

P11 可能性回帰分析による雪崩の到達範囲予測の検討

建設省土木研究所 寺田秀樹 ○大浦二郎

中村良光 藤澤和範

パシフィックコンサルタンツ(株) 須原 茂 吉野秀夫

1. はじめに

雪崩の到達距離は、地形・気象・環境要因など、様々な要因が複雑に関連し合っており、これらの要因がどの程度影響しているかなどについて整理することは非常に困難である。また、雪崩の到達範囲の評価については、シミュレーション計算を用いる場合でもパラメータ設定には専門家の経験的判断や主観的な評価によるところが大きいのが現状である。

そこで、見通し角を出力とした可能性線形回帰モデルの雪崩到達危険度評価への適用を検討した。この手法を用いることで、雪崩の到達範囲に対する影響要因を客観的に評価することができる。また、同定したモデルを利用することで雪崩到達危険度を簡便に評価することができる。

2. 雪崩到達距離に影響を及ぼす要因の整理

雪崩到達距離の危険度判定には見通し角が利用されることが多い。図-1に示すように見通し角は雪崩のデブリ（堆積）末端から雪崩発生点の上端を直接見通した仰角で、到達距離は発生点から停止点までの水平到達距離である。本検討に用いたデータは、発生範囲、堆積範囲が明確で縦断面の作成可能な表層雪崩26データである。

雪崩の到達距離に関連する文献・資料より雪崩の到達に関する要因を抽出した。また、雪崩発生事例のデータから到達距離（見通し角）と影響要因の相関関係を整理した。それらを基に、ブレーストミングにより雪崩到達距離（見通し角）に影響する要因を要因関連図としてまとめた。

到達距離（見通し角）に影響を与える要因は、大きく分けて雪崩の駆動力を増大させる要因と抵抗力を小さくする2つの要因パターンから成る。これらの要因の中から、2次的な要因や計測が繁雑で評価が困難な要因を除いて、数量化I類により到達距離に関する影響度合いを調べた。その結果に基づき、以下に示す9要因を本検討での評価要因とした。各要因の定義を表-1、図-1、2に示す。

- | | | |
|-------------|---------|-------------------|
| (1) 積雪・気象要因 | ①最高気温 | ②積雪深 |
| (2) 地形要因 | ①発生区傾斜角 | ②走路傾斜角 ③斜面長 ④斜面形状 |
| (3) 発生状況要因 | ①発生標高 | ②発生区面積 ③収束度 |

ここで、斜面形状は、（沢・平・尾根）、（渓流・収束・中立・発散・その他）等の区分では人の主観的な感覚が多分に含まれるため、定量的にデータを取り扱えるよう図-2のように定義した。また、斜面長を定義した地盤勾配10°は、これまで表層雪崩を対象に行われたシミュレーションの動摩擦係数の値等を参考に雪崩の減速が始まる地点として設定した。また、積雪深については、渡辺ほか(1976)の計測結果等を参考に100m当たり30cmの増加があるものとみなした。

表-1 各要因の定義

要 因	要 因 の 定 義
最 高 気 温	近傍の観測点から標高補正した発生日の最高気温
積 雪 深	近傍の観測点から標高補正した発生日の積雪深
発生区傾斜角	地盤勾配が30°となる地点と発生源頭部の間の平均傾斜角
走路傾斜角	地盤勾配が10°となる地点と30°となる地点間の平均傾斜角
斜面形状	$\frac{L_1 + L_2}{2B}$ (図-2参照)
収束度	(発生区最大幅) / (30°地点の幅)
斜面長	10°地点と30°地点間の斜距離
発生標高	雪崩発生区標高
発生区面積	雪崩発生区面積

3. 可能性線形回帰モデルの同定

雪崩の到達危険度の判定は、専門家の経験的判断や主観に基づくあいまいなシステムであると考え（可能性線形システムとみなす）、見通し角を出力値とした可能性線形回帰モデルの同定を行った。出力値（目的変数）は、見通し角 ($\theta = \tan(H/L)$) とし、入力値（説明変数）は、既に示した到達要因（9要因）の5段階の階級区分による評価値を用いた。この場合の可能性線形システムは式(1)で表される。表-2に各要因の階級区分を示す。入力要因の階級区分は、入力値の数値が大きくなるほど見通し角が小さくなるように設定されている。

$$Y = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + \dots + A_9 X_9 \quad \text{式(1)}$$

A_0 : ファジィ定数項

$A_1, \dots, A_9$: 影響要因のファジィ係数

$X_1, \dots, X_9$: 影響要因の評価値 (1, 2, 3, 4, 5)

Y : 出力ファジィ値

ただし、ファジィ係数 A_i は、図-3に示される可能性分布関数（対称な三角形ファジィ数）で、 B_i は中心、 C_i は可能性の幅で与えられる。

$$A_i = (B_i, C_i) \quad \text{式(2)}$$

出力 Y_i の可能性分布関数は、式(3)で計算できる。

$$Y_i = \left(\sum_{j=1}^n B_j^i X_{ij}, \sum_{j=1}^n C_j^i X_{ij} \right) \quad \text{式(3)}$$

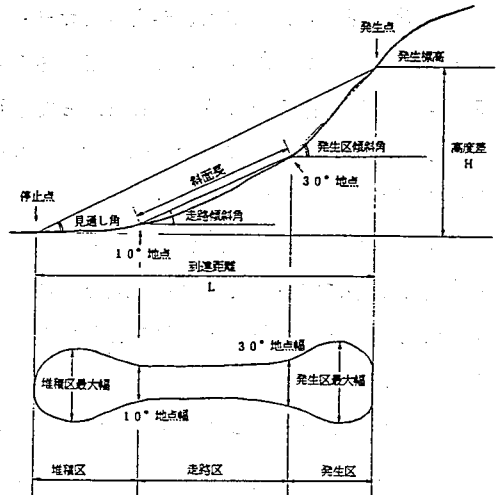


図-1 雪崩到達の概念図及び要因の定義

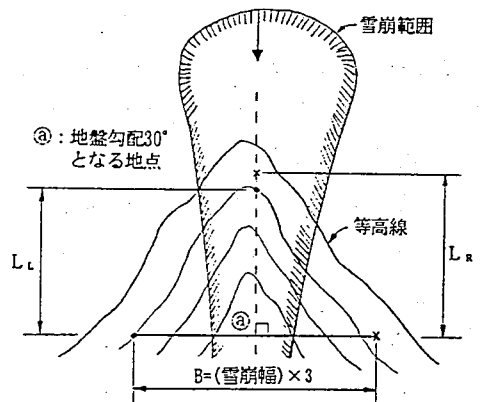


図-2 斜面形状の計測方法

表-2 各要因の階級区分

要 因	階 級 値	要 因	階 級 値
最 高 気 温 (℃)	1. $-1.0 \leq X$ 2. $-1.0 \leq X < -1.0$ 3. $-1.0 \leq X < -1.0$ 4. $-1.0 \leq X < -1.0$ 5. $X < -1.0$	積 雪 深 (cm)	1. $X < 150$ 2. $150 \leq X < 250$ 3. $250 \leq X < 350$ 4. $350 \leq X < 450$ 5. $450 \leq X$
発生区傾斜角 (°)	1. $30 \leq X$ 2. $40 \leq X < 50$ 3. $35 \leq X < 40$ 4. $30 \leq X < 35$ 5. $X < 30$	走路傾斜角 (°)	1. なし 2. $X < 15$ 3. $15 \leq X < 20$ 4. $20 \leq X < 25$ 5. $25 \leq X$
斜面形状	1. $X \leq -0.1$ 2. $-0.1 \leq X < 0.1$ 3. $0.1 \leq X < 0.3$ 4. $0.3 \leq X < 0.5$ 5. $0.5 \leq X$	収束度	1. $X < 0.75$ 2. $0.75 \leq X < 1.25$ 3. $1.25 \leq X < 2.00$ 4. $2.00 \leq X < 3.00$ 5. $3.00 \leq X$
斜面長 (m)	1. なし 2. $100 \leq X < 100$ 3. $100 \leq X < 500$ 4. $500 \leq X < 1000$ 5. $1000 \leq X$	発生標高 (m)	1. $X < 300$ 2. $300 \leq X < 500$ 3. $500 \leq X < 700$ 4. $700 \leq X < 900$ 5. $900 \leq X$
発生区面積 (㎡)	1. $X < 1000$ 2. $1000 \leq X < 5000$ 3. $5000 \leq X < 10000$ 4. $10000 \leq X < 50000$ 5. $50000 \leq X$	なお、斜面長、走路傾斜角の「なし」とは、定義に見合う区間がないことを示す。	

ファジィ回帰モデルでは、与えられたデータ (y_i, x_i) を出力ファジィ値 Y_i が度合い h ($0 \leq h \leq 1$) 以上で含むようファジィ係数 A_i を決める。したがって、可能性の度合い h での出力ファジィ値 Y_i のメンバシップ関数は式(4)で表される。

$$1 - |(Y_i - X_i' B) / (C' | X_i)| \geq h \quad \text{式(4)}$$

ファジィ係数 A_i は、式(4)の条件下で出力ファジィ値 Y_i 幅の合計を最小にすることによって求められる。可能性の度合い h は、最もあいまいさが小さくなることを条件に $h = 0$ とした。

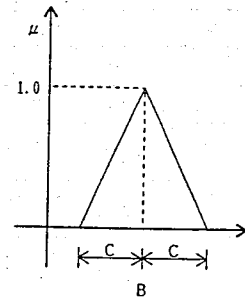


図-3 三角形ファジィ数

4. 解析結果及び考察

説明変数を表-2の9要因にしたファジィ線形回帰モデルの同定結果を以下に示す。

$$Y = (47.8, 0.0) + (-0.24, 0.0) X_1 + (-1.55, 0.0) X_2 + (-3.11, 1.22) X_3 + (-1.23, 0.0) X_4 + (1.42, 0.0) X_5 + (-0.15, 0.0) X_6 + (-2.12, 0.0) X_7 + (0.05, 0.0) X_8 + (-0.25, 0.0) X_9 \quad \text{式(5)}$$

Y : 見通し角 X_1 : 最高気温 X_2 : 積雪深 X_3 : 発生区傾斜角 X_4 : 走路傾斜角
 X_5 : 斜面形状 X_6 : 収束度 X_7 : 斜面長 X_8 : 発生標高 X_9 : 発生区面積

このモデル式による出力結果を図-4に示す。

図-4の縦軸は見通し角、横軸は26件の斜面番号、図中の●が実測値である。たとえば、図-4に示す斜面番号1の予測出力値(見通し角)は、下限値=27.4°、中心値=31.0°、上限値=34.7°からなる三角形ファジィ数で与えられる。

ファジィ係数の中心値を比べることで、各要因の影響度合いを評価することができる。見通し角は発生区傾斜角、斜面長、積雪深、斜面形状、走路傾斜角に支配され、決定づけられている。影響の大きい要因について、工学的特性との関係を考えて以下のようなものである。発生区傾斜角は傾斜が緩いほど、斜面上の積雪層を不安定にするには大きな積雪層厚が必要となるため、発生規模が大きくなり、到達距離も大きくなる。また、可能性の幅が現れたのは、雪質の違いにより急斜面でも大量の積雪が生じ、大規模な雪崩となることもあるためと考えられる。

また、雪崩の走路区間において、斜面長が大きく、その傾斜が急なほど、減速しずらくなり到達範囲が大きくなる。ところが斜面形状の係数をみ

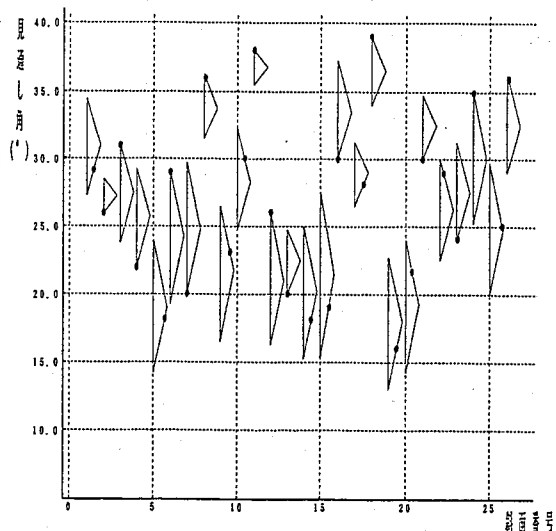


図-4 出力結果

ると、沢状の方が雪崩の流動深が増し、到達範囲が大きくなると考えられるのに対し、計算結果は尾根状なほど到達距離が大きくなることになっている。これは、斜面形状が収束度と同じような内容を表現していることからその影響で逆の傾向になったものと考えられる。発生標高の係数も中心値は小さいが正の値であり、これも標高補正された最高気温や積雪深と関連が深く、従属関係にあるためと

そこで、重複した内容をもつと思われる要因のうち、斜面形状と発生標高を除いたモデル式を作成した。そのモデルでは最高気温の影響が小さいために、さらに最高気温を除いたモデル式を最終的なモデルとして構築した。式(6)にそのモデル式を示す。

式(6)から、発生区傾斜角、積雪深、発生区面積は雪崩の規模に関する要因であることから、発生した雪崩の規模が大きく、雪崩が減速しない流下区間が長ければ、雪崩の見通し角は小さく、到達距離は長くなることがわかる。

つまり、雪崩の到達範囲は、雪崩の規模と斜面の条件によって主に決まると言える。Terada et al. は、多数の雪崩を質点系のモデル（Perla型）で再現計算を行い、最適な抵抗係数（M/D）を求め、雪崩量（発生量）との関係を調べた。その結果、雪崩の見通し角が小さくなる雪崩は抵抗係数が大きい。また、雪崩量が大きくなると抵抗係数の値は大きくなるが、斜面長が大きくなると、同じ雪崩量でも抵抗係数の値が特に大きくなることを述べた。今回の結果は、これと整合していると考えられる。

構築したモデルを1992年5月4日に北アルプス白馬大雪溪で発生した大規模な表層雪崩に適用し、モデルの検証を行った。図-5に検証結果を示すが、予測の範囲内または安全側に予測された。

また、モデル式による算出結果から下限値を予想最遠範囲、中心値を危険度の極めて高い範囲とすること等で、簡便に雪崩到達危険度を評価することができると考えられる。

Figure 1 is a graph showing the membership function μ (Y-axis, ranging from 0 to 1.0) versus the angle of view Y (X-axis, ranging from 0 to 35). The graph displays two triangular functions: a solid line and a dashed line. The solid line starts at $Y=7$, reaches a peak of $\mu=1.0$ at $Y=12$, and ends at $Y=17$. The dashed line starts at $Y=12$, reaches a peak of $\mu=1.0$ at $Y=17$, and ends at $Y=22$. An arrow points to the X-axis at $Y=21.8$, labeled "実測値 (21.8°)".

雪崩の到達危険度の判定について、ファジィ理論に基づく可能性線形システムを適用し、得

られたファジィ係数から到達範囲にかかわる要因の評価を行い、工学的裏付けのある表層雪崩の到達危険度評価モデルの構築を行った。

最終的に得られたモデル式から、表層雪崩の見通し角に影響を及ぼす要因は、主に雪崩の規模と流下する斜面の条件に関する要因、特に斜面長である。また、発生が期待される雪崩の規模が大きい斜面ほど、雪質の違い等により実際の雪崩規模が変化する範囲が広がる。その結果、到達範囲に幅（あいまいさ）を生じさせていると言える。

今後は、発生危険度と組み合わせた総合的評価手法及びシミュレーションのパラメータ同定に対する本手法の適用を検討したい。

【参考文献】 Terada, H., et al.: Model project for establishing warning and evacuation system against snow avalanche. *Annals of Glaciology*, Vol. 19, (in press)