

# 熱帯対流圏界面・遷移層における ケルビン波の伝播および碎波と関連したオゾン変動

\* 小石 和成<sup>1</sup>・塩谷 雅人<sup>1</sup>・鈴木 順子<sup>2</sup>

1:京都大学/生存圏研究所 2:JAMSTEC

## 1. はじめに

熱帯域における対流圏界面領域は成層圏への唯一の大規模な流入口にあたっている。また、熱帯対流圏界面遷移層 (Tropical Tropopause Layer: TTL) における気候値としての化学的なオゾンの生成率は約 1 ppbv/day と見積もられており (Wennberg *et al.* 1998), この高度域では大気運動に対する準保存的なトレーサーとして振る舞うと考えられる。そのため、この領域でのオゾン変動を理解することは、対流圏起源の長寿命・短寿命の化学物質が成層圏へと輸送されていく過程、そして成層圏のオゾンが対流圏へと輸送される過程といった大気質の将来予測に関わる重要なトピックとなっている。これまで下部成層圏での温位面のゆらぎとオゾンの変動との関係は、衛星データの解析からよく知られて来たが (*e.g.*, Salby *et al.* 1990), まさに対流圏と成層圏との物質交換を起こしている TTL での温位面のゆらぎとオゾン変動との関係を記述するためには、高い鉛直分解能が必要なためゾンデデータを用いた事例解析からしか知られていない (Fujiwara *et al.* 1998; Koishi and Shiotani 2010). また一方で, Tindall *et al.* (2006) は TTL での温度擾乱はケルビン波が最も振幅が大きい成分であることを示し, Flannaghan and Fueglistaler, (2011) はケルビン波のシア領域で乱流混合が起こることを指摘している。したがって、本研究では、ケルビン波に関連してオゾンの鉛直分布がどのように変化しているのか、位相との関係性があるのか、12 年分のオゾンゾンデデータを用いて記述する。

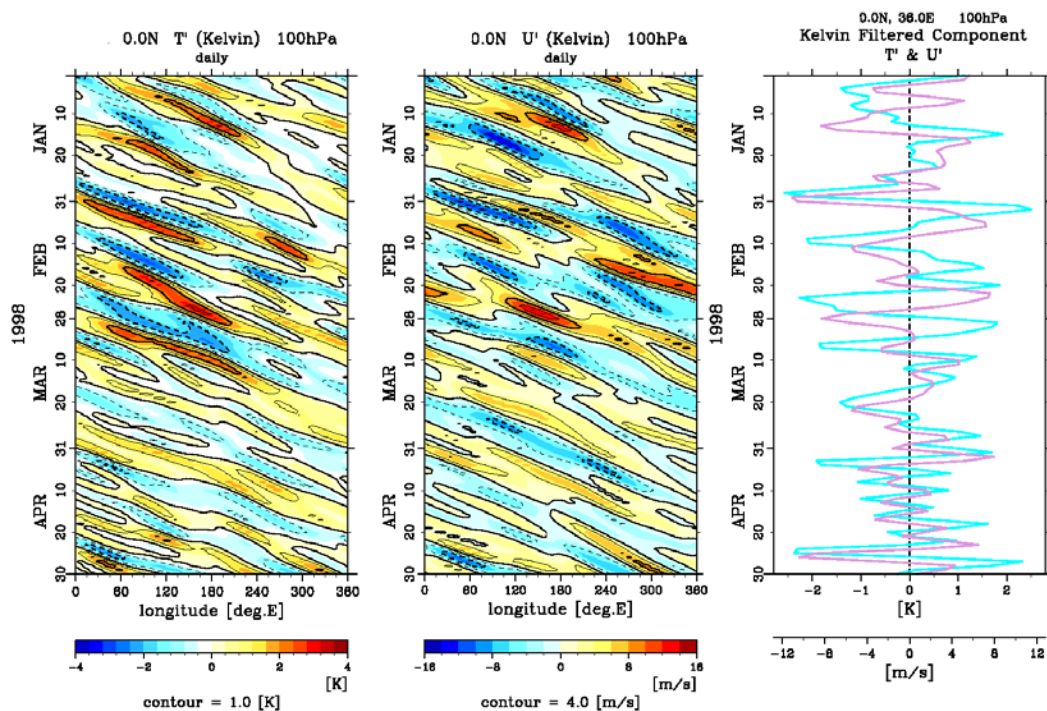


図 1. ERA-Interim から得られた 100 hPa でケルビン波フィルターをかけた (左端) 温度偏差の時間経度断面, (中央) 東西偏差の時間経度断面, (右端) 温度・東西風偏差の時系列 (経度 36.0°E, 緯度 0.0°N).

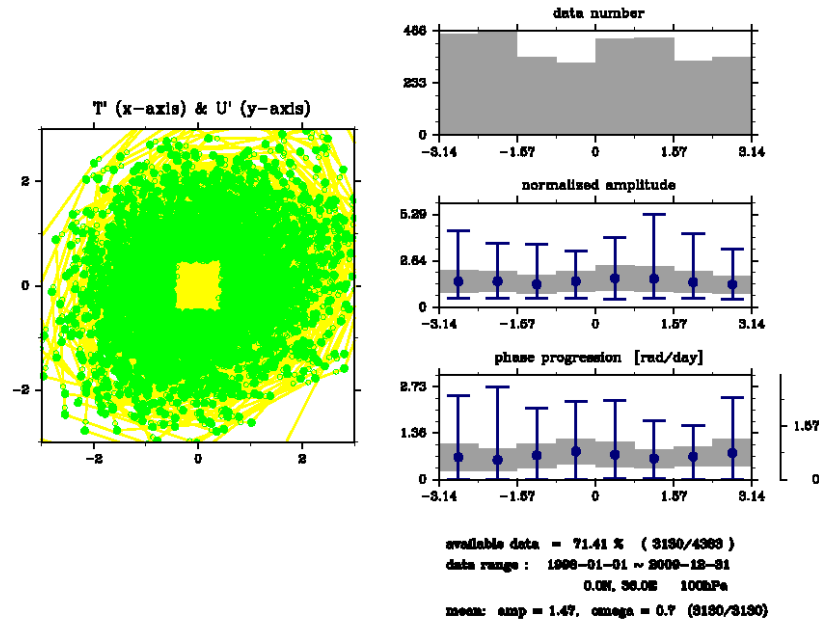


図 2. ERA-Interim から得られた経度 36.0°E・緯度 0.0°N での温度偏差と東西風偏差の (左図) 位相空間でのトラジェクトリー, (右図) 8 つの位相カテゴリー毎での統計量. 左図の色付きの丸印 (●) は 1 日毎の位相空間上での座標の位置を示している. トラジェクトリーの時間発展が分かるように色なしの丸印 (○) には 1 日前の座標がどちらの方向にあったかを表した. 右図では上から順にデータ数, 振幅, 位相の変化率を示している. 振幅と位相の平均値は丸印 (●) で, 最大・最小値はバーで, 標準偏差は棒グラフで表している.

## 2. データと解析方法

SHADOZ (Southern Hemisphere ADditional OZonesondes) が提供する赤道から ±10 度の緯度範囲内にある 10 の観測点での週 1 回程度観測されるゾンデデータを利用して, 1998 年から 2009 年までのオゾンゾンデ (合計 3264 のプロファイル) のケルビン波の位相に関するコンポジット解析を行った. この際, ケルビン波の同定には時空間について均質な情報を持つ ECMWF (ヨーロッパ中期予報センター) 提供の ERA-Interim 客観再解析データを使用した. 具体的な解析の手順は以下の通りである.

まず, 対流圏界面の高度におよそ相当する 100 hPa (約 16.5 km) での温度・東西風データに対してケルビン波フィルターを適用し, 温度と東西風の偏差を作成した. フィルタリングの閾値は *Suzuki and Shiotani (2008)* と同様で, 東西波数 1–10, 周期 4–23 日, 等価深度 8–240 m/s とした. 図 1 には, 1998 年 1 月から 4 月の赤道上で温度と東西風のケルビン波フィルターをかけた偏差成分の例を示している. ここで, 経度 36.0°E, 緯度 0.0°N での時系列が右端に示してある. ここに見られるように, ある地点上でみたケルビン波の温度偏差 (水色) は東西風偏差 (紫色) に対しておよそ 1/4 周期先行している. そのため, 横軸に温度偏差, 縦軸に東西風偏差をとった, 位相空間では時間方向に左回転する軌跡が描かれる (図 2 の左図). この温度と東西風との位相空間における各時刻の角度と絶対値を, 各々ケルビン波の (正の温度ピークを基準とした) 位相と振幅として使用した. ただし, 図 1 右図のゼロ線付近での擾乱を省くために絶対値で温度偏差 0.6 K・東西風偏差 2.0 m/s 以下の値は除去した. 図 2 の右図には, データ数, 振幅値, 位相の変化率を示してあるが, 位相を 8 つに区分したところ, 充分均質にデータ数を取ることができたので  $2\pi/8$  をビンとした 8 つの位相で議論する. 位相 1–8 はそれぞれ図 2 左図での  $-\pi$  から  $\pi$  を 8 等分したカテゴリーに対応する. 以上から, 各観測点毎に 8 つの位相を判定した時系列データを作り, それぞれの位相に対応する SHADOZ のオゾンゾンデデータをコンポジットして, ケルビン波の位相毎の温度とオゾンの鉛直構造を記述した.

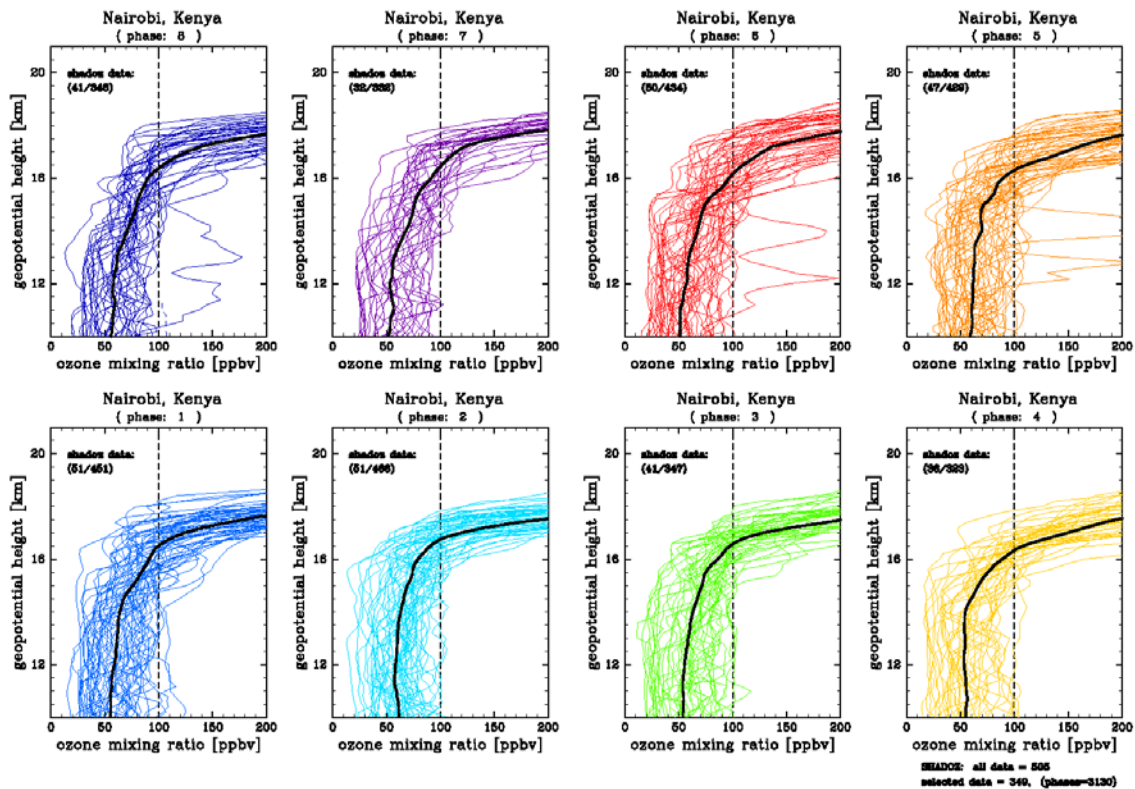


図 3. Nairobi におけるケルビン波の位相毎に選別したオゾン鉛直プロファイル. 下段の左端から右回りに、位相 1-8 それぞれに判定された SHADOZ のプロファイルを重ねて描いている. 各々の図中の太実線は各位相毎での平均プロファイルを表し、左上の 2 つの数値は各位相で使用した SHADOZ のプロファイル数と ERA-Interim で同定された各位相の日数とを示している. 点線はオゾン混合比 100 ppbv を表す.

### 3. 高度座標上でのオゾン変動

図 3 には、先の手続きで求めた各位相でのオゾンの鉛直プロファイルを示した. 高度 15 km から 17 km での範囲のオゾン混合比はおよそ 10 から 200 ppbv という広い変動幅を示し、およそ 100 ppbv を中心とはするものの変動性を定義するのが困難なことが分かる. しかしながら、コンポジットによる位相毎の平均値には、ケルビン波の鉛直構造と関連した変動がみられている.

図 4 は 図 3 で得た位相毎の平均値について位相-高度の断面で示し、各高度での平均値を差し引いた偏差を示したものである. 全ての観測点について概ね同様の特徴がみえたため、ここでは各観測点での位相毎のコンポジットを平均したものをを用いて、左図に温度、右図にオゾンの高度平均からの偏差として示してある. この高度座標でみたコンポジットからは、高度 17 km から 18 km の範囲で特に温度偏差の振幅が大きく、その位相線が下部成層圏から対流圏へと下方伝播してくる様子が分かる. 同様のオゾン偏差の鉛直構造からも、この温度場の偏差を反映した in-phase のオゾン変動がみられる. これは下部成層圏においては衛星データの解析からよく知られた変動であり (e.g., Salby et al., 1990), 温度が暖くなる際には上層の温位が下降してくるために、上層の高濃度のオゾンが鉛直移流されてくる結果だと考えられる. 本研究では、このようなケルビン波に伴う TTL でのオゾン変動が事例解析ではなく、統計的な描像としても見られることを初めて示した.

### 4. 温位座標上でのオゾン変動

さらに、鉛直移流によるオゾンの変動成分を除去するために、同様の解析を温位座標上でも行った. 温位座標における 図 4 と同様の温度およびオゾンの偏差を示したのが 図 5 である. ここでは、温度偏差について高度座標のときと同様の鉛直構造がみられている. このときの温度偏差は



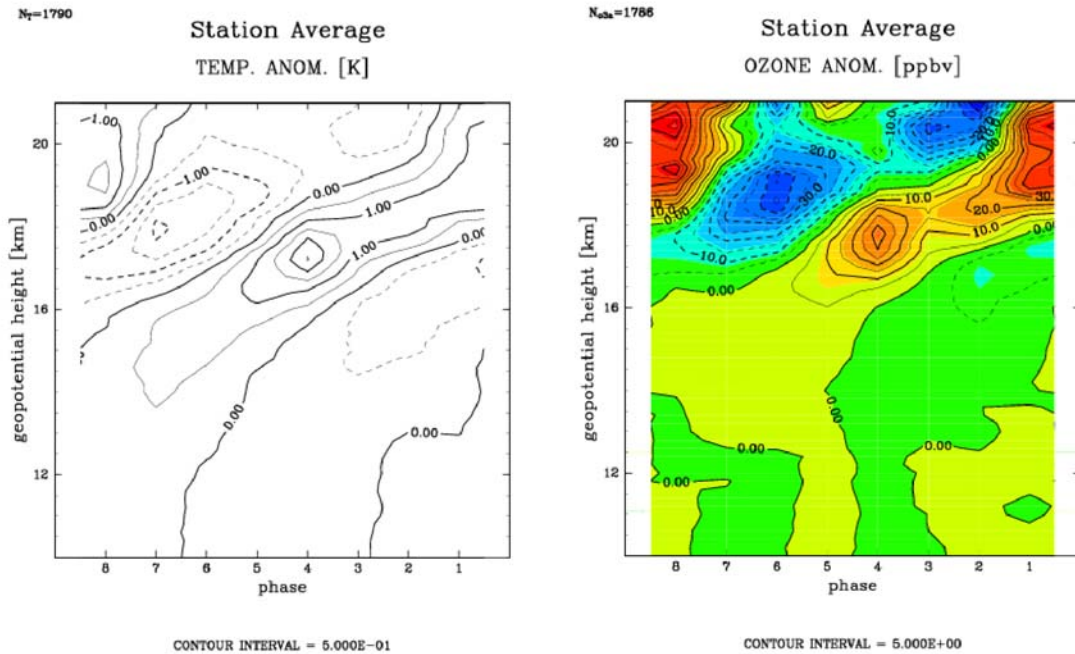


図 4. ケルビン波の位相毎にコンポジットを取った高度座標における温度とオゾンの鉛直プロファイル偏差. 左図および右図は各々、高度平均値を差し引いた温度およびオゾンの偏差を表している. コンター間隔はそれぞれ 0.5 K と 5 ppbv.

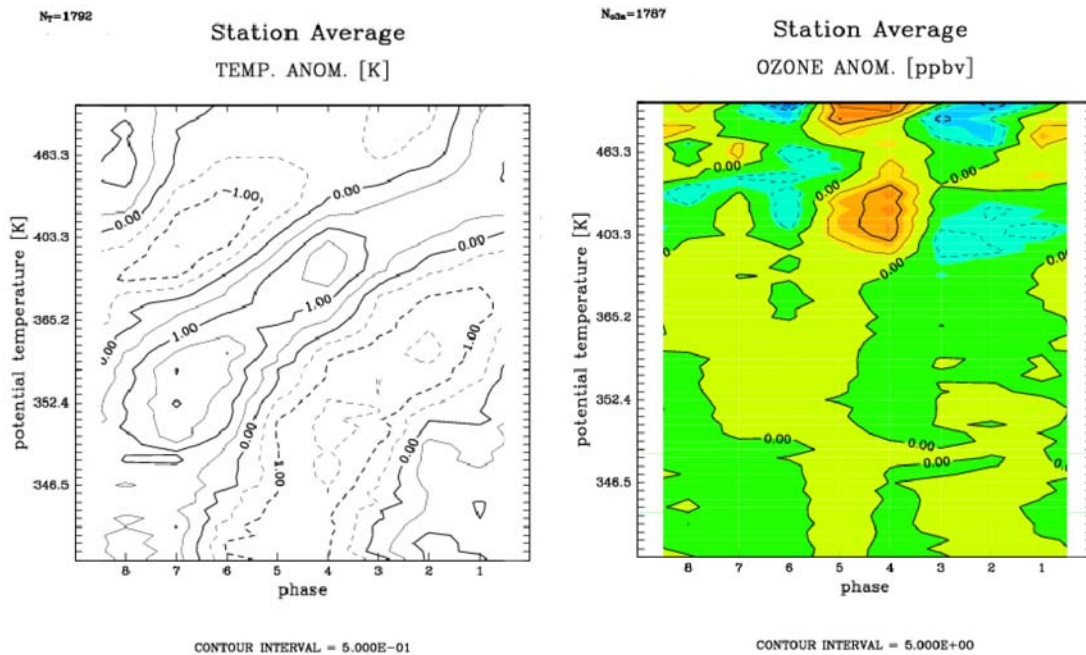


図 5. ケルビン波の位相毎にコンポジットを取った温位座標における温度とオゾンの鉛直プロファイル偏差. 左図および右図は各々、温位平均値を差し引いた温度およびオゾンの偏差を表している. コンター間隔はそれぞれ 0.5 K と 5 ppbv.

*Koishi and Shiotani (2010)* でみられたように安定度の低い対流圏側で擾乱の振幅が大きくなり、温位レベルで 350 から 400 K にあたる TTL で大きく変動していることが分かる. この際、オゾン偏差では高度座標のときとは違って温度偏差と in-phase にはならず遅れを持って変動する様子がみられている. この温度偏差とは位相にズレを持つオゾンの変動は、鉛直移流ではない等温位面をまたぐ輸送効果を受けているものと考えられる. 特に、オゾンの増大は温位 400~440 K (高度範囲で約 17.5~19 km) において最も顕著に現れている. これは *Flannaghan and Fueglistaler (2011)* と整

合的な結果であり、シアー域 (温度偏差でいえば極大と極小のピーク) で確かにオゾンが時間的に増加する様子が見られる。ただし、温度偏差の極小というよりは極大域側でオゾンの増大がみられる点に興味深い。これは *Nishi et al. (2007)* でみられた西風に遷移するとき大振幅となるケルビン波と対応しているのかもしれない。

## 5. まとめ

客観解析データの 100 hPa でのケルビン波成分をキーとして、温度偏差と東西風偏差とを位相空間として定義される東進擾乱についてコンポジット解析を行った。ここで合成された SHADOZ の温度およびオゾンの鉛直プロファイルには、明瞭な位相伝播が見られた。これは、温位面の揺らぎがもたらす鉛直移流によって説明できると思われる。さらに、この鉛直移流の成分を除去するために、同様の解析を温位座標で行ったところ、温度の位相に対して遅れを持ったオゾンの変動が得られた。これは、*Flannaghan and Fueglistaler (2011)* や *Nishi et al. (2007)* で示しているように西風に遷移する位相において不安定が起きることで碎波混合が生じやすくなっている可能性がある。このような乱流混合が、オゾンの増大に寄与していることが想像される。今後は、オゾンが増加する頻度の統計などを取り、鉛直的な「混合」が選択的に起こりやすい位相があるのかについて確証を得ていきたい。

## 参考文献

- [1] Wennberg, P. O., et al. (1998), Hydrogen radicals, nitrogen radicals, and the production of O<sub>3</sub> in the upper troposphere, *Science*, 279, 49-53.
- [2] Salby, M. L., P. Callaghan, S. Solomon, R. R. Garcia (1990), Chemical fluctuations associated with vertically propagating equatorial Kelvin waves, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 95(D12), 20491-20505.
- [3] Flannaghan, T. J. and S. Fueglistaler, (2011), Kelvin wave and shear-flow turbulent mixing in the TTL in (re-)analysis data, *Geophysical Research Letters*, 38(L02801), doi:10.29/2008GL033641.
- [4] 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, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 103(D15), 19173-19182.
- [5] 小石和成, 塩谷雅人 (2010), 熱帯対流圏界面遷移層における水蒸気変動と鉛直温度構造との関係, 日本気象学会 2010 年度春季大会, D162.
- [6] Tindall, J. C., J. Thurnburn, E. J. Highwood (2006), Equatorial waves in the lower stratosphere. I: A novel detection method, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132, 177-194.
- [7] Nishi, N., J. Suzuki, A. Hamada, and M. Shiotani (2007), Rapid Transitions in Zonal Wind Around the Tropical Tropopause and their Relation to the Amplified Equatorial Kelvin Waves, *Sola*, 3, 13-16.
- [8] Suzuki, J., and M. Shiotani (2008), Space-time variability of equatorial Kelvin waves and intraseasonal oscillations around the tropical tropopause, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 113(D16) doi:10.1029/2007JD009456.