

降雪粒子の落下運動に関する研究

—1998年度日本気象学会賞受賞記念講演—

梶 川 正 弘*

1. はじめに

この度は日本気象学会賞をいただき、身に余ることと、たいへん重く受けとめております。これまでの研究を振り返ってみますと、多くの方々のご協力なくしては出来なかったものが数多くあります。あらためて厚くお礼申し上げます。

受賞の対象となりました氷晶、雪結晶、雪片、霰などの降雪粒子の落下運動に関する諸問題は、それら粒子自体の成長や相対運動に伴う雲の微物理過程のみならず、雲力学、光散乱過程、放射過程など多様な物理過程に関係するものです。ここでは、落下速度と落下姿勢・落下パターンに絞って、興味深い事項や現在の問題点について述べてみたいと思います。用語として、落下姿勢は粒子のある対称軸がとる空間方位を指し、落下パターンは安定運動に落下中の振動や宙返りなどの不安定運動を加えた全体を指します。また、落下運動はそれらに落下速度も含めた総括的な表現として用いております。

私の研究の出発点のひとつは、Nakaya (1954) による雪結晶の落下速度の測定結果を示す図にありました (第1図)。この測定結果に興味を持ったのは、サイズで約2 mm以上の樹枝、立体樹枝および粉雪 (主に交差角板) の落下速度がほぼ一定になっていることでした。さらに、それ以下のサイズでは空気抵抗の変化によるとしても、どのように落下速度が減少していくのかという点が気にかかりました。そこで、模型実験と実測の両面からこれらの問題に取り組むことにしました (以下に、これまで得られた主な研究結果と興味深い事項および残されている課題などを中心に、解説ス

タイルで記述いたします)。

2. 氷晶の落下速度について

(1) タンク実験による氷晶モデルの抵抗係数と落下姿勢

サイズ100 μm 程度以下の氷晶の落下速度を計算で求めようとする、レイノルズ数 Re が0.5~0.01程度の領域で、氷晶モデルの抵抗係数 C_d を知る必要がある。それまで低 Re 領域における実験データが少なかったため、グリセリン水溶液を満たした容器の中をモデル粒子を落下させる実験 (タンク実験) を行った (Kajikawa, 1971)。

角板状氷晶のモデルとして直径と厚さの比を変えたアルミ円盤を用い、 Re が約200~0.004までの C_d を決定した。 Re で0.1はサイズ約35 μm の角板氷晶の落下運動に相当する。角柱状氷晶のモデルは細いガラスとアルミ円柱を用い、直径と長さの比を変えて、 Re が約100~0.004までの範囲で C_d を決定した。 Re で0.1はサイズ約50 μm の無垢角柱 (中身の詰まった角柱) の落下運動に相当する。

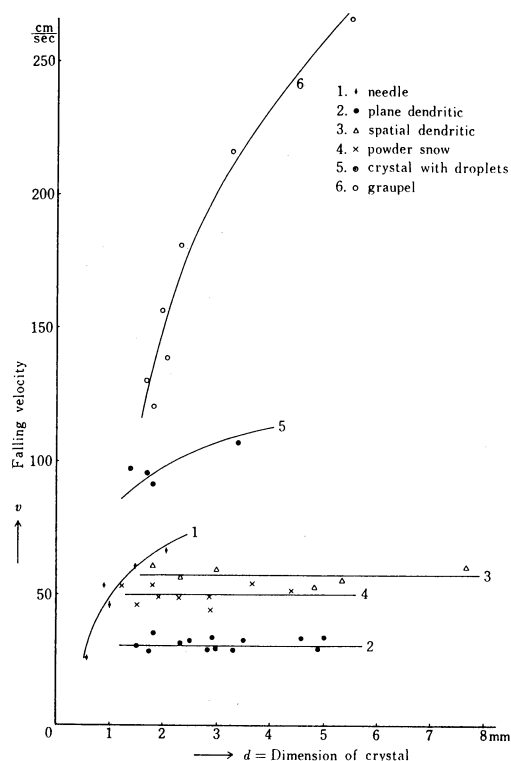
これらの実験では、円盤の場合に抵抗最大の落下姿勢 (円盤の面が水平方向の Flatwise 方位の姿勢) とは異なる Edgewise 方位の落下姿勢 (円盤の面が鉛直方向で横向きの姿勢)、円柱で通常の Roundwise 方位の落下姿勢 (円柱の長軸が水平方向の姿勢) とは異なる Flatwise 方位の落下姿勢 (円柱の長軸が鉛直方向の姿勢) が、それぞれ $Re=0.15$ 以下と $Re=0.1$ 以下の低 Re 領域で確認された。このような落下姿勢では流体から受ける抵抗が小さくなり、同一粒子でも落下速度は相当大きくなる。

低 Re 領域において抵抗の小さくなる落下姿勢の存在は、他の実験でも指摘されているが (例えば、Willmarth *et al.*, 1964; Happel and Brenner, 1983), こ

* 秋田大学工学資源学部。

—1998年10月13日受領—

—1998年12月4日受理—



第1図 Nakaya (1954) による雪結晶の落下速度 v とサイズ d との関係。結晶の形は、1 から順に針状、平面樹枝、立体樹枝、粉雪、雲粒付および霰。

のような姿勢の存在する Re の上限に関しては、実験毎に結果の数値が大きく異なっている。この差の原因として、用いた流体とモデル材料の密度比の違いが考えられる (Clift *et al.*, 1978)。なお、空気中においてはこのような低 Re 領域の実現が困難なため、実験的研究は行われていない。

Jayaweera and Cottis (1969) も Re が 0.1 以上の領域で著者と同様の実験を行っていたが、低 Re 領域での落下姿勢には言及していない。List and Schemenauer (1971) は、円盤よりも天然の雪結晶に近い形のモデルや霰のモデルを用いたタンク実験を行い、それらの C_d を求めると共に、落下パターンを議論する重要な研究結果を同時期に発表している。

(2) 人工氷晶の落下速度の測定値と計算値との比較
低温室内に設置した実験装置内で人工的に氷晶を作り、ストロボ光照明を利用して個々の落下速度を実測した (Kajikawa, 1973)。ただし、この方法では氷晶が

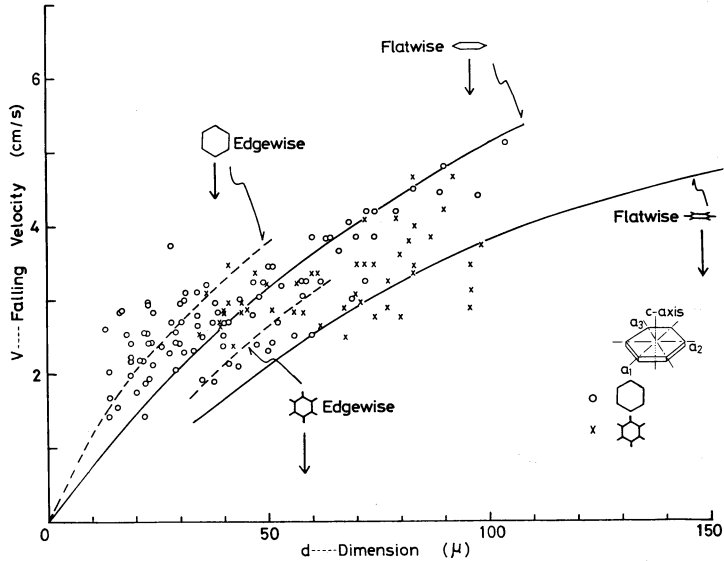
光点として撮影されるので、落下姿勢は判別できない。落下姿勢の判別は、落下速度の数値から、上述の抵抗係数と落下姿勢の関係を利用して、間接的に推定することになる。落下速度の測定結果を第2図と第3図に示す。第2図の実線は、角板状氷晶について c -軸鉛直 (Flatwise 方位) の落下姿勢を仮定し、先述の薄い円盤の C_d を利用した計算値で、破線は c -軸水平 (Edgewise 方位) の落下姿勢を仮定した同様の計算値である。この図によると、角板ではサイズ $35 \mu\text{m}$ 以下 ($Re=0.1$ 以下)、枝付き角板でサイズ $50 \mu\text{m}$ 以下 ($Re=0.1$ 以下) で、実測値は Flatwise 方位の落下姿勢を仮定した計算値より大きいものが多くなる。このことは、サイズの小さい範囲における Edgewise 方位の落下姿勢の存在を示唆している。

角柱状氷晶の測定結果を示した第3図で、実線は c -軸水平 (Roundwise 方位) の落下姿勢を仮定し、先述した有限の長さの円柱の C_d を利用した計算値で、破線は c -軸鉛直 (Flatwise 方位) の落下姿勢を仮定した同様の計算値である。実測値と計算値の比較から、無垢角柱についてはサイズ $40 \mu\text{m}$ 以下 ($Re=0.1$ 以下)、中空角柱については実測値は少ないが、サイズ $50 \mu\text{m}$ 以下 ($Re=0.1$ 以下) で、Flatwise 方位の落下姿勢も実測データの中に含まれていると考えられる。ここで用いた落下速度計算法は一般的なものであるが、詳細は梶川 (1974) を参照して頂きたい。

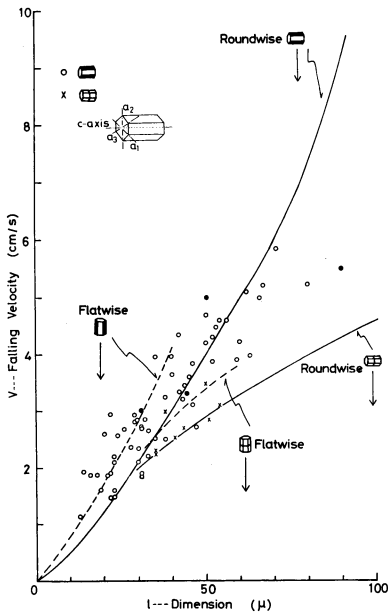
ハロー現象に関与する結晶の形・サイズと巻雲内での姿勢については、未解決の問題点が残されている。例えば、 22° ハローはランダム方位する氷晶の2つの結晶柱面 (60° プリズム) による可視光の屈折で発現するとされている (Tricker, 1970)。この通説に対して Fraser (1979) は、サイズ $12 \sim 40 \mu\text{m}$ の遷移領域 (角柱状氷晶がブラウン運動でランダム方位をとるサイズより大きく、 c -軸水平の一定方位をとるサイズより小さい領域) でこのハロー形成が可能とした。一方、Tape (1994) によるシミュレーションでは、このハロー形成には必ずしもランダム方位を必要としていない。著者の落下速度の実測結果は、前者の遷移領域の考えを支持している。この他にも氷晶の落下運動とハロー現象や粒子間の衝突・付着現象 (Kajikawa and Heymsfield, 1989) などとの関係には、興味深い問題が数多く残されている。

3. 雪結晶の落下運動について

一個一個の雪結晶の3次元的落下運動は、ステレオ



第2図 板状結晶の落下速度 v とサイズ d との関係 (Kajikawa, 1973を一部改変). 白丸印は角板で×印は枝付角板. 実線と破線は、それぞれ落下姿勢が Flatwise 方位と Edgewise 方位の薄い円盤の抵抗係数を用いた計算値. 板状結晶の結晶軸 (c-軸および3本の a-軸) を図中に示す.



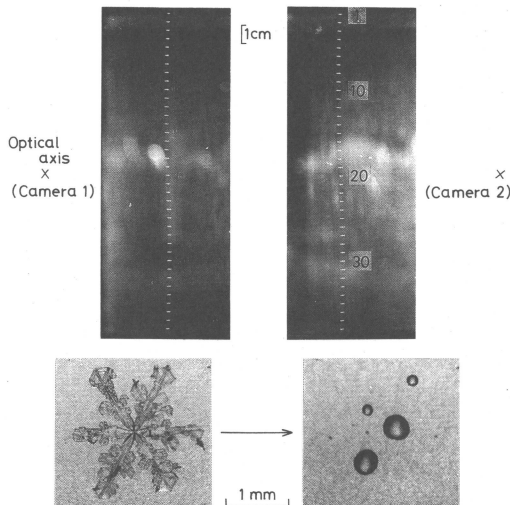
第3図 角柱状結晶の落下速度 v とサイズ l との関係 (Kajikawa, 1973を一部改変). 白丸印は無垢角柱 (中身の詰まった角柱) で×印は中空角柱. 実線と破線は、それぞれ落下姿勢が Roundwise 方位と Flatwise 方位の有限長の角柱の抵抗係数を用いた計算値. 角柱状結晶の結晶軸 (c-軸および3本の a-軸) を図中に示す.

写真解析の手法により観測された (第4図, 第5図). この方法では結晶の落下速度とサイズおよび質量が同時に測定されるので, 落下速度の実測値と計算値との精度良い比較も可能である (Kajikawa, 1972; 1975 a; 1992). 本稿で使用した結晶形の記号は Magono and Lee (1966) によるもので, まとめて第1表に示す.

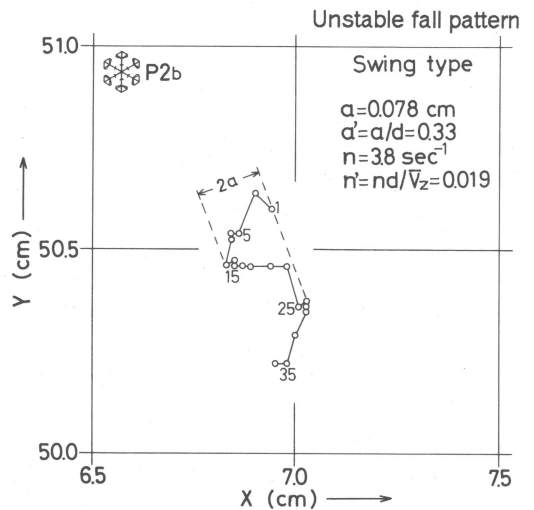
(1) 板状雪結晶の落下速度とその変動

いわゆる樹枝状結晶の落下速度 (落下運動の鉛直成分の平均値) を第6図に示す. 破線で示した Nakaya and Terada, Jr. (1935) の実測値と比較すると, サイズで3 mm を越えるところから両者の差が大きくなる. これは測定した結晶の質量の違いによると考えられる. この図の実線は薄い円盤の抵抗係数を利用した計算値であるが, 普通樹枝では計算値が実測値より小さく, 角板に近い形の結晶ほど実測値に近くなるようである. 抵抗係数として, List and Schemenauer (1971) の実験結果を利用するとさらに近似は良くなる. また, 結晶の断面積を考慮する計算法でも近似は改善される (Heymsfield and Kajikawa, 1987).

樹枝状結晶の落下速度に対する雲粒付着の影響は顕著であり, これらの落下速度を単純な仮定のもとで計算から求めると誤差が大きくなる (例えば, Geresdi, 1998). 比較的誤差の小さい落下速度の推定方法として



第4図 上段は発光間隔1/100秒のストロボ光で撮影された落下中の雪結晶のステレオ写真(落下速度:47.7 cm/s, Kajikawa, 1992). 下段左は落下した結晶(扇形付六花, サイズ:2.4 mm). 下段右は融解後の半球状水滴(質量:0.038 mg).



第5図 第4図の落下運動を水平面へ投影した軌跡(Kajikawa, 1992). この不安定運動の落下パターンはジグザグ型. a : 振幅, a' : 無次元振幅, d : サイズ, n : 振動数, n' : 無次元振動数, V_z : 落下速度.

第1表 本稿で用いた雪結晶の結晶形の記号と名称 (Magono and Lee, 1966 より抜粋).

記 号	名 称		
P1a	角板	正規六花	板状結晶
P1b	扇形		
P1c	広巾六花		
P1d	星状六花		
P1e	普通樹枝		
P1f	羊齒状六花		
P2a	角板付六花	変遷六花	板状結晶
P2b	扇形付六花		
P2c	角板付樹枝		
P2d	扇形付樹枝		
P2e	板付角板		
P2f	扇形付角板		
P2g	樹枝付角板		
P6d	立体樹枝付樹枝	立体型	霰粒付結晶
P7b	放射樹枝	放射型	
R1d	霰粒付六花	霰粒付結晶	
R2b	濃密霰粒付六花	濃密霰粒付結晶	
R2c	濃密霰粒付立体六花		
R3a	六花霰状雪	霰状雪	
R3b	塊状霰状雪		
R4a	六花霰	霰	
R4b	塊状霰		
R4c	紡錘状霰		

は、雲粒付着率を考慮した実験式を用いることが考えられる (Kajikawa, 1998).

落下速度の鉛直および水平成分の変動について、その標準偏差をみると、前者では非常に小さいが(鉛直成分の平均値の1~3%), 後者ではかなり大きい(水

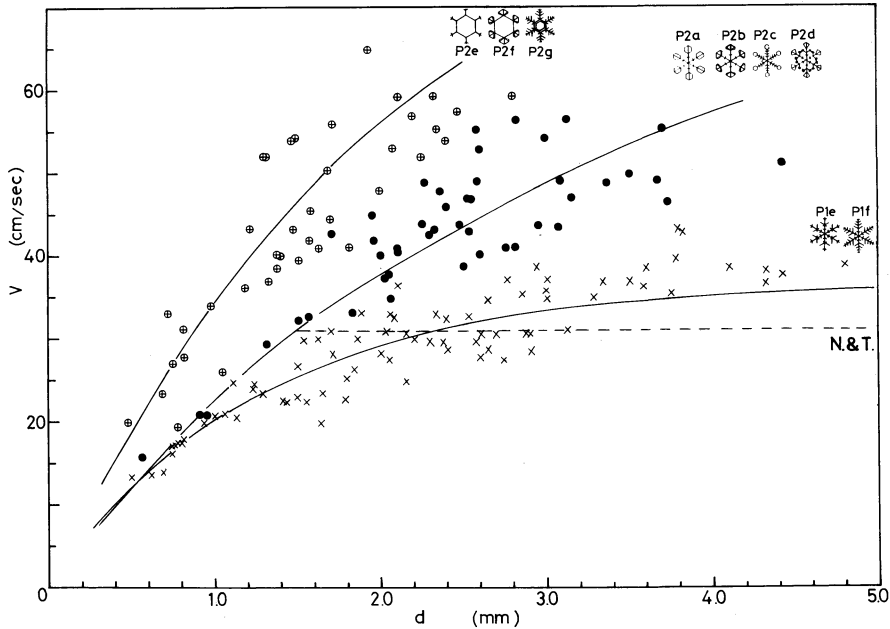
平成分の平均値の約50%). このことは、ほぼ同じ形とサイズをもつ板状結晶の不規則な集合過程において、落下速度の水平成分の変動が重要な役割を果たしていることを示唆する.

(2) 板状雪結晶の落下パターン

板状雪結晶の落下姿勢は、基本的にc-軸鉛直のFlatwise方位であるが、サイズがある限度以上に大きくなると、振動(Fluttering)や回転などの不安定運動が始まる. これらの複雑な運動は、結晶相互の衝突・付着による雪片形成や雲粒捕捉率に影響を与える.

主な板状結晶について、全てが不安定運動を起こす限界のサイズと Re を第2表に示す. 詳細に解析すると、不安定運動が始まる限界は、ベスト数($Be=C_a Re^2$)と結晶の無次元慣性モーメント I^* (Stability number)によりほぼ決まることが分かった(第7図). 即ち、質量が同じならば結晶のa-軸に関する慣性モーメントの小さい方が不安定運動を起こしやすい.

不安定運動を水平面へ投影した軌跡によりその落下パターンを分類すると、第3表に示すように4種に分類することが出来た. ここで、回転と螺旋は観測方法からみて、周期の違いにすぎないと考えられる. したがって、不安定運動の落下パターンは基本的に非回転(Flutteringあり)、ジグザグ(Flutteringあり)および回転または螺旋(Flutteringあり)の3種ということに



第6図 樹枝状雪結晶の落下速度 V とサイズ d との関係 (Kajikawa, 1975a). 実線は薄い円盤の抵抗係数を用いた計算値, 破線は Nakaya and Terada, Jr. (1935) による樹枝の測定値, 結晶のスケッチと記号は Magono and Lee (1966) による (第1表).

第2表 全ての結晶が不安定落下運動を示す下限のサイズ d とレイノルズ数 Re (Kajikawa, 1992).

Crystal Shape	d (mm)	Re
P1a	1.23	47.0
P1b	1.50	43.0
P2g, P2e, P2f	1.68	60.7
P1c	1.94	53.7
P2c, P2a, P2b, P2d	2.29	77.9
P1d	2.55	59.9
P1e, P1f	3.50	90.7

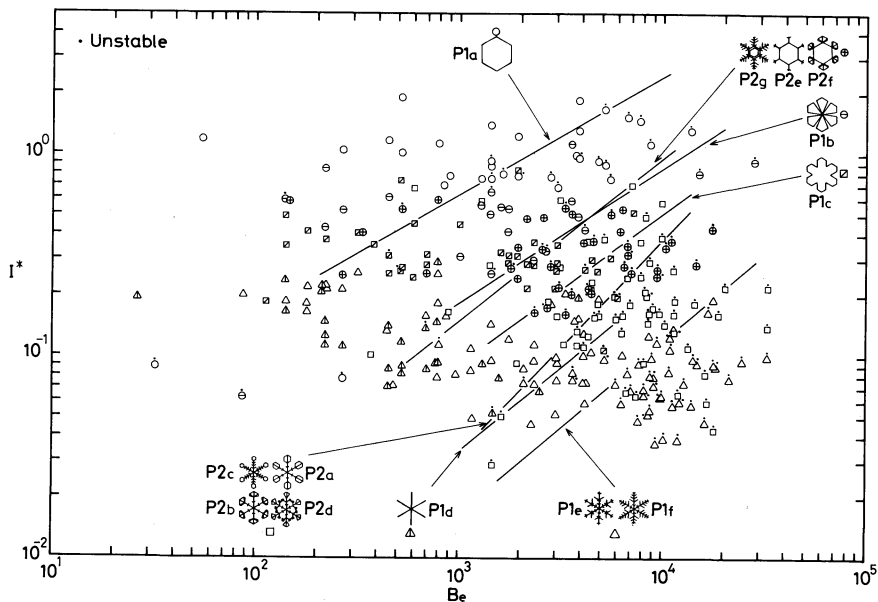
第3表 板状結晶の不安定落下パターンの分類と割合 (Kajikawa, 1992を一部改変).

TYPE Crystal Shape	Nonrotation	Swing	Rotation	Spiral
P1a, P1b	1	0	1	0
P2g, P2e, P2f	4	1	2	2
P2c, P2a, P2b, P2d	5	7	4	1
P1e, P1f	5	15	6	0
Total Number (Rate, %)	15 (27.8)	23 (42.6)	13 (24.1)	3 (5.6)

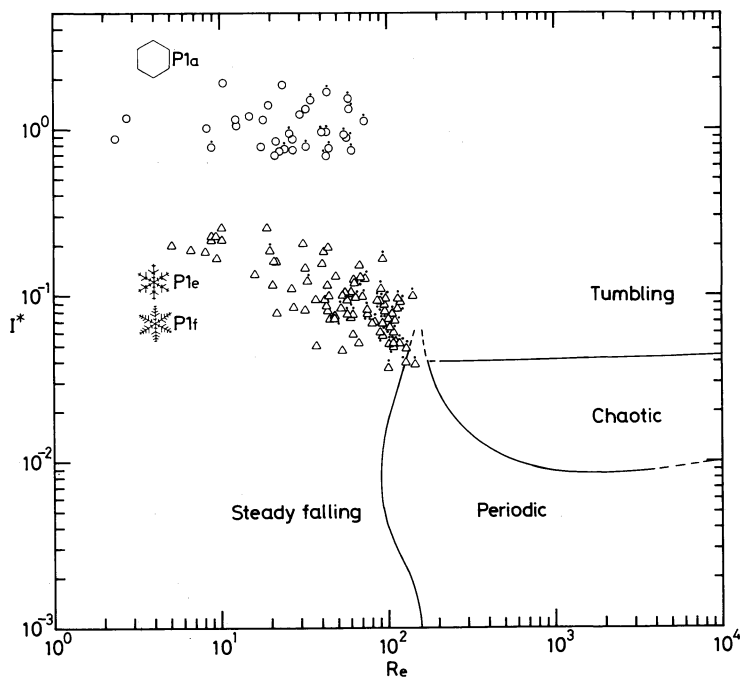
なる。雲粒付着の効果については、雲粒付着量が多くなるほど螺旋の割合は少なくなる傾向を示した (Kajikawa *et al.*, 1997). さらに、円盤のタンク実験 (例えば, Willmarth *et al.*, 1964) にみられるような宙返りは観測されなかった。角板でも宙返りが観測されなかったのは、 Re 数と I^* で示されるタンク実験の落下パターンダイアグラムにおいて、宙返りの領域に入ら

ないことの他に、流体と物体の密度比が模型実験と現実の雪結晶で大きく異なることも関係している可能性がある (Clift *et al.*, 1978).

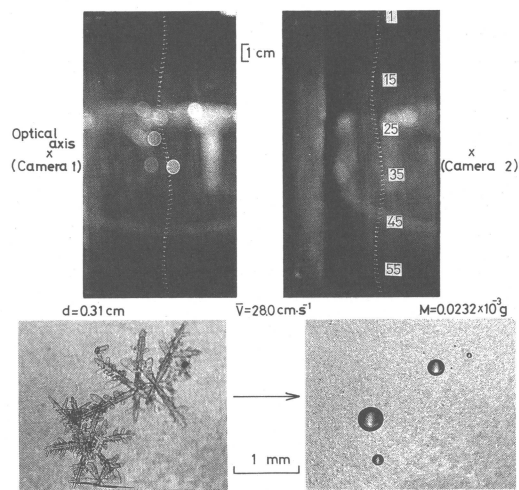
第8図に最近報告されたタンク実験による薄い円盤の落下パターン (Field *et al.*, 1997) と著者による雪結晶の観測結果との比較を示す。雪結晶は I^* の大きい角板 (P1a) と小さい普通樹枝 (P1e) の場合のみを表示した。この図から、雪結晶では円盤の安定運動の範囲でも不安定運動を示すことがわかる。また、 $Re-I^*$ ダイアグラムのみで雪結晶の落下パターンを分類するの



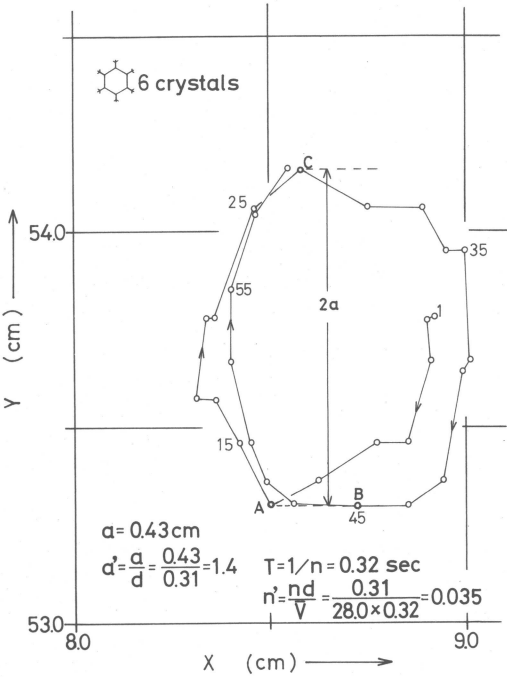
第7図 安定・不安定運動の境界を示すベスト数 $Be (= C_d R_e^2)$ —無次元慣性モーメント (Stability number) I^* ダイアグラム (Kajikawa, 1992). $I^* = I / (\rho d^5)$, 角板の a -軸に関する慣性モーメント $I = (Md^2)/16$. M は質量で ρ は空気密度.



第8図 落下パターンを区分する $Re-I^*$ ダイアグラムにおける薄い円盤 (Field et al., 1997) と雪結晶の比較. 小黑丸は不安定落下の結晶. 図中の落下パターンは, 左から右上の順に安定落下, 振動, カオスの運動および宙返り.



第9図 上段は発光間隔1/100秒のストロボ光で撮影された落下中の初期雪片のステレオ写真(落下速度: 28.0 cm/s, Kajikawa, 1982). 下段左は落下した初期雪片(樹枝状結晶 6 個から成る雪片, サイズ: 3.1 mm). 下段右は融解後の半球状水滴(質量: 0.023 mg).



第10図 第9図の落下運動を水平面へ投影した軌跡(Kajikawa, 1982). この不安定運動の落下パターンは螺旋型. a : 振幅, a' : 無次元振幅, d : サイズ, T : 周期, n : 振動数, n' : 無次元振動数, $\bar{V}$: 落下速度.

は難しいことが読み取れる. 板状結晶の落下運動が安定か不安定かを先ず第7図の $Be-I^*$ ダイアグラムで結晶形毎に判別し, その上で不安定運動の落下パターンは $Re-I^*$ ダイアグラムで区分するのが1つの方法であろう (Kajikawa, 1992).

(3) 角柱状結晶の落下パターン

雲粒付角柱状結晶の落下運動のステレオ写真観測によると, Fluttering しながら鉛直方向に関して回転するものが多い (Kajikawa, 1976) しかし, Zikmunda and Vali (1972) の観測で指摘されたような, c -軸に関する回転運動は現在のところ確認されていない. サイズの大きい角柱の落下運動や針状結晶の雪片形成過程も興味深い課題である.

4. 雪片の落下運動について

(1) 初期雪片の落下速度とその変動および落下パターン

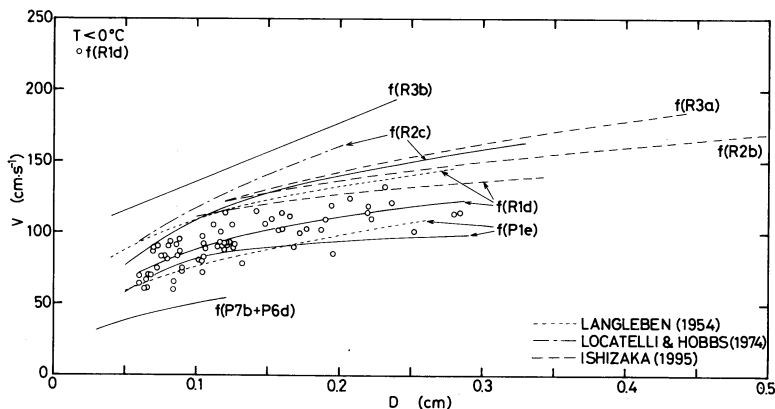
構成結晶数が2~6個からなる初期雪片の落下運動についても, 雪結晶の場合と同様にステレオ写真解析法で観測された(第9図, 第10図). 第4表に示すように, 初期雪片では単一粒子の場合より不安定運動の割合が多く, かつ回転または螺旋が多くなる(Kajikawa, 1982). これは主に粒子の非対称性の増大によると考え

第4表 初期雪片の落下パターンの分類と割合 (Kajikawa, 1982). 結晶2個から成る雪片のみ24%が安定落下.

Number of Component Crystals	Stable Motion	Unstable Motion			
		Glide Type			Spiral Type
		Nonrotation	Swing	Rotation	
2	23	25	6	32	96
3	0	5	1	14	54
4	0	1	1	4	27
5	0	0	0	1	8
6	0	0	0	0	8
Total Number (Rate, %)	23 (75)	31 (101)	8 (26)	51 (167)	193 (631)

られる.

落下速度の鉛直および水平成分の変動について, その標準偏差で評価すると, 前者では2 cm/s より小さい(鉛直成分の平均値の3~5%)が, 後者ではかなり大きい(1~8 cm/s で水平成分の平均値の約50%). このことは雪片形成過程において, 落下速度の水平成分の



第11図 雪片の落下速度 V と融解水滴直径 D との関係(梶川, 1996b). $f(\quad)$ は雪片を構成する主な結晶形を示す記号. 例えば, $f(P1e)$ は普通樹枝 $P1e$ が主たる構成結晶形の雪片. T は測定時の気温.

変動が鉛直成分の変動よりも重要な役割をもつことを示唆する (Kajikawa, 1989).

(2) 雪片の落下速度

通常の雪片の落下運動は, 落下してくる粒子をそのまま降り込ませる方式の装置で観測された(梶川ほか, 1996b). 構成結晶形と含水の有無による落下速度の違いは顕著であり, 雪片のサイズ・融解水滴直径または質量のみで落下速度を表現するには無理がある(第11図). また, C_d のばらつきも非常に大きいので, さらなる研究の方向としては雪片内部の通気効果 (Magono, 1953) の評価が必要と考えられる.

落下パターンについては現在整理中であるが, やはり雪片内部の通気効果や含水率が大きく影響している可能性がある.

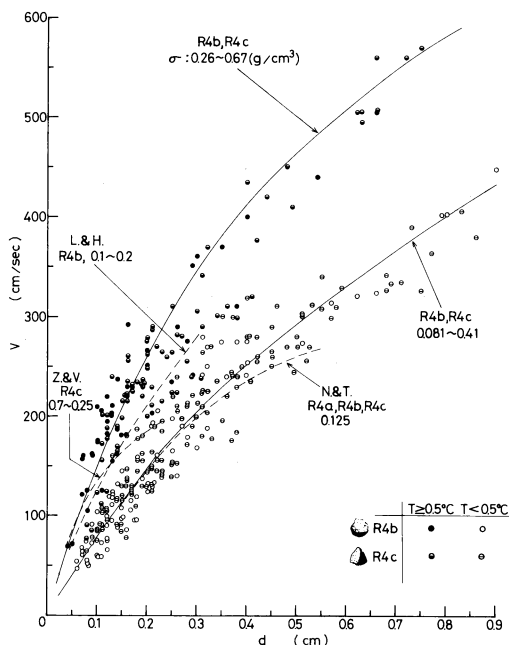
5. 霰の落下運動について

(1) 塊状霰, 紡錘状霰および六花霰の落下速度

霰の落下運動は, 雪片の場合と同様の降り込み方式の装置で観測された. 第12図に示されているように, 塊状霰と紡錘状霰の落下速度の差はそれほど大きくないが, 密度の影響には顕著なものがある (Kajikawa, 1975b).

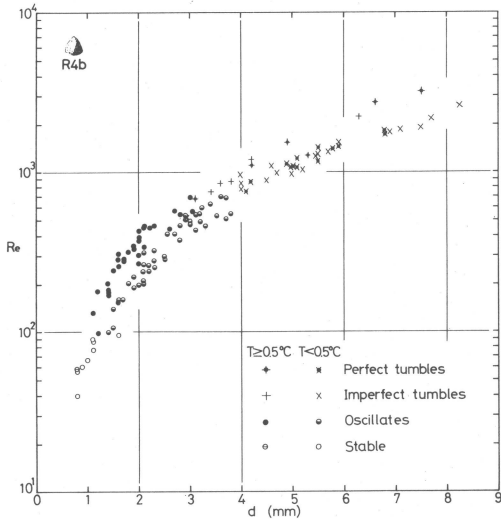
(2) 紡錘状霰の落下パターン

落下パターンを分類すると, R_e の増す順に, 頂点を通る中心軸が鉛直方向で一定の安定, この軸方位が空間的に変化する振動, 落下中に頂点が真下を向く宙返りとなる(第13図). 注目されるのは, R_e で宙返りの領域に入るものの中には, 第14図のように頂点が真下まで行かないで起きあがるものがみられることである



第12図 塊状霰 $R4b$ と紡錘状霰 $R4c$ の落下速度 V とサイズ d との関係 (Kajikawa, 1975b). σ は霰の密度. L. & H.: Locatelli and Hobbs (1974), Z. & V.: Zikmunda and Vali (1972), N. & T.: Nakaya and Terada, Jr. (1935).

(Kajikawa, 1980). この落下パターンは, 霰モデルのタンク実験 (List and Schemenauer, 1971) にみられないものである. これを不完全宙返りとして, 先の完全宙返りから区別することが出来る. この不完全宙返



第13図 紡錘状霰の落下パターンを区分するレイノルズ数 Re -サイズ d 関係 (Kajikawa, 1980). T は測定時の気温. 図の右下の落下パターンは, 上から順に完全宙返り, 不完全宙返り, 振動および安定落下.

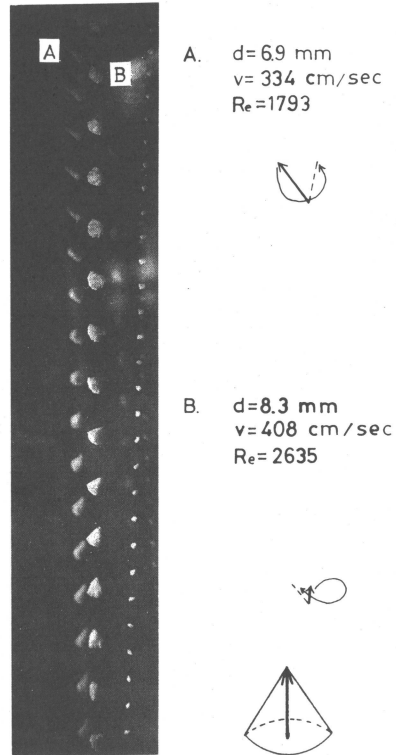
りには, 仮説ではあるが霰内部の密度不均一と頂角の大小が関係している可能性が考えられる (梶川, 1996a).

紡錘状霰が宙返りを続けながら成長すると, やがては塊状霰になると考えられる. これに対して, 不完全宙返りは紡錘状の形を保ったまま成長できる可能性がある. このことが霰の内部に1 cmに近い紡錘状霰の存在する原因ではないかと思われる (梶川, 1996a). 落下パターンにおける霰モデルのタンク実験 (List and Schemenauer, 1971) と天然の霰との違いは, 振動および宙返りが始まる Re にもみられる. これらの原因は実際の霰が密度不均一であること (モデルは密度均一), 表面粗度の相違 (モデルの表面は滑らか), 流体と物体の密度比がモデル実験と天然の霰で異なることによると考えられる.

6. まとめ

降雪粒子の落下運動に関するこれまでの観測や実験のなかで, 不十分な点や残されている課題としては, 次のようなことがあげられる.

(1) 角柱状結晶 (雪粒なし) の不安定運動を示す限界のサイズおよび落下パターンの観測は, 雪粒捕捉成長や雪片形成との関連で興味深い. タンク実験では,



第14図 不完全宙返りを示す紡錘状霰 (ストロボ発光間隔1/200秒). 太い矢印は紡錘状霰の頂点を通る対称軸で, 細い矢印は頂点のおよその動き (Kajikawa, 1980).

$Re > 50$ 以上で不安定落下となるが, この Re を天然の結晶にあてはめると, サイズが1.5 mmを越えることになるので, 針状結晶以外では検証が難しいと思われる.

(2) 雲粒付角板の落下パターンについては, 現在のところ観測データが少ないので観測例を増やす必要がある. 板状結晶で宙返りを示す可能性があるのは雲粒付の角板と考えられる. したがって, タンク実験との比較のためにも宙返りの有無を確認する必要がある.

(3) 巻雲を構成する粒子 (特に砲弾集合, 交差角板) の落下速度と落下パターンについては, 放射過程, 光散乱過程との関わりで実測が望まれる.

(4) 雪片の落下運動に及ぼす内部通気の影響は, 複雑な落下運動を解明する鍵の1つと考えられるので, 何らかの方法で評価する必要がある.

(5) 紡錘状霰の落下運動のステレオ写真観測と内部

密度の同時観測により、前述の仮説の直接証明が期待される。

謝 辞

私がこれまで研究を続けてこられたのは、ひとえに修士課程の時よりご指導頂いた恩師の北海道大学理学部の孫野先生、海外調査をはじめとして多くの研究の機会を与えて下さいました北海道大学理学部の菊地先生、さらには日頃から一緒に仕事をさせて頂いている多くの方々のご指導とご協力のおかげです。ここに、あらためて心からお礼申し上げます。これまでの研究内容を見ますと、足りないところや詰めの甘いところばかりが目につき、反省させられます。この受賞を機会に、なお一層の努力をいたしたいと思いますので、皆様方のご指導をお願い申し上げます。

参 考 文 献

- Clift, R., J. R. Grace and M. E. Weber, 1978 : Bubbles, Drops, and Particles, Academic Press, 380pp.
- Geresdi, I., 1998 : Idealized simulation of the Colorado hailstorm case : Comparison of bulk and detailed microphysics, *Atmos. Res.*, **45**, 237-252.
- Field, S. B., M. Klaus, M. G. Moore and F. Nori, 1997 : Chaotic dynamics of falling disks, *Nature*, **388**, 252-254.
- Fraser, A. B., 1979 : What size of crystals produce the haloes?, *J. Opt. Soc. America*, **69**, 1112-1118.
- Happel, J. and H. Brenner, 1983 : Low Reynolds Number Hydrodynamics, Martinus Nijhoff Publishers, 553pp.
- Heymsfield, A. J. and M. Kajikawa, 1987 : An improved approach to calculating terminal velocities of plate-like crystals and graupel, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1088-1099.
- 石坂雅昭, 1995 : 雲粒付雪片の落下速度について, *雪氷*, **57**, 229-238.
- Jayaweera, K. O. L. F. and R. E. Cottis, 1969 : Fall velocities of platelike and columnar ice crystals, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **95**, 703-709.
- Kajikawa, M., 1971 : A model experimental study on the falling velocity of ice crystals, *J. Meteor. Soc. Japan*, **49**, 367-375.
- Kajikawa, M., 1972 : Measurement of falling velocity of individual snow crystals, *J. Meteor. Soc. Japan*, **50**, 577-584.
- Kajikawa, M., 1973 : Laboratory measurement of falling velocity of individual ice crystals, *J. Meteor. Soc. Japan*, **51**, 263-272.
- 梶川正弘, 1974 : 降水粒子の落下速度について, *天気*, **21**, 317-332.
- Kajikawa, M., 1975a : Experimental formula of falling velocity of snow crystals, *J. Meteor. Soc. Japan*, **53**, 267-275.
- Kajikawa, M., 1975b : Measurement of falling velocity of individual graupel particles, *J. Meteor. Soc. Japan*, **53**, 476-481.
- Kajikawa, M., 1976 : Observations of the falling motion of columnar snow crystals, *J. Meteor. Soc. Japan*, **54**, 276-284.
- Kajikawa, M., 1980 : Observations of the free-fall behavior of conelike graupel particles, *Proc. Int. Conf. Cloud Physics, Clermont-Ferrand*, 257-260.
- Kajikawa, M., 1982 : Observations of the falling motion of early snow flakes. Part I : Relationship between the free-fall pattern and the number and shape of component snow crystals, *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 797-803.
- Kajikawa, M., 1989 : Observations of the falling motion of early snow flakes. Part II : On the variation of falling velocity, *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 731-738.
- Kajikawa, M. and A. J. Heymsfield, 1989 : Aggregation of ice crystals in cirrus, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3108-3121.
- Kajikawa, M., 1992 : Observations of the falling motion of plate-like snow crystals. Part I : The free-fall patterns and velocity variations of unrimed crystals, *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 1-9.
- 梶川正弘, 1996a : 紡錘状霰の落下姿勢の安定性に影響する因子について, *雪氷*, **58**, 223-228.
- 梶川正弘, 谷口泉子, 伊藤誠子, 1996b : 雪片の落下速度と構成結晶形との関係, *雪氷*, **58**, 455-462.
- Kajikawa, M. and K. Okuhara, 1997 : Observations of the falling motion of plate-like snow crystals. Part II : The free-fall patterns and velocity variations of rimed crystals, *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 811-818.
- Kajikawa, M., 1998 : Influence of riming on the falling velocity of dendritic snow crystals, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII*, **11**, 169-174.
- Langleben, M. P., 1954 : The terminal velocity of snowflakes, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **80**, 174-181.
- 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.

- Locatelli, J. D. and P. V. Hobbs, 1974 : Fall speed and masses of solid precipitation particles, *J. Geophys. Res.*, **79**, 2185-2197.
- Magono, C., 1953 : On the growth of snow flake and graupel, *Sci. Rep. Yokohama Nat. Univ., Sec. I*, **2**, 18-40.
- Magono, C. and C. W. Lee, 1966 : Meteorological classification of natural snow crystals, *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. VII*, **2**, 321-335.
- Nakaya, U. and T. Terada, Jr., 1935 : Simultaneous observations of the mass, falling velocity and form of individual snow crystals, *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. II*, **1**, 191-200.
- Nakaya, U., 1954 : *Snow Crystals : Natural and Artificial*, Harvard Univ. Press, 510pp.
- Tape, W., 1994 : *Atmospheric Halos*, Amer. Geophys. Union, 143pp.
- Tricker, R. A. R., 1970 : *Introduction to Meteorological Optics*, American Elsevier, 285pp.
- Willmarth, W. W., N. E. Hawk and R. L. Harvey, 1964 : Steady and unsteady motions and wakes of freely falling disks, *Phys. Fluids*, **7**, 197-208.
- Zikmunda, J. and G. Vali, 1972 : Fall patterns and fall velocities of rimed ice crystals, *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1334-1347.

Studies on the Falling Motion of Snow Particles

Masahiro Kajikawa*

* *Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, Akita 010-0852, Japan.*

(Received 13 October 1998 ; Accepted 4 December 1998)
