

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04578

研究課題名(和文) 高解像観測による南極対流圏界面の精密研究

研究課題名(英文) Intensive study of the Antarctic tropopause region based on high-resolution observations

研究代表者

富川 喜弘 (Tomikawa, Yoshihiro)

国立極地研究所・研究教育系・准教授

研究者番号：20435499

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,890,000円

研究成果の概要(和文)：対流圏界面領域(高度10km付近)は、温度や化学成分(オゾン、水蒸気など)の分布が高度とともに急激に変化するため、その研究には高鉛直分解能なデータが必要とされるが、気象条件が過酷で物資や人員の輸送も制限される南極域ではこれまで十分な観測が行われてこなかった。本研究では、対流圏界面領域の水蒸気量を高精度で測定可能な水蒸気ゾンデによる観測を南極昭和基地で継続的に実施し、多数のデータを取得するとともに、同領域における水蒸気増大現象が、水蒸気の水平輸送経路をあらわすatmospheric riverに沿った水蒸気輸送によって引き起こされていたことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

南極における水蒸気ゾンデ観測は、地球温暖化にも影響する上部対流圏・下部成層圏の水蒸気量を高精度で測定することができます。本研究では、同観測で得られた上部対流圏の水蒸気増大が、atmospheric riverと呼ばれる水蒸気輸送経路に沿って輸送されてきたことを示しました。今後、南極域への水蒸気輸送を定量的に明らかにすることは、南極氷床の総量を左右する涵養過程の定量化につながると期待されます。

研究成果の概要(英文)：The tropopause region (around 10 km altitude) is a region where the distribution of temperature and chemical constituents (ozone, water vapor, etc.) changes abruptly with altitude, and thus requires high-vertical resolution data for research. In the Antarctic region, where weather conditions are harsh and transportation of supplies and personnel is limited, sufficient observations have not been conducted to date. In this study, we have conducted continuous observations at Syowa Station in Antarctica using a balloon-borne hygrometer, which can measure water vapor in the tropopause region with high precision, and obtained a large number of data. The results also revealed that the water vapor enhancement in the upper troposphere was caused by water vapor transport along an atmospheric river, which represents the horizontal water vapor transport path.

研究分野：中層大気科学

キーワード：南極 対流圏界面 水蒸気

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

対流圏(地表~高度約10km)と成層圏(高度約10~50km)の境目である対流圏界面の大きな特徴は、その鉛直スケールの小ささと、力学・化学・放射過程の間の相互作用である。つまり、その動態を捉えるためには、対流圏界面領域の気温、風などの力学量とオゾン、水蒸気などの化学成分の濃度を高鉛直分解能で同時に観測する必要がある。

対流圏と成層圏の大気安定度(あるいは鉛直温度勾配)の違いを利用して定義する対流圏界面を熱的対流圏界面と呼ぶ [WMO, 1957]。中高緯度域の熱的対流圏界面直上に、通常の成層圏よりも高い安定度を持つ気温逆転層が存在することが明らかになったのは近年のことである [Birner et al., 2002]。この層は対流圏界面逆転層(TIL)と呼ばれ、約2kmの高度幅を持ち、1年を通じて存在する [Randel et al., 2007]。高い安定度を持つ大気層では空気塊の鉛直運動が抑制されることから、TILは対流圏界面付近の物質分布・物質輸送とも密接に関連する。

一方で、冬(極夜期)の南極上空では、気温が高度20km付近まで下がり続けるため、熱的対流圏界面を明確に定義することができず、TILに関する定量的な議論も十分なされていなかった。申請者は、南極域のオゾンゾンデデータを用いて、極夜期でも明確に定義可能なオゾン対流圏界面 [Bethan et al., 1996] を基に TIL を定義し、南極域の TIL が夏季には地球上で最も強く、冬季にはほぼ消滅することを示した [Tomikawa et al., 2009]。南極の対流圏界面領域では、他の緯度帯と共通の力学・化学・放射過程間の相互作用に加え、極夜期の紫外線加熱の消失や春季のオゾンホールといった特殊要因があるため、気温・物質分布を決める南極固有のメカニズムが存在する可能性が高い。

近年、衛星観測の高解像度化が進み、南極域を含む全球の対流圏界面領域で気温や化学成分の高鉛直分解能観測が可能になってきた [Hegglin et al., 2009]。しかし、その鉛直分解能(~2km程度)は対流圏界面領域の気温や化学成分の濃度の急激な高度変化を捉えるには必ずしも十分ではない。また、衛星観測は大気中のエアロゾルの影響を強く受けるため、火山噴火等に伴う成層圏エアロゾルの増加が起こると、データの信頼性・連続性が落ちる問題がある。一方で、日本を含む各国の南極観測隊により、南極対流圏界面の地上または直接(in situ)観測も実施されている。特に南極昭和基地では、気象庁による定期的な気球観測のほか、国際共同による気球を用いたオゾンゾンデ観測 [Sato, Tomikawa et al., 2009]、水蒸気ゾンデ観測 [Tomikawa et al., 2015]等が実施されてきた。これらの実績を踏まえ、本研究課題ではこれまで個別に実施してきた複数の観測を同時かつ集中的に実施する。これまでに南極でそのような同時観測を集中して行った例はなく、本研究課題で実施する集中観測が初の試みとなる。

また、対流圏界面領域の鉛直スケールの小さな構造は、気候モデルでも再現されるようになってきた [Miyazaki, Sato, Tomikawa et al., 2010a,b]。しかし、力学過程だけでなく、化学・放射過程、およびそれらの相互作用まで再現可能な化学気候モデルの鉛直解像度は必ずしも十分ではなく(~1km程度)、更なる高解像度化が望まれている。本研究で得られる観測結果、および研究成果は、近い将来実現するであろう高解像度化学気候モデルの検証と改良にも必須である。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、力学・化学・放射過程が複雑に絡み合う南極対流圏界面の変動メカニズムに対する各種プロセスの影響を定性的・定量的に理解し、それが引き起こす南極対流圏界面を横切る物質輸送を直接・間接に評価することである。以下に具体的目標を列挙する。

- ・南極対流圏界面逆転層の形成・維持・消滅過程に対するオゾン、水蒸気、大気循環の寄与を定量的に評価する。
- ・上記各プロセスの時空間変動を引き起こす要因を調べ、南極対流圏界面逆転層の変動要因を明らかにする。
- ・南極対流圏界面を横切る物質交換の直接・間接推定を行い、比較する。
- ・南極対流圏界面を横切る物質交換が対流圏のオゾン変動、成層圏の水蒸気変動に与える影響を見積もり、南極大気環境および気候への影響を定量的に明らかにする。

3. 研究の方法

(1)南極昭和基地において水蒸気ゾンデ観測を実施し、上部対流圏から下部成層圏における水蒸気やオゾンの高精度・高鉛直分解能な濃度データを取得する。

(2)水蒸気ゾンデ観測により捉えられた上部対流圏・下部成層圏における水蒸気増加イベントについて、気象再解析データや衛星観測データ、粒跡線モデル等を用いてその起源や輸送過程を調べる。

4. 研究成果

(1)南極昭和基地における水蒸気ゾンデ観測

本科研費および南極予算を用いて、南極昭和基地における水蒸気ゾンデ観測を継続的に実施した。実施した水蒸気ゾンデ観測の概要は表1の通りである。

観測には、水蒸気ゾンデの中でも現在最も信頼度が高いとされる EN-SCI 社製 Cryogenic Frostpoint Hygrometer (CFH)を用いた。しかし、CFH に使用されている冷媒の代替フロン(CHF₃) がモントリオール議定書ギガリ改正により規制対象となったため、今後の入手はほぼ不可能となった。そのため、明星電気株式会社が新たに開発した水蒸気ゾンデ SKYDEW を 2021 年度に南極昭和基地に持ち込み、初めての観測を実施した。今後は、SKYDEW を用いた水蒸気ゾンデ観測を継続していく予定である。

表 1：南極昭和基地における水蒸気ゾンデ観測の履歴。C は CFH、S は SKYDEW を示す。

月	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度
4	C	C	C	C	C
5					C
6				C	
7	C	Cx5	C		C
8		C			
9					C
10	C	C	C	C	
11					C
12				C	
1			C		Cx2, S
2	C	C			C
3					
合計	Cx4	Cx9	Cx4	Cx4	Cx8, Sx1

実施した水蒸気ゾンデ観測のメタデータは、北極域データアーカイブシステム (ADS : <https://ads.nipr.ac.jp/data/meta/A20210616-003>) に登録されている。

(2) 上部対流圏水蒸気増加イベントの解析

2016 年 7 月に南極昭和基地で実施された水蒸気ゾンデ・オゾンゾンデ同時観測キャンペーンにおいて、冬季の上部対流圏における水蒸気増加イベントを複数回捉えることに成功した。図 1 は、水蒸気ゾンデおよび Aura 衛星搭載 MLS で観測された水蒸気混合比の鉛直分布である。水蒸気ゾンデ観測と衛星観測の結果がよく一致すること、および 7/17, 20, 25 に対流圏界面直下で水蒸気混合比が 20 ppmv を越える水蒸気増加イベントを捉えていたことがわかる。そこで、これらの水蒸気が豊富な空気塊の起源を調べるため、気象再解析データ (ERA-Interim) を用いた後方粒跡線解析を行った。その結果、7/20, 25 の上部対流圏の空気塊は下部対流圏から輸送されてきていることがわかった。気象再解析データを用いてそれぞれのイベント時の総観規模場を調べたところ、いずれも低気圧前面の上昇流によって上部対流圏まで輸送されてきていた。一方で、7/25 のイベントではほぼ等温位面に沿った断熱的な移流が卓越するのに対して (図 2) 7/20 のイベントでは 1 日で温位が 20K 程度増加する非断熱的な移流が卓越していた (図 3)。後者は低気圧前面を上昇する際に水蒸気の凝結に伴う潜熱の放出があったことを示唆している。低気圧前面の上昇流による水蒸気の輸送は、atmospheric river と呼ばれる水蒸気輸送経路の代表例として知られており、南極域においては南極氷床の涵養を左右するプロセスとなる。今後も南極昭和基地における水蒸気ゾンデ観測を継続することで、南極氷床の涵養に対する atmospheric river の寄与を定量的に明らかにする観測データを得ることができる。

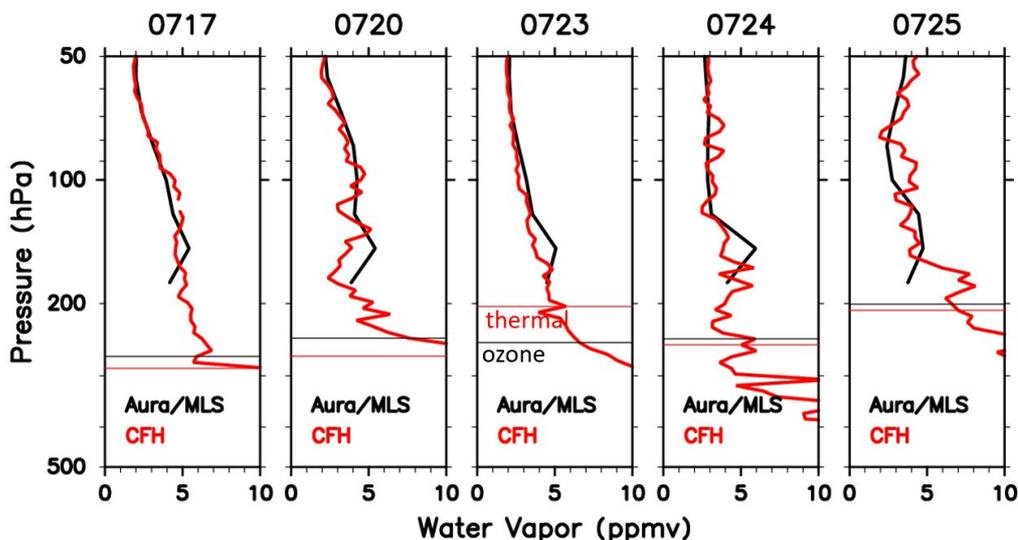


図 1：2016 年 7 月の昭和基地における水蒸気ゾンデ観測 (黒線) および Aura 衛星搭載 MLS による

る同時観測（赤線）で得られた水蒸気混合比の鉛直分布。細黒線・赤線は、それぞれ気温とオゾン濃度で定義された対流圏界面。

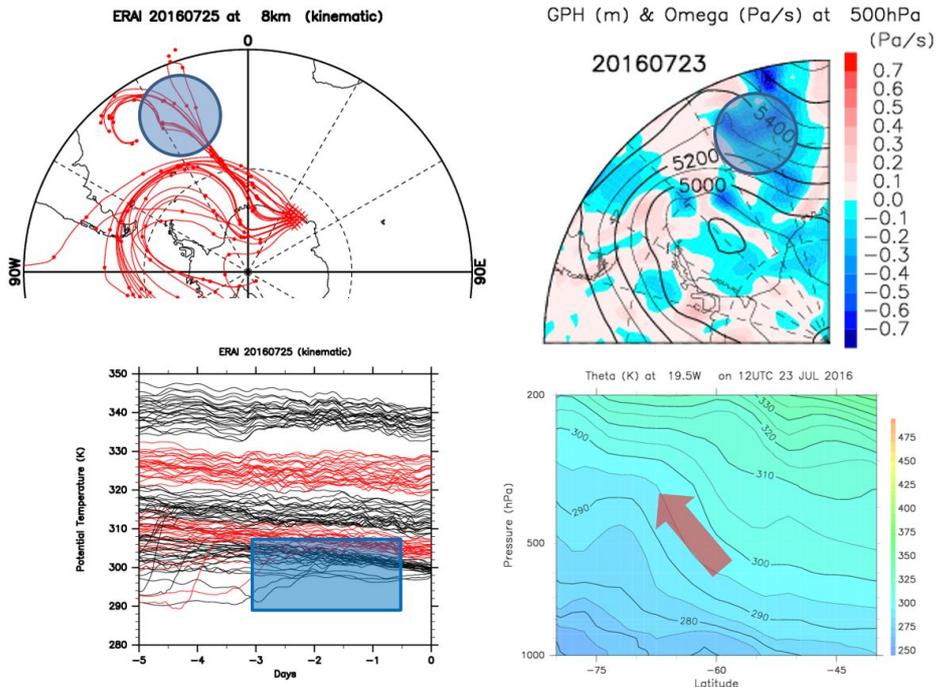


図 2 : 2016 年 7 月 25 日のイベントにおける (左上) 粒跡線の軌跡、(左下) 粒跡線上の温位、(右上) 500 hPa におけるジオポテンシャルハイト (等値線) と 速度 (カラー) および (右下) 東経 51 度における温位の緯度高度断面。

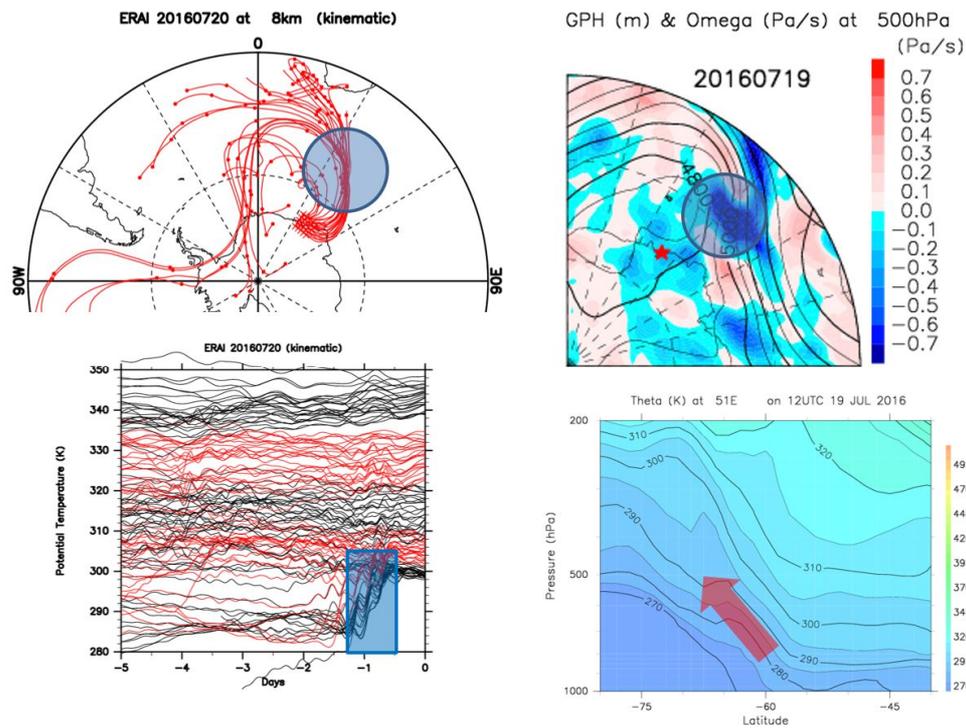


図 3 : 2016 年 7 月 20 日のイベントにおける図 2 と同じ断面図。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Tomikawa, Y.
2. 発表標題 NIPR trajectory model (NITRAM) & Meteorological field display system
3. 学会等名 NIPR workshop for international collaboration on atmospheric science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富川喜弘、AJ0901関係者
2. 発表標題 PANSY/NICAM/SOFIE共同研究 & 昭和基地での特殊ゾンデ観測
3. 学会等名 2018年度PANSY研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富川喜弘
2. 発表標題 59次水蒸気・気温基準ゾンデ観測計画
3. 学会等名 南極エアロゾル研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomikawa, Y., M. Kohma, M. Takeda, and K. Sato
2. 発表標題 Moistening of the Antarctic upper troposphere observed by balloonborne water vapor measurements
3. 学会等名 ISAR-5 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomikawa, Y., M. Kohma, M. Takeda, and K. Sato
2. 発表標題 Moistening of the Antarctic upper troposphere via the warm conveyor belt
3. 学会等名 The Eighth Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomikawa, Y., M. Kohma, M. Takeda, and K. Sato
2. 発表標題 Balloonborne ozone and water vapor measurements around the Antarctic tropopause region in winter of 2016
3. 学会等名 Joint SPARC Dynamics & Observations Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomikawa, Y., M. Kohma, M. Takeda, and K. Sato
2. 発表標題 Fine vertical structure of the Antarctic tropopause region in winter of 2016 obtained by balloonborne ozone and water vapor observations
3. 学会等名 IAPSO-IAMAS-IAGA Joint Assembly 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富川喜弘
2. 発表標題 63次の特殊ゾンデ観測およびスーパープレッシャー気球観測
3. 学会等名 南極エアロゾル研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富川喜弘、AJ0901関係者
2. 発表標題 昭和基地での特殊ゾンデ観測の現況
3. 学会等名 2020年度PANSY研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富川喜弘
2. 発表標題 南極昭和基地での特殊ゾンデ観測の実施状況と今後の計画
3. 学会等名 南極エアロゾル研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富川喜弘、高麗正史、武田真恵、佐藤薫
2. 発表標題 水蒸気・オゾンゾンデ観測で捉えられた南極上部対流圏の湿潤化プロセス
3. 学会等名 東南極で検出される気候変動に関する研究集会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富川喜弘、高麗正史、武田真恵、佐藤薫
2. 発表標題 南極昭和基地におけるオゾン・水蒸気ゾンデ集中観測（速報）
3. 学会等名 日本気象学会2017年度春季大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 平沢尚彦・山内恭	4. 発行年 2017年
2. 出版社 日本気象学会	5. 総ページ数 452
3. 書名 南極氷床と大気物質循環・気候	

1. 著者名 南極OB会編集委員会	4. 発行年 2019年
2. 出版社 成山堂書店	5. 総ページ数 240
3. 書名 改訂増補 南極読本ーペンギン、海水、オーロラ、隕石、南極観測のすべてがわかるー	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐藤 薫 (Sato Kaoru) (90251496)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授 (12601)	
研究分担者	平沢 尚彦 (Hirasawa Naohiko) (10270422)	国立極地研究所・研究教育系・助教 (62611)	
研究分担者	高麗 正史 (Kohma Masashi) (80733550)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------