

令和元年6月7日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06979

研究課題名(和文)波動原理により風力エネルギーを電気エネルギーに変換する発電旗の研究

研究課題名(英文) Research on an energy harvesting flag which convert wind energy to electric energy by wave principles

研究代表者

西垣 勉 (Nishigaki, Tsutomu)

近畿大学・生物理工学部・教授

研究者番号：80251643

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、適切に形状設計された圧電フィルムがその表面に貼付されて一体化され、波動発電機能を実装したスマート発電ダクトを開発し、サイズを大きくした場合に圧電体の面積比以上の発電量が低風速域でも得られる構造体の設計基準について示すことを目的とした。円筒ダクト状のプラスチック製柔軟発電体を作製し、その簡易風洞内での振動挙動を観測した結果、中風速域で振幅および発電量が急激に上昇する風域があることがわかり、励振メカニズムとしては渦励振による影響が最も大きくなるものと示唆された。そこで、この渦励振の発生周波数とダクトの固有振動数の関係を解析的にも検討し、低風速域発電ダクトの設計指針を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

身の周りに広く薄く存在する"捨てているエネルギー"の新たな活用方法の開発は、大型構造物の遠隔モニタリング用電源を配線なしで実現できるなど、機器・構造物のメンテナンスコストの削減と信頼性の向上などに大きく寄与でき、社会的意義も大きい。特に低風速域での発電量を上昇させることで、晴天の昼間しか発電しない太陽光発電に加えて重要な選択肢を提供でき、その発電メカニズムとして圧電体構造物の振動利用が学術的にも重要な課題といえる。強風時のみ発電する発電システムよりも、柔軟・コンパクトで低風速時にも発電する方法の開発により、その利用価値は格段に上昇することから、設計指針を導出できたことが重要であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, a smart wind energy harvesting duct with appropriately shaped piezoelectric film bonded on their surfaces was investigated. This energy harvesting ducts possess ability of generating electric energy from wind energy, based on the wave motion excited from the wind of constant speed. Flexible ducts with piezoelectric film bonded on their surfaces were manufactured and their vibration behavior in a simple wind tunnel was observed using high speed cameras. It was observed that there existed a wind speed range in which the power generation of the proposed energy harvesting duct increased rapidly against the wind speed. From these results, it was implied that the mechanisms of excitation of the energy harvesting duct were due to the vortex excitation from the wind. Finally, the design criterion of the proposed energy harvesting system suitable for generating electric energy at low wind speed under 5m/s was summarized.

研究分野：工学

キーワード：圧電フィルム 環境発電 風力発電 波動原理 発電旗 渦励振

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) 近年、ミリワット(mW)あるいはマイクロワット(μ W)オーダーの超低電力でも動作する各種電子デバイスが開発され、これを用いた遠隔モニタリングのための電源として、交換が必要なバッテリーに代わり、従来は注目されることが無かった身の回りや自然界にうすく広く存在する「捨てている微小エネルギー」の回収利用が注目されている。
- (2) この回収利用法およびその研究分野は、「エネルギーハーベスティング」(Energy Harvesting)あるいは「環境発電」とも呼ばれるが、自然エネルギー利用法の代表格と考えられる太陽光発電では、発電量が天候条件に大きく左右され、晴天時の昼間しか発電しないという見方をされることもあり、第二の方法として、様々な振動エネルギーの回収がますます試みられるようになってきている。この振動エネルギー回収法には、海洋における波浪発電や、車両や人の移動によって発生する路面・床面の振動発電、風力を励振力とする振動発電など種々の方法があり、それぞれ一長一短ではあるが、目的とする発電量および励振源となる環境エネルギーの特性によって利用法を検討する必要がある。
- (3) ここで、風力エネルギーの回収では、太陽光発電よりも晴雨の天候条件に左右されないことから期待感が持たれているが、大規模な風車を用いると確かに大きな電力は得られるが、騒音問題や風車の回転機構の耐久性の問題などがあり、さらに微風では風車が回転しないという大きなデメリットがあり、これらは一部社会問題にもなっていることから、環境発電システムとして最適とはいえない状況にあるといえる。そこで、微風域から強風域まで風量に応じた発電量が期待できる方法の開発が必要となってきた。
- (4) これまで、風力を振動エネルギーに変換する環境発電法は、ひずみを電気エネルギーに変換する圧電素子を弾性板に貼り付け、この弾性板に風励振による不安定振動、すなわちフラッター振動を起こす発想が多く見受けられている。しかし、弾性板のフラッター振動では、特定の振動数で弾性板の振幅が大きくなることを利用していることから、発電風域が狭く、振動板の疲労損傷も問題と考えられる。そこで、より柔軟な構造体による発電機構の実現が望ましいと考えられる。柔軟構造体による風力発電機構が実現すれば、天候条件に大きく左右されずに発電でき、摺動機構がないためメンテナンスの手間も大幅に減少し、超軽量でそのサイズも自由に設計でき、コンパクト・軽量に設計したものを構造物の全般にわたって多数設置することも可能である。
- (5) しかしながら、従来の弾性板よりも非常に薄肉・軽量で柔軟な構造体にこの風力エネルギーによる環境発電を適用する方法は確立されていない。その理由は、柔軟な構造物から取り出せる振動エネルギーは小さく、従来のような数cmサイズの圧電素子では発電量が小さくなってしまいうからである。研究代表者はこれまでに、PVDF(高分子圧電フィルム)を用い、その形状を適切に設計すれば、より空間的に大きさのある旗構造であっても発電機構が実現できるかを検討し、基本的な検証結果を報告した(引用文献)。
- (6) 本研究ではこの成果を発展させて柔軟構造物の波動発電システムとしての利用方法についての実現性を検討するため、円筒形状をした波動原理による柔軟発電構造体の開発を志向した。

2. 研究の目的

- (1) 本研究では、適切に形状設計された圧電フィルムがその表面に貼付されて一体化され、波動発電機能を実装したスマート発電ダクトを開発し、サイズを大きくした場合に圧電体の面積比以上の発電量が低風速域でも得られる構造体の設計基準について示すことを目的とした。
- (2) 風力エネルギーによって引き起こされる弾性板の振動や、よりフレキシブルな柔軟体の「はためき」から発電するには、ひずみを電気エネルギーに変換する圧電素子の利用が有効である。圧電効果の大きい材料である圧電セラミックスを用いて、これを貼付した弾性板に、風による不安定振動(フラッター)を引き起こす方法を考えれば、最大1mW程度の発電量も期待できる。しかし、フラッター振動が引き起こされる風速領域は限定されるため、風速10m/s以上の強風域では発電できても、より現実的な5m/s以下の低風速域に対応させることは困難である。また、発電構造体を激しく振動させることは、発電量の確保という意味では一見良いようにも思われるが、構造体内に大きなひずみを起こすことは、非常に長い期間にわたっての発電を考えた時、繰り返し荷重による疲労損傷・破壊を引き起こすため耐久性には問題がある。
- (3) そこで、弾性板よりもはるかにフレキシブルな柔軟体を考え、風によるはためきによって発電する方法が考えられる。この場合、用いる圧電素子はセラミックスよりもはるかに柔軟である必要があり、PVDF(ポリフッ化ビニリデン)のような圧電フィルムの利用が適している。しかし、圧電フィルムを用いた環境発電についての従来の研究は、長さ5cm程度の小さなテストピースでの発電実験は世界で多数試みられているが、本格的な柔軟発電構造体での検討例は全く見受けられない。その理由として、大型な柔軟発電機構では、はためきの動きは旗のように風の方向に沿った波動現象として現れ、この波動を有効利用した発電様式が十分に検討されていないためであると考えられる。
- (4) 構造物に波動現象が生じるとき、波の凹凸によって発電構造体に貼付された圧電フィルムは、引張変形を受ける部分と圧縮変形を受ける部分が生じ、発生した電荷は正と負の部分

で相殺が起こり、発電量の大幅な低下が起こると考えてよい。研究代表者らはこれまでに、柔軟構造物のアクティブ振動制御法において、圧電フィルムセンサ/アクチュエータを適切な形状に設計すれば、上記のような正負の電荷の相殺がセンサ/アクチュエータ機能の低下に繋がらないようにするために、例えば、片持ばりの波動吸収制御研究では、はりの全面に貼付した三角形形状センサと長方形形状アクチュエータの組合せが有効であることを見出し、実際に振動制御実験でもその効果を検証し、報告している。本研究では、このように柔軟構造体に生じる波動現象と、その表面に貼付された圧電フィルムによる機械エネルギーから電気エネルギーへの変換メカニズムに、解析的に相関が見出せるという過去の知見を足がかりにして、さらに5 m/s以下の低風速域でも発電可能とするために、鯉のぼりや吹き流しなどと同様の円筒ダクト状の発電旗構造とすることで、低風速域での格段の性能向上を試みた。

- (5) 以上の観点から、本研究は風力エネルギーに着目した環境発電と、圧電フィルムを用いた柔軟発電構造体の利用、さらにフィルムの形状設計が構造体の波動現象と密接な関係がある事実を、研究代表者のこれまでの研究成果・知見に基づき組み合わせ、理想的な風力エネルギーハーベスターの開発に取り組むものであり、特に低風速域に対応させるために大面積の円筒ダクト構造を用いることは、過去のどの研究にも見られないユニークな手法である。

3. 研究の方法

- (1) 厚さ0.1 mm以下程度のプラスチック製の柔軟発電体を作製し、その表裏に圧電フィルムを貼付した。圧電フィルムの形状は長方形とし、その出力電圧を精密に測定して発電量を評価し、 μW オーダーの発電量をmWに近づける手がかりを得る。
- (2) まず、風量・風速とはためきの運動形態および発電特性の関係を把握するため、風洞を作製した。理想的な人工風を起こせる小型の風洞を作製するために吹き出し口直径200 mm程度のシロッコファンを用いることとし、断面の直径が最大400 mm程度の円筒内で、空気を回流させることで安定した空気流れを再現するように工夫する。旗のはためきの運動は、ハイスピードカメラで500fps程度のフレームレートを用いて詳細に観測することとした。
- (3) 次に、圧電素子の面積と発電量の関係を確認するために、幅2.5 cm×長さ5 cmの最小サイズから、幅20 cm×長さ30 cmのA4サイズまで面積を数段階に変化させ、試験条件として、風速0.5 m/sの微風から、風速15 m/sの強風までにわたって、発電旗の発生電圧または発生電流を電子回路を用いて測定する。風速の測定には熱線式風速計を用い、電子回路は市販のOPアンプ等を用いることとし、風速と発電量と素子の面積を軸にとったグラフを作成し考察することとした。最大サイズの面積は最小サイズの面積の比を面積比と定義し、最大サイズの発電量は最小サイズの発電量の面積比以上になることを期待した。
- (4) しかし、上述の実験において大きな発電効果が得られるのは、面積が大きい発電構造体の全面に圧電素子を貼付した場合は限らない。それは、旗のはためき現象と密接に関連し、大面積の圧電フィルムでも、フィルム内に正と負の電荷が同時に発生してしまえば、それらが相殺することで、発電量は大幅に小さくなってしまふことが十分予想されるからである。この考察から、フィルム貼付範囲を旗の全スパンとはせず変化させた場合の基礎測定実験を繰り返し、最も発電量が期待できる貼付位置や形状を本試験条件の範囲内で調べ、後に検討する他の形状の圧電フィルム考案への手掛かりを得ることとする。また、旗の大きさとはためきの運動形態も密接な関係があることが考えられるため、この実験を大きさの異なる柔軟構造体を数種類試作して実験を繰り返すこととした。
- (5) 以上により、考慮する風速域のどの風速で励振されても発電量が最大限に確保できる、柔軟構造体の設計指針を得ることを試みた。
- (6) 以上までで得られた実験結果および知見をもとに、m(メートル)オーダーの大面積かつ円筒ダクト状の柔軟発電体の風によるはためき現象で、mWオーダーの発電量を確保するエネルギーハーベスター設計手法の確立に取り組んだ。
- (7) 厚さ0.1~0.3 mm、長さ0.3~1 m程度のプラスチック製あるいは布製の柔軟構造体に圧電フィルムを貼付し一体化させたスマート発電ダクトを考えた。発電ダクトを風洞に設置し、0.5~15 m/sの範囲で風速を段階的に上げて行きながら、圧電素子の出力電圧と旗の運動を記録した。圧電素子の出力電圧の時間波形の測定は、前年度に作製した電子回路での測定する。旗の変位は、波動であることを確認する必要から、ハイスピードカメラによる画像によりはためきのモードを整理しながら実験する。前年度に実施した大面積化についてさらに検討をすすめるため、本実験では最小テストピースの面積比を大きくした場合の実験も可能である。
- (8) スマート発電ダクトは、低風速域での効果的発電を期待して考案された。ダクト状の旗構造として、我が国には鯉のぼりがあり、実際に2~3 m/sの風速で45°、5 m/sの風速で90°の角度となって泳ぐと言われている。このように低風速域でも泳ぐ理由は、断面積が根本から先端にわたって一定ではなく、特に先端では絞ってあるからだと考えられている。このようなメカニズムを取り入れることで、低風速域用発電構造を完成させた

ることを考える

- (9) 本実験は、少数のテストピースの試作と測定では十分とはいえず、特に、圧電素子と柔軟構造体を一体化させた後の、発電旗の剛性や質量（面密度）等を変化させた実験が必要となる。そこで、柔軟構造体の厚さや圧電フィルムの厚さの組合せも変えて実験し、はためきの運動形態と発電効果の関係を詳細に観測する。さらに、波動現象から有効な交流電圧を得るために、前年度の結果をもとに旗の長さ方向にわたって電極が反転するような曲線形状のフィルムを考案し、旗の表裏に異なる形状でも貼付し実験を試みる。
- (10) 発電旗の剛性は、圧電フィルムと柔軟構造体の接着方法にも大きく左右されることが予想され、剛性が大きいとはためかない。そこで、前項の実験結果も踏まえて、超極薄両面テープによる圧電フィルムと構造体の接着や、接着層の剛性も考慮した上で圧電フィルムと同程度までに薄い柔軟構造体を用いたテストピースも作製し、前項と同様に測定を繰り返す。
- (11) 次に、提案するスマート発電ダクトを実際に屋外での自然風に適用した場合の、はためきの観測および発電特性の検証実験を考える。この場合も、発電旗近傍の風速を常時モニタしながら実験し、はためきの様子もハイスピードカメラで観測することで、室内風洞実験とのはためきおよび発電効果の違いを定量的に比較し、本発電ダクトが実装された場合に起こり得る問題点の把握、および自然風下で期待される発電効果の予測を得ることとする。
- (12) 以上により、本柔軟円筒発電ダクトによる波動発電機構の実現性について、相当数の実験データが取得できる計画であるが、実際には圧電フィルムの発生電圧には種類の電磁ノイズが混入し、発電量の系統的な把握が難しくなることも考えられる。その場合、圧電フィルムを積層させシールド構造とした場合の実験も実施し、発電特性の精度よい評価を試みる。
- (13) 最後に、m（メートル）オーダーの大面積スマート発電ダクトに波動原理が適用された風力エネルギーハーベスターの発電効果、および面積比以上となる1 mW以上の発電量を5 m/s以下の低風速域でも得るための構造システムの設計方法について、本研究で得られた知見を総括し纏める。

4. 研究成果

- (1) 厚さ0.1mm、直径80mm、軸長300mm程度のサイズのプラスチック製の円筒（柔軟ダクト）を作成し、これを鉛直方向に配置しその両端を緩く支持した上で、別途作製した簡易風洞内で水平方向に風力を与えたときの振動挙動を観測したところ、風速によって振動挙動が大きく変化することが確認できた。そこで、さらに詳細に観測するためにダクト上部から軸方向にハイスピードカメラを設置し、カメラからの映像を分析し振動挙動と比較検討した結果、低風速域では支持軸回りの回転運動（水平面内における回転運動）が主となるような振動挙動が観測され、中風速域では円筒の円周方向波動が現れ、柔軟円環・柔軟円筒殻に対応する曲げ振動が発生する領域があることがわかった。圧電素子による発電は、ダクトの面内ひずみを利用するものであるため、面内振動が発生するのはこの円周方向波動が強く励起される条件となるため、この波動を利用したダクトの設計方法へと検討をすすめた。
- (2) 基礎的な例として、上記のダクトの支持軸付近に長形状圧電フィルムを貼付した場合について、圧電素子の出力電圧と振動挙動を同時に観測し、発電量の評価をこころみた結果、上記の円周方向波動を活用することによって発電量が大幅に向上する可能性のあることが見出された。
- (3) 円周方向波動を低風速域で励起する条件について解析的に予測可能とする方法について検討するために円環の振動を表す運動方程式から薄肉円環の固有振動数の理論解析解を導き、上記のサイズを持つ薄肉円環について解析した。その一方で、薄肉円環への励振力は渦によって発生するものと考え、中実円柱の場合の渦発生周波数を円環の半径の関数として表し、これらの2つの周波数が一致すると共振と同じ効果が起き曲げ振動の振幅が大きくなり、発電量が大幅に大きくなるものと考えた。検討の結果、円環を薄肉にするか、現状のまま半径を大きくするとこの条件を満たすことを明らかにできた。
- (4) 以上の成果により、圧電フィルムを用いた発電ダクトの可能性および本研究で課題とする低風速域での発電量を向上させるダクト構造の基本的設計法が、簡易風洞およびハイスピードカメラを用いた観察および理論解析的考察の組合せによって見出されたため、今後は発電特性に影響を与えられ、ダクトのサイズおよび材質、風速、圧電フィルムのサイズや貼付位置などを第二年度の予測結果を中心に変更させながら、同時にハイスピードカメラを用いたダクトの振動波動挙動の観察を実施し、これらの結果を分析・考察することで、発電量が向上する条件と、そのメカニズムを明らかにすることを目的に実験を継続していく予定である。本研究課題の最終目標は、低風速域における発電量の向上方法を明らかにすることであり、風励振による流体と構造の連成振動を最も有効に利用する条件を見出すべく、本実験系のエネルギーハーベスターとしての最適設計条件を明らかにできればと考えている。

< 引用文献 >

Tsutomu Nishigaki, Development of a Piezoelectric Polymer Energy Harvesting Flag, SPIE 20th International Symposium on Smart Structure and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, SPIE paper Vol.8688, No.72922H, pp.1-7 (2013)

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：

発明者

権利者：

種類：

番号：

出願年：

国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1) 研究分担者
該当なし

(2) 研究協力者
該当なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。