

論 文

シチズンサイエンスによる超高密度雪結晶観測 「#関東雪結晶 プロジェクト」

荒木健太郎^{1*}

要 旨

降雪現象の高精度予測のためには、降雪雲の物理特性の実態解明が必要不可欠である。本研究では、関東甲信地方で降雪時に市民から雪結晶画像を募集する「#関東雪結晶 プロジェクト」を実施し、2016～2017 年冬季観測結果により、シチズンサイエンスによる雪結晶観測の有効性を確かめ、降雪特性の実態把握を試みた。

雪結晶の撮影にはスマートフォンのカメラを採用し、ソーシャル・ネットワーク・サービスを用いた画像収集を行った。これにより、ごく簡易な雪結晶観測手法を確立し、シチズンサイエンスとして効率的な観測データ収集を実現した。この結果、ひと冬を通して 1 万枚以上の雪結晶画像が集まり、そのうち解析可能なものは 73% だった。この取り組みによって首都圏での時空間的に超高密度な雪結晶観測が実現できた。観測結果は、現象の実態解明だけでなく、数値予報モデルの検証・改良などにも応用可能である。一方、シチズンサイエンスデータの特性として、人口の多い都心部での現象では観測数が増えるものの、内陸部のみでの降雪の場合は観測数が少ない傾向が見られた。今後、シチズンサイエンスによる雪結晶観測のネットワークを拡充するために、自治体や教育機関との連携、効果的な広報・普及活動が必要である。

キーワード：降雪，シチズンサイエンス，雪結晶，南岸低気圧

Key words: snowfall, citizen science, snow crystals, South-Coast Cyclone

1. はじめに

南岸低気圧の通過に伴い、冬季首都圏では降雪がもたらされる（柴山，1976；牧野ら，2013；荒木，2016）。首都圏では少しの雪でも交通等へ甚大な影響があるが、現状ではこの降雪現象の正確な予測は難しい（気象庁，2015）。その理由としては、南岸低気圧に伴う降雪現象が、低気圧の発達度合や位置、雲の水平・鉛直層構造や物理的性質（気温・水蒸気量などの熱力学構造、気流などの力学構造、雲・降水粒子特性など）、地表面付近の状態などの様々な要素が複雑に関係する現象であるためと考えられている（荒木，2014；原，2014，2015；Araki and Murakami，2015；気象庁，2015）。

首都圏降雪現象を高精度に予測するためには、まずは現象の実態把握、特に地上における降雪観測が必要不可欠だが、観測例が極めて少なく理解が進んでいない。地上における降雪特性観測としては、降雪結晶を専用施設で観測する方法（例えば Ishizaka *et al.*, 2013；Colle *et al.*, 2014）や、光学式・ビデオ式ディストロメータ（Löffler-Mang and Joss, 2000；Kruger and Krajewski, 2002；Garrett *et al.*, 2012）も採用されてきているが、これらは特定の地点での観測であるため、降雪結晶の空間変動の詳細を把握するのは困難である。

雪結晶の空間変動を把握するためには複数地点での観測が必要であり、このために過去には北海道の石狩平野で市民参加型の手法で観測が行われたことがある（樋口，1959；Higuchi，1962）。近年では、多くの市民が観測等の研究に参加する「シ

¹ 気象庁気象研究所

〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

* 問合せ先：araki@mri-jma.go.jp

チズンサイエンス (市民科学; Citizen Science)」が盛んになってきている。アメリカでは NOAA の National Severe Storms Laboratory により、mPING (Meteorological Phenomena Identification Near the Ground) プロジェクトがなされている (Elmore *et al.*, 2014; <https://mping.nssl.noaa.gov/>)。mPING では、市民が GPS 搭載のスマートフォン (以下、スマホ) のアプリを使い、降水種別 (雨・雪・霰・雹・凍雨・着水性降水など) を含む天気現象を報告できるようにしている。この観測結果は、数値予報モデルにおける降水種別予測精度の評価などに利用されてきている (Elmore *et al.*, 2015; Burg *et al.*, 2017)。しかし、このような降水種別だけの観測では、降水・降雪現象における熱力学場に関する議論は可能だが、雪結晶の種類も含む降雪物理特性の議論はできない。また、この手法では観測者の主観による観測データの不確実性が生じる。これを解決するには、客観性の高い雪結晶画像を収集することが有効と考えられるが、シチズンサイエンスによる雪結晶の大規模な観測研究はこれまでに行われていない。

そこで本研究では、首都圏における降雪現象の実態解明を目指し、2016~2017 年冬季に関東甲信地方においてシチズンサイエンスによる雪結晶観測を実施した。ここでは、シチズンサイエンスによる雪結晶観測の有効性を評価することを目的とし、雪結晶の時空間変動に関する事例解析を行い、2016~2017 年冬季の降雪特性の把握を試みた。また、雪結晶観測のシチズンサイエンスデータとしての特性や、今後の雪結晶観測の展望、利用可能性について考察した。

2. 手法

2.1 「#関東雪結晶 プロジェクト」

気象庁気象研究所では、重点研究「A1 メソスケール気象予測の改善と防災気象情報の高度化に関する研究」(平成 26~30 年度)の一環として、平成 28 年度から関東甲信地方の市民から降雪時に雪結晶画像を募集する「#関東雪結晶 プロジェクト」(以下、#関東雪結晶)を実施している (<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/fo/fo3/araki/snowcrystals.html>)。ここでは、降雪雲の物理特性を中心とした首都圏降雪現象の実態解明を目的としており、

将来的には高精度雨雪判別手法の開発や数値予報モデルの検証・改良に活かすことを想定している。

2.2 スマートフォンを用いた簡易雪結晶観測手法

これまで、鮮明な雪結晶撮影方法として顕微鏡を用いた手法が多く考案・採用されている (Bentley, 1931; Nakaya, 1954; 樋口, 1962; 小林, 1969; 菊地, 1979; 油川・尾関, 2002; 油川, 2005)。その他に明視野照明としてヘッドランプを用いる雪ルーペ (福沢, 1990) や、発光ダイオードを取り付けた観察台 (秋田谷, 2009)、シャーレとアクリルの筒、青いアクリル板を用いて野外で簡易な暗視野の透過光撮影を行う藤野式 (藤野, 2011) などもある。しかし、これらはいずれもデジタルカメラに加え、ルーペ・拡大レンズや専用の機材等を必要としているため、一般市民がこれらの手法で雪結晶観測に参加するには敷居が高い。

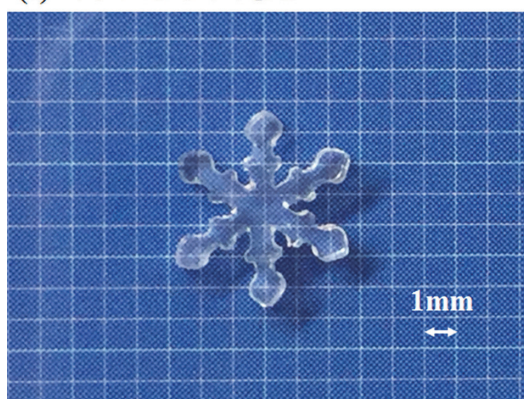
そこで、#関東雪結晶では、いまやほとんどの市民が携帯しているスマホのカメラを採用した。図 1 に撮影例を示す。スマホカメラで倍率を最大にして接写すれば、1 mm 前後の粒径の雪結晶も判別可能である (図 1a)。さらに、近年は 100 円均一の小売店でも、倍率 10 倍程度のスマホ用マクロレンズが扱われるようになってきている。このように安価に入手可能なマクロレンズを使用すれば、より鮮明な雪結晶画像を撮影可能である (図 1b)。

撮影時には、背景に黒や青の暗い色の生地等の素材を使用することを推奨し、暗視野の反射光撮影の手法を採用した。また、背景素材は雪結晶の融解促進を防ぐため、予め外で冷やしておくことを推奨した。撮影時には mm 単位の定規などのスケールがわかるものを視野に入れることを呼びかけた。市民の観測者は綺麗な形をした板状結晶 (樹枝六花など)のみを撮影してしまう懸念があったため、様々な雪結晶が視野に入る遠めの距離での撮影と、樹枝六花などの板状結晶以外の雪結晶についても個々に接写することを呼びかけた。

2.3 SNS 等を用いた観測データ収集

観測に参加する市民のデータ共有時の煩雑さを軽減するため、#関東雪結晶ではソーシャル・ネットワーク・サービス (SNS) のひとつである Twitter を採用した。Twitter 上で雪結晶画像の撮影時刻・場所を記載の上、ハッシュタグ「#関東

(a) マクロレンズなし



(b) マクロレンズあり

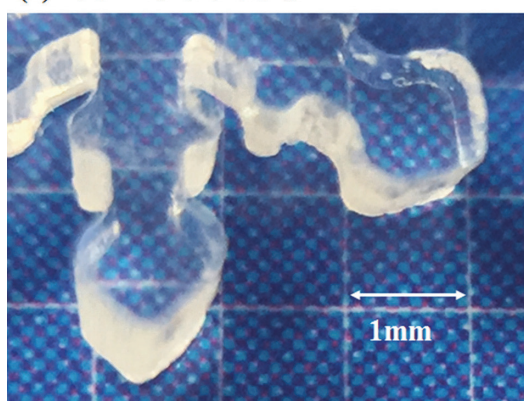


図 1 スマホのカメラによる撮影例。(a) マクロレンズを用いない例。(b) 倍率 10 倍のマクロレンズを使用した例。いずれも Apple 社の iPhone 6 のカメラで最大倍率にして、プラスチックで作成した人工雪結晶を撮影。1 マスは 1 mm である。

雪結晶」をつけて投稿するよう呼びかけた。現代はすでに多数の SNS 利用者があり、スマホ上でも SNS を利用しやすい環境が整っている。このため、スマホで観測した雪結晶画像をそのままスマホ上で投稿でき、手軽にデータ共有ができる。

SNS 利用は情報拡散の容易さも大きなメリットである。ハッシュタグで検索すれば話題になっている投稿にアクセスしやすく、自分以外の市民が撮影した雪結晶画像も参照しやすい。そのため、リアルタイムで観測された美しい雪結晶の画像を手軽に閲覧できることで、市民の知的好奇心や観測意欲が高まることが期待される。美しい雪結晶画像は情報拡散されやすいため、同一ハッ

シュタグでの投稿を増やすことにより新規観測参加者数も増えることが見込まれる。さらに、市民の投稿した雪結晶画像には他の市民からの賛同を意味する「いいね」が多くつくことで観測参加へのモチベーションが高まり、一度だけではなくリピーターとして観測に参加する市民も増えることが考えられる。

また、プライバシー保護の観点から Twitter 上での公開投稿が難しいことも考えられるため、別途メールによるデータ共有も呼びかけた。

2.4 解析手法

雪結晶観測データの品質管理として、まず観測時刻・観測位置の情報の有無を確認した。その後、これらの情報のある観測データについて、雪結晶の写っていない画像や、画像が不鮮明のために固体降水を判別できないものは除外した。

こうして得られた雪結晶画像の観測データを用いて、2016～2017 年冬季の首都圏降雪事例について、雪結晶の時空間変動を調査した。また、気象場や降水分布の把握には、気象庁地上天気図 (6 時間毎) や館野 (つくば) の高層気象観測、気象衛星観測、レーダー観測 (高解像度降水ナウキャストの解析値)、アメダスによる地上気象観測の結果等を用いた。

3. 結果

3.1 2016～2017 年冬季の雪結晶観測データ

2016～2017 年冬季の主な首都圏降雪事例日と、その際に #関東雪結晶で得られた雪結晶画像数の一覧を表 1 に示す。ひと冬を通して、#関東雪結晶により合計 1 万枚以上の雪結晶画像が集まり、そのうち撮影時刻・位置情報のあるものは約 9,500 枚 (89%)、解析可能なものは約 7,800 枚 (73%) だった。

雪結晶画像が寄せられた事例日数は合計 20 日に及んだが、この中で 2016 年 11 月 24 日が最も画像数が多く、5,000 枚を超える画像が寄せられた。これに続き 2017 年 2 月 9 日、2017 年 1 月 20 日でも 1,000 枚を超える雪結晶観測が行われた。一方、これらの事例は低気圧に伴って平野部で降雪が起きているという点で共通していたが、低気圧に伴う降雪現象であっても 2017 年 1 月 8 日や 2017 年 3 月 27 日のように内陸部中心のものは

表 1 2016～2017 年冬季の主な首都圏降雪事例と、# 関東雪結晶により得られた雪結晶画像数一覧.

事例日	画像数	時刻 位置あり	解析 可能	降雪の概況
2016年11月24日	5,267	4,367	3,777	南岸低気圧により広範囲で降雪.
2017年1月8日	29	27	18	南岸低気圧により内陸部中心に降雪.
2017年1月20日	1,314	1,264	950	複数の低気圧により平野部中心に降雪.
2017年2月9日	2,563	2,425	1,848	南岸低気圧により広範囲で降雪.
2017年2月10日	467	428	336	関東南部中心に降雪.
2017年2月24日	20	17	15	関東南部で局地的・一時的に降雪.
2017年3月27日	19	11	9	低気圧により内陸部中心に降雪.
その他	1,003	959	863	※雪結晶画像で時刻・位置ありは89%,
総数	10,682	9,498	7,816	解析可能は73%.

寄せられた画像数が少なかった. また, 低気圧を伴わずに関東南部中心に局地的に降雪のあった 2017 年 2 月 10 日でも, 比較的多くの雪結晶画像が寄せられていた.

これらの事例のうち, 寄せられた画像数の多かった 2016 年 11 月 24 日, 2017 年 1 月 20 日, 2 月 9 日, 2 月 10 日について事例解析を行った.

3.2 2016 年 11 月 24 日の降雪事例

2016 年 11 月 24 日は首都圏の広い範囲で季節外れの雪が降り, 各地で積雪が観測された. 24 日 3 時 (日本時間, 以下同様), 本州の南海上に前線が存在しており, 前線上の伊豆諸島付近で低気圧が発生した (図略). 低気圧は発達しながら東に進み (図 2a), 首都圏には低気圧に伴う雲が広くかかって降雪がもたらされた (図 2b). 24 日 9 時の館野高層気象観測では, 850 hPa で -4.4°C の気温が観測された. 牧野ら (2013) によれば, 関東全域で積雪となるとき (全域型) の館野高層気象観測による 850 hPa の気温の平均値は -4.4°C , 関東北部のみ積雪となるとき (北部型) では -3.0°C であると報告されている. 本事例はこの全域型に当てはまり, 熱力学場としては広範囲で積雪しうな気象場だった.

この事例で # 関東雪結晶によって得られた雪結晶画像の撮影位置の分布を図 3 に示す. 標高の高い山岳域を除き, 首都圏の広い範囲で雪結晶が観測された. 特に東京 23 区や横浜市・川崎市などの神奈川県東部では画像数が多く, 埼玉県南部や千葉県北西部でも画像数が多かった.

24 日のレーダー観測結果と, 当日観測された代

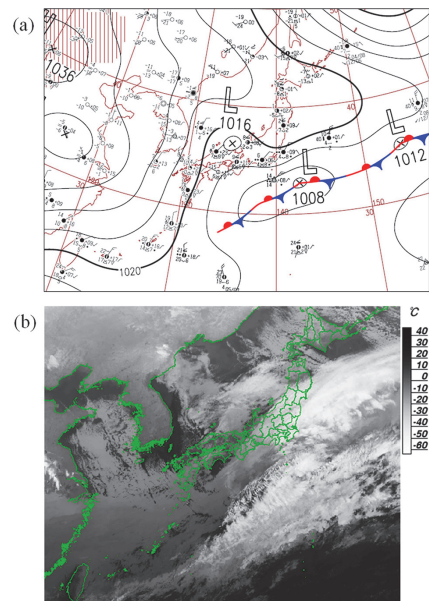


図 2 2016 年 11 月 24 日 9 時の (a) 地上天気図と (b) Himawari-8 赤外画像 (波長 $10.4\mu\text{m}$) による雲頂温度 ($^{\circ}\text{C}$).

表的な雪結晶を図 4 に示す. 9 時の時点で首都圏の広い範囲で降水が観測され (図 4a), 各地で雪が降っていた. 雪結晶のグローバル分類 (菊地ら, 2012; Kikuchi *et al.*, 2013) に基づいて観測された雪結晶を確認すると, 8～9 時の間には広い範囲で雲粒付着のない樹枝状結晶 (P3) や扇状結晶 (P2) による雪片が圧倒的に多かった (図 4b).

一方, 11～12 時にかけても継続して降雪雲が広くかかり (図 4c), 関東北部中心に朝と同様な雲

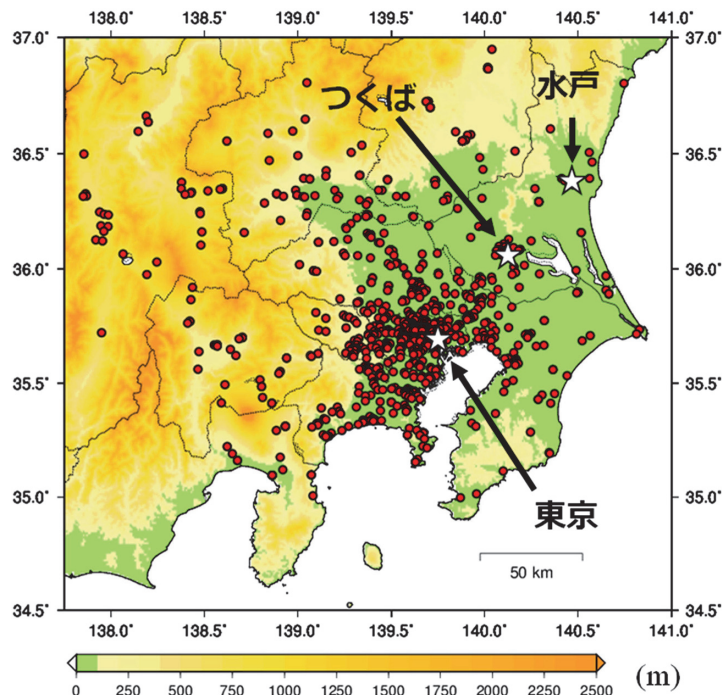


図 3 2016 年 11 月 24 日に #関東雪結晶によって雪結晶が観測された地点分布.

粒付着のない樹枝状結晶・扇状結晶による雪片が多く観測された (図 4d ①-2, ④-2). しかし, 関東南部を中心に針状結晶 (C1, 図 4d ②-2, ⑧-1) のほか, 濃密雲粒付結晶 (R2, 図 4d ⑦) や霰状雪 (R3, 図 4d ②-3, ⑧-2, ⑨, ⑩, ⑪) も多く見られた. つくばでも一時的に霰状雪が観測された時間があった (図 4d ④-3).

本事例では, 発達初期段階の南岸低気圧中心の北から北西象限において降雪が起こり, 関東地方の北部と南部で異なる雪結晶の時間変動をしていた. 図 4 中の赤字で示す雪結晶は, その地域で降雪粒子特性が変化していたことを表している. 関東南部では樹枝状結晶や扇状結晶から針状結晶へと代表的な雪結晶が変化したことから, 湿潤な雲内で雪結晶の成長する温度が, $-20 \sim -10^{\circ}\text{C}$ から $-10 \sim -4^{\circ}\text{C}$ へと変化したことがわかる (Kobayashi, 1961). また, 関東南部で観測された濃密雲粒付六花 (R2c, 図 4d ⑦, ⑧-2) や霰状雪の存在は, 当日昼にかけて関東南部では対流性の雪雲が上空を通過したことを意味している.

3.3 2017 年 1 月 20 日の凍雨事例

次に, 2017 年 1 月 20 日の事例では, 朝から昼前にかけて関東平野を中心に広く降雪が観測された. 20 日 9 時の地上天気図上には近畿～東海地方と関東平野の南東海上に中心を持つ前線を伴わない低気圧がふたつあり (図 5a), 前者の低気圧は 20 日 3 時, 後者の低気圧は 9 時から解析されたものだった (図略). これらはいずれも発達しながら東～北東進したが, 20 日 21 時には前者の低気圧は消え, 後者は関東平野の東海上に達し, 前線を伴う温帯低気圧として解析された. 20 日 9 時の気象衛星赤外画像では関東平野の南東海上に中心を持つ低気圧の雲が関東平野にかかっており (図 5b), 降雪はこの発達初期段階の低気圧によってもたらされたものだった.

館野の 20 日 9 時の高層気象観測結果では, 高度約 100 m のごく下層に強い逆転層が存在しており, 逆転層の下端 (高度 76 m) は -0.3°C だった (図 6). 逆転層上部は東寄りの風で暖気移流場だった (図略). 850 hPa の気温は -3.4°C で, 牧野ら (2013) の北部型にあたる熱力学場だった.

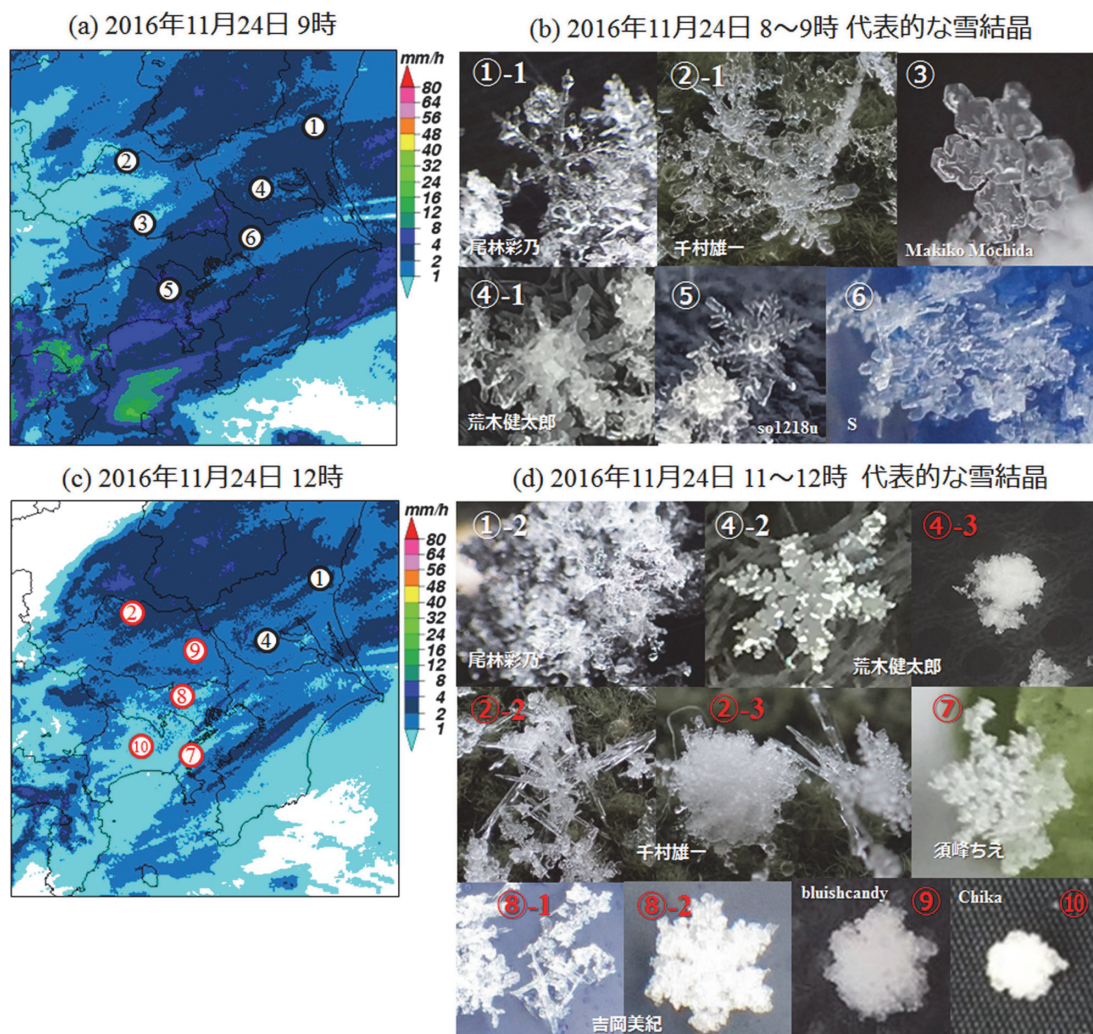


図 4 2016 年 11 月 24 日の降水分布と # 関東雪結晶で観測された代表的な雪結晶. (a) 9 時, (b) 8~9 時, (c) 12 時, (d) 11~12 時. 降水分布は高解像度降水ナウキャストによる降水強度分布 (mm h^{-1}). (b), (d) の雪結晶画像中の番号はそれぞれ (a), (c) 中の位置と対応しており, 画像毎に撮影者名を記載している. (c), (d) の赤字で示す雪結晶は, (b) の時点と比べて降雪粒子特性が変化したことを意味している.

20 日 9 時には, 関東平野の南東海上の低気圧に伴い千葉県から茨城県にかけて降水域が広がった (図 7a). この降水域で茨城県では 8 時半頃から 10 時過ぎまで濃密雲粒付六花 (R2c, 図 7b ①-1) や雲粒付六花 (R1c, 図 7b ②, ③) による雪片が多く観測された. 同時刻の千葉県北西部などでも濃密雲粒付六花の他, 濃密雲粒付立体 (R2d) や濃密雲粒付柱状 (R2a) も観測された (図 7b ④, ⑤). その後, 10 時過ぎにはわずかに雲粒付着した針状結晶による雪片 (C1, 図 7b ①-2, ⑤) が一時的に

観測されたことから, 朝に比べて高い気温の雲内で雪結晶が成長したことが読み取れる.

一方, この事例では 9 時半頃から千葉県成田市や茨城県つくば市などの狭い範囲で凍雨が観測された (H3a, 図 7b ①-2, ⑥). 成田航空地方気象台でも凍雨を観測したほか, 気象庁官署の横浜でも 12~13 時や 16 時台に凍雨が観測された (図略). なお, 他の気象官署では凍雨は観測されなかった. 10 時のアメダスによる地上気温場を確認すると, ちょうど凍雨の観測された茨城県南部から千葉県

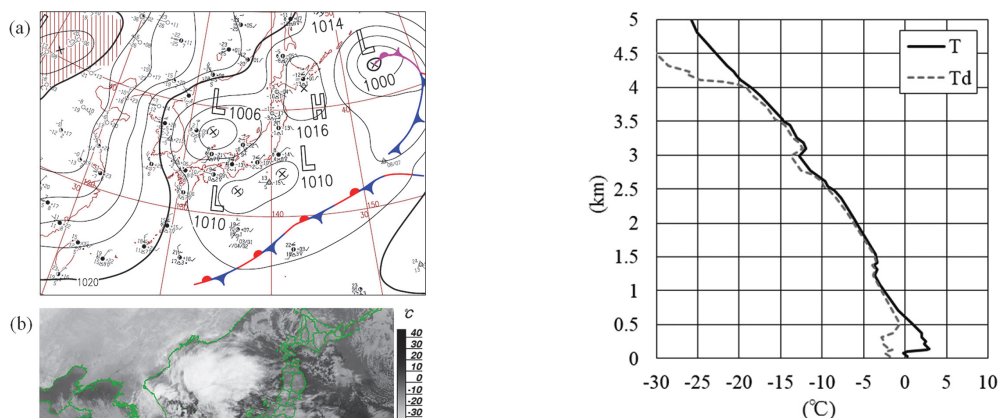


図 5 2017 年 1 月 20 日 9 時の (a) 地上天気図と (b) Himawari-8 赤外画像 (波長 $10.4 \mu\text{m}$) による雲頂温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

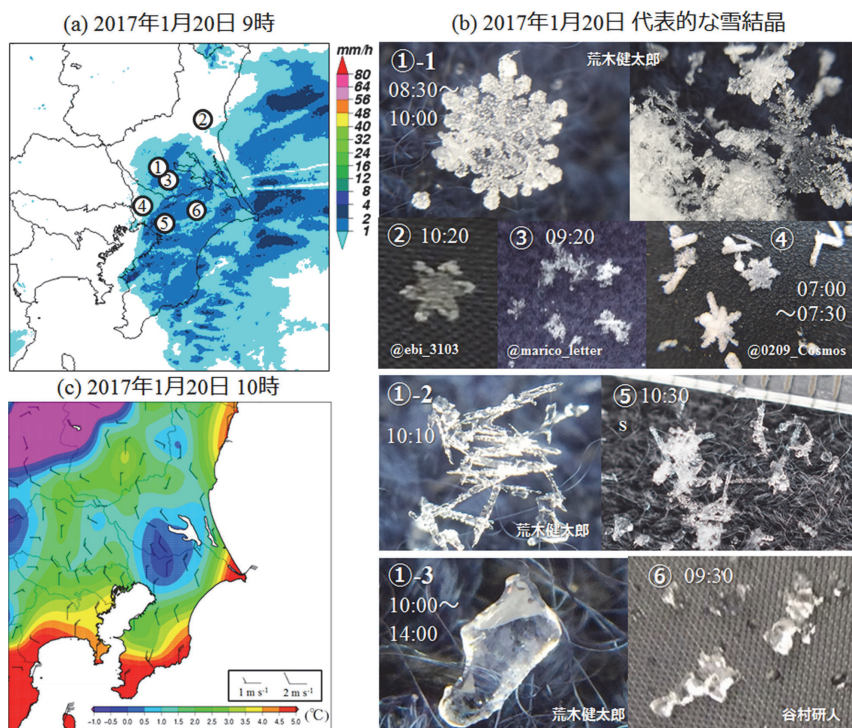


図 7 (a) 2017 年 1 月 20 日 9 時の高解像度降水ナウキャストによる降水強度分布 (mm h^{-1}), (b) 同日に # 関東雪結晶で観測された代表的な雪結晶, (c) 10 時のアメダスによる地上気温 ($^{\circ}\text{C}$, 塗り分け) と地上風 (矢羽) の水平分布。各雪結晶画像中の番号は (a) の位置と対応しており, それぞれ撮影者名と観測時刻を記載している。観測時刻に幅があるものは同様な雪結晶が観測されていることを意味する。

北西部にかけて 0°C 以下の低温な環境となっていた (図 7c)。このことから、凍雨は関東平野の中でもごく限られた地域で発生していたといえる。

3.4 2017 年 2 月 9 日の降雪事例

2017 年 2 月 9 日には茨城県北部を中心に大雪となり、水戸で 10 時に積雪深 12 cm を観測した。この大雪は 6~10 時のわずか 4 時間で起こったもので、交通等に大きな影響があった。

9 日 9 時の地上天気図上には近畿地方の南海上に前線を伴う温帯低気圧が存在し、これとは別に前線を伴わない低気圧が房総半島の東海上に位置していた (図 8a)。茨城県北部を中心とした大雪は後者の前線を伴わない低気圧によるもので、この低気圧は同日昼過ぎにかけて関東平野の東海上を発達しながら北上した (図略)。一方、9 時の時点で西~北日本は温帯低気圧に伴う上層雲に広く覆われており (図 8b)、温帯低気圧は発達しながら本州南岸を北東進した。館野の 9 時の高層気象観測では 850 hPa の気温は -3.7°C で、平野部でも積雪に至りやすい熱力学場だった (図略)。

レーダー観測では、9 日 8 時には房総半島の東海上の低気圧に伴う降水域が茨城県から栃木県にかけて広がり、静岡県などには温帯低気圧に伴う降水域がわずかに観測された (図 9a)。同日明け方から 10 時頃にかけては、茨城県や栃木県の降水域では雲粒付着のない樹枝状結晶 (P3) による雪片が卓越していた (図 9b ①-1, ②, ③, ④, ⑤-1)。なお、大雪となった茨城県北部では、降雪終了時までほとんど雪結晶の種類は変化しなかった。

一方、9 日明け方から朝にかけては、関東の広範囲で雲粒付着がないか極めて少ない状態の角板状結晶 (P1, 図 9b ①-2) や鼓状結晶 (CP1, 図 9b ⑤-2, ⑥) に加え、交差角板状結晶 (CP4, 図 9b ⑦-1, ⑦-2, ⑦-3) も観測された (図 9 中において赤字で示すもの)。交差角板状等の結晶は、樹枝状結晶よりも低温な環境で成長するため (Colle *et al.*, 2014)、温帯低気圧に伴って発生した上中層の層状雲による降雪であることが想像される (石坂ら, 2015)。このことから、9 日朝の時点では、茨城県から栃木県にかけては関東平野の東海上の低気圧に伴う降雪雲に加え、温帯低気圧から広がった上中層のより低温な層状雲も存在する多層構造

の雲が雪を降らせていたことが推察できる。

その後、夕方にかけて本州南岸の温帯低気圧に伴う降水域が広い範囲にかかり (図 9c)、首都圏の広い範囲で樹枝状結晶 (P3) や扇状結晶 (P2) などによる雪片が広く観測された (図 9d ⑧, ⑨, ⑩, ⑪)。15 時のレーダー観測では、神奈川県東部から千葉県、茨城県南部にかけて西南西~東北東の走向を持つバンド状になった相対的に強いエコーが観測されている (図 9c)。15 時では温帯低気圧の中心は関東の南海上にあり (図略)、低気圧中心の北側の降雪現象であるといえる。一般的に温帯低気圧中心の北~北西側では、低気圧の流れに伴う暖気の供給などによって上中層に生成セルが存在することが知られており、この生成セルが形成するバンド状の強エコー域では樹枝状結晶が卓越すると指摘されている (Colle *et al.*, 2014)。これらのことから、本事例の昼頃から夕方にかけて関東平野で観測された雪結晶は、冬季温帯低気圧の中心の北側での典型的な降雪粒子特性を持っていたと考えられる。

3.5 2017 年 2 月 10 日の霰事例

2017 年 2 月 10 日には、前日に首都圏降雪をもたらした温帯低気圧が発達しながら日本の東を北東進し、日本付近は冬型の気圧配置になった (図 10a)。このとき、日本海上には明瞭な筋状雲が形成されており、日本海寒帯気団収束帯 (JPCZ : Japan sea Polar air mass Convergence Zone) 上で雲頂温度の低い降雪雲が衛星赤外画像で捉えられている (図 10b)。関東南部はこの JPCZ に伴う雲列の延長線上に位置し、10 日昼過ぎから夜にかけて東西にのびる降水域が形成された (図 11a)。本事例は低気圧による降雪現象ではないが、#関東雪結晶によるシチズンサイエンスデータを評価するために雪結晶の時空間変動について解析を行った。

当日は局地的に降水強度が大きくなるどころがいくつも見られ、対流性の降水の様相を呈していた (図 11a)。特にレーダーエコー強度が大きかった地域では、直径 1 cm を超える大粒の固体降水が見られた (図 11b ①)。霰の平均的な粒径は 1~3 mm であると言われているが (菊地ら, 2012)、本事例では比較的大きな粒径の塊霰 (R4b, 図 11b ②, ④, ⑧, ⑪) や紡錘霰 (R4c, 図 11b ⑤, ⑦) が

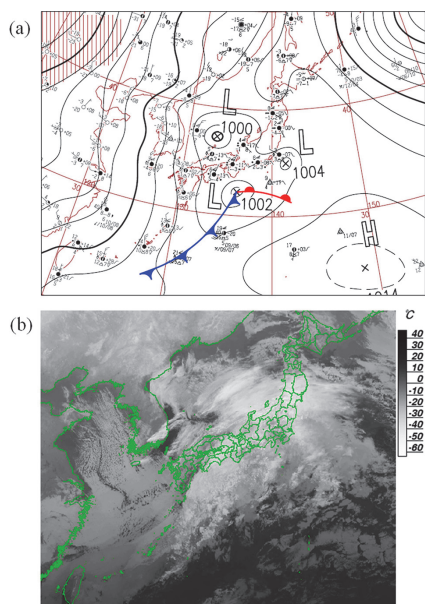


図 8 2017 年 2 月 9 日 9 時の (a) 地上天気図と (b) Himawari-8 赤外画像 (波長 $10.4\mu\text{m}$) による雲頂温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

多かった。また、レーダー・衛星観測データから個々の雲は北東進していた。レーダーエコー強度が大きく大粒の霰が観測された地域の風下にあたる地域では、濃密雲粒付結晶からなる雪片が見られ (図 11b ③, ⑨), その中に雲粒付六花 (R1c, 図 11b ⑩) なども観測された。

これらより、2 月 10 日に関東南部に霰をもたらした雲は大きな上昇流を持つ積乱雲であるといえる。この積乱雲群は、山を越えてきた北西風と南西風が収束して発生していたものだった (図略)。

4. 考察

4.1 超高密度雪結晶観測で実現できること

本研究では、シチズンサイエンスによる雪結晶観測を通し、超高密度な雪結晶観測を実施した。ここでは、#関東雪結晶を通して明らかとなったシチズンサイエンスによる雪結晶観測の利点と課題について考察する。

まず、事例解析を行った 4 事例では、世界でも類のない超高密度な雪結晶観測を実施することが

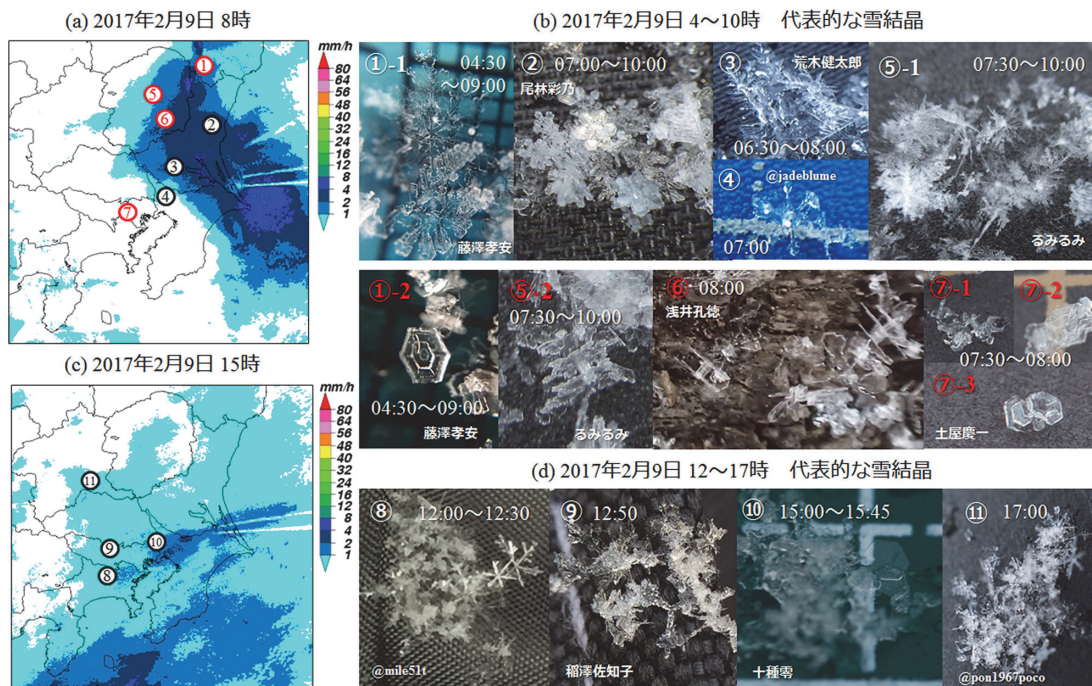


図 9 2017 年 2 月 9 日の降水分布と # 関東雪結晶で観測された代表的な雪結晶。(a) 8 時, (b) 4~10 時, (c) 15 時, (d) 12~17 時。降水分布は高解像度降水ナウキャストによる降水強度分布 (mm h^{-1}) を意味する。(a), (b) 中の赤字で示す雪結晶は低温な環境で成長した雪結晶を意味する。

できた。2016 年 11 月 24 日や 2017 年 1 月 20 日の降雪事例では、雪結晶の時空間変化から雲内で

雪結晶の成長する温度が変化したことを確認でき、雲粒付着の程度から上空の過冷却の水雲の存在も定性的ながら時空間的な議論が可能となった。2017 年 2 月 9 日の事例でも、雪結晶観測から降雪雲の多層構造を推定できた。

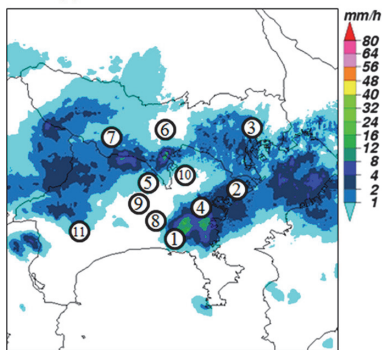
このような観測結果をレーダー観測による三次元的な降水粒子分布の解析や地上・高層観測・数値シミュレーションなどによる力学的・熱力学的構造の解析と組み合わせることで、首都圏の降雪現象の実態解明が可能であると考えられる。また、雪結晶観測結果は、数値予報モデルの検証・改良や偏波レーダーを用いた降水種別判別手法の高精度化、デイスドロメータなどを用いた地上での降水粒子判別手法の検証・高精度化にも応用できることが考えられる。これらにより、降雪予測精度の向上、気象庁の「推計気象分布」による天気分布の高精度化、偏波レーダー情報を用いたリアルタイムでの面的な降水種別プロダクトの提供、航空業界などでの地上降水種別の自動観測などに貢献することが期待される。

4.2 シチズンサイエンスデータの可能性

関東平野における低気圧通過時の雪結晶観測例は、著者の知る限り伊東 (1956) のみである。2017

図 10 2017 年 2 月 10 日 15 時の (a) 地上天気図と (b) Himawari-8 赤外画像 (波長 $10.4\mu\text{m}$) による雲頂温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

(a) 2017 年 2 月 10 日 15 時



(b) 2017 年 2 月 10 日 代表的な雪結晶

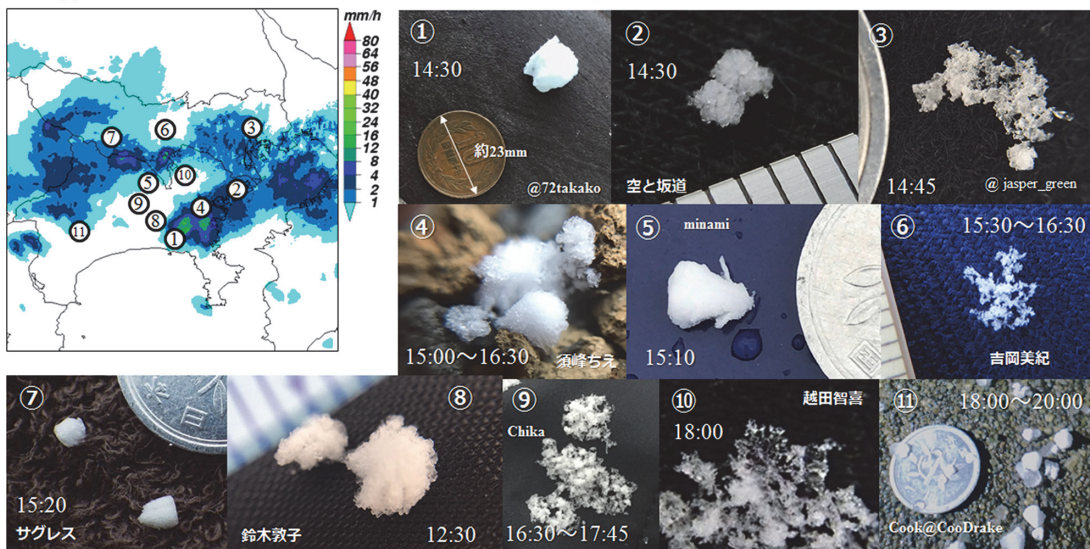


図 11 (a) 2017 年 2 月 10 日 15 時の高解像度降水ナウキャストによる降水強度分布 (mm h^{-1}), (b) 同日に #関東雪結晶で観測された代表的な雪結晶。図中の表記法は図 7 (a), (b) と同じ。

年 1 月 20 日の事例では、局地的な凍雨の観測も実施でき、その水平分布を推定することができた。2 月 9 日の事例では、図 9d ⑨中に三花 (P5b) も確認できる。さらに、2 月 10 日の積乱雲による霰事例は現象としてはよくあることだが、実はこれまで解析された例は極めて少なく (原, 2012)、降雪粒子の観測研究は本研究がおそらく初めてである。

このように、#関東雪結晶では、研究者のみによる従来の雪結晶観測とは比べ物にならない数の観測データが収集できる基盤を構築できた。このため、これまで関東平野で降るとは考えられていなかったような雪結晶が今後観測できる可能性もある。このような取り組みを首都圏に限らず全国に拡張すれば、各地での降雪現象の実態把握についての研究が進むだけでなく、雪結晶の地域特性や動態に関わる新たな知見が得られるだろう。

4.3 解析作業の効率化に向けて

#関東雪結晶では、2016~2017 年のひと冬で 1 万枚以上の雪結晶観測データが得られた。このような膨大なデータは「雪結晶ビッグデータ」と言っても過言ではない。本研究ではマニュアルで画像をひとつずつ解析したが、マンパワーがかかりすぎるため、画像から雪結晶の種類を自動で判別する手法 (Praz *et al.*, 2017 など) を開発し、適用して解析作業の効率化を図ることが望まれる。

また、市民の観測した雪結晶情報を Web-GIS (オンラインの地理情報システム) に自動でマッピングする仕組みを作ること解析作業効率化に有効と考えられる。このシステムをスマホでも利用可能なオープンな場で公開できれば、市民も自分以外の観測者の雪結晶画像も含めて閲覧できるため、知的好奇心が高まり観測データ数の増大や品質向上が見込まれる。このようなシステムに対して高精度な雪結晶の自動判別のしくみを適用できれば、研究者の解析作業が大幅に効率化するだけでなく、市民も自分の撮影した雪結晶が何に分類されるかがわかるため知的好奇心をより高めることが期待できる。

ただし、Web-GIS を用いた観測結果のマッピングのためには観測データの位置情報を上手く抽出・処理する必要がある。本研究ではプライバシーを考慮し、スマホの GPS 機能を利用したジ

オタグという位置情報をつけた SNS 投稿を推奨はせず、投稿の本文に大まかな位置情報を記載するよう呼びかけた。今後は観測データ数も増大することが想定されるため、個人情報の保護を念頭に置き、Web-GIS をベースにした Twitter 等の SNS と連携したスマホのアプリなどを開発・適用することも必要になってくることが考えられる。

4.4 シチズンサイエンスデータの観測特性

2016 年 11 月 24 日の降雪事例における雪結晶観測地点分布から、人口の多い都心部に観測数が集中している傾向にあるのがわかる (図 3)。また、都心部で降雪に至らなかった 2017 年 1 月 8 日、2017 年 2 月 24 日、2017 年 3 月 27 日については、雪結晶観測数が極端に減っている (表 1)。人口の多い都心部でシチズンサイエンスデータ数が増える傾向があるということは mPING のシチズンサイエンスデータを扱った Chen *et al.* (2016) でも指摘されており、シチズンサイエンスによる雪結晶観測データについてもデータ取得率は人口と密接に関係があると想像できる。

このことは、都心部での降雪現象については時空間的に密な雪結晶観測が行えるということであるが、裏を返すと人口の少ない内陸部のみで大雪となる場合には密な雪結晶観測が困難であるということである。2017 年 3 月 27 日には、栃木県那須町で表層雪崩による災害が発生した (栃木県, 2017)。表層雪崩の発生には低気圧に伴う低温型結晶が重要であることが指摘されているが (中村ら, 2014; 荒木, 2018)、この事例ではわずか 19 枚の雪結晶画像しか集めることができなかった (表 1)。今後は人口の多くない地域でも雪結晶観測データ数を増やすことが必要である。

また、人口だけではなく時間帯や曜日によっても観測データ数は変動することが想像されるが、2016~2017 年冬季の関東平野では日中の降雪事例がほとんどだったため、今後事例を蓄積して調査を行う必要がある。

4.5 雪結晶観測研究のプロモーション

都心部での降雪現象でも、雪結晶の観測データ数にはばらつきがある。2016 年 11 月 24 日の降雪事例は、東京では 11 月としての初雪は 54 年ぶりで、11 月としての積雪は 1875 年の統計開始以来初めてのことだった。各メディアが数日前から

都心での降雪の可能性を呼び掛けており、社会的に注目度の高い現象だった。2017 年 2 月 9 日はちょうど筆者が日中にラジオ番組に出演しており、リアルタイムで雪結晶観測の呼びかけを行っていた。

このため、#関東雪結晶が主なターゲットとした SNS である Twitter では、この両日に「#関東雪結晶」という言葉がトレンド入りした (Twitter 社が話題性の高いものを順位づけし、上位の言葉にはユーザがアクセスしやすくなる)。これらの 2 事例では 2017 年 1 月 20 日の事例よりも観測数がかかなり多いことから、シチズンサイエンスによる観測研究では話題性が高まることで観測参加者数も増えると考えてよいだろう。

本研究では、テレビ等のメディアに出演している気象キャスター等の協力を得て、各種 SNS やメディアにおける観測参加の呼びかけについての情報発信をしていただいた。また、日本気象予報士会などの関係者にも観測への参加や呼びかけについて助力いただいた。さらに、気象研究所の #関東雪結晶のページ (<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/fo/fo3/araki/snowcrystals.html>) 上で解説動画を公開したほか、各種サイエンスカフェや日本雪氷学会主催の積雪観測 & 雪結晶撮影講習会などで #関東雪結晶の取り組みや雪結晶観測のコツを広報した。今後の新規観測参加者やリピーターの獲得のためには、本研究と同様に関係者の協力を継続的に得て、メディアを利用した効率的な広報活動を行う必要があることは言うまでもない。

シチズンサイエンスによる観測研究は、一般の市民が最先端の科学研究に簡単に携わることができるため、市民が研究を身近に感じ、知的好奇心を刺激されるというメリットがあり、それに加えて教育的な効果も期待できる。また、本研究は雪結晶を観測対象としているため、観測参加のために気象情報の利用機会が増え、防災・減災に繋がることも期待できる。これらのことから、各地の小学校・中学校等の教育機関や自治体など、理科教育・防災教育的なメリットのある組織と連携して観測を行うことも視野に入れたい。

4.6 観測を継続・拡大するための取り組み

首都圏の降雪現象は発生頻度が低く、観測に参

加する機会も多くはないことから、実際に観測に参加した市民から「スマホで雪結晶撮影をするのが案外難しい」という意見が多く寄せられた。特にスマホ用マクロレンズを使用して撮影を行う場合、焦点を合わせる距離感を会得するのに経験が必要であると思われる。

そこで、冬季に観測しやすい霜結晶や凍結水滴を対象にマクロレンズを使用してスマホで撮影し、Twitter 上にハッシュタグ「#霜活」で投稿・共有することを試みている (図 12a, b)。天然の霜結晶は冬季早朝以外には観測が難しいが、アイス菓子などで成長した霜結晶であれば夏季でも撮影可能である (図 12c)。他にも朝露を撮影対象とし、#霜活と同様に「#露活」というハッシュタグをつけて Twitter で投稿・共有することも試みている (図 12d)。

これらを通して #関東雪結晶の取り組みについても広く周知されることが見込まれるため、シチズンサイエンスでの観測参加者数の増大や、観測参加者のスマホを使ったマクロ撮影技術の向上を通し、雪結晶観測データの高密度化・高品質化が期待できる。

5. まとめ

本研究では、首都圏の降雪現象の実態解明を目指し、関東甲信地方で降雪時に市民から雪結晶画像を募集する「#関東雪結晶 プロジェクト」を実施した。これにあたり、スマートフォンを用いた簡易雪結晶観測手法を確立し、ソーシャル・ネットワークワーキング・サービスを用いた容易なデータ共有を実現した。2016~2017 年冬季には 1 万枚を超える雪結晶画像の観測データが得られ、世界で初めてとなるシチズンサイエンスによる超高密度雪結晶観測を実現した。

「#関東雪結晶 プロジェクト」で得られる雪結晶観測データは、降雪現象の実態解明にとどまらず、降雪結晶特性が重要な低気圧に伴う表層雪崩の実態把握にも有効であると考えられる。また、数値予報モデルにおける降水種別予測や雲物理過程の検証・改良、偏波レーダーを用いた降水種別判別アルゴリズムの高精度化などにも貢献できることが期待される。ただし、今後も観測事例の蓄積が必要であることは言うまでもない。都心部を

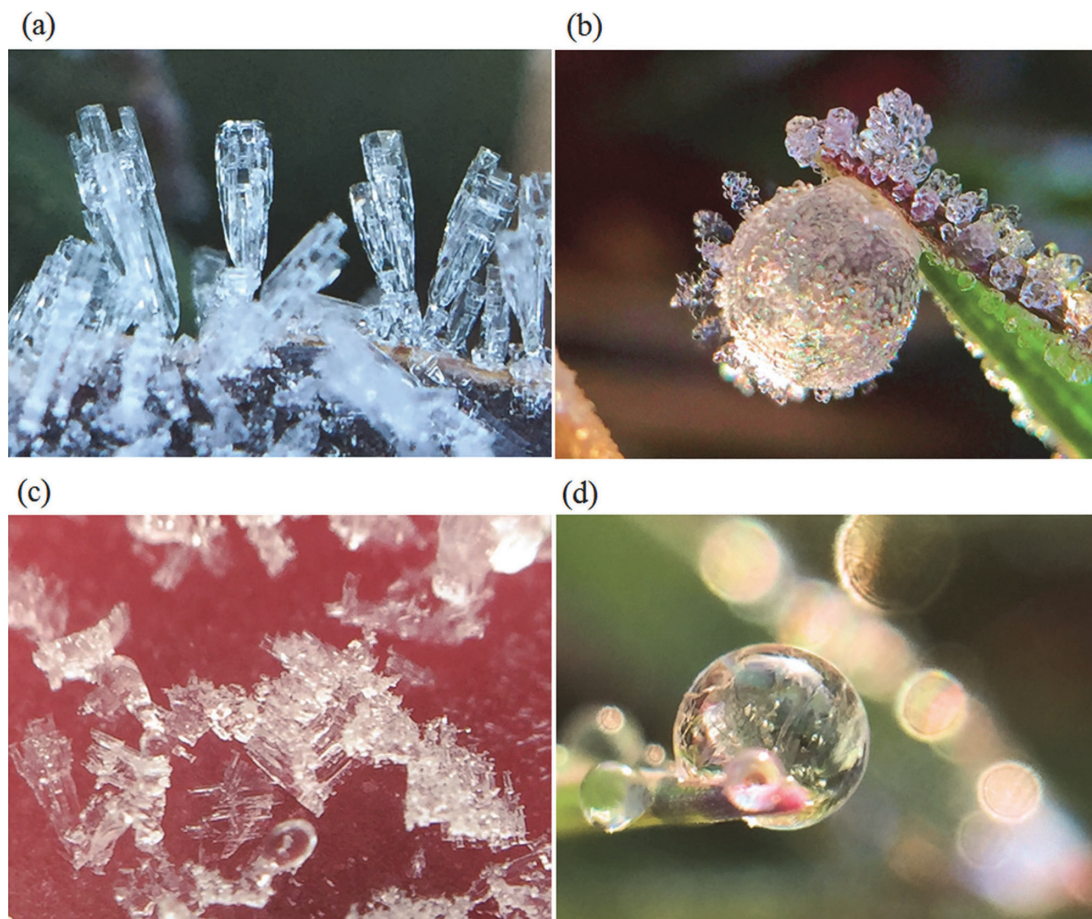


図 12 シチズンサイエンスによる雪結晶観測の拡充に向けた取り組み。#霜活の一環として撮影した (a) 霜結晶, (b) 表面で霜結晶が成長した凍結水滴, (c) アイス菓子の表面で成長した霜結晶と, (d) #露活の一環として撮影した朝露。

含まない降雪現象時には観測数が減ることが想定されるため、教育機関等も含めた観測ネットワークを構築・拡充する必要がある。また、機械学習技術等を利用した雪結晶自動判別手法の確立も必要である。

本研究ではシチズンサイエンスを通して雪結晶の観測研究を行ったが、降雪だけでなく積雪に対しても応用可能であると思われる。同様な枠組みを立ち上げ、シチズンサイエンスによる超高密度な降積雪物理特性観測が実施されれば、雪氷学における降積雪の観測研究にイノベーションがもたらされる可能性がある。将来的に、「雪が降ったら雪結晶観測」が当たり前の文化が築き上げられることを願う。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、「#関東雪結晶プロジェクト」の雪結晶観測に非常に多くの方にご参加いただきました。また、プロジェクトの運営や広報活動についても、多くの方に大変お世話になりました。株式会社・興和の藤野丈志氏、防災科学技術研究所雪氷防災研究センターの本吉弘岐氏には、雪結晶観測についての様々なアドバイスをいただきました。二名の査読者、編集委員の本谷 研氏には建設的で非常に価値のあるコメントをいただきました。この場をかりて心からのお礼を申し上げます。本研究は、文部科学省科学研究

費補助事業「首都圏の高精度雨雪判別手法確立に向けた降雪機構の実態解明」(課題番号: 17K14394)の一環として実施したものです。

文 献

- 油川英明 (2005): 雪結晶のカラー及び暗視野の顕微鏡写真. 天気, **52**, 359-362.
- 油川英明, 尾関俊浩 (2002): 二光源による雪結晶の暗視野顕微鏡写真撮影法. 雪氷, **64**, 541-547.
- 秋田谷英次 (2009): 雪の結晶や積もった雪粒子の写真を撮ろう. 雪氷研究の系譜—北海道の雪氷から世界の雪氷圏まで—, 日本雪氷学会北海道支部, 付録 CD-ROM, 雪氷教育レシピ 7.18.
- 荒木健太郎 (2014): 雲の中では何が起きているのか, ベレ出版, 343 pp.
- 荒木健太郎 (2016): 南岸低気圧. 天気, **63**, 707-709.
- 荒木健太郎 (2018): 低気圧に伴う那須大雪時の表層雪崩発生に関わる降雪特性. 雪氷, **80**, 131-147.
- Araki, K. and Murakami, M. (2015): Numerical simulation of heavy snowfall and the potential role of ice nuclei in cloud formation and precipitation development. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, **45**, 4.03-4.04.
- Bentley, W.A. and Humphreys, W.J. (1931): *Snow Crystals*. Dover Pub. Inc., 226 pp.
- Burg, T., Elmore, K.L. and Grams, H.M. (2017): Assessing the skill of updated precipitation type diagnostics for the Rapid Refresh with mPING. *Wea. Forecasting*, **32**, 725-732.
- Chen, S., Gourley, J.J., Hong, Y., Cao, Q., Carr, N., Kirstetter, P., Zhang, J. and Flamig, Z. (2016): Using citizen science reports to evaluate estimates of surface precipitation type. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, 187-193.
- Colle, B.A., Stark, D. and Yuter, S.E. (2014): Surface microphysical observations within East Coast winter storms on Long Island, New York. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 3126-3146.
- Elmore, K.L., Flamig, Z.L., Lakshmanan, V., Kaney, B.T., Farmer, V., Reeves, H.D. and Rothfus, L.P. (2014): mPING: Crowd-sourcing weather reports for research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 1335-1342.
- Elmore, K.L., Grams, H.M., Apps, D. and Reeves, H.D. (2015): Verifying forecast precipitation type with mPING. *Wea. Forecasting*, **30**, 656-667.
- 藤野丈志 (2011): 野外における雪結晶の簡易な透過光撮影. 雪氷研究大会 (2011・長岡) 講演要旨集, 248 pp.
- 福沢卓也 (1990): 雪ルーベ 素早く正確な雪質判定のために. 雪氷, **52**, 123-125.
- Garrett, T.J., Fallgatter, C., Shkurko, K. and Howlett, D. (2012): Fall speed measurement and high-resolution multi-angle photography of hydrometeors in free fall. *Atmos. Meas. Tech.*, **5**, 2625-2633.
- 原 旅人 (2014): 最近発生した顕著事例に関する検討. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 118-144.
- 原 旅人 (2015): 事例検討. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 82-99.
- 原 基 (2012): 関東地方に積雪をもたらした積乱雲. 天気, **59**, 158.
- 樋口敬二 (1959): 雪の結晶の水平分布について (序報) —石狩平野における観測—. 天気, **6**, 186-189.
- 樋口敬二 (1962): 雪の結晶の観察と記録. 気象研究ノート, **13**, 45-58.
- Higuchi, K. (1962): Horizontal distribution of snow crystals during the snowfall (III). *J. Meteor. Soc. Japan*, **40**, 266-276.
- 石坂雅昭, 藤野丈志, 本吉弘岐, 中井専人, 中村一樹, 椎名 徹, 村本健一郎 (2015): 2014 年 2 月の南岸低気圧時の新潟県下における降雪粒子の特徴. —関東甲信越地方の雪崩の多発に関連して—. 雪氷, **77**, 285-302.
- Ishizaka, M., Motoyoshi, H., Nakai, S., Shiina, T., Kumakura, T. and Muramoto, K. (2013): A new method for identifying the main type of hydrometeors contributing to snowfall from measured size-fall speed relationship. *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 747-762.
- 伊東彊自 (1956): 東京の雪. 雪氷, **18**, 25-27.
- 伊豫部勉, 松元高峰, 河島克久, 和泉 薫 (2015): 2014 年 2 月関東甲信大雪における詳細な積雪深分布の特徴. 雪氷, **77**, 411-419.
- 菊地勝弘 (1979): 雪の結晶の観察. 天気, **26**, 31-52.
- 菊地勝弘, 亀田貴雄, 樋口敬二, 山下 晃, 雪結晶の新しい分類表を作る会メンバー (2012): 中緯度と極域での観測に基づいた新しい雪結晶の分類—グローバル分類—. 雪氷, **74**, 223-241.
- Kikuchi, K., Kameda, T., Higuchi, K., Yamashita, A. and Working group members (2013): A global classification of snow crystals, ice crystals, and solid precipitation based on observations from middle latitudes to polar regions. *Atmos. Res.*, **132-133**: 460-472.
- 気象庁 (2015): 予報が難しい現象について. <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yohokaisetu/yohokaisetu.html> (2017.08.20 閲覧).
- 小林禎作 (1969): 雪の結晶の二色光源による顕微鏡写真撮影法. 低温科学, 物理篇, **27**, 395-397.
- Kobayashi, T. (1961): The growth of snow crystals at low supersaturations. *Philosophical Magazine*, **6**, 1363-

- 1370.
- Kruger, A. and Krajewski, W.F. (2002) : Two-dimensional video disdrometer : A description. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 602–617.
- Löffler-Mang, M. and Joss, J. (2000) : An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 130–139.
- 牧野眞一, 岸本賢司, 土井内則夫, 梅津浩典 (2013) : 大雪の事例 (平成 25 年 1 月 14 日関東地方南部の大雪事例). 平成 25 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 28–48.
- 中村一樹, 上石 勲, 阿部 修 (2014) : 2014 年 2 月の低気圧の降雪による雪崩の特徴. 日本雪工学会誌, **30**, 106–113.
- Nakaya, U. (1954) : Snow Crystals, natural and artificial. *Harvard Univ. Press.*, 510 pp.
- Praz, C., Y.-A. Roulet and A. Berne (2017) : Solid hydrometeor classification and riming degree estimation from pictures collected with a Multi-Angle Snowflake Camera. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 1335–1357.
- 柴山 武 (1976) : 雪の降り始め, 降り終りの予報. 天気予報指針 (実用編), 気象庁予報部, 253–260.
- 栃木県 (2017) : 那須町で発生した雪崩による被害について (第 10 報). <http://www.pref.tochigi.lg.jp/m01/nadarehigai.html> (2017.08.20 閲覧).

Ultra-dense ground observation of snow crystals by citizen science “#KantoSnowCrystal project”

Kentaro ARAKI¹*

¹ Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052

* Corresponding author: araki@mri-jma.go.jp

Abstract: To improve forecasts of snowfall events, a better understanding of the microphysical properties of snow clouds is needed. The Meteorological Research Institute conducted the “#KantoSnowCrystal Project” to collect images of snow crystals from citizens during snowfall events in the Kanto and Koshin regions in Japan. Smartphone cameras were used to capture the images, which were mainly collected through social networking services. Through the campaign in the 2016–2017 winter season, we confirmed the availability of snow crystal observations by citizen science, and tried understanding the snowfall characteristics in these metropolitan areas.

Through the project, we were able to establish an easy method for snow crystal observation and data collection. More than 10,000 snow crystal images were gathered throughout the 2016–2017 winter, of which 73% were analyzable. The #KantoSnowCrystal Project thereby realized spatiotemporally ultra-dense observations of snow crystals in these metropolitan areas, and the observation dataset should contribute to investigations of snowfall mechanisms in these areas and the verification and improvement of numerical weather models, etc. The amount of data, however, varied considerably between heavily populated central urban areas and less-populated inland areas. Collaboration with local autonomous bodies and educational organizations, and effective outreach and dissemination activities are needed to expand the network of snow crystal observation by citizen science.

(2017 年 8 月 21 日受付, 2017 年 12 月 10 日改稿受付,
2018 年 1 月 9 日受理, 討論期限 2018 年 9 月 15 日)