

論文の内容の要旨

論文題目 中層大気に於けるオゾン減少の役割

氏名 永島達也

中層大気は力学過程・放射過程・化学過程が密接に関連しあった結合系として捉える事が可能である。その結合系の中で、成層圏オゾンが果たす役割は非常に大きな物である事が知られている。何故なら、オゾンは太陽紫外線の吸収、遠赤外線放射の放射吸収を通して、中層大気の非断熱的構造の形成に大きく影響を及ぼすからである。しかしながら近年、その成層圏オゾンに顕著な減少傾向の見られることが、各種の観測により明らかになってきており、その減少と人間活動に伴って大気中に大量排出されている幾つかの化学物質の関連が取り沙汰されるようになってきている。このような成層圏オゾンの変化は、中層大気の結合系を通じて、中層大気の温度場、循環場に影響を与え、引いては、対流圏にまで影響を及ぼす可能性も指摘され始めている。実際、成層圏の幾つかの領域では顕著な気温の低下傾向が報告されているが、そのような変動の原因が成層圏オゾンの減少と言えるか否かについては、意見が分かれており、特に北半球高緯度下部成層圏の低温化については、研究の進展が待たれている状況と言える。一方、このような成層圏気温の低下傾向は、今後更にオゾン減少が進行してしまう事を予期させるが、それがどの程度の規模になるかは、現在想定されている化学物質の排出規制等を考慮しながら、適当な数値モデルを用いて検討していく必要がある。そこで、本研究では大気大循環モデルを基礎として、その中に中層大気の化学過程を組み込み、上述の結合系を陽に表現したモデル(化学大循環モデル)を開発し、これらの問題を考察する事にした。

開発した化学大循環モデルを用いて、1990年代の化学物質量を想定した実験を行った所、同時期に観測されたオゾン全量の季節進行の様子を比較的よく再現する事が出来た(図1)。南極オゾンホールや北半球高緯度のオゾン減少も、モデルに組み込んだ化学過程の作用により計算可能である事が確認されたため、このモデルを用いて、(1)成層圏気温低下傾向の要因の検証、及び(2)今後のオゾン層予測実験、の2つの問題について考察を進める事とした。

(1)に対しては、1986年から2000年までの各種化学物質と、海面水温(SST)の変動を様々

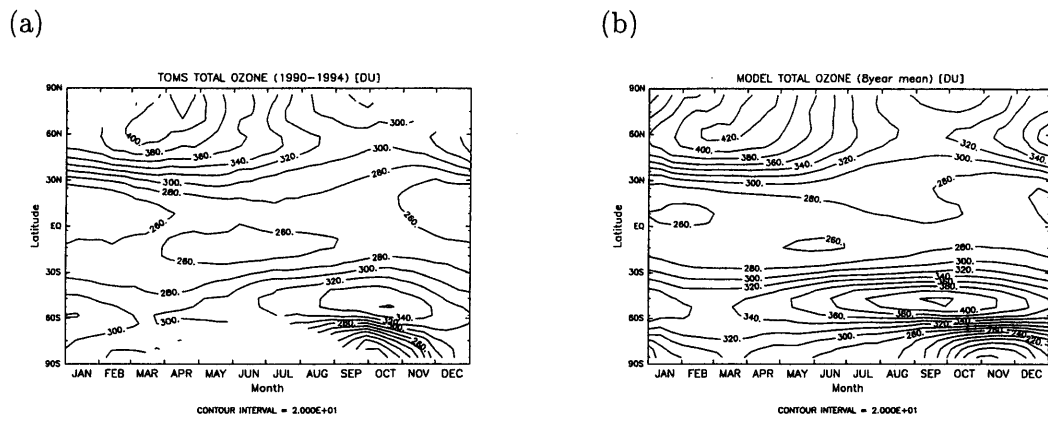


図 1: 経度平均したオゾン全量時系列。(a)TOMS による 5 年間 (1990 年~1994 年) の平均値、(a) 実験の平均値である。コンター間隔は 20DU。

表 1: 各実験の設定

実験名	実験期間	CO ₂ の増加	SST の変化	ハロゲン化合物, N ₂ O, CH ₄ の変化	備考
EXP1	1986-2010	○	○	○	
EXP2	1986-2010	○	○	-	化学過程含まず
EXP3	1986-2010	×	×	○	
EXP4	1986-2000	×	○	○	
EXP5	1986-2000	○	×	○	

○は年々の変化を与え、×は実験期間中 1986 年相当の値を使い続ける事を意味する。

に想定した 15 年間の感度実験を 5 種類行い (表 1)、各実験の結果を比較する事によって成層圏気温低下傾向の要因を検討した。

計算された中層大気気温は、実際に観測される低温化の様子を比較的よく再現している (図 2)。特に、中上部成層圏、及び南半球高緯度春季における気温低下傾向を再現しており、前者は大気中のハロゲン量の増加に伴うオゾンの減少が引き起こす短波放射加熱の減少と、CO₂ の大気中濃度の増加に伴う大気の冷却がほぼ同程度の寄与を示している事が分った。一方、南半球高緯度の 10 月から 12 月には南極オゾンホールに相当する大規模なオゾン減少が再現され、その約 1ヶ月後には気温の低下傾向も認められた。実験期間の前半と後半における各種気温変動要素 (短波放射加熱・長波放射加熱・力学的加熱) の変化を調べた所、10月/11月にはオゾン減少に伴う短波放射加熱の減少が起こっており、これによって気温低下傾向が説明できる事が確認された。一方、気温低下が起こっている領域の上層 (約 10hPa) では、観測でも見られるような気温上昇域が再現された。この気温上昇には、同高度における下降流の増大が大きく寄与している事が示唆された。

一方、上記の 15 年間の実験では北半球高緯度下部成層圏に於いて、有意な気温減少傾向は計算されなかった。気象場の年変動が卓越したためである。そこで EXP1/EXP2/EXP3 に関して実験期間を更に 10 年延ばした実験を行った所、EXP1 のみで北半球高緯度下部成層圏の 1 月から 4 月にかけて有意な気温減少傾向が再現された。また、EXP2 にも有意ではないが気温低下の傾向が計算され、EXP3 では計算されなかった。これにより、北半球下部成層圏の気温低下傾向には SST の変化が大きく影響している事が示唆された。

熱帯から北半球中緯度の下部成層圏・上部対流圏には、対流圏変動の影響と見られる特徴的

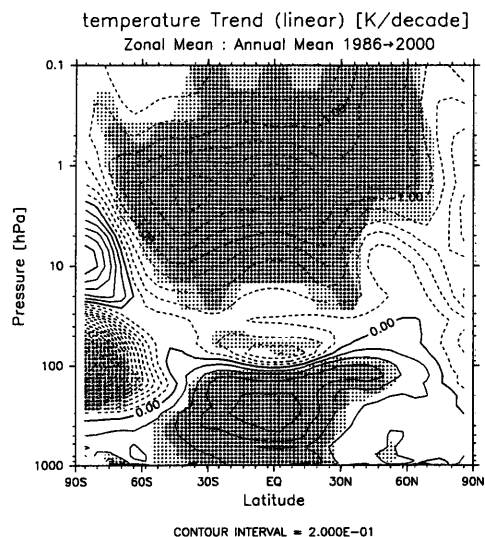


図 2: EXP1 で計算された、年平均・経度平均した気温のトレンド [K/10 年]。コンター間隔は、0.2K/10 年であり、淡トーンは 95%、濃トーンは 99%の信頼区間を示す。

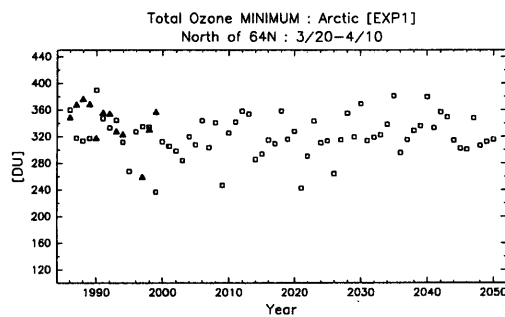
な気温の変動が見られた。各種気温変動要素を解析すると、熱帯の 70hPa 付近に見られる気温減少傾向は、同高度における力学的加熱量の減少が原因と考えられ、主に上昇流の強化が影響している。一方、北半球中緯度 (30°N から 45°N) の 125hPa 付近には顕著な気温上昇傾向が見られ、この気温上昇にも力学的な加熱が大きく作用しており、下降流速の増加が見られた。一方、TEM 方程式系の質量流線関数の変動傾向を調べた所、上記の 2 領域を繋ぐような形で、成層圏の循環が強化されている様子がわかる。つまり、熱帯から北半球中緯度の下部成層圏・上部対流圏に見られる気温の変動傾向は、成層圏循環強化の一側面を見ていた事になる。また、対流圏に於いてもハドレー循環が強化されており、これが成層圏循環の強化と繋がっている様子が見られた。このような循環の強化はオゾンの変動傾向とも整合的と言える。このような一連の変動傾向は、SST の変化を考慮に入れた実験でのみ再現されるが、この実験で使用した SST データの熱帯域では海水温の上昇が見られ、それに伴って対流活動が活発化した事が、ハドレー循環の強化に繋がっていると考えられる。一方、SST の変動が成層圏循環の変動にどのように影響を及ぼしているのか判断は難しいが、ハドレー循環の強化及び中緯度における惑星波動の活動を変化させる事によって、成層圏循環の変動が起こっている可能性が示唆される。また、このような成層圏循環の強化に伴って、中緯度、特に北半球中緯度の下部成層圏・上部対流圏に気温の上昇傾向が生じているが、これにより同高度域における気温の南北勾配が大きくなり、北半球高緯度成層圏のほぼ全域で、冬季から春季の西風が強くなっていた。この西風の強化は極向きの熱輸送が減少する事と表裏の関係にあり、既に述べたような北半球高緯度成層圏の気温低下傾向を引き起こされたものと解釈できる。一方、その気温低下傾向は、EXP2 の方が EXP1 よりも、特に下部成層圏の 2 月から 4 月において小さい値を示していたが (EXP1: -3K/10 年, EXP2: -1.4K/10 年)、これは、両者とも上記したような熱輸送の減少に伴って下部成層圏の気温が冷えていくものの、EXP1 には低温下でのオゾン破壊化学反応系が組み込まれているため、オゾンの破壊が起こり、春 (2 月から 4 月) の短波放射加熱を減少させている事が原因であった。気温トレンドの値から北半球下部成層圏春季の気温低下傾向に対する、力学的な作用と化学的な作用の寄与を見積もると、ほぼ 1:1 という結果であった。

次に 1986 年から 2050 年までの化学境界条件 (ハロゲン化合物, CO₂) 及び SST の変動を考慮

した 65 年間のオゾン層予測実験を行った。計算された南極オゾンホールは、TOMS 観測の存在する期間で観測されたオゾンの経年変化を良く再現していた (図 3(b))。計算された南極オゾンホールは、最初の 15 年程度は広さ・深さともに拡大していき、その後 2015 年位までほぼ同規模で推移する。その後、2030 年までかけた比較的ゆっくりとした回復の後、2030 年から 2035 年にかけて急激に回復し、2040 年代後半には 220DU という、1980 年代の値にまで回復した。このような南極オゾンホールの長期的な推移は、モデルで計算された下部成層圏における無機塩素総量の推移にほぼ等しい。一方、CO₂ の変動及び SST の変動を考慮しない実験を同期間行った所、計算される南極オゾンホールの長期的な推移は、考慮した場合と比べてほとんど変化しなかった。CO₂ の大気中濃度の増加及び SST の変化に伴う成層圏循環の変化は、南極オゾンホールには余り影響しないようである。

一方、北半球高緯度における計算結果は、今後も南極オゾンホールのような大きなオゾン破壊は起こりそうにも無い事を示している (図 3(a))。 (1) の実験結果が示した所によれば、北半球高緯度下部成層圏の冬季から春季における気温低下傾向は再現されてはいるが、高々 -3K/10 年程度であり、大気中の塩素負荷が最大になる 2015 年程度までに約 8K 程度の気温低下にしかならない。この気温低下には約半分程度化学的なオゾン減少の効果が入っているが、そのオゾン減少自体が非常に小さく、気温低下は余り大きくならない。更に大気中の塩素負荷の減少にともなって化学的なオゾン減少も小さくなっていくため、気温はそれ以上低下せず、結果として大きなオゾン減少は、今回の計算では起こらなかった。

(a)



(b)

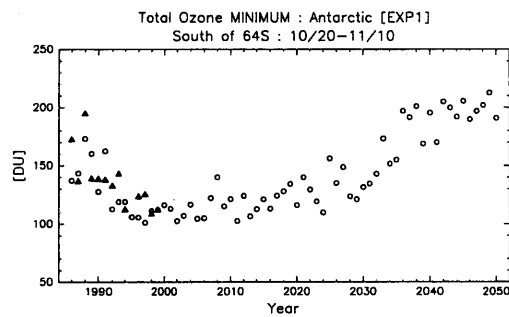


図 3: オゾン層予測実験で計算された、(a)64°N 以北の 3/20~4/10 におけるオゾン全量最低値 (b)64°S 以南の 10/20~11/10 におけるオゾン全量最低値。▲は TOMS にオゾン全量観測から求めた同様の値