

Numerical Study on the Fundamental Mechanism of Vortex-Induced Vibration in Brimmed Diffuser Structure for a Wind Turbine

金, 泰伶

<https://hdl.handle.net/2324/4495975>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 金 泰 侖 (Kim Taeyoung, キム テヨン)

論 文 名 : Numerical Study on the Fundamental Mechanism of Vortex-Induced Vibration in Brimmed Diffuser Structure for a Wind Turbine
(風車用つば付きディフューザ構造に発生する渦励起振動の基礎的メカニズムに関する数値的研究)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

風レンズとも称する風車用つば付きディフューザは、風車ローターを囲むように取り付ける環状ダクトである(図 1 参照)。ダクトの出口に円周に沿って鉛直につば(ブリム)が立っている特殊な構造をしており、風力発電の発電効率を上げる効果がある。この効果は、ブリム後方に形成されるはく離渦の負圧を利用してローターを通過する気流を増速させる原理から得られる。しかし、ブリムから生成される大規模な渦はディフューザ構造に振動をもたらす潜在的なリスクも伴う。2012年には3 kW級レンズ風車のつば付きディフューザに自励振動が観察された。この振動は設計最大風速よりもかなり

低い風速で発生しており、ブリムからのはく離渦による渦励起振動と推定される。従来の渦励起振動に関する研究の対象は主に一般的な建築構造物となっており、両持ち・片持ちはりなどの単純な構造かつ円柱や角柱などの単純な空力形状に対して行われてきた。しかし、それらとは異なり、風車用つば付きディフューザでは、空気力学的な断面形状は翼に近く、支持構造は風力発電に伴う空力的制約によって複雑になるため、その渦励起振動の特性が明らかになっていない。本研究では、風車用つば付きディフューザに発生する渦励起振動の基礎的メカニズムを解明することを目的とする。そのため、実機サイズ(レイノルズ数 $\sim 3 \times 10^5$)での渦励起振動を模擬することはせず、3次元流れの複雑性を排除して2次元的な渦構造となる288の低レイノルズ数でモデル化し、2次元空力弾性問題として数値解析を行った。空力弾性解析は、振動モードの重ね合わせ法に基づく構造の運動方程式と2次元のナビエ・ストークス方程式を連成させて行った。ただし、風車用つば付きディフューザの振動特性は、その3次元構造に深く起因しているため、ディフューザ構造体の3次元有限要素モデルを用いて振動モード解析を行い、最大変位が発生するディフューザ断面位置での振動モードを2次元モードとして抽出した。3次元有限要素モデルは、実際に渦励振が観測された実機モデルを基本モデルとして、アルミ合金製のつば付きディフューザ本体、それをナセルから支える5本のアーム、ディフューザを補強するリブ、そしてブリムを補強する2列のコルゲーションから成る(図 2 参照)。本研究



図 1 風車用つば付きディフューザ

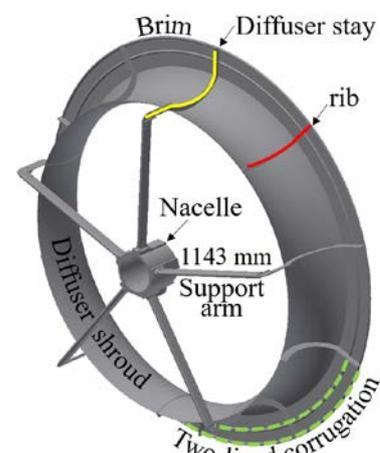


図 2 ディフューザの補強構造

では、それらの補強構造の有無や構造材料を炭素繊維強化プラスチック（CFRP）に代替したモデルを検討することで、ディフューザ構造体の振動モードを多様に変化させ、それらの振動モードと渦励振との関係を明らかにした。様々な構造モデルを調べた結果、ディフューザ断面に発生する振動モードは、図3に示す5つの基本振動モードに分類されることがわかった。それらは、ディフューザ断面が半径方向に振動する半径モード、回転振動する回転モード、

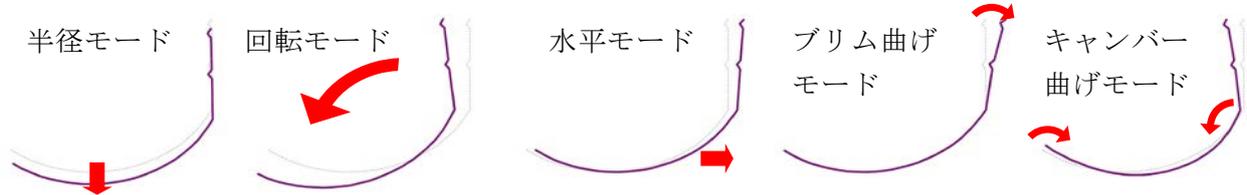


図3 つば付きディフューザに発生する5つの基本振動モード

前後に振動する水平モード、ブリムの曲げ振動を伴うブリム曲げモード、ディフューザのキャンバーが振動するキャンバー曲げモードである。前者の3つのモードは、ディフューザを支持するアームの振動に起因するモードであり、後者の2つのモードはディフューザ断面自身の変形に起因する。風車用ディフューザ構造では、これらのモードが特定の固有振動数で現れることが特徴であり、2つ以上のモードが連成されることもある。剛体モデルを用いた2次元流体解析により、つば付きディフューザに働く流体力および渦パターンの特性を明らかにした。

図4にディフューザに働く荷重分布とはく離渦の様子を示す。周期的な渦の発生に伴って流体力は振動し、主に3つの高調波成分を含むことがわかった。最も周波数が低い1次渦成分は渦強度が最も強く、揚力の振動に強い影響を与える。一方、2次・3次の渦成分の強度は1次に比べて小さいが、抗力振動

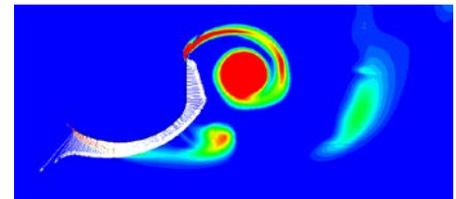


図4 つば付きディフューザに働く荷重分布とはく離渦

に与える影響は1次渦成分と同程度であるため無視できない。上述の振動モードと渦パターンとの連成効果を調べた2次元空力弾性解析より、風速に比例して増加する渦周波数がディフューザの固有振動数に達したときに共振が発生し、変位振幅が大きい場合には、風速が共振点から外れても共振状態が継続するlock-in現象が起ることを確認した。また、ディフューザまわりの渦パターンは、半径および回転モードを最も励起しやすく、高次の渦周波数がそれらのモードを励起する場合、その振動は無視できない大きさになることが明らかとなった。補強リブやブリムのコルゲーションが渦励振に及ぼす影響を調べた結果、補強リブはキャンバー曲げモードを、コルゲーションはブリム曲げモードを防ぐ効果があったが、支持アームの変形に起因する半径・回転モードでの渦励振を防ぐ効果は見られず、そのため渦励振を抑制する効果は小さかった。重量を変えずにディフューザの材料をCFRPに代替した場合、ブリム曲げモードまたはキャンバー曲げモードに伴う渦励振を抑制する効果が見られる一方、半径モードまたは回転モードに対してはその効果が小さいことがわかった。そのうえ、ディフューザを補強することで支持アームの剛性が相対的に低下し、変位振幅が大きくなる場合も見られた。支持アームの材料をCFRPに代替した場合、支持アームの曲げ剛性は強化される一方でねじり剛性が低下し、支持アームのねじりによる回転モードが発生しやすくなり、結果的には渦励振を抑制する効果は小さかった。以上より、風車用つば付きディフューザの渦励振を抑えるためには半径・回転モードの原因となる支持構造の変形を防ぐ必要があることがわかった。支持構造はディフューザ構造の全体的な剛性と重量のバランスも考慮して補強する必要があり、ディフューザ入口前方の流れにも影響するため、流体・構造両面から総合的な設計が必要であることが示唆された。