

令和 2 年 5 月 4 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06154

研究課題名（和文）ウィンドファーム発電量最大化のための風車後流の実験式構築に関する研究

研究課題名（英文）Study on Construction of Experimental Formula for Wind Turbine Wake to Maximize Wind Farm Power Generation

研究代表者

前田 太佳夫（MAEDA, Takao）

三重大学・工学研究科・教授

研究者番号：80238865

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：ウィンドファームの最適運転と発電量増加を目的として、風車の運転条件と流入風の風特性を変数とした後流の拡大率、後流の偏向および後流速度分布の実験式の構築を行った。とくに流入風の風向変動を考慮した後流形状を再現することにより、風向変動にともなう後流と主流の混合が再現でき、風向変動の無い場合と比べて速度欠損の最大値を小さく予測するため、風向変動を考慮していない試算値に比べて発電量が大きくなることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

風車を様々な条件で運転し、後流風速データをフィールド実験によって取得することは容易でなく、学術的な価値は高い。また、本研究で得られた風車斜め流入風状態での後流の風速分布の実験式を用いれば、斜め流入状態を積極的に活用することにより、セクターマネージメントにより上流側風車の発電量低下と下流側風車に及ぼす後流の影響を最小化してウィンドファーム全体の総発電量を向上させることが可能となり、今後の再生可能エネルギー社会の実現に向けて意義がある。

研究成果の概要（英文）：In order to optimize the operation of the wind farm and increase the amount of power generation, we constructed experimental formulas for the wake expansion, wake deflection and wake velocity distribution with the various operating conditions of the wind turbine and the wind characteristics of the inflow wind. In particular, by reproducing the wake profile considering the wind direction fluctuation of the inflow wind, the mixing of the wake and the external flow due to the wind direction fluctuation can be reproduced, and the maximum value of velocity deficit can be predicted to be smaller than that when there is no wind direction fluctuation. As the results, it became clear that the amount of power generation is larger than the calculated value that does not consider the wind direction fluctuation.

研究分野：工学

キーワード：風力発電 後流 ウィンドファーム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

風力発電所の事業規模を拡大してスケールメリットを生み出すとともに、風車へのアクセス道路や送電線を集約し、風車1台当たりのコストを低減するウィンドファーム(風車を1つのサイトに複数台設置する集合型風力発電所)の導入が主流となっている。ウィンドファームでは、上流側風車の後流が下流側風車に流入することにより、速度欠損による発電量の低下や速度勾配による翼の疲労が問題となる。これらの問題を解決するため、風車の後流が影響する範囲について、風洞実験、理論解析、実機による観測が行われてきた。これらの研究はいずれも、風が風車の正面から流入する場合の後流の速度分布を推定するものであって、風車に流入する風の向きと後流の向きおよび速度分布を定量化するものではない。したがって、風車の運転条件と主流の風特性から後流速度分布を定量化し、後流が下流側風車に及ぼす影響の評価とウィンドファームの総発電量を向上されるための方法の開発が期待されている。

2. 研究の目的

定常風下での風洞実験により、風車後流の半径方向への拡大は翼端渦の軌跡と密接に関係していることが知られている。また、実際に屋外に設置されている風車では、後流内速度の下流方向への回復は定性的には風洞実験結果と似た傾向を示すが、屋外風車の方が後流速度欠損の回復は早いことが知られている。これら風洞実験と屋外実験の結果の違いから、後流速度欠損の回復は上流風の乱流強度に依存すると考えられる。そのため、風車の後流速度分布をモデル化するためには、上流風の乱流強度を変数とした関係式が必要である。

一方、風車は風に正対するようにロータ面の向きを運転制御しており、さらにウィンドファームでは年間の卓越風向に対して可能な限り後流の影響を受けないように風車群が配置されている。しかし、風向は時間的に変化するため下流側風車が後流内に入る状況が必ず出現する。また、風車へ流入する風が斜めに流入する状態(ヨー状態)においては、後流が偏向することにより、風車への流入風向と後流の向きが異なることが考えられ、それにより後流が非対称性を示す可能性がある。

そこで本研究では風車が斜め流入状態での、流入風と後流の向きの偏差を測定し、実験式を構築することを目的とする。これにより、斜め流入状態における上流側風車の発電量低下と下流側風車に及ぼす後流の影響を最小化し、ウィンドファーム全体の総発電量を向上させることが可能となる。

3. 研究の方法

風車後流の測定は三重大学生物資源学部附属紀伊・黒潮生命地域フィールド・サイエンスセンター附帯施設農場にあるテストサイトで行った。本テストサイトでは冬季に北西風が卓越となるため、この北西風に対して風車の斜め流入状態を設定して実験を行った。実験装置概要を図1に示す。実験装置は上流から、流入風を測定する基準風速測定マスト、供試フィールド風車、後流測定用移動式マストの順に配置されている。

実験に用いた風車は定格出力30kW、ロータ直径10m、ハブ高さ13.4m、可変ピッチ機構を持つ3枚翼のアップウインド型水平軸風車である。この風車は運転状態に関する様々なデータを取得するための装置が装備されている。発電機軸にはトルク検出器、ピッチ角制御用パワーシリンダにはストローク値からピッチ角を測定するポテンショメータ、ロータ軸にはアジマス角検出用のフォトセンサが設置されている。また、風車に生じる推力を測定するために、ナセルとタワーの間にスライドユニットとロードセルを設置してある。

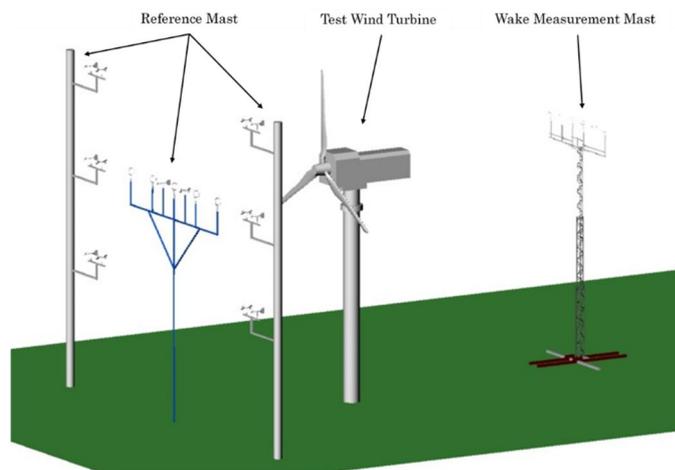


図1 実験装置概要

風車への流入風の観測のため、風車上流に基準風速測定マストを設置して、5個の超音波風速計を取り付けてある。基準風速測定マストは風車から見て303°方向の、ロータ回転面から上流10mの位置に設置してある。5個の超音波風速計は、13.4mの高さにロータ回転面に対して平行かつ水平に設置されている。超音波風速計の設置間隔は横方向に2.5mである。なお、5個の超音波流速計で計測された風速の平均値を流入風速とする。

後流の風向と風速は、地上高7mから22mまで伸縮できるクランクアップマストに、超音波風速計を取り付けて、任意の位置に移動して測定を行った。超音波風速計は、ロータ回転面に平行かつ水平に1.25m間隔に6個取り付けられている。なお、テストサイトの制約から後流の計測範囲は $x/D=3.0$ (x :主流方向距離, D :風車ロータ直径)までである。

変動する流入風に対する風車後流モデルの構築のため、実験によって得られたデータを乱流

強度や風向などの風特性別に抽出して整理し、後流モデルの普遍化を行った。とくに主流風の乱流強度に加えて、風向変動が風車後流の速度欠損領域に与える影響に着目し、風向標準偏差の影響を考慮した風車後流モデルとしてガウス関数を応用した風向変動モデルの開発を行った。

4. 研究成果

(1) ロータ推力と後流の関係

風車へ流入する風が正面である場合には、後流風速はロータ中心位置で最も減速し外側に行くにしたがい回復する。そこでガウス関数を用いて後流速度分布を次式のように定義する。

$$\hat{U}_N(r) = 1 - \hat{U}_D \exp\left\{-\frac{r^2}{2\hat{D}_r^2}\right\} \quad (1)$$

ここで、 \hat{U}_N は後流内の無次元風速、 \hat{U}_D は無次元風速の最大欠損値、 r はロータ中心からの半径方向位置、 \hat{D}_r は後流の半値全幅を表す。風車ロータ面に主流方向風速 U_0 の一様な風が流入する場合、ガウス関数を用いた有次元の風車後流風速分布 U_{wake} は式(1)に U_0 を乗じることにより次式のように表せる。

$$U_{\text{wake}}(r) = U_0 \hat{U}_N(r) = U_0 \left[1 - \hat{U}_D \exp\left\{-\frac{r^2}{2\hat{D}_r^2}\right\} \right] \quad (2)$$

この式において、後流形状を表すパラメータである \hat{U}_D および \hat{D}_r を決定することで、風車後流速度分布を求めることが出来る。さらに、ロータ推力係数 C_t と後流の運動量欠損の関係に式(2)を代入すると次式が得られる。

$$U_0^2 \int_0^{R_w} \rho \left[1 - \hat{U}_D \exp\left\{-\frac{r^2}{2\hat{D}_r^2}\right\} \right] \cdot 2\pi r dr - U_0^2 \int_0^{R_w} \rho \left[1 - \hat{U}_D \exp\left\{-\frac{r^2}{2\hat{D}_r^2}\right\} \right]^2 \cdot 2\pi r dr = \frac{1}{2} \rho A U_0^2 C_t \quad (3)$$

ここで R_w は後流半径、 A はロータ受風面積である。式(3)は式(2)に対する拘束条件であり、後流形状を表すパラメータである \hat{U}_D および \hat{D}_r の関係式となっている。なお、実機の風車で推力係数 C_t を直接求めることは容易ではないが、出力係数から C_t を求めることは可能である。

(2) 乱流強度と後流拡大率の関係

乱流強度 TI が正面流入状態の風車後流に与える影響について考察するため、フィールド風車の実験によって得られたデータから、上流風の乱流強度の違いによって風車後流データを抽出して整理を行った。

風車後流位置 $x/D=2.0, 3.0$ での乱流強度別の後流内風速分布をガウス関数にフィッティングすることにより後流の速度分布および後流の半値全幅 D_r を求める。乱流強度 TI と後流拡大率 β_0 の関係を次のように定義した。

$$\beta_0 = \frac{D_{r2} - D_{r1}}{s_2 - s_1} \quad (4)$$

ここで D_{r1}, D_{r2} は、ある無次元下流方向位置 s_1, s_2 における後流の半値全幅を示す。

抽出した後流データを流入風の乱流強度別に $0.225 \leq TI < 0.275$, $0.275 \leq TI < 0.325$ および $0.325 \leq TI < 0.375$ に分類した。このとき、各条件における推力係数、流入風の乱流強度、流入風速と風向はほぼ同程度のものを抽出した。なお、本実験サイトでは平均風速が比較的低いため、 TI は大きめの値を示す。

図2は流入風の乱流強度と後流拡大率の関係を示す。図は縦軸が後流拡大率 β_0 、横軸は乱流強

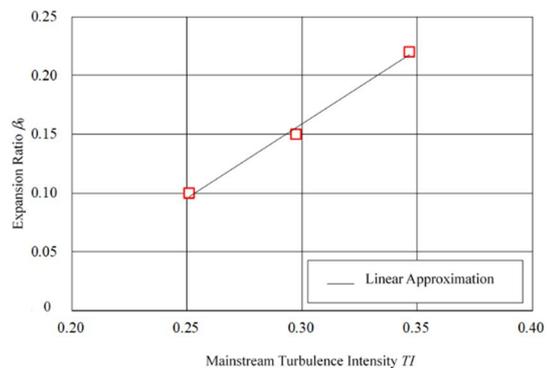


図2 乱流強度と後流拡大率の関係

度 TI を示す．図中のプロットは，乱流強度別の後流拡大率を示す．図より，本実験で行った $x/D=0.3$ までの範囲では，後流拡大率は乱流強度の増加にしたがい，ほぼ線形的に増加することがわかる．そこで，図中の黒線のように後流拡大率を線形近似すると，本実験における乱流強度と後流拡大率の関係は次式になる．

$$\sigma_0 = 1.256TI - 0.218 \quad (5)$$

(3) 流入風の風向と後流偏向の関係

流入風の風向が風車後流の偏向（横方向への移動）に与える影響を評価するために，30kW 風車を用いたフィールド実験の時系列データを用いて，流入風向から予測した風車後流中心の横方向移動量と風車後流による速度欠損領域の横方向分布を求めた．また，流入風の横方向速度成分によって風車後流中心が横方向に動かされると仮定し，風車後流中心の移動量と流入風向の関係を求めた．

フィールド実験の結果から，斜め流入風状態においては，風車後流の速度欠損は正面流入風状態と比べて低下することが明らかとなった．ガウス関数を用いた正面流入状態の後流モデルにおいて，ロータ面に働く推力の減少をヨー偏角から見積もることにより，斜め流入風の影響の考慮を行った．さらに，斜め流入風状態においては，風車後流に偏向が生じるため，風車後流中心が風車ロータ面通過後の風向 θ_{wake} で下流方向へ移動するもの仮定して， θ_{wake} を流入風向 θ の関数として表すと，ロータ面より下流位置 x における風車後流中心の横方向移動量 Y は次式となった．

$$Y = x \cdot \tan \theta_{wake} = x \cdot \tan \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{3}{2} \cdot \tan \theta \right) \right\} = \frac{3}{2} x \cdot \tan \theta \quad (6)$$

この式を用いて，流入風向から予測した風車後流中心の横方向移動量と風車後流の速度欠損領域を比較した結果，フィールド実験で得られた流入風向と風車後流の移動量は多くの時間帯でおおむね同様の変動を示し，風車後流が流入風の横方向速度によって移動していることを確認できた．

したがって，風車のヨー制御によって意図的に流入風向 θ を与えれば，後流を θ_{wake} の角度で下流方向へ流す制御が可能となる．

(4) 流入風の風向標準偏差の影響

風車ロータ面に流入する風向が時間的に変動すると，後流と主流の混合が促進され，風向変動のない場合の後流速度分布とは異なることが考えられる．そのため，風向変動が風車後流の速度欠損領域に与える影響を調べた．風向標準偏差の抽出範囲を変えたデータセットを作成し，後流モデルのフィッティングを行い後流の半値全幅を算出する．この計算により得られた風向標準偏差 σ に対する半値全幅 D_r の拡大率を一次関数で近似することにより， $x/D=2.0$ での半値全幅 D_r を風向標準偏差 σ_0 の関数として表すと次式が得られた．

$$D_r = 0.0366 \sigma_0 + 1.0784 \quad (7)$$

なお，本フィールド実験で得られたデータでは， TI よりも σ_0 の影響が支配的であった．

(5) ウィンドシアが風車後流へ与える影響

風速分布がウィンドシアを持つ場合の風車後流形状の再現のため，ガウス関数を用いた後流モデルに，流入風のウィンドシアを設定した．

後流モデルの簡略化のため，ロータ面に作用する局所推力分布の空間的变化を無視して，同心円状のガウス関数を用いた風車後流速度分布 U_{wake} は，流入風のウィンドシアを考慮し，次式のように表した．

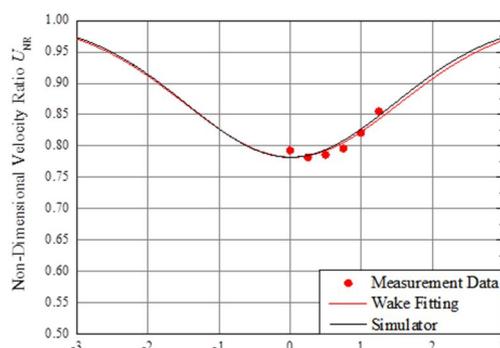


図3 モデルと実験値の比較

$$U_{wake}(r) = U_{ref} \hat{U}_N(r) = U_{hub} \left(\frac{z+H}{H} \right)^{a_s} \left[1 - \hat{U}_D \exp \left\{ -\frac{r^2}{2\hat{D}_r^2} \right\} \right] \quad (8)$$

ここで U_{hub} はハブ高さの流入風速， z は後流内で注目している高さ， H はハブ高さ， a_s はウィンドシアのべき指数である．図3に本モデルと実験結果との比較を示す．

(6) ウィンドファームの出力予測

本研究のフィールド実験で用いた 30kW 風車を 風に直角方向に 3 基および主流方向に $x/D=2.0$ の間隔で 3 基に配置することを想定し、ガウス関数を用いた風向変動モデルによって計算した後流風速から、下流側風車の年間発電量を計算するとともに、ウィンドファーム全体の発電量を試算した。

ウィンドファーム内の風車に流入する風エネルギーをガウス関数を用いた風向変動モデルによって算出し、風車周りの流れ場をもとに、各風車に流入する風エネルギー E を次式で計算した。

$$E = \int_A \frac{1}{2} \rho U^3(x, y, z) dA \quad (9)$$

ここで、 U はロータ回転面に流入する風速、 A はロータ受風面積である。なお、 U は三次元性を考慮して x, y, z の関数となっている。

本モデルで試算されるウィンドファームの発電量の比較対象は、風向変動を考慮しない場合のウィンドファームの発電量とした。本研究では、風洞実験による結果を用いた。

また、風車の運転状態としては、風洞実験と本モデルとを公平に比較するため、風洞実験によって得られた出力係数 0.32 を本モデルにも用いた。また、ウィンドファームの 1 列目は一様風が流入するとし、2 列目と 3 列目の風車に後流が流入すると仮定して後流損失を計算した。

風洞実験によって得られるウィンドファームの発電量を基準値 1 とすると、ガウス関数を用いた風向変動モデルによって、風向変動を考慮した場合のウィンドファームの発電量は 1.452 となった。ガウス関数を用いた風向変動モデルでは風向変動にともなう後流と主流の混合が再現できており、風向変動の無い場合と比べて速度欠損の最大値を小さく予測するため、風向変動を考慮していない試算値に比べて発電量が大きくなる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----