

I-15 ファジィ推論を用いた雪崩危険度監視システムの開発

Development of an Observation System for Avalanche Danger by using Fuzzy Reasoning

竹内 則雄*, 森末 晴男**, 矢田 敬***, 川井 忠彦****
 Norio TAKEUCHI, Haruo MORISUE, Kei YADA and Tadahiko KAWAI

【抄録】本研究の目的は近年増加傾向にあるスキー場周辺で発生する雪崩の被害を未然に防ぐことであり、そのためには有効な避難勧告の時期や範囲の設定を行う必要がある。雪崩現象については未解明の部分も多く残されているため、本研究では、気象条件、地形条件、植生の3つの経験則を利用してファジィ推論による雪崩危険度監視システムを開発した。はじめに各条件に対するメンバーシップ関数を提案し、個々の条件が過去の経験と適合することを確認した後、WSを利用して対話形式のシステムを作成した。一方、避難勧告のためには危険個所で発生した雪崩の到達範囲も推定する必要がある。本研究ではPerlaらのモデルを基礎として、雪崩運動中の抵抗値、雪の取り込みを考慮したうえで、雪崩の質点中心の運動を扱うことにより3次元地形における雪崩の運動を解析する方法を提案し、監視システムに組み込んだ。本システムのデータベースは試作ではあるが、雪崩発生危険度の推定の可能性を示すことができた。

【Abstract】 Objective of this study is to prevent a disaster of the snow avalanche which has an increasing tendency every year in the certain skiing ground periphery. The time and a place of snow avalanche occurrence need to be estimated, to enforce refuge advice to a skier. An observation system was developed by utilizing fuzzy reasoning that a weather condition and the lay of the land condition are used in this study. Furthermore, the destination of snow avalanche was predicted for refuge advice. Analysis of snow avalanche motion on 3 dimensional lay of the lands was proposed by using Perla's model and was incorporated into the observation system. The possibility of the estimation to the risk of snow avalanche was able to be shown.

【キーワード】 雪崩, ファジィ推論, 監視システム, 危険度, 雪崩運動

【Keywords】 snow avalanche, fuzzy reasoning, observation system, danger, snow avalanche motion

1. はじめに

56 豪雪, 59 豪雪における大規模な雪崩や新潟県柵口で発生した表層雪崩[1]等, 雪崩の災害によって多くの人命が失われている。1960 年代以降は登山者やスキーヤー等のレジャー関連の犠牲者も増加傾向にある[2]。このような災害を契機に雪崩防護柵等のハード面からの対策に加え, 雪崩発生の予知や予測, 警告避難体制の整備等のソフト面からの対策が求められるようになってきた[3][4]。

雪崩は多量の降雪や積雪層の変化によって支持力よりも駆動力が上回った場合に発生する現象であり, その現象が生ずる過程によって雪崩の形態も異なる[5]。雪崩の発生を予測するためには, 場所, 時間, 規模の3つの要素を考慮する必要があるが, これらの要素は互いに絡み合いながら関わっているため, 雪崩発生の予測は困難を極める。

現在, 雪崩の予知については, ①気象条件より判断する方法[4][6], ②危険度ランクによる方法[7], ③ファジィ推論を用いる方法[3], 等が提案されている。これによって, 全層雪崩についてはある程度予測が可能になりつつあるが, 表層雪崩については信頼性の高い予知方法が確立され

ていないのが現状である。

一方, 適切な避難勧告を行うためには, 危険個所で発生した雪崩の影響範囲, すなわち, 雪崩の到達距離と広がり幅を推測する必要がある。雪崩の運動については国内外において数多くの報告が行われているが[8]-[10], 広がり幅に関する研究は少ない。

このような現状において, 著者らはスキー場周辺で発生する雪崩による被害を未然に防ぐことを目的として, ファジィ推論を用いた雪崩危険度監視システムを開発した。本研究では, このシステムの概要を述べるとともに, 過去の経験則に基づいた気象条件, 地形条件, 植生に関するファジィ関数を提案する。さらに, Perla のモデル[10]に雪崩運動中の抵抗値や雪の取り込みを考慮して雪崩の質点中心の運動を扱うことにより, 3次元地形における雪崩運動の解析法[11]を示し, 本監視システムに組み込むことで, 危険個所を推定する方法を提案する。

2. 雪崩発生危険地域の判定要因

雪崩は様々な要因によって発生するが, 雪質や気象条件,

* 正員 工博 明星大学理工学部土木工学科 教授 (〒191 東京都日野市程久保 2-1-1) Tel. 0425(91)9806
 ** 正員 佐藤工業(株) 技術本部 部長 (〒103 東京都中央区日本橋本町 4-12-20)
 *** 正員 佐藤工業(株) 土木本部 課長代理 (〒103 東京都中央区日本橋本町 4-12-20)
 **** 正員 工博 東京理科大学工学部電気工学科 教授 (〒162 東京都新宿区神楽坂 1-3)

地形条件、環境条件（植生）等の地域特性にかなり影響される。しかし、これらを分析すると、地域を越えて雪崩の発生しやすい共通した条件を見いだすことができる[3][4][12]。これらのうち人為的なものを除き、自然・環境条件によるもののみを整理してみると以下ようになる。

- (1) 気象条件
- ・多量の降雪がある場合

・積雪深の深い場合

・気温上昇・下降、降雨

・強風時

・地震時
- (2) 地形条件
- ・急傾斜の場所

・標高の高い場所

・斜面に横から強風が吹く場所

・雪底が発達して落下しやすい場所
- (3) 環境条件
- ・植生の疎な場所

・低木、草等の場所

本研究では以上の条件を考慮し、比較的データの整備が容易で、かつ雪崩発生への影響が大であると思われる以下の条件から雪崩発生の危険地区の判定を行うこととした。

- (気象条件)
- ・降雪量

・天候

・連続降雪時間

・気温

・積雪量
- (地形条件)
- ・斜面の勾配
- (環境条件)
- ・植生

3. 各種要因の感覚表現

ファジィ推論にあたり、先の3つの条件における感覚表現と入力メンバーシップ関数を定義する。

- (1) 気象条件の感覚表現
- (降雪量と連続降雪時間)

一般に、連続した降雪期間中に多量の降雪があると雪崩が発生すると言われており、吹雪の中の表層雪崩は全体の32%になるという報告もある[4]。これは、表層雪崩の発生原因の一つである、積雪層上の雪の重量が増加して駆動力が抵抗力より上回った場合に該当する[5]。このためには、降雪がどの程度連続的にあり、しかも、1日当たりに換算してどの程度の量が降ったかを調べる必要がある。

本監視システムが対象としている新潟県湯沢町付近における1983年からの10年間のデータによれば、60cm/日以上 の降雪量は全体の5%程度の頻度で発生し、降雪量は多いと判断することができる。湯沢町役場では60cm/日 で大雪注意報を、100cm/日 で大雪警報を発令している[6]。また、50cm/日 が雪崩発生の必要条件としている報告[3]や、5cm/時（120cm/日）で表層雪崩が発生するという報告[13]もある。

以上から、表1に示すように降雪量に関して5段階の感

覚表現を設定した。また、表中のランクは推論規則で利用する1～10までの値をとる危険度評価のためのランクで、危険度が大きいほど値は大きくなる。この値は先に述べたような状況を鑑み決定した。図1は降雪量の入力メンバーシップ関数を示したものである。

表1 降雪量の感覚表現

No	感覚表現	設定条件	ランク
1	少ない	20cm/日	3
2	やや少ない	40cm/日	6
3	多い	60cm/日	8
4	非常に多い	80cm/日	9
5	極めて多い	100cm/日	10

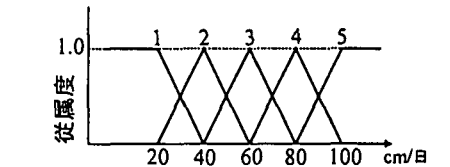


図1 降雪量の入力メンバーシップ関数

一方、大量の降雪があっても、連続降雪時間が短ければ表層雪崩の原因である新雪の量は少ない。本研究では、新雪の積雪状況を連続降雪時間によって評価するものとし、積雪の変化量が40cmで表層雪崩の危険があるという報告[13]に基づき、平均的な湯沢地区の日降雪量(20cm/日)より、表2に示すような7段階の新雪状況を設定した。また、ランク付けも降雪時間が長いほど危険とした。図2は連続降雪時間の入力メンバーシップ関数が示されている。

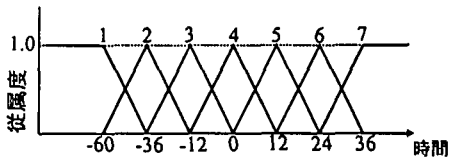


図2 連続降雪時間の入力メンバーシップ関数

表2 連続降雪時間の感覚表現

No	感覚表現	設定条件	ランク
1	新雪がある場合がある	曇・晴（連続60時間なし）	2
2	〃	曇・晴（連続36時間なし）	3
3	新雪がある	曇・晴（連続12時間なし）	5
4	〃	曇・晴（雪がやんだ状態）	7
5	〃	雪（連続12時間降雪）	8
6	新雪が積もっている	雪（連続24時間降雪）	9
7	新雪がたくさん積もっている	雪（連続36時間降雪）	10

(気温)

一般に、気温が低下すると昇華凝結により積雪層の脆弱部におけるせん断抵抗力が駆動力を下回るため表層雪崩が発生しやすくなる。雪崩発生に寄与する要因として、気温が最も高いという報告[3]もあるが、気温は地域特性が大きいため、地域に適した感覚表現が必要である。北陸地区に関しては、表層雪崩発生の限界値は-10 度～4 度という報告[3]や降雪中-1 度以下で雪崩が発生したという報告[4]がある。

湯沢地区における 1983 年から 10 年間の 1 月、2 月の平均気温が-2 度程度であるため、本研究では、表 3 に示すように気温について 5 段階のクラスを設けた。また、危険度ランクは零度以下が危険となるように定義した。図 3 は気温の入力メンバーシップ関数である。

表 3 気温の感覚表現

No	感覚表現	設定条件	ランク
1	暖かい	10℃ 以上	3
2	やや寒い	5℃	5
3	寒い	0℃	7
4	かなり寒い	-5℃	9
5	極めて寒い	-10℃	10

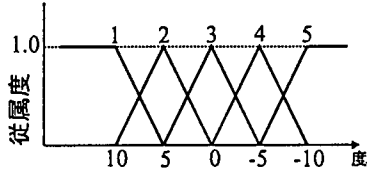


図 3 気温の入力メンバーシップ関数

(積雪量)

雪崩発生件数は、最大積雪深が 1m 未満の場合、極めて少なく、1m 以上になると急激に増加する傾向にある[12]。しかし、気温や降雪量さらには地域特性との関係もあり、必ずしも 1m 以下が極めて安全とは言いきれない。新潟県湯沢町では、積雪深が 50cm 以上のとき雪崩注意報が発令されている[6]。

本監視システムが対象としている新潟県湯沢町付近における 1983 年からの 10 年間のデータから判定すると、積雪量が 2m 以上のとき多いと考えられるため、それを基準として表 4 のように 4 段階の入力メンバーシップ関数を作成した。これは、北海道、東北、北陸、中部地方のデータから求めた建設省の研究[3]より 1 クラス程度少な目である。また、危険度ランクについては、300cm 以上で非常に高い評価をしている報告[12]もあり、これに準じて定義した。図 4 は積雪量のメンバーシップ関数を示したものである。

表 4 積雪量の感覚表現

No	感覚表現	設定条件	ランク
1	少ない	50cm 以下	4
2	やや多い	100cm	7
3	多い	200cm	8
4	極めて多い	300cm 以上	9

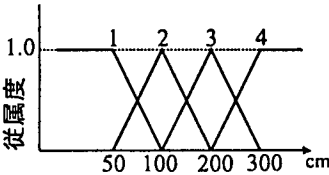


図 4 積雪量の入力メンバーシップ関数

(2) 地形条件の感覚表現

本監視システムはある特定のスキー場周辺における雪崩防災システム的な位置づけであるため、地形条件は予めデータベースとして登録する。地形条件のデータベースを作成するにあたり、図 5 に示すように該当地域を 25m の格子に分割し、各格子点における標高を入力した。25m 格子とした理由は、細分しすぎても植生等の他のデータベースがそれに対応しきれないためであり、また、大きくしすぎると地形勾配等を表現しにくくなり、雪崩影響範囲のための雪崩運動の解析に支障をきたすためである。

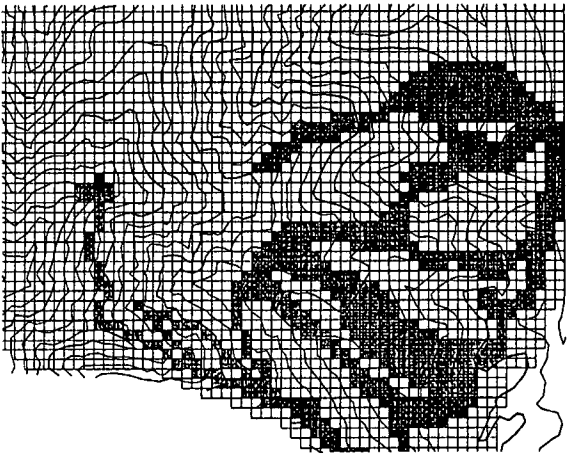


図 5 監視地区の 25m 格子分割

斜面勾配と雪崩との関係は見通し勾配によって判断することが多いが、本研究では、25m の格子内での安全性を検討するため、各格子毎に見通し勾配で言われている経験を適用することにした。一般に、表層雪崩については、20 度～50 度の範囲が危険とされており[3]、45 度程度が最も危険であるというのが大半をしめている[12]。また、15 度以下と 55 度以上では雪崩はあまり発生していない。以上から、本研究では表 5 に示す感覚表現と図 6 に示す入力メンバーシップ関数を斜面勾配に適用した。

表5 斜面勾配の感覚表現

No	感覚表現	設定条件
1	緩やか	20°以下
2	やや緩やか	30°
3	やや急	40°
4	急	45°
5	かなり急	50°
6	非常に急	55°
7	極めて急	60°以上

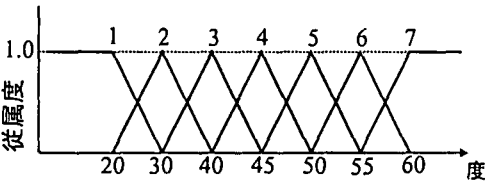


図6 斜面勾配の入力メンバーシップ関数

(3) 環境条件の感覚表現

同じ勾配であっても、該当場所の植生によっては雪崩発生の危険性に差がある[12]。また、雪崩防護柵や道路、建物あるいはスキー場のように人為的に整備された場所も同様に危険性に差が生ずる。

本研究では、これらを摩擦力の大小という立場から危険性に関する感覚表現を作成した。表6は植生に関する感覚表現を表したものである。摩擦力が小さいほど雪崩発生の危険性が高くなる。防護柵や建物については摩擦力が極めて大きいものとした。また、スキー場における摩擦係数については、実験[14]を参考に設定した。図7に入力メンバーシップ関数を示す。

表6 植生による摩擦力の感覚表現

No	感覚表現	設定条件
1	極めて小さい	低木(粗: $h < 2m$) , 草
2	小さい	低木(密: $h < 2m$)
3	やや小さい	中低木(粗: $2m < h < 10m$)
4	やや大きい	中低木(密: $2m < h < 10m$)
5	大きい	スキー場
6	極めて大きい	高木($h > 10m$) , 防護柵, 建物等

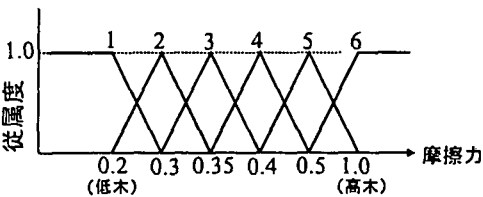


図7 植生の入力メンバーシップ関数

ただし、木の枝から落ちた雪が原因となって発生する新雪雪崩については、すでに気象条件等による環境条件から危険と判断できるものと考え、ここでは考慮していない。

4. 出力の感覚表現

雪崩危険度の判定として、積雪状況に応じて、スイスでは5段階、フランスとイタリアでは8段階、ドイツとオーストリアでは12段階の危険度ランクが用いられている[2]。最近、ヨーロッパでは以下に示す5段階に危険度を分けて考える傾向がある。

- 1段階：安全（危険は非常に少ない）
- 2段階：おおむね安全
- 3段階：危険
- 4段階：かなり危険
- 5段階：極めて危険

この評価は人工的に管理されていない、すなわち、常時パトロールすることが難しい場所に入る登山者や山岳スキーヤー等のためのものと思われ、危険側を重視したランク分けとなっている。

一方、日本のスキー場に来るスキーヤーは雪崩に関する知識を持ち合わせていない者がほとんどであり、やや安全であってもパトロールを怠ることができないという事情がある。特に、表層雪崩に関するデータが少ない現状では、ヨーロッパのように5段階に分類すると、危険とおおむね安全の間にギャップができすぎるように思う。スキー場経営にとって、人身事故は致命的にもなりかねないため、危険であれば立ち入り禁止とすればよいが、いわゆる様子眺めの場合にはパトロールを強化して危険に近づくのか安全側に移行するのを見極めなければならない。このような理由から、パトロールによるデータをもとに将来的に再分類する必要性は含まれているが、現段階においては、安全側に注意に関する項を加え、パトロールを前提として極めて安全から極めて危険までの9ランクに危険度を分けて考えた。

表7は各ランクの内容を示したもので、図8はその出力メンバーシップ関数を示したものである。

表7 出力のための感覚表現のランク

ランク	記号	内 容
1	VVS	Very Very Safety (極めて安全)
2	VS	Very Safety (かなり安全)
3	S	Safety (安全)
4	NC	Not Care (ほぼ安全)
5	C	Care (注意が必要)
6	VC	Very Care (注意)
7	D	Danger (危険)
8	VD	Very Danger (かなり危険)
9	VVD	Very Very Danger (極めて危険)

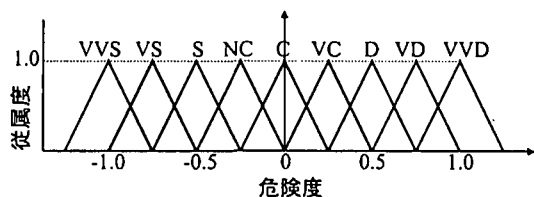


図8 出力メンバーシップ関数

5. ファジィ推論と推論規則

ファジィ推論はいくつかのファジィ命題からある1つのファジィ命題を引き出す推論方法で、推論を行うに当たり、推論規則を明確に定義する必要がある。この規則はIF-THEN形式で表現され、前件部および後件部はファジィ命題の形式で表現されている。

本研究では、推論方法として「MAX-MIN-代数積（重心法）」[15][16]を用いた。また、刻々と変わる気象条件と、データベースとして登録されている地形条件と環境条件の2つに分けて推論し、それぞれの推論結果を合成することで、個々の格子内における推論結果を導き出す方法を提案する。以下に各条件に対する推論規則と合成法を示す。

(1) 気象条件に対する推論規則

気象条件には天候、気温、積雪量、降雪量の4つのデータがある。これらのデータを入力し、推論を行う場合、データの組合せによってどの出力メンバーシップ関数により推論するかといった規則を用意しておく必要がある。本研究では、気象条件に対し、2章でまとめたランクを用いて4つのデータの平均値から表8のように決定した。

表8 気象条件のための推論規則

ランクの平均値	出力感覚の記号
10～8	VVD
8～7	VD
7～6	D
6～5	VC
5～4	C
4～3	NC
3～2	S
2～1	VS
1～0	VVS

ただし、天候が雨や、気温が15度以上の場合、積雪量が30cm以下の場合には、明らかに表層雪崩は発生しないため、予め「極めて安全(VVS)」とした。また、通常指摘されている事実と異なるような場合には若干の修正を行った。ただし、この場合の修正は1ランク危険側の出力メンバーシップ関数を利用する程度である。

(2) 地形条件、環境条件に対する推論規則

地形勾配と植生は予め25m格子毎にデータベースとして入力されている。このデータをもとに、過去の雪崩発生記録の検討や斜面安定解析等を行い、表9のように推論規則を作成した。行が斜面勾配のランクを、列が植生のランクを表している。また、表内部は出力のための感覚表現の記号を示している。

表9 地形条件のための推論規則

No.		植 生					
No.		1	2	3	4	5	6
斜面勾配	1	VC	C	NC	S	S	S
	2	VD	D	D	VC	NC	NC
	3	VVD	VD	D	VC	C	NC
	4	VVD	VVD	VD	D	VC	C
	5	VVD	VD	D	VC	C	NC
	6	VD	D	VC	C	NC	S
	7	C	C	NC	S	S	S

(3) 両推論結果の合成

気象条件による推論は、天候等から雪崩の発生しそうな日であるか否かを推論している。したがって、雪崩が発生しそうな具体的な場所等の情報は得られない。一方、地形条件による推論では危険個所の推測はできるものの、いつ雪崩が発生する危険性が高いのか不明である。

これら2つの条件を重ね合わせることで、図5に示すような任意のメッシュ位置における現在の雪崩発生の危険性を推論することができる。そこで、本研究では式(1)を用いて気象条件による推論結果と地形条件による推論結果を合成した。

$$F_D = \sqrt{(F_{DW} + 1.0) \times (F_{DG} + 1.0)} - 1.0 \tag{1}$$

ここで、 F_{DW} は気象条件による雪崩発生危険度、 F_{DG} は地形条件による雪崩発生危険度であり、 F_D が両者を重ね合わせた雪崩発生危険度を示している。単純平均ではなく式(1)のようにした理由は、例えば、気象条件で極めて危険という結果が得られても、平地では、すなわち極めて安全な地区では表層雪崩は発生しないし、逆に、極めて危険な勾配であっても、雪が無ければ雪崩は発生しないという評価を行いたいためである。式(1)では、どちらかが極めて安全であれば、推論結果も極めて安全となり、両者が極めて危険であれば、推論結果も極めて危険となる。

式(1)によれば、 F_D のとりえる値は $(-1.0 \leq F_D \leq 1.0)$ である。最終的に、式(1)で得られた危険度を表7に示した感覚的表現に照らし合わせて総合的な危険度を判断する。

図9は本システムで用いた推論の流れを整理した図である。

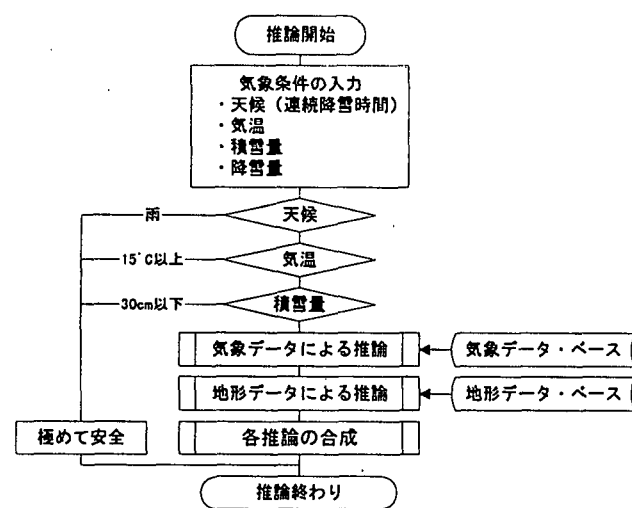


図9 推論の流れ

6. 推論例

(1) 気象条件による推論

新潟県柵口で発生した表層雪崩の場合、気象状態は
降雪量：50cm/日、降雪時間：36時間以上
気温：-2度、積雪量：450cm
であった[1][12]。この条件をここで提案したシステムによって推論すると、出力値は1.0となり極めて危険であるという結論が得られる。

一般に、表層雪崩は、
降雪量：50cm/日、降雪時間：12時間以上
気温：0度、積雪量：100cm
程度の条件を越えると発生しやすくなると言われている[3]。本システムによりこの条件で推論を行うと、出力値は0.62となり危険からかなり危険の間に入る。この条件で降雪量を20cm/日、積雪量を50cmとすると本システムの出力値は0.25で注意に該当する。

このように、本システムによる気象条件に対する推論結果は一般的に言われていることと類似の傾向を示す。

(2) 地形条件、環境条件による推論

気象条件で取り上げた新潟県柵口の場合、雪崩発生地点の斜面勾配は45度で、爪で引っ掻いたようなガリー状になっている。したがって、植生的には低木、草に該当するものと思われる。この地域は雪崩多発地帯としても有名であるが、本システムによる推論結果は1.0で極めて危険に該当する。

環境条件が最悪であっても、斜面勾配が一定以上に急になると危険性は低下すると言われている。本システムでも、新潟県柵口の例で斜面勾配を57.5度にすると、出力値は0.375となり、注意から危険の範囲に入る。逆に、斜

面勾配が25度程度の場合には、出力は0.5で、危険に該当する結果が得られる。この結果は、雪崩発生面の斜度と頻度の関係[12]と類似の結果を示している。

7. 雪崩の運動方程式

雪崩現象を運動力学的に眺めると、一個の剛体的な積雪層として運動を開始した後、雪塊や雪粒からなる流体的な雪氷混相流となり、最後に再び剛体的な堆積物に変わると考えられる。しかし、現在のところ、これらを統一的に解析する手法は開発されていない[9]。本研究では、雪崩の質点運動を扱う従来の研究[8]-[10]を応用し、雪崩の広がり幅を求めた[11]。

いま、斜面地形の方程式は、 x, y 面が水平面で z 軸が鉛直上向きの座標系とすると以下ようになる。

$$z = f(x, y) \tag{2}$$

このとき、雪崩の重心における運動方程式は次のようになる[8]。

$$\frac{d}{dt}(mv) = F - R \tag{3}$$

ここで、 m は雪崩重心の質量、 t は時間、 v は速度、 F は雪崩の駆動力、 R は抵抗力である。なお、 F と R については文献[9]に従って設定した。また、雪崩の滑走中、雪の取り込みあるいは堆積等によって質量が刻々と変化するため、既往の方法[8]により滑走距離に応じて質量変化率を考慮した。

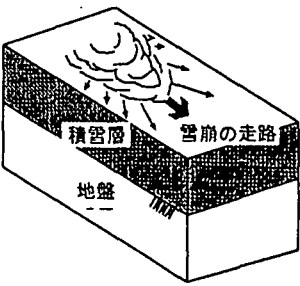


図10 雪崩の広がり概念

式(3)は雪崩重心の運動状況を示しているものであり、図10に示すような広がり幅はこのままでは表現できない。そこで、本研究では図11に示すような θ 方向に対して、各時間毎に初期速度 $v \cos \theta$ 、質量 $m \cos \theta$ として運動方程式(3)を解き、 θ 方向の速度が充分小さくなる位置を雪崩の広がり範囲として広がり幅を計算した。図中、(i)は雪崩の走路を求める際の時間ステップ、(j)は雪崩の広がり幅を求める時間ステップであり、各(i)について広がり幅を計算し、それらを連ねた範囲を雪崩全体の広がり範囲とする。

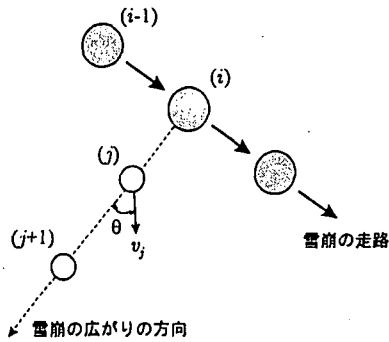


図 11 雪崩の広がり計算

図 12 は、本手法により求めた雪崩の広がり範囲が示されている。図中、慣性走路とあるのは、抵抗力を無視し、慣性効果だけで求めた走路であり、勾配走路は抵抗力が充分大きく慣性効果が無視できる場合の走路で、この場合、最大傾斜方向を連ねた走路となる。一般に、慣性効果が増加するにつれて勾配走路から慣性走路へと徐々に変化し、この範囲が雪崩の取り得る範囲の目安になると言われている[8]。

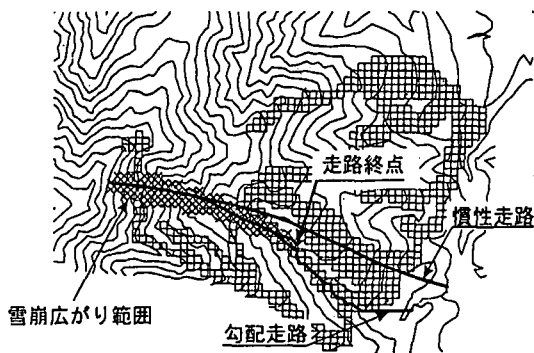


図 12 実地形における雪崩の走路と広がり範囲

本シミュレーションでは、雪崩の走路は勾配走路とほぼ同じで、広がり幅は、徐々に勾配走路側に収束する傾向が得られた。ただし、これは斜面勾配や抵抗力によって異なる。図 13 はこのときの鳥瞰図が示されている。

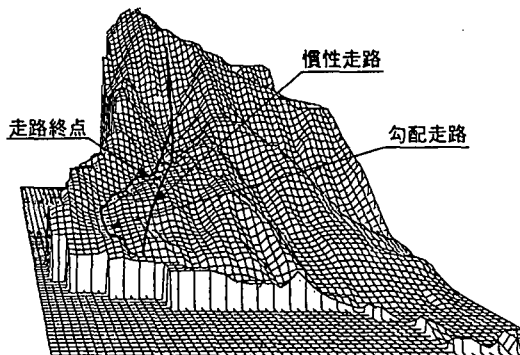


図 13 雪崩走路の鳥瞰図

8. 雪崩危険度監視システム

これまで述べてきた関係を用いて、新潟県湯沢町にあるスキー場周辺の雪崩危険度判定システムをワークステー

ションを用いて作成した。

写真 1 は本システムを立ち上げた時の画面で、データベースとして登録されている地形図が表示される。

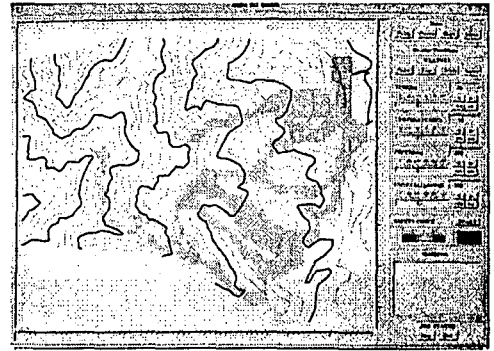


写真 1 システム立ち上げ時の画面

画面右側に各種メニューが配置されており、この部分を拡大したものが写真 2 である。マウス操作だけで処理選択や気象条件の入力が可能である。また、モニターには推論結果が表示され、危険という結論の場合には警報音が鳴るようになっている。この写真はモノクロであるが、実際のシステムはカラー表示となっており、緑(安全)から赤(危険)まで危険度に応じて表示される。

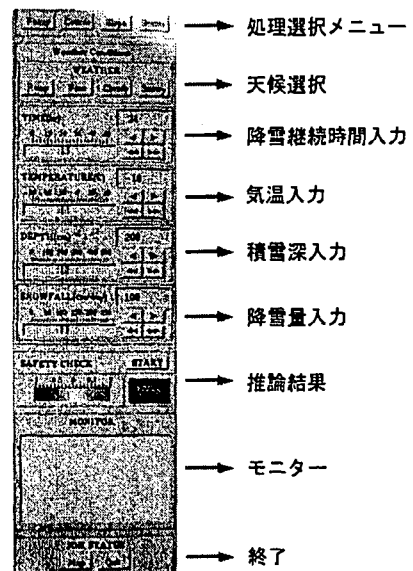


写真 2 メニュー画面

写真 3 は本システムに内蔵された植生データベースを示すものである。このデータは、航空写真、現地踏査をもとに作成した。

写真 4 は気象データ、地形データをもとに推論した結果を示したもので、推論条件は、天候：雪、連続降雪時間：14 時間、気温：0 度、積雪量：150cm、降雪量：40cm/日とした結果である。実際のシステムではカラー表示となっているが、色の濃い部分が雪崩発生の危険性が高い格子を表している。

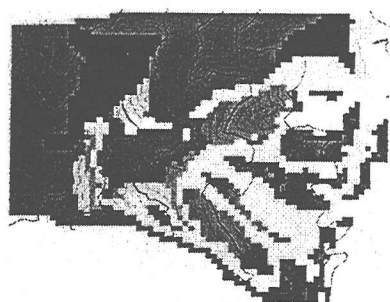


写真3 植生データベース

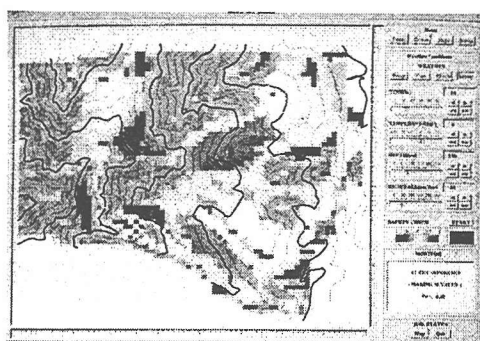


写真4 危険度判定例

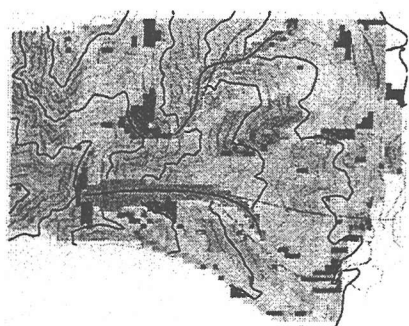


写真5 雪崩の走路と広がり幅

本システムでは、ファジィ推論結果をもとにマウスにより雪崩の始まる点を指定する。写真5は、指定された危険箇所から生じた雪崩の走路を示した画面である。広がり幅を表示することで、パトロールを強化する範囲がより明確に理解できる。

9. むすび

ファジィ推論を用いた雪崩危険度判定法について、気象条件、地形条件、環境条件に対するメンバーシップ関数の考え方を示し、それに基づいて作成した推論システムの一例を示した。

本システムでは、気象データを手動入力としているが、これらのデータは自動計測が可能であるため、自動監視システムへの拡張が可能である。現在、気象データは1箇所のものを利用しているが、本システムは格子毎に推論しているため、複数箇所の気象データを各格子に割り振ることが可能であり、これにより、より精度の高い推論を行うこ

とができるものとする。また、雪崩の運動走路とその影響範囲を表示することで、特定のスキーコースの閉鎖や、監視パトロールの強化地域の推定がより明確になるものとする。

表層雪崩に関するデータは極めて少なく、現段階では信頼性の保証を確保することができないが、今後、推論性能の向上を図ることで危険予知の一助になるものとする。

謝辞：本研究を行うにあたり早川典生教授（長岡技術科学大学）からは貴重なご意見を頂いた。また、深見弘氏（佐藤工業）にはデータベースの作成に協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林俊一：新潟県能生町柵口地区を襲った表層雪崩，日本雪氷学会誌「雪氷」，Vol48, No.2, pp87-91, 1986.6
- 2) 北海道雪崩事故防止研究会編：最新雪崩学入門，山と溪谷社，1996.3
- 3) 建設省：雪崩発生予知・予測に関する研究，第42回建設省技術研究報告（昭和63年度），1988
- 4) 広部良輔，山田稔，五十嵐高志：雪崩警報システムの試作について，国立防災科学技術センター研究速報，No.39, pp1-12, 1979.12
- 5) 清水弘，秋田谷英次：日勝峠雪崩（昭和62.1.29）の発生機構，雪氷，Vol49, No.3, pp139-145, 1987.9
- 6) 湯沢町防災会議：湯沢地域防災計画，1988
- 7) 日本建設機械化協会編：新編防雪工学ハンドブック，森北出版，1988
- 8) 納口恭明：実際の地形上での雪崩の運動走路，国立防災科学技術センター研究報告，No.38, 1986.
- 9) 前野紀一，西村浩一：三次元地形における雪崩運動の数値計算，低温科学—物理編—，1987.11
- 10) Perla, R. I. : Avalanche release, motion and impact, Dynamics of Snow and Ice Masses, Ed. S.c.Colbeck, Academic Press, pp397-462, 1980.
- 11) 矢田敬，深見弘，竹内則雄：雪崩の運動走路シミュレーション，日本シミュレーション学会第11回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス発表論文集，pp41-44, 1992.6.
- 12) 雪崩対策研究会編著：雪崩とその対策，経済調査会，1986.12
- 13) 山田稔：雪崩発生の条件と予測について，第12回雪害防災研究発表会梗概集，pp53-60, 1987.
- 14) 矢田敬他：雪塊の動摩擦係数に関する基礎的実験，第31回地盤工学研究発表会講演集，1996（投稿中）
- 15) 水本雅晴：最近のファジィ制御法，数理科学，No.333, pp20-26, 1991.3.
- 16) 古田均他：ファジィ理論の土木工学への応用，森北出版，1992