

実際の地形上での雪崩の運動走路 II

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 II

By

Yasuaki Nohguchi

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

Abstract

Numerical calculations of snow avalanches were carried out on the Nohmachi-Maseguchi and Sagurigawa-Mogurasawa and Adersawa avalanches to examine the effect of the difference of release point on the traveling paths. As a result, it was found that the traveling paths sometimes change greatly due to differences in the release point as well as to those in the resistant parameter. Moreover, it was demonstrated that the horizontal spread of an avalanche path could be shown by giving some release points simultaneously ; we called this the "System of Particles Model".

1. ま え が き

ゆがんだ斜面上(最大傾斜方向の水平面への射影が直線でない斜面)を滑落する雪崩の走路は、はじめから決っているわけではない。これは雪崩の進行方向が、慣性効果のために斜面の最大傾斜方向と一致しないためでそのずれは雪崩の速度スケールが大きくなるにつれて増大する。

したがって、ゆがんだ地形上で雪崩の走路を求めるということ(いいかえると、ゆがんだ地形上のある点を雪崩が通過するかいなかを求めること)は、雪崩の到達距離や衝撃力と同様、防災上、省いて考えることのできない重要な問題である。

*第1研究室

「実際の地形上での雪崩の運動走路 I」(納口, 1986)では, 過去に大規模な雪崩のおきた場所の地形図を用い, 滑落物体の走路の数値計算を行った. この場合, 発生点(速度ゼロとして計算をはじめめる点)を固定しても, 走路は, 抵抗のパラメータによって決まる速度スケールに応じて, 大きく変化することが示された. また, これを逆に利用すると, 実際の走路から運動速度を推定することができることも示された.

ところで, 実際の雪崩では, 発生点が必ずしも明らかではない場合がしばしばある. ゆがんだ地形上では, 発生点のわずかな違いもまたその走路に影響を与えるものと考えられる. また, 発生点が明らかであっても, それが広い範囲にわたっており, 1点だけで発生点を代表できない場合もしばしばある.

そこで, 本報告では, 発生点のちがいが運動走路にどの程度, 影響するかを, 実際の雪崩を例にして数値計算によって示す. それと同時に, 発生点を複数個与えて走路を計算することにより, これまで質点的な取り扱いだったものを, 水平的な広がりを考える質点系的な取り扱いへと発展させる.

2. 方程式

運動方程式はつぎのとおりである(納口, 1983).

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\dot{x}}{dt} &= -\frac{f_x}{1+f_x^2+f_y^2}g' - \frac{R}{m} \frac{\dot{x}}{V} \\ \frac{d\dot{y}}{dt} &= -\frac{f_y}{1+f_x^2+f_y^2}g' - \frac{R}{m} \frac{\dot{y}}{V} \\ \frac{dx}{dt} &= \dot{x} \\ \frac{dy}{dt} &= \dot{y} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

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

$$V = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + (f_x\dot{x} + f_y\dot{y})^2} \quad (3)$$

$$R = m\delta V^2 + \mu N \quad (4)$$

$$N = \frac{m}{\sqrt{1+f_x^2+f_y^2}}g' \quad (5)$$

ただし地形面は $z = f(x, y)$ であり $f_x, f_y, f_{xx}, f_{xy}, f_{yy}$ は地形の一次微分・二次微

分である。 δ と μ は抵抗のパラメータ、 N は地形面からの拘束力の大きさ、 m は質量(この値は実際は方程式には陽に含まれなくなる)である。

数値計算する上での地形の読み取り f_x , f_y , f_{xx} , f_{xy} , f_{yy} は前報(納口,1986)にしたがう。

3. 能生町^{ませぐち}柵口の雪崩

前報(納口, 1986)は1986年1月26日に発生した新潟県能生町柵口地区の面発生乾雪表層雪崩の走路を、権現岳の急斜面上の一点を発生点として計算をおこなった。この結果、抵抗のパラメータ δ の値によって(クーロン摩擦力は作用しないものとして計算している*)走路が大きく変化することがわかり、それらの走路の中から実際に被災地点を襲うものを見つけることができた。

ところで、その後の調べから(新潟県豪雪対策本部, 1986)実際の発生点はかなりの広がりをもっていると同時に、走路も、被災地点へ向う走路(今後、主走路と呼ぶ)のほかに、分岐し拡散する成分も存在していたことが明らかとなった(図1)。

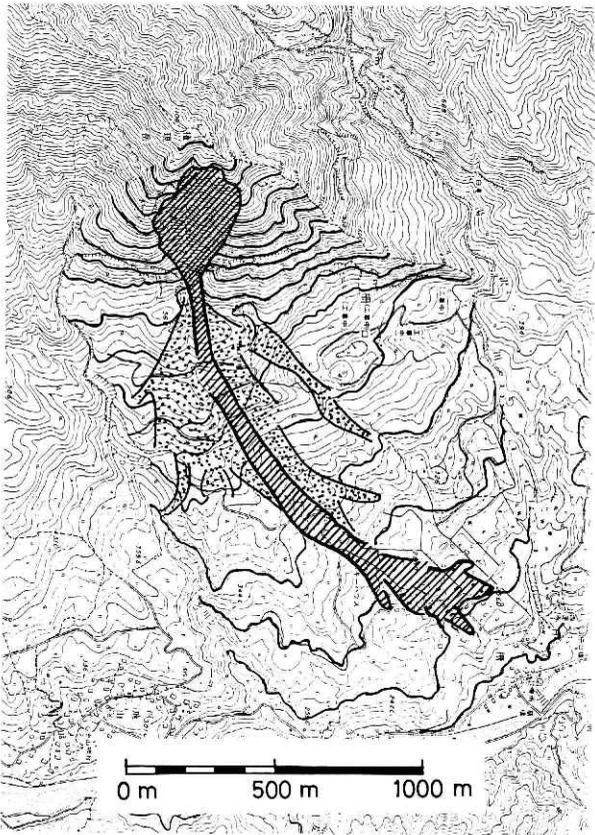


図1 能生町柵口の雪崩の走路。斜線は主走路、点は拡散部

Fig. 1 Traveling path of Nohmachi-Maseguchi avalanche (slant line : main path, dot : spread)

*摩擦力を与えた計算は付録参照

そこで、柵口のようなゆがんだ地形上では、発生点をかえることが走路にどのように影響を与えるかを調べる。それと同時に、これまでのように雪崩の運動をひとかたまりのものとして一点で代表させるのではなく、出発点をずらした複数個の部分からなる水平的な広がりをもつものとして調べることにする。

$\delta=0.007\text{m}^{-1}$ ($V_{30}^*=26\text{m/s}$) の場合

図2は5個の点(No.1~No.5で示す)を出発点とし、 $\delta=0.007\text{m}^{-1}$, $\mu=0$ として求めた走路である。走路上の黒い印は5秒おきの位置を表わす。走路は、急斜面から緩斜面にかわるところに1ヶ所(大雪積とおおのきづみおおのきづみと呼ばれるところ)と、さらに下方の1ヶ所の2ヶ所(図中の矢印)で鋭く収束している。どの走路も分岐することなく、収束性を保ちつつ、主走路を被災地点へ

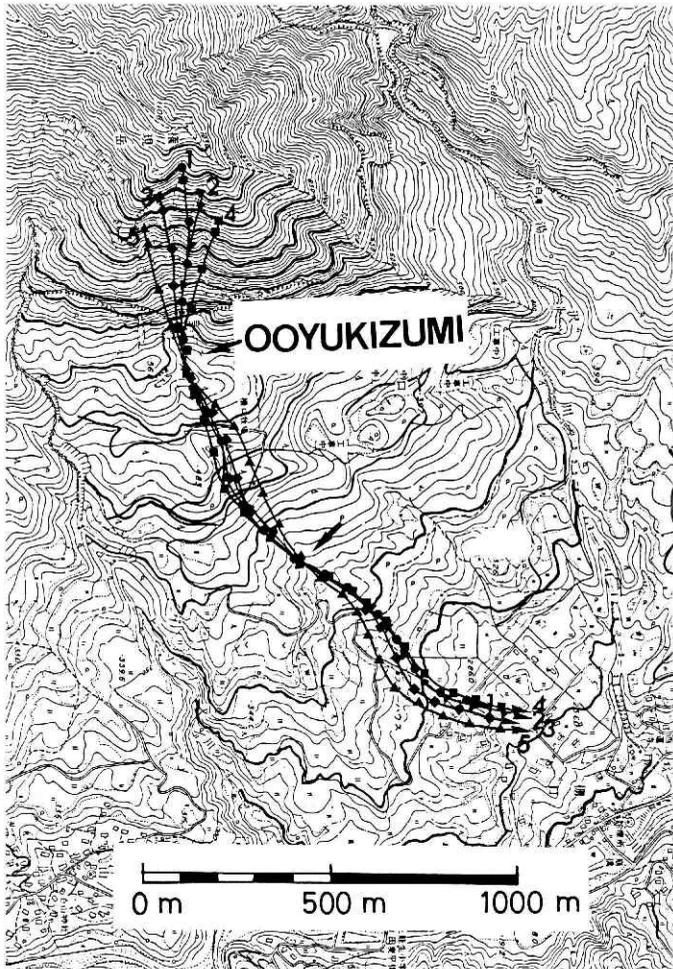


図2 $\delta=0.007\text{m}^{-1}$ の場合の走路

Fig. 2 Traveling path ($\delta=0.007/\text{m}$)

$$*V_{30} = \sqrt{g \sin 30^\circ / \delta}$$

と向っている。また、全体としての走路は緩やかに蛇行しており、小さな地形の変化に影響を受けている。とくに、No.5 以外の 4 本の走路は大雪積の収束部以後非常に接近しており、水平距離にして50m以内である。これは、発生点での広がり度が200m程度であるのと比べると1/4以下である。このように収束性がよく蛇行的なのは、速度スケールが小さいために谷型のくぼんだ地形に完全に捕えられたまま運動するためである。

$\delta=0.0025\text{m}^{-1}(V_{30}=44\text{m/s})$ の場合

図3は $\delta=0.0025\text{m}^{-1}$ として求めた走路である。走路上の黒丸印は2秒おきの位置を表わす。出発点は $\delta=0.007\text{m}^{-1}$ の場合と同様である、この場合、大雪積で収束後、5本の走路のうちNo.4だけが下側に向かって右に分岐し、被災地点とは違う方向に進む。他の4本は収束性も

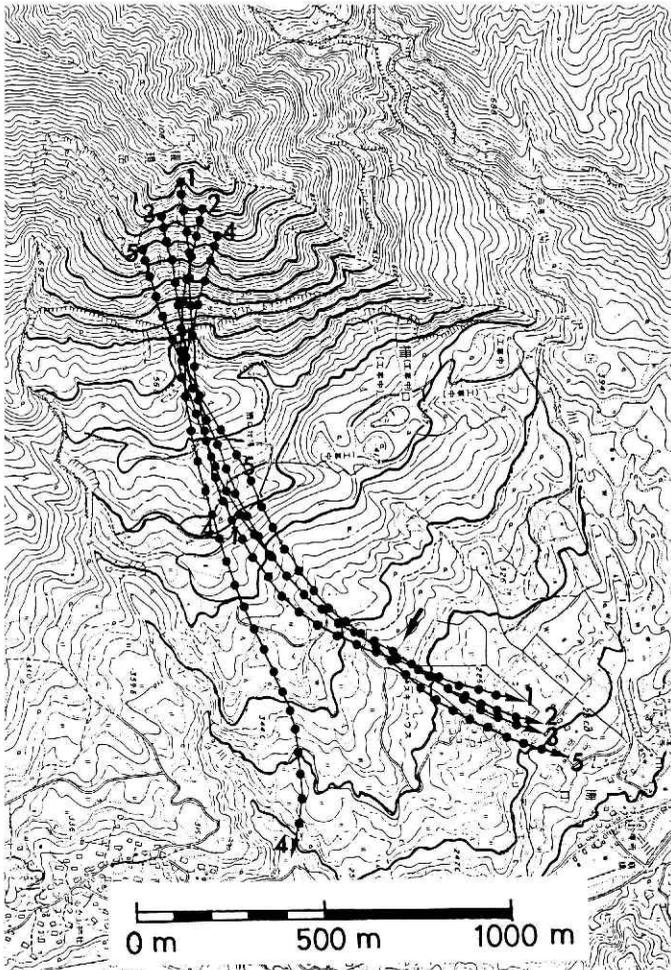


図3 $\delta=0.0025\text{m}^{-1}$ の場合の走路
 Fig. 3 Traveling path
 ($\delta=0.0025/\text{m}$)

よく(最もふくらんだところで約100mの広がりをもつ), $\delta=0.007\text{m}^{-1}$ の場合と同様, 下方にも1ヶ所鋭く収束するところがある(図中の矢印). ただし, その位置は $\delta=0.007\text{m}^{-1}$ の場合とくらべるとかなり下方へと移動している.

主走路側の各走路(No.1, 2, 3, 5)の位置関係は, $\delta=0.007\text{m}^{-1}$ の場合と同じである. とくに, 同じ標高(950m)を出発点とするNo.2とNo.3の走路は大雪積で収束後はほとんど同じである.

この場合の解釈として, 文字どおり, 実際的主走路側が主な走路(5本のうち4本の走路がとおる)であり, 一部(5本のうち1本)分岐する成分も存在するといえる.

$\delta=0.002\text{m}^{-1}$ ($V_{30}=49\text{m/s}$) の場合

図4は $\delta=0.002\text{m}^{-1}$ として求めた走路である. 走路上の黒丸印は2秒おきにつけた位置である. この場合は, 大雪積で収束したあとNo.4につづいてNo.1も主走路から分岐し, 被災地

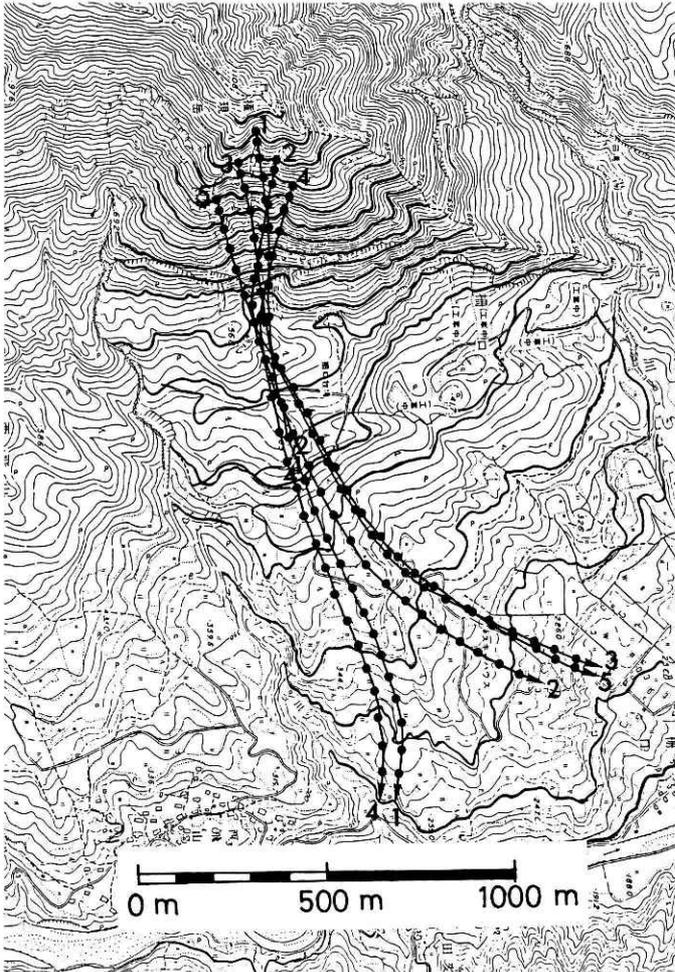


図4 $\delta=0.002\text{m}^{-1}$ の場合の走路

Fig. 4 Traveling path ($\delta=0.002/\text{m}$)

点に向うのはNo 2, 3, 5の3本となる。また、前のふたつの計算ではNo 3とほとんど同じ走路であったNo 2は、下方に向かってやや右側にずれる。このため、下方の収束部はほぼ消失となる。ただし、No 3とNo 5の位置関係だけは、 $\delta=0.007\text{m}^{-1}$ 、 0.0025m^{-1} の場合と同じままに保存される。

この計算では、分岐する成分(2本)も主走路側の成分(3本)に匹敵する程度であるといえる。これは、速度スケールの増加につれて、収束性が失われ、分岐・発散の傾向が強くなっていくことを表わす、また、No 1とNo 4が分岐側、No 2・No 3・No 5が主走路側というように、必ずしも出発点が近いからといって、その後の走路も近いということはいえないことがわかる。いいかえると、わずかの出発点の差が走路の大きな差を生じうるといことがわかる。

$\delta=0.001\text{m}^{-1}$ ($V_{30}=70\text{m/s}$) の場合

図5は $\delta=0.001\text{m}^{-1}$ として求めた走路である。黒丸印は2秒おきにつけた位置である。この

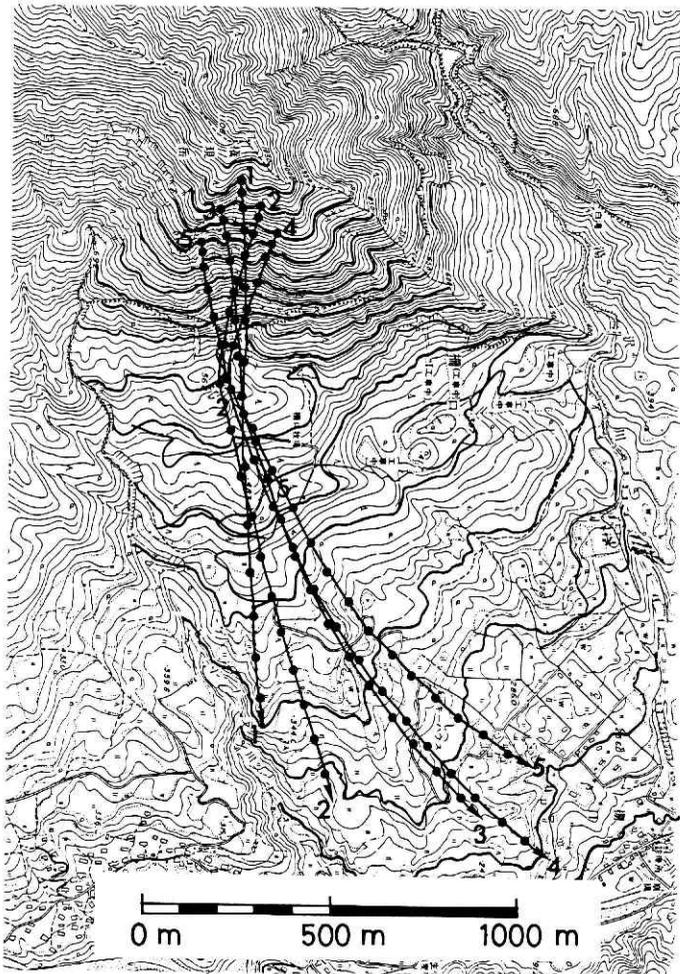


図5 $\delta=0.001\text{m}^{-1}$ の場合の走路

Fig. 5 Traveling path ($\delta=0.001/\text{m}$)

場合は、さらに拡散的な傾向は強まり、No. 2も主走路側から分岐側に移る。その一方で、 $\delta = 0.0025\text{m}^{-1}$ と $\delta = 0.002\text{m}^{-1}$ の計算では分岐側にあったNo. 4の走路が今度は再び主走路側にもどる。これは大雪積の向って左側の小山に衝突し、それからはねかえったような形で主走路側に現われている。No. 3はこれまでの計算よりもかなり右側(下方に向って)にずれてNo. 4の近くを通るようになる。No. 3, No. 4, No. 5は、一応、主走路側にはあるが、No. 3とNo. 4は右側(下方に向って)によりすぎているため、被災地点を襲うのはNo. 5だけである。しかし、No. 5にしても、実際の雪崩の主走路と比較するとかなり右側(下方に向って)によりすぎている。

図6と図7に各走路上での速度の時間変化をまとめて示す。図の中の矢印は、急斜面から緩斜面にかわる大雪積の収束部を表わす。最大速度は、 $\delta = 0.007\text{m}^{-1}$ の場合は約35m/s、 $\delta = 0.0025\text{m}^{-1}$ の場合は50~60m/s、 $\delta = 0.002\text{m}^{-1}$ の場合は60~65m/s、 $\delta = 0.001\text{m}^{-1}$ の場合は70

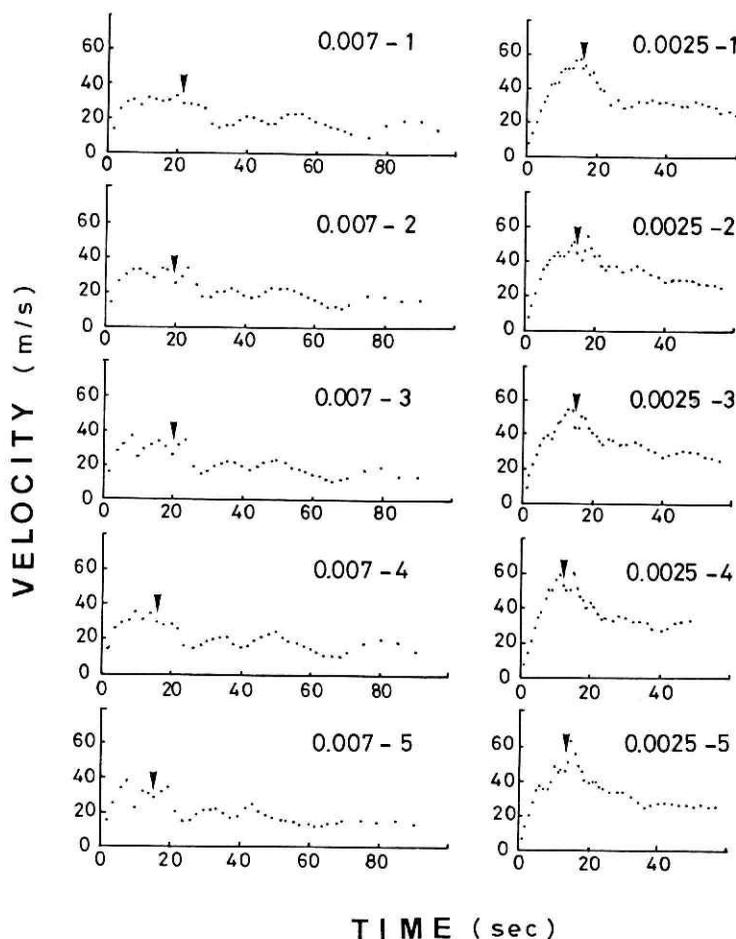


図6 速度の時間変化($\delta = 0.007\text{m}^{-1}$ と $\delta = 0.0025\text{m}^{-1}$ の場合)

Fig. 6 Velocity vs. time ($\delta = 0.007/\text{m}$, $\delta = 0.0025/\text{m}$)

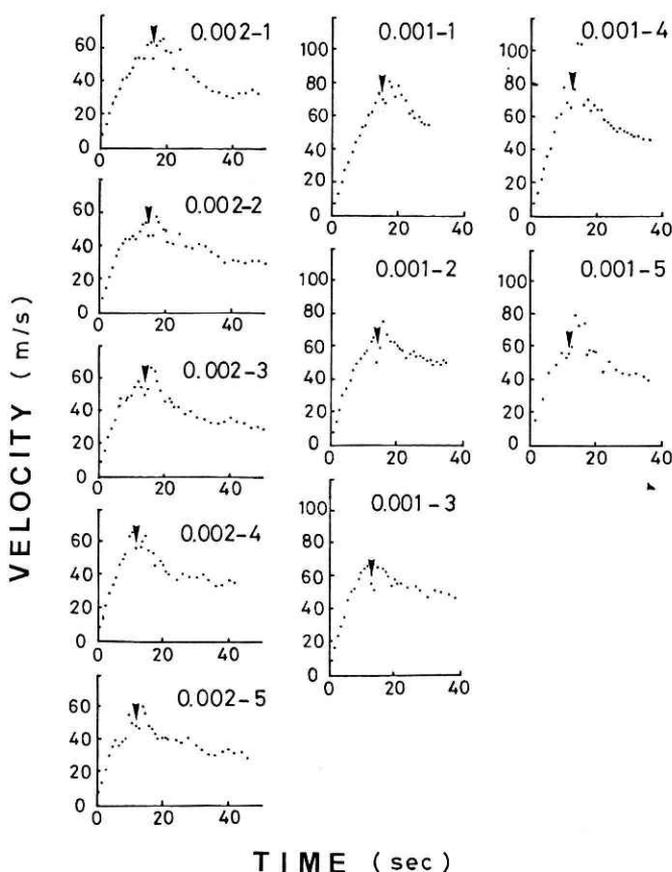


図7 速度の時間変化($\delta=0.002\text{m}^{-1}$ と $\delta=0.001\text{m}^{-1}$ の場合)

Fig. 7 Velocity vs. time ($\delta=0.002/\text{m}$, $\delta=0.001/\text{m}$)

～100m/sである。これらの値はいずれもこの収束部の前後で得られる。

つぎに、各出発点ごとに、抵抗のパラメータ δ の変化にともなう走路の変化をまとめる。No.1の場合、 $\delta=0.0025\text{m}^{-1}$ から $\delta=0.002\text{m}^{-1}$ にかけて主走路側からの分岐が生じる。No.2の場合は $\delta=0.0025\text{m}^{-1}$ から $\delta=0.002\text{m}^{-1}$ にかけて大きく主走路の右側(下方に向って)にずれ、 $\delta=0.001\text{m}^{-1}$ にかけて分岐が生じる。No.3の場合は $\delta=0.002\text{m}^{-1}$ から $\delta=0.001\text{m}^{-1}$ にかけて大きく主走路の右側にずれる。ただし分岐は生じない。No.4の場合は $\delta=0.007\text{m}^{-1}$ から $\delta=0.0025\text{m}^{-1}$ にかけてまず主走路から右側への分岐が生じ、つぎに $\delta=0.002\text{m}^{-1}$ から $\delta=0.001\text{m}^{-1}$ にかけて今度は再び主走路側にもどる。No.5の場合はすべて主走路側にあり、しかも大きな移動はない。

これらの計算結果を実際の走路と比較するとつぎの点にちがいがみられる。ひとつは主走路の左側に分岐する成分が計算では現われていないことである。もうひとつは、計算では右

側に分岐するのは比較的、高速の成分であるのに、主走路側よりも到達距離が短いということである。前者に対する説明としては、 $\delta=0.007\text{m}^{-1}$ よりも大きな値、すなわちもっと速度スケールが小さくて慣性効果の少ない運動を計算することによって、明らかに左側の分岐成分が現われるであろうということである。それは、大雪積の収束部から左側に向って小さな沢状の地形となっているためである。ここでおこなった計算の速度スケールではすべてこの沢を無視して直進している。

一方、後者に対する説明としては、高速度で右側に分岐する成分は発散的な傾向が強いため、エネルギーの散逸が大きく、分岐後は急速にブレーキがかかるためと思われる。

いずれにしても、主走路の大部分が $\delta=0.007\text{m}^{-1}\sim\delta=0.0025\text{m}^{-1}$ 程度の速度スケールの成分からなっているものと考えることができる。

3. 三国川阿寺沢・もぐら沢の雪崩

1945年2月24日午前3時過ぎに新潟県六日町の三国川阿寺沢・もぐら沢で大規模な面発生乾雪表層雪崩が発生し、水門見張り小屋で就寝中の2名が死亡している。この雪崩の発生点は、もぐら沢・小阿寺沢・大阿寺沢(写真1, 写真2)にまたがり、非常に広範囲にわたって、ほぼ同じ時刻に発生したものと推定されている。これらの沢では、その後も何度か雪崩が発



写真1 もぐら沢
Photo. 1 Mogurasawa



写真2 阿寺沢
Photo. 2 Aderasawa

生しているが、このときの雪崩ほど規模は大きくない。これは、斜面の植生の変化(1945年当時は全山が禿山であった)によると考えられる。

ここでは現在、ダム工事がおこなわれており、過去の大雪崩の運動を数値計算により再現することは、防災面からも重要である。

この雪崩の特徴のひとつは、発生点が広範囲なのに比べ、走路は3つの沢(もぐら沢・小阿寺沢・大阿寺沢)に収束されたのち、それらがひとつになって三国川の流れている平坦部(写真3)へとやってきている点にある。

計算では図8に示すように、出発点としてもぐら沢上の4点(M1, M2, M3, M4)、小阿沢上の4点(S1, S2, S3, S4)、大阿沢上の6点(L1, L2, L3, L4, L5, L6)の合計14点を設



写真3 三国川の流れる平坦部

Photo. 3 The Saguri River

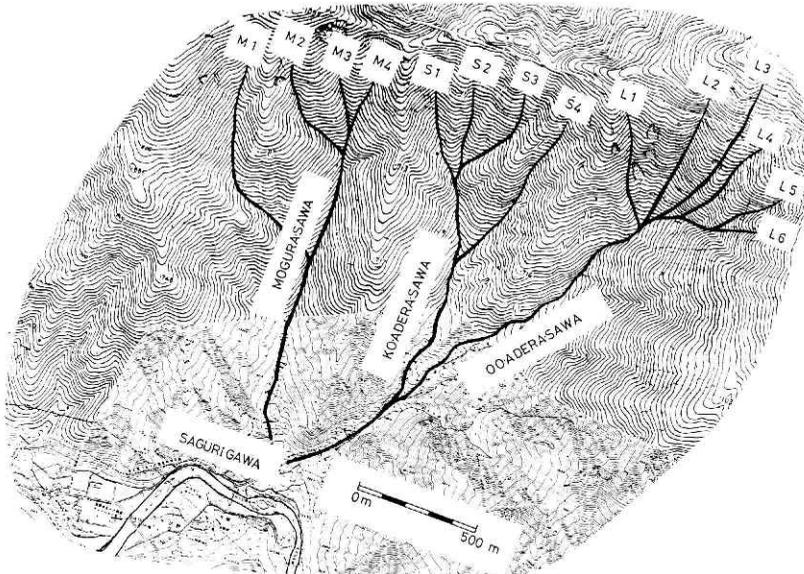


図8 もぐら沢・小阿寺沢・大阿寺沢。数字は出発点、実線は沢筋

Fig. 8 Mogurasawa, Koaderasawa and Ooaderasawa (numbers : release point, solid line : thalweg)

定した。また抵抗のパラメータとしては、これまで大規模な乾雪表層雪崩に対して比較的妥当な結果を出している値($\delta=0.0025\text{m}^{-1}$, $\mu=0$)を用いた。以下にその結果を示す。

もぐら沢の場合

図9は、もぐら沢に流れ込む小さな沢上への4点(M1, M2, M3, M4)を出発点として計算した走路である。黒丸印は1秒おきの位置である。大きな黒丸印はとくに10秒おきの位置を表わす。

いずれの走路も本沢に進入後、単純に沢筋に沿って流れ下るのではなく、大きく左右の岸

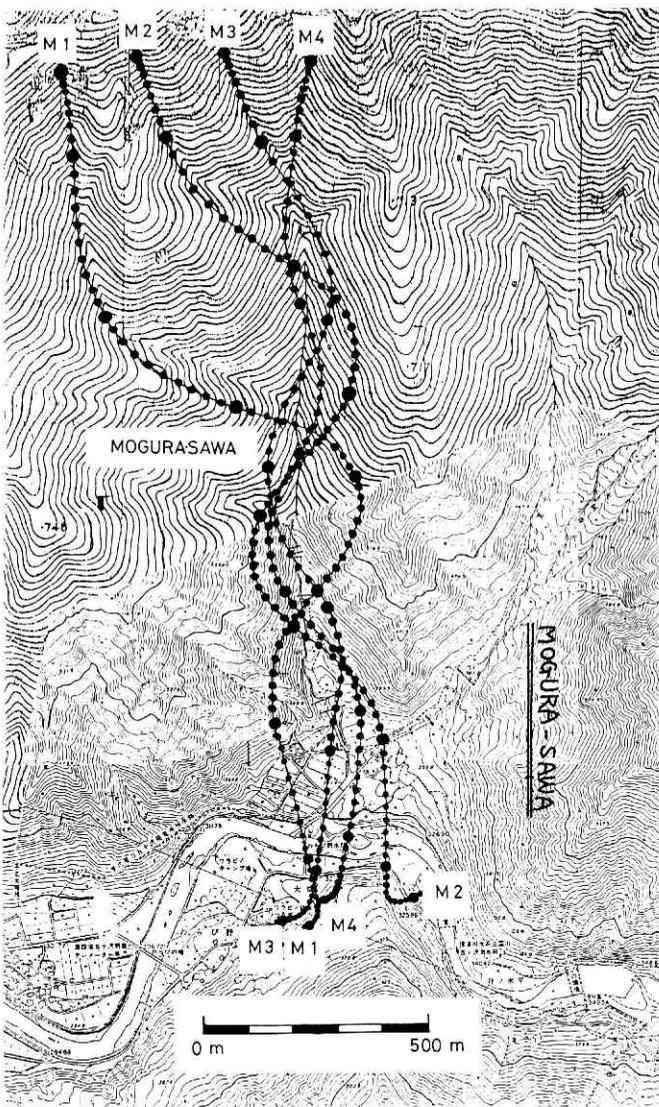


図9 もぐら沢における走路
Fig. 9 Traveling path on
Mogurasawa

に乗り上げるように蛇行し(ただしもぐら沢を外れることはなく), 三国川の流れる平坦部へとやってくる。各走路の水平方向の広がり、発生時においては水平距離にして500m程度だったのが、この平坦部では200m程度の広がり収束している。

三国川を通過後、各走路は対岸にぶつかり、その結果、速度は急激に低下している。この対岸は凸形の地形をしており、その影響で対岸に向って左側(M2)と右側(M1, M3, M4)に分岐する。

小阿寺沢の場合

図10は小阿寺沢上流の小さな沢上の4点(S1, S2, S3, S4)を出発点として計算した走路である。黒丸印は1秒おきにつけた位置である。

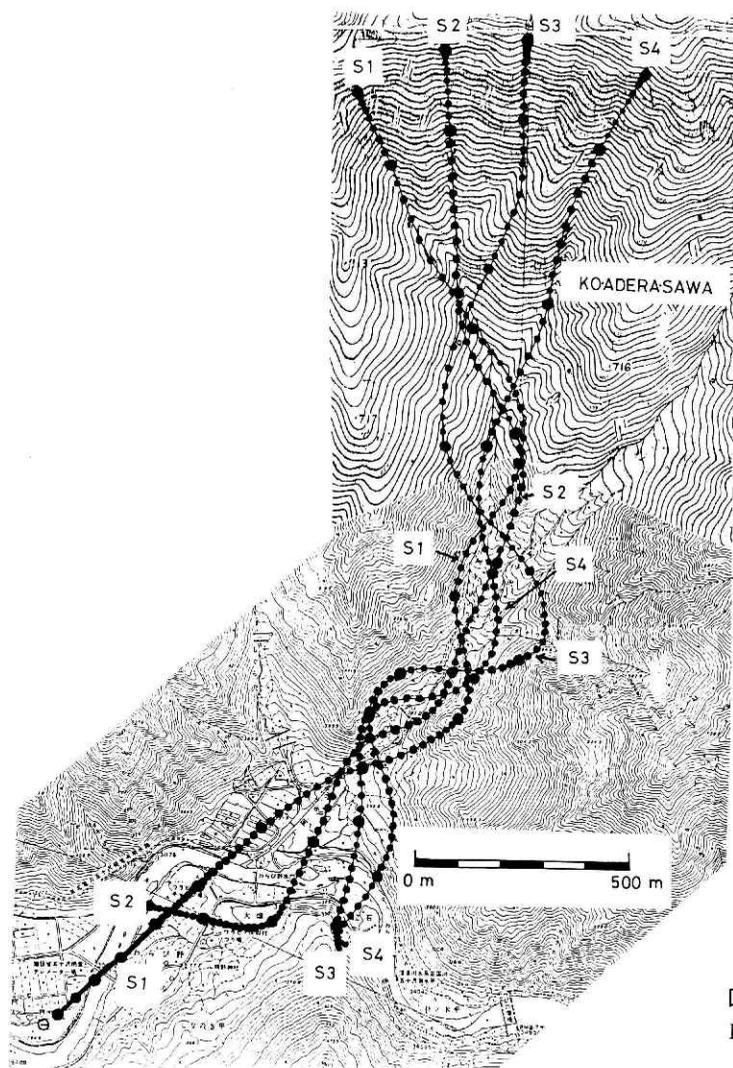


図10 小阿寺沢における走路
Fig. 10 Traveling path on Koaderasawa

出発点での走路の水平的な広がり約500mである。本沢へ進入後は、もぐら沢の場合と同様、左右に大きく蛇行する。このときの走路の水平方向の広がり、広いところで約250mであるが、沢から平坦部へ出る狭いところでこの広がり約50mにまで収束する。

平坦部に出たからは、走路は発散的な傾向をもつ。S3とS4は三国川を越えたのち対岸の凸地形によって左側に分岐し、そこでほとんど速度は低下してしまう。一方、S2は右側に分岐し、岸からはねかえったような形で再び平坦部へもどされる。S2, S3, S4が対岸にぶつかるのに対して、S1だけは対岸にぶつかることなく、平坦部をまっすぐに通り返れる。

出発点での進行方向と平坦部での進行方向を比べると、走路は全体に右に曲げられている。とくに、S1は90°近くも右に曲げられ、その結果、対岸にぶつかることなく平坦部を通り抜けている。

大阿寺沢の場合

図11は大阿寺沢上流の小さな沢上の6点(L1, L2, L3, L4, L5, L6)を出発点として計算した走路である。走路上につけた黒丸印は1秒おきの位置を表わす。この場合は出発点での水平方向の広がり1kmに近く、また、出発点から平坦部までの水平距離は約3kmにおよぶ大きなものである。

本沢へ進入後は、他の沢の場合と同様、大きく左右に蛇行しながら流下するが、全体的に見ればほぼまっすぐに平坦部へと向う。平坦部においては走路の水平方向の広がり約200mである。この場合は、平坦部に出たからもあまり発散的な傾向はなく、比較的よく収束している。

6個の走路のうちL1だけは三国川の対岸に衝突し、勢力を失う。しかし、他の5個は対岸に近づいて押しもどされるものもあるが(L3)、ほぼ平坦部をまっすぐに通り返れるような走路である。

図12は各走路上での速度の時間変化を示す。図中の矢印は三国川に達した時点を表わす。もぐら沢の場合は出発後60～70秒後、小阿寺沢の場合は70～80秒後、いちばん距離の長い大阿寺沢の場合は80～100秒後にここに到達する。この地点での速度は、いずれも20～30m/sである。この計算中に現われた最も速い速度はL1の69.9m/sである。他の走路における最高速度はおおよそ50～60m/sである。

この計算は、実際におこりうる最も高速度の雪崩を想定しておこなったものである。したがって、ここでときどき起るであろう小規模な雪崩とは単純に比較することはできない。一般に、速度の小さな小規模な雪崩では、前述のような蛇行は生じず、完全に沢に沿うように流下するのみである。

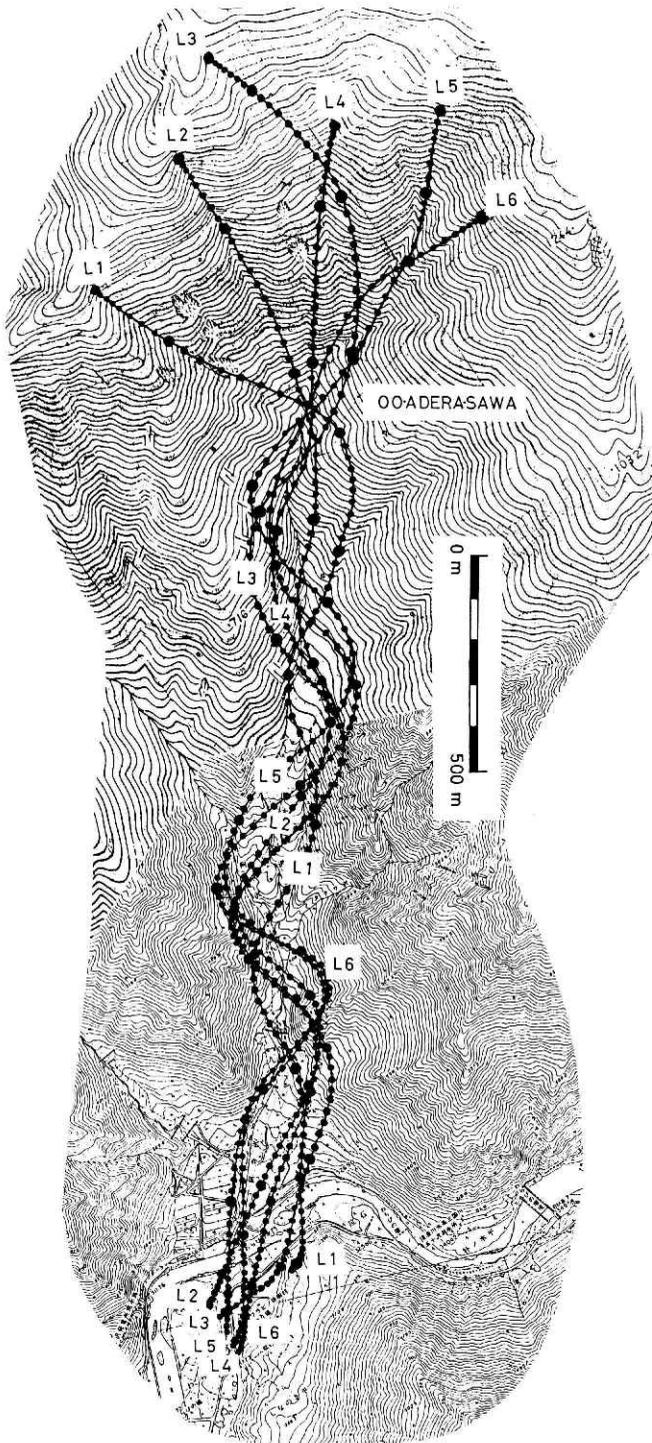


図11 大阿寺沢における走路
Fig. 11 Traveling path on Ooadersawa

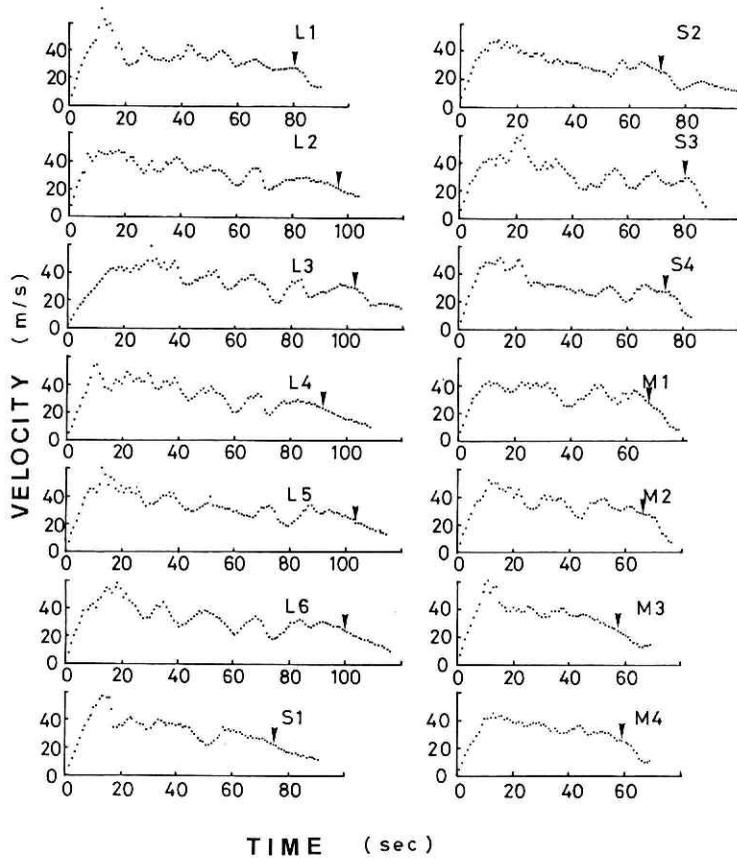


図12 速度の時間変化
Fig. 12 Velocity vs. time

5. 質点モデルと質点系モデル

一個の発生点、一本の走路によって雪崩全体の運動を代表させるようなモデル化は、雪崩をひとかたまりのものとして考えるもので質点的なとらえ方といえる。ここでおこなったいくつかの計算を、それぞれ、ひとつの雪崩と考えるのに対応している。

ところで、ゆがんだ地形(最大傾斜方向の水平面への射影が直線でない地形)においては、発生点のわずかのちがいや、抵抗のパラメータのちがいによって走路は大きく変化するというのがこれまでの計算結果である。いいかえると、地形のゆがみが、雪崩の中に含まれている発生点や抵抗パラメータ(すなわち速度スケール)のちがう成分をばらばらに分解する役目をしていることになる(ちょうど光のスペクトル分解に似ている)。

実際の雪崩は、発生点には広がりがあり(雪崩の分類における面発生という言葉自体が広がりを意味する)、運動自体も表面近くの低密度で高速度の成分と底層部での高密度で低速度の成分の存在が知られている。

したがって、ゆがんだ地形(一般に天然のものであればどの地形もゆがんでいるのが普通)で雪崩の運動を計算する場合、雪崩をひとかたまりのものとみるよりも、いくつかの出发点といくつかの速度スケールをもつ成分の集りとして考えるのが自然である。しかも、こうすることによってのみ、運動に水平的な広がりを与えることができることになる。今後、このようなモデルを「質点系モデル」と呼ぶことにする。

上記の意味で、この報告でおこなった、ある雪崩に対するそれぞれの計算を、ひとつのものとする考えにより、質点系モデルが構成できる。このモデルを発展させるにはつぎのことに注意をはらわなければならない。ひとつは各質点間の相互作用である(ここでの計算では、これは無視している)。もうひとつは、質点の空間的な配置と速度スケールの分布に関する重みのつけ方である(ここでの計算では、とくに配置に関する論理的な配慮はしていない)。

この質点系モデルに数学的な表現を与えるとするとつぎのとおりである。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\dot{x}_i}{dt} &= - \frac{f_x(x_i, y_i)}{1 + f_x^2(x_i, y_i) + f_y^2(x_i, y_i)} g'_i - \frac{R_i}{m_i} \frac{\dot{x}_i}{V_i} - \frac{1}{m_i} \sum_j S_{x,ij} \\ \frac{d\dot{y}_i}{dt} &= - \frac{f_y(x_i, y_i)}{1 + f_x^2(x_i, y_i) + f_y^2(x_i, y_i)} g'_i - \frac{R_i}{m_i} \frac{\dot{y}_i}{V_i} - \frac{1}{m_i} \sum_j S_{y,ij} \\ \frac{dx_i}{dt} &= \dot{x}_i \\ \frac{dy_i}{dt} &= \dot{y}_i \end{aligned} \right\} (6)$$

$$g'_i = f_{xx}(x_i, y_i) \dot{x}_i^2 + 2f_{xy}(x_i, y_i) \dot{x}_i \dot{y}_i + f_{yy}(x_i, y_i) \dot{y}_i^2 + g \quad (7)$$

$$V_i = \sqrt{\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2} \quad (8)$$

$$R_i = m_i \delta_i V_i^2 + \mu_i N_i \quad (9)$$

$$N_i = \frac{m_i}{1 + f_x^2(x_i, y_i) + f_y^2(x_i, y_i)} g'_i \quad (10)$$

ただし、 i は i 番目の質点を意味し、 $S_{x,ij}$ と $S_{y,ij}$ は j 番目の質点と相互作用を表わす。

雪崩を連続体的に扱うこれまでのモデルはいずれも斜面に垂直な方向か斜面下方向に速度分布を求めるもので、横方向、すなわち水平方向の流れの広がりに対する考慮はされていない。ゆがみのない地形においては、これは当然であるが、ゆがみのある地形においてはこのようなモデルはもはや適当ではない。とくに、雪崩に対する防護施設をどこに設けるかというような場合、雪崩の走路の水平的な広がりに対する配慮は欠くことのできない重要な点と思われる。

6. あとがき

能生町柵口の雪崩と三国川もぐら沢・阿寺沢の雪崩を例にして、雪崩の運動走路の数値計算をおこなった。これらはいずれも、いわゆるゆがんだ地形上の雪崩である。この結果、発生点の変化も場合によって走路を大きく変えることがわかった。それと同時に、出発点を何点か与えることによって、実際の雪崩においても出現するであろう分岐・発散・収束といった水平方向の広がりも再現できることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 新潟県豪雪対策本部(1986)：61年豪雪の概要。
- 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)：実際の地形上での雪崩の運動走路。I。国立防災科学技術センター研究報告, 第38号, 147-168。

(1986年11月26日 原稿受理)

付 録

これまでの計算では摩擦係数 μ をゼロとしてきた。しかし、これでは停止しないため停止域での運動は扱えない。No.1の点を出発点として、停止を含めた主走路を再現するため μ を考慮して計算した結果を図13、図14に示す。図13は $\delta=0.002\text{m}^{-1}$ 、 $\mu=0.20$ ($V_{30}=40.0\text{m/s}$, $\tan^{-1}\mu=11.3^\circ$)として計算したものである。このときの最大速度は 54.7m/s であり、その走路は主走路内にあるが到達点は被災地点よりもやや手前である。図14は $\delta=0.002\text{m}^{-1}$ 、 $\mu=0.15$ ($V_{30}=42.6\text{m/s}$, $\tan^{-1}\mu=8.5^\circ$)として計算したものである。このときの最大速度は 55.1m/s であり、走路・停止点とも実際の主走路にほぼ近い。いずれの場合も停止点近くになって走路が蛇行しているが、これは速度が小さくなって慣性効果が減少したために地形の最大傾斜方向の変化に従って蛇行したものである。

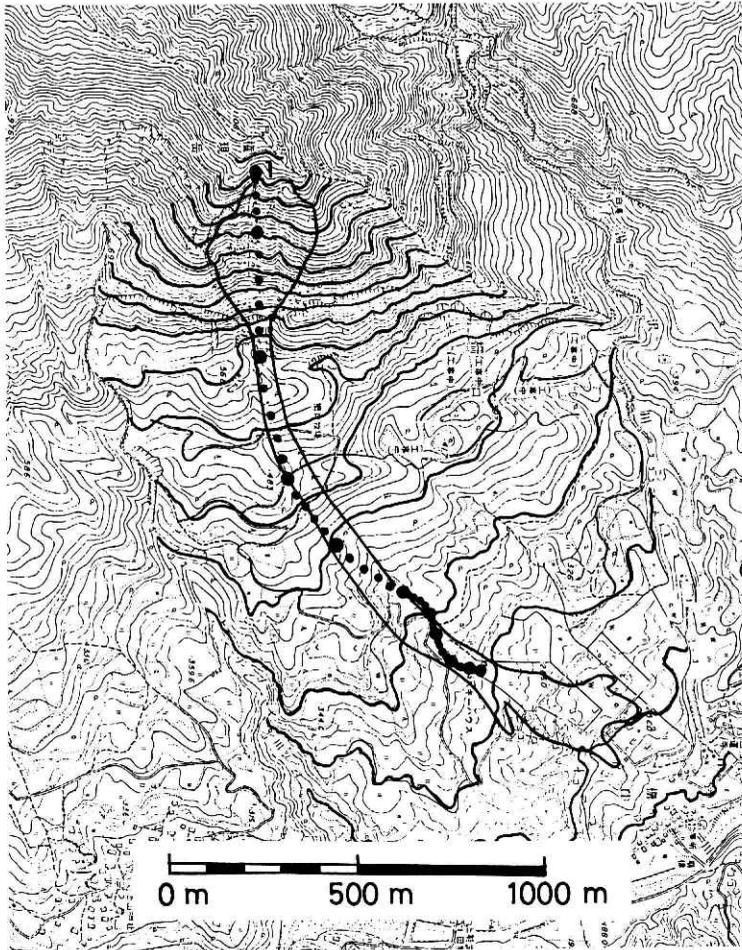


図13 $\delta=0.002\text{m}^{-1}$ 、 $\mu=0.20$ の場合の走路

Fig. 13 Traveling path ($\delta=0.002/\text{m}$, $\mu=0.20$)

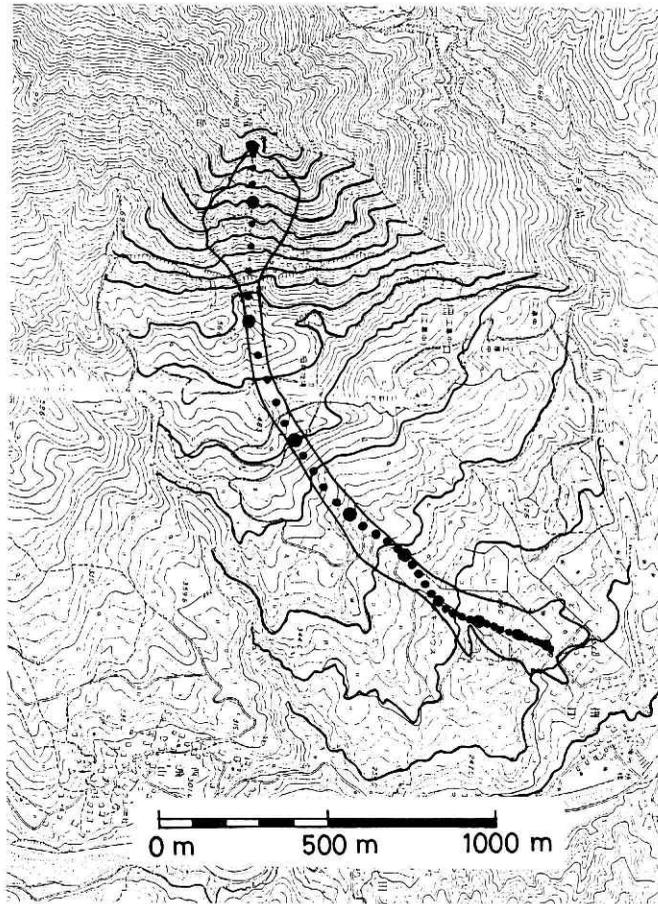


図14 $\delta=0.002\text{m}^{-1}$, $\mu=0.15$ の場合の走路

Fig. 14 Traveling path ($\delta=0.002/\text{m}$, $\mu=0.15$)