

土木研究所資料

離散ボールモデル法による雪崩運動の研究

平成元年2月

建設省土木研究所
砂防部急傾斜地崩壊研究室

Copyright © (1989) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

離散ボールモデル法による雪崩運動の研究

急傾斜地崩壊研究室 室 長 吉松弘行

研究員 藤沢和範

大浦二郎

要 旨

雪崩による被害想定区域の設定を目的として、離散ボールモデル法を用いて検討した。ボールの相似則を明らかにし、2次元解析によりパラメータスタディを行ない良好な結果を得られる数値を求めた。この数値を用いて3次元解析を行ない雪崩の到達範囲の設定が可能なことを示した。今後の検討課題として雪崩の発生位置と発生量の予測がある。

キーワード：雪崩運動シミュレーション，雪崩の到達範囲，離散ボールモデル法

まえがき

道路及び鉄道などいろいろな施設を個々に守る雪崩対策事業は行われてきたが、積極的に集落を雪崩から保護する制度はなかった。しかし56豪雪、59豪雪時などには雪崩災害が発生し多くの人命が奪われたこともあり昭和60年度より建設省において雪崩対策事業が創設された。昭和62年度には雪崩危険箇所調査を実施し、豪雪地帯対策特別措置法に基づく豪雪地帯指定市町村において14,848箇所が把握されている。しかし雪崩防止施設の整備が終了した箇所は2ヶ所であり、今後も早急な対策施設の整備が見込めないため被害想定区域の設定及び警戒避難体制の整備が重要となっている。本研究は被害想定区域の設定法として離散ボールモデル法を用いた設定手法について検討したものである。

平成元年2月

目 次

まえがき

1. 目的	1
2. 離散ボールモデル法の概要	2
2.1 ボール質量	2
2.2 ボール相互の接触	2
2.3 ボールと斜面との接触	5
2.4 運動方程式	7
2.5 荷重—変形曲線	7
2.6 離散ボールモデル法の相似パラメータ	9
3. パラメータスタディ	10
4. 災害雪崩のシミュレーション	16
4.1 災害雪崩	16
4.2 斜面のスミージング	29
4.3 シミュレーション	29
4.4 シミュレーションの結果	30
4.5 シミュレーション結果の検討	43
5. あとがき	48

1. 目 的

雪崩運動のシミュレーション法の一つとして、離散ボールモデルによるものがある。その2次元離散ボールモデルについてはすでにいくつかの応用例があり、ボール諸元の値はほぼ明らかである。しかし3次元離散ボールモデルでは適用例は極く少なく、ボール諸元の値は不明確である。本研究では新潟県棚口雪崩を例にとって3次元離散ボールモデルのパラメータスタディを行い、その適用に際してのボール諸元の値を明らかにする。

また上記の値を参考に他の雪崩災害地についてもシミュレーションを行い係数の設定について検討する。

2. 離散ボールモデル法の概要

離散ボールモデルは積雪を多数のボールの集合体とみなすもので、このボールモデルによる雪崩の運動のシミュレーションは離散化した個々のボールの運動を求めて雪崩全体の運動を推定するものである。

2.1 ボール質量

図1(a)に離散ボールモデルを示す。個々のボールは、相互に接触、すべり、離散を生じつつX、YおよびZ方向に自由に運動する。また、ボールの質量や変位等はその中心で代表されるとき、図1(b)に示すように、その中心点とボール境界の間にマックスウェル型のバネ・ダッシュポットをおいてボールを粘弾性体とする。ボールの質量 m は

$$m = 4 r^2 \rho_s = \pi r^2 \rho_a$$

ここに r はボール半径、 $\rho_a = 4/\pi \rho_s$ 、 ρ_s は雪密度

3次元解析では、

$$m = (2r)^3 \rho_s = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_a$$

$$\rho_a = \frac{6}{\pi} \rho_s$$

さらに、ボールの境界にはすべりを表現するためのスライダーを考える。

2.2 ボール相互の接触

(a) ボール相互の接触力 f_{ij}

各ボール毎に、そのボールと近傍のボールとの距離を常にチェックし、

$$L < r_i + r_j$$

であれば、 i および j ボールは接触しているとする。ここに、 L はボール相互の距離、 r_i および r_j はそれぞれ i および j ボールの半径である。いま、図1(b)のモデルを簡略化し、図1(c)に示すようなモデルに置換して、そのバネ常数 k と粘性係数 η を

$$k = \frac{k_i \cdot k_j}{k_i + k_j}, \quad \eta = \frac{\eta_i \cdot \eta_j}{\eta_i + \eta_j} \quad (1)$$

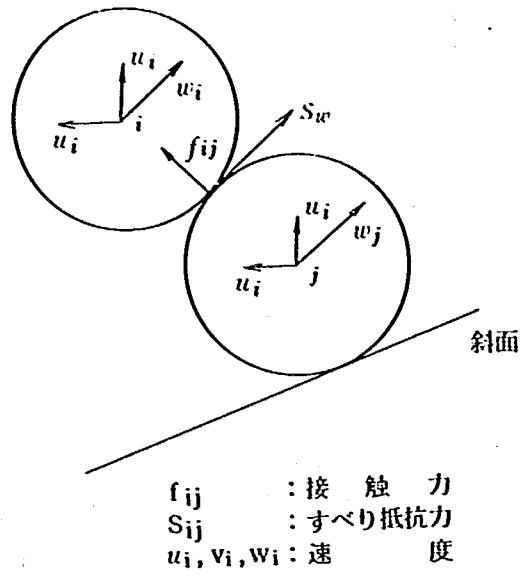
とする。図1(c)に示すモデルについて、 i および j の変位と力の関係を示す。ボール中心 i を通りボール中心 j の方向を正とする局所座標 X を考え、また、バネとダッシュポットの間点 m をとって、 i 、 m 、 j それぞれの点の X 方向の時刻 t での速度を X_i' 、 X_m' 、 X_j' とすると、接触により i j 方向に作用する力 f_{ij}' は、

$$f_{ij}' = k (X_m' - X_i') \Delta t + f^{el}$$

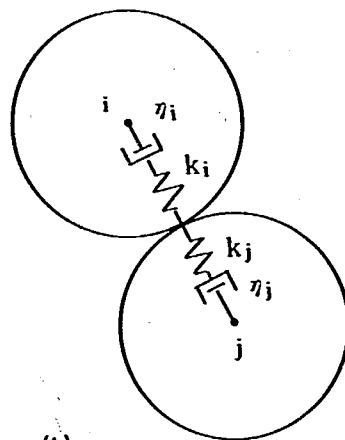
また、ダッシュポット部分においては

$$f_{ij}' = \eta (X_j' - X_m')$$

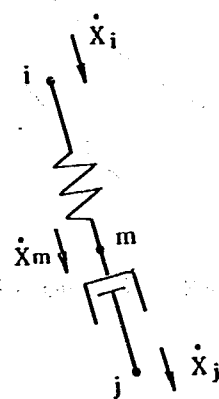
と得られる。上式より X_m' を消去すると



(a)



(b)



(c)

図1 ボールモデル

$$f_{ij}^t = \frac{k}{1 + k \Delta t / \eta} (\dot{X}_i - \dot{X}_j) \Delta t + \frac{1}{1 + k \Delta t / \eta} f^{t-\Delta t} \quad (2)$$

が得られる。ここに、 Δt は時間刻み幅、 $f_{ij}^{t-\Delta t}$ は時刻 $(t - \Delta t)$ での接触力である。また、 k_i および k_j を

$$2 \text{次元}; \quad k_i = 2 E_i \quad k_j = 2 E_j$$

$$3 \text{次元}; \quad k_i = \pi r E_i \quad k_j = \pi r E_j$$

と評価する。ここに、 E は雪の弾性係数であり、図 2 に示すように

$$\text{圧縮時} \quad E = E_c = E_0 e^{\beta \rho'} \quad \beta > 0$$

$$\text{除荷時} \quad E = E_t = \alpha E_c \quad \alpha > 1$$

ここに、 α および β は常数で、 E_0 は静止状態の積雪の圧縮弾性係数、 ρ' はボールの接触変形による密度増加分を表す。 $\beta = 0$ のとき、弾性係数 E_c は線形で、 $\beta > 0$ のとき、 E_c は非線形となる。また $\alpha = 1$ のとき、除荷時の荷重-変形曲線は圧縮時のそれに重なる。さらに、これらのバネ常数や粘性係数に大きな値を採用すれば、ボールの変形は小さくなり、ボールを剛体とみることになる。

また、接触しているボールの離散は、相互の接触面に張力が働き、その値が粘着力を越える時に生ずるとする。 $(f_{ij}^t \leq -C_T, C_T: \text{粘着力})$

(b) すべり抵抗 S_{ij}

ボール相互の接触面におけるすべり現象は Mohr-Coulomb の条件に支配されるとする。図 3 に、すべり抵抗 S_{ij} を示す。すべり抵抗 S_{ij} 直角方向にずり変形があるときに生ずる。

$$S_{ij}^t = C_s + \mu f_{ij}^t, \quad f_{ij}^t \geq -C_T \quad (3)$$

図 4 に上記の接触力および、すべり抵抗を示す。

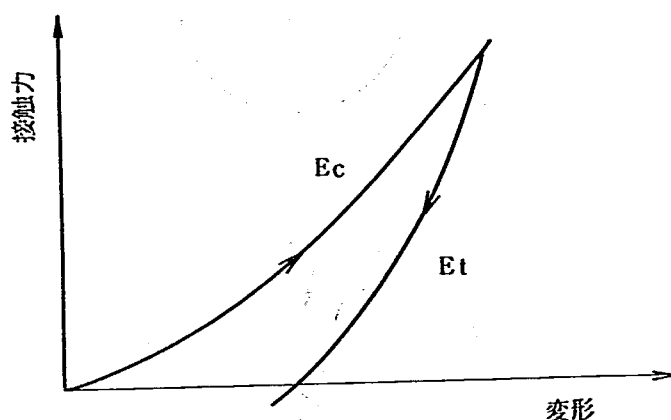


図 2 ボールのバネ常数

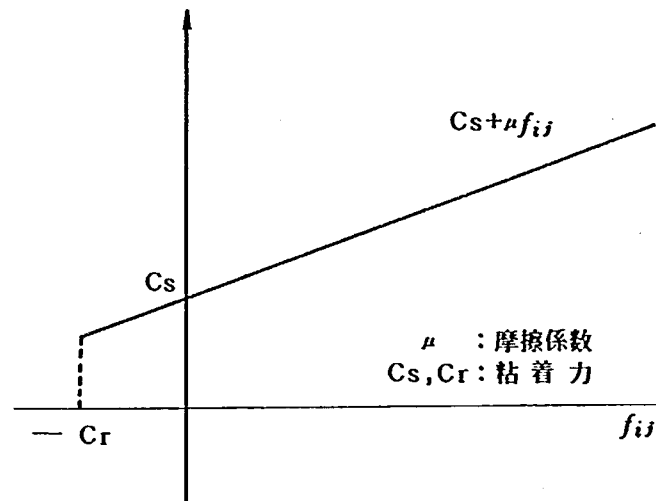


図3 すべり抵抗力

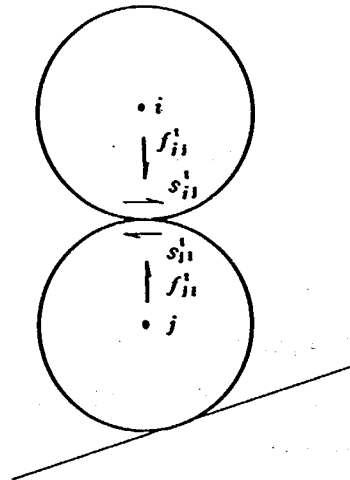


図4 接触面に作用する力

2.3 ボールと斜面との接触

2次元解析では斜面を多数の直線で近似し、各線分からのボールの高さを求める。

いま、ボール重心 i より線分12に垂線を下し、その垂線と線分12の交差点を j とすると、

$$X_j = X_i + \lambda_x Q$$

$$Y_j = Y_i + \lambda_y Q$$

$$Q = \lambda_x (X_i - X_1) + \lambda_y (Y_i - Y_1)$$

λ_x, λ_y : ベクトル12の方向余弦

斜面からのボールの高さ h は、

$$h = \{ (X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 \}^{1/2} \quad (4)$$

であり、

$$h \leq r$$

のとき、ボールは斜面に接触したとする。斜面に接触しているボールに作用する力は、ボールとボールの接触の場合とほぼ同様に求められる。

3次元解析では、斜面を4節点面要素に分割し、各節点の高度等のデータを読み込む。解析ではその4節点面要素から2つの三角形を生成し、ボールとそれらの三角平面およびその稜線との接触をチェックする。

左手系座標系において、図5に示すようにボール側より見て反時計回りに三角形平面の節点を1, 2, 3とすると、平面の式は、

$$\lambda_1 x + \lambda_2 y + \lambda_3 z - p = 0$$

$$\lambda_1 = \frac{a_1}{(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)^{1/2}}, \quad \lambda_2 = \frac{a_2}{(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)^{1/2}}$$

$$\lambda_3 = \frac{a_3}{(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)^{1/2}}$$

$$p = \frac{a_1 X_1 + a_2 Y_1 + a_3 Z_1}{(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)^{1/2}}$$

$$a_1 = \Delta Y_{13} \Delta Z_{21} - \Delta Y_{21} \Delta Z_{13}$$

$$a_2 = \Delta Z_{13} \Delta X_{21} - \Delta Z_{21} \Delta X_{13}$$

$$a_3 = \Delta X_{13} \Delta Y_{21} - \Delta X_{21} \Delta Y_{13}$$

$$\Delta X_{ij} = X_i - X_j, \quad \Delta Y_{ij} = Y_i - Y_j, \quad \Delta Z_{ij} = Z_i - Z_j$$

$$(i, j = 1, 2, 3)$$

三角表面からのボールの高さ h は、

$$h = |\lambda_1 X_i + \lambda_2 Y_i + \lambda_3 Z_i - p|$$

と求められ、 $h \leq r$ のときボールは平面に接触したと判断する。3次元解析では、ボールと三角形平面の接触の他にボールと稜線との接触も考慮する必要がある。

斜面に接触したボールの接触力は式(1)で、

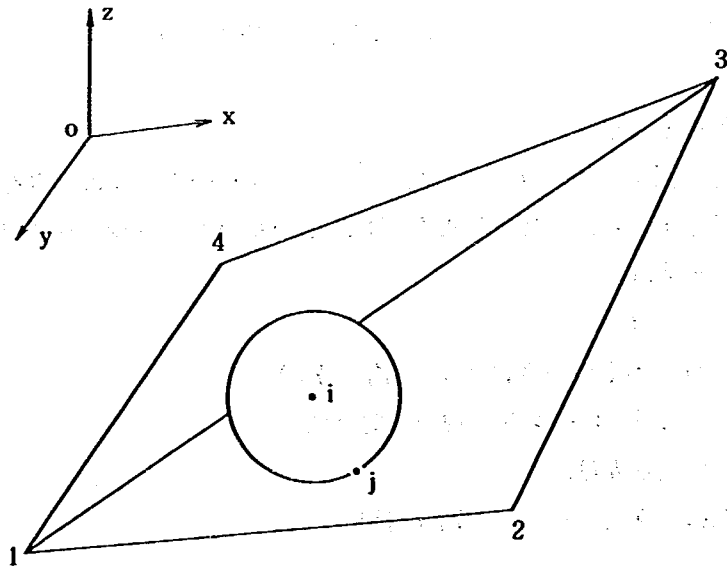


図5 斜面要素と座標系

$$\begin{aligned}\dot{X}_i &= \lambda_1 u_i + \lambda_2 v_i + \lambda_3 w_i \\ \dot{X}_j &= 0\end{aligned}$$

として求められる。

2.4 運動方程式

i ボールの運動方程式は、

$$\begin{aligned}m_i \dot{u}_i &= m_i g_x + \sum f_{ij}^x \\ m_i \dot{v}_i &= m_i g_y + \sum f_{ij}^y \\ m_i \dot{w}_i &= m_i g_z + \sum f_{ij}^z\end{aligned}$$

となる。ここに、 u_i, v_i および w_i は全体座標系 (X, Y, Z) での i ボールの速度 $\dot{u}_i, \dot{v}_i, \dot{w}_i$ は加速度、 g_x, g_y および g_z は重力加速度の X, Y および Z 方向成分、 f_{ij}^x, f_{ij}^y および f_{ij}^z は、接触力 f_{ij}^i およびすべり抵抗 S_{ij}^i を X, Y, Z 座標系に変換したもので、 $\sum$ は i ボールについて総和をとることを表す。

各ボールについて同様の運動方程式をたて、それらを時間に関し数値積分して各ボールの運動を求める。すなわち時刻 t の次のステップ $t + \Delta t$ では i ボールの速度 $u_i^{t+\Delta t}, v_i^{t+\Delta t}$ および $w_i^{t+\Delta t}$ は、

$$\begin{aligned}u_i^{t+\Delta t} &= u_i^t + g_x \Delta t + \frac{\Delta t}{m_i} \sum f_{ij}^x \\ v_i^{t+\Delta t} &= v_i^t + g_y \Delta t + \frac{\Delta t}{m_i} \sum f_{ij}^y \\ w_i^{t+\Delta t} &= w_i^t + g_z \Delta t + \frac{\Delta t}{m_i} \sum f_{ij}^z\end{aligned}$$

と求まる。

この離散ボールモデルは、雪崩の流速や到達距離の計算から雪崩対策上の形、雪崩衝撃力の推定まで応用範囲が広いのであるが、欠点として、多数のボールの運動を計算するため所要時間が一般に長いことがあげられる。

2.5 荷重—変形曲線

バネ常数の比 α の値については、既往の計算結果を参考に以下のように設定した。計算は図 6 に示すモデルについてのものでもバネ常数の比 α の値を 10 から 100 まで変えてシミュレートしている。その結果のボール流下状態を図 7 に示す。

これより、バネ常数の比 α の値は 10 以上であれば良いと判断される。

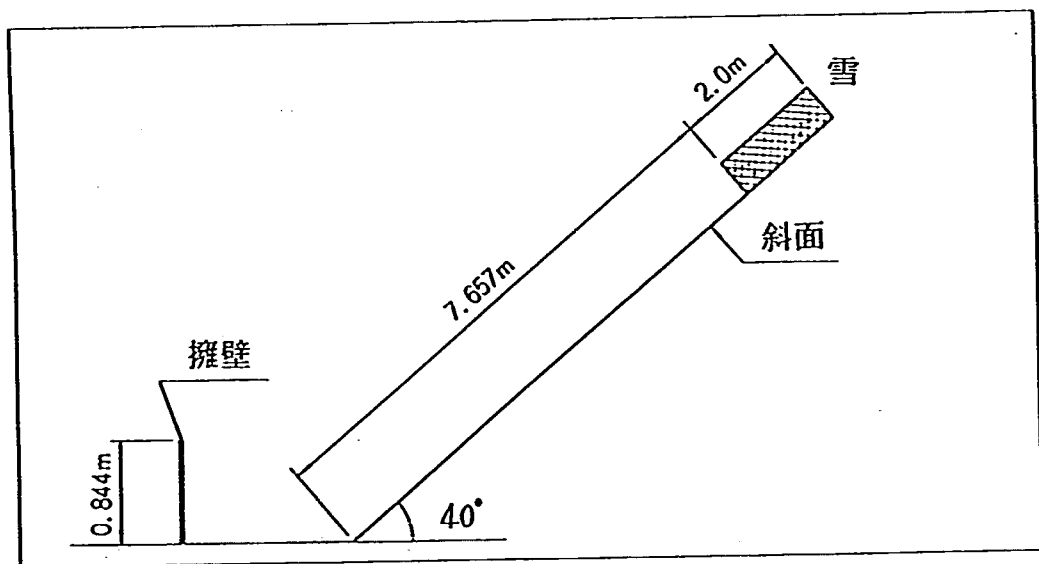
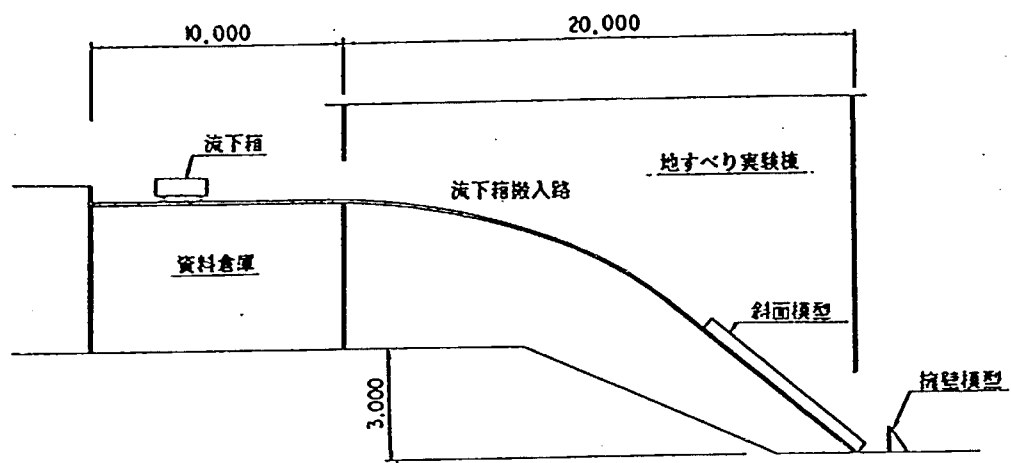


図6 パネ常数比 α についての計算モデル

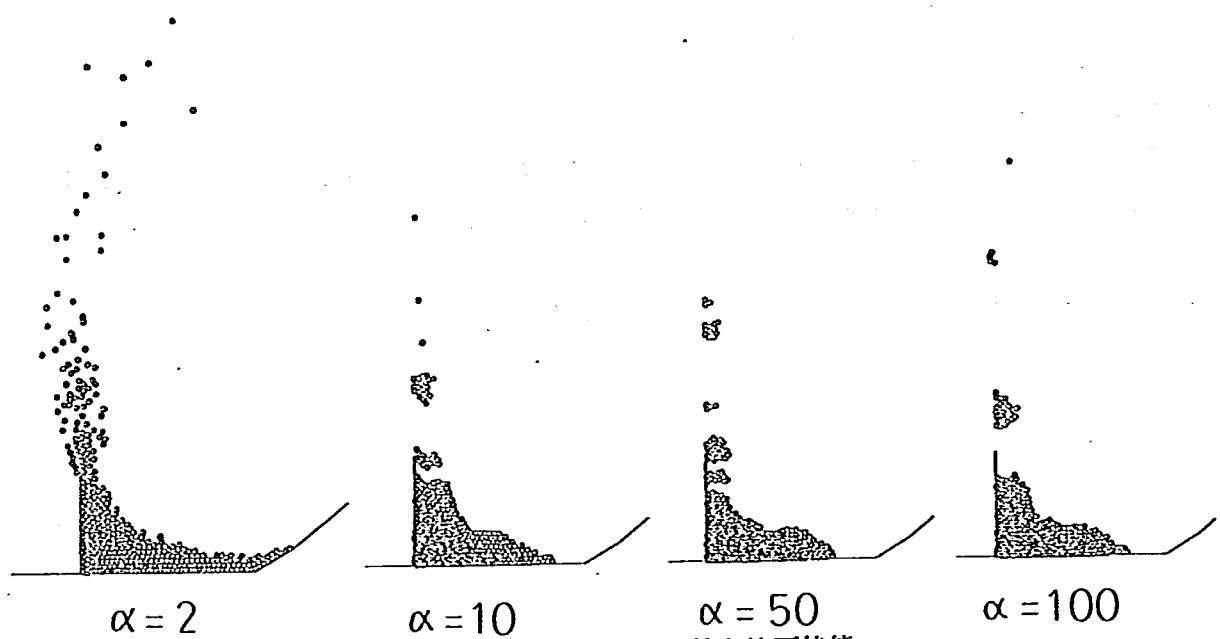


図7 パネ常数比 α の値と流下状態

2.6 離散ボールモデル法の相似パラメータ

離散ボールモデルの挙動を支配する式として、ボールが斜面に接触している場合のものを挙げるこ
とができる。斜面垂直方向を x 軸、斜面に沿う 2 方向を y, z とする局所座標系を考え、斜面に接触
しているボールの x および y 方向のつり合い式を示す。

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \frac{\ddot{x}}{g} + 2 r E l \frac{\dot{x}}{l} + 2 r \eta V \frac{\dot{x}}{V} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g_x$$

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \frac{\ddot{y}}{g} + 2 r E l \frac{\dot{y}}{l} + 2 r \eta_s V \frac{\dot{y}}{V} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g_y$$

$$- \mu \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g_y - 4 C r^2$$

ここに l は代表長さ、 V は代表速度、 g_x, g_y は重力加速度 g の x, y 方向成分。上式を無次元化
すると、

$$\frac{\ddot{x}}{g} + \frac{3}{2\pi} \pi_1 \frac{\dot{x}}{l} + \frac{3}{2\pi} \pi_2 \frac{\dot{x}}{V} = \frac{g_x}{g}$$

$$\frac{\ddot{y}}{g} + \frac{3}{2\pi} \pi_3 \frac{\dot{y}}{l} + \frac{3}{2\pi} \pi_4 \frac{\dot{y}}{V} = \frac{g_y}{g} - \pi_5 \frac{g_y}{g} - \frac{3}{\pi} \pi_6$$

ここに、

$$\pi_1 = \frac{E l}{r^2 \rho g} \quad \pi_2 = \frac{\eta V}{r^2 \rho g} \quad \pi_3 = \frac{E_s l}{r^2 \rho g}$$

$$\pi_4 = \frac{\eta_s V}{r^2 \rho g} \quad \pi_5 = \mu \quad \pi_6 = \frac{C}{r \rho g}$$

$\pi_1 - \pi_6$ が離散ボールモデルの相似パラメータである。2次元および3次元ともに同様の相似パ
ラメータを持つ。

ボール半径を r_p から r_m に変え、 $\rho_p = \rho_m, g_p = g_m, l_p = l_m, V_p = V_m$ の場合には

$$E_m = \left(\frac{r_m}{r_p}\right)^2 E_p \quad E_{sm} = \left(\frac{r_m}{r_p}\right)^2 E_{sp} \quad \eta_m = \left(\frac{r_m}{r_p}\right)^2 \eta_p$$

$$\eta_{sm} = \left(\frac{r_m}{r_p}\right)^2 \eta_{sp} \quad C_m = \left(\frac{r_m}{r_p}\right) C_p$$

となる。

3. パラメータスタディ

棚口雪崩を例にとりシミュレーションを行なう。図-8に平面図を示す。また、表1にシミュレーションのケースを示す。

表1 シミュレーションのケース

ケース	雪密度 g/cm^3	ボール 半径 m	弾性係数 kgf/m^2	粘性係数 $\text{kgf}^{\text{s}}/\text{m}^2$	粘着力 kgf/m^2	摩擦係数	備考 (ボール個数)
1	0.1	0.5	10^6	10^6	40	0.15	300
2						0.20	
3						0.25	
4					50	0.15	300
5						0.20	
6						0.25	
7					60	0.15	300
8						0.20	
9						0.25	
10	0.1	0.25	2.5×10^5	2.5×10^5	20	0.20	600
11	0.1	0.5	10^5	10^5	40	0.20	300
12	0.1	0.5	10^7	10^7	40	0.20	300
13	0.1	0.5	10^6	10^6	40	0.20	300
14	0.1	0.5	10^6	10^6	40	0.20	300
15	0.2	0.5	2×10^6	2×10^6	80	0.20	300
16	0.3	0.5	3×10^6	3×10^6	120	0.20	300
17	0.1	0.5	10^6	10^6	40	0.20	616
18	0.1	0.5	10^6	10^6	40	0.20	1200
19	0.1	0.5	10^6	10^6	40	0.15	1200
20	0.1	0.5	10^6	10^6	40	0.15	600
21	0.1	0.5	10^6	10^6	40	0.15	1600

図9にケース21のボール流動堆積分布を示す。流動堆積分布は10m四方の斜面に存在する個数を10段階で示した。また、図10(1)と(2)に雪崩主流および支流判定領域を通過するボール(それぞれ主流ボールおよび支流ボールと呼ぶ)の平均流速を示す。以下に各ケースの計算結果と考察をまとめる。

(1) 図11に粘着力 C 、摩擦係数 μ による先端ボールの到達斜距離を示す。これより到達距離に対して粘着力の影響が大きく摩擦係数の影響は比較的小さいと言える。先端ボールだけでなく各ボールの到達点を見ると $\rho = 0.1 \text{ g/cm}^3$, $r = 0.5 \text{ m}$, $E = 10^6 \text{ kgf/m}^2$, $\eta = 10^6 \text{ kgf s/m}^2$ の場合で、 $C = 40 \text{ kgf/m}^2$, $\mu = 0.15$ の値が災害雪崩の調査結果に近いものであった。

(2) 図12に摩擦係数 μ と主流ボールの最大流速を示す。これより急斜面下のボール流速に対する摩擦係数の影響は比較的小さいといえる。

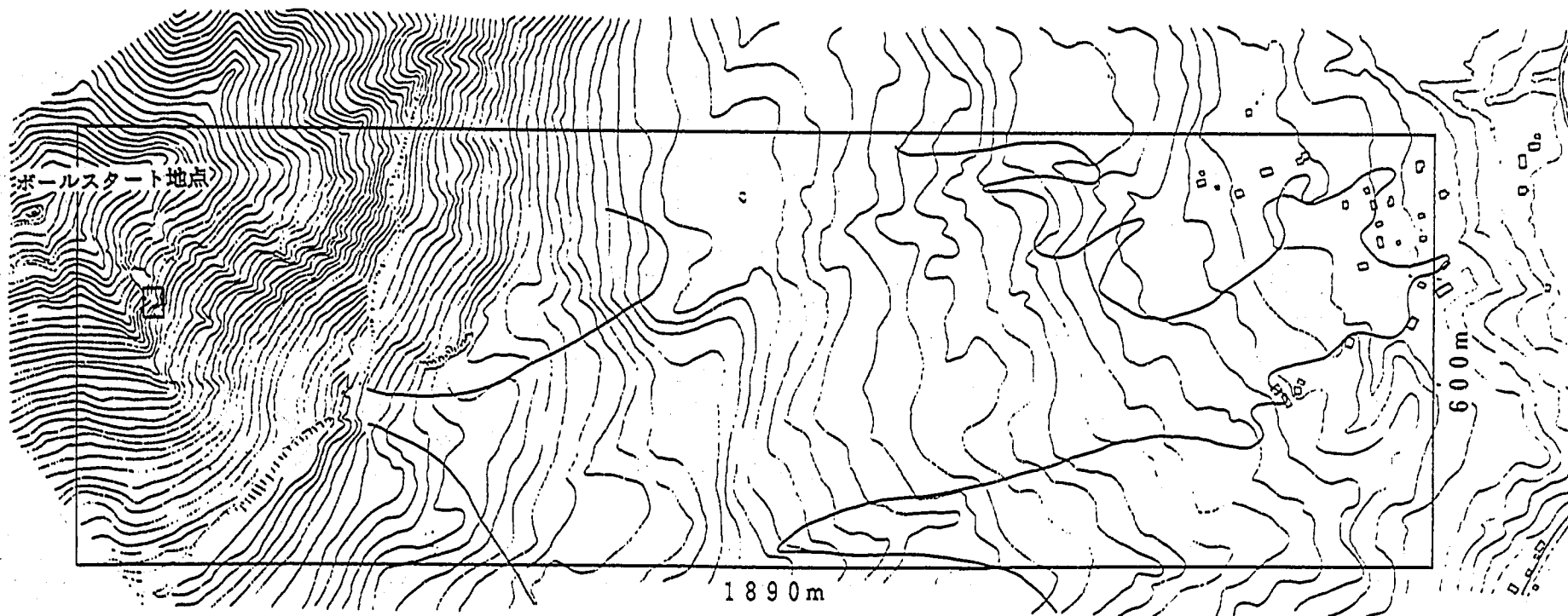


図 8 柵口雪崩斜面

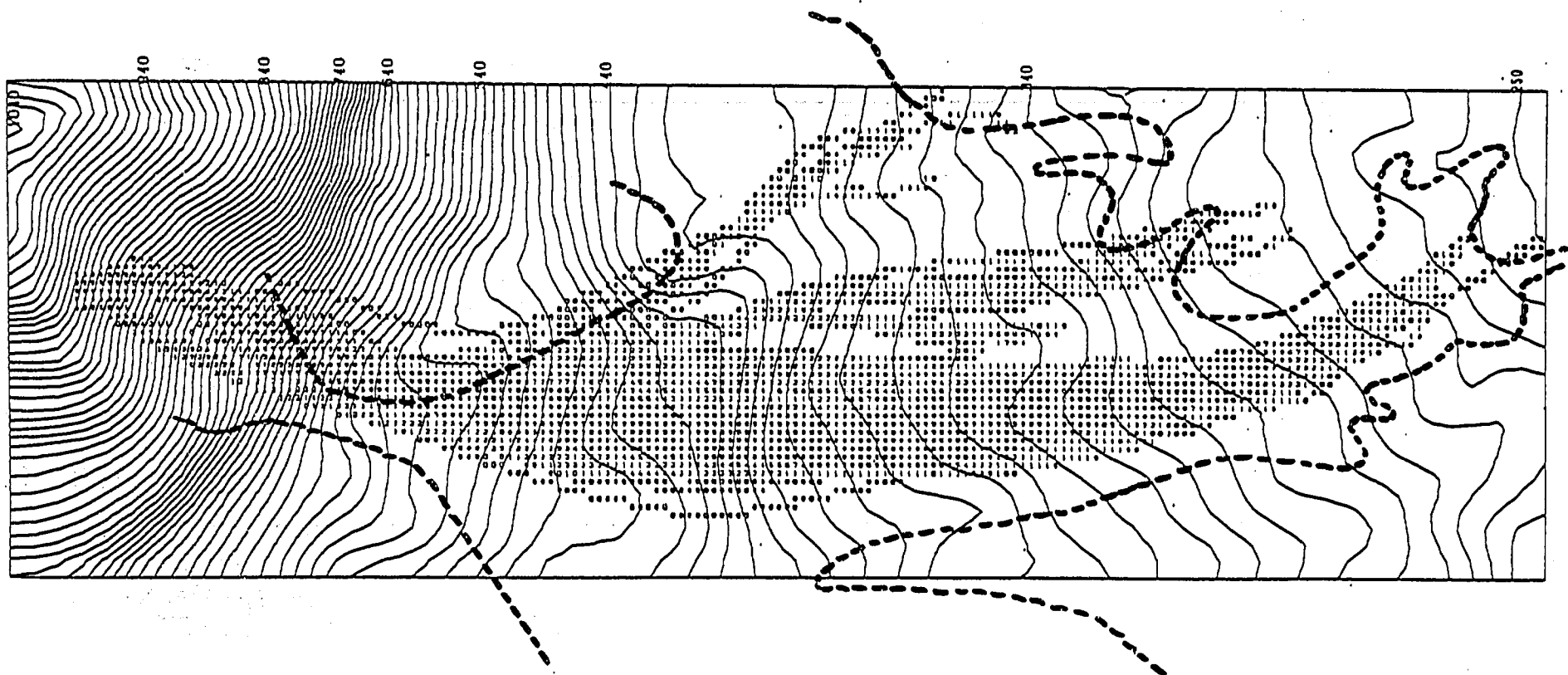


図9 計算ケース21(最大ボール高さ)

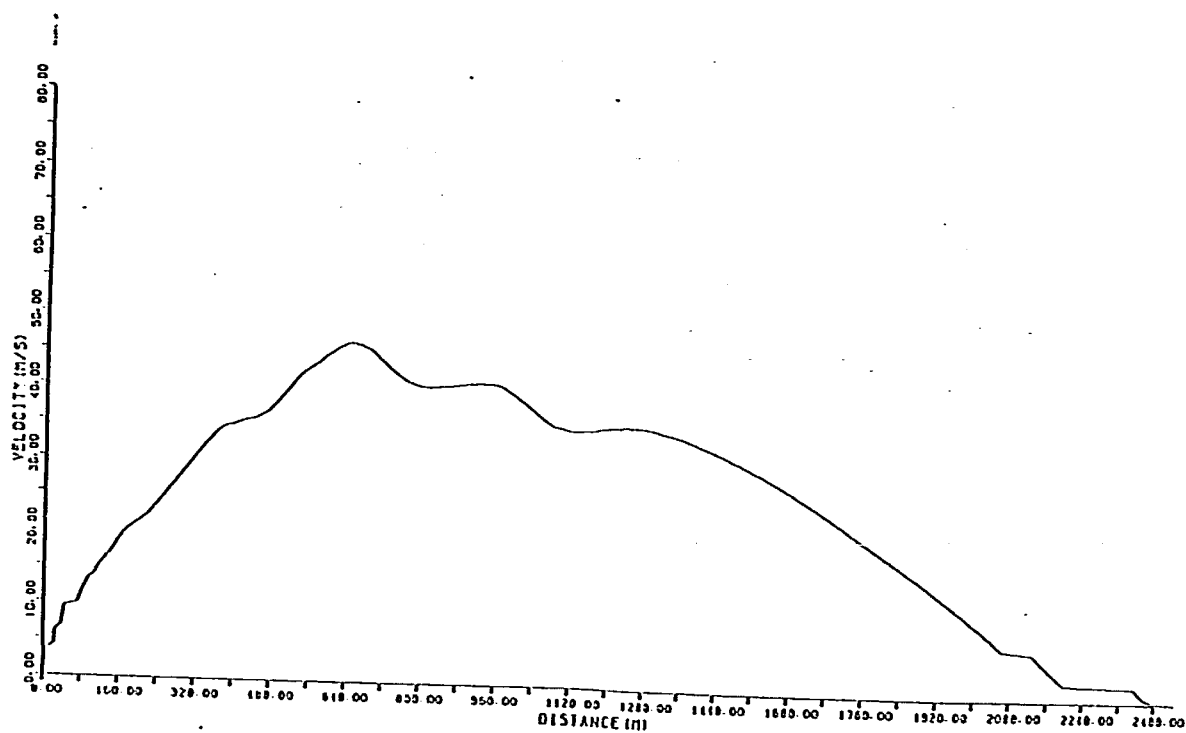


図10(1) 計算ケース21 (主流ボール平均流速)

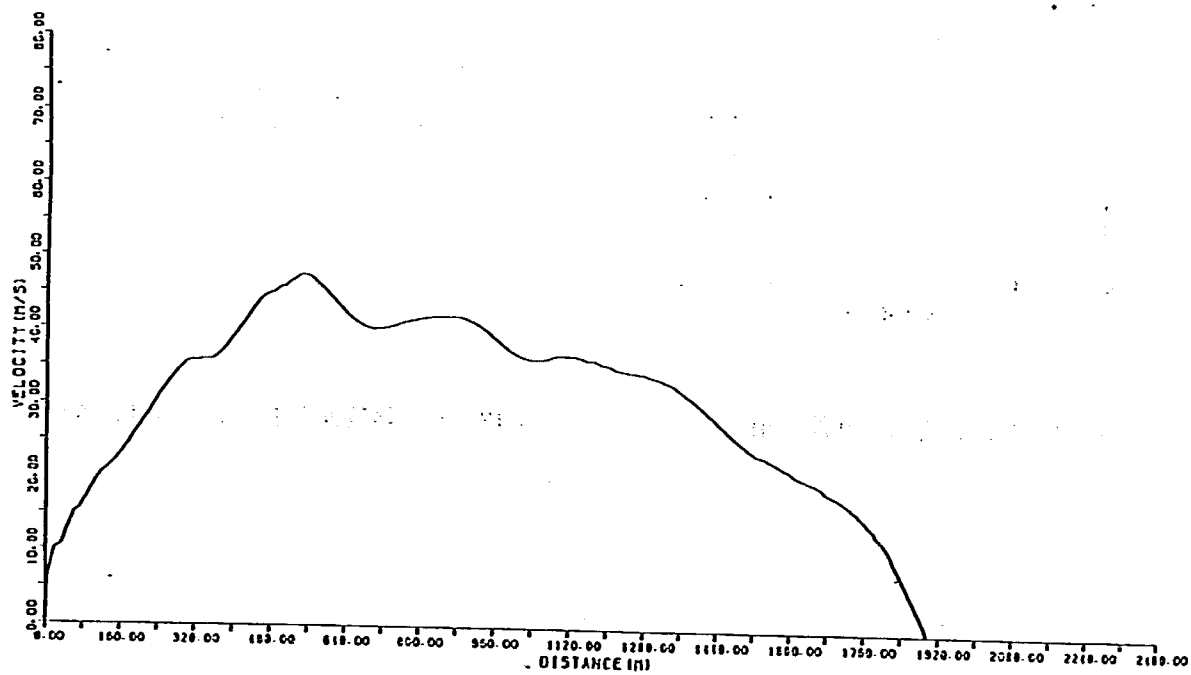


図10(2) 計算ケース21 (支流ボール平均流速)

- (3) 図13に示すように粘性係数 η の値が変化しても主流ボールの到達斜距離はそれ程差がない。
- (4) 図14に示すようにボールの弾性係数 E は到達斜距離に大きく影響する。
- (5) 図15に、ボール半径、雪密度を変化させ、斜面に接触しているボールのつり合い式が等価となるようにボール諸元を決定した場合の主流ボールの到達斜距離を示す。これより、ボール半径を0.5 mから0.25 mに変化させても到達斜距離は一致しており雪密度を0.1から0.3に変えたと到達斜距離は、小さくなる傾向がある。なお、いずれの場合も流速はほぼ一致している。

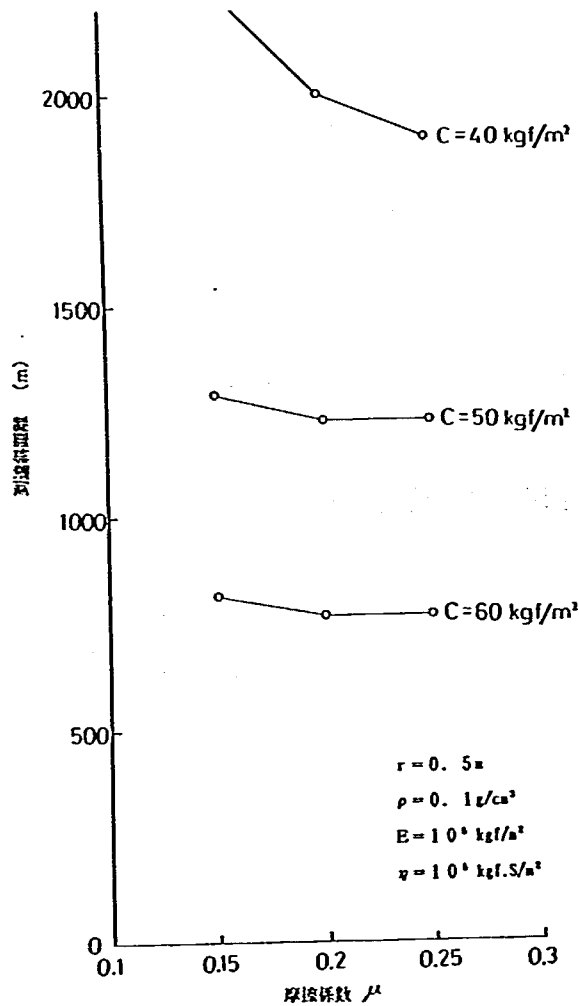


図11 C , μ と雪崩到達斜距離

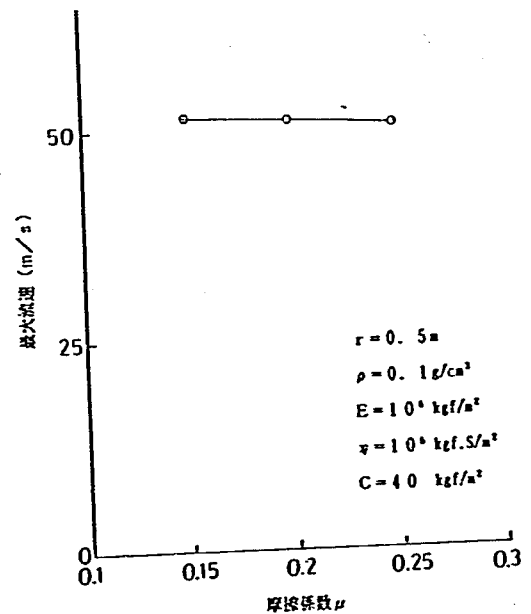


図12 摩擦係数 μ と主流ボール最大流速

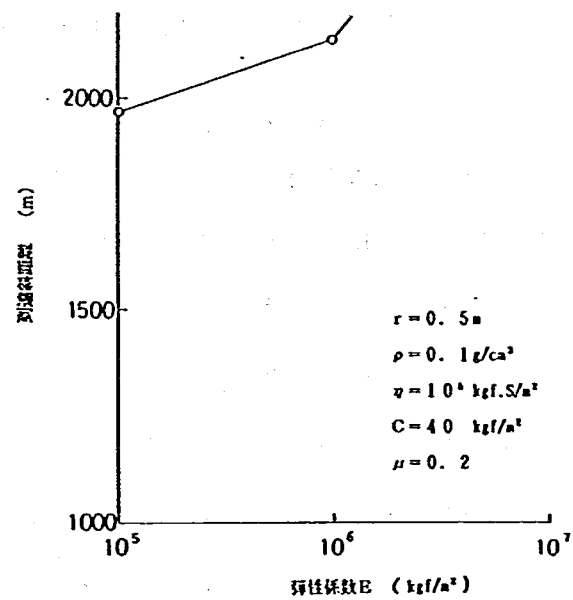
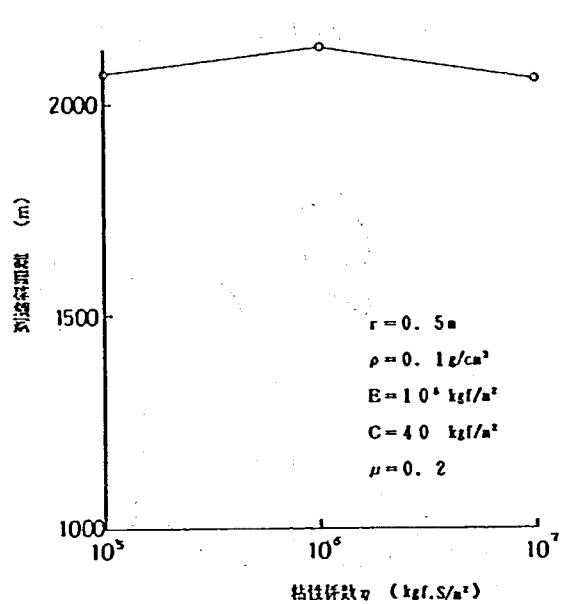


図13 粘性係数 η と主流ボールの到達斜距離

図14 弾性係数 E と主流ボールの到達斜距離

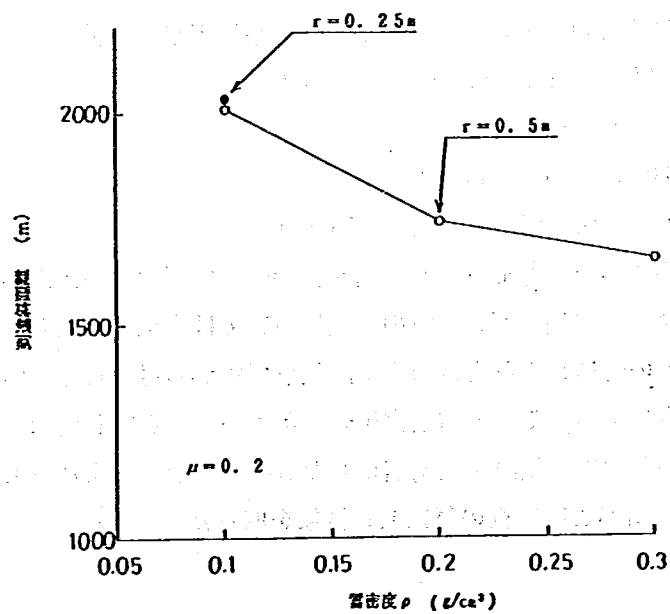


図15 雪密度 ρ と主流ボールの到達斜距離

4. 災害雪崩のシミュレーション

4.1 災害雪崩

ここでは以下の6つの災害雪崩を取り上げる。表2にそれらの発生年月日および図-16に災害地を示す。

表2 災害雪崩

雪 崩	発生年月日	災 害 地
棚 口 雪 崩	61. 1. 26	新潟県能生町棚口
寒 谷 雪 崩	59. 2. 6	新潟県糸魚川市寒谷
田 海 雪 崩	61. 1. 26	新潟県青梅町田海
清津峡温泉	59. 2. 9	新潟県中里村小出 (清津峡温泉)
大 倉 雪 崩	56. 1. 7	新潟県守門村大倉
里 見 雪 崩	57. 2. 24	長野県小谷村里見



図16 災害地位置図

それぞれの災害雪崩の斜面状、雪崩発生状況を示すと、表3のようになる。

また各災害発生時の気温、雪崩部の積雪密度、雪崩スタート時の雪崩厚を表4に示す。棚口雪崩発生時の気温は61年1月26日23時の能生の気温(-1.1° 、気象庁気象日報)をもとに次式より求めた。

$$T = T_0 - \Delta T \times \Delta H = -1.1 - 0.5 \times 8.5 = -5.3$$

T_0 : 能生の気温(-1.1°)

ΔT : 高度100m毎の気温低下(-0.5°)

ΔH : 能生と雪崩発生域の高度差(850m)

田海雪崩および大倉雪崩についてもそれぞれ雪崩発生時の糸魚川および湯沢の気温(-0.2 および -2.6°)より同様に求めた。清津峡雪崩発生時の気温については文献4)より -6.0° とした。雪崩は必ずしも発生日の最低気温の時に起きるとは限らず、気象日報から見てむしろ雪崩発生時の気温はその日の平均気温に近いようである。そこで雪崩発生時刻が不明である寒谷雪崩と里見雪崩の気温については、それぞれ能生の当日の平均気温を高度補正したもの(気象日報より $-1.6^{\circ} - 0.5 \times 8.25 = -5.7^{\circ}$)および里見雪崩の雪崩実態調査の気象調査結果を取った。

表3 雪崩実態調査

		梶口雪崩	寒谷雪崩	田海雪崩	清津峡	大倉雪崩	里見雪崩
斜面状況	保全対象物	2	2	1	2	2	1, 2
	斜面状態	自然	自然	自然	自然	自然	自然
	斜面勾配	45°	39°	25°	40°	39°	40°
	見通し勾配	19°	18°	18°	30°	24°	30°
	斜面方位	東	南西	北東	西	東	南東
	斜面長(m)	2100	2300	2700	600	850	1400
	斜面の種類	平	沢	沢	平	平	沢
	斜面形状	5	1	5	5	5	2
	斜面の地質	軟岩	普通土	普通土	軟岩	普通土	普通土
	植生	無	低木	低木	低木	低木	低木
	植生状態	疎	疎	疎	疎	疎	疎
	防雪施設	無	無	無	予防柵	予防柵	無
	破損施設	—	—	—	—	—	—
雪崩発生状況	発生年月日	61. 1. 26	59. 2. 6	61. 1. 26	59. 2. 9	56. 1. 7	57. 2. 24
		23:00	日中	19:00	17:20	0:09	
	発生標高(m)	900	875	870	700	670	1200
	雪崩全長(m)	2100	2300	2700	600	800	1100
	雪崩幅(m)	150	200	150	50	200	30
	雪崩の種類	表層	表層	表層	表層	表層	表層
	見通し勾配	19°	18°	18°	30°	24°	18°
	雪崩発生兆候	無	無	無	無	無	無
	発生誘因	降雪	降雪	雪庇		雪庇	降雪
	雪崩形状	—	—	逆三角型	瓢箪型	四角型	逆三角型
	雪崩量(m³)	200,000	255,000	20,000	10,500	300,000	9,000
	発生時積雪深(m)	3.70	4.12	3.05	4.36	4.0	0.78

発生時積雪深は集落での値を取った。寒谷雪崩および里見雪崩の発生時刻は不明である。

保全対象物

1 : 道路 2 : 集落

斜面形状

1 : 渓流型 2 : 収束型 3 : 中立型 4 : 発散型 5 : その他

表4 災害雪崩の雪崩発生時の気温、雪密度、雪崩層厚

災害雪崩	発生年月日	雪崩発生時 積雪深(m)	雪崩発生時 の 気 温	雪 密 度 (g/cm³)	雪崩層厚 (cm)
1 梶 口	61. 1. 26	370	-5.3	0.2	200
2 寒 谷	59. 2. 6	412	-5.7	0.2	230
3 田 海	61. 1. 26	305	-4.9	0.2	136
4 清津峡温泉	59. 2. 9	436	-6.0	0.1	202
5 大 倉	56. 1. 7	400	-3.0	0.17	156
6 里 見	57. 2. 24	78	-2.3	0.1	17

雪崩部の雪密度については不明の点が多いが、ここでは雪崩到達シミュレーションの結果を3に述べたボールの無次元パラメータで整理すれば雪密度は陽には現れないので、ここでは雪崩部の雪密度についてはそれ程深く検討せず、既往の雪崩災害調査結果、例えば文献5)および6)、を参考に表4のように設定した。

雪崩層厚は、柵口雪崩については文献6)から2 m、寒谷雪崩については文献3)から2.3 m、田海雪崩については平岩の61年1月21日と1月26日の積雪深の差1.22 mに、雪崩実態調査の積雪深3.05 mと平岩の積雪深2.70 mの比を乗じて1.36 mとした。清津峡雪崩の雪崩層厚は文献4)より2.02 m、大倉雪崩の雪崩層厚は文献7)より1.56 m、里見雪崩の雪崩層厚は雪崩実態調査の降雪記録より0.17 mとした。

図-17に柵口、図-18に寒谷、図-19に田海、図-20に清津峡温泉、図-21に大倉、図-22に里見の平面図を示す。

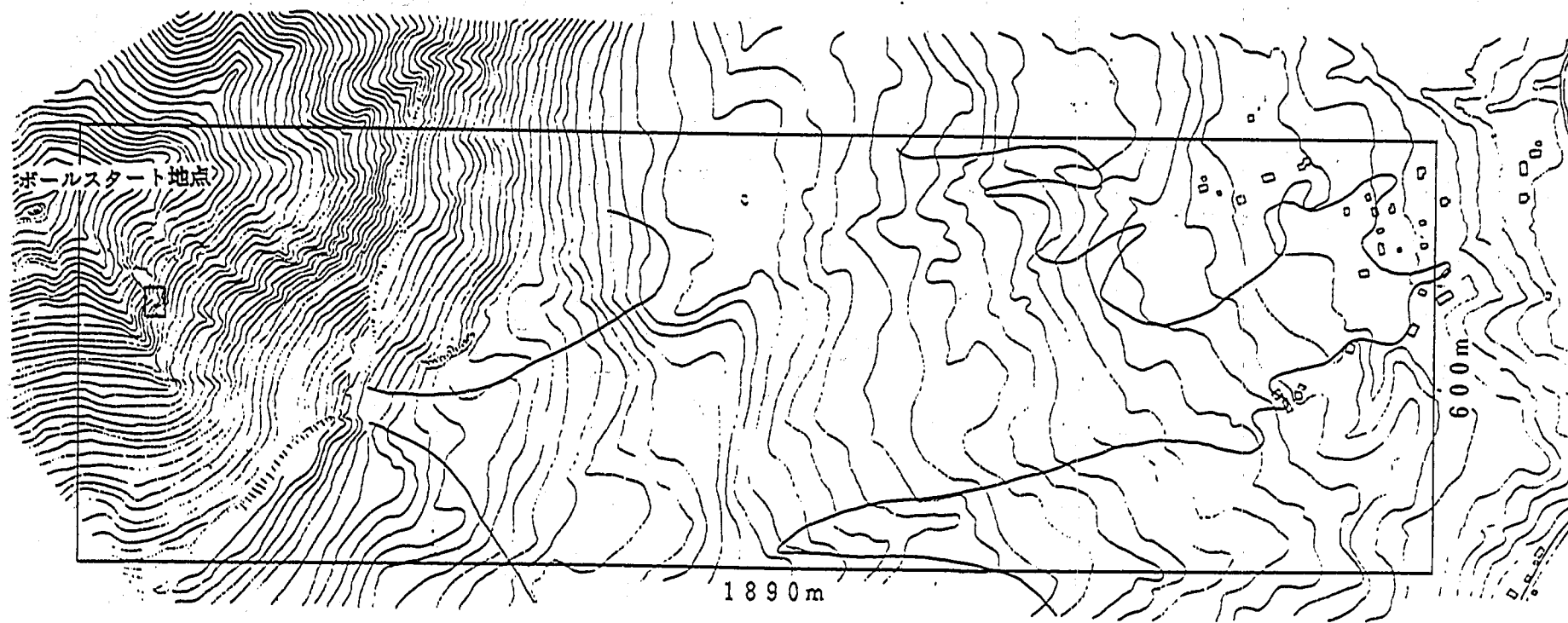


図17 柵口雪崩

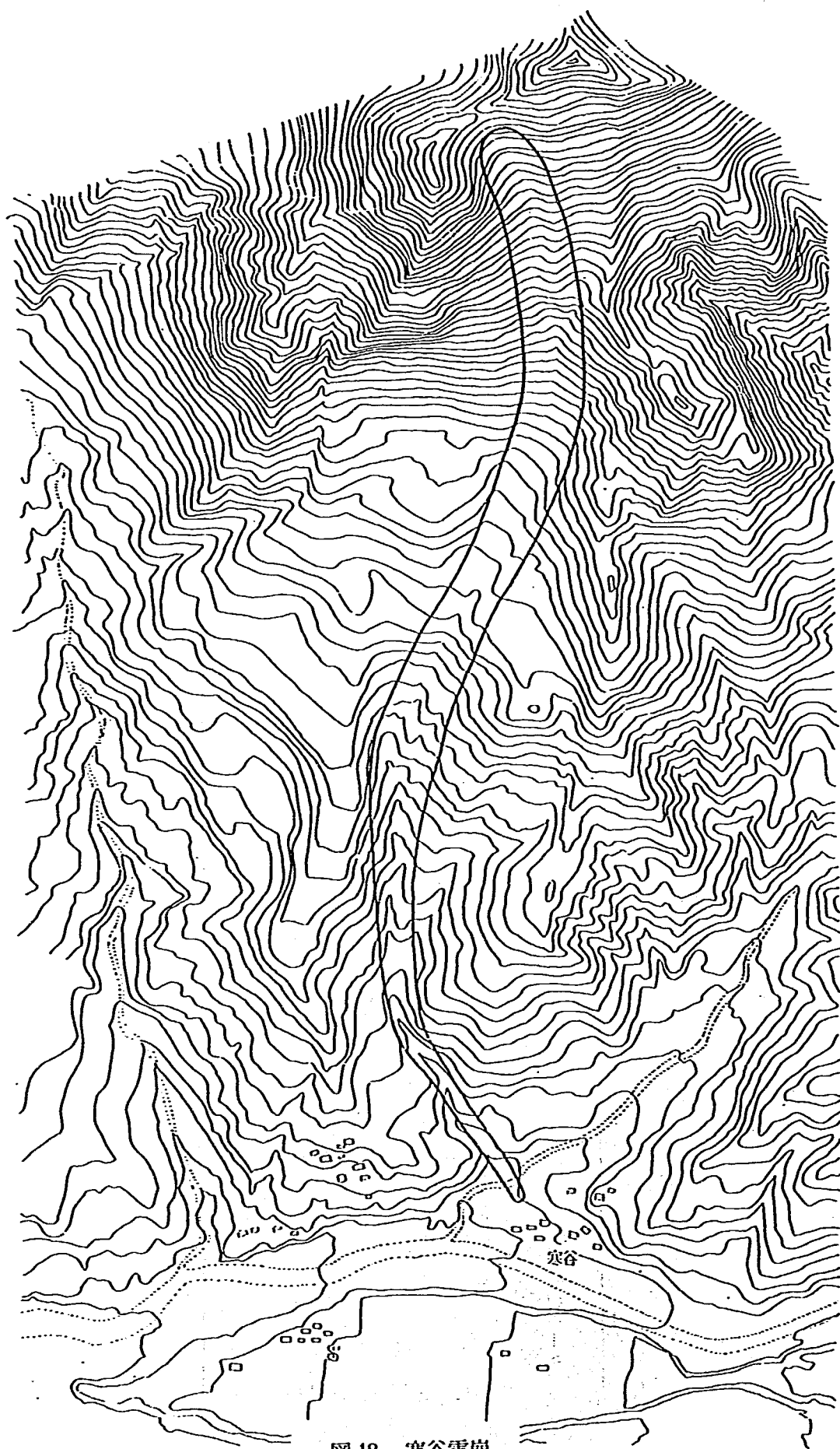


图 18 寒谷雪崩

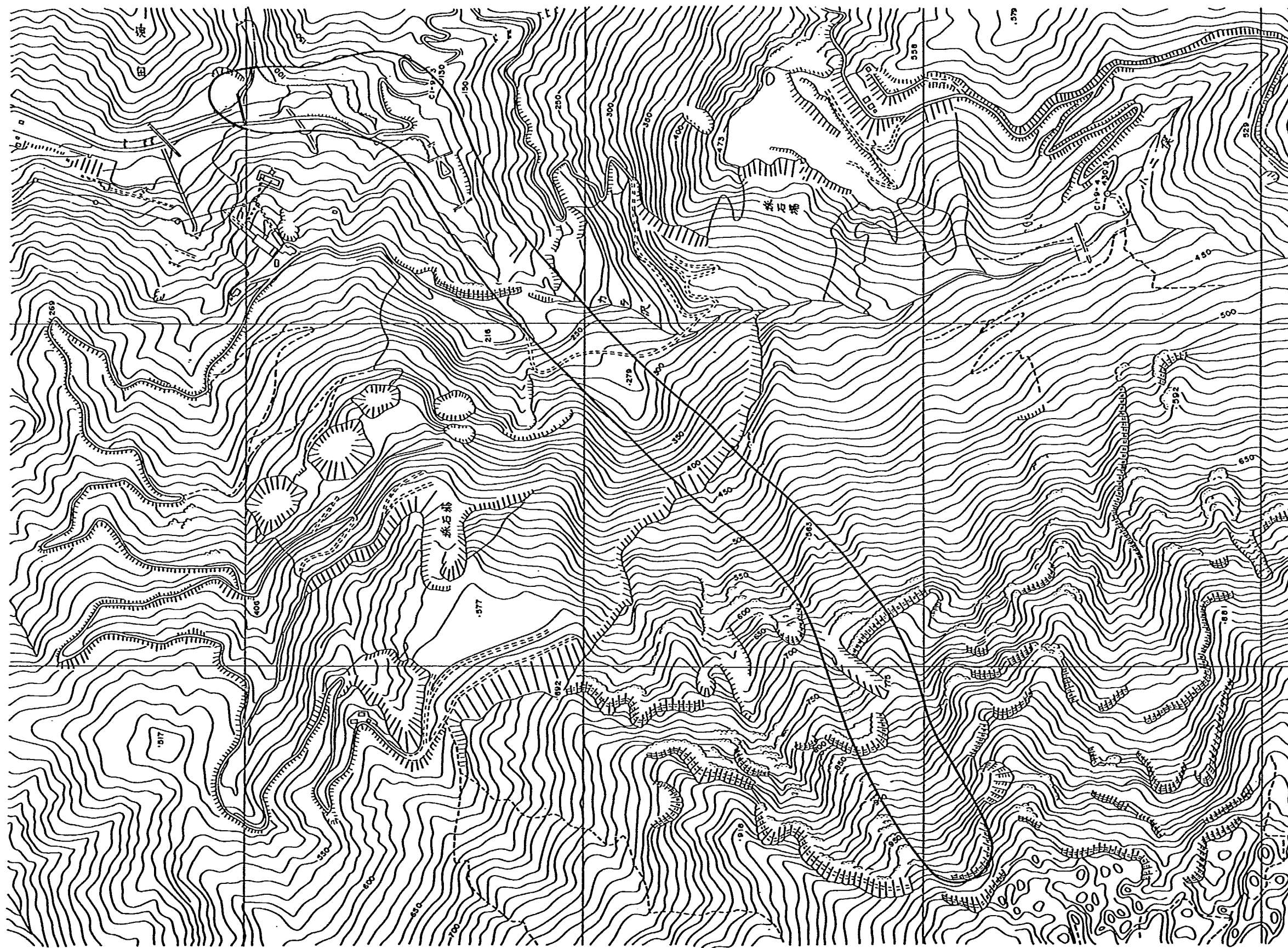


图19 田海雪崩

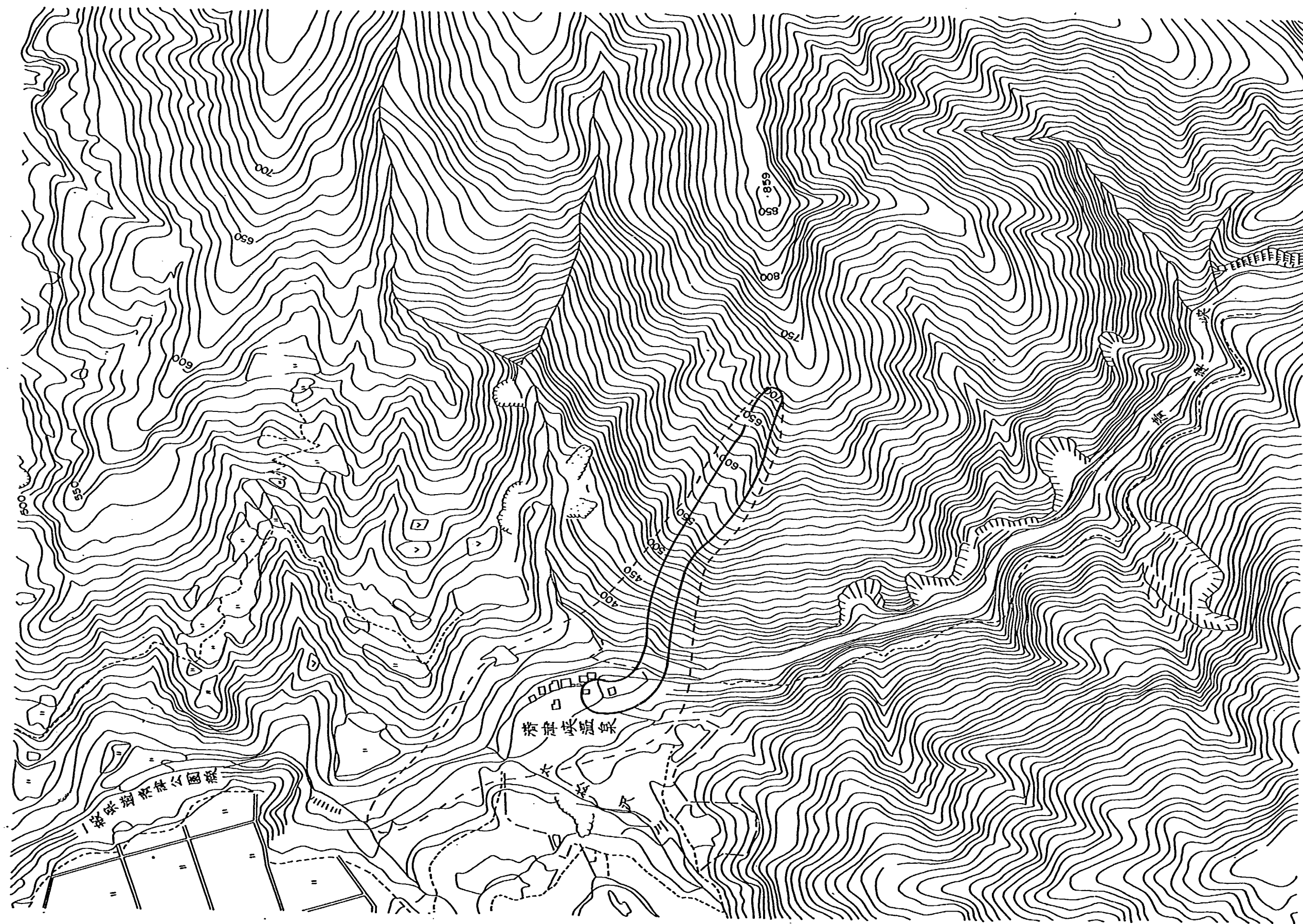


图 20 清津峡温泉雪崩

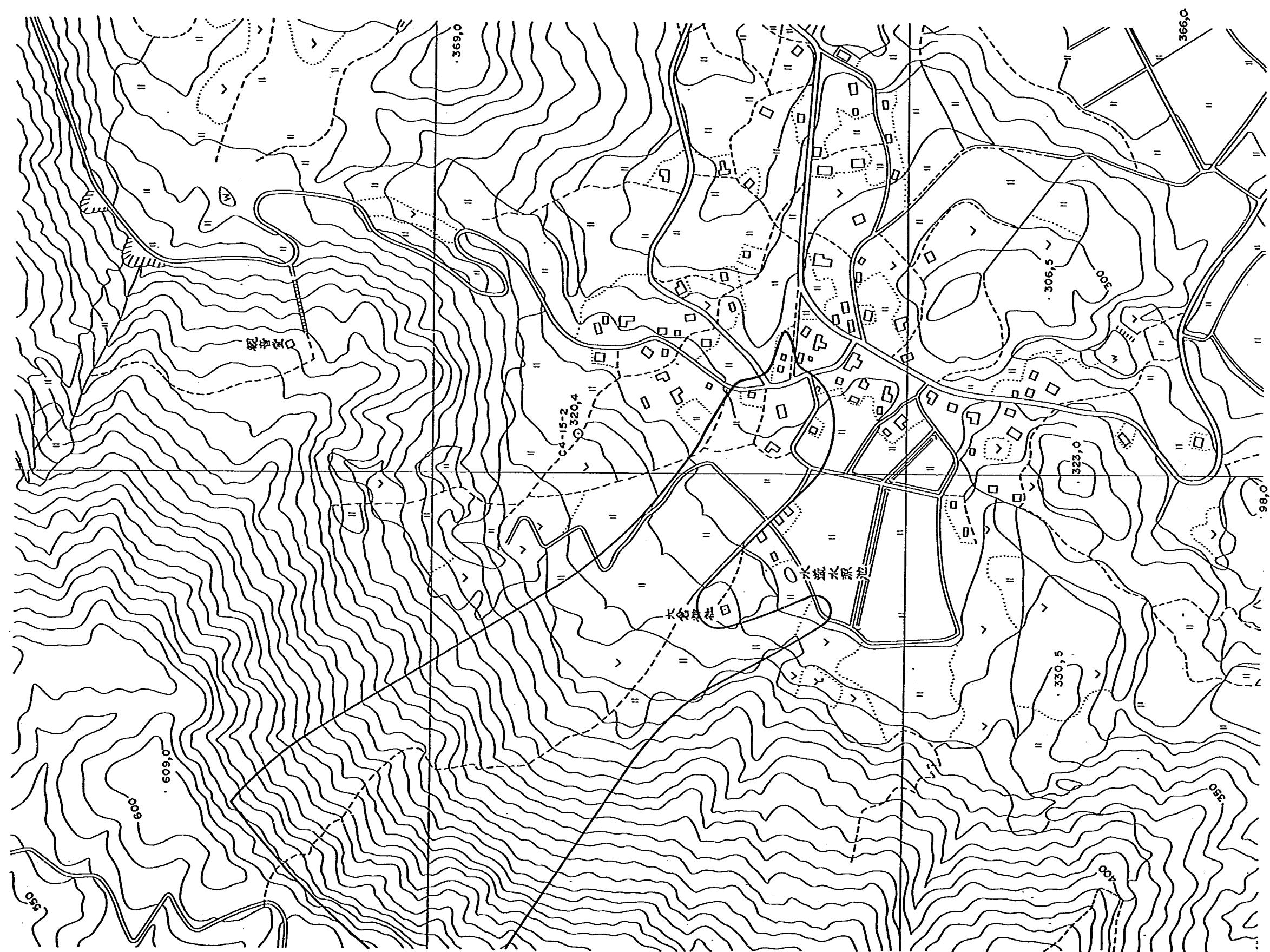


图21 大倉雪崩

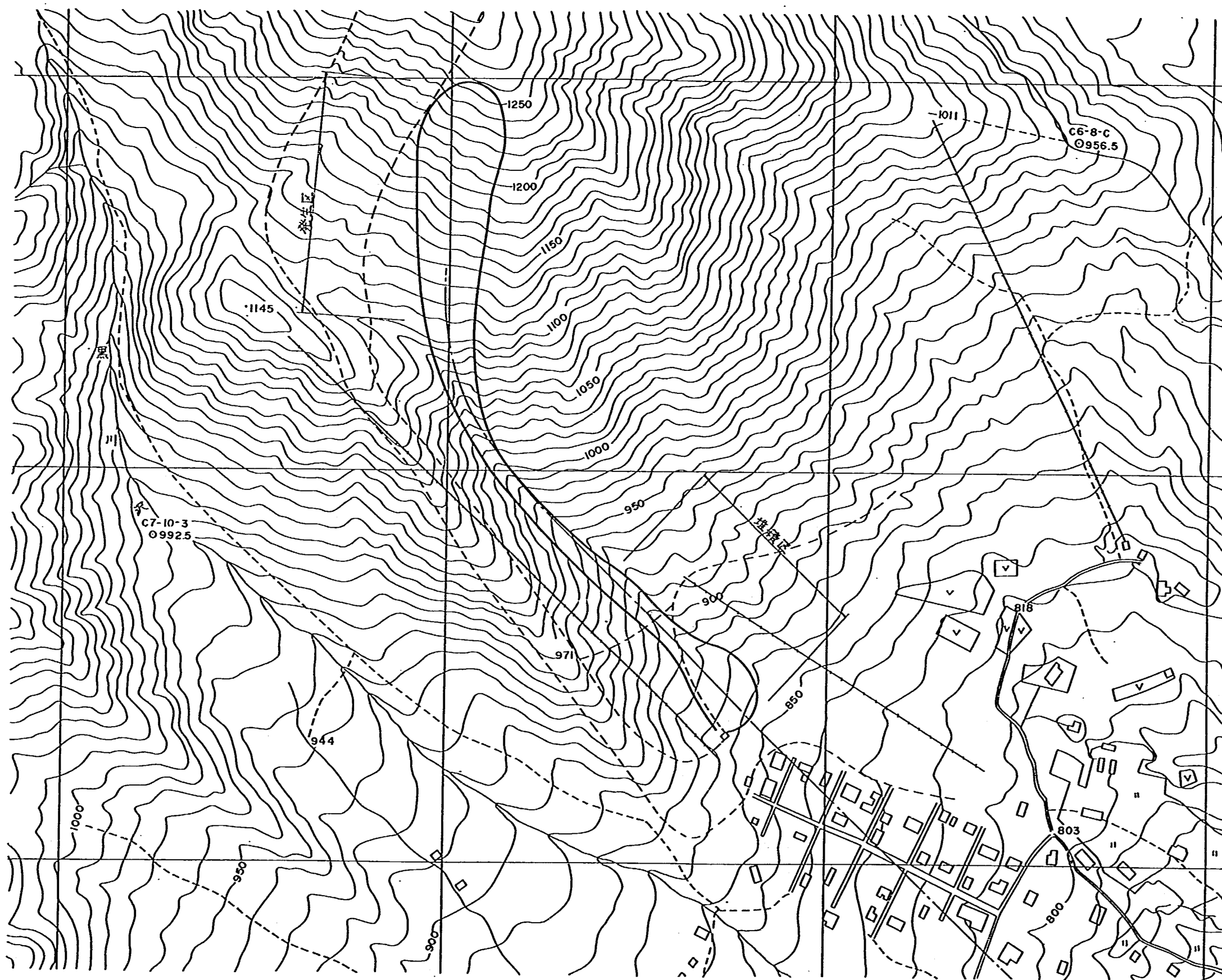
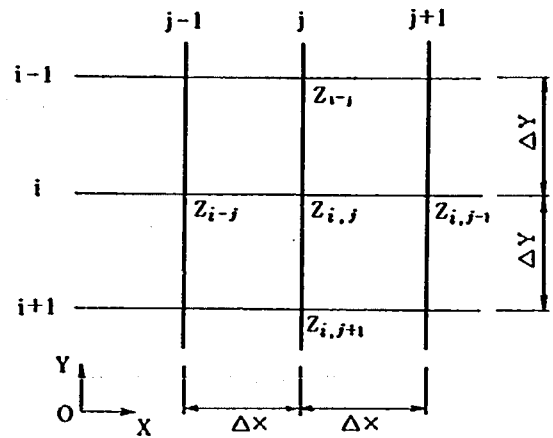


图22 里見雪崩

4.2 斜面のスミージング

表層雪崩のシミュレーションでは、雪面コンター図をもとに雪崩斜面の数値化を行う必要があるが、往々にして雪面コンター図がない場合がある。その場合には地形図をもとに雪崩斜面を数値化することになるが、積雪の吹き溜まり吹く払いによる雪面の平滑化を何らかの形で考慮する必要がある。

斜面の数値化の際、その平滑化を意識して経験的に斜面高度を修正するのの一つの方法であるが、ここでは機械的な斜面スミージングについて述べる。



いま、斜面を平面(XY面)上で等分割にし、そのメッシュの*i*, *j*番目の高度を $Z_{i,j}$ とすると、スミージングは次式によるとする。

$$Z_{i,j} = 0.5 Z_{i,j} + 0.125 (Z_{i,j-1} + Z_{i,j+1} + Z_{i-1,j} + Z_{i+1,j})$$

ここに $Z_{i,j}$ はスミージング後のメッシュ*i*, *j*の高度。

この操作を全てのメッシュに渡って行う。ただしメッシュの縁辺では、

縁辺、たとえば*i* = 1とすると

$$Z_{1,j} = 0.5 Z_{1,j} + 0.125 (Z_{1,j-1} + Z_{1,j+1}) + 0.25 Z_{2,j}$$

隅角部、たとえば*i* = *j* = 1とすると

$$Z_{1,1} = 0.5 Z_{1,1} + 0.25 (Z_{1,2} + Z_{2,1})$$

である。この1回の操作により $2\Delta X \times 2\Delta Y$ の領域レベルのスミージングがなされたとする。いは、 $L \times L$ の領域レベルのスミージングが必要とし、スミージング操作の回数は

$$n = \frac{1}{2} \left\{ \frac{L}{2\Delta X} + \frac{L}{2\Delta Y} \right\}$$

とする。これにより $2n\Delta X \times 2n\Delta Y$ の領域を見渡して $Z_{i,j}$ がスミージングされたことになる。 L としては40m程度が適当と考えられる。 $\Delta X = \Delta Y = 20$ m であるならばスミージングは1回ということになる。ここでは各雪崩斜面とも1回のスミージングを実施した。

4.3 シミュレーション

掘口雪崩についてはボールパラメータによる雪崩到達距離の変化を計算しており、図11～図15に示すとおりその雪崩到達距離は粘着力*C*、摩擦係数 μ 、弾性係数*E*等による。特に、その雪崩到達距離は粘着力*C*および弾性係数*E*の影響が大である。

表1により行われたシミュレーションからボールパラメータの妥当な値は、雪密度0.1 g/cm³、ボール半径0.5 mで

$$\text{弾性係数 } E = 10 \text{ kgf/m}^2$$

$$\text{粘性係数 } \eta = 10 \text{ kgf.s/m}^2$$

$$\text{摩擦係数 } \mu = 0.15$$

$$\text{粘着力 } C = 40 \text{ kgf/m}^2$$

である。いま、無次元パラメータの値、

$$\pi_1 = \frac{El}{r^2 \rho g} \quad \pi_2 = \frac{\eta V}{r^2 \rho g} \quad \pi_3 = \frac{E_s l}{r^2 \rho g}$$

$$\pi_4 = \frac{\eta_s V}{r^2 \rho g} \quad \pi_5 = \mu = 0.15 \quad \pi_6 = \frac{C}{r \rho g}$$

がそれぞれの災害雪崩と棚口雪崩とで等しくなるとすると、それぞれの災害雪崩についてのボールパラメータの値は表5に示すようになる。ただし、各災害雪崩で気象条件や斜面形状が異なるので、そのボールパラメータの値でシミュレーションを行っても雪崩の到達域が所定位置となるとは限らない。その場合には、雪崩到達域に最も大きな影響がある粘着力Cの値を変化させてシミュレーションを行い、所定の雪崩到達域になる粘着力Cの値を求める。

表5 ボールパラメータの値

諸 元	寒 谷	田 海	清 津 峡	大 倉	里 見
雪 密 度 ρ (g/cm)	0.2	0.2	0.1	0.17	0.1
ボール半径 r (m)	0.383	0.34	0.336	0.26	0.085
弾 性 係 数 E (kgf/m ²)	1.17×10^6	2×10^6	4.52×10^5	4.60×10^5	2.89×10^4
粘 性 係 数 η (kgf.s/m ²)	1.17×10^6	2×10^6	4.52×10^5	4.60×10^5	2.89×10^4
摩 擦 係 数 μ	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
粘 着 力 C (kgf/m ²)	61.3	80	26.9	35.4	6.8
ボール層数	3	2	3	3	1
ボール個数	400	400	400	400	400

* ボール層数はボール半径を50 cm以下となるよう設定した。

4.4 シミュレーションの結果

棚 口	寒 谷	田 海	清津峡	大 倉	里 見
図 23	図 24	図 25	図 26	図 27	図 28

シミュレーション結果は上記の図面に示す。ただし大倉雪崩は発生域が広いため、そのシミュレーションでは雪崩発生点を3ケースとして検討した。

それぞれの結果から災害雪崩に最も近い到達となる計算ケースを選び、そのC（ボール粘着力）と π_6 （無次元粘着力）を表6に示す。

表6 C（ボール粘着力）と π_6 （無次元粘着力）

災 害 地	年 月 日	積 雪 深 (cm)	気 温 (℃)	雪 密 度 (g/cm ³)	雪崩層厚 (cm)	C kgf/m ²	π_6
1 棚 口	61. 1. 26	340	-5.3	0.2	200	40	0.8
2 寒 谷	59. 2. 6	412	-5.7	0.2	230	61.3	0.8
3 田 海	61. 1. 26	305	-4.9	0.2	122	46.3	0.68
4 清津峡温泉	59. 2. 9	436	-6.0	0.1	202	60.5	1.8
5 大 倉	56. 1. 7	400	-3.0	0.17	156	29.7	0.67
6 里 見	57. 2. 24	78	-2.3	0.1	17	1.19	0.14

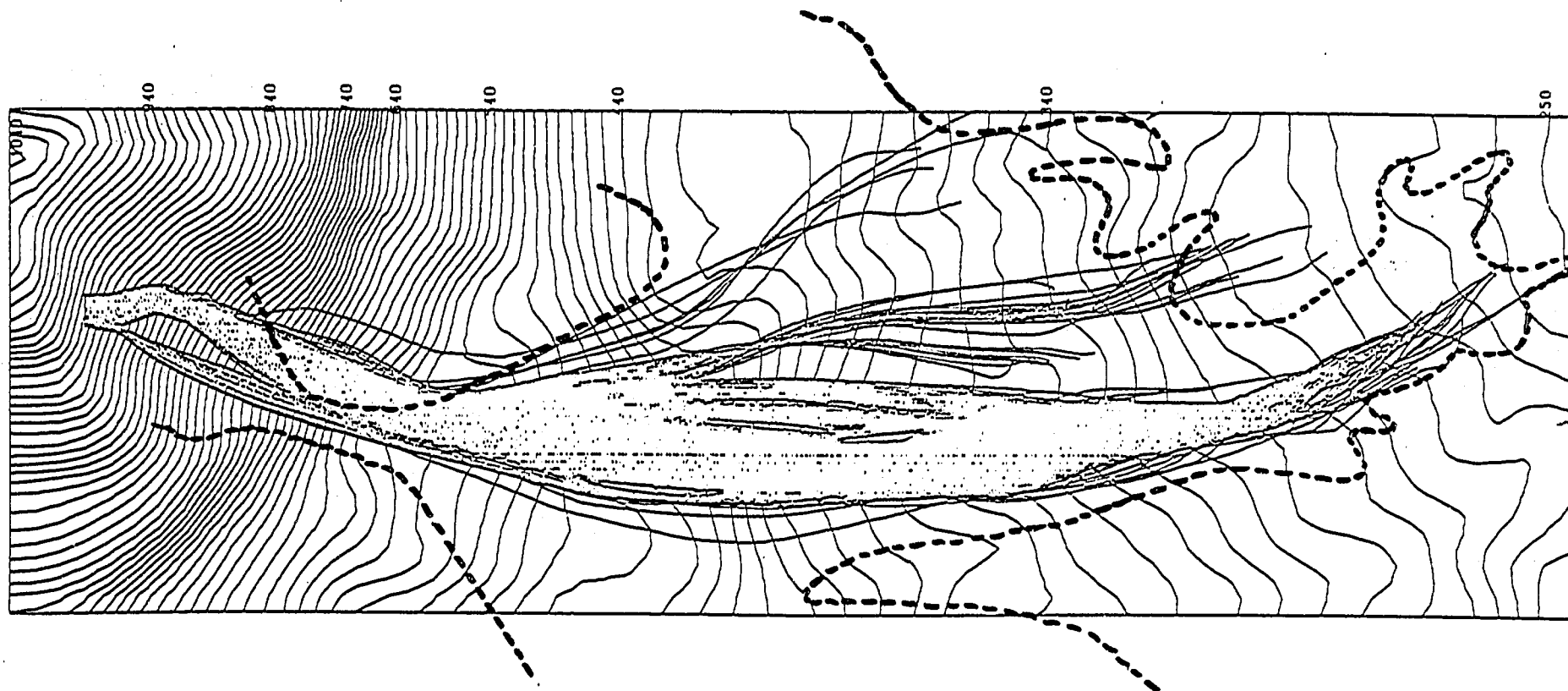


図23.1 柵口雪崩のボール軌跡

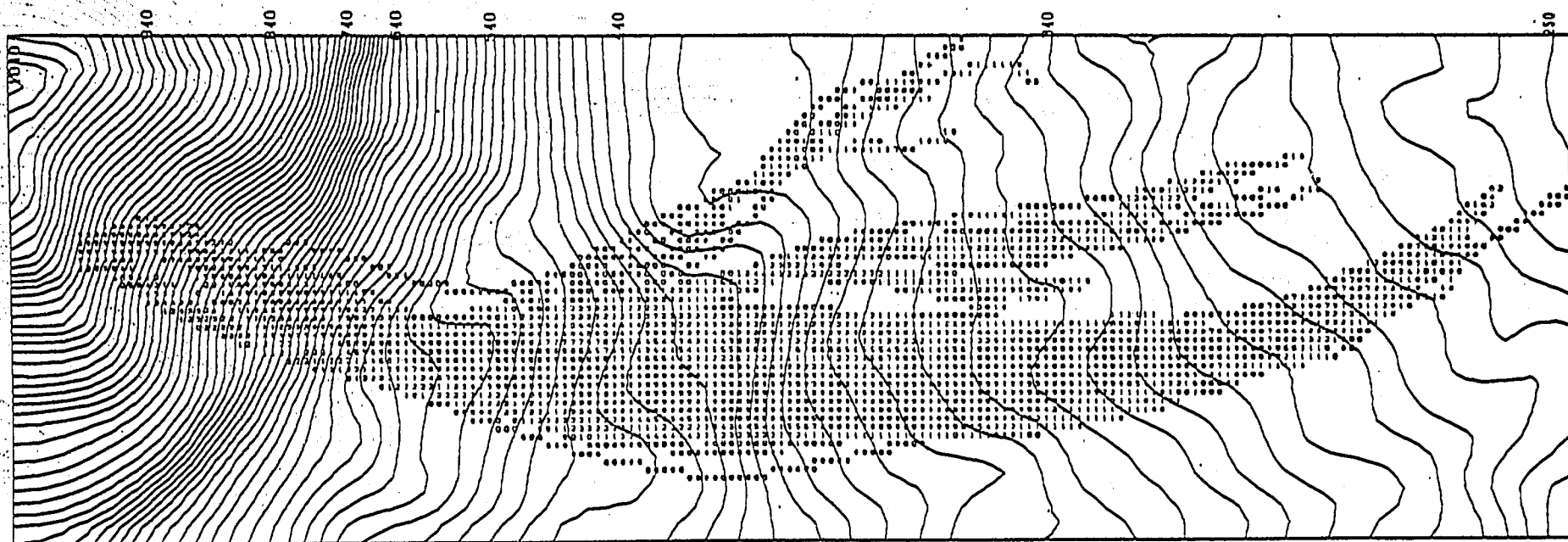


図 23.2 柵口雪崩のボール到達・堆積

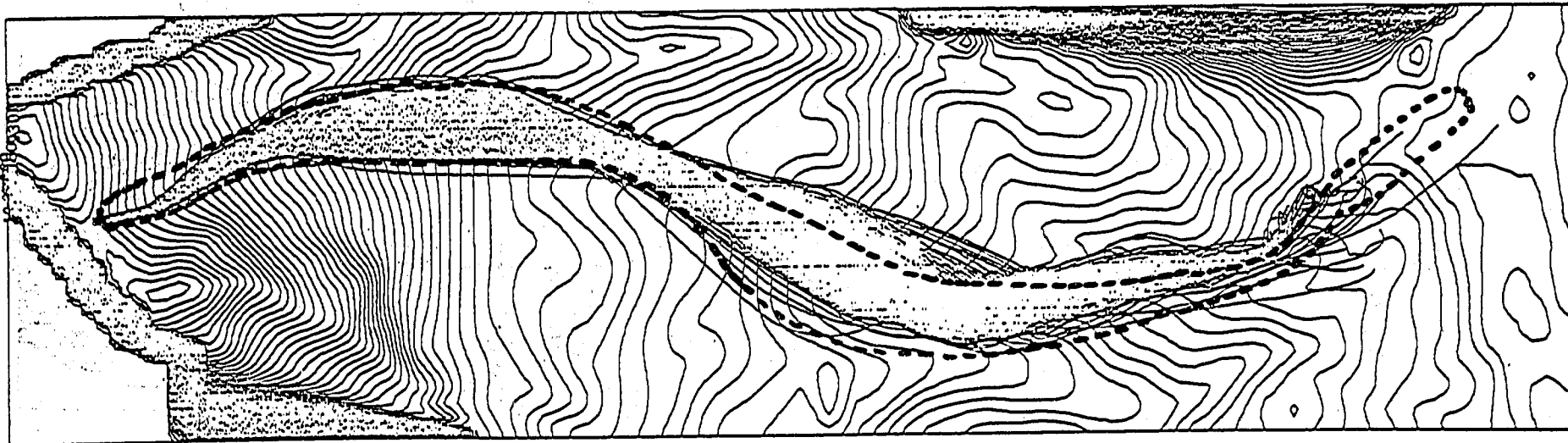


図 24.1 寒谷雪崩のボール軌跡

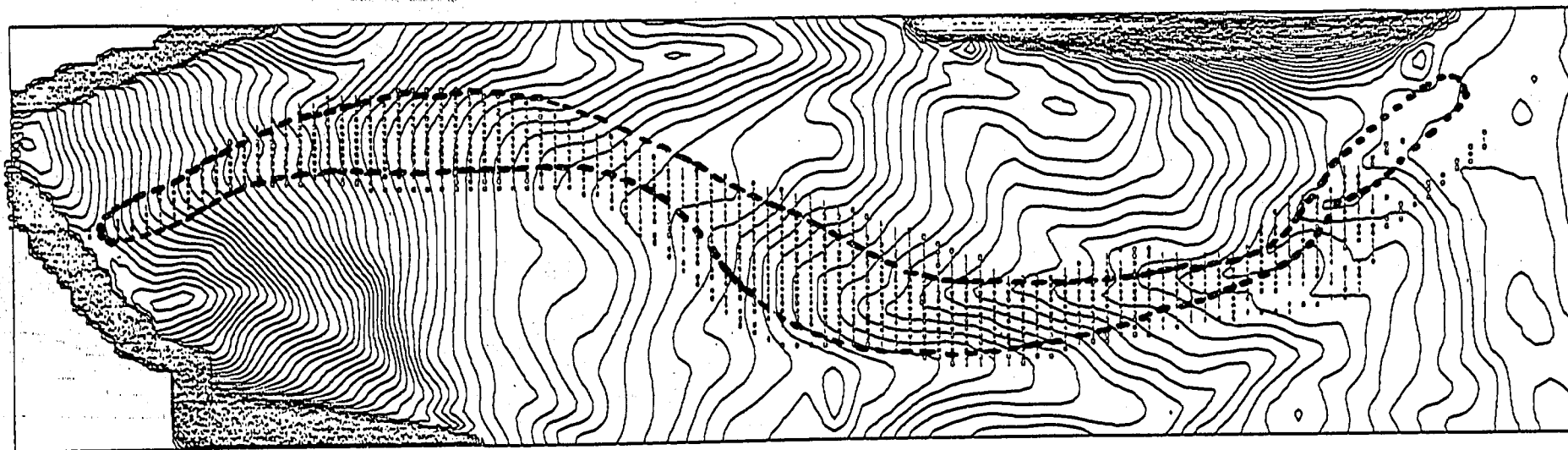


図 24.2 寒谷雪崩のボール到達・堆積

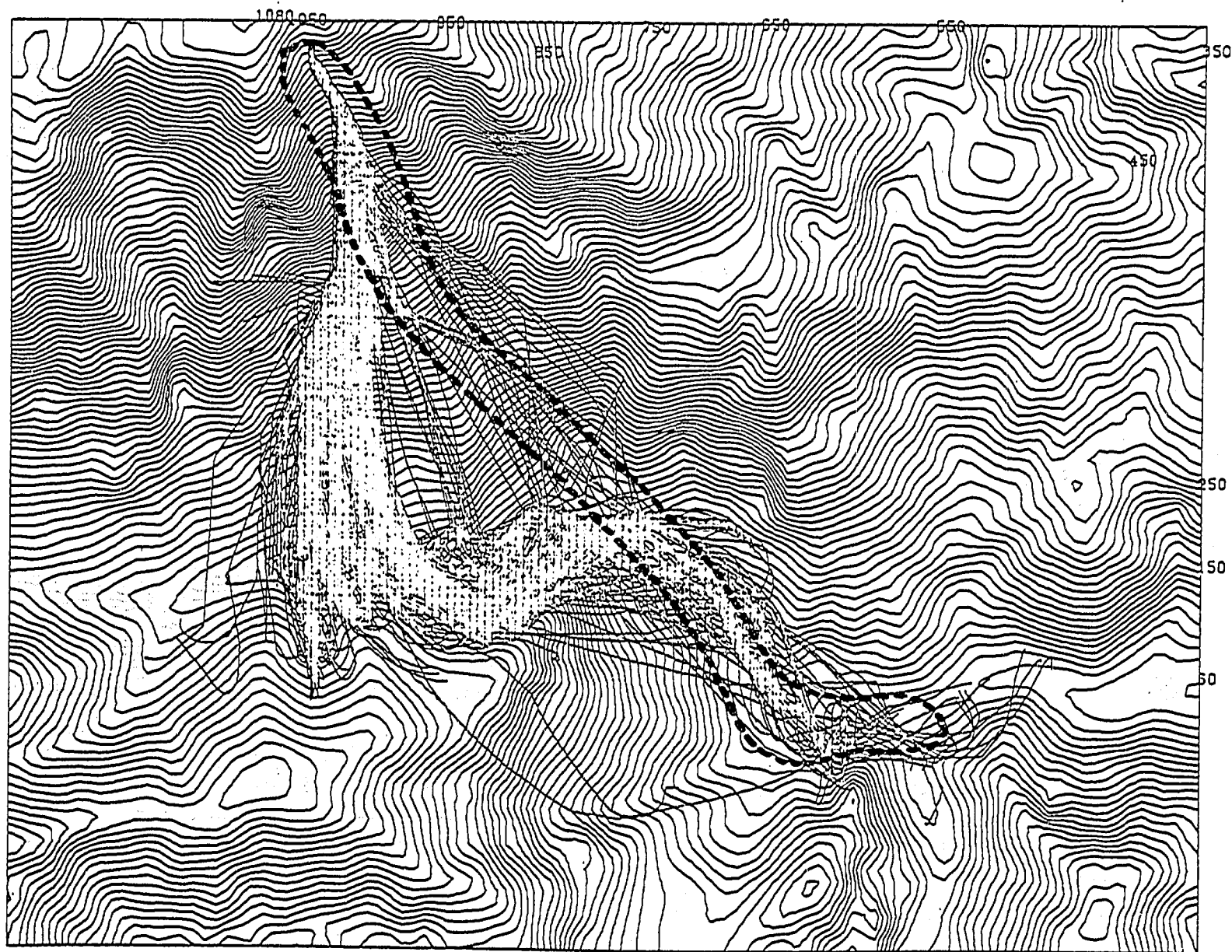


図 25.1 田海雪崩のボール軌跡 ($C = 46.25 \text{ kgf/m}^2$)

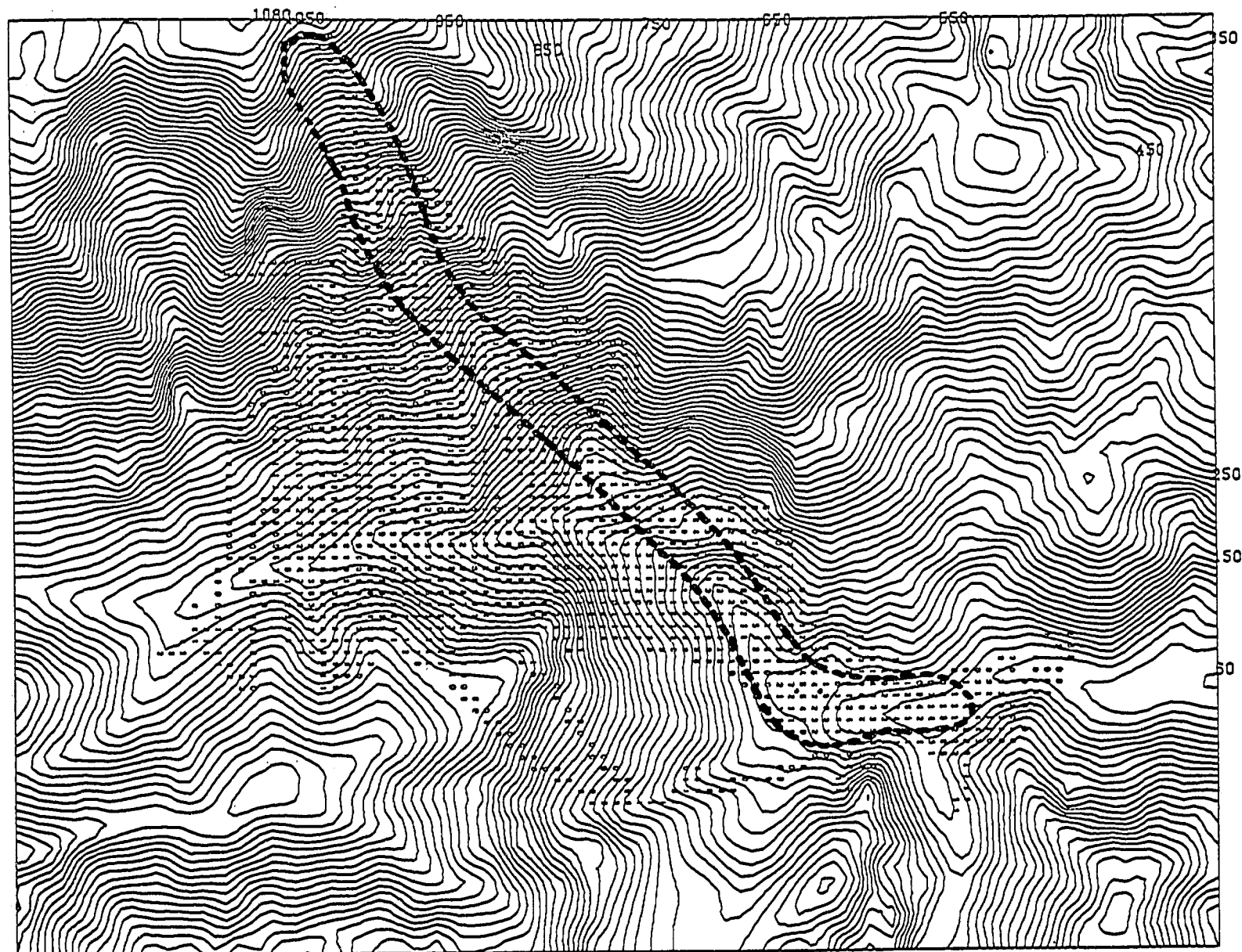


図 24.2 田海雪崩のボール到達・堆積 ($C = 46.25 \text{ kgf/m}^2$)

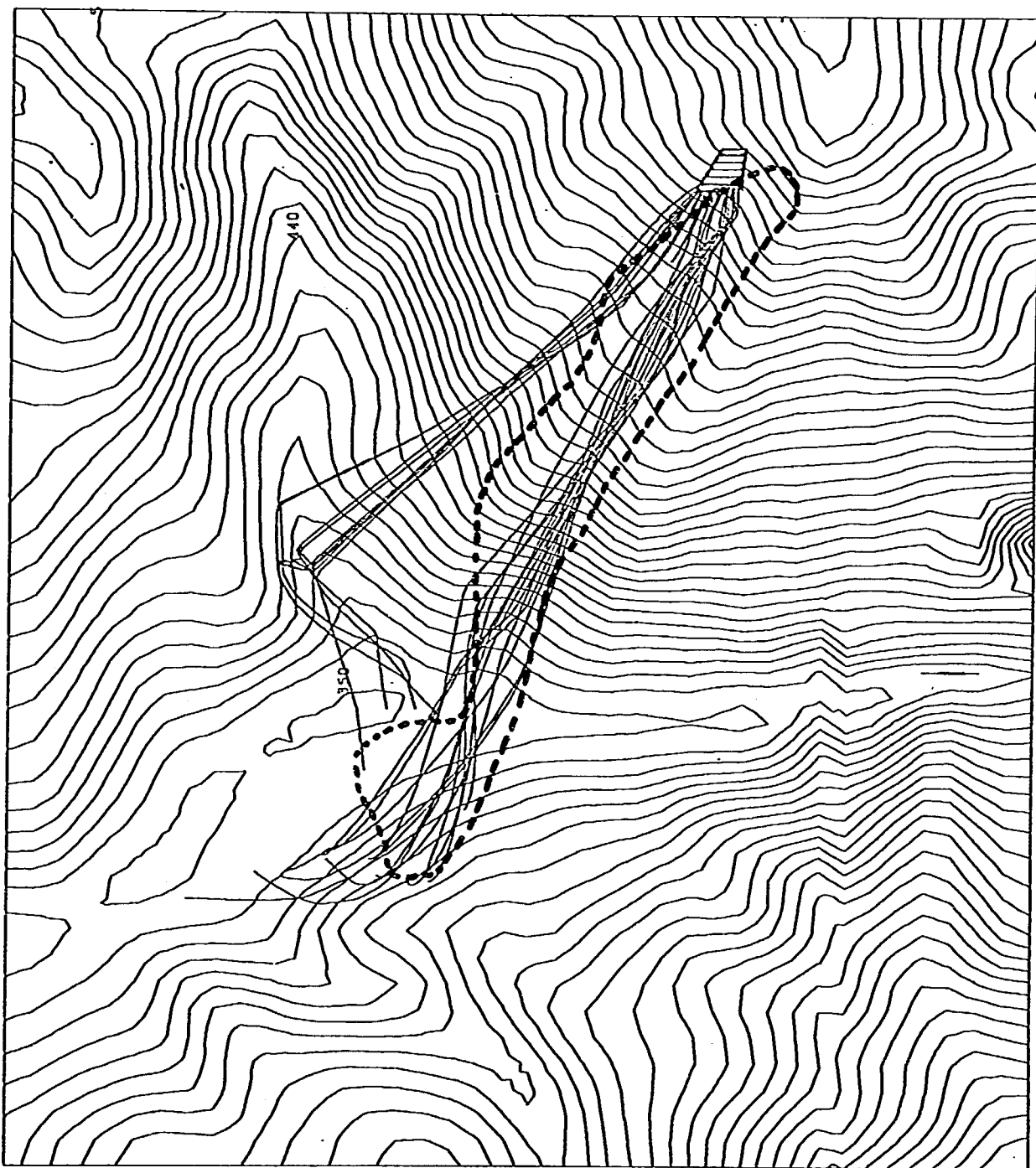


図 26.1 清津峡雪崩のボール軌跡 ($C = 60.48 \text{ kgf/m}^2$)

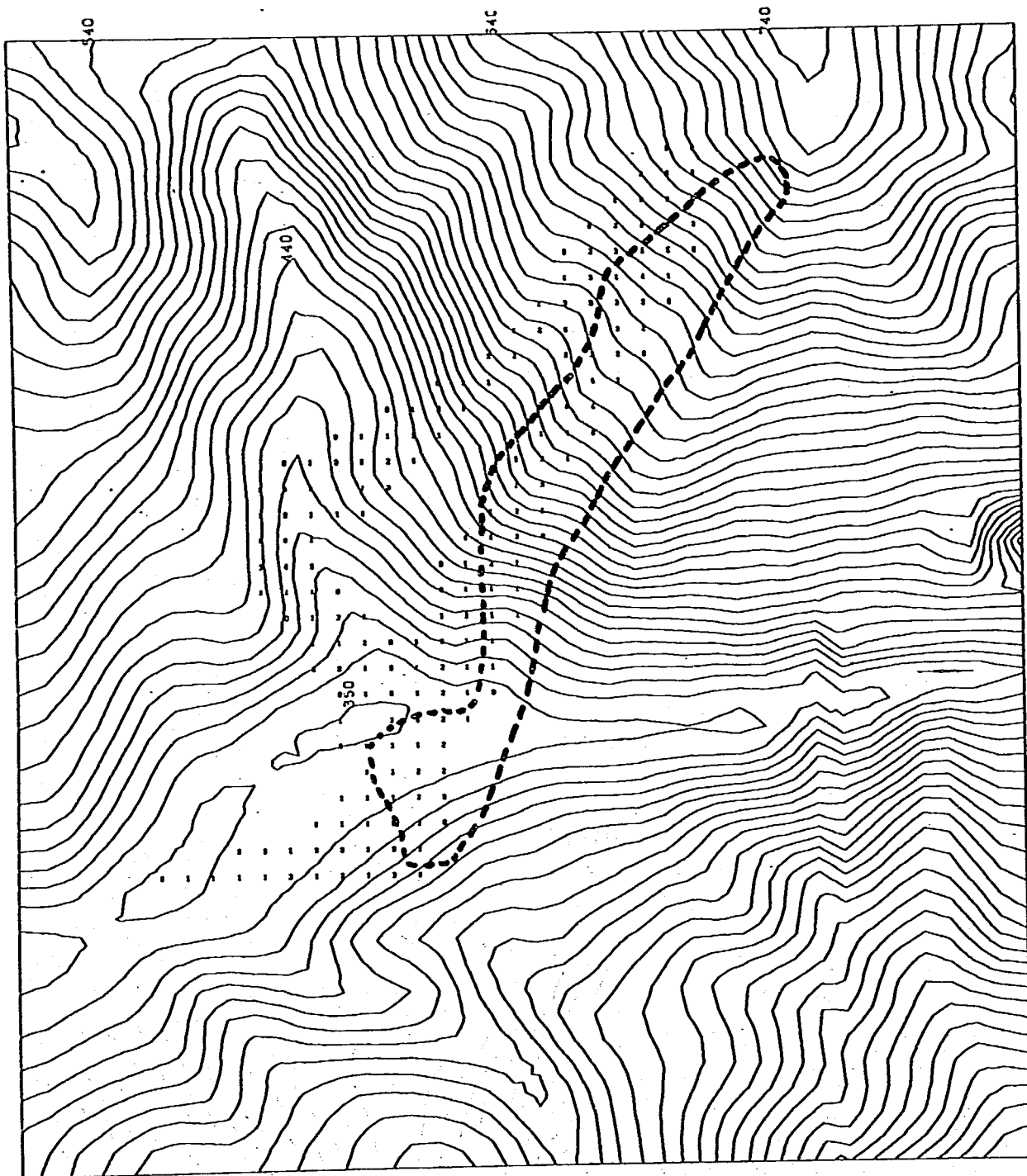


図 26.2 清津峡雪崩のボール到達・堆積 ($C = 60.48 \text{ kgf/m}^2$)

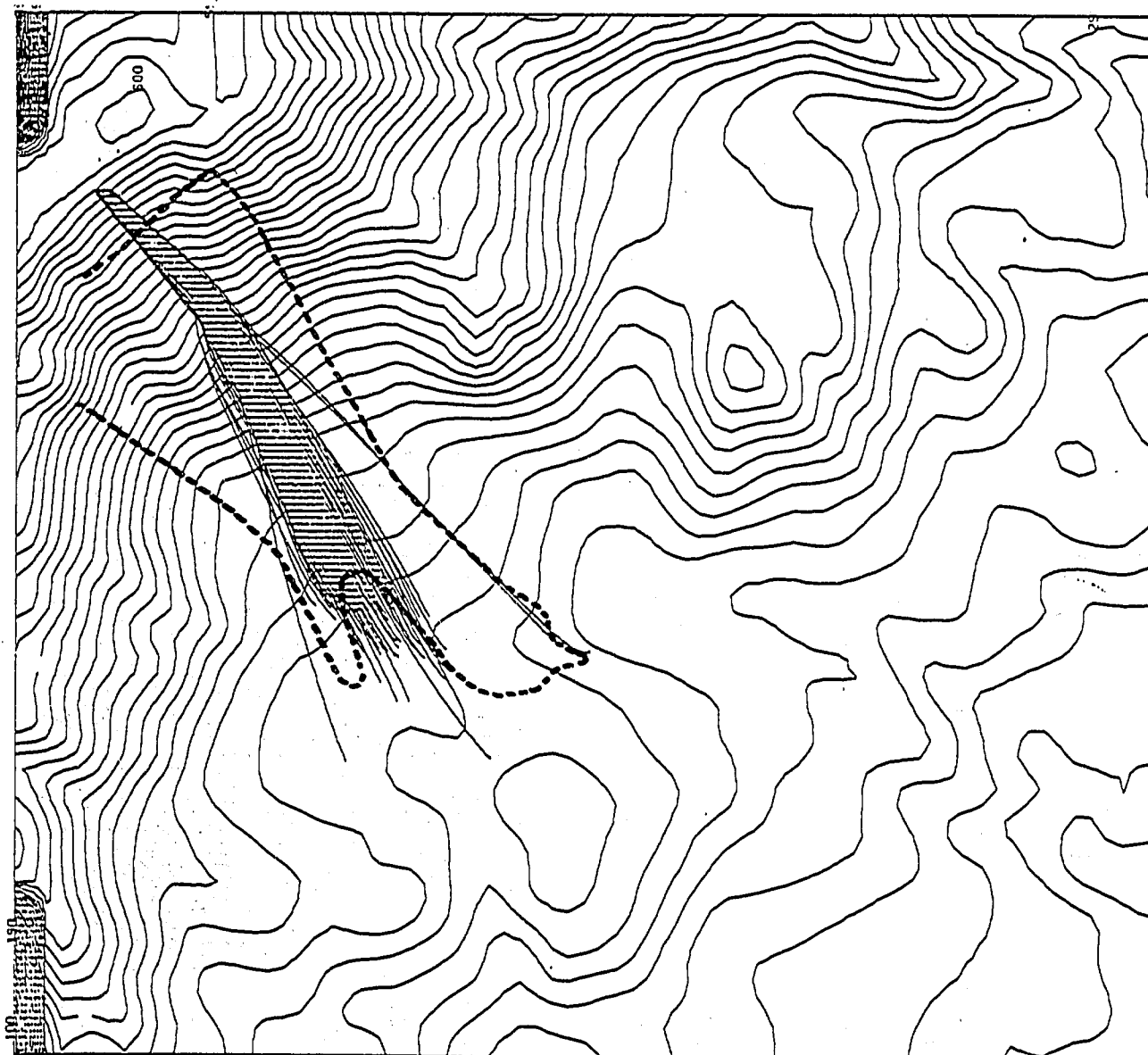


図 27.1 大倉雪崩のボール軌跡 ($C = 29.7 \text{ kgf/m}^2$)

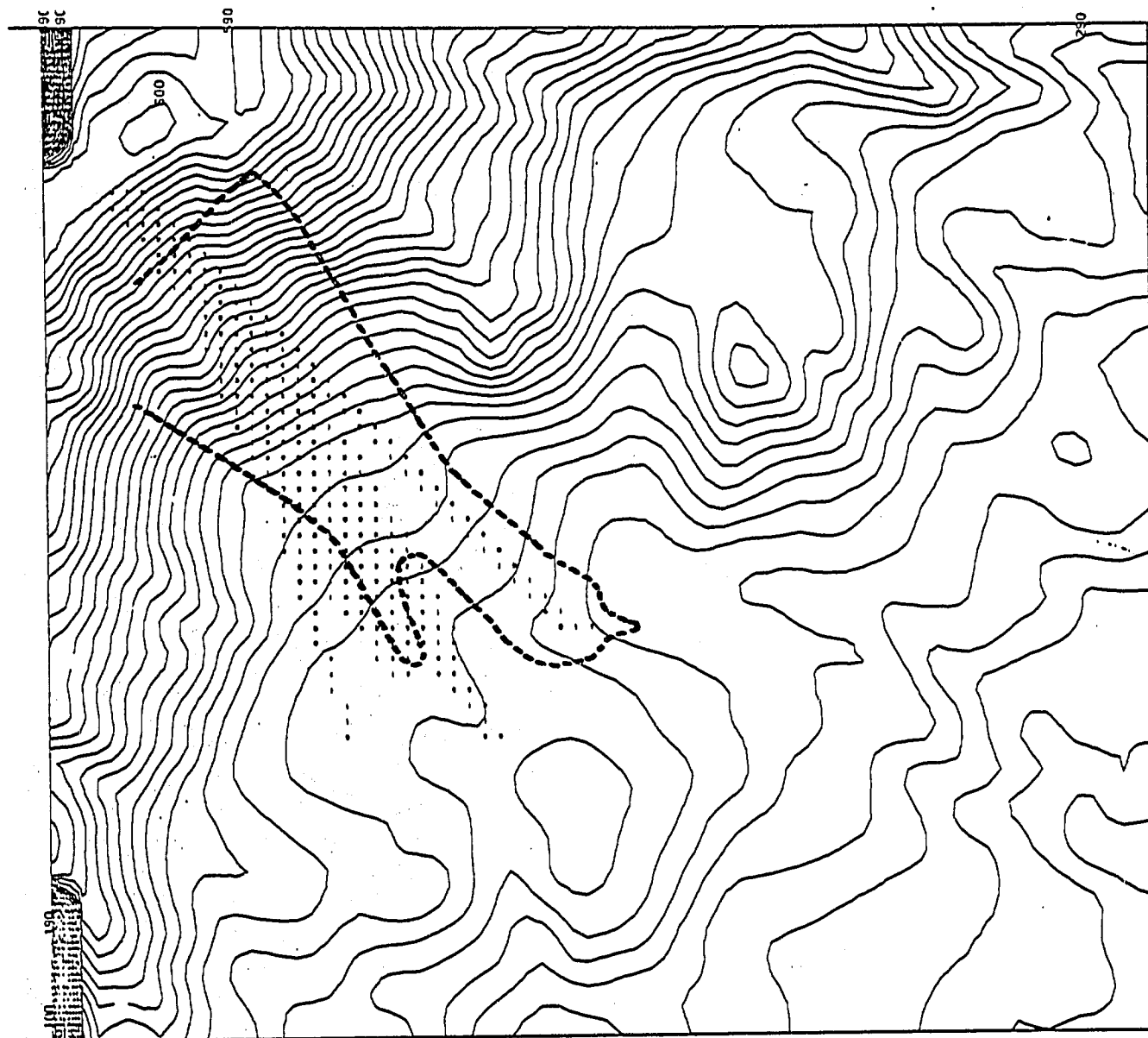


図 27.2 大倉雪崩のボール到達・堆積 ($C = 29.7 \text{ kgf/m}^2$)

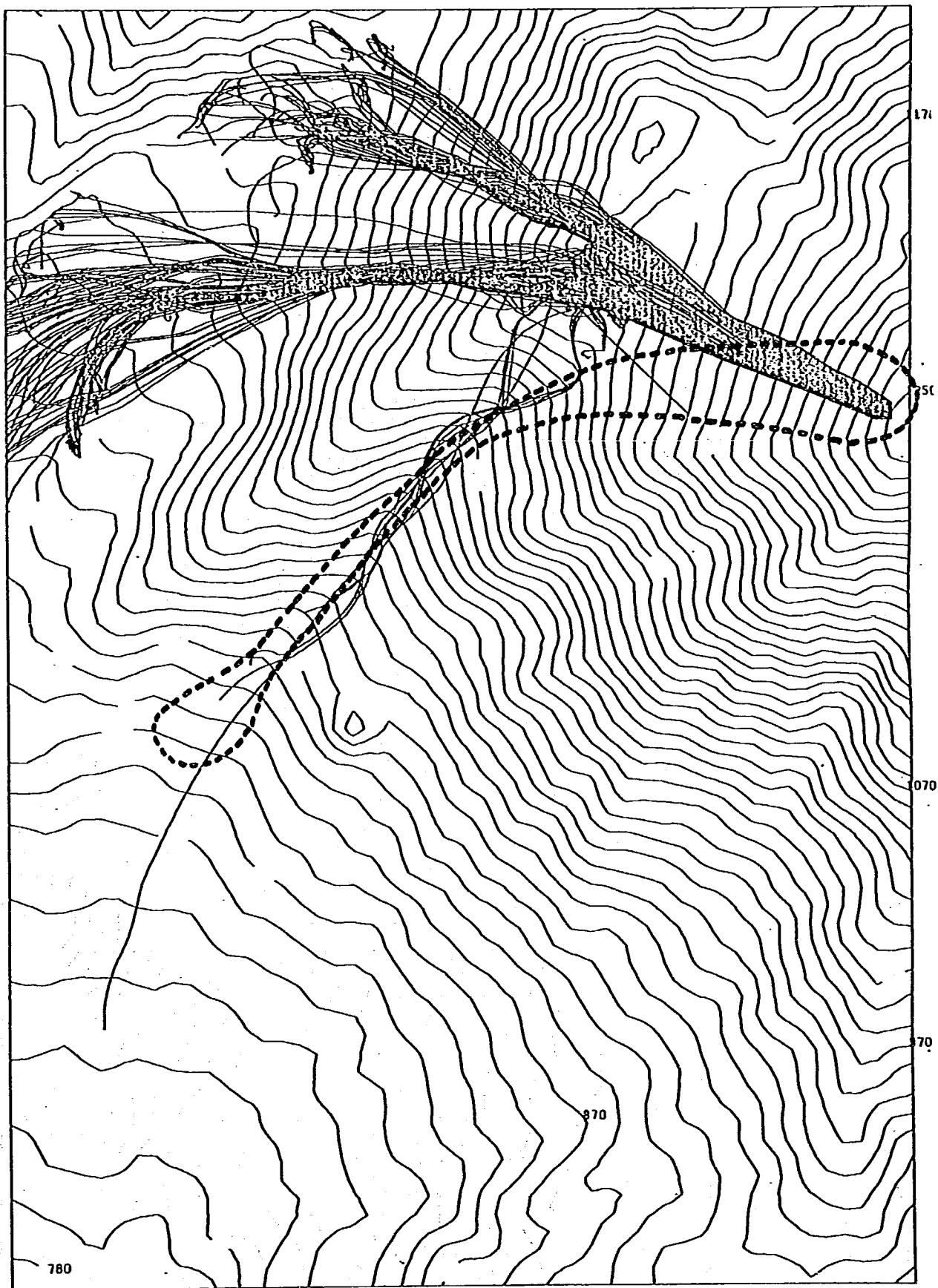


図 28.1 里見雪崩のボール軌跡 ($C = 1.19 \text{ kgf/m}^2$)

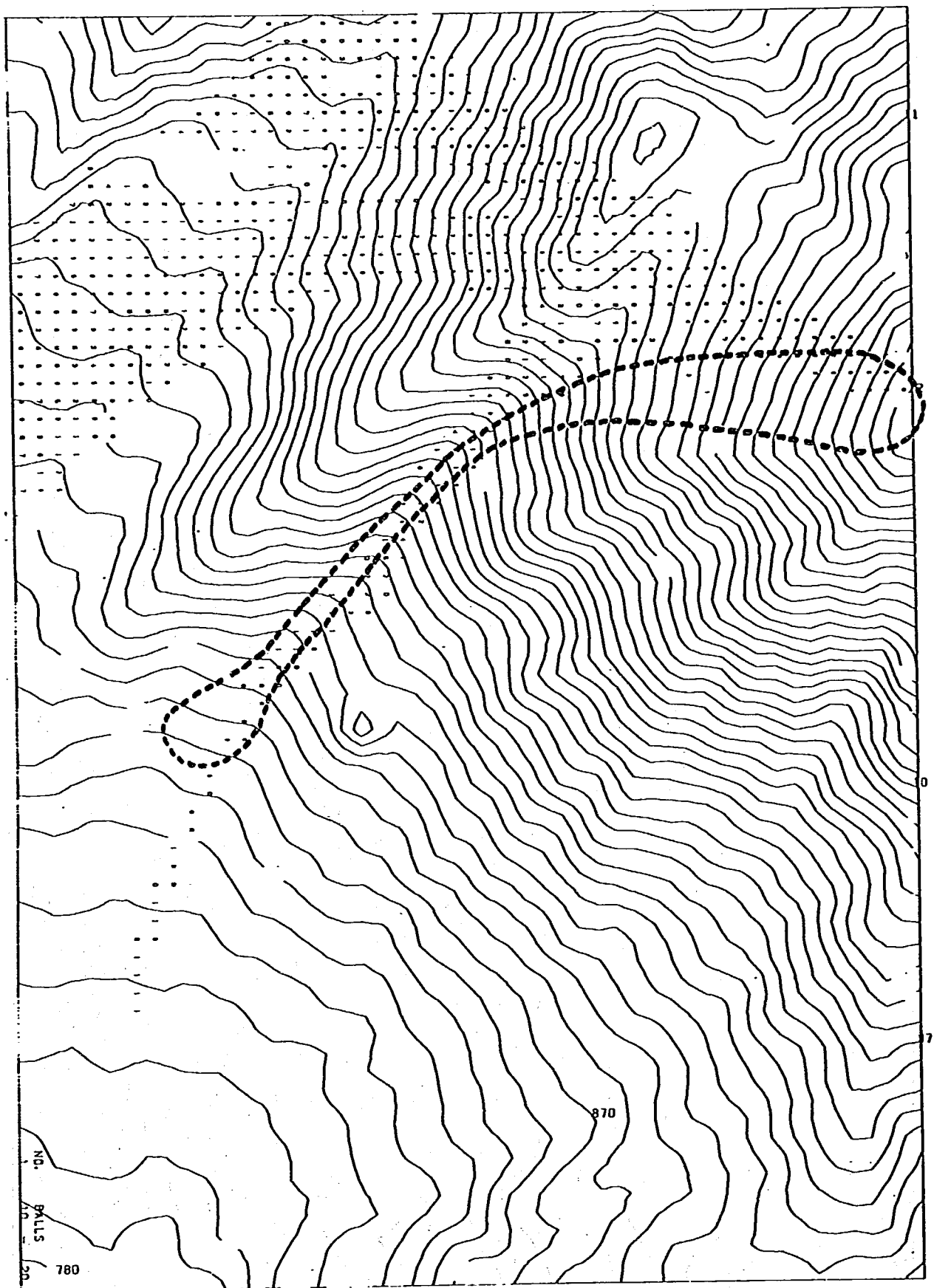


図 28.2 里見雪崩のボール到達・堆積 ($C = 1.19 \text{ kgf/m}^2$)

4.5 シミュレーション結果の検討

雪崩層厚と無次元粘着力 π_6

図29および図30に、雪崩層厚と C および π_6 の関係を示す。これらより、 C （ボール粘着力）と π_6 （無次元粘着力）は雪崩層厚に関係することが分かる。なお清津峡雪崩の一点のみ、他の災害雪崩の結果と傾向があわないようであり、データの検討が必要と考えられる。

斜面勾配と無次元粘着力 π_6

図31に斜面勾配を横軸として無次元粘着力 π_6 を示す。両者の間には明確な関係は見出せない。

斜面方位と無次元粘着力 π_6

図32に斜面方位を横軸として無次元粘着力 π_6 を示す。両者の間には明確な関係は見出せない。

植生と無次元粘着力 π_6

図33に植生を横軸として無次元粘着力 π_6 を示す。本業務のデータの範囲内では両者には関係がない。

雪崩量と無次元粘着力 π_6

図34に雪崩量を横軸として無次元粘着力 π_6 を示す。両者の間には明確な関係は見出せない。

積雪深と無次元粘着力 π_6

図35に積雪深を横軸として無次元粘着力 π_6 を示す。雪崩層厚の場合と同様に積雪深と無次元粘着力 π_6 は線形の関係があると言える。

気温と無次元粘着力 π_6

図36に気温を横軸として無次元粘着力 π_6 を示す。シミュレーションデータが少ないので断定できないが、無次元粘着力 π_6 は気温の上昇とともに減少しているようである。

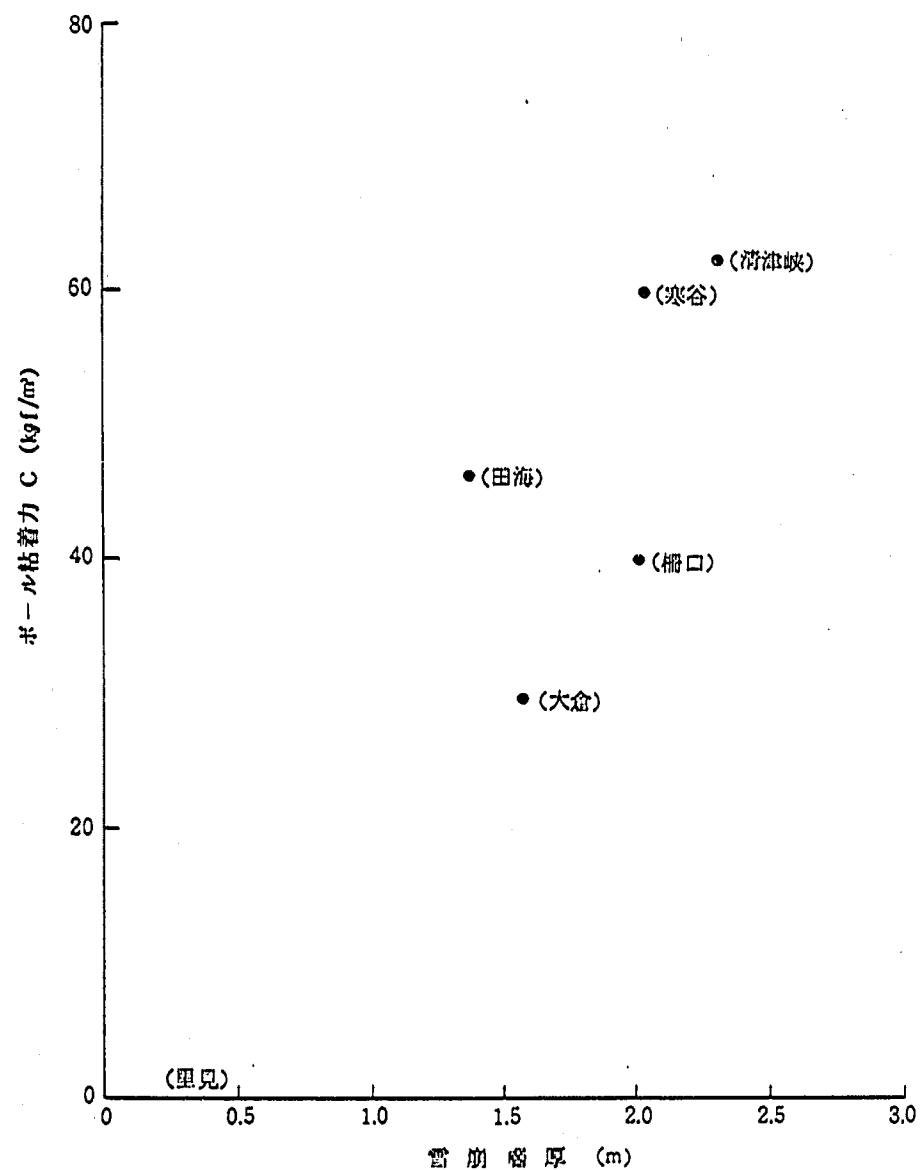


図 29 雪崩層厚—ボール粘着力 C

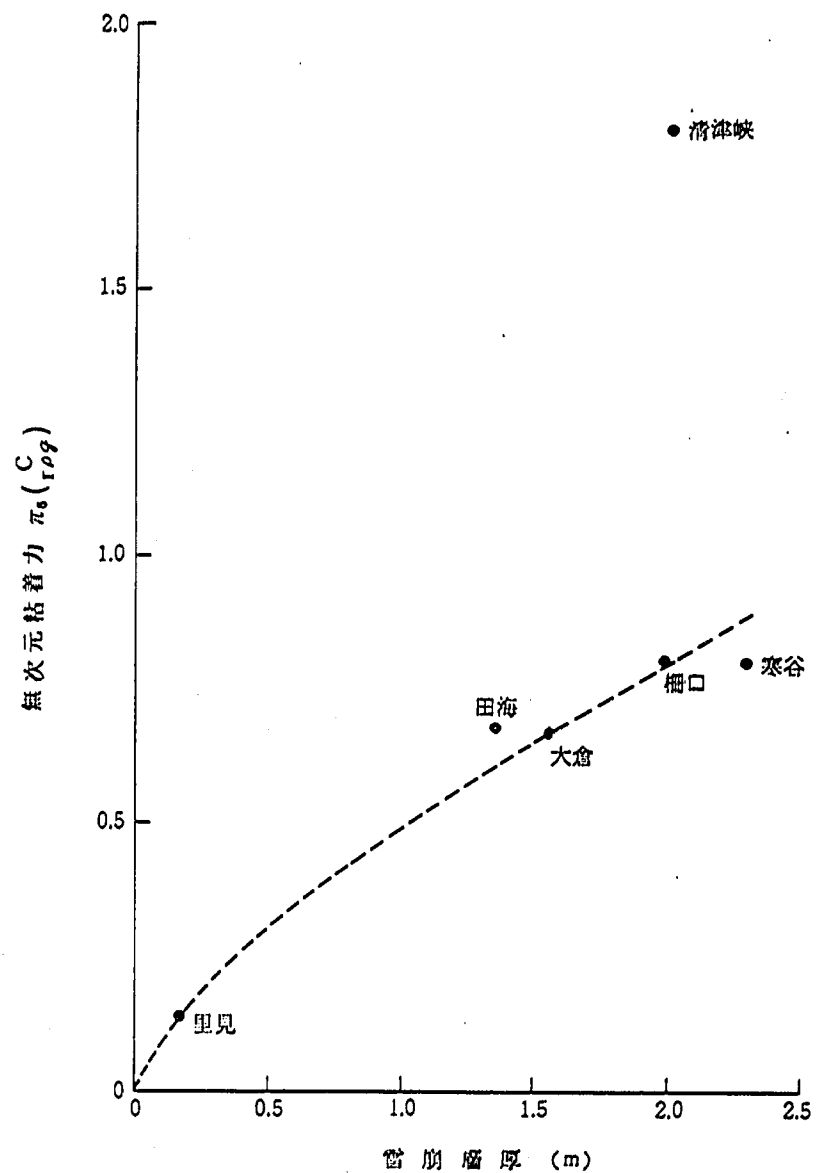


図 30 雪崩層厚—無次元粘着力 π_0

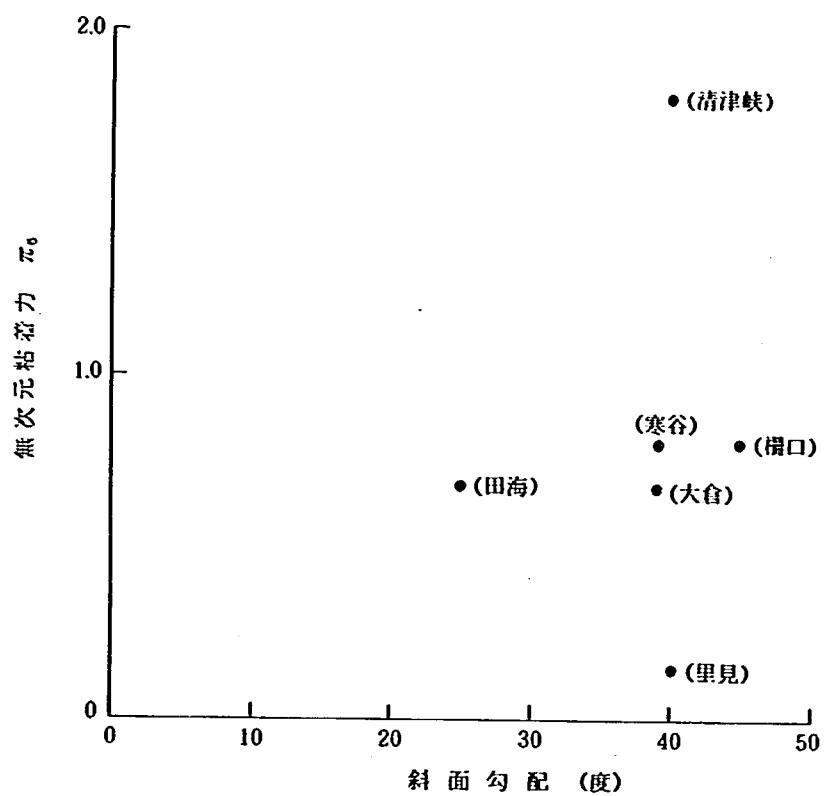


図 31 斜面勾配—無次元粘着力 π_0

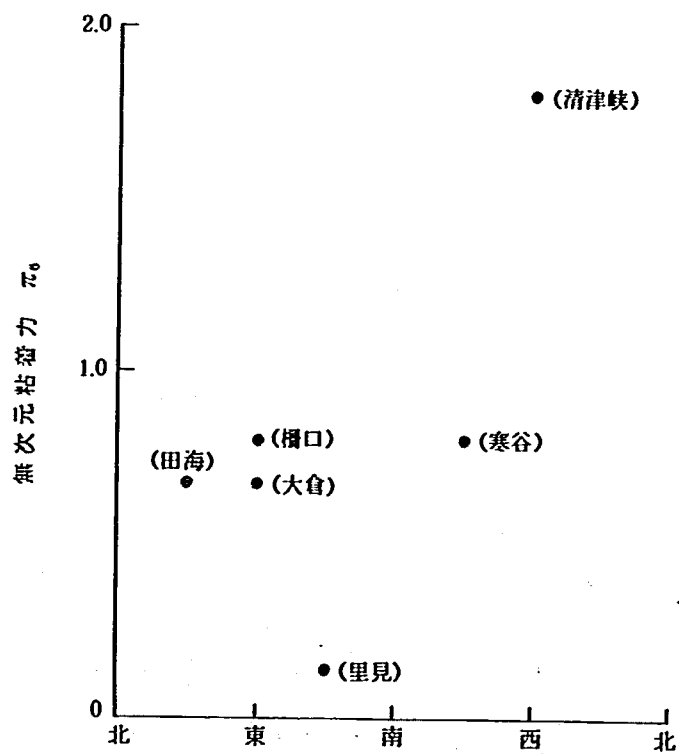


図 32 斜面方位—無次元粘着力 π_0

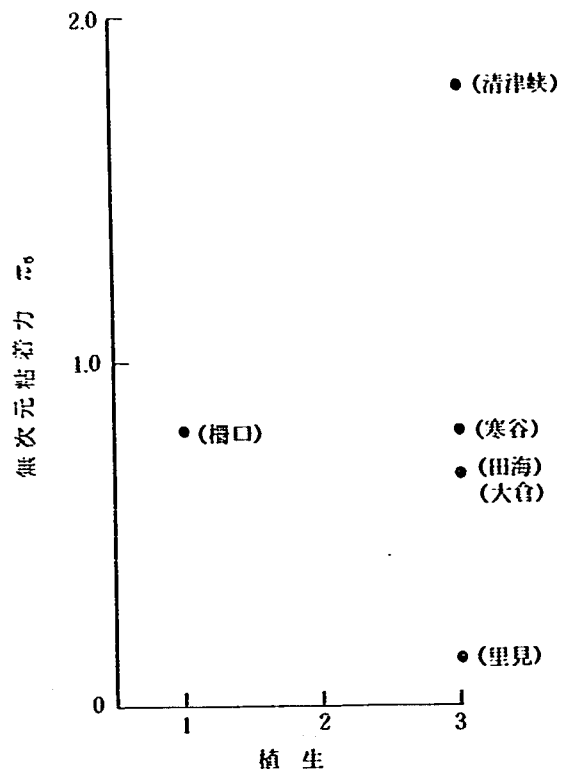


図 33 植生—無次元粘着力 π_6

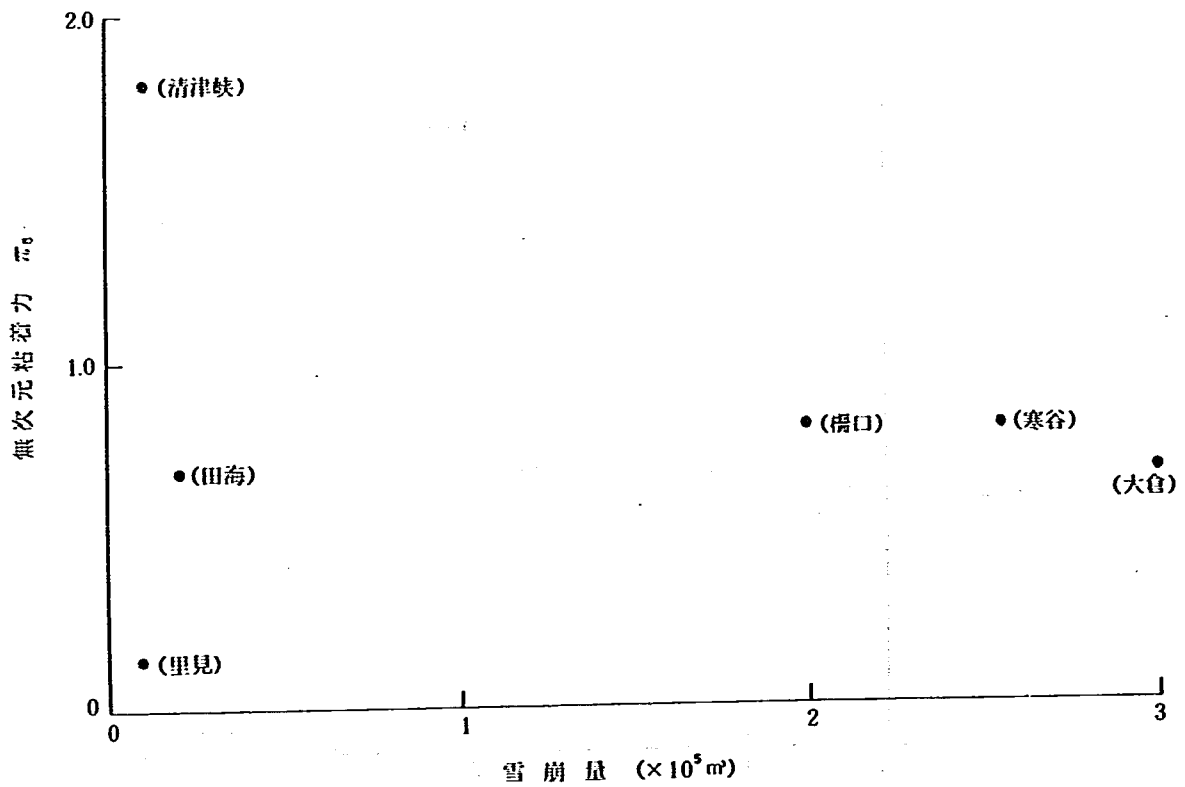


図 34 雪崩量—無次元粘着力 π_6

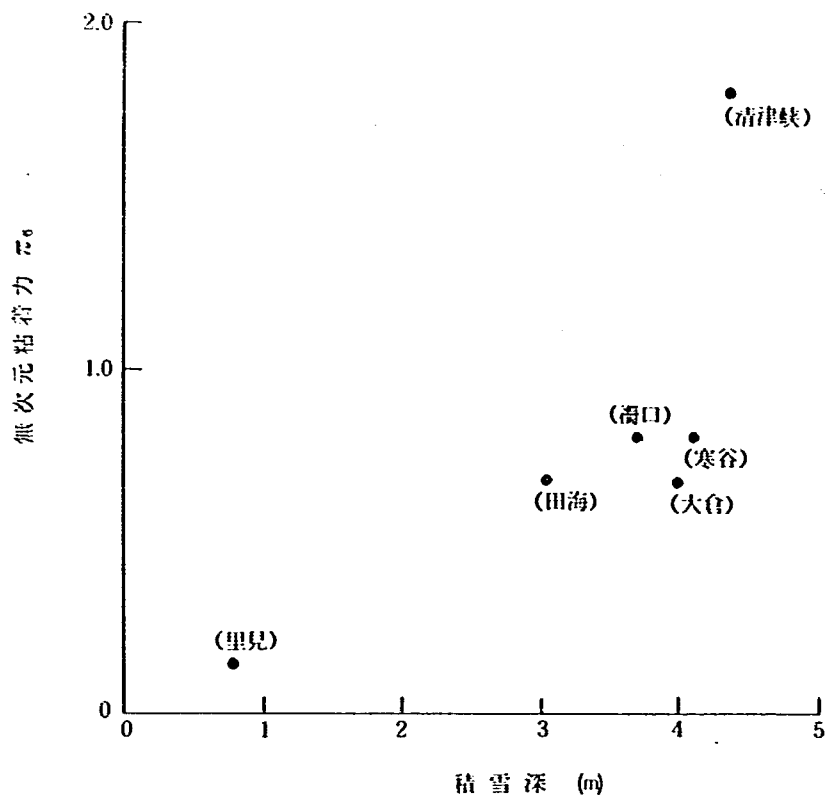


図 35 積雪深—無次元粘着力 π_0

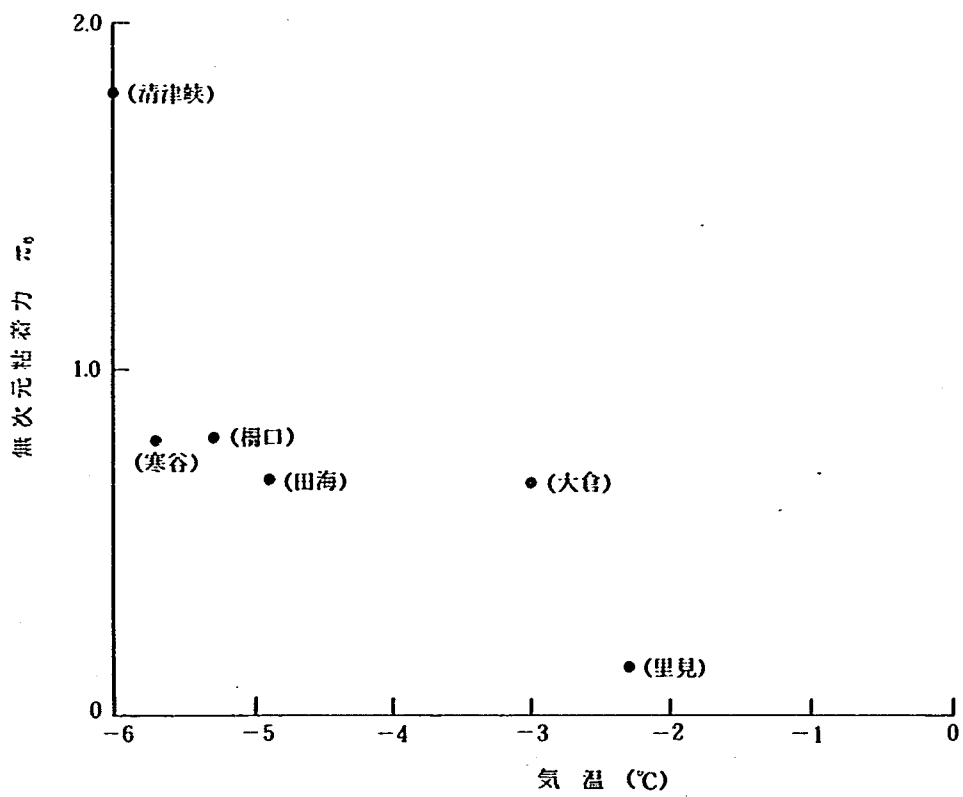


図 36 気温—無次元粘着力 π_0

5. あとがき

表層雪崩の災害調査において、雪崩到達域を正確に調査することは困難な作業である。その雪崩到達域のデータにはかなりの推定がなされ、大きく誤差を含む場合もあるとみられ本研究において再調査を要するデータもあった。

雪崩の到達範囲を予測するためにはパラメーターの設定が必要である。今回、検討を行った雪崩は新潟県が主であり、 C および π_0 の設定が他の地域に適用できるのか否かは今後、検討が必要である。また雪崩の発生位置や発生量の予測も重要な検討課題である。

参 考 文 献

- 1) 中西宏, 吉松弘行, 寺本和子: 離散ボールモデルによる雪崩到達区域シミュレーション, 昭和63年度砂防学会研究発表会概要集, 昭和63年5月
- 2) 新潟県砂防課: 柵口雪崩災害概要中間報告, 昭和61年2月
- 3) 新潟県糸魚川土木事務所, 関新井測量: 昭和63年度寒谷雪崩対策事業調査
- 4) 土木学会新潟会: 59豪雪の記録, 13.中里村清津峡温泉雪崩災害の概要, 59年12月
- 5) 自然災害科学総合研究班: 新潟県能生町表層雪崩災害に関する総合的研究, 自然災害特別研究突発災害研究成果No B-60-8, 昭和61年3月図5 柵口雪崩
- 6) 野沢英之助, 藤原明, 長谷川一成: 柵口雪崩災害について, 昭和61年度砂防学会研究発表会概要集, 昭和61年5月
- 7) 中俣三郎, 和泉薫: 56豪雪と新潟地方の雪崩災害, 新潟大災害研年報, 第3号(1981年)

離散ボールモデル法による
雪崩運動の研究

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2734号
平成元年2月(1989)

急傾斜地崩壊研究室 室 長 吉松弘行
研究員 藤沢和範
大浦二郎

要 旨 雪崩による被害想定区域の設定を目的として、離散ボールモデル法を用いて検討した。ボールの相似則を明らかにし、2次元解析によりパラメータスタディを行ない良好な結果を得られる数値を求めた。この数値を用いて3次元解析を行ない雪崩の到達範囲の設定が可能なことを示した。今後の検討課題として雪崩の発生位置と発生量の予測がある。

キーワード：雪崩運動シミュレーション、雪崩の到達範囲、離散ボールモデル法

郵便はがき

は
つ
て
下
さ
切
手
を

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
砂防部急傾斜地崩壊研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2734号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印