

降ひょう記録計記録の電子計算機 による自動検測

矢 崎 忍*

国立防災科学技術センター

Automatic Measurement of Records on Hail-Pad by Computer

By

S. Yazaki

National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo

Abstract

NRCDP sets about 300 hail-pads in the northern Kanto district to obtain data of hailfall distribution. The hail-pad consists of a hard aluminum foil and records hailfall as depressions on the foil. From the depression pattern the intensity of the hailfall are estimated.

A trial to automate this estimation by computer is presented. An outline of the processes is as follows.

- (1) At first this plate is printed on paper to obtain a clear binary pattern. Each depression is taken on the paper as a white circular spot in black ground.
- (2) Next this pattern is scanned and digitized with a figure scanner,
- (3) then some properties of each spot (which is regarded as an ellipse) such as area, eccentricity and direction are computed,
- (4) and then these values are transformed into the corresponding properties of each hailstone such as diameter, incidence angle and kinetic energy.

1. はじめに

国立防災科学技術センター第1研究部では、ひょう雲の構造と行動についての調査研究のため、降ひょう発生頻度の高い北関東平野部に約300台の簡易型降ひょう記録計を設置し、降ひょう分布調査を行っている(清野ほか1961)。

この簡易型降ひょう記録計とは、発泡スチロールの台の上に硬いアルミ箔(厚さ0.1mm又は0.2mm;大きさ(受ひょう部)220mm×220mm)を密着してのせたものであり、降

* 第3研究部計測研究室

ひょうはこのアルミ箔の凹みとして記録される (写真1)。

局所的变化の激しい降ひょう分布のようすを適確につかむためには、平面的に密なデータ得ることが重要である。そのためにはを多数の記録計を設置しなければならず、したがって個々の記録計については、簡易性と低廉性は最も要求されるものである。この設録計自体は、記録の質や精度の点で十分なものとはいえないが、上記の要求によく合致したものであり、今のところこれにとって代るものは考えにくい。

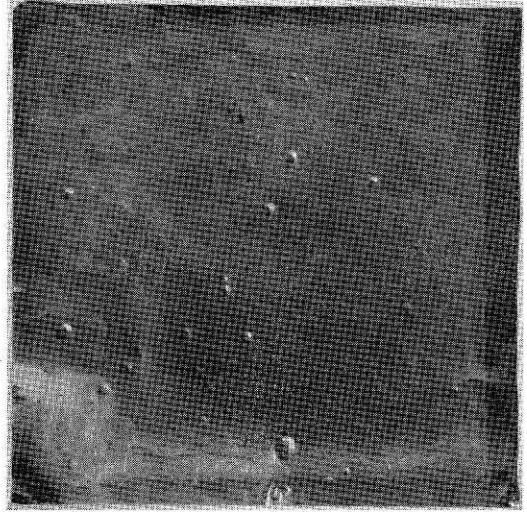


写真1 アルミ箔上のひょう痕
Photo. 1 Hail records on an aluminum foil.

さて、この記録から我々が求めたいの

は農作物に対する被害率をよく説明しうる量である。小元ほか (1976) によると、被害率を決定する最も重要なす物理量は、降ひょうの衝突エネルギーであることが知らせている。しかし、衝突エネルギーをある程度正確に求めるには、多くのアルミ箔について個々のひょう痕の大きさや数を逐一計測しなければならず、大へんな労力と時間を要する。

そこで現在は、簡便な方法として、一人の研究者がアルミ箔全体を一見して判断し、「目測強度」といった値を定め代用している。小元ほか (1976) によると、この「目測強度」と衝突エネルギーの間にはかなり良い対応が見つかることがわかった。アルミ箔上の痕跡記録そのものの精度を考えると、この程度の評価でも一応の用はなすと考えられるが、この方法は読み取りがいくぶん主観的であることは避けられない。

したがって、今後さらに大量の資料を解析するにあたっては、これを客観的かつ迅速に処理する方法を開発しなければならない。本論文はこの目的のための電算機を用いた処理の自動化について述べられる。

2. 図形読取装置によるアルミ面上のひょう痕の読み取り

平面上に記録された情報を計算機で処理するにはまずこれを走査して格子点上の値の列を得なければならない。

このように平面記録を読み取る機械として我々が持っているのは、図形読取装置 (諸星 1976) である。この機械は平面形を光学的に走査するものであり、本来の使用法としては、平面土の情報が濃度色の濃淡の形で与えられたものを読み取るのに用いるものである。

ところでアルミ面上のひょう痕の場合、その情報の形は面の凹み (変形) であるから、走査して得たいのは面上の各点における面の変位の値である。しかし今述べたようにわれわれ

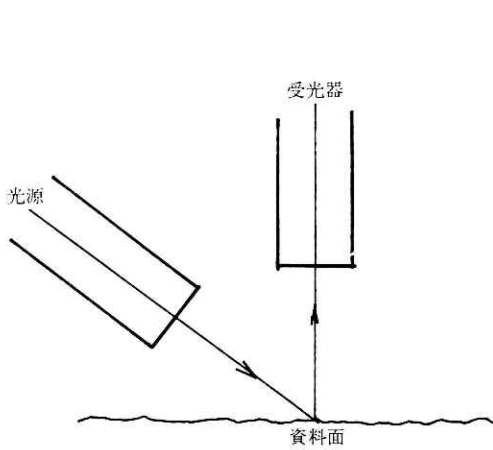


図1 光学系
Fig. 1 Detecting part of the figure scanner.

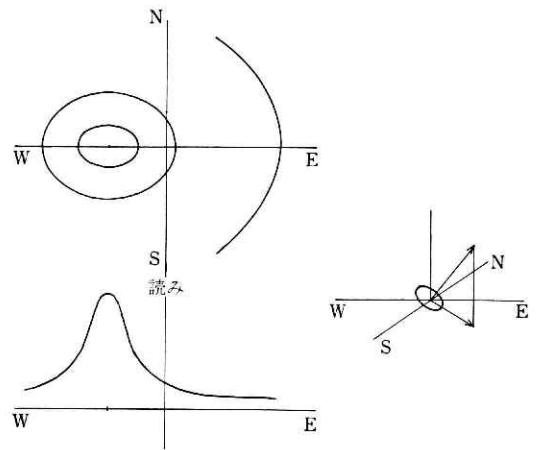


図2 面の傾きと光学系の読み
Fig. 2 Relation between gradient of a surface and reading of the scanner.

の図形読取装置では、これを直接得ることはできない。

そこでいかに記録を読み取るかが問題になるが、これには二つの考え方がある。一つは、アルミ板をとにかくこの機械で直接読んで、あとは計算機プログラムで処理しようというものである。もう一つは、これを機械にかける前に何らかの方法で処理して、その変位を紙面の濃度に変換して、それからこの機械で読み取るという考え方である。

初めに、前者の方法を検討してみる。

この場合の読み（出力）は、表面の光学的状態（濃度や散乱度）による成分と、面の变形による成分の和である。したがってまず、これから光学的な変動によるものを取り除かなければならないが、これは資料によって異なり、また同一資料上でも、表面のサビやよごれによって不均一が生じている場合があるといった具合で、なかなか面倒である。

次に、表面の状態が一様であった（あるいは一様にした）として、変形と読みの関係を調べてみる。この機械の検出部（光学系）は図1のようになっている。これによると読みは主に面の傾き（変位の勾配）による（正確には変位自体にもよるが、これは傾きによる変動に較べて小さい）。傾きて読みの関係はたとえば図2のようになるだろう。このように読みの形が非対称だから、面の傾きは2次元量として扱わなければならない（対称ならば、傾きの絶対値だけなら1次元量である）。したがって、傾きから読みへの変換が求まったとしても、逆の変換は1つの変換式では求まらない。原理的には、偏微分方程式の解とし

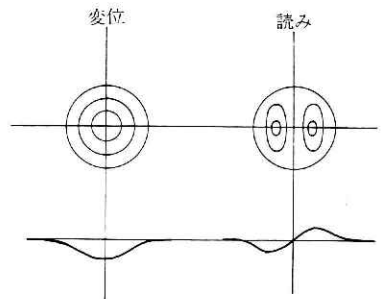


図3 凹みの形とそれに対する読み
Fig. 3 Shape of a depression and reading of that.

て求まるはずだが実際にはほとんど不可能である。すなわち、このときの読みから機械的な計算だけによって変位を求めることはできないということである。

そこでこの場合に可能な方法として考えられるのは、対象に制限を加えることによって（ひょう痕だけを考えるとということ）いわゆるパターン認識を行うことである。凹みの形とその読みの関係はたとえば図3のようになるだろうから、これを念頭において逆に読みの形から凹みの形を推算することになる。

しかし実際には、必ずしもこのようなきれいなパターンが得られるとは限らず、またひょう痕以外の凹凸がある場合もあり、そのプログラムは非常にむずかしいものになることが予想される。しかも、そのような複雑なプログラムを作ったとしても、それから得られる情報は、せいぜい変位に関する二値情報（凹んでいるかいないかの区別）であろうと思われる。

このように、この直接読むという方法は機械にかけるまでの手間が全くかからないという点では最も望ましいものであるが、その計算機処理が面倒であり、したがって計算機の使用時間を多く費すことになり、今回の目的には通さないとされた。

今回行ったのは、アルミ箔の表面にインクを塗って、これを紙に写し取るという方法である。実際に用いたのは謄写用インクであるが、これは油性で乾きにくいので薄く均一に塗れ、またにじみにくいので小さなものもよく採れて好都合である（写真2）。

この方法は、インクの塗り方や紙のあて方にかなり依存するように思われるが、実際に行ってみると十分安定した（試行ごとのバラツキが少ない）ものが得られることがわかった。

これは、板面の変位をひょうが当たったか当たらないかによって、二値化したことにほかならない。変位を二値化するということは、ひょう痕による凹みを平面的な形（切り口の形ということにする）と深さに分けるとする）と深さのほうの情報を捨ててしまうことである。したがって、これが妥当であるかどうかを検討しておかなければならない。消極的な理由としては、図形読取装置を用いる方法では、どんな方法でも深さを求めることは一般に困難であるということがある。しかし物理的にも後に述べるように、切り口の形と深さは近似的には独立に変化しえない。すなわちこれらの間には関数関係があるということである。したがって、この記録自体の精度を考えると切り口の形を調べるだけで一応十分であるということが

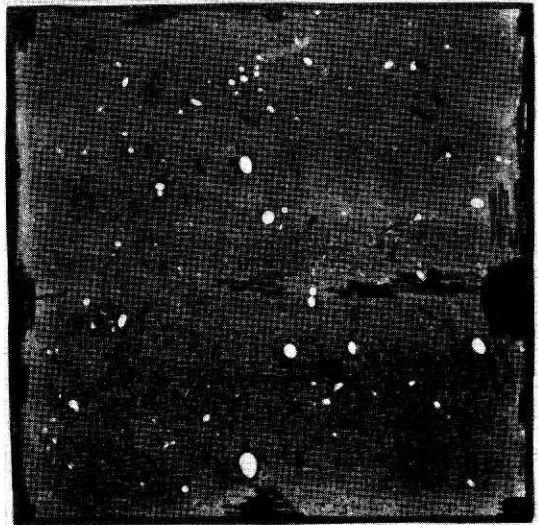


写真 2 写真のアルミ箔を紙に写し取ったもの
Photo. 2 Printed pattern of a surface of the aluminum foil of Photo. 1.

いえる。

次に、この方法の利点をいくつかあげてみる。

まず、これは面の変位が紙面の濃度に変換されているから、これを図形読取装置で読んだデータは、そのまま変位のデータとして使えるということがある。しかもこの場合、白黒の差が十分大きいから、これを数値的に二値化するのが大へん楽である。

それから、読み取り図形の情報の形が濃度であるから、修正がしやすいということがある。実際の降ひょう計アルミ箔には、ひょう痕と区別つけにくい凹みなどがある場合があるが、これを計算機で判断するのは容易ではない。したがってこういうものは人間が見てひょう痕以外は塗りつぶしてしまえば、計算機プログラムは非常に簡単なものになる。要はこれらの処置がオフラインでできるということである。

この方法は、機械にかけるまでの手間がいくらかかるが、あとの機械による処理は非常に速く、結局全体の所要時間を考えると、いちばん速いものの一つであると思われる。

3. 計算機プログラム

粒子（ひょう痕）の識別と、個々の粒子について形と大きさの算出を行なう。

(1) 粒子の識別

対象とする図形は二値図形であるから、粒子を記述するには例えばその境界の座標を粒子ごとに全部書き上げられればよい。粒子とは一つのつながった（連結な）領域であるから、粒子の識別は領域のつながりを見ていけばよい。一方、計算機内部（主記憶装置）へのデータの読み込みは、走査線単位でしかも走査と同じ順序で行っていくのが最も望ましい。したがって領域のつながりは隣接する走査線上でのつながりを次々に追っていくという方法で行なわれる。

1本の走査線が粒子を切る部分を、ここでは「弦」ということにする。各粒子は弦の集りと見なせるから、粒子の識別は、弦を粒子ごとに分類することによってなされる。ところで各粒子は、その性質上凸図形と考えられる。このことに注意すると、次のようなプログラムが可能である。

走査線を順に第1列、第2列、・・・とよぶことにする。隣接する2本の走査線第 $i-1$ 列と第 i 列に対して、第 $i-1$ 列上のある弦にはすべて異った番号がついているとする。そこで、これら2本の走査線上の弦を比較することによって、第 i 列の弦に次の方法で番号をつける（図4）。

(i) 第 i 列の弦が第 $i-1$ 列の弦 a に接していたら、 b には a と同じ番号をつける。

(ii) 第 i 列の弦に c 接する弦が第 $i-1$ 列になかったら、 c には新しい番号をつける。

この操作のくり返しによって、すべての弦の分類、すなわち粒子の識別ができる。しかしこのままでは、このデータは新しいデータの読み込みによって失われてしまうから、これ

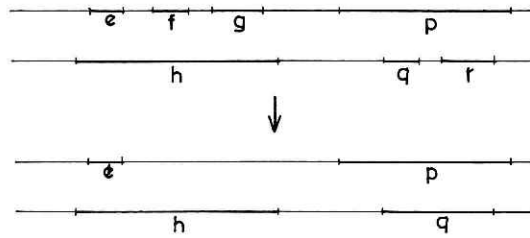


図 4 粒子と「弦」
Fig. 4 Spots and a pair of adjacent scanning lines.

をたとえば弦の両端の座標に変換して、番号ごとにあらかじめ（主記憶設置の中に）用意した表に書き込んでおく。しかし一般には、全部の粒子のデータをしまうほどの容量を主記憶装置はもっていないから、そこで

- (iii) 第 $i-1$ 列の弦 d に接する弦が第 i 列になかったら、この弦の属する粒子は走査し終わったと判断し、そのデータ（粒子の境界の座標）をこの時点で処理してしまうか、または磁気ディスク等を書いておく。

こうすれば、1 個の表をくり返し使うことができ、用意しておく表の数は「1 列上にある粒子の数の最大値」以上であればよいことになる。

以上の方法は、初めに述べたように、粒子が凸であるときにだけ有効なものである。ところで実際の読み取りデータ上の各粒子は、全体的な形としては凸であるとしても、細かく見れば境界の形に小さい凹凸（ぎざぎざ）があるかも知れない。今回、後に述べるように図形読取装置で読んだデータを、そのままこのプログラムのデータとして使用したいから、このような場合も考慮しておかなければならない。この小さい凹凸は意味のないものであるから、これによって結果に大きな誤差を生じる可能性さえ取り除いておけばよい。それには、上の (i), (ii), (iii) の手順の前に次の修正を行っておけばよい。すなわち

- (o) 第 i 列の弦 h に接する弦が第 $i-1$ 列に 2 つ以上あったら、これらのうち 1 番左のもの (e) のを除いて他 (f, g) は消してしまう。また第 $i-1$ 列の弦 p に接する弦が第 i 列に 2 個以上あったら、これら (g, r) をつないでしまう (図 5)。

この処置によって、図 6 のような修正が行なわれたことになる。これによってこのプログラムは小さなノイズに対して安定になる。

なお、この方法は各粒子が凸からのはずれが小さくて、それを無視できるような場合にのみ有効なものであるが、一般の（凸とは限らない）粒子を対象としたときにも、これを一部修正することによって同様のプログラムが可能である。

(2) 形状の計算

まず何を求めるかを決めなければならない、最も重要なものは面積である。これだけを求

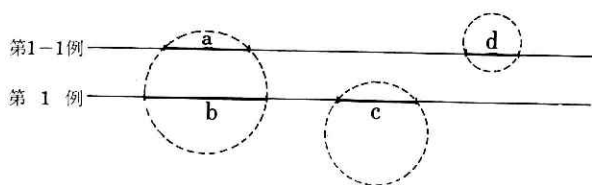


図5 「弦」の修正
Fig. 5 Correction of data.

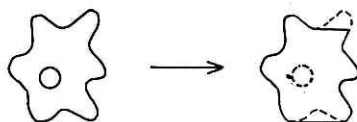


図6 修正例
Fig. 6 An example of correction of aspot.

めるのならば、プログラムはもっと簡単になる。もう少し詳しく記述するにはたとえば、これをだ円と見て面積長軸の向き離心率を求めることができる。

ここでは、これらを与えられたデータから求める計算法を結果だけあげておく、
走査方向を x 軸、送り方向を y 軸にとって連続座標で表わすことにする。与えられたデータは弦の両端の座標、すなわち $(x_1(y), x_2(y), y)$ ($x_1 < x_2$) という形をしているとしたが、ここではむしろ

$$x_c = \frac{2}{1} (x_1 + x_2)$$

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

で定義される $(x_c(y), \Delta x(y), y)$ という形で求めておいたほうが便利である (図7)。まず面積 (S) は、

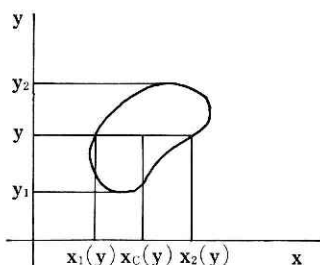


図7 広 標 系
Fig. 7 Definition of variables.

$$S = \int_{y_1}^{y_2} \Delta x(y) dy$$

で求められることはすぐわかる。

次に長軸の向き (ϕ) を求めるには、まず $(x_c(y), y)$ を結ぶ線の向き θ を求める (図8)。実際にこれを求めるには、 $(x_c(y), y)$ のデータから最小自乗法で

$$x_c(y) = \tan \theta \cdot y + \text{定数}$$

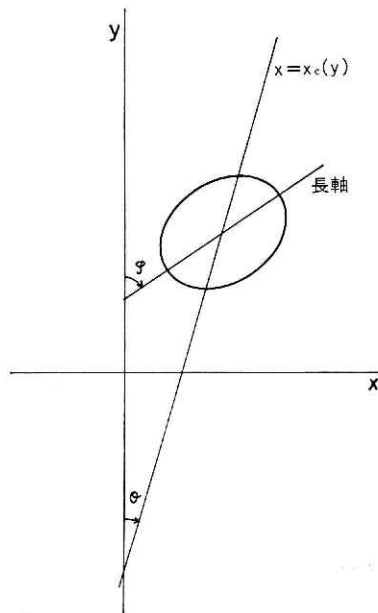


図8 長軸と直線 $x = x_c(y)$
Fig. 8 Major axis and a line $x = x_c(y)$ of an ellipse.

として求めてもよいしもっと簡単には

$$\tan \theta = \frac{x_c(y_2) - x_c(y_1)}{y_2 - y_1}$$

としてもよい。すると φ はこの θ と前に求めた面積 K を用いて

$$\varphi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2 \tan \theta}{1 - \tan^2 \theta - A} \right)$$

(ただし $-\frac{\pi}{2} \leq \theta$, $\varphi \leq \frac{\pi}{2}$ で, φ は θ と同符号) で求められる。ここに,

$$A = \frac{19 S^2}{\pi^2 (y_2 - y_1)^4}$$

とおいた。

離心率 (e) は, 上で求めた θ と φ を用いて

$$e^2 = \frac{2 \tan \theta}{(\tan 2\varphi - \tan \theta) \sqrt{1 + \tan^2 2\varphi} + (1 - \tan^2 2\varphi) \tan \theta}$$

で求まる。

(3) システムと処理時間について

このプログラムは, その処理速度が非常に大きいのが特徴である。

まずデータであるが, これは図形読取装置で走査した生のデータをそのまま用いることができる。

それは, このデータ自体がほとんど二値データになっており, 改めて二値化するという手続きは実質的に要らないこと, 求めるものが面積とか概形であり, 小さなノイズによる影響は平均化されてしまって結果にはほとんどきかないこと, さらにプログラム自体にもノイズを無害化する処置がしてあることによる。

次に処理時間であるが, 実際に調べてみると走査線当たりだいたい 100 ms であった 1 走査線のデータ数 2,200 の場合。これは図形読取装置のドラムの回転周期 (200 ms) と同じオーダーの値である。データの処理が入出力より速くできれば, いわゆる実時間処理ができる。図形走査は必ずしもドラムの各回転ごとに行う必要はなく, たとえば 2 回転に 1 回走査すれば入力データの転送時間間隔は 400 ms となる。したがってこれを適当に選べば, このプログラムは図形走査に対して実時間で処理を行えるはずである。

この方法によれば, データを磁気テープなどに往復させる時間の節約になり, 全体の処理時間は約半分になる。

今日行ったものでは, 画面の大きさ 220 mm × 220 mm で, メッシュの大きさ 0.1 mm × 0.1 mm ならば約 16 分, 0.2 mm × 0.2 mm ならば約 4 分, 0.4 mm × 0.4 mm のときに約 2 分で読み取り, 演算, 出力が可能である。

図 11 は, 写真 2 のパターンを 0.2 mm × 0.2 mm のメッシュで読んで処理した結果を, モ

ニターとしてラインプリンタに打たせたものである。ただしここでは面積だけを求めた。数字は各粒子の面積を円の直径に換算して、mm 単位で測った値である。下の表は大きさ毎の度数を数えたもの。

4. アルミ面上のひょう痕からひょう粒子への変換

ひょう痕の測定ができたら、次にこれからひょう粒子自体を求めなければならない。それには、衝突するひょう粒子のもつ独立な物理量を調べる必要がある。なぜならば、衝突によってできる凹みの形状には、これらすべての量が関与するはずであるから。

一般にこれらの量として考えられるのは、形・大きさ（体積）・硬さ・質量・速度・入射角および衝突時の粒子の向きである。しかし、今の目的のためにはこれらすべてを考える必要はない。このうち変動の大きなくつかの量（成分）だけを考えれば十分である。

まず、硬さは一定としてよいだろう。形による影響はあまり大きくないと思われるから形も一定（球形）とする。次に、密度（質量/体積）は一定であり、速度はほぼ終端速度（これも質量と大きさだけで決まる）であるから、大きさ、質量、速度のうち独立なものは1個だけになる。この量として、ここでは運動エネルギー（ $1/2 \times \text{質量} \times \text{速度}^2$ ）を用いることにすると、結局独立なものとしては、運動エネルギーと入射角だけになる。

ところで、入射角もほぼ0すなわち面に直角に当たるとすれば、残りは1個だけであるから、これによって作られる凹みについても、この近似では独立な変量は1個ということになる。これが、ひょう痕を測定するとき、切り口の大きさと深さを別々に測る必要はないといった理由である。

しかし、ひょう痕については3個の量：面積（ S ）、離心率（ e ）、向き（ φ ）を求めたからひょう粒子についても3個の量：運動エネルギー（ E ）、入射角（ θ 、 φ' ）をもって記述することにする（図9）。

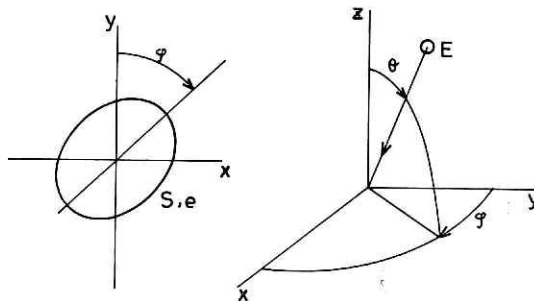


図9 ひょう粒子とひょう痕の記述
Fig. 9 Description of a hailstone (right) and a depression on the foil (or a spot on the pattern).

したがって求める変換は (S, e, φ) から (E, θ, φ) へのそれである。

まず φ と φ' は他と独立で、 $\varphi = \varphi'$ としてよいだろう。そこでこの変換は一般に、

$$E = E(S, e)$$

$$\theta = \theta(S, e)$$

$$\varphi' = \varphi$$

と書ける。しかし実際にはこれを、

$$E = E(S)$$

$$\theta = \theta(e)$$

$$\varphi' = \varphi$$

と近似して十分であると思われる。すなわち、ひょう痕の切り口の面積がひょう粒子の建物エネルギーに、形（離心率）が入射角に対応すると考えるわけである。

このうち最も重要なのは最初の関係である。そこで、これを実験によって求めた。実験結果は図 10 のとおりである。

この実験で衝突粒子として用いたのは鉄製のボールである。鉄とひょう粒では密度が違うから、上にあげたすべての量を再現することはできない。合わせたのは大きさと運動エネルギーである（したがって質量、速度、運動量などは同じではない）。それは、この 2 個が凹みの形状に最も大きく効くと考えたからである。また硬さも同じではない。これら（同じでな

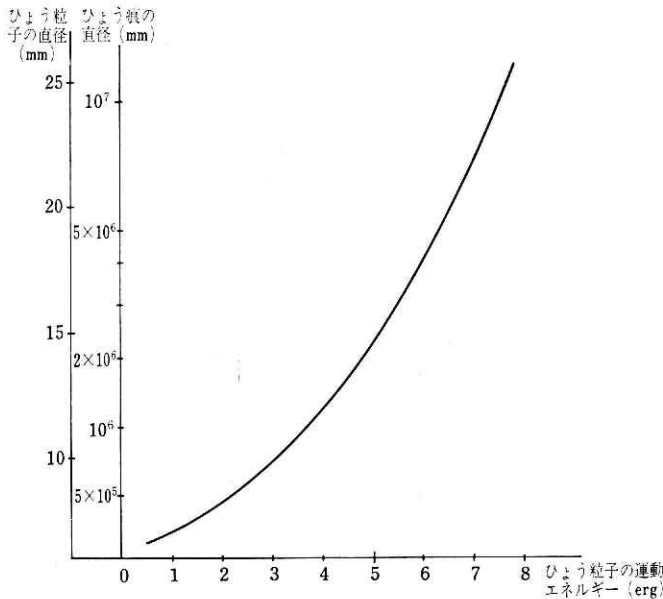
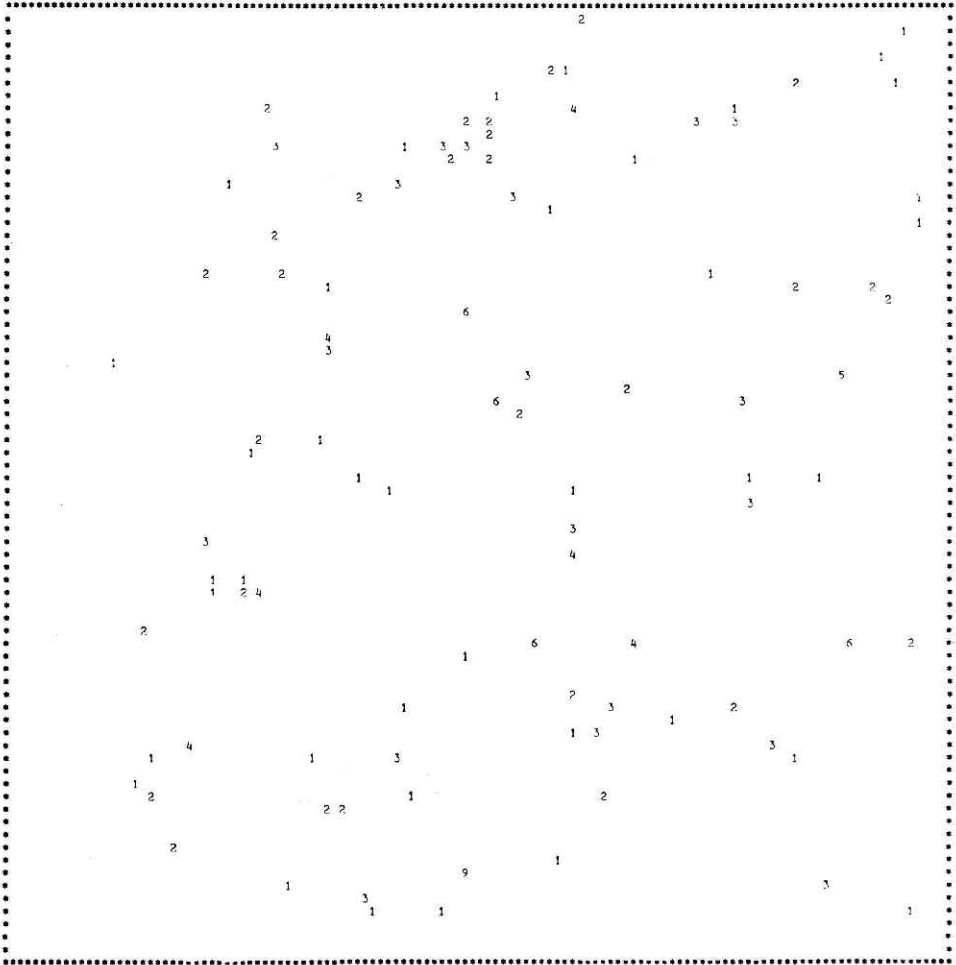


図 10 ひょう痕の大きさとそれに対応するひょう粒子の大きさおよび運動エネルギーの関係
 Fig. 10 Transformation of size of a spot into size and kinetic energy of the hailstone.

い分) が結果にどの程度影響を及ぼすかは検討する必要があるかも知れない。

5. おわりに

今回行った読み取り方法は、その計算機の使用時間が非常に短くてすむという点で望まし



RANK	DIAMETER(MM)	COUNTS
1	0 - 1	40
2	1 - 2	29
3	2 - 3	19
4	3 - 4	6
5	4 - 5	1
6	5 - 6	4
9	8 - 9	1

図 11 写真2のパターンの処理結果
 Fig. 11 A result of processing of a pattern of Photo. 2. Each figure indicates area in terms of diameter (unit mm) of each spot.

いものである。また測定精度も、この簡易型記録計から期待される精度に対して一応満足できるものである。

ところで、この方法ではひょう痕の深さに関する情報は捨ててしまった。これには一応合理的な理由があったが、中には凹みの形を次元的に見なければ正しい判断ができないようなものもある。その一つは、2個以上のひょう痕が近接して重なったものであるもう。一つは、ひょう粒子がアルミ板の上を跳ねて2回以上面にあたる場合があるが、この識別である。これは2回目以後の衝突は速度がちがうから、切り口の大きさと深さの関係を見れば判断がつくはずである。しかしこのような判断を計算機で行なうには、非常に面倒なプログラムを要し、所要時間も長くなってしまふ。今回の場合のようにあまり精度が要求されないものに対しては、むしろ少し雑でも計算機処理の速いものを作って、それで得た結果に何らかの—たとえば粒子数が少ないときには人間が見て判断し、粒子数が多いときには統計的に処理をするといった—補正を加えることで十分であると思われる。

なお今回は、ひょう粒子の運動エネルギーを求める関係だけを求めたが、入射角についても必要があれば同様に求めることができる。

最後に、今日行ったアルミ箔の表面を紙に写し取るという方法は、菅原正巳当センター前所長の御教示によるものである。また本報告を書くにあたって、第一研究部小元敬男異常気候防災研究室長をはじめ同研究室の諸氏にいろいろ御助言をいただいた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 諸星敏一 (1976) : 電子計算機による強震記録の読み取り (第2報). 国立防災科学技術センター研究報告, 第16号, 29-45.
- 2) 小元敬男, 清野裕, 八木鶴平, 米谷恒春 (1976) : 農作物のひょう害と降ひょう強度との関係. 国立防災科学技術センター昭和51年度研究発表会講演要旨, 2-5.
- 3) 清野裕, 小元敬男 (1976) : 1972年8月3日のひょう雲の構造と行動, 国立防災科学技術センター研究報告, 第14号, 53-63.

(1976年8月11日 原稿受理)