## Radar observations of mammatus clouds and turbulence in three frequency bands

深尾昌一郎<sup>1,3</sup>, H. Luce<sup>2</sup>,

妻鹿友昭<sup>3</sup>,山本真之<sup>3</sup>,橋口浩之<sup>3</sup>,山本衛<sup>3</sup>,田尻拓也<sup>4</sup>,中里真久<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 福井工業大学,<sup>2</sup> Université du Sud-Toulon Var<sup>3</sup>京都大学生存圈研究所,<sup>4</sup>気象研究所

要旨 Mammatus clouds(乳房雲)と背景大気乱流を、50-MHz、X-帯および Ka-帯の3波長帯レーダーを同時に用いて観測した。その結果、雲底部の強い風シアが ケルビンヘルムホルツ不安定(KHI)を励起し、それにともなう3 m/s 以上にもな る大きな下降流が乳房雲を生成していることが明らかとなった。この場合、従来考 えられていたように Cloud-base Detrainment Instability (CDI) が乳房雲生成の 必要条件とはならない。

1.はじめに

"Mammatus clouds"は高積雲、乱層雲、積乱雲などの雲底から"袋"状に垂れ下がった 雲で、女性の乳房のような形状から乳房雲と呼ばれている。乳房雲は悪天候時などにしば しば現れる。その存在は既に 20 世紀初頭から知られていながら、レーダーなどを用いた定 量的な観測はようやく近年になって始まったばかりである。そのためその特徴や生成機構 はまだ充分には理解されていない [例えば *Kollias et al.*, 2005; *Schultz et al.*, 2006]。

ひとつの有力とされる生成機構では、雲底で"Cloud-base Detrainment Instability (CDI)"が発生することが契機となる。図1のように乾燥大気の上に飽和湿潤大気(高積雲な ど)がある場合を考える。このとき雲粒子を考慮した相対温位が下層大気のそれより低く なると、雲底部で温位勾配が負になり不安定が発生する。このため雲粒子(氷晶であるこ とを後に示す)が下層に降下(detrainment)し乾燥大気と(乱流)混合する。これが CDI である。氷晶は乾燥大気上層で昇華し、そこの気温を下げる。降下氷晶数が増えるにとも ない一層低温となり負の温位勾配が強められ不安定となる。乾燥大気の上層が冷えること から、(逆さま)対流不安定が発生する。この結果、雲が上昇・下降させられ、下降部の雲 底に袋状の乳房雲が生成されるというものである [Kanak et al., 2008; Luce et al., 2009]。

しかし生成機構は必ずしもこれのみに限らないようである。本稿では最近の観測結果 からシア不安定が生成機構に重要な役割を演じている可能性について論じる。

2.観測

乳房雲の降水粒子を Ka-帯(35-GHz)と X-帯(10-MHz)のレーダーで、一方背景大



図1 CDI を契機とする乳房雲生成機構

気の力学場を 50-MHz 帯 MU レーダーで観測した。 乾燥大気の運動を測定できる MU レー ダーを同時に用いた点が新規である。 MU レーダーの高度分解能を他レーダー並みにする ため、周波数領域干渉計映像法 (RII モード)を適用した [*Luce et al.*, 2006; *Hassenpflug et al.*, 2008]。 また同じ場所でライダーも運用された。

二回の観測キャンペーンがそれぞれ 2008 年 10 月 6 - 18 日および 11 月 4 - 16 日の間 に実施された。本稿では 10 月 8 日早朝に捉えられた乳房雲について論じる。生憎、現象が 発生したのは真夜中で、乳房雲は直接視認されなかった。しかし高度 5~6 km 近傍に X-お よび Ka-帯レーダーで、従来から乳房雲として知られている様態と同一のレーダーエコーが 得られており、乳房雲を捉えたことは間違いない。

なお潮岬および浜松における高層気象観測ならびに気象衛星観測から、この時間帯に MU レーダー上空の中部対流圏に乾燥空気がに流入していたことが分かっている。

3.結果

乳房雲が X-および Ka-帯レーダーにより、高度 3~6 km 域に、午前 4 時頃から約 20 分 間観測されている。同じ時間帯に MU レーダーでも等方的な大気エコーが観測されている (図2)。その位置は X-および Ka-帯レーダーで観測されたものとほぼ同じである。また高 度 3 km 近傍に融解層が観測されていることから、X-および Ka-帯レーダーで、より高層で 観測された乳房雲は氷晶からなるものと考えられる。図 2 の結果は乳房雲の生成にともな い、大気も乱されていることを示す。乳房雲はほぼ 3~4 分の間隔で 4、5 個生成されてい る。その高度の水平風速から乳房雲の水平スケールは 3~4 km 程度、また鉛直スケールは 0.6~1.1 km と推定される。雲底が糸が捩れた (twisted)ような 形状を示しているのはケ ルビンヘルムホルツ不安定 (KHI) によることを示している。

図3は MU レーダーで観測された、乳房雲の上下における背景大気の鉛直流変動を示 す。乳房雲の発生にともない±3m/s以上の上昇・下降流が生成されている。また上下の風 速変動は完全に逆対称(位相差 180 度)になっている。このことからこの上下動は KHI に



図 2 MU レーダーにより観測された乳房雲エコーの高度・時間変化。黒実線は Ka-帯レ ーダーで観測された雲底高度のエコー強度。

起因するものと考えられる。MUレーダーで観測された水平風から風シアを算出すると乳 房雲が生成されている高度5 km 近傍で25m/s/kmを超える値となり、シア不安定が生成さ れていることが示唆される。下降流域が乳房雲エコーの位置に、その間は上昇流域に対応 している。これから下降流が乳房雲を作っているものと考えられる。なお KHI にともなう 臨界層(クリティカルレベル)は認められなかった。



図3 乳房雲の直上下2高度(5.94 km 及び4.24 km)における鉛直流の時間変化

X-帯レーダーで観測された鉛直速度を図4上図に示す。これは氷晶の対地降下速度で あり、氷晶の対大気降下速度と大気鉛直流の和に等しい。全体として下向き速度が卓越し ている。また同時に得られた大気の鉛直流を同下図に示す。実線は X-帯レーダーで観測さ れた0 m/s レベルである。X-帯鉛直速度が正となるのは MU レーダーの上昇流が最大とな る時間帯と一致している。乳房雲の領域で明確な上昇流が認められる。

両図からこの高度(高度約 6 km)における両者の相関を取ったものを図 5 に示す。赤 点は乳房雲が発生している時間帯、黒点は雲内のデータである。乳房雲が発生している間、 氷晶と大気の鉛直速度差はほぼ-1.3 m/s で、これが氷晶の対大気終端速度(terminal speed)



図4 (上) X-帯および(下) MU レーダーにより観測された鉛直速度の高度・時間変化



図 5 図 4 において黒線で示された高度約 6 km における氷晶と大気の鉛直速度の相関。赤 点は乳頭雲の発生時、黒点はそれ以外の時間帯のデータ。

である。この値は雲内でも変わらない。このことから、氷晶は KHI によって生じた大気の 鉛直流により上下に変動を受けていることがわかる。つまり雲内の氷晶が下方へ押し下げ られたところで乳房雲が生成されることになる。

4.まとめ

乳房雲を背景大気乱流とともに、50-MHz、X-帯および Ka-帯の3 波長帯レーダーを用

いて同一場所で観測した。その結果、雲底部の強い風シアにより KHI が発生、それにとも なって大きな鉛直上下流が発生したことが認められた。その下降流時に雲内の氷晶が下降 し、乳房雲が生成されたことが強く示唆される。この結果は、必ずしも常に CDI が乳房雲 生成の必要条件となるのではなく、他の熱力学的・微物理学的な条件下でも生成される可 能性があることを示すものである。

## 謝辞

MUレーダーは京都大学生存圏研究所により所有・運用されている。また X-帯レーダーお よび Ka-帯レーダーは気象研究所が科学技術振興調整費「渇水対策のための人工降雨・降雪 に関する総合的研究」(http://jcsepa.mri-jma.go.jp/)により整備した。両レーダーによる観 測とデータ解析に三菱電機特機システム(株)市山尚・大東雄二両氏の尽力を得たことを 謝す。

## 参考文献

- 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.
- Luce, H., G. Hassenpflug, M. Yamamoto and S. Fukao, High-resolution vertical imaging of the troposphere and lower stratosphere using the new MU radar system, *Ann. Geophys.*, 24, 791-804, 2006.
- Luce, H., T. Nakamura, M. Yamamoto, M. Yamamoto, and S. Fukao, MU radar and lidar observations of clear-air turbulence and mammatus underneath cirrus, Submitted to *Mon. Weather Rev.*, 2009.
- Kollias, P., I. Jo, and B. A. Albrecht, High-resolution observations of mammatus in tropical anvils, *Mon. Weather Rev.*, **132**, 1877-1890, 2005.
- Schultz, D. M., K. M. Kanak, J. M. Straka, R. J Trapp, B. A. Gordon, D. S. Zrnic, G. H. Bryan, A. J. Durant, T. J. Garrett, P. M. Klein, and D. K. Lilly, The mysteries of mammatus clouds: observations and formation mechanisms, *J. Atmos. Sci.*, **63**, 2409-2435, 2006.