

複数波長帯マルチスペクトル同時解析による対流圏オゾン 高度分布の導出

誌名	日本リモートセンシング学会誌 = Journal of the Remote Sensing Society of Japan
ISSN	02897911
著者名	佐藤,知紘 是津,耕司 笠井,康子
発行元	日本リモートセンシング学会
巻/号	37巻4号
巻号補足	
掲載ページ	p. 341-350
発行年月	2017年9月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



複数波長帯マルチスペクトル同時解析による 対流圏オゾン高度分布の導出

佐藤知紘^{*1}・是津耕司^{*1}・笠井康子^{*1,2,3}

Satellite-based Remote Sensing of Tropospheric Ozone Profile
Using Multi-spectral Synergetic Retrieval Algorithm

Tomohiro SATO^{*1}, Koji ZETTSU^{*1} and Yasuko KASAI^{*1,2,3}

Abstract

Ozone in the lowermost troposphere is one of the most significant air pollutants and the amount has been increasing over the past few decades in the northern hemisphere. Ozone in the Earth's atmosphere has been measured in several wavelength regions including the ultra-violet (UV), visible (VIS), thermal infrared (TIR) and microwave (MW) regions. The tropospheric ozone estimate was improved by combining radiances measured in several wavelength regions or measured with several geometries. This paper reviews estimates of the tropospheric ozone profile using a combination technique involving several space-based measurements. The combination technique was applied to estimate the tropospheric ozone column for the first time in the late 1980s. The stratospheric ozone column derived from the SAGE-I limb measurement was subtracted from the total ozone column derived from the TOMS nadir measurement. The tropospheric ozone residual method was also applied to TOMS and SBUV, TOMS and UARS/MLS, and Aura/OMI and Aura/MLS measurements. Feasibility studies to estimate the tropospheric ozone profile using the UV, VIS, and TIR wavelength regions were performed based on the maximum a posteriori retrieval method in recent decades. The combination of UV and TIR nadir measurements showed the highest sensitivity to the lowermost tropospheric ozone. This combination was applied to the satellite measurements of Aura/OMI and Aura/TES, and of MetOp/GOME-2 and MetOp/IASI. In the case of GOME-2 and IASI measurements, the degree of freedom for signal (DFS) value in the lowermost troposphere was increased approximately 40% by combining the two measurements. We also report a feasibility study of estimating the tropospheric ozone by combining the MW limb and TIR nadir measurements assuming Aura/MLS and Aura/TES. The DFS value of the lowermost tropospheric ozone increased approximately 6% as a result of adding the MW measurement to the TIR measurement, although the MW measurement alone has no sensitivity in the lowermost troposphere.

Keywords : Remote sensing, Ozone, Synergetic retrieval, Lowermost troposphere, Air pollution

1. はじめに

大気汚染暴露による呼吸器や循環器系疾患などの健康被害が深刻であり、世界保健機関 (WHO) によると、2012 年における大気汚染による全世界の死者数は約 370 万人と報告され、大気汚染は人類の 8 大死因の一つであると指摘された¹⁾。大気汚染問題といえば、古くはロサンゼルスやメキシコシティなどの都市の局所的な問題であったが、現在では大陸を超えて大気汚染物質が輸送される越境汚染²⁾

がより深刻な問題となり、地球規模での対策が必要である。

代表的な大気汚染物質として、オキシダント (Ox) や窒素酸化物 (NOx)、浮遊粒子状物質 (SPM) が挙げられる。わが国では、環境省などが中心となって大気汚染物質の常時監視が実施されている。図 1 に示すのは、国立環境研究所「環境数値データベース」月間値・年間値データファイル³⁾ の値を用いて計算された福岡県内における Ox, NOx, SPM の年度ごとの平均値の推移である。NOx や SPM の観測値は、2000 年度以降明らかな減少傾向を示している一方で、Ox だけは増加している。この傾向は福岡県だけでな

(2017. 2. 14 受付, 2017. 7. 18 改訂受理)

^{*1} 情報通信研究機構

〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

^{*2} 東京工業大学

〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259

^{*3} 筑波大学

〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

^{*1} National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo, 184-8795, Japan

^{*2} Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho, Midori, Yokohama, Kanagawa, 226-8503, Japan

^{*3} University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8577, Japan

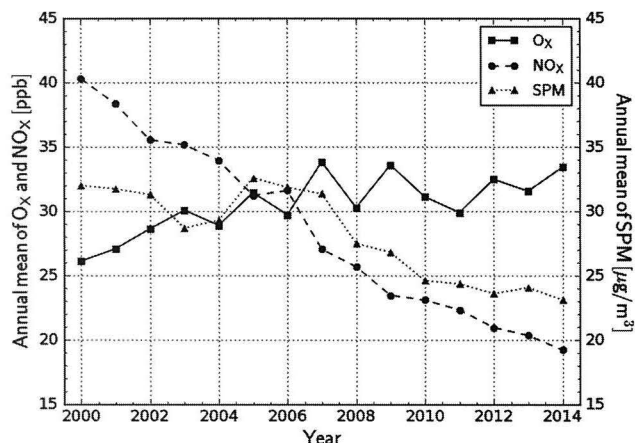


Fig 1 Long-term trend of O₃, NO_x and SPM in Fukuoka from 2000 to 2014. Annual mean data acquired in all observation sites in Fukuoka were averaged. Data used in this figure are available at <http://www.nies.go.jp/igreen/index.html> [Last access on February, 8 2017].

く日本全国で観測されており、今後も O₃ 等の大気汚染物質の長期的な観測が求められる。

O₃ の主成分のオゾン (O₃) は、地球大気の高層においてそれぞれ異なる重要な役割を果たしている。成層圏のオゾンは、太陽紫外線の内、320 nm よりも短波長の紫外線を吸収する。この波長域の紫外線は生物の DNA を損傷させるため、成層圏のオゾンは地球上の生物が生命活動を維持する上で極めて重要である。さらに、オゾンの紫外線吸収による大気の加熱は、高度が上がるほど温度が高くなるという成層圏の温度構造を形成する主原因である。また、上部対流圏のオゾンは、二酸化炭素やメタンに次ぐ温室効果ガスの一つである。そして、地表面付近では O₃ の主成分として我々の健康や農作物に直接被害を及ぼす⁴⁾。

このように、オゾンは存在する高度領域によって異なる重要な役割を持っているため、高度領域ごとに分離されたオゾン量の観測が求められる。地表面に存在するオゾンの観測は地上からの観測が主流だが、それでは観測範囲が観測器の設置場所に制限され、地形（海上など）や治安上の理由で測定器を設置することが困難な地域の観測ができない。地球規模で密な観測を行う方法として衛星リモートセンシングは有用であるが、単一の測器による観測では地表面、中部、上部のように対流圏を高度方向に分解した観測は困難である。そこで衛星リモートセンシングの発展的手法として、複数の波長帯のオゾンの観測スペクトルを組み合わせた解析による対流圏最下部に存在するオゾン量を導出する試みが行われている。本稿では、複数の衛星リモートセンシングによる対流圏オゾン観測について解説し、まだ実施されていないテラヘルツ波観測を取り入れた複数波長帯マルチスペクトルの同時解析によるオゾン観測のフィジビリティ検討について報告する。

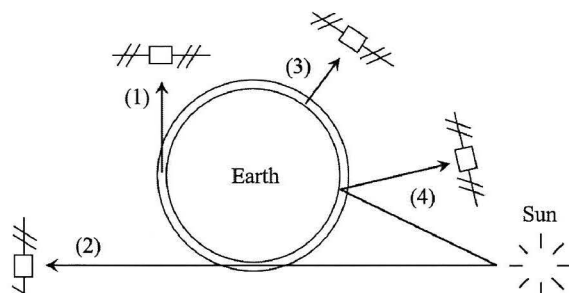


Fig 2 Geometries of satellite remote sensing. (1) Limb observation, (2) Solar occultation, (3) Nadir viewing, emission observation, (4) Nadir viewing, solar backscatter observation

2. 衛星リモートセンシングによる地球大気オゾン観測

衛星リモートセンシングによる地球大気中のオゾン存在量の導出では、太陽光を光源としたオゾンの吸収スペクトルや、オゾンそのものからの放射スペクトルを取得し、その取得されたスペクトルからオゾンの存在量を推定（リトリバル）する手法が用いられる⁵⁾。一般にリトリバルでは、観測スペクトルベクトル y_{obs} と、放射伝達理論に基づくフォワードモデル F によってシミュレーションされるスペクトル y_{sim} を比較し、その差が小さくなるオゾン存在量高度分布等の大気物理量ベクトル x を求める。シミュレーションスペクトル y_{sim} は一般に式 (1) で表される。

$$y_{sim} = F(x, b) + \epsilon \quad (1)$$

ここで、 b はフォワードモデルで必要となるモデルパラメータベクトル、 ϵ はスペクトルノイズベクトルである。リトリバルの手法は様々だが、一般にリトリバルモデルを R とすると、リトリバルによって算出される推定量ベクトル x_{ret} は式 (2) で表現される。

$$x_{ret} = R(y_{obs}, b, c) \quad (2)$$

ここで、 c はリトリバル解析で使用されるパラメータベクトルである。

オゾンは紫外領域から可視、赤外、マイクロ波まで、幅広い波長帯に遷移を持ち、これまで様々なジオメトリによる観測が行われてきた。図 2 の (1) に示すリム (Limb) 放射観測では、地球の周縁に沿って大気からの放射スペクトルを測定する。主にマイクロ波や赤外線の放射が測定され、高い鉛直分解能でオゾンの高度分布を導出できることが特徴である。代表的な測器としては、Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) や Aura 衛星に搭載された Microwave Limb Sounder (MLS)⁶⁾⁷⁾、国際宇宙ステーション搭載超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES)⁸⁾ がある。(2) の太陽掩蔽観測 (solar occultation) では、大気層を横切って減衰しながら透過する太陽光を測定する。この太陽

掩蔽観測では、太陽光を直接測定した参照スペクトルと、地球大気を透過して測定したスペクトルとの差分からオゾンの存在量を求める。参照スペクトルを観測の度に測定することで、スペクトル強度の絶対値の補正が測定毎に可能となり、一般に衛星リモートセンシングの短所とされる推定結果の絶対値の信頼性が高いことが特徴である。代表例としては、Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE) シリーズ^{9)~11)} やカナダの SCISAT 衛星搭載の Atmospheric Chemistry Experiment - Fourier Transform Spectrometer (ACE-FTS)¹²⁾、太陽光ではなく星の光を光源とした ENVISAT 衛星搭載 Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars (GOMOS)¹³⁾ が挙げられる。(3) (4) の天底 (Nadir) 観測では、測器が大気を見下ろす形で赤外および可視・紫外領域のスペクトルを取得する。このため、高い水平分解能が得られることが長所になる。(3) では、地表面および地球大気からの赤外放射光とオゾンとの相互作用 (オゾンによる吸収) による赤外スペクトルを測定する。代表的な測器には Aura 衛星搭載 Tropospheric Emission Spectrometer (TES)¹⁴⁾ や MetOp 衛星搭載 Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI)¹⁵⁾ が挙げられる。Aura/TES については、打ち上げ当初の予定では Limb 観測と Nadir 観測を両方行う予定だったが、2005 年 5 月に装置の寿命を優先して Nadir 観測のみ行うようにプランが変更された。(4) では、地球大気中に存在する分子により後方散乱された太陽紫外線強度をいくつかの波長で測定し、波長により大気層への紫外線の侵入高度が異なることを利用して、オゾン存在量の高度分布や全量を求める。この後方散乱法は、衛星リモートセンシングの中で最も長い歴史があり、Nimbus7 衛星搭載 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) や Solar Backscatter Ultraviolet (SBUV) は、オゾンホール発見の時期に大きな役割を果たした¹⁶⁾。TOMS や SBUV によって 1970 年代後半から行われてきた全球オゾン全量の長期観測は、近年では Aura 衛星搭載 Ozone Monitoring Instrument (OMI)¹⁷⁾ や MetOp 衛星搭載 Global Ozone Monitoring Experiment 2 (GOME-2)¹⁸⁾ によって受け継がれている。

3. 複数衛星観測による対流圏オゾンカラム量導出

複数の異なる波長帯やジオメトリによる観測結果を組み合わせることで、各々の観測からだけでは得られない情報 (高分解能、高精度等) を得ることが可能になる。このアプローチが初めて行われたのは 1980 年代後半で、複数の観測データを同時に使用した対流圏オゾン存在量の導出が試みられた。南極上空のオゾンホールとフロンガスとの関係性が初めて Farman 等によって発表されたのが 1985 年であり¹⁹⁾、世界的に成層圏オゾンが注目されていた時期である。地球大気中に存在するオゾンの 90% 以上は成層圏に分布することから、当時は観測されたカラム全量を成層圏のオゾン量とみなしていた。Fishman と Larsen は TOMS によるオゾンカラム全量の赤道域 (南緯 15 度~北緯 15 度)

の値が経度によって違いがある (アフリカや南アメリカ、大西洋上空のオゾン全量の値は相対的に大きい) ことに注目し、1979 年 10 月から 1980 年 9 月の期間に TOMS によって観測されたオゾンカラム全量と、SAGE-I によって観測された成層圏のオゾン高度分布から計算した成層圏オゾンカラム量を比較した²⁰⁾。SAGE-I 観測から導出された赤道域の成層圏オゾンカラム量には経度による変動は確認できなかったため、TOMS によって観測された経度分布は対流圏オゾン量に起因することが示唆された。

この対流圏オゾンカラム量をカラム全量から成層圏カラム量を引くことで導出する方式 (Tropospheric ozone residual method, TOR 法) は、その後 TOMS と SBUV²¹⁾、TOMS と UARS/MLS²²⁾ の観測データに適用された。これらを用いる測器の衛星プラットフォームが異なることによる観測時間・地点の不一致や測器間のバイアスが問題視されていた。Ziemke 等はその弱点を埋めるため、同一の衛星に搭載されている測器 (Aura 衛星搭載 OMI と MLS) の観測データを用いた対流圏オゾンカラム量の導出を行った²³⁾。Aura/MLS の Limb 観測と OMI の Nadir 観測のある地点の観測時間のタイムラグは、南から北へ周回する場合 (ascending) は 7 分間 (MLS の方が OMI よりも早い)、北から南へ周回する場合 (descending) は 12 時間であり、解析には ascending のデータのみが使用された。この Aura/MLS と OMI を用いた TOR 法により、雲の存在による OMI 観測の不足等の制約はあるものの、衛星リモートセンシングによる対流圏オゾンによる大気汚染の日単位の追跡監視の可能性が示された。

4. 複数波長帯マルチスペクトルによる対流圏オゾンの導出

4.1 最大事後確率推定法

3 章では、複数の衛星観測によってそれぞれリトリバルされた結果を組み合わせることで対流圏オゾン量を導出した事例を紹介したが、近年では、複数の測器で観測されたスペクトルを同時に用いたりリトリバルによる対流圏オゾンの導出が行われている。この方式を用いることで、対流圏をいくつかの層に分けた対流圏オゾンの存在量高度分布や、温度や雲などの観測条件が整えば対流圏最下部のオゾン存在量の導出も可能となる。このリトリバル手法は、複数の観測スペクトルを同時に用いることから、synergetic retrieval や joint retrieval と呼ばれる。そのリトリバル原理は、最大事後確率推定法 (Maximum a posteriori, MAP 法)⁵⁾ に基づいており、ここではまず MAP 法の原理について述べる。

MAP 法では、フォワードモデル F を用いて式 (1) により計算されるシミュレーションスペクトルベクトル y_{sim} と実際に観測されたスペクトルベクトル y_{obs} を比較するだけでなく、そこに先験値ベクトル x_a を事前確率として導入する。具体的には、オゾン存在量等の大気物理量ベクトル

x が先験値ベクトル x_a となる確率 (すなわち事前確率) が、ある分散・共分散行列 S_a の正規分布で与えられた場合に、ある分散・共分散行列 S_e の正規分布で誤差が与えられる y_{obs} から、事後確率が最大となる解を求める。 S_a 、 S_e の各値は、リトリバー対象となる物理量の気中の変動や、観測スペクトルに生じるノイズからそれぞれ計算される。ここで χ^2 を式 (3) と定義すると、事後確率は $\exp(-\chi^2)$ に比例するので、実際には χ^2 の値を最小にする解を推定することになる。

$$\chi^2 = (y_{\text{obs}} - y_{\text{sim}})^T S_e^{-1} (y_{\text{obs}} - y_{\text{sim}}) + (x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a) \quad (3)$$

推定値 x_{ret} は、 x_{true} を真値としてリトリバーを線形モデルとみなした場合、式 (4) で与えられる。

$$x_{\text{ret}} = x_a + A(x_{\text{true}} - x_a) + G\epsilon \quad (4)$$

ここで、 A はアベレージング・カーネル行列 (averaging kernel matrix)、 G は利得行列 (gain matrix) で、どちらもヤコビアン行列 $K \left(= \frac{\partial y}{\partial x} \right)$ を用いて次のように計算される。

$$A = \frac{\partial \hat{x}}{\partial x} = GK \quad (5)$$

$$G = \frac{\partial \hat{x}}{\partial y} = (K^T S_e^{-1} K + S_a^{-1})^{-1} K^T S_e^{-1} \quad (6)$$

アベレージング・カーネル行列 A は、リトリバー結果の x_{ret} を評価する上で極めて重要な行列である。 x_{ret} の要素数 (つまりはリトリバー高度グリッド数) を n とすると、 A は $n \times n$ の行列になる。 A の行は、各高度グリッドのリトリバー結果がどの高度領域の情報から得られたものかを示しており、ピークが鋭いほど高度分解能が高い。また、 A の行の要素の合計値は measurement response (m) と呼ばれ、リトリバー結果が主に観測スペクトル (式 (3) の第 1 項) に由来しているのか、先験値 (式 (3) の第 2 項) に由来しているのかを定量化する指標である。 i 番目の高度における m の値は式 (7) で計算される。

$$m[i] = \sum_j A[i, j] \quad (7)$$

m の値が 1 に近いほどリトリバー結果が観測スペクトルの情報から導出されており、0 に近いほど先験値に由来していることを示している。 m はマイクロ波を用いた Limb 観測で広く用いられており、一般的には 0.8 を閾値としてデータを選別することが多い。また、 A のトレースは degree of freedom for signal (DFS) と呼ばれ、リトリバー結果に独立した高度情報が何層含まれるかを示す。DFS は、主に赤外や可視・紫外領域の Nadir 観測のリトリバー結果の高度分解能の評価に用いられる。

リトリバーに生じる誤差は、スペクトルノイズ誤差、スムージング誤差、フォワード計算に由来する誤差の 3 つに大きく分けられる。特にスペクトルノイズ誤差 Δx_m とスムージング誤差 Δx_n は、このリトリバー手法を用いた

場合に必ず生じる誤差であり、合わせてリトリバー誤差と呼ばれることもある。スペクトルノイズ誤差 Δx_m は、スペクトルを観測する際に生じるノイズがリトリバー結果に及ぼす誤差である。スムージング誤差 Δx_n は、連続的に分布している実際の気中をコンピュータの計算上離散的なグリッドに変換して処理することによって生じる誤差である。 Δx_m 、 Δx_n の共分散行列 S_m 、 S_n は、それぞれ次のように与えられる。

$$S_m = G S_e G^T \quad (8)$$

$$S_n = (U - A) S_a (U - A)^T \quad (9)$$

ここで、式 (9) の U は単位行列である。 Δx_m 、 Δx_n の値は、それぞれの共分散行列の対角要素の平方根で次のように与えられる。

$$\Delta x_m[i] = \sqrt{S_m[i, i]} \quad (10)$$

$$\Delta x_n[i] = \sqrt{S_n[i, i]} \quad (11)$$

リトリバー解析に複数の観測スペクトルを同時に用いる場合は、シミュレーションスペクトルベクトルをスペクトルノイズによって規格化した上で連結させることが多い。この規格化には、i) 放射輝度や反射率等の単位の異なるスペクトルを同時に扱うことができる、ii) スペクトル強度の絶対値の桁の違いにより発生する数学的な問題を軽減することができる、という利点がある。例として 2 つの観測スペクトルをリトリバーする場合は、式 (12) (13) のようになる。

$$y_{\text{sim}}^{(k)} \rightarrow v_{\text{sim}}^{(k)} = D(1/\epsilon^{(k)}) [y_{\text{sim}}^{(k)} - y_{\text{obs}}^{(k)}], \quad (k=1, 2) \quad (12)$$

$$v_{\text{sim}} = \begin{bmatrix} v_{\text{sim}}^{(1)} \\ v_{\text{sim}}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

ただし、 $D(a)$ は、対角要素がベクトル a の各要素、非対角項が全て 0 の行列である。このとき、スペクトルノイズ共分散行列は次のように拡張される。

$$S_e = \begin{bmatrix} S_e^{(1)} & 0 \\ 0 & S_e^{(2)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

スペクトルベクトルと同様に、 x も先験値 x_a のばらつき σ_a を用いて式 (15) のように規格化されることが多い。この規格化は、 x に与えられる物理量が複数の種類にまたがり、その絶対値のオーダーが異なる場合 (例えば体積混合比と温度を同時にリトリバーする場合など) に有効である。

$$x \rightarrow u = D(1/\sigma_a) [x - x_a] \quad (15)$$

式 (15) の他にも、対数を取って絶対値のオーダーの差を小さくする場合もある。共分散行列 S_e と S_a も同様に規格化すると次のようになる。

$$S_e \rightarrow S_v = D(e) S_e D(e)^T \quad (16)$$

$$S_a \rightarrow S_u = D(\sigma_a) S_a D(\sigma_a)^T \quad (17)$$

S_e と S_a の対角要素は、それぞれ ε と σ_a の各要素の 2 乗で与えられることが多く、 S_v と S_u の対角要素は 1 になる。規格化された各行列、ベクトルを用いると、式 (3) の χ^2 の計算式は次のようになる。

$$\chi^2 = v_{\text{sim}}^T S_v^{-1} v_{\text{sim}} + u^T S_u^{-1} u \quad (18)$$

4.2 複数波長帯マルチスペクトルによる地表面オゾン量導出

複数波長帯マルチスペクトルの同時リトリバルによる対流圏オゾン高度分布の初めての導出は、Aura/OMI¹²⁾ と TES⁹⁾ を用いて行われた²⁴⁾。OMI は、Nadir 観測によって紫外 (UV) と可視 (VIS) 領域の太陽光の後方散乱光を、UV-1 チャンネル (270~310 nm)、UV-2 チャンネル (310~365 nm)、可視チャンネル (365~500 nm) の 3 チャンネルで観測する (観測分解能: 0.42~0.63 nm)。オゾンのリトリバルには、UV-1 と UV-2 の 2 つの UV チャンネルが用いられ、それぞれオゾンのハートレー吸収帯 (Hartley band) とハギンズ吸収帯 (Huggins band) に対応している。TES は地球からの 650~3050 cm^{-1} の赤外線放射をフーリエ変換赤外分光によって観測する (観測分解能: 0.1 cm^{-1})。オゾンのリトリバルには 985~1075 cm^{-1} (9.6 μm) の熱赤外 (TIR) 領域が用いられる。北緯 30.5 度の観測における地表面から 825 hPa までの領域の DFS を計算すると、TES のみの観測では 0.11、OMI のみの観測では 0.12、同時解析では 0.33 となり、DFS の値が約 3 倍に増加している。このように、UV と TIR 領域の観測を組み合わせることで対流圏最下部のオゾン導出感度が上昇することは、Landgraf と Hasekamp によるシミュレーションによっても示されている²⁵⁾。

Natraj 等は、UV と TIR だけでなく VIS や中赤外光 (MIR) による観測も加えた対流圏最下部のオゾン導出のフィジビリティ検討を実施した²⁶⁾。この研究は、NASA が中心となって進めている Geostationary Coastal and Air Pollution Events (GEO-CAPE) ミッション²⁷⁾ の装置設計のために行われた。雲、エアロゾルのない 16 の大気プロファイルに対してリトリバルをシミュレーションし、各波長帯を用いた場合の対流圏最下部における DFS の値を比較した。最も DFS が高く計算されたプロファイルにおいて、各波長帯の地表面から 900 hPa の領域の DFS の値は、UV のみは 0.34、VIS のみは 0.44、TIR のみは 0.21、UV と VIS を組み合わせた場合 (UV+VIS、以下、同様に表記する。) は 0.58、UV+TIR は 0.63、UV+TIR+VIS は 0.69 となった。MIR 領域の観測は、どの波長帯と組み合わせても DFS の値が上昇することはなかった。単一の観測の中では VIS による DFS の値が最も高かったが、リトリバルされたオゾン存在量高度分布とシミュレーションで真値と仮定し

た高度分布の絶対値を比較すると、VIS は過大評価し、UV が最も両者の差が小さかった。TIR は、対流圏最下部における導出感度は UV や VIS よりも小さいが、対流圏の上部や中部の領域では最も DFS の値が大きかった。UV と VIS のみの観測では昼間の観測に限定されてしまうことから、TIR 観測を組み合わせることは重要であり、2 種類を組み合わせる場合では UV+TIR の組み合わせが最も対流圏最下部のオゾン存在量の導出に適していると結論付けた。

この UV+TIR という組み合わせは、現在も運用・観測が続いている 2 つの衛星で実現可能である。一つは、Aura 衛星に搭載されている OMI¹²⁾ と TES⁹⁾、もう一つは MetOp 衛星に搭載されている GOME-2¹³⁾ と IASI¹⁰⁾ である。Fu 等は OMI と TES の観測データを使って対流圏オゾン高度分布を導出し、観測確度に信頼性が高いオゾンゾンデの観測結果と比較した²⁸⁾。地表面から 700 hPa におけるオゾンの平均存在量の両者の差分は、OMI のみは 97.94%、TES のみは 73.61%、OMI+TES は 48.10% となり、UV と TIR を組み合わせることで、DFS だけでなくリトリバルされたオゾン存在量の確度も上がることを示した。Cuesta 等は、GOME-2 と IASI の観測を組み合わせ対流圏最下部のオゾン存在量を導出した²⁹⁾。2009 年夏にヨーロッパで行われた 105 のオゾンゾンデ観測と、それぞれに対して距離 110 km 以内、時間 7 時間以内の GOME-2+IASI 観測から導出された地表面から海拔 3 km における高度領域のオゾン量を比較したところ、両者は平均 1% 以内で一致した。さらに、GOME-2 と IASI 観測を組み合わせ解析を行うことで、局所的化学輸送モデル CHIMERE によってシミュレーションされた陸上および海上の地表面から海拔 3 km の高度領域で増大したオゾンの導出に成功した。この増大は、それぞれ単体の観測の解析結果では再現できなかった描像であり、複数の波長帯の観測スペクトルを組み合わせ解析による対流圏オゾン分布の検出精度向上を実観測で示した一例と言える。

5. マイクロ波導入による対流圏オゾン高度分布導出のフィジビリティ検討

4 章では、主に紫外や可視、赤外の波長領域の観測スペクトルを同時に用いた MAP 法による対流圏オゾン存在量の導出について、事例と共に紹介した。本章では、この複数波長帯マルチスペクトル同時解析に、テラヘルツ波による観測スペクトルを導入した場合の対流圏オゾン高度分布導出のフィジビリティ検討を報告する。テラヘルツ波の波長領域の定義は明確には定まっておらず、本稿では周波数が 0.1~10 THz の電磁波を指すこととする。実観測スペクトルへの応用を考慮し、本フィジビリティ検討では Aura 衛星搭載の MLS によるマイクロ波 (MW, テラヘルツ波の中では最も低い周波数領域に属する) Limb 観測と、同衛星搭載 TES の TIR 領域の Nadir 観測の同時解析を想定した。ここでは MW 観測導入による対流圏オゾン導出感度への影響を純粋に評価するために、アンテナパターン

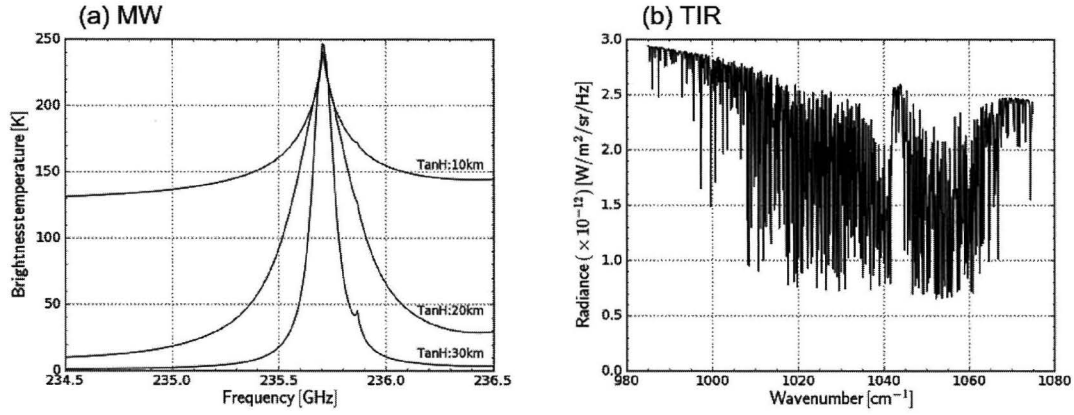


Fig. 3 (a) Simulated limb emission spectra in the MW region. Spectra at 10, 20 and 30 km of tangent height are displayed. (b) Simulated nadir emission spectrum in the TIR region.

Table 1 Specification of radiative transfer calculation for the MW Limb observation and TIR nadir observation.

	MW limb	TIR nadir
Spectral range	234.5~236.5 GHz	985~1075 cm ⁻¹
Spectral resolution	6 MHz	0.1 cm ⁻¹
Molecules	H ₂ O, O ₃ , N ₂ O, CO, NO, SO ₂ , NO ₂ , HNO ₃ , ClO, OCS, H ₂ CO, HOCl, CH ₃ Cl, H ₂ O ₂ , HO ₂	H ₂ O, CO ₂ , O ₃ , N ₂ O, CH ₄ , SO ₂ , NO ₂ , NH ₃ , OCS, CH ₃ Cl, H ₂ O ₂ , HCOOH, HO ₂
Sensor height	705 km	
Scan direction	Tangent height: 0~80 km (0.5 km step)	Solar zenith angle: 0 degree
Surface albedo	0.05	
Thermal contrast	0 K (Surface temperature: 294.2 K)	

や分光計のチャンネル応答関数といった装置関数は考慮しないこととした。

本解析では、各分子の存在量および気温、圧力の真値 x_{true} および先験値 x_a には、UARS/MLS の観測データ⁶⁾ から求められた中緯度帯夏の気候値データを使用した。リトリバル推定量ベクトル x_{ret} にはオゾンの存在量高度分布のみを入れ、オゾンだけは気候値データの 0.8 倍の値を真値として、真値と先験値に差をつけた。この真値を用いて放射伝達モデル F によってスペクトル y_{true} を計算し、

$$y_{\text{true}} = F(x_{\text{true}}, b) \quad (19)$$

この y_{true} から、4.1 章で示した MAP 法に基づいた手法によってオゾン存在量高度分布をリトリバルした。

$$x_{\text{ret}} = R(y_{\text{true}}, x_a, b) \quad (20)$$

放射伝達モデル F には、MW, TIR のどちらの領域も計算可能な the Advanced Model for Atmospheric Terahertz Radiation Analysis and SimUlation (AMATERASU)³⁰⁾ を使用した。図 3

に各波長領域の AMATERASU を用いて計算されたスペクトルを、表 1 に各波長領域の放射伝達計算の詳細を示す。計算で考慮した各分子の分光パラメータは HITRAN 2012³¹⁾ の分光カタログの値を用いた。リトリバルで用いた各波長帯のスペクトルノイズは、Aura/MLS, TES の観測器のスペクトルノイズを基に、MW は 1.4 K⁷⁾, TIR は 4.4×10^{-15} W/m²/sr/Hz³²⁾ とした。スペクトルノイズ共分散行列 S_e は、対角項に各ノイズの 2 乗値を持ち、非対角項は全て 0 の正方行列とした。オゾン量の変動幅が成層圏では約 10%³³⁾, 対流圏では約 20% (約 10 ppb)²³⁾ であることを考慮し、オゾンの先験値に与える分散 ϵ_a は、

$$\epsilon_a = 0.1 x_a + 1 \times 10^{-8} \quad (21)$$

与え、その共分散行列 S_a の各成分は、高度毎の相関を考慮して式 (22) のように与えた。

$$S_a[i, j] = \epsilon_a[i] \epsilon_a[j] \exp \left[-\frac{|z[i] - z[j]|}{z_c} \right] \quad (22)$$

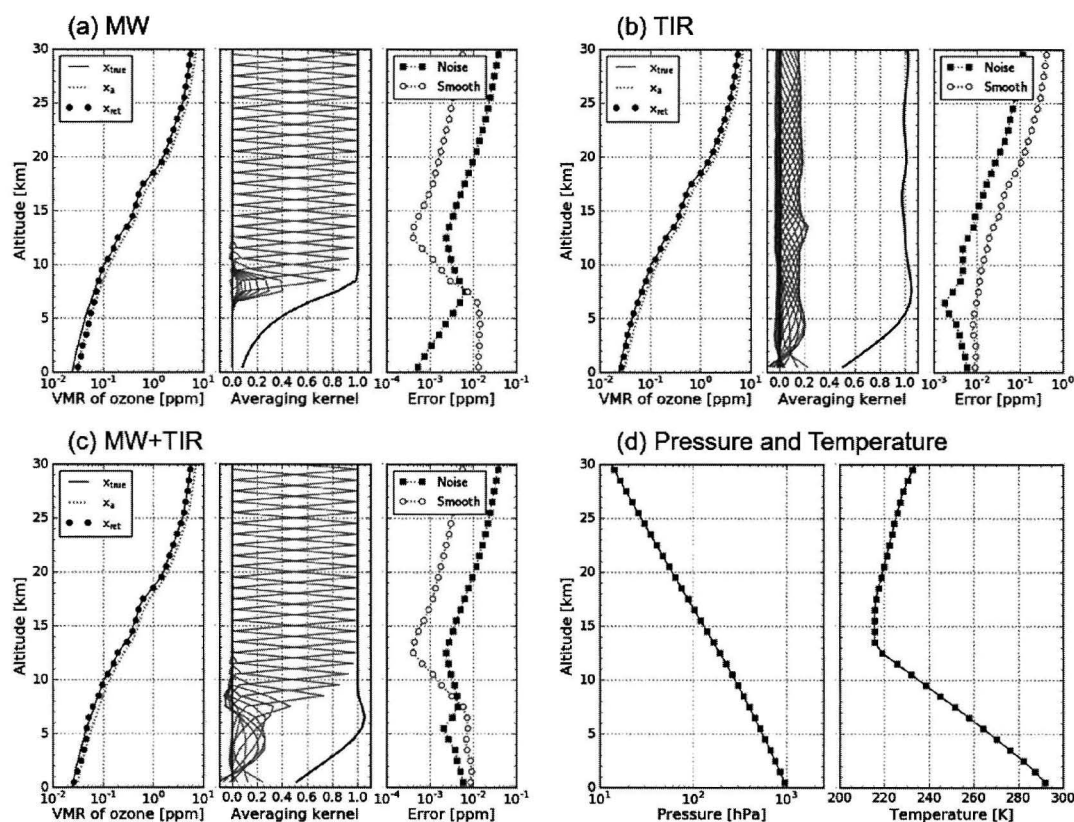


Fig. 4 Retrieval simulation results of tropospheric ozone profile using the MW Limb observation (a), the TIR nadir observation (b), and both MW and TIR observations (c). The left panel shows ozone volume mixing ratios (VMRs) of true (x_{true}), a priori (x_a) and retrieved (x_{ret}) profiles. The middle panel shows averaging kernel matrix and measurement response by gray and black solid line, respectively. The right panel shows errors from spectrum noise (Δx_m) and smoothing error (Δx_n). The pressure and temperature profiles used in this simulation is shown in (d).

z は高度グリッドベクトルであり、地表面から 1 km 毎に区切った高度グリッドを用いた。 z_c は高度毎の相関を示す距離で、ここでは 3 km とした。

図 4 に、MW による Limb 観測 (a)、TIR による Nadir 観測 (b)、MW+TIR 観測 (c) それぞれの場合のオゾンのリトリバルシミュレーション結果を示す。ここでは、左のパネルに x_{true} 、 x_a 、 x_{ret} の高度分布を、中央のパネルにアベレーシング・カーネルおよび measurement response を、右のパネルに Δx_m 、 Δx_n を示している。また (d) には、このシミュレーションで用いた圧力と温度の高度分布を示す。(a) の MW 観測の結果を見ると、高度 7 km より高い領域では、アベレーシング・カーネルのピーク値が 1 を示す理想的な観測が可能であることを示している。それよりも低い高度では measurement response の値が減少していき、観測感度が小さくなっていく。この結果はリトリバルされたオゾン存在量プロファイル x_{ret} でも確認でき、高度 7 km より高い領域での x_{ret} は真値 x_{true} とほぼ一致しているが、それよりも低い高度では先験値 x_a に近くなり、それに伴ってスムージング誤差 Δx_n が大きくなっている。(b) では Nadir 観測を想定しているため、(a) の Limb 観測のような高い高度分解能は得られていないが、高度 3 km 以上の領

域の感度はほぼ一様で、アベレーシング・カーネルのピーク値は 0.15~0.2、半値全幅は約 4 km である。MW と TIR による観測を同時に用いた (c) のアベレーシング・カーネルを見ると、それぞれの特徴が足し合わされた形をしている。つまり、高度 7 km よりも高い領域では、MW による Limb 観測の高い高度分解能が維持され、それよりも低い高度領域では TIR による Nadir 観測の感度が維持されている。表 2 に、各観測波長帯の 7~13 km (上部対流圏)、2~7 km (中部対流圏)、0~2 km (対流圏最下部) における DFS の値を示す。上部対流圏での DFS の値は、MW+TIR 観測では 4.92、MW 観測では 4.88 であり、この高度領域では MW 観測が支配的であることが分かる。中部対流圏では、MW 観測、TIR 観測、MW+TIR 観測の DFS の値はそれぞれ 0.04、0.89、1.22 であり、MW 観測を TIR 観測に加えることで、DFS の値が約 1.4 倍 ($\sim 1.22/0.89$) に上昇した。対流圏最下部では、MW 観測の DFS の値は 0 であり、MW 観測単体では感度がない。TIR 観測と MW+TIR 観測の DFS の値はそれぞれ 0.32 と 0.34 であり、MW 観測を加えることで DFS の値が約 6% 上昇した。これは、MW の Limb 観測によって上部対流圏より高高度のオゾン存在量が正確に求められ、それが TIR の Nadir 観測からのオゾン量導出時

Table 2 Degree of freedom for signals in the upper, middle and lowermost troposphere for the MW+TIR, MW and TIR observations.

	MW+TIR	MW	TIR
Upper troposphere (7~13 km)	4.92	4.88	1.03
Middle troposphere (2~7 km)	1.22	0.04	0.89
Lowermost troposphere (0~2 km)	0.34	0	0.32

に束縛条件として作用し、その分最下部の感度が上昇したためと考えられる。これは、MAP法に基づいたリトリバルアルゴリズムの中に、3章で述べたTOR法の概念が組み込まれたことによって最下部のオゾン量導出感度が上昇したという見方もできる。

6. おわりに

本稿では、近年深刻化している大気汚染問題に関連して、代表的な大気汚染物質の一つであるオゾンに注目し、衛星リモートセンシングによる対流圏あるいは地表面に分布するオゾン観測について紹介した。複数の波長帯、複数の観測手法で得られたスペクトルを同時に用いた解析を行うことで、一つの観測器から得られるデータからだけでは導出が困難とされていた対流圏オゾンの高度分布や地表面オゾン存在量の導出の鉛直分解能や精度を向上させることが可能となる。

このような複数の異なる特徴を持つデータを統合的に組み合わせる新しい情報や価値を生み出すという考え方は、現在急速に普及しているビッグデータやAIを用いた研究やビジネス産業の根本にあるものである。衛星リモートセンシングがもたらす環境データの有用性も注目を集めており、例えば総務省が主催する「宇宙×ICTに関する懇談会」³⁴⁾では、衛星リモートセンシングデータを用いた新たなビジネスや産業への展開可能性について議論が始められている。また、情報通信研究機構においても、第4期中長期計画における実空間情報分析技術の研究開発の中で、衛星リモートセンシングデータとライダーやIoTセンサー等による地上観測データを大気化学輸送モデルに基づいて同化し、アジア圏から都市レベルまでマルチスケール・マルチモーダルな大気汚染予測を行う技術の研究開発を進めており、特に近年問題となっている越境汚染の被害対策支援に向けた応用を検討している³⁵⁾。衛星リモートセンシングがもたらす環境データを従来の既成概念に捕らわれずにいかに利用・活用していくか、また、そのためにはどのようなセンシングデータが必要になるか、この二つの概念を効率よく社会システムの中で回すサイクルの形成が、衛星リモートセンシングをますます発展させていくと考えられる。

謝辞：本稿で行ったシミュレーションでは、NICTの

Philippe Baron氏の助言を受けた。また、日頃の研究をサポートしてくれているNICTのビッグデータ利活用研究室メンバーに感謝の意を表する。

引用文献

- 1) WHO: Burden of disease from Ambient Air Pollution for 2012, Geneva: World Health Organization, 2014. (http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/AAP_BoD_results_March2014.pdf [Last access 2017. 07. 19])
- 2) M. E. Park, C. H. Song, R. S. Park, J. Lee, J. Kim, S. Lee, J. H. Woo, G. R. Carmichael, T. F. Eck, B. N. Holben, S. S. Lee and Y. D. Hong: New approach to monitor transboundary particulate pollution over Northeast Asia, *Atmos. Chem. Phys.*, 14 (2), pp. 659–674, 2014.
- 3) <http://www.nies.go.jp/igreen/index.html> [Last access 2017. 07. 19]
- 4) A. Gryparis, B. Forsberg, K. Katsouyanni, A. Analitis, G. Touloumi, J. Schwartz, E. Samoli, S. Medina, H. R. Anderson, E. M. Niciu, H. E. Wichmann, B. Kriz, M. Kosnik, J. Skorkovsky, J. M. Vonk and Z. Dortbudak: Acute effects of ozone on mortality from the “Air pollution and health: A European approach” project, *Am. J. Resp. Crit. Care*, 170, pp. 1080–1087, doi:10.1164/rccm.200403-333OC, 2004.
- 5) C. D. Rodgers (ed.): *Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice* (Vol. 2), World scientific, 2000.
- 6) J. W. Waters, W. G. Read, L. Froidevaux, R. F. Jarnot, R. E. Cofield, D. A. Flower, G. K. Lau, H. M. Pickett, M. L. Santee, D. L. Wu, M. A. Boyles, J. R. Burke, R. R. Lay, M. S. Loo, N. J. Livesey, T. A. Lungu, G. L. Manney, L. L. Nakamura, R. R. Perun, B. P. Ridenoure, Z. Shippony, P. H. Siegel, R. P. Thurstans, R. S. Harwood, H. C. Pumphrey and M. J. Filipiak: The UARS and EOS microwave limb sounder (MLS) experiments, *J. Atmos. Sci.*, 56 (2), pp. 194–218, 1999.
- 7) J. W. Waters, L. Froidevaux, R. S. Harwood, R. F. Jarnot, H. M. Pickett, W. G. Read, P. H. Siegel, R. E. Cofield, M. J. Filipiak, D. A. Flower, J. R. Holden, G. K. Lau, N. J. Livesey, G. L. Manney, H. C. Pumphrey, M. L. Santee, D. L. Wu, D. T. Cuddy, R. R. Lay, M. S. Loo, V. S. Perun, M. J. Schwartz, P. C. Stek, R. P. Thurstans, M. A. Boyles, K. M. Chandra, M. C. Chavez, G. S. Chen, B. V. Chudasama, R. Dodge, R. A. Fuller, M. A. Girard, J. H. Jiang, Y. Jiang, B. W. Knosp, R. C. LaBelle, J. C. Lam, K. A. Lee, D. Miller, J. E. Oswald, N. C. Patel, D. M. Pukala, O. Quintero, D. M. Scaff, W. van Snyder, M. C. Tope, P. A. Wagner and M. J. Walch: The earth observing system microwave limb

- sounder (EOS MLS) on the Aura satellite, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44 (5), pp. 1075–1092, 2006.
- 8) K. Kikuchi, T. Nishibori, S. Ochiai, H. Ozeki, Y. Irimajiri, Y. Kasai, M. Koike, T. Manabe, K. Mizukoshi, Y. Murayama, T. Nagahama, T. Sano, R. Sato, M. Seta, C. Takahashi, M. Takayanagi, H. Masuko, J. Inatani, M. Suzuki and M. Shiotani: Overview and early results of the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES), *J. Geophys. Res. Atmos.*, 115, D23306, doi: 10.1029/2010JD014379, 2010.
 - 9) R. Beer: TES on the Aura mission: Scientific objectives, measurements, and analysis overview, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44 (5), pp. 1102–1105, 2006.
 - 10) C. Clerbaux, A. Boynard, L. Clarisse, M. George, J. Hadji-Lazaro, H. Herbin, D. Hurtmans, M. Pommier, A. Razavi, J. Turquety, C. Wespes and P. F. Coheur: Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder, *Atmos. Chem. Phys.*, 9 (16), pp. 6041–6054, 2009.
 - 11) D. F. Heath, A. J. Krueger, H. A. Roeder and B. D. Henderson: The solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for Nimbus G, *Opt. Eng.*, 14 (4), pp. 144323–144323, 1975.
 - 12) P. F. Levelt, G. H. van den Oord, M. R. Dobber, A. Malkki, H. Visser, J. de Vries, P. Stammes, J. O. V. Lundell and H. Saari: The ozone monitoring instrument, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44 (5), pp. 1093–1101, 2006.
 - 13) R. Munro, M. Eisinger, C. Anderson, J. Callies, E. Corpaccioli, R. Lang, A. Lefebvre, Y. Livschitz and A. P. Albiñana: GOME-2 on MetOp, *Proc. The 2006 EUMETSAT Meteorol. Satellite Conf.*, Helsinki, Finland, Vol. 1216, p. 48, 2006.
 - 14) M. P. McCormick, P. Hamill, W. P. Chu, T. J. Swissler, L. R. McMaster and T. J. Pepin: Satellite studies of the stratospheric aerosol, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 60 (9), pp. 1038–1046, 1979.
 - 15) M. P. McCormick, J. M. Zawodny, R. E. Veiga, J. C. Larsen and P. H. Wang: An overview of SAGE I and II ozone measurements, *Planet. Space Sci.*, 37 (12), pp. 1567–1586, 1989.
 - 16) M. Cisewski, J. Zawodny, J. Gasbarre, R. Eckman, N. Topiwala, O. Rodriguez-Alvarez, D. Cheek and S. Hall: The Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE III) on the International Space Station (ISS) Mission, *Proc. SPIE Remote Sens.*, Int. Soc. Opt. Photon., pp. 924107–924107, November, 2014.
 - 17) P. F. Bernath, C. T. McElroy, M. C. Abrams, C. D. Boone, M. Butler, C. Camy-Peyret, M. Carleer, C. Clerbaux, P. F. Coheur, R. Colin, P. DeCola, M. De Mazière, J. R. Drummond, D. Dufour, W. F. J. Evans, H. Fast, D. Fussen, K. Gilbert, D. E. Jennings, E. J. Llewellyn, R. P. Lowe, E. Mahieu, J. C. McConnell, M. McHugh, S. D. McLeod, R. Michaud, C. Midwinter, R. Nassar, F. Nichitiu, C. Nowlan, C. P. Rinsland, Y. J. Rochon, N. Rowlands, K. Semeniuk, P. Simon, R. Skelton, J. J. Sloan, M. A. Soucy, K. Strong, P. Tremblay, D. Turnbull, K. A. Walker, I. Walkty, D. A. Wardle, V. Wehrle, R. Zander and J. Zou: Atmospheric chemistry experiment (ACE): mission overview, *Geophys. Res. Lett.*, 32 (15), L15S01, doi: 10.1029/2005GL022386, 2005.
 - 18) E. Kyrölä, J. Tamminen, G. W. Leppelmeier, V. Sofieva, S. Hassinen, J. L. Bertaux, A. Hauchecorne, F. Dalaudier, C. Cot, O. Korabiev, O. Fanton d'Andon, G. Barrot, A. Mangin, B. Théodore, M. Guirlet, F. Etanchaud, P. Snoeij, R. Koopman, L. Saavedra, R. Fraisse, D. Fussen and F. Vanhellemont: GOMOS on Envisat: An overview, *Adv. Space Res.*, 33 (7), pp. 1020–1028, 2004.
 - 19) J. C. Farman, B. G. Gardiner and J. D. Shanklin: Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction, *Nature*, 315 (16), pp. 207–210, 1985.
 - 20) J. Fishman and J. C. Larsen: Distribution of total ozone and stratospheric ozone in the tropics: Implications for the distribution of tropospheric ozone, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 92 (D6), pp. 6627–6634, 1987.
 - 21) J. Fishman, A. E. Wozniak and J. K. Creilson: Global distribution of tropospheric ozone from satellite measurements using the empirically corrected tropospheric ozone residual technique: Identification of the regional aspects of air pollution, *Atmos. Chem. Phys.*, 3 (4), pp. 893–907, 2003.
 - 22) S. Chandra, J. R. Ziemke and R. V. Martin: Tropospheric ozone at tropical and middle latitudes derived from TOMS/MLS residual: Comparison with a global model, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 108 (D9), 4291, doi:10.1029/2002JD002912, 2003.
 - 23) J. R. Ziemke, S. Chandra, B. N. Duncan, L. Froidevaux, P. K. Bhartia, P. F. Levelt and J. W. Waters: Tropospheric ozone determined from Aura OMI and MLS: Evaluation of measurements and comparison with the Global Modeling Initiative's Chemical Transport Model, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 111 (D19), D19303, doi:10.1029/2006JD007089, 2006.
 - 24) J. Worden, X. Liu, K. Bowman, K. Chance, R. Beer, A. Eldering, M. Gunson and H. Worden: Improved tropospheric ozone profile retrievals using OMI and TES radiances, *Geophys. Res. Lett.*, 34 (1), L01809, doi:10.1029/2006GL027806, 2007.
 - 25) J. Landgraf and O. P. Hasekamp: Retrieval of tropospheric ozone: The synergistic use of thermal infrared emission and ultraviolet reflectivity measurements from space, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 112 (D8), D08310, doi:10.1029/2006JD008097, 2007.
 - 26) V. Natraj, X. Liu, S. Kulawik, K. Chance, R. Chatfield, D. P. Edwards, A. Eldering, G. Francis, T. Kurosu, K. Pickering, R. Spurr and H. Worden: Multi-spectral sensitivity studies for the retrieval of tropospheric and lowermost tropospheric ozone from simulated clear-sky GEO-CAPE measurements, *Atmos. Env.*, 45 (39), pp. 7151–7165, 2011.
 - 27) J. Fishman, L. T. Iraci, J. Al-Saadi, K. Chance, F. Chavez, M. Chin, P. Coble, C. Davis, P. M. DiGiacomo, D. Edwards, A. Eldering, J. Goes, J. Herman, C. Hu, D. J. Jacob, C. Jordan, S. R. Kawa, R. Key, X. Liu, S. Lohrenz, A. Mannino, V. Natraj, D. Neil, J. Neu, M. Newchurch, K. Pickering, J. Salisbury, H. Sosik, A. Subramaniam, M. Tzortziou, J. Wang and M. Wang: The United States' next generation of atmospheric composition and coastal ecosystem measurements: NASA's Geostationary Coastal and Air Pollution Events (GEO-CAPE) mission, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93 (10), pp. 1547–1566, 2012.

- 28) D. Fu, J. R. Worden, X. Liu, S. S. Kulawik, K. W. Bowman and V. Natraj: Characterization of ozone profiles derived from Aura TES and OMI radiances, *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (6), pp. 3445–3462, 2013.
- 29) J. Cuesta, M. Eremenko, X. Liu, G. Dufour, Z. Cai, M. Höpfner, T. von Clarmann, P. Sellitto, G. Foret, B. Gaubert, M. Beekmann, J. Orphal, K. Chance, R. Spurr and J. M. Flaud: Satellite observation of lowermost tropospheric ozone by multispectral synergism of IASI thermal infrared and GOME-2 ultraviolet measurements over Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (19), pp. 9675–9693, 2013.
- 30) P. Baron, J. Mendrok, Y. Kasai, S. Ochiai, T. Seta, K. Sagi, K. Suzuki, H. Sagawa and U. Joachim: AMATERASU: Model for Atmospheric TeraHertz Radiation Analysis and Simulation, *J. Natl. I. Inf. Commun. Technol.*, 55 (1), pp. 109–121, 2008.
- 31) L. S. Rothman, I. E. Gordon, Y. Babikov, A. Barbe, D. C. Benner, P. F. Bernath, M. Birk, L. Bizzocchi, V. Boudon, L. R. Brown, A. Campargue, K. Chance, E. A. Cohen, L. H. Coudert, V. M. Devi, B. J. Drouin, A. Faytl, J. M. Flaud, R. R. Gamache, J. J. Harrison, J. M. Hartmann, C. Hill, J. T. Hodgers, D. Jacquemart, A. Jolly, J. Lamouroux, R. J. Le Roy, G. Li, D. A. Long, O. M. Lyulin, C. J. Mackie, S. T. Massie, S. Mikhailenko, H. S. P. Müller, O. V. Naumenko, A. V. Nikitin, J. Orphal, V. Perevalov, A. Perrin, E. R. Polovtseva, C. Richard, M. A. H. Smith, E. Starikova, K. Sung, S. Tashkun, J. Tennyson, G. C. Toon, V. I. Tyuterev and G. Wagner: The HITRAN2012 molecular spectroscopic database, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 130, pp. 4–50, 2013.
- 32) K. W. Bowman, J. Worden, T. Steck, H. M. Worden, S. Clough and C. Rodgers: Capturing time and vertical variability of tropospheric ozone: A study using TES nadir retrievals, *J. Geophys. Res.*, 107 (D23), 4723, doi:10.1029/2002JD002150, 2002.
- 33) J. R. Ziemke and S. Chandra: Development of a climate record of tropospheric and stratospheric column ozone from satellite remote sensing: evidence of an early recovery of global stratospheric ozone, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 5737–5753, 2012.
- 34) http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/space-times-ICT/index.html [Last access 2017. 07. 19]
- 35) T. Kuroda, D. Goto, Y. Kasai and K. Zettsu: Simulation of the Cloud and Aerosol Distributions with the Horizontal with the Horizontal resolution of ~ 5 km using NICAM, The 2nd workshop on Atmospheric Composition Observation System Simulation Experiments (OSSEs), Reading, United Kingdom, 2016.

〔著者紹介〕

●佐藤 知紘 (サトウ トモヒコ)



2014年3月東京工業大学大学院博士課程修了，博士（理学）。学校法人市川学園常勤講師を経て，2015年9月情報通信研究機構テラヘルツ研究センター研究員に着任。2016年4月より同機構統合ビッグデータ研究センタービッグデータ利活用研究室テニユアトラック研究員。その他研究歴：2011年4月～2014年3月日本学術振興会特別研究員（DC1），研究課題「上部対流圏下部成層圏におけるオゾン同位体比の3次元グローバル観測」。主な研究分野：衛星リモートセンシング，大気化学，データマイニング。主な所属学会：日本リモートセンシング学会，日本大気化学会，日本地球惑星科学連合，American Geoscience Union（AGU）等。

E-mail: tosato@nict.go.jp

●是津 耕司 (ゼツ コウジ)



1992年日本IBM，2003年通信総合研究所（現 情報通信研究機構），2011年同ユニバーサルコミュニケーション研究所情報利活用基盤研究室長を経て，2016年より同統合ビッグデータ研究センタービッグデータ利活用研究室長。博士（情報学）。キール大学招聘研究員（2009），京都大学連携准教授（2008–2012），ACM SIGMOD 日本支部副支部長（2015～），スマートIoT推進フォーラム異分野データ連携プロジェクトリーダー（2017～）など。データマイニング，情報検索などの研究に従事。日本データベース学会，情報処理学会，電子情報通信学会，米国計算機学会（ACM）各会員。

●笠井 康子 (カサイ ヤスコ)



国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）上席研究員，東京工業大学特任教授，筑波大学特任教授。1995年東京工業大学理工学研究科修了。博士（理学）。東京大学，理化学研究所を経て1999年郵政省通信総合研究所（現NICT）研究官。2002年フランス科学アカデミー招聘研究員。2000

年から国際宇宙ステーションSMILESプロジェクトに従事，クラウド上における衛星ビッグデータ処理系の開発を担当。SMILESのNICTリーダーを経て，欧州宇宙機関（ESA）が計画する木星圏探査ミッションJUICE（Jupiter Icy Moon Explorer）搭載のサブミリ波分光計（SWI）の日本代表，火星テラヘルツ波小型探査機代表。国際宇宙空間研究委員会（COSPAR）地球観測部会副議長，国際放射線コミッションコミッショナー，欧州委員会HORIZON2020エキスパート，日本学術会議IGAC小委員会委員，総務省「異能vation」プログラムオフィサーなどを歴任。研究テーマは地球惑星の分光リモートセンシング探査，衛星データから独自のアルゴリズムを用いて同位体比など高度なグローバルデータの導出により新しい地球惑星の姿を拓くこと。