

寒冷地における風力発電の実用運転について

菊地 光一*・伊藤 博*・吉村 昇**

Practical Running of Windmill in Cold Northern District

Koichi KIKUCHI*, Jun ITO* and Noboru YOSHIMURA**

Abstract: The authors are interested in using wind energy in a cold northern district. For several years, the wind condition above the roof of ANCT (Akita National College of Technology) has been investigated, and windmills of small size constructed for trial have been put into operation in actual running. Akita Prefecture is situated in a latitude band where migratory low and high atmospheric pressure passes in groups except during the summertime and it is especially under great influence of continental high atmospheric pressure. Consequently in winter we have heavy snow and strong winds from the west.

In Akita Prefecture, which faces the Japan Sea, we have stronger winds than in other prefectures, especially those on the Pacific Ocean side. Therefore, the authors have had a great desire to use wind energy.

In October 1982, the authors had an opportunity to install a windmill generator of propeller type with an output of 1 kW at a velocity of 7 m/s. This windmill generator is under operation in actual running at present. In this paper the authors report some results of the operation and also state matters to be considered in installing a windmill in the polar regions. The main contents are as follows:

- (1) Operation in practical running for confirmation of safety of the windmill generator.
- (2) Influence of life-environment.
- (3) Utilization of wind energy for melting snow on a galvanized sheet roof.

要旨: 筆者らは寒冷地における風力エネルギーの利用に関心を持ち、ここ数年来、秋田工業高等専門学校屋上での風況調査および小型風車の試作、実用運転などを行ってきた。秋田県は夏を除き、移動性の高、低気圧群が通過する緯度帯にあり、冬は特に大陸高気圧の影響を強く受け、西風が強く雪が多い。

また、日本海側にある本県は他都道府県、特に太平洋側と比較して概して風が強いので、筆者らは風力エネルギーの利用を強く念願していた。

1982年11月、風速 7 m/s で 1 kW のプロペラ型風力発電装置を設置する機会を得、現在実用運転中であるが、次のような項目について得られた成果を報告するとともに、極地で風力発電を実施する場合の留意事項について述べる。

- (1) 風車の安全性確認のための試験運転、
- (2) 生活的環境への影響、
- (3) 発生エネルギーの屋根雪処理への利用。

* 秋田工業高等専門学校. Akita National College of Technology, 1-1, Iijimabunkyo-cho, Akita 011.

** 秋田大学鉱山学部電気工学科. Department of Electrical Engineering, Mining College, Akita University, 1-1, Tegatagakuen-cho, Akita 010.

1. はしがき

石油は有限であり、供給不足は必ずやってくる。石油の代替エネルギーについてはいろいろな角度から研究がなされている。風力エネルギーもそのひとつで、クリーンで再生可能なエネルギーとして、サンシャイン計画などでも取り上げられている。

筆者らは寒冷地における風力エネルギーの利用に関心を持ち、ここ数年来、秋田工業高等専門学校屋上での風況調査、および小型風車の試作、実用運転などを行ってきた（菊地・後藤, 1981a, b）。

今までの調査で、秋田県は冬期間、大陸高気圧の影響を強く受け、西方向の風が強く、雪も多いので風のエネルギーを利用して、克雪のための有効な手段を検討してきた。

昭和 57 年 11 月、定格風速 7 m/s で、1 kW の発電機出力を発生する風力発電装置を設置する機会を得、現在運転中である。風車を実用化するには、運転中の故障がなく、強風に対しても十分安全であるかどうか重要な問題点であるので、風力発電装置全体の安全性確認を第一の研究課題とした。

次に、風車が風を切る時に風切音が発生し、騒音として人的生活環境へ影響を与えるので、その騒音レベルがどの程度であるかを把握するため基礎調査を行った。

また、冬期間における風力の発生エネルギー利用の一方法として屋根雪処理の実験を試みた。

なお、昭和基地は風エネルギー利用の好適地と考えられるので、今までの実験経験により、昭和基地で風力発電を実施する場合の留意事項について検討した。

2. 実験施設、設備の概要

2.1. 風力発電装置

(1) 設置場所: 風況、クラブ活動などの教育活動を考慮して、本校校地内のプール東側とした。

(2) 風力発電装置: 図 1 にその外観を示す。クレオソート注入木柱 3 本で本体を支持し、風車の中心位置は地上高約 12 m である。

(3) 風車: 日の丸プロ製天風 1 号、プロペラ形（木製）直径 3.8 m。強風安全対策として、プロペラが強風時上方偏向する姿勢制御方式で、風速 7 m/s で上方に偏向するよう調節する。

(4) 発電機: 自励式直流発電機で、定格は風速 7 m/s で出力 1 kW、発生電圧は直流 24V である。負荷は常に 1 kW の抵抗を用いた。

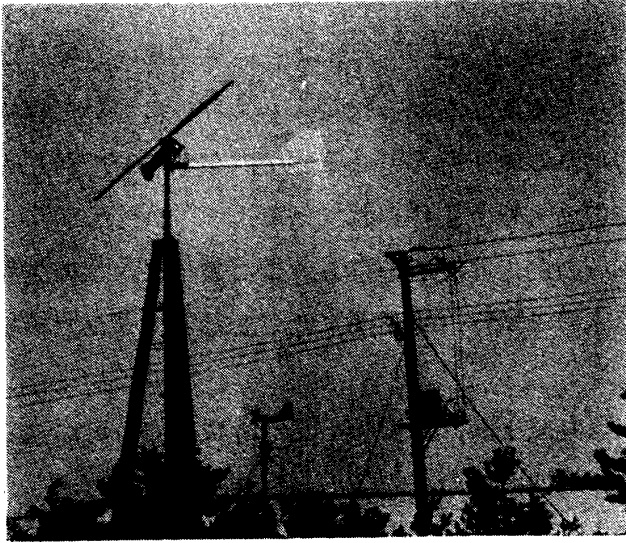


図 1 風力発電装置外観
 Fig. 1. Exterior view of windmill generator equipment.

2.2. 実験棟

実験棟の構造，寸法略図を図 2 に示す．屋根は北側に傾斜するよう配置し，東西に二等分して，東側半分に面発熱体を取り付け，西側半分には取り付けない．

面発熱体 1 枚の定格は 200W，24V で 5 枚並列として使用した．面発熱体の配置を図 3 に示す．面発熱体の取り付け部は，面発熱体取り付け後，さらに長尺垂鉛鍍鉄板で覆う．実験棟内部には計測装置を格納する．

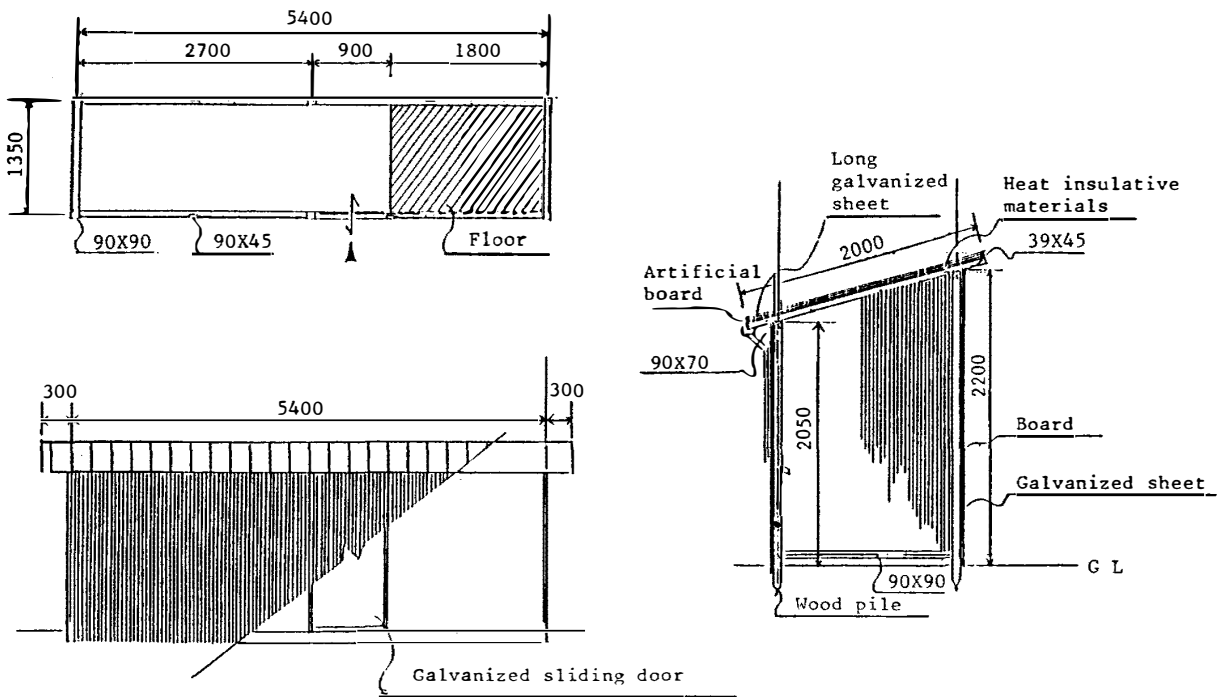


図 2 実験棟の構造，寸法図
 Fig. 2. Dimensions and arrangement of test laboratory.

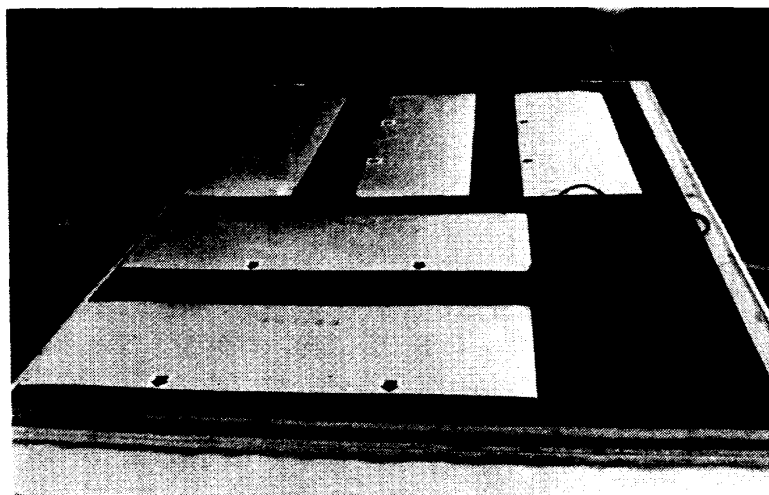


図 3 面発熱体配置図

Fig. 3. Arrangement of planar heater.

2.3. 主要計測装置

本報告に直接関係のある主要計測装置の概要を下記に示す。

- (1) 風向・風速記録計 1 式: 光進電気工業製プロペラ形風向・風速発振器 1 台, 風向・風速記録器 (自動平衡形 2 ペン方式) 1 台, 平均装置 (電氣的積分方式) 1 台.
- (2) 温度記録計 1 台: YEW 製 ER-6-30 型, 6 打点方式.
- (3) 風エネルギー積算計 1 台: 光進電気工業製, プロペラ形発振器よりの信号で作動, 測定面積 1 m^2 , エネルギーカウンター 6 桁, 分解能 1 Wh .
- (4) 直流電力積算計 1 台: 光進電気工業製, 発電機出力を積算する電磁カウンターで直流電力の積算量を表示する. 分解能 1 Wh .
- (5) 2 方向加速度振動計 1 台 (振動検出用センサ付): 坂田電機 (株) 製, 周波数範囲 $10 \text{ Hz}-5 \text{ kHz}$, 加速度レベル $1 \text{ gal}-1000 \text{ gal}$, 減衰器 $20 \text{ dB}(\times 10)$ 3 段, 出力電圧 1 V/Full , チャンネル数 2.
- (6) 多ペンレコーダー, DC 電圧モジュール各 1 台: 理化電機工業 (株) 製卓上型 R-20, 2 方向加速度振動計と連動させ記録する.
- (7) 電圧記録計: YEW 製 3057 型, 風車発電機からの発生電圧の記録.

3. 実験方法

3.1. 風車の安全確認のための実用運転

風向・風速記録計により風況調査を行う。冬期間, 雪氷が風車のプロペラに付着した場合や, 風向・風速が急変した場合, 車軸の縦方向および横方向の振動の程度を車軸に取り付けたセンサーで検出し, 2 方向加速度振動計を用いて, 多ペンレコーダーに記録して検討する。そのほか, 風速が 10 m/s 以上の強風時, プロペラを含めて風力発電装置全体の構造物は安

全であるか、また年間を通じ電力は正常に発生し、負荷に異常なく到達しているかを調査する。

3.2. 生活環境への影響

主として風車の発生する騒音が人的生活環境にどのような影響を与えるかを調査する。風車の発生する騒音の調査方法は「JIS-Z-8731」騒音レベル測定法に基づき、風車からの騒音レベルを測定する。風車からの騒音は、音源を点音源、球面波と仮定する。音源から騒音レベル測定点までの距離を求める方法を図4に示す。音源（風車の中心）は図4に示すように地上高12mである。また、測定点は音源より障害物のない道路上で、測定基準位置Pよりほぼ直線上に設定した。

風車騒音源から騒音レベル測定位置までの距離 x は、以下のように求められる。

$$x = \sqrt{12^2 + c^2}$$

$$c: \sqrt{a^2 + b^2}$$

a : 風車直下点 K から測定基準位置 P までの距離

b : 測定基準位置 P から騒音レベル測定位置までの距離

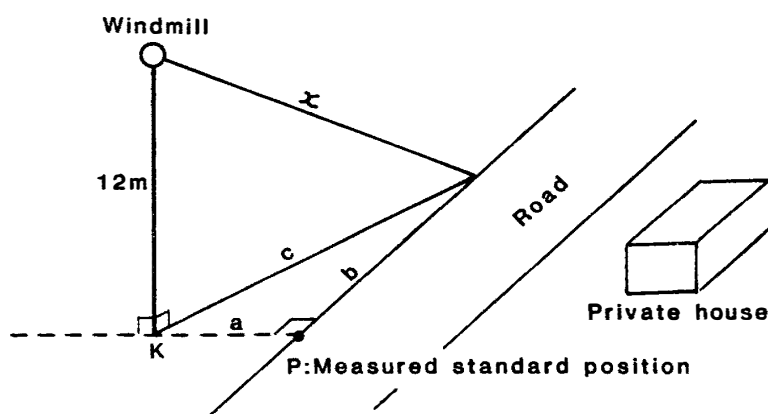


図4 音源より騒音レベル測定点までの距離を求める方法
Fig. 4. Method of measuring distance from sound source to point of noise level measurement.

3.3. 発生エネルギーの屋根雪処理への利用

雪国では、雪と寒さとの自然条件を考慮した住宅建設が、快適な生活を維持するため極めて重要な条件で、特に雪の多い地域では屋根雪処理が重要な課題となる。

1981年の豪雪による雪が直接、間接の原因となった事故死(栗山, 1982)は全国で133人に達し、このうち、屋根雪とかかわるものが74人で、全体の約56%にあたる。また、51歳以上の高齢者の死亡数が全体の65%に達したことは、この豪雪の特徴と言われている。

本研究は、この屋根雪処理に風力エネルギーを利用した場合の効果について基礎調査を行

ったものである。実験方法は面発熱体（商品名：パネルヒーター）を実験棟の屋根に図3のように配置し、これに風力発電によって得た電力を直接供給し、融雪状態を調査したものである。

4. 実験結果と検討

4.1. 風況調査の結果

風況調査の結果について、その代表的な例を次に示す。

(1) 1日の平均風速の年間度数分布：1日の平均風速の年間度数分布の一例を図5に示す。度数は風速記録計のペンレコーダーに記録された10分間平均風速を、それぞれ1時間範囲で平均し、それを1日（24時間）について平均し、1日の平均風速に対応する年間度数を求めたものである。年間を通じて若干の欠測日があるので、欠測日のデータは除外した。これによると、2 m/s を超え 3 m/s までの範囲の度数は最も高く、3 m/s を超え 4 m/s までの風速がこれに次ぐ。1日の平均風速が 15 m を超える日はなかった。

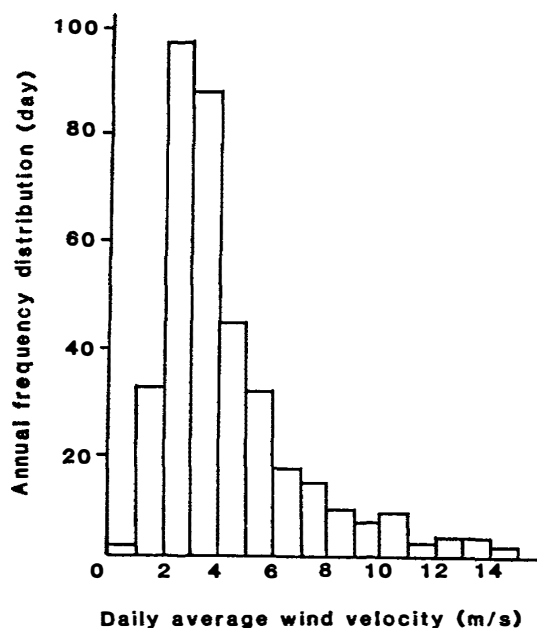


図5 1日の平均風速の年間度数分布

調査期間：1980年2月-1981年1月

調査場所：秋田工業高等専門学校電気工学科棟屋上

Fig. 5. Annual frequency distribution of daily average wind velocity.
Investigated term: February 1980-January 1981,
Investigated place: Roof of the building of Electrical Engineering Dept., Akita National College of Technology.

(2) 日平均風速・日最多風向・日降雪量：1980年から現在までの風況調査の結果、月平均風速および月降雪量の大きい月の例として、1983年12月についての調査結果を表1に示す。降雪量は実験棟屋根の積雪量を3カ所で測定し、その平均積雪量を示す。この間の平均

表 1 日平均風速・最多風向・降雪量・天気概況の例
 Table 1. Example of daily average wind velocity, most frequent wind direction, snow depth and weather conditions.

Observation subjects	Average wind velocity (m/s)	Most frequent wind direction	Snow depth (cm)	Weather condition
Dec. 1, 1983	12.8	WNW	No measurement	Snowstorm with strong breeze
2	8.9	W	No measurement	Fine, later rainy
3	9.9	WNW	0	Cloudy, often rainy
4	8.8	WNW	1	Snowy
5	4.3	SE	0	Cloudy, later rainy
6	3.9	NW	4	Snowy
7	2.3	ESE	No measurement	Cloudy, occasionally rainy
8	4.2	WNW	No measurement	Cloudy, occasionally rainy
9	2.4	NW	0	Fine
10	3.3	SE	0	Fine, later cloudy
11	6.2	W	0	Cloudy, often rainy
12	9.9	WNW	0	Snowy
13	3.2	SE	5	Rainy, with occasional thunder
14	6.6	NW	0	Cloudy, often snowy
15	4.1	NW	7	Cloudy, later snowy
16	9.8	WNW	6	Cloudy, often snowy
17	4.4	NW	7	Snowy
18	4.3	WNW	7	Cloudy, often snowy
19	7.1	WNW	10	Cloudy, often snowy
20	5.7	NW	10	Cloudy, later snowy, occasionally fine
21	2.2	WNW	10	Cloudy, later fine
22	3.7	SW	6	Fine, later rainy
23	6.8	NW	1	Fine, later snowy with strong breeze
24	4.2	WNW	2	Cloudy, often snowy, occasionally fine
25	8.4	W	25	Heavily snowy
26	10.2	WNW	19	Snowy
27	2.4	SE	11	Fine, later snowy
28	2.5	SE	11	Fine
29	3.0	ESE	16	Cloudy, later snowy
30	2.5	SE	18	Cloudy, often fine, occasionally snowy
31	2.1	SE	15	Fine, occasionally snowy
Daily average	5.5			

風速は最低 2.1 m/s, 最高 12.8 m/s で, 平均は 5.5 m/s であった。

(3) 月平均風速・月平均気温の変化: 1983年3月より1984年3月までの13カ月間における月平均風速および月平均気温の変化を図6に示す。7月-9月は気温が高く, 風速は弱い。また, 12月-2月の冬期間は気温が低く, 風速は大である。

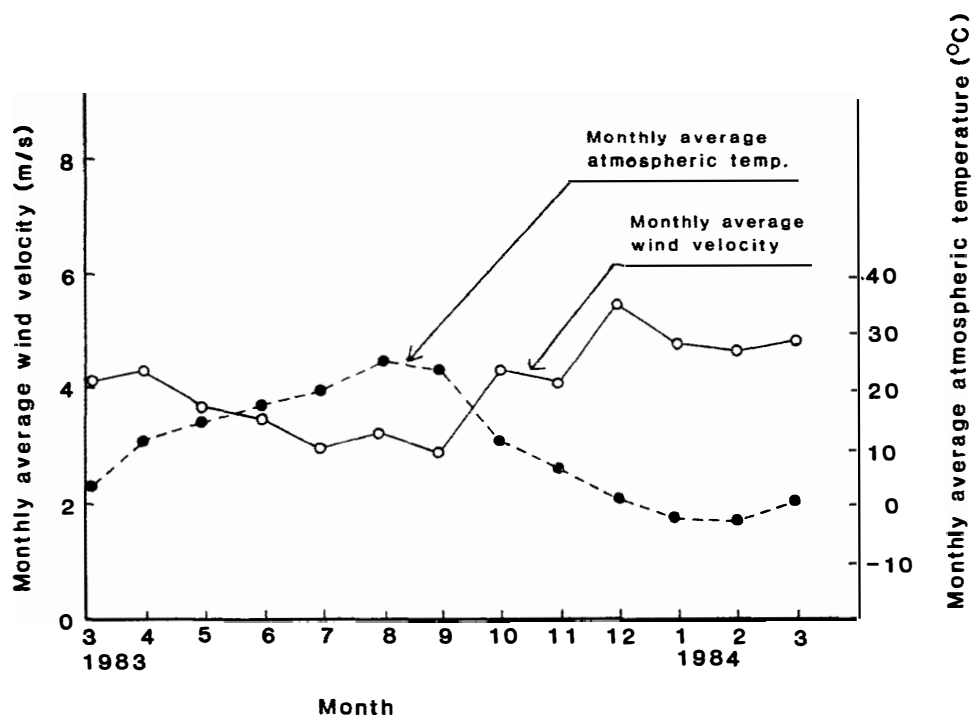


図 6 平均風速・気温の季節的月変化

Fig. 6. Seasonal variations of monthly average wind velocity and atmospheric temperature.

本地域の冬期間は一般に大陸からの強い寒気団に影響されることが多く、風雪が強く、気温も低い。

観測期間の月平均気温は秋から冬にかけて、平年を下回る月が続き、月平均風速は平年値に比べ、 -0.1 – $+1.6$ m/s の差があった。ただし、ここで用いた平年値は秋田地方気象台の 1975–1980 年の風車形風速計による 6 年間の平均値である。図 6 に示す期間の最大風速 (10 分間平均値) は 12 月 25 日の 20 m/s であり、瞬間最大風速は同日の 30 m/s であった。なお、風速の 1 日における時間変化は、春夏は 13 時–15 時頃に最も強くなる傾向があり、秋冬はあまり変動は見られなかった。

4.2. 風車の起動・出力特性

風車直径 1.85 m、懸垂形の場合の回転特性を風洞実験によって求めた結果を図 7 に示す。風速 7 m/s で風車回転数は約 530 rpm で、発電機は定格出力となり、それ以上の風速では偏向し、10–32 m/s で回転数は約 550–580 rpm となり、風速 34 m/s 以上では風車回転数は漸次減少する。

実用運転中である直径 3.8 m の上方偏向形風車天風 1 号による実測の結果を図 8 に示す。風速 7 m/s で定格出力 1 kW となり、それ以上の風速では上方に偏向し、最高出力 1.04 kW 程度となる。10 m/s 以上の風速では発生電力は漸次減少する。

本校に設置した天風 1 号の起動風速は約 2 m/s で、一度回りだすと約 1 m/s 程度でも回

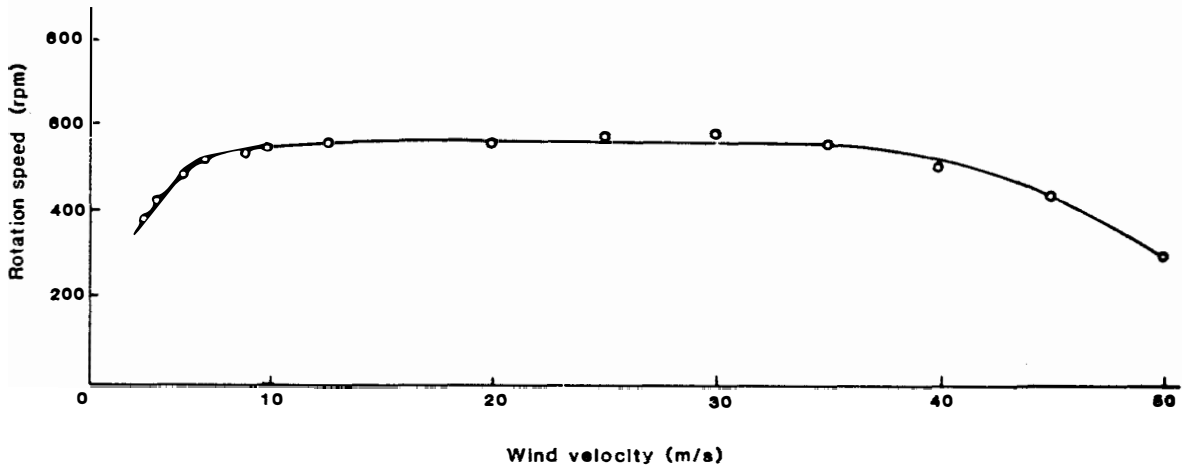


図 7 懸垂型風車の風速と回転数との関係 (風洞における測定結果)

測定場所: 宇宙科学研究所; 風車の直径: 1.85 m; 型式: 懸垂型

Fig. 7. Relation between wind velocity and rotational speed of the suspension-type windmill (Measurement result in the wind tunnel). Measurement place: The Institute of Space and Astronautical Science; Windmill diameter: 1.85 m; Type: Suspension-type.

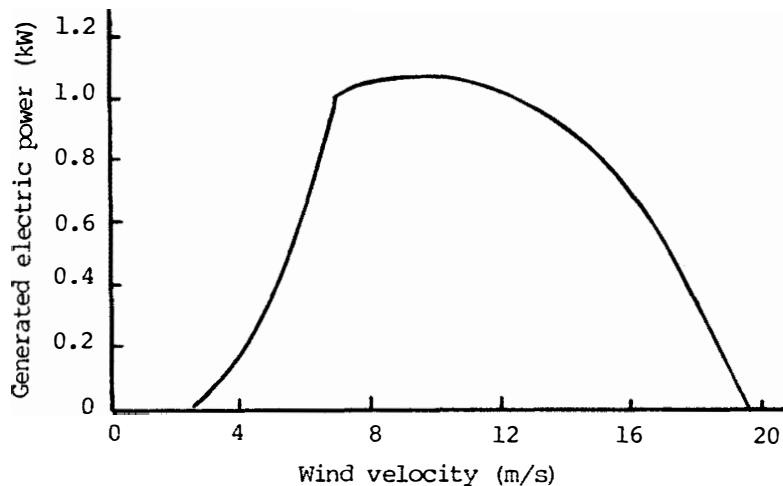


図 8 風車の風速と発生電力との関係 (天風 1 号)

Fig. 8. Relation between wind velocity and electric power output of the windmill (Tenpu 1).

転し、風に正対して回転する。また、暴風・突風などの際はプロペラの回転面はほとんど水平となり、風をさける構造となっている。図 7 と図 8 を比較すれば、図 7 の懸垂形が出力特性が非常に良いことを示している。

天風 1 号が風速 7 m/s 以上になった場合でもプロペラを偏向しないで出力を上昇した場合、風洞実験に基づく風速と出力との関係を図 9 に示す。風速 7 m/s で 1.0 kW, 風速 10 m/s で 3.0 kW である。

4.3. 月別平均発生電力量と変換効率

本装置における月平均発生電力量と変換効率の一例を表 2 に示す。発生電力は直流電力積

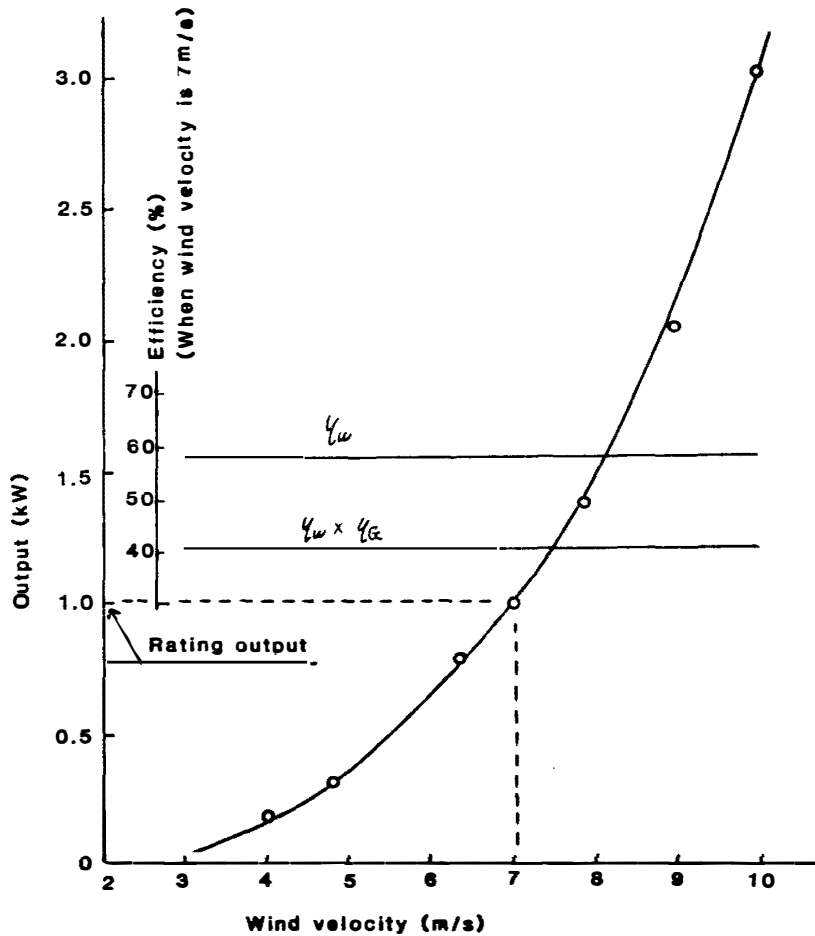


図 9 姿勢制御を行わない場合の風速と出力との関係 (天風 1 号)
 (大型風洞における測定結果)
 測定場所: 宇宙科学研究所; 風車直径: 3.8 m; η_w : 風車効率;
 η_G : 発電機効率

Fig. 9. Relation between wind velocity and electric power output of the windmill (Tenpu 1), when no attitude control system is used (Measurement result in a large wind tunnel). Measurement place: The Institute of Space and Astronautical Science; Windmill diameter: 3.8 m; η_w : Efficiency of windmill; η_G : Efficiency of generator.

表 2 月平均電力量と変換効率の例

Table 2. Example of monthly average electric energy and conversion efficiency.

Term (month/date)	Daily average wind energy (Wh)	Daily average generated electric power (Wh)	Conversion efficiency (%)
a. 7/ 1- 7/30	248.5	935.2	33.2
b. 7/31- 8/29	239.8	890.3	32.7
c. 8/30-10/ 5	276.4	947.3	30.2
d. 10/ 6-11/16	549.9	2 087.0	33.5
e. 11/17-12/16	2 763.0	4 692.0	15.0
f. 12/16- 1/ 6	—	—	—
g. 1/ 7- 2/22	470.0	558.5	10.5

算計によって積算したもので、変換効率は下記のようにして求める。

$$\text{変換効率} = \frac{\text{発生電力量}}{\text{風エネルギー} \times \text{プロペラ面積 (11.34 m}^2\text{)}}$$

風エネルギーは、風エネルギー積算計によって測定面積 1 m^2 について積算した数値を読み取ったものである。表2でe期間(11/17-12/16)は1日当たりの平均風エネルギーおよび平均発生電力量ともに最大であるが、変換効率は14.9%と非常に低い。日平均風速のこの期間の平均は4.84 m/sであったにもかかわらず、7 m/sを超える日が2日あり、また瞬間風速10 m/sを超える時間帯が相当あった。これは風速7 m/s以上では、プロペラが上方に偏向し、風を逃がすため、風のエネルギー全部が電力発生に寄与しないために、変換効率が非常に低下したもので、風エネルギーが大きくとも、変換効率が大きくならない場合もあり得ることを意味している。

プロペラ形の場合は、図7に示した懸垂形のような出力特性を示す風車の利用によって、風速利用幅の増大による変換効率の向上を期待すべきであろう。



図10 風速、風向の変化に対応するV、H方向の振動加速度変化の例
(測定期間: 1984年1月19日, 1414-1423)

Fig. 10. Example of variation of vibration acceleration in V. and H. directions, with variations of wind velocity and wind direction (Measurement term: 1414-1423, January 19, 1984).

4.4. 振動調査

風車の安全性確認の一方法として、振動調査を行った。振動は風車の支柱に垂直方向（以下 V 方向と記す）、水平方向（以下 H 方向と記す）に取り付けたセンサーで検出し、2 方向加速度振動計で直読するとともに、多ペンレコーダで記録し振動加速度で表わす。風速、風向の変化に対する V, H 方向の振動加速度変化の一例を図 10（測定期間 1984 年 1 月 19 日、1414-1423）に示す。同じ風速でも、風向が変化する場合としない場合では、発生する振動加速度にかなりの差が見られる。この場合の振動加速度は、風車垂直軸の V 方向、H 方向それぞれについて、振動加速度に風圧による振動加速度が加わった総合的なものを測定している。例えば、図 10 で風速 5.4 m/s において、風向が変化しない場合は V 方向に 110 gal, H 方向に 120 gal, また、風向が急に变化した場合 V 方向に 330 gal, H 方向に 280 gal である。

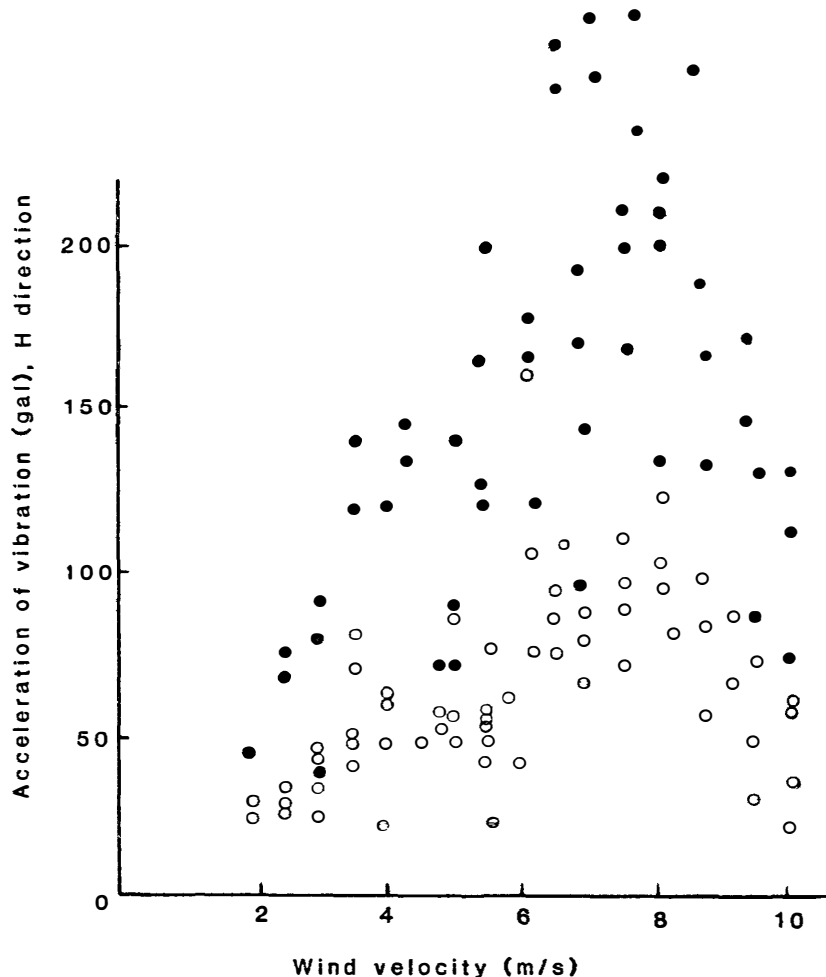


図 11 風速と風車の振動加速度との関係（測定期間：1984年1月18日、0900-1400）

○：風向変動角の小さい場合，●：風向変動角の大きい場合

Fig. 11. Relation between wind velocity and vibration acceleration of windmill (Measurement term: 0900-1400, January 18, 1984).

○: In the case of a small wind direction angle.

●: In the case of a large wind direction angle.

なお、測定期間 1984 年 1 月 18 日、0900-1400 の観測記録をもとにして (図 10 参照)、風速と振動加速度との関係を図 11 に示す。風向変動の多少にかかわらず、風速 8 m/s で振動加速度がピークとなり、それ以上でも、それ以下でも減少の傾向を示す。実用運転に用いた風力発電装置は、風速 7 m/s で上方に偏向し、8 m/s で出力最大となり、それ以上では出力が漸次減少する。

図 11 で風向変動の少ない場合とは、5 秒間における風向変動角が 5° よりも小さい場合で、ほとんど風向の変動しない場合も含まれる。また、風向変動の大きい場合とは、風向変動角が 5° を超える場合と仮定した。振動加速度は 5 秒間の平均値で、風速は同時刻における 5 秒間の平均値を示す。振動加速度測定の結果、最大値は H 方向で約 400 gal、V 方向で約 385 gal (図 10 参照) で、この程度の振動加速度では構造物は十分安全であった。

4.5. 騒音調査

強風時、風車は風切音を発生するが、これが騒音源となり、人的生活環境に影響を与える。騒音について調査した一例を図 12 に示す。測定期日は昭和 59 年 2 月 6 日、測定時間帯における平均気温約 -5°C 、平均相対湿度約 60%、風速約 7 m/s という条件下で行った。

騒音レベルの測定は「JIS-Z-8731 騒音レベル測定法」(日本音響材料協会, 1973) に準拠して A 特性を測定した。風車の騒音源は点音源とみなし、球面波と仮定する。現実の騒音源

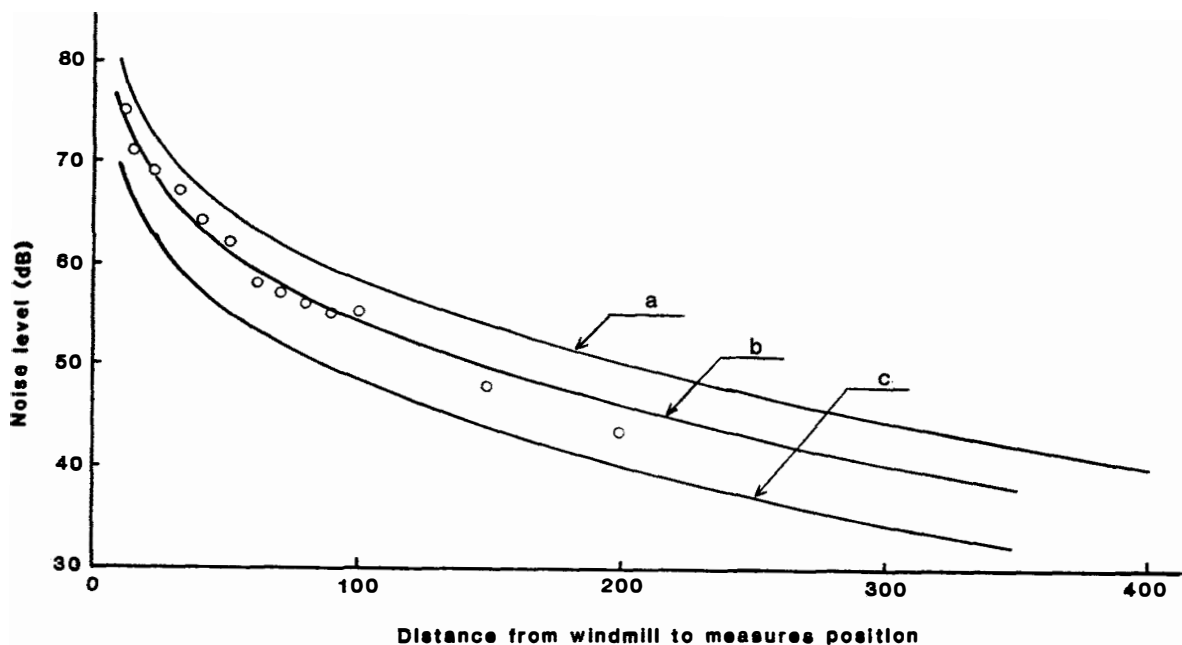


図 12 騒音レベルの減衰特性

- a: 基準レベルで 80 dB の理論値; b: 基準レベルで 76 dB の理論値;
c: 基準レベルで 70 dB の理論値; ○: 測定値 (基準レベルで 76 dB)

Fig. 12. Attenuation characteristics of noise level.

a: Theoretical value of 80 dB on standard level; b: Theoretical value of 76 dB on standard level;
c: Theoretical value of 70 dB on standard level; ○: Measurement value (76 dB standard level).

が大きさを持っていますが、その大きさに比して測定する場所までの距離が大きい場合は、それを点音源とみなすことができる。また、距離による減衰特性算出の理論値は、音源は無指向性と仮定し、減衰要因としては計算を簡略化するため、幾何学的な距離減衰と空気による吸収減衰のみとした。

図 12 における風速約 7 m/s の実測値は基準レベル 76 dB における理論値を示す b 曲線と近似している。測定点が風車より 100 m 以上になると、実測値の減衰が理論値より大きくなる。これは理論値では考慮しなかった積雪などによる影響と思われる。実測の結果によれば、風速 7.5-8 m/s で騒音レベルは最大となり、基準位置で約 80 dB となり、その減衰は a 曲線で近似される。また、風速 7 m/s における基準点における騒音レベルは、前述のように約 76 dB であり、また風速 6 m/s における基準点における騒音レベルは約 70 dB である。騒音レベルが約 45 dB 以下の場合、暗騒音レベル以下となり、人的生活環境への影響はあまり問題とならない。

図 6 でもわかるとおり、風車設置点では月平均風速が 6 m/s を超えることはなく、年間を通じてほとんどの時間帯で騒音レベルは c 曲線よりも低いと考えられる。c 曲線では基準点より約 130 m 離れれば騒音レベルは 45 dB 以下となり、人的環境への影響はほとんどない。

4.6. 発生エネルギーの屋根雪処理への利用

4.6.1. 融雪所要発熱量の計算

どのくらいの熱量（電力）で、どのくらいの雪を融かすことができるかは、面発熱体の定格ならびに発電機出力を決定するのに重要な意味を持っている。所要発熱量は、次のように計算する（日本建設機械化協会，1977）。

$$\text{所要発熱量 } q_0 = \frac{1}{\eta} \{q_s + q_m + A_r(q_e + q_h)\} \text{ [kcal/m}^2\text{h]} \quad (1)$$

q_s : 雪に伝えられる顕熱量 = $c_1 \cdot \Delta t \cdot s \cdot r_s$ [kcal/m²h]

q_m : 雪の融解潜熱 = $J \cdot s \cdot r_s$ [kcal/m²h]

q_e : 気化熱 = $h_{fg}(0.00872V + 0.0107)(4.70 - p)$ [kcal/m²h]

q_h : 対流および輻射による伝熱量 = $290(0.00872V + 0.0107)(t_f - t_a)$ [kcal/m²h]

A_r : 全面積に対する積雪の無い部分の面積比（ここでは 0.5 と仮定）

η : 熱効率（ここでは 0.7 と仮定）

但し c_1 : 雪の比熱 [0.5 kcal/kg°C]

Δt : 雪温の絶対温度 [°C]

r_s : 雪密度 [kg/m³]

s : 設計降雪量 [m/h]

J : 水の融解潜熱 [80 kcal/kg°C]

V : 風速 [m/s]

p : 大気の水蒸気圧 [3.9 mmHg]

t_f : 融雪面加熱温度 [°C]

t_a : 外気温 [°C]

h_{fg} : 融雪水の気化熱 = $539 - 0.643(t_f - 100) - 0.000834(t_f - 100)^2$

表 3 の条件を式 (1) に代入すると所要発熱量は

表 3 融雪所要発熱量計算のための条件
Table 3. Conditions in calculation of heat required for snow melting.

Subjects	Condition	A sign
Atmospheric temperature	-3°C	t_a
Snowfall intensity	3.5 and 7 cm/h	S
Density of snow	150 kg/m ³	r_s
Temperature of snow	-3°C	Δt
Velocity	5 m/s	V
Heating temperature of the surface	0°C	t_f
Melted area/heated area	0.5	A_r

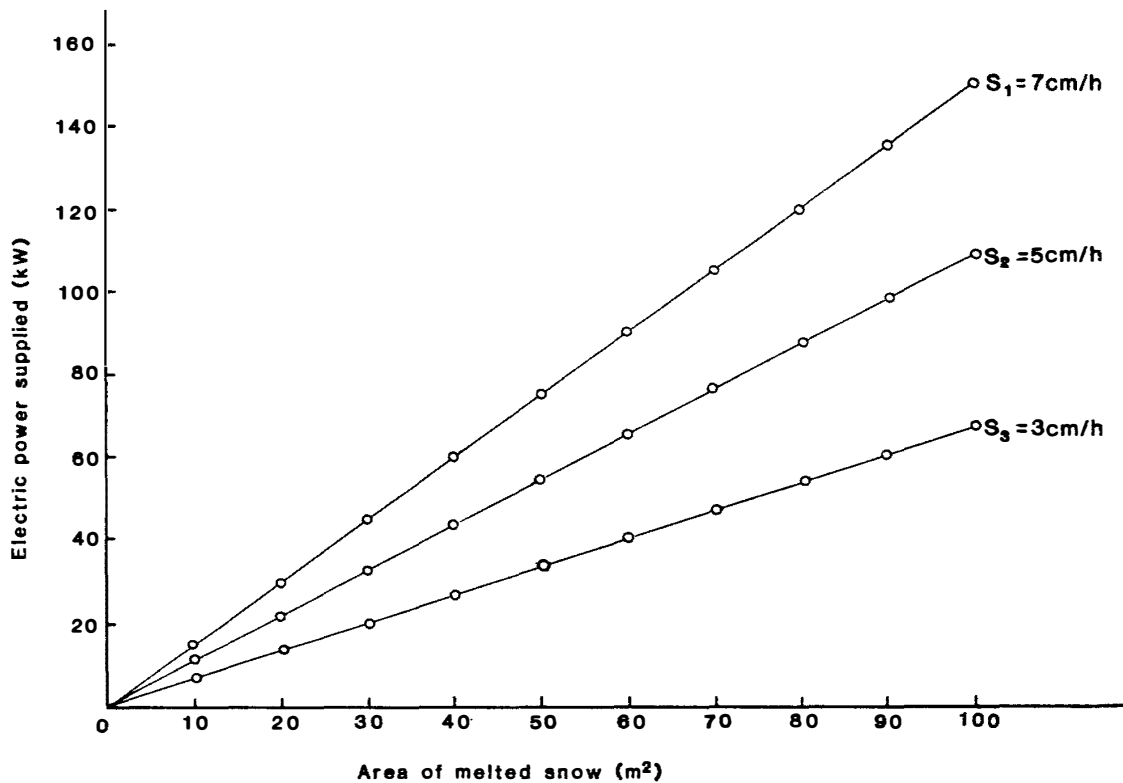


図 13 供給電力による融雪面積

雪の密度: 150 kg/m³; 大気温度: -3°C; 雪の温度: -3°C; 風速: 5 m/s;
溶けた面積/加熱面積: 0.5

Fig. 13. Relation between electric power supplied and area of melted snow.
Density of snow: 150 kg/m³; Atmospheric temperature: -3°C; Snow temperature: -3°C; Wind velocity: 5 m/s; Melted area/heated area: 0.5.

$$S_1 = 7[\text{cm/h}] \text{ の場合: } q_0 = 1301.0[\text{kcal/m}^2\text{h}] = 1.51 [\text{kW/m}^2]$$

$$S_2 = 5[\text{cm/h}] \text{ の場合: } q_0 = 943.0[\text{kcal/m}^2\text{h}] = 1.10 [\text{kW/m}^2]$$

$$S_3 = 3[\text{cm/h}] \text{ の場合: } q_0 = 585.5[\text{kcal/m}^2\text{h}] = 0.681 [\text{kW/m}^2]$$

となり、この所要発熱量から電力と融雪面積との関係を示すと図 13 のようになる。

したがって融雪の必要な時期に必要なエネルギーを供給する必要がある。そのためには、風のエネルギーを蓄積して必要な時に供給するか、他のエネルギーとの併用を考慮する必要がある。

特に外気温度の低い場合、融雪水が排水途中で凍結することがあるので、十分な配慮が必要である。実際の面発熱体による融雪は外気温、融雪面温度、融雪面水分量、降雪量、風向・風速、日射量など多くの要素がからみあっており、解析は非常に複雑である。特に風力発電のエネルギーを利用する場合は、供給電力が日々変動するので、風速が大で融雪進行中に風速が弱まったり、夜になり気温が低くなると、融雪によって生じた水分が凍結し、以降の融雪に悪影響を与える。

4.6.2. 実験結果

実験棟に設置した面発熱体による融雪の実測結果では、風速 5 m/s、外気温約 0°C、日射量 4.7 MJ/m²、降雪量 22 cm の場合、約 93 W/m² 以上の電力が連続供給できれば、融雪効



図 14 実験棟における融雪の実例

(a) 融雪の初期の例 (1983年2月2日1200)

(b) 融雪の後期の例 (1983年2月15日1000)

Fig. 14. Example of snow melting in the rest laboratory.

(a) Example of early stage of snow melting (1200, February 12, 1983)

(b) Example of later period of snow melting (1000, February 15, 1983)

果は大いに期待できる。この実例よりも外気温が低く、日射量が少なく、降雪量の多い場合にはさらに大きな供給電力が必要となる。

なお、面発熱体の加熱による局部的な融雪点が発生すれば、日射との相乗効果で、その融雪点を中心に急激に融雪が進展する。融雪中の事例を図 14 に示す。図 14 の左側屋根には面発熱体に取り付けられており、(a) は局部的な融雪点の発生した例を示し、(b) は大部が融雪した場合の例を示す。

5. 極地で風力発電を実施する場合の留意事項

昭和基地要覧 1983 年版 (国立極地研究所, 1983) によれば昭和基地は大陸から離れているため、斜面下降風の影響が少なく、南極の基地のうちでは比較的暖かく、風もそれほど強くない。

昭和基地における 1957 年から 1982 年までの気候表によれば、最高気温は 10°C (1977 年 1 月 21 日) で、最低気温は -45.3°C (1982 年 9 月 4 日) である。また、最大風速は 47.2 m/s 、最大瞬間風速は 59.2 m/s である。なお、1957 年から 1982 年までの最大風速 10 m/s 以上の年平均日数は 207 日、 15 m/s 以上は 115 日、 29 m/s 以上は 14 日である。また、ブリザード日数は年平均 75 日もあり、日本内地に比べ、風の連続性、方向性が非常に強いので、風エネルギーの利用には適当な地域と考えられる。

風力発電装置としてはいろいろの形式のものが実用化され、また研究中であるが、現在世界で実用化されているものはプロペラ形が多いので、以下プロペラ形について述べる。

極地で風力発電を実施する場合、風力発電システムは、風の強さなどより回転調節方法と暴風安全対策が主要な要素となる。回転調節方法は、ブレードの取り付け角を変える可変ピッチ方式と風車全体を風向により反らせる姿勢制御方式がその主流のように思われる。

可変ピッチ方式は、小型のものは回転により生ずる遠心力を利用し、角度を変えるものが多く、大型では風力センサーにより風速を検知し、油圧や電力により、ブレードの角度を変える形式が提案されているが、一般に精度の高い部品を必要とし、制御回路も複雑で製作費も高く、耐久性に難点があるように思われる。

姿勢制御方式は、定格風速以上になると、自動的に回転面が風向に対して最適の角度に姿勢を変えるため、構造上自動的に突風をかわすことになり、暴風時の安全装置の必要はない。なお、発電機出力約 10 kW 以上の場合は、自動停止装置を付加する方法も実用化されている。したがって、姿勢制御方式は、製作費が安く、耐久力大で、作動部分が少なく、保守面からも有利と考えられ、極地での風力エネルギーの利用にあたっては、十分考慮されてよい有力な方式と考えられる。

本報告は極地の風力エネルギーの有効利用を大いに期待し、プロペラ形について、風エネルギーによって得た電力をバッテリーを介して使用する場合に限定して、一般的留意事項を

次に述べる。

- (1) トラブルの多い旋回部や電気接続部は管内に密封すること。
- (2) 回転調節には姿勢制御方式が有力な方法であること。
- (3) 構造はできるだけ簡単で剛性大であること。
- (4) 故障、過充電の場合は、自動的に停止するシステムとなっていること。
- (5) 電気回路は過放電防止回路付で、回路構成は簡単なものであること。
- (6) 蓄電池は鉛電池が良いが、触媒液は栓付きのものであること。なお、蓄電池の保温箱は二重にして排気良好な構造とすること。
- (7) 風車の定格風速は 10 m/s 程度のものと 20 m/s 程度のものと組み合わせて使用すること。

酷寒の地では、可動部の作動油が硬化し、回転調節不能となったり、異種金属の膨張係数の差によるトラブル、蓄電池の電解液の凍結などの事故が考えられるので、十分な酷寒対策が考慮されなければならない。

6. ま と め

6.1. 風車安全性確認のための実用運転

振動調査の結果、本装置では 8 m/s で最大出力となり、振動も最大となるが、8 m/s で風向が急変した場合、振動加速度は最大約 400 gal となるが、十分安全に運転できる。

また、電力引き出しの回転接触部が一回接触不良の事故があったが、これは工事施工の不良が原因で、その他は発生電力は負荷に異常なく到達しており、本装置の安全性はほぼ確認できた（約2年間連続運転）。

6.2. 騒 音

風速 7.5-8.0 m/s で騒音レベルは最大となり、基準位置で約 80 dB となる。約 130 m 離れば騒音レベルは 45 dB 以下となり、人的生活環境への影響はほとんどない。

6.3. 発生エネルギーの屋根雪処理への利用

外気温 0°C では、約 93 W/m³（風速約 5 m/s）以上の電力が供給できれば融雪効果は大いに期待できる。なお、面発熱体による局部的融雪点が発生すれば、日射との相乗効果で融雪点を中心に急激に融雪が進展する。

6.4. 局地で風力を利用する場合の留意事項

構造はできるだけ簡単で剛性の大きいものを用い、回転制御には姿勢制御方式を採用、風車の定格風速は 10 m/s 程度のものと 20 m/s 程度のものとを組み合わせ使用し、風の利用率の向上を図る必要がある。

文 献

- 菊地光一・後藤美千男(1981a)： 自転車用発電装置を利用した小型風車発電装置の特性について．秋田の自然エネルギー，**2**，29-34.
- 菊地光一・後藤美千男(1981b)： 小型風力発電装置の試作．秋田高専研究紀要，**16**，47-52.
- 国立極地研究所(1983)： 昭和基地要覧1983年版．東京，4-6.
- 栗山 弘(1982)： 56年豪雪における人的被害の特徴．雪氷，**44**(2)，83-91.
- 日本建設機械化協会(1977)： 新防雪工学ハンドブック．東京，森北出版，16-29，268-275，333-343.
- 日本音響材料協会(1973)： 騒音対策ハンドブック．東京，技報堂，**9**，60-67.

(1984年8月1日受理；1984年8月6日改訂稿受理)