

## 研究展望

# 活火山地域の防災対策の課題と展望

A REVIEW ON COUNTERMEASURES FOR PREVENTION OF NATURAL DISASTERS  
DUE TO VOLCANIC ACTIVITIES

土木学会地盤工学委員会  
火山工学研究小委員会第2分科会

*Second Working Group of Research Subcommittee on Volcanic Engineering,  
Geotechnical Engineering Committee, JSCE*

*Key Words: volcanic disaster mitigation, eruption prediction, volcanic hazard map, sabo plan,  
evacuation analysis, local plan for disaster prevention, reconstruction plan*

## 1. はじめに

土木学会地盤工学委員会の火山工学研究小委員会では、1995年9月より火山工学という新しい工学の確立を目指して活動を続けている。火山工学を総合的な工学として確立させるために、理学、農学、医学、社会学、法学、経済学等とも連携させた活動を行っている。この結果、火山工学研究小委員会は、火山工学という新しい工学の認識を深めるとともにその研究範囲を明らかにした<sup>1)</sup>。引き続き、1995年度までの成果をもとに1996年度以後、火山工学研究小委員会内に「火山地域の施工・利活用分科会(第1分科会)」と「活火山地域の防災分科会(第2分科会)」を設けて調査研究を継続している。

火山災害に対する防災対策は、ハード、ソフト面とも、地震災害や風水害対策に比べると整備が遅れている。この原因は、火山災害の発生頻度が地震、豪雨および台風に比較して小さいためと、被害が活火山の周辺に限られることが多いために、国レベルの対策の対象になりにくい側面がある。しかし、一旦火山が噴火すると雲仙普賢岳の火山災害の例でも明らかなように、災害が継続し、ハード対策や被災者の生活再建にただちに着手できないなどの制約があり、既存の防災対策だけでは火山災害対策は不十分であることが明らかになっている。雲仙普賢岳の火山災害対策ではハザードマップの避難対策への活用、砂防ダム工事への無人化施工の導入、砂防工事の応急・緊急対策の導入、雲仙岳災害対策基金の設立等がなされたが、特化された1つの事例に終わっている。総合的な活火山地域の防災対策の確立はこれからの課題である。

活火山地域の防災対策は火山学や防災工学の専門家によって個々の火山についてなされているのが実情である。活火山地域の防災対策を確立するために

は、火山学や地質学の専門家による噴火予知、活動監視に加えて、工学の専門家による火砕流、山体崩壊、土石流などに対する力学的シミュレーション技術の活用が必要である。これらの成果に基づいて、ハザードマップの作成・活用、噴火シナリオの作成、災害波及、被害想定などの考え方および方法を明らかにした上で、土地利用、都市計画、まちづくり、防災施設の配置、地域防災計画および復興計画の策定を行うべきである。しかし、現在までのところ、このような視点からの研究は十分に行われていない。

そこで、本分科会では、火山学や地質学の専門家に加えて、砂防工学、防災工学、災害心理学、防災計画学、医学の研究者および防災行政の担当者の参加を得て、活火山地域の防災のあり方について、横断的な調査研究を行っている。このような取り組みによって、実効性のある活火山地域の防災のあり方が、学問や行政の枠組みを越えて検討できることが期待される。

本研究は、これまでの分科会の活動成果をとりまとめ、活火山地域の防災対策の確立に向けて現状の把握と課題を示している。

## 2. 活火山地域における防災対策の現状と体系化の必要性

### (1) 活火山地域における防災対策の現状

#### a) 防災対策の検討状況

雲仙普賢岳の火山災害は国レベルの活火山対策の在り方にさまざまな問題を提起した。活火山の防災対策に関係する国土庁、消防庁、建設省等の行政機関、地震保険を取り扱う損害保険料率算定会等が火山災害対策を検討し始めた。これらの検討は防災アセスメント又は被害想定をした上で、実効性のある

活火山対策を行なったり、防災施設の整備効果を把握することを目的としている。

本分科会の主査である高橋（長崎大学）は、「砂防事業経済効果把握手法研究会」（建設省九州地方建設局雲仙復興工事事務所，1994，1995年度）、「火山災害に伴う被害影響評価調査ワーキング会議」<sup>2)</sup>（建設省東北地方建設局福島工事事務所，1996年度）、「火山災害研究委員会」<sup>3)</sup>（損害保険料率算定会，1994～1996年度）等に委員として参加した。それらの委員会では、火山災害の発生のシナリオ、被害シミュレーション、影響範囲、直接被害・間接被害の評価、防災施設による被害軽減効果の評価手法、費用対効果を議論し、火山地域の防災対策のあり方、火山保険の可能性等が検討された。火山災害研究委員会では、火山の噴火履歴等を災害の観点から再整理することや有史以後ではなくて2,000年間の火山活動歴を対象にするなど、リスク評価の立場から火山災害の見直しがなされた。また、火山噴火のシナリオに従って、被害の拡大と影響の評価がなされた。火山災害研究委員会において、総合科学としての火山工学の必要性や外国の火山対策も研究の視野に入れるべきとの指摘がなされた。

**b) 火山噴火時の応急対策マニュアルの作成**

1994，1995年度には自治省消防庁において「火山噴火災害時における応急対策活動のあり方に関する調査研究委員会」および「火山噴火災害応急対策システムに関する調査研究委員会」が設置された。地震および風水害については、災害の態様や地域特性に応じた実効性の高い応急対策に関する検討が行われ、地域防災計画や災害時の応急対策マニュアル等が整備されている。しかし、火山災害に対しては災害予測が困難なことなどから、総合的な応急対策システムの検討が行われていなかった。そこで、消防庁は上述の2委員会において、火山災害時の応急対策計画の策定および運用のためのマニュアルを策定するための調査研究を行った。この成果として、火山噴火災害応急対策（計画策定、計画運用）のあり方を示した。消防庁の報告<sup>4)</sup>によれば、火山地域の地域防災計画の平常時の対策として、「事前に対象火山の特性に応じた防災アセスメント又は災害想定を行い、実施後はその結果を地域防災計画に登載し、当該市町村の火山噴火災害対策の前提・目安としての位置づけを明確に定めておく」としている。

**c) 新防災基本計画における位置付け**

1995年1月17日の未明に発生した阪神・淡路大震災は、我が国が災害に見舞われやすい自然条件下にあること、現代社会は自然災害に対して脆弱であることを改めて強く認識させた。中央防災会議は、

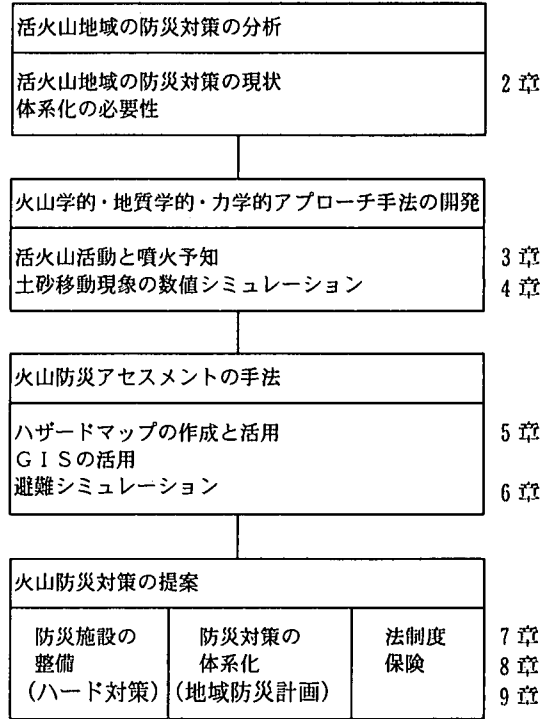


図-1 第2分科会の調査研究の流れと本研究展望の構成

1995年7月に防災基本計画を改訂した。新防災基本計画<sup>5)</sup>では、具体的かつ実践的な計画とすることを基本方針としている。防災基本計画の火山災害対策編において、「国および地方公共団体は適切な土地利用の誘導、警戒避難対策の推進、住民等への情報提供等を効果的に行うため、各火山の特性を考慮した火山に関するハザードマップの整備を推進するものとする」、「地方公共団体はそれぞれの火山の特性を考慮して、防災マップ、地区防災カルテ、火山に関するハザードマップ、火山災害時の行動マニュアル等をわかりやすく作成・配布し、研修を実施する等防災知識の普及啓発に努めるものとする」と述べられている。火山災害のシミュレーション結果に基づいた実効性の高い火山災害対策を行うことが示されているが、具体的な方針を示すに至っていない。

**(2) 活火山地域の防災分科会の活動のフレーム**

雲仙普賢岳の火山災害の教訓やその後の火山災害に対する検討では、防災アセスメントに基づいた実効性のある活火山地域の防災対策を体系化することが求められている。本分科会では、各自の専門領域を活火山地域における防災という観点から見直し、火山噴火と噴火予知、土砂移動現象の力学シミュレーション、防災アセスメント、ハザードマップの作成と活用、防災施設の整備等の社会基盤整備のあり

方をとりまとめ、次いで、地域防災計画・復興計画の策定の方策を検討している。本分科会発足当初から議論を重ねてまとめられた活動のフレームを基に本研究展望の構成を示すと図-1のとおりである。本分科会の委員会構成は付表-1に示すとおりである。また、付表-1には本研究展望の執筆者を示している。

### 3. 火山活動と噴火の予知

#### (1) 火山活動の概要

##### a) 国内外の著名な火山と火山活動

一般に、珪酸分に富むマグマ（珪長質マグマ）は粘性が高くしかも揮発性成分に富むため爆発的な噴火を起こし易く、それに伴う火山災害の程度も大きいことが知られている。ここ20年間に起きた主な珪長質マグマの噴火として、合衆国セントヘレンズ火山（1980年～1985年）、フィリピンのピナツボ火山（1991年）、雲仙普賢岳（1990年～1995年）、カリブ海のスープリエールヒルズ火山を挙げることができる（図-2）。セントヘレンズ火山では山体崩壊が引き金となって大爆発が起き、その噴煙が成層圏を突き抜ける程上昇した。山体崩壊の堆積物が火口から20kmを越えて広がり火砕流も発生した（図-3）。また、ピナツボ山は、1991年に、セントヘレンズよりも大きな規模で噴煙柱を上げる大噴火を起こした。この噴火では火砕流が四方八方へ約20km流下した。これらに比べて、普賢岳では溶岩ドーム噴火で始終し、溶岩崩落によって発生した火砕流の広がりも高さ6kmであった。スープリエールヒルズ火山では、雲仙普賢岳とよく似た溶岩ドームの噴火で始まったが、溶岩の噴出率は時間と共に増大し1998年春まで活動が継続した。また、この噴火の途中にはほぼ規模の大きな爆発的な噴火を発生した。

これらのうち、スープリエールヒルズ火山を除いて、噴火に関与したマグマ（溶岩）の組成はすべて珪酸分の多いデイサイトであり組成的にお互いに酷似したものであった。マグマの液体部分（メルト部分）だけを取り上げると、スープリエールヒルズ火山も含めて、全て同じ流紋岩組成であった。また、4火山の噴火の溶岩ともに、地下のマグマ溜まり内において晶出していた結晶（斑晶）として角閃石を含有するため、いずれのマグマとも元々は同程度の揮発性成分量を持っていたと考えられる。しかし、噴火は4者4様であった。これらのことは、火山噴火の規模や様式が決してマグマの組成で決まっている訳ではなく、マグマが上昇中に遭遇する複雑な機構によって支配されていることの証である。

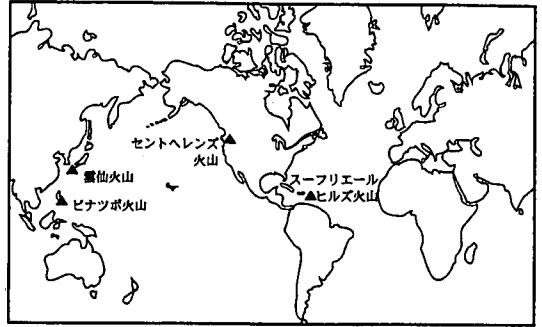


図-2 最近20年間に起きた主な珪長質マグマの噴火

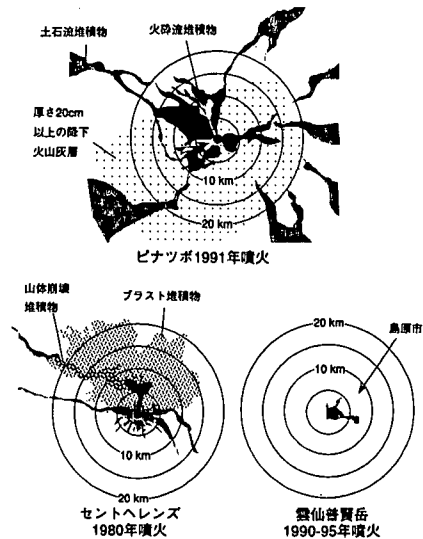


図-3 最近起きた珪長質マグマの3大噴火による火砕流などの堆積物分布状況

火山爆発指数 (VEI: Volcano Explosivity Index)

	1回の噴出量	噴煙高度	成層圏の影響	噴火例
0	非爆発的噴火 10万m <sup>3</sup>	0.1km以下	なし	
1	小噴火 100万m <sup>3</sup>	0.1-1km	なし	
2	中噴火 1000万m <sup>3</sup>	1-5km	なし	雲仙普賢岳 1991年
3	中大噴火 1億m <sup>3</sup>	3-15km	可能	
4	大噴火 10億m <sup>3</sup>	10-25km	明瞭	
5	巨大噴火 1km <sup>3</sup>	25km以上	深刻	セントヘレンズ 1980年
6				ピナツボ 1991年
7	↑ カルデラ形成 1000km <sup>3</sup>			タンボラ 1815年
8				

図-4 火山噴火の爆発度を示す指標<sup>6)</sup>

## b) 火山活動の特徴

噴火の規模を表すものとして火山爆発指数 (VEI: Volcano Explosivity Index)<sup>6)</sup> が提案されている (図-4)。この指数は1回の爆発で放出されたマグマの量に基づく。上に挙げた火山のうち、規模の最も大きかったピナツポ火山の噴火が VEI 6 であるのに対し、最も穏やかであった普賢岳噴火は2であった。VEI が7以上の巨大噴火は世界的に見ても非常に稀である。巨大噴火が世界中で起こる間隔は一般的に長く数百年から数千年の間隔である<sup>7)</sup>。一方、VEI が3以下の小噴火は頻繁に起こり、日本でも毎年複数の火山で発生する。例えば、三宅島や伊豆大島のような、粘性の低い玄武岩溶岩を噴出する火山では噴火の間隔が比較的短く、それぞれ約22年と約35年という良い規則性が認められる。高粘性のデイサイト質火山岩からなる火山でも規則的な噴火間隔が認められることがあるが、その間隔は数百年と長い。

噴火は無秩序に起こっているわけではなく、一定の噴火のサイクルや規則性がある。特に、積算噴出量と噴出時間の関係を示す「階段図」は、火山毎に特有の平均的な噴出率があることを示している。階段図からはその火山が噴火時期予測型か噴出量予測型かを検出することができる。これは規則性が階段の上面にあるか下面にあるかによる。図-5には雲仙普賢岳の階段図を示す<sup>8)</sup>。噴出物は溶岩の体積に換算してある。また、逆三角形は火砕流を伴う溶岩ドーム噴火を示す。しかし、このような階段図の規則性が地下のどのような機構を反映しているのかは厳密には解明されていない。

## (2) 噴火の予知

### a) 噴火の前兆と経験則

噴火の場所や時期を予測する噴火の予知は、以下に示すような、主に地球物理学・地球化学的手法で噴火の前兆現象をとらえることによって行われる。

- 1) 火山体での地震 (火山性地震) の増加と移動
- 2) 発生する地震の特性変化 (火山性微動の発生)
- 3) 火口付近の地殻変動の増加 (傾斜・伸縮変動、光波測距や GPS による変化)
- 4) 火口付近の重力・電磁気的な変化 (磁力強度や比抵抗の変化)
- 5) 火山ガスの量、温度、組成の変化
- 6) 火口近傍の表面的変化

これらの前兆現象はマグマが火口へ接近することによって起こされるものである。噴火の予知には、過去に起きた複数の噴火で見られた前兆現象の推移からある規則性を導きだし、それに観測される現象を当てはめて診断するという手法がとられる。例え

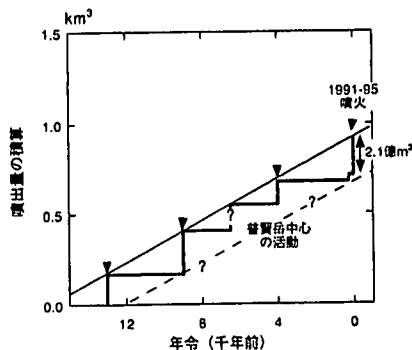


図-5 雲仙普賢岳の階段図<sup>8)</sup>

ば、桜島では南岳が噴火を頻繁に繰り返しており、京大防災研究所附属火山活動センター (桜島火山観測所) が山腹に設置した傾斜計や伸縮計の変化から噴火の前兆を読み取り噴火の予知を行っている。これは噴火直前に山頂部が隆起することを利用したものであり、山頂噴火を自動的に予知するシステムを開発して70%以上の成功率を上げている<sup>9)</sup>。

しかし、桜島は噴火を頻繁に繰り返す日本でも稀な火山であるため、ほかの噴火回数の少ない火山でこのような経験則を得ることは困難である。また、桜島での経験が他の火山にも直接当てはまるわけではない。例えば、伊豆大島火山の1986年噴火では、噴火直前には地震・磁力・重力などの異常な変化が急激に発生した一方で、火口域のみが逆に沈降するという現象が現れた。当時は、後者の現象を重視したために噴火開始を予知することに失敗している。また、火山活動を監視していない火山の噴火予知は困難である。九重山、秋田焼山、新湯焼山等の最近の噴火やその類似現象のように、抜き打ち的であっても噴火が小規模であるうちは問題が少ない。しかし、噴火間隔が長くより規模の大きな噴火が起こりうる火山 (例えばカルデラ噴火を起こす火山) での監視の漏れは大災害をもたらす危険性が予想される。

### b) 噴火の推移予測

いったん開始した噴火の推移予測は、噴火に伴う災害の期間や規模を予測する上で不可欠である。これらは下に示すように主に地質学・史料学的データに基づいて行うことが可能である。

- 1) 古文書による過去の噴火の推移
- 2) 堆積物から読み取れる噴火の推移
- 3) 階段図に基づく噴出量予測
- 4) 初期噴出マグマ物質からの予測

似た様式の噴火が繰り返す場合には、地質調査に基づく情報や古文書調査から過去の噴火経歴を洗い

出し、噴火がどのような推移をたどるかについてある程度の予測が可能である。しかし完全なわけではない。例えば、雲仙火山の地質調査や古文書調査は1990年の噴火前まで多く行われていた。しかし、普賢岳の噴火開始時に溶岩ドームが崩れて火砕流が発生する危険性を指摘できた科学者はいなかった。ここでは直近の噴火(1792年)で溶岩流の山腹流出のみが起きた事件が背景にあった。また、伊豆大島火山の1986年噴火ではカルデラ床とカルデラの外斜面にできた割れ目から噴火が起きた。大島火山には北西-南東に走る割れ目火口から過去の噴火が起きたことは既知のことであったが、山頂火口以外で噴火が起こる可能性は低いと見なされていた<sup>10)</sup>。これは過去数百年間の噴火が中央火口の溶岩流だけであったためである。これらは直近の噴火経歴にのみ基づく噴火予知の危険性を示唆している。

階段図を適用することによって、噴出時期のおおよその検討がつくことのほか、いったん始まった噴火でどれくらいのマグマが噴出されるかを大雑把に予想することができる。一方、初期に放出された噴出物からその後の噴火様式の推移を予想することはある程度できる。普賢岳噴火ではマグマ物質が初期の水蒸気爆発で放出され、溶岩ドーム出現以前に、本格的なマグマ噴火に移行することが予測されていた<sup>8)</sup>。しかし、同様なマグマ物質は九重山の1995年噴火の際にも認められたがマグマ噴火には至らなかった。

### c) 防災への適用

このような火山毎の噴火様式の特性や規則正しい噴出率の関係をj用いて、現段階で科学的に十分な物理モデルを与えることは不可能である。また、これらを噴火予知に適用する段階に至っていない。しかし、これらの特徴を、噴火様式の推移予測や火山災害の軽減に活かすことは現時点でも十分に可能である。過去の噴火経歴を定量的に調べ上げ、火山災害履歴図やハザードマップ、階段図を火山毎に作成することが重要である。

## 4. 火山の土砂移動現象の数値シミュレーション

セントヘレンズ火山、ピナツポ火山、雲仙普賢岳等で噴火活動がみられ、火砕流等による一次的な災害をもたらしている<sup>11)</sup>。地盤表層部が火山噴出物からなる地域では地震や地球環境の変化(エルニーニョ、温暖化等)によるとみられる異常気象(集中豪雨、氷の融解等)に起因する土石流、火山泥流、岩

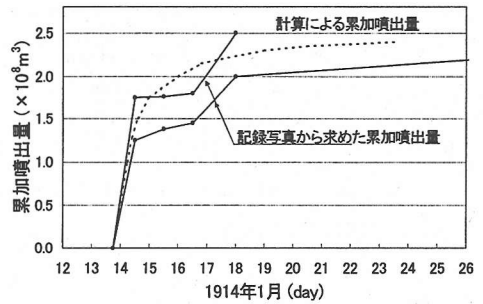
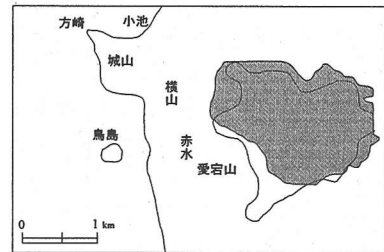
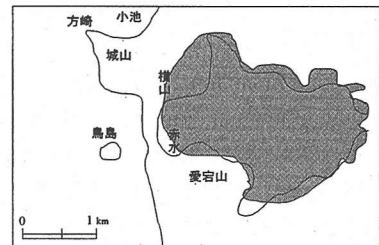


図-6 桜島大正溶岩流の累加噴出量

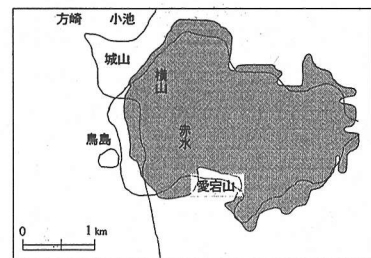
● 計算結果 ○ 石原らによる推定



(a) 14 時間後



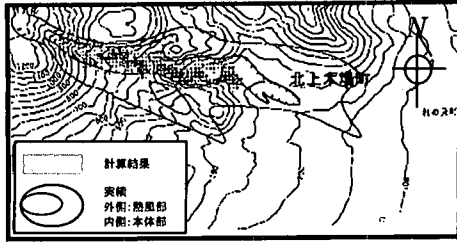
(b) 44 時間後



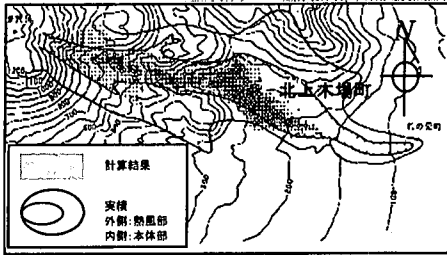
(c) 100 時間後

図-7 桜島大正溶岩の流下範囲の時間的変化

盤・岩石の斜面崩壊による二次的な災害が生じている<sup>12), 13)</sup>。これらの土砂移動現象を解析するための手法としては、火山噴出物を連続体とみなすものと



(a) 6月3日火砕流とその再現計算



(b) 6月8日火砕流とその再現計算

図-8 1991年6月雲仙・普賢岳で発生した火砕流の再現計算

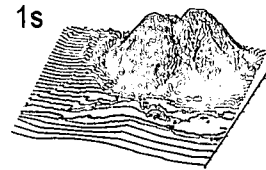
不連続体とみなすものとに大別される。これらのアプローチは流体を重視するか固体を重視するかの工学的な利用目的によって使い分けられるべきものである。本章ではこれらの手法の概要を紹介する。

### (1) 連続体力学からのアプローチ

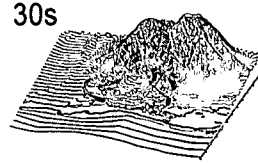
溶岩流や火砕流、泥流等のシミュレーション手法のひとつに、現象を支配する時間と空間に関する微分方程式系を数値積分する方法がある。このとき、これらの現象は変形しながら運動するので、擬塑性流体として取り扱われ、その流れの構成則が興味を中心となる<sup>14)</sup>。流れの構成則はマクロ的な運動に対応して求められ、たとえば離散的な構造を持つ火砕流や土石流・泥流を対象として得られた構成則は、空間平均された連続体モデルとしての意味を持っている。したがって、連続体モデルは粒子に比べ十分大きな空間にわたって空間積分したときに、積分領域全体の運動と一致している必要がある。また、数値計算の実行にあたっては、工学的な課題が現象の平面的なひろがりや挙動であることが多いこととその取扱の容易さから2次元浅水流方程式を支配方程式として用いることが多い。この手法はすでに防災対策を検討する際やハザードマップを作成する際に広く用いられており成果を上げている<sup>15)</sup>、<sup>16)</sup>、<sup>17)</sup>。

ここでは連続体モデルによる数値シミュレーションの実例を紹介する。

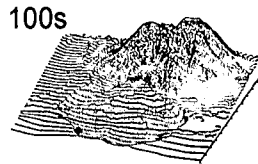
まず、溶岩流をとりあげ、桜島の大正溶岩に適用した例を示す<sup>18)</sup>。溶岩の材料特性については石原ら



(a) 崩壊1秒後



(b) 崩壊30秒後



(c) 崩壊100秒後

(d) 有明海への土塊の突入による津波の形成と伝播

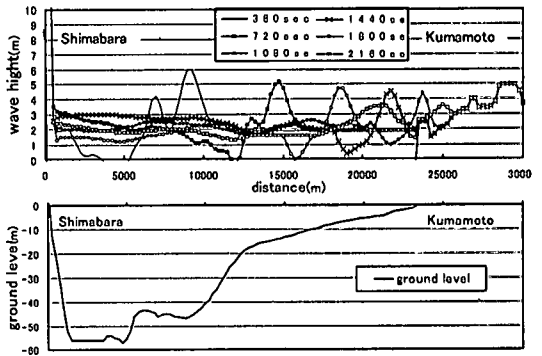


図-9 眉山崩壊と有明海への突入による津波の形成伝播

による成果が用いられている<sup>19)</sup>。数値シミュレーションに必要な溶岩の供給は、同一の物性を持つ溶岩がマグマだまりから火道を通してモデル化されている<sup>18)</sup>。石原ら<sup>19)</sup>により記録写真から推定された火口からの溶岩の噴出量との比較が図-6に示されているが、両者は極めてよい一致を見ている。

図-7に数値シミュレーション結果と石原らによる記録写真からの推定流下範囲の比較が示されているが、両者がよく一致していることが分かる。

1991年6月3日の42名もの被害者を出した雲仙普賢岳の火砕流における数値シミュレーション結果を示す<sup>20)</sup>、<sup>21)</sup>。図-8にシミュレーションから得られた火砕流の到達範囲と実績との比較が示されているが、これらの成果がその後の溶岩ドームの成長に応じて作成された火砕流ハザードマップの検討に生かされた<sup>18)</sup>。

火山活動に伴う火砕流や山体崩壊は直接的に山麓を中心とする集落等に壊滅的な被害をもたらすが、そのような火山が海域などの水域に隣接していると大量の土砂が水域に突入することにより津波状の段波を生じることがある。1792年に眉山崩壊により生じた通称島原大変肥後迷惑と呼ばれる災害はその典型的な例であろう。図-9には眉山の崩壊から有明海での段波の形成と伝播について計算を行った例が示されているが<sup>22), 23), 24), 25)</sup>、このような複雑な現象に対しても連続体モデルによる数値シミュレーションは比較的容易に適用することができる。

その他にも、泥流<sup>26)</sup>や土石流<sup>27)</sup>に関するシミュレーションも数多く行われている。

現在の連続体モデルによる数値シミュレーション技術のレベルは一応の計算が可能という段階にあるといえよう。しかし、たとえば、実用的なレベルでの火砕流や土石流等の数値シミュレーションでは均一粒径しか扱えない。したがって、実際に計算条件を設定する際には流れを支配する代表粒径に関する力学的・物理学的考察が重要なキーポイントの一つとなる。また、大規模崩壊土塊の滑動のように現象によってはそのメカニズムが十分な精度で解明されたとはいえないものもあり、これらの問題についての基礎研究のさらなる進展が必要である。また、支配方程式に平面2次元浅水流方程式を用いているため、現象によっては、たとえば溶岩トンネルの形成とその後の溶岩の流出過程のような計算ができない。

一方、数値シミュレーションを行うには計算に必要な数多くの物理的パラメータを定める必要がある。そのための調査法および計算条件の設定法と計算結果の評価法に関する基本的な考え方等、現場に適用する際の諸問題についてもさらなる検討と経験の蓄積が必要である。

## (2) 不連続体としての火砕流、土石流、火山泥流の解析

火砕流、土石流、火山泥流は岩塊・土塊（固体）とそれらの間隙を満たす水蒸気・ガス（気体）、間隙水（液体）からなる多相混合体である。火砕流では気体の温度依存特性が挙動の解析に重要であり、土石流、火山泥流では固体と液体との相互作用特性が重要である。

多相混合体を不連続体とみなす手法の一つに、離散要素法(Discrete Element Method, DEM)がある<sup>28)</sup>。離散要素法には固体を剛体、弾性体とみなすもの、固体粒子間にバネ、ダッシュポット、スライダーを入れるものなど多くのモデルが提案されている<sup>29)</sup>。

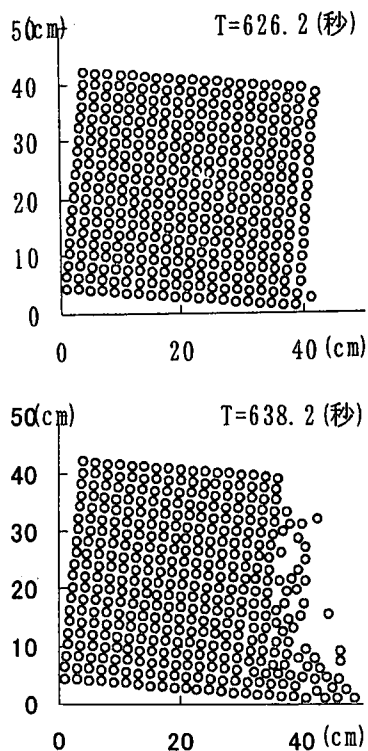


図-10 数値実験結果の一例

このような土砂移動現象を不連続体とみなしての数値シミュレーションは砂防ダム、橋脚、河川、堤防、河床への衝撃力、土砂の堆積挙動、落石挙動等を評価するために有効である。ここでは、北村らが提案している最も単純なモデル<sup>30)</sup>を紹介する。

図-10は、斜面上に堆積した多相混合体（例えば、火山堆積物）を想定した400個の粒子集合体（円板）の二次元流れのシミュレーション結果の一部を示している<sup>31)</sup>。すなわち、粒子間力のある条件下で低下させていった場合、626.2秒後に崩壊が始まることと638.2秒後の崩壊状態を示している。この計算は実際の火山活動とは直接的に関係していないが、このアプローチは降雨に伴う斜面崩壊のすべり面の位置・形状、あるいは土石流・火山泥流の開始・流動・堆積状況を解析する方法として発展する可能性がある。

## 5. 火山ハザードマップの現状と新たな展開

火山ハザードマップは、日本語で「火山災害予測図」と呼ばれ、火山が災害を及ぼす可能性のある範囲を示す地図である。火山ハザードマップには、災

害事象とその程度、あるいは災害危険度が表現されていなければならない。当該火山の噴火の特質を良く知った上で災害予測を行い、災害の危険区域と危険度を評価することが大切である。活火山地域の防災対策を考える上で、ハザードマップは次のように位置付けられる。

①火山ハザードマップは、対象とする火山で発生が予想されるあらゆる火山現象について、その発生確率、規模、影響範囲、時系列的变化等を分析・予測したもので、防災対策を考える上での基本（前提）条件となるものである。

②火山ハザードマップは、単なるマップ（地図）ではなく、シミュレーション等各種の解析成果を含んでおり、ハード対策としての施設の種類の規模、設置位置等の決定に活用するとともに、避難計画などのソフト対策にも活用されるものである。

以上の位置付けをふまえて、海外と日本の火山ハザードマップの現状について紹介する。

### （1）海外の火山ハザードマップの現状

海外では、すでに20数年前から火山ハザードマップが作成されている。その災害危険度の表示方法を見ると、次のように分けられる。

#### a) 現象別表示法

火山噴火に伴って発生する溶岩流・火砕流・泥流・降灰等の危険区域を個別に表示するもので、ネバド・デル・ルイス火山（コロンビア、図-11）やセントヘレンズ火山（アメリカ、図-12）、マヨン火山（フィリピン）などに代表される。

#### b) 全体表示法

複合する災害現象をまとめて表示するもので、その呼び方は国によって次のように異なる。例えば、インドネシアの立ち入り禁止区域・第1種危険区域・第2種危険区域等、ニュージーランドの最重要危険域、危険区域等がある。

#### c) その他、避難状況等

特殊なものとして、溶岩流だけを扱ったもの（マイウ島等）や、降下火砕物だけを対象としたもの等がある。避難情報図をつけているものは、ラバウル島やカルカル島（パプアニューギニア）が代表例に挙げられる。

### （2）日本の火山ハザードマップの現状

日本で最初に公開された火山ハザードマップは、1983年に北海道の森町を中心とした駒ヶ岳火山防災会議協議会が火山噴火地域防災計画図の中で表示した危険区域図であった。続いて北海道の上富良野町が1986年に、美瑛町が1987年に十勝岳の緊急避

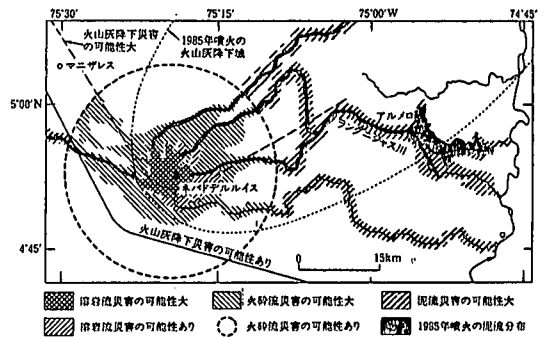


図-11 ネバド・デル・ルイス火山のハザードマップ<sup>32)</sup>

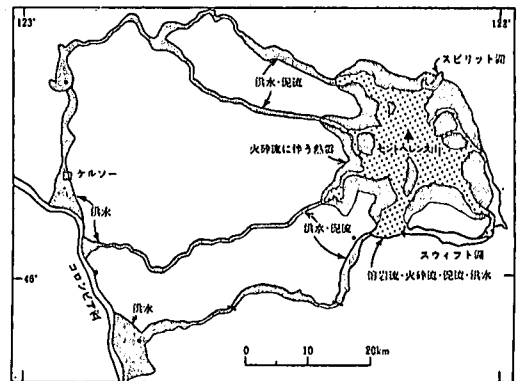


図-12 セントヘレンズ火山のハザードマップ

難図を作成した。

近年一般的になってきた火山ハザードマップ作成のための指針は、1992年に国土庁が策定した「火山噴火災害予測図作成指針」<sup>33)</sup>と1992年に建設省が策定した「火山災害予想区域図作成指針(案)」<sup>34)</sup>がある。両者の大きな違いは、前者が一般住民に活用されるという点である。さらに、前者の作成目的は、予測図を作成することにより、①地域防災計画への反映、②土地利用規制等の行政施策、③住民等に対する啓発等の対策のためであるが、後者の目的は火山砂防事業および火山噴火警戒避難対策事業によるハード、ソフト両面の対策を効果的かつ円滑に実施することにある。

一般的に火山ハザードマップとは、住民用のマップのことを指す。日本ではすでに表-1に示すように18火山で周辺住民に配布されている。マップの表示方法はまちまちであるが、いずれもイラスト等を用いて噴火や前兆現象、噴火時の防災行動や心構え、非常持ち出し品リスト、防災関連施設等をわかりやすく示している。またマップの体裁もポスター型(掲示用)、折りたたみ地図型(保存用)、冊子型(保存



表-1 日本で公表された火山ハザードマップ<sup>35)</sup>

作成年度	火山名	作成機関	名称
1985年	北海道駒ヶ岳	駒ヶ岳火山防災会議協議会	駒ヶ岳火山噴火災害危険区域図
1986年	十勝岳	北海道上富良野町	かみふらの町防災計画緊急避難図
1987年	十勝岳	北海道美瑛町	びえい町防災計画緊急避難図
1989年	十勝岳	北海道上富良野町	十勝岳噴火対策緊急避難図
1991年	雲仙岳	(財)砂防・地すべり技術センター	雲仙岳火山災害予想区域図
1992年	霧島山火山	高原油	霧島山防災の心得
1993年	三宅島	東京都三宅村	三宅島火山防災マップ
	伊豆大島	東京都大島町	伊豆大島火山防災マップ
	桜島	鹿児島市, 垂水市, 桜島町	桜島火山防災マップ 桜島火山防災ポケットブック
	樽前山	苫小牧市, 千歳市, 恵庭市, 白老町	樽前山火山防災マップ
	雲仙岳	雲仙復興工事事務所, 島原市, 深江町	防災マップ
1994年	北海道駒ヶ岳	駒ヶ岳火山防災会議協議会	みんなの防災ハンドブック 駒ヶ岳
	阿蘇山	一の宮町ほか9町村と阿蘇広域行政事務組合	阿蘇火山噴火災害危険区域予測図
	浅間山	長野県佐久市ほか3市町, 群馬県長野原町, 嬬恋村	浅間山火山砂防マップ
	草津白根山	草津町, 長野原村, 六合村	草津白根火山防災マップ
1995年	有珠山	伊達市, 虻田町, 壮瞥町, 豊浦町, 洞爺村	有珠山火山防災マップ
	霧島山火山	鹿児島県霧島町ほか3町, 宮崎県都城市ほか3市町	霧島山火山防災マップ
1997年	薩摩硫黄島	鹿児島県	火山災害危険区域予測図
	永良部島	"	"
	中之島	"	"
	諏訪之瀬島	"	"
1998年	岩手山	建設省及び岩手県	岩手山火山防災マップ
1999年	雌阿寒岳	阿寒町	雌阿寒岳ハザードマップ

(3) GISの利活用による新たな展開

GIS (Geographic Information System) は、「地理情報システム」と呼ばれ、さまざまなデータ (情報) と地図データと結び付けて扱うしくみの全体をいう。

火山ハザードマップは、ペーパー時代からコンピューターで管理する時代へと変わりつつあり、その中心に位置するのがGISハザードマップである。

a) GISデータベースとその活用

対象火山周辺の地形情報、土地利用情報、道路ネットワーク情報、行政情報等を図形情報として入力し、属性データとして家屋や人口、行政機関、避難場所等を入力することによってデータベースとしていつでも利用できる (図-13 参照)。

さらに、デジタル化した地形情報を用い、各種災害現象のシミュレーションが容易に可能で、シミュレーション結果のデータと保全対象の重ね合わせにより、時々刻々変化する状況が画像で表現できる。

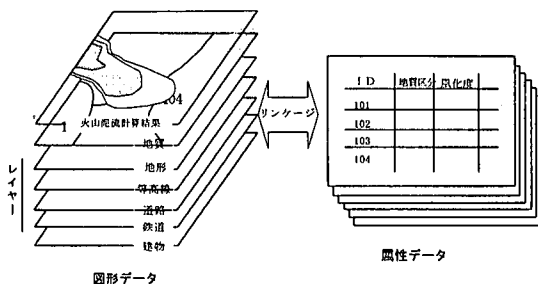


図-13 火山泥流に対する避難のためのGISのリンケージ

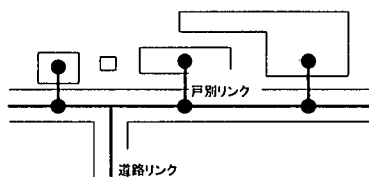


図-14 避難解析のための戸別リンクと道路リンク

同時に各現象に伴う被害量の算定も容易にできる。さらに対象火山の噴火形態の時系列的变化に対応し、行政が対応すべき情報伝達や避難状況のシミュレーションがGIS上で可能となる。これらをもとに避難計画の立案や訓練が実施できるようになる。

#### b) GISのハザードマップ普及や広報による活用

従来、ハザードマップは紙として印刷され、住民に配布され、普及してきた。この場合、ハザードマップの更新は、次の印刷を待つしかないため、リアルタイム性という点で問題があった。しかし、GISによりハザードマップを作成すると、Web GISの普及により、インターネットで火山のハザードマップが保全対象や噴火形態の変化に応じたよりリアルタイムな形で入手することが可能ようになる。さらに、上記に示すように、避難場所、避難経路等も明示されるため、効果的なハザードマップの普及が実現することになる。

## 6. 避難シミュレーション

災害時の避難計画を避難シミュレーションにより解析評価する研究は、高橋ら<sup>36)</sup>や高棹ら<sup>37)</sup>の成果が知られている。これらは数値シミュレーションによる時間別の氾濫区域の変化を避難経路選択に反映させた避難計算の有効性を示し、個人の災害意識、経験等の違いをモデル化して避難行動を再現する避難シミュレーション手法を開発している。

この手法をふまえ、地理情報システム(GIS)の図形情報と属性情報のリンケージデータベース(図-13)、演算、表現機能などの特徴を生かし、災害時の避難時間を計算する手法、避難計画の分析および評価手法について示す。ここでは、1926年の十勝岳の噴火による大正泥流により、甚大な被害を受けた北海道上富良野町を事例に報告する。

### (1) GISデータベースの構築

GISデータベースは、都市計画図(1:2500)、富良野町基本図(1:5000)をもとに構築した。データベースは、まず図-14のように道路ネットワークを作成し、道路のリンクとノードの属性テーブルを作成し、戸別リンクに住民の男女別・年齢階級別人数構成をノード属性として入力する必要がある。表-2に構築したネットワークの概要を示す。

さらに、道路ネットワーク以外の図形情報として、等高線、河川、鉄道、建物等を基盤データとして入力し、19座標第七系で座標を統一した。表-3に避難解析用GISデータの一覧を示す。

表-2 上富良野道路ネットワーク概要

道路リンク数	10,258
ノード数	8,040
住宅ノード数	2,744
世帯数	4,390
住民総数	10,996

表-3 避難解析のためのGISデータ一覧

入力図形	データ内容	データ出典
道路中心線	管理区分、除雪状況など	都市計画図、国土基本図など
住宅ノード	世帯数、居住者数、年齢構成など	住民台帳
避難所ノード	屋外・屋内、収容人数など	火山噴火地域防災計画
等高線	標高	1:2,500都市計画図 1:5,000国土基本図
標高点	標高	
道路線		
河川・湖沼		
公共施設敷地	学校、公園	
行政界	町丁大字名	
鉄道		
建物		

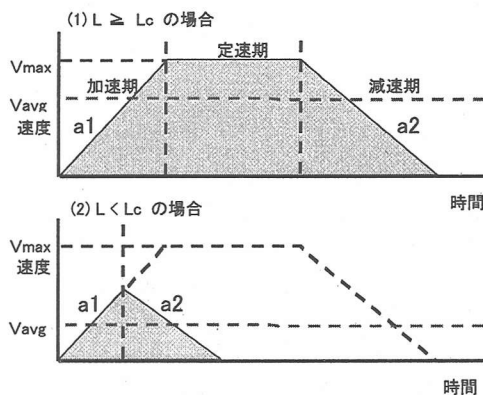


図-15 平均速度計算モデル

表-4 避難システム評価の指標

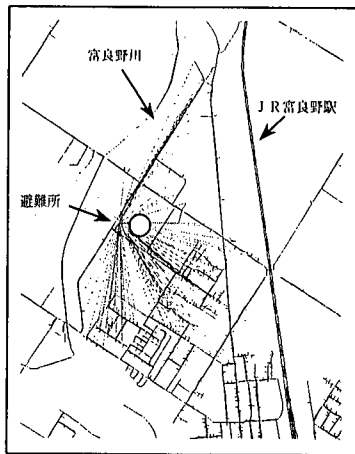
DET (避難時間)	Delay (混雑度)	避難システムの評価
大	大	避難経路・避難所とも不十分である。
大	小	避難経路は十分に確保されているが、避難所の数が不足または配置に偏りがある。
小	大	一時的な混雑は見られ、避難経路に改善の余地がある。
小	小	避難経路の状況・避難所の数・配置とも適切である。

### (2) 避難走向速度の算定

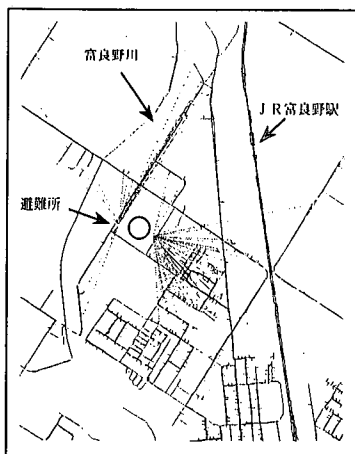
避難場所が近くになく遠隔地への避難が必要になる場合、さらに自動車の利用が日常化している地方都市の場合、災害の種類によっては自動車による避難行動が十分考えられるため、避難計算では歩行避難と自動車避難の両ケースについて検討することが重要である。

#### a) 歩行避難速度の算定

災害時の歩行速度は避難時の環境、避難の形態、災害種類等から影響を受ける。この研究では、上富良野町の協力を得て、避難訓練時のビデオにより、



計画による避難区域



計算による避難区域  
(入口2箇所別々に配置)

図-16 計画と計算による避難所への人数の割当

表-5 最短距離割り当ての効果

	最遅避難時間	単位	平均避難時間	単位
避難計画	2,367	s	492	s/人
計算結果	2,125	s	347	s/人
時間差	242	s	145	s/人
計算により避難先が異なる世帯			967	世帯
計算により避難先が異なる住民			2,749	人
2749人の計算による平均短縮時間			311	s/人
2749人の計算による最大短縮時間			1,688	s

避難歩行時間を計測した。対象は82グループ、209人である。この結果によると、平均歩行速度は1.26m/sであり、これらの平均歩行速度は高橋ら<sup>36)</sup>とほぼ同じ値である。

### b) 自動車による避難速度の算定

一般に、都市市街地のような多数の短いリンクで構成される区間の自動車走行速度の特性に関する研究はほとんど事例がない。そこで、これらを明らかにするため、自動車走行実験により、短いリンクの走行距離に対する平均走行速度を計算するモデルが開発されている<sup>38)</sup>(図-15)。

この実験によれば、基本走行パターンは加速期・定速期・減速期の3つの段階に分けることができ、走行距離が短い場合には加速期・減速期の2つの段階のみとなることが明らかとなった。そこで、実験の結果得られた加速・減速パターンを直線近似し、任意の運転区間の平均速度を区間長の関数として定式化し、モデルを開発した。このモデルにより、上富良野町を例に平均速度計算モデルと比較し、このモデルの方が現実的な走行速度を算出可能なことが明らかになった。

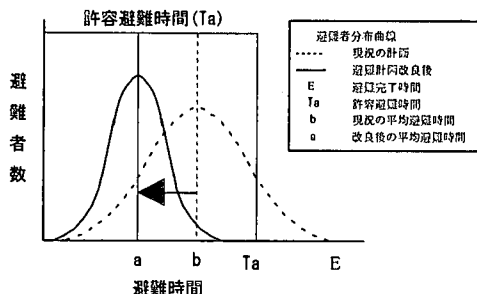


図-17 避難者数と避難時間の関係(概念図)

### (3) 避難行動のモデル化とシミュレーションプログラムの開発

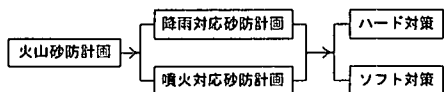
本研究では「避難すべきかどうか」、「どこに避難すればよいか」等の災害時の住民が行う迷いと判断はないものとし、「住民は避難勧告と同時に避難を開始し、最寄りの避難所へ最短経路を通して移動し、避難所ノードにたどり着いた時点をもって避難完了とする」という仮定のもとに、避難解析の検討を実施した。

#### a) 最適避難所および避難経路の選定手法

最適避難所および避難経路は、GISにより構築したネットワーク情報をもとに、P-Median問題として最短距離法により求めた。P-Medianはセンター位置(避難所)から需要位置(住民世帯)までの移動費用(避難時間)の総和が最小になるようにP箇所のセンターを配置する問題である。

#### b) 動的避難時間の計算プログラムの開発

配分の問題として避難時間を解析するには、避難の混雑度が大きな意味を持つ。そこで、避難計画の評価のため、静的避難時間(SET)と動的避難時間(DET)を検討し、その差としての混雑(Delay)の



降雨対応砂防計画：降雨による土石流等の土砂移動による災害の

防止軽減

噴火対応砂防計画：噴火に伴う火山泥流等の土砂移動による災害の

防止軽減

ハード対策：砂防施設を配置し、流出土砂の捕捉・導流などによる対策

ソフト対策：土砂移動発生監視・情報提供等による警戒避難対策の支援

図-18 火山砂防の基本フレーム<sup>41)</sup>

概念を導入した(表-4)。静的避難時間 (SET) とは、最短経路を所定の速度で避難した場合の総経路長に対する単純な移動時間である。動的避難時間 (DET) とは歩行の場合には群衆密度の増加に伴う速度の低下と疲労による歩行割引率<sup>39)</sup>を考慮した避難時間、自動車の場合には交通容量<sup>40)</sup>を考慮して経路に進出できる台数を制限した避難時間のことである。この混雑 (Delay) の概念により避難計画や避難インフラの偏りや避難の円滑性を評価することが可能である。

#### (4) 最適計算によるケーススタディー

上富良野町は地域防災計画で 31 ヲ所の指定避難所を定めている。このうち 1996 年 2 月 29 日実施の防災訓練で対象となった 18 ヲ所の避難所を対象に、作成したモデルで避難シミュレーション計算を実施して、避難計画と計算結果を比較した。

##### a) 最適避難所の検討

上富良野町の市街地を対象に、地域防災計画による避難計画と計算による避難者の配置を比較すると、避難計画人数 778 人のうち、計算で最短と割り当てられた人数は 441 名であった。図-16 は避難計画で最大収容人数の西小学校を例に、避難計画と計算による避難者の配置を図示したものである。避難計画で西小学校の南部に割り当てられている避難者には、西小学校よりも近い避難所があることになる。

##### b) 最適避難経路の検討

西小学校への避難の場合、避難計画では最遅静的避難時間 (SET) が 670.1 秒、最遅動的避難時間 (DET) が 671.3 秒で、混雑 (Delay) は 1.2 秒であった。また、平均避難時間にしても、SET が 451.6 秒、DET が 456.8 秒で、Delay は約 5.2 秒となった。

これらの Delay は避難時間の 0.2 ~ 1.1% に当たる。一方、計算により最短経路による割り当ての場合には、最遅延避難時間は避難計画と同じで、平均避難時間は SET が 365.9 秒、DET が 368.8 秒で、Delay

表-6 火山砂防計画で対象とする土砂移動現象の特性

土砂移動現象	主な構成物質	運動の規定主要因	流速 (m/s)	流動深 (m)	土砂量 (m <sup>3</sup> )
溶岩流	溶岩	粘性	10 <sup>0</sup>	10 <sup>0</sup> ~10 <sup>1</sup>	~10 <sup>8</sup>
火砕流	軽石・溶岩塊 火山灰等の 粒子 + ガス	粒子の反発力 ガス圧力	10 <sup>1</sup> ~ 10 <sup>2</sup>	10 <sup>1</sup> ~ 10 <sup>2</sup>	~10 <sup>10</sup>
火山泥流	微細粒子 石礫 + 水 (大量の)	せん断力	~ 10 <sup>1</sup>	10 <sup>0</sup> ~ 10 <sup>1</sup>	~10 <sup>7</sup>
降雨型土砂流	微細粒子 石礫 + 水	せん断力	~ 10 <sup>1</sup>	10 <sup>0</sup> ~ 10 <sup>1</sup>	~10 <sup>6</sup>

は 2.9 秒で 0.7% に当たる。したがって、これらの結果は、西小学校への避難の事例では、避難路等の避難インフラと住民の配置がバランスよく、あまり混雑が問題になることはなく、実用上問題はないことを示している。

#### c) 最短距離割り当ての避難の効果

上富良野町の危険区域の全住民 2,121 世帯、5,902 人を対象に、避難計画による避難時間と計算による避難時間を比較すると表-5 のようになる。

表-5 によると、避難時間を最短距離に適合するように避難割り当てを変更すると、避難計画と比較して最遅避難時間が 4 分 2 秒、平均避難時間が約 2 分 25 秒短縮される。さらに、その割り当てで避難先が異なるのが 967 世帯、2,749 人で、これらの平均短縮時間は約 5 分 11 秒/人、最大短縮時間が 28 分 8 秒避難計画という結果になった。これらの短縮時間は、泥流の発生後から危険区域に達する時間が実績や泥流数値計算によると約 20 分であることを考慮すると、非常に大きい。

#### (5) 避難計画の評価に関する提案

現在、避難計画は各地方自治体の地域防災計画に組み入れられている。このため、避難所や災害時に利用できる避難路が指定整備されていると、避難時間と避難者の関係は図-17 の破線のような分布になることが予想される。しかし、火山泥流災害の場合は、火山泥流が危険区域に到達する時間を過去の泥流の実績や泥流シミュレーション等から想定することが可能なため、許容避難時間 (Ta) を設定することができる。

しかし、避難時間の分布が許容避難時間を上回っている場合には避難所や避難路等の避難施設の充実により、避難者と避難時間の分布を図-17 の実線に示すように向上させることが可能である。

このようにして、災害時の避難というソフト対策が可能になり、避難計画を評価することが可能にな

る。このような避難のためのインフラ施設は、災害時以外は地域生活に密着した活用が可能であり、災害時は避難のための施設として使用可能であり、その投資効果は非常に高いことになる。

## 7. 火山砂防施設の計画と設計

火山防災施設は広義には避難壕や避難道路あるいは警戒避難のための観測・情報機器等も含む。土木工学的には火山山麓における土砂災害防止軽減のための火山砂防施設が代表的な構造物である。

火山砂防施設は、火山噴火に伴う土砂移動現象に対して、流出土砂量の低減・流下方向の変更等によって、保全対象地域の土砂災害の防止・軽減を図るために配置される。しかし火山噴火は、発生場所・現象・規模を特定しにくいいため、全ての現象に対して予防的に砂防施設を設置することは困難である。そこで、特定できない災害現象に対しては、現象のモニタリングや警戒避難対策等のいわゆるソフトな対策がとられる。一方、噴火に伴う土砂災害はその規模が降雨による土砂災害より大きくなることが多く、大規模な施設が要求されるが、その効果にも限りがあることに注意を要する。

### (1) 火山砂防の概念

火山地域における災害は様々な形態をとり、複合的であることが多い。これに対応するため火山砂防基本計画が検討され、その内容に基づいて施設計画等が進められる。

火山砂防基本計画とは、火山地域における降雨あるいは噴火に起因した土砂災害を防止・軽減することを目的に実施する砂防事業を、計画的・経済的に進めるため、整備目標や土砂処理方法等の基本方針を整理したものである(図-18)。

火山砂防計画で対象としている土砂移動現象は、降雨による土石流の他、火砕流や火山泥流、溶岩流等、多種多様であり、移動土砂量が大規模で、特に噴火期間中や直後に連続的に発生する等の特徴がある。そのため、砂防施設による土砂コントロールに限界があり、すべての土砂移動を抑制することはできない。

砂防計画では計画対象土砂量を設定して、これらの処理を図る計画を立てる。

従来の砂防計画では、生起確率で評価される想定規模降雨による土砂移動量を推定し、それを砂防施設で調節・抑制することを前提に、計画対象土砂量を設定している。

表-7 砂防施設の種類と機能

砂防施設の機能 \ 砂防施設の種類	土砂生産抑制	流出土砂調節	流出土砂捕捉	流路固定	流向制御	氾らん防止
山腹工	○	-	-	-	-	-
床固工	○	○	△	○	-	-
砂防ダム	○	○	○	○	○	△
遊砂地	-	△	○	○	△	○
流路工・導流工	-	-	-	○	○	○
導流堤	-	-	-	-	○	○

○：主たる機能、△：場合によって期待される機能

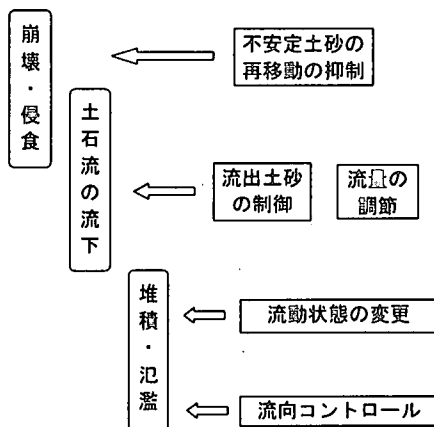


図-19 土砂処理計画の概念

火山砂防では、降雨対応と噴火対応の双方でそれぞれ、計画対象土砂量が設定される。

①降雨対応砂防計画：大規模降雨時の土砂量+（特に噴火中／直後の連続発生土砂量）

②噴火対応砂防計画：想定される土砂移動現象毎に、噴火実績等に基づいて計画対象土砂量を設定する。すなわち、複数の現象が発生すると想定されれば、複数の計画対象土砂量が存在することになる。

また、火山砂防施設で対象とするのは、基本的に「ながれ」現象が主体であるが、それぞれの流動メカニズムや挙動特性が異なる(表-6)。

このような土砂移動現象ごとの流動特性の相違は、砂防施設の計画・設計時におけるターゲットを決めにくくしている原因の一つである。

### (2) 火山砂防施設計画

火山砂防基本計画に基づいて直接土砂処理を行う砂防施設計画が立てられる。

砂防施設による土砂処理は、図-19のような方法によることが一般である。

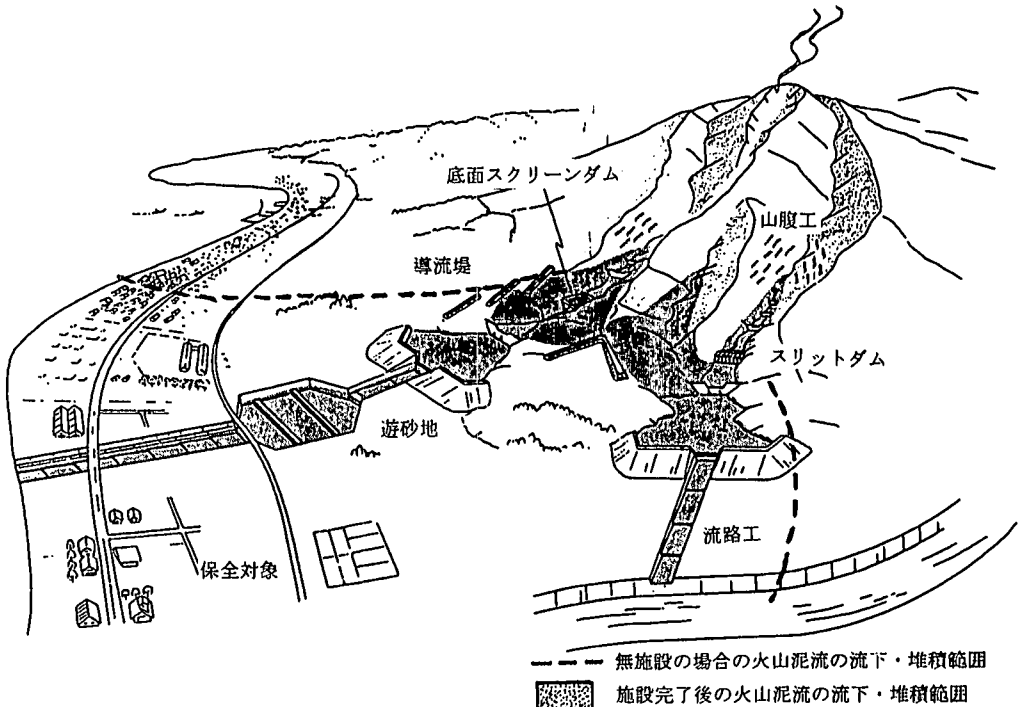


図-20 火山泥流対策砂防施設の配置概念<sup>41)</sup>

### a) 火山砂防施設の種類と機能

火山砂防施設は、従来型の砂防施設と類似した構造物であるが、対象とする土砂移動規模に応じて大規模となることが多い。表-7 に主要な砂防施設の種類と機能を列挙する。

### b) 施設配置計画

計画の対象とする土砂移動現象の特徴に合わせた施設効果を考慮するため、各現象ごとに配置方法が異なる(図-20 に代表例を示す)。

### c) 計画土砂収支

施設効果は基本的には土砂量コントロールであるため、土砂収支を計算して所定の土砂量を処理できるかどうかチェックする。ただし、量的検討のみでは詳細な確認ができないため、数値シミュレーション等によって土砂処理状況をチェックする。

ただし、数値シミュレーションにも次のような課題が残されている。

①土砂移動モデルが十分に解明されていない現象に対する施設効果の把握に課題がある。例えば火砕流対策施設では、粒子の停止条件が未解明であるため、施設配置後の計算結果を定量的に解釈することが困難である。

②2次元シミュレーションでは、地形量をメッシュデータで取り扱い、微細な地形変化はメッシュサイズに規定されて表現できない。とくに、複雑な構造をもつスリットダムは形状が表しにくいいため、その効果は別の方法で把握する必要がある。

③数値計算は初期条件によって結果が左右され、複雑な流出過程が想定される火山災害時の想定条件によって施設効果が異なる。そのため、適切な計画シナリオを設定することが要求される<sup>42)</sup>。

## (3) 火山砂防施設の設計と課題

### a) 多機能型火山砂防施設の設計外力

火山砂防施設が対象とする異なる複数の土砂移動現象に対処するためには、土砂処理場の位置付けを考慮する必要がある。

その場合の構造物の設計外力設定手法が未確定である。複数の土砂移動現象を対象とする砂防施設の計算に用いる外力(流体力、水圧、土圧、地震力等)は、通常最大値を採用すべきであるが、それぞれの現象ごとに発生期待値が異なるため、これらを総合した適正な設計外力を設定することが難しい。

火山噴出物はその組成にもよるが、土木材料となり得る。実際に雲仙普賢岳では、現地発生材料を用いた砂防構造物が施工されている。その設計方法については技術基準が整備されておらず、現場独自の対応で進めているが、構造物そのものの議論と同時に設計外力についても考慮すべき点が多い。

### b) 火山砂防施設の維持管理と機能保全

①土砂移動が集中的に発生する期間の捕捉容量確保; 噴火活動が継続した場合、あらかじめ準備した砂防施設の土砂捕捉容量が不足することが予想される。捕捉容量の確保は重要な課題であり、砂防ダム

や遊砂地堆砂の掘削(除石)工の実施や、応急的な遊砂地の建設などが実行可能な方法になる<sup>43)</sup>。後者は広大な土地の準備が必要であり、土地利用の高度化した地域では困難である。除石工のタイミングと掘削土砂量は、連続的な流出土砂量予測に基づいて、いくつかのパターンを想定する必要がある。雲仙普賢岳の例では、実績降雨パターンに基づく土砂量予測から必要除石量や限界等が検討された<sup>44)</sup>。

②土砂掘削方法と作業効率の向上；通常の土砂掘削方法はブルドーザ・バックホウ・ダンプトラックの組合せにより、集土・積込・運搬のサイクルで実行される。これらの土工機械の能力が作業効率を支配するが、緊急時に大量の土砂を掘削運搬するためには、より効率的な工法を検討する必要がある。

③土捨場の確保；掘削土砂の処分場の確保の問題は通常の土工作业でも生じるが、災害時の緊急的な土捨場の確保はより深刻な問題である。土地提供者や環境悪化等の問題についての事前調整が必要であろう。

#### c) 火山活動静穏期の利活用

火山砂防施設は、非噴火期間には一見無用の施設と見られがちである。もともと防災施設のもつ宿命ではあるが、公共事業として実施する以上は、複合的な効用をもたらす施設であることが望まれる。この問題については、次のような視点が必要である。

①恒久施設として施工される火山砂防施設が、火山活動期と静穏期の推移の中で位置付けられる必要がある。そのためには、過去の活動履歴に基づく噴火発生間隔が参考となる。例えば、北海道の有珠山では20～30年間隔の噴火が予想されており、砂防計画や施設の規模はこれらに対応して検討される必要性がある。

②火山砂防施設は大規模となる場合が多く、施設の配置による環境・景観等への影響についても考慮すべきである。特に活火山地域は名勝地が多く、静穏期の観光事業との連携など、積極的な対応法も考えられる。

③ハード対策の実施のみですべての土砂移動現象に対して、安全が図れるわけではない。砂防施設の効果には限界があるので、危険区域は土地利用規制によって非居住区域とすることが望まれる。その際に地域開発と振興(復興)との関連を十分に議論すべきである。また、法制度の整備も望まれる。

砂防施設は防災施設であると同時に公共施設でもある。特に土砂移動の生じにくい静穏期には、これらの利活用に関する計画を住民参加のもとで検討したい。

#### (4) 今後の展望

火山砂防は、広義の火山防災の中に含まれる工学的な分野での防災事業とみなすことができる。ソフト対策は防災消防分野との連携が必要であるし、社会的・心理学的な対応も組み込まねば、万全を期すことは困難であろう。現在の公共事業体系の中では、ソフト対策について火山砂防は補助(支援)的な立場でしかない。ハード対策に関しても、大噴火時のような輻輳した災害現象に対する効果には限界がある。

当然ながら、火山砂防事業の実施によって相当の被害軽減が図られる場合もあるし、またそうでないこともある。この問題を解決するためには地域性や特殊性の克服が重要であろう。また総合的な火山防災の一翼を担うためには、ここで論じた課題の解決を図ることが重要である。

## 8. 火山防災対策の体系化

### (1) フェイズと事態想定

火山災害は、個々の火山によって、また同一の火山でも噴火の形態が著しく異なることがあるため、災害の展開は一定のシナリオで類似化しにくいという特色を有している。本章では、過去に発生した火山災害の事例を踏まえ、火山災害の展開を時間軸で捉え5つのフェイズに区分し、各フェイズごとに要求される防災活動から事前に計画あるいは整備すべき火山防災対策の全容の体系化を試みる。

体系化した試案表-8は、1998年11月29日に開かれた第5回岩手山火山災害対策検討委員会で公表された試案を若干改訂したものである。

#### a) 活動活発期

火山観測データから、普段とは異なる活動の活発化を読みとることができる現象が表れる時期である。この時期は予想される災害に対してあらゆる準備を行なう時期であり、当然、被害を軽減するための防災対策を実施する期間でもある。具体的には、火山の観測はもとより、起こりうる事態の想定や地域住民への啓発・教育活動等が必要になる。

#### b) 異常逼迫期

観測データに急激な異常が継続的に表れ、場合によっては噴煙、火山灰の噴出等が観測され、噴火の危険性が高まっている時期である。この時期は、いつ噴火をするか分からないことから、各種の観測計を強化したり、入山規制などの活動が必要になる。

#### c) 緊急避難期

噴火現象に伴い、噴石、火砕流、溶岩流、泥流等

が発生し、人体が危険にさらされるため、避難を余儀なくされる時期である。つまり、直接的な被害が発生する危険性の高い時期である。したがって、このフェイズでは、人的被害の発生を防ぐための対策が重要で、避難と医療活動を最重要対策と位置づけることができよう。これら2つの具体的な活動には、避難勧告地域や警戒区域の指定、避難勧告等の判断、避難情報の伝達、あるいは負傷者が発生したときの応急救護や後方医療機関への搬送等が含まれる。

#### d) 応急生活期

噴火現象の継続の有無に関わらず、被災者が発生している場合は、一日も早く応急生活を安定させなければならず、この時期を応急生活期と呼ぶことにする。この時期は応急的な生活の維持と恒久的な生活の再建に向けた準備が重要な活動になる。この時期の各種活動の成否が、生活再建の立ち上がりの時期とその内容を決定するために非常に大切な期間といえる。また、堆積した火山灰によって土石流が継続的に発生し、被害の拡大が予想される場合には、応急的な砂防事業が必要になる。

#### e) 生活再建期

噴火沈静の見通しができ、砂防計画等の防災事業の策定に伴い、具体的な生活再建のプログラムを作成する時期である。生活再建は、場合によっては災害前に居住していた場所に戻るケースと移転を余儀なくされるケースに分かれることが考えられる。この時期から、農地の復旧や本格的な砂防事業などが開始される。

これら5つのフェイズの時間的な設定は、噴火現象によって大きく異なるため、一律にはできない。しかし、災害全体は、おおよそこれらの5つの段階を経て推移することが考えられることから、事前対策の全容は、この段階ごとに検討を行うことによって整理できる。

### (2) 事前対策の項目と内容

フェイズごとに必要となる活動に対応する事前対策を検討するために、以下の4つの対策項目を設定した。

#### a) 施設・設備系

この対策は、通信系の設備や道路・建築系の、いわゆるハード系の対策である。具体的な例としては、避難対策関係の火山の観測システムや避難路・シェルター、2次的な被害拡大防止対策の砂防計画等が含まれる。

#### b) 調査系

調査は、防災計画の策定を始めとしてすべての防災対策の前提となる作業である。特に噴火現象の予

測は、防災対策全般の基本となる重要な調査である。つまり、防災対策の基本方針を決めるためには、噴火がどのような形態で発生し、その影響がどの範囲まで及ぶかを予測（ハザードマップ）し、発生する被害を想定しておく必要がある。災害は、発生する季節、時間によって大きく左右されることから、起こりうる事態を時間軸で想定した災害シナリオを策定することが望まれる。

発災直後に必要になる応急対策を円滑に行うためには、あらかじめ地域内の防災力を把握しておくことが重要である。例えば、冬期に備え暖房設備のある避難所の選定と収容可能人数、道路に堆積した土砂を除去するための重機の保有先、医療機関別専門別医師数、暖房器具の流通ストック、水・食料の調達先等が挙げられる。

的確な防災対策を実施するためには、住民の危機意識の実態や行政がPRしている対策についての周知度調査も必要である。さらに噴火後の砂防事業等の公共事業に備えるためには、公共事業想定区域の地権者調査等も行っておくべきである。

#### c) 対応計画系

対応計画は、発災時の被害軽減や応急活動を迅速に行うためのルールおよびシステムである。例えば、観測情報に基づいた避難情報の伝達のシステム、避難対象区域の指定、避難場所とその割り当て区域、負傷者に対する医療計画、被害調査の方法、避難場所の運営計画、水・食料の調達配給計画、緊急物資等の輸送計画、交通規制計画等が対応計画に該当する。

#### d) 啓発・訓練系

地域の防災力を高めるためには、災害に対する住民の意識や知識を向上させることが重要である。このためには、火山災害の噴火のメカニズムや二次的な被害を軽減する上で必要な砂防事業等の防災事業に対する正しい知識を住民に学習してもらうことが不可欠になる。また、行政の作成した避難計画に当たって訓練を行い、訓練を通じて具体的な避難行動を知ってもらう必要もある。

### (3) 体系化に向けた展望

表-8から防災対策を体系化する方法としては、各フェイズ別に整理する方法、また、事前対策の4項目毎に整理する方法、さらにはフェイズやハード・ソフトの分類に関わらず、情報、避難、医療、避難所、物資というように各応急活動別に体系化する等いろいろな方法が考えられる。

この体系化については、防災対策を実施する機関によって各々目的が異なることから、その目的に応



表-8 火山防災対策の体系化

フェイズ	必要とされる活動	事前に実施可			
		施設・設備系	調査系	対応計画系	啓発・訓練系
活動活発期	<input type="checkbox"/> リスク把握		○被害想定 ○地域防災力の把握 ○事態想定(災害シナリオ策定)		
	<input type="checkbox"/> 住民啓発・教育		○住民意識調査		○住民(自主防)リスク勉強会
	<input type="checkbox"/> 火山観測	○観測システム構築(地震計、監視カメラ等)		○観測情報伝達計画	
	<input type="checkbox"/> 風評被害防止		○経済被害実態調査		○観光客啓発(教育/広報) ○事業者勉強(対策検討)会
	<input type="checkbox"/> 重要データバックアップ	○遠隔地保管			
異常逼迫期 ～噴煙・ 火山灰噴出	<input type="checkbox"/> 登山規制			○立入規制計画(基準、伝達手段、規制手段)	○住民・観光客啓発
	<input type="checkbox"/> 火山灰対応・健康調査・火山灰予報	○火山灰予報システム		○火山灰予報計画	
	<input type="checkbox"/> 緊急観測(のけもの設置等)			○緊急観測計画(けもの設置場所、情報伝達計画)	
緊急避難期	<input type="checkbox"/> 緊急退避・避難	○退避施設整備 ○避難路整備	○退避・避難シミュレーションによる計画の検証	○避難に関する情報伝達計画(判断基準、伝達手段等) ○退避・避難計画(避難路、避難所、弱者対応等)	○住民啓発(火山・避難の知識等)・訓練
	<input type="checkbox"/> 救出・災害医療	○関連機関情報共有システム	○受入能力調査	○緊急輸送(リコーター)計画 ○災害医療マニュアル	
	<input type="checkbox"/> 災害対策初動体制	○防災関係機関緊急連絡システム ○防災拠点耐震補強	○防災拠点被災度調査	○職員参集計画(参集基準等) ○関係機関連絡体制	
	<input type="checkbox"/> 広域応援			○広域応援計画、協定	
	<input type="checkbox"/> 警戒区域・避難勧告区域設定		○避難勧告・警戒区域設定の影響予測	○避難勧告・警戒区域設定計画	
	<input type="checkbox"/> 観光客対応(帰宅)			○輸送計画	○観光業者訓練・計画づくり支援
	<input type="checkbox"/> 安否情報提供	○安否情報収集・伝達システム			○伝言ダイヤルの普及
	<input type="checkbox"/> 避難所生活			○避難所運営計画	○避難所運営訓練
応急生活期	<input type="checkbox"/> 物資調達・配布(含/機援物資対応)	○備蓄		○物資調達・配布計画	
	<input type="checkbox"/> ボランティア受入			○ボランティア受入計画	○ボランティア訓練
	<input type="checkbox"/> 被害調査・罹災証明発行				
	<input type="checkbox"/> 仮設住宅建設			○仮設住宅建設計画(戸数、用地)	
	<input type="checkbox"/> 義援金配布	○被災者対応のための拠点づくり		○義援金配分計画	
	<input type="checkbox"/> 生活情報提供				
	<input type="checkbox"/> 心のケア				
	<input type="checkbox"/> 応急砂防・治山工事	○仮遊砂地、仮導流堤建設	○地籍調査(空撮、地権者調査)		○砂防・治山啓発
生活再建期	<input type="checkbox"/> 生活再建支援		○災害支援制度の検討(事例調査も含む)		
	<input type="checkbox"/> 集団移転		○住民意向調査		
	<input type="checkbox"/> 農地復旧				
	<input type="checkbox"/> 恒久的砂防・治山工事	○恒久的砂防計画策定	○地籍調査(空撮、地権者調査)		○砂防・治山啓発

(第5回岩手山火山災害対策検討委員会資料 改訂)

じて内容がその都度組み替えられるべきものと思われる。今後重要なのは、この全体のマトリックスを作成する上での基本的な考え方と内容に関する精度をいかに高めるかであるといえる。

### 9. 火山災害と被災者救済法

これまでの火山災害等の自然災害による被災地域の復興は、国等行政の実施する公共事業が中心となっていた。しかし、地域社会を形成する中核は、「地

域住民」という人的存在であり、公共施設という物的存在ではない。すなわち、被災地域の復興は、「被災者の自立復興」を最終目的とするものであり、公共事業はその最終目的の手段にすぎないのである。したがって、わが国の将来の災害対策法制度は、この点についての理念を確立し、人的存在を中心に捉えたものとしなければならず、究極的には、災害復旧のための公共事業の推進と被災者救済システムを絡めたものとしなければならない。

わが国の現行の災害対策関連法規は、過去の様々な災害のたびにツギハギ的に創設されてきたもので

あり、体系的な整備がなされておらず、災害対策・復興対策に関する法制度の理念が明確にされていない。そのため、災害対策基本法 63 条 1 項の警戒区域の設定が問題となった雲仙岳噴火災害では、その設定に伴う経済的損失の補償制度がなく深刻な事態を招いたのであり、阪神・淡路大震災等では、国・地方自治体として、被災者の自立復興（住宅再建・生活再建・生業再建）のための経済的条件を整えることができなかった。

被災者の自立復興を検討する場合、災害後の時間的経過に従った対策を考える必要があるが、その点については、概ね次のように整理することができる。

- 応急対策－災害直後の衣食住の確保等
- 復旧対策－道路・港湾・学校・農業施設等の公共施設の復旧事業等
- 復興対策－被災者の住宅再建・住居の確保・事業者の事業再建等

応急対策については、主に災害対策基本法・災害救助法等により対処するシステムになっている。復旧対策については、本来災害対策を前提としないものも含めて各省庁の各種事業等により対応することが多い。問題は復興対策である。復興対策としては、被災者個人に対する防災集団移転促進事業・災害対策資金貸付制度等が僅かながら存在するものの、わが国では自助努力原則が絶対視され、被災者個人に対する救済システムが完備していない。1998 年 5 月には極めて画期的な法律として「被災者生活再建支援法」が成立したが、これとて内容的に十分というには程遠い。また、地震保険等の損害保険制度も存在してはいるものの、少なくとも地震・噴火・津波による災害に対しては無力であるといわざるを得ない。

いずれにしても被災者の自立復興を図るためには、被災者個人への経済的支援が不可欠であり、そのための財源が確保されなければならない。すなわち、国等行政が直接助成金・補助金を支給するのか（公的補償）、それとも、普段から国民が全員で共済掛金を積み立てて被災者に共済金を支給するのか（国民共助の共済システム）等の方法は別にしても、何らかの新たな法システムを創設しなければ、災害のたびごとの議論に終始することは避けられない。特に、共済システムによる共済金支給（住宅再建資金・生活再建資金等の資金供与）制度は、大規模災害の際の必要資金規模に対応することができ、しかも、自助努力原則から問題視されることもなく、国民の一定のコンセンサスさえあれば、極めて現実的なものであるということが出来る。この共済システムの中は、さまざまな対応を組み込むことができる。す

付表-1 火山工学小委員会第 2 分科会委員構成

五十音順、敬称略

○主査

氏名	所属	本論文の担当
安養寺 偈夫	(財)砂防・地すべり技術センター	7 章
安藤 良輔	(株)片平エンジニアリング	
石橋 晃睦	日本工営(株)中央研究所	6 章
片田 敏孝	群馬大学工学部	
北村 良介	鹿児島大学工学部	4 章
木村 拓郎	(株)社会安全研究所	8 章
熊谷 晃	岩手大学大学院農学研究科	
小宮 学	気象庁地震火山部	
酒井 嘉昭	(株)アーバス	
澤田 豊明	京都大学防災研究所付属災害観測実験センター	
○高橋 和雄	長崎大学工学部	1 章, 2 章, 10 章
千葉 達朗	アジア航測(株)防災部	
中川 一	京都大学防災研究所	6 章
中筋 章人	国際航業(株)	5 章
中田 節也	東京大学地震研究所火山噴火予知研究推進センター	3 章
廣井 脩	東京大学社会情報研究所	
福崎 博孝	弁護士	9 章
南 哲行	建設省土木研究所砂防部	
宮本 邦明	筑波大学農林工学系	4 章
目黒 公郎	東京大学生産技術研究所	
矢野 栄二	帝京大学医学部	

なわち、住宅再建共済システムでは、共済掛金のランク付けの基準として、耐震構造建築か否かを取り込むことにより、住宅耐震問題に対処することができ、また、火山周辺の市町村などでは、共済掛金のランクが高くなるものの、この共済システムの中から、警戒区域設定に伴う経済的損失を補償することも可能となる。

わが国の災害対策法制度は、被災地域の物的復旧・復興や全体的経済政策などが中心問題とされ、被災者個人の生活再建（自立復興）という人的側面が軽視されてきた。しかし、この人的側面こそが災害対策の中心であるべきであり、そのための法システムの創設や拡充が将来的な課題とならざるを得ないことを銘記すべきである。

## 10. まとめ

土木学会火山工学研究小委員会の第2分科会の活動内容と各委員の研究内容をまとめた。工学解析やシミュレーションの適用によって防災アセスメントを実施するとともに、火山災害特性を踏まえた災害対策を検討し、火山対策を地震対策や風水害対策並みに近づける努力が始まっている。本研究はその大枠を示した。

雲仙普賢岳の噴火災害の対策では、継続する災害に対して対症療法とも言うべき対策が進められた。今後は噴火災害の実態を明らかにし、実効性のある防災対策が望まれている。そのためには、理学、工学、社会学、行政などと幅広い領域をカバーした本分科会の活動の方向性は正しいと認識している。火山噴火に対する防災アセスメント(被害想定)に工学的手法は有効で、この手法を具体的に活用したハード、ソフトの防災対策の確立は本分科会のような活動で実現しうるものと考えている。

本研究のとりまとめにあたっては、1999年度(財)砂防地すべり技術センター研究開発助成を受けたことを付記する。

## 参考文献

- 1) 陶野郁雄, 北村良介: 火山工学の確立とその研究課題, 自然災害科学, Vol. 17, No. 2, pp. 121-130, 1998.
- 2) 建設省福島工事事務所: 平成8年度火山災害に伴う被害影響評価調査報告書(概要版), 全28頁, 1997.
- 3) 損害保険料率算定会: 火山災害の研究, 地震保険調査研究 42, 1997.
- 4) 消防科学総合センター: 火山噴火災害応急対策システムに関する調査研究報告書, 全191頁, 1996.
- 5) 中央防災会議, 国土庁防災局編: 防災基本計画, 大蔵省印刷局, 全197頁, 1995.
- 6) Newhall, C. G. and Shelf, S.: The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism, Journal of Geophysical Research, Vol. 87, pp. 1231-1238, 1982.
- 7) Simkin, T. and Siebert, L.: Volcanoes of the World (second ed.), Smithsonian Institution, Geoscience Press, Inc., Tucson, Arizona, 349pp., 1994.
- 8) 中田節也: 火山噴火物と噴火の推移, 兼岡一郎・井田喜明編「火山とマグマ」, 東大出版会, pp. 158-178, 1997.
- 9) 石原和弘: 火山観測による噴火の仕組みの理解, 火山, 42巻, pp. 445-458, 1997.
- 10) 小野晃司: 火山噴火の長期的予測, 火山, 34巻, pp. S201-S214, 1990.

- 11) 土質工学会雲仙普賢岳火山災害調査委員会編: 雲仙普賢岳の火山災害, 全128頁, 1993.
- 12) 土質工学会 1993年鹿児島豪雨災害調査委員会: 1993年鹿児島豪雨災害, 全209頁, 1995.
- 13) 地盤工学会北海道古平町国道229号岩盤崩落調査委員会: 北海道古平町国道229号岩盤崩落調査委員会報告書, 1997.
- 14) Yamashita, S. and Miyamoto, K.: Numerical Simulation Method of Debris Movement with a Volcanic Eruption., Proc. of J-U.S. Workshop on Snow Avalanche, Landslide, Debris Flow Prediction and Control, pp. 433-442, 1991.
- 15) 建設省河川局: 火山災害予想区域図作成指針(案), 1992.
- 16) 建設省九州地方建設局河川部河川計画課: 雲仙・普賢岳噴火対策砂防事業, 1995.
- 17) 鹿児島市, 垂水市, 桜島町: 桜島火山防災ポケットブック, 1995.
- 18) 山下伸太郎, 宮本邦明, 大原正則, 緒統英章, 水山高久: 溶岩流の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第34巻, pp. 391-396, 1990.
- 19) 石原和弘, 井口正人, 加茂幸介: 桜島火山の溶岩流(II) - 大正溶岩流のシミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 28B-1, 1985.
- 20) 山田孝, 宮本邦明, 水山高久: 火砕流の流動メカニズムとシミュレーション, 新砂防, Vol. 44, No. 3(176), pp. 20-27, 1991.
- 21) 宮本邦明, 鈴木宏, 山下伸太郎: 火砕流の流動モデルと流下・堆積範囲の予測に関する研究, 水工学論文集, 第36巻, pp. 211-216, 1992.
- 22) Miyamoto, K., Michiue, M. and Kubota, T.: Study on Mayuyama Landslide in 1792, Hydraulic Engineering for Sustainable Water Resources Management at the Turn of the Millennium, Proc. of 28<sup>th</sup> IAHR Congress, CD-ROM, IAHR99/pdf/d140.pdf, 1999.
- 23) Michiue, M., Hinokidani, O. and Miyamoto, K.: Study on the Mayuyama Tsunami Disaster in 1792, Hydraulic Engineering for Sustainable Water Resources Management at the Turn of the Millennium, Proc. of 28<sup>th</sup> IAHR Congress, CD-ROM, IAHR99/pdf/d141.pdf, 1999.
- 24) 福住真仁, 道上正規, 宮本邦明, 檜谷治, 小島隆行: 1792年眉山崩壊の2次元数値解析, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集(共通セッション), pp. 280-281, 1999.
- 25) 檜谷治, 道上正規, 宮本邦明, 畦森雅樹: 1792年眉山崩壊に伴う津波の数値シミュレーション, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集(共通セッション),

- pp. 282-283, 1999.
- 26) 宮本邦明, 鈴木宏, 山下伸太郎, 水山高久: 十勝岳大正 15 年(1926 年)泥流の再現計算, 水工学論文集, 第 33 卷, pp. 361-366, 1989.
  - 27) 江頭進治, 本田尚正, 宮本邦明: 姫川支川蒲原沢土石流のシミュレーション, 水工学論文集, Vol. 42, pp. 919-924, 1998.
  - 28) 伯野元彦: 破壊シミュレーション, 森北出版, pp. 10-15, 1997.
  - 29) Tsuji, Y., Tanaka, T. and Ishida, T.: Lagrangian Numerical Simulation of Plug Flow of Cohesionless Particles in Horizontal Pipe, Powder Technology, Vol. 71, pp. 239-250, 1992.
  - 30) Kitamura, R., Fukuhara, S. and Kisanukii, G.: Simulation Model for Flowage of Particulate Material, Jour. of Japan Society for Natural Disaster Science, Vol. 17, pp. 29-52, 1997.
  - 31) 梶原清作, 北村良介, 植村桂樹: 水の浸透による不飽和粒状体の崩壊挙動のモデル化, 応用力学論文集, Vol. 1, pp. 757-766, 1998.
  - 32) 宇井忠英編: 火山噴火と災害, 東京大学出版会, p. 126, 1997.
  - 33) 荒巻重雄: 火山災害と災害予測図, 測量, 第 36 卷, 第 9 号, p. 15, 1986.
  - 34) 国土庁防災局: 火山噴火災害危険区域予測図作成指針, 1992.
  - 35) 建設省河川局: 火山災害予想区域図作成指針(案), 1992.
  - 36) 中筋章人, 塚本哲, 清水幹輝: 火山ハザードマップの現状と将来, 日本災害情報学会 1999 年研究発表大会, pp. 58-62, 1999. 10.
  - 37) 高橋保, 中川一, 東山基: 洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムの評価に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 32 号 B-2, pp. 1-24, 1989.
  - 38) 高棹琢馬, 椎葉充晴, 堀智晴: 水害避難行動のミクロモデルシミュレーションと制御に関する研究, 土木学会論文集, No. 509/II-30, pp. 15-25, 1995.
  - 39) 小泉栄一, K. クマール, 石井秀樹: 災害時の避難所と避難経路の評価手法に関する研究(3)短い区間の自動車走行における走行時間推定に関する基礎研究, 土木学会第 51 年次学術講演会講演概要集 4 部門, pp. 56-57, 1996.
  - 40) Takahashi, T., Nakagawa, H., Higashiyama, M. and Suwa, H.: Assessment of Evacuation System for Water or Mud Floods, Jour. of Japan Society for Natural Disaster Science, Vol. 12, No. 2, pp. 37-62, 1990.
  - 41) 交通工学研究会: 19858 道路の交通容量, pp. 33-44, pp. 380-382, 1987.
  - 42) 建設省河川局砂防部: 火山砂防計画策定指針(案), 1988.
  - 43) 安養寺信夫, 宮本邦明, 山下伸太郎: 火山噴火に伴う土砂災害の被害想定, 火山工学シンポジウム発表論文集, pp. 7-14, 土木学会, 1994.
  - 44) 池谷浩: 活動中の活火山における土石流対策計画, 砂防学会誌, 47-2, pp. 23-29, 1994.
  - 45) Hashinoki, T., Anyoji, N., Ikeya, H. and Matsui M.: On the Measure against Debris Flow in Active Volcanoes, Proceedings of the International Sabo Symposium, pp. 247-254, 1995.

(1999. 6. 28 受付)