

スーパーセル型雷雲に伴う竜巻の発生過程と構造に関する数値シミュレーション

A numerical simulation on the genesis and structure of a tornado spawned by a supercell storm

野田 暁[1], # 新野 宏[2]

Akira Noda[1], # Hiroshi Niino[2]

[1] 東大海洋研, [2] 東大・海洋研

[1] Ocean Research Institute, Univ. of Tokyo, [2] Div. of Marine Meteor., Ocean Res. Inst., Univ. of Tokyo

竜巻は大気中の最も激しい渦である。最新の観測によれば、強い竜巻の最大風速は秒速 142m にも達することがわかってきた。このような竜巻に襲われると、町は廃墟と化し、多くの犠牲者が出る。アメリカでは、竜巻によって毎年 80 人近くの人命が失われており、その研究は熱心に行われている。しかしながら、竜巻の水平スケールは 100m 程度と小さく、平均寿命も 10 分程度と短いために、その詳細な構造や発生過程の観測は容易ではなく、未だに解明が進んでいるとはいえない。

現在のところ、竜巻には 2 つの異なった発生機構があると考えられている。1 つは局地前線に伴うもの、もう 1 つはスーパーセルという特殊な積乱雲に伴うものである。前者についてはかなり理解が進んできているが、強い竜巻を生ずることが多い後者については未知の部分がまだ多く残されている。

地球科学においては、観測の難しい現象の解明には数値シミュレーションが有効であることが多い。しかしながら、竜巻を生み出すスーパーセルの水平スケールは 20km 程度なので、その振舞を現実的に表現するには、これより十分大きな計算領域を必要とする。一方、竜巻は直径 100m 程度の渦であるので、これを適切に表現するためには数 10m の水平解像度が必要となり、非常に大規模な計算が必要となる。このため、これまでスーパーセルに伴う現実的な竜巻のシミュレーションは数えるほどしか行われておらず、竜巻の発生機構と構造は明らかになっていなかった。ここでは、これまでにない高分解能でスーパーセルの再現を行い、竜巻の発生機構と構造を明らかにした結果について報告する。

用いた数値モデルは、準圧縮非静力学メソスケールモデル (ARPS Ver. 4.5.1, Xue et al., 1995) である。計算領域は水平方向に 66.4km×66.4km、鉛直方向に 15.1km の直方体で、水平方向の格子間隔は一律で 70m、鉛直方向は可変で、地表面付近の 20m から上空に行くほど増加し、モデル上端では 760m とした。モデルの初期場は、1977 年 5 月 20 日にアメリカ・オクラホマ州で竜巻を伴うスーパーセルが発生した際の環境場の風速・温度・湿度の鉛直分布の高層観測データを水平一様に与えた。対流を発生させるためには、水平方向に半径 10km、鉛直方向に半径 1.5km の回転楕円体型の温度擾乱 (最大振幅 4K) を、計算領域中央の高度 1.5km に置いた。水平境界は開放、上下の境界面は free-slip とした。実時間で 3 時間分の計算を行うのに、東京大学海洋研究所の IBM-Regatta の 16 ノードによる並列計算で約 720 時間を要した。

計算を開始して、35 分が経過すると、ストームの南東部に直径数 km のメソサイクロンと呼ばれる反時計回りの循環が形成され、これによる降水粒子の移流で、フック (鉤針) 状の降水粒子の分布が見られるなど、観測されるスーパーセルの特徴を備えたストームが形成された。60 分を過ぎた頃から、高度 2km 付近で気圧が下がり始め、これに伴い、高度 1km ~ 4km にかけて、急激に上昇流が強まった。圧力場の解析から、この気圧低下は、鉛直シアのある水平流とストームの上昇流の相互作用によって生じたことがわかる。強化された上昇流が水平風の持つ鉛直シアに伴う水平渦度を立ち上げ、上昇流で引き伸ばすために、65 分を過ぎると、高度 800m 付近で一段と大きな鉛直渦度を持ったメソサイクロンが形成され、これに伴う更に大きな気圧低下が生ずる。この気圧低下のために、高度 1km で秒速 40m を越える上昇流が生ずるようになる。一方、地表面近くでは、ストームの降水域から吹き出す冷気と環境場の暖湿な空気との間に突風前線が形成されており、この前線付近では大きな水平シアのために、シア不安定で生じた鉛直渦が多数存在している。ほとんどの鉛直渦はあまり発達することなく衰弱するが、上述の強い上昇流の近くに位置した鉛直渦は、上昇流による引き伸ばしを受けて急激に発達し竜巻へと発達した。このような竜巻の発生機構を明示した研究はこれが初めてである。この竜巻は、明瞭なロート雲を伴い、渦の強化と共にロート雲が地表面近くまで下降し、衰弱と共に上空に帰っていくという観測される特徴を良く再現していた。更に、竜巻を含むメソサイクロン周辺の水平風と降水粒子の分布も、ドップラーレーダーによる観測と驚くほど類似していた。

再現された竜巻の詳細な解析から、竜巻の構造に関する多くの知見が得られた。一例を述べると、竜巻はこれまでの観測から指摘されてきたように上昇流と下降流の境目に位置していたが、渦度収支の解析から、上昇 (下降) 流で引き伸ばさ (縮めら) れて、増大 (減少) した鉛直渦度が、水平移流により下降 (上昇) 域に運ばれることにより、軸対称構造が維持されることが明らかになった。