

学位論文の要約

粗面上における竜巻状渦の強度および構造に関する研究

佐藤 宏樹

第1章 序論

竜巻は、人間の生活圏において最も激しい風を伴う大気現象である。たとえ比較的弱い竜巻であっても、人命や建造物などに対して被害をもたらす。わが国で報告される竜巻は多くが海岸線付近に分布しており、その中には海上で発生したのちに上陸するものも一定数みられる。その際、比較的弱い竜巻は上陸後すぐに衰退するものの、強力な竜巻は上陸後しばらく持続するということが指摘されている。このような、平坦な地表面上で発生した竜巻が粗い地表面上へと移動する際における変化について、地表面摩擦が竜巻に及ぼす影響という観点から考察することが、本論文の主な目的である。

竜巻は積雲対流に伴い発生する現象であるが、その中で最も大きな風速をもつ主要部は、地表面付近に摩擦的に形成された境界層に由来するものである。マイソサイクロンまたは下層メソサイクロンなどの竜巻より1段階大きな旋回気流に対応する構造を理想化して境界条件とし、その内部で竜巻状の渦を発生させる Ward 型装置などの実験装置、およびそれを数値的に再現したものを用いた研究により、地表面付近における竜巻の気流構造について調べられてきた。そのような既往研究では、地表面の粗度および渦の地表面に対する相対運動によって渦の強度と構造が変化するという結果が得られていた。ただし、個々の研究では実験設定の範囲が限られていた。個々の実験設定に依存した結果がそれぞれ報告されてきたものの、粗度や移動速度を様々に変えた場合に対する渦の応答についてはよく知られていなかった。そこで本論文では、粗面上における竜巻状渦の強度および構造に関するより一般的な描像を得るため、粗度要素の幾何学的配置および相対運動速度を様々に変化させて数値計算を行った。

第2章 数値計算の手法

本論文で興味の対象とする流れは、地表面付近におけるマッハ数 0.3 未満の気流である。そのため、非圧縮流れとして竜巻状の渦を数値的に再現することにした。計算には、有限体積法の数値流体解析プログラムである OpenFOAM (OpenCFD 社) の *pimpleFoam* ソルバを使用した。乱流モデルとしてはラージエディシミュレーションの手法を採用した。また壁面近傍に形成される格子解像度以下の薄い境界層を表現するために、壁関数を使用した。

第3章 粗面上に静止した竜巻状渦の準定常状態における強度と構造

竜巻状の渦の気流の形態と強度は、スワール比とよばれる無次元量により変化する。領域の寸法や流入条件をそろえたうえで平坦面上および粗面上で竜巻状渦を発生させた場合、粗面上で形成される渦は平坦面上で形成された渦よりも低いスワール比に対応する形態を呈することが先行研究により調べられてきた。しかし、そうした研究では粗度要素の配置が数通りでしか調べられていなかったため、どのような粗面が竜巻に対して大きな影響をもたらすのか、また粗度が竜巻の強度を変化させる詳細な力学的機構はどのようなになっているかといったことまでは解明されていなかった。そこで第3章の研究では、粗度要素の配置密度および高さを体系的に変化させた数値計算により竜巻状の渦を作成し、得られた渦の強度と構造を比較することで、粗度が渦の強度と構造を変化させる機構の詳細を調べた。

計算領域は、底面の半径 544 m、流入域の深さ 500 m、全体の高さ 2000 m の円筒型をしている。計算領域の底面に、1 辺 16 m の直方体を底面とする粗度要素を格子状に配置した。その水平面内の配置密度 (λ_p)、すなわち領域底面積に占める粗度要素の底面積の割合は 0.016、0.032、0.250、0.444 の 4 通りで変化させ、さらに粗度要素の高さ (h) は 8 m、16 m、32 m、64 m の 4 通りで変化させた。これらの組からなる 16 通りの粗度要素の配置のほか、粗度要素をまったく配置しない設定 (NOBLOCK) を含めて、計 17 通りの粗度配置を設定した。

領域下部側面には、Natarajan and Hangan (2012) を参考に設定した流入風を与えた。流入風の動径成分は高度の $1/7$ 乗に比例しており、接線成分は動径風速に外部スワール比 (S_E) と領域の形状比をかけたものとなっている。外部スワール比 S_E については 0.28、1.0 の 2 通りで変化させた。計算された渦が準定常状態に達した後、180 秒間の時間平均を施し、これをさらに円筒軸まわりに方位角平均した場を求めた。これを解析の対象とした。

まず、外部スワール比 S_E が 0.28 の場合、NOBLOCK の設定では中心軸が下降流からなる 2 セル渦の構造が形成された。十分な配置密度または高さで粗度要素を配置した場合、中心軸が上昇流からなる単セル渦へと気流形態が変化することが確認された。このことは、粗度の導入は渦のスワール比の低下をもたらすものとした多くの先行研究の結果と整合的である。粗度要素の高さ h の等しい実験間を比較すると、配置密度 λ_p が中程度の値 0.25 の場合に最も最大接線風速が低下した。一方、配置密度 λ_p が同じ実験間を比較すると、粗度要素の高さ h を大きくするほど最大接線風速が低下した。

粗度を導入した場合、角運動量の低下した流体層が底面近傍に形成され、これが渦の中心軸付近へと流入することになる。その量について、損失角運動量流束 (Υ) により調べた。背の高い粗度要素を中程度の配置密度でならべた場合、粗度要素の間隙から上の流れ場に供給される Υ が大きくなる。渦の断面において求めた Υ が大きい場合ほど最大接線風速が小さくなっていた。このことから、渦の断面における角運動量の低下が最大接線風速の低下と関連しているものと考えられる。

外部スワール比 S_E を 1.0 にした場合、NOBLOCK の設定では多重渦の気流構造が現れた。これに時間平均および方位角平均を施すと、2 セルの気流形態となった。外部スワール比 S_E が 1.0

の場合についても、粗度要素を導入すると中心軸が上昇流からなる気流形態の渦が形成された。この気流形態の変化は、外部スワール比 S_E が 0.28 の場合よりも背の高い粗度要素を導入した場合に、より大規模な構造において生じた。外部スワール比 $S_E = 1.0$ の渦については、粗度要素の高さを 64 m まで変化させても最大接線風速があまり変化しなかった。

粗度の影響を受けた渦の角運動量分布と、渦の最大接線風速及びそれが現れる位置との関係について考察した。竜巻の動径-鉛直断面では、下層において遠方から流入した気流が中心軸付近で鉛直に折れ曲がることで形成されるコーナー流構造が幾重にも重なっている。これは、L 字型をした角運動量の等値線により縁取られている。軸対称的な渦において、最大接線風速はその位置における動径方向の角運動量勾配と一致する。これにより、多重のコーナー流構造において、角運動量の等値線が密になった部分に最大接線風速が現れることになる。この部分をコーナー流の主要階層と呼ぶことにする。粗度要素を導入すると、内側からコーナー流が乱されていくことになる。主要階層に対応するコーナー流構造が直接的に乱された場合、コーナー流の主要階層は外側の階層へと切り替わる。一方、コーナー流の主要階層よりも内側において粗度要素の配置を変化させた場合、主要階層自体は大きく変化せず、構造全体が膨張して強度変化するような変化を見せる。

外部スワール比が高い場合にできる大規模な渦は、NOBLOCK において形成されたコーナー流の主要階層が大規模であったため、高さ 64 m までの粗度要素を導入してもそれを直接的に乱すに至らず、したがってあまり大きな強度変化が見られなかったものと考察される。

以上のように、第 3 章の研究によって竜巻状渦の強度を大きく変化させる粗度要素の配置が明らかとなり、その原因について角運動量分布をもとにした解釈を与えることができた。

第 4 章 竜巻状渦が平坦面上から粗面上へと移動する際における強度と構造の変化過程

第 3 章の研究により、粗面上に静止した竜巻状の渦の準定常状態に対して粗度が与える影響についてはよく理解された。一方、現実の水上竜巻の上陸過程などを考えると、竜巻が平坦面上で発生した後に粗面上へと移動することになる。第 4 章の研究では、このような場合における渦の強度・構造変化の過程を明らかにすることを目的として、理想的な数値計算を行った。

計算領域は、円筒域と可動域の 2 つの部分により構成される。円筒域は、第 3 章の計算領域を基本にしつつ若干の改良を加えたものとなっている。円筒域下部側面に与える流入風分布の外部スワール比 S_E は、0.12 および 0.28 という 2 通りで変化させた。可動域は、地表面付近を表す板状領域である。可動域の左側は粗度要素を配置していない平坦面となっており、右側は粗度要素を配置した粗面となっている。円筒域の底面と可動域の上面は、その接触部における場の量をガラーキン射影法により計算する境界条件 (OpenFOAM の *CyclicACMI* 境界条件) により接続した。円筒域を固定し、その下で可動域を一定速度で移動させることで、地表面に対する竜巻の相対運動を表現した。円筒域と可動域の相対運動の速さ c は、低速 (1.6 m s^{-1})、中速 (8 m s^{-1})、高速 (16 m s^{-1}) の 3 通りで変化させた。さらに底面の粗度配置は NOBLOCK を含む 5 通りで変化させた。

相対運動の速さ c が 1.6 m s^{-1} の場合、渦が粗面上に到達後に短距離を移動する間に、渦の強度と構造が変化した。特に、 $S_E = 0.12$ の渦を、配置密度 $\lambda_p = 0.25$ で高さ $h = 16 \text{ m}$ の粗度要素を配置をした粗面上に移動させた場合、下層における渦の強度が大きく低下したことで、上層から下層までつながった低圧部が見られなくなった。平坦面上から粗面上へと切り替わる境界を通過する際の変化を除くと、移動中の渦の強度と構造はほぼ一定であった。渦の位置が平坦面上から粗面上へと移動する間に損失角運動量流束 (Υ) が増大していたことから、この変化は、第3章に示した粗面上に静止した渦の粗度による強度・構造変化に近いものであるといえる。

相対運動の速さ c が 8.0 m s^{-1} の場合、粗面上に移動した後であっても上層から下層まで連続した渦構造を保ち、また最大風速や最大接線風速も比較的高い値を保った。渦の軸に対する角運動量は、地表付近において渦の進行方向左側 (右側) に正 (負) の角運動量が現れる分布となっていた。これは、一様な速度場の中におかれた基準点に対する角運動量分布と類似している。渦中心軸のまわりに配置した点源に対して行った後方流跡線解析により、先述の角運動量分布の中から渦の維持に好適な流体を渦が選択的に取り込んだことが確認された。このようにして、適度な速さで移動する渦に対しては、渦と地表面の相対速度が渦の維持に寄与することが確認された。

相対運動の速さ c が 16 m s^{-1} の場合、渦が粗面上をしばらく移動した後に柱状の渦構造が屈曲した。この際に、渦の強度が大きく低下した。特に外部スワール比 S_E が 0.12 、粗度要素の配置密度 λ_p が 0.25 、粗度要素の高さ h が 16 m s^{-1} の場合には、屈曲した渦がその屈曲部の前後で分裂した。その直前の時刻に屈曲部の直前に配置した点源から行った前方流跡線解析により、渦の最大接線風速半径およびその外側に配置した流体粒子が屈曲部を通過する際、渦付近に留まらずに遠方へと飛び去ってしまうことが確認された。このように、相対運動の速さが大きすぎる場合には、渦の軸が屈曲変型することで旋回気流の構造が乱れ、渦の強度が低下することが確認された。

外部スワール比 S_E が 0.28 の渦についても、粗面上に移動する速度に応じて同様の変化が見られた。しかし、これにより底面付近の渦が屈曲崩壊するには至らなかった。低速で移動する渦については、粗度によるスワール比の調節の結果むしろ渦の強度の高い状態へと変化したことで衰退を免れたものと考えられる。また高速で移動する渦については、渦がもつ大きな気圧傾度力により、屈曲部を通過する気流が遠方へと飛び去ることを防いだものと考えられる。

以上のように、平坦面上における初期の渦の状態、粗面の状態、そして渦の移動速度により、粗面上に移動後の渦は多様な変化を遂げることが示された。

第5章 市街地等の粗い陸面への竜巻の侵入過程に関する考察

第3章の研究により、背の高い粗度要素が適度な配置密度でならば粗面において、渦の強度が大きく低下することが示された。第4章の研究により、渦の移動する速さが適度であれば、粗度による強度低下をある程度緩和して強度の高い渦を粗面上に維持することが可能であることが示された。ただし、外部スワール比の高い場合に生じる大型で強力な渦については、こうした地表面の影響を受けにくいことが示された。これらをもとにすると、平坦面上で発生した渦が粗面上

へと移動後に強度を保つ条件として、渦の規模が粗度要素に比べて十分に大きい場合、または渦が適度な速さで移動することで屈曲崩壊を免れつつ角運動量の供給を受けることができる場合に限られるものと考えられる。

現実の竜巻については、大型のものほど強度も高いという関係が見られる。また、細く弱い水上竜巻については低速で移動するものが多い。このことから、小型で弱い渦については市街地等の粗面に移動した場合に摩擦的影響により衰退しやすく、大型で強力な竜巻ほど市街地でも持続しやすいという可能性が示唆された。市街地で報告される竜巻には強力なものの割合が高いということを示唆する研究があるが、本研究の結果を踏まえると、これは細く弱い渦が粗度により減衰することによる生存バイアスを受けた結果である可能性が示唆される。

第6章 結論

竜巻状の渦が地表面から受ける力学的影響について、地表面の粗度要素の分布性状及び渦の地表面に対する移動速度によって多様な変化が見られることが、本研究により明らかとなった。また、そうした変化をもたらす機構について本研究により明らかとなった。このような発見は、竜巻渦本体の気流に関する力学の理解に大きく寄与するものである。