



雪結晶ダイヤグラムの比較研究 —中谷 Ta-S, Mason Ta-S, 小林 Ta-S—

元 CRREL 熊井 基

1. 中谷 Ta-S ダイヤグラム (Nakaya, 1954)

中谷の雪結晶研究は低温室で対流型の人工雪装置内に成長している雪の近くの空気を吸収管に吸収し、その増加量 m を化学天秤で測定し、全含水量 D (g/m^3) を計算して求める。温度 T_a の氷飽和蒸気密度 D_i を Smithsonian Meteorological Table で求め、次の式で D の氷飽和 D_i に対する過飽和度 S を求める。

ここで D_w は氷飽和水蒸気圧である。

$$S = (D/D_i) \times 100 \quad (1)$$

人工雪 125 個を測定した温度 T_a , それら D の D_i に対する S を求め、これらの結晶型をグラフに記入する。そして同型の結晶を包囲する曲線で示すと、中谷 Ta-S ダイヤグラム図 1 (Nakaya, 1954) ができる。

表 1 の式 (2) は中谷の水飽和曲線を示す。

$$S = (D_w/D_i) \times 100 \quad (2)$$

表 1 温度, D_w , D_i , $D_w - D_i$, 氷飽和曲線式 (2), 式 (4)

温度 T_a °C	氷飽和 D_w g/m ³	氷飽和 D_i g/m ³	$D_w - D_i$ g/m ³	式 (2) 中谷	式 (4) Mason
0	4.847	4.847	0.000	100	0
-5	3.407	3.246	0.161	105	5
-10	2.358	2.139	0.219	110	10
-11	2.186	1.964	0.222	113	13
-12	2.026	1.803	0.223	最大 112	12
-13	1.876	1.653	0.223	最大 113	13
-14	1.736	1.515	0.221	115	15
-15	1.605	1.387	0.218	116	16
-20	1.074	0.8835	0.191	122	22
-25	0.7047	0.5521	0.153	128	28
-30	0.4534	0.3385	0.115	134	34
-35	0.2856	0.2032	0.082	141	41
-40	0.1757	0.1192	0.057	147	47
-45	0.1055	0.06836	0.037	154	54
-49.9	0.0624	0.03867	0.024	161	61

(2) 式は温度が 0°C のとき $Dw = Di$

従って $S = 100$

依って図 1 の $S = 100$ の横軸は水飽和曲線を示す。

無限に降る雪の結晶形は総て異なる。これを 8 種類の結晶型に分類することによって、中谷 Ta-S ダイアグラムができた。

中谷 Ta-S ダイアグラム図 2 は水飽和曲線の過冷却微水滴量を $W = 0$ で示す。そして水飽和曲線以上の範囲を過冷却微水滴量 $W = 0.005$ より $W = 1\text{g/m}^3$ を 7 本の曲線で示し、水飽和曲線以下を湿度 93% と 90% の 2 本の点線で示す。

2. 中谷 Ta-S ダイアグラム図 1 の測定

人工雪の装置、図 3 を低温室に於いて組み立てる。この装置の水槽の温度は電圧で調節する。水

槽から水蒸気が上昇し、冷却して過冷却雲がウサギの毛の付近に現れる。水平顕微鏡でウサギの毛にできる初期結晶形を水平顕微鏡で観察する。人工雪の温度 T_a を特別注文の温度計又は熱電対で測定する。真空ポンプで 23L のタンクを真空にする。このタンクに人工雪の周囲の空気を、静かに毎分 1L の割合で、五酸化リンをガラス、ウールにまぶした吸収管 (図 3 の上部にある Plug, 図 4) に吸収させ、その増加質量 m を測定する。タンクの容積を V , 吸収した空気的全含水量を D とすれば、

$$D = m/V$$

タンクの温度 T' は常に人工雪の温度 T_a と異なるので、タンクの容積の補正が必要である。 V' は

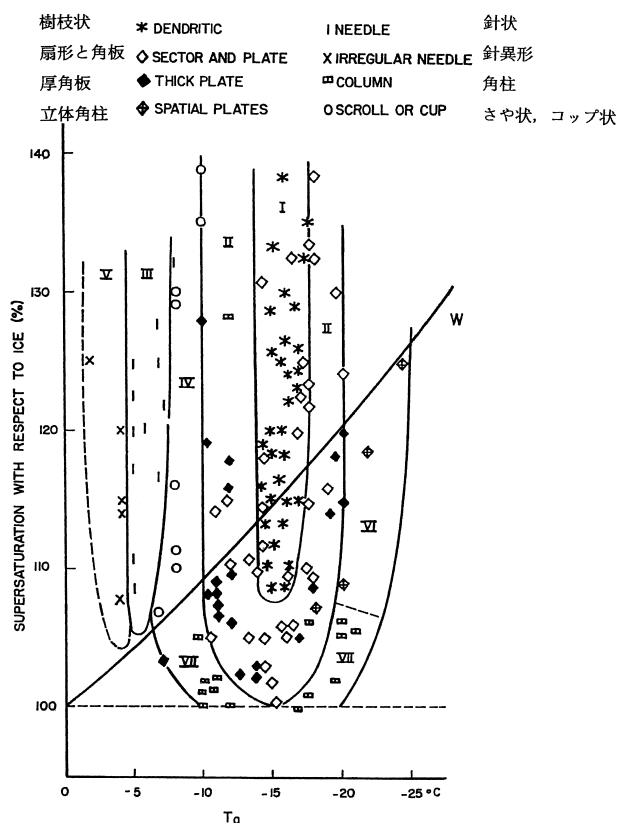


FIG. 448. T_a - s diagram, showing the conditions of formation of various shapes of snow crystals; W is a line giving the saturated vapor pressure with respect to supercooled water.

図 1 中谷 Ta-S ダイアグラム (1954). 雪の様々な結晶形の成長の条件を示す。W は過冷却水に対する飽和蒸気圧を示す。(From Nakaya, Harvard Univ. Press, Cambridge (1954), p. 229)

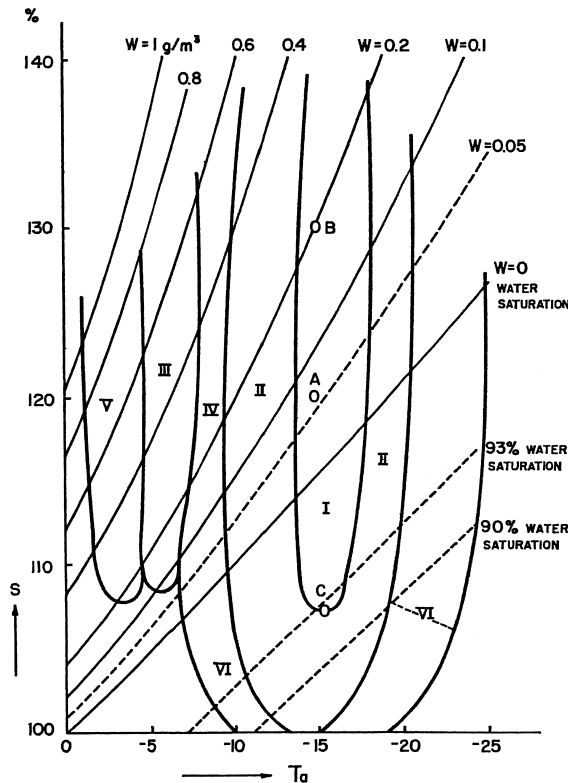


FIG. 509. T_a - s diagram, showing the conditions of snow formation as a function of temperature and supersaturation.

図 2 中谷 Ta-S ダイアグラム (1954). 雪の生成の条件を温度と過飽和度について示す. (From Nakaya, Harvard Univ. Press, Cambridge (1954), p. 297)

23 L のタンクの容積である。

$$V = V' \frac{273 + T_a}{273 + T'} \quad D = m \frac{273 + T'}{V' (273 + T_a)}$$

温度 T_a の氷飽和蒸気密度 D_i を Smithsonian Meteorological Table から求め、 D の水に対する過飽和度 S を式(1)で求める。

図 1 の中谷 Ta-S ダイアグラムの結晶型、温度、水飽和曲線上下との関係を下記に示す。

Irregular needle, 針異型: $-3 \sim -5^\circ\text{C}$, 水飽和の上

Needle, 針: $-3 \sim -7^\circ\text{C}$, 水飽和の上

Scroll or Plate, さや状, コップ: $-7 \sim -10^\circ\text{C}$, 水飽和の上

Column, 角柱: $-9 \sim -22^\circ\text{C}$, 水飽和の下

Sector and plate, 扇形, 角板: $-12 \sim -20^\circ\text{C}$, 水飽和の上と下

Thick plate, 厚角板: $-7 \sim -20^\circ\text{C}$, 水飽和の上と下

Dendrite, 樹枝: $-14 \sim -17^\circ\text{C}$, 水飽和の上と下
Spatial plates, 立体角柱: $-18 \sim -25^\circ\text{C}$, 水飽和の下

針異型は針状結晶が 2, 3 個集まった結晶である (熊井・樋口, 1952)。

3. Mason Ta-S ダイアグラムの測定

Mason Ta-S ダイアグラム (Mason, 1962) の人工雪の測定は、常温の実験室で図 5 の拡散型の人工雪装置を使用して実験を行う。装置の上部の水槽から水蒸気は下部の装置内に拡散する。この装置は下部のドライアイスで冷却する。従って装

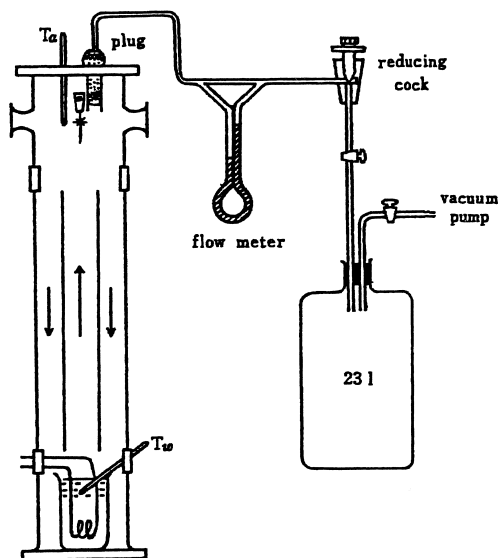


FIG. 446. Method of measuring the degree of supersaturation.

図 3 中谷の低温室用の対流型的人工雪装置; 全含水量 D (g/m^3) の過飽和度を測定する方法. (From Nakaya, Harvard Univ. Press, Cambridge (1954), p. 245)

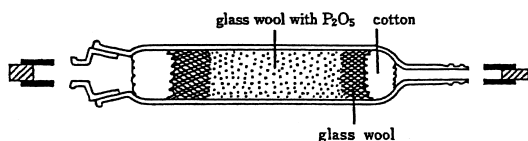


FIG. 447. The plug for measuring the supersaturation.

図4 人工雪の近くの空気を吸収し、増加量を測定し、全含水量 D (g/m^3)を測定する。(From Nakaya, Harvard Univ. Press, Cambridge (1954), p. 246)

置の上部は 0°C 以上に、中部は 0°C より -40°C に冷却し、過冷却の雲ができる。下部は -40°C 以下で過冷却雲は氷晶になる。過飽和水蒸気密度は数 % から 300% に達する。従ってこの人工雪の装置内の上下の温度勾配は、自然の逆である。

人工雪装置の中心に垂直にナイロン繊維を下げる。種々の人工雪は 0°C より -50°C のナイロン繊維の上に成長する。人工雪の温度は熱電対で測定する。

人工雪の温度 T_a と結晶型を測定する. 人工雪が成長している近くの空気的全含水量 D を求め, 次の式(3)で S を求める.

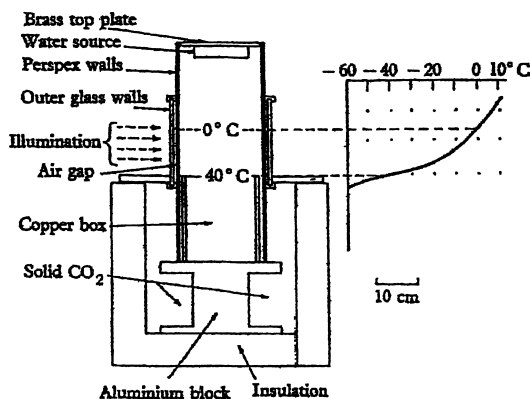


Fig. 15. The diffusion cloud chamber.

図 5 Mason の常温室用の拡散型人工雪装置. (From Mason, Cambridge Univ. Press (1962), p. 68)

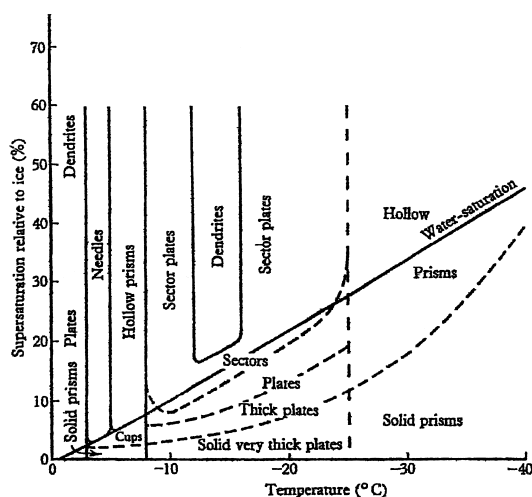


Fig. 16. The variation of ice crystal habit with temperature and supersaturation of the vapour.

図 6 Mason Ta-S ダイアグラム (Mason, 1962). 雪の結晶習性の変化は温度と水蒸気の過飽和度による。(From Mason, Cambridge Univ. Press (1962), p. 68)

$$S = (D/D_i) \times 100 - 100 \quad (3)$$

従って温度 0°C のとき $S=0$ であり, Mason Ta-S ダイアグラムに示す通りである. しかし, Mason (1962) には全含水量 D を求めた方法の記述はない. 表 1 に温度 T_a , 水飽和蒸気密度 D_w , 水飽和蒸気密度 D_i , 式 (4), を示す. 次の式 (4) は Mason Ta-S ダイアグラムの水飽和曲線を示す.

$$S = (D_w/D_i) \times 100 - 100 \quad (4)$$

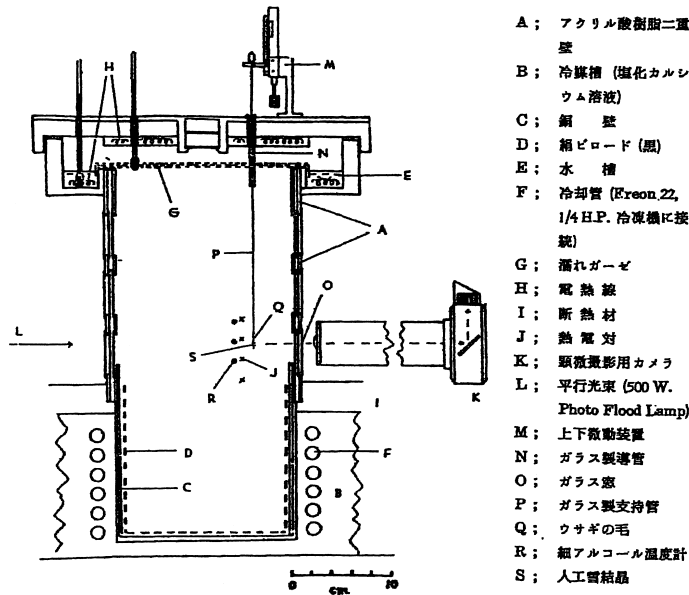


図 7 小林の常温室用の拡散型人工雪装置. (小林, 北海道大学低温科学研究 (1957), p. 5)

Mason Ta-S ダイアグラム図 6 は測定した同じ結晶型の人工雪の温度範囲を曲線で示す. しかし測定した結晶の数も記号も論文に記して無い.

図 6 の Mason Ta-S ダイアグラムの結晶型, 温度, 水飽和曲線上下の関係を下記に示す.

Plates, Dendrites, 角板, 樹枝: $0 \sim -3^{\circ}\text{C}$, 水飽和の上

Needles, 針: -3 より -6°C , 水飽和の上

Hollow prisms, さや状: -6 より -8°C , 水飽和の上

Hollow Prisms, さや状: -25 より -40°C , 水飽和の上と下

Cups, カップ: -3 より -8°C , 水飽和の下

Sector, Plates, 扇形, 角板: -8 より -25°C , 水飽和の上と下

Dendrites, 樹枝: -12 より -16°C , 水飽和の上

Thick plates, 厚角板: -8 より -25°C , 水飽和の下

Solid prisms, 角柱: -3 より -8°C , 水飽和の下

Solid prisms, 角柱: -25 より -40°C , 水飽和の下

Hollow prisms, Cups, Scroll, さや状, は同義語である.

4. 小林 Ta-S ダイアグラムの測定

小林 Ta-S ダイアグラム (小林, 1957) 図 8 の測定は常温の実験室で拡散型の人工雪装置 (図 7) を冷凍機に接続して冷却し, 装置の上部の濡れたガーゼから水分を下に補給し, 上部の温度が 0°C で下部の温度が -60°C の空間に, 自然と温度勾配が逆の空間に, 吊るしたウサギの毛に人工雪を作る. 温度 T_a は熱電対で測定する. 種々の結晶型の雪結晶の写真を撮影する. 温度 T_a の結晶の近くの全含水量 D (g/m^3) を Drop Hygrometer で測定したと記してあるが, 図 7 の人工雪装置に Drop Hygrometer は記して無く, その性能も不明であるが, 中谷の縦軸の式 (1) を用いている. しかし, 小林 Ta-S ダイアグラム (1957) の測定法で, 式 (1) の過飽和度 S の精度は望めない.

小林は結晶の温度 T_a を測定し, 8 種類の結晶型に分類し, 合計 65 個の結晶の測定を図 8 に示している.

図 8 の小林 Ta-S ダイアグラムの結晶型, 温度, 水飽和曲線上下との関係を下記に示す.

Needle, 針: -5 より -6°C , 水飽和の上と下

Scroll, Cup, さや状: -4 より -10°C , 水飽和の上と下

針状	NEEDLE	○ SECTOR, PLATE	扇形, 角板
サヤ型	▮ SHEATH	● THICK PLATE	厚角板
カップ, さや状	○ CUP, SCROLL	* DENDRITE	樹枝
角柱	▣ COLUMN	◆ SIDE EXTENSION	立体角柱

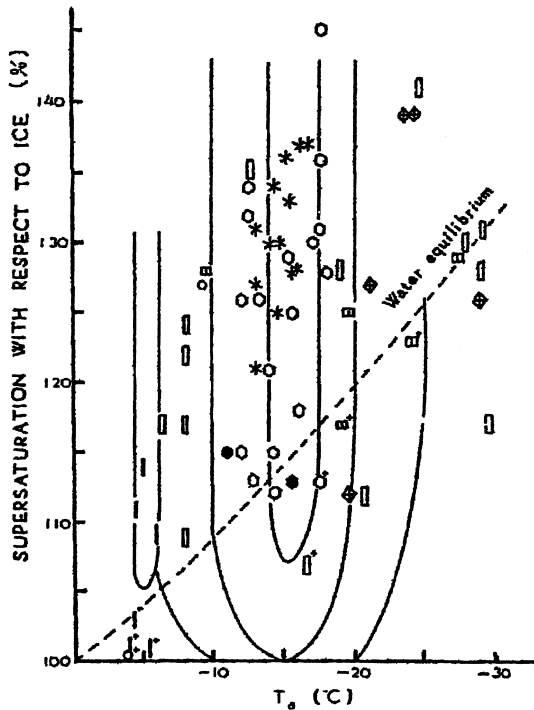


図 8 小林の Ta-S ダイアグラム (小林, 1957). 雪の結晶習性の変化は温度と水蒸気の過飽和度による. (小林, 北海道大学低温科学研究所 (1957), p. 14)

Sheath, サヤ型: -6 より -30°C , 水飽和の上と下

Thick plate, 厚角板: -11 より -16°C , 水飽和の上と下

Sector, Plate, 扇形, 角板: -12 より -17°C , 水飽和の上と下

Dendrite, 樹枝: -13 より -16°C , 水飽和の上と下

Column, 角柱: -10 より -23°C , 水飽和の上と下

Side extension, 立体角柱: -18 より -25°C , 水飽和の上と下

5. 雪の中谷 Ta-S ダイアグラムの研究の概略

1932 年末 (昭和 7 年) 中谷吉郎教授が雪の

研究を北海道大学で始める. 十勝岳で雪結晶の写真を撮り, 結晶型の分類を始める.

1935 年 常時低温研究室竣工し, 人工雪の研究を始める.

1936 年 3 月 12 日 最初の人工雪できる. 秋に昭和天皇陛下が北海道大学行幸に際し人工雪を熱心にご視察され, 中谷の鋭明に“ああ”とか“うん”とお声をかけられる (中谷, 1948).

1944 年 花島政人「雪の結晶の生成条件について」論文は人工雪 700 枚の写真を撮り, Ta-Tw ダイアグラムを低温科学 (岩波書店) に発表した.

1951 年 U. Nakaya: The Formation of Ice Crystals を American Meteorological Society の Compendium of Meteorology に発表した. この

論文の Ta-S ダイアグラムには水飽和曲線はない。

1953 年 国際理論物理学会議に來日の F.C. フランク博士はじめ多数の低温室訪問があり、人工雪の実験を説明する。彼らは対流型の人工雪装置は着想が良いと称賛する。

1954 年 U.Nakaya: SNOW CRYSTALS natural and artificial を Harvard University Press から出版した。Fig. 448, Ta-S に水飽和曲線を追加した。この研究 (1932-1946) には寺田東一、花島政人の他に高野玉吉、加賀美と 12 名の大学院学生が参加した。

1946 年より中谷研究室で雪の人工研究に花島政人助教授、孫野助教授、小口助手、熊井助手、羽生寿郎、千葉 蒙、板垣和彦、樋口敬二、六車二郎の各大学院学生が参加した。

1955 年より三鷹市の運輸技術研究所の低温室で凝結核を除いた空気を用いて人工雪の実験を中谷の指導で、花島、小口、熊井、六車が参加した。

1958 年より熊井 基はシカゴ大学に於いて、雪の核の研究を始めた。

1960 年の夏にグリーンランドの Site 2 の実験基地に中谷教授は北海道大学より、熊井はシカゴ大学より訪れ、欧米の研究者と共に雪氷の研究を行う。中谷教授は 1960 年に文化勲章受賞者候補に選ばれ、北海道大学杉野目晴貞学長より北海道大学の名誉になるので受理するように進められたが、研究は継続中なので辞退したと語った。中谷教授はグリーンランドから東京に戻り、東京大学病院に入院しガン手術を受けた。手術は手遅れであり、誠に残念であった。

1961 年より Hanover, NH. のダートマス大学にある CRREL 研究所で、熊井は雪氷の研究を行った。

1962 年 4 月 11 日、中谷宇吉郎教授逝去、61 歳。

1963 年 8 月 27 日、米国パークレーの IUGG 国際会議の気象学の部門の中に、中谷先生の人工雪研究が先駆となった雲物理学 (Cloud Physics) という一分野が形成された。シカゴ大学の Byers 教授はこのシンポジウムを故中谷博士の追悼記念の“氷の結晶と雪核のシンポジウム”として開かれることにした。Byers, Bender, 中谷博士の長女の咲子、孫野、東、熊井、磯野、Hosler, Macklin, Latham, Big が参加した。

1979 年 7 月 4 日、常時低温研究室跡に人工雪誕生の地記念碑建立。

6. 雪結晶の中谷 Ta-S ダイアグラム再測定

1946 年より中谷研究室で行われた人工雪の研究は中谷宇吉郎教授の指導のもとに前述の研究者によって行われた。

Compendium of Meteorology に掲載の中谷ダイアグラム (Nakaya, 1951) には水飽和曲線が記入してない。その後中谷の著書 Snow Crystals (Nakaya, 1954) に掲載の中谷ダイアグラムには水飽和曲線が記入してある。この中谷ダイアグラムを製図する時に、中谷が水飽和曲線の記入が大事であると言われた言葉がこの原稿の著者の心に残った。水飽和曲線の上には過冷却微水滴は存在し、その下では存在しないが、雪結晶形の研究に大事な要素である。

低温室で花島の装置を用いて、我々は 1948 年頃より人工雪を作り、その結晶型、Ta を測定し、人工雪の周囲の空気を吸気管で吸収し、その増加質量を化学天秤で測定して、人工雪が成長している空気の全含水量 D を求め、また氷に対する過飽和度 D_i を Smithsonian Meteorological Table から求めた。 D の水飽和 D_i に対する過飽和度 S を式(1)で求めた。人工雪の研究の温度範囲は 0°C より -25°C 、氷に対する過飽和度の範囲は $S=100$ より $S=140$ であった。多数の測定結果は中谷 Ta-S ダイアグラムに一致した。そして温度が 0°C より -2°C の領域では雪結晶ができないことを確認した。また表 1 の $(D_w - D_i)$ が最大の -12°C と -13°C では角板結果ができることを確認した。それから -15°C では水飽和の上と下で樹枝状ができることを確認した。これらは長年にわたる多数の研究員の測定によって中谷 Ta-S ダイアグラム図 1 と図 2 が正しいことを再確認した。

人工雪が兎の毛にでき始める過程を水平顕微鏡で観察すると、毛に付着している吸湿性物質に微水滴ができ、それが凍結する Condensation freezing による nucleation と、毛に付着している昇華核に水晶ができる Sublimation nuclei の二通りの核があることを電子顕微鏡で発見した (Kumai, 1951)。これが天然の雪の中心核や凝結核を電子顕微鏡を用いて研究するきっかけにな

り、北海道では“電子顕微鏡による雪の核の研究” (Kumai, 1951), “北アメリカに於ける雪と雪核の研究” (Kumai, 1961), “グリーンランド氷冠に於ける雪核と人工降雪の研究” (Kumai and Fracis, 1962), “南極に於ける雪結晶と雪核の化学分析” (Kumai, 1976), “消散過程の過冷却人工霧に Seeing し、生成した初期の結晶型と温度の関係” (Kumai, 1982) 等の研究を行う動機になった。

7. 孫野, 李の天然雪ダイヤグラム (Magono and Lee, 1966)

この孫野, 李による研究は、自然雪の様々な結晶形の成長を気温、湿度、雲粒の有無の関係で示す。この論文は 1966 年に北海道大学理学部紀要に発表された。結論は人工雪の実験結果である中谷 Ta-S ダイヤグラム図 1 と図 2 (Nakaya, 1954) が、天然の雪の様々な結晶形の生成条件を良く示していることを立証した。この研究で写した雪の顕微鏡写真は約 3 万枚に及び、参加した研究員は孫野長治と李、黒岩大助、小林禎作、大喜多敏一、板垣和彦、樋口敬二、織笠桂太郎、若濱五郎、六車二郎、高橋 劭、菊地勝弘、中村 勉と 23 名の大学院学生であった。

8. 小林禎作との対話

北大理学部の常時低温研究室で 1952 年ころ人工雪を作っていると、小林が人工雪を常温の研究室で作ったので、見にくくしようと知らせてきた。北大低温科学研究所の彼の研究室を訪れると、ドライアイスで冷却した装置に樹枝状結晶ができていた。これが彼との最初の出会いであった。その後、彼が研究を発表するたびに討論をした。1962 年、イギリスの Mason の研究室から戻ってきた小林は Cleamont, NH に訪ねて来た。中谷研究室には人工雪専門の研究者花島や孫野がいるのに、小林を Mason の研究室に行くように中谷教授が選んだ理由を彼は私に尋ねた。中谷先生は心の広い人で、小林が適任と考えたと思うと答えた。Mason からの要請があり、小林に行ってもらふことにしたと、グリーンランドの Site 2 の研究基地で 1960 年の夏に中谷先生から聞いた。中谷先生は小林がイギリスに行く直前に、オートバイ事故で怪我をしたことを大変に心配しておら

れたと彼に話した。小林は 2 年の契約であったが、Mason の研究室は低温科学研究所より設備が悪く満足な測定が得られないので、1 年で切り上げて帰って来たと私に語った。

9. 中谷 Ta-S ダイヤグラムと Mason Ta-S ダイヤグラムの比較研究

Mason Ta-S ダイヤグラム図 6 には温度 0°C より -3°C の範囲で角板と樹枝が記してある。しかし、この温度で天然の角板と樹枝の測定の記録はない。また中谷 Ta-S ダイヤグラムにも測定の記録はない。

中谷ダイヤグラムは温度 -3°C より -5°C の範囲で針異形が記してある。針異形は針の組み合わせである。これは天然の針異形の温度に一致する。

Mason Ta-S ダイヤグラムは温度 -3°C より -6°C の範囲で針結晶の測定を記している。中谷 Ta-S ダイヤグラムは温度 -5°C より -7°C の範囲で針結晶を記している。これは天然の針結晶の成長の温度と一致する。

Mason Ta-S ダイヤグラムは温度 -6°C より -8°C の範囲で、さや状結晶を水飽和曲線の上に記している。中谷 Ta-S ダイヤグラムは温度 -7°C より -10°C の範囲で、さや状結晶が水飽和曲線の上に記している。両測定は天然のさや状結晶の観測に一致する。

中谷 Ta-S ダイヤグラムの厚角板は温度 -7°C より -20°C の範囲で、水飽和曲線の上下で成長している。天然の厚角板の成長は中谷ダイヤグラムに一致する。Mason Ta-S ダイヤグラムでは厚角板は温度 -8°C より -25°C で水飽和曲線の下のみで成長している。

中谷ダイヤグラムの扇形と角板結晶は温度 -12°C より -20°C の範囲で、水飽和の上下で成長し、Mason Ta-S ダイヤグラムの扇形と角板結晶は -8°C より -25°C の範囲で水飽和の上下で成長する。多少の温度のずれがあるが両ダイヤグラムは一致している。

中谷 Ta-S ダイヤグラムの樹枝状結晶は温度 -14°C より -17°C の範囲で、水飽和曲線の上下で成長している。この水飽和曲線の上下の成長は、天然の樹枝状結晶の成長に一致している。Mason Ta-S ダイヤグラムでは水飽和の上だけで

成長している。これは Mason の S 測定の不正確によると考えられる。

中谷 Ta-S ダイアグラムの角柱結晶は温度 -9°C より -22°C の範囲で、水飽和曲線の下で成長する。Mason Ta-S ダイアグラムの角柱結晶は温度 -3°C より -8°C 及び、 -25°C より -40°C の範囲で水飽和曲線の下で成長する。しかし、Mason の -3°C より -8°C で成長する自然の角柱結晶の測定はない。中谷 Ta-S ダイアグラムの角柱結晶は天然の角柱結晶の観測に一致する。

中谷 Ta-S ダイアグラムの立体角柱の 4 結晶は温度 -18°C より -25°C の範囲で、水飽和曲線の下で成長する。これは自然の立体角柱結晶の測定に一致する。

10. 中谷 Ta-S ダイアグラム図 1 と小林 Ta-S ダイアグラム図 8 の比較研究

中谷ダイアグラムの目的は低温室で対流型の人工雪装置を用いて、天然の雪の結晶がどのような気象条件で成長しているかを研究した。人工雪の温度 T_a 、結晶形、結晶が成長している近くの空気の全含水量 D を測定し、 D の水飽和 D_i に対する過飽和度 S を式 (1) で求めた。雪結晶の T_a と S をグラフに記入して中谷 Ta-S ダイアグラム図 1 と図 2 ができた。

中谷 Ta-S ダイアグラム図 1 (1954) と小林 Ta-S ダイアグラム図 8 (1957) の比較研究を以下に記す。中谷 Ta-S ダイアグラムには雪結晶 125 個、小林 Ta-S ダイアグラムには雪結晶 65 個の観測が記してある。

中谷 Ta-S ダイアグラム図 1 の -3°C より -5°C の範囲で水飽和曲線の上で生成する針異形は、天然の雪の針異形と同じ温度範囲で観測されている。しかし、小林 Ta-S ダイアグラムは、この温度範囲で針異形の雪結晶の生成の記録は無い。

中谷 Ta-S ダイアグラムの針結晶は -5°C より -7°C の範囲で、水飽和の上で成長している。小林 Ta-S ダイアグラムの針結晶は水飽和の上と下で成長している。しかし天然雪の針状結晶は水飽和の上で成長する。

中谷 Ta-S ダイアグラムのさや状結晶は -7°C より -10°C の範囲で、水飽和の上で成長する。小林 Ta-S ダイアグラムのさや状結晶は水飽和の上

と下で成長する。しかし天然のさや状結晶は水飽和の上で成長する。

中谷 Ta-S ダイアグラムの厚角板結晶は -7°C より -20°C の範囲で、水飽和の上と下で生成する。小林 Ta-S ダイアグラムの厚角板結晶は -11°C より -16°C の範囲で水飽和の上と下で生成する。天然の厚角板結晶の観測に一致する。

中谷ダイアグラムの扇形結晶は -12°C より -20°C の範囲で、水飽和の上下で生成する。小林 Ta-S ダイアグラムの扇形結晶は -12°C より -17°C 範囲で水飽和の上と下で生成する。これは天然の扇形結晶の観測に一致する。

中谷 Ta-S ダイアグラムの樹枝状結晶は -14°C より -17°C の範囲で、水飽和の上と下で生成している。しかし小林 Ta-S ダイアグラムでは水飽和の上のみで観測している。天然の樹枝状結晶は水飽和の上下で観測している。これは小林 Ta-S ダイアグラムの S の測定に問題がある。

小林 Ta-S ダイアグラムの角柱結晶は -10°C より -23°C の範囲で、水飽和の上下で生成している。中谷 Ta-S ダイアグラムの角柱結晶は -9°C より -22°C の範囲で、水飽和の下で観測している。

小林 Ta-S ダイアグラムの立体角柱は -18°C より -23°C の範囲で、水飽和の上と下で生成している。中谷 Ta-S ダイアグラムの立体角柱は -18°C より -25°C の範囲で水飽和の下で生成している。

小林 Ta-S ダイアグラム (1957) のサヤ型結晶 (Sheath) は温度範囲が -6°C より -30°C で、水飽和の上と下で成長する。このサヤ型結晶の写真は、自然のさや状結晶と異なり針状結晶より長い結晶である。このサヤ型結晶は自然のさや状結晶とは形態及び生成温度範囲が異なる。小林ダイアグラム (1957) の論文に微量のシリコンに依る結晶型の変化の記述がある。このサヤ型結晶は特にシリコンによる結晶型の変化が顕著である。

小林の装置の中に吊るした水滴の成長又は蒸発の測定で、結晶の周囲の空気の過飽和度が測定できるとは考えられない。この雪結晶の Ta-S ダイアグラムの最も重要な過飽和度の吸収管による測定は、中谷により開発され、中谷グループが実行した。

11. 小林 Ta-S ダイアグラム (小林, 1957) 図 8 と小林ダイアグラム (Kobayashi, 1961) 図 9 の比較研究

この二つの小林のダイアグラムを比較して、測定結果が大きく異なっている温度範囲は 0°C より -3°C の部分である。小林 Ta-S ダイアグラム (小林, 1957) のこの温度範囲に於いて、角板結晶は生成していない。これは中谷の図 1 に一致している。しかし小林ダイアグラム (Kobayashi, 1961) 図 9 は、温度範囲が 0°C より -3°C に於いて角板が生成する。この相違について以下に記す。

1957 年の論文は北海道大学の低温科学研究所の低温科学に発表している。1961 年の論文は、小林がロンドンの Mason の研究室に 1 年滞在中の測定結果を論文に書き、Philosophical Magazine に発表している。小林の拡散型の人工雪装置で 0°C より -3°C の温度範囲で角板結晶の生成は、装置下部の温度が -40°C 以下に過冷により起こる Self nucleation による氷晶核が発生している。 0°C より -3°C の温度範囲でその氷晶核で角板が生成する実験結果を得た。かくして温度が 0°C から -40°C の範囲で、結晶習性の温度による変化を測定した小林ダイアグラム (Kobayashi, 1961) を図 9 に示す。

一方熊井は CRREL の低温室で消散過程の過冷

却霧に Seeding を行い、生成した初期の結晶型と温度の関係を測定した。Seeding をすれば温度 0°C より -3°C で角板結晶ができるが、Seeding をしなければ空気中の自然の核では Self nucleation しないので、角板はできない事を確認した。そして低温室の温度が 0°C から -40°C の消散過程の過冷却霧に、Seeding して初期の結晶型と温度の関係を測定した結果 (Kumai, 1982) を図 10 に示す。この測定で明らかになった事は、温度 0°C から -3°C で

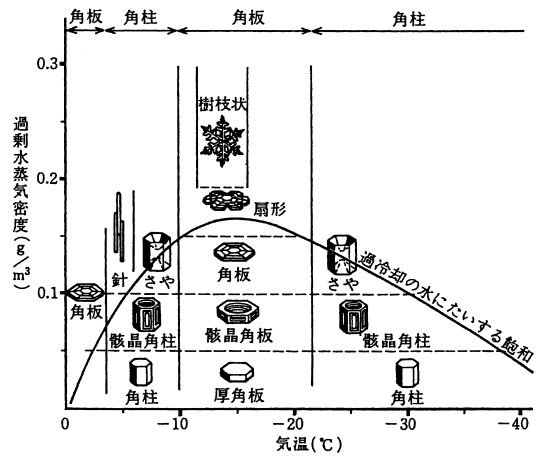


図 9 小林のダイアグラム (Kobayashi, 1961). 雪の結晶習性の変化は温度による。(朝倉ら, 朝倉書店 (1995), p.193)

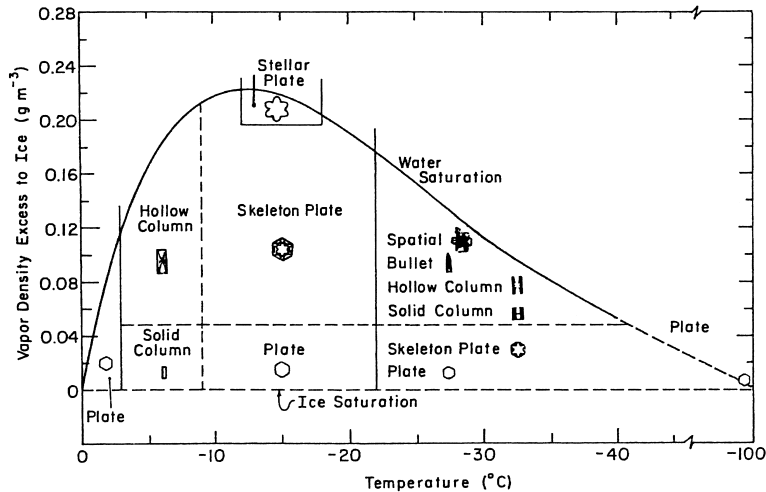


FIG. 8. Variation of early stage ice crystal habit with temperature and water vapor density excess relative to ice at 1000 mb.

図 10 消散過程の人工霧に Seeding し、生成した初期の結晶型と温度の関係を示す。(Kumai, 1982)

は, Seeding しなければ角板結晶はできないが, Seeding により角板ができる. そして樹枝状結晶の初期結晶は水飽和の下でも生成する.

図9の小林ダイヤグラム(1961)の水飽和曲線の最高は 0.16 g/m^3 を示し, 図10の熊井ダイヤグラム(1982)は水飽和曲線の最高は 0.223 g/m^3 を示しているので検討を要する. 表1に温度 T_a , 水飽和 D_w , 氷飽和 D_i , $D_w - D_i$ の値が記してある. これらの値は Smithsonian Meteorological Table より求めた. 依って熊井ダイヤグラムが正しい.

12. 結語

人は雪が平衡状態で成長すると考えがちであるが, 人工雪の実験の結果, 雪は定常状態で成長していることが分かったと中谷は語る. 中谷 $T_a - S$ ダイヤグラム図1と図2は天然の雪結晶型の成長の気象条件を最も良く示している. 針異形結晶が生成する温度より高い温度領域 0°C より -3°C では, 天然の雪は観測されていない. Mason $T_a - S$ ダイヤグラム(1962)と小林ダイヤグラム(1961)には 0°C より -3°C の温度領域で角板と樹枝結晶が成長すると記してある. しかし, この温度では天然の角板や樹枝結晶の成長の観測はない.

中谷 $T_a - S$ ダイヤグラム(図1と図2)が最も良く天然の雪の結晶形の生成条件を示していると著者は考えるが, 小倉義光著一般気象学(小倉, 1999)には, 小林 $T_a - S$ ダイヤグラムが掲載されており, 中谷 $T_a - S$ ダイヤグラムは掲載されていない. 朝倉ほか著, 新版気象ハンドブック(1995)の図11. 27には小林ダイヤグラムを掲載し, 中谷ダイヤグラムと間違いが記してある. ここに記して次の版で訂正を願う次第である.

謝 辞

日本雪氷学会全国大会が2000年10月の上旬に加賀市で開かれ, 会場で久しぶりに中村勉君に会い, 中谷ダイヤグラムの成立について語りました. 10月20日にアメリカの自宅に戻ると, 航空便で送られた数冊の気象学の書籍が届いていました. それには中谷ダイヤグラムの掲載がなく, また小林ダイヤグラムを誤って中谷ダイヤグラムと書いてあり, この原稿を書く動機になりました. この度, 中村 勉教授と学会誌「雪氷」の編集委

員の亀田貴雄准教授より原稿の依頼があり, 両氏より参考資料を送って戴きました. ここに記してお礼を申し上げます.

また, 図1, 2, 3, 4はハーバード大学出版局より, 図5, 6はケンブリッジ大学出版局より, 図7, 8は北海道大学低温科学研究所より, 図9は朝倉書店より図の転載許可を戴き, 各社にお礼を申し上げます.

文 献

- 朝倉 正 他編, 1995: 気象ハンドブック. 朝倉書店, 360pp.
- 花島政人, 1944: 雪の結晶の生成条件について. 低温科学(岩波書店), **1**, 52-65.
- 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**, 1-26 (図版 I-IX).
- Kobayashi, T., 1961: The growth of snow crystal at low supersaturation. Phil. Mag., **6**, (71), 1363-1370.
- Kumai, M., 1951: Electron-microscope study of snow-crystal nuclei. J. Meteor., **8**, (3), 151-156.
- Kumai, M., 1961: Snow crystals and the identification of the nuclei in the Northern United States of America. J. Meteor., **18**, (2), 139-150.
- Kumai, M., 1976: Identification of nuclei and concentrations of chemical species in snow crystal sampled at the South Pole. J. Atmos. Sci., **33**, (5), 833-841.
- Kumai, M., 1982: Formation of ice crystals and dissipation of super-cooled fog by artificial nucleation. J. Appl. Meteor. **21**, (4), 579-587.
- 熊井 基・樋口敬二, 1952: 降雪時に大気中に含まれている雪の結晶の数と質量の測定, J. Meteor. Soc. Japan, **30**, (11).
- Kumai, M. and Fracis, K.E., 1962: Nuclei in snow and ice crystals on the Greenland Ice Cap under natural and artificially stimulated conditions. J. Atmos. Sci., **19**, 474-481.
- Magono, C. and Lee, C. W., 1966: Meteorological classification of natural snow crystals. J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII, **1**, (4).
- Mason, B.J., 1957: The physics of clouds. Oxford Univ. Press, 155.
- Mason, B.J., 1962: Cloud, rain and rainmaking. Cambridge Univ. Press, 66.
- 中谷宇吉郎, 1948: 楡の花. 雪今昔物語, 甲文社, 325-368.
- Nakaya, U., 1951: The formation of ice crystals. Compendium of Meteorology, American Meteorological Society, 207-220.
- Nakaya, U., 1954: Snow crystals. Harvard Univ. Press, 246.
- 小倉義光, 1999: 一般気象学 (第2版), 東京大学出版会, 308pp.

(2008年7月30日受付)