

—報告—

Report

南極昭和基地におけるフーリエ変換赤外分光器 (FTIR) を用いた 極成層圏雲 (PSC) の特性評価

中島英彰^{1*}・佐伯浩介²・矢吹正教^{3,4}・塩原匡貴⁴

Characterization of polar stratospheric cloud (PSC) using ground-based
Fourier-transform infrared spectrometer (FTIR) at Syowa Station, Antarctica

Hideaki Nakajima^{1*}, Kosuke Saeki², Masanori Yabuki^{3,4} and Masataka Shiobara⁴

(2010 年 3 月 16 日受付; 2010 年 4 月 22 日受理)

Abstract: Polar stratospheric clouds (PSCs) play an important role in ozone destruction via the occurrence of heterogeneous reactions on their surface that convert reservoir species of active chlorine and bromine (*e.g.*, HCl, ClONO₂, HBr, or BrONO₂) into active Cl₂ or Br₂. However, a lack of direct measurements means that uncertainty remains regarding the characteristics, types, mixtures, and nature of PSCs. To address this problem, we conducted, for the first time, ground-based measurements of the features of PSCs using a low-resolution Fourier-transform infrared (FTIR) spectrometer at Syowa Station, Antarctica, in 2007. Many PSCs were observed between July and August 2007. We succeeded in identifying the features of Ice (Type-II), NAD and/or β -NAT (Type-Ia), and STS (Type-Ib) PSCs in the zenith sky infrared spectra measured by FTIR.

要旨: 極成層圏雲 (PSC) は、その表面上での不均一反応により、塩素や臭素といったラジカルを閉じ込めているリザーバー分子から塩素・臭素を活性化させ、大規模なオゾン破壊の引き金を引くため、その特性評価の解明が望まれている。しかし、これまでは直接観測の難しさなどから、なかなかその特徴に関しては明らかにされてこなかった。我々は、第 48 次日本南極地域観測隊による越冬観測期間中に、低分解能フーリエ変換赤外分光器 (FTIR) を用いた地上からの PSC の特性評価観測を南極昭和基地において世界で初

¹ 国立環境研究所大気圏環境研究領域, Atmospheric Environment Division, National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba-city, Ibaraki 305-8506.

² 東北大学大学院環境科学研究科, Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, 6-6-20 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579.

³ (現所属 present affiliation): 京都市大学生存圏研究所, Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011.

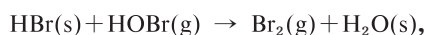
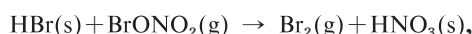
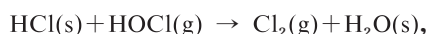
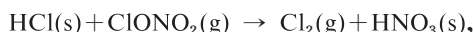
⁴ 情報・システム研究機構国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

* Corresponding author. E-mail: nakajima@nies.go.jp

めて立ち上げた。昭和基地では 2007 年 7-8 月にかけて、数多くの PSC イベントが MPL データから確認された。これらの日の FTIR 赤外放射スペクトルから、Ice (Type-II)、NAD もしくは β -NAT (Type-Ia)、及び STS (Type-Ib) PSC の存在が示唆された。

1. 序 章

極成層圏雲 (Polar Stratospheric Cloud: PSC) は、オゾン層破壊に関連して鍵となる働きをしていることが近年の研究で明らかとなってきた。つまり、冬季極域の -78°C 以下にまで冷却する極域成層圏において、その他の場所では存在しえない PSC が熱力学的に成長する。PSC にはさまざまなタイプが存在することが分かっているが、その組成や形成過程に関しては、まだ不明な点が多い (Lowe and MacKenzie, 2008)。PSC の存在下においては、オゾン破壊を促進する活性の塩素や臭素をリザーバーの形で蓄えている、 HCl 、 ClONO_2 、 HBr 、 BrONO_2 といった物質が、PSC 表面上の、



といった不均一反応によって Cl_2 や Br_2 を生成する。

生成された Cl_2 や Br_2 は、春に太陽光が極域成層圏に戻ってくると、そこで光解離によって活性の Cl 、 ClO 、 Br 、 BrO などを生じさせ、触媒反応による大規模なオゾン破壊へと繋がることになる。

しかし、PSC は気温が -78°C 以下程度までに低下する、高度 15-25 km といった極域冬季の成層圏に限って発生するため、飛翔体などによる直接観測が困難で、その特性やタイプ、組成、形状、粒形分布といった特徴がなかなか明らかにされてこなかった。それでも、地上からのライダー等によるリモートセンシング観測 (Iwasaka *et al.*, 1993; Shibata *et al.*, 1997)、光学式エアロゾルゾンデなどを用いた観測 (Hayashi *et al.*, 1998)、及び人工衛星からの観測 (Hayashida *et al.*, 2000; Saitoh *et al.*, 2002) などにより、その特性が徐々に明らかにされつつある。

一方、さまざまなグループが貢献している化学気候モデル (Chemistry Climate Model: CCM) によるオゾン層将来予測モデル (WMO, 2007) によると、南極上空では 2040-2065 年頃までにオゾンホールが元のレベルまで回復するという予測が大多数であるが、北極上空に関してはモデル間のばらつきが大変大きく、確固たるオゾン回復時期に関する結論はまだ得られていない。その原因の一つとして、北極の冬季成層圏最低気温付近に出現する PSC の物理・化学過程に関してまだよく分かっていないことが挙げられる。本研究の目的は、PSC の特性に関する情報を地上リモートセンシング観測から得て、それを将来的には

オゾンマッチ観測によるオゾン破壊量と定量的に比較することにより、各種 PSC がオゾン層破壊に与える影響の大きさを定量的に把握しようとするものである。

2. PSC の特徴

PSC は、気温が -78°C 以下にまで低下する極域の成層圏に生成する。PSC は従来からの観測により、大きく三つのタイプに分類されている。つまり、Type-Ia、Type-Ib、及び Type-II である。Type-Ia は、硝酸三水和物からなる固体粒子と考えられており、NAT (Nitric Acid Trihydrate) と呼ばれている。なお、NAT の亜種に、硝酸二水和物 NAD (Nitric Acid Dihydrate) が存在すると考えられている。Type-Ib は、過冷却三成分液滴 (Super-cooled Ternary Solution) と呼ばれており、硫酸 (H_2SO_4)、硝酸 (HNO_3)、水 (H_2O) が成層圏の温度に従ったある割合で混合された液体粒子と考えられている。この PSC は球形をしていることから、ライダー観測等による偏光解消度 (Depolarization Ratio) が 0 に近いことに特徴がある。また Type-II は、純粋な水が氷結した氷 (Ice) であり、成層圏条件下では -85°C 程度以下にまで冷却しないと生成しないと考えられている。

PSC の光学的性質に関しては、成層圏の状況を模した実験チャンバーにおいて、さまざまなタイプの PSC を擬似的に生成し、その光学的特性の指標となる複素屈折率の値が測定されてきた (Toon *et al.*, 1994; Clapp *et al.*, 1995; Norman *et al.*, 1999; Norman *et al.*, 2002, etc.)。これらの複素屈折率データを用い、ある種の PSC の平均粒径半径と粒径分布を仮定してやり、ミー散乱計算を行うことによって、各種 PSC の消散係数スペクトルを得ることができる。図 1 に、このようにして得られた各種 PSC による消散係数スペクトルを示す。

また、実際の PSC の地上からの観測方法として、図 2 に示すような位置関係を考える。つまり、高度 20 km を中心に、上下 ± 2 km の幅に $0.55\text{ }\mu\text{m}$ の波長域で、最大で光学的厚さが 0.1 となるような PSC 層を仮定する。この時、地上から鉛直上方に向けて赤外放射観測した場合に観測器に入射してくる赤外光は、(1) 大気からの赤外熱放射、(2) PSC からの赤外熱放射、(3) 太陽からの赤外光が PSC 層によって 1 回散乱された赤外光、(4) 同じく、PSC 層によって多重回散乱された赤外光、の四つが考えられる。そこで、放射伝達コードである HSTAR を用いて、 $700\text{--}6400\text{ cm}^{-1}$ ($1.6\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$) の波長域に関してさまざまなタイプの PSC を仮定し、波数分解能 0.2 cm^{-1} で放射伝達計算を行った結果を図 3 に示す。この際、太陽天頂角としては 80 度を仮定している。図 3 の $700\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ は主に赤外熱放射が卓越的な領域、 3000 cm^{-1} 以上は太陽光の散乱が卓越的な領域となっていることが分かる。また、 $800\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ 付近と 2400 cm^{-1} より短波長側では、PSC のタイプによって異なる放射強度が得られていることが分かる。これは逆に言うと、地上から鉛直上方の赤外放射スペクトルを観測することによって、上空の PSC のタイプ (組成、平均粒径、粒径分布、タイ

ブ識別, 混合等) を判別する可能性を示唆するものである。この原理に従った観測を次節に述べるように, 2007 年の南極昭和基地 (以下, 昭和基地) にて行った。

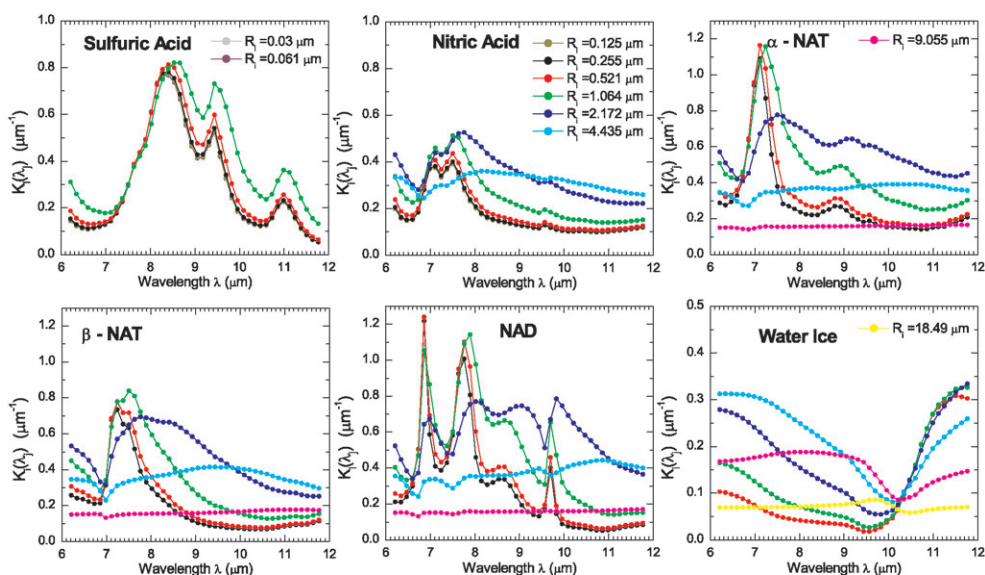


図1 実験で得られた各種 PSC の複素屈折率データを用いてミー散乱計算によって求められた, 各種 PSC の赤外消光係数。

Fig. 1. Calculated extinction coefficients of several types of Polar Stratospheric Cloud (PSC), based on Mie scattering using complex refractive indices from laboratory measurements.

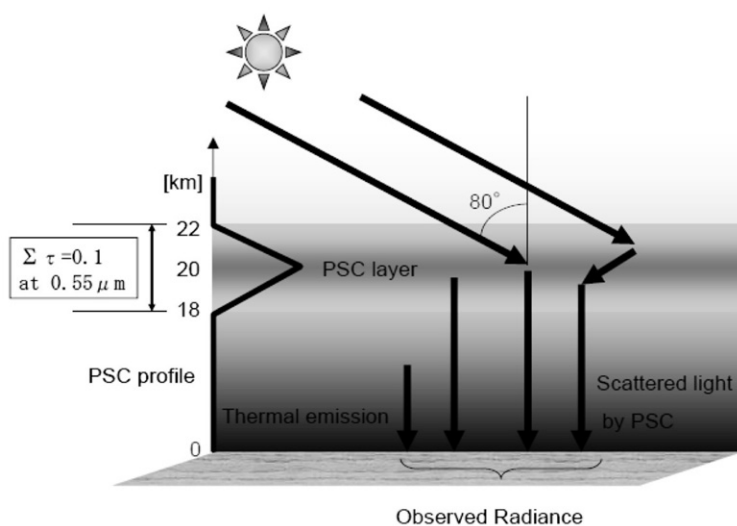


図2 PSC の天頂観測におけるジオメトリー
Fig. 2. Geometry of zenith sky PSC observation.

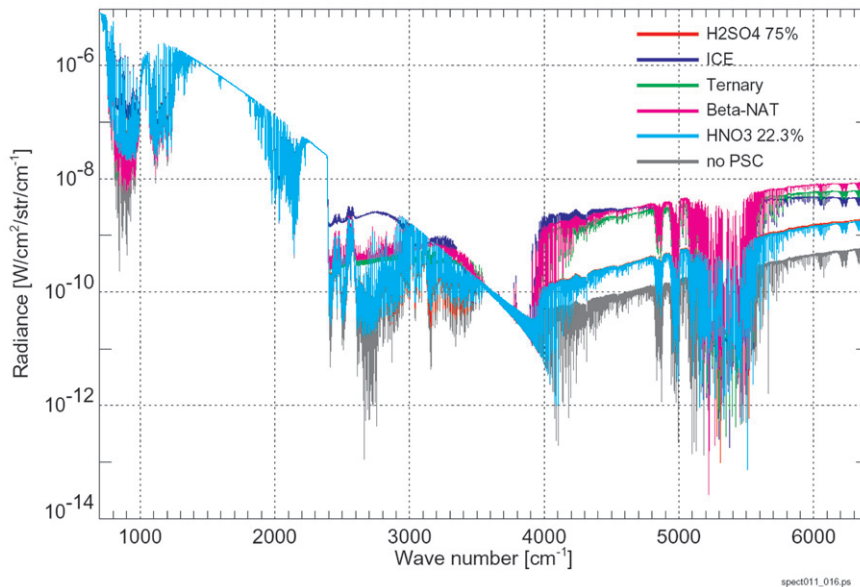


図3 いくつかのタイプの PSC を仮定した放射伝達計算の結果。

Fig. 3. Result of radiative transfer calculation by assuming several types of PSC.

3. 昭和基地における観測

3.1. Micro-Pulse Lidar (マイクロパルスライダー) による PSC 観測

昭和基地(69.0°S, 39.6°E)には、対流圏雲や PSC の観測を目的として、2001 年に Micro-Pulse Lidar (以下, MPL) が設置された (Shiobara *et al.*, 2003). MPL は 523 nm, 5 μ J の Nd:YLF レーザーを光源に、直径 20 cm のカセグレンタイプ望遠鏡とフォトダイオードを受光素子に用いた連続運用のライダーシステムである。鉛直分解能は 30 m, 時間分解能は 1 分である。MPL は主に対流圏の雲観測に用いられてきたが、対流圏が晴れているときには成層圏の PSC も観測可能である (Shibata *et al.*, 2003)。また、2007 年 1 月にはそれまで天頂から 45 度斜め方向に向けて観測を行っていたのを改め、天窓を設置して天頂方向を見上げるように改修をして、SN 比の改善を行った。

2007 年は、7 月上旬から昭和基地上空に PSC が現れ始め、MPL データに PSC の様子が観測され始めた。図 4 に、この年で最も濃い PSC が現れた 2007 年 8 月 28 日の昭和基地上空の PSC の様子を示す。高度 15–17 km, 高度 18–20 km, 及び高度 21 km 付近に複数の PSC 層が確認される。なお、約 1 時間周期の縦じまは、観測棟内の暖房機の On/Off による±数 °C の室温の変化に伴う MPL の感度特性の変化によるものである。また、0500–1400 UT に見える黒い領域は、基地が昼間であるため、太陽の散乱光により光学的に薄い PSC 層の観測ができていないことを示す。なお、この図のカラースケールは任意スケールでの距離二乗補正した散乱シグナル強度を示す。地上から 4 km 程度までの高度は白くスケールアウ

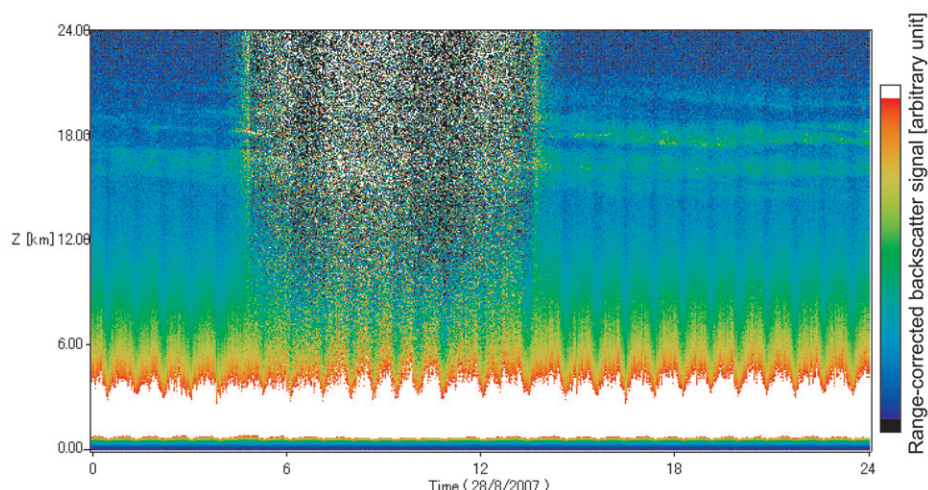


図4 2007年8月28日の昭和基地におけるマイクロパルスライダー (MPL) による観測結果。カラースケールは、バックscatter信号強度の任意スケールでの相対値を示す。
 Fig. 4. Micro-pulse lidar (MPL) data collected at Syowa Station on 28 August 2007. Color scale shows the arbitrary backscatter signal strength.

トしている。図5に、2007年7-8月にかけての、基地上空が晴れてPSCの観測が可能であったすべての日のMPL観測データを示す。図から分かるとおり、7月4-5、8-12、28日～8月2日、8月28-29日に基地上空にてPSCの存在が確認できる。また一方で、7月13日、8月8-10日、8月25-26日は、基地上空は晴れているにもかかわらず、PSCの存在が確認できない。これは、昭和基地からのレーウィンゾンデ観測により、基地上空の温度に対応していることが明らかとなった。つまり、PSCの存在が確認されていない期間は、基地上空がPSC飽和温度である -78°C 以上であったことが確認された。2007年9月以降は、昭和基地上空の気温が上昇し、MPLでPSCを観測することはなくなった。

図6に、2007年9月1-9日のMPLデータを示す。9月3-5日にかけて、高度12 km付近に濃い雲の層が見える。図7には、9月4日のオゾンゾンデによるオゾン混合比と気温のデータを示す。比較のため、その直近の8月30日とそれ以前の2007年4-8月にかけて行った22回のオゾンゾンデによる観測データも併せて示してある。図8には、9月5日の昭和基地の温位330 K (高度12.0 kmに相当) からの後方流跡線解析の結果を示す。これらの図から分かった事は、9月3-5日にかけては昭和基地付近にブロッキング高気圧が停滞し、その結果、圏界面高度が通常の8 km付近から12 km付近にまで上昇していた。また、図8から分かるとおり、観測日2日前から中緯度起源の空気塊がブロッキング高気圧に向かって8.5 km付近から12 km以上に大陸方向へ急激に持ち上げられ、急速に230 Kから190 K以下にまで冷却されることでCirrus(巻雲)を発生させていたことが判明した。よって、ここでの雲の発生やオゾンの減少は力学的なものであり、PSCとは異なる現象である事が判明した。

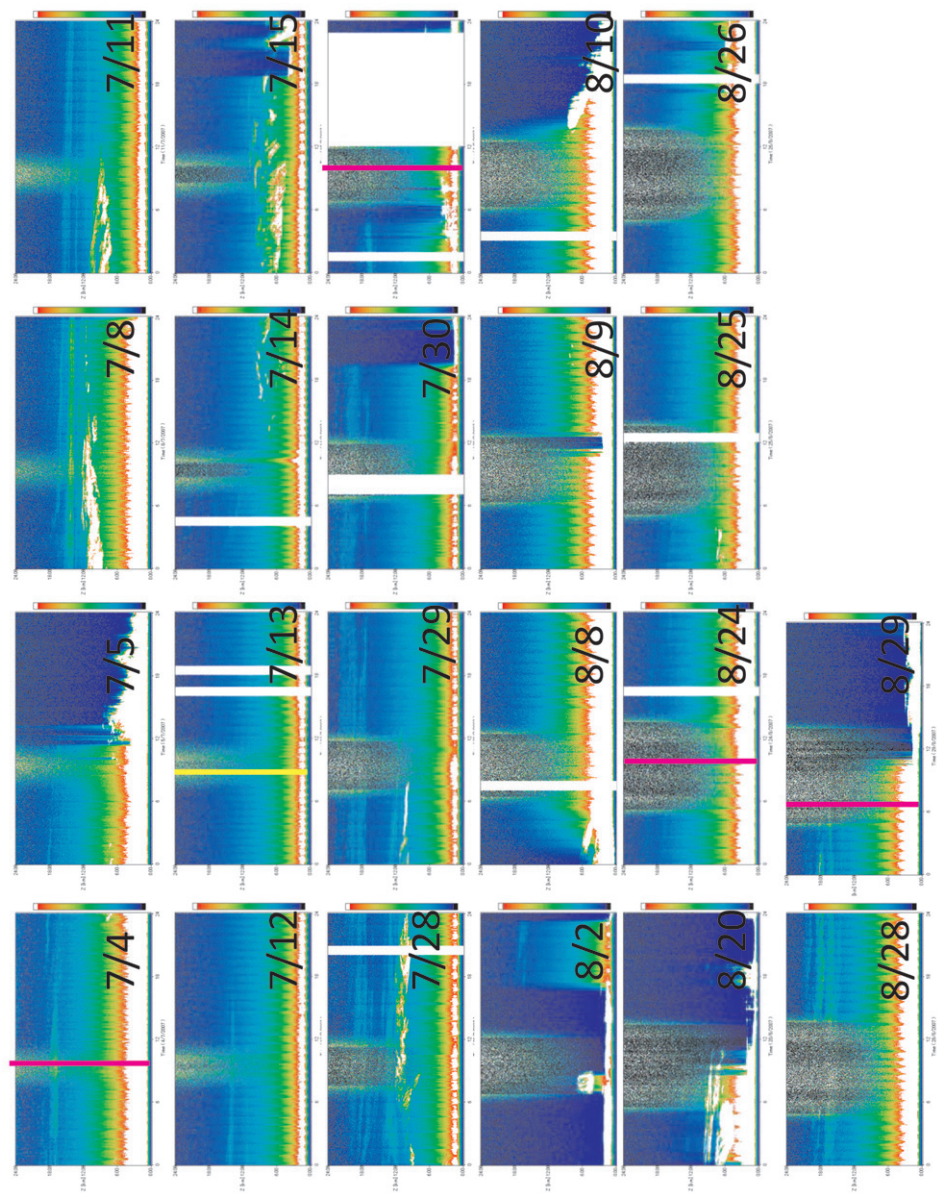


図5 2007年7-8月の昭和基地における晴天日のMPLデータ一覧。
Fig. 5. MPL data collected in July and August 2007 on (partly) clear days.

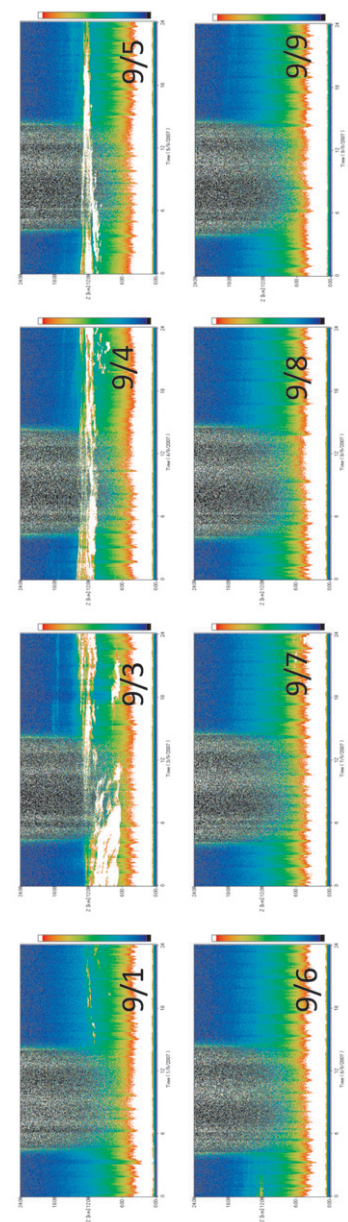


図 6 2007 年 9 月 1-9 日の昭和基地における晴天日の MPL データ一覧。
Fig. 6. MPL data for the period 1-9 September 2007.

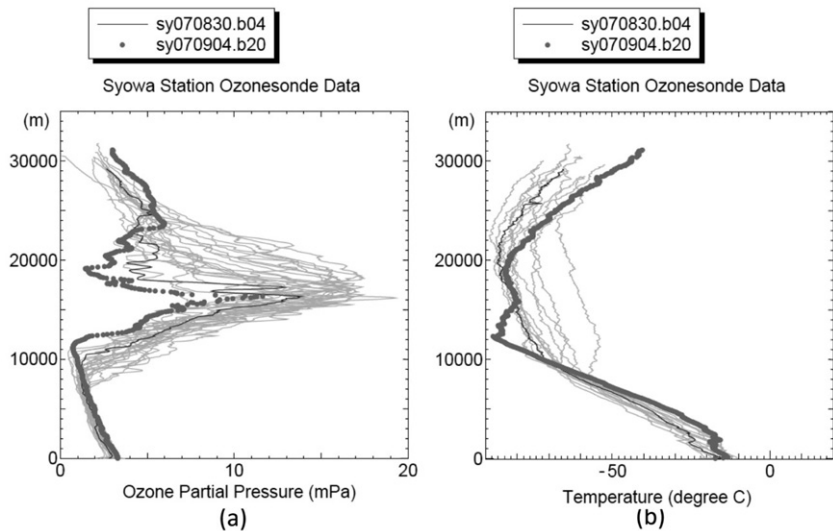


図 7 昭和基地からの 2007 年オゾンゾンデ観測で得られたオゾン分圧 (a) 及び気温 (b) の鉛直分布。濃い実線は 8 月 30 日、濃灰色の丸は 9 月 4 日、薄い実線はそれ以前の観測による値を示す。

Fig. 7. (a) Ozone partial pressure and (b) temperature profiles for 4 September (filled circles) and 30 August (thick line), and previous measurements (thin lines) for 2007 obtained by ozonesondes from Syowa Station.

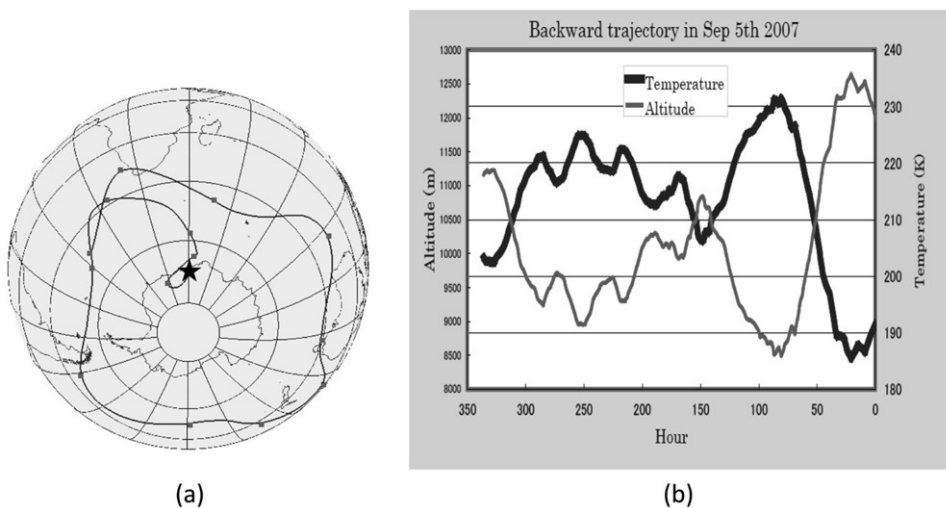


図 8 2007 年 9 月 5 日昭和基地上空温位 330 K (高度約 12.0 km) における空気塊の、15 日間の等温位面後方流跡線の (a) 地理座標及び (b) 流跡線上での空気塊の気温・高度変化。

Fig. 8. (a) Fifteen-day backward trajectory analysis and (b) temperature-altitude history of an air mass observed over Syowa Station (★) at 330 K (12.0 km) potential temperature surface. Each square indicates an interval of 1 day.

3.2. FTIR による PSC 観測

第 48 次日本南極地域観測隊 (2006 年 12 月~2008 年 3 月; 以下, 第~次隊) により, 昭和基地において, 低分解能フーリエ変換赤外分光器 (FTIR) を用いた PSC の観測が行われた。用いた FTIR は, ドイツ・ブルカー社製の Equinox 55s タイプ FTIR である。この FTIR は, 最大分解能 0.2 cm^{-1} , 検出器に液体窒素冷却のサンドイッチタイプ MCT 及び InSb 検出器, 及び常温の DTGS 検出器を有している。ビームスプリッターは KBr 及び CaF_2 を用意したが, PSC の観測には $4\text{ }\mu\text{m}$ より長波長側にも透過率のある KBr を用いた。

この FTIR を, 2007 年 5 月に昭和基地の観測棟に設置した (図 9)。鉛直上方観測のため, FTIR の入射口の前に 45 度鏡を設置し, 天井に開けた天窓を通して鉛直上方を観測できるようにした。そして, 昭和基地に PSC が現れる冬季前の 5 月下旬に, FTIR を用いた観測を開始した。MPL データに見られたように, 7 月上旬からは昭和基地上空に PSC が現れ始め, 8 月下旬まで断続的に昭和基地上空に PSC が出現した。図 10 に, 2007 年 2 月~2008 年 1 月まで, 第 48 次隊越冬期間中の FTIR の観測日一覧を示す。この図の中で, Equinox 55s で観測を行った日を網かけで示し, さらにその日に PSC が上空に現れた日を濃いグレーで示した。Equinox 55s FTIR 観測は PSC の出現時期である 7-8 月を中心に, PSC が出現しなくなった 11 月にかけて観測を行った。基本的には晴天時に観測を行ったが, 11 月以降には雲からの放射観測も行う目的で曇りの日にも観測を行った。合計 1 年間で, Equinox 55s FTIR では 55 日分のデータを取得した。そのうち, PSC が観測されたのは 13 日間であった。

一般的に, 分光器による絶対放射観測スペクトルにはそれぞれの測器固有の波長依存性

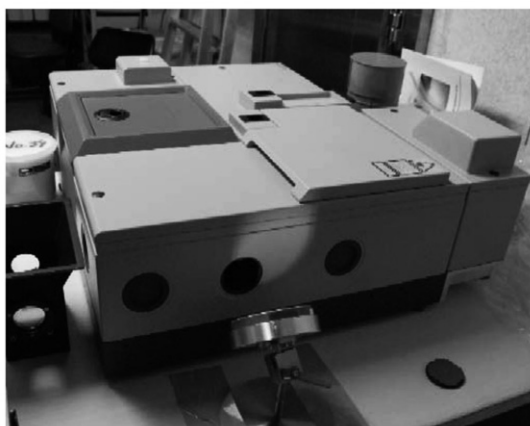


図 9 昭和基地・観測棟に設置された, ドイツ・ブルカー社製 Equinox 55s タイプの FTIR。分光器の手前面に設置された 45 度鏡によって, 天頂方向からの赤外放射が分光器に導入される。

Fig. 9. Bruker Equinox 55s FTIR spectrometer installed at Syowa Station. The 45° mirror on the near side of the spectrometer takes the zenith sky infrared radiation into the entrance port of the spectrometer.

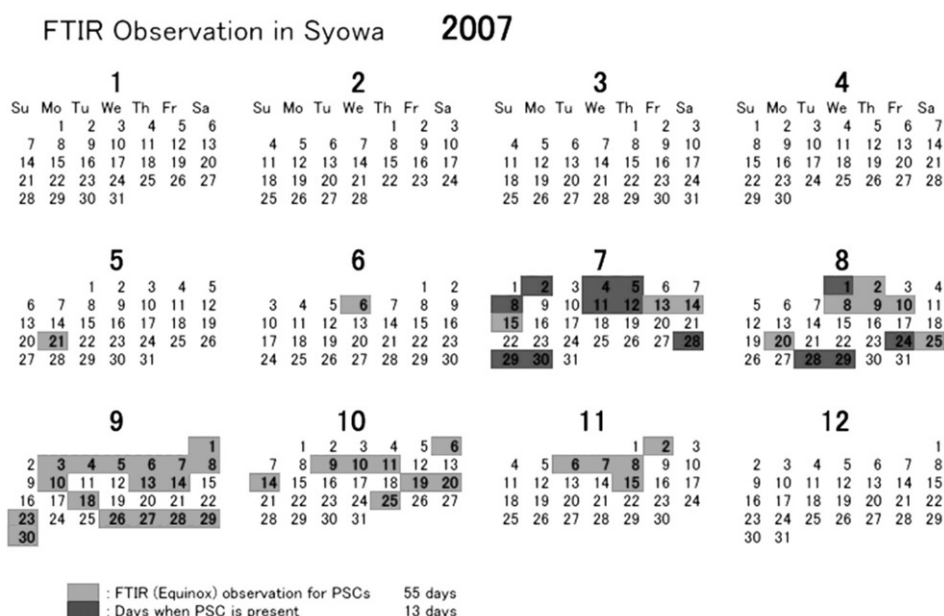


図 10 昭和基地における FTIR の観測サマリー。網掛けされた日は、Equinox 55s FTIR による観測を行った日を示す。また、濃く網掛けされた日は、昭和基地上空で PSC が観測された日を示す。

Fig. 10. Summary of FTIR observations at Syowa Station. Hatching indicates days on which measurements were taken by Equinox 55s FTIR. Dark hatching indicates days when PSCs were observed over Syowa Station.

が含まれており、観測スペクトルを評価するためには、黒体炉データを用いた補正を行うことが不可欠である。図 11 にその補正の方法を述べる。図 11a, b は MCT チャンネルのデータを、図 11c, d は InSb チャンネルのデータを示す。なお、本 FTIR 分光器は MCT と InSb がサンドイッチ型に張り合わされているため、 1800 cm^{-1} 付近より長波長側の InSb シグナルには、MCT の吸収によるシャープなカットオフが見られる。また、 670 cm^{-1} 付近及び 2300 cm^{-1} 付近には大気中の二酸化炭素による強い吸収線が、 $1300\text{--}1800\text{ cm}^{-1}$ には同じく大気中の水蒸気による、幅広い吸収線構造が見られる。

図 11a, c 中の黒線は、 0°C 付近に保たれた黒体炉を FTIR で観測したときのスペクトルを示す。また、薄い灰色、濃い灰色のスペクトルは、それぞれ PSC が存在しないときと存在しているときの天頂方向からの放射スペクトルを示す。それぞれを黒色の黒体炉スペクトルで補正したスペクトルが、図 11b, d に示されている。これらの図から、黒体炉スペクトルで補正することにより、測器特有のスペクトルの山などが取り除かれていることが分かる。なお、図 11b, d のスペクトルに現れている振幅の激しい領域は、前述した大気中の水蒸気や二酸化炭素による吸収線が存在する領域であり、そこでのスペクトルの補正は、黒体炉をもってしても困難であることを示唆している。

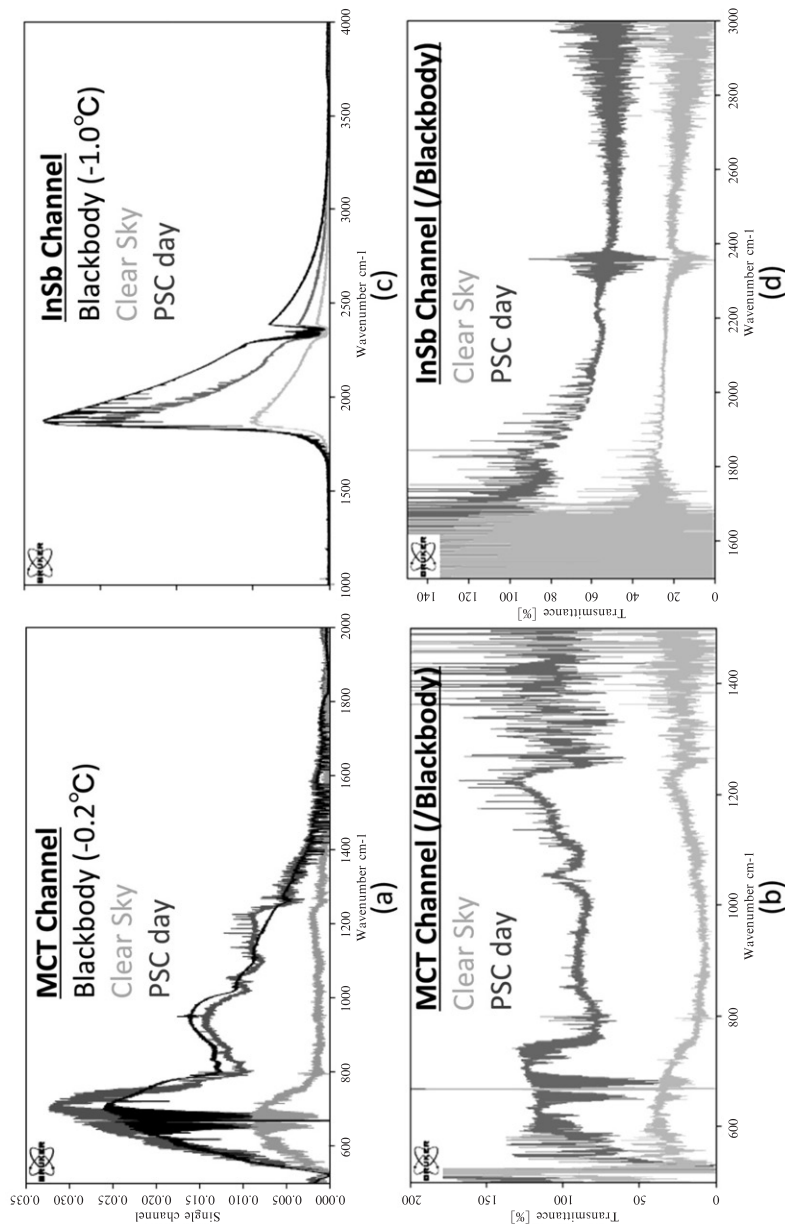


図 11 赤外放射スペクトルの黒体炉データを用いた校正. (a) MCT チャンネルにおける赤外放射スペクトル, (b) 補正済み赤外スペクトル, (c) Insb チャンネルにおける赤外放射スペクトル, (d) 補正済み赤外スペクトル.

Fig. 11. Correction of radiant spectra with blackbody calibration data. (a) Radiance in the MCT channel, (b) calibrated spectra, (c) radiance in the InSb channel, and (d) calibrated spectra.

4. PSC 観測結果

2007 年の昭和基地で PSC を実際に観測できたのは、前述のとおり 7-8 月にかけてであった。この期間は極夜から極夜明けにかけてであり、まだ十分に太陽が高く上ってこない時期である。図 3 のシミュレーションでも予測されたことであるが、PSC のタイプによって放射スペクトルに違いが生じるのは、 1000 cm^{-1} 付近と 2400 cm^{-1} より短波長側である。このうち、InSb チャンネルに相当する 2400 cm^{-1} より短波長側は、太陽光による散乱が無い場合には放射強度が非常に弱い。そこで、今回は主に MCT チャンネルの放射スペクトルを用いて解析を行った。

図 12a に、2007 年 7 月 4 日～8 月 29 日までの、8 日間の FTIR MCT チャンネルで得られた天頂赤外放射スペクトルを示す。これらのスペクトルは、 0°C 黒体炉スペクトルで補正されたものである。なお、データは生の分解能 (0.5 cm^{-1}) で黒体炉補正を行った後、波長軸方向に 25 点のスムージングを施したものである。7 月 13 日 (黒) や 8 月 29 日 (黄緑) は、MPL データから基地上空に PSC が測定されておらず、比較的フラットな形状を示している。また、図 12b には、平均粒径 $1.0, 2.0, 5.0\text{ }\mu\text{m}$ 、半値幅 1.5 の対数正規分布の Ice (Type-II) PSC を仮定した、ミー散乱計算から導出された硝酸係数スペクトルを示す。一方、8 月 1 日

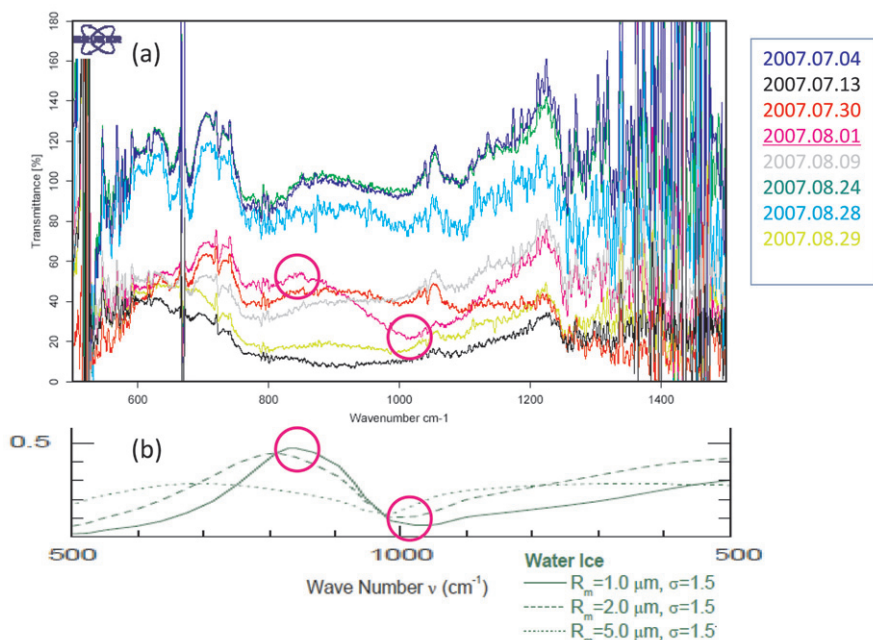


図 12 MCT チャンネルにおける観測スペクトル (a) と計算によって求められた Ice PSC によるスペクトル (b)。2007 年 8 月 1 日のスペクトルに、Ice PSC による特徴が見取れる。

Fig. 12. (a) Observed and (b) calculated spectra for ice PSC in the MCT region. The characteristic features of ice PSC (O) are evident in the spectrum captured on 1 August.

のスペクトル(マゼンタ)には, 850 cm^{-1} と 1000 cm^{-1} 付近に計算と似通った特徴(マゼンタ○印)が見出され, 上空に Ice PSC の存在が示唆される. 図 5 の MPL データでは, 残念ながらこの日のデータ欠損のため PSC が明確には確認できないが, この日午後 2 時のレーウィンゾンデ観測によると, 高度 21 km で -87.6°C , 高度 23 km で -90.5°C と, PSC 観測日の中で最低気温を記録した. このことから, Ice PSC の存在が示唆される.

図 13 には, 同様に平均粒径 0.5 , 1.0 , $1.5\text{ }\mu\text{m}$ の (b) NAD, 及び (c) β -NAT を仮定した硝酸係数スペクトルと実際の観測スペクトルとの比較を示す. これらの比較から, 7 月 30 日, 8 月 9 日, 及び 8 月 28 日のスペクトルには NAD の特徴(マゼンタ○印)が, また 7 月 4 日及び 8 月 24 日のスペクトルには NAD 及び β -NAT 両方の特徴(マゼンタ及び青○印)が見て取れる. これらの日は MPL 観測からも PSC の存在が確認されており, NAD 及び β -NAT といった, Type-Ia の固体系 PSC の出現が示唆される.

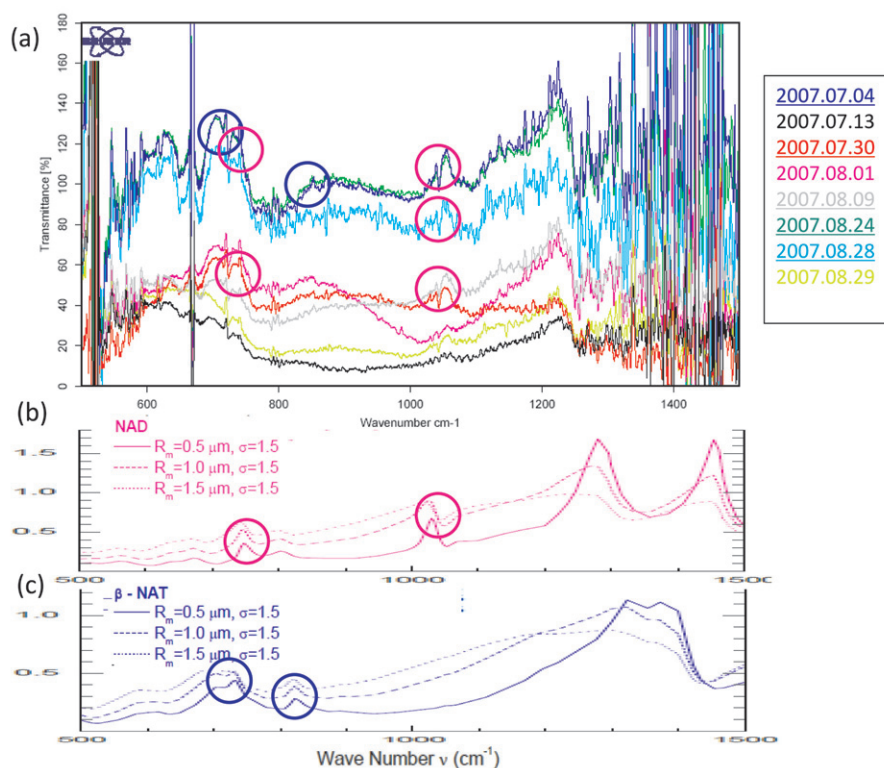


図 13 MCT チャンネルにおける観測スペクトル (a) と計算によって求められた NAD (b) と β -NAT PSC (c) によるスペクトル. NAD と β -NAT による特徴 (○) が見て取れる.
 Fig. 13. (a) Observed and calculated spectra for (b) NAD and (c) β -NAT PSC in the MCT region. The characteristic features of NAD and β -NAT PSCs (○) are evident in the underlined spectra.

図 14 に、同様に平均粒径 $0.05, 0.075, 0.1 \mu\text{m}$, 半値幅 1.86 の硫酸液滴と、平均粒径 $0.1, 0.2, 0.5 \mu\text{m}$, 半値幅 1.5 の硝酸液滴による消散係数スペクトルを示す。STS (Type-Ib) PSC は成層圏の気温に依存し、硫酸・硝酸・水が任意の割合で混合したものであるが、その消散係数スペクトルは硫酸と硝酸のスペクトルの重ね合わせとして表現できることがわかっていている (Oshchepkov *et al.*, 2006)。7 月 4 日, 8 月 9 日, 8 月 24 日, 及び 8 月 28 日のスペクトルには、硫酸エアロゾルによると思われる特徴 (マゼンタ○印) が見て取れる。このうち、8 月 9 日と 8 月 28 日は NAD の、7 月 4 日と 8 月 24 日は NAD 及び β -NAT の特徴も見て取れた。実際、MPL データから見ても、複数の層の PSC が観測されていることが多く、これらの日は、NAD, β -NAT 及び STS からなる複数の PSC 層からの放射が合わさって観測されていたことを示唆するものである。実際、上下に NAT 層で挟まれた STS の観測が、北極・ニーオルスンでのライダー観測でも見つかっており (Shibata *et al.*, 1997), 「サンドイッチ構造」と名づけられているが、昭和基地でもそのような PSC 層の存在を示唆するものである。残念ながら、現在の MPL 観測は偏光消光度観測に対応しておらず、PSC の球形・非球形の判別は出来ないが、FTIR 観測とレーウィンゾングの気温、及び流跡線解析を組み合わせることによって、今後 PSC の形成メカニズムに関する知見を明らかにすることが出来るものと期待される。

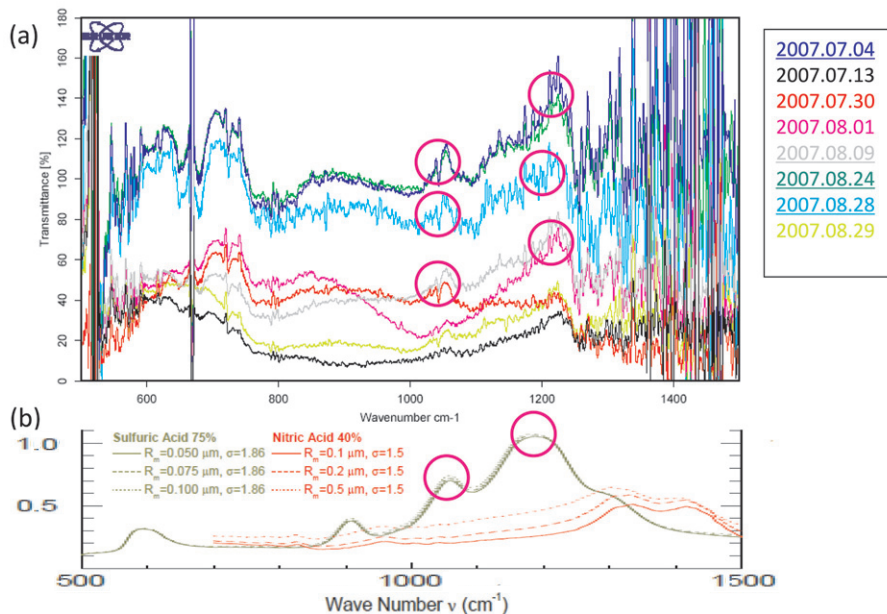


図 14 (a) MCT チャンネルにおける観測スペクトルと (b) 計算によって求められた STS PSC によるスペクトル。STS PSC による特徴 (○) が見て取れる。

Fig. 14. (a) Observed and (b) calculated spectra for STS PSC in the MCT region. The characteristic features of STS PSC (O) are evident in the underlined spectra.

5. ま と め

我々は、第48次隊による越冬観測期間中に、低分解能フーリエ変換赤外分光器 (FTIR) を用いた地上からの PSC の特性評価観測を、昭和基地において立ち上げた。このような観測を実施するのは、世界でも初めての試みである。昭和基地では 2007 年 7-8 月にかけて、数多くの PSC イベントが MPL データから確認された。これらの日の FTIR 赤外放射スペクトルから、Ice (Type-II), NAD もしくは β -NAT (Type-Ia), 及び STS (Type-Ib) PSC の存在が示唆された。今後は、その場の温度や、流跡線解析による温度履歴もあわせて解析することで、PSC の生成メカニズムの解明が期待される。また、オゾンゾンデマッパ観測によるオゾン破壊量の定量化と併せて解析することで、PSC のタイプの違いによるオゾン破壊量の違いに関して新たな知見が得られるものと期待される。

文 献

- Clapp, M.L., Miller, R.E. and Worsnop, D.R. (1995): Frequency-dependent optical constants of water ice obtained directly from aerosol extinction spectra. *J. Phys. Chem.*, **99**, 6317-6326.
- Hayashi, M., Iwasaka, Y., Watanabe, M., Shibata, T., Fujiwara, M., Adachi, H., Sakai, T., Nagatani, M., Gernandt, H., Neuber, R. and Tsuchiya, M. (1998): Size and number concentration of liquid PSCs: balloon-borne measurements at Ny-Ålesund, Norway, in the winter of 1994/1995. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **76**, 549-560.
- Hayashida, S., Saitoh, N., Kagawa, A., Yokota, T., Suzuki, M., Nakajima, H. and Sasano, Y. (2000): Arctic polar stratospheric clouds observed with the Improved Limb Atmospheric Spectrometer during winter 1996/1997, *J. Geophys. Res.*, **105** (D20), 24715-24730.
- Iwasaka, Y., Hayashi, M., Kondo, Y., Koike, M., Koga, S., Yamamoto, M., Amedieu, P. and Matthews, W.A. (1993): Two different type nitrate aerosols in the winter polar stratosphere: morphology of individual particles observed with an electron microscope. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **45**, 1181-1192.
- Lowe, D., and MacKenzie, A.R. (2008): Polar stratospheric cloud microphysics and chemistry. *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, **70**, 13-40.
- Norman, M.L., Qian, J., Miller, R.E. and Worsnop, D.R. (1999): Infrared complex refractive indices of supercooled liquid $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ aerosols. *J. Geophys. Res.*, **104** (D23), 30571-30584.
- Norman, M.L., Miller, R.E. and Worsnop, D.R. (2002): Ternary $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ optical constants: new measurements from aerosol spectroscopy under stratospheric conditions. *J. Phys. Chem. A*, **106**, 6075-6083.
- Oshchepkov, S., Sasano, Y., Yokota, T., Nakajima, H., Uemura, N., Saitoh, N., Sugita, T. and Matsuda, H. (2006): ILAS data processing for stratospheric gas and aerosol retrievals with aerosol physical modeling: methodology and validation of gas retrievals. *J. Geophys. Res.*, **111**, D02307, doi:10.1029/2005JD006543.
- Saitoh, N., Hayashida, S., Sasano, Y. and Pan, L.L. (2002): Characteristics of Arctic polar stratosphere clouds in the winter of 1996/1997 inferred from ILAS measurements. *J. Geophys. Res.*, **107** (D24), doi:10.1029/2001JD000595.
- Shibata, T., Iwasaka, Y., Fujiwara, M., Hayashi, M., Nagatani, M., Shiraishi, K., Adachi, H., Sakai, T., Susumu, K. and Nakura, Y. (1997): Polar stratospheric clouds observed by lidar over Spitsbergen in the winter of 1994/1995: liquid particles and vertical "sandwich" structure. *J. Geophys. Res.*, **102** (D9), 10829-10840.
- Shibata, T., Sato, K., Kobayashi, H., Yabuki, M. and Shiobara, M. (2003): Antarctic polar stratospheric clouds under temperature perturbation by nonorographic inertia gravity waves observed by micropulse lidar at Syowa Station. *J. Geophys. Res.*, **108** (D3), 4105, doi:10.1029/

2002JD002713.

- Shiobara, M., Yabuki, M. and Kobayashi, H. (2003): A polar cloud analysis based on Micro-pulse Lidar measurements at Ny-Ålesund, Svalbard and Syowa, Antarctica. *Phys. Chem. Earth*, **28**, 1205–1212.
- Toon, O.B., Tolbert, M.A., Koehler, B.G., Middlebrook, A.M. and Jordan, J. (1994): Infrared optical constants of H₂O ice, amorphous nitric acid solutions, and nitric acid hydrates. *J. Geophys. Res.*, **99** (D12), 25631–25654.
- WMO (2007): Scientific assessment of ozone depletion, 2006: report of the Montreal Protocol Scientific Assessment Panel. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization. (Global ozone research and monitoring project report ; **50**).