大気中の汚染物質による化学反応と気候変動の相互作用を探る

地球温暖化が成層圏オゾンの対流圏への降下を促進しさらなる温暖化を招く可能性が示唆された

これまで地球温暖化は、二酸化炭素やメタンのように寿命の長いガスの影響のみが重要視されてきた。だが最近は、オゾンや硫酸エアロゾルなど大気中の化学反応によって生成する物質と温暖化などの気候変動の相互フィードバック、すなわち「化学·気候相互作用」について大きな関心が持たれている。大気組成変動予測研究領域では、化学との相互作用も考慮に入れたモデルを用い、対流圏オゾン分布と温暖化の関係の将来予測を行った。

取材協力：
秋元 肇 領域長
地球フロンティア研究システム
大気組成変動予測研究領域

取材協力：
須藤 健悟 研究員
地球フロンティア研究システム
大気組成変動予測研究領域

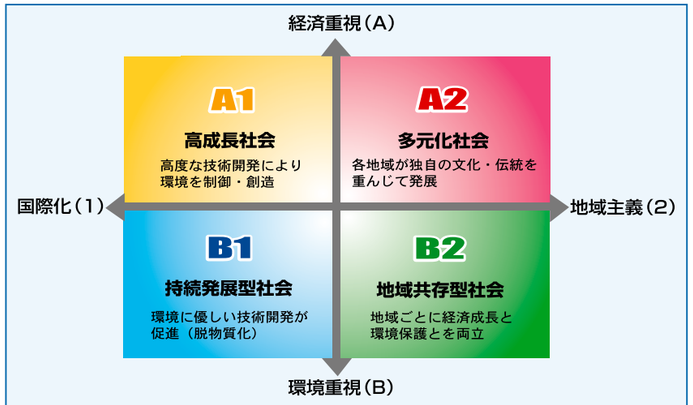
生物を守る成層圏オゾンと環境を悪化させる対流圏オゾン

オゾンは酸素原子3個からなる気体（O_3）である。特に成層圏が存在する高度約25ｋｍを中心に地球を薄く取り巻くように分布している。「オゾン層」と呼ばれているのはこの成層圏オゾンの分布のことだ。成層圏では太陽からの強い紫外線によって大気中の酸素（O_2）を分解し、そこでできた酸素原子（O）と酸素分子（O_2）からオゾン（O_3）が作られる。このように成層圏のオゾンは自然界のメカニズムによってもともと存在していたもので、大気の循環によってその一部が対流圏に降下することがある。またオゾンは光を吸収して分解し、酸素原子と酸素分子に戻る反応が起る。このときに地球の生物に有害な紫外線を吸収し、生物の生存に適する環境にしている。成層圏オゾンは人間を含む地球上の生物にとって、非常に重要な存在なのである。

それに対し、地上から平均11kmの厚さを持つ大気の層である対流圏では、主に自動車や工場等から排出される二酸化窒素（NO_2）が太陽光により酸素原子と一酸化窒素（NO）分子に分解されることでオゾンが形成される。対流圏のオゾンは光化学スモッグの主な原因であり、生物にとっても有害な化学汚染物質である。

さらに、対流圏のオゾンは地球の温暖化を進める「温室効果ガス」の一種でもある。世界の科学者や環境問題の専門家が集って地球温暖化の研究や温暖化防止対策について検討している「気候変動に関する政府間パネル」（IPCC）は、2001年に出された第3次報告書で、対流圏オゾンを二酸化炭素（CO_2）、メタン（CH_4）に次ぐ第3の温室効果ガスとしている。このように対流圏オゾンは地球環境にマイナスの影響を及ぼすと考えられ、特に温暖化·気候変動との関わりが注目されている。

対流圏のオゾンは大気汚染の化学反応によってできるため、今後予想される東アジアの工業化や人口増によって、対流圏オゾンが大幅に増加することが考えられる。さらに現在、地球は温暖化傾向にあるが、温暖化による大気中の水蒸気や気温変化は、対流圏のオゾンを始めとする大気中の化学反応にどのような影響を及ぼすのだろうか。秋元領域長や須藤研究員らは、その将来予測をシミュレーションによって行なうことにした。



（図1）IPCCの世界発展シナリオ·排出シナリオ。「経済重視」または「環境重視」、「国際化」または「地域主義」のどちらを志向するかによって、発展の中味も温室効果ガスの排出の程度も異なってくる。

温暖化の進展に従って対流圏上層のオゾンが増加

対流圏オゾンのような温室効果ガス増加にともない、気候はどのように変動するのか、現在そのシミュレーションに使われているのが化学·気候モデル“CHASER”である。“CHASER”は地球フロンティア研究システム、東京大学気候システム研究センター、国立環境研究所の三者が共同で開発したもので、対流圏の化学過程と、その気候への影響を全地球規模で計算することができる。

この実験モデルを使い、IPCCから提案されている排出シナリオの一つであるA2（多元化社会）シナリオに従って、対流圏でのオゾンの増加を CHASERを用いてスーパーコンピュータで計算した。ここで採用したA2は2100年までにもっとも激しいCO_2増加を予想しており、シミュレーションにその影響が顕著に現れ、温暖化の影響を評価しやすいシナリオである。

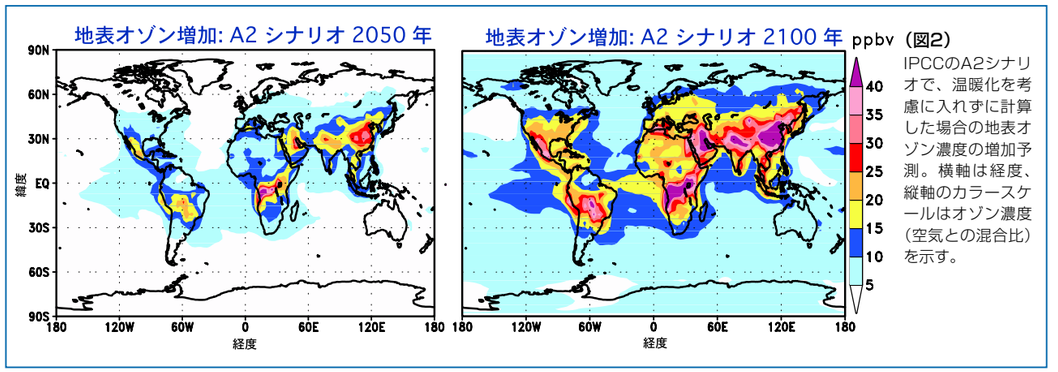
A2シナリオをもとに、まず温暖化を考慮に入れず、窒素酸化物や一酸化炭素など対流圏オゾン生成の元となるガス（オゾン前駆気体）の放出のみを増加させて計算すると、東アジアを中心とした領域で地表のオゾンが大幅に増加する（図2）。東アジア域では現在に比べ2050年に最大で50%、2100年に最大で100%の増加が予測される。もちろんこれはあくまでもシナリオに基づいた計算ではあるが、なんら対策をとらないままだと地球上は生物の生存に過酷な環境になっていくことがわかる。

最近の実験から明らかになったのは、将来の地球温暖化の影響を考慮に入れると、さらに大きく状況が変わってくることだ。温暖化を考慮に入れるか入れないかで、オゾンの増加にかなりの差が出る（図3）。

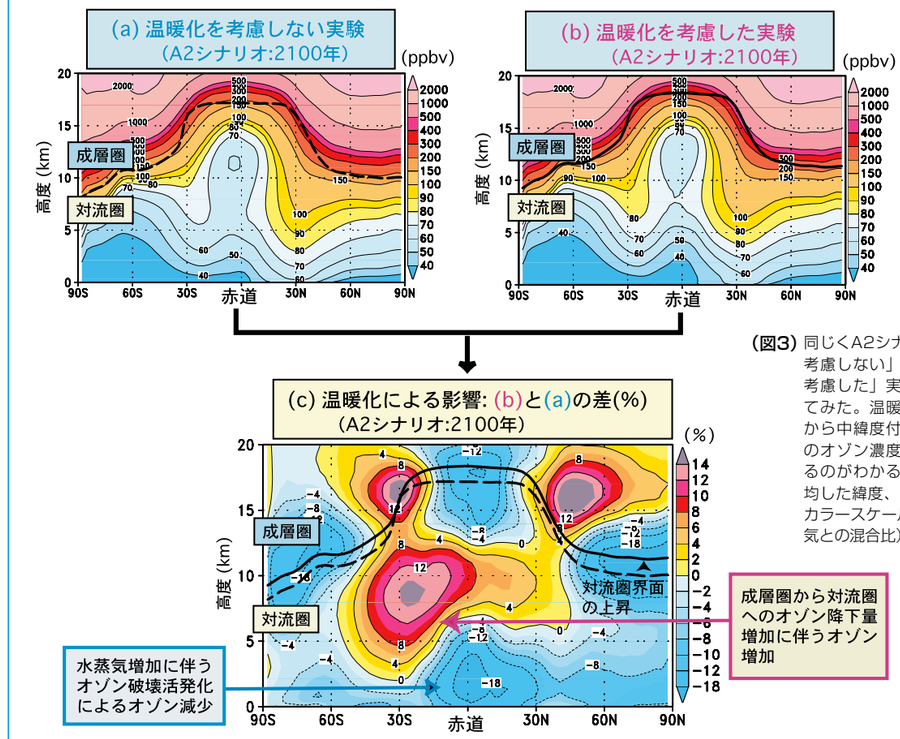
温暖化を考慮に入れると、対流圏下層では温暖化によって水蒸気が増加する。水蒸気はオゾンと化学反応を起こしてオゾンを破壊する効果があるため、対流圏下層ではオゾンは減少する。ただし、これは温暖化を考慮に入れた場合と比較しての減少であって、温暖化すれば現状よりもオゾンが減るというわけではなく、水蒸気増加によってオゾン増加の程度が若干緩和されるということである。

これに対して、温暖化により対流圏上層では中緯度の広範囲にわたってオゾンが大幅に増加する。ここでの温暖化によるオゾン増加は、温暖化を考慮に入れずに予測した増加量のさらに20～40%増となる。

なぜ温暖化によってこのような違いが生まれるのだろうか。このモデル実験では、温暖化が進むと成層圏の「成



（図2）IPCCのA2シナリオで、温暖化を考慮に入れずに計算した場合の地表オゾン濃度の増加予測。横軸は経度、縦軸のカラースケールはオゾン濃度（空気との混合比）を示す。



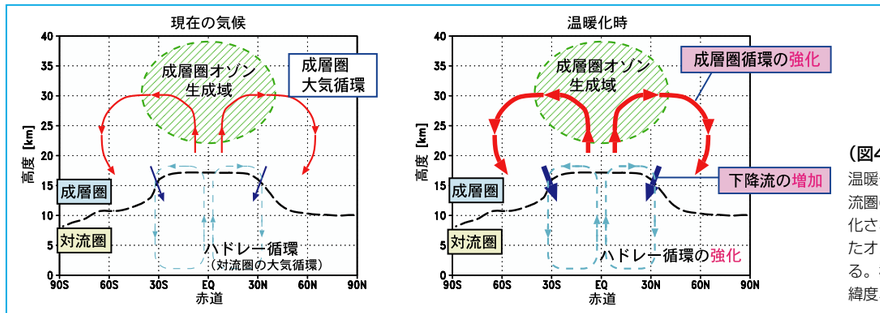
(図3) 同じくA2シナリオで「温暖化を考慮しない」実験と「温暖化を考慮した」実験を行って比較してみた。温暖化により赤道付近から中緯度付近で対流圏上層部のオゾン濃度が大幅に増えているのがわかる。横軸は東西に平均した緯度、縦軸は高度 (km)、カラースケールはオゾン濃度 (空気との混合比) を示す。

層圏大気循環」と対流圏の「ハドレー循環」が強化されると予測されている。このように成層圏では成層圏大気循環が強まって、赤道域から亜熱帯下部成層圏へ運ばれるオゾン量が増え、さらに対流圏のハドレー循環の下降流の増加にリレーされて、成層圏から対流圏へオゾンがどんどん流入することになる (図4)。このため、対流圏下層では水蒸気の増加によってオゾンが減少しているのに、上層では成層圏から降りてきたオゾンによって逆にオゾンは増加する。実験では2100年までに83%のオゾン降下量の増加が計算された(図5)。

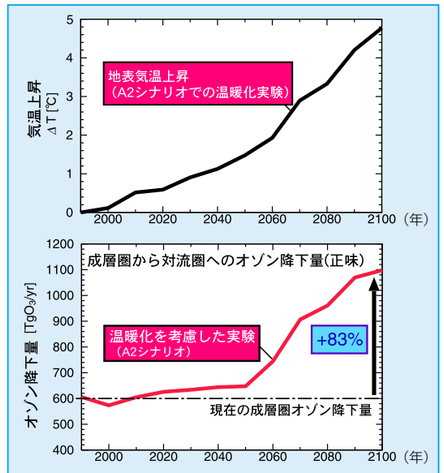
上部対流圏のオゾンの増加は強い温室効果を持ち、地表面の温度の上昇に顕著な影響を与えるため (図6)、さらなる温暖化を招く恐れがある。温暖化が対流圏上層のオゾン増加を促進し、それがさらに温暖化を進めるという悪循環をもたらす可能性があることを、このモデル実験は示唆しているのである。

化学・気候相互作用モデルによって精度の高い将来予測が可能に

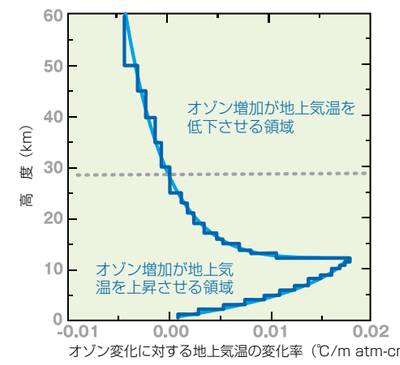
この実験に使われた化学·気候モデル“CHASER”は、従来の気候モデルに光



(図4) 温暖化によって成層圏と対流圏の両方で大気循環が強化され、成層圏で生成されたオゾンが対流圏に流入する。横軸は東西に平均した緯度、縦軸は高度 (km)。



(図5) 上図はA2シナリオを用いて全球平均地表気温が時間の経過にしたがってどれだけ上昇するかを計算したもの。下図はその際に成層圏から対流圏へのオゾン降下量がどのように変化するかを示したものである。



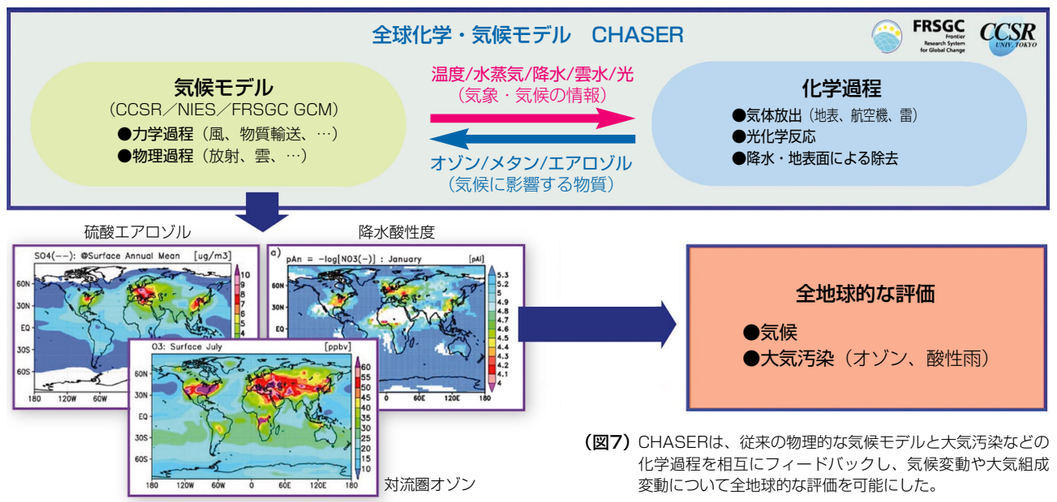
(図6) 高度10km付近の上部対流圏のオゾン増加が、地上気温を最も上昇させる。ジグザクの線はモデル実験から導き出された値。それを滑らかにつなげると、地上気温の変化率推移がよりわかりやすくなる。

化学反応を組み込んだもので、風や雲などの物理的現象だけでなく、化学的現象を計算に入れたものである。すなわち窒素酸化物 (NOx)、一酸化炭素 (CO)、二酸化硫黄 (SO_2) などの汚染前駆物質の放出や、それが大気中を運ばれ、化学反応を起こし、降水によって除去される過程などを計算し、オゾンや硫酸エアロゾルなどの生成·分布を全地球的にシミュレートすることができる (図7)。従来は気候変動に関して、物理現象だけで議論を行ってきたが、そこに化学現象を組み込むことで、お互いのフィードバックが可能になる。これが「化学·気候相互作用」であり、大気汚染と気候変動がカップリング (結合)したともいえる。

対流圏オゾンや硫酸エアロゾルの問題は、気候変動に少なからぬ影響を与え、逆に温暖化が進むことで大気汚染がさらにひどくなる可能性がある。今回のモデル実験はオゾンに焦点を当て、そのメカニズムのひとつを提示することができた。化学·気候相互作用を解明していこうという流れの中でもきわめて先駆的なものである。

シナリオに基づいた実験や計算は一つの仮説であり、必ずしも現実がその通りに推移することを示すものではないが、地球環境の今後に対する一種の警鐘として機能する。かつて成層圏オゾンの破壊についても、実験室的研究から生みだされた仮説をもとに研究者が警鐘を鳴らし、オゾン保護条約の締結など国際的な取り組みがなされた。そののちに南極上空でオゾンホールが発見され、仮説が裏付けられることになったのである。

万が一にも今回のシミュレーション結果が現実化されることがないよう、この結果を受けてさまざまな温暖化防止についての国際的な取り組みや施策がなされることが期待される。



(図7) CHASERは、従来の物理的な気候モデルと大気汚染などの化学過程を相互にフィードバックし、気候変動や大気組成変動について全地球的な評価を可能にした。

※CCSR：東京大学気候システム研究センター　NIES ：独立行政法人国立環境研究所　FRSGC：地球フロンティア研究システム