

令和 2 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17801

研究課題名(和文)極域UTLSにおける雲出現頻度極小領域及びTILの季節性の研究

研究課題名(英文)On seasonality of cloud frequency and TIL in the UTLS region

研究代表者

高麗 正史(Kohma, Masashi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：80733550

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：南極域での上部対流圏・下部成層圏(UTLS)領域では、極成層圏雲と対流圏の雲の間の空隙領域や対流圏界面逆転層の消失・再出現などの固有の現象が見られるが、この緯度・高度領域における観測データの不足から、その物理的理解は得られていない。本課題では、南極昭和基地でのラジオゾンデ観測や南極大型大気レーダーによる乱流パラメータの高精度推定に関する研究を行い、南極対流圏・下部成層圏のエネルギー散逸率の季節変化・高度依存性を世界で初めて示すことに成功した。また、ほぼすべての緯度帯に適用できる対流圏界面高度変動に関する理論式を導出し、その妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流は大気波動の碎波により主に生じ、運動エネルギーを熱エネルギーに変換する重要な過程である。しかし、対象のスケールが小さいため、その観測的推定は難しく、レーダーやラジオゾンデ等の高解像度観測から粗い近似や経験的な係数が用いられて研究されてきた。ラジオゾンデに基づく推定の検証は十分に行われておらず、今回、先行研究と比べ2桁大きなサンプル(数1000回)のラジオゾンデ観測データに基づく検証を実施した。その結果、ラジオゾンデによる推定に用いられている経験的な係数に高度依存性があることが判明した。今後、この結果をラジオゾンデ観測網に適用することで、自由大気乱流強度の全球マップを得られると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) region in Antarctica, phenomena such as the loss and re-appearance of the inversion layer of the tropopause have been observed. However, the mechanisms of these phenomena has not been understood due to the lack of observational data in this latitude and altitude region. In this research, we have studied high-precision estimation of turbulence parameters using radiosonde observations and the MST/IS Radar at the Syowa Station in the Antarctica, and demonstrated the seasonal variation and altitude dependence of energy dissipation rates in the Antarctic troposphere and lower stratosphere. In addition, the theoretical equation for the tropopause height variation applicable to almost all latitudes was derived, and their validity was verified by observational data and numerical calculations.

研究分野：大気力学

キーワード：対流圏界面 乱流エネルギー散逸率 ラジオゾンデ 大気レーダー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 対流圏と成層圏の境界面である対流圏界面においては、温度や大気微量成分濃度に微細な鉛直構造が見られることが知られている。南極域においては、圏界面付近の鉛直構造が他の緯度帯では見られないような季節変化をする。例えば、圏界面の直上に存在する対流圏界面逆転層(TIL)は、南極域においては、冬季に消失・夏季に再出現する。この季節性は、南極域対流圏界面付近の鉛直温度構造は、他の緯度帯とは異なる熱バランスで維持されていることを示唆している。南極 UTLS 領域の温度構造に影響を与えるものとして、成層圏大循環による輸送に加えて、主に水蒸気やオゾンによる放射加熱・冷却、及び非可逆的な混合過程が考えられる。したがって、この南極 UTLS 領域の季節性の物理を理解するためには、高精度・高鉛直分解能な温度・風速・大気微量成分の観測が不可欠である。しかしながら、これまで南極域においてそのような観測データは得られていなかった。

(2) 自由大気中の乱流パラメータ(乱流運動エネルギー散逸率、鉛直渦拡散係数)の推定は、1980年台から大気レーダー観測に基づいて行われている(Hocking, 2011, JASTP)。ただし、それらが網羅する時空間領域には制限が大きく、乱流パラメータの全球的な分布や時間変動は明らかになっていない。近年の測器の応答時間の改善やサンプリング周期の短縮を背景に、一般に使われるラジオゾンデデータに基づく乱流強度推定が最近提案されている(Thorpe 法、Clayson and Kantha, 2008, JTECH; Wilson et al., 2011, AMT)。ラジオゾンデによる推定が可能となれば、全世界で行われているラジオゾンデ観測に基づき、乱流パラメータの時空間変動が明らかになる。しかしながら、Thorpe 法による自由大気中の乱流強度推定の妥当性は十分に検証されておらず、レーダーによる推定値とわずか数回のラジオゾンデ観測の結果が比較した研究が数例あるだけであった。

(3) 南極域の対流圏界面の高度は、夏に低く・冬に高くなる季節変化をする。南極に限らず、圏界面高度の時間変化の要因を定性的に調べた研究はあるものの、定量化は行われていなかった。これは、圏界面高度の時間変化率を陽に記述する方程式が、これまでほとんど提案されておらず、また、提案されたもの(Johnson, 1986)についても、その妥当性が検討されていないかった。

2. 研究の目的

(1) 南極昭和基地大型大気レーダー(PANSY レーダー)による観測、水蒸気・オゾンゾンデ観測、及び再解析データを組み合わせた解析を行い、南極域の上部対流圏から成層圏に渡る、温度・オゾンの鉛直構造の季節変化の理解を目指す。

(2) PANSY レーダーにより乱流強度推定を行い、南極域における対流圏から下部成層圏までの乱流強度の鉛直分布・季節変化を明らかにする。また、大量のラジオゾンデ観測と比較することにより、ラジオゾンデによる乱流推定の妥当性を検証する。

(3) 対流圏界面高度の時間変化を記述する理論式を提案する。また、その妥当性を、数値計算や観測データ、再解析データを用いて検証する。

3. 研究の方法

(1) 南極昭和基地にて、オゾンゾンデ観測(40回)と水蒸気ゾンデ観測(10回)を行った。観測期間は、極成層圏雲出現期、成層圏極渦崩壊期、TIL 極大期の3つに分けて実施した。

(2) 乱流エネルギー散逸率は、波数空間での高波数方向へのエネルギー輸送を記述するパラメータである。PANSY レーダーは2012年から観測が開始され、2015年10月よりフルシステム観測を実施している。この観測では、それまでの部分システムと比べて、送信ビームのビーム幅がさらに細くなり、乱流強度の鉛直プロファイルの高精度観測が可能となった。1年分のラジオゾンデ観測(700プロファイル以上)から推定したエネルギー散逸率と、レーダーによる推定値を比較し、Thorpe 法で経験的に与えている係数の妥当性を検討した。

(3) 対流圏界面において、温位の鉛直勾配が不連続的に変わる。この特徴から、衝撃波の理論で使われる「ショック当てはめ」の手法を対流圏界面に適用するという着想を得た。つまり、対流圏界面を、温位の鉛直勾配の不連続点としてモデル化する(図1)。導出された式について、理想化された傾圧不安定波動の数値計算結果、及び、GNSS 掩蔽観測・再解析データによる現実大気データに適用することで、その妥当性を検証した。

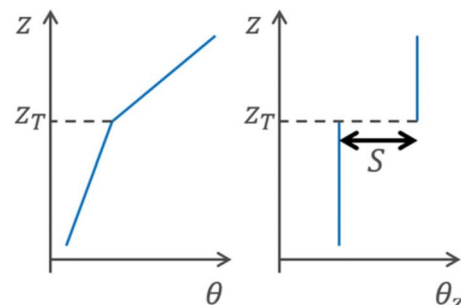


図1: 対流圏界面付近での、温位(左)と温位の鉛直勾配(右)の鉛直分布の模式図

4. 研究成果

(1) 昭和基地におけるゾンデ集中観測

まず、試験観測として4月にオゾンゾンデ・水蒸気ゾンデ連結飛揚を実施した。この連結飛揚は、南極で初めての試みであったが、上昇時・下降時ともにデータを受信できた。次に、極成層圏雲及び対流圏界面の鉛直微細構造を調べるために、7月にオゾンゾンデを14回、水蒸気ゾンデを7回飛揚した。また、7月を含む極夜期は、TILが消失する時期と対応し、その平衡状態の維持機構を解析する上で今後使用するデータとなる。また、TILの回復が見られる11月にオゾンゾンデ飛揚を14回、TILが季節の中で最も強くなる12月にオゾンゾンデ飛揚を14回実施した。これら以外に、16Hzで温度を精密に測定できる気温基準ゾンデを、7月と11月に一度ずつ飛揚した。この高鉛直分解能(～30m)・高精度(～0.01K)データにより、乱流強度の鉛直プロファイルの推定が可能となる。

(2) 乱流エネルギー散逸率の推定

南極昭和基地における大型大気レーダー及びラジオゾンデそれぞれから、自由大気中の乱流エネルギー消散率の推定を行い、それらと比較した。南極の自由大気中の乱流エネルギー消散率の推定は、世界初の試みである。また、ラジオゾンデに基づく推定の検証は十分に行われておらず、今回、先行研究と比べ2桁大きなサンプル数のラジオゾンデ観測データに基づく検証を実施した。本研究では、Thorpe長とOzmidov長との間の比例定数を1とした。その結果、レーダー・ラジオゾンデのどちらの推定においても、高度1.5～20kmにおいて、エネルギー消散率は $5 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ の値の幅を持つことが示された。中央値の高度依存性を調べると、成層圏で2つの推定結果はよく一致するのに対し、対流圏ではラジオゾンデの推定値のほうが大きかった(図2)。先行研究での直接数値計算の結果を踏まえると、この結果は、対流圏と成層圏で卓越する乱流発生源のメカニズムの違いがあることを示唆している。季節変化を調べると、冬季から春季にかけて、成層圏の乱流のエネルギー消散率が増大する傾向にあることがわかった。これは、大気重力波の季節変化と対応している、それらの関係を強く示唆するものである(Kohma et al., 2019, JGR)。

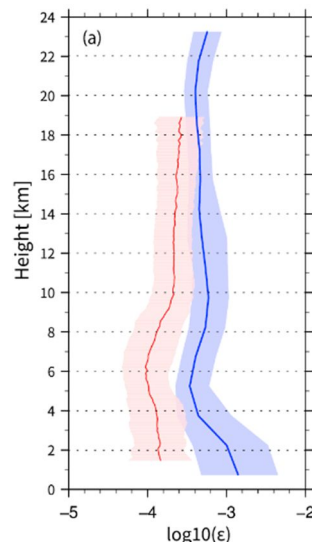


図2: レーダー(赤)とラジオゾンデ(青)によって推定された乱流エネルギー散逸率の鉛直分布

(3) 対流圏界面高度の傾向方程式

傾圧不安定などの総観規模擾乱や成層圏突然昇温などの惑星規模擾乱に伴い、数日～数ヶ月スケールで変動することが知られている。今回、対流圏界面を温位の鉛直勾配の不連続点として単純化することにより、対流圏界面高度の時間変化率を診断する式を導出した。さらに、その式を傾圧不安定の数値実験や衛星観測データ、再解析データに適用した。いずれの場合も、今回導出した診断式が機能することが確かめられた(図3)(Kohma & Sato, 2019, JAS)。南極冬季においては、下部成層圏の低温のために、気温減率に基づく対流圏界面の定義が機能しないことが報告されている。そのため、気温減率の代わりに渦位に基づく対流圏界面高度(力学的圏界面)が用いられることが多い。そこで、圏界面高度の傾向方程式を拡張し、力学的圏界面高度についての傾向方程式を導出した。既存の傾向方程式との違いは、圏界面を渦位の不連続点であるとしてモデル化している点である。今後、この方程式の妥当性を再解析データに基づいて検証する予定である。

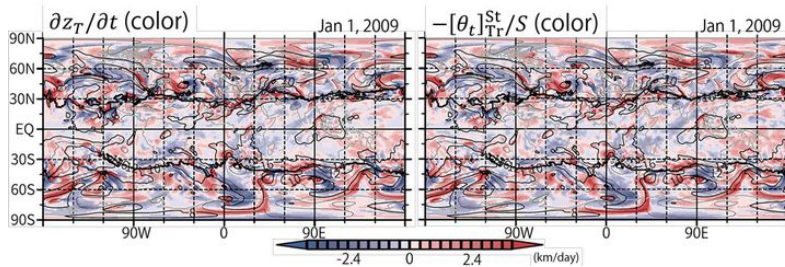


図3: 対流圏界面高度の時間変化率の水平マップ。
左) 観測された時間変化率 右) 推定値

参考文献

- Hocking, W. K. (1983). *J. Atmos. Terr. Phys.*, 45(2-3), 89-102. doi:10.1016/S0021-9169(83)80013-0
- Clayson, C. A., & Kantha, L. (2008). *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 25(6), 833-852. doi:10.1175/2007jtecha992.1
- Wilson, R., Dalaudier, F., & Luce, H. (2011). *Atmos. Meas. Tech.*, 4(5), 795-804. doi:10.5194/amt-4-795-2011
- Kohma, M., K. Sato, Y. Tomikawa, K. Nishimura, and T. Sato (2019), *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(6), 2976-2993. doi:10.1029/2018JD029521
- Kohma, M., and K. Sato (2019), *J. Atmos. Sci.*, 76(11), 3337-3350. doi:10.1175/JAS-D-19-0054.1

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Matsushita Yuki, Kado Daiki, Kohma Masashi, Sato Kaoru	4. 巻 38
2. 論文標題 Relation between the interannual variability in the stratospheric Rossby wave forcing and zonal mean fields suggesting an interhemispheric link in the stratosphere	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annales Geophysicae	6. 最初と最後の頁 319 ~ 329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/angeo-38-319-2020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kohma Masashi, Sato Kaoru	4. 巻 76
2. 論文標題 A Diagnostic Equation for Tendency of Lapse-Rate-Tropopause Heights and Its Application	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Atmospheric Sciences	6. 最初と最後の頁 3337 ~ 3350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JAS-D-19-0054.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 高麗 正史	4. 巻 66
2. 論文標題 極域対流圏界面雲の出現に関する力学的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 天気	6. 最初と最後の頁 411 ~ 419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24761/tenki.66.6_411	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kohma M., Sato K., Tomikawa Y., Nishimura K., Sato T.	4. 巻 124
2. 論文標題 Estimate of turbulent energy dissipation rate from the VHF radar and radiosonde observations in the Antarctic	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 2976 ~ 2993
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JD029521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Thurairajah Brentha, Sato Kaoru, Yue Jia, Nakamura Takuji, Kohma Masashi, Bailey Scott M., Russell James M.	4. 巻 164
2. 論文標題 Simultaneous observation of gravity waves at PMC altitude from AIM/CIPS experiment and PANSY radar over Syowa (69°S, 39°E)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.	6. 最初と最後の頁 324 ~ 331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jastp.2017.10.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sato, K., M. Kohma, M. Tsutsumi, and T. Sato	4. 巻 122
2. 論文標題 Frequency spectra and vertical profiles of wind fluctuations in the summer Antarctic mesosphere revealed by MST radar observations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res. Atmos.	6. 最初と最後の頁 3 ~ 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2016JD025834	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hirano, S., M. Kohma, and K. Sato	4. 巻 121
2. 論文標題 A three-dimensional analysis on the role of atmospheric waves in the climatology and interannual variability of stratospheric final warming in the Southern Hemisphere	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res.	6. 最初と最後の頁 8429 ~ 8443
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2015JD024481	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Minamihara, Y., K. Sato, M. Kohma, and M. Tsutsumi	4. 巻 12
2. 論文標題 Characteristics of vertical wind fluctuations in the lower troposphere at Syowa Station in the Antarctic revealed by the PANSY radar	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 SOLA	6. 最初と最後の頁 116 ~ 120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/sola.2016-026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 M. Kohma, K. Sato
2. 発表標題 Tendency equation for lapse-rate-tropopause heights
3. 学会等名 AOGS 16th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高麗正史、佐藤薫、西村耕司、堤雅基
2. 発表標題 南極UTLS領域における乱流パラメータの極渦・総観規模擾乱への依存性
3. 学会等名 地球惑星科学連合2019年大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Kohma, K. Sato, K. Nishimura, and M. Tsutsumi
2. 発表標題 Turbulent Kinetic Energy Dissipation Rates Depending on the Polar Vortex and on Synoptic-scale Disturbances in the UTLS Region in the Antarctic
3. 学会等名 AGU Fall meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Kohma and K. Sato
2. 発表標題 Tendency equation for lapse-rate-tropopause heights
3. 学会等名 AGU Fall meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Kohma, K. Sato, K. Nishimura, Y. Tomikawa and T. Sato
2 . 発表標題 Turbulent kinetic energy dissipation rate derived from multi-year observations by radar and radiosonde in the Antarctic
3 . 学会等名 SPARC FISPAS Workshop (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Kohma, K. Sato, K. Nishimura, and M. Tsutsumi
2 . 発表標題 Turbulent kinetic energy dissipation rates depending on the polar vortex and on synoptic-scale disturbances in the UTLS region in the Antarctic
3 . 学会等名 The 9th Symposium on Polar Science (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Kohma, K. Sato, K. Nishimura, Y. Tomikawa and T. Sato
2 . 発表標題 Seasonal variation of energy dissipation rate derived from radar and radiosonde observations at Syowa Station in the Antarctic
3 . 学会等名 SPARC General Assembly 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 高麗正史、佐藤薫
2 . 発表標題 Lapse-Rate Tropopause高度の傾向方程式の導出とその適用
3 . 学会等名 日本気象学会秋季大会
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 高麗正史、佐藤薫、西村耕司、富川喜弘、佐藤亨
2. 発表標題 大型大気レーダーとラジオゾンデに基づく南極自由大気中の乱流パラメータ推定
3. 学会等名 日本気象学会春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kohma, M., K. Sato, Y. Tomikawa
2. 発表標題 Seasonal variation of Thorpe scale and energy dissipation rate derived from radiosonde observations at Syowa Station in the Antarctic
3. 学会等名 Joint SPARC Dynamics and Observations Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kohma, M., K. Sato, Y. Tomikawa
2. 発表標題 Seasonal variation of Thorpe scale and energy dissipation rate derived from radiosonde observations at Syowa Station in the Antarctic
3. 学会等名 AGU Fall meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kohma, M. K. Sato, K. Nishimura, Y. Tomikawa, T. Sato
2. 発表標題 Energy dissipation rate estimation based on observations by the PANSY radar in the Antarctic
3. 学会等名 The 8th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究代表者のホームページ
<http://www-aos.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~kohmasa/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----