



Title	熱帯のオゾンと熱帯対流圏界層(TTL)
Author(s)	藤原, 正智; 塩谷, 雅人; 小池, 真
Description	SCJ第20期200910-20600104-017, 平成20年(2008年)9月10日
Citation	今後の日本の大気化学研究 IGAC小委員会の提言, 38-48
Issue Date	2008
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74905
Type	journal article
File Information	IGAC_Report_Fujiwara.pdf



3. 5. 熱帯のオゾンと熱帯対流圏界層(TTL)

対流圏のオゾンは、都市～越境大気汚染の原因物質・指標物質、大気酸化能(気体状有機化合物の除去能)の指標物質、そして、地球温暖化物質である。従って、その変動および変動メカニズムに関する研究が世界的に精力的に行われてきている。熱帯域の対流圏オゾンについては、そこに位置する国々の事情により、研究の歴史は比較的浅い。人工衛星によるグローバルなオゾン全量観測が始まったのは 1970 年代であるが、それらのデータから熱帯域の対流圏積分量を推定する試みが始まったのは 1980 年代後半である。一方、航空機を用いたオゾンを主とする反応性大気成分のその場観測キャンペーンが、主として欧米の研究者を中心として 1980 年代～1990 年代に精力的に行われている。なかでも、NASA(米国航空宇宙局)による Global Tropospheric Experiment(GTE)プログラムにより、南米、大西洋、アフリカ南部、太平洋各領域において、多成分の大気化学測定が実施された。これらの観測研究により、特に南米とアフリカにおけるバイオマス燃焼が熱帯全域の大気化学に重大な影響を与えていることが認識されるようになった。一方、日本の研究者は、人工衛星データ解析においてエポックメイキングな貢献をすると同時に、GTE等の欧米の観測プログラムではカバーされていなかったインドネシア海洋大陸・東南アジア域において、航空機観測キャンペーン(Biomass Burning and Lightning Experiment, BIBL)やオゾンゾンデ観測を精力的に実施してきている。本節の熱帯オゾンに関連する項目では、これら日本の研究者の貢献を中心に紹介する。

熱帯対流圏界層(Tropical Tropopause Layer, TTL)は、対流圏の空気が成層圏へ侵入する主たる領域であり、従って、成層圏オゾン光化学の初期条件を与える領域である(図 3.5-1)。歴史的に、成層圏の極端低濃度状態にまで水蒸気濃度を絞る“脱水過程”を伴うような輸送過程が重要なはずである、との認識のもとに、輸送に関わる力学過程に関する研究がなされてきた。研究の歴史に関する詳しい解説については、藤原(2001)、藤原・山崎(2007)を参照されたい。研究を主導してきたのは主に米国の研究者たちで、航空機観測、気象場解析、理論研究などの手法が用いられてきていた。一方、1990 年代より、日本人研究者による熱帯太平洋域(西のインドネシア海洋大陸・東南アジア域から東のガラパゴス諸島まで)における各種ゾンデ集中観測キャンペーンを契機として、大規模擾乱の重要な役割がはじめて明らかになってきている。本節の熱帯対流圏界層に関連する項目では、これら日本の貢献に関わる観測活動を中心に紹介する。

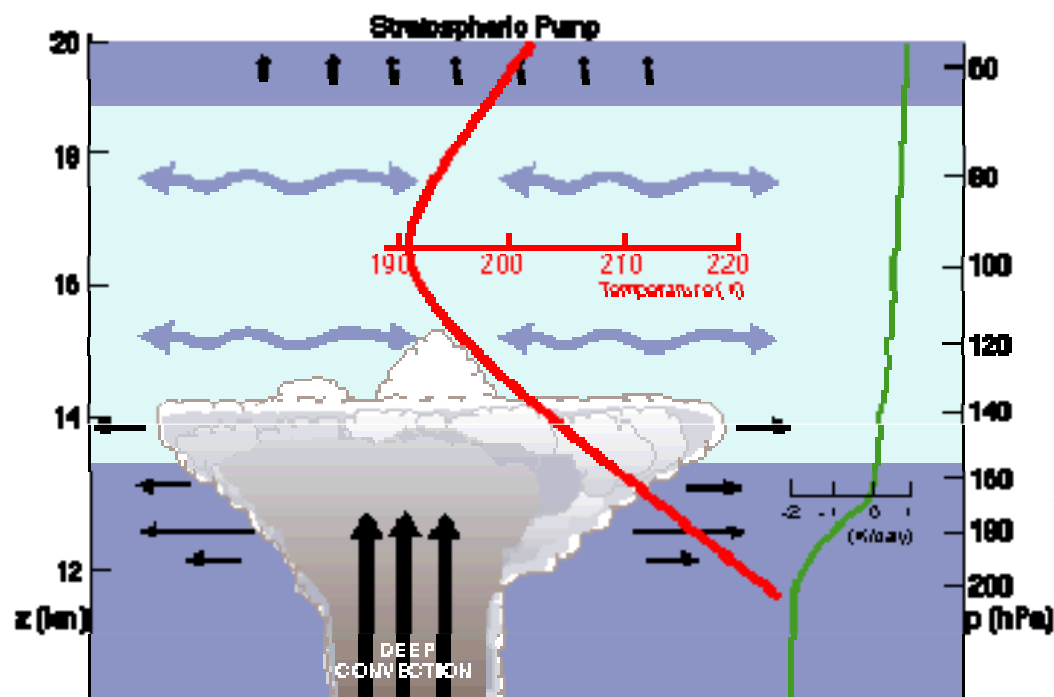


図 3.5-1. 熱帯対流圏界層 (Tropical Tropopause Layer, TTL) の概念図 (J. R. Holton 氏の website より)。赤線は気温プロファイル、緑線は放射加熱率プロファイルを示す。この領域は、活発な積雲活動に代表される対流圏と、Brewer-Dobson 平均子午面循環が支配的になる成層圏との遷移領域として把握される。

(1) 人工衛星によるオゾン観測データの解析: オゾン QBO、オゾン全量の季節変動、東西波数 1 構造

赤道下部成層圏の東西風には準二年周期の振動 (Quasi-Biennial Oscillation, QBO) があることが知られているが、QBO に伴うオゾン濃度変動 (いわゆるオゾン QBO) を人工衛星データに基づき明らかにしメカニズムを議論した研究に、Hasebe (e.g., 1994)、大気大循環モデルを用いた研究に Nagashima et al. (1998) などがある。一方、熱帯域のオゾン全量の衛星観測データにより、Shiotani (1992) は一年を通じて東西波数 1 構造 (大西洋に極大、太平洋に極小) が存在することを見出し、つづく Shiotani and Hasebe (1994) は複数の衛星観測データを組み合わせることで、この構造が成層圏ではなく対流圏に存在することを示唆した。この東西波数 1 構造の高度範囲や形成メカニズムを明らかにするためには、オゾンゾンデ観測網が必要不可欠であるが、当時、熱帯域には定常的なオゾンゾンデ観測地点がほとんどなかった。このことが、のちの長谷部文雄・塩谷雅人両氏によるプロジェクト Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region (SOWER) (後述)、および Anne M. Thompson 氏によるプロジェクト Southern Hemisphere Additional Ozonesondes (SHADOZ) (後述) の動機となっていく。

(2) 東南アジアにおけるオゾンゾンデ観測

日本の人工衛星観測計画(ADEOS)に関連し、宇宙開発事業団(NASDA、当時)と東京大学がインドネシア航空宇宙庁(LAPAN)と協力して、1992年にインドネシア・東ジャワ・ワトコセ LAPAN 気球観測所にオゾンゾンデ観測システムを導入した。1993年5月から月1~2回の定常的な観測が開始され、現在(2008年)にいたるまで維持されている(e.g., Fujiwara et al., 2000)。1999年からは SHADOZ プロジェクト(後述)に参画し、また、2003年ごろからは、北海道大学・京都大学が日本側の運営責任を担うようになっている。エルニーニョに伴う対流圏オゾン増大現象の発見(Fujiwara et al., 1999)、および、赤道ケルビン波による成層圏オゾンの対流圏への輸送現象の発見(Fujiwara et al., 1998)が、初期の大きな科学的成果である。また、農業環境技術研究所のグループは、マレーシア気象局やシンガポール気象局のオゾンゾンデ定常観測をサポートしてきている(e.g., Yonemura et al., 2002)。このうち、マレーシアのクアラルンプールにおけるオゾンゾンデ定常観測は、インドネシア・ワトコセ同様、1993年から現在まで観測を継続しており、SHADOZ プロジェクトにも参画している。さらに、2003年にはタイでオゾンゾンデ集中観測がおこなわれている(Kita et al.)。2004年9月からは、SOWER プロジェクト(後述)のもと、ベトナム・ハノイにおいてもオゾンゾンデ定常観測がおこなわれてきている。東南アジア域の大気質長期変動の監視や、モンスーン循環に伴う物質輸送過程の解明がその目的である。なお、インドネシアやタイなどにおいて、名古屋大学・福岡大学による Optical Particle Counter エアロゾルゾンデ観測が多数実施されており、対流圏と下部成層圏におけるエアロゾルの貴重なデータが蓄積されている(e.g., Iwasaki et al., 2007)。

(3) エルニーニョおよびインド洋ダイポールモード現象に伴うインドネシア海洋大陸域での対流圏オゾン増大現象

エルニーニョ南方振動(ENSO)とは、太平洋における数年以上の周期を持つ大気海洋相互作用現象であり、エルニーニョが生じるとインドネシア域は半年程度にわたって少雨・乾燥状態となる。具体的には、雨季の開始が極端に遅れたり、乾季の乾燥度が増したりするなどし、森林火災、泥炭地火災などのバイオマス燃焼が極端化・長期化する。一方、インド洋ダイポールモードとはインド洋における ENSO 同様の現象であり、ダイポールモード現象が生じると、インドネシア域は少雨・乾燥状態となる。1982/83年のエルニーニョ時にカリマンタン等で大規模森林火災が生じたところから、東南アジア諸国では越境大気汚染問題として認識されていたようである。しかし、大気化学の観点で本格的な研究が行われ始めたのは、前項目にあるように日本人が積極的に東南アジアで大気化学研究を始めた1990年代、特に、1994年、1997年の事例(いずれも、エルニーニョとダイポールモードの同時発生とみなせる)からである(e.g., Fujiwara et al., 1999)。特に、1997年の事例については、既出のオゾンゾンデ観測による対流圏オゾン増大現象の把握のみならず、気象庁気象研究所のグループが現地入りして各種微量成分に関する航空機観測を実施したり(e.g., Tsutsumi et al., 1999; Matsueda and Inoue, 1999)、衛星観測によるオゾンやエアロゾルの水平分布の解析が行われたり(Nakajima et al., 1999; Thompson et al., 2001)と、様々な観点から、インドネ

シア森林火災の大気化学への影響が研究された。なお、中島映至氏が中心となり Geophysical Research Letters の 1999 年 8 月 15 日号に INFOS-97 特集号が組まれている。さらに、Sudo and Takahashi (2001)は大気化学過程を考慮した大気大循環モデルを用いて 1997 年の事例を検討した上で、森林火災のみならず、乾燥化による水蒸気濃度減少自体が対流圏オゾン増大に寄与していたことを示唆した。また、Kita et al. (2000)は衛星データを用いて 1979 年以降のインドネシア域における対流圏オゾン増大現象を調べ、1982/83 年、1987 年、1991 年にもエルニーニョと同期した増大があったことを見出している。

(4) Biomass Burning and Lightning Experiment (BIBLE) A、B、C (日本の大規模な大気化学航空機観測)

1998 年から 2000 年にかけて、JAXA (当時 NASDA) / EORC が中心となり、インドネシア海洋大陸～北部オーストラリアにおける対流圏オゾンの光化学過程の解明を目的とした航空機観測、Biomass Burning and Lightning Experiment (BIBLE) プロジェクトが実施された (Kondo et al., 2002; 近藤他, 2007)。この観測では、限られた期間・領域ではあるが、オゾンの光化学に関わる多成分の同時観測を、航空機を使って立体的に実施することにより、発生源・輸送過程・化学反応過程の定量化をおこなった。この結果、9-10月においては、太平洋から運ばれてくる清浄な大気がインドネシア上空を通過すると、強い積雲対流活動に伴う雷による窒素酸化物の生成と、下層の化石燃料やバイオマス燃焼の影響を受けた空気の上方輸送により、オゾンの前駆気体 (光化学生成の材料となる物質) の濃度が増大し、数日の時定数でオゾン生成を引き起こしていることが明らかとなった (Koike et al., 2002; Kita et al., 2002; 図 3.5-2)。また 8-9 月の北部オーストラリアでは安定した逆転層の存在により、バイオマス燃焼で放出された各主成分は境界層内に閉じ込められ、東風によりゆるやかに輸送されながら、アマゾンやアフリカのバイオマス燃焼と同程度の効率で光化学的なオゾン生成を引き起こしていることが分った (Takegawa et al., 2003)。また北部オーストラリアのバイオマス燃焼での各種大気成分の放出比 (Shirai et al., 2003) や、熱帯での雷の 1 フラッシュあたりの窒素酸化物の生成量 (Koike et al., 2007) など世界に先駆けて推定がおこなわれた。BIBLE プロジェクトで得られた結果は、この地域の体系的な観測として衛星観測や数値モデル計算の検証などにも広く使用されている。

この研究ではエアロゾルの観測がほとんど実施されなかった。近年の数値モデル計算研究では大気中の光吸収性エアロゾルの大気加熱により、アジアモンスーン循環が影響を受ける可能性を示唆するものもある。今後、熱帯域において、エアロゾルやさらには雲物理に焦点をあてた研究が必要である。

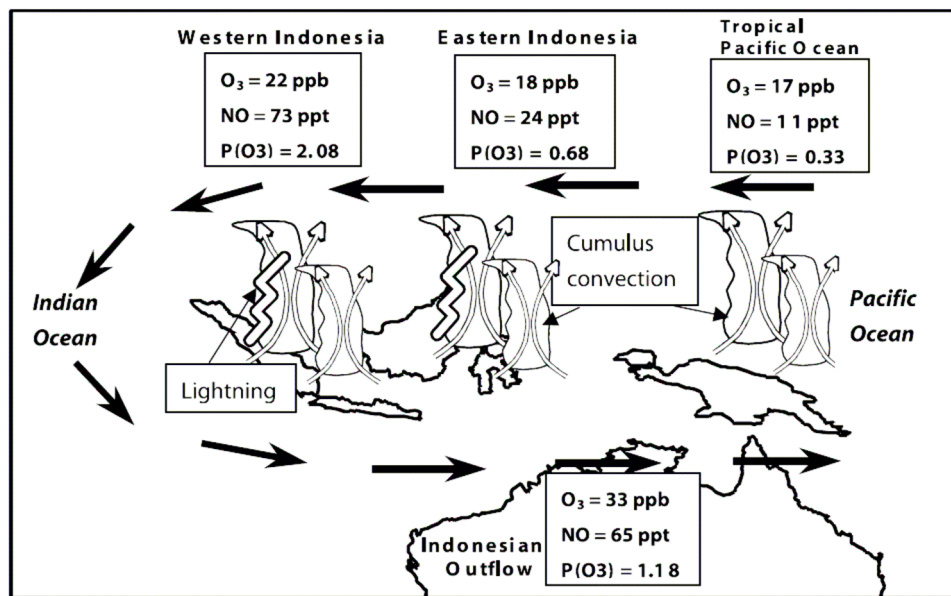


図 3.5-2. インドネシア上空での対流活動が上部対流圏オゾンに与える影響の模式図。上部対流圏での水平移流を黒い矢印で示す。1998 年 9-10 月 BIBLE-A 観測に基づくもの[Kita et al., 2002]。

(5) Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region (SOWER) プロジェクト

このプロジェクトは、(1)に述べたように、熱帯対流圏のオゾンの東西波数1構造の解明をひとつの大きな動機として、長谷部・塩谷両氏により計画され、1998 年 3 月、ガラパゴス諸島におけるオゾンゾンデ・水蒸気ゾンデ集中観測の形で始まり、以後、年に1、2回程度の集中観測を実施するという形で現在(2008 年)にいたるまで継続している。NOAA/CMDL(当時)の協力を得て、オゾンだけでなく上部対流圏・下部成層圏の水蒸気測定も実施してきている。当初の問題意識は太平洋におけるオゾンや他の気象要素の東西分布の解明であったが、その後、対流圏界面領域における水蒸気濃度決定メカニズム(脱水メカニズム)の解明に重きが置かれるようになってきた。観測領域も、東・中央太平洋のガラパゴス諸島とキリバス・クリスマス島(およびハワイ・メキシコ間の船舶観測)から、西太平洋域(インドネシアを中心として、東はキリバス・タラワ島から北西のベトナム・ハノイまで)に重点を変えてきている。赤道ケルビン波による水蒸気除去過程の世界初の観測(Fujiwara et al., 2001)、熱帯太平洋の上部対流圏・下部成層圏の水蒸気の東西分布の解明(Voemel et al., 2002)、観測空白域であった熱帯東・中央太平洋のオゾン分布とその変動の解明(Shiotani et al., 2002; Takashima et al., 2008)などが、第一期の主たる成果である。また、科学的研究と並行して、高精度水蒸気ゾンデの検証・改良にも世界的に重要な役割を果たしてきている(e.g., Fujiwara et al., 2003)。最近では、対流圏界面領域における大規模な準水平輸送における脱水過程が注目されており、大気大循環モデルを用いた研究(Hatsushika and Yamazaki, 2003)や衛星データを用いた研究(Eguchi and Shiotani, 2004)がある。SOWER ではこれらの研究を踏まえ、そ

の場観測による脱水過程の定量化を目指し、近年、多地点準同時観測(いわゆる“MATCH”観測)を実施してきている(Hasebe et al., 2007)。さらに、ライダーによる雲粒子観測を組み合わせ、脱水過程の雲物理学の解明にも力を入れている(Shibata et al., 2007)。

(6) Southern Hemisphere Additional Ozonesondes (SHADOZ) プロジェクト

(1)に述べたように、SOWER とは別に熱帯対流圏オゾンの東西波数1構造の問題をひとつの動機としたプロジェクト、Southern Hemisphere Additional Ozonesondes (SHADOZ) が NASA (当時) の Anne M. Thompson を中心として計画され、1998 年から始まっている。個別のグループにより維持されてきていた既存の熱帯のオゾンゾンデ観測地点にゾンデや気球を供給し、データアーカイブ・配布用の website を運営するという形で、熱帯オゾンゾンデ観測ネットワークを構築した。常時 10~14 の地点がこのプロジェクトに参加して現在 (2008 年) に至っている。既出のインドネシア・ワトコセ、マレーシア・クアラルンプールも参加しており、日本人グループの貢献も大きい。SHADOZ のデータセットは、東西波数1構造の解明(Thompson et al., 2003)のほかに、特に熱帯対流圏界層 (Tropical Tropopause Layer, TTL) の構造解明に重要な貢献をした。日本人による SHADOZ データを用いた TTL の研究としては Takashima and Shiotani (2007)がある。

(7) 今後の課題

1990 年代から 2000 年代の 15 年あまり、日本人研究者は熱帯の国々と密接な研究協力体制を築きながら、大気化学に関する多くの観測的研究をおこなってきた。特に、東南アジア域においては、世界的に重要な貢献をしてきたといえる。気候変動および大気質変動の問題が重要視されるようになってきた現在、この地域の大気質変動の監視、およびプロセスの解明はますます重要となってきたといえる。一部については長期間に渡ってデータが蓄積してきたので、長期変動の問題に真正面から取り組むべきである。また、日本人研究者の活動により、現地研究者の活動のレベルも向上してきたといえる。これまでの継続観測の部分を徐々に現地研究者の主導に切り替えていくと同時に、日本人研究者はエアロゾル測定などより高度な研究の方向性を模索するべきである。数値モデルを用いたプロセスの定量的解明は不十分であるので、今後力を入れていくべきである。以下にいくつかの具体的な研究課題について言及する。

A> 熱帯対流圏・下部成層圏オゾン：年々変動から、10 年規模変動・長期トレンドへ

インドネシアにおけるオゾンゾンデ定常観測は今年 (2008 年) で 16 年目を迎えた。また、SHADOZ プロジェクトも 11 年目を迎えた。エルニーニョ・南方振動や、インド洋ダイポールモード現象に伴う顕著な年々変動の問題は依然として重要であるが(特に、メカニズム解明、モデルによる定量的再現、自然起源によるものと人間活動の影響との分離)、さらに、対流圏・下部成層圏の各高度領域における 10 年規模変動、および、長期トレンドを議論できる状況に入りつつあると考えられる。こういった気候変動の問題に、現場観測の立場から取り組むことが必要である。

B> “発展する”熱帯の国々と越境大気汚染～全球大気質

日本人研究者が強い研究協力体制を築いてきた東南アジア域は、世界的に見ても経済発展が著しい。これに伴い、越境大気汚染、全球大気質変動の問題はますます重要となっている。気体成分の定常観測をさらに強化するとともに、エアロゾルの定常観測点の確立を検討するべきである。また、この地域には日本の気象力学の観測研究者も精力的に展開してきている(京都大学のグループ等)。今後さらに連携を強化し、物質輸送過程の総合的理解を目指すべきである。

C> アジアモンスーンと大気化学

アジアモンスーン循環に伴う大気質変動の研究は、不思議なことにいまだ立ち遅れている。対流圏下層中層においては、雨季・乾季、バイオマス燃焼が絡んだオゾン変動、エアロゾル変動の実態把握が必要であるし、上部対流圏・下部成層圏については、モンスーン循環とその変動に伴う特有の成層圏対流圏大気交換過程が存在しており、その観測的研究およびメカニズム解明が必要である。

D> 熱帯対流圏界層(TTL)のサイエンス

世界的には、水蒸気の問題から、雲物理学の問題へと進んでいる。また、世界的にみても現場観測を継続しているグループは大変少ない。したがって、現場観測の立場からこの問題に取り組んでいくことが、世界の TTL サイエンスコミュニティへの大きな貢献である。また、モデリングの観点からは、短寿命ハロゲン種等の TTL への鉛直輸送とその成層圏光化学へのインパクトが議論されるようになってきている。成層圏オゾンの経年変化に重要な役割を果たしているのはいかと思えるようになってきているからである。この問題についても現場観測の立場からの貢献を考えていく必要がある。

E> モデリング、および、対流圏と中層大気との相互作用

熱帯の大気化学のモデリングはいまだ充分であるとは言えない。1997 年のエルニーニョに伴うオゾン変動の事例についても、定量的に十分に詰められたとはいえない。対流圏オゾン変動のモデリングの際には、各種物質の地表からのフラックス量のデータが不可欠であり、これらのデータ収集・整備の努力も必要である。現地との協力体制を持つ強みを活かしたい。また、成層圏と対流圏との間の大気交換過程(Stratosphere-Troposphere Exchange、STE)およびその定量化についても不十分である。成層圏側については、Chemistry-Climate Model Validation Activity (CCMVal)という枠組みの一部という形でモデル間の STE の比較の取り組みが始まっており、日本としても積極的な貢献が求められている。対流圏側については STE はオゾンフラックスの観点で非常に重要である。モデリングのコミュニティでは、対流圏と成層圏・中間圏を同時に扱う大気化学・気候モデリングという新しい方向性が提示されている。成層圏対流圏大気交換過程の問題を契機として、日本でも、モデリングに限らず、対流圏と成層圏の垣根を越えるような研究活動

が期待される。

- Eguchi N., M. Shiotani (2004), Intraseasonal variations of water vapor and cirrus clouds in the tropical upper troposphere, *J. Geophys. Res.*, 109, D12106, doi:10.1029/2003JD004314.
- 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(D15), 19173–19182.
- Fujiwara, M., K. Kita, S. Kawakami, T. Ogawa, N. Komala, S. Saraspriya, and A. Suropto (1999), Tropospheric Ozone Enhancements During the Indonesian Forest Fire Events in 1994 and in 1997 as Revealed by Ground–Based Observations, *Geophys. Res. Lett.*, 26(16), 2417–2420.
- Fujiwara, M., K. Kita, T. Ogawa, S. Kawakami, T. Sano, N. Komala, S. Saraspriya, and A. Suropto (2000), Seasonal variation of tropospheric ozone in Indonesia revealed by 5–year ground–based observations, *J. Geophys. Res.*, 105(D2), 1879–1888.
- Fujiwara, M., F. Hasebe, M. Shiotani, N. Nishi, H. Vömel, and S. J. Oltmans (2001), Water vapor control at the tropopause by equatorial Kelvin waves observed over the Galápagos, *Geophysical Research Letters*, 28, No. 16, 3143–3146.
- 藤原正智, 赤道ケルビン波に伴う成層圏対流圏大気交換と熱帯対流圏界面領域の研究—2000年度山本・正野論文賞受賞記念講演—, *天気*, 48(11), 801–810.
- Fujiwara, M., M. Shiotani, F. Hasebe, H. Vömel, S. J. Oltmans, P. W. Ruppert, T. Horinouchi, and T. Tsuda (2003), Performance of the Meteolabor “Snow White” chilled–mirror hygrometer in the tropical troposphere: Comparisons with the Vaisala RS80 A/H–Humicap sensors, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20, Issue 11, 1534–1542.
- 藤原正智, 山崎孝治, 成層圏対流圏結合, *天気*, 54(7), 597–600.
- Hasebe, F. (1994), Quasi–Biennial Oscillations of Ozone and Diabatic Circulation in the Equatorial Stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, 51, 729–745.
- Hasebe, F., M. Fujiwara, N. Nishi, M. Shiotani, H. Vömel, S. Oltmans, H. Takashima, S. Saraspriya, N. Komala, and Y. Inai (2007), In situ observations of dehydrated air parcels advected horizontally in the Tropical Tropopause Layer of the western Pacific, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 803–813.
- Hatsushika H., K. Yamazaki (2003), Stratospheric drain over Indonesia and dehydration within the tropical tropopause layer diagnosed by air parcel trajectories, *J. Geophys. Res.*, 108 (D19), 4610, doi:10.1029/2002JD002986.
- Iwasaki, S., Maruyama, K., Hayashi, M., Ogino, S.–Y., Ishimoto, H., Tachibana, Y., Shimizu, A., Matsui, I., Sugimoto, N., Yamashita, K., Saga, K., Iwamoto, K., Kamiakito, Y., Chabangborn, A., Thana, B., Hashizume, M., Koike, T., and Oki, T. (2007), Characteristics of aerosol and cloud

- particle size distributions in the tropical tropopause layer measured with optical particle counter and lidar, *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 3507–3518.
- Kita, K., M. Fujiwara, and S. Kawakami (2000), Total ozone increase associated with forest fires over the Indonesian region and its relation to the El Nino–Southern oscillation, *Atmospheric Environment*, **34**, Issue 17, 2681–2690.
- Kita, K., S. Kawakami, Y. Miyazaki, Y. Higashi, Y. Kondo, N. Nishi, M. Koike, D.R. Blake, T. Machida, T. Sano, W. Hu, M. Ko, and T. Ogawa (2002), Photochemical production of ozone in the upper troposphere in association with cumulus convection over Indonesia, *J. Geophys. Res.*, **107**, 8400, doi: 10.1029/2001JD000844.
- Koike, M., Y. Kondo, D. Akutagawa, K. Kita, N. Nishi, S.C. Liu, D.R. Blake, S. Kawakami, N. Takegawa, M. Ko, Y. Zhao, and T. Ogawa (2002), Reactive nitrogen over the tropical Western Pacific: Influence from lightning and biomass burning, *J. Geophys. Res.*, **107**, 8403, doi: 10.1029/2001JD000823.
- Koike, M., Y. Kondo, K. Kita, N. Takegawa, N. Nishi, B. Liley, T. Kashihara, S. Kudoh, S. Kawakami, D. Blake, T. Shirai, M. Ko, Y. Miyazaki, Z. Kawasaki, and T. Ogawa (2007), Measurements of Reactive Nitrogen Produce by Tropical Thunderstorms during BIBLE–C, *J. Geophys. Res.*, **112**, D18304, doi:10.1029/2006JD008193.
- Kondo, Y., M. Ko, M. Koike, S. Kawakami, and T. Ogawa (2002), Preface to special section on Biomass Burning and Lightning Experiment (BIBLE), *J. Geophys. Res.*, **107**, 8397, doi:10.1029/2001JD002401.
- 近藤豊、竹川 暢之、小池 真、白井知子、北和之、小川利紘 (2007)、大型航空機による大気化学観測 –BIBLE/PEACE 計画–、*気象研究ノート*、**215**, 67 – 79.
- Matsueda, H., and H. Inoue (1999), Aircraft Measurements of Trace Gases Between Japan and Singapore in October of 1993, 1996, and 1997, *Geophys. Res. Lett.*, **26**(16), 2413–2416.
- Nagashima, T., M. Takahashi, and F. Hasebe (1998), The First Simulation of an Ozone QBO in a General Circulation Model, *Geophys. Res. Lett.*, **25**(16), 3131–3134.
- Nakajima, T., A. Higurashi, N. Takeuchi, and J. Herman (1999), Satellite and Ground–Based Study of Optical Properties of 1997 Indonesian Forest Fire Aerosols, *Geophys. Res. Lett.*, **26**(16), 2421–2424.
- Shibata, T., H. Vömel, S. Hamdi, S. Kaloka, F. Hasebe, M. Fujiwara, and M. Shiotani (2007), Tropical cirrus clouds near cold point tropopause under ice supersaturated conditions observed by lidar and balloon–borne cryogenic frost point hygrometer, *Journal of Geophysical Research*, **112**, D03210, doi:10.1029/2006JD007361.
- Shiotani, M. (1992), Annual, Quasi–Biennial, and El Niño–Southern Oscillation (ENSO) Time–Scale Variations in Equatorial Total Ozone, *J. Geophys. Res.*, **97**(D7), 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(D7), 14575–14584.
- Shiotani, M., M. Fujiwara, F. Hasebe, H. Hashizume, H. Vömel, S. J. Oltmans, and T. Watanabe (2002), Ozone-sonde observations in the equatorial Eastern Pacific – the Shoyo-maru survey –, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 80, No. 4B, 897–909.
- Shirai, T., D.R. Blake, S. Meinardi, F.S. Rowland, J. Russell-Smith, A. Edwards, Y. Kondo, M. Koike, K. Kita, T. Machida, N. Takegawa, N. Nishi, S. Kawakami, and T. Ogawa, et al. (2003), Emission estimates of selected volatile organic compounds from tropical savanna burning in northern Australia, *J. Geophys. Res.*, 108, doi: 10.1029/2001JD000841.
- Sudo, K., and M. Takahashi (2001), Simulation of Tropospheric Ozone Changes During 1997–1998 El Niño: Meteorological Impact on Tropospheric Photochemistry, *Geophys. Res. Lett.*, 28(21), 4091–4094.
- Takashima H., M. Shiotani (2007), Ozone variation in the tropical tropopause layer as seen from ozone-sonde data, *J. Geophys. Res.*, 112, D11123, doi:10.1029/2006JD008322.
- Takashima, H., M. Shiotani, M. Fujiwara, N. Nishi, and F. Hasebe (2008), Ozone-sonde observations at Christmas Island (2N, 157W) in the equatorial central Pacific, *Journal of Geophysical Research*, 113, D10112, doi:10.1029/2007JD009374.
- Takegawa, N., Y. Kondo, M. Ko, M. Koike, K. Kita, D. R. Blake, W. Hu, C. Scott, S. Kawakami, J. Russell-Smith, and T. Ogawa (2003), Photochemical production of O₃ in biomass burning plumes in the boundary layer over northern Australia, *Geophys. Res. Lett.*, 30, doi:10.1029/2003GL017017.
- Thompson, A. M., J. C. Witte, R. D. Hudson, H. Guo, J. R. Herman, and M. Fujiwara (2001), Tropical tropospheric ozone and biomass burning, *Science*, 291, No. 5511, 2128–2132.
- Thompson, A. M., J. C. Witte, S. J. Oltmans, F. J. Schmidlin, J. A. Logan, M. Fujiwara, V. W. J. H. Kirchhoff, F. Posny, G. J. R. Coetzee, B. Hoegger, S. Kawakami, T. Ogawa, J. P. F. Fortuin, and H. M. Kelder (2003), The 1998–2000 SHADOZ (Southern Hemisphere ADditional OZone-sondes) tropical ozone climatology. 2. Tropospheric variability and the zonal wave-one, *Journal of Geophysical Research*, 108, No. D2, 8241, doi:10.1029/2002JD002241.
- Tsutsumi, Y., Y. Sawa, Y. Makino, J. Jensen, J. Gras, B. Ryan, S. Diharto, and H. Harjanto (1999), Aircraft Measurements of Ozone, NO_x, CO, and Aerosol Concentrations in Biomass Burning Smoke Over Indonesia and Australia in October 1997: Depleted Ozone Layer at Low Altitude Over Indonesia, *Geophys. Res. Lett.*, 26(5), 595–598.
- Vömel, H., S. J. Oltmans, B. J. Johnson, F. Hasebe, M. Shiotani, M. Fujiwara, N. Nishi, M. Agama, J. Cornejo, F. Paredes, and H. Enriquez (2002), Balloon-borne observations of water vapor and ozone in the tropical upper troposphere and lower stratosphere, *Journal of Geophysical Research*, 107, No. D14, 4210, doi:10.1029/2001JD000707.

Yonemura S., H. Tsuruta, S. Kawashima, S. Sudo, L. C. Peng, L. S. Fook, Z. Johar, and M. Hayashi
(2002), Tropospheric ozone climatology over Peninsular Malaysia from 1992 to 1999, J.
Geophys. Res., 107 (D15), 4229, doi:10.1029/2001JD000993.