

マグナス効果を用いた新型風力発電機の考案

一人と自然にやさしいエネルギー自立社会をめざして

兵庫県立洲本実業高等学校 電気科 3年

影山 奎斗 辻岡 凌玖 畑崎 海翔

1. はじめに

新型コロナウイルス猛威による経済活動後退に加え、ウクライナ危機による石油などのエネルギー資源等の高騰などで人々の暮らしに深刻な影響を与えている。風力などの再エネは、政治的かつ経済的リスクに左右されず、コストも安いという特長、すなわち公益に資する有力な技術である。課題であった再エネによる余剰電力を貯蔵する新たな蓄熱技術も開発されている。

本校電気科では、これまで風力発電機の高性能化のために、原動機と発電機の統合化が総合効率を高めるという実験結果を報告したり。また、プロペラ風車の諸課題を解決するために、新たにマグナス風力発電機を開発し、総合的なエネルギー回収率の向上をはかるという風車開発のあり方を提案した²⁾。さらに、幅広い風速域にわたり有効利用できる縦軸風車構造を新たに開発してきた^{3~4)}。

プロペラ風車は日に日に大型化し、世界最大となる 7MW 級の洋上風車が福島県沖に設置されている。一方、風力発電機はソーラ発電と比較しても、エネルギー変換効率が高くメンテナンスもしやすい特長があるものの、カットイン風速が高いうえ、静粛性に欠けるという技術的課題が解消できずにいる。

そこで、このような課題を解決するために、微風でもスムーズに回転し、いかなる風環境においても静かに回転し発電する小型風力発電機を開発を行った。

本研究では、エネルギー自立社会の実現をめざして、我が国のエネルギー事情についてまとめた上で再エネの有望性を指摘し、横軸型風力発電機の性能改善をとおして、マグナス効果を用いた新型風力発電機開発について報告する。

2. 新型風力発電機開発

2. 1 我が国のエネルギー事情

財務省貿易統計(2022年速報値)によると、我が国の原油の輸入価格は、令和4年7月期 99,666円/kLで、令和3年7月期 49,902円/kLと比べると、199.7%と2倍になっている。令和4年3月以降ウクライナ危機の影響で原油価格が高騰してきていることがわかる。財務省貿易統計8月期速報値によると、輸出額 8兆 619億円、輸入額 10兆 8,792億円、差引額 2兆 8,173億円と貿易収支が大幅に悪化してきている。これは、鉱物性燃料の再騰によるものである。我が国の原油海外依存度(2020年)は、約 99.7%と高くその輸入先は、約 90%が中東であり、内訳はサウジアラビアが 40.1%でトップ、順にアラブ首長国連邦 31.5%、クウェート 9.0%、カタール 8.3%、露国 4.1%となっている。同様に LNG では、オーストラリア 31.9%と高く、順にマレーシア 14.2%、カタール 11.7%、露国 8.2%、ブルネイ 4.2%となっている。今日、中東だけではなく国際情勢には政治的リスクが常態化し、原油価格が安定しづらいことは周知のとおりである。

電気料金の国際比較(資源エネルギー庁 2021年)によれば、産業用電気料金(米セント/kWh 比較)は、イタリア(1位)、日本(2位)、英国(3位)で、日本は米国の2倍以上の料金となり世界で2番目の高さとなっている。また、家庭用電気料金についても、独国よりも安いものの、米国、韓国、カナダ、フランス、英国などと比べて高く米国の約2倍となっている。

世界のCO₂排出量比較では、中国 28.4%が最も多く、順に米国 14.7%、EU28カ国 9.4%、イ

ンド 6.9%、露国 4.7%、日本 3.2%と続いており、注目すべきは先進国より途上国の排出総量が多くなっている点である。

米国は、風力発電のコスト低下に伴い、2030年までに洋上風力発電量を EU60GW、日本 10GW に対し、30GW まで拡大すると発表している(2022年9月)。

以上、再エネのひとつである風力発電技術は、環境面も含め、経済合理性の観点からも、ますます有望な技術として位置づけられている。

2.2 新型風力発電機開発

従来型のプロペラ風車の問題点を改善することを目的として、マグナス効果を用いた新たな風車らを提案する。

図1に、本校が開発したスパイラルマグニウス風力発電機を示す。直径φ650[mm]、全高750[mm]、使用材料は、透明アクリル樹脂や白色MBS樹脂を用い軽量化を図り、発電機にはステッピングモータを採用した。マグニウス(Magnius)とは、サボニウス(Savonius)とマグナス(Magnus)との融合を意味する名称である。さらに、起動性を高めるためにサボニウス翼をスパイラル状にねじることで起動性を向上させている。3Dプリンターの導入により、このような異形状の翼体成形も容易になったことで、さまざまな実験検証が可能となっている。ものづくりを通じた体験学習は、コストと時間の関係で敬遠されがちではあったが、これらの設備導入により課題研究がますます効果的に推進されよう。



図1 スパイラルマグニウス風車(洲実開発品)

図2に、本校が新しく開発したマグリウス風力発電機を示す。同じく、直径φ650[mm]、全高750[mm]、使用材料は、前述と同様のアクリル樹脂やMBS樹脂を用い、発電機には同仕様のステッピングモータを採用した。マグリウス(Magrius)とは、ダリウス(Darrieus)とマグナス(Magnus)との融合を意味する名称である。これにより、回転トルクが向上し、トルク係数 C_t と共にパワー係数 C_p も向上できた。翼は、3Dプリンターにより NACA0015 翼を採用し、表面は加工痕を少し残すような仕上げとしている。また、翼の先端にいくほど回転半径が小さくなるように設計したことで、なめらかな回転となり、トルクが向上する結果となった。



図2 新型マグリウス風力発電機(新開発)

この新型風力発電機の開発については、課題研究(3単位)を活用して実施した。「エネルギー諸問題」、「風力発電技術」、「新型風車開発」の3つで構成し取り組んだ研究概要について述べる。

「エネルギー諸問題」では、我が国の厳しいエネルギー事情や切実な地球環境問題について調査した。次に、エネルギー自立社会の実現のために、「風力発電技術」について調査・研究を行った。高校近辺の風速測定や、レイリー分布の結果を踏まえ、市街地でよく見られる風車に関する技術的課題を調査した結果、微風においても起動しやすく、強風時においても止まることが少ない、すなわち如何なる風環境においても発電可能な風車こそが理想であることがわかった。一般に、風車は抗力型と揚力型に大別できるが、今回は、スパイ

ラルマグニウス風車の改善に加え、新型マグリウス風車に注目して開発を行った。風力発電機に関する知識を深めるために、空気力学の専門書や学会論文、特許・実用新案の調査をもとに、新規性の確認も行った。

2.3 新型風力発電機の性能改善

(a) 原動機サイドの性能改善

風車性能向上のために、マグナス効果を有効に活用する方法について、様々な意見を出し合いながら検討した。クッタ・ジューコフスキーの定理 (Kutta-Joukowski Lift Theorem) による理想流体における回転体の揚力は、風速だけではなく、回転数、回転翼形状、空気密度などの影響を受けることが示される。①回転数を高めるための機構開発、②回転翼形状について、③回転翼表面性状などが改良ポイントとして指摘された。そこで、風車原動機的设计と加工方法に注目して、表1に示すような改善案を検討した。

表1 風車原動機の改善案

項目	課題	対策
①	・効率向上化構造 ・回転速度向上化	揚力型採用 ディフューザ採用
②	・テーパ翼 ・パラレル翼	角度最適化
③	・翼表面に渦流発生	翼表面のあらし

図3に、今回開発したマグリウス風車の回転翼を示す。120度毎に3枚のNACA0015翼を備え、さらに、翼をテーパ状に固定する構造とした。この工夫により、回転数が向上し、特に2[m/sec]前後の微風域においても問題なく起動した。さらに、このマグリウス風車にディフューザを設置した。図の丸い金属製の輪が、吸入部よりも排出部を拡大させたディフューザである。これにより、流入空気が約32%程度増速されたことで、風車出力が増加し、エネルギー変換効率を向上させることができた(図4にその結果を示す)。また、強風域の場合でも、安定した回転が得られ、風切り音や機械的な異音の発生はみられず、静粛性の高い風車機構となった。

以上、騒音が少なく、起動性が良好でエネルギー



図3 ディフューザ付マグリウス風車

変換効率も向上できるディフューザを備えた風車構造が開発できた。

図4に、本開発風車と従来品との特性比較を示す。縦軸はパワー係数 C_p 、横軸は周速比 TSR で表し、式(1)、(2)より求めた。

$$C_p = T\omega / (\rho AV_m^3 / 2) \quad (1)$$

$$TSR = r\omega / V_m = 2\pi Nr / (60V_m) \quad (2)$$

ただし、Tはトルク[N・m]、 ω は角速度[rad/sec]、 ρ は標準状態の空気密度、Aは受風面積[m²]、 V_m は平均風速[m/sec]、rはロータ半径[m]、Nは回転数[rpm]を示す。その結果、茶色で示される本開発マグリウス風車は、パワー係数 C_p 0.21と従来品と比較して31%の向上し、さらに周速比が大きくなった。揚力型風車の傾向がみられる新型風車となっている。

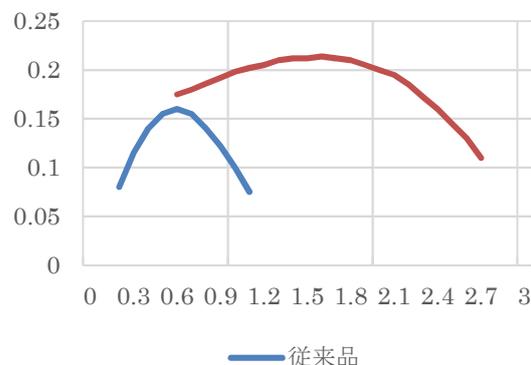


図4 本開発風車の特性比較

以上、ディフューザを設置することで、カットイン風速も低くでき、エネルギー変換効率が向上し、さらに、設備利用率が高まることで発電総量も多

くなった。さらに、従来風車よりも静粛な風車が開発できた。

(b) 発電機サイドの性能改善

発電機には、MATYUSHITA 製 FMD00810BA ステッピングモータを採用した。定格は 12[V]、80[mA]、コイルの抵抗は 1 相あたり 145[Ω]である。モータからは 4 本の線が出ており、2 相駆動式である。内部構造は、回転子（ロータ）と固定子（ステータ）からなる。回転子には、主軸に固定された N 極と S 極の永久磁石の周りにそれぞれ 50 個の小歯がついたケースがかぶさり、1/2 ピッチ機械的にずれた状態で構成されている。結果、軸方向からは、100 個の小歯が見えることから、1 ピッチの角度が $2\pi/100[\text{rad}]$ となっている。固定子には、8 個のコイルと小歯のついた鉄心があり、A 相と B 相の 2 相で構成されている。これは、磁石に鉄心をかぶせるハイブリッド型ステッピングモータである。

図 5 に、発電機として使用したときの位相差 $\pi/2[\text{rad}]$ の 2 相正弦波交流出力波形を示す。

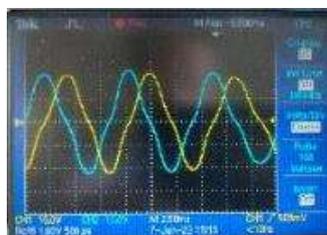


図 5 出力波形（ステッピングモータ）

次に、ステッピングモータによる 2 相出力を 1 つの母線出力に効率よくまとめるための方法を検討した。並行運転時の同期化に関する課題と捉え、コンデンサーを用いた位相を調整させる同期化実験を行った。

図 6 に、オシロスコープによる同期化対策についての測定結果を示す。(a)は、同期後の A 相と B 相及び母線電圧の波形を示す。無負荷状態での位相差と母線電圧波形を確認した。位相差がなくなることで、母線電圧はひずみの少ない波形が得られ、同期前後の母線電圧を比較したとき、11% (5[Ω]重負荷時)と向上がみられた。(b)は、同期前の A 相と B 相及び母線電圧の波形である。母線電圧において



(a) 同期後の A 相と B 相及び母線電圧の波形



(b) 同期前の A 相と B 相及び母線電圧の波形

図 6 同期化対策についての測定実験

はひずみの著しい波形が得られた。

以上、風車原動機の出力向上と共に発電機の出力向上も図ることができ、負荷特性実験から風力発電機として約 61%もの性能向上ができた。

3. まとめ

従来開発品と比較した結果、広い風速域にわたりスムーズな回転が可能となり、エネルギー変換効率や設備利用率が向上した。すなわち、人と自然にやさしいエネルギー自立社会をめざす新たな風車が開発できた。

参考文献

- 1) 植野裕介；「小型プロペラ型風力発電装置の開発」平成 25 年度産業教育振興中央会生徒研究文・作文コンクール（2013）
- 2) 岩脇陸斗、除補博之、除補順之、神代瑛介、皿袋雅大、吉田勇樹；「人と環境にやさしいマグニウス風力発電機の開発」平成 27 年度産業教育振興中央会生徒研究文・作文コンクール（2015）
- 3) 田村銀河、登森慎悟、水田海人、宮尾実里；「人と自然の豊かな関係をきづく社会実現に向けて」平成 28 年度産業教育振興中央会生徒研究文・作文コンクール（2016）
- 4) 長尾伸洋；「工業高校における風車を用いた機電融合学習の提案」, 日本産業技術教育学会誌 52 巻 1 号, pp. 33-38, (2010)