

令和 4 年 9 月 2 日現在

機関番号：32708

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02291

研究課題名(和文) モジュラータワーを持つ未来型風力発電設備の実用化に向けた合理的な耐風設計法の確立

研究課題名(英文) Establishment of reasonable wind-resistant design method of wind turbine with polygonal cross-section modular tower

研究代表者

金 容徹 (Kim, Yong Chul)

東京工芸大学・工学部・教授

研究者番号：30572416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は多角形断面のモジュラータワーを持つ風力発電設備の実用化に向けた合理的な耐風設計法の確立である。風圧実験、風力実験及び振動実験による研究成果をまとめると以下となる。上部構造物の風力がタワー部の風力より大きく、断面の違いによる影響は小さいことが分かった。タワー部では、4角形断面の風力が最も大きく、断面の辺数が多くなるにつれて円断面の風力に近づく。なお、FEM解析よりも、上部構造物を考慮すると断面の違いによる差が小さいことが分かった。振動実験より、4角形断面で不安定振動が、他断面では渦励振と考えられる振動が見られたが、風車では不安定振動や渦励振は見られなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本で風力発電設備が1990年代後半から本格的に導入されてから、構造物としての取り扱いは20年あまりである。風力発電設備の大型化に伴い従来の円断面タワーは製作上の問題、断面強度の問題、輸送上の問題等が指摘されている。その対案として多角形断面モジュラータワーが検討されているが、強風に対する耐風安全性はまだ十分に議論されておらず、日本を含めた国際規基準でも多角形断面モジュラータワーに関する基準はない。日本での風力発電の導入可能量は太陽光の10倍、地熱と中小水力の100倍と言われており、そのポテンシャルは圧倒的に高いことを考慮すると、本研究成果は学術的にも社会的にも大きな意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish a reasonable wind resistant design method for the wind turbine tower with a polygonal cross-section. Based on the results of a series of wind tunnel tests, the following concluding remarks can be made. The wind force of the upper structure was found to be larger than that of the tower, making the effect of cross section small. The wind force of the square cross section is the largest, and as the number of sides increases, wind force approaches the value of the circular cross section. And from the FEM analysis, the difference in wind forces on various polygonal cross section tower was found to be relatively small because of the larger wind force on upper structure. From the aeroelastic tests, unstable vibration was observed in the square cross section, and limited vibration was observed in other polygonal sections, but unstable and limited vibrations were not observed in the wind turbine because of existence of blade in front of tower.

研究分野：建築構造

キーワード：風力発電設備 多角形断面モジュラータワー 風洞実験 耐風設計法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本での風力発電設備の導入は1990年代後半に本格化し、現在では国内の各所で見られるようになった。地球温暖化や環境・エネルギー問題への対応により、風力発電設備は益々増加しさらに大型化が進んでいる。特に大型化に伴い強風による支持構造物であるタワー部の倒壊といった耐風安全性の問題が表面化している。2003年に沖縄県宮古島を直撃した台風14号(最大瞬間風速は74.1m/s)により複数の風力発電設備が倒壊した例をはじめ、倒壊までは至らなかったものの2015年の台風21号(最大瞬間風速は81.1m/s)や2018年の台風21号(最大瞬間風速は58.1m/s)によるブレードの破損は多数報告されている。このような被害を踏まえて、風力発電設備の耐風安全性を適切に確保する必要性が高まっているが、風力発電設備の風荷重を低減させる試みはまだ不十分である。風力発電設備に作用する風力特性は建設地の風環境、ブレードの形状やピッチ角及びロータの回転有無など様々な条件によって大きく左右されるため、風荷重を精度高く合理的に定めるにはこれからも多くの研究がなされるべきである。

従来の円断面タワーの場合、大型化になるにつれて製作上様々な問題を伴うとともに、断面の強度が著しく低くなり、断面内に補強材を適用するとしても、製作費用の増加に対して強度の増加が低いので効果的でない。これを解決する1つの対案としてタワー断面を分離して建設現場や現場付近で組立てる多角形断面のタワーが検討されているが、多角形断面のタワーを持つ風力発電設備の耐風安全性はまだ明らかにされていない。

そこで、本研究では多角形断面のタワーを持つ風力発電設備の空力特性および振動特性を明らかにして合理的な耐風設計法の確立することを目的とした。

2. 研究の目的

本研究の目的は多角形モジュラータワーを持つ風力発電設備の実用化に向けた合理的な耐風設計法の確立である。円断面タワーは従来から使われているが、風力発電設備の大型化に伴い様々な側面から円断面タワーの弱点が指摘されている。その対案として多角形断面のモジュラータワーが検討されているが、それらの耐風安全性はまだ明らかにされていない。これまで申請者は世界に先がけて様々な不整形超高層建物の耐風安全性を多様な側面から検討しており、耐風設計上有利な形状は何かについて研究してきた。風力発電設備は上部構造物の重さによる圧縮力を受ける高層建築物と読み替えることができる。本研究では多角形断面モジュラータワーを持つ風力発電設備の耐風安全性を主に層風力及び全体風力の特性、FEMによる応答特性および振動実験による不安定振動の評価より検討し、風荷重の特性を明らかにしたうえで、風力係数及び風荷重の組み合わせ係数を提案することにより合理的な耐風設計法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 2019年度の計画(風圧実験実施)

定格出力5MW級ピッチ制御型の風力発電設備を対象とし、ハブ高さが120m、タワーの上下端部の直径が6mと4mの風圧模型を製作した。タワー部の断面として円断面タワーを基準模型とし、当初比較対象の多角形断面を4角形と8角形及び12角形としたが、14角形断面タワーが実際にヨーロッパで使われていることを考慮して14角形断面も対象に入れた(その後、10角形断面も追加)。なお、4角形断面のみ、ヘリカル角度が180度のヘリカル形状も対象とした。実験時には、タワー部の違いによる風荷重の変化を明確にするため、同じ上部構造物を用いた。タワー1本あたりの実験パラメータは上部構造物の有無、ピッチ角、アジマス角度と風向である。

なお、風圧実験で得られた多点の変動風圧を層風力に換算し、3次元FEMモデルに直接入力して時刻歴応答解析を行い、タワー部に生じる時々刻々の応力の検討を行った。本研究は基本的に暴風時を対象とするので、ピッチ角90度を対象に上部構造物の有無、アジマス角度や風向毎のタワー部下端の最大縁応力度を精密に検討した。

FEM解析に用いるため、当初計画していなかった追加の風力実験を行った。タワーに働く力は風圧実験より求めることができたが、FEM解析のためには上部構造物に働く力も必要であったため、上部構造物に働く力を別途実施した風力実験より求めた。風圧実験よりタワー部に働く力を、風力実験より上部構造物に働く力を求めて、FEM解析を行い、タワー部下端の最大縁応力度を用いて、組み合わせ係数による風荷重の組み合わせを検討した。

(2) 2020年度の計画(風力実験及び振動実験実施)

前年度の同じ断面と寸法の風洞実験模型を用いて風力実験と振動実験を行った。実験においては、一つの模型で風力実験と振動実験が行えるように製作した。

風力実験によりタワー断面の違いによる平均的な風力の変化を調べることができた。しかし、模型の重さの関係で、変動成分まで検討することはできなかった。なお、振動実験の結果より上部構造物の有無や断面形状による振動特性の違いを明らかにすることができた。タワーのみの

上部構造物がない場合、アスペクト比が大きい煙突と同じ挙動を示すことが分かり、特に、4角形断面では低い風速で不安定振動が発生して風直角方向の変動変位が急激に大きくなることが確認できた。他断面では不安定振動は発現しないものの、同じ低い風速で渦励振が発生することが分かった。特に、8角形断面を持つタワーでは大きな渦励振があらわれており、高風速では10角形断面を持つタワーの変動変位が他断面より大きいことが分かった。しかし、上部構造物を設置することにより、不安定振動や渦励振があらわれなくなり、上部構造物により不安定振動や渦励振が抑制されることが分かった。

(3) 2021年度の計画（耐風設計法の確立）

前年度までの成果を参考に、多角形断面タワーを持つ風力発電設備の風荷重特性を総合的に検討し多角形断面タワーの設計用風力係数を従来の円断面タワーの倍率で提案した。倍率は風力成分により異なる。これにより現在の指針等で定められている円断面タワーの規定値を用いて多角形断面タワーの設計用風力係数を算定することができる。なお、設計用風荷重の組合わせをタワー基部で発生する最大縁応力度より検討し、円断面タワーを除いた多角形断面の場合、組合わせ係数は風車の場合は0.5以下、タワーのみの場合は0.8以下であることが分かった。

4. 研究成果

2019年度には多角形断面を持つタワーを対象に風圧実験を実施し、タワー部の層風力及び全体風力の特性を検討した。対象とした多角形断面は、4角形、4角形ヘリカル(ヘリカル角度180度)、8角形、10角形、12角形、14角形と円形の計7体であり、14角形断面は実際にヨーロッパで使われている形状である。なお、上部構造物(ロータとナセル)に働く力は風力実験より別途求めた。それらの風洞実験結果を詳しく検討した上で、ピッチ角90度を対象にFEM解析を行い、タワー部下端における最大縁応力度のタワー形状、アジマス角度及び風向による変化を明らかにした。

その結果、上部構造物の風力係数がタワーの風力係数より全体的に大きくなり、タワー断面の影響が比較的小さくなることが分かった。上部構造物では、ピッチ角0°がピッチ角90°より絶対値の大きい風力係数がみられた。なお、タワーでは、4角形断面の風力係数が最も大きく、辺数が多くなるにつれて、風力係数も小さくなり、剥離による影響が小さくなった。抗力係数と揚力係数のパワースペクトルでは、アジマス角60°と90°でブレードの剥離で生じた渦の影響だと思われるピークがみられた。Hasofer-Lind法から信頼性指標とモンテカルロ法から破壊確率を求めており、風直角方向の信頼性指標は6.87、風方向の信頼性指標は1.06であった。仮定した条件下では風方向の破壊確率は10%程度であった。

2020年度には風力実験及び振動実験を実施し空力特性および振動特性を検討した。対象とした多角形断面は、前年度と同様に、4角形、4角形ヘリカル(ヘリカル角度180度)、8角形、10角形、12角形、14角形と円形である。上部構造物(ロータとナセル)の影響を調べるために、上部構造物がある場合とない場合(タワーのみ場合)に分けて風力実験と振動実験を行った。

その結果、風力実験より風車の最大平均風力係数は、4角形断面で最大で、円断面で最小となることがわかった。なお、振動実験よりタワーのみの変動変位は、4角形断面で不安定振動が、他断面では渦励振と考えられる振動が見られた。風車の最大変動変位では不安定振動や渦励振は見られなかったが、4角形断面で大きな勾配が見られた。パワースペクトルにおける固有周波数成分のピークは4角形断面ではタワーより風車の方が小さくなり、上部構造物の影響が見られなかったが、円断面では、上部構造物の影響は見られなかった。

2021年度には前年度までの成果を参考に、多角形断面タワーを持つ風力発電設備の風荷重特性を総合的に検討し多角形断面タワーの設計用風力係数を従来の円断面タワーの倍率で提案した。倍率は風力成分により違いはあるが、4角形断面タワーが最も大きく(平均的に約1.4)、断面の辺数が多くなるにつれて円断面に近づき、14角形断面では平均的に約1.1であった。しかし、4角形断面のヘリカルタワーの変動揚力係数は円断面より小さかった。これにより現在の指針等で定められている円断面タワーの規定値を用いて多角形断面タワーの設計用風力係数を算定することができる。

次に、設計用風荷重の組合わせをタワー基部で発生する最大縁応力度より検討した。風力発電設備はタワーに上部構造物の付いた特殊な形状であるため、アジマス角や風向により最大縁応力度は大きく変化することが分かった。なお、上部構造物が最大縁応力度に与える影響がとても大きいので、タワーの断面形状による最大縁応力度の差は比較的小さくなった。最後に組合わせ係数を用いた時の風荷重の組合わせを検討した。その結果、円断面タワーを除いた多角形断面の組合わせ係数は、風車の場合は0.5以下、タワーのみの場合は0.8以下であることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 金容徹	4. 巻 67B
2. 論文標題 多角形断面モジュラータワーを持つ風力発電設備の層風力特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 287-293
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kim Yong Chul	4. 巻 11
2. 論文標題 Aeroelastic and Aerodynamic Tests of Wind Turbine with Various Polygonal Towers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 11740 ~ 11740
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app112411740	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Y.C. Kim and Y. Tamura	4. 巻 33
2. 論文標題 Investigation of aerodynamic performance of pitch-control wind turbine with polygonal towers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Wind and Structures	6. 最初と最後の頁 87-101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 YC Kim, T Tamura
2. 発表標題 Aerodynamic characteristics of wind turbines with various cross-sectional tower shapes
3. 学会等名 Second International Symposium on Flutter and its Application（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金 容 徹
2. 発表標題 多角形断面タワーを有する風力発電設備の空力特性に関する研究
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yong Chul Kim, Yukio Tamura
2. 発表標題 Aerodynamic behavior of wind turbines with polygonal cross-sectional tower
3. 学会等名 International Association for Bridge and Structural Engineering(2020 Christchurch) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yong Chul Kim
2. 発表標題 Aeroelastic characteristics of wind turbine with various cross-sectional shape of tower
3. 学会等名 The 2021 International Conference on Innovative Structural Engineering and Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金容徹
2. 発表標題 多角形断面タワーが風力発電設備の風荷重に与える影響
3. 学会等名 2021年度日本風工学会年次研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金容徹
2. 発表標題 多角形断面タワーを持つ風車の振動特性の評価
3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>4年次の卒業研究4件 多角形断面タワーを持つ風力発電設備の空力特性, 2019 風力発電設備の風荷重の組合わせに関する研究, 2019 多角形断面タワーを持つ風力発電設備の信頼性設計に関する基礎的な研究, 2019 多角形断面タワーを持つ風力発電設備の風力及び振動特性の評価, 2020</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田村 幸雄 (Tamura Yukio) (70163699)	東京工芸大学・工学部・名誉教授 (32708)	
研究分担者	松井 正宏 (Matsui Masahiro) (60350576)	東京工芸大学・工学部・教授 (32708)	
研究分担者	吉田 昭仁 (Yoshida Akihito) (90329219)	東京工芸大学・工学部・教授 (32708)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------