

成層圏プラットフォームによる地球観測構想（第2報） －成層圏変化は如何にしてグローバル効果を及ぼすか－

佐々木保徳^{*1} 小山 登^{*1}

本報告は、成層圏における個々の変化を議論するのではなく、成層圏における変化が全球的に影響を及ぼす過程を概観したものである。成層圏における変化はまず、人為的大気物質が成層圏にも到達し、その一部が大気化学反応を引き起こす結果、残留成分や化学反応成分による大気組成変化として生じる。その結果生じる大気成分変化は、太陽放射との相互作用に由来見られなかった新しい過程をもたらす、これが次に物理的過程における変化を生ぜしめる。そして、このようにして生じる変化は主として対流圏を経由してグローバルに伝搬する。この過程を正しくとらえるためには、成層圏における個々の素過程を観測に基づいてモデル化し、これらの素過程モデルを統合した成層圏モデルを全球モデルに組み込むことが必要である。また、成層圏における変化の観測は、成層圏と最も密接な関係にある対流圏における変化の観測と同時に行なう必要がある。さらに成層圏モデルには人為的活動を考慮した社会科学モデルも組み込むことが必要である。

キーワード：成層圏、対流圏、化学的变化、物理的变化、モデル、全球的效果

Global Environmental Observation Initiative from Stratospheric Platform (2nd report). - How will the effect of change in the Stratosphere be global ? -

Yasunori Sasaki^{*2} Noboru Koyama^{*2}

This report does not discuss each elementary process involved in Stratospheric process in details but review the process through which change in the Stratosphere may affect on the global scale. The change in the Stratosphere will at first occur as change in composition of atmospheric components with chemical reactants and non-reactants of artificial substances, since some species of artificial substances reached to the Stratosphere like gases and aerosols will be involved in some chemical reactions. This change in the component of atmospheric constituents will bring other processes that have not seen before especially in the interaction with solar irradiation, resulting in some physical processes. After all the subsequent change in this process may affect on the global scale through the Troposphere. In order to make this mechanism clear, individual elementary process model must be developed to be integrated into a Stratospheric model, which, in turn, must be plugged in some proper global model to estimate the effect of the change in the Stratosphere on the global variability in environmental condition. The change in the Stratosphere must be observed with that in the Troposphere, since both spheres are so closely correlated with each other. Some socio-scientific models which will properly consider human activities must also be incorporated.

Key Words : Stratosphere, Troposphere, chemical change, physical change, model, global effect

* 1 海洋観測研究部

* 2 Ocean Research Department

1 はじめに

人類の生産活動の結果排出されるフロンガス等により、成層圏でオゾン層が消失し、地上に到達する紫外線の増大が皮膚癌の増加や視覚障害をもたらす恐れが指摘されているが、これはオゾンホールという言葉とともに余りにも有名で、既に万人の知るところである。

しかし、これはほんの一例に過ぎず、成層圏における変化（オゾンのように消滅したり再生したりして、一方向のみへ進行するというものではない場合は“変動”という用語が良いかも知れない）で危惧されているものは他にも沢山ある。そして、それらの成層圏における物理的、および化学的变化の原因の大部分は、成層圏構成成分の化学的变化によるもので、それが単に化学的变化のみならず物理的变化をも引き起こしている。

この大気系を構成する圏の一つである成層圏における変化の影響は、上述の紫外線の例に限らず、単に成層圏だけでなく地球環境状態の創出に与かる他の系、例えば、大気系（ここでは特に対流圏）は無論のこと、海洋系、雪氷系、陸域系、（人類も含めた）生物系などにも影響を及ぼす。したがって、成層圏における変化が地球環境状態に対して及ぼす影響を同時に考えなければならない。このように、地球環境科学を構成する各分野を統合してシステム科学的にとらえなければならない（要するに、統合した全球モデルにおいて、成層圏というこれまでになかった違う切り口から見る、ということである）。

また、成層圏における変化（成層圏における従来の変化は回復可能な、許容範囲内にあったはずで、今日の変化は明らかに人為的影響によるものであるとすれば、それを強意の表現を用いて表現するとき、やはり“破壊”というべきであろう）は、こうしている今現在も進んでおり、成層圏について知る必要があるのはまさに今である。地球科学においてしばしば言われるように、20年後には正確な予測モデルが完成するであろう、というのでは遅すぎる。今現在明らかになっていることをまとめて、政策担当者を始めとして多くの人々に伝えることが必要なのである。

そこで、本報告では、成層圏における個々の化学的、物理的变化の過程の観測や研究に関する議論に入る前に、ともすれば“木を見て森を見ない”研究者がしばしば陥りやすい、“何故成層圏の観測や研究が急がれているのか”という基本的課題を総観的に議論することとする。これは、研究者が政策、教育、産業、ジャーナリズムなどの関係分野との理解を十分に図るうえで最も基本的なことである。なお、成層圏において生じているとされる無数の化学的反応過程や物理的变化過程については世界中の科学者が取り組んでおり、成書も既に相当数出ている。

2 成層圏変化の影響

2.1 成層圏における変化とは何か？

成層圏における変化の影響は如何にしてグローバルに及ぶか？

成層圏における変化には、まだわかっていないものが

多いが、現在わかりつつある範囲で非常に粗っぽく言えば、成層圏の影響の根源は成層圏における大気化学成分変化であると言える。

図1は、一般的な大気構造を示したものである。図1に示すように、成層圏ではその中間層に温度の極大値が

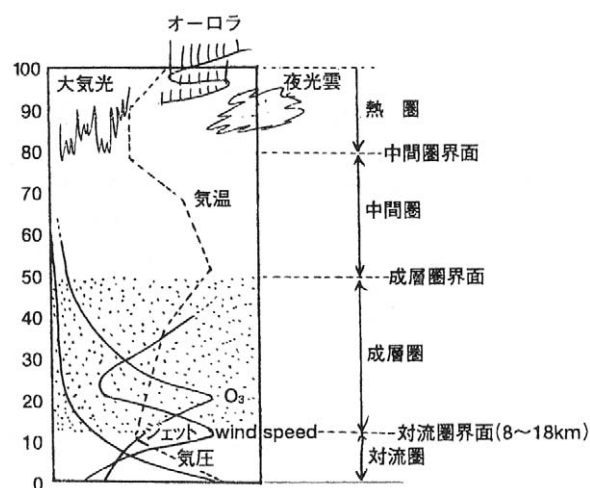


図1 標準大気
Fig.1 Model atmosphere

存在する。これが成層圏の最も際立った特徴であり、このように温度の極大が存在するということは太陽放射に対する成層圏大気物質に強い吸収効果を持つものが存在するということである。このような大気物質が、これから述べる主として人為的に大気中に放出された物質により変質作用を受け、これが反応に与かることなく残存している成分とともに、特に太陽放射との相互作用に従来みられなかった変化を生ぜしめる結果、その影響がグローバルに及ぶことが危惧されるということである。これを具体的に見ると以下のとおりである。

図2は、この成層圏における変化がグローバルな地球環境に対して影響を及ぼす過程を推定のもとに最も単純化して示したものである。図2に示すように、成層圏における変化をもたら

す根本的原因是、人為的に大気中に排出されたガス類やエアロゾル類である。これらの一部は種々の化学反応を同時に引起し、反応に与かることなく残存する成分とともに成層圏大気成分バランスに変化をもたらす。そして、成層圏に存在したガス類はオゾンなどを除けば2原子以下の原子からなる単純気体分子が多いため、太陽放射に対する吸収効果はあまり大きくはなかったが、オゾンが減少することにより吸収効果が一層低下することが危惧される。ただし、成層圏に到達した二酸化炭素やメタンなどに代表される3原子以上の気体分子で反応に与かることなく残存しているものの吸収効果による温暖化や、エアロゾル粒子などが増えることにより成層圏における散乱効果が大きくなることなどにより、多少の相殺効果はあるものと思われる。そして、成層圏における正味の吸収効果の低下は成層圏の気温低下を招き、成層圏

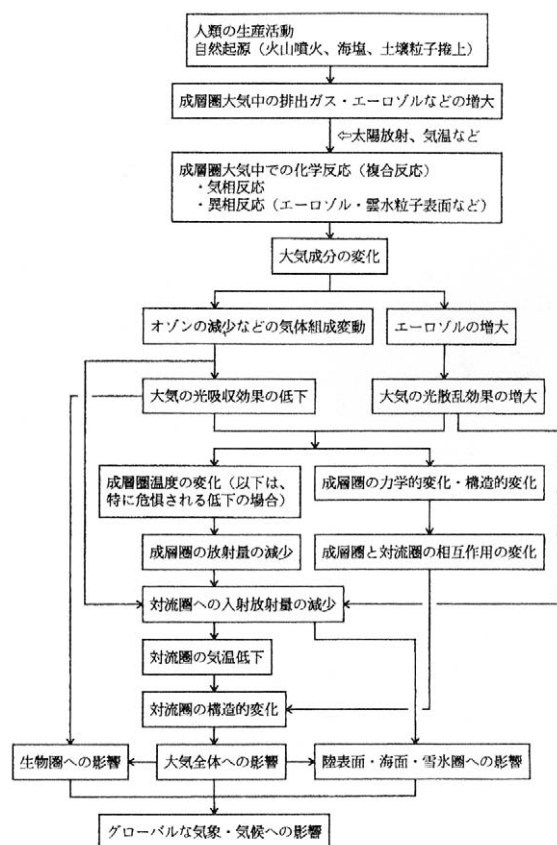


図2 成層圏変化がグローバルな気象、気候に影響を及ぼすと考えられる過程の例

Fig.2 An example of estimated process through which the change in the Stratosphere may affect on the global weather and climate.

から対流圏上層部への輻射エネルギーも低下し、結果として成層圏における気温低下をも引き起こす可能性が危惧される。仮に、成層圏において気温低下が生じると、対流圏においても成層圏と同様の化学的反応に影響が及ぶほか、対流圏特有の種々のダイナミクスにも変化が生じる恐れがある。その結果、ダイナミクスが活発で大規模な対流圏の変動を通じてグローバルな気象や気候に影響が及ぶと考えられる。また、このような成層圏や対流圏における成分変化がもたらす太陽放射に対する吸収や散乱効果の変化は、地表の陸域圏、雪氷圏、生物圏などに到達する太陽放射成分にも変化をもたらす、これらの各圏における定常的変動にも変化をもたらすことが危惧される。

2.2 成層圏と対流圏の比較、及び両圏の関係

2.2.1 成層圏と対流圏の比較

表1は、成層圏と対流圏の比較をしたものである。この他にも類似点や相違点はあるが、主なものだけ挙げている。気圧、気温などの基本的気象要素は除いてある。

ここで、相違点として特に注意すべき重要なことは、大気中における物質の拡散過程である。

鉛直方向の物質拡散は、対流圏では渦動拡散が支配的

あるが、成層圏では分子拡散が中心となることである。通常、渦動拡散速度は分子拡散速度に比べて103～104の大きさを持つとされる。したがって、人為的に対流圏に放出されたガス類などは鉛直方向にも直ちに全対流圏にわたって拡散するが、対流圏界面を通して成層圏に入ってきたガス類などが成層圏の上部にまで達するには相当の時間を要するというのである。実際、現在オゾンホールを生じさせているフロンガスは1970年代に大気中に放出されたものが主で、1970年代よりもさらに大量に使用、放出された1980年代のフロンガスの大部分は今後到達するという予測さえあるほどである。

また、対流圏の平均気温は成層圏よりもやや高いが、化学反応ポテンシャルは絶対温度の指数関数であるため、同じ化学反応であっても対流圏の方が活発なはずで、これに活発な鉛直対流による攪拌効果などが加わる。ただし、対流圏には鉛直対流が存在することで、反応物質の供給過程や反応生成の除去過程はその分だけ複雑で、また、降雨が存在し、雲水、水蒸気も多いことがさらに複雑にしている。なお、雲水やエアロゾル粒子などの表面で進行する異相反応などについても、雲水やエアロゾル粒子分布密度には両圏で違いがあることから何らかの差異があることは十分考えられる。

表1 成層圏と対流圏の比較

Tab.1 Comparison of Stratosphere and Troposphere.

	対 流 圏	成 層 圏
相違点	①鉛直対流が強い。 ・断熱冷却効果により降雨、降雪現象が生じる。 ②鉛直方向の物質拡散は、渦動拡散が支配的なため、拡散速度が大きい。	①鉛直対流が非常に弱い。 ・断熱冷却効果が弱く、降雨、降雪現象が生じない。 ②鉛直方向の物質拡散は、主に分子拡散によるため、拡散に時間を要する。
類似点	①水平方向には、ともに気流が存在する。 ②大気成分は、濃度は異なるが物質的にはほぼ同じであり、大気中における化学反応の種類もほぼ同じである。(ただし、対流圏の方が温度が高いため化学反応ポテンシャルが高く、また化学反応物質の供給や反応生成物の除去なども活発である。)	

2.2.2 成層圏と対流圏の関係

成層圏と対流圏の関係を示したものが図3である。図3に示すように、両者は接しており、成層圏は対流圏の上部の位置している。そして、地球上におけるほとんどの変動現象の源となるエネルギーのうちの大部分を供給する太陽放射エネルギーは成層圏を通して入ってくる。この過程で、紫外線等の生命にとって有害な放射はかなりの部分が吸収される。

一方、人為的に大気中に放出されたガス、水蒸気、エアロゾル等は地表から対流圏に拡散し、そののち成層圏に運ばれる。したがって、成層圏に流入する物質はすべて対流圏から流入する。無論、対流圏や地表からの放射も同様である。

このように、対流圏と成層圏との圏界面である対流圏界面では、放射エネルギーや、気体、エアロゾルなどの化学反応物質および化学反応生成物質などの物質の交換

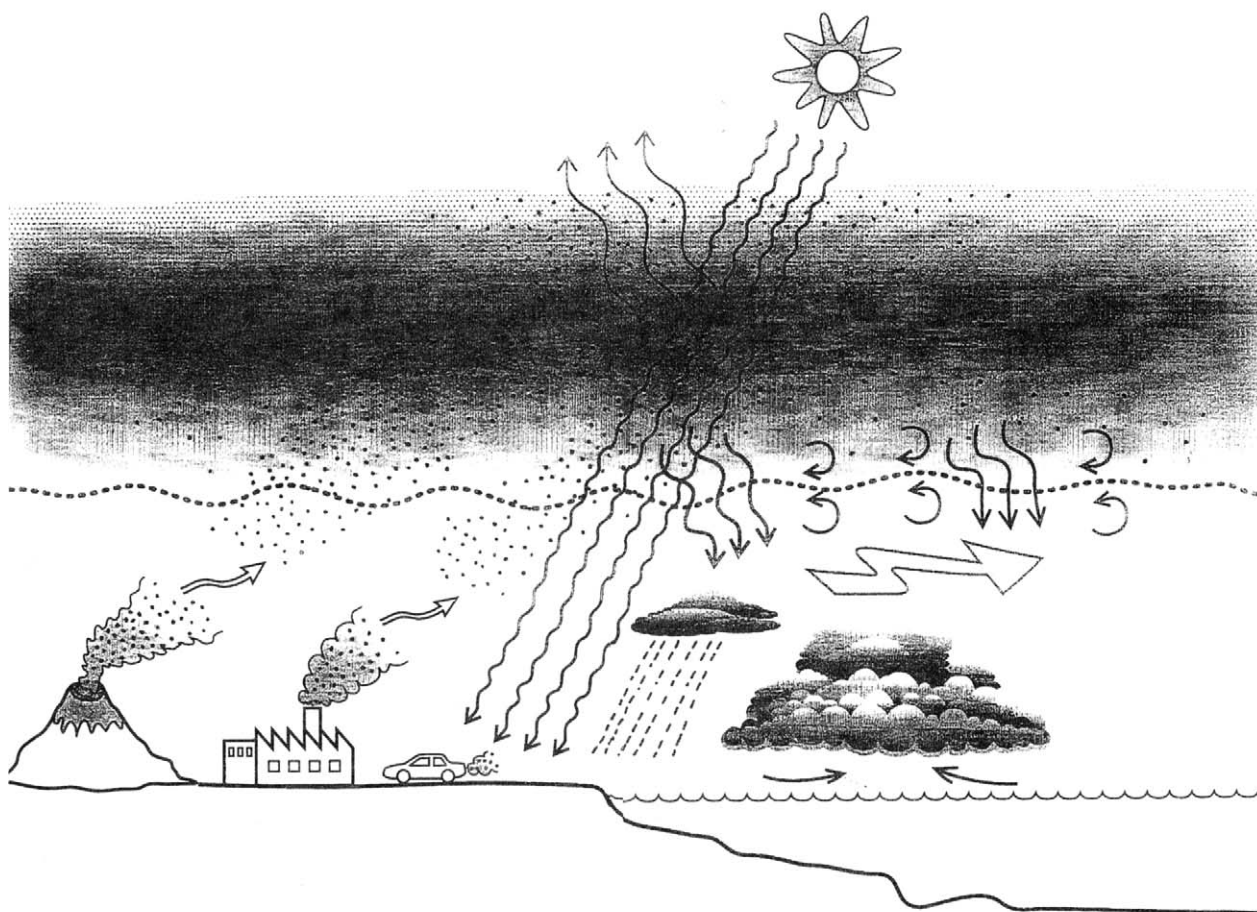


図3 成層圏と対流圏との関係の模式図
Fig.3 Schematic sketch of relationship of Stratosphere and Troposphere.

が行われるとともに、運動量の交換も行われている。その結果、成層圏における変化は対流圏を経由してグローバルに伝えられることになる。そういう点ではやはり成層圏は対流圏と最も直接的な関係にあると言える。

3 成層圏変化のグローバル効果を調べるには何が必要か？

3.1 素過程現象の観測

成層圏では、化学反応を始め多くの化学的および物理的現象が実際に進行しつつあり、それらを観測することが必要である。特に成層圏における化学反応は気相反応、異相反応ともに複合反応で同時並行的に多くの反応が進行するため、それらを可能な限り同時観測する必要がある。

また、エアロゾル粒子や雲水粒子表面を反応場として進む異相反応の解明には、これらの粒子の詳細な観測、測定が必要である。しかし、雲水粒子は全体が水で構成されており、また、エアロゾル粒子は固体もしくは液体が周囲を液体で取り囲まれたものであって、いずれも液

体成分が中心であり、サンプリングすれば変質するため、観測、測定が難しい。

さらに、エアロゾル粒子は異相反応の場を与えるのみならず、大気中を伝搬する放射に対しては吸収効果と散乱効果を持つ。そのため、光学的特性も明らかにされなければならないが、これらの粒子の代表的光学的特性である屈折率を測定するにあたっては、通常の屈折率ではなく複素屈折率として測定されなければならない。しかし、採集すれば変質するため、正しく測定することがほとんど不可能に近いこともあり、エアロゾルの観測、測定は成層圏観測における最も困難な課題の一つであると言えるであろう。

その他、成層圏における化学的及び物理的变化とほとんど同様の変化は対流圏においても進行している。そして、両圏は相互に影響を及ぼし合いながら進行しているため、成層圏だけを観測することは意味が弱い。やはり、対流圏と成層圏間で、エネルギー、物質、運動量など種々の収支をとりながら、相互作用としてとらえた観測を行う必要がある。

3.2 成層圏変動モデルの開発、および 全球モデルへの統合

上述の個々の素過程変化をモデル化して素過程変動モデルの開発を進める必要がある。それは、単に多くの観測結果を並べて変動を眺めるだけでは、個々の変動間の相関の有無や相関の大きさが定量的に明らかにならないからであり、さらには、未確認変動などの発見にもつながらないからである。

そして次に、観測した個々の素過程現象から個々の素過程モデルを開発し、これを統合して成層圏変動モデルを開発することが必要である。例えばそれらは、物理過程に関係するものでは大気モデル、大気力学モデル、気象モデル、放射伝達モデル、熱・運動量交換・伝達モデル、化学過程に関係するものでは大気成分モデル、大気物質移流・拡散モデル、化学反応モデル、反応条件モデルなどで、これらはほんの一部に過ぎない。そして、これらの素過程モデルを統合した成層圏変動モデルを適当な全球モデルに組み込むことにより、成層圏における如何なる変動が如何なるグローバル効果を及ぼすかを定性的、および定量的に推定することが出来るはずである。

ただし、成層圏変動モデルには、経済成長モデル、生産モデル、環境政策モデル、国際人口動態モデルなどを始めとする多くの人為的活動を反映させた社会科学モデルも必要であることは言うまでもない。

4 まとめ

以上の議論をまとめると、成層圏における変化がグローバルに及ぼす効果を明らかにするために必要なことは以下のようにまとめられるであろう。

- (1)成層圏における変化の源である大気の化学的变化を精密に観測し、モデル化すること。
- (2)その結果生じる物理的变化をモデル化すること。
- (3)成層圏と対流圏との相互作用をモデル化すること。
- (4)大気物質の供給・除去過程をモデル化すること。
- (5)個々の素過程モデルを統合した成層圏変動モデルを開発すること。また、このモデルは、成層圏変動が全球的に及ぼす効果の推定を可能とするように、適当な全球変動モデルに統合可能なモデルであること。
- (6)成層圏モデルには人為的影響を評価するための社会科学モデルも必要である。

5 おわりに

「はじめに」で述べたように、現在すでに多くの大気科学者が成層圏を始めとする大気について種々の角度から観測、研究を進めている。しかし、それら個々の研究は確かにいずれも重要な研究であるが、内容にこだわるあまりに究極的な目標を見失ってはならない。そして、目標は常に全球的影響を及ぼす過程の解明であることを忘れてはならない。さらに、このような地球環境学的問題は緊急の課題であって、本来ならば今しかるべき指針を与えるべきものであることも忘れてはならない。残念ながら、わが国ではこの分野の研究は始まったばかりであり、蓄積もなければ人材も不測している。しかし、この分野の科学が成果を上げて、成層圏が全球的に及ぼす影響の推定という大命題に対していささかなりとも指針を与えるまでになるためには、最早純粋理学的研究としての環境学から脱皮してシステム科学とならなければならぬことも銘記すべきである。

参考文献

- 1) 磯野謙治他、文部省特定研究「人間の生存にかかわる自然環境に関する研究」成果報告書「大気中のエアロゾルの気象学的挙動に関する研究」、昭和52年3月。
- 2) 科学技術庁、海洋科学技術センター、北極圏総合研究シンポジウム論文集、平成6年7月
- 3) Proceedings of the Tsukuba International Workshop on Stratospheric Change and Its Role in Climate and on the ATMOS-C1 Satellite Mission, Meteorological Research Institute, etc, October 20-22, 1997, Tsukuba, Japan
- 4) 岩坂泰信、オゾンホールー南極から眺めた地球の大気環境一、裳華房、1997年4月（第4版）
- 5) 廣田勇、気象の教室I、グローバル気象学、東京大学出版会、1997年4月（第3刷）
- 6) 環境庁地球環境部監修、オゾン層破壊ー紫外線による健康影響、植物・生態系への影響ー中央出版、平成7年9月
- 7) 気象庁編、IPCC第2次報告書、地球温暖化の実態と見通し、大蔵省印刷局、平成8年10月
- 8) 宇宙からの地球大気観測、地球環境観測委員会成層圏・対流圏科学サイエンスチーム、1996年3月

（原稿受理：1999年8月26日）

