

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24年6月8日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2011

課題番号：20244077

研究課題名（和文） オゾン層破壊に関連した極成層圏雲の特性評価に関する研究

研究課題名（英文） A study on characterization of polar stratospheric clouds (PSC) related to ozone depletion

研究代表者

中島 英彰 (NAKAJIMA HIDEAKI)

独立行政法人国立環境研究所・地球環境研究センター・室長

研究者番号：20217722

研究成果の概要（和文）：オゾンホールに代表される極域成層圏オゾン破壊において、極成層圏雲(PSC)の存在は極めて重要な役割を果たしている。ところが、PSCの特性に関してはこれまで良く判っていなかった。本研究では地上分光観測、ライダー観測、ゾンデ観測、衛星観測など多角的観測手法を用いてPSCとオゾン等微量気体成分の観測を行い、PSCの特性評価を行うとともに、それがオゾン破壊に及ぼす影響について、定量的に解明することを目的とした。その結果、2011年春季に起こった観測史上最大の北極オゾンホールを捉えることに成功した。

研究成果の概要（英文）：Polar Stratospheric Cloud (PSC) plays essential role in polar ozone depletion and/or ozone hole. However, the characteristics of PSC, such as type, mixture, its role on ozone destruction, etc. have not yet understood well. In this study, we made comprehensive observations of PSC, ozone, and related minor constituents by ground-based spectrometers, lidar, sondes, and satellites to clarify characteristics of PSCs and its effect on ozone depletion quantitatively. We succeeded to capture the historical largest Arctic ozone hole which occurred in 2011 spring.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	11,000,000	3,300,000	14,300,000
2009年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2010年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2011年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
年度			
総計	34,100,000	10,230,000	44,330,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：地球環境システム、成層圏、オゾン層、オゾン破壊、オゾンホール、極成層圏雲、PSC、FTIR

1. 研究開始当初の背景

1980年代初頭の南極オゾンホールの発見後、モントリオール議定書などによってオゾン破壊する物質であるフロン等の生産量・消費量は国際的に規制されてきた。そのおかげで、大気中の塩素量は、2000年ぐらいを境に減少に転じ始めたと思われる。

しかし、現時点で成層圏オゾン量が回復に向かったとの統計的に確実な報告は無く、今後温室効果気体の増加に伴う成層圏の寒冷化による、特に北極域におけるさらなるオゾン破壊の危険性も認識されてきていた。2006年に発行された世界気象機関(WMO)の「オゾン破壊に関する科学的アセスメント(2006年版)」において、Executive Summaryに以

下のように記述されている。「北極域のオゾン破壊は、気象条件によって大きな年々変動を示す。これは、寒い北極の冬に出現するPSCが大きく影響することがわかっているが、その長期間における変動の原因はまだ良くわかっていない。」「2004/2005年の北極の冬は、これまでで最大規模のオゾン破壊が起こった。北極域に関しては、長期的なPSCの出現に関する予測を行う知見が不足しているため、しばらくは大きなオゾン破壊が起こる可能性を否定できない。」

そこで、本研究では北極域でのオゾンとPSCの観測を集約的に行い、オゾン破壊メカニズムの解明と、それにPSCが関わる影響を定量的に評価しようとするものである。

2. 研究の目的

1980年代のオゾンホール発見以降、各国の科学者の集約的な研究のおかげで、オゾンホールメカニズムに関してはかなりの部分が解明されてきた。それによると、成層圏オゾン破壊の引き金を引くのは、冬季に太陽光が当たらなくなることによる放射冷却により、下部成層圏の気温が196 K程度以下にまで下がると発生する、硝酸、硫酸、水からなる極成層圏雲（Polar Stratospheric Clouds: PSC）である事が判ってきた。PSC上での不均一反応により、準安定な塩素リザーバ分子が活性化され、春先の太陽光の到来とともに触媒的にオゾンを破壊するのである。

PSCは、その組成と相の違いによって、Type Ia, Type Ib, Type IIなどいくつかのタイプがあることが判っている。この、それぞれタイプの異なるPSCによる塩素活性化の度合いや、オゾン破壊の速度や規模の違いがあるかどうかといった問題に関しては、これまで様々な研究がなされてきたにもかかわらず、これまで明らかにされては来なかった。そこで、本研究では、PSCのタイプの違いとオゾン破壊の関係を調べるために、PSCやオゾン、関連した微量気体成分に関する様々な観測を行い、また別途行われている入手可能な観測データを組み合わせることによって、多角的に解析していく。そして、PSCのタイプとオゾン破壊の関係について、南北両半球の状況の比較も含めて解明していくことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、主に次に示す4つの方法を用いて研究を行った。

- (1) 2007年南極昭和基地で得られたフーリエ変換赤外分光器（FTIR）による微量気体成分及びPSCのデータ解析

筆者らは、2006年12月～2008年3月にか

けて、第48次南極地域観測隊に参加し、昭和基地で越冬観測を行ってきた。本研究では、この時得られた高分解能FTIRの分光データを解析し、大気微量成分の鉛直分布を導出した。また、低分解能FTIRやOPC、MPLといった測器のデータ及び人工衛星CALIPSOのデータから、PSCのタイプや分布について解析した。それにより、南極オゾンホールの各段階におけるPSCの出現の特徴とその役割に関して明らかにすることを目指した。

- (2) 北極圏・スバル諸島・スピッツベルゲン島・ニーオスルンにおけるPSCの観測

ニーオスルン観測基地に置いて、以下の観測を行った。①低分解能FTIRを用いた、PSCの特性評価に関する観測。②OPCを用いた、PSC観測。③ライダーを用いた、PSC観測。④オゾンゾンデマッチ観測。これらの観測データを用い、北極上空におけるPSCの出現特徴とオゾン破壊の関係について明らかにすることを目指した。

- (3) ロシア・西シベリア・サレハルドにおけるオゾンゾンデマッチ観測

ロシア気象庁の定常高層気象観測所がある、西シベリア・サレハルドにおいて、オゾンゾンデマッチ観測を実施した。2009/2010、2010/2011年の冬季～春季には、ドイツ・アルフレッドウェーゲナー観測所とロシアの担当者との間で、綿密に連絡を取り合いながらオゾンゾンデマッチ観測を実施した。

- (4) 人工衛星CALIPSO及びAura/MLSデータを用いた、PSCとオゾン破壊の比較解析

人工衛星CALIPSOデータから、PSCのタイプを判別する手法が、NASA Langley研究所のPitts博士らによって最近開発された。本研究では、CALIPSOデータからタイプの判別されたPSCの観測点から粒跡線計算を行い、衛星マッチ解析によりAura/MLSの観測点を探し、微量成分の変化とPSCのタイプ・量に関する解析を行った。

4. 研究成果

- (1) 2007年南極昭和基地で得られたフーリエ変換赤外分光器（FTIR）による微量気体成分及びPSCのデータ解析

2007年に南極昭和基地で高分解能FTIRによって取得した赤外分光データを、SFIT2という解析コードを用いて解析した。図1に、解析によって得られた、2007年昭和本地上空でのオゾンカラム全量の季節変化を示す。Day number 230～300にかけてオゾンが減少する、いわゆるオゾンホールが見て取れる。また図2に、同様にHClの季節変化を示す。こちらはDay number 210～280にかけてHClカラム量の減少がみられ、PSCの出現に伴う準安定なHClから活性なClO_xへの変換が見

て取れる。

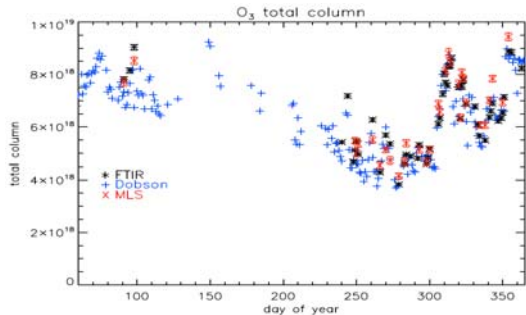


図 1. 2007 年昭和基地上空のオゾンカラム全量の季節変化

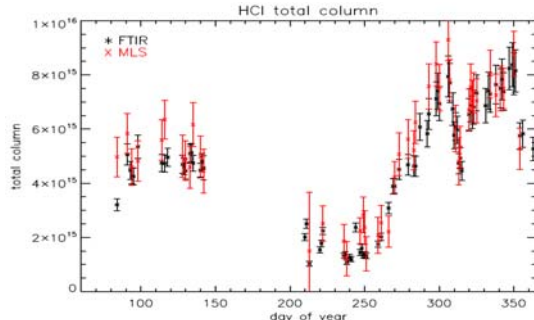


図 2. 2007 年昭和基地上空の HCl カラム全量の季節変化

(2) 北極圏・スピッツベルゲン島・ニーオスルンにおける PSC の観測

ニーオスルンに置いて 2008/2009, 2009/2010, 2010/2011 の 3 冬にわたり、PSC の観測を行った。用いた測器は、低分解能 FTIR、2 波長 (1064, 532 nm) ライダー、及び光学エアロゾル (OPC) ゾンデである。2008/2009 年の冬は北極上空が高温で推移したため、あまり多くの PSC は出現しなかったが、2009/2010 年及び 2010/2011 年の冬季には、多くの PSC が出現し、良好なデータを取得することが出来た。図 3 に、2009/2010 年冬季にニーオスルンにおいてライダーによって観測した PSC の高度分布を示す。12/31 あたりから高度 20 km 及び 25 km 付近に現れた PSC の層が、時間の経過に伴って高度 23 km をピークに一体化していく様子が捉えられている。また赤線の偏光消滅度データより、1/2~5 日の PSC は、上下の層が固体、真ん中の層が液体の、いわゆる「サンドイッチ構造」になっていることも判る。

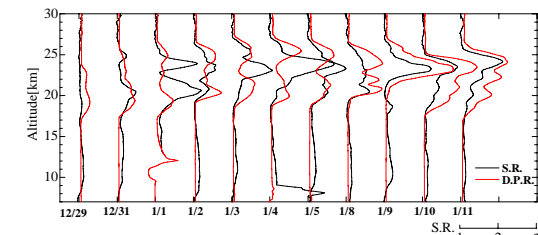


図 3. 2009/2010 年冬季のライダーによる PSC の観測結果

また図 4 に、2010 年 1 月 8 日にニーオスルンから打ち上げた OPC の観測結果(a)と、同日のライダー観測結果(b)、及びゾンデによる気温の高度分布(c)を示す。この日は、高度 20~25 km に PSC の層が確認できる。PSC のタイプは、主に Type Ib(STS)だが、高度 21~22 km では Mix2-enhanced タイプの大粒径 PSC が混在していると考えられる。

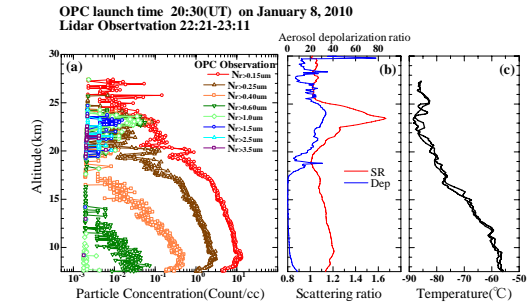


図 4. 2010 年 1 月 8 日の OPC 観測結果

(3) ロシア・西シベリア・サレハルドにおけるオゾンゾンデマッチ観測

我々は、ドイツ・アルフレッドウェーゲナー研究所が主導する、「北極域オゾンゾンデマッチキャンペーン」に参加する形で、ロシア・サレハルドにおけるオゾンゾンデ観測を実施した。具体的には、2009/2010 年の冬~春季に 6 回 (2010/1/26, 1/30, 2/6, 2/7, 2/16, 2/19)、2010/2011 年の冬~春季に 4 回 (2011/2/25, 3/15, 4/13, 4/19) のオゾンゾンデ観測を実施した。図 5 に、2011 年 4 月 13 日のオゾンゾンデ観測による、オゾンの鉛直分布を示す。2011 年は観測史上最大となる北極上空でのオゾン破壊が進行し、4 月半ばになっても図の矢印の高度 20 km 付近に低オゾン領域が確認できる。

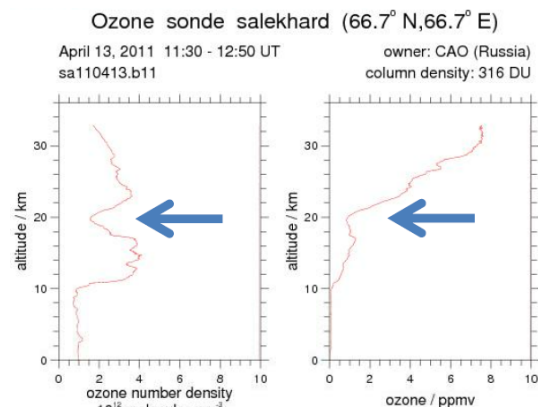


図 5. 2011 年 4 月 13 日サレハルドにおけるオゾンの鉛直分布 (数密度・混合比)

図 6 は、北極上空 14 箇所のオゾンゾンデ観測点での合計 187 発のオゾンゾンデ観測に

基づく、2011年北極上空でのオゾン破壊の様子を示す。図の赤線で示した2010/2011年冬～春季のオゾン破壊は、これまでの観測史上で最大であり、図の黒線の2003年の南極オゾンホールに匹敵していることが判る。本結果は、2011年10月に雑誌Natureに掲載された (Manney et al, 2011)。

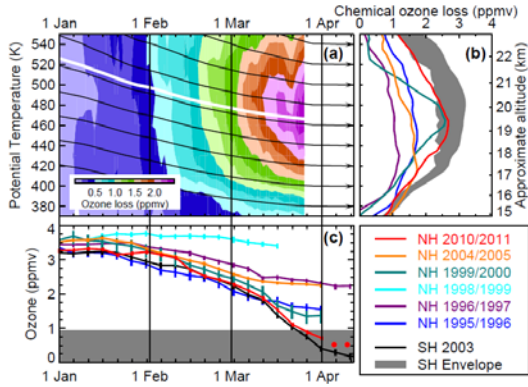


図6. オゾンゾンデマッチ観測による2011年北極圏上空でのオゾン破壊の様子

(4) 人工衛星CALIPSO及びAura/MLSデータを用いた、PSCとオゾン破壊の比較解析

NASA Langley 研究所のPittsらによって、人工衛星CALIPSOデータからPSCのタイプを判別する手法が開発された (Pitts et al, ACP, 2007, 2009, 2011)。図7は、CALIPSOデータから判別した、2007年7月19日南極上空でのPSCのタイプと諸パラメーターである。図7(a)の○をつけた、A緑(STS)、B水色(Ice)、及びCオレンジ(NAT-Mix2-enhanced)それぞれのPSC出現地点から粒跡線計算を行い、Aura/MLSデータによりオゾンその他の気体成分の濃度変化を解析した。

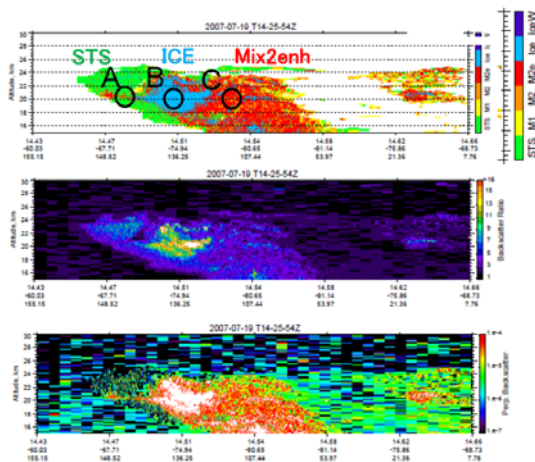


図7. 人工衛星CALIPSOデータから判別した、(a)PSCのタイプ、(b)散乱比、(c)直行成分

図8に、Aura/MLSデータから得られた、図

7の3つのPSCの観測点前後での空気塊中の O_3 、 ClO 、 HCl 、 HNO_3 の濃度変化を示す。この例では、PSC出現後、STS PSCで -10.7 ppbv/sun-lit hour (slh)、Ice PSCで -7.1 ppbv/slh、Mix2-enhanced PSCで -10.2 ppbv/slhのオゾン変化率の値が得られた。その他の多くのケースや、2010年、2011年の北極上空についても解析を行った結果、概してSTSタイプのPSCが、他のPSCに比べて大きなオゾン破壊を示すという結果が得られてきている。

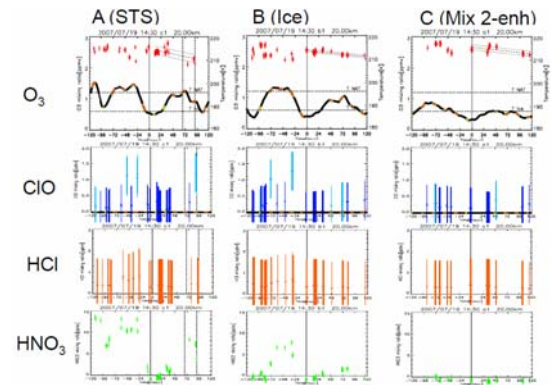


図8. マッチ解析によってAura/MLSデータから得られた O_3 、 ClO 、 HCl 、 HNO_3 の濃度変化

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15件)

- ① Terao Y., T. Sugita, and Y. Sasano (2012), Ozone loss rates in the Arctic winter stratosphere during 1994-2000 derived from POAM II/III and ILAS observations: Implications for relationships among ozone loss, PSC occurrence, and temperature. *J. Geophys. Res.*, 117, D05311, doi:10.1029/2011JD016789.
- ② Kohlhepp, R., ..., I. Murata, H. Nakajima, et al. (2012), Observed and simulated time evolution of HCl, ClONO₂, and HF total column abundances, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 3527-3557, doi:10.5194/acp-12-3527-2012.
- ③ Manney, G. L., ..., H. Nakajima, et al. (2011), Unprecedented Arctic ozone loss in 2011, *Nature* 478, 469-475, doi:10.1038/nature10556.
- ④ Shiraishi, K., et al. (2011), Comparative analysis of measurements of stratospheric aerosol by lidar and aerosol sonde above Ny-Ålesund in the winter of 1995, *Polar Science*, 5(4), 399-410,

- doi:10.1016/j.polar.2011.08.003.
- ⑤ 中島英彰, 佐伯浩介, 矢吹正教, 塩原匡貴 (2010), 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, 南極資料, 54, 793-809, <http://ci.nii.ac.jp/naid/110008591708>.
- ⑥ 白石浩一, ほか (2010), ニーオルセンにおける成層圏エアロゾルと北極 PSC のゾンデ、ライダー観測, 南極資料, 54, 899-916, <http://ci.nii.ac.jp/naid/110008591771>.
- ⑦ 白石浩一 (2010), 極成層圏雲の物理化学と環境変動, エアロゾル研究, 25, 219-225, joi:JST.JSTAGE/jar/25.219
- ⑧ Milz, M., ..., H. Nakajima, ..., T. Sugita, et al. (2009), Validation of water vapour profiles (version 13) retrieved by the IMK/IAA scientific retrieval processor based on full resolution spectra measured by MIPAS on board Envisat, Atmos. Meas. Tech., 2, 379-399, doi:10.5194/amt-2-379-2009.
- ⑨ Khosrawi, F., R. Müller, ..., and H. Nakajima (2009), Evaluation of ClaMS, KASIMA and ECHAM5/MESSy1 simulations in the lower stratosphere using observations of Odin/SMR and ILAS/ILAS-II, Atmos. Chem. Phys. 9, 5759-5783, doi:10.5194/acp-9-5759-2009.
- ⑩ Sato, K., Y. Tomikawa, ..., H. Nakajima, and T. Sugita (2009), Longitudinal dependent ozone increase in the Antarctic polar vortex revealed by balloon and satellite observations, J. Atmos. Sci. 66, 1807-1820 doi: 10.1175/2008JAS2904.1.
- ⑪ Tanaka, T., M. Fukabori, T. Sugita, ..., and H. Nakajima (2008), Line shape of the far-wing beyond the band head of the CO₂ 3 band, J. Mol. Spectrosc. 252, 185-189, doi: 10.1016/j.jms.2008.08.004.
- ⑫ Khosrawi, F., R. Müller, ..., and H. Nakajima (2008), Seasonal cycle of averages of nitrous oxide and ozone in the Northern and Southern Hemisphere polar, midlatitude, and tropical regions derived from ILAS/ILAS-II and Odin/SMR observations, J. Geophys. Res., 113, D18305, doi: 10.1029/2007JD009556.

[学会発表] (計 30 件)

- ① Nakajima, H., M. Ohya, Y. Takahashi, and M. C. Pitts (2011), "Quantification of ozone destruction in terms of PSC types from CALIPSO and MLS data", AGU 2011 Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., December 8, 2011.
- ② 中島英彰, 大矢麻奈未, 高橋友香理, M. C.

Pitts (2011), 「CALIPSO と MLS データによる PSC タイプによるオゾン破壊量の定量化」、日本気象学会 2011 年度秋季大会 (名古屋)、2011 年 11 月 16 日

- ③ Nakajima, H., K. Saeki, Y. Nagahama, and N. B. Jones (2011), "Variation of chlorine species related to Antarctic ozone hole observed by ground-based FTIR at Syowa Station, Antarctica", The 20th NDACC Symposium, Reunion, France, November 7, 2011.
- ④ 白石浩一, 中島英彰, 村田 功, 佐伯浩介, 富川喜弘, 大矢麻奈未 (2011), 2009 年冬季ニーオルスンライダー、エアロゾルゾンデと CALIPSO ライダーで観測した PSC の比較解析、第 17 回大気化学討論会 (宇治)、2011 年 10 月 19 日
- ⑤ 杉田考史, 寺尾有希夫, 笠井康子, 林田佐智子, 香川晶子 (2011), SMILES によって観測された春季南極成層圏での高い HCl/Cl_y 比. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会 (幕張)、2011 年 5 月 23 日
- ⑥ Shiraishi, K., H. Nakajima, I. Murata, Y. Tomikawa, K. Saeki, and M. Ohya (2010), "Solid PSCs detected by Aerosol sonde and lidar above NY-ÅLESUND in the winter of 2009/10", Second International Symposium on the Arctic Research (ISAR-2) –Arctic System in a Changing Earth–, Tokyo, December 8, 2010.
- ⑦ Murata, I., H. Goto, I. Morino, H. Nakajima, and H. Nakane (2010), "Ozone decrease observed in the mid-latitude after the breakup of the polar vortex", Second International Symposium on the Arctic Research (ISAR-2) –Arctic System in a Changing Earth–, Tokyo, December 8, 2010.
- ⑧ Nakajima, H., I. Murata, K. Shiraishi, Y. Tomikawa, K. Saeki, and M. Ohya (2010), "Observation of polar stratospheric clouds in Ny-Ålesund and its relationship on ozone destruction", Second International Symposium on the Arctic Research (ISAR-2) –Arctic System in a Changing Earth–, Tokyo, December 7, 2010.
- ⑨ 中島英彰, 大矢麻奈未, 佐伯浩介 (2010), 「昭和基地上空における PSC のタイプ識別とオゾン破壊量の関係」、第 33 回気水圏シンポジウム、国立極地研究所 (立川)、2010 年 12 月 1 日
- ⑩ 中島英彰, 村田 功, 佐伯浩介, 白石浩一, 富川喜弘, 大矢麻奈未 (2010), 「2010 年ノルウェー・ニーオルスンにおける PSC の特性評価とオゾン破壊」、日本気象学会 2010 年秋季大会、京都、2010 年 10 月 27 日
- ⑪ 中島英彰, 村田 功, 佐伯浩介, 後藤秀美,

白石浩一、磯野靖子、大矢麻奈未、富川喜弘、塩原匡貴、山内 恭 (2010)、「ノルウェー・ニーオルスンにおける PSC 観測」、第 13 回南極エアロゾル研究会、国立極地研究所 (立川)、2010 年 7 月 22 日

- ⑬ Nakajima, H., I. Murata, K. Saeki, K. Shiraishi, Y. Isono, and M. Ohya, “PSC observations for emission spectra by low-resolution FTIR at Ny-Ålesund, Norway and Syowa Station, Antarctica”, NDACC/Infrared Working Group Meeting, Murramarang Resort, Australia, June 3, 2010.
- ⑭ 中島英彰、村田 功、佐伯浩介、後藤秀美、白石浩一、磯野靖子、大矢麻奈未、富川喜弘、塩原匡貴、山内 恭 (2010)、「2010 年ノルウェー・ニーオルスンにおける PSC の特性評価とオゾン破壊」、日本地球惑星科学連合 2010 大会、幕張メッセ、2010 年 5 月 28 日
- ⑮ 中島英彰、佐伯浩介、大矢麻奈未 (2010)、「JARE48 による PSC の特性評価とオゾン破壊量との関係」、日本気象学会 2010 年度春季大会、東京、2010 年 5 月 25 日
- ⑯ Nakajima, H., I. Murata, K. Shiraishi, K. Saeki, Y. Isono, H. Goto, and M. Ohya (2010), “PSC observations with ground-based FTIR and optical particle counter-type aerosolsonde at Ny-Ålesund, Svalbard”, RECONCILE Science Meeting, Kiruna, Sweden, March 9, 2010.

[図書] (計 1 件)

- ① 杉田考史 (2011) 2.2 成層圏オゾンの観測。日本リモートセンシング学会編, 基礎からわかるリモートセンシング, 理工図書, 18-20.

[その他]

ホームページ等

研究成果の記者発表 (1)

<http://www.nies.go.jp/whatsnew/2011/20110406/20110406.html>

研究成果の記者発表 (2)

<http://www.nies.go.jp/whatsnew/2011/20111003/20111003.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島 英彰 (NAKAJIMA HIDEAKI)

独立行政法人国立環境研究所・地球環境研究センター・室長

研究者番号：20217722

(2) 研究分担者

杉田 考史 (SUGITA TAKAFUMI)

独立行政法人国立環境研究所・地球環境研究センター・主任研究員

研究者番号：90312230

(3) 連携研究者

村田 功 (MURATA ISAO)

東北大学・大学院環境科学研究科・准教授
研究者番号：00291245

長濱 智生 (NAGAHAMA TOMOO)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授
研究者番号：70377779

白石 浩一 (SHIRAISHI KOICHI)

福岡大学・理学部・助教

研究者番号：80299536