HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Studies on the formation of high ice-concentration cirrus in the Tropical Tropopause Layer [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	三村, 慧
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(環境科学)
Dissertation Number	甲第13383号
Issue Date	2018-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/72382
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Satoru_Mimura_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士（環境科学）　　氏 名　三 村　慧

審査委員　主査　教 授　長谷部 文 雄
副査　教 授　渡 辺　力
副査　准教授　藤 原 正 智
副査　助 教　豊 田 威 信
副査　准教授　鈴 木 健太郎（東京大学大気海洋研究所）

学 位 論 文 題 名

Studies on the formation of high ice-concentration cirrus
in the Tropical Tropopause Layer
（熱帯対流圏界層における高氷晶数密度巻雲の生成過程に関する研究）

熱帯対流圏界層（Tropical Tropopause Layer; TTL）に生成する巻雲は，大気の放射バランスを変化させるだけでなく，水平移流に伴う脱水を経て成層圏へ流入する水蒸気量の決定にも密接に関わっており，その理解は気候変動予測の観点からも重要である。TTL 巻雲の生成過程は，航空機等による現場観測データと雲微物理モデルシミュレーションとの比較から多くの議論がなされてきたが，TTL 内で実際に進行する過程はまだ十分に理解されていない。このような問題意識の下で実施された航空機観測 Airborne Tropical TRopopause EXperiment (ATTREX) では，厚さが約 20 m と非常に薄く，10^4 L^{-1} という高い氷晶数密度を持つ特徴的な巻雲が観測された。この特徴は，この巻雲が均質核生成により形成され，氷晶の落下や空気塊の混合・散逸をほとんど経験していないことを示唆する。本研究は，理想的な条件下で観測されたと見なせるこの事例に注目し，雲微物理モデルによってその生成条件を特定することにより，TTL 内巻雲形成過程の理解の深化を目的として実施する。

最初に単粒径エアロゾル条件を仮定し，均質核生成過程を記述する雲微物理モデルを用いて，等温位かつ冷却率一定の条件下で，過飽和が解消するまでに実現する氷晶数密度の最大値（最大氷晶数密度）が 10^4 L^{-1} に達する条件を考察した。観測値に基づく水蒸気混合比を初期値とし，冷却率とエアロゾル半径の関数として求められた最大氷晶数密度の分布は，冷却率増加に伴う増大とエアロゾル半径増加に伴う減少を示す。さらに，エアロゾル半径に対する依存性は，粒径が大きいほど顕著であるという非線形性を示す。

最大氷晶数密度のエアロゾル半径依存性は，異なる粒径のエアロゾルが混在する条件下で，エアロゾル間相互作用が氷晶生成に影響を与える可能性を示唆する。そこでエアロゾル分布を二粒径に拡張し，生成される氷晶の数密度や粒径分布に与える影響を考察した。背景量が等しい大小二粒径のエアロゾルが混在すると，単粒径の場合より生成する氷晶数が増加する現象（増幅効果）が見出された。この増幅効果は，小粒径エアロゾルからの氷晶生成によりもたらされ，大粒径エアロゾル半径（r_1）が大きいほど大きいが，小粒径エアロゾル半径（r_s）

との比 r_s/r_1 で定義される無次元量で評価すると，r_1 に関わらず $r_s/r_1 \sim 0.7$ の条件下で極大をとるという興味深い性質が得られた。

生成された氷晶の粒径分布については以下の結果を得た。単粒径エアロゾル条件では，エアロゾル半径が大きいほど分布幅が狭くモード径が大きくなる。二粒径条件では，高い冷却率が必要とされる大粒径エアロゾル条件下（例えば $r_1 = 1\,\mu m$）で氷晶粒径分布に二峰性が実現する。この特徴は，r_1 が大きく，r_s/r_1 比が小さい条件で顕著となる。形成された粒径分布の維持される特徴的時間を終端速度の違いにより評価すると，分布幅が狭い大粒径エアロゾル条件ほど長く，r_s/r_1 比 0.1 から 1.0 の範囲で 4–5 日から 11 日に分布する。

一連の計算で得られた氷晶粒径は常に ATTREX 観測結果より大粒径側に偏在し，観測結果を説明しない。この結果は，観測された氷晶を水蒸気量に換算した際に水蒸気が不足するという事実とも整合的で，ATTREX 観測における氷晶粒径の過小評価もしくは水蒸気混合比の過大評価の可能性を示唆する。一方，観測された数密度の巻雲の生成には $2–8\,K\,h^{-1}$ 以上の冷却率が必要であり，これを満たす大気中の現象にはメソスケール擾乱が該当する。今回解析対象とした薄い巻雲は，擾乱に伴う上昇流によって氷晶生成の臨界条件に達した直後の状態にあり，上昇の継続により層として厚みを増してゆく過程が後に続くと考えれば，一般的な TTL 巻雲形成過程の初期段階を観測したものと解釈できる。今後，より高分解能の氷晶粒径分布が得られれば，本研究で行われたような数値シミュレーションとの比較により巻雲の生成過程をより詳細に考察することも可能になる。

以上の研究結果は，生成直後と見なすことのできる理想的な条件下で観測された事例に注目し，雲微物理モデルを活用してその生成条件を特定することにより，均質核生成過程による TTL 内巻雲の形成過程の理解を深め，その一般化に貢献することが期待される。

審査委員一同は，これらの成果を高く評価し，また研究者として誠実かつ熱心であり，大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ，申請者が博士（環境科学）の学位を受けるのに充分な資格を有するものと判定した。