

論 文

領域および輪郭線による降雪雪片の形状特徴解析

正員 村本健一郎[†] 正員 松浦 弘毅[†] 正員 椎名 徹^{††}

Analysis of Snowflake Shape by a Region and Contour Approach

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

あらまし 落下中の降雪雪片の形状を解析することは、雪片の生成メカニズムを解明する上で重要である。降雪雪片の形状を定量的に解析するためには、多くの雪片像より特徴量を抽出し、それらの相関を明らかに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輪郭線を記録した。記録された輪郭データを用いて、落下中の雪片の運動に關与する雪片の領域の特徴解析と、雪片同士の併合に關与する輪郭線の複雑さとの2通りの解析を行った。領域の特徴解析では、面積、重心、落下姿勢および正規化モーメント特徴量を求めた。一方、輪郭線の複雑さとして、円形度、凹率およびフラクタル次元を計算し、これらの関係を調べた。モーメント特徴量、円形度、凹率は、面積や撮影方向により、影響を受けるが、フラクタル次元は、ほとんど一定値をとることがわかった。

キーワード 画像計測, 領域解析, 輪郭線解析, 降雪雪片, フラクタル次元

1. ま え が き

雲の中で、数十 μm の大きさの氷晶が発生すると10数分のうちに1mmを超える雪結晶までに成長する⁽¹⁾。やがて、このように成長した雪結晶は自分の重みで落下が始まり、雲粒の中を落下していく途中で雲粒が雪結晶に付着して種々の形に成長し、日本では樹枝状六花と呼ばれる対称六角形が多く見られる。この樹枝状六花の落下速度は遅いので、すぐに空間密度が高まり互いに接触する割合が高く、しかも枝の構造が機械的にからみやすいため、いくつもの結晶の合体した雪片となり、その形は立体的で複雑である^{(2)~(5)}。しかしながら、これまでの雪片の研究のほとんどは地上に落下した雪を観測していたので^{(6)~(8)}、空中での立体的な形状とは必ずしも一致していなかった。また落下中の雪片同士の併合には、雪片輪郭線の複雑さや雪片の相互作用が關与していることが報告されているが^{(9)~(11)}、落下中の雪片についての形状や輪郭線の複雑さは、まだ

定量的に解析されていない。

一般に、平面図形の特徴解析には、領域を解析する方法と、領域の輪郭線を解析する方法とがある⁽¹²⁾。領域の特徴解析は平面図形を平板とみなしたときの解析方法である。一方、輪郭線の特徴解析では輪郭線の複雑さを調べることが多い。雪片の形状の場合には、領域の特徴は落下中の姿勢や運動に關与し⁽¹¹⁾、輪郭線の複雑さは雪片同士の併合に關与することが報告されている^{(9),(10)}。

本研究では、空中を落下している降雪雪片の形状を立体的に解析することを目的として、まず同時に2方向(水平および垂直)から落下中の降雪雪片をテレビカメラにより連続的に撮影した。次に、この2方向からの2次元映像を画像処理して雪片の輪郭線をチェーンコードを用いて符号化した。記録された輪郭データより、領域の特徴解析および輪郭線の複雑さを解析した。領域の特徴解析では、面積、重心、落下姿勢を示す慣性の主軸および正規化モーメント特徴量を求めた。一方、輪郭線の複雑さとして、円形度、凹率およびフラクタル次元を計算し、これらの関係を調べた。

本論文のデータは、1991年12月に北海道大学低温科学研究所3階屋上(札幌市)で観測されたものである。

[†] 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

^{††} 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

2. 観測装置

図1(a)は観測装置である。撮影空間を限定するために、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、その映像を水平方向および垂直方向の2台のテレビカメラ(各方向からの撮影範囲: 5.1 cm × 5.1 cm, 両方向のカメラから観測空間までの撮影距離: 122 cm, シャッタースピード: 1/4,000 秒)で撮影した。図1(b)に示すように、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、ビデオレコーダで録画した。再生映像から、両方向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: 512 × 512 画素, 濃淡: 256 階調)を入力し、各種の処理を行った。撮影空間と分解能との対応から、1画素長は0.1 mm となり、雪片の断面積はほとんど4~50 mm²の範囲に存在するので、1個の雪片は400~5,000 画素から構成されることになる。また、落下速度は、粒径が大きいほど速くなり、1~10 mmの

粒径に対して20~150 cm/秒であるので^{(6),(13)}、横方向からの雪片映像の残像は0.05~0.375 mm となる。従って、横方向からの雪片映像の残像による影響は5% 以内の誤差となる。一方、上方向からの雪片映像については、撮影空間はレンズの被写界深度内であるので、鮮明に撮影することができた。

3. 輪郭形状記録

降雪雪片を抽出しその形状を記録するために、雪片の密度を一樣とみなして雪片の映像を2値化し、その形状を輪郭線により記録する手法を用いた。最初にカメラから取り込まれた降雪雪片の映像(図2(a))を画像処理装置に入力し、判別分析2値化法によりしきい値を決め⁽¹²⁾、2値化したデータをコンピュータのメモリ上に記録して、雪片を背景から分離した後(図2(b))、以下の方法で雪片の輪郭線を抽出する。雪片を表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、図2(c)に示すように、雪片と背景との境界線上に3 × 3 画素のマスクを作り⁽¹²⁾、中央の画素に対して、隣接する境界画素が0~7のどの位置にあるかによって、方向コードを順次割り当てる(図2(d))。この方法では雪片の位置および形状を、開始点の座標とそれに続く輪郭線の方向データ(3ビット)だけにより記録しているので、すべての輪郭線の座標を記録するよりもデータ量が少なくなる。図3に上方向および

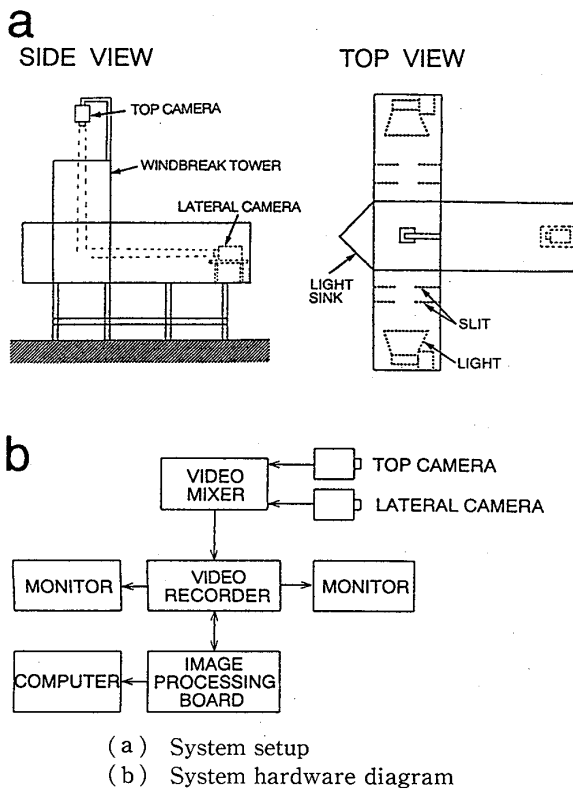
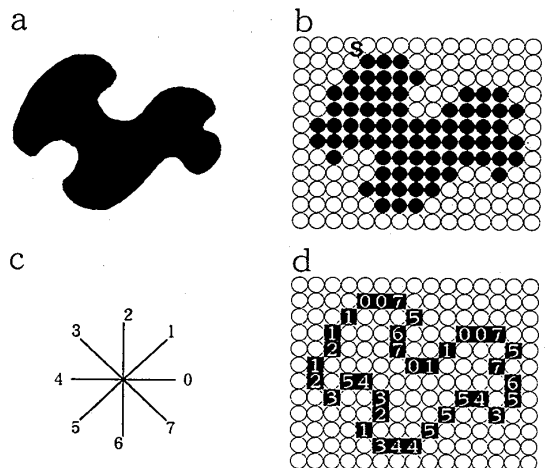


図1 降雪観測システム

Fig. 1 Configuration of equipment for measuring falling attitude of snowflakes.



(a) A model of snowflake
 (b) Binary image of snowflake
 (c) Direction code
 (d) Example of direction code for contour image

図2 チェインコードによる輪郭線解析
 Fig. 2 Analysis of contour images by chain code.

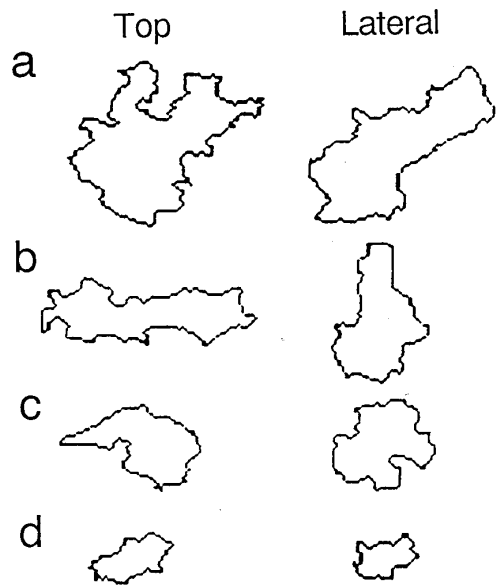


図3 2値化処理した雪片像の輪郭線データによる表示例
Fig. 3 Examples of snowflake image reconstructed by direction code.

横方向から撮影された4個の雪片像について、2値化処理後の輪郭線データによる表示例を示す。

4. 解析方法

前章までに述べた方法で抽出および記録した上方向および横方向からの降雪雪片の映像の2次元輪郭線データを用いて雪片の形状を解析した。ここでは雪片領域内の特徴量の定量化としてモーメントによる解析を行い、雪片輪郭線の複雑さの定量化として円形度、凹率およびフラクタル次元の解析を行った。

4.1 モーメント特徴

座標 (i, j) における画像 $f(i, j)$ の $(p+q)$ 次のモーメント m_{pq} は

$$m_{pq} = \sum_i \sum_j i^p j^q f(i, j) \quad (1)$$

で定義される⁽¹²⁾。検出した雪片は2値画像であるから、 $f(i, j)$ は雪片の領域内で1、背景で0とした。

4.1.1 面積

式(1)で、0次のモーメント m_{00} は、 $f(i, j)$ の総和となり、面積を表す。

4.1.2 重心

式(1)で、1次のモーメント m_{10} ならびに m_{01} を m_{00} で正規化することにより、領域の重心座標 $G(i_G, j_G)$ が求められる。すなわち、

$$i_G = m_{10} / m_{00} \quad (2)$$

$$j_G = m_{01} / m_{00}$$

これより、雪片の重心を通る最長および最短粒径を求めることができる。

4.1.3 正規化モーメント特徴量

重心の周りのモーメント M_{pq} は、特に、重心モーメントと呼ばれ

$$M_{pq} = \sum_i \sum_j (i - i_G)^p (j - j_G)^q f(i, j) \quad (3)$$

で与えられる⁽¹²⁾。また、2次モーメントは慣性モーメントとも言われる。画像 $f(i, j)$ の2次重心モーメントは式(3)で、 $p=0, q=2$ ならびに $p=2, q=0$ とおくと求められ、次のようになる。

$$\begin{aligned} M_f &= \sum_i \sum_j \{(j - j_G)^2 + (i - i_G)^2\} f(i, j) \\ &= M_{02} + M_{20} \end{aligned} \quad (4)$$

2次モーメントの形状に依存する部分だけを取り出すために、以下のように正規化する。

領域が半径 R 、面積 A の円の2次モーメント M_c は

$$\begin{aligned} M_c &= \sum_i \sum_j (j^2 + i^2) f(i, j) \\ &= \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^R r^2 r dr d\theta \\ &= \frac{\pi}{2} R^4 = \frac{A^2}{2\pi} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。よって、2次重心モーメントの正規化量 M_n を

$$M_n = \frac{2\pi}{m_{00}^2} M_f \quad (6)$$

で表す。正規化された2次重心モーメント M_n は、領域の大きさ、並進および回転に関して不変特徴量をもつ⁽¹⁴⁾。 M_n は画像 $f(i, j)$ の形状が円のときに最小値1となり、円より変形するに従って大きい値になる。ここでは、4.2.1で述べる円形度との対応から、モーメント特徴量として、 M_n の逆数を用いる。 $1/M_n$ は領域の重心への集まり方を反映しているため、雪片形状の特徴量として使うことができる。

4.1.4 慣性の主軸

式(4)で、重心を原点としたときの x 軸ならびに y 軸についての2次モーメントを、それぞれ、 μ_{02} ならびに μ_{20} とすると、原点の周りの2次モーメント μ_2 は、次のように表すことができる。

$$\mu_2 = \mu_{02} + \mu_{20} = \sum_i \sum_j j^2 f(i, j) + \sum_i \sum_j i^2 f(i, j) \quad (7)$$

更に、原点を通る傾き θ の直線

$$j = i \tan \theta \quad (8)$$

の周りの2次モーメント μ_0 を求め、 μ_0 が最小となる角が主軸方向 θ で、次式で表される⁽¹²⁾。

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}} \right\} \quad (9)$$

この θ は図形が伸びている方向を表しているので、横方向から撮影した降雪雪片の映像から、落下中の傾き、すなわち落下姿勢を求めることができる。

4.2 輪郭線解析

雪片の2次元輪郭線データを使って、形状の複雑さを円形度、凹率およびフラクタル次元により求める。

4.2.1 円形度

円形度 ϕ は、輪郭線長を L 、断面積を A とすると $\phi = 4\pi A / L^2$ (10)

で表される値である。円のときは1.0となり、複雑な形状になるほど小さい値となり、画像のままとまりの程度を示すことができる。

4.2.2 凹率

図4に示すように雪片をその重心(G)から輪郭線までの距離と角度で極座標表示したときに、輪郭線が多価関数となる部分の長さ(l)の全輪郭線長(L)に対する割合を凹率と定義する。従って、凹部が存在しないときは0となり、凹部が多いと大きな値となり、最大で0.5となる。

4.2.3 フラクタル次元

フラクタル次元は輪郭線の複雑さを表すために用いることができる。測定に使う物差しの長さ ϵ を変えたときの輪郭線長 $L(\epsilon)$ を求め、 $L(\epsilon)$ と ϵ を対数グラフにプロットしたとき、ある範囲でデータが直線上に並べばフラクタルとなり、その直線の傾きから次のフラクタル次元 D が定義されている⁽¹⁵⁾。

$$L(\epsilon) = k\epsilon^{1-D} \quad (11)$$

但し、 k は定数である。各データはばらつきがあるが、

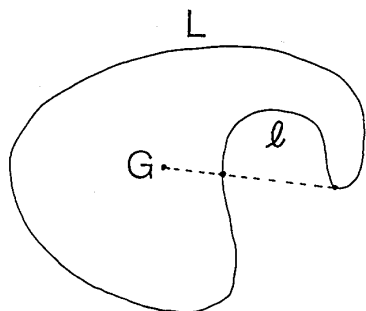
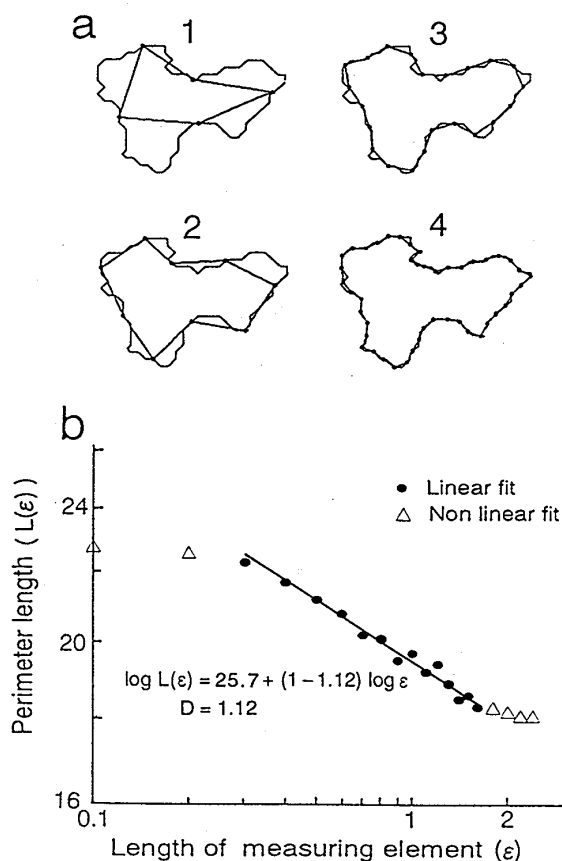


図4 凹率
Fig. 4 Concave rate.

最小2乗法により ϵ に対する $L(\epsilon)$ の直線を探し、その直線の傾きよりフラクタル次元 D を計算できる。図5(a)は実際の雪片例について ϵ の長さを次第に短くしていったときの $L(\epsilon)$ の変化の様子を示す。図5(b)より ϵ と $L(\epsilon)$ は直線上に並ぶ範囲が存在するので、フラクタルであることを示している。従って、その直線の傾きから D を求めることができる。

5. 解析結果と考察

前章で述べた方法で落下中の降雪雪片の形状を解析する前に、5.1では、実際にカメラから取り込んだ既知の図形に対する形状特徴量の誤差を調べた。5.2では、同一雪片の上方向と横方向からの形状特徴量の比較を行った。5.3では、横方向からの雪片映像について、落下中の傾き(落下姿勢)を調べた。5.4では、雪片の大きさに対する形状特徴量を調べた。5.5では、各形状特徴量間の関係を調べた。



(a) Measurement of perimeter of snowflake
(b) Slope obtained by a least-squares linear fit

図5 雪片のフラクタル次元の計算例
Fig. 5 Example of determination of fractal dimension on snowflake.

表1 測定誤差

		円			正方形			正三角形		
面積 (mm ²)		5	20	50	5	20	50	5	20	50
誤差 (%)	面積	8.9	4.4	2.5	10.0	5.0	2.9	11.4	5.7	3.0
	最短径/最長径	10.1	5.1	3.6	11.2	5.6	4.0	12.3	6.2	4.5
	モーメント	8.1	4.0	2.3	9.2	4.6	2.8	10.3	5.1	3.0
	円形度	11.7	7.8	6.2	11.0	6.7	4.8	14.9	9.9	7.8

5.1 測定誤差

前章で述べた形状特徴量は、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などの影響を受ける。そこで、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、種々の大きさの円、正方形、正三角形を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、真値との誤差の絶対値の平均を示したものである。本実験で観測された雪片の面積は約4~50 mm²であるから、誤差は最大で約15%程度である。

5.2 同一雪片の2方向からの形状特徴量の比較

表2は、図3に示した4個の雪片についての形状特徴量の解析結果である。以下に1991年12月17日21時30分~23時40分の間に札幌市で観測された58個の雪片について解析を行った結果を示す。

図6は、同一雪片の上方向と横方向からの形状に関して、(a)面積、(b)最短径と最長径の比、(c)モーメント特徴量、(d)円形度、(e)凹率、(f)フラクタル次元により解析した結果である。両方向の相関係数は、面積(a)、モーメント特徴量(c)および円形度(d)では、それぞれ、0.94、0.58、0.82となり、上方向と横方向の解析結果に正の相関傾向が見られたが、最短径と最長径の比(b)、凹率(e)およびフラクタル次元(f)では両方向に特別の関係が見られなかった。また、面積(a)は81%の雪片で上方向からの面積の方が大きいことから、雪片は空気抵抗を多く受ける形状で落下していることがわかる。更に、円形度(d)は横方向の値が大きく、凹率(e)は上方向の値が大きいと言える。

5.3 落下姿勢

図7(a)は、横方向から撮影した雪片映像のうち、最短径と最長径の比が1/3以下の細長い形状の33個の雪片について、落下姿勢(主軸方向)の分布を示したものである。空気の最大抵抗を受ける0~30°付近にピークが現れ、更に、70~90°付近に第2のピークが現れた。

表2 形状特徴量

形状特徴	方向	雪片 a	雪片 b	雪片 c	雪片 d
面積 (mm ²)	上	47.3	29.5	21.3	7.8
	横	44.0	25.7	23.6	6.5
最短径/最長径	上	0.38	0.15	0.47	0.38
	横	0.27	0.36	0.40	0.50
モーメント特徴量	上	0.78	0.45	0.71	0.77
	横	0.59	0.67	0.76	0.83
円形度	上	0.24	0.21	0.34	0.56
	横	0.31	0.34	0.30	0.56
凹率	上	0.08	0.11	0.05	0.00
	横	0.04	0.03	0.08	0.02
フラクタル次元	上	1.12	1.14	1.15	1.13
	横	1.10	1.13	1.19	1.12
落下姿勢(度)	横	50.7	4.4	12.8	37.2

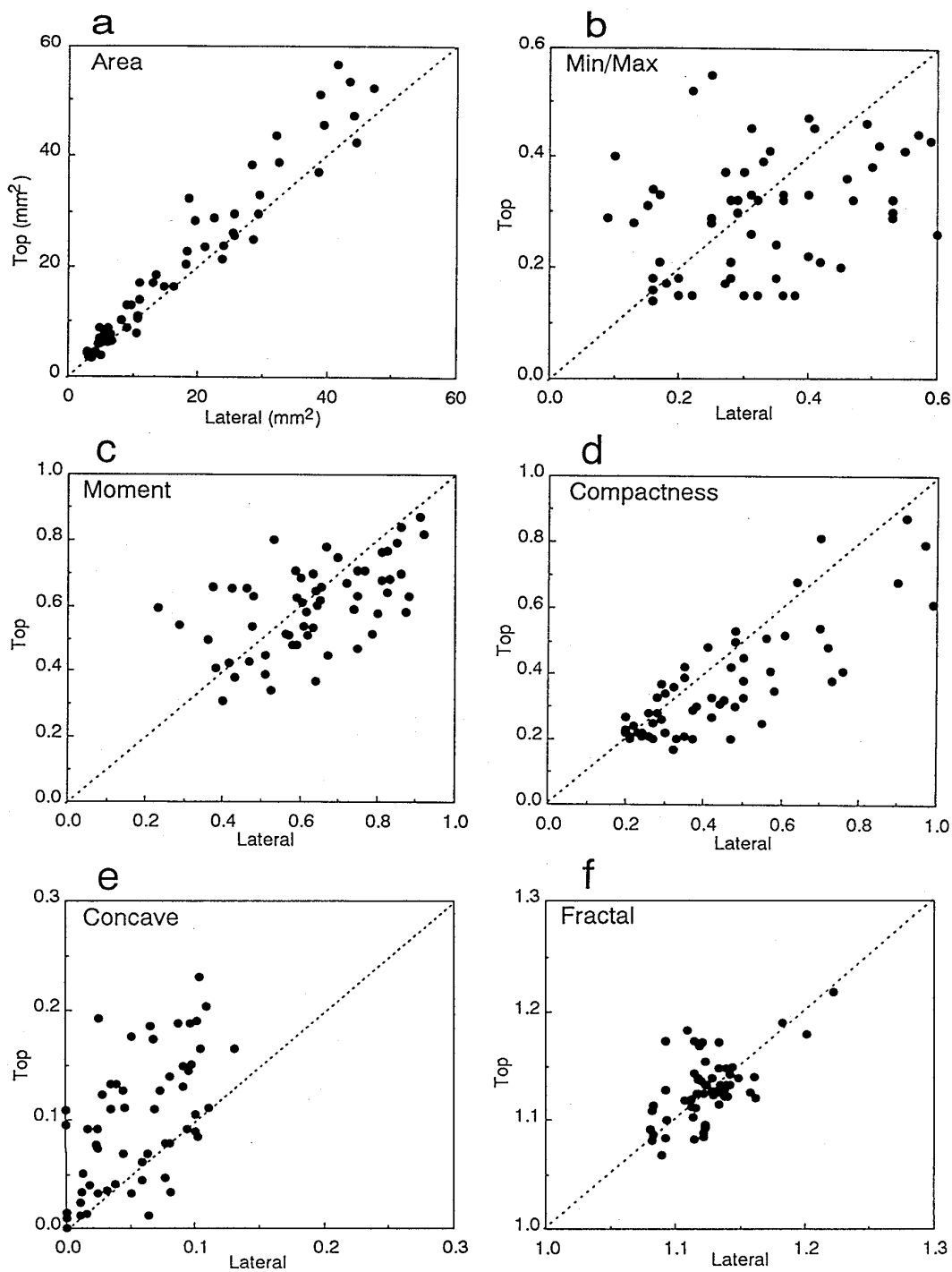
この分布は角柱状結晶の場合の落下姿勢とほぼ同じ傾向である⁽¹¹⁾。また、図7(b)は、面積と落下姿勢との関係である。面積が小さいほど、落下姿勢角度の値ならびに分散がともに小さくなる傾向が見られる。

5.4 雪片の面積と他の形状特徴量との比較

図8は上方向から撮影した雪片映像について、雪片の面積に対する、(a)最短径と最長径の比、(b)モーメント特徴量、(c)円形度、(d)凹率、(e)フラクタル次元との関係を平均値と分散で表したグラフである。最短径と最長径の比(a)、モーメント特徴量(b)および円形度(c)は面積が大きくなるほど小さな値をとり、凹率(d)は、面積が大きくなるほど値は大きくなる。この傾向は、表1の測定誤差の割合を考慮しても一般的な傾向と言える。一方、フラクタル次元(e)は断面積に関係なくほぼ一定値をとることがわかる。

5.5 各形状特徴量の間関係

図9(a)は、領域の特徴量である最短径と最長径の比に対するモーメント特徴量の関係である。最短径と最長径の比は雪片が丸いほど1に近づき、モーメント特徴量は雪片内部の重心への集中の程度を表しているの



- (a) Area
- (b) Ratio of major to minor axes
- (c) Invariant moment
- (d) Compactness
- (e) Concave rate
- (f) Fractal dimension

図6 同一雪片の2方向からの形状特徴
 Fig. 6 Two-dimensional display of the feature parameters of lateral and top image on snowflake.

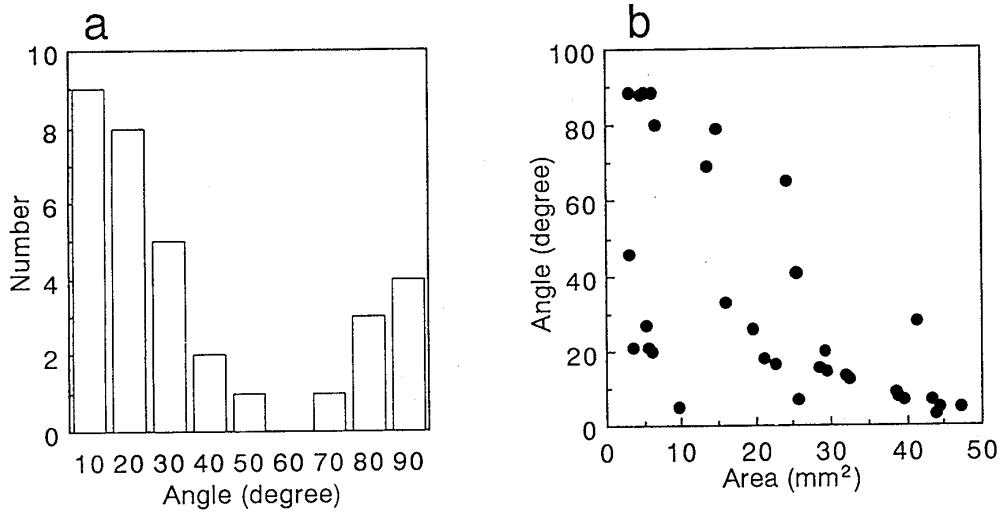
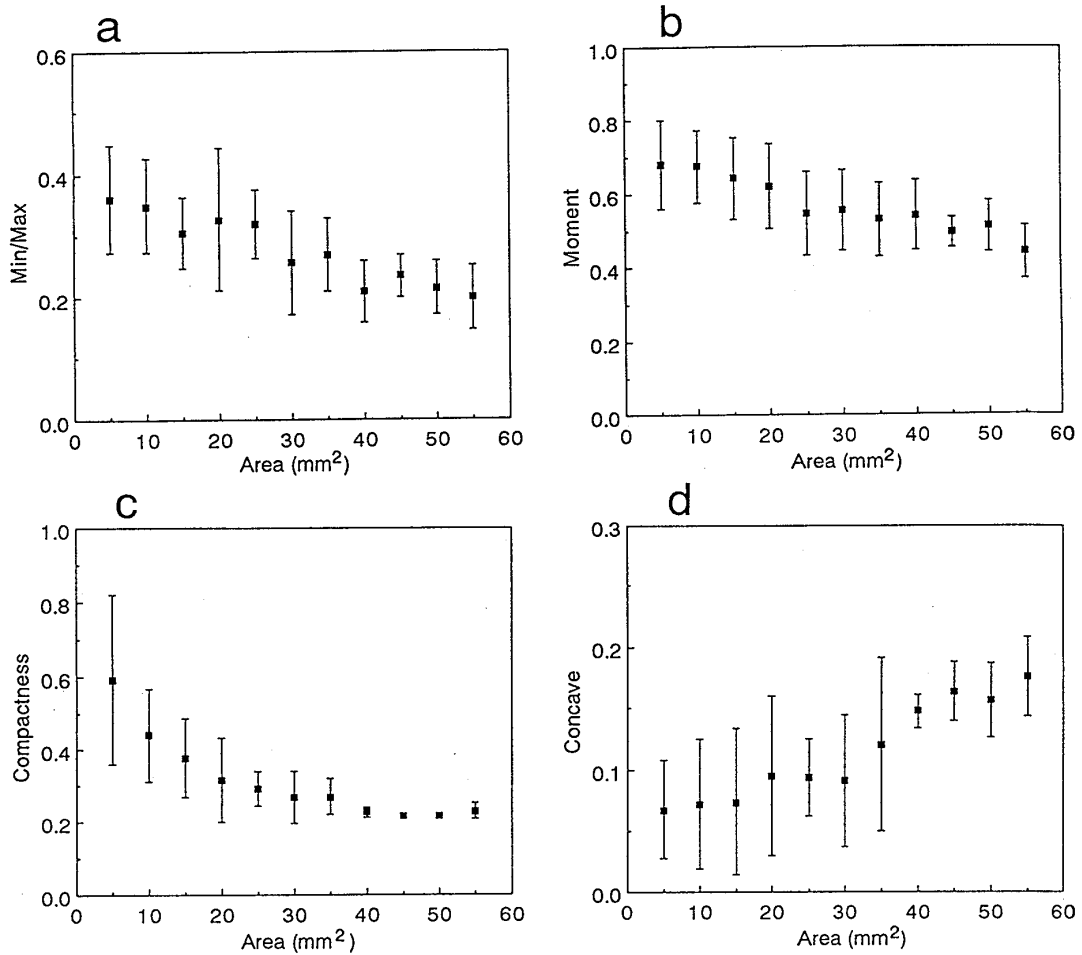


図7 落下姿勢の分布

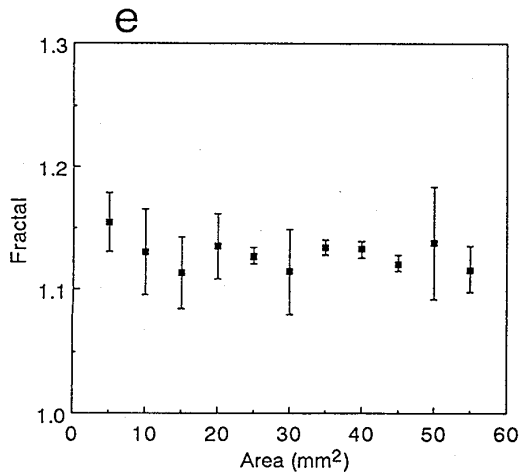
Fig. 7 Frequency distribution of the deviation of principal axis directions from the horizontal plane.



- (a) Ratio of major to minor axes
- (b) Invariant moment
- (c) Compactness
- (d) Concave rate

図8 面積と他の形状特徴との関係

Fig. 8 Relationship between the area and the other feature parameters.



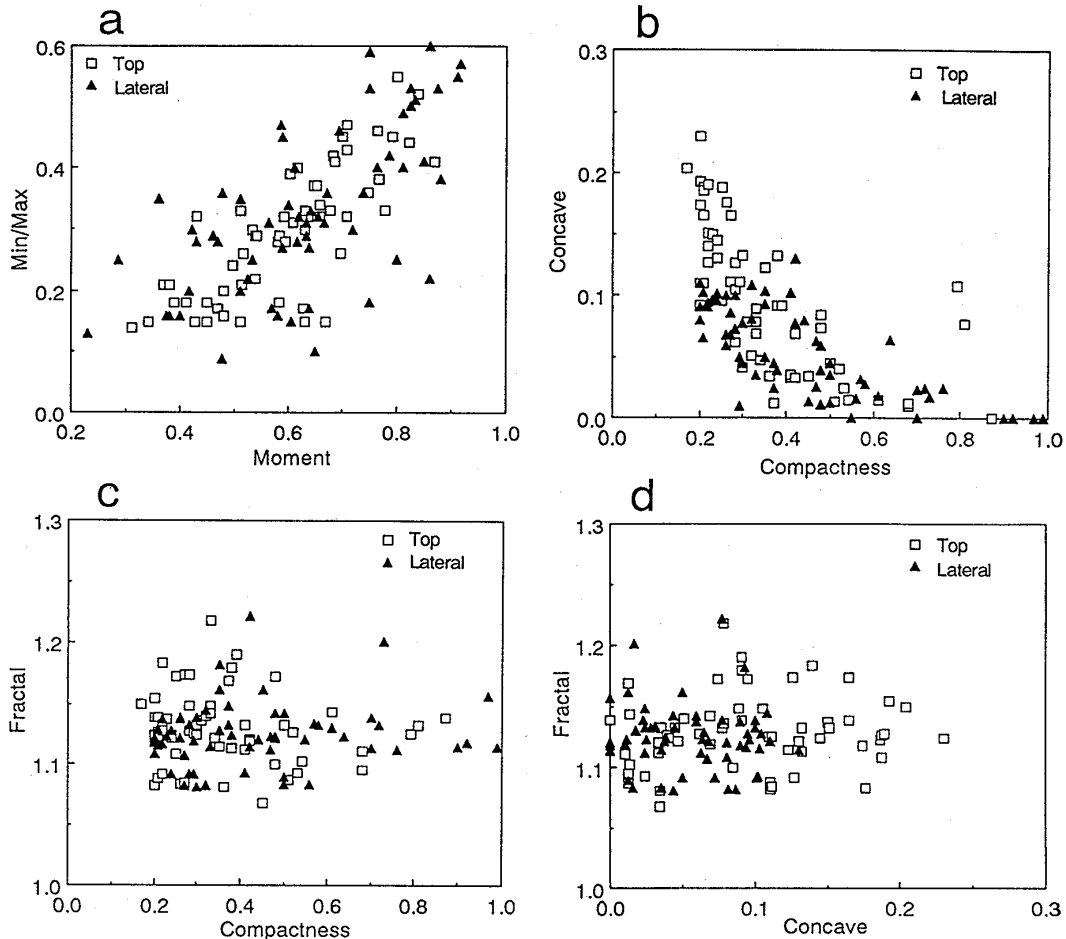
(e) Fractal dimension

図8 (つづき)
Fig. 8 (Continued.)

で、二つの特徴量は正の相関傾向 (上方向の相関係数: 0.77, 横方向の相関係数: 0.64) を示した. 図 9 (b) は, 輪郭線の特徴量である, 凹率と円形度との関係である. 凹率は円形度とは逆の特徴量と言えるので, 二つの特徴量は負の相関傾向 (上方向の相関係数: -0.68 , 横方向の相関係数: -0.73) を示した. 図 9 (c) および (d) は, 輪郭線の複雑さを表すフラクタル次元に対する, 他の輪郭線の特徴量である円形度と凹率との関係である. フラクタル次元は, 円形度の $0.2 \sim 1.0$ および凹率の $0.0 \sim 0.2$ の変化に対してほぼ一定の値となった.

5.6 雪片の形状特徴量についての考察

雪片の領域の特徴量である最短径と最長径の比に対するモーメント特徴量との関係 (図 9 (a)), 輪郭線の特徴量である凹率と円形度との関係 (図 9 (b)) は, いずれも妥当な相関傾向が見られたので, これらの特徴量



(a) Invariant moment and ratio of major to minor axes
(b) Compactness and invariant moment
(c) Compactness and fractal dimension
(d) Concave rate and fractal dimension

図9 形状特徴量間の関係
Fig. 9 Relationship between feature parameters.

は雪片の形状解析に有効であると言える。雲の中で発生した小さな雪結晶は、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。この雪片の大きさと形状特徴との関係については(図8), 雪片の面積が大きくなるに従い、最短径と最長径の比, モーメント特徴量, 円形度は小さく, 逆に凹率は大きくなり, 更に落下姿勢は水平に近づくことから(図7(b)), 雪結晶の併合数が多くなるほど, 横方向に細長い形状になることが示された。また, 雪片の面積は上方向の映像が横方向映像より大きく(図6(a)), 落下姿勢は水平方向が多いことから(図7(a)), 雪片は空気抵抗を多く受ける形状で落下していることが示された。一方, フラクタル次元は雪片の大きさや撮影方向に影響を受けず, ほぼ一定の値をとることから(図6(f), 8(e), 9(c), 9(d)), 結晶の併合数, すなわち面積や他の領域特徴量および輪郭線特徴量に関係なく, 雪片には固有のフラクタル次元が存在すると言える。

6. 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形状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と横方向から撮影し, 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領域特徴および輪郭線の複雑さを解析した。

形状解析パラメータのうち, 最短径と最長径の比およびモーメント特徴量は形状の内部へのまとまり方を示す尺度として, また円形度および凹率は輪郭線の複雑さを示す尺度として, 有効であることがわかった。一方, フラクタル次元は雪片の大きさや上方向と横方向の映像に関係なく雪片固有の値をもつことが明らかになった。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, 本論文の形状解析パラメータを使うことにより, 落下中の雪片の形状解析が可能となるので, 実際に併合が起こったときの雪片を観測するなどして, 雪片形状と併合過程との関係を明らかにしたい。また, 形状の定量化が可能となったので, 雪片形状のデータベースの構築へと発展できる。

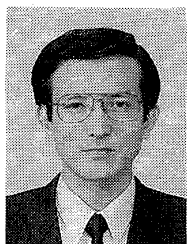
形状解析に加えて, 雪片の落下運動の解析も行うこ

とにより⁽¹⁶⁾, 形状と落下運動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, 02555117)によるものである。

文 献

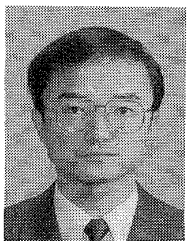
- (1) Mason B. J. : "Clouds, rain and rainmaking", Cambridge Univ. Press (1962); 大田正治, 内田英治訳: "雲と雨の物理", 総合科学出版(1968).
- (2) Higuchi K. : "On the coalescence between plane snow crystals", J. Meteor., **17**, pp. 239-243 (1960).
- (3) Justo J. and Weickmann H. K. : "Types of snowfall", Bull. Amer. Meteor. Soc., **54**, pp. 1148-1162 (1973).
- (4) Lo K. K. and Passarelli R. E. Jr. : "The growth of snow in winter storms: an airborne observational study", J. Atmos. Sci., **39**, pp. 697-706 (1982).
- (5) Vardiman L. : "The generation of secondary ice particles in clouds by crystal-crystal collision", J. Atmos. Sci., **35**, pp. 2168-2180 (1978).
- (6) Langleben M. P. : "The terminal velocity of snowflakes", Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **80**, pp. 174-181 (1954).
- (7) Iwai K. : "Three-dimensional structures of natural snow crystals shown by stereo-photo micrographs", Atmos. Res., **11**, pp. 137-147 (1989).
- (8) Rogers D. C. : "The aggregation of natural ice crystals", Rep. No. AR110, Dept. Atmos. Resources, University of Wyoming, pp. 1-35 (1974).
- (9) Passarelli R. E. Jr. : "Theoretical and observational study of snow-size spectra and snowflake aggregation efficiencies", J. Atmos. Sci., **35**, pp. 882-889 (1978).
- (10) Passarelli R. E. Jr. and Srivastava R. C. : "A new aspect of snowflake aggregation theory", J. Atmos. Sci., **36**, pp. 484-493 (1979).
- (11) Zikmunda J. and Vali G. : "Fall patterns and fall velocities of rimed ice crystals", J. Atmos. Sci., **29**, pp. 1334-1347 (1972).
- (12) Castleman K. R. : "Digital Image Processing", Prentice-Hall, Englewood Cliffs N. J. (1979).
- (13) 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).
- (14) Hu K. M. : "Visual pattern recognition by moment invariants", IRE Trans. Info. Theory, **8**, pp. 179-187 (1962).
- (15) Feder J. : "Fractals", Plenum Press (1988); 松下 貢, 早川美徳, 佐藤信一訳: "フラクタル", 啓学出版(1991).
- (16) 村本健一郎, 松浦弘毅, 香川隆夫, 椎名 徹, 小池俊雄 : "降雪雪片の落下運動解析", 信学技報, **IE91-73** (1991).
(平成4年7月28日受付, 11月24日再受付)

**村本健一郎**

昭46 富山大・工・電気卒。昭48 同大学院修士課程了。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、画像電子学会、日本ME学会、日本雪氷学会、IEEE 各会員。

**松浦 弘毅**

昭38 名大・工・電子卒。昭43 同大学院博士課程了。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、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。

**椎名 徹**

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