

# MUレーダーが捉えた 上部対流圏・下部成層圏のケルビン・ヘルムホルツ不安定

深尾昌一郎<sup>1,2</sup>・Hubert Luce<sup>3</sup>・山本衛<sup>2</sup>・橋口浩之<sup>2</sup>・中村卓司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東海大学総合科学技術研究所   <sup>2</sup>京都大学生存圏研究所

<sup>3</sup>Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement  
Terrestre, Université de Toulon et du Var, CNRS, France

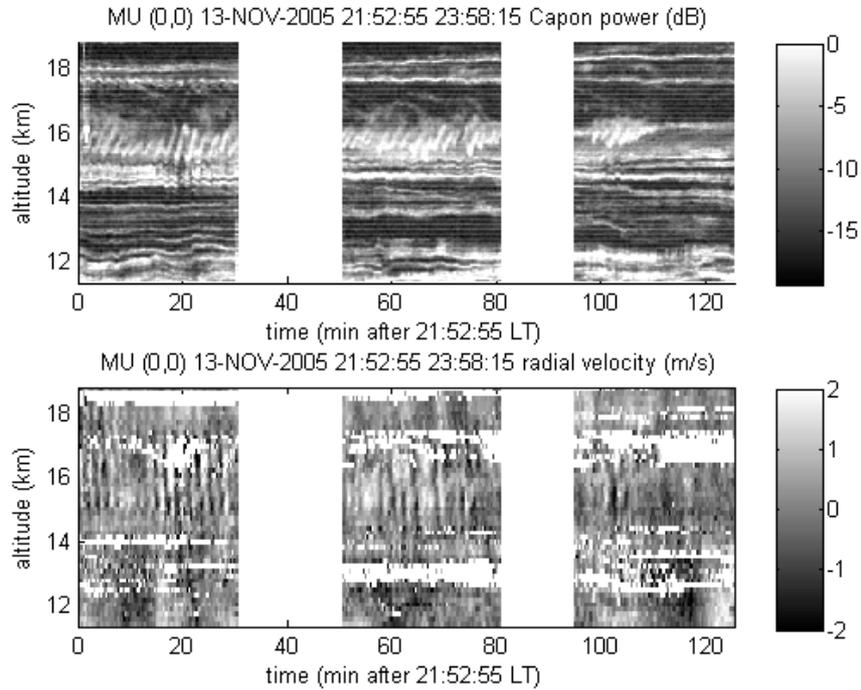
## 1. 高層大気中のケルビン・ヘルムホルツ不安定

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 (e. g., Browning and Watkins, 1970)。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 (e. g., Shapiro, 1980; Gavrilov et al., 2006)。これまで主として高高度分解能 FMCW レーダーや音波レーダーなどによる大気境界層中の観測事例が数多く報告されてきた (e. g., Gossard, 1990.)。しかしながらその上層の上部対流圏・下部成層圏で KHI を直接捉えた観測例は少ない。それは KH 波が振幅数  $m \sim 1$  km 程度で周期数分程度の小規模現象であるため観測が容易でなかったことによる (e. g., Klostermeyer and Rüster, 1980; Chilson et al., 1997)。本稿では VHF 帯 MU レーダー (滋賀県甲賀市信楽町;  $34.85^\circ$  N,  $136.10^\circ$  E) により上部対流圏と下部成層圏で観測された事例について報告する。観測には距離映像法 (Frequency domain Interferometric Imaging: FII 或いは Range IMaging : RIM) と呼ばれるレーダー干渉計法が適用され、観測分解能が従来のものに比して格段に向上した (Fukao, 2007)。

## 2. MU レーダーによる観測

MU レーダーの通常観測モードの最小分解能は高度 150 m、時間 2 分である。これに距離映像法 (FII) を適用して高高度分解能の輝度 (brightness ; エコー強度に相当) 分布などを求めた。FII では帯域 1 MHz 中の隣接した 5 周波をパルス毎に切替えて送信し、それぞれ受信された信号出力にカポン (Capon) フィルターを施し最小化する。この処理ではウェイトイングベクトルが信号対雑音比に依存する適応型フィルターとなる (深尾・濱津, 2005)。大気レーダーにおける FII の有効性は既に確認されている (Palmer et al., 1999; Luce et al., 2001)。

図 1 上図は 2005 年 11 月 13 日 2152 LT から約 2 時間の高度 11.7~18.6 km における輝度分布を示す。高度 15.5 km 辺りに周期数分の “S” 字型構造が連なって存在する。一般に通常観測モードで同構造をこれほど明瞭に観ることは不可能である。これが KH 波でその振幅や波面の傾き、発生タイミング、持続時間などの変動は著しく大きい。一方、同下図は 150 m の分解能で観た鉛直分布である。また図 2 上図は高度 15.35 km と 15.95 km における鉛



**Figure 1** (Top) Height-time plot of echo power after Capon processing (dB) obtained with the vertical beam between 11.4 km and 18.9 km from 2152 LT to 2358 LT on 13 November 2005. (Bottom) the corresponding plots of radial velocity measured at a range resolution of 150 m.

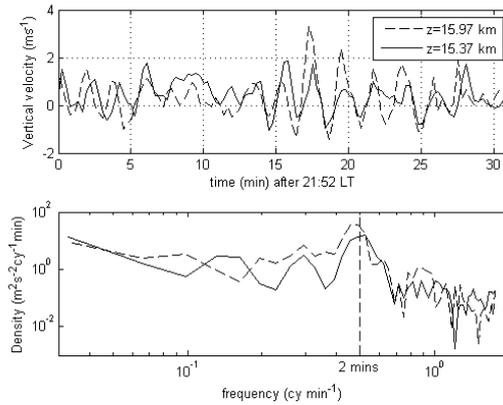
直流の時系列で、両者に見られるほぼ  $90^\circ$  の位相差は図 1 下図からも分かるように 15.5 km 辺りで生じている。いずれも KHI のよく知られた特徴 (e. g., Klostermeyer and Rüster, 1980; Chilson et al., 1997) であり、観測された S 字型構造は KHI と認められる。なおこの卓越周期 (図 2 下図) と背景風速から KH 波の水平波長は約 5.3 km と推定される。一方その振幅は 0.5~1.0 km であることから KHI のアスペクト比は 5.3~10.6 程度とみなされる (Luce et al., 2008)。

図 1 上図には KH 波の主として下部に極薄の持続性エコー層が無数に観られる。厚さが数 10 m 以下のものもある。散乱強度を調べると、KH 波の存在する高度域では強い等方性散乱が、一方薄層が存在する高度域では分反射が卓越している。このことから KH 波が強い等方性乱流となっていること、一方薄層は厚さ数 m の安定温度成層に起因していることが考えられる。さらにこれらの薄層が KH 波とともに振動する様子も観測されており興味深い。

MU レーダーデータと気象庁高層気象観測データを解析することにより、この KHI は準単色の慣性重力波 (周期 $\approx$ 12 時間、水平/垂直波長 $\approx$ 600 km/3.5 km) がジェット気流上部の風シアを強めることにより生じたことが確かめられている (Luce et al., 2008)。

### 3. KHI の遍在性

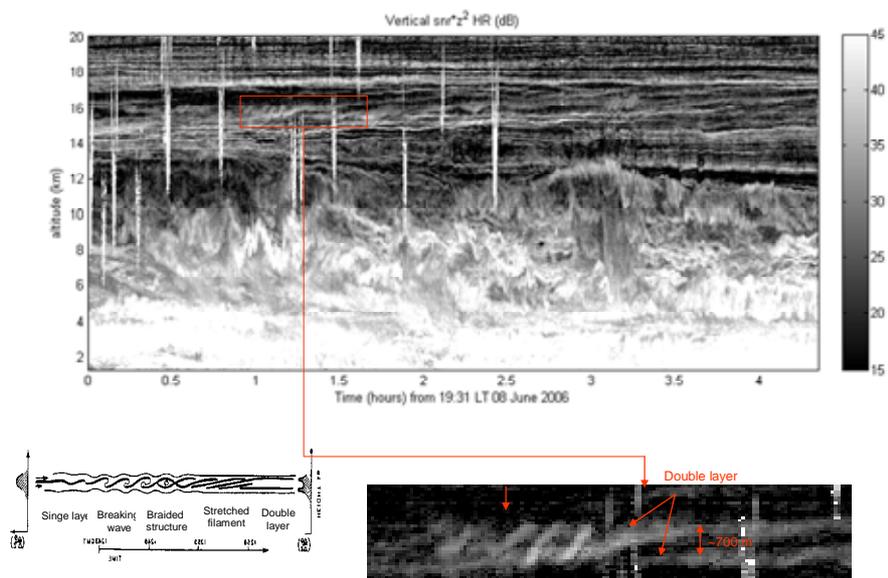
図 3 上図に示すように MU レーダーの観測高度域で KHI はかなり普遍的に存在するよう



**Figure 2** (Top) Time series of radial velocities measured with the vertical beam at 15.37 km (solid line) and 15.97 km (dashed line). (Bottom) Corresponding velocity spectra.

である。対流圏界面上部には多重の薄層構造がかなり頻繁に長時間持続して現れることがある。一方 KHI はしばしば小規模な鉛直振動を伴ってそれらに重畳して現れる。その持続時間は数時間から数十分と著しく変動的である。

KHI の単層から双層に分岐する特徴的な時間発展はよく知られている。それと同様の発展過程を辿った KHI が対流圏界面上部でも MU レーダーにより実際に捉えられている (図 3 下図)。

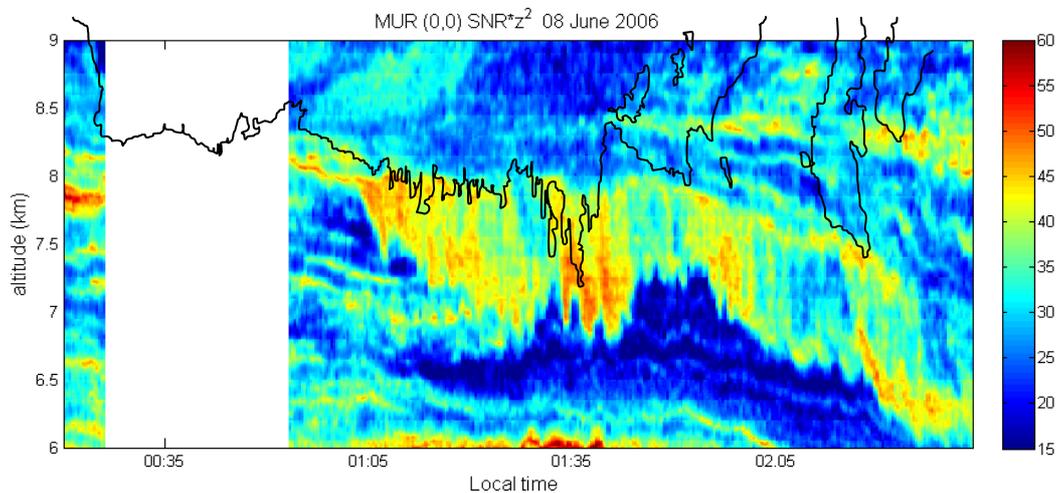


**Figure 3** (Top) Height-time plot of radar reflectivity (dB) measured with the vertical beam. (Bottom left) Morphology of KHI evolution. (Bottom right) Close-up of the rectangle in the top diagram.

#### 4. Mammatus clouds の観測

Mammatus clouds (乳房雲) は雲底から垂れ下がったこぶ状の雲である。巻雲・高積雲・積乱雲などに現れ、大雨の前兆ともされる。生成時には雲底に下降気流や渦流を伴うとされているが、観測の困難さから、未だその発生機構は十分に理解されていない (Schultz et al., 2006)。

2006年6月、信楽 MU 観測所において初めて MU レーダーと Rayleigh/Mie ライダーの同時観測を試みた。実際に視認は出来ていないが、ライダーは巻雲の下端から乳房雲に特徴的な垂れ下がりをつ捉えた。一方 MU レーダーは雲底とその下方に強い乱流を観測 (図4)、それに伴って下降流のあるところで雲粒子が下方に貫入する様子をつ捉えた。そこにこぶ状の乳房雲が生成されていると推定される。



**Figure 4** The MU radar observations of echo power in the vertical beam. Strong turbulent echoes developed at the cirrus cloud base and below it when the cloudy protuberances are generated. Solid line shows the cloud base contour estimated from the lidar observations.

また MU レーダー観測から雲底より少し上方に強い風シアがあり、これにより弱い KHI が生成されていたことが想定される。さらに同時期に放球された GPS ゾンデ観測により、巻雲の下は極めて乾燥しており、振り落とされた氷晶がそこですぐ昇華し温位を下げ、そこに対流不安定層を生成したことが予想される (“逆” 対流不安定)。図4に示す MU レーダーが捉えた強い乱流はこれに起因したものと考えてよい。

#### 参考文献

Browning, K. A., and C. D., Watkins, Observations of clear air turbulence by high power radar, Nature, 227, 260-263, 1970.

- Chilson, P.B., Muschinski A., and G. Schmidt, First observations of Kelvin-Helmholtz billows in an upper level jet-stream using VHF frequency domain interferometry, *Radio Sci.*, 32, 1149-1160, 1997.
- 深尾昌一郎・濱津享助, 気象と大気のレーダーリモートセンシング, 京都大学学術出版会, 491 頁, 平成 17 年.
- Fukao, S., Recent Advances in Atmospheric Radar Study, *J. Meteor. Soc. Japan*, 85B, 215-239, 2007.
- Gavrilov N. M., S. Fukao, H. Hashiguchi, K. Kita, K. Sato, and Y. Tomikawa, Combined MU radar and ozonesonde measurements of turbulence and ozone fluxes in the tropo-stratosphere over Shigaraki, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi:10.1029/2005GL024002, 2006.
- Gossard, E. E., Radar research on the atmospheric boundary layer, in *Radar in Meteorology*, Ed. D. Atlas, Am. Meteorol. Soc., Boston, Mass., 1990
- Klostermeyer, J., and R. Rüster, Radar observations and model computation of a jet stream-generated Kelvin-Helmholtz instability, *J. Geophys. Res.*, 85, 2841-2846, 1980.
- Luce, H., M. Yamamoto, S. Fukao, D. H  lal, and M. Crochet, A Frequency radar Interferometric Imaging applied with High Resolution Methods, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 63, 221-234, 2001.
- Luce, H., G. Hassenpflug, M. Yamamoto, S. Fukao, and K. Sato, High-resolution observations with the MU radar of a KH instability triggered by an inertia-gravity wave in the upper part of a jet-stream, *J. Atmos. Sci.*, In press, 2008.
- Palmer, R. D., T.-Y. Yu, and P. B. Chilson, Range imaging using frequency diversity, *Radio Sci.*, 34, 1485-1496, 1999.
- Schultz, D. M., K. M. Kanak, J. M. Straka, et al., The mysteries of mammatus clouds: Observations and formation mechanism, *J. Atmos. Sci.*, 63, 2409-2435, 2006.
- Shapiro, M. A., Turbulent mixing within tropopause folds as a mechanism for the exchange of chemical constituents between the stratosphere and troposphere, *J. Atmos. Sci.*, 37, 994-1004, 1980.