

赤道大気レーダーの周波数領域干渉計法を用いた 熱帯の対流圏界面付近における乱流の初期観測結果

妻鹿友昭 (京都大学生存圏研究所) 山本真之 (京都大学生存圏研究所) 橋口浩之 (京都大学生存圏研究所)

山中大学 (海洋研究開発機構) Hubert Luce (ツーロン大) 阿保 真 (首都大学東京)

山本衛 (京都大学生存圏研究所) 深尾昌一郎 (福井工業大)

概要

熱帯の対流圏と成層圏の大気交換に重要な要因の一つに対流圏界面付近の擾乱がある。インドネシアのスマトラ島にある赤道大気レーダー (EAR) は周波数領域干渉計法を用いて高い距離分解能を持つ VHF 帯ウインドプロファイラレーダーである。2008 年 12 月にこの EAR とライダーとラジオゾンデの観測キャンペーンを行なった。このキャンペーンにおいて EAR は対流圏界面のエコー層の擾乱を観測した。同時に観測されたラジオゾンデの風速データから、この擾乱は Kelvin-Helmholtz instability であることを示唆している。

1 はじめに

積雲対流が活発な熱帯域は対流圏大気が成層圏に流入する主要な領域とされており、全球規模の成層圏・対流圏間の大気交換 (Stratosphere-Troposphere Exchange; STE) における重要な領域である。熱帯域の上部対流圏から下部成層圏にかけては、大気の性質は対流圏的な性質から成層圏的な性質に次第に変化する層 (熱帯対流圏界遷移層: Tropical Tropopause Layer (TTL)) である。この領域での、力学・放射・光化学的な諸過程の理解は STE に重要である。風速を高い鉛直・時間分解能で連続観測する大気レーダーは、大気中の乱流を観測する有用な手段となっている。過去の観測では、赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR) の観測により熱帯域における対流圏界面付近の乱流現象を捉えた。この研究では赤道上で対流圏界面付近の擾乱はケルビン波により発生し Kelvin-Helmholtz instability (KHI) の発生が示唆された [1]。

2008 年の 12 月に EAR サイトにおいて Cloud experiment using Lidar and Equatorial Atmosphere Radar (CLEAR) キャンペーンが行なわれた。このキャンペーンの期間中に、EAR の観測により対流圏界面付近の擾乱が観測された。このキャンペーンにおいて周波数領域干渉計観測法を用いた EAR によりこれまでよりも高い距離分解能で対流圏界面の観測を行なった。本稿では CLEAR キャンペーンで観測された対流圏界面付近の擾乱について述べる。

2 CLEAR キャンペーンの概要

CLEAR キャンペーンはインドネシア、スマトラ島赤道大気観測所 (0.2° S, 100.32° E, 海拔高度 865m) で 2008 年 12 月 6 日 - 24 日の間に行なわれた。このキャンペーンで用いた主な測器は EAR とラジオゾンデおよび偏光ライダーである。

EAR は VHF 帯ウインドプロファイラである [2]。このキャンペーンでは 5 つの送信周波数 (46.5, 46.75, 47.0, 47.25, 47.5 MHz) を用いて周波数領域干渉計法を用いて観測を行なった。周波数領域干渉計法での観測はビームは鉛直方向に向けた。周波数領域干渉計法を用いることによりパルス幅よりも高い距離分解能を持って、大気中の温度や水蒸気量の勾配に伴うブラック散乱のエコーを観測することができる [3]。ラジオゾンデはこのキャンペーンの期間中に 17 回放球した。偏光ライダーは阿保 (首都大学) が運用して、主に雲の観測を行なった。

以下に 12 月 17 日-18 日に対流圏界面付近に発生した波状の構造をした散乱を、EAR と地方時の 12 月 17 日 23 時 48 分に上げたゾンデの観測データの結果を述べる。以下に述べる時間は現地の地方時である。

3 観測結果

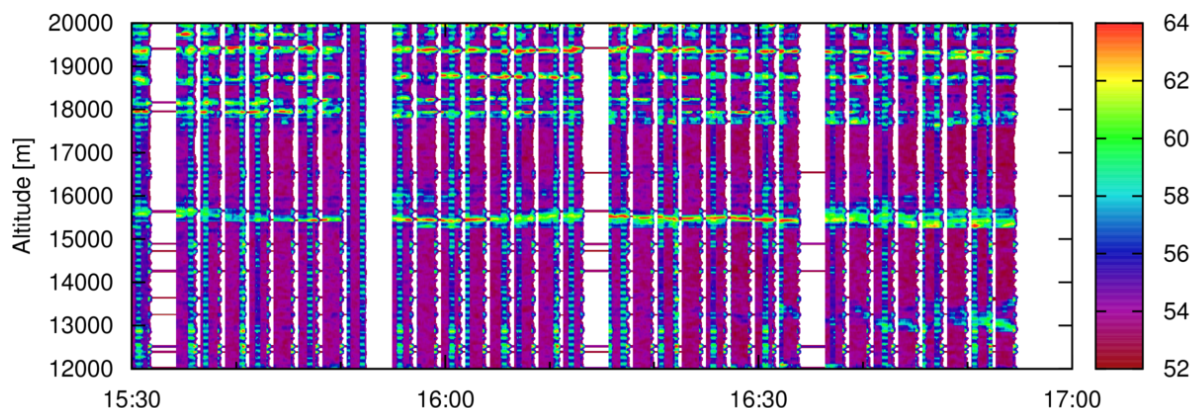


図 1 周波数干渉計観測で捉えた対流圏界面付近の安定した層の時間高度変化 2008 年 12 月 17 日 15 時 30 分から 17 時まで (色は散乱強度 単位は dB 以下同様)

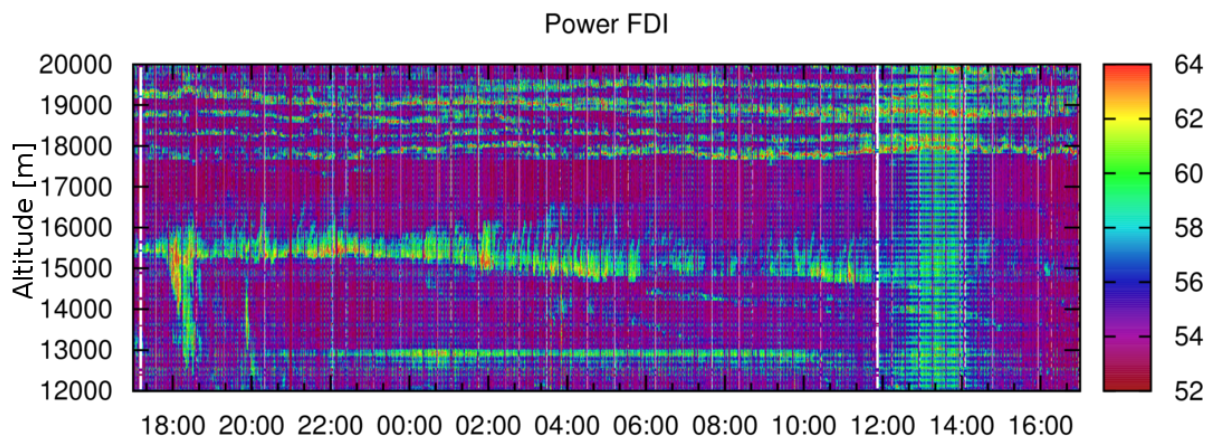


図 2 周波数干渉計観測で捉えた対流圏界面付近の擾乱の層の時間高度変化 2008 年 12 月 17 日から 18 日 17 時まで

図 1 と図 2 は EAR の周波数領域干渉計観測の結果である。図 1 では 15.5km 付近に薄いエコー層が存在している。図 2 は図 1 の後の時間である。18 時ごろに大きな擾乱があった後、波のような形のエコーが存在しながら 18 日の 14 時ごろまで続いている。このエコー層が存在する高度は時間と共に低くなっている。

図 3 は図 2 にラジオゾンデがこの高度を通過した時刻の後に強い散乱を持つ大きな擾乱があった 1 時から 2 時 30 分を拡大した図である。図 3 の 1 時 40 分から 2 時 15 分付近の時間に、高度 15 km から 16 km の間に大きな波状の擾乱が存在する。この時の擾乱の厚さ最大で約 1km である。強い散乱の領域がある。

ラジオゾンデが放球された時間は 23 時 48 分である。図 4 にこのラジオゾンデが観測した温度と温位の鉛直プロファイルを示す。高度 14.5km 付近に温度のギャップが存在し温度と温位が上昇しており、その上では 15.5km よりから 16km にわたって温位の変化が緩やかになっており、対流圏と成層圏の大気の混合が起って

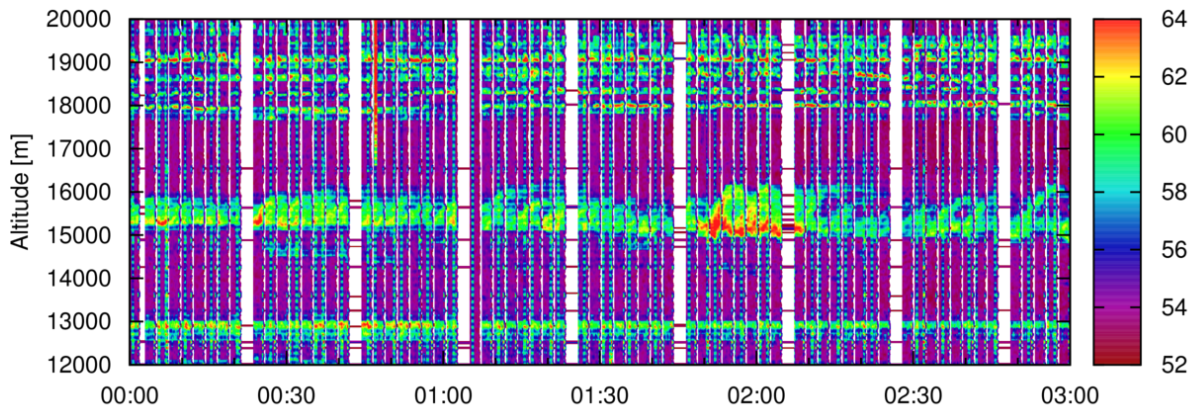


図3 対流圏界面付近の擾乱の時間高度図

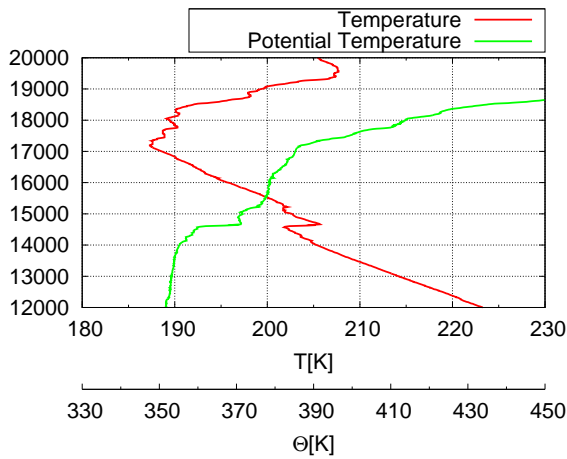


図4 ラジオゾンデによる温度の鉛直プロファイル。赤線が温度、緑線が温位。

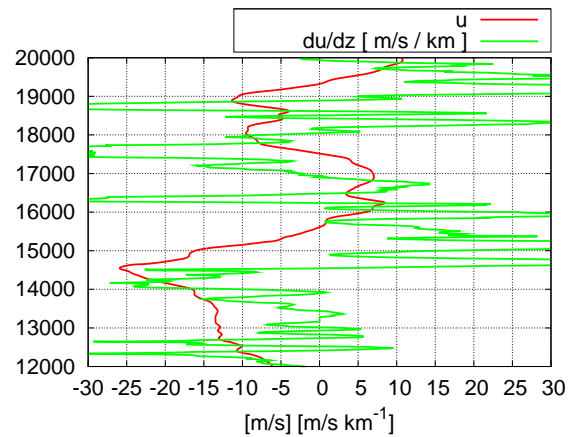


図5 ラジオゾンデによる東西風の風速と東西風のシアの鉛直プロファイル。赤線が東西風 [m/s]、緑線がシア [m/(s・km)] である。

いると考えられる。また、18km 付近から温度の上昇があり、この時対流圏界面は二重圏界面構造を持って行たと考えられる。図5の赤線は東西風を示しているが、14.5km から16km 付近に大きい東西風のシアが存在する。ラジオゾンデの温度と東西風から計算したリチャードソン数は、図3のエコーの下層と同じ高度である15 km から15.150 km の間は一つの観測高度を除いて0.25より小さくなっており、この高度にKHIが発生していることが示唆される。

図6と図7は、それぞれ図1と図3の図に示した期間内の一回の観測のドップラー速度とスペクトル幅の鉛直プロファイルである。中心の印がドップラー速度、エラーバーがスペクトル幅を表わす。図6は安定した層の存在する時間と図7は擾乱時の強い散乱が存在する時間のプロファイルである。安定したエコー層が存在する時間に対流圏界面と考えられる強いエコー層が存在する15.5 km 付近のスペクトル幅は1m/sを超えないが、擾乱時には3m/sを超えるドップラーのスペクトル幅が存在し、擾乱時の乱流の運動エネルギーが大きいことを示している。また鉛直方向のドップラー速度も安定した層がある時間よりも擾乱時は大きな値となっている。

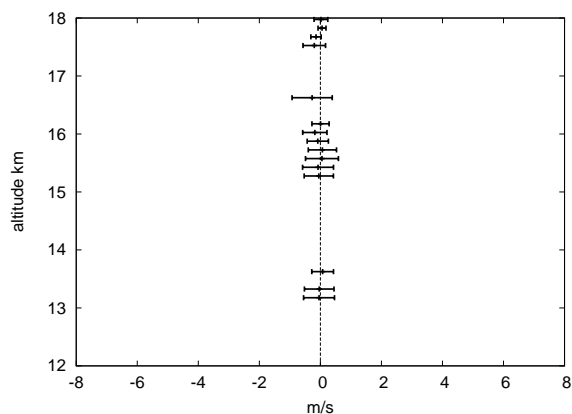


図6 安定したエコー層のドップラー速度とスペクトル幅の鉛直プロファイル (12月17日 16:18-16:20)

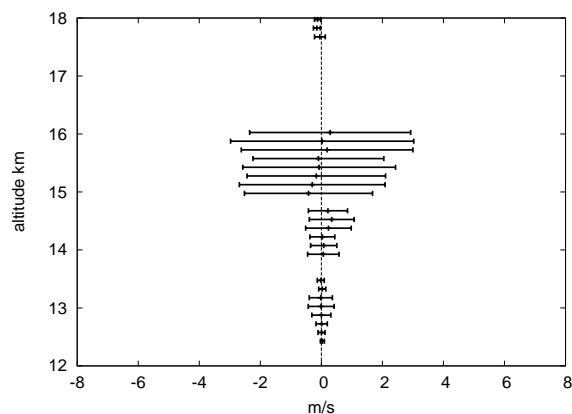


図7 擾乱時のドップラー速度とスペクトル幅の鉛直プロファイル (12月18日 1:58-2:00)

4 まとめ

本発表ではインドネシアの赤道のEARのFDIを用いた初期観測結果から、対流圏界面付近におけるエコー層の擾乱の詳細な構造を観測を示した。ラジオゾンデによる温度と水平風の観測結果から、擾乱のある高度で対流圏と成層圏の大気混合の発生と擾乱は風速のシアからKHIであることを示唆している。今後、さらに多くの時間のドップラー・スペクトルの処理を進め、擾乱のスケールと対流圏界面付近のcirrus(ライダーの観測結果)とエコー層の関係を調べること、他点のラジオゾンデのデータなどを使い背景場と擾乱の関係を明かにしていく。

参考文献

- [1] Masatomo Fujiwara, Masayuki K. Yamamoto, Hiroyuki Hashiguchi, Takeshi Horinouchi, and Shoichiro Fukao. Turbulence at the tropopause due to breaking Kelvin wave observed by the Equatorial Atmosphere Radar. *Geophys. Res. Lett.*, 30(4):20.1–20.4, 1171, 2003. doi: 10.1029/2002GL016278.
- [2] Shoichiro Fukao, Hiroyuki Hashiguchi, Mamoru Yamamoto, Toshitaka Tsuda, Takuji Nakamura, and Masayuki K. Yamamoto. Equatorial Atmosphere Radar(EAR):System description and first results. *Radio Sci.*, 38(3), 2003. doi: 10.1029/2002RS002767.
- [3] Hubeurt Luce, Masayuki K. Yamamoto, Shoichiro Fukao, D Helal, and Michel Crochet. A frequency domain radar interferometric imaging (FII) technique based on high-resolution methods. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, (63):221–234, 2001.