

## 降水粒子の落下速度について\*

梶 川 正 弘\*\*

## 1. まえがき

降水粒子の落下速度は、雲物理のみならず気象学の多くの分野で良く用いられる物理量の一つと考えられる。ここでは、現在までになされた落下速度の測定値の代表的なものを紹介し、合わせてそれに流体力学的な見地から簡単に考察を加えたり、また数値計算によって落下速度を求める方法についても述べてみたいと思う。ここでいう落下速度は全てその粒子の大気中における終速度を指している。

降水粒子の落下速度については、雲物理の教科書（例えば、Mason, 1971など）以外にも、藤原（1967）によって簡明な形で解説されているので、これらを参考にしつつごく最近の研究も含めて述べることにする。さらに降水粒子の落下速度が密接に関係してくる、雲物理上の諸問題は数多いが、ここではごく若干のものについて簡単に触れるにとどめたいと考える。

## 2. 雨滴の落下速度

## 2.1 測定値

天然の雨滴あるいは水滴の落下速度はかなり古くから測定されてきたが、その中で現在良く用いられている値としては、Gunn and Kinzer (1949) のものがある。第1表にその数値を示す。ただし直径 0.16mm 以下は Beard and Pruppacher (1969) の結果に基づいている。Foote and Du Toit (1969) によると、この測定値は次の様な  $N$  次の多項式で表わすことができる。

$$v_0 = \sum_{j=0}^N a_j d^j \quad (1)$$

ここで  $d$  は直径で  $a_j$  の値は第2表に示されている。

\* On the Falling Velocity of Precipitation Particles.

\*\* M. Kajikawa 秋田工業高等専門学校  
—1974年4月20日受理—

また逆に終速度を与えて、水滴直径を計算する場合には次式が使われる。

$$d = \sum_{j=0}^{13} b_j v_0^j \quad (2)$$

ここで  $b_j$  は同じく第2表に示されている。

さらに今まで述べた地上の測定値から上空における雨滴の落下速度を換算で求めるには次式が用いられる。

$$v = v_0 10^Y \left[ 1 + 0.0023 \left( 1.1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) (T_0 - T) \right] \quad (3)$$

ここで、

$$Y = 0.43 \log_{10} \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right) - 0.4 \left[ \log_{10} \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right) \right]^{2.5} \quad (4)$$

(3)と(4)式でサフィックスのゼロは、 $20^\circ\text{C}$ で1013mbの条件での値を示し、 $\rho$ は空気の密度、そして $T$ は気温である。これらの式から求められたいくつかの値を第1図に示す。(3)式よりもっと簡単な近似式としては次式がある。

$$v = v_0 \left[ \frac{\rho_0}{\rho} \right]^{0.4} \quad (5)$$

## 2.1 水滴の落下速度の計算

一般に直径  $d$ 、質量  $m$  の球が密度  $\rho$  で粘性係数  $\eta$  の流体中を定速度  $v$  で動くときに受ける抵抗力は次のように表わされる。

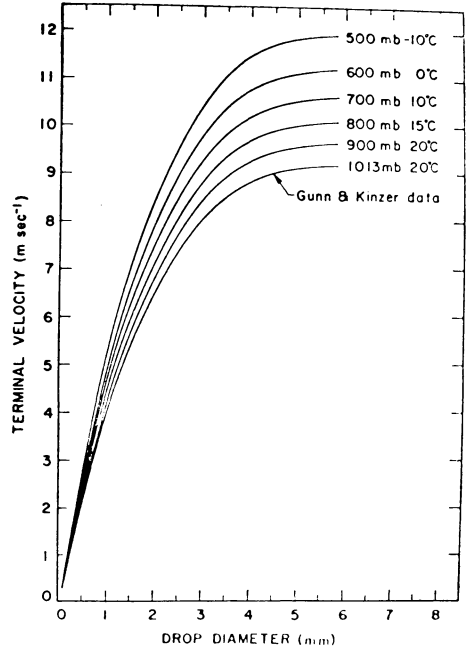
$$F_d = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 \frac{1}{2} C_d \rho v^2 \quad (6)$$

ここで  $C_d$  は球の抵抗係数であり、またこれはレイノルズ数 ( $Re$ ) の関数である。 $Re$  は次の様に定義される。ただし  $\nu$  は動粘性係数。

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} = \frac{v d}{\nu} \quad (7)$$

第1表 水滴の落下速度. 1013mb, 20°C の静止大気中の値. (Gunn and Kinzer, 1949 および Beard and Pruppacher, 1969 による)

水滴の直径 (mm)	落下速度 (cm/sec)	レイノルズ数 $Re$	抵抗係数 $C_d$
0.04	4.7	0.12	
0.05	7.2	0.24	
0.06	10.3	0.41	
0.08	17.5	0.93	
0.10	25.6	1.69	
0.12	34.5	2.74	
0.16	52.5	5.55	
0.20	72	9.61	4.2
0.30	117	23.4	2.4
0.40	162	43.2	1.66
0.50	206	68.7	1.28
0.60	247	98.7	1.07
0.70	287	134	0.926
0.80	327	175	0.815
0.90	367	220	0.729
1.00	403	269	0.671
1.20	464	372	0.607
1.40	517	483	0.570
1.60	565	603	0.545
1.80	609	731	0.528
2.0	649	866	0.517
2.2	690	1013	0.504
2.4	727	1164	0.495
2.6	757	1313	0.494
2.8	782	1461	0.498
3.0	806	1613	0.503
3.2	826	1764	0.511
3.4	844	1915	0.520
3.6	860	2066	0.529
3.8	872	2211	0.544
4.0	883	2357	0.559
4.2	892	2500	0.575
4.4	898	2636	0.594
4.6	903	2772	0.615
4.8	907	2905	0.635
5.0	909	3033	0.660
5.2	912	3164	0.681
5.4	914	3293	0.700
5.6	916	3423	0.727
5.8	917	3549	0.751



第1図 (3)式で計算された種々の条件における水滴の落下速度. (Foote and Du Toit, 1969による)

(6), (7)式より,

$$\frac{C_d Re}{24} = \frac{F_d}{3\pi\eta dv} \tag{8}$$

となり, ここで  $3\pi\eta dv$  は球に作用する粘性力である. 水滴が重力のもとで空气中を終速度で落下する場合には,  $F_d$  は水滴の重さに等しい (浮力項は省略する) ので,

$$\frac{C_d Re}{24} = \frac{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3 \sigma g}{3\pi\eta dv} \tag{9}$$

となり, ここで  $\sigma$  は水滴の密度である.

また (7) 式と組み合わせると次式が得られる.

$$C_d Re^2 = B_e = \frac{4}{3} \frac{\sigma \rho g d^3}{\eta^2} \tag{10}$$

$B_e$  は Best ナンバー (Best, 1950) と呼ばれる.

(9) 式より速度は次式で表わされる.

$$v = \frac{1}{18} \frac{\sigma g d^2}{\eta} \left( \frac{24}{C_d Re} \right) \tag{11}$$

特にストークスの法則が成立するとき即ち球に働く抵抗が粘性抵抗だけのときには,

第2表 水滴の速度を表わす多項式(1)と(2)における定数. これらの式で直径( $d$ )はmm, 速度( $v$ )はm/secの単位である(Foote and Du Toit, 1969による)

$j$	$a_j$			$b_j$ $N=13$
	$N=3$	$N=5$	$N=9$	
0	$-1.9274 \times 10^{-1}$	$-3.1682 \times 10^{-1}$	$-8.5731540 \times 10^{-2}$	$1.6186834 \times 10^{-1}$
1	$4.9625 \times 10^0$	$5.4506 \times 10^0$	$3.3265862 \times 10^0$	$-4.5352824 \times 10^{-1}$
2	$-9.0441 \times 10^{-1}$	$-1.3806 \times 10^0$	$4.3843578 \times 10^0$	$1.0314424 \times 10^0$
3	$5.6584 \times 10^{-2}$	$2.3612 \times 10^{-1}$	$-6.8813414 \times 10^0$	$-5.0842472 \times 10^{-1}$
4		$-2.8781 \times 10^{-2}$	$4.7570205 \times 10^0$	$-7.3450430 \times 10^{-2}$
5		$1.6486 \times 10^{-3}$	$-1.9046601 \times 10^0$	$1.5748428 \times 10^{-1}$
6			$4.6339978 \times 10^{-1}$	$-5.8210528 \times 10^{-2}$
7			$-6.7607898 \times 10^{-2}$	$9.0774564 \times 10^{-3}$
8			$5.4455480 \times 10^{-3}$	$-5.8192169 \times 10^{-4}$
9			$-1.8631087 \times 10^{-4}$	$8.2413985 \times 10^{-5}$
10				$-3.2915963 \times 10^{-5}$
11				$5.4687449 \times 10^{-6}$
12				$-3.9849021 \times 10^{-7}$
13				$1.0944173 \times 10^{-8}$
最大誤差	0.11m/sec	0.07m/sec	0.03m/sec	0.1mm

$$F_d = 3\pi\eta dv = \frac{1}{6}\pi d^3 \sigma g \quad (12)$$

となりこのときには  $C_d R_e / 24$  は1でもあるので, 速度は次式で表わされる.

$$v = \frac{1}{18} \frac{\sigma g d^2}{\eta} \quad (13)$$

特に, 1,013mb で20°Cの条件では, (13)式は,

$$v = 0.298 \times 10^6 d^2 \quad (14)$$

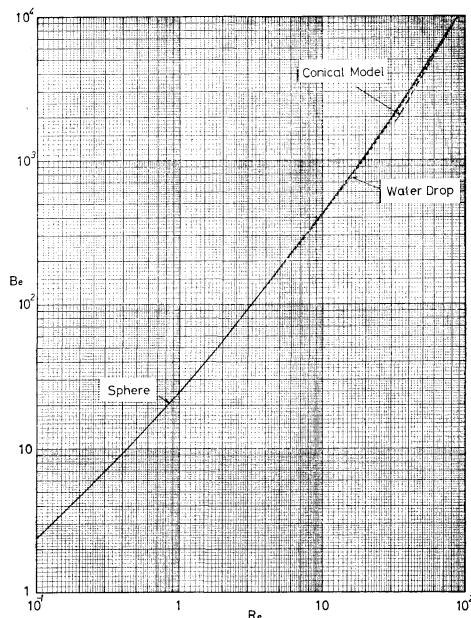
となり, この式は直径  $40\mu\text{m}$  以下 ( $R_e \leq 0.12$ ) で成立する. ただしここで  $v$  と  $d$  の単位は c.g.s. とする.

Beard and Pruppacher (1969) は  $R_e$  が0.2ないし200の範囲で, 固体球の抵抗係数を実験で精度良く求め, 一方垂直風洞を使って飽和空気中で水滴の抵抗係数を測定し, これら両者を比較し,  $R_e < 200$  では, 水滴が球とみなせることを示した. また抵抗係数の実験式として次式を得た.

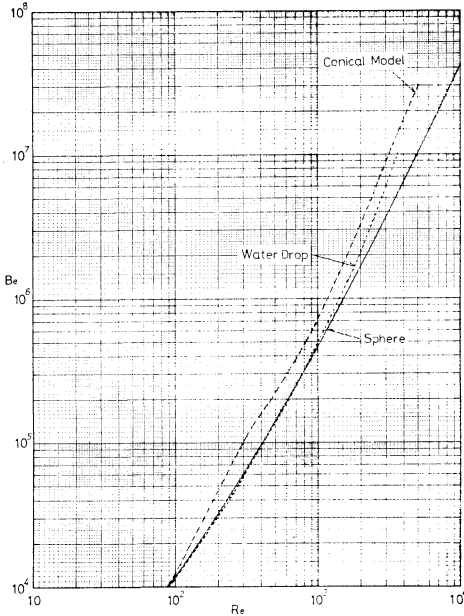
$$\frac{C_d R_e}{24} = 1 + 0.10 R_e^{0.955}, \quad 0.01 \leq R_e \leq 2 \quad (15)$$

$$\frac{C_d R_e}{24} = 1 + 0.11 R_e^{0.81}, \quad 2 \leq R_e \leq 21 \quad (16)$$

$$\frac{C_d R_e}{24} = 1 + 0.189 R_e^{0.632}, \quad 21 \leq R_e \leq 200 \quad (17)$$



第2図 レイノルズ数 ( $R_e$ ) とベスト数 ( $B_e$ ). 球 (Goldstein edit., 1965), 水滴 (Gunn and Kinzer, 1949 および Beard and Pruppacher, 1969) および紡錘霰のモデル (List and Schemenauer, 1971) について示す.



第3図  $R_e$  と  $B_e$  の関係で第2図のつづき。

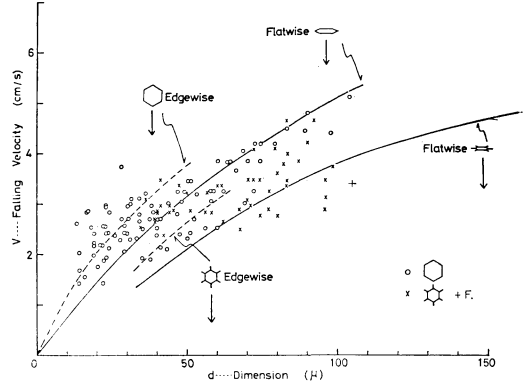
第1表にあげた直径 0.16mm 以下の速度は、水滴に対する  $B_e$  と  $R_e$  の関係を示す第2図および第3図と(7)式および(10)式より計算できる。その手順は、大気条件から、 $\rho$ ,  $\eta$  および  $\sigma$  が与えられた直径  $d$  を入れると、(10)式で  $B_e$  が計算できる。第2図または第3図より対応する  $R_e$  を読みとり(7)式に入れて  $v$  を計算するわけである。

第3図をみると  $R_e > 700$  では、水滴の抵抗係数が固体球より次第に大きくなっているが、これは良く知られているように、水滴の形が球状でなく扁平になって、水平断面積が増加することに関係している。水滴の変形に関しては、最近では例えば、Pruppacher and Beard (1970) や Pruppacher and Pitter (1971) が参考になろう。また第3図で  $R_e < 500$  で水滴の抵抗係数が、固体球のそれよりも逆に小さいのは、水滴内部の渦状流れの存在(最近のものでは例えば、Pruppacher and Beard, 1970)の証拠と考えられる。

### 3. 雪結晶の落下速度

#### 3.1. 氷晶の落下速度の測定値

ここでは慣用に従って雪結晶の内の、成長初期のものを氷晶と呼ぶことにする。大きさをいうと約100 $\mu$ m以下で、 $R_e$  では0.5以下に相当する。この大きさは天然の雲の中における結晶成長に対して、Ventilation 効果が影響し始める下限にあたりと考えられる(Koehnig,

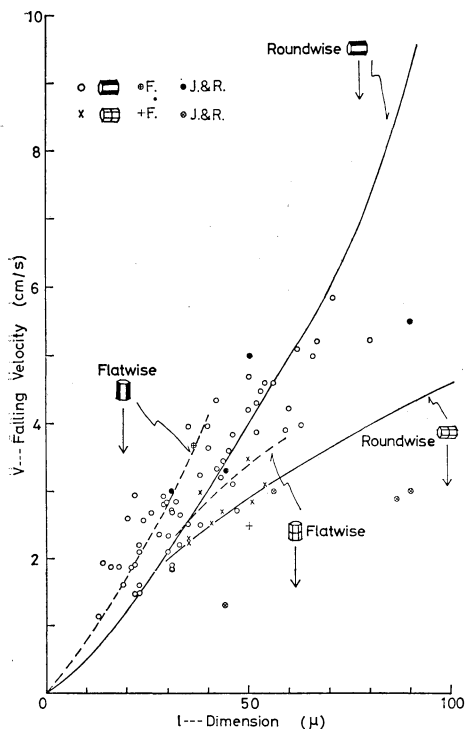


第4図 板状の氷晶の落下速度 (Kajikawa, 1973による)。F. は Fukuta (1969) の測定値。

1969による)。

天然の氷晶の落下速度測定を最初に試みたのは Yagi (1970) で、旭川市の過冷却霧の中に混じる氷晶を対象とした。測定は落下軌跡を写真にとり、その傾きと風速から落下速度を計算する方法で行われた。しかしこの方法では、個々の氷晶と軌跡との対応が完全ではなく、速度の平均値として 10.7cm/sec, 平均粒径 103 $\mu$ m が得られた。そのときの結晶形は、角柱とか角板という単純なものでは少なかった。

一方、実験室内で氷晶を作りその速度を測定することは Fukuta (1969) によってなされた。方法は光をチョッパーで定時間間隔で遮断し、落下軌跡を写真にとることである。ただしこの研究では、速度が Seeding 後の経過時間の関数として表現されている。Jayaweera and Ryan (1972) は、同じく低温室内で氷晶を作り、その落下速度を測定した。また模型実験による抵抗係数を使った速度の計算法(後述)による数値と測定値を比較して、この計算法の有効性を示した。また Kajikawa (1973) は前者と同様に、ドライアイス Seeding により氷晶を作り、ストロボ光で照明して落下軌跡を写真にとりその速度をきめた。写真上の軌跡と装置の下部で受け取った氷晶との対応は完全になされた。以上の結果をまとめて第4図と第5図に示す。第4図は板状結晶で、単純な角板と枝の発達したものとに分類した。Fukuta による数値は、論文中の図より間接的に大きさと速度の関係に直したものである。実線は模型実験より得られた円板の抵抗係数(Kajikawa, 1971)を使って計算した数値である。破線は、落下姿勢が底面を垂直にしている場合の計算値で、大きさが約 50 $\mu$ m 以下 ( $R_e$  では 0.15 以下に相当する) ではこの姿勢をとる可能性がある。この姿勢



第5図 角柱状氷晶の落下速度 (Kajikawa, 1973 による). F. は Fukuta (1969), J. and R. は Jayaweera and Ryan (1972) の測定値.

をとると抵抗係数が小さくなるので、同じ大きさでも速度は増加することになる。

第5図は角柱状結晶の測定値である。Solid なものと Hollow なものに分けた。実線は有限円柱の抵抗係数を使った計算値であり、破線は軸を垂直に落下する姿勢の場合である。大きさでは  $40\mu\text{m}$  ないし  $50\mu\text{m}$  以下、 $Re$  が 0.15 以下でこの姿勢をとる可能性がある。この姿勢をとると抵抗係数が小さくなり、速度は増す。以上の測定値には、ばらつきが大きいのがこれは主として、同じ大きさでもその質量のばらつきが大きいことに原因が考えられる。また、同じ大きさでも幾何学的な形状が一定していないことによる。即ち板状結晶では大きさと厚さの比が一定していないし、角柱状結晶では長さや直径の比が一定していないことが考えられる。さらに先にも述べたように落下姿勢の差もばらつきを大きくしている可能性がある。

### 3.2. 氷晶の落下速度の計算法

氷晶の落下速度を計算する試みは多くなされている

1974年7月

(例えば前節で紹介した以外には、Magono *et al.* 1967, Harimaya, 1968, Jayaweera and Cottis, 1969, List and Schemenauer, 1971 等) が、結局問題は抵抗係数をどう選ぶかということにあると考えられる。ここでは、Jayaweera and Cottis (1969), List and Schemenauer (1971) および Kajikawa (1971) などの取った方法を、氷晶の2つの基本的な形である板状と角柱状に分けて述べることにする。

板状結晶がその底面を水平に保ちながら終速度で落下するとき、良く知られているように重力と空気の抵抗力がつりあって次式が成立する。

$$V(\sigma - \rho)g = \frac{1}{2}\rho v^2 C_d S \tag{18}$$

ここで  $V$  は体積、 $\sigma$  は氷晶の実質部分の密度、 $\rho$  は空気の密度、 $g$  は重力加速度、 $v$  は落下速度、 $C_d$  は抵抗係数および  $S$  は断面積である。また  $Re$  は  $d$  を氷晶の直径として (7) 式で与えられる。 $\sigma$  に対して  $\rho$  を省略し、氷晶の質量を  $m$  とすると、(18) 式は次のようになる。

$$mg = \frac{1}{2}\rho v^2 C_d S \tag{19}$$

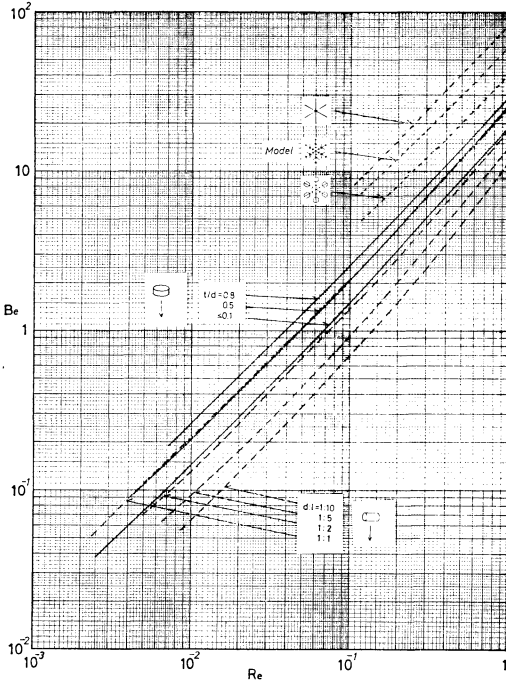
落下速度を計算するには質量と断面積 (角板とすると  $3\sqrt{3}d^2/8$  となる) を与えてさらに角板の抵抗係数が必要となるが、抵抗係数はまたレイノルズ数の関数したがって速度により変わるので、このままでは計算できない。そこで水滴の場合と同様に (19) 式と (7) 式より  $v$  を消去して  $B_e$  を求める。

$$B_e = C_d Re^2 = \frac{16}{3\sqrt{3}} \frac{mg}{v^2 \rho} \tag{20}$$

ここで右辺は与えることが可能な量であるから、もし  $B_e$  と  $Re$  の関係がわかれば、水滴のときと同じ手順で速度を計算できることになる。第4図実線はこの方法で計算されたものである。ただし、 $m$  は融解水滴直径より計算し、また  $C_d$  は模型円板の値を使ったが、円板の  $C_d$  が角板のそれにきわめて近いことは、List and Schemenauer (1971) の実験でも確かめられている。第6図と第7図に円板、有限円柱および各種の雪結晶模型の  $B_e$  と  $Re$  の関係を示す。結晶の直径 ( $d$ ) に比較して厚さ ( $t$ ) が大きい場合即ち  $t/d$  が 0.1 をこえると、 $C_d$  は従来まで得られている薄い円板の  $C_d$  の値より大きくなるので、そのような結晶に対してはおのおのの  $t/d$  に相当する  $B_e$  と  $Re$  の関係曲線の値を用いねばな

第3表 円板の  $f(=R_e/B_e)$ .  $R_e$  が 0.1 以下の範囲に適用できる.

$t/d$	$\leq 0.1$	0.5	0.8
$f$	$\frac{17}{250}$	$\frac{9}{200}$	$\frac{19}{500}$



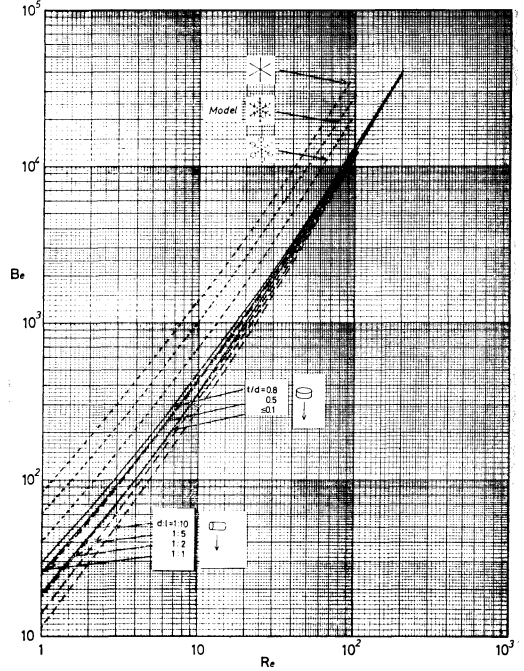
第6図 円板, 有限円柱および雪結晶モデルに対する  $B_e$  と  $R_e$  の関係, Kajikawa (1971) と List and Schemenauer (1971) による.

らない。しかし  $R_e$  が約40以上になると  $t/d$  のファクターはほとんどきいてこない事が第7図からわかる。

以上述べた方法をもっと単純化して, Jayaweera and Ryan (1972) は次の方法をとった.  $f=R_e/B_e$  とおくと (20) 式と (7) 式を組み合わせると,

$$v = \left( \frac{16}{3\sqrt{3}} \frac{g}{\nu\rho} \right) \frac{m}{d} \quad (21)$$

となる.  $R_e$  と  $B_e$  の関係を見ると  $R_e$  の比較的せまい範囲では, それらの比即ち  $f$  の値がほぼ一定値をとると近似的に考えられる部分がある. 例えば  $R_e \leq 0.1$  の範囲 (大きさが約  $50\mu\text{m}$  以下に相当する) で  $f$  の値は第3表のようになる. また実際の板状氷晶では,  $t/d$  の値は,  $d$  が  $100\mu\text{m} \rightarrow 10\mu\text{m}$  になるにしたがい  $0.2 \rightarrow 0.5$  へと変るので, これらの大きさの範囲に対して  $f$  の値は,



第7図 各種モデルに対する  $B_e$  と  $R_e$  の関係で第6図のつづき.

Jayaweera and Ryan (1972) のように  $1/20$  をとることができる. この方法が実測と合うことを彼等は確かめた. 以上述べたことは, 上空の大気条件の違うところに対して,  $\nu, \rho$  および  $g$  が変わるだけで基本的に適用できることはいうまでもない. 次に角柱状結晶の計算法を述べる.

角柱状結晶が主軸を水平に保ちながら終速度で落下するとき, 板状の場合と同様にして次式が成立する.

$$V(\sigma - \rho)g = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d l \quad (22)$$

ここで  $d$  は副軸方向の長さで  $l$  は主軸方向の長さである.  $\sigma$  に対し  $\rho$  を消去し, 質量を  $m$  とすると,

$$mg = \frac{1}{2} \rho v^2 d l \quad (23)$$

となり, この式と (7) 式を組合せると,  $B_e$  は

$$B_e = C_d R_e^2 = \frac{2dmg}{v^2 \rho l} \quad (24)$$

によって表わされ, 板状の場合と同様に  $B_e$  と  $R_e$  の関係がわかれば速度を計算できることになる. ただし抵抗係数 ( $C_d$ ) としては, 有限円柱の値を使うことになる.

第4表 有限円柱の  $f(=Re/Be)$ ,  $Re$  が0.1以下の範囲に適用できる.

$d/l$	1/10	1/5	1/2	1/1
$f$	$\frac{3}{20}$	$\frac{11}{100}$	$\frac{3}{40}$	$\frac{6}{125}$

が、それは直径と長さの比即ち  $d/l$  の値により変わってくるので、計算に際しては  $d/l$  の値に適合した  $Be$  と  $Re$  の関係曲線の値を選ばねばならない。円柱と六角柱の  $Ca$  が良く一致していることは Podzimek (1968) の角柱の  $Ca$  と比較してみるとわかる。  $Be$  と  $Re$  の関係は第6図と第7図に示されている。先に述べた第5図の実線は以上の方法で計算された値である。ただし、 $m$  は融解水滴直径より計算した。長さが  $20\mu\text{m}$  以上ではだいたい実測と合っていると見られるがばらつきも大きい。この原因は、同じ長さでも質量のばらつきがあることと  $d/l$  の値が一定でないことによると考えられる。

板状の場合と同様にもつと単純化した方法としては、 $f=Re/Be$  とおくと、(24) 式と (7) 式より  $v$  は次式で表わされる。

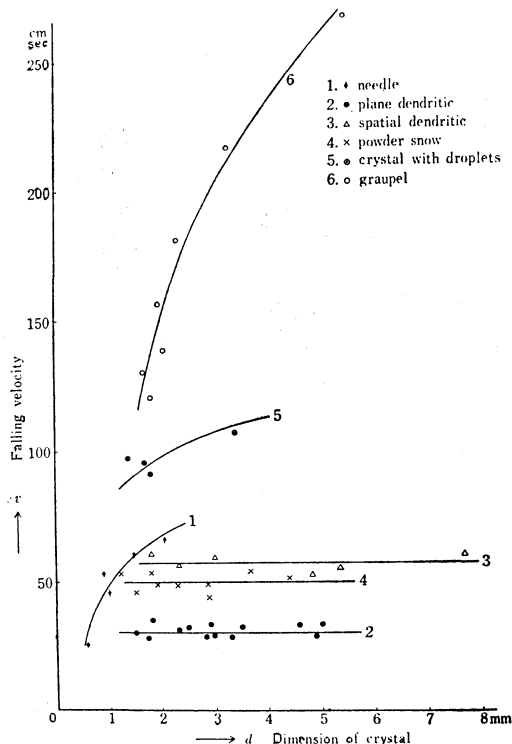
$$v = \left( \frac{2g}{\nu\rho} \right) \frac{m f}{L} \quad (25)$$

従って  $f$  の値がわかればこの式だけで速度を計算できることになる。  $Re$  が0.1以下の範囲(長さで約  $50\mu\text{m}$  以下)では  $f$  の値は第6図から第4表のようになる。また実際の Solid な角柱では、長さが  $100\mu\text{m} \rightarrow 10\mu\text{m}$  まで変化するにしたがい  $d/l$  が  $1/1.12 \rightarrow 1/1.54$  となるので、その間の結晶に対して  $f$  の値は  $1/20$  をとって近似的には良いと考えられる。

### 3.3. 雪結晶の落下速度の測定値

個々の雪単結晶の落下速度は Nakaya and Terada (1935) および Nakaya (1954) によって測定され、その結果を結晶の大きさの関数として示したのが第8図である。それによると落下速度の大きい霰は、一定時間間隔で照明し落下軌跡を写真に取る方法を用い、それ以外の結晶は2mの高さを落下する時間から速度をきめた。また落下した結晶は融かして質量も測定した。図をみると、霰、雪粒付、針状は大きさの増加と共に速度を増すが、樹枝、立体樹枝、粉雪は大きさに関係なく一定の値を持っている。後の3者は空隙が多いため、空気抵抗のきき方が複雑なることを示すと考えられる。これらの測定値に関連して次の2点が問題となってくるとされる。

1974年7月



第8図 雪結晶の落下速度と大きさの関係。(Nakaya and Terada, 1935による)

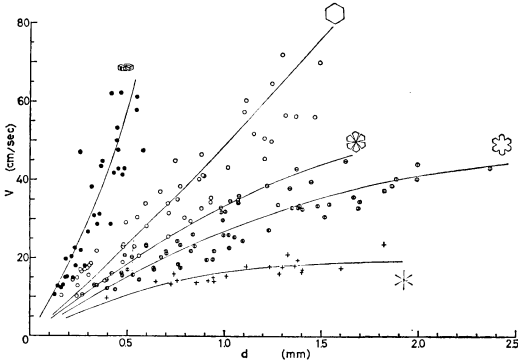
(1) 大きさが1.5mm以下では速度の値はどう変わってくるか。

(2) 樹枝よりもっと簡単な形の角板の速度はどうなるか。また角柱はどうか。

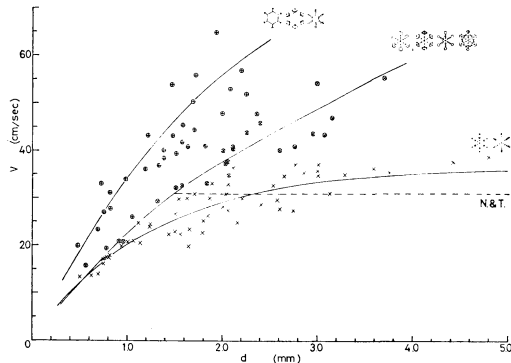
第1の点に関して板状結晶の大きさが増すと速度が一定値になることが流体力学的に予想できるかという点に対し、Magono (1954) は次のような考察を行った。樹枝を例にとると、(18) 式において  $V=St$  とおけるから  $v$  は、

$$v = \sqrt{\frac{2t(\sigma - \rho)g}{Ca\rho}} \quad (26)$$

となり、ここで  $t$  として観測値の  $0.0011\text{cm}$  を入れ  $Ca$  としては1.2を選ぶと、速度は一定値  $35\text{cm/sec}$  となり実測値とほぼ等しくなる。しかし厳密にいえば、 $Ca$  は  $Re$  の関数であるから、もっと小さい結晶を含めて全体として速度を議論する際には、 $Ca$  を一定と考えるのは不充分と思われる。そこで Jayaweera and Cottis (1969) や Kajikawa (1971) は模型円板の抵抗係数を使って、氷晶の場合と同様な方法で速度を計算して、Nakaya



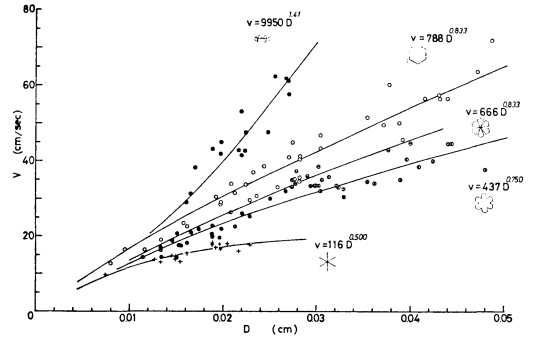
第9図 比較的小さい雪結晶の落下速度と大きさの関係、(Kajikawa, 1972による)



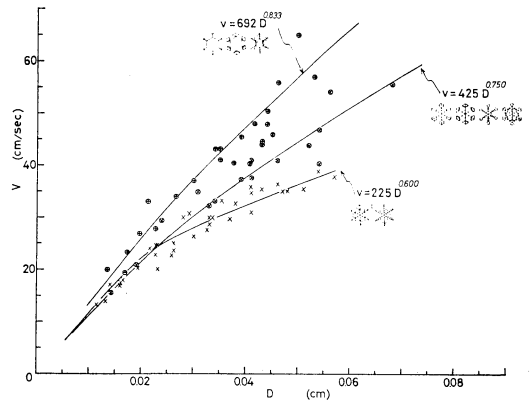
第10図 普通樹枝、角板付結晶および枝付角板の落下速度と大きさの関係 (梶川, 1972による)。破線は、Nakaya and Terada (1935) による樹枝の測定値。

and Terada (1935) の測定値と比較した。実測より計算値はやや小さくなったが、結晶の大きさが約 2 mm 以上では速度がほとんど一定値に近づく傾向が得られた。しかしここでさらに問題となるのは、Magono (1953) によって指摘されたように結晶が大きくなると、落下中にひらひらする振動運動が入ってくることである。この振動を起す限界の大きさは梶川 (1972) によると樹枝で、3.5mm、角板で1.3mm 程度となるようである。これらの点に関しては、佐粧 (1960) の用いた、ステレオ写真法などを用いてもっとくわしく観測する必要がある。

第2の点に関して、Kajikawa (1972) は落下中の結晶をストロボ写真にとって、種々の結晶形について1個ずつ速度を測定した。同時に結晶を融かして水滴とし質量をきめた。その結果を先ず大きさ (d) と速度 (v) の関係で示すと第9図のようになる。結晶形は厚板、角



第11図 雪結晶の落下速度 (v) と融解水滴直径 (D) との関係、図の中の式は各々の結晶形についての実験式で、単位は C.G.S. 単位を用いる。

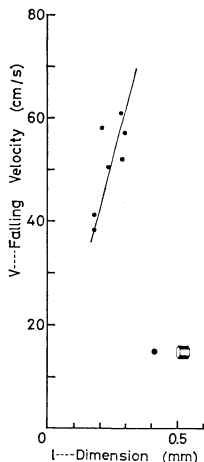


第12図 普通樹枝、角板付結晶および枝付角板の落下速度 (v) と融解水滴直径 (D) との関係、図中の式は実験式で C.G.S. 単位を用いる。

板、扇形、広幅および星状に分けた。また樹枝状とそれに近い結晶はまとめて第10図に示した。これらの分類と図中の略記号は全て Magono and Lee (1966) に従っている。これらの図の中の実線は、模型実験による円板の抵抗係数を使って計算された数値であるがほぼ実測値と合っているといえよう。この計算法は後述する。同じ大きさで同じような板状結晶でも形によって速度がかなり違っているのは主に質量のファクターがきいている他に、抵抗係数の結晶の形による違いも考えられる。そこで質量の指標として融解水滴直径 (D) をえらび、これと速度の関係を示したのが第11図である。

Fujiwara (1957) によると落下速度は融解水滴直径を用いて、次式で表わされる。





第13図 短角柱 ( $a$  軸の長さ  $d$  と  $c$  軸の長さ  $l$  との比がほとんど 1 に近いもの) の落下速度 (Kajikawa, 1972による).

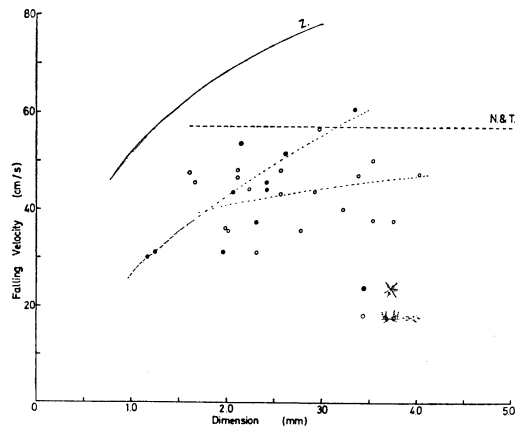
$$v = kD^n \quad (27)$$

第11図中には、この形の式を実験式としてあてはめたものが記入しており、実測値と良く合っている。単位は  $v$  に cm/sec,  $D$  に cm を用いる。第10図の破線は Nakaya and Terada (1935) の測定値である。これらの両者の測定条件は、気温  $-10^{\circ}\text{C}$  前後で高度 1,000m ほどの所であり、図では地上の値には換算していない。地上あるいは上空の値への換算法としては、Cornford (1965) によると近似的には次式で良いとされている。即ち速度は密度の平方根に反比例する。

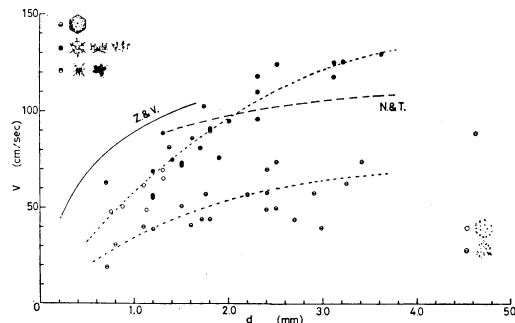
$$v = v_0 \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)^{1/2} \quad (28)$$

例えば第10図の値よりも、地上では 5% 程度小さい速度となってくる。第12図は樹枝状の結晶に対する融解直径と速度の関係である。また図中には (27) 式の形の実験式も示してある。これを見るとやはり同じ大きさでも普通樹枝、角板付樹枝、枝付角板の順に落下速度は大きくなっている。この原因もやはり質量の違いが主に起きていると考えられる。

次に角柱状結晶の測定値であるが、雲粒の付かない角柱の測定値は少ない。Kajikawa (1972) の短い角柱 ( $d$  と  $l$  の比がほとんど 1 に等しいもの) の測定値を第13図に示す。図中の実線は円柱の抵抗係数を使って計算された数値で実測とよく合っている。また軸比がこれより大きい角柱についてもこの計算法が適用できることが



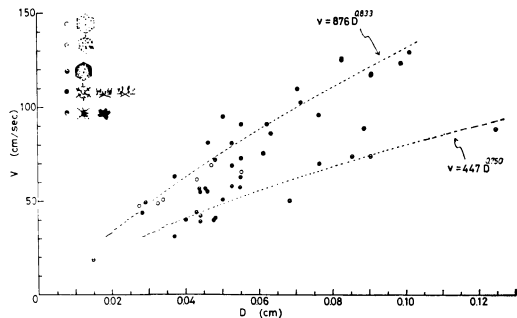
第14図 立体型雪結晶の落下速度と大きさの関係。N. and T. は Nakaya and Terada (1935) による測定値で Z. は Zikmunda (1972) による測定値である。



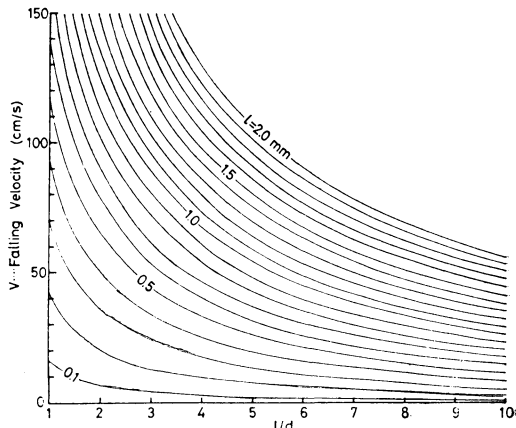
第15図 雲粒付雪結晶の大きさと落下速度との関係。N. and T. は Nakaya and Terada (1935) による測定値で、Z. and V. は Zikmunda and Vali (1972) による測定値。

同じく確かめられた。角柱状結晶の落下速度が、大きさと軸比の両者に依存することは、Jayaweera and Mason (1965), Jayaweera and Cottis (1969) および Kajikawa (1971) 等の模型実験からも指摘されている通りなので、速度は単純な実験式の形では表現できないと考えられる。雲粒付の角柱状結晶の落下速度とつづみ状結晶のそれは、Zikmunda and Vali (1972) によって測定されている。

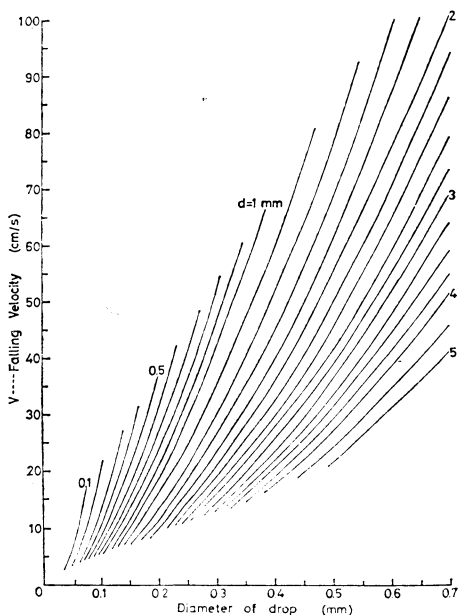
次に立体型結晶の測定値をまとめて第14図に示す。観測者によりかなり相違がみられるが、多分質量の違いが大きいと考えられる。さらに雲粒付結晶についての測定値をまとめると第15図となる。雲粒付六花とそれ以外のものとの2つに分けることができそうだが、



第16図 雲粒付雪結晶の落下速度 ( $v$ ) と融解水滴直径 ( $D$ ) との関係。図中の式は実験式で C.G.S. 単位を用いる。



第18図 角柱状雪結晶の落下速度。横軸は  $a$  軸の長さ ( $d$ ) と  $c$  軸の長さ ( $l$ ) との比で、 $l$  をパラメーターとして表わされている (Kajikawa, 1971による)。



第17図 板状結晶の落下速度の計算値。横軸は融解水滴直径で、大きさをパラメーターとして表わされている。結晶の大きさに対する厚さの比 ( $t/d$ ) が0.1以下の場合に適用できる (Kajikawa, 1971による)。

いずれもばらつきが大きい。点線はこの2種について、おのおの速度の平均値である。第16図は融解水滴直径と速度の関係に直したものであるが、前述の2種についておのおの実験式を示した。式の形は(27)式と同じである。

### 3.4. 雪結晶の落下速度計算法

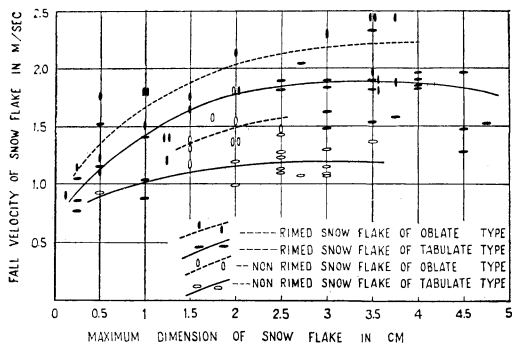
板状の雪結晶の場合には、基本的には氷晶の場合と同じであるが直径に対する厚さの比 ( $t/d$ ) が小さく0.1以

下とみなせる (例えば, Ono, 1969, Kajikawa, 1972) のでより簡単になる。第17図は融解直径と速度の関係を、大きさをパラメーターとして示したものであって、この図の値は、厚板、星状および普通樹枝を除いては第9図と第10図の実線のように良くあてはまる。厚板については  $t/d$  の比に対応する  $B_e$  と  $R_e$  の関係曲線を使う必要がある (第6図および第7図参照)。また星状と普通樹枝については、抵抗係数の値を List and Schemenauer (1971) にあるように、おのおのの形に対応する模型実験の値を用いる必要がある。第6図および第7図には彼等の実験による  $B_e$  と  $R_e$  の関係が示されており、これを用いて第9図と第10図における星状と樹枝の速度は計算された。

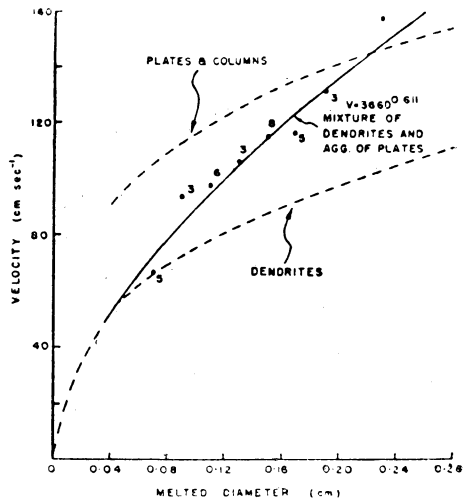
角柱状結晶の場合には、やはり氷晶のときと同様に有限円柱の  $C_d$  を用いて計算できる。例えば角柱の質量 ( $m$ ) と直径 ( $d$ ) および長さ ( $l$ ) との実験式としては、Higuchi (1956) による次式がある。

$$m = 1.3 \left( \frac{d}{2} \right)^2 l \quad (29)$$

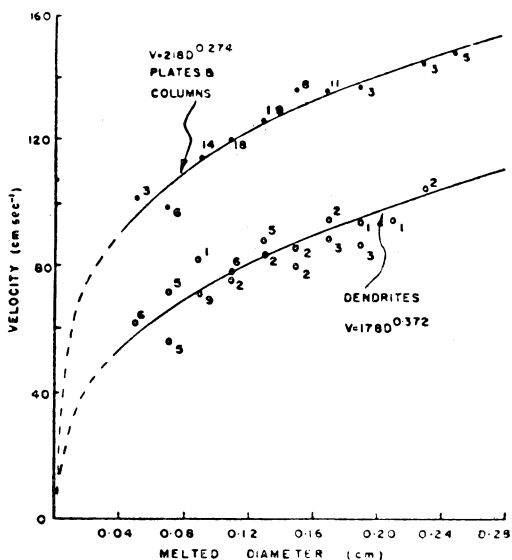
ここで  $m$  は  $mg$  で  $d$  および  $l$  は  $mm$  を単位とする。そこでこの式と(24)式、(7)式および第6図と第7図を用いると落下速度は、 $l/d$  に対し、 $l$  をパラメーターとして第18図のように表わされる。この値は角柱の実測と合うことが Kajikawa (1972) により確かめられている。



第19図 雪片の大きさと落下速度との関係 (Magono, 1953による).



第21図 雪片の落下速度 ( $v$ ) と融解水滴直径 ( $D$ ) との関係。樹枝と不規則角板集合からなる雪片の場合。測定時気温は第5表に示す。(Langleben, 1954による)



第20図 雪片の落下速度 ( $v$ ) と融解水滴直径 ( $D$ ) との関係。樹枝から成る雪片および角板と角柱からなる雪片の場合。測定時気温は第5表に示す (Langleben, 1954による)。

4. 雪片の落下速度

雪片の落下速度は、その空間密度の計算に関係するので単結晶にくらべて多くの観測がなされている。これらを見ると、落下速度は雪片の形や密度、さらには構成要素に変化が大きいため測定結果のばらつきが大きい。さらに雪片は落下中に振動運動 (例えば、Magono, 1953a および Sasyo, 1971 など) をするものがほとんどなのでさらに複雑となる。雪片の空間的な大きさの関数として速度を表わしたものに Magono (1953b) の研究がある。これを第19図に示す。これを見ると大きさによる速度の差よりも形や密度の影響が大きいことがわか

る。またこの結果をもとにして流体力学的な考察から速度を表わす式として次の式が得られた。

$$v = 132 \sqrt{\frac{r}{0.40 + 0.63r}} \quad (\text{雲粒付球状雪片}) \quad (30)$$

$$v = 194 \sqrt{\frac{r}{0.45 + 0.60r}} \quad (\text{球状雪片}) \quad (31)$$

ここで  $r$  は球状雪片としたときの半径である。さらに Magono and Nakamura (1965) は、もっと一般化した、速度と密度の関係式として次式を導いた。

$$v = 330(\sigma - \rho)^{1/4} \quad (32)$$

ここで  $\sigma$  は雪片の密度で  $\rho$  は空気密度である。また以上3つの式は単位として c.g.s. 単位を用いる。

一方、レーダ観測に利用する立場からは融解直径と速度の関係が望ましい。この形で速度を表わしたものとでは、例えば、Langleben (1954), Imai *et al.* (1955), Litvinov (1956) や梶川 (1974) などがある。第20, 21, 22図には Langleben の測定値を示した。彼はこれらの測定値を表わす実験式として次の一般形が成立することを示した。

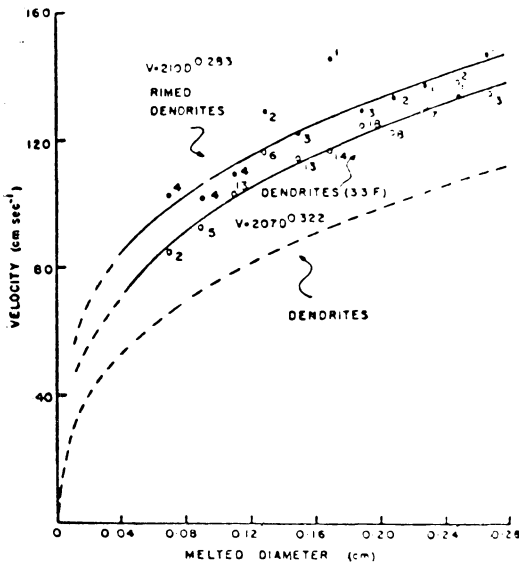
$$v = kD^n \quad (33)$$

ここで  $k$  と  $n$  は、地上気温や雪片の主たる構成要素 (凝集型) により決る定数である。この式の形は、3.3.

第5表 雪片の落下速度の一般式  $v=kD^n$  における定数  $k$  と  $n$  の値

$k$	$n$	融解直径 ( $D$ ) の測定範囲 (cm)	主たる構成要素	地上気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	観測者
178	0.372	0.05~0.24	樹 枝	-1.1~-2.2	Langleben (1954)
207	0.322	0.04~0.28	樹 枝	+0.6	Langleben (1954)
218	0.247	0.05~0.26	角板と角柱	-3.9	Langleben (1954)
366	0.611	0.06~0.24	樹枝と不規則角板集合	-3.3	Langleben (1954)
207	0.33	0.05~0.25	粉雪と立体角板集合	0	Imai et al. (1955)
210	0.283	0.04~0.28	雲粒付樹枝	-3.9	Langleben (1954)
394	0.667	0.05~0.33	雲粒付樹枝と濃密雲粒付樹枝	<0	Kajikawa (1974)
509	0.667	0.04~0.2	雲粒付立体型	<0	Kajikawa (1974)
787	0.750	0.07~0.18	霰状雪含む	<0	Kajikawa (1974)
87	0.16	0.04~0.16	六花状結晶, 単結晶も含む	-2~-7	Litvinov (1956)
115	0.16	0.03~0.15	立 体 型	-2~-6	Lituinov (1956)

節で述べたように, Fujiwara (1957) により理論的に導かれている。単位として c.g.s. 単位を用いた場合における  $k$  と  $n$  の数値を第5表にまとめてある。この表をみるとこれら2つの定数の値は雪片の凝集型や地上気温により広範囲に変わってくるのがわかる。従って、この (33) 式を利用するときには雪片の特徴によって、適した定数を与えなければならないことになる。

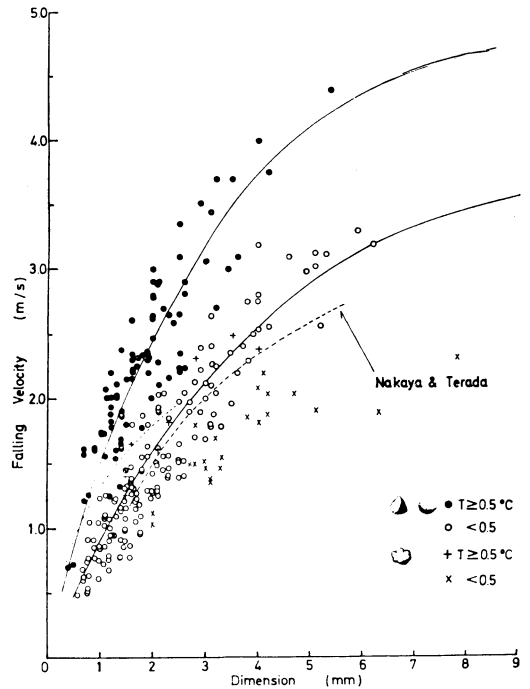


第22図 雪片の落下速度 ( $v$ ) と融解水滴直径 ( $D$ ) との関係。雲粒付樹枝および地上気温が +0.6 $^{\circ}\text{C}$  のときの樹枝からなる雪片の場合。(Langleben, 1954) による。

### 5. 霰と雪の落下速度

#### 5.1. 霰の落下速度

測定値としては 3.3 節で述べた Nakaya and Terada (1935) のものが唯一であったが最近では, Zikmunda



第23図 霰の大きさと落下速度との関係(梶川, 1973による)。点線は, Zikmunda and Vali (1972) による測定値で実線は紡錘状霰の模型実験による抵抗係数を用いて得られた計算値。また  $T$  は地上気温を示している。

第6表 霰の落下速度の測定条件

測定者	大きさ ( $d$ ) の範囲 (mm)	密度 ( $\sigma$ ) ( $\text{g/cm}^3$ )	気温 ( $T$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )
Nakaya and Terada (1935)	1.6~5.5	平均 0.125	-8~-15
市村, 藤原 (1964)	0.1~8	約 0.4	
Zikmunda and Vali (1972)	0.5~2	0.7~0.45 ( $0.5 \leq d < 1.0$ ) 0.45~0.25 ( $1 < d \leq 2$ )	-4~-6
梶川 (1973)	0.3~6	0.26~0.56 ( $T \geq 0.5$ ) 0.093~0.28 ( $T < 0.5$ )	-6.4~+2.6

and Vali(1972), 市村と藤原(1964) および梶川(1973) によって測定されている。Fujiwara (1957) によっても指摘されているように、霰の落下速度はその密度に大きく左右されると考えられる。霰の密度については、Nakaya and Terada の測定によると 0.125 に対し、例えば Maruyama (1968) や今井 (1954) の測定によると 0.4 となっている。従って同じような形で同じ大きさでもこれら両者では速度の差は大きくなると予想される。第23図に現在までの測定結果をまとめて示した。これは大きさと速度の関係であるが、第24図には融解直径と速度の関係に直してある。霰の形についてみると、予想されるごとく六花霰は他の2種より小さくなる。また、塊状と紡錘状霰は差が見られないのでまとめてある。密度や他の測定条件は第6表に、観測者別に示してある。第23図の実線は後述する計算法で求められた数値で梶川 (1973) による地上気温で分けた2種類の測定値とかなりよく合っていると見られる。また第24図の実線は、(27) 式の形をあてはめた実験式である。次に落下速度の計算法について述べる。

紡錘状霰がその底面を下にし、軸を垂直にして落下するときには次式が成立する。塊状霰についても同じ式が成立する。

$$V(\sigma - \rho)g = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (34)$$

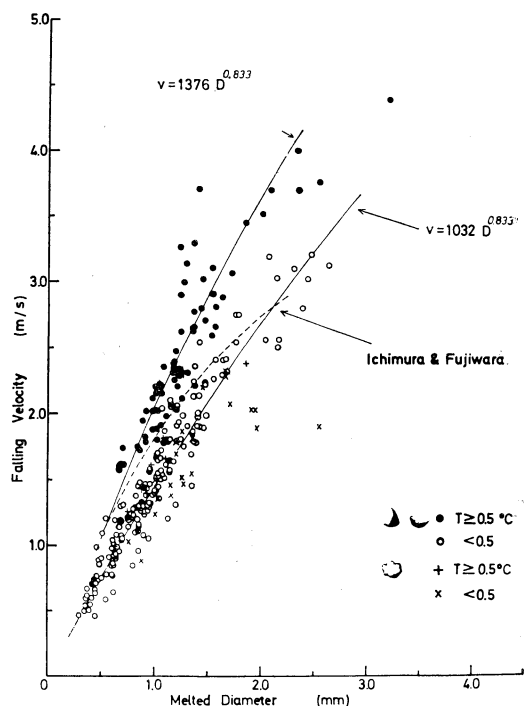
ここで記号は今までに述べた通りで (ただし  $d$  としては、底面の直径をとる)、 $\sigma$  に対し  $\rho$  を省略し、霰の質量を  $m$  とすると (この  $m$  は融解直径より計算できるしまた密度を与えれば大きさを使って当然計算できる)、次式のように変形される。

$$mg = \frac{\pi}{8} \rho C_d d^2 v^2 \quad (35)$$

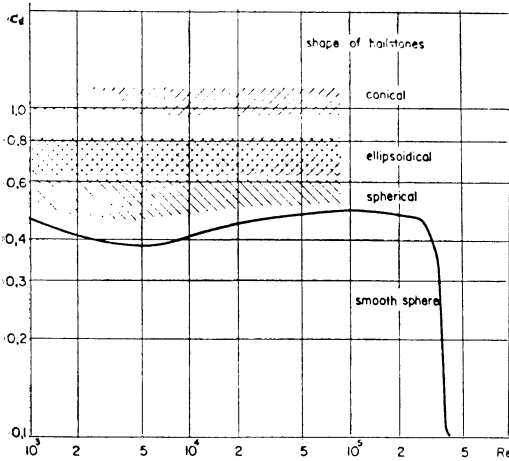
この式と  $R_e$  を与える (7) 式とを組合せると  $B_e$  は

$$B_e = C_d R_e^2 = \left(\frac{8g}{\pi \rho v^2}\right) m \quad (36)$$

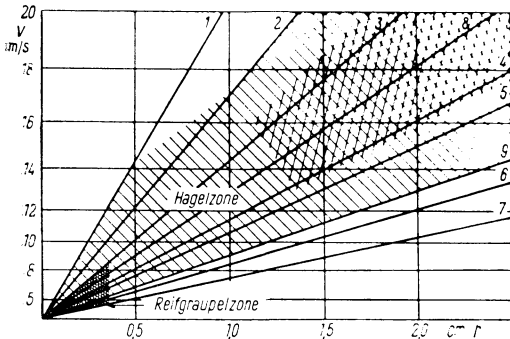
となる。右辺は計算できる量なので、例えば紡錘状霰の模型実験による抵抗係数 (List and Schemenauer, 1971) を使って第2図と第3図のように  $B_e$  と  $R_e$  の関係を求めておけば、先ず  $B_e$  を計算し、これらの図から  $R_e$  を決めてこれを (7) 式に代入し速度が計算できることになる。以上の計算法に対して問題となるのは次の2点である。先ず霰の落下中の姿勢の問題であるが、Magono (1953 a) の指摘のように霰は底面を下にして軸をかたむけて落下するので、先の計算式では軸を垂直と考えているしさらに抵抗係数も模型霰が軸を垂直にしていると



第24図 霰の融解直径 ( $D$ ) と落下速度 ( $v$ ) との関係。図中の式は実験式で C.G.S. 単位を用いる。地上気温による2種の分類はその密度の差に対応している。



第25図 各種の雹レイノルズ数と抵抗係数との関係 (List, 1961による)



第26図 各種の雹の大きさと落下速度の関係 (List 1959による). 横軸は雹の平均半径 ( $r$ ) を示す. 1: 球状, 密度 ( $\sigma$ )=0.8g/cm<sup>3</sup>, 抵抗係数 ( $C_d$ )=0.5; 2: 球状,  $\sigma$ =0.8,  $C_d$ =0.7; 3: 球状,  $\sigma$ =0.8,  $C_d$ =1.0; 4: 球状,  $\sigma$ =0.5,  $C_d$ =1.0; 5: 紡錘状, 頂角90°,  $\sigma$ =0.8,  $C_d$ =0.8; 6: 紡錘状, 頂角90°,  $\sigma$ =0.5,  $C_d$ =0.8; 7: 紡錘状, 頂角70°,  $\sigma$ =0.5,  $C_d$ =1.0; 8: 回転楕円体,  $\sigma$ =0.8,  $C_d$ =0.7; 9: 回転楕円体,  $\sigma$ =0.8,  $C_d$ =1.4 となっており, 斜線により霰の部分と雹の部分が表示されている.

きの値を使っている故に計算結果に影響してくると思われる。第2に  $R_e$  が200程度をこえると落下中に振動を伴ってくる(梶川, 1973など)が, この現象は, Jayaweera and Mason (1965) や List and Schemenauer (1971) の模型実験からも予想されることである。この点に関しては, 霰の成長機構とも関係するので天然の観測を多く行なう必要がある。

5.2. 雹の落下速度

雹の落下速度を計算する場合には, 他の降水粒子と同様に抵抗係数を定めることが必要である。各種の形の模型雹や人工の雹さらには天然の雹を用いて風洞実験から抵抗係数を用める試みは, List (1959) や Bailey and Macklin (1968) などにより行われた。第25図は List によって測定された抵抗係数で各種の形について示されている。 $R_e$  は $10^3$ ないし $10^5$ 程度になると考えられるので, 抵抗係数はほとんど一定となるが, 落下姿勢や表面の roughness によってもかなり変化をもつと考えられる。第26図はいろいろなモデルの雹に対する大きさと落下速度の関係を示している。落下速度を計算する場合には抵抗係数をほぼ一定とおけることから, 密度が与えられれば (34) 式が利用できると考えられる。最近, Knight and Knight (1970 および 1973) によっても重ねて指摘されているように霰を含めて雹の落下運動の問題については, その成長機構に関連して重要となっているので多くの研究が望まれる。

6. あとがき

降水粒子をいくつかに分けて, その落下速度について, 主な実測値の紹介と計算法を述べてきた。しかし, 落下速度あるいは落下運動が密接に関連する事項については, ごく一部に簡単にしか触れていないのは充分でないと思われる。また, 著者の不勉強から中には, 雹の部分のようにあまりに簡単にすませたところもあるし, さらには, わかりにくい説明や誤解もあると考えられるのでこの点について御教示頂ければ幸いに思います。

終りにこの稿の執筆を推められ, また御閲読頂いた気象大学の駒林教授に感謝の意を表します。

文 献

Bailey, I.H. and W.C. Macklin, 1968: The surface configuration and internal structure of artificial hailstones, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **94**, 1-11.  
 Beard, K.V. and H.R. Pruppacher, 1969: A determination of the terminal velocity and drag of small water drops by means of a wind tunnel, *J. Atmos. Sci.*, **26**, 1066-1072.  
 Best, A.C., 1950: Empirical formulae for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **76**, 302-311.  
 Cornford, S.G., 1965: Fall speeds of precipitation element, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **91**, 91-94.

- Foote, G.B. and P.S. Du Toit, 1969: Terminal velocity of raindrops aloft, *J. Appl. Meteor.*, **8**, 249-253.
- Fujiwara, M., 1957: Note on collision frequency of snowflakes. 75th Anniv. Vol., *J. Meteor. Soc. Japan*, 57-64.
- 藤原美幸, 1967: レーダ気象のための雲物理学, 気象研究ノート, **90**, 157-168.
- Fukuta, N., 1969: Experimental studies on the growth of small ice crystals. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 522-531.
- Goldstein, S. edit., 1938: *Modern development in fluid dynamics*. vol. **1**, Oxford Univ. Press. 16.
- Gunn, R. and G.D. Kinzer, 1949: The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, *J. Meteor.*, **6**, 243-288.
- Harimaya, T., 1968: On the shape of cirrus uncinus cloud: a numerical computation. *Studies of cirrus clouds*. Part III, *J. Meteor. Soc. Japan*, **46**, 272-279.
- Higuchi, K., 1956: A new method for the simultaneous observation of shape and size of a large number of falling snow particles, *J. Meteor.*, **13**, 274-278.
- 市村市太郎・藤原美幸, 1964: 霰の落下速度の観測. 成雨機構研究報告書, **2**, 89-94.
- 今井一郎, 1954: 季節風による降雪の研究, 気象集誌, **32**, 10-32.
- Imai, I., M. Fujiwara, I. Ichimura and Y. Toyama, 1955: Radar reflectivity of falling snow, *Papers Meteor. Geophys.*, **6**, 130-139.
- Jayaweera, K.O.L.F. and B.J. Mason, 1965: The behaviour of freely falling cylinders and cones in a viscous fluid, *J. Fluid Mech.*, **22**, 709-720.
- Jayaweera, K.O.L.F. and R.E. Cottis, 1969: Fall velocities of plate-like and columnar ice crystals, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **95**, 703-709.
- Jayaweera, K.O.L.F. and Ryan, 1972: Terminal velocity of ice crystals, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **98**, 193-197.
- Kajikawa, M., 1971: A model experimental study on the falling velocity of ice crystals, *J. Meteor. Soc. Japan*, **49**, 367-375.
- Kajikawa, M., 1972: Measurements of falling velocity of individual snow crystals, *J. Meteor. Soc. Japan*, **50**, 577-584.
- 梶川正弘, 1972: 雪結晶の落下速度の測定(2), 1972年度気象学会秋季大会予稿集, p. 74.
- 梶川正弘, 1973: 霰の落下速度の観測, 1973年度気象学会春季大会予稿集, p. 61.
- Kajikawa, M., 1973: Laboratory measurement of falling velocity of individual ice crystals. *J. Meteor. Soc. Japan*, **51**, 263-272.
- 梶川正弘, 1974: 雪片の落下速度の測定, 秋田高専研究紀要, 第9号, 83-87.
- Knight, C. and N. Knight, 1970: The falling behavior of hailstones, *J. Atmos. Sci.*, **27**, 672-681.
- Knight, C. and N. Knight, 1973: Conical graupel, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 118-124.
- Koenig, L.R., 1969: Numerical modeling of ice deposition, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 226-237.
- Langleben, M.P., 1954: The terminal velocity of snow flakes, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **80**, 174-181.
- List, R., 1959: Zur Aerodynamik von Hagelkornern., *Z. angew. Math. Phys.*, **10**, 143-159.
- List, R., 1961: On the growth of hailstones. *Int. Congress of cloud Phys.*, Verona, Italy, 29-38.
- List, R. and R.S. Schemenauer, 1971: Free-fall behavior of planar snow crystals, conical graupel and small hail, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 110-115.
- Litvinov, I.V., 1956: Determination of the steady-state velocity of falling snow particles, *Izv. Akad. Nauk. SSSR Geophys. Ser.* **7**, 853-856.
- 孫野長治, 1953a: 雪片の落下速度, 雪氷の研究 **I**, 19-28.
- Magono, C., 1953b: On the growth of snow flake and graupel, *Sci. Rep. Yokohama Nat. Univ. Sec. I*, No. **2**, 18-40.
- Magono, C., 1954: On the falling velocity of solid precipitation elements, *Sci. Rep. Yokohama Nat. Univ. Sec. I*, No. **3**, 33-40.
- Magono, C. and T. Nakamura, 1965: Aerodynamic studies of falling snowflakes, *J. Meteor. Soc. Japan*, **43**, 139-147.
- Magono, C. and C.W. Lee, 1966: Meteorological classification of natural snow crystals. *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser.*, **VII**, **2**, 321-335.
- Magono, C., K. Kikuchi and M. Kajikawa, 1967: Distribution of low-level cloud rows and three dimensional analysis of cirrus clouds—cloud over the Pacific Ocean: Part II, *J. Meteor. Soc. Japan*, **45**, 467-477.
- Maruyama, H., 1968: On conical graupel and its density, *Papers Meteor. Geophys.*, **19**, 101-108.
- Mason, B.J., 1971: *The physics of clouds*. second ed. Oxford Univ. Press. 592-602.
- Nakaya, U. and T. Terada, Jr., 1935: Simultaneous observations of the mass, falling velocity and form of individual snow crystals, *J. Fac. Sci. Hokkaido Imp. Univ.*, Ser. **II**, **1**, 191-200.
- Nakaya, U., 1954: *Snow crystals, natural and artificial*. Harvard Univ. Press. 108-116.
- Ono, A., 1969: The shape and riming properties

- of ice crystals in natural clouds, *J. Atmos. Sci.*, **20**, 138-147.
- Podzimek, J., 1968: Aerodynamic conditions of ice crystal aggregation, *Proc. Int. Conf. Cloud Physics*, Toronto, 295-299.
- Pruppacher, H.R. and K.V. Beard, 1970: A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **96**, 247-256.
- Pruppacher, H.R. and R.L. Pitter, 1971: A semi-empirical determination of the shape of cloud and rain drops. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 86-94.
- 佐糺純男, 1960: 静止大気中を落下する紙片の姿勢に就いて, *気象集誌*, **38**, 125-133.
- Sasyo, Y. 1971: Study of the formation of precipitation by the aggregation of snow particles and the accretion of cloud droplets on snowflakes. *Papers Meteor. Geophys.* **22**, 69-142.
- Yagi, T., 1970: Measurement of the fall velocity of ice crystals drifting in supercooled fog, *J. Meteor. Soc. Japan*, **48**, 287-292.
- Zikmunda, J. and G. Vali, 1972: Fall patterns and fall velocities of rimed ice crystals. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1334-1347.
- Zikmunda, J., 1972: Fall velocities of spatial crystal and aggregates, *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1511-1515.
- 佐糺純男, 1960: 静止大気中を落下する紙片の姿勢



太田久雄・長尾 隆著

## 公害と気象

### —観測と調査の実際—

地人書館, 1974, A 5, 本文 242P, 索引 4P

この数年、環境問題が世界的に重視されるようになり、わが国でもこれに関係した書物は数多く出版されている。本書は公害と気象という表題になっているが、内容は都市や工場などの汚染源周辺地域で問題となっているいわゆる高濃度大気汚染と気象との関係を、観測や調査をしようとする人を主として意識して書かれた本である。

内容は3編に分けられ、Ⅰ. 大気汚染と気象、Ⅱ. 測定、Ⅲ. 調査の実際となっている。Ⅰ. は基礎編ともいえるべきもので、章を列挙してみると、総論、大気汚染物質と汚染の実態、大気汚染に伴った気象の変化、煙の拡

散、高煙変化による汚染の変化、局地的な気流とそれによる汚染質の移動、都市の大気汚染である。Ⅱ. は総論、測定機器と観測方法、上空の気象および汚染物質調査、の3章で、汚染自体の観測・測定法はⅠ. の中で部分的に測定機の説明がされている関係もあって、Ⅱ. の中では、主に気象関係の観測に重点が置かれている。Ⅲ. は単一地点観測値の解析、各種等値線の引き方と汚染との関係法、汚染の地域分布の調査法、大気汚染の気象予測、拡散計算の章から成っている。

著者はいずれも気象関係の出身で、千葉県の公害研究所や気象コンサルタントとして、大気汚染気象調査の第一線に立っているだけに、日常の体験にもとづいた書き方がされているから、現場でこの種の調査を手がけようとする人にはよい手引となるだろう。限られた頁数にこれだけのことを盛込むのだから、全体の書き方が、概説的になったのは止むを得まい。大気汚染気象に馴染みの薄い気象関係者は一読すると、現象の実態がよくわかる。紹介者の欲を言えば、本書は気象に重点が大きいかかっているが、もう少し大気汚染について詳しく書かれているとよかったという気がしないでもない。(河村 武)