

# 静止衛星からの対流圏汚染物質の観測 —赤外分光計フィージビリティ研究—

○驚 和俊<sup>1,2</sup>、フィリップ・バロン<sup>2</sup>、エリック・デュピイ<sup>2</sup>、北 和之<sup>1</sup>、  
笠井康子<sup>2</sup>、今須良一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ibaraki Univ., <sup>2</sup>National Institute of Information and Communications  
Technology(NICT), <sup>3</sup>Center for Climate System Research Univ. of Tokyo, <sup>4</sup>Nara Women's Univ.

## 【背景】

### ・日本における大気汚染の現状

1970年代までの高度経済成長に伴う副産物として社会に強い衝撃を与え表層化した大気汚染は、日本政府による排出ガス規制や大気汚染防止法の制定等により沈静化するかと思われた。確かに汚染物質の排出規制以降、わが国における窒素酸化物や炭化水素類等の汚染物質の排出は減少傾向にある。しかし日本の大気汚染状況は好転してはいない。その一例として、夏季の光化学スモッグ注意報等発令日数は、平成に入って以降、微小ながら増加しているといったものが挙げられる。

また、現在の汚染状況と1970年代の汚染状況とは大きく異なる点がある。それは、過去問題とされた汚染は、都市域や工場地帯のものが主であったが、現在の汚染は都市と地方の差異はそれほど見られず、平均的にどの地域でも濃度が上昇しているといった、広域的な汚染傾向が認められるという事である。この傾向を踏まえ、現在の大気汚染の原因の一つとして、大陸からの汚染物質輸送が考えられている。

汚染状況を正確に把握し、安全な生活を確約するためにも、広域的、かつ頻繁に汚染状況を観測するシステムが必要である。現在日本国内には、環境省が全国に設置した測定局（一般環境大気測定局1581局、自動車排出ガス測定局451局、平成18年度末）により、24時間汚染物質の観測が行われている。しかし大陸の汚染情報は限られており、総合的な判断は難しい。その為、日本国内に限らずアジア全域を常時監視出来るようなシステムの開発が急務である。[1]

### ・静止軌道からの大気汚染観測

低軌道衛星からのリモートセンシングは、地球規模での広域大気観測を行う方法の主要な一つである。しかしこの低軌道衛星観測は、ある地点を一日に観測する回数に制限がある為に、予報等を目的とした汚染の日変動観測には不向きである。それに代わる方法として、静止軌道を利用した観測が考えられている。静止衛星は、地球の自転周期と同周期を持つ静止軌道を使用することで、同一地点での連続的な観測を可能にする事が期待される。しかし一方で、低軌道衛星の軌道高度がせいぜい700kmなのに対し、静止軌道は36000kmにあるので、十分な観測精度が得られるのかが懸念される。

欧米では既に静止衛星からの汚染観測検討は進んでおり（アメリカ：Geo-CAPE、欧州：GeoTroPE[2,3]、MTG等）、日本でも、大気化学研究会（JSAC）と宇宙航空研究機構（JAXA）が協力し検討会を立ち上げ、静止軌道からのアジア域に於ける大気汚染の広域観測・監視に向けた議論を、2008年春から始動した。現在は可視紫外センサと赤外センサによる静止衛星観測検討を行っている[1]。ここでは赤外センサに対する検討を報告する。赤外光を用いる観測は、地球の熱放射を見ている為に昼夜を問わず観測できる事や、この波数域に吸収構造を持つ物質が多くそれらの観測が出来るといった利点がある一方、オゾンなどでは可視紫外域に比べ観測精度を決める信号雑音比（SN比）が低いといった問題がある。

## 【本研究の目的】

静止衛星観測の装置スペックを決めるために、「科学的観測要求」と「現実的な測器仕様」のトレードオフを行う。大気化学研究会（JSAC）の検討によると、オゾン・CO共に境界層内で観測精度20～30%を要求している。オゾンとCOの「科学的観測要求」を実現する

ための測器周波数を求めることを本研究の目的とする。シミュレーション解析によりフーリエ変換型赤外分光計を用いて静止軌道から観測した場合、各周波数分解能におけるオゾンとCO観測の精度推定を行った。

**【解析手法】**

解析は情報通信研究機構（NICT）のテラヘルツプロジェクトで開発された AMATERASU モデルを使用し行った。AMATERASU[4]は LBLRTM[5]を含む様々なモデルにより検証されており、吸収係数や放射伝達計算を行うフォワード計算、吸収スペクトルから分子情報を導出するリトリーバル計算、各種誤差解析を行う事が出来る。本研究では、まずフォワード計算によって静止衛星による擬似観測スペクトルを計算し、その擬似観測スペクトルに対しリトリーバル・誤差解析を行った。

**・リトリーバル・誤差解析**

リトリーバル・誤差解析モデルはロジャースの最適法を元にして いる[6]。導出される分子の体積密度比(VMR) の高度情報の推定値  $\hat{x}$  は次式により与えられる。

$$\hat{x} = Gy_m + (I - GK)x_a \tag{1}$$

$$A = GK$$

ここで  $G$  は寄与関数、 $y_m$  は各周波数における観測スペクトル強度(m 個の成分)、 $I$  は単位行列、 $K$  はフォワードモデルによる重み関数 (dy/dx)、 $x_a$  は微量成分存在量の先験値を表している。また  $A$  はアベレージングカーネルと呼ばれ、リトリーバルで得られたある高度存在量を持つ、他の高度に対する重みを示す。

観測誤差  $S_M$  とスムージング誤差  $S_n$  は次式により得られ、

$$S_M = GS_yG^T \tag{2}$$

$$S_n = (A-I)S_a(A-I)^T$$

この時  $S_y$  は観測スペクトルの共分散行列、 $S_a$  は  $x_a$  の共分散行列である。

**・計算条件**

図は仮定した観測ジオメトリである。観測装置は東経 145° の赤道上、高度 36000km に位置し、そこから北緯 30° 東経 145° の地点の観測を行ったと仮定している。この時の地表温度は 260K とした。この観測地点でアジアの汚染大気と、非汚染時の大気をそれぞれ想定し観測シミュレーションを行った。その際用いた分子の高度情報は、検討会の科学要求チームにより作成されたものを使用している。この分子情報は対流圏までしかないので、それ以上の高度に対しては US スタンダードの夏季中緯度域を対象としたものを使用した。また観測器はフーリエ変換型赤外分光計（FTS）を仮定し、JAXA の測器検討チームにより頂いたパラメータを使用した。

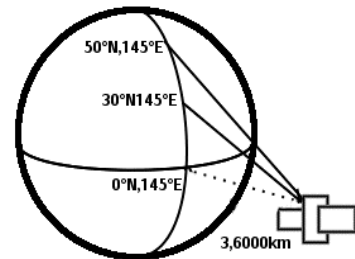


図1 観測ジオメトリ

表1 設定条件

大気物質の存在量	対流圏(0 - 12km) (日本語に)	“Scientific Requirements Team” (SRT)により提供二種類のシナリオを用意した。 1) アジア汚染増大シナリオ 2) アジア背景平均汚染シナリオ
	成層圏以上 (12km - top)	US スタンダード 夏季中緯度大気
Sa	30%, 直交成分のみ考慮	
Sy	Sy=1/√SN。直交成分のみ考慮	

## 【解析結果】

オゾンとCOを精度30%で観測するには、スペクトルSN比と波数分解能がクリティカルなポイントとなる。今回はスペクトルのSN比（感度）と波数分解能に着目し解析を行った。

### ・対流圏オゾン

オゾンの解析はオゾンの吸収構造が存在する  $970\sim 1100\text{cm}^{-1}$  を用いて行った。図2にフォワード計算で得られた擬似観測スペクトルとリトリーバル解析で得られたアベレージングカーネルを示す。アベレージングカーネルより対流圏オゾンを3層に分離する事が可能であるとわかった。

表2はアジア汚染増大シナリオにおける観測精度の波数分解能依存性を表したものである。また、括弧内にはアジア背景平均汚染シナリオにおける精度を示した。これらの計算では、瞬時視野(IFOV)を20m平方、4000km平方を観測するのにかかる時間を1時間とした。表2によると、アジア汚染増大シナリオのオゾンは周波数分解能が  $0.1\sim 0.5\text{cm}^{-1}$  の中では誤差30%以内での観測は可能であるが、アジア背景平均汚染シナリオの場合では周波数分解能  $0.3\text{cm}^{-1}$  や  $0.5\text{cm}^{-1}$  以上になると誤差が39 - 44%に達した。

波数分解能  $0.1\text{cm}^{-1}$  の場合で、瞬時視野と観測時間を変えた時の観測精度をまとめたものが表3になる。表3に示した計算ではアジア汚染増大シナリオを用いた。同じ波数分解能でも瞬時視野が10kmと20kmの場合、20kmの方が3倍程度、観測精度が良くなる。また対流圏の各層でのオゾンを精度良く（各層に対し20%以下）観測するためには、SN比が300以上あると良いことがわかる。

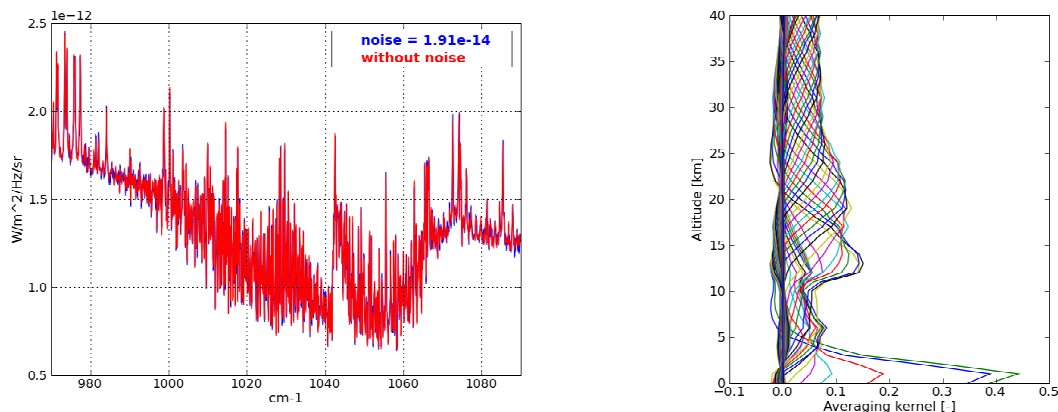


図2 フォワード計算によって得られた擬似観測スペクトル（左）とリトリーバル解析によって得られたアベレージングカーネル

表2 対流圏オゾン観測精度の波数分解能依存性

波数分解能	0.1cm-1	0.2cm-1	0.3cm-1	0.5cm-1
SN比	SNR=302	SNR=604	SNR=906	SNR=1510
Boundary Layer (0-2km)	11(26)%	14(33)%	16(39)%	18(44)%
Middle troposphere (2-7km)	21(29)%	26(34)%	30(39)%	33(44)%
Upper troposphere (7-15km)	3(3)%	4(4)%	5(5)%	6(6)%

表3 汚染大気での対流圏オゾン観測精度の SNR 依存性

	IFOV [km <sup>2</sup> ]	10×10			20×20		
	Observation time [hour]	1	2	3	1	2	3
	SNR	36	52	65	302	430	528
Boundary Layer (0-2km)		30%	24%	22%	10%	9%	8%
Middle troposphere (2-7km)		60%	50%	45%	21%	18%	16%
Upper troposphere (7-15km)		9%	8%	7%	3%	3%	2%

・ CO

CO に対しても吸収構造の見られる 2000~2300cm<sup>-1</sup> に対し同様に解析を行った。図2にフォワード計算で得られた擬似観測スペクトルとリトリーバル解析で得られたアベレージングカーネルを示す。アベレージングカーネルより、対流圏 CO は二層に分離出来そうだが、今回は対流圏カラムとして観測制度を求めた。対流圏カラムとして解析した結果が表4である。この解析には汚染大気シナリオを用いた。これを見ると CO に関しては波数分解能が 0.1cm<sup>-1</sup> であれば SN 比が 20 で、0.2cm<sup>-1</sup> であれば SN 比が 40 あれば精度 20%以下で汚染大気が観測可能であることが分る。

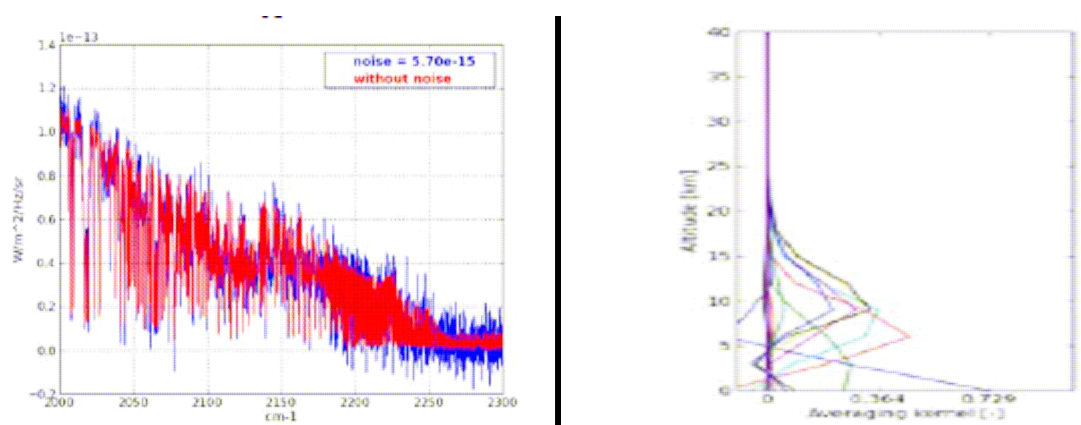


図3 フォワード計算によって得られた擬似観測スペクトル（左）とリトリーバル解析によって得られたアベレージングカーネル

汚染大気での対流圏 CO カラムの観測精度

		0.1cm <sup>-1</sup>	0.2cm <sup>-1</sup>	0.3cm <sup>-1</sup>
SNR	10	25%	38%	50%
	20	18%	27%	36%
	30	14%	22%	29%
	40	12%	19%	25%
	50	11%	17%	23%
	60	10%	16%	21%
	70	9%	14%	19%
	100	8%	12%	16%
	200	6%	9%	11%
	300	5%	7%	9%

## 【まとめ】

静止衛星による大気汚染物質観測の検討の一環で、赤外観測によって対流圏オゾンが導出できるかシミュレーションにより検討した。

結果、オゾンについては、誤差が20～30%で対流圏を三層に分離しての観測が出来るようであり、観測精度に関して僅かだがSNRより波数分解能の方が効いていた。測器性能としては、最低でも波数分解能が0.2、SNRが600必要であり、波数分解能が0.1、SNRが300あれば望ましい。

COについては対流圏の層分離は難しく、対流圏カラムとして見た時、波数分解能が $0.1\text{cm}^{-1}$ であればSNRが20で、 $0.2\text{cm}^{-1}$ であればSNRが40あれば精度20%以下で汚染大気が観測可能である。

以上より、赤外域の測器を考える場合、オゾン・CO共に波数分解能が $0.2\text{cm}^{-1}$ は欲しい所であるが、より具体的な条件は、他の弱い吸収情報を持つ分子の導出を考慮するかにかかってくる。

## 参考文献

- [1] H. Akimoto, Y. Kasai, K. Kita., Planning a Geostationary Atmospheric Observation Satellite, Commission on the Atmospheric Environment Observation Satellite of the Japan Society of Atmospheric Chemistry, March 2008
- [2] J. M. Flaud, et al., The Geostationary Fourier Imaging Spectrometer (GeoFIS) as part of the Geostationary Tropospheric Pollution Explorer (GeoTroPE) mission: Objectives and capabilities, *Advanced in Space Research* 34 (2004) 688-693
- [3] Johannes Orphal, et al., Monitoring tropospheric pollution using infrared spectroscopy from geostationary orbit, *C. R. Physique* 6 (2005) 888-896
- [4] P. Baron, J. Mendrok, Y. Kasai, S. Ochiai, T. Seta, K. Sagi, K. Suzuki, H. Sagawa, and J. Urban (2008), AMATERASU: Model for Atmospheric TeraHertz Radiation Analysis and Simulation, *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, 55(1), 109-121.
- [5] C. Melsheimer, C. Verdes, S. A. Buehler, C. Emde, P. Eriksson, D. G. Feist, S. Ichizawa, V. O. John, Y. Kasai, G. Kopp, N. Koulev, T. Kuhn, O. Lemke, S. Ochiai, F. Schreier, T. R. Sreerekha, M. Suzuki, C. Takahashi, S. Tsujimaru, and J. Urban (2005), Intercomparison of general purpose clear sky atmospheric radiative transfer models for the millimeter/submillimeter spectral range, *Radio Sci.*, 40(1), RS1007, doi10.1029/2004RS003110
- [6] Rodgers. C. O., *Inverse methods for atmospheric sounding: Theory and practice*, World Scientific 2000