

# 垂直軸型風力発電システムの開発について

近藤夏樹, 浅治邦裕  
日本飛行機(株)

## Development of Vertical Axis Wind Turbine Generator System

by  
Natsuki Kondo (Nippi) and Kunihiro Asaji (Nippi)

### ABSTRACT

This paper presents the development of vertical axis wind turbine generator system, performed by Nippi Corporation. Preliminary system with 7.5kW generator has been designed, built and used to study high performance torque control method and to prove the aerodynamic/acoustic performance. Applying the results and experiences of this study, the new system with 10kW generator has been designed and built.

### 1. はじめに

風力発電は地球温暖化対策として、欧米を中心に普及が進んでいるクリーンエネルギーの1つである。発電用に使われる風車の型式としては大型風車及び小型風車とも、水平軸のプロペラ型が多く用いられている。一方で直線翼垂直軸風車は、①風向に左右されないのが回頭が不要、②プロペラ型と比較して騒音が小さい、③設置スペースをコンパクトにできる、等のメリットを有する。当社では、この垂直軸型風車に着目し、7.5kW 級風力発電システム試作に始まり、船舶搭載型の 30kW 級システム、量産型の 10kW/20kW 級システムへと、実用化を目指した研究を行ってきた<sup>(1)</sup>ので、その成果について紹介する。

### 2. 7.5kW 級システムによる研究

図1に 7.5kW 級風力発電システムに用いた試作風車の外観を示す。回転直径は 4m でスパン長 3.6m、翼弦長 0.3m と対称翼ブレードを 3 枚持つ (ソリディティ=0.45)。発電性能は周速比 (=ブレードの回転周速度÷平均風速) 3.0 において、出力係数  $C_p$  は約 0.35 である。 $C_p$  は風車が風から取り出せるエネルギーの割合を示し、次式で表される。

$$C_p = \frac{L}{0.5 \rho V^3 A}$$

$L$  : 実際に得られる出力 [kg・m/s]

$\rho$  : 空気密度 [kg・s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>]

$A$  : 風車の風が当たる面積 [m<sup>2</sup>]

$V$  : 風速 [m/s]



図1 7.5kW 級風力発電システム風車部外観

風車全体の支持構造は、最初ロータの回転を下側だけで支持する片持ち式で設計したが、軸の危険回転速度と試作ということを考慮して、ロータの回転を上下の軸受で受ける形式とした。

構造で特筆すべき点は、ブレードの重量を軽くするためにアルミサンドイッチ構造を採用した点である。同システムの主要諸元を表1に、システム構成を図2に示す。

表1 7.5kW 級風力発電システム主要諸元

ロータ	直径	4.0m
	高さ	3.6m
	受風面積	14.4m <sup>2</sup>
ブレード	ブレード	3
	翼幅	0.3m
	構造	アルミサンドイッチ構造
発電機	発電方式	同期発電機
	定格出力	7.5kW
負荷	バッテリー、照明	
カットイン風速	4.0m/s	
カットアウト風速	15.0m/s	

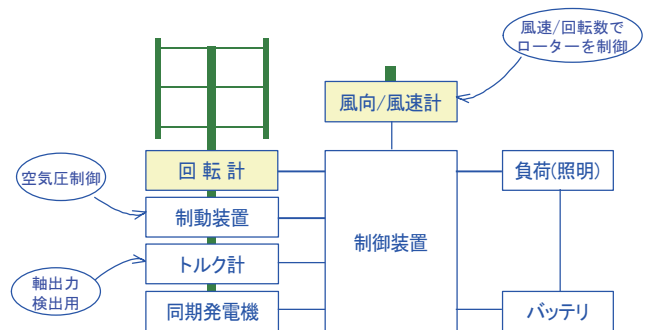


図2 7.5kW 級風力発電システム構成

試作に先立ち、ブレードの風洞試験と強度試験を実施した。風洞試験は実物の 1/3 模型で行い、得られた空力特性を試作風車の性能推定に使用した。試験状況を図3に、ブレードの揚力/抵抗特性を図4に示す。ブレードの強度試験は、カットアウト風速の 1.5 倍(22.5 m/s)の風速における荷重を設計最大荷重 (100%) として、150% 荷重を負荷し、破壊しないことを確認した。



図3 ブレード単体風洞試験

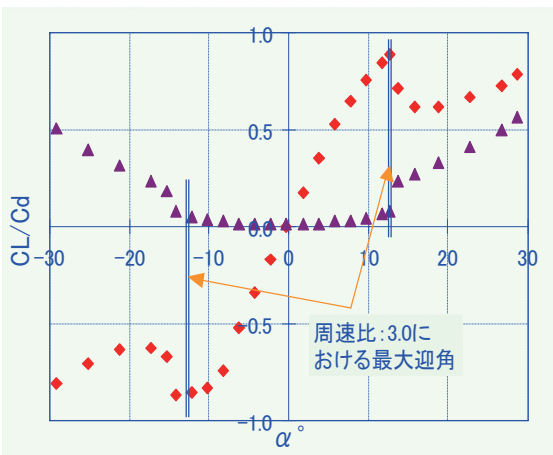


図4 ブレード単体風洞試験結果

ロータのピッチが固定式であることから、風速とロータ回転数をモニタし、風速の変化に対応して周速比をなるべく発電効率の良い 3.0 一定に保つ様、トルク制御している。具体的には、風速とロータ回転数のデータを基に発電機に負荷トルクを指示して、風速に合わせてロータ回転数を制御する方法である。図5にトルク制御の例を示す。

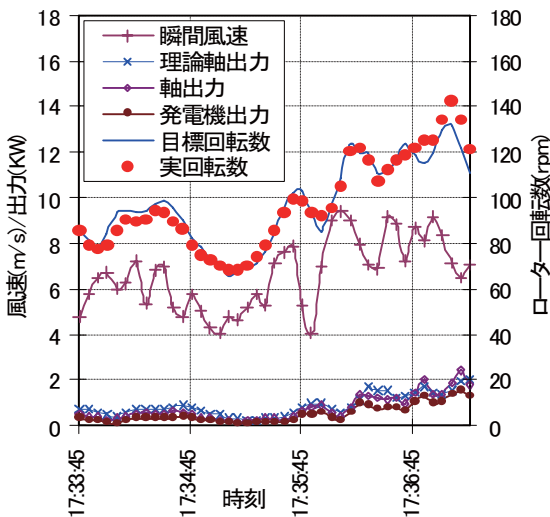


図5 トルク制御の例

同図を見ると、風速の変化に対し、周速比 3 を維持する為の回転数制御がほぼ目標通り実行できていることがわかる。

図6はトルク制御を行った 7.5kW 級風力発電システムの発電機出力例を示す。この図から発電機の出力は、理論軸出力の 60%近辺に集中している。実出力が理論出力から落ちる要因としては以下の項目が考えられる。

- ・風速変動の割合
- ・ロータの質量及び回転軸回りの慣性モーメントの影響
- ・風車構体の影響
- ・ロータ回転系の摩擦等（軸受、増速装置）

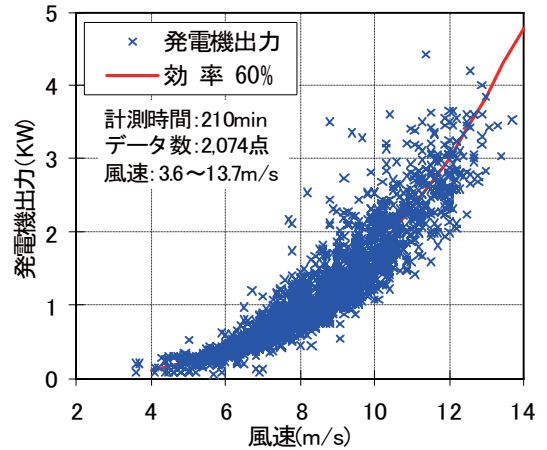


図6 トルク制御による発電機出力例

この内、風速変動の割合について、変動が大きい場合と小さい場合で発電機出力を比較した結果を図7～8に示す。風速変動が小さい場合（変動幅 3～4m/s）、理論軸出力に対し 90%以上の効率で発電しているが、変動が大きくなると（変動幅 5～7m/s）、回転数を風速に合わせるために、トルク制御における発電機への負荷トルクの増減が激しくなり、出力効率は小さくなる。

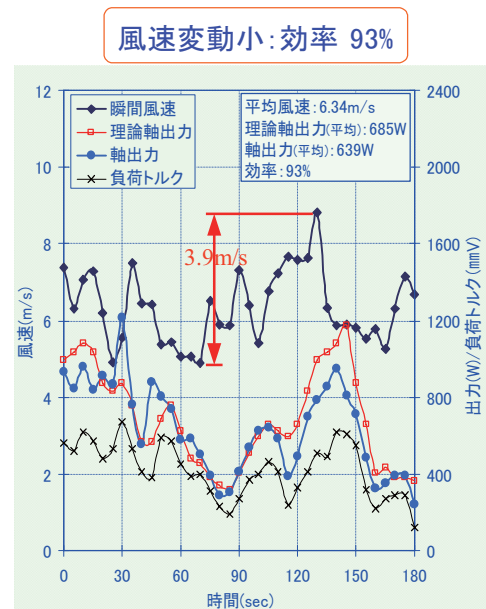


図7 風速変動の影響（風速変動が小さい場合）

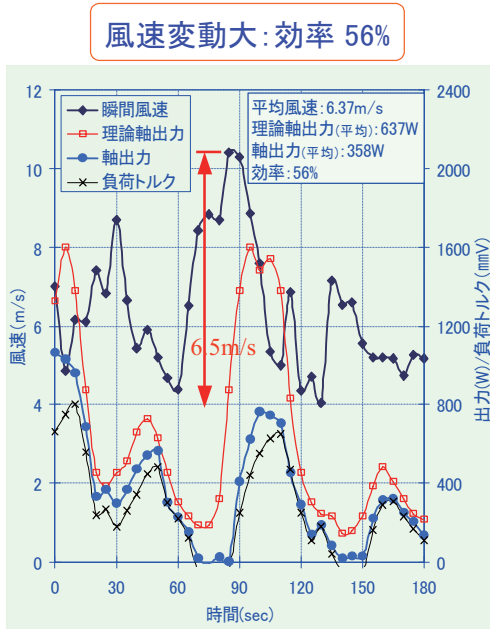


図8 風速変動の影響（風速変動が大きい場合）

次に騒音計測結果について述べる。測定方法（マイク位置、暗騒音補正方法、等）については JIS C1400-0 風力発電システム 第 11 部：騒音測定方法を参考にして、図 9、10 に示す位置にマイクロフォンを設置し、暗騒音の少ない夜間（22:00～8:00）に 1 分間の等価騒音レベル  $L_{Aeq}$  の連続計測を行った。また風速・風向についても 1 分間平均を騒音と同時計測し、一定条件（風速 5.5m/s 以上、マイクに対する風向 ±30 度以下）を満たしたデータについて暗騒音補正を行い、風速別に整理した。



図9 騒音計測状況

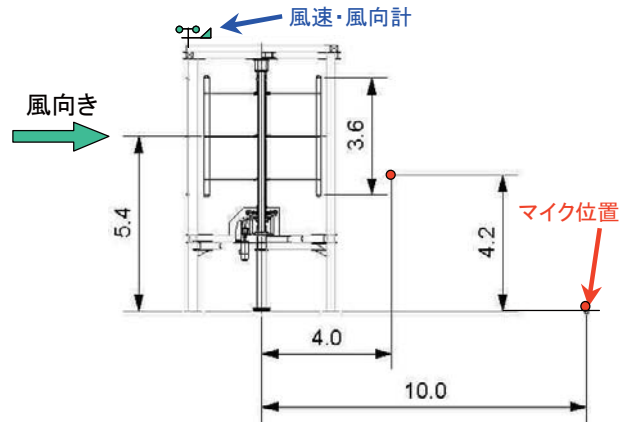


図10 騒音計測位置

暗騒音は風車計測の計測と同じマイク位置・時間帯で風車を強制的に停止させて計測した。暗騒音の補正は JIS C 1400-0 でも用いられている下式を使用した。有効計測は計測値と暗騒音との差が 6dB 以上の場合のみとし、他は無効データとした。

$$L_S = 10 \log \left[ 10^{\frac{L_{S+n}}{10}} - 10^{\frac{L_n}{10}} \right]$$

- $L_S$  : 運転時の風車の音だけの等価音圧レベル
- $L_{S+n}$  : 風車の音及び暗騒音を合成した等価音圧レベル
- $L_n$  : 暗騒音の等価音圧レベル

図 11 に暗騒音補正を行った騒音計測値を示す。同システムより発生する音は静粛で、昼間は暗騒音に埋もれてほとんど気にならないレベルであった。

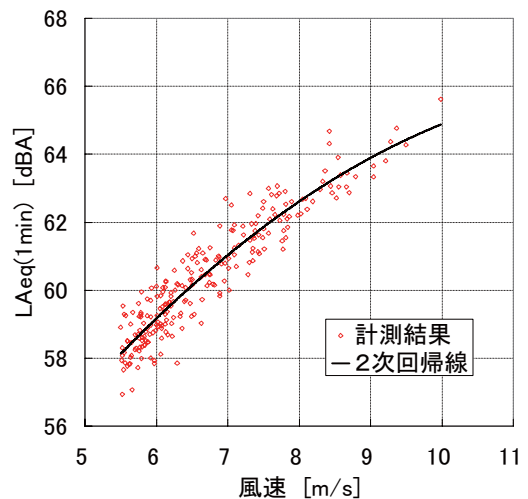


図11 騒音計測結果

3. 船舶への搭載

7.5kW 級システムの研究を経て、日本郵船株式会社と共同で船舶に搭載するための 30kW 級風力発電装置を開発し、日本-北米西海岸間の運航において運用試験を実施した<sup>(2)(3)(4)</sup>。目的は以下の通りである。

- ・ 洋上の風況下で運用して得られる電力量の評価
- ・ 船内電源への系統連系技術の確立
- ・ 船舶に搭載するにあたっての問題点の抽出

本装置が置かれる風況は搭載船の航路や運航する季節に影響されるため実際に航海している自動車運搬船で行った風況調査を用い予測した (図 12)。この風況予測に基づき、航海速度 20 ノットを考慮して、相対風速 25m/s までを運転範囲とし、これを元に図 13 に示すような年間発電量、稼働率を計画した。

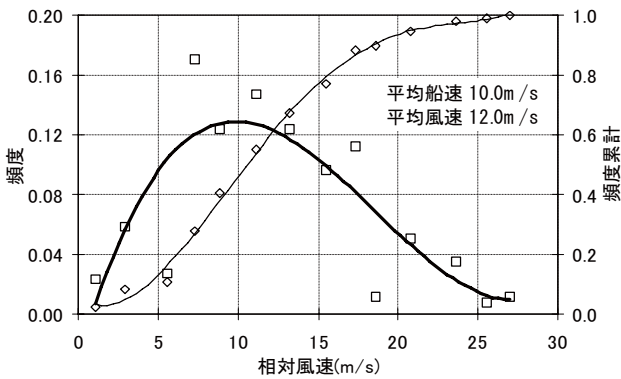


図 12 風況調査結果

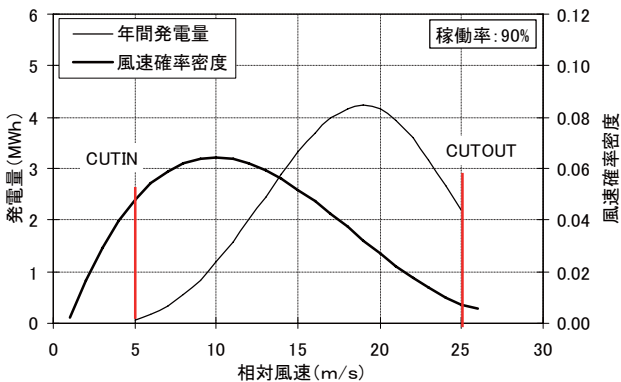


図 13 年間発電量予測

設置位置の選定で問題となるのが、進行方向からの風の剥離である。搭載船はその構造上ブリッジが前方にあり、風と正対して進行する場合、ブリッジの後方に風の乱流領域が形成されガレージデッキ部の一部ははその領域内に入る。搭載位置は船の周囲の流れ解析結果を参考にし、スペースの制約とピッチング時の過度な負荷を考慮して船体の中央部とした。このため本装置の設置位置が前述の剥離領域にかかり風速が十分に得られない可能性もあるが、この影響は搭載後の試験時に確認することとした。

表 2 船舶搭載型 30kW 級風力発電システム主要諸元

ロータ	直径	4.0m
	高さ	4.5m
	受風面積	18.0m <sup>2</sup>
	ブレード	3
ブレード	翼幅	0.32m
	構造	アルミサンドイッチ構造
発電機	発電方式	誘導発電機
	定格出力	30kW
カットイン風速		5.0m/s
カットアウト風速		25.0m/s

同システムの主要諸元を表 2 に示す。本装置の 7.5kW 級試作風車では、ロータ回転軸からの取得エネルギー効率の実測値が 64% だったのに対して、本装置の取得エネルギー効率は 45% として設計を行った。これはブレードを支持するアームの本数を増やしたことや風の乱れ具合が不明なこと、翼型を研究試作から変更したことによる。このエネルギー取得効率を考慮して、最大出力を得る為の受風面積を 18.0 m<sup>2</sup> とした。

陸上設置と異なる点は設置場所が動揺することである。ロータが回転している状態で船が動揺するとロータにはジャイロモーメントが働き、ブレードを支持するアームに曲げ荷重が作用する。従来の構造ではアームの役割はブレードの回転時の遠心力とトルクを回転軸に伝えることであるため、断面形状は薄い翼型が採用されてきた。本装置では、曲げ荷重を軽減する対策としてロータ径を絞りブレードを軽量化しジャイロモーメントを小さくしている。さらにアームの断面形状を見直すとともにブレードを支持する本数を増加させ曲げ荷重に耐えうる設計とした。

制御面では船全体の動揺速度をジャイロセンサにより監視し、設計条件以上になった場合に回転を停止する機能を持たせ、安全面に配慮した設計とした。発電した電力は倉内の安全点検のために点灯されている電灯用に用いられた。

次に風況について述べる。図 14、15 は、それぞれ日本から北米へ向かう間 (往路)、北米から日本へ向かう間 (復路) の風速出現率とその累計グラフを示している。

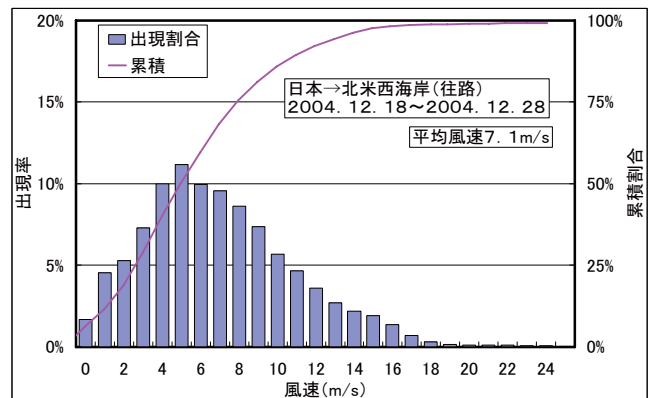


図 14 往路での風速出現率



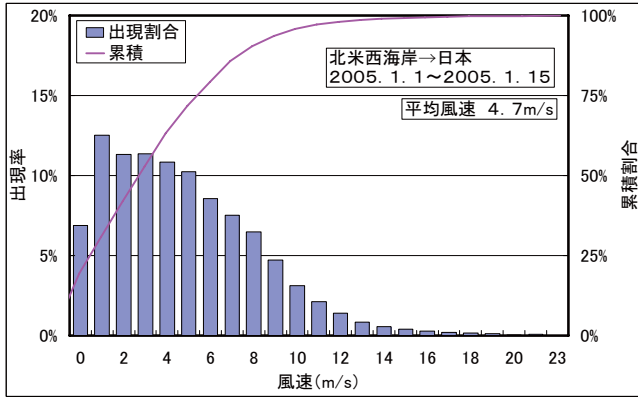


図 15 復路での風速出現率

これらのデータから風況は計画段階のものと大きく異なっていることが分かってきた。計画では、相対風速が 12 m/s であったが、実測では 4~5m/s であり、この差異の原因は

- (1) 計画での風況調査の位置が、比較的風が強いブリッジであったこと
- (2) 本船前方で起こる剥離流の影響があったこと
- (3) 本船の航海ルートが正対風を受けるような経路を余り取らないこと

が挙げられる。

(1)については本船が新造船であったため、風況データを設置予定位置で計測できなかった。発電量見積りが、類似船のブリッジにて観測されたデータによっていることが過大評価の原因として挙げられる。

(2)について、設置位置検討に船の CFD 解析結果を参考にした。それによると設置位置はブリッジ前で剥離した空気の流れが戻ってくる位置と想定できたが、実際は剥離の影響が残り、風の弱い場所となっていると考えられる。

(3)に関しては、本船は自動車運搬船であるので、形状的に風の抵抗を受け易い。その為、なるべく追い風を受けるように航行するため、風車で受ける風は船速分よりも低い風速になることがある。

本船は偏西風や貿易風、海流などの影響で往路と復路とで異なった経路により航行されていることが多い。グラフからは風車が受ける風が、往路、復路でかなり異なっていることが分かる。

最後に図 16、17 に航海中の発電例を示す。平均風速と発電量の関係は概ね設計計画値以上であり、設計余裕分で性能の向上が図れる可能性がある。

図 16 では高い風速域での発電電力の落ち込みが見られるが、これは当初運航中に倉内電灯を消灯する計画となっていたため、消費負荷が少なくなることで系統連系保護装置が作動しやすくなるのをカットアウトの条件を低く設定することで処置したことによるものである。

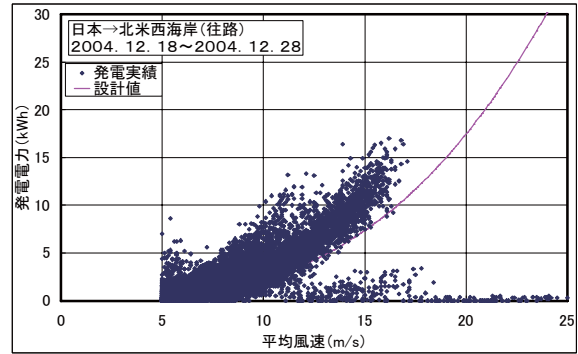


図 16 船舶搭載型システムの発電事例 (往路)

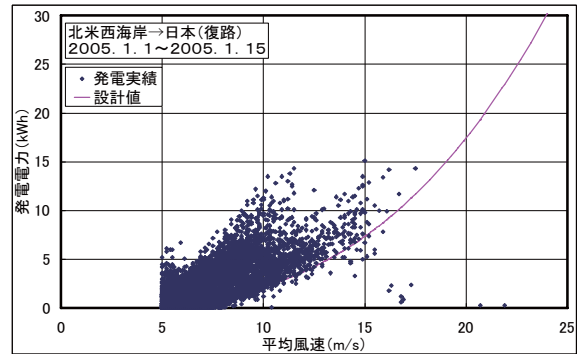


図 17 船舶搭載型システムの発電事例 (復路)

#### 4. まとめ



図 18 10kW 級実用風車 1 号機

試作風車を通して実用化のための多くのデータを得ることができた。H19 年からは 10kW/20kW 級風力発電システムを事業化し、10kW 級の 1 号機を本社ビル屋上に設置した (図 18)。また昨年 JAXA 殿との共同研究をスタートし、CFD を用いた風車の空力性能評価を試みている。今後は、同風車のデータを蓄積しつつ、実運用上の問題点と改善方法を研究していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 浅治,他,「縦型風車の騒音について」,第 25 回記念風力エネルギー利用シンポジウム,2003.
- 2) 浅治,他,「縦軸型風車の船舶への応用について」,第 26 回風力エネルギー利用シンポジウム,2004.
- 3) 浅治,他,「船舶へ搭載した縦軸型風車の稼動状況」,第 27 回風力エネルギー利用シンポジウム,2005.
- 4) 浅治,他,「船舶へ搭載した縦軸型風力発電装置について」,第 76 回風洞研究会議論文集.