

論文の内容の要旨

1 申請者

防衛大学校 瀬口 貴文

2 論文題目

The Analyses of Jumping Cirrus with Ground-based Observations

(地上観測によるジャンピング・シーラスの解析)

3 論文の内容の要旨

ジャンピング・シーラス (Jumping Cirrus, 以下 JC) とは、発達した積乱雲のかなとこ雲上部で飛び上がるように発生する薄い雲の現象である。3次元非静力学雲モデルを使用して、大規模積乱雲を理想的な条件下で再現した数値計算によると、深い対流を伴う積乱雲で、強い上昇流により隆起する雲頂（オーバーシュート）が沈み、それによって誘起される大気重力波の碎波により JC が発生し得ることが示された。衛星による観測では、オーバーシュートを伴う積乱雲の上部が湿っていることが示唆されている。したがって、オーバーシュート後に発生する JC が積乱雲上部に水蒸気を輸送し、下部成層圏を加湿する可能性がある。成層圏の水蒸気量は微量であるが、温室効果ガスとして気候変動に影響することが知られており、JC の実態の解明が気候変動予測の向上に寄与することが期待される。

しかしながら、実際の観測事例が少なく、JC の時空間スケールや発生時の環境場といった解析がほとんどない。そのため、JC は発生条件や規模、頻度といった基本的な性質さえ、いまだ十分に解明されていない。これは、JC が光学的に薄く、観測が困難である点に起因する。例えば、衛星搭載のイメージャーでは鉛直方向のデータがなく JC を解像できない。衛星搭載レーダーやライダーでは定点観測ができないため JC の瞬間を捉えられる可能性が低く、運よく捉えたとしても連続的な変化を追うことができない。そこで本研究では、雲の水平鉛直方向の時間発展を高頻度で追える地上可視カメラを中心に用いて、複数の JC を観測した。その情報をもとに、静止気象衛星ひまわり 8 号、ラジオゾンデ、地上気象レーダーを併用して、JC の時空間スケールや JC 発生時の周囲の環境の状態、JC を発生させた積乱雲の降水特性を解析し、JC の特徴を観測に基づいて明らかにした。

可視カメラによる地上観測では、2016-2018 年の夏季の間、富士山頂および防衛大学校にそれぞれ複数台のカメラを設置し、関東周辺域を対象とする定点パノラマ撮影を実施して、合計 28 件の JC を検出した。その時空間分布を調べると、積乱雲の発生しやすい午後に山間部での発生事例が多く、積乱雲発生の好条件と整合的であることから、JC は発達した積乱雲に対して普遍的な現象であることが示された。可視カメラによる形態観察からは、JC は一部が昇華して消えていく様子が確認でき、積乱雲上部への水蒸気輸送を示唆していると考えられる。一方、ひまわり 8 号が搭載する多波長スペクトルイメージャーの赤外バンド 13 (大気の窓に当たる $10.4 \mu\text{m}$ 帯) および可視バンド 3 ($0.64 \mu\text{m}$ 帯) の画像では、JC や強い対流に

特有の兆候などは見られなかった。

次に、高度や水平幅、鉛直速度、持続時間といった JC や積乱雲の時空間スケールに加え、JC 発生時の大気の状態、降水特性を調査し、本研究の全 28 件に対するそれらの平均的な特徴を、先行研究の米国のスーパーセルで発生した JC の事例と比較した。本研究では、上昇流の強さの指標となる対流有効位置エネルギー (CAPE)、および重力波の砕波に重要な指標とされるかなとこ雲上部の鉛直シアが小さく、JC のもとである積乱雲とかなとこ雲の規模自体が小さなシングルセル、またはマルチセルの積乱雲であった。一方で、水平スケールを除く JC のパラメータ、高さ、持続時間、鉛直速度は先行研究と同程度の値を示した。つまり、JC は比較的弱い対流からも発生するといえる。JC の発生に影響する要因を探るために、上述の各パラメータの相関を調べたが、JC とオーバーシュート、周囲大気のいずれの間にも良い相関はみられなかった。

館野のラジオゾンデによるサウンディングから算出した圏界面高度と JC の高度を比較すると、全 28 件中 6 件が成層圏に到達したことが示された。一方で、ひまわり 8 号のバンド 8 (6.2 μm , 水蒸気吸収帯) とバンド 13 の輝度温度差を利用した解析では、かなとこ雲上部の下部成層圏の水蒸気層を検出することはできなかった。これは、かなとこ雲上部の温度勾配が小さかったか、かなとこ雲上部に検出されるほど十分な量の水蒸気がなかったためであると考えられる。また、かなとこ雲が圏界面に到達していなかったため、上部を加湿しても、そこが上部対流圏だった可能性も考えられる。算出した JC の幅と高さから、その体積を概算し、先行研究の成層圏雲の氷雲量 0.2-0.8 mg m^{-3} をかけあわせると、本研究の JC は平均して 2.6-10.5 ton の水蒸気をかなとこ雲上部に輸送しているの見積もられる。

C バンドドップラーレーダー、X バンドマルチパラメータレーダー (XARIN)、およびフェーズドアレイ気象レーダー (PAWR) で観測された JC 発生前後の積乱雲による地上推定雨量は、5 事例を除いて 100 mm h^{-1} を、全事例で 50 mm h^{-1} を超える値を記録し、JC を発生させる積乱雲は激しい降水を伴うといえる。JC の発生時刻と地上雨量のピークは、いずれかが先に現れる割合がおおむね半分であり、両者に有意な関係はみられなかった。また、PAWR のレーダー反射因子とドップラー速度の 3 次元分布を確認したが、JC は測定されなかった。これは高高度に存在する JC を構成する粒子が X バンドではとらえられない微小な雲氷であることを示している。

本研究は、世界で初めて、地上可視カメラ観測に基づいて複数の実事例の JC の時空間スケールや発生時の環境場を解析したものである。さらに、JC 発生時の大気状態の解析により、米国や欧州といった異なる地域の事例に比べて対流が弱い条件下でも、JC が発生し得ることを明らかにし、JC が普遍的に存在する可能性を示した。よって本研究は、JC の形態的な特徴や発生条件を観測によって世界で初めて示し、JC の理解を進展させたといえる。

4 キーワード

ジャンピング・シーラス、オーバーシュート、かなとこ雲、積乱雲、地上観測