

「オゾン層破壊の科学アセスメント：2018」から見る 最近のオゾン層研究の動向とその保護に向けた取り組み

塩谷 雅人^{1*}

Recent research results and activities for the protection of ozone layer based on “Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018”

Masato Shiotani^{1*}

概要

最近、「オゾン層破壊の科学アセスメント」の最新刊(Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018)が公開された。ここでは、そのアセスメントレポートで取り上げられている主要な話題を簡単に紹介して、オゾン層研究の動向とその保護に向けた取り組みの現状について紹介する。

1. はじめに

今年(2019年)2月、世界気象機関(WMO: World Meteorological Organization)と国連環境計画(UNEP: United Nations Environment Programme)が中心となって、およそ4年に1度のペースで発刊される「オゾン層破壊の科学アセスメント」の最新刊(Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018¹⁾)が公開された。これまでに同名のアセスメントレポートとしては、2014、2010、2006、2002、1998、1994、1991、1989版が存在する。さらに遡ると、オゾン層に関するアセスメントレポートとして、Atmospheric Ozone 1985 - Assessment of our Understanding of the Processes Controlling its Present Distribution and Change²⁾がある。これらのアセスメントレポートは、オゾン層あるいはオゾン層の存在する成層圏(高度約15~50km)領域の科学に関する研究成果の集大成となっており、いわゆる政策立案者(policy maker)に対する科学的な知見の重要な源泉情報としても有効に利用されてきた。

私自身、大学院生の頃Atmospheric Ozone 1985に接する機会があつて、このレポートの中の、特に大気の輸送過程と水蒸気分布について興味を持って読んでいたことを思い出す。ただし、内容としては、そのタイトルにOzone Depletionの文字がないことからわかるように、南極オゾンホール話題については明示的に述べられていない。いわゆる南極オゾンホールの発見論文は1985年のFarmanらによるNature誌に掲載された論文³⁾とされているが、Atmospheric Ozone 1985では(おそらく発刊ぎりぎり情報差が差し込まれたのか)、このFarman論文において最も有名な、英国ハレーベイ観測基地でのオゾン全量観測から近年顕著なオゾン減少が見られる図と、1段落(10行ちょっと)ほどの観測事実の記述のみが収録されている。一方で、オゾンホールを考える上で鍵となるオゾン破壊の張本人であるCFC(クロロフルオロカーボン)について、オゾン層を破壊しうる可能性を持った人為起源物質として多くのページが割かれ、その観測事実や数値モデル結果について記述されている。しかしながら、のちに理解されるようになったCFCに端を発するオゾン破壊をもたらすメカニズムについてはいっさいの記述がなく、

2019年7月16日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 大気圏環境情報分野。

* E-mail: shiotani.masato.8a@kyoto-u.ac.jp

今となってみるとオゾンホール研究の幕開けとなった時期のレポートとしてなんとも不思議な感じのものとなっている。

今回めぐりめぐって、2018年版のアセスメントレポートの中の「全球的なオゾン分布の過去と現在そして未来」に関する章の共著者の一人として取りまとめに参加する機会を得た。以下ではScientific Assessment of Ozone Depletion: 2018を通して見た最近のオゾン層研究の動向とその保護に向けた取り組みについて紹介したい。

2. オゾン層破壊の科学アセスメント：2018のポイント

アセスメントレポートには毎回総括要旨(Executive Summary)がつけられ、科学者のみならず政策立案者がこのレポートの概要を把握することを容易にしている。概要とはいえ各章のまとめも含めて今回のものは70ページにもおよぶが、特に冒頭部分にあるハイライトの中から、今回のレポートで特に強調されていると私自身感じるものとして以下の3点を取り上げたい。なお、この章ではそれらの点について簡単に述べたあと、章を改めて個別のポイントについて詳しく記述する。

まず、今回のレポートで初めて、オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書(1987年に採択)のもとで進められてきたオゾン破壊物質の削減が実を結び、「オゾン層の回復がはじまった(the start of the recovery of stratospheric ozone)」ことが明瞭に記述された。観測事実としては、1990年代の終わりにかけて減少傾向にあったオゾン量は、2000年あたりから明瞭な減少傾向が見られなくなり、最近では若干の増加ともとれる傾向が見られていた。しかしながら、これまでのアセスメントレポートでは回復傾向に対する記述は慎重で、たとえば一つ前の2014版アセスメントレポート⁴⁾では、「オゾン層が1980年代のレベルに回復可能となっている(enabling the return of the ozone layer toward 1980 levels)」と回復に向けた明確な記述を避けたようにも見えるものとなっていた。今回初めて明瞭な回復傾向について言及したことは、モントリオール議定書にもとづいて遂行されてきた施策が、われわれ人類に大きな成功をもたらしたことを改めて確認したものになっているといえよう。

次に重要な点は、モントリオール議定書の成功は認められるものの、オゾン破壊物質の一つであるCFC-11(トリクロロフルオロメタン: CCl_3F)の放出量が予期せず増加していることを指摘していることである。すなわち、CFC-11の大気中濃度の減少は排出制限の結果から予想される減少量に届かず鈍化しており、これは言い換えるとCFC-11の排出量が想定を上回っていることを示している。2つの独立した観測ネットワークの結果からもこの増加傾向は捉えられており、東アジアからの排出が原因であると推測されている。改めてモントリオール議定書の遵守に向けた取り組みが国際的に認識されるべき時期にきているといえる。

もう一つ、オゾン層保護と気候変動問題、特に温暖化問題との関連を象徴的に表す施策として、モントリオール議定書の改正(キガリ改正)がおこなわれ、その効果についての言及がなされていることがあげられる。モントリオール議定書によってオゾン破壊物質である特定フロン(クロロフルオロカーボン:CFC)は代替フロン(ハイドロクロロフルオロカーボン:HCFCとハイドロフルオロカーボン:HFC)に置き換えていくこととなったが、のちにHCFCもオゾン破壊物質として削減の対象となった。残るHFCについて、実は強力な温室効果気体であることがわかっており、こちらは京都議定書において削減対象となっている。このHFCを新たに議定書の規制対象とする改正提案がキガリ改正で、その効果についての科学的な検証がおこなわれている。

以下では、上記した3つのポイントについて、レポートに取り上げられている図なども交えながらももう少し詳しい記述をおこないたい。

3. オゾン層の過去と現在そして未来

図1は北半球高緯度(北緯63度から北緯90度)と南半球高緯度(南緯63度から南緯90度)でオゾンの減少

が顕著に見られる月、北半球の場合は3月、南半球の場合は10月のオゾン全量の直近までの時系列を描いている(データとしてはさまざまな衛星観測データが組み合わせて用いられている)。オゾン全量とはオゾン量の鉛直積分に比例する値で、おおよそ高度20km付近のオゾン量を代表していると考えてよく、その高度範囲は極域でのオゾン破壊が起こる高度でもある。

いわゆるオゾンホール発見は、南半球高緯度域での10月のオゾン全量が1970年代の後半から顕著に減少していることが1985年に報告されたことに端を発している。一方、北半球高緯度においても(図1を見てもわかるように)、オゾン全量自身南半球高緯度に比べて大きく、程度は小さいもののオゾンの減少傾向を見て取ることができ、南半球極域で起きていたものと同じようなメカニズムで北半球高緯度でもオゾン破壊が起こっていたことがわかっている。

南半球高緯度では(下図)1980年頃から1990年代後半にかけてオゾン量の減少傾向が見られるものの、2000年あたりからは特に明瞭な減少傾向は見られず、近年はやや増加傾向にあるようにも見受けられる。今回のレポートでは、全球で見たオゾン量の変化が2000年あたりで減少傾向は底を打ち、現在は緩やかな増加傾向にあることを統計的に明らかにした上で、2章でも述べたように初めて「オゾン層の回復がはじまった(the start of the recovery of stratospheric ozone)」というメッセージが書き込まれることになった。

ここで、モントリオール議定書以降に実施された施策の結果、いわゆる特定フロン類がこれまでにどのように削減され、それによって今後オゾン層がどのように回復してゆくと考えられているのかについて述べる。図2には(a)特定フロン類の排出量、(b)オゾン破壊に関わる塩素量、(c)全球平均・年平均したオゾン全量、(d)南極域10月のオゾン全量が描かれている。2018年頃までは実際の観測データにもとづいており、それ以降は(a)、(b)については放出シナリオ、(c)、(d)については化学気候モデル(大規模な数値モデル計算結果)にもとづくものとなっている。(c)、(d)の図の中には赤

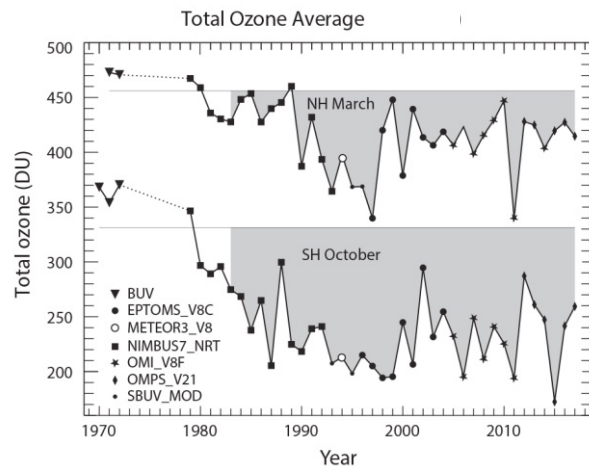


図1：北半球3月、南半球10月の高緯度域(極から63度まで)のオゾン全量の経年変化(アセスメントレポートのFigure 4-4)。

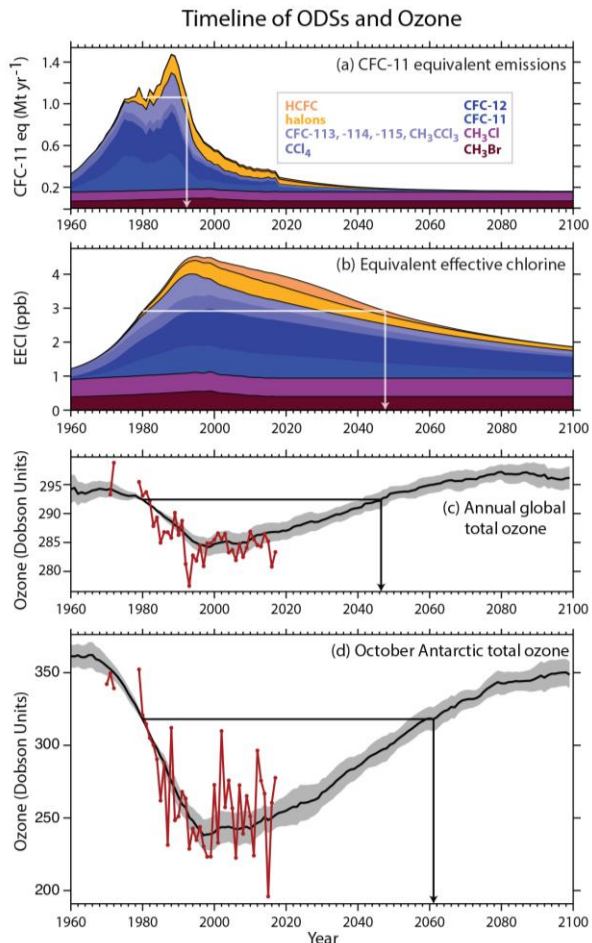


図2：(a)特定フロン類の排出量、(b)オゾン破壊に関わる塩素量、(c)全球平均・年平均したオゾン全量、(d)南極域10月のオゾン全量(アセスメントレポートのFigure ES-1)。

線で観測データにもとづく値がプロットされているが、基本的には図1と同様な時間変化傾向を見取ることができる。

モントリオール議定書は1987年に採択され、1989年に発効したものの、当初の規制はゆるかったため次第に強化され、最終的には特定フロンを中心とするオゾン破壊物質の全廃にまで規制は強化された。(a)、(b)には自然起源の物質も描かれているが、1990年あたりにピークを持つ人為起源のオゾン破壊物質の増加と減少傾向を読み取ることができる。ここで重要なことは、モントリオール議定書の国際的な約束のもとでこれらオゾン破壊物質の排出が削減されたものの(図2(a))、実際にはそれらの大気中での寿命が長いために、オゾン破壊に関わる物質としては成層圏に長時間とどまり続けることである(図2(b))。たとえば大気中に残存するオゾン破壊物質の量が1980年代のレベルに戻るのには2050年頃と予想されており、削減が10年ほどで実現できたのと比べると、その影響はずっと長期間残ることになる。オゾンの回復傾向も、ちょうどこの図2(b)を上下逆さまにしたような形で推移することが化学気候モデル計算からわかっており、オゾン量が1980年の値に戻るのには世界的に見て2050年頃(図2(c))、南極域では2060年頃(図2(d))になると予想されている。

4. 予期せず増加しているCFC-11の放出量

モントリオール議定書が果たした役割として、国際的な合意のもとでオゾン破壊物質の排出を各国が規制してきたことはもちろん最初にあげるべき重要なものであるが、同時にその効果の検証のためにオゾン破壊物質の全球的な観測ネットワークが構築されたことも重要である。排出が規制されている物質の中でも2番目に大きな排出量となっているCFC-11は、過去には冷凍機の冷媒やドライクリーニングの溶剤などとして利用されてきた。排出規制対象として、たとえば日本国内では1995年末に製造が打ち切られ、1999年からは出荷もされなくなっている。図2(a)からもわかるように(下から3つめの薄い青)全球的に見た放出量は急速に減少してきていると考えられていた。ところが近年このCFC-11が予想されるほど減少していない、言い換えると何らかの形で想定外の排出がおこなわれていることを示唆する観測事実が明らかになってきた。

Montzkaらは地上での大気サンプルにもとづく全球的な観測網のデータを用いて、2010年代の初頭あたりからCFC-11の濃度の減少量が小さくなっていること、そしてこれはおそらく想定外の排出の存在が示唆されることを明らかにした⁵⁾。特に近年では、ハワイのマウナロア観測所のデータがしばしば人為起源の大気汚染物質の濃度と高い相関を持つことから、その起源と考えられる空気塊がアジア域から到来している可能性について言及した。さらにRigbyらは、Montzkaらとは独立したデータを加えて、やはり2012年以降CFC-11の減少量が減速していることを示した⁶⁾。これらの観測データをまとめてグラフにしたものが図3である。2006年あるいは2012年からの排出量の予測値が灰色の点と破線で示されているが、観測値(赤と黒)はその上にあって、想定外の排出がおこなわれていることが推測される。ちなみに緑の線で報告されている生産量が描かれているが、こちらは2010年にはほぼゼロになっていた。

さらにRigbyらは、国際的な観測ネットワー

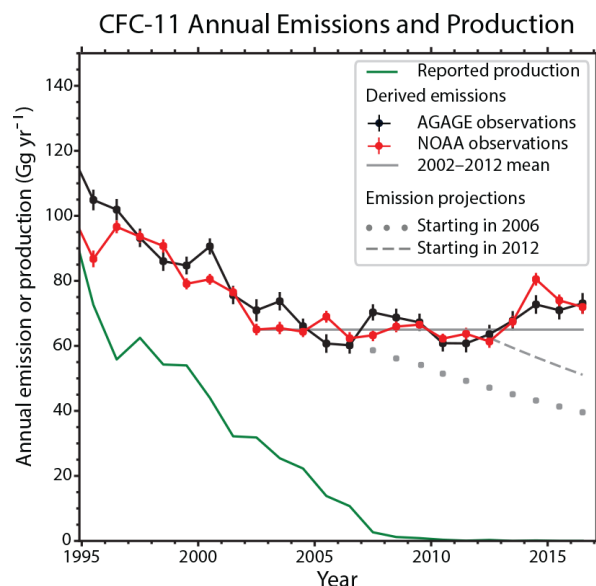


図3：CFC-11の年間放出量と生産量。独立した二つの観測データが示されている(アセスメントレポートの Figure ES-2)。

クのうち、韓国のGosanと日本のHaterumaのデータに注目して、しばしば高濃度のCFC-11が間歇的に観測されること、大気輸送モデルを使った逆計算法による放出域の推定結果によると、中国東部からの放出量が増加しているらしいことを明らかにした。Hateruma(沖縄県・波照間島)は日本の国立環境研究所が運用するモニタリングステーションであり、大陸からの大気の流れの下流域にあって、東アジアからの人為起源大気成分の対流圏内輸送過程を把握するためにも重要な位置を占めていたといえる。Rigbyらの論文には環境研の研究者も含まれており、日本語による詳しい説明が以下のWebサイトにあるので参照されたい。

<https://www.nies.go.jp/whatsnew/20190521/20190521.html>

5. キガリ改正を受けて

モントリオール議定書が採択されたあと、毎年、議定書の締約国会議が開かれ、さまざまな形で規制の見直しがおこなわれてきた。当初は、CFC(クロロフルオロカーボン)が削減の対象であり、HCFC(ハイドロクロロフルオロカーボン)やハイドロフルオロカーボン(HFC)はフロンの代替物質として利用された。しかしほどなく、HCFCも分子構造の中に塩素を含むことから規制の対象となっている。一方で、HFCは分子構造の中に塩素を含まずオゾン層に対する影響はないものの、強力な温室効果気体であることが知られており、2016年ルワンダ共和国の首都キガリで開催された第28回モントリオール議定書会議において、HFCも利用が削減されることとなった。いわゆるキガリ改正である。今まさに、オゾン層保護の問題と温暖化の問題は不可分な関係になってきているといえる。

今回のアセスメントレポートにはこのキガリ改正を受けた温暖化の将来予測について述べられている。図4はその論議のもととなる排出の将来シナリオ(左)とそのシナリオの結果予想される地表気温の上昇に関する将来予測(右)である。削減することなく放っておいた場合(青の範囲)とキガリ改正によって放出を制限した場合、2100年における地表温度上昇は前者で0.3~0.5度と見積もられるのに対して、キガリ改正による排出制限のもとでは0.1度以下になり、パリ協定(2015年採択された気候変動抑制に

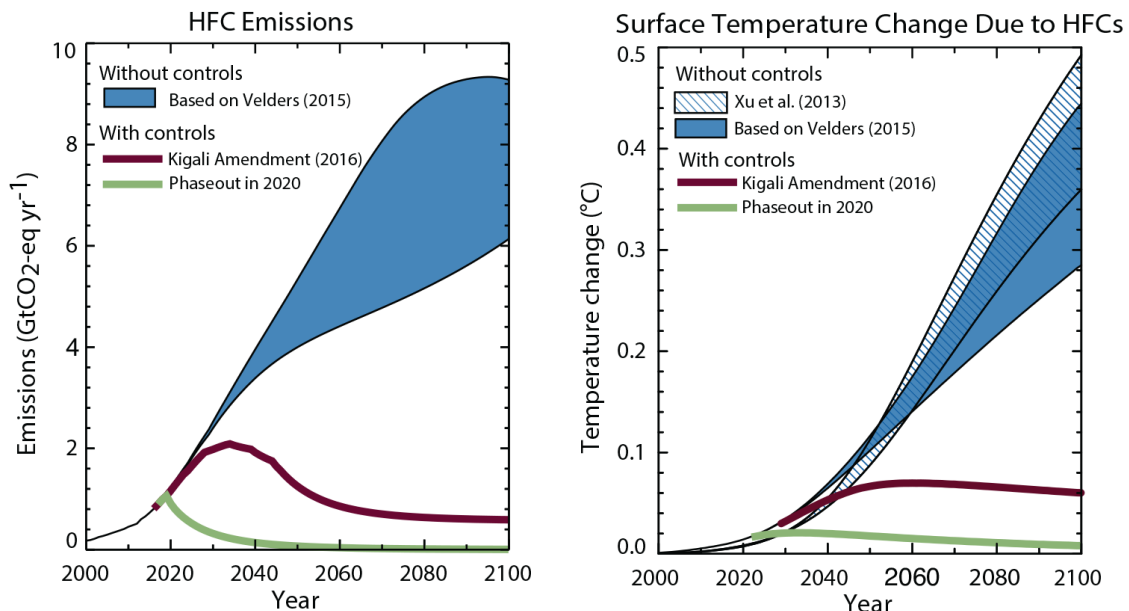


図4：(左) HFC の排出シナリオと(右)全球平均した地表気温の応答(アセスメントレポートの Figure ES-4)。

関する多国間の国際的な協定)が掲げる目標(産業革命前からの世界の平均気温上昇を「2度未満」に抑える)に対して大きな意味合いを持つことが述べられている。HFCはオゾン層破壊とは直接関係のない大気中の物質ではあるが、モントリオール議定書の元でフロンの代替として利用が認められてきた物質であり、モントリオール議定書のもとで議論されるべきであるという責務を感じ取ることができる。

6. おわりに

オゾンホールの発見から30年以上の時間が流れたが、この「オゾン層破壊の科学アセスメント」の一連の成果は、科学者のオゾン層保護に向けた責務を改めて感じさせるものとなっている。当初の、定点観測ではあるが長期間の観測データが示した南極域春季のオゾン減少という問題提起のあとは、航空機観測、衛星観測、さらにはモデリング研究によって南極オゾンホールメカニズム解明が進んだ。様々な測定手段で相補的な観測をすることにより、科学者はその謎解きに終止符を打ち、オゾン破壊物質の最終的な全廃にいたる国際的な合意にまで人々の意識を高めることに成功した。またさらに、国際的な合意の成果が本当に実現されているのかを確認・検証するために、フロンに代表されるオゾン破壊物質の長期モニタリングが強化されてきた。今あらためて、オゾンホール問題の謎解きに果たした科学者の役割と、その後の国際的な協力のもとで成し遂げられたオゾン破壊物質の全廃という責任感あふれる人々の貢献が、今後もわれわれ人類が勝ち得た一つの成功体験として語り継がれることに期待したい。

参考文献

- 1) WMO (World Meteorological Organization), (2018): Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, Global Ozone Research and Monitoring Project–Report No. 58, 588 pp., Geneva, Switzerland.
- 2) WMO (World Meteorological Organization), (1986): Atmospheric Ozone 1985 - Assessment of our Understanding of the Processes Controlling its Present Distribution and Change. WMO Report No. 16, WMO, Geneva, Switzerland.
- 3) Farman, J. C., Gardiner, B. G., & Shanklin, J. D. (1985). Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction. *Nature*, 315(6016), 207-210. <https://doi.org/10.1038/315207a0>
- 4) WMO (World Meteorological Organization), (2014): Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014, Global Ozone Research and Monitoring Project–Report No. 55, 416 pp., Geneva, Switzerland.
- 5) Montzka, S. A., Dutton, G. S., Yu, P., Ray, E., Portmann, R. W., Daniel, J. S., et al. (2018). An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11. *Nature*, 557(7705), 413-417. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0106-2>
- 6) Rigby, M., Park, S., Saito, T., Western, L. M., Redington, A. L., Fang, X., et al. (2019). Increase in CFC-11 emissions from eastern China based on atmospheric observations. *Nature*, 569(7757), 546-550. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1193-4>

著者プロフィール



塩谷 雅人 (Masato Shiotani)

<略歴> 1982年京都大学理学部卒業／1987年京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了(理学博士)／同年日本学術振興会特別研究員／同年京都大学理学部助手／1995年北海道大学大学院地球環境科学研究科助教授、1998年同教授／2001年京都大学宙空電波科学研究センター教授／2004年京都大学生存圏研究所教授(配置替え)、現在に至る。<研究テーマと抱負>観測データにもとづくグローバルな大気環境の理解。<趣味など>ちょいと一杯のおいしいお酒。