

令和元年6月13日現在

機関番号：10102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05551

研究課題名(和文) 大気中で自由落下成長する樹枝状雪結晶に形態多様性をもたらす条件を解明する風洞実験

研究課題名(英文) Supercooled cloud tunnel studies on the shape variety of branched planar snow crystals grown while falling freely in the atmosphere

研究代表者

高橋 庸哉 (Takahashi, Tsuneya)

北海道教育大学・教育学部・教授

研究者番号：60236297

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：雲内における雪結晶の自由落下成長を再現できる風洞を用いて、主枝形態や副枝密度により多様な形態を有する樹枝状雪結晶の成長条件を明らかにした。実験温度は -12°C ～ -16.5°C である。水飽和条件下では樹枝状結晶の形態は主に気温に依っていた。 -14.2°C 付近の羊歯六花を中心に樹枝六花、星六花、広幅六花、扇六花が対称に分布する。成長時間が5分から10分、20分と伸びるにつれて、副枝密度の高い結晶の成長領域が広がる。また、水に対して未飽和条件下で行った実験でも羊歯六花や樹枝六花、星六花、広幅六花が成長し、結晶形は気温ばかりでなく、水に対する過飽和水蒸気量にも依存することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

雪結晶研究の先駆者である故中谷宇吉郎博士は「雪の結晶は天から送られた手紙」という人口に膾炙している言葉に続けて、「その中の文句は結晶の形及び模様という暗号で書かれている」と記している。本研究により暗号の一端が読み解かれ、雪結晶の代表的な形で、羊歯六花や樹枝六花、星六花など多様な形態を有する樹枝状雪結晶の雲内における成長条件が明らかになった。降水機構及び関連大気諸過程等を理解する上で重要な基礎的知見が得られたばかりでなく、結晶の形態や質量、大きさ、落下速度等のデータは雲のモデリングや気象制御、水収支などでも基礎データとなる。

研究成果の概要(英文)：Under what conditions do the branched snow crystals grow in the atmosphere? To address this issue, we carried out experiments between -12° and -16.5°C using a vertical supercooled cloud tunnel that can simulate the process by which a snow crystal continuously grows while falling in a cloud. The crystal habits were mainly temperature dependent, with habit regimes roughly symmetric about the fern regime near -14.2°C . Away from this temperature were dendrites, stellars, broad branches, and then sectors. When growth time shifts from 5 min, to 10min, to 20min, a regime of a higher density of side branches spread out. Even below water saturation, crystals having fern type, dendrite type, stellar type, and broad-branch type branches were grown. The crystal habits were dependent not only of temperature but also of excess vapor density with respect to ice.

研究分野：大気物理学、特に雲微物理学 気象教育

キーワード：樹枝状雪結晶 自由落下成長 鉛直過冷却雲風洞 降雪粒子の成長 雲微物理過程 降水機構

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究の位置づけ：雪結晶の成長は降水機構や関連大気諸過程で基本的役割を果たしており、雲のモデリングや気象制御、水収支等を考える上でも重要である。中でも雪結晶の代表形として知られる樹枝状結晶は大きさ・質量共に成長が速いのでとりわけ重要な役割を果たす。樹枝状雪結晶は羊歯六花や樹枝六花、星六花、広幅六花など主枝の形や副枝の密度により多様な形態を取る。故中谷宇吉郎北大教授の先駆的な研究以来、多くの人工雪実験が行われてきたが、これらの実験では結晶形を樹枝状雪結晶の下位まで分類できておらず、多様性の成因は不明のまま残されてきた。また、兎の毛等の支持物の上に雪結晶を成長させたもので、天然雲内で自由落下しながら成長する雪結晶とは成長環境条件（温度場及び水蒸気場）を異にするという本質的な問題もあった。

(2) これまでの研究経緯：雪結晶は雲の中を落下しているため、雪結晶回りの流れや雲粒の存在で水蒸気と熱の輸送が促進される。したがって、大気中での雪結晶の成長を調べるためには、自由落下させながら雪結晶を成長させることが不可欠である。このために、鉛直過冷却雲風洞を開発し、実験を続けてきた。この装置により、大気中での雪結晶の自由落下成長過程が実験室内に世界で初めて再現できるようになった。これまで行った実験は実験温度間隔が広く、実験中の気温変化も大きかった。また、雪結晶の成長への雲粒の影響も考慮されていない (Takahashi and Fukuta 1988; Takahashi et al. 1991)。そこで、研究代表者は気温と雲水量を変えながらより詳細な実験を行い、樹枝状結晶の多様性は主に気温に依存し、雲水量にも依っていることを示した。また、雲粒が雪結晶の周りに存在する (Fog effect) ことによる結晶質量増を実証した (Takahashi 2014)。しかし、実験は水飽和条件下で、成長時間は 10 分に限られていた。

2. 研究の目的

『羊歯六花や樹枝六花、星六花など樹枝状雪結晶の形態多様性は雲の中でどのようにして生まれるか?』この課題は従来不明のまま残されてきたが、上記論文によりその糸口が得られた。本研究では、天然に見られる広い環境条件範囲まで実験条件を拡張し、様々な成長時間（結晶径）及び水に対して未飽和（氷飽和以上）条件で実験を行う。これにより、樹枝状雪結晶の大気中での気相成長過程や落下過程をより詳細に示し、樹枝状雪結晶に多様性をもたらす成長環境条件を解明する。

3. 研究の方法

実験に用いた鉛直過冷却雲風洞では雪結晶の落下速度に等しい上昇気流を与えて、空中の一点に浮かせながら成長させることができる (Takahashi and Fukuta 1988)。故中谷宇吉郎博士は狭い実験室内で天空と同じ条件を作ることができないので細い繊維の上に成長させたとしていたが (岩波新書「雪」)、この風洞により大気中での雪結晶の自由落下成長過程を低温室内に初めて再現できるようになった。

水飽和条件下で成長時間 5 分及び 20 分の樹枝状雪結晶成長実験及び水に対して未飽和（氷飽和以上）での雪結晶成長実験を行った。実験条件は次の通りである：

(1) 水飽和条件下で成長時間 5 分及び 20 分の樹枝状雪結晶成長実験

等温及び水飽和条件下で、成長時間 5 及び 20 分、雲水量 $0\sim 0.72\text{ g m}^{-3}$ 、成長温度 $-12^{\circ}\text{C}\sim -16.5^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 水に対して未飽和（氷飽和以上）での雪結晶成長実験

等温及び水に対する飽和比が 1 以下の条件下で、成長時間 10 分、成長温度 $-12^{\circ}\text{C}\sim -16.5^{\circ}\text{C}$ 。

尚、最初に風洞に入れられる氷晶形は角板及び厚角板、角柱で、その大きさは 5 から 20 μm に分布し、平均 10 μm であった。

4. 研究成果

(1) 水飽和条件下で成長時間 5 分及び 20 分の樹枝状雪結晶成長実験

図 1 に成長時間 5 分での雪結晶の形態変化を示す。気温の低下とともに、結晶形は扇六花、広幅六花、星六花、樹枝六花、羊歯六花と変化する。さらに低下すると逆順となり、扇六花に至る。結晶分類名称は Kikuchi et al. (2013) に依る。また、星六花及び樹枝六花、羊歯六花の区分は Takahashi (2014) で用いた基準に従った。すなわち、成長時間 5 分/20 分で、樹枝六花は 1 本/4 本以上の副枝を持つ主枝を、羊歯六花は 2 本/8 本以上の副枝を持つ主

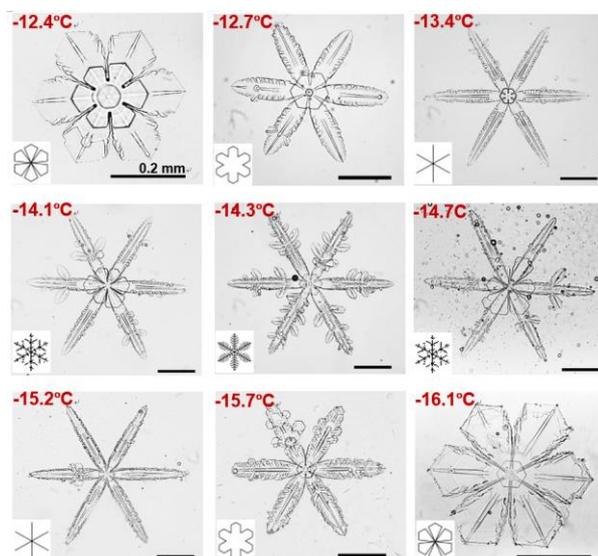


図 1. 成長時間 5 分での気温に依る樹枝状雪結晶の形態変化。各写真の左下に Kikuchi et al. (2013) に依る概略図を示す。

枝を少なくとも 3 本持つ結晶とした。

図 2 は成長時間 5 分での気温と雲水量による結晶形の変化を示したものである。成長時間 10 分の場合と同様に、樹枝状雪結晶の形態は第一義的に気温に依っている。成長時間 10 分に比べると、結晶形の領域は -14.2°C を境として概ね対称に分布している点は同じであるが、次の違いが見られた：a) 各結晶形領域は -14.2°C 側にずれていた、b) 樹枝六花と羊歯六花の混在域は雲水量が高い方に広がっていた、c) -13.5°C 付近の他に、 -14.6°C 付近でも雲水量の増加と共に星六花から樹枝六花に変化した。

図 3 は成長時間 5 分での結晶直径の気温依存性をみたもので、成長時間 10 分の場合と同様の傾向を示した。即ち、気温の低下とともに結晶直径は増加し、この間に結晶形は扇六花から広幅六花、星六花へと変化する。その変化は -13.5°C 以下でゆっくりとなり、副枝が成長する。 -14.6°C で成長がピークとなり、さらに気温が低下すると直径は減少する。成長時間 10 分の場合と比べて、ピークの温度は 0.3°C 高くなっており、 -14°C 付近での小さな落ち込みはなかった。成長時間 5 分での結晶質量の気温依存性を図 4 に示す。結晶直径とほぼ同様の傾向を示すが、結晶質量は雲水量が大きいほど結晶質量は増加した。結晶に近接する雲粒によって水蒸気・気温勾配が急となるためと考えられる。結晶直径は雲水量に依存しなかったため、雲水量増は結晶の厚み増加をもたらしていることになる。

図 5 に成長時間 20 分での雪結晶の形態変化を示す。成長時間 5 分、10 分と同様の変化をするが、 -12.7°C と -13.1°C では雲粒捕捉成長が卓越し、 -15.4°C では立体枝が成長した。成長時間 10 分と比較して、星六花と樹枝六花及び樹枝六花と羊歯六花の境界は外側に移動し、成長時間 20 分ではより広い気温域及びより低い雲水量域で羊歯六花

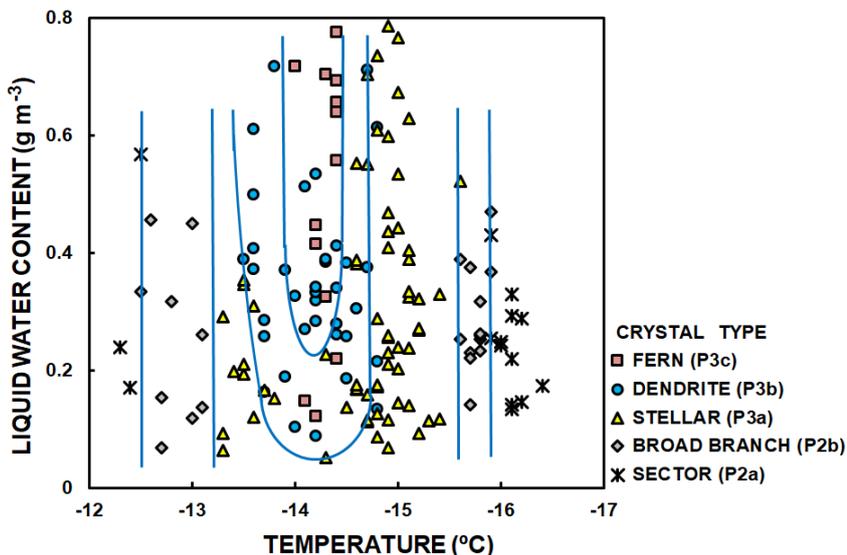


図 2. 成長時間 5 分での雪結晶の形態と気温、雲水量。

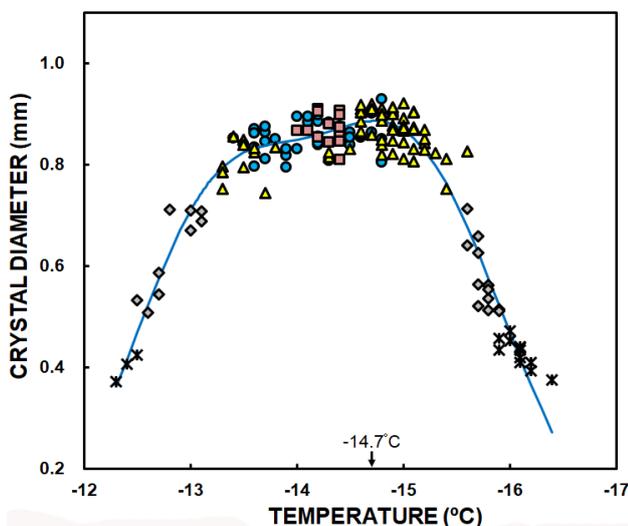


図 3. 成長時間 5 分での雪結晶直径。データと記号は図 2 に同じ。適合曲線はすべての LWC の値を含む。下の矢印は最大を示す。

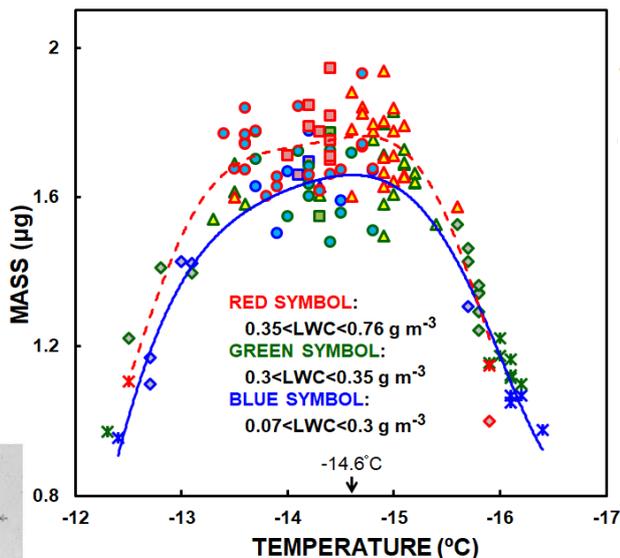


図 4. 成長時間 5 分での雪結晶質量。データと記号は図 2 に同じ。データは 3LWC にグループ分けされている。下の矢印は最大を示す。

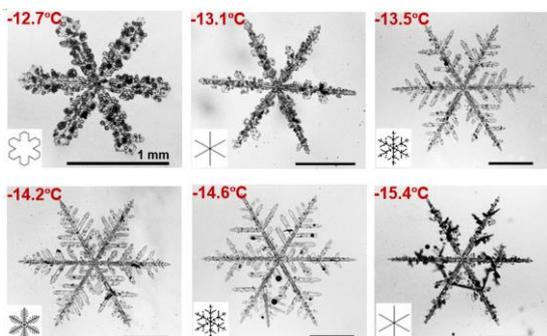


図 5. 成長時間 20 分での気温に依る樹枝状雪結晶の形態変化。

が見られるようになった。

(2) 水に対して未飽和（氷飽和以上）での雪結晶成長実験

4つの温度での水に対する過飽和水蒸気量と結晶形の関係を図6に示す。角板、扇六花、広幅六花、星六花、樹枝六花、羊歯六花が見られた。水飽和以下でも副枝が成長しており、雲粒の存在が副枝の成長に必須ではないことが示された。 -14.3°C では副枝に富んだ羊歯六花が成長する一方、 -15.0°C では副枝が殆ど成長しない星六花が成長した。この結果は水飽和条件下で得られた実験結果 (Takahashi 2014) と一致している。水に対する過飽和水蒸気量が小さい場合に、結晶上にステップや気泡が見られるものがあった。結晶(I) はステップの例で、扇六花の基底面にステップが見られる。結晶の先端は尖っているが、ステップは丸みを帯びている。結晶(H)では、それぞれの柱面方向への三本の気泡列が見られる。

図7は気温と水に対する過飽和水蒸気量による結晶形の変化を示したものである。結晶形は気温ばかりでなく、過飽和水蒸気量にも依存する。結晶形の領域は約 -14.2°C を境として概ね対称に分布している。例えば、水に対する過飽和水蒸気量が 0.15 g m^{-3} では、結晶の形

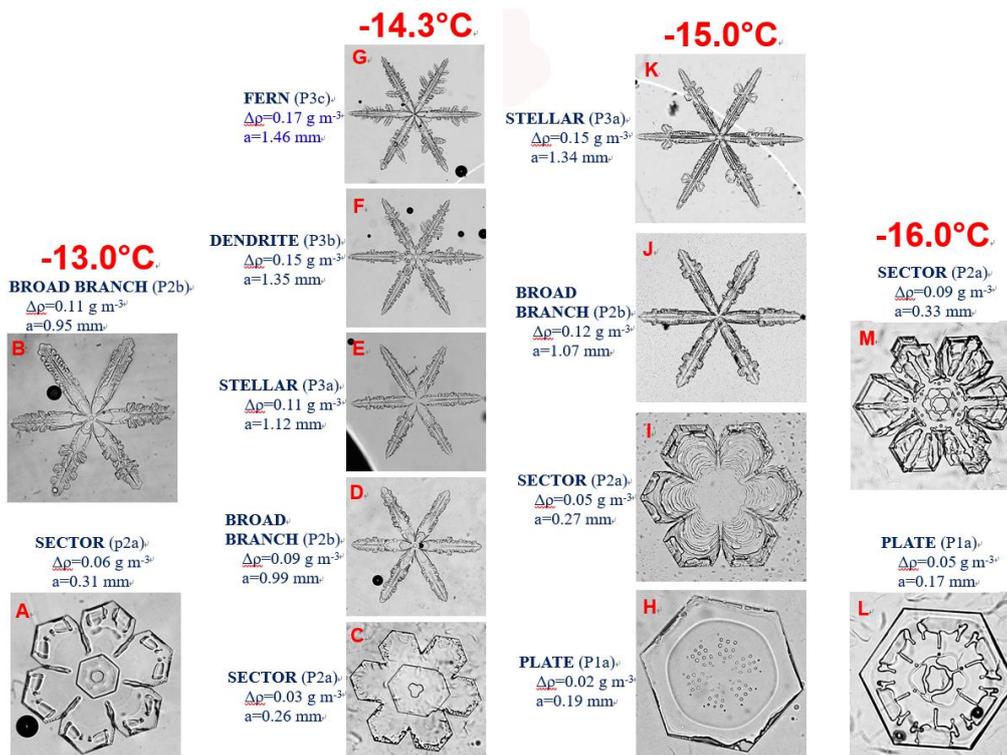


図6. 成長時間 10 分での気温と水に対する過飽和水蒸気量により雪結晶形態の変化。各結晶の上または左に結晶形及び氷過飽和水蒸気量 ($\Delta\rho$)、結晶直径 (a) を示す。

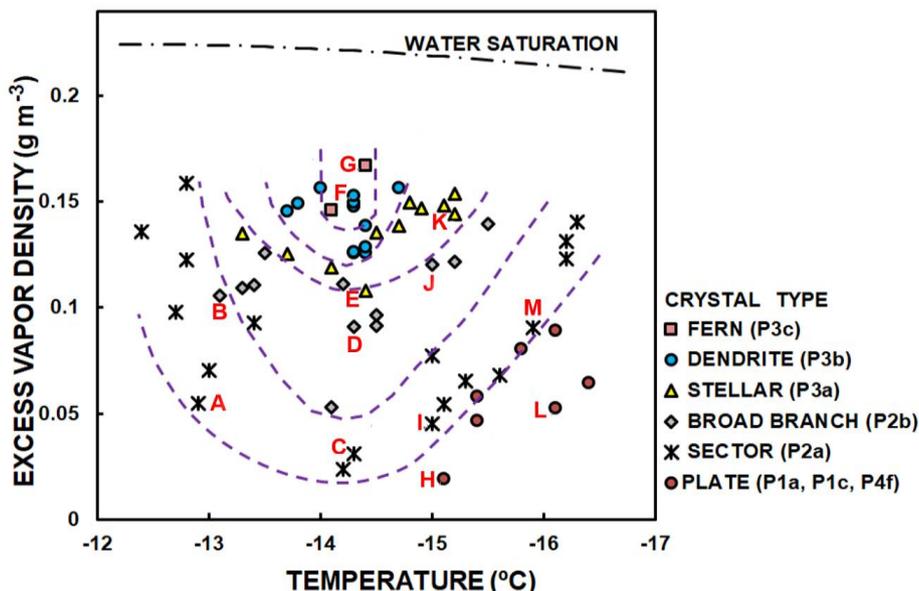


図7. 成長時間 10 分での雪結晶の形態と気温、水に対する過飽和水蒸気量。アルファベット記号, A~M は図6の各写真の左上に同じ記号を持つ結晶を示す。

態は気温によって分けられた： -12.9°C 以上で扇六花、気温の低下と共に、広幅六花、星六花、樹枝六花、樹枝六花と羊歯六花の混在となり、ここから逆に樹枝六花、星六花、 -16.0°C 以下で扇六花と変化する。また、氷に対する過飽和水蒸気量の増加と共に結晶形は変化した。例えば、 -14.3°C では、その増加と共に扇六花から広幅六花、星六花、樹枝六花、樹枝六花と羊歯六花の混在と変化した。静的チェンバー実験では広幅六花、星六花、樹枝六花、羊歯六花は水飽和以下で得られておらず(Kobayashi, 1961; Rottner and Vali 1974)、大きな差異が認められた。雪結晶が自由落下する本実験では、通風により結晶表面に常に新たな環境をもたらされ、成長が促進され、枝が成長したと考えられる。

<引用文献>

- Kikuchi, K, T. Kameda, K. Higuchi, A. Yamashita and working group members for new classification of snow crystals, 2013: A global classification of snow crystals, ice crystals, and solid precipitation based on observations from middle latitudes to polar regions. *Atmospheric Research*, **132–133**, 460–472.
- Kobayashi, T., 1961: The growth of snow crystals at low supersaturations. *Phil. Mag.*, **6**, 1363–1370.
- Rottner, D. and G. Vali, 1974: Snow crystal habit at small excesses of vapor density over ice saturation. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 560–569.
- Takahashi, T., 2014: Influence of Liquid Water Content and Temperature on the Form and Growth of Branched Planar Snow Crystals in a Cloud. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 4127–4142.
- Takahashi, T., T. Endoh, G. Wakahama and N. Fukuta, 1991: Vapor diffusional growth of free-falling snow crystals between -3 and -23°C . *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 15–30.
- Takahashi, T. and N. Fukuta, 1988: Supercooled cloud tunnel studies on the growth of snow crystals between -4 and -20°C . *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 841–855.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① T. Takahashi, Supercooled Cloud Tunnel Studies on the Growth of Branched Planar Snow Crystals below Water Saturation. Proceedings of 15th Conference on Cloud Physics, 査読無, 2018, 4pp.
<https://ams.confex.com/ams/15CLOUD15ATRAD/webprogram/Paper347181.html>

[学会発表] (計 4 件)

- ① 高橋庸哉, 水飽和以下での雪結晶の成長条件を解明する鉛直過冷却雲風洞実験. 日本気象学会秋季大会, 2018.
- ② T. Takahashi, Supercooled Cloud Tunnel Studies on the Growth of Branched Planar Snow Crystals below Water Saturation. 15th Conference on Cloud Physics, 2018.
- ③ 高橋庸哉, 樹枝状雪結晶に形態多様性をもたらす成長条件を解明する風洞実験—成長時間の効果. 日本気象学会春季大会, 2017.
- ④ T. Takahashi, Supercooled Cloud Tunnel Studies on the Growth Conditions of Branched Planar Snow Crystals: The Influence of Crystal Growth Time. 17th International Conference on Cloud & Precipitation, 2016.

[その他]

雪の結晶に関する出張授業を道内小学校で次のように実施し、成果の普及を図った： (2016年度) 石狩市立紅南小・札幌市立北陽小・同新陽小・同和光小、(2017年度) 札幌市立新陽小・同北陽小、(2018年度) 札幌市立屯田北小・同月寒東小・同明園小・同北陽小・同新陽小。