

積乱雲の雲頂から飛び上がる巻雲: Jumping Cirrus の観測と定量的解析による特徴

瀬口貴文¹, 岩崎杉紀¹, 鴨川仁², 岡本創³, 石元裕史⁴, 牛山朋来⁵

1.防衛大, 2.学芸大, 3.九大応力研, 4.気象研, 5.土木研

1 はじめに

Jumping Cirrus (JC) とは, Fujita の飛行機観測により撮影・命名された「かなとこ雲から 1-2 km ジャンプする雲」のことである¹⁾. Wang et al. は, 数値実験で, 非断熱過程(重力波の碎波)により JC が発生することを示した²⁾. しかし, JC の定量的な観測がないため, その定義はおろか, 発生条件や規模, 頻度といった基本的な性質も分かっていない.

Setvák et al. は, JC の雲粒の昇華によりオーバーシュートの上の成層圏が加湿される可能性を衛星データによって示した³⁾. これまでは, オーバーシュートは断熱過程が支配的なため, すぐに沈み, 成層圏に物質輸送することはないと考えられてきた. しかし, JC による成層圏加湿の有無がわかれば, 成層圏・対流圏間の水蒸気輸送の機構が明らかになり, より正確な成層圏の水蒸気量の推定に寄与することが期待される.

本研究は, カメラ撮影により JC を観測し, その形態・特徴を定量的に理解することを目的とする. さらに, 衛星やラジオゾンデ等のデータを用いて当時の大気状態を解析し, 発生条件や成層圏の加湿の有無を明らかにすることを目的とする.

2 観 測

2016 年の 7・8 月の間, 富士山頂と防衛大学校の屋上(横須賀市)に 3 台ずつ可視カメラを設置して, 15 秒間隔で定点パノラマ撮影を続けた. 表 1 にカメラとレンズの仕様を示す. 本カメラでは, 1 ピクセルのずれが, 100 km 離れると数十 m 程度になる. 観測範囲は富士山・防衛大を基点に, 概ね北西(石川県・能登半島)方向から北東(千葉県・銚子)方向の間をカバーしている.

2016 年は合計で 19 件の JC が撮影出来た. 図 1 はその一例である. 両観測点から同一の JC を捉えられなかったため, ステレオ解析により JC の位置をピンポイントで特定することはできなかった.

2017 年の夏季には, カメラを 3 台増やして, より広範な観測を実施した. それらのデータは現在解析中である.

表 1 カメラとレンズの仕様 (USB3.0 規格)

カメラDMK24UJ003 (IMAGING SOURCE)		レンズVS-1214H1 (VS Technology)	
解像度	3856×2764 (1000万画素)	焦点距離(35mm換算)	67mm
階 調	8 bit (モノクロ)	画 角	36°(29°×22°)
ピクセルサイズ	1.67μm×1.67μm	ディストーション	-0.52%

3 解 析

まず, 夜間に撮影した写真上の星の位置情報を調べ(星図ソフト, ステラナビゲータ Ver.10, AstroArts 社を使用), 各ピクセルの方位角と仰角(図 1 のグリッド線)を導出し, JC の方位角と仰角を求めた.

次に, ひまわり 8 号のデータによる近い時刻の赤外輝度温度分布(図 2)を確認し, 図 1 で求めた方位角方向に存在する発達した積乱雲を特定して観測点との直線距離を求めた. これと図 1 で求めた仰角を組み合わせる JC の高度を見積もることができる. ただし, JC 自体は衛星から見えないため, 最も対流が発達していると考えられる最低温度の位置を使って直線距離を求めている.

最後に, 茨城県つくば市館野のラジオゾンデのデータを用いて, JC 発生時付近の大気状態を確認した(図 3).

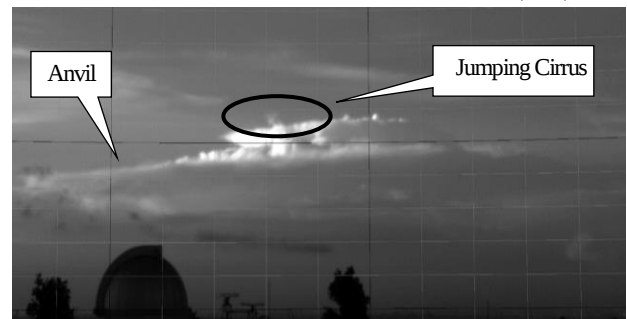


図 1 栃木県鹿沼付近で発生した積乱雲と JC. 2016 年 8 月 4 日 18 時 18 分, 防衛大から撮影. この事例では方位角-3.5°方向に JC が発生. かなとこ雲から 1.3 km ジャンプして高度 16.8 km に達し, 図 3 に示す CPT を越えている.

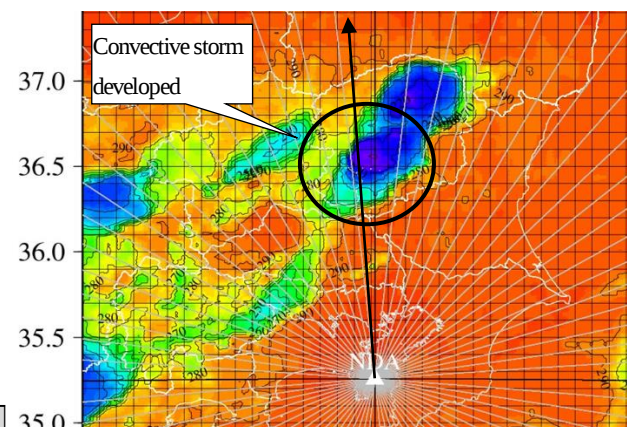


図 2 ひまわり 8 号による赤外帯 (13 ch, 10.4 μm) の輝度温度分布. 2016 年 8 月 4 日 18 時 20 分. 観測点を中心に放射状に 5°毎に方位角を付記. グリッド線は経緯度, 色は温度を示す. 矢印は図 1 で求めた方位角-3.5°方向. 最低温度部は 210 K で観測点から 143.5 km の位置.

4 考察

4.1 JCの特徴

2016年の19件のJCの空間スケールと、当時の大気状態の平均値を表2に示す。JCの到達高度が17 kmを超える事例もあった。

表2 JCの空間スケールと大気状態の平均値

	かなとこ雲	JC
高度	13.3 km	14.6 km
幅	24.8 km	1.4 km
ジャンプ高		1.2 km
雲頂の輝度温度	228 K	
大気状態		
圏界面高度	CPT 17.14 km / DT 16.98 km	

Wang et al. の報告²⁾では、3D 非静力学雲モデルを使って、米中西部で1981年8月に発生した積乱雲をシミュレートした結果、JCの到達高度は約15 kmであった。本観測結果はこれとよく一致する。また、オーバーシュートが沈んだ後に飛び上がるJCは、周囲の風向(西風)に逆らってオーバーシュートした方向向かうという報告通りの特徴を示す事例もみられた。数値実験では、水平スケールには言及していないが、どの程度の規模(対流の強さや、かなとこ雲の大きさ)の積乱雲であればJCが発生できるかは定性的にもわかっていない。

館野のゾンデの気温の鉛直分布と比較すると、3件が対流圏界面(DT: Dynamic Tropopause または CPT: Cold Point Tropopause のいずれか)に達していた(図1~3の事例を含む)。それらの事例では、CAPEが他の事例に比べて大きく、対流が活発であったと考えられる。

一方で、対流が弱くJCの到達高度が圏界面より低い場合でも、風速が急減している高度でJCが発生している事例が15件あった(図1~3の事例を含む)。この場合、該当高度に存在するCritical Layerにおいて重力波が破碎している可能性が高い。このことからJCの発生には風速の鉛直シアが重要であると考えられる。

4.2 大気差

地球の大気圏内を伝播する電磁波は、大気による光の屈折(大気差)の影響を受ける。本観測に使用したカメラも例外ではなく、写った星の位置は実際より浮き上がり高い高度にあるように見えている。したがって、これを基に作成したグリッドでは観測対象が低く写る。この大気差を補正してグリッドをつけると、実際は本結果より100 m程度高度が高くなると予想される。当日は補正後の結果をもって発表する予定である。

5 今後の展望

時空間スケールの把握のため、発生から消滅までの所要

時間と成長速度を求める。また、ひまわり8号のデータは赤外帯だけでなく、可視画像も確認してJCを含む積乱雲の形態を見る。JCは氷粒を含むため、3.9 μm 帯で雲相を確認する。さらに、水蒸気吸収帯である6.2 μm 帯と赤外帯の輝度温度の差分画像を求め、対流の上部の水蒸気の有無を調べる³⁾。

JCの発生機構としては、対流の十分な発達にかかわる断熱過程だけでなく、重力波が壊れる非断熱過程が重要であると考えられるため、風速のプロファイル及び大気安定度にも注目して解析をする予定である。

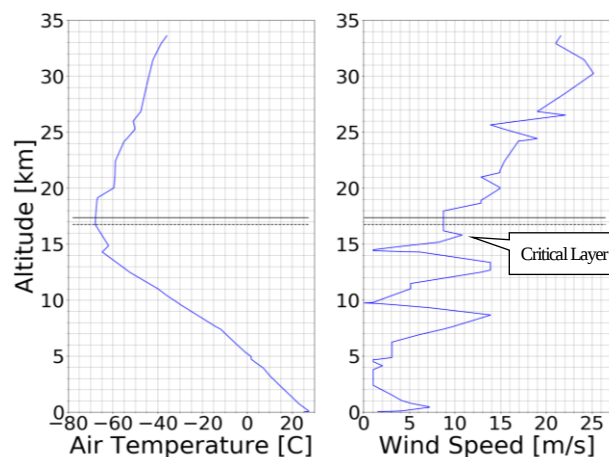


図3 館野における気温(左)と風速(右)の鉛直分布。2016年8月4日21時。雲の場所とは100 kmほど離隔。実線・破線はDTとCPTの高度をそれぞれ示す。本事例では、DT=17.37 km, CPT=16.77 km。CAPE値は782.3。

謝辞

本研究は、認定NPO法人「富士山測候所を活用する会」が富士山頂の測候所施設の一部を気象庁から借用管理運営している期間に行なわれた。また、本研究の一部に九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を頂いた。

参考文献

- 1) Fujita, T. T., 1982: Principle of Stereoscopic Height Computations and their Applications to Stratospheric Cirrus over Severe Thunderstorms. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **60**, 355-368.
- 2) Wang, P. K., S. H. Su, Z. Charvát, J. Št'ástka, H. M. Lin, 2011: Cross Tropopause Transport of Water by Mid-Latitude Deep Convective Storms: A Review. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **22**, 447-462.
- 3) Setvák, M., D. T. Lindsey, R. M. Rabin, P. K. Wang, A. Demeterová, 2008: Indication of water vapor transport into the lower stratosphere above midlatitude convective storms: Meteosat Second Generation satellite observations and radiative transfer model simulations. *Atmos. Res.*, **89**, 170-180.