

## 4-6 Poker Flat FTIRによる大気微量成分の観測

### 4-6 Trace Gas Observation with Poker Flat FTIR

関 浩二 笠井康子 村山泰啓 水谷耕平 板部敏和

Frank J. Murcraey, William R. Simpson, and Steven A. Lloyd

SEKI Kouji, KASAI Yasuko, MURAYAMA Yasuhiro, MIZUTANI Kohei, ITABE Toshikazu,  
Frank J. Murcraey, William R. Simpson, and Steven A. Lloyd

#### 要旨

我々はアラスカ州ポーカーフラット (65.07° N, 147.26° W) に設置したフーリエ変換型赤外分光計 (FTIR) を用いて、1999年7月から大気微量成分の観測を行っている。従来、FTIRによる観測では目的とする大気微量成分の赤外吸収スペクトルの総吸収量からその成分の気柱全量を導出する研究が主なものであった。本稿ではリトリバル法を用いてオゾンの吸収スペクトルの吸収線形から各高度における存在量の鉛直分布を導出し、得られた結果と他の観測手法による観測データとの比較・検証を行った。

We have been observing atmospheric trace gases using Fourier transform infrared spectrometer (FTIR), which was installed at Poker Flat observation site, Alaska (65.07° N, 147.26° W) since July 1999. FTIR has often been used to derive the total column amount of trace gas from its intensity of the absorption spectrum. In this paper, we have derived height profile of ozone concentration from line shape of the absorption spectrum of ozone using a retrieval method. We explain the scheme of the retrieval method we used and the comparison between our results retrieved and those obtained from other instruments.

#### [キーワード]

フーリエ変換型赤外分光計, 大気微量成分, 高度プロファイル, リトリバル法, SFIT2  
FTIR, Trace gas, Height profile, Retrieval method, SFIT2

## 1 はじめに

地球の大気は窒素、酸素、水蒸気といった主成分のほかに、オゾンや二酸化炭素のように非常に存在量の少ない成分(大気微量成分)を含んでいる。これらは大気に対する体積混合比で $10^2$ から $10^9$ 程度と微量であるが、オゾン層破壊や地球温暖化などの現象に対して鍵となる働きをしているものが多い。これらの存在量やその時間変動を調べることで地球大気における様々な現象に対する知見を深めることができる。

大気微量成分はそれぞれ特有の波長で電磁波を吸収するため、太陽光や月光が地球大気を透過する際には波長ごとに異なった透過率を持つ。大気微量成分による電磁波の吸収が起こる波長

でその吸収量を測定することで、その成分の存在量を求められる。また、励起状態にある微量成分は特有の波長で電磁波を放射するため、微量成分の放射する熱放射スペクトルを観測することで微量成分の存在量を求めることも可能である。

我々は、通信総合研究所とアラスカ大学との国際共同研究(アラスカプロジェクト)の一環として、アラスカ大学ポーカーフラット実験場(65.07° N, 147.26° W)でフーリエ変換型赤外分光計(Fourier transform infrared spectrometer; FTIR)を用いて北極域大気中の大気微量成分の観測を行っている。FTIRによる観測は、対流圏から成層圏まで(高度0-30 km程度)に存在する大気微量成分の存在量を導出できるという性

質を持つ。

ポーカーフラットに設置したFTIR (Poker Flat FTIR) では、1999年7月から太陽光の赤外吸収スペクトルと、大気微量成分が放射する熱放射スペクトルを観測している。FTIRでは分光計に入射した光を二方向に分け、一方を固定鏡、もう一方を移動鏡で反射させたのち、これらの干渉光を検出器で受信する。移動鏡の位置に対する干渉光強度の変化(インターフェログラム)を数値的にフーリエ変換することで赤外スペクトルを得る[1]。地上設置型のFTIRによる観測の特徴としては、一度の測定で広い波長領域を測定できるため多種類の微量成分を同時に観測できる点や、ミリ波ラジオメータなどと比べると装置開発が進んでおり長期間安定した条件の下で観測を行うことができるため、長期間にわたる大気の変動を調べやすい点などが挙げられる。特に、二酸化炭素、メタン、オゾン、水蒸気など地球温暖化にかかわる物質が赤外光を吸収する特性を持つことから、FTIRによる観測はこれらの成分の観測に適している。

本稿では、FTIRにより観測される太陽光の吸収スペクトルを基にした大気微量成分の存在量の導出について述べる。従来、FTIRによる観測では、目的とする微量成分の吸収スペクトルの総吸収量からその成分の気柱全量を導出する研究が主なものであった[2][3]。近年、対流圏・成層圏における化学反応過程や物質輸送過程に対する理解を深めるために各高度における微量成分の存在量の情報が重要となっており、1995年頃からリトリーバル法を用いて微量成分の吸収スペクトルの吸収線形からその存在量の鉛直分布(高度プロファイル)を導出するアルゴリズムが開発されている。なかでもニュージーランド水文大気研究所(National Institute of Water and Atmosphere ; NIWA)と米航空宇宙局ラングレー研究所(National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center ; NASA Langley)が共同開発したSFIT2プログラムを利用してデータ解析した研究が多く行われてきている[4][5]。日本国内ではこれまでリトリーバル法を用いた研究はほとんどなされてこなかった。現在、我々は国立環境研究所、東北大学などと協力してSFIT2プログラムの導入を進め、解析

条件等の調整とともに、高度プロファイルの導出を試みている。

本稿ではPoker Flat FTIRにより2001年2月-10月の9か月にわたって観測されたオゾンの吸収スペクトルから高度プロファイルの導出を試み、得られた結果と他の観測手法による観測データとの比較・検証を行った。オゾンは大気中の微量成分の中でも比較的存在量が多く、また、過去にFTIR以外の手法での観測・検証が行われてきているため[6]、FTIRによって得られた結果を比較・検証する目的に適した成分である。

## 2 観測

Poker Flat FTIRは1999年7月の設置以来、遠隔操作による自動観測によって原則毎日観測を行っている。豊富な観測データに基づいて、数日以上のような様々な時間スケールの微量成分の変動を議論できる。

Poker Flat FTIRでこのような自動観測が可能であるのは、アラスカから通信総合研究所までの高速ネットワークシステム(System for Alaska Middle atmosphere Observation data Network system ; SALMON)の寄与が大きい。Poker Flat FTIRでは、インターネット経由で一日の観測スケジュールをあらかじめ予約しておくことができ、そのスケジュールに従って一日分の観測を自動的に行う。観測されたスペクトルは30分に一度程度の頻度でSALMONを通して通信総合研究所内のサーバーに自動転送される。

地上からの測定の場合には、測定の際に太陽天頂角が大きく変化すると観測する大気領域が大きく異なってしまうため、一度の測定時間を10分程度に収めることが望ましい。しかし、リトリーバル法により微量成分の高度プロファイルを導出するためには、吸収スペクトルの吸収線形の情報が不可欠であるため、ある程度以上高い周波数分解能と高いS/N比を持つスペクトルを観測する必要がある。

高い周波数分解能のスペクトルを観測するためには移動鏡の移動距離を長くする必要があり、一度の測定に時間がかかる。Poker Flat FTIRで使用している分光計(ブルッカー社 120HR)は $0.0019\text{ cm}^{-1}$ の最高周波数分解能を持つが、この分

解能でスペクトルを測定するためには移動鏡の一往復当たり10～20分程度の時間がかかる。その上、高いS/N比を持つスペクトルを観測するためには移動鏡の往復回数を増やす必要があり、往復回数の分だけ測定に時間がかかる。本稿で解析対象としたオゾンの $3051\text{ cm}^{-1}$ 付近の吸収スペクトルの場合には、大気中のオゾンの熱運動に起因するスペクトルのドップラー広がり $0.004\text{ cm}^{-1}$ より大きいため、高度プロファイルを導出する際には $0.0035\text{ cm}^{-1}$ の周波数分解能で測定を行っても $0.0019\text{ cm}^{-1}$ の周波数分解能で測定を行う場合と大きな違いは現れないと見積もった。そのため、本稿では、Poker Flat FTIRでは観測するスペクトルの周波数分解能を $0.0035\text{ cm}^{-1}$ に落として移動鏡が一往復する時間を短縮し、一度の測定における移動鏡の往復回数を2倍にしてスペクトルのS/N比を向上させている。

以上のような観測条件で、Poker Flat FTIRは1999年7月の観測開始以来、2000年については4月から10月まで、2001年については2月から10月までほぼ毎日観測を行っており、晴天等の条件を満たす日には一日に5～10回スペクトルを取得している。今回、解析対象とした2001年2月24日～10月28日の247日間のうち、有為な情報が得られる程度のS/N比を持つスペクトルが取得された日は73日であった。

### 3 解析

FTIRにより観測される赤外吸収スペクトルから大気微量成分の存在量を導出する際に、従来はフォワード法を用いて目的とする微量成分の吸収スペクトルの総吸収量からその成分の気柱全量を導出する研究が主なものであった。なかでも、NASA Langleyが開発したSFITプログラムを利用した研究が多く行われてきた[2][3]。SFITでは、目的とする微量成分の存在量の鉛直分布(高度プロファイル)をあらかじめ仮定して、その高度プロファイルを定数倍し、観測されたスペクトルと最も残差の小さくなる理論スペクトルを最小二乗法により計算して、その成分の鉛直方向の総量(気柱全量)を導出する。微量成分の高度プロファイルを自由に変化させると最小二乗法で最適化するパラメータの数が増え、

スペクトルの残差をゼロにする無限個の解が存在してしまうため、SFITでは高度プロファイルを求めることはできない。また、求まる気柱全量についても、仮定した高度プロファイルが現実の大気と近い場合には良い結果が得られるが、高度プロファイルが現実と異なる場合には次に述べるリトリーバル法に比べて誤差が大きくなりやすいという欠点を持つ。

これに対し、リトリーバル法では微量成分の吸収スペクトルの総吸収量だけでなく、吸収線形からその成分の高度プロファイルを導出する[4][5]。また、気柱全量についてもフォワード法より良い推定が可能と考えられる。地上設置型のFTIRで観測される微量成分による赤外吸収スペクトルは、図1に示すように、太陽から地上までの各高度における吸収スペクトルの足し合わせとなっている。ここで、ある高度におけるスペクトルの吸収線形は温度と圧力に応じた圧力広がり $\gamma$ とドップラー広がり $\delta$ を持つ。ドップラー広がり $\delta$ は高度によって大きく変化しないが、圧力広がり $\gamma$ は気圧によって大きく変化するため高度が上がるとともに急激に小さくなる。その結果、圧力広がり $\gamma$ がドップラー広がり $\delta$ よりも卓越する高度範囲においては、スペクトルは低い高

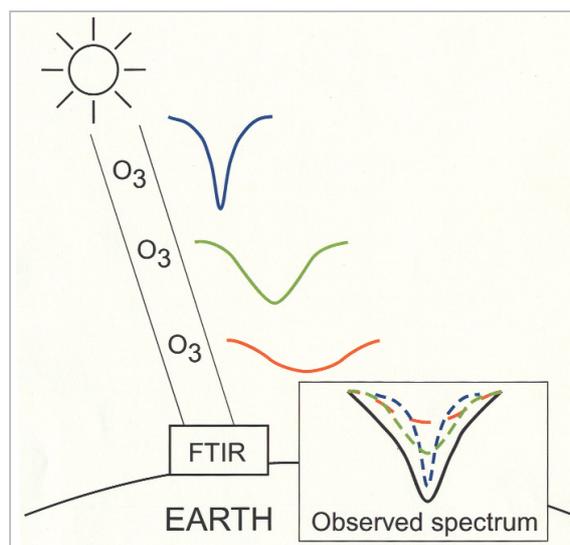


図1 FTIRで観測される赤外吸収スペクトルの概念図

FTIRで観測されるスペクトルは太陽から地上までの各高度における吸収スペクトルの足し合わせになっている。リトリーバル法では各高度での吸収線形の違いを利用して大気微量成分の各高度における存在量(高度プロファイル)を導出する。

度では幅の広い吸収線形となり、高い高度では幅の狭い吸収線形となる。リトリーバル法ではこのような各高度での吸収線形の違いを利用して微量成分の高度プロファイルを導出する。

リトリーバル法の数学的手法には幾つかの方法があるが、本稿ではロジャーズの最適法を用いた[7][8]。ロジャーズの最適法では、観測されたスペクトルの吸収線形の情報を使用するため周波数を細かく区切り、各周波数におけるスペクトルの強度を  $y_1, y_2, \dots, y_m$  とし、 $m$  個の成分を持つ  $y$  ベクトルとする。また、目的とする微量成分の高度プロファイルに対応する  $x$  ベクトルを、各高度における微量成分の存在量を  $x_1, x_2, \dots, x_n$  とし、 $n$  個の成分を持つベクトルとして定義する。この時、重み関数  $K (= \partial y / \partial x)$  を定義すると、観測スペクトルと微量成分の高度プロファイルの間には  $y = Kx$  の関係が成り立つ。ロジャーズの最適法では、観測スペクトル  $y$ 、高度プロファイルの先験的情報  $x_a$  (これをアプリアリと呼ぶ) にそれぞれ共分散行列  $S_y, S_a$  を与えることで、最も確からしい高度プロファイル  $\hat{x}$  を以下の式で導く。

$$\begin{aligned} \hat{x} &= x_a + S_a K^T (K S_a K^T + S_y)^{-1} (y - K x_a) \\ &= x_a + D (y - K x_a) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

$$D = S_a K^T (K S_a K^T + S_y)^{-1} \quad (2)$$

である。

本稿では Poker Flat FTIR により観測されたオゾンの  $3051.20 - 3051.90 \text{ cm}^{-1}$  の周波数領域(オゾンの非対称伸縮振動の3倍音遷移、回転量子数  $J = 7 - 31$ )の吸収スペクトルからオゾンの高度プロファイルと気柱全量の導出を試みた。データ処理には、NIWA と NASA Langley が共同開発した SFIT2 プログラムを用いた[4][5]。観測スペクトルを  $0.0035 \text{ cm}^{-1}$  ごとの周波数に区切り、 $y$  ベクトルとした。解析に用いたスペクトルの例として、2001年3月23日午前9時(アラスカ標準時)にポーカーフラットで観測されたオゾンの吸収スペクトルを図2に示す。下図にはスペクトルの観測値を+記号、リトリーバル法による計算値を実線で示す。上図にはスペクトルの観測値から計算値を差し引いた残差を示す。スペクトル強度の気温に対する依存性が小さいことや、他の分子の吸収線との重なりが小さいことなどを

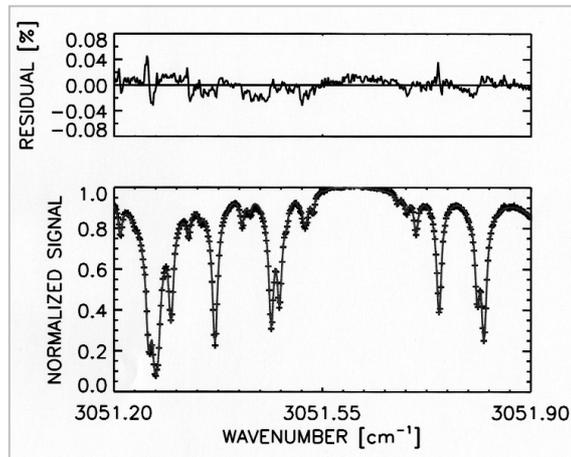


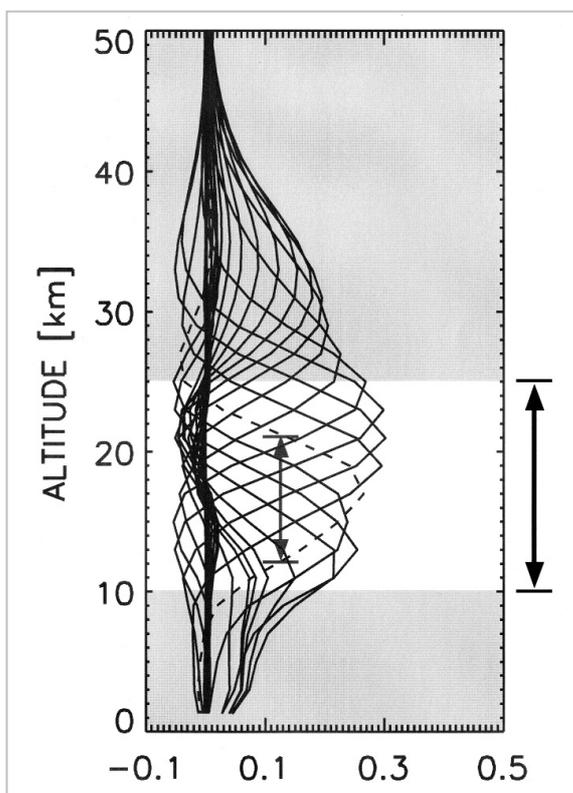
図2 (下図)2001年3月23日午前9時(アラスカ標準時)にポーカーフラットで観測されたオゾンの赤外吸収スペクトル。観測値を+記号、リトリーバル法による計算値を実線で示す  
(上図)スペクトルの観測値から計算値を差し引いた残差

考慮して、この周波数領域のオゾンの遷移を選んだ。

高度プロファイルについては、高度  $0 - 100 \text{ km}$  を  $29$  層に区切り、 $x$  ベクトルとした。アプリアリ  $x_a$  には  $1976$  年米国標準大気を用いた[9]。アプリアリ  $x_a$  の共分散行列  $S_a$ 、観測スペクトル  $y$  の共分散行列  $S_y$  は共に対角行列とした。  $S_a$  はアプリアリの  $10\%$  の値を仮定して、  $S_y$  はスペクトルの  $S/N$  比を  $500$  として作成した。また、SFIT2では重み関数  $K$  を計算する際にスペクトル取得時の各高度における気温・気圧の情報が必要となる。気温・気圧の情報としては、イギリス気象庁 (United Kingdom Meteorological Office ; UKMO) がデータを提供している高度 ( $0 - 50 \text{ km}$ ) に対しては、ポーカーフラット付近における一日ごとの気温・気圧情報を用いた[10]。UKMO がデータを提供していない高度 ( $50 - 100 \text{ km}$ ) に対しては CIRA86 の提供する北緯  $65$  度における月平均の気温・気圧情報を用いた[11]。吸収スペクトルの中心周波数、吸収強度、圧力広がり係数などの分光学的パラメータには、 $1996$  年 HITRAN データベースを用いた[12]。

リトリーバル法による解析の際に得られる、 $A = DK$  をアベレーシングカーネルと呼ぶ。アベレーシングカーネルは、スペクトルから高度プロファイルについてどの程度の情報が得られるかを示す指標となる。例として、 $2001$  年  $3$  月  $23$  日

午前9時(アラスカ標準時)にポーカーフラットで観測されたオゾンの吸収スペクトル(3051.20 – 3051.90  $\text{cm}^{-1}$ の周波数領域)を解析した際に得られたアベレージングカーネルを図3に示す。アベレージングカーネルが大きなピークを持つ領域(高度10 – 25 km)が、吸収スペクトルから高度プロファイルについて多くの情報が得られる高度を表す。10 kmよりも高い高度でアベレージングカーネルのピークが徐々に大きくなるのは、対流圏ではオゾンの混合比が少ないが成層圏では高度が上がるとともにオゾンの混合比が増えるためオゾンの単位体積当たりの存在量(数密度)が増え、高度プロファイルの情報が得やすくなることに対応している。また、25 km以上の高度で



**図3** 2001年3月23日午前9時(アラスカ標準時)にポーカーフラットで観測されたオゾンの吸収スペクトル(3051.20 – 3051.90  $\text{cm}^{-1}$ の周波数領域)を解析した際に得られたアベレージングカーネル

アベレージングカーネルが大きなピークを持つ領域(図右の矢印: 高度10 – 25 km)は吸収スペクトルから高度プロファイルについて多くの情報が得られる高度を表す。また、アベレージングカーネルの半値全幅(図中の矢印: 10 km程度)は得られた高度プロファイルの高度分解能を表す。

アベレージングカーネルのピークが小さくなるのは、高度が上がるとともに大気の数密度が指数関数的に減少するためオゾンの数密度も減り、高度プロファイルの情報が得難くなることに対応している。一方、得られた高度プロファイルの高度分解能はアベレージングカーネルの半値全幅(高度10 – 25 kmでは10 km程度)によって近似的に表される。25 km以上の高度でアベレージングカーネルの半値全幅が大きくなるのは、ドップラー広がり(圧力広がりよりも卓越して、スペクトルの吸収線形がドップラー広がりによって決まるため、高度プロファイルの高度分解能が悪くなることに対応している。

## 4 結果

リトリバル法により導出したオゾンの高度プロファイルの一例として、2001年3月23日午前9時(アラスカ標準時)のポーカーフラットにおけるオゾンの高度プロファイルを図4に示す。図中の破線がアプライオリの高度プロファイル、実線がリトリバル法により導出した高度プロファイルである。FTIRで観測された高度プロファイルとの比較のために、同じ日の午前10時にフェアバンクス(64.81°N, 147.86°W; ポーカーフラットから約40 km南西)において打ち上げられた気球(オゾンゾンデ)観測の結果を点線で示す。スペクトルから高度プロファイルの情報が得られると考えられる高度10 – 25 kmについてリトリバル結果とオゾンゾンデの観測値を比較すると、高度17 – 25 kmでは両者はよく一致し、高度10 – 17 kmではFTIRの値がオゾンゾンデの1/2 – 1/3程度の範囲におさまっている。

リトリバル法を用いて、上記と同様の条件で2001年2月24日 – 10月28日の期間に観測されたオゾンの吸収スペクトルから高度プロファイルと気柱全量を導出した。2001年のポーカーフラットにおけるオゾンの気柱全量を図5に示す。図中の丸記号がリトリバル法により導出した気柱全量である。導出した気柱全量との比較のために、Earth Probe 衛星搭載のオゾン全量測定センサー TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer; Earth Probe/TOMS) による2001年のフェアバンクス近郊(フェアバンクスより半径40

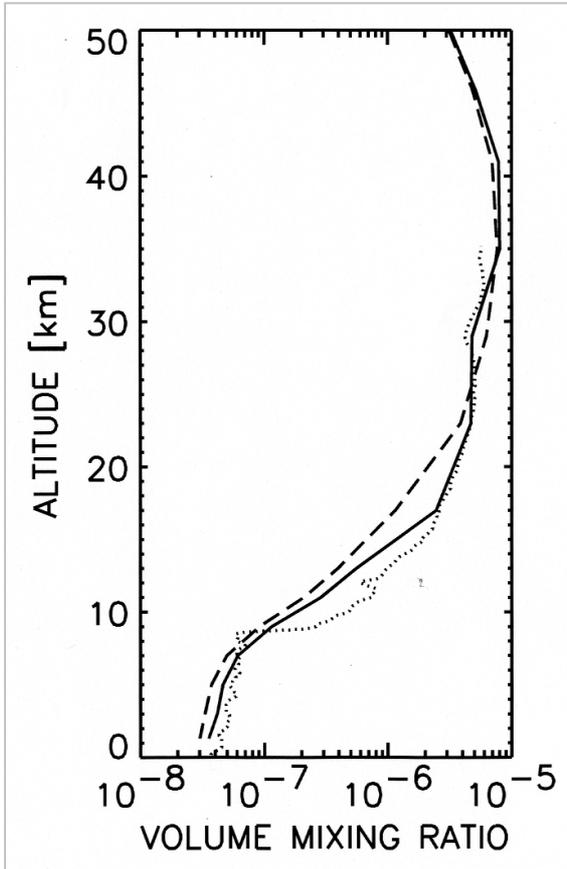


図4 2001年3月23日午前9時(アラスカ標準時)のポーカークラットにおけるオゾンの高度プロファイル

先験的情報(アプリオリ)を破線、リトリーバル法により導出した高度プロファイルを実線、同じ日の午前10時にフェアバンクス(ポーカークラットから約40 km南西)において打ち上げられた気球(オゾンゾンデ)による観測値を点線で示す。

km 以内)における観測値<sup>[13]</sup>を実線で示す。FTIRとEarth Probe/TOMSの観測値の時間変動を比較すると、4月下旬から5月にかけての時間スケール数十日程度の増減や、6月から10月にかけてのなだらかな減少・増加傾向などについて、おおむね両者は一致していることが分かる。

## 5 議論

FTIRで測定した3051.20 - 3051.90  $\text{cm}^{-1}$ のオゾン吸収スペクトルの吸収線形が高度(気圧)依存性を持つ圧力広がりによって決まることを利用して高度プロファイルを求めた。3で述べたように高度10 km以下と高度25 km以上ではオゾンの存在量が少なく、更に高度25 km以上ではスペクトル

の吸収線形がドップラー広がりによって決まるため、高度プロファイルの情報はほとんど得られていないと考えている。図4中で、FTIRからオゾンの高度プロファイルの情報が得られた高度10 - 25 kmについて、FTIRとオゾンゾンデの観測値と比較すると、高度17 - 25 kmで両者は良い一致を示していることが分かる。一方、高度10 - 17 kmではFTIRの値はオゾンゾンデよりも1/2 - 1/3程度小さくなっている。このような誤差が現れる要因として、幾つかの可能性が考えられる。一つは、オゾンゾンデが0.1 km程度の高度分解能で局所的なオゾン混合比を測定しているのに対して、FTIRでは10 km程度の高度分解能でオゾン混合比を求めているため、鉛直方向の観測領域に空間的な違いが生ずる可能性がある。次に、オゾンゾンデが風に流されて移動しながら測定を行うのに対し、FTIRでは常に太陽の方向を観測するため、FTIRとオゾンゾンデでは水平方向の観測領域が数十km以上の空間的な違いを生ずる可能性がある。FTIRとオゾンゾンデの観測時刻も1時間程度の違いがあるため、両者がオゾン混合比の時間的・空間的な違いを観測している可能性が考えられる。また、SFIT2で使用している大気の放射伝達モデルが微量成分の存在量に対する非線形の項を考慮していないため、FTIRではオゾン混合比が低く見積もられる可能性がある。

図5のオゾン全量の長期変動については、図には示さないが、6月から9月にかけてはFTIRとTOMSの値の比をとるとFTIRの値が数%低く見積もられる傾向が見られた。この要因としては、リトリーバル法に用いるオゾンのアプリオリ・プロファイルとして年間を通して同一のものを使用しており、現実のオゾン場の季節変動が考慮されていないため、系統的誤差に季節変動が生じている可能性が考えられる。季節ごとに使用するアプリオリを変えることにより、こうした効果を取り除ける可能性がある。

## 6 まとめ

我々は、アラスカ大学との通信総合研究所の国際共同研究(アラスカプロジェクト)の一環として、アラスカ大学ポーカークラット実験場で

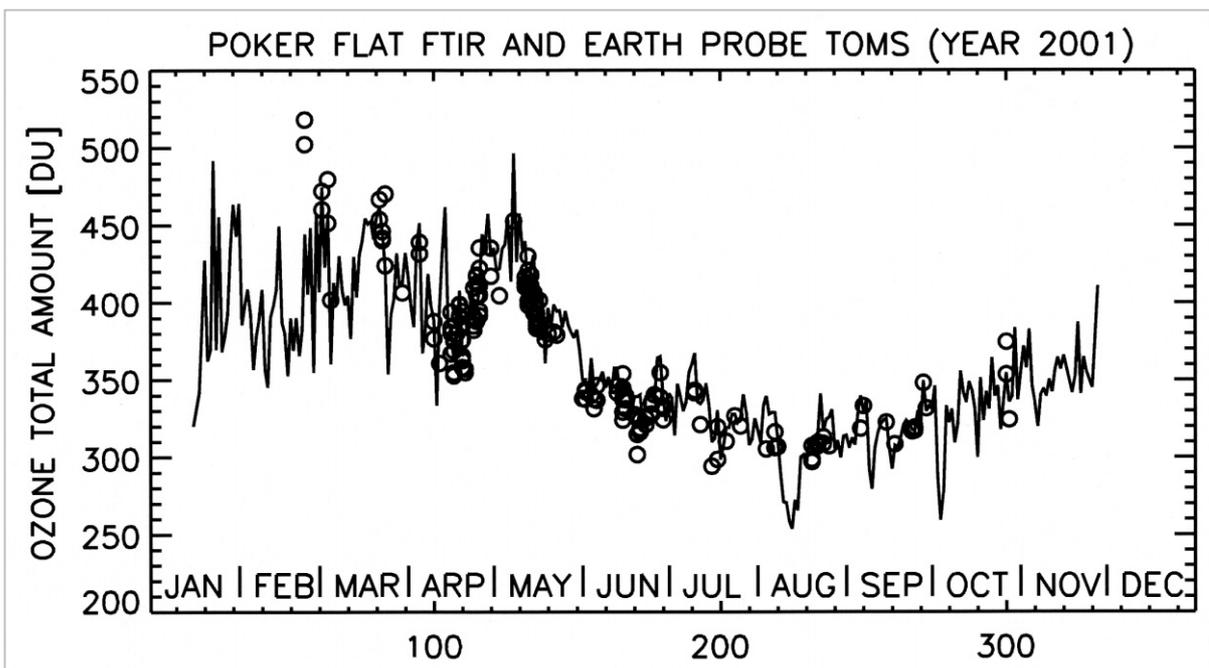


図5 リトリバル法により導出したポーカーフラットにおけるオゾンの気柱全量

2001年2月24日ー10月28日の期間にFTIRで観測された73日間の全データを丸記号でプロットしてある。

Earth Probe衛星搭載のオゾン全量測定センサーTOMSによる2001年のフェアバンクス近郊(フェアバンクスより半径40 km以内)における観測値を実線で示す。

1999年7月からFTIR(フーリエ変換型赤外分光計)を用いて太陽光の赤外吸収スペクトルを測定し、北極域対流圏・成層圏中の大気微量成分の観測を行っている。従来、SFITプログラムを利用して目的とする微量成分の吸収スペクトルの総吸収量からその成分の気柱全量を導出する研究が主なものであったが、SFITは微量成分の高度プロファイルを求めることができず、気柱全量についても正確な導出が難しいという欠点を持っていた。1995年頃から、SFIT2プログラムを利用して微量成分の吸収スペクトルの吸収線形からその成分の高度プロファイルを導出する研究が多く行われてきているが、日本国内では2001年頃までリトリバル法を用いた研究はほとんどなされてこなかった。現在、我々は国立環境研究所、東北大学などと協力してSFIT2の導入を進め、解析条件等の調整とともに、高度プロファイルの導出を試みている。

本稿ではリトリバル法を用いて2001年2ー10月の9か月にわたって観測されたオゾンの吸収スペクトルから日ごとのオゾンの高度プロファイルを導出し、得られた結果とオゾンゾンデ、Earth Probe/TOMSによる観測データとの比較

検証を行った。今回示したオゾンの高度プロファイルの観測例については、オゾンの吸収スペクトルから高度情報が得られる高度10ー25 kmにおいて、17 km以上ではよく一致し、10ー17 kmでもFTIRの値がオゾンゾンデの1/2ー1/3程度の範囲に収まっていた。後者の誤差については、FTIRとオゾンゾンデの高度分解能や観測している大気領域の違いや、SFIT2で用いている大気の放射伝達モデルが考慮していない項があることなどの要因が可能性としてあげられる。

また、オゾンの気柱全量については、FTIRとEarth Probe/TOMSの比較から、2001年2ー10月の両者の観測結果が、全体としてよく一致しており、1ー2か月より長い変動成分もよく再現されることが示された。ただし、6ー9月ではFTIRの方が数%低く見積もられる傾向が見られた。全期間について同一のオゾンのアプリオリを使用していることが、誤差に季節変化を与えている可能性などが考えられる。

今後は二酸化炭素、メタン等の地球温暖化に関わる物質をはじめとする他の微量成分の存在量を導出し、豊富な観測データから微量成分の日変動、季節変動、経年変動について議論を進

める予定である。また、アラスカプロジェクトではポーカフラット実験場でミリ波ラジオメータによる観測も行っており、成層圏から中間圏まで(高度20-60 km程度)に存在する大気微量成分の存在量の導出を試みている。FTIRとミリ波ラジオメータによる同時観測からは、オゾン等の共通の観測対象について対流圏から中間圏までの広い高度範囲にわたる情報を得ることができるため、今後、FTIRとミリ波ラジオメータとの共同研究を進める予定である。

#### 参考文献

- 1 P. F. Griffiths and J. A. De Haseth, "Fourier Transform Infrared Spectrometry", John Wiley & Sons, 1986.
- 2 C. P. Rinsland, R. E. Boughner, J. C. Larsen, G. M. Stokes, and J. W. Brault, *J. Geophys. Res.*, 89, 9613-9622, 1984.
- 3 C. P. Rinsland, B. J. Connor, N. B. Jones, I. Boyd, W. A. Matthews, A. Goldman, F. J. Murcray, D. G. Murcray, S. J. David, and N. S. Pougatchev, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1025-1028, 1996.
- 4 N. S. Pougatchev, B. J. Connor, and C. P. Rinsland, *J. Geophys. Res.*, 100, 16689-16697, 1995.
- 5 C. P. Rinsland, N. B. Jones, B. J. Connor, J. A. Logan, N. S. Pougatchev, A. Goldman, F. J. Murcray, T. M. Stephen, A. S. Pine, R. Zander, E. Mahieu, and P. Demoulin, *J. Geophys. Res.*, 103, 28197-28217, 1998.
- 6 R. D. McPeters and G. J. Labow, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3695-3698, 1996.
- 7 C. D. Rodgers, *Rev. Geophys. Space. Phys.*, 14, 609-624, 1976.
- 8 C. D. Rodgers, *J. Geophys. Res.*, 95, 5587-5595, 1990.
- 9 U.S. Standard Atmosphere, 1976, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1976.
- 10 R. Swinbank and A. O'Neill, *Mon. Weather Rev.*, 122, 686-702, 1994.
- 11 M. J. Rycroft, G. M. Keating, and D. Rees (eds.), "Upper Atmosphere Models and Research", *Adv. Space Res.*, 10, #6, 1990.
- 12 L. S. Rothman, C. P. Rinland, A. Goldman, S. T. Massie, D. P. Edwards, J.-M. Flaud, A. Perrin, C. Camy-Peyret, V. Dana, J.-Y. Mandin, J. Schroeder, A. McCann, R. R. Gamache, R. B. Wattson, K. Yoshino, K. V. Chance, K. W. Jucks, L. R. Brown, V. Nemtchinov, and P. Varanasi, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 60, 665-710, 1998.
- 13 R. D. McPeters, P. K. Bhartia, A. J. Krueger, J. R. Herman, C. G. Wellemeyer, C. J. Seftor, G. Jaross, O. Torres, L. Moy, G. Labow, W. Byerly, S. L. Taylor, T. Swissler, and R. P. Cebula, "Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide", NASA Technical Publication 1998-206895, 1998.

#### 謝辞

イギリス気象庁(UKMO)より気温・気圧のデータの提供を、米航空宇宙局ゴッダード宇宙飛行センター(NASA Goddard Space Flight Center)よりEarth Probe衛星搭載のオゾン全量測定センサー TOMSによるオゾンの気柱全量のデータの提供を受けました。ここに記して感謝いたします。

蘭 浩二

電磁波計測部門北極域国際共同研究グループ専攻研究員 博士(学術)  
大気リモートセンシング、分子分光学

笠井康子

電磁波計測部門 SMILES グループ主任研究員 博士(理学)  
大気リモートセンシング 分子分光学

村山泰啓

電磁波計測部門北極域国際共同研究グループリーダー 博士(工学)  
中層大気環境の観測的研究

水谷耕平

電磁波計測部門ライダーグループリーダー 理学博士  
レーザーリモートセンシング

板部敏和

基礎先端部門長 理学博士  
レーザーリモートセンシング

Frank J. Murcray, Ph. D.

デンバー大学教授  
高層大気物理学

William R. Simpson, Ph. D.

アラスカ大学フェアバンクス校助教授  
大気物理化学

Steven A. Lloyd, Ph. D.

ジョンズホプキンス大学教授  
大気リモートセンシング