

# アラスカにおけるオゾンゾンデキャンペーン観測及び観測結果の3次元化学輸送モデルデータとの比較

*Intensive Ozonesonde Observation at Fairbanks and Comparison with Three-Dimensional Chemical Transport Model*

山森美穂 村山泰啓 柴崎和夫 村田 功 香川晶子 笠井康子  
宮崎和幸

YAMAMORI Miho, MURAYAMA Yasuhiro, SHIBASAKI Kazuo, MURATA Isao,  
KAGAWA Akiko, KASAI Yasuko, and MIYAZAKI Kazuyuki

## 要旨

2003年8月、米国アラスカ州フェアバンクスにおいて、オゾンゾンデのキャンペーン観測を行った。この観測は、アラスカプロジェクト地上測器による環境観測技術衛星「みどりⅡ」搭載センサ「改良型大気周縁赤外分光計Ⅱ(ILAS-Ⅱ)」の比較検証実験の一環として実施された。取得されたデータは、ILAS-Ⅱのオゾンデータの検証と下部成層圏におけるオゾンの微細構造の解析に用いられた。観測されたオゾンの微細構造と、3次元化学輸送モデルデータから流跡線計算を介して作成された高解像度のデータセットとの比較を行った。

An observation campaign including intensive launches of ozonesondes was conducted at Fairbanks (64.8 N, 147.9 W), Alaska, during 23-30 August 2003. The objectives are validation of data from Improved Limb Atmospheric Spectrometer-II (ILAS-II) on board the Advanced Earth Observing Satellite-II (ADEOS-II) with Alaska Project ground-based instruments and examination of small-scale ozone variation in the upper troposphere and lower stratosphere. Observed small-scale structures in ozone are compared with high-resolution fields reconstructed from 3-dimensional chemical transport model using the reverse domain filling technique.

## [キーワード]

成層圏オゾン、オゾンゾンデ、オゾンの微細構造、ILAS-II、化学輸送モデル  
Stratospheric ozone, Ozonesonde, Fine structure in ozone distributions, ILAS-II, Chemical transport model

## 1 まえがき

成層圏オゾンは地球上の生命体を有害な紫外線から保護する重要な役割を担っている。クロロフルオロカーボン等の人為起源物質による極域でのオゾン破壊は大きな地球環境問題となっており、全球規模でオゾンを監視する取組が行われている。また、成層圏オゾンは、地球大気の熱源として、中層大気の温度や風系の構造に大きな影響を及ぼしている。

下部成層圏においてオゾンがしばしば鉛直スケールの小さい層状構造を呈することは、1970年代以前から認識してきた。オゾンの光化学的寿命の長い下部成層圏(高度15~25 km付近)では、オゾンの微細構造は力学的に、すなわち南北や鉛直に濃度勾配が存在するもとで、異なる緯度帯や高度域を起源とする空気塊が観測地点に運ばれた結果生成されると考えられている。層状の構造の成因として、ロスビー波の碎波やカオス的移流、重力波が挙げられている。前者二つは、準水平2

成層圏・対流圏観測実証  
アラスカにおけるオゾンゾンデキャンペーン観測及び観測結果の3次元化学輸送モードルデータとの比較

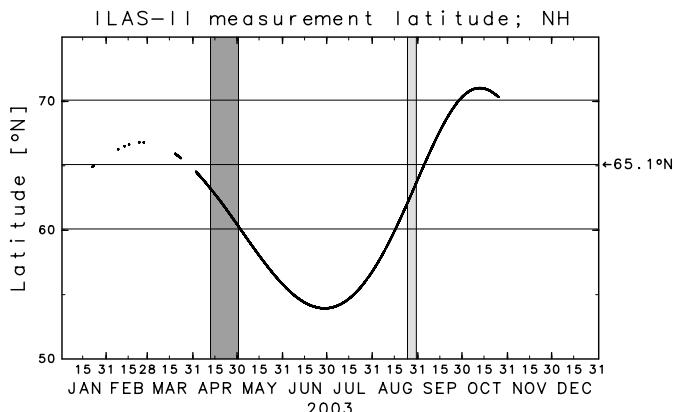


図1 ILAS-II観測点の時系列(北半球のみ)

次元移流、後者は主として鉛直移流により、層状構造の生成に寄与すると考えられている。両者は時間スケール等が異なるため、生成される層状構造の時空間スケールが異なるはずである。それぞれが中層大気における物質輸送への寄与も異なることが考えられる。

ILAS-IIはみどりIIに搭載され、2002年12月打ち上げられた。2003年4月より定常運用が開始され、2003年10月のみどりIIの電源パネル破損により運用が終了されるまで、オゾン破壊プロセスにかかる種々の化学種のデータを取得した<sup>[1]</sup>。図1はILAS-IIによって観測された緯度(北半球のみ)の時系列を示す。アラスカプロジェクト<sup>[2]</sup>の観測拠点であるポーカーフラットの緯度帯は観測域に含まれおり、観測時期は2003年4月と8月である。そこで、我々はILAS-II協力検証実験に参加し、その一環として2003年8月フェアバンクスにおいて、オゾンゾンデのキャンペーン観測を行った。目的はILAS-II検証と小鉛直スケール構造のメカニズム解明である。

本稿では、オゾンゾンデキャンペーン観測の報告と、取得された高頻度オゾンゾンデ観測データと3次元化学輸送モデルとの比較を示す。なお、オゾンゾンデデータを含むアラスカプロジェクト取得データによって行ったILAS-IIデータの検証は、文献<sup>[3]</sup>を参照されたい。

## 2 キャンペーン観測

オゾンゾンデキャンペーン観測は、2003年8

月23~30日にフェアバンクス(64.8 N, 147.9 W)で行われた。期間中、近傍でのILAS-II観測と同期させた観測(毎日04 UTC)と3時間ごとの強化観測(8月26日18 UTCから28日04 UTCまで)を含む計22回の電気化学式(Electrochemical concentration cell; ECC)オゾンゾンデ観測が実施された。用いたオゾンゾンデEn-Sci 2 Z-GPSはGPS受信機を内蔵しており、地表から高度30 kmまでのオゾン、温度、湿度に加えて、位置データに基づく水平風速を提供する。また、8月26日07, 10, 13 UTC, 28日19 UTC, 29日01 UTCには、GPSラジオゾンデ(Vaisala RS 80-15 GH)観測も実施された。ECCオゾンゾンデ観測は、放球のたびに準備に時間を要するため、高頻度観測はほとんど行われてこなかったが、この観測では36時間にわたって時間と鉛直の両方向に分解能の高いデータを取得することできた。

図2は、観測で得られたオゾン混合比の鉛直プロファイルである。各プロファイルは放球時刻の23日20 UTCからの時間差によって、1日当たり2 ppmvの割合でシフトさせて描いている。幾つかの特徴が見て取れる。一つは、高さ25~30 km付近の構造である。期間の前半には、高度28 km付近のオゾンが少なく、26 kmと33 kmの2か所に極大があるが、後半には高度33 km付近で最大値を取る鉛直分布となっている。また、対流圏界面の直上にあたる高度11~17 kmに、鉛直スケール1 km程度の極大あるいは極小が継続して現れている。以降では、後者に着目する。

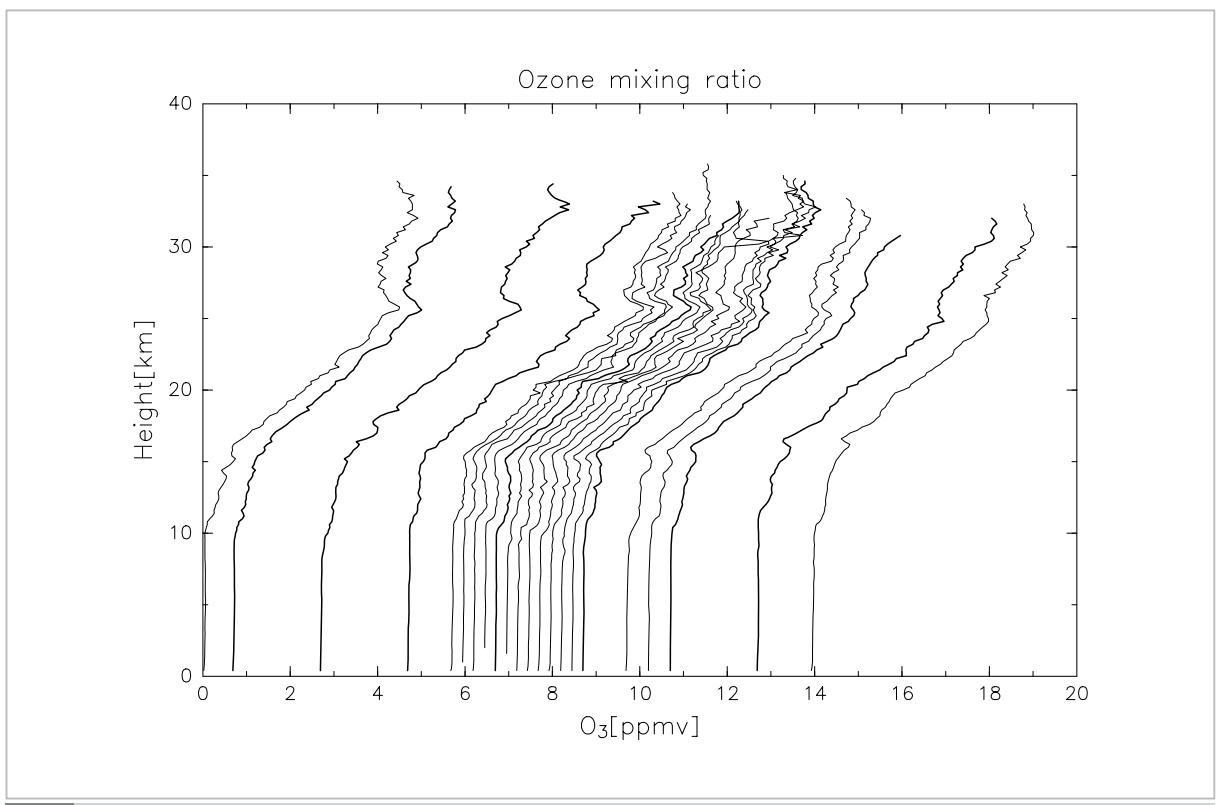


図2 オゾンゾンデ鉛直プロファイル

各プロファイルは放球時刻の23日20 UTCからの時間差によって、1日当たり2 ppbvの割合でシフトさせて描いている。太線はILAS-II検証に用いられた鉛直プロファイルを示す。

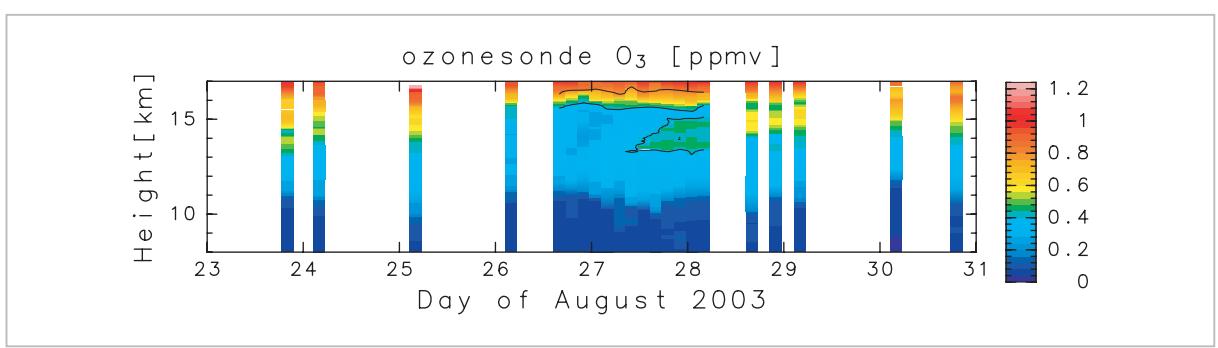


図3 オゾンゾンデ観測によるオゾン混合比の時間高度断面図(高さ8~17 km)

### 3 対流圏界面直上域の層状構造

図3はオゾン混合比の時間高度断面図を、高さ8~17 kmについて示したものである。厚さ数百メートルから1 kmの層状に、オゾンが増大または減少している構造が見られる。28日の高さ13.5 kmと14.7 km付近に極大、14.0 kmと15.2 km付近に極小が現われており、3時間ごと観測期間以後も継続しているように見える。この時期この高度においては、オゾンの光化学的寿命は十分に長く、その分布は輸送に依存すると考え

られる。すなわち、オゾンの多いところから運ばれてくれればオゾンは多く、逆に少ないところから運ばれてくれればオゾンは少ない。

27日から29日にかけて、フェアバンクス上空の対流圏界面付近は低圧部の東に位置しており、卓越風向は南寄りであった。一方、この時期この高度におけるオゾンの大局的な緯度勾配は正(極ほど大)である。南からの移流は負偏差をもたらすと考えられ、観測結果と一見矛盾する。この構造の成因を調べるため、3次元化学輸送モデルのデータを利用する。

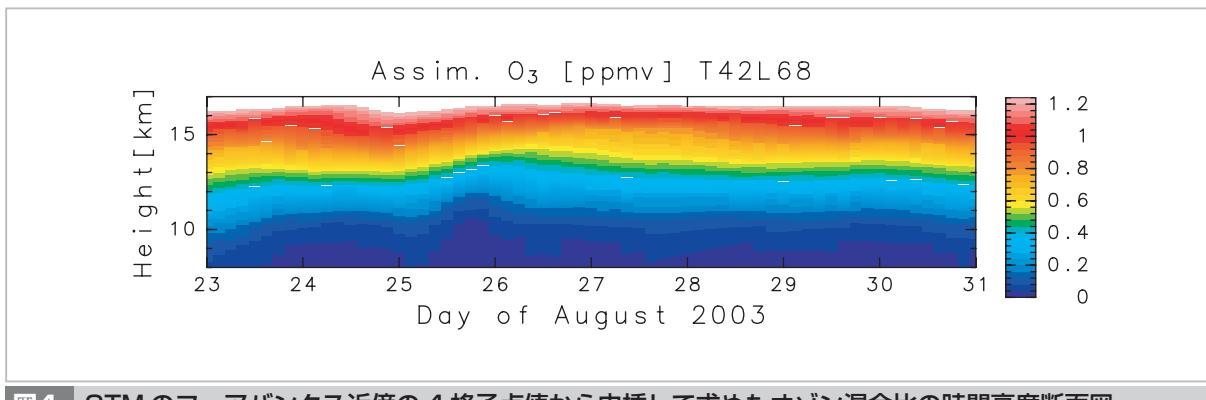


図4 CTMのフェアバンクス近傍の4格子点値から内挿して求めたオゾン混合比の時間高度断面図

## 4 3次元化学輸送モデルデータとの比較

### 4.1 3次元化学輸送モデル

下部成層圏におけるオゾン分布が輸送の効果に支配されるため、一点観測によるオゾン鉛直プロファイルを解釈する上でも、オゾン混合比や風速場の3次元分布の情報が重要である。これらの情報として、気象研究所と東北大学による成層圏オゾン実況監視システムで計算された3時間ごとのアウトプットを用いた。このシステムは3次元化学輸送モデル(Chemical Transport Model; CTM)<sup>[4]</sup>と大気循環モデル(General Circulation Model; GCM)の結合モデルである。現実の大気場を再現するために、NCEP/NCAR Reanalysisの風速場とTotal Ozone Mapping Spectrometer(TOMS)のオゾン全量を同化している<sup>[5]</sup>。モデルの解像度はT42 L68(水平解像度約300 km、下部成層圏での鉛直解像度500 m~2 km)である。オゾンの鉛直勾配の大きい下部成層圏での鉛直格子間隔を細かく取ることで、オゾン分布の再現性が従来に比べ向上している。

### 4.2 リバースドメインフィリング(Reverse Domain Filling; RDF)法

モデルデータとオゾンゾンデ観測データとでは空間分解能・空間代表性が異なるので、単純な比較では細かい構造まで比較することができない。事実、モデルデータによるフェアバンクス近傍のオゾン混合比の時間高度断面図(図4)には、層状構造が見られない。しかし、オゾンが下部成層圏では光化学的寿命が十分長くトレーサーとみなせ

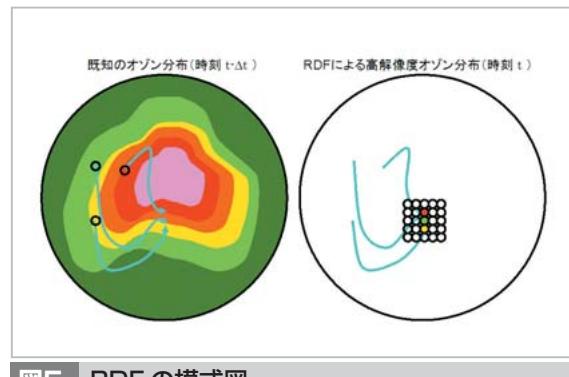


図5 RDFの模式図

ることを利用して、後方流跡線を介して高分解能の分布を作成した。手順は、以下のとおりである(図5に模式図を示す)。

- (1) 時刻  $t$ 、位置  $x$  から後方流跡線を計算し、トレーサー分布が既知である時刻  $t - \Delta t$  における気塊の位置  $x_0$  を推定。
- (2) 時刻  $t - \Delta t$ 、位置  $x_0$  におけるトレーサーの混合比を時刻  $t$ 、位置  $x$  における値とする。
- (3) 流跡線計算の初期値を高密度に配置することで、高解像度の分布を得る。

この手法はReverse Domain Filling(RDF)と呼ばれている<sup>[6]</sup>。RDFの特徴は、元のデータより高解像度の分布が得られることである。ただし、現実大気中に存在するモデル解像度以下のスケールでの混合の効果が含まれない点に注意が必要である。

流跡線の計算は、モデルの3時間ごとの気象場を用いて、断熱過程を仮定して行った。

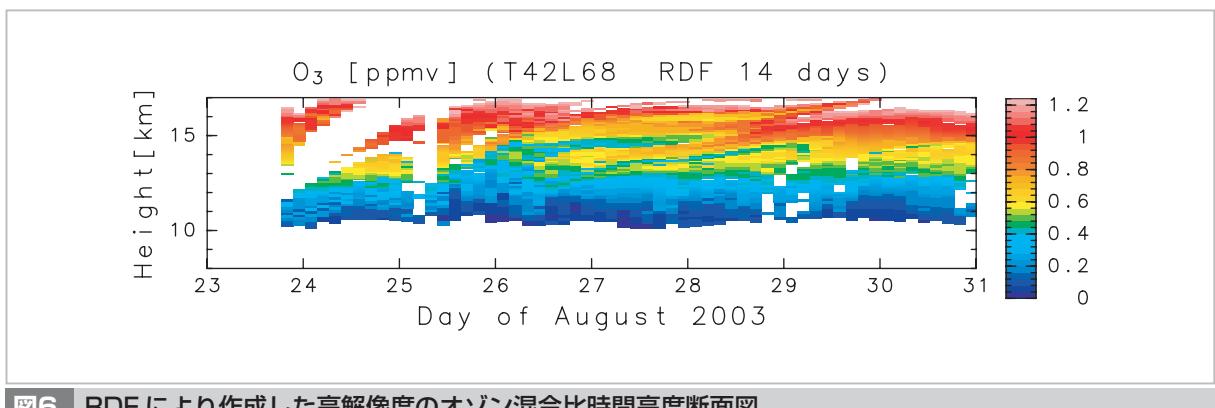


図6 RDF により作成した高解像度のオゾン混合比時間高度断面図

#### 4.3 比較

図6は、RDFによって作成した高鉛直解像度の時間高度断面図である。フェアバンクス上空の各高度(約0.1 km 間隔)から後方流跡線を計算し、14日前の位置のオゾン混合比に基づいて作成した。図3に現れた観測された層状構造の出現時刻や出現高度などの特徴は、おおむね再現された。ただし、次のような相違がある。(1)図6のオゾン混合比の値は、オゾンゾンデ観測値より1割程度大きい。(2)図3に比べ、図6の方が鉛直方向に細かい構造を持っている。

RDFによって、高解像度の水平分布図も作成した。時間発展を調べた結果、低圧部を反時計回りに取り巻く流れによって、極側起源の高オゾン気塊が細く引き伸ばされつつ南側からフェアバンクス上空に到来したことが分かった。

#### 5 考察

RDFによって作成した時間高度断面図が、おおむねオゾンゾンデ観測に見られた層状構造を再現することから、観測されたオゾンの層状構造はモデルで表現される大規模な流れ場による移流によって生成されたと考えられる。図6に見られる、より細かい鉛直構造は、RDFで得られる分布には現実大気中の鉛直拡散の効果が反映されていないためと考えられる。

高度8~17 kmでは、オゾンは2週間程度の期間ではほぼ保存すると考えられている。確認のため、モデルで計算されている奇数酸素(オゾンと酸素原子)の化学反応による変化量を流跡線に沿って積算したところ、オゾン混合比に占める割

合は3%程度以下であった。

今回行ったRDFは、後方積分期間を14日と設定している。当然のことながら、RDFで得られる分布は、後方積分期間が長いほど細かい構造を持つ。どの期間が最も適当であるか、検討が必要である。逆に、最も適当である後方積分期間の長短は、下部成層圏における混合の強さの情報を含むと考えられる。

#### 6 むすび

ILAS-II検証と下部成層圏におけるオゾンの鉛直微細構造の研究を目的として、2003年8月にオゾンゾンデキャンペーン観測を実施した。これまでに例のない3時間ごとの高頻度観測を行い、対流圏界面直上域の厚さ数百メートルから1 kmの層状構造の時間経過をとらえることができた。3次元化学輸送モデルデータを用いてRDFの手法により作成した高解像度オゾン分布は、観測された層状構造を再現した。これは、この層状構造がモデルで表現される大規模な流れ場によって生成されたことを示す。

#### 謝辞

オゾンゾンデ観測は、竹谷文一さん(名古屋大学)、中山智喜さん(名古屋大学)、池田奈生さん(奈良女子大学)、川村誠治さん(情報通信研究機構)とともに行った。またILAS-IIサイエンスチームメンバーから助言を頂いた。

流跡線計算には、国立極地研究所粒跡線モデルを用いた<sup>[7]</sup>。

## 参考文献

- 1 H. Nakajima, et al., "Characteristics and performance of the Improved Limb Atmospheric Spectrometer-II (ILAS-II) on board the ADEOS-II satellite", *J. Geophys. Res.*, 111, D11S01, doi:10.1029/2005JD006334, 2006.
- 2 Y. Murayama, H. Mori, M. Ishii, M. Kubota, S. Oyama, M. Yamamoto, K. Seki, K. Mizutani, S. Ochiai, T. Kikuchi, K. Nozaki, K. Igarashi, H. Masuko, T. Itabe, R. W. Smith, M. Conde, B. J. Watkins, R. L. Collins, H. S. Stenbaek-Nielsen, W. R. Simpson, V. Bedford, J. Harrison, F. Williams, and S. Akasofu, "CRL Alaska Project-International Collaborations for observing Arctic atmosphere environment in Alaska-J", *Comm. Res. Lab.*, 49 (2), 143-152, 2002.
- 3 M. Yamamori, A. Kagawa, Y. Kasai, K. Mizutani, Y. Murayama, T. Sugita, H. Irie, and H. Nakajima, "Validation of ILAS-II version 1.4 O<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, and temperature data through comparison with ozonesonde, ground-based FTS, and lidar measurements in Alaska", *J. Geophys. Res.*, 111, D11S08, doi:10.1029/2005JD006438, 2006.
- 4 K. Shibata, M. Deushi, T. Sekiyama, and K. Orito, "Development of a MRI chemical transport model for the study of stratospheric chemistry", *Pap. Meteorol. Geophys.*, 55, 75-119, 2005.
- 5 K. Miyazaki, T. Iwasaki, K. Shibata, M. Deushi and T. T. Sekiyama, "The Impact of Changing Meteorological Variables to Be Assimilated into GCM on Ozone Simulation with MRI CTM", *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 909-918, 2005.
- 6 R. T. Sutton, H. Maclean, R. Swinbank, A. O'Neill, F. W. Taylor, "High-resolution stratospheric tracer fields estimated from satellite observations using Lagrangian trajectory calculations", *J. Atmos. Sci.*, 51, 2995-3005, 1994.
- 7 Y. Tomikawa, and K. Sato, "Design of the NIPR trajectory model", *Polar Meteorology and Glaciology*, 19, 120-137, 2005.



山森美穂

都留文科大学助教 博士（理学）大気科学



村山泰啓

総合企画部企画戦略室プランニングマネージャー（前電磁波計測研究センター環境情報センシング・ネットワークグループ研究マネージャー）博士（工学）大気リモートセンシング、中層大気力学

柴崎和夫

國學院大學教授 理学博士  
大気化学



村田 功

東北大學大学院環境科学研究科准教授  
博士（理学）  
大気化学

香川晶子

富士通エフ・アイ・ピー株式会社環境システム部課員 博士（理学）  
大気科学



笠井康子

電磁波計測研究センター環境情報センシング・ネットワークグループ主任研究员  
博士（理学）  
大気分光リモートセンシング



宮崎和幸

独立行政法人海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター  
博士（理学）  
大気科学

成層圏・対流圏観測実証…大気観測から社会の安全へのアプローチ／  
アラスカにおけるオゾンゾンデキャンペーン観測及び観測結果の3次元化学輸送モデルデータとの比較