

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20310107

研究課題名（和文） FEP解析を応用した火山噴火の想定シナリオ作成手法の高度化

研究課題名（英文） A Study on the Volcanic Scenario Adapting the FEP Analysis

研究代表者

村上 亮（MURAKAMI MAKOTO）

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：50370804

研究成果の概要（和文）： 火山活動の開始から終息に至るまでの活動推移の予測に資するため、物理・化学的なプロセスに基づいた因果律に立脚する演繹的な手順で火山噴火シナリオを作成する手法の骨格部分を開発した。火山現象を物理的・化学的な素過程に分解し、その組み合わせで、準備過程、噴火過程、収束過程を総合的に表現する方法を採用した。火山活動の場の環境条件および発端過程を入力とし、その結果を帰結とする関数的表現の有効性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）： We developed a framework of a logical method to compile an event sequence scenario describing an evolution of volcanic activity from its start to end depending deductive analysis based on causality relationship between primitive physical or chemical processes governing the volcanic phenomena. We adopted FEP Matrix (Feature, Event and Process) analysis method developed in the field of high level nuclear waste repository management as a tool to analyze logical relationship between volcanic processes. Firstly we listed the most important requirements that a volcanic scenario should satisfy; they are 1) comprehension and completeness, 2) traceability and accountability, 3) ease for expansion, 4) flexibility, 5) dependence on deductive reasoning and 6) affinity to computer processing. To achieve those we propose a logical algorithm in which we disassemble a volcanic event sequence into a series of primitive processes of physical or chemical nature and then reconstruct the entire sequence with a chain of primitive processes with their causality relationships. Furthermore we use a function format to represent a physical or chemical primitive process having environmental parameters and starting event as input variables and consequence event as output variable. We applied this method for the 2000 Miyakejima and 1986-87 Izuoshima eruptions and found that the whole volcanic processes are successfully described by a combination of physical and chemical primitive processes which we listed as a function set for a basaltic volcanic activity. Thus we verified the validity of our method to realize the deductive scenario compilation for volcanic eruption forecasting.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	6,100,000	1,830,000	7,930,000

研究分野：自然災害科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：FEP, ハザードマップ, 火山, 火山噴火シナリオ, 火山噴火予知, 自然災害, 自然現象観測・予測, 防災

1. 研究開始当初の背景

わが国では、ほぼ 10 年に 1 回の頻度で人命を奪う噴火が発生しており、国民生活の安全・安心を確保する上で、噴火予知手法の一刻も早い確立が待ち望まれている。地震計や GPS による精密地殻変動観測装置などを中心とする観測技術の高度化と観測網の充実によって、地下のマグマの移動をいち早く捉え、火山噴火の可能性を事前に検知することが可能となってきた。例えば、最近、わが国で発生した 1991 年雲仙岳噴火、2000 年有珠山噴火、2000 年三宅島噴火、および 2004 年浅間山噴火では、観測データに現れた前駆的なシグナルによって、それぞれ、事前に噴火の可能性が認識され、火山噴火予知連絡会の検討が気象庁の情報発信に反映されて、防災活動の効果的実施への貢献に繋がった。

観測データに基づき噴火開始の予測がある程度可能となった現在、噴火の推移や終息を的確に予測する手法の開発が、火山学にとっての次の大きな目標となっている。これまで、わが国の火山噴火予知計画は、主として物理・科学的な機構の理解に基づく決定論的な火山噴火予知の実現を目指してきた。今後このアプローチが噴火予知を実現するための基本的な戦略である。しかし、マグマの地表への上昇を支配する主要因であるマグマ溜まり内の発泡状況を知ることは、現時点でも困難であり、マグマの上昇開始から停止までを決定論的な手法で推移予測することは難しい。むしろ、ある程度の不確定性は覚悟の上で、定性的にせよ噴火現象がどのような推移をたどる可能性が高いのかを展望する火山活動推移シナリオを活動前に作成しておき、それに基づいて防災対策を実行することが被害の軽減には有効であると考えられる。

欧米では火山活動推移シナリオの作成は当然として、さらにそれに確率を付与するなど、実践的な応用をめざした研究が進んでいる。一方、わが国では、十分に検討されたシナリオの準備なく噴火を迎え、その後の火山活動の推移の予測をある種場当たり的に行うことを余儀なくされることが多かった。十分に検討された火山活動推移予測シナリオが事前に準備されていれば、事態の進行に伴って適宜取得される観測情報を最大限に活用しながら、その後の事態の推移予測が可能となる。むしろ、各種の観測がほぼリアルタイムに行えるようになった今こそ、このような予測シナリオ手法を確立が望まれている。

2. 研究の目的

本研究で目指すのは、基礎となる物理的・化学的法則に立脚して、演繹的に火山活動シナリオを構築する手法である。定性的であっても、地下で発生する火山現象の因果律に立脚した物理・化学的モデルによって、演繹的に火山活動推移を推論する手法が有効である。この手法によれば、初期段階のシナリオでは想定していなかった事象が発生したとしても、その時点から新しい情報を盛り込んで、演繹的にその後の経過を分析・予測して現象の進行と同時進行形で新たな活動推移を推定することが可能となる。また、警報の発令や防災の意思決定やその実施の局面において関係者への説明性も高まる。行政担当者を始め報道関係者や住民は必ずしも火山の専門家ではないが、そのような関係者に対して、現象の背後で進行する物理・化学的メカニズムに基づいたモデルを用いて、判断の背景や根拠を客観的に説明することが可能となり、現状認識と推移予測情報の共有に多大の効果が上がると期待される。さらに、推移予測の検討の過程や根拠などの途中過程をすべて記録することによって、透明性や説明性を向上させ、事後の検証作業にも適している。

3. 研究の方法

全く新たに最初から手法開発するのは容易ではなく効率も悪いため、演繹的シナリオ作成手法として実績のある既存の手法を応用することにした。核廃棄物地層処分分野においては、未来の複雑な現象を包括的に予測する目的のシナリオ作成が必要とされたことから、早くから研究が始められ、国際的にも共通化した標準的な FEP 解析と呼ばれる手法が定着し、それらを効果的に進めるための支援ツールである FepMatrix も我が国で開発され、効果をあげている。これは、全体としては複雑な現象を素過程に分解し、それらの関連で全体を理解する分析を効果的に実施するために用いられる支援ツールであり、膨大で複雑な素過程間の関連性について、それぞれ必要とされる詳細度に応じて整理して理解させる点において極めて有効である。

我々の目標とする火山活動推移シナリオ作成手法においても、素過程の組み合わせによって火山活動推移を理解・表現するという点については共通であり、火山現象を

FepMatrix での操作に適した形で素過程に分解することにより、このツールの特長を最大限に利用する形で、火山活動推移シナリオを効果的・効率的に作成する手法の開発を目指すことにした。

火山現象には、そのメカニズムや支配する物理・化学的素過程や、その関連の仕方において、特徴があるはずである。それらを洗い出して明確化したうえで、火山現象の特徴に最適化したシナリオ作成手法を開発することを考えた。未来の現象の推論である地層処分との決定的な差は、観測可能性であり、火山現象では、現象の進展に合わせて観測を試み、その情報が推移予測に直接影響を与えるため、その性質を予測手法に組み込むことが特に重要である。

我々が目指すシナリオは、防災を意識した噴火予測に貢献するという目標が明確になっているので、その達成に必要な諸要件を洗い出し、それらを達成する手法を探るという方法で開発研究を進めることにした。分析の結果我々の必要とする要件は以下のよう

(1) 包括性・網羅性：できるだけ多くの火山現象を広範囲にカバーし、発現頻度が稀な現象であっても、その発現可能性は指摘しておくこと。可能であれば、発生の確率または蓋然性を順序づけられることが望ましい。

(2) 追跡性・説明性：完成したシナリオの根拠になったデータや考察や分析について、作成後においても詳細に追跡可能であり、第三者への説明性が高いこと。

(3) 発展性：シナリオ作成手法は、火山学の進歩に応じて容易に拡張や改良が施せること。

(4) 柔軟性：一度完成したシナリオであっても、新たな知見やデータの出現に応じて、修正や追加が容易に施せること。

(5) 演繹性：シナリオを構成する事象の発展は論理的因果律に基づくこととし、対象火山の過去の活動例がない現象であっても論理的・演繹的分析から、発現可能性のある現象を予測できること。

(6) 計算機親和性：シナリオは計算機上で作成することとし、計算機が有する優れた記録性、検索能力、表示能力、分析能力を活用できること。

本研究では、地層処分野で開発された手法を出発点として、火山現象の特質に合わせた修正や変更を適宜加えながら、最終的に、火山現象の推移予測に最適化したシナリオ作成手法への到達を目指した。素過程の表現方法としては、必ずしも地層処分のFEPの概念を無条件に踏襲することはせず、むしろ、発端要素と帰結要素の間の因果関係や、その

因果律によって発生するプロセスとその前提となる環境条件が火山現象を支配する共通要因になっているという火山現象の特質を生かすことで、火山現象の構造を最も効果的に表現できると考え、それに適した新たな枠組みを火山用に構築し、それに立脚して火山活動水シナリオ作成手法を作成した。

4. 研究成果

本研究の主要な成果は次の2つである。その第1は、計算機親和性が高く、できるだけオートマチックに現象の連鎖を予測する方法論として、火山現象記述言語の概念を提唱したことである。

第2の成果は、火山現象の素過程のリストを詳細に試作し、火山現象記述言語とFepMatrixを合体させた方法論によって、実際の火山現象が記述可能であること検証し、それを通じて、この手法により演繹的な火山現象シナリオ作成が可能であることを実証したことである。

(1) 火山現象記述言語の開発

火山現象がシナリオの本質は火山現象の言語と記号および図表などによる表現または記述であり、どのような作成手法をとるにせよ、完成したシナリオは火山現象を人間が理解できる表現手段によって記述したものである。シナリオの作成手法について、計算機親和性を高めるためには、この表現方法の規則(文法)が最大限に単純であり、なおかつ論理的である必要がある。この事情は、数値計算におけるFORTRANなどの計算機言語に求められる要件に類似している。計算機言語の文法や要素はできるだけ単純である方が望ましいが、必要に応じて複雑な計算にも対応できるための発展性や包括性も備えていなければならない。四則演算や積分などに代表される数値計算の集合を火山現象の集合に置き換え、計算機言語を火山現象記述言語に置き換えれば、我々の提唱する火山記述言語の特質が理解しやすい。火山記述言語は、火山現象を支配する個々の物理的・化学的素過程を構成要素とし、それらの関係を支配することができるだけ単純な規則や論理関係の約束事で、複雑な火山現象でも整理された形で記述することをめざすものである。本研究では、火山現象の特質は、①どんな複雑な火山現象でも、きっかけとなる発端現象とその帰結となる現象で定義される素過程の連鎖として表現できる。②それぞれの素過程の帰着現象は、その現象が発生する場を支配する環境条件と発端現象の組み合わせによって定まる、という2つの性質にあると考えることにした。

さらに火山現象においては現象の発生場所や時間の前後関係も現象記述の重要な要

素となるため、火山現象記述言語にはそれらの要素も盛り込む。

以上を踏まえて、火山噴火に係る現象・変遷を素過程に分割するとともに、各素過程の内容を下記の4つの要因に分類し、それらを用いて論理関数論的に表現することを火山現象記述言語の基本概念とした：

(要因の分類)

- 事象発生の前提となる「場の環境」：x1
- 事象発生のきっかけを示す「発端」：x2
- 事象発生の結果を示す「帰結」：x3
- 事象の発生に伴う「観測・観察される事項」：d

(論理関数論的表現)

- 関数： $f(x1, x2, d) \rightarrow x3$.

表-1 素過程の情報の整理方法（関数表のフォーマット）

素過程	関数			
	場の環境, 条件: x1	発端: x2	帰結: x3	観測・観察される事項: d
1				
...				
n				

○火山現象記述言語の基本ルール

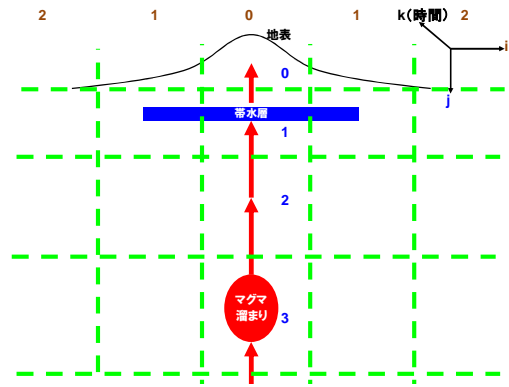
上に示した火山現象記述言語に関する基本概念考に基づき、関数による素過程の内容表現の基本ルールを設定した。

この考え方及び後述する基本ルールに基づき関数として整理した素過程の情報は、表-1のフォーマットで関数表として取りまとめることで、素過程の連鎖であるシナリオの検討に利用しやすくする。

次に、関数による素過程の内容表現の基本ルールを以下に示す。

- 関数表では、各行で一つの素過程を示す。ひとつの素過程は、一組の「場の環境・条件 (x1)」、「発端 (x2)」、「帰結 (x3)」及び「観測・観察される事項 (d)」を含むひとつの関数 ($f(x1, x2, d) \rightarrow x3$) で表現する。

図-1 各要素の位置関係を表す概念図



●「場の環境・条件 (x1)」、「発端 (x2)」、「帰結 (x3)」は、その位置と時間の情報を図-1の概念図に基づきパラメータ化して保持する (例えば、 $x1(i, j, k)$).

●ある素過程での「帰結 (x3)」が、別の素過程での「発端 (x2)」になることがある。このような関係は素過程の連鎖を表現するために重要であり、関数表においては、異なる素過程での「帰結 (x3)」と「発端 (x2)」を同じ表現とすることでこのような関係があることを明確にする。

●ここで、ある素過程に含まれるひとつの事象（「発端 (x2)」→「帰結 (x3)」）について、その発生の前提となる「場の環境・条件 (x1)」は必ずしもひとつとは限らず、また事象の種類や程度に応じて複数の「観測・観察される事項 (d)」が存在し得る。そのため、「場の環境・条件 (x1)」と「観測・観察される事項 (d)」については、関数表の一行（ひとつの素過程＝ひとつの関数）において複数設定することを可能とする。これと関係して、「場の環境・条件 (x1)」や「観測・観察される事項 (d)」については、関数表の該当欄に選択枝として事前に設定しておく。一方、「発端 (x2)」と「帰結 (x3)」については、関数表の一行（ひとつの素過程＝ひとつの関数）においてひとつずつを設定する。

●ある素過程での「帰結 (x3)」の発生により、「場の環境・条件 (x1)」の状態がそれまでのものから変化 (例えば、on→off あるいは off→on) し、それ以降の現象の展開が変わる場合がある。このような関係も素過程の連鎖を表現するために重要である。

これらのルールは、FepMatrix との親和性も考慮しながら作成されている。以上のルールで、実際の火山現象をシナリオとして表現可能かについて検証した結果を次に示す。このプロセスは、今回開発したシナリオ構築手法の有効性の検証の意味も併せ持っている。

(2) 実際に発生した火山噴火への適用と検証

2000年噴火の本質的な活動は、三宅島火山直下のマグマ溜まりからマグマが移動し、三宅島北西沖に巨大ダイクを形成したプロセスと考えることができる。岩脈へのマグマの移動に伴い、三宅島直下のマグマ溜まりの収縮とそれによるマグマ溜まり天井の破壊が発生し、カルデラを形成した。また岩脈形成に伴う応力変化は、M5クラスの構造地震を含む50日間に及ぶ大規模な群発地震活動を引き起こした。さらに、カルデラ形成に伴うマグマ溜まりの減圧は、より深部からの玄武岩マグマの上昇を導き、その結果激しいマグマ水蒸気噴火とそれに続く大量の火山ガス連続放出が起こった。それぞれの噴火現象の中で、原因となる事象、噴火現象を駆動するプロセス、結果として生じた事象を抽出し、“関数”として記述することを試みた。以下、いくつかの具体的な事例にそって、それぞれの現象をどのように関数として表現したかを記述する。

前回の1983年噴火終了から2000年噴火の開始までの噴火準備期間では、火山体の長期的な膨張が観測されている。推測される膨張源の位置などから、この膨張はマグマ溜まりへのマグマの継続的な注入によるマグマ溜まり内の過剰圧の上昇とそれによるマグマ溜まり壁岩の（弾性）変形を反映していると考えられる。この現象を記述するための関数は、次のようにあらわされる。この噴火準備期間の場の環境(x1)としては、ある深さにマグマ溜まりが存在すること、より深部からのマグマの供給があること、マグマ溜まりの壁岩が弾性体としてふるまうことなどが挙げられる。このような条件下で、マグマ溜まりへのマグマの注入（発端：x2）が、マグマ溜まり内の圧力の増加をもたらす（帰着：x3）、その圧力増加（発端：x2）がマグマ溜まりの膨張をもたらした（帰着：x3）、と、二つの連鎖する関数として記述することができる。マグマ溜まりの膨張は、火山体全体の膨張として測地的に観測され、これが事象の観測(d)となる。

2000年噴火は、6月26日のダイク貫入開始に伴う地殻変動、地震活動で始まった。この開始時期の一連の現象は、噴火準備期間に蓄積されたマグマ溜まりの過剰圧が、マグマ溜まり壁岩の強度を超えて、マグマ溜まり壁岩が破壊してダイクが成長を開始した過程ととらえることができる。このイベントの場の環境(x1)としては、マグマ溜まり壁岩が脆性的にふるまうこと、マグマ溜まりが過剰圧を持っていることが挙げられる。マグマ溜まりの壁岩の応力集中（発端：x2）が、壁岩の破壊をもたらす（帰着：x3）、過剰圧のあるマグマ溜まりの存在（場の環境：x1）は、形成されたクラックへのマグマの注入（帰着：

x3）をもたらした。これらの現象は、群発地震の発生とその震源域の移動、火山性微動の発生、火山体の局所的な膨張といった観測事実（判定子：d）によって推測される。

シナリオ作成には、ある関数あるいはひとまとまりの関数群で記述される事象と、別の事象との間の連鎖関係を記述することが不可欠である。三宅島2000年噴火の例では、噴火初期に発生したダイクの形成はダイク周辺の岩盤に応力変化をもたらした。その結果、三宅島北西海域に貫入したダイクを中心とした広い範囲で大規模な地震活動を誘発した。群発地震の震源分布と震源メカニズムは、ダイクの開口変形によって、ダイク周辺の岩盤の応力場が変化し、それに伴って岩盤の断層破壊が生じたことを示している。従って、群発地震の発生は、環境(x1)である応力場が、ダイクの貫入によって変化し、その結果せん断破壊が生じ得る環境に変化したことを意味する。これは、ある事象の帰着(x3)が、それ以降の事象の環境(x1)に影響を与えたということである。このように、環境(x1)がある事象によって変化することによって、さまざまな火山現象が連鎖して発生したと理解することができる。

このような事象の連鎖に注目して2000年噴火の推移を記述すると、次のような記述が可能となる。1) マグマ溜まりからダイクへのマグマの流出と、マグマ溜まり内のマグマ圧力の急激な減少。2) マグマ溜まり内の圧力減少によるマグマ溜まり天井への応力集中と破壊、環状断層の発生。3) 天井岩の破壊の地表への進展、マグマ溜まりからの環状断層の地表への到達と、カルデラの出現。4) マグマ溜まりからのマグマの流出とそれに伴うマグマ溜まりの減圧の進行、マグマ溜まり天井の周期的な沈降。5) マグマ溜まりの減圧による、マグマ溜まり内のマグマ発泡と、一部のマグマの環状断層沿いの上昇。6) 上昇したマグマによる帯水層の加熱と水蒸気爆発の発生。7) 更に上昇したマグマと帯水層の接触による、マグマ水蒸気噴火。8) マグマ水蒸気噴火による帯水層の破壊と開放火道の形成。9) 安定した開放火道の確立による長期的な連続脱ガス。これらの事象は、それぞれが因果関係にあり、先に起こった現象による環境要因の変化が、次の事象を誘発したと考えられる。これらの相互関係をも取り込んだ関数リストを作成した。

以上のように、関数リストと今回開発したシナリオ構築手法によって、2000年三宅島噴火現象がシナリオとしての表現可能性を検証した。この検証は、開発したシナリオ作成手法の有効性についての検証の意味も併せ持っている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表]

① 村上 亮, 川村 淳, 牧野 仁史, 下司 信夫, 及川 輝樹, 西村 卓也, 梅田 浩司, 佐々木 寿, 瀬尾 俊弘, 大井 貴夫 (2011): “FEP 解析を応用した火山噴火シナリオ構築手法の検討—その具体例の提示—, 日本地球惑星科学連合大会, 2011年5月22日, 幕張市.

② 村上 亮, 川村 淳, 牧野 仁史, 下司 信夫, 及川 輝樹, 西村 卓也, 梅田 浩司, 佐々木 寿, 瀬尾 俊弘, 大井 貴夫 (2011): “FEP 解析を応用した火山噴火シナリオ構築手法の検討—演繹的推論の要素導入の試み—, 日本地球惑星科学連合大会, 2011年5月22日, 幕張市.

③ 村上 亮, 川村 淳, 牧野 仁史, 下司 信夫, 及川 輝樹, 佐々木 寿, 瀬尾 俊弘, 西村 卓也・梅田 浩司・大井 貴夫 (2010): “FEP 解析手法を応用した火山噴火シナリオ構築手法の検討”, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会 2010 年 5 月 23 日, 幕張市.

④ 村上 亮, 川村 淳, 佐々木 寿, 牧野 仁史, 瀬尾 俊弘, 西村 卓也, 梅田 浩司, 大井 貴夫, 下司 信夫, 及川 輝樹 (2009): “FEP 解析手法を応用した演繹的火山噴火シナリオ作成の推定ロジックルールの試作と三宅島 2000 噴火経過予測への試験的適用”, 日本火山学会秋季大会, 2009 年 10 月 12 日, 小田原市.

⑤ 村上 亮, 川村 淳, 佐々木 寿, 牧野 仁史, 瀬尾 俊弘, 西村 卓也, 梅田 浩司, 大井 貴夫, 下司 信夫, 及川 輝樹 (2009): “FEP 解析手法を応用した火山噴火シナリオの検討—伊豆大島への適用事例—”, 日本地球惑星科学連合大会, 2009 年 5 月 16 日, 幕張市.

⑥ 村上 亮, 川村 淳, 大井 貴夫, 牧野 仁史, 西村 卓也, 梅田 浩司, 瀬尾 俊弘 (2008): “火山噴火シナリオ作成手法の予察的な検討”, 日本地球惑星科学連合大会, 2008 年 5 月 26 日, 幕張市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 亮 (MURAKAMI MAKOTO)
北海道大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号: 50370804

(2) 研究分担者

西村 卓也 (NISHIMURA TAKUYA)
国土地理院・地殻変動研究室・主任研究官
研究者番号: 90370808
牧野 仁史 (MAKINO HITOSHI)
日本原子力研究開発機構・地層処分基盤研究ユニット・研究職員

研究者番号: 60421632

瀬尾 俊弘 (SEO TOSHIHIRO)
日本原子力研究開発機構・地層処分基盤研究ユニット・研究職員

研究者番号: 60421628

梅田 浩司 (UMEDA KOJI)
日本原子力研究開発機構・地層処分基盤研究ユニット・研究職員

研究者番号: 60421616

下司 信夫 (GESHI NOBUO)
産業技術総合研究所・研究員
研究者番号: 70356955

及川 輝樹 (OIKAWA TERUKI)

産業技術総合研究所・研究員
研究者番号: 10435761

(3) 連携研究者

川村 淳 (KAWAMURA MAKOTO)
三菱マテリアルテクノ (株) 資源・環境・エネルギー事業部・グループリーダー

研究者番号: 10469827

大井 貴夫 (OHI TAKAO)
原子力発電環境整備機構 技術部処分技術・性能評価グループ・課長

研究者番号: 00421636