

## 成層圏変動とその気候に及ぼす影響に関する つくば国際ワークショップの報告\*

内野 修<sup>\*1</sup>・神沢 博<sup>\*2</sup>・小寺 邦彦<sup>\*3</sup>  
永井 智広<sup>\*4</sup>・廣田 道夫<sup>\*5</sup>・牧野 行雄<sup>\*6</sup>

### 1. はじめに

大規模な火山噴火による成層圏エロゾルの増加や、南極のオゾンホールなどに見られる成層圏オゾンの減少は、気候変動に深く関わっている。一方成層圏に関する知見は対流圏に比較して不十分であり、不確定部分が多く残されている。近年急速に進歩しているリモートセンシング技術等を駆使して、成層圏変動のメカニズムを解明し、精度の高い気候モデルを構築して、気候変動予測の精度を高めることは緊急の課題である。

このため各国立試験研究機関等の参加により、1995(平成7)年度から科学技術振興調整費・総合研究「成層圏の変動とその気候へ及ぼす影響に関する国際共同研究」を実施してきたが、1997年度はI期の最終年度にあたる。この時期に、これまでの成果の確認とその科学的な意義の検討を行い、今後の研究計画へ反映させるため、気象研究所の主催、科学技術庁、資源環境技術総合研究所、通信総合研究所、国立環境研究所、宇宙開発事業団、資源協会地球科学技術推進機構の後援により、1997年10月20日(月)～22日(水)、茨城県つくば市において標記ワークショップを開催した。

ワークショップには、本研究の担当者のみならず世界気候研究計画(WCRP)の副計画である「成層圏過程が気候に及ぼす影響の研究(SPARC)」など関連する国際的な研究計画を推進している各国の研究者を招聘し、またわが国の次世代地球観測衛星の大気化学観測ミッション計画を検討するグループ(ATMOS-C1チーム)とも協力し、より広範囲の大気科学研究者と意見交換を行った。本報告は同ワークショップ・プログラム委員会メンバーがまとめたものである。

本ワークショップのプロシーディングスを御入用の方は、(社)資源協会 地球科学技術推進機構 地球科学技術フォーラム事務局(担当:大竹良征, TEL 03-5418-7175)にお問い合わせ下さい。

### 2. 概要

海外からの招聘研究者16名を含めて、参加者総数は103名であった。研究発表は、基調講演4件を含む51件で、各セッション名と発表件数は第1表の通りである。

初日は、野瀬気象研究所長の歓迎の挨拶に続いて、SPARC共同議長 M. Geller 博士他3人の基調講演があり、午後から一般の研究発表に入った。3日目午後の総括討論では、以下の2点を確認した。

① 本研究は国際 SPARC 計画の欠くべからざる一部であり、その全ての面において重要な役割を果たしている。本研究が科学技術庁の助成のもとに継続されることを希望する。

② 衛星観測は、複数年にまたがる全球的データセットを得るための重要かつ効率的な方法であり、全球気候モデルの開発と検証に不可欠である。ATMOS-C1衛星は気候/化学システムに関わる主要な問題に対し、有望な計画であり、我々はその開発の継続を支持する。本計画は二国間及び国際的協力により、さらに効果的なものとなるであろう。

\* Report on Tsukuba International Workshop on Stratospheric Change and Its Role in Climate and on the ATMOS-C1 Satellite Mission.

\*1 Osamu Uchino, 気象庁観測部.

\*2 Hiroshi Kanzawa, 国立環境研究所.

\*3 Kunihiko Kodera, 気象研究所気候研究部.

\*4 Tomohiro Nagai, 気象研究所気象衛星・観測システム研究部.

\*5 Michio Hirota, 気象研究所(現:気象大学校).

\*6 Yukio Makino, 気象研究所環境・応用気象研究部.

© 1998 日本気象学会

第1表 「成層圏変動とその気候に及ぼす影響に関するつくば国際ワークショップ」の研究発表表.

セッション名	発表件数
基調講演	4
「ATMOS-C1ミッション」	14
「成層圏エロゾルと極成層圏雲」	5
「赤道域成層圏」	4
「成層圏微量成分と不均一相反応」	6
「成層圏-対流圏 気候システム解析」	9
「力学-化学結合モデル」	5
「成層圏気候モデル」	4
総括討論	
合計	51

最後に内野（標記ワークショップ実行委員長；気象庁）の挨拶によりワークショップを閉幕した。

### 3. 発表

以下に、各セッションのラポーターの報告を基にして、セッション毎の概要を報告する。

#### 3.1 基調講演

Geller (New York State Univ.) は、SPARCが今後取り組むべき課題について、以下の4点を挙げた。

1) 重力波による熱と運動量フラックスの研究、特にラジオゾンデ観測網の高分解能データを使って、重力波の形態学を研究する新たな国際共同研究の推進。

2) 中緯度成層圏における波動を駆動力とした半球全域の循環及び惑星波動の活動の重要性を記述する新しい研究法の開発。この方法による大気循環モデルの改良に必要な科学的探求は未だ定式化の途上にある。

3) 上部対流圏・下部成層圏における化学と気候の相互作用、及び極域だけに限定されない上部対流圏における不均一相化学反応の重要性。

4) 気候変化の指標を与える、成層圏の諸要素の監視。すなわち成層圏気温、オゾン鉛直分布の変化、水蒸気、力学等におけるトレンドの監視。

41年にわたる観測の中で、最近6年間、成層圏突然昇温のパターンが変化していることは興味がある。

Labitzke (Berlin Freie Univ.) は、変化の傾向は基本的に太陽の11年周期と準2年周期振動(QBO)との干渉に左右されるが、たまに火山爆発が重なる時の短期的な傾向には注意を要することを指摘している。

Bojkov (WMO) は、人為的なオゾンの変化につい

て、以下のことを示した。

南北両半球の中緯度帯でオゾンの減少率は1979~1996年の全期間を通じて、確実に40%/10年であった。

南極オゾンホールのは大きさは、極渦の力学によって制限され、過去5年間本質的に飽和してしまっているが、その寿命は、1950~60年代の頃より1か月長くなっている。渦崩壊が遅れるのは、オゾンの減少による加熱の低下によって、極渦が安定化するためである。

大気中塩素の増加は、ここ数年、晩冬季のシベリア上空に有為なオゾンの減少をもたらした。

北半球の対流圏オゾンの経度方向の分布に変化が見られる。この変化は気候を変化させるものとして重要であるので、注意深くモデルに組み込む必要がある。ただし変化の地理上の分布は他の温室効果気体とは異なる。

Labitzke は、年平均値から、最も大きな成層圏気温の傾向として、亜熱帯で $-0.6^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 、高緯度域で $-0.7^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ が得られていることを示した。また圏界面の高さにも変化があった。しかし年平均値は複雑な力学過程を隠してしまっていることも事実である。季節毎に見ると、北半球高緯度の50 hPa 高度で $-2^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ という劇的な気温変化が観測された。

トレンド解析の際には、データセットの長さが重要であり、慎重な取扱いが必要である。1979年以後の傾向には不確実性も大きい。また成層圏突然昇温の発生が遅れる傾向も見られる。

小寺(気象研究所)は、SPARCの大気大循環モデル相互比較計画(GRIPS)を解説した。この計画には、各モデルの特徴、物理量が如何にパラメーター化されているか、モデルの気候値がどのようなものかということも記述することも含まれる。

また彼は、北半球冬季の循環における成層圏-対流圏の結合した変動について、極夜ジェットがより強いと、プラネタリー波の南北方向への伝播が、赤道方向に強化されることを示した。さらにオゾン変化が放射バランスに影響し、直接的に気温を変化させるのとは別に、オゾン変化が力学に影響する複雑な関係があることを指摘した。

#### 3.2 ATMOS-C1ミッション

小川(東京大学)は、ATMOS-C1衛星の背景及び任務を解説した。その目的は、オゾンの力学/化学過程を理解し、温室効果気体やエロゾルの生成・消滅域を定量的に把握し、地球温暖化及びオゾン破壊予測モ

デルを改良することである。方法は全球的な衛星観測で、データを結合し、3次元大循環モデルや化学輸送モデル用のデータベースを開発することである。中根(国立環境研究所)は、未解明の重点領域として、オゾンの減少した極域と気候の相互作用、極域と中緯度域との相互作用、対流圏-成層圏相互作用、小規模過程の重要性、上部対流圏/下部成層圏におけるオゾンの変化等を挙げた。

塩谷(北海道大学)、長谷部(茨城大学)、Voemel(NOAA/CMDL)は、成層圏-対流圏の交換、惑星規模の熱帯オゾンの変化、熱帯域のオゾンと水蒸気のゾンデ観測について各々詳細な研究を紹介した。

Gille(NCAR)は、2002年打ち上げ予定のNASAのEOS(Earth Observing System)化学プラットフォーム搭載機器HIRDLS(High Resolution Dynamics Limb Sounder)、MLS(Microwave Limb Sounder)及びTES(Tropospheric Emission Spectrometer)について紹介した。これらにより上部対流圏・下部成層圏における包括的な観測が計画されている。Kunzi(Bremen Univ.)はマイクロ波放射計の成果と将来計画を紹介した。続いて柴崎(國學院大学)、増子(通信総合研究所)、鈴木(国立環境研究所)、青木(気象研究所)、小川(東京大学)、阿保(東京都立大学)がATMOS-C1衛星の搭載機器について、開発の現状を述べた。

Schoeberl(NASA/GSFC)は、UARS(Upper Atmosphere Research Satellite)の成果に基づき、科学的な目標は問題が解決されると共に変化するので、計画は柔軟性と巾を持つべきことを強調した。また長寿命のトレーサーデータは大変価値があること、軌道の決定は、科学者と技術者の綿密な協力によって行われるべきこと、アルゴリズムは打ち上げ前に十分開発すべきこと、データは何回にもわたって再処理する必要があること等を指摘した。

### 3.3 成層圏エロゾルと極成層圏雲(PSC)

エロゾルライダー観測網がカナダ・ユーレカ(80°N)、つくば(36°N)、那覇(26°N)、インドネシア・バンドン(7°S)及びニュージーランド・ローダー(45°S)に展開されてきた。1997年に開始されたバンドンを除いて、数年のデータが蓄積されている。永井(気象研究所)はこれらのデータを用いてピナトゥボ火山起源の成層圏エロゾルの減少過程を示した。その時定数(1/e)は1.3年と推定された。またエロゾル後方散乱係数の積分値は、中高緯度で大きな季節変化を示

すが、これは圏界面高度が変化するためである。

1994/95年の冬以来PSCがユーレカで観測されている。永井は1995年1月及び1997年2月の興味深い事例を示した。そこでは粒子は硝酸三水和物が形成される気温よりも5K以上高い気温で観測された。

柴田(名古屋大学)はスバルバル(79°N)で、ライダーにより観測されたPSCについて述べた。今まで4年間、毎冬「サンドウィッチ」構造、即ち約5kmの厚さを持った偏光解消度のない層の上下に厚さ約0.5~1kmの比較的薄い、偏光解消度のある層を観測した。この構造は1時間程度で生成するので、空間的スケールは100km以下と考えられる。硫酸エロゾルに水蒸気や硝酸が取り込まれる微物理モデルが、現象をある程度説明できる。

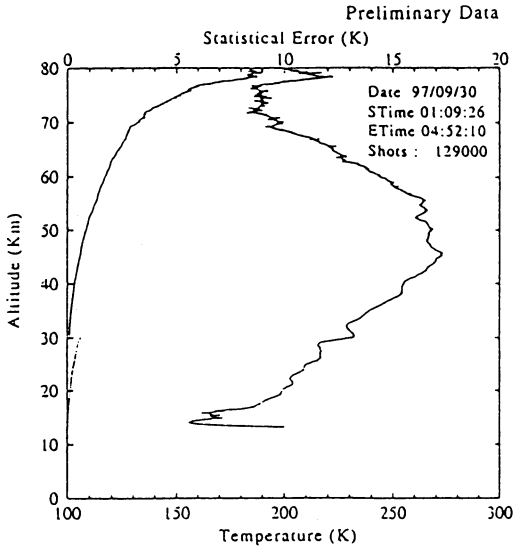
Carswell(York Univ.)はユーレカでのオゾン、エロゾル及び気温のライダー観測について報告した。オゾンは通常DIAL(Differential Absorption Lidar)で測定される。エロゾルが多い時、PSCが存在する時はラマンライダー法が採用される。1994/95年以降、冬のオゾンは大きく減少しており、40~50%も減少した層が見られた。また70kmまでの等温的な気温鉛直分布が、中部成層圏の強い渦領域の内側で見られた。

藤原(福岡大学)は、ユーレカとインドネシアにおける、気球搭載の光学的粒子ゾンデによるエロゾル粒径分布の観測について報告し、安井(通信総合研究所)は、それをライダー観測と比較した。観測は1994年以来エロゾル量が減少していることを示している。赤道域成層圏の粒子の数密度は高緯度域より大きい。しかし高緯度では大きな粒子がより多く、粒子の全質量は高緯度でより大きい。

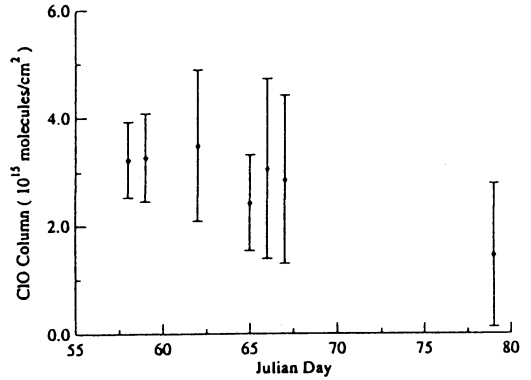
### 3.4 赤道域成層圏

Agus(インドネシア航空宇宙局(LAPAN))は、インドネシアにおける大気観測の現状を紹介した。LAPANは、南緯10.2度から北緯1.5度、東経107度から136度までの広い領域に9つの観測所を展開しており、赤道大気の研究に焦点を合わせて、日本を含む各国との国際共同研究を実施している。

水谷(通信総合研究所)と永井(気象研究所)は、バンドンに設置された新しいライダーシステムを紹介した。いずれもNd:YAGの3波長(355, 532及び1064nm)を利用し、1つは高度35kmまでのエロゾルの後方散乱と偏光解消度を測定している。もう1つは、成層圏の温度測定と重力波研究のために多チャンネルの受信部を有し、レーリー散乱及びラマン散乱(窒素



第1図 インドネシア・バンドンにおける気温の鉛直分布の予備観測結果(1997年9月30日)。図中左側に統計誤差を示す。



第2図 1997年の春、ユーレカ上空で観測されたClOの日平均鉛直カラム量。FTIR法による。

の386 nm, 及び水蒸気の408 nm)を受信することができる。第1図に気温鉛直分布の予備観測結果を示す。誤差2 Kで高度60 kmまで観測可能である。

Kaloka (LAPAN) は、インドネシアにおける紫外線観測について報告した。全天紫外日射計により、数地点で1992年以来観測を実施しているが、UV-Bは着実に減少しており、太陽黒点数と興味深い相関を示している。

### 3.5 成層圏微量成分と不均一相化学反応

牧野(気象研究所)は、ユーレカ及びつくばで行われたフーリエ変換赤外分光(FTIR)観測について報告した。ユーレカでは塩素活性化の様子が見られた(下部成層圏におけるHClの減少とClOの増加、第2図)。1996年4月につくば(38°N)上空で極渦の空気が観測されたのは特に興味深い。落合(通信総合研究所)は、オゾン及びClO用に新しく開発されたミリ波放射計について、1997年春のニーオルセンにおける国際比較観測の結果を示した。Matthews(ニュージーランド国立水文大気研究所)は、南極におけるHClやClO等の測定について報告した。FTIR観測から得られたHClの鉛直分布は、マイクロ波放射計によるClOや、DOAS(Differential Optical Absorption Spectroscopy)によるClONO<sub>2</sub>の結果と整合性を有するものであった。

後半の発表は直接成層圏の研究ではないが、大気化

学に関する興味深い話題であった。横内(国立環境研究所)は、北太平洋上の塩化メチル、臭化メチル及び沃化メチル(CH<sub>3</sub>Cl, CH<sub>3</sub>Br, CH<sub>3</sub>I)の測定について述べた。試料空気は船上で採取され、ガスクロマトグラフ質量分析法によって分析される。これらの化合物が最終的にどれくらい成層圏に達するかはまだ未解決である。牧田(航空宇宙技術研究所)は、粒子及び温度構造を考慮したジェット機排ガスのシミュレーション結果を報告した。忽那(資源環境技術総合研究所)は、気相及び不均一相の化学反応実験装置を紹介した。反応槽における壁効果を避けるため、粒子を音波により空中浮遊させる方法が使われた。

### 3.6 成層圏-対流圏気候系の解析

黒田(気象研究所)及び川平(福井県立大学)は南半球の年々変動を解析した。平均帯状風の偏差場から抽出された年々変動のモードは、冬季、極方向と下向に伝播し、波動活動の季節変化を伴う。1989年以後のオゾン全量の東西波数1の増大と惑星波動の東西波数1の増大との関係が示唆された。この関係は、1989年以後明瞭に変化した対流圏の循環とも関係している。

1997年3~4月の北極の極めて冷たい安定な極渦に関連して、梶原(気象庁)は、この期間極めて低濃度のオゾンが見られたことを報告した。神沢(国立環境研究所)は、ADEOS衛星のILAS(Improved Limb Atmospheric Spectrometer)データによって、渦の構造を解析した。

Harris(欧州オゾン研究協力ユニット)は、欧州におけるオゾン研究の成果と計画について紹介した。

山崎(北海道大学)は、変換されたオイラー平均残

差循環を使用し、成層圏—対流圏の大気交換を取り扱ったが、熱帯における上向き質量フラックスは北半球の秋に極大、夏に極小を持つことを示した。QBOとピナトゥボ火山爆発の影響も、長期的傾向と共に検出された。また彼は、成層圏—対流圏の大気交換を推定するために、精巧なトラジェクトリー計算を行った。正味の移流運動としてブリューワー・ドブソン循環が得られた。

原田（(財)日本気象協会）は、10日間3時間毎のラジオゾンデ観測からニュージーランド上空の重力波の特徴を報告した。結果は大規模な気象擾乱が、これらの重力波を引き起こしている可能性を示している。佐藤（京都大学）は、高分解能のGCMシミュレーションに現れた重力波の全球分布と3次元的伝播を、波の運動量及び熱輸送と共に解析し、観測とよい一致を得た。

### 3.7 力学—化学結合モデル

ここでは、それぞれの結合モデルにおいていくつかの重要な力学・化学相互作用が起こり得ることが示された。

ほとんど全てのモデルにおいて、高度40 kmのオゾンは観測より低く見積もられている。Smith (NCAR) は、彼らの3次元モデルをUARSデータやUKMO (英国気象局)モデルによる同化データに強制的に合わせることによってより良い結果を得た。最も重要な変化は、UARSによるCIOデータを使用したことである。いくつかのグループから指摘されている、 $O+HO_2 \rightarrow OH+O_2$ の反応速度の減少(40%)も、結果を改善した。

Austin (UKMO) は、成層圏におけるオゾンの減少から気候にフィードバックされる放射の効果について紹介し、結合モデルの予備の結果を示した。オゾン全量観測との比較は、このモデルでは極域における下降が不十分であることを示している。彼は放射スキームの改良が、この問題を解決できることを示した。

永島（東京大学）は、大気大循環モデルによる南極オゾンホールシミュレーションを報告した。結果はオゾン破壊が不十分であった。原因はUARSのCLAES (Cryogenic Limb Array Etalon Spectrometer) データに由来する過剰な水蒸気(13 ppmv)及びそれによるPSCの生成と考えられる。同じUARSのMLSまたはHALOE (Halogen Occultation Experiment)の水蒸気データの方がより良いという指摘があった。

秋吉（国立環境研究所）は二酸化炭素倍増及びピナ

トゥポエーロゾルの、化学組成の変化に及ぼす効果を1次元化学放射結合モデルによって考察したが、①二酸化炭素倍増による成層圏気温の低下は、オゾンの増加をもたらす、逆に下部成層圏の気温を数年にわたって若干回復させること、②ピナトゥボ起源のエーロゾルによって、下部成層圏に4.0Kの気温上昇と5%のオゾン減少が見られることを示した。

佐々木（気象庁）は、2次元モデルと結合させた3次元化学輸送モデルについて報告した。冬季のオゾンは、初めの数週間TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)の変動と良く一致していたが、その後モデルでは高緯度にオゾンが過剰となった。モデルのトップが10 hPaというのは現実的なシミュレーションにとっては低すぎるという指摘があった。

### 3.8 成層圏気候モデル

Pawson (Berlin Freie Univ.) は、SPARC/GRIPSについて報告した(基調講演)。中層大気気候モデルの相互比較の主な結果は以下の通りである。

1) 熱帯成層圏界面の半年周期振動(SAO)はほとんどのモデルで東風に偏っており大変弱い。移動性のサブグリットスケールの重力波をパラメータ化したモデルでは、十分な強さの西風が達成されたが、東風の開始は波動に極めて強く規制されている。

2) 対流圏及び成層圏においてモデルの等圧面高度場には系統的な誤差がある。500 hPaの主要な気候学的特徴の位置及び強度は、しばしば適切に表現されなかった。成層圏の極渦はいくつかのモデルでは余りに帯状であり、他のいくつかのモデルでは余りに波の成分が大きかった。

3) モデルは帯状平均した熱構造にいくつかの非現実的な特徴を示した。熱帯圏界面の高度及び気温はモデル間でかなりばらばらしている。100 hPaの気温にはモデル間で約30 Kの幅があった。

成層圏の年々変動の重要な要素は大きな火山爆発によって注入される火山性エーロゾルの役割である。Robock (Maryland Univ.) は、気候モデルに1991年7月のピナトゥボ火山の爆発以後の観測から得られたエーロゾル負荷を加えて積分を行った。エーロゾルによる輻射エネルギー吸収の急増により熱帯は温暖化する。この偏差は次の冬季において赤道—極間の気温差を増大させ、極夜ジェットを強化する(成層圏の極渦の強化)。これは年々変動のモードを起動し、成層圏の極夜ジェットを強化すると共に、対流圏において大西洋と北ヨーロッパを横切る帯状流を強化し(冬季の気

温が例年より高くなる)アジアにも拡大する。モデルの結果は、観測と定性的に一致する。

柴田(気象研究所)は、ピナトゥポエロゾルに関連した成層圏気温の経時変化を求める為、力学加熱を固定したモデルを使用した。低緯度の中部成層圏では、最初の40日に気温は約2 K 上昇し、1年後には約3 K 上昇のピークに達した。またバックグラウンドエロゾル濃度を3倍にすると、低緯度の下部及び中部成層圏で0.15 K 気温が上昇した。これは長波長放射の吸収が追加されたためである。高緯度では同程度の冷却が見出された。これは日射による加熱率が変化したためである。

最後に千葉(防災科学技術研究所)は、気候一中層大気モデルに非帯状オゾン分布を導入した際の効果を考察した。通常多くのモデルでは帯状平均のオゾン気候値を用いて放射加熱率を計算しているが、よく知られているように気温とオゾン波動の間には関係がある。しかしモデルに経度方向の非対称性を導入しても、計算した大気に何の効果もないことが示された。ただ成層圏の気温、オゾン及び放射場になにかしら微妙な効果はあり、これは冬季の成層圏における惑星波の放射による増巾(減衰ではなく)を引き起こす可能性がある。

#### 4. 今後

「成層圏の変動とその気候へ及ぼす影響に関する国際共同研究」は、1998年度からII期を実施することとなった。またSPARCは1998年中を目処に実施計画を作成中である。研究の各分野における指針が盛り込まれる予定である。

#### 略語一覧

(和訳名の一部は著者らによる仮訳である。)

CLAES : Cryogenic Limb Array Etalon Spectrometer (冷却型大気周縁エタロン分光

計)

DIAL : Differential Absorption Lidar (差分吸収ライダー)

DOAS : Differential Optical Absorption Spectroscopy (差分光吸収分光法)

EOS : Earth Observing System (地球観測システム)

FTIR : Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (フーリエ変換赤外分光法)

GRIPS : GCM Reality Intercomparison Project for SPARC (大気大循環モデル相互比較計画)

HALOE : Halogen Occultation Experiment (ハロゲン掩蔽実験)

HIRDLS : High Resolution Dynamics Limb Sounder (高分解能ダイナミック大気周縁探査機)

ILAS : Improved Limb Atmospheric Spectrometer (改良型大気周縁分光計)

MLS : Microwave Limb Sounder (マイクロ波大気周縁探査機)

PSC : Polar Stratospheric Clouds (極成層圏雲)

QBO : Quasi-Biennial Oscillation (準二年周期振動)

SAO : Semi-Annual Oscillation (半年周期振動)

SPARC : Stratospheric Processes and their Role in Climate (成層圏過程が気候に及ぼす影響の研究)

TES : Tropospheric Emission Spectrometer (対流圏放射分光計)

TOMS : Total Ozone Mapping Spectrometer (オゾン全量分光計)

UARS : Upper Atmosphere Research Satellite (高層大気観測衛星)

UKMO : United Kingdom Meteorological Office (英国気象局)

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