



Title	50000 kW規模発送電電力系統への風力発電システムの浸透可能性について
Author(s)	永井, 實; 屋我, 実; 天久, 和正
Citation	日本機械学会論文集. B編 = Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B, 61(586): 212-217
Issue Date	1995-06-25
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/360
Rights	Copyright (c) 1995 日本機械学会

50 000 kW 規模発送電電力系統への風力発電システムの
浸透可能性について*永井 實^{*1}, 屋我 実^{*1}, 天久和正^{*2}Penetration of Wind Turbine Generator into a 50 MW Capacity Diesel
Power Electric Line System

Minoru NAGAI, Minoru YAGA and Kazumasa AMEKU

Development of a wind turbine generator (WTG) system in Japan seems to have lagged far behind compared with that in European countries and the United States. However, NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) has recently reported that Japan is also abundant in wind energy resources, based on a several-year systematic survey conducted throughout the country and that Japan could expect to obtain electricity to meet about 10-20% of national electricity demand from wind resources alone. One of the difficulties of WTG development is the fluctuation in speed and direction of natural wind, which causes fluctuations in both voltage and frequency in the electric utility system. Therefore, the problem that needs to be solved is how far WTG capacity may penetrate into that of the conventional existing electric power systems, for instance, diesel power systems on remote islands.

This paper evaluates the actual performance of two 250 kW WTG pilot plants connected to a diesel power electric line system of about 50 MW located on the Miyako islands, Okinawa, Japan. Wind energy resources and wind characteristics on the islands are reported, and the fluctuation of the WTG output and its influence on the total systems are determined and also numerically analyzed. It is confirmed that the multiple WTGs have a tendency to cancel out each other's fluctuations at a rate inversely proportional to the square root of the number. From the results of the investigation and analysis, it is estimated that on the objective island WTG capacity of as much as 10 MW may be permissible, that is, 20% of the existing diesel system only if the WTG system consists of forty 250 kW machines or a much greater number of smaller-scale wind turbine generators.

Key Words: Natural Energy, Wind Turbine, Electric Power, Power Fluctuation, Penetration Ratio

1. はじめに

自然エネルギーの開発利用にもっとも熱心な国の一つであるデンマークでは、1993年末までに総数3549機、総容量約490000kWの風力発電機が電力系統に連係運転され、その発電量は10.2億kWhに達した。これは同国の総発電設備容量の約5.6%、総発電量に対しては約3.3%にも相当している。デンマーク政府はさらに2005年までに風力発電システム150000kWを達成し、同国の電力需要の16%までを風力のみで賄う計画である⁽¹⁾。

日本国内に設置された風力発電機の容量はこれまでのところ10000kWにさえ及ばず、欧米諸国に比べ大きく立ち後れているが、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)は最近の系統的な調査結果に基づいて、わが国にも相当豊富で豊富な風エネルギー資源が存在

することを示した⁽²⁾。同資料によればわが国においても電力需要の10%までを風力のみで賄うことは十分可能であるとの試算も示されている⁽³⁾。

一方、風力発電システムはその出力変動のために、既存の電力系統に投入した場合、果たしてどの程度までの浸透が許容されるかが議論を呼ぶところである。

本論文は、このような問題意識より、沖縄県宮古島においてNEDOにより試験中の250kW2機よりなる系統連係風力発電システムについて、報告書⁽⁴⁾に基づき運転状況報告と今後の検討課題について述べる。

2. 宮古島とその発送電電力系統の概要

表1に宮古島と同地域をカバーしている沖縄電力宮古第一、同第二発電所の設備概要を示す。沖縄電力(株)は同地域の人口56400人(世帯数18600戸)の電力需要を、これまでは1500kWから10000kWのディーゼルエンジン発電機計10台によって賄ってきている。図1に宮古島(諸島)の地図を資料⁽⁵⁾によって示す。図1には上述の既存発電所のほかにNEDOによる三つの新エネルギー実証試験プラントも示されてい

* 平成6年7月14日 沖縄地方講演会において講演、原稿受付 平成6年9月21日。

^{*1} 正員、琉球大学工学部 (〒903-01 沖縄県中頭郡西原町字千原1)。

^{*2} 学生員、琉球大学大学院。

る。同島は最高標高 110 m 程度のきわめて平坦な地形であり、風力発電システムの立地には絶好の条件であるといえる。

図 2 に同島北部の西平安名岬(にしへんなぎき)に設置された集合形風力発電システムの完成予想図を示す。図 2 の手前側 2 機が国産 250 kW 風力発電機で 1992 年 3 月および 93 年 3 月までにそれぞれ設置され現在すでに系統連係稼働中である。図 2 の後方は今後設置予定の 100 kW クラス風車 6 機であり完成すれば、合計 1 MW クラスウィンドファームとなる予定である。

表 1 宮古島と発電設備の概要

Location : 125° 15' E	Electric power supply :
: 24° 50' N	Diesel 1,500 kW × 1
Area : 204 km ²	2,400 × 2
Population : 56400	2,500 × 3
	4,000 × 1
	4,500 × 1
Wind turbine	5,500 × 1
250 kW × 2	10,000 × 2
Total 500 kW	Total 45,400 kW

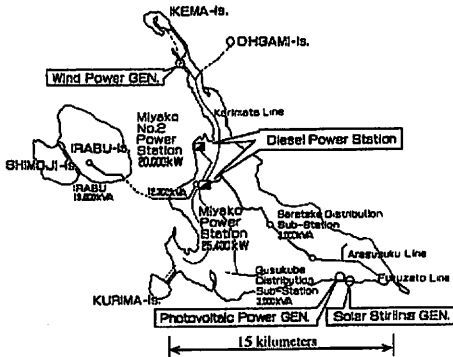


図 1 宮古島と電力系統線

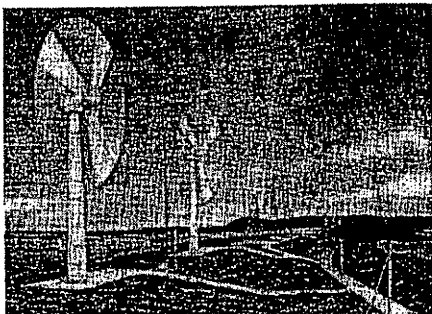


図 2 西平安名岬の集合形風力発電システム

3. 西平安名岬風況と M1 号風車の実績

ウィンドファームが建設された西平安名岬は海拔 10 m 程度の砂州であり、ほぼ三方が海洋に開かれています。図 3 に同地点地上 30 m の年間風況を示す。図 3 中棒グラフが風速階級別(年間)出現頻度で実線がその累積度数曲線である。図 3 より同地点の風況は 4 m/s より 10 m/s クラスの出現頻度が一様に高く、5 m/s 以上の累積頻度は 74.4%、年間平均風速 8.0 m/s (前年は 8.5 m/s) ときわめて優秀な値を示すことがわかった。この風況は基本的には夏期は南ないし南西、冬期は北ないし北東の季節風によるもので、南西諸島全域でほぼ同様に期待されるが、上述の西平安名岬地形がこのように好記録につながったと理解される。

なお同地点では並行してガストファクタの測定も行っているが、台風襲来時の強風域も含めてその平均値は約 1.20 と全国の気象官署の平均値(1.45~1.60)に比べかなり低く、乱れ度の小さい海洋風の特徴を示していることがわかった⁽⁶⁾。

図 4 に風況観測より得られた同地点の風力エネルギー賦存量を示す。図 4 中白抜きの棒グラフが各風速ごとの風の有している全エネルギーであり、その下のグラフは全エネルギーに風力発電機の出力係数($C_p =$

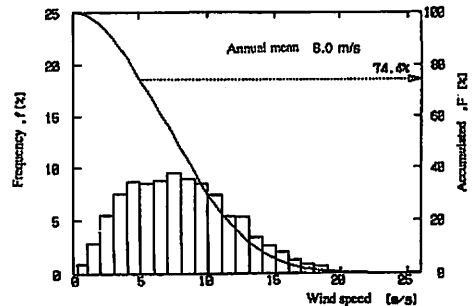


図 3 風速階級別出現頻度(1992.1.12)

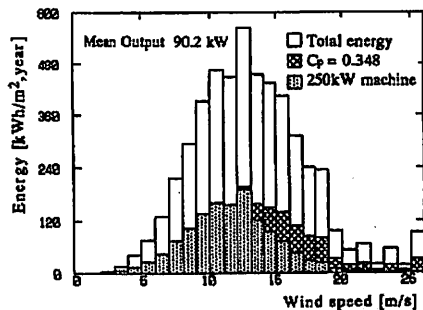


図 4 風力エネルギー分布(1992.1.12)

0.348) を乗じたものである。図 4 より、同地域の風力エネルギーは風速 12 m/s 台にもっとも多く存在することがわかる。13 m/s 以上の風速では可変ピッチ制御により定格風速 250 kW 以上の部分 (図 4 中網目の部分) はカットされるがそれが全体に占める割合は相対的に小さい。その結果導入風車の予想設備利用率は 36.1% (平均出力 90.2 kW) にも達することがわかった。

図 5 に同年の月別平均風速と 250 kW 風車による月別推定 (可採) 発電量の推移を示す。同年 7 月の平均風速は 6.3 m/s で 10、11 月の平均風速は 10.7 m/s といずれも十分良好な風況といえるが、図 5 より明らかなように、推定可採エネルギー量でみると夏期季節風よりも冬期季節風のほうがかかなり豊富であるといえる。月別平均風速が同じであるにもかかわらず 10 月の推定値が 11 月よりも高いのは、両者の風速階級別頻度分布すなわち風況曲線の差によるものである。

M1 号風車はこの年の 4 月に供用開始され約 5 箇月の系統連係試験の後、9 月より本格運転に入っているが、同 10 月には上記好風況に恵まれたため、早期月発電量 111 900 kWh、設備利用率 60.2% と正に驚異的な成績を取っている。図 6 に同 10 月の日別平均風速と発電電力量の推移を示す。図 6 より日発電電力量は日平

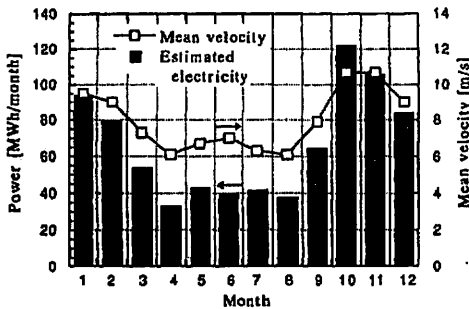


図 5 月別平均風速と推定発電量

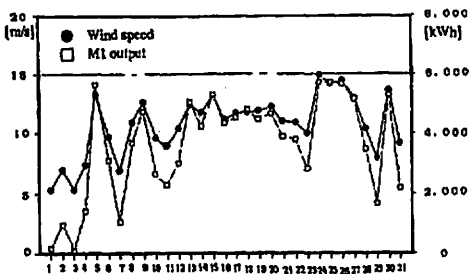


図 6 M1 号機風車の日ごと発電量 (1992, 10)

均風速の増減によく対応しその振幅を増して増減することがわかる。特にこの月の中旬から下旬にかけて日平均風速 10 m/s 以上の日が連続しているがこれは沖縄でミーニシ (新北風) とよばれる季節風によるものである。10 月 24 日には日発電電力量 5 730 kWh すなわち設備利用率 95.5% を記録した。

表 2 に 1992 年 10 月より 1993 年 9 月の間の M1 号機発電実績を示す。表 2 より同機の 92 年度下半期、93 年度上半期および合計発電量はそれぞれ 445 440、193 560 および 639 000 kWh となり、年間設備利用率は 29.2% となることがわかった。欧米諸国の風力発電機の実績によれば、年間設備利用率 20% が一応の評価基準となっており西平安名岬風車はこれを優に上回った。ちなみに同形風車 5 機が設置されている青森県竜飛 (たつひ) 岬の資料⁷⁾は、同岬の年間平均風速が 9.8 m/s ときわめて高いにもかかわらず設備利用率を 19.1% (1992 年) と報告している。また沖縄電力 (株) は本結果に基づき M1 号機の発電原価を 43.94 円/kWh と計算した。

4. ウィンドファームの出力変動特性とそれが電力系統に及ぼす影響

前述のように西平安名岬では 93 年 4 月以来 250 kW 風力発電機 2 機が系統連係運転を継続している。2 機の出力合計 500 kW は宮古島の既設ディーゼル発電設備容量 45 400 kW の約 1% に当たり、その出力変動が系統電力にどのような影響を及ぼすのか興味もたれている。

図 7 に今年 3 月 10 日に現地計測で得られた M1 号機と 2 号機の出力およびナセル上風速の変動をそれぞれ

表 2 M1 号機風車の発電実績

Month	Electricity kWh	Capacity factor %	Wind speed m/s
1992.10	111,920	60.2	10.7
11	98,510	54.7	10.7
12	65,070	35.0	9.0
1993. 1	85,740	46.1	9.3
2	37,780	22.5	8.2
3	46,420	25.0	7.8
Sub total	445,440	40.8	9.3
1993. 4	47,950	26.6	7.6
5	26,660	14.3	5.8
6	46,350	25.8	7.4
7	16,870	9.1	5.7
8	34,040	18.3	6.0
9	21,690	12.1	6.4
Sub total	193,560	17.6	6.5
Total	639,000	29.2	7.9
Miyako total	159,781,000	-----	-----
Ratio of M1	0.4	-----	-----

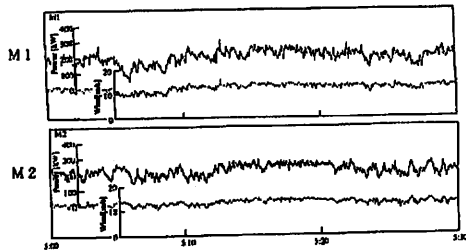
れ示す。図7(a)の5:00-5:30間の測定例は風速が10~13m/sの範囲で変動したため風車出力が定格以下の150kWから250kWの範囲で大きく変動する場合、図7(b)は9:00-9:30間の測定例で風速が15m/s前後で変動し、風車出力がほぼ定格出力250kW前後で比較的に安定している場合を示している。次に図8に、両風車の出力を1sごとにサンプリングして合計した場合の変動曲線を示す。図7と図8を比較することによって風力発電機2機の合計出力の変動率は、1機の場合に比べて明らかに減衰していることがわかる。

図9に、それをさらに解析的に確かめるために作成した、風力発電機出力変動のパワースペクトルを示す。図9中実線が1号機風車のパワースペクトル密度

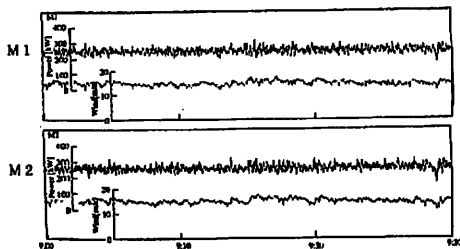
分布であり破線が1、2号機合計出力のそれである。図9より破線はつねに実線の下方に存在し、実線のおおよそ1/2程度に減衰しているといえる。

表3は、各データ1800点(30min)ずつの統計処理によって得られた、風力発電機の30min平均出力と変動の標準偏差である。これにより2機合計風力発電機の標準偏差(率)は定格以下運転時13.3%、定格運転時3.1%となり、M1号機単独運転の変動率に対して、それぞれ0.739と0.756へ減衰することがわかった。複数台風車の出力変動はもし各風車の変動が互いに独立であれば n 台風車の変動率は $1/\sqrt{n}$ に減衰すると推定され、かつそれを支持するデータがアメリカにおいて報告されている⁽⁴⁾。今回の解析も、理論減衰率($1/\sqrt{2}=0.707$)にこそ達しないがほぼそれにちかひことがわかった。

次に図10に1994年3月10日3:00より翌11日3:00に至る宮古島の全系統電力需要の推移と周波数および発電所端電圧の変動を示す。図10より当日の電力需要は深夜の約11000kWの最低電力から午後7時台の23500kWの最高電力の範囲(発電所設備利用

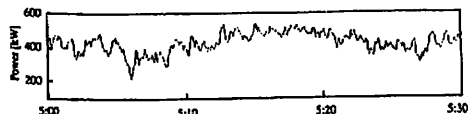


(a) 風車が定格出力以下で発電している場合

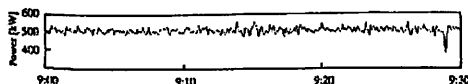


(b) 風車が定格出力で発電している場合

図7 風車出力と風速の変動(1994.3.10)



(a) 両風車が定格出力以下で発電している場合

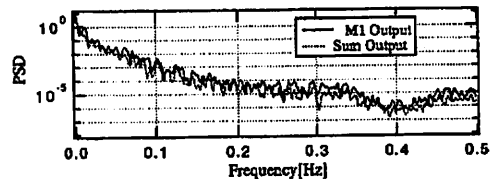


(b) 両風車が定格出力で発電している場合

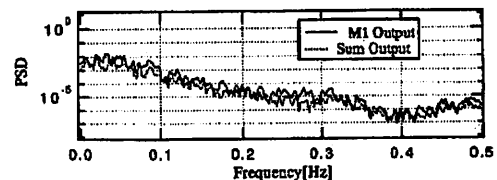
図8 風力発電機2機の合計出力変動

表3 風力発電機の出力変動

	Under rated power		At rated power	
	Mean[kW]	Deviation[kW]	Mean[kW]	Deviation[kW]
M1	206.42	37.10(0.180)	251.51	10.43(0.041)
M2	218.17	29.50(0.135)	254.68	10.72(0.042)
M1+M2	424.59	56.45(0.133)	506.19	15.92(0.031)
Damping	(to M1) (to M2)	0.739 0.985	(to M1) (to M2)	0.756 0.738



(a) 風車が定格出力以下で発電している場合



(b) 風車が定格出力で発電している場合

図9 風力発電機出力変動のパワースペクトル

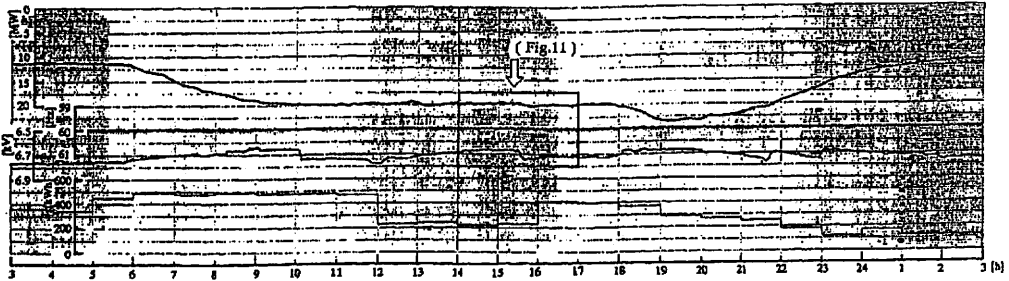


図 10 宮古島全系統の負荷電力、周波数および発電所端電圧の変化(1994, 3, 10-11)
(下段に風力発電機 2 機の時間平均出力を記入)

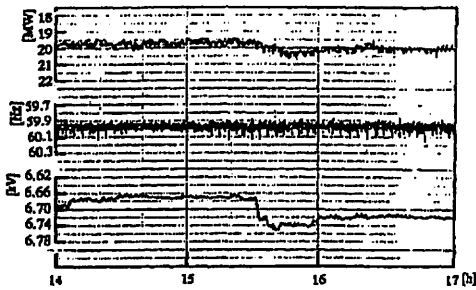


図 11 負荷電力、周波数および電圧変動の詳細

率 0.242~0.518)で変化している。また図 11 に、図 10 と同じグラフより 15:00 前後の詳細変動曲線を示す。図 11 より電力変動の幅は約 500 kW すなわち平均値を中心に約 ± 250 kW の範囲で変動することがわかる。周波数変動には奇妙なひげ状の突起がみられるが、これは周波数変換器のノイズと思われるので、これを無視するとほぼ 60 ± 0.05 Hz の範囲で変動している。発電所端電圧は 6 650~6 750 V の範囲で階段状に変化するが、刻々の変動は数 V の振幅で十分に小さい、階段状の電圧変化は小形ディーゼル発電機の台数制御によると思われる。

図 10 の下方で階段状に変化しているのは、当日運転中の 250 kW 機 2 機の時間平均出力を示したものである。風車出力は風速の増減によって変動するが、図 11 中 12:00~16:00 にみられる出力減少は、当日試験的に M1 号機または M2 号機をシャットダウンさせたことによる。風車出力が増加すれば、発電所側はそれを電力需要の減とみなして供給電力を減少させるように制御される。ただし、図 11 より明らかなように、風力発電機の出力変動はシャットダウン変動も含めてたかだか 250 kW の範囲であり、宮古島系統の電力需要変動の範囲に収まっているということができ

表 4 集合形風力発電機システムの出力変動予測

Capacity of Wind farm	Machine					
	500kW		250kW		100kW	
	$\times 1$	± 100 kW	$\times 1$	± 50 kW	$\times 1$	± 20 kW
5,000kW	10	316	20	224	50	141
10,000kW	20	447	40	316	100	200
20,000kW	40	632	80	447	200	283

る。すなわち、図 10 でみる限り、10 000~20 000 kW クラス系統電力に対し、ディーゼル発電システムに系統連係された 500 kW クラス風力発電システム(最大浸透率 5%)の出力変動は、系統の固有変動に対しほとんど影響を与えないといえる。

5. 今後の浸透可能性について

NEDO と沖縄電力は、今後西平名安岬ウィンドファームを 1 000 kW にまで増設する計画である。また、宮古島における各種の計画は、例えば農業用かんがい用水供給事業のように、それによって増大する電力需要に対し、風力発電等自然エネルギー発電に対する期待がかなり高いといえることができる。そこで、これまでの計画値をもとに今後ウィンドファームが増設された場合の出力変動を予測することを試みた。

試算結果を表 4 に示す。表 4 はウィンドファームの合計容量を 5 000, 10 000 kW および 20 000 kW とし、風力発電機の単機容量を 500, 250 kW および 100 kW の場合にわけて計算した。その際各単機風車の出力変動振幅を定格出力のそれぞれ 20% とかなり高めに設定し、風車台数 n によって合計出力変動の標準偏差が $1/\sqrt{n}$ に減衰するとしたものである。その結果、表 4 より明らかなように、10 000 kW ウィンドファームを建設した場合、250 kW 機 40 機の出力変動は ± 316 kW で図 11 で観察した宮古島の系統需要変動 ± 250 kW

とほぼ同程度であることがわかった。同規模容量を500 kW 機 20 機で構成すると±447 kW でかなり問題になると思われるが、100 kW 機 100 機で構成するとその変動は±200 kW にまで減衰し、まったく問題はないと予想することができる。

表4によって、宮古島のウィンドファーム容量を20 000 kW にまで増設した場合でも出力変動を±500 kW 程度以下に抑えることは十分可能であることがわかった。ただし、図10でみたように、宮古島系統の冬期深夜電力の需要は10 000 kW 程度であり、これを超えるウィンドファームの容量は、良風況時に文字どおり過剰設備投資になるといわざるを得ない。農業用電力等深夜電力需要の開拓は、別途考慮すべき課題である。

なお、著者らは宮古島におけるウィンドファーム建設の立地可能性についても並行して検討している。例えば西平名安岬のウィンドファームは長さ約600 m の直列状に風車8台を設置し、合計約1 000 kW の発電システムとなる予定である。同様に、宮古島を北西から南東にかけて脈理状に走る尾根すじおよび北東側海岸線に直列状に1 000 kW/km のウィンドファームを建設することは十分可能であろう。ちなみに西平名安岬から東平名安岬に至る北東側海岸線のみでも直線距離で30 km あり、優に30 000 kW のシステムの立地は可能といえる。

結論として、現状の宮古島電力系統において浸透率20%、10 000 kW クラスのウィンドファームを建設することは技術的に十分許容されることがわかった。ただし、今後増設される風車群に対してその変動特性等を常時計測し、さらに詳細な解析を行うことは今後の課題である。

本研究のために貴重な資料を提供くださったNEDOと沖縄電力(株)に厚くお礼申し上げる。本研究の一部は93年度科学研究費(一般B)によって補助された。また本稿をまとめるに当たり喜納芳洋君と仲嵩貴君に手伝ってもらった。記して謝意を表する。

文 献

- (1) NEF News, 1-3(1994-1), 2, 新エネルギー財団.
- (2) 大型風力発電システムの開発(風況観測)付属資料(全国風況マップ), (1993-3), 千代田アイムズ・アンド・ムーブ; 朝日新聞, (1993-8-30).
- (3) 清水, 第15回風力エネルギー利用シンポジウム, (1993-11), 77, 日本風力エネルギー協会.
- (4) NEDOニューサンシャイン計画成果報告書, 集約型風力発電システムの制御技術の開発, (1994-3), 沖縄電力(株).
- (5) New Energy, パンフレット, (1991-10), 沖縄電力(株).
- (6) 永井, 風力エネルギー, 15-2(1991-2), 32.
- (7) 土屋, 第15回風力エネルギー利用シンポジウム, (1993-11), 54, 日本風力エネルギー協会.
- (8) McNerney, G. and Richardson, R., *IEEE/PES WM*, (1992-1), 1.