

SOWER/Pacific (Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region/Pacific Mission) について*

長谷部 文 雄**・塩 谷 雅 人***

1. はじめに

熱帯対流圏・成層圏におけるオゾン・水蒸気の分布とそれらの変動に対する支配過程の理解, また, 対流圏界面を通じた物質交換過程の解明は, 大気力学的に興味深い課題である。いっぽう, インドネシアの森林火災にともなって大気中に放出される炭化水素類や, 深層水の湧昇する熱帯東部太平洋の高い生物生産性に起因する高濃度ハロゲン化合物等のオゾン収支に対する影響評価は, 大気化学的に重要な研究課題である。これらの課題を視野におきながら, 熱帯地方で決定的に不足している衛星観測に対する検証データの提供をも目的として, われわれは Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region/Pacific Mission (SOWER/Pacific) を計画した。

ここでは SOWER/Pacific が狙う科学的な興味の対象について略述し, これまでおこなってきた3回のキャンペーン観測のあらましを紹介する。

なお, 1996年のガラパゴス調査は NASDA の支援を受けた。ガラパゴスでの観測の第一歩は住友財団の研究費によって, またクリスマス島での観測はアサヒビール環境研究助成金の援助, および Anne Thompson (NASA) の SHADOZ プロジェクトからの援助によって実現できたものである。そのほかの観測経費の主要部分は, 文部省科学研究費に依っていることを記し, それぞれに謝意を表わしたい。

2. SOWER/Pacific とは

高温・多湿な赤道域は大気大循環を駆動する心臓部で, 南北方向のハドレー循環と東西方向のウォーカー循環とが共存している。ハドレー循環は赤道地方の過剰な熱エネルギーと運動量を中緯度に輸送し, ウォーカー循環は海洋と相互作用して, エルニーニョ・南方振動 (ENSO) として知られる特異な現象を引き起こしている。エルニーニョの影響は大気波動を通して中緯度に伝播し, 冷夏・暖冬あるいは豪雨・干ばつなど様々な気候学的現象を引き起こすため, 熱帯地方は地球規模の環境変動を理解する上で極めて重要な領域といえることができる。

1997年から1998年にかけて観測史上最強といわれるエルニーニョが観測された。その影響は, 南米における大雨やインドネシアにおける雨期の遅れとして現れ, 制御を失ったバイオマス燃焼の結果, 東南アジア各地で大規模な煙霧の被害に見舞われたことは記憶に新しい。このように大規模なバイオマス燃焼が, 前駆気体の大量放出を通して対流圏オゾン分布に影響を与えていることは確実である (Fujiwara *et al.*, 1999a)。また, 平常時であれば熱帯西部太平洋域は最も活発な対流活動域であり, 発達した対流性積乱雲中の雷放電で生成された窒素酸化物のオゾン収支に対する役割が指摘されている。いっぽう, 熱帯東部太平洋域は有数の湧昇域として知られ, 高濃度の栄養塩に支えられた高い生物生産性は良漁場を提供するだけでなく, ヨウ化メチルなどのハロゲン化合物の大気中への大量放出とその解離生成物による触媒的オゾン消滅反応の強化が予想される。とりわけ, この海域では7月から10月頃にかけて海洋境界層の上に逆転層が発達するために, 境界層内に閉じこめられたハロゲン化合物によるオゾン消滅反応は, 熱帯東部太平洋における海洋境界層内のオゾン収支に大きな影響を与える可能性がある。

* Report on the SOWER/Pacific (Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region/Pacific Mission).

** Fumio Hasebe, 茨城大学理学部。

*** Masato Shiotani, 北海道大学大学院地球環境科学研究科。

大気オゾンがその生成域から遠く離れた中高緯度で春先に極大値を示すという事実を見いだしたドブソンや成層圏の乾燥状態が大気塊の熱帯対流圏界面通過時に曝される低温によりもたらされることを見抜いたブルーワーにより、地球規模の物質輸送が推論されたことは良く知られている。全球規模の質量輸送に関する理解は、いわゆるダウンワードコントロールにより駆動される非断熱循環として大きく前進したが (Holton *et al.*, 1995), 熱帯地方のホットタワーによるオーバーシュートや中緯度における圏界面量込みにもなう微小スケールの混合過程の対流圏-成層圏交換過程への寄与の評価は、依然として不明瞭なまま残されている。いっぽう、熱帯対流圏界面付近における大気波動の破碎にもなう対流圏オゾンの増大が指摘され、対流圏-成層圏交換過程の理解に関する新しいページが開かれようとしている (Fujiwara *et al.*, 1998)。オゾンが成層圏に源を持ち、水蒸気が主に対流圏に源を持つ大気組成であるために、オゾンと水蒸気は互いに相補的な役割を演じながら大気大循環にもなう物質輸送の理解の発展の歴史に重要な契機を与えてきた。熱帯には ENSO の他に 1 年周期変動と準 2 年周期振動の存在が知られているが、光化学的寿命が長い下部成層圏から対流圏のオゾンは、これらの現象に対応した力学過程に主として依存しながら、興味深い変動を示している (たとえば Shiotani, 1992; Hasebe, 1993, 1994; Shiotani and Hasebe, 1994)。こうした力学過程は、前述のように成層圏の乾燥状態をも直接支配している。また、水蒸気は強力な温室効果ガスであると同時に大気中の濃度が温度のフィードバックを受けるため、その熱帯対流圏における挙動は地球温暖化の定量的評価の上で鍵になる。地球温暖化にもなうエルニーニョの強度・頻度の増加する可能性が指摘されるなど、熱帯域を対象とした研究は今後の飛躍が期待される重要な分野である。そのような研究の発展の中で、ともに温室効果ガスであるオゾンと水蒸気の動態の解明が重要課題の一つであることは言を待たない。

SOWER/Pacific は、衛星観測で赤道域のオゾン全量分布に見出された東西波数 1 の構造 (Shiotani, 1992) の解明を直接の契機として提案された。その後の議論の展開の中で上述された様々な観点が付加され、現在では、熱帯太平洋域を対象にオゾン・水蒸気の気候値を確立するとともに、大気力学的観点からの対流圏界面付近の物質交換過程と大気化学的観点にもとづく対流圏オゾン変動の解明を軸に、力学・放射・

光化学の 3 分野を網羅しながら、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の長期観測計画として整理されている。SOWER/Pacific の特徴は、過去に多くの研究者の興味を引いてきた熱帯西部太平洋だけではなく、中部・東部太平洋にも注目し、東西方向の構造を明らかにしようと試みている点である。前述のウォーカー循環の存在により、熱帯太平洋域では東西方向に全く異なる気候状態が出現する。西太平洋には「海洋大陸」を中心に大規模な上昇流が組織され、地球上で最も高高度で最も低温の圏界面が位置している。一方、熱帯東部太平洋は冷たい湧昇流の影響を受けるため、赤道直下に位置していても高温湿潤となるのは比較的短い雨期の期間に限られており、活発な積雲活動にもなう降水を観測することは稀である。また、熱帯中部太平洋は、ENSO にもなう変動を最も顕著に受ける領域であると同時に、オゾン生成域からは最も隔離された領域であり、大陸起源の大気塊が観測されることも稀であるため、おそらく地上で最も低濃度のオゾンが観測されるはずである。このように異なった気候条件が、大気力学過程・大気化学過程を通してオゾンや水蒸気の分布に決定的な影響を及ぼしていると考えられるのは既に述べたとおりである。

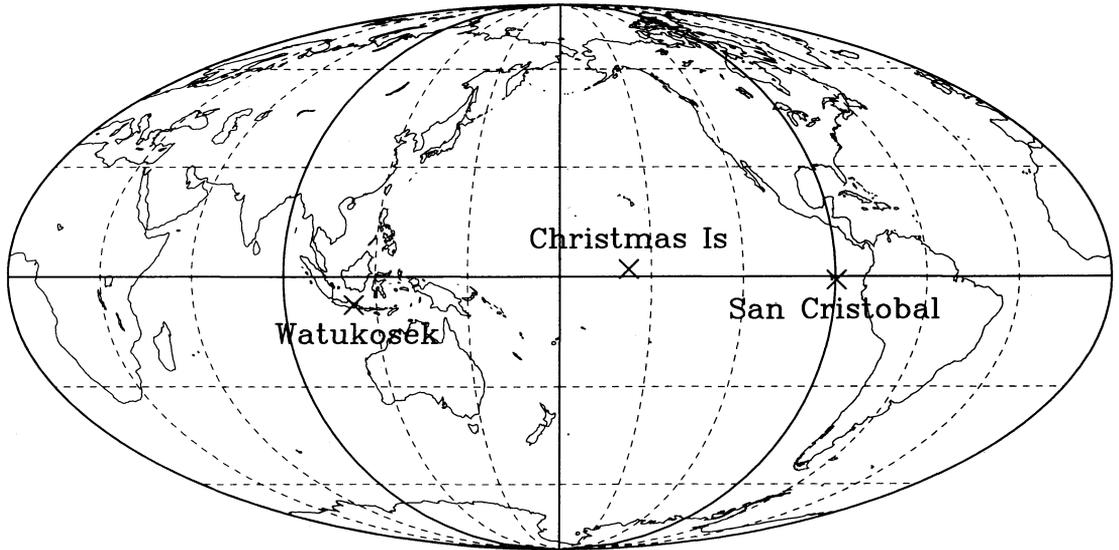
3. これまでの足跡

このような問題意識の下、SOWER/Pacific では熱帯太平洋域を代表する観測点として以下の 3 地点を候補として選んだ。西太平洋域にあるインドネシアのワトコセ、中央太平洋キリバスのクリスマス島、東太平洋エクアドルのガラパゴス諸島である (図 1 参照)。特に、中部・東部太平洋域では、継続的な観測を可能にする島嶼が非常に少なく、一般的な気象観測もほとんどおこなわれていない領域であり、これらの地域においてはオゾン・水蒸気のみならず定常的な高層気象観測の実現も狙っている。

水蒸気観測に関しては、上部対流圏から成層圏領域にかけてその濃度が非常に低いため、通常のラジオゾンデによって情報を得ることができない。そこでわれわれは、気球搭載用の凝固点湿度計を用いた水蒸気観測に豊富な経験を持つ NOAA/CMDL のグループ (Oltmans, 1985; Oltmans and Hofmann, 1995; Vömel *et al.*, 1995a) の協力を得て水蒸気・オゾンゾンデ観測をおこなっている。

3 つの観測点のうち、まずインドネシアのワトコセについては、これまで既に東京大学と NASDA の協力

SOWER/Pacific



第1図 SOWER/Pacific の観測点

のもと LAPAN がオゾンゾンデ観測を実施しており、赤道域で継続的にオゾンゾンデ観測がおこなわれている数少ない観測点の一つである (Fujiwara *et al.*, 1999 b). 南アメリカ大陸西岸の沖にあるガラパゴス諸島のうちの一つ、サンクリストバル島では以前から WMO の支援によってバイサラゾンデシステムにもとづく高層気象観測がおこなわれていた。また、NOAA の研究グループによってウインドプロファイラーも設置されている。ここは1日1回飛行機の便があり、比較的アクセスが容易である。ハワイの南にあるクリスマス島は、古くは原爆実験のおこなわれたところでもあるが、現在、ゾンデ観測のための地上施設はない。ただ、ここにも NOAA のウインドプロファイラーが設置されている。また、アデレード大学の MF レーダも稼働している。クリスマス島は、赤道中央太平洋の拠点ともなるべき場所であると我々は認識しているが、残念なことに飛行機の便は1週間に1便のみとアクセスに難点がある。なお、ここでは1993年に我々の共同研究者によってオゾン・水蒸気観測がおこなわれた (Vömel *et al.*, 1995b, Kley *et al.*, 1997)。

我々がこの観測計画に思いを巡らせ始めたとき、インドネシアのワトコセでは既にオゾンゾンデ観測がおこなわれていたため、まず中部・東部太平洋域に目をやり、その中で高層観測所があってアクセスの比較的

容易なガラパゴス諸島・サンクリストバル島をまず第一の候補と考えた。1996年7-8月には、ウインドプロファイラーを設置していた NOAA のグループが保守のためサンクリストバル島を訪れるというので、それに同行して、まずこの島でのオゾン・水蒸気ゾンデ観測の可能性を探った。さすがに、既に高層気象観測をおこなっているだけあって、ゾンデ風船用の水素発生器なども設置されており、オゾン・水蒸気ゾンデ観測をおこなうことは比較的容易であると思われた。

当初、観測のための資金が思うように調達できない状況がしばらく続いたが、1998年3-4月、2週間にわたる最初のキャンペーン観測がサンクリストバル島で実現した。これは、熱帯東太平洋域において、我々が知るところでは世界ではじめてのオゾン・水蒸気観測である。キャンペーン期間中、通常のラジオゾンデ観測に加えて、オゾンは2日に1回(6発)、水蒸気は4日に1回(オゾン観測と同時に3発)の観測をおこなった。さらに、サンクリストバル島では第1回目と同規模のキャンペーンを1998年9月にも実施した。

次に、我々が目指したのはクリスマス島である。こちらは1998年10-11月に現地調査をおこなった上で、1999年2-3月にはサンクリストバル島とクリスマス島での同時キャンペーンをおこなうことに成功した。(ただし、クリスマス島ではオゾンゾンデ観測のみ。)

これまでのところ、キャンペーン的ではあるが少しずつ継続してデータが得られるようになってきている。(観測結果については、速報的ではあるが、第9回大気化学シンポジウム、第5回大気化学討論会講演、IUGG99などで既に発表しているので、興味のある方はそれらの講演集等を参照されたい。)ただ、我々としては、単に測器を持ち込んで自分達の興味だけでデータを取って帰る、というのは本意ではない。できることならば、我々と地元の人達との間で経験を共有して、それがその土地に根付くことを願うものである。しかしながら、この地域における大気科学研究を支える経済基盤・下部構造は容易に想像されるように未成熟であり、継続的な観測をおこなうにはまず資金的な面での問題が生ずる。これが、現在のところ我々自身キャンペーン的にならざる観測をおこなえない要因の1つであるが、こういった問題点も時間をかけて解決していきたいと考えている。

4. 今後の計画

サンクリストバル島、クリスマス島における我々のSOWER/Pacific計画については、上記したように、まだまだ継続的な観測ができる状況ではないが、幸いにも研究費のメドがつき、あとしばらくは観測をおこなうことができる予定である。

まず、もっとも近い観測計画としては1999年9-10月に、サンクリストバル島、クリスマス島での同時観測に加え、水産庁の照洋丸を利用してその2点をつなぐ形で東太平洋赤道域の観測をおこなう予定である(本稿印刷時には実施済)。照洋丸においては、海洋観測はもちろんのこと、大気海洋相互作用までを視野に入れ大気境界層に興味を持つグループ、および船上での大気化学分析をおこなうグループとの相乗り観測をおこなう。具体的には、1日4回程度のラジオゾンデ観測、1日1回程度のオゾンゾンデ観測をおこなう。(残念ながら、水蒸気ゾンデ観測は、今回もサンクリストバル島のみでおこなわれる。)船上では、地表オゾン観測、炭化水素やハロカーボン類の測定、さらには海洋中のクロロフィル観測もおこなう予定である。

このキャンペーンが終了すれば、サンクリストバルでは2年4回、クリスマス島では1年2回の観測データが蓄積されるわけで、我々が目指す科学的な目標に向けては、おおまかな描像が浮かび上がってくることを期待している。今後は、これまでのようなキャンペーン観測だけではなく、継続的な観測を目指した計画を

立てていきたい。もちろん、先にも述べたように、息の長い観測をおこなっていくためには地元の人の協力がなければ不可能である。サンクリストバルでは、地元の人の協力を得てすでにオゾンゾンデ観測をおこないはじめており、今後は水蒸気観測にも挑戦してゆく予定である。いっぽうクリスマス島では、物資、人材の両面からまだまだ継続的な観測は難しそうであると我々は判断しているが、たとえば地上オゾン計のようなものを設置して継続観測の足掛かりを掴みたいと考えている。

謝辞

本稿の著者としては、実際に原稿執筆を担当したもののみを記したが、これまで以下の共同研究者に観測あるいは調査に参加してもらったなどしてSOWERを支えていただいた(敬称略)-S. J. Oltmans (NOAA/CMDL), H. Vömel (NOAA/CMDL), M. Haeg (University of Colorado), K. Gage (NOAA/AL), 西憲敬(京大院・理), 小川利紘(NASDA/EORC), 藤原正智(東大院・理), 庭野将徳(北大院・地球環境)。ガラパゴスでの観測キャンペーンを実施するにあたっては、エクアドル気象・水文研究所(INAMHI)のメンバー、特に、現地観測所のMario Agamaほかのメンバーから多大の協力を得た。また、クリスマス島での観測キャンペーンを実施するにあたっては、測器類の搬入・準備にあたってJohn Brydenの協力を得たことに感謝したい。

参考文献

- Fujiwara, M., K. Kita and T. Ogawa, 1998: Stratosphere-troposphere exchange of ozone associated with the equatorial Kelvin wave as observed with ozonesondes and rawinsondes, *J. Geophys. Res.*, **103**, 19173-19182.
- Fujiwara, M., K. Kita, S. Kawakami, T. Ogawa, N. Komala, S. Saraspriya and A. Suropto, 1999a: Tropospheric ozone enhancements during the Indonesian forest fire events in 1994 and in 1997 as revealed by ground-based observations, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2417-2420.
- Fujiwara, M., K. Kita, T. Ogawa, S. Kawakami, T. Sano, N. Komala, S. Saraspriya and A. Suropto, 1999b: Seasonal variation of tropospheric ozone in Indonesia revealed by 5-year ground-based observations, *J. Geophys. Res.*, (in press).

- Hasebe, F., 1993 : Dynamical response of the tropical total ozone to sea surface temperature changes, *J. Atmos. Sci.*, **50**, 345-356.
- Hasebe, F., 1994 : Quasi-biennial oscillations of ozone and diabatic circulation in the equatorial stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, **51**, 729-745.
- Holton, J., P. H. Haynes, M. E. McIntyre, A. R. Douglass, R. B. Rood and L. Pfister, 1995 : Stratosphere-troposphere exchange, *Rev. Geophys.*, **33**, 405-439.
- Kley, D., H. G. J. Smith, H. Vömel, H. Grassl, V. Ramanathan, P. J. Crutzen, S. Williams, J. Meywerk and S. J. Oltmans, 1997 : Tropical water-vapor and ozone cross-section in a zonal plane over the central equatorial Pacific Ocean, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 2009-2040.
- Oltmans, S. J., 1985 : Measurements of water vapor in the stratosphere with a frost point hygrometer, *Measurements and Control in Science and Industry, Proceedings of the 1985 International Symposium on Moisture and Humidity, Washington, D. C., Instrument Society of America*, pp. 251-258.
- Oltmans, S. J. and D. J. Hofmann, 1995 : Increase in lower-stratospheric water vapour at a mid-latitude Northern Hemisphere site from 1981-1994, *Nature*, **374**, 146-149.
- Shiotani, M., 1992 : Annual, quasi-biennial, and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) time-scale variations in equatorial total ozone. *J. Geophys. Res.*, **97**, 7625-7633.
- Shiotani, M. and F. Hasebe, 1994 : Stratospheric ozone variations in the equatorial region as seen in Stratospheric Aerosol and Gas Experiment data. *J. Geophys. Res.*, **99**, 14575-14584.
- Vömel, H., S. J. Oltmans, D. H. Hofmann, T. Deshler and J. M. Rosen, 1995a : The evolution of the dehydration in the Antarctic stratosphere vortex, *J. Geophys. Res.*, **100**, 13919-13926.
- Vömel, H., S. J. Oltmans, D. Kley and P. J. Crutzen, 1995b : New evidence for the stratospheric dehydration mechanism in the equatorial Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 3235-3238.



第6回二酸化炭素国際会議 (Sixth International Carbon Dioxide Conference) のお知らせ

1981年9月にスイス ベルンにて第1回会議が開催されました「二酸化炭素国際会議」も2001年には第6回を迎えることになり、前回のケアンズ会議において日本で開催されることが合意されました。それに伴い実行委員会を組織し、開催準備を進めているところであります。この度、会議開催を具体的に予告するためのfirst circularを作成しました。

会議の概要は以下ようになっております。詳しくは下記のwebをご覧ください。また、本会議に関心のある方は、今後の情報をお送り致しますので、事務局までご連絡下さい。

記

目的：地球表層における二酸化炭素の変動と循環に関する最新の知見の発表と討議

開催日：2001年10月1日(月)～5日(金)

開催場所：仙台国際センター

主催団体：二酸化炭素国際会議組織委員会

事務局：〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉

東北大学大学院理学研究科

大気海洋変動観測研究センター

青木周司

Tel : 022-217-5792 Fax : 022-217-5797

E-mail : secre@co2.geophys.tohoku.ac.jp

URL : <http://co2.geophys.tohoku.ac.jp>