

深度合成を用いた簡易雪の結晶撮影法の開発

牟田 淳*

Development of a simple photographic method of snow crystals by
means of focus staking

Atsushi MUTA

概要

雪洞・顕微鏡システム自作等の大掛かりな施設・装置を用いる事なく、比較的多くの人が作成出来る雪の結晶撮影システムを作り、北海道旭岳において実証した。その結果、大掛かりな施設・装置を使用した場合と同様の美しい雪の結晶写真を比較的安定的に撮影する事が出来た。さらに、小型昆虫撮影・研究の分野等で使用されている深度合成の技術を立体的な雪の結晶撮影に適用し、これまでに得られていた雪の結晶写真よりもより広い範囲でピントがあう写真を作成する事に成功した。この結果、より容易に雪の結晶写真が撮影でき、かつこれまでよりも精細な雪の結晶写真を撮影する事が出来た。

1. はじめに

雪の結晶は見た目が大変美しく、私たちは冬になると必ず雪の結晶を用いたデザインを見かける。美しい雪の結晶は様々な分野で見られ、科学教育にも利用される事がある。例えば石川県加賀市にある中谷宇吉郎雪の科学館では、学校と連携して科学教育を行っている [1]。

雪の結晶は日本でも活発に研究されてきた。例えば中谷宇吉郎は人工雪の結晶を作り、人工雪の研究の結果として雪の結晶の形が基本的には温度と水蒸気量で決まる、いわゆるナカヤ・ダイヤグラムを発表した [2]。このように雪の結晶研究は日本人にとってゆかりのある研究対象であり、この観点からも雪の結晶を活用した科学教育は大変有用であろう。

雪の結晶はサイズが様々であるが、肉眼で見えるサイズの雪の結晶も沢山ある。図1は私が北海道大雪山系旭岳で撮影したものである。三脚のグリップに様々な大きさの雪の結晶が見られるが、雪の結晶撮影に適している結晶の大きさは1mm程度である。これよりも小さい雪の結晶は小さいので肉眼で扱いにくく、また時々1cm程度の大きな

雪の結晶を見かける事もあるが、そのような大きな結晶は風等で一部が欠けている事が多い。

図1 三脚のグリップに降り積もった雪の結晶。様々な大きさの結晶が見える [3]

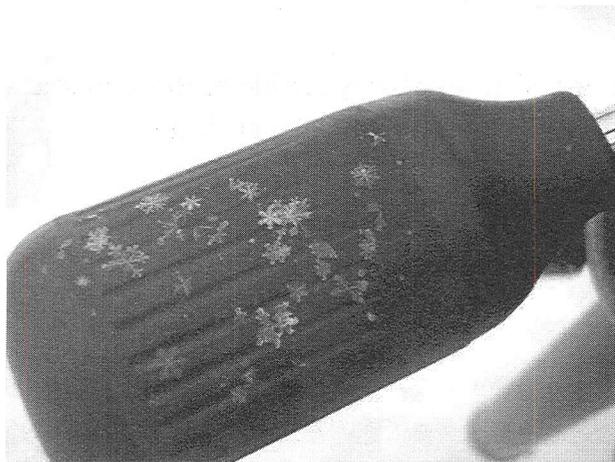


図1を見ると、雪の結晶撮影は簡単と思うかもしれない。しかしながらこの雪の結晶を1個取り上げてガラス板等の上に置き、その1個の雪の結晶を拡大して綺麗に撮影しようとする、様々な困難に直面する。

困難の例として、雪の結晶撮影に適した1mm程度の大きさのマクロ撮影になると、一般に普通の一眼デジカメでは撮影できずマクロ撮影用のシステムを作る必要がある事が挙げられる。1mm程度のマクロ撮影が出来るレンズはキャノンMP-E65等のレンズもしくは顕微鏡の対物レンズ等に限定され(2015年現在)、またピントの合う範囲(焦点深度)が極端に浅くなるので頑丈かつ微調整の出来るシステムが必要になる。別の困難の例として、雪の結晶は透明なのでガラス板の上に置くと見えにくくなる事が挙げられる。そのため、光の当て方(ライティング)によって雪の結晶の見え方が大きく変わってしまい、雪の結晶撮影のためのライティングの知識を身につける必要がある。さらに別の困難な理由の例として、雪の結晶はすぐに溶けるもしくは昇華して形が変わってしまう事が挙げられる。そのため1個の雪の結晶をじっくりと撮影する事が出来ない。また、基本的には雪が降っている時しか雪の結晶を撮影出来ない、場所と時期がかなり限定される。他にも大きな困難があるが、本論文の中で紹介する。このように雪の結晶撮影には数多くの困難があり、雪の結晶を撮影して公開している人は日本全国でも数人程度である。

天然雪の結晶カラー写真で著名な例として西暦2003年頃までに行われた[4]、[5]等がある。これらの文献に見られる雪の結晶写真は大変美しいが、その一方で撮影システムが大掛かりになるという特徴がある。例えば[4]では雪洞を作り、その中に電源、顕微鏡他の撮影システムを作成し、雪の結晶を撮影している。[5]では顕微鏡を含めた

大掛かりな撮影システムを自作し、且つカメラを冷やさないためカメラ部分のみ気温調整をしている。このように [4] [5] の方法はかなり本格的であり、これらの方法で人々が広く雪の結晶撮影をする事は難しい。

一方で [4] [5] における西暦 2003 年頃までの雪の結晶撮影以降、技術が大きく進歩した。

例えば 2003 年頃は低温では正常に作動しないカメラがほとんどであったが、現在は一眼デジカメが氷点下 - 20℃ 程度でも普通に作動する。実際、冬季アラスカのようにしばしば氷点下 - 20℃ 以下となる場所で、普通に一眼デジカメを用いてオーロラ撮影が行われている。低温に強いカメラが出現した理由の一つに、低温に弱いアルカリ・マンガン電池から低温に強いリチウム電池によるバッテリーが多く使われるようになった事が挙げられる。また、雪の結晶のライティングに用いる照明も、電力を多く消費する豆電球から電力消費量が少ない LED 照明が使われるようになった。このように雪の結晶を美しく撮影する技術のうち様々な技術が現在は日常的になっている。つまり、美しい雪の結晶の撮影は以前より簡単になっていると考えられる。

技術の進歩の別の例として、例えばオリンパス TG-3 等のコンパクトデジカメ等を用いて雪の結晶写真が撮影出来るようになってきている。しかしながら 2015 年 3 月の段階では、これらコンパクトデジカメを使った、[4] [5] 並の美しい雪の結晶写真は撮られていない。この理由として、雪の結晶が撮影出来るコンパクトデジカメは全て W.D (ワーキング・ディスタンス、レンズから被写体までの距離) が極めて小さく、ライティングの自由度がほとんどない事、画質は圧倒的に一眼デジカメの方が良い事等が挙げられる。

私はこれまで、様々な方法で一眼デジカメを用いて雪の結晶写真撮影を試みてきた [3], [6] - [8]。例えば撮影台部分がギアで上下する機能が付いた三脚に一眼デジカメ、マクロレンズを取り付け、ライティングを行い、撮影台を上下させてピント合わせを行ない、自動車の中で撮影した例が図 2 の写真である。撮影場所は北海道大雪山系旭岳である。

図 2 2013 年 1 月に撮影した雪の結晶写真 (2013 年) [8]

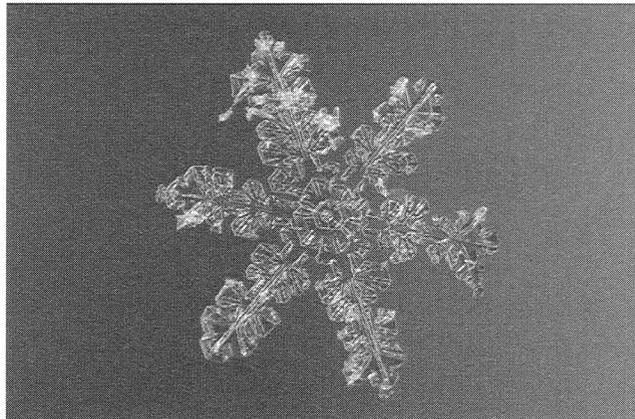


図2の写真を見ると、大掛かりな装置を使わなくてもある程度美しい写真が撮影出来る事がわかる。しかしながらピントを合わせるために撮影台をミリ単位以下で上下させる必要があるため（詳細は以下(1)式で説明）、この方法ではほとんどの場合失敗した。このような写真が撮影出来るのは、数日撮影して1枚撮れるかどうかという頻度であった。そこで、安定してピントを合わせやすいシステムを作る必要がある。

しかし仮にピントを合わせやすいシステムを作ったとしても、もう一つ根本的な問題がある。それは、雪の結晶全体にピントを合わせる事自体がそもそも困難な点である。一般に雪の結晶に限らず、顕微鏡写真の多くは平面的な写真となる。これは顕微鏡写真ではピントが合う範囲（焦点深度）が非常に狭くなるためである。そのため、雪の結晶写真の多くが、一部のみピントがあった写真となる。ピントが合う範囲 D （焦点深度）はレンズの開口数 $N.A$ を用いて、以下の Berek の式で表される事が知られている。

$$D = \pm \frac{\lambda}{2 \times (N.A)^2} \quad (1)$$

ここで、 λ として可視光領域の波長 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ がしばしば基準波長として使われる。例えば開口数を $N.A = 0.1$ とすると、 $D = \pm 27.5 \mu\text{m} \approx \pm 0.028 \text{mm}$ となる。これは撮影に使われる雪の結晶の大きさ数 mm と比べると 100 倍程度小さく、そのため雪の結晶写真は平面的な写真になってしまう。よって、安定して綺麗な雪の結晶写真を撮影するためには、この焦点深度の問題も解決する必要がある。この問題は、これまでの [4] [5] 等の雪結晶撮影でも解決されていない問題である。

2. 目的

以上から、本論文の目的は、雪洞や自作顕微鏡等の大掛かりな装置を用いる事なく、主に既存のパーツを活用して作成可能であり、かつピント合わせ等も含めて安定して雪の結晶を撮影出来る装置を開発する事である。さらに、これまでは撮影されていない、雪の結晶全体にピントを合わせる写真の作成方法を確立する事である。

3. システム

今回開発した、安定した簡易雪結晶撮影システムの概要を図3に示す。

図3 安定した簡易雪結晶撮影システム

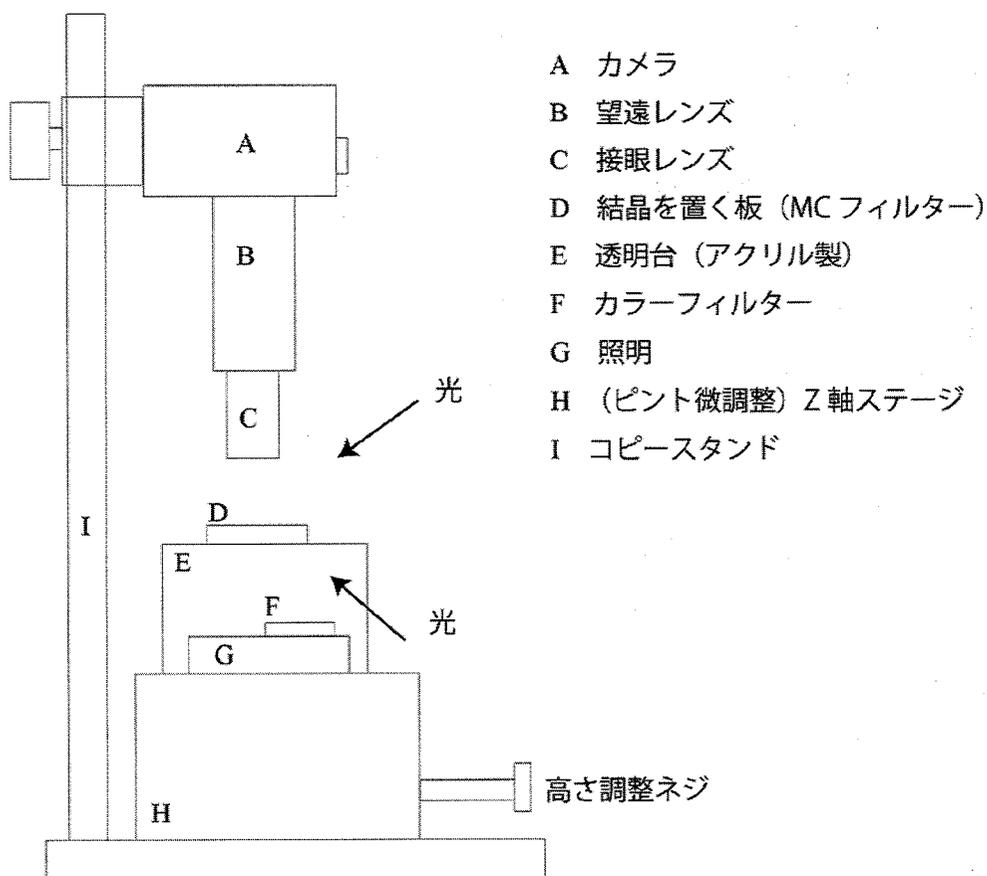


図3の撮影システムの大まかな様子を示す。撮影台 (E,H) 並びにカメラを固定・おまかに上下移動するために、市販のコピースタンド (I) を利用した。ここでコピースタンドとは、一般に本や絵等の試料を写真撮影するため等に使われている。図3のA、B、Cはカメラシステムであり、Dに雪の結晶を置き、E、F、G及び光とある部分が雪の結晶を照らすライティングシステムである。以下図3のシステムの詳細と特徴を説明する。

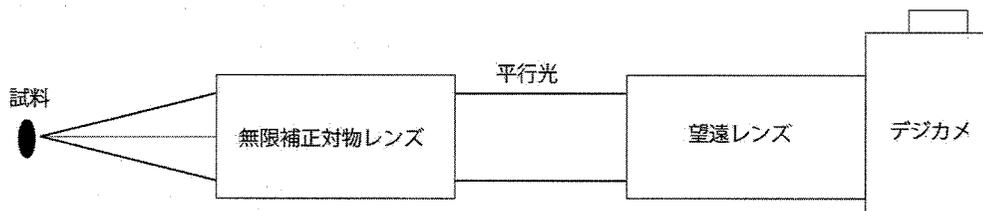
カメラシステム

雪の結晶を撮影するためのレンズとして、参考文献 [5] 等でも使用されたミットヨ製の無限補正対物レンズ M-PLAN APO 5X (C) を用いた。このレンズの開口数は $N.A=0.14$ 、作動距離は $W.D=34\text{mm}$ 、分解能は $2\mu\text{m}$ である。このレンズは作動距離が 34mm と長いので、後述するライティングの自由度が高くなっている。

ただしこの対物レンズは無限補正対物レンズであり、図4のように対物レンズの中心の延長線上の試料から出た光は対物レンズを出た後に平行光となり、対物レンズのみで

は像を作らない。よって像を結ぶ為のレンズが必要である。普通は像を結ぶためのレンズとして顕微鏡用の結像レンズを使うのだが、ミットヨ製顕微鏡用結像レンズは光学実験等で使用されるCマウントのカメラしか正式には対応していない。Cマウント対応のカメラは専門家向けであり、一般に家電量販店等で簡単に入手する事は出来ない。

図4 無限補正対物レンズを用いた撮影システム



そこで本研究では図3、図4のように結像レンズの代用品として、市販のキャノンズーム望遠レンズ 90-300mm (B) を転用した。顕微鏡用結像レンズとキャノンの望遠レンズの間は、市販されている顕微鏡用結像レンズをCマウントに繋ぐホルダー及びCマウントのフィルター径をキャノンのレンズのレンズ径に変換するステップダウンリングを用いた。こうすると、家電量販店等で手に入るキャノンの一眼デジタルカメラに図3のB、Cを装着する事が出来る。一眼デジタルカメラはキャノン EOS kiss x6i を用いた。

ピント合わせ

雪の結晶撮影ではピント合わせが重要である。コピースタンドで大まかにカメラの上下位置を決め、正確にピントを合わせるためにZ軸ステージ(H)を用いた。本研究で用いたZ軸ステージは高さ調整ネジ1回転で0.5mm上下する仕様になっており、ミリ単位以下の正確なピント合わせが容易に可能である。

ライティングシステム

顕微鏡撮影のライティングシステムとして、例えば試料の下から光を当てる透過照明と試料の上から光を当てる落射照明等が知られている。しかし雪の結晶は透明であるので、単純に照明をあてても雪の結晶はその輪郭等がきれいに見えない。そこで、光の当て方を工夫する必要がある。

図5 光の当て方による雪の結晶の見え方の違い (2013年)

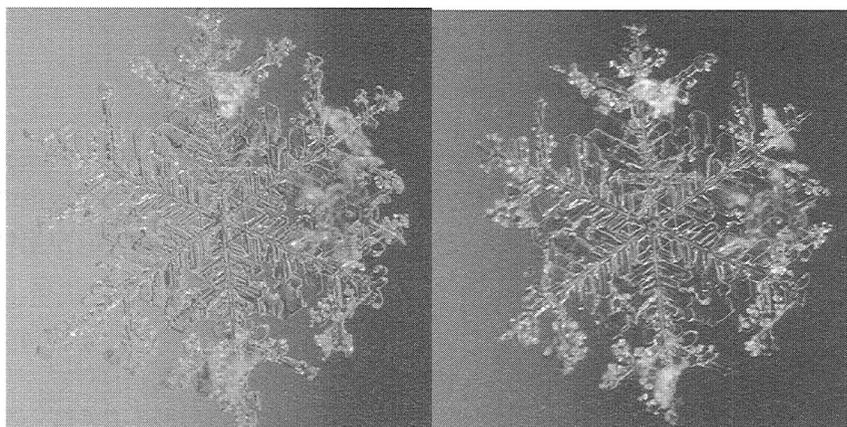


図5は同じ雪の結晶写真を、ライティングを変えて撮影したものである。ただし、撮影日時は2013年12月であり図3のシステムを作る前のシステムを用いている。図3のシステムと比較するとz軸ステージを用いていない事、レンズにキャノンのマクロレンズMP-E65を用いている点が異なる。ピントはコピースタンドで強引に合わせた。

図5を見ると、同じ雪の結晶写真でもライティングによって見え方が大きく異なる事がわかる。まず図5の左の写真は、左の部分が背景と同じ色で見えにくい。日常世界で形をうまく認識出来る要因の一つに、被写体の色や明るさに変化がある事が挙げられる。よって雪の結晶を見えやすくする方法の一つとして、色や明るさに変化を与える事が考えられる。

色や明るさに変化を与える方法の例として、まず背景と雪の結晶の色を変える事が挙げられる。例えば図5左写真の背景が灰色の部分には雪の結晶が良く見えている。よく見える理由は背景が灰で雪の結晶が白になっており、明るさが異なっているので見えやすくなっているのである(ただし実際の写真はカラーであり、灰色は青色である)。この写真は図3のようにカラーフィルター(F)を背景に置き、雪の結晶のななめ上及びななめ下から白い光を当てて撮影された。こうすると、背景はカラーフィルターの色になり、雪の結晶は白くなる。また、光を当てる向きにより光の反射の度合いつまり雪の結晶の明るさが大きく変わり、雪の結晶の見え方は大きく変化する。

この時、図3の斜めから当てる光の色を水色にすると、水色の雪の結晶写真を得る事が出来る(色は判別できないか、図5右図が該当写真である)。また、透明な試料を撮影する別の方法として偏光フィルターを使う方法も知られている。

図3における斜めからの光の光源は市販されている単3、単4等を用いたLED照明、LEDアームライト等を活用した。図3の下からの照明(G)も同様にLED照明を用いた。ただし、撮影場所は氷点下10℃程度の場所であるので、普通のマンガン電池等を用いるとすぐに電圧が降下し使えなくなってしまう。低温に強い電池はリチウム電池が

有名であるが、単3、単4のリチウム電池は大変高価である。そこでここでは低温に強い事で知られるエネルー普充電池（現パナソニック）を用いた。

温度・風対策

雪の結晶は屋外では風が吹いている事が多く、よほど運がよくない限り失敗する。そこで、風をよけるため車の中で撮影した。また、温度を極力下げため、車中ではエンジンを切った。エンジンをつけると車が幾分振動するので、撮影の際ブレが生じ雪の結晶撮影は不可能になる。この点からもエンジンを切る必要がある。

水蒸気量・昇華対策

自動車内の水蒸気量が低下すると雪の結晶はどんどん昇華して形を変えてしまうので、今回は簡易措置としてぬれタオルや息等により自動車内の水蒸気量を増やした。ただし雪の結晶の撮影の際は、息が雪の結晶付近にかかって雪の結晶を融かしてしまうので、マスクをして雪の結晶に自分の息がかからないようにした。

結晶を置く板（MC フィルター）

結晶を置く板（図3のD）として、写真撮影で用いるMC フィルターを用いた。雪の結晶を撮る際、ゴミや汚れ対策が必要になる。例えば普通のガラス板に雪の結晶をおいて撮影すると、きれいに拭いても斜めから光を当てると汚れが浮き出てしまう。そこで、キムワイブ等できれいに汚れを取り、ブローア等で汚れを飛ばした。しかしながらそれでも汚れの除去は不十分な場合が多い。そこでマルミ製の EXUS LENS PROTECT 等、汚れが付着しにくいMC フィルターを用いた。

以上図3の装置は多くが家電量販店や東急ハンズ等で入手可能であり、専門的な知識がない人でも図3の装置を構築出来ると考えられる。また、図3の装置を含めて雪の結晶撮影装置は飛行機用の大きなスーツケースと小型アルミケースに入る量であり、組み立ても30分程度で出来る。このため南関東居住者等、雪国に住んでいない人でも飛行機や自動車等を利用して雪が降っている場所に移動する事により容易に雪の結晶撮影が出来る。

4. 撮影結果

多くの場合、撮影場所は限定される。例えば南関東等ではしばしばぼたん雪等となり、雪の結晶は見えない。また、図3の撮影システムを持ち運ぶには大きなスーツケースと小型アルミケースが必要なため、登山しなければならない所は不可能であり、飛行機や

自動車等で行けるところが望ましい。私はこれまで山形県蔵王と北海道大雪山系旭岳で雪の結晶撮影を行なったが、現在は主に北海道大雪山系旭岳で雪の結晶撮影をしている。今回の撮影は北海道旭川空港から車で約1時間の所にある北海道上川郡東川町旭岳の駐車場に自動車を置き、その車の中で2015年1月2-4日に行った。この場所は[4]の雪の結晶撮影が行われた場所でもある。

自動車内にキャンプ用テーブルを置き、振動防止用ゴムでテーブルを固定する。テーブルの上にすべり止めシートを敷き、その上に図3のシステムを配置した。撮影した写真のいくつかを以下に示す。

図6 北海道旭岳で撮影された雪の結晶写真(2015年)

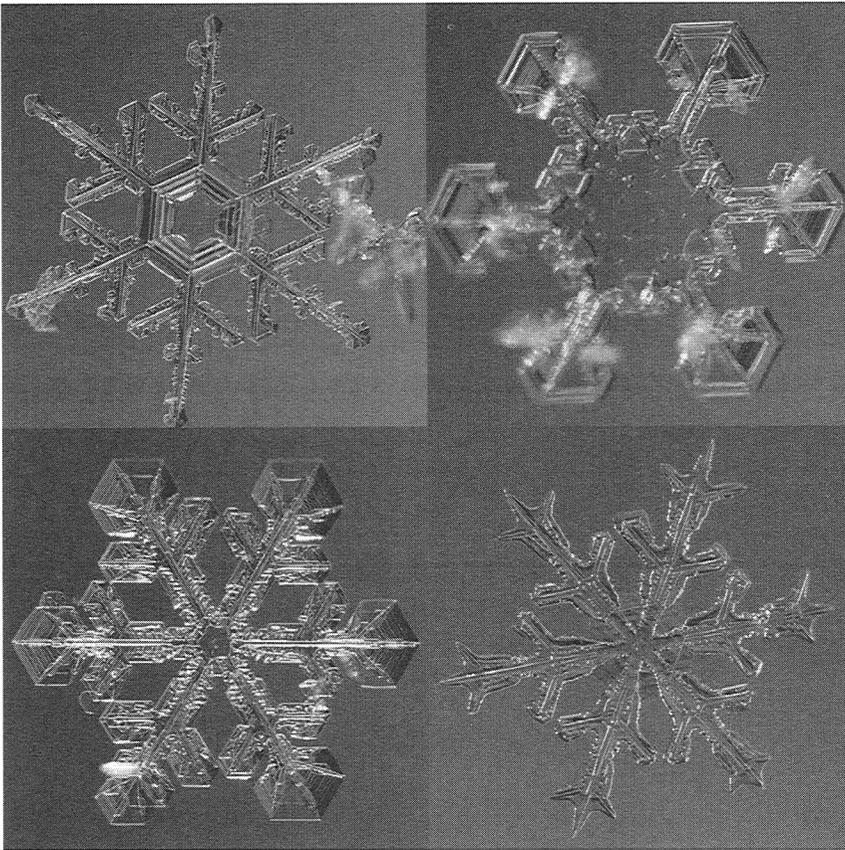


図6に示すように、ほとんどピントがあった雪の結晶写真を撮影する事が出来た。今回撮影した図6と、ピント微調整のためのZ軸ステージを用いていない2013年撮影の図2及び図5を比較すると、図6の方がはるかにクリアな画像になっている事がわかる。この理由は図6ではZ軸ステージを用いた事により、細かいピント合わせが可能であったため、またレンズをキャノンMP-E65からミットヨ無限補正対物レンズM-PLAN

APO 5X に変更したためと考えられる。

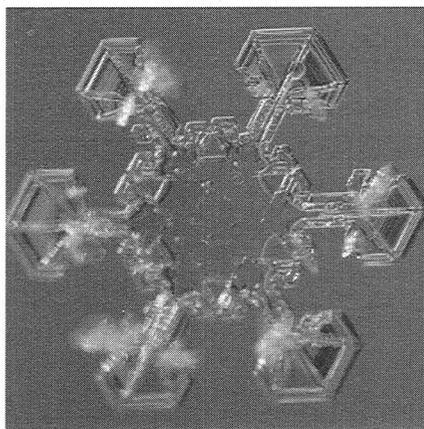
3節で議論したように、写真の背景の灰色は図3のFのカラーフィルターによるものであり、雪の結晶の色は主に図3の「光」と書かれた斜め上下からの光の色である。

図6下の写真は2枚ともピントがよく合っているものの、図6の上の2枚の写真において、一部ぼやけている部分がある。これは1節でも議論したように、ピントが合う範囲が極めて狭くなっているためである。つまり、厚さが薄い雪の結晶は、ピントが合えば綺麗に撮影出来るが、厚さが厚い雪の結晶は同時に雪の結晶全体にピントを合わせる事が出来ないため、一部ぼやけた写真となる。このような場合の解決法は次の5節で議論する。

5. 深度合成を用いた雪の結晶撮影

今回使用したミットヨ製の対物レンズの開口数は $N.A=0.14$ である。この値を1節の(1)式に代入すると焦点深度は $D = \pm 14 \mu m = \pm 0.014 mm$ となるので、 $0.028 mm \approx 0.03 mm$ の範囲が(1)式に基づく大まかにピントの合う範囲である。図7の雪の結晶写真は大きさが数 mm 程度であるので、雪の結晶の大きさの100分の1程度のオーダーの厚さの範囲しかピントが合わない事になる。

図7 一部ピントがあっていない(左下部分)雪の結晶写真。図6右上と同じ写真。



その結果、雪の結晶写真はしばしば図7のように雪の結晶写真の一部のピントが合わない写真(左下部分)となる。一見ピントが合っているように見える写真でも、拡大してみると一部しかピントがあっていない事が多い。よって雪の結晶写真を撮影する際、いかに雪の結晶全体にピントを合わせるかが重要な問題となる。

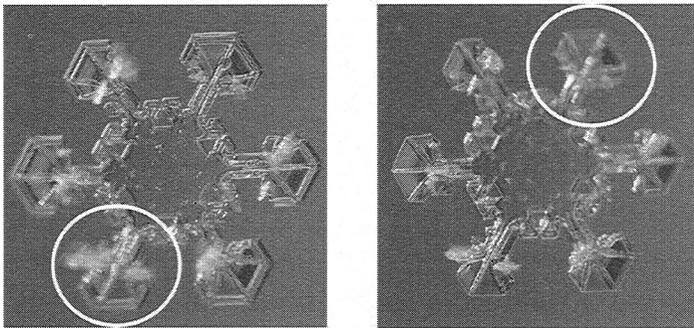
ここで他分野に目を向けると、マクロ撮影が必要な小型昆虫撮影の世界では、深度合成による小型昆虫撮影方法が知られている。この方法は写真1枚では小型昆虫すべてに

ピントは合わないが、小型昆虫の各部分にピントを合わせた複数の写真を合成して、小型昆虫全体にピントの合った写真を撮影する方法である [9] [10]。そこで本論文では小型昆虫の撮影等に使われている深度合成の方法を用いて、雪の結晶全体にピントが合う写真を作成した。深度合成のソフトは現在では様々なソフトがあるが、本論文では [9] に紹介されている combineZP という深度合成ソフトを使った [11]。このソフトは雪の結晶の各部分にピントがあった複数枚の写真を読み込むと、まず複数の写真の合成対象の位置を補正し、その後深度合成を行ってくれるソフトである。このソフトを使った結果を以下に示す。

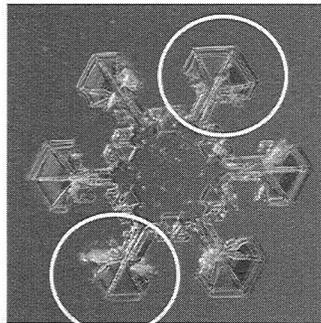
図8の上図はそれぞれ白丸で囲んだ部分のピントがあっていない。しかしながらこれらを含む5枚の写真を深度合成ソフトに読み込んで合成して加工すると、図8の下図のようにピントがあった写真が得られる。このようにして、小型昆虫の研究のみならず、雪の結晶撮影において深度合成技術が大変有用である事が実証された。

図8 上写真：複数の一部ピントがあった写真
下写真：複数の一部ピントがあった写真5枚を深度合成した写真

合成前の写真



合成後の写真

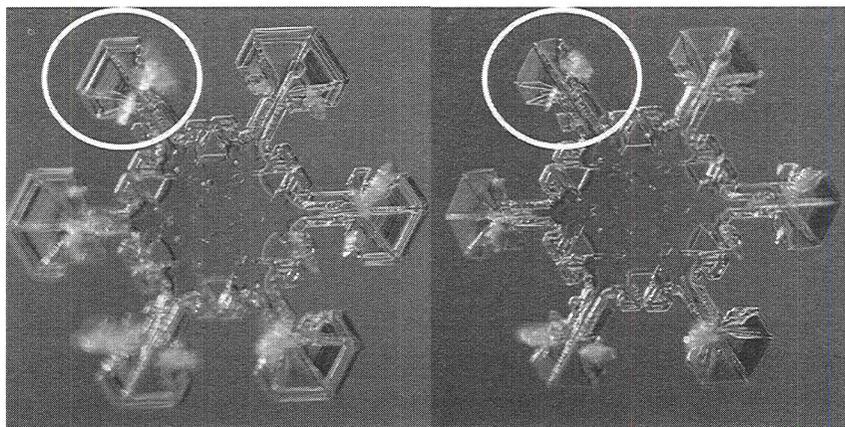


6. 深度合成を用いた雪の結晶撮影の今後の改善点

これまでの結果より雪の結晶撮影は [4] [5] と比べて比較的簡単に、かつ深度合成を利用する事により全体のピントがあった写真が高い確率で撮影出来るようになった。しかしながら以下のようにいくつかの解決すべき問題点も存在する。

深度合成の写真を作成するためには、ピントの合う範囲を変えた雪の結晶写真を何枚も撮影する必要がある。しかしながら、撮影している間に雪の結晶が昇華・融ける等して形を変えてしまうという問題点がある。例えば図9は同じ雪の結晶であるが、左の写真を撮影した約75秒後に撮影した写真が右の写真である。わずかに約75秒しかたっていないが、白丸の部分が小さく変化している等、一部が昇華し形を変えている事がわかる。このため、小型昆虫撮影と異なり、ピントの合う位置を変えた何枚もの雪の結晶写真を撮るためには、雪の結晶が昇華して形を変える前に急いで撮影する必要がある。

図9 昇華により形が変化した雪の結晶（白丸部分）



本研究では数枚（5枚）の写真を用いて深度合成を行ったが、より正確な雪の結晶合成写真を撮影する為には、雪の結晶の昇華による形の変化をなるべく防ぐ必要がある。そのために今後は本格的に雪結晶周辺の水蒸気量をコントロールする等して、雪の結晶の昇華を遅らせる工夫等が必要であろう。

7. まとめ

本論文では大掛かりな装置や大掛かりな自作による工作を必要とせず、既に販売されている物品を主に利用して比較的容易に雪の結晶を撮影するシステムを構築し、かつ実

際の撮影で実証した。この装置はあまり難しくないと考えられ、多くの方が実行可能であると考えられる。また、数枚（5枚）の写真による深度合成を行い、厚みのある雪の結晶の場合も全体にピントの合った写真を撮る事が出来た。

しかしながら今回作成・実証した雪の結晶撮影システムをさらにより安定した撮影をするためには6節で指摘した問題点を解決する事が必要である。ただし、システムは複雑になるので多くの人にとって実行可能である可能性は低くなる。

6節で指摘した問題点を解決する方法として、例えば図3の雪の結晶があるD付近を透明ケース等に入れてそのケース内のみの水蒸気量を上げるといった方法が効率的であろう。ここで狭い空間における水蒸気量の調整方法は、[2,12]等で広く確立している。また、今回の撮影は1年通して比較的寒い1月に撮影を行ったので雪の結晶が融ける事はなかったが、冬の期間でも2月下旬-3月上旬頃の比較的暖かい時期に撮影する場合は、自動車内で雪の結晶を撮影中に雪が融けてしまう。そこで、雪の結晶の周りに透明ケースを作り、透明ケース内を冷却するといった事も必要であろう。つまり、雪の結晶の周りを囲む透明ケースを作り、その中の温度・水蒸気量をコントロールする事により雪の結晶を安定して撮影出来るようにしていきたい。例えば1つの雪の結晶撮影に数分程度の時間をかけられるようにし、じっくりと意図した深度合成等の撮影が出来るようにしていきたい。

深度合成写真技術を使う事により、これまでの小型昆虫撮影に加えて本論文で示した雪の結晶も被写体全体にピントがあった写真が撮影出来るようになった。顕微鏡写真の多くは平面的である事が大きな欠点である。そこで例えばボルボックス等のマイクロな植物等も深度合成技術を用いて立体的に撮影出来ると、対象物をよりリアルにかつ魅力的に理解出来て科学教育にも有用であると考えられる。そこで雪の結晶に限らず他のマイクロな対象物も深度合成を利用して撮影し、科学教育等に活用していきたい。

また、今回行った天然雪の結晶撮影の欠点の一つは、撮影時期が主に雪が降る1-3月に限られ、かつ撮影出来る場所が北海道旭岳や蔵王スキー場等、雪の結晶が得られやすい場所に制限される事である。しかしながら近年は人工雪の結晶作成も個人レベルで行われ始めている [12]。人工雪の結晶はまだ天然雪の結晶ほどには魅力的でわかりやすい写真は知られていない。そこで例えば人工雪の結晶を作成し、その人工雪の結晶を図3等の装置に置いて人工雪の結晶を撮影する方法等、安定してかつ系統的に雪の結晶を撮影するシステムを開発し、科学教育等に活用していきたい。

参考文献

- [1] <http://www.kagashi-ss.co.jp/yuki-mus/> (2015.3.15現在)
- [2] Nakaya,U. (1951) The formation of ice crystals. *Compendium Meteor*, pp.207-220.
- [3] 牟田淳 (2010) : 宇宙と物理をめぐる十二の授業. オーム社. 31p.
- [4] 中谷宇吉郎雪の科学館 and Kanda,K. (1999) : 天から送られた手紙:写真集雪の結晶, プロセスアート
- [5] Libbrecht,K.G.and Rasmussen,P. (2003) *The Snowflake:Winter's Secret Beauty*,Voyageur Press
- [6] 牟田淳 (2010) : デザインのための数学. オーム社. 172p.
- [7] 牟田淳 (2012) : 六角形の神秘 (雪の結晶写真提供) . 日本経済新聞
- [8] 牟田淳 (2014) : 東京工芸大学メディア芸術 at ICC (雪の結晶写真等展示) . NTTインターコミュニケーション・センター [ICC]
- [9] 丸山宗利 (2010) : 小型昆虫の深度合成写真撮影法. 月間むし. 473、pp.38-42
- [10] 丸山宗利 (2011) : ツノゼミ ありえない虫. 幻冬舎
- [11] CombineZP ダウンロードサイト : <http://hadleyweb.pwp.blueyonder.co.uk/> (2015.3.15現在)
- [12] 村井昭夫 (2005) : ペルチェ素子を使用した対流型人工雪生成装置の製作. 雪氷. 日本雪氷協会雑誌. 日本雪氷学会. vol.67 No.4 pp.341-351

(2015年3月25日受理)