なだれ被害と煙型なだれハザードマップ作成

福嶋祐介・陸 旻皎 長岡技術科学大学 環境・建設系

1. はじめに

本報告は2部構成となっており、前半は地震後 の大雪によるなだれ災害に関する調査報告で、後 半が被害を未然に防ぐ方法として開発したなだ れハザードマップの作成法と結果である。

2. 平成16 年新潟中越地震と雪崩災害

2004 年10 月23 日午後5 時56 分に新潟県中 越地方を震源とするマグニチュード6.8 の非常 に大きな内陸直下型地震が発生した。被害は、死 者51人、重軽傷者4、795人、住宅被害は120、410 棟、129、061 世帯、さらに空中写真からは計3、 791箇所の地すべり、斜面崩壊が確認されており、 そのうち362 箇所が崩壊幅50m以上の規模であ った。

図1に示すように降雪期に入ると大量の雪、図 2に示すように被災地を中心として被害をもた らし、雪崩発生やその危険性に伴って昭和60年度 以来の大雪に見回られ、雪崩発生による通行止め 27箇所、雪崩の危険による事前通行規制箇所28箇 所、合計55箇所において雪崩の被害をうけ通行止 めを余儀なくされた。さらに、2005年2月17日に 高柳町田代地内において、雪崩により車両ごと河 川に押し流されて1名が死亡した。また、翌18日 においても高柳町山中塩沢地内の工事現場で雪 崩が発生し2名が巻き込まれ1名が死亡した。

新潟県としては、2月1日に豪雪警戒本部を、 2月18日には豪雪対策本部を設置した。雪崩災害 防止のために、以下の対策強化を図った。

- 雪崩パトロールの一層の強化と雪崩等が懸念 される道路区間の通行止め等の規制強化
- ② 市町村、警察、消防などの関係機関や、トラック協会等関係団体と連携した雪崩情報収集の一層の強化
- ③ 市町村を通じた、標識・看板・広報紙等による住民への注意喚起
- ④ 工事発注者に対する、工事現場での安全管理 徹底の指示



図 1 新潟県による最大積雪深の観測結果



図 2 中越地震による震度分布と豪雪対策本部設置状況

2.1 地震による防雪施設の被災の特徴

中越地震直後の被害調査において防雪施設の 被害が多く確認された。被害の特徴としては、図 3、図4に示すように土砂崩壊によって斜面に設 置してある予防工や防護工が損壊あるいは崩落 土砂により埋没した箇所が多くみられた。特に土 砂が埋没している箇所は多く、予防工や防護工に 土砂が堆積し機能不全を起こし、さらに雪崩発生 区において土砂崩落のため植生がない裸地であ る。よって、全層雪崩の発生する危険度が増大し て、さらに防護機能の低下のために本来雪崩から 保護する対象物が雪崩による被害を受ける危険 性が高くなっている。

被災地域における防雪施設の特徴として、大型 の固定柵が主流であり、基礎部分も大量のコンク リートで施工されているのが一般的である。また、 設置箇所も雪崩発生区であるため斜面勾配が急 峻であり、そのために機械力が使えず人力作業が 中心である。こうした事情により、早急な復旧が 困難となっていた。

基礎についての被災の特徴として、単独基礎と 連続基礎では、単独基礎の損壊が目立っており、 今後の検討課題と考えられる。また、図5のよう に基礎部分から滑り落ちるように崩落した雪崩 予防柵や防護柵の鋼材等は、再利用可能であるこ とが分かった。

2.2 被災地での雪崩災害

本研究室において、今後の研究データとして用 いるため、地震による防雪施設の被害調査や被災 地域における気象観測ならびに週1回の積雪断面 観測、雪崩観測を2004年12月21日より行った。ま た、2005年度冬季において、今後の研究データと なるため継続して観測を行っている。

気象観測地点は図6の丸枠内の新潟県十日町 市魚ノ田飛渡第一小学校内(標高202m)において、



図 3 土砂崩落により損壊した雪崩予防柵



図 4 崩落土砂に埋没した雪崩予防柵



図 5 上部材が再利用可能な雪崩防護柵



図 6 雪崩発生地点図

気象観測機器を2004年12月21日から2005年5月11 日まで設置し常時観測を行なった。さらに、定期 観測として積雪層構造を観測するため近傍の休 耕田にて週1回積雪断面観測を行なった。

雪崩観測によって観測地点近傍ならびに他の 被災地において雪崩が発生した。これらの発生状 況について以下に示す。

2004-2005年冬季における、中越地震被災地で 被害を受けた箇所での雪崩災害について図6の ①~⑤の地点での事例を示す。各地点での雪崩の 特徴としては、①道路崩落箇所での雪崩、②土砂 崩落地での雪崩、③雪崩による避難勧告、④土砂 と雪崩の混合崩落、⑤融雪に伴う全層雪崩、であ る。

道路崩落箇所での雪崩

2005 年2 月2 日18 時30 分頃、国道252 号線 魚沼市上稲倉(図6①)にて図7に示すように幅 =20m、高さ=15m、積雪深=3m にわたり湿雪面 発生全層雪崩が発生し、道路延長=40m、幅=6.2 m、高さ=3m、デブリ量=700m³ にわたり道路を 埋没させた(図8)。

図9に1月26日と2月3日に発生区近傍で定期観 測として行った積雪断面観測の結果を示す。発生 前の積雪底部の層構造と発生後を比較すると、明 確にざらめ化が進行しており、さらに発生後の観 測から新雪が多量に積もり、積雪深が195cmから 315cmと120cmも急増した。それに伴い積雪の単位



図 7 発生区の状況



図 8 道路埋没状況



図 9 積雪断面観測結果

面積当たりの積雪重量も700kg/㎡から928kg/㎡ と228kg/㎡増加し、上載荷重を急増させた。この ことにより、斜面積雪が不安定化し、なだれ発生 要因になったと考えられる。また、走路上の乾い た新雪を誘発して流下したため流下距離が伸び、 さらに除雪による雪堤が高くなっていたことに より、道路上に多量のデブリが堆積したと考えら れた。

この雪崩発生区斜面は地震による大規模な土 砂崩れなどは確認されていないものの、道路は地 震により大規模に崩壊し復旧作業が行われた箇 所であった。また、近傍斜面においても雪崩発生 の痕跡は確認できず、地震によって特異的に雪崩 危険度が高くなっていたと考えられる。

②土砂崩落地での雪崩

国道252 号線魚沼市上稲倉(図62)にて、中 越地震によって崩落した土砂が図10に示すよ うに擁壁後背部を没し、雪崩防護機能が低下し、 さらに発生区においては土砂崩落により地表面 の植生がない裸地であったため雪崩危険度が増 大していた箇所であった。

その後、大量の積雪により擁壁部分は積雪中に



図 10 地震直後の斜面状況



図 11 雪堤による雪崩阻止状況

埋没し、さらに土砂崩落斜面からも雪崩が発生す る危険性が高まり、道路上に到達し雪崩災害を生 じさせる危険性が高まった。よって、雪崩が道路 へ流下するのを防ぐため応急対策として、道路脇 に高さ=3m、延長=40mの雪堤を構築し、雪崩発 生に備えた。その後、図11に示すように2月17 日午前に湿雪面発生全層雪崩が発生し雪堤で停 止しているのを確認することができた。

③雪崩による避難勧告

本件は数多くの雪崩被災例のうち、2004-2005 年冬季において避難勧告が出された唯一の例で ある。南魚沼市浦佐新町(図6④)において、中 越地震によって斜面崩壊ならびに雪崩予防柵の 損壊(図12)が発生し、さらに崩落土砂で斜面 下に設置してある擁壁の堆積スペースが埋没し ていた。

同斜面において2月4日夕方、集中豪雪ならび に防雪施設の機能不全から雪崩が発生し、住居に 到達する危険性があるとして南魚沼市が道路を 挟んだ向かい側の3世帯1棟のアパートに対し、 避難勧告を出した。その後2月7日午前9時頃に



図 12 地震により損壊した雪崩予防柵



図 13 避難勧告住居と雪崩発生状況

縦=10m、横=5m、積雪深=2m、デブリ量=120m³ の湿雪面発生全層雪崩が発生し、防護擁壁後背部 で停止した(図13)。

さらに、2次崩落の危険性があるため応急対策 として擁壁背面の堆積容量拡大と雪堤を構築す ることにより、雪崩が道路上に達する危険性を回 避したうえで避難勧告を解除した。

④土砂と積雪の混合崩落

国道252 号線十日町市魚ノ田(図6④)におい て、中越地震により土砂崩壊が発生した斜面の一 部に崩壊の発生を免れた箇所があった(図14 〇内)。この地点においては、崩落が著しく、さ らに防雪施設の倒壊が発生した箇所であったた め、当研究室では2004 年12 月21 日より近傍の 十日町市立飛渡第一小学校内にて気象観測機器 を設置した。さらに降雪期においては、週一回の 積雪断面観測と斜面監視パトロールを独自に行 い、その変化を観測してきた。

降雪期に入ると、この斜面の崩落部分では、小 規模な雪崩が1降雪ごとに発生し、斜面上には雪 が積もらない状態であった(図15破線〇内)。



図 14 地震直後の発生区斜面状況



図 15 崩落前の斜面状況

しかし、崩壊せずにいた箇所(図15〇内)にお いては植生があり、降雪ごとの雪崩は発生せずに 斜面の積雪は増加をしていた。

同斜面において図16に示すように、2005年2 月17日21 時頃、土砂と積雪の混合したものが崩 落し、道路延長=60mに渡り埋没させ通行止めと なった。このような土砂と積雪の混合崩落を"土 砂雪崩"という呼称を用いられた。図17に示す ように土砂雪崩のデブリは、樹木や岩石が混合し ており、排雪作業に時間がかかり早急な復旧が行 えない。この土砂雪崩は、被災地において例年よ り格段に多く見られた。これは、地震により斜面 が崩落しやすく、さらに大雪が重なったことが原 因と言える。

図18の発生前後に行った積雪断面観測の結 果から、積雪深が324cmから285cmに減少し、平均 密度も364kg/mから419kg/mと増加した。さらに、 図20に示す雪崩発生地点近傍の県の気象観測 点のデータより、雪崩発生前に気温上昇しており 積雪深も減少していることが分かった。さらに、 積雪層構造からは約50 c mはざらめ雪であり、図 19から硬度が脆弱であったことがいえる。しか



図 16 土砂雪崩発生状況



図 17 土砂雪崩のデブリ

観測地点名	R252 十日町市新水	R252 十日町市新水
観測日	2005年2月15日	2005年2月18日
観測時間(開始)	11時50分	13時45分
観測時間(終了)	12時45分	14時30分
天気	くもり	晴れ
気温	2.7°C	5.7°C
積雪深	324cm	285cm
積雪相当水量	1190mm	1218mm
全層平均密度	364kg/m3	419kg/m3





し、雪崩発生時の気温が低いのは、融雪水が地表 面に到達または、地表面から地中への到達に時間 遅れが発生したためと考えられた。よって、この 土砂雪崩の原因としては、気温上昇による融雪水 が主たる発生要因として考えられる。また、発生 時の近傍斜面では、被害は無いものの全層雪崩が 多発しており、発生時期は全層雪崩発生時期と同 一であると言える。また、積雪のグライドやクリ ープによる樹木への圧力が定常的に加わってい ることも土砂雪崩が発生しやすい一因と考えら れた。

いずれにせよ、土砂雪崩は今後数年も継続して 発生する危険性は高く、さらに継続的に斜面観測 を行っていた結果から前兆現象が明確に現れず に、発生の予知予測が困難である。今後について は、無雪期における危険箇所の推定などを計り災 害防止を行わなければならない今後の最重要課 題といえる。

⑤融雪に伴う全層雪崩

2005年2月17日午前6時半頃と9時頃に、魚沼市 須原(旧守門村) (**図21**⑤)の県道70号小出



図 2 1 発生区斜面状況



図 22 道路上に堆積したデブリの状況



図 2 3 積雪断面観測結果

守門線須川地内において湿雪面発生全層雪崩が 発生した(図22)。発生区は、縦=20m、横= 10m、深さ=2.0m、発生区量=400m³で、図2 2の道路上の堆積量は、延長=20m、幅=7m、 高さ=1~2m、堆積量=210m³であった。雪崩発 生後の積雪断面観測結果を図23に示す。積雪構 造は、低層部に密度の非常に高いざらめ層があり、 融雪が進行して脆弱化しており、全層雪崩発生の 危険性が高い構造をしていた。さらに、周辺斜面 からの雪崩の発生があり、道路脇斜面に雪堤を2 段構築し、雪崩の危険性が低下するまで通行止め を継続し、斜面状況の監視を行なう対策が採られ た。

この斜面は、中越地震が発生したことにより、 発注されていた雪崩予防柵の施工が余震の発生 により中断された箇所であり、さらに予防柵にお いても損壊が融雪後に確認できた。

2.3 被災地雪崩災害調査のまとめ

新潟県中越地震によって発生した地形変化や 土砂崩壊による雪崩防止施設の損壊・埋没が被災 地を中心に多く見られ、しかもこの状況下で19 年ぶりの大雪となったため、この地域に雪崩災害 が多発した。この雪崩災害は、防雪施設の設計施 工法、新しい雪崩現象など、多くの検討課題を残 したといえる。本報告ではそういった今後の課題 となるような問題を抽出して述べたものである。

最初に被災地域における雪崩予防柵について、 大型の固定柵が主流であり、基礎部は大量のコン クリートによって施工されているため修復が困 難である点、さらに、雪崩発生区の急峻な斜面で の作業のため人力作業が主となり早急な復旧作 業が困難である点、を指摘した。今後は、大型の 固定柵の見直しを行い、基礎についてはアンカー 工法など新たな工法を積極的に考慮すべきと考 えられる。また復旧作業にあたり雪崩防止柵につ いては、上部材の再利用可能な鋼材等は利用すべ きと言える。

次に、被災地を襲った19年ぶりの大雪のために 発生した雪崩災害のうち、将来に課題を残すよう な事例を解析、紹介した。それらは以下のように まとめることができる。

- きわめて多量の降雪が、2月2日という厳寒期 に全層雪崩を起こした例(国道252号線魚沼市 上稲倉の雪崩)
- ② 地震による土砂崩落により機能を低下させた 防雪施設に起きた雪崩の例(国道252号線上稲 倉で発生した雪崩)
- ③ 地震によって斜面崩壊ならびに雪崩予防策の 損壊があった箇所に雪崩が生じたために避難 勧告の出た例(南魚沼市浦佐新町の例)
- ④ 地震により崩落した斜面で、雪と土砂が混合して崩落した"土砂雪崩"。その発生には積雪層の断面観測から、底面付近の滑りやすいざらめ雪層の存在と、その上の硬度の高いしまり雪層の存在が示唆され、将来の大きな課題と指摘された。(国道252号線十日町市魚/田の雪崩)
- ⑤ 融雪により形成されたと見られる高密度のざらめ層の存在により発生した全層雪崩(魚沼市須原県道70号線で発生した雪崩)

このような土砂崩壊による地形変化や防雪施 設の損壊・埋没は、1年を経過しても充分復旧し たとは言えず、今後も新たに発生することも予想 されることから、地震後数年以上は2004-2005 年同様に雪崩の危険性は十分高くなっているこ とがいえる。

よって、今後も継続して、気象観測ならびに定 期的な積雪断面観測を行なう必要性が高いこと から、2005 年冬季においても同様な観測を継続 して、今後の雪崩予知予防の研究データとする。

3. 表層なだれハザードマップ作成

3.1 シミュレーションモデルの定義

本研究において形跡を行うにあたり、煙型雪崩の形状を半楕円体と定義して、シミュレーション モデルとした。その模式図を図24に示す。ここで、U_{abs}は煙型雪崩の移動速度、C は体積濃度、 hは高さ、S_iは空気と境界面の面積、S_bは底面と 境界部の面積、 ρ および ρ_a はそれぞれ、現象、 空気の密度、 θ は斜面の傾斜角である。これは、 福嶋らによって提案されたモデルである。

煙型雪崩の横方向の広がり、流下経路、速度や 乱れエネルギーなどの諸条件を未知数とし解析 する方法を本研究では用いている。流下方向に対 して水平に切断した任意の断面は、図のように半 楕円体となり、ここでhは現象の中心部分での値 となる。

3.2 基礎方程式

福嶋・大澤(2003)は、3次元の傾斜サー マルの理論を基に、雪崩と外部との雪粒子の収支 を加えた煙型雪崩のモデルを提案した。この理論 では未知数を雪崩の最大高さ、平均濃度、フロン トの流下速度、最大広がり幅、雪粒子の総量など とした基礎方程式が提案されている。本研究では この理論を用いて解析を行なう。以下に使用した 基礎方程式を示す。

雪崩内では雪粒子や空気が激しく運動してお り、外部からの空気の巻き込みが発生すると考え るため、この煙型雪崩モデル内の空気の質量保存 式を式(1)とする。

このとき t は時間、V_oは現象の体積、ρ_oは現 象中の空気の平均密度、E_aは現象による周囲空 気の連行係数である。左辺はモデル内の空気量の 時間変化を、右辺は空気の巻き込み量を表してい



$$\frac{d}{dt}(\rho + k_{v}\rho_{a})KV_{o} = (\tau_{i}S_{i} + \tau_{b}S_{b})U_{abs} + \frac{1}{2}\rho_{a}\left\{(1 + k_{v})E_{a}U_{abs}S_{i} + Rv_{s}(E_{s} - c_{b}\cos\theta)S_{b}\right\}U_{abs}^{2} - \rho_{a}Rgv_{s}V_{o} - \beta\rho K^{3/2}V_{o}/h - \xi_{p}\rho_{a}Rg\cos\theta h \qquad (5)$$

$$\times \left\{\frac{1}{2}CE_{a}U_{abs}S_{i} + v_{s}(E_{s} - c_{b}\cos\theta)Sb\right\}$$

$$\frac{dX}{dt} = U\cos\theta_x \qquad (6)$$

$$\frac{dY}{dt} = V\cos\theta_y \qquad (7) \quad \psi = \tan^{-1}\left(\frac{U\cos\theta_x}{V\cos\theta_y}\right) \qquad (8)$$

$$U_{abs} = \sqrt{\left\{ (U + V \cos \gamma)^2 + (V \sin \gamma)^2 \right\}} \quad (9) \quad \frac{db_{\max}}{dt} = \alpha_{BB} (\tan \theta)^{-0.264} U_{abs} \quad (10)$$
$$V_{abs} = \left(\frac{\pi}{2}\right) P_{abs} \quad (11) \quad S_{abs} = \left(\frac{\pi}{2}\right) P_{abs} \quad (12)$$

$$V_{o} = \left(\frac{\pi}{6}\right) P_{b} b_{\max} h \qquad (1\ 1) \qquad S_{b} = \left(\frac{\pi}{4}\right) P_{b} b_{\max} \qquad (1\ 2)$$

$$S_{b} = \alpha S_{b} \qquad (1\ 2)$$

$$R = \left(\alpha - \alpha\right) / \alpha \qquad (1\ 4)$$

$$C_{D}\pi \frac{D_{s}^{2}}{8} \rho_{0} v_{s}^{2} = \pi \frac{D_{s}^{3}}{6} (\rho_{s} - \rho_{0}) g \qquad (15) \qquad C_{D} = \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.150 \,\text{Re}^{0.687}) \qquad (16)$$

(17)
$$\boldsymbol{\tau}_{i} = \boldsymbol{\rho}_{a} \boldsymbol{\alpha} K$$
 (18)
(19) $\boldsymbol{\rho} = \boldsymbol{\rho}_{0} \left(\mathbf{1} + RC \right)$ (20)

$$C_{D}\pi \frac{\sigma_{s}}{8} \rho_{0} v_{s}^{2} = \pi \frac{\sigma_{s}}{6} (\rho_{s} - \rho_{0}) g \qquad (1 5) \qquad C_{D} = \frac{2}{\text{Re}} (1 + 0.150 \,\text{Re}^{0.087}) \qquad (1 6)$$

$$\text{Re} = \frac{D_{s} v_{s}}{v} \qquad (1 7) \qquad \tau_{i} = \rho_{a} \alpha K \qquad (1 8)$$

$$\tau_{b} = \rho_{b} \alpha K \qquad (1 9) \qquad \rho = \rho_{0} (1 + RC) \qquad (2 0)$$

$$\rho_{b} = \rho_{0} (1 + Rc_{b}) \qquad (2 1) \qquad E_{a} = \frac{0.1\theta}{90^{\circ}} \qquad (2 2)$$

(23)
$$Z = \frac{R_p^{0.6} u_*}{v_s}$$
 (24)

$$E_{s} = \frac{A_{1}Z^{5}}{\left(1 + \frac{A_{1}}{0.3}Z^{5}\right)} \qquad (2 \ 3) \qquad Z = \frac{R_{p}^{0.6}u_{*}}{v_{s}} \qquad (2 \ 4)$$

$$R_{p} = \frac{\sqrt{gRD_{s}}D_{s}}{v}, \qquad u_{*} = \left(\sqrt{\frac{\tau_{b}}{\rho_{a}}}\right) \qquad (2 \ 5) \qquad r_{0} = c_{b} / C = 1 + 31.5\mu^{-1.46} \qquad (2 \ 6)$$

$$\mu = \sqrt{\alpha K} / v_{s} \qquad (2 \ 7) \qquad A = \xi_{A}h^{2} \qquad (2 \ 8)$$

$$\mu = \sqrt{\alpha K / v_s}$$
(27) $A = \xi_A h^2$ (28)
 $P_b = \xi_b h$ (29) $P_i = \xi_i h$ (30)

$$\xi_{A} = \frac{\pi}{4} \xi_{b} \qquad (3 \ 1) \qquad \xi_{i} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \sqrt{\left(4\xi_{b}^{-2} + 1\right)} \xi_{b} \qquad (3 \ 2)$$

$$k_{v} = \frac{2}{\varepsilon} \qquad (3 \ 3) \qquad \xi_{p} = \frac{4}{2\varepsilon} \qquad (3 \ 4)$$

$$-\frac{\zeta_{b}}{\zeta_{b}} \qquad (33) \quad \zeta_{p} = \frac{1}{3\pi} \qquad (34)$$

$$\boldsymbol{\xi}_{b} = \mathbf{8.470}^{3/2} \left\{ (\boldsymbol{\xi}_{i} + \boldsymbol{\xi}_{b}) \boldsymbol{c}_{D} + \left(1 - \frac{\boldsymbol{c}_{D}}{\alpha}\right) \frac{1}{2} \left(1 + k_{v}) \boldsymbol{\xi}_{i} \boldsymbol{E}_{a} \right) \right\}$$
(3.6)

~

$$+ \xi_P \cot \theta \frac{\xi_i E_a}{2\xi_A} \left[\frac{3}{4} (1+k_v) \xi_i E_a + (\xi_i + \xi_b) c_D \right] \right\}$$

$$(37)$$

る。

同様に斜面より雪粒子を巻き上げ、雪崩の中に 取り込むため、雪粒子の質量保存式を式(2)の ようにおく。Cは雪粒子の体積濃度、v。は粒子の 沈降速度、E。は底面を通じて生じる粒子の連行 係数、c。は底面近傍の粒子の体積濃度である。 式(2)において左辺は粒子の総量の時間変化を 表している。また右辺は、底面からの粒子の巻上 げ率から、底面への沈降率を引いたものである。

次に、実際の雪崩の運動について記す。本モデ ルでは雪崩の流速および流下・停止の判定を、x 方向とy方向のそれぞれについて計算を行い、判 定している。

x 方向の運動方程式は式(3)のようになる。 k_vは付加質量係数、g は τ_i 、 τ_b はそれぞれ空 気との界面に作用するせん断応力および底面に 作用するせん断応力、また U は x 方向の速度を表 す。同様に y 方向の運動量保存式は式(4)とな る。V は y 方向の速度である。

固体粒子を含む流れでは乱流構造が変化する ため、相対的に運動エネルギーは減少し、抵抗係 数が小さくなっていくことが知られている。この 現象は、固体粒子を浮遊させるために乱れエネル ギーを消費するためと考えられている。

乱れエネルギーの保存式として、式(5)を示 す。ここで、K が雪崩内の乱れエネルギーの平均 である。またE_aは現象による周囲空気の連行係 数、R は密度ρ₀の空気中での粒子の比重、βは 分子粘性逸散率に関する係数、ζ pはポテンシャ ルエネルギーに関する形状係数である。式(5) において左辺は乱れエネルギーの時間変化を表 している。右辺は、第一項が平均流のせん断応力 による乱れエネルギーの生成項、第二項が境界面 での混合に伴う乱れエネルギーの生成項、第三項 は火砕物を浮遊させるために消費する乱れエネ ルギーの割合、いわゆる Bagnold の項であり、第 四項は分子粘性逸散率を、第五項はポテンシャル エネルギーを増加させるために費やされる乱れ エネルギーの割合をそれぞれ示している。

これらの式により、時間 t における x 方向および y 方向の、時間 t における位置が得られる。 x 方向の現位置は式(6)で表される。このとき、X は x 方向の変異の水平距離を表す。 x 方向と同様に、y 方向についても式(7)で表される。Y は y 方向の変異の水平距離である。

これらの式より、雪崩の進行方向は式(8)と なる。φは雪崩の進行方向である。また、速度ベ クトルの絶対値は式(9)の通りである。 γは斜面が **Z**軸と交わる角を表す。雪崩の横方向 の広がり幅は、式(10)の通りである。

ここで b_{max} は最大横広がり幅、α_{BB}は最大広が り幅に関する無次元係数である。

以上が2次元解析モデルの基礎方程式である。

3.3 構成関係式

基礎方程式内で用いられた変数等、構成関係式 について説明する。

煙型雪崩の形状を半楕円体と仮定している。そのため、体積は式(11)の通りである。また現象底面の面積 S_b 、現象と空気との界面の面積 S_i は式(12-13)のように表される。

 S_b は角度 θ で滑らかに傾斜した斜面と現象の 底面との界面の面積である。この解析において、 2次元解析モデルにおいて斜面の傾斜角 θ は現 象の中心部より前方の範囲の斜面特性を平均し て θ を導出する。しかし、実地形の斜面の幾何学 的形状は複雑であり、式(12)より導出した面 積 S_b と実地形の底面積とでは、誤差が生じやす い。そこで2次元解析モデルでは、斜面の形状に よっては現象底面の面積 S_b に地形条件を考慮し た補正を加えた。この補正に関しては改めて述べ る。

空気の密度が ρ_0 であるとき、粒子の比重 R は式(14)のように表される。

雪粒子の沈降速度 v_sは、静止空気中では粒子 に働く重力と空気からの効力のつりあい式より 求める。そのつりあい式は、式(15)のように 表される。

このとき式(12)の左辺は粒子に作用する効 力を、右辺は粒子に作用する重力と浮力の差を表 している。ここで C_D は効力係数であり、Schiller の式より求める。Schillerの式は式(16)の通り である。ここで、R e は粒子レイノルズ数である。 vは空気の動粘性係数である。

せん断応力 τ_i および τ_b は式(18)(19) のとおりである。

このときρ₀は底面付近の現象の密度、αは底 面と境界面に働くせん断力に関する無次元係数 である。

現象内の粒子の平均密度 ρ 、底面の密度 ρ_b は 式(20)(21)のように表される。 c_b は底面 付近の濃度である。

周囲空気の連行係数E_aは式(22)のように 表される。

粒子の連行係数E。は流れの特性量である空気の密度、底面でのせん断応力、および粒子の特性

量である粒径、粒子レイノルズ数、粒子の沈降速 度などの関数であると考えられる。Garcia(19 90)は開水路の浮遊砂流のデータに基づいた実 験式を提案した。本研究では、式(23)に示す Garciaの式より粒子の連行係数E_sを導出して用 いている。ここで無次元係数Zは式(24)のよ うに与えられる。R_pは粒径を用いた粒子レイノ ルズ数であり、またu_{*}は摩擦速度で、それぞれ 式(25)のように与えられる。係数A₁は、A₁ = 1.3×10⁻⁷で表される。

煙型雪崩中の底面濃度と平均濃度の比は式(2 6)のとおりである。ここでμは式(27)で表 される。

Beghin et al。(1981)は単純なサーマルに 対して実験を行い、サーマルの形状が斜面の角度 によって一義的に決まり、半楕円体の相似な形状 で近似できることを明らかにしている。ここでは では火砕流や雪崩の形状が局所的な傾斜角 θ に よって決まり、斜面の角度の変化に対応して、流 下方向に変化すると仮定し、Beghin et al。(19 81)の解析と同様に式(28-30)で与えた。 ξ_{A} 、 ξ_{b} 、 ξ_{i} は無次元の形状係数である。これ らの形状係数とポテンシャルエネルギーに関係 する形状係数を g_{P} 、付加重量係数 k_vは斜面の角度 θ の関数であると考え式(31-35)のように 与える。このとき傾斜角の単位は度(°)で表し ている。

乱れエネルギーの式内の粘性逸散率に関係す る係数 β は次のように求めた(福嶋、1986)。 まず界面でのせん断応力を式(36)で表す。こ こで c_{D} は抵抗係数である。浮力体積CAが保存 される単純なサーマルにおいて、連続式と運動量 方程式による式系の解と、さらにこれに乱れエネ ルギーを含む式系とが $t \rightarrow \infty$ でおなじ漸近解と なるように係数 β を定めると式(37)を得る。 式(37)をみると、係数 β は、傾斜角で変化す る形状係数、空気の連行係数などの関数として与 えられることに注意を要する。

以上が本研究において用いた構成関係式であ る。

3. 4 計算条件

煙型雪崩の解析シミュレーションを行うにあ たり、初期条件を以下のように設定した。

まず雪崩の初期高さは $h_0 = 10 \text{ m}$ 、雪崩の初 期最大広がり幅は $b_{\text{max0}} = 20 \text{ m}$ とした。空気 中雪粒子の相対比重はR = 710、抵抗係数 c_D 、 せん断力に関係する無次元係数 α はそれぞれ c_D =0.02、 α =0.1 とした。初期濃度はCo=1.0%、 初期速度はU_{abs}o=0m/s(Uo=0m/s、Vo=0 m/s)とした。なおU_{abs}o=0m/sとしているた めに発生直後に粒子を浮遊させるために乱れエ ネルギーが消費される。このとき乱れエネルギー が負になり解析が終了するのを防ぐために、雪崩 が発生位置からの最急勾配線の方向に加速しう るよう初期条件として乱れエネルギーKに大き な値を与えた。

現在、この理論ではまだ正確な値の求められて いない係数が多く存在する。しかしながら既往の 研究では大澤(2003)がこの理論により開発 したシミュレータを用いて、2000年3月27 日、岐阜県吉城郡上宝村神通川水系蒲田川支流左 俣谷穴毛谷の上流で発生した大規模な煙型雪崩 の再現が可能であることを示している。よって今 回用いる定数は、この解析の際に用いられたもの に準じる。それにより、今回使用するパラメータ ーは、雪粒子の粒径D_sと、雪崩の広がり幅に関 する無次元係数 $\alpha_{\rm BB}$ の2つとした。

雪粒子の性質は時間と共に変化し、雪崩の規模 等に影響を与えることがわかっている。今回は広 がり係数は大澤が用いた α_{BB} =0.060 に対して、 雪粒子の粒径にD_s=0.05、0.10、0.15、0.20、0.30 の5つの条件を与え、それぞれに対して解析を行 ない、各パターンでのハザードマップを作成した。

雪崩の広がり幅に関する無次元係数 α_{BB} は雪崩の広がり幅に対し、支配的な影響を与える。雪 粒子D_s=0.15の結果に関して、 α_{BB} =0.040およ び α_{BB} =0.080について解析を行い、 α_{BB} につい て検討を行った。

解析の際に使用した地形データは、国土地理院 数値地図 50mメッシュ(標高)の、旧山古志村周 辺の地形データである。雪崩の発生領域は旧山古 志村全域およびその周辺を含む南北約 8600m、東 西約 12000mの範囲とした。なお、この地形デー タは日本全国のデータがそろっており、容易に入 手することが可能であるため、この理論を用いて 他地域に関しても容易にハザードマップを作成 することができると考える。

前述したとおり煙型雪崩などを含む表層雪崩 は、現在でも発生条件などのメカニズムがわかっ ておらず、予測や対策が難しい。そこで、本研究 では、前述の雪崩の発生領域内、およそ40000箇 所の全メッシュより、図25にあるように1メッ シュずつ実際に雪崩を発生させて流下を解析す ることによって雪崩の到達頻度を調べるという 手法をとった。現在、表層雪崩の発生しやすい地





------ 煙型雪崩 💿 雪崩通過メッシュ 図26 雪崩通過箇所判断の模式図



1/5000新潟県中越地震災害対策基 図27 本図

形の目安として植生分布や斜面の角度等が経験 則により求められているが、本研究で使用してい るモデルでは雪崩が発生しにくいといわれる地 形ではほぼ雪崩の流下が無いまま停止するとい う結果が得られている。そこで、雪崩の流下距離 が5m未満の場合はその雪崩が発生しなかった ものとして、除外して処理を行っている。

その流下運動を調べ、計算範囲内の各メッシュ において、雪崩がいくつ通過したかを集計し、そ の通過回数を危険度の指標として用いた。なお、 通過の判断は図26のように行う。そして危険度 ごとに、コンターで図示した。ただしそれだけで は実際のハザードマップとして用いるのは不便 であるため、出力結果を1/5000新潟県中越地震災 害対策基本図および航空写真上に重ね合わせる ことにより、結果としている。なお、使用した災 害対策基本図を、図27に示す。

雪崩の挙動に関しては前述のように、雪崩の最 大広がり幅に関する無次元係数 a BBの正確な値 がわかっていない。そのため、雪崩の端の部分に 関しては不正確な結果が出ることが予想される。 そのため、全メッシュのうち雪崩の通過回数が5 回未満であるものは描画を行わない。

3.5 山古志村ハザードマップ

上記のシミュレーションモデルには多くのパ ラメーターがあり、種種の検討を行っているが、 本報告書では、計算結果の一部のみを掲載する。

図28は a BB=0.060、D S=0.15 という条件に より作成した結果である。また、長岡市役所山古 志支所、山古志小学校、山古志中学校、長岡農業 高校山古志分校などについて、図中に位置を記し た。さらにこの領域について、何箇所かを拡大し て細かく見ていく。

拡大箇所の一覧を図29に、実際に拡大したも のは図30から図41までに示す。

点のうち特に代表的と思われるもの、また集落の うち雪崩が達する危険性が高い箇所などを拡大 して抜き出した。

今回は通過回数が5回以下のところを描画して いないために、雪崩の吹き溜まりといえる箇所が 多く残った。地形的な特徴を見ると、図36や図 **39**のように河川などの谷型地形になっている ところに多く集まる。これは谷型地形の箇所の標 高が低いために雪崩が到達しやすいこと、また両 横から流れ込むために他の箇所よりも雪崩が向 かってくる可能性が高いこと、さらに両横は斜度



図28 山古志村雪崩ハザードマップ







(山古志小学校周辺) 図34 拡大図4



拡大図5 (中野地区) 図36



拡大図6(大久保地区) 図33





拡大図 8 図37



図38 拡大図9



図39 拡大図10

が急であるために雪崩の発生自体が多いという ことが考えられる。

3.6 結果と考察

図30から図41までに、雪崩の多い地点のうち特に代表的と思われるもの、また集落のうち雪崩が達する危険性が高い箇所などを拡大して抜き出した。

一方で集落に比較的近い場所で発生した場合、 図37や図40、図41などからわかるとおり、 貯水池や田畑などを多く通過する傾向にある。こ れらの箇所は人の手で切り開かれることにより、 結果的に周辺より標高が低く、またなだらかで雪 崩の流下を妨害するものが少ない地形になって しまっていることが原因と考えられる。

山古志村には、過去集落に直撃したものだけで も数件の表層雪崩と思われる雪崩の被害の記録 が残っている。そこで、特に雪崩の通過が目立っ た箇所を表した。

図30より、小松倉地区集落では数件の民家が



図40 拡大図11



図41 拡大図12(中野地区)

雪崩の通過回数 20 回以上の領域に入っているこ とがわかる。地図を見ると小松倉地区は周囲を斜 面に囲まれた盆地状の地形で、直感的にも雪崩が 到達しやすいことがわかる。さらに斜面のすぐ近 くに存在する民家も多く、被害が発生しやすいと 考えられる。

図31より、虫亀地区では北西と中央付近に、 雪崩の発生する可能性が高い箇所があることが わかる。特に中央付近のものは民家に非常に近く、 通過数20箇所以上の領域に、やはり数件の民家 が含まれている。この箇所では実際に、昭和59 年2月に表装雪崩によるものと思われる被害が発 生している。

図32および図33はそれぞれ山古志支所、山 古志中学校、山古志小学校の周辺であり、山古志 地区の中心地といえる箇所である。この箇所でも 住宅地の周辺で雪崩が発生する可能性が高いこ とがわかる。特に山古志支所は、付属施設まで雪 崩が到達する可能性があることがわかる。

図34は中野地区の西側を拡大している。この

区域には非常に大きな雪崩の吹き溜まりが存在 していることがわかる。この図より、山古志地区 の主要道路の1つである濁沢種苧原線を、雪崩が 通過していく可能性が非常に高いことがわかる。 これは、西側に東西方向に長い谷型地形が複数存 在し、西側で発生した雪崩のほとんどがこの道路 上を通って東側へ抜けていくためと考えられる。 現在この路線はトンネルの改修が行われ、種苧原 地区へと抜けるための重要交通路となることが 期待されているが、そのためには十分な雪崩対策 が必要といえるだろう。

図35は東竹沢地区大久保集落周辺の拡大図 である。記録に残っている雪崩のうちの多くは竹 沢地区であり、解析結果を見ても実際に竹沢地区 に属する集落では雪崩が通過する確率がある地 域が目立った。一方、その他の地区では、図41 に記した中野地区のように周辺は雪崩の通過数 が多いが、集落内の通過数は少ないというような 地区も複数確認できた。

4. 結論

4. 1 現地調査について

新潟県中越地震によって発生した地形変化や 土砂崩壊による雪崩防止施設の損壊・埋没が被災 地を中心に多く見られ、しかもこの状況下で19 年ぶりの大雪となったため、この地域に雪崩災害 が多発した。この雪崩災害は、防雪施設の設計施 工法、新しい雪崩現象など、多くの検討課題を残 したといえる。

最初に被災地域における雪崩予防柵について、 大型の固定柵が主流であり、基礎部は大量のコン クリートによって施工されているため修復が困 難である点、さらに、雪崩発生区の急峻な斜面で の作業のため人力作業が主となり早急な復旧作 業が困難である点、を指摘した。今後は、大型の 固定柵の見直しを行い、基礎についてはアンカー 工法など新たな工法を積極的に考慮すべきと考 えられる。また復旧作業にあたり雪崩防止柵につ いては、上部材の再利用可能な鋼材等は利用すべ きと言える。

このような土砂崩壊による地形変化や防雪施 設の損壊・埋没は、1年を経過しても充分復旧し たとは言えず、今後も新たに発生することも予想 されることから、地震後数年以上は2004-2005 年同様に雪崩の危険性は十分高くなっているこ とがいえる。

4.2 煙型なだれハザードマップについて

本研究では煙型雪崩の理論を用いることによ り、3次元地形データを利用して、雪崩の通過回 数を危険度の指標として求めた数値シミュレー タの開発を行った。このシミュレーションモデル により旧山古志村の煙型雪崩による被害が発生 する可能性のある箇所を求めることができた。ま た、その結果を解析することにより、煙型雪崩の 特徴を明確にすることができた。本報告書では、 モデル計算の1ケースしか紹介できなかったが、 他のケースの結果を総合し、結論を以下に記す。

・旧山古志村の、過去に実際に表層雪崩の被害が 発生したという記録が残っている集落は、実際に 流下回数の多い箇所がある、もしくは流下回数が それほど多くない箇所でも広範囲にわたって存 在しているという結果が得られた。煙型雪崩を想 定した場合、旧山古志村では非常に広範囲で雪崩 発生の危険性があることがわかった。過去に雪崩 被害実績が無い地点でも、流下頻度が高い地点が 多々存在する。これらの地点については、雪崩が 発生した場合の流速などを調べ、被害発生の危険 性について評価していくことが重要である。

・粒子の粒径D_sを変化させることにより、D_sが 雪崩の挙動に大きな影響を及ぼしていることが わかった。雪粒子の粒径Dsが大きくなると、雪崩 内の雪の沈降が顕著になるため、相対的に流下速 度や流下距離が小さくなり、危険範囲は狭くなる。 粒径の違いによって、粒子の沈降速度などが異な るため、濃度や速度の挙動に影響を与える。また、 速度の大きさに影響を与えることにより、最終的 に流下経路も変化するということがわかった。

・最大広がり幅に関する無次元係数 aBB は雪崩 の形状に関して非常に支配的な係数であり、雪崩 の運動にも大きな影響を及ぼす。このためハザー ドマップについても aBB の設定により少なから ず差異が生じる。 α_{BB}は雪崩の広がり幅に影響を 与えているが、それにより雪崩が影響を受ける地 形の範囲が広がる。その結果として、流速や流下 距離に影響を与える。また、地形次第では α_{BB}に よって、流下方向が変化するということも考えら れる。

 ・速度ごとに通過頻度を求めることにより、集落 周辺では比較的流下速度が小さくなることがわ かった。これは流下速度が経路の勾配による影響 を非常に強く受けるためである。また、流下速度 の大きい雪崩は谷型地形において発生しやすく、 これらの雪崩は大きな規模に発達する可能性が あるということが考えられる。

以上のように、旧山古志村における煙型雪崩の 知見が得られた。しかしながら、解析に用いられ るパラメータの多くは実際の現象に依存し、いま だ良くわかっていない。そのため、その部分の緻 密化が必要になる。また雪粒子の粒径などの実際 の数値も現在観測が難しい。これらの実際のデー タや、より精密な地形データを用いることができ れば、より正確な結果が得られるだろう。

この解析モデルは、Windows上で利用可能な アプリケーションである煙型雪崩ハザードマッ プ作成シミュレータとして開発した。この数値シ ミュレータを使用すれば、他の地域の地形データ を用いることにより、他の地域に関しても比較的 容易に今回作成したハザードマップと同様のも のが作成できる。

4.3 まとめ

以上のように、地震後に北陸地域は非常に雪崩 災害が起きやすくなっており、今後も引き続き、

注意が必要である。また、平時でも、研究開発を 重ね、総合的な雪崩ハザードマップ作成技術を開 発・向上し、対策を講じていく事が肝要である。