

論文審査の結果の要旨

氏名 雪本 真治

竜巻や塵旋風など大気中の強い渦の接線風速分布は最大風速半径より内側の渦核部分が角速度一定の剛体回転、外側が角運動量一定のポテンシャル渦からなるランキン(Rankine)渦で近似されることが多い。しかしながら、近年可搬型ドップラーレーダーが開発され、竜巻まで数kmの距離から風速分布が観測できるようになって、渦核の外側の接線風速分布は、ポテンシャル渦のように半径の -1 乗に比例するのではなく、半径の -0.6 乗程度に比例する例が見つかってきた。これは、遠方で緩やかに回転していた空気が竜巻中心へ角運動量保存的に流入しポテンシャル渦が形成されるという従来の常識とは異なる結果であり、その原因究明が待たれている。一方、竜巻などの強い渦の発生頻度は低いため、その性質は室内実験によっても調べられてきている。代表的な室内実験は、回転流体の底面中心に流出口を開けたときに生ずる吸込渦である。吸込渦の実験的研究は、ダム取水口に生じて流出効率を下げたり、冷却水の流入口で気泡を巻き込み配管に損傷を与えたりする工学的な観点から多数あるが、多くの教科書や論文でもその接線速度分布はランキン渦を想定しており、接線速度分布を決める機構やその詳細な測定を行った研究はほとんどない。本研究は、非常に基礎的でありながら、応用的にも重要な、強い渦の接線速度分布の決定機構を室内実験、数値実験、境界層理論に基づいて解明したものである。

本論文は5章から構成される。過去の研究と問題点を総括する第1章に続き、第2章では本研究で行った室内実験が記述されている。室内実験には底面が共通な二重円筒水槽を用いており、鉛直軸周りに一定の角速度で回転している。内側の円筒水槽（以下内槽）の側壁上部はスポンジでできており、外側の円筒水槽（以下外槽）の水はスポンジを通りながら内槽側壁の回転数に馴染んで内槽に流入する。流入した水は内槽の底面中央にある流出口から一定の吸込流量で流出し、ポンプで外槽に戻される。このようにして、内槽内には定常な吸込渦が形成される。渦の接線速度分布は粒子画像流速測定(PIV)法で求めた。また、鉛直面内の運動は側壁から流入する水に蛍光染料を混ぜ、鉛直なレーザーシートにより観察した。実験の結果、

水槽の回転角速度が遅く、吸込流量が大きいときには渦核の外側でポテンシャル渦が実現したが、水槽の回転角速度が早いか、吸込流量が小さいときには接線速度はポテンシャル渦に比べて遅くなることがわかった。後者の場合、側壁から流入した流体は側壁沿いに下降し、底面の境界層を通過して、大部分は中心の流出口から流出し、残りは渦核の縁で上昇流に転じて中心へと流入し、下降して流出口から出ることがわかった。

第3章では、室内実験では観察できない詳細な流れの構造を調べるため、軸対称を仮定した円筒座標系の数値モデルを用いて室内実験に対応する設定で吸込渦の再現を試みた。その結果、室内実験の結果が非常に良く再現された。ポテンシャル渦とそうでない渦が実現する場合の底面境界層の流量を調べたところ、前者では渦核外側のすべての半径で吸込流量が底面境界層の流量を上回っており、内部領域で中心への流入が生じていた。一方、ポテンシャル渦が形成されない場合には、ある半径より内側では底面境界層の流量が吸込流量に等しくなっており、内部領域では中心への流入がなかった。これから、底面境界層が渦の接線速度分布を含む渦の構造に支配的な役割を演じていることがわかった。

第4章では、前章の結果を受け、ポテンシャル渦の下に形成される回転境界層の性質を、境界層理論に基づいて調べている。その結果、数値実験で得られた渦の底面に形成される回転境界層は、ポテンシャル渦の下に形成される理論的な回転境界層と同じものであることがわかった。更に、境界層理論から求まるポテンシャル渦の底面境界層の渦核外縁での半径方向の境界層流量が吸込流量より小さければ、渦核の外側全体でポテンシャル渦が実現するという判定基準が得られ、この判定基準は室内実験や数値実験の結果を見事に説明することがわかった。類似の判定基準は、実験水槽の底面が回転せず、側壁だけが回転する、より現実大気に近い設定においても得られることが示された。第5章では全体のまとめが述べられている。

以上のように、本論文は吸込渦という代表的な強い渦の接線速度分布が底面境界層の効果によって支配されていることを解明し、併せて渦の特性に関する判定基準をも与えたもので、渦に関する基礎的研究として、また竜巻など自然界の渦や工学的に応用の多い渦の研究上も極めて有用な結果を得たもので極めて高く評価できる。

なお、本論文は新野 宏氏、木村龍治氏、野口尚史氏との共同研究であるが論文提出者が主体となって実験、数値計算及び理論的考察を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

従って、論文提出者に博士(理学)の学位を授与できると認める。