

4. オゾン層のモデリング*

佐々木 徹**

オゾン層の生成理論は最初、チャップマンによって純酸素大気理論として打ち立てられた。その後、水素酸化物や窒素酸化物を加えた理論が登場し、輸送の重要性が指摘されてから、その計算には大きな計算機を用いた数値モデルを必要とするようになった。SST 問題やフロン問題の高まりとともに、モデル研究は、鉛直分布を計算する1次元モデルから緯度分布や季節変化を表現できる2次元モデルへと進み、最近では3次元モデルへと発展しようとしている。

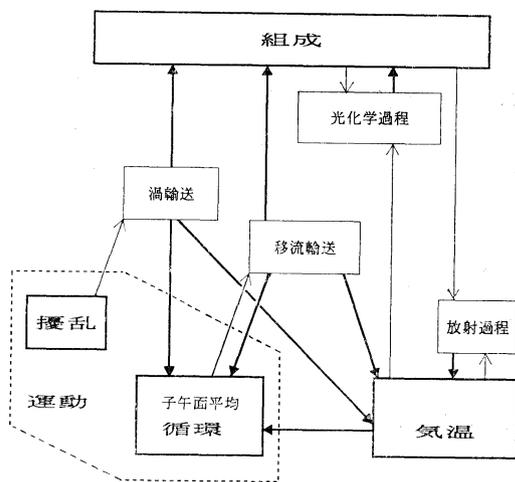
1. モデルの構成

オゾン層の存在する成層圏大気を理解するには、組成・運動・気温という3要素を相互の関連の上で総合的にとらえることが必要である。第1図にみるように、組成は放射過程を通して気温の変化を引き起こし、気温は光化学過程を通じて組成に働きかけると同時に、力学過程を通して運動を誘起する。また一方運動は移流や渦運動を通じて組成や熱の輸送に寄与する。モデルを構成するにはこのことの認識が基本的に必要である。

2次元モデルの場合、組成・熱・運動量それぞれに関する輸送は、子午面平均循環による移流輸送と、擾乱による渦輸送に分離される。渦輸送を与える渦拡散係数などのパラメータは外部から入力してやる必要があるが、他の量は上に述べた関係から全てモデル内部で SELF-CONSISTENT に求めることが原理的に可能である。しかし、オゾンの分布を決める光化学過程の理解を目的とするときには、生成消滅の光化学計算、および組成に関する輸送計算のみを残し、循環と気温は外部から与えるというモデル構成も有効な手段である。こうしたモデルの完成の後に、気温や循環も予測するモデルへと発展させるのが、現実的な戦略となっている。

2. 子午面平均循環と渦輸送

2次元モデルの場合、輸送を決めるのは、子午面平均



第1図 オゾン層モデルの構成図 (2次元モデルの場合)

循環と渦拡散係数である。下部成層圏の子午面循環として水蒸気やオゾンの分布から推定された Brewer-Dobson 循環は、低緯度で上昇し高緯度で下降する各半球1セルの循環という姿をしている。ところが、風の観測値を帯状平均して得られる Euler 平均循環は、対流圏で3セル、冬半球の下部成層圏では2セルの、間接循環を含む形をしている。物質輸送の観点から、Euler 平均循環においては、惑星波運動による低緯度から高緯度への大規模な渦輸送があると考えられる。しかし、最近では物質の輸送について次のような循環の姿が描かれている。

Euler 平均循環における間接循環は、惑星波動の側面を見ているに過ぎない。長寿命の物質にとって、定常惑星波動そのものは平均すればなんの輸送効果ももたないので、物質輸送計算に Euler 平均循環を適用するのは適当でない。物質を運ぶのは、定常惑星波動の効果を除いた時に現れる循環である。この目的にかなうのが、非断熱加熱冷却により駆動されると解釈できる Residual 平均循環で、間接循環は消え、下部成層圏では各半球1セル、また上部成層圏では夏半球から冬半球への循環となる。Euler 平均循環に伴う大きな渦輸送は必要ない。

* Modeling of ozone layer.

** Toru Sasaki, 気象研究所.

物質の輸送を決めるパラメータとして、Residual 平均循環と比較的ちいさな渦拡散係数を使えばよいことがわかったが、寿命が惑星波運動の周期と同程度以下の大気成分に対しては、Chemical Eddy を考慮する必要がある。寿命の短い成分は波動にもまれながらその混合比を変化させるので、波動を平均した場合でも残る輸送効果があるからである。但し、現在のモデルではその扱いは不十分であり、今後の課題の一つである。

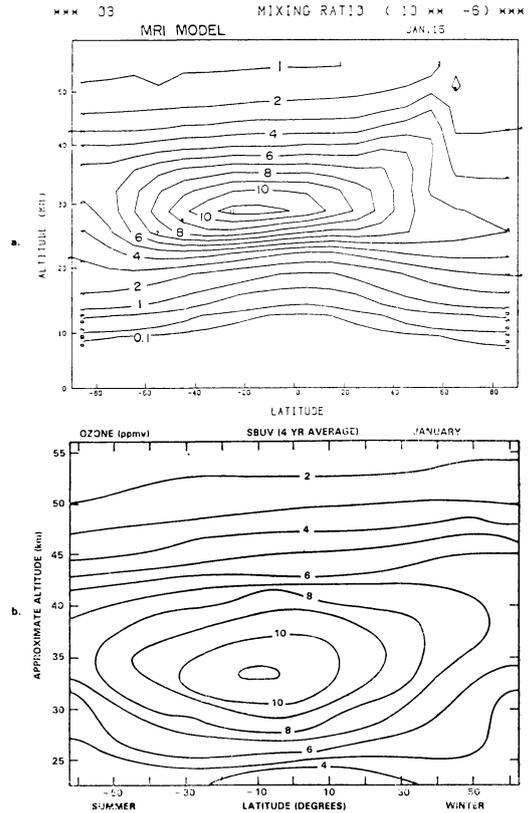
3. モデリング上の諸問題

大気成分の光化学反応を含むモデリングを行う場合、特有の問題がいろいろと生じてくる。2次元モデルであれば、例えば日変化のある解離係数や大気成分密度の日平均値をどう定義するかという問題がある。また、反応のきわめて速い大気成分の混合比計算を如何に安定させるかということもある。ここで、後者の問題を少し説明したい。

オゾンモデルには、通常40種前後の大気成分をモデルに組み込むが、その中には、寿命が数十年以上という安定な成分もあれば、10万分の1秒という活性な成分もある。光化学計算によって混合比の変化を予測して行く場合、一般に時間ステップよりも光化学的寿命が短いと計算不安定を起こす。このような時には、この成分は光化学平衡にあると仮定して求めることができる。実際には、光化学平衡の関係にあるいくつかの成分、例えば、 O_3 、 O 、 $O(^1D)$ を O_x としてまとめ、寿命の長い O_x 全体の混合比を予測し、各成分は光化学平衡の関係から求めるファミリー法という手法がよくとられる。

ところがある大気成分の場合、緯度や高度、季節により、時間ステップよりも寿命が長くなったり短くなったりということが生じる。このような成分に対しては、通常の計算では不安定を起こすし、また光化学平衡を仮定することもできない。そこで寿命が短い場合に限り、変化率を寿命に関するファクターで除して緩和させる手法が使われる。これで計算は安定するが、ある成分についてのみ変化率を小さくすれば、大気成分全体の保存則を破るので、失われた変化分を他の成分で補償するなどの手続きが必要である。

上の手法で、気象研のモデルの場合、24時間の時間ステップでの積分が可能となったが、他のモデルでもインプリント法やギア法などの手法を用いて長時間ステップでの安定した積分に努めている。



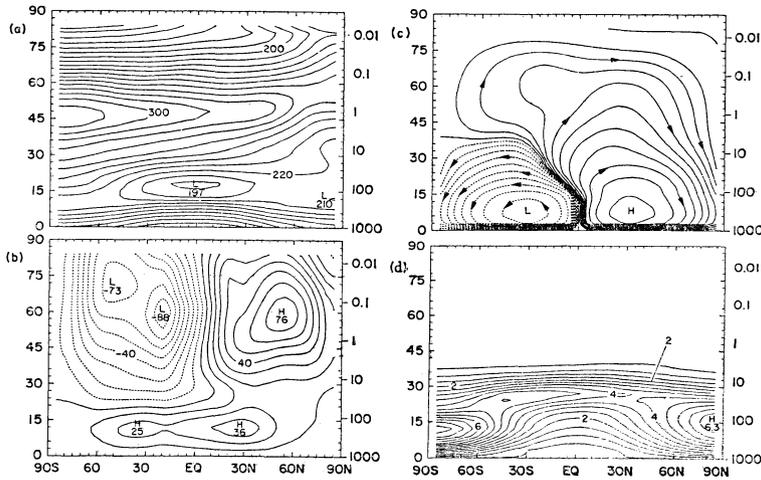
第2図 オゾン混合比の子午面分布

- (a) 気象研究所2次元モデルによる計算値。
 - (b) Nimbus-7 搭載の SBUV による観測値。
- いずれも1月の場合。

4. モデル計算の実際

気象研究所の2次元モデルを紹介する。現バージョンでは、子午面平均循環と気温、及び渦拡散係数を外部から与える方式をとっている。気温は観測値を、循環は放射計算による熱バランスからの推定値で、Residual 平均循環に相当するものを使っている。渦拡散係数は、オゾンやソースガスの分布を再現するようにチューニングされた値を使っている。

この他、光化学計算を行うための基本データとして次のような資料を用いている。太陽フラックスと、酸素分子およびオゾンの吸収断面積については Atmospheric Ozone 1985 (W.M.O., 1986) を用いている。この他の吸収断面積、および反応速度定数は、NASA Panel for Data Evaluation (1987) を使っている。これは、成層圏モデリングに必要なデータを2年毎にまとめているも



第3図 WISCAR モデルによる計算値

(a) 気温 (K), (b) 帯状風 (m/sec), (c) 子午面循環 (流線関数),
(d) オゾン密度 ($\times 10^{12}$ 個/cm³).

ので、各モデルに共通の基礎データを与えている。

第2図はオゾン混合比の子午面分布のモデル計算値と、SBUVによる観測値を示している。成層圏上部でモデル計算値が小さめであるが、全体的な分布の様子や極大値などよく再現されている。ここには示さないが、NO_x や HO_x, ClO_x 等の分布も大体においてよく再現されているといっよい。

次に、気温や循環と大気成分間のフィードバック機構を入れた WISCAR モデル (Hitchman and Brasseur, 1988) の紹介をしておきたい。このモデルでは、準地衡風近似を用いた方程式系を使い、大気成分混合比とともに気温を予測し、帯状風、子午面循環を診断している。渦拡散係数のうち鉛直成分 K_{zz} は重力波の breaking の解から、また水平成分 K_{yy} は対流圏界面に与えたロスビー波の成層圏での伝はんの解から求めている。これらの解は帯状風に依存するので、循環の変化が擾乱の変化としてフィードバックする、より閉じたモデルとなっている。

第3図は、WISCAR モデルによって求められた気温、帯状風、子午面循環およびオゾン分布である。初めに述べた、組成・気温・運動の3要素がほぼ閉じた形として関連しながら求められたわけである。観測値と比較してもよく計算されているといっよいであろう。

5. 今後の課題

現在のオゾンモデルを概観すると、大体においてオゾ

ンその他微量成分の分布や変動を再現しているといっよいが、観測値と有為な差を示すものもまだある。これらの原因としては、まだ反応速度定数や分子の吸収断面積の精度、取扱が不十分なことが考えられる。

オゾンホール再現には、不均一相反応を取り入れることが必須である。一部のモデルでは、その効果をパラメタライズした形で取り込んで南極・北極についてオゾン減少の再現を試みている。ただ不均一相反応の大きさの見積もりはまだ不十分であり、極成層雲の生成とも併せて今後の研究の進展を待つ必要がある。

2次元モデルの場合、移流計算に使う子午面平均循環、渦輸送計算に使う渦拡散係数の扱い方については、最近よく整理されてきたが、必ずしも十分な精度で求められているわけではない。基本的には成層圏大気がオゾンという大気成分を鍵としてどの様に気温・循環を作っているのかという理解を深める中で、モデル内部で解決して行くべきであろう。

オゾン層モデルは、最終的には3次元大循環モデルとの結合という形で発展して行く必要がある。ただ、数多くの反応をそのまま取り込んで現在の計算機の能力では対処しきれない。問題に合わせて光化学スキームを簡略化することや、予め計算した気温・循環場で光化学を動かすオフラインの手法などのアプローチが必要になってくるであろう。

文献

Hitchman, M.J., and G. Brasseur, 1988 : Rossby Wave Activity in a Two-Dimensional Model, Closure for Wave Driving and Meridional Eddy Diffusivity. *J. Geophys. Res.*, **93**, 9405-9417.
 W.M.O., 1986 : Atmospheric Ozone 1985, Assess-

ment of Our Understanding of the Processes Controlling Its Present Distribution and Change, Geneva.

NASA Panel for Data Evaluation, 1987 : Chemical Kinetics and Photochemical Data for Use in Stratospheric Modeling, *JPL* 87-41.

事務局からのお知らせ

「日本応用数学会」設立準備委員会近藤次郎代表から下記の案内がありました。

「日本応用数学会」設立趣意書

(一部省略)

近年のわが国の工業技術の発展は目ざましく、とくに多くの先端技術の分野において他国の追跡を許さぬものがあります。小型コンピュータを始めとする各種情報処理機器は、社会の、そして産業の隅々にまで行きわたって、高度の知的作業を人間に代って受け持つようになってきています。また、スーパーコンピュータの発展と普及とも相俟って、設計、開発、製造の各過程における大規模なシステムの数理的取扱いの重要性が著しく増大してまいりました。しかし、残念ながら、わが国ではそれらの根底をなすソフトウェアを欧米に大きく依存しているが現状であります。このようなソフトウェアをわが国独自で開発し発展させる力をつけることが急務であることはいうまでもありません。そして、ソフトウェア技術の基礎となる最も重要なものは、道具としての数学であり、またそれを使いこなす数理的技術でありましょう。

科学技術計算や数値計画における数理の重要性は言うまでもありません。さらに、先端技術では、技術の壁を打ち破るために、つねに新しい発想とそれを実現させるための「何か」が要求されています。そして、その「何か」として、最近、数学に、とくにこれまでの数学の枠組みを越えた新しい数理的発想に、大きな期待が寄せられています。

このような機運の高まりを受け、私どもはこのたび日本応用数学会 (Japan Society for Industrial and Applied Mathematics, 略称 Japan SIAM) を設立し、活動を開始することにいたしました。

本学会には、シンポジウム・研究会・講習会の開催、会

誌・論文誌の刊行など学会としての標準的な活動を行う他に、常設あるいは特設の研究部会を設けて特に重要な問題について集中的に研究を行い解決にあたる、他学会における問題に対して数理的側面から解決の支援を行う、数学の新しい成果の普及も含めて広い意味での応用数学の教育活動に貢献する、応用志向の数学者を養成する体制の確立を図る、等々多くの仕事が期待されます。

1. ご入会手続きについて

「日本応用数学会発起人就任・入会ご回答」用紙に該当事項をご記入の上、

平成2年1月31日

までに下記宛に返送下さい。また、ご入会いただけます場合には、同封の会員カードに所要事項をご記入の上、併せてご返送下さい。

発起人就任・入会ご回答および入会カード返送先

〒113 東京都文京区弥生 2-4-16

日本学会事務センター「日本応用数学会」
担当

2. 年会費および入会金のご送金について

ご入会いただけます場合には、年会費および入会金を同封の振込用紙にてお振込み下さいますようお願い申し上げます。振込用紙の記載事項に誤りのある場合にはご訂正下さい。また、振込料金は恐縮でございますが振込人の方でご負担下さい。

平成2年度会費 9,000円 (平成2年4月～平成3年3月分)

入会金 2,000円

なお、設立趣意書にありますように本学会は横型の学会ですので、「日本気象学会の会員の方は入会金 (2,000円)」は免除となります