簡単な降ひょう記録計によるひょう粒の大きさの推定

著者	清野 豁
雑誌名	国立防災科学技術センター 研究報告
巻	20
ページ	31-38
発行年	1978-11
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00000777

551・578・6

簡単な降ひょう記録計によるひょう粒の大きさの推定*

清　野　　豁**

国立防災科学技術センター

On Estimation of Hailstone Diameter by Hailpad

By

Hiroshi Seino

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

In the hailfall observation network operated by the National Research Center for Disaster Prevention, an instrument called a hailpad is used. The main part of the hailpad consists of aluminum foil (0.12 mm thick) and styrofoam. Steelballs are used to prepare a calibration curve for the hailpad to estimate hailstone diameters from dent diameters on aluminum foil. Accuracy of the field data analyzed with the calibration curve and feasibility of the hailpad are discussed.

1. まえがき

降ひょうは局地的な現象であり，かつ局所的変化の著しいことはよく知られている．そのため，降ひょう分布の把握には多数の測器による密度の高い観測網が必要である．国立防災科学技術センターが北関東の群馬県と埼玉県に展開した降ひょう観測網には，アルミ箔と発泡スチロールを組み合わせた簡単な降ひょう記録計が用いられた（小元・八木・清野・米谷，1978）．アルミ箔と発泡スチロールを組み合わせて降ひょうを観測する方法は，米国で降ひょう抑制実験やレーダー観測のために1950年代の後半に開発され，Schleusener and Jennings (1960) が最初に紹介した．hailpad と呼ばれるこの測器は，構造が簡単で製作費が安く，取扱いが容易であるため，その後も多くの観測に使用され (Changnon, 1977 など)，また，米国内のみならずカナダ，フランス，スイス，イタリーなどでも使用されている (Strong, 1974 ; Vento, 1976 など)．同種のもので，水平面だけでなく垂直面にも受ひょう面をもつ hail cube, hail stool と呼ばれる測器も開発されており，また，米国やカナダではこの他にも，ひょう粒と雨滴を分離して前者を冷凍箱に落すひょう粒捕捉器，ひょう粒の運動量を磁気テープに記録する降ひょう記録計なども使われている (Changnon, 1969)．

＊　この研究は特別研究「積雲対流がもたらす災害の発生機構に関する研究」の一環として行なわれたものである．

＊＊　第1研究部異常気候防災研究室

国立防災科学技術センターが群馬県および埼玉県で用いてきた降ひょう記録計の模式図を図1に示した．この記録計は発泡スチロールの上に0.12 mmのアルミ箔を置き，金属性の枠で固定し，支柱により地上に設置される．受ひょう面は500 cm^2の面積をもち，この面が水平になるように設置して観測する．観測は群馬県および埼玉県の農業共済組合連合会を通して，主として地元の農家に委託された．アルミ箔上にひょう痕ができると，新しいアルミ箔と交換され，記録のついたアルミ箔は上記共済連を通して国立防災科学技術センターに回収される．ここでは，この回収されたアルミ箔のへこみの大きさからひょう粒の大きさを推定する方法について述べ，この方法で得られるデータの精度について検討する．

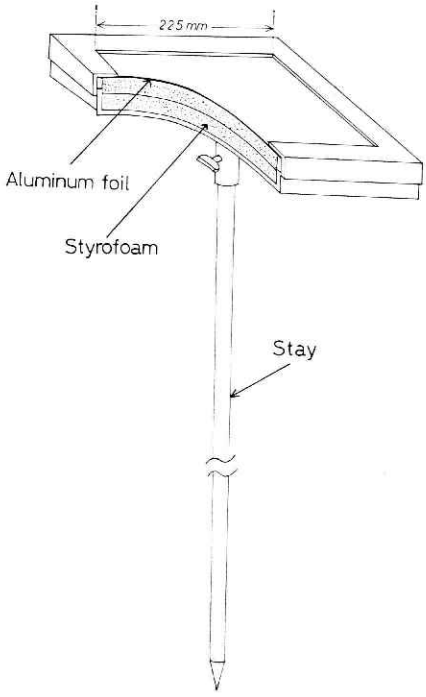


図 1　群馬県および埼玉県で使用した降ひょう記録計の模式図
Fig. 1　Schematic view of NRCDP hailpad.

2.　降ひょう記録計の検定

降ひょう記録計のアルミ箔上には雨滴によるへこみは生じないので，ひょう粒だけが記録される．このへこみの大きさをひょう粒の大きさに変換するためには，あらかじめ検定曲線を用意しなければならない．検定には既知の大きさのひょう粒を用いるのが理想的であるが，実際のひょう粒を用いることは困難であるので，同じ直径をもつスチールボールを代りに使って検定を行なった．なお，Changnon (1969)，Strong (1974)，Vento (1976) なども同様の方法を採用している．

2.1　スチールボールによる検定方法

ひょう粒とスチールボールでは比重が全く異なるので，ひょう粒のかわりにスチールボールを用いて検定を行なうには次のような方法をとる．まず必要なことはひょう粒の落下速度（終速度）を知ることである．直径 d のひょう粒の落下速度 V_T は，

$$V_T=\left(\frac{4\rho gd}{3\rho_a C_D}\right)^{1/2} \tag{1}$$

で与えられる．ここで ρ はひょう粒の密度，g は重力の加速度，ρ_a は空気の密度，C_D は抵抗係数である．直径 d のひょう粒が V_T の速度でアルミ箔にあたる瞬間の運動エネルギー（衝突エネルギーと呼ぶ）e_I と運動量 q_I は，

$$e_I=\frac{\pi}{12}\rho d^3 V_T^2=\frac{\pi\rho^2 g}{9\rho_a C_D}d^4 \tag{2}$$

$$q_I=\frac{\pi}{6}\rho d^3V_T=\left(\frac{\pi^2\rho^3 g}{27\rho_a C_D}\right)^{1/2}d^{3.5} \tag{3}$$

と表わされる．ここで $\rho=0.9\,\mathrm{g\cdot cm^{-3}}$，$\rho_a=1.2\times10^{-3}\,\mathrm{g\cdot cm^{-3}}$ (1000mb, 25℃)，$g=980\,\mathrm{cm\cdot sec^{-2}}$，$C_D=0.6$ である．

一方，直径 d のスチールボール（密度 ρ_s）が距離 h_s 落下したときの衝突エネルギー e_I と運動量 q_I はそれぞれ次式で与えられる．

$$e_I=\frac{\pi}{6}\rho_s d^3 g h_s \tag{4}$$

$$q_I=\frac{\pi}{6}\rho_s d^3\sqrt{2gh_s} \tag{5}$$

ここで $\rho_s=7.8\,\mathrm{g\cdot cm^{-3}}$ である．(4)式の衝突エネルギー e_I が (2)式の衝突エネルギー e_I に等しくなるような高さ h_s を求めれば，スチールボールでひょう粒の衝突エネルギーを，また，(5)式の運動量 q_I が(3)式の運動量 q_I に等しくなるような高さ h_s を求めれば，運動量をそれぞれ simulate したことになるが，ここでは後述の理由で衝突エネルギー e_I のみを使った．(4) (5)式ではスチールボールの抵抗係数を無視しているが，Changnon (1969) によれば，この誤差は1％以内である．スチールボールを使ってひょう粒のもつ衝突エネルギー e_I と運動量 q_I を simulate する方法は上記の通りであるが，式からわかるように，衝突エネルギー e_I と 運動量 q_I とではスチールボールを落す高さ h_s の値は異なる．われわれが必要とするのはひょう粒によってできるへこみの大きさを与える h_s である．この問題について Strong (1974) は，スチール・ガラス・氷の三種の球を用いて実験を行ない，同じ直径をもつ三種の球を同じエネルギーでアルミ箔に衝突させると，三種の球とも同じ大きさのへこみをつくるが，直径と運動量が同じでもエネルギーが異なれば，へこみの大きさは異なることを示した．すなわち，ひょう粒と同等の衝突エネルギーを与えるような高さからスチールボールを落せば，これによってできるへこみの大きさは，同じ大きさのひょう粒によってできるへこみの大きさに等しくなり，ひょう粒のかわりにスチールボールを使って検定を行うことができる．

2.2 風の影響によるへこみの変形

上記の方法で水平なアルミ箔上にスチールボールを鉛直に落下させると，アルミ箔上には球形のへこみができる．一方，実際の観測で得られたアルミ箔上のへこみには球形のものはまれであり，だ円状のへこみの方が多いのが普通である．これはひょう粒が強い風に流される結果である．降ひょう時に風が全くないか，あるいは弱いこともままあるが，一般には強い風が吹くことが多い．強い風が吹いている場合，ひょう粒は鉛直には落下せず，鉛直方向からある角度 (θ) をもってアルミ箔に衝突する．この時，アルミ箔上にはだ円状のへこみができる．ひょう粒が球形であったとすれば，このへこみの長軸と短軸のうち，短軸は同じ大きさのひょう粒が風のない場合（鉛直に落下する場合）につくる円形のへこみの直径にほぼ

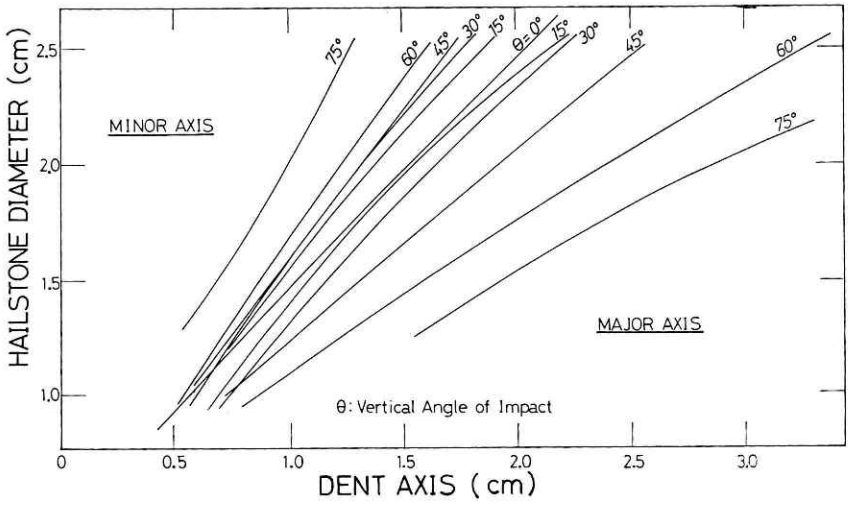


図 2　衝突角 (θ) を変化させた時のへこみの長軸および短軸とひょう粒の直径の関係 (Strong, 1974)

Fig. 2　Dent axes vs. hailstone diameter for wind-blown hailstones (Strong, 1974).

等しいと考えられる．すなわち，だ円状のへこみの短軸を読み取ることによって，ひょう粒が鉛直に落下したものとして扱うことができる．衝突角 θ の変化によってへこみの長軸と短軸がどのように変化するかについて，Strong (1974) の実験結果を図2に引用した．実験に使われたアルミ箔の厚さは 0.25mm であり，われわれのものの約2倍の厚さである．彼はこの実験結果から，短軸の大きさは θ が 45° までは同じエネルギーで鉛直に落下する場合 ($\theta=0°$) のへこみの直径とそれほど差はないと結論している．この結果をみると，衝突角 θ が 15° から 60° の範囲の短軸の変動幅は 2 mm であり，衝突角 θ を 0° から 60° までとると 3 mm である．ここで，$\theta=30°$ を基準にとり短軸を読み取るとすれば，$\theta=0°$ で落下するひょう粒に対しては直径で 2 mm の過大評価となり，$\theta=60°$ で落下するひょう粒に対しては 1 mm の過小評価となる．一般に降ひょう時には強い風が伴うことを考慮すれば，$\theta=30°$ で検定を行った結果を用いて，へこみの短軸を読み取り，ひょう粒の直径を見積る場合，その誤差は±1 mm以内であると考えてさしつかえないであろう．

表 1　検定曲線を求める際にスチールボールを落す高さ

Table 1　Steelball dropping height to match impact energy of hailstone.

d (cm)	V_T (m/sec)	e_I (erg)	h_s (cm)
0.5	9.0	2.41×10^{4}	48
0.6	9.9	4.99×10^{4}	58
0.7	10.7	9.24×10^{4}	67
0.8	11.4	1.58×10^{5}	77
0.9	12.1	2.52×10^{5}	87
1.0	12.8	3.85×10^{5}	96
1.2	14.0	7.98×10^{5}	115
1.4	15.1	1.48×10^{6}	135
1.6	16.2	2.52×10^{6}	154
1.8	17.1	4.04×10^{6}	173
2.0	18.1	6.16×10^{6}	192
2.5	20.2	1.50×10^{7}	240
3.0	22.1	3.12×10^{7}	288
3.5	23.9	5.78×10^{7}	337
4.0	25.6	9.85×10^{7}	385

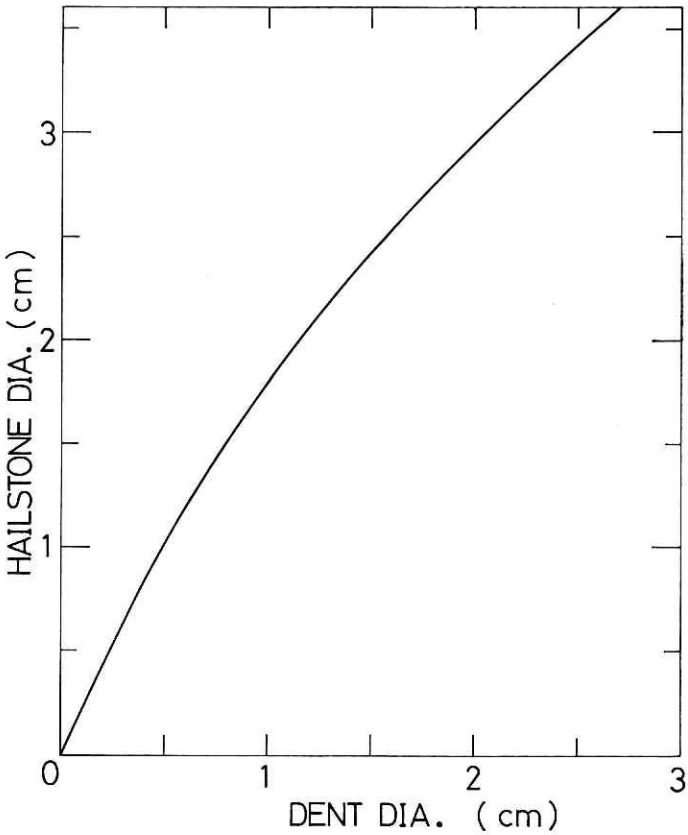


図 3 群馬県および埼玉県で使用した降ひょう記録計の検定曲線
Fig. 3 Calibration curve for NRCDP hailpad,

表1は実験に用いたスチールボールの大きさと，同じ大きさのひょう粒がもつ落下速度と衝突エネルギー，および，その衝突エネルギーを与えるためにスチールボールを落す高さを示したものである．これらの大きさのスチールボールを，$\theta=30°$でアルミ箔に衝突させて求めた検定曲線を図3に示した．

3. 考　　察

前節では，アルミ箔と発泡スチロールを組み合わせた簡単な降ひょう記録計からひょう粒の大きさを推定する方法を述べた．ここでは，この検定に関して生ずる誤差，読取りの際の問題点，記録計としての有用性と問題点について検討する．

3.1 検定に係わる誤差

図3の検定曲線を用いて，アルミ箔上のへこみの大きさをひょう粒の大きさに変換する際の誤差としては，風の影響によるものと，各種の物理量を仮定したことによるものが考えられる．前者については，先にも触れたように，図3の検定曲線を使ってへこみの短軸からひ

ょう粒の直径を求める場合のひょう粒の直径の，衝突角 θ の変化にともなう変動幅は±1 mm以内と考えられ，へこみの短軸からひょうの粒径を求める場合，風の影響（少なくとも水平成分）を考慮する必要はない．

後者の誤差，つまり，各種の物理量を仮定したことによる誤差について Strong (1974) は，これらの物理量を仮定したことによる誤差の積算は，ひょう粒一個について最大±39%にも達するが，それぞれが誤差 ε をもつ量を N 回測定して平均したときの誤差 ε_f は，$\varepsilon_f=\varepsilon/\sqrt{N}$ で表わされるから，これらの物理量に平均値を用いることにより，アルミ箔上の数百個のひょう全体について見れば，これらの誤差は小さくなると述べている．われわれの観測で得られた一枚のアルミ箔の平均的なひょう粒数は数百個であるから，この数百個全体についての誤差は数%程度になると考えられる．

3.2　読み取り時の問題点

読み取り時の問題点として，まず，アルミ箔に一度衝突したひょう粒が，再衝突してできるへこみが考えられる．数百個のへこみの中から再衝突によるへこみを区別することは非常に困難である．先の検定（$\theta=30°$）ではアルミ箔に一度あたったスチールルボールはすべてアルミ箔外に飛び出し，再衝突は見られなかった．ひょうの場合にも同じことが言えるかどうかは確認していないが，もし再衝突があったとしても，再衝突によるへこみの大きさは最初の衝突によるへこみにくらべて小さく，アルミ箔上の数百個のひょう全体で考えた場合，一回の降ひょう全体で考える降ひょうパラメーターのうち，ひょう粒の総数には若干の誤差を与えるが，その他のパラメーター（最大直径，衝突エネルギー，総質量など）に対する寄与率は小さく無視できる．われわれはアルミ箔の読み取りに際し再衝突を考慮していない．

アルミ箔上のへこみに関して，さらに，ひょう粒以外によるへこみ，すなわち鳥がくちばしでつついてできたへこみ，いたずらによるものなどの問題があるが，これらのへこみは注意深く見ればひょう粒によるへこみとの区別はたやすい．また，同じひょう粒でも一般の固いひょう粒とは異なるいわゆる soft hail によるへこみが，少数例ではあるが，これまで観測されている．この場合のへこみは，小元・清野 (1978) が述べたように，アルミ箔上に比較的浅い大きいへこみとして記録されるので，固いひょう粒によるへこみとは容易に区別される．

3.3　降ひょう記録計の性能と問題点

国立防災科学技術センターが群馬県および埼玉県で使ってきた降ひょう記録計の受ひょう面積は 500 cm^2 である．この面積でとらえた降ひょう状況を，はたしてその地点の代表値と見なせるかどうかという問題がある．Changnon and Towery (1972) は十分な精度を与える最小の受ひょう面積は 1 ft^2 (≒930cm^2) であると述べている．これに比べるとわれわれの受ひょう面積は小さい．しかし，一例だけではあるが，われわれが20m×20mの面積内に16台の降ひょう記録計を置いて観測した例では，16台の記録にはそれほど重大な差はなく（清

野・小元・八木・米谷, 1978), 代表性についてはあまり問題がないと言えるであろう. ただし, 露出の良い所に記録計を設置しなければならないことは言うまでもない.

アルミ箔と発泡スチロールを組み合わせた降ひょう記録計は, 安価で取扱いが容易であるため, 多数配置して密度の高い観測網を展開でき, ひょう粒の個数と大きさに関する情報を簡単に得ることができる利点がある. しかしその半面, 時間に関する情報については全く切り捨てざるを得ない. 降ひょう時刻やその持続時間を把握することは重要な問題であるが, そのためには測器が高価となり密度の高い観測網の展開に大きな支障となる. われわれは現地観測者からおよその降ひょう時刻を報告してもらう方法をとった. なお, ひょうが強い雨に混じって降ったという場合には, レーダーと降ひょう域に位置する, あるいは隣接の雨量計の記録を併用することにより, 降ひょう時刻を推定できる (小元・八木・清野, 1976; 清野・小元・八木・米谷, 1978).

4. あとがき

国立防災科学技術センターが北関東の群馬県と埼玉県に展開した降ひょう観測網に使われた降ひょう記録計は, 測器として不備なところもあるが, 簡単に降ひょうの強さを評価するには十分有用な測器である. ここでは, アルミ箔上のへこみの大きさからひょう粒の大きさの情報を取り出す方法について述べてきたが, ひょう粒の直径と衝突エネルギーの関数と考えられるへこみの深さも重要な情報である. しかし, われわれはこの点についてはまだ検討していないので, これ以上の議論は別の機会に譲る.

なお, この降ひょう記録計を使った群馬県における観測全般については, 小元・八木・清野・米谷 (1978) に, 降ひょう分布と農作物の被害率との関係については小元・清野 (1978) に, 降ひょう分布と降雨量分布の関連については清野・小元・八木・米谷 (1978) に, 農作物のひょう害については清野・小元 (1978) に, 電子計算機によるアルミ箔の自動検測の試みについては矢崎 (1976) に報告されている.

5. 謝　辞

原稿のとりまとめにあたって, 有益な御討論をいただいた小元敬男第1研究部長 (現大阪府立大学), 八木鶴平異常気候防災研究室長, 米谷恒春主任研究官に御礼申し上げる.

参考文献

1) Changnon, S. A. Jr., (1969): Hail evaluation techniques. Part I, Final Rep. NFS GA-482, Illinois State Water Survey, Urbana, 99pp.
2) ——— (1977): The scales of hail. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 626-648.
3) ——— and N, G. Towery (1972): Studies of hail data in 1970-72. Final Rep. Illinois State Water Survey, Urbana, 28pp.
4) 小元敬男・八木鶴平・清野　豁 (1976): 昭和50年6月9日の群馬県の降ひょう (序報). 国立防災科学技術センター研究速報, **22**, 31pp.

5) 小元敬男・八木鶴平・清野　豁・米谷恒春 (1978)：群馬県における降ひょう観測 (1971-75)．農業気象，**34**，17-21.
6) 小元敬男：清野　豁 (1978)：降ひょう特性と農作物の被害率の関係．農業気象，**34**，65-76.
7) Schleusener, R. A. and R. C. Jennings (1960): An energy method for relative estimates of hail intensity. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **41**, 372-376.
8) 清野　豁・小元敬男・八木鶴平・米谷恒春 (1978)：弱い降ひょうを伴った対流系の降水分布の特徴について．国立防災科学技術センター研究報告，**19**，1-15.
9) 清野　豁・小元敬男 (1978)：農作物のひょう害の形態と回復過程—昭和52年7月7日の降ひょう—．国立防災科学技術センター研究速報，**27**，19pp.
10) Strong, G. S. (1974): The objective measurement of Alberta hailfall. *Mas. Sci. Thesis*. The university of Alberta, 182pp.
11) Vento, D. (1976): The hailpad Calibration for Italian hail damage documentation. *J. Appl. Meteor.*, **15**, 1018-1022.
12) 矢崎　忍 (1976)：降ひょう記録計の電子計算機による自動検測．国立防災科学技術センター研究報告，**16**，47-58.

(1978年6月8日原稿受理)