

— 論 文 —

降雪雪片の落下運動パターン解析

正員 村本健一郎[†] 正員 高木 繁則^{††}正員 椎名 徹^{†††} 正員 松浦 弘毅[†]

Analysis of Fall Patterns of Snowflakes

Ken-ichiro MURAMOTO[†], Shigenori TAKAGI^{††}, Toru SHIINA^{†††}
and Kohki MATSUURA[†], *Members*

あらまし 降雪雪片の落下運動を解析することは、雪片の生成メカニズムを解明する上で重要である。降雪雪片の落下運動を定量的に解析するためには、多くの雪片像より運動パターンを分類することが必要である。本研究では、テレビカメラを使って、落下中の降雪雪片を連続的に撮影し、この2次元映像を画像処理して雪片の重心位置と輪郭線を記録した。記録されたデータを用いて、水平面上での雪片の落下運動パターンの分類および雪片自身の回転運動の解析を行った。落下運動は、安定、直線、回転および振動の各運動に分類でき、新しいパラメータを導入することにより、自動分類が可能になった。一方、雪片自身の回転(自転)運動は、小さい雪片ほど速く回転する傾向があり、落下中の回転(公転)運動との方向には相関があった。

キーワード 画像計測, 降雪雪片, 落下運動パターンの自動分類, 回転運動

1. ま え が き

降雪は雲内で発生した水の結晶が成長し、更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水の結晶が雪結晶までに生長すると、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、しかも機械的にから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^{(1)~(8)}。落下中の雪片同士の併合には、降雪雪片の形状^{(2)~(4)}ならびに大気中の降雪雪片の落下運動^{(5)~(10)}が関与していることが報告されているが、定量的な解析は行われていなかった。降雪雪片の形状については、形状の特徴解析および輪郭線の複雑さ等が詳しく解析されているが⁽¹¹⁾、雪片や雪結晶の落下運動については、水平面上の雪片の運動のシミュレーションを行い、各運動パター

ンと雪片同士の衝突率との関係を求めた理論的解析^{(5)~(7)}および液体中の小さな円板の落下運動や垂直風洞につらしたモデル雪片の運動軌跡を測定した実験室内でのモデル実験^{(12)~(15)}がほとんどであり、実際の雪片を直接観測した報告はわずかである^{(8)~(10)}。しかも実際に雪片を観測している場合でも、横方向からの単一方向の写真撮影による目視観測のみであり、定性的に運動パターンが分類されているだけで、雪片の運動軌跡を正確に把握するには不十分であった。

本研究では、空中を落下している降雪雪片の落下運動を定量的に解析することを目的として、上方向から、広視野と狭視野の2台のCCDカメラを使って連続的に撮影した降雪雪片の映像をビデオ編集機により合成しながら録画し、画像解析を行った。広視野の映像では、落下中の個々の雪片映像を連続して6~15フレーム録画できる視野に設定し、この映像から雪片軌跡を追跡することにより、水平面上の落下運動パターンを解析した。一方、狭視野の映像では、拡大した雪片映像を連続して2~5フレーム録画できる視野に設定し、雪片の大きさや雪片自身の回転運動を解析した。次に、運動パターンの自動分類法を提案し、実際の雪片に適用し、目視による分類との比較検証を行った。更に、

[†] 金沢大学工学部電気・情報工学科, 金沢市
Faculty of Technology, Kanazawa University, Kanazawa-shi, 920
Japan

^{††} インテック・システム研究所, 富山市
INTEC SYSTEMS LABORATORY INC., Toyama-shi, 930
Japan

^{†††} 富山工業高等専門学校電気工学科, 富山市
Toyama National College of Technology, Toyama-shi, 939 Japan

論文／降雪雪片の落下運動パターン解析

雪片の運動パターンと雪片の大きさや雪片自身の回転運動との関係も調べた。

本論文のデータは1992年1月に金沢市小立野で観測されたものである。

2. 観測装置

図1は観測装置である。降込み型の防風タワー内にハロゲンランプ(250 W×2台)の平行光線で限定された照射空間を形成した。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、その映像を上方向からの2台のテレビカメラ(各カメラから観測空間の中心までの撮影距離:244 cm, 撮影(フレーム)間隔:1/30秒, シャッタースピード:1/4000秒)で撮影した。水平面上での雪片の運動パターンの解析では、雪片映像の重心点の座標を追跡することにした。運動の軌跡が形成されるには、多数の雪片映像を必要とするので、撮影範囲を広視野(31 cm×31 cm×31 cm)に設定した。一方、雪片の大きさや雪片自身の回転運動の解析では、詳細な輪郭形状データを必要とするので、撮影範囲を狭視野(10 cm×10 cm×10 cm)に設定した。今回、観測した粒径3~10 mmの雪片に対する落下速度は、60~150 cm/秒であるので^{(16),(17)}, カメラからの奥行方向に対して狭視野では、個々の雪片映像を連続して2~5フレーム、広視野では、6~15フレームを撮影できた。2台のカメラで同一雪片を観測するために、ビデオ編集機で1画面の右半分と左半分を同一時刻の2台のカメラからの映像を合成し、ビデオレコーダで録画した。再生映像から、狭視野では2フレーム以上、広視野では6フレーム以上の雪片が同時に撮影されている映像を検索して、画像処理装置(分解能:

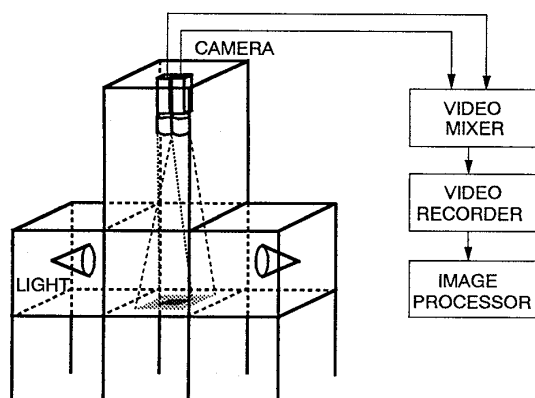


図1 降雪観測装置

Fig. 1 Configuration of equipment for measuring fall pattern of snowflakes.

512×512画素, 濃淡:256階調)に入力し, 各種の処理を行った。本実験で観測された雪片の断面積はほとんど10~60 mm²の範囲に存在するので, 撮影空間と分解能との対応から, 狭視野では1画素長は0.2 mmとなり, 1個の雪片は250~1500画素で構成される。また, 広視野では1画素長は0.6 mmとなり, 1個の雪片は30~170画素で構成される。

3. 解析方法

3.1 輪郭形状記録

本観測装置で撮影される降雪雪片は背景に対して明さがはっきりしているので, 雪片の密度を一様とみなして, モード法によりしきい値を決め⁽¹⁸⁾, 雪片の映像を2値化し, その重心座標と雪片の輪郭線をチェーンコードにより記録した。図2は, 2値化処理後の輪郭線データによる広視野映像(右側)と狭視野映像(左側)の水平面上の運動軌跡の表示例である。aは安定運動, bは直線運動, cは円弧運動, dは振動運動の例である。図中のSは, 連続的に撮影された雪片のうち, 第1のフレームの雪片を示している。この広視野映像からは雪片の落下運動軌跡, 狭視野映像からは雪片の輪郭線を解析できる。

3.2 水平面上の移動距離と移動角

図2に示すように, 鉛直軸の周りに円弧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, 上方向からの

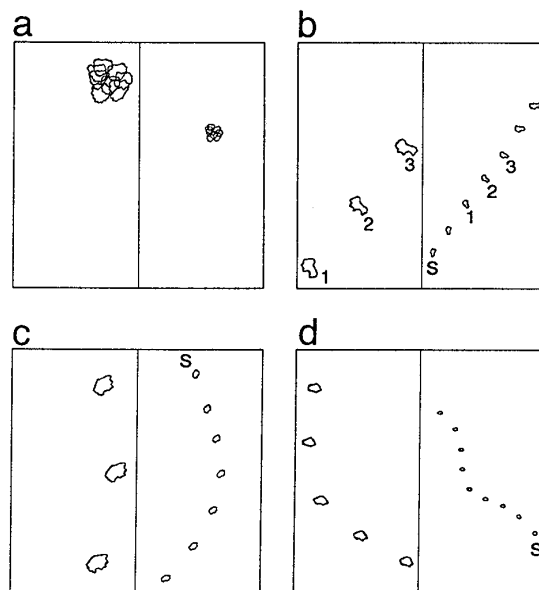


図2 輪郭線データによる雪片像の水平面上の運動表示例

Fig. 2 Examples of the horizontal movements of snowflake image reconstructed by edge information.

雪片映像の重心座標を求め、各フレーム間の雪片映像の重心位置の移動距離と移動角より、落下中の雪片の水平面上での運動軌跡を求めた。図3に示すように、連続した3個の各フレーム(1/30秒)ごとの雪片の重心位置を P_{t-1} , P_t , P_{t+1} とし、2点間の移動距離を l_t , 3点から構成される移動角を θ_t とする。このようにして求められる雪片の移動距離の累積値と移動角との関係を、図4に示すように、第1フレーム目の雪片の重心位置を原点 O として重心の移動を連続的に表すことができる。図中の a~d は、図2の a~d に対応している。運動パターンを解析するため、図中の A~C(C') の領域に分割する。重心位置の原点から各領域への移動パターンにより、雪片の落下運動を以下のように分類する。

(1) 安定運動

雪片が運動を伴わずに、ほぼ鉛直に落下する場合を安定運動とする。図4の A 領域に存在することになる。

(2) 直線運動

雪片が一定の方向に移動しながら落下する場合を直線運動とする。B 領域に存在することになる。

(3) 円弧運動

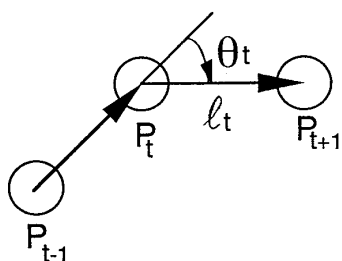


図3 移動距離と移動角

Fig. 3 Displacement and angle of motion calculated by the difference between two vectors.

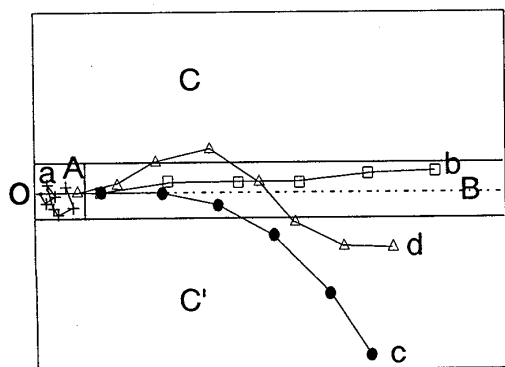


図4 落下運動の移動距離と移動角の経時変化による表示
Fig. 4 Time change of the displacement and angle of motion.

雪片が一方方向に円弧状の運動しながら落下する場合を円弧運動とする。C または C' 領域に存在することになる。

(4) 振動運動

雪片が運動の向きを変えながら落下する場合を振動運動とする。C から C' 領域またはその逆方向に移動することになる。

(5) その他の運動

上記の(1)~(4)のいずれにも当てはまらない運動、または二つ以上の運動が組み合わされた複雑な運動をその他の運動とする。

3.3 落下運動パターンの定量的評価

3.3.1 移動距離と移動角の平均値

3.2 で定義した移動距離 l_t と移動角 θ_t を使って、雪片の落下運動パターンを定量的に分類する手法を述べる。まず、 θ_t の値にかかわらず、 l_t が小さい値であれば、安定運動となる。すなわち、観測された雪片映像を $(N+1)$ フレームとすると、平均移動距離 L は

$$L = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N l_t \tag{1}$$

であるので、 L が小さい値であれば、安定運動と言える。次に、それ以外の、 L が大きい値の場合、すなわち、直線運動、円弧運動および振動運動については、移動角の大きさと方向に着目して次の二つのパラメータを導入して検討する。

$$\alpha = \frac{1}{N-1} \left| \sum_{t=1}^{N-1} \theta_t \right| \tag{2}$$

$$\beta = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^{N-1} |\theta_t| \tag{3}$$

式(2)は移動角の相加平均の絶対値を表し、撮影された $(N+1)$ 個の雪片映像の第1コマ目と第 $(N+1)$ コマ目の雪片の運動方向の角度差の絶対値を平均化した値である。一方、式(3)は移動角の絶対値の相加平均を表し、全雪片映像の平均移動角の大きさを表す。

3.3.2 運動パターンと角度特徴量との関係

式(1)で示した L の値が小さいときの安定運動以外の運動、すなわち、直線、円弧および振動運動について、式(2)および式(3)の α , β を用いて検討する。

α は図3における直線 P_0P_1 と $P_{N-1}P_N$ の方向の差を表しているため、直線運動の場合は、 α は小さい値となり、円弧運動では、円弧半径が小さいほど、 α は大きい値となる。一方、振動運動では、 α の値は特に定まらない。

β は個々の移動角の絶対値の平均であるから、直線運

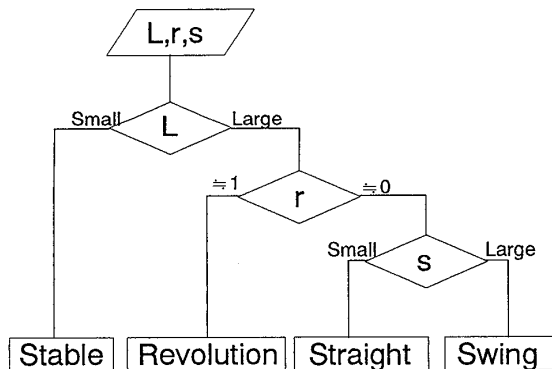


図5 移動距離と角度特徴量による雪片の落下運動の分類
 Fig. 5 Classification of fall patterns of snowflakes by the displacement and the angle feature parameters.

動の場合は、 β は小さい値となり、振動運動では、大きい値となる。また、完全な円弧運動の場合は、 β は α と一致する。

パラメータ α と β を使って、上記の三つの運動を定量的に評価するため、角度特徴量を表す新しいパラメータとして、円弧係数 r と角度変動係数 s を導入する。

$$r = \alpha / \beta \quad (4)$$

$$s = \alpha + \beta \quad (5)$$

雪片の運動の方向が変化しない場合は $\alpha = \beta$ となるので、 $r = 1$ となるが、方向の変化する運動では $\alpha < \beta$ となるので、 r は1より小さい値となる。すなわち、 $0 \leq r \leq 1$ であり、 r が大きいときは円弧運動の成分が強いと言える。一方、 s は移動角度の変化を表す値で、 s が小さいほど、直線性が強くなる。また、 s が大きいほど、移動角度が大きくなり、円弧または振動運動の成分が強いことを表す。

これより、図5のアルゴリズムにより、雪片映像の各運動を四つの運動パターンに分類できる。まず、 L が小さい場合が安定運動である。 L が大きい場合のうち、 r が1に近い値の場合は円弧運動、 r が0に近い値の場合は直線と振動運動である。後者の二つの運動は、 s が小さい場合は直線、大きい場合は振動運動となる。このようにして、すべての運動を定量的に評価して分類できる。

3.4 回転角の計算法

図2b, cに示したように、雪片自身が回転運動をしながら落下する場合が見られた。このような雪片の回転角を解析するために、まず、図6aに示すように雪片をその重心(G)から輪郭線までの距離(r)と角度(δ)で極座標表示し、それを1次元波形とみなしてグラフを描く(図6b)。複数フレームの雪片像についての図6c

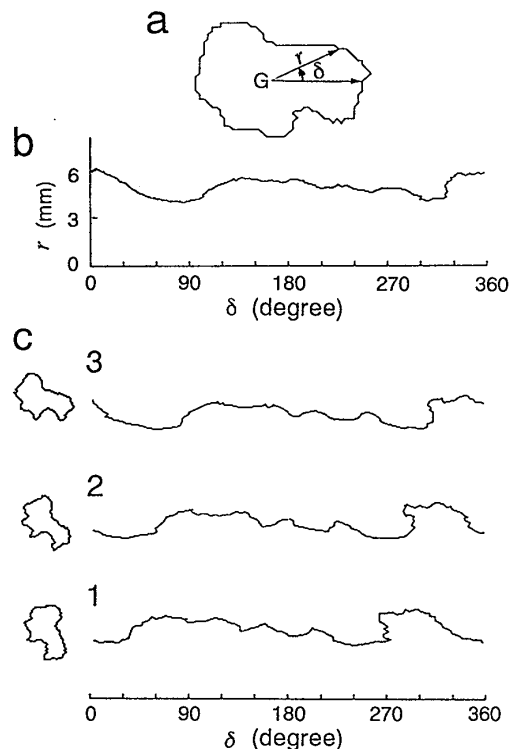


図6 回転角速度の計算法
 Fig. 6 Calculation method of rotational speed.

のグラフのうち、連続した2フレームのグラフについての波形を横軸に移動して相関解析を行うことにより、落下中の雪片の1/30秒ごとの回転角度を求めることができる。図6cは図2bの雪片映像1, 2, 3についての解析例である。

4. 解析結果と考察

前章で述べた方法で、降雪雪片の落下運動を解析する前に、4.1では、実際にカメラから取り込んだ既知の図形に対する面積と重心点位置の誤差を調べた。4.2では、落下中の運動パターンの自動分類を行った。4.3では、雪片の大きさと運動パターンとの関係、4.4では、移動距離と角度特徴量との関係を調べた。4.5では、雪片自身の回転運動を調べた。また、4.6では、移動角と移動距離との関係、4.7では、運動パターンと角度特徴量との関係について考察した。

4.1 誤差測定

前章で述べた落下運動解析のための重心点の位置は、実際にカメラから図形を取り込み、2値化して輪郭点列を得た場合には、画像を取り込む際の量子化誤差や2値化のしきい値のとり方、レンズによるひずみ、更にカメラから被写体までの距離の影響を受ける。そこで、本実験で観測された雪片とほぼ同じ面積をもつ9

~64 mm²の正方形紙片を使って、そのような入力の際の誤差等の影響を調べる実験を行った。表1は、種々の大きさの正方形の紙片を撮影空間内で位置や角度を変えて、雪片の撮影と同じ条件でカメラより10個ずつ取り込んで、真値との誤差の平均を求めたものである。重心位置は広視野の映像を使用するので、誤差は最大で約21%程度である。一方、面積は狭視野の映像を使うので、誤差は最大で約12%程度である。表2は、被写界深度による紙片の変形の割合を示したものである。奥行の中心に紙片を置いたときを基準として、最も手前と最も奥での変形の割合を求めた。重心位置の解析には広視野の映像を使うので、撮影距離に対する位置ずれの割合は0.92~1.08である。一方、面積の計算には狭視野の映像を使うので、拡大率は0.98~1.02である。一方、各辺のなす角の変形は量子化誤差の範囲内であった。

4.2 運動パターンの自動分類

表3は、図2に示した4個の雪片の運動についての、式(1)~(5)で表される各運動特徴量の計算値である。但し、sについては、観測されたすべての雪片のsの値の最大値は80.4°であったので、rとの対比をわかりやすくするために、90°で規格化した。以下に1992年1月23日18時30分~22時10分の間金沢市小立野で観測された90個の雪片の運動のうち、目視により運動パターンが分類できた84個について解析を行った結果を示す。

図7は、各雪片についてのL, α, β, r, sの関係である。各マークは目視により分類された運動パターン

を示している(+ : 安定運動, □ : 直線運動, ● : 円弧運動, △ : 振動運動)。図7aはαとL, 図7bはβとLとの関係である。今回観測されたデータでは、安定運動とそれ以外の運動とを識別するためのLのしきい値は4.5 mmであった。Lとα, βとの関係では、直線運動ではα, βの値がともに小さく、円弧運動では、Lとα, βとはともに反比例の傾向を示した。一方、振動運動では、Lとα, βとは特別の関係が見られなかった。安定運動のβは比較的大きな値となっているが、Lが小さいので、運動としての意味は少ないと言える。図7cは、角度特徴量rとsの関係である。図中の網かけ領域(r=0.61~0.71, s=0.12~0.22)は、図5のアルゴリズムにより、雪片の落下運動パターンを分類できるしきい値幅を示している。このようにしきい値を設定することにより、84個中74個の雪片の運動パターンの分類が目視による分類と一致した。表4は目視による分類と自動分類との評価を示したものである。

4.3 雪片の面積と運動パターンとの関係

図8は雪片の断面積と平均移動距離Lとの関係を平均値と分散で表したグラフである。一般に、面積が小さいほど、Lの分散が大きくなる傾向が見られたが、安定運動では、面積に関係なく、ほぼ同じ分散で、しかもLは小さかった。

図9は断面積と角度特徴量rおよびsとの関係である。図9aは、円弧運動ではrは1に近い値となるが、いずれの運動も面積とrとの特別な相関は見られないことを示している。図9bは直線運動では面積に関係な

表1 入力誤差

面積 (mm ²)		9	25	64	
誤差 (%)	重心位置	狭視野	11.4	7.8	3.3
		広視野	21.3	14.8	7.2
	面積	狭視野	12.3	8.2	3.7
		広視野	29.4	17.1	8.6

表3 各運動特徴量の計算例

運動特徴量	雪片 a	雪片 b	雪片 c	雪片 d
L (mm)	2.7	11.3	10.5	6.3
α (度)	23.6	1.2	18.9	2.5
β (度)	42.5	4.7	19.3	23.7
r	0.56	0.25	0.98	0.11
s	0.73	0.07	0.42	0.29

表2 被写体までの距離による誤差

		狭視野			広視野		
距離 (cm)		239	244	249	229	244	259
割	重心位置	1.01	1.0	0.99	1.08	1.0	0.92
合	面積	1.02	1.0	0.98	1.14	1.0	0.86

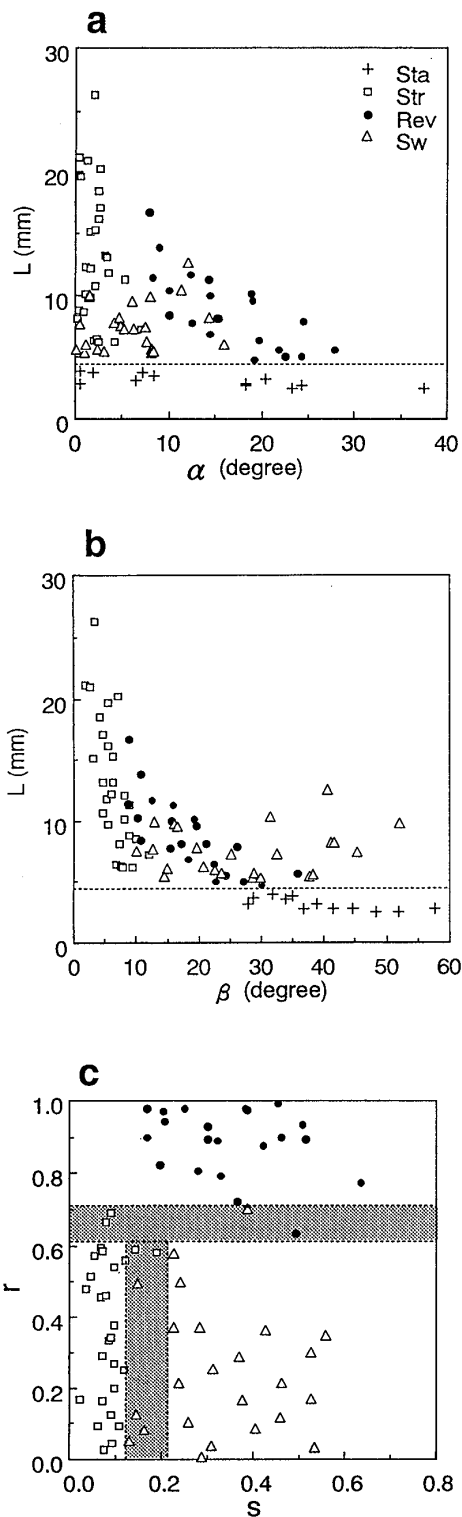


図7 移動角と移動距離, および角度特徴量の関係
 Fig. 7 Relationship between arithmetic mean of angles (α and β) and displacement, and angle feature parameters.

く, s はほぼ一定となるが, 他の運動では面積が小さいほど s は大きくなることを示している。

表4 自動分類の評価

	安定運動	直線運動	回転運動	振動運動	合計
目視分類(個)	12	27	21	24	84
自動分類(個)	10	25	20	19	74
一致率(%)	83.3	92.6	95.2	79.2	88.1

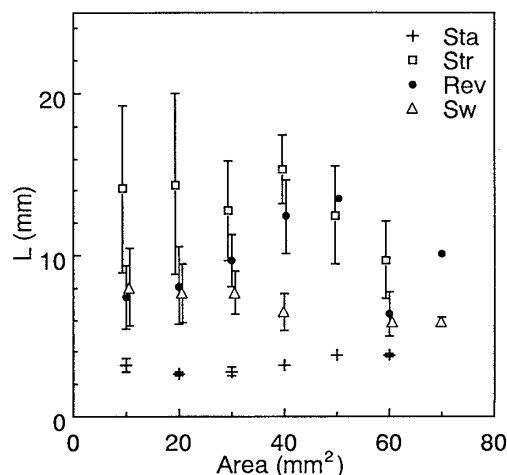


図8 面積と移動距離との関係
 Fig. 8 Relationship between the area and the displacement.

4.4 平均移動距離と角度特徴量との関係

図10は平均移動距離 L と角度特徴量 r および s との関係である。図10aでは円弧運動と振動運動をする雪片は, r の値により, 完全に分類でき, また, これらの運動は直線運動をする雪片(図10b)よりも, L の値が小さい傾向になることがわかる。更に, 図10bより, 直線運動をする雪片については, L が大きいほど, s は小さくなり, 直線性が強くなることがわかる。

4.5 回転運動

図11は解析した全雪片の運動パターンについて, 雪片自身が回転する場合の分布である。雪片自身の回転は, 安定, 直線, 円弧の各運動をする雪片のほぼ半数にみられるが(41.7~61.9%), 振動運動ではほとんど見られなかった(8.2%)。

図12は, 3.4の方法で解析した面積と雪片自身の回転角速度との関係である。小さい雪片ほど回転角速度は速くなる傾向がある。また, 回転の方向には特別の関係は見られなかった。

図13は円弧運動をする雪片について, 雪片自身の回転角速度(絶対値)と r との関係である。 r が大きくなるほど, 回転角速度は速くなる傾向が見られた(相関係数=0.75)。

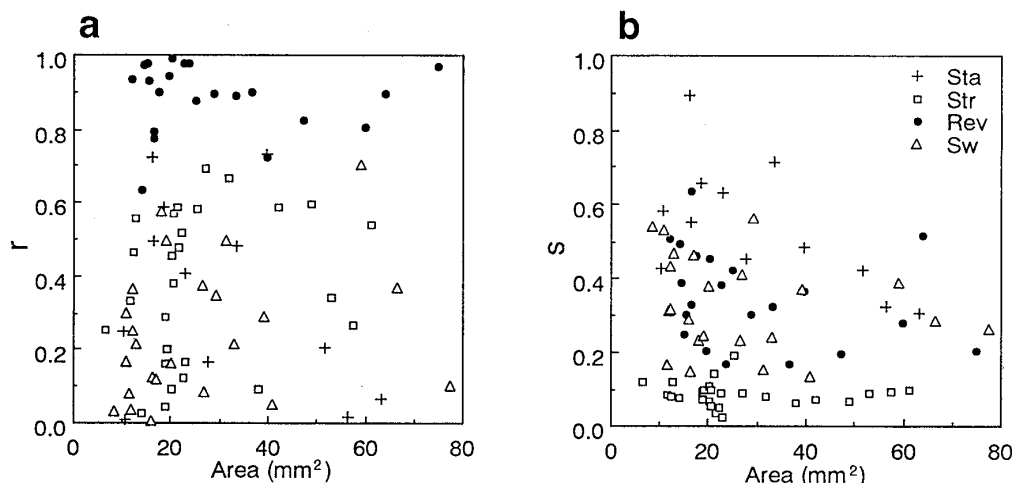


図9 面積と角度特徴量との関係
Fig. 9 Relationship between the area and the angle feature parameters.

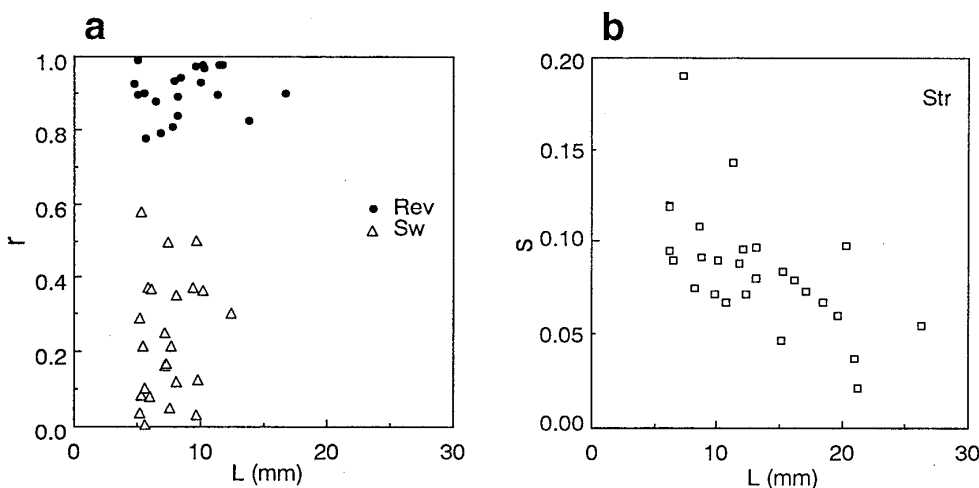


図10 移動距離と角度特徴量との関係
Fig. 10 Relationship between the displacement and the angle feature parameters.

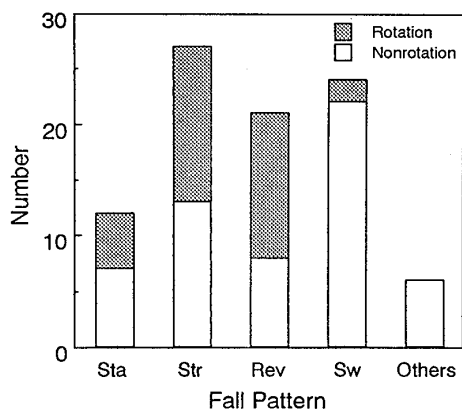


図11 運動パターン別の回転発生分布
Fig. 11 Frequency distribution of the rotation.

図14は円弧運動する雪片について、円弧運動の移動(公転)角速度と雪片自身の回転(自転)角速度との関係を示したものである。77%の雪片で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た。

4.6 移動角と移動距離との関係

水平面上の雪片の移動角の相加平均の絶対値 α と移動角の絶対値の相加平均 β は、完全な円弧運動であれば、 $\alpha = \beta$ となるが、振動運動の要素が加わると、 $\alpha < \beta$ となる。これは、図7a, bの円弧運動では α と β はほとんど同じ傾向を示すが、振動運動では α は β よりも小さい値となることよりわかる。また、平均移動距離 L との関係では、円弧運動の L と α , β は反比例の傾向を示すことがわかる(図7a, b)。これは、 L が大きいほど移動速度が速いので、円弧運動の場合は急激

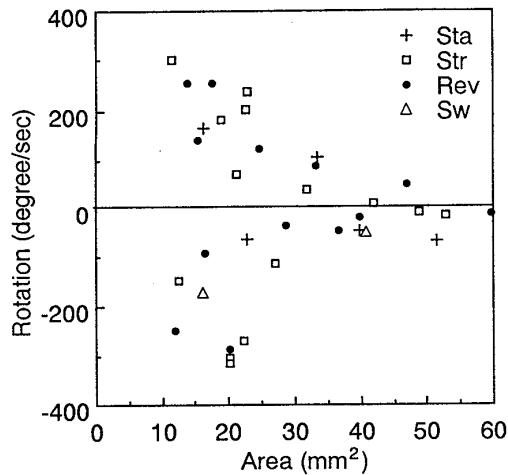


図 12 面積と回転角速度との関係

Fig. 12 Relationship between the area and the rotational speed.

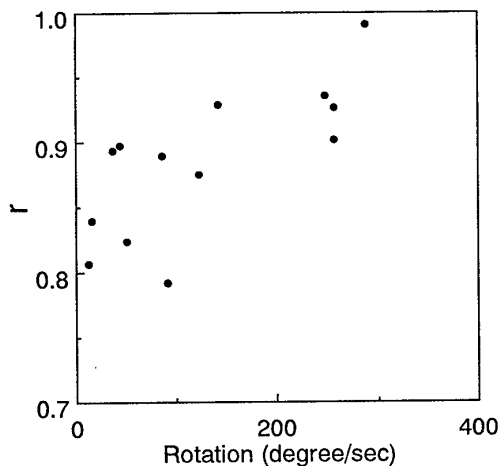


図 13 回転角速度と円弧係数との関係

Fig. 13 Relationship between the rotational speed and the coefficient of arc.

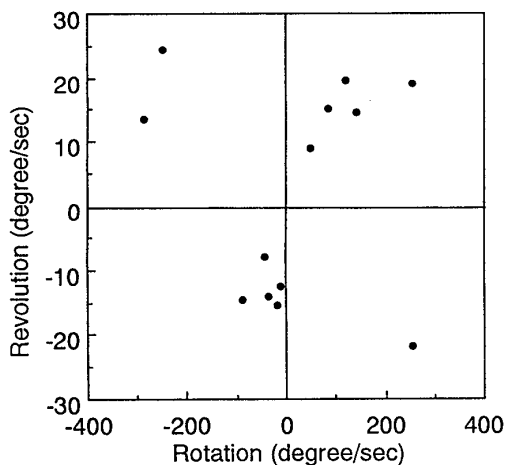


図 14 回転角速度と移動角速度との関係

Fig. 14 Relationship between the rotational and revolutional speed.

な角度変化が生じにくいためと考えられる。一方、直線運動では L に関係なく、 α 、 β の値はともに小さくなり、逆に安定運動では、 α 、 β に関係なく、 L の値は小さくなる。これらは、いずれも妥当な傾向であるので、 α 、 β は落下運動の解析に有効であると言える。

4.7 運動パターンと角度特徴量についての考察

雲の中で発生した雪結晶は落下中にいくつも併合して、地上では 20~100 個の結晶の併合した雪片となって落下してくる。この併合は、雪片の接触する場合に生ずるので、直線、円弧、振動の各運動の場合で、しかも平均移動距離が大きいとき、すなわち散乱断面積が大きくなる時に生じやすいと考えられる。

本実験で観測された雪片の落下運動のうち、直線、円弧、振動の各運動は、ほぼ同じ割合で生じるが、安定運動は、やや少ないことが示された(表 4, 図 11)。これらの運動パターンは、図 5 および図 7c に示したように、まず安定運動を取り出し、次に、円弧係数 r および角度変動係数 s を使って、円弧、直線、振動の各運動を分類することができた(表 4)。分類できなかった雪片の多くは、振動運動と他の運動との識別であったが(図 7c)、これらは目視による観測でも運動パターンの特徴が弱い雪片であった。

平均移動距離 L については、直線運動の L の値は他の運動に比較して大きく(図 8)、特に、直線性が強いほど、 L が大きくなる(図 10b)。しかし、他の運動と L との間には特別の関係はみられなかった(図 10a)。これは、直線運動の成分が強くなるほど角度の変化が生じにくくなるためと考えられる。

一方、面積については、各運動の円弧係数と面積との相関は見られなかったが(図 9a)、安定、円弧および振動運動の角度変動係数と面積は反比例の傾向となった(図 9b)。すなわち、小さい雪片ほど、水平面上での移動角が大きいことがわかった。

これに対して、雪片自身の回転運動は、いずれの運動パターンにも関係なく、面積が小さいほど、回転運動は速くなった(図 12)。これは小さい雪片ほど、輪郭形状が円形に近づき⁽¹¹⁾、回転しやすくなるためと考えられる。また、円弧運動をする雪片のうち、回転運動を伴うものは、円弧係数が大きいほど、回転速度は速くなり(図 13)、それらの方向は同方向であることが示された(図 14)。

5. むすび

落下中の雪片同士の併合には、雪片の形状ならびに

運動が関与していることが報告されている。本研究では、これらのうち、落下中の雪片像を画像処理して落下運動パターンの解析を行うことを目的としている。そのために、まず落下中の雪片像を上方向からの2台のカメラを使って撮影し、その映像をコンピュータに記録し、解析するソフトウェアを開発した。このソフトウェアを用いることにより、地上付近での落下中の雪片の運動パターンならびに雪片の断面積や雪片自身の回転運動を解析した。

今回、解析した雪片の運動パターンの分類は、88%の確率で自動的に分類できた。他の気象条件では、平均移動距離 L および角度特徴量 r, s のしきい値を新しく設定する必要があるが、本方法により、多数の雪片像の処理が可能となった。自動分類率を更に高くするには、 L, r, s のしきい値を決めるための新しい手法の導入等の検討が必要である。

運動パターンと雪片自身の回転では、円弧、直線および安定運動の場合に回転が生じ、円弧運動と雪片自身の回転運動は同方向が多いことが明らかになった。また、雪片自身の回転運動の速度は、面積に反比例していることもわかった。

雪片同士の衝突による併合には、水平面上の雪片の運動が関与し、円弧運動では円弧半径を用いて、振動運動では振動の振幅を用いて、それぞれ衝突の起こる領域の有効断面積が計算されている⁽⁸⁾。一方、安定および直線運動では、主に各雪片の落下速度の差によって併合の起こることが報告されている⁽¹⁾。しかし、これらの解析結果と実際の雪片併合との直接的な関係はまだ十分には調べられていない等の問題は残されている。今後、本論文の運動パターンの分類法を使うことにより、落下中の雪片の運動パターンの分類が可能となるので、実際に併合が起こったときの雪片を観測するなどして、運動パターンと併合過程との関係を明らかにしたい。

雪片の落下運動の解析と同時に落下速度^{(16),(17)}や形状解析⁽¹¹⁾も行うことにより、これらの関係が調べられれば、雪片生成のメカニズムの解明が更に進むものと期待される。

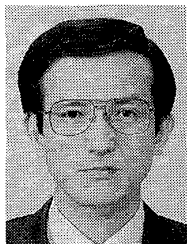
謝辞 本研究の一部は文部省科学研究費補助金(01890012, 05041077)によるものである。

文 献

- (1) Byers H. R. : "Elements of cloud physics", University of Chicago Press (1973).
- (2) Hosler C. L., Jensen D. C. and Goldshlak P. L. : "On the

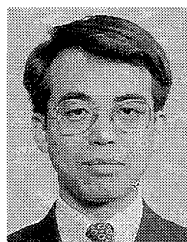
- aggregation of ice crystals to form snow", *J. Meteor.*, **14**, pp. 415-420 (1957).
- (3) Vardiman L. : "The generation of secondary ice particles in clouds by crystal-crystal collision", *J. Atmos. Sci.*, **35**, pp. 2168-2180 (1978).
- (4) Higuchi K. : "On the coalescence between plane snow crystals", *J. Meteor.*, **17**, pp. 239-243 (1960).
- (5) Pitter R. L. and Pruppacher H. R. : "A numerical investigation of collision efficiencies of simple ice plates colliding with supercooled water drops", *J. Atmos. Sci.*, **31**, pp. 551-559 (1974).
- (6) Passarelli Jr., R. E. : "Theoretical and observational study of snow-size spectra and snowflake aggregation efficiencies", *J. Atmos. Sci.*, **35**, pp. 882-889 (1978).
- (7) Passarelli Jr. R. E. and Srivastava R. C. : "A new aspect of snowflake aggregation theory", *J. Atmos. Sci.*, **36**, pp. 484-493 (1979).
- (8) Sasyo Y. : "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).
- (9) Zikmunda J. and Vali G. : "Fall patterns and fall velocities of rimed ice crystals", *J. Atmos. Sci.*, **29**, pp. 1334-1347 (1972).
- (10) Kajikawa M. : "Observation of falling motion of columnar snow crystals", *J. Meteor. Soc. Japan*, **54**, pp. 276-284 (1976).
- (11) 村本健一郎, 松浦弘毅, 椎名 徹 : "領域および輪郭線による降雪雪片の形状特徴解析", *信学論(D-II)*, **J76-D-II**, 5, pp. 949-958 (1993-05).
- (12) Jayaweera K. O. L. F. and Cottis R. E. : "Fall velocities of plate-like and columnar ice crystals", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **95**, pp. 703-709 (1969).
- (13) Jayaweera K. O. L. F. and Mason B. J. : "The behaviour of freely falling cylinders and cones in a viscous fluid", *J. Fluid Mech.*, **22**, pp. 709-720 (1965).
- (14) Jayaweera K. O. L. F. and Mason B. J. : "The falling motions of loaded cylinders and discs simulating snow crystals", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **92**, pp. 151-156 (1966).
- (15) Willmarth W. W., Hawk N. E. and Harvey R. L. : "Steady and unsteady motions and wakes of freely falling disks", *Phys. Fluids*, **7**, pp. 197-208 (1964).
- (16) Langleben M. P. : "The terminal velocity of snowflakes", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **80**, pp. 174-181 (1954).
- (17) 村本健一郎, 椎名 徹, 北野孝一 : "降雪粒子の粒径分布と落下速度のデータベース", *信学論(D-I)*, **J74-D-I**, 8, pp. 586-589 (1991-08).
- (18) Castleman K. R. : "Digital Image Processing", Prentice-Hall, Englewood Cliffs N. J. (1979).

(平成6年1月14日受付, 4月1日再受付)



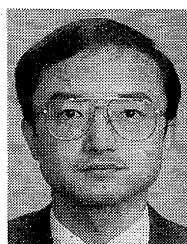
村本健一郎

昭46 富山大・工・電気卒。昭48 同大大学院修士課程了。同年富山高専助手。同高専電気工学科助教授を経て平3より金沢大学工学部電気・情報工学科助教授。医博。この間、生体情報処理、画像計測の研究に従事。情報処理学会、計測自動制御学会、画像電子学会、日本リモートセンシング学会、日本ME学会、日本雪氷学会、IEEE各会員。



高木 繁則

昭53 早大・教育・理学科卒。昭56 富山大大学院修士課程了。同年日立コンピュータエンジニアリング(株)入社。平1(株)インテック・システム研究所入社。現在に至る。この間、ファジィ理論を用いた制御システムの開発ならびに画像計測の研究に従事。情報処理学会、日本ファジィ学会各会員。



椎名 徹

昭59 東北大・工・通信卒。昭61 同大大学院修士課程了。同年(株)富士通研究所入社。昭62 富山高専電気工学科助手。平6 同講師。現在に至る。この間、光回路・部品等の開発ならびに画像計測の研究に従事。応用物理学会会員。



松浦 弘毅

昭38 名大・工・電子卒。昭43 同大大学院博士課程了。同年金沢大学工学部助手。昭57 同電子工学科教授。現在同電気・情報工学科教授。工博。この間、光波応用計測、画像計測、生体情報処理の研究に従事。情報処理学会、計測自動制御学会、日本ME学会、テレビジョン学会、日本脳波・筋電図学会各会員。