

大気環境衛星の検討

北 和之(茨城大・理)、笠井康子(情報通信研究機構)、秋元 肇(海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター)

大気化学研究会では、平成 18 年度に「大気環境観測衛星検討会」(当初は「対流圏化学衛星検討会」)を立ちあげ、主に対流圏の大気化学・大気質に関する観測を行なう衛星の実現へ向けての議論を行っており、この場を借りて紹介させていただきます。

大気環境衛星の必要性

大気汚染は人間の健康を害し、森林衰退や農作物の減収をもたらす大きな問題である。世界的に見て最近の大気汚染で最も注目を浴びている大気汚染物質は一般に、途上国では粒子状物質(エアロゾル)であり、先進国ではオゾンである。その理由は人間に対する健康影響が、エアロゾルとオゾンがそれぞれの地域において最も人間の健康に対し悪影響を与えていると考えられていることによる。例えば我が国の場合、健康影響の指標である環境基準の不適合率が最も高い大気汚染物質がオゾン(オキシダントの主成分)であり、全国の実に 99%以上の測定局で環境基準が満たされていない。最近アジア大陸からの越境輸送が影響していると思われるオゾン濃度の増加が全国的に見られ、オゾン濃度が 120 ppb を越える光化学スモッグ注意報の発令日数が増えている(環境省, 2007)。例えば昨年(2007 年) 5 月 8 日には、これまで注意報が一度も発令されたことのない大分県、新潟県でオキシダント注意報が発令された。欧米においてもオゾンの環境基準の未達成率が高く、その原因及び対策に対する社会的・行政的関心が高まっている。

オゾンは窒素酸化物(NO_x)と揮発性有機化合物(VOC) (炭化水素・アルデヒドなど)から大気中の光化学反応で生成し、その大気中滞留時間は季節と場所によって異なるが一般に数日以上と比較的長い。従ってオゾンの分布は、 NO_x や VOC の放出と輸送、それらからの化学反応による生成、生成したオゾンの長距離輸送などにより複雑な影響を受ける。同様にエアロゾルの中でも健康に大きな影響を持つ微小粒子は、二酸化硫黄、VOC, オゾンなどから化学反応で生成し、オゾン同様に長距離輸送される。これら大気中の変動の大きい大気汚染物質の変動のメカニズムを解明し、広域にわたってその空間的・時間的変動を把握するには、オゾン・エアロゾル及びその原因物質の流れをほぼリアルタイムに近い時間分解能で監視できる静止衛星観測が最も適している。

大気環境衛星の科学目的

大気環境衛星の科学目的は、端的に言えば、地表付近のオゾン・エアロゾルの分布・変動を理解することであり、そのためその前駆気体の放出源分布、放出された前駆物質の気象現象に伴う輸送プロセス、および輸送される間におこる光化学変化によるオゾン・エアロ

ゾルの生成・消失過程の定量的理解を進めることである。また、その延長として、大気汚染移に関する情報・予報に直接的に役立つことも重要である。

これまで静止衛星による大気観測は気象衛星に限られ、大気汚染物質の観測は、低軌道周回衛星から行われてきた。しかし静止衛星から観測すると、以下のようなメリットがあり、対流圏大気化学の定量的理解を進める上の、ブレイクスルーにつながると期待される。

CO, NO_x, SO₂ など一次大気汚染物質の放出量は、人間活動や生物活動の日変化サイクルによって変化する。さらに、それらの物質からオゾンやエアロゾルが光化学反応で生成・消失する量は、日射強度(太陽高度)によっても変化する。周回衛星では各観測領域を数日から1日に1回、ある地方時で観測できるだけであるが、静止衛星では各地域について1時間程度の間隔で繰り返す24時間連続した観測を行い、これらの日変化を観測できる。

オゾンやエアロゾルは、時々刻々風で輸送されその分布を変えていく。静止衛星は時間だけでなく水平方向にも広い範囲を連続的に観測することを可能にし、そのデータから汚染物質分布の現況把握とそれに基づく予測を可能とする。オゾンやエアロゾルの濃度は、この輸送による変化と光化学的な変化の両方の影響を受けるが、静止衛星観測は両者の分離を可能にし、関与するプロセスの定量的理解を促進し、モデル計算による予測精度の大きな向上につながる。同時に、静止衛星による時々刻々のオゾンやエアロゾルの分布の観測は、それをモデルに同化することで、予測精度を飛躍的に高め、実用的な大気汚染予報を可能にすると期待される。

静止衛星観測では、積分時間を長く取ることで、十分な精度で10km以下の高空間分解能での観測が可能となる。それにより、メソスケール気象現象による影響を含め、都市スケールでのきめ細かな汚染状況の把握や予測に貢献できる。また、空間分解能を高くすることで、雲による妨害を避けられる可能性が3~10倍程度増え、観測頻度の大幅な向上も可能となる。また、24時間連続的な監視を行うことで、火山噴火や山火事など突発的な現象にも対応でき、それらの影響のいち早い把握や予測を可能にする。

大気環境衛星のフィジビリティ研究

大気汚染物質をモニタする静止衛星の実現を目指し、我々は2007年から衛星フィジビリティ研究に着手した。現段階(2007年度末)ではStudy Phase 1 (Task 1: Literature Review, Task2: Establishment of Scientific Requirements)をほぼ終え、Study Phase 2 のSimulations and Sensitivity Studyにおいて感度解析と誤差解析に着手した。

大気環境観測衛星では、まずオゾンとエアロゾルの測定が重要である。エアロゾルには、黄砂など土壌粒子、硫酸エアロゾル、有機エアロゾルなど多様な種類があり、生成過程や環境影響が異なる。また、エアロゾルの気候影響を知るには、光の吸収量や雲粒子になる効率を知る必要がある。そのため、観測によりエアロゾルの光学的厚さのほか、エアロゾル種類や光吸収量、有効半径についての情報を得る必要がある。オゾンとエアロゾルの変動を予測するためには、それらを生成する前駆物質も観測する必要がある。オゾンについ

ては、NO₂ や有機硝酸 (PAN など)、CO、VOC (CH₄、C₂H₆、HCHO など)、エアロゾルについては、二酸化硫黄 (SO₂)、グリオキザール (CHOCHO)、アンモニア (NH₃) などが衛星から測定可能な前駆物質と考えられている。

これらの観測を現実のものとするセンサーとして、可視・紫外・近赤外センサー (UV/VIS/NIR) と赤外型センサー (IR) の2種類が、世界の様々な大気汚染観測衛星計画で提案されている。また、雲を透過して化学物質を24時間観測できるマイクロ波センサー (MW/THz/FIR) の可能性も捨て難い。表1に、これら3センサーの特徴を整理した。

表1 大気物質観測に使用されるセンサーの特徴

	UV/VIS/NIR	IR	MW/THz/FIR
観測可能な分子	O ₃ , SO ₂ , NO ₂ , HCHO, BrO, IO, CHOCHO, CO, CH ₄	O ₃ , NO ₂ , HNO ₃ , N ₂ O ₅ , CO, SO ₂ , NH ₃ , HCHO, PAN, Organic Nitrates, HCN, H ₂ O, CH ₄ , C ₂ H ₆ , CO ₂	O ₃ , CO, HCN, N ₂ O, H ₂ O, CH ₃ CN
物質高度分布	導出は難しい	導出可能	導出可能
観測高度重み	地表面付近 (UV は自由対流圏)	境界層 - 上部対流圏	上部対流圏
エアロゾル	光学的厚み + 吸収性エアロゾル	光学的厚み + エアロゾルのタイプ	感度なし
昼夜観測	昼間のみ	昼夜24時間	昼夜24時間
雲の影響	影響が大きい	影響あり	影響が少ない

これらの波長領域において測定対象となりうる各化学種について、感度解析・誤差解析を行なうために使用している4つの解析ツールについて以下に簡単に説明を行う。

■ FRCCG/JAMSTEC モデル FRCCG/JAMSTEC では、1) 差分吸収法 (DOAS 法) に基づいたスペクトルフィッティング法 (Irie et al., 2008) と、2) モンテカルロ法を用いた三次元放射伝達モデル (MCARaTS; Iwabuchi, 2006) を開発している。現時点では主に地上から測定した太陽散乱光のスペクトルを解析し、微量気体とエアロゾルの高度分布を導出するために利用しているが、地平線すれすれからやってくる太陽散乱光を対象としており、衛星観測よりも複雑なジオメトリーでもその性能は評価・検証されている。

MCARaTS は、Monte Carlo Atmospheric Radiative Transfer Simulator の略語で、大気・海洋・地表面系の三次元放射伝達を扱う多目的モデルである。このモデルでは曇天時の大気地表面における放射エネルギーの空間的・角度的分布を詳細に計算する。太陽放射の他、赤外・マイクロ波の熱放射も扱うことができ、適用可能な波長範囲はおおよそ 0.2-2000 μm である (ホームページ: <http://www.geocities.jp/null2unity/mcarats/>)。

■ SCIATRAN モデル

SCIATRAN は GOME (240-790 nm、天底観測) 及び SCIAMACHY (240-2400 nm、天底・周縁・太陽掩蔽・月掩蔽観測) のような衛星搭載用紫外・可視・近赤外域分光計で観測される輝度スペクトルを速く正確にシミュレーションすることを目的に開発された放射伝達モデルである (Rozanov, et al., 2005)。開発はドイツ・ブレーメン大学のリモートセンシング・環境物理研究所 (IUP/IFE) で行なわれている。

SCIATRAN の適応可能波長範囲は 175.44 nm から 2400 nm で、一部の計算を除き、原則的には任意のセンサジオメトリに対応している。つまり、宇宙、地上ならびに大気中 (航空機など) での太陽光散乱観測に対応が可能である。フォワードモデル計算のプロダクトとしては、放射輝度・強度、荷重関数、エアマスファクター、斜めコラム量、ブロックエアマスファクター (エアマスファクターを高度分解したもの)、フラックス、光学的厚さ (斜め値・鉛直値) がある。また、スペクトルからリトリーバル反転解析を行うことも可能で、微量成分の鉛直高度分布、雲の高度、ならびに接線高度補正が行える。2008 年 2 月現在で最新のバージョンは、2.2 であり、マニュアルが IUP/Bremen の Web サイトにて公開されている。

■ 東京大学 CCSR モデル

東大 CCSR のモデルでは Line-By-Line Radiative Transfer Model (LBLRTM) [Clough et al., 2004] を用いて大気層ごとに光学的厚さ (透過率に変換) の計算を行った上で、東大のコードにより各層の値を加算し、大気上端での透過率を算出している。LBLRTM は、Fast Atmospheric Signature Code (FASCODE) をベースとして開発された大気放射伝達モデルであり、種々のエアロゾルや雲の存在も含めた任意の大気条件下で、大気上端もしくは任意の層厚での大気的光学的厚さや放射輝度、ヤコビアン (ある物質の濃度もしくは温度を各層で単位量変化させた場合の大気上端での輝度温度の変化量のこと) を計算することが可能である。LBLRTM は web 上に公開されており、世界中で最も広く利用されている line-by-line 放射伝達モデルの一つであり比較・検証も継続的に充分に行われている。Tropospheric Emission Spectrometer (TES) (Clough et al., 1995) 等、衛星搭載センサのリトリーバル処理にも利用されている。

■ NICT の MATRAS モデル

MATRAS モデル (Model for Atmospheric Terahertz Radiation Analysis and Simulation) (Baron et al., 2008; Mendrok et al., 2008) は情報通信研究機構 (NICT) で開発を遂行している晴天時/雲存在下の両方に対応した大気放射伝達/リトリーバルコードである。地球気象条件下における計算可能周波数範囲は $0\text{-}3000\text{cm}^{-1}$ 程度である。モデルは a) 晴天時/雲存在下における放射伝達計算、b) 観測測器シミュレーション c) 大気物理量 (分子・雲・測器) のリトリーバル反転解析と誤差解析などの計算が可能である。現在、MATRAS は 1)

種々のプラットフォーム(衛星、航空機、気球、地上)からの分光観測解析とシミュレーション、２)大気放射収支計算、３)惑星大気(火星と金星)放射観測シミュレーション解析研究などに用いている。

まとめ

大気環境研究会の大気環境観測衛星検討会では、その下にフィジビリティ研究ワーキンググループを立ち上げ、どのような衛星観測が最も効果的であるか、サイエンスプランをまとめることを目的に活動を行なっている。まだまだ発展途上であるが、科学的・実目的/要求にたいする議論、誤差解析・感度解析の進め方などについて、活発な議論を行なってきた。今後は、上記で紹介した各ツールを用い、具体的な検討を行なっていく予定である。

図 大気環境衛星のイメージ。左上はの２つのパネルは、赤外および紫外/可視光のスペクトルと観測可能な分子を示す。

