

# 風力発電による地球温暖化対策

牛山 泉

地球環境問題の顕在化に伴って風力や太陽光などの再生可能エネルギーの導入が活発化しており、特に、現在の世界の風力発電の総容量は5,000万kW(原発50基分)、わが国のそれも100万kWに達している。さらに、ヨーロッパを中心に2020年までに世界の電力の12%を風力発電で賄うという壮大なプログラムも展開されており、これにより大幅なCO<sub>2</sub>削減が見込まれることになる。また、ヨーロッパでは洋上風力発電の設置も始まっており、海洋国のわが国においても、その将来が期待されている。

キーワード：大気温暖化、CO<sub>2</sub>削減、再生可能エネルギー、風力発電、洋上風力発電、環境影響評価

## 1. はじめに

温暖化などの地球環境問題がますます顕在化しつつある中で、再生可能エネルギーが国内外で注目されているが、特に風力発電の導入は急進展をみせている。2005年2月には京都議定書が発効し、2005年末には日本版RPS法(新エネルギー等特別措置法)の実効性を高めるための見直しが行われている。

しかし、急速に進行しつつある地球温暖化の速やかな抑制と、石油資源が停滞期から衰退期を迎えようとしている事態を考えると、環境負荷の小さな風力発電など再生可能エネルギーの導入拡大は最優先事項である。しかし、最近ではわが国の大型風車の90%以上を占める海外機の強風や雷による被害もいくつか報告されており、環境影響についての検討もなされつつある。

ここでは、国内外の風力発電の現状と地球温暖化防止を含めた風力発電の環境影響評価、技術的課題さらには将来展望などを明らかにする。

## 2. 国内外の風力発電システムの導入状況

世界の風力発電の総設備容量は2005年9月には5,000万kWを超えている(図-1)。

特にデンマークは電力需要の20%を風力発電でまかなっており、ドイツやスペインでも風力発電の寄与率は高く、ほぼ6%に達している。また、EWEC(ヨーロッパ風力エネルギー協会)は2002年に

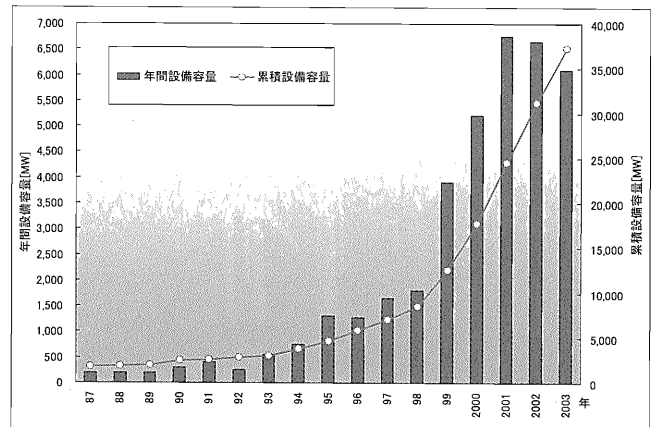


図-1 世界の風力発電導入量

“Wind Force 12”を発表したが、これは2020年までに世界の電力の12%を風力発電で賄うという大目標である。

なお、世界の電力消費量は2020年でも25,578TWh/年であるのに対し、世界の利用可能な風力資源

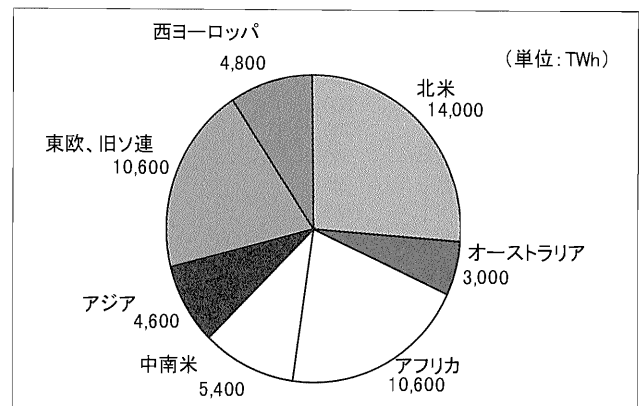


図-2 世界の風力資源総量 (53,000 TWh)

の総量はその2倍の53,000 TWh/年と見積もられている(図-2)。

わが国においても、これまで政府・NEDO(独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)による導入促進策や電力事業者による風力電力の優遇買上げ自主メニューの設定など、いくつかの効果的な施策が講じられて、1990年代の中期以降、風力発電の導入量は急増した。2005年9月現在、大型風車1,000本が設置され、総設備容量は100万kWに達している。

写真-1に愛媛県伊方町の三菱重工業製1,000kW風車11基からなるウィンドファームを示す。また、富士重工業においても航空機製造の技術的蓄積を活かして、ダウンウィンド方式の2,000kW風力発電機を

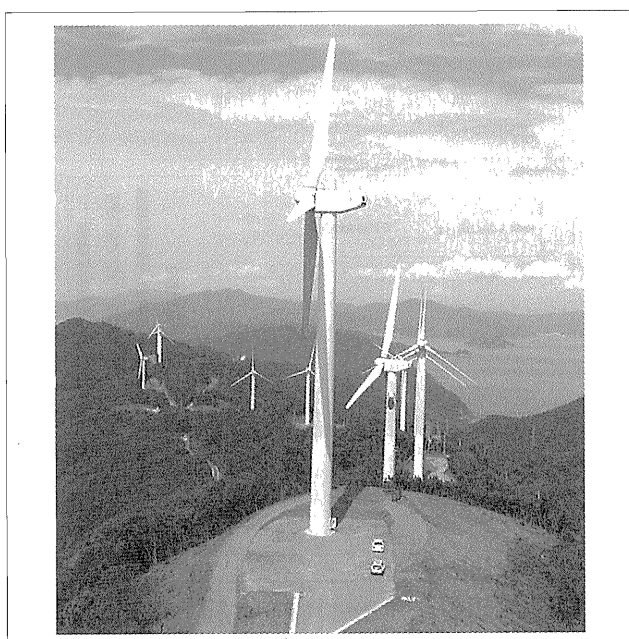


写真-1 三菱重工業1,000kW風車(愛媛県伊方町)

開発した。

しかしながら、わが国に設置されている風力発電システムの運転実績は必ずしも満足すべきものではない。表-1に示すようにNEDOの補助金を受けて設置したフィールドテスト事業者サイトの運転実績は、平均設備利用率で17%程度にすぎず、今後はこの利用率をいかに向上させるかが重要な課題となる。また、これらNEDOフィールドテスト事業者の風力発電システムにおける部位別故障および異常の発生頻度を図-3に示すが、制御系と主回路がきわだっている。NEDOにおいては、これらの課題を解決するため、利用率向上の取組みが行われている。

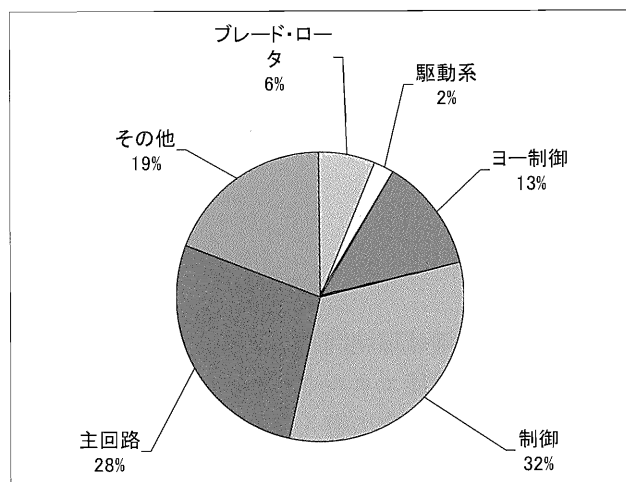


図-3 風力発電 (FT 事業者) の部位別故障・異常発生頻度

### 3. 風力発電の技術トレンド<sup>1)</sup>

風力発電の国内外における技術開発は、最近の10年間で驚くべき進歩を見せている。一番顕著なのが風

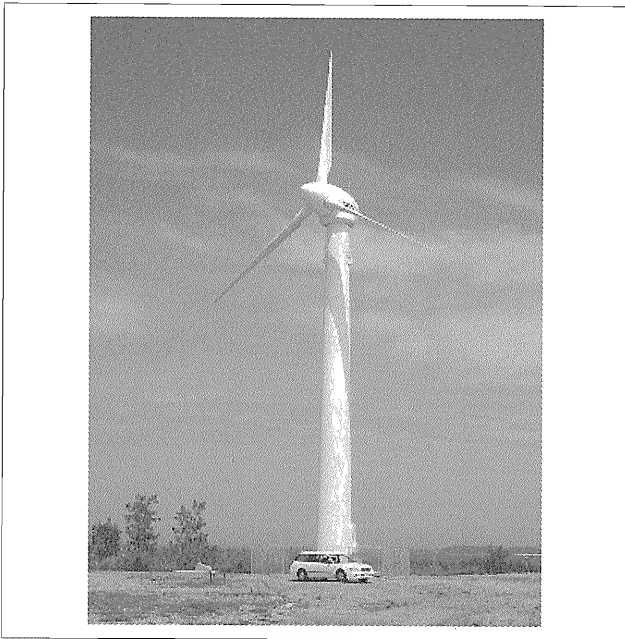
表-1 風力 FT 事業者サイトの運転実績

サイト	風車規模 (kW/基)	年平均風速 (m/s)	発電量 (kWh/基)	停止頻度 (kWh/基)	停止時間 (hr/基)	設備利用率 (%)		稼働率 (%)		
						a	b	a	b	
東三稚神小深群能百五北北浜え外串平	稲浦内ノ国東井浦馬生川和方谷中りも海間	490 400 225 500 230 300 730 300 225 600 300 750 490 600 400 600 250	4.5 5.0 6.7 6.9 4.3 4.3 7.1 4.2 4.1 4.7 4.6 4.9 4.5 5.8 6.4 5.3 4.8	485,198 519,017 518,450 1,566,138 340,201 306,134 1,472,932 288,176 277,359 702,776 319,694 770,182 473,955 1,034,095 744,440 902,125 248,588	1 0 2 7 6 0 4 2 2 2 3 1 10 4 0 0 0	360.0 0.0 264.0 120.0 480.0 0.0 1,632.0 48.0 336.0 48.0 120.0 1,896.0 507.6 44.4 0.0 0.0 0.0	11.3 14.8 26.3 35.8 16.9 11.6 23.0 11.0 14.1 13.4 12.2 11.7 11.0 19.7 21.2 17.2 11.4	11.8 14.8 27.1 36.3 17.9 11.6 28.3 11.0 14.6 13.4 12.3 15.0 11.7 19.8 21.2 17.2 11.4	47.3 82.4 78.8 80.0 76.5 63.4 72.5 61.9 40.0 86.2 66.3 64.6 97.9 84.0 69.9 70.9 78.1	49.3 82.4 81.2 84.2 80.9 63.4 89.1 62.2 41.6 86.7 67.2 82.4 100.0 84.4 69.9 70.9 78.1
平均	434.7	5.2	645,262	2.6	344.5	16.6	17.4	67.6	74.9	

車の大型化で、最近の風力発電装置の平均出力は1 MWを超えている。また、これら大型風車のブレードもかつてのような航空機用翼型の転用から運用風速域でのレイノルズ数を考慮して厚翼の風車専用翼型が採用されるようになった。そして、出力制御方式も、固定ピッチの失速制御方式から、ピッチ制御方式が主流になりつつある。

さらに、発電機も従来の誘導電動機を電力系統に接続する定回転のものから、発電機と電力系統をインバータシステムを介して接続し、風速の広い範囲にわたって高効率を維持できる可変速回転とするものが増えている。この場合に、風車と発電機の間増速歯車を介在させず、風車と多極の発電機を直結するダイレクトドライブ方式が多くなりつつある。

また、大型風車を設置できない山岳丘陵地や離島などに適した、10 kW から 100 kW クラスの高性能風車の開発はわが国の得意芸である（写真—2）。



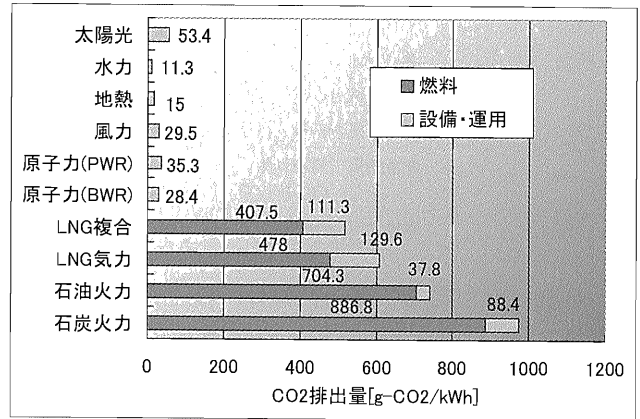
写真—2 NEDO/富士重工の100 kW 風車

2010年までに300万kWの目標を実現し、さらに21世紀中盤までを念頭に置いた風力開発と導入を実現するためには、基本的な設計コンセプトの異なる欧州からの輸入機では不可能である。欧州型から脱却した日本の風況、立地条件に合致した輸送、建設が容易で信頼性と耐久性の高い日本型の風力発電装置の技術開発を国家プロジェクトとして促進することが必要である。

#### 4. 温暖化防止と風力発電

従来の火力発電に比べて、風力発電など再生可能エ

ネルギーによる発電システムの環境負荷、特に二酸化炭素排出量の小さなことは良く知られているが、各種発電システムの二酸化炭素排出量を比較したものが、図—4である。



図—4 各種発電システムの二酸化炭素排出量

これより明らかなように風力発電など再生可能エネルギーは設備・運用にわずかな二酸化炭素を発生するのみで、火力発電のように化石燃料による二酸化炭素の発生がまったくないのが特徴である。一方、原子力発電は発電時の二酸化炭素こそないものの、廃棄物の長期保管について冷却時の二酸化炭素の発生があり、放射性廃棄物の排出は二酸化炭素とは次元の異なる桁違いに大きな環境負荷因子である。

また、政府の目標値である2010年に風力発電300万kWを導入した場合の二酸化炭素排出削減量を試算したのが表—2である。ここでは、600kW風車を年平均6m/sの場所に設置した場合に、年間発電量を1,090MWhと仮定している。

表—2 二酸化炭素削減量の試算

風力発電システム導入目標	代替される火力発電(2010年度目標比率)	風力発電による抑制量(百万kWh/年)	CO <sub>2</sub> 削減原単価(g-CO <sub>2</sub> /kWh)	CO <sub>2</sub> 排出削減量(千t-CO <sub>2</sub> /年)
300万kW(2010年度目標)	石炭(25%)	1,362.5	945.7	1,289
	石油(32%)	1,744.0	712.6	1,243
	LNG(43%)	2,343.5	533.7	1,251
	合計(100%)	5,450.0	—	3,782

新エネルギー財団の風力委員会（委員長：牛山泉足利工業大学教授）では2002年度から2003年度にかけて、日本における風力発電の長期目標の検討を行った<sup>2)</sup>。これにより日本における風力発電産業を創生するための道筋を示すことができました。ここでは陸上ばかりでなく洋上も含めた導入目標を設定し、各段階での市場規模、経済性（設置コスト、発電コスト）、技術開発課題、風力発電関連産業規模などについて明らかにしている。

表—3 わが国の風力発電導入長期目標

	2010年	2020年	2030年
導入目標	350万kW	1,000万kW	3,000万kW
（陸上設置）	300万kW	700万kW	2,000万kW
（洋上設置）	50万kW	300万kW	1,000万kW
市場規模	700億円/年 （15万円/kWとして）	1,100億円/年 （12万円/kWとして）	3,200億円/年 （10万円/kWとして）
電力規模	20,200万kW	23,700万kW	27,700万kW
日本の風力の電力需要寄与率	0.6%	1.7%	5.1%
世界の風力の電力需要寄与率	5.6%	12%	18.5%
環境効果	環境効果 CO <sub>2</sub> 排出量	156万kL削減 413万トンCO <sub>2</sub>	446万kL削減 1,190万トンCO <sub>2</sub>
雇用効果	2.5万人	7.1万人	20万トン

わが国の風力発電の導入目標は、陸上に関しては政府の2010年までに300万kWが明確になっているが、これはあくまで通過目標であって長期目標とはいえない。また、これには洋上風力は含まれていない。

さらに、国際的な長期目標である「Wind Force 12」に歩調を合わせると、わが国の果たすべき役割は、表—3に示すように、2020年において1,000万kW、2030年には3,000万kW程度の導入が必要になる。これにより二酸化炭素の大幅な減少がもたらされ、新たな雇用も創出されることになるわけである。

## 5. 風力発電の環境影響評価

近年、風力発電の導入が拡大する一方で、景観問題や生態系への影響、特に鳥類の飛行への悪影響などが指摘されつつあるが、国内においてはもちろんのこと、海外においても十分な調査が行われていないのが実情である。

これまでに、スペインやカリフォルニアでの鳥類が風車のブレードに接触するいわゆるバードストライク事故の報告がなされているが、これらは風車の設置に際して十分な検討がなされれば避けられたものである<sup>3)</sup>。このためには、風車を設置する側と国や自治体との間の十分な調査結果に基づくデータの共有が必要であり、風力発電の環境影響評価に関するガイドラインも検討する必要がある。

わが国においては、2003年度に国立・国定公園などにおける風力発電設置に関する検討委員会が設置されたが、当然のことながら景観や生態系への影響を最小限にしなければならない。

景観に関しては、わが国古来の美意識としての「借景」「添景」「修景」という概念を再確認する必要がある。自然環境に人工物を設置することによる負の効果でなく、景観を引立てるプラスの効果を考えるわけである。明らかに景観が損なわれる場合には設置を見

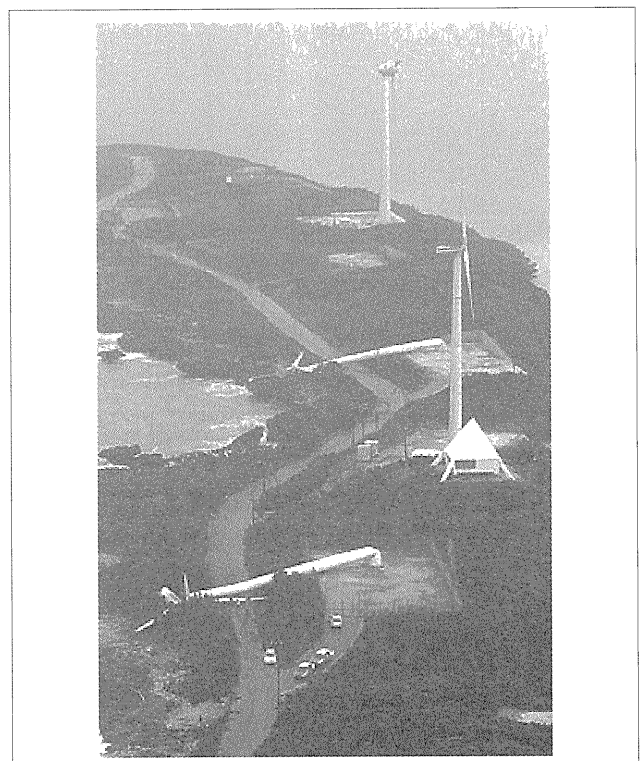
合わせることは当然である。

また、生態系に関しては地域ごとの専門家の協力、助言を得られるようなシステムを設けることが必要であり、開発側と地域との情報の共有、合意の形成が不可欠といえよう。

## 6. 風力発電の将来展望と課題

ここで、風力発電導入拡大における最大の課題は、風力適地における電力系統の強化である。これは風況条件や立地環境条件のよい風力発電建設適地が連系可能な電力系統から離れた遠隔地にある場合が多いため、強力な系統の新設や既存系統の増設など電力品質維持の対策が必要になるためである。

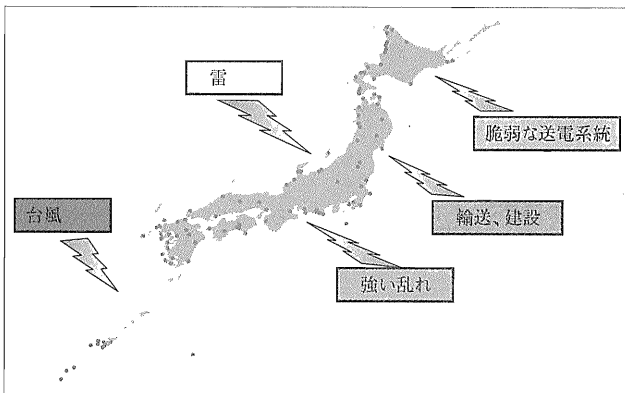
また、適切な賦存量の評価と適地の明確化のための、



写真—3 宮古島風14号被害

わが国固有の複雑地形にも適用しうる風況解析ソフトウェアの開発が不可欠である。一方、わが国はモンスーン地帯に位置することから台風や春一番などの強風に対する対策も不可欠である。2003年9月上旬には宮古島において複数台の風車倒壊事故が起きている（写真—3）。

そのうえ、山岳丘陵地が多く、風の乱れの多いわが国の風況下では、風車ブレードに常に動的変動荷重が加わりブレードの寿命や電力品質に悪影響を及ぼすことになる。また、日本海側の冬季雷など風力発電システムの雷撃被害も目立っている。したがって、わが国の風況や国状に適合する独自の風力開発のための研究、試験センターの設置も不可欠である。ここで図—5に、わが国の地形、気象条件に起因する特有の環境条件を示す。



図—5 風力発電における日本特有の環境条件

これらの状況を踏まえて、2004年3月の新エネルギー産業会議において、風力発電システムの導入促進に関する提言が行われている。その内容は下記の5項目である。

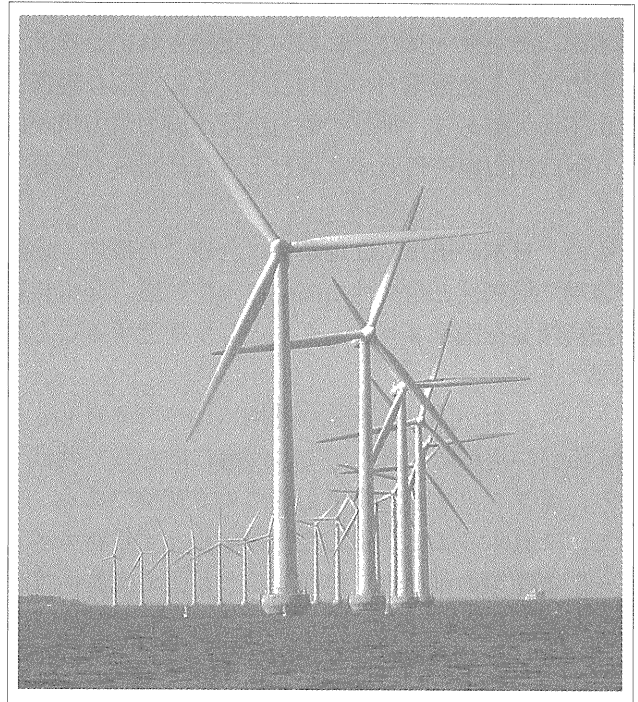
- ・提言1：風力発電の長期ビジョンの策定
- ・提言2：風力発電施設建設・運用に係わる規制緩和
- ・提言3：公園地域内における風力発電施設設置に係わる規制緩和
- ・提言4：日本の国土、風況に合った風力発電設備の研究開発
- ・提言5：オフショア（洋上）風力の研究開発

これらのうち、特に提言4の日本型風力発電設備の研究開発は2004年度以降NEDOにおいて、既に取り組みがスタートしている。

## 7. オフショア（洋上）風力発電

欧州では多数の洋上風力発電プロジェクトが展開さ

れており、写真—4はデンマークのコペンハーゲン沖に設置されたミドルグルンデン洋上ウィンドファームである。今後、日本でも海岸線の総延長33,000km、経済水域は世界6位という地理的条件を活かした、風況の良い洋上での風力発電が期待できる。



写真—4 デンマーク・ミドルグルンデン洋上風車群

わが国における洋上風力発電に関わる賦存量については、複数の研究がなされている。筆者らの、算定条件として沿岸から沖合い方向に1km離れた海域を対象として、500kW風力発電機の設置を想定したものでは936~2,550億kWh/年の範囲にあり<sup>4)</sup>、2,000kW風力発電機の設置を想定した場合には、1,342~4,027億kWh/年と大きな値になっている。一方、藤井による賦存量の推定値は、2,550~7,650億kWh/年と大きくなっている<sup>5)</sup>。さらに、HendersonおよびLeutzは7,080億kWh/年としている<sup>6)</sup>。賦存量の推計値が研究者により異なるのは推計の前提が異なることによるものであるが、推計値の小さな値（1,342億kWh/年）を基準としても、NEDOの風況マップに基づく陸上の風力発電賦存量（341億kWh/年：シナリオ2の10D×3Dのケース）の約3.93倍という大きな潜在賦存量を有し、洋上風力発電のポテンシャルのきわめて大きいことがわかる。

しかし、洋上風力発電が事業として成立するためには、経済面、社会条件面、自然環境面など多くの課題があることも確かであり、本格導入に向けた準備として実証試験設備の設置と、洋上に特化した超大型風車の開発や深海域用の浮遊式洋上風車などの技術開発が

必要となる。

## 8. おわりに

2010年までに300万kWという国家目標を実現し、さらに拡大するには、実績のあるドイツをはじめ、スペイン、デンマークなどにおいて実施されているような風力による発電電力の電力会社による買取り義務付けが不可欠であり、併せて電力会社が風力電力購入により財政的負担を負わずに済むような仕組みも必要である。

また、日本の風況、立地条件に合致した輸送、建設が容易で信頼性と耐久性の高い日本型の風力発電装置の技術開発を国家プロジェクトとして促進することが必要である。

さらに、わが国には狭隘な陸地に比べて3万kmを超える長い海岸線があり、これが海に向かって開けており、オフショア風力発電もきわめて有望である。そして、これらのことが風力発電を中心とする新エネルギー関連産業の創出と、停滞するわが国の産業活性化につながるようになる。

こうして、風力発電の導入促進は、温暖化など環境

問題の解決、エネルギーセキュリティの確保、新産業創設による雇用の促進にもつながることになる。

JCMA

### 《参考文献》

- 1) 牛山 泉：風車工学入門，森北出版，2002年
- 2) 牛山 泉：風力発電システムの導入促進に関する提言，第2回風力エネルギー利用総合セミナー，2002年6月，足利工業大学総合研究センター
- 3) 鮎川ゆりか：風力発電と鳥—海外の報告事例に見る—，風力エネルギー，Vol. 27, No. 2, 2003
- 4) 長井 浩・牛山 泉：日本におけるオフショア風力発電の可能性，風力エネルギー，Vol. 22, No. 1, 1998
- 5) 藤井朋樹：An Estimation of the Potential of Offshore Wind Power in Japan by Satellite Data，日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会，Nov., 1999
- 6) R. Leutz, T. Ackermann, A. Suzuki and T. Kashiwagi, Offshore Wind Energy Potentials of Japan and South Korea, ISOPE 2002

### 〔筆者紹介〕

牛山 泉（うしやま いずみ）  
足利工業大学大学院  
工学研究科  
足利工業大学総合研究センター（兼任）  
教授  
工博



## 絵で見る安全マニュアル 〈建築工事編〉

本書は実際に発生した事故例を専門のマンガ家により、わかりやすく表現しています。新入社員の安全教育テキストとしてご活用下さい。

### ■要因と正しい作業例

- |          |        |         |
|----------|--------|---------|
| ・物動式クレーン | ・電動工具  | ・油圧ショベル |
| ・基礎工用機械  | ・高所作業車 | ・貨物自動車  |

A5判 70頁 定価650円（消費税込） 送料270円

## 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館） Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289