

LESモデルを用いた数値流体解析による竜巻状渦内の変動風速の形成メカニズムの解明

東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 学生会員 ○長坂 陽介
東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 正会員 石原 孟

1. はじめに

近年日本では竜巻の発生個数が増加しており、大きな被害をもたらしている。その理由は、竜巻に伴う風速場が3次元乱流場となっているためである。現地観測や室内実験では、竜巻状渦内の瞬間的な3次元速度場を把握することが困難であるため、竜巻状渦内の乱流構造は殆ど解明されていない。一方、近年LESを利用した数値流体解析による研究^[1]では、竜巻状渦内の変動風速の標準偏差は渦中心で最も大きく、最大旋衡風速の約85パーセントに達することを明らかにしたが、変動風速の形成メカニズムは解明されていない。

そこで、本研究では、まず数値竜巻発生装置を作成し、数値的に竜巻状渦を発生させ、その瞬間的な流れ場を調べるとともに、竜巻状渦内の変動風速の形成メカニズムを明らかにする。

2. 数値解析モデル

本研究では、松井と田村^[2]が用いたWard型竜巻発生装置を数値的にモデル化した。図1には作成した数値竜巻発生装置及び計算格子の鳥瞰図を示す。作成した数値モデルは室内竜巻発生装置と同様にガイドベーン、収束層、対流層、ハニカム、吸い上げ部等を設けている。装置上部に一定の流出速度を一様に与えることにより上昇流を再現した。また装置下部のガイドベーンの外側に自由流入を境界条件とし、ガイドベーンの変角を変化させることにより地面付近の角運動量を与えた。本研究では、文献1において変動風速が大きかったガイドベーン角度 60° 、スワール比0.65の竜巻状渦を再現した。数値解析モデルおよび解析条件の詳細については文献3を参照されたい。なお、本研究では最大旋衡風速 V_c とそれに対応する半径 r_c により各パラメータを無次元化している。

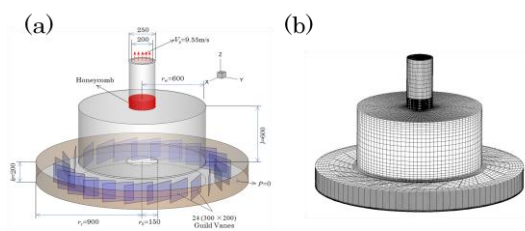


図1 数値解析モデルの(a)鳥瞰図と(b)格子分布

3. 数値解析結果

図2には室内実験による可視化写真と数値解析の結果より求めた流跡線を示した。この図から、渦中心付近に大きな乱れが発生していることが分かる。瞬間的な渦構造を調べるために渦中心における平均圧力の0.7倍のコンター面を求め図3に示した。これらの図から、竜巻状渦は中心軸の周りを回転運動していることが分かる。

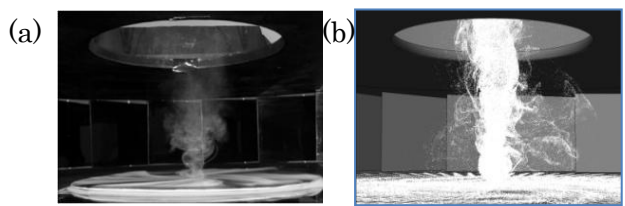


図2 室内実験(a)と数値解析(b)の比較

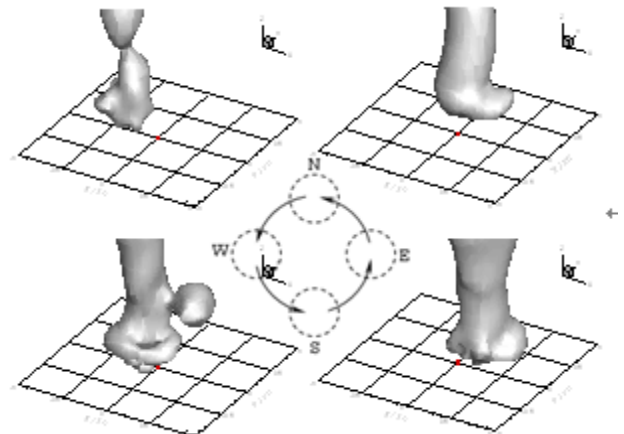


図3 圧力コンター面の時間変化

まず、この回転運動に伴う詳細な流れ場を調べるために地表面付近($z=0.2r_c$)における水平断面の速度ベクトル図を作成し、図4(a)~(d)に示した。これらの図から、渦の中心付近では回転運動により風向風速が大きく変化していることが分かる。図5には竜巻状渦が1周するときの数値竜巻発生装置の中心点における半径、円周方向変動風速の時間変化を示す。この図から、半径、円周方向変動風速は大きさは交互に入れ替わっていることが分かる。この1周期における半径風速と円周風速の標準偏差を求めると、それぞれ $0.94V_c$ 、 $1.06V_c$ となり近い値を示す。文献1より竜巻状渦の中心で半径方向と円周方向の変動風速の効果が打ち消し合うことで平均風速へ寄与しないことが分かっていた

が、それは変動風速は渦の偏心回転運動によりもたらされ、その結果変動風速の効果が打ち消し合うためであることが分かった。

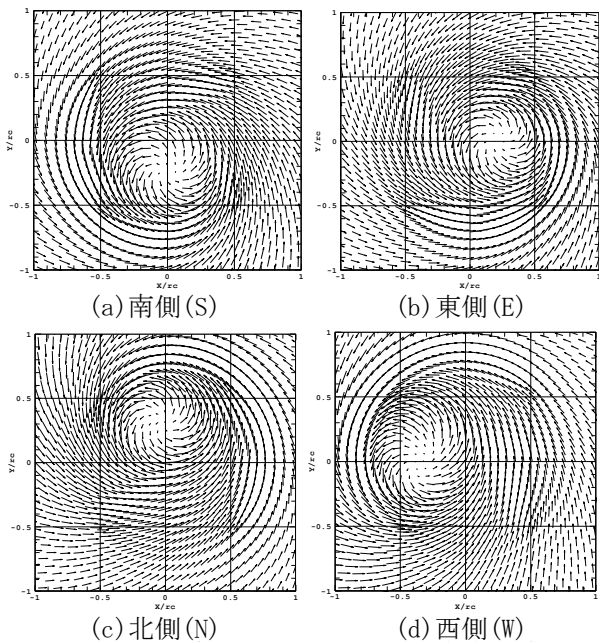


図4 地表面付近のベクトル図の移動の様子

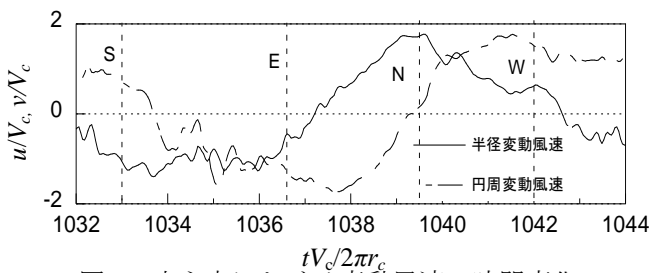


図5 中心点における変動風速の時間変化

次に、変動風速の周波数特性を調べるために半径 $r=0, r_c$ の各高さにおける円周風速のパワースペクトルを求め、図6に示した。縦軸は無次元化パワースペクトル密度、横軸は無次元化周波数である。ここで、 n は周波数、 $S(n)$ はパワースペクトル密度、 σ_v は風速の標準偏差を表す。横軸が1となる周波数は円周風速 V_c の速さで半径 rc の円周上を周回する周波数であり、これを渦の基本周波数と呼ぶ。パワースペクトル密度のピークは基本周波数とその約 $1/10$ の低周波数に見られ、低周波数のピークは渦の偏心回転運動の周波数に対応している。渦中心($r=0$)の地表面付近($z=0.2r_c$)では低周波数の変動が卓越し、上空($z=2r_c$)では基本周波数も寄与していることが分かる。また、中間の高さ($z=0.5r_c$)では流れ場の混合により明確なピークは見られない。一方中心から離れた位置($r=r_c$)の上空($z=2r_c$)では基本周波数が卓越しており、偏心回転運動による変動風速への寄与が小さいことが分かる。

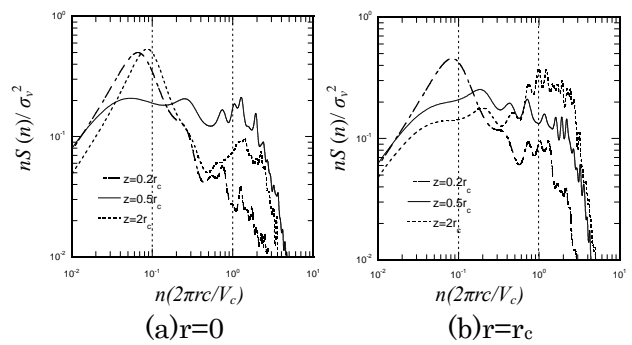


図6 円周風速のパワースペクトル密度分布

最後に、耐風設計において重要な最大瞬間風速を求め、平均風速と変動風速のガスト風速への寄与を調べた。図7には地表面付近($z=0.2r_c$)の $r=0, 0.5r_c$ における円周風速の平均値、ひよ順偏差、最大瞬間風速の比較のグラフを示す。この図から、渦中心の $r=0$ における平均円周風速は0であるため、最大瞬間風速は全て変動風速によることが分かる。一方、中心から少し離れた $r=0.5r_c$ では、最大瞬間風速は平均風速によることが分かる。このことから、台風とは異なり竜巻の渦中心では常に最大瞬間風速程度の風速があると分かり、大きな被害をもたらすと推測される。

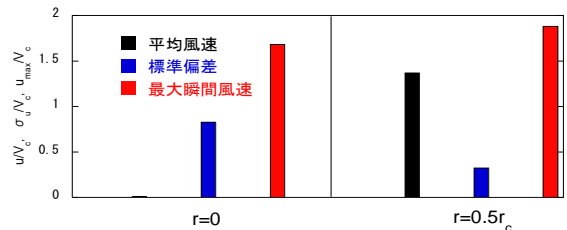


図7 地表面付近($z=0.2r_c$)における最大瞬間風速

4. 結論

本研究では、LESモデルを用いて発生させた竜巻状渦の瞬間流れ場を調べた。その結果、竜巻状渦内の地表面付近における大きな変動風速は、竜巻状渦の偏心回転運動によってもたらされることが分かった。また、スペクトル解析によりその周波数は基本周波数の $1/10$ であることが分かった。さらに、渦中心では偏心回転運動により風向が大きく変化し、風速は常に最大瞬間風速と同程度であることが分かった。

参考文献

[1] 石原孟, 長坂陽介, 劉震卿 LESモデルを用いた数値流体解析による竜巻状渦内の三次元乱流場の解明, 日本風工学会誌 No. 127, 2011, [2] 松井正宏, 田村幸雄竜巻状流れ場に対するスワール比粗度の影響に関する室内実験, 第19回風工学シンポジウム, pp.7-12, 2006 [3] T. Ishihara, S. Oh, Y. Tokuyama: Numerical study on flow fields of tornado-like vortices using the LES turbulence model, Proc of CWE 2010, 502, pp.1-8, 2010