



Title	降雪粒子の結晶形と上層大気状態の関係
Author(s)	村井, 五郎; MURAI, Gorow
Citation	低温科学. 物理篇, 15, 13-32
Issue Date	1956-11-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17908
Type	departmental bulletin paper
File Information	15_p13-32.pdf



降雪粒子の結晶形と上層大気状態の関係*

村 井 五 郎

(低温科学研究所 気象学部門)

(昭和 31 年 7 月受理)

I. 緒 言

地上に降つて来た雪を観測して、その時の上層大気状態との関係を調べることの重要性はしばしば指摘されて来たことで、その試みは G. Stüve¹⁾, Nakaya-Sekido²⁾ 以来いろいろとなされて来ているが、最近では Kumai-Higuchi³⁾, Imai⁴⁾ および Gold-Power⁵⁾ などの研究がある。その中 Kumai 等は上層気象資料を用いていないし、Imai の輪島における観測は対象が殆んど驟雪だけで持続性の降雪が無く、そのため上層資料との対応をつける事があまり出来なかつたと述べている。

Gold 等はカナダのモントリオールで降雪粒子を観測し、テヒグラムを用いて雲底・雲頂高度を求め、雪の生成された温度を推定して Nakaya-diagram⁶⁾ とのよき一致を得た。しかしながら、これには次のような不満な点がある。すなわち、(i) モントリオールではゾンデ観測が無いため、240 km, 300 km, 400 km も離れたゾンデ観測所の資料から外挿してモントリオールの上空の状態を推定した事。(ii) 湿度を全然用いながつた事。(iii) 結晶生成温度の決め方がそんなに明確には示されていないし、また例示が少ない事。(iv) どの程度の数の結晶から、どのようにして主要結晶形を決めたか不明確な事——などの点である。筆者はこれらの点を考慮して 1955~1956 年の冬期間、札幌において降雪粒子を観測して、その時の雲の状態との関係を調べた。

II. 方 法

[A] 降雪粒子の観測

降雪粒子の観測は当研究所構内において行ない、結晶形の決定は次の諸方法によつた。(a) 顕微鏡観察、(b) 顕微鏡写真、(c) 接写、(d) 樋口式の影写真法⁷⁾、(e) レプリカ作製⁸⁾。

先ず雪を 22.5×18 cm (約 400 cm²) のガラス板に約 30 秒間 (雪の強度により増減) 受け、接写または影写真法によつて全体を記録し、次にガラス板全体を顕微鏡視野内に動かしてくま

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 331 号

なく観察して大体の傾向を調べ、代表的と思われる部分を撮影する。次にそれを徐々に融かして水滴とし再び影写真をとつた。この際ガラス板は Dri-film で処理してあるので、水滴はほぼ半球になる。樋口式の方法は操作が簡単であり得られた写真は鮮明で、極めて有効な方法であつた (筆者の場合は A.C. 100 V を減圧して 16 V とし、自動車用豆球を用いた) (写真 1, 2, 3)。その他、ポリビニールフォルマールの二塩化エチレン溶液 (0.5%) を用いてレプリカを作製して後で顕微鏡で調べた。以上の方法を 5~15 分間隔で実施して多数の雪の記録を集めた。その今冬季中に行なつた観測日数は 45 日、総観測回数は 1040 回であつた。気温が高くて融けるおそれのある場合は、作業を低温室 (-10°C) 内で行なつた。

[B] 結晶形の決定

多くの場合雪は種々の結晶形が混合して降つて来る。例えば Nakaya⁹⁾ は十勝岳の観測で多種多様の結晶形が終日入り乱れて降つた例を報告しているが、筆者の場合はそれ程甚だしい変化にはぶつからなかつた。しかし主要結晶形の決定に相当困難した日も二三あつた。

さて、例えば樋口式の方法でとつた影写真には、一枚に大体 1000 個程度の粒子が撮れるが、その中大体 1/4 以上を占めると思はれるものを (正確に数えたわけではない)、主要結晶形 (以下 MCF と書く) とし、1/4 以下ではあるが可成りの量混入しているものを亜主要結晶形 (以下 SMF と書く) とし、僅かしか混つてないものをその他とした。このようにして毎時 (12 h, 13 h, 14 h ……) の主要結晶形を決めたのであるが、或る時刻の主要結晶形の決定に参与する結晶粒子の数は数千個に達し、ほぼその頃の代表的な結晶形と見なす事が出来よう (第 1 表)。この際結晶形の分類は国際的にきめられたものを基準とし¹⁰⁾、詳細に関しては Nakaya の分類^{11), 12)} を参照した。

[C] 雲の状態の決定

雲の状態 (雲頂高度 H_t , 雲頂温度 T_t , 雲底高度 H_b , 雲底温度 T_b) の決定には、主として札幌管区気象台の地上、高層両資料および筆者の目視観測を用いた。ゾンデ観測は 0 時, 12 時の 1 日 2 回なので途中の時刻の状態は、地上観測による雲の状態の変化 (雲形, 雲量, 雲向, 雲底高度), 地上気温変化, 不連続線の有無などを考慮して内挿した。雲頂高度の決定法は後に実例をもつて示すが、多くの場合地上 2 km 附近に逆転があつたため比較的容易に決める事が出来た。

[D] 雪生成温度 (T_s) の決定

さて雲の状態がわかつたとして、次に雪は果してその雲のどこで生成されるかが大きな問題である。Gold 等は雪生成の場所として二つの場合で大別して考えた。すなわち, (i) non-frontal snow の場合は、雲は対流活動, 不安定, またはトラフ内での収斂などで発生し、その雲

の上層部の雲頂から1000~2000フィートを雪生成のレベルとしている。(ii) frontal snow の場合はフロント上空を吹走する暖気内の厚い中層雲の上層部の雲頂から1000~2000フィートを雪の主要な源としている。しかしこのような決め方は、雲が非常に厚い場合または非常に薄い場合に問題があるので筆者は次のような方法によつた。第1図に示すように雲を大きく分けて上半部を雪の結晶形決定に関係深い領域とし、下半部を結晶の成長に関係深い領域と考え、その結晶形決定域の中央附近(すなわち雲頂から1/4のところ)が、主要結晶形決定に最も関係深い高さとして仮定して、その高さを H_s 、その温度を T_s とした。しかし結晶形決定温度として T_s なる点温度を採るのは雲の厚い場合など不適當なので、 $t = T_t - T_s$ という幅を持たせて $T_s \pm t$ を採用した。この方法は前記 Gold 等の考えと非常に似ていて、Cu 系の雲においては、対流活動のため発生初期の小結晶は雲の上部に押し上げられている可能性が大きいし、また As, Ns なども今冬の場合、多くは温暖前線に伴つたものであるから、可成りの上昇気流があると考えられるので、それほど大きな間違いはないと思われる。

[E] 湿度

前述のようにして H_s が決まれば、その相対湿度 R_s も定まる。しかるに降雪粒子は殆どの場合雲粒付なので雲は過冷却水滴から成り立つていたと考えられる。ゾンデの湿度計はこの過冷却水滴に対する値だから、結晶の成長を論ずる場合は氷面に対する湿度(これを R' とする)を考慮する必要がある。そこで以下に示す状態図には R' をも記入した。

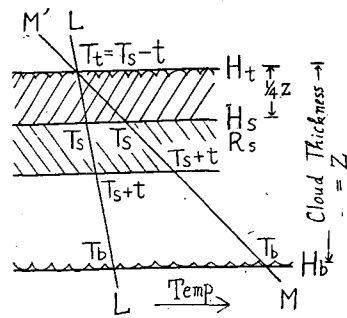
III. 実 例

例 1. Jan. 7, 1956.

MCF; 14~16 h: 雲粒付立体樹枝, 不規則結晶

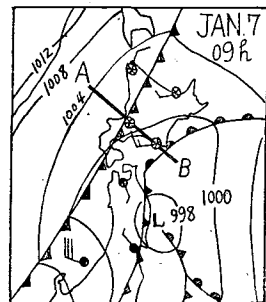
16~17 h: あられ, 雲粒付樹枝状六花

札幌は16時頃迄は本道南岸沿いにある温暖前線の勢力下であり(第2図), 低気圧の東進と共に雲は次第に高くなり且つ薄くなつて来たが(第3図)16時に寒冷前線が通過して雲はCbとなり驟雪となつた。寒冷前線通過前は立体樹枝および不規則結晶だったのが通過後はあられまじりの雲粒付六花がMCFとなつた。12時の状態曲線(第4図)には $H=2.5$ km (730 mb)に温暖前面

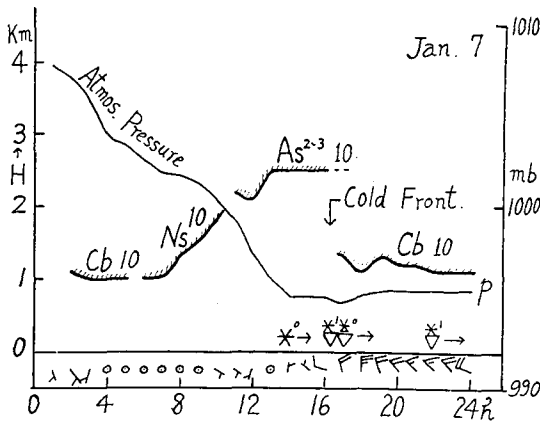


第1図 雲の頂(H_t , その温度 T_t)から1/4の所(H_s)を雪生成高度とし、その温度 T_s を雪生成温度とした。

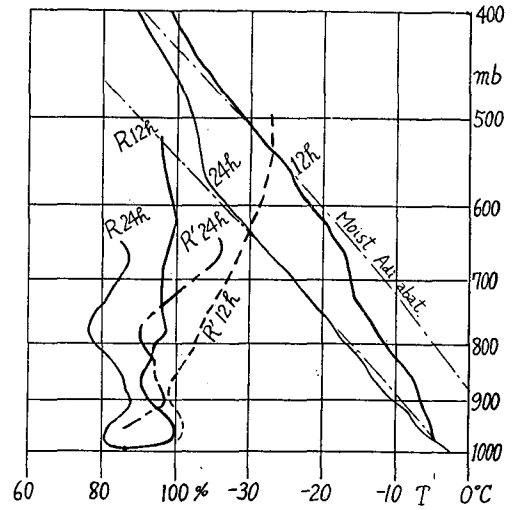
Fig. 1. The cloud level mainly responsible for snow formation (H_s) was assumed to be located at 1/4 from the top of the cloud.



第2図 1956年1月7日 09時の地上天気図

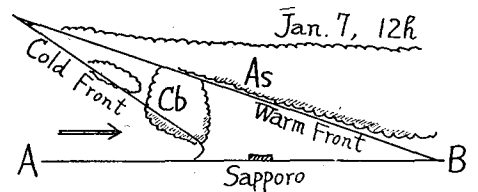


第3図 1月7日地上観測から得られた、札幌における雲形、雲量、雲底高度などの変化図



第4図 1月7日、12時、24時の札幌の状態曲線

が顕著に現われている。As²はこの辺りにあり $H_i \approx 4.0 \text{ km}$, $T_i = -22^\circ\text{C}$ と決めた。従つて $H_s = 3.7 \text{ km}$, $T_s = -20^\circ \pm 2^\circ\text{C}$, $R_s = 100\%$ ($R'_s = 120\%$) と求まる。次に16時以後は雲はCbとなつたが、その対流活動はその上層の温暖層に遮ぎられてCbの雲頂は大体2.7 kmと求まる(第3, 5図)。前と同様にして $H_s = 2.3 \text{ km}$, $T_s = -16^\circ \pm 2^\circ\text{C}$, $R_s = 93\%$ ($R'_s = 106\%$) を得る。これは観測された六花の生成にとって適当な温度である。

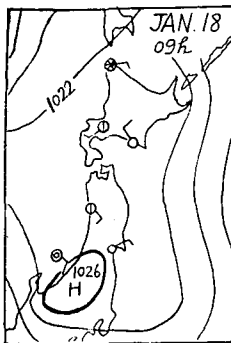


第5図 第2図のABに沿つた断面図

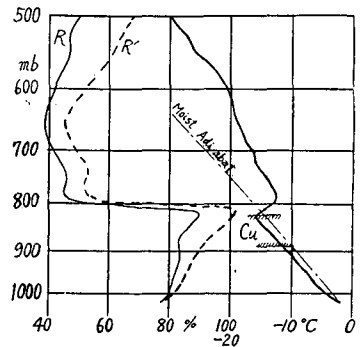
例 2. Jan. 18, 1956. 10~16 h

MCF; 樹枝状六花の flake (写真4, 5)

本道は2, 3日前から高気圧圏内にあり一般に穏やかであつた(第6図)。結晶形は典型的



第6図 1月18日、09時の地上天気図



第7図 1月18日、12時における状態曲線

な Dendrite で可成り雲粒が付着し、その多くは 30~120 個集つて大きな雪片を形成していた。雲形は Cu で、 $H_0=1.2$ km。筆者の目視観測によれば雲厚は非常に薄いもので、屢々太陽がすけて見える程度であつた。12 時の状態図は第 7 図の如くなり $H=1.6$ km (830 mb) に顕著な沈降性の逆転があり、また湿度も $H=1.7$ km から急減しているのて雲頂は大体 $H_t=1.6$ km ($T_t=-15^\circ\text{C}$) と推定される。よつて $H_s=1.5$ km, $T_s=-14^\circ\pm 1^\circ\text{C}$, $R_s=86\%$ ($R'_s=98\%$)。 T_s は観測された六花の生成適温である。注意すべき事は、雲厚が僅か 400 m 位でも直径 5~7 mm の見事な六花が生成され、その多くが 100 個以上の雪片を形成していた事である。

例 3. Jan. 19, 1956.

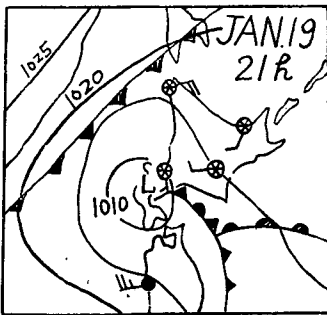
MCF; 12~15 h: 雲粒付の樹枝つき角板, 角板状の発達をもつ六花

15~18 h: 雲粒付六花, あられ

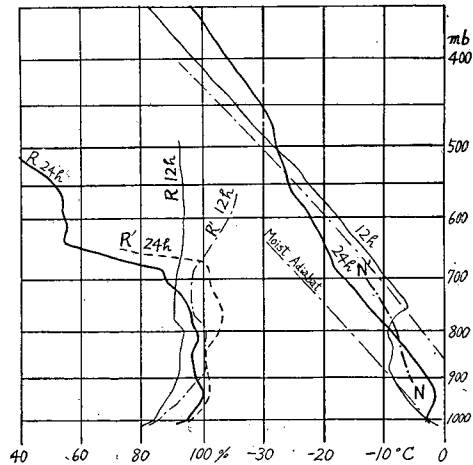
18~21 h: 雲粒付の針

21~23 h: 雲粒付六花, 雲粒付の針

本道は日本海を東進して来た低気圧に伴つた温暖前線の前面にあるため (第 8 図), 06~15 時までの主雲形は $As^2\sim As^3$ で次第に雲は降下して来た。12 時の状態曲線には (第 9 図) $H=1.2\sim 2.4$ km (880~760 mb) に顕著な逆転があり、 As はこの温暖前面の上方に拡がっていると考えられる。雲形、雲底高度などの変化などを考慮して $H_t\approx 4.0$ km ($T_t=-18^\circ\text{C}$) と推定し $H_s=3.6$ km, $T_s=-15^\circ\text{C}$, $R_s=93\%$ ($R'_s=107\%$) を得る。ところが低気圧が本道に上陸する頃から温暖前線は閉塞前線となり、16 時すぎから雲形は Cb となり、結晶形は六花とあられに変化した。18~21 時には大量の針状結晶が観測されたが (写真 6), これは第 9 図に示したように 12 時の曲線が 24 時のそれに移行する途中で $N-N'$ という状態を通つたため針状結晶生成の適温である $-5\sim -10^\circ\text{C}$ の厚い層が形成されたために降つたものと考えられる。24 時には、



第 8 図 1 月 19 日, 21 時の地上天気図



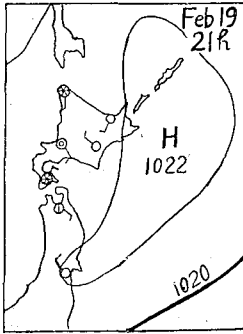
第 9 図 1 月 19 日, 12 時, 24 時の状態曲線

$H_i=3.1$ km ($T_i=-18.5^\circ\text{C}$) となり, $H_s=2.7$ km, $T_s=-15^\circ\pm 3.5^\circ\text{C}$ となつてこの頃降つた六花の生成適温と一致している。

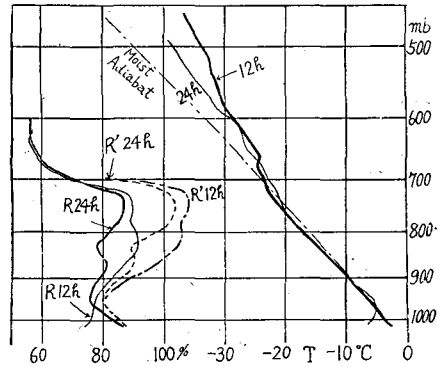
例 4. Feb. 19, 1956. 16~18 h

MCF: 樹枝つき角板 (写真 7).

本道一帯は移動性高気圧の圏内にあり (第 10 図) 一般に穏やかであつたが各地に驟雨があつた。雲形 Cb, 雲量 10, $H_b=1.2$ km。状態図 (第 11 図) によると $H=2.6$ km (720 mb) から急に安定になつており, 例 2 と同様な沈降性逆転層と思われる。又湿度もその辺から急減しているので $H_i=2.6$ km, $T_i=-22^\circ\text{C}$ と決める。よつて $H_s=2.2$ km, $T_s=-20^\circ\pm 2^\circ\text{C}$, $R_s=90\%$, $R'_s=106\%$ となり角板生成の適温である。ここで六角板が発生し, それが六花生成の適温層 (-15°C 附近) を通過したため, 六角板から樹枝が発達したものと思われる。



第 10 図 2 月 19 日, 21 時の地上天気図

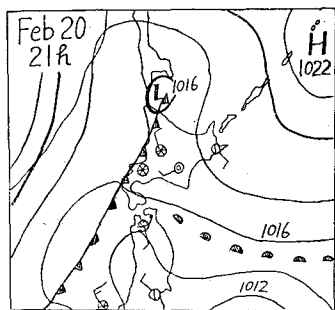


第 11 図 2 月 19 日, 12 時, 24 時の状態曲線

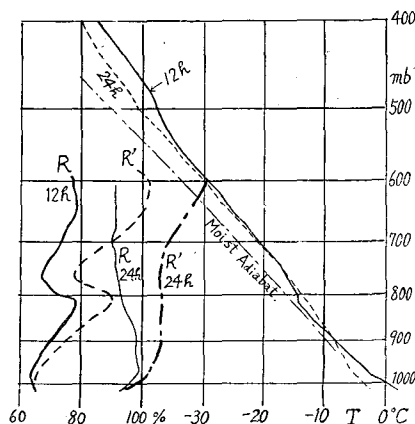
例 5. Feb. 20, 1956. 18~21 h

MCF: 角柱, 平板つき砲弾 (写真 8, 9)

本道は移動性高気圧通過後の, 弱い低気圧を伴つたトラフ内にあつて (第 12 図), 雲形は Cb, 天気は驟雪模様であつた。MCF は角柱組み合わせ, および平板つきの太い砲弾で, 20 時すぎには角柱が減退して側面結晶と角板系が増加して来た。12 時と 24 時の状態図 (第 13 図) からだけで H_i を決めるのは困難だが 14 時ころ迄 $H=4.0$ km に As^0 が観測され, また 12 時の状態曲線は $H=4.3$ km (540 mb) 辺りからやや安定化しているのので, 12 時ころにはこの辺りにやや安定な層があつたと思われる。ところが 24 時の状態曲線を見ると氷面に対する過飽和度は上空に行くに従つて増加しており, また $H=4.3$ km の安定層は解消して $H=5.3$ km (500 mb) 辺りからわずかに安定化しているように見えるだけである。そこで一応 18 時の H_i として $H_i=5.0$ km ($T_i=-37^\circ\text{C}$) と採る。すると $H_s=4.0$ km, $T_s=-30^\circ\pm 7^\circ\text{C}$, $R_s=84\%$ ($R'_s=112\%$) となる。これは Weickmann の飛行機観測の結果¹³⁾ や, aufm Kampe 等の実験結果¹⁴⁾ が示すように, 砲弾集合が -25°C 以下で生成される事と一致している。



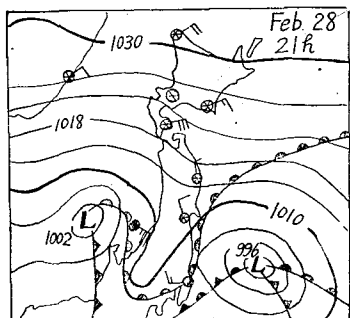
第12図 2月20日, 21時の地上天気図



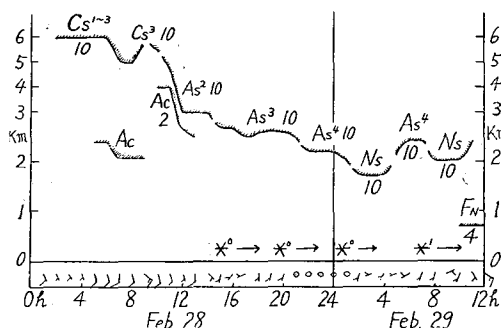
第13図 2月20日, 12時, 24時の状態曲線

例 6. Feb. 28, 1956. 15~24 h

MCF: 側面結晶, 砲弾組み合わせ (写真 10, 11)

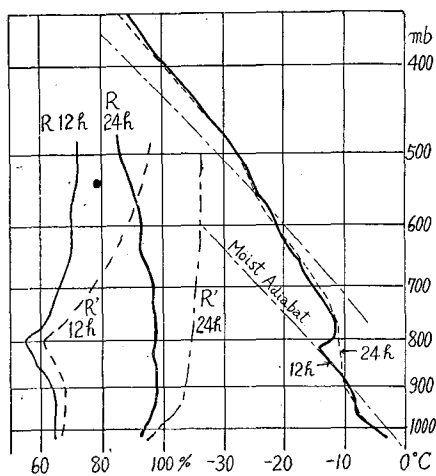


第14図 2月28日, 21時の地上天気図



第15図 2月28~29日, 札幌における雲形, 雲量, 雲底高度などの変化図

第14図に見られる通り, 日本海南部と房総沖に強い低気圧があり, 本道はそれ等から延びる温暖前線の勢力下にあつた。雲形, 雲量, 雲底高度, 風向, 風力などの変化を第15図に示したが, 温暖前線の接近をよく示している。状態図(第16図)によると, 12時には $H=1.7$ km (820 mb) に顕著な温暖前線による逆転があり, 24時には更に降下している。これらの図から H_i を決めるのは困難であるが, 2~10時に $H=6.0$ km に $Cs^1 \sim Cs^3$ があり, 12~14時には $H_b=3.0$ km に As^2 , 15~21時には $H_b=2.6$ km に As^3 がある事などを総合して考えると, 観測時間に相当する雲頂は



第16図 2月28日, 12時, 24時の状態曲線

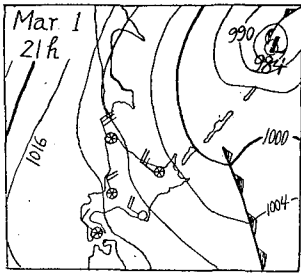
$H_i=5.5\sim 6.0$ km位が適当と思われる。よつて $H_s=5.0$ km, $T_s=-25\pm 5^\circ\text{C}$, $R_s=80\%$, ($R'_s=100\sim 105\%$)を得る。この低温度での側面結晶, 砲弾組合せは Nakaya, aufm Kampe, Weickmann 等の結果と一致して居り, 例えば Weickmann は, Ci 系の氷晶が次第に降下して来て Freezing Nuclei として働き, そこから砲弾が成長して cluster をなして砲弾組合せが出来るのだと述べているが, この例の場合が丁度これに相当するのだろう。

例 7. Mar. 1, 1956. 17~21 h

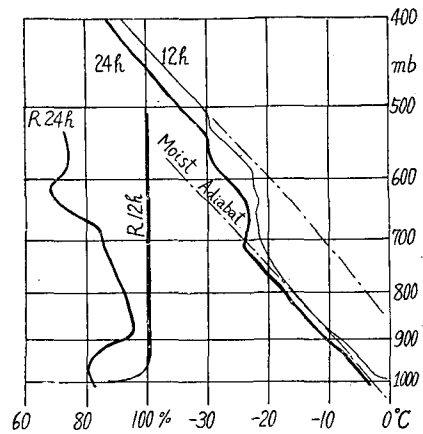
MCF: あられ, 樹枝状六花, 扇形結晶 (写真 12)

SMF: 広幅六花

発達した低気圧が千島方面に去り, 満洲方面の寒冷な高気圧が南下して来て (第 17 図) 14 時ころ弱い寒冷前線が通過して驟雪が始まつたが一旦小止みとなり, その後 17 時すぎに顕著な寒冷前線が通過して, はげしい霰と雪をもたらした。状態図 (第 18 図) によると, 12 時に



第 17 図 3月1日, 21時
の地上天気図



第 18 図 3月1日, 12時,
24時の状態曲線

は $H=2.0$ km (770 mb) 辺りから安定層になつており, 24 時には $H=2.6$ km (710 mb) に顕著な逆転があつて対流性の雲は, これ以上には上に抜けられないと思われる。24 時には湿度も $H=3.0$ km (680 mb) 辺りから急減しているので雲頂は大体この附近であろう。従つて $H_i=2.6$ km, $T_i=-23^\circ\text{C}$, $H_s=2.1$ km, $T_s=-19\pm 4^\circ\text{C}$, $R_s\geq 95\%$ ($R'_s\geq 114\%$)となる。この T_s は扇状結晶などの角板系には好都合だが, 六花生成の適温ではない。注意すべき事は, 雲厚が僅か 1.7 km にしかならないのに, この雲から (写真 2, 3) に示したような巨大な霰を莫大にもたらした事である。

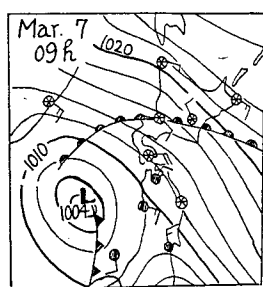
例 8. Mar. 7, 1956. 09~20 h

MCF; 09~13 h: 角板系 (雲粒付着なし) (写真 13, 14)

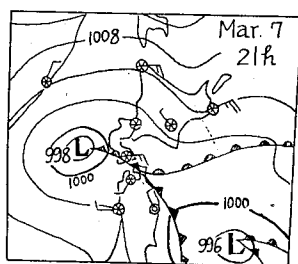
13~18 h: 針状, 広幅のシダ状六花 (雲粒付) (写真 15~18)

18~20 h: 角板系, 樹枝つき角板 (雲粒付) (写真 19)

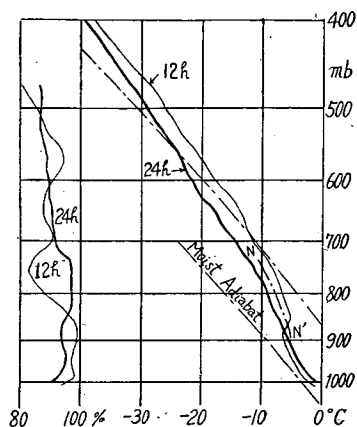
日本海の低気圧から温暖前線が東に延び, 本道はこの影響下にある (第 19 図)。17 時ころ迄は雲は Nb (雲量 10) であつたが, 18 時以後は Cb となり驟雪化した。これは第 19 図, 第 20 図に見られるように温暖前線が南下して寒冷型になつた事と, 前線が閉塞化した事によるのであろう。さて 12 時の状態曲線 (第 21 図) には $H=1.0$ km (890 mb) 附近に温暖前線の逆転があり, 湿度と安定度を考慮して $H_i \approx 5.0$ km ($T_i = -24^\circ\text{C}$)。従つて $T_s = -18^\circ \pm 6^\circ\text{C}$, $R_s = 91\%$,



第 19 図 3月7日, 09時
の地上天気図



第 20 図 3月7日, 21時
の地上天気図



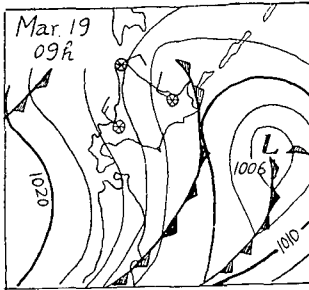
第 21 図 3月7日, 12時,
24時の状態曲線

($R'_s = 110\%$) と求まる。但しこの頃の雲は雲粒が全く付着してない事は注意すべき事であろう (写真 13, 14)。13~17 時には針が大量に観測されたが (写真 15), これは例 3 におけると同様に針生成に適当な $-5^\circ \sim -10^\circ\text{C}$ の厚い層が形成され (第 21 図の $N-N'$) たためと思われる。12 時にも $-5^\circ \sim -10^\circ\text{C}$ の層が厚かつたが, R_s が 100% に達していなかつたので, その頃は観測されず, その後次第に湿度が増加して針を生成したものであろう。次に 24 時の状態曲線から $H_i = 3.7$ km ($T_i = -20^\circ\text{C}$) と求まるので, 12 時の値と内挿すると 18~21 時には $H_i \approx 4.0$ km, $T_i = -20.5^\circ\text{C}$ 。従つて $H_s = 3.4$ km, $T_s = -17^\circ \pm 3.5^\circ\text{C}$, $R_s = 90\%$ ($R'_s = 105\%$) と求まる。

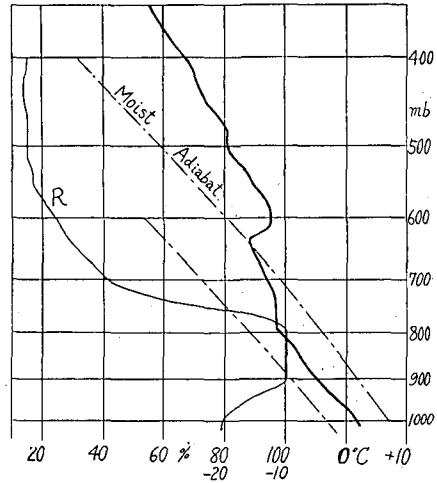
例 9. Mar. 19, 1956. 09~12 h

MCF: あられ, 雲粒付角板系 (写真 20)

本道には, 低気圧後面の大陸高気圧が張り出し (第 22 図), 雲は Cb, 雲量 10, $H_b = 1.2$ km。12 時の状態曲線から (第 23 図) $H_i = 2.0$ km (800 mb), $T_i = -12^\circ\text{C}$ 。従つて $H_s = 1.7$ km, $T_s = -10^\circ \pm 2^\circ\text{C}$, $R_s = 100\%$, ($R'_s = 110\%$) と求まる。この日の角板系は Nakaya-diagramm の高温領域の角板であろう。また, あられは最大のものが水滴に換算して直径が 3.3 mm に達し, 雲厚が僅か 800 m 位しかないのに, この位成長し得る事を示しているのは注目すべき事である。



第22図 3月19日, 09時の地上天気図



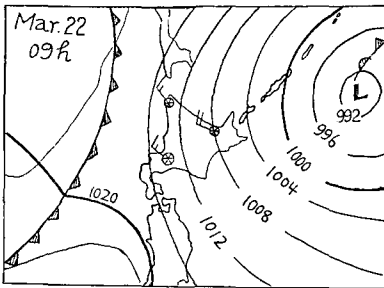
第23図, 3月19日, 12時の状態曲線

例 10. Mar. 22, 1956. 10~14 h

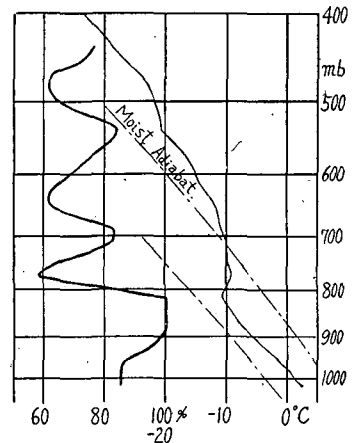
MCF: 針状, 針つき角柱, 微小あられ (写真 21)

低気圧後面の驟雪で (第 24 図), 雲は Cb, ($H_b=1.0$ km) と F_N ($H_b=0.4$ km)。第 25 図からわかるように $H_i=1.8$ km (820 mb), $T_i=-11^\circ\text{C}$ 。よつて $H_s=1.4$ km, $T_s=-8^\circ\pm 3^\circ\text{C}$, $R_s=100\%$, ($R'_s=108\%$)。これは観測された針の生成適温である。

以上 10 例を示したが, このようにして決めた H_s , T_s 等をまとめたのが第 1 表である。



第24図 3月22日, 09時の地上天気図



第25図 3月22日, 12時の状態曲線

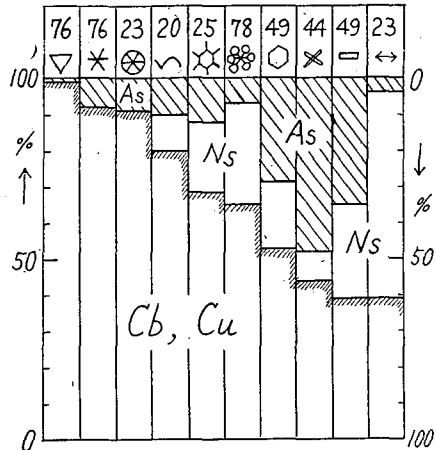
IV. 結晶形と雲形の関係

如何なる雲の中で、如何なる結晶形が生成されるかについては従来飛行機観測などで多少研究されている。例えば Weickmann¹⁶⁾, Schaefer¹⁶⁾, Browne¹⁷⁾, Murgatroyd¹⁸⁾, Imai¹⁹⁾等はこの問題を取扱っている。そこで筆者も一冬ではあるが、この問題について調べて見た。雪はその母体雲から何時間かかかって落下して来るが、地上に落下して来た結晶形はその1時間前の雲からのものであるとして、降雪期間を1時間毎に区切り、その間の主要結晶形と、それに相当する雲形を結びつけてその頻度を調べた結果を第26図に示す。これを見て明かな事は(i)霰・平面六花・立体樹枝・不規則結晶は殆んどすべて対流性の雲からのものである。Nakaya²⁰⁾は人工雪生成実験において、対流または擾動の強弱(つまり水蒸気の供給の度合)が結晶形に及ぼす影響を述べているし、前記の Imai, Schaefer, Browne, Murgatroyd 等の結果と一致したものである。六花の splinter を新たな核として発達した不規則な結晶が対流性の雲から多く降下することは Brewer-Palmer²¹⁾ や Schaefer 等も強調している事である。(ii)角板は Cu 系からでも St 系からでも降る。(iii)角柱, 針は As, Ns, F_N 等 St 系の厚い雲に由来する事が多い。針は Ns, F_N に由来する事が多いのはその生成適温が高いため As で生成される率が少ないからであろう。「樹枝つき角板」および「角板状の発達をもつ六花」が六花と角板の中間に位するのは当然であろう。

ただし札幌の雪の多くはシベリヤ気団が日本海を渡って不安定化した変質気団内での俄か雪や寒冷前線に伴ったもので、従って対流性の雲(主として Cb)からのものが大部分である。温暖前線による As, Ns からの降雪は全期間中僅か数回を数えたに過ぎない(第1表参照)。

V. 結晶形と生成温度, 湿度の関係

結晶形と、その生成温度および過飽和度の間の関係は Nakaya et al²²⁾の研究をはじめとして、最近では aufm Kampe et al²³⁾, Weickmann²⁴⁾, Schaefer²⁵⁾, Mason²⁶⁾等が実験室内または飛行機上で研究を行なっている。これらを参考として、自由大気中において生成された雪について調べて見よう。



第26図 主要結晶形と、その母体雲の雲形との関係。

一般に樹枝系は対流性雲に、針、角柱は層雲系の雲に由来する事が多い。(最上段の数字は統計に使った回数を示す)

Fig. 26. Dependence of crystal types on snow-forming cloud forms. Number in each column indicates the frequency occurred.

第1表 1955—1956年の冬に観測した降雪粒子の結晶形および雲の状態に関する資料

Table 1. Observed crystal forms and the cloud conditions occurring at the time of observations, during the winter of 1955-1956.

No.	Date	Time (h)	MCF	SMF	Cloud Form	Cloudiness	H_t (km)	T_t (°C)	H_b (km)	T_b (°C)	Z (km)	H_s (km)	$T_s \pm t$ (°C)	R_s (%)	R_s' (%)	Remarks
1	Dec. 1	13—14	G		Cb	8	3.6	-25	1.1	-7	2.5	2.9	-20±5	45	54	Shower
2	6	17—18	PD, D _r		Cb	4	2.1	-15	1.2	-10	0.8	1.9	-14±1	100	114	"
3	18	14—15	G, D _r		Cb, FN	10	2.2	-20	1.0	-12	1.2	1.8	-18±2	98	117	"
4	22	10—11	G, D _r		Cb	9	2.0	-18	1.2	-12	0.8	1.8	-16±2	79	91	"
5	23	10—13	G, D _r		Cb	10	3.1	-27	1.2	-13	1.9	2.5	-24±3	79	99	"
6	Jan. 7	14—16	SD, I _r		As ²	10	4.0?	-22	2.5	-16	1.5	3.7	-20±2	100	120	Warm Front
7	7	16—17	G, D _r		Cb	10	2.7	-18	1.2	-10	1.5	2.3	-16±2	93	106	Cold Front
8	13	12—15	G, D _r		Cb	10	2.8	-22	1.1	-8	1.7	2.3	-18±4	74	88	Shower
9	15	16	G		Cb	8	3.5?	-32	1.1	-15	2.4	2.8	-28±4	78	102	"
10	18	10—16	D _r		Cu	5	1.6	-15	1.2	-12	0.4	1.5	-14±1	86	98	"
11	" 19	12—15	PD, DP _r		As ³	10	4.0	-18	2.7	-9	1.3	3.6	-15±3	93	107	Warm Front
12	19	15—18	D _r , G		Cb, FN	8	—	—	0.9	-7	—	—	—	—	—	Occluded Front
13	19	18—21	N _r		Cb	10	2.7	-12	1.1	-7	1.6	2.2	-10±2	92	101	"
14	19	21—23	D, N _r		Cb	10	3.1	-18.5	1.1	-4	2.0	2.7	-15±3.5	90	102	"
15	20	10—14	G, D _r		Cb	10	2.0	-16	1.1	-10	0.9	1.8	-15±1	83	97	Shower
16	" 21	09	G	DP _r	Cb	9	1.8	-19.5	1.2	-15	0.6	1.6	-19±0.5	67	81	"
17	24	16	SD _r	D _r	Cb	7	1.9	-22	1.2	-16	0.7	1.7	-21±1	80	100	"
18	25	11—17	SP, I _r	DP _r	Cb	10	2.3	-29	1.2	-20	1.1	2.0	-27±2	76	98	"
19	26	09—12	SP _r	SD _r , D _r	Cu, Cb	7	2.2	-21	1.2	-14	1.0	1.9	-20±1	78	94	Thin cloud
20	28	09—10	D _r		Cb	10	4.0?	-22	0.8	-2	3.2	3.3	-16±6	93	108	Shower
21	" 29	14—17	D _r , G	DP _r	Cb, FN	10	2.0?	-18	1.0	-10	1.0	1.7	-16±2	72?	84	"
22	30	09	P	SD	Cb	8	2.2	-23	1.1	-16	1.1	2.0	-21±2	69	84	"
23	31	13	I _r	DP	Cu, Cb	10	2.0	-24	1.2	-18	0.8	1.8	-23±1	65	81	Thin cloud
24	Feb. 1	11	P		Cb	10	2.1	-24	0.9	-15	1.2	1.7	-21±3	70	85	"
25	3	11, 14	D _r		Cu, Cb	10	2.4	-16	1.2	-9	1.2	2.1	-14±2	81	93	"
26	" 6	12—13	P	SP _r	Cb	9	1.9	-24	1.1	-18	0.8	1.7	-22±2	60	74	"
27	8	14—16	SP _r	P	Cb	10	2.6	-27	1.2	-16	1.4	2.2	-24±3	60	78	Shower
28	15	14—16	SP		As ²	10	4.0	-25	3.0	-20	1.0	3.7	-23±2	90	114	Warm Front
29	15	18—19	P, SP		As ³	10	4.0	-24	2.5	-16	1.5	3.6	-22±2	80	100	"
30	15	19—20	C, AC	SP, D	As ⁴	10	4.0	-24	2.5	-16	1.5	3.6	-22±2	80	100	"

No.	Date	Time (h)	MCF	SMF	Cloud Form	Cloudiness	H_t (km)	T_t (°C)	H_b (km)	T_b (°C)	Z (km)	H_s (km)	$T_s \pm t$ (°C)	R_s (%)	R_s' (%)	Remarks
31	Feb. 15	20-22	P, SP		Ns	10	3.5	-21	2.0	-12	1.5	3.0	-19±2	85	100	Warm Front
32	15	22-23	C _r		Ns	10	2.9	-17	1.5	-9	1.4	2.5	-14±3	100	110	"
33	15	22-23	CN _r	N	FN	6	1.5	-9	1.0	-6	0.5	1.4	-8±1	100	108	"
34	15-16	23-02	DP _r	C _r	Ns	10	2.7	-15	1.5	-8	1.2	2.3	-14±1	100	113	"
35	18	15-18	I _r , G		Cb	10	3.0	-27	1.2	-13	1.8	2.6	-24±3	67	83	Shower
36	" 19	16-18	PD _r	D _r	Cb	10	2.6	-22	1.2	-11	1.4	2.2	-20±2	90	106	"
37	20	18-21	AC, CP		Cb	10	5.0?	-37	1.2	-10	3.8	4.0	-30±7	84	112	Trough
38	21	13-14	D _r	DP _r	Cb	7	2.0	-17	1.2	-11	0.8	1.8	-16±1	76	90	Thin cloud
39	25	10-11	P, SP		Cb	10	2.0	-20	1.2	-13	0.8	1.8	-18±2	70	83	"
40	28	15-21	SP, AC		As ^s	10	5.8	-30	2.5	-13	3.3	5.0	-25±5	80	102	Warm Front
41	" 28	21-24	C, SP		As ^d	10	5.8	-30	2.2	-11	3.6	4.9	-25±5	87	114	"
42	29	11-12	SP, P		Ns	10	4.5?	-20	2.0	-9	2.5	3.9	-18±2	97	115	"
43	Mar. 1	17-19	G, D _r	DP _r	Cb	10	2.6	-23	0.9	-10	1.7	2.1	-19±4	95	114	Cold Front
44	1	19-21	G		Cb	10	2.6	-23	0.9	-10	1.7	2.1	-19±4	95	114	"
45	2	11-16	SP, PD _r	D _r , SD	Cb	10	2.8	-24	1.0	-10	1.8	2.4	-21±3	91	109	Shower
46	" 2	16-20	G, DP _r	D _r	Cb, FN	10	2.8	-25	0.6	-8	2.2	2.3	-20±5	92	110	"
47	3	10-11	P _r	PD _r	Cb	10	2.3	-21	1.2	-13	1.1	2.0	-19±2	83	100	"
48	7	09-13	PP	PD	Ns, FN	10	5.0	-24	1.2	-6	3.8	4.0	-18±6	91	110	Warm Front
49	7	13-18	N, PP _r		Ns, FN	10	3.0?	-12	1.4	-6	1.6	2.3	-8±4	93	100	"
50	7	18-20	PP _r , P		Cb	10	3.7	-21	1.2	-6	2.5	3.4	-17±4	90	105	Occluded Front
51	" 8	10-13	AC	SP	As ₂	10	4.5?	-25	3.2	-20	1.3	4.2	-24±1	96	120	Rear of cyclone
52	9	17	G		Cb, FN	10	2.9	-21	1.3	-10	1.6	2.4	-18±3	80	95	Cold Front
53	13	11-14	SP _r , AC	G, PD _r	Cb	10	4.4	-32	1.5	-10	2.9	3.6	-26±6	100	126	"
54	19	09-11	G, DP _r		Cb	10	2.0	-12	1.2	-7	0.8	1.7	-10±2	100	110	"
55	22	10-14	N _r , CN _r	G	Cb, FN	10	1.8	-11	0.4	-1	1.4	1.4	-8±3	100	108	Shower
59	27	11-12	D _r		Cu, Cb	6	2.4	-18	1.1	-8	2.3	2.1	-15±3	88	102	Cold Front
57	Apr. 6	17-20	N _r , P _r		Cb, FN	10	2.2	-13	0.3	0	1.9	1.6	-9±4	-	-	"
58	18	20-22	N _r		Cb	10	2.3	-10	0.9	-4	1.4	2.0	-8±2	100	108	Trough

MCF (Main Crystal Form): G; Graupel, D; Dendrite, P; Plate, C; Column, N; Needle, I; Irregular crystal, SD; Spatial dendrite, SP; Spatial Plate, DP; Dendrite with Plate Extension, PD; Plate with dendritic Extension, PP; Plate with broad branches, AC; Assemblage of Columns, CP; Column with Plate at one end, CN; Column with Needle Extension. Suffix "r" denotes the "rimed crystal".

SMF; Sub-main Crystal Form.

H_t ; Cloud-top Height, T_t ; Cloud-top Temperature, H_b ; Cloud-base Height, T_b ; Cloud-base Temperature, Z ; Cloud Thickness, H_s ; Snow-forming Height, $T_s \pm t$; Snow-forming Temperature, R_s ; Relative Humidity at H_s , R_s' ; Relative Humidity with respect to ice at H_s .

前述のように、地上に降つて来る雪には、多種多様のものを含んでいる事が多く、また「樹枝つきの角板」「つづみ型の角柱」などのように結晶形が複合したものも多い。複雑な構造をもつ雲内部で一様な結晶が生成される事は先ず無いと言つた方がよく、事実今冬季間中においても例2で述べた1月18日以外はすべて2種類以上の結晶を含んでいた。

Weickmann は Cb の飛行機観測を行なつて、高度 6000~6500 m (温度 $-15^{\circ}\sim-20^{\circ}\text{C}$) の狭い範囲内で、過冷却水滴、星状六花、六角板など多種類の結晶が共存するのを観測した。また、前記研究者の行なつた室内実験においても、例えば Nakaya-diagram を見ると、樹枝状六花の適温の -15°C においても、飽和度の低いところでは扇状結晶、角板が生成されるし、aufm Kampe et al. によると -20°C 附近では、二次元的および三次元的の種々の結晶が存在し得ることを示している。

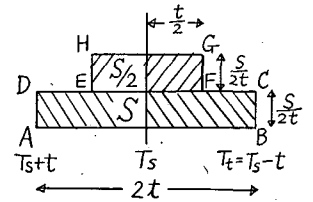
従つて厚い雲内で出来た結晶をただ単に T_0 附近の温度で生成されたとするのは危険である。しかしながら、前述のように主要結晶形を採用し、且つ $(T_0 \pm t)$ なる幅をもたしてあるので、物事を平均的に見ている事になり、この危険は相当減殺されるだろう。そこで次の方法によつて先ず結晶形と温度の関係を調べた(これは Gold 等の方法と本質的に同じである)。主要結晶形の生成温度 $(T_0 \pm t)$ が求めたので、 T_0 を中心として、一定面積 S を $2t$ で除した値 $(S/2t)$ を高さとして第27図のように矩形 ABCD を作る。次に T_0 を中心として ABCD の上に、高さ $(S/2t)$ 幅 t の矩形 EFGH を図のようにしてのせる。亜主要結晶形の時には夫々の矩形の高さを半分にした。各結晶形ごとにこのような手続きを繰り返して、段々積み重ねた結果を第28図に示す。

このような方法は、上層の状態が第1図の $L-L'$ のように $(T_0 - T_0)$ が小さいときは $(\pm t)$ が小さくなるためヒストグラムの高さが高くなり、逆に $M-M'$ のように $(T_0 - T_0)$ が大きいときは $(\pm t)$ が大きくなつて棒の高さが低く幅広くなる。これは雲厚が大きい程、また、大気的不安定度が大きい程、生成温度 T_0 が不正確なものになり、且つ生成温度範囲が幅広くなるであろうから、この方法は割に合理的なものと考えられる。

ABCD の上に EFGH をのせたのは T_0 附近に重みをかけた事であるが、雲内部の上昇流は、Cb などでは上に向ふに従つて増加するという Thunderstorm Project²⁷⁾ などの結果にまづ違もなく、上昇気流のため発生初期の小結晶は雲頂に向つて昇る可能性が大きいので、平均的な意味では大きな間違いはないと考えられる。SMF の時、面積を半分にしたのは MCF に重みかけた事に外ならない。

このようにして作つた結果が第28図であるが、これを見てわかる事は

(i) 針状結晶の最大値は -8°C にあつて Nakaya の実験結果と一致している。



第27図 主要結晶形と温度の関係を調べるヒストグラム(第28図)を作る時に使う方法

Fig. 27. In plotting fig. 28, each observation is given an area of certain units $(\frac{1}{2}S)$ centered at $T_0^{\circ}\text{C}$.

(ii) 六花の最大値は $-14^{\circ}\sim-16^{\circ}\text{C}$ にあつて、これも極めてよく一致している。

(iii) 角板のそれは $-18^{\circ}\sim-20^{\circ}\text{C}$ にあつて大体一致しているが、Nakaya の -12°C 附近に生成さるべきものに関しては、あまりはつきりした結果は得られなかつた。

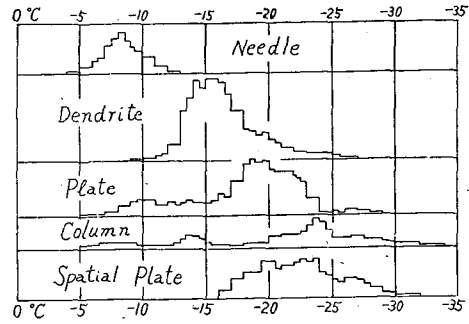
(iv) 角柱の最大値は $-23^{\circ}\sim-25^{\circ}\text{C}$ にあつて大体の傾向は一致している。ただし Nakaya の -10°C 近辺に出来る筈の角柱に関しては、はつきりした結果が得られなかつた。 -13°C に

一つの極大があるが、前述のように角柱は温暖前線に伴つた As, Ns などの層雲系の雲に由来する事が多いので、対流性雲より上昇流が弱く、そのためもつと下層で MCF が形成されると考えれば、この -13°C の極大も、また -23°C の極大ももう少し高温側に平行移動して Nakaya の実験結果に近づく可能性はある。

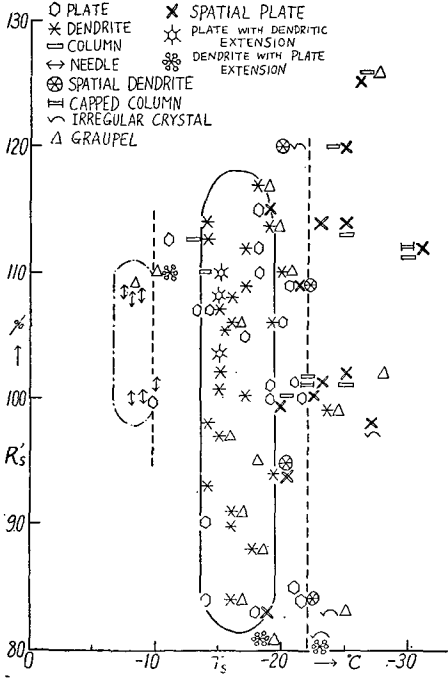
(v) 角板集合(側面結晶); 不規則な結晶の代表として Nakaya の分類による Spatial Plate を採用したが、最大は $-20^{\circ}\sim-24^{\circ}\text{C}$ にあつて、これも Nakaya の結果とよく一致している。

以上を要約して、温度に関しては、我々の結果は Nakaya の結果と極めてよく一致している事がわかる。

次に湿度について考えてみよう。生成温度 T_s を横軸にとり、生成高度の湿度 R_s を氷に対する値になおした湿度 R_s' を縦軸にとり、その時観測された MCF をパラメーターとして図にしたのが第 29 図である。これは全く Nakaya-diagram に相当するものである。温度に関しては前述の如くよく一致しているが、湿度に関しては大分趣を異にしている。針、六花、角板に関しては定性的にはよく似ているが、氷に対する値に換算しても、100% に達しない領域が多く存在する事である。



第 28 図 主要結晶形と生成温度の関係
Fig. 28. Distribution of main crystal types with temperature



第 29 図 主要結晶形と、生成温度 (T_s), 生成湿度 (R_s') の関係

Fig. 29. Distribution of observed main crystal types with temperature (T_s) and humidity (R_s'). R_s' : relative humidity with respect to ice.

氷晶が生成される場合、氷飽和か氷飽和か

に関しては可成り多くの研究があるが、例えば Nakaya-diagram は氷飽和で表示し、氷飽和と水飽和の間でも角柱、角板、六花などが生成し得る事を示している²⁹⁾。また、F. d'Albe³⁰⁾ は「如何なる氷晶も水飽和以上に達しなければ形成されない」と結論し、従つて彼は、氷相は必ず液相を通つて達せられ、Wegener 流の昇華核の代りに“Freezing Nuclei”を主張した。また、Weickmann³¹⁾ は「氷晶は水飽和に非常に近付いた時にのみ(平均湿度 97%) 形成される」と結論して、F. d'Albe と同様、Freezing Nuclei を主張した。これら多くの人々の結論から Houghton³²⁾ は、「氷飽和またはそれ以下で昇華が起るような核は大気中には存在しない事は多分真実であろう」と述べている。従つて“氷自身”を除いては、大気中には眞の昇華核は存在しない事になる筈であるが、事実氷飽和以下の条件で多くの雪が観測されたのはどのような訳なのであろうか。

先ず考えられる事は、(i) ゾンデが果して雪の母体雲中に突入したか否か、という事であるが、殆んど凡ての場合、雲量が 10 であつた事を考えると、少なくとも雲のどこかに突入した筈だから、100% またはその近くになつている筈である。(ii) ゾンデの湿度計の「おくれ」、精度。現在使用しているゾンデの湿度計はロール・プレスされた毛髪を用いていて、低湿度においてもタイム・コンスタントが短かく、可成りの精度を持ち、室内での静的な検定では最大誤差±3% 程度といわれている。実際の飛揚時には、精度はこれより下るだろうが、それだけでは到底氷面湿度 70~80% という値は説明出来ない。(iii) そこで、氷飽和に達していない日を調べて見ると、殆んど例外なしに雲厚が非常に薄い事がわかつた。例えば Jan. 31, Feb. 1, Feb. 3, Feb. 6, Feb. 25 の各日は状態図その他から求めた雲厚は夫々、800 m, 1200 m, 1200 m, 800 m, 800 m であるが、筆者自身の目視観測には「雪は薄くて、屢々太陽や青空がすけて見え、時々積雲系の雲が流れ去つた」と記されているので、ゾンデはこの対流性の雲には突入しないで、その周囲の雲の非常に薄い場所を通り抜けてしまつたため、このような低湿度しか得られなかつたと解釈するのが妥当であらう。

要するに、時間的にも空間的にも変化のはげしい雲の内部の事を、1日僅か2回のゾンデ資料から求めるのは無理な事ではあるが、少なくとも定性的には意味があるであらう。

とにかく、雲内部のどこかに氷飽和の所があつて Eiskeim を生成するか、若しくは、母体雲の更に上層にある Ci や Cs などから氷晶が降下して来て核として働けば、それから後は氷について未飽和であつても、氷飽和以上でありさえすれば昇華で成長し得るから、氷飽和になつていなかつたからといつて、そんなに気にする必要はなからう。

このようにして我々は、湿度はともかくとして、温度に関しては Nakaya と大体一致した結果を得た。ところで我々は雪の主要結晶形は主として、母体雲の上半部(特に上限から 1/4 の所附近)で生成される、という大きな仮定をしたが、雲厚の頻度を調べてみると、800 m~2000 m が最も多く、平均約 1.6 km である。従つて雲頂から 1/4 というのは 0.4 km になり、実はたまたま Gold-Power の 1000~2000 ft (300~600 m) に平均的に見て一致している。

対流性の雲においては、主要結晶形生成レベルとして雲頂附近をとつた方がよいような考え方もあるが、もし雲頂と仮定すると、生成温度は $(T_s - t)$ となり、 t の最大頻度は 2°C 、平均 2.8°C であるから、Fig. 28 も Fig. 29 も平均 $2\sim 3^\circ\text{C}$ ずつ低温側にずれる事になり Nakaya の結果と少し食い違つて来る。とにかく Nakaya の実験結果とよく一致したという事はこの仮定が大体平均的に見て正しい事に外ならない。ただ、前述の通り、角柱のようにその源が主として層雲系の雲にあつた場合には約 3°C 、Nakaya のそれとずれて低温側に出すぎているのは、上昇気流が比較的弱い層雲系の場合は、主要結晶形決定層として、雲の大体中央附近 (1/2 のところ) をとつた方がより適當のようである。しかし角柱の場合は例が少ないため、更に少なくとももう一冬観測しないとつきりした事はいえない。

VI. 結 論

以上の事を要約すると次のようになる。

(i) 雲 厚

例 2、例 9 で述べたように、かなり大きな結晶でも薄い雲から (400 m 位) 降り得る事がわかつた。雨の場合だと Bowen³²⁾、Ludlam³³⁾ 等が述べた様に、対流性の “Warm Cloud” からの雨は、その厚さが約 2 km 以上にならないと起らぬ事を結論したが、雪の場合はそれよりずっと薄くても直径 7 mm に達する六花や、水滴に換算して $2\sim 3$ mm の大きなあられを多数降らした事は注目に値しよう。

(ii) 雲 形

(a) あられ、平面六花、立体樹枝、不規則結晶は対流性雲に由来する事が多く、(b) 角柱、針、側面結晶は層雲系の雲に由来する事が多い。(c) 平面角板は、そのどちらからでも降つて来る。

(iii) 主要結晶形の生成レベル

主要結晶形の生成レベルを雲頂から 1/4 のところにとつたのは大体正しいと思われる。ただし層雲系の雲の時は、もう少し下層にとつた方が適當かも知れない。

(iv) 主要結晶形と温度

主要結晶形と生成温度の関係は第 28 図、第 29 図に示したように、Nakaya の実験室内での結果とよく一致している。すなわち、(a) 針は -8°C 前後で、(b) 平面六花は -15°C 前後で、(c) 平面角板は -19°C 附近で、(d) 角柱は -24°C 前後で、(e) 側面結晶は -22°C 附近で生成された結果になつた。

(v) 主要結晶形と湿度

第29図のように、氷上飽和に換算しても湿度100%に達しないものが大分出て来たが、これは雲厚が非常に薄く、その下を対流性の雲が団塊状をなして流れているような場合であった。大部分の結晶は水飽和と氷飽和の中間領域で生成され、水飽和に達している場合は割に少なかった。

VII. 摘 要

以上の研究は、僅か一冬の結果であり、その上1955~1956年の冬は暖冬で、例年よりも雪が少なく、理想的な観測はあまり出来なかつた。また、此の種の研究には、元来レーダーや飛行機によつて、雲の状態、降雪区域などを決める事が望ましいのであるが、それが望めない現在は、ゾンデ観測に頼る外はない。従つて少なくとももう一冬観測を行なつて、更に確実な資料の集積が必要と考えられる。

おわりに、この研究は、当研究所の小林禎作氏²⁴⁾が以前から企図されていた事を筆者が実施したものであるが、同氏からは終始適切な助言と、援助をいただいた。また、種々有益な討論、御教示をいただいた吉田順五教授を中心とする雪氷研究グループ、堀健夫教授、写真をいただいた小島賢治氏ならびに甚大な御好意をいただいた气象台の方々に対して、心から感謝の意をあらわす次第である。この研究の一部は北海道庁の科学研究補助金によつた。

文 献

- 1) Stüve, G. 1931 Beitr. z. Phys. d. fr. Atm., **12**, 170.
- 2) Nakaya, U. and Y. Sekido 1936 General classification of snow crystals and their frequency of occurrence. J. Fac. of Sci., Hokkaido Univ., Ser. II, **1**, 243.
- 3) 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. 気象集誌, **30**.1.
- 4) 今井一郎 1954 季節風による降雪の研究. 気象集誌, **32**. 192.
- 5) Gold, L. W. and B. A. Power 1954 Dependence of the forms of natural snow crystals on meteorological conditions. Jour. of Met., **11**, 35.
- 6) Nakaya, U. 1954 Snow crystals, natural and artificial. Harvard Univ. Press.
- 7) 樋口敬二 1954 降雪の結晶形, 大きさ, 質量の同時観測の方法について. 気象集誌, **32**. 77.
- 8) Schaefer, V. J. 1941 A method for making snowflake replicas. Science, **93**. 239.
- 9) (2)に同じ.
- 10) 例えば Schaefer, V. J. 1951 Snow and its relationship to experimental Meteorology. Compendium of meteorology. Amer. Met. Soc. 221.
- 11) (6)に同じ.
- 12) 雪の結晶 1950 岩波写真文庫, **7**.
- 13) Weickmann, H. K. 1949 Die Eisphase in der Atmosphäre. Ber. dtsh. Wetterd. US-Zone, Nr. **6**.

- 14) aufm Kampe, H. J., H. K. Weickmann and J. J. Kelly 1951 The influence of temperature on the shape of ice crystals growing at water saturation. *Jour. of Met.*, **8**. 168.
- 15) (13) に同じ.
- 16) (10) に同じ.
- 17) Browne, I. C. 1953 *Quart. J. R. Met. Soc.*, **79**. 442.
- 18) Murgatroyd, R. J. 1955 Cloud physics at the meteorological research flight. *Archiv für Met., Geophys. und Bioklimat.*
- 19) (4) に同じ.
- 20) 中谷宇吉郎 例えば 1938 雪の結晶の研究. 気象集誌, **16**, 臨時号.
- 21) Brewer, A. W. and H. P. Palmer 1949 Condensation processes at low-temperatures and the production of new sublimation nuclei by the splintering of ice. *Nature*, **164**. 312.
- 22) Nakaya, U. (6), (20) に同じ.
- 23) aufm Kampe et al (14) に同じ.
- 24) Weickmann, H. K. (13) に同じ.
- 25) Schaefer, V. J. (16) に同じ.
- 26) Shaw, D. and B. J. Mason 1955 The growth of ice crystals from the vapour. *Phil. Mag.*, **46**. 249.
- 27) Thunderstorm, The. 1949 U. S. Weather Bureau, Washington, D. C.
- 28) 例えば (6) 参照.
- 29) Fournier d'Albe, E. M. 1949 Some experiments on the condensation of water vapour at temperatures below 0°C. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **75**. 1.
- 30) (13) に同じ.
- 31) Houghton, H. G. 1951 On the physics of clouds and precipitation. *Compendium of Meteorology*, Amer. Met. Soc. 165.
- 32) Bowen, E. G. 1950 The formation of rain by coalescence. *Austr. Jour. Sci.* **3**. 193.
- 33) Ludlam, F. H. 1951 The production of showers by the coalescence of cloud droplets. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **77**. 402.
- 34) 小林禎作 1955 レプリカによる降雪の観測について. *天気*, **2**, 1.

Résumé

Although the importance to investigate the relation between the type of falling snow crystals and the upper-air conditions has often been pointed out, only few attempts with this end in view have hitherto been made.

Of recent Gold and Power attempted to correlate the natural snow crystal types to the upper meteorological conditions under which they are formed, and could show the dependence of crystal types on temperature which was in reasonable agreement with the experimental results of Nakaya.

As for the upper-air data, however, they used of necessity those extrapolated from the neighbouring radiosonde stations, because of the absence of a sonde ascent at their own Observatory, Montreal, and made relatively little use of humidity data to locate the cloud layers for the reason that they are least reliable and involved further errors in extrapolations.

We have daily radiosonde ascent in our city, Sapporo, and the accuracy of hygrometer used in sonde has been much improved by the use of the roll-pressed hairs, which

therefore permits us safely to use the three elements measured by sonde.

Observations were made during the winter of 1955-1956 for 45 days in our Institute. A number of snow crystals were caught on a clean glass (18×22.5 cm) and, being immediately brought into the "low temperature room" (-10°C), where they were observed by various means photomicrograph, shadow photograph, replica, etc.

Table 1 shows the results, in which by main crystal form (MCF) is meant that the crystal form in question was over 1/4 in number of the total. A rough determination of cloud conditions aloft could be made from a consideration of the general synoptic weather situation and from the sequence of surface observations, especially of cloud-base heights, cloud types, cloudiness, and cloud directions. An emagram was used for estimating the cloud-top height, taking into consideration the lapse rate, moist adiabatic layers, humidity distributions, upper wind directions, etc.

In winter we usually have a subsidence inversion or an absolute stable layer aloft, so that the top height of non-frontal cloud easily be determined, while in warm frontal cloud the determination was not so easy.

The cloud level mainly responsible for snow formation was assumed to be located at 1/4 from the top of the cloud, and the temperature (T_s) and the humidity (R_s) at the level were used for our discussions (see Fig. 1). Relative humidity with respect to ice (R_i) was also taken into account.

The results obtained can be summarized as follows:

(1) Fig. 28 shows the occurrences of main crystal types related to the estimated temperature, which is in good agreement with the results of Nakaya.

(2) The distribution of the crystal forms with temperature and relative humidity with respect to ice, as shown in Fig. 29, is also in qualitative agreement with Nakaya-diagram.

The fact that the snow crystals were formed in the unsaturated region, which is unreasonable, can be explained as follows:

(a) The formation of snow crystal in this region corresponds, in many cases, to those observed when the cloud layer was so thin that the sun or the blue sky could be seen more or less clearly through it.

(b) The radiosonde itself did not enter the snow-forming cloud, but passed through the unsaturated region among the cloud cells.

(3) Dependence of crystal types on snow-forming cloud forms is shown in Fig. 26, which shows that graupels, dendritic, spatial dendritic and irregular crystals are mainly produced in convective clouds, while columns, needles, and spatial plates come for the greater part from stratiform clouds.

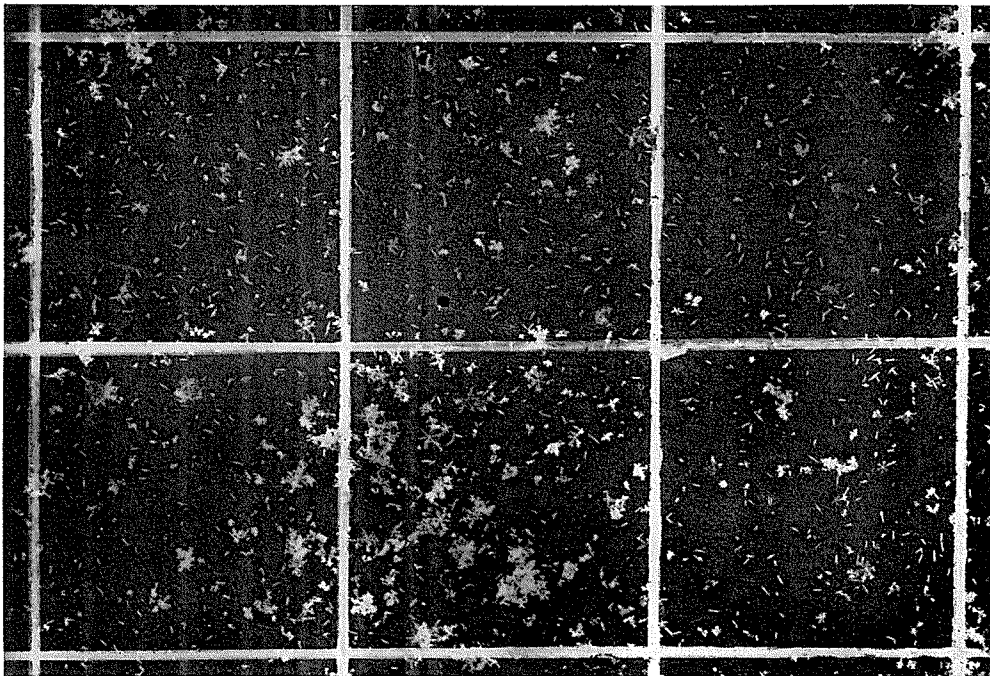


写真 1. 1956年3月7日13時20分の雪を樋口式影写真法でとる (×1)
 Shadow photograph (Higuchi's method.), Mar. 7, 1956

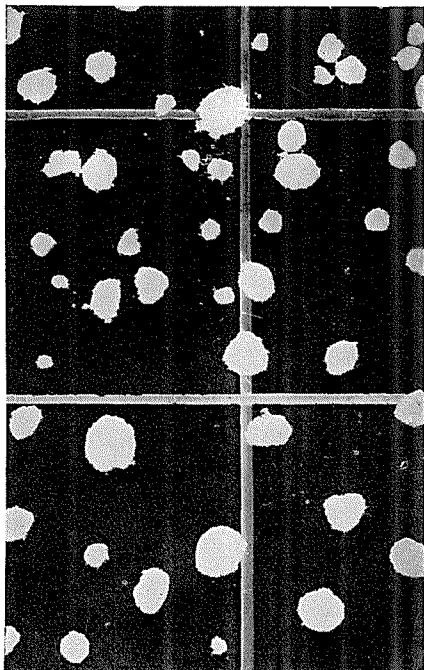


写真 2. 3月1日20時10分 (×1)
 Graupels (Shadow photograph),
 Mar. 1, 1956

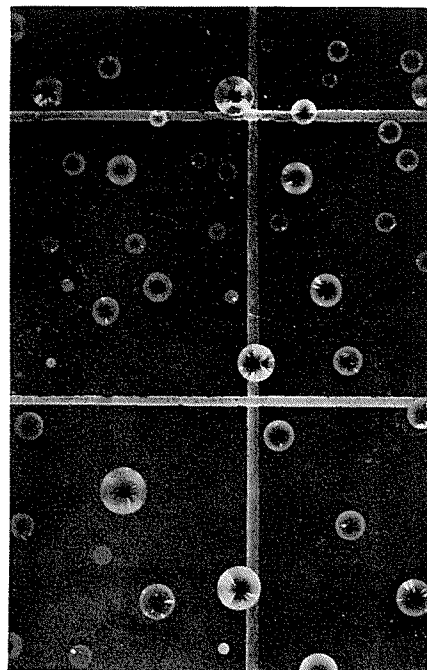


写真 3. 3月1日20時1分 (×1), 写真
 (2)のアラレをとかしたもの (×1)
 Graupels in Photo (2) were melted.
 (Shadow photograph)
 The glass was coated with "Dri-film".

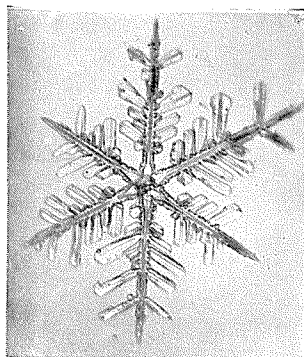


写真 4. 1956年1月18日
14時ころの雪 (写真4, 5, 6は
小島賢治氏の御好意による)
(×13)

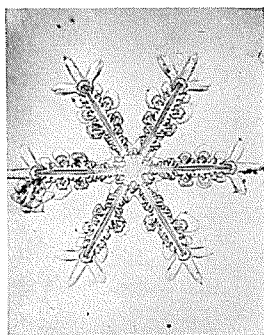


写真 5. 1月18日14時ころ
(×13)

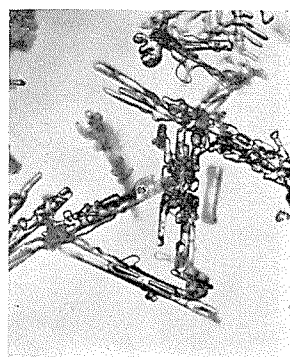


写真 6. 1月19日19時こ
ろの針状結晶 (×13)

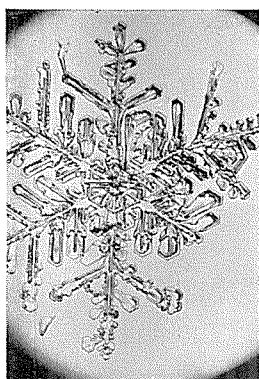


写真 7. 2月19日16時ころ
(×10)

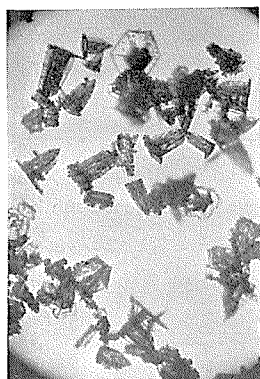


写真 8. 2月20日19時30
分ころ (×10)



写真 9. 2月20日19時40
分ころ (×10)

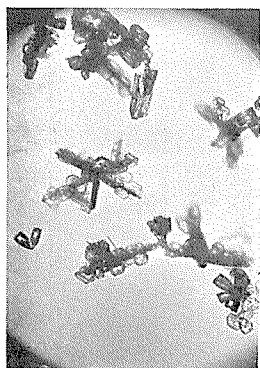


写真 10. 2月28日20時15
分ころ (×10)

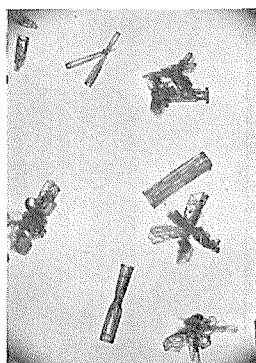


写真 11. 2月28日21時15
分ころ (×10)

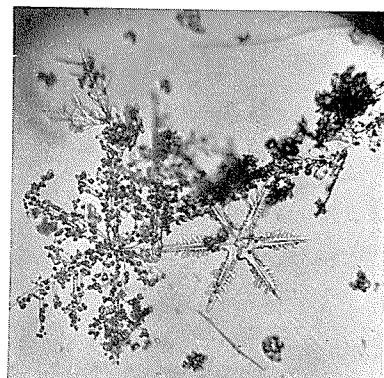


写真 12. 3月1日19時10分ころ
(×10)

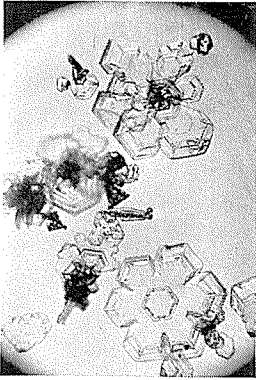


写真 13. 3月7日 09時 20分ころ (×10)

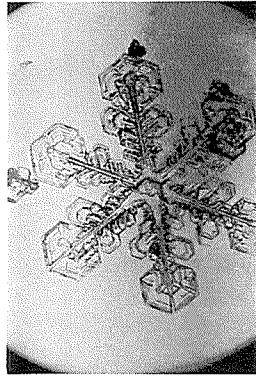


写真 14. 3月7日 10時 45分ころ (×10)

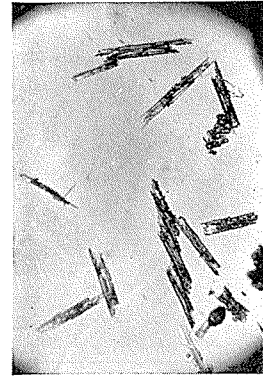


写真 15. 3月7日 13時 30分ころ (×10)

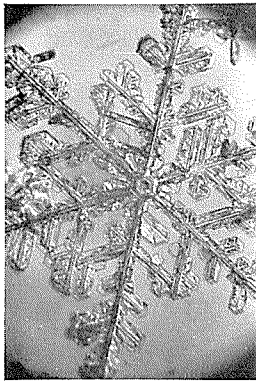


写真 16. 3月7日 14時 30分ころ (×10)

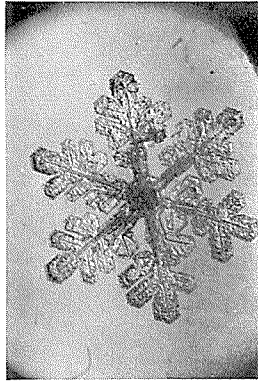


写真 17. 3月7日 14時 30分ころ (×10)

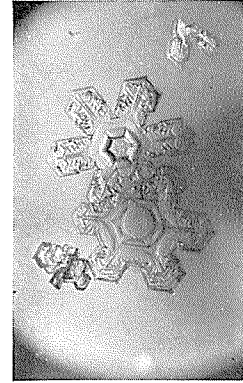


写真 18. 3月7日 15時 20分ころ (×10)

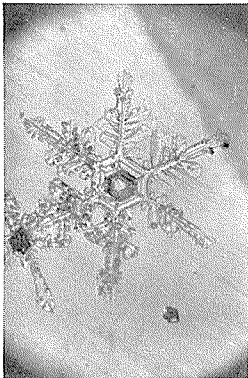


写真 19. 3月7日 20時 00分ころ (×10)

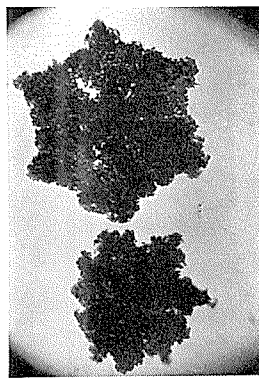


写真 20. 3月19日 10時ころ (×10)

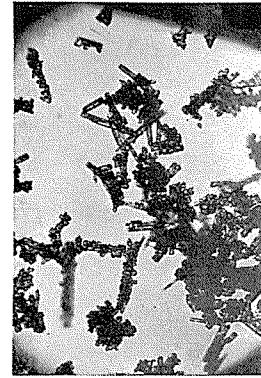


写真 21. 3月22日 11時ころ (×10)