

氷晶核としての黄砂*

田 中 豊 顕**

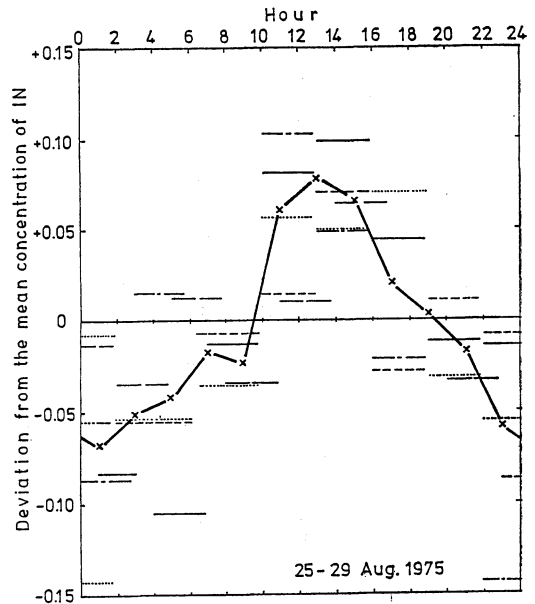
1. はじめに

中国大陸の黄土は、東西 7000 km 南北 200 km の広大な地域に分布している。この黄土が風で舞い上がり、日本にまで運ばれ、黄砂現象として観察される。1959年4月、磯野・駒林・小野はこの黄砂雲の中で、氷晶核濃度が著しく増加することをはじめて観測した。さらに実験によって、黄砂粒子が氷晶核として作用することを確認し、黄砂粒子が有効な氷晶核であることを明らかにした。

黄砂雲は、通過するそれぞれの場所において、氷晶核濃度を高めアメリカ大陸にまで到達することが観測された (Isono *et al.*, 1971)。この氷晶核の観測によって、黄砂雲の緯度方向における広がりを知ることが出来た。ところが鉛直方向と経度方向の広がり、さらには年間を通した時間的な変化は分かっていない。そこで富士山頂と石垣島を通年観測点として選び、さらに、互いに離れた観測点での現象の関連を見る手段として航空機と船舶を利用して、氷晶核として有効なエアロゾル粒子の空間的・時間的な変化を調べた。

黄砂粒子はエアロゾル粒子であると同時に、氷晶核としての属性をもっている。そのため、気温の変化に応じて、過冷却雲の氷晶化と降雪の形成に重要な働きをする (Isono *et al.* 1965)。ところが氷晶核の作用する物理過程は明らかでない。氷晶核の作用過程を調べるために、氷晶核の活性化温度スペクトルを測定し、新しく開発した顕微鏡用低温槽を用いて、氷晶核を含む雲粒の存在をはじめて示した。

ここではこうした観測と実験の結果を中心に、大陸から運ばれる黄砂が日本の氷晶核として主要な部分を占め、しかも過冷却雲粒の凍結核として、降水形成に重要な役割をしていることの概略を述べる。



第1図 富士山頂における氷晶核の日変化
(1975年8月25-29日)

2. 氷晶核の定義と作用過程

氷晶核とは氷晶芽の形成(核形成)を促進する個体粒子であり、氷の粒子は含まない。代表的な自然氷晶核は土壌粒子や火山灰、一方、人工氷晶核は沃化銀等である。氷晶核の作用過程は4つある。①氷晶核が内部凍結核として作用する場合、②混合核として存在し、先ず吸湿生成成分が凝結核として働き、続いて個体粒子が凍結核として働く場合、③接触凍結過程で働く場合、④昇華凝結過程で作用する場合。

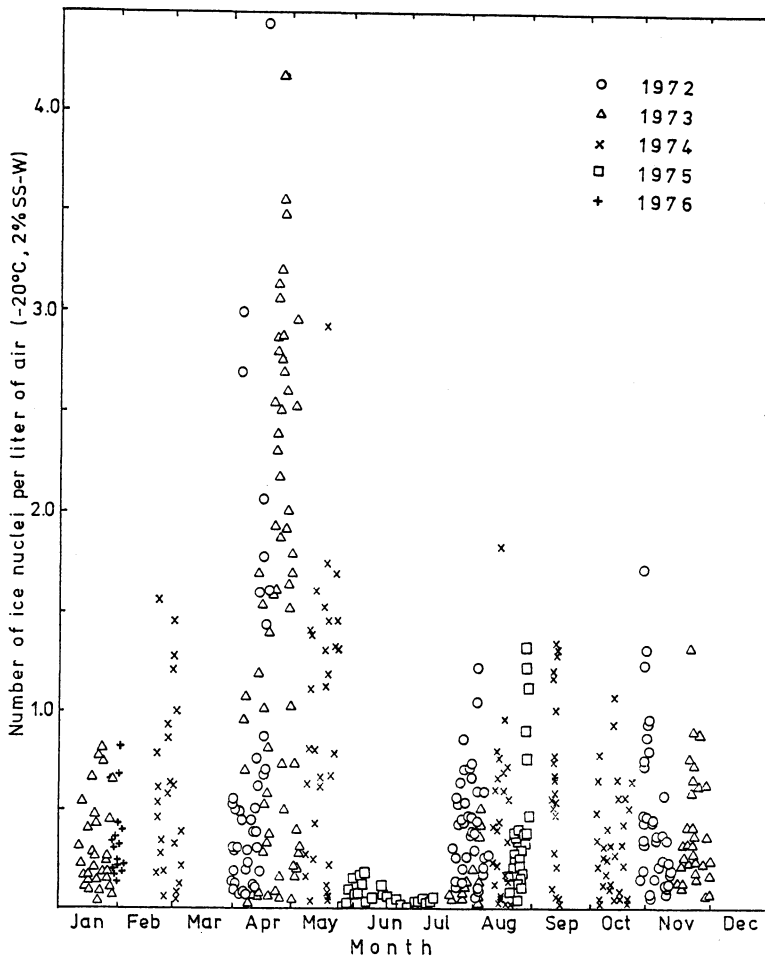
以上いずれの過程が進行するかは氷晶核の存在状態(混合核か否か等)と場の条件(温度と湿度)に依存する。

3. 氷晶核の測定法

氷晶核の測定は、場の条件を人為的に整え、4つのプ

* Loess particles as ice nuclei.

** Toyoaki Tanaka, 気象研究所応用気象研究部。



第2図 富士山頂における氷晶核の季節変化 (1972-1976年)

プロセスのいずれかあるいはそれらの複合過程を人為的に進行させることである。主な測定法は現在、砂糖液法とフィルター法の2つがある(田中, 1974)。この研究では主にフィルター法を採用し、 -20°C 、水過飽和2%で測定した。

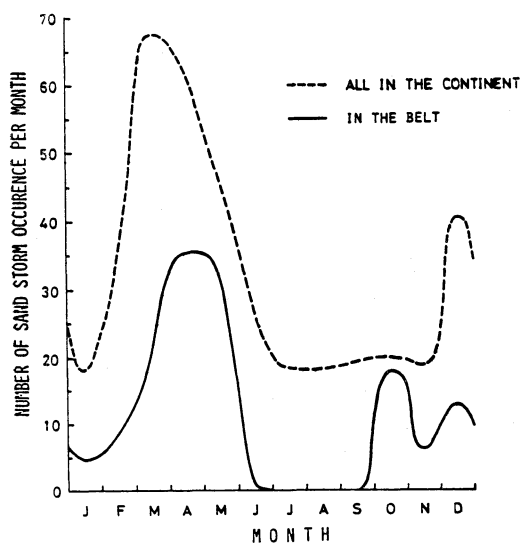
フィルターによる試料の採集は、富士山頂の場合主として東京管区気象台の松原広司氏*、石垣島では測候所の石原正仁氏**がそれぞれ担当した。低温槽による氷晶の検出は著者が担当した。

4. エーロゾル粒子と氷晶核の高度分布及び相互の量的関係

現在の所属 * 松原広司 (気象庁観測部)

** 石原正仁 (気象研究所台風研究部)

エートケン粒子と大粒子、さらに氷晶核の高度分布を知るために、飛行機を使って、地上から富士山頂の高度まで、それぞれの空間個数を測定した。その結果、地上では空気 1cm^3 当たり、エートケン粒子が 10^5 個、大粒子が 10^3 個程度に対して氷晶核は空気1リットル当たり1~2個程度で、他のエアロゾル粒子に比べて極めて少ない。一方、富士山頂の高度では、エートケン粒子も大粒子も地上に比べて2桁少なくなる。ところが氷晶核の数はそれほど変化しないことが分かった。このことはまた、他のエアロゾルに対する氷晶核の割合が、地上におけるよりも山頂の方が大きいことを意味している。つまり氷晶核の測定にとって、地上より山頂の方がS/Nが高い訳で、山頂は有利な条件にあるとすることができる。



第3図 大陸における月別砂塵発生頻度 (1973年)

5. 富士山頂における氷晶核濃度の変動 (エーロゾルとして)

5.1 氷晶核の日変化

氷晶核の長期的な変動を調べるうえで1日の測定値はもっとも基礎的な値である。1日の代表値を得るために氷晶核濃度の時間変化を調べた。夏の高気圧下における富士山頂では明瞭な日変化が観察された。測定期間5日間の濃度平均に対する各測定値の偏差の時間変化を調べた結果、氷晶核濃度は日中、平均値より高くなり、逆に夜間は低くなることが分かった(第1図)。こうした顕著な日変化は他の季節には現れなかった。このことから1日の代表値を得るために、日中(14-16 LST)と夜間(21-23 LST)、それぞれ少なくとも1回づつ2時間の測定を行った。測定回数はさらに気象の変化に応じて随時増やした。

5.2 氷晶核の季節変化

1972年から1976年の5カ年にわたって、富士山頂測候所で氷晶核の観測を行った。その間、1973年4月22日から26日にかけて飛来した黄砂雲は富士山頂を包み、レドームを被っていた着氷の白い表面に堆積し、レドームを黄色に変えた。氷晶核の高濃度は正にその黄砂雲の中で観測された。この結果は東京都内で観測された(磯野ら、1959)黄砂雲と氷晶核の関係が、4000m近い高度においても現れることを示している。

5カ年の観測から、氷晶核の濃度変化を見ると、観測

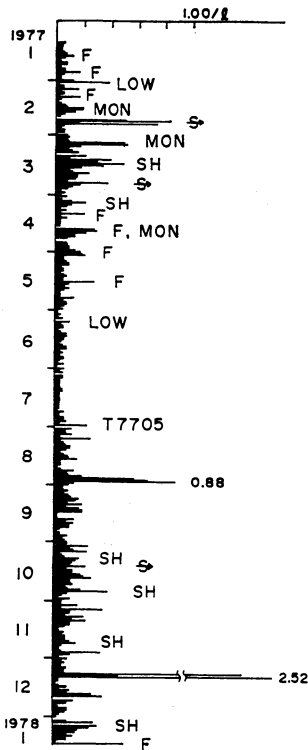
をした年が違っていても月がおなじであれば、その変化の傾向は同じであることが分かった。つまり氷晶核濃度は第2図にまとめたように3月から5月にかけて最大となり、黄砂雲の中では空気1リットル当たり5個にもなる。ところが、6月から7月の中旬にかけて、濃度は最低となり、空気10リットル当たり2個程度となる。7月下旬から濃度は再び高くなり、12月まで、1リットル当たり1個以上の比較的高い濃度が現れる。1月に入ると濃度は下がり1個に満たない。2月から濃度は再び上昇し、春の高濃度の期間につながる。1年を通してみると、氷晶核濃度は春に最大、夏に最小となり、秋に極大、冬に極小が現れる。

次にこの季節変動を支配する原因を明らかにするために、氷晶核を運ぶ気塊の流跡線を調べた。

5.3 氷晶核の輸送経路と発生源

全観測日の、700 mb 等圧面での流跡線を調べた結果、富士山頂への気塊は、夏期を除いて、ほとんどが中国大陸から直接数日間に到達していることが分かった。次に氷晶核の季節変化が主としてどの地域を通過した気塊によって支配されているかを知るために、富士山頂への気塊が通過する地域を大陸と海洋(D)の2つに分け、さらに大陸を砂漠地帯から黄河流域(B)を中心にその北(A)と南(C)の3つの区域に分けた。全観測期間の流跡線を上記の四地域に分類し、該当する日に観測された氷晶核濃度について、地域別の季節変化を調べた。その結果、(B)を通過する気塊の中では、第2図に示したと同様、氷晶核濃度に顕著な季節変化が現れた。以上の結果から富士山頂における氷晶核濃度の季節変化は、主として(B)の地域、つまり中国大陸の砂塵発生域を通過した気塊によってもたらされていることが明らかになった。

気塊が砂塵を含むか否かは大陸で砂塵が発生するか否かにかかっており、砂塵の発生頻度が問題になる。観測期間中の1973年について、1日2枚の印刷天気図を基に、大陸における砂塵の月別観測回数を調べた(第3図の破線)。その結果砂塵の発生頻度は3、4、5月に最大になっている。他の月は20回程度で12月だけが40回と多くなっている。重要なことは年間を通じて大陸の何処かで、月平均10回程度は、砂塵が発生していることである。さらに興味あることは、月平均流跡線を中心に1000 kmの帯を考え、その帯の中で観察された月別砂塵発生頻度が第3図の実線のように、春に最大、夏に最小、秋に極大を示すことである。この変化の傾向は正に富士山



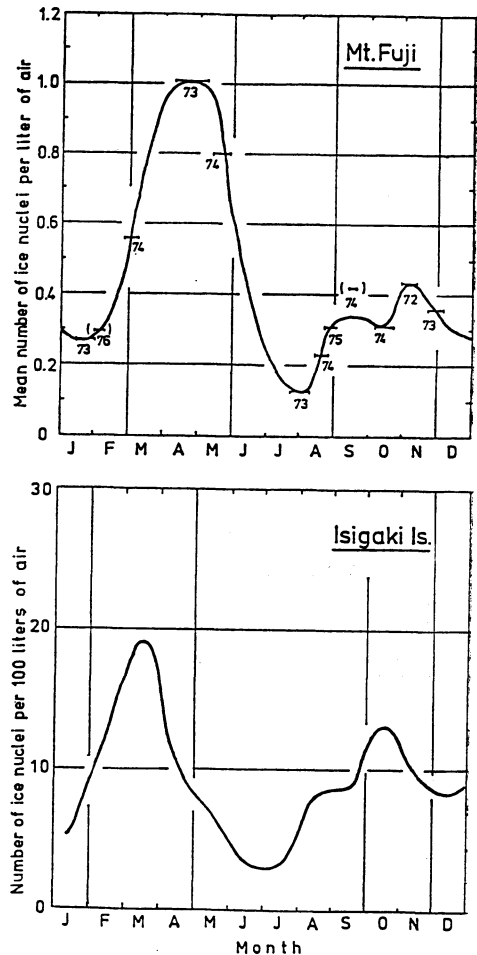
第4図 石垣島における氷晶核濃度の季節変化 (1977-1978年)

頂における氷晶核の季節変化と一致している。以上の結果は、富士山頂で観察される氷晶核が主として大陸で発生した砂塵粒子であり、気流に乗って運ばれたものであることを示している。

次に氷晶核の水平的なひろがりを知るために、東経127度線に沿った氷晶核濃度の船上観測を行った。1979年5月初旬、東京から石垣島の位置する北緯25度付近までは、南下するにつれて氷晶核濃度が減少すること、一方、6月中旬同緯度から東京へ北上する間、低濃度で、しかも変動の少ないことが分かった。

6. 石垣島における氷晶核濃度の変化

石垣島地方気象台において1977年1月から1978年1月まで、最低1日1回正午に、1年間を通して、氷晶核の測定を行った。測定回数は台風の接近、黄砂雲の飛来など気象の変化に応じて随時増やした。第4図は氷晶核の1年間の変動を示す。変動の大まかな傾向は2月から4月にかけて高濃度を示す場合がしばしば現れ、6月と7

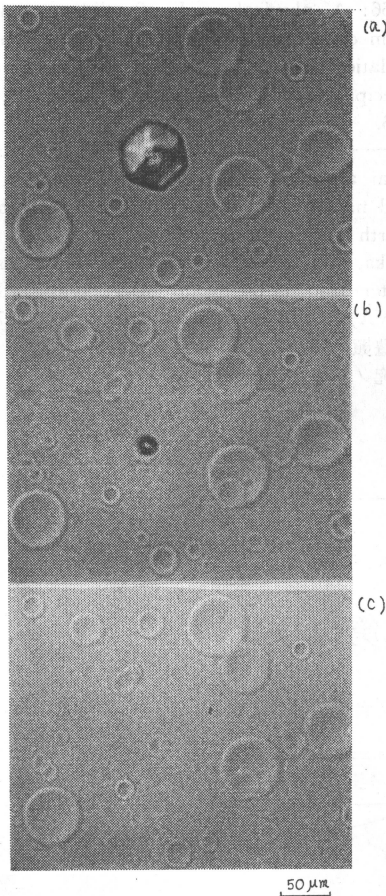


第5図 富士山頂と石垣島における氷晶核の月平均濃度の季節変化

月は低濃度が続いている。8月から再び高濃度がしばしば現れるようになる。2月、3月および10月に観測された黄砂雲の中では必ず氷晶核の高濃度が観察されている。

既に見た富士山頂での氷晶核濃度と石垣島で観測された氷晶核濃度のそれぞれの月別平均値の変動をあわせ第5図に示す。第一の特徴は、石垣島においても明瞭な季節変動が見られることである。第二の特徴は、地域差による季節区分のずれを考慮すれば春と秋に極大および夏と冬に極小の現れる点において、両地点での変動傾向は完全に一致していることである。

約2000 km 隔たった2つの地点で氷晶核濃度がおなじ傾向で変化する事実は、その変動を支配する原因が同じ



第6図 筑波山頂で採集された雪粒のレプリカとその中に含まれた氷晶核上に成長したの氷晶

であることを示唆している。つまり石垣島での氷晶核濃度が富士山頂での季節変動とおなじ原因で変動しているものと考えられる。

7. 雲及び降水と氷晶核（気象核として）

7.1 富士山頂における雲の発生と氷晶核の変化

1974年9月14日から17日にかけての氷晶核濃度の変動と、その間の温度スペクトルの変化を調べた（田中, 1974）。15日の正午を境に山頂は雲に包まれ、氷晶核濃度は著しい減少を示した。それ以後氷晶核濃度は低濃度が続いた。この雲の発生に伴う氷晶核濃度の変化は温度スペクトルの変化にも現れた。正午までの比較的高い濃度の期間、活性化温度の低下に伴って氷晶核数は直線的に増加する傾向にある。ところが低濃度が始まった時点

から、活性化温度が -22°C より高い温度では氷晶核が全く検出されなくなり、より低い温度で活性化する数も少なくなった。このスペクトルの変化は、比較的高い温度で作用する有効な氷晶核が、雲のなんらかの作用で大気中から除去されたことを示唆している。有力な可能性として、氷晶核が雲粒の中に取り込まれたことが考えられる。もしそうであれば、氷晶核は雲粒に含まれているはずである。

7.2 雲粒に含まれる氷晶核…混合核としての氷晶核
雲の内部（雲粒と外気）と外部（雲粒を含まない外気）において同時刻に2種類の試料を採取しそれぞれの試料について氷晶核を検出した。その結果、雲の内部で採取した試料の方が、外部の雲粒を含まない試料より2倍ほど多い氷晶核を検出した。つまりこの結果は、雲の発生に伴って有効な氷晶核が急激に消失したのは、そうした氷晶核が雲粒に取り込まれたためであることを示している。

もし氷晶核が雲粒に取り込まれているのであれば、雲粒から氷晶核が検出できるはずである。第6図の写真は筑波山頂にかかる雲の中で、PVA法（Tanaka, 1972）で採集した雲粒の残さを中心に成長した氷晶の昇華蒸発過程を示す。こうした実験から、自然の雲には氷晶核として作用する粒子を既に含むような雲粒の存在することが明らかになった。

氷晶核を含む雲粒は雲の発達に伴う温度の低下によって凍結し、氷晶となる。氷晶は成長過程をへて降雪粒子となり地上で雪として観察される。つまり大気中の氷晶核と降雪粒子の数の間には一定の関係が期待できる。

7.3 降雪粒子と氷晶核

1964年1月、能登半島の輪島において、大気中の氷晶核濃度と降雪粒子を構成する氷晶の数を測定した（Isono *et. al*, 1965）。その結果、氷晶核濃度の増加に伴って落下する氷晶の数も増加することが分かった。

8. まとめ

富士山頂と石垣島での氷晶核の連続観測から、氷晶核濃度は両地点とも春に最大、夏に最小となる顕著な季節変化を示すことが明らかになった。両地点での春の最大はいずれも中国大陆から飛来した黄砂雲の中で観測された。これらの観測から黄砂粒子は日本列島の氷晶核として重要な物質であり、氷晶核の個数濃度を支配していることが分かった。

氷晶核の個数濃度はさらに雲の発生とも密接に関係し

ており、氷晶核を含んだ雲粒の存在を実験によって始めて示した。この事実は氷晶核として働く粒子が混合核として存在し、まず凝結核として働き、次に凍結核として働くことを示している。こうした氷晶核の作用過程は、雲の生成とその氷晶化にとって重要な物理過程であると同時に、雲の人工調節にとっても重要な知見である。

文 献

Isono, K., K. Komabayashi and A. Ono, 1959: The nature and the origin of ice nuclei in the atmosphere, J. Meteor. Soc. Japan, 37, 211-233.

———, ———, T. Takahashi and T. Tanaka,

1966: A physical study of solid precipitation from convective clouds over the sea, Part II. Relation between ice nucleus concentration and precipitation, J. Meteor. Soc. Japan, 44, 218-226.

———, T. Takeda, T. Tanaka, K. Iwai and M. Fujiwara, 1971: Concentration and nature of ice nuclei in the rim of the North Pacific Ocean, Tellus, 23, 40-59.

Tanaka, T., 1972: The method for measuring water droplets by means of Polyvinyl Alcohol (PVA) film, Pap. Met. Geophys., 23, 287-306.

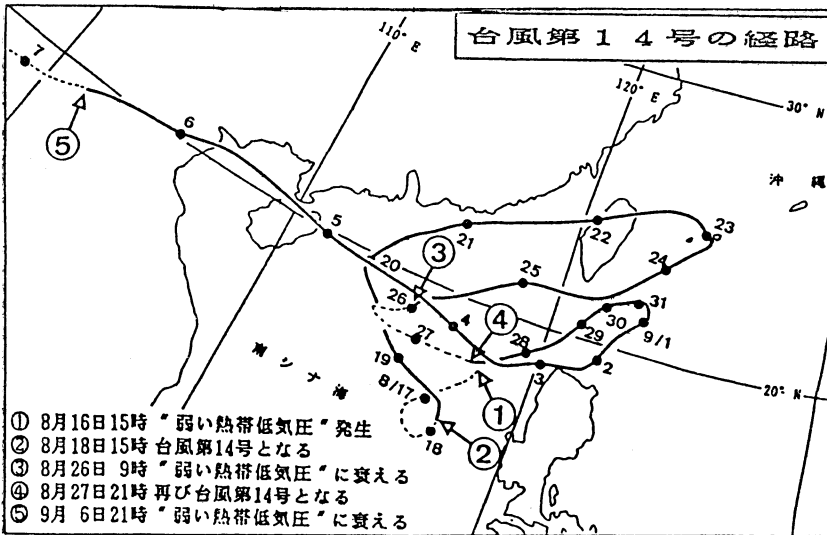
田中豊顕, 1974: 雲の氷晶化過程と氷晶核. 気象研究ノート, 122, 689-737.



長寿で迷走した台風第14号

南シナ海で発生した“弱い熱帯低気圧”は、1986年8月

18日15時台風第14号となり、発達した勢力(960 mb)の



まま台湾に上陸した。台風はその後、台湾付近や南シナ海を迷走し、9月6日21時、インドシナ半島で“弱い熱帯低気圧”に衰えた。

台風としての通算寿命は、途中熱帯低気圧に衰えていた36時間を差し引いても、17日と18時間もの長寿台風で、統計を始めた昭和26年以後第3位となった。(1位は47年の第7号で19日)

(気象庁ニュース 61.9.15 より)