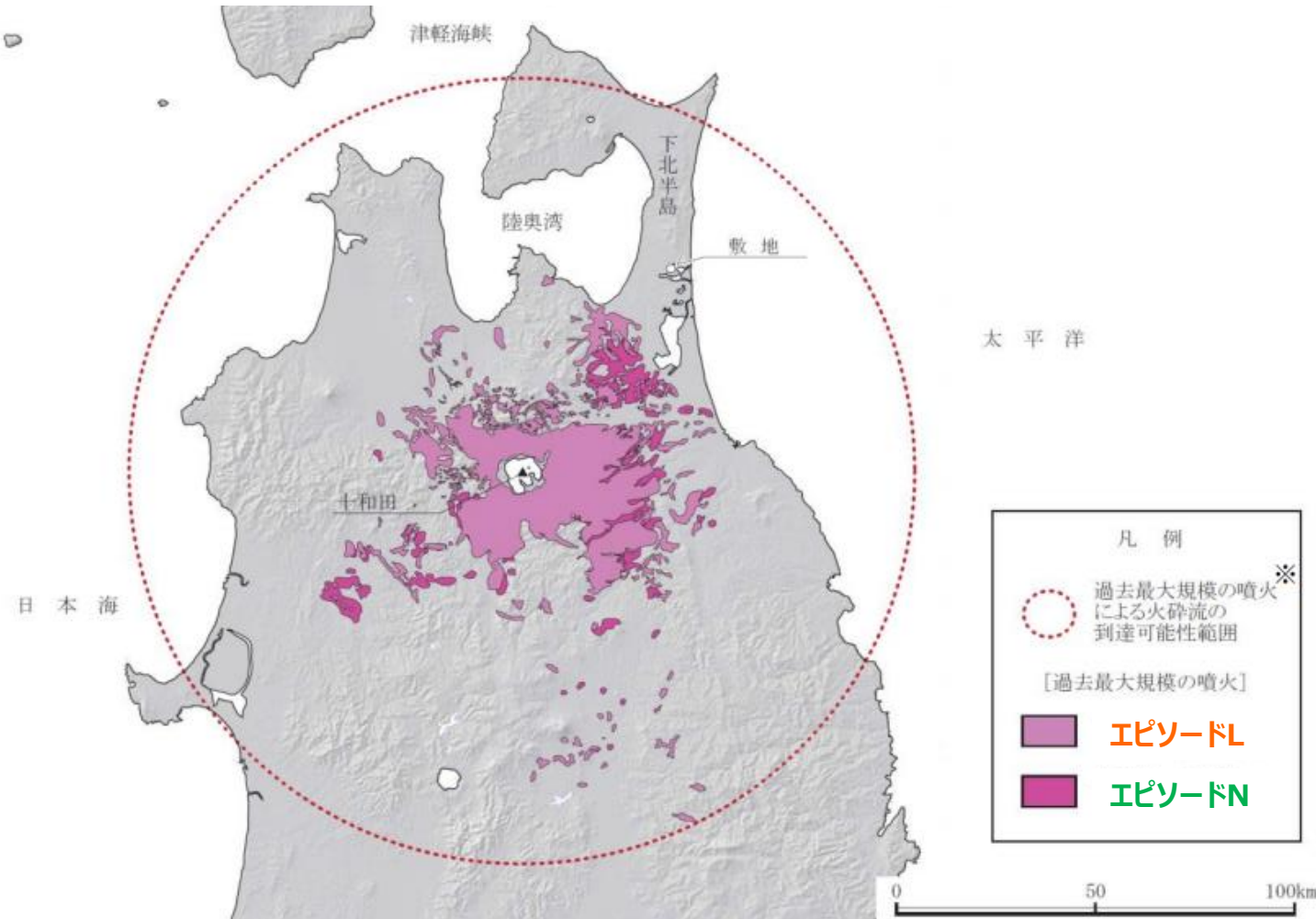
U. S. Geological Survey (2002)

※¹ 日本ではマグマが噴出すらしい水蒸気噴火のほうがより一般的

※² マグマ溜まりが小規模ならばカルデラ形成を伴わずとも大半のマグマがあふれ出すということもありうる



コラム:カルデラ形成噴火とは

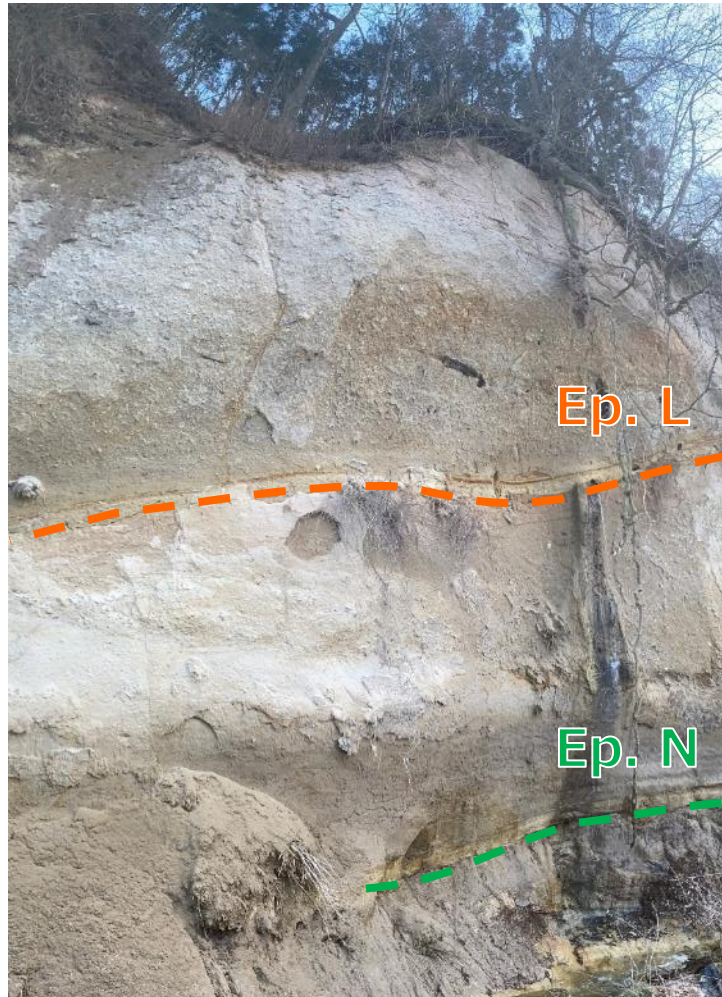


エピソードLの火砕流堆積物（火口から約20km）

十和田火山のカルデラ噴火による火砕流到達範囲
日本原燃（2017）を一部改変



背景：研究対象



十和田火山のカルデラ形成噴火

エピソードL (1万5500年前)

- 噴出量は**56 km³**
- マグマ溜まりの深さは**5～7km**
- マグマの種類は**デイサイト質～流紋岩質**
- 軽石や火山灰の降下が続いて**大規模な火砕流**（八戸火砕流）が発生

エピソードN (3万6000年前)

- 噴出量は**46 km³**
- マグマ溜まりの深さは**5～7km**
- マグマの種類は**デイサイト質～流紋岩質**
- 軽石や火山灰の降下が続いて**大規模な火砕流**（大不動火砕流）が発生

エピソードQ (6万1000年前)

- 噴出量は**12.7 km³**
- マグマの種類は**安山岩質～デイサイト質**
- スコリアの降下が続いて**火砕流**（奥瀬火砕流）が発生

Nと**L**は噴出したマグマや噴火が進展する過程が類似



目的

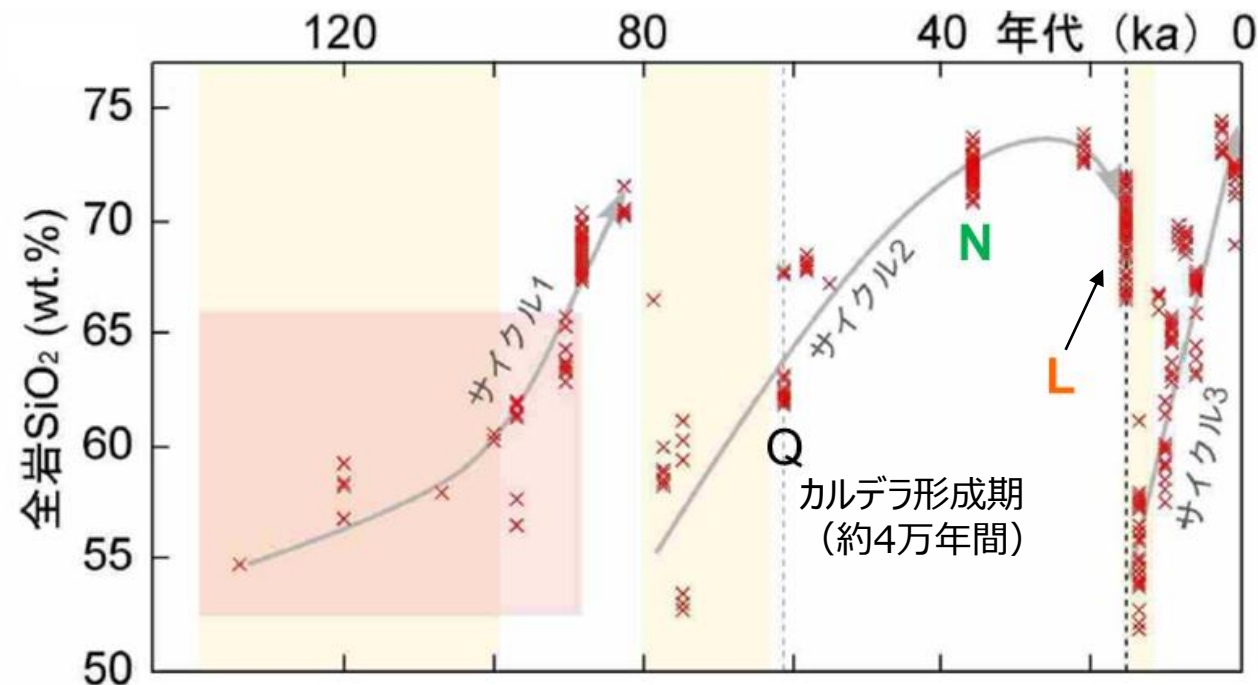
既往研究の疑問点

- 十和田火山の活動のうち、カルデラ形成噴火を繰り返していた（少なくとも）約4万年間は1つのサイクルの活動とされている

→ **本当か？**

- **エピソードN**と**エピソードL**は主要な元素の組成が類似していることが知られている

→ **微量な元素**や**含有鉱物の化学組成**はどうか？



産業技術総合研究所（2019）を一部改変

十和田火山におけるカルデラ形成噴火を岩石学的手法により解析し

カルデラ形成期における噴火の準備・進展過程を検討する

東北大学と共同で十和田火山のカルデラ形成期に関する研究を実施
共同研究「カルデラ噴火及び非カルデラ噴火の比較研究（R1～R3）」（担当：廣井・佐藤勇）



手法：野外調査

- 堆積物が厚い十和田火山の東部及び南部を調査
- 7か所で**エピソードN**、10か所で**エピソードL**の試料を採取
- 各種分析に供するために十分な大きさの**軽石**を中心に採取



試料採取地点
○ **エピソードN** ● **エピソードL**



手法：化学分析

軽石の化学組成分析

軽石：マグマが地表に噴出する際に減圧発泡して多孔質になりながら冷却してできた岩石

- 全岩主要元素：蛍光X線分析（XRF）（**N**: 26試料、**L**: 58試料）
- 全岩微量元素：誘導結合プラズマ質量分析（ICP-MS）（**N**: 9試料、**L**: 28試料）
- 鉱物主要元素：エネルギー分散型X線分光分析（FE-SEM/EDS）（**N**: 6試料、**L**: 13試料）



岩石粉末試料
(全岩化学組成分析等)



岩石薄片または樹脂マウント試料
(顕微鏡観察、ガラス及び鉱物化学組成分析等)



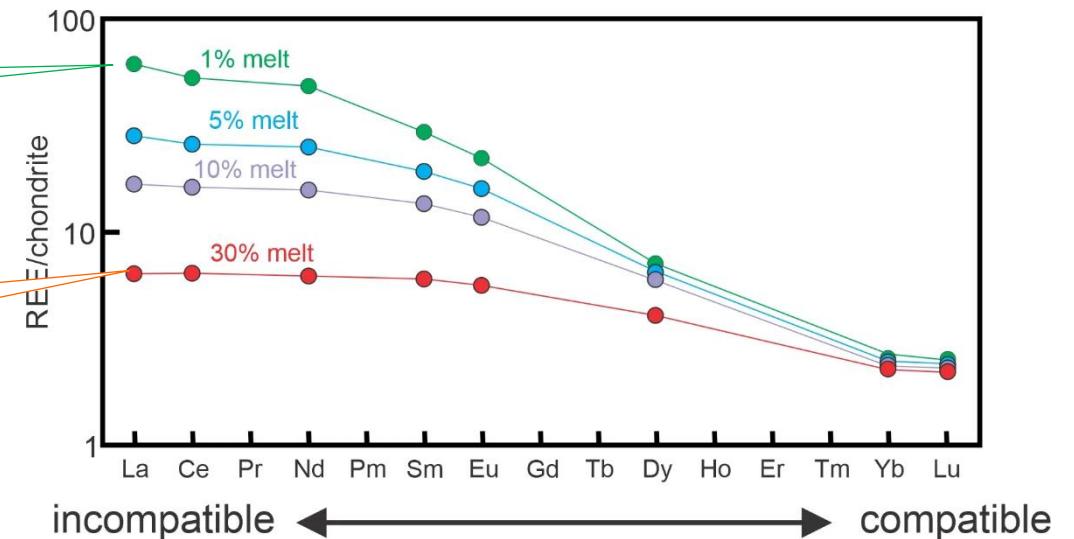


コラム：岩石の微量元素

- 地球科学における「微量元素」とはマントルや地殻の岩石には微量しか含まれない元素を指す
- 微量元素のうち、**岩石（固相）** よりも**マグマ（液相）** に取り込まれやすいものを「不適合元素」という
- 岩石が溶けてマグマができるとき、不適合元素が他の元素に先んじて岩石からマグマに移動するため岩石の溶融程度によって、できたマグマ中の不適合元素と他の元素の割合が大きく変化する
→ マグマ中の不適合元素の割合は生成時の温度圧力等の条件を反映する

岩石が溶ける量が少ないとマグマ中の不適合元素の含有量が大きくなる

岩石が溶ける量が多いと他の元素も多量にマグマに溶け出すため、相対的に不適合元素の含有量が小さくなる



微量元素の挙動は岩石やマグマの形成過程を敏感に反映する

Perkins (2022)



結果：全岩化学組成

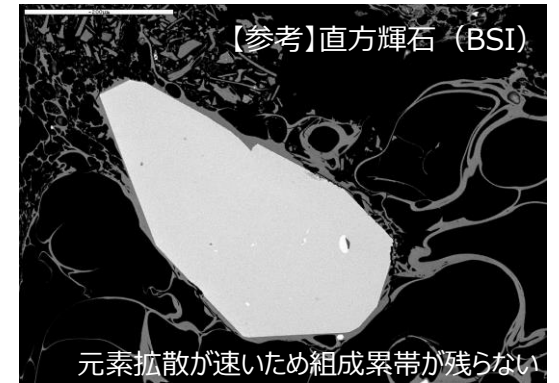
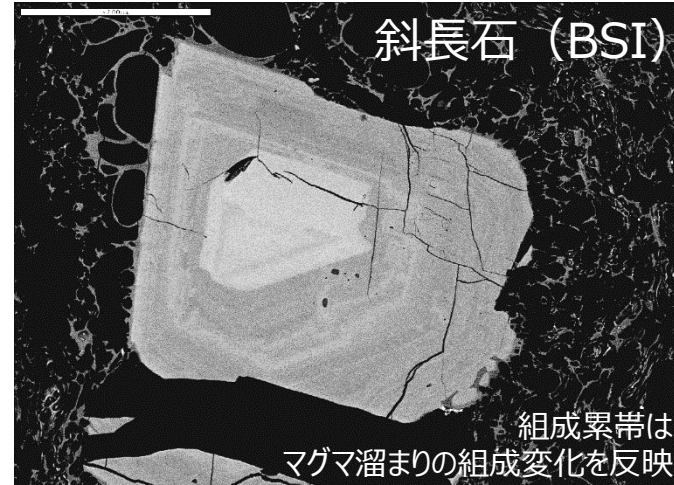
- **エピソードN**と**エピソードL**とでは不適合元素の組成トレンドが**明瞭に異なる**
→両者は同じマグマではなく溶解度が異なる別のマグマ
- 不適合元素によって同SiO₂量に対して**L**の方が高いものと**N**の方が高いものがある
→両者は互いに生成時からプロセスが異なるマグマ



結果：鉍物化学組成

斜長石の中心部のAn値を比較

鉍物は基本的に中心から外側にむかって成長するため
中心部の組成は鉍物晶出初期のマグマの組成を反映
→ マグマ溜まりの変化（マグマの混合等）を捉えられる



エピソードNとエピソードLはピークが不一致

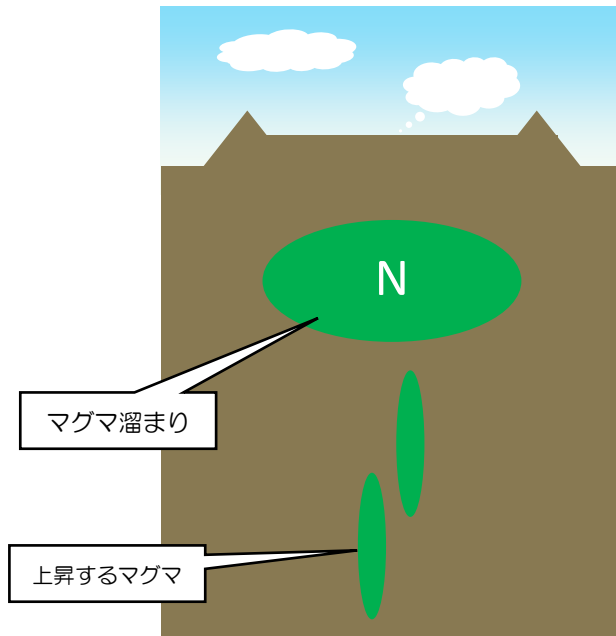
- **エピソードN**はAn₅₀に明瞭なピーク
- **エピソードL**には**エピソードN**と異なる複数のピーク

エピソードNと**エピソードL**のマグマが一連であれば
エピソードLの斜長石にもAn₅₀のピークがあってよいはず

An値：斜長石に含まれるCaとNaの割合を示す値



考察



N噴火
(36,000年前)



既往研究の結果より
エピソードNと**エピソードL**とでは
マグマ溜まりの深さは同じ
地下5~7km (Nakatani et al. 2022)

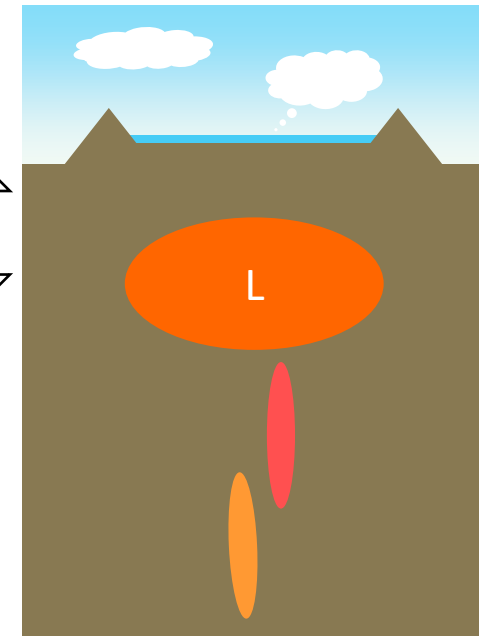
しかし

両者は組成の異なるマグマであり
同じ深さで同時に共存することは不可能

エピソードNと**エピソードL**の巨大噴火間に
マグマの総入れ替えが起きている

さらに

エピソードNは単一組成のマグマ
エピソードLは複数の組成のマグマ
マグマの生成プロセスも変化している



L噴火
(15,500年前)





結論

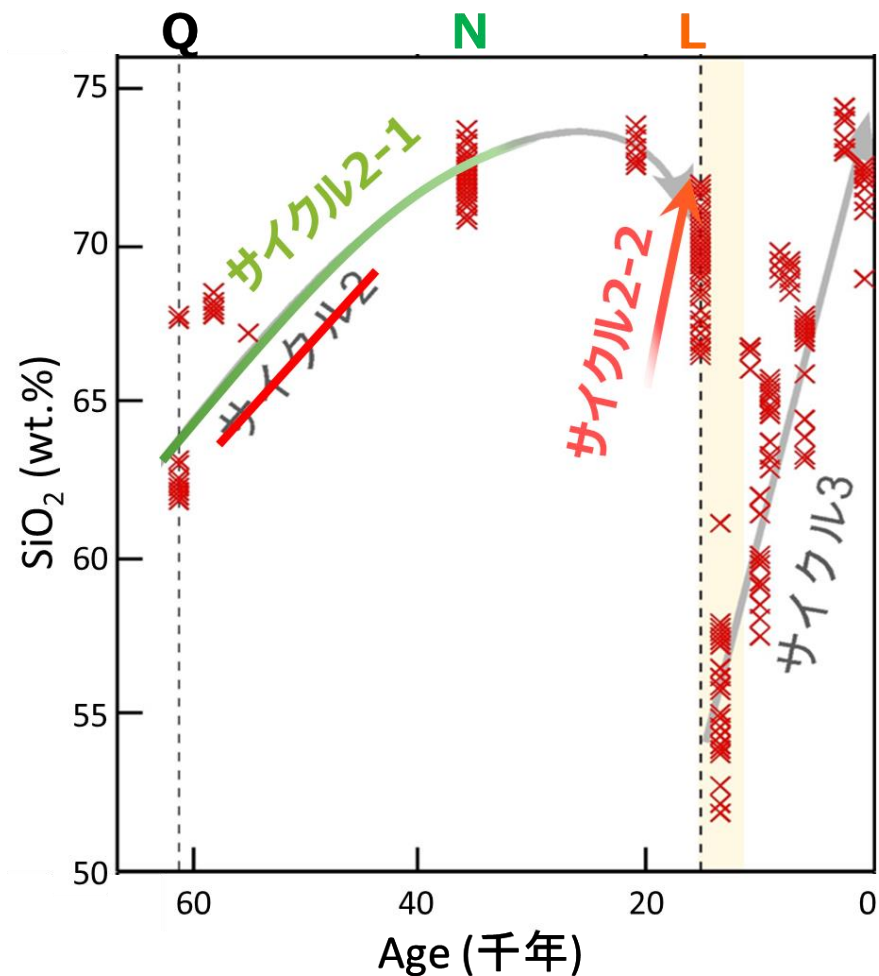
十和田火山の2回の連続する巨大噴火におけるマグマは
共通ではないことが岩石学的に示された

- **エピソードN**の巨大噴火に伴い十和田火山下のマグマの大半が噴出した後、**エピソードL**までに下部地殻でのマグマの生産、供給および蓄積が新たに起こっていると考えられる

→巨大噴火間に十和田火山下で**マグマが入れ替わっている**

- ほぼ単一の組成のマグマが蓄積した**エピソードN**に対し、**エピソードL**では組成の異なる複数のマグマが混合しており、地下のマグマプロセスに何らかの変化が生じたものと考えられる

→巨大噴火間に**活動のサイクルが切り替わっている**



※ 本成果は国際誌Journal of Volcanology and Geothermal Researchに共同研究者と共著で投稿予定

産業技術総合研究所（2019）を一部改変



今後の課題

- エピソードLの噴火準備過程の束縛
 - **エピソードL**のカルデラ形成噴火をおこしたマグマ溜まりの形成にかかる時間を、**エピソードN**と**エピソードL**の間の小・中規模噴火の岩石地質学的研究により推定する
- カルデラ形成期と後カルデラ期の比較
 - 十和田火山では現在までの後カルデラ期の活動が規模・頻度ともに過去のカルデラ形成期と異なることから、そのメカニズムを比較検討する
- 地下構造探査との比較
 - 委託研究にて実施している十和田火山下の地下構造探査の結果と上記知見を比較検討し、その整合性を確認する



Appendix: Sr同位体比と原岩について

エピソードNと**エピソードL**のSr同位体比は大半が0.7042前後で大きな差が無い

- 地殻物質の混入の影響は限定的
- マグマの原岩の種類は同じである可能性がある

Sr同位体比は表面電離型質量分析計(TIMS)で11試料を分析 (N:3試料、L:8試料)
既往研究の同位体組成範囲はHunter & Blake (1995) 及び産総研 (2019) による

エピソードNと**エピソードL**の化学組成を既往の実験岩石学的研究と比較すると両者とも3~7kbで溶融した角閃岩が原岩であるのがもっともらしい

- 東北地方の下部地殻は角閃岩からなる
- 3~7kbの圧力は下部地殻の圧力に相当する

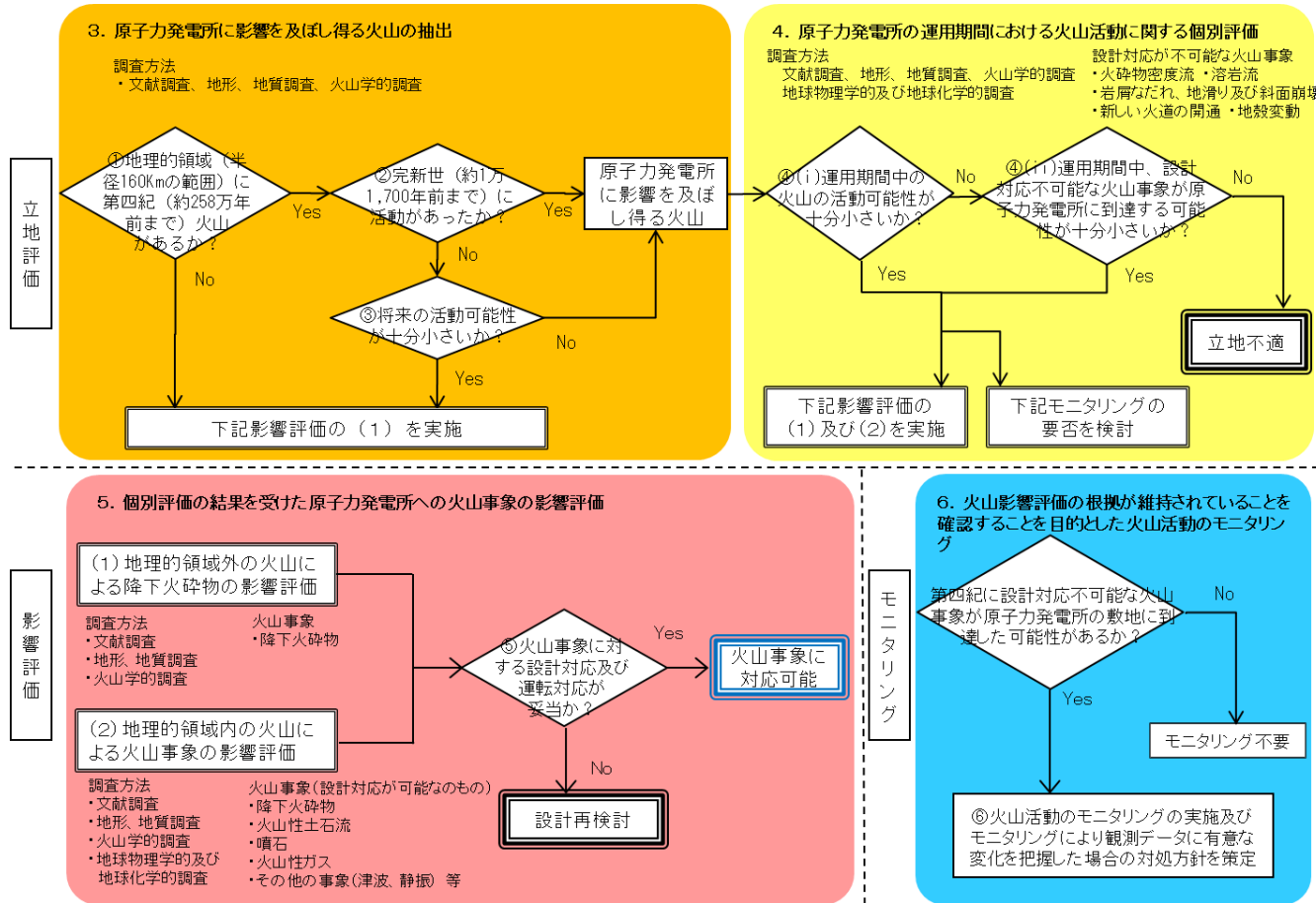
両者の組成差は原岩の違いによるものではなく
角閃岩が溶融した深さの違いによると考えられる

○ **エピソードN** ● **エピソードL**

既往研究の角閃岩溶融実験の組成範囲はBeard&Lofgren(1991) による



Appendix: 火山影響評価



- ◆ 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」では、安全施設は、想定される自然現象が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、**火山の影響**を挙げている。
- ◆ 火山影響を適切に評価するための一例として、「原子力発電所の火山影響評価ガイド」（火山ガイド）が作成されている
- ◆ **巨大噴火**を経験した火山については、現在の活動状況が巨大噴火が差し迫った状態ではないと評価でき、運用期間中における巨大噴火の可能性を示す科学的に合理性のある具体的な根拠が得られていない場合は運用期間中における巨大噴火の可能性は十分に小さいと判断する

火山ガイドで示されている火山影響評価の基本フロー