HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	雪片構成要素の短時間変動（序）
Author(s)	藤吉，康志
Citation	低温科學. 物理篇，44，119-130
Issue Date	1986-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18523
Type	departmental bulletin paper
File Information	44_p119-130.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Yasushi FUJIYOSHI 1985 Short-term Variation of Snow Particles Comprising an Aggregate. *Low Temperature Science, Ser. A, 44.* (With English Summary P. 130)

雪片構成要素の短時間変動 (序)*

藤吉康志
(低温科学研究所)

(昭和60年月10受理)

I. 緒　　言

降雪雲が観測点上空を通過する際，降り始めには大雪片ないしはアラレが，降り終わりには小雪片ないしは小粒子が観測されることが多い。その理由としてこれまでは，単純に，雪粒子の落下速度の差から生ずる，風の鉛直シャーによるふるい分けであろうと考えられてきた。特に，降りはじめの雪片と，降り終わりの雪片とは，同じタイプの雪粒子から構成されており，これらの雪片の違いは，落下速度のみであろうと考えられてきた。

しかし，われわれが行った予備的観察から，上述のような解釈が可能なのは，水平方向に一様な層状性の雲の場合であり，対流雲からの降雪の場合には，降り始めの雪片の落下速度が必ずしも大きくは無く，また，雪片構成要素の種類も時間的にかなり変動していることが示唆された[1]。したがって，雪片の粒径分布の時間変化は，ふるい分け以外の効果をも考慮して説明される必要がある。

そこで本報告では，降りはじめから降り終わりまでの間に，雪片を構成する雪粒子のタイプが，どのように変化して行くのかを明らかにし，さらに，そのような変化が生ずる理由について考察を行う。

II. 観測方法とデータ

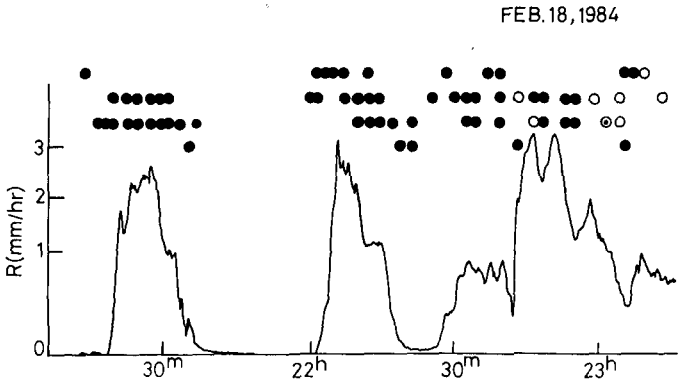
雪片は，1分前後の間隔で，−10°Cに冷やしたシリコンオイル (3000 CSt) で直接受け，後で，−10°Cの低温室内で竹ぐしを使ってほぐし，顕微鏡写真をとった。降雪強度の時間変化は，視程計を用いて測定し，同時に波長3.2 cmのレーダーで降雪雲を観測し，CRT面上のレーダーエコー画像を写真に撮り，その鉛直構造および水平構造を解析した。解析したデータは，1984年2月18日に観測したものである。

III. 結　　果

第1図は，視程計から得た視程の時間変化を示したものである。ただし，縦軸の目盛りは，視程と降雪強度との間の経験式[2]

$$V(\mathrm{km}) = 1.0 \times R^{-2/3}\ (\mathrm{mm/hr})$$

* 北海道大学低温科学研究所業績　第2774号



第1図 視程の時間変化と，降雪粒子の大きさの時間変化

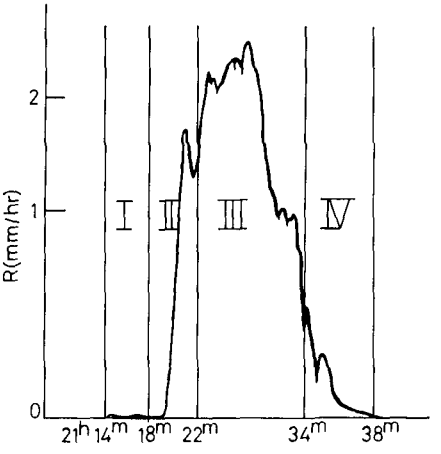
を使って換算した降水強度を目盛ってある。

第1図に示した黒丸（または白丸）は，雪片（またはアラレ）の大きさの時間変化を示したものである。最上段の黒丸（または白丸）は，大雪片（または大アラレ），二段目の黒丸（または白丸）は中雪片（または中アラレ），三段目の黒丸（または白丸）は小雪片（または小アラレ），最下段の黒丸は小粒子がそれぞれ主に降っていたことを示している。22時30分以降は，降雪セルが接近して観測点上空を通過したため，それほど顕著では無いが，22時30分以前ではひとつの降雪系が独立に通過して行き，その際，降り始めには大雪片が，降り終わりには小雪片ないしは小粒子が降っていたことが分る。以下では，21時14分から21時38分までの降雪について詳しく述べることにする。

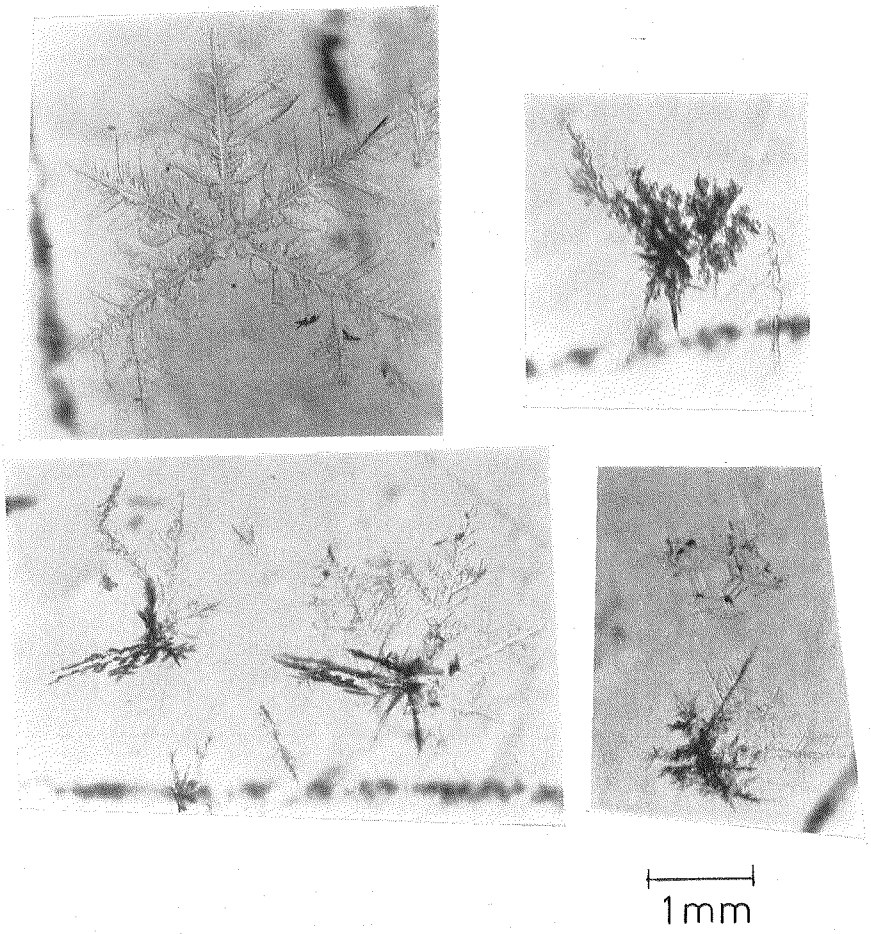
第2図は，第1図の21時14分から21時38分の時間帯を拡大したものである。この時間帯はさらに，以下に述べるような降雪粒子の違いにより，I～IVの時間帯に細分された。

I (21時14分～21時18分)： 大雪片が降り，ほとんど雲粒の付いていない大きな樹枝か，放射樹枝から雪片が構成されている。放射樹枝は，アラレ状粒子か濃密雲粒付きの樹枝の破片（IIの時間帯に見られるものよりは大きい）から長い枝が伸びたものであり，樹枝の中心部分は，角板，広幅六花，扇形六花であり，角の部分が樹枝状に長く発達したものである。第3図は，21時14分に降った大雪片を構成する典型的な雪結晶の写真であり，第4図は同じ21時14分に降った大雪片を構成する雪結晶を模式的に分類したものである。

II (21時18分～21時22分)： 中および小雪片が降り，交叉角板が主であり，放射樹枝がまったく見られない。ただし，21時16分に採取した雪片は，交叉角板と樹枝とがほぼ半分



第2図 21時14分から21時38分までの視程の時間変化

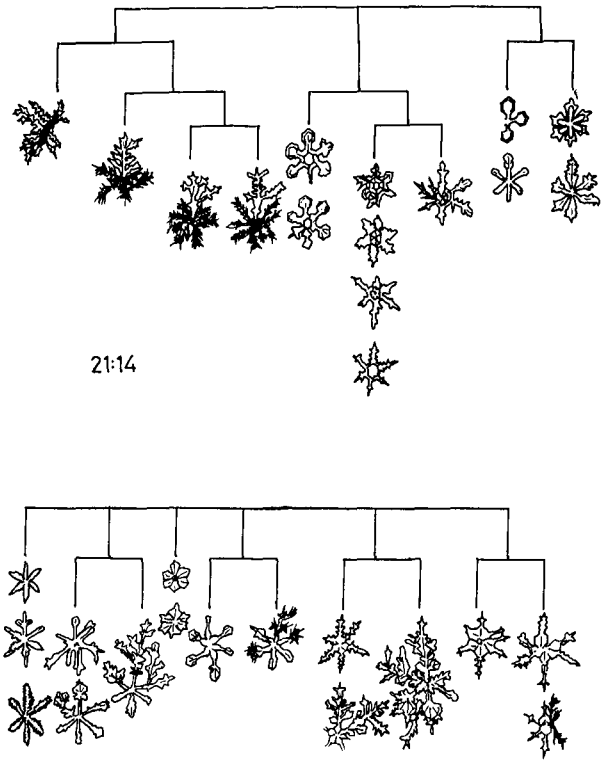


第3図　21時14分に採取した大雪片を構成する典型的な雪結晶の写真

ずつ混ざり合っていた。結晶形が判別できない濃密雲粒付き粒子や，雲粒付き樹枝の破片も雪片を構成しているが，数が少ない。他に，中心部分が小アラレ状粒子で，周りの部分が交叉角板的発達をしているものもある。第5図は，この時間帯に降った雪片を構成する典型的な雪結晶を示したものである。第6図は，21時19分，21時22分に降った雪片を構成する雪結晶を模式的に分類したものである。

III　(21時22分～21時34分)：中および小雪片が降り，最も降雪強度が強く，継続時間も最も長い。雪片は，濃密雲粒付き粒子が主に併合したものであり，交叉角板的発達がほとんど見られない。また，I, IIでは，樹枝の破片はほとんどすべて濃密雲粒付きであったが，III, IVでは，軽度に雲粒が付着したものも含まれていた。第7図は，この時間帯に降った雪片を構成する典型的な雪粒子の例であり，第8図は，21時24分，21時29分，21時33分に採取した雪片を構成する雪粒子を模式的に分類したものである。

IV　(21時34分～21時38分)：小雪片と小粒子とが降り，濃密雲粒付き粒子と，濃密雲粒付き樹枝の小さい破片が見られる。第9図は，この時間帯に見られた雪片を構成する雪粒子



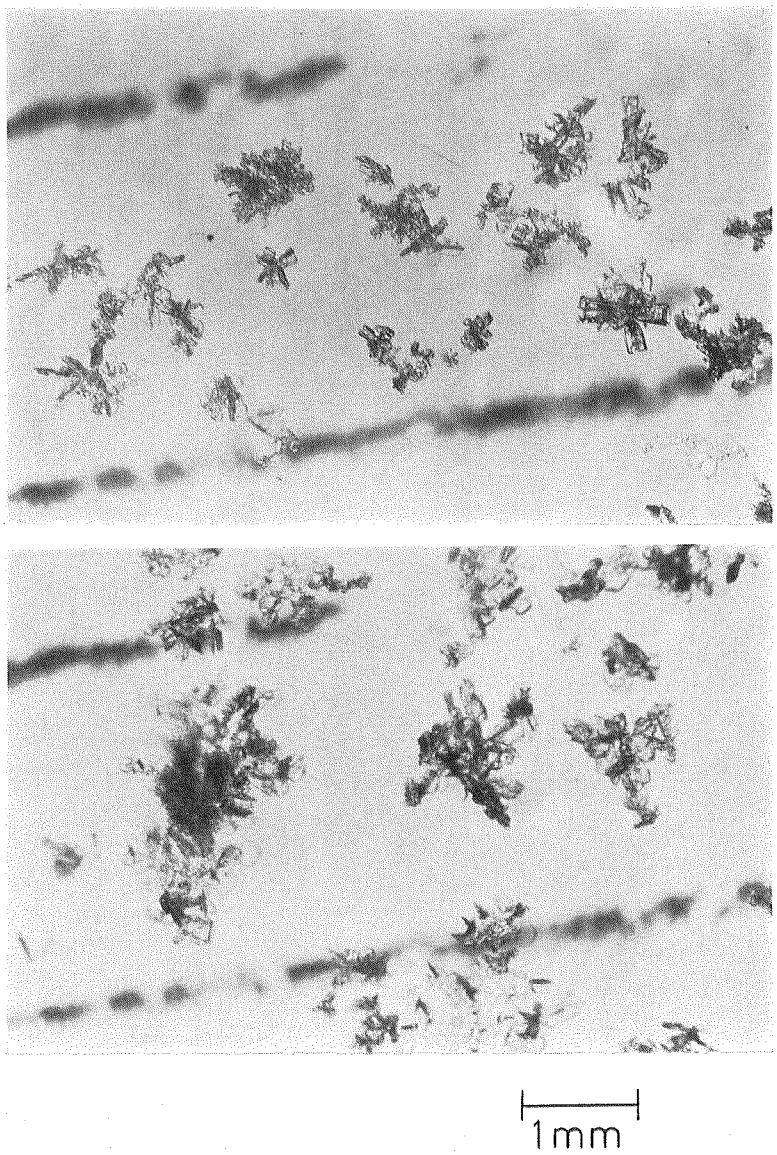
第4図 21時14分に採取した大雪片を構成する雪結晶の模式的分類図

の典型的な例であり，第10図は，21時36分と21時37分に採取した小雪片ないしは小粒子を模式的に分類したものである。

上述の観測結果をまとめて示したものが，第11図である。第11図の下の横軸の目盛りは，雪片が観測点に降りはじめたときからの経過時間と，エコーの移動速度（約11 m/s）と経過時間をかけることによって得た水平距離である。第11図の上の縦軸は，高度とその高度に対応する気温を，21時の札幌管区気象台の高層ゾンデのデータから求めて目盛ったものである。

時間帯Iで降った大雪片は，$-10\sim-20$°Cの温度範囲で昇華成長した，雪粒の付いていない雪結晶から構成されていた。したがって，図中$-10\sim-20$°Cの領域を昇華凝結（deposition）による成長領域とした。ただし，雪片の主な構成要素である放射樹枝の中心部分は，小さなアラレ状粒子か，濃密雲粒付きの樹枝の破片であった。このことは，放射樹枝は，雲粒付着が盛んに生ずる領域内で形成された小アラレ状粒子か，濃密雲粒付きの樹枝の破片が，上空に運ばれた後落下し，$-10\sim-20$°Cの温度層内で昇華成長することによってできたものであることを示している。濃密雲粒付き粒子が，上空から$-10\sim-20$°Cの温度層内に落下してきたことを示すため，-20°C高度より高い領域に大きい黒丸を書き入れた。

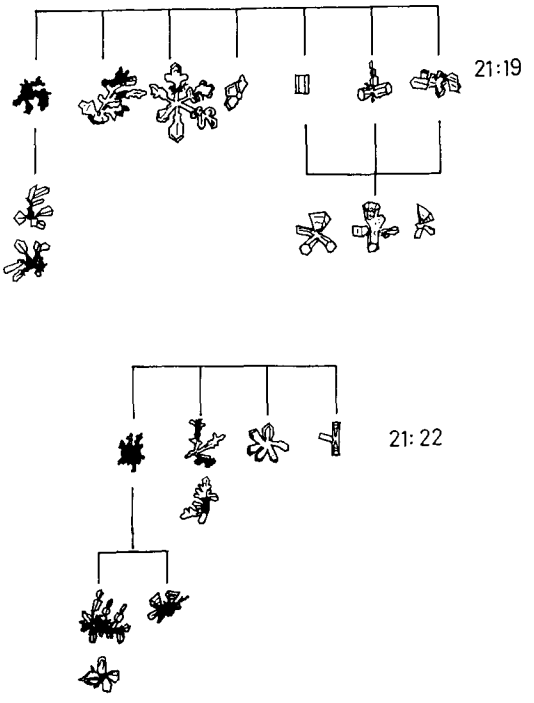
時間帯IIでは，角柱，交叉角板等が見出されていることから，$-20\sim-30$°Cの領域を，昇華凝結による成長領域とした。濃密雲粒付き粒子から交叉角板が成長している粒子は，(1)-30°C高度よりも上空に運ばれた濃密雲粒付き粒子が落下し，$-20\sim-30$°Cの層内で昇華成



第5図　時間帯IIで採取した雪片を構成する典型的な雪粒子の写真

長した；あるいは，(2) 上昇流によって下方から運ばれてきた濃密雲粒付き粒子が，−20〜−30°Cの層内を通過中に昇華成長したことを示している。この濃密雲粒付き粒子は，Iの時間帯で放射樹枝の中心部分に見出された雪粒子よりは小さい。ここで着目すべきことは，Iの時間帯で見られた樹枝的成長が，この時間帯の粒子にはまったく見られないことである。このことは，時間的，空間的に極めて接近して観測された雪粒子でも，上空の雲内では，まったく異なった温度，湿度条件の中で成長していることを示している。

時間帯IIIでは，角柱，交叉角板が見られたことから，−20〜−30°Cが昇華凝結による成長領域であるが，IIの時間帯ほど顕著に発達していないことから，この温度領域での，昇華凝



第6図 21時19分，21時22分に採取した雪片を構成する雪粒子の模式的分類図

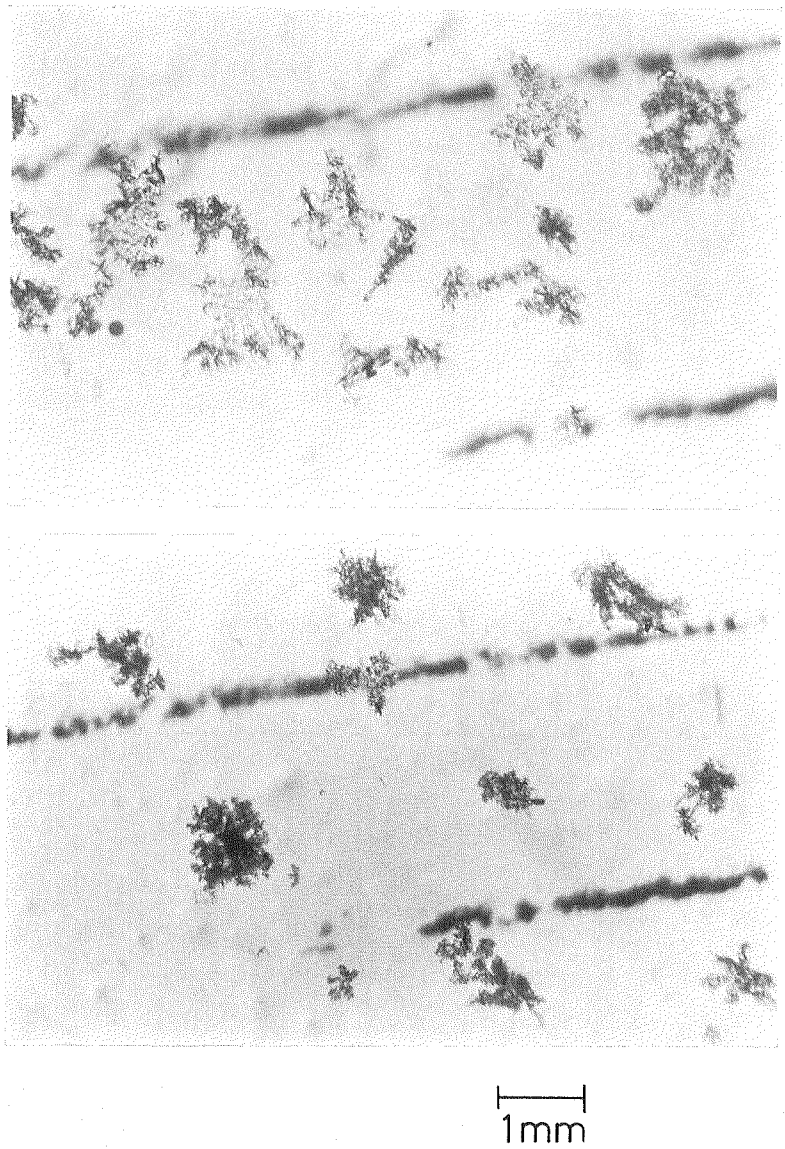
結成長は，(1) II より狭い領域か；あるいは (2) 上昇速度が早い（その領域での滞在時間が短い）ために少ないと考えられる。また，濃密雲粒付きの粒子が主に雪片を構成していたということから，ほとんどの温度領域で，付着凍結 (riming) が主であるとした。ただし，濃密雲粒付きの樹枝の破片や，枝先に雲粒が付着した広幅六花等が混ざっていることから，−10〜−15°C で昇華凝結による成長領域があるはずである。

時間帯 IV では，時間帯 III とほとんど同じタイプの雪粒子が観測されているが，どれも小さいことから，III の粒子のうち，落下速度の特に遅いものが，風によってふるい分けられたと考えられる。したがって，成長等の条件は，III と同じであるとした。

IV. 考　　察

上述の雪片構成要素の時間変化は，雲内における雪粒子のどのような動き，およびそれに伴うどのような成長過程を考えることによって説明できるであろうか。

第12図は，21時の札幌での高層ゾンデのデータから作った，エコーの移動方向（310° から 130° の方向）と平行な面内での，風速の鉛直プロファイルである。縦軸には，高度と，同じくゾンデから得た気温が目盛ってある。エコーは，310° から 130° の方向（図中矢印の方向）に約 11 m/s で移動していた。風向は，高度 0.5 から 2 km までの間ほとんど不変 (315°) で，エコーの走向とほとんど一致している。11 m/s の風速は，高度 1 km（気温 −13°C）と，1750 m（気温 −20°C）の風速に対応する。一方，雪片の構成要素のうち，濃密雲粒付き樹枝の破片がほとんどの時間帯で見付かっていることから，雲を形成する強い上昇流は，少くとも樹枝状成長が

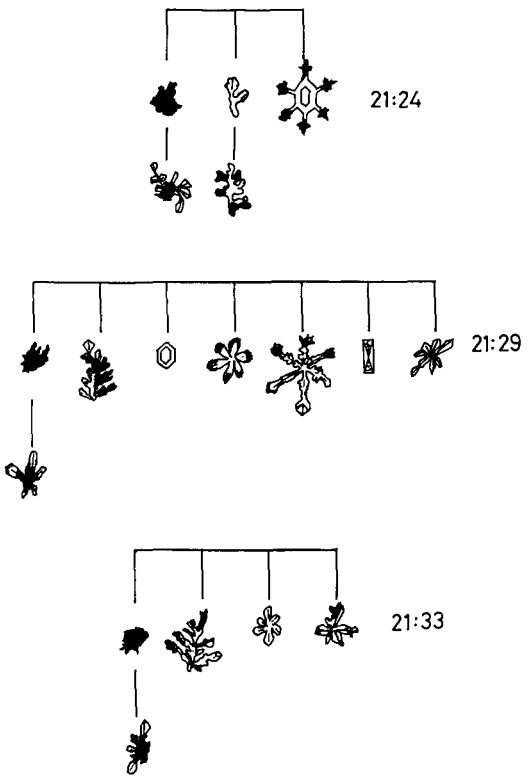


第7図　時間帯 III で採取した雪片を構成する典型的な雪粒子の写真

生ずる温度（−15°C 前後）よりも気温の高い領域，すなわち 1,250 m よりも低い高度で発生していると考えられる。したがって雲底高度は 1 km と推定される。

時間帯 I では，放射樹枝の中心部分を形成する，濃密雲粒付き樹枝の破片ないしは小アラレ状粒子は，雲水量の多い，恐らくは上昇速度の大きい領域で形成され，上空に運ばれた後，雲水量の少い，恐らくは弱い上昇流域を落下しながら樹枝状成長を行うと共に，この領域で成長した樹枝状結晶と併合しながら落下して，雪片を作ったものと思われる。

時間帯 II では，周りが交叉角板的発達をしている小アラレ状粒子ないしは濃密雲粒付き樹枝の破片は，雲水量の多い，恐らくは上昇速度の大きい領域で形成され，(1) 上空に運ばれつ



第8図 21時24分，21時29分，21時33分に採取した雪片を構成する雪粒子の模式的分類図

つ弱まった上昇流域内を上昇しつつ昇華成長し，その後，同じ領域内で形成された角柱集合等と併合して雪片を形成したか，あるいは，(2) −30°C 高度よりも上空に運ばれた後，弱い上昇流中を落下しながら昇華成長した後併合して，雪片を形成したものと考えられる。

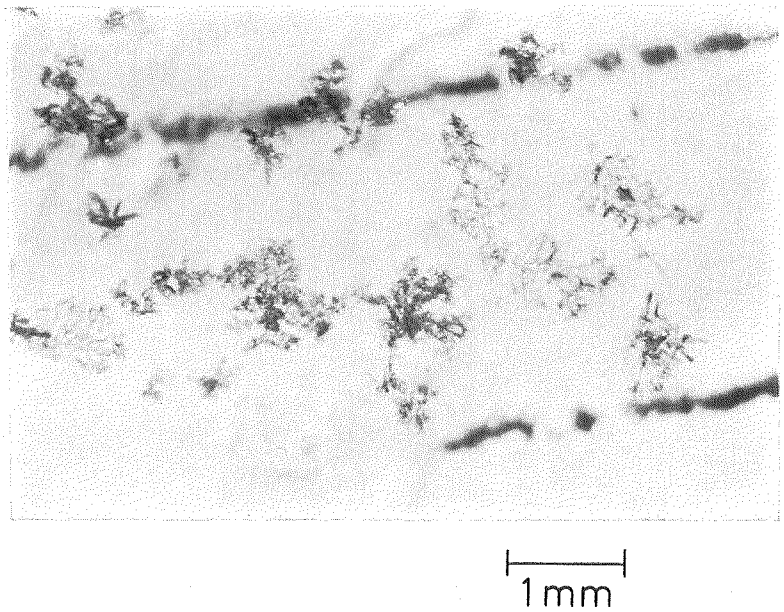
時間帯 III では，小アラレ状粒子ないしは，濃密雲粒付き樹枝の破片は，雲水量の多い，恐らくは上昇速度の大きい領域で形成され，(1) 上空に運ばれつつ併合した後雲外に出る；(2) 雲頂部から雲外へ運び出された後，落下しながら併合；(3) 上空に運ばれた後，雲水量の多い強い上昇流域を下降しつつ互いに併合して雪片を形成したかのどれかであると考えられる。

時間帯 IV は，III で形成された雪粒子が，単に風によってふるい分けられたものであろう。

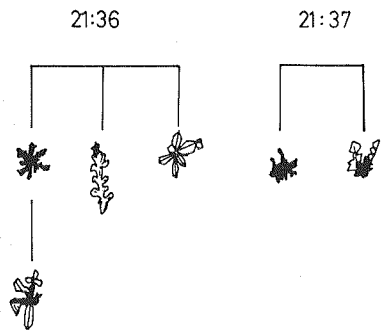
このように，いくつかの可能性を同時に持ってはいるが，各時間帯で見出された雪粒子の成長過程については，個々別々には解釈できる。次に，これらの粒子が時間的に連続して現われる必然的理由，すなわち，これらの粒子を作る降雪形成過程が，互いにどのように結びついて，ひとつの降雪システムを構成していたのかについて考察してみる。

観測結果を満足する降雪システムとして，以下のような3種類のモデルが考えられる。

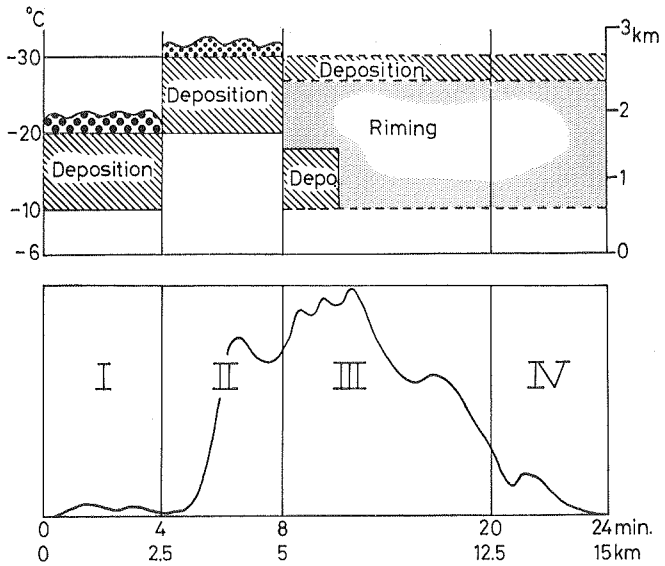
i) Model of mono-cell in a steady state
ii) Model of mono-cell in a non-steady state
iii) Model of multi-cells in a steady state



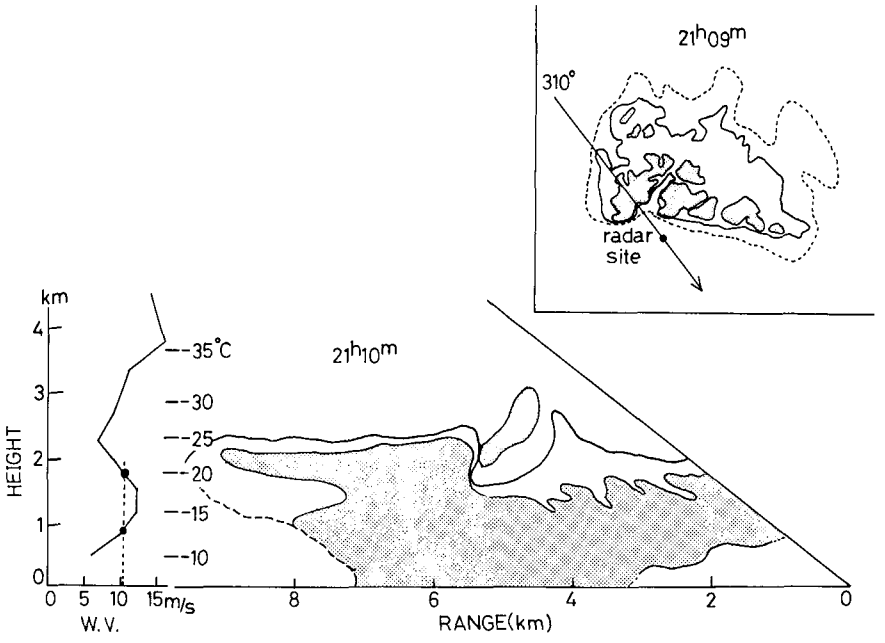
第9図　時間帯IVで採取した雪片を構成する典型的な雪粒子の写真



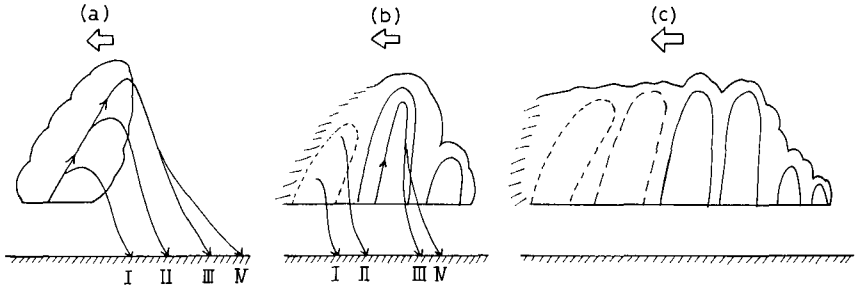
第10図　21時36分と21時37分に採取した小雪片ないしは小粒子を構成する雪粒子の模式的分類図



第11図　各時間帯で採取した雪片を構成する雪粒子の成長過程を模式的に示した図



第12図 エコーの移動方向と平行な面内での，風速の鉛直プロファイルと，気温の高度変化，及び，21時10分の降雪雲のエコーのREI断面図と21時09分のPPI断面図



第13図 降雪雲系の模式図

(a) Model of mono-cell in a steady state
(b) Model of multi-cells in a steady state
(c) Advanced model of multi-cells in a steady state

i) は，第13図(a)に示したように，1つの降雪セルから，I～IVのような雪粒子が定常的に降っているというモデルである。降雪セルの中心部分の強い上昇流域で形成された，濃密雲粒付き粒子および濃密雲粒付き樹枝のうち，低高度（気温が高い）で落下を始めた粒子は，雲の縁に近い弱い上昇流中を落下しながら昇華成長をして落下する (I)。さらに上に運ばれてから落下する粒子は，同じく昇華成長をして落下する (II)。風速は，−20～−25°Cの間では，上空に行くほど遅くなっているので，上昇流は進行方向と逆向きに傾く。そのため，IIの場合には，Iの粒子とは異なって，中層のみで昇華成長をし，下層の樹枝状成長領域では昇華成長をしない。最も上空に運ばれた粒子は，そのまま雲外に飛び出して落下する (III, IV)。このように考

えると，IとIIの雪粒子の違いはうまく説明できる。しかし，①最も上空に運ばれた，IIIとIVの粒子が，IIのような昇華成長をほとんど示していないこと；②上昇流中に，より長い時間滞在していたはずのIII, IVの雪粒子の方が，I, IIの雪粒子の中心部分に見られた濃密雲粒付き粒子および濃密雲粒付き樹枝の破片に比べて，雲粒付着の程度の小さい樹枝を数多く含んでいること；③Iで，上昇流中をも落下しうるような，昇華成長をしていない，大きな濃密雲粒付き粒子がまったく見られないこと；④ i) のようなモデルでは，雲の後側ほどエコートップが高くなっているべきであるが，第12図に示したREI断面図では，エコートップはほとんど一定であること；⑤特にIのような大きな樹枝が，たとえ強い上昇流域を外れているとは言え，まったく雲粒が付着していないということは考えにくい等の理由により，観測結果を説明しうるモデルとしては不適であろう。

ii) は，1つの降雪セルが観測点上空を通過中に，雲の発達段階 (stage) が急激に変化した結果，IからIVのような雪粒子が落下してきたと考えるモデルである。しかし，①今回観測したような雪粒子の変化が，極く稀に生じるのでは無く，割合頻繁に観測されることから，このモデルのような雲の発達段階の急激な変化が，丁度観測点上空で生ずるという確率は低いと考えられる；②レーダー観測からは，通過中に段階が変化している様子は見られなかった等の理由により，このモデルも不適であろう。

iii) は，第13図(b)に示したように，IとIIの雪粒子は，消滅段階 (decaying stage) にある降雪セルから，IIIとIVの雪粒子は，成熟段階 (mature stage) にある降雪セルからもたらされたものと考えるモデルである。i) のモデルと同様に，下層で落下をはじめた濃密雲粒付き粒子および濃密雲粒付き樹枝の破片は，昇華成長して放射樹枝となり，また，消滅段階 (decaying stage) では，雲全体はほとんど氷晶化しているため，下層では樹枝状結晶が形成され，それらと併合して雪片を形成する (I)。一方，上空で落下をはじめた粒子は昇華成長し，周りが交叉角板的発達をし，また，上空で成長した交叉角板等と併合して雪片を形成する (II)。一方，成熟段階の雲内では，全体に過冷却雲粒が多く，付着凍結成長が卓越し，それらの濃密雲粒付き粒子が上昇中あるいは下降中に併合して落下する (III, IV)。これら，発達段階の異なった降雪セルが，全体でひとつの降雪雲系を構成する。一般に，小さな対流雲であっても，内部には段階の異なる対流セルがいくつも存在していることは良く知られた観測事実である[3]。また，雲の進行方向に対して，後から新しい対流セルが発達し，前方に位置する対流セルほど衰退していることも良く知られている[3]。視程計のデータを良く見ると，IIIの時間帯でもいくつかのピークが見られることから，IIIに見られた降雪粒子も，さらにいくつかの降雪セルからもたらされていたことが示唆される。したがって，第13図(b)よりはむしろ，第13図(c)に示したような降雪雲系が通過したことによって，I～IVのような雪粒子が地上で観測されたものと考えられる。

V. 結　　論

地上での雪片の直接採取から，30分足らずの降雪であっても，降り始めから降り終わりまでの間で，雪片の大きさおよび雪片を構成している雪粒子の種類のどれも変化していることが

明らかとなった。これらの時間変化は、異なった発達段階にある複数の対流セルが，同時に近接して存在し，全体としてひとつの降雪雲系を構成していたと考えることによって説明可能である。また，雲粒付き樹枝の破片から成長したと考えられる雪粒子が多く見つかり，雪結晶の破壊過程が，降雪形成過程に重要であることが示唆された。

雪片の大きさおよび雪片構成要素の時間変化は，雲の力学過程と微物理過程との相互作用によって決まるため，本観測で得たような時間変化が一般的というわけでは無い。今後は、両過程に同時に着目した研究が必要である。

文　献

1) 藤吉康志 1983 雪片構成要素の時間変化 (I), 日本気象学会春季大会講演予稿集, **43**, 189.
2) 藤吉康志・若濱五郎・遠藤辰雄・入川真理・小西啓之・竹内政夫 1983 札幌における—冬間の降雪強度と視程の同時観測, 低温科学, 物理篇, **42**, 147–156.
3) Mossop, S. C. 1985 Microphysical properties of supercooled cumulus clouds in which an ice particle multiplication process operated. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 183–198.

Summary

Snowflakes were directly sampled at the ground in a short period of time and snow particles comprising them were analyzed in detail. It was observed that both the sizes of snowflakes and the types of snow particles comprising them vary from the beginning to the end of snowfall even the duration of the snowfall is less than 30 minutes. These short-term variations could be explained by the cloud model of multi-cells in a steady state, that is, the snow cloud system is composed of multiple convective cells in different growing stages. It was also suggested that disintegration of snowflakes and/or rimed dendrites plays an important role in the snow formation processes, since snow particles which presumably grew from broken branches were found very often.