

— 解 説 —

オゾン層変動と地球温暖化とを結ぶ観測的研究

- 21 世紀 COE プログラムにおける課題 -

北海道大学大学院地球環境科学研究科

長谷部 文雄

1. はじめに

オゾン層変動というと、誰でも真っ先に思い浮かべるのは南極オゾンホールであろう。新聞等で報道されているとおり、今年の南極オゾンホールも例年並みかそれ以上に発達しつつある。オゾンホール内では、下部成層圏においてオゾンを破壊する化学反応のサイクルが活発に働いている。この反応サイクルにおいてはオゾン破壊物質が触媒的に働き、オゾン破壊しながら次々とリサイクルされている。そのため、オゾン破壊物質の方は反応が一巡しても消滅せず、無限連鎖的にオゾン破壊が進行するのである。その結果、条件の整った高度領域では、ほぼ 100 % のオゾンが破壊し尽くされてしまう。

一般にフロンガスと呼ばれる人為起源の塩素化合物 (Chlorofluorocarbon; CFC) がオゾンホールの原因となっているのは間違いないが、CFC は化学的に安定で、上記の反応サイクルに直接組み込まれているわけではない。CFC は熱帯域で対流圏から成層圏へ侵入し、そこで光解離されて塩素原子 (Cl) を放出する。Cl は化学的に安定な HCl や ClONO₂ の形で成層圏に留まり、大気大循環に乗って南極上空まで輸送される。これらの安定な分子を化学的反応性に富む Cl に変換するのが極成層圏雲 (Polar Stratospheric Cloud; PSC) である。PSC は極低温の冬季極域下部成層圏で発生する特殊な雲で、硫酸・塩酸・硝酸や氷などを含む微小な粒 (エアロゾル) で構成される。この PSC の表面上で進行する化学反応 (heterogeneous reactions; 異相反応)こそ、オゾンホール形成の鍵となる反応である。

地球温暖化は 21 世紀最大の環境問題である。地球は文字通り暑くなるのであるが、それは地球表面から宇宙へ出て行く放射に対する大気の透明度が落ちて熱が下層に「こもる」からで、成層圏は逆に低温化する。成層圏オゾンは、太陽紫外線吸収による加熱を通して大気の温度構造を支配すると同時に、化学的生成・消滅率の温度依存性により温度に支配される。こうして、オゾン層の問題は地球温暖化とも結びついてくるのである。

21 世紀が環境の世紀と呼ばれるのに値するかは、今のところかなり怪しいと言わざるを得ない。人類は 20 世紀の負の遺産を清算することができるのであろうか。それはさておき、大学における教育・研究分野においても「構造改革」の必要性が叫ばれ、日本政府による上からの具体化の一つとして、21 世紀 COE (Center of Excellence) プログラムというものが昨年より動き出している。元々「トップ 30」と呼ばれて注目を集めたこのプログラムでは、分野ごとに全国の大学の中から研究拠点が選抜され、「世界最高水準の拠点に育てる」ために重点的な予算配分がなされることになっている。

ここ北海道大学で採択された課題の一つに、地球環境科学研究科と低温科学研究所とによる「生態地球圏システム激変の予測と回避」がある。この課題のカバーする領域は広く (図 1)、私たちは成層圏大気科学の観点からこの課題に参加している。「予測と回避」を実現するために数値モデルの利用は不可欠であるが、モデルだけで環境問題を理解することはできない。ここでは、観測的研究として取り組まれるべき課題について簡単に紹介する。

2. オゾン層破壊に対する現状認識

南極オゾンホールの発見 (Chubachi, 1984; Farman et al., 1985) から間もなく 20 年になろうとしている。オゾン層破壊を実際に招いてしまったという点で遅きに失したとはいえ、フロンガス規制は地球環境問題に対する科学・社会の対応が功を奏しつつある例と言って

①世界最高水準の拠点形成実現に向け最重要視している事項
劇的変化メカニズムの解明

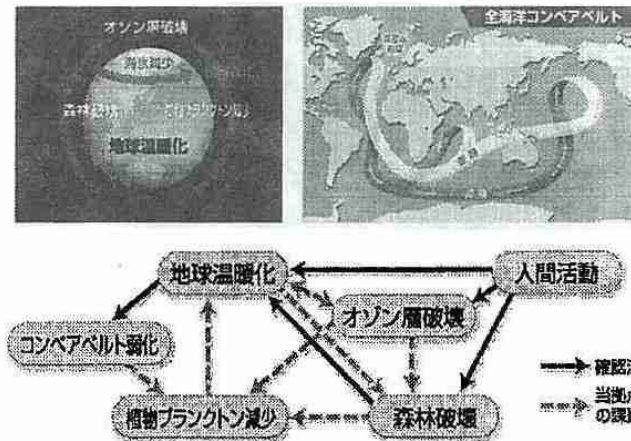


図 1: 21 世紀 COE プログラム「生態地球圏システム激変の予測と回避」の概要

良い。オゾン層およびその破壊物質の現状について、World Meteorological Organization (WMO) による最新のレポート (WMO, 2003) から代表的な項目をいくつかピックアップしてみよう:

- 対流圏において、オゾン破壊物質の総量 (total combined effective abundance of ozone-depleting compounds) は、1992-1994 年をピークに減少しつつある。
- 成層圏においては、臭素総量が依然として増加傾向にあるものの、塩素総量の増加は頭打ちになりつつある。
- 南極地方の春季オゾン破壊 (いわゆる南極オゾンホール) の形成) は、過去 10 年間にわたり継続してきた。
- 北極域においても、冬季が低温の年には 30 % に達するオゾン全量の減少が観測されている。
- 中緯度のオゾン破壊は依然として続いており、1980 年代と比較すると 1997-2001 年の値は約 3 % 少なかった。
- 化学過程を含む気候モデルを用いた数値実験によれば、南極地方の春季オゾン量は 2010 年までには増加に転じると予想される。
- 北極域のオゾンは変動性が大きいいため破壊量の予測は困難であるが、南極オゾンホールに匹敵するようなオゾン破壊が北極域で起こるとは考えにくい。
- 大気中の塩素・臭素負荷量の減少によりオゾン層の回復が期待されるが、他の要素の寄与も考慮に入れる必要がある。ここで想定されている「他の要素」には、(主として二酸化炭素の増加による) 成層圏の低温化、大気中の輸送過程の変動、メタンと亜酸化窒素の増加による寄与などが含まれている。

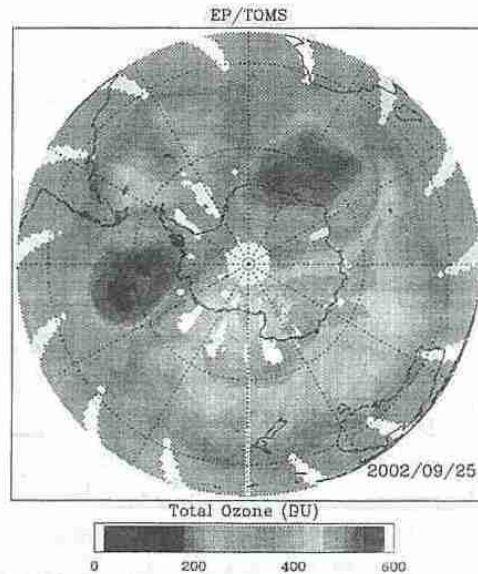


図 2: 2002 年 9 月 25 日の南極上空のオゾン全量分布。NASA が公開している人工衛星 Earth Probe 搭載 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) による観測値を用いて作図

- 過去 20 年間にわたって継続している成層圏の低温化は、オゾンの減少と温室効果ガス・水蒸気の増加とに起因する。

様々な項目が列挙されているが、南極オゾンホール形成メカニズムは概ね理解されたというのが共通認識で、現在は、期待されるオゾン破壊物質の大気中濃度減少に伴って、オゾン層が予想通り回復するかを見極める段階であると言って良からう。このような書き方をすると、南極春季オゾンが増加に転じる 2010 年頃まで寝て待てばよいように思われるかも知れないが、決してそうではない。それは、オゾンホールに関連して、今まで観測されたことのない特異な現象が生じており、我々はまだそれを理解していないからである。

3. 21 世紀 COE としての問題意識

2002 年の南極オゾンホールは、9 月後半に 2 つに分裂した (図 2)。これは、成層圏突然昇温と呼ばれる現象に伴って極渦が分裂したことに対応する。極渦というのは、極夜ジェットと呼ばれる西風により形成され極を周回する大規模な渦のことで、太陽の当たらない極夜条件下で極成層圏の気温が低下する結果、中緯度との温度差に比例して上空の西風が強化されることにより形成される。オゾンホールの形状は、この極渦の形で決まるのである。北半球においては、惑星規模の海陸分布が発達しているため、対流圏で励起された大気波動(プラネタリー波)が成層圏まで伝播して極渦を変形させ、短時間の内に平均帯状風を西風から東風に変えてしまうことがある。これが成層圏突然昇温で、北半球では 2-3 年に一度くらいの頻度で観測されている。しかし、南半球は南極大陸を中心とした比較的対称性のよい海陸分布をしているため、極渦が円形に近い構造を保ちながら安定して存在する。

南半球における成層圏突然昇温の発生-極渦の分裂は、成層圏科学者にとって衝撃的であった。図 1 に書き込まれているように、極渦は温暖化によって強化されると予想されており、単純に考えれば、成層圏突然昇温は起こりにくくなると思われるからである。これが地球温暖化に伴う気候変動の一側面を表しているのか単なる偶然に過ぎないのか、判断

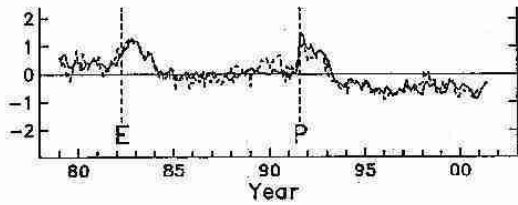


図 3: 高度 17 km 付近の全球平均温度の長期変化。E と P は El Chichón と Pinatubo 火山噴火を示す (WMO, 2003)

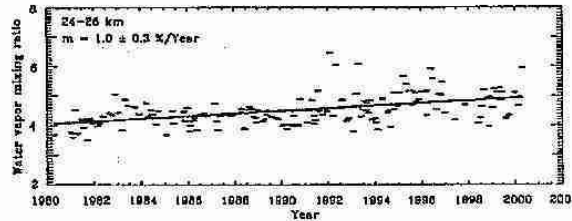


図 4: 下部成層圏における水蒸気混合比の長期変化。Boulder 上空における水蒸気ゾンデ観測に基づく結果 (SPARC, 2000)

する根拠を我々はまだ持ち合わせていない。

オゾンの減少と並び、成層圏における長期変動としてよく知られている事実には、温度の低下 (図 3) と水蒸気の増加 (図 4) が挙げられる。成層圏の低温化は温室効果ガス増加やオゾン減少によるものと理解されているが、水蒸気の増加についてはその約 1/2 が人為起源のメタン放出量の増加により説明されると言われているものの、詳しいことは分かっていない。いずれにせよ、南極オゾンホールが形成が始まる以前の状態にまでオゾン層破壊物質が減少したとしても、成層圏は以前のままの成層圏ではなくなってしまっているのである。1970 年代以前とは異なる大気環境の下で、オゾン層が期待通りに回復する保証はない。実際、成層圏の低温化は極渦の安定化によってオゾン破壊反応場の維持に貢献するだけでなく、PSC の生成を促進することによって極域春季下部成層圏で Cl 生成量を増加させるであろう。また、PSC は水蒸気の凝結により成長するため、成層圏水蒸気の増加は PSC の発達を促すであろう。これらはいずれもオゾン層の回復を妨げる方向に働く (Shindell et al., 1998)。中緯度においても、成層圏における低温化と水蒸気の増加にตอบสนองしながら、エアロゾル表面における異相反応により成層圏オゾンは減少してきたと考えられている (Dvortsov and Solomon, 2001)。

このように、成層圏の気候を対象とする科学は、オゾン層回復を一つのキーとしながら、中緯度をも含めたオゾン層長期変動の注意深いモニタリングと成層圏水蒸気の増加メカニズムの解明、温暖化等の気候変動に対するその影響評価などを主要な課題としながら発展してゆくと予想される。ここで注目すべきことは、地球規模における環境破壊として並び称されてきたオゾン層破壊と地球温暖化とがもはや独立した研究テーマではなく、相互の依存性を明らかにしながら解明されなければならない時代になりつつあるということである。2002 年南極オゾンホールの分裂は、それを端的に示しているように思われる。これらの間に潜む相互作用の解明に対する貢献、それが 21 世紀 COE プログラムに参加する我々の大きな目標である。

それでは、この課題に具体的にどのように取り組んで行くのか。我々は、観測による貢献という立場から次のようなテーマで研究を進めようとしている:

1. 水蒸気ゾンデ Snow White の改良: 成層圏は極度に乾燥しているため、精度良い水蒸気観測を行うには高度の技術が必要である。Snow White は、成層圏をも観測対象としながら商品化されている唯一の鏡面冷却型水蒸気ゾンデである。上部対流圏 (UT) から下部成層圏 (LS) における測定の障害となってきた問題点にも、ようやく解決の目処が立ちつつある。製造元と協力しながら、UT/LS 領域でも利用可能な測器とし

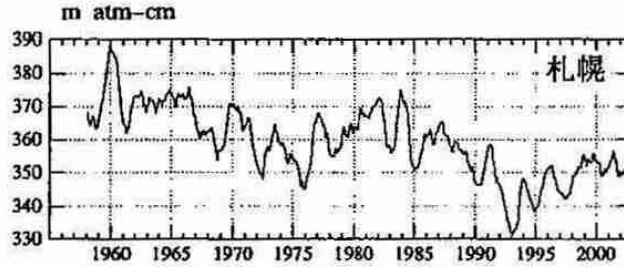


図 5: 札幌におけるオゾン全量の長期変動。季節変動を取り除いた時系列で示す (気象庁, 2003)

て Snow White を完成させたい。

2. 成層圏水蒸気の継続的観測: 前項で述べた技術的困難さの故に、米国 Boulder 上空における NOAA による観測が長期間にわたる成層圏水蒸気観測としては唯一である。不足する観測データを補うために、我々は改良型 Snow White を用いて札幌上空 UT/LS 領域の水蒸気観測を継続的に実施する。
3. オゾンゾンデ観測: 日本のオゾンゾンデ観測は 1960 年代に気象庁により開始され、現在では札幌管区気象台を含む国内 4 カ所で毎週一回の割合で実施されている (図 5)。定常観測は、この気象庁の観測で十分と考えられるが、使用されている明星電気の測器は、世界標準となっている Electrochemical Concentration Cell (ECC) 法と電極の材質などが異なっている。そこで、我々は ECC を用いた観測を気象台の観測に同期させて年に数回実施し、検証用データとして提供する。また、北海道上空に極渦の断片が到達する場合などには定常観測では対応できないので、集中観測を機動的に実施する。後者の観測は、国立環境研究所と共同で行う予定である。
4. 若手研究者の育成: COE は単なる研究費ではなく、若手研究者の育成も重要な課題である。我々は、教育カリキュラムの一環としてオゾン-水蒸気ゾンデ観測を実施することにより、学生にゾンデ観測を体験する場を提供している。コンピュータ・ネットワークを利用した検索の普及により、多くの情報が居ながらにして手に入ることは便利ではあるが、その反面、データはどこかから与えられるものという意識を学生に植え付けることになりかねない。他に類例を見ない我々の取り組みにより、測定器を自ら操作し必要なデータを自分で観測することの意義を学生にも理解させたい。

4. おわりに

オゾンホール形成は極域に限られるが、その将来予測には全球をカバーする観測の蓄積が必要となる。成層圏を対象とする大気科学は、必然的にグローバル科学とならざるを得ないのである。北海道の特異性に着目することは重要であるが、全球的視野を欠くことはできない。観測体制の構築や研究費の捻出には、国際的な連携が必要となる。21 世紀 COE プログラムは、政府により選別された拠点が互いに競い合うという側面のみ強調され、地球規模の問題を解決するために拠点間の連携を構築しようとする視点に欠ける。研究者の側は、そうした既成の枠組みを突破しようとする意識を常に持ち続ける必要がある。

我々は、熱帯域におけるオゾンと水蒸気の変動を明らかにするために Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region (SOWER) と呼ばれる国際プロジェクトを組織し、東部太平洋の Galápagos 諸島、中部太平洋の Christmas 島、西部太平洋の Indonesia などでのゾンデ観測を実施してきた。成層圏水蒸気を理解するには、その入り口で対流圏からの流入を制御する役割を果たしている熱帯域を無視した研究はあり得ない。幸い、科学研究費等により我々は熱帯域での観測も継続することができる。熱帯域における成層圏水蒸気のトレンド検出と成層圏の乾燥状態を支配する脱水メカニズムの解明は、当面する SOWER の主要課題である。こうした活動を通して発展途上にある国で暮らす人々と共同で問題解決に当たることは、互いの信頼関係を構築する上で極めて重要である。そうした努力を抜きにして人工衛星を用いた上空からの温室効果ガス排出量監視により排出規制を遵守させようとするなら、大国として技術力・経済力を誇示することはできても、問題解決の障害になりはしないかと私は懸念している。

オゾンホールメカニズムが科学的に解明されても、それを解消するためにできることは、オゾン層破壊の原因となる物質の排出を止めることだけで、自然の持つ浄化メカニズムに頼るしか回復の手はない。オゾン層破壊は決して過去の問題ではなく、いま我々が学ぶべき教訓は少なくない。成層圏科学者は人為起源の塩素化合物によるオゾン層破壊の可能性に気付きながらも、オゾンホールの予測に失敗した。実際のデータにその兆候が現れてからでさえ、その重要性に気付くには時間がかかったし、TOMS で捉えられた観測値は異常に低い値として自動的に削除されていて誰も注意しなかったと言われている。そのような失敗を繰り返さない英知を人類が持ち合わせていることを期待したい。

謝辞

原稿に目を通して適切なコメントを下された北海道大学大学院地球環境科学研究科の池田元美研究科長と山崎孝治教授に感謝します。

参考文献

- Chubachi, S., 1984: Preliminary results of ozone observations at Syowa station from February 1982 to January 1983. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Iss.*, **34**, 13-19.
- Dvortsov, V. L., and S. Solomon, 2001: Response of the stratospheric temperatures and ozone to past and future increases in stratospheric humidity. *J. Geophys. Res.*, **106**, 7505-7514.
- Farman, J. C., B. G. Gardiner, and J. D. Shanklin, 1985: Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, **315**, 207-210.
- 気象庁, 2003: オゾン層観測報告: 2002. ISSN 1344-7335, 67 pp.
- Shindell, D. T., D. Rind, and P. Lonergan, 1998: Increased polar stratospheric ozone losses and delayed eventual recovery owing to increasing greenhouse-gas concentration. *Nature*, **392**, 589-592.
- SPARC, 2000: SPARC Assessment of Upper Tropospheric and Stratospheric Water Vapour, D. Kley, J. M. Russell III, and C. Phillips, Eds., WCRP 113, WMO/TD-No. 1043, SPARC Report No. 2.
- WMO (World Meteorological Organization), 2003: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 47*, 498 pp., Geneva.