

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19403008

研究課題名（和文） 赤道大気中の物質輸送に係る微小乱流の観測的研究

研究課題名（英文） Observational study of atmospheric turbulence related with constituent transportation in equatorial atmosphere

研究代表者

深尾 昌一郎 (FUKAO SHOICHIRO)

京都大学・生存圏研究所・研究員(学術研究奨励)

研究者番号：30026249

研究成果の概要：

MU レーダーイメージング観測により、慣性重力波をトリガーとして発生したケルビンヘルムホルツ不安定の構造や、乳房雲内部などにおける乱流の微細構造を初めて明確に捉えることに成功した。ついで、MU レーダーで開発された周波数イメージング技術を赤道大気レーダーに適用し、初めて赤道大気における乱流の微細構造を詳細に捉えることができた。ライダー、気象レーダー等との同時観測データの解析を進め雲物理量と乱流量との関係が明らかにされつつある。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2008 年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
年度			
年度			
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：レーダー大気物理学

科研費の分科・細目：気象・海洋物理・陸水学

キーワード：赤道大気レーダー、大気レーダー、イメージング、ライダー、乱流、リモートセンシング、地球観測、国際貢献

1. 研究開始当初の背景

インドネシア海洋大陸域では、太陽光による島嶼の加熱と周辺の海洋からの水蒸気供給によって、地球上で最も活発な対流現象が発生している。しかしながら、観測データの不足から赤道域大気現象にはまだ多くの未解明を残しており、高時間分解能で大気の3次元運動を連続観測することが求められてきた。京都大学は、大型高機能レーダーである赤道大気レーダー(EAR)をインドネシア共和国西ス

マトラの赤道直下に完成させ、2001年7月より本格的な観測を開始した。

熱帯における成層圏対流圏大気交換に関する研究はBrewer[1949]の論文以降活発に行われたが、1990年代前半まで対流圏界面を突き抜けるような背の高い積乱雲が主な要因であると考えられてきた。近年、高度14～18km辺りに熱帯対流圏界層(TTL)と呼ばれる対流圏とも成層圏ともつかない熱帯域特有の遷移領域が存在するとの考え方が一般的になって

きており、積乱雲は対流圏内のせいぜい14kmまでしか届いていないことが分かってきた。この TTL を横切る輸送の力学過程について多くの研究が行われてきたが、まだ多くの未知が残されている。解明が遅れている最大の原因はこの領域における観測データの少なさである。EAR は 2001 年 11 月に TTL 領域で観測された 5 日間程度持続する乱流強度増大が、赤道ケルビン波の伝播に伴ってその破砕位相部における対流不安定が原因で生じていたことを明らかにした。これは TTL におけるケルビン波の不安定化(砕波)によって発生した乱流によって、対流圏と成層圏の間で気塊の交換が非可逆的に発生していることを明確に示すものであった。

大気乱流の解明は、大気中のエネルギー、運動量および物質の輸送を理解する上で本質的に重要であるが、その観測は極めて困難である。大気レーダーは、大気乱流からの散乱エコーを観測すること、時間・空間的に連続観測可能である点で、大気乱流の観測装置として優位にあるが、空間分解能に限界があった。近年、レーダー・イメージング技術によって、大気乱流構造を解像しうるほどに分解能が飛躍的に向上しうるということが分かってきた。

2. 研究の目的

MU レーダーは、2003 年度に導入されたデジタル受信システムによって、直径 103m の円形アンテナ面を 25 等分割して行う超多チャンネル干渉計観測と、5 周波を用いる周波数領域干渉計観測を同時に行うことが可能となった。まず、この新機能を生かしたレーダー・イメージング技術を開発し、高空間・距離分解能で大気乱流の 3 次元構造を捉えることを目的とする。

さらに、EAR を始めとして、特定領域研究「赤道大気上下結合(CPEA)」で赤道大気観測所に整備された各種リモートセンシング機器による連続観測を行うとともに、ラジオゾンデを用いたキャンペーン観測を実施し、赤道域の物質循環に寄与する鉛直流や微小乱流の実態を解明することを目的とする。EAR は MU レーダーのようなアンテナ面を分割して行う超多チャンネル観測には対応していないが、5 周波を用いる周波数領域干渉計の機能を有している。そこで、MU レーダーで開発されたイメージング観測技術を EAR に応用して、高時間・高距離分解能のイメージング観測により、大気の微細構造を捉える。

3. 研究の方法

海外での観測実験に先立って、MU レーダー

によりイメージング観測技術を確立し、中緯度における乱流の微細構造について調べる。MU レーダーの対流圏・下部成層圏標準観測モードでは、単一周波数で 5 方向(天頂方向及び東西南北に天頂角 10 度)にそれぞれ指向したビームを送信毎に切り替えることにより風速 3 成分の観測を行っている。本研究では乱流の微細構造を捉えるため、5 周波数(46.0, 46.25, 46.5, 46.75, 47.0MHz)を送信毎に切替えながら、25 群での受信信号を独立に検波処理し、後のイメージング解析処理のために各群における複素時系列データを記録する。

赤道大気観測所において現地設置の観測機器に加えて、ラジオゾンデを放球するキャンペーン観測を実施する。EAR も MU レーダーと同様、標準観測モードでは単一周波数で 5 方向(天頂方向及び東西南北に天頂角 10 度)にそれぞれ指向したビームを送信毎に切り替えることにより 3 次元風速の測定を行っている。本研究では乱流の微細構造を捉えるため、5 周波数(46.5, 46.75, 47.0, 47.25, 47.5MHz)を送信毎に切替える周波数領域イメージング観測も実施する。送信出力が MU レーダーの 1/10 しかない EAR では S/N の劣化はシビアに最高観測高度に影響するため、ビーム方向は鉛直 1 ビームのみとする。

4. 研究成果

高機能化された MU レーダーデジタル受信システムの 5 周波切替・25 チャンネル受信機能に対して、Capon 法を用いた 3 次元イメージング技術を開発した。0.5 μ s パルスモードとの比較実験により、イメージング観測結果の妥当性を検証した。

乱流の最も重要な発生原因の一つであるケルビン・ヘルムホルツ(KH)不安定は、成層大気中で熱や物質を鉛直混合する渦を生成する。MU レーダーの周波数イメージングモードによる高分解能観測によって、高度 16km 付近の圏界面における渦の構造を初めて捉えた(図 1)。KH 渦構造は 2 時間以上に渡って観測され、水平波長は約 5.3km、鉛直スケールは 0.5~1.0km であった。背景の風速場に慣性重力波が重畳しており、それが KH 不安定の発生に重要な役割を果たしていることを示した。また、乳房雲内部における乱流の微細構造を初めて明確に捉えることに成功した。

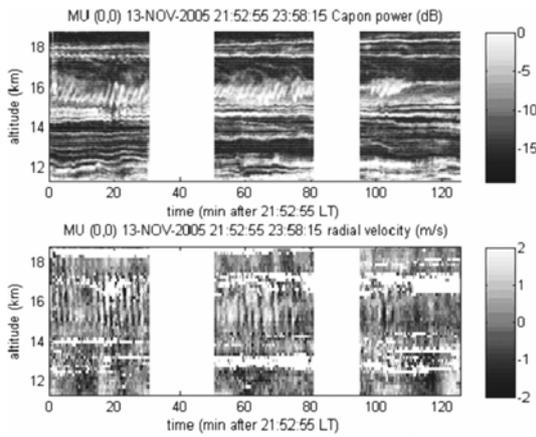


図1. (上)2005年11月13日21時52分～23時58分に高度11.4～18.9kmでMUレーダーイメージング観測により得られたブライトネスの時間高度変化。(下)対応する通常の150m分解能の鉛直流分布。

赤道大気レーダーを用いて上部対流圏における鉛直流の変動を詳細に調べた。対流イベントに合わせて高度14km以下で比較的強い上昇流が観測され、それ以上の高度では下降流であった。また、積雲活動の衰弱に伴って強い上昇流は見られなくなることを示した。

さらに赤道大気レーダーと95GHz帯のミリ波ドップラーレーダーを用いて、巻雲内粒子の落下速度を評価した(図2)。巻雲の雲底は8～10km、雲頂は12～14kmであった。背景の鉛直流の効果を考慮した真の落下速度とレーダー反射因子の比較から、巻雲の中層では粒径がレーダー反射因子を決める主要要素であることが分かった。

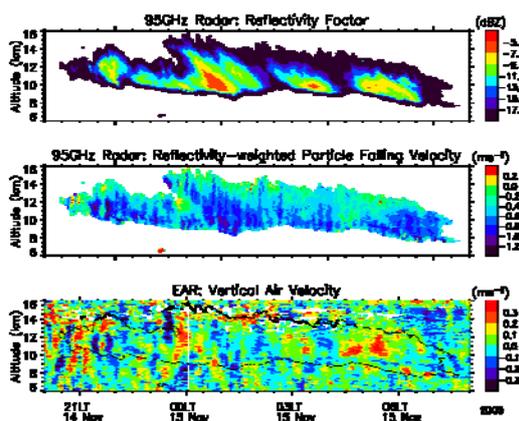


図2. 2005年11月14日20時～15日8時における、上から、95GHzレーダーで観測されたレーダー反射因子、鉛直ドップラー速度、赤道大気レーダーで観測された鉛直流の時間高度変化。最下図の実線は95GHzレーダーで観測された雲粒子からのエコー領域を示す。

MUレーダーで開発された周波数イメージング技術を赤道大気レーダーに適用し、初めて赤道大気における乱流の微細構造を詳細に捉えることに成功した。ライダー、気象レーダー等との同時観測データの解析を進め雲物理量と乱流量との関係が明らかにされつつある。

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15件)

- ① H. Luce, G. Hassenpflug, M. Yamamoto, S. Fukao, and K. Sato, High-resolution observations with MU radar of a KH instability triggered by an inertia-gravity wave in the upper part of a jet stream, *J. Atmos. Sci.*, **65**, 1711-1718, 2008. 査読有
- ② G. Hassenpflug, M. Yamamoto, H. Luce, and S. Fukao, Description and demonstration of the new Middle and Upper atmosphere Radar imaging system: 1-D, 2-D, and 3-D imaging of troposphere and stratosphere, *Radio Science*, **43**, doi:10.1029/2006RS003603, 2008. 査読有
- ③ M. K. Yamamoto, Y. Ohno, H. Horie, N. Nishi, H. Okamoto, K. Sato, H. Kumagai, M. Yamamoto, H. Hashiguchi, S. Mori, N.O. Hashiguchi, H. Nagata, and S. Fukao, Observation of particle fall velocity in cirriform cloud by VHF and millimeter-wave Doppler radars, *J. Geophys. Res.*, **113**, doi:10.1029/2007JD009125, 2008. 査読有
- ④ S. Fukao, Recent advances in atmospheric radar study, *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 215-239, 2007. 査読有
- ⑤ M. K. Yamamoto, N. Nishi, T. Horinouchi, M. Niwano, and S. Fukao, Vertical wind observation in the tropical upper troposphere by VHF wind profiler: A case study, *Radio Sci.*, **42**, doi:10.1029/2006RS003538, 2007. 査読有

[学会発表] (計48件)

- ① 深尾昌一郎・H. Luce・妻鹿友昭・山本真

之・山本衛・田尻拓也・中里真久, Radar observations of mammatus clouds and turbulence in three frequency bands, 第 23 回大気圏シンポジウム, 相模原, 2009 年 2 月 26 日.

- ② M. Yamamoto and S. Fukao, 1D, 2D, and 3D imaging of atmosphere and ionosphere with the MU radar and the Equatorial Atmosphere Radar (EAR), The International Symposium: Fifty Years after IGY - Modern Information Technologies and Earth and Solar Sciences -, Tsukuba, Japan, November 10, 2008.
- ③ S. Fukao, Recent advances in atmospheric radar studies, Keynote talk of The International School on Atmospheric-Ionospheric Remote Sounding and Modeling, Chung-Li, Taiwan, October 6, 2008.
- ④ M. Yamamoto, G. Hassenpflug, S. Saito, H. Luce and S. Fukao, MU radar 1D, 2D, and 3D imaging of atmosphere and ionosphere, 12th International Symposium on Equatorial Aeronomy, Crete, Greece, May 18, 2008.
- ⑤ 深尾昌一郎, Hubert Luce, 山本衛, 橋口浩之, MU レーダーによる対流圏界面のケルビンヘルムホルツ不安定の観測, 第22 回大気圏シンポジウム, 相模原, 2008 年 2 月 28 日.
- ⑥ S. Fukao, Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere (CPEA), International CAWSES Symposium, Kyoto, October 25, 2007.
- ⑦ M.K. Yamamoto, T. Horinouchi, M. Niwano, N. Nishi, H. Hashiguchi, M. Yamamoto, and S. Fukao, Vertical wind observation in the tropical upper troposphere by VHF wind profiler --- A case study ---, 33rd International Conference on Radar Meteorology, Cairns, Australia, August 8, 2007.

[図書] (計 1 件)

- ① 深尾昌一郎他, 地球環境の心臓 赤道大気の鼓動を聴く, クバプロ, pp.186, 2009.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深尾 昌一郎 (SHOICHIRO FUKAO)
京都大学・生存圏研究所・研究員(学術研究奨励)
研究者番号: 30026249

(2) 研究分担者
山本 衛 (MAMORU YAMAMOTO)
京都大学・生存圏研究所・教授
研究者番号: 20210560

橋口 浩之 (HIROYUKI HASHIGUCHI)
京都大学・生存圏研究所・准教授
研究者番号: 90293943

山本 真之 (MASAYUKI YAMAMOTO)
京都大学・生存圏研究所・助教
研究者番号: 90346073

(3) 連携研究者
長澤 親生 (CHIKAO NAGASAWA)
首都大学東京・システムデザイン学部・教授
研究者番号: 80145664

下舞 豊志 (TOYOSHI SHIMOMAI)
島根大学・総合理工学部・助教
研究者番号: 30325039