

日本上空の氷晶核数の変動とその発源地（序報）

磯野 謙治* 駒 林 誠* 小 野 晃*

1. 緒 論

降雨に関する最近の研究によれば、降雨はいわゆる Bergeron-Findeisen 型のものと「暖い雨(warm rain)」型の二つに分類することができる。前者は良く知られているように過冷却した水滴からできている雲の中で氷晶が急速に成長することが降雨の開始及び継続に支配的であるもので（従って、「氷晶雨」という言葉を用いてもよいのではないと思われる）、これに対して、後者はこのような過程が伴わなくて降る雨、あるいは、氷晶過程があってもこれが支配的な原因でない雨である。十数年前までは中緯度より高緯度地方の並以上の強さの雨は「氷晶雨」であると考えられていたが、近年「暖い雨」の研究が進み、中緯度地方でもこのような雨の降ることが明らかにされた。しかし、「氷晶雨」の重要性はいささかも減じたものではなく、その機構を明かにすることは学問的にも、また実用的にも極めて重要である。

「氷晶雨」において最も重要な過程は前述のように過冷却雲中の氷晶の成長過程であるが、この過程が始まるためには氷晶が生ずることが必要である。大気中で氷晶が生ずるためには「核」が必要であると考えられている。この氷晶の核となる粒子は以前は「昇華核」とよばれていた。これは、大気中の水蒸気が直接このような粒子の上に昇華して氷晶ができるものと考えられていたためである。しかし、その後の研究により、氷上飽和の水蒸気圧では核上に氷晶を生ぜず、水飽和以上あるいは、これに極めて近い水蒸気圧に達して始めて氷晶を生ずることが分り、氷晶形成の最初期において、まず大気中の

水蒸気が核上に凝結し、極めて薄い水の膜ができて、これが核の作用により凍結するものと考えられるようになった。従って「昇華核」の名称は適当でなく「凍結核」とよばれるべきであることが Weickmann によって提案され、「昇華核」の名称は用いられなくなった。しかし、氷晶形成の最初期の過程に関しては未だ明かにされていないことが多く、核の種類及び周囲の条件により必しも一定の過程によって氷晶を生ずるとも限らないので、このように過程を示す名称を用いず、「氷晶核」(ice nuclei 或は ice-forming nuclei) という名称を用いる方が適当ではないかと思われる**。

最近氷晶核に関する実験的研究が著しく進歩したが、大気中の自然の氷晶核作用温度、その物質、その時間的、空間的分布及び変動についての我々の知識は未だ極めて貧弱である。このため、最近、世界気象機構(WMO)中に凝結核、氷晶核、降水中の化学成分を大規模な観測網をつくって観測する方法を決定するための作業委員会ができた***。このような観測網が確立されれば、降水機構の研究のみでなく、雨量の予報や、人工降雨等に大いに役立つことと思われる。これらの観測方法を決定する資料を作るための一つの試みとして東京で氷晶核の観測を約2週間にわたって行った所、短期間にもかかわらず興味ある結果が得られたので、ここに報告させて頂くこととする。

2. 氷晶核の測定方法

これまで氷晶核の数の測定に用いられてきた方法は Schaefer などにより行われたように、低温槽内に戸外の空気を導き、暗視野照明により槽内に生じた氷晶が視野中をキラキラ光りながら落下するのを目視観測を行い、その数を数える方法である。この方法は原理的には簡単な方法であるが、種々の難点がある。第一に一般に大気中で比較的高温で作用する氷晶核の数は極めて少いのが普通であって、たとえば -13°C 以上で作用する核は $1/l$ 中1個以下、 -15°C で2、3個/ l 程度であるため、これを十分な精度で観測するためには、相当の長時間連続的に視野を注視する必要があるために、目が疲れて数え落すおそれがある。また -20°C 以下の温度では相当

* 東京大学理学部地球物理学教室—1958年6月17日受理

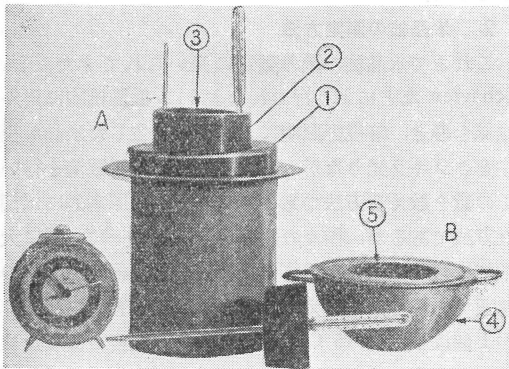
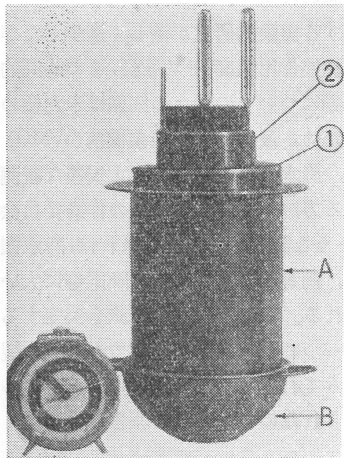
** 氷晶核と凝結核の二つの概念は全く異なるものである。これを混同してはならない。我が国の気象文献中にはしばしばこの混同が見られる。一つの物質粒が凝結核としても氷晶核としても作用する場合もあり得るが、これはまた別の問題である。

*** 委員は E.M. Fournier d'Albe(Chairman, 巨大凝結核及び氷晶核), C.E. Junge (大及びエイトケン核), K. Isono (氷晶核), E. Eriksson (降水の化学成分)

に多数の核があるために、これを数えるのが難しくなる。第二に低温槽の壁や導入管等に霜がつき易く、その数が極めて僅かで目にとまらない程度でも、これが壁面から離れて低温箱内を落下するときは氷晶核上に生じた氷晶と見間違えられ誤差を生ずる。この誤差を防ぐことは極めて困難である。第三に氷晶以外の微粒子で氷晶と区別のつき難い粒子が視野中を落下し誤差の原因となること等である。

上述のような困難は、この種の観測を実際に行った者が皆遭遇することである。ところが、最近 Bigg¹⁾が発表した方法は極めて巧妙であって実際にこの方法を用いて見て大変便利であることがわかった。もとより、この方法も完全というわけにはいかず*、なお改良を要することが多いが、これまでの方法に比べはるかに優れ、安定した結果が得られる。この方法は Bigg の原論文に述べられているが、将来この方法を利用される方々の御参考のために、われわれが試作した装置について略述することとする。

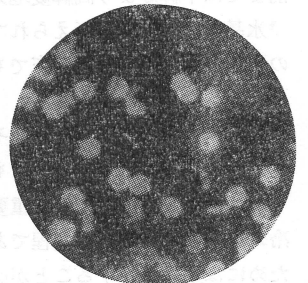
その構造は第1図に示すように、低温槽となる空気冷却筒Aとシャーレ冷却部Bからなっている。Aの部分は手で簡単に持ち上げ、Bの部分から離すことができるようになっている。



第1図 氷晶核測定装置

Aは銅製の二重の筒で、①及び②にエチレングリコール水溶液が満してある。①に適当量のドライアイスを入れて冷却すると②を所定の温度に冷却する。②には攪拌器及び温度計が挿入されている。③の部分即ちAの内筒に氷晶核数を測定すべき空気が入られる。Bの部分にはエチレングリコールと水の混合液(3:1)を入れる容器④と真鍮製の皿⑤からなり、④にドライアイスを入れ -12°C 程度に冷却して、⑤をその上に置くと、⑤の下部は液中に入っているため全体が冷却される。

観測を行うには硝子シャーシ砂糖水溶液(濃度、水100gr, 砂糖 120gr)を入れ⑤内に置き冷却して置く、②の温度が適当の温度になったならば、Aを持ち上げ、空気中で数回上下に動かすとAの内筒内の空気が完全に入れ替る。次にAをBの上に置き蓋(ゴム栓を用いた)をして若干時間を置けば、内筒内の気温は所定の温度まで冷却され、この中に霧を生ずると共に氷晶ができて槽内を落下する。数分を経て、Aを除いてシャーレ内を見ると第2図に示すように極めて美しい白色の六角板が見出される。



第2図 砂糖溶液中(-12°)に生じた六角板状の結晶($\times 1$)

この数を数えれば内筒内の空気(1l)中の、その時の槽の温度以上で作用する核の数が得られる。シャーレを替え数回これを繰返し平均値をとる。また槽内気温をかえて、他の温度で作用する核を測定することもできる。砂糖溶液の温度を上げれば結晶は消えるから、また同じものを用いることができる。この方法の特長は、感度が高く、目で微小な氷晶を数える必要がなく、シャーレ内に生じた直径数ミリ程度の極めて明瞭な六角板の結果の数を数えれば良いので、僅かな数でも見落しがないこと、操作が極めて簡単であること、氷晶以外のものが落下しても数え込むおそれがないことである。この場合でも、最も注意しなければならないことは筒壁についた霜が落下することであるから、筒の内壁、壁、温度計、筒の下部等をエチレングリコール、あるいはグリセリン等を十分ひたしたガーゼで1回の観測毎にふいて霜の発生を防ぐことが必要である。また槽内の水蒸気の補給方法については検討を要するが、これまでの結果によれば暖候期においては、むしろ特に行わない方が安定した結果が得られる。

* 現在、自働測定装置の試作研究を行っている。

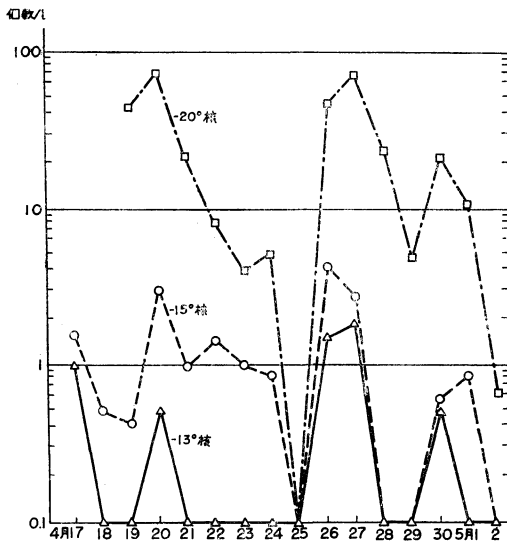
今回は、特に水蒸気の補給を行わないで数え、次に息を吹き、ここで再び数える方法を取り、両方法の比較を行った。観測の際は②の温度と内筒内の気温とに余り差のないように注意すべきである。

なお、砂糖溶液中に生じた六角形の結晶は急速に成長するから、余り時間を置くと互に接して数えることが難しくなる。またBの温度を下げ過ぎると不安定となり氷晶が落ちなくても白色の不規則な沈澱を生ずる。

3. 観測結果

本年4月17日から5月2日の期間に東京大学理学部1号館屋上で、上述の装置を用い自然氷晶核の測定を行った。この期間は移動性高気圧、低気圧が去来し、気圏が頻繁に交代したため氷晶核の発源地を知るのに極めて都合であった。

測定は -13°C 、 -15°C 、 -20°C の三つの温度で行った。第3図は、この温度で測定した空気1l中の核数の



第3図 東京における自然氷晶核数の日々変化

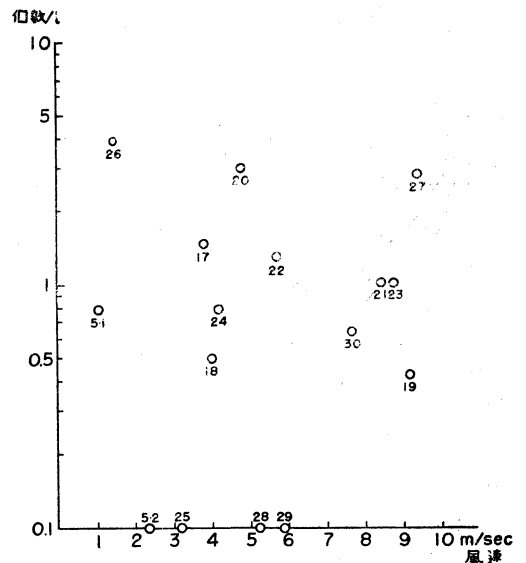
戸外の空気を -13°C 、 -15°C 、 -20°C に冷却して氷晶を作り、その個数を測定した。氷晶核の数は日によりかなり変動しているが、 -13°C 核 -15°C 核 -20°C 核は略々平行に変動している。25日は氷晶核の数が著しく少ないが、地上、上層とも海洋からの空気が入っている日である。26日、27日は日本各地で黄砂が観測され氷晶核の数も高い値を示めている。測定限界は10lあたり1個である。

日々の変動を示したものである。測定は11h~14hの間に行った。図に見られるように、大気中の氷晶核数は極めて大きく変動する。大ざっぱに見ると各温度の核数は

ほぼ平行に変化するが、細かく見れば差異が見出される。なお、この測定では0.1個/l以下の測定精度は低いので0.1個/l以下はすべて0.1/lとしてプロットしてある。更に小数の核を測定するためには大きな容器の装置を用いることが必要である。

4. 観測結果の考察

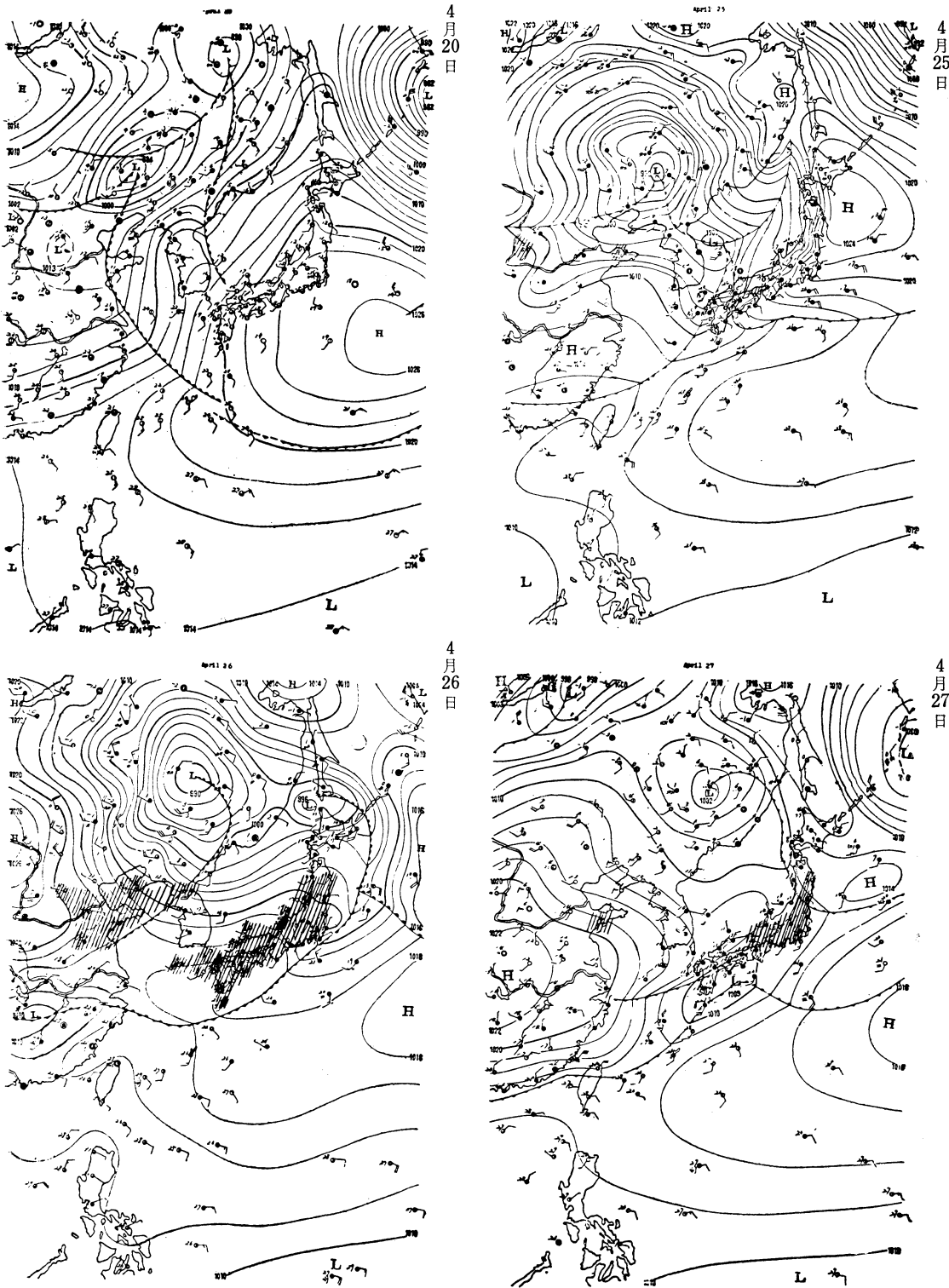
前節に述べたように、空気単位体積中の核数は日によって著しく異なる。このような変動が局所的なものであるか、あるいは、大規模な気象状態によるものかを検討する必要がある。たとえば、観測点附近には南に化学教室があり、これから何らかの氷晶核として有効な物質が放出されていないとも限らないし、またこのような核が工場等から放出される可能性もある。更に附近の地面から風によって運ばれた土壌粒子なども核として作用する可能性がある。もしこのようなことであれば、観測された核の濃度が東京の代表的な値でなく単に観測点附近に存在する源に左右されているのかも知れない。もし、これが、変動の原因であるならば、局所的な風向、風速等によるものと考えられるので、風向、風速との関係を調べたが、直接の関係は認められなかった。第4図は風速と



第4図 地上風速と自然氷晶核数(東京)

-15°C 核の数とその測定時における東京の地上風速との関係をプロットしたもので核の数は局地的風速には無関係であることがわかる。

-15°C 核数の関係を示したもので、両者の間には関係は認められない。また、観測点附近にはグラウンドがあり、強風の日には砂塵が猛烈に吹き上げられ、測定場所



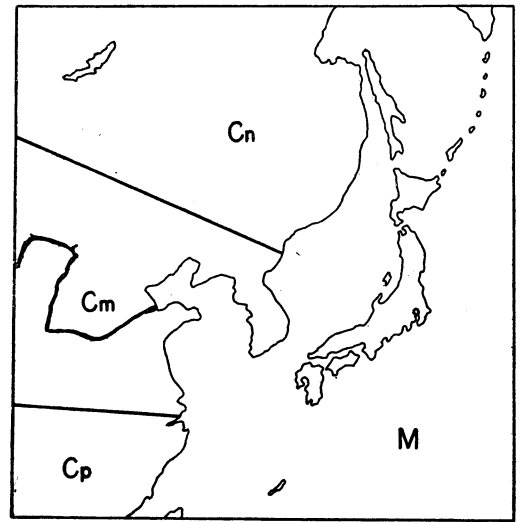
第 5 図 観測当時の地上天気図

は砂塵に包まれることがしばしばあったが、これは核数にほとんど影響を与えなかった。たとえば4月29日は、これが甚しい日であったが核の数は増加しなかった。

以上のような事実から、氷晶核数の変動の原因は観測点附近の局所的なものではない。即ち氷晶核の源は観測点に近くのものではないことが推定される。

一方、第3図を見ると直ちに気付くことは、核数の極大或は極小となる日は比較的規則的な周期(6~7日)でおこっていることである。これは大規模な気象状態の推移と関連していることを暗示する。実際、この期間の天気図(第5図)と核数の変動とを比較して見ると判然とする。この期間で核数の極めて多かった日である、20日、26日、27日はいずれも寒冷前線が大陸から移動し東京を通過した日である。特に26日、27日は日本の各地で黄砂の観測された日である。天気図に斜線を施した部分は黄砂及び風塵の観測された地域である。なお日本航空の航路実況図によると26、27日には上空まで塵あいが多くて視程が極めて悪く、風防ガラスが黄色くなった。これは日本上空に黄砂がひろがっていたことを示している。このような事実から、観測された大きな氷晶核数の原因は黄砂と関係があり、黄砂中には氷晶核として有効な鉱物が含まれていることが推定されるので、期間中の各日に東京に達した空気の地上及び850mb、500mbの等圧面上の流跡線を画いた。この流跡線からわかったことは、大陸中で風塵を経験した空気が東京上空に到着した日に核数が増大することである。26日、27日のは黄砂が日本の各地で観測されているが、これは、地上850mbの風で運ばれて来たものではなく、寒冷前線の進行速度に近

い速度をもつ700mb~500mbの気流に運ばれて来たことがわかった。このように、風にはシャーがあり、また砂塵は空気中を落下するから、その移動の様子は複雑であるが、各日に東京上空にある空気を発源地によって分類すると、比較的少い幾つかの型に分れる。これを第1表に示した。ここに用いた符号は便宜的なものでCは大陸から来たことを表しその添字n, m, pはそれぞれ北, 中, 南を表し、Mは海洋上に長くあった空気を表す。たとえばC_nは大陸北部(中国最北部からシジリヤ)の地域を表わし、C_mは黄河上流地帯、山東省、モンゴル方面から来たもの、C_pは揚子江方面、(華南)から来たものを



第6図 第1表の地域分類図

第1表

月 日	東京上空の空気の種別			氷 晶 核 の 数			備 考
	地 上	850mb	700~500mb	-13°核	-15°核	-20°核	
4月17日	C	C _m ⇄ 13日	C _m	+	++	欠測	華北、朝鮮、日本全土 で黄砂観測される 敦賀、白河で黄砂観 測される -13°核及び-15° 核の欄の ○……0.1/l 以下 +……0.1~1/l ++……1/l~10/l -20°核の欄 ○……1/l 以下 +……1~10/l ++……10~40/l +++……40/l 以上 C: 大陸 M: 海洋 m: 大陸中部 n: 大陸北部 s: 大陸南部 ⇄: 風塵を大陸で 経験した、日附 は経験した日
18	CM	C _s	C _m	○	+	欠測	
19	CM	C _n	C _m	○	+	++	
20	C ⇄ 16日	C _m ⇄ 15日	C _m	+	++	+++	
21	CM	C _s	C _s	○	+	++	
22	CM	C _s	C _s	○	++	+	
23	CM	C _s	C _s	○	+	+	
24	CM	C _s	C _m	○	+	+	
25	M	C _s	C _s	○	○	○	
26	C	C _s	C _m ⇄ 25日	++	++	+++	
27	M	C _m ⇄ 26日	C _m	++	++	+++	
28	M	C _m	C _m	○	○	+	
29	M	C _m	C _m	○	○	+	
30	C	C _m	C _m	+	+	++	
5月1日	CM ⇄ 26日	M	C _m	+	+	++	
2	M	C _m		○	○	○	

あらわす。従って C_M は黄砂の発生する地帯から来たものである。☆は風塵の起った地域をその日に通過したことを表している。また核数の欄で 0 は 1/l 中 0.1 個以下、+ は 1 個/l 以下、++10 個/l 以下、+++40 個/l 以上を表している。この表から次のことが分る。すなわち

- (1) 大陸で風塵を起した寒冷前線が来たとき、前線附近及びその後方において氷晶核数が極めて増大する。(4月17日(?-20°核欠測), 20日, 26日, 27日) この場合、しばしば日本で黄砂が観測されている(26日, 27日)。黄砂の移動速度は速く、その前面は寒冷前線とほぼ等しい速度で移動する。従って、氷晶核は 700~500mb の高さの気流に乗って、落下しつつ到達したものと推定される。
- (2) 850mb, 及び地上、共に大陸から来た空気で、850mb 面の空気が大陸中部(C_M) からきたとき-13°核、-15°核、-20°核共に多い(17日(-20°核は欠測), 20日, 30日)。
- (3) 850mb が大陸北部あるいは南部から来て、地上が大陸から出た後、数日海上にあった場合は中程度の核数である(4月18日, 19日, 21日, 22日, 24日, 5月1日)。
- (4) 850mb が風塵を経験しない大陸から来た空気では地上が海洋性の空気であるときは氷晶核は少い(4月25日, 28日, 29日, 5月2日)。
- (5) -13°核が 0.1 個/l より多くなるのは、いずれかの高さの空気が大陸から来て、しかも黄河上陸からモンゴルにかけての乾燥地帯の砂塵を運んできたものと考えられる日である(17日, 20日, 26日, 27日, 30日)。

上述の事実から、今回観測された氷晶核数の変動は局的な原因によるものではなく、大規模な気象状態、特に上空にある空気が何処から移動して来たかということを密接な関係があること、この期間中日本上空の大気中の氷晶核の大部分は大陸、特に黄河上流地方からモンゴルにかけての乾燥地帯に発源していることが推定される。しかし、氷晶核の或るものは必ずしもこの地域から来たものとは考えられない。海洋性の気団中の氷晶核の起源については、今回の観測のみからは結論は得られない。すなわち、大陸から発生したものが、長時間の中に落下して数を減じたものとも、また日本内地で発生したものとも、或は海洋に起源をもつものとも、いずれの可能性もあるが、今後の観測によって明かにされよう。

氷晶核の起源については、Findeisen 以来、いろいろ考えられているが、Schaefer が Washington 山上で観

測を行い、米国西部の乾燥地帯の方向から風が吹くときに増大することから、この地方に起源があるものと推定している。また最近オーストラリアの Smith²⁾等は飛行機で観測を行って、対流の起り難い垂直安定度の高い日、特に気温逆転のあるときに地上よりも逆転層の上の方が氷晶核の多いことから、氷晶核は地面から出るものではなく、上層に源を有すること、流星雨の起った日の約30日後に多いとの観測結果を得たことは、Bowen の氷晶核の流星塵説を支持するものであることを主張した。また Murgatroyd 等も英国上空で同様な観測を行い、同様な結果(ただし流星雨のとの対応を認められなかった)を得て、氷晶核の源は上方にあるものと推定した。またフランスでは Soulage が大西洋岸で氷晶核数の測定を行って、海洋上から空気中に多いこと、内陸では少いこと、海水のしぶきは核として作用しないことから、海洋から空気中に含まれる沃素と、大陸から来た物質が海岸附近の大気中で化合して AgI 等の核を生ずるものと推定した。また高橋(喜)は東京の観測結果から風速の大きなきに氷晶核が多くなることを報告した。

このように氷晶核に関しては未だ一致した見解が得られていないが、今回の測定結果から考えると、これまでの氷晶核数に関する観測結果の解釈が、一地点の気象状態とのみの相関によってなされ、比較的大規模な気象状態との関係が省りみられなかった傾向があったために、直ちに起源を上空に求めたり、海岸発生説を唱えたりしたものではないかと考えられる。或はこれ等が事実かも知れないが、その前に、たとえば Smith 等の場合に逆転層の上の空気がいずれの経路をとって来たものか、乾燥地帯の砂塵と関係がないものかを調べる必要がある。フランスの Soulage の場合も同様にアフリカの砂漠その他に起源があるとも考えられるから、これを調べる必要があるように思われる。

なお氷晶核の物質については、今後電子顕微鏡等を用い調べる予定であるが、これまで電子顕微鏡で雪の核の廻折像を調べた所によると、粘土鉱物その他の土壌粒子が多く存在することから、黄砂中の或る種の鉱物粒子が氷晶核として作用することは充分考えられることである。

結論 今回の氷晶核の観測の結果から次の結論が得られる。

- (1) 氷晶核は日々極めて大きな変動をする。
- (2) 氷晶核数と大規模な気象状態の間に密接な関係がある。

- (3) 大陸の黄河上流, モンゴルの乾燥地帯から日本上空に到来した空気中には氷晶核が多く, 海洋性気団中には極めて少い.
- (4) 日本上空の氷晶核の中の極めて多くの部分は黄河上流地方からモンゴルにかけての乾燥地帯に源をもっている. この附近の表土中には極めて有効な氷晶核として作用する鉱物粒子が存在すること. -13°C 以上の温度で核として作用するものがあること.
- (5) 氷晶核数が極めて少く, 雨を起させ, あるいは力学的可能降水量をすべて降らせるために十分な核数のない場合がしばしばある. 特に海洋性気団に於いては, 多くの場合核数は不十分である. 従って, 人工氷晶核の種類によって降雨を開始させ, 雨量を増大させることの可能である場合がしばしばあるものと推定される.

なお他の地域たとえば日本内地で発生する氷晶核もあるものと考えられるが, これに関しては, 今後, 他の季節において観測を行えば検出し得るかもしれない. また氷晶核物質を取り出し同定を行うことを計画している. これらについては第2報以下で報告したい.

参 考 文 献

- 1) Bigg, E.K., 1957: Tellus **9**, 394.
- 2) Smith, E.J. and Heffernan, K.J., 1954: Q. J. R. M. S. **80**, 344.
Smith, E.J., A.R. Kassander, and S. Twomy, 1956: Nature, **177**, 82.
- 3) Murgatroyd, R.J. and M.P. Garrod, 1957: Q. J. R. M. S. **83**, 522.
- 4) Soulague, G., 1958: Comptes Rendus Acad. Sci **246**, 143.
- 5) 高橋喜彦他, 1957: 気象集誌 Ser. II **35**, 137.

例 会 告 示 (I)

生気候に関するシンポジウム

日本気象学会 共催
日本温泉気候学会

日時 昭和33年10月11日(土) 9時30分~17時

場所 東京大学医学部 1号館1階

研究発表 (9時30分~12時)

1. 季節病カレンダーについて 靱山政子(気象研究所)
田中恒男(東大衛看,
公衆衛生学教室)
2. 気象変動と交通死亡について
窪田為延(東京医歯大
衛生学教室)
3. 血液諸成分の季節的変動に関する知見補遺
小泉明, 鈴木継美,
西川眞八(東大公衆衛
生学教室)
4. 血液成分の季節変動
吉村数人, 大柴進(京都
府立医大生理学教室)
5. 気候並に気象と産褥子宮収縮との関係
阿部温男, 下村正美(順
天堂大衛生学教室)

6. メニエル氏病及び鼻出血と気候変動

渡辺勉, 古本京二,
李洞海(東京医大耳鼻
科)小倉孝, 鈴木淳一,
徳増厚二(東大耳鼻科)

7. 疼痛と気象との関係

浜田昇次(湯河原整形
外科病院)

8. 喘息と気象との関係

川上武(久我山病院)

9. 花粉と気象の関係

荒木朋齊(東大物療内
科)

シンポジウム (13時~17時)

話題 気象・気候変動の生体には及ぼす影響

座長 大島良雄(東大医学部物療内科教室)

話題提供者

- 1 柏木 力(東大医学部物療内科・気象
研究所)
- 2 田多井吉之助(公衆衛生院生理衛生
学部)
- 3 神山恵三(気象研究所)
- 4 松岡脩吉(東大医学部公衆衛生学教
室)