

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：33401  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21540455  
 研究課題名（和文） MUレーダー超高分解能イメージング観測による微小乱流の研究

研究課題名（英文） Study of atmospheric turbulence based on high-resolution imaging observations with the MU Radar

研究代表者  
 深尾 昌一郎 (FUKAO SHOICHIRO)  
 福井工業大学・工学部・教授  
 研究者番号：30026249

研究成果の概要（和文）：熱や物質の鉛直輸送に重要な寄与をされるとされる大気乱流とその主要因であるケルビン・ヘルムホルツ(KH)不安定はそのスケールが小さいことから直接観測はこれまで困難であった。これをMUレーダーのイメージングモードによる超高分解能観測に加えて、多周波数帯レーダーとライダー観測を援用して、総合的に解析した。自由大気中におけるKH不安定の構造をかつてない高分解能映像観測で解析し、KHIと風速シアとの関係が明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：Kelvin-Helmholtz Instability (KHI) and KHI-induced atmospheric turbulence contribute to vertical transportation of heat and substance. However, it is difficult to observe them since their scale is very small. We analyzed them using high resolution imaging observation mode of the MU radar in addition to multi-frequency band radar and lidar observations. The structure of KHI and the relation between KHI and wind shear were clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：リモートセンシング、大気乱流、物質輸送、シア不安定、レーダー映像法、ケルビン・ヘルムホルツ不安定、KHI、大気レーダー

1. 研究開始当初の背景

乱流混合は熱や物質の鉛直輸送に寄与する重要なプロセスであるが、そのスケールが極めて小さいことから観測が難しい現象の一つである。これまで、直接観測やリモートセンシングによって大気乱流の特徴が徐々に明らかにされてきた。下部成層圏のような安定な成層大気においては、乱流はしばしば

数十メートルより薄い層構造を成しており、山岳・対流・ジェット気流に伴う傾圧波によって生成される重力波に引き起こされたケルビン・ヘルムホルツ(KH)不安定が、この薄層の原因と考えられている。対流圏界面領域はジェット気流のシアによる強い乱流が生成される領域として知られており、tropopause folding(対流圏界面褶曲)は特に

活発な乱流混合をもたらし、積乱雲の成層圏貫入とともに、対流圏・成層圏間大気交換の主要因のひとつとなっている。近年、数値モデル研究によって、対流圏界面褶曲がジェット中心から鉛直に伝播するメソスケール重力波の生成に寄与することが示され、この重力波がジェット気流の上下における力学的(シア)不安定を通じて乱流層の発達を促していることが指摘されている。

シア不安定に加えて、対流不安定も乱流の主要な発生源であるが、これらの不安定の一部は安定な成層領域における重力波から発生している。地表面加熱による熱的対流は中緯度の特に夏季における境界層を含む対流圏における乱流生成の最も重要なメカニズムである。雲に伴う乱流は、混合に対して重要な役割を果たしており、雨粒の生成に対しても重要な影響を与えている。雲頂あるいは雲底における取り込み混合(entrainment)による乾燥大気と湿潤大気の混合に起因する対流不安定もまた、乱流の重要な発生源である。

以上のように、下層大気中には大気乱流の発生源が多く存在しており、乱流は発生源・背景大気状態・大規模場との相互作用などによって特性を様々に変化させる。しかしながらこれらの特性の詳細はまだ充分明らかにされておらず、また自由大気中における特性も良く理解されていない。混合効果の評価やエネルギー消散率・乱流拡散係数などの乱流パラメータの精確な推定が必要であり、これらによって中層下層大気中における乱流生成や空間分布・消長を明らかにできる。

## 2. 研究の目的

MUレーダーは世界最高性能のVHF帯大気レーダーであり、重力波、前線、台風、大気乱流などの研究に大きな成果を残してきた。2004年にMUレーダーは高機能化への改修が行われ、レーダーイメージング観測が可能となった。すなわち、新システムでは周波数イメージングモードによる運用が可能となり、レンジ分解能が飛躍的に向上した。初期的な研究から様々な高度範囲におけるKH波や大気波動の特徴が明らかにされた。特にKH不安定によって生じる乱流渦がジェット気流上部(高度16km程度)において、詳細にイメージ化された。さらに、熱的対流に伴う乱流もイメージ化され、巻雲の下面からの蒸発冷却による対流不安定によって引き起こされた大気乱流も観測された。

MUレーダーは現在のところ乱流を最も正確にイメージ化でき、それらの発生・発達・

形成メカニズムや、メソ～総観規模現象との関連を研究する上で最も強力な測器である。本研究は、MUレーダーのイメージングモードによる超高分解能データから乱流の特性を解明することを目的とする。特に、不安定が混合・エネルギー消散・鉛直輸送に重要な役割を果たすことから、自由大気中におけるKH不安定の構造をかつけない高分解能観測で捉えることに注力する。これによりジェット気流に伴う傾圧波から発生した重力波に引き起こされたKH不安定の結果と考えられる対流圏界面褶曲に伴う乱流現象の詳細な描像を明らかにする。これは対流圏界面褶曲を通して対流圏界面領域における対流圏・成層圏大気交換に対する乱流の寄与を定量的に見積ることにつながる。さらに、雲頂・雲底近くで発生する対流不安定に伴う乱流に関する知見を飛躍的に発展させる。

## 3. 研究の方法

滋賀県甲賀市信楽町の信楽MU観測所(34.85N, 136.10E)において、観測実験を実施する。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、複素時系列データを記録する。信号対雑音比(S/N)を上げるためにビーム方向は天頂のみとし、背景の風速3成分の情報を得るために定期的に通常の5方向(天頂方向及び東西南北に天頂角10°傾けた方向)標準観測モードを実行する。同時に、9GHz雨レーダー、1.3GHzウィンドプロファイラー、ライダー等を運用する。現地でリアルタイムにデータの一次処理を実施し、天気図や気象衛星画像等も利用して、狙った現象が観測された時に、ラジオゾンデを放球し、温度・湿度プロファイルの情報を得る。

## 4. 研究成果

大気中の微小乱流は様々な力学/対流不安定により生成される。なかでもケルビン・ヘルムホルツ不安定(Kelvin-Helmholtz instability; KHI)は晴天大気乱流のもっとも重要なもののひとつである。KHIは大気中の風速鉛直シアの強い高度でKH波(KH billow)を発生し熱や物質を上下に混合する。またKH波は力学エネルギーを消散し大規模力学場にも影響を与える。

各年度に2009年10月、2010年11月、2011年9月にキャンペーン観測を実施した。特に2011年9月の観測では、MUレーダー周波数イメージング観測に加えて、約2週間の間にGPSラジオゾンデ気球を60発放球し、乱流を検出するため、1秒毎のデータを取得し、オ

ライン処理を行った。また(ラマン・レイレー・3 波長)ライダー、1.3GHz 帯ウィンドプロファイラー、雲撮影用カメラによる連続観測も実施した。以下では、2008 年 11 月 8 日に観測された同様の事例を詳細に解析した結果について述べる。

KHI に起因すると目される輝度分布の例を図 1 に示す。サンプリング間隔は 6 秒である。上手の高度 14~15 km 付近に典型的な“S”字型組紐構造が連なって存在する。同様の事例は FMCW レーダーにより主として大気境界層中で多く報告されている。一方、中図は高度約 1.5 km で捉えられた“大波”(billow)状構造である。厚さ約 500 m、周期 3 分 20 秒である。さらに下図では高度 6.5 km 近傍に厚さ約 1000 m、周期 4 分 30 秒の“S”字型組紐構造があるが、それに周期 45 秒程度のより小規模の構造が重畳している。

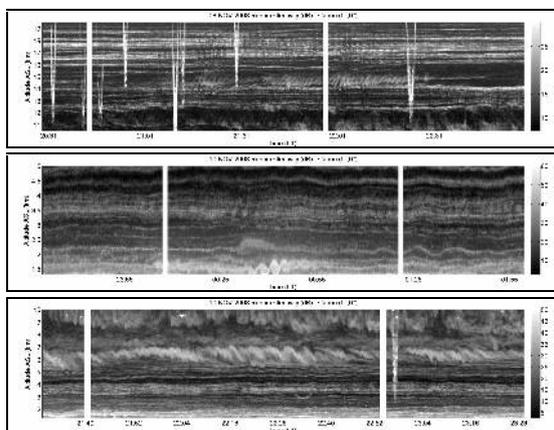


図 1. MU レーダー周波数イメージング観測で得られた KHI 起因と考えられるエコー構造の 3 例。

図 2 にレーダー反射率(上図)と MU レーダーで観測された鉛直流(中図)並びに Ka 帯 FMCW レーダー(波長 8 mm)で得られたレーダー反射率(dBZ; 下図)を示す。中図の黒線は Ka 帯 FMCW レーダーの-9dBZ の反射率レベルに対応する。これはほぼ氷晶雲の雲底高度を表わすものと考えてよい。これらの図は KHI が雲底で頻繁に発生していることを示している。最大振幅の組紐構造は 1220 LT 頃に現れたもので厚さは 1,000 m にもなる。周期は 1 分 36 秒~2 分 06 秒である。鉛直流は雲底高度の上下でほぼ 90° 異なっており、雲底高度が臨界層に対応する。雲底に 300 m 程の“ふくらみ”が見られるが、その位置は上下動と完全に対応している。これはいわゆる乳房雲と考えられる。雲底に見られる KHI は、本キャンペーン中に対流圏で見られた KHI の半数

以上で、雲底は KHI が出来易い環境にあるものと考えられる。

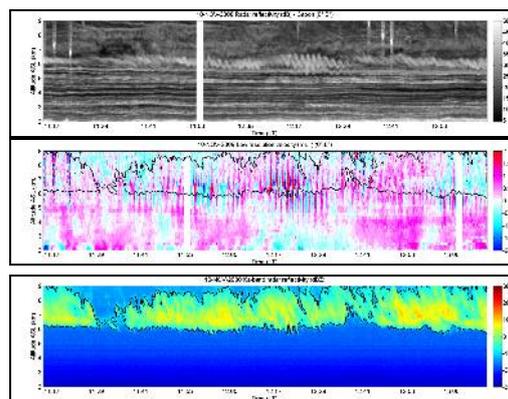


図 2. 雲底で発生した KHI。(上図)Capon 法適用後のレーダー反射率(dB)。(中図) MU レーダーで観測された鉛直流。図中の黒線は下図の反射率レベル-9dBZ の領域を示す。(下図) Ka 帯 FMCW レーダーで得られたレーダー反射率(dBZ)。

図 3 は MU レーダーのレーダー反射率(上図)と、風速、同シアと温位(下左図)、 $N^2$ (下中図)、及びリチャードソン数  $Ri$ (下右図)である。KHI の組紐構造が高度 16~17 km に 2150 LT から、また 2325 LT からに認められる。2325 LT 前に長時間続く一組のレーダー反射率の薄層構造は KHI の発展結果とも考えられる。1 時間前に放球されたゾンデ観測の結果は高い安定性( $N^2 > 10^{-3} s^{-1}$ )、強い風シア( $> 40 ms^{-1} km^{-1}$ )、及び 0.25 に近いリチャードソン数を示している。しかし MU レーダーで観測される KHI 構造には、明確な砕波乱流や温位の中立構造に対応するものが見られない。また高度 11 km 以下の高度域では明瞭な双層(double layers)構造を示すものもなかった。

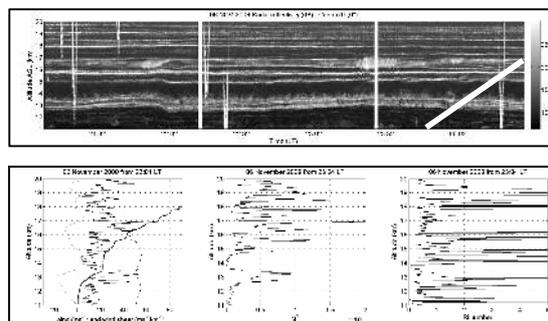


図 3. (上図)MU レーダーで得られたレーダー反射率。右下の白線は 2304LT に信楽 MU 観測所から放球された GPS ゾンデの高度を示す。(下左図)南北・東西風(破線)、風速シア(実線)、温位(太実線)。(下中図) $N^2$ 。(d)リチャードソン数  $Ri$ 。

50 MHz レーダーで観た KHI は時間・高度強度図上で様々なパターンになることが分かった。多くはこれまで FMCW レーダーで境界層大気中に観られたものに似た組紐構造をしているが、対流圏中では比較的弱い風シアと関係している。層厚は数百 m で、水平波長は 1500~3000 m である。またその寿命はほぼ 30 分以下である。圏界面近傍のごくまれな事例を除いて、KHI が砕波して双層構造に変移することはなかった。

#### 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 30 件)

- ① H. Luce, N. Nishi, J.-L. Caccia, S. Fukao, M. K. Yamamoto, T. Mega, H. Hashiguchi, T. Tajiri, and M. Nakazato, Kelvin-Helmholtz billows generated at a cirrus cloud base within a tropopause fold/upper-level frontal system, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L04807, doi:10.1029/2011GL050120, 2012, 査読有.
- ② S. Fukao, H. Luce, T. Mega, and M.K. Yamamoto, Extensive studies of large-amplitude Kelvin-Helmholtz billows in the lower atmosphere with the VHF Middle and Upper atmosphere radar (MUR), *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 1019-1041, doi:10.1002/qj.807, 2011, 査読有.
- ③ T. Mega, M.K. Yamamoto, H. Luce, Y. Tabata, H. Hashiguchi, M. Yamamoto, M.D. Yamanaka, and S. Fukao, Turbulence generation by Kelvin-Helmholtz instability in the tropical tropopause layer observed with 47-MHz range imaging radar, *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2010JD013864, 2010, 査読有.
- ④ H. Luce, T. Mega, M.K. Yamamoto, M. Yamamoto, H. Hashiguchi, S. Fukao, N. Nishi, T. Tajiri, and M. Nakazato, Observations of Kelvin-Helmholtz instability at a cloud base with the middle and upper atmosphere (MU) and weather radars, *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2009JD013519, 2010, 査読有.
- ⑤ Luce. H., T. Takai, T. Nakamura, M. Yamamoto, and S. Fukao, Simultaneous observations of thin humidity gradients in the lower troposphere with a Raman lidar and the very-high frequency Middle- and Upper-atmosphere radar, *J. Atmos. Oceanic*

*Tech.*, 27, 950-956, 2010, 査読有.

- ⑥ M.K. Yamamoto, T. Kishi, T. Nakamura, N. Nishi, M. Yamamoto, H. Hashiguchi, and S. Fukao, Wind observation around tops of midlatitude cirrus by the MU radar and Raman/Mie lidar, *Earth, Planets Space Letter*, 61, e33-e36, 2009, 査読有.

[学会発表] (計 71 件)

- ① H. Luce, S. Fukao, M.K. Yamamoto, H. Hashiguchi, T. Mega, T. Tajiri, and M. Nakazato, Structure and dynamics of air inhomogeneities in the environment of a cirriform cloud from balloon and high-resolution radar measurements, The 13th Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST/ST Radar, Kuhlungsborn, Germany, 2012 年 3 月.
- ② R. Wilson, H. Luce, H. Hashiguchi, F. Dalaudier, S. Fukao, T. Nakajo, Y. Shibagaki, M. Yabuki, and J. Furumoto, Small scale turbulence and instabilities observed simultaneously by radiosondes and the MU radar, The 13th Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST/ST Radar, Kuhlungsborn, Germany, 2012 年 3 月.
- ③ H. Luce, R. Wilson, F. Dalaudier, N. Nishi, S. Fukao, M. Yabuki, H. Hashiguchi, J. Furumoto, Y. Shibagaki, and T. Nakajo, A new field campaign for tropospheric turbulence studies with the MU radar and intensive in situ observations with RS92G Vaisala radiosondes, The 13th Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST/ST Radar, Kuhlungsborn, Germany, 2012 年 3 月.
- ④ Luce Hubert, Wilson Richard, Dalaudier Francis, Hashiguchi Hiroyuki, Yabuki Masanori, Furumoto Jun-ichi, Yamamoto Mamoru, Yamamoto Masayuki, Fukao Shoichiro, Nakajo Tomoyuki, Nishi Noriyuki, Fujiyoshi Yasushi, and Shibagaki Yoshiaki, A new multi-instrumental campaign at Shigaraki MU Observatory (September 2011) for studying turbulence sources and characteristics in the lower atmosphere, 日本気象学会 2011 年度秋期大会, 名古屋, 2011 年 11 月.
- ⑤ S. Fukao and H. Luce, Observations of Large-Amplitude Kelvin-Helmholtz Billows in the Earth's Atmosphere with the MU Radar, International Symposium on Earth-science Challenges (ISEC), Oklahoma, USA, 2011 年 9 月.

- ⑥ S. Fukao (Invited talk), Advances in Science and Techniques for Ground-based Radar Remote-sensing of the Earth's Atmosphere, 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2011), Vancouver, Canada, 2011年7月25日.
- ⑦ 深尾昌一郎・H. Luce・妻鹿友昭・山本真之, MUレーダーで観測された下層大気の大振幅ケルビン・ヘルムホルツ波の統計的研究, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会, 那覇, 2010年10月.
- ⑧ 深尾昌一郎・H. Luce・山本真之・妻鹿友昭・橋口浩之・山本衛, MUレーダーによる対流圏・成層圏大振幅ケルビン・ヘルムホルツ波の高分解能観測, 日本地球惑星科学連合2010大会, 千葉, 2010年5月.
- ⑨ S. Fukao, H. Luce, M.K. Yamamoto, T. Mega, and H. Hashiguchi, Large-Amplitude Kelvin-Helmholtz Billows observed with the MU Radar in the lower atmosphere, International Symposium on the 25th Anniversary of the MU radar, 宇治, 2010年9月.
- ⑩ H. Hashiguchi, M. Yamamoto, M.K. Yamamoto, S. Fukao, and H. Luce, Imaging observations with the MU radar and an L-band wind profiler, International Symposium on Radar and Modeling Studies of the Atmosphere, Uji, Kyoto, Japan, 2009年11月.
- ⑪ 深尾昌一郎・H. Luce・中村卓司・山本真之・山本衛, MUレーダーとライダー同時観測で捉えられた巻雲にともなう晴天大気乱流, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会, 金沢, 2009年9月.
- ⑫ 深尾昌一郎・山本真之・Hubert Luce・妻鹿友昭・橋口浩之・山本衛・田尻拓也・中里真久, 50-MHz帯レーダーで観るケルビン・ヘルムホルツ不安定の構造とダイナミックス, 第3回赤道大気レーダーシンポジウム, 宇治, 2009年9月.
- ⑬ H. Luce, S. Fukao, M.K. Yamamoto, T. Mega, M. Yamamoto, H. Hashiguchi, T. Tajiri, and M. Nakazato, Characteristics of Kelvin-Helmholtz instabilities in the troposphere (up to~16km) seen by the MU radar in range imaging mode, The Twelfth International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar-MST12, London, Ontario, Canada, 2009年5月.
- ⑭ H. Luce, M.K. Yamamoto, T. Mega, M.

Yamamoto, and S. Fukao, Mammatus and turbulence observations with the VHF MU radar, Ka-band and X-band radars during the TANUKI 2008 campaign, The Twelfth International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar-MST12, London, Ontario, Canada, 2009年5月.

- ⑮ H. Luce, T. Nakamura, M. Yamamoto, and S. Fukao, MU radar and lidar observations of clear-air turbulence mammatus underneath cirrus, The Twelfth International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar-MST12, London, Ontario, Canada, 2009年5月.
- ⑯ H. Luce, T. Nakamura, M. Yamamoto, and S. Fukao, MU radar and lidar observations of clear-air turbulence and mammatus underneath cirrus, The European Geoscience Union General Assembly 2009, Vienna, Austria, 2009年4月.

〔図書〕(計2件)

- ① S. Fukao, M. Yamamoto, S. Gurubaran, N. Balan, and T. Nakazawa 編, Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere(CPEA). Earth, Planets and Space, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (SGEPSS), pp.167, 2009.
- ② 深尾昌一郎・浜津享助, 気象と大気のレーダーリモートセンシング(改訂第2版), 京都大学学術出版会, pp.502, 2009.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

深尾 昌一郎 (SHOICHIRO FUKAO)  
福井工業大学・工学部・教授  
研究者番号: 30026249

### (2)研究分担者

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