

MUレーダーによる対流圏・下部成層圏 ケルビン・ヘルムホルツ不安定波の形態学的研究

深尾昌一郎^{1,2}, H. Luce³, 妻鹿友昭², 山本真之², 橋口浩之², 山本衛²

¹ 福井工業大学, ² 京都大学生存圏研究所, ³ Université du Sud-Toulon Var

1. はじめに

ケルビン・ヘルムホルツ不安定 (Kelvin-Helmholtz instability; KHI) は強い安定成層にある大気中でもっとも重要な晴天大気乱流 (clear air turbulence; CAT) である (e.g., Browning and Watkins, 1970)。KHI は風速鉛直シアの強い高度で生成され、強い安定成層大気中で熱や物質の上下混合と輸送に重要な役割を果たすとされている (e.g., Shapiro, 1980; Gavrilov et al., 2006)。

KHI の古典的なライフサイクル像は実験室やコンピュータシミュレーションにより詳しく調べられている。リチャードソン数 $Ri = N^2/S^2$ (ただし N は Brunt Väisälä 振動数; S は水平風の鉛直勾配) が 0.25 以下になると、水平層構造が力学的に不安定となり、KH 波 (KH billow) が生成される。これにより生じた渦回転 (roll) により流体は不安定となり、最終的に砕波する。KH 波をレーダーで観測すると、エコー強度は屈折率勾配が大きい上下端で強くなり、乱流混合が進んだコア内部では小さくなることが知られている。しばしば見られるレーダーエコーはその形状から、“S”字型構造、組紐 (braids) あるいはキャッツ・アイ (cat's eye) などと呼ばれる。しかし種々の制約のため、まだ大気中の KHI を完全に解明するには程遠い状況である。

これまで観測の困難さのため、特に上部対流圏・下部成層圏で KH 波を捉えた報告例は少なかった (e.g., Fukao, 2007; 深尾他, 2009, 2010; Luce et al., 2008, 2009)。本研究では VHF 帯 MU レーダー (滋賀県甲賀市信楽町; 34.85°N, 136.10°E) に距離影像法 (Range IMaging: RIM, 或いは Frequency domain Interferometric IMaging: FII; e.g., 深尾・浜津, 2005) を適用して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。

2. 対流圏・下部成層圏域の層状構造

図 1 は MU レーダーにより鉛直方向ビームで観測されたレーダー (相対) 反射率である。顕著な特徴は、上部対流圏・下部成層圏域に層厚が極めて薄い散乱層が幾重にも重なって観られることである。一般にそれらが交差することは何時間にも亘って殆ど無い。同様の薄層構造は既に先駆的に、下部成層圏 (Sato and Woodman, 1982) や中間圏 (Yamamoto et al., 1988) でも報告されており、いずれも慣性重力波の関与が示唆されている。また特殊ゾンデで安定成層大気中に頻繁に観測される温度薄層 (temperature sheet) もレーダー散乱薄層との関連が示されている (Luce et al., 2002)。

最近の大掛かりなコンピュータシミュレーションにより、これらは乱流層の上下端から強い散乱が生じるもので、KHI 発展過程の最終段階である乱流薄層とみなされている (例えば、Fritts et al., 2003)。ただしコンピュータシミュレーションでは現象の進行を早めるために Ri を極端に小さなもの (0.01 程度) にすることが一般に行われているようである。

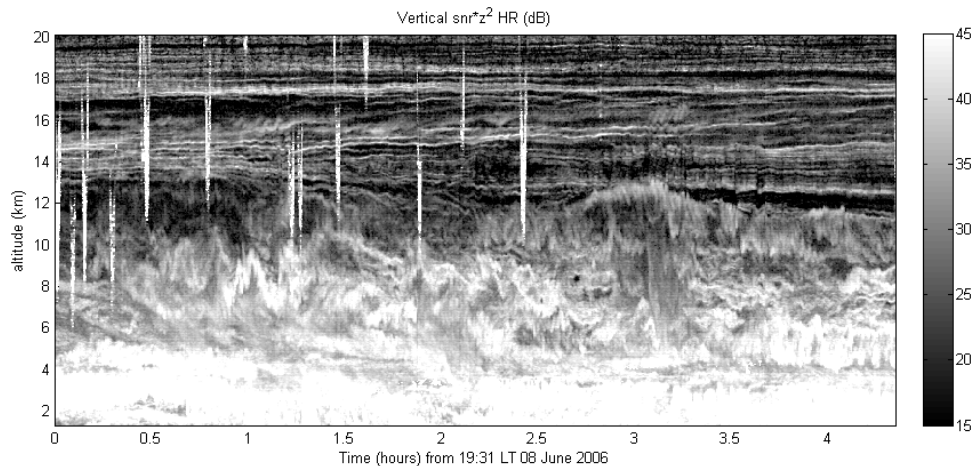


図 1 Height-time section of relative radar reflectivity observed by the vertical beam of the MU radar for approximately 4 hours from 1931 LT on June 8, 2006. Multiple thin scattering layers are observed in the upper troposphere and the lower stratosphere regions.

3. MUレーダーによる高分解能観測

3.1 距離影像法による観測

MU レーダーに距離影像法 (FII) を適用することにより高い高度分解能の輝度 (brightness ; エコー強度に相当) 分布がえられる。本観測方式では帯域 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にカポン (Capon) フィルターを施し出力を最小化する (e.g., Hassenpflug et al., 2008; Palmer et al., 1999; Luce et al., 2001)。

本研究のために特別観測キャンペーン『TANUKI (Turbulent Atmosphere observationNs Using a Ka-band radar and other Imaging radars)』が設定され、2008 年 10 ~ 11 月にかけてほぼ 1 ヶ月間実施された。観測のサンプリング時間間隔は 6 秒、実効的な鉛直分解能は数 10 m である。

3.2 ケルビン・ヘルムホルツ (KH) 渦の発達と減衰

図 2 に境界層上端部の高度 1.6 km 近傍に観られた KH 渦 (vortex) の発達・減衰過程 (仮に第 1 ~ 5 段階と区分する) を示す。(相対) レーダー反射率 (同図上図と中図) はすべての段階で殆どビーム方向に依存しない。このことから既に第 1 段階の KH 波発生前から小規模な等方性乱流が発達していたと考えられる。第 2 段階で水平層が KH 波で変形され、その後の第 3 段階で振幅約 400 m の渦に発達している。渦内は渦端に比べてレーダー反射率が小さいことが分かる。第 4 ~ 5 段階になると浅く平坦となり、0052 LT には最終的に二層構造が形成されている。しかしこのような KHI の発達・減衰の全段階が観られるのは MU レーダーではまれである。この KH 渦は約 20 m/s/km の北風の南向きシアに伴っており、渦軸方向は略東西で、南方向に伝搬していることが確かめられている。鉛直流 (同図下) の方向は想定される渦回転の向きと符合する。なお周期は 3 分 20 秒で水平波長は約 1 km である。

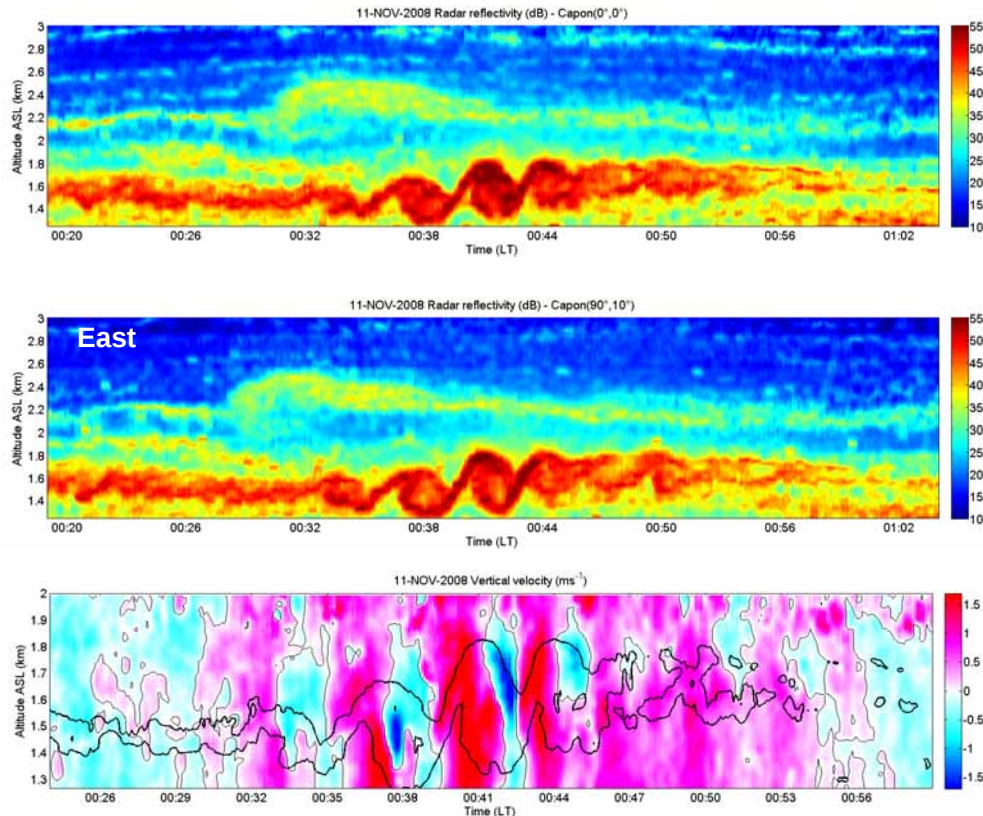


図2 (Top) Height-time section of radar reflectivity between 1.245 km and 3.0 km from 0020 LT to 0105 LT showing several KH rounded billows around the altitude of 1.6 km. (Center) Same as the top panel for the East beam. (Bottom) The corresponding height-time section of vertical velocity W . The contour (black line) shows the 46 - dB reflectivity level.

3.3 典型的な KHI

TANUKI キャンペーンや MU レーダーの通常の観測で図2のような事例が観られるのは極めて稀である。上部対流圏・下部成層圏域では一般に S 字型構造または組紐 (braids) 構造が捉えられることが多い。図3上図は2008年11月10日の事例で高度6.2 km 近傍で捉えられた典型的な KH 波である。この高度域で風シアは 24 m/s/km と大きかった。1212 LT ~ 1231 LT には平均周期 1 分 36 秒の KH 波が計 11 連観られる (同中図)。KH 波の最大振幅は約 1,000 m、水平波長は約 4 km である。KHI が碎波・混合・二層分離という典型的な発展過程を辿らずに、同じ形状の構造まま成長・減衰してゆくことが特徴である。その直下には乱流薄層が存在する。両者の散乱は等方的で、ともに大気が強く乱流混合されていることが示唆される。一方その下方の 3.0 ~ 5.2 km の高度域は分反射が卓越している。TANUKI キャンペーンで捉えられた多くの KH 波は、 Ri が比較的大きく 0.25 に近い。この点が一般のコンピュータシミュレーションの設定と異なる。

KH 波が現れているとき鉛直流 (W) が広い高度範囲 (4 ~ 9 km) で振幅の大きな準単色の振動を伴っている (この事例では最大振幅 $\pm 3 \text{ m/s}$)。またその位相が KH 波の上下で 90° 異なっているのも過去の事例と符号する (e.g., Klostermeyer and Rüster, 1980; Chilson et al., 1997; Luce et al., 2008, 2009)。Howard and Maslowe (1973)によれば位相差は Ri に依存し、 90° は Ri が 0.25 に近いとき生じる。今回の観測結果はこれと矛盾しない。

KHI が観測された頻度は薄層が観測された頻度に比してそれ程頻繁ではない。KHI に起因すると目される組紐構造の出現は高度 1.3 ~ 11.0 km の範囲で全観測期間（約 25 日間）の約 1.7% に過ぎなかった。風シアが強いと言って必ずしも KHI が生起するわけではない。むしろ殆どの場合、風速の鉛直シアが増大する高度と対応しているようである。

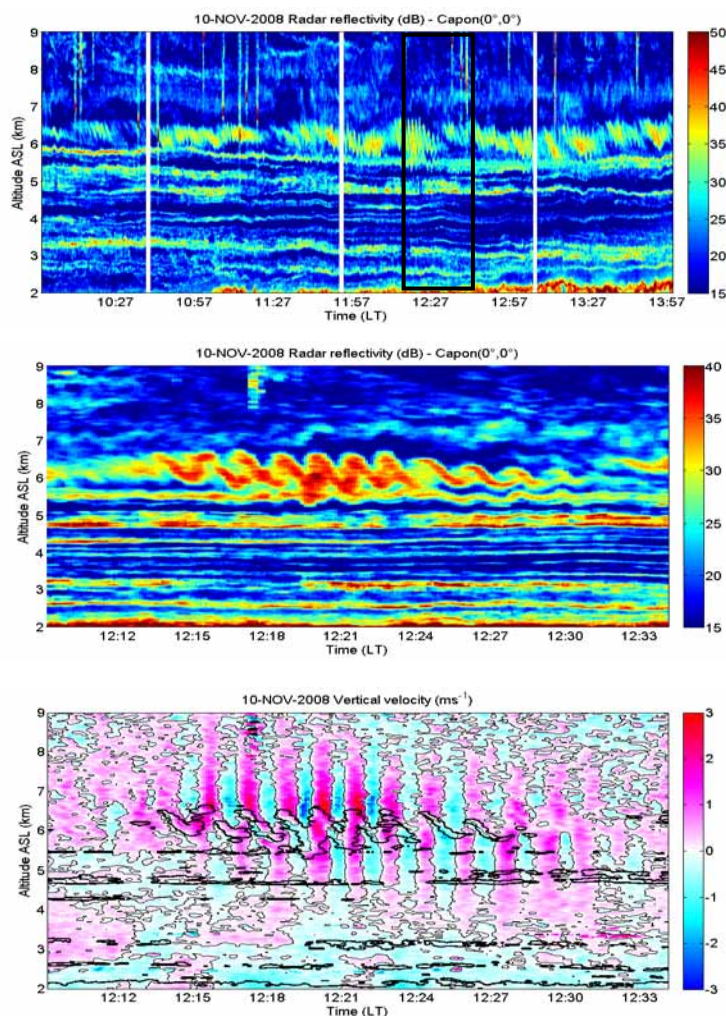


図3 (Top) Height-time cross-section of radar reflectivity between 2.0 km and 9.0 km from 1000 LT to 1400 LT. (Center) The expanded view corresponding to the inset in the top panel. (Bottom) The corresponding vertical velocity. The thick contours indicate the 34 - dB reflectivity level. The thin contours show $w=0 \text{ ms}^{-1}$.

4. まとめ

50 MHz 帯 MU レーダーにレーダー映像法を適用して初めて長期間の高分解能観測が試みられた。捉えられた KHI は確かに様々な構造をしている。いずれも形態的にはこれまで FMCW レーダーや X - 帯レーダーで境界層大気や対流圏中に観られたものに酷似した組紐構造である (e.g., Atlas et al., 1970; Gossard, 1990; Browning, 1971)。

しかし本観測で観られた特徴は、KHI が対流圏・下部成層圏中のあらゆる場所・時間に普遍的に存在するものでないこと、つまり発生頻度が数%以下に過ぎないこと、並びに殆ど

すべての KH 波が、碎波・混合・二層分離という典型的な発展過程を辿らずに、発生したときの組紐構造を保ったまま時間とともに成長・減衰していることである。これは Ri が 0.25 より小さくなると直ちに層不安定が生じて、温度勾配などが緩和され、再び Ri が 0.25 より大きくなることにより、不安定が休止し完全な KHI に発展していないことを示唆するものである。

以上、実際の成層大気中で発生している KHI は実験室やコンピュータのモデルで再現されているものとかかなり異なると示唆される。あるいは薄層構造が KHI の最終段階に現れるものばかりではないのではないかと考えられる。これらの点について今後の更なる検討が必要である。

参考文献

- Atlas D., J. I. Metcalf, J. H. Richter, and E.E. Gossard, The birth of “CAT” and microscale turbulence, *J. Atmos. Sci.*, 27, 903-913, 1970.
- Browning, K. A., Structure of the atmosphere in the vicinity of large-amplitude Kelvin-Helmholtz billows, *Q. J. R. Met. Soc.*, 97, 283-290, 1971.
- Browning, K. A., and C. D., Watkins, Observations of clear air turbulence by high power radar, *Nature*, 227, 260-263, 1970.
- Chilson, P. B., A. Muschinski, and G. Schmidt, First observations of Kelvin-Helmholtz billows in an upper jet-stream using the 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 (2005) .
- Fukao, S., Recent Advances in Atmospheric Radar Study, *J. Meteor. Soc. Japan*, 85B, 215-239, 2007.
- 深尾昌一郎・Hubert 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・講演集, http://www.isas.jaxa.jp/j/researchers/symp/2009/0226¥_taikiken¥_proc.shtml, 2009.
- 深尾昌一郎・Hubert Luce・妻鹿友昭・山本真之・橋口浩之・山本衛, 対流圏・下部成層圏ケルビン・ヘルムホルツ不安定波の形態学的研究, 第 5 回 MU レーダーシンポジウム, 印刷中, 2010.
- Fritts, D. C., C. Bizon, J. A. Werne, and C. K. Meyer, Layering accompanying turbulence generation due to shear instability and gravity-wave breaking, *J. Geophys. Res.*, 108, 8452, doi:10.1029/2002JD002406, 2003.
- 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
- Hassenpflug, G., 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 Sci*, 43, RS2013, doi:10.1029/2006RS003603, 2008.
- Howard, L. N., and S. A. Maslowe, Stability of stratified shear flow, *Boundary-Layer Meteorol.*, 4, 511-523, 1973.

- 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., S. Fukao, F. Dalaudier, and M. Crochet, Strong mixing events observed with MU radar and high-resolution balloon techniques, *J. Atmos. Sci.*, 59, 2885-2896, 2002.
- Luce, H., 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, 1711-1718I, 2008.
- Luce, H., T. Nakamura, M. K. Yamamoto, M. Yamamoto, and S. Fukao, MU radar and lidar observations of clear-air turbulence underneath cirrus, *Mon. Weather Rev.*, In press, 2009.
- Palmer, R. D., T.-Y. Yu, and P. B. Chilson, Range imaging using frequency diversity, *Radio Sci.*, 34, 1485-1496, 1999.
- Sato, T., and R. F. Woodman, Fine altitude resolution radar observations of stratospheric turbulent layers by the Arecibo 430-MHz radar, *J. Atmos. Sci.*, 39, 2546-2552, 1982.
- 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.
- Yamamoto, M., T. Tsuda, S. Kato, T. Sato, and S. Fukao, Interpretation of the structure of mesospheric turbulence layers in terms of inertia gravity waves, *Phys. Scripta*, 37, 645-650, 1988.