実際の地形上での雪崩の運動走路 I

納 口 恭 明*

国立防災科学技術センター雪害実験研究所

Traveling Path of Snow Avalanche on Real Configuration I

By

Yasuaki Nohguchi

Institute of Snow and Ice Studies, National Research Center for Disaster Prevention, Nagaoka, Niigata-ken, 940

Abstract

In general, for a curved thalweg, running path of snow avalanches is not in accordance with the thalweg because of inertia of the avalanche. The difference is great especially for high speed avalanche. To examine the difference, traveling paths of snow avalanches were calculated on real slopes where large scale avalanches had occurred before. As a result, for high speed avalanches, real traveling paths could be reproduced by the calculation with resistance parameter $\delta = 0.0025$ /m; for this value, the terminal velocity on 30° slope is 44 m/sec.

1. はじめに

一般に、物体がゆがんだ斜面上を滑落する場合、その出発点を決めても走路は一義的には 決まらない、ゆがんだ斜面とは、斜面上の最大傾斜方向をつらねてできる曲線の水平面への 射影が直線でなく、屈曲するような斜面を指す、このとき、慣性効果のために、運動走路は 一般にこの曲線と一致しない、以後このような不一致を「横のずれ」と呼ぶことにする。

この横のずれは運動の速度スケールと斜面のゆがみの空間スケールとに密接に関係する. 一般に雪崩の速度スケールは1m/sのオーダーから100m/sのオーダーまで広い範囲に わたっており、とくに高速の雪崩では走路が沢筋をはずれて思わぬ災害をもたらす場合があ 3.

これまで、雪崩の運動のシミュレーションをおこなう場合、連続体的に扱う場合でも質量 中心的に扱う場合でも、ゆがみのない単純な地形上での雪崩を扱うか、あるいはゆがんでい てもあらかじめ走路を設定しておくなどして扱うかであり、慣性効果にもとづく横のずれを 正当にかつ積極的に記述したものはない、とくにこの横のずれは、長い距離を流下する大規 模な雪崩にとっては、流下につれて増幅され、走路に大きな差を生じうるものであり、防災上 無視しえないものである.

「モデル地形における雪崩の運動走路」(納口, 1983)において,著者は任意の地形面 上を滑落する物体の正確な運動方程式を導出し,2・3のパラメータを含む簡単な数式で表 現できるモデル地形上での運動走路の計算をおこない,横ずれの定性的な考察をおこなった. この場合,運動走路は雪崩の質量中心の走路を想定しているのであるが,むしろ雪崩の走路 を見積るための試験体として質量mの物体をころがることなく滑り落したものと考えるのが よい(以後実際の雪崩の走路と区別する意味で,計算にもとづく走路を試験体の走路と呼ぶ).

本論文では、この方程式を用い、過去に大規模な雪崩(流下距離が1000m程度のオーダーのもの)のあった地点の地形図上で運動走路を計算し、速度スケールに応じた雪崩の運動走路の推定をおこなう.

2. 運動方程式

一般の地形をつぎの式

z = f(x, y)

(1)

で表わすと(*z*は鉛直上向き, *x* y 面は水平面), この地形面上に抱束された質量 m の物体の運動は解析力学によりつぎのように記述することができる(納口, 1983).

$\frac{\mathrm{d}\dot{x}}{\mathrm{d}t} = -$	$\frac{f_x}{1+f_x^2+f_y^2}$	$g' - \frac{R}{m}$	$\frac{\dot{x}}{V}$		
$\frac{\mathrm{d}\dot{y}}{\mathrm{d}t} = -$	$\frac{fy}{1 + f_x^2 + f_y^2}$	$g' - \frac{R}{m}$	$\frac{\dot{y}}{V}$	}	(2)
$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \mathbf{\dot{x}}$	2				
$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = \dot{y}$]	

ただし

$$g' = f_{xx} \dot{x}^{2} + 2 f_{xy} \dot{x} \dot{y} + f_{yy} \dot{y}^{2} + g$$
(3)

$$V = \sqrt{\dot{x}^{2} + \dot{y}^{2} + \dot{z}^{2}}$$

$$= \sqrt{\dot{x}^{2} + \dot{y}^{2} + (f_{x} \dot{x} + f_{y} \dot{y})^{2}}$$
(4)

でありRは抵抗力の大きさを表わす(抵抗力の方向は物体の進行方向に逆向きに作用するものとする).

(2)式は抵抗力の項R/mと地形面の空間一次微分 $f_{x,fy}$ (地形面の傾斜を表わす)と空間 二次微分 $f_{xx,fxy}$, f_{xy} (地形面のゆがみを表わす)を与えることにより解くことができ る. x, yは地形図上に固定された座標であり、地形面の空間微分は位置(x, y)の関数で ある.

3. 計算方法

計算は差分法でおこない,時間ステップは1秒である。また地形図上での空間微分 f_{x_i} $f_{y_i}, f_{xx_i}, f_{xy_i}, f_{yy}$ の計算は試験体の位置 (x_i, y) を中心とする100 m 四方の領域を考え (図1),つぎの式によって与えた.





 $f_{x} = (f_{2} - f_{4}) / \triangle$ $f_{y} = (f_{1} - f_{3}) / \triangle$ $f_{xx} = 4 (f_{2} - 2 f_{0} + f_{4}) / \triangle^{2}$ $f_{yy} = 4 (f_{1} - 2 f_{0} + f_{3}) / \triangle^{2}$ $f_{xy} = (f_{5} - f_{6} - f_{8} + f_{7}) / \triangle^{2}$

(5)

ただし△はこの場合100 mである.

△の大きさと地形図の精度の選択は重要な問題である.地形図の精度をあげ、△を小さく すればするほど正確になるというわけではない.これは、微視的にみた場合に地形のもつギ ザギザな構造-いわゆるフラクタル-のために、(2)式のような微分方程式が意味をなさなく なるからである.このため雪崩のもつ空間スケールと速度スケールに応じた適度な粗視化が 必要となる.この点については別報で改めて詳述する.

4. 抵抗力表現と速度スケール・空間スケール

抵抗力Rを速度の2乗に比例する項によってつぎのように与える.

 $R = m \delta V^2$

(6)

(6)式右辺の質量mは(2)式における抵抗の項にmが陽に含まれないように便宜的に与えたもの である.このとき運動方程式(2)式はパラメータとしてδひとつを含むことになる.ここでは 雪崩の発生・停止を考えずに流動状態で運動中の走路のみを考えることから、クーロン摩擦 力に相当する項はゼロとみなしている.

(6)式のような抵抗力表現の現象論的意味は,速度の2乗に比例する力のために一定勾配の 斜面ではある平衡速度が得られるということである.すなわち,一定の傾きのの斜面上の試 験体の一次元運動の方程式は

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = g\sin\theta - \delta V^2 \tag{7}$$

であり、このとき平衡速度 V_{θ} は

 $V_{\theta} = \sqrt{g \sin \theta / \delta}$

(8)

(10)

となる.したがってパラメータδによって試験体の速度スケールを設定することができる. それと同時に(7)式を無次元化すると、平衡速度に達するまでの過渡的な走行距離の目安 (Lc)が1/δとなることがわかる.すなわち

$$\frac{Lc}{L} \frac{dV^*}{dt^*} = 1 - V^{*2}$$

$$V = V_{\theta} V^*$$

$$t = (L / V_{\theta}) t^*$$

$$Lc = 1 / \delta$$
(9)

から(Lは代表長さ),

 $L >> Lc = 1 / \delta$

では過渡項 dV^*/dt^* が無視で きることがわかる.したがって一 定傾斜の斜面上での走行距離がLcよりも十分に大きければ試験体の 速度は平衡速度とみなすことがで きる.この意味でLcを過渡現象 の代表長さとみなすことができる. 計算で用いた δ の値と速度スケー νV_{30} (雪崩の運動領域の代表的 **表1** 抵抗の係数と速度スケール・空間スケール. **Table 1** *δ*vs. *V*₃₀ and *L*_c.

δ(1/m)	V_{30} (m/sec)	Lc (m)
0. 05	1 0	. 20
0. 007	26	143
0. 0025	4 4	400
0. 002	4 9	5 00
0. 001	7 0	1, 000

な傾きとして $\theta = 30^{\circ}$ の平衡速度),過渡現象の空間スケール Lc を表1 に示す.

5. 横ずれを生むゆがんだ地形の典型

自然にみられる。横ずれが生じる雪崩の典型的な例は図2のaのように沢筋が大きく屈曲 する場合と、図2のbのように沢の側面から雪崩が発生してその沢を通り越して対岸の側面 までかけ上る場合である。また図2のcのように尾根の近くを運動する場合は、その尾根を 越えるか越えないかで大きな走路のちがいを生む。

とくに長距離を運動する大規模な雪崩では、このような横ずれを何度か生ずるであろうか ら、その走路は自明とはいいがたい.





Fig. 2 Typical configuration with curvature.

6. 実際の地形図上での雪崩の走路のシミュレーション

6.1 妙高高原幕ノ沢の雪崩

新潟県の妙高高原幕ノ沢は沢筋が屈曲する a のタイプ(図2)の地形である(図3). こ の沢はかつてスキー場であったが、1970年3月7日におたた雪崩で死者2名を出して以来 廃止されてしまった.この雪崩は沢のはじまりである神奈山の頂上付近で発生したものと思 われ、走行距離2000~3000m,体積10⁶m³におよぶ大規模なものである.これと同様な 大規模雪崩が昭和59年(1984年)の豪雪時にも発生していたことが春になって大沼らによっ て見つけられ調査がおこなわれた(この結果の概要は下村によって昭和59年度日本雪氷学会 なだれ懇談会で発表された).雪崩は乾雪表層雪崩で2,3回程度,発生したものと推定され る.

この沢は,はじめは直線的であるが,標高1300mから1000mくらいにかけて大きくS字 形に屈曲している.写真1は上流部から屈曲しているところを見たものである 正面に見え る尾根の向こう側は現在スキー場として使用されている.雪崩は沢の屈曲による横ずれのた めに,かなり尾根の頂上近くまでのり上っているのが樹木の折れた状況から推定された(図 4).



図3 妙高高原幕ノ沢(実線は沢筋). Fig.3 Makunosawa.

実際の地形上での雪崩の運動走路 I ― 納口







図 4 幕ノ沢の雪崩の範囲(一点鎖線は尾根). Fig. 4 Avalanche of Makunosawa.

そこで,はじめに横ずれの最大な走路を求めることによって,尾根をのりこえて隣りの沢 に入り込む可能性を検討してみよう.

抵抗の係数 δ が小さいほど速度スケールは大きくなり慣性効果も大きくなる(表1).したがって δ がゼロの極限(すなわち抵抗力Rがゼロ)で慣性効果は最大となり,最大の横ずれを生じることになる.図5は(2)式のRをゼロとして計算した試験体の走路である.出発点としてA・B・Cの3点を設定した(今後とくにことわらないかぎり出発点では初速度はゼロである). A・Bを出発点とした場合,S字形の屈曲部に達っする前に,下流に向って左側の尾根(一点鎖線)を越えて隣の沢に入ってしまった.S字形の屈曲部に達っするようにC点から初速度10m/sで沢に沿うように出発した場合は,CのS字形の屈曲のために下流に



図5 R = 0の場合の走路. Fig. 5 Traveling path (R=0).

向って右側の尾根(一点鎖線)を越えて隣の沢に入ってしまった.いずれにしても,抵抗の 項をゼロとすると,走路は沢の内部におさまらずに外へとび出してしまうことがわかる.す なわち雪崩の慣性効果を大きく見積ると尾根を越えて隣の沢に進入することが可能性として 存在することになる.逆にいうと,雪崩が沢の内部にだけとどまるという条件が与えられる とすれば,それは慣性効果あるいは速度スケールに対して大きな制約となることを意味する. いいかえると,この程度の条件だけで雪崩の速度スケールの上限が決められることになる.

ところで昭和59年の豪雪時に発生した雪崩は非常に大規模であるにもかかわらず隣の沢に 入り込んだ様子は認められない.そこでつぎに,調査によって推定された雪崩走路の横ずれ を,抵抗力を適当に与えた計算によって再現してみよう.

図6・図7はそれぞれ δ = 0.0025 m⁻¹, δ = 0.007 m⁻¹ として計算した走路を示す. 黒 丸印は2秒おきにつけた試験体の位置である.因に V_{30} はそれぞれ44 m/sと26 m/sである. これらの値は表層なだれとしては中程度かやや遅い速度である.また*L*cはそれぞれ400 m と143 mであり、S字形の屈曲部の空間スケールと同程度である.

 $\delta = 0.0025 \text{ m}^{-1}$ の場合(図6),向って右側の尾根を越えることなく約35秒でS字形の屈曲部に到達し,その後この屈曲による横ずれは,下流に向って右側の尾根のごく近くまで接近している.したがってこれよりも抵抗が小さくなると横ずれは尾根をのり越えると考えてよい.

一方, $\delta = 0.007 \, \text{m}^{-1}$ の場合(図7)は調査から推定した雪崩の範囲(破線)のもう一方

実際の地形上での雪崩の運動走路 I ― 納口



図6 $\delta = 0.0025 \,\mathrm{m}^{-1}$ の場合の走路. Fig. 6 Traveling path ($\delta = 0.0025$ /m).



図7 $\delta = 0.007 \text{ m}^{-1}$ の場合の走路. Fig. 7 Traveling path ($\delta = 0.007$ /m).

の側に近く、 $\delta = 0.0025 \, \text{m}^{-1}$ の走路と同様に沢をはみ出すことなく流下する.したがって これらふたつにより実際の雪崩の運動のおおよそをつかまえることができる.

沢をはみ出すことなく流下するという走路上の制約から決められた試験体の運動によって 実際の雪崩の運動の過程を逆に推定することができる.図8は速度Vと(3)式のg'の時間変 化を示したものである.



図8 速度 V と g'の時間変化(白丸: $\delta = 0.0025 \,\mathrm{m}^{-1}$,黒丸: $\delta = 0.007 \,\mathrm{m}^{-1}$).

Fig. 8 Velocity V and g' vs. time (open circle: $\delta = 0.0025$ /m, solid circle: $\delta = 0.007$ /m).

 $\delta = 0.0025 \text{ m}^{-1}$ の場合 S字形の屈曲部にさしかかったところで最高速度 49.4 m / s(177 km/h)が得られている.一方 $\delta = 0.007 \text{ m}^{-1}$ の場合は沢のはじめの直線部分で最高速度 30.3 m / s(108 km/h)が得られる.また g' に関しては、 $\delta = 0.0025 \text{ m}^{-1}$ の場合に S字形の屈曲部で大きな変動が生じている.しかしいずれの場合にも g' の値はこの計算中は正であった.

g'が負の値のとき試験体はジャンプすることになる. 一般に速度が大きくなるほど地形の凹凸の影響を受けて g'の変動は大きくなることが計算結果から読みとれる. また δ が 0.0025 m^{-1} よりも小さくなるとミクロなジャンプが生じてくるであろうことがわかる.

6.2 黒部峡谷志合谷の雪崩

富山県の黒部峡谷志合谷では煙型の高速度の雪崩の研究が長期にわたっておこなわれている(清水・他,1972~1977). この谷は図9で示されるとおりはじめ直線的であった谷が標高900m付近から大きくS字形に屈曲を生じている.

ここでは昭和13年12月27日に発生した煙型の乾雪表層雪崩で工事のための冬営宿舎(図中の円内)が襲われ,80名以上の死者・行方不明者がでている(この雪崩は吉村昭の小説「高



図 9 黒部峡谷志合谷(実線は谷筋,矢印は宿舎跡). Fig. 9 Thalweg of Shiaidani.

熱隧道」にとりあげられていて有名である). これは明らかに沢筋の屈曲にともなう横ずれのため谷筋からはずれて宿舎を襲ったものと考えてよい. 清水らのその後の観測でもこの地点が雪崩に襲われることが示されている(清水・他, 1972).

この横ずれも妙高高原幕ノ沢の場合と同様, a のタイプ(図2)であり, 屈曲の空間スケールも同程度であり, したがって同じ程度の速度スケールを与えれば相応の横ずれを生じる ことが予想できる.ここでは速度スケールとして $V_{30} = 44 \text{ m}/\text{ s}$ ($\delta = 0.0025 \text{ m}^{-1}$) と $V_{30} = 70 \text{ m}/\text{ s}$ ($\delta = 0.001 \text{ m}^{-1}$)を与えた場合の走路の計算をおこなう.

屈曲部から上流へ約1kmほどさかのぼったところを出発点として求めた走路を図10($\delta = 0.0025 \,\mathrm{m}^{-1}$ の場合)と図11($\delta = 0.001 \,\mathrm{m}^{-1}$ の場合)に示す。図中の黒丸印は1秒おきにつけた試験体の位置である。 $\delta = 0.0025 \,\mathrm{m}^{-1}$ の場合 Lc は 400 m であり、 $\delta = 0.001 \,\mathrm{m}^{-1}$ の場合 Lc は 1000 m である。したがって屈曲部に到達するまでの直線部でともにほぼ平衡 速度となる。

 $\delta = 0.0025 \text{ m}^{-1}$ とした場合(図10),試験体は出発後20秒で最高速度47.9 m/s に達し、 25秒で屈曲部に到達する.ここで試験体は谷筋をはずれ、谷の側壁に沿って直進し、かつて 雪崩に襲われた宿舎跡の上の方を迂回して再び谷の方へ下って行く.その後、谷底を再び通 り過ぎて対岸の尾根をかけあがり黒部川の方へと進む.



図10 $\delta = 0.0025 \,\mathrm{m}^{-1}$ の場合の走路(矢印は宿舎跡). Fig. 10 Traveling path (δ =0.0025 /m).



図11 $\delta = 0.001 \,\text{m}^{-1}$ の場合の走路 (矢印は宿舎跡). Fig.:11 Traveling path ($\delta = 0.001 \,/\text{m}$).

この計算では,試験体の走路は宿舎跡を直撃しない.しかし試験体はその横10数mを通っ ていることから,雪崩の空間的な広がりを考えるとき,この走路は宿舎跡を十分に襲うとみ なしてもよいであろう.またその進入方向も,清水ら(1972)が雪崩の衝撃力のために曲 げられた鋼鉄製のはりの方向から推定したものと大きなくいちがいはない.

一方,さらに速度スケールを大きくした $\delta = 0.001 \text{m}^{-1}$ の場合(図11)は,試験体は出発後20秒で屈曲部に到達し,21秒で最高速度94.0 m / sに達すると同時にジャンプする. ジャンプした後の走路は,ジャンプを起さないように上側から地面の方向に試験体に拘束力を与えることによって計算したものである.

この場合も,試験体は谷筋をはずれて宿舎跡の上方を谷の側壁に沿って進む.そしてその 後もさらに直進し,もとの谷筋にもどることなく黒部川の方へと向う.ただし,この場合は ジャンプによる方向の変化は考慮に入れていないため,ジャンプ後の走路は参考として考え るべきかもしれない.

図12はこれらふたつの速度スケールの範囲内にある試験体の通過可能な走路の領域である.

この計算では、出発点として直線状にのびている谷筋上の1点のみを与えた.しかしさら にその上流の直線状の谷筋をはずれた所を出発点とすると、途中に蛇行が発生し、屈曲部に 別の方向から進入する場合が現われることが予想できる.この計算については今後の課題と する.

6.3 三国川黒又沢の雪崩

昭和59年豪雪のあった1984年2月10日(推定)に新潟県の三国川黒又沢で大規模な面発生乾 雪表層雪崩が発生し三国川ダム貯水池の橋がその衝撃力で破壊された(三国川ダム貯水池周 辺雪崩対策検討委員会,1984).この雪崩は,比較的まっすぐに流下して大きな沢に横から 突入し,沢の対岸までかけ上ったのち再び下って橋を破壊したであろうと推定される.した がってbのタイプの(図2)雪崩である.

計算は、妙高高原幕ノ沢と黒部峡谷志合谷での乾雪表層雪崩に対して妥当な走路を与えている $\delta = 0.0025 \text{ m}^{-1}$ を用いておこなった(図13). 図の中の黒丸印は 2 秒おきの試験体の位置である.

試験体は出発後,約20秒で沢に到達し,そのまま対岸までかけ上り,約30秒で再び沢に向って流下しはじめる.このとき試験体の進行方向は,破壊された橋の左側(下流側から見て)を指し示している.この計算中の最高速度は54m/s(199km/h)である.

図13の破線でかこまれた領域は調査により推定された雪崩の範囲である(三国川ダム貯水 池周辺雪崩対策検討委員会,1984).計算結果ではこの領域よりも大きく対岸へのり上が った形となっている.しかし図の中の雪崩の範囲は雪崩の雪の堆積(デブリ)にもとづくも のであり,同報告書(1984)に記されている雪崩による倒木を考慮すると、この程度の横



図12 試験体の通過可能な範囲(矢印は宿舎跡).

Fig. 12 Range of traveling path.



図13 三国川黒又沢 ($\delta = 0.0025 \text{ m}^{-1}$ の走路). Fig. 13 Traveling path of avalanche of sagurigawa ($\delta = 0.0025$ /m).

ずれも妥当なものといえる.

ここでいう走路は雪崩にともなう運動体すべての質量中心の走路を想定しており、したが ってかならずしも堆積した雪の領域と一致しないのは当然である.むしろ雪崩の領域をあと から推定する場合、デブリや倒木のほかにこのようなシュミレーションを含めて推定するこ

6.4 宇奈月深谷の雪崩

これまでの例でみたとおり, 乾雪表層雪崩では *δ* = 0.0025 m⁻¹ で比較的, 実際の横ずれ を再現することができ, しかもそのときの速度スケールが, ふつう考えられる表層雪崩の速度 と矛盾していないことがわかった.

一般に速度の小さな湿雪全層雪崩では、ゆがんだ地形においても横ずれはほとんど生じない. では、横ずれを生じないような全層雪崩はどの程度の速度スケールでなければならないのであろうか. このような、横ずれを生じないという条件もまた速度スケールを設定するうえで、大きな拘束となる.

昭和56年の豪雪時に富山県宇奈月の深谷で全層雪崩が発生し(1981年3月18日)作業中の 1名が死亡した.図14に示すようにこの雪崩は典型的なbのタイプ(図2)の雪崩であり,



図14 字奈月深谷の雪崩の走路. Fig. 14 Avalanche of Unazuki.

.

谷の側壁から発生した雪崩は谷底に横から進入し,その後谷筋に沿って流下している(走路 は航空写真から求めた).

図15は $\delta = 0.007 \, \text{m}^{-1}$ として計算した走路である.この値に対する V_{30} は26 m / s であり



図15 $\delta = 0.007 \, \text{m}^{-1}$ の場合の走路. Fig. 15 Traveling path (δ =0.007 /m).

Lcは143mである. 雪崩の発生点から沢まで約300mの距離があるから, この場合沢に到 達するまでに試験体は十分に平衡速度に達していることになる. 図中の黒丸印は1秒おきの 試験体の位置である.

試験体は出発後,約16秒後に速度28m/sで谷筋に進入し,そのまま対岸へかけ上り,その後谷筋を中心とする蛇行を左右それぞれ2度づつおこなう.蛇行の波長は水平距離にして約300m,振幅は約100m弱である.また最高速度は出発10秒で得られた31.0m/sである.

この走路は、図14に示してある実際の走路とかなりかけ離れており、したがってこの試験 体に与えた速度スケール($V_{30} = 26 \text{ m/s}$)ではこの雪崩の運動を再現できないことがわかる. 実際、この速度スケールは、一般に考えられている全層雪崩の速度よりもかなり大きめの値 である.

そこでさらに抵抗係数を大きくすなわち速度スケールを小さくした場合の走路を図16に示、 す($\delta = 0.05 \,\mathrm{m}^{-1}, V_{30} = 10 \,\mathrm{m}/\mathrm{s}, Lc = 20 \,\mathrm{m}$).黒丸印は2秒おきの試験体の位置である.





この場合,谷筋には出発して約40秒後に,速度10m/s で進入する.その後, 微視的には 小さな蛇行をするが巨視的に見るとほとんど横ずれもなく谷筋に沿って流下する.したがっ てその走路は図14に示した実際の走路に近いものといえる.

ここで与えた速度スケールの $V_{30} = 10 \text{ m/s}$ という値は一般の全層雪崩の速度としては妥当なものである.したがって全層雪崩として妥当な走路は、同じく全層雪崩としてふさわしい速度スケールにおいてのみ得られるということが、走路の横ずれという観点から明らかになったといえる.いいかえると、ゆがんだ地形においては速度スケールのちがいが横ずれという形で敏感に反映されるということである.

6.5 能生町柵口の雪崩

速度スケールのちがいが横ずれという形で敏感に反映するという結果は、ゆがんだ地形上の、ある地点が雪崩に襲われるかいなかも速度スケールに微妙に支配されるということを意味する、逆にいうと、ゆがんだ地形上の、ある地点を雪崩が通過したということだけで、運動を推定するうえでの大きな拘束条件となる.

1986年1月26日に新潟県能生 町の観現岳で発生した雪崩(面発 生乾電表層雪崩)は麓にある柵口 地区を襲い13名の死者を出した.

ここでの走路の計算(納口, 1986) から,抵抗係数δのちがいによっ て大きく走路が変化し、ある程度 以上 δ を小さく(すなわち速度ス ケールを大きく)すると、実際の 被災地点をまったくとおらないよ うな走路となることがわかった. ⊠17は $\delta = 0.0025 \, \text{m}^{-1}$, $\delta =$ $0.002 \,\mathrm{m}^{-1}$, $\delta = 0.001 \,\mathrm{m}^{-1} \,\mathcal{D} \equiv$ 種類の走路である、 $\delta = 0.0025 \, \text{m}^{-1}$ であるか $\delta = 0.002 \, \text{m}^{-1}$ であるか によっては尾根(一点鎖線)によ って左右に分岐させられる.した がって左へ分岐した走路は実際の 被災地点(図17の中の斜線部)を 絶対にとおることはない、この場



図17 能生町柵口の雪崩($\delta = 0.001 \text{ m}^{-1}$, $\delta = 0.002 \text{ m}^{-1}$, $\delta = 0.0025 \text{ m}^{-1}$, 黒丸印は10秒おきにつけた試験体の位置).

Fig. 17 Traveling path of avalanche of Maseguchi.

合は c のタイプ(図2)の横ずれである、なお図の中に示した破線の領域は新潟県(1986)の調べによる雪崩の走路である、

この雪崩は,納口(1986)の計算の段階では,発生点ばかりでなく走路も不明であった. したがって,ゆがんだ地形上では,運動走路を推定するうえで,横ずれという観点は有効となりうる.

7. 考察

これまでの計算結果から,適当なパラメータを与えさえすれば,実際の雪崩の走路を試験 体の走路によって再現できることがわかった.この場合,適当なパラメータとは適当な速度 スケールと同じ意味である.

しばしば直感と称して,沢筋に沿う走路を一般的なものと考え,それをはずれるようなものを何か特殊な運動と考えがちである.しかし本論文の計算結果からもわかるように,秒速数10メートルの速度をもつような乾雪表層雪崩においてはむしろ沢筋を大きくはずれる方が 当然であるといえる.逆にいうと,沢筋に沿うような走路をもつ雪崩は宇奈月深谷の雪崩からもわかるように,秒速10メートル程度の低速度の雪崩(一般には湿雪全層雪崩)に限られることになる.これはいいかえると,速度の大きいものほど地形の横の変化に鈍感で直進的であり,速度の小さいものほど地形の横の変化に敏感で追随的であるといえる.

このような横ずれの性質を利用することによって、ゆがんだ地形上にのこされた走路の情報から、速度を含めて運動を再現し推定することが可能となる.能生町柵口の例は、どこが 襲われたかという情報のみから発生点・走路・速度を推定することのできた理想的な例とい える.

任意の地形面上に拘束された滑落物体の厳密な方程式((2)式)と抵抗力を表わす簡単な式 ((6)式)のみから、ゆがんだ地形上の実際の雪崩の走路をおおよそ再現できることがわかっ たといえる.しかし(6)式の抵抗力表現では停止を表現することはできず、したがって雪崩 の発生から停止までのすべてを表わすことはできない.とくに停止に近くなった低速度の運 動には新たな項(たとえばクーロン摩擦力のような項)の導入が必要となる.これらに関し ては今後の課題とする.

8. おわりに

ゆがんだ地形上での雪崩の走路の横ずれを求めるために、過去に大規模な雪崩のあった地 点の地形図から雪崩の運動走路の計算をおこなった.この結果、高速度の乾雪表層雪崩に対 しては、速度スケールとして秒速数10メートルを与えるような抵抗係数をもつ試験体の走路 が実際の雪崩の走路を再現することがわかった.また走路の横ずれは速度スケールを敏感に 反映するため、ゆがんだ地形上に残された走路の横ずれから速度を逆に推定することが可能 となることがわかった.

最後に,妙高高原幕ノ沢の雪崩に関しては大沼匡之氏からその発生をお知らせ頂くと同時 に数々の参考意見を頂いた.また黒部峡谷志合谷の雪崩に関しては北海道大学低温科学研究 所の清水弘教授から様々の御助言と地形図の提供を受けた.また国立防災科学技術センター 新庄支所の佐藤篤司には本論文を校閲して頂き多くの厳しい御指摘を受けた.記してこれら の方々に感謝の意を表する.

参考文献

- 1)新潟県砂防課(1986):柵口雪崩災害概要中間報告,12pp.
- 2) 納口恭明(1983):モデル地形における雪崩の運動走路.国立防災科学技術センター研究報告, 第31号,153-174.
- 3)納口恭明(1986):能生町の大規模雪崩の運動走路のシミュレーション. 国立防災科学技術セン ター研究速報,第73号(発行予定).
- 4) 三国川ダム貯水池周辺雪崩対策検討委員会(1984): 同報告書.
- 5) 清水弘他(1972): 黒部峡谷志合谷のなだれ研究 I 志合谷のなだれ予備調査 低温科学,物 理篇,30,103 - 114.
- 6) 清水弘他(1973): 黒部峡谷高速なだれの研究 I. 低温科学, 物理篇, 31, 179-189
- 7)清水弘他(1974):黒部峡谷高速なだれの研究Ⅲ. 低温科学,物理篇, 32, 113-127.
- 8) 清水弘他(1975): 黒部峡谷高速なだれの研究Ⅳ. 低温科学,物理篇, 33, 109-116.
- 9) 清水弘他(1977): 黒部峡谷高速なだれの研究 V. 低温科学, 物理篇, 35, 117-132.

(1986年6月5日 原稿受理)