

南極における風力発電機開発の意義と日本南極地域観測隊が 使用した実験機の問題点

石 沢 賢 二*

The Significance and the Problems of Wind Generator Development in Antarctica Experimented by the Japanese Antarctic Research Expedition

Kenji ISHIZAWA*

Abstract: Wind generators have been used and tested by the Japanese Antarctic Research Expedition (JARE), to supply power for unmanned observatories and for heaters at the stations. A solar battery is also effective as a heat source of the thermally insulated box for unmanned observation, but the battery fails to work for about two months in winter. Therefore, a wind generator is necessary to make up for the powerless winter months. Even a small power of the wind generator less than 10 W is sufficient for this purpose.

The use of a wind generator as a domestic power source at an inland station will reduce amount of fuel to be transported to the station over a long distance.

The expected power of the wind generator at Syowa Station (69°00'S, 39°35'E) and Mizuho Station (70°42'S, 44°20'E), Antarctica, was calculated by using the wind utilization curves at the two stations.

The troubles of many wind generators JARE used in Antarctica were found to have resulted not from severe weather conditions but from fundamental matters such as vibration of blades. Studies of the wind generator itself are required in the first place, before it is put to use in Antarctica.

要旨: 日本南極地域観測隊がこれまで利用を目指してきた風力発電機の用途は、無人観測用の電力源と、基地の雑用電力源とである。無人観測用保温箱の熱源としては、太陽電池も有効だが極夜の約2カ月は発電不能で、風力発電に期待がかかる。しかし、これには大きな電力は必要なく、10 W 以下の発電能力で十分である。また、輸送距離の長い内陸基地で風力発電機を雑用電力源として使用すると、燃料輸送量の節減に大きく役立つ。

南極昭和基地 (69°00'S, 39°35'E) とみずほ基地 (70°42'S, 44°20'E) での風況曲線のデータより、風力発電で期待される発電量を計算した。

日本の南極地域観測隊が実験・使用してきた風力発電機の故障原因を調べた結果、南極特有の厳しい気象条件よりも、風力発電機そのものの研究不足によるブレードの振動等の根本的な事柄が多いことがわかった。

1. はじめに

南極地域の風況が風力発電にとって非常に良好なことから、日本南極地域観測隊は、第1次観測隊以来多くの実験機を持ちこみ、南極大陸氷床上の各地で実用機として使用したり、

* 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

試験機としてテストを繰り返してきた。実用機としては、おもに気水圏や宙空部門の無人観測機器の電源として用いたものであり、ある時には長期間のデータ取得に成功したが、多くの場合、発電機あるいはその周辺施設がさまざまな原因により故障・破損して観測が失敗することが多かった。

このように無人観測の電源として使用する他に、基地の雑用電源として風力発電を利用しようという考え方もあり、昭和基地 (69°00'S, 39°35'E) やみずほ基地 (70°42'S, 44°20'E) で実地試験が行われたが(栗野, 1973; AWANO *et al.*, 1976; AWANO and TAKEUCHI, 1979; 伊藤ら, 1974), 実用機として使用されるまでには至っていない。

ここでは、南極での風力発電の有意性を再検討するとともに、これまで南極地域で運転されてきた風力発電機の運転状況をふりかえり、故障の問題点を分析し、今後の新型機設計の基礎資料としたい。

2. 南極での風力発電機開発の意義

2.1. 無人観測装置の電力源

きびしい南極の寒さの中で、観測機器を長期間運転継続させるために克服しなければならないものに二つの事柄がある。ひとつは、寒冷に耐えしかも消費電力が少ないセンサーや記録機器の開発である。もうひとつは、耐寒性に優れた小型軽量な電力源の開発である。前者は、電子部品のめざましい性能改善により優れたものが出現しており、 -40°C 位までなら外部から加温することなしに動作するものもある。また後者については、耐寒性の優れたリチウム電池が開発され南極でも成果をあげているが、 -40°C 以下では放電効率が低下し、まだまだ改善の余地がありそうだ。

日本の観測隊が、無人観測の主なフィールドとしてきた場所の位置と、深さ 10 m の雪温から求められた年平均気温 (SATOW, 1978) を図 1 に示す。風力発電機を設置して観測が行われた場所は、黒四角で示してある。この図からわかるように、年平均気温が -40°C 以下の内陸部にも観測域が広がってきている。

観測地点の年最低気温が観測機器の動作温度以上の場所なら問題はないが、それより低温の場所では、動作が保証されなくなる。このような場所でも、年平均気温が機器の動作温度より高い所では、雪洞やピットを深く掘って短期間の低温期を逃れるという方法が残されている。深さ 10 m の雪温は、その場所の年平均気温にほぼ等しいことを利用した方法である。しかし、さらに寒冷な場所においては、何等かの方法で加温する必要がある。菊地・牧野 (1988) は、観測機器の電源にはリチウム電池を使用し、観測機器を -30°C に保つ保温箱の電源には小型の風力発電機を使用し、やや長期間のデータ取得に成功した。このような方式は、風力発電機の使用法として今後主流になるものと思われる。ともかく、内陸の寒冷地における無人観測においては、なんらかの保温用電力源が不可欠である。

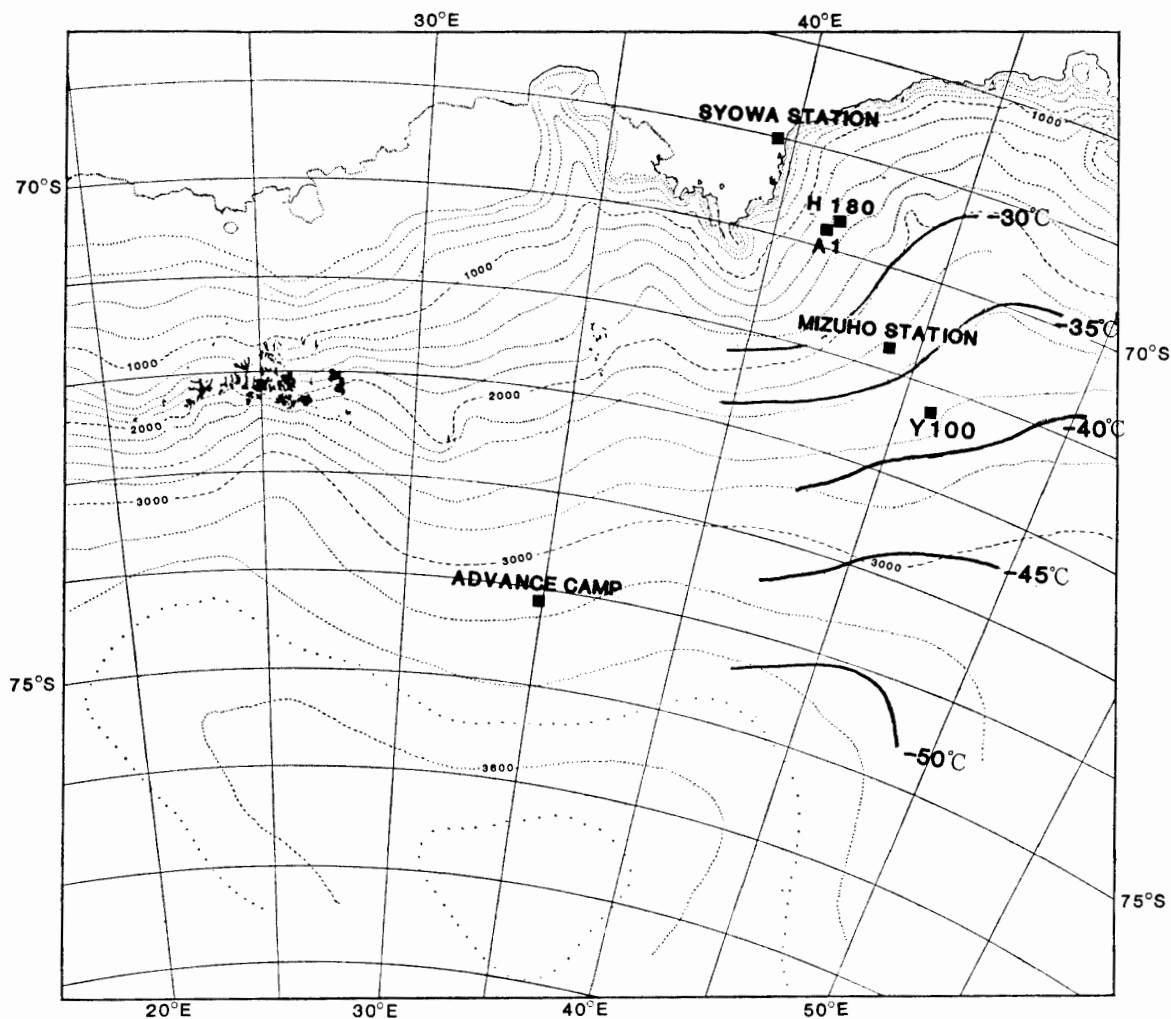


図 1 風力発電機を使用して無人観測が行われた場所と年平均気温。年平均気温は、10 m 深の雪温による。

Fig. 1. Location of unmanned observatories with the wind generator (black square) and the annual mean air temperature represented by 10-m deep snow temperature.

2.2. 太陽光発電

無人観測に利用できる自然エネルギーとして期待されているのに太陽電池の利用がある。これは昭和基地での宙空系テレメトリー観測の電源として実用化されている（国立極地研究所，1986）。しかし、極夜の 1.5 カ月から 2 カ月間は太陽電池による給電はできなく、ディーゼル発電機によって充電された蓄電池を使用している。

太陽電池による発電エネルギーはどれほど期待できるだろうか。表 1 は、みずほ基地で計測された水平面全日射量（国立極地研究所編，1985 b）と、藤井（私信，1984）によって得られた約 3 カ月間の実地試験の結果から推定した月ごとの太陽電池による平均発電量である。番号 3 の値は、みずほ基地で得られた変換効率 9.5% の太陽電池による 3 カ月間の発電量である。藤井が実験に用いたパネルは真北に向け、水平面から 75 度の角度に設置された。番

号 4 の全天日射量に対する太陽電池の発電率を計算してみると約 4% から 5% になることがわかる。実験した 3 カ月以外の月については、発電量が全天日射量の 4.5% であると仮定したときの値が番号 5 に示してある。

図 2 には、100 mm 厚の断熱材でできた立方体の保温箱から失われる熱損失が示してある。

表 1 太陽電池で期待できるエネルギー (みずほ基地, 1980 年)
Table 1. Expected energy of the solar battery at Mizuho Station in 1980.

番号	項目	単位	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1	月平均全天日射量	cal/cm ² ·day	695	487	243	63	3	0	1	32	169	395	697	816
2	月平均全天日射量	W/m ²	336.7	231.6	117.7	30.5	1.5	0.0	0.5	15.5	81.9	191.4	329.0	395.3
3	月平均太陽電池発電量 (実測値)	W/m ²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9.9	13.6	16.1
4	全天日射量に対する発電率	%	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.17	4.55	4.07
5	太陽電池推定発電量	W/m ²	15.3	10.5	5.3	1.4	0.1	0.0	0.0	0.7	3.7	9.9	13.6	16.1

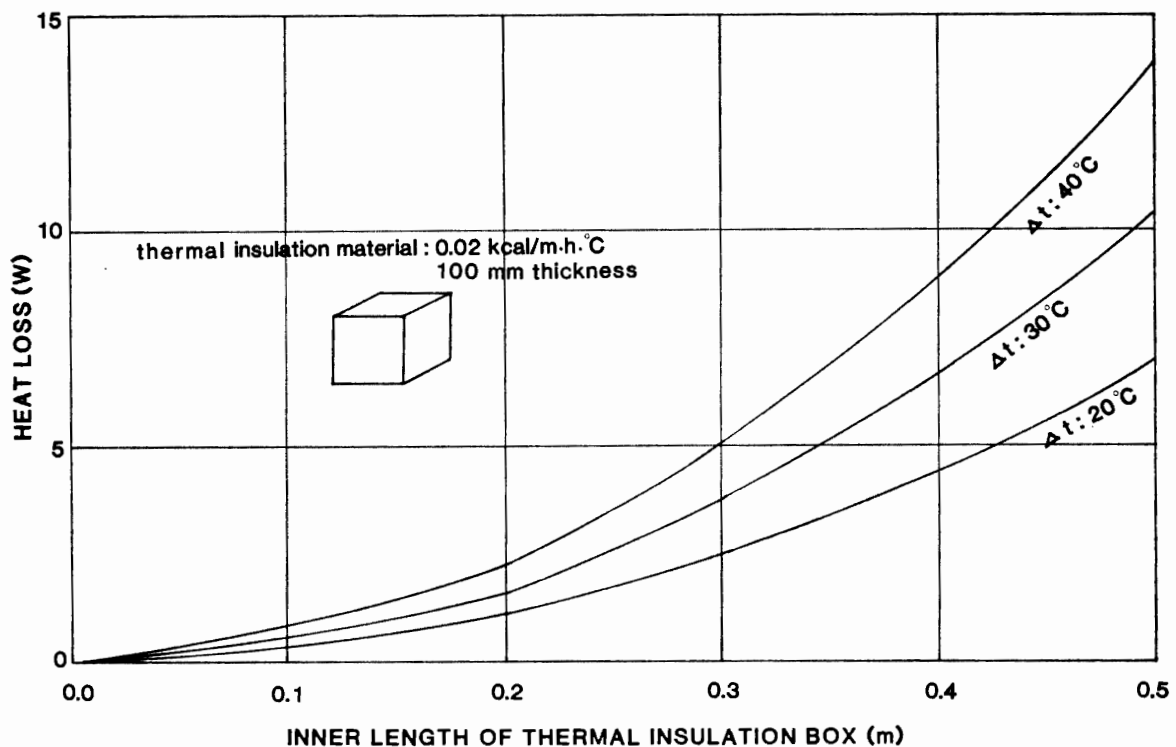


図 2 保温箱の熱損失。熱伝導率が $0.02 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$ で厚さが 100 mm の断熱材でできた立方体の保温箱から出る熱量と保温箱の内径の寸法との関係を、外気温との温度差をパラメーターにして示した。

Fig. 2. Heat loss of the thermal insulation box. The cubic thermal insulation box is made of the material with 100-mm thickness and $0.02 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$ thermal conductivity. The parameter, Δt , is the temperature difference between the air temperature and the temperature of the box's inside.

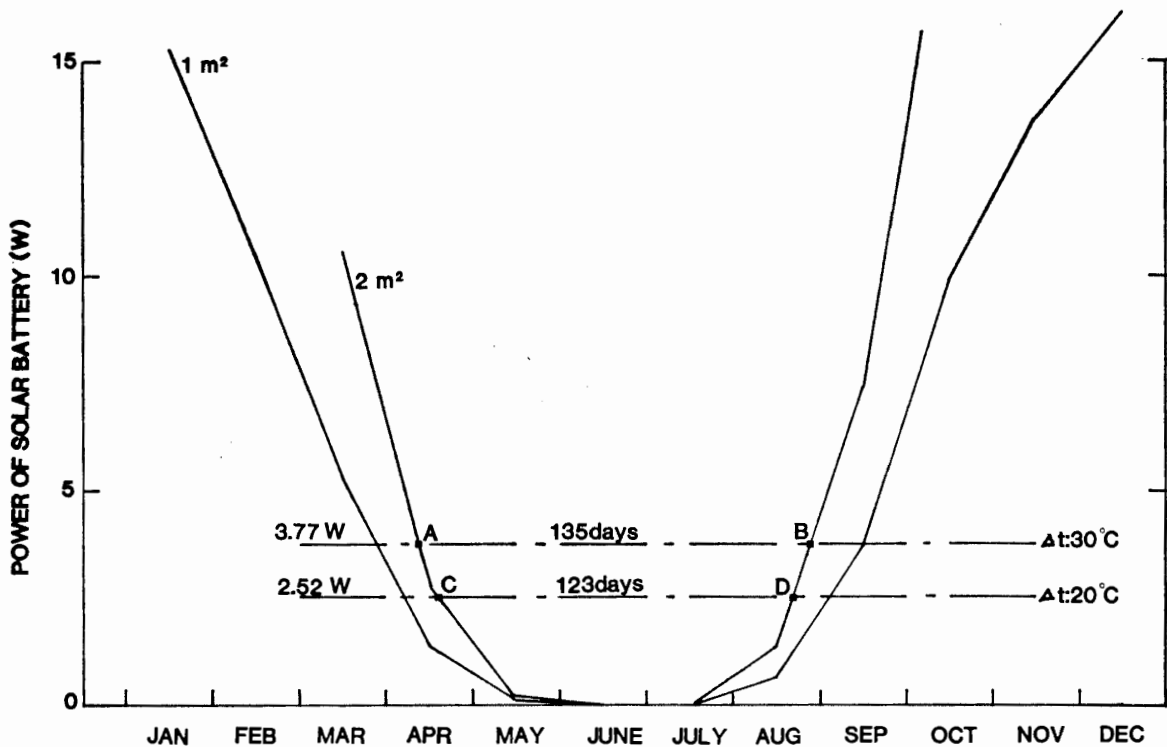


図 3 みずほ基地における太陽電池の発電量. モジュール面積 1 m^2 と 2 m^2 の太陽電池の発電量. 2つの水平な直線は, 外気温との温度差により失われる保温箱の熱損失

Fig. 3. Power of the solar battery with module area of 1 and 2 m^2 at Mizuho Station. Two even lines are the heat loss of thermal insulation box with temperature difference of 30 and 20°C respectively. In the period of A-B and C-D, the heat loss exceeds the power of the solar battery with module area of 2 m^2 .

外気と保温箱内の温度差, Δt , をパラメータとし, 横軸に保温箱の内径をとって計算した. 図 3 は, 表 1 の 5 で求めたモジュール面積 1 m^2 と 2 m^2 による太陽電池発電量の月別の値を示している. また, 図 2 で求めた熱損失の値のうち, 内径 30 cm 立方の保温箱がそれぞれ温度差 20°C と 30°C の環境におかれたときの熱損失も, 比較のために示してある. 2 m^2 の太陽電池を使用したとき, A 点から B 点までの約 135 日間は熱損失が発電量を上回るもので, なんらかの熱源が必要であることがわかる. その間に必要なエネルギーは約 9721.8 Wh である. $12\text{ V } 200\text{ Ah}$ の蓄電池を使用すると約 4 個必要となるが, 低温での放電特性を考慮すると, さらに多くの蓄電池が必要になるだろう.

以上の考察により太陽電池は, 夏季には十分利用できるが, 極夜の 4 月から 7 月までの間はかなりの量のバックアップ電源が必要となり, 風力発電に期待がかかる.

2.3. 昭和基地およびみずほ基地の風の性質

図 4 と 図 5 に示したのは, それぞれ昭和基地とみずほ基地において, 1980 年から 1982 年までの 3 年間の 3 時間ごとの 10 分間平均風速のデータ (JAPAN METEOROLOGICAL

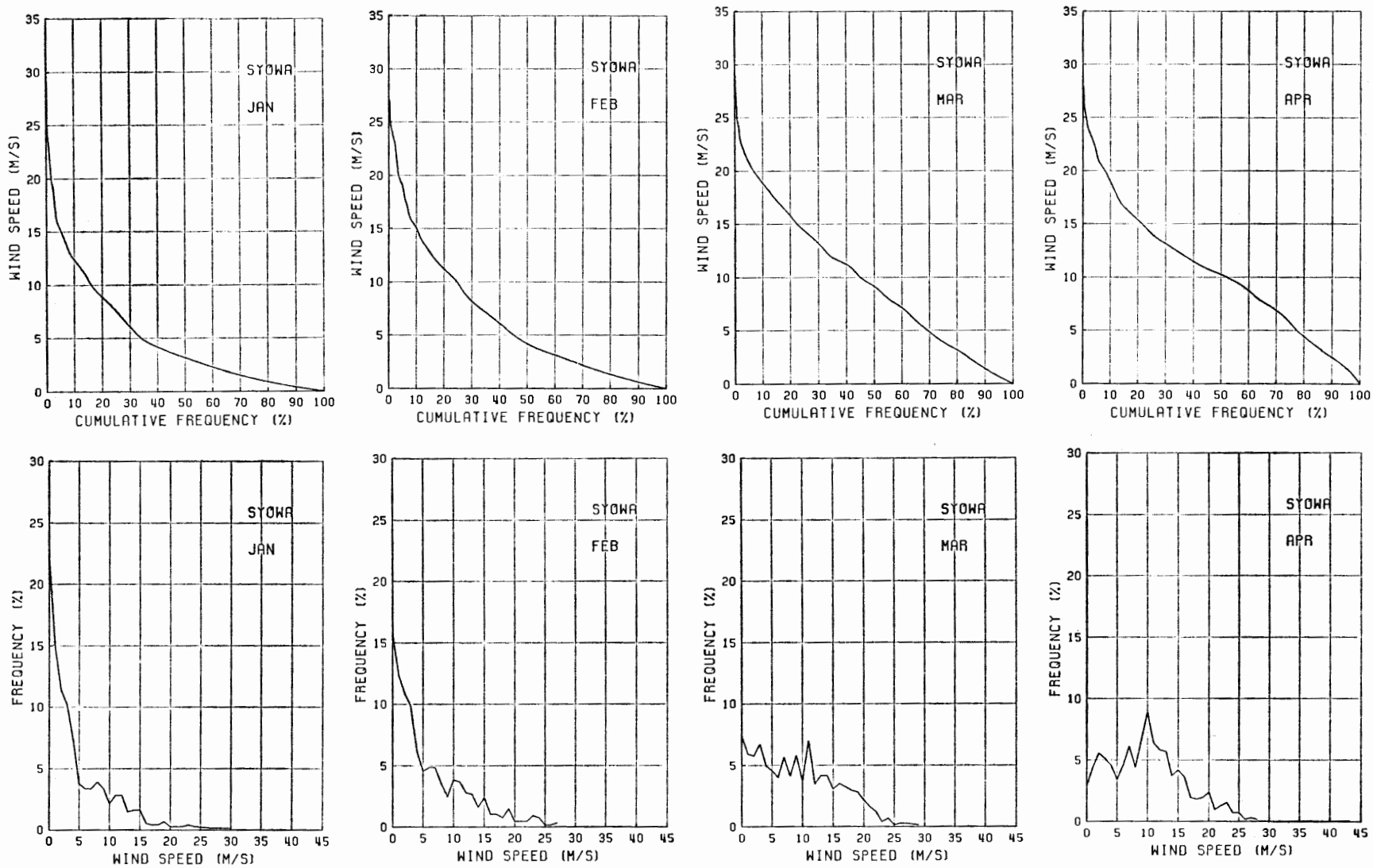


図 4 昭和基地の風況曲線 (上) と風速の出現頻度分布 (下)

Fig. 4. Monthly cumulative distribution curve of wind speed (upper) and monthly frequency of wind speed (lower) at Syowa Station.

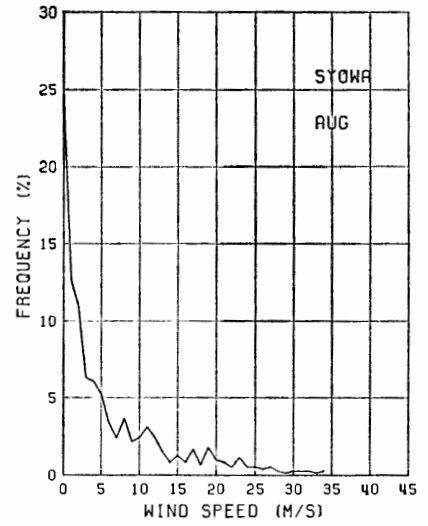
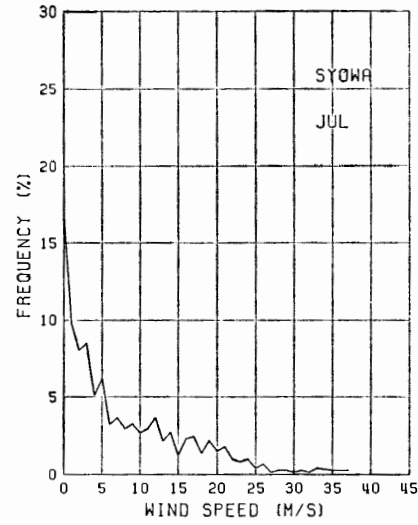
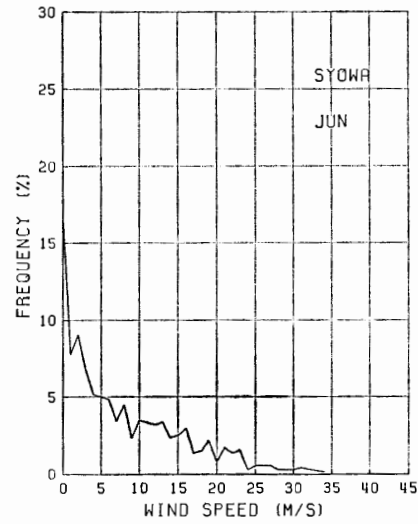
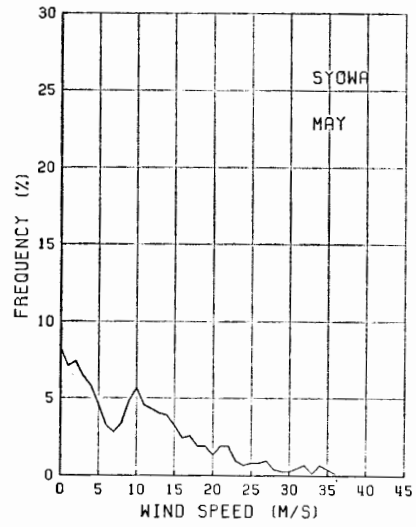
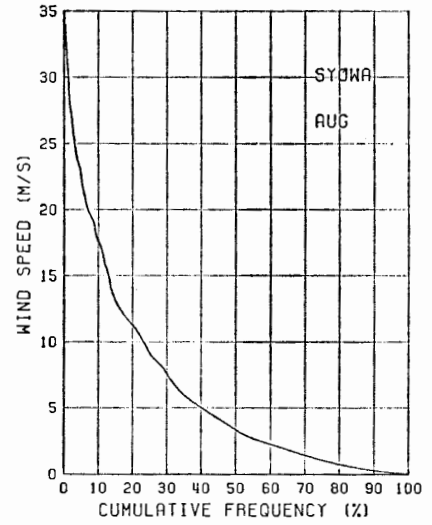
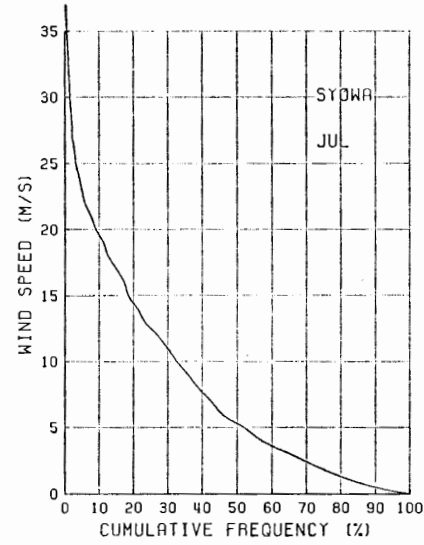
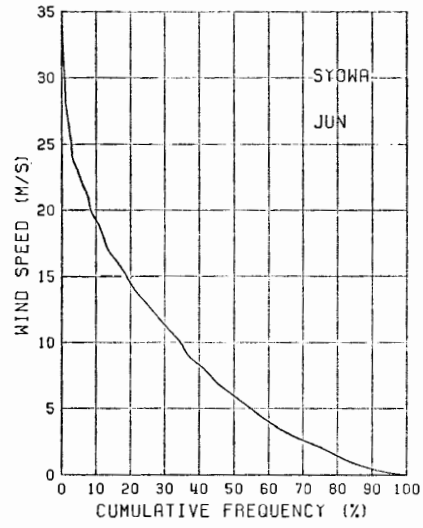
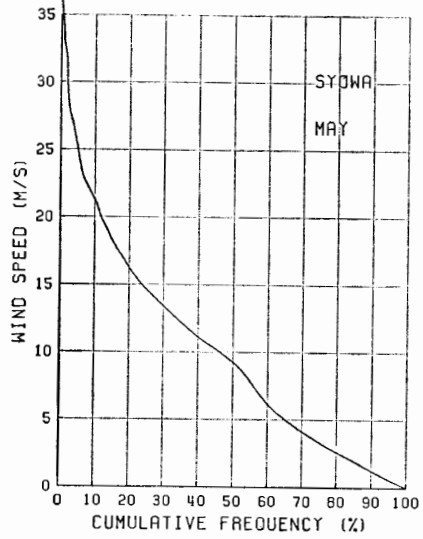


図 4 つ づ き
Fig. 4. (Continued)

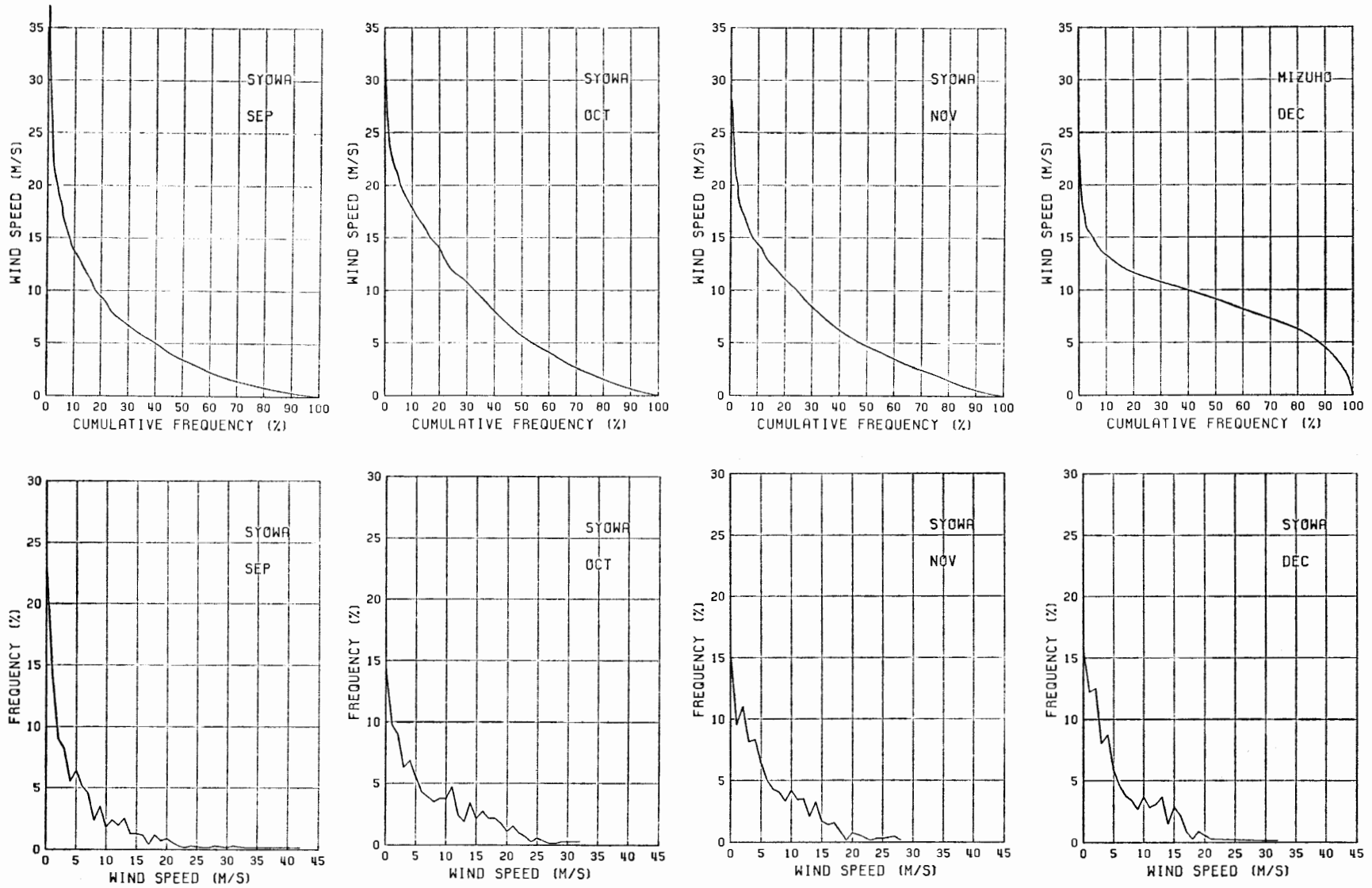


図 4 つづき
Fig. 4. (Continued)

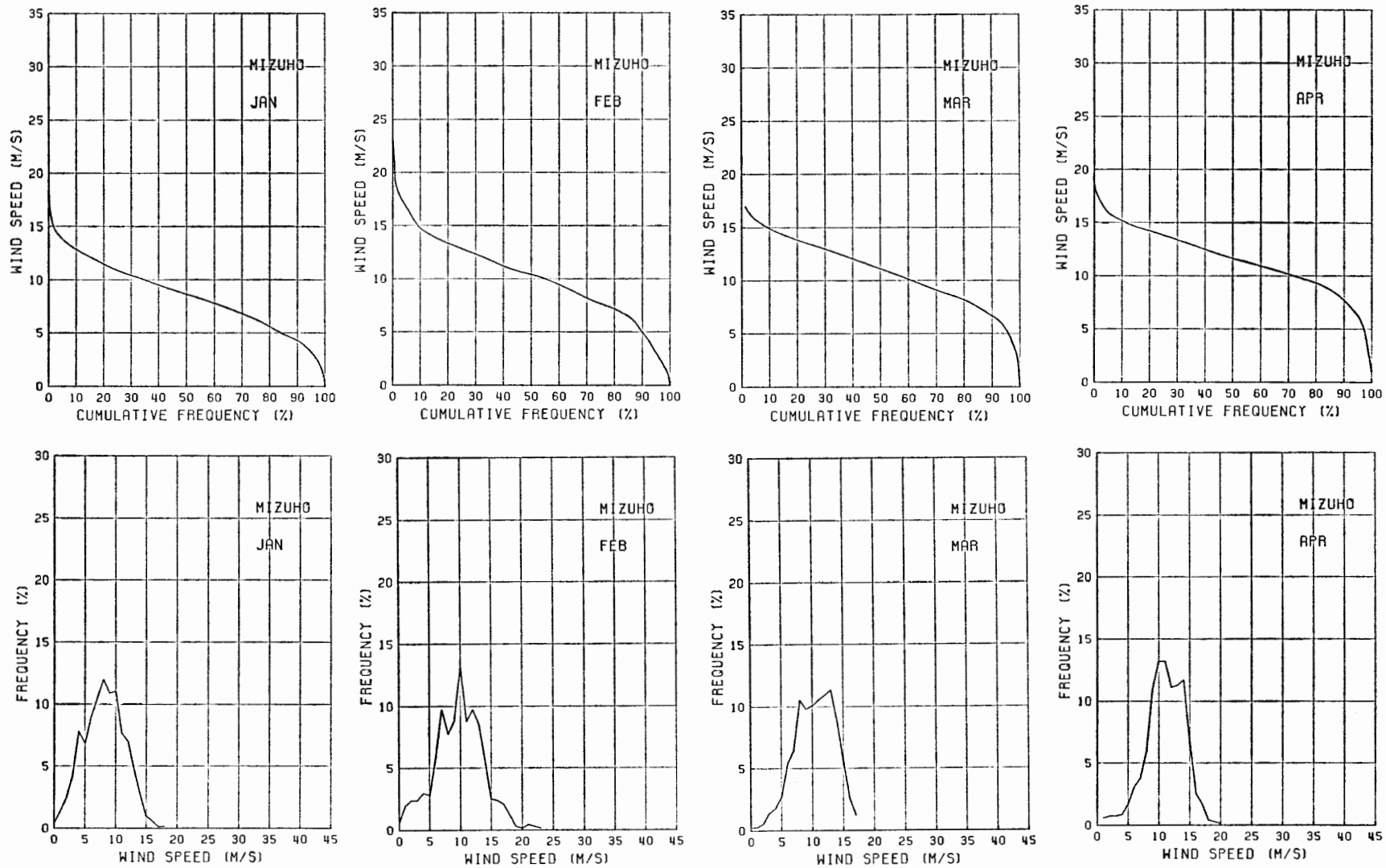


図 5 みずほ基地の風況曲線 (上) と風速の出現頻度分布 (下)
Fig. 5. Monthly cumulative distribution curve of wind speed (upper) and monthly frequency of wind speed (lower) at Mizuho Station.

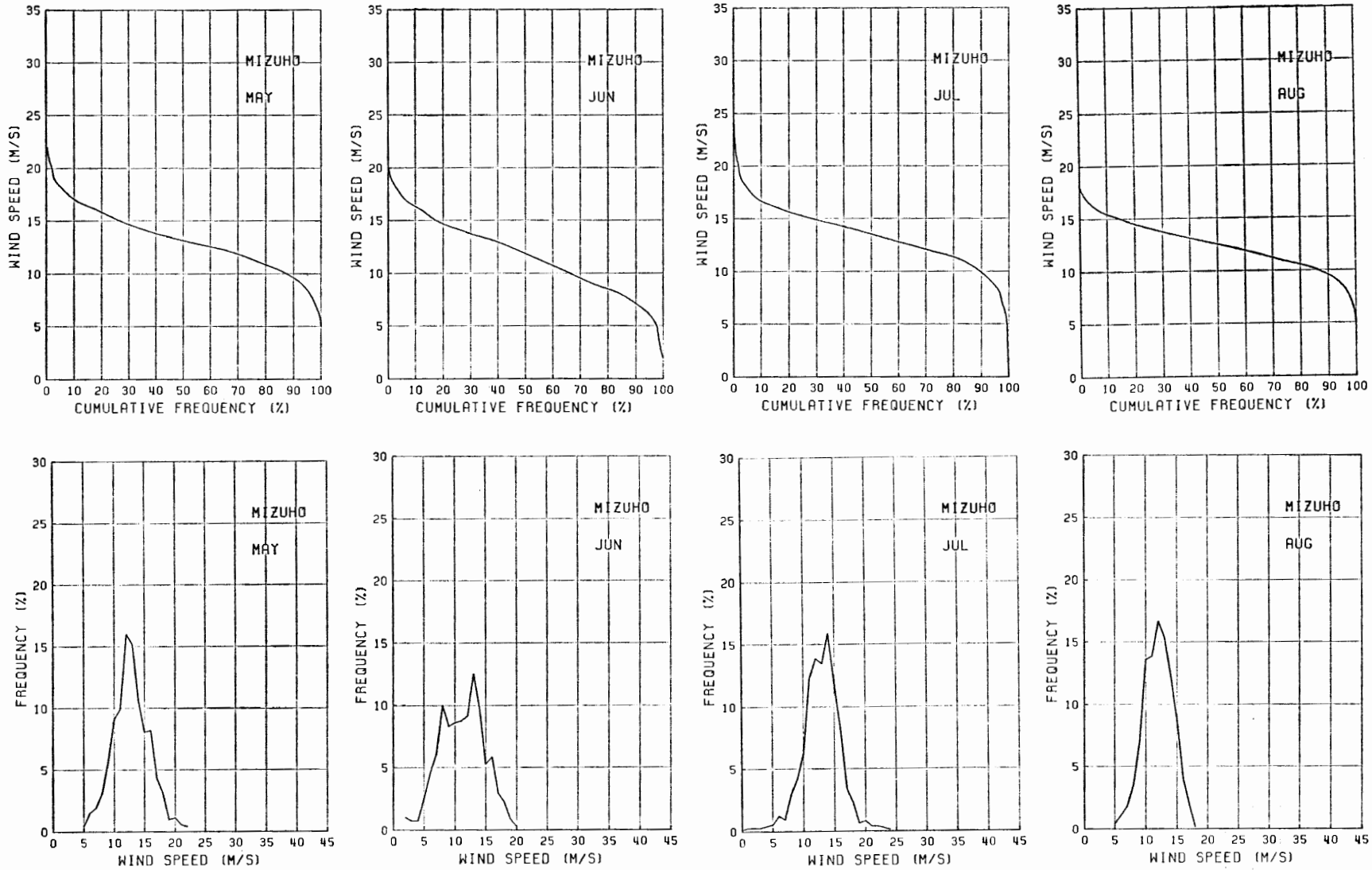


図 5 つ ぶ き
Fig. 5. (Continued)

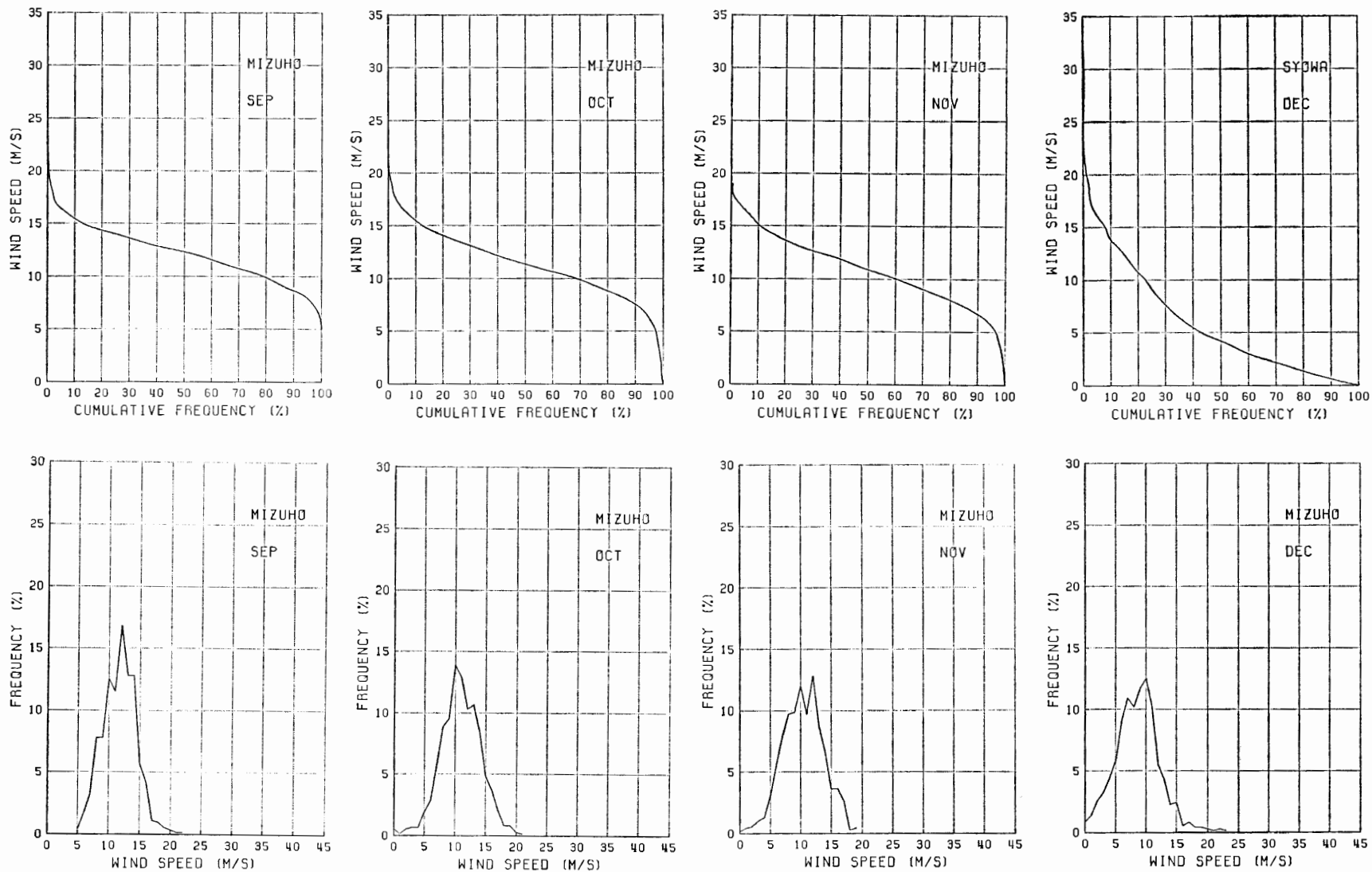


図 5 つ づ き
Fig. 5. (Continued)

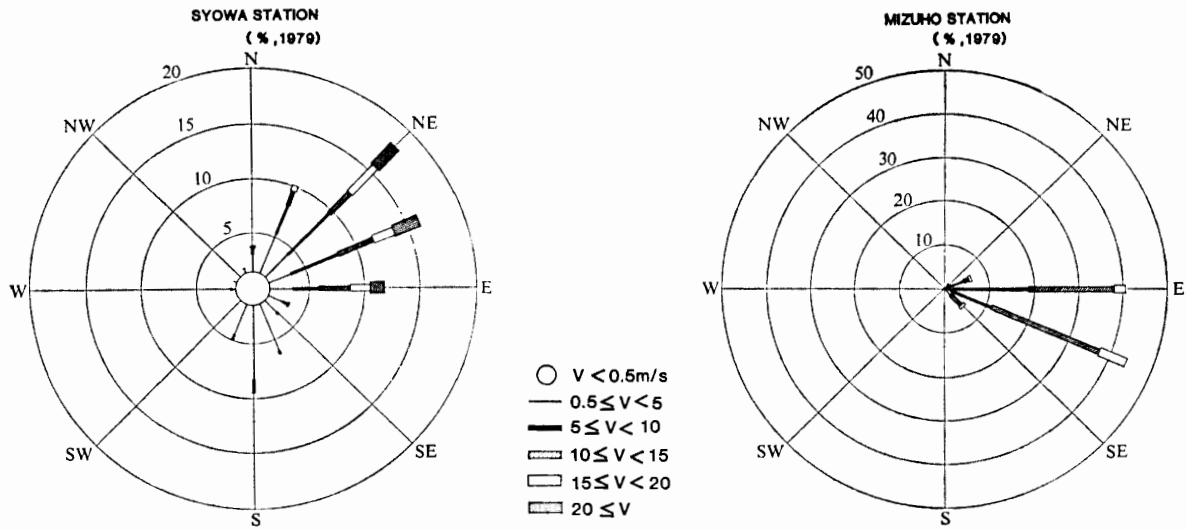


図 6 昭和基地とみずほ基地の風速別風配図
 Fig. 6. Windrose divided by wind speed at Syowa and Mizuho Stations.

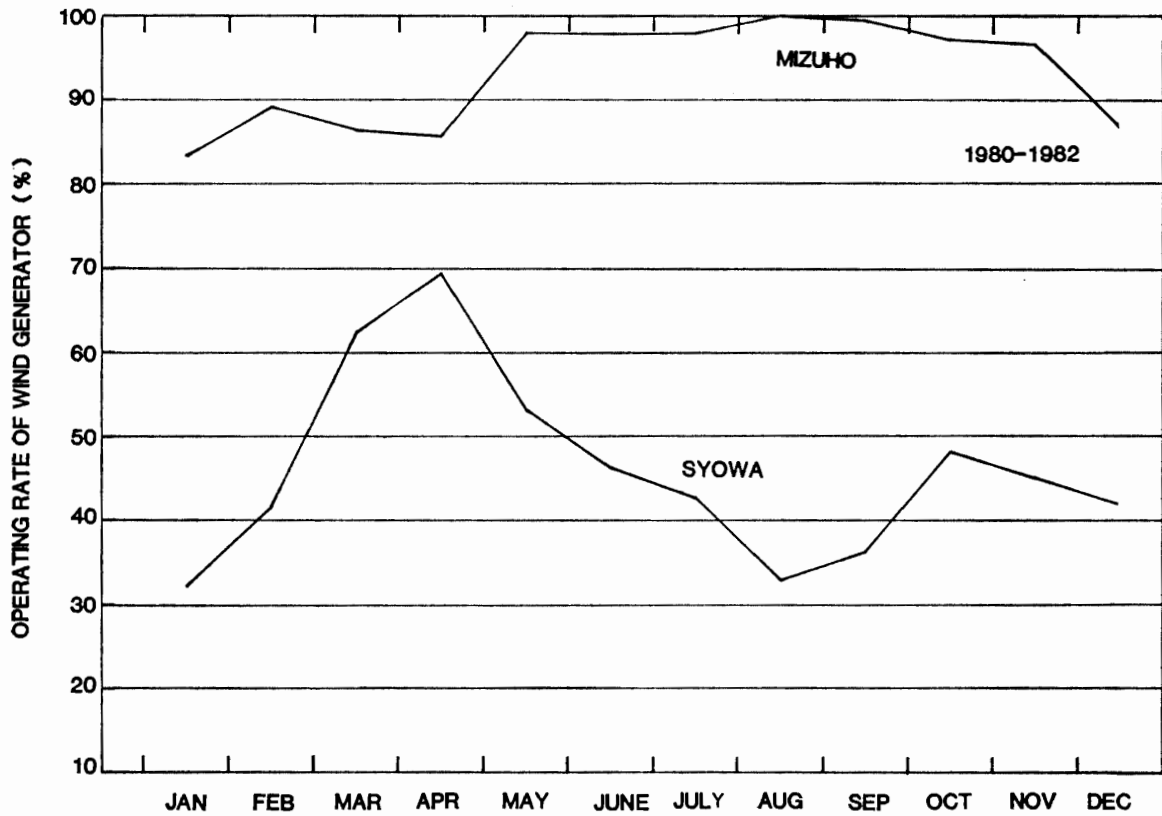


図 7 風力発電機の運転可能時間率。風速 5-20 m/s の風が吹く時間率を示す。
 Fig. 7. Operating rates of the wind generator at Syowa and Mizuho Stations. The rates coincide with the frequency of wind speed between 5 and 20 m/s.

AGENCY, 1982, 1983, 1984; OHATA *et al.*, 1981; NISHIMURA *et al.*, 1982; TAKAHASHI *et al.*, 1983) から得られた月別の風況曲線と風速の出現頻度である。この図からある風速 (m/s) 以上の風が吹く時間数 (% 表示) を読み取ることができる。昭和基地は、一般に弱風の時間数が多いが強風も吹く。これに対しみずほ基地は、5 から 15 m/s の風が一年を通して安定して吹いており、20 m/s 以上の強風も少ない。これらの図から、みずほ基地は風力発電にとって理想的な風況であることがわかる。図 6 は、昭和基地とみずほ基地の風配図 (国立極地研究所, 1985 b) である。どちらも風向はほぼ一定しており風力発電にとって条件は良い。風速 5 から 20 m/s の範囲の風に対して発電可能な風力発電機を想定した場合の発電可能時間数 (% 表示) が、図 7 に示してある。みずほ基地は、一年のうち 93.2% の期間 5 から 20 m/s の風が吹いていることになる。これに対し昭和基地は、46% である。

以上検討したように、南極は風力発電にとって非常に良好な場所といえる。特にみずほ基地は、年間を通して安定した風があり最良の場所である。

2.4. 風力発電によるエネルギー

風車の出力は、風速の 3 乗と風車の受風面積に比例し、次式によって表される。

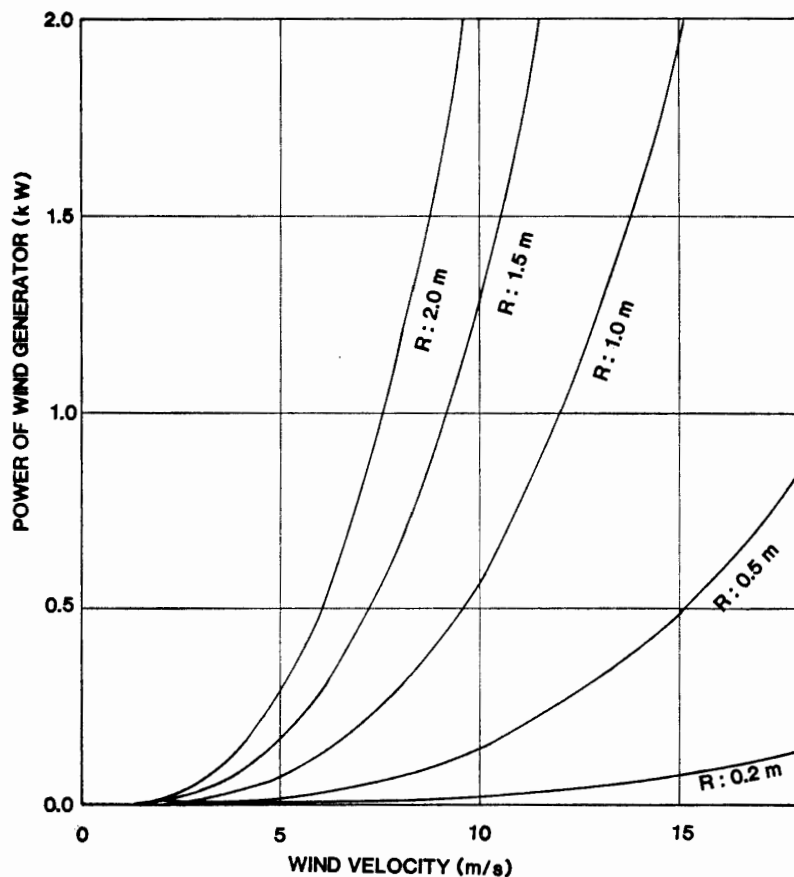


図 8 風力発電機の出力

Fig. 8. Power of the wind generator. R indicates the radius of a blade.

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \text{ (W)}, \quad (1)$$

ここで P : 風車の出力 (W), C_p : 風車の出力係数, ρ : 空気密度 (kg/m^3), A : 風車の受風面積 (m^2), V : 風速 (m/s).

理想風車は, 最大でも風力エネルギーの 59.3% しか利用できないことが理論的研究によりわかっており, 式 (1) における C_p は, 最大 0.593 である. 式 (1) に $A = \pi R^2$ (ただし, R (m) は風車の半径) を代入して次式を得る.

$$P = \frac{1}{2} C_p \pi \rho R^2 V^3 \text{ (W)}. \quad (2)$$

実際の風車の効率を 70%, 伝達装置・発電機系の効率を 80% と仮定すると, 総合効率は 33.2% となる. ここで総合効率を 30% とし, 式 (2) に $C_p = 0.3$, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ を代入して得られたのが図 8 である. この図の出力を持つ風力発電機を昭和基地およびみずほ基地に設置したときに, 得られる月ごとの平均出力を計算したのが表 2 である. カットイン風速を 5 m/s, カットアウト風速を 20 m/s として図 4 と図 5 の風況曲線から計算した. この表から無人観測用保温箱への熱の供給のためには, ごく小さい径のブレードで十分であること (図 2 参照), みずほ基地では, 半径 2 m のブレードがあれば年平均で約 2 kW 程度の出力が期待できることなどがわかる.

表 2 風力発電機で期待できるエネルギー (昭和基地, みずほ基地, 1980-1982 年)
Table 2. Expected energy of the wind generator at Syowa and Mizuho Stations in 1980-1982.

	ブレード 半径	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年平均 (W)
昭和 基地 (S)	0.5 m	33	43	72	82	63	50	46	34	34	52	46	43	50
	1.0 m	132	172	289	329	252	200	187	134	135	209	183	172	199
	2.0 m	528	687	1156	1317	1006	773	731	537	540	837	731	688	794
みず ほ 基地 (M)	0.5 m	86	105	117	126	135	121	136	138	133	123	116	92	119
	1.0 m	345	421	466	506	540	482	543	552	533	494	465	370	476
	2.0 m	1379	1682	1864	2023	2161	1930	2171	2208	2132	1976	1860	1487	1905

2.5. 風力発電機稼働による燃料輸送量の低減

風力発電機を内陸基地の雑用電源 (ヒーター等) として使用した時, どれほどの利用効果があるかを考えてみることにする. 内陸基地を運営する上で最も問題となるのが輸送であり, その距離が長くなるほど深刻となる. 現在あすか観測拠点の電力源として使用しているディーゼルエンジンの燃料消費率は 0.2379 g/Wh である. その燃費をもとに風力発電機の運用により節約できる燃料を計算したのが表 3 である. また, 節約した燃料を輸送しなくても済むので (付録参照), それによる輸送用燃料の節約分も同じ表に示してある. 例えば, 輸送距離が 500 km ある場所で 5 kW の風力発電機を運用すると 発電機用の燃料が 10.42 t, さらに

表 3 風力発電機稼働による燃料の節約量
 Table 3. Amount of fuel saved by operating the wind generator.

風力発電機出力	発電機燃料節約量	輸送燃料節約量
1 kW	2.084 t	0.521 kg/km
2	4.168	1.042
3	6.252	1.563
4	8.336	2.084
5	10.420	2.605

輸送用の燃料が 1.3 t で、年間で合計 11.7 t の燃料が節約できることになる。

3. 日本南極地域観測隊が使用した風力発電機とその問題点

表 4 は、第 1 次から第 26 次観測隊まで南極に搬入した主な風力発電機の一覧表である。第 1 次観測隊で搬入後、第 12 次観測隊まではしばらく中断のあったものの、第 18 次観測隊で無人観測が始められて以来、ほとんど毎年持ち込まれ、実用機としてあるいは実験機として運用されてきたことがわかる。この表から日本の観測隊は、風力発電に関しては豊富な経験を有していると言ってよい。しかし、そのほとんどがなんらかの故障を起こし、途中で運転を断念している。これだけ長年の豊富な経験を有するにもかかわらず、その結果が芳しくないのはなぜなのか。このことを探るために、論文、観測隊報告書や担当した人の話をもとにそれぞれの原因を調査し、その対策を考える。

3.1. 第 1 次観測隊 (日本機械学会, 1960)

バッテリーの充電および非常用の電源として考えられた直径 4.4 m のブレードを持つ本格的なものであった。可変ピッチ機構を有し、ブレードの回転数は 168 rpm 一定である。模型による風洞実験や静岡県御前崎での実地試験も行われた後、南極に搬入されたが、昭和基地への輸送途中、デポしておいた場所の海水が流れ、実用するには至らなかった。

3.2. 第 12 次観測隊 A (伊藤ら, 1974)

南極における風力発電の利用を目的としたものであり、日本で利用されていたいわゆる山田式風車をそのまま南極に持ち込み実験した。日本で風洞試験を行った結果、ある風速でブレードが大きく振動することがわかった。これは、回転数制御用の錘と風力のバランスが崩れた時に起こった。この風力発電機は、みずほ基地に設置された。風向がほぼ一定で、しかも風速も安定しているので、風車の首振りをやめて固定し、また、錘でのブレード回転面の傾きによる回転数制御をやめて、強風の時にもブレードが風向に正対するようにした。運転時間は、延べ 2673 時間に達し、故障もなく作動したが、総合効率は 9.15% と低かった。

3.3. 第 12 次観測隊 B (伊藤ら, 1974)

三枚羽根の山田式風車を昭和基地に設置し 1824 時間運転した。電力の取り出しは、スプリング付きスリップリング機構により行われた。ブリザードの際、この部分に雪が入り込み

表 4 日本南極地域観測隊による風力発電機の運転
Table 4. Wind generators operated by the Japanese Antarctic Research Expedition.

隊次 型名	1	12A	12B	14	18A	18B	19A	19B	20,21,22	21	23	24	25	26
製造会社	本田技研	山田風力 電設工業	山田風力 電設工業	日大理工	Electro GmbH	Dyna Technology	Electro GmbH	日大理工	Dyna Technology	WINCHERGER 1222H	極研 1号	極研 2号	0-20-TM- 12V-900R	0-200-TM1- 24V
タワー	5.5m スチールパイプ	モノポール	モノポール		4m スチールパイプ	3m スチールパイプ	4m スチールパイプ		3m スチールパイプ	3m スチールパイプ	3.5m スチールパイプ	5m スチールパイプ		3m スチールパイプ
風車	プロペラ 直径4.4m 3枚	プロペラ 直径1.8m 2枚木製	プロペラ 直径2.75m 3枚木製	タービン 直径1.2m 静翼31枚 動翼30枚	プロペラ 直径3m 2枚木製	プロペラ 直径1.8m 2枚木製	プロペラ 直径3m 2枚木製	タービン 直径1.2m 静翼45枚 動翼24枚	プロペラ 直径1.8m 2枚木製	プロペラ 直径1.8m 2枚木製	プロペラ 直径2.8m 2枚FRP製	プロペラ 直径2.8m 2枚FRP製	プロペラ 直径1.0m 2枚木製	プロペラ 直径2.1m 2枚金属製
方位制御 強風対策	ダウンwind 遠心式可変 ピッチ	固定 上方偏向	アップwind 逆可変 ピッチ	ダウンwind 負荷で 調節	アップwind 可変ピッチ (11-33m/s) 側方偏向	アップwind エプブレーキ (270-900 rpm)	アップwind 可変ピッチ (11-33m/s) 側方偏向	ダウンwind うず電流 ブレーキ	アップwind エプブレーキ (270-900 rpm)	アップwind エプブレーキ (270-900 rpm)	固定 なし	ダウンwind 電磁ブレーキ	アップwind なし	アップwind エプブレーキ
ブレード 回転数 (rpm)	168	400	220	190 17m/s	220	900	220	303 20m/s	900	900	900 10m/s	900 10m/s	900	900
増速機	12.6倍			6倍	直結	直結	直結	6倍			直結	直結	直結	直結
発電機	DC24V 40A 自動車用	ブリッジ整流型 直流発電機	ブリッジ整流型 直流発電機	単相AC 100V	永久磁石 式AC発電機	4極分巻 自励式 直流発電機	永久磁石 式AC発電機	他励式3相 AC発電機	4極分巻 自励式 直流発電機	4極分巻 自励式 直流発電機	他励式 ブラシ 交流発電機	他励式 ブラシ 交流発電機	直流発電機	直流発電機
実験出力 (kW)		0.1 7m/s	0.1 7m/s	0.3 15m/s				2.38 26-30m/s					0.007 10m/s	
定格出力 (kW)	1.0	0.1	0.3		1.2	0.2	1.2		0.2	0.2	1.0	1.0	0.02	0.2
定格風速 (m/s)				17	10	10.3	10				10	10		
運転期間	水没	1971, 5, 30- 6, 26 1971, 9, 28- 1972, 1, 18	1971, 8, 1- 10, 15		1977, 1, 18- 2, 20 1977, 5, 30- 8, 23?	1977, 5, 28- 5, 29	1978, 1, 25- 2, 5? 1978, 9, 5- 1980, 1, 23?		1979, 10, 17 10, 27? 1980, 1, 15- 2, ? 1981, 9, 30- 11, 9?	1980, 11, 4- 1981, 1, 10?	1982, 6, 7- 7, 17 1982, 7, 17- 10, 3	1983, 4, 17- 4, 25	1984, 11, 25 1985, 5, 5?	1985, 2-27 5?
設置場所		みずほ基地	昭和基地	昭和基地	A1	A1	A1	昭和基地	Y100	H180	みずほ基地	みずほ基地	前進拠点	前進拠点
目的	非常用	実験	実験	実験	無人観測	無人観測	無人観測	実験	無人観測	無人観測	実験	実験	無人観測	無人観測
故障		12m/s, 22m/s で振動 ブリッジによる ノイズ	陽極出力端 子のスプリ ング機構に雪 が入り凍結 発電機と ポールの接触 回転部が凍 結	ベルトに雪 が入る	蓄電池過充 電で水素 爆発 電源ケーブル 断線 尾翼固定 ボルト欠落	強風で転倒 ブレード破損	側方偏向が 働きそのまま 復帰せず 発電機本体 がトラスから 脱落	無風時励 磁電流が 流れて電池 が放電	集電スリッ ピング破損 ブレード破損 ブリッジの 異常摩擦 電源ケーブル 断線	集電スリッ ピング破損	振動による ブレード破損 地吹雪によ るブレードの 摩擦 グリースの硬 化	回転数過大 による ブレード破損 電磁ブレーキ コイル焼損 ブレードの振 動	ブレード破損 ブレード破損 電磁ブレーキ コイル焼損	ブレードの 取り付け ボルト脱落 尾翼折損 グリースの硬 化

凍りついて接触抵抗が大きくなり、総合効率は 1.26% と低かった。厳冬期には、発電機とポールの接触回転部が凍りついて回転しなくなり、風向板が動かなくなった。また、翼固定板のナットがゆるんでブレードが落下し破損する事故もあった。

3.4. 第 14 次観測隊 (栗野, 1973; AWANO *et al.*, 1976)

プロペラ型風車の出力は風車の半径の 2 乗に比例するので、大きな出力を得るためには風車の外径を大きくする必要がある。このような大直径の風車は、南極への搬入や現地での設置が難しい。これらのプロペラ型風車の欠点から逃れるために設計されたのが、空気タービン式風力発電機である。プロペラ型風車の 1/4 の半径で同一の出力が期待できるものである。日本での簡単な実験の後、昭和基地に設置された。ブリザード時にベースボックス内に雪が入り、タイミングベルトが凍りついた。また、ステーを十分にとらなかったために、十分な記録が得られないまま発電機本体が転倒し、ブレードが破損してしまった。

3.5. 第 18 次観測隊 A (鮎川ら, 1979; AYUKAWA *et al.*, 1986; 国立極地研究所, 1978)

日本の観測隊において風力発電を初めて無人観測施設の実用電源として使用した。風車は、スイス製の直径 3 m の 2 枚羽根のもので、11 から 33 m/s の風速において可変ピッチ機構により一定の回転数を保ち、さらに強風になるとブレード回転面は、風に対して 90 度の角度になり風を逃す方式のものである。昭和基地とみずほ基地の間にある氷床上の A1 点 (69°47'S, 41°34'E) に建設されたが、建設運転開始後 1 カ月ほどで、観測機器とバッテリーおよび風力発電機の制御装置を収納した小屋が爆発を起こしてしまった。

バッテリーの過充電により発生した水素ガスに、観測計器か発電機の制御系から発生した電気放電による火花が引火したものと考えられている。風力発電機本体は離れたところに設置してあり無事だったので、次節に述べる第 18 次観測隊 B のウィンチャージャー機の転倒事故の後、保温箱のヒーター電源として再び使用した。しかし風による振動と低温による硬化のため、電源取り出しケーブルが断線し、電力供給が不可能となった。また、風車の方向を制御する尾翼の止めネジが振動によりゆるんで欠落し、方向制御ができなくなった。

3.6. 第 18 次観測隊 B (国立極地研究所, 1978)

第 18 次観測隊 A の風力発電システムが爆発により失われたため、新たに同地点に設置されたのがこの風力発電機である。電力は保温箱のヒーターとして使用する予定だったが、試験運転中に強風により転倒し、ブレードが破損し使用不能となった。ステーは、角材を雪中に埋めたデッドマンを使用した。埋め戻し後十分時間が経たないうちに強風が吹いたため、雪粒子の焼結が進まず十分な支持力が得られなかったのが原因と思われる。

3.7. 第 19 次観測隊 A (国立極地研究所, 1979)

第 18 次観測隊 A, B の観測を継続させるために新たに無人観測点 A1 に持ち込まれたもので、機種は 18 次隊 A のものとまったく同じであるが、バッテリーの過充電を防ぐため

に、風力発電機の電圧が増加するに従い、段階的に負荷抵抗を変えて定電圧にする制御装置を有している。また、強風の時に尾翼をブレード回転面に対し 90 度に曲げる機構を持っている。過充電による爆発事故をなくすため、バッテリー保温箱と観測機器の保温箱を別置きにし、バッテリー箱の上部には水素抜きのための塩化ビニールパイプを取り付けた。

しかし、運転後数日でトラブルが発生し発電不能になった。発電機の尾翼を曲げてブレードを強風から守る機構が作動し、その後弱風になっても復帰しなかったのが原因である。その後、この尾翼屈伸機構を取り外し、電子的過充電防止回路を作製し再運転したところ、約 1 年 5 カ月間順調に動作した。しかし、その後発電機本体がタワーから脱落しブレードが破損した。原因は発電機をのせているタワー上部の止めが振動によりゆるんだものと思われる。

3.8. 第 19 次観測隊 B (AWANO and TAKEUCHI, 1979)

第 14 次観測隊で持ち込んだものと同じ型式のタービン式発電機である。発電機としてだけでなく、強風時には、うず電流を利用した電磁ブレーキを作動させ、それによる熱も利用できるものだった。実験は昭和基地で行われ、26 から 30 m/s の強風時に 2.38 kW の電力がえられた。発電機が他励式であったため、弱風時には励磁電流を停止する必要があるが、励磁電流をバッテリーからとっていたため、何度か過放電させてしまった。

3.9. 第 20, 21, 22 次観測隊 (国立極地研究所, 1980, 1981, 1982; 大畑・勝田, 1983)

みずほ基地から約 100 km 離れた Y 100 地点 (71°17'S, 46°16'E) に気象観測装置の電源用として、200 W ウインチャージャー 1222 H 機を 4 台並列に設置した。並列にした理由は、1, 2 台故障しても残りの発電機でバックアップできるだろうという発想であったが、運転後約 10 日で 3 台にトラブルが発生した。修理・再運転を第 21 次観測隊で 3 回、第 22 次観測隊で 5 回も行ったが、その度に故障し、長期間の運転はできなかった。主な故障は、振動によるブレードの破損、ブラシの異常摩耗による整流子の破損、振動による界磁コイル接続部の断線、振動による出力取り出しケーブルの断線、出力取り出し用スリッピングの破損、風力発電機からの過大入力による DC-DC コンバータの焼損などであった。

3.10. 第 21 次観測隊 (国立極地研究所, 1981; 大畑・勝田, 1983)

昭和基地とみずほ基地のほぼ中間地点にある H 180 地点 (69°36'S, 42°02'E) に気象観測用電源としてウインチャージャー 1222 H 機 1 基を設置した。約 30 日間順調に動作した。しかしここでも 3.9 節と同じような故障が起こり運転を中止した。

3.11. 第 23 次観測隊 (国立極地研究所, 1983)

無人観測基地における風力発電機の数々の故障は、購入した発電機の特性を十分理解せずに使用したのが一因であるとの反省から、新たに自らの手で試作し、問題点を見直そうという気運が極地研究所のグループに起こった。試作機は、交流発電機を除くブレードの設計・製作、発電機制御盤の設計・製作、タワーの製作まですべて極地研究所で行われた (石沢, 1

kW 風力発電機の試作, 手記, 22 p. 1981).

実験はみずほ基地で冬期の約 4 カ月間運転されたが, その間に 2 度ブレードが破損した。原因は, ブレードの回転数が高すぎた (1200 rpm, 14 m/s) ため動的バランスがとれず振動がはげしかったこと, ブレードの回転中心位置が雪面から約 3.5 m と低く, 地吹雪粒子によるブレード前縁が摩耗したこと, による。また, ブレードの重量を軽くしたことにより, 低風速での起動性はよかったが, 慣性がたりないため, 一定した回転数が得られないという欠点があった。また, 無風でブレードが完全に停止した後は, 回転軸受部のグリースが硬化し, 強風が吹かないと再起動しないことがあった。

3.12. 第 24 次観測隊 (国立極地研究所, 1984)

第 23 次観測隊で試作したものと基本的には同じであるが, アップウインド式をダウンウインド式にしブレードの重量を増して, 風速の急激な変化にもスムーズに回転するようにした。機構が複雑になるのをさけるため, 増速機を取り付けずブレードを発電機に直結にしたため, 定格風速 10 m/s での回転数を 900 rpm として設計した。強風対策としてパウダー式電磁ブレーキを新たに設置し, 強風時に連続スリップ状態にしてブレードの回転数を一定になるようにした。また, 風向制御をさせるようにしたためスリップリングも装備した。

実験はみずほ基地で行ったが, ダウンウインド型では 10 m/s の風で 28 rpm の回転数しか得られず, 急ぎょアップウインド式に変更して運転をしたが, 2 日後 17 m/s の強風時にブレードが破損した。ブレードの過回転を防止する電磁ブレーキの制御系が良好に動作せず, 回転数が上がり遠心力が増して, ハブの取り付けネジがひきちぎれた。ブレーキの制御装置を改良し, 運転を再開した結果, 今度は, 風速 20 m/s のとき電磁ブレーキのコイルが焼損した。強風時電磁ブレーキは, 連続スリップ状態になり熱をもつので強制的に放熱する必要があるが, 外気温が低いことと防雪の理由から放熱口を目張りしていた。このことが原因でコイルが高温となり焼損した。

3.13. 第 25 次観測隊 (国立極地研究所, 1985 a)

みずほ基地から約 500 km 南に入った前進拠点 (74°12'S, 34°59'E) の無人観測点のヒータ電源として使用された。10 m/s の風速で約 7 W の発電量を持つ小型の風力発電機が 2 台設置されたが, 約 6 カ月動いた後ブレードが破損した。原因はブレードの強度不足である。

3.14. 第 26 次観測隊 (KIKUTI and AGETA, 1987; 菊地・牧野, 1988; 国立極地研究所, 1986)

第 25 次観測隊が設置したのと同地点の気象観測保温箱用電源として, 200 W 風力発電機が使用された。これは, ウインチャージャー 1222 H 機と類似した機種である。約 4 カ月ほどは順調に稼動した様子だが, ブレードをハブに取り付けるボルトが脱落し, さらに尾翼も折損した。原因は, ブレードの回転による振動と思われる。

4. 故障の原因とその対策

4.1. 原因

これまで述べてきたさまざまな故障とその原因を示したのが表 5 である。故障の原因は、最終的にはそれを予測しえなかったという意味で、すべて人間側のミスに帰するのであるが、ここでは自然現象による原因と人為的原因の 2 つに大別した。この分類は非常にあいまいであるが、例えば強風が吹いてブレードが振動し破壊に至った場合には、ブレードの動的アンバランスによる振動で人為的なものとした。また、低温耐久性のある素材を使用しなかったために電線がぜい性破壊を起こした場合は、人為的ミスでなく低温によるものとした。

表 5 風力発電機の故障原因
Table 5. Causes of wind generators' troubles.

故障・破損箇所	自然に起因する				人為的なものに起因する		計
	低温	地吹雪	凍結	強風	ブレードの動的アンバランスによる振動	構造的欠陥・設計ミス	
タワー				2	1		3
ブレード		1		1	5		7
方位制御装置 (尾翼等)					2	1	3
増速機		1					1
発電機							0
ブレーキ						1	1
電線	2				2		4
ブラッシング						1	1
スリップリング			1			3	4
充電制御装置						3	3
計	2	2	1	3	10	9	

表 5 に示したように、故障箇所では、増速機・発電機のような風力発電機以外の分野で、すでに完成されている部品には故障がほとんどないことがわかる。風力発電機に特有なブレード、スリップリング、風車方位制御装置、充電制御装置などに故障が多い。原因としては厳しい南極の自然現象によると思われるものは少なく、低温による電線の破壊が目につく程度である。逆に人為的なものとしては、ブレードの振動によるものが圧倒的に多く、ブレードの破損のほとんどは振動による。また発電機とバッテリーを結ぶインターフェース回路もうまくいっていないことがわかる。出力取り出しのスリップリングの故障は直流発電機にみられるものである。

4.2. 対策

自然に起因するもののうち低温による電線の破壊については、 -50°C でも硬化せず柔軟性のあるケーブルが市販されているので、それを使用することで解決する。

地吹雪によるものには、地吹雪粒子によるブレード前縁の摩耗があるが、地吹雪強度の雪

面からの高さによる急激な減衰を考慮すれば、タワーの高さを高くすればよいことがわかる。同時に、摩耗に強い材料を使用する。また、凍結は、沿岸部で比較的気温の高い昭和基地で起こっているが、防雪の方法を改善しなければならない。防雪を完全にしたため、加熱部の放熱効果が失われる事故がみずほ基地で起きているので、このことも十分考慮する必要がある。強風によるものは、ステアーを十分にとらなかつたためにタワーが倒壊したものと、ブレードの遠心力が増大して破壊したものがある。前者は、ステアーを強化する必要がある。雪中のデッドマンの支持力がどれほどあるのかは、よくわかっていないので、雪の性質とともに今後、実験・研究する必要がある。後者は、ブレードの回転数を増加させないで定回転に保つ可変ピッチ機構と、さらに強風のときにブレードの回転を停止する機構を組み込む必要がある。

人為的なものに起因するもののうち、ブレードの動的アンバランスによる振動問題には、精密なブレードを製作するのは当然のことだが、タワーを設置する場所は、雪面のところが多いので、雪を支持地盤としてとらえ、ブレード・ポール・地盤の相互作用を考慮した力学的・振動論的研究が必要とされる。また、設計上第一に研究することの一つに、バッテリーへの充電方式をあげなければならない。このとき、強風時には静電気の影響が著しいので、制御用電子機器の静電気対策は、十分に行う必要がある。

5. ま と め

これまでみてきたように、日本の観測隊の失敗原因として、基礎的な実験を十分しないで安易に実用機として使用していることがあげられる。しかし、風力発電機は完成されたものではなく、開発途上のものである。さまざまな用途に道を開くためにも、基礎的な事柄からじっくり腰を落ちつけて、風力発電機そのものの研究をしなければならない。

謝 辞

これまでに日本南極地域観測隊に関連して風力発電の実用に向けて苦勞をかさねてくれた隊員、関係者に感謝します。特に筆者の質問にたいして過去のことを丁寧に御教示くださった方々に感謝します。国立極地研究所の川口貞男教授からは南極の気象について教えていただきました。同じく藤井助教授からはみずほ基地での太陽光発電のデータを提供していただきました。

筆者とこれまで実験・討論を重ねてきた国立極地研究所の寺井啓、勝田豊氏に、また、この調査の機会を与えて助言して下さった同観測協力室長の竹内貞男氏に感謝します。

文 献

- 栗野誠一 (1973): 風力発電. 極地, 9 (1), 20-25.
AWANO, S. and TAKEUCHI, S. (1979): Axial flow wind air-turbine NU-102 with electric eddy-current brake. Mem. Natl Inst. Polar Res., Ser. F (Logistics), 3, 1-110.

- AWANO, S., MURAYAMA, M. and TAKEUCHI, S. (1976): Wind electric generator NU-101 driven by axial-flow air-turbine with stator. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Ser. F (Logistics)*, 2, 1-47.
- 鮎川 勝・寺井 啓・勝田 豊・吉田治郎・外谷 健・坂本純一 (1979): 南極における無人観測 (1) — 無人観測装置の開発と観測結果の速報. *南極資料*, 66, 1-24.
- AYUKAWA, M., HIRASAWA, T. and MAKITA, K. (1986): On the Japanese unmanned automatic observatory in Antarctica and some results obtained at the observatory. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 38, 201-220.
- 伊藤正則・中尾正義・西山 孝・高野共平 (1974): 南極における風力発電 (II) — 昭和基地およびみずほ内陸基地における試運転結果. *極地*, 9 (2), 8-13.
- JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY (1982): Meteorological data at the Syowa Station in 1980. *Antarct. Meteorol. Data*, 21, 1-43.
- JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY (1983): Meteorological data at the Syowa Station in 1981. *Antarct. Meteorol. Data*, 22, 1-43.
- JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY (1984): Meteorological data at the Syowa Station in 1982. *Antarct. Meteorol. Data*, 23, 1-43.
- KIKUCHI, T. and AGETA, Y. (1987): Glaciological research program in East Queen Maud Land, East Antarctica, Part 6, Advance Camp, 1985. *JARE Data Rep.*, 129 (Glaciology 15), 104 p.
- 菊地時夫・牧野章帆 (1988): 南極東グリーンモードランド前進拠点における無人氣象観測. *天気*, 35, 39-46.
- 国立極地研究所編 (1978): 日本南極地域観測隊第 18 次隊報告 (1976-1978). 東京, 95-101.
- 国立極地研究所編 (1979): 日本南極地域観測隊第 19 次隊報告 (1977-1979). 東京, 117-123.
- 国立極地研究所編 (1980): 日本南極地域観測隊第 20 次隊報告 (1978-1980). 東京, 88-89.
- 国立極地研究所編 (1981): 日本南極地域観測隊第 21 次隊報告 (1979-1981). 東京, 89-91.
- 国立極地研究所編 (1982): 日本南極地域観測隊第 22 次隊報告 (1980-1982). 東京, 268.
- 国立極地研究所編 (1983): 日本南極地域観測隊第 23 次隊報告 (1981-1983). 東京, 300.
- 国立極地研究所編 (1984): 日本南極地域観測隊第 24 次隊報告 (1982-1984). 東京, 234-235.
- 国立極地研究所編 (1985a): 日本南極地域観測隊第 25 次隊報告 (1983-1985). 東京, 167-168.
- 国立極地研究所編 (1985b): 南極の科学 9 資料編. 東京, 古今書院, 79.
- 国立極地研究所編 (1986): 日本南極地域観測隊第 26 次隊報告 (1984-1986). 東京, 168-172.
- 国立極地研究所編 (1987): 日本南極地域観測隊第 27 次隊報告 (1985-1987). 東京, 369-405.
- 日本機械学会 (1960): 南極地域観測—機械関係資料. 71-74.
- NISHIMURA, H., INOUE, J. and SATOW, K. (1982): Meteorological data at Mizuho Station, Antarctica in 1981. *JARE Data Rep.*, 77 (Meteorology 12), 92 p.
- 大畑哲夫・勝田 豊 (1983): 南極における無人観測 (2) — 第 20 次隊, 21 次隊におけるシステムの概要と結果の報告. *南極資料*, 78, 117-139.
- OHATA, T., KOBAYASHI, S., ISHIKAWA, N. and KAWAGUCHI, S. (1981): Meteorological data at Mizuho Station, Antarctica in 1980. *JARE Data Rep.*, 65 (Meteorology 10), 93 p.
- SATOW, K. (1978): Distribution of 10 m snow temperatures in Mizuho Plateau. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 7, 63-71.
- TAKAHASHI, S., OHMAE, H., ISHIKAWA, M., KATSUSHIMA, T. and NISHIO, F. (1983): Meteorological data at Mizuho Station, Antarctica in 1982. *JARE Data Rep.*, 86 (Meteorology 15), 97 p.

(1988 年 3 月 31 日受付; 1988 年 5 月 10 日改訂稿受理)

付録. 雪上車の燃料消費量

南極大陸上にある基地への物資の輸送には, 雪上車 (大原鉄工所製 SM 50 S 型) が使われている. この雪上車の燃料消費量は, けん引する物資の重量 (その重量を含む) に大きく左右される. 図 A-1 は, 第 27 次越冬隊が内陸を旅行したときの記録 (国立極地研究所, 1987) を整理したものである. 季節による暖機運転の時間の違いや, 雪面状況によりバラツキは大きい, ほぼ図のような直線で近似できる.

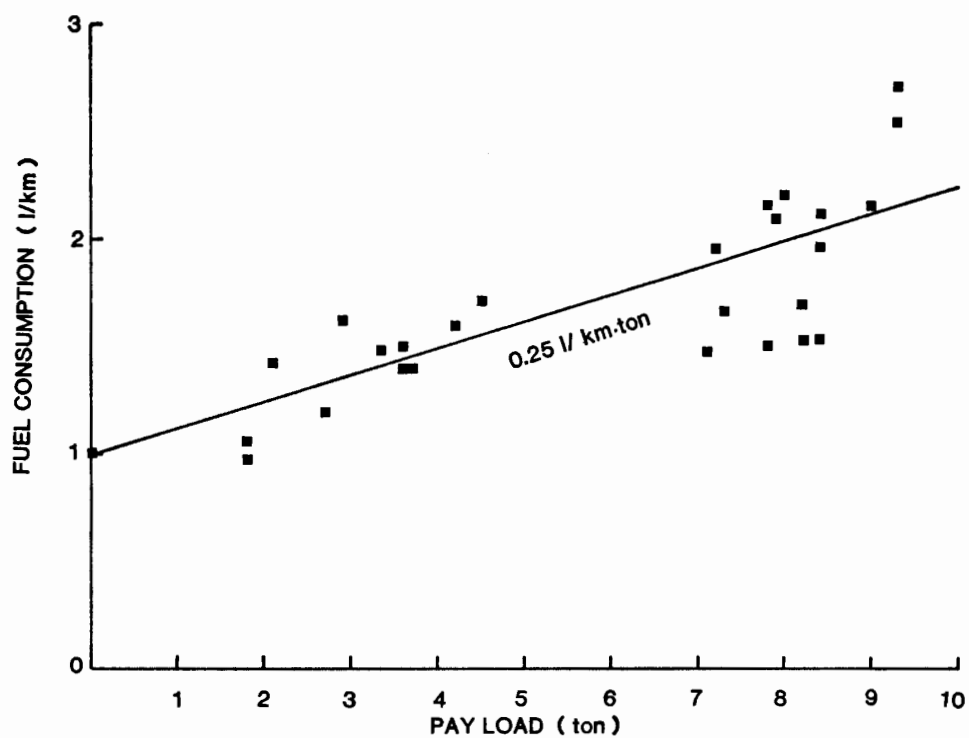


図 A-1 雪上車の燃料消費量とけん引重量との関係。けん引重量には、その重量を含む。

Fig. A-1. Relation between the fuel consumption of SM50S type oversnow vehicle and the payload. The weight of the sledge is included in the payload.