

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 8月 23日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22241004

研究課題名（和文）

低緯度上部対流圏エアロゾルの特性解明

研究課題名（英文） Clarification of the characteristics of aerosol particles in tropical upper troposphere

研究代表者

柴田 隆 (SHIBATA TAKASHI)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：70167443

研究成果の概要（和文）：

本研究では、気球搭載光学粒子計数計、地上設置ライダー、気球搭載鏡面冷却型露点湿度計を用い、インドネシアのビアクにて、それぞれの測定器で、熱帯圏界面層内のエアロゾル粒径分布と温度対蒸発特性、エアロゾルと巻雲の後方散乱断面積、および湿度、の各高度分布を得た。さらにこれらの観測結果を用いた微物理数値モデル実験により、熱帯圏界面層内でしばしば観測される、極端な水蒸気過飽和の原因を推定した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we obtained the vertical distributions of size distribution and temperature dependence of volatility of aerosols, backscattering coefficients of aerosols and cirrus clouds, and humidity, using balloon borne optical particle counter, ground based lidar, and cryogenic frost point hygrometer, respectively, in tropical tropopause layer over Biak, Indonesia. We clarified the mechanism how the high super saturation of the humidity over ice is formed by using microphysical numerical model applying the observed parameters.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	17,900,000	5,370,000	23,270,000
2011年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2012年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
総計	37,300,000	11,190,000	48,490,000

研究分野：環境学

科研費の分科・細目：環境解析学・環境動態解析

キーワード：熱帯圏界面、エアロゾル、巻雲、氷晶核、脱水、ライダー、OPC、露点湿度計

1. 研究開始当初の背景

(1) 低緯度上部対流圏エアロゾル (Low latitude Upper Tropospheric AeroSols; 以下 LOUTAS と略す) は、低緯度の対流圏界面付近の非常に低温な領域で氷雲を生成し、脱水によって成層圏の水蒸気量を決める。これまでの散発的な大型航空機を用いた観測によると、LOUTAS は主としてこの高度域で

生成した硫酸を主成分とする二次粒子であるとされている。が、LOUTAS の高度分布、粒径分布、組成、それらの変化などの詳細は明らかでない。LOUTAS 粒子の特徴が十分知られていないため、LOUTAS から氷粒子が生成する過程は明らかでない。このため対流圏から成層圏に輸送される水蒸気量の精密な見積りは困難となっている。(1990年代以降

成層圏水蒸気量が年々増加したが、その原因は未だ解明されていない。)水蒸気は主たる温室効果気体であり、また圏界面直下に生成された氷雲(巻雲)は温室効果をもつ。成層圏の水蒸気は光化学反応を通して成層圏全体の大気組成を左右する。大循環によって成層圏に至った LOUTAS は成層圏エアロゾルを形成し、高緯度では極成層圏雲を生成して極域成層圏オゾン破壊(オゾンホール)で主たる役割を演ずる。

(2) LOUTAS に関する知見の欠如は、これら成層圏を含めた気候や物質循環の理解、さらには正確なモデル予測を妨げている。

(3) 本研究の着想に至った経緯は以下の通りである: 応募者らは低緯度上部対流圏における脱水過程の研究のため、気球搭載露点計を用いた湿度、及びライダーを用いた巻雲(氷雲)の同時測定を行い、圏界面直下の巻雲が存在する高度で、対氷相対湿度が常に百数十%から最大二百%の高い過飽和状態にあることを見いだした。この高度域の相対湿度は成層圏に輸送される水蒸気量に直接関係する(対応する蒸気圧の水蒸気が成層圏に達するため、高過飽和が生じる原因・機構に関する知見は、精密なモデル予測に欠かせない。氷雲粒子が存在する状態で数十%以上の過飽和を達成するためには、雲粒子の個数濃度が $1000 \text{ 個}/\text{m}^3$ 程度以下と極めて低い必要がある。雲粒子の個数濃度は生成元となるエアロゾルの組成や個数粒径分布に依存する。従って、過飽和の原因を知るためにはこれらのエアロゾル粒子の微物理的な情報を得ることが不可欠である。

2. 研究の目的

(1) 大気エアロゾルは気候や物質循環に様々な形で大きく影響する。このうち、低緯度上部対流圏のエアロゾルは、氷雲を生成し対流圏から成層圏に運ばれる水蒸気を脱水して成層圏の乾燥状態を作り出しているとともに、成層圏エアロゾルの起源でもある。低緯度上部対流圏エアロゾルはその重要性にもかかわらず、これまで研究対象とされることが希で、理解が遅れている。

(2) 本研究の目的は低緯度上部対流圏エアロゾルを、先行研究における大型航空機を用いる方法に対し、ゴム気球や地上からの遠隔測定を用いたより安価かつ航空機とは異なる面で自由度の高い方法で観測し、主な特徴(高度分布、粒径分布、組成)を明らかにすることである。さらにその上で、上記氷雲や水蒸気との関係の解明をめざす。

3. 研究の方法

(1) 本研究は観測を中心として実施された。LOUTAS、巻雲、及び水蒸気の観測には、それぞれ、気球搭載 OPC とライダー、ライダ

ー、及び気球搭載 CFH を用いた。観測地は従来観測拠点として築いてきた赤道直下に位置するインドネシア、ビアクを利用した。ビアク上空は低緯度領域の中でも対流圏から成層圏に輸送される空気塊が脱水を受ける地域にあり、研究目的に最適の地点と考えられる。観測時期は対流圏から成層圏への輸送が最も活発となる北半球冬季にキャンペーン観測として集中的に実施した。研究期間に得られた観測結果と微物理数値モデルを用いながら各プロセスを解析した。

(2) ライダー観測では波長 1064 nm と 532 nm におけるエアロゾルと巻雲の後方散乱係数を測定した。また偏光解消度が 532 nm で測定され、巻雲と液滴エアロゾルの判別に利用された。ライダーは三回のキャンペーン期間中連続的に動作させた。OPC はゴム気球で高度 30 km 付近まで到達した。OPC は、最小検出粒径が直径 $0.3 \mu\text{m}$ で、 $10 \mu\text{m}$ までの間の 10 の粒径閾値以上の粒子数を計数した。

(2) OPC は 2 台を同時に使い、1 台の OPC には加熱吸入口を用いてエアロゾルの揮発特性を測定した。2011 年の観測では加熱温度を 200°C 、2012 年の観測では 100 、 150 、 200°C の三通りで観測した。これらの温度では硫酸水溶液のみが揮発するため、主な残存粒子は硫酸塩、海塩および鉍物粒子と考えられる。2013 年の観測では 200 、 250 、 300°C の三通りで観測した。特に 300°C では硫酸塩はほぼ蒸発するため、主な残存粒子は海塩および鉍物粒子と考えられる。

(3) 水蒸気は露点湿度計(CFH)で測定した。CFH は熱帯圏界面や成層圏の低温・乾燥状態での測定に最適化されている。

4. 研究成果

(1) 図 1 は 2011 年 1 月 11 日から 12 日にかけて観測された 532 nm における後方散乱計数のプロットである。後方散乱計数は粒子(エアロゾルもしくは巻雲)の濃度におおよそ比例する量である。高度 15 から 16 km 付近、後方散乱係数 $10^{-7}/\text{m}/\text{strad}$ 以上の濃い部分は巻雲からの強い後方散乱を示している。この巻雲の上、高度 17.5 から 18.5 km にかけて、後方散乱係数 $10^{-7}/\text{m}/\text{strad}$ 以下でより安定な薄いエアロゾル層が見える。この図では見にくいだが、12 日の午前 3 から 6 時にかけて高度 17.5 から 18 km の間に巻雲が出現した。

(2) 高度 17.5 から 18.5 km にかけてエアロゾル層は種々の考察の結果、火山起源の硫酸水溶液液滴エアロゾルであると推定された。2010 年 10 月末にインドネシア、ジャワ島にあるメラピ火山が噴火し、噴火雲が 18 km を越える高度まで到達したことが報告されている。候補となるような規模の噴火はこの時期他になく、また衛星ライダー CALIOP の観測

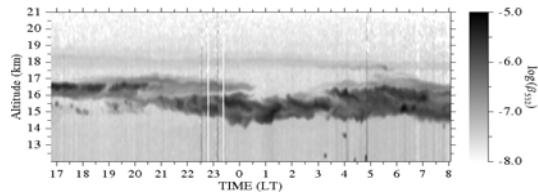


図1 ライダーで観測された後方散乱係数。16km 付近の濃い散乱は巻雲を、18km 付近の薄い層は火山性エアロゾルを示す。

データから、メラピ火山噴火がエアロゾル層の起源として最も可能性の高いと考えられる。

(3) 12日早朝に現れた巻雲は、後方流跡線解析の結果、直前に積雲対流の影響を受けておらず、おそらく観測された高度で生成されたものと推定できる。

(4) 熱帯圏界面に現れる巻雲内でしばしば観測された高い対氷過飽和 (>150%) や氷生成に関する室内実験の結果から、この領域の巻雲は硫酸水溶液液滴の中で均一核生成されるであろうことが示唆されていた。このような均一核生成過程で生じる氷粒子の個数濃度は硫酸水溶液液滴の濃度程度になるはずであることが示されている。ところが、熱帯圏界面付近に発生した氷粒子の個数濃度は液滴エアロゾルの個数濃度に比べて一桁以上小さく、最近では、熱帯圏界面付近の氷粒子が主として硫酸水溶液液滴の中での均一核生成というプロセスで生成するという仮説には疑問の目が向けられている。

(5) 今回観測された巻雲生成事例は、期せずして生じた、熱帯圏界面領域の氷生成に関する自然界での実験と見なすことができる。12日早朝に現れた巻雲は硫酸水溶液エアロゾルが卓越する環境の中で生成しており、水溶液エアロゾルの中での巻雲の均一核生成プロセスの可否を判定するには絶好の事例と考えることができる。OPCで観測されたエアロゾル層内の硫酸水溶液エアロゾルの個数濃度は $\sim 3 \times 10^6 / \text{m}^3$ 程度である。一方、散乱理論を用いてライダー観測データより推定した巻雲粒子の個数濃度は $10^5 / \text{m}^3$ 程度以下であり、OPCで観測されたエアロゾル濃度より一桁以上小さい。また同時に観測された非揮発性エアロゾル濃度とほぼ一致する(図2(b))。この結果は、硫酸水溶液液滴の中で均一核生成に対する疑問と同時に、先行研究で示唆された固体エアロゾルによる巻雲粒子の核生成を支持している。

(6) 硫酸水溶液液滴エアロゾルに比べて個数濃度が一桁程度小さい固体エアロゾル (非揮

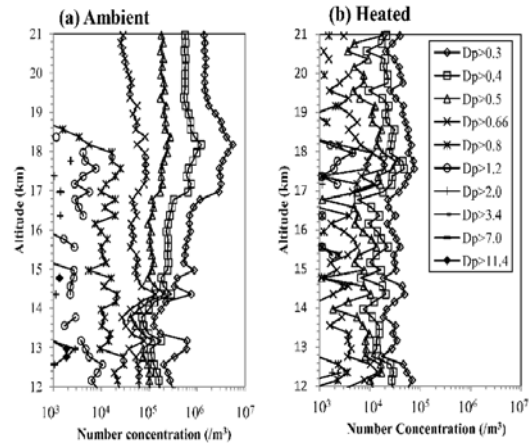


図2 OPCによって観測された(b)中凡例の粒径(直径)より大きい粒子の個数濃度。(a)は外気温にて、(b)は200°Cに加熱した後測定した。

発性エアロゾル) による巻雲粒子生成を組み込んだ微物理数値モデルによるシミュレーションの結果、大気中でしばしば見られるような冷却率のもとでも150%を越える対氷相対湿度が達成されることが確認された。

(7) 上記の研究により、熱帯圏界面付近でしばしば観測される高い対氷過飽和をもたらす原因が上記固体エアロゾル粒子を核とした巻雲粒子生成である可能性が高いことが示された。本研究では非揮発性エアロゾルの組成を詳細に決定できるような測定は残念ながら実施できておらず、今後LOUTAS詳細な組成を求めることが大きな課題として残る。

(8) なお以上の成果は米国地球科学学会誌 (Journal of Geophysical Research) にて発表済みである。

(9) 上記の結果のほか2011, 2012および2013年の三回にわたる冬季のキャンペーンで、各キャンペーン期間を通してのライダー観測と合計6回の加熱・非加熱OPC同時飛揚に成功しており、さらなる解析を進めており、下記の雑誌掲載論文に加えて今後順次発表していく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① Y. Inai, F. Hasebe, M. Fujiwara, M. Shiotani, N. Nishi, S.-Y. Ogino, H. Vomel, S. Iwasaki, and T. Shibata, Dehydration in the tropical tropopause layer estimated from the water vapor match, 査読無、Atmos. Chem. Phys. Discuss., 13,

- 633-688, 2013.
- ② Inai, Y., T. Shibata, M. Fujiwara, F. Hasebe, and H. Voemel, High supersaturation inside cirrus in well-developed tropical tropopause layer over Indonesia, 査読有、Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2012GL053638, 2012.
- ③ T. Shibata, M. Hayashi, A. Naganuma, N. Hara, K. Hara, F. Hasebe, K. Shimizu, N. Komala, Y. Inai, H. Voemel, S. Hamdi, S. Iwasaki, M. Fujiwara, M. Shiotani, S.-Y. Ogino, and N. Nishi, Cirrus cloud appearance in a volcanic aerosol layer around the tropical cold point tropopause over Biak, Indonesia in January 2011, 査読有、J. Geophys. Res., 117, D11209, doi:10.1029/2011JD017029, 2012.
- ④ Suginori Iwasaki, Takashi Shibata, Hajime Okamoto, Hiroshi Ishimoto, and Hisayuki Kubota, Mixtures of stratospheric and overshooting air measured using A-train sensors, 査読有、J. Geophys. Res., 117, D12207, doi:10.1029/2011JD017402, 2012.
- ⑤ F. Hasebe, Y. Inai, M. Shiotani, M. Fujiwara, H. Vomel, N. Nishi, S.-Y. Ogino, T. Shibata, S. Iwasaki, N. Komala, T. Peter, and S. J. Oltmans, Cold trap dehydration in the Tropical Tropopause Layer characterized by SOWER chilled-mirror hygrometer network data in the Tropical Pacific, 査読無、Atmos. Chem. Phys. Discuss., 12, 25833-25885, 2012.

[学会発表] (計5件)

- ① 柴田隆、林政彦、原圭一郎、長沼歩、原直子、稲飯洋一、長谷部文雄、清水健作、熱帯圏界面付近で観測された火山性エアロゾル層とそこでの巻雲生成、エアロゾル科学・技術討論会、2012年8月28日～8月30日、北九州学術研究都市
- ② 林政彦、武田尚太、長沼歩、原圭一郎、柴田隆、2012年1月のBiak上空TTL領域のエアロゾル揮発特性の鉛直分布、日本気象学会春季大会、2012年5月26日～5月29日、つくば国際会議場
- ③ 岩崎杉紀、久保田尚之、柴田隆、岡本創、石元裕史、中高緯度の対流圏界面まで達する深い対流、日本気象学会春季大会、2012年5月26日～5月29日、つくば国際会議場
- ④ 櫻井万祐子、柴田隆、熱帯圏界面層でのエアロゾルと巻雲生成に関する数値実験、日本気象学会秋季大会、2012年10月3日～10月5日、北海道大学
- ⑤ 岩崎杉紀、久保田尚之、柴田隆、岡本創、石元裕史、オーバーシュート解析における

MODIS と IIR の輝度温度の違い、日本気象学会秋季大会、2012年10月3日～10月5日、北海道大学
[図書] (計0件)

[産業財産権]
○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等
<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/~tshibata/kibanA.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田隆 (SHIBATA TAKASHI)
名古屋大学・環境学研究科・教授
研究者番号：70167443

(2) 研究分担者

長谷部文雄 (HASEBE FUMIO)
北海道大学・地球環境学研究科・教授
研究者番号：00261735
岩崎杉紀 (IWASAKI SUGINORI)
防衛大学校・応用科学群・講師
研究者番号：30535274
林政彦 (HAYASHI MASAHIKO)
福岡大学・理学部・教授
研究者番号：50228590

(3) 連携研究研究者なし

()
研究者番号：