

土木学会第 69 回年次学術講演会 (平成 26 年度)

数値流体解析を利用した複雑地形上の乱流場の特性の解明

東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 学生会員 ○田中 貴大
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

複雑地形上に建設された風車の疲労による損傷を未然に防ぐためには、複雑地形上の乱流特性を考慮して風車の設計を行うことが重要である[1]. 乱流特性を評価する方法の一つとして、LES による数値流体解析があげられるが、これまで3方向の変動風速の標準偏差と変動風のスペクトルを同時に再現した例は少なく、実地形の解析例もほとんどない[2][3]. また、変動風速の標準偏差の比(乱れ比)の評価手法として、風車の国際基準 IEC[4]では平坦地の値の割り増しを提案しているが、このモデルで安全側の評価が可能かどうかは不明である.

そこで本研究では風洞を数值的に模擬し、LES により三次元孤立峰周りの数値流体解析を行い、地形が変動風速の標準偏差に与える影響を調べ、乱れ比の新しいモデルを提案する. さらに実地形上における数値流体解析を実施し、実測値による検証を行うとともに、提案した乱れ比に関するモデルの適用可能性について検証する.

2. 数値風洞の作成

本研究ではまず、石原ら[2][3]の実験を忠実に再現した数値風洞を作成した. 図1は作成した風洞の鳥瞰図と孤立峰近傍の格子を示す. 地形周辺で解像度を高めており、水平方向最小格子間隔は2mm, 鉛直方向最小格子間隔は0.2mmである.

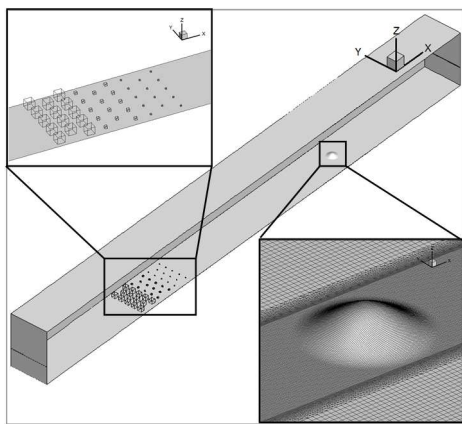


図1 数値風洞の鳥瞰図と孤立峰近傍の格子分布

作成した数値風洞により平坦地上の流れを解析し、主流方向の変動風速の標準偏差の鉛直分布とスペクトルを石原らの実験結果と比較した(図2). 各軸の無次元化にはモデル地形の高さ h での風速 U_h , 及び変動風速の標準偏差 σ_u を用いた. 解析結果は実験値とよく

一致していることがわかる.

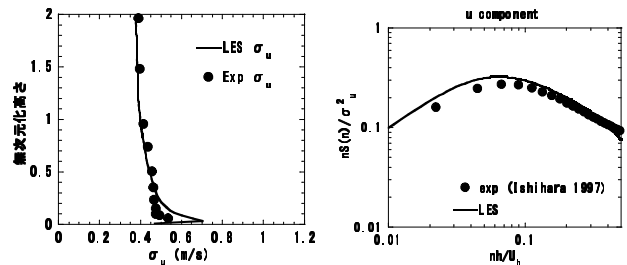


図2 平坦地上の変動風速の標準偏差とスペクトル

3. 地形による変動風速の標準偏差の変化

この数値風洞を用いて孤立峰上の流れを解析し、孤立峰の中心断面における変動風速の標準偏差の鉛直分布を実験値とともに図3に示す. 変動風速の標準偏差は境界層外縁風速 U_{ref} を用いて無次元化している. 解析結果は実験とよく一致していることがわかる.

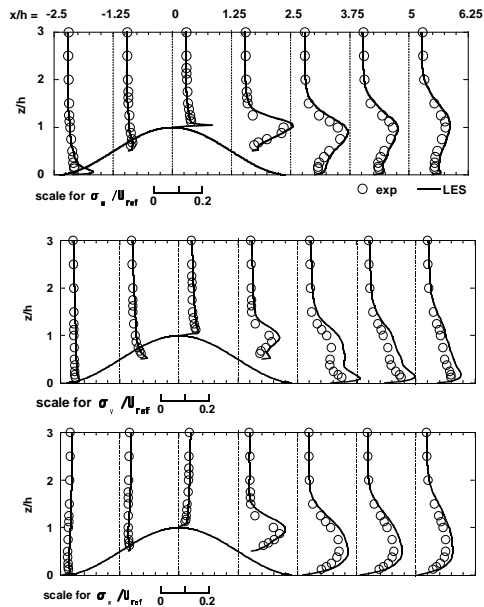


図3 中心断面における主流方向の変動風速の標準偏差

また、地形上の乱れの各成分の比がどのように変化するかを調べるため、地表面粗度のある孤立峰[3]の中心断面において、地表面からの高さ $z = 1h$ での変動風速の標準偏差の比 σ_v/σ_u , σ_w/σ_u を、図4に示す. 山の背後で風速比(平坦地上の風速に対する地形上の風速の比)が0.7を下回り、発電効率が著しく低下すると考えられる領域は通常風車を建設しないため除外し、本研究では、山の背後には等方的な乱流場が形成されると仮定し複雑地形における乱れ比のモデルと

土木学会第 69 回年次学術講演会 (平成 26 年度)

して $\sigma_v/\sigma_u = \sigma_w/\sigma_u = 1$ を提案した. 現行の IEC のモデルでは, 山の背後における鉛直方向の乱れ比の増大を大きく過小評価するが, 提案したモデルではこれをカバーできることがわかる.

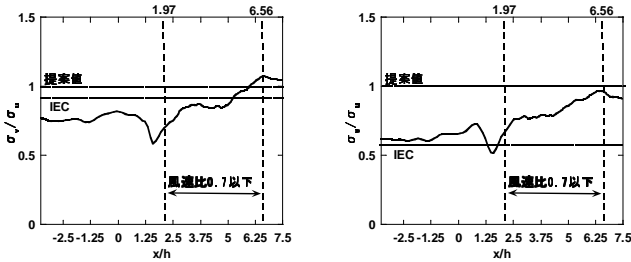


図 4 中心断面における σ_v/σ_u (左)と σ_w/σ_u (右)の変化

4. 数値風洞による実地形の乱流特性の解明

数値風洞を用いた実地形上の解析の妥当性を検証し, その乱流特性を解明するために太鼓山(京都府与謝郡伊根町)における数値流体解析を行い, 実測値との比較を行った. 図 5(右)には流入風が西風時の風車ハブ高さの水平面内の, 無次元風速のベクトルと風速比のコンター図を示す. 風車立地点では増速を表す赤色となっている.

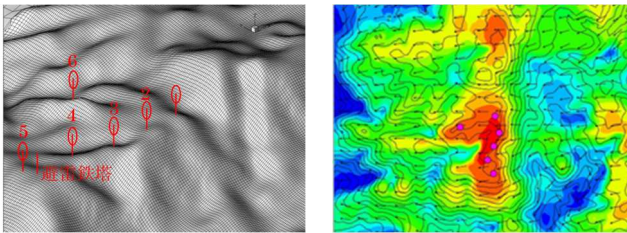


図 5 解析領域図(左)と無次元風速の分布(右)

図 6 は避雷鉄塔立地点における高度 49.7m の風速で無次元化した平均風速と乱流強度の鉛直分布を示す. 崖地形の影響を受け, 西風の平均風速は鉛直方向にほぼ一様である. 一方, 南風では太鼓山山頂の影響により強い鉛直シアが発生している. 数値解析はこれらの現象を再現しており, 解析の妥当性が示された. LES の結果より求めた避雷鉄塔 49.7m における吹上げ角は西風で約 5 度, 南風で-5 度である. また, 乱流強度の鉛直分布でも南風ではシアが発生し, 西風では鉛直方向の変化が小さいことから, 平均風速の標準偏差は鉛直方向にほぼ一様であるとわかる.

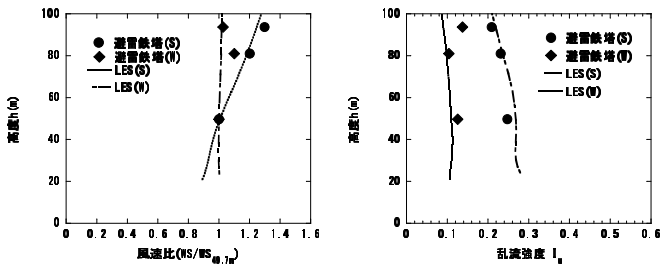


図 6 避雷鉄塔における平均風速と乱流強度の鉛直分布

前章で提案した乱れ比のモデルが実際に適用可能か調べるために, 風車 3 号機立地点のハブ高さにおける乱れ比を風向別に図 7 に示した. 鉛直方向の乱れ比が主風向である西風の時に増大していることがわかる. IEC のモデルではこうした乱れ比の増大に対応できず, 大きく過小評価となっているが, 提案したモデルでは乱れ比の増大に対応できていることがわかる.

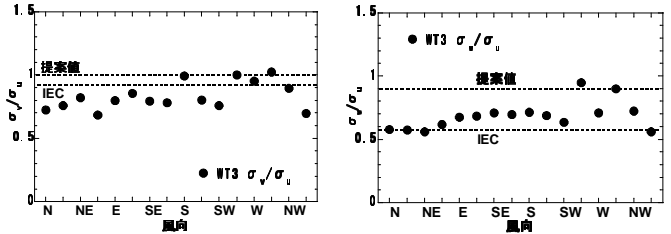


図 7 風車 3 号機立地点の乱れ比の風向別の変化

5. 結論

本研究では, LES による数値風洞を作成し, 地形上の流れの解析を行い, 以下の結論を得た.

- 1) 既往の風洞実験を忠実に再現し, 変動風速の標準偏差および変動風速のスペクトルについて数値解析結果が実験値とよく一致することを示した.
- 2) 三次元孤立峰周辺の流れ場の解析を実施し, 地形が風直角方向と鉛直方向の乱れ比に与える影響を明らかにし, 乱れ比の新しいモデルを提案した.
- 3) 作成した数値風洞を実際の複雑地形上の観測データを用いて検証し, 本研究で新しく提案した乱れ比に関するモデルが複雑地形上で適用可能であることを明らかにした.

謝辞: 本研究で用いた太鼓山の解析結果は, 京都府との共同研究である太鼓山風力発電所 3 号機ナセル落下事故調査の成果である. ここに記して感謝の意を表す.

参考文献

[1] 京都府太鼓山風力発電所 3 号機ナセル落下事故報告 http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/denryoku_anzen/newenergy_hatsuden_wg/pdf/001_03_02.pdf

[2] 石原孟, 日比一喜: 急な斜面をもつ 3 次元孤立峰周りの流れ場の乱流特性, 日本風工学会論文集, No.73, pp.3-14, 1997.

[3] 石原孟, 日比一喜: 急峻な山を超える乱流境界層に関する研究, 第 15 回風工学シンポジウム, p61-66, 1998.

[4] IEC61400-1 Edition 3: Wind turbines – Part 1: Design requirements, 2005