

## 降雪雪片の落下運動解析

Analysis for Falling Motion of Snowflakes

村本 健一郎\* 松浦 弘毅\* 香川 隆夫\* 椎名 徹\*\* 小池 俊雄\*\*\*  
Ken-ichiro MURAMOTO Kohki MATSUURA Takao KAGAWA Toru SHIINA Toshio KOIKE

\* 金沢大学工学部 Kanazawa University  
\*\* 富山工業高等専門学校 Toyama National College of Technology  
\*\*\* 長岡技術科学大学工学部 Nagaoka University of Technology

Abstract: Falling attitude of snowflakes were simultaneously photographed by two TV cameras from horizontal and vertical directions. These images were analyzed by image processor and personal computer. The attitude and location of each snowflakes were measured every 1/30 seconds from their two images. There were two patterns in falling motion of snowflakes, one was rotational trajectory, the other was spiral trajectory. And there was a tendency that the rotational speed of smaller snowflakes was faster than the bigger one, and the directions of revolution and rotation in falling snowflakes were the same in many cases.

## 1. まえがき

降雪は雲内で発生した氷の結晶が成長し、さらにいくつも併合して落下してきたものである。すなわち雲内で過冷却した氷の結晶が雪結晶にまで成長すると、ついに自分の重みで落下が始まるが、この雪結晶は落下速度が遅いので、空間密度が高まり、互いに接触する割合が高く、しかも機械的にかみやすい構造のため、いくつもの結晶が併合し雪片となるのである<sup>(1)</sup>。落下中の雪片同士の併合のメカニズムを解明するためには、降雪雪片の形状並びに大気中の降雪雪片の落下運動を調べなければならない。降雪雪片の形状については既に報告した<sup>(2)</sup>。雪片や雪結晶の落下運動の報告については理論的解析<sup>(3), (4)</sup>や実験室内でのモデルを使って行われた場合<sup>(5), (8)</sup>がほとんどで実際の雪片を直接観測した報告はわずかである<sup>(9), (12)</sup>。

しかも実際に雪片を観測している場合でも横方向だけからの写真撮影による手法を用いるので、雪片の立体的な形状や水平面上での運動軌跡を正確に解析することはできなかつた<sup>(9), (12)</sup>。

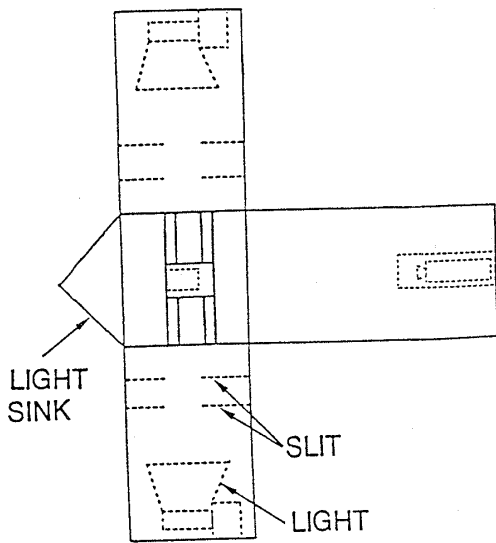
そこで、空中を落下している降雪雪片の形状変化および落下運動を定量的に解析することを目的として、同時に2方向(水平および垂直)から連続的に録画した降雪雪片の映像をビデオ編集機により実時間で合成して1画面を構成し、個々の雪片の映像を画像処理して輪郭形状を記

録した。次に、記録されたデータを用いて輪郭線の解析並びに個々の雪片の追跡により形状や落下運動軌跡を解析した。本研究は、空中を落下している雪片の水平面および垂直面上での形状の変化および運動軌跡を定量的に解析可能とするものであり、大気中を落下している間に、雪片同士が付着して成長する過程の解明にも役立つものと期待できる。

## 2. 観測装置

図1は観測装置である。日射の影響を少なくするために降込み型の防風タワー内にハロゲンランプ(250W×2台)からの平行光線で限定された照射空間(縦:7cm, 横:7cm, 高さ:12cm)を形成した。防風タワー内を落下中の雪片が照射空間を通過するときだけ白く映るので、その映像を水平方向および垂直方向の2台のCCDカメラ(シャッタースピード:1/2000秒)で撮影し、両方向からの撮影時刻を合わせるためにビデオ編集機で1画面の右半分と左半分に同一雪片の両方向からの映像を合成しビデオレコーダに録画した。再生映像を画像処理装置(分解能:256×256画素、濃淡:256階調)に1/30秒間隔で入力し、各種の処理を行った。照射空間の縦方向の長さは12cmに設定したので、落下速度60~120cm/秒に対して<sup>(13)</sup>、毎秒3~6コマの同一雪片の映像が取り込まれることになる。

TOP VIEW



SIDE VIEW

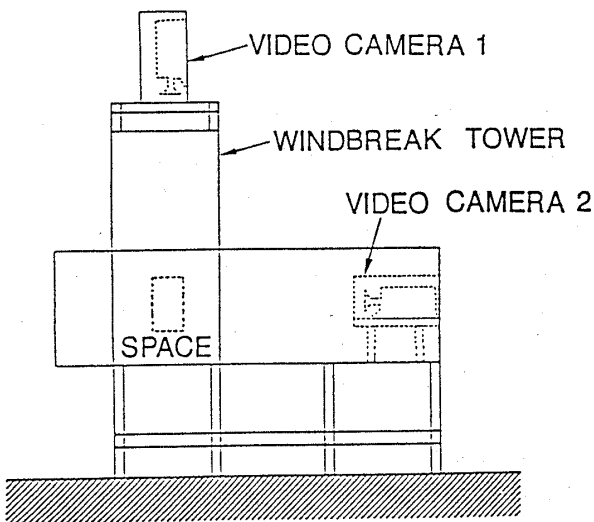


図 1. 観測装置

3. 解析方法

3.1 輪郭形状記録

ここでは降雪雪片の密度を一様とみなして雪片の映像の形状を輪郭線により解析する手法を用いた。最初に図 2 a のカメラから取込まれた降雪雪片の映像を画像処理装置に入力し、コンピュータ (PC-9801RA) のメモリ上に 2 値化して雪片を背景から分離して記録する (図 2 b)。次に、このメモリ上の雪片を表わす画素を最上位行から下方へ順次検索し、雪片の左上の画素である開始点 (S 点) を検出し、その位置を記録する。続いて、降雪雪片の輪郭情報を得るために、雪片の輪郭線上に 3 × 3 マスクを作り中央の画素に対して、隣接画素の 1 ~ 8 のどの位

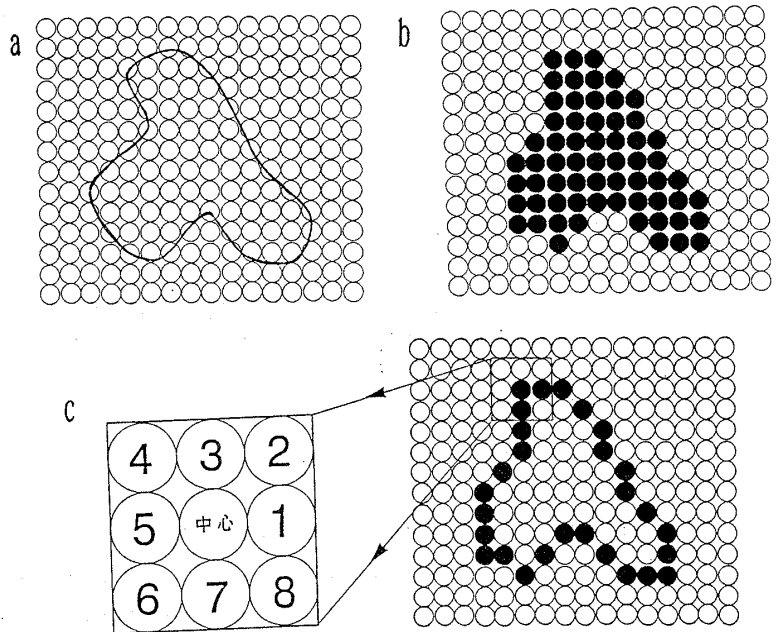


図 2. 降雪雪片の輪郭線検出と記録

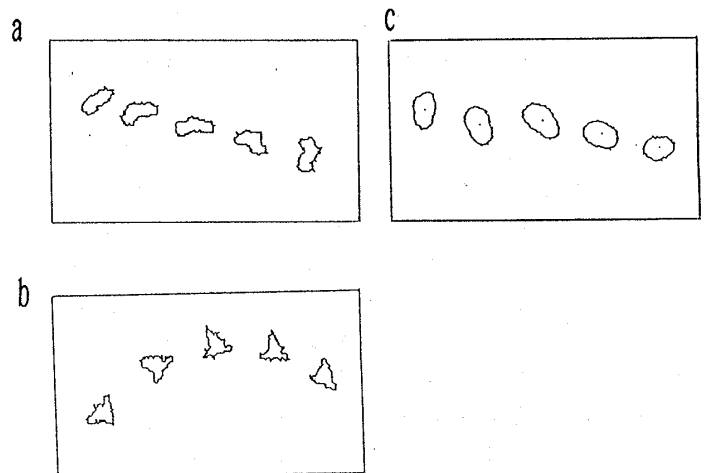


図 3. 雪片映像

置にあるかによって方向コードを割り当て雪片の形状を記録した (図 2 c)。この方法では雪片の形状および位置を開始点の座標とそれに続く輪郭線方向データだけで記録しているので、全ての輪郭線の座標を記録するよりもデータ量を圧縮できる。

3.2 形状と位置解析

図 3 に、前節の方法で解析・記録した 2 次元輪郭線データを 1/30 秒毎の 5 コマ連続表示した例を示す。これは上方向から見た映像である。a は雪片自身が回転している例、b は螺旋運動している例、c は振動運動をしている例である。各雪片について以下の形状解析を行った。

- (1) 断面積の大きさ

輪郭線で囲まれた内部の面積を計算した。

(2) 重心点の検出

輪郭線内の雪片の密度を一定と見なし、2次元的重心の座標を求めた。

3.3 重心の位置解析

図3に示すように、鉛直軸のまわりに螺旋を描いて落下する雪片や振動運動をしながら落下する雪片が見られた。これらの運動を解析するためにさらに以下の解析を行った。

(1) 移動角

上方向からの雪片映像の重心座標を追跡し、落下中雪片の水平面内での運動軌跡を定量化し、解析した。図4に示すように、連続した3個の単位時刻(1/30秒)毎の雪片の位置  $P_{t-1}$ ,  $P_t$ ,  $P_{t+1}$  から構成される3点より移動角  $\theta_t$  を計算した。

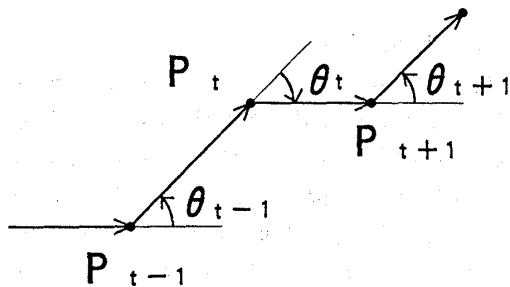


図4. 移動角

(2) 円弧半径

螺旋運動を描いて落下する雪片については、図5に示すように、 $n$ 個の雪片映像について連続した3個の雪片から構成される  $(n-2)$  個の円弧の半径を計算し、それらの平均を螺旋運動の円弧半径とした。

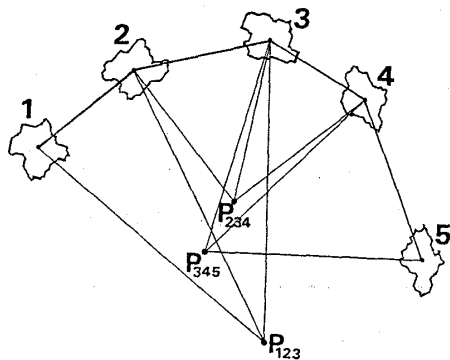


図5. 円弧半径の求め方

3.4 輪郭線解析による回転運動

図3に示すように、雪片自身が回転運動をしながら落下する雪片が見られた。このような雪片の回転角を解析するために、まず、図6aに示すように1個の雪片の輪郭線データで、その

方向コードの値が変化する位置(1, 2, 3, ..., i, ...) について重心(G)からの距離( $d_0, d_1, d_2, \dots, d_i, \dots$ ) および基準線とのなす角( $\theta_0 = 0^\circ, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, 360^\circ$ ) を求めた。次に縦軸を重心からの距離( $d$ )、横軸を角度( $\theta$ )としてグラフを描いた(図6b)。1/30秒毎の3~6コマの図6bのグラフのうち連続した2コマずつのグラフを横軸に移動して相関解析を行い、落下中の雪片の1/30秒毎の回転角度を求めた。

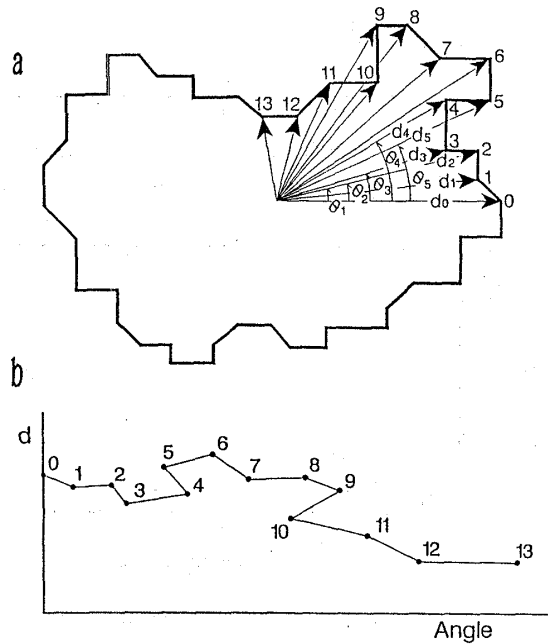


図6. 回転角の求め方

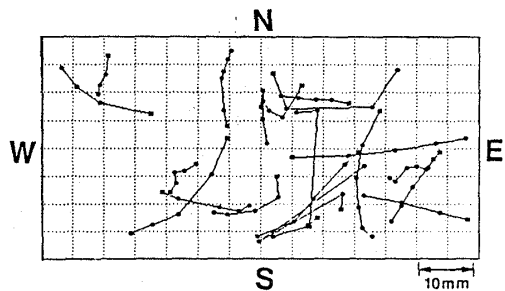


図7. 雪片重心点の軌跡

4. 解析結果と考察

4.1 落下運動軌跡

図7は上方向から撮影したの雪片映像の重心点の軌跡を24個の雪片について描いたものである。■印は第1番目の雪片の重心点を表わし、それに続く重心点の位置を●印で表わして、連続的に直線で結んだ。これより、落下中の運動は、螺旋運動、回転運動、及び直線運動に分類できる。

### 4.2 螺旋運動

図8 a は 3.3 の方法で求めた 1/30秒毎の移動角と螺旋運動の円弧半径との関係である。また、図8 b は螺旋運動の円弧半径と上方向から撮影した雪片映像の断面積との関係である。図

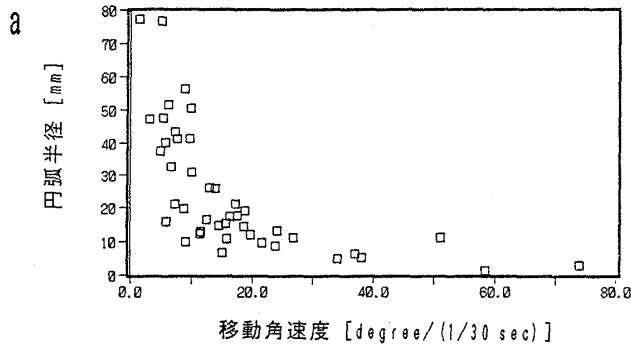


図8 (a). 移動角速度と円弧半径

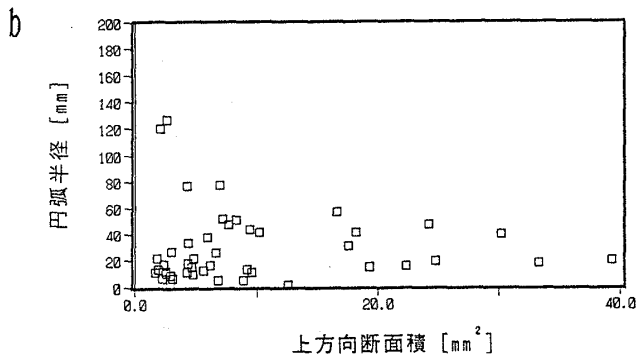


図8 (b). 上方向断面積と円弧半径

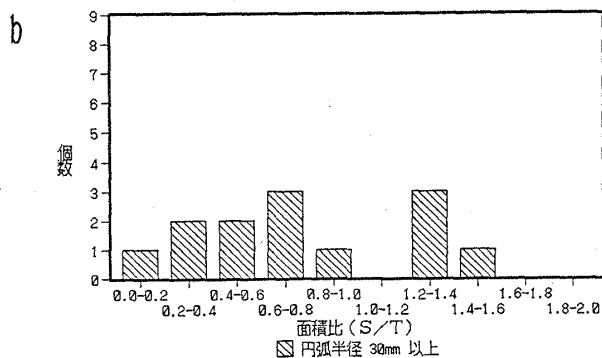
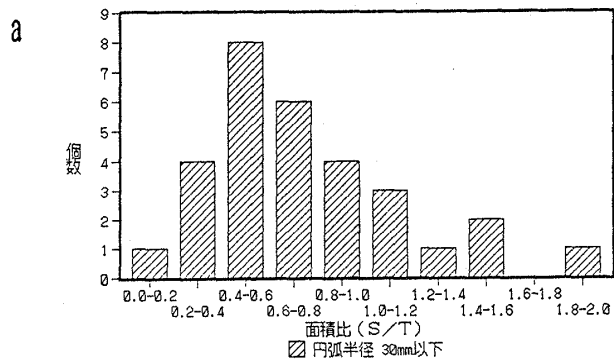


図9. 雪片の断面積比 (SIDE/TOP) の分布

8 a より、移動角と円弧半径は反比例の関係となるので、雪片の移動距離はほぼ一定となることがわかる。一方、目視による観測から円弧半径が30mm以下であれば螺旋を描いて落下し、30mm以上では直線的に落下していると判定できた。図8 b では断面積の小さい雪片では円弧半径は広い範囲に分布するが、螺旋運動をする雪片および螺旋運動をしない雪片の割合はほぼ一定であるといえる。図9 は円弧運動をする雪片および円弧運動をしない雪片のそれぞれについて、上方向と横方向の雪片の断面積比の分布を調べたものである。断面積比が小さいとき、すなわち平らな形状では円弧運動を描きやすいことがわかる。図8 b および図9 より雪片が円弧運動をするかしないかは断面積の大きさではなく、雪片の平らさに影響されることがわかる。

### 4.3 回転運動

図10は、3.4の方法で雪片自身の自転速度を求めたときの0~360°の角度に対する重心からの距離との関係を示した例であり回転する様子が示されている。図11は、この方法で求めた雪片自身の回転速度と断面積との関係を示している。小さい雪片ほど回転速度は速くなる傾向にあるが、左右の向きには一定の関係は見られない。

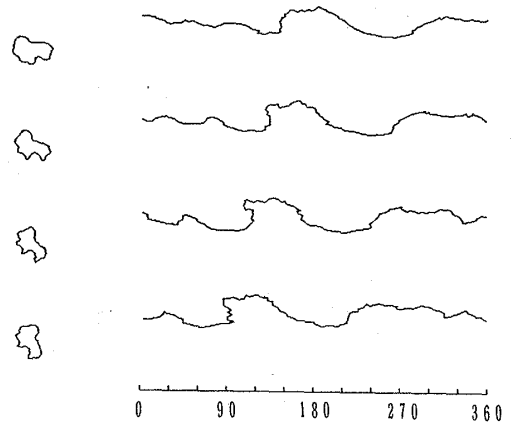


図10. 回転角の解析例

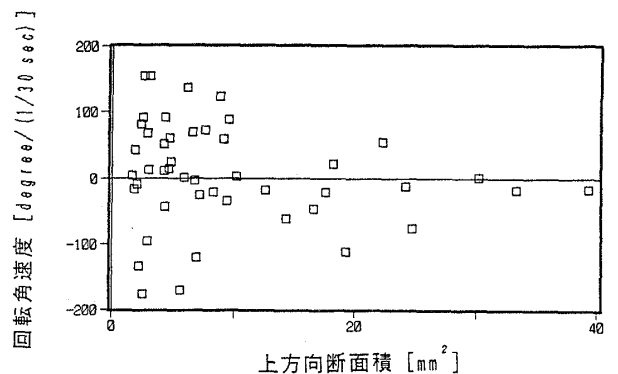


図11. 上方向断面積と回転角速度

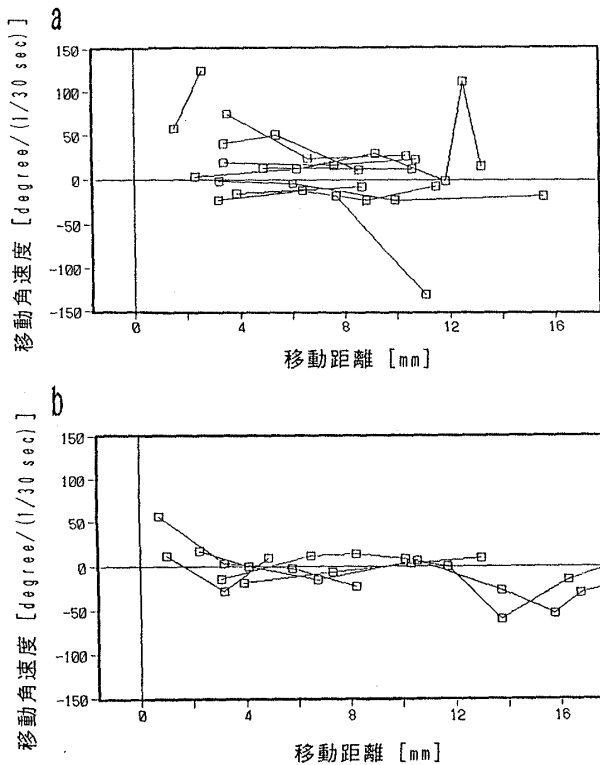


図 1 2. 移動距離と移動角速度

#### 4.4 移動角と回転角

図12は上方向からの1/30秒毎に撮影した数コマの連続映像から、雪片の移動距離と移動角の関係を第1番目(原点)の位置に続いて連続的に示したものである。図12aは移動角が同じ方向になる場合(螺旋運動)で、図12bは正負交互の値になる場合(振動運動)を示したものである。図13は螺旋運動する雪片と振動運動する雪片について移動角と回転角との関係を示したものである。螺旋運動をする場合(図13a)には移動角と回転角は同一方向すなわち、両者は同じ方向に回転する傾向を示しているが、振動運動をする場合(図13b)には角度の方向に特別な関係は見られなかった。

#### 5. あとがき

数千mの上空で生成された小さな雪の結晶が空中を落下中に、いくつも併合し、雪片となって地上に落下してくるが、この間の過程については、まだ解析されていないことが多い。本研究により地上付近での雪片の落下形態及び落下運動の定量的解析が可能となった。これらの成果は雪片の生成メカニズムの解明等に役立つものと期待される。

本研究の一部は、文部省科学研究補助金(課題番号 02555117)によるものである。

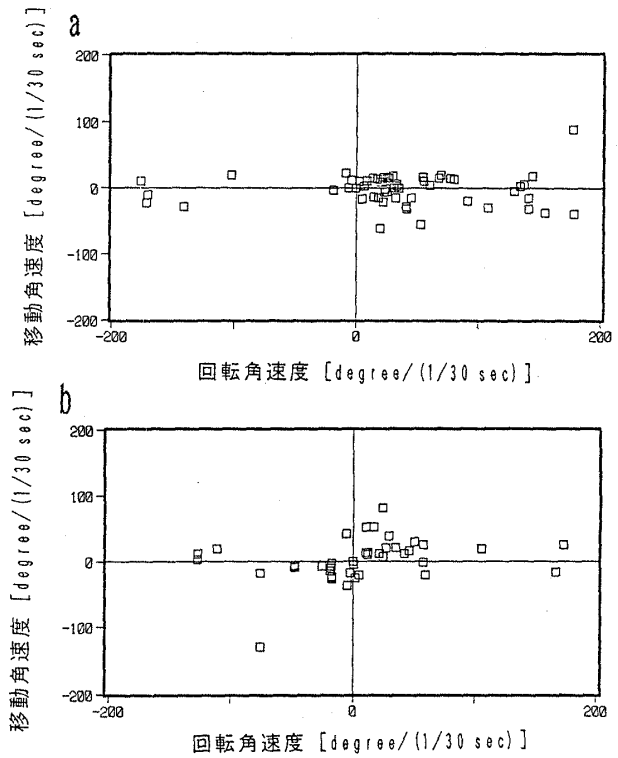


図 1 3. 移動角と回転角

#### 参 考 文 献

- (1) B. J. MASON: "CLOUDS, RAIN AND RAINMAKING", Cambridge Univ. Press(1962); 大田正治, 内田英治訳: "雲と雨の物理", 総合科学出版(1968).
- (2) 村本健一郎, 椎名徹, 大江謙一: "画像処理による降雪粒子の形状解析", 信学技報, IE89-8, pp. 25-32(1989).
- (3) R. E. Passarelli, JR: "Theoretical and observational study of snowsize spectra and snowflake aggregation efficiencies", J. Atmos. Sci, 35, pp. 882-889(1978).
- (4) R. E. Passarelli, JR, and R. C. Srivastava: "A new aspect of snowflake aggregation theory", J. Atmos. Sci, 36, pp. 484-493(1979).
- (5) K. O. L. F. Jayaweera and B. J. MASON: "The behaviour of freely falling cylinders and cones in a viscous fluid", J. Fluid Mech, 22, pp. 709-720(1965).
- (6) K. O. L. F. Jayaweera and B. J. MASON: "The falling motions of loaded cylinders and discs simulating snow crystals", Quart. J. Roy. Meteor. soc, 92, pp. 151-156(1966).
- (7) K. O. L. F. Jayaweera and R. E. Cottis: "Fall velocities of plate-like and columnar ice crystals", Quart. J. Roy. Meteor. soc, 95, pp. 703-709(1969).
- (8) W. W. Willmarth, N. E. Hawk, and R. L. Har-

vey: "Steady and unsteady motions and wakes of freely falling disks" *Phys. Fluids*, 7, pp. 197-208 (1964).

(9) M. Kajikawa: "Observation of falling motion of columnar snow crystals", *J. Meteor. Soc. Japan*, 54, pp. 276-284 (1976).

(10) M. Kajikawa: "Observation of falling motion of early snow flakes part I. Relationship between the freefall pattern and the number and shape of component snow crystals", *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, pp. 797-803 (1982).

(11) Y. Sasyo: "Study of the formation of precipitation by the aggregation of snow particles and the accretion of cloud droplets on snowflakes", *Pap. Meteor. Geophys* 22, pp. 69-142 (1971).

(12) Y. Sasyo: "The collection efficiency of simulated snow particles for water droplets (II)", *Pap. Meteor. Geophys.*, 28, pp. 159-168 (1977).

(13) 村本健一郎, 椎名徹: "画像処理による降雪粒子の大きさと落下速度の自動測定", *信学論 (D-II)*, J72-D-II, pp. 1382-1387 (1989).