

地球規模課題対応国際科学技術協力

(環境・エネルギー分野「地球規模の環境課題の解決に資する研究」領域)

南米における大気環境リスク管理システムの開発

(アルゼンチン共和国、チリ共和国)

平成 25 年度実施報告書

代表者：水野 亮

名古屋大学太陽地球環境研究所・教授

<平成 24 度採択>

1. プロジェクト全体の実施の概要

地球の大気環境は、温室効果ガス等の排出などの人為的なリスクと火山や森林火災等の自然起源のリスクにさらされている。本研究はアルゼンチンおよびチリの研究者らと協力し、国際的な地球観測網の「空白域」である南米域において、(1)先端的な観測機器による大気観測網の整備を進め、地域社会および世界各国で活用される基本的な大気質データを取得し関係諸機関に提供すること、および(2)リアルタイムな大気環境リスク情報伝達システムのひな形を構築し、取得された観測データをもとに地域社会へのアラート(警報・注意喚起)の発信等、相手国における具体的な大気環境リスクの社会管理システムの構築を目指すものである。

H24 年度はプロジェクトを開始するため、相手国の研究機関と今後の共同研究の進め方を議論した。特に本研究の柱のひとつであるエアロゾルライダーの観測網について、新規・既存のライダー併せて計9基のライダーから構成される観測網とすることを決め、さらに相手国と新規に共同開発するライダーの仕様を詰めた。オゾン観測においては観測データの高精度化のための機器開発に向けた準備を進めた。また、JICA 主導の下で9月に2週間にわたり詳細計画策定調査を行ない、R/D、MoU の締結に向けて相手国の社会的な状況、背景を調査した。本プロジェクトは他のプロジェクトと異なりチリとアルゼンチンの2つの国を相手国としているが、投入規模の大きいアルゼンチン側にやや比重をかけて調査を行った。調査の結果、両国とも独自に行政が危機管理体制のインフラ整備を行っていることが明らかになった。本プロジェクトでめざす準リアルタイムな大気環境リスク情報伝達システムをどのようにそれぞれの国の危機管理インフラに組み込んでいくか、その具体的な設計を進めることが今後のプロジェクトを進める上で重要である。そこで、本格的なプロジェクト開始初年度にあたる H25 年度に両相手国の危機管理インフラ整備の現状を把握するためのベースライン調査を行い、その調査結果をもとにどのような省庁部局とどういった連携を取るべきかを明確にし、構築すべき情報伝達システムの設計をより具体化したいと考えた。

H25 年度はプロジェクトを正式に開始する年度にあたり、主要相手国のひとつであるアルゼンチンのブエノスアイレスにおいて 10 月にキックオフミーティングを開催し、関連省庁や学識経験者を含む市民に本プロジェクトの背景とねらいについて深く理解を促した。本プログラムとしては初の2か国(チリとアルゼンチン)を相手とする3か国間プロジェクトとしてスタートしたが、R/D の締結に時間を要し、実質的なプロジェクト開始が9月まで遅れたのが悔やまれる。この遅れに伴い、ベースライン調査の実施も年度終盤にずれ込み、調査結果のまとめは H26 年度に持ち越さざるを得なくなった。しかしながら、本研究の柱のひとつであるエアロゾルライダーの観測網については、アルゼンチン政府からの援助も受け、新たに2か所のラマンライダー観測ステーションを設置し観測を開始することができた。大陸南端部のリオ・ガジェゴスでのオゾン観測においては、現地におけるデータ解析環境の整備が進み、9月にはオゾンホール到来に伴うオゾン混合比高度分布の変化を検出することができた。しかしながら現状では、リオ・ガジェゴスにおいては停電が頻発し、また、それに伴う観測装置の故障が起きるなど定常的なモニタリングを行うには解決すべき問題が残されている。停電に関しては H25 年度に JICA 経費で購入した無停電電源装置を H26 年度に現地に設置し運用を開始することで改善できると考えている。

国内においては、オゾン観測に用いるミリ波分光計の超伝導受信機において、これまでの2SB受信機による片サイドバンド化に代わる新たな手法として導波管を用いた片サイドバンド化実験に成功し、超伝導受信機を長期間安定して動作させる見通しが得られた。同受信機は H26 年度に現地の観測装置に搭載する予定である。エアロゾルライダーに関しては、高スペクトル分散ライダーの実機設計をアルゼンチンの CEILAP と進め、必要な機材の調達を行った。また H25 年度設置した2台を含む既設のエアロゾルライダーのデータをオフラインであるが入手し、解析手法およびデータ利用手法の検討に着手した。統合データ解析においては、再解析気象データ(ERA Interim)をナッジングによって同化した化学輸送モデルを構築した。リオ・ガジェゴス上空のオゾン全量

を衛星観測結果と比較し、オゾン全量の絶対値とその時間変化ともに観測を良く再現することを確認した。

2. 研究グループ別の実施内容

オゾン・紫外線グループ

研究題目：「オゾンホール・紫外線リスクの高精度実態把握と住民への情報伝達に関する研究」

オゾンホール直下にしばしば位置する南米南端のパタゴニア地域におけるオゾン層破壊と紫外線量変動の実態を把握するためのモニター観測を実施し、地域住民への迅速な情報伝達システムを開発することを目的とする。また同モニター観測を行うためのミリ波遠隔測定技術の高精度化開発を行う。さらに地球規模の環境変動の動向を把握するためチリ・アタカマ高地、南極昭和基地を含む広範囲の地上観測網を形成し、三次元化学輸送モデルや国際的データベースへのデータ提供を行う。また南米における大気環境リスク管理システムの開発を目指す本研究課題全体を統括する。

H24 年度は、H25 年4月より本格的に開始する本計画の準備を進めた。南米南端リオ・ガジェゴス市の南部パタゴニア大気観測所に設置したミリ波分光計について、初期運用を開始した 200GHz 帯の受信機から下層大気の吸収の影響の少ない 100GHz 帯の受信機への載せ替えを行った。また、これに合わせて 100GHz 帯における観測効率を向上させるべくビーム伝送光学系の再設計を行った。H25年度以降、2、3年の間にビーム伝送系の改良、冷却黒体の改良、受信機の片サイドバンド化などの開発を進め、観測の高精度化を目指す。H24 年度はまだ暫定研究期間で本格的な開発は進めてはいないが、ビーム伝送系の再設計と電磁界シミュレータを用いた数値計算評価、片サイドバンド化のための導波管フィルタの設計と試作など本計画開始後に向けた基盤的な開発を進めた。また、相手国研究者とともに高度分布のリトリーバル解析プログラムに関する技術検討を行った。アルゼンチンの相手機関である CEILAP のライダーのデータ解析は MATLAB を用いて行われており、MATLAB と親和性が高く欧州の研究グループで解析に用いられている ARTS、Q-Pack のパッケージを利用したミリ波データ解析プログラムと名大で開発した C 言語と FORTRAN によるミリ波データ解析プログラムの比較を行った。解析結果自体は基本的により一致を示すが、様々なミリ波観測装置に対応できるように汎用化されている ARTS、Q-Pack では、我々のミリ波観測装置に特化した名大の解析プログラムより計算時間が長くかかった。相手国におけるソフト開発体制の強化やライダーデータとの結合を見据え、今後は MATLAB ベースの ARTS、Q-Pack を用いた解析システムを構築するのが得策と考えられるが、大量のデータを迅速に処理するために我々のミリ波分光計観測にカスタマイズし、解析時間の短縮を図る必要があることが明らかになった。

H25 年度は南米南端リオ・ガジェゴスの南部パタゴニア大気観測所に設置したミリ波分光計の定常的なモニター観測を実現するための環境整備と、更なる高精度化観測のための機器開発を進めた。先に述べた機器開発項目の中で H25 年度は特に受信機の片サイドバンド化において大きな成果が得られた。当初予定していた 2SB 受信機を用いた方法は電波天文の ALMA 計画の受信機開発で大きな成功を収めているが、使用する2個の超伝導受信機の性能の均一性、すなわち歩留まりの高さが要求され、最適のチューニングポイントを長期間安定して持続させるのが容易ではない、という課題があった。電波天文では観測対象の視線速度に応じて周波数設定を変更(ドップラー効果)する必要が生じるが地球大気の観測ではドップラー効果が無視できるため、観測周波数は固定される。そこで、その周波数に合わせたフィルタを用いることでサイドバンド除去回路を組めることに着目した。ただし、単なるバンドパスフィルタを用いただけでは遮断周波数の信号が反射波としてスペクトルベースラインを歪ませる定在波の原因となるため、観測に適したフィルタとはならない。そこで、導波管型の90度ハイブリッド回路を用いることにより透過波と反射波の出力端を分離し、反射波による定在波の発

生を極力低減することに成功した。名古屋大学の陸別観測所で稼働中のミリ波オゾン分光計に搭載し、実際のオゾン観測を通して実用化試験を行った。従来の2SB受信機のような調整は一切不要で、長期にわたり安定したサイドバンド分離が可能であることが実証された。同タイプの受信機をH26年度に現地の観測装置に実装し観測に用いる予定である。

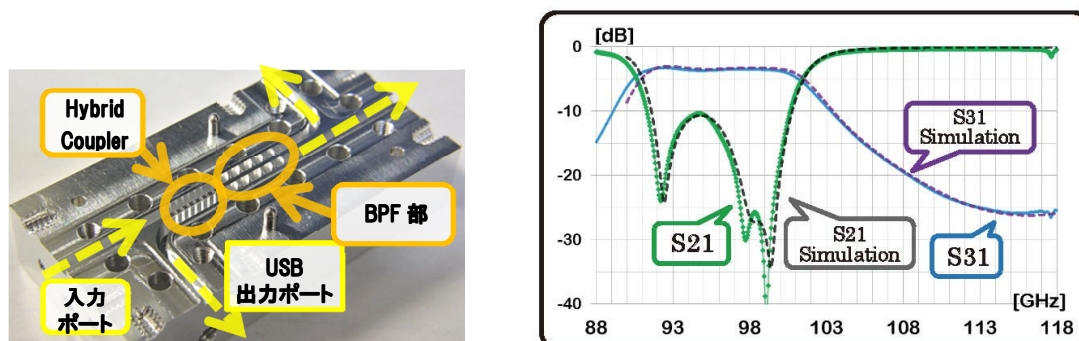


図 1. 導波管型イメージバンド除去フィルタの構成（写真左）とフィルタ特性（右）。緑色がフィルタの透過特性（S21）の実測値（実線）と設計値（破線）を示す。オゾンの線スペクトルがある 110GHz 付近ではほぼ 100%の透過特性を持ち、イメージバンドの 98GHz 付近の信号はほとんど透過しない（減衰量が $-20\text{dB}=1/100$ 以下）。（図は長谷川豊、大阪府立大学大学院修士論文、2014 より）

また、ミリ波オゾン観測のデータ解析に関しては、H24 年度中に開発した ARTS、Q-Pack のパッケージを用いた解析プログラムがH25年度中に相手国側で稼働できる状態に整備された。一方国内では、北海道の名古屋大学陸別観測所で取得しているミリ波オゾン観測データを用い、OMI 衛星のオゾン全量データや陸別観測所で稼働中の国立環境研究所のブリューワ分光計によるオゾン全量データとの相互比較を通して、ミリ波データの強度校正に対する吟味を行なった。その結果、陸別観測所の観測装置ではミリ波スペクトルの強度が 10%程低めに出ていることが明らかになった。まだ原因の特定は完全にはできておらず根本的な解決は今後の課題であるが、ブリューワ分光計のオゾン全量測定値を用いてミリ波データ強度を再校正し、鉛直プロファイルを導出する解析アルゴリズムを開発した。ブリューワ分光計はリオ・ガジェゴス観測所にも3年次に導入予定であり、導入後はブリューワ分光計の観測データも活用して、リオ・ガジェゴスのミリ波データ解析の信頼性を高めていく予定である。

現地の観測運用においては、ミリ波分光計を用いて H25 年8月下旬から10月末にかけて連続的なモニターデータが取得できている(3.2.1 成果の項参照)。しかし、リオ・ガジェゴス市の商用電力網の問題から1か月に1回以上の頻度で停電が発生している。商用電線が停電した後、観測施設の発電機に切り替えるまで10分程度の時間を要するが、この間に極低温冷凍機や液体窒素製造機が停止し、機械的な安全面から自動的に再起動するようにはなっていない。そのため、現地の担当研究者が長期間国内外に出張した際等に長期のデータ欠損が生じている。H25 年度に購入した三相 200V の無停電電源をH26 年度に設置し停電に備えるとともに、現地のエンジニアに研修を行い、複数の人間がミリ波分光計の起動、停止、観測ができる運用体制を作っていく必要がある。また、部品の老朽化に伴い極低温冷凍機が動作不良となり、H26 年1月から観測が中断している。またオゾンライダーも同様に部品の老朽化からレーザーの発振が停止している。これらの問題については H26 年度の6月までに対処し観測を再開させる予定である。

対流圏エアロゾル・統合データ解析グループ

研究題目：「対流圏エアロゾルの監視・予測・警報システムの構築および大気環境リスクに対する統合的なデータ解析手法に関する研究」

・対流圏エアロゾル観測

人間活動に影響を及ぼす火山灰や森林火災の煙、ミネラルダストなどの対流圏のエアロゾルイベントを常時監視するとともに、エアロゾルの輸送を予測して関係機関に警報を発するためのシステムの構築を目的とする。そしてこのために、高機能のライダー観測ネットワークおよび準リアルタイムのデータ解析システムを構築する。

H24 年度は CEILAP におけるライダー研究について調査し、既存のラマン散乱ライダーの改良と新たに製作する高スペクトル分解ライダー(HSRL)の構成について検討を行った。その結果、新たに開発する HSRL は、これまでに CEILAP が火山噴煙観測用に開発したラマン散乱ライダーの設計をベースに、レーザーを狭帯域化するとともに、受信光学系にヨウ素セルを追加して波長 532 nm の高スペクトル分解ライダー測定を行う構成を採用することとした。これによって昼夜共に 532 nm における消散係数の直接測定が可能になる。また、HSRL の製作の方法、必要な機器の仕様と調達方法について具体的な検討を行った。一方、既存のライダーおよび新たに製作する HSRL を用いて構築する対流圏エアロゾル観測ライダーネットワークの観測地点の配置について検討した。

H25 年度は、製作するライダーについて、前年度の検討結果に基づいて、532nm では HSRL 方式、355nm ではラマン散乱ライダー方式、1064nm ではミー散乱ライダー方式で測定を行う3波長のハイブリッド型のライダーの設計を固めた。特に、最も重要な基礎技術であるレーザー波長の制御(レーザー波長をヨウ素の吸収線に同調する技術)について日本で開発したライダーに用いた技術を基に再検討し CEILAP と理解を共有した。確定したライダーの設計に基づいて CEILAP が機材の調達を行った。ライダーネットワークの配置について、観測地点の状況や製作する高スペクトル分解ライダー(HSRL)の特徴を考慮して再検討を行った。その結果、観測地点は、ブエノスアイレスの CEILAP とエアロパルケ、北部のコルドバとトゥクマン、中部のバリローチェ、ネウケン、コモドロー・リヴァダビア、南部のリオ・ガジェゴスとチリのプンタアレナスの計9地点とし、この内のプンタアレナスと北部のコルドバ、トゥクマンに HSRL を配置する計画とした。HSRL によって、北部では森林火災エアロゾル、南部ではパタゴニアダストの光学特性の観測が期待される。

ネットワークデータの解析システムを日本側に整備するとともに、既存のラマン散乱ライダーのデータを CEILAP からオフラインで入手して解析手法およびデータ利用手法の検討に着手した。

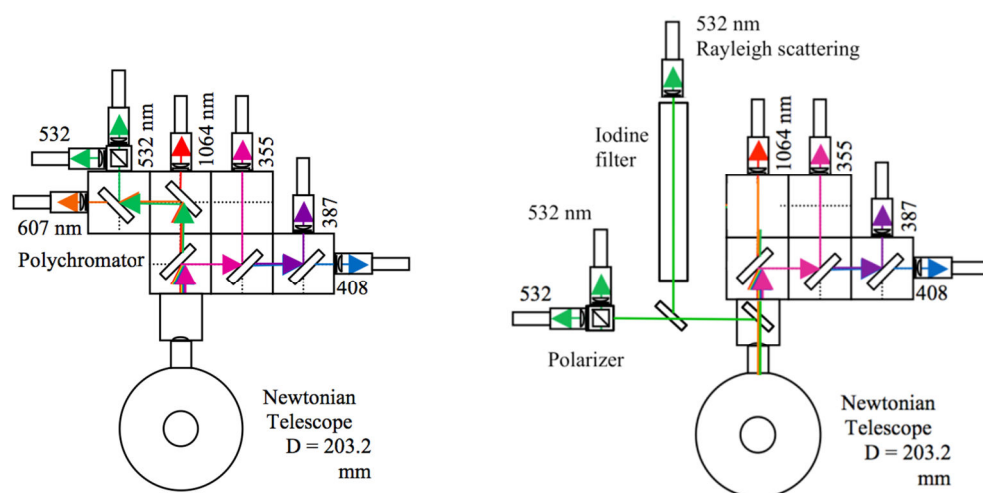


図 2. 本プロジェクトでアルゼンチン、チリに設置するラマン散乱ライダー（左）と高スペクトル分散ライダー(HSRL)（右）の構成図。

・統合データ解析

地球規模の大気環境問題のひとつに挙げられる南極オゾンホールとその人間活動等への影響の理解に資する情報の提供を目的とし、各種の高精度観測に基づくオゾン等のデータを活用するための三次元化学輸送モデルの開発を行う。このモデルを用いて短期的なオゾン等の大気組成濃度の予報を配信し、南米の人間活動にとって有益な情報源とすることを目指す。リオ・ガジェゴスのオゾンライダー、ミリ波分光放射計、オゾンゾンデ等の観測データに、アタカマ、昭和基地での各種データ、いくつかの衛星観測データを統合的に利用する。開発した化学輸送モデルを用いて、南極オゾンホールの南米先端部への到来を事例としてモデルの性能評価、統合的データ解析の有効性を検証する。

H24年度は、いくつかの衛星観測データの整備とナッジングに利用する気象データの選定等を進めた。H25年度以降にその気象データを利用した化学輸送モデルの開発を進める。H25年度は、JEM/SMILES のデータと、アタカマの地上ミリ波観測データ、さらに米国 MLS 等の既存衛星データなどと、再解析気象データをナッジングによって同化した化学輸送モデルによる3次元の計算結果とを比較することにより、相互検証・モデルの性能評価を行う。H26年度以降は、上記のモデルの性能評価に基づく化学輸送モデルの改良を行うとともに、短期予報の気象データを化学輸送モデルに使うことで、成層圏の微量成分分布の短期的な予報を試みる。その後、本事業の観測網が整備され定常的なアウトプットが期待される観測網のデータを活用したデータ解析を進める。研究期間の最終年度には、これらの結果をインターネットを通じて配信するシステムの構築を行う。

H25年度は、ECMWF の再解析気象データ(ERA Interim)をナッジングによって同化した化学輸送モデルを構築し、その性能評価のために以下を進めた。オゾン層の将来予測などに使われる化学気候モデルに、ERA Interim の過去の東西風、南北風、および気温データをナッジングすることで化学輸送モデルとし、実際に2009年から2012年の気象データを利用してモデル計算を行った。南極域の春期から初夏にあたる9月から12月について、リオ・ガジェゴス上空のオゾン全量を衛星観測結果と比較した。特に、2009年11月後半には南極半島からアルゼンチン・チリに掛けて低濃度のオゾンに広く覆われるという極めて特徴的な事象が見られた。この事象を対象に、米国の OMI(Ozone Monitoring Instrument)によるオゾン全量の観測結果とモデル計算を比較した(図を参照)。オゾン全量の絶対値とその時間変化ともにモデルは観測を良く再現することを確認した。

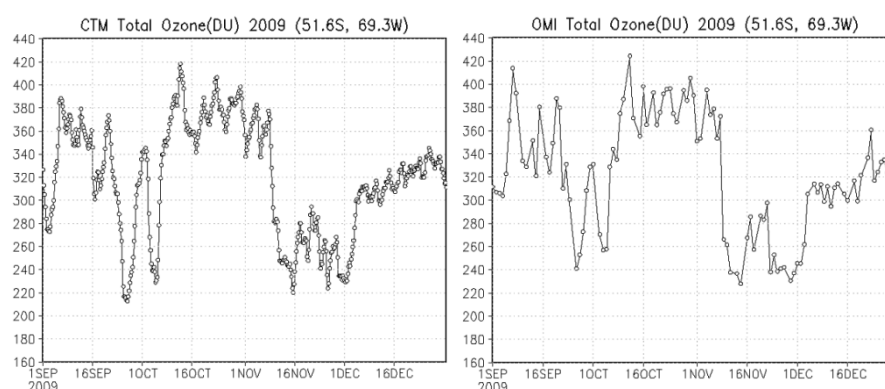


図3. リオ・ガジェゴス(南緯51.6度、西経69.3度)上空の2009年9月から12月のオゾン全量(単位はドブソンユニット)の時間変化。左が化学輸送モデルで右が衛星観測センサ OMI の結果を示す。

3. 成果発表等

(1) 原著論文発表

- ① 本年度発表総数(国内 0 件、国際 4 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数(国内 0 件、海外 12 件)
- ③ 論文詳細情報

H24 年度

Mona, L., Liu, Z., Mueller, D., Omar, A., Papayannis, A., Pappalardo, G., Sugimoto, N., and Vaughan, M., “Lidar Measurements for Desert Dust Characterization: An Overview”, *Advances in Meteorology* Volume 2012, Article ID 356265, 36 pages doi:10.1155/2012/356265, 2012.

Scaife, A., Spanghel, T., Fereday, D., Cubasch, U., Langematz, U., Akiyoshi, H., Bekki, S., Braesicke, P., Butchart, N., Chipperfield, M., Gettelman, A., Hardiman, S., Michou, M., Rozanov, E., and Shepherd, T., “Climate change projections and stratosphere-troposphere interaction”, *Clim. Dyn.*, 38, 2089–2097, doi:10.1007/s00382-011-1080-7, May 2012

Fujiwara, M., Suzuki, J., Gettelman, A., Hegglin, M. I., Akiyoshi, H., and Shibata, K., “Wave activity in the tropical tropopause layer in seven reanalysis and four chemistry climate model data sets”, *J. Geophys. Res.*, 117, doi:10.1029/2011JD016808, 2011JD016808, Jun. 2012

Mitchell, D. M., Charlton-Perez, A. J., Gray, L. J., Akiyoshi, H., Butchart, N., Hardiman, S. C., Morgenstern, O., Nakamura, T., Rozanov, E., Shibata, K., Smale, D., and Yamashita, Y., “The nature of Arctic polar vortices in chemistry-climate models”, *Quart. J. Royal Met. Soc.*, 138, 1681–1691, doi:10.1002/qj.1909, Oct. 2012

Sugita, T., Kasai, Y., Terao, Y., Hayashida, S., Manney, G. L., Daffer, W. H., Sagawa, H., Suzuki, M., and Shiotani, M., “HCl/Cly ratios just before the breakup of the Antarctic vortex as observed by SMILES/MLS/ACE-FTS”, *Remote Sensing of Atmosphere, Clouds, and Precipitation IV*, edited by Hayasaka, T., Nakamura, K., and Im, E., vol. 8523 of *Proc. SPIE*, doi:10.1117/12.975667, Nov. 2012

Kuwahara, T., Nagahama, T., Maezawa, H., Kojima, Y., Yamamoto, H., Okuda, T., Mizuno, N., Nakane, H., Fukui, Y., and Mizuno, A., “Ground-based millimeter-wave observation of stratospheric ClO over Atacama, Chile in the mid-latitude Southern Hemisphere”, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 2601–2611, Nov. 2012.

Yumimoto, K., Uno, I., Sugimoto, N., Shimizu, A., Hara, Y., and Takemura, T., “Size-resolved adjoint inversion of Asian dust”, *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, L24807, doi:10.1029/2012GL053890, Dec. 2012.

Sugimoto, N., Hara, Y., Shimizu, A., Nishizawa, T., Matsui, I., and Nishikawa, M., “Analysis of Dust Events in 2008 and 2009 Using the Lidar Network, Surface Observations and the CFORS Model,” *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 49(1), 27–39, 2013, DOI:10.1007/s13143-013-0004-3, January, 2013.

H25 年度

Sakazaki, T., M. Fujiwara, C. Mitsuda, K. Imai, N. Manago, Y. Naito, T. Nakamura, H. Akiyoshi, D. Kinnison, T. Sano, M. Suzuki, and M. Shiotani, “Diurnal ozone variations in the stratosphere revealed in observations from the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES) onboard the International Space Station (ISS)”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 2991–3006, doi:10.1002/jgrd.50220, April 2013.

Nakamura, T., H. Akiyoshi, M. Deuchi, K. Miyazaki, C. Kobayashi, K. Shibata, T. Iwasaki, “A multi-model comparison of stratospheric ozone data assimilation based on an ensemble Kalman filter approach”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 3848–3868, doi:10.1002/jgrd.50338, May 2013.

Sugita, T., Kasai, Y., Terao, Y., Hayashida, S., Manney, G.L., Daffer, W.H., Sagawa, H., Suzuki, M., Shiotani, M., Walker, K.A., Boone, C.D., Bernath, P.F., “HCl and ClO profiles inside the Antarctic vortex as observed by SMILES in November 2009: comparisons with MLS and ACE-FTS instruments”, Atmos. Meas. Tech., 6, 3099–3113, doi:10.5194/amt-6-3099-2013, November 2013.

Isono, Y., A. Mizuno, T. Nagahama, Y. Miyoshi, T. Nakamura, R. Kataoka, M. Tsutsumi, M. K. Ejiri, H. Fujiwara, and H. Maezawa, “Variations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over Antarctica associated with a magnetic storm in April 2012”, Geophysical Research Letters, in press, 2014

(2) 特許出願

- ① 本年度特許出願内訳 (国内 0 件、海外 0 件、特許出願した発明数 0 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数 (国内 0 件、海外 0 件)

4. プロジェクト実施体制

(1) 「オゾン・紫外線」グループ (研究題目: オゾンホール・紫外線リスクの高精度実態把握と住民への情報伝達に関する研究)

① 研究者グループリーダー名: 水野 亮 (名古屋大学太陽地球環境研究所・教授)

② 研究項目

- ・オゾン・紫外線観測システム (ミリ波分光計、オゾンライダー、その他関連観測機器) の高精度化
- ・モニタリング観測にもとづく、オゾンホールの変動の把握とオゾンホール崩壊期の低オゾン空気塊の南半球中緯度帯への拡散輸送プロセスの解析
- ・取得された観測・解析データを関係各省庁および各機関と共有するためのリスク情報伝達システムの開発

(2) 「対流圏エアロゾル・統合データ解析グループ」グループ (研究題目: 対流圏エアロゾルの監視・予測・警報システムの構築および大気環境リスクに対する統合的なデータ解析手法に関する研究)

① 研究者グループリーダー名: 杉本 伸夫 (国立環境研究所環境計測研究センター・室長)

② 研究項目

- ・準リアルタイムエアロゾルモニタリング観測網の開発
- ・エアロゾルの種類、発生源、輸送、季節変動などの諸特性の解明
- ・大気環境リスク (オゾン・紫外線、エアロゾル) の理解を向上させる統合解析システムの開発

以上