

	オダ シンイチ
氏 名	織田 信一
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第1019号
学位授与の日付	平成28年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	自動車用送風機の電力回生に関する研究 (Research of electric power regeneration using automotive cooling fan)
論文審査委員	主査 教授 長谷川 豊 教授 田川 正人 教授 森西 洋平

論文内容の要旨

1. はじめに

自動車の開発において、燃費向上は最重要課題の一つである。本研究は自動車の燃費向上の一助となる自動車用風車システムの開発を目指している。自動車用送風機は、高速走行時では冷却用としての稼働頻度は極めて低く、車速風により空回り状態となっている。したがって、高速走行時においては送風機を風車として活用し、電力回生を行うことは作動頻度上、実現可能であり、さらにブラシレスモータを搭載していれば、大きな部品変更を行う必要もない。本研究では、送風機性能を維持しつつ風車性能を向上させるロータ翼の研究により、電力回生を行うと同時に自動車の空気抵抗低減にも貢献できる自動車用送風機／風車の開発を行った。

2. 電力回生と冷却系の空気抵抗低減に関する従来の研究

電力回生技術として実用化されているブレーキ回生は、ハイブリッド車の駆動用モータを減速時に発電機として活用するものである。本研究のような風車による電力回生の研究例として、藤本ら（2009）によるトラックのキャビン上に風車を搭載し電力回生を行った実験例や、細江ら（2004）による電気自動車に風力発電機を搭載し電力回生回路を検討した実験例がある。

これらの風車作動は空気抵抗の増加につながるため、減速時のみの回生である。これに対し Huang ら(2006) の数値検討の例では自動車のエンジンルーム内に風車を搭載し、出力試算を行っている。Huang らの研究の注目すべき点は、自動車冷却系に風車を搭載した場合、風車が空気抵抗となって冷却系の通過風量を減少させ、熱交換器等の空気抵抗を低減するため、自動車全体では空気抵抗低減につながるると同時に電力回生を行なうという点である。これは通常走行時においても風車を作動できるということを意味する。

燃費には車両空気抵抗も大きな影響があるため、空気抵抗を減らす取組みも積極的に行われている。自動車の冷却系を通風する際に生じる抵抗は、車両全体の抵抗の 4.5~9%と報告されており(炭谷ら 2004)、可動シャッタにより通過風量を必要最低限に制御することが近年実施されるようになった。

また、冷却系の流れを CFD や実験により解析した研究が進められており、Gregor ら(2010) は車両冷却系を通風することにより発生する抗力を、発生要因別に分類し、各々の寄与を CFD により算出した。本研究では自動車用送風機を風車としても活用することにより、電力回生を行うと同時に、空気抵抗低減効果についても調査を行った。

3. 本研究の目的と研究成果

本研究の目的は以下の 5 項目である。これらに対し、得られた研究成果を併記する。

目的①：送風機としての性能を犠牲にすることなく、風車としての性能を向上させるロータ仕様を明確にする。

翼型改良(円弧翼型から S 字翼型へ改良)および高ソリディティ化によって、送風機としての最高効率を維持しつつ、風車効率を約 4 倍に向上することができる仕様を CFD により検討し、実機での性能評価や翼周りの流れ場の実測により検証した。ただし、高ソリディティ化は最高効率点での送風性能は維持するが、最高効率点よりも高風量域での送風性能が低下するため、高風量域での送風性能が要求される場合には、この改善が必要である。

目的②：送風機ロータの風車化による冷却系通過風量の制御可能範囲を明確にする。

実車搭載状態でのロータ特性の測定と実車での通過風量の検証から、今回開発した高ソリディティロータの各回転数における風量低減効果を調査し、最大 40% の風量低減が可能であることが明確になった。これにより、冷却系を通風することにより生じる損失動力の低減や暖機性向上が期待できる。また風量制御を行うには高ソリディティ化が必須であることを明確にした。

目的③：実際の車両に送風機/風車を搭載した状態において、風車発電効果と冷却系通風による損失動力の低減効果を明確にする。

風車発電効果に対しては実車での発電量を(株)デンソーとの共同研究において実測し、ロータ特性から試算した発電量と対応がとれることを確認した。100km/h 走行時での発電量は高ソリディティロータでは 48W であり、LED ヘッドライトの消費電力 30W(片側)を車速 90km/h

以上において回生できる。損失動力の低減効果については、実車搭載状態でのロータ特性と実車風洞での測定結果より、高ソリディティロータでは冷却系通風による損失動力の約 20%を低減できることを明確にし、CFD での検証を行った。また、この測定方法によって求めた抵抗係数は、炭谷ら (2004) の抵抗係数に類似していることから測定の妥当性を証明できた。

目的④：送風機、および風車としての単体性能をロータ仕様から推定できる CFD 解析手法を確立する。

今回使用した解析手法により、風車作動時の最高効率点近傍におけるロータ性能は実験値と対応することがわかった。また、ロータ周りの速度を測定し、解析と同様の速度分布であることを確認した。しかし、送風機作動時や高風量の風車作動時には、ロータ性能の解析結果と実験値には乖離があり、原因調査のためには、より詳細な流れ場の調査や解析手法の検討が必要であると思われる。

目的⑤：実際の車両に搭載された状態における、送風機、風車性能および冷却系通風に伴う車両損失動力を推定できる CFD 解析手法を確立する。

車両搭載状態における送風機、風車性能の解析を実施するためには、周期境界条件を適用した 1 枚翼での解析ではなく、全ての翼をモデル化する必要がある。また、ロータ上流側、および下流側の流れも複雑となり、解析工数が大幅に増加するため、計算機の能力向上が必須となる。そのため冷却系通風に伴う損失動力の解析においてはロータを抵抗体と仮定して解析を行った。今後、計算機の能力向上を行い、実車搭載状態での全翼モデルによる送風機、風車性能の解析を実施する予定である。

4. 今後の課題

上記に示した研究目的に対して、残存課題として以下の案件があげられる。今後、これらについて研究を継続していく所存である。

- ・高ソリディティ翼の高風量域における送風性能の改善
- ・CFD による送風機、風車性能の解析精度向上
- ・実車搭載状態での CFD 解析手法の確立と、性能改良方法の検討。
- ・(株)デンソーとの共同による送風機/風車の実用化検討

論文審査結果の要旨

自動車の開発において、燃費向上は最重要課題の一つである。本論文は、自動車の燃費向上の一助となる自動車用風車システムの開発を目指して実施した一連の研究の成果をまとめたものである。

自動車に風車を搭載して電力回生を目指した先行研究として、車両の外部に風車を搭載し電力回生を行った実験例がある。しかし、風車作動は車両全体の空気抵抗増加につながるため、減速時のみの電力回生が有効となる。これに対して、自動車のエンジンルーム内に風車を搭載する場合には、風車が空気抵抗となって冷却系の通過風量を減少させ、冷却系通風に伴う空気抵抗を低減すると同時に電力回生を行なえる可能性がある。これは通常走行時にも風車を作動可能であることを意味する。また、自動車用送風機は、高速走行時では冷却用としての稼働頻度は極めて低く、車速風により送風機のロータは空回り状態となっている。したがって、高速走行時には送風機ロータを風車として活用し、電力回生を行うことは作動頻度上、実現可能である。さらにロータ駆動用モータとしてブラシレスモータを搭載していれば発電機としても利用できるため、大きな部品変更を行う必要もない。

本論文は、送風機性能を維持しつつ風車性能を向上させる送風機/風車ロータ翼の仕様を明らかにすると共に、実際の車両に送風機/風車を搭載した状態において、風車発電効果と冷却系通風による損失動力の低減効果を明確にした。また、送風機および風車としての単体性能をロータ仕様から推定できるCFD解析手法、実際の車両に搭載された状態における、送風機、風車性能および冷却系通風に伴う損失動力を推定できるCFD解析手法を確立し、妥当性を検証した。

送風機/風車に適したロータ仕様に関しては、翼型改良（円弧翼型からS字翼型へ改良）および高ソリディティ化によって、送風機としての最高効率を維持しつつ、風車効率を約4倍に向上させる仕様をCFD解析により検討し、実機を用いた性能試験と翼周り流れ場の計測により妥当性を検証した。

実車搭載時の風車発電効果に関しては、(株)デンソーとの共同研究において実測し、ロータ特性から試算した発電量と対応がとれることを確認した。100km/h走行時での発電量は高ソリディティロータでは48Wであり、LEDヘッドライトの消費電力30W（片側）を車速90km/h以上において回生できる。

冷却系通風による損失動力の低減効果については、実車搭載状態でのロータ特性と実車風洞での測定結果より、高ソリディティロータでは冷却系通風による損失動力の約20%を低減できることを明確にし、CFD解析による検証も併せて行った。

ロータ単体のCFD解析手法に関しては、風車作動時の性能と周囲速度場の解析結果は実験値と対応し、解析手法の妥当性が検証できた。車両搭載状態におけるロータ性能ならびに冷却系通風に伴う損失動力のCFD解析に関しては、ロータならびにラジエータ、コンデンサを抵抗体と仮定して解析を行い、実験に基づく損失動力の測定結果と概ね一致する結果を得た。

以上の通り、本論文は送風機性能を維持しつつ風車性能を向上させる送風機/風車ロータを開発することに成功すると共に、実車に送風機/風車ロータを搭載した際の風車発電効果と冷却系通風による損失動力の低減効果を明確にした。また、開発ツールとして利用したCFD解析手法を確立し、その妥当性を検証した。

本論文で得られた冷却系通風抵抗に関する知見は学術的に高い価値を有していると共に、開発した自動車用風車システムは工学的・工業的に有用である。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認められる。