自動車用送風機の電力回生に関する研究
(翼ソリディティの風車効率への影響)Research of Electric Power Regeneration using Automotive Cooling Fan
(Influence of the Blade Solidity on the Wind Turbine Efficiency)

○学 織田 信一 (名工大) 正 長谷川 豊 (名工大)
正 鈴木 博貴 (名工大) 正 牛嶋 達夫 (名工大)

Shinichi ODA, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, Japan

Yutaka HASEGAWA, Nagoya Institute of Technology

Hiroki SUZUKI, Nagoya Institute of Technology

Tatsuo USHIJIMA, Nagoya Institute of Technology

The common target for vehicles has always been lowest fuel consumption. This paper deals with a new cooling fan for vehicle engine. This fan is used as a cooling fan at low speed or when the vehicle needs cooling. This fan is also used as a wind turbine and generates electric power at high vehicle speed. The fan has possibility to reduce the vehicle air resistance along with the regeneration of the electric power. We have developed a fan rotor that can operate as cooling fan with the same performance as the current fan and can operate also as a wind turbine at higher performance than the current fan. In this paper we report the influence of blade solidity on the wind turbine efficiency. The effectiveness of this proposal has been confirmed through the wind tunnel tests and CFD calculations.

Key Words: Turbomachinery, Wind turbine, Wind energy, S-Shaped profile, Electric power regeneration

1. 緒言

自動車の燃費向上を狙った技術開発の一つに電力回生技術がある。既に実用化されているブレーキ回生や、研究段階である風車を用いた電力回生の例⁽¹⁾は減速時のみの回生である。しかし、車両エンジンルーム内に風車を搭載した例⁽²⁾は、冷却系の通風抵抗により発生する車両動力損失を風車により電力に変えるものであり、減速時のみに限定されるものではない。

本研究では、低速走行時には従来と同様に冷却用として作動するが、高速走行時には風車として作動する自動車用送風機の翼形状の開発を行っている。自動車用送風機は高速走行時には作動頻度が低くなるため、風車としての活用は可能であり、駆動モータにブラシレスモータを採用した場合には、発電機として活用できる。翼形状としては、冷却効率を同等とし風車効率を向上させるため、S次翼型⁽³⁾が有効であるが、本稿ではさらにロータを高ソリディティ化することによる効率への影響について報告する。

2. 実験装置と実験方法

2-1 供試ロータ諸元 本研究で使用したロータの外観を図1に示す。ロータ図1(a)はベースロータであり、自動車用送風機として一般に使用されている5枚翼ロータである。図1(b)に9枚翼の高ソリディティロータの外観を示す。高ソリディティロータはロータ前後の厚みを低減するため翼枚数を5枚から9枚へと変更している。図2にS字翼型形状を示す。この翼型の特徴は、翼後縁に逆キャンバーを設定していることであり、送風機性能を維持し、風車性能を向上させることができる。表1に翼弦長 C とソリディティ C/t (t :翼ピッチ)を示す。ベースロータは翼スパン方向にソリディティを低減しているが、高ソリディティロータは一定とし、後述するCFDによる検討より1.0とした。

2-2 ロータ特性の測定方法 測定装置の概要を図3に示す。ロータへの通風は遠心送風機を用い、吸入部に設置したピトー管により風量を求めた。ロータとの接続には一辺400mmの矩形ダクトを用い、シュラウドを通してロータに通風される。流入全圧は、ロータ上流1m(ロータ径の3倍)の位

置での静圧 p (ゲージ圧)と、ダクト内平均風速 v_d より求めた。ロータの回転数制御はインバータにより行い、トルク計出力よりロータ動力 L を算出した。ロータ性能は以下の式(1)~(6)で定義する無次元特性値により評価した。なおロータ動力 L は送風機作動時を正、風車作動時を負とした。また、ロータ上流のゲージ圧 p は送風機作動時に負、風車作動時には正となる。

$$\text{Flow coefficient} \quad \phi = Q / (Au) \quad (1)$$

$$\text{Wind turbine efficiency} \quad \eta = L / (p + 0.5 \rho v_d^2) Q \quad (2)$$

$$\text{Fan Efficiency} \quad \eta = (-p + 0.5 \rho v_d^2) Q / L \quad (3)$$

where

$$\text{Rotor area} \quad A = \pi(D_r^2 - D_h^2) / 4 \quad (4)$$

$$\text{Rotational velocity} \quad u = (D_r + D_h) \omega / 4 \quad (5)$$

$$\text{Mean axial velocity} \quad v_d = Q / 0.16 \quad (6)$$

3. CFD 解析方法

解析には汎用解析ソフト(Fine/Open NUMECA 社)を使用し、定常 RANS 解析を行った。使用した解析モデルを図4に示す。解析では周方向に周期境界条件を適用し、翼1ピッチ分の解析を行った。翼への流入部は一辺400mmの矩形ダクトと同一面積の円形断面とし、流路長さはロータ径 D_r の3倍を確保した。ロータ下流側では、ロータ径 D_r の2倍の円形断面、3倍の長さを有する出口流路へと急拡大させた。乱流モデルはSST(Shear Stress Transport)モデルを使用し、境界条件については入口で速度一定、出口で圧力一定である。メッシュ数はロータ部で約300万、流入部と流出部で約300万であり、合計約600万となる。

4. 実験および解析結果

ソリディティの最適化を図るため、ソリディティを変化させた場合のCFD解析を行った。解析モデルは翼根からスパン方向にソリディティ $\sigma = C/t$ を一定とし、 $\sigma = 0.5, 0.75, 1.0$ である。

ロータ後方 $z/D_r = 0.11$ の位置において、風車作動条件の風量

$\phi=0.67$ の絶対速度の周方向成分を図 5 に示す。図において白抜きとなっている部分は周方向成分が回転方向を示している。 $\sigma=0.5, 0.75$ では翼根から翼中央にかけて反回転方向の成分が占めているが、翼端では回転方向の領域が存在する。これは翼根から翼中央にかけては、風車として作用しているが、翼端では、送風機として作用していることを示している。これに対し $\sigma=1.0$ では、翼端でも反回転方向となり、翼の全域で風車として作用している。

図 6 に CFD による風車効率の解析結果を平均ソリディティに対して示す。ベースロータは翼根から翼端にかけての局所ソリディティが変化するため、ここでは平均ソリディティ σ_{mean} を翼面積/ロータの回転面積で評価した。ベースロータの平均ソリディティは $\sigma_{mean}=0.45$ であるが、風車としての実質的な作用を行っている翼根から翼中央にかけてのソリディティは $\sigma=0.47\sim0.63$ であることより、より高いソリディティでの結果と考えることができる。そして、ソリディティが増えるにつれて効率は向上し、ソリディティ $\sigma=1.0$ では $\eta=-0.4$ に近い効率が得られる。

ロータ効率の実験結果および CFD 解析結果を図 7 に示す。 $\phi=0.2$ 近傍の送風機条件では、高ソリディティロータ ($\sigma=1.0$) はベースロータと同等の効率を維持している。一方、 $\phi=0.6$ 近傍の風車条件では、高ソリディティロータは $\eta=-0.4$ の効率が得られ、ベースロータの効率の約 2 倍とすることができた。また、風車条件において、解析は実験結果とよい対応を得ることができた。

5. 結言

自動車用送風機を風車としても活用し、送風機効率を維持しつつ風車効率を向上させる手段の一つとして、ソリディティの影響を調査し、以下の結論が得られた。

ソリディティを大きくすることにより、ロータの後流に発生していた回転方向の速度成分を低減できることを CFD 解析により確認した。この回転方向成分は風車作動時において送風機として作用し、風車効率を低減する要因となっているものである。そして、ソリディティを翼根から翼端にかけ $\sigma=1.0$ に設定することにより、この回転方向成分は消失し、風車効率を大きく向上させることを解析、実験で確認できた。

引用文献

- (1) 藤本晃司, 車両搭載型風力発電システムの基礎的検討, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), Vol.129, No. 1 (2009), pp. 235-236.
- (2) Huang, C.N., Design of Auxiliary Generation System by Wind Power for improving Vehicular Efficiency, Proceeding of the IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES 2006) (2006), pp.178-183.
- (3) 秋元博路, 3.6m 長自航模型試験による前翼型表面効果翼船の特性評価, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.3(2006), pp. 97-103.

Table 1 Blade configuration of base rotor and high solidity rotor

	Base rotor			High solidity rotor		
	root	middle	tip	root	middle	tip
Chord length C (m)	0.045	0.067	0.085	0.040	0.079	0.107
Solidity C/t	0.63	0.47	0.44	1.0	1.0	1.0

Fig.1 Appearances of testing rotors

Fig.2 Blade profile of testing rotor

Fig.3 Wind tunnel test equipment

Fig.4 The computational model and the coordinate system

Fig.5 Tangential component of absolute velocity in constant solidity rotor at outlet section ($z/D_r=0.11$, $\phi=0.67$)

Fig.6 Wind turbine efficiency as a function of mean solidity σ_{mean} ($\phi=0.67$)

Fig.7 Efficiency of base and high solidity $\sigma=1.0$ rotor