

平成30年 5月18日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17760

研究課題名(和文) 熱帯対流圏界層クロック・トレーサー濃度変動と成層圏大気年齢についての研究

研究課題名(英文) Temporal variation of the clock tracers in the tropical tropopause layer and its impact on the stratospheric age of air

研究代表者

稲飯 洋一 (Inai, Yoichi)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：50587623

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：地球の大気は層構造を成しており地表面に近い方から対流圏、成層圏と呼ばれている。対流圏で排出された温室効果ガスやオゾン層破壊物質は地球規模の大気循環によって成層圏まで運ばれ様々な問題を引き起こしている。成層圏内の輸送の速さを表す指標としてクロック・トレーサーと呼ばれる物質の濃度から成層圏大気年齢を推定する手法がある。この手法で推定された成層圏内の輸送速度と別の手法で推定される速度に矛盾が生じており、未解決の謎となっている。本研究では流跡線解析と呼ばれる手法を用いて成層圏内の輸送を調査した結果、両者の矛盾のうち20%程度は熱帯対流圏界層における大気混合過程の長期変動に起因していることを示した。

研究成果の概要(英文)：The atmosphere of the earth has a layered structure including the troposphere and stratosphere. Greenhouse gases and any pollutants are transported to the stratosphere from the troposphere by global meridional circulation. There is an barometer for transport speed in the stratosphere called "age of air," which is estimated from stratospheric concentration of clock tracers. The estimated transport speed is, however, not consistent with that estimated from another method. This study survey the stratospheric transport by using trajectory analysis, and the results suggest that 20% of the inconsistency between the two arise from long-term variation in mixing processes around the tropical tropopause layer.

研究分野：大気科学

キーワード：成層圏大気年齢 熱帯対流圏界層 物質輸送 子午面循環

## 1. 研究開始当初の背景

対流圏から成層圏への物質輸送過程は成層圏全体の環境決定要素であり地球規模の環境変動にも影響を持っているが、その重要性に比して理解は不十分である。例えば、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)や六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)は、地表に排出/吸収源を持ち化学的に安定でその濃度は増加トレンドを示すため、その濃度から任意の成層圏大気が対流圏を離れてからの経過時間「成層圏大気の年齢(age of air; AoA)」が推定される(この性質からCO<sub>2</sub>やSF<sub>6</sub>は「クロック・トレーサー」と呼ばれている)。この成層圏 AoA は成層圏内の物質輸送速度、すなわち成層圏子午面循環の強度を反映するため、多くの全球モデルで予想されている地球温暖化に伴う成層圏子午面循環の強化は成層圏 AoA の“若年化”として確認されるはずである。ところが、日欧による中高緯度中部成層圏におけるクロック・トレーサーの長期観測結果からは、若年化とは逆に成層圏 AoA の“高齢化”が示されており(例えば、Engel et al., 2009)、未解決の問題として我々の成層圏に関する理解を阻んでいる。

対流圏から成層圏への大気輸送過程を考える上で重要となるのが、20世紀末に提唱された熱帯対流圏界層(tropical tropopause layer; TTL)という枠組みである。TTLは熱帯域の対流圏-成層圏間(平均的には高度14 kmから18 km)に存在する両圏の遷移層あるいは緩衝域である。対流圏から成層圏への物質輸送はTTLを介することになるため、対流圏から成層圏への物質輸送を理解するためには、TTLにおける輸送過程を理解することが不可欠である。

## 2. 研究の目的

以上のような背景の中、本研究課題では観測されている成層圏 AoA の高齢化と全球モデルが示す成層圏子午面循環の強化は、TTL-中緯度成層圏間の混合過程の長期的な変化によって互いに矛盾せず解釈できる可能性に着目する。すなわち、モデルの示す成層圏子午面循環の強化とそれによる成層圏 AoA の若年化が進行中でも、成層圏流入前の「TTL大気の年齢」を増加させる効果を持つTTL-中緯度成層圏間の混合過程の経年変化が若年化を相殺し正味で成層圏を高齢化させようのではないかと、この着想のもと、本研究は成層圏流入前のTTLにおける高齢化仮説を検証することで、成層圏 AoA の変動及び、対流圏から成層圏に至る物質輸送過程の理解の深化を図ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 流跡線解析と混合比率の推定

TTLから成層圏へ流入してくる大気塊の起源、つまり対流圏起源か中緯度下部成層圏(extratropical upper troposphere and lower stratosphere; ExUTLS)起源か、を推定するために全球再解析気象データを用いた後方流跡線解析を実施する。後方流跡線解析とは任意の時空間座標を始点とし、その空気塊を時間を遡って追跡していく手法であり、これによりターゲットとする空気塊がどこから運ばれてきたものかを推定することができる。本解析では1980年から2016年までの期間について毎月3回、TTL上端部分の空気塊を90日過去まで追跡する。そうして計算された後方流跡線に従ってそれぞれの空気塊の起源を同定し、対流圏起源とExUTLS起源の空気塊の混合比率(特にExUTLS大気の混合比率)を推定する。

(2) TTLにおけるAoA、水蒸気変動の推定  
対流圏とExUTLSではクロック・トレーサー濃度など大気組成が特徴的に異なるため、TTL上端におけるその混合比率の変化は熱帯下部成層圏の大気組成の変化となって現れるはずである。この点に注目して、本研究で推定されたExUTLS大気の混合比率をTTL上端におけるAoAや水蒸気濃度変動に変換し、水蒸気について観測から推定されている値と比較することで、TTL上端におけるこれらの変動を理解するとともに結果の堅牢性を向上させる。

(3) 中高緯度中部成層圏におけるAoAの推定  
背景で述べたように中高緯度中部成層圏においてAoAの高齢化が観測されている(Engel et al., 2017)。TTL上端から中高緯度中部成層圏までの輸送には一般に数年程度の時間を要すると考えられるため、本研究で推定するTTL上端におけるAoA変動をEngelらの観測と比較するためには、この輸送時間も考慮に入れる必要がある。このために後方流跡線解析を用いてEngelらにより観測されている空気塊を10年過去まで追跡して、この輸送に要する時間を推定する。

(4) 対流圏における熱帯域への大気輸送の評価  
対流圏と成層圏におけるクロック・トレーサー濃度差に加えて、対流圏の南北半球間においてもクロック・トレーサー濃度は異なっている。このため対流圏の南北両半球から成層圏への大気流入口である熱帯域への大気輸送も成層圏AoAに影響を与える可能性がある。このような対流圏におけるクロック・トレーサー(CO<sub>2</sub>)の南北輸送を把握するために、熱帯対流圏におけるCO<sub>2</sub>観測データに注目して、CO<sub>2</sub>濃度と大気輸送の関係を調査した。大気輸送については後方流跡線解析を用いてCO<sub>2</sub>ゾンデなどにより観測された大気塊を15日過去まで追跡し、衛星観測データも用いて対流

による混合過程も考慮しながら各空気塊の起源となる緯度を推定した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 流跡線解析と混合比率

推定された TTL 上端における ExUTLS 大気の混合比率 (図 1) は、5 月に極小 (約 10%)、9 月に極大 (約 40%) を持つ顕著な季節変動が示された。また解析に含まれうる誤差を評価した結果、上記の推定値の 0.4 倍から 1.8 倍までが誤差範囲として推定された。このことを考慮に入れると本研究の推定値は航空機観測などによる先行研究と誤差の範囲内で整合的なものであった。TTL 上端における ExUTLS 大気混合比率の長期変動については、1980 年から 1999 年の期間に増加トレンド (4%/10 年)、1999 年から 2016 年の期間に減少トレンド (-6%/10 年) が示された。この TTL 上端における ExUTLS 大気混合比率の長期変化傾向は本研究により初めて定量化されたものである。

##### (2) TTL における AoA、水蒸気変動の推定

ExUTLS 大気の混合比率から推定された TTL 上端域における水蒸気濃度について、その絶対値、季節変動、年々変動は既存の衛星や気球による観測的研究と整合するものであった。TTL 上端における AoA については、絶対値として 0.5 年程度と推定されたことに加え、上述の ExUTLS 大気の混合比率の長期変化傾向に伴って、1980 年から 1999 年の期間に 0.1 年/10 年程度の増加トレンド、1999 年から 2016 年の期間に -0.1 年/10 年程度の減少トレンドを持つと推定された (図 2)。

##### (3) 中高緯度中部成層圏における AoA の推定

TTL 上端から中高緯度中部成層圏までの輸送時間について、最頻輸送時間としては約 1.8 年、平均輸送時間としては約 3.1 年と推定された。これに TTL 上端における AoA を加えた約 3.6 年が中高緯度中部成層圏の AoA として評価された値であるが、これは Engel らの観測に基づく推定値 (約 5 年) よりかなり小さい (図 3)。この過小評価の原因については、流跡線計算誤差や小スケールの混合過程の影響などが考えられた。一方、本研究で推定された AoA の長期変化傾向は、Engel らの観測に見られる長期変化傾向の 50% 程度に相当するものであった。そして内 20% 程度が ExUTLS 大気の混合比率の長期的な変動に起因していると計算された。

##### (4) 対流圏における熱帯域への大気輸送の評価

熱帯対流圏で観測された CO<sub>2</sub> 濃度と大気塊の起源となる緯度の間に正の相関があること

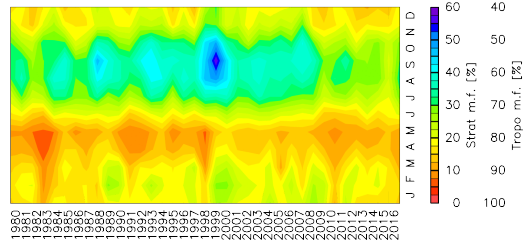


図 1: TTL 上端域における ExUTLS 大気と対流圏大気の混合割合 (Inai (2018) より抜粋)。

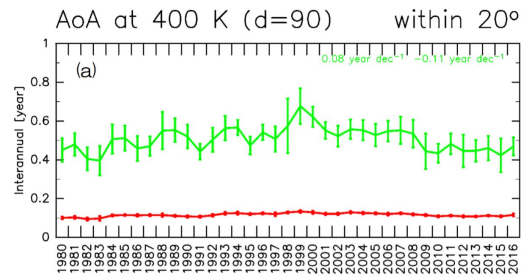


図 2: TTL 上端域における AoA の経年変動 (緑) と対流圏からの輸送に要する時間 (赤) (Inai (2018) より抜粋)。

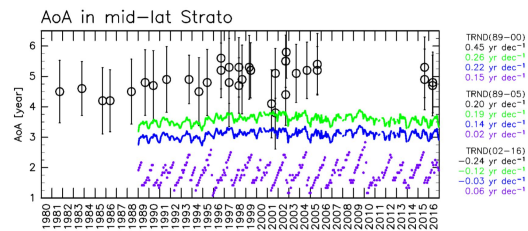


図 3: 本研究で評価された中高緯度成層圏の AoA (緑)、成層圏内の輸送時間 (青)、最頻輸送時間 (紫) と Engel et al. (2009, 2017) による推定値の比較 (Inai, 2018)。

が確認された (図 4)。これは解析期間が 2012 年 2 月と 2015 年の 2-3 月であったため北半球の CO<sub>2</sub> 背景濃度が南半球のそれに対して高い季節であったことに加え、熱帯域における CO<sub>2</sub> 分布が大気の長距離輸送によって決定されていること、本研究で実施した対流混合を考慮に入れた流跡線解析が熱帯域において有効な解析手法であることを示すものである。

##### (5) 今後の展望

以上の研究成果を端的に表現すれば、申請当初の研究目的に掲げた「成層圏 AoA 高齢化の謎の解明」に対し、その長期変動の約 50% を理解するメカニズムを提示することができたと言える。しかし、残りの 50% については未解決であることに加えて、中高緯度中部成層圏 AoA を絶対値においては過小評価しているなど、課題として残された部分も少なくない。

本研究で用いた流跡線解析について、その精度は入力値として用いる気象データの質に強く依存する。今後、本研究課題の解析手法に近年新たに整備されつつある次代の客観再解析データを適用することや研究対象領域を全球のUTLS領域に拡大することで、TTLにおけるExUTLS大気混合比率に見られる長期変動について、その影響の評価を精緻化しさらに変動の要因を特定していきたい。

<引用文献>

Engel, A., et al. (2009), Age of stratospheric air unchanged within uncertainties over the past 30 years, *Nat. Geosci.*, 2, 28-31, doi:10.1038/ngeo388.

Engel, A. et al. (2017), Mean age of stratospheric air derived from AirCore observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 6825-6838, <https://doi.org/10.5194/acp-17-6825-2017>.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

Inai, Y. (2018), Long-term variation in the mixing fraction of tropospheric and stratospheric air masses in the upper tropical tropopause layer, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, <https://doi.org/10.1029/2018JD028300>. (査読あり)

Inai, Y., S. Aoki, H. Honda, H. Furutani, Y. Matsumi, M. Ouchi, S. Sugawara, F. Hasebe, M. Uematsu, and M. Fujiwara (2018), Balloon-borne tropospheric CO<sub>2</sub> observations over the equatorial eastern and western Pacific, *Atmospheric Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.016>. (査読あり)

稲飯洋一 (2017), 総説 -トピックス「物質交換・物質循環」- 対流圏-成層圏間の輸送過程 Transport processes between the troposphere and stratosphere, *大気化学研究*, 37, 8-16, [https://jpsac.org/wordpress/wp-content/uploads/2017/07/AACR\\_vol37.pdf](https://jpsac.org/wordpress/wp-content/uploads/2017/07/AACR_vol37.pdf). (査読あり)

[学会発表](計 9 件)

稲飯洋一: 成層圏へ流入する大気の起源の変動が成層圏大気の年齢に与える影響,

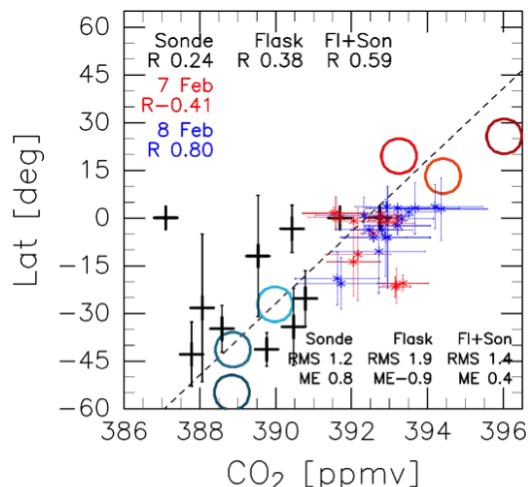


図 4: 東部赤道太平洋で観測された CO<sub>2</sub> 混合比と空気塊起源の緯度の関係(アスタリスクと十字)。比較のために周辺領域の地上観測ステーションで観測された月平均値も丸で示されている(Inai et al., 2018)

日本気象学会秋季大会, 札幌, Nov., 2017.

稲飯洋一: 成層圏へ流入する大気の起源の変動と成層圏大気の年齢, 第 23 回大気化学討論会, 香川, Oct., 2017.

Inai, Y., S. Sugawara, S. Aoki, S. Morimoto, and T. Nakazawa: Variation in the mixing fraction of tropospheric and stratospheric air masses sharing the tropical lower stratosphere, *Japan Geoscience Union Meeting*, Makuhari, Japan, May, 2017.

稲飯洋一: 熱帯対流圏界層上端大気起源の経年変動 その原因と成層圏大気質への影響, 日本気象学会秋季大会, 名古屋, Oct., 2016.

稲飯洋一: 熱帯対流圏界層上端大気の起源についての考察, 第 22 回大気化学討論会, 札幌, Oct., 2016.

稲飯洋一, 長谷部文雄, 青木周司, 菅原敏, 古谷浩志, 植松光夫, 松見豊, 大内麻衣: 東部/西部熱帯太平洋の対流圏における二酸化炭素分布と大気輸送過程, 日本気象学会秋季大会, 京都, Oct., 2015.

Inai, Y., F. Hasebe, S. Aoki, S. Sugawara, H. Furutani, M. Uematsu, Y. Matsumi, M. Ouchi: CO<sub>2</sub> soundings over the eastern/western Pacific, *Asian Conference on Meteorology 2015*, Kyoto, Oct., 2015.

Inai, Y., T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, M. Shiotani: Tropospheric Transport

over south-east Asia/western Pacific region, the Composition and Transport in the Tropical Troposphere and Lower Stratosphere Meeting, Boulder, Colorado, USA, Jul., 2015.

Inai, Y., F. Hasebe, S. Aoki, and the CRYO-SOWER-LAPAN science team: A Quick Report on the CRYO-SOWER-LAPAN 2015 Biak Campaign, the Composition and Transport in the Tropical Troposphere and Lower Stratosphere Meeting, Boulder, Colorado, USA, Jul., 2015.

〔その他〕

稲飯洋一: 県人研究者 キリバス滞在記 水没危機の島に触れ > 下 大気観測, 徳島新聞, 2016年12月14日掲載.

稲飯洋一: 県人研究者 キリバス滞在記 水没危機の島に触れ > 中 海面上昇, 徳島新聞, 2016年12月13日掲載.

稲飯洋一: 県人研究者 キリバス滞在記 水没危機の島に触れ > 上 国の素顔, 徳島新聞, 2016年12月12日掲載.

(上記新聞連載記事は『月刊 切抜き速報 科学と環境版 2017年5月号』にも掲載)

稲飯洋一: 気球による大気観測, 宇宙航空研究開発機構大樹スペーススクール, 北海道, 2016年7月28日講演.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

稲飯 洋一 (Yoichi Inai)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 50587623