

ミリ波ドップラーレーダーで観測された霧のマルチスケール構造

植松明久^{*,**}・山本真之^{*}・橋口浩之^{*}・深尾昌一郎^{*}

^{*} 京都大学生存圏研究所

^{**} 現所属：独立行政法人 情報通信研究機構

要 旨

3次元走査可能な35GHz帯ミリ波ドップラーレーダーによって2000年8月1日に北海道釧路地方で観測された霧の組織化構造について解析を行った。霧は300-600m程度の水平スケールを持つロール状構造と、1.5km程度の水平スケールを持つバンド状構造という2つの異なる水平スケールを持っていた。これら2つのスケールの構造はそれぞれ、ケルビン・ヘルムホルツ(K-H)不安定と大気重力波によって生じていたと考えられる。

キーワード： 霧，ミリ波レーダー，ケルビン・ヘルムホルツ不安定，大気重力波

1. はじめに

霧は一様に分布しているとは限らず，過去の衛星観測 (Welch and Wielicki, 1986, Kurita et al., 1990) やシミュレーション (Nakanishi, 2000) において霧がセル状やバンド状といった組織化構造をなしていることが示され，対流不安定や力学的不安定との関係が議論されている。一方，霧と背景の力学場との関係として，ケルビン・ヘルムホルツ不安定 (K-H不安定: Nakanishi et al., 2000) や大気重力波 (Roach, 1976, Duynkerke, 1991, Richardone et al, 1995) が霧のふるまいに影響を及ぼすことが指摘されているほか，強い風速シアが引き起こすK-H不安定や大気重力波が霧の粒径分布に影響を及ぼす (Nilsson, 1996) ことが指摘されている。しかしながら霧の3次元構造やその動きを捉えることができなかったため，霧の組織化構造と背景の力学場との関係は十分に示されていなかった。

ミリ波レーダーは通常の5-10GHz帯を用いた気象レーダーは観測できない霧の内部構造を観測することが可能である。これまでもビーム方向が固定されたレーダーを用いて北海道釧路地方で霧の観測例が報告されている (柳沢ら, 1986)。本研究では3次元走査可能かつドップラー観測機能を有する

35GHz帯ミリ波ドップラーレーダーを用い，海霧の多発する北海道釧路地方で2000年8月1日に観測されたデータと，函館海洋気象台所属の高風丸より8月1日1時に取得されたラジオゾンデのデータを解析し，K-H 不安定 (Uematsu et al., 2005b) や大気重力波 (Uematsu et al., 2006) に起因する，異なる2つのスケールを持つ霧の構造について解析を行った。

2. 観測概要

観測に使用したミリ波ドップラーレーダーは周波数34.75GHz，ピーク出力100 kW，ビーム幅0.3°で，125mの距離分解能を持つ (Hamazu et al., 2003)。観測の詳細はUematsu et al. (2005a) に記載している。

図1に観測サイトの地図を示す。ミリ波レーダーは北海道白糠町 (図1のRで示した場所，北緯43.00°，東経144.11°，標高46m，海岸線から0.9km) に設置された。ラジオゾンデは釧路港沖に停泊していた函館海洋気象台所属の高風丸 (図1のKで示した場所，北緯42.57°，東経144.19°，レーダーサイトから南東へ12km) から放球された。

3. 2つのスケールを持った霧の構造

図2に、2000年8月1日01時29分にミリ波ドップラーレーダー（仰角 0.0°）で観測された、(a)レーダー反射因子、(b)ドップラー速度（視線方向風速）の水平分布を示す。また図2(c)(d)は(a)(b)の四角で囲んだ部分を拡大した領域を示している。レーダー反射因子の分布を見ると、300-600 m 程度の範囲の間隔を持つロール状構造が存在して南西-北東方向に伸びているのが分かる。また、レーダー反射因子にはロール状構造に加えて東西方向に伸びる1.5 km 程度の間隔を持つバンド状構造が存在している。一方、ドップラー速度の分布を見ると、1.5 km 程度の間隔を持つバンド状構造が存在しているのが分かる。

4. K-H不安定に伴うロール状構造

図3に、ラジオゾンデ及びミリ波レーダーで観測された水平風の hodograph を示す。ラジオゾンデ観測・レーダー観測のどちらにおいても、低い高度で南東風であったものが、高度が上がるにつれて南西風へと変化する傾向がみられる。特に、ラジオゾンデ（レーダー）観測の高度50-60m（80-120m）において、 $50 \text{ m s}^{-1} \text{ km}^{-1}$ を上回る北西-南東方向の風速シアが存在していた。風速シアの方向は、図2(a)(c)で観測された300-600 m 程度の水平スケールを持つロー

ルの長軸方向と垂直であった。

図4に、ラジオゾンデで観測された温度・露点温度、湿位・相当湿位・飽和相当湿位、ブランド・バイサラ振動数の2乗 (N^2)、リチャードソン数 (R_i) の高度プロファイルを示す。但し N^2 , R_i は

$$N^2 = (g/\theta)(d\theta/dz) \quad (1)$$

$$R_i = N^2 / s^2 \quad (2)$$

で表される。 g は重力加速度、 θ は湿位、 z は高度、 s は水平風速の鉛直シアである。 R_i についてはラジオゾンデ単独のデータから求めたプロファイル（実線）と、ラジオゾンデで求めた N^2 とレーダーで求めた風速シアを組み合わせる計算したプロファイル（点線）を併せて示した。高度500m付近に温度逆転層が存在し、逆転層よりも下層において湿位がほぼ一定であることや、 N^2 が小さいことから成層状態はほぼ中立であったと考えられる。一方図3で示した hodograph から強い風速シアが存在していたことを反映して、 R_i はラジオゾンデ単独で求めた高度50-70m、ラジオゾンデとレーダーを組み合わせる求めた高度80-120mにおいて、K-H不安定の必要条件とされている0.25を下回っていた。このことから、観測された300-600 m 程度の水平スケールを持つロール状構造はK-H不安定によって生じたものと考えられる。

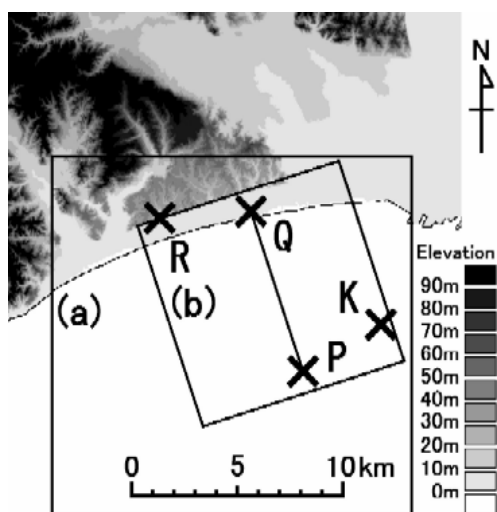


Fig. 1 Topography of the study area. Square (a) shows display area of Figs. 2a and 2b, and square (b) shows display area of Figs. 2c and 2d. R and K show the radar site and the location of the Koufumaru observational vessel, respectively. Line P-Q shows the cross section displayed in Fig. 5. The original topography data are on a 50-m grid derived from a global digital elevation model of the Geophysical Survey Institute of Japan.

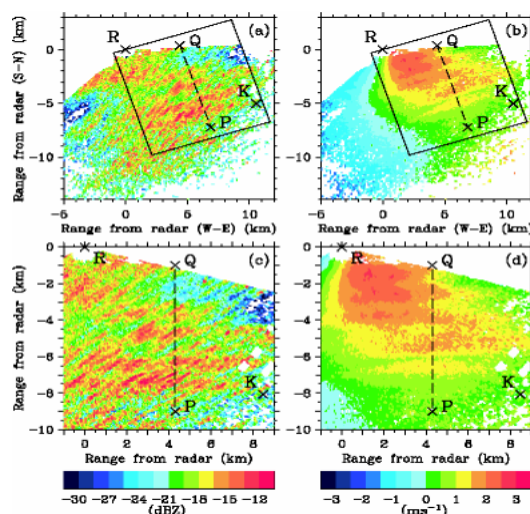


Fig. 2 (a) PPI display of radar reflectivity obtained by the mm-wave radar at elevation angle 0.0° at 0129 LT on 1 August 2000. The square shows the plot area of (c). R and K show the radar site and the location of the Koufumaru observational vessel, respectively. Lines P-Q show the cross section displayed in Fig. 5. (b) Same as (a) but for Doppler velocity. The positive (negative) value indicates direction toward (away from) the radar. (c) and (d) Extracted grid data for the area shown in the squares of (a) and (b).

5. 大気重力波に伴うバンド構造の水平伝搬

図2(d)で示したドップラー速度から 1.5 km スケールのバンド状構造を取り出すため、以下の抽出処理を行った。また、レーダー反射因子(図2(c))についても同様の構造を取り出すため、下記(3)及び(4)の処理を行った。

- (1) 元のドップラー速度（視線方向風速）から、平均風を差し引いた。
- (2) 風速変動に関して、波の伝搬方向（P-Q）に関する成分を計算した。
- (3) 2.0 km より大きな空間スケールの成分を取り除くため、 2.0×2.0 km の移動平均を計算し、元のデータから差し引いた。
- (4) 0.5 km より小さな空間スケールの成分を取り除くため、 0.5×0.5 km の移動平均を計算した。

図5に前述の抽出処理を行った後のレーダー反射因子・ドップラー速度の変動成分を5分毎に示す。レーダー反射因子・ドップラー速度の両方において、左右の方向にバンド状構造が存在していることが分かる。図6に図5のP-Q断面におけるレーダー反射因子・ドップラー速度の変動成分を示す。両者はほぼ

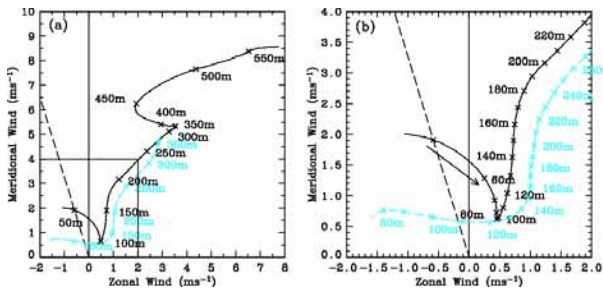


Fig. 3 (a) Wind velocity hodograph obtained by the rawinsonde at 0100 LT on 1 August 2000 (solid line) and radar at 0100-0130 LT on 1 August 2000 (dashed line). The rawinsonde was launched from the Koufumaru observational vessel. (b) Same as (a) but enlarged from the square of (a). Symbols $\times$ show wind velocity at 50 and 10 m altitude intervals in (a) and (b), respectively. The dashed lines show the wind direction at 50 m altitude (based on rawinsonde observation). The arrow in (b) shows the shear vector between 50 and 60 m altitude (based on rawinsonde observation).

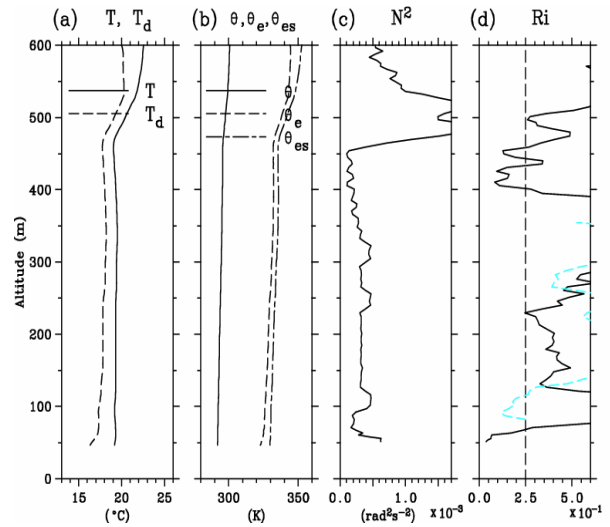


Fig. 4 Altitude profiles of (a) temperature (solid line) and dew point temperature (dotted line), (b) potential temperature (solid line), equivalent potential temperature (dotted line), and saturation equivalent potential temperature (dashed-dotted line), (c) square of the Brunt-Väisälä frequency (N^2), and (d) Richardson number (R_i). (a)-(c) were obtained from the rawinsonde at 0100 LT on 1 August 2000. Solid line of (d) was obtained from the rawinsonde only. Dotted line of (d) was obtained from the combination of the radar wind and the rawinsonde potential temperature.

逆位相の関係にあり、PからQの方向へ伝搬していることが分かる。伝搬方向は図3で示したラジオゾンデ観測における高度50mの風向と同一であり、バンド状構造の長軸方向と垂直である。一方伝搬速度は10分間で 2.5 km 伝搬していたことから 4.17 m s^{-1} であり、周期は 6 分である。また、波の振幅に相当するドップラー速度の変動の大きさは 0.2 m s^{-1} である。

6. 大気重力波に伴う上昇流の見積りと霧水量・レーダー反射因子の増加への寄与

一般に鉛直流は雲や霧の生成・発達・消散に重要な役割を果たす。そこで、線形理論の分散関係式を用い、鉛直振幅 A_w の推定を試みる。波の水平・鉛直波数をそれぞれ k, n 、背景風に相対する周波数を $\hat{\omega}$ 、プラント・バイサラ振動数を N とすると、波数と振動数の関係は

$$n^2 = k^2 (N^2 - \hat{\omega}^2) / \hat{\omega}^2 \quad (3)$$

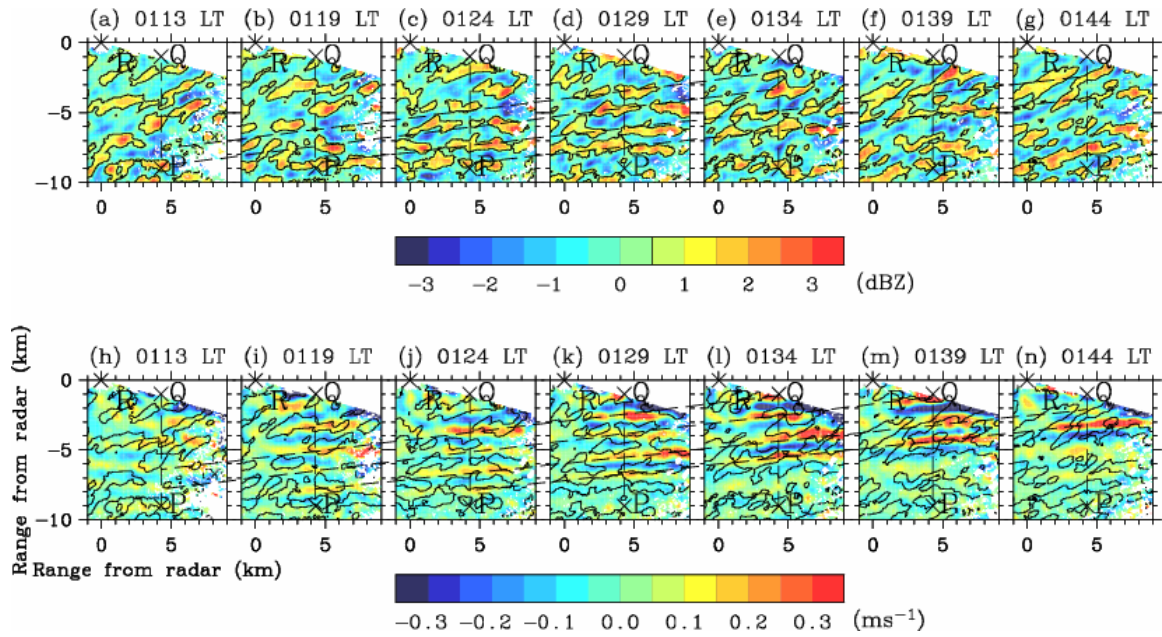


Fig. 5 (a)-(g) Radar reflectivity and (h)-(n) Doppler velocity fluctuations obtained at every 5 minutes at 0113-0144 LT on 1 August 2000. The plot area is the same as for Figures 2c and 2d. R shows the radar site. The positive (negative) sign of a contour value in Doppler velocity fluctuations indicates direction from P toward Q (from Q toward P). Contour lines of radar reflectivity fluctuation of 0.5 dBZ are displayed in (a)-(n). Vertical lines P-Q show the cross section displayed in Figure 6. Horizontal dashed lines show a ridge of radar reflectivity or Doppler velocity fluctuation.

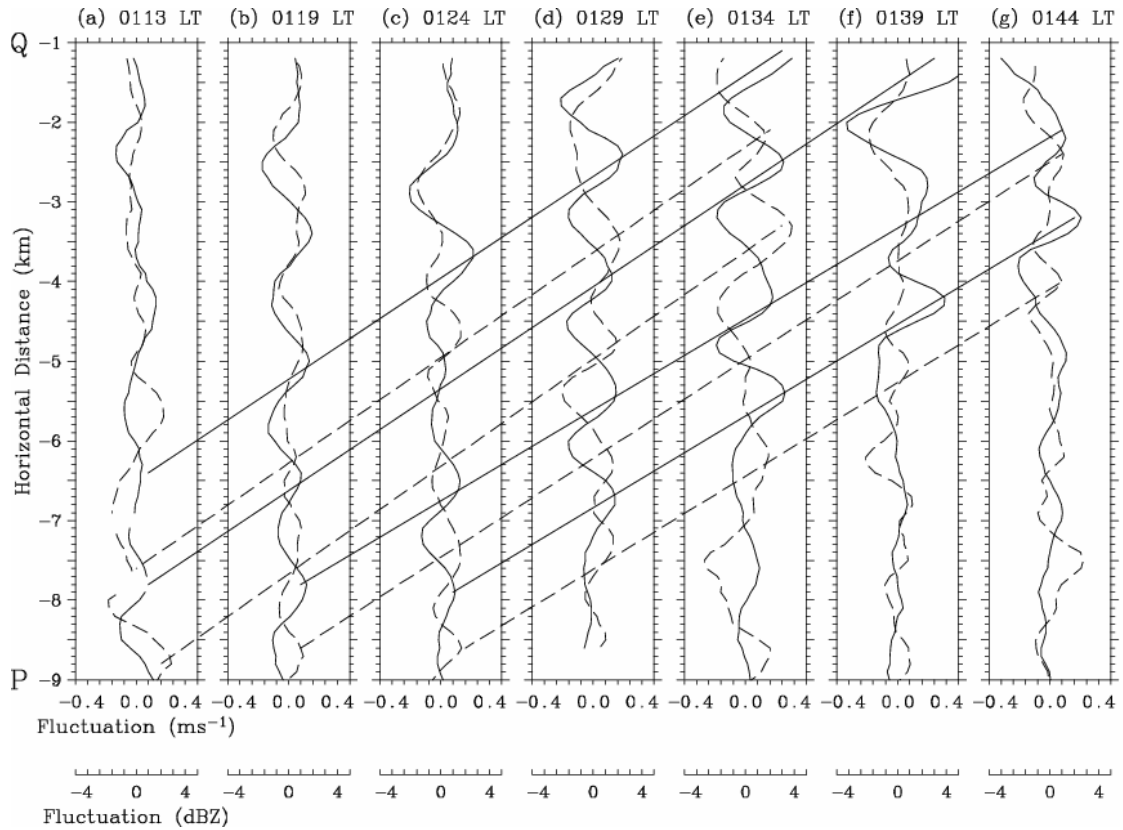


Fig. 6 Cross sections of radar reflectivity (dashed line) and Doppler velocity fluctuations (solid line) along line P-Q in Figures 2 and 5 during 0113-0144 LT on 1 August 2000. Horizontal dashed (solid) lines show a ridge of radar reflectivity (Doppler velocity) fluctuation.

で表される (Gossard and Hooke, 1975)。また、鉛直振幅 A_w は 水平振幅 A_u と k, n で表され、

$$A_w = (k/n) |A_u| \quad (4)$$

である。観測結果から鉛直振幅 A_w を推定した結果、静的安定度の比較的良好な高度 50 m ($N^2 = 6.2 \times 10^{-4} \text{ rad}^2 \text{ s}^{-2}$) において 7.8 cm s^{-1} 、静的安定度が悪く中立成層に近い高度 70 m ($= 1.7 \times 10^{-4} \text{ rad}^2 \text{ s}^{-2}$) において 19.4 cm s^{-1} であった。上昇流によって断熱冷却が生じ、霧が凝結すると仮定すると、高度 70 m において 0.075 g m^{-3} 程度の霧水量の増加と 3.6 dBZ 程度のレーダー反射因子の増加が見込まれ、観測されたレーダー反射因子におけるバンド状構造の生成をある程度説明可能である。

7. まとめ

図7に、異なる2つの水平スケールを持つ霧の構造と、風向・風速シアの方向や大気重力波の伝搬方向との関係を示す模式図を示す。K-H不安定によって生じた 300-600 m 程度の水平スケールを持つロール状構造の長軸方向は、ラジオゾンデで観測された高度 50-60 m における風速の鉛直シア方向と垂直になり、一方大気重力波によって生じた 1.5 km 程度のスケールを持つバンド状構造の長軸方向は、高度 50 m における風向と垂直になっている。また、大気重力波の伝搬方向はラジオゾンデ観測による高度 50 m における風向と同一である。このように、K-H不安定と大気重力波がそれぞれ異なる2つの水平スケールを持つ霧の構造の生成に寄与していると考えられる。

謝 辞

高風丸によるラジオゾンデのデータを提供してくださった気象研究所の山本 哲氏(現 国立環境研究所)、気象庁の赤枝 健治氏に深く感謝いたします。またラジオゾンデ観測を実施してくださった函館海洋気象台に深く感謝いたします。

参考文献

柳沢善治・石原正仁・沢井哲滋 (1986) : ミリ波レーダーによる海霧の観測, 天気, Vol. 33, pp. 603-612

Duynkerke, P. G. (1991): Observation of a quasi-periodic oscillation due to gravity waves in a shallow radiation

fog, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 117, pp. 1207-1224.

Gossard, E. E., and W. H. Hooke (1975): Waves in the atmosphere, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 456pp.

Hamazu, K., H. Hashiguchi, T. Wakayama, T. Matsuda, R. J. Doviak, and S. Fukao (2003): A 35-GHz scanning Doppler radar for fog observations, J. Atmos. Oceanic Technol., Vol. 20, pp. 972-986.

Kurita S., K. Okada, H. Naruse, T. Ueno, and M. Mikami (1990): Structure of a fog in the dissipation stage over land, Atmos. Environ., Vol. 24A, pp. 1473-1486.

Nakanishi, M. (2000): Large-eddy simulation of radiation fog, Bound. -Layer Meteor., Vol. 94, pp. 461-493.

Nilsson, E. D. (1996): Planetary boundary layer structure and air mass transport during the International Arctic Ocean Expedition 1991, Tellus, Vol. 48B, 178-196.

Richiardone, R., S. Alessio, F. Canavero, F. Einaudi, and A. Longhetto (1995): Experimental study of atmospheric gravity waves and visibility oscillations in a fog episode, Nuovo Cimento, Vol. 18C, pp. 647-662.

Roach, W. T. (1976): On some quasi-periodic oscillations observed during a field investigation of radiation fog, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 102, pp. 355-359.

Uematsu, A., H. Hashiguchi, M. Teshiba, H. Tanaka, K. Hirashima, and S. Fukao (2005a): Moving cellular structure of fog echoes obtained with a millimeter-wave scanning Doppler radar at Kushiro, Japan, J. Appl. Meteor., Vol. 44, pp. 1260-1273.

Uematsu, A., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, K. Hirashima, and S. Fukao (2005b): Shear-induced roll structure of fog observed by a millimeter-wave scanning Doppler radar, Geophys. Res. Lett., Vol. 32, L14824, doi:10.1029/2005GL022423.

Uematsu, A., H. Hashiguchi, M. K. Yamamoto, S. K. Dhaka, and S. Fukao (2006): Influence of gravity waves on fog structure revealed by a millimeter-wave scanning Doppler radar, J. Geophys. Res., in revision.

Welch, R. M., and B. A. Wielicki (1986): The stratocumulus nature of fog, J. Climate Appl. Meteor., Vol. 25, pp. 101-111.

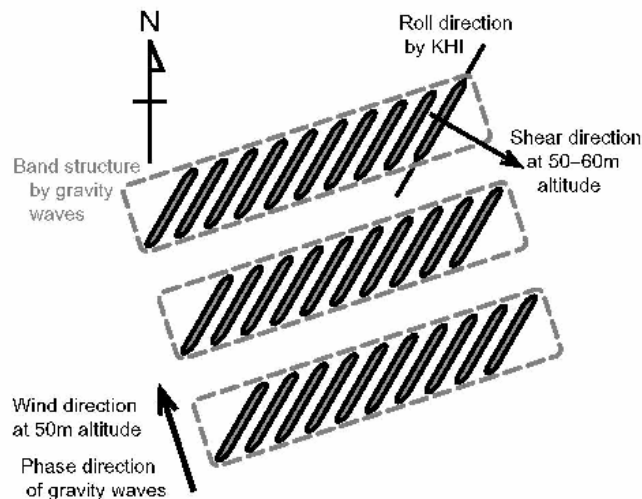


Fig. 7 Schematic chart of the multi-scale structure of fog. Intense regions of radar reflectivity are highlighted.

Multi-scale structure of fog observed with a millimeter-wave Doppler radar

Akihisa UEMATSU****, Masayuki K. YAMAMOTO*, Hiroyuki HASHIGUCHI*, and
Shoichiro FUKAO*

* Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

** Now at National Institute of Information and Communications Technology

Synopsis

Multi-scale structure of sea fog was observed by a 35-GHz millimeter-wave scanning Doppler radar in Kushiro, Hokkaido Prefecture on 1 August 2000. There were two different scales of organized fog structures. One was fine-scale roll at an interval of 300-600 m perpendicular to the shear direction at 50-60 m altitude, and the other was larger-scale band at an interval of 1.5 km perpendicular to the wind direction at 50 m altitude. Two factors, Kelvin-Helmholtz instability (KHI) and atmospheric gravity waves, were cause of the multi-scale structure of fog.

Keywords: fog, millimeter-wave radar, Kelvin-Helmholtz instability, atmospheric gravity waves