

風況を選ばないインテリジェント風力発電機の研究開発

研究代表者 九州工業大学工学部 教授 金元敏明

1. 緒言

地球温暖化防止，循環型社会の構築に向けて，非再生資源依存型からクリーンな再生可能資源依存型への転換を担う一つとして，風力発電が世界的規模で導入されつつある^[1]。しかし，日本における 2005 年 3 月末の発電能力は 92 万 kW であり^[2]，国策 2010 年 300 万 kW の達成には到底辿り着けそうにない。このままでは次の国策「新国家エネルギー戦略 2030 年目標」は夢で終わりかねない。日本の海岸線全周(約 35,221km)に渡って風車ロータ径 100m の風力発電機を隙間無く設置した場合，気象データによる全国平均風速 5m/s^[3]の下で約 9,334 万 kW(1 基出力 265kW として)程度となる。風力発電機の出力は風車ロータ径の 2 乗と風速の 3 乗に比例するからあくまで参考値にほかならないが，この量は全原子力発電量の約 2 倍にも達する。

この量を有効利用するにしても，日本に設置されている風車の約 82%^[2]は，風況が良好な欧米に適した輸入風車に頼っているのが現状であり，次のような問題を持っている。

- (1) 高出力のためには大径風車ロータが適しているが微風下では稼働せず，微風下では軽量小型風車ロータが適しているが強風下では出力が低いなど，適用範囲が限定される。
- (2) 強風下における風車ロータの破損や発電機への過負荷を避け，かつ発生電力の質を確保するため，ブレーキや可変ピッチなどの複雑な回転速度抑制機構を必要とする。
- (3) 破損，危険回避，効率の面から大径になるほど風車ロータの回転速度を抑制し，その分増速機構を介して発電機の回転速度を増加させて所望の起電力を得る必要がある。
- (4) 微風速と強風速の差が著しく，風車にとって良好な風況が安定して得られない，たとえば日本における平均風速は岬で 5~8m/s，海岸で約 5m/s(ミドルグランデンウィンドファームでは約 9m/s)，内陸で約 3m/s，山岳山頂で 5~10m/s(アルタモントパスウィンドファームでは 8~13m/s)であり，従来風車の定格運転開始風速約 11m/s に達する地域や季節/時間はかなり限定される。

日本に代表されるような微風と強風の差が著しく，かつ風車にとって良好な風況が豊富に得られない地域では，これらの問題を克服した独自の風車が望まれる。

以上のことを踏まえ，筆者らは大径の前段風車ロータと小径の後段風車ロータが固定子を持たない発電機の内外二重回転電機子を互いに駆動する新たな風力発電機を提案した。前後二段(タンデム)風車ロータと内外二重回転電機子の的確な連携プレー能力(インテリジェンスと呼ぶ)によって，特段の機械的制御機構なしで定格運転が可能となり，かつ極微風速から強風速まで連続高出力運転ができる特徴を持っている。本研究では主に，従来の成果^[4]を踏まえて好適風車ロータ形状の設計指針を求めるとともに，実用化に向けて二重回転電機子方式二重巻線型誘導発電機とタンデム風車ロータからなるフィールド実験機を準備することにした。

2. インテリジェント風力発電機の着想

2.1 風車ロータと発電機の連携プレー 本風力発電機は前述のように、直径が異なる前後二段の風車ロータ（前段：大径，後段：小径）が固定子を持たない新たな発電機の内外二重回転電機子をそれぞれ駆動する（Figure 1）。このとき、内外二重回転電機子に働く相反回転トルク，すなわち前後二段の風車ロータそれぞれの発生トルク（方向は逆）が同じ点で運転されるが，風車ロータ（回転電機子）の回転速度や回転方向は任意である。本風力発電機の特徴はこのことを利用する風車ロータと発電機の連携プレー能力であり，風速に応じて次のような挙動をする（Figure 2）。

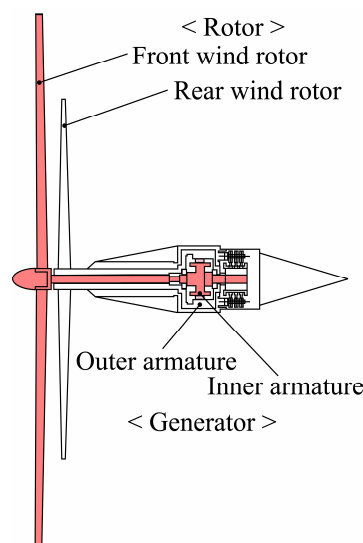


Figure 1 Schematic drawing of Intelligent Wind Turbine Generator

(1) ほんの微風速（カットイン風速）で，両風車ロータは互いに逆方向に回転（相反回転）を始め，発電を開始する。

(2) 風速の増加に伴って後段風車ロータは回転速度を増し，後段風車ロータの最高回転速度付近で定格運転状態に達する。この間，両風車ロータの相対回転速度は従来の単段風車に比べて格段に速いので，微風速下でも従来風車に比べて高出力となる。

(3) 後段風車ロータとは逆方向に回転している前段風車ロータの回転速度も同様に風速とともに増すが，定格運転域での増加は少ない（下述）。

(4) 一方，小径の後段風車ロータが高回転速度（強風速）で風車運転として発生

できる回転トルクには限界があるので，回転トルクが前段風車ロータと一致するように風に逆らった一種の送風運転，すなわち後段風車ロータの回転速度は徐々に遅くなり，停止状態を経て前段風車ロータと同方向に回転するようになる。

(5) このとき，機械的な制動機構なしで，両風車ロータ間の相対回転速度とトルクの積（出力）は風速によらず一定にすることができる。二重巻線型誘導発電機の採用により，安定した出力が得られるようになり，周波数も一定に保つことができる。また，風に逆らう後段風車ロータの影響により，前段風車ロータの過回転が自動的に抑えられる（強風時の自動ブレーキ効果）。

(6) 以上のような風車ロータの挙動（高出力化，ブレーキ効果等）は前段風車ロータ径を相対的に小さく選定，あるいは低速型にできることを物語っており，同じ出力の従来風車に比べて風車ロータにかかる遠心力が小さくなるからブレードの材料選定や内部構造設計に自

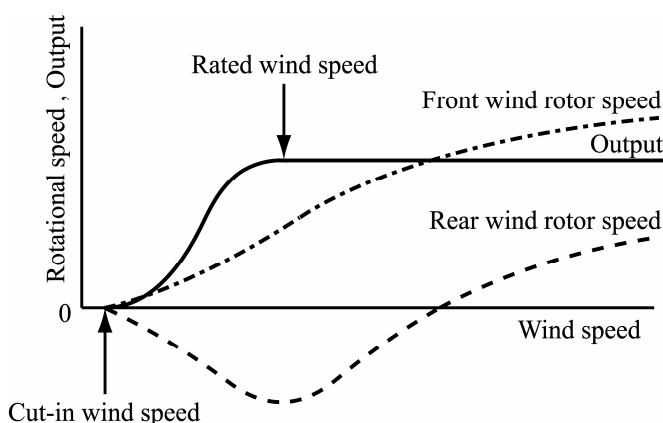


Figure 2 Predictable operation of proposed Intelligent Wind Turbine Generator

由度が増す。このとき、後段の小径風車ロータを高速型に選定することで増速機構は不要となる。

2.2 実験的実証 前段風車ロータ径 $d_F=550\text{mm}$ (ひねりのない二次元ブレード枚数 $Z_F=3$, 周方向から測ったブレードの取付角 $\beta_F=25.2\text{deg.}$)、後段風車ロータ径 $D_R=390\text{mm}$ (同ブレード

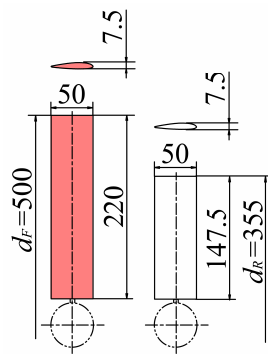


Figure 3 Blade C

枚数 $Z_R=5$, 同取付角 $\beta_R=25.2\text{deg.}$) の場合 (Figure 3) について、風速 v_{m0} に対する出力 P , 回転トルク T , 回転速度 N (添字 F, R : 前後段風車ロータの値) を Figure 4 に示す。ここに、従来の成果で最適なブレード枚数とし^{[4][5]}, 定格運転開始風速を仮に 8m/s と決め、低風速から定格運転開始風速までは最適回転速度で運転し、それ以降は出力一定となるように回転速度を制御した。実機におけるこのような運転は、後述する二重回転電機子方式二重巻線型誘導発電機の二次側周波数変調により容易に実現できる。従来の単段風車ロータによる定格運転ではブレーキやブレードのピッチコントロールで出力制御を行うのが普通である。これに対し本方式では、回転速度抑制機構は何ら必要なく、後段風車ロータが相反回転から同方向回転に移行し、相対回転速度を自動的に制御することで出力を一定に保つことができ、ひねりがないブレードのため迎え角が半径方向に大きく変化して性能は期待できないものの、着想通りの運転が可能である。

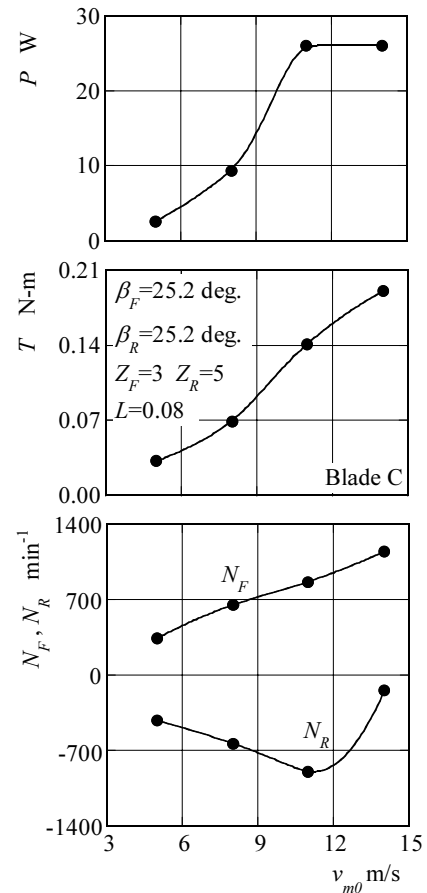


Figure 4 Performances at generating mode

3. 最適な風車ロータ形状の把握

3.1 実験装置 本来の姿は、タンDEM風車ロータと内外二重回転電機子との組み合わせとなるが、ここでは基礎データを得るため、インバータで回生制動させる電動機で風車ロータそれぞれの発生動力(回転トルクは同じ)を吸収させた。このとき、後段風車ロータの回転軸(外軸)はタイミングベルトとプーリを介して別軸に連結されている。それぞれの風車ロータ回転軸と電動機の間にはトルク検出器と回転検出器が取り付けられており、これら軸系の機械トルクを予め調べて実測値に加算することにより、風車ロータが発生する真のトルクで評価することにした。実験に際して追加準備した二次元ブレード形状を Figure 5 に示す。風洞出口(径 600mm)に設ける前段風車ロータ径は $d_F=500\text{mm}$, 後段風車ロータ径

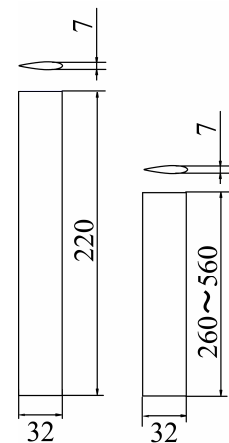


Figure 5 Blade E

は $d_R=260\sim 560\text{mm}$ 間で変化させた。なお、ハブ径は 50mm である。ここに、ブレード端の翼弦長を用いた実験レイノルズ数は $Re=6\times 10^4$ であり、実機よりかなり小さいが、傾向を把握する本研究目的は達成できると考えている。

3.2 出力特性に及ぼすブレード取付角の影響 前段風車ロータのみで運転したときに最高出力が得られるブレード取付角 $\beta_F=11.3\text{deg.}$ の場合について、出力係数 $C_P [=P/(\rho AV^3/2)]$, ρ : 空気密度, A : 前段風車ロータ面積]とトルク係数 $C_M [=T/(\rho V^2 Ad_F/4)]$ に及ぼす後段ブレード取付角 β_R の影響を Figure 6

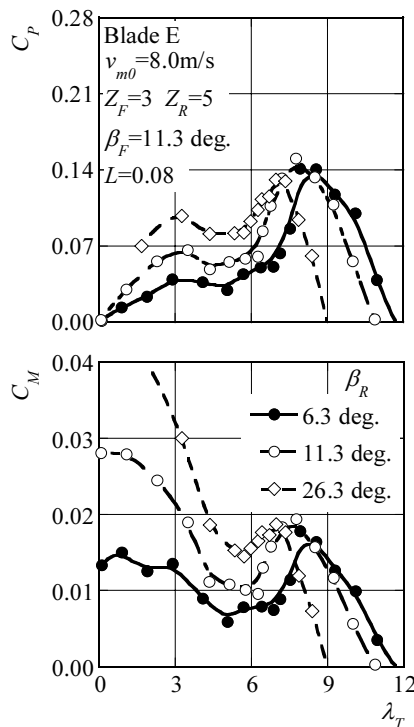


Figure 6 Performances of Blade E

に示す。ここに、 λ_T は周速比(=前段風車ロータ径を基準とした前後段風車ロータの相対外周速度/風速)である。後段ブレードの取付角によらず周速比 $\lambda_T=5$ 付近でトルク係数と出力係数は減少

するが、 $\lambda_T=7\sim 9$ で最高出力がえられる。その最高出力係数 C_{Pmax} を示すときのトルク係数 C_{Mopt} および周速比 λ_{opt} (第一添え字 T,F,R は相対, 前段, 後段の値) を Figure 7 に示す。後段ブレード

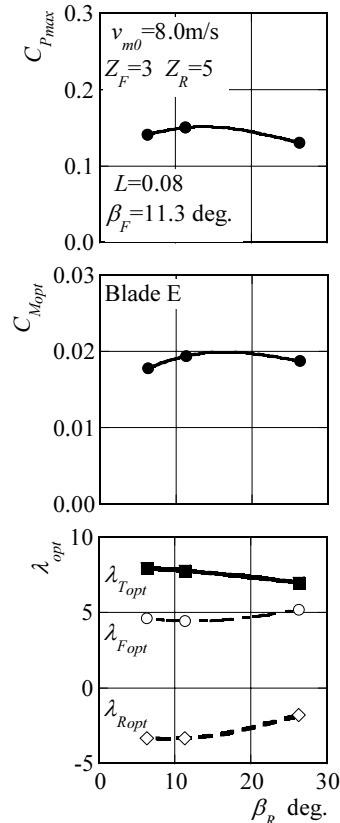


Figure 7 Effect of rear blade setting angle on the performances

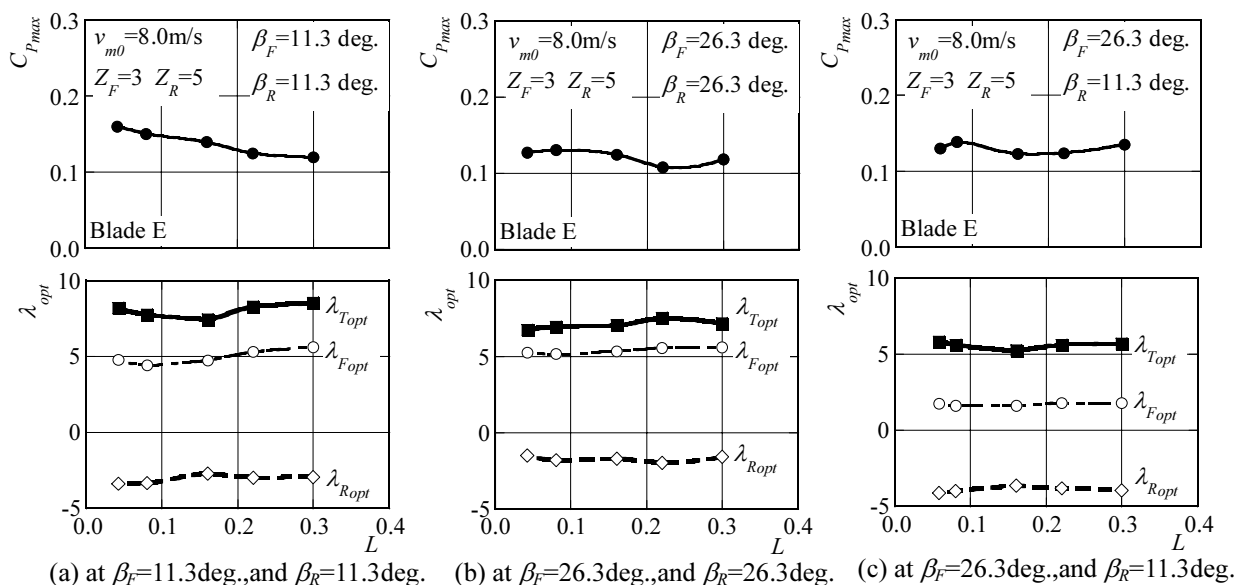


Figure 8 Effect of the axial distance between both wind rotors on the performances

ドの取付角が $\beta_R=10\sim 15\text{deg}$.付近で高出力となり、それには前段風車ロータの回転速度(λ_{Fopt})の寄与が大きい。

3.3 出力特性に及ぼす前後段風車ロータ間距離の影響 前後段風車ロータの軸間距離 l (風車ロータ取付中心間, $L=l/d_F$)が出力特性に与える影響を Figure 8 に示す。ブレードの取付角度によって L に対する傾向は幾分異なるものの、先に求めた最適ブレード取付角付近で高出力となり[図 8(a)], 本実験範囲では、軸間距離が短いほど出力係数 C_{Pmax} は高くなる。前段風車ロータを通過した流れは外側に偏る傾向にあるので、軸間距離が短いほど後段風車ロータが吸収する風のエネルギーが相対的に増加するためと考えられる。しかし、軸間距離を短くするには限界があり、ブレードの材料や形状によるたわみを考慮して最適な軸間距離を選定する必要がある。

3.4 出力特性に及ぼす後段風車ロータ径の影響 次に後段風車ロータ径が出力特性に与える影響を調べた(Figure 9, 10)。ここに、両風車ロータ間距離は上記実験範囲において最適な $L=0.04$ とした。風車ロータ径比 $D(=d_R/d_F)$ が 1 までは後段風車ロータ径が大きくなるにつれて C_{Pmax} と C_{Mopt} は高くなり、1 以上になると低下する(Figure 9)。このとき、後段風車ロータ径の増加につれて、 λ_{optT} は減少して増加するが、その寄与は後段風車ロータ周速比 λ_{optR} に比べ前段風車ロータ周速比 λ_{optF} のほうが幾分大きい。相対回転速度が早い領域($N_T=3000\text{ min}^{-1}$)にお

いては D にかかわらず前段風車ロータと後段風車ロータが相反回転する[Figure 10(a)]。しかし、相対回転速度が遅い領域($N_T=400\text{ min}^{-1}$)において、 D が 0.84 以下では後段風車ロータの回転方向が前段風車ロータと同方向に回転するが、 D が 0.84 以上になると逆に前段風車ロータの回転方向が変わり、後段風車ロータと同方向に回転する[Figure 10(b)]。これは後段風車ロータの回

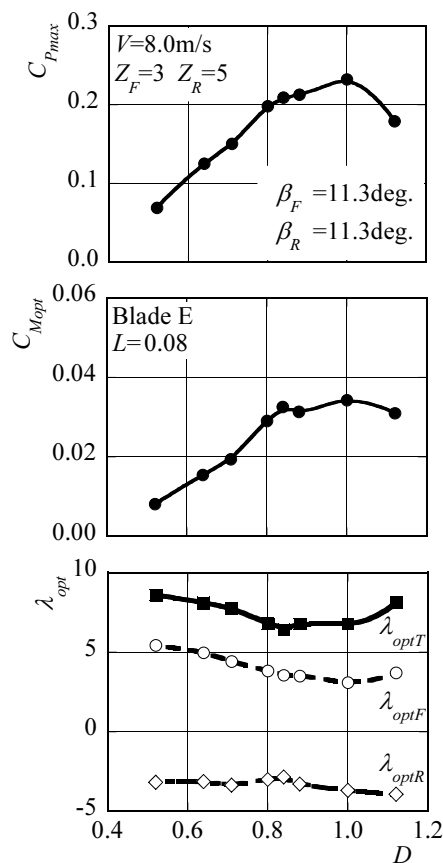


Figure 9 Effects of the rear wind rotor diameter on the performances

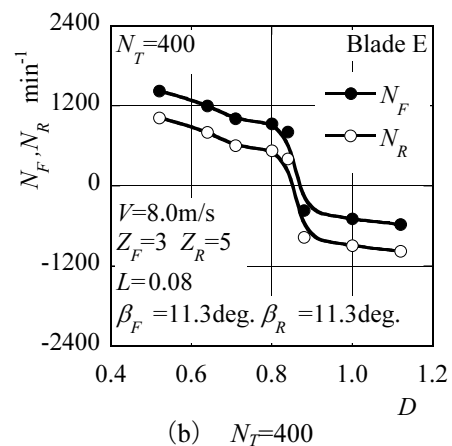
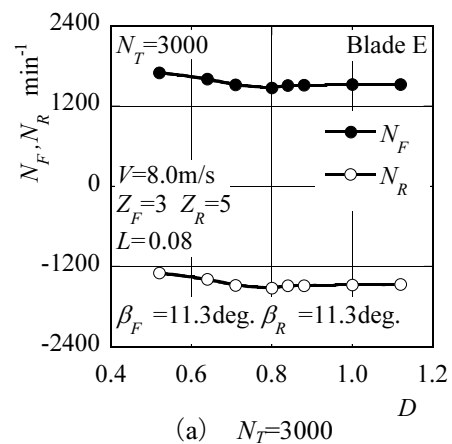


Figure 10 Rotation behavior of wind rotor

転トルクが前段風車ロータよりも上回り、前段風車ロータが後段風車ロータの回転トルクと釣り合うように回転方向を変えるためと考えられる。しかし、この回転挙動は本風力発電機の着想から大きく外れるものである。従って、本風力発電機の着想に沿いつ出力係数の高い $D=0.84$ 付近が最も適しているとみなしてよい。

3.5 数値計算によるブレード

設計の準備 数値計算を設計に流用するため、反りと厚み分布を持つ二次元ブレード (Figure 3) からなる風車ロータを計算対象として運転シミュレーションを試みた。このとき、三次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式とした定常計算を行うこ

とにし、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを適用して保存形有限要素法に基づく有限体積法を用いた CFX-5 を使用した。Figure 11 に計算格子を示す。計算機容量から十分広い範囲に微細な格子を膨大に設けることが不可能なので、計算格子を微細にとった風車ロータを含む領域 [Figure 11 (a), 646,484 格子点] の外側に格子が粗い領域 [Figure 11 (b), 19,859 格子点] を設けた。両領域は速度と圧力で接続され、前後段風車ロータ間は Frozen Rotor Interface で接続される。全境界では流れの横切りを許し、前段風車ロータより 600 mm 上流に設けられた境界上の風洞ノズル範囲で風速 $v_{m0}=10.5\text{m/s}$ を与えた。

最高出力運転時における風車ロータ前後の流れを実験結果 (EXP : 定期的に測定) とともに Figure 12 に示す。ここに、 R は無次元半径 ($=r/r_F$, r_F : 前段風車ロータ半径), V_{Mtm} は $V_{\theta m}$, V_R はそれぞれ周方向に平均した無次元 (v_{m0} で除した値) 軸方向速度成分, 旋回速度成分 (前段風車ロータの回転方向が負), 半径方向速度成分である (シミュレーション結果については両ブレードが Figure 13 の位置にあるときの値)。高い精度での予測には限界があるものの、今まで未知であった流れの概要を知るには十分な結果が得ら

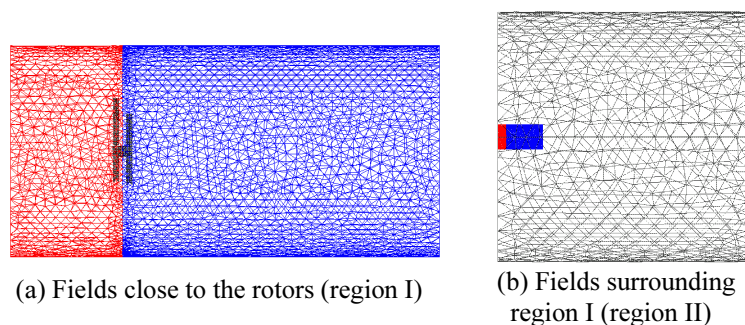


Figure 11 Fields of the flow simulation with grid generation

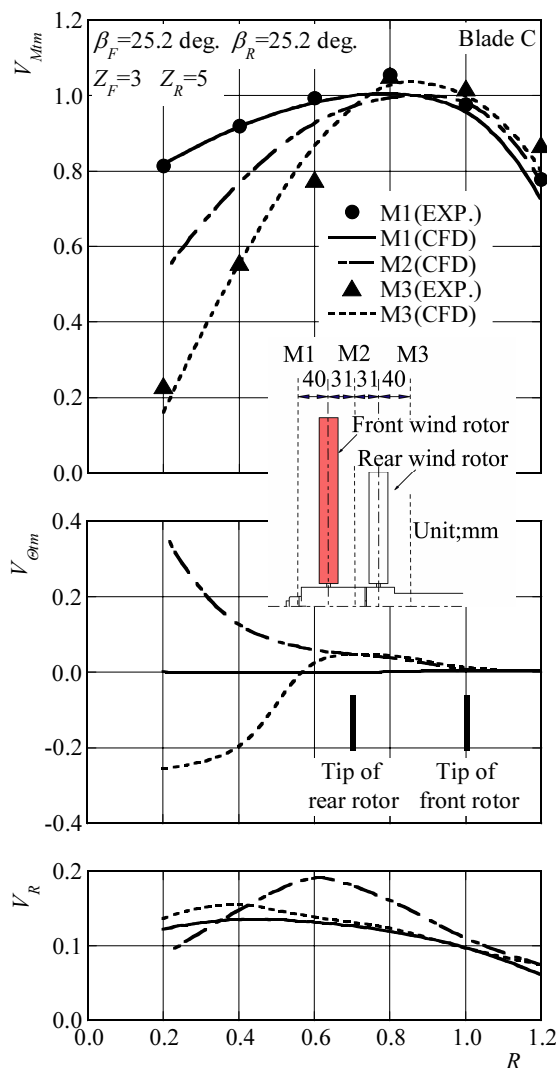


Figure 12 Velocity distributions around the tandem wind rotors in the radial direction

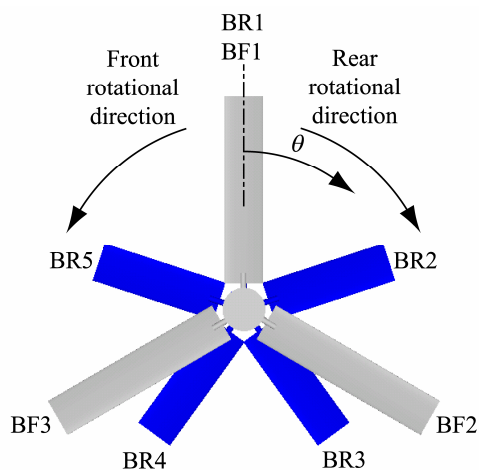


Figure 13 Relative blade positions

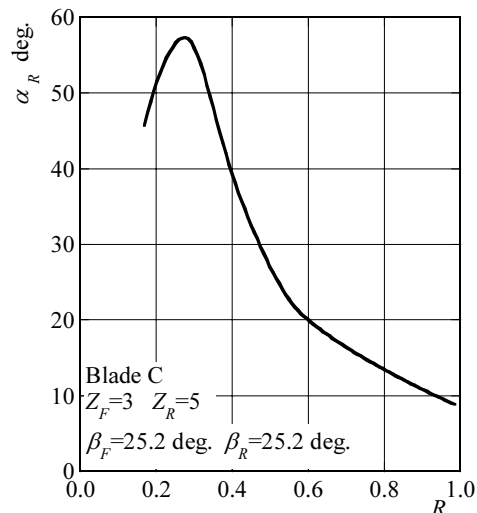


Figure 14 Attack angle of the rear wind blade

れている。すなわち、軸方向速度は風車ロータを通過する毎に半径が小さい領域で遅くなるが、旋回速度成分は逆に早くなる。また、半径外向きの流れも確認できる。なお、半径が大きいところで速度が遅くなるが、これは風車ロータ径が風洞ノズル径に近いためであり、十分広い流れ場ではほぼ一定速度になると考えてよい。Figure 14 に後段ブレードに対する迎え角 α_R を示すが、捻りが必要なことを示唆している。

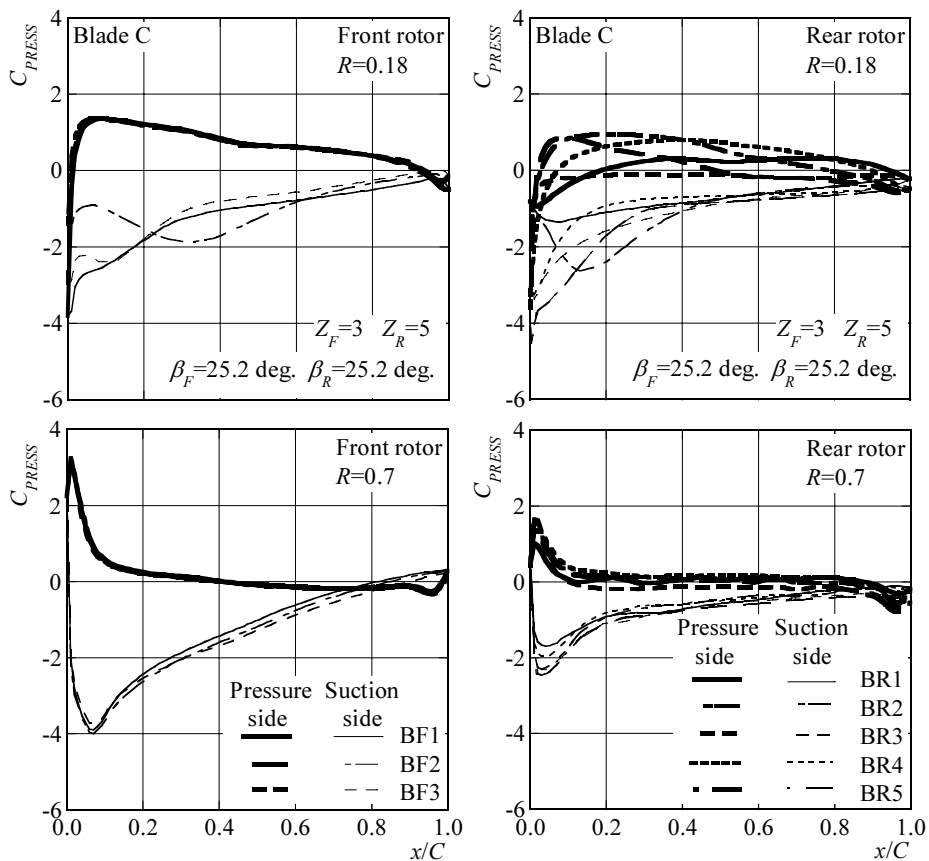


Figure 15 Pressure distributions around wind rotor blades

Figure 15 にブレード前縁から測った無次元翼弦位置 x/C (C : 翼弦長) に対するブレード面上圧力係数 $C_{PRESS} [= (P - P_0) / (\rho v_{m0}^2 / 2)$, P_0 : 大気圧] 分布を示す(前後段ブレードの位置関係は Figure 13 参照)。ブレード枚数が少ない前段のほうが当然翼負荷は大きく、前後段風車ロータ

間の干渉があるから、ブレードの位置によって圧力分布が異なり、後段ブレードのハブ側でその違いが目立つ。

4. フィールド実験用インテリジェント風力発電機モデルの準備

4.1 二重巻線型誘導発電機の二重回転電機子化 風車用発電機として、永久磁石同期発電機、直流励磁同期発電機、誘導発電機、巻線形誘導発電機等が考えられるが、昨今のメガワット級の大型風力発電機については、コスト、性能の点で巻線形誘導発電機が採用される傾向にあるが、永久磁石同期発電機の例もある。

二重回転電機子方式永久磁石同期発電機については既に保有している^[6]ので、ここでは、将来の大型化を想定して次の仕様をもつ二重巻線型誘導発電機の二重回転電機子方式化を試みた。試作したモデルを Figure 16 に示す(外側回転電機子からの出力：1.2kW，相対回転速度：360min⁻¹

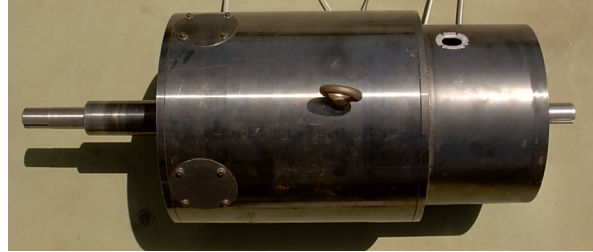


Figure 16 Induction generator with double armatures

～1260min⁻¹，極数：8極，起電圧：200V，起電流：4.5A，周波数：60Hz）。本二重回転電機子方式二重巻線型誘導発電機は系統連携電源(二重給電巻線形誘導発電機)のみならず独立電源(二次励磁/定電圧/定周波数巻線形誘導発電機)にも適用できる。

4.2 風車ロータの設計 上記で準備した発電機の容量を踏まえ、前後段風車ロータ径 $d_F=2000\text{mm}$ ， $d_R=1330\text{mm}$ ，ハブ径 290mm，のフィールド実験用タンデム風車ロータを設計した。このとき、前述の研究成果を踏まえて、前後段風車ロータのブレード枚数はそれぞれ $Z_F=3$ ， $Z_R=5$ ，両風車ロータ間距離は $l=160\text{mm}$ ，設計(定格運転開始)風速は $v_{m0}=8\text{m/s}$ (前後段風車ロータの回転速度は $N_F=400\text{min}^{-1}$ ， $N_R=500\text{min}^{-1}$ ，出力は $P=450\text{W}$)とした。上述の数値計算のみで設計するまでには至っていないので、前後段ブレードは産業技術総合研究所で風車専用翼型として開発された MEL012 翼型^[7]を使用することにした。

(1) 前段風車ロータ 一般的な翼素運動量理論を基本に、単段風車ロータとして最適なブレード取付角と翼弦長を以下の式から決定した。

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \quad C = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos \phi_{F_{in}}) \quad (4-1)$$

ここに、 ϕ は回転方向から測った相対流入角、 λ_r は局所周速比、 C は翼弦長、 B はブレード枚数、 C_L は揚力係数である。流れ場は軸方向誘導係数 a (ディスク理論による軸方向速度成分の減速割合)と旋回方向誘導係数 a' (同周方向速度成分の減速割合)によって決定される。式(4-1)は a および a' によって λ_r と ϕ との関係を結び付けた簡単化の式である^[8]。上式から前段ブレード流入角 ϕ_F と翼弦長を算出した後、風車ロータを通過する流れの角運動量変化がすべて回転トルクに変換されると仮定して、所望の出力を満たす回転トルクが得られていることを確認する方法をとった。ここに、微小環状流管の回転トルクは

$$dT_F = -\rho dQ_2 v_{u2} r_2 \quad (4-2)$$

で与えられる (dQ は微小環状流管を通る流量).

風速と翼弦長から求まるレイノルズ数 $Re=1 \times 10^5$ において, MEL012 翼型の揚抗比 ($\varepsilon=C_L/C_D$) が最高となる迎え角は 11deg. であるが, その前後で急激に揚抗比 ε は低下するので危険を避け, ここでは迎え角が 8deg. となるようにブレードの取付角を決定した. 以上の方法で求めた前段風車ロータのブレード

形状を Figure 17 に示す.

(2) 後段風車ロータ 上記で設計した前段風車ロータのみで数値シミュレーションを行い, 後段風車ブレードの流入角 ϕ_{Rin} を得た (図略). この結果から前段風車ロータと同じ回転トルク (数値シミュレーション) が得られる後段ブレードへの相対流入角 ϕ_r を角運動量変化から求めた. このとき, 流入角が半径方向に自然に変化するように

$$\phi_r = k \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \quad (4-3)$$

と仮定して, 必要な角運動量変化から変数 k を決定した. ここに, 必要な角運動量変化量は以下の式から求められる.

$$dT_F = -dT_R \quad dT_R = \rho dQ_3 v_{u3} r_3 - \rho dQ_4 v_{u4} r_4 \quad (4-4)$$

このようにして求めた流入角を用いて, 翼素運動量理論の式 (4-1) から翼弦長を求めること

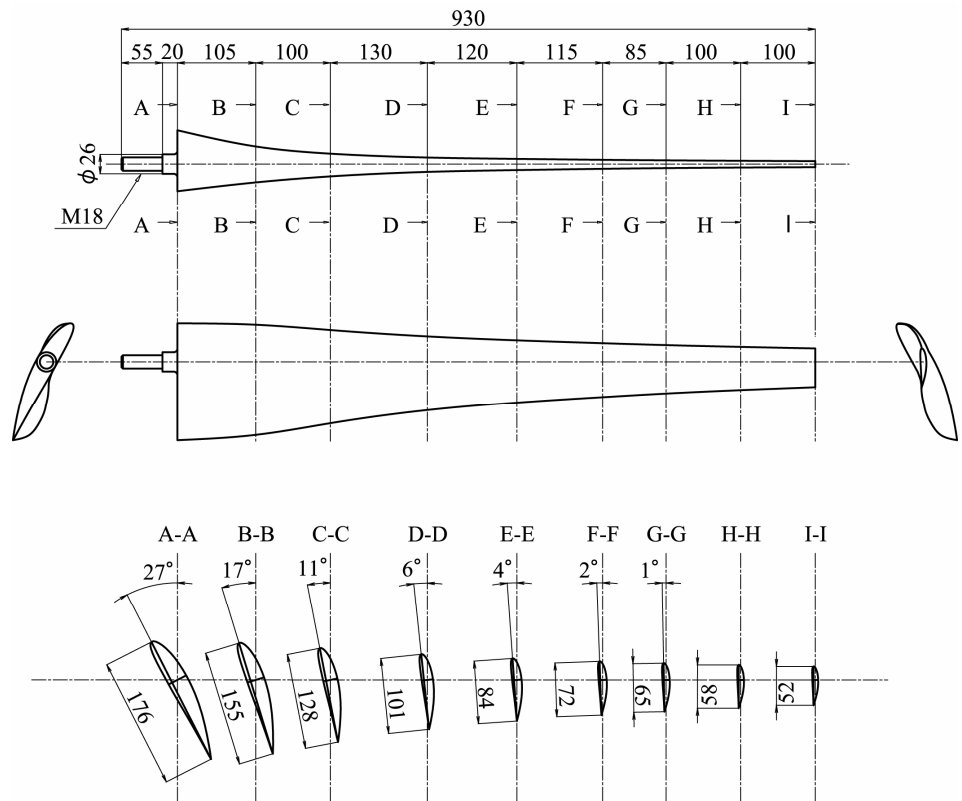


Figure 17 Blade profile of the front wind rotor

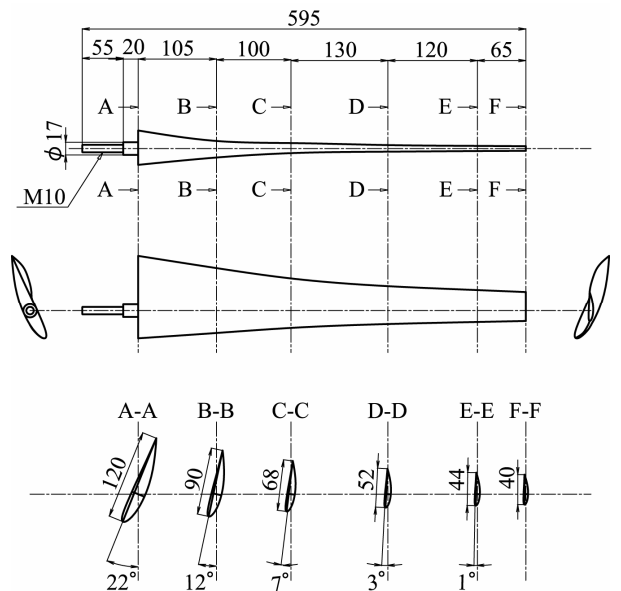


Figure 18 Blade profile of the rear wind rotor

になるが、製作の都合上、後段ブレードの翼弦長はここで求めた値より 40%~50%程度長く取っている。以上のように設計した後段風車ロータのブレード形状を Figure 18 に示す。

4.3 インテリジェント風力発電機モデル 上記の二重回転電機子方式二重巻線型誘導発電機とタンデム風車ロータからなるインテリジェント風力発電機を高さ 8m のタワーに設け (Figure 19) フィールド実験の準備をした。本フィールド実験では独立電源用と系統連系用を対象とする。内外二重回転電機子の回転速度と回転方向が検出できるようになっており、それらは二次側(内側回転電機子)の周波数変調機能と外部負荷が調節できる簡単な制御サーキットに連結され、風速に対応した、風車ロータと発電機の確かな連携プレー運転を実現する。なお、本モデルは実験室で行う基盤技術の確立に向けた問題点抽出とその改良後の評価(フィールドバック)、レイノルズ数の効果、および風洞における定常流とフィールドでの実風況下における非定常流の穴埋めをするためにも用いる。



Figure 19 Model Intelligent Wind Turbine Generator for field test

5. 結言

従来の研究成果を踏まえて好適風車ロータ形状の設計指針を求めるとともに、実用化に向けて二重回転電機子方式二重巻線型誘導発電機とタンデム風車ロータからなるインテリジェント風力発電機のフィールド実験用モデルを準備した。

最後に、財団法人 JFE21 世紀財団 2005 年度技術研究助成により本研究を格段に進展させることができたことを記し、関係諸兄に謝意を表す。

参考文献

- [1] 茅陽一, 新エネルギー大辞典, 2002, p.365.
- [2] <http://www.nedo.go.jp/intro/pamph/fuuryoku/index.html>
- [3] <http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>
- [4] Toshiaki Kanemoto and Ahmed Mohamed Galal, Development of Intelligent Wind Turbine Generator with Tandem Wind Rotors and Double Rotational Armature, JSME International Journal, Ser. B, Vol. 49, No. 2(2006), pp. 450-457.
- [5] Ahmed Mohamed Galal, Toshiaki Kanemoto, Yuko Konno, Kota Ikeda and Yuji Inada, Intelligent Wind Turbine Generator with Tandem Rotors Applicable to Offshore Wind Farm, Proceedongs of the 16th ISOPE, Vol. 1 (2006), pp.357-362.
- [6] 金元・金子・田中・八木“相反転方式水力発電に関する基礎研究：第1報”, 日本機械学会論文集, 66-644, B (2000), pp. 1140~1146.
- [7] <http://www.aist.go.jp/RIODB/db060/cgi-bin/contrl/menu.cgi>.
- [8] 牛山泉, 風車工学入門(2002), p.100.