HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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
Author(s)	藤原, 正智
Citation	天気, 48(11), 801-810
Issue Date	2001-11-30
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/71617
Type	article
File Information	Tenki.2001.801.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

〔解　説〕　*101*：*107*：*108*：*201*（熱帯；対流圏界面；オゾン；成層圏対流圏大気交換；赤道ケルビン波）

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—

藤　原　正　智*

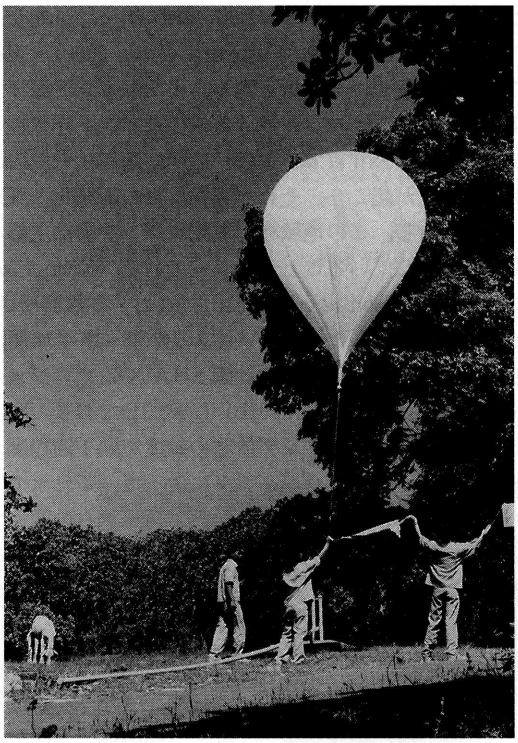
1．はじめに

日本気象学会2000年秋季大会において，1998年にJournal of Geophysical Research誌に掲載された論文“Stratosphere-troposphere exchange of ozone associated with the equatorial Kelvin wave as observed with ozonesondes and rawinsondes”（Fujiwara *et al.*, 1998a）に対して，山本・正野論文賞という大変栄誉ある賞を頂きました．この論文は私が東京大学の地球惑星物理学専攻に大学院生として在籍していた時に執筆したものです（共著者：北和之先生，小川利紘先生）．本稿では，この論文のもととなったインドネシアにおけるオゾン観測にまつわる諸事情，論文の要点，この論文の成層圏対流圏大気交換（STE）研究の歴史における位置付け，および最近の熱帯対流圏界面領域に関する研究の進展についてまとめます．なお，本稿末尾に略語一覧を付します．

2．オゾンゾンデ集中観測の動機

2.1. インドネシアにおけるオゾンゾンデ定常観測

東京大学，インドネシア航空宇宙庁（LAPAN），宇宙開発事業団は，インドネシア共和国ジャワ島スラバヤ近郊のワトゥコセッ村（Watukosek；7.5°S, 112.6°E；標高50 m）にあるLAPANの観測所において，月1，2回程度のオゾンゾンデ定常観測を1993年から共同で行ってきた．第1図に観測風景の写真を示す．私自身は1994年からこの観測に関わり始めた．当時，南アメリカ，アフリカ，大西洋地域においては，熱帯対流圏オゾン収支の問題に迫ろうとする観測的研究が盛んに行われていた．大気化学研究者のほとんどは，バイオマス燃焼と総称される，熱帯雨林やサバンナ地域における自然発火や，焼畑，プランテーション開発に伴う人為的燃焼に伴い，煤煙だけでなくオゾン前駆気体（窒素酸化物，炭化水素類，一酸化炭素など）が大量に放出され，オゾンが光化学的に大量生成されることに注目していた．対流圏におけるオゾンは大気の酸化能（大気中の有機化合物等の除去能）の指標として重要であるばかりでなく，温室効果気体のひとつとし



第1図　ワトゥコセッ観測所におけるオゾンゾンデ観測（1995年5月）．

* 京都大学宙空電波科学研究センター（日本学術振興会特別研究員）．

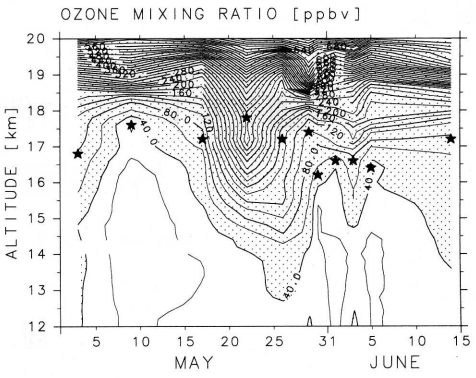
—2001年6月6日受領—
—2001年8月29日受理—

© 2001　日本気象学会

ても注目されており，その収支と変動メカニズムは近年の大気科学の重要な研究対象のひとつである．東南アジア域は，豊富なバイオマスを擁しながら同時に活発な人間活動が営まれている特異な領域であるのにもかかわらず，1990年代前半以前にはオゾン等大気微量成分の長期定常観測は報告されてこなかった．ワトゥコセッにおける定常観測の大きな成果のひとつは，1994年および1997年の9，10月期に生じたインドネシア大森林火災に伴う対流圏オゾンの増大とその変遷を詳しく記述し，東南アジア域の対流圏オゾン収支にもバイオマス燃焼が重要な役割を果たしていることを初めて指摘したことである（Fujiwara *et al.*, 1998b；Fujiwara *et al.*, 1999；Fujiwara *et al.*, 2000）．現在では人工衛星データ解析も進み，インドネシア海洋大陸においては，エルニーニョあるいはインド洋双極子モード現象（Saji *et al.*, 1999）に伴い数年に一度の周期で大旱魃が起こり，それが森林火災の広域化，長期化をもたらし，この地域の対流圏オゾン変動に主要な役割を果たしていることが分かっている（Kita *et al.*, 2000；Thompson *et al.*, 2001a）．なお，本観測所は，1998年から始まったNASA主導の熱帯―南半球亜熱帯域オゾンゾンデ観測強化計画SHADOZプロジェクト（Thompson *et al.*, 2001b）に参加しており，1999年8月以降，オゾンゾンデ放球の頻度を週1回程度に上げている．このプロジェクトによって，これまで主に断片的なキャンペーン観測と人工衛星からの間接的な推定でしか分かっていなかった熱帯対流圏オゾンのグローバル分布とその変動の様子がようやく詳細に分かり始めているという状況である．

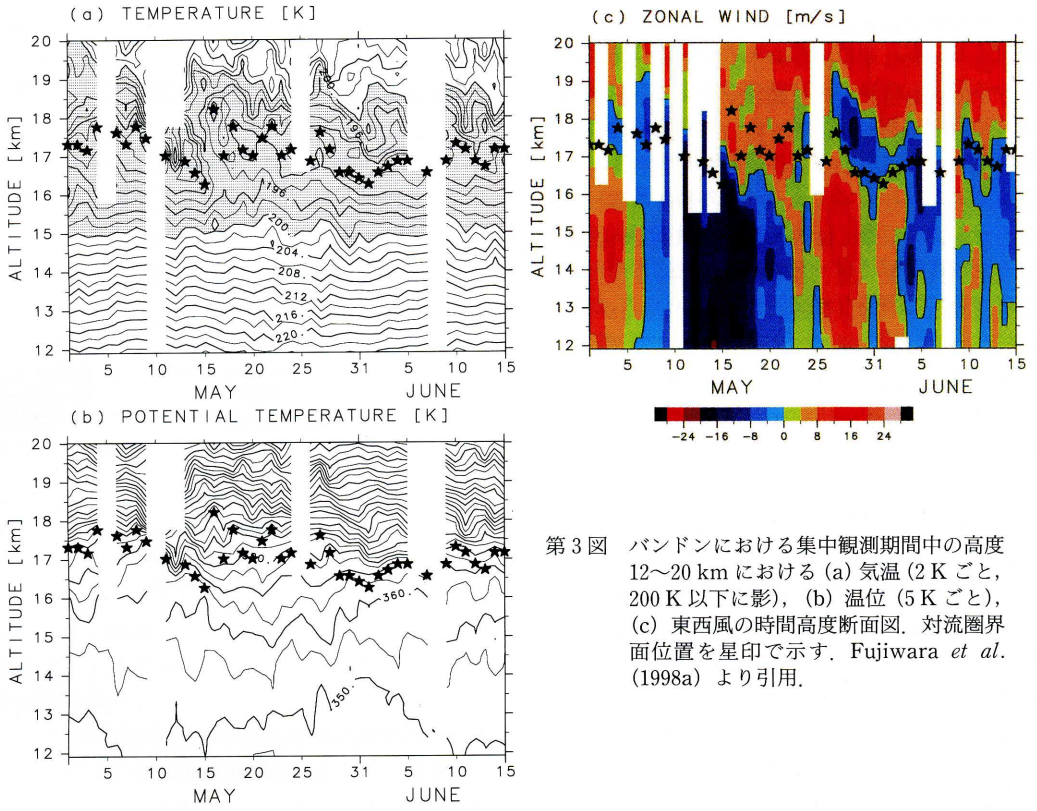
2.2. 上部対流圏オゾン増大現象

定常観測開始から2年弱が経過した時点で，乾季末期（9，10月）におけるバイオマス燃焼に伴うオゾン増大とは別に，5，6月という雨季から乾季への移行期に上部対流圏においてオゾン濃度が増大したプロファイルがしばしば得られることが分かってきた（Komala *et al.*, 1996）．必ずしも層状に増大するのではなく，むしろ高度とともに増大して成層圏へとつながっているように見えたため，Tsuda *et al.*（1994）が気象ラジオゾンデ観測からその可能性を指摘したような赤道ケルビン波に伴う成層圏からの輸送が可能性のひとつとして考えられた．しかしながら，熱帯においては対流圏から成層圏への質量輸送があることは古くから知られていたものの，逆方向の物質輸送についてはほとんど議論されてこなかったことに加え，大気



第2図　集中観測期間中の高度12～20 kmにおけるオゾン混合比の時間高度断面図．等値線は20 ppbvごと．40 ppbv以上の領域に影．対流圏界面位置を星印で示す．Fujiwara *et al.*（1998a）より引用．

化学の分野ではバイオマス燃焼花盛りということもあった．そのため，少し離れた地域（例えばこの時期乾季末期にあたるインドシナ地域）におけるバイオマス燃焼に伴うオゾン増大空気塊が，背の高い積乱雲によって上部対流圏へ鉛直輸送されたのち水平移流によって観測所上空へ入り込んできたのではないかという考え方もあった．いずれにせよ，月1，2回の観測ではその時間変動性が分からないため，10個程度のオゾンゾンデを1，2か月間程度の期間に集中的に放球してみて，現象の時間変動を観測してみることが提案された．具体的には1995年5，6月を集中観測期間に設定し，まずは週1回程度の観測で増大現象が始まるのを待ち，現象が見えてきたら2，3日に1度程度と観測頻度を上げてもらうこととし，5月末の10日間には北　和之先生，藤原，三木　緑さん，小川利紘先生の4名で現地へ出かけることとした．答えを知った今となってみればずいぶん大胆な観測計画ではあるが，第2図のオゾン混合比の時間高度断面図に示すように，非常に幸運なことに現象のメカニズムを特定するのに過不足ないデータセットを得ることに成功した．同時期にジャワ島バンドン（6.9°S, 107.6°E）でLAPANと共同で1日1回の気象ラジオゾンデ定常観測を行っておられた，京都大学超高層電波科学研究センター（当時）の津田敏隆先生にもご協力を頂き，集中観測期間中は1日2回に頻度を上げて頂いた．（データ解析では結局1日1回のデータしか使用しなかった．）なお，ワトゥコセッとバンドンは東西に約600 km離れているが，今回対象とした擾乱のスケールと比較

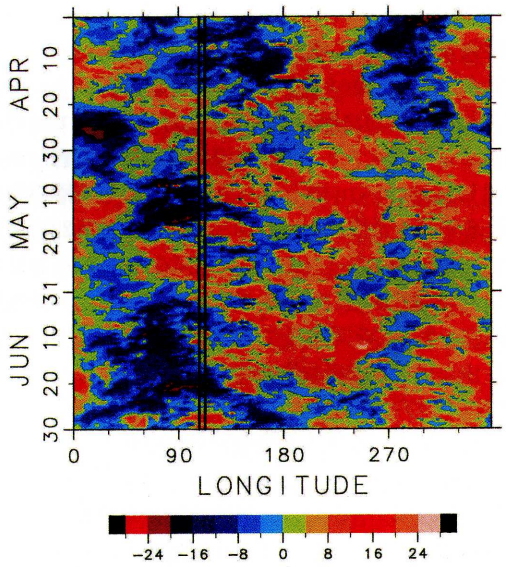


第3図　バンドンにおける集中観測期間中の高度12～20 kmにおける(a)気温(2 Kごと，200 K以下に影)，(b)温位(5 Kごと)，(c)東西風の時間高度断面図．対流圏界面位置を星印で示す．Fujiwara *et al.* (1998a)より引用．

すると，結果的に両者は同一地点とみなすことができた．

3．論文（Fujiwara *et al.*, 1998a）の要旨など

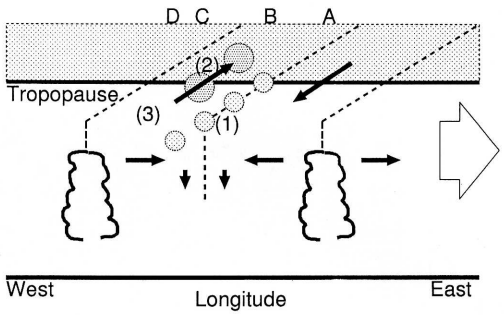
データ解析を一任された私は，Tsuda *et al.* (1994)でその可能性が示唆されていた“赤道ケルビン波に伴う輸送”というアイデアにかなり固執していた．赤道ケルビン波とは，理論的には赤道領域に捕捉された(惑星規模の)重力波であり，東方に伝播し，南北風成分が存在しないなどの特徴を持っている（Matsuno, 1966)．主に，赤道下部成層圏東西風のQBOの駆動源のひとつとして注目を集めてきたが（柳井，丸山，1969；高橋，1995)，東南アジア～西太平洋上空の対流圏界面付近で大きな振幅を持っており卓越擾乱であるとも言えることも知られてはいた（e. g., Sato *et al.*, 1994；Nishi and Sumi, 1995)．観測当時東京大学の修士2年生であった私は，山岬正紀先生や高橋正明先生や松田佳久先生や故新田　勉先生らの気象学，気象力学等の講義で“赤道ケルビン波”という言葉は繰り返し聞いていた．しかしながら，線型波動理論から導出



第4図　気象庁全球客観解析データに基づく7.5°S, 100 hPaにおける東西風の時間高度断面図．ワトゥコセッとバンドンの位置を黒線で示す．Fujiwara *et al.* (1998a)より引用．

される“赤道ケルビン波”と第3図に示すラジオゾンデ観測による気温，温位，東西風の時間高度断面図に見えている擾乱とがひとつに結びつくまでには結局1年半近くの時間を要してしまった．今から思えばむしろ不思議なくらいであるが，物事（あるいは図）を“本当に見る”ことは自分にとっては案外易しくないことなのだろう．実を言うと，気象場解析研究で広く使われている全球客観解析データの熱帯対流圏界面付近の信頼性については根拠なく疑問視していた．しかし，京都大学の西　憲敬先生に「客観解析データの熱帯100 hPa も案外悪くないですよ」と言われて，第4図に示す7.5°S，100 hPa の東西風の経度時間断面図を作成し，東方伝播する惑星規模の擾乱（例えば，経度0度，5月15日から日付変更線，6月10日にかけての西風領域）を見たことが，解明への大きなきっかけになったことを記しておきたい．また，最近の大気化学の常套手段である客観解析データを用いた流跡線解析については，空気塊起源としてオゾン高濃度域を仮定せざるを得ないため“答え先にありき”の感が強いし，個々の事例解釈に終始せざるを得なくなってしまうと不必要に毛嫌いしていたところがあった．それもあって，あくまでゾンデデータによる時間高度断面図に固執しオゾン変動の背景にある擾乱の解明を第一に考え続けていたのだが，このことが結果的には良かったのかもしれない．

観測されたオゾン変動（第2図）の主な特徴は，(a) 40 ppbv の等値線が5月9日から26日の17日間に高度17.8 km（ほぼ対流圏界面高度．ただし，ここでは対流圏界面を各プロファイルの気温極小位置で定義）から12.8 km まで5 km 降下したことと，(b) 対流圏界面におけるオゾン濃度極大（約300 ppbv）は5月22日に見られたことである．一方，同時期のバンドンにおけるラジオゾンデ観測の結果を見ると（第3図），対流圏界面高度・気温の明瞭な変動が見られ，温位の図からは5月15，16日の対流圏界面のジャンプを境にして，空気塊の下方変位領域（すなわち，等温位線が前後の期間に比べて下がっている領域）が成層圏下端部から上部対流圏へ入りさらに下降していった様子が分かる．また，東西風データには，周期約23日の明瞭な東西風振動が見られ，高度15〜19 km の領域では風速ゼロの線が時間とともに下降して対流圏界面ジャンプ位置をちょうど横切っており，また高度15 km 以下の領域については等位相線が垂直になっている．ラジオゾンデデータ，客観解析データ，GMS 雲画像データの解析により，高度15〜19 km 領域の東西風振動については，東西波数2，東西位相速度8.9 m/s の赤道ケルビン波であり，高度15 km 以下については，東進する季節内変動スケールの積乱雲群（いわゆる MJO）であることが分かった．これら2つの擾乱に伴う下降流によって成層圏オゾンが対流圏深くにまで輸送されたと解釈するとオゾン変動の特徴 (a) が説明される．また，第4図よりこの赤道ケルビン波の対地東西位相速度は8.9 m/s，背景東西風は東半球でほぼゼロと見積もられたが，これらによる波の固有東西位相速度（8.9 m/s）に対して波の東西風振幅は8〜12 m/s と同程度の大きさであり（第3図 c），波の破砕条件が満たされていた．従って少なくとも西風極大の位相部で砕波が生じていた可能性が示唆された．5月22日には対流圏界面領域において，西風極大とオゾン濃度極大（特徴 (b)）とが対応しており，砕波に伴う大気混合がこのオゾン濃度極大を引き起こし，同時に不可逆輸送に寄与したことが考えられた．第5図に以上の過程をまとめた模式図を示す．対流圏界面付近の赤道ケルビン波と対流圏内の MJO に伴う下降流によって成層圏オゾンが対流圏へ輸送され（図中 (1)），さらに赤道ケルビン波の砕波位相部においても不可逆混合が生じて成層圏オゾンは対流圏側へ輸送されたのである（図中 (2)）．対流圏側へ輸送されたオゾンの一部は擾乱システム通過後に



第5図　オゾン輸送を引き起こした東進する擾乱システムの経度高度概念図．点線は東西風ゼロの位置を示す．オゾン増大域を影をつけた円で示す．A〜D は，この擾乱が観測点を通過した日にちを示す．すなわち，A：5月6〜11日，B：5月15〜16日，C：5月21〜22日，D：5月26日．オゾン輸送過程はそれぞれ (1) 赤道ケルビン波と MJO に伴う下降流による輸送，(2) 赤道ケルビン波の砕波位相部（西風極大）における大気混合，(3) 水平混合による対流圏への不可逆輸送．Fujiwara *et al.* (1998a) より引用．

成層圏へ戻った可能性もあるが，このシステムに伴うオゾン輸送量は最大で9.9 DU（Dobson単位）で，オゾン増大領域は東西方向，南北方向にそれぞれ6600 km，1800 kmに渡ったと見積もられた．この地域の対流圏オゾン量はバイオマス燃焼の強い影響のない場合最大25 DU程度であり，見積もられた最大輸送量はその40%にも当たる．それまで熱帯対流圏オゾン収支においては，バイオマス燃焼と中高緯度からの輸送の寄与のみが強調されてきたが，本研究は赤道ケルビン波とMJOに伴う熱帯成層圏からのオゾン輸送もオゾン収支に寄与している可能性を初めて明らかにしたのである．また，熱帯STEにおける熱帯大規模擾乱システムの役割を初めて観測的に明らかにしたという意義もあり，こちらについては歴史的事情を踏まえながら次章に詳しく説明する．

この論文は私にとってほぼ初めての査読付き論文であったが，研究室の1年上の先輩であった今村　剛さんなくしては世に出せなかったかもしれない．ある日曜日の夕食時に「早く論文にしないと誰かにその“赤道ケルビン波に伴うSTE”というアイデアをとられちゃうぞ」と彼に言われたのが執筆開始のきっかけであったし，英文校正をはじめとして微に入りご指導を受けた．もちろん，内容に関しても一番の理解者であった．

4．熱帯地域におけるSTE—研究の歴史とFujiwara *et al.*（1998a）の位置付け

STE研究の歴史はイギリス上空の下部成層圏水蒸気観測から成層圏内子午面循環（いわゆるBrewer-Dobson循環）の存在を見抜いたBrewer（1949）の論文に始まる．非常に湿った対流圏大気は何らかの過程を経て成層圏へ入っているはずであるが，観測された中緯度下部成層圏の水蒸気濃度は中緯度対流圏界面気温から算出される飽和水蒸気濃度よりずっと低かった．この一見乾燥しすぎた大気は，より低温な熱帯対流圏界面を通過することによってしか実現し得ない．すなわち，熱帯対流圏界面を上方へ抜けて成層圏内を低緯度から高緯度へ向かう一連の流れが存在すべきであるというのが彼の洞察であった．この論文以降，熱帯におけるSTEを論じる際には，“cold trap”（低温捕水），“dehydration”（水蒸気除去）などがキーワードとなった．Newell and Gould-Stewart（1981）は，Kley *et al.*（1979）による熱帯（9月のブラジル）での成層圏水蒸気観測データと熱帯地域の高層気象観測データに基づき，熱帯対流圏界面が成層圏水蒸気濃度を説明するのに本当に十分低温であるかどうかを調べた．その結果，熱帯対流圏界面の気温値は必ずしもどこでも十分に低いとは言えず，北半球冬季のインドネシア・西太平洋上空と北半球夏季のベンガル湾上空のみがその条件を満たしていることが分かった．すなわち対流圏大気は限定された季節・地域のみから成層圏へ入っていることが示唆され，彼らはこれを“stratospheric fountain”（成層圏の泉）仮説と命名した．これらの季節・地域では積乱雲活動が極めて活発であるため，水蒸気除去過程および熱帯における対流圏大気の成層圏下端部への運び上げに積乱雲が本質的な役割を果たしているのではないかと考えるのは自然な流れであった．Danielsen（1982）は対流圏界面をつきやぶるような背の高い積乱雲に伴って対流圏界面付近に発達するかなとこ雲が効率的な水蒸気除去過程となるという仮説を提出した．また熱帯対流圏界面領域には分厚い層雲は見られないことから，Brewer-Dobson循環という東西一様でゆるやかな上昇流自体が熱帯対流圏界面を越える輸送に本質的な役割を果たしているという考え方は疑問視された（Holton, 1984；cf., Robinson, 1980）．このような事情により1980年代から1990年代前半にかけては積乱雲のみが注目され，積乱雲の熱帯STEに果たす役割に着目した高高度航空機を用いた集中観測も2度行われた（パナマ，1980年8，9月（1982年Geophysical Research Letter誌第9巻6号, 599-624）；オーストラリア北端部ダーウィン，1987年1，2月（1993年Journal of Geophysical Research誌第98巻D5号，8561-8773））．

しかしながら，1990年代に入って，上記の議論に修正の必要が出てきた．まずBrewer-Dobson循環の駆動源が中緯度成層圏における砕波（当初は主にロスビー波を想定）であることが気象力学的に解明され（“ダウンワードコントロールの原理”：Haynes *et al.*, 1991；余田，1995），熱帯対流圏界面領域もこの循環の影響を必ず受けているはずであるということになった．また，“成層圏の泉”領域の対流圏界面領域は平均的には上昇流ではなく下降流になっていることが観測から明らかになった（Gage *et al.*, 1991；Sherwood, 2000）．さらに，熱帯対流圏界面領域にはしばしば目には見えにくい薄い巻雲が存在していて（“subvisible/subvisual cirrus”：e. g., Winker and Trepte, 1998）積乱雲とは別の水蒸気除去メカニズムの存在が示唆された．それでも，Holton *et al.*（1995）のSTE概念図

(余田 (1995) にも掲載されている) に象徴的に示されている通り, 熱帯における STE には, Brewer-Dobson 循環による平均的な引き上げか対流圏界面を突き抜けるような背の高い積乱雲に関連した過程か, いずれかあるいは両方の寄与が主であるという考え方が1990年代半ばを過ぎても一般的であった.

中高緯度においては, 総観規模擾乱活動に伴う tropopause folding (対流圏界面巻き込み) に伴い成層圏大気が対流圏深くまで入り込むことが早くから知られていた (Danielsen, 1968). 一方, 熱帯対流圏界面領域については, Parker (1973) によって卓越擾乱は赤道ケルビン波であることが早くから指摘されてはいた. Madden and Julian (1972) も MJO に付随して対流圏界面付近を東進する大規模擾乱が存在することを指摘していた. しかしながら, 不思議なことに Tsuda *et al.* (1994) まで, すなわち1970年代から1990年代前半まで, 熱帯 STE における熱帯大規模擾乱システムの役割を論じた人間はいなかった. Fujiwara *et al.* (1998a) は, オゾンゾンデ観測によって, 赤道ケルビン波と MJO に伴う物質輸送が確かに存在することを実証し, 砕波の役割を含む具体的なメカニズムを初めて詳細に議論したのである. 本論文によって, これまですっかり見過ごされてきた熱帯 STE における熱帯大規模擾乱システムの役割を考えるための土台が提供されたと言える.

5. その後の展開

観測実施 (1995年5, 6月) から論文出版 (1998年8月) まで結局3年以上かかってしまったが, その間, 特に初めの1年間は, この観測結果と "赤道ケルビン波による STE" というアイデアを携えて, 様々な日本人 (主に気象力学) 研究者の方々とお会いし, 議論にお付き合い頂いたり, 諸々の周辺事情等をお聞きしたりすることが出来た. このことは, 研究者としてのキャリアの出発点において極めて重要かつ幸運であったと思う. その後結果の解釈が固まってきた頃から, 第10回中層大気会議 (1997年6月; 藤原, 1998) を皮切りにいくつもの国際会議へ出かけて宣伝活動を行った. しかしながら, 興味を持って頂いた方はそれなりにはいたものの, 幸か不幸か赤道ケルビン波にかけてみようという人が現れるほどには重要視されることなく, その間にじっくりと発展問題に取り組むことができた. (ごく最近になって, 対流圏界面直下の巻雲の変動が赤道ケルビン波に関連しているという観測結果 (Boehm and Verlinde, 2000) や, 人工衛星による熱帯対流圏界面の水蒸気データを調べると, 季節内振動のスケールの東進擾乱が卓越しているという結果 (Mote *et al.*, 2000) が得られている. ただし, 残念ながら, Fujiwara *et al.* (1998a) を動機とした研究ではなかった.)

ごく初期の段階で, 赤道ケルビン波の熱帯 STE における役割の重要性を見抜いて下さった高橋正明先生とは, 共同研究として CCSR/NIES AGCM を用いた数値実験を行うことになった (Fujiwara and Takahashi, 2001). 赤道波をより現実的に表現するために, 上部対流圏から下部成層圏における鉛直分解能を550 m 程度と可能な限り細かくとり, 簡単なオゾン光化学過程を導入した AGCM を走らせてみたところ, Fujiwara *et al.* (1998a) の観測事例によく似た現象が多数見られることが分かった. 1例について詳しく調べ, 赤道ケルビン波に伴いオゾンと水蒸気が特徴的な変動を見せることを示した. 一点観測では間接的にしか分からなかった空間構造も詳しく調べることができ, Fujiwara *et al.* (1998a) で到達した結論に大きな間違いはなかったことを確認できた. また, 熱帯対流圏界面における卓越擾乱は東進する惑星規模重力波であることを確認し (ほとんどが赤道ケルビン波であろう), 特に北半球夏季のインド洋上で振幅が最大となっていることを見出した. 今後の観測計画に活かせればと考えている.

また, オゾンゾンデを扱えることを買われて, 1999年から SOWER/Pacific というプロジェクトに参加することになった (長谷部, 塩谷, 2000; 藤原, 庭野, 2000). このプロジェクトは1998年から始まっていたが, 1998年9月にガラパゴス諸島サンクリストバル島で行われた, オゾンゾンデと NOAA/CMDL 鏡面冷却型水蒸気ゾンデを用いた集中観測期間中にたまたま赤道ケルビン波が観測所上空を通過しており, 対流圏界面領域における水蒸気とオゾンが特徴的な変動を見せていたことが分かった (Fujiwara *et al.*, 2001). この結果は, 熱帯対流圏界面領域における水蒸気除去メカニズム研究の新しい展開と位置付けられることになるのではないかと期待している. SOWER/Pacific では2000年初頭より, 安価で操作の容易なスイス製の鏡面冷却型水蒸気センサー (通称 SnowWhite. ゴム気球・ラジオゾンデ搭載型) の改良にも携わってきている (藤原ほか, 2000; 藤原ほか, 2001). これは, 気象ラジオゾンデの相対湿度計は熱帯では高度11〜13 km までし

か測定できないという事情があるからである．このセンサーが完成した暁には，水蒸気，オゾン，さらに可能であればエアロゾル，他の微量気体も含めた多点同時集中観測を実施して，対流圏界面領域における赤道ケルビン波に伴う輸送過程・微物理過程・光化学過程・放射過程の結合システムの解明に観測の立場から取り組みたいと考えている．

実はごく最近，熱帯対流圏界面領域に関して，新しい考え方が提出された．これはHolton *et al.*（1995）からのパラダイムシフトであるとさえ言われている（2001年4月，ドイツにおけるSPARC Tropopause Workshopにて；Haynes and Shepherd（2001）も参照のこと）．Highwood and Hoskins（1998）は，熱帯対流圏界面はどのように定義されるべきか，という問題に取り組み，熱帯上部対流圏～下部成層圏の鉛直構造を次のように詳しくまとめた．「積乱雲活動に伴うoutflowが極大をとる高度はおよそ12 km（200 hPa）にあり，惑星境界層上端と同じ相当温位値はおよそ13 km（160 hPa，温位350 K）に見られ，ほとんどのconvective outflowは14 km（145 hPa，360 K）までしか届かず，気温鉛直勾配値“−2 K/km”に基づくWMO定義による対流圏界面はおよそ16 km（100 hPa，375 K）に位置し，熱帯でしばしば用いられる気温極小位置で定義された対流圏界面はおよそ18 km（80 hPa，400 K）にある．その上からBrewer-Dobson循環による東西一様でゆっくりとした上昇流の領域となる．」つまり，積乱雲活動に直接影響を受ける“対流圏”（13 km以下）とBrewer-Dobson循環の世界である“成層圏”（18 km以上）との間に対流圏とも成層圏ともつかない遷移領域が存在するのである．これは今後，Tropical Tropopause（またはTransition）Layer，略してTTLと呼ばれていくことになるであろう．また，Folkins *et al.*（1999）はオゾン，相当温位，大気安定度，雲のない場合の放射冷却/加熱の鉛直分布からTTLの下端が明瞭に見られることを示している．さらに，Fujiwara *et al.*（2000）とFujiwara and Takahashi（2001）は，熱帯上部対流圏のオゾン分布の東西非一様を指摘しており，TTLの“厚さ”に明瞭な東西非一様性があることが示唆される．つまり，これまでは熱帯の積乱雲はいわゆる“対流圏界面”（16～18 km）をしばしばつきやぶりさえすると信じられてきたのであるが，実際にはせいぜい14 kmまでしか届いておらず，その上にTTLという特別な領域が存在しているのだということになったのである．このようなパラダイムシフトの中で，成層圏へ入る大気の水蒸気除去メカニズムに関しても，「TTL内で何が起こっているのか」，という問題設定がなされ，すでに幾つかの仮説が出てきている．Sherwood and Dessler（2000；2001）は依然として，TTLに直接影響を与える背の高い積乱雲の効果に着目している．Holton and Gettelman（2001）はTTL内では鉛直輸送速度よりも水平輸送速度の方がずっと大きいことに着目して，TTL内の空気塊は成層圏に入る前に必ず“成層圏の泉”の経度帯を通過して水蒸気除去を受けると考えるだけで，成層圏水蒸気濃度を十分に説明できるのだと論じている．しかしながら，TTLという見方は，同時にこの領域が“対流”領域ではなくむしろ大気安定度のより高い背景場を持つ“大気波動”領域であるということを強調しているのではないだろうか．この領域の諸変動を支配するもののひとつとして，赤道ケルビン波の重要性が理解される素地が出来たと言えるのかもしれない．積乱雲，水平（東西/南北）輸送，東西一様なゆっくりとした上方輸送，そして大気波動，どれがどの程度TTL内の諸過程を支配しているのか，今後の課題である．

略語一覧：

AGCM：Atmospheric General Circulation Model（大気大循環モデル）

CCSR：Center for Climate System Research（東京大学気候システム研究センター）

LAPAN：Lembaga Pener Rangan Bangan Dan Antariksa Nasional (in Indonesian)（National Institute of Aeronautics and Space）（インドネシア航空宇宙庁）

MJO：Madden-Julian Oscillation（40～50日振動/季節内振動；例えばMadden and Julian（1972））

NIES：National Institute for Environmental Studies（国立環境研究所）

NOAA/CMDL：U. S. National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory（米国大気海洋庁気候監視診断センター）

QBO：Quasi-Biennial Oscillation（準2年振動）

SHADOZ：Southern Hemisphere ADditional Ozonesondes (http://code916.gsfc.nasa.gov/Data_services/shadoz/)

SOWER/Pacific：Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region/Pacific Mission

SPARC：Stratospheric Processes And their Role in Climate

STE：Stratosphere-Troposphere Exchange（成層圏対流圏大気交換過程/問題）

WMO：World Meteorological Organization（世界気象機関）

謝　辞

受賞対象論文の共著者である小川利紘先生，北　和之先生には大学院生時代を通じて大変お世話になりました．インドネシア航空宇宙庁の Slamet Saraspriya さんと Ninong Komala さん，およびワトゥコセッ観測所のスタッフの方々には観測に際して大変お世話になりました．また，ここでは繰り返しませんが，本文中にお名前を挙げさせて頂いた全ての皆様に大変にお世話になりました．加えて，内容の重要性に早い段階で気付いて下さり励まして下さった佐藤　薫先生と堀之内　武さん，いつも暖かく見守って頂いた岩上直幹先生に感謝いたします．査読者の方および編集委員の中村　尚先生には本稿に貴重なコメントを頂きました．第2～4図の作成には地球流体電脳ライブラリを用いました．

参　考　文　献

Boehm, M. T. and J. Verlinde, 2000：Stratospheric influence on upper tropospheric tropical cirrus, Geophys. Res. Lett., **27**, 3209-3212.

Brewer, A. W., 1949：Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapor distribution in the stratosphere, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **75**, 351-363.

Danielsen, E. F., 1968：Stratosphere-troposphere exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity, J. Atmos. Sci., **47**, 2013-2020.

Danielsen, E. F., 1982：A dehydration mechanism for the stratosphere, Geophys. Res. Lett., **9**, 605-608.

Folkins, I., M. Loewenstein, J. Podolske, S. J. Oltmans and M. Proffitt, 1999：A barrier to vertical mixing at 14 km in the tropics：Evidence from ozonesondes and aircraft measurements, J. Geophys. Res., **104**, 22095-22102.

Fujiwara, M., K. Kita, and T. Ogawa, 1998a：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, T. Ogawa, N. Komala, S. Saraspriya, A. Suripto and T. Sano, 1998b：Total ozone enhancement in September and October 1994 in Indonesia, Atmospheric Ozone (Proceedings of the XVIII Quadrennial Ozone Symposium, L'Aauila, Italy, 12-21 September, 1996), R. D. Bojkov and G. Visconti, eds., Parco Scientifico e Tecnologico d'Abruzzo, **1**, 363-366.

Fujiwara, M., K. Kita, S. Kawakami, T. Ogawa, N. Komala, S. Saraspriya and A. Suripto, 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**, 2417-2420.

Fujiwara, M., K. Kita, T. Ogawa, S. Kawakami, T. Sano, N. Komala, S. Saraspriya and A. Suripto, 2000：Seasonal variation of tropospheric ozone in Indonesia revealed by 5-year ground-based observations, J. Geophys. Res., **105**, 1879-1888.

Fujiwara, M., F. Hasebe, M. Shiotani, N. Nishi, H. Voemel and S. J. Oltmans, 2001：Water vapor control at the tropopause by equatorial Kelvin waves observed over the Galapagos, Geophys. Res. Lett., **28**, 3143-3146.

Fujiwara, M. and M. Takahashi, 2001：Role of the equatorial Kelvin wave in stratosphere-troposphere exchange in a general circulation model, J. Geophys. Res., **106**, in press.

藤原正智，1998：第10回中層大気会議の報告，天気，**45**，379-382.

藤原正智，庭野将徳，2000：SOWER/Pacific 観測キャンペーンに参加して，天気，**47**，53-56.

藤原正智，塩谷雅人，長谷部文雄，H. Voemel, S. J. Oltmans, P. Ruppert, 2000：熱帯上部対流圏—対流圏界面における水蒸気ゾンデ観測，日本気象学会2000年秋季大会講演予稿集，245.

藤原正智，塩谷雅人，長谷部文雄，H. Voemel, S. J. Oltmans, P. Ruppert, 2001：熱帯上部対流圏—対流圏界面における水蒸気ゾンデ観測（その2），日本気象学会2001年春季大会講演予稿集，433.

Gage, K. S., J. R. McAfee, D. A. Carter, W. L. Ecklund, A. C. Riddle G. C. Reid, and B. B. Balsley, 1991：Long-term mean vertical motion over the tropical Pacific：Wind-profiling Doppler radar measurements, Science, **254**, 1771-1773.

長谷部文雄，塩谷雅人，2000：SOWER/Pacific (Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region/Pacific Mission) について，天気，**47**，47-51.

Haynes, P. H., C. J. Marks, M. E. McIntyre, T. G.

Shepherd and K. P. Shine, 1991：On the "downward control" of extratropical diabatic circulation by eddy-induced mean zonal forces, J. Atmos. Sci., **48**, 651-678.

Haynes, P. and T. Shepherd, 2001：Report on the SPARC Tropopause Workshop, SPARC Newsletter No. 17 (http：//www.aero.jussieu.fr/～sparc/News17/).

Highwood, E. J., and B. J. Hoskins, 1998：The tropical tropopause, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **124**, 1579-1604.

Holton, J. R., 1984：Troposphere-stratosphere exchange of trace constituents：The water vapor puzzle, Dynamics of the Middle Atmosphere, J. R. Holton and T. Matsuno, eds., Terra Scientific Pub. Co., Tokyo, 369-385.

Holton, J. R., P. H. Haynes, M. E. McIntyre, A. R. Douglass, R. B. Rood and L. Pfister, 1995：Stratosphere-troposphere exchange, Rev. Geophys., **33**, 403-439.

Holton, J. R. and A. Gettelman, 2001：Horizontal transport and the dehydration of the stratosphere, Geophys. Res. Lett., **28**, 2799-2802.

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, Atmos. Environ., **34**, 2681-2690.

Kley, D., E. J. Stone, W. R. Henderson, J. W. Drummond, W. J. Harrop, A. L. Schmeltekopf, T. L. Thompson and R. H. Winkler, 1979：In situ measurements of the mixing ratio of water vapor in the stratosphere, J. Atmos. Sci., **36**, 2513-2524.

Komala, N., S. Saraspriya, K. Kita and T. Ogawa, 1996：Tropospheric ozone behavior observed in Indonesia, Atmos. Environ., **30**, 1851-1856.

Madden, R. A and P. R. Julian, 1972：Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period, J. Atmos. Sci., **29**, 1109-1123.

Matsuno, T., 1966：Quasi-geostrophic motions in the equatorial area, J. Meteor. Soc. Japan, **44**, 25-43.

Mote, P. W., H. L. Clark, T. J. Dunkerton, R. S. Harwood, and H. C. Pumphrey, 2000：Intraseasonal variations of water vapor in the tropical upper troposphere and tropopause region, J. Geophys. Res., **105**, 17457-17470.

Newell, R. E. and S. Gould-Stewart, 1981：A stratospheric fountain?, J. Atmos. Sci., **38**, 2789-2796.

Nishi, N. and A. Sumi, 1995：Eastward-moving disturbance near the tropopause along the equator during the TOGA COARE IOP, J. Meteor. Soc. Japan, **73**, 321-337.

Parker, D. E., 1973：Equatorial Kelvin waves at 100 millibars, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **99**, 116-129.

Robinson, G. D., 1980：The transport of minor atmospheric constituents between troposphere and stratosphere, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **106**, 227-253.

Saji, N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran and T. Yamagata, 1999：A dipole mode in the tropical Indian Ocean, Nature, **401**, 360-363.

Sato, K., F. Hasegawa and I. Hirota, 1994：Short-period disturbances in the equatorial lower stratosphere, J. Meteor. Soc. Japan, **72**, 859-872.

Sherwood, S. C., 2000：A "stratospheric drain" over the maritime continent, Geophys. Res. Lett., **27**, 677-680.

Sherwood, S. C., and A. E. Dessler, 2000：On the control of stratospheric humidity, Geophys. Res. Lett., **27**, 2513-2516.

Sherwood, S. C. and A. E. Dessler, 2001：A model for transport across the tropical tropopause, J. Atmos. Sci., **58**, 765-779.

高橋正明，1995：数値実験による準2年周期振動の研究—1994年度日本気象学会賞受賞記念講演—，天気，**42**，69-78.

Thompson, A. M., J. C. Witte, R. D. Hudson, H. Guo, J. R. Herman and M. Fujiwara, 2001a：Tropical tropospheric ozone and biomass burning, Science, **291**, 2128-2132.

Thompson, A. M., J. C. Witte, R. D. McPeters, 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, B. J. Johnson, H. Voemel and G. Labow, 2001b：The 1998-2000 SHADOZ (Southern Hemisphere ADditional Ozonesondes) tropical ozone climatology：Comparison with TOMS and ground-based measurements, J. Geophys. Res., submitted.

Tsuda, T., Y. Murayama, H. Wiryosumarto, S. W. B. Harijono, and S. Kato, 1994：Radiosonde observations of equatorial atmosphere dynamics over Indonesia, 1, Equatorial waves and diurnal tides, J. Geophys. Res., **99**, 10491-10505.

柳井迪雄，丸山健人，1969：熱帯成層圏大気の運動—準2年振動と大規模波動について—，天気，**16**，239-260.

余田成男，1995：ダウンワード・コントロール，天気，**42**，601-604.

Winker, D. M. and C. R. Trepte, 1998 : Laminar cirrus observed near the tropical tropopause by LITE, Geophys. Res. Lett., **25**, 3351-3354.

Stratosphere-Troposphere Exchange Associated with Equatorial Kelvin Waves and Researches on the Tropical Tropopause Region

Masatomo FUJIWARA*

**Radio Science Center for Space and Atmosphere, Kyoto University, Uji, Kyoto 611-0011, Japan*
(Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science)
E-mail : fuji@kurasc.kyoto-u.ac.jp

(Recieved 6 June 2001 ; Accepted 29 August 2001)

新 入 会 員

(2001年9月1日～2001年10月1日)

会員番号	種別	氏名	住所または勤務先	地区
9608	学A	川原 誠	防衛大学校地球宇宙科学研究科	関東
9609	B	千手 智晴	九州大学応用力学研究所海洋循環力学部門	九州
9610	学A	松木 篤	名古屋大学太陽地球環境研究所東山分室	中部
9611	学A	山本 奈美	東京都文京区小石川5-2-2-1006	関東
9612	A	中尾 哲弥	防衛大学校理工学研究科地球宇宙科学	関東
9613	学A	山本 宗尚	滋賀県彦根市竹ヶ鼻町688サンタウン竹鼻A-225	関西
92233	特別団体	Institute fuer Meereskunde an der Universitaet Kiel	Bibliothek Duesternbrooker Weg 20 24105 Kiel, Germany	関東

新入会員	個人	6名
	特団	1
退会	個人	2名