巨大降水要素の容積分布

孫 野 長 治*

Volume Distribution of the Large
Precipitation Elements

C. Magono

Yokohama National University, Yokohama

(Manuscript received 26 June, 1953)

Abstract

It is known that photographic paper is coloured without development and fixing when it is exposed to the daylight or a light source of relatively short wave length. When the precipitation elements fall on a photographic paper and melt on it, the areas wet by the precipitation elements are coloured a different colour from the other unwet areas as shown in photos. 5~10.

The coloured areas are stable if the paper is protected from the direct rays of the sun. By the use of this phenomenon, the size or shape of the precipitation elements (rain drop, snow crystal, snow flake, sleet, graupel) which fell on a photographic paper are simply recorded on the photographic paper.

In this work, the relation between the volume of individual precipitation elements and the records coloured by them on the photographic paper, was investigated.

a) Rain drop.

From the calibration of the water drops at terminal velocity, the following relation was obtained

$$d = 10^{-\frac{1}{3}} D^{\frac{2}{3}},$$

where d = equivalent diameter of rain drops in mm, D = mean diameter of wet areas by rain drops on the photographic paper in mm.

b) Snow crystal and snow flake.

As the outline of the horizontal shape of the snow crystals or snow flakes in falling state is coloured and recorded on the photographic paper, we obtain

$$d = 2^{-\frac{1}{3}} D,$$

where d = diameter of the snow crystals or snow flakes assumed to be spherical in falling state, D = mean diameter of areas coloured by them on the photographic paper due to their fall on the paper in mm.

* 横浜国立大学

c) Sleet (partially melted snow flake)

The particles of sleet collapse and spread on the photographic paper when they fall on it, but their depths are roughly uniform, so their volumes are calculated from the records on the paper and the increase of the weight of the paper due to their fall.

d) Graupel.

The graupels melt to semispherical drops on the paper, so their diameters, equivalent to the ones of spherical water drops are also calculated as follows,

$$d = 2^{-\frac{1}{3}} D,$$

where D = diameter of circles by the graupels in mm.

Some examples of the volume distribution of great precipitation elements are shown in figs. 4~10.

序 論

巨大降水要素（雨滴・雪片・霰等）の容積分布はその生成機構の推定の手がかりになるばかりではなくレーダー観測の結果の検討にも大切な要素であるが、雨滴以外には観測の試みもなされていないようである。雪片なども雨滴と同様に吸収法¹⁾で質量分布が測れないこともないが、前者の場合は質量の他に体積や形状も一緒に知ることが望ましい。また雪片や霰が雨滴と混つて降る霰の場合にはその区別も必要である。こういう条件を満たすものとして印画紙の感光による変色を利用した観測法を試みてほぼ成功したので報告する。

§ 1. 印画紙の変色

印画紙は現像しなくても感光すると種々の色に変色することがわかつて居り²⁾、天然色印画に利用しようとのころみがあつたくらいである。ところが感光の際に印画紙の一部がぬれていると、その部分は他の地の色とは別な色に変色する。この現象を利用し、印画紙で雨滴や雪片を受けて光にさらしてぬれた部分を別な色に変色させ写真5~10のように記録しようというのである。一般には他の色は赤褐色に、ぬれた部分は紫色に変わり、放置すると両方とも褐紫色になつて区別できなくなるの多いが、「八重 FS」、「染井 FS」、「吉野 No. 4」、「日出 No. 2」等の小西六写真工業株式会社系の印画紙は比較的短い波長の光に曝らすと地の色は青系色に、ぬれた部分は赤褐色に変つて区別が明瞭で、しかも再び前述の強い光にあてさえしなければ変色がそれ以上に進行せず安定に記録が残る。露光用の光は直射日光・明るい裸電球（例えば幻燈器用の電球）・水銀燈などが適当し、露光時間は光源の強さにもよるが数秒から数分でよい。適当に着色したら乾かして湿気を帯びないように保存する。現像・定着の操作は一切必要としないからすこぶる簡単で野外作業に適している。また印画紙は期限切れでも、かぶつていてもかまわない。

§ 2. 雨滴の観測

吸取紙の場合と同様に印画紙上の痕跡の大きさと、雨滴の実際の大きさとを前もって検定しておかなければならない。

a. 検 定

吸取紙と異り印画紙上できる水滴の痕跡はその落下速度によつて違うから、水滴をその終端速度で落として検定しなければならない。水滴が終端速度をうるに要する高さは Laws³⁾ 氏の報告にしたがい、水球直径（以後 d mm で示す）0.6mm 以下は 3m の高さから、2mm 以下は 6m の高さから 3~6mm の水滴は 8.6m の煙筒の上から落すことにした。

d が 3~6mm の水滴は第 1 図 A に示す如くガラス管の端から滴下させて作り、その大きさはガラス管の外径で自由に変えられる。水球直径 d は印画紙の水滴を受ける前後の重量増加から算出した。この方法を “dropping method” と名付けて第 2 図では○印で示す。水滴の痕跡は写真 1 の如く褐色の部分と黒褐色の部分が生ずる。水滴は印画紙に落ちた瞬間に一旦は褐色部で示される範囲に拡がり次に表面張力で収縮しその部分が黒褐色に変色する。痕跡の径としては褐色部の直径 (D mm) を採ることに決める。 d が 3mm 以下の水滴はこの方法で

Fig. 1

作ることも、受止めることも困難なので、第 1 図 B に示す如く注射器を大体とじた水道の蛇口に連結するとその圧力で微水滴が飛出し手前にくるほど小さくなり、水圧さえ変らなければこの分布も一定する。 d は写真 2, 3 の如く大きさのそろつた部分を数十箇とり、それらによる印画紙の重量増加の平均から算出した。第 2 図では “spraying method” として ●印で示

Fig. 2

す。痕跡の直径 D は目盛付の虫眼鏡で測つた。更に小さくなると重量では測定精度がおちるので印画紙上の水滴を横から顕微鏡で観測して体積から d を測定しようとしたが第1図Cに示す如く半球形ではなく形が複雑で体積の推定が困難であり、蒸発や印画紙の吸収のため見ている中に消えてしまう。そこでパラフィン紙で受けてみると第1図Cの下に示す如くその断面は円筒形の上に半球を乗せた形であることを思わせる。このドームの高さと幅だけを手早く測り、体積を半球と円筒の和として計算した。痕跡の方は同じ大きさの微水滴が分布する所を別の印画紙(例えば写真4)で受けて決め第2図では“microscopic method”として○印で示す。

以上の手続きで検定した終端速度で落ちる水滴の直径(d mm)と印画紙上に作られた痕跡の直径(D mm)との関係を第2図に示す。破線は高橋氏⁴⁾の吸取紙の場合の関係を写したものである。 d が 3mm 以上の水滴では両者は大体一致するが小さくなると印画紙の痕跡の方が小さい方にずれる。これは水滴が吸取紙ににじみながら横に拡がる面積と、水滴が印画紙の上で瞬間的につぶれて拡がる面積とが偶然に一致しているが、水滴の小さい場合は運動量が小さいからつぶれ方が、吸取紙のにじみ方に及ばないからであろう。水滴は印画紙の上で一旦、拡がるのはその運動エネルギーに起因するのであるから、その面積は印画紙の種類に関係しない筈であり、手許にある印画紙ではすべて実験誤差の範囲内で一致した。極端な例として第2図右上の×印は吸取紙で受けた場合の痕跡の径であるが別に変りは見られない。印画紙は何でもよいが変色の明瞭度や安定度からは前記の小西六系が適当で、費用の点から、また後述の印画紙の測重の点からは薄手の印画紙がこの目的に

Fig. 3

向いている。

検定の結果を対数目盛で図示すると第3図の如く原点を通る直線関係になり、これを実験式で表わすと

$$\log(10D) = 1.5 \log(10d)$$

$$d = 10^{-\frac{1}{3}} D^{\frac{2}{3}} = 0.464 D^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

となる。検定曲線が原点を通ることは予想されるが直線になつたり、 d が D の $\frac{2}{3}$ 乗に比例したのは偶然であろう。しかし d が D の $\frac{2}{3}$ 乗に比例することは両者が体積と面積との関係に相当し、水滴はその大小にかかわらず印画紙の上で一様な厚さの円板状に一旦は拡がることを示している。この一様な厚さを h mm とすれば

$$\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 h = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^3 = \text{水滴の体積} \quad (2)$$

の関係が成立し h は 0.067mm となる。大きな水滴ほどよくつぶれると考えられるが厚さが一様にならなければならないという積極的な理由は別に考えられないが検定式の形は至つて簡

単である。

写真5, 6は1953年1月新潟県塩沢で雪のあい間に降つた雨滴の痕跡である。実際は日出 No. 2 の印画紙「キネビネ (16.5×12cm²)」で採つたものであるが写真にその半分の面積のものを示してある。全部について検定式(1)を使つて0.2mm幅ごとの分布を整理した結果を夫々第4, 第5図に示す。第4図は降り終りの細雨とでも称すべきものであり、第5図は中程度の雨滴であるが、高橋氏⁵⁾の指摘されたように分布に二つの山が見られる。図中のNは観測箇数を示す。

§3. 雪片、ぬれ雪、霰

通常の雪片は印画紙の上に落下の際に上下にはいくらかつぶれはする

Fig. 4

Fig. 5

が横には拡がらずにフワリと乗るから、雪片の残した痕跡を雪片の落下中の水平断面と考えることができる。大ざっぱに落下中の雪片の形を、この痕跡の平均直径を直径とするような球形と考えれば各雪片の容積が測定される。また印画紙の雪片を受ける前後の重量差を測つておけば雪片の平均密度が計算される。前記の印画紙ならば薄手のキヤビネならば 4g 前後で、その上に乗る雪片の重量は数百ミリグラムから数十ミリグラム程度である。

Fig. 6

なれているし、また大きい雪片は数が充分多いにもかかわらず分布の凹凸が烈しいのも特徴である。平均直径 17 mm と 18 mm 間の容積分布の 22.4% は唯一箇の雪片で占められたものである。この場合の雪片の総容積は 18 cm^3 で総重量は 280 mg であつたから平均密度は 0.016 g cm^{-3} である。雪粒付の角柱結晶の集まつた雪片は印画紙に落下する際に分裂してしまうが、この場合は何処を元にして散つたかは見当がつくから質量分布は出せるが容積の推定は困難である。

雪片の中でも一部分が融けて水分を多量に含むもの（以下ぬれ雪と称す）は印画紙の上で横にもつぶれるが融け残つた氷片を含んで居るので、つぶれたままの形で残る。しかしつぶれ方は含水量の多少により異なるから厚さも 0.067 mm 以上まちまちである。ただ同時に降つた雪片は含水量も似て居り厚さも大体一樣になるからその都度、厚さを測つておけば容積が測定され

写真7は1952年1月塩沢で採つた雪片の一例であるが、これと同時に採つた他の一枚分のも加えて整理した結果を第6図に示す。上方の横軸は水球に換算した直径を示す。二つの山が見られるが小さい方の山は単結晶または破片の分布を示すものであろう。雪片の容積分布は密度が小さいので雨滴に比べて数分布の山とは非常には

Fig. 7

る。第7図は1951年4月札幌で降ったぬれ雪の一例で厚さは1mmとして計算したものである。別に印画紙の重量増加から出した重量と比較するとこのぬれ雪の密度は 0.7 g cm^{-3} に相当する。

霰は印画紙の上では大体半球状に融けるから、その濃い方の痕跡の直径(D mm)から次の如く水球に換算した直径(d mm)が求められる。

$$d = \sqrt[3]{\frac{1}{2}D} = 0.79D \quad (3)$$

Fig. 8

Fig. 9

痕跡のかたよつものは長径、短径の平均をDとする。写真8は1953年1月横浜で降った霰の一例で整理の結果を第8図に示すが、分布の形は雨滴に近いといえる。霰の容積はこの方法では出せない。

§4. 霰

霰という言葉は、雨と雪または霰とが混じつて降る天候状態*を指す場合と、一部とけた雪片そのもの**を指す場合と両者を含めた場合と***があり、通常は霰と訳される英語の“Sleet”は雨滴が外から再び凍りかけたもの****を指しているようであるが、ここでは天候状態の意味に使用する。霰の観測には印画紙は非常に都合がよい。図版9は1953年1月塩沢で雨滴と同時に降ったぬれ雪の一例で天候が雨から雪に移行

する際に採つたものであるが、痕跡の形も複雑であり未融解の氷片が含まれているために水が

* 詳解漢和大辞典、大言海、辭苑

** 言海、日本大辞林

*** 大辞典、大百科辞典

**** W. J. Humphreys (1920): Physics of the Air, p. 264.,

V. J. Schaefer (1951): Compendium of Meteorology, p. 221.

跳ねて居り明瞭に雨滴と区別される。殆んど融けていたから検定は雨滴と同様に扱つて整理した結果が第9図の破線である。明かにぬれ雪の分布は雨滴よりも大きい方にずれて居り、小雪片が先に融けて雨滴となり大雪片は融けおくれて霰となつたことを示している。

Fig. 10

写真 10 は 1952 年 12 月鎌倉で降つた雨滴とみず霰の混合である。印画紙で受けてみるまでは肉眼では霰の混じていることが判らなかつたが、印画紙の上では明かに小氷球の混じているのが区別された。この小氷球はしばらくは融け残つていたので雨滴に比して変色も濃かつたが念のために個々に矢印をつけておいた。雨滴と霰を別々に検定した結果を第 10 図に示して

あるが霰の混じた霰の場合も霰の山の方が大きい方にずれている。しかしこの霰は相当にぬれていたから (3) 式で検定したのでは霰の換算直径が大き過ぎたかも知れない。

結 言

印画紙による雨滴・雪片・霰などすべての降水要素に一貫して用いられ、しかも頗る簡単な観測法を提出したが、なお次のような難点があるので考慮中である。静かな状態で検定するときは水滴は大きくても円形の痕跡が生じるが、実際の大雨滴（豪雨の場合）では印画紙上で流れて痕跡が不明瞭になる。印画紙上で分裂するような雪片の容積の測定が困難である。以上の欠点は紙で降水要素を受止める方法のすべてに通じるが、改良の可能性があると思われる。

終りに本研究の雨滴の検定を担当した渡辺・松本の両君、観測と整理を援助された荒井・中山・養島・中田の諸氏、観測の便宜を与えられた塩沢の雪実験所長の莊田氏に深く感謝の意を表す。本研究は文部省の科学研究費によつて行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 岡田武松; 雨, 岩波, 昭和 26 年, 36 頁.
- 2) 藤沢 信; 写真, 岩波全書, 昭和 9 年, 8 頁.
- 3) J. O. Laws; Measurement of the fall-velocity of water drops and rain drops: Trans. Amer. Geophys. Union. 1941, p. 709.
- 4) 1) に同じ.
- 5) 高橋喜彦; 雨滴観測による降雨機巧の研究序報; 気象集誌, 第 2 輯, 13 卷, 昭和 9 年, 67 頁.

Photo. 1 : $\times 1$

Water drops of
diameter 3.4 mm

Photo. 2 $\times 1$

Water drops of
diameter 1.3 mm

Photo. 3 : $\times 1$

Water drops of
diameter 1.0 mm

Photo. 4 : $\times 1$

Water drops of
diameter 0.56 mm

Photo. 5 (fig. 4) : $\times 1$

A part of Cabinet size, exposing time 2 min.

Rain drops.

13 h 20, Jan. 25, 1953, at Shiozawa.

Photo. 6 (fig. 5) : $\times 1$

A part of Cabinet size, exposing time 7 sec.

Rain drops.

12 h 42, Jan. 25, 1953, at Shiozawa.

Photo. 7 (fig. 6) : $\times 0.7$

Cabinet size, Snow flakes and snow crystals.

10 h 50, Jan. 31, 1952, at Shiozawa.

Photo. 8 (fig. 8) : $\times 1$

A part of Cabinet size, exposing time 30 sec.

Graupeln.

23 h 15, Jan. 7, 1953, at Yokohama.

Photo. 9 (fig. 9) : $\times 1$

A part of Cabinet size, exposing time 10 sec.

Sleet (rain drops and wet snow flakes).

13 h 10, Jan. 25, 1953, at Shiozawa.

Photo. 10 (fig. 10) : $\times 1$

A part of Cabinet size, exposing time 30 sec.

Sleet (rain drops and wet graupeln).

Graupeln, being marked by arrows.

12 h 30, Dec. 10, 1952, at Kamakura.