

# 氷晶発生過程に関する研究

村上正隆、折笠成宏、斎藤篤思、田尻拓也（物理気象研究部）

永井智広、酒井 哲（気象衛星・観測システム研究部）、橋本明弘（予報研究部）

## 1. はじめに

中緯度地方の雲システムの大部分は、氷相を含んでいる。氷晶発生過程は氷晶雲・混合雲の微物理構造を決定するだけでなく、雲の寿命や雲量さらにはその後の降水の発達に大きな影響を及ぼす要素である。氷晶発生過程の研究は、戦後から約半世紀にわたって行われてきたが、凝結核とは異なり氷晶発生過程には幾通りものメカニズムが存在し非常に複雑なため、定量的にも定性的にも未解明の部分が多い。

氷晶発生過程の解明は、領域モデルとして導入されている高解像度非静力学モデルによる降水予測の精度向上には不可欠のものである。全球モデルにおける上層雲・中層雲の取り扱いを通しての雲の放射効果、雲・降水過程を通して水循環とエネルギー循環にも大きく寄与しており、全球モデルの予測精度向上、気候変動のメカニズム解明、地球温暖化予測の立場からも氷晶発生過程の解明は重要である。

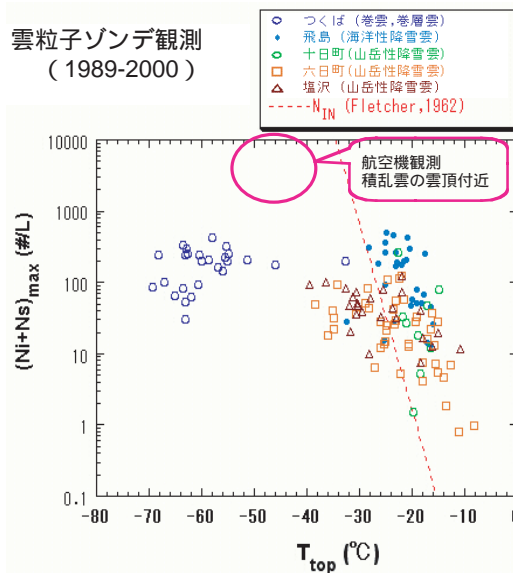
## 2. 氷晶発生メカニズム

氷晶発生メカニズムは大きく、均質核形成と不均質核形成に分類できる。自然大気中で起こる均質核形成は、均質凍結核形成で、水滴直径に若干依存するが、約 $\cdot 45$  までに全ての水滴が凍結する。

しかし、一般的には雲の温度がこれほど下がる前に、異物質でできた核となる粒子の働きで氷晶が生成される。氷晶を生成する手助けをする粒子を総称して氷晶核という。氷晶核の働き方は4通りが考えられる。水蒸気が直接氷に変化して氷晶を生成するとき芯となる粒子は、昇華（凝結）核と呼ばれる。残りの3つはいずれも水滴を凍結する手助けをするものである。比較的暖かい温度領域で水滴内に取り込まれ、その後の温度低下によって水滴を凍結させるのが（内部）凍結核である。凝結核と凍結核の性質を合わせ持つ粒子（混合核と呼ぶ）の上に凝結によって水滴が生成された直後、不溶性の物質が凍結核として働き、水滴を凍らせる。このような粒子を凝結凍結核という。接触凍結核として働く粒子は、水滴に衝突して凍結させる。

## 3. 雲内氷晶とエアロゾル

雲粒子ゾンデおよび航空機観測のデータを用いて、日本付近の雲内最大氷晶数濃度を雲頂温度の関数として調べた（第



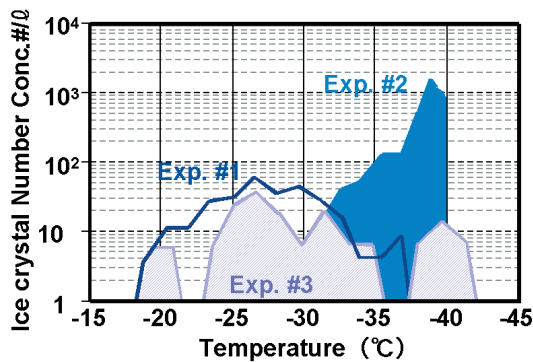
第1図 雲内最大氷晶数濃度（縦軸）と雲頂温度（横軸）の関係。破線はFletcher（1962）の経験式。

1図）。層状性の氷晶雲内の氷晶数濃度は雲頂温度が $\cdot 50 \sim \cdot 70$  でも数100個/Lと比較的低濃度で、全体的にFletcher経験式より雲頂温度依存性が弱いことが示された。 $\cdot 10 \sim \cdot 30$  の領域では、上昇流や過冷却雲粒の共存下で比較的高濃度の氷晶が観測された。また、 $\cdot 40$  以下の対流雲の上昇流コア中では数1000個/Lの氷晶が観測され、均質凍結が卓越していることを示唆した。

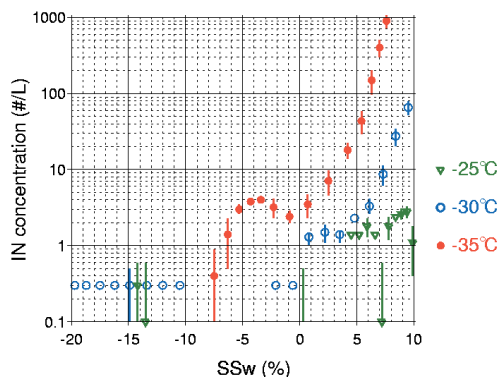
次に、波状雲について氷晶核濃度と初期氷晶濃度の同時観測データを解析した。平均的には両者に概ね良い対応が見られたが、個々のケースについては1桁近い相違も見られた。また、山岳性降雪雲内の初期氷晶濃度は、黄砂飛来時に通常時の平均値より1/2オーダー高濃度となっており、黄砂粒子が氷晶核として有効であることが示された。しかし、黄砂飛来時でなくてもそれに近い値が観測される場合もあり、黄砂以外の粒子が氷晶核として働いていることも示唆された。

## 4. エアロゾルの氷晶核能力

エアロゾル粒子の氷晶核としての活性化能力を調べるため、雲生成チェンバーおよび連続流熱拡散型氷晶核計の開発・改良を進めた。雲生成チェンバーは断熱膨張（雲生成）過程を準実スケールで再現することができ、均質凍結も含め5通り



第2図 雲生成チェンバー実験で得られた氷晶数濃度（縦軸）と気温（横軸）の関係。Exp.#1は外気エアロゾル（露点温度-5）、Exp.#2は外気エアロゾルに高濃度の線香の煙を混合（露点温度-5）、Exp.#3は外気エアロゾル（露点温度-10）。



第3図 1ミクロン以下のダスト粒子の氷晶核としての活性化スペクトル。縦軸は氷晶核数、横軸は水に対する過飽和度。

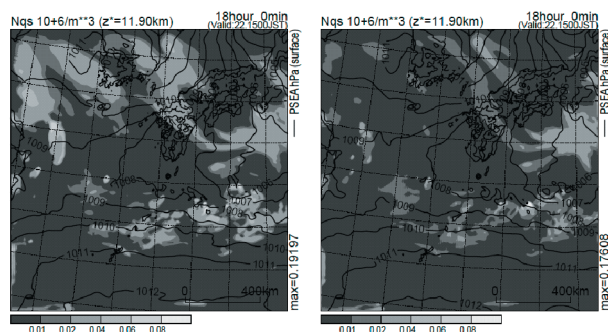
の一次氷晶発生機構を調べることができる。一方、氷晶核計は一定の過冷却度・過飽和度で起こる均質凍結、昇華核、凝結凍結核の活性化を調べることができる。

雲生成チェンバー実験から、上昇流3m/sの下では、秋季の外気エアロゾルから-20付近で数個/L、-30付近で数10個/Lの氷晶が生成され、高濃度の有機炭素エアロゾル（線香の煙）を混合した場合には-37以下で1000個/L以上の高濃度の氷晶が発生することも確認された（第2図）。

氷晶核計による測定でも、夏季の外気エアロゾルから水飽和付近では-20で1個/L、-35で10個/L程度の氷晶が生成されるが、水飽和付近での急激な変化は観測されなかった。サブミクロンのダスト粒子（Arizona test dust）では、-25付近で凝結凍結核として働き始め（数個/L）、-35付近では水に対する相対湿度93%から昇華核として働き始め（数個/L）、多くのダスト粒子が凝結凍結核として働き、水飽和付近で活性化する氷晶核数が急増することが明らかとなった（第3図）。

## 5. 氷晶発生機構モデリングと雲・降水へのインパクト

雲物理バルクパラメタリゼーションに関しては、昇華核形成における氷過飽和度を上昇流による余剰水蒸気の生成及び



第4図 高度11.9kmにおける雪粒子の数濃度分布図。（左）従来の氷晶生成スキーム（Meyers et al., 1992）、（右）新しいスキームによる結果。

雲・降水粒子の成長による余剰水蒸気の消費を考慮した診断型スキームを開発し、非静力学モデル（NHM）を用いて感度実験を行った。従来のスキームと比べて、上層雲の過大評価を大幅に改善することが確かめられた（第4図）。また、冬季季節風時の雪雲に関しても、降雪量や地形に相対的な降雪分布は氷晶発生過程のパラメタリゼーションに依存することが示された。

エアロゾル（水溶性と不溶性エアロゾルの混合）、水滴（水質量、溶質質量）、氷粒子（水質量、形状ファクター、バルク密度）を陽に取り扱う詳細雲物理モデルを開発した。その中で、氷晶核を不溶性エアロゾルと相対湿度によって膨潤する水溶性エアロゾルの混合物と仮定し、昇華核形成および凝結凍結核形成を統一的に扱えるよう定式化し、NHMへの適用を検討中である。

## 6. まとめ

観測・実験結果から、活性化する氷晶核数濃度の温度依存性はFletcher経験式より弱いこと、通常の雲では凝結凍結核の活性化が卓越し、昇華核の活性化は副次的であることが明らかとなった。NHMを用いた感度実験では、氷晶発生過程の取り扱いが上層雲の広がりや氷晶数濃度、山岳性降雪雲からの降雪量やその空間分布に大きな影響を及ぼすことが示された。

世界的に見ても、本格的な氷晶発生過程に関する研究は緒に就いたばかりである。本研究で用いられた氷晶核と雲内氷晶に関する観測データやエアロゾルの氷晶核としての活性化能力に関する実験・観測データは、質・量ともにまだ不十分なもので、今後も継続してデータを取得する必要がある。

今後の研究では、各種エアロゾルの氷晶核活性化スペクトル（過冷却温度と氷過飽和度の関数として）を明らかにして、氷晶核の時間空間的変動の定量的把握に努めるとともに、現実の各種雲システムの中で氷晶核がどのような役割を果たすか解明していく必要がある。