

サボニウス風力発電機の効率向上と PBL 型授業への応用

Efficiency Improvement of a Savonius Wind Power Generator and Its Application for Problem Based Learning

吉田義昭, 川西達也, 池原健太

Yoshiaki Yoshida, Tatuya Kawanishi and Kenta Ikehara

広島工業大学工学部, 〒731-5193 広島市佐伯区三宅 2-1-1

Faculty of Engineering, Hiroshima Institute of Technology

2-1-1 Miyake, Saeki-ku, Hiroshima-shi 731-5193 Japan

Abstract

We have developed a Savonius wind power generator using a hub dynamo for teaching material. The shape of the wind turbine is optimized to get the rated output power of hub dynamo. Through the development process of the teaching material, we tried a problem based learning (PBL) for college students. And we verified the educational effect of the PBL method with the teaching material.

Keywords: Savonius wind power generator, optimum design of wind turbine, problem based learning

(受理 2017年8月16日)

1. はじめに

近年, 深刻化するエネルギー・環境問題を背景に再生可能エネルギーの利用に関心が高まっている. その中でも風力発電は導入ポテンシャルが最も高い¹⁾. しかし大規模な風力発電の開発には, 立地調査, 風況調査および環境アセスメントに数年以上を要する. 国内の風力発電導入量は増加傾向にあるが, 太陽光発電の10分の1以下である. 今後は環境負荷の小さいマイクロ風力発電に注目が集まるだろう. 本学が位置する広島市の年間平均風速(1981~2010年)は 3.8 m/s ²⁾であるが, サボニウス風車であれば低風速(5.0 m/s 以下)でも発電する. 構造が簡単で製作も容易なため, 自然エネルギーを身近に学べる教材としての利用価値は高い.

これまでに著者らは図1に示すサボニウス風力発電1号機(以下, 1号機と呼ぶ)を製作した³⁾. 風車に大型プラスチック容器(容量90L), 発電機に自転車用発電機のハブダイナモ(定格6V, 2.4W, 125rpm)を使用している⁴⁾. 高校生の出前授業や大学授業で1号機の実演を行った⁵⁾⁶⁾. 風速と発電出力を測定して発電効率を求めた. 学生同士でディスカッションも行った. エ

ネルギー変換を学べる教材としても1号機は有効であったが, 学生から寄せられた意見(改善点)の一つが「発電効率の向上」であった⁶⁾. 風速 5.0 m/s のときに, 1号機は出力 0.89 W (定格の37%), 回転数 60.9 rpm (定格の49%), 発電効率2.3%であった. 効率が低くなった理由は二つ考えられる. 一つ目は, 軸受が風車の下側だけにある片軸受タイプであるため, 風車が回ると左右にわずかに揺れて損失が増えたからである. 二つ目は風車の形状を最適化していない(風車直径が大

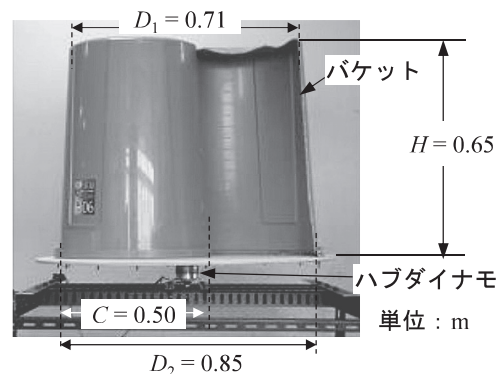


図1 サボニウス風力発電1号機

大きく、アスペクト比が 1.3 と小さい) ため、定格出力に必要な回転数に達しなかったからである。

風力発電コンペ WINCOM 2014 によるとハブダイナモを利用したサボニウス風力発電機が定格出力に達したのは、風速 7.0 m/s のときである⁷⁾。風速 6.0 m/s 以下で定格出力を得られるかは不明である。以上を背景に、本論文では 1 号機の課題を解決するため、風車の形状を最適化し、風速 5.0 m/s で定格出力が得られる 2 号機を開発する。併せて性能評価に必要な簡易送風機 (風速: 2.0~6.0 m/s) も製作する。さらに、「サボニウス風力発電の効率向上」をテーマに 2 号機の開発過程 (設計・製作・性能評価) を PBL 型 (問題解決型) 授業に応用し、その教育効果を検証する。

2. 実験装置の設計・製作

2.1 サボニウス風車の原理

図 2 にサボニウス風車の構造を示す。直径 C の円筒管を縦に切断して二枚のバケットとし、中心を少しずらしてオーバーラップ a を設ける。上下の端板は回転速度や効率を上げるために有効である。風が風車を押すことで抗力が発生する。バケット凹面の抗力係数 (= 2.3) は凸面の抗力係数 (= 1.2) よりも大きいので、風車にトルクが発生し回転する⁸⁾。またバケット凹面に抗力を与えた風の一部は、オーバーラップ部を通して反対側バケットの凹面にも抗力を与える。よってサボニウス風車は低回転であるがトルクは大きい。ハブダイナモは 1 秒間に 2.08 回転 (1 分間に 125 回転) させれ

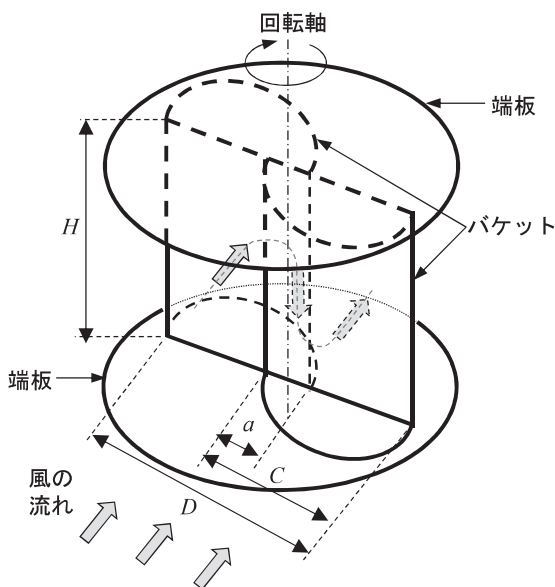


図 2 サボニウス風車の構造

ば定格出力が得られるため、サボニウス風車に利用しやすい。しかし、抗力型風車の周速 V_r は風速 V_w より速くはならないため、形状選定に注意が必要である。

2.2 風車形状の最適設計

表 1 に 1 号機と 2 号機の仕様を示す。2 号機の形状を最適化するために以下の手順で検討を行った。まず風の入力と同じにするため、受風面積 $A (= DH)$ は 1 号機と同じ 0.51 m^2 とした。次に、オーバーラップ比 $K_O (= a/C)$ は 0.2~0.3 の範囲で効率が最も高い^{9), 10)}。オーバーラップ a が大きい方が、風車直径 $D (= 2C - a)$ は小さくなり、回転数上がる可能性がある。よってオーバーラップ比 K_O を 0.3 とした。

続いて、アスペクト比 $K_A (= H/C)$ を検討するため、周速比 λ との関係式を導く。周速比 λ は(1)式で定義される。

$$\lambda = \frac{V_r}{V_w} = \frac{\pi D n}{V_w} \quad (1)$$

ここで、 n : 1 秒間あたりの風車の回転数。(1)式から風車直径 D は周速比 λ に比例することがわかる。(2)式に示すアスペクト比 K_A について、以下の変形を行う。まず、受風面積 $A (= DH)$ とオーバーラップ比 $K_O (= a/C)$ を用いて H と C を消去する。さらに (1)

表 1 サボニウス風車の仕様

項目	2号機	1号機
風車直径 D [m]	0.51	0.78
バケット直径 C [m]	0.30	0.50
オーバーラップ a [m]	0.09	0.15
高さ H [m]	1.0	0.65
受風面積 $A = DH$ [m^2]	0.51	0.51
オーバーラップ比 $K_O = a/C$	0.3	0.3
アスペクト比 $K_A = H/C$	3.3	1.3

ただし、1号機の直径 $D = (D_1 + D_2)/2$

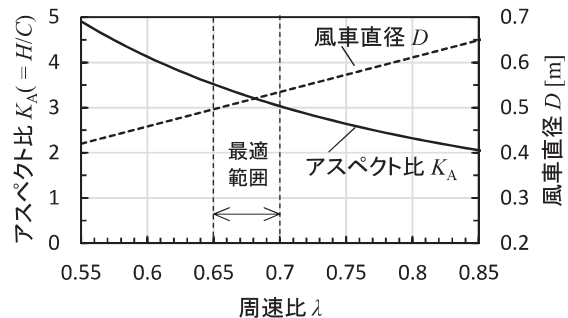


図 3 アスペクト比および風車直径の特性 (計算値)

($K_O = 0.3$, $V_w = 5.0 \text{ m/s}$, $n = 2.08 \text{ rps}$, $A = 0.51 \text{ m}^2$)

式を用いて風車直径 D を消去する.

$$K_A = \frac{H}{C} = \frac{(2-K_O)A}{D^2} = \left(\frac{\pi n}{V_w}\right)^2 \cdot \frac{(2-K_O)A}{\lambda^2}, \quad (2)$$

(2)式からアスペクト比 K_A は周速比 λ の二乗に反比例することがわかる. (1)式と(2)式を用いて, 周速比 λ に対するアスペクト比 K_A および風車直径 D の特性を計算した結果を図3に示す. 計算条件は, $V_w = 5.0 \text{ m/s}$, $n = 2.08 \text{ rps}$, $A = 0.51 \text{ m}^2$ として, 周速比 λ を $0.55 \sim 0.85$ の範囲で変化させた. 文献によると, サボニウス風車の最大効率が得られる周速比 λ の最適範囲は $0.80 \sim 0.85$ ⁹⁾, $10)$, あるいは $0.65 \sim 0.70$ ^{11), 12)} である. どちらが2号機に適しているのか不明であるため, 以下の検討を行った. 文献^{9), 10)}ではアスペクト比 K_A が 4.3 のとき最大効率になる. しかし, 図3から K_A を 4.3 にすると周速比 λ が 0.60 を下回る. 周速比 λ の最適範囲から外れてしまう上に, 風車直径 D が 0.45 m となり 0.50 m を下回る. つまり十分なトルクが得られない可能性がある. 次に, 周速比 λ を 0.85 とすると, アスペクト比 K_A が 2.0 とやや小さい. また風車直径 D が 0.65 m と大きくなり, 十分な回転数が得られない可能性が高い. 一方, 周速比 λ が $0.65 \sim 0.70$ であれば, アスペクト比 K_A が $3.0 \sim 3.5$, 風車直径 D が 0.50 m 前後となる. 文献¹⁰⁾から, K_A が 2.0 より 3.0 の方が, 1.3 倍以上の回転数が得られるので, 必要な回転数に達する可能性が高い. 以上の検討から, 最適設計値は $\lambda = 0.67$ として, $K_A = 3.3$, $D = 0.51 \text{ m}$, $C = 0.30 \text{ m}$, $a = 0.09 \text{ m}$, $H = 1.0 \text{ m}$ に決定した.

2.3 サボニウス風力発電2号機の製作

図4に2号機の概観を示す. 表2に主な部品のリストを示す. 図の丸数字は表の部品番号に対応する. 市販品として入手可能な部品がほとんどである. 特注品は「③バケット」と「④定着カラー」であるが, 汎用品の切断のみで対応できたため, コストの増加はわずかであった. 長さ 1.0 m の心棒を通して風車の回転軸とする. 回転軸の上側は図5(a), (b)に示す軸受を用いて支持した. これによって風車の回転による揺れを最小限に抑える. 図6に端板(下部)の詳細図面を示す. 端板の加工(切断, 穴あけ)は, 精度を出すためにレーザ加工機を用いた. これに対して, バケットは半円筒形であり, レーザ加工機が使えないため, 卓上ボール盤を用いて穴あけを行った. 図7は風車内部を上側から見た様子を示す. 丸で囲んだアルミ製(厚み 1 mm) の「自作

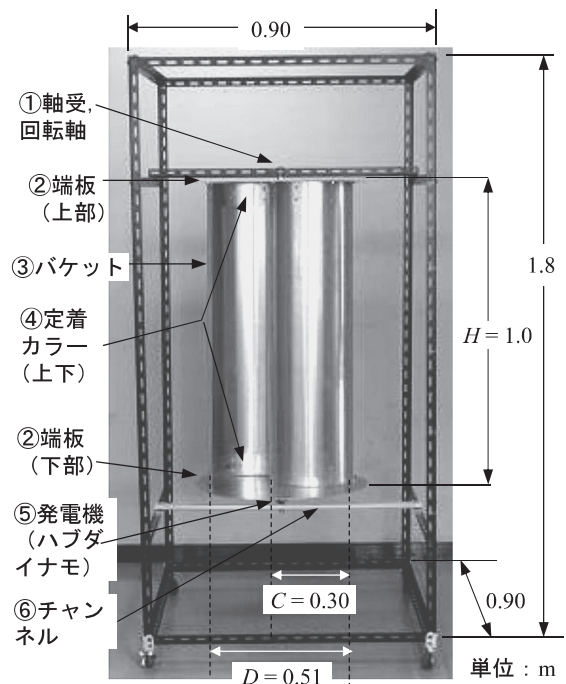
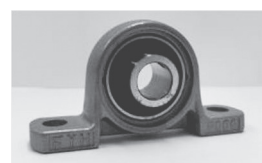


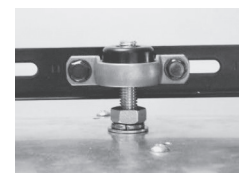
図4 サボニウス風力発電2号機

表2 主要部品一覧

No.	部品名(型式等)	仕様
①	軸受(FYH製, UP000C)	形状: ピロー形, 貫通形カバー付 軸穴径: 10 mm
	回転軸(メータ寸切)	鉄/クロメート 直径: 10 mm, 長さ: 1000 mm
②	端板(アルミ円板)	直径: 580 mm, 厚み: 1 mm 上下2枚
③	バケット(フカガワ製, 単管)	直径: 300 mm (半円縦割, 2枚, 亜鉛鋼板) 長さ: 1000 mm, 厚み: 0.6 mm
④	定着カラー(フカガワ製, バケットを端板に固定する金具)	直径: 300 mm (半円縦割, 4枚, 亜鉛鋼板) 長さ: 85 mm, 厚み: 0.6 mm
⑤	発電機(シマノ製, DH-2N30J)	ハブダイナモ 永久磁石式同期発電機: 28極 定格: 6 V-2.4 W, 125 rpm
⑥	チャンネル(キタジマ製, CH-40, ハブダイナモの固定金具)	厚み2.3 mm, 幅40 mm, 高さ17 mm, 長さ900mm



(a) 軸受概観



(b) 取付状況

図5 軸受(拡大写真)

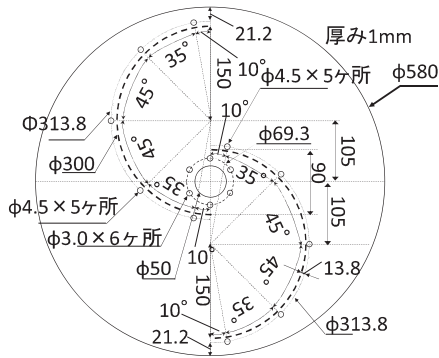


図6 端板（下部）の詳細図面（単位：mm）

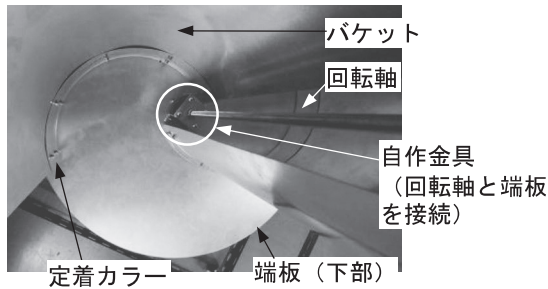
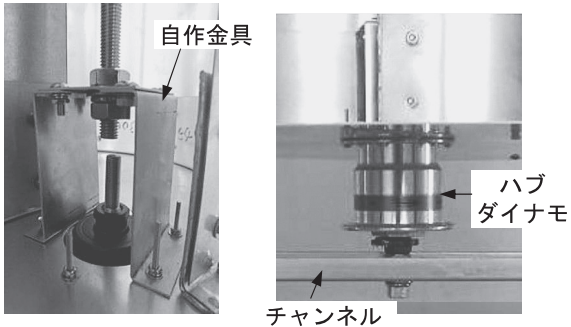


図7 上側から見た風車内部



(a) 自作金具 (b) ハブダイナモ

図8 端板（下部）に取り付けた部品

金具で「回転軸」と「端板（下部）」を接続する。「自作金具」の拡大図を図8(a)に示す。図8(b)に示すように、ハブダイナモのケース本体を端板の裏面に取り付ける。ハブダイナモの軸（下側）は「チャンネル⑥」に固定し、軸受の役割も兼ねる。風車の回転とともにハブダイナモのケース本体が回転することによって発電する。

2.4 簡易送風機の製作

2号機の性能評価を行うために、風車直径0.51m×高さ1.0mの範囲に風を当てる必要がある。そこで、図9に示す簡易送風機を製作した。工業用扇風機（山善製、YKC-455）を6台用いた。扇風機単体は三段階のスイッチで強・中・弱の設定ができる。実験では、6台の扇

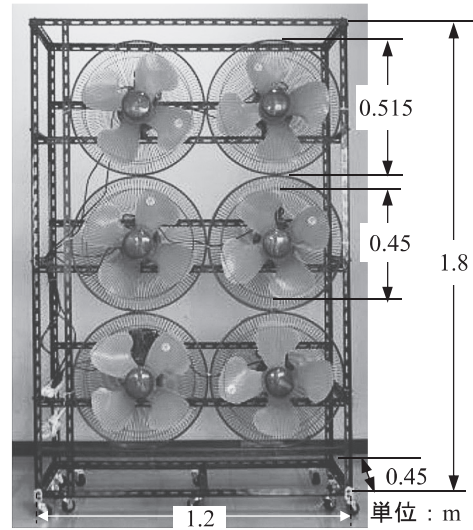


図9 簡易送風機

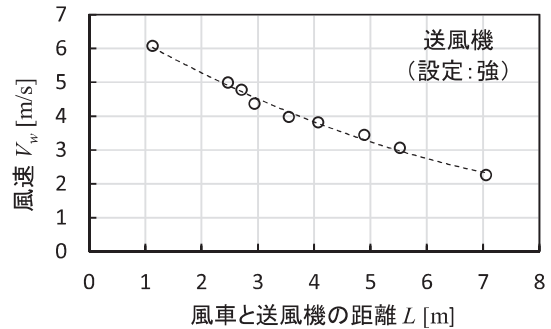


図10 簡易送風機の風速特性

風機のスイッチを強の設定にしたままで、風車と送風機の距離 L を変えることによって、風速を 2.3～6.0 m/s の範囲で調節した。得られた風速特性を図10に示す。この風速 V_w は風車がない状態で測定した値である。熱線式風速計（KANOMAX 製、6035-00）を用いた。なお、風車直径 0.51 m×高さ 1.0 m の範囲を通過する風の風速分布の不均一性は以下のように考慮した。上記の通過範囲を縦横 5×5 に分割し、25 等分したメッシュの各中心点で風速を測定する。この 25 点の風速値を平均し、風速 V_w として扱う。ただし、後述する授業実践で風速を 25 点測定することは、時間的に困難である。そこで、風速 V_w (25 点平均値) に等しくなる測定位置 (1 箇所) を事前に確認し、1 箇所の測定で済むようにした。

3. 実験方法

風速を 2.3～6.0 m/s の範囲で 9 点変化させて、2号機の発電出力 P_o と発電効率 η を測定する。空気の密度を ρ ($=1.225 \text{ kg/m}^3$) とおけば、入力 P_m は(3)式、発電効率 η は(4)式で表される。

$$P_{in} = \frac{1}{2} \rho A V_w^3, \quad (3)$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100, \quad (4)$$

比較のため、1号機の測定も交互に行う。図11に実験回路を示す。抵抗負荷 R は 15Ω (定格負荷) を用いる。抵抗両端の電圧 v をオシロスコープで計測し、(5)式から発電出力 P_o を求める。

$$P_o = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v^2}{R} dt = \frac{V^2}{R}, \quad (5)$$

ここで、 T : 電圧 v の周期、 V : 電圧実効値。同じ風速の下でも、発電出力 P_o はわずかに変動するため、3回測定して平均値を求める。周波数から、ハブダイナモの1分間あたりの回転数 $N_s (=120/fp)$ を求める。ハブダイナモの極数 p は28である。2号機の電圧波形の測定例を図12に示す。風速が 5.0 m/s のときであり、周波数は 29.8 Hz 、回転数 N_s は 128 rpm である。定格回転数 125 rpm をやや上回り、発電出力は 2.4 W を得た。このときの周速比 λ は 0.70 (周速 3.5 m/s)、発電効率は 6.2% であった。なお、発電時に抵抗の温度上昇により負荷抵抗値はわずかに変わる。そこで、発電出力を正確に求めるために、各風速で電圧を測定した後、直ちに負荷を外し、テスターで抵抗値を計測した。

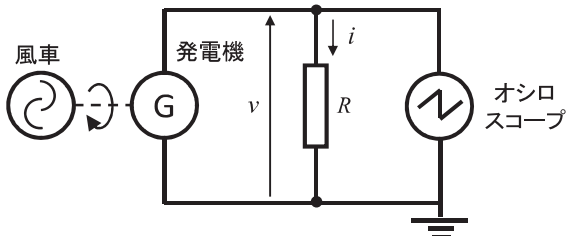


図11 実験回路

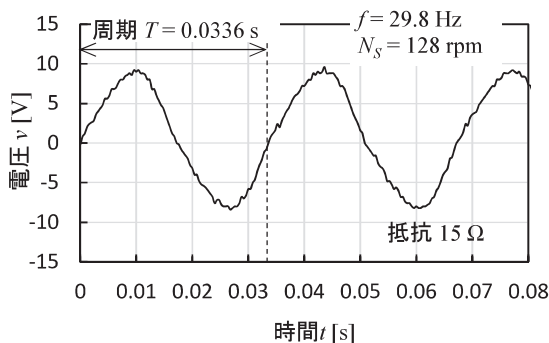


図12 電圧測定例 (2号機, 風速 $V_w = 5.0 \text{ m/s}$)

4. 実験結果および考察

4.1 発電出力特性

図13に風速に対する発電出力特性を示す。図より、2号機は風速が 5.0 m/s で 2.4 W となりほぼ定格出力を得ることができた。さらに風速 6.0 m/s のとき 2.8 W となり定格出力を超えた。これに対して、1号機は風速が 5.0 m/s で 0.89 W であり、 6.0 m/s で 1.3 W となった。受風面積が同じであるにも関わらず、2号機は1号機に比べて、 $1.6 \sim 3.3$ 倍の発電出力が得られており、性能が大幅に改善した。風車形状を最適化した効果が著しく現れたと考えられる。両機とも、風速が 4.0 m/s 前後のときに出力増加が最も大きく、風速の三乗に比例する特性を示す。風速が 5.0 m/s 前後から出力の増加は緩やかになる傾向を示している。同様な特性が文献4でも示されており、妥当な結果といえる。

4.2 発電効率特性

図14に発電効率と周速比の関係を示す。1号機は周速比が $0.28 \sim 0.59$ まで変化しても発電効率は $1.8 \sim 2.5\%$ と小さいままである。周速比が 0.56 (風速 4.8 m/s , 周速 2.7 m/s , 回転数 59.7 rpm) のときに、最大効率 2.5% (入力 35 W , 出力 0.86 W) を得た。しかし、図3の周速比の最適範囲 ($0.65 \sim 0.70$) を下回っており、効率が低くなった原因と考えられる。

一方、2号機は周速比が $0.31 \sim 0.69$ に変化したとき、

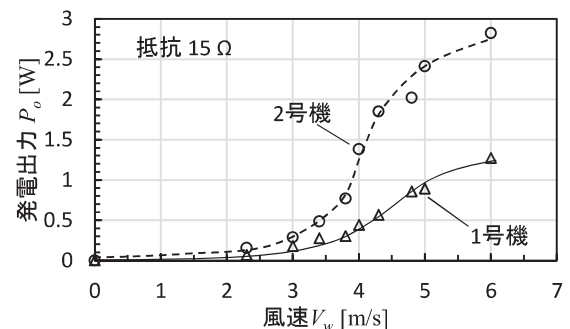


図13 風速に対する発電出力特性

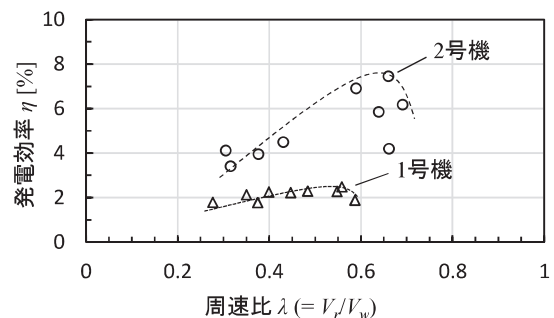


図14 発電効率と周速比の関係

発電効率が 3.4~7.6%と大きく変化した。特に周速比が 0.65 (風速 4.3 m/s, 周速 2.8 m/s, 回転数 106 rpm) のときに, 最大効率 7.6% (入力 25 W, 出力 1.9 W) となった。これは図 3 の周速比の最適範囲 (0.65~0.70) で動作しており, 効率が高くなった原因と考えられる。このように, 2 号機の最大効率は 1 号機と比べて 3 倍になり大幅に向上した。しかし 3 章で述べたように, 風速が 5.0 m/s のときに定格出力が得られたが, 発電効率は 6.2%に低下した。これは, 図 13 の示したように, 風速 5.0 m/s 前後から発電出力の増加が緩やかになったためと考えられる。定格出力時に最大効率を得られるように設計精度を向上させることが課題である。

5. 授業実践

2 号機の開発過程 (設計・製作・性能評価) を PBL 型授業に応用する。その授業実践を本学の授業科目の一つである「専門ゼミナール」で行った。

5.1 専門ゼミナール

本学工学部電気システム工学科の学生は, 3 年次後期に研究室に配属される。「専門ゼミナール」は配属された 3 年生を対象に実施する授業であり, 4 年生から始まる卒業研究や就職活動に必要な知識や技能の基礎を修得することを目的としている。1 回 90 分の授業が 15 回行われる。15 回の内, 2 回は学科全体で「ガイダンス」や「就職活動に備えた学力試験」を行う。残りの 13 回はゼミ単位で教員が授業を行う。

5.2 実施方法

PBL 型授業を行う目的は, 「サボニウス風力発電の効率向上」をテーマに, エネルギー分野の電気技術者として, ものづくりの実際を学び, 卒業研究の基礎にすることである。13 回の授業の内, 9 回分に PBL 型授業をあたえた。実施内容を表 3 に示す。残り 4 回は「ゼミの先輩との交流会」や「就職・進路指導」などを行っているため, 表からは外した。参加者は, ゼミ配属された 3 年生 7 名である。ものづくりの経験が少ない学生が 5 人含まれる。加えて, 本テーマを卒業研究や修士研究として取り組んでいる 4 年生 1 名, 大学院生 1 名も参加した。なお, 各回の授業時に 3~4 の設問からなるワークシート (A4・1 枚) を配布して問題に取り組ませる。その最後の共通設問は, 「今日の授業を振り返って, 意見・感想を自由に記述する」ことであるため, 以下の実施方法の説明では省略した。

表 3 PBL 型授業の実施内容

回数	実施内容
第1回	風力発電に取り組む背景・目的の理解
第2回	1号機の動作原理と課題の理解, 解決策の検討
第3回	2号機の設計その1(最適形状の検討)
第4回	2号機の設計その2(構造検討)
第5回	2号機の製作その1(部品リストの作成)
第6回	2号機の製作その2(開発工程と製作コスト)
第7回	2号機の測定その1(定格出力の測定)
第8回	2号機の測定その2(風速に対する出力特性)
第9回	アンケートと振り返りレポート作成

(1) 風力発電に取り組む背景・目的の理解

事前学習として文献 1 の風力発電に関する章を読む指示をした。授業時は 3 つの設問に取り組む。1 問目は, 文献 1 から, 関心をもったキーワードを 3 つ挙げて, そのキーワードを選んだ理由を記す。2 問目は, 風力発電コンペ WINCOM 2014 の動画⁷⁾を見せる。動画には風速 7.0 m/s のときに, ハブダイナモを利用したサボニウス風力発電機が定格出力を出したことが紹介されている。動画を見た意見・感想を書く。3 問目は, 授業で風力発電の効率向上に取り組む背景・目的について理解したことや考えたことを書く。終わりに, 次回の授業に備えて, サボニウス風車の最適形状に関する資料^{4), 10)}を配布し, 熟読しておく指示をする。

(2) 1号機の動作原理と課題の理解, 解決策の検討

3 つの設問に取り組む。1 問目は, 1 号機を用いてサボニウス風力発電の実演を見せて, その動作原理を説明させる。また, 1 号機が定格出力に達しない理由を 3 つ考える。2 問目は, サボニウス風力発電機の形状から入力, 出力, 効率を求める方法を説明させる。3 問目は文献^{4), 10)}を参考に, サボニウス風車でハブダイナモの定格出力を出すために必要な解決策を 3 つ考える。

(3) 2号機の設計その 1 (最適形状の検討)

2 つの設問に取り組む。1 問目は, 文献^{4), 10)}を参考に, 図 2 に示すサボニウス風車でハブダイナモの定格出力を出すための最適形状 (a, C, D, H) を提案させる。ただし, オーバーラップ比 0.3, 受風面積 0.51 m^2 とする。2 問目は, 風速 5.0 m/s または 6.0 m/s で定格出力が得られたと仮定して発電効率を求める。さらに, その値が文献 10 の値と比べて小さくなる理由を考える。

(4) 2号機の設計その 2 (構造検討)

2 つの設問に取り組む。1 問目は最適形状案 (表 1) を基に, 2 号機の具体的な構造を検討する。風車, 回転

軸、発電機の位置、端板、固定枠などを考慮して平面図と断面図を寸法も含めて描かせる。2問目は、簡易送風機の構造を検討させる。工業用扇風機の1台あたりの寸法を提示した上で、設計したサボニウス風車を回すために必要な扇風機の台数、配列、固定枠の寸法を考慮して図示させる。

(5) 2号機の製作その1 (部品リストの作成)

時間の都合上、2号機と簡易送風機の部品調達や組立作業は、参加した4年生、大学院生および教員の3名で事前に完成させた。授業では完成した実物をよく観察させ、使用部品リストを作成することで製作の一端を学ぶという方式を採用した。具体的には、4チーム(1チーム2~3名)になって、2つの設問に取り組む。1問目は2号機を観察し、使用部品リストを作成する。2問目は簡易送風機を観察し、使用部品リストを作成する。

(6) 2号機の製作その2 (開発工程と製作コスト)

2つの設問に取り組む。1問目はサボニウス風力発電の原理、最適化、仕様設計、製作、性能評価などものづくりに必要な開発プロセスをまとめる。前回のチームで話し合いながらまとめる。2問目は2号機と簡易送風機のそれぞれの製作コストを算出する。前回の部品リストをもとに、カタログやWeb検索により材料の入手方法とコストを特定し積算する。

(7) 2号機の測定その1 (定格出力の測定)

2つの設問に取り組む。1問目は図11の実験回路を構成し、2号機で定格出力を得られるか実験する。負荷は「15Ω抵抗」と発電が視覚的にわかる「自転車用電球」の2通りで測定する。風速も測定する。2問目は定格出力時の発電効率 η を求める。ハブダイナモの発電機効率が70%¹⁾であることから風車効率 $\eta_r (= \eta/0.7)$ も求める。なお、実験は、「簡易送風機の操作」、「オシロスコープの計測」、「風速の測定」、「負荷抵抗値の測定」などを全員で協力しながら行った。

(8) 2号機の測定その2 (風速に対する出力特性)

2つの設問に取り組む。1問目は風速が3.0~6.0 m/sの範囲で段階的に風速を変えて、出力を6点測定する。2問目は、測定結果から風速に対する出力特性のグラフを作成し、そこからわかることを考察させる。

(9) アンケートと振り返りレポートの作成

(1)~(8)を振り返って、5つの質問アンケートに答える。また授業を通しての学び、気づき、意見・感想をテーマに600字以内でレポートを作成する。

6. 教育効果および考察

6.1 ワークシートの活用と工夫

毎回の授業を円滑に進めるためにワークシートを活用している。第8回(2号機の測定その2)の授業時に学生が作成したワークシートの例を図15に示す。設問数は3問程度にしている。設問文に続く記入欄は、通常は学生が自由に記入できるように、単に空欄にすることが多い。しかし、図15の場合は、風速を6通りに変えたときの測定値(7項目:風速、電圧、電流、出力、周波数、回転数、負荷抵抗)を記録する必要がある。そのため、記入欄に測定記録表も加えた。このような工夫から、学生は授業の中で取り組むべき課題が明確になり、積極的に授業に参加することができた。また授業時間内で終わらせることができるように、設問ごとに取り組む時間の目安も入れている。最後の設問である自由記述欄は、必ず書かせるように指示した。数行の記述内容であるが、学生は授業の振り返りをすることで実施内容の要点を理解し、課題や疑問点も明確になる。図15の自由記述では、「実際に測定を行って見て、風力発電の特徴がグラフに出ていることが実感できた」と記している。つまり、学生は積極的に実験を行い、データ

2016年12月14日(水)

第 8 回 吉田ゼミ 専門ゼミナール ワークシート

テーマ: 風力発電の測定その2(定格出力の測定)

学生番号() 名前()

1. 最適化されたサボニウス風力発電機で最小風速(Cut in)~最大付近の6点を測定し特性化しよう。負荷15Ω抵抗で実験しなさい。(70分)

実験結果をまとめてください。

負荷	風速(目安) (m/s)	測定値 (m/s)	電圧V[V]	電流I[A]	出力P[W]	周波数 (Hz)	回転数 (rpm)	備考
15Ω (15.0Ω)	最小	3	3.75	0.257	0.969	16.37	70.16	
15Ω (15.0Ω)	3.5							
15Ω (15.0Ω)	4	4	4.2	0.314	1.33	21.35	71.30	
15Ω (15.0Ω)	4.5	4.78	6.05	0.419	2.51	31.58	135.3	
15Ω (15.0Ω)	5	5	6.32	0.403	2.55	33.16	142.1	
15Ω (15.0Ω)	最大	6	6.84	0.537	3.66	38.71	149.2	
(15.0Ω)		4.3	5.24	0.357	1.88	25.29	108.2	

$\eta_r = \frac{P}{P_{max}} = \frac{1.33}{3.66} = 36.3\%$

測定条件や測定結果の記録

2. 1の結果をグラフ(横軸を風速、縦軸出力)を作成し、考察しよう。(手書き又はエクセルでもよい) 10分 or 短縮

<グラフ>

グラフの作成と考察の記入

3~5 m/s での風速は3倍は比例増加が確認された。出力が上昇していること、回転数が5 m/s 以後で、飽和していることがわかる。

3. 今日専門ゼミナールを振り返っての学び、気づき、感想、意見・要望など自由に書こう(10分)

今回は、実際に測定を行って見て、風力発電の特徴がグラフに出ていることが実感できた。

自由記述欄(振り返り)

図15 学生が作成したワークシートの例

(第8回授業: 2号機の測定その2)

を取得することにより、第8回授業の課題である「風速に対する出力を特性化」し、その特徴も実感を伴って理解したことがわかる。このようにして教員は、自由記述から学生の姿勢や理解度を知り、次回の授業を改善するヒントにすることができた。

6.2 ワークシートとレポートの評価結果

学生が作成したワークシート（第1回～第8回）とレポート（第9回）について、それぞれ10点満点で評価を行った。「知識・理解」、「思考・判断」、「表現」の3つの観点から到達度を数値化した。ただし、どの観点に比重を置くかは設問の内容によって異なる。表4に評価結果（7人の学生の平均点）を示す。ワークシート

表4 PBL型授業の評価結果（各回、10点満点）

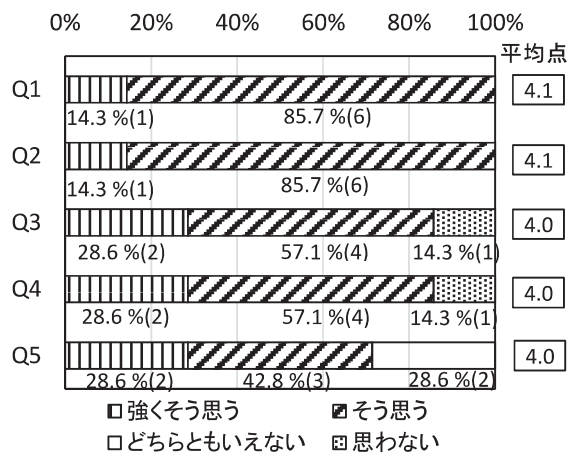
回数	実施内容	平均点
第1回	背景・目的の理解	8.4
第2回	原理と課題の理解、解決策の検討	8.3
第3回	設計その1(最適形状の検討)	8.9
第4回	設計その2(構造検討)	7.1
第5回	製作その1(部品リストの作成)	9.7
第6回	製作その2(開発工程と製作コスト)	8.6
第7回	測定その1(定格出力の測定)	10
第8回	測定その2(風速に対する出力特性)	10
第9回	振り返りレポート作成	9.3
総合平均		8.9

とレポートの両方を含めた総合平均は8.9点と非常に高い。これは、毎回の実施する課題の量が適切であり、学生の多くが意欲的に取り組むことができたからと考えられる。しかし、「設計（第3回、第4回）」の平均は8.0点（2回分）とやや低くなった。第3回は、計算式を用いて最適形状を検討すればよいため、平均は8.9点と高いが、第4回の平均は7.1点と最も低い。「構造検討」には思考力や判断力が強く問われるため、学生は難しく感じたようである。例えば、ある学生は自由記述欄で「完成している物を見て納得するのは簡単であるが、一から自分で寸法などを設定するのは考えることが多く、想像力がとても必要だと思った」と記した。別の学生は「実際の材料や部品ではどう取り付けるかまで考えたり、工夫したりする必要が出てくるので大変だと思った」と記した。このことから学生たちは、ものづくりにおいて、構造まで考えて設計することの重要性に気付くことができたと言える。一方、「製作（第5回、第6回）」の平均は9.1点、「測定（第7回、第8

回）」の平均は10点と非常に高い。この理由は、第5回以降は完成した2号機の実物を見て、課題に取り組むため、実施することがイメージしやすかったからと考えられる。またチームで効率よく作業をしたことも点が上がった理由に挙げられる。振り返りレポートについては、ほとんど学生が600字の9割以上を埋めて、授業で得た学びや考えをまとめた。以上から、PBL型授業を通して、学生が実践的な問題解決能力の基礎を身に付けることができたと考えられる。

6.3 アンケート結果

参加した3年生7名のアンケート結果を図16に示す。「強くそう思う」に5点、「そう思う」に4点、「どちらともいえない」に3点、「思わない」に2点、「全くそう思わない」に1点を与えて、各質問の平均点を求めた。5点満点に対して各質問の平均点は、4.0～4.1点であり、肯定的な回答が多く得られた。Q1の結果より、卒業研究レベルのテーマを授業で扱うことにより、実践的な問題解決力の基礎を身に付けることができたと考えられる。その客観的根拠は6.2節で説明したとおりである。Q2の結果から学生達は、サボニウス風車の最適化を目指した設計・製作、そして実機の測定を通して、「マイクロ風力発電」の理解を深めることができたと考えられる。Q3の結果から本授業が「ものづくり」への関心や理解を深めることに有効であることが確認



- Q1. 卒業研究に取り組むための基礎を学べたか？
- Q2. 「マイクロ風力発電」の理解が深まったか？
- Q3. 「ものづくり」への関心や理解が深まったか？
- Q4. 自然エネルギーへの興味や関心が深まったか？
- Q5. チームワークを身に付ける機会になったか？

図16 アンケート結果：()は人数

できた。時間の都合上、参加した3年生に実際の製作をさせることはできなかった。今後は製作現場を見学させる、または、製作台数を増やして、製作体験を積ませることも重要であろう。Q4の結果から、自然エネルギーへの興味や関心を深めることにも役立ったと言える。しかし、今回は送風機による定格出力の発電であった。今後は、自然の風を利用した発電にも取り組みたい。Q5の結果から、チームになって部品リストの作成やコスト算出をし、また全員で協力して測定を行ったことがチームワークの機会になったと考えられる。しかし、分担した役割の内容によっては、チームワークをあまり実感できない学生(2名)がいた。なお、Q3、Q4で一人(同じ学生)が「思わない」の否定的な回答を選んだ。振り返りレポートの内容を見る限り、この学生は、授業に真面目に参加していたが、ものづくりの経験がほとんどなく、電気エネルギー分野にもあまり関心がなかったようである。しかし、本授業を通して、ものづくりの大変さや仲間と協力をする必要性を感じたと述べており、一定の教育効果が認められた。

6.4 レポートの記述内容

振り返りレポートの内容から学生がどのような学びや気づきを得たのかを知ることができる。特に多かったのがサボニウス風力発電機的设计、製作、測定を通して学んだ「ものづくり」に関する意見・感想であり、7人全員が記述していた。図17に記述例を示す。5.2節で述べたとおり、参加した7人の内、ものづくりの経験が少ない学生が5人含まれていた。しかし、図17から学生の多くが、ものづくりのプロセスを学ぶ中で、最適な値に設計することの重要性や難しさを実感できており、問題解決力を磨く機会になったことが窺える。

- ・実際に最初からものを作るためには、さまざまな事を考慮し、部品の一つ一つからどうすべきか細かく考える必要があることを実感することができた。
- ・サボニウス風車の最適設計におけるアスペクト比、オーバーラップ比などを考慮し、自分たちでどのようにすればよいか考えることでより理解を高めることができた。
- ・設計時に部品の大きさや数など、適切に選択する必要があるとわかりました。
- ・風車の原理や構造、最適な形状を考え、実際に設計してみてどのような風車になるかを理論式に基づいて考えたり、風車や送風機にかかるコストや、材料の選定やリスト化など、難しくもありましたが、将来に役立てられるのではないかと思います。

図17 レポートの抜粋(ものづくりに関する記述例)

7. まとめ

ハブダイナモを利用したサボニウス風力発電の最適形状化を行い、風速5.0m/sで定格出力2.4Wを得ることができる実験教材(2号機)を開発した。発電出力と発電効率は1号機と比べて1.6~3.3倍に向上した。2号機の開発プロセスをPBL型授業に応用した。学生が授業に積極的に参加できるようにワークシートの内容に工夫を凝らした。学生が作成したワークシートとレポートを総合評価した平均点は8.9点(10点満点)と非常に高い結果が得られた。またアンケート結果から、各質問の平均点が4.0~4.1点(5点満点)であり、肯定的な回答を多く得ることができた。本授業が「ものづくり」への関心や理解を深めることに有効であることが示された。以上から、本実験教材の有効性とPBL型授業の教育効果を検証することができた。今後は、風車の上下にハブダイナモを合計2個つけた場合の発電効率についても検討を行いたい。また、風力発電コンペWINCOMに参加できる構造に改良していく予定である。

参考文献

- 1) 伊藤義康:分散型エネルギー入門, pp.48-71(講談社,2012).
- 2) 気象庁,過去の気象データ検索, 平年値(年・月ごとの値).
- 3) 川西達也, 吉田義昭:平成28年電気学会全国大会, 1-010, p.14(第1分冊,2016).
- 4) 川村康文:自分で作るハブダイナモ風力発電, pp.62-74, p.93(総合科学出版,2012).
- 5) 吉田義昭, 川西達也, 青木健太, 山添紘弥:応用物理教育40(2), pp.123-130(2016).
- 6) 川西達也, 吉田義昭:第77回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 14a-P1-21, 01-070(2016).
- 7) 第7回風力発電コンペWINCOM2014:http://www.cit.nihon-u.ac.jp/campus-life/event/wincom/result_presentation
- 8) 牛山 泉:風力エネルギー読本, pp.50-59(オーム社,2005).
- 9) 松本文雄, 牛山 泉, 西沢良史:垂直軸風車製作ガイドブック, p.17, pp.24-25, pp.48-49, p.85(パワー社,2011).
- 10) 牛山 泉, 長井 浩, 篠田仁吉:日本機械学会論文集(B編)52巻, 480号, pp.2973-2982(1986).
- 11) 三野正洋:自転車発電機(ハブダイナモ)による超小型風車の製作, p.2, p.61(パワー社,2011).
- 12) 白井 徹, 阿久津敏乃介:第23回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, pp.144-147(2001).