

# Analysis System for Falling Motion of Snowflakes Using Sequential Images

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-12-20 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24517/00052948">https://doi.org/10.24517/00052948</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



## 連続画像を用いた降雪雪片の落下運動解析システム

富山工業高等専門学校 正会員 椎 名 徹  
金沢大学工学部 正会員 村 本 健一郎

〈あらまし〉 降雪雪片の衝突・併合成長には、個々の雪片の落下速度の相違や雪片が落下するときの揺らぎが関係しているため、成長のメカニズム解明には雪片の落下運動を解析することが重要である。本研究では、水平同一方向からシャッタースピードおよび撮影視野の設定が異なる2台のCCDカメラを用いて、降雪雪片の形状と落下運動を同時に撮影し、連続的に画像処理するシステムを開発した。雪片の落下姿勢とその変動および形状の解析を行うために、落下中の雪片を狭い視野にて数フィールド連続して撮影した。また、同一の雪片を広い視野にて連続約20フィールド観測して、雪片の落下軌跡を追跡することにより落下運動を解析した。落下運動の特徴量として平均角度変動量を定義し、形状特徴量と落下姿勢および落下運動の変化との関係を求めた結果、落下姿勢を表す慣性主軸の長軸が落下の方向に対してほぼ直角となり、空気抵抗を大きく受ける方向に落下する傾向が実験的に確認された。

キーワード：画像計測、降雪雪片の連続画像、落下運動、落下姿勢、衝突・併合

〈Summary〉 Falling snowflakes were photographed simultaneously by two CCD cameras having different shutter speeds. The high speed camera was used for determining the shape and the low speed one to measure the motion. The shape of a snowflake and its falling motion are analyzed using continuously photographed image frames. The falling motion of a snowflake is calculated by tracing its position in subsequent frames. Relationships between shape and motion parameters were analyzed. Data indicate that tilt angle and falling direction were perpendicular to each other. It is considered that snowflakes encounter more resistance from air toward the upper direction during their fall.

**Key words:** Image processing measurement, Sequential image of snowflakes, Falling motion, Falling attitude, Collision and coalescence

### 1. まえがき

地上で観測される降雪雪片は、上空の降雪雲内での氷晶の発生および拡散成長と雲内での力学過程により成長した結果と考えられている<sup>1)</sup>。降雪雪片は、雲粒捕捉成長、衝突・併合成長により複雑な形状となり地上へと達する<sup>2)~5)</sup>。特に、降雪雪片の衝突・併合成長では、雪片同士の(鉛直方向の)落下速度の相違や、雪片が落下するときの(水平方向の)揺らぎが関係している。雪片の粒径が同じでも雲粒の付着具合により質量が異なり、それぞ

れの落下速度が異なるため、雪片同士の衝突・併合が起こる。この落下速度の相違による衝突・併合過程を想定することにより、雪片の粒径分布を理論的に計算する方法が試みられた<sup>6)~8)</sup>。しかし、雲粒付着具合と質量および落下速度の関係については定量的に測定されていなかった。

我々は、これまで落下中の降雪雪片の大きさと落下速度を自動的に長期間観測するシステムを作成した。雪片映像から得られる降雪情報をデータベース化することを目的として、パーソナルコンピュータと画像処理ボードを用いて毎分48フィールドをリアルタイム処理した<sup>9)</sup>。このシステムにより個々の雪片の大きさと落下速度は自動測定できたが、雪片生成メカニズムの解明に不可欠となる形状と落下運動の同時解析はできなかった。

<sup>1)</sup>“Analysis System for Falling Motion of Snowflakes Using Sequential Images” by Toru SHINA (Member) (Toyama National College of Technology) and Ken-ichiro MURAMOTO (Member) (Faculty of Engineering, Kanazawa University).

降雪雪片の落下運動を詳細に解析するには、連続した落下映像を解析する必要がある。また、より多くの野外観測を行うため、形状および落下運動のリアルタイム自動解析システムの確立が不可欠であった。本研究では、雪片の形状とその落下姿勢および落下運動パターンとの関係を解析するために、落下中の降雪雪片の連続映像を画像処理できる自動解析システムを開発し、水平方向および鉛直方向の雪片同士の衝突・併合に関する物理量を求める。

## 2. 降雪雪片の落下運動観測システム

### 2.1 落下運動観測装置

降雪雪片の落下運動観測装置の概観を図1に示す。落下中の降雪雪片の運動が風の影響を受けないように縦と横各1m、高さ2mのアルミフェンスで囲み、更にその周囲を2重の防風ネット(縦と横各7m、高さ6mおよび縦と横各4m、高さ5m)で囲んだ。また、複数の雪片が同時に観測されないように、観測塔の上部は5cm×5cmの窓を開けた板で覆った。この板を設置したことによって降雪雪片の運動の変化が起こらないように、観測装置下部に足を作成し、アルミフェンスと地面との間に通気口を設けた。これにより無風状態の観測装置上空を雪片が自然落下し、装置上部の小さな窓を通過する前後において、雪片の運動に変化がないことを目視により確認した。また、単位時間に小さな窓を通過する雪片の粒径分布を調べたところ、観測塔上部を板で覆わない場合と同様の粒径分布が得られた<sup>9)</sup>。窓から入り込んだ雪片は自然落下し、250Wのハロゲンランプ4台により照射された観測空間内を落下するときに白く反射するので、2台のCCDカメラ(シャッタースピード：1/

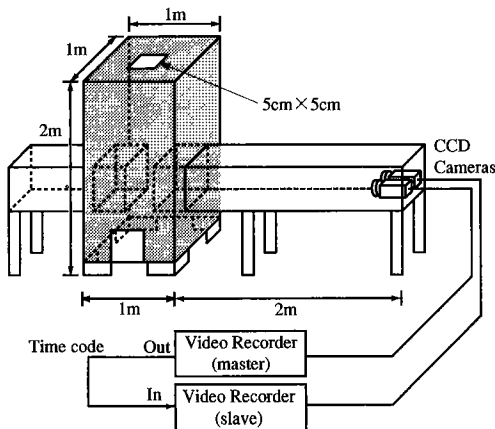


図1 降雪雪片の落下運動観測装置

Fig. 1 Configuration of equipment for measuring snow particles.

60秒(低速)および1/4000秒(高速))を用いて撮影し、ビデオ録画した。2台のカメラの映像を同期録画するため、タイムレコーダ内蔵の録画機(松下電器(株)製、AG 7750, 2台)を用いた。これにより、同期の取れた映像を再生することが可能となった。なお、降雪雪片の落下運動の観測(合計232個)は、1997年1月10日～30日、新潟県南魚沼郡六日町にて行った<sup>10)</sup>。

図2のシャッタースピードを1/60秒に設定したカメラは、連続映像を用いた落下運動の解析に使用した。同一雪片の落下軌跡をより長く追跡するために、観測空間は縦240mm、横96mm、奥行き70mmの広い空間に設定し、連続した7～24フィールドの画像から雪片軌跡を追跡することにより落下運動を求めた。また、シャッタースピードを低速(1/60秒)に設定することにより、雪片映像の残像の長さより落下速度を同時に測定した。次に、形状情報を詳細に捕らえるために、図2のシャッタースピード1/4000秒に設定したカメラの撮影空間を縦48mm、横32mm、奥行き70mmの狭い空間に設定した。この空間を雪片が落下中に連続して2～5フィールド撮影されるので、落下姿勢を示す慣性主軸の角度と落下運動による角度の変化をモーメント法により求めた<sup>11)</sup>。

2台のカメラの観測空間は、図2のように広く設定した観測空間の中心部に、狭く設定した観測空間が位置するように設定して、同一の雪片を撮影できるように2台のカメラの撮影方向を一致させた。また、カメラと観測空間の距離を2.5mに離すことにより、撮影空間はレンズの被写界深度内に設定され、雪片の形状と落下運動を鮮明に撮影することができた。なお、上記の観測空間を用いると、今回の観測において1/4000秒のCCDカメラの映像1画面に2個以上の雪片が観測されることはなかった。また、平均約5分間隔で1個の雪片が撮影された。

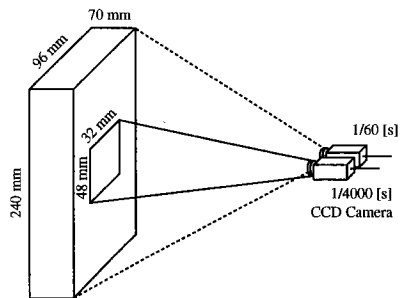


図2 カメラの設定と撮影空間

Fig. 2 Shutter speed and photographing space.

## 2.2 落下運動画像解析システム

2.1の落下運動観測装置を用いて得られた映像をパソコン(PC/AT 互換機)用の画像処理ボード((株)フoton製 FDM-PCI II, PCIバス)にて自動解析するシステムを作成した。この画像処理ボードは、パソコンのメインメモリに NTSC 映像信号をデジタル記録することが可能である。連続数十フィールド以上の映像を蓄積することができるようにパソコンのメインメモリを 128 MB に増設した。この画像処理ボードは映像入力端子を 6 個装備しているため、本研究では 2 台の CCD カメラの映像を同時に取り込み、映像を画像合成した。入力信号は NTSC 信号のため、1/60 秒ごとに奇数、偶数フィールドを連続して読み込み(合計 1/30 秒に 1 フレーム)、各フィールドごとに、縦横 240×512 画素、白黒濃淡 256 階調の画像を解析した。実際に観測、録画した雪片映像をビデオ再生し、リアルタイムで自動解析を行った。

### 2.2.1 降雪雪片映像の画像処理手順

画像処理ボードにて 1 フィールドを取り込み、2 値化処理した後の降雪雪片の映像例を図 3 に示す。2 台のカメラを用いて撮影された同一雪片の映像を 1 枚の画像に合成しながら、1 秒分の 30 フレーム(60 フィールド)を連続画像としてメインメモリに取り込み、自動解析した。左の領域はシャッタースピードが 1/4000 秒に設定されたカメラにより取り込まれた雪片映像を示し、右の領域は 1/60 秒に設定されたカメラにより取り込まれた映像を示す。これら左右の領域には同一の雪片が撮影されている。画面右側の破線で囲まれた領域が画面左側の全視野範囲に相当する。

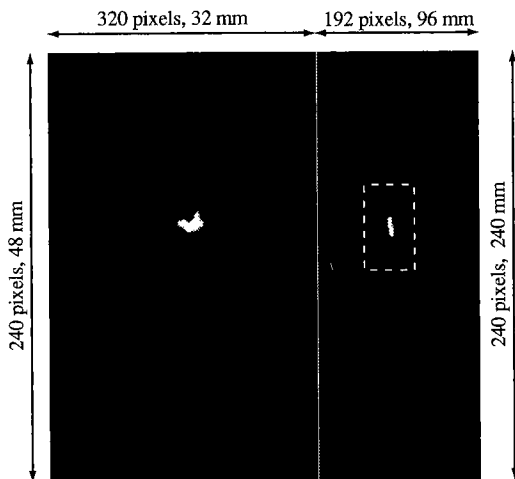


図 3 降雪雪片映像

Fig. 3 Typical snowflake images photographed by two cameras.

本システムの画像解析の処理手順を図 4 に示す。1 個の雪片が落下中の連続映像を画像処理する手順を以下に示す。

- (1) 画像処理ボードにて連続 60 フィールド(1 秒間分)の画像をメインメモリに取り込む。
  - (2) 図 3 の画面右側の破線で囲まれた領域内において水平走査線数本を検索し、雪片(ある濃度値以上の白い領域)が存在するかどうか調べる。最初のフィールドから順次各フィールドについて検索する。
  - (3) あるフィールドにおいて白い領域が存在する場合は雪片を検出したものとして、(4)以降の処理(雪片の画像解析)を行う。雪片が存在しない場合には再び(1)の処理に戻る。
  - (4) 雪片の検出されたフィールドを中心として、前後の連続したフィールドから同一雪片の検索を行う(2.2.2 参照)。
  - (5) 連続画像から雪片の落下映像が撮影された映像のみを 2 値化し、形状および落下運動を解析してその結果を保存する。
- (1)~(5)の処理を繰り返すことにより、個々の雪片の形状および落下運動の自動解析を行う。

(2)の画面右側の領域に雪片が存在する場合には、撮影された雪片映像が任意の水平走査線を必ず通過するため(後述の 2.2.2 および図 5 参照)、5 cm×5 cm の窓から降ってくる降雪雪片を確実に検出し、画像処理することができた。また、雪片を検出したときの画像解析は 10 秒間以内で処理されるため、約 5 分ごとに窓から入ってくる雪片も今回の観測では 95%検出することができた。

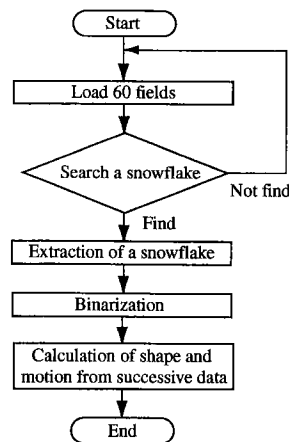


図 4 処理手順

Fig. 4 Diagram of processing.

2.2.2 連続フィールドにおける同一雪片の抽出

2.2.1で述べたように、60フィールドの映像の中に同一の雪片映像が複数フィールド連続して存在する。奇数および偶数フィールドを複数枚連続して重ね合わせ、1個の雪片が落下する様子を1枚の画像に合成した例を図5に示す。画面の左右両側に雪片が存在するフィールドには、対応するそれぞれの雪片映像に番号を付記した。画面右側には連続した7~24フィールドに同一雪片映像が存在し、それらフィールドの中で連続した2~5フィールドにおいて画面左側にも同一の雪片映像が撮影された。

今回の落下運動観測では、1フィールドに降雪雪片が1個のみ撮影されたので、画面右側の広い視野内で検出された雪片の重心座標から画面左側の対応する位置座標を求め、この座標を基準として雪片を検索することにより画面右側と左側との同一雪片の対応を求めた。この方法により観測された全ての雪片について対応が取れた。

一方、図5の広い視野内(画面右側)での映像において、連続したフィールドの前後の雪片映像はほとんど接触しており、落下運動の軌跡を描くことがわかる。そこで、カメラのシャッタースピードが1/60秒による雪片の残像を利用して、1/60秒後(または1/60秒前)の映像における雪片の位置を予測することが可能である。次のフィールドにおける雪片位置の推定方法を図5左の拡大図に示す。上から下へ雪片はほぼ鉛直方向に落下し、1/60秒間に移動した雪片の残像が撮影される。そこで、画面右側の2値化した雪片映像の各y座標における左右の境界のx座標を求めて、2点追跡法により骨格線を求めた。この骨格線を直線近似し、方向をもつベクトルとして、次のフィールドにおける雪片の予測される座標を重心からの移動ベクトルにより計算した。この予測した座標の近傍を検索することにより、新しいフィールド

での同一雪片を高速に特定できた。

2.2.1の(3)のように、あるフィールドの画面右側において雪片が一度検出されると、その前後のフィールドについて雪片の位置を推定し、その近傍を検索することにより同一雪片の落下運動を連続して追跡できた。保存されている1秒間分の60フィールド全てについて順番に雪片を検索、追跡する方法よりも、本手法は高速に雪片を検出し、雪片の撮影された映像のみを画像解析することが可能である。

3. 雪片運動特徴量

前章の落下運動画像解析システムにて自動取得する雪片運動特徴量を以下に示す。

3.1 形状特徴量

図5から図6のように1画面ごとに抽出された雪片領域について、モーメント法を用いた形状解析を行った。座標*(i, j)*における濃度*f(i, j)*の(*p+q*)次のモーメント  $m_{pq}$  は、

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

で定義される。対象となる画像は2値化画像とし、濃度*f(i, j)*は雪片領域では1、背景領域では0とした。重心を中心としたモーメント  $M_{pq}$  は特に重心モーメントと呼ばれ

$$M_{pq} = \sum_i \sum_j f(i, j) (i - i_c)^p (j - j_c)^q \quad (2)$$

で与えられる。ここで、(*i<sub>c</sub>, j<sub>c</sub>*)は重心の座標を表す。

3.1.1 面積および重心

雪片の断面積 *A* は、雪片領域の濃度を全て1として、式(1)における0次モーメント  $m_{00}$  で与えられる。また、1次モーメント  $m_{10}$  および  $m_{01}$  を面積にて正規化することにより、雪片領域内における重心が求められる。

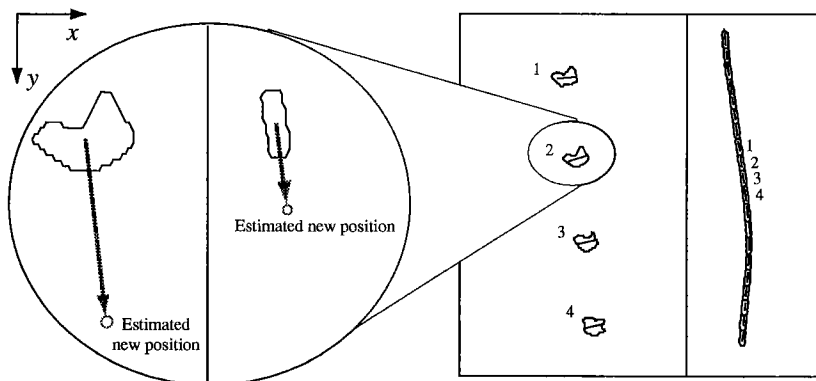


図5 降雪雪片の落下姿勢と落下運動  
Fig. 5 Analysis of falling motion.

### 3.1.2 正規化慣性モーメント

2次の重心モーメントは慣性モーメントと呼ばれている。形状に依存する成分を取り出すため、同一の面積をもつ円の慣性モーメントで正規化した慣性モーメント  $M_n$

$$M_n = \frac{(M_{02} + M_{20})}{\left(\frac{m_{00}}{2\pi}\right)} \quad (3)$$

を用いる<sup>11)</sup>。正規化慣性モーメント  $M_n$  は、領域の大きさ、座標および回転に関して不変的な特徴量である。 $M_n$  は領域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な値となる。そこで、 $M_n$  の逆数を雪片形状の特徴量として使用する。

### 3.1.3 慣性主軸

雪片の  $i$  軸ならびに  $j$  軸についてのそれぞれの2次重心モーメント  $M_{02}$  および  $M_{20}$  より、雪片の慣性主軸すなわち短軸  $2a$  と長軸  $2b$  は、

$$a^2 = 2\{M_{02} + M_{20} - \sqrt{4M_{11}^2 + (M_{02} - M_{20})^2}\} / m_{00} \quad (4)$$

$$b^2 = 2\{M_{02} + M_{20} + \sqrt{4M_{11}^2 + (M_{02} - M_{20})^2}\} / m_{00}$$

で表される。

短軸と長軸の比は形状を表す特徴量であり、伸長度  $e$  を式(5)により定義した。

$$e = \frac{a}{b} \quad (5)$$

## 3.2 落下特徴量

### 3.2.1 落下姿勢

前節の慣性主軸  $2b$  の水平面となす角度(慣性主軸角)  $\theta$  は次式で表される。

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2M_{11}}{M_{20} - M_{02}} \right) \quad (6)$$

この主軸角  $\theta$  が落下中の降雪雪片の傾き、すなわち図6(a)の落下姿勢を表している。

### 3.2.2 落下速度と落下方向

雪片領域の重心座標が画像1フィールドごとに移動する距離をフィールド間の時間間隔(1/60秒)で除算することにより、雪片の移動速度が求められる。ここでは、

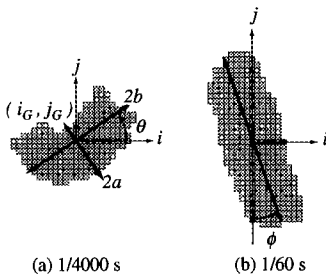


図6 降雪粒子映像からの特徴量の抽出(シャッタースピード)

Fig. 6 Models of snowflake images.

鉛直方向の移動速度を落下速度と定義する。また、図6(b)のようにシャッタースピードが1/60秒に設定されたカメラにより撮影された雪片映像は、落下にともなって残像が生じる。この残像の慣性主軸と鉛直軸との傾きから落下(移動)方向の傾き角  $\phi$  が求まる。

### 3.2.3 平均角度変動量

図6(a)のように雪片映像(形状解析用)の慣性主軸角  $\theta$  は、水平面からの雪片の傾きを表しており、図6(b)のような残像(落下運動解析用)の慣性主軸角  $\phi$  は、1/60秒ごとの雪片の落下方向を示している。雪片の連続画像から、これら主軸角の変動の時間平均を平均角度変動量  $\omega_\theta$  および  $\omega_\phi$  として

$$\omega_\theta = \frac{1}{(N-1)T} \sum_{i=1}^{N-1} |\theta_i - \theta_{i-1}|$$

$$\omega_\phi = \frac{1}{(N-1)T} \sum_{i=1}^{N-1} |\phi_i - \phi_{i-1}| \quad (7)$$

で定義した。但し、 $T$  はフィールド間の時間間隔(1/60秒)、 $N$  はフィールド数を表す。この値は直線的に落下する雪片では0となり、移動方向が変動する雪片ほど大きな値を示す。

## 4. 解析結果と考察

落下運動画像解析システムを用いて自動取得した雪片運動特徴量(形状および落下特徴量)の統計処理を行った結果を以下に示す。

### 4.1 形状特徴量

視野が狭いカメラ(図3左領域)により撮影された映像

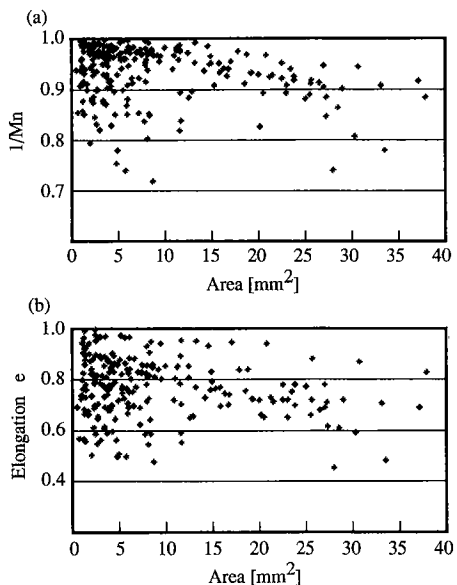


図7 形状特徴量間の関係

Fig. 7 Relationships between feature parameters.

は、雪片の形状を捕らえており、この画像より雪片領域を抽出し、面積、慣性モーメント、伸長度(最短径と最長径の比)を求めた。

図7(a)は雪片の面積に対する正規化慣性モーメントの逆数、図7(b)は面積と伸長度との関係を232個の雪片について求めたものである。なお、面積による形状特徴量の変化を解析するため、雪片面積によって分類し、形状特徴量の平均値と標準偏差を求めた。表1に正規化慣性モーメントの逆数と伸長度の各々の統計量を示す。表1から危険率0.05にて統計的に検定すると、正規化慣性モーメントの逆数の値は雪片面積が大きくなるほど減少する傾向にあることがわかる。これは大きな雪片ほど形状が複雑なることを示している。また、伸長度も雪片面積が大きくなるにつれて小さな値となる傾向がある(危険率0.05にて検定)ので、大きい雪片ほど扁平な形状になることを示している。落下の過程で雪片同士が衝突・併合を繰り返す、成長するにつれて(面積が大きくなると)形状が複雑化していくと考えられる<sup>2)-5)</sup>。

4.2 形状と落下方向の関係

形状と落下方向の関係を求めるため、落下方向を表す角度の絶対値 $|\phi|$ と面積および正規化慣性モーメントの逆数との関係を図8に示す。なお、面積および正規化慣性モーメントの逆数と落下方向の角度との関係における

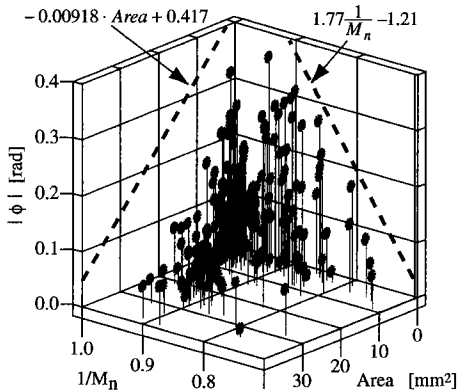


図8  $|\phi|$ と面積および $M_n$ の関係  
Fig. 8 Relationships between  $|\phi|$  and the invariant moment, the area.

上限を表すため、図中の平面上( $1/M_n=1.0$ および面積Area=0)に最大値同士を結んだ破線を示す。また、表1に雪片の面積にて分類したときの $|\phi|$ の平均値と分散を示す。面積の小さな雪片は落下方向にばらつきがあるが、面積が大きくなると分散が小さくなり鉛直方向に落下している。危険率0.05にて検定すると、面積が大きくなると $|\phi|$ が小さくなることがわかる。大きな雪片に比べて、小さな雪片は落下時の水平方向の揺らぎによる雪片同士の衝突・併合に貢献すると考えられる。

前節4.1の結果も考慮すると、慣性モーメントの逆数が小さくなると雪片形状が円形でなくなり、落下の方向角 $|\phi|$ が小さくなる。雪片の形が扁平になると、空気抵抗を大きく受ける方向に安定に落下するため、落下の方向角が小さくなると考えられる<sup>9)</sup>。落下の過程で雪片同士が衝突・併合を繰り返すにつれて、水平方向(雪片の長軸方向)に雪片が成長して、その面積が次第に増加し、伸長度(最短径と最長径の比)の小さな複雑な形状の雪片に発達する。この結果は、これまでの報告例<sup>2)-5)</sup>と一致している。

4.3 落下姿勢と落下方向の関係

雪片の断面積が小さな場合には、画像の解像度により各測定値にばらつきが生じる可能性がある。また、慣性主軸角を求める際に、最長軸と最短軸がほとんど等しくなる雪片(球形)の場合には、慣性主軸角を求める意味がなくなる。そこで、雪片面積が $8\text{ mm}^2$ 以上かつ伸長度が0.9以下の雪片(79個)について、落下姿勢の評価を行う。また、落下姿勢を示す図6(a)の雪片映像は、2~5フィールド撮影され、慣性主軸の長軸が水平となす角(慣性主軸角) $\theta$ はその間にわずかに変動した(8%以内)。本節では、落下姿勢と落下方向との関係を主に解析するため、同一雪片の各フィールドにおける $\theta$ の中から最大値を個々の雪片の代表値に選ぶことにする。

表2に慣性主軸角 $\theta$ の中央値および平均値とその標準偏差を示す。落下姿勢を表す慣性主軸角の最大値は、ほとんどの雪片が $\pm 0.7\text{ rad}$ の範囲内に分布しており、 $\pm 0.2\text{ rad}$ の範囲内に45.8%の雪片が存在していた。表より、多くの雪片は長軸をほぼ水平の向きにした状態で落下していることがわかる。次に、視野角が広い映像

表1 形状特徴量および $|\phi|$ の統計量  
Table 1 Statistical feature parameters

	$1/M_n$		$e$		$ \phi $	
	Area (mm <sup>2</sup> )	$8 \leq A < 20$	Area (mm <sup>2</sup> )	$8 \leq A < 20$	Area (mm <sup>2</sup> )	$8 \leq A < 20$
Number	50	37	Number	50	Number	50
Mean	0.938	0.890	Mean	0.778	Mean	0.0909
Stdev	0.055	0.053	Stdev	0.111	Stdev	0.0693

表2 落下姿勢角  $\theta$  と落下方向角  $\phi$  の中央値と平均値  
Table 2 Median and mean value of  $\theta$  and  $\phi$

[rad]	Median	Mean	(Stdev)
$\theta$	0.0480	-0.0177	0.433
$\phi$	0.0228	-0.0069	0.0624

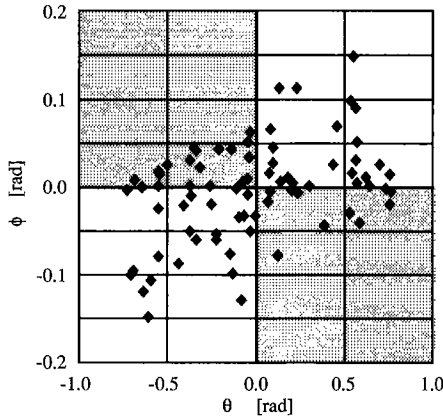


図9 落下姿勢と落下方向  
Fig. 9  $\theta$  versus  $\phi$ .

から落下運動の方向角  $\phi$  を図6(b)のように求めた。鉛直下向きの場合を 0 rad とし、撮影方向から見て右下方に向かって落下した場合を正とする。表2に落下運動の方向角  $\phi$  の中央値と平均値を示す。 $\phi$  は 0 rad 付近に分布し、雪片はほぼ鉛直方向に落下することがわかる。

次に、同一雪片の落下姿勢と落下方向との関係を求めるため、各雪片の落下姿勢  $\theta$  と落下の方向角  $\phi$  との関係を図9に示す。図中の第1象限と第3象限に全体の65%が分布し、 $\theta$  と  $\phi$  の間に正の相関関係があることがわかる。同一雪片の  $\theta$  の中から最大値を代表値に選んだ場合( $\theta$  の標準偏差は比較的大きい)においても、ほとんどの雪片は落下姿勢を示す慣性主軸(長軸)に対して直角な方向に落下する傾向がみられる。すなわち、空気抵抗を大きく受ける方向に落下することに対応している。

#### 4.4 落下運動

広い視野の雪片画像を用いて、連続したフィールド間の移動距離から同一雪片の移動速度を時間系列で観測することができる。図5に示した雪片(平均面積 5.7 mm<sup>2</sup>)の映像ごとの水平方向および鉛直方向の移動速度を図10に示す。雪片の落下速度(鉛直方向移動速度)は平均 34.0 cm/s、標準偏差 2.4 cm/s、水平方向移動速度は平均 2.0 cm/s、標準偏差 3.2 cm/sであった。次に、典型的な7個の雪片の落下運動の様子を図11に示す。広い視野で撮影された連続画像から 1/60 秒おきに

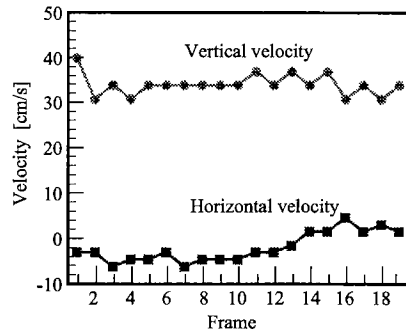


図10 雪片の移動速度の変化  
Fig. 10 Time change of velocities.

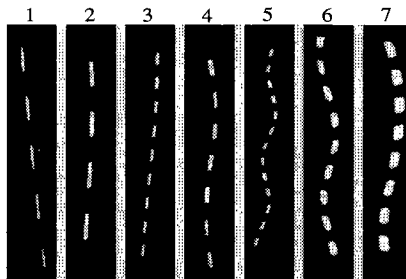


図11 降雪雪片の落下運動例  
Fig. 11 Samples of falling motion of snowflakes.

雪片映像を重ねた画像である。雪片 1,3,5 は面積が小さく、雪片 3,5,6,7 は落下速度が遅く、雪片 1,2,3 は直線的に落下運動し、その他は振動しながら落下している。振動しながら落下する雪片は、水平方向の衝突・併合に関係し、雪片同士の落下速度の相違が鉛直方向の衝突に寄与すると考えられる。

降雪雪片の粒径  $d$  [mm] と落下速度  $v$  [cm/s] との関係には

$$v = \kappa d^\epsilon \quad (8)$$

が用いられ<sup>12)</sup>、パラメータ  $\kappa$ 、 $\epsilon$  が種々の降雪地域で観測されている<sup>9)</sup>。本システムの形状解析から得られた雪片の断面積  $A$  より等価粒径  $d = 2\sqrt{A/\pi}$  を計算し、この粒径と落下速度の関係を図12に示す。最小2乗法により曲線式(8)を求めたところ、 $\kappa = 28.9$ 、 $\epsilon = 0.257$ (相関係数 0.72)を得た。なお、次節と関連づけるため、観測期間中に得られた降雪雪片 232 個から画像左側の映像が4フィールド以上連続して撮影された雪片 109 個を使用して、各々の雪片の等価粒径と落下速度の平均値を図12に用いた。

狭い視野内に撮影された雪片映像を用いて、同一雪片が連続した数フィールドの間に移動する距離を求めるこ



とにより、落下速度  $v$  の測定誤差を求めた。画面内の左右の領域に雪片映像が存在する場合について、狭い視野から計算した落下速度の値 ( $28.0 \text{ cm/s} < v < 54.0 \text{ cm/s}$ ) と広い視野から求めた値との相対誤差は最大 9.2% であった。

図 13 に雪片の面積と水平方向の移動速度との関係を示す。なお、図 11 の 7 個の雪片の値を表すために、番号を付記した●印で図中に示す。面積ごとの水平方向移動速度の平均値と標準偏差を表 3 に示す。危険率 0.05 の検定により、面積が大きくなると水平方向の移動速度が小さくなるのがわかる。

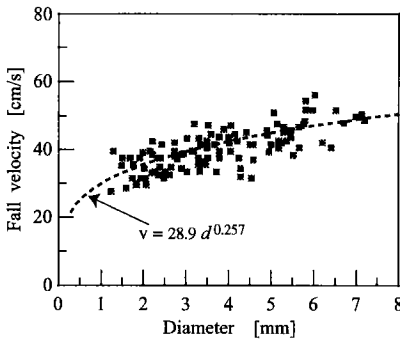


図 12 粒径と落下速度の関係

Fig. 12 Relationship between the diameter and fall velocity.

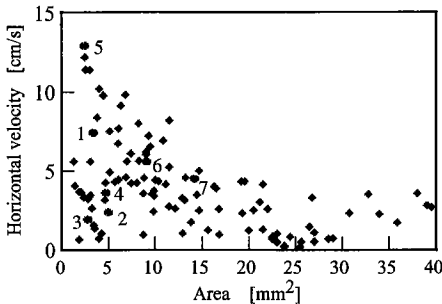


図 13 面積と水平方向移動速度の関係

Fig. 13 Relationship between the area and horizontal velocity.

表 3 水平方向移動速度の統計量

Table 3 Statistical value of horizontal velocity

Area (mm <sup>2</sup> )	Horizontal velocity (cm/s)	
	8 ≤ A < 20	20 ≤ A
Number	40	28
Mean	4.07	1.70
Stdev	1.85	1.66

雪片同士の衝突回数は移動速度の差と衝突断面積に比例する<sup>6)</sup>。大きな雪片の落下速度(鉛直方向の移動速度)は図 12 より 50 cm/s 程度であり、水平方向移動速度(図 13 より 5 cm/s 以下)より十倍以上大きいので、鉛直方向での雪片同士の衝突・併合に寄与すると考えられる。また、図 13 および表 3 から、断面積の小さな雪片は大きな雪片に比べて水平方向への移動速度が大きいため、水平方向での雪片同士の衝突・併合に貢献すると考えられる。

#### 4.5 形状と落下運動の関係

運動を評価するパラメータとして、連続した画像から式(7)の平均角度変動量  $\omega_\phi$ 、 $\omega_\theta$  を求めた。平均角度変動量  $\omega_\phi$  および雪片の落下姿勢(慣性主軸角  $\theta$ )の平均角度変動量  $\omega_\theta$  と雪片断面積との関係を図 14 に示す。また、表 4 にそれぞれの角度変動量の面積別の統計量を示す。危険率 0.05 の検定より、面積が大きくなると、各々の角度変動量が小さな値になるのがわかる。図 7(b)より雪片の面積が大きくなると短径と長径との比が次第に小さな値になるという検定結果と関連付けると、形状が円形から扁平になると空気抵抗を大きく受ける状態で安定して落下するために角度変動量が小さくなる

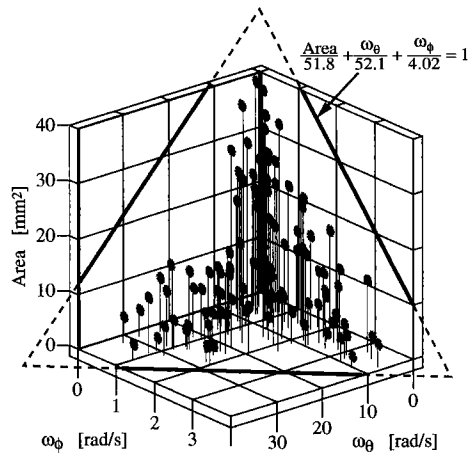


図 14 面積と落下運動  $\omega_\theta$ 、 $\omega_\phi$  の関係

Fig. 14 Relationship between the area and  $\omega_\theta$ 、 $\omega_\phi$ .

表 4 落下運動パラメータの統計量

Table 1 Statistical value of motion parameters

Area (mm <sup>2</sup> )	$\omega_\theta$		$\omega_\phi$		
	8 ≤ A < 20	20 ≤ A	8 ≤ A < 20	20 ≤ A	
Number	40	28	Number	40	28
Mean	12.41	5.39	Mean	1.369	0.707
Stdev	8.30	2.69	Stdev	0.746	0.433

ると考えられる。図 14 より、 $\omega_\theta$  が大きくなると  $\omega_\phi$  が小さくなる傾向が見られる。図 14 には、各々雪片の測定値の上限と接する面と式を示す。今回観測された雪片の平均角度変動量  $\omega_\theta$ 、 $\omega_\phi$  の値は、図中の平面より小さな値を持つことがわかる。

## 5. む す び

降雪雪片の衝突・併合による成長過程を解析するためには、雪片の落下運動を連続的に画像解析する必要がある。本研究では、水平同一方向からシャッタースピードおよび視野範囲の異なる 2 台の CCD カメラを用いて、降雪雪片の落下運動を毎秒 60 フィールドの連続画像として撮影し、落下中の雪片の形状と落下運動を同時に測定するリアルタイム画像解析システムを開発した。

形状と落下運動の関係を求めるため、モーメント法を用いて形状特徴量として伸長度と正規化慣性モーメントを求め、雪片面積が大きくなると扁平な形状になることを統計的に検定した。また、落下運動解析のために平均角度変動量を定義し、連続して撮影された同一の雪片の軌跡から落下運動を測定した。形状と落下運動の統計解析から、雪片が大きくなると落下方向角、水平移動速度およびその角度変動量が小さくなることを検定により確認できた。また、落下姿勢を表す慣性主軸の長軸が落下の方向に対してほぼ直角となり、空気抵抗を大きく受ける方向に落下する傾向が実験的に確認された。

以上のように、本システムを用いることにより、個々の雪片の落下中の形状特徴量と落下運動および落下速度の自動測定が可能となった。雪片の形状と落下運動の同時測定から得られた本研究の運動物理量を用いて、雪片同士の衝突シュミレーションおよび衝突確率を求めることが可能であり、降雪雪片生成のメカニズム解明に役立つことが期待される。

## 参 考 文 献

- 1) R. R. Rogers and M. K. Yau, "A short course in cloud physics," Pergamon Press, 1989.
- 2) K. Higuchi, "On the coalescence between plane snow crystals," J. Meteor., vol. 17, pp. 239-243, 1960.

- 3) J. Jiusto and H. K. Weickmann, "Types of snowfall," Bull. Amer. Meteor. Soc., vol. 54, pp. 1148-1162, 1973.
- 4) K. K. Lo and R. E. Jr. Passarelli, "The growth of snow in winter storms: an airborne observational study," J. Atmos. Sci., vol. 39, pp. 697-706, 1982.
- 5) L. Vardiman, "The generation of secondary ice particles in clouds by crystal-crystal collision," J. Atmos. Sci., vol. 35, pp. 2168-2180, 1978.
- 6) R. E. Jr. Passarelli, "Theoretical and observational study of snow-size spectra and snowflake aggregation efficiencies," J. Atmos. Sci., vol. 35, pp. 882-889, 1978.
- 7) R. E. Jr. Passarelli and R. C. Srivastava, "A new aspect of snowflake aggregation theory," J. Atmos. Sci., vol. 36, pp. 484-493, 1979.
- 8) J. Zikmunda and G. Vali, "Fall patterns and fall velocities of rimed ice crystals," J. Atmos. Sci., vol. 29, pp. 1334-1347, 1972.
- 9) 村本健一郎, 椎名 徹, "降雪粒子の大きさと落下速度の自動測定," 信学論 D-II, vol. J 72-D-II, no. 9, pp. 1382-1387, Sep 1989.
- 10) 丸山光明, 椎名徹, 村本健一郎, 松浦弘毅, "降雪粒子の落下運動と形状の関係," 信学技報, IE-97-91, pp. 7-12, Nov 1997.
- 11) K. R. Castleman, "Digital Image Processing," Prentice-Hall, Englewood Cliffs N. J., 1979.
- 12) M. P. Langleben, "The terminal velocity of snowflakes," Quart. J. Roy. Meteor. Soc., vol. 80, pp. 174-181, 1954.

(2001 年 9 月 19 日受付)

## 椎 名 徹(正会員)



昭 61, 東北大学大学院修士課程了。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, 同学科助教授。博士(工学)。この間, 光回路・部品等の開発並びに画像計測の研究に従事。電子情報通信学会, 日本雪氷学会, 各会員。

## 村 本 健一郎(正会員)



昭 48, 富山大学大学院修士課程了。同年, 富山高専助手。同高専助教授を経て平 3 より金沢大・工・助教授。現在, 同大学情報システム工学科教授。工博・医博。画像計測, パターン認識, リモートセンシング, 生体情報処理等の研究に従事。電子情報通信学会, 情報処理学会, 計測自動制御学会, 日本雪氷学会, 日本リモートセンシング学会, IEEE, 米国神経科学会, 各会員。