

報告

氷貯蔵庫で成長した巨大霜結晶

樋口敬二¹⁾, 伏見碩二²⁾, 西村有香里³⁾, 三田恵里³⁾,
高橋良幸³⁾, 神田健三⁴⁾, 角川咲江⁵⁾, 嶋林 栄⁵⁾

要 旨

滋賀県東近江市にある「西堀榮三郎記念 探検の殿堂」の水貯蔵庫の壁に、全体が7cmを超える巨大霜結晶が成長していることが1998年に判明し、話題となったが、その後、観察、測定等が進められ、霜結晶の形態と成長について、次のような成果が挙げられた。霜結晶は氷貯蔵庫内のほとんど風のない所でゆっくり成長し、1辺が2cm程度の巨大霜結晶は2ヶ月近くかかって成長する。霜結晶にはコップ型、針状、角柱、角板の結晶形があり、それぞれが成長する温度範囲は中谷宇吉郎、小林禎作による人工雪の実験結果と近い値であった。結晶の中で特徴的なのは、コップ型であり、六角形の巻き込み構造(Scroll form)が発達しており、巻き込みの回数は時間とともに増加する過程などが観察された。同じようなコップ型の巨大霜結晶はグリーンランド、南極のクレバスにおいて観察されている。一方、氷貯蔵庫内に成長した巨大霜結晶のレプリカを7~8%の溶液によって作成することに成功し、研究大会で展示して好評を得た。今後の研究課題としては、実験装置内で巨大霜結晶を成長させ、巻き込み構造の成長過程を解明することが挙げられる。

キーワード: 巨大霜結晶, コップ型結晶, 極地における霜結晶

Key words: large frost crystals, cup crystal, frost crystals observed in the Polar regions

1. はじめに

滋賀県東近江市にある「西堀榮三郎記念 探検の殿堂」には、南極体験ゾーンという -25°C に保たれた低温室があり、その一隅にカーテンで仕切られた氷貯蔵庫があって、その壁にコップ型の巨大な霜結晶が成長していることが、1998年に判明し、新聞では中日新聞1998年9月11日(滋賀版)、テレビではNHKニュース(1998年10月6日)、また科学ニュース誌「サイアス」(1998年11月6日)でも報じられた。その後、2002年、2003

年、2004年、滋賀県立大学の大学院修士課程の卒業研究として観察、測定等が進み、その成果は神田ら(1998)、西村ら(2003)、Higuchi *et al.* (2003)によって学会発表してきたが、2010年10月末に南極体験ゾーンが閉鎖され、巨大霜結晶の成長が終わったのを機会に、これまでの成果をまとめて報告することにした。

2. 霜結晶を観察した氷貯蔵庫の構造と室内環境

1994年8月に開館した「西堀榮三郎 探検の殿堂」は、第1次南極地域観測隊越冬隊長・西堀榮三郎を記念して、生地に建てられたものである。建物は2階建てで、1階の南極体験ゾーンは年間を通じて -25°C に保たれた低温室であり、床面積 160.5m^2 、高さ4.7mであり、その一角に氷貯蔵庫があり、霜結晶の観察はここで実施した。

氷貯蔵庫は、幅250cm、奥行きは入口の左側が

- 1) 名古屋大学名誉教授
〒470-0154 愛知県東郷町和合ヶ丘1-12-4
- 2) 滋賀県立大学名誉教授
〒520-2134 大津市瀬田4丁目3-7-102
- 3) 滋賀県立大学環境科学部卒業生
- 4) 中谷宇吉郎雪の科学館
〒922-0411 加賀市潮津町イ106
- 5) 西堀榮三郎記念探検の殿堂
〒527-0135 東近江市横溝町419



図 1 氷貯蔵庫の天井と壁を覆った霜の結晶 (1998 年 8 月 19 日撮影)

150 cm, 右側が 250 cm, 高さ 250 cm で, 床は南極体験ゾーンより 80 cm 高くなっており, 入口はカーテンで仕切られていた. 左側面は金網で南極体験ゾーンとつながっており, 右側面は搬出扉で, その外側は屋外だが, めったに開かれることはない. 奥の扉は機械室への扉で, 月に 1 回, メンテナンスの時に開けられる. 天井は金網が張られていたが, 図 1 に示すように天井と壁面の上部はほとんど霜で覆われていた.

霜結晶は, 主に氷貯蔵庫の左側面, 奥の扉, 天井, カーテンの内側に成長していた. 左側面では床からの高さ 80 cm 付近より上部に, 奥の扉では 100 cm 付近より上部に成長しており, 高さを増すほど霜は厚くなっていた. 天井では金網から結晶が下に向かって成長しており, 厚さは 40 cm ほどであり, 床には落ちた霜が厚く堆積していた.

氷貯蔵庫内の霜結晶の観察と室内環境の測定は, 伏見が滋賀県立大学教授であった時に指導して, 滋賀県立大学・環境科学部・環境生態学科・地球環境大講座の大学院修士課程の卒業研究 (西村, 2002; 三田, 2003; 高橋, 2004) として, 角川の協力の下に実施し, 樋口が観察と討議に参加した.

記録式温度計による気温の測定を床からの高さの異なる 5~6 点で実施した結果, 気温の日変化から, 貯蔵庫に南極体験ゾーンの空気が流入していることが判った (西村, 2002). そこで, 線香の煙の流れによって空気の流れを調べた結果, 霜結晶は貯蔵庫内の風がほとんど無い所で成長した可能性が大きいと考えられた (三田, 2003).

また, 氷貯蔵庫内の水蒸気量をガステック検知

管式気体測定器によって測定したところ, 貯蔵庫内の水蒸気量は, 月 1 回程度, 南極体験ゾーンの壁に水を撒いて氷を増やす着氷作業の後に, 増加していた. したがって氷貯蔵庫は南極体験ゾーンとつながっているために, 気温だけではなく, 水蒸気量の影響も受けていることが明らかになった (西村, 2002). 一方, 南極体験ゾーンへの入場者が多い夏に, 人の呼吸が供給源になる可能性があるが, これは実証が難しく, 検討できなかった.

3. 霜結晶の形と成長条件

氷貯蔵庫における霜結晶の形と成長条件は, 2002 年~2004 年の 3 年にわたる観察と測定によって, 次のような結果が得られた (西村, 2002; 三田, 2003; 高橋, 2004).

霜結晶の形は, 2002 年には, 壁面に成長した結晶をコップ型, 針状, 角板に分類して観察し, 結晶の種類の通年変化を調べた. 例えば, 2 月には, すべてコップ型であるのに, 8 月には上から角板, 針状, コップ型が成長していた. 2003 年には, これらに角柱, 凍結氷を加えた 5 種の分類によって, 壁面とともに, 温度計の設置場所付近に吊るした麻ひもに成長する結晶を 1 週間毎に観察し, 通年変化を調べた. 2004 年には, 壁面の結晶を 2003 年と同じ分類によって観察し, 2 ヶ月間の変化を調べた.

その結果, いずれの場合も, 気温の高い天井から気温の低い床に向かって, 凍結氷, 角板, 針状, 角柱, コップ型が分布する傾向があった.

次に, 気温の測定は, 2002 年には, 床からの高さ 190 cm, 117 cm, 17 cm の 3 カ所, 2003 年には, これに 150 cm の測点を加えた 4 カ所, 2004 年には, 6 カ所 (高さ 160 cm, 130 cm, 115 cm, 100 cm, 85 cm, 70 cm) に記録式温度計を設置して実施した. 測定結果によって, 縦軸が高さ, 横軸が時間の図で, 高さとの関係の 1 年にわたる時間的变化を示す等温線図を作ると, いずれの場合も, 氷や霜で覆われた天井付近が最も気温が高く, 0~-2°C であり, 高さが低くなるにつれて気温が低くなり, 高さ 80 cm で-14°C 程度であった.

以上の観察と測定の結果に基づいて, 各結晶形が成長する温度範囲をまとめたのが表 1 である. このように 0°C に近い気温の高い領域に角板, 角

表 1 霜結晶の形と成長条件: 人工雪の実験・小林ダイアグラム (1961) との比較

結晶形	温度範囲 (°C)			
	西村 (2002)	三田 (2003)	高橋 (2004)	小林ダイアグラム
角板	~ -1.0	-1.2~ -7.1	-0.3~ -6.5	0.0~ -3.8
角柱	—	-0.1~ -9.1	-1.3~ -10.6	-3.8~ -10.0
針状	-1.0~ -6.0	-2.8~ -10.9	-4.0~ -8.7	-3.8~ -6.6
コップ型	-4.2~ -12.0	-5.6~ -14.2	-5.6~ -16.2	-6.6~ -10.0

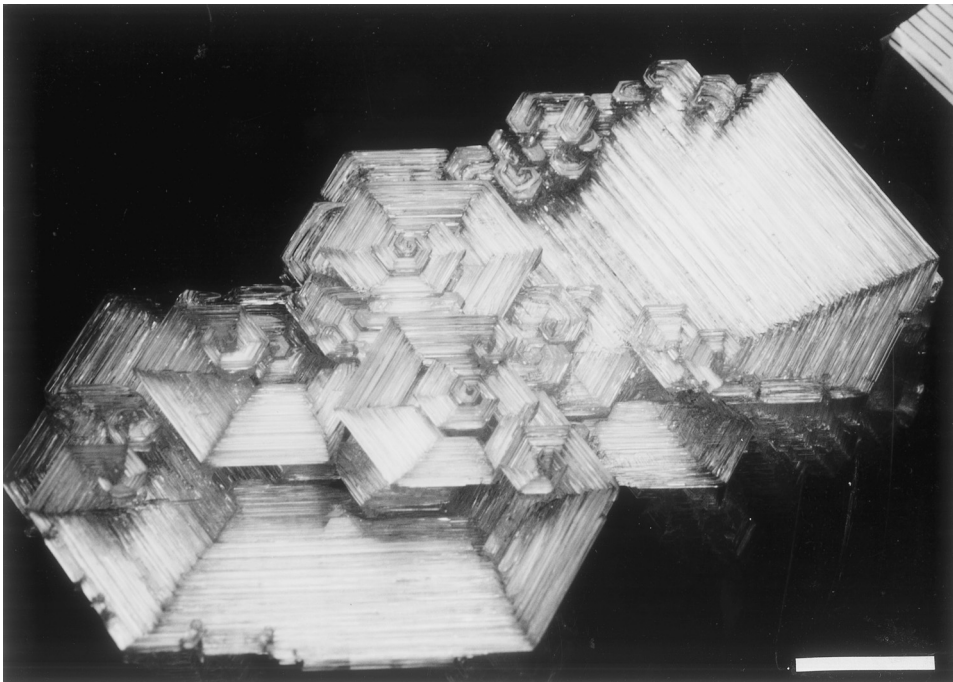


図 2 最初に発見された巨大霜結晶 (写真に記入した白線は 1 cm のスケール)

柱の成長がみられるのは、中谷の人工雪の実験 (中谷, 1949; Nakaya, 1954) と異なっており、小林による人工雪の実験 (Kobayashi, 1961) に近い結果なので、表 1 には小林ダイアグラムの温度範囲を示したが、霜結晶と人工雪との傾向は似ている。

ただし、この表の小林ダイアグラムでコップ型と記載している結晶は、原論文 (Kobayashi, 1961) では Sheath と記載されており、小林 (1957) は「中谷の Ta-s ダイアグラムの屏風型 (scroll) またはコップ型 (cup) の結晶の領域に相当する所には、我々の実験ではサヤ型 (sheath) 及び屏風型 (scroll) の成長がみられる。」と述べ、コップ型と記載していない。ところが、小林の用語には、この領域の結晶を、「さや」とした

り (小林, 1970)、一方、コップ状として、写真の説明にはコップ状 (骸晶角柱) と書く (小林, 1978)、というような混乱が見られる。

従って、氷貯蔵庫で観察されたコップ型霜結晶については、成長領域を人工雪の実験と比較するには、小林ダイアグラムより中谷ダイアグラム (Nakaya, 1954) の scroll or cup の結晶の方が適当で、 $-6^{\circ}\text{C} \sim -18^{\circ}\text{C}$ の範囲であり、観察の結果とよく一致している。

また、成長速度については、2003 年に角板の一边の長さを一週間毎に測定した結果、成長量は 1 日で 0.43 mm 以下であり、山下らの人工雪の実験 (Yamashita and Ohno, 1984) における比較的大きい結晶の成長速度より 1 桁小さく、霜結晶の成長速度は大きくなるほど遅くなるので、図 2 に示



図 3 コップ型結晶 (皿状結晶) (写真に記入した白線は 1 cm のスケール)

すような 1 辺が 2 cm 程度に巨大化するには約 2 ヶ月以上の期間がかかると推定される。

4. コップ型霜結晶の形態

これまで述べたように、氷貯蔵庫において霜結晶について観察と測定を実施したが、この霜結晶に注目するようになった最初のきっかけは、端から端までが 7 cm を超える巨大なコップ型の霜結晶 (図 2) である。1998 年に初めて角川、嶋林が発見し、神田、伏見、樋口が観察して討議した。

コップ型には、単純な皿型 (図 3) から、皿型を裏返しにすると六角形の谷筋に沢山のコップ型が連なる複雑な構造を持つもの、コップ型を横から見ると骸晶結晶の角柱そっくりに見えるものまで、さまざまだが、これらの結晶の形を写真で表示するのは難しいので、基本形を単純化すると、図 4 のようになると考えられる。

樋口は、1959 年 1 月に手稲山頂で採取した雪結晶のレプリカによって、0.2~0.3 mm の氷晶の形と表面エネルギーの関係を計算と観察に基づいて論じ、骸晶結晶の「短い角柱」と「厚い角板」の区別は軸比 0.55 をとるのが妥当であるという結

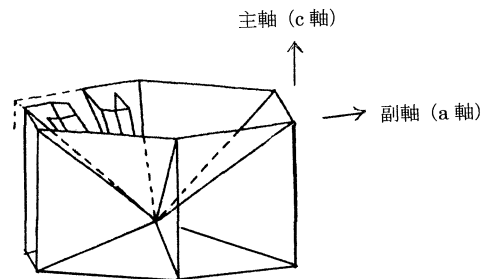


図 4 コップ型結晶の基本形

論を得た (樋口, 1961)。このような微細で単純な形の氷晶に関する議論をそのまま 100 倍の大きさで複雑な形の巨大霜結晶に適用はできないが、この「厚い角板」に巻き込み構造を加えた形が図 4 で、コップ型霜結晶の基本形と考えてよいと思われる。

巨大霜結晶の典型が図 2 だが、その特徴は、骸晶構造が発達し、六角形の巻き込み構造 (Scroll form) がいくつも繋がっていることである。中には図 5 に示すように、或る部分では六角形の巻き込みが示す結晶主軸 (C 軸) がずれており、また他の部分では六角形が示す副軸 (a 軸) の方向が



図 5 コップ型結晶 (多結晶) (写真に記入した白線は 1cm のスケール)

大きく異なっているので、霜結晶の全体は多結晶である場合がある。

なお、氷貯蔵庫で観察した巨大霜の端から端までの大きさは、図 2 の結晶で 7cm、最大値は 2002 年の場合、10 cm、2003 年の場合、3 cm、2004 年の場合、3.7 cm であった。なお、その後は小さくなる傾向があり、2008 年頃は 1cm 程度であった。

中谷は、人工霜の実験で、「霜の杯状結晶 (cup crystal) は、図 6 に示したように、一辺が螺旋状に巻き込んだものが多い。」(中谷, 1949) と述べているが、写真は示していない。ただ、「盃状霜」の項に、「この種類は完全に出来ると六角の洋酒盃のような形になるのであるが、普通その一部分が欠けていることが多い。」と述べ、その例として、1941 年、樺太内路で撮影した写真を挙げているが、5mm 程度の小さいものである。

中谷は人工雪の実験で、装置内で天井のコルク蓋に付着したコップ型の結晶の例を挙げ、「これらの結晶は、多くは、装置を一晩低温室に放置した場合に、翌朝出来ていることが多いので、空気及び水蒸気の流れが弱いことも必要であるらしい。」と考察しているのは、氷貯蔵庫内の霜の場合

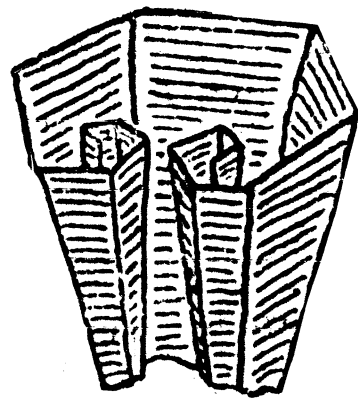


図 6 霜の杯状結晶 (中谷・1949, 第 10 図)

と共通性があり、興味深い。

また、中谷の例に似た形の結晶の成長が権田らによる人工雪の実験において観察されている (Sei *et al.*, 2000)。

一方、中谷は、天然の霜についても、1940 年の凍上調査 (中谷・孫野, 1944) の際、道床に敷かれた砂利層の石の底面に付着した霜の結晶を観察し、霜柱状、コップ型、骸晶 (スケレトン)、角板状、角柱状に分類し、コップ型について「コップ

型を上からみたもので、六角の一頂点が螺旋形に巻き込んでいるのもこの種の結晶の特徴を示している。この結晶は Wegener が Greenland の氷河のクレバスの中で発見した写真とよく一致している。」と述べている。また、「結晶の中での傑作はコップ型である。この結晶は顕微鏡の下では、水晶で作った六角形の洋酒盃のように輝いて見えるのであった。」という感想を残している（中谷, 1941）。ただし、大きさは口径 4 mm の小さいものである。

中谷・孫野（1944）が指摘している Wegener によるクレバス内のコップ型結晶は見事な巻き込み構造を持っているが、口径 1 cm の大きさである（Seligman, 1936）。しかし、これより更に巨大な結晶が南極のクレバスや氷洞内で Knight and Devries（1985）によって観察されている。六角形の一辺は 2 cm 程度だが、長さは 50 cm に及ぶものもあるという巨大さで、コップ型結晶には、巻き込み構造が発達しており、spiral complex とよばれている。

ところが、同じような観察が日本の研究者によって極地で行われていたことが、氷貯蔵庫の巨大霜結晶の観察がきっかけとなって判明した。というのは、2002 年、山形で開催された雪氷学会全国大会で、後述のように三田、角川が作成した巨大霜結晶のレプリカを展示し、アンケートを求めたところ、小野延雄から「巨大霜結晶はカナダのタクトヤクタクでイヌイットが永久凍土を利用して、冷蔵貯蔵庫に使っていた所でみました」、小林俊一から「南極みずほ基地の雪洞の中で見たことがあります」、竹内 望から「アラスカのフェアバンクスでは、真冬に樹木の枝に大きくてきれいな結晶が沢山見られます」、佐藤和秀から「みずほ基地で見たのとそっくりです」、成田英器から「南極昭和基地対岸の大陸のクレバス内に約 10 cm 弱大の霜結晶を見たことがあります」、矢吹裕伯から「モンゴルの氷室（食料庫内）にて同じような霜を見ました」というように、各地での観察体験が寄せられた。

そこで、小野、成田に写真の入手を依頼したが、図 7 は、小野が 1972 年 5 月にカナダの永久凍土層にあるペンゴ貯蔵庫の天井に成長した霜結晶を外に持ち出して撮影した写真で、さしわたし 13



図 7 カナダ・永久凍土内の貯蔵庫の巨大霜結晶（小野, 1972）

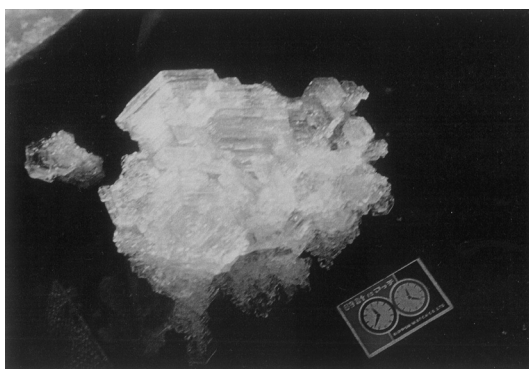


図 8 南極・クレバス内の巨大霜結晶（成田, 1971）

cm もある巨大霜結晶である。

一方、図 8 は、成田が 1971 年 1 月下旬に南極で撮影した霜結晶の写真で、昭和基地の対岸（大陸）の S16 地点付近にあった幅約 3 m のクレバスに中尾正義がザイルで下りて霜結晶を採取した。なお、成田によると、当時、S16 の 10 m 雪温は約 -13.5°C であったという。写真にはスケールとしてマッチ箱が置いてあり、それによると、さしわたし 16.5 cm の巨大霜結晶である。はっきりではないが、巻き込み構造が認められる。

このように、巨大霜は極地で成長しており、その意味では、探検の殿堂の南極体験ゾーンの氷貯蔵庫で巨大霜が観察されたのは、名称と一致して面白。

なお、アンケートには、小島賢治から「私も若い時に北大の低温室の冷却管にできた巨大霜結晶のマクロ写真を撮ったり、レプリカ作りを試みたりしました。」という思い出が寄せられた。また、

有名な Bentley and Humphreys の “Snow Crystals” (1931, 1962) には、巻末の窓霜、霜の写真の中に洋酒盃そっくりの霜の結晶の写真が出ているが、雪の結晶と同様に倍率は示されていない。

5. コップ型結晶の巻き込み構造の発達

先に述べたように、氷貯蔵庫のコップ型巨大霜結晶の特徴は六角形の巻き込み構造 (Scroll form) が発達していることであるが、その成長過程が観察によって明らかにされた。

Knight and Devries (1985) は、南極のスコット基地の氷洞内で観察した巨大霜結晶の巻き込み構造 (図 9) について、その生成する要因を次のように考えている。図 10 に示したように、始めの単純なコップ型結晶 (下部) の六角形の一辺で、中ほどの部分が水蒸気の過飽和度が両端より小さいために、周りと同じ速度で成長できなくなると、その部分に切れ込みが生じ、そこから巻き込みが始まる、という説明である。

そこで、その推定を確認するために、2003 年に氷貯蔵庫で成長した一つのコップ型結晶を観察し、10月31日、11月6日、11月8日、11月12日に写真を撮ったが、写真の掲載では細部が判り難いので、連続した写真を図化して変化の過程を図 11~14 に示した。これらの図では、形の略図が 10月31日~11月12日の順に並べてある。

図 11 のように、10月31日①に直線であったコップ型結晶の一辺に11月6日②に切れ込みが入り、8日③、12日④には巻き込み構造に成長しており、Knight の説を支持している。一方、図 12 のように、結晶の角の部分から成長する巻き込み構造が観察され、その初期状態として10月31日①から角に成長した結晶も観察できた。

また、始めは単純な六角形であった結晶は約 2 週間で巻き込み構造をもつ結晶に変化し、図 13 のように、巻き込み構造が10月31日①には二つであったのに、11月12日④には多数に増える過程、図 14 のように、巻き込み回数が時間とともに増加し、10月31日①に9回だったのが、11月12日④には20回に増える過程、隣接する二つの巻き込み構造が接して片方が優先的に成長する過程など、多くの興味ある事実が観察された。

巻き込み構造の個数の増加については、小林ら

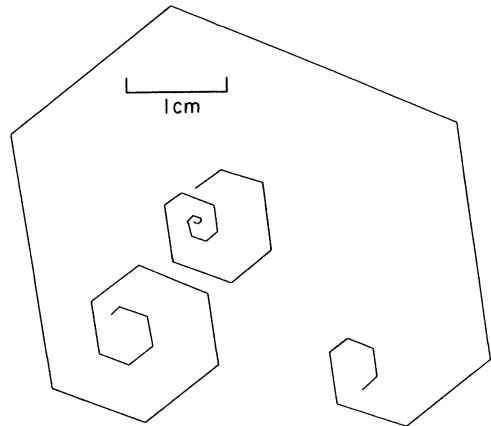


図 9 南極・氷洞内の巨大霜結晶の巻き込み構造

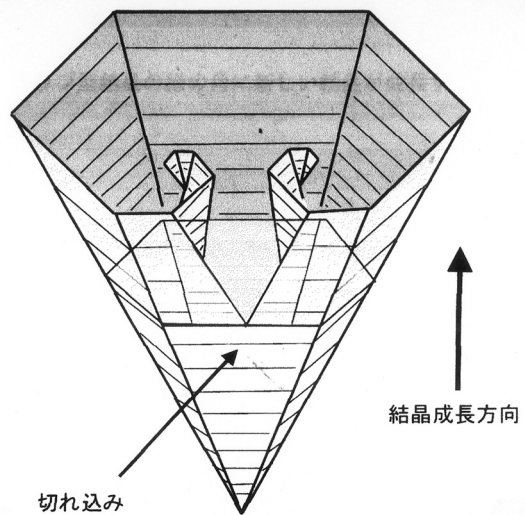


図 10 コップ型結晶の巻き込み構造の模式図

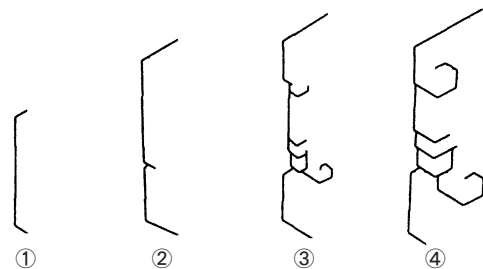


図 11 巻き込み構造の始まり

(Kobayashi *et al*, 1976) が図 15 の模式図のような機構を考えているが、実測例は示されていない。また今回の観察例によって、巻き込み構造の発達過程は判って来たが、氷貯蔵庫における霜結

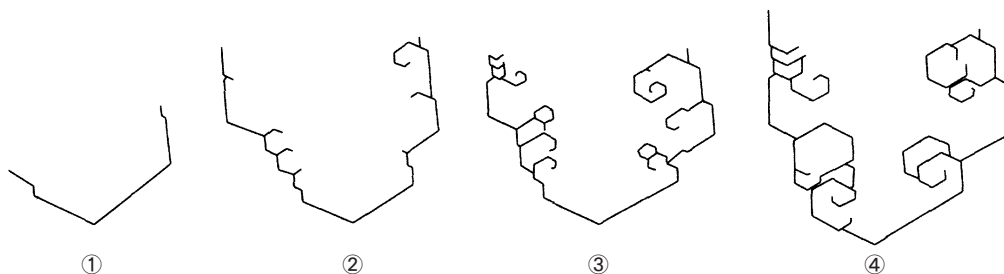


図 12 角から成長した巻き込み構造

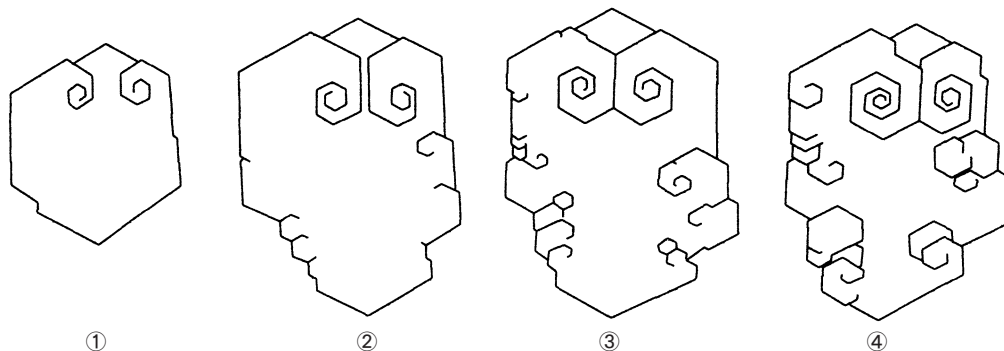


図 13 巻き込み構造・個数の増加

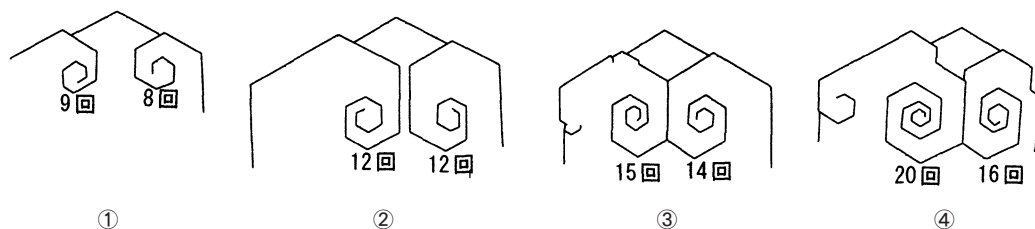


図 14 巻き込み回数の増加と巻き込み構造の接近

晶の成長は広い氷貯蔵庫内で制御可能ではなく自然状態に近いので、将来の課題は実験装置の中でコップ型霜結晶を成長させて、巻き込み構造の形成を研究することである。

7. 霜結晶のレプリカの作成

雪の結晶のレプリカ作成は、ポリビニールホルマールをジクロロエタンに溶かした溶液を使って作る方法が、1949年に中谷宇吉郎によってアメリカから伝えられて以来、長年にわたって各地で行われているが、巨大霜結晶のように雪の結晶よりはるかに大きい結晶のレプリカはこれまで作成されていなかった。

そのため、神田は1998年、塩沢で開催された雪

氷学会全国大会の際には、巨大霜結晶を展示するため、内径10cmのガラス容器に零下に冷やした灯油を入れ、その中に収めた結晶を車で塩沢まで運んで、大会会場に実物展示し、参加者の注目を集めたのである。

しかし、巨大霜結晶のレプリカは、常温の部屋でじっくり観察が出来るし、また探検の殿堂としては教材として利用できるもので、三田と角川が次のように工夫して、作成に初めて成功した。

雪の結晶のレプリカの場合、1~2%の溶液が使用されるが、巨大霜結晶は大きく、かつ立体的なので、膜を厚くして強度を持たせるために高濃度の溶液を使う必要がある。そこで、7~14%の8種の濃度の溶液をテストした結果、余り高濃度だ

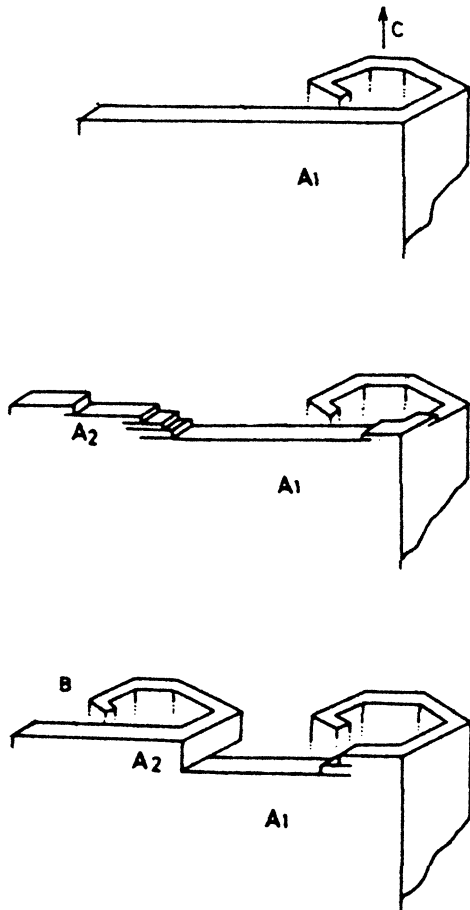


図 15 巻き込み構造が増える機構

と低温室内で粘性が大きくなって不適當であり、巨大霜結晶の場合、7~8%の溶液を結晶の上にとらして作るのが適當であることが判った。

図 16 は、そのようにして作ったレプリカの一例で、全体の大きさは 8 cm である。

その後、高橋は同じ結晶の写真とレプリカを比較して、レプリカは霜結晶の立体構造全体を把握できるが、結晶の微細構造が表面の昇華によって失われる場合もあるので、結晶の実物観察には双眼実体顕微鏡とデジタルカメラを併用するのが良いとしている (高橋, 2004)。

しかし、レプリカは公開展示には適しており、巨大霜結晶のレプリカを 2002 年、山形で開催の雪氷学会全国大会のポスター・セッションに展示したところ、大きな反響があり、アンケートには

72 名から回答が寄せられた。その中には、前述のように、世界各地における観察例の教示があったほか、レプリカを使っての研究課題、教育普及の教材としての活用、霜柱など他の雪氷のレプリカ作成など、多くの意見をいただいた。

また、2003 年、札幌で開催された IUGG (国際測地学・地球物理学連合) 大会のポスター・セッションで、巨大霜結晶のレプリカを図 17 のように展示したところ (Higuchi *et al.*, 2003)、海外、国内の多くの研究者から大きな関心を寄せられ、特にインド、ナイジェリアなど、雪氷現象の起こらない暑い国からの参加者が驚異のまなざしで見入っていたのが印象的であった。まさにレプリカならではの効果であり、雪氷現象の国際的な理解に貢献することができた。

こうして、巨大霜結晶のレプリカは公開の場で大きな役割を果たしたが、2010 年 10 月末に南極体験ゾーンが閉鎖され、霜の成長が終わってみると、将来、レプリカの存在は雪氷現象における結晶成長に関する研究に貢献する可能性が大きい。もし結晶の骸晶構造について研究したいという人があれば、探検の殿堂を訪ねて、保管されているレプリカを詳細に観察されることをお勧める。

8. あとがき

このようにして、「西堀榮三郎 探検の殿堂」の南極体験ゾーンにある氷貯蔵庫で成長した巨大霜結晶の形態と成長を観察と測定によって調べたが、同じような巨大霜は各地に存在する冷凍庫においても、何処かの一隅で成長している可能性があるので、機会があれば探してみられるようお願いしたい。

そして、研究活動の場が広がりつつある南極・北極域においても、Knight 達が見つけたような長さ 50 cm に達する巨大な霜結晶が成長している可能性があるため、観察の機会を逃されないよう期待している。

謝 辞

本稿の作成に当たり、写真を提供戴いた澤田弘行、小野延雄、成田英器の諸氏に厚くお礼申し上げます。

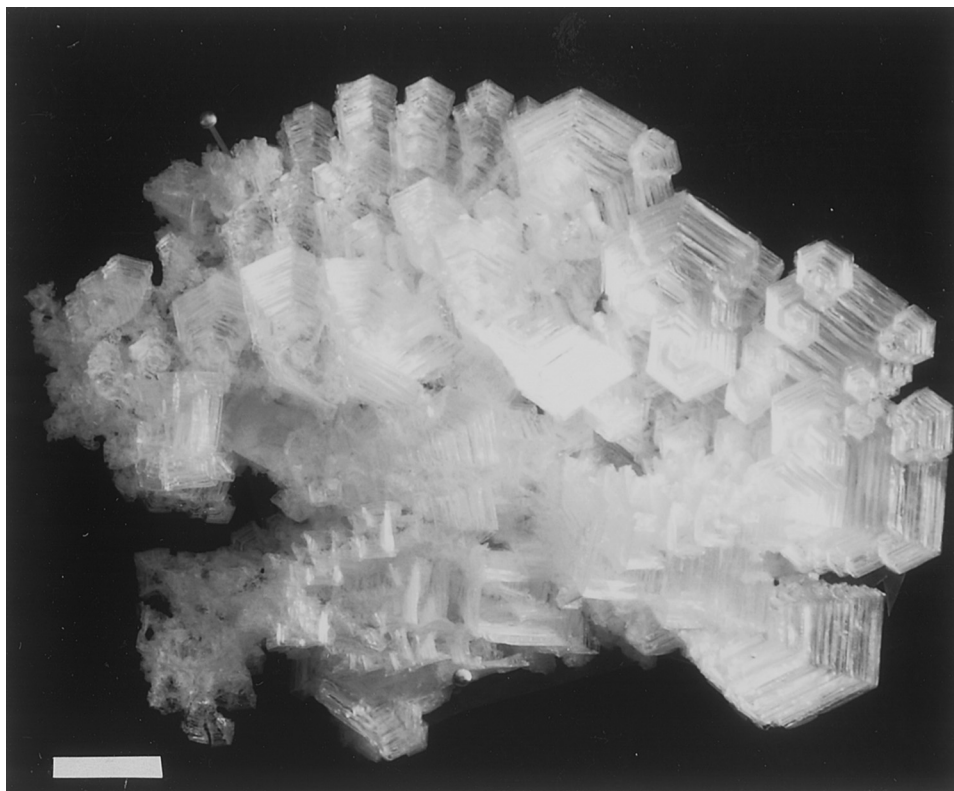


図 16 巨大霜結晶のレプリカ (写真に記入した白線は 1 cm のスケール)

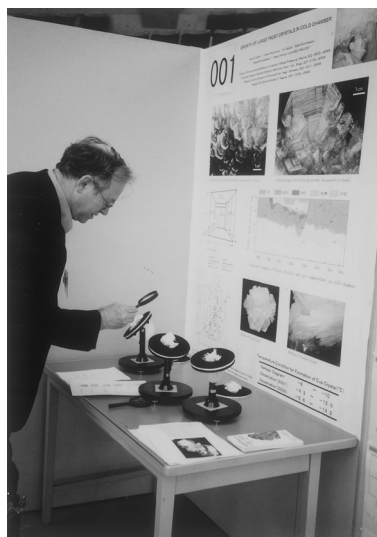


図 17 国際会議・IUGG における巨大霜結晶のレプリカの展示

文 献

- Bentley, W.A. and Humphreys, W.J., 1931 and 1962: Snow Crystals, Dover Publ., Inc., 223pp.
- 樋口敬二, 1961: 氷晶の形について, *Jour. Met. Soc. Japan*, **39**, 5, 237-248.
- 樋口敬二, 2010: 霜の結晶について, *雪氷写真館*, 雪氷, **72**, No. 4, 2.
- Higuchi, K., Fushimi, H., Nishimura, Y., Sanda, E., Sumikawa, S., Shimabayashi, S., and Kanda, K., 2003: Growth of large frost crystals in cold chamber, XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG 2003 Sapporo Japan..
- 神田健三・嶋林 栄・角川咲江・伏見碩二・樋口敬二, 1998: コップ型霜結晶の屏風型・骸晶構造, 1998 年度・日本雪氷学会全国大会.
- Knight, C.A. and Devries, A.L., 1985: Growth forms of large frost crystals in the Antarctic, *Journal of Glaciology*, **31**, 108, 127-135.
- 小林禎作, 1957: Diffusion Cloud Chamber による雪結晶習性の研究, *低温科学, 物理篇*, **16**, 1-35.
- Kobayashi, T., 1961: The growth of snow crystals at

- low supersaturations, *Phil. Mag.* **6**, 71, 1363-1371.
- 小林禎作, 1970, : 雪の結晶—自然の芸術をさぐる—, ブルーバックス B-163, 講談社, 304pp.
- 小林禎作, 1978: 雪—結晶の形—, 数理科学, **189**, 10-17.
- Kobayashi, T., Furukawa, Y., Kikuchi, K. and Uyeda, H., 1976: On twinned structures in Snow crystals, *J. Crystal Growth*, **32**, 233-249.
- 中谷宇吉郎, 1941: 凍上の話, 第三・冬の華, 甲鳥書林, 101-131.
- 中谷宇吉郎, 1949: 雪の研究—結晶の形態とその生成—, 岩波書店, 161pp.
- Nakaya, U., 1954: *Snow Crystals, natural and artificial*, Harvard University Press, 510pp.
- 中谷宇吉郎, 孫野長治, 1944: 凍上の機構について I (現場調査), 低温科学, 第一輯, 岩波書店, 1-10.
- 西村有香里, 2002: 巨大霜結晶の成長条件に関する研究, 滋賀県立大学・環境科学部・環境生態学科・地球環境大講座, 平成 13 年度卒業論文.
- 西村有香里, 伏見碩二, 三田恵里, 角川咲江, 神田健三, 樋口敬二, 2003: 巨大霜結晶のレプリカ, 2002 年度日本雪氷学会, 展示.
- 三田恵里, 2003: 巨大霜結晶の成長過程と成長条件に関する研究, 滋賀県立大学・環境科学部・環境生態学科・地球環境大講座, 平成 14 年度卒業論文.
- Sei, T., Gonda, T. and Goto, Y., 2000: Formation process of branches of needle ice crystals grown from vapor, *Polar Meteorology and Glaciology*, **14**, 27-33.
- Seligman, G., 1936: *Snow Structure and Ski Fields*, London, 73-77.
- 高橋良幸, 2004: 巨大霜結晶の構造に関する研究, 滋賀県立大学・環境科学部・環境生態学科・地球環境大講座, 平成 15 年度卒業論文.
- Yamashita, A. and Ohno, T., 1984 Ice crystal growth in unforced air flow cloud chamber, *Jour. Met. Soc. Japan*, **62**, 1, 135-139.

Growth of large frost crystals in cold chamber

Keiji HIGUCHI¹⁾, Hiroji FUSHIMI²⁾, Yukari NISHIMURA³⁾, Eri SANDA³⁾, Yoshiyuki TAKAHASHI³⁾,
Kenzo KANDA⁴⁾, Sakie SUMIKAWA⁵⁾ and Sakae SHIMABAYASHI⁵⁾

- 1) *Professor emeritus, Nagoya University,
1-12-4 Wagogaoka, Togotyo, Aichi 470-0154*
- 2) *Professor emeritus, University of Shiga Prefecture,
3-7-10, Seta 4 tyome, Otu, Shiga 520-2134*
- 3) *Graduate, University of Shiga Prefecture*
- 4) *Nakaya Ukichiro Museum of Snow and Ice,
106 Shiozutyo I Kaga, Ishikawa 922-0411*
- 5) *Explorer Museum Nishibori Eizaburo memorial,
419 Yokomizoty, Higashiomi, Shiga 527-0135*

(2011 年 3 月 7 日受付, 2011 年 3 月 16 日改稿受付, 2011 年 5 月 1 日最終改稿受付,
2011 年 5 月 9 日受理)