



Title	人工雪の生成条件について：補遺
Author(s)	花島, 政人
Citation	低温科学, 2, 23-29
Issue Date	1949-10-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17395
Type	departmental bulletin paper
File Information	2_p23-29.pdf



人工雪の生成条件について — 補遺*

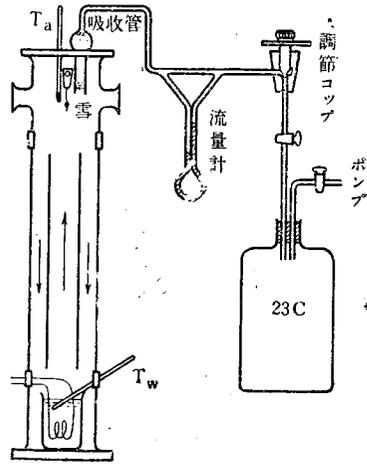
花 島 政 人**

1. 緒 言

雪の結晶の人工作製に於て、主として気温と過飽和の度とによつて、その結晶形が決定されることが前の研究で分つたので、各種結晶形について、その結晶の出来るところの気温と実際の過飽和度との関係を調べた。過飽和度は従来は單に定性的或は比較的の値しか得られていなかったが、この實驗では結晶の出来つゝあるところの空氣を五酸化磷を通じて吸収して、その實際の過飽和度を量的に測定したのである。更にその外、その結晶の出来るところの気温の偏差 (fluctuation) と結晶形との関係、装置内の微水滴及び結晶の初期状態についても調べた。

2. 過飽和度の測定法

雪の結晶を作る装置は従來のもので、第1圖の左側のものである。硝子の二重管より成り、その下部に電熱で液温を調節する水槽があつて、そこから出た暖い水蒸氣は内部の管内を上昇し乍ら冷えて、上では過飽和になり、上蓋からそこに吊した兎毛上に雪の結晶として凝結する。そして冷えた空氣は二本の硝子管の間を下るようにしてある。結晶の出来るところの気温 (T_a) と下の水蒸氣を供給する水槽の液温 (T_w) の種々な組合せで雪の結晶を作り、その生成のときの T_a と T_w と結晶形との間の関係を調べて前論文の第5圖が得られた。同圖は縦軸に T_w を、横軸に T_a を採つたもので、結晶形は樹枝、扇形、厚角板、立體角板、針、針異型、コップ、角柱の8種に分け、各々を記號で $T_a - T_w$ 圖中に記入してある。



第 1 圖

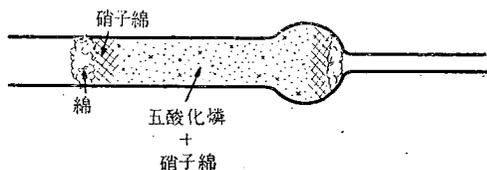
その圖で見られた如く、結晶形は T_a に非常に利き、且又 T_w にも利くことが分る。 T_w は水

* 北海道大學低温科學研究所業績 第18號。氣象集誌，第2輯，第22卷(昭和19年)，第4號。

** 北海道大學理學部物理學教室。

(1) 氣象集誌，第2輯，第20卷(昭和17年)，第7號。

蒸気の供給度を示すもので、過飽和の度合を定性的に示していると考えられる。それでこの過飽和の実際の度合を定量的に調べるために、雪の結晶の出来つゝあるところから水蒸気で過飽和になつている空気を一定量だけ採り、その中の水蒸気だけを五酸化磷に吸収させ、その目方の増加から過飽和度を測定した。装置は第1圖の如きもので、吸収管、流量計、調節コックを通つて雪の結晶の出来つゝあるところから一定量の空気を豫め真空ポンプで真空にしておいた約23 lのタンクに採る。吸収管は第2圖に示す如きもので、吸収剤の五酸化磷はガラスウールに充分よくまぶしてかたくなく又ゆるすぎないように注意して填める。その前後にはガラスウールと綿とを填め、更にゴム栓で密栓して、デシケーター中に保存し、使用直前にゴム栓ごとと秤量し、再びデシケーターに入れて低温室内へ持込む。



第 2 圖

充分な大きさに雪の結晶が発達したところで、豫め T_a 位までの温度に冷しておいた吸収管を挿入し、出来るだけ T_a , T_w を一定にし、流量も又出来るだけ一定であるように流量計を見乍ら調節コックを加減し、毎分約 1 l の割合で雪の結晶の出来つゝあるところの空気を約 23 l 採る。吸収の終つた吸収管は栓をして取出し、デシケーターに入れて持出し、大體暖い外氣温度になるまでに放置し暖い外氣に出しても濡れぬまでになつてから秤量する。この實驗の温度範圍では、この重量の増加は 30 乃至 60 ミリグラム位であつて、その増量は充分精確に測り得た。

雪の結晶の出来つゝあるところの温度 T_a に於ける飽和蒸氣壓から單位體積中の飽和蒸氣量を計算し、吸収管の重量の増加より出した實際の水蒸氣の單位體積中の重量との比を、その過飽和度 S とした。本論文に於ける過飽和度 S はこの定義により過飽和の度合を示すものでなく、過飽和の領域に於ける相對温度のことである。

吸収管の重量増加を m , 吸収した空氣の容積を V とすると求める空氣の絶對濕度 D は

$$D = \frac{m}{V}.$$

しかし結晶の出来るところの温度とタンクの温度とは一般に異つてゐるので、容積に對する補正を考えねばならぬ。結晶の出来るところの温度を θ , タンクの温度を θ' , タンクの容積を V' とすると

$$\frac{V}{V'} = \frac{273 + \theta}{273 + \theta'}$$

なる關係があるから

$$D = \frac{m}{\frac{273 + \theta}{273 + \theta'} V}$$

となる。

その温度で飽和にある水蒸気の量を $D_{sat.}$ (g/m^3) とすると過飽和度 S (%) は

$$S = \frac{D}{D_{sat.}} \cdot 100$$

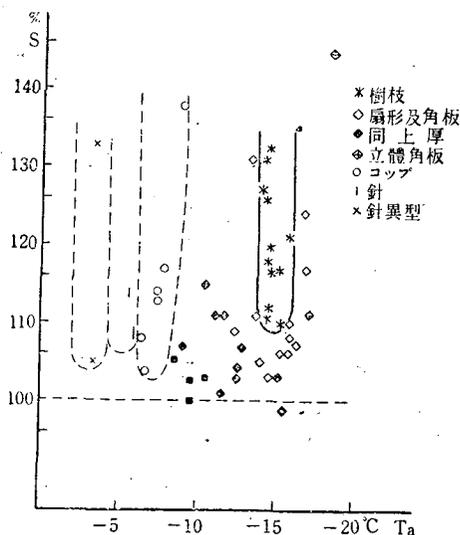
である。

このように測定しようとする空気を一定容積だけ採つて、その中に含まれている水蒸気を五酸化燐、鹽化カルシウム、又は濃硫酸の如き吸湿剤に吸収させて、水分の全質量を秤量して湿度を測るという方法は、かなり古くから用いられていて、五酸化燐をガラスウールにまぶして使うのは Tyndall ⁽¹⁾ なども試みている。

常温の室内でこの吸収方法を行い、アスマン通風湿度計よりの湿度と比較してみると、1% 以内でよく一致し、又この時吸収管を2本直列に連結して行つても、2本目には殆んど重量の増加が認められず、常温に於て水蒸気の量が相當に多いときでも1本の吸収管で充分であつた。それでこの實驗に於ては過飽和の測定の大部分は吸収管1本で行つた。

3. 気温及過飽和度と結晶形との關係

上述の方法で雪の結晶の出來つゝあるところの過飽和度を、種々の異つた T_a , T_w の組合せで測定し、それと結晶形及び T_w との間の關係を調べた。そして T_a-S 圖中に各結晶形を異なる符號で描き込んだ。その結果を第3圖に示す。圖は縦軸に過飽和度を%で、横軸に T_a を採つたもので、結晶形は前報告第5圖と同様な記號で記入してある。



第 3 圖

と生成時の温度によつて支配されることが分つた。もつとも樹枝狀六花結晶の場合は過飽和の度

(1) A. M. Tyndall : Proc. Phys. Soc., Vol. 34 (1922), p. 72.

が餘り小さくなると、即ち量的に言つて過飽和度が 110%以下になると T_a が適温の場合でも扇形結晶になつてしまふ。又餘りに多いときは雲粒付結晶になる。この結果から樹枝状結晶の生成条件は気温が -15°C を中心とした 2~3 度の範圍で過飽和度が 110% 乃至 140% であることが分つた。

針状結晶、コップ及屏風型結晶は前論文第 5 圖で見られる如く何れも T_a が高いと同時に T_w も高いことが必要で、即ち水蒸氣の供給は多いのである。 T_a と T_w が共に高いことは過飽和の度合が餘り變らないことを意味する。實際にこれ等の結晶の生成時の過飽和度を測つた結果第 3 圖に見られるように、別に増加していないのである。これ等の結晶はいつでも過飽和度約 105% 以上ならば出来るので、結晶形を決める重要な要素は温度である。

角板結晶は最も複雑で、その構造を更に詳しく調べて、次の分類を確定しないと決定出来ない。しかし普通の扇形及角板は樹枝の条件をすこしはずれた時に出来、厚角板が普通角板とコップ型との中間の条件にあることが大體言える。立體角板は気温が -18°C 附近及びそれ以下で出来ることも前論文の通りである。

これ等の實驗結果から各種の雪の結晶の生成条件を列記すれば第 1 表の如くなる。

第 1 表

結 晶 形	氣 温 ($^{\circ}\text{C}$)	過 飽 和 度 (%)	摘 要
樹 枝 狀 扇 形 及 角 板 同 上 厚 立 體 角 板 コ ッ プ ツ 針 異 型	$-14^{\circ}\sim-17$ $-8\sim-12, <-20$ <-18 $-6\sim-8$ $-5\sim-6$ >-5	110~140 100~110 100~140 <105 100~135	{ 樹枝状より気温が高い方及低い方に 少しずれたところ、及気温が $14^{\circ}\sim$ 17° では過飽和度は 110%以下

4. 装置内の微水滴

天然の雪にはよく氷の粒の附着した結晶が見られる。これは殆んど全ての型の結晶で見られるので、北海道などでは降雪回数の 3分の1以上もこの粒の附着したものが混つている。このことに就てはすでに「雪の研究」第 4 號⁽¹⁾に於て精しく論じられている。いろいろな結晶について、それに附着している粒の直径の頻度曲線は 0.03 耗程度のところ極大があつて、丁度雲の粒の大きさである。これはこの種の粒の附着した結晶の降るときに、結晶が成長した層より下に過冷却した水滴から出来ている雲の層があつて、上層より雪の結晶が落ちて来る途中、その層を通ると

(1) 中谷宇吉郎・寺田東一：北海道大學理學部紀要，第 2 輯，第 1 卷 (1935)，7 號，199 頁，雪の研究。No. 4 (英文)。

きに、その粒が結晶に附着して、水滴の儘凍りついた場合と、結晶生成の層中に過冷却水滴の雲粒があつて、雲粒がつきつゝ結晶が成長する場合とが考えられる。

人工でも、この粒の附着した結晶を作ることが出来て、その時も粒の大きさは大體同じである(寫眞 2)。これを作るのには水蒸氣を供給する水槽の液温を $+20^{\circ}\text{C}$ 以上に高くすればよい。雪の結晶を顕微鏡で見ながら水温を高くすると、粒がすーと飛んで来てポツツと結晶につくのがよく見られ、それをその儘に放置しても粒が大きくなることは決してなかつた。

ところが、この人工雪を作る装置の中を暗くして、側面より強い光線を入れて調べて見ると、このような粒が出来ない時でも、丁度結晶の出来る場所の附近では、過飽和の水蒸氣ばかりでなく澤山の小さな水滴が浮遊していて、対流などの空氣の動きによつて盛んに動き廻つていのが見られた。寫眞 1 は装置内の結晶の出来る場所を暗視野で側面から照した時の光束を示す。即ち普通肉眼では透明に見えるのが照明次第でこのように、白く光つて微水滴の存在が分るのである。その微水滴をデッキグラスに塗つた油の膜に受けて顕微鏡寫眞を撮り、その大きさを測つて見ると、直径が千分の數耗程度の微滴で、結晶についた粒より一桁小さいことが分つたのである(寫眞 3)。

この微滴は雪の結晶に附着しても、粒としては凍りつかなくて、水蒸氣の凝縮と同じように、透明な氷の結晶、即ち普通の雪となる。その微水滴の凝縮機構の問題は今後に残された問題の一つである。

5. T_a の偏差 (fluctuation) と結晶形との關係

人工雪の實驗では任意に調節し得る條件は装置の外側の温度 T_r と F から水蒸氣を供給する水槽の液温 T_w とである。 T_a は T_r と T_w と装置内の対流とによつて決まるが、これは直径約 2.5 mm の細い酒精寒暖計を用いたので、測つている T_a は時間並に空間について平均値を採つているのである。しかし水蒸氣を含んだ暖い空氣は多分煙草の煙が空中に上つてゆく場合のように、細い筋となつて、上昇しているものと考えられる。それで結晶のところの温度は特に顕微鏡的に見たら、かなり激しい偏差を受けているはずである。雪の結晶の大きさは顕微鏡的のものであるから、その成長特に形の決定にはこの偏差を無視することが出来ず、かなり強い影響を與えているものと想像される。

それで毛髮程度の細い銅コンスタンタン熱電對と週期約 2 秒の短週期檢流計とを使用して、結晶直前の氣温の偏差を單纖條の電球の纖條の像をシンドリカルレンズを通して點にし、レコーディングドラムに巻いた印畫紙の上に記録した。そしてこの記録と出来た結晶形との關係を調べた。その 1 例を寫眞 4, 5 に示す。氣温は寫眞に見られるように激しい偏差を示して、その振

幅は 2°C 程度である。しかし結晶形との関係は豫期に反して、この程度の偏差は結晶形に影響を與えていないことが分つた。下部が暖いときは流體は不安定となり温度が偏差を示すことは周知のことである。Thomson などの研究と同様に、この人工雪の装置の場合も、上と下との温度差、即ち T_c と T_w との温度差が大きくなればなる程この上部の温度の偏差は大きくなつていゝ。結晶形は $T_c - T_w$ の温度差では決まらないので、この偏差の大小だけでも亦決まらないことが分つた。

6. 雪の結晶の初期状態

人工雪の研究の中で結晶形とそれを支配する外的條件との間の關係を調べるとき、雪の結晶全體の形を問題としないで、結晶の枝 1 本について論じたのである。即ち結晶の枝の形の同じものは同じ條件の下に出来るから、平板とか立體とかは問題としないで、枝の習性が主な問題となつたのである。しかし從來の一般分類の如く結晶全體の形を問題とするときは結晶初期の状態が大切な要素である。例えば正規の六花狀の結晶が出来るためには、結晶の出来はじめから六花又は六角板の平板結晶であることが必要なのである。もし初期に例えば立體扇形集合が出来ていゝとその後樹枝の條件にしても六花にはならず、毬狀の立體樹枝になつてしまふ。⁽¹⁾

人工雪の初期状態を見ることは前から試みられていたのであるが、極初期状態を調べるには顯微鏡の倍率を大きくする必要があるので装置の外から檢鏡することが出来ず、又取出して顯微鏡下へ持つて來ると、すぐ昇華してしまう點に困難があつた。此の種の微小な結晶は -30°C 位のところでも數秒のうちに昇華してしまう。それで結晶を不凍油の中に浸して保存し乍ら顯微鏡で調べる方法をとつた。油は種々なるものを試みたが、主として耐寒緩衝油を用いた。

人工雪を作る装置は第 1 圖の普通に使うものを使用し、結晶を兎毛につけて發達させることも同様である。氣温、水温を決めておいて兎毛を入れると、間もなく白い光點の出来るのを認める。その時兎毛を装置外に取出すや否やすぐ不凍油の中に浸す。この光點は毛を入れるとすぐ出来ることもある。これらの光點を顯微鏡で檢鏡すると寫眞 6, 7, 8 に示す如く、もうすでに結晶初期状態になつていゝ。即ち雪の結晶はこの程度の大きさ、形までに極めて短時間内に出来てしまふことが分る。

多數の實驗の中、板狀結晶即ち六花又は六角板狀になつたときは、例外なく結晶の出来るところの氣温が $-14^{\circ}\sim -18^{\circ}\text{C}$ の範圍内で水温は $+8^{\circ}\sim +18^{\circ}\text{C}$ 程度であつた。大體結晶形とその生成條件との關係圖は前論文第 5 圖の範圍 I の大部分と範圍 II の一部である。氣温が -18°C 以下になると水温即ち水蒸氣の供給度を少し位變えてみても殆んどいつも寫眞 8 に示すような六角

(1) 中谷・戸田・丸山：北海道大學理學部紀要，第 2 輯，第 2 卷(1933)，13 頁，雪の研究，No. 11 (英文)。

柱になつた。

天然の雪でも寫眞 9, 10, 11 に示すような極めて小さい六花又は六角板が見られ又普通の六花状結晶に混つて非常に小さい六花の結晶も觀測される。これ等も結晶初期の状態であつて、平板結晶は直徑 0.1mm 或いはそれ以下でもちやんと平板結晶になつている。即ち六花状の雪の降るときはかなり上層から六花が出来る条件になつていることが人工雪の實驗と俟つて分つた。

7. 總 括

今まで定性的に測られていた雪の結晶の出来るところの水蒸氣の過飽和度を五酸化磷を用いた水分吸収法で測定し、雪の結晶と過飽和度との關係を調べた。その結果結晶形は過飽和度だけでは一義的に決まらず、出来るところの氣温によつて主として決定されることが分つた。この結果は從來雪の結晶形について考えられていた所謂常識、即ち過飽和度が高い時に樹枝となり、比較的乾いた時に角板になるという説とは著るしく異つた結論である。舊くは Wegener や Shedd 等は從來の考え方に従つて雪の結晶形の生成機構を論じ、又近年になつても Findeisen 等も同様な考え方をしているが、これ等の説は今回の研究によつて實驗的根據がないことが分つた。人工雪の結晶を作る装置内に雪を構成する水滴より一桁小さい約 1000 分の 1 耗程度の微水滴が浮遊し、それは雪の結晶に附着しても粒とならず、恰も蒸氣の如くなつてることが分つた。又結晶形と T_a の偏差 (fluctuation) との間には特別な關係が見出されなかつた。雪の結晶生成の極く初期で、それを油浸して、その初期状態を見ることが出来て、極く初期からちやんと各種の形が出来、その生成条件も普通の大形の結晶の場合と殆んど同じことが分つた。

本實驗は北海道大學低温研究室に於て中谷教授の指導の下に文部省科學研究費によつて行つたものである。茲に厚く感謝の意を表する。

低 温 科 学 第 二 輯 (第 一 刷) 正 誤 表

(頁)	(行)	(誤)	(正)	(頁)	(行)	(誤)	(正)
目次	20	福島	福富	90	13	写真 12	写真No.30
3	12	α	αd	94	28	" 7	" No.25
6	第6圖	5 cm	0.5 cm	99	16	示すと	みると
"	20	$\frac{3}{\text{kg/cm}}$	$\frac{3}{\text{kg/cm}^2}$	"	"	写真No.1の如く	トル
24	22	相對温度	相對湿度	"	22,23	写真1に見られる	トル
26	第1表の5	<105	>105	100	2	写真と同様に	トル
27	4	写真 2	写真No.2	101	27,28	写真No.2に示す様に	トル
"	10	" 1	" No.1	101,102	30,1	写真に示す如く	トル
"	14	" 3	" No.3	102	13	第1表及び写真No.2を	第1表を
"	19	F	下	108	26	写真 1	写真No.31
"	30	写真 4,5	写真No.4,5	"	29	" 4	" No.34
28	4	T_c	T_a	"	29	" 4	" No.34
"	5	T_c	T_a	109	3	" 4	" No.34
"	23	写真 6,7,8	写真No.6,7,8	"	"	" 5	" No.35
"	29	" 8	" No.8	"	20	" 2	" No.32
29	2	" 9,10,11	" No.9,10,11	112	3	" 3	" No.33
34	10	鐵線があるが	鐵線であるが	113	17	" 6	" No.36
59	第13圖	---細土含有量	---細土含有量	"	18	" 7	" No.37
"	"	-x-粘土含有量	-x-粘土含有量	"	29	" 8	" No.38
70	24	b c	b : c	115	27	" 9	" No.39
71	3	写真No.1	写真No.12	116	4	" 9	" No.39
"	3	" No.2	" No.22,13	120	13	$1.0 \times 10^{-7} V$	$1.0 \times 10^{-2} V$
"	16	" No.1	" No.21,12	121	7	30cm	130cm
74	6	第2圖(A)	" No.14	128	14	3m	4.8m
"	"	" (B)	" No.15	136	第1表の1	左右對線	左右對稱
"	"	" (C)	" No.16	142	1	打點式によつて	自記的に
"	8	写真 (A)	" No.14	159	6	Ag	Aq
"	10	写真 (B)	" No.15	164	25	$\Delta t'g > t_w$	$\Delta t'g > \Delta t_w$
"	18	" (C)	" No.16	166	27	0.001N	0.001/N
"	20	" (A)	" No.14	171	3	9桁	6桁
75	9	第4圖(D)及(E)	" No.17, No.18	"	16	$\frac{T_l}{T_a} Vt$	$\frac{T_l}{T_t} Vt$
"	11	写真 (D)	" No.17	172	2	$R-I = \frac{e}{e_{sat}} 100$	$RH = \frac{e}{e_{sat}} 100$
"	12	" (E)	" No.18	"	22	a), b)	写真No.40, No.41
77	脚註3	Seron	Screen	174	第3表	相對温度	相對湿度
80	11	$\int_0^\infty \varphi(r) d^2(r) pr$	$\int_0^\infty \varphi(r) p^2(r) dr$	180	6	$B_{nap} s$	B_{napus}
88	10	写真 1	写真No.19	181	2	<i>Faphanobras-sica</i>	<i>Raphanobras-sica</i>
"	20	" 2	" No.20	182	4	<i>Horde m</i>	<i>Hordecum</i>
89	1	" 3	" No.21	183	13	<i>nap s</i>	<i>napus</i>
"	3	" 4	" No.22	244	19	單位生殖	單爲生殖
"	12	" 5	" No.23	248	15,16	温度氏はでも	湿度でも
"	"	" 6	" No.24	"	16	尙松島	尙松島氏は
"	14	" 4	" No.22	252	13	Schwarkinowa	Schwarnikow
"	22	" 7	" No.25	257	6	写真1-5	写真No.56の1-5
"	27	" 8	" No.26	259	8	写真4-5	写真No.56の4-5
"	28	" 9	" No.27	260	6	" 6	" No.56の6
90	3	" 12	" No.30				
"	10	" 8	" No.26				
"	11	" 11	" No.29				
"	12	" 9	" No.27				