

## 南半球オゾン層破壊の気候への影響に関する WCRP 特別ワークショップの報告\*

廣岡俊彦\*1・直江寛明\*2・野口峻佑\*3・飯田千尋\*4

### 1. はじめに

南半球におけるオゾン減少の気候への影響を広く議論する目的で、標記ワークショップが、2013年2月25日から3月1日の期間、アルゼンチン共和国ブエノスアイレスのアルゼンチン・カトリック大学において開催された。このワークショップは、Pablo Canziani (アルゼンチン・カトリック大) と Alan O'Neill (英, レディング大) が共同ホストを務め、WMO/UNEP の「オゾン層破壊に関する科学アセスメント 2010年版」(WMO 2011) の内容と関連し、南極オゾンホールと南半球対流圏の気候との関係を結びつけるメカニズムをどのように理解すればよいか、将来的な温室効果気体の増加と、オゾン層の破壊と回復がどのように相互作用し、それが極渦と対流圏の気候にどのように影響を与えるか、さらに、今後どのような観測や研究を進めていけば未解明の問題が解決されるか、などといったことを議論するのが目的であった。このため、単なる研究成果の発表よりも、基調講演を基に上記問題点を広く議論して今後の研究や観測計画に生かすことを意図し、南半球の気象や気候、大気化学、海洋、雪氷など広い分野から、招待ベースで約50名の

研究者が集められた。その約半数は大学院生やポストクラスの若手研究者で、若い世代にも積極的に議論に加わってもらう目的で参加が呼びかけられたものである。日本からは、標記の著者4名が参加した。

セッションは、成層圏オゾン変動と気候への影響、南半球対流圏の気候と天候への影響、雪氷圏・海洋循環・炭素吸収への影響、モデリングと変動予測の4つからなり、それぞれ、2人から3人の基調講演後、その内容について広く議論するというスタイルを取る。さらに、翌日午前にも、その日のセッション前に前日のセッションのまとめと議論が続く。また、セッションの間にはポスター発表の時間を十分に取っており(第1図)、最終日には若手研究者だけで議論し合った結果の発表も行われた。このように、色々な配慮が施された会議であった反面、講演やポスター発表要旨も配られず、プログラムも変更を重ね、当日行ってみないような講演があるのかわからない奇妙な会議でもあった。

本ワークショップは、もともと2012年11月末に同じ場所で開かれた SPARC SSG 会議に引き続いて行われるはずであったが、AGU Fall Meeting と会期が重

\* Report on the WCRP Special Workshop on Climatic Effects of Ozone Depletion in the Southern Hemisphere.

\*1 (連絡責任著者) Toshihiko HIROOKA, 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門, hirook@geo.kyushu-u.ac.jp

\*2 Hiroaki NAOE, 気象庁地球環境・海洋部.

\*3 Shunsuke NOGUCHI, 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻.

\*4 Chihiro IIDA, 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻.



第1図 ポスターセッションの一コマ。

なり参加者が見込めなかったため今回の開催時期に延期されたものであり、何となくラテン気質（余田 2013, 私信）が感じられる会議であった。ともあれ、他に類を見ないワークショップであったことは事実で、そのこともあって、今回このワークショップの報告を思い立った。以下では、各セッションの議論の雰囲気、参加した4名の著者で分担して報告する。また最後には、初めての海外渡航で、初めての国際会議として本ワークショップに参加した大学院生に、新鮮な印象記をまとめてもらった。（廣岡俊彦）

## 2. セッション1：成層圏オゾン変動と気候への影響

本セッションは overview のセッションであり、Sophie Godin-Beekmann（仏, CNRS/ピエール・マリーキュリー大）により「オゾン層の過去変化、現在の状況、将来の展開」について、Darryn Waugh（米, ジョンズホプキンス大）により「南極オゾンホールと南半球の気候と天候」について、Wenju Cai（豪, CSIRO）により「オゾン層破壊と南半球循環」について、それぞれ基調講演があった。ここでの主題となった内容は、以降のセッションでも繰り返し議論された。

Godin-Beekmann の講演では、オゾンホールの出現と発現機構の解明、モントリオール議定書によるオゾン層破壊物質（ODS）の規制、オゾンホールの現状、将来予測などについてレビューが行われた。すでに WMO（2011）で報告されているように、ODS の減少によりオゾンホールが1980年のレベルに戻るのには2050年から2070年の間と見積もられ、かつては成層圏の低温化を通してオゾンホールの消滅を遅らせると考えられていた温室効果気体の増加は、ブリューワー・ドブソン循環の強化とオゾン破壊反応の抑制に働くため、オゾンホールの消滅を促進するとされている。

それに関連して行われた議論の中心は、オゾン層回復を見積もる根拠となる、成層圏オゾンの長期変動と等価実効成層圏塩素量（EESC）の関係についてであった。EESCとは、ODSであるCFC（クロロフルオロカーボン）やハロゲン化合物の放出量（地上における観測値）を基に、塩素及び臭素のオゾン層破壊効率が異なる点や、成層圏へ輸送されるODSの平均滞留時間を考慮して（すなわち mean age “平均年齢” という概念を導入して）、成層圏における実効塩素換算量を推定したものである。EESCを計算する際

の仮定や計算式に関して、ODS濃度としては本来成層圏における化学物質濃度を用いるべきであるのになぜ対流圏・地上における観測値を使っているのか、平均滞留時間という概念は本当に妥当なのか、実際に成層圏で濃度を測定する必要があるのではないか、ODS濃度をより正確に測定するための新しい観測・新しい観測手法が必要ではないか、といった議論がなされた。EESCは、成層圏オゾンの回復を議論するために、ODSが長寿命であるという仮定のもとに「オゾン層破壊に関する科学アセスメント2006年版, 2010年版」(WMO 2007, 2011)において採用されているが、次期アセスメントでは、超短寿命のODSについても議論される予定とのことである。

WaughとCaiは、それぞれ、主に大気と海洋の立場から、オゾンホールが極域に生じると南半球の大気大循環、および海洋大循環にどのような影響が生じるのかについてレビューを行った。この内容は、以降のセッションでも繰り返し議論される本ワークショップの中心的テーマであった。議論の詳細は、以下のセッション2と3で述べられるので、そちらを参照頂きたい。

オゾン層の変動が気候に与える影響を評価するためには、事例解析をきちんと行い、オゾン層破壊と大気循環変動の関係について因果関係を解明することが有効だ、との指摘もあった。例えば、2002年に南半球で初めて大規模突然昇温が起き、JASで特集号が生まれ、オゾンホールへの影響を含めた観測的事実そのものは色々調べられたわけだが、なぜこの年に起きたのかという点については未だによくわかっていない。さらに、2011年の顕著な北極オゾン層破壊、2012年南極オゾンホールの弱小化など、やるべきことはまだまだたくさんあるとの印象を持った。（直江寛明）

## 3. セッション2：南半球対流圏の気候と天候への影響

セッション2は、セッション1のWaughとCaiにより議論された内容のうち、対流圏の気候と天候への影響をより詳しく議論しようという目的で、Edwin Gerber（米, ニューヨーク大）が「南半球の偏西風に対する成層圏オゾンの影響：平均気候、その変動と人為起源強制力との関係」について、Ryan Fogt（米, オハイオ大）が「オゾン変動が南半球環状モードと南極気候に与える影響」について、それぞれ基調講演を行った。

これまで、オゾンホールが発達により南緯60度付近の西風が成層圏・対流圏ともに強まり、対流圏ジェットが極側にシフトする、という話は聞いたことがあったが具体的なイメージはわからなかった。しかし、セッション1と2の基調講演を聴いて、オゾン損失にともなう成層圏寒冷化の影響が南半球のほぼ全領域の気候に及ぶことを初めてイメージすることができた。これは今回のワークショップに参加して得られた貴重な知見である。

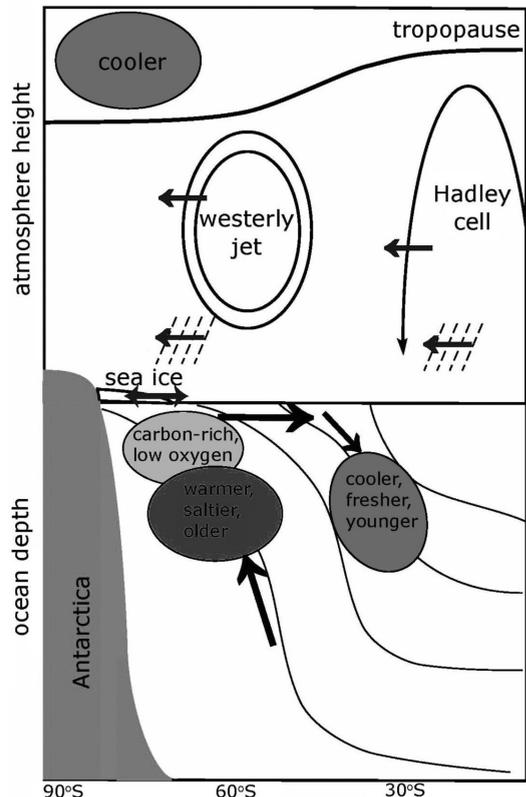
オゾンホールは9月から10月にかけて最大に発達する。成層圏オゾンの消失により、南半球の春と夏では気温が上がりにくくなり、1980年以前と比べると、南半球の夏(12月, 1月, 2月: DJF)では負の気温偏差となり、変動の振幅は夏に最大となる。負の気温偏差は、成層圏極渦にともなう西風を持続させ、その影響が南緯60度を中心に成層圏・対流圏結合によって地表まで達し、正の南半球環状モード(SAM)を強化する。この影響により、対流圏ジェットが極側にシフトする。ジェットの極側シフトは、ハドレー循環の高緯度側下降域の極側シフトにつながり、熱帯域が拡大する。夏季におけるジェットの極側シフトは、南極海域の低気圧(アムンゼン・ベリングスハウゼン海低気圧: ABSL)の位置を変え、ジェットの低緯度側で乾燥化、ジェットの高緯度側で湿潤化を引き起こす。さらに、成層圏の西風偏差が地表まで下りてくると、海洋表層の南極周極流を加速し、海水域を広げ、海洋の深層循環にまで影響を及ぼす(第2図)。こうして、成層圏オゾン破壊の影響は、南半球大気海洋のほぼ全域に及び、それはDJFに最大となるという。

また、対流圏ジェットの極側シフトについても、気候モデルによる過去再現実験と将来予測実験の比較に基づき議論された。将来はオゾン層が回復するので、2000年と比べるとジェットのシフトは低緯度側に変位する。ただし、地球温暖化にともない熱帯域の拡大が生じ、両者の影響は相殺される、とのことであった。

(直江寛明)

#### 4. セッション3: 雪氷圏・海洋循環・炭素吸収への影響

このセッションでは、南極成層圏のオゾン層破壊が、対流圏の気候、天候の変動を通し、さらに雪氷圏、海洋循環、二酸化炭素の海洋への取り込みにまで影響を及ぼすということが詳細に議論された。Gareth Marshall(英, 南極調査所)は「南半球環状モード



第2図 南極域成層圏のオゾン減少が、対流圏の気候や海洋循環に影響を及ぼすメカニズムを説明する模式図(Waugh氏の厚意による)。詳細は本文参照。

の南極および南半球高緯度域の気温への影響」という題目で、Marilyn Raphael(米, カリフォルニア大)は「雪氷圏, 南極と海水」、Steve Rintoul(豪, CSIRO)は「海洋循環, 南極海の変化とオゾン」という題目で、それぞれ基調講演を行った。

オゾン層破壊の影響は、対流圏だけに留まらず、地表気候・雪氷圏・海洋循環にまで及ぶとされる。これは、セッション1のoverviewでWaughにより紹介された模式図(第2図)を用いて以下のように説明される。まず、オゾン減少による成層圏の寒冷化により、対流圏ジェットの強化と極側へのシフトが起こる。これにより南極海上の西風が強化され、海水の移流パターンの変化や、さらには西風に駆動されている南極海での子午面循環の強化が起これと考えられる。なお実際に、1990年代前半から2000年代後半までのCFC-12濃度の測定により、この子午面循環の強化と

整合的な水塊の性質変化が観測されている (Waugh *et al.* 2013) とのことである。

興味を持たれるのは、このような循環の変化により、海洋の二酸化炭素の取り込みがどのように変化するかである。南緯40度以南の海域は、人為起源二酸化炭素の海洋への全沈降のうち、おおよそ40%以上を担っていると見積もられており (Khatiwala *et al.* 2009)、その変化の炭素循環への影響は大きい。観測によると、大気中の二酸化炭素濃度が増加しているにもかかわらず、南極海での二酸化炭素の取り込みは増えていないとのことである。これは、上にみたオゾン減少にともなう南極海での子午面循環の強化により、炭素に富んだ深層水が海洋表層へより多く供給されることになり、二酸化炭素吸収効率が低下するからであると説明された。

また、海水の変動について幾度か議論がなされた。観測によると、南極大陸周辺の水氷量は増加しているが、いくつかのモデルでは、成層圏でのオゾン減少にともない水氷量は減少するという結果が出ている。これはモデルの欠陥によるものなのか、それとも海水変動に影響を及ぼす未知のプロセスによるものなのかは、よくわからないとのことである。

他に、南半球環状モード (SAM) についても活発な議論があった。Marshall の発表では、気候要素の変化が SAM との関連で説明されていた。ここで、SAM は数学的操作により取り出される半球規模の帯状対称なモードであるのに対し、観測される氷床の変化や海洋混合層の応答は局地的な帯状非対称なものである。そのため、SAM 指標の変動との相関関係の確認に留まらず、その間の物理過程を具体的に記述していくべきであるとの認識の共有がなされた。

(野口峻佑)

#### 5. セッション4：モデリングと変動予測

このセッションでは、オゾン減少の気候や天候への影響に関するモデリングと将来的な変動予測について、2つの基調講演とそれに関わる議論が行われた。

Nathan Gillett (カナダ環境省気候モデリング・解析センター) は、都合でワークショップに出席できず web 中継での講演となり、「オゾン減少に対する対流圏の応答」という題目で、気候モデルや化学気候モデル (CCM) による将来予測シミュレーション結果を中心にレビューを行った。成層圏極域でのオゾン減少は、南半球夏季 (DJF) の南半球環状モード

(SAM) の強化を引き起こすことが示されているが、オゾン層が回復する将来気候では、SAM が逆に弱まるとこれまで考えられていた。しかしながら、温室効果気体増加シナリオとオゾン層破壊物質 (ODS) 減少シナリオを組み込んだ CCM シミュレーション結果 (CCMVal-2) では、SAM の変化傾向に明瞭な変化は見られないとのことである。これは、ODS の減少はオゾン層の回復を通し、SAM を弱めるように働くが、逆に温室効果気体の増加は SAM を強めるので、両者が相殺されるためと考えられている。一方、化学反応を組み込まずに温室効果気体やオゾン層の変化を外部的に与えた大気海洋結合モデル将来予測実験 (CMIP5) では、DJF については SAM がほぼ一定、他の季節は SAM が強化されるとのことである。なお、CMIP5 の過去再現実験では亜熱帯ジェットの極側シフトと強化が見られるものの、再解析データの結果と比べると変化が小さいとのことである。また、DJF の期間において、対流圏の SAM を現実的に表現するためには、モデルの成層圏の鉛直層数を増加させることやオゾン変化の東西非一様性が重要である (東西一様なオゾン変化は SAM を弱く表現する) ことが示された。

Michael Sigmond (カナダ、トロント大) は、「南極海水の変化傾向・大気と海洋のカップリング・季節変動の予測」という題目で、成層圏オゾン減少、SAM の変動および海水の変動の関係について、現時点で海洋と結合した唯一の CCM であるカナダ中層大気モデル (CMAM) を用いたシミュレーション結果を中心に講演した。観測およびモデルシミュレーションの両方に、オゾンホールが SAM の強化を通して南極域海水を増加させるという特徴が見られるが、モデルは観測を十分には再現できていないとのことである。また、大気と海洋のカップリングについては、大気海洋結合モデル (CMAM) と、非結合の CCM が同じような変化傾向を示すことから、海洋から大気へのフィードバックは小さいということを議論していた。また、北半球においては、成層圏突然昇温後に北半球環状モード (NAM) 指数の予測精度が向上することが示されるが、それと同様に、南半球の最終昇温後の SAM の予測精度についても今後調べる必要があること、さらに、成層圏の鉛直解像度を上げると南半球対流圏の予測精度が上がるなどが議論された。

(飯田千尋, 廣岡俊彦)

## 6. ワークショップの印象

今回、私（飯田）は海外に行くのが初めての経験であり、大会の3カ月前に指導教員の廣岡教授に勧められるまで修士論文の内容を国際学会で発表することなど全く想像していなかった。そのような中、私が地球の反対側で開催された本大会に参加して感じたことを記す。

まず、印象的だったことを2つ挙げると、スケジュールが自由であることと、議論を大切にすることである。1つ目については、開催地が南米でありラテン気質なのか大会直前まで厳密なスケジュールが決まっていなかった。さらに、当日の変更も英語によって口頭のみで伝えられるため、一体今日は何の講演や議論が行われるのかといった状況で毎日会場に通っていた。また2つ目について、本大会はそれぞれのセッションのまとめや課題をその講演が行われた翌日の午前中に再度納得いくまで議論する形式であった。参加者が少ないこともあり、有名な研究者から学生までが本筋の議論に参加して私の席の前後左右から意見が飛び交い続ける様子はとても新鮮であった。この2つの特徴によって議論が長引いたとしても、臨機応変にスケジュールが進んでいく様子には驚いた。また、学生と若手研究者のみで今後の方向性について席を輪にして話し合い、代表者が大会中に発表するといったことも国内学会ではなかなか見られないものであった。

次に、私が参加したポスター発表は、昼食前に1-2分ほどでの口頭のショートプレゼンテーションがあり、私などは即席でつくった文章を話したものの、最後の Thank you というフレーズを言う頃には緊張で

声も足も震えてしまったものだが、5分くらい熱くアピールしている人もいた。ポスター発表では、内容に興味を持ってもらえると、私が英語をあまりできなくても気にせず質問され、なんとか発した回答が相手に伝わったときは本当に嬉しかった。一方で、相手の質問の意図が理解できず十分に回答できなかったときにはもどかしく、これほど自分が英語を真剣に勉強してこなかったことに後悔したことはなかった。また、人数が少なかったこともあり、Paul Newman（米、NASAゴダード宇宙飛行センター）が発表を聞きに来てくれたり、O'Neillが話しかけてくれたりと貴重な経験を多くすることができた。

最後に、初めての海外が南米のブエノスアイレスということもあり、国際線の飛行時間が片道約25時間、日本との時差は12時間、季節は日本と逆の夏で、街ではほぼスペイン語しか通じないというすべてが貴重な体験であった。ガイドブックに載っているよりこの地域の治安は良く、ヨーロッパ風の古い建物とドックの向こうに見える近代の高層ビルが建設されている様子は南米のイメージを一新させた（第3図）。また、タンゴを見ながらの懇親会もあり、この土地の文化に浸ることができた。自分の考えを世界に発信する面白さを少しは感じる事ができたので、この経験を今後活かしていきたいと思う。（飯田千尋）

### 略語一覧

- ABSL : Amundsen Bellingshausen Seas Low アムンゼン・ベリングスハウゼン海低気圧  
 AGU : American Geophysical Union 米国地球物理学連合  
 CCM : Chemistry-Climate Model 化学気候モデル  
 CCMVal-2 : The Second Round of Chemistry-Climate Model Validation Activity 第2回化学気候モデル相互比較プロジェクト  
 CFC : Chloro-Fluoro-Carbon クロロフルオロカーボン  
 CMAM : Canadian Middle Atmosphere Model カナダ中層大気モデル  
 CMIP5 : Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 第5期大気海洋結合モデル相互比較計画  
 CNRS : National Center for Scientific Research フランス国立科学研究センター  
 CSIRO : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation オーストラリア連邦科学産業研究機構  
 EESC : Equivalent Effective Stratospheric Chlorine 等価実効成層圏塩素量



第3図 高層ビルの建設が進む、ブエノスアイレスの港付近の風景。

JAS : Journal of the Atmospheric Sciences 米国気象学会大気科学ジャーナル

NAM : Northern Annular Mode 北半球環状モード

NASA : National Aeronautics and Space Administration 米国航空宇宙局

ODP : Ozone Depletion Potential オゾン層破壊ポテンシャル

ODS : Ozone Depleting Substance オゾン層破壊物質

SAM : Southern Annular Mode 南半球環状モード

SPARC : Stratospheric Processes And their Role in Climate 成層圏諸過程とそれらの気候への影響に関する国際共同研究

SSG : Scientific Steering Group 科学運営グループ

UNEP : United Nations Environment Programme 国際連合環境計画

WCRP : World Climate Research Programme 世界気候研究計画

WMO : World Meteorological Organization 世界気象機関

#### 参 考 文 献

Khatiwala, S., F. Primeau and T. Hall, 2009: Reconstruction of the history of anthropogenic CO<sub>2</sub> concentrations in the ocean. *Nature*, **462**, 346-349.

Waugh, D. W., F. Primeau, T. DeVries and M. Holzer, 2013: Recent changes in the ventilation of the southern oceans. *Science*, **339**, 568-570.

WMO, 2007: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No.50, 572pp., Geneva, Switzerland.

WMO, 2011: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No.52, 516pp., Geneva, Switzerland.