

学位論文  
博士（工学）

令和6年度

風力発電機の形状決定における設計と  
デザインの融合に関する研究

永尾 徹

## 目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 成長する風力発電	1
1.1.2 風力導入に関する国内の動き	4
1.1.3 風力発電機の視覚性	7
1.2 研究の目的	8
1.2.1 必要性	8
1.2.2 従来の研究	8
1.3 本論文の構成	13
1.4 第1章まとめ	14
第2章 風力発電機の形状に関する決定要素	16
2.1 風車形式	16
2.2 現代の風力発電機の視覚的印象の決定要素	17
2.3 視覚的印象に影響を与える部位と決定要件	18
2.3.1 全体の大きさ	18
2.3.2 ロータ	18
2.3.3 発電機と動力伝達システム	21
2.3.4 タワー	22
2.3.5 ナセル	23
2.4 第2章まとめ	24
第3章 環境と設計条件	25
3.1 日本の南西諸島の風力エネルギー資源	25
3.2 世界の熱帯低気圧と風力発電	26
3.3 インドのサイクロンによる風力発電の大規模災害	26
3.3.1 被災したウィンドファーム	27
3.3.2 サイクロンの軌跡と風速	27
3.3.3 被害状況	28
3.3.4 観測された破壊状況	30
3.3.5 残存性分析	30
3.3.6 原因	31
3.4 宮古島の台風による風力発電災害	31

3.4.1	台風の概要と軌跡	32
3.4.2	風力発電の被害	33
3.4.3	風速	34
3.5	風車の強度	34
3.5.1	風車の強度クラス	34
3.5.2	地域	36
3.5.3	風速	36
3.4.4	耐風速設計	37
3.6	第3章まとめ	37
第4章	風力発電機開発と形状の決定（技術的アプローチ）	39
4.1	NEDO 離島用風力発電システム技術開発	39
4.2	技術開発の経緯	37
4.2.1	開発の工程	40
4.3	開発要求 (No.11)	41
4.3.1	離島における風力発電の課題	41
4.3.2	要求事項	42
4.4	概念設計 (No.12)	42
4.4.1	風車形式と風力発電出力	43
4.4.2	ロータ	44
4.4.3	発電機と動力系統	46
4.4.4	タワー	47
4.4.5	ナセル	48
4.4.6	概念設計における構想図	49
4.5	基本設計 (No.13)	49
4.5.1	全体レイアウト	50
4.5.2	ナセルへのアクセス	51
4.5.3	技術審査会における指摘	52
4.6	詳細設計 (No.14)	52
4.7	第4章まとめ	54
第5章	風力発電機開発と形状の決定（視覚的アプローチ）	55
5.1	デザインの担当会社	55
5.2	初期のデザインの位置付け	55
5.3	デザインの意味と目的	56
5.4	デザインの方向	57

5.5	先行開発	58
5.6	離島用風力発電のデザイン	60
5.7	第5章まとめ	63
第6章	技術とデザインの融合	64
6.1	デザインと設計間の問題	64
6.2	技術とデザインの評価基準の違い	65
6.2.1	技術的に優れた形状	65
6.2.2	デザインの的に優れた形状	65
6.3	境界問題の融合と解決	66
6.3.1	問題の原因	66
6.3.2	対応策	66
6.4	完成形	67
6.5	デザインの継承と発展	69
6.5.1	100kW 中型風力発電システム(SUBARU22/100)	69
6.5.2	40kW 小型風力発電システム(SUBARU 15/40)	70
6.5.3	2MW ダウンウインド大型風力発電システム(SUBARU 80/2.0)	70
6.6	第6章まとめ	75
第7章	風力発電機に対する視認者の印象	77
7.1	背景と研究概要	77
7.2	ナセル	77
7.2.1	ナセルの基本形状	77
7.2.2	実際のナセル形状と分類	78
7.3	ナセル形状に対する印象調査	80
7.3.1	調査対象者	80
7.3.2	調査手続き	80
7.3.3	調査内容	80
7.3.4	調査票	81
7.3.5	SD 法の適用	84
7.4	分析	85
7.4.1	基礎統計量	85
7.4.2	$\chi^2$ 検定	87
7.4.3	ナセル形状の「好き」「嫌い」の傾向	87
7.4.4	重回帰分析	88
7.4.5	「好き」、「嫌い」に影響を与える因子	90

7.5 第7章まとめ	91
第8章 全体のまとめ	93
8.1 総括	93
8.2 結論	94
8.3 おわりに	95
謝辞	97
参考文献	99

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 成長する風力発電

##### 1) 世界

石炭、石油などの化石エネルギーに依存して発展してきた現代社会は、今日大きな問題に直面している。一つは化石エネルギーの使用によって発生する温室効果ガスによる地球温暖化であり、他方は化石エネルギーの地域的偏在を原因とする社会や経済の不安定化である。このような問題を解決するものとして、再生可能エネルギーの利用が世界規模で進んでいる。

人類の再生可能エネルギーの利用は、バイオマスエネルギーである薪炭による火の利用から始まり、その後技術の進展に従って水力や風力エネルギーの利用が加わり、現代に至って太陽エネルギーの利用に広がってきた。2022年の今日に於いては、世界のエネルギー消費のうち 22.7%は電力が占めている（図 1.1）。

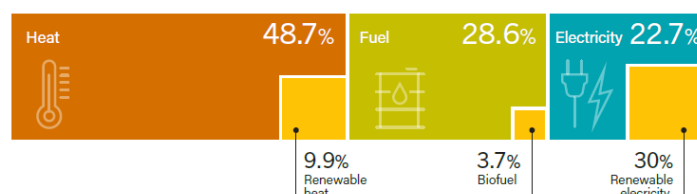


図 1.1 世界のエネルギー消費における再生可能エネルギーの割合<sup>[1.1]</sup>

電力における再生可能エネルギーの割合は 2022 年には 29.9%で、2012 年の 21.3%から 10 年間で 1.4 倍に増加した（図 1.2）。

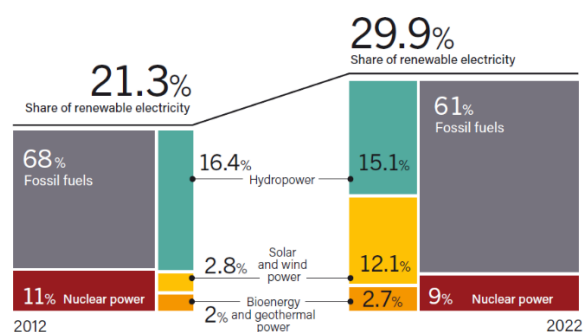


図 1.2 発電におけるエネルギー供給源の変化（2012 から 2022 年）<sup>[1.1]</sup>

このうち再生可能エネルギーの累積設備容量の割合は、水力、太陽光、風力が 95%を占めている。水力は長い間トップの座を占めていたが、太陽光の増加は突出して水力に迫る勢いで増加しており、新規導入量は他を圧倒している（図 1.3）。

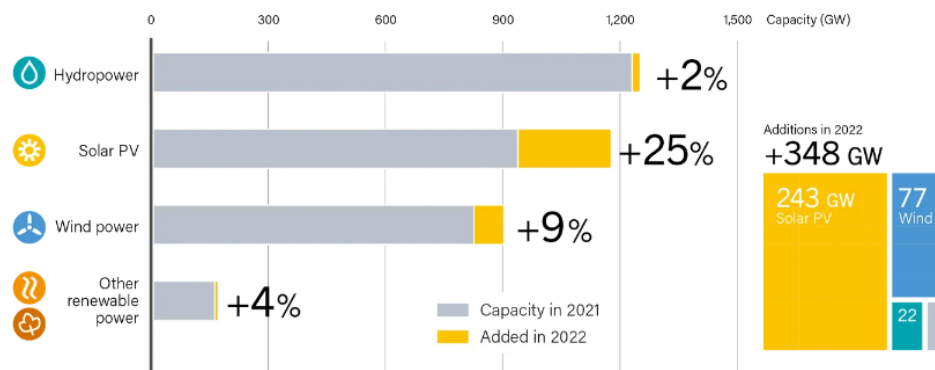


図 1.3 世界の再生可能エネルギー累計設備容量と追加容量（2022 年）<sup>[1.2]</sup>

世界全体の風力発電の累積導入量は 2022 年末で 906GW に達した（図 1.4）。一方運転中の原子力発電の容量は 392GW<sup>[1.3]</sup>（2023 年 8 月時点）であり、風力発電の設備容量は原子力発電の 2.3 倍に達している。

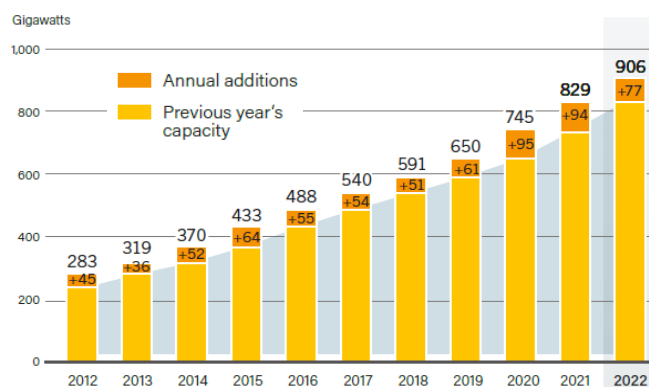


図 1.4 世界の風力発電設備容量（2012 年～2022 年）<sup>[1.1]</sup>

## 2) 日本

日本に目を向けて見ると、発電設備容量に占める再々可能エネルギーの割合は 22.7%，そのうち風力は僅か 0.9%で、太陽光の 9.9%に較べてその一割に

満たず、世界と比較して風力の位置付けの低いことが目立っている（図 1.5）。

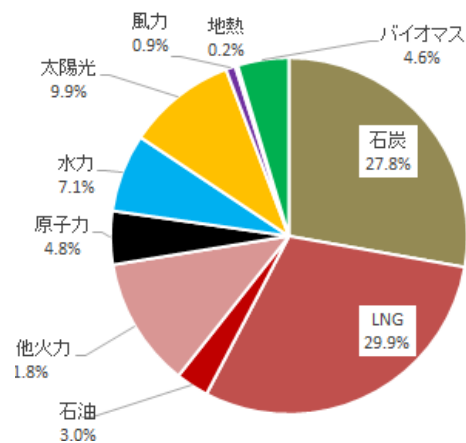


図 1.5 日本全体の電源構成（2022 年）<sup>[1.4]</sup>

環境省が発表した日本の再生可能エネルギーポテンシャル（大型水力を除く）を表 1.1 に示す。これによると、より現実的と考えられる事業性を考慮した導入ポテンシャルは、風力が太陽光のポテンシャルを設備容量、発電量ともに圧倒しており風力の成長の余地は大きい。

表 1.1 日本の再生可能エネルギーポテンシャル<sup>[1.5]</sup>

令和元年度推計結果 (令和元年度再生可能エネルギーに関するソーシング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書)						【参考】総合エネルギー統計 (2020年度速報)※4
再エネ種	区分	導入ポテンシャル※1		事業性を考慮した導入ポテンシャル※2 (シナリオ1（低位）～シナリオ3（高位）)		発電電力量実績  発電量 (億kWh/年)
		設備容量 (万kW)	発電量 (億kWh/年)	設備容量 (万kW)	発電量 (億kWh/年)	
太陽光	住宅用等※3	20,978	2,527	3,815~11,160	471~1,373	(内訳) ・原子力 [388] ・石炭 [3,101] ・天然ガス [3,906] ・石油等 [636] ・水力 [784] ・太陽光 [791] ・風力 [90] ・地熱 [30] ・バイオマス [288]
	公共系等※3	253,617	29,689	17~29,462	2~3,668	
	計	274,595	32,216	3,832~40,622	473~5,041	
陸上風力		28,456	6,859	11,829~16,259	3,509~4,539	
洋上風力		112,022	34,607	17,785~46,025	6,168~15,584	
中小水力		890	537	321~412	174~226	
地熱		1,439	1,006	900~1,137	630~796	
合計		417,402	75,225	34,667~104,455	10,954~26,186	10,013

※1 現在の技術水準で利用可能なエネルギーのうち、種々の制約要因（法規制、土地利用等）を除いたもの。中小水力のみ、既開発発電所分を控除している。  
※2 送電線敷設や道路整備等に係るコストデータ及び売電による収益データを分析に加え、経済的観点から見て導入可能性が低いと認められるエリアを除いたもの。  
低位なシナリオ（FIT価格よりも低い売電価格）～高位なシナリオ（FIT価格程度）に分けて推計している。（シナリオ別導入可能量）  
※3 住宅用等：商業施設、オフィスビル、マンション、戸建住宅等。公共系等：庁舎、学校、公民館、病院、工場、工業団地、最終処分場、河川敷、港湾、公園、農地等  
※4 資源エネルギー庁 総合エネルギー統計 2020年度エネルギー需給実績（速報）



国内における風力発電の累積導入量は 4.8GW、2,622 基の風力発電機が設置（2022 年末時点）されており，この 5 年間の平均新規導入率は前年比プラスで 7.2%増大している（図 1.6）。

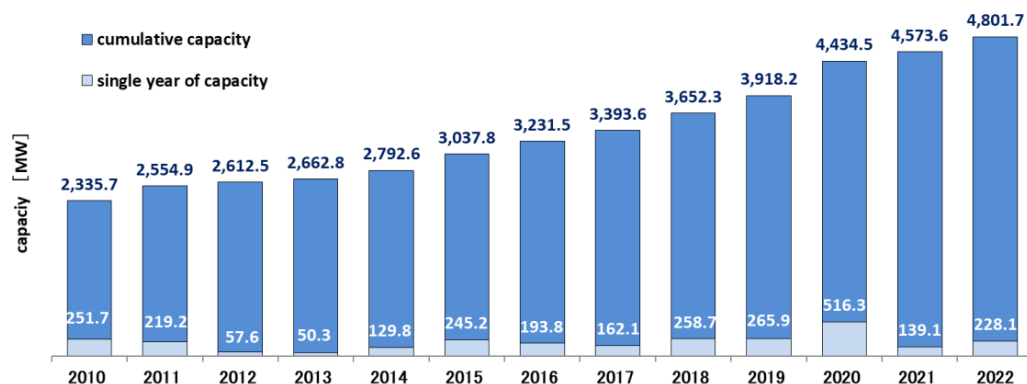


図 1.6 日本の風力発電累積及び新規導入量（暦年）<sup>[1.6]</sup>

### 1.1.2 風力導入に関する国内の動き

政府は 2020 年 10 月，2050 年までに CO<sub>2</sub> をはじめとする温室効果ガス排出の実質ゼロを目指す「2050 年カーボンニュートラル宣言」を発表した．続いて 2021 年 10 月には，「第 6 次エネルギー基本計画」を閣議決定した．その内容は，2030 年時点の再生可能エネルギーの電源構成比率を 36～38%に引き上げること，風力発電については，特に洋上風力発電を「再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札」と位置付けている．今後年間 1GW 程度の区域を 10 年に渡って追加指定し，2030 年までに 10GW，2040 年までに浮体式も含む 30GW～45GW の案件を形成することを目指すとしている．

政府は，今後の主力電源として期待される洋上風力発電の導入拡大を目的として，海域利用に関する法律を 2019 年 4 月から施行した．この法律は「海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（再エネ海域利用法）」である．その骨子は，

- ・ 政府が洋上風力発電事業を実施可能な促進区域を指定すること．
- ・ その区域に対して政府が公募を行って事業者を選定すること．
- ・ 当該海域には 30 年間の占用期間を担保し事業の安定性を確保する．

という具体的な促進政策であり，この法律の制定から洋上風力発電導入に関

する動きが急速に拡大した。

これを受けて、経済産業省と国土交通省は洋上風力発電の促進区域を指定し、2020年6月から11月にかけてラウンド1として4海域について公募を行った。その結果2021年12月に事業者が選定され、現在は建設に向けて準備が進んでいる。続いてラウンド2として新たな4海域について2023年春に公募され、そのうち3海域について同年12月に選考結果が発表された。2023年末時点の促進区域、有望区域、準備区域を図1.7に、その詳細を表1.2に示す。想定設備容量の合計は2022年末の累積設備容量の約2倍の8.8GWに達している。

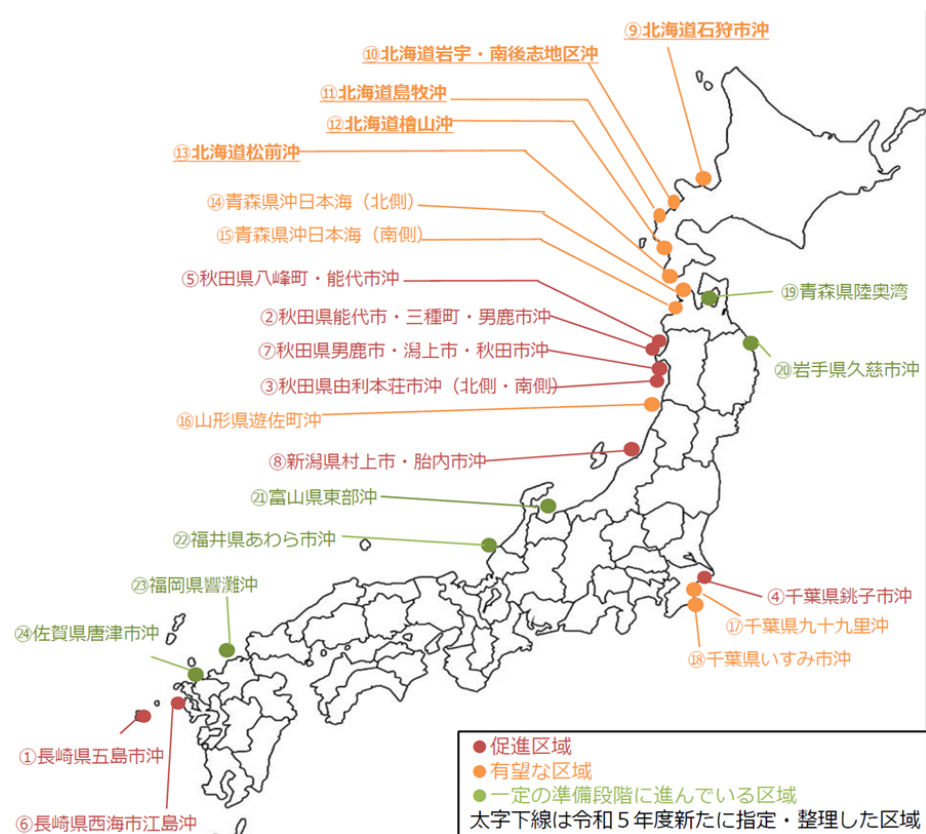


図 1.7 促進区域、有望区域等（2023 年 11 月 30 日時点）<sup>[1.7]</sup>

表 1.2 促進区域・有望区域詳細

区分	海 域	規模(MW)	合計
促進区域	長崎県五島市沖(浮体)	17	ラウンド1 事業者選定済 1.7 GW
	秋田県能代・三種・男鹿市沖	478.8	
	秋田県由利本庄氏沖(北側・南側)	819	
	千葉県銚子市沖	390.6	
	秋田県八峰町・能代市沖	360	ラウンド2 1.8GW
	長崎県西海市江島沖	420	
	秋田県男鹿市・潟上市・秋田市沖	340	
	新潟県村上市・胎内市沖	357	
有望区域	北海道石狩市沖	910-1,140	3.5GW (中央値 の合計)
	北海道岩宇・南後志地区沖	560-705	
	北海道牧島沖	440-555	
	北海道檜山沖	910-1,140	
	北海道松前沖	250-315	
	青森県沖日本海(北側)	300	2.2GW
	青森県沖日本海(南側)	600	
	山形県遊佐町沖	450	
	千葉県いすみ市沖	410	
	千葉県九十九里浜沖	400	

政府以外の動きとしては、日本を代表する風力発電業界団体の一般社団法人日本風力発電協会（JWPA）は、政府の2050年のカーボンニュートラルを達成するために、2050年時点の電力需要の80%以上を再生可能エネルギーで賄うこととし、中でもポテンシャルの大きい風力発電及び太陽光発電を主力とした場合の、風力発電の必要導入量を見積もった<sup>[1.6]</sup>。これによると、2021年における我が国の風力発電の設備容量は4.8GWであるが、第6次エネルギー基本計画では、2030年に風力全体で23.6GW（陸上風力発電;17.9GW, 洋上風力発電;5.7GW）としている。その後についてJWPAが見積もった2050年の必要導入量は、風力全体で140GW（陸上風力発電;40GW, 着床式洋上風力発電;40GW, 浮体式洋上風力発電;60GW）としている（図1.8）。

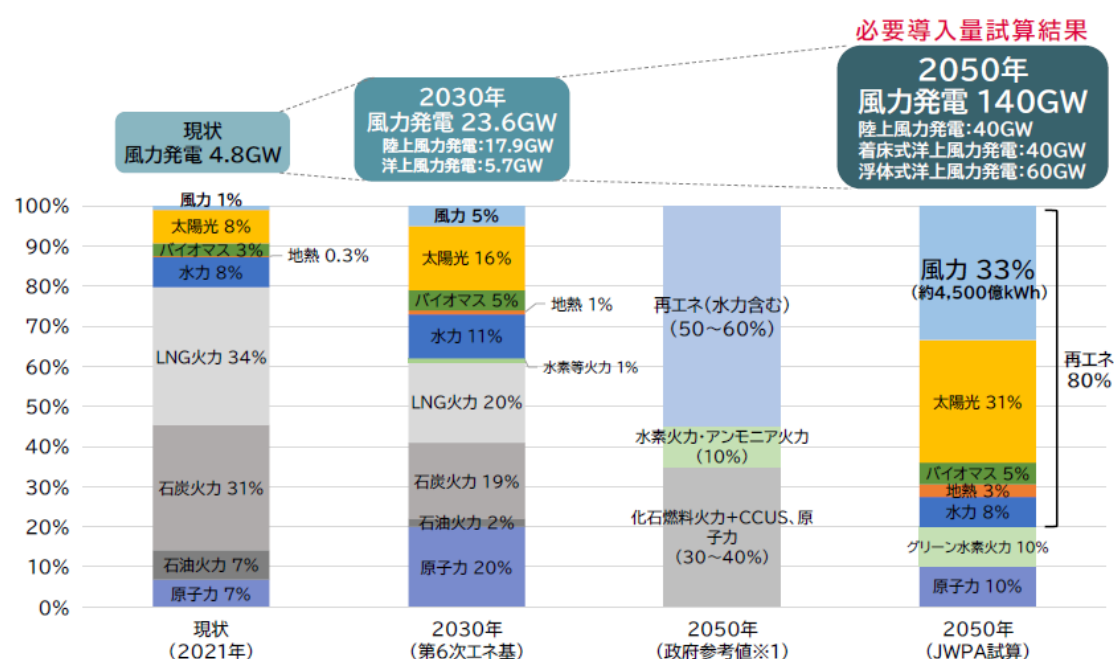


図 1.8 カーボンニュートラル実現に必要な再生可能エネルギー導入量<sup>[1.9]</sup>

以上述べたように、風力発電の導入は政府の具体的施策と民間の努力が相まって、今後急激に増加すると予測される。

### 1.1.3 風力発電機の視覚性

風力発電機は高さが 100m を超える巨大な電気設備であるが、大きさが類似の電気設備としては、全国に約 42 万基<sup>[1.10]</sup>が建設されている送電用鉄塔があり至る所で人々の目に入る。静止している送電用鉄塔に較べて、風力発電機は回転するため、ひときわ目立つ電力設備である。

風力発電機の視覚性については、建設前に環境に対する影響を評価することが国や自治体から規定されている<sup>[1.11]</sup>。そこでは、風力発電機を建設する場所や配置を対象として、建設前の眺望や景観に与える影響が、実行可能な範囲で回避又は低減されていることが要求されている。この規定は景観に対して与える、負の影響を最小化することを目的としており、遠景としての風力発電機群の見え方について検討するもので、風力発電機を積極的に景観の向上に利用する意図は含まれていない。

一方、人々の目に映る風力発電機の個々の形状、すなわち近景としての風力発電機の形状については、風力発電機の開発段階で決定されるため、風力発電機の設計者が持つ風力発電機の形状に対する意識は、近景としての景観に対して大きな意味を持っている。

## 1.2 研究の目的

### 1.2.1 必要性

風力発電の導入拡大に従って、陸上や洋上で大型風力発電機が人々の目に触れる機会は増加している。巨大な風力発電機を眺める人々にとって、その視覚的に良い印象を与えることは、風力発電機が社会的に受容されるための重要な要素であり、風力発電を円滑に導入拡大するための必須条件と言ってもよい。本研究は、大型風力発電機の開発時に決定される風力発電機の形状について、技術的に決定される要素（設計）と、美的観点から決定される要素（デザイン）の領域を明らかにする。更に実際の風力発電機の開発を例にとって、開発段階で発生する設計とデザイン間の不整合について議論を進める。その結果、両者の共通の方向を見出して、人々に心地良い視覚性を与える風力発電機の形状を実現する方法について提案するものである。

なお、本論文で使用する「デザイン」とは、目に見える配置、模様、形状等を決めることを示し、「設計」とは機能、性能を決定する技術的行為を示している。

### 1.2.2 従来の研究

風力発電機の形態や形状に影響を与える要因については、これまで多くの研究が行われてきた。

米国では、NASA がエネルギー省の支援を受けて、大型水平軸風力発電機に特化した一連の研究開発を実施した。Glasgow (1978)<sup>[1.12]</sup>, Robbins ら (1979)<sup>[1.13]</sup>, Linscott (1983)<sup>[1.14]</sup>などから詳細な報告がされている。ここで開発された風力発電機は、200 kW から巨大な 7200 kW に渡り、ロータはすべて 2 枚ブレード構成で、ロータ位置はアップウインド形式とダウンウインド形式の両方について研究された。

同じ時期にドイツでは、連邦教育研究省の支援を受けて、風下側に 2 枚ブレードを配置した 3MW の GROWIAN 大型風力発電機が開発された。この開発の意義と成果は、Pulczynski (1991) <sup>[1.15]</sup>と Hesse (2021) <sup>[1.16]</sup>によって紹介されている。カナダでは、出力 4MW に達する大型垂直軸風力発電機が開発研究され、その内容は Templin ら (1983) <sup>[1.17]</sup>と Benmeddour ら (2010) <sup>[1.18]</sup>によって報告されている。英国でも British Aerospace 社などが参画した 3MW の大型水平軸風力発電機の開発が行われたが、垂直軸風力発電の技術開発について Price (2006) <sup>[1.19]</sup>から報告されている。

大規模風力発電機の研究開発に関する米国、ドイツ、カナダ、英国の取り組みは、商業用風力発電機の大量生産には至らなかったが、多くの複雑な技術的課題への取り組みとその成果は、その後の風力発電の発達に貢献した。

Gipe ら(2022) <sup>[1.20]</sup>は、近代的な風力発電の先駆者として実用に耐える多くの風力発電機を市場に提供したデンマークを筆頭に、さまざまな国における研究、開発、実用化の取り組みを歴史的に展開して研究している。この中で、Gipe らは現在の風車の基本的形態となった水平軸、3 枚ブレード、アップウインド風力発電機がデンマークの技術と運用実績によって定着したことが説明されている。

Gupta (2015) <sup>[1.21]</sup>は、風力発電機構成の歴史的変遷に関する包括的な研究を行った。この研究では、垂直軸と水平軸の風力発電機の特徴を紹介しながら、歴史を通じて風力エネルギーの利用と形態を探っている。この研究では、水平軸風力発電機が優れた自己始動能力、効率的な高高度風の取り込み、高い出力係数 ( $C_p$ ) を示すと結論付けている。また、理論的にはブレードの枚数を増やせば  $C_p$  は向上するが、枚数が増えるにつれて  $C_p$  の増加率は減少し、コストが大幅に上昇することを強調している。その結果、3 枚ブレード構成が主流となったと結論付けている。

Ohya ら (2017) <sup>[1.22]</sup>は、従来の風車形状から逸脱した、特徴的なシュラウド構成を特徴とする風レンズ風車の開発を行った。この風レンズ風車は、外周にシュラウドを備え、高い性能を発揮する。しかし、現在までのところ、このデザインを取り入れた大型風車は発表されていない。

これらの研究は主に風力発電機の技術的、経済的側面を強調したものであ

り、形状や視覚的デザイン面について議論はされていない。

風力発電機の視覚効果に関しては、Sullivan ら（2012）<sup>[1.23]</sup>が風力発電機の観察可能な距離を特定するために、米国の 5 つの風力発電所に焦点を当てた研究を行った。その結果、風力発電施設は最大 19km の距離で、視覚野における重要な焦点として認識されることが判明した。Abromas ら（2015）<sup>[1.24]</sup>は、リトアニアの Šilalė 地域に位置する風力発電所の視覚的影響分析の研究を実施した。この研究では、視界が良好な条件下では、120～150m の風力発電機のブレード先端高さは 30km 離れた地点で観察が可能であるが、景観への視覚的影響は、主に 15～20km の距離に配置された背景の影響を受けると結論づけている。Guan（2022）<sup>[1.25]</sup>は、風力発電所の計画手順を最適化する目的で、風車が景観に与える視覚的影響を評価するモデルを開発し、研究に利用している。

この一連の研究は、遠景または集合体としての風力発電機が視覚認知に与える影響をまとめて調査したもので、風力発電機の個々の形状の視覚的側面に特化した先行研究は見当たらない。

日本においては風車の視覚性については、風車の建設前に環境影響評価を実施することが国や自治体で規定されている。これは風車単体または風車群に対して、建設前の主要な眺望や景観に対する影響が、実行可能な範囲で回避又は低減されているかを検討することが要求されている<sup>[1.11]</sup>。ここでは風車の「遠景としての視覚性」を評価するもので、景観に対する負の影響を最小化することが目的であり、風車を積極的に景観の向上に利用するというものではない。

図 1.9 は環境省が発行した「国立・国定公園内における風力発電施設の審査に関する技術的ガイドライン」（2013 年 3 月）の風力発電機の景観的な評価例を示したものである。この図を見て分かるように風力発電機の外形全体を大きく捉えて評価していることが分かる。





図 1.9 環境影響評価における風車の見え方のシミュレーション<sup>[1.26]</sup>

2020 年に山形県出羽三山に於いて 180m の大きさを持つ出力 3.2MW の風力発電を 40 基，総容量 128MW の巨大ウィンドファームを建設する計画が発表された．この計画に対して県知事をはじめ地元の人々による反対運動が起き，結局この計画は同年に取下げとなった．図 1.8 は風力発電の景観評価で用いられた羽黒山入り口の大鳥居前から見た風力発電機群のシミュレーションイメージである．このイメージでは遠景としての風力発電機群の見え方について評価しているが，近景としての風力発電機の形状について議論しているものではない．



図 1.10 出羽三山のウィンドファーム完成イメージ<sup>[1.27]</sup>



このような景観に関する研究例は、平野勝也他による「周辺景観のスキーマに着目した風力発電施設の景観評価特性」<sup>[1.28]</sup>をはじめとする多くの研究がなされているが、遠景としての風車の景観について研究を実施しており、風車単体に関する研究ではない。

風車の近景の視覚性を決定する事項について、荒川忠一他によって「ヴァナキュラー風車の提案」<sup>[1.29]</sup>が、景観に適合する風力発電機として研究されている。この研究の中で、著者は「回転するプロペラそのものについては、デザイン性の観点から形を変更することは非常に困難を伴うことが予想される。つまりプロペラの空力性能の追求、あるいは構造上の強度の問題から、プロペラ形状に変更を加えるのは、当分の間難しいと判断している。したがって、タワーと呼ばれる風車を支える柱に対して、さまざまな仕掛けをつくることで、ヴァナキュラー風車の提案を行うこととした。」として手を加えられる範囲を示している。この研究ではタワー形状を地方の景観に合うように芸術性を考慮して、タワーを大胆に曲げたデザインの提案がされているが、技術的な成立性については議論されていず、ナセル部分については含まれていない。他には鈴木紀彦他による「水平軸ダウンウインド型小型風車のナセル形状に関する研究」<sup>[1.30]</sup>で、ナセル形状が風車の性能に与える影響について研究されている。この研究はロータ直径 600 mm，ナセル直径 150 mm，ロータ/ナセル直径比は 4 のマイクロ風車特有のナセルが相対的に大きい形状であり、ナセル形状が性能に与える影響は大きいと考えられる。本論文の対象とする発電用大型風車のロータ/ナセル直径比は、代表的大きさの 2MW 風力発電の例では、ロータ直径 80m，ナセル直径 4m，ロータ/ナセル直径比は 20 でロータ径に対するナセルの大きさ及び性能に与える影響は小さく、本研究とは対象とする風車の規模が異なっている。

ここに述べたように、系統連系を目的とした発電の一端の担っている大型の風力発電機について、その設計とデザインを関連付けて議論した先行研究は見当たらない。本研究では、実際の風車開発事例をもとに、工学的デザインと視覚的デザインの両面から風車の形状を決定する要因を明らかにすることを目的とし、さらに、風車の形状を決定する技術的デザインと視覚的デザイ

ンの価値観や評価基準の違いについて考察する．最後に，両分野の異なるアプローチや評価基準を統合し，工業生産において審美的に優れた完成品を実現するための手法を提案する．

### **1.3 本論文の構成**

**第 1 章**「序論」においては，現代の環境やエネルギー問題の解決策としての風力発電の位置付け及び，本研究の目的，先行研究他について述べる．

**第 2 章**「風力発電機の形状に関する決定要素」においては，現代の発電用大型風車について，その形状を決定する要素を明らかにする．人々の視界一杯に広がる大型の風力発電機の視覚性（見た目）に影響を与える部位は，どのような技術判断によって決定されるか，またデザインを施すことが可能な部位について明らかにする．

**第 3 章**「環境と設計条件」においては，インドや日本において国際標準に準拠した風力発電機が熱帯低気圧で倒壊する事故が相次いだことを受けて，風力エネルギーの豊富な日本の南西諸島に風力発電を導入するために必要な，台風に耐えることの出来る新たな設計環境条件を明らかにする．

**第 4 章**「風力発電機開発と形状の決定（技術的アプローチ）」においては，第 3 章で述べた環境条件に適応できる風力発電機の設計開発を例にとって，技術的な観点から形状に影響を与えた検討事項と決定の考え方について明らかにする．

**第 5 章**「風力発電機開発と形状の決定（視覚的アプローチ）」においては，第 4 章で述べた風力発電機の設計開発において，インダストリアルデザインの視覚的な観点から形状を決定する考え方と方法について説明する．

**第 6 章**「技術とデザインの融合」においては、風力発電機開発の開発過程で発生するデザインと設計間の問題の具体的な例について考察し、設計面とデザイン面の価値観と目指す方向の違いと問題、及びデザインと設計の境界問題を明らかにし、両者を融合して統一した解を得るための解決方法について実際の例を基に提示する。

**第 7 章**「風力発電機に対する視認者の印象」においては、今後の風力発電機の開発に役立てることを目的として、風力発電機の形状を特徴付ける唯一のデザイン要素であるナセルの形状に着目し、風力発電を見る人々がその形状についてどの様に感じているか、好感を持たれるナセルの特性は何か、について調査しその傾向について考察を加える。

**第 8 章**「まとめ」では本研究の総括を行い、結論を述べる。

#### **1.4 第 1 章まとめ**

地球温暖化やエネルギー供給の不安定化に対する問題への対策として、世界的に化石燃料エネルギーから再生可能エネルギーに転換を図っており、2022 年には、世界のエネルギー消費の 29.9%は再生可能エネルギーが占めるに至っている。

その中で、風力エネルギーの利用も拡大しており、風力発電の設備容量は、2022 までの 10 年間に世界では 2.9 倍、日本では 1.80 倍に増加した。

日本は政府のカーボンニュートラル宣言を受けて、風力発電の導入拡大についての具体的な施策を実施しており、現在（2023 年）の国内の風力発電の設備容量は 2030 年に 1.9 倍、2040 年には 5.8 倍から 8.7 倍の大幅な導入を政府の目標としている。

風力発電の導入には、社会受容性について慎重な配慮が必要であるが、人々の風力発電の見え方はその中の重要な要素である。環境影響評価の中で風力発電の遠景としての見え方については多くの研究や方法が紹介されているが、風力発電機の近景としての形状について研究された例は見当たらない。

この状況を背景として、本研究の目的を次のように設定した。

- (1) 大型風力発電機の開発時に決定される風力発電機の形状について、技術的に決定される要素（設計）と、美的観点から決定される要素（デザイン）の領域を明らかにする。
- (2) 更に実際の風力発電機の開発を例にとって、開発段階で発生する設計とデザイン間の不整合について議論を進める。
- (3) その結果、両者の共通の方向を見出して、人々に心地良い視覚性を与える風力発電機の形状を実現する方法について提案する。

## 第2章 風力発電機の形状に関する決定要素

人々の視界一杯に広がる大型の風力発電機の視覚性（見た目）に影響を与える部位は、どのような技術判断によって決定されるか、またデザインを施すことが可能な部位について明らかにする。

### 2.1 風車形式

風のエネルギーを受けて動力を得る風車には図 2.1 に示す多くの形式がある。

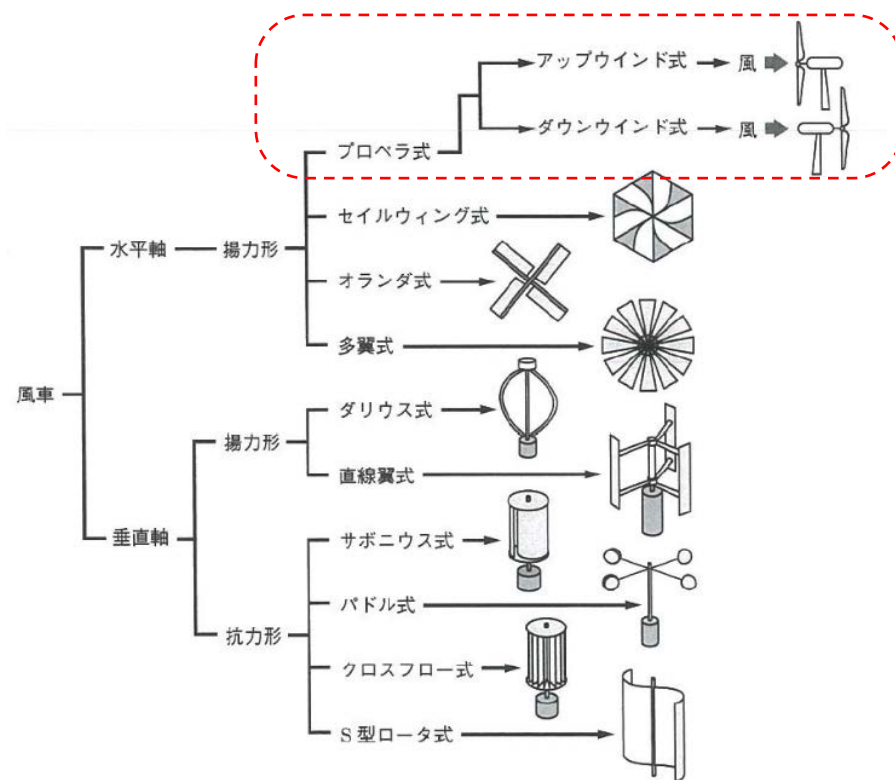


図 2.1 様々な風車の形式 [2.1]

本研究においては、電力系統に供給する発電を目的とした事業用もしくはそれに類した風力発電機を対象とする。したがって風力エネルギーを動力エネルギーに変換する効率（出力係数  $C_p$ ）が高い水平軸プロペラ型風車（図 2.1 の赤線囲み範囲）に絞って検討を進める。そのための発電容量の小さい小形風力発電や、大型風力発電機として実用のレベルに達していない垂直軸風車は含んでいない。

## 2.2 現代の風力発電機の視覚的印象の決定要素

図 2.2 は知多半島にある海浜公園に建設された風力発電機である。富士重工業（株）と日立製作所（株）が共同開発した、国内で最も多く建設された出力 2MW 風力発電機で、タワー高さ（ハブ高）80m、ロータ直径 80m、ロータ最上部高さは地上 120m で、日本国内の平均的なサイズの風力発電機である。この写真は手前の風車から 300m 離れた地点から撮影したもので、3 本の風力発電機は各々約 240m 離して建てられている。撮影は 35 mmフルサイズの撮像素子を持つデジタルカメラを用いて、レンズの焦点距離は 46mm である。焦点距離 50mm 前後のレンズは、いちばん人間の視角に近く、自然な遠近感の描写が特長<sup>[2,2]</sup>と言われており、人の目に映る風力発電機の誇張のない自然な形と言って良い。

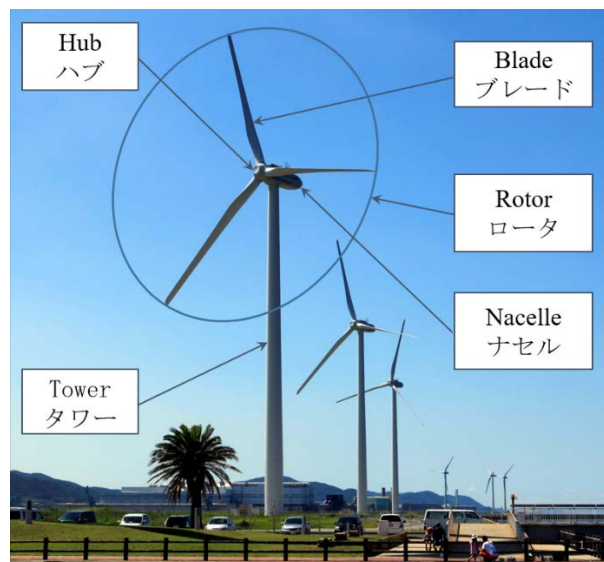


図 2.2 風力発電機の見え方

この写真では、地上から高いところで回転するブレードとハブから構成されたロータ、ロータを支えるナセル、そして地上からそびえるタワーが目に入る。大型風力発電を眺める人が受ける印象（視覚的印象）は下の 4 つの要素が支配的である。

- (1) 全体の大きさ（容積と長さ）
- (2) ロータの長さと形
- (3) タワーの高さと形
- (4) ナセルの大きさと形

## 2.3 視覚的印象に影響を与える部位と決定要件

### 2.3.1 全体の大きさ

建造物の視覚的な大きさは「高さ」、「幅」、「奥行」が代表的な要素である．風力発電機を正面から見た場合，高さは「タワー高さ＋ブレード長さ」，幅は「ロータ直径」，奥行きは「ナセルの長さ」が相当する．以下ロータ，タワー，ナセルの形状とその決定要件について技術的観点から考察する．

### 2.3.2 ロータ<sup>[2.3]</sup>

風車が風から取り出すことの出来るエネルギー  $P$  は，式 2.1 で表される．

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad \text{式 2.1}$$

$P$  : 風車取得エネルギー，  $C_p$  : パワー係数，  $\rho$  : 空気密度，  $A$  : ロータ面積，  
 $V$  : 風速

式 2.1 のパラメータのうち，空気密度  $\rho$  と風速（この場合最大出力を得る定格風速  $V$ ）は，風速の出現確率から 10～12m/s の間でほぼ標準化されている．パワー係数  $C_p$  は，図 2.3 に示すように風車の形式と周速比  $\lambda$  によって変わるが，事業用風力発電機では，効率が高い水平軸 3 枚ブレード形式，もしくは少数であるが水平軸 2 枚ブレード形式が選択される（図 2.3 内赤線囲み範囲）．その  $C_p$  は 0.4～0.5 の間にあり，設計によって大差はない．

風車を設計する際には，まず出力  $P$ （風力発電機の場合は発電電力）を最初に決めるが，式 2.1 において， $P$  を決定する決定的に重要なパラメータはロータ面積  $A$  であり，風車の出力を決めたらロータ面積，ブレードの長さはほぼ自動的に決定される．

\*周速比（Tip speed ratio  $\lambda$ ）は、風速に対するブレード先端の速度の比を表し 2.2 式で定義される。

$$\lambda = \omega R / V \quad \text{式 2.2}$$

$\lambda$ ：周速比， $\omega$ ：ブレード回転速度 (rad/s)， $R$ ：ロータ半径

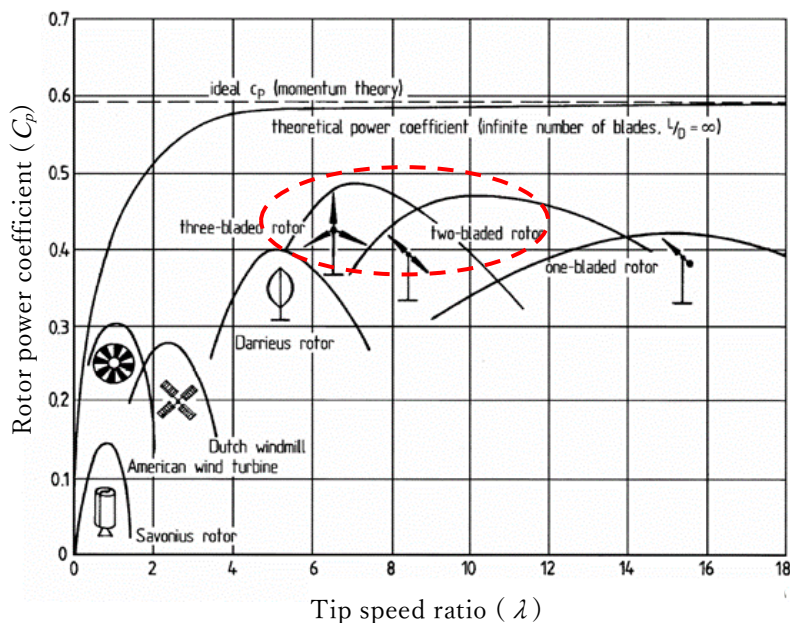


図 2.3 様々な形式の風車の出力係数 ( $C_p$ ) と周速比 ( $\lambda$ ) [2.4]

#### (1) ブレード枚数

水平軸風車のロータのブレード数は、図 2.3 に示すように 1 枚から多翼まで多くの選択肢があるが、先に述べたように水平軸 3 枚ブレード形式、もしくは少数であるが水平軸 2 枚ブレード形式が選択肢となる。

#### (2) ハブ形式とブレード枚数

ブレード枚数とそれを回転中心で支えるハブの形式は、図 2.4 に示す組合せがある。ハブ形式は図 2.5 に示すリジッド式 (a)とティータ式 (b)が存在する。後者はブレードや主軸にかかる荷重が低減され 2 枚ブレード形式に適用することができる。



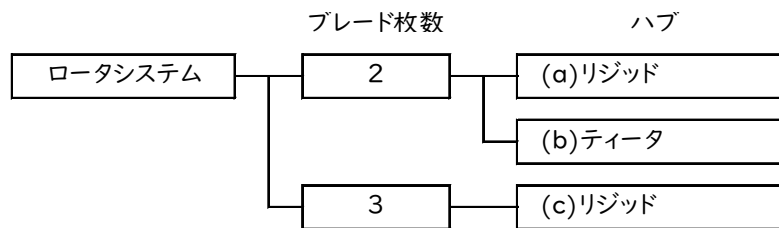
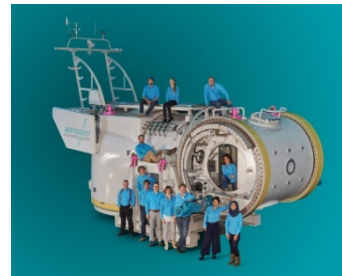
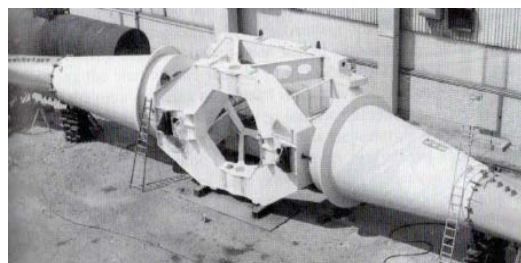
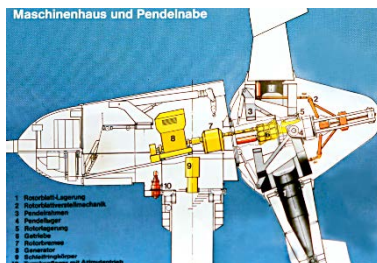


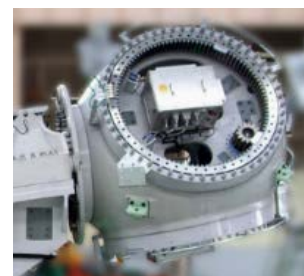
図 2.4 ブレード数とハブの組合せ



(a) 2 枚ブレードリジッドハブ (Aerodyne 3MW) [2.4]



(b) 2 枚ブレードティータハブ (GROWIAN 3MW) [2.5] [2.6]



(c) 3 枚ブレードリジッドハブ (SUBARU 2MW)

図 2.5 ブレードとハブの形

この中で、ティータハブはロータ回転面に直交するティータヒンジを装着するために、リジッドハブに較べて大きな形状となる。

### (3) ロータ位置

ロータがタワーの風上側に位置するアップウインド形式 (a)と、風上にあるダウンウインド形式 (b)が存在する (図 2.6)。

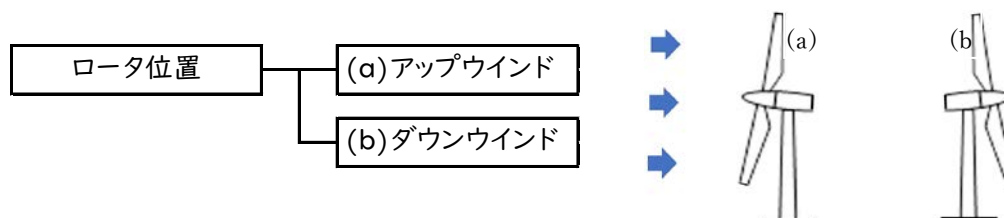


図 2.6 ロータ位置

ダウンウインド形式は、強風時にロータとタワーが接触する危険性が無いこと、ロータがヨー回転中心の風下にあるため、正の風向安定性（風見安定）を持っている他、吹上風や浮体式洋上風力発電機の風上に傾斜する特性を利用して、受風面積を増やす等の利点が多い。一方で、タワーで乱された風がブレードに当たって発生する空力騒音や、材料疲労に関する問題が報告されており、慎重な検討が必要である。

### 2.3.3 発電機と動力伝達システム<sup>[2.7]</sup>

発電機と動力伝達システムは図 2.7 の組合せがある。

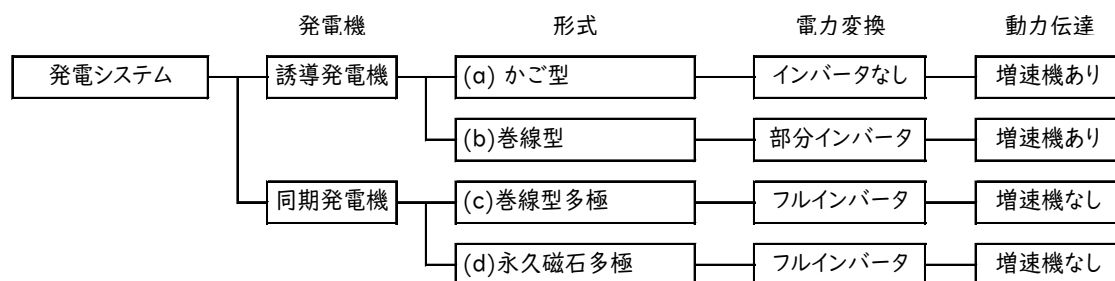


図 2.7 発電機と動力伝達システム

各案に対する技術的な特徴は次のとおりである。

(a) かご型誘導発電機：単純で安価なシステムである。発電機は系統に直接結合され、風速の変動が電力変動を起こすこと、突入電流が大きいなど

電力品質が離島の小規模系統に適していない。

- (b) 巻線誘導発電機：小容量の電力変換装置を用いる。定格電流程度の突入電流が発生すること、増速機と巻線発電機に対する冷却と塩害対策を両立させるためには、複雑なシステムが必要になる。
- (c) 巻線多極同期発電機：増速機を使わない単純な構成である。大容量の電力変換装置によって良好な電力品質が得られる。巻線励磁による巻線損失が発生し、発電機の冷却と塩害対策の両立は課題となる。
- (d) 永久磁石多極同期発電機：励磁は永久磁石によるため、発電機の発熱は少なく冷却も容易である。大容量の電力変換装置によって電力品質が良く、最も単純な構成で信頼性、整備性が優れている。

#### 2.3.4 タワー<sup>[2.8]</sup>

タワーはラティス形式（図 3.8(a)）とモノポール形式（図 2.8(b)）の 2 種類が候補になり、各々下記の特徴を持っている。

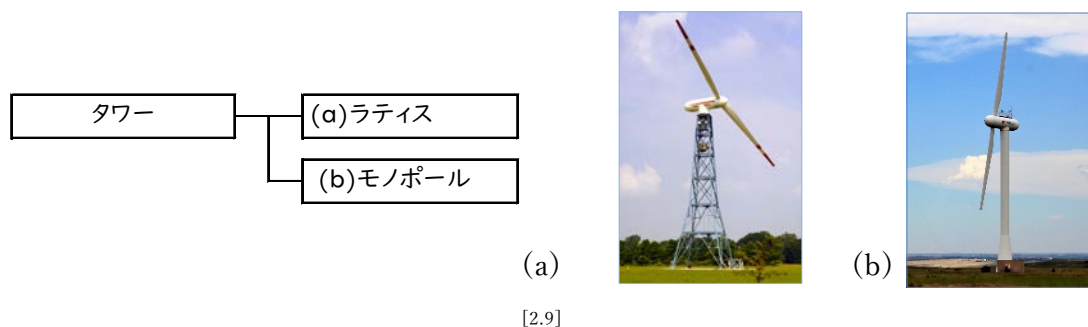


図 2.8 タワー形式

- (a) ラティス形式：輸送、組立に重機が不要でありモノポール形式の価格の三分の一と安価である。維持段階でトラスの点検、ボルト増締め等の作業項目が多く、整備性や耐環境性が劣る。その軽量さを利用して、強風時の退避や整備作業で風力発電機を地上に倒す可倒式タワーとして利用される。
- (b) モノポール形式：機器をタワー内に収納することができ、耐環境性が高いほか、安全に人の昇降が出来る。

タワー形式は，上に述べた要件を考慮して選定するため，視覚的見地からその形式が決定されることはない．

### 2.3.5 ナセル

ナセルはタワーの頂上で発電機，増速機，制御装置等の機器を収納して風雨から保護する．ナセルの形状は，図 2.9 に示す誘導発電機・増速機ありの長細形と，図 2.10 に示す同期発電機・増速機無しの短太形に分類される．このように発電機の形式と増速機の有無によって，ナセルの基本的な形状はある程度決定される．

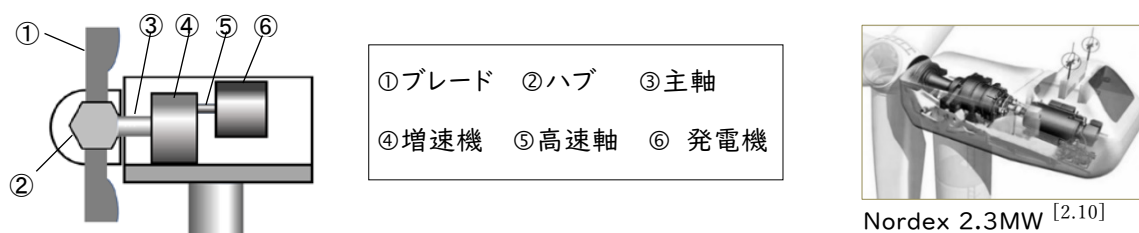


図 2.9 発電機と動力伝達システムの配置 (誘導発電機と増速機)

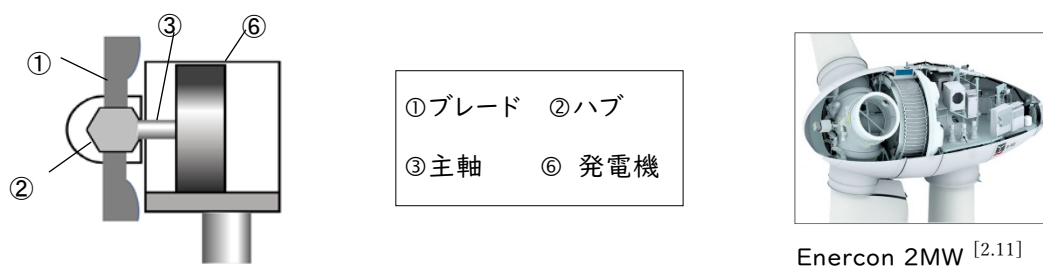


図 2.10 発電機と動力伝達システムの配置 (同期発電機)

限られた自由度の中ではあるが，ナセルは風力発電の形状を作り込むデザインの対象となる．ナセルの形状からメーカーが判別でき，風力発電メーカーは自社独特のデザインを施し，自社のアイデンティティとすることは自動車メーカーのデザインの扱いと同じである．ナセル形状は，風力発電機における視覚視覚性（見た目）を考慮して形を決定できる，唯一のデザインアイテムと

言って良い.

## 2.4 第2章まとめ

現代の発電用大型風車について形状を決定する要素について検討を加え、以下の結論を得た.

- (1) 風力発電機で目に付く部位は「タワー」、「ブレード」、「ナセル」であり、各々について設計仕様から決まる技術的内容, 大きさ, 形状の選択肢を示した.
- (2) 風力発電機の視覚性に影響を与える「タワー」、「ロータ」は, 技術的判断のみで決定される.
- (3) 「ナセル」は, 風力発電機的设计に於いて視覚性を考慮して形状の決定が可能な唯一のデザイン対象である.

### 第3章 環境と設計条件

日本の沖縄諸島や宮古島等の南西諸島では、ディーゼル発電によって電力を供給している例が多い。ディーゼル発電はコストが高く、本土の数倍の費用を必要としている。一方その地域は風力資源が豊富で風力発電を導入することが費用削減に有効と考えられるが、猛烈な台風が襲来するために、それに耐える風力発電機が存在せず導入は容易ではない。

大型風力発電機の設計開発は、国際規格の IEC61400-1 Wind energy generation systems および関連規格に準拠して行われる。この IEC 規格は、欧州の環境条件を背景にして作られているため、温帯モンスーンに位置するアジアの環境条件には必ずしも適合していない。その例として、欧州には存在しない台風やサイクロンなどの熱帯低気圧があり、インドや日本において IEC に準拠した風力発電機が猛烈な風によって倒壊する事故が相次いだ。

このような背景のもと、本章では日本の台風に耐えることのできる風力発電機に必要な設計条件について明らかにする。

#### 3.1 日本の南西諸島の風力エネルギー資源

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が作成した全国の局所風況マップにおいて、南西諸島と本土でも風況が良いと言われる東日本地域の比較を図 3.1 に示す。

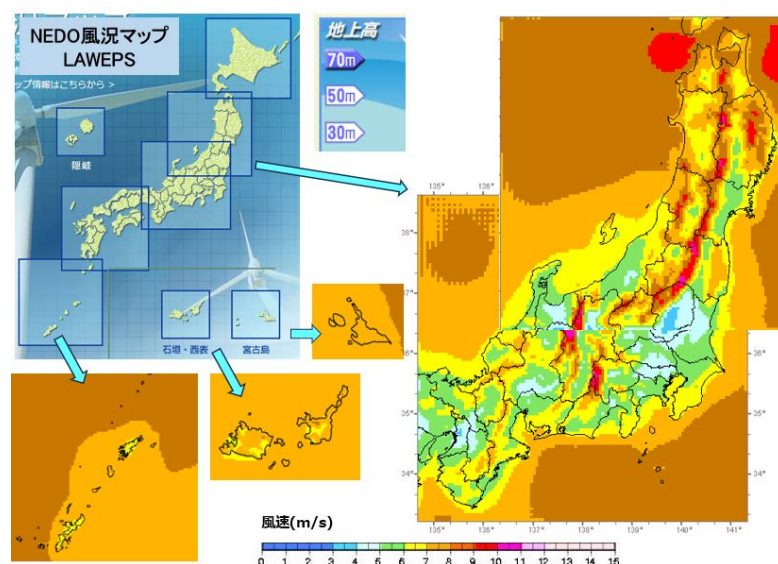


図 3.1 NEDO 局所風況マップ<sup>[3.1]</sup>（南西諸島と東日本地域）（地上高 70m）



一般に風力発電はハブ高さの年平均風速が 5 m/s から 6 m/s 以上の場所が望ましい<sup>[3.2]</sup>とされており，図 3.1 の南西諸島はこの領域に位置しており，風力発電導入の有望地域とされる．また琉球大学永井の，南西諸島における風力利用の可能性研究<sup>[3.3]</sup>では，「南西諸島型風況は季節的かつ普遍的であり，いずれの島においても年間平均風速が 6.5m/s 以上の安定した風の吹く優風況地点が存在すると期待され，風力発電機を導入すれば採算性のある風力発電が可能であり，南西諸島離島の現状のディーゼル発電の相当量を風力発電に置換することが可能と結論できる．と結論付けており，南西諸島への風力発電の導入が期待されている．

### 3.2 世界の熱帯低気圧と風力発電

世界の熱帯低気圧は地域によって名前が変わり，インド，南太平洋ではサイクロン，北米大陸の太平洋側やメキシコ湾のハリケーン，北太平洋西部で発生するタイフーンがあり，日本では台風と呼ばれる．図 3.2 は世紀を跨いだ 20 年間に世界で発生した熱帯低気圧の軌跡を示しているが，日本が位置する北西太平洋および南シナ海と，インド洋北部には強い熱帯低気圧が頻繁に襲い，風力発電に大きな被害を与えた．

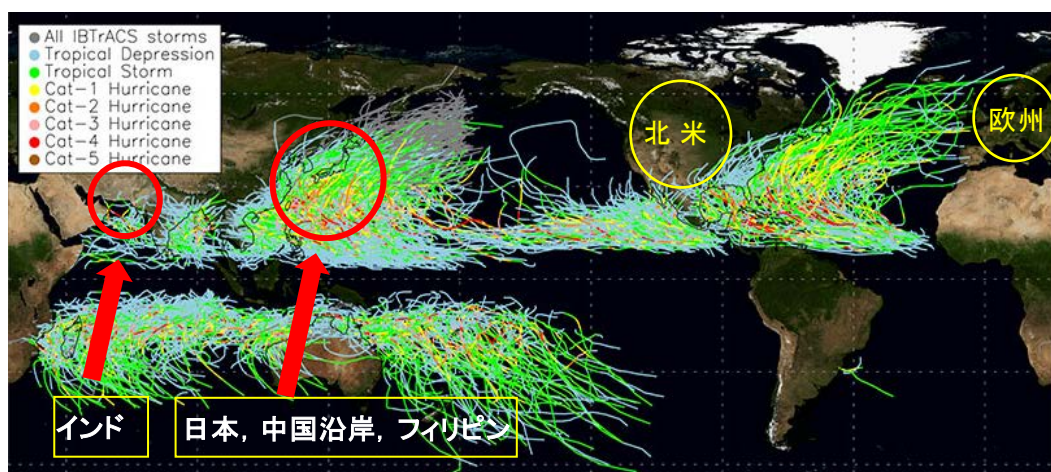


図 3.2 世界の熱帯低気圧の軌跡 (1990 年-2010 年)<sup>[3.4]</sup>

### 3.3 インドのサイクロンによる風力発電の大規模災害<sup>[3.5]</sup>

1998 年 6 月 8 日の深夜から 9 日の未明にかけて，パキスタン国境に近いイ

ンド西北沿岸の Saurashtra 地方を巨大なサイクロンが襲った。このサイクロンの強風と水害によって、死者 2,000 人以上、破損した風力発電はその地方の 4 割にあたる 129 基、失われた風車設備容量は 30MW 以上、倒壊した送電線、電柱の数は 8,800 本以上、ウィンドファーム損害総額は 5 百万 INRs(150 億円)に上った、この災害は風力発電の歴史に残る大きな事件になり、熱帯低気圧による風力発電の強度が注目をされる契機となった。筆者らは同年 12 月に現地を訪れ被害状況を調査した。

### 3.3.1 被災したウィンドファーム

被害を受けた Gujarat 州 Saurashtra 地方はアラビア海に面し、年間平均風速 5.5～5.8m/s の風力発電に適した地帯である。沿岸に沿って Lamba, Nevadra, Bhogat の 3 個所のウィンドファームが 15km の距離で広がり、その間に 315 基の風車が林立している。被災した 3 個所の風力発電の総設備容量は 85MW であった。図 3.3 に Lamba ウィンドファームの遠景を示す。



図 3.3 Lamba ウィンドファーム遠景

### 3.3.2 サイクロンの軌跡と風速

図 3.4 は米国の気象衛星の観測を現地地図に重ねたものであるが、サイクロンの中心はウィンドファームのほぼ直上を通過していることが分かる。



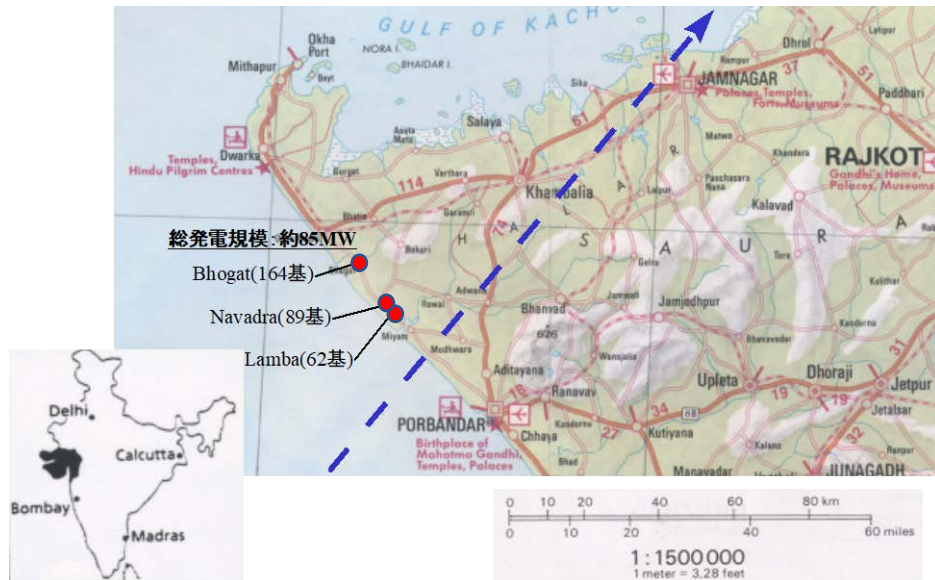


図 3.4 ウィンドファームの位置とサイクロンの軌跡

サイクロン襲来の早い段階でウィンドファームへの送電線が倒壊したため、その後のウィンドファームにおける最大風速は計測されていない。ウィンドファームから北西へ 60km 離れた気象観測施設で、突風 65m/s 以上(地上高 20m)が計測されているが、計測塔の倒壊でそれ以降のデータが欠損しており、最大風速はこれより高い可能性がある。地表境界層の影響（1/7 乗則）を考慮し、地上高 20m における観測値を、風車のハブ高さに修正した結果、ウィンドファームにおける最大風速は、標準的な風力発電のハブ高さの地上高 30m においては、69m/s 以上、地上高 40m のハブ高さでは 72m/s 以上の風が吹いたと推定される。

### 3.3.3 被害状況

筆者らは、被害から 6 ヶ月たった 98 年 12 月に現地に入り、破壊状況の調査を行った。現地は復旧には殆ど手がついていない状態で、破壊された風力発電や電柱がそのまま放置されており、生々しい被害状況を確認する事が出来た。

現地の写真を図 3.5 に示す。またウィンドファーム内の風力発電機種別の諸元と被害の状況を表 3.1 に示す。

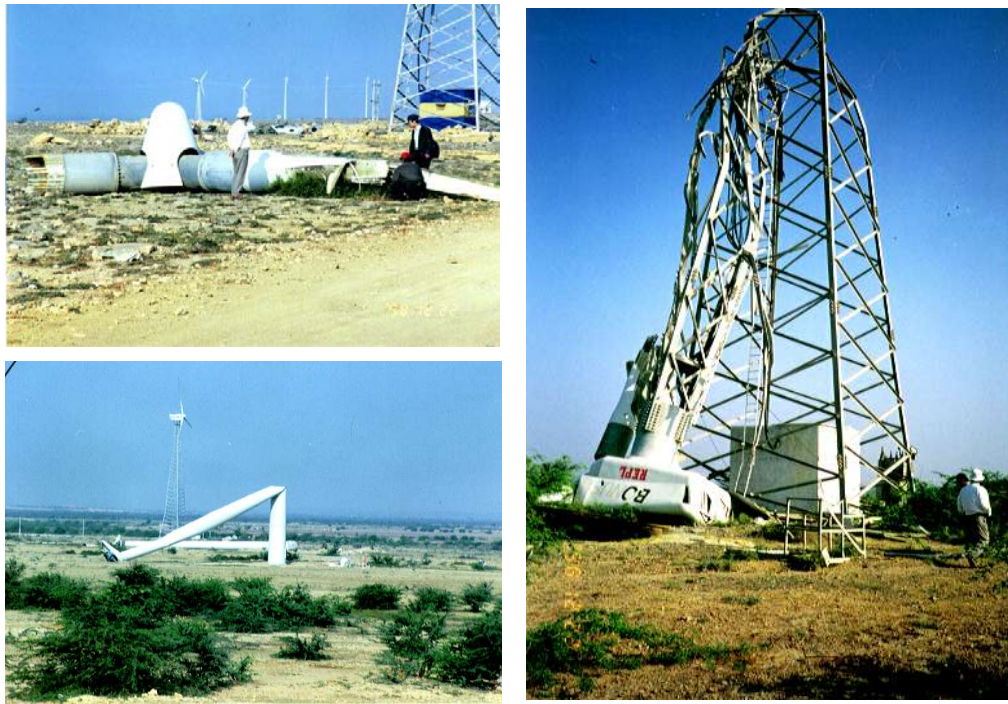


図 3.5 風力発電の被害状況

表 3.1 風力発電機種別の被害状況

機種	ピッチ制御	タワー形式	耐風速	風車数(基数)			割合(%)	
				総数	被害なし	被害あり	被害なし	被害あり
A	ストール	モノポール	60m/s	83	65	18	78%	22%
B	ストール	ラティス	不明	52	50	2	96%	4%
C	ピッチ	ラティス	70m/s	50	32	18	64%	36%
D	ストール	ラティス	67m/s	38	14	24	37%	63%
E	ストール	ラティス	60m/s	34	0	34	0%	100%
F	ストール	不明	不明	14	0	14	0%	100%
G	ピッチ	モノポール	70m/s	13	13	0	100%	0%
H	ストール	モノポール	60m/s	7	0	7	0%	100%
I	ストール	不明	不明	6	6	0	100%	0%
J	ピッチ	ラティス	70m/s	5	0	5	0%	100%
K	ストール	モノポール	不明	4	2	2	50%	50%
L	ストール	モノポール	65m/s	4	4	0	100%	0%
M	不明	不明	不明	3	0	3	0%	100%
N	ストール	不明	60m/s	2	0	2	0%	100%
全体				315	186	129	59%	41%

WINDPOWER MONTHLY, September 1998<sup>[3.6]</sup>の記事を元に、筆者がデータを追加した。

- 機種 D(耐風速 67m/s )ドイツとインドの型式認証を保有
- 機種 L(耐風速 65m/s )型式認証を保有せず
- 機種 H(耐風速 60m/s )全 7 基中, 6 基はタワー根本から倒壊, 1 基はタワーの途中から折損

### 3.3.4 観測された破壊状況

現場で観測された風力発電の部位ごとの破壊モードを図 3.6 に示す。いずれも落下、倒壊、折損、火災等の大きな破壊に至っている。

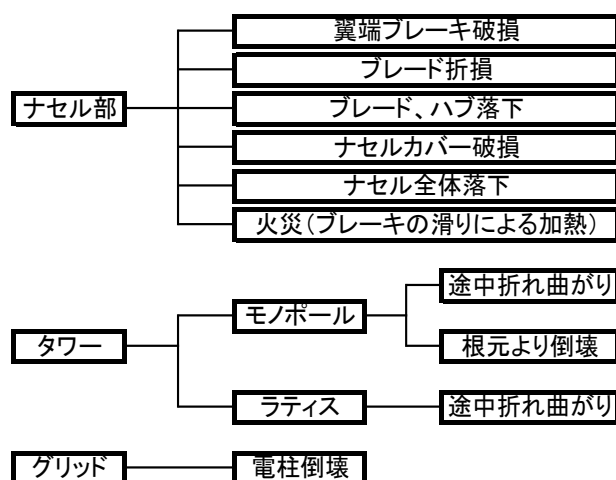


図 3.6 破壊モード

### 3.3.5 残存性分析

表 5.1 に示す風車の機種別の被害状況から、強風中の安全性に影響を与えると考えられる因子と残存性の関係を分析した。因子としては、設計耐風速（表 3.2）風力発電のブレード制御方式（表 3.3），タワーの形式（表 3.4）を選定した。

表 3.2 耐風速と残存率

設計耐風速	基 数	被害なし	残存率
60 m/s	126 基	65 基	52%
70 m/s	68 基	45 基	66%(1.3 倍)

色付け部分は残存率が高い形式。( ) 内はそうでない形式に対する残存率比。以下同じ。

表 3.3 ブレード制御方式と残存率

制御方式	基 数	被害なし	残存率
ピッチ	68 基	45 基	66%(1.1 倍)
ストール	244 基	141 基	58%

強風時に風車を過回転から回避する制御方式として以下の2種類がある.

- ピッチ制御:ブレードをフェザー位置にして回転を止める. 新しい風力発電に採用
- ストール制御:ブレード先端の空力ブレーキを遠心力で展開して回転を止める初期に多い形式

表 3.4 タワー形式と残存率

タ ワー	基 数	被害なし	残存率
ラティス	179 基	96 基	54%
モノポール	111 基	84 基	76% (1.4 倍)

上に示す比較では顕著な傾向は認められないものの, 高い耐風速, モノポールタワー形式の残存性が高いと結論付けられる.

- 1) 高い設計耐風速度: 設計耐風速 70m/s は 60m/s に対して残存率は 1.3 倍高い.
- 2) ピッチ制御方式: ストール制御方式に対して残存率は 1.1 倍高い.
- 3) モノポールタワー: ラティスタワーに対して残存率は 1.4 倍高い.

### 3.3.6 原因

最大風速は風車の中心位置で 69m/s~72m/s 以上と推定されるが, 現地で建設されていた風力発電の耐風速性能は 70 m/s 以下であり, 設計耐風速を超える風が吹いたこと破壊の主要要因と推定する. 破壊形態からラティスタワーは強風に対してモノポールタワーより脆弱な傾向が窺われる.

## 3.4 宮古島の台風による風力発電災害<sup>[3.7]</sup>

2003 年 9 月 11 日に沖縄県宮古島を襲った台風 14 号は, 最大瞬間風速 74.1m/s (宮古島地方気象台の観測値) の猛烈な風が吹き, 死者 3 名, 負傷者 95 名, 家屋の損壊は 371 軒にものぼる大きな被害をもたらした. この台風によって宮古島にあった 7 機の風力発電機のうち, 3 機がタワーの根元から倒壊, 3 機はブレードが折損し, 残る 1 機もナセルが破損するほぼ全滅の大きな被害を受けた (図 3.7)



3.3 項は、破損した風力発電を所有する沖縄電力と、学識経験者・専門家から構成される事故調査委員会の報告<sup>[3.7]</sup>を基にまとめたものである。



図 3.7 沖縄宮古島風力発電<sup>[3.7]</sup>

#### 3.4.1 台風の概要と軌跡

2003 年の 9 月 16 日にマリアナ諸島近海で発生した台風 14 号（マエミー）は、10 日 21 時には中心付近の最大風速が 55m/s の「猛烈な台風」に発達した。宮古島では、10 日 17 時頃から 11 日 17 時頃までの約 24 時間暴風域に入り、11 日には下宮古島で最大瞬間風速 74.1m/s、最低気圧 912 hPa が観測された。この台風は大規模な降水も伴って、11 日朝に 1 時間降水量 58.5mm を観測し、9 日から 12 日時までの総降水量は 470mm に達した<sup>[3.9]</sup>。図 3.8 に台風 14 号の衛星写真と軌跡及び風力発電の位置を示す。

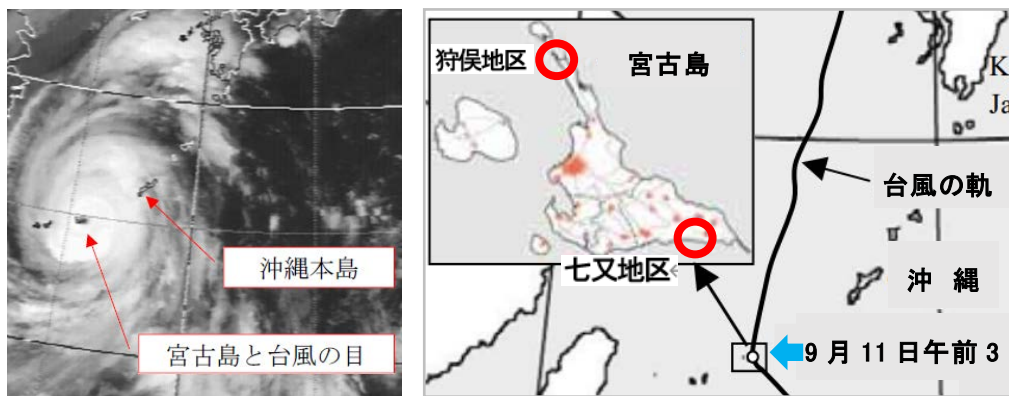


図 3.8 台風 14 号<sup>[3.7]</sup>と軌跡（赤丸は風車サイト，赤い部分は集落）<sup>[3.10]</sup>

### 3.4.2 風力発電の被害

宮古島には沖縄電力の所有する風力発電機が，南部の七又地区に 1, 2 号機，北部先端の狩俣地区に 3, 4, 5 号機の 7 基が建設されており，そのすべてが深刻な被害を受けた（表 3.5）。

表 3.5 宮古島風力発電の諸元と被害状況（参考文献<sup>[3.7]</sup>から作成）

番 号	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機
場 所	七又地区		狩俣地区			
製造メーカ	Enercon	Vestas	NEG-Micon			Enercon
定格出力	500 kW	600 kW	400/100 kW	400/100 kW	400/100 kW	600 kW
ブレード制御	ピッチ制御	ピッチ制御	ストール制御			ピッチ制御
ブレード枚数	3枚					
ハブ高さ	44m	35m	36m	36m	36m	46m
被害状況	・タワー基礎 コンクリ破壊 倒壊	・ナセルカバー 割れ	・タワー下部で 座屈倒壊 ・基礎コンクリ クラック	・ナセルカバー 飛散 ・基礎コンクリ クラック	・タワー下部で 座屈倒壊 ・基礎コンクリ クラック	・ナセルカバー 割れ



1 号機

2 号機

3 号機

4 号機

5 号機

6 号機

図 3.9 風力発電の破損状況

### 3.4.3 風速

風力発電位置における最大風速計測値は得られていないため、沖縄電力は東京大学他の協力を得て、宮古島地方気象台の計測値を用いて狩俣地区および七又地区の風力発電のハブ位置の風速を推定した（表 3.6）<sup>[3.11]</sup>。

表 3.6 風速の推定値

場 所	号機	ハブ高さ	風速シミュレーション結果	
			最大風速	最大瞬間風速
狩俣地区	3 号機	36 m	59.7 m/s	87.9 m/s
	4 号機	36 m	59.2 m/s	87.3 m/s
	5 号機	36 m	59.4 m/s	87.6 m/s
	6 号機	46 m	61.5 m/s	90.3 m/s
七又地区	1 号機	44 m	59.8 m/s	90.7 m/s
	2 号機	35 m	56.8 m/s	87.4 m/s

最大風速は 10 分間平均値、最大瞬間風速は 0.25 秒の風速である。

### 3.4.4 原因の推定と対策

子の事項の原因は、台風による風が設備や基礎の耐力を越えてため破壊に至ったと結論つけされている。さらにその後の対策としては以下の提案がされている<sup>[3.12]</sup>。

- (1) 風力発電設備設置地点の周辺状況を加味した設計風速を採用
- (2) 停電で風力発電の制御電源が喪失することを防止するバックアップ電源付加
- (3) 風力発電設備の基礎形状の見直しと鉄筋の補強

## 3.5 風車の強度

### 3.5.1 風車の強度クラス

風力発電機に関する技術基準は、デンマーク規格 DS472 やドイツの Germanischer Lloyd（2013 年に Det Norske Veritas と合併し DNV となった）規格が使われているが、1994 年にこれらの内容を統合した形で International Electrotechnical Commission（国際電気標準会議）が国際標準として風力発電に関する規格を制定した。IEC 規格は IEC61400-1 初版が 1994 年に発行され、

その後数度の改訂の後，2019 年に ed.4 Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements が発行され，現在の最新版として使われている（表 3.7）．

表 3.7 IEC 61400-1 の変遷

規格	発行年	名称
IEC 61400-1 (ed.1)	1994	Wind turbine generator systems - Part 1: Safety requirements
IEC 61400-1 (ed.2)	1999	Wind turbine generator systems - Part 1: Safety requirements
IEC 61400-1 (ed.3)	2005	Wind energy generation systems - Part1: Design requirements
IEC 61400-1 (ed.4)	2019	Wind energy generation systems - Part1: Design requirements

IEC61400-1 では風力発電機風が運用される場所の風の強さによって，その場所に適合する風車クラスを設定している．表 3.8 に ed.2(1999)の風車クラスと風速基準を示す．

表 3.8 IEC61400-1 (ed.2) 1999 による風車クラスと風速

風車クラス		I	II	III	IV	S
年平均風速 (m/s)	$V_{ave}$	10	8.5	7.5	6	設計者が規程
基準風速 (m/s)	$V_{ref}$	50	42.5	37.5	30	
極値風速 (m/s)	$V_{e50}$	70	59.5	52.5	42	

（風速は風車のハブ高さにおける値）

各風速の意味は以下の通りである．

- 年平均風速  $V_{ave}$ ：風車が運用される場所における年間平均風速
- 基準風速  $V_{ref}$ ：風車クラスを定義するための風速の基本パラメータ
- 極値風速  $V_{e50}$ ：50 年に一度遭遇する可能性のある最大瞬間風速

風車の強度はこの風速に耐えるように設計する．

各風速は以下の関係で設定されている．

$$V_{ref}=5 \times V_{ave} \quad V_{e50}=1.4 \times V_{ref}$$

以上のように風車は運用される場所の年間平均風速の 7 倍（ $=5 \times 1.4$ ）の風速に耐える強度を持つことが要求される．この関係は，欧州に比べて年平均



風速は低く、その反面希に猛烈な熱帯低気圧の風が吹く温帯モンスーンには当てはまらない。

宮古島を直撃した台風 14 号では、宮古島地方気象台での最大瞬間風速は 74.1m/s が観測されているが、風車の設置されている場所における風速とは必ずしも一致しない。そのため計測された風速データから、風車設置地点での風速を推定した結果、破損した風車で最大瞬間風速は 80.7～81.8m/s と報告されている<sup>[3.12]</sup>。

宮古島で被害を受けた風力発電機の強度クラスは、ClassI (70m/s) と ClassII (60m/s) であり、いずれも台風 14 号に対しては強度が不十分であったと言える。

### 3.5.2 地域

年間平均風速が高く、風力発電に適した地域の沖縄をはじめとする南西諸島は、台風の来襲頻度がきわめて高いことが図 3.10 から分かる。

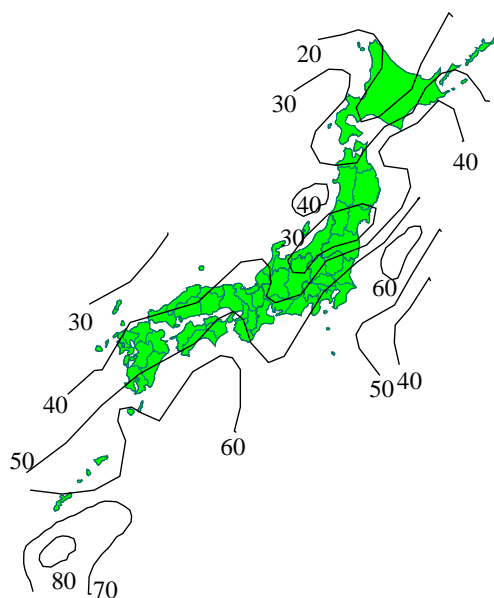


図 3.10 台風直撃回数（70 年間）<sup>[3.13]</sup>

### 3.5.3 風速

瞬間最大風速は、表 3.9 に示すように、80m/s 前後の例が報告されている。

表 3.9 日本における台風の最大瞬間風速<sup>[3.14]</sup>

順位	地 点	最大瞬間風速	台風名称	発生時期
1	宮古島	85.3 m/s	昭和 41 年台風第 18 号	1966 年 9 月 5 日
2	室戸岬	84.5 m/s	昭和 36 年台風第 18 号	1961 年 9 月 16 日
3	与那国島	81.1 m/s	平成 27 年台風第 21 号	2015 年 9 月 28 日
4	名瀬	78.9 m/s	昭和 45 年台風第 9 号	1970 年 8 月 13 日
5	那覇	73.6 m/s	昭和 31 年台風第 12 号	1956 年 9 月 8 日

### 3.5.4 耐風速設計

台風の直撃を受ける可能性の高い沖縄地方の瞬間最大風速の出現確率を図 3.11 に示す。IEC61400 では、耐風速は 50 年に 1 度の最大風速で設計する事が要求されている。最高クラスの Class I の耐風速は 70m/s であるが、沖縄地方では 50 年再現風速は 73～79m/s 以上であり、上記規格ではカバーしきれていない。

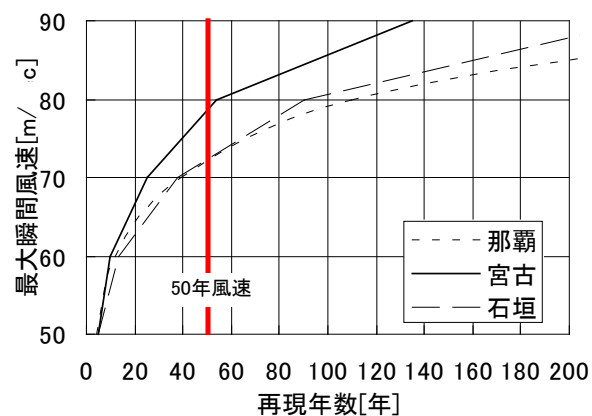


図 3.11 最大瞬間風速の再現年数<sup>[3.15]</sup>

### 3.6 第 3 章まとめ

- (1) 風力資源の豊富な日本の南西諸島では、風力発電の導入が望まれるが、猛烈な台風が襲来するために導入は容易ではない。
- (2) インドの風車の破壊は風車の設計耐風速を越えた風速（70m/s 以上）が原因である。
- (3) 豊富な風力資源を有する南西諸島では、更に厳しい風速 80m/s を越え

る台風が襲来している.

- (4) 沖縄地方では 50 年再現風速は 73～79m/s 以上であり，風車の国際規格 IEC61400-1 で規定する最大の設計耐風速要求 70m/s を越えており，国際規格ではカバーできていない.

## 第4章 風力発電機開発と形状の決定（技術的アプローチ）

本章では、第3章で求めた環境条件を適用した国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の離島用風力発電システム開発を例にとって、技術的な観点から形状に影響を与えた検討事項と決定の考え方について明らかにする。

### 4.1 NEDO 離島用風力発電システム技術開発

国内の426の有人離島には約146万人の人々が居住している（2000年時点）。（2018年時点ではそれぞれ416島、約100万人）<sup>[4.1][4.2]</sup>。それらの島の多くは島内の電気はディーゼル発電によっているが、それに要する発電コストは40円/kWhから100円/kWhで本土に較べて極めて高く、加えて船舶による燃料の運搬は気象、海象の影響を受けやすく、燃料供給が不安定な環境で運用されている。その一方、離島地域の多くは風力エネルギーに恵まれており、風力発電の利用が可能になれば、離島の電力問題の解消に繋がる。しかし国内では大型風車の開発に目が向けられており<sup>[4.3]</sup>、既存の大型風力発電機は電力システムの弱小な離島では容量が過大であること、離島では大型風力発電の輸送と建設が困難であること、南西諸島に数多く襲来する強い台風で風車が耐えられないなど、離島のインフラや気象条件に対応できる風車は存在しないことが明らかになった。この問題を解決するため、NEDOでは「離島用風力発電システム技術開発」事業（以下、本技術開発と呼ぶ）を開始した<sup>[4.4]</sup>。

### 4.2 技術開発の経緯

NEDO 離島用風力発電システム技術開発は、1998年から準備が始まり2003年3月に開発が完了した。開発内容と開発担当企業は公募の結果、富士重工業株式会社が提出した航空機技術を利用した風力発電システム案が採択された。本事業で開発された2基の風力発電機と関連設備は、沖縄県の伊是名島に建設されて島の実際の電力システムを使った運用試験を経て、2003年3月に4年間に渡る開発を完了した<sup>[4.5]</sup>。

開発を担当した富士重工業株式会社航空宇宙事業部門（以下、開発担当会社と呼ぶ）は、風力発電技術について、工業技術院機械技術研究所、東海大学

との共同研究を通して、風力発電の要素技術を学んだ。その中で機械技術研究所が所有する 15kW 実験風力発電機に対して、ブレードの翼型<sup>[4.6]</sup>、形状、材質の変更、制御方法の変更等大幅な設計変更を行った。更に平地での運転試験の後、気流の乱れが多い山岳地で運転試験を行い、風力発電の基礎的技術を取得してきた。この共同研究で得た技術と、自らが持つ航空技術を下敷きにして、本技術開発を担当することになった。これは開発担当会社にとって初めての風車、発電、系統制御、建設という風力発電全体システムの開発であった。

#### 4.2.1 開発の工程

工業製品の着想から製品化するまで図 4.1 に示す工程を踏む。検討は No.0 基礎的な検討から開始され、No.1 技術開発を経て No.2 量産／事業化に至って完了する（図 4.1 a）<sup>[4.7]</sup>。

No.0 基礎検討は政府と NEDO 内で実施され、No.2 量産／事業化は、開発担当会社が実施したもので図 4.1 a の網かけの部分には含まれていない。

No.1 技術開発は、「No.11 開発要求から No.15 試作／評価」までの各工程に細分化される（図 4.1 b）。このうち No.11 開発要求の検討は NEDO 内で実施されたものである。

技術開発の各工程の作業内容と成果物を表 4.1 に示す。

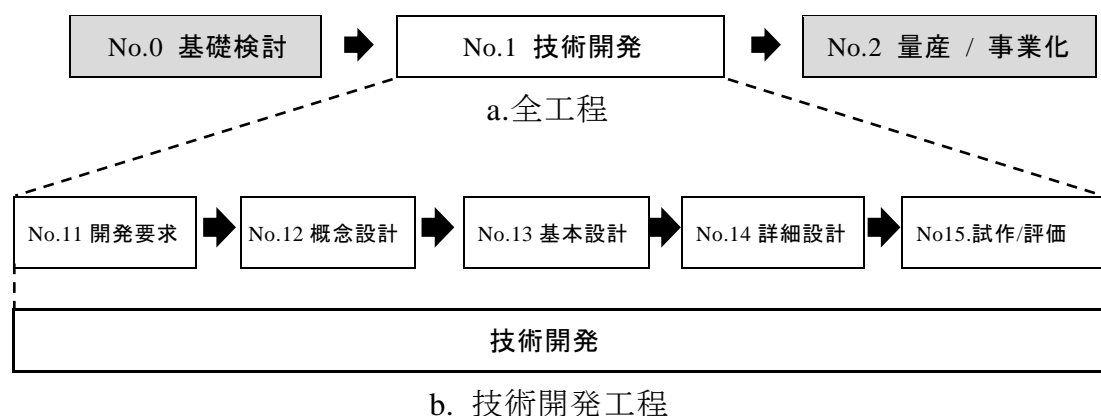


図 4.1 基礎検討から事業化までの工程

表 4.1 技術開発詳細

No	開発段階	内 容	成果物
0	基礎検討	開発の必要性和実現の可能性を検討する。	開発事業構想
11	開発要求	運用環境，性能，機能，信頼性，日程，コストなどの要求事項を設定する。	提案要求書
12	概念設計	要求事項を満たすシステム構想案を複数挙げ，その中から基本的構成を選択して，具体的な設計目標と開発計画を設定する。	提案書，開発計画書，構想図
13	基本設計	構想図を基にサブシステム・構成品の技術検討を行い，システム全体計画の精度を高め，開発計画の成立性と課題を確認する。関連試験を行って課題の解決方法を得る。機器の仕様を決定し製造者との細部調整を経て，細部の開発計画を作成する。	基本設計報告書，計画図，試験計画書，細部仕様書
14	詳細設計	計画図を基に各サブシステム，部位との整合を完全にとって製造図，製造仕様書，調達仕様書，詳細な試験計画を作成する。全体を詳細設計報告書としてまとめる。	詳細設計報告書，製造図，試験計画書，調達仕様書
15	試作/評価	製造図にもとづき部品製作と組立てをして試作品を完成させ，システム試験を実施する。試験としては技術，実用試験などがある。	試験報告書
2	量産/運用	試作機の結果を反映して量産機の設計，製造を行い事業として展開する。	量産機

### 4.3 開発要求 (No.11)

#### 4.3.1 離島における風力発電の課題

工程 No. 0 で離島における風力発電の必要性和実現の可能性が検討された後，工程 No.11 においてシステムの運用環境，性能，機能，信頼性，日程，コストなどの要求事項を検討した。その結果，日本の離島に風力発電を導入するためには以下の課題があることが明らかになった。

- 1) 大型風力発電機は出力過大で離島では運用できない。離島の電力を供

給するディーゼル発電所の設備容量は 1500kW 程度であるが、電力需要がピークの 20%程度の軽負荷時には 300kW 程度まで下がる。そのため大型の風力発電機は既存の系統に対する併入率が高くなり、電力品質が維持できない。

- 2) 大型風力発電機の建設に必要な大型クレーン等の重機は離島には無く、島外からの搬入も容易ではない。
- 3) 第 3 章で示した日本の南西諸島に襲来する強い台風に耐える風力発電機は、市場には存在しない。

#### 4.3.2 要求事項

課題は具体的な開発要求事項に細分化された後、1999 年春に NEDO から開発に関する事業が公募された。本技術開発に対する技術的要求を下に示すが、従来の風力発電機の技術水準を越える高度で挑戦的な要求含んでいる。( )内は従来の技術レベルを示す。

- 1) 80m/s 以上の耐風速性能を有すること。(70m/s)
- 2) 耐用年数は 20 年以上であること。(従来と同等)
- 3) 系統併入比率は最大 40% 以上であること。(30%)
- 4) 20t クラス以上の大型重機なしで建設できること。(大型重機を使用)
- 5) 発電コストは 20 円/kWh 以下であること。(離島における実績はない)

#### 4.4 概念設計 (No.12)<sup>[4.8]</sup>

公募を受けて、後の開発担当会社は、要求事項を満たす設計案を検討した。検討は全体システムを構成する主要な要素について、各々複数の案から最適の内容を選定し、全体として最適なシステム案を作成した。

絞り込みにあたっては次の方針によった。

- (1) 新しい技術に挑戦していること。(先行者の後追いではなく、独特の技術を指向)
- (2) 普遍性と発展性がある。(大型風力発電機にも適用できる技術を選択)
- (3) 会社が保有する能力と経験で対応可能である。(確実な開発内容と工程)

システムの具体的な設計仕様と開発計画を提案書にまとめて、1999 年 5 月末に NEDO に提出し提案が採択された。

提案書で記述した設計仕様と開発計画は、開発工程 No.12 概念設計として位置付けられ、それに沿った開発が開始された。

この段階で設定した仕様と諸元を表 4.3 に示す。( ) 内はその後の設計の進展で変更または決定された項目である。

表 4.3 NEDO 離島用風力発電システムの設計仕様（概念設計）

風車形式	水平軸	ロータ位置	アップウインド	ブレード枚数	3
ロータ直径	( 20 m )	定格出力	100 kW	定格風速	10.5 m/s
耐風速	80 m/s	ハブ高さ	( 20m )	増速機	ギアレス
タワー形式	モノポール	建設方式	( 3 案併記 )	寿命	20 年
発電機	永久磁石多極同期				

#### 4.4.1 風車形式と風力発電出力

- (1) 風車形式：第 2 章 2.1 項及び 2.3.2 項で述べたように、風力エネルギーを動力エネルギーに変換する効率（出力係数  $C_p$ ）が最も優れていること、市場で唯一成功を収めていること、及び開発担当会社が技術経験を持っていること、を考慮して水平軸 2 枚ブレードもしくは 3 枚ブレード形式を検討対象とした。
- (2) 出力：離島の電力系統規模と輸送の制約から決まるロータ長から決定した。
  - (a) 系統規模：中小規模離島の平均的な系統規模は 1,500 kW であり、20% 程度の軽負荷時の系統併入率 40% に相当する出力は 120 kW 程度である。
  - (b) ブレード長さ：多くの離島には定期航路を用いて車両総重量 15t 未満、全長 12m 以内の大型トラックが輸送可能で荷台に積載できるブレード長は 10m 程度、ハブを含むロータの直径は 22m 以下である。
  - (c) 風力発電出力：南西諸島の離島地域には年平均風速 6m/s～8m/s の風が期待できる。風力発電の定格出力が得られる定格風速はレーレ分布に従うとして、年平均風速の 1.5 倍の 9m/s～12m/s と推定される。 $C_p$  を 0.3～0.4 の範囲とすると、ロータ直径 22m（面積 380m<sup>2</sup>）として式 4.1 から



定格出力は約 50kW ( $C_p=0.3$ ,  $V=9\text{m/s}$ )～約 160kW ( $C_p=0.4$ ,  $V=12\text{m/s}$ )が得られる。

以上の結果から、定格出力を 100kW とした。

$$P = \frac{1}{2}C_p \rho A V^3 \quad \text{式 4.1}$$

$P$ :風車取得エネルギー,  $C_p$ :パワー係数,  $\rho$ :空気密度,  $A$ :ロータ面積,  $V$ : 風速

#### 4.4.2 ロータ

以降の検討における選択肢は、2.3 項に示した内容に従った。

##### (1) ハブ形式とブレード枚数

ハブはリジッド式 (a)とティータ式 (b)が候補で、3 枚ブレードはリジッドハブだけに適用できる。

図 4.2 に示すブレード枚数とハブ形式の組合せ (a), (b), (c) 案について、比較検討検討した。その結果を表 4.4 に示すが、2 枚はブレード 1 枚当たりの荷重、回転速度、空力騒音のほか、(2) に示す 2 枚ブレードが視覚的に好まれないことも考慮して、(c) 3 枚ブレード+リジッドハブ形式を選定した。

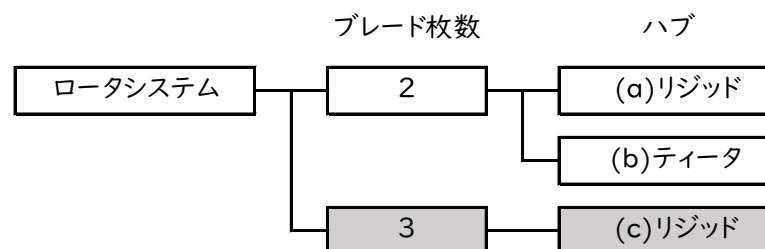


図 4.2 選択したブレード数とハブの組合せ

表 4.4 ロータシステムの比較

形 式	(a) 2 枚ブレード リジッドハブ	(b) 2 枚ブレード ティータハブ	(c) 3 枚ブレード リジッドハブ
ロータ回転速度	70 rpm		60 rpm
ロータ価格比	1.0	1.5	1.5
フラップ方向荷重/1 枚	110kNm	100kNm	76kNm
空力騒音	99 dB(A)		96 dB(A)
視覚に対する評価	不安定で刺激的		安定的
機構の複雑さ	最も単純	複雑	単純

## (2) 2 枚ブレードの見え方

図 4.3 は、フィジーで運用されている 2 枚ブレード風車 275kW 風力発電機を示す<sup>[4.9]</sup>。

図 4.4 (a) はブレードが水平位置, (b)は垂直位置にある写真である。この写真で分かるように、風車を正面以外の位置から見た場合、ブレードが垂直位置にある場合は見え、水平位置にある場合はよく見えない。そのためブレードの回転が、人の目にはブレードが空中で消えたり、現れたりを繰り返すフラッシュとして見える。そのため、近くで見る場合不安定で刺激的であり、2 枚ブレードの高い回転速度と相まって好まれない。



図 4.3 2 枚ブレード風車 (Vergnet 275kW, Butoni Wind Farm, Fiji)

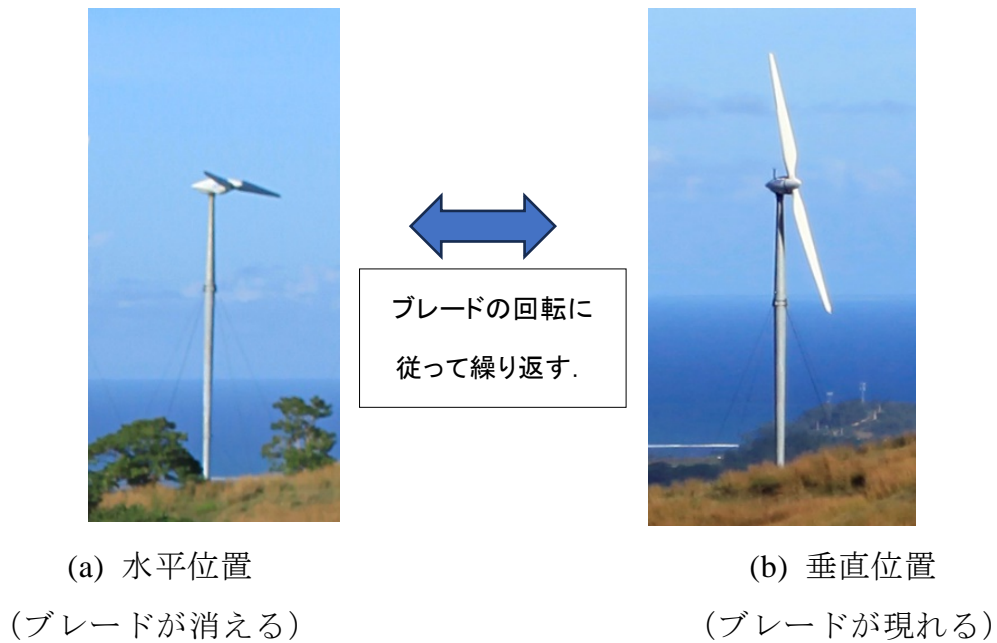


図 4.4 2 枚ブレードの見え方

### (3) ロータ位置

ロータがタワーの風上側に位置するアップウインド形式図 4.4 (a)と、風上にあるダウンウインド形式 図 4.4 (b)が選択対象である。ダウンウインド形式は、強風時にロータとタワーが接触する危険性が無いこと、ロータがヨー回転中心の風下にあるため、正の風向安定性（風見安定）を持っており制御等に利点は多い。一方で、タワーで乱された風がブレードに当たって発生する空力騒音や、材料疲労に関する問題が海外の開発例で報告されており、本開発では確実性を考慮して(a)アップウインド形式を選択した。

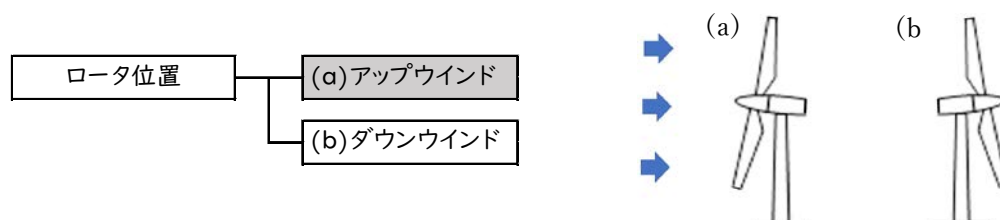


図 4.4 選択したロータ位置

### 4.4.3 発電機と動力系統

離島の厳しい自然環境と十分でない整備インフラを考慮して、構成が単純

で部品点数が少ない (d) 永久磁石多極同期発電機形式を選択した (図 4.5).



図 4.5 選択した発電機と動力伝達システム

#### 4.4.4 タワー

タワーはラティス形式とモノポール形式の 2 種類を検討した結果、次の (1) 項と (2) 項に述べる理由から (b) モノポール形式を選択した (図 4.6).

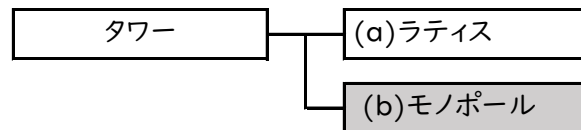


図 4.6 選択したタワー形式

(1) 南西諸島の高温、高塩分環境、高風速等の厳しい環境から、内部の機器や作業員を保護する能力が高い。

(2) 強風下で、モノポールタワーはラティスタワーに対して残存率が高い。

3.2.5 項で実施した残存性分析では、モノポールタワーの残存性はラティスタワーの 1.4 倍としたが、設計耐風速 70m/s、ピッチ制御風車のみを取り出して比較した場合、1.7 倍に拡大し、モノポールタワーの残存性が際立っていることが分かる (表 4.5)。

表 4.5 タワー形式と残存率（設計耐風速 70m/s，ピッチ制御方式）

機種	ピッチ制御	タワー形式	設計耐風速	風車数			割合	
				総数	被害なし	被害あり	被害なし	被害あり
C	ピッチ	ラティス	70 m/s	50	32	18	64%	36%
G	ピッチ	モノポール	70 m/s	13	13	0	100%	0%
J	ピッチ	ラティス	70 m/s	5	0	5	0%	100%
ラティス合計				55	32	23	58%	42%
モノポール合計				13	13	0	100%	0%

### (3) 建設方式

本開発には「20t クラス以上の大型重機なしで建設できること」が要求されている。概念設計段階では，表 4.3 に示すとおり大型クレーンを使用しないタワー起倒方式を選定した。しかしその詳細については，図 4.7 に示す (a)，(b)，(c) の 3 案について併記に留め，詳細は次の開発ステップで決定することとした。

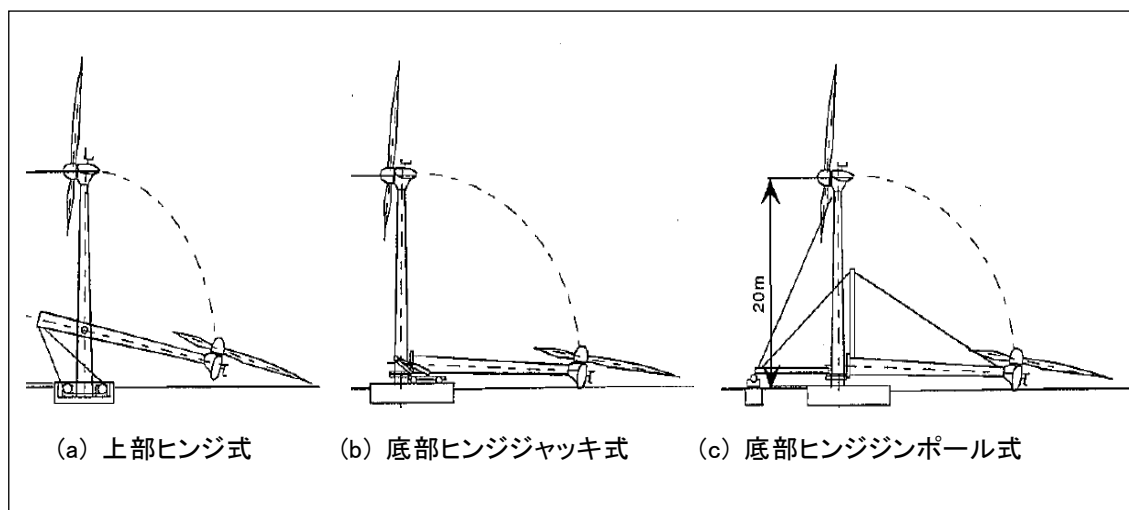


図 4.7 タワー起倒方式案（大型重機を使用しない建設）

#### 4.4.5 ナセル

概念設計で，増速機を用いない永久磁石多極同期発電機が選定された結果，ナセル形状は短太形となる。図 4.7 は主要な機器を収納し，ロータと結合してタワー上に搭載したナセルの形状である。

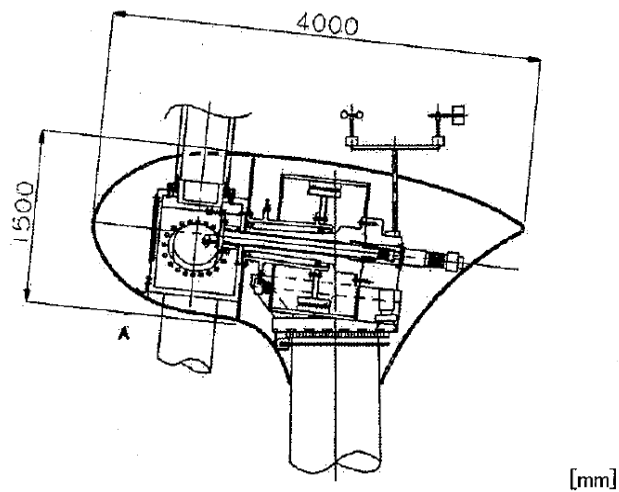


図 4.7 ナセルの機器配置と形状（概念設計）

#### 4.4.6 概念設計における構想図

風力発電機全体を表す構想図を図 4.8 に示す．この段階では内部の機械，電気等のサブシステムおよび全体の概略形状が示されているが，この段階ではナセル形状は内部の機器を包絡線で囲んだだけで，機器や構造の干渉や作業性など細部の検討はされていない．

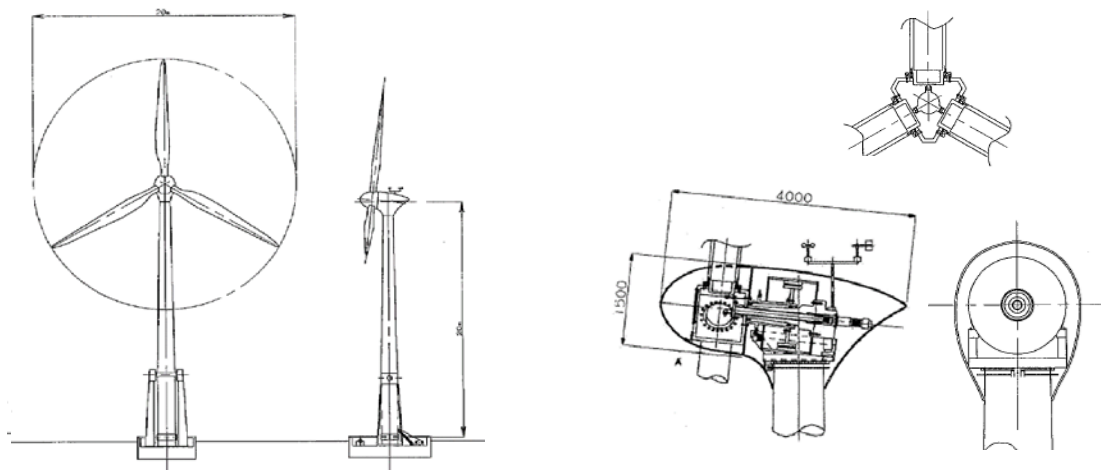


図 4.8 構想図（概念設計）

#### 4.5 基本設計 (No.13)

基本設計は，概念設計の結果をもとに詳細に技術検討を行う製造図面作成前の段階である．ここでは風力発電機の各要素の形状は概ね決定された状態

である。

#### 4.5.1 全体レイアウト<sup>[4.6]</sup>

直径 1.5m の永久磁石多極同期発電機をはじめとして、各機器の形状がほぼ決定した。図 4.9 にナセル内機器レイアウト、図 4.10 に全体構想図、図 4.11 に完成イメージ図を示す。ここでは概念設計時点には存在して無かった整備点検用の作業台と手摺がナセル後方に追加され、特徴的な外形を作っている。この段階では、部品の配置や相互の干渉の細部について、若干の調整が必要な事項が残っている状態である。

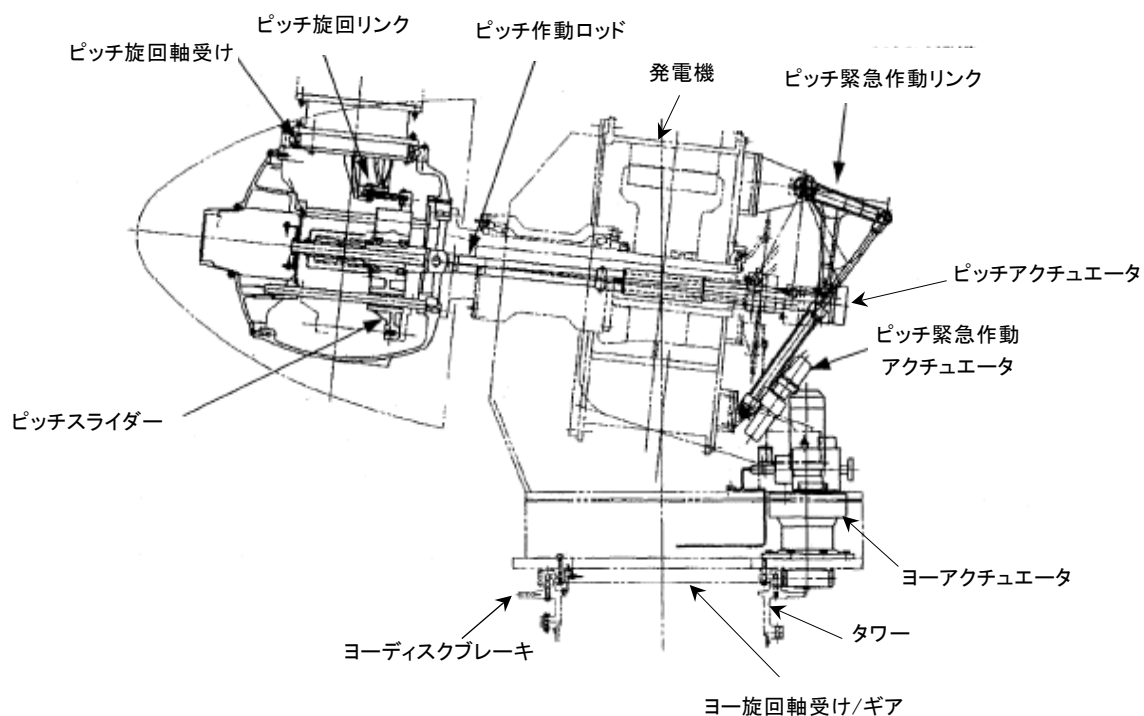


図 4.9 ナセル内機器レイアウト（基本設計）

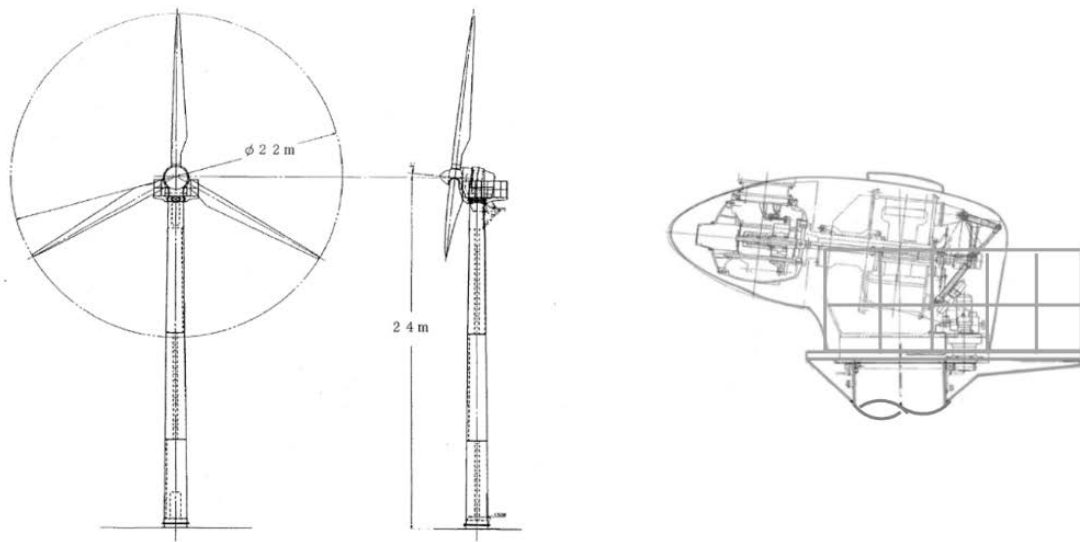


図 4.10 全体構想図（基本設計）

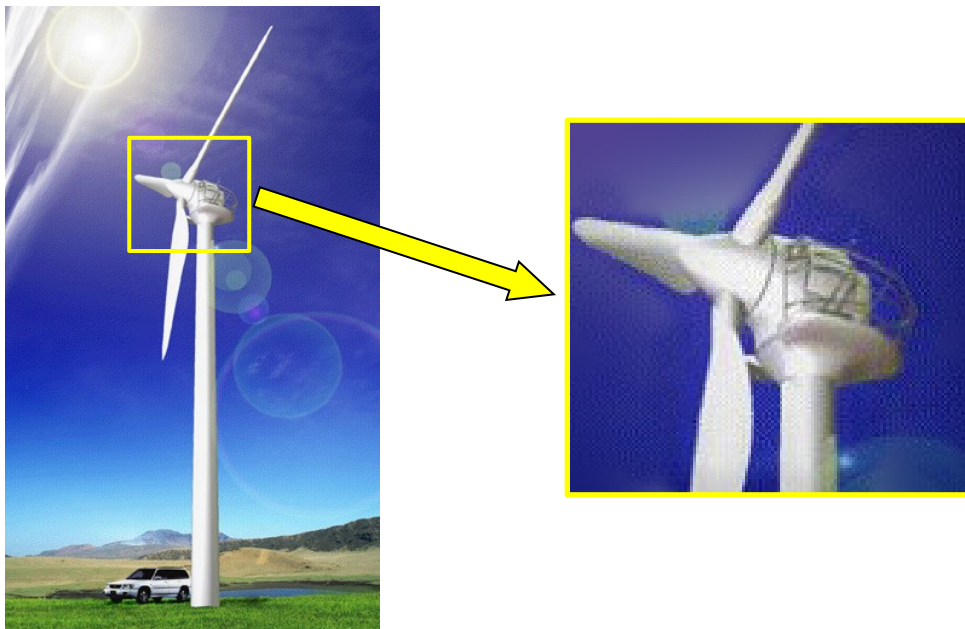


図 4.11 完成イメージ図（レンダリング）（基本設計段階）

#### 4.5.2 ナセルへのアクセス

作業員がタワー内の梯子を登って、ナセル後方の作業台に到達できるように、タワー側面と作業台下面に扉を設置した。下ヒンジで外に開く扉の内側には、昇降用のステップを取付け、安全のため作業台周りを手摺で囲んでい



る（図 4.12）.

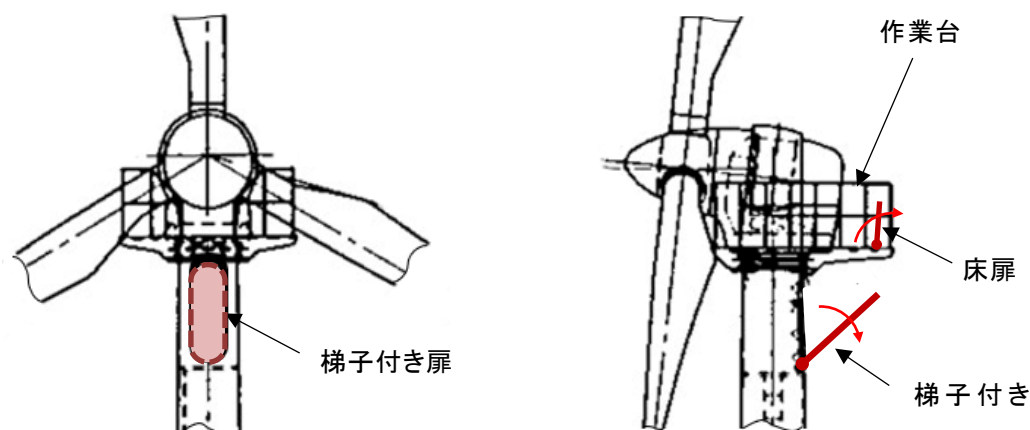


図 4.12 ナセルへの接近（基本設計）

#### 4.5.3 技術審査会における指摘

開発の節目で、外部有識者および NEDO 担当で構成される技術審査会が開催され、進捗や開発内容について審査が行われる。基本設計終了時の技術審査では、以下 2 点の指摘を受けた。

- (1) ナセルアクセスの安全性：高所でのタワー外側の扉を使った昇降は、危険を伴い見直す必要がある。
- (2) ナセルデザイン：ナセルの形は、後方に張り出した作業台に制約を受け、無骨で見た目に美しくない。

基本設計で得られたナセル形状とレイアウトは、安全性とデザインの両面から問題点が指摘されたため、詳細設計段階で見直すこととした。

#### 4.6 詳細設計 (No.14) <sup>[4.10]</sup>

詳細設計は、すべての部品や機器の機能、性能、形状を完全に整合させる設計の最終工程であり、製造に直結する製造図面や仕様書の作成が含まれる。基本設計の技術審査における指摘に対応するため、ナセルとタワーに大幅な設計変更を行った。

基本設計のナセル後部の作業台を用いた外側からのアクセス経路を、タワーから外に出ずにナセル内部に行くことが可能な内側アクセス方式に設計変

更した。主要な変更箇所は以下のとおりである。

- (1) タワー頂部の直径を拡大して、作業員が通る空間を確保する。
- (2) ハブや軸受け、発電機などの大型部品をロータ側へ移動し、発電機と架構構造の間に隙間を設ける。
- (3) 架構ベース板に作業員が通ることのできるマンホールを開ける。

この設計変更によって、作業員はタワー内部から直接ナセル内にアクセスすることが可能になった。ナセル内の機器配置を図 4.13 に、作業員のアクセス経路を図 4.14 に示す。

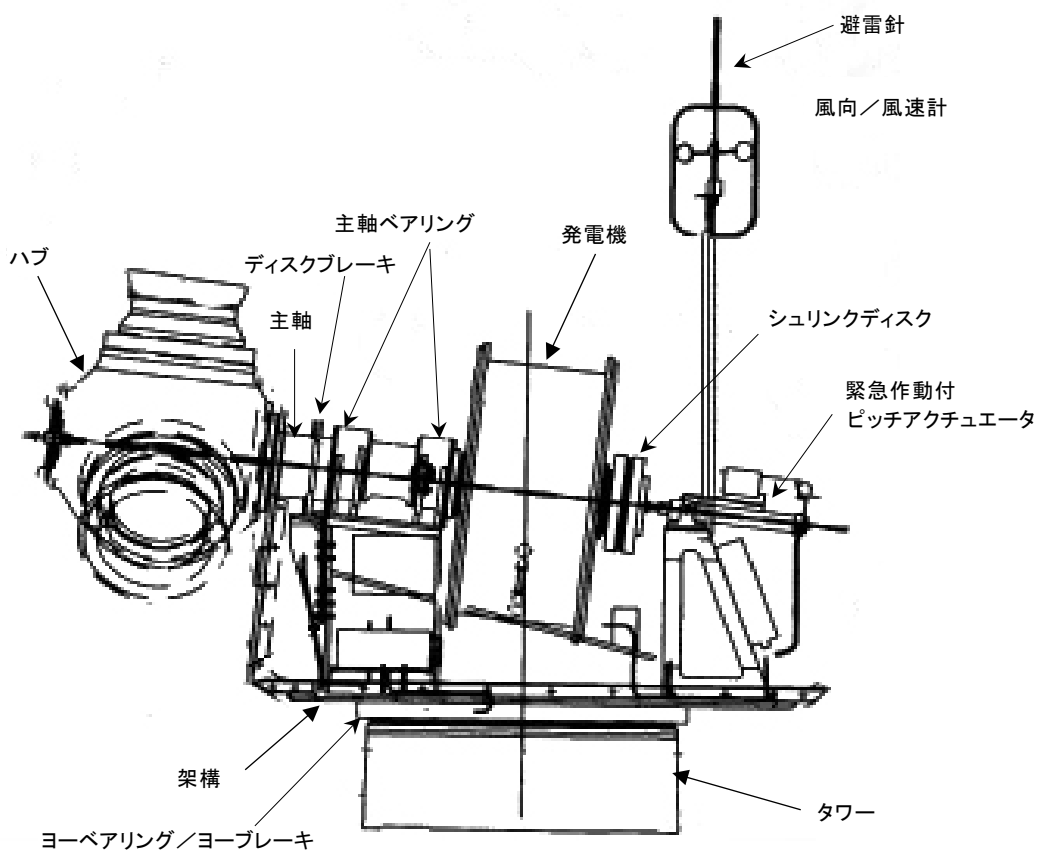


図 4.13 ナセル内機器配置

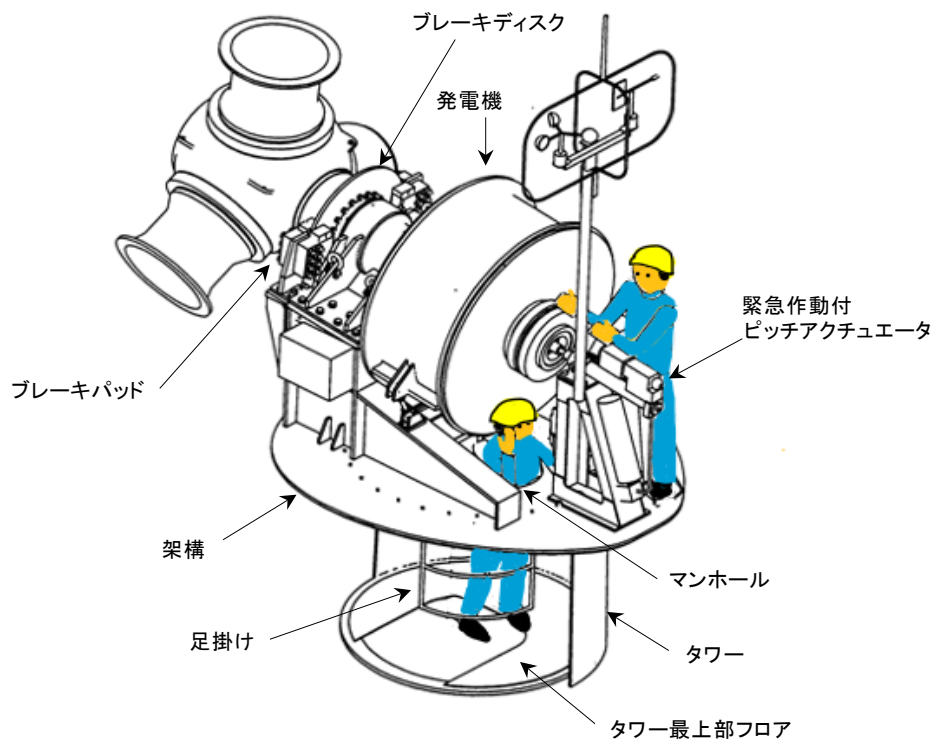


図 4.14 作業員アクセス経路

#### 4.7 第 4 章まとめ

日本の南西諸島に襲来する猛烈な台風に耐える風力発電機の開発を例に取り，風力発電機の形状に影響を与えた技術的な検討内容と問題について，開発方針，定格出力，ハブ形式とブレード枚数の決定根拠，発電機形式，タワー形式およびナセル内の機器配置について，決定に至る工学的な手法を開発工程に沿って明らかにした．しかしこの方法のみでは作業性やデザインについて十分な配慮が反映できず，結果として大きな設計変更が必要となり，修正すべき点があることが明らかになった．

## 第5章 風力発電機開発と形状の決定（視覚的アプローチ）

本章では第4章で述べた風力発電機の設計開発において、インダストリアルデザインを適用した視覚的な観点から、形状を決定する考え方と方法について説明する。

### 5.1 デザインの担当会社

本技術開発では、基本設計の段階から社外のインダストリアルデザインを専門とする会社に、風力発電のデザインを依頼した。デザインを担当した株式会社 GK ダイナミックス<sup>[5.1]</sup>は、乗り物等の移動体のデザインを得意とする会社で、ヤマハ発動機株式会社のオートバイのデザインはすべて GK ダイナミックスが担当しており<sup>[5.2]</sup>、乗り物のデザインに豊富な経験を持つ会社である。加えて GK ダイナミックス（以下デザイン担当会社と呼ぶ）のデザイン担当者は、航空機のデザインにも精通しており<sup>[5.3]</sup>、航空機メーカーの新製品である風力発電に、自社製品の持つ形を表現したいと考えた開発担当会社（富士工業）の意図を表現することが出来ると考えて、依頼したものである。

### 5.2 初期のデザインの位置付け

4.5.3 項で述べたように基本設計段階のデザインは「ナセルの形状は、無骨で見た目にも美しくない、」という指摘を受けたが、このデザインもデザイン担当会社が行ったもので、図 4.11 の作業台下部形状やナセルとタワーの接続部に、わずかにデザイナーの意図を読むことができる。

しかし、この段階では移動体のデザインの経験が豊富なデザイン担当会社といえども、風力発電機のデザインは初めての経験であったこと、技術的設計が精緻な工学的方法に則って設計されており、デザインの踏み込みが許容できる領域について、デザイン担当と技術担当の間で明確になっていなかった。したがって、図 4.9 ナセル内機器レイアウト（基本設計）に示す、技術的検討で決められた機器配置に、その外側を覆う形を造ることをデザインとすることに留まっていた。

詳細設計において、ナセルの設計変更に関する技術的な内容は 4.6 項で述べたが、視覚的な設計であるデザインを変更するに当たり、他の明示的な設

計仕様と同様のターゲット像を構築することが必要となった。そのため本開発では詳細設計に至って、デザインの目的や方向について明らかにした。

### 5.3 デザインの意味と目的

ものの形状は人間の情感や五感を揺さぶる力を持っている。この力を製品の上に具現化する行為である工業デザインは、その形に機能と性能を美しく視覚化する作業でなければならない。ものの美しさは抽象的で、これが美しさだと定義することは困難であるが、共同で行う造形作業では、その理由や評価の基準を明らかにして、開発に携わるメンバーが共有できる必要がある。

本開発に於いては、デザインの意味と目的を以下のような希求の形に表現した。

- 人々の目に触れる機会の多い風力発電機は、環境製品であり自然と調和する美しい形を持ちたい。
- 新しい風力発電機ブランドの出現を表現したい。

開発担当会社では、本技術開発とは別に、自社ブランドの風力発電機を市場に投入する新製品事業計画を並行して進めていた<sup>[5.4]</sup>。自社事業として並行開発していた風力発電機は、出力 40kW、ブレード直径 15m の小型ではあるが、大型風力発電と同等の規格、技術、設計を用い技術的には本格的な内容で、NEDO の本技術開発に選定した永久磁石多極同期発電機と同形式の発電機を用いており、小型の低増速比の増速機があるものの、ナセル形状は同じく短太配置であった（図 5.1）。そのため 40kW 風力発電機の開発においてデザインの考え方と手法を確立して、それを本事業開発に適用する手順を取った。

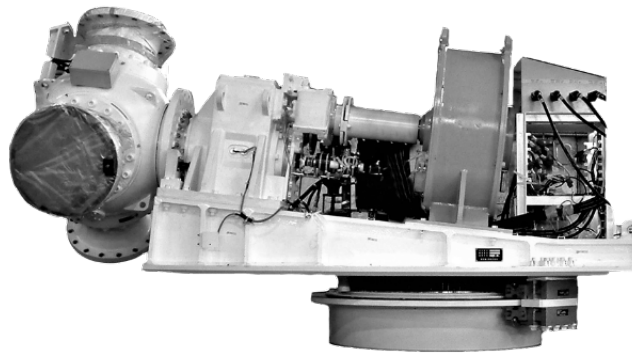


図 5.1 40kW 風力発電機の本セル内機器レイアウト

#### 5.4 デザインの方向

新しい風車ブランドの形を表すためには、「航空機メーカーが開発する風力発電機」を訴求するデザインが必要で、その方向を表すイメージ図を作成した（図 5.2）。この図には、空を飛ぶ象徴であるライト兄弟とその飛行機<sup>[5.5]</sup>、大西洋単独横断飛行に挑戦したリンドバーグ<sup>[5.6]</sup>、開発担当会社の前身である中島飛行機のプロペラ機<sup>[5.7]</sup>、精緻な技術が形に表れたカメラ<sup>[5.8]</sup>、そして回転体のイメージを持つヒマワリと、ナセルを暗示させる卵が配されている。



図 5.2 デザインの方向イメージ

さらに、このイメージに沿った新しい風力発電機のデザインの位置と性格を示すものとして、図 5.3 で、デザインの位置と性格を表した。この図では先行する風力発電機メーカーのデザインに対して、航空機メーカーが開発する新しい風力発電機の位置と方向を示したものである。基調となる形状は、流れる空気の中にあって、張り詰めた曲面の内側から湧き上がって来る「力感・張り」を持たせて、冷たい機械に「艶やかな情感と豊かな陰影」を表現することを目指した。

この作業は迂遠に見えるが、デザインの基調を視覚的に表しており、設計担当者とデザイナーの間で、製品の位置付けや形の方角を共有し、共同作業を円滑に行うために極めて有効であった。

新しいナセルの形状は、空力的形状を持つ卵型を基調として、機能が美しさとして表現できるデザインとした。卵型は、球と並ぶ究極の形で、外からの風や圧力に耐える強さを表す形として採用したものである。

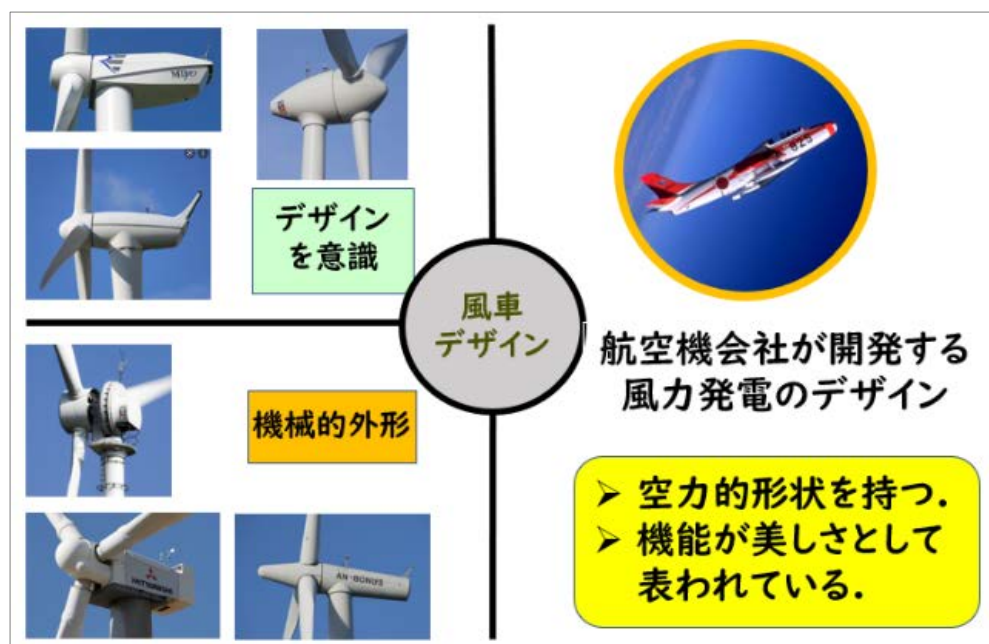


図 5.3 新しい風力発電機のデザインの位置と性格

## 5.5 先行開発

開発担当会社が、自社事業として本技術開発に先行して開発している 40kW 小型風力発電（SUBARU 40kW）の造形において、上記のデザインの考え方を



適用した．図 5.4 にデザイナーが作成したナセルのレンダリングと，全体イメージを示す．

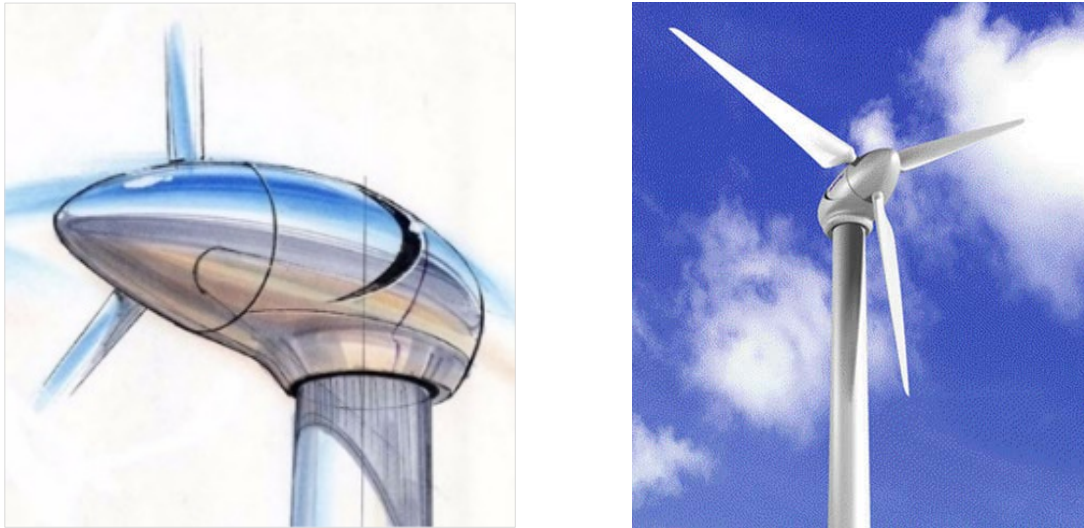


図 5.4 40kW 小型風力発電機のナセルレンダリングと全体イメージ

このレンダリングを基に図 5.1 に示した構成品レイアウトと整合を取りながら，ナセルの形状を決めた．図 5.5 に示す完成形は，レンダリングに対して，ナセル横の空気取入口の位置，大きさやタワー接合部の詳細な形状が現実的になっているが，デザインの基調は保たれている．図 5.6 に完成した機器配置（合成）とナセル外観を示す．

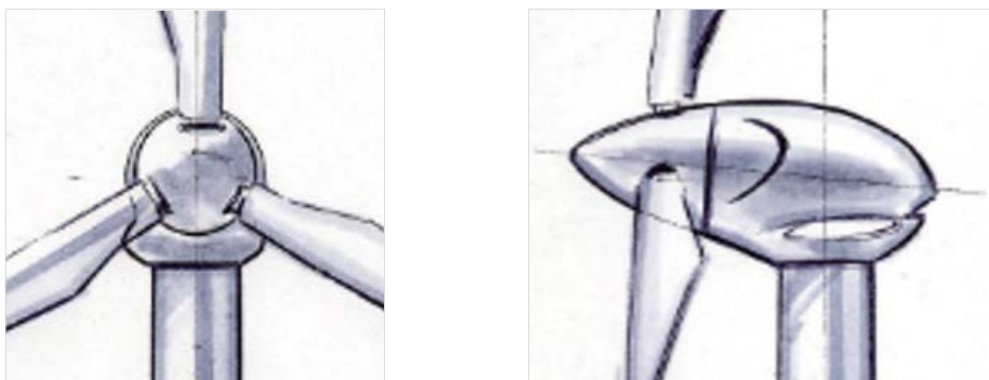


図 5.5 40kW 小型風力発電機のナセルデザイン



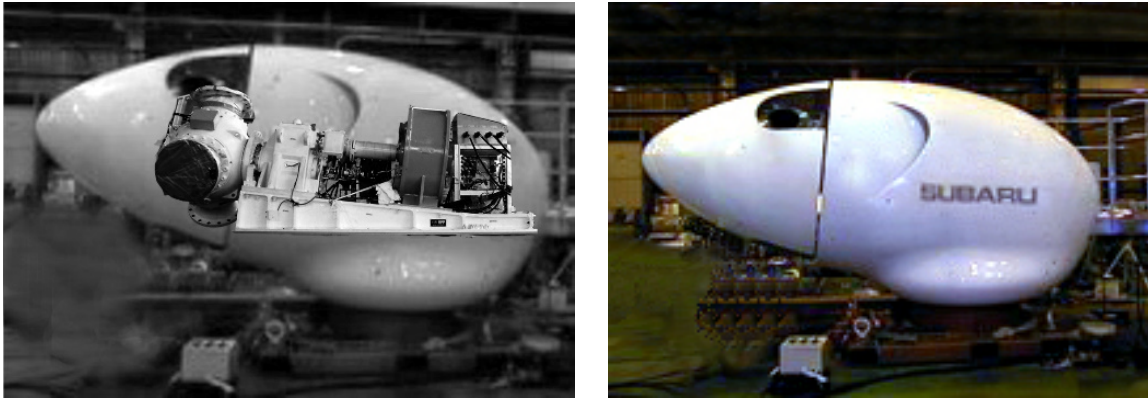


図 5.6 機器配置とナセル外観（40kW 小型風力発電機）

## 5.6 離島用風力発電のデザイン

40kW 小型風力発電機で確立したデザイン手法を，離島用風力発電機の詳細設計に適用した．

図 5.7 は，検討途中のナセル内の機器形状，配置に合わせたナセルデザインである．架構の上下にはヨー旋回アクチュエータ，ヨーベアリング，ヨーブレーキ等の大型の機器が取付けられており，この部分はどうしても外に向かって膨らむ部分（バルジ）であり，全体のスリム化に対して処置が難しい部位である．

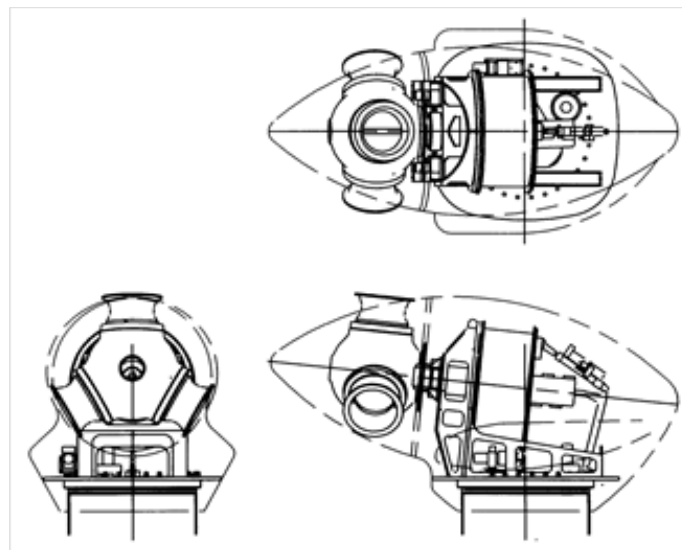


図 5.7 ナセルデザイン（途中案）

ナセルの下部からタワーに向かって遷移するこの部分は、風車を下から見上げる視点にとってナセルの表情に与える影響は大きい。この部分には、重要な構造物、機器が収納されており、デザインと技術的設計を両立させることは容易ではなくナセル下部のバルジの処理が、全体のデザインの成否を決める、困難で重要な部位である（図 5.8）。

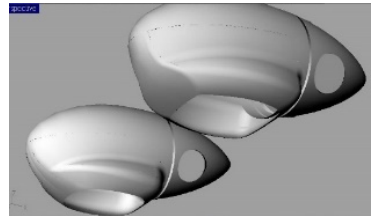


図 5.8 ナセル下部のバルジ例

図 5.9 は 図 5.7 に示した機器、構造物を無理なく包み込む Loose fit 案で、緊張感が欠けた形状となっている。図 5.10 は空力的形状を意識した全体を絞り込んだ Tight fit 案であるが、ナセル形状に余裕はなく内部の機器、構造はナセル内に収まっていない。

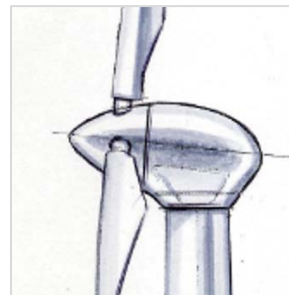
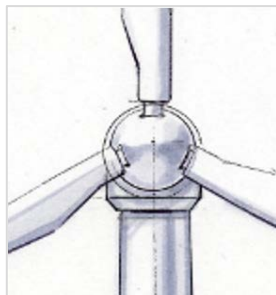


図 5.9 Loose fit 案

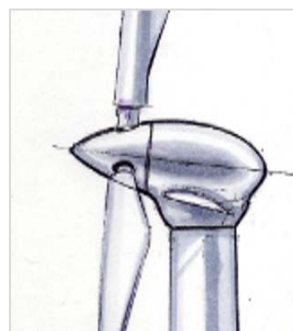
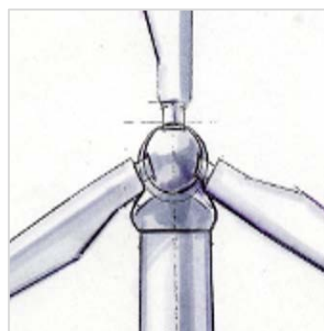


図 5.10 Tight fit 案

図 5.11 はナセル首下のバルジの形状を工夫して内部の機器を包み込むデザインであるが、この案でも干渉は完全には解消されていない。図 5.12 は同案のレンダリングを示すが、図 5.7 に示す機器、構造の配置では理想的なナセルデザインが得られず、更に内部を削り込んで再配置が必要な状況であった。

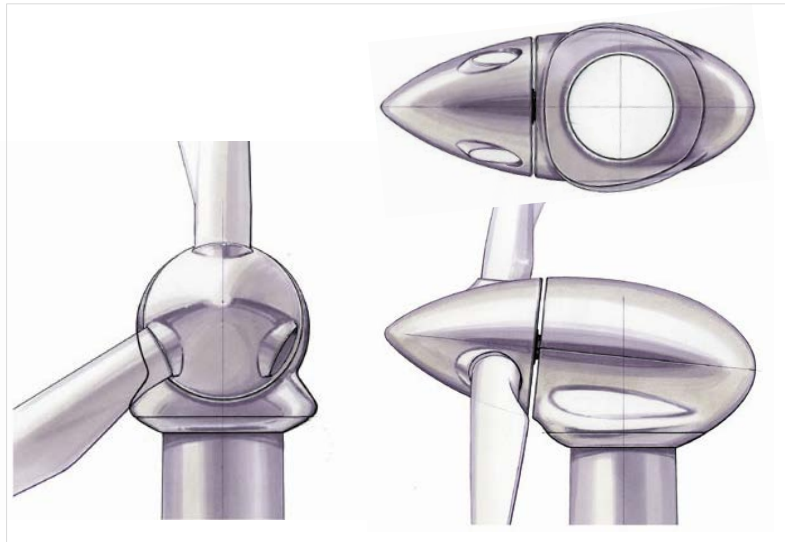


図 5.11 大バルジ案

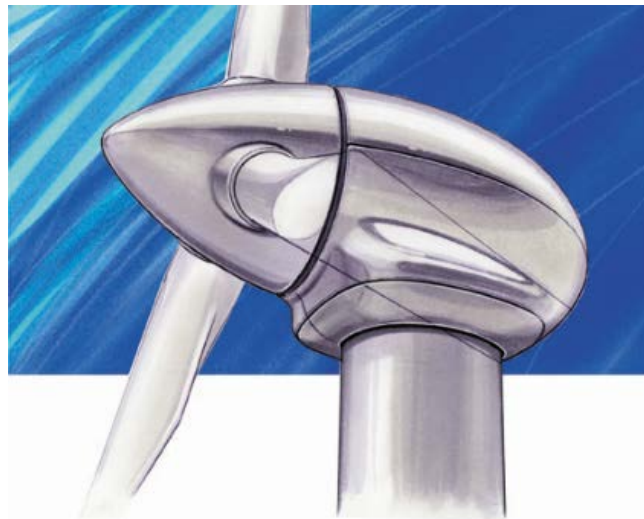


図 5.12 大バルジ案のレンダリング

## 5.7 第5章まとめ

第4章で述べた風力発電機の開発において、技術的検討とは別に行われたインダストリアルデザインの視覚的な点で、形状を決定する考え方と方法について、技術的なアプローチと比較しながら明らかにした。デザインの初期にその方向性や位置付けを明確にして工程を進めることが重要であるが、インダストリアルデザインの立場から形状を製品に創り込む作業において、4章で述べた技術的方法と齟齬をきたすことがある。

## 第6章 技術とデザインの融合

本章では、風力発電機開発の開発過程で発生するデザインと設計間の問題の具体的な例について考察し、設計面とデザイン面の価値観と目指す方向の違いと問題、及びデザインと設計の境界問題を明らかにし、両者を融合して統一した解を得るための解決方法について実際の例を基に提示する。

### 6.1 デザインと設計間の問題

第5章に示した詳細設計に於ける設計変更によってナセル後方の作業台が廃止され、ナセルの外形は洗練された形になった。その一方で、デザイン担当者が作成した滑らかな曲面は、技術担当者が設計した機器、構造物をナセルの内部に取り込むことが出来ずに、多くの場所でナセルからはみ出す物理的干渉が発生した。第5章の図5.11に示した大バルジ案は、タワーに向かって表情豊かにバルジで造形されているが、詳細を見るとナセルカバーと内部が干渉して、各所でナセルカバーからはみ出しているものであった。図6.1の矢印部分には、架構がナセルカバーと干渉している例を示している。

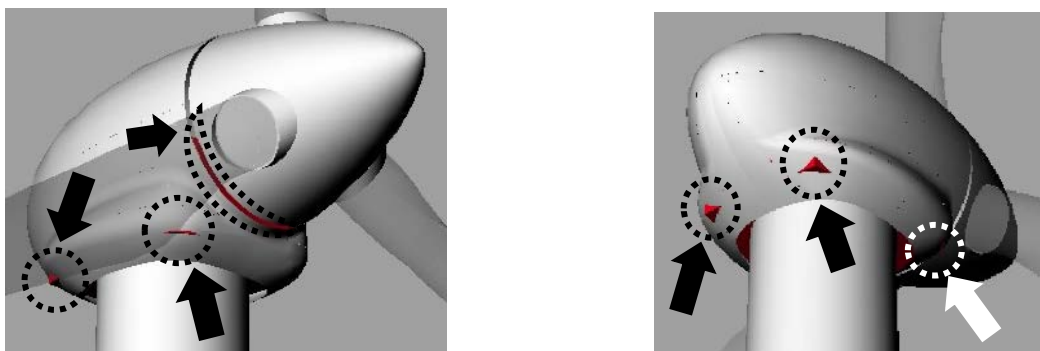


図 6.1 架構とナセルカバーの干渉（矢印部分）

この対策として、ナセルカバーの干渉部分に部分的な膨らみを付けて、干渉を回避する局所的対応は容易ではあるが、ナセル全体の連続した滑らかな面を崩すことになる。したがってナセル形状と合わせて構造および機器の形状や配置の見直しを行うことに決定し、デザイン担当者と架構、機器設計担当者間で調整が頻繁に行われた。この調整を通じて形状を決定する上で、

次に述べる両者の評価基準の違いが明らかになった。

## 6.2 技術とデザインの評価基準の違い

設計担当者とデザイン担当者は、お互いに自分の持ち場で優れた形状を追求する。両者の「優れた形状」は定義が異なっており、調整の現場では往々にして意見の衝突が発生する。形状を創る工程は、設計担当者が先行して内部の機器や構造物の形と位置を決めた後、デザイン担当者が外形を覆う。そこで干渉が発生した場合は、内部の形状やレイアウトに戻って修正する。形状を決定する場面では、荷重、応力などの客観的な数値を使って議論する設計担当者と、インダストリアルデザインの美的価値から形を決めるデザイン担当者の間には、共通の言語が少なく、両方をバランス良く融合させた形を実現することは容易ではない。設計担当者の技術的な視点と、デザイナーの希求する優れた形には、以下の違いがあることが明らかになった。

### 6.2.1 技術的に優れた形状

技術担当者の形状への関心は、機能、強度、剛性、更にはコストであり、技術的に優れた形状とは次の条件を満たしたものである。

- 機器の配置が単純で明快である。
- 機能、強度に関して無駄な部分がない。
- 荷重伝達経路が短く単純である。
- 計算のためのモデル化が容易である。

### 6.2.2 デザイン的に優れた形状

デザイン担当者は、長年に渡って通用する力を持ったデザインを希求する。そのためには、時代を超えて通用するコンセプトと、それを具現化する造形力が必要であり、下の条件に合致するものを優れたデザインとする。

- 周囲の環境と調和している。
- 機能を追求し虚飾を廃し簡潔である。
- 製品の構造や機器を無理なく包み込んでいる。
- 類似のデザインが他に存在しない。

## 6.3 境界問題の融合と解決

### 6.3.1 問題の原因

基本設計審査の席上で受けた指摘に対応するために、大きな設計変更が必要で開発日程や人員配置に影響を及ぼす開発計画の見直しが必要になった。これには、それまで執ってきた以下に述べる設計の手順と決定に関する優先順に原因があった。

#### (1) ナセル内機器配置に対するナセル形状決定の自由度

各部を設計する担当者が作った機器や構造の形を積み上げたものを、ナセル内のレイアウトとして固定し、その後付け作業でナセル形状を決定した。作業性やデザインの作り込みは、ナセル内の機器、構造の配置が決定された後、それに影響を与えない範囲で行われたが、この時点では使える空間は既になく、ナセルやタワーの外側に、美しさを損なう形での作業台や通路を追加すること以上は出来なかった。

#### (2) 作業性やデザインに対する意識

ナセルのデザインは、既定の機器や構造の外形の包絡面を決める自由度しか残されていなかったことと相まって、デザインが明確な設計事項として明示されていず、デザインは作業性と共に十分な配慮がなされなかった。

### 6.3.2 対応策

上に述べた問題の対応策として、以下に示す方法を適用した結果、有効であることを確認した。

#### (1) 境界領域の決定にかかわる事項に関する責任と権限を明確にする。

ナセルの全体レイアウトや作業性、デザインの様な各サブシステムに横断的に関係する領域の設計は、個々のサブシステムで重視する点が異っており、調整が難航することが多い。このような問題を全体最適化の立場から解決するためには、全体の責任を持つ設計統括者が日程、資源等も考慮して最終的に決定することとする。設計統括者は、開発担当会社の風力事業統括を担当する部長であった。

## (2) デザイン作業を，技術設計作業と対等の位置に置く．

デザインはデザイン担当会社（GK ダイナミックス）に委託していたが，形状の決定に関して開発担当会社内部の設計組織と同じ位置付けとした．具体的には，技術とデザイン間の調整会を頻繁に開催し，意志の疎通を図った（図 6.2）．デザイン担当会社の部長職のデザイナーにデザインに関する責任と権限を持ってもらい，調整は設計統括者とデザイン責任者の両者も参加した．担当者間で調整のつかない場合は，設計統括者が決定することとした．

## (3) 開発目的に，美しいデザインを実現することを明らかにする

デザインの位置付けと方針を示し，それに従ってデザイン作業及び関連する事項を決定する．



図 6.2 デザイン担当者と設計担当者の調整

## 6.4 完成形

上に述べた対応策を適用して，設計とデザインを変更した．その結果，内部の機器や構造部品とナセルカバーの干渉問題を解決し，ナセル下部の形状を表情豊かに表現したデザインを得ることができた，図 6.3 にナセル外形と内部の機器，構造の配置を，図 6.4 に完成したナセル外観を示す．

工場で完成の後，試験サイトである沖縄県の伊是名島に 2 基が建設された．伊是名島に建設された NEDO 離島用風力発電機を図 6.5 に示す．



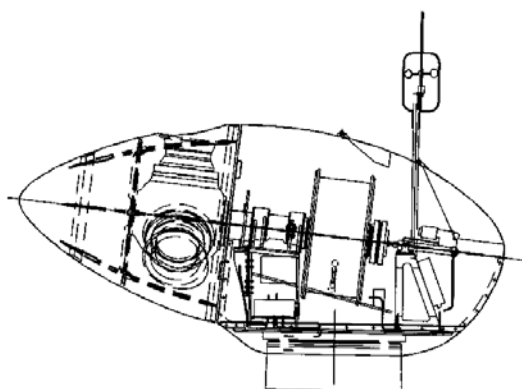


図 6.3 ナセル透視



図 6.4 完成したナセル



図 6.5 NEDO 離島用風力発電機（沖縄伊是名島）

## 6.5 デザインの継承と発展

NEDO 離島用風力発電システムの開発担当会社では、この開発で得た経験を用いて、以下の風力発電に関わる開発、製造事業を開始した<sup>[6.1]</sup>。

### 6.5.1 100kW 中型風力発電システム (SUBARU22/100)

NEDO 離島用風力発電システム技術開発で開発した 100kW 風力発電は、開発の完了後、2003 年に試験サイトのある沖縄県伊是名村に譲渡され、島の発電に使用された。更に開発担当会社は SUBARU 22/100 という商品名で製造販売し、ショッピングモール<sup>[6.2]</sup>や、公園に設置された。

伊是名島で運転された 1 基は、環境省の浮体式洋上風力発電実証事業の小規模実験機としてダウンウインド形式に改造され、長崎県杵島沖で運転試験に供された（図 6.6）。試験中の 2012 年 9 月に戦後最大級となった台風 16 号が五島列島全域を暴風雨圏に巻き込みながら通過した。風車への最接近時の中心気圧は 940hPa、ナセルでの最大瞬間風速は 53.5m/s、最大波高は 16.9m に達したが、風車、浮体等の施設は全く損傷が見られず、直ちに運転が再開できる状況であったと報告されており<sup>[6.3]</sup>、強風に対する性能が改めて確認された。



図 6.6 浮体式洋上ダウンウインド風力発電機 <sup>[6.3]</sup>

### 6.5.2 40kW 小型風力発電システム (SUBARU15/40)

NEDO 離島用風力発電に先駆けて、自社事業として開発した 40kW 小型風力発電<sup>[6.4]</sup>は（図 6.6）、本開発に先駆けて同様のデザイン手法を用いた先行的な例となった。この小型風力発電機は、商品名 SUBARU15/40 と命名され、2001 年グッドデザイン賞（商品デザイン部門）<sup>[6.5]</sup>を受賞し、更に同年新エネルギー財団から新エネルギー大賞（資源エネルギー庁長官賞）<sup>[6.6]</sup>を受賞したが、形状の美しさや開発の意図が第三者に評価されたものである。事業としては足利工業大学<sup>[6.7]</sup>、日本大学<sup>[6.8]</sup>、東京電機大学<sup>[6.9]</sup>をはじめとする研究機関や、各地の公共施設<sup>[6.10]</sup>、企業<sup>[6.11]</sup>に販売された。



図 6.6 40kW 小型風力発電機（SUBARU 15/40）（撮影一條厚）

### 6.5.3 2MW ダウンウインド大型風力発電システム (SUBARU 80/2.0)

#### (1) 開発の経緯

小型風力発電機、100kW 中型風力発電機の開発で得た技術と経験を生かして、電力関係の販路を持つ日立製作所を共同開発者として、当時の最大市場

の 2MW クラスに参入し, 2MW 風力発電機(SUBARU 80/2.0) を開発した<sup>[6.12]</sup>. この風力発電機は量産商用機としては世界初となるダウンウインド形式を採用した. この形式は数々の利点を持っており, 1970 年代に米国 NASA やドイツで多くのダウンウインド試験機が作られたが, タワー後流とブレードの干渉による騒音や材料疲労の問題が発生し, その後顧みられることが無かった<sup>[6.13]</sup>. しかし現代の数値流体解析技術の進歩により高精度の高い解析を行い, 更に伊是名島で運転中の 2 基の NEDO 離島用風力発電機の 1 基を, ダウンウインドに改修して実証試験を行い (図 6.7), 問題が解決されることを確認してダウンウインド形式を採用した<sup>[6.14],[6.15]</sup>.



図 6.7 アップウインド (左) とダウンウインド (右) の実証試験<sup>[6.9]</sup>

## (2) デザイン

2MW ダウンウインド大型風力発電機は, 共同開発会社 (日立製作所) が供給できる発電機が巻線型誘導発電機で, ロータの回転を増速する必要があるため, 第 2 章図 2.9 に示す「誘導発電機・増速機あり」に適した長細形を採用した. それまで開発した小型, 中型風力発電機は, 両者とも同期発電機の短太形状であり, 長細形状のナセル設計は初めての経験となった.

新開発の 2MW ダウンウインド風力発電機のデザインは, 小型, 中型風力



発電機と同じデザイン会社（GK ダイナミックス）に依頼し、デザインと技術の調整、融合については、小型、中型で開発した方法を用いた。大型風力発電のナセルデザインは、開発担当会社（富士重工業）のアイデンティティの表現に加えて、製造コストを抑制できる形状を目指した。基本形状は航空機に似た長細形ナセルであるため、航空機メーカーの作る製品というイメージを表現しやすい形状であったが、ダウンウインドという他に見られない形式が形に表れることに配慮した。図 6.8 は、ナセルデザインの検討初期に作成したデザイン座標で、この図の左右座標はナセル側面形状の軸で、右方が○形、左方が□形、上下座標はナセル断面形状の軸で、上方が○形、下方が□形を表している。

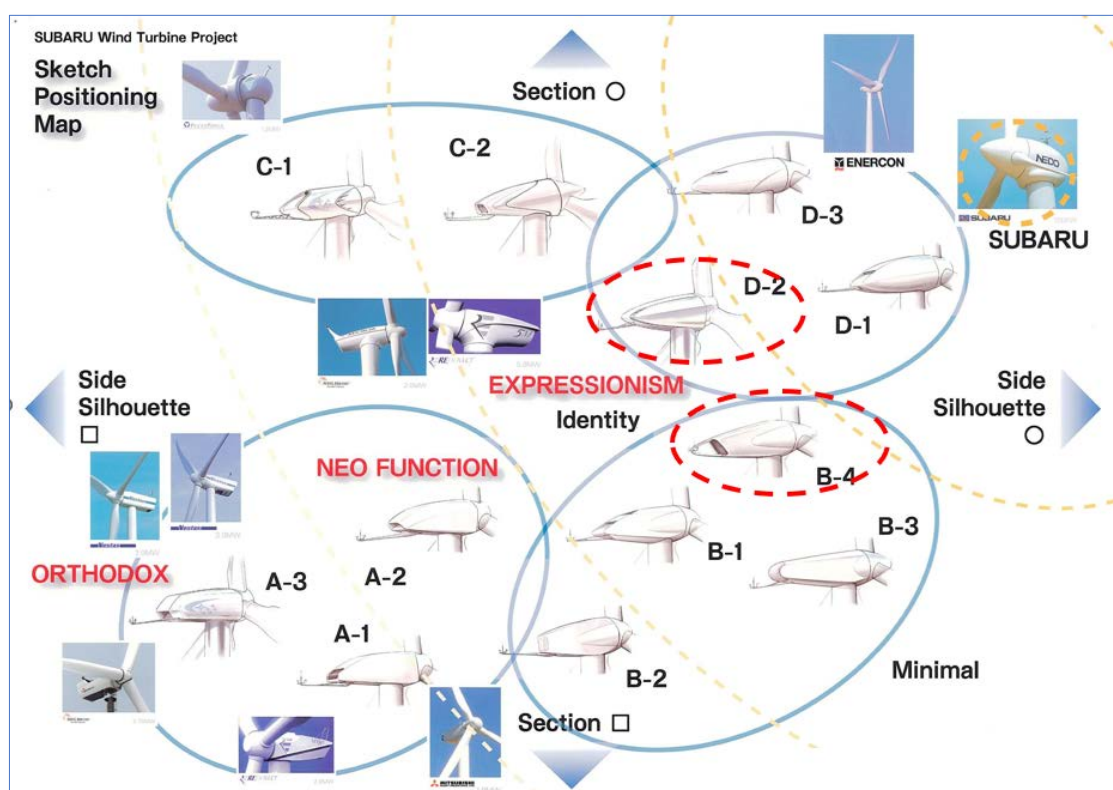


図 6.8 2MW ダウンウインド風力発電機の初期のデザイン座標

航空機の図面は、左側を進行方向（風上）で作成する習慣があり（船舶とは逆）、それに従って、富士重工業の風力発電機の図面は左側を風上において作成する。アップウインド形式を採用した 40kW 小型、100kW 中型風力発電

機は左側にロータを置いて作図されたが、ダウンウインド風力発電機は図 6.8, 図 6.9 に示すように左側を風上としてロータを右側に置いて作図されている。図 6.9 は、デザインが絞り込まれて来た段階の各案のレンダリングであるが、左方向に飛行する航空機のイメージが表れているが、複雑な曲面が多くコストを削減できる形にはまだなっていない。

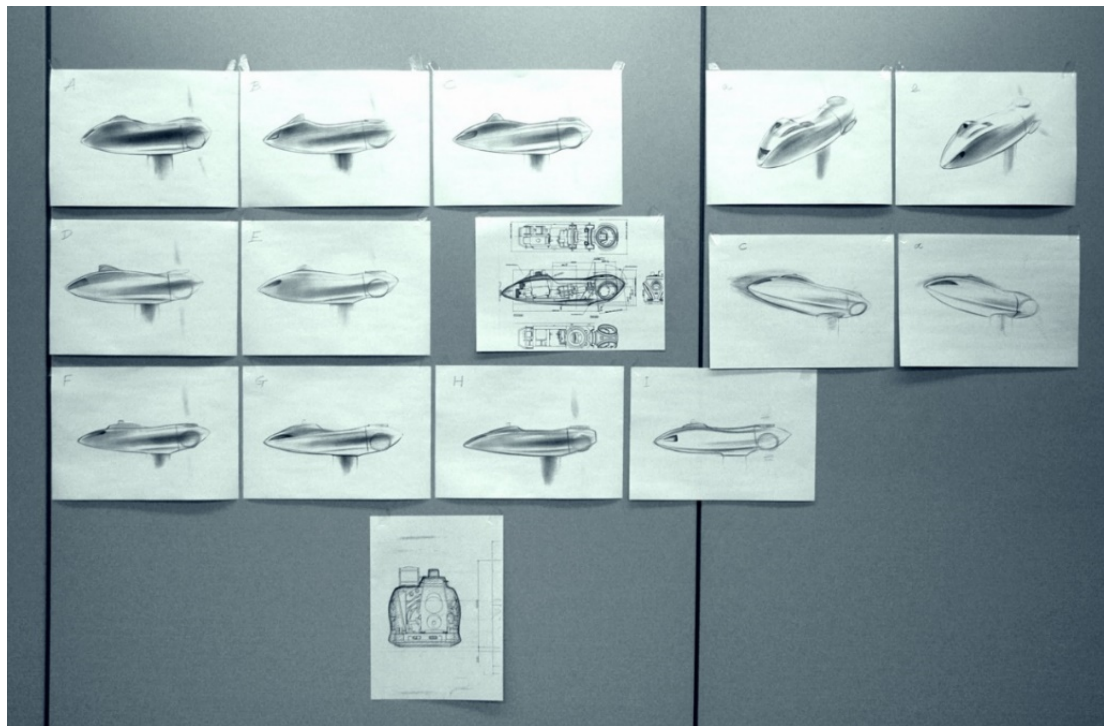


図 6.9 2MW ダウンウインド風力発電機のレンダリング

図 6.10 は完成したナセル，図 6.11 は山岳地帯のウィンドファームに建設された 2MW ダウンウインド風力発電機であるが，左側に飛行する航空機のイメージを持った独創的なデザインとなった。

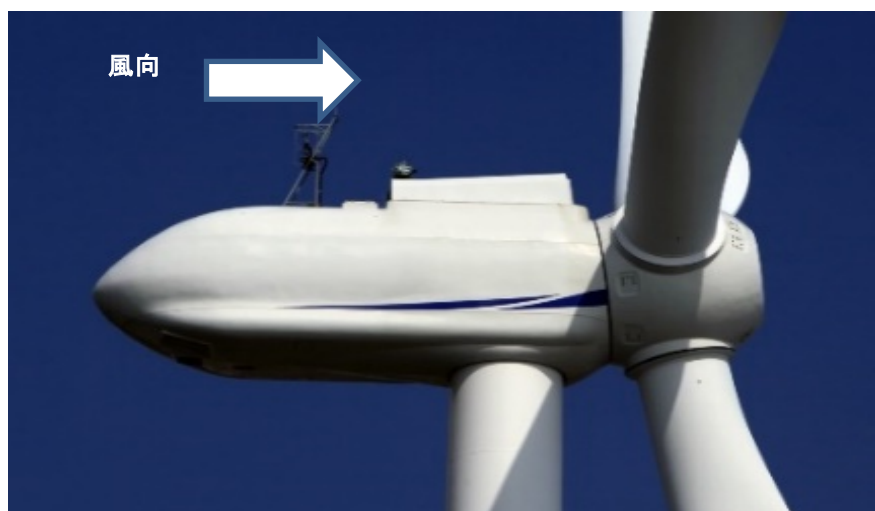


図 6.10 ダウンウインド風力発電機（SUBARU 80/2.0）のナセル



図 6.11 ウィンドファームにおけるダウンウインド風力発電機

### (3) 事業化と発展

この 2MW ダウンウインド大型風力発電機は, SUBARU 80/2.0 と命名され, その開発が評価されて, 平成 18 年度 (2004 年度) の新エネ大賞 (資源エネルギー庁鑑賞) を受賞した<sup>[6.16]</sup>. SUBARU 80/2.0 は後に共同開発会社である日立製作所に事業譲渡の後, 日立 HTW2.0-80 と改名され, 浮体式の洋上風力発電 (図 6.12) を含めて 300 基を超える受注があり, 国内のベストセラー風力発電機となった<sup>[6.17]</sup>.



福島沖洋上風力発電



五島市沖洋上風力発電（撮影松信隆）

図 6.12 2MW ダウンウインド風力発電機の洋上浮体式への発展

## 6.6 第 6 章まとめ

環境対策やエネルギー問題に対する有力な対策となる風力発電を円滑に導入するためには、風力発電の社会的受容性が高いことは重要な要件である。風力発電機の「見た目の美しさ」は、その要件の一つであり、視覚性に配慮した風力発電機のデザインの意義は大きい。しかし、自動車や家庭用電化製品の様に、デザインの認識度が高く、設計とデザインの間が近い商品に比べ、巨大な電気設備である風力発電機は、デザインに対する認識度も低く、設計とデザインをバランスよく進める方法について課題が多い。

本章では、風力発電機のデザインを決定づける要素について、技術的設計の判断から決定される要素と、視認性(デザイン)で決定される要素を、NEDO 離島用風力発電システム開発を例にとって明らかにした。さらに、風力発電の形状デザインにおいて、設計とデザインの判断基準、方法について分析を行い、開発現場で発生する設計とデザインの問題を切り分け、両者を高いレベルで融合する方法について、以下の結論を得た。

- (1) 風力発電機のデザインの作り込みは、社会受容性の観点から重要である。
- (2) 設計とデザインは、形の決定において異なる方法と価値観を持っている。
- (3) 設計とデザインは、単純明快、無駄の排除、虚飾を廃す等、共通する価値



観を有しており，形状決定における融合の糸口がある．

- (4) 両者の形の決め方，評価基準を共に尊重し，開発を円滑に進めるためには，開発初期に製品デザインのあるべき姿を議論し，設計とデザイン間で共通の価値観とデザインコンセプトを持つことが必要である．
- (5) デザインは技術的な設計作業と同列の体制とし，並行して進めることが有効である．

NEDO 離島用風力発電システムの開発に端を発した「美しい風力発電機」の開発は，日本文化が持っている簡潔な自然観と美意識を共通の価値観として，設計とデザインの双方が切磋琢磨し，その過程でお互いの創造性を高め合い，美しくも厳しい日本の自然と景観に溶け込んで調和する形を実現することが出来た．

## 第7章 風力発電機に対する視認者の印象<sup>[7.1]</sup>

### 7.1 背景と研究概要

巨大な風力発電機は人々の目に触れる機会が増えている．再生可能エネルギーの中の重要な位置を占める風力発電が人々に好感をもって受け入れられるためには，社会受容性に対する配慮が重要である．本章では 風車の形状を決定する諸要素のうち，風車の設計段階でデザインを作り込むことが出来る唯一の部位であるナセルの形状に注目した．

ナセルは図 7.1 に示すように風車全体の中で存在感が大きく目立つ部位であり，視認者の好き嫌いに影響を与えやすい部位である．本研究ではナセルの形状に対して視認者がどのように感じるかについて，大型化が進んでいる<sup>[7.2]</sup>風力発電機の開発に役立てることを目的として調査を行った．

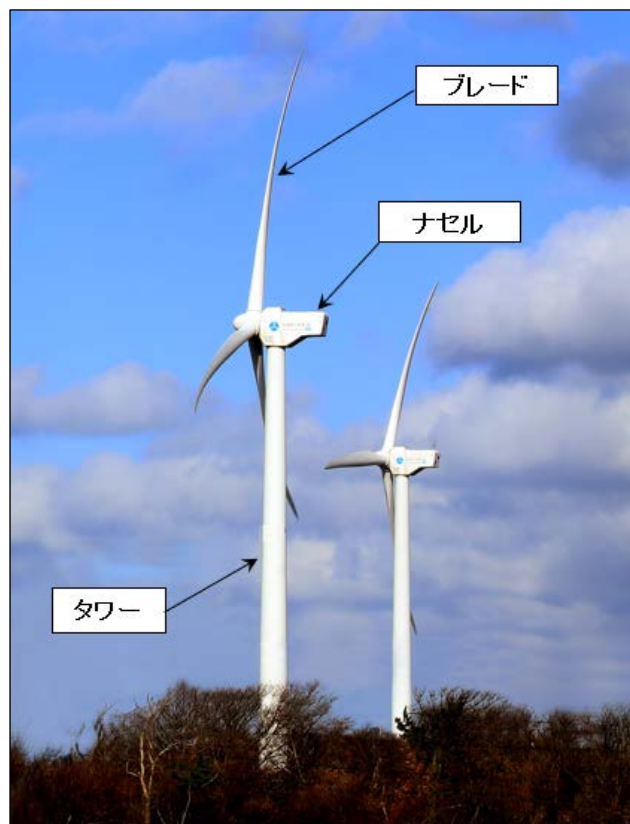


図 7.1 風車各部の見え方

### 7.2 ナセル

#### 7.2.1 ナセルの基本形状

風力発電機ナセルについて、第2章2.3.5項で説明を行ったが、要約すると以下の通りである。

- 発電機、増速機、制御装置等の機器を収納して自然環境から保護する。
- ナセルの形状は、誘導発電機／増速機を持つ長細形状（図7.2(a)と、同期発電機／増速機を持たない短太形状（図7.2(b)）に分類される。
- ナセル形状の自由度は大きく、外観上の見栄えを考慮して形状を決めることが可能な唯一のデザインの対象である。

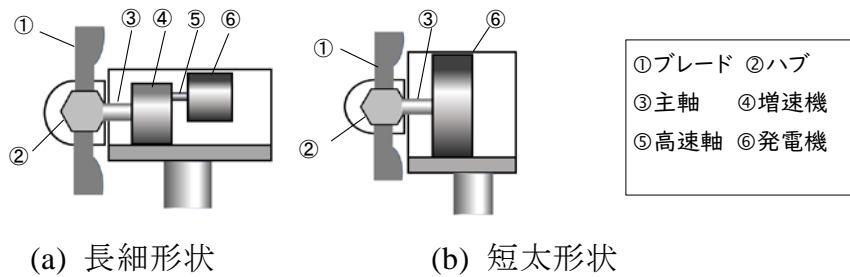


図 7.2 ナセルの基本形状

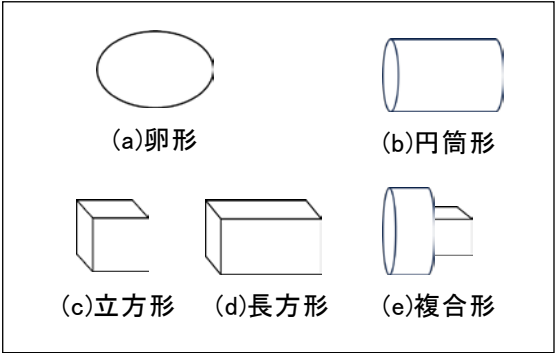
## 7.2.2 実際のナセル形状と分類

国内外で目にすることの多い風力発電機ナセルの例を図7.3に示す。使用した写真は筆者撮影の他、wind-turbine-models.com<sup>[7.3]</sup>等による。



図 7.3 様々な形状の風力発電機ナセル

調査にあたって、ナセルの「基本形状」を図 7.4 の (a)卵形から (e)複合形の 5 種類に分類した。基本形状に対して表情を与える形状の「創り込み」について表 7.1 に示す 3 種類に分類した。図 7.5 は図 7.2 の様々なナセルを、「基本形状」および「創り込み」によって分類したものである。



創り込み分類	記号
直線処理	L
曲線処理	C
意匠的处理	D

表 7.1 創り込み分類

図 7.4 ナセルの基本形状分類



図 7.5 ナセル形状分類

### 7.3 ナセル形状に対する印象調査

風車ナセルは様々な形状と意匠で設計されているが、どのような形のナセルが好まれ、逆に好まれないのか、その評価要因は何か、についてアンケートによる調査を行った。

#### 7.3.1 調査対象者

足利大学工学部において、2023 年度前期の人間の感情に対して興味を有していると考えられる「心理学」と、工学的な関心を持っていると考えられる「材料力学」を受講した学生を対象としてアンケート調査を行った。アンケートは 2023 年 7 月に実施し 123 名から回答を得たが、同一内容の回答を連続するなど、信頼性が低いと判断された回答 13 名分と、日本語の習熟が十分でないと思われた留学生 15 名の回答は分析対象から除外した。その結果、分析対象者は 95 名であった。（有効回答率 77.2%）

#### 7.3.2 調査手続き

前述の講義が終了する前に、学生に対して調査への協力可否を確認し、合意が得られた学生に対してアンケートを行った。回答は無記名とし、回答は任意であること、回答の有無、内容は授業成績へ考慮しないことも併せて説明した。本調査は、足利大学の研究倫理審査会の承認を得て実施した（承認番号:足利大倫委第 54 号）。

#### 7.3.3 調査内容

回答はデータ処理の確実性と迅速性を考慮して、Web のフォーマットへ記入することで回収した。調査対象とするナセルは図 7.4 に示す 25 点から、5 種類の「基本形状」と 3 種類の「創り込み」の組合せが偏らないことに留意して 15 点を選択した（図 7.6）。

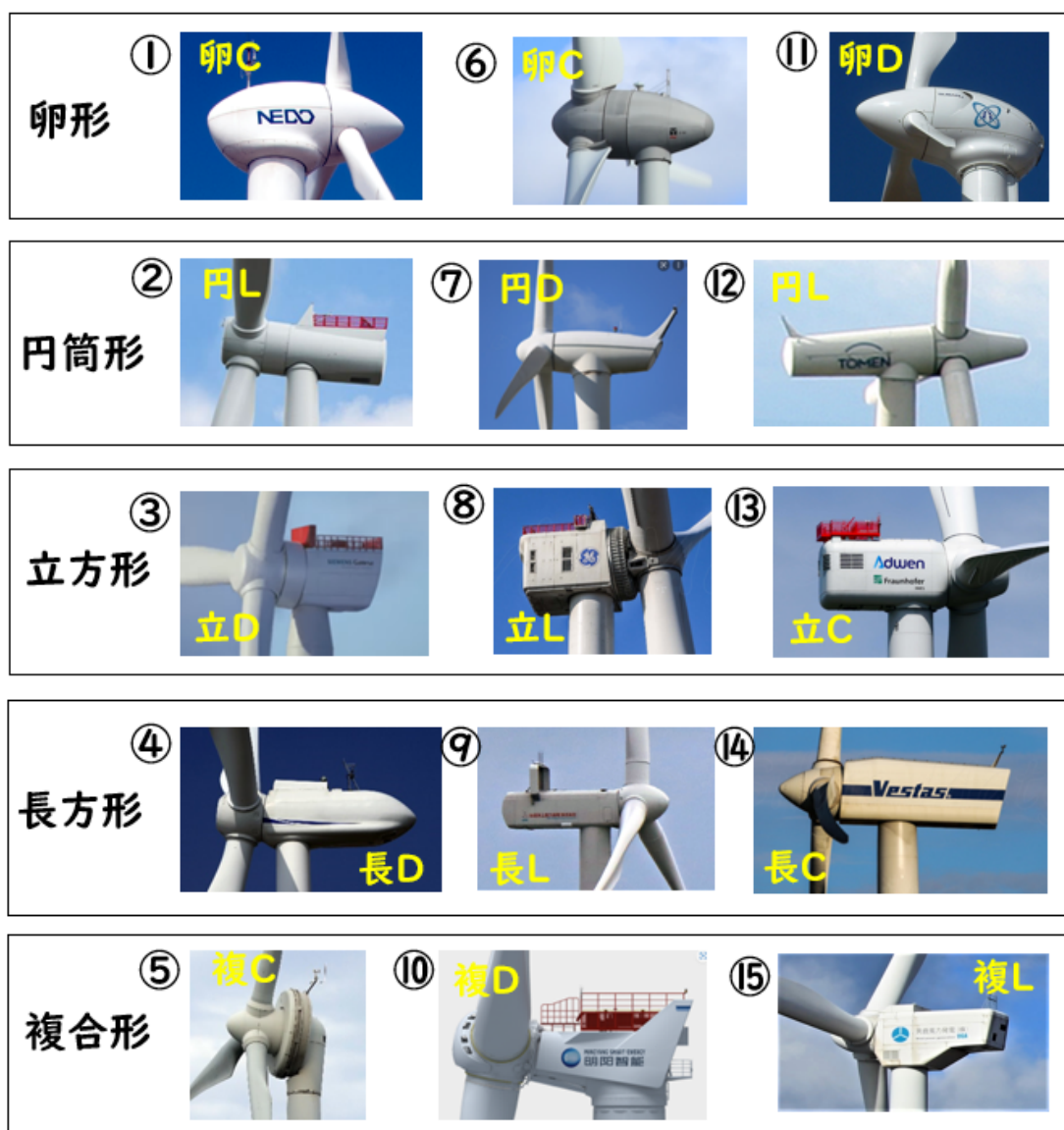


図 7.6 調査対象としたナセル

### 7.3.4 調査票

被験者に示す調査票に記載する 15 点のナセルの写真は、形状以外の視覚的刺激を排除するため、ナセル上に描かれたロゴやマークを消去した。さらにナセル色は白黒に、背景は空色に統一し、ナセルの姿勢や方向を揃えた（図 7.7）。

調査において学生一人が回答に要する時間を 10 分程度とし、その時間内で一人の学生が回答出来る点数は 5 点と想定した。そのため 15 点のナセル写真を A, B, C の 3 グループに分けて、3 種類の調査票を準備し各々 5 点の風車

写真を掲載した．調査票は A3 サイズのコピー用紙にカラーで印刷し，1 人 1 枚を配布した．

各グループ内で，「基本形状分類」と，「創り込み分類」の配分に片寄りが無いことに留意して形状を配分し，グループ間で分類の種類と数はほぼ均等であることを確認した（表 7.3）．

表 7.3 調査票のナセル形状の均等化の確認

グループ	風車分類			基本形状分類の数					創り込み分類の数		
	ナセル番号	記号		卵	円	立	長	複	L	C	D
A	①	卵	C	1	1	1	1	1	1	2	2
	②	円	L								
	③	立	D								
	④	長	D								
	⑤	複	C								
B	⑥	卵	C	1	1	1	1	1	2	1	2
	⑦	円	D								
	⑧	立	L								
	⑨	長	L								
	⑩	複	D								
C	⑪	卵	D	1	1	1	1	1	2	2	1
	⑫	円	L								
	⑬	立	C								
	⑭	長	C								
	⑮	複	L								



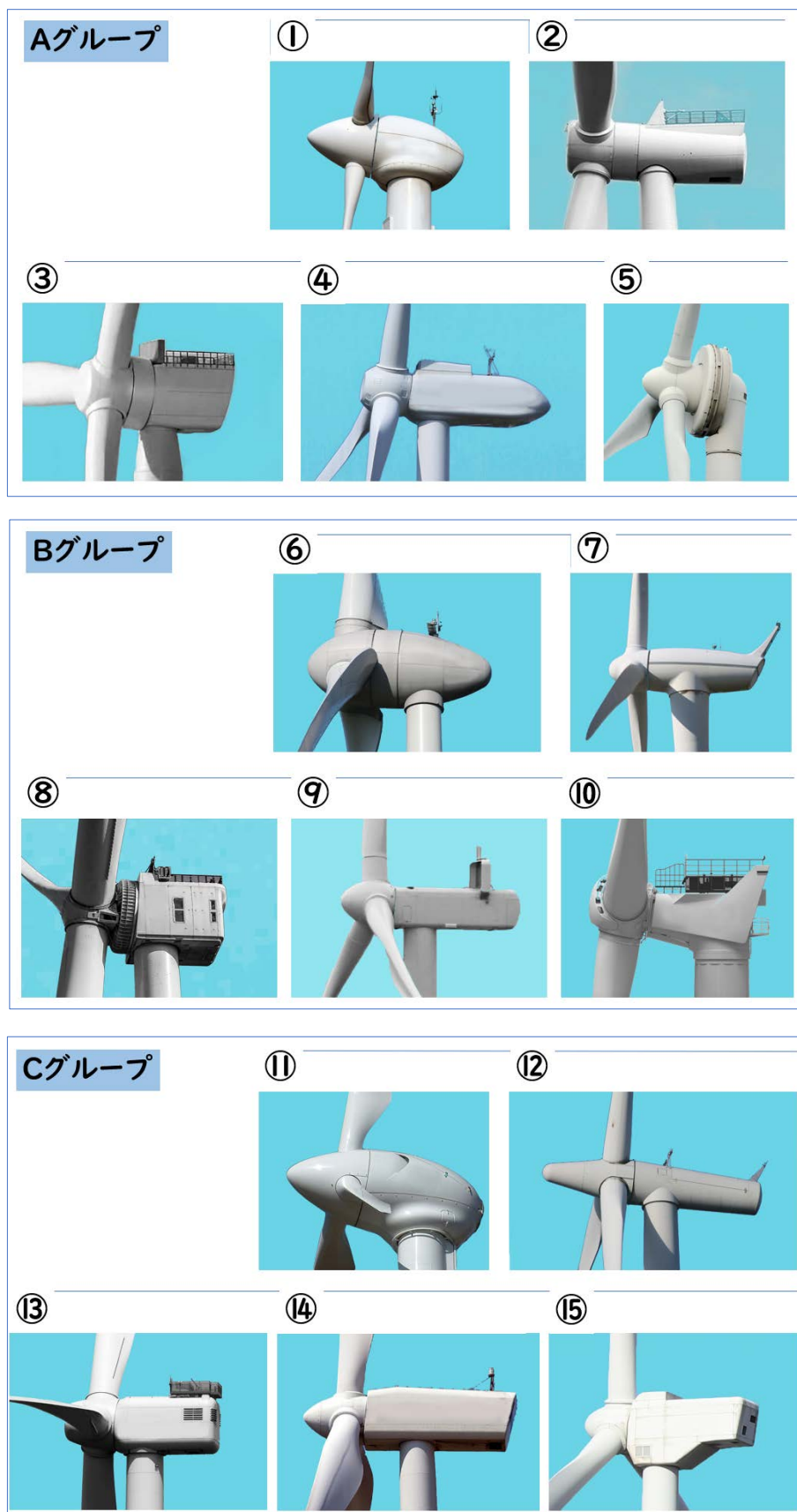


図 7.7 調査票に示したナセル (A, B, C グループ)



### 7.3.5 SD 法の適用

調査では 5 種類の風車それぞれに対する印象について SD 法を用いた。SD 法 (Semantic Differential method) は心理学的測定法として開発され、回答者が対象物に持つ印象を、相反する形容詞対の強度を回答してもらい、その強度によって対象の印象を明らかにする方法である。製品評価や景観評価などに有効な手法として利用されており<sup>[7.4]</sup>、風力発電機のナセル形状の視覚的特性を明らかにする目的に合致している。

本調査で用いた形状評価の形容詞は、表 7.4 に示す 14 対、評価尺度は 5 段階とし、総合的な形容詞対の「美しい - 美しくない」「好き - 嫌い」は最後に評価を求めた、さらに「最も好感を持った風車」、「2 番目に好感を持った風車」、「最も好きでない風車」、「2 番目に好きでない風車」についても併せて回答を求めた。形容詞対の選定にあたっては、土木や都市計画において SD 法による景観評価を用いた先行研究を参考に、風車の見え方の評価にふさわしいと思われる語を選んだ。参考とした研究は、三浦らの「オフィスビルの外観に関する研究」<sup>[7.5]</sup>、井上らによる「SD 法を用いた街路景観評価に関する研究」<sup>[7.6]</sup>、荒井らによる「風力発電施設的环境アセスメントに関する研究」<sup>[7.7]</sup>、酒井らの「街路景観評価に関する研究」<sup>[7.8]</sup>、小栗らの「SD 法を用いた景観評価サンプルの作成に関する研究」<sup>[7.9]</sup> によった。

表 7.4 風車ナセルの形状評価のための形容詞対と評価尺度

	非常に	やや	どちらでもない	やや	非常に	
機能的な						装飾的な
安全な						危険な
調和した						違和感のある
洗練された						野暮な
こちよい						不快な
開放感のある						圧迫感のある
自然と調和する						自然と調和しない
活気のある						沈んだ
こまやかな						粗っぽい
力強い						弱々しい
環境にやさしい						環境に厳しい
親しみのある						親しみのない
美しい						美しくない
好き						嫌い

## 7.4 分析

データの分析には、IBM SPSS Statistics 27<sup>[7.10]</sup>と js-STAR ver 10<sup>[7.11]</sup>を使用した。単純集計を行った後に、「最も好感を持った風車」と、「最も好きでない風車」に関する  $\chi^2$  検定を行い、SD 法の「好き - 嫌い」を目的変数とする重回帰分析と「美しい - 美しくない」を目的変数とする重回帰分析を行った。

### 7.4.1 基礎統計量

A, B, C 各グループの 5 種類のナセル各々について、形容詞対に対する被験者の評価尺度の平均値を、図 7.8 (a), 図 7.8 (b), 図 7.8 (c) に示した。この図の左側はポジティブな評価を、右側はネガティブな評価を表している。

7.4.2 項に述べる  $\chi^2$  検定の結果、A, B, C グループの各々の中で「最も好感を持った」の評価の数が有意に多いナセルについて、評価した人数を赤字で記載した。反対に「最も好きでない」と有意に評価されたナセルには人数を青字で記載した。この人数によって、ナセル形状に対する相対的な人気、不人気の程度を知ることが出来る。

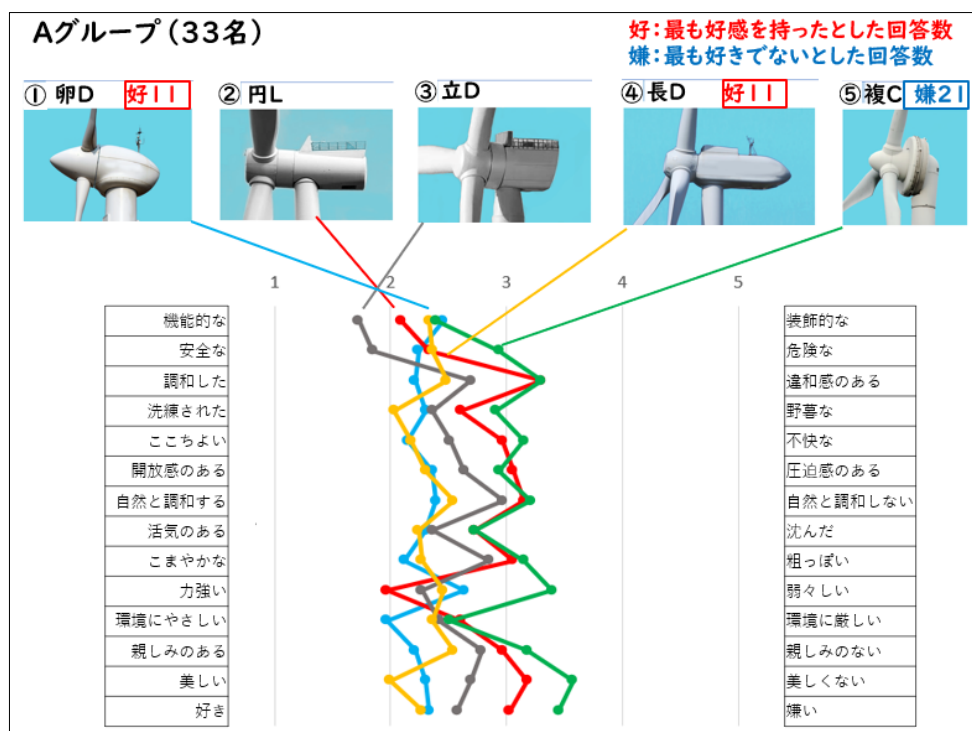


図 7.8 (a) 評価尺度平均値 (A グループ)

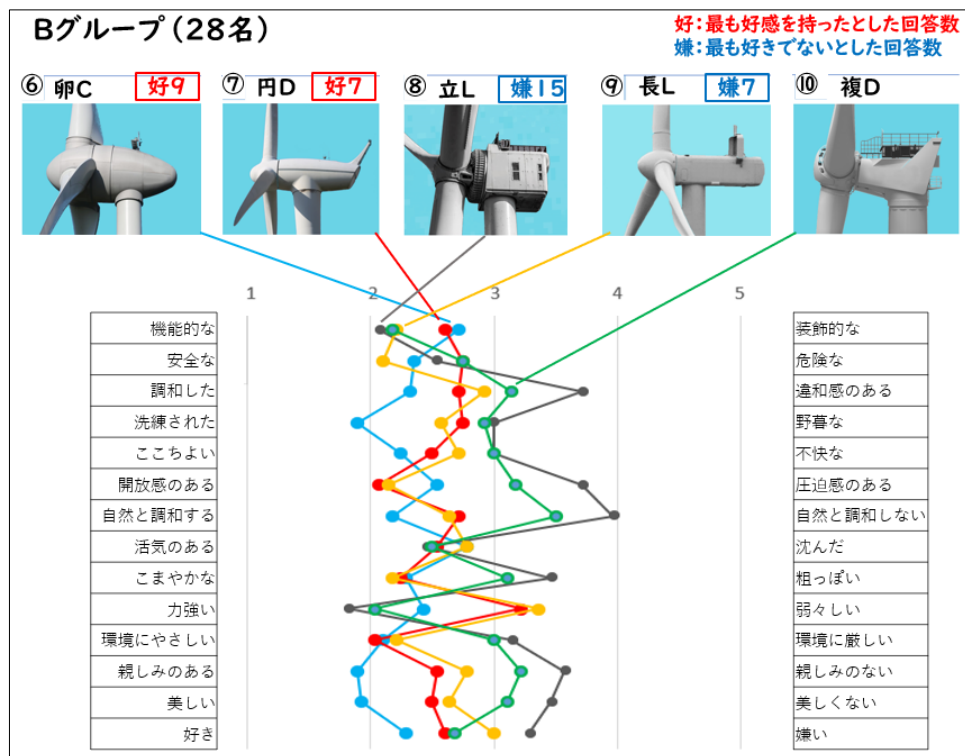


図 7.8 (b) 評価尺度平均値 (B グループ)

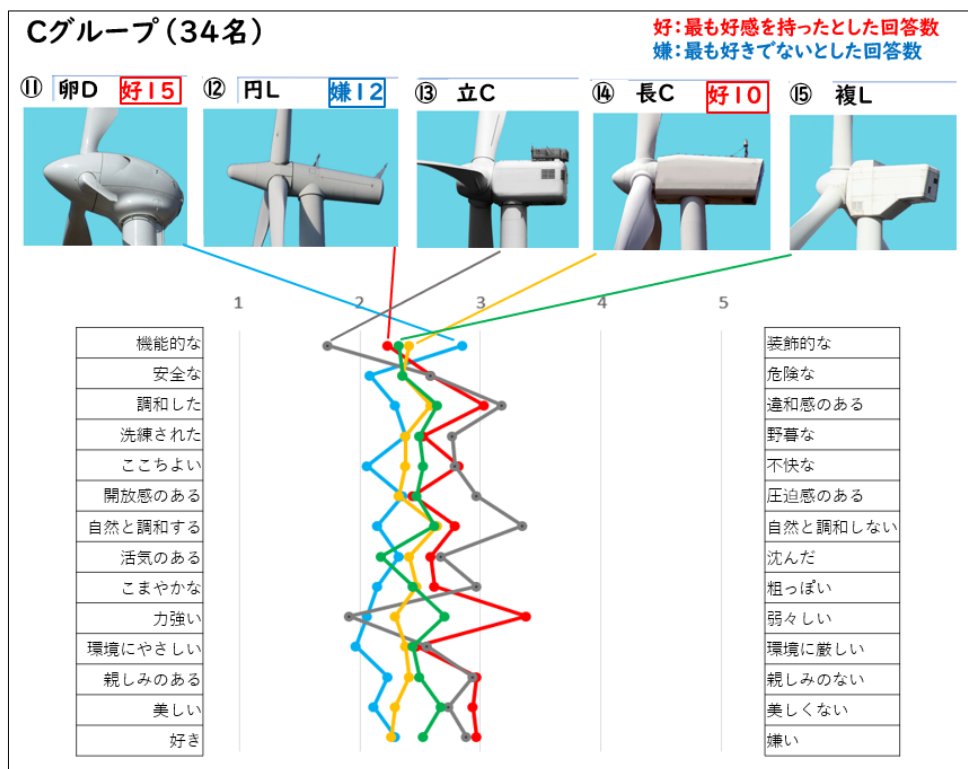


図 7.8 (c) 評価尺度平均値 (C グループ)

## 7.4.2 $\chi^2$ 検定

各々のナセル形状を「最も好感を持った」と「最も好きでない」と評価した人数について  $\chi^2$  検定により有意性の検定を行った（表 7.5）.

表 7.5 最も好感を持った／最も好きでない風車の  $\chi^2$  検定

Aグループ	$\chi^2(4)=32.26, p<.01$				
ナセル番号	①	②	③	④	⑤
最も好感を持った	11	3	6	11	2
最も好きでない	1	6	3	2	21

Bグループ	$\chi^2(4)=23.72, p<.01$				
ナセル番号	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
最も好感を持った	9	7	3	1	8
最も好きでない	2	1	15	7	3

Cグループ	$\chi^2(4)=17.92, p<.01$				
ナセル番号	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮
最も好感を持った	15	3	2	10	4
最も好きでない	6	12	6	2	8

（表中の数字は回答人数で，色付きは統計的に有意な評価を示す）

### 7.4.3 ナセル形状の「好き」「嫌い」の傾向

ナセル形状の「好き」「嫌い」は，表 7.5 の得点で相対的な比較が可能であり，以下の傾向がみられる．

- (1) 基本形状は卵形が一様に好まれる（図 7.9）.



図 7.9 卵形ナセル

- (2) 創り込みは，意匠的处理もしくは曲線処理されたデザインが好まれる

(図 7.10).



図 7.10 意匠的处理，曲線处理されたナセル

(3) 単純な立方体，長方形，円盤形のデザインは好まれない（図 7.11）.



図 7.11 好まれないナセル

(4) 単純な円筒形は好まれない（図 7.12）.

同じ基本形状が円筒形のナセル⑦（円 D）は「好まれる」と評価されているが，なだらかな樽型に意匠的な処理をされており，基本形状に対する意匠処理が好き嫌いに影響を与えると考えられる．

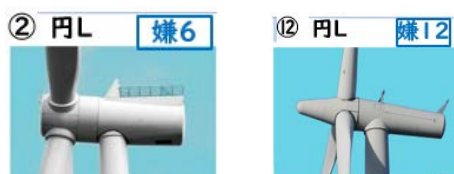


図 7.12 単純な円筒形ナセル

#### 7.4.4 重回帰分析

グループ毎に，ナセル形状の「好き - 嫌い」に影響をする形容詞を探索するために，「好き - 嫌い」を基準変数とした重回帰分析を行った（表 7.6）．その結果，各グループで共通して「美しい - 美しくない」が相対的に最も影響力

を有していることが分った。

次に「美しい - 美しくない」を基準変数とした重回帰分析を行った(表 7.7)。  
その結果「美しい - 美しくない」に影響を与える因子はグループ間で差があり、A グループは「開放感のある - 圧迫感のある」、「こちよい - 不快な」、「こまやかな - 粗っぽい」で、B グループは「親しみのある - 親しみのない」、C グループは「こちよい - 不快な」の形容詞対が影響力を有していることが分った。

表 7.6 重回帰分析結果 (好き - 嫌い)

	A グループ	B グループ	C グループ
機能的な - 装飾的な	0.03	0.04	0.01
安全な - 危険な	0.05	-0.04	0.05
調和した - 違和感のある	0.09	-0.03	0.19 *
洗練された - 野暮な	-0.02	-0.17 *	0.07
こちよい - 不快な	0.10	0.04	0.11
開放感のある - 圧迫感のある	0.08	0.10	-0.08
自然と調和する - 自然と調和しない	0.02	0.09	-0.01
活気のある - 沈んだ	0.03	0.02	0.10
こまやかな - 粗っぽい	0.08	-0.02	0.18 *
力強い - 弱々しい	0.00	0.15 *	0.10
環境にやさしい - 環境に厳しい	-0.03	0.19	0.03
親しみのある - 親しみのない	0.10	0.01	-0.03
美しい - 美しくない	0.39 **	0.59 **	0.26 **
adjusted R <sup>2</sup>	0.46 **	0.53 **	0.50 **

基準変数：「好き - 嫌い」

\*  $p < .05$  \*\*  $p < .01$

表 7.7 重回帰分析 (美しい - 美しくない)

	A グループ	B グループ	C グループ
機能的な - 装飾的な	-0.05	-0.06	-0.09
安全な - 危険な	-0.01	-0.04	-0.01
調和した - 違和感のある	-0.06	0.20 *	0.05
洗練された - 野暮な	0.16 *	0.14 *	0.03
こちよい - 不快な	0.22 **	0.23	0.33 **
開放感のある - 圧迫感のある	0.27 **	0.03	0.16 *
自然と調和する - 自然と調和しない	0.13	-0.11	0.04
活気のある - 沈んだ	-0.12	0.05	0.05
こまやかな - 粗っぽい	0.25 **	-0.01	0.16 *
力強い - 弱々しい	0.12 *	0.02 *	0.05
環境にやさしい - 環境に厳しい	0.06	0.11	0.11
親しみのある - 親しみのない	0.11	0.42 **	0.07
adjusted R <sup>2</sup>	0.62 **	0.64 **	0.53 **

基準変数：「美しい - 美しくない」

\*  $p < .05$  \*\*  $p < .01$

#### 7.4.5 「好き」、「嫌い」に影響を与える因子

具体的にどのような形状のナセルが、「好き」、反対に「嫌い」と評価されるかを明らかにするため、グループ A、B、C の「最も好感を持った」風車と「最も好きでない」風車を、同一のグラフ上で評価尺度平均値を比較した。

図 7.13 に示す「最も好感を持った」4 点の風車は（グループ A は風車①、④が同点であり 2 点を計上した）、各々の形容詞対に対する評価は左側のポジティブ側にあり、「調和した」、「こちよい」、「開放感のある」、「こまやかな」、「美しい」、「好き」の項目で、ほぼ同じ評価を得ている（図 7.13 の黄色太矢印）。

この 4 点のナセルは、基本形状分類では卵形が 3 点、作り込み分類では D（意匠顕示）が 3 点で、唯一の長方形 D の風車④も、ナセルの外形は曲線で処理されている。

このことから、立体的で卵状の形状が好まれ、作り込みについては意匠的处理が好感を得やすいと考えられる。

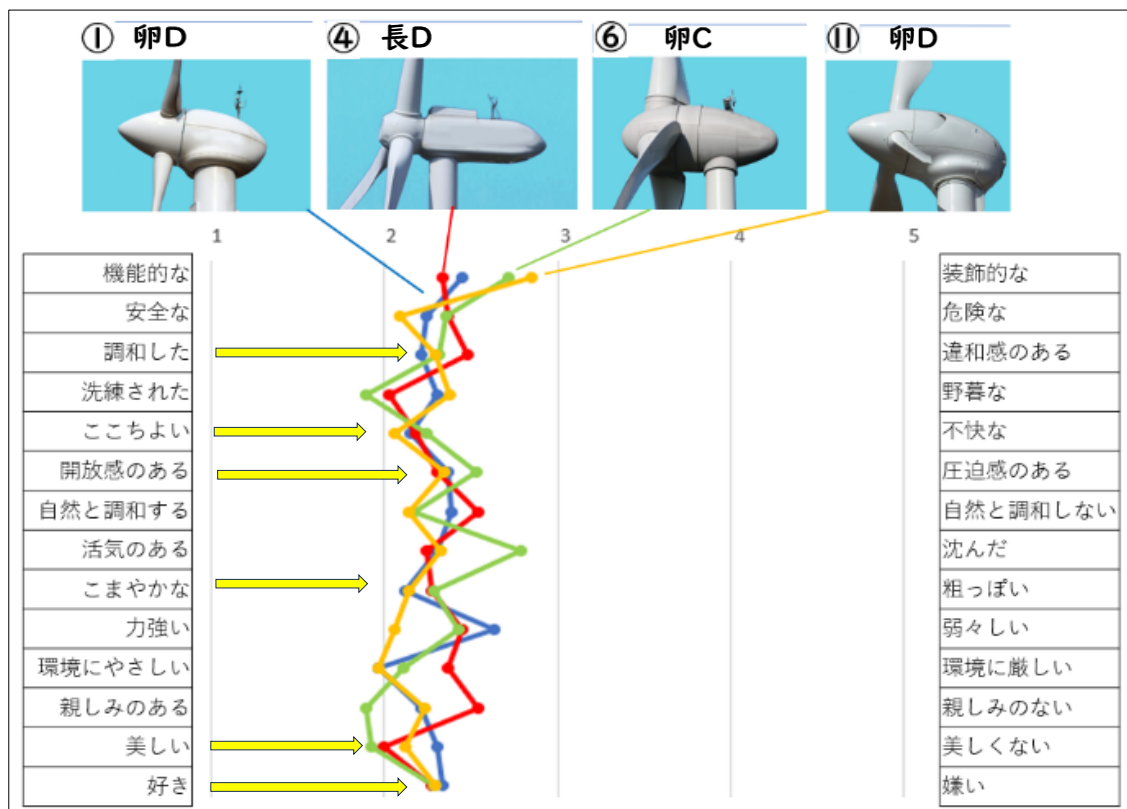


図 7.13 「最も好感を持った」ナセルの評価尺度平均値



「最も好きでない」とされたナセルの評価尺度平均値を図 7.14 に示す。「最も好感をもった」4 点のナセルの評価尺度平均値は、類似の傾向を示したが「最も好きでない」ナセル 3 点の評価尺度平均値のばらつきは大きく、「好きでない」ことに有意な形容詞対は見当たらない。「最も好きでない」ナセル群では、黄色太矢印で示す「機能的な」、「活気のある」といったポジティブな形容詞が高い値を示しているが、「好き」という評価には至っていない。ネガティブな評価である形容詞は、灰色太矢印で示した「違和感のある」、「自然と調和しない」、「粗っぽい」、「親しみのない」が目立ち、「嫌い」という評価に結び付いていることが窺われる。

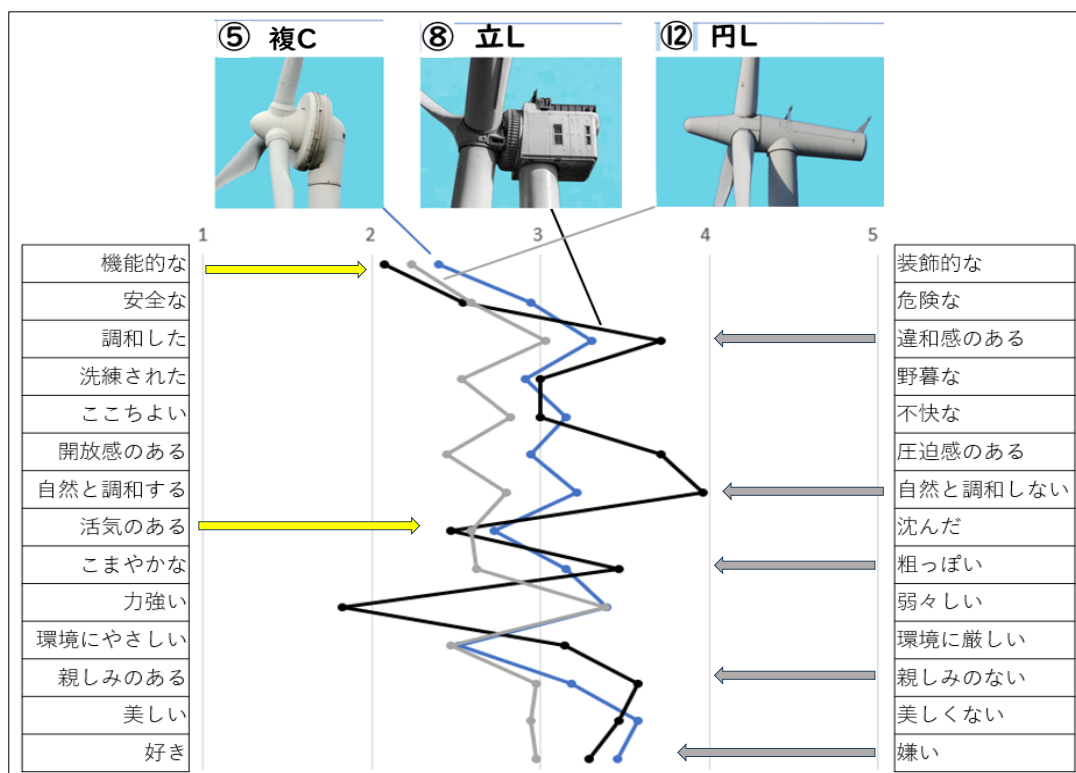


図 7.14 「最も好きでない」ナセルの評価尺度平均値

## 7.5 第7章まとめ

- (1) 「美しい-美しくない」が「好き-嫌い」に最も影響力を持ち、「美しい」ナセルは好まれ、「美しくない」ナセルは嫌われる。



- (2) 「開放感のある」、「こちよい」、「こまやかな」、「親しみのある」形が「美しいナセル」と評価される.
- (3) 卵形のナセルは好まれる.
- (4) 単純な立方形, 直方形, 円筒形のナセルは好まれない.
- (5) 意匠的处理や曲面处理で形状の創り込みすることは, 好感度を得るために有効である.
- (6) その例として, 円筒形風車ナセルにおける意匠的处理の効果を見ると, 単純な円筒形は, 「最も好きでない」, 「2 番目に好きでない」と評価されているが, 円筒形の基本形に対して, 整形や意匠顯示のデザインを施すことによって, 「最も好感を持った」と評価されその効果は顕著である.
- (7) 観測者の風車ナセルのデザインの好き嫌いは, アンケートと SD 法による解析によって傾向を把握することが出来る.
- (8) 今回のアンケート調査による風車ナセルの好感度の調査は, 工学部の学生を対象としたもので, 地域や対象年齢によって結果は異なると思われるが, 調査結果について一般性を得るためには調査対象を年齢や地域, 日常生活における風車への視覚度合い等を考慮して調査範囲を広げることが望ましい.

## 第 8 章 全体のまとめ

### 8.1 総括

本研究は、開発時に決定される大型風力発電機の形状について、技術的に決定される要素（設計）と、美的観点から決定される要素（デザイン）の領域を明らかにする。更に実際の風力発電機の開発を例にとりて、開発段階で発生する設計とデザイン間の不整合と問題について考察する。その結果、両者に共通の方向を見出して、人々に心地良い視覚性（見た目）を与える風力発電機の形状を得る手法について明らかにして、今後の風力発電機の開発に資することを目的として実施した。

第 1 章「序論」では、研究の背景と目的及び研究の進めかたについて述べ、研究の目的を次のように設定した。

- (1) 大型風力発電機の開発時に決定される風力発電機の形状について、技術的に決定される要素（設計）と、美的観点から決定される要素（デザイン）の領域を明らかにする。
- (2) 更に実際の風力発電機の開発を例にとりて、開発段階で発生する設計とデザイン間の不整合について議論を進める。
- (3) その結果、両者の共通の方向を見出して、人々に心地良い視覚性を与える風力発電機の形状を実現する方法について提案する。

第 2 章「風力発電機の形状に関する決定要素」では、現代の発電用大型風力発電機において視覚性に影響を与える「タワー」、「ロータ」は、技術的判断のみで決定されること、それに対して「ナセル」は視覚性を考慮して形状を決定することが可能な唯一のデザイン対象であることを示した。

第 3 章「環境と設計条件」では、インドおよび沖縄地方における猛烈な熱帯低気圧による風力発電機の事故について議論し、風力資源の豊富な日本の南西諸島に、風力発電を導入する場合には、国際標準の IEC 規格を越えた強度が必要なことを示した。

第 4 章「風力発電機開発と形状の決定（技術的アプローチ）」においては、

NEDO の風力発電機の開発を例に取り、形状に影響を与えた技術的な検討内容と、決定に至る工学的な考え方について、工程に従って明らかにした。そこでは工学的な手法を用いるだけでは、美しさを製品の形状に反映することが難しいことを示した。

第5章「風力発電機開発と形状の決定（視覚的アプローチ）」では、風力発電機の開発において、技術的検討と並行して実施されたインダストリアルデザインにおける形状決定の考え方と方法について、技術的なアプローチと比較しながら示した。

第6章「技術とデザインの融合」においては、風力発電機のデザインを決定づける要素について、技術的判断から決定される要素と、インダストリアルデザインの観点から決定される要素を明らかにした。さらに、風力発電機の形状決定において、設計とデザインの両者を高いレベルで融合する方法について明らかにした。

第7章「風力発電機に対する視認者の印象」では、視認者にとってどのような形状の風力発電機のナセルが好感を持たれるかを明らかにするために、学生を対象としてアンケート調査を実施し、好まれる、反対に好まれない形状が統計的に示されることを明らかにした。

## 8.2 結論

環境・エネルギー問題の有望な解決策である風力エネルギーの導入を促進するためには、風力発電機が社会的に受け入れられることが重要であり、風力発電機の形状の視覚的な美しさはその重要な要素のひとつである。

しかし、自動車や家電製品のように製品の美しさが価値の向上と密接に関係する製品では、技術的な形状決定と美的な形状決定が密接に関係している。それに比べて風力発電機は、送電鉄塔と同類の大型電気設備であり、その美的なデザインに対して注意は払われていず、技術と美的デザイン間のバランスをどのように取り、美しさに向けてどの様に融合するかについては、取り

組むべき課題が多い。

本研究では、NEDO の風車開発を例に、風車のデザインを決定する要素について、工学的判断に由来するもの、並行して美的判断に由来するものを明らかにし、風力発電機の形状を決定するための、工学的判断と美的判断の基準と方法を検討した。

この研究を通じて、開発業務で生じる問題と両者を高いレベルで統合する方法について以下の結論が得られた。

- (1) 美的設計と工学的設計では、形状を決定する方法や価値観が異なる。
- (2) 両者のアプローチや評価基準を尊重しながら円滑に進めるためには、開発プロセスの早い段階で製品デザインの目指すべき形を包括的に定義し、両デザインサイドで共有する価値観やコンセプトを確立することが不可欠である。
- (3) 美的デザインをエンジニアリングデザインのプロセスと同等に扱い、並行して進めることが効果的である。
- (4) 美的デザインと工学的デザインは、シンプルであること、無駄を省くこと、装飾を避けることなど、その根幹において共通の価値観を有している。形を決定する際の統合の基礎は、共有された価値観の中に見出すことができる。
- (7) 風車を見る人の風車ナセルデザインの好き嫌いは、アンケートと SD 法による解析によって傾向を把握することが可能である。
- (8) 若者を対象とした好みの傾向が把握できたこと、意匠の創り込みに効果があることが明らかになった。

### 8.3 おわりに

今日の風力発電機は、洋上への進出に従って超大型化が進み、これに伴いナセルの形は、四角形、長方形、円筒形になってきた。機械の収納容器であるナセルは、風車が大型になると、作り易さや経済性の面で四角形、長方形に移行していることが窺われ、そのような形状の風力発電機が日本を含む世界の洋上風力発電を席卷しており、この傾向は固定化しつつある。

社会受容性の一要素である風力発電機のナセル形状は卵形や、一般に好ま

れない基本形状の上に丁寧に意匠の作り込みがされた風車は、好感度が高いことが本研究で明らかになった。

社会受容性の一要素である風力発電機のナセル形状の美しさについて、卵形や、丁寧に意匠の作り込みがされた風車は、好感度が高いことが本研究で明らかになった。今日の風力発電機は、洋上への進出に従って超大型化が進み、これに伴いナセルの形は、四角形、長方形、円筒形になってきた。機械の収納容器であるナセルは、風車が大型になると、作り易さや経済性の面で四角形、長方形に移行していることが窺われ、そのような形状のナセルを持つ超大型風力発電機が日本を含む世界の洋上風力発電をほぼ独占している状況で、この傾向は固定化しつつある。

皆から好まれる美しい風力発電機の開発は、まず開発者に美しい形を実現する意欲が何よりも大切であるが、経済性や開発制約でその実現は困難なことも多いと思われる。しかし上に述べたような後付けであっても意匠の創り込みは効果的であり、人々から愛される美しい形の風力発電機が実現されることに意欲をもって開発が行われることを期待する。

## 謝辞

工業製品の美しい姿形（すがたかたち）や、その存在自体の美しさは、社会を豊にする力を持っております。本研究は、筆者が開発の責任者として従事した風力発電機開発設計を例にとって、美しい形状の実現に焦点を当て開発で発生した問題と解決方法について実施したものです。美しい形の実現には、開発に携わるすべての人々が、その製品に美しさを盛り込むことに意欲を持ち続けることが重要な要素となります。

この論文で述べた開発の内容と成果は、現在では風力事業を株式会社日立製作所に譲渡された富士重工業株式会社の風力発電開発プロジェクトに携わった仲間達と、デザインを担当した株式会社 GK ダイナミックスの方々の、心血を注いだ努力と献身の結果達成されたもので、関係された方々に心から敬意と感謝を申し上げます。

足利大学前理事長（名誉教授）牛山泉先生には、風力発電の開発について、長年に渡ってご指導と励ましを頂いてきましたが、本論文の作成にあたっては、暖かいご指導とご教示を頂きました。牛山先生の存在そのものが、風車開発のバックボーンで、道に迷った時の進む方向を照らす灯台となり、どれだけ勇気つけられたか分かりません。

論文を作成するにあたっては、足利大学自然エネルギー・環境学系教授の中條祐一先生（論文提出時）には、本論文に繋がった国内外の学会の査読論文の作成から出版に至るまで、詳細に渡り目を通して頂きました。更に技術と美という領域の研究の発表について数々のアドバイスを頂き研究を続けることが出来ました。ほとんど毎週中條先生の研究室をお伺いし先生と議論を重ねた結果、迷っている研究の方向が見えて来たことは数知れません。

足利大学教職課程センター教授の森慶輔先生には、心理学の手法を利用した分析を通じて共同研究に参画して頂き、新たな研究領域へ導いて頂きました。また足利大学工学部機械分野准教授の飯野光政先生には、同じく共同研究に加わって頂き、若い感性を生かした貴重な視点で研究に色彩を加えて頂きました。

この博士論文提出と審査の機会を与えて頂いた足利大学学長末武義崇先生、論文に対して懇切な助言を下さり主査として論文の審査の労を執って下さっ

た副学長安藤康高先生をはじめとして、足利大学教授の根本泰行先生、横山和哉先生、小林重昭先生、平石広典先生には、多忙な時間を割いて審査と助言を頂き感謝に堪えません。

私が足利大学で院生、学部生に対する講義の支援をはじめとして、多くの便宜を図ってくださった大学職員の皆様のご厚意は忘れることは出来ません。皆様にお会いできることが大学への通勤に楽しみを与え、そしてどれだけ助けられたことでしょう。

最後に、ここに至るまで仕事が出来た気力と健康を授けて下さった今は亡き父永尾富男と母永尾喜美江に感謝を捧げます。そして私の企業、財団から大学に至る長い間、我儘な私を支え理解し励まし続けてくれた妻雅子、長女真樹子、次女有樹子は仕事を続ける大きな力となりました。心から感謝しております。

## 参考文献

### 第 1 章

- [1.1] Renewable 2023, Global Status Report, REN, 2023
- [1.2] Renewable 2023, Renewables in Energy Supply, Global Status Report, <[https://www.ren21.net/gsr-2023/modules/energy\\_supply/01\\_energy\\_supply/](https://www.ren21.net/gsr-2023/modules/energy_supply/01_energy_supply/)> (参照日 2024.01.03)
- [1.3] Nuclear Power in the World Today, Nuclear Essentials,2023.08, <<https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>> (参照日 2023.09.03)
- [1.4] 自然エネルギー白書, 環境エネルギー政策研究所, <<https://www.isep.or.jp/archives/library/category/japan-renewables-status-report>> (参照日 2024.01.03)
- [1.5] 我が国の再生可能エネルギー導入ポテンシャル Ver.1.0, 環境省地球温暖化対策課, 2022
- [1.6] 日本の風力発電の累積導入量 (2023 年 12 月末時点), 日本風力発電協会ホームページ, <[http://jwpa.jp/pdf/dounyuujisseki2022graph\\_hp.pdf](http://jwpa.jp/pdf/dounyuujisseki2022graph_hp.pdf)> (参照日 2024.01.04)
- [1.7] 石井孝裕, 洋上風力政策の現状, 令和 5 年度日本風力エネルギー学会シンポジウム, 2023
- [1.8] 令和 4 年度に 実施した系統確保スキーム令和 4 年度に実施した系統確保スキームに関する調査事業について, 資源エネルギー庁, 2023.05.12, <<https://www.meti.go.jp/press/2023/05/20230512001/20230512001-1.pdf>> (参照日 2023.09.03)
- [1.9] JWPA Wind Vision 2023, 日本風力発電協会, 2023
- [1.10] 鉄塔・電柱に係る技術基準をめぐる現状について, 経済産業省産業保安グループ, 2019
- [1.11] 発電所に係る環境影響評価の手引, 経済産業省産業保安グループ電力安全課, <[https://www.meti.go.jp/policy/safety\\_surity/industrial\\_safety/sangyo/electric/files/1507chapter\\_four.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/safety_surity/industrial_safety/sangyo/electric/files/1507chapter_four.pdf)> (参照日 2023.09.04)



- [1.12] Glasgow John C., DOE/NASA Mod-0 100KW wind turbine test results, NASA Lewis Research Center Cleveland, OH, United States, 1978
- [1.13] Robbins William H. and Thomas Ronald L., Large horizontal axis wind turbine development, NASA Lewis Research Center, NASA TM-79174, 1979
- [1.14] Linscott B. S., DOE Large Horizontal Axis Wind Turbine Development at NASA Lewis Research Center, DOE/NASA/20320-47, NASA TM-8344 4, 1983
- [1.15] Pulczynski, Jörn, Die große Windenergieanlage GROWIAN: Eine Fallstudie, Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel No. 263, 1991
- [1.16] Hesse Nicole, Visible winds: The production of new visibilities of wind energy in West Germany, 1973–1991, University of Stuttgart Historical Institute DOI: 10.1111/1600-0498.12420, 2021
- [1.17] Templin R.J. and Rangi R.S., Vertical-axis wind turbine development in Canada, 10.1049/ip-a-1.1983.0085, Print ISSN 0143-702X, Online ISSN 2053-7905, 1983
- [1.18] Benmeddour A., Wall A., McAuliffe B., Penna P.J., Su J.C., Overview of wind energy research and development at NRC-IAR (Canada), *Revue des Energies Renouvelables SMEE'10* Bou Ismail Tipaza, 2010
- [1.19] Price Trevor J., UK Large-Scale Wind Power Programme From 1970 to 1990: The Carmarthen Bay Experiments and the Musgrove Vertical-Axis Turbines, *Wind Engineering* Vol 30, No3, 2006
- [1.20] Gipe Paul and Möllerström Erik, An overview of the history of wind turbine development: Part I-The early wind turbines until the 1960s, *Wind Engineering*, Vol.46(6), 2022, An overview of the history of wind turbine development: Part II-The 1970s onward, *Wind Engineering*, Vol.47(1), 2022
- [1.21] Gupta Ashwani K., Efficient Wind Energy Conversion: Evolution to Modern Design, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol.137, 2015

- [1.22] Ohya Yuji, Karasudani Takashi, Nagai Tomoyuki, and Watanabe Koichi, Wind lens technology and its application to wind and water turbine and beyond, Renewable Energy and Environmental Sustainability 2.2, 2017
- [1.23] Sullivan Robert G., Kirchler Leslie B., Lahti Tom, Roché Sherry, Kevin Beckman, Cantwell Brian, Richmond Pamela, Wind Turbine Visibility and Visual Impact Threshold Distances in Western Landscapes, Available at: <https://blmwyomingvisual.anl.gov/docs/WindVITD.pdf> (accessed 18, Nov, 2023), 2012
- [1.24] Abromas Jonas, Grecevičius Petras, Piekienė Nijolė, Visual Impact Assessment of Wind Turbines on Landscape in Šilalė region, 2015
- [1.25] Guan Jinjin, Landscape Visual Impact Evaluation for Onshore Wind Farm: A Case Study, 2022
- [1.26] 国立・国定公園内における風力発電施設の審査に関する技術的ガイドライン, 環境省, 2023
- [1.27] 出羽三山の風車建設に反対する会ホームページ, <<https://dewasanzan.net/>> (参照日 2023.09.04)
- [1.28] 平野勝也他, 周辺景観のスキーマに着目した風力発電施設の景観評価特性,土木学会論文集 D1 (景観・デザイン) ,Vol.75,No1,pp28-35, 2019
- [1.29] 荒川忠一他,ヴァナキュラー風車の提案,環境芸術学会論文集,2001 年 1 巻, pp.13-19, 2001
- [1.30] 鈴木紀彦他, 水平軸ダウンウィンド型小型風車のナセル形状に関する研究, 第 35 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, pp.445-448, 2013

## 第 2 章

- [2.1] 西方正司他, わかりやすい風力発電, オーム社, 2013
- [2.2] CANON 写真用語集, <<https://ptl.imagegateway.net/contents/original/glossary/index.html>> (参照日 2024.01.06)
- [2.3] Tony Burton, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, David Sharpe, Michael Graham, Wind Energy Handbook, Third Edition, Jhon Willey & Sons, 2021

- [2.4] After final assembly - inspirations for future improvements, Aerodyne Breaking News, < [https://www.aerodyn-engineering.com/BreakingNews/2017\\_06/](https://www.aerodyn-engineering.com/BreakingNews/2017_06/)>, (参照日 2023.01.14)
- [2.5] Erich Hau, Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics, Third, translated edition, Springer, 2013
- [2.6] Große Windkraft Anlage GROWIAN, GROWIAN ポスター
- [2.7] 牛山泉他, 風力エネルギー読本, オーム社, 2005
- [2.8] Guidelines for Design of Wind Turbines, DNV/Risø Publication, 2001
- [2.9] John C. Glasgow, DOE/NASA MOD-O 100kW wind turbine test results, National Aeronautics and Space Administration, <<https://picryl.com/media/mod-0-100-kw-kilowatt-wind-turbine-tower-d841b0>>, (参照日 2023.01.14)
- [2.10] Typical nacelle layout of a modern wind turbine, source Nordex 2.3M W,<<https://www.wind-energy-the-facts.org/architecture-of-a-modern-wind-turbine-7.html>>, (参照日 2024.01.07)
- [2.11] エネルコン風車カタログ, 日立パワーソリューションズ HP, < <https://www.hitachi-power-solutions.com/energy/wind-solor/wind-power/products/index.html>>, (参照日 2024.01.15)

### 第 3 章

- [3.1] 局所風況マップ, NEDO, <https://appraw1.infoc.nedo.go.jp/nedo/index.html>, (参照日 2024.04.18)
- [3.2] 風力発電導入ガイドブック改訂第 9 版, NEDO, 2008
- [3.3] 永井實, 南西諸島における風力利用の可能性, 1989 年風力エネルギー利用シンポジウム 11 巻, pp18-32, 1989
- [3.4] Hamish Ramsay, The Global Climatology of Tropical Cyclones, 2017, <<https://oxfordre.com/naturalhazardscience/display/10.1093/acrefore/9780199389407.001.0001/acrefore-9780199389407-e-79;jsessionid=84CE340B968E4A9C6241D151E34E6EF9>>, (参照日 2024.01.13)
- [3.5] 永尾徹, 加藤裕司, 吉田茂雄, 我が国における風力発電の信頼性・安全性設計への考察, 第 30 回日科技連信頼性・保全性シンポジウム, 2000

- [3.6] WINDPOWER MONTHLY, September 1998.
- [3.7] 台風 14 号による風力発電設備の倒壊等事故調査結果について（概要），  
沖縄電力株式会社，2004
- [3.8] 台風や雷に強い「日本型風力発電」を，技術基準を強化へ，朝日新聞，  
2007，<<https://www.asahi.com/special/070110/TKY200706250235.html>>，（参  
照日 2024.01.13）
- [3.9] 台風による災害，平成 15 年（2003 年）台風第 14 号（マエミー），宮古  
島地方気象台，<https://www.data.jma.go.jp/miyako/knowledge/typhoon.html>，  
（参照日 2024.01.13）
- [3.10] 丸山敬，河井宏允，奥田泰雄，林 泰一，宮古島を来襲した台風 0314 号  
について，その 2 被害の特性，京都大学防災研究所年報 第 47 号 B，20  
04
- [3.11] 石原孟，山口敦，藤野陽三，2003 年台風 14 号による風力発電設備の被  
害とシミュレーションによる強風の推定，土木学会誌 88 巻 12 号，2003
- [3.12] 高原景滋他，エコアイランド宮古島における風力発電 - 新たな出発に  
向かって，風力エネルギー，Vol.32.No2，2008
- [3.13] 石島 英，台風学のすすめ，沖縄自分史センター，1995
- [3.14] 観測史上の順位，最大瞬間風速，気象庁，< <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/rankall.php>>（参照日 2024.01.14）
- [3.15] 石島英，沖縄の気候解説，沖縄気象台編，沖縄気象協会出版，1998.

## 第 4 章

- [4.1] 離島振興計画フォローアップ，国土交通省国土政策局，2021.< <https://www.mlit.go.jp/common/001415188.pdf>>，（参照日 2024.01.13）
- [4.2] 日本の島嶼構成，離島経済新聞社，<<https://ritokey.org/about/summary.html>>，（参照日 2024.01.13）
- [4.3] 川村伸弥，ニューサンシャイン計画における風力利用開発，風力エネルギー利用シンポジウム，1996.< [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo1979/18/0/18\\_0\\_1/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo1979/18/0/18_0_1/_pdf)>，（参照日 2024.06.03）
- [4.4] 神門正雄，ニューサンシャイン計画における風力技術開発，風力エネルギー

ギー利用シンポジウム,1999.<[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo1979/21/0/21\\_0\\_1/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jweasympo1979/21/0/21_0_1/_pdf)>, (参照日 2024.06.03)

- [4.5] 「離島用風力発電システム等技術開発」事後評価報告書,NEDO 研究評価委員会, 2004
- [4.6] 松宮輝, 小垣哲也, 高橋則之, 飯田誠, 早稲田一嘉, 風車用新 MEL 翼型の開発と実験的検証, 第 22 回新エネルギー利用シンポジウム, pp.92-95, 2000
- [4.7] 航空宇宙工学便覧第 2 版 (日本航空宇宙学会編), A9 開発計画管理 pp269-272,丸善, 1992
- [4.8] 平成 11 年度ニューサンシャイン計画「離島用風力発電システム等技術開発・離島における風力発電システムの開発」, 富士重工業株式会社, 2000
- [4.9] 永尾徹, 南の島のウィンドファーム, 風力エネルギー, Vol.35,No.3,pp61-67, 2011
- [4.10] 平成 13 年度ニューサンシャイン計画「離島用風力発電システム等技術開発・離島における風力発電システムの開発」, 富士重工業株式会社, 2002

## 第 5 章

- [5.1] GK Dynamics, <https://www.gk-design.co.jp/dy2/>, (参照日 2024.01.25)
- [5.2] 伊丹孝裕, 日々おもうこと, < <https://www.gk-design.co.jp/dy2/1436/>>, (参照日 2024.01.25)
- [5.3] 一條厚, モータサイクルのデザインへの想い, TOYOTA ART MANAGEMENT, ネット TAM, <<https://www.nettam.jp/column/108/>>, (参照日 2024.6.03)
- [5.4] 永尾徹, 富士重工業における風力発電システムの開発 (中小規模の風力発電システムへの取組, 日本風力エネルギー協会誌, Vol26 No2, 通巻 58 号, 2001
- [5.5] The First Twenty-Five Years, The Evolution of Aircraft Design, Diamond Jubilee of Powered Flight, pp.1-22, Air Force Museum, 1978

- [5.6] Lindberg flies “Spirit of St Louis” into history, Chronicle of Aviation, p. 241, Chronicle Communications Ltd. 1992
- [5.7] 中島キ 43 (1 式戦闘機「隼」), 太平洋戦争日本陸軍機, pp.50-57, 航空情報別冊, 1969
- [5.8] 佐貫亦男, ドイツカメラのスタイリング, pp.8-15, グリーンアロー出版社, 1996

## 第 6 章

- [6.1] 永尾徹, SUBARU 風車の歩み, 風力エネルギー, Vol.30, No.4, 2007
- [6.2] イオンモール下田 20 周年のあゆみ, イオンモール下田 HP, <<https://shimoda-aeonmall.com/20th/history.html>>, (参照日 2024.1.27)
- [6.3] 宇都宮智昭, 佐藤郁, 白石崇, 乾悦郎, 石田茂資, 浮体式洋上風力発電の実用化に向けて - 五島市杵島における実証事業 -, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, I\_1-I\_6, 2014
- [6.4] 富士重工業「スバル小型風力発電システム」を開発, 富士重工業プレスリリース, <[https://www.subaru.co.jp/news/archives/00\\_10\\_12/11\\_1.htm](https://www.subaru.co.jp/news/archives/00_10_12/11_1.htm)>, (参照日 2024.1.27)
- [6.5] グッドデザイン賞受賞, 風力発電 SUBARU15/40, <<https://www.g-mark.org/award/describe/2128>>, (参照日 2024.01.27)
- [6.6] 新エネルギー大賞受賞, スバル小型風力発電, <<https://www.nef.or.jp/award/kako/h13/p05.html>>, (参照日 2024.01.27)
- [6.7] 足利大学総合研究センター, ハイブリッド発電システム, <<https://www2.ashitech.ac.jp/crc/hybrid.html>>, (参照日 2024.06.03)
- [6.8] トラッドシステム, 風力発電の工事实績 (日本大学工学部), <<http://www.tradsystem.com/wind/results05.html>>, (参照日 2024.06.03)
- [6.9] 東京電機大学エネルギー情報システム研究グループ, 風力発電システムに関する研究, <[https://www.im.dendai.ac.jp/laboratory/drive\\_lecturer/](https://www.im.dendai.ac.jp/laboratory/drive_lecturer/)>, (参照日 2024.06.03)
- [6.10] いわき市フラワーセンター風力発電, <https://iwaki-flowercenter.com/guide/>, (参照日 2024.06.03)

- [6.11] コナミサステナビリティ, <<https://www.konami.com/sustainability/ja/>>, (参照日 2024.06.03)
- [6.12] NEDO 離島用風力発電システム等技術開発, 離島用風車から大型ダウンウインド風車へ, < <https://webmagazine.nedo.go.jp/practical-realization/articles/201002fujijyuukou/>>, (参照日 2024.01.27)
- [6.13] 牛山泉, 永尾徹, 飯野光政, 米, 独, デンマークを中心とする大型風車の技術形成, 1930 年代から 1980 年代にかけて 第二報 石油危機以降, 日本技術史教育学会誌, Vol.23, No.2, 2022
- [6.14] 永尾徹, 2MW 大型風車「SUBARU 80/2.0」の開発, 風力エネルギー, Vol.30, No.1 通巻 77 号, 2006
- [6.15] 永尾徹, 日本型大型風車の開発, 日本設計工学会会誌「設計工学」 Vol.42, No.7, pp19-25, 2007
- [6.16] 新エネ大賞「SUBARU80/2.0 ダウンウインド型風力発電システム」, 新エネルギー財団, <<https://www.nef.or.jp/award/kako/h18/p02.html>>, (参照日 2024.01.28)
- [6.17] メーカー別累計設備容量 (2022 年末), 日本風力発電協会 HP, <[https://jwpa.jp/pdf/dounyuujisseki2022graph\\_hp.pdf](https://jwpa.jp/pdf/dounyuujisseki2022graph_hp.pdf)>, (参照日 2024.01.27)

## 第 7 章

- [7.1] 永尾徹, 森慶輔, 飯野光政, 発電用大型風車の形状に対する視認者の印象, 日本感性工学会論文誌, Vol.23, No.3, 2024
- [7.2] Earle, Steave, Environmental geology, <<https://environmentalgeol.pressbooks.tru.ca/chapter/solar-and-wind/>>, (参照日 2024.06.03)
- [7.3] Welcome to wind-turbine-models.com, <<https://en.wind-turbine-models.com/>>, (参照日 2024.06.03)
- [7.4] 大塚尚寛, 岡本善則, SD 法による露天採掘跡地の景観評価に関する検討, 資源と素材, Vol.110, 1994
- [7.5] 三浦佳世, 難波精一郎, 桑野園子, 村石喜一, 大川平一郎: オフィスビルディングの外観の印象とその規定因, 人間工学第 32 巻第 1 号, 1996
- [7.6] 井上博司, 藤井真紀子: SD 法を用いた街路景観評価構造の分析, 岡山大



学環境理工学部研究報告，第 3 巻第 1 号，1998.

- [7.7] 荒井歩，酒井玲子：風力発電施設の環境アセスメントにおける四季変化が景観の印象評価に与える影響，東京農大農学部集報，第 64 巻第 1 号，2019
- [7.8] 酒井裕一，藤居良太：街路景観評価に対する分析手法の考察，日本造園学会第 65 巻第 5 号，2002
- [7.9] 小栗ひとみ，岩田圭佑，松田泰明：SD 法を用いた景観評価における評価サンプルの作成方法が評価結果に及ぼす影響，国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所地域景観ユニット，<[https://scenic.ceri.go.jp/pdf\\_paper/scenic\\_paper27\\_10.pdf](https://scenic.ceri.go.jp/pdf_paper/scenic_paper27_10.pdf)>，(参照日 2024.01.30)
- [7.10] IBM SPSS Statistics 27, IBM Support, <<https://www.ibm.com/support/pages/downloading-ibm-spss-statistics-27>>，(参照日 2023.12.06)
- [7.11] js-STAR ver 10, <<https://www.kisnet.or.jp/nappa/software/star/info/howto.htm>>，(参照日 2023.12.06)