

# 日本型風力発電ガイドライン

## 台風・乱流対策編

平成 20 年 3 月

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

# 日本型風力発電ガイドライン

## 台風・乱流対策編

平成 20 年 3 月

発行： 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

調査委託先： 株式会社 東洋設計

再委託先： 財団法人 日本気象協会

財団法人 電力中央研究所

## 序 文

本ガイドラインは、日本国内で風力発電設備を設置する事業者を情報提供の主たる対象として、風力発電設備予定地の環境条件のうち台風、乱流等の風況の把握手法とその条件に見合う風車の選定を行うための手順、風車の選定等に参考となる技術情報をまとめるとともに、風車選定に関する有用な情報および風に関する被害を考慮したリスクと対策に関する検討結果をとりまとめたものである。

風力発電所の設置にあたっては、平均風速が高いなど良好な設置場所の選択が重要であるとともに、その地域で発生が予想される強風や風の乱れなどに対応した適切な強度を有する風車を選定することが重要である。

日本においては、毎年台風の接近と通過が予想され、また、平地が少なく、複雑地形が多いことによる風の乱れや強風の影響が大きい地域が少なくないと予想される。

一方、今日世界で大量に供給されている風車は、国際的に共通の基準（IEC 61400）をもとにして予想される風の強度や乱れのレベルに応じた仕様を有する風車である。その共通の基準は、おおむね欧米の風況をもとに策定され、これまで数回の改訂が行われているが、現在のところ日本を含めたモンスーン地帯などの強風発生地域においては、その風況に適合した特別な風車の選定を行うべきとのコメントが付されている。

さらに、最近風車の導入量拡大に伴い台風による被害事例が少なからず見られるとともに、日本の地域特性と地形状況に起因する風車への影響が見られている。このような状況に鑑み、日本において風車を設置する場合には、予定地で将来にわたって発生が予想される最大風速と風の乱れを適切に予想し、そのレベルに応じた風車の選定を行う必要がある。

そのため、本ガイドラインは、風況による風車選定手法の提示や課題明確化のためのプロセスを提示するマニュアル的な位置付けとする。あわせて、検討過程での情報についても参考資料として提供するものである。

今後、研究の進展、現場での経験や知見の蓄積によって本ガイドラインを改訂し、その充実がさらに図られることが期待される。

日本型風力発電ガイドライン策定委員会

委員長 牛山 泉

台風・乱流ガイドライン検討委員会

委員長 荒川 忠一

平成 19 年度 日本型風力発電ガイドライン策定委員会および検討委員会の委員名簿

1) 日本型風力発電ガイドライン策定委員会

日本型風力発電ガイドライン策定委員会			
NO	氏名	所属	備考
1	牛山 泉	足利工業大学・副学長	委員長
2	関 和市	東海大学・教授	副委員長
3	荒川 忠一	東京大学・教授	
4	石井 勝	東京大学・教授	
5	石原 孟	東京大学・准教授	
6	大熊 武司	神奈川大学・教授	
7	中西 幹郎	防衛大学校・准教授	
8	松宮 輝	(独)産業技術総合研究所・客員研究員	
9	村上 周三	慶応大学・教授	
10	横山 茂	(財)電力中央研究所・首席研究員	
11	小川 晋	(社)日本電機工業会・課長	
12	勝呂 幸男	日本風力エネルギー協会・副会長	

2) 台風・乱流ガイドライン検討委員会

台風・乱流ガイドライン検討委員会			
NO	氏名	所属	備考
1	荒川 忠一	東京大学・教授	委員長
2	松宮 輝	(独)産業技術総合研究所・客員研究員	副委員長
3	加藤 信介	東京大学・教授	
4	田村 幸雄	東京工芸大学・教授	(諸事情により休止)
5	長野 靖尚	名古屋工業大学・特任教授	
6	中村 秀治	広島大学・教授	
7	岡田 恒	(財)日本住宅・木材技術センター・理事	
8	小林 隆久	気象研究所・室長	
9	田中 伸和	(財)電力中央研究所・首席研究員	
10	蜂屋 一雄	電源開発(株)・室長代理	
11	小松崎勇一	(株)ユーラスエナジー・部長	
12	本田 明弘	三菱重工業(株)・主席研究員	
13	前川 聡	(株)日立エンジニアリング・アド・サービス・部長	
14	吉田 茂雄	富士重工業(株)・課長	
15	吉田 兵吾	(株)日本製鋼所・グループマネージャ	

平成 18 年度 日本型風力発電ガイドライン策定委員会および検討委員会の委員名簿

1) 日本型風力発電ガイドライン策定委員会

日本型風力発電ガイドライン策定委員会			
NO	氏名	所属	備考
1	牛山 泉	足利工業大学・副学長	委員長
2	関 和市	東海大学・教授	副委員長
3	荒川 忠一	東京大学・教授	
4	石井 勝	東京大学・教授	
5	石原 孟	東京大学・助教授	
6	大熊 武司	神奈川大学・教授	
7	中西 幹郎	防衛大学校・助教授	
8	松宮 輝	九州大学・教授	
9	村上 周三	慶応大学・教授	
10	横山 茂	九州大学・客員教授	
11	小川 晋	(社)日本電機工業会・課長	
12	勝呂 幸男	日本風力エネルギー協会・副会長	

2) 台風・乱流ガイドライン検討委員会

台風・乱流ガイドライン検討委員会			
NO	氏名	所属	備考
1	荒川 忠一	東京大学・教授	委員長
2	松宮 輝	九州大学・教授	副委員長
3	加藤 信介	東京大学・教授	
4	田村 幸雄	東京工芸大学・教授	
5	長野 靖尚	名古屋工業大学・名誉理事	
6	中村 秀治	広島大学・教授	
7	岡田 恒	(財)日本住宅・木材技術センター・理事	
8	小林 隆久	気象研究所・室長	
9	田中 伸和	(財)電力中央研究所・研究参事	
10	林 宏典	(財)日本気象協会・技師	
11	本田 明弘	三菱重工業(株)・主席研究員	
12	前川 聡	(株)日立エンジニアリング・アフト・サービス部長	
13	吉田 茂雄	富士重工業(株)・課長	
14	吉田 兵吾	(株)日本製鋼所・グループマネージャ	

所属・役職名は平成 18 年度当時のものとした。

平成 17 年度 日本型風力発電ガイドライン策定委員会および検討委員会の委員名簿

1) 日本型風力発電ガイドライン策定委員会

日本型風力発電ガイドライン策定委員会			
NO	氏名	所属	備考
1	牛山 泉	足利工業大学・副学長	委員長
2	関 和市	東海大学・教授	副委員長
3	荒川 忠一	東京大学・教授	
4	石井 勝	東京大学・教授	
5	石原 孟	東京大学・助教授	
6	大熊 武司	神奈川大学・教授	
7	中西 幹郎	防衛大学校・助教授	
8	松宮 輝	九州大学・教授	
9	村上 周三	慶応大学・教授	
10	横山 茂	九州大学・客員教授	
11	小川 晋	(社)日本電機工業会・主任	
12	勝呂 幸男	日本風力エネルギー協会・副会長	

2) 台風ガイドライン検討委員会

台風・乱流ガイドライン検討委員会			
NO	氏名	所属	備考
1	荒川 忠一	東京大学・教授	委員長
2	田村 幸雄	東京工芸大学・教授	
3	中村 秀治	広島大学・教授	
4	岡田 恒	建築研究所・グループ長	
5	田中 伸和	(財)電力中央研究所・研究参事	
6	飯田 秀重	(財)日本気象協会・技師	
7	本田 明弘	三菱重工業(株)・主席研究員	
8	前川 聡	(株)日立エンジニアリング・アド・サービス部長	
9	吉田 茂雄	富士重工業(株)・課長	
10	吉田 兵吾	(株)日本製鋼所・グループマネージャ	

### 3) 乱流ガイドライン検討委員会

台風・乱流ガイドライン検討委員会			
NO	氏名	所属	備考
1	松宮 輝	九州大学・教授	委員長
2	加藤 信介	東京大学・教授	
3	長野 靖尚	名古屋工業大学・名誉理事	
4	小林 隆久	気象研究所・室長	
5	田中 伸和	(財)電力中央研究所・研究参事	
6	林 宏典	(財)日本気象協会・技師	
7	本田 明弘	三菱重工業(株)・主席研究員	
8	前川 聡	(株)日立エンジニアリング・アンド・サービス部長	
9	吉田 茂雄	富士重工業(株)・課長	
10	吉田 兵吾	(株)日本製鋼所・グループマネージャ	

所属・役職名は平成 17 年度当時のものとした。

# 目 次

序 文	
委員名簿	
目 次	

1 . 適用範囲	1
2 . 関連法規、規格	2
2 . 1 法規および省令	2
2 . 2 法規等に関連する国内規格・指針	2
2 . 3 技術規格	2
2 . 4 関連するハンドブック・マニュアル類	3
3 . 用語及び定義	4
4 . 記号及び略語	10
5 . 風条件の評価及び風車の選定	13
5 . 1 風車選定のための風条件の設定	13
5 . 2 風車の選定	16
5 . 2 . 1 技術規格に適合した風車からの選定	17
5 . 2 . 2 技術規格による標準的な風条件を超える場合の風車の選定	20
5 . 3 風車本体以外（タワー、電気設備）の設計	21
5 . 3 . 1 タワーの設計	21
5 . 3 . 2 電気設備の設計	22
5 . 4 稀な事象への対策	22
6 . 風条件の評価方法	23
6 . 1 現地風況観測	24
6 . 2 地形の複雑度の判定	26
6 . 3 極値風速マップ及び極値風速データベース	29
6 . 3 . 1 気象官署等における風観測データによる極値風速算出	31
6 . 3 . 2 極値風速マップ	32
6 . 3 . 3 極値風速データベース	45
6 . 3 . 4 数値シミュレーションまたは風洞実験による小地形影響評価	47
6 . 4 風観測データの統計解析および推定式による乱流強度の設定方法	49
6 . 4 . 1 観測データからNTM式パラメータの導出	50
6 . 4 . 2 単純地形モデルおよび線形モデルを用いた乱流強度の設定	51
6 . 4 . 3 非線形モデルまたは風洞実験による乱流強度の設定	53
6 . 5 風条件の設定例	56



6.5.1	風況観測例	56
6.5.2	風の評価方法の適用例	61
7.	リスク評価	65
7.1	風車の風による被害とその分析	65
7.2	風車のリスクと風車の国際規格	71
7.2.1	風の外部条件	74
7.2.2	風車の運転モードに応じたリスク	80
7.3	風車に作用する風荷重とリスク	84
7.3.1	終局荷重	89
7.3.2	疲労荷重	92
7.3.3	荷重の部分安全係数	98
7.4	強度に関わるリスク	99
7.5	法規上の要件	100
7.6	リスク軽減のための対応策	102
7.6.1	経年変化・部分損傷	103
7.6.2	小規模損傷等の観察、判定条件の可能性について	105
7.6.3	監視事例	106
8.	今後の課題	109
9.	参考文献	111

## 付属書

付属書A (参考)	IEC規格による風力発電機の設計条件	付A- 1
A 1	既存の国際規格	付A- 1
A 2	設計手順とIEC規格による風条件	付A- 2
A 2.1	耐風設計の流れ	付A- 2
A 2.2	規格における風条件	付A- 3
A 3	荷重特性値	付A- 5
A 3.1	設計荷重ケース (Design Load Case)	付A- 5
A 3.2	終局荷重 (Ultimate Load)	付A- 6
A 3.3	疲労荷重 (Fatigue Load)	付A- 7
A 3.4	空力弾性モデルによる荷重解析	付A- 9
A 4	部分安全係数	付A-11
A 5	設計荷重	付A-12
付属書B (参考)	極値風速マップ及び極値風速データベースについて	付B- 1
B 1	極値風速マップ・データベース作成の目的	付B- 1

B 2	既存の作成例	付 B- 3
B 3	極値風速マップ・データベースの内容	付 B- 5
	B 3.1 極値風速マップ・データベースの概要	付 B- 5
	B 3.2 極値風速マップ	付 B- 5
	B 3.3 極値風速データベース	付 B- 6
B 4	作成方法の概要	付 B- 7
B 5	作成手順	付 B- 8
	B 5.1 気象官署位置の極値風速	付 B- 9
	B 5.2 気流解析	付 B-12
	B 5.3 極値風速の内挿	付 B-15
	B 5.4 極値風速マップ値の算出	付 B-17
B 6	極値風速マップ	付 B-19
	B 6.1 極値風速マップ	付 B-19
	B 6.2 建築物荷重指針（2004）との比較	付 B-21
B 7	極値風速マップの検証	付 B-22
	B 7.1 風況観測地点における検証	付 B-22
	B 7.2 気象官署位置における比較	付 B-24
B 8	風況観測地点における極値風速算定例	付 B-26
	B 8.1 極値風速データベースおよび CFD による地形影響評価	付 B-26
	B 8.2 極値風速データベースおよび簡易手法による地形影響評価	付 B-36
	B 8.3 平坦地における算定例	付 B-39
	B 8.4 地形影響評価のまとめ	付 B-40
B 9	「建築物荷重指針・同解説（2004）」の概要	付 B-41
	B 9.1 日本型風力発電ガイドラインにおける 「建築物荷重指針・同解説」の位置付け	付 B-41
	B 9.2 建築物荷重指針（2004）の概要	付 B-42
	B 9.3 建築物荷重指針（2004）における基本風速分布図の作成方法	付 B-43
付属書 C（参考） 現地観測・実験結果		付 C- 1
C 1	風況観測・風力発電設備応力測定	付 C- 2
	C 1.1 観測地点	付 C- 2
	C 1.2 観測仕様、観測項目	付 C-11
	C 1.3 風況観測の整理	付 C-17
	C 1.4 風車応力観測の整理	付 C-43
C 2	風車模型風洞試験	付 C-57

付属書D（参考） 風車被害・実績状況	付D- 1
D 1 国内（日本における風車被害）	付D- 1
D 1.1 風車事故発生要因	付D- 1
D 1.2 部位別発生状況	付D- 2
D 2 海外（海外における風車被害例）	付D- 6
D 2.1 風車事故発生状況	付D- 6

日本型風力発電ガイドライン制定の経緯

## 1 . 適用範囲

本ガイドラインは、「水平軸プロペラ式」風力発電設備を対象として、風条件の設定に適用する。小形風車は対象外とする。風力発電設備の構成要素として、モノポール型タワーの基部までを対象とするが、設計対象とはしない。

荷重の具体的計算手法等は、建築基準法に関連した別途検討手法による。

### 概 要

本ガイドラインは、日本特有の環境条件（地形、気象）に起因する「台風（強風）」「風の乱れ」「落雷」による運転停止や機器の損傷といった設備被害のうち、特に台風（強風）風の乱れによるブレードへの被害は設備の長期間停止を余儀なくされる状況もあり、主に事業者が風車の選定にあたって参考となる手順及び技術情報などの被害の発生に関するデータ等を提示することを目的とする。

本ガイドラインは、「水平軸プロペラ式」風力発電設備を対象として風条件の設定に適用するものとし、小形風車は対象外とする。

本ガイドラインの主な項目は、風条件の評価及び風車の選定、風条件の評価方法、リスク評価である。

主な項目をまとめるにあたっての算定根拠や計測、実験結果等の資料は、参考として別途とりまとめを行った。

## 2 . 関連法規、規格

日本に風力発電設備を設置する際には、以下に示す法令等の規定を満足しなければならない。

### 2.1 法規および省令

- ・ 電気事業法(平成 11 年、法律 121 号)
- ・ 電気事業法施行規則(平成 11 年、省令 40 号)
- ・ 電気設備に関する技術基準を定める省令(平成 9 年、省令 52 号)
- ・ 発電用風力設備に関する技術基準を定める省令  
(平成 17 年 3 月 29 日、経済産業省令第 34 号)
- ・ 建築基準法(昭和 25 年、法律 201 号、平成 19 年改正)
- ・ 騒音規制法(昭和 43 年、法律 98 号)
- ・ 振動規制法(昭和 51 年、法律 64 号)

### 2.2 法規等に関連する国内規格・指針

- ・ 風力発電規程 : JESC V0001(2001) [ JEAC 5005-2001 ] ((社)日本電気協会)
- ・ 建築物荷重指針・同解説(2004、(社)日本建築学会)
- ・ 塔状鋼構造設計指針・同解説(1980、(社)日本建築学会)
- ・ 煙突構造設計施工指針(1982 年版、日本建築センター)
- ・ 煙突構造設計指針(2007、(社)日本建築学会)
- ・ 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説(2007、(社)土木学会)

### 2.3 技術規格

風力発電機的设计に関わる技術規格 (Technical Standards) として、IEC (International Electrotechnical Commission) 規格の「IEC 61400」シリーズが広く国際的に適用されており、日本において設置される風車の大部分がこれらの規格にしたがった設計、製造及び評価を受けている。本ガイドラインの発行時点においては、これらの規格を満足することは国内法的には必要ではないが、実務上は推奨されているのが実態であり、商業的な契約において要求されていることが多い。

風力発電設備に関する国内規格・標準

- ・ JIS C 1400-0(2005)、風力発電用語
- ・ JIS C 1400-1(2001)、風力発電システム - 第 1 部 : 安全要件(IEC 61400-1 ed2(1999))
- ・ JIS C 1400-2(1999)、風力発電システム - 第 2 部 : 小形風力発電システムの安全基準  
(IEC 61400-2 ed1(1996))
- ・ JIS C 1400-11(2005)、風力発電システム - 第 11 部 : 騒音測定方法(IEC 61400-11)

ed2(2002))

- ・ JIS C 1400-12(2002)、風力発電システム - 第 12 部：風車の性能計測方法(IEC 61400-12 ed1(1998))

#### 風力発電設備に関する海外規格

- ・ IEC 61400-1、第 3 版(2005)、第 1 部：設計要件(IS)
- ・ IEC 61400-2、初版(1996)、第 2 部：小形風車の安全性(IS)
- ・ IEC 61400-11、第 2 版(2002)、第 11 部：騒音測定方法(IS)
- ・ IEC 61400-12、初版(1998)、第 12 部：風車の性能計測方法(IS)
- ・ IEC 61400-13、初版(2001)、第 13 部：機械的荷重の計測方法(TS)
- ・ IEC 61400-14、初版(2005)、第 14 部：風車の音響パワーレベル及び純音性評価値の表示(TS)
- ・ IEC 61400-21、初版(2001)、第 21 部：系統連系風車の電力品質特性の測定及び評価(IS)
- ・ IEC 61400-23、初版(2001)、第 23 部：風車の実翼構造強度試験(TS)
- ・ IEC 61400-24、初版(2002)、第 24 部：風車の雷保護(TR)

\* : (IS)国際規格、(TS)技術仕様書、(TR)技術報告書

#### 2.4 関連するハンドブック・マニュアル類

- ・ 風況精査マニュアル(概要版)(1997、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構：以下 NEDO)
- ・ 高所風況精査マニュアル(2006、NEDO)
- ・ 風力発電導入ガイドブック(2008、第 9 版、NEDO)

### 3 . 用語及び定義

本ガイドラインでは、主として JIS C1400-0 : 2005 (風力発電用語) の用語に従った。使用した用語及び関連用語を以下に示す。

- 3.1 **風車** wind turbine  
単一又は複数の風力エネルギーを主軸の動力に変換するロータをもつ装置(風車の最小単位。異種類のロータをもつ風車を含む)。
- 3.2 **風力発電装置** (風力発電機) wind turbine generator  
風がもつ運動エネルギーを電気エネルギーに変換する装置。風力発電システムのうち、発電所の構外に設置される遠隔監視制御装置、表示盤などを除く。
- 3.3 **風力発電システム**(風力発電設備、風力変換装置) WTGS、wind turbine generator system  
風がもつ運動エネルギーを電気エネルギーに変換するシステム。
- 3.4 **風力発電所** wind power station  
一グループ又は複数グループの風力発電装置。
- 3.5 **ヨー制御** (方位制御) yaw control  
風車回転面を変動する風向に追尾させる制御(風車の保護及び出力制御のために方位を制御することもある)。
- 3.6 **風速** wind speed  
空気が移動した距離とそれに要した時間の比(単位は通常 m/s)。
- 3.7 **風速度** wind velocity(vector)  
風の速度ベクトル。
- 3.8 **平均風速** mean wind speed  
風速の瞬間値を、規定期間内で統計的に平均したもの。規定期間は、数秒から数年の場合がある。  
備考 “平均風速”として、月平均風速及び年平均風速が通常使われる。
- 3.9 **瞬間風速** instantaneous wind speed  
時々刻々に変動する風速の瞬間的な値。
- 3.10 **10分間平均風速** 10 minute average wind speed  
風速の10分間平均値(ある時刻の平均風速には通常、正時前10分の平均値を取る)。
- 3.11 **年平均** annual average  
十分な期間にわたって集めた十分な量の測定データセットを平均した値であって、測定対象の期待値を推定できるもの。平均を計算する期間は、季節差などの非正常効果をならすため、年数は整数とする。
- 3.12 **年平均風速** annual average wind speed  
年平均用語の定義に従って平均した風速。

- 3.13 **最大風速** peak wind speed、 maximum wind speed  
ある期間内（時間・日・月・年など）における最大の風速（通常 10 分間の平均値をとっている）。
- 3.14 **最大瞬間風速** maximum instantaneous wind speed  
特定の時間、期間の中での瞬間風速の最大値。  
通常測定時間、0.1～数 10 秒間の平均値の最大値を取る。
- 3.15 **極値風速** extreme wind speed  
t 秒間で平均した最大平均風速で、T 年間（再現期間：T 年）で経験しそうな風速。  
この規格では、再現期間は T=50 年及び T=1 年、並びに平均時間は t=3 秒及び t=10 分を用いる。  
一般的には、定義がややあいまいな耐風速という用語が用いられることがあるが、この規格では用いない。この規格では風車の設計には設計荷重ケースに用いる極値風速を用いる。
- 3.16 **耐風速** survival wind speed  
構造物が耐えられるよう設計された最大風速の一般名称。この規格では、この用語は用いない。設計条件では、極値風速を用いる。[ 極値風速参照 ]
- 3.17 **基準風速** reference wind speed  
風車階級を定義するための基準となる極値風速。  
備考 基準風速  $V_{ref}$  の階級で設計された風車は、風車のハブ高さにおける再現期間 50 年の極値的 10 分平均風速が  $V_{ref}$  以下の気象に耐えるように設計されている。
- 3.18 **風速分布** wind speed distribution  
風速の累積分布関数であって、ある長時間内の風速の分布を示すもの。  
通常用いられる分布関数はワイブル分布関数、レイリー分布関数  $P_R(V_0)$  及びワイブル分布関数  $P_W(V_0)$  である。  
（以下略）
- 3.19 **最多風速出現頻度** maximum occurrence frequency of wind speed  
ある期間内（月・年など）における風速の出現度数の最も多いもの。
- 3.20 **風向** wind direction  
観測者から見て、風が向かってくる方向。例えば、“北風とは北から吹く風”、“山風とは山から谷に向かって吹く風”の意味である。  
風速ベクトルの方向は、風向に対して 180 度反転した方向であることに注意。
- 3.21 **風向度数分布** frequency distribution of wind direction  
ある地点のある期間（月・年など）における各方位別の風向の出現度数分布。
- 3.22 **風配図** wind rose  
ある地点のある期間における各方位別の風向の出現度数を、放射状のグラフに表したものの。
- 3.23 **風速階級別風向の出現度数分布** frequency distribution of wind direction for each wind force scale



- ある地点のある期間における風速階級に対応する各方位別の風向出現度数分布。
- 3.24 **ウィンドプロフィール、ウィンドシア - 法則** (風速の高度分布) wind profile、wind shear law  
風速の鉛直方向分布。数学表現として、対数則及び指数則がよく用いられる。
- 3.25 **ウィンドシア** - wind shear  
風向に対して垂直な面を横切る風速の変化。  
備考 地表境界層では鉛直方向の風速変化。
- 3.26 **回転サンプル風速度** rotationally sampled wind velocity  
回転するロータのある点から見た風速度。
- 3.27 **突風** (ガスト) gust  
風速の瞬間的な変化で、その立ち上がり時間、振幅及び継続時間で特徴付けられるもの。
- 3.28 **突風率** (ガストファクター) gust factor  
ある測定時間の平均風速  $u_m$  に対する、同じ時間内の最大瞬間風速  $u_{max}$  の比 ( $G=u_{max}/u_m$ )。
- 3.29 **乱流強度** (乱れの強さ) turbulence intensity  
風速の標準偏差の平均風速に対する比。  
この比は、指定の時間内に採取した同一の風速測定データセットから決定する。
- 3.30 **粗度長** (粗度定数、粗度係数) roughness length  
風速の高度分布が対数則に従うとした場合、平均風速が零となる外挿高さ。
- 3.31 **(風車)ロータ** (翼車、ロータ、ロータシステム) wind turbine rotor  
風車において、風からエネルギーを吸収するために回転する部分。  
ブレード、ハブ、シャフトなどから構成される。
- 3.32 **翼** (羽根、ブレード) blade、rotor blade  
ロータを構成する回転翼。
- 3.33 **ハブ** (ロータヘッド) hub  
翼をロータ軸に固定する部分。
- 3.34 **主軸** (ロータ軸) main shaft、rotor shaft  
ロータからの動力を発電機に伝達する回転軸。増速機付きの風車においては、低速軸及び高速軸の総称。
- 3.35 **ナセル** nacelle  
水平軸風車において、タワーの上部に配置され、動力伝達装置、発電機、制御装置などを格納するもの、及びその内容物の総称。
- 3.36 **(風車の)支持構造物** support structure  
タワー及び基礎からなる風車の一部分。
- 3.37 **タワー** (塔) tower  
風車ロータ、動力伝達装置、発電機などを地上から適切な高さに支持するための架台。
- 3.38 **基礎** foundation

- タワーの荷重を地盤に伝えるための工作物。
- 3.39 **ロータ直径** rotor diameter  
風車ロータの直径。ダリウス風車の場合には、赤道面の直径。
- 3.40 **受風面積** swept area  
ロータ翼先端の回転による軌跡が、風向に垂直な平面に投影した面積。
- 3.41 **ハブ高さ** hub height  
風車ロータ中心の地上高さ。垂直軸ダリウス風車の場合には、赤道面の高さ。
- 3.42 **出力曲線** (パワーカーブ、出力特性曲線) power curve  
横軸に風速、縦軸に風車出力をとり、両者の関数関係を示す曲線又はプロットされたデータ群。
- 3.43 **ピッチ角** pitch angle  
翼のあるスパン方向位置(通常はブレード半径の100%位置)における、翼弦とロータ回転面のなす角度。
- 3.44 **ロータ回転速度** rotor speed  
風車ロータの軸周りの回転速度( $r/min$ 、 $min^{-1}$ )。
- 3.45 **周速比** TSR、tip speed ratio  
風速に対する翼先端の周速度の比。
- 3.46 **前方風速** undisturbed wind speed、free-stream speed  
風車ロータに流入する風であり、風車の影響を受けていない距離が十分離れた前方の風速。
- 3.47 **風車後流** wake  
風車に流入した空気流の風車ロータの後方流れであり、風車前方の自由気流と比較して、一般的に風速が低く、乱流強度が高い。
- 3.48 **カットイン風速** cut-in wind speed  
風車が利用可能な動力を生むハブ高さにおける最小の風速。
- 3.49 **定格風速** rated wind speed  
風車の定格出力が発生するハブ高さにおける規定の風速。
- 3.50 **カットアウト風速** cut-out wind speed  
風車が利用可能な動力を生むハブ高さにおける最大の風速。
- 3.51 **定格回転速度** rated rotor speed  
定格出力を発生する風車ロータ回転速度。
- 3.52 **(風力発電システムの) 定格出力** rated power  
一般には製造業者によって指定される、機器又は装置の規定の運転状態における出力の値。
- 3.53 **利用可能率** (稼働率) availability、on-wind availability、true availability  
ある期間中において、全暦時間から風車の保守又は故障による停止時間を差し引いた値の、同期間中の全暦時間に対する比(研究又は実証目的の風車においては、暦時間の代わりに、運転可能な風速が得られた時間の合計値を用いることもある)。

- 3.54 **設備利用率** capacity factor  
ある期間中における風車総発電量の、同期間中に定格出力で運転したと仮定して風車が発生可能な発電量に対する比。
- 3.55 **複雑な地形** complex terrain  
地形が変化に富み、又は障害物が存在し、それらによって風がゆがめられやすい風車サイトの地理形状。
- 3.56 **気流のゆがみ** flow distortion  
障害物、地形変化、ほかの風車などに起因する気流の変化。計測される風速は自由気流風速から偏り、大きな不確かさを伴う。
- 3.57 **自由流風速** free stream wind speed  
通常は、ハブ高さにおける、乱されていない自然の気流の速さ。
- 3.58 **障害物** obstacles  
建物、樹木、近隣の風車など、風を乱す要因となる風車周辺の恒常的建造物及び物体。
- 3.59 **サイト・キャリブレーション** site calibration  
試験サイトにおいて、風車設置点に一時的に設置された風向風速計に流入するハブ高さの風速及び風向と、性能計測に用いる風況観測マストで計測される風速及び風向のデータを取得し、風車に流入する地形による流れのゆがみを補正すること。
- 3.60 **試験サイト** test site  
性能計測を行う風車及びその周辺を含む土地。
- 3.61 **設計条件** design situation  
発電、パーキングなど、風車の運転が可能なモード。
- 3.62 **(風車の)外部条件** external conditions (for wind turbines)  
風車の運転に影響を与える要素であって、風の条件とその他の気象条件(雪、氷など)からなる。
- 3.63 **設計限界** design limits  
設計に用いられる最大値又は最小値。
- 3.64 **限界状態** limit state  
構造物及びそれにかかる荷重の状態であって、それを超えると構造物が設計要求事項に合致しなくなる状態。設計計算(すなわち、限界状態に対する設計要求事項)の目的は、限界状態になる確率を当該構造物に定められたある値以下に抑えることである。
- 3.65 **運用の限界状態** serviceability limit states  
通常の運用基準の限界に関する状態。
- 3.66 **最終限界状態** ultimate limit state  
故障又はそれに匹敵するほどの大幅な変形若しくはゆがみに相当する限界状態。
- 3.67 **(風車の)重大故障** catastrophic failure (for wind turbines)  
構成部品又は構造物が、分解又は破壊して、基礎機能を失い安全性を損ねること。

- 3.68 **潜在欠陥** latent fault、 dormant failure  
通常の運転時には検知できない、構造部品又はシステムの欠陥。
- 3.69 **設計荷重ケース** design load case  
風力発電装置の設計に用いる外的運転条件、故障・輸送・建設・保安などを考慮した荷重の条件。
- 3.70 **運転荷重** operation load  
風力発電システムの運転及び制御によって発生する荷重。
- 3.71 **地震荷重** seismic load  
基準地震が風力発電装置に与える荷重。
- 3.72 **パーキング** parking  
正常停止後の風車の状態。
- 3.73 **外挿** extrapolation  
ある既知の数値データを基にして、そのデータの範囲の外側で予想される数値を求めること。また、その手法を外挿法（補外法）という。当該数値データを、何らかの関数にあてはめ、数値データの無い範囲（外側）の値を推定する。
- 3.74 **内挿** interpolation  
補間とも言う。ある既知の数値データを基にして、そのデータの範囲の内側で予想される数値を求めること。また、その手法を内挿法（補間法）という。  
最も簡単なものは、一次関数（直線）による内挿（直線内挿）である。
- 3.75 **疲労強度** fatigue strength  
疲労による破壊に到るまでの繰り返した回数に対応する応力を疲労強度という。金属は繰り返し荷重により生じる応力が、降伏点よりかなり小さい場合でも、疲労によって破壊することがしばしばある。
- 3.76 **終局強度** extreme strength  
応力度、ひずみ度曲線における最大応力度のこと。
- 3.77 **フェザリング状態** feathering state  
ブレードのピッチ角度が0度程度の状態のこと。
- 3.78 **ファイン状態** fine state  
ブレードのピッチ角度が-90度程度の状態のこと。
- 3.79 **風力係数** wind force coefficient  
建築物の形状によって定まる係数のことで、風圧力の算定などに用いる。

## 4. 記号及び略語

以下に本文中に用いた単位記号を示す。

D	ロータの直径	[m]
$I_{ref}$	ハブ高さにおける乱流強度の期待値 (風速 15m/s 時)	[-]
t	時間	[s]
U	風速	[m/s]
$V_{ave}$	ハブ高さにおける年平均風速	[m/s]
$V_{ref}$	ハブ高さにおける 10 分間平均風速の 50 年再現期待値 (基準風速)	[m/s]
$V_{eN}$	再現期間 N 年の極値風速	[m/s]
$V_{gustN}$	再現期間間隔 N 年間で予想される最大の突風の振幅	[m/s]
$V_{hub}$	ハブ高さにおける 10 分間平均風速	[m/s]
$V_{in}$	カットイン風速	[m/s]
$V_{out}$	カットアウト風速	[m/s]
$V_r$	定格風速	[m/s]
WS	風速	[m/s]
WD	風向	[-]
$Z_{hub}$	風車のハブ高さ	[m]
Z	基準地上高さ	[m]
$\alpha$	風速の鉛直分布を示すパラメータ (ウインドシアの指数)	[-]
$\rho$	空気密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\theta_{eN}$	予想再現期間間隔 N 年における極値風向変化	[° ]
$\Lambda_1$	乱れの定数 主方向のパワースペクトル	[m]
$\sigma_1$	ハブ高さにおける主方向風速の標準偏差	[m/s]
$V_{ref}^*$	風車設置場所におけるハブ高さにおける 10 分間平均風速の 50 年再現期待値 (極値風速)	[m/s]
$I_{ref}^*$	風車設置場所におけるハブ高さにおける乱流強度の期待値 (風速 15m/s 時)	[-]
$V_{ave}^*$	ハブ高さにおける年平均風速	[m/s]
$\theta$	気流傾斜角 (風のロータ面への流入角)	[° ]
$V_{e50}$	再現期間 50 年のガスト (3 秒平均風速) ( $=1.4 \times V_{ref}$ )	[m/s]
$V_{e1}$	再現期間 1 年のガスト (3 秒平均風速) ( $=0.8 \times V_{e50}$ )	[m/s]
b	パラメータ (b=5.6)	[m/s]
I	乱流強度	[-]
V	10 分間平均風速	[m/s]
$\sigma$	風速の標準偏差	[m/s]

添え字 $90q$	非超過確率 90%	[-]
$E(X)$	確率変数 $X$ の期待値	[-]
$Std(X)$	確率変数 $X$ の標準偏差	[-]
$\theta$	風向	[° ]
TI	乱流強度	[-]
E	傾斜地および尾根状形状に風が直角に当たる場合の補正係数	[-]
PO	風向出現頻度	[-]
$\Delta I_{ref}$	十分大きい風速における乱流強度の実測値を NTM 式で近似した期待値との差	[-]
$\bar{U}$	参照高さにおける風速	[m/s]
$\kappa$	乱れエネルギー	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	$\kappa$ の散逸率	[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]

以下に、本ガイドラインで使用されている略語を示す。

IEC	International Electrotechnical Commission 国際電気標準会議
RIX	Ruggedness Index Risoe 研究所が複雑地形における風況シミュレーションの予測精度を判断するために開発した指標で、剥離が発生するといわれている勾配 (Threshold slope : 通常 0.3、傾斜角で約 17 度、勾配で 30%) 以上の地形が占める割合
A	Abnormal 異常 (部分安全率について)
F	Fatigue 疲労
N	Normal and extreme (for partial factors) 正常及び極値 (部分安全率について)
T	Transport and erection (for partial factors) 輸送及び建設 (部分安全率について)
U	Ultimate 最終限界
DLC	Design load case 設計荷重ケース
ECD	Extreme coherent gust with direction change 風向変化を伴う極値コヒーレントガスト
ECG	Extreme coherent gust

	極値コヒーレントガスト
EDC	Extreme wind direction change 極値風向変化
EOG	Extreme operating gust 運転時の極値突風
ETM	Extreme turbulence model 極値乱流モデル
EWM	Extreme wind speed model 極値風速モデル
EWS	Extreme wind shear 極値ウインドシア
NWP	Normal wind profile model 正常なウインドプロファイルモデル
NTM	Normal turbulence model 通常の乱流モデル
RANS	Reynolds Averaged Navier–Stokes Simulation レイノルズ平均モデル
LES	Large Eddy Simulation 空間平均モデル
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
CFD	Computational Fluid Dynamics 数値流体力学

## 5 . 風条件の評価及び風車の選定

### 概 要

地形等が風況に与える影響及び風況が風力発電設備に与える影響を明確化し、風車設置場所に適した安全な運転が可能な風車を選定することを目的として、風条件を評価する手順を記す。

風車設置場所の風条件に適合する風車を選定するためには、風車の設計要件を定めた国際規格である IEC 61400-1 あるいは Germanischer Lloyd Guideline(ジャーマニッシュロイドガイドライン、以下 GL ガイドラインと表記する)などで設定される風条件と比較する必要がある。

なお、これらの規格およびガイドラインの内容は、必要に応じて随時改訂されるため、評価を実施する際には、その時点での最新版の規定の内容を確認する必要がある。

### 5.1 風車選定のための風条件の設定

風車選定のために必要な風条件のうち主要なものは、以下のとおりである。

これらの評価は、**図5.1**に示す手順に従うこと。

- ( 1 ) ハブ高さにおける 10 分間平均風速の 50 年再現期待値 (以下「極値風速」と称する)
- ( 2 ) ハブ高さにおける 10 分間平均風速 15m/s に対する乱流強度の期待値
- ( 3 ) ハブ高さにおける年平均風速

なお、ほかにも「気流傾斜角」、風速の鉛直分布を示す「ベキ指数」、「空気密度」などについても、標準的な条件と異なる場合にはそれらを考慮すること。

風車設置を検討する場合、設置場所における 1 年間以上の風況観測を実施することが一般的である。しかしながら、上記の主要三項目について観測結果から直接求めるためには、以下に示す事項が課題となっている。

#### 観測高度

ハブ高さでの観測を原則とするが、近年になって風車が大型化した結果、観測を実施する高度はハブ高さを下回る場合がほとんどであるため、ハブ高での風条件を評価するためには複数高度における観測結果を外挿して推定する必要がある。

#### 観測場所

ウィンドファームのように数 km にも及ぶ広範囲の事業計画を行う際には、各風車設置場所での風条件を観測場所と周辺の地形条件などを考慮して推定する必要がある。

#### 観測期間

日本国内における風車設置場所の極値風速は、稀に通過する台風によって決定される地域が多いため、短期間の風況観測のみから再現期間 50 年の極値を求めると誤差が大きくなる場合がある。



これらの課題に対処するための評価手順を図5.1に示す。図中の $V_{ref}$ 、 $I_{ref}$ および $V_{ave}$ は、それぞれ、本ガイドラインに記載された手順で設定された極値風速、乱流強度および年平均風速であり、各々の詳細に関しては6章に記述する。

また、特に観測期間での課題に対処するためには、6.3.1項に示す気象官署等における観測データにより極値風速を算定する方法がある。しかし、風車設置予定場所における1年間程度の観測データと気象官署等の長期観測地点の観測データとの間に風速の相関がなく、かつ風況の経年変化が少ないという条件を満たさない場合は、この方法で極値風速を評価できない可能性がある。そこで、本ガイドラインでは、日本の耐風設計に関する最新の知見に基づき、気象官署の観測データおよび大規模地形効果などを考慮した極値風速マップ/データベースを提供する。極値風速マップの具体的な内容は6.3.2項に記述する。

風車の選定に必要な極値風速、乱流強度及び年平均風速は、最低 1 年間にわたる現地での風況観測結果と合わせて、地形の複雑度に応じて、極値風速マップあるいは極値風データベースに基づく手法、気象官署等における観測データに基づく手法、数値シミュレーションあるいは風洞実験に基づく手法などの適切な手法を組み合わせることで評価を行うこと。

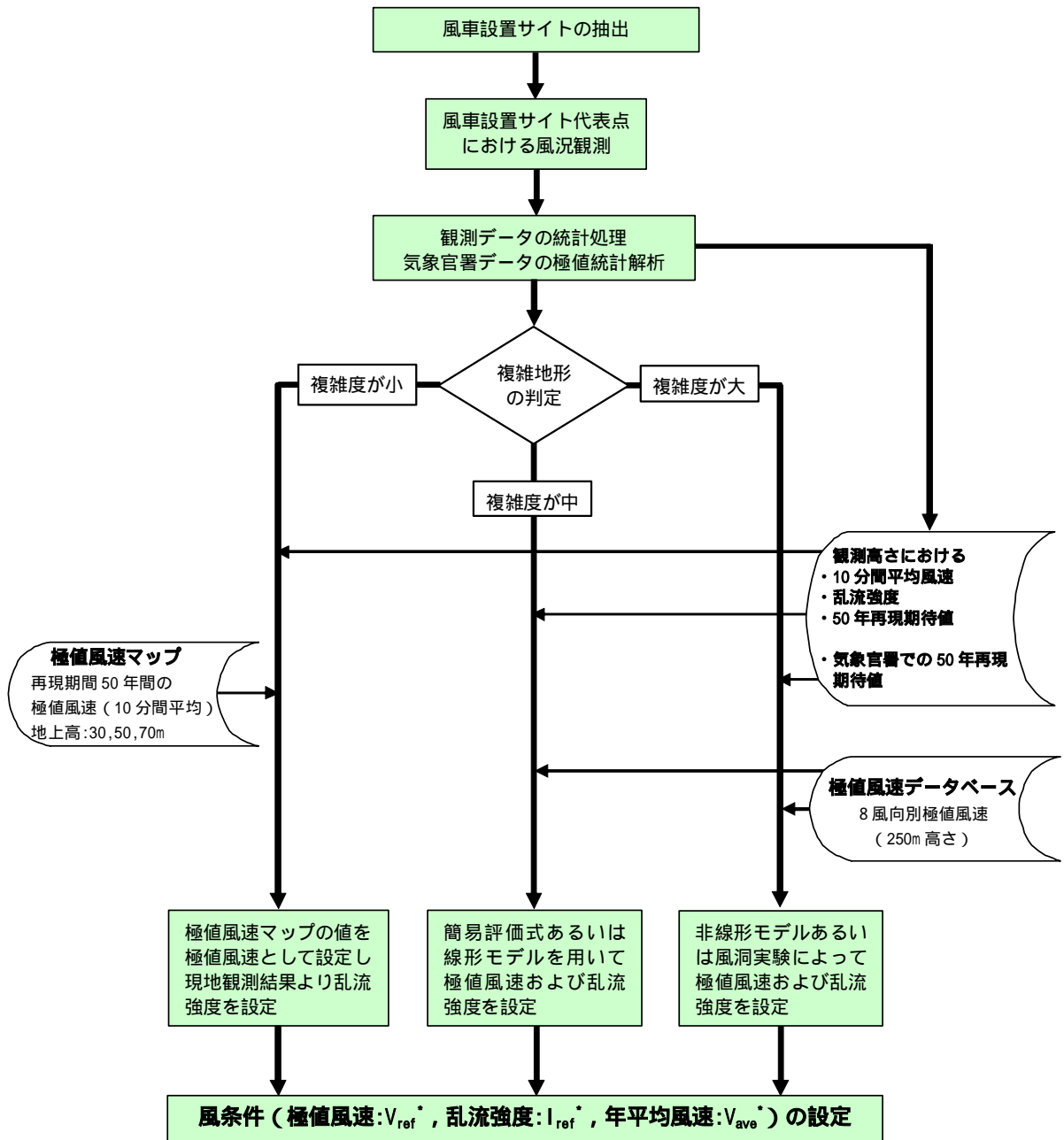


図 5.1 風条件の評価手順

## 5.2 風車の選定

前節において設定されたハブ高さにおける風条件に適合する風車を選定する際には、図5.2に示す手順に従うこと。

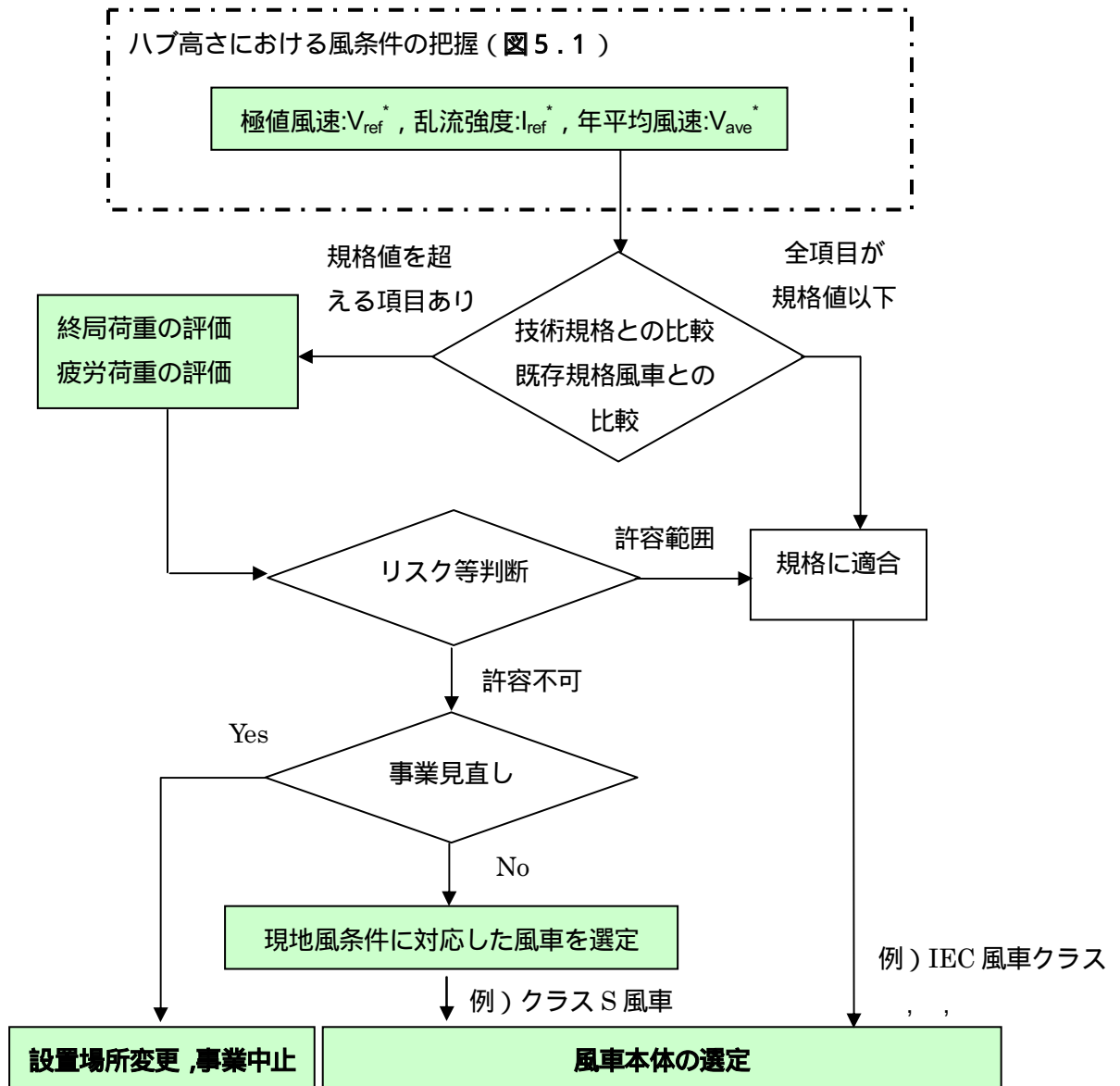


図5.2 風車設置場所の風条件を考慮した風車本体の選定手順

### 5.2.1 技術規格に適合した風車からの選定

以下の条件を満足する場合には、風車の技術規格により設計・製造された風車を選定する。複数の風車が隣接する場合、相互の影響を考慮すること。

- ・  $V_{ref}^*$  50m/s
- ・  $I_{ref}^*$  0.16
- ・  $V_{ave}^*$  10m/s

ただし、 $V_{ave}^*$ は、適合する風車クラスの  $V_{ref}$  に 0.2 を乗じた風速を上回らないこと。

注)  $V_{ref}^*$  は風車設置予定地のハブ高さにおける風条件を示す。例えば、 $V_{ref}^*$  は風車設置予定地におけるハブ高さでの 10 分間平均風速の 50 年再現期待値を意味する。

ここで、風車設置予定地におけるハブ高さでの 10 分間平均風速の 50 年再現期待値(極値風速)  $V_{ref}^*$ 、および風速 15m/s における乱流強度の期待値  $I_{ref}^*$  に関しては、表 5.1 に示す IEC 規格による風条件に示される基準風速  $V_{ref}$ 、乱流強度  $I_{ref}$  との比較を行って適合する風車を選定する必要がある。

表 5.1 風車の国際規格 IEC 61400-1(2005)に規定されている風条件

風車クラス					S
$V_{ref}$	(m/s)	50	42.5	37.5	設計者が規定する数値
A	$I_{ref}$ (-)	0.16			
B	$I_{ref}$ (-)	0.14			
C	$I_{ref}$ (-)	0.12			

上記の IEC 規格では、年平均風速は、基準風速  $V_{ref}$  に 0.2 を乗じた値と定めており、設置場所における年平均風速  $V_{ave}^*$  も、IEC 規格に対応する風車クラスの年平均風速以下であることを確認する。

図 5.3 に日本の気象官署において観測された極値風速と年平均風速の関係を示す。その比率は 0.2 よりも小さいことから、IEC 規格で定めた標準的な風条件は日本の風条件と異なることに注意を要する。

また、(後述する)  $V_{e50}$  と  $V_{ref}$  との関係についても、同様の相違が起こり得るので、荷重評価においては注意が必要である。

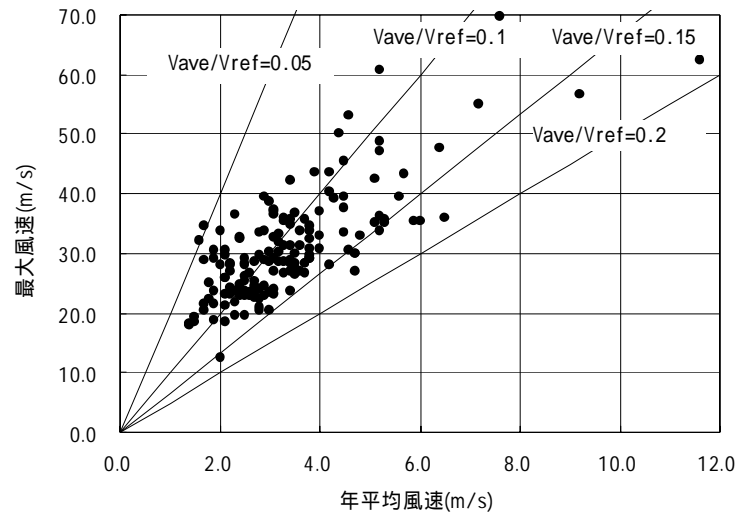


図 5.3 日本の気象官署における最大風速と年平均風速との関係

風車の型式または部位によって、強度を決定する要因となる設計荷重ケース(DLC)は様々あることから、風車設置場所の風条件の一部項目が規格で定める風車クラスの標準的な風条件を上回った場合でも、風車の安全性を確保できる場合がある。さらに、出力制御方法を含む運用方法の変更、耐用年数の短縮などで安全性を確保できる場合もある。

そのような場合で、認証機関もしくは風車メーカーが実施する技術的検討によって、十分な安全性が確保できることを証明できれば、標準的な風条件を逸脱した設置場所であってもその機種を採用することが許容される。

参考までに IEC 61400-1(2005)では、風車クラスの基本パラメータおよび付加パラメータを表 5.2 のように定めている。

表 5.2 風車クラスの基本パラメータおよび付加パラメータ

項目	記号	IEC (JIS)	設置場所条件	備考
ハブ高さにおける再現期間50年の10分間平均風速	$V_{ref}$	50 m/s ( ) 42.5m/s ( ) 37.5m/s ( )	(設置場所において設定した風条件を記入)	暴風時の風速
再現期間 50 年のガスト (3 秒平均風速)	$V_{e50}$	$1.4 \times V_{ref}$		
再現期間 1 年のガスト (3 秒平均風速)	$V_{e1}$	$0.8 \times V_{e50}$		故障等の考慮
ハブ高さにおける年平均風速	$V_{ave}$	$0.2 \times V_{ref}$		発電量・疲労荷重
ハブ高さにおける乱流強度 (風速 15m/s)	$I_{ref}$	0.16 (A) 0.14 (B) 0.12 (C)		疲労荷重 $\sigma_2 = 0.7\sigma_1$ $\sigma_3 = 0.5\sigma_1$
気流傾斜角(風のロータ面への流入角)		8°		
風速の鉛直分布 (べき法則)		通常時は 0.2 暴風時は 0.11		地表面粗度、障害物の影響
空気密度		1.225 kg/m <sup>3</sup>		高地、極低温

## 5.2.2 技術規格による標準的な風条件を超える場合の風車の選定

風車設置場所の風に関する風条件が、技術規格（IEC 61400-1(2005)など）で定められた通常の風車クラス（クラスⅠ、Ⅱ、Ⅲ）の設計条件を超える場合には、図5.2に示す手順で風車の選定を行うこと。

「風車クラスS」とは、IEC規格等で定められている通常の風車クラス（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）に当てはまらない設計条件によって設計・製造された風車全てを指す。したがって、必ずしも厳しい風条件に適合した風車とは限らず、例えば台風の影響がほとんどなく非常に平坦な地形を対象として、設計条件を「緩和した」風車も「クラスS」に分類されるため、クラスSでは具体的設計条件を詳細に確認する必要がある。

そのような特別仕様に基づいて設計・製造されたクラスS風車は、それが当該風車製造業者の標準的な製品となっている場合を除いては、その価格及び納期等の契約条件が標準的な風車クラスの風車と比較して、事業者にとって厳しいものになる可能性が高いため、事業の妥当性も考慮して、以下に示す対応策も含めて十分な検討を事前に行う必要がある。

### （1）風車設置場所の変更

特に、風車設置位置での $V_{ref}^*$ がIEC規格等において満足できない場合、風車の終局強度で問題を生じる可能性があり、設置場所の見直しを要する。ただし、前項に示す通り、風車メーカー等による技術検討の結果、実際の風条件において風車が $V_{ref}^*$ に対して十分に安全であることが確認された場合にはこの限りではない。

### （2）運転制限あるいは運転期間の短縮

風車設置位置での $I_{ref}^*$ あるいは $V_{ave}^*$ が、IEC規格等において満足できない場合、風車の疲労強度などで問題を生じる危険性がある。

ただし、

風車の運転条件に制限を設けることで、安全性が確保できる。

耐用年数を短縮することで、疲労による累積損傷を低減できる。

運転中の限界荷重に、十分な安全性が確保できる。

などと判断される場合にはこの限りではない。

このような実際の風条件における風車の安全性についての判定は、風車メーカーによる技術的検討で十分な場合もあるが、中立な第三者による評価を実施することが望まれる。

なお、このような風車を運転する際には、定期的なあるいは常時の監視および定期点検を強化するなど、安全上必要な措置を講じて、不測の事態が生じないように対策を行う必要がある。

### 5.3 風車本体以外（タワー、電気設備）の設計

タワーおよび基礎などの支持構造物、系統連系のための電気設備などの仕様は、風車本体（ロータ、ナセル）の仕様に適合させるとともに、設置場所の環境条件にも適合するように決定する必要がある。

#### 5.3.1 タワーの設計

風車タワーの設計には、台風や低気圧による暴風時の風荷重、風及び翼荷重による変動荷重によって生じる疲労荷重を考慮すること。また、IEC規格等に基づいてガストの影響や異常時の荷重など、風車特有の荷重条件についても考慮すること。

風以外の荷重については、我が国固有の環境条件（地震）を考慮した建築基準を満足する必要があるが、機器故障を含めた種々の状況を想定した設計が必要であるため、風速に応じた比例計算のような単純な補正計算によって設定しないこと。

風車メーカーでは、風車本体との動的な連成効果も含めて検討した標準的なタワーを供給している。これとは別に設置者等がタワーを設計・製造する際には、技術規格に基づいて決定された荷重条件を風車メーカーから提示を受け、それを適用する必要がある。タワーの設計者は、その荷重条件の設定に関して誤解がないよう注意しなければならない。

国際規格であるIEC規格では、荷重、強度の評価に部分安全係数法に基づく安全係数の設定がなされている。そのため、日本の評価基準を用いる場合には、与えられた荷重の条件に安全係数が含まれているか、用いる強度値、限界状態との対応が正しいかなどについて確認し、評価の考え方に食い違いが生じないようにこれらを明確にした上で評価を実施する必要がある。

日本では、建築基準法の規定を満足したタワーを設計することとなっているが、同法では風車タワーは塔状構造物として取り扱われており、風車固有の設計条件が盛り込まれたIEC等の国際規格は体系が異なっている。そのため、風車タワーを設計する際には、風車固有の設計条件が盛り込まれた国際規格の他、我が国固有の環境条件（台風、地震等）を考慮した建築基準法も満足する必要がある。

暴風時のタワーの扱いに関しては、土木学会「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」（以下、土木学会指針と称する）を参考とすることができる。この指針ではタワーに加えて、基礎の設計も対象としている。

また、建築基準法に準じた設計風速が風車の設計規格を下回る場合に、単純に風速の換算（例えば、風速の二乗に比例して荷重を変化）を行っただけでは、IEC規格に定める他の設計荷重ケース（DLC）を考慮しない結果となってしまう可能性があり、荷重の過小評価に繋がる場合もあるので、そのような手法を適用してはいけない。

建築基準法ではタワーの疲労強度についての明確な規定はないが、ロータや増速機と同様に、タワーにも繰り返し変動する外力による疲労荷重が作用するため、発電事業者が設定する運転期間に対して、十分な疲労強度があることを確認する必要がある。



### 5.3.2 電気設備の設計

風力発電所の電気設備は、適切な国際規格（IEC規格等）もしくは日本国内の規格に基づいて適切に設計すること。また、系統連系設備は、その要件を満たすこと。

風車設計時に想定していないような長期間の停電などが想定される場合には、制御装置のバックアップ電源として自家発電機を用意するなどの必要な安全措置を講じること。

台風時のヨー制御など、風車の能動的な制御を前提とした荷重設定を行う場合には、各機器の制御用電源を確保しなければならない。また、制御に必要な計測機器、制御用の駆動機器、ブレーキ等についても、想定される条件での動作が可能であることを確認する必要がある。

一方で、これは、制御用バックアップ電源の設置を義務づけるものではない。

### 5.4 稀な事象への対策

発生確率が非常に低い外部条件に対しては、機器の仕様や運用方法で対応する以外に、保険など経済的な方法で損失を低減する方策を取ることも許容される。

風車は自然のエネルギーを利用した発電設備であり、ランダムに発生する多様な環境条件の下での運転を可能にしながら、同時に発電コストの低減を実現するため、IEC規格などによって標準化された設計条件に基づいて設計・製造を行うことが要求されている。

しかしながら、工学的に想定されるあらゆる事態に対しても安全な設計を要求することは、経済的ではない。したがって、竜巻やダウンバーストなど発生確率が非常に低い外部条件に対しては、機器の仕様や運用方法で対応する方法だけでなく、外部への危害発生防止策を講じつつ、保険など経済的な方法による方策を取ることも許容される。

## 6 . 風条件の評価方法

風車の選定に必要な極値風速及び乱流強度は、極値風速マップあるいは極値風速データベースに基づく手法、または、最低1年間にわたる現地での風況観測結果を合わせて評価すること。周辺地形の複雑度が大きく、平坦地として取り扱うことができない場合、また、複数の地形要素が組み合わさるなど単純な地形モデルが適用できないと判断された場合には、数値シミュレーションあるいは風洞実験など適切な手法を用いた評価を行うこと。

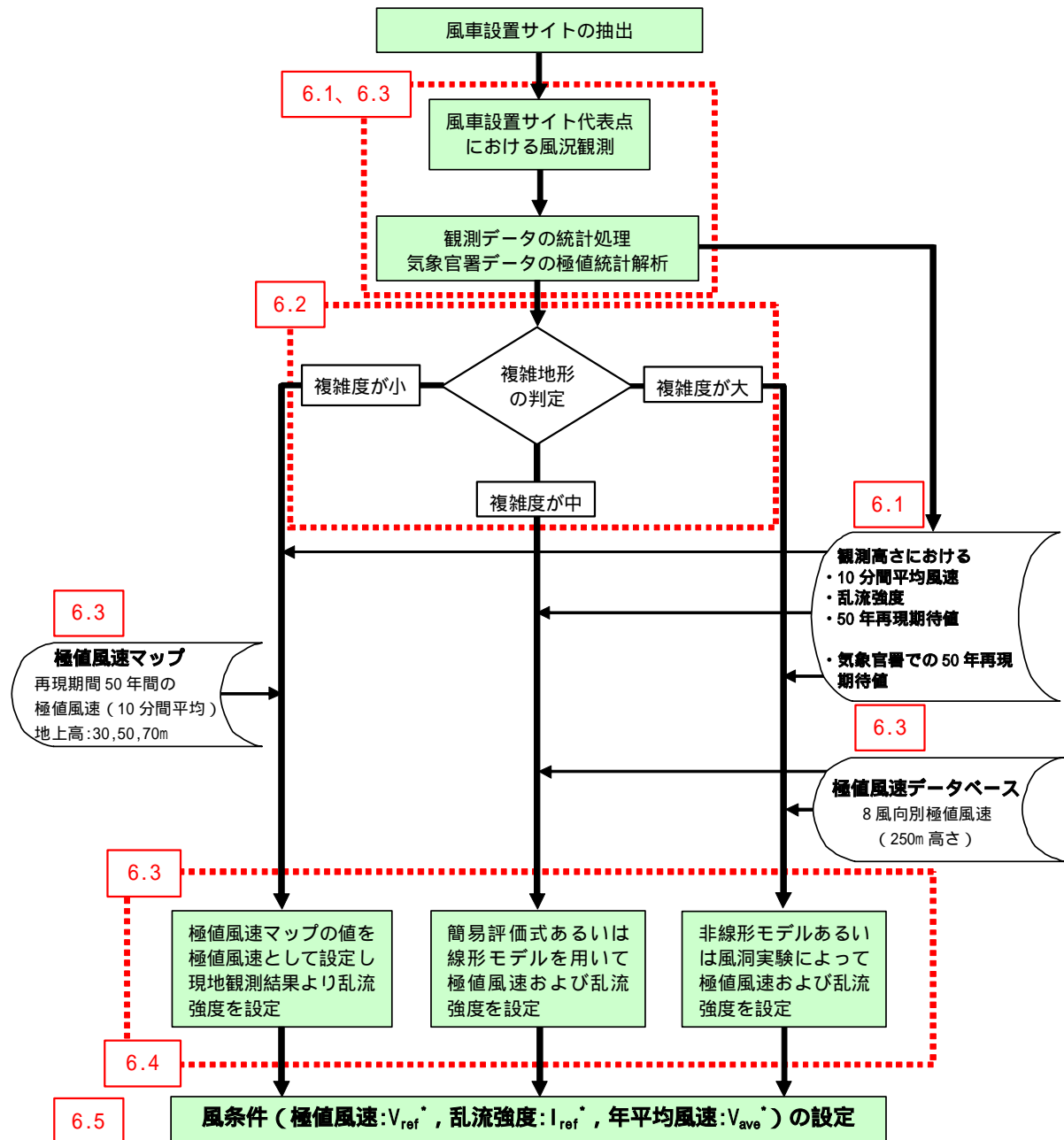


図 6.1 風条件の評価手順

図6.1は、図5.1の再掲であり、風条件の評価手順を示している。図中の番号は本章の各節に対応している。風力発電の事業者は、風車を設置するにあたり、風車設置予定場所において事前に風況観測を行うことを必須条件としている。

5章で記述されているように、風車設置予定場所における風の条件に対して適切な風車を選定するにあたり、極値風速、乱流強度および平均風速を確認する必要があるが、この章では、予定場所における地形の複雑度の判定法とともに、極値風速および乱流強度の評価方法を記載する。IEC規格は平坦地形における風モデルを規定しているため、平坦地形以外の風条件の設定方法については記載されていない。本ガイドラインでは、極値風速および乱流強度の評価方法を地形の複雑度の大きさ別に選択する方法を提示している。

以下に、現地風況観測、地形判定方法、極値風速の設定方法、乱流強度の設定方法およびこれらの手法の適用例について記載する。

## 6.1 現地風況観測

風力発電事業の予定地では、事前に現地での風況観測（風況精査）を少なくとも1年間以上実施すること。

観測高さは風車のハブ高さを原則とするが、これを満足することができない場合には、複数の高さで観測した結果を用いて外挿するなど適切な方法で高度補正を行うこと。

風況観測を行う際、次の3つのパラメータを評価できるように考慮すること。

- (1) ハブ高さにおける10分間平均風速
- (2) ハブ高さにおける10分間平均風速に対する非超過確率90%に相当する乱流強度
- (3) 風の鉛直分布を示すべき指数

上記のパラメータ以外に、現地観測やその他の方法を用いて、空気密度や、地形が複雑と判定される場合に気流傾斜角および乱流強度の3成分を評価できるようにすること。

日本においては、季節変動を考慮し、1年間の観測結果は風条件の把握の面でも妥当と考えられる。また、風力発電を補助事業として行う場合は、少なくとも1年間以上の風況観測の実施が必要とされている。

風況観測地点の選択には、風車設置予定地と地形が著しく異なることや、丘陵や障害物の影響が及ばないこと等に十分留意する必要がある。

風況観測から得られる風速の頻度分布は、風力発電の事業採算性を判断する材料となるほか、乱流強度の頻度分布ともあわせて、風車の選定にも用いられる。

風況観測の高さは、IEC規格等にしがたって、設置を計画している風車のハブ高さで実施することが求められるが、物理的制約や法的規制のためにそれが困難である場合には、可能な限り高

い高さでの観測を実施し、さらに複数高さでの観測を行うことにより、ハブ高さにおける風速を推定する。ただし、地形が複雑な場合には、このような外挿により推定されるハブ高さにおける風速の予測誤差が大きくなる可能性がある。このため、数値解析による風況解析を実施し、確認することを推奨する。

風条件のうち、乱流強度は現地での観測データから推定することができるが、ウィンドファーム等、複数の風車を設置する場合で、全ての風車位置での風況観測を行うことができない場合には、地形の複雑度に応じて数値解析による風況解析を実施するなど追加検討を行う必要がある。

風況観測データの取得方法については、NEDO 風況精査マニュアルもしくは NEDO 高所風況精査マニュアルに示された方法に従うこととするが、IEC 61400-1 (設計要件) および IEC 61400-12-1 (性能計測) の規定に従って実施することも可能である。

## 6.2 地形の複雑度の判定

平坦な地形条件に対応して設定されている標準風条件に対して、別途風条件の確認、評価が必要な地形条件に関しては、以下の指標を用いて地形の複雑度を判定すること。

- (1) 半径 5km 以内での地形の最大傾斜が 10 度以上。
- (2) 半径 5km 以内での風上側地形断面での標高の標準偏差が  $1.5 \times$  ハブ高さ以上。
- (3) 半径がハブ高さ  $\times 5$ 、10、20 内の風上側地形断面での標高の標準偏差がそれぞれハブ高さ  $\times 0.5$ 、0.8、1.4 を超える。
- (4) 小地形による増速率が 1.1 を超える。
- (5) 隣り合う等高線間の勾配のうち、勾配が 30%以上の割合が 30%を超える。

これらの指標は風向別に評価した後、その最大値によって判断する必要がある。

上記の指標による複雑度の判定条件は以下の通りである。

- |                                       |        |
|---------------------------------------|--------|
| a) (1)、(2)、(3)、(4)、(5)の全てが該当せず        | : 複雑度小 |
| b) (1)、(2)、(3)、(4)のいずれかが該当および(5)が該当せず | : 複雑度中 |
| c) (1)、(2)、(3)、(4)のいずれかが該当および(5)が該当   | : 複雑度大 |

ただし、ここで示される判定方法は地形の複雑度の目安であり、複雑度が小または中と判定された場合でも、地形によっては乱流強度や極値風速が大きな値を取る可能性もあるため、注意を要する。

風車の国際規格である IEC 61400-1(2005)および GL ガイドライン(2003)では、ヨーロッパを中心とした比較的平坦な地形条件を前提に設定された標準風条件に対して、別途地形の影響などを考慮すべき複雑地形の判定条件を表 6.1 のように定めている。

表 6.1 複雑地形の判定指標

風車からの離隔	最大傾斜	風車周辺の最大起伏
$< 5 \cdot Z_{hub}$	$< 10^\circ$	$< 0.3 \cdot Z_{hub}$
$< 10 \cdot Z_{hub}$		$< 0.6 \cdot Z_{hub}$
$< 20 \cdot Z_{hub}$		$< 1.2 \cdot Z_{hub}$

注)  $Z_{hub}$  : ハブ高さ 最大起伏 : 標高差

風車設置場所の地形の複雑度は、地形の平面からの変化によって特徴づけられ、表 6.1 に示す全ての条件を満たさない設置場所は複雑であると判定される。

表 6.1 の対象領域は、最大でハブ高さの 20 倍であるため、例えば、ハブ高さ 30m の風車では、評価の範囲が 150m、300m、600m 以内であり、風車の近傍領域のみを考慮していることが分かる。また、評価をハブ高さの 1.3 倍の半径の円盤を上記領域内の地形に合わせた基準面の傾きとその基準面からの凹凸で行うことから、基準面もハブ高さ 30m クラスの風車で直径 78m 程度となるが、このような小さな基準面の適合を領域内にわたって忠実にを行うためには、高密度で精密な地形の数値情報が必要となる。しかし、容易に入手可能で信頼性の高い地形情報である、国土地理院の数値地図は 50m メッシュの標高値であることから、対象地点付近の測量等が必要となる。

また、我が国のように、風車の近くに山岳が存在する場合には、風車近傍の小さな凹凸のみならず、やや遠方の山岳の影響が無視できない。さらに、数 km 以内にある小地形は風速の増速効果、風速の鉛直プロファイルの変化、乱流強度の変化などをもたらす可能性がある。

本ガイドラインは、地形の複雑度の大きさに対応した風車の選定パラメータを設定する方法を示すものであるため、上記 IEC 規格の方法では複雑度の大小を評価することが難しい。このため、本ガイドラインでは、地形の複雑度の評価方法の判定には上記 (1) ~ (5) の値を用いることとする。ただし、(1) ~ (5) までの指標は、風向別に評価した後、その最大値によって判断すること。風向の分割数は 8 以上とする。

(1) ~ (3) は、IEC 規格に準拠した指標であり、(1) により、小地形による風速への影響の可能性があると判断され、(2) および (3) により、風車近傍での複雑度が判定される。風上側に標高の高い山岳地が広がる場合、ハブ高さにおける風速の増速を考慮する必要性は小さいと考えられるが、風の乱流強度は大きくなる可能性がある。

(4) は、(1) の小地形による増速効果と関連する項目である。増速率の評価については、送電用鉄塔の耐風設計技術における小地形による風速の割り増し係数についての記述を参照のこと。(1) では増速の可能性が示されるが、通常、増速率は地表のごく近くで大きく、離れると小さくなる。したがって、大型風車に対しては、ハブ高さにおける風速を増速率によって補正すれば、風車上部の風速分布を平坦地のものと仮定しても風車の強度等の評価に与える影響は小さいと考えられる。

(5) に係わる指標として代表的なものは、Risoe 研究所の開発した風況シミュレーションソフト WAsP で用いられている RIX である。RIX は、WAsP の適用範囲を判定するための基準であり、流れのはく離が発生すると言われている勾配以上の地形が占める割合を方位別に示したものである (Mortensen 他、2006)。通常、RIX の算定に用いるのはく離発生判定のための斜面勾配の閾値は、0.3 (傾斜度で約 17 度、勾配で 30%) に設定される。

RIX の一般的な算出方法は、目的地点からの半径 3.5km 内をその周方向に 72 分割(5 度毎)し、各分割された方位の直線と等高線との交わる点における勾配を求め、勾配は隣り合う等高線の間隔とその間の高低差を用いて計算し、設定された勾配の閾値以上(デフォルトでは 30%勾配)の値の割合を求めてその方位の RIX の値とする。RIX の目安として以下の値が与えられている。

- ・平坦および丘陵：0%
- ・丘陵よりは複雑：10%
- ・山岳部：10～50%以上

RIX は、WAsP における複雑度を表す指標ではあるが、最終的な判断は WAsP の利用者の判断に任されており、目安である。本ガイドラインでは、上記の RIX の目安から、30%の値を選択している。

Risoe 研究所では、WAsP の推定精度について RIX を用いて評価を行っており、複雑度について式(6.2.1)で表される RIX を導入して評価を行っている(Mortensen 他、2006)。

$$\Delta RIX = RIX_{WTG} - RIX_{MET} \quad (6.2.1)$$

ここで、添え字の WTG および MET はそれぞれ、予測地点および参照点(風況観測点)を表している。予測地点および参照点における複雑度が同じであれば、 $RIX=0$  であり、参照点が予測地点よりも複雑であれば、 $RIX < 0$  となる。逆に、参照点が平坦かあるいはそれに近い場合は  $RIX > 0$  となる。WAsP に用いられている線形理論は、周辺地形において流れのはく離が殆どない、すなわち  $RIX = 0$  を前提条件としており、RIX の値が大きくなれば、この条件からのずれが大きくなり推定精度は悪くなることが考えられる。しかし、RIX の値が大きき値を取る複雑地形であっても、RIX の絶対値が十分小さければ満足できる推定精度が得られ、RIX の絶対値と推定精度には正の相関がある、との報告(Mortensen 他、2006)がされていることに留意すべきである。

以上で示したように、この判定基準は地形の複雑度の目安であり、複雑度が小または中と判定された場合でも、地形によっては(例えば、谷風)乱流強度や極値風速が大きき値を取る可能性もあるため、注意を要する。

ただし、現地観測結果の風速データが標準風条件およびこれに小地形の影響補正を加えた結果から大きくずれている場合には、上記地形影響評価の結果に関わらず、風特性の把握を行い、周辺への展開に際しても数値シミュレーションの適用などを考慮すること。また、得られた風特性を整理し、風車構造や運用上の問題の有無を評価することが必要となった場合に参照できるように保存すること。なお、地形の判定を行うためのツールとして、電力中央研究所の開発したプログラムや WAsP があり、一般に入手可能である。

### 6.3 極値風速マップ及び極値風速データベース

風車の選定条件としての極値風速は、風車設置場所における最低1年間以上の期間を有する観測データと気象官署の風観測データとの相関係数、もしくは極値風速マップ/極値風速データベースを用いて決定すること。ただし、数値シミュレーションを行う場合には、極値風速データベースに代わり気象官署における50年再現期待値を用いることを妨げない。

具体的な地形の複雑度の判定は、6.2節に記載される定義によって行うこと。

#### (1) 気象官署等における風観測データを用いる場合

風車設置場所近傍に長期の気象データを有する気象官署等が存在し、風車設置場所で観測されたデータと高い相関を有する場合は、統計解析に基づく評価によることができる(6.3.1項参照)。

#### (2) 風車設置場所での十分な期間の観測データがない場合、もしくは近傍気象官署データとの相関が高くない場合

##### 平坦地形と判断される場合

本ガイドラインの「極値風速マップ」(6.3.2項参照)の値を利用することができる。「極値風速マップ」の仕様は以下のとおりである。

- ・10分間平均風速の50年再現期待値
- ・1kmメッシュマップ
- ・地上高30、50、70mの3高度の風速
- ・国土数値情報の土地利用区分に基づく地表面粗度の影響を考慮

##### 平坦地形ではないと判断される場合

「極値風速データベース」(6.3.3項参照)をもとに、地形の複雑度に応じて単純地形モデル(建築物荷重指針・同解説(2004)の「小地形による乱れの強さの補正係数」の項で定義される方法)あるいは適切な数値シミュレーションや風洞実験を実施して求める(6.3.4項参照)。「極値風速データベース」の仕様は、以下のとおりである。

- ・風向別の10分間平均風速の50年再現期待値
- ・1kmメッシュマップ
- ・上空250mにおける8風向の風速
- ・小地形影響評価のためのデータベース

なお、の平坦地形の場合でも、の方法により極値風速を求めることを妨げるものではない。

本ガイドラインでは、風車設置場所の極値風速( $V_{ref}^*$ )は、以下の手法で評価する。



熱帯性低気圧（台風）が頻繁に襲来する気象条件にある日本においては、風車設置場所の極値風速は、稀に通過する台風によって決定される地域が多いため、短期の風況観測から再現期間 50 年の極値風速を直接求めることは誤差が非常に大きいため適切ではない。しかし、風車設置場所近傍に長期の気象観測データを有する気象官署等が存在し、風車設置場所で観測された風速データと高い相関を有し、風況の経年変化が少ないという条件が満たされていれば、統計解析によって極値風速を推定することができる。

風車設置場所での十分な期間の観測データがない場合、もしくは近傍気象官署データとの相関が低い場合、短期間の風況観測のみから再現期間 50 年という長期間の極値を統計的に推定すると誤差が大きくなってしまう場合がある。それを補完するため、本ガイドラインでは、建築学会「建築物荷重指針・同解説」（2004）におけるデータをもとに、数 km 以上のスケールでの大規模地形の影響を考慮して「極値風速マップ」および「極値風速データベース」を作成・提供する。すなわち、風車設置予定地点における極値風速を簡易に評価するための支援資料として、

極値風速分布の概略が把握できる「極値風速マップ」

小地形の影響などさらに詳細な検討を加える利用者向けの「極値風速データベース」

の 2 種類の資料を提供する。

上記のデータは、いずれも全国を平面的に 1km メッシュで網羅したものであり、平均標高データ（1m 単位）で表現されるような数 km 以上のスケールにおける大規模地形の影響を考慮したものである。さらに、小スケールの地形の影響については、必要に応じて利用者が「極値風速データベース」の値をもとに個別に検討する必要がある。

提供する極値風速マップ/極値風速データベースは、以下のような条件を備えたものである。

気象官署があるメッシュの値（以下、気象官署メッシュ値と称する）は、観測値および台風シミュレーション結果を統計処理して求められた建築物荷重指針・同解説（2004）の 50 年再現期待値を用いて求め、それ以外のメッシュの値は、気象官署メッシュ値と気流解析結果をもとに内挿により求めたものである。

気象官署メッシュ値は、建築物荷重指針・同解説（2004）に基づく 50 年再現期待値を、風向別に気流解析結果の風速鉛直分布から求めたべき指数・粗度区分を用いて上空（地上高 250m）の風速に換算し、極値風速マップ/極値風速データベースの作成に用いている。

気象官署間の任意地点においては、風上側の数 km スケール以上の大きな地形による増速・減速等の効果が反映されている。

「極値風速マップ」は、全風向の中で最大の極値風速をプロットしたものである。また、「極値風速データベース」は、8 風向別に極値風速のデータが用意されている。

「極値風速データベース」は、上空（地上高 250m）の風速として与えている。

### 6.3.1 気象官署等における風観測データによる極値風速算出

気象官署等における風観測データを用いて極値統計解析を行う場合には、極値型分布（Gumbel 分布）、極値型分布（Fréchet 分布）、極値型分布等、適切な分布関数を用いて行うこと。

風車設置場所で観測された風速データと近傍の気象官署等での同期間の風速データとの相関解析を行い、相関係数 0.8 以上が得られる場合に、気象官署等のデータから得た再現期待値に回帰係数を乗じることで、風車設置場所での極値風速を求めることができる。

日本国内における風車設置場所の極値風速は、稀に通過する台風によって決定される地域が多いため、一般的に、一年間程度の短期間の風観測により再現期間 50 年の極値風速を推定することは困難であるが、以下の条件を満足して信頼性が確保された場合にはその限りではない。

風向及び風速に関して、相関係数 0.8 以上が得られる場合。

風況の経年変化が少ない場合（規定する高い相関が毎年保たれると期待できる場合）。

なお、気象官署等における長期間の風観測データを用いて、相関解析により風車設置場所での極値風速を求める際には以下の点に留意する必要がある。

#### （1）気象官署等における観測資料の均質性の確認

##### ・観測場所、観測高度

観測途中において観測場所、観測高度が変更となっている場合があるので確認する必要がある。

##### ・使用測器

4 杯型風程式風速計、3 杯風速計、風車型風向風速計等、使用測器を確認する必要がある。

##### ・観測法

日当たりの観測回数や平均風速の評価時間などを確認する必要がある。

##### ・統計法

気象官署等における年最大値の算出に際して、欠測データの取扱いなど統計処理方法について確認する必要がある。

#### （2）使用測器の違いによる補正

使用されている測器の特徴を確認するとともに、使用測器の交換時期、ならびに測器間における観測データの補正が行われているか確認する必要がある。

### 6.3.2 極値風速マップ

風車設置場所が平坦地形と判断される場合は、「極値風速マップ」から求められる値をその場所における極値風速として使用することができる。

「極値風速マップ」は、**図6.2**～**図6.16**に示したとおり全国を1kmメッシュで網羅した極値風速であり、これにより風車設置場所周辺の極値風速分布の概要を把握できる。

「極値風速マップ」の特徴は、以下のとおりである。

- ・地上高30m、50m、70mの3高度における風速であること
- ・国土数値情報の土地利用区分に基づく地表面粗度の影響を考慮したこと
- ・極値風速分布を把握できるように分布図の形で提示したこと

「極値風速マップ」は、1kmメッシュの平均標高データおよび地表面粗度分布による風況への影響が考慮されて作成されている。そのため、そのようなメッシュで表現されるような数km以上のスケールにおける大規模地形の影響は考慮されているが、それより小スケールの地形起伏が顕著である地域では、その影響について必要に応じて利用者が**6.3.3**項に示す「極値風速データベース」をもとに個別に検討する必要がある。

また、「極値風速マップ」は、地上高30～70m程度のハブ高さを持つ風車を主な対象としている。対象とする風車のハブ高さにおける極値風速を「極値風速マップ」から求める際には、各高度の「極値風速マップ」の値をもとに高度方向の線形補間で求める。べき法則を利用して2高度の極値風速から補間することも可能であるが、地上高30～70m前後では極値風速マップとの高度差が小さいので線形補間した結果と実用上ほとんど差がない。

なお、極値風速マップを地上高30m、50m、70mの3高度、地表面粗度の影響を考慮したマップとした理由は、以下のとおりである。

- ・「極値風速マップ」が極値風速分布の概略を把握するためのものと位置づけ、利便性やわかりやすさという観点から、高度・地表面粗度の補正ができるだけ必要ないようなマップとした。
- ・日本における風車は、山間部のような比較的複雑な地形上に立地される場合が多く、風速の鉛直分布が必ずしもべき法則に従うとは限らないため、簡易式による高度補正でハブ高さでの風速を求める方法ではなく、ハブ高さ付近の風速を直接示すものとした。
- ・地表面粗度影響の考慮には、数値シミュレーションによる気流解析を利用している。このような気流解析は、風況調査では一般的に用いられる手法であり、風上側の粗度分布の影響を客観的に取り入れることができる。

次ページ以降に、地上高30m、50m、70mの3高度の極値風速マップを示す。

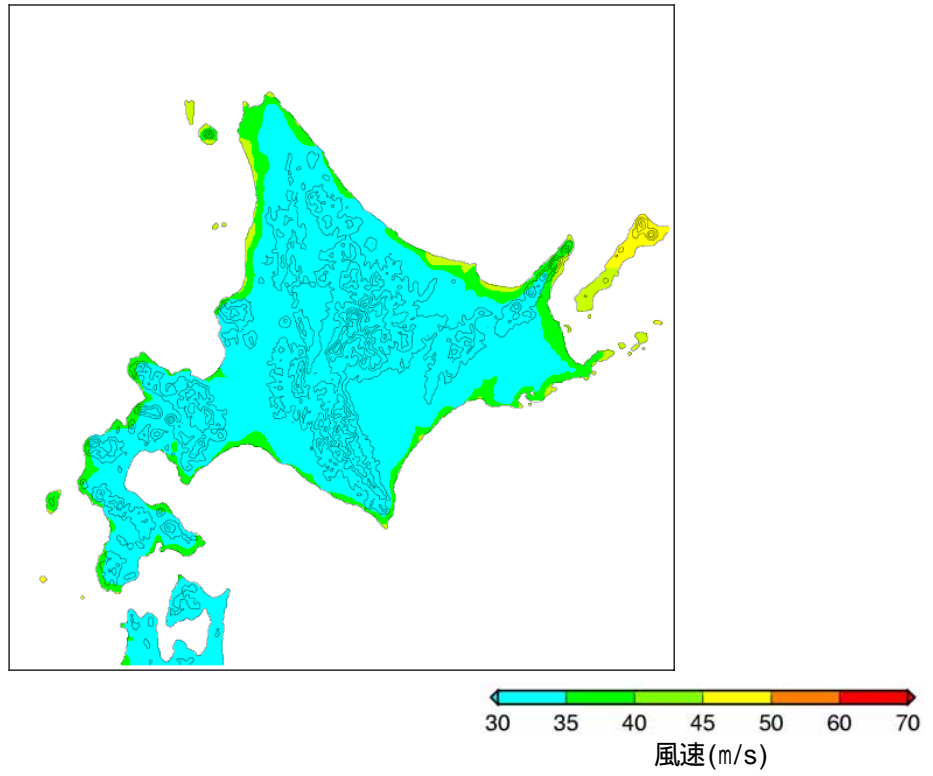


図6.2 極値風速マップ：北海道エリア（地上高30m）

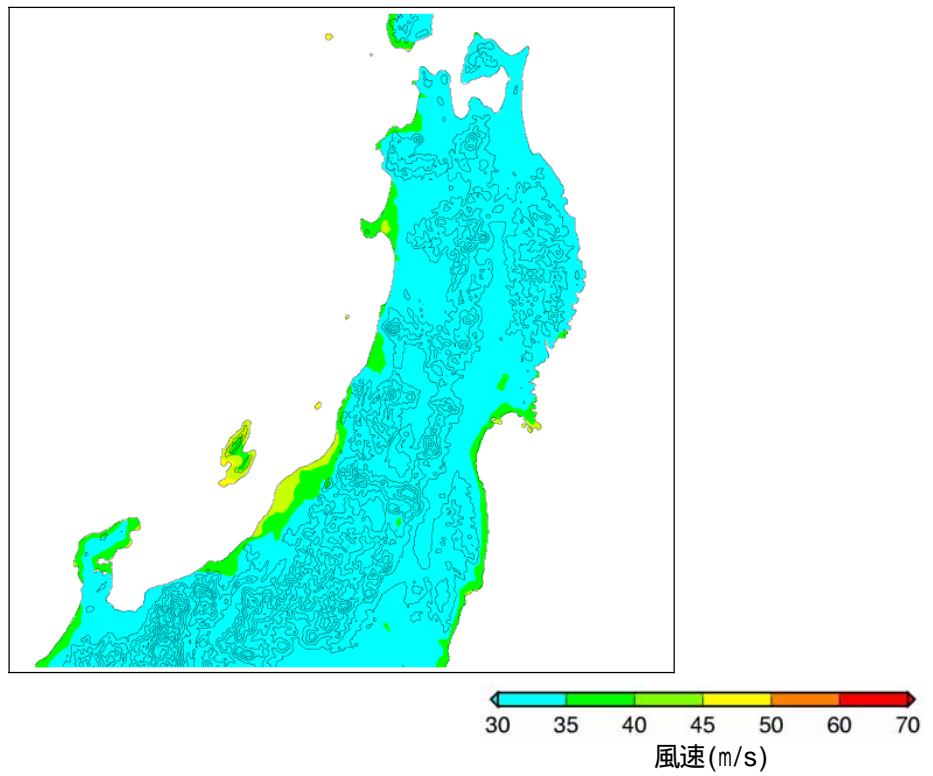


図6.3 極値風速マップ：東北エリア（地上高30m）

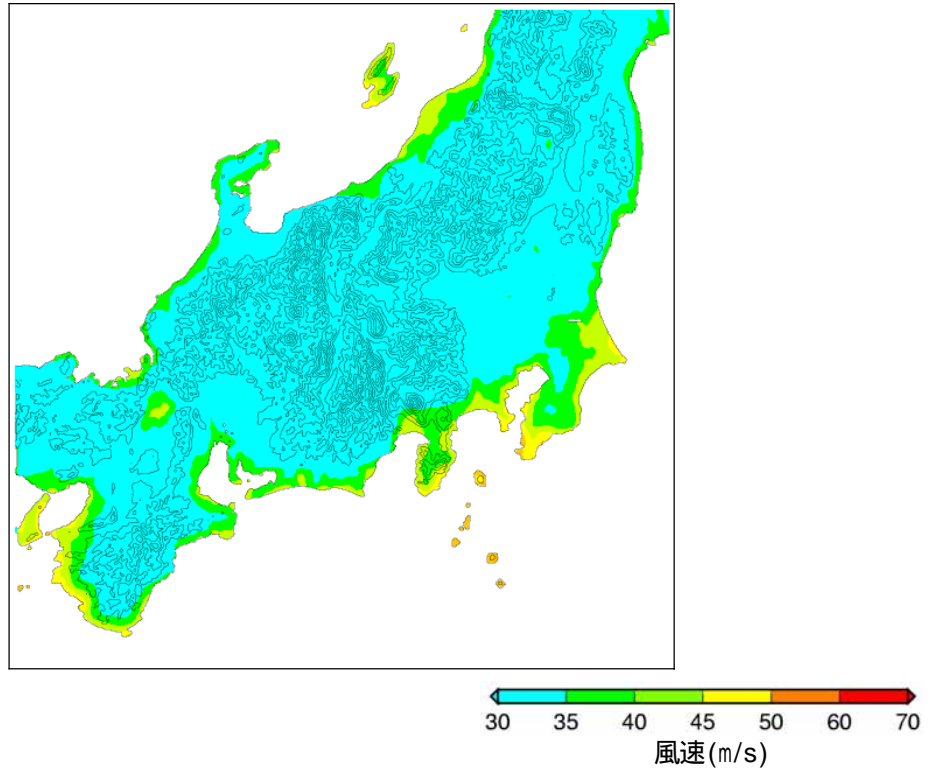


図6.4 極値風速マップ：関東・中部・近畿エリア（地上高30m）

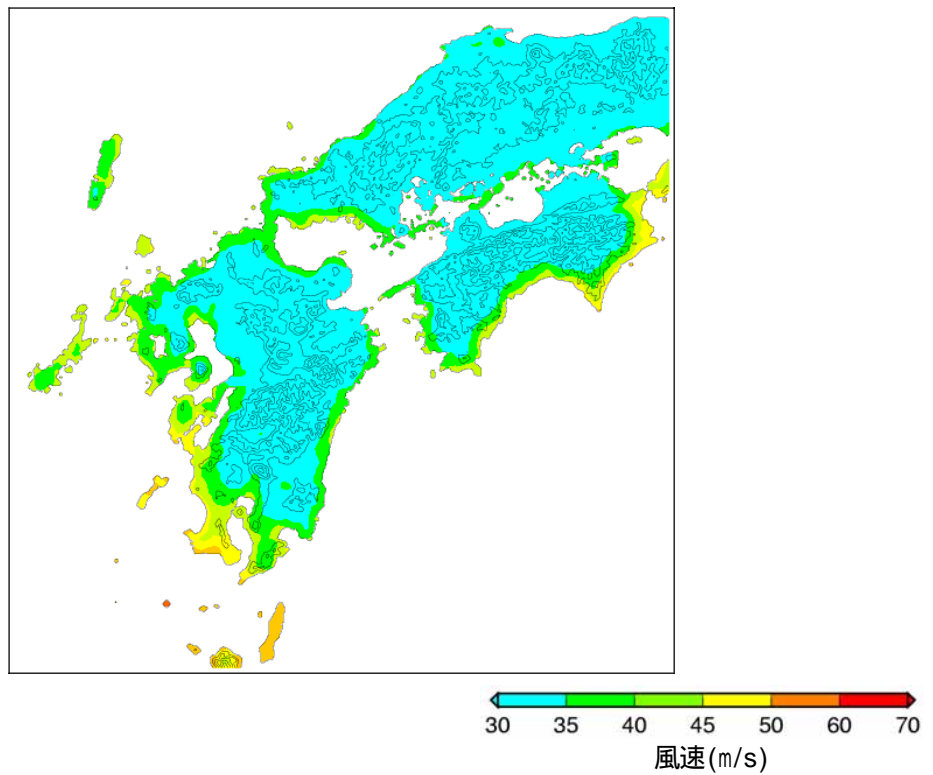


図6.5 極値風速マップ：中国・四国・九州エリア（地上高30m）

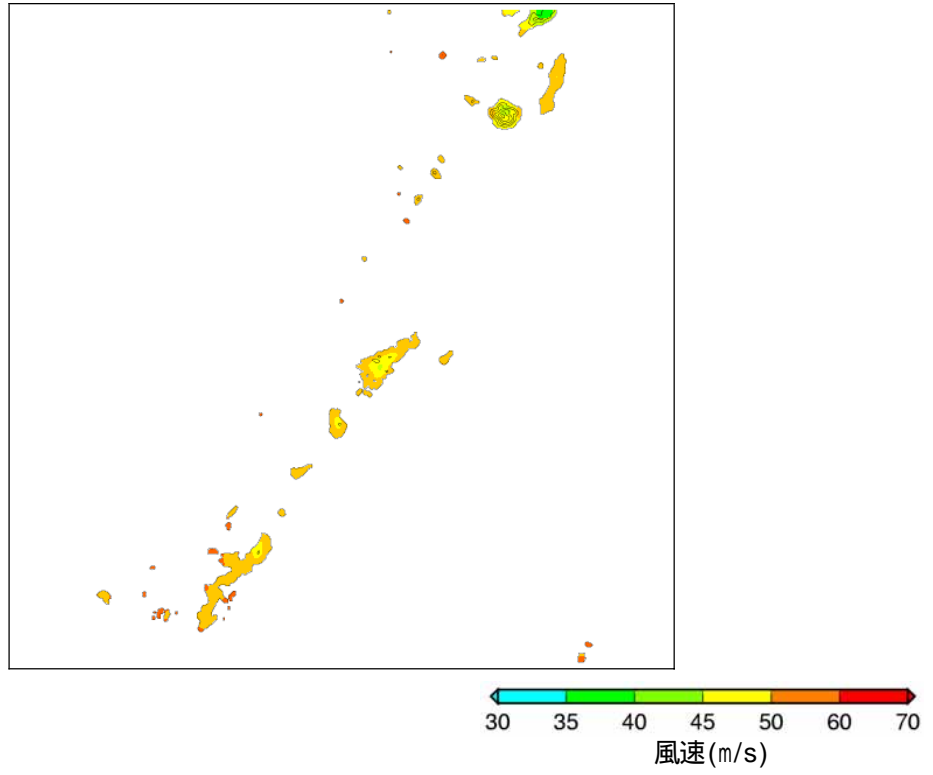


図6.6 極値風速マップ：沖縄エリア（地上高30m）

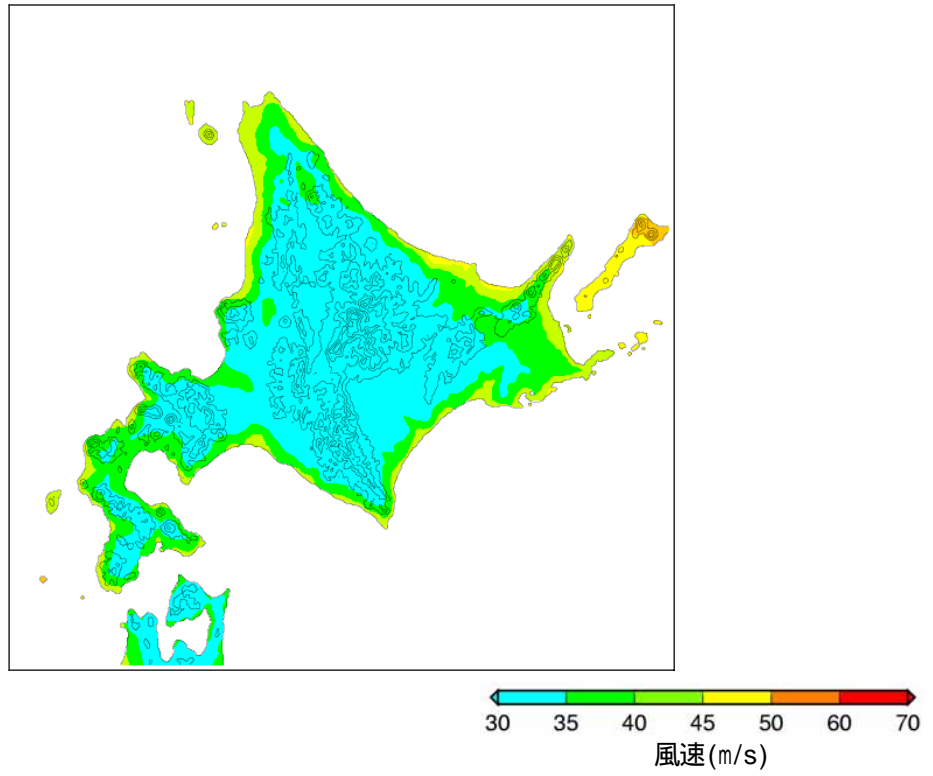


図6.7 極値風速マップ：北海道エリア（地上高50m）

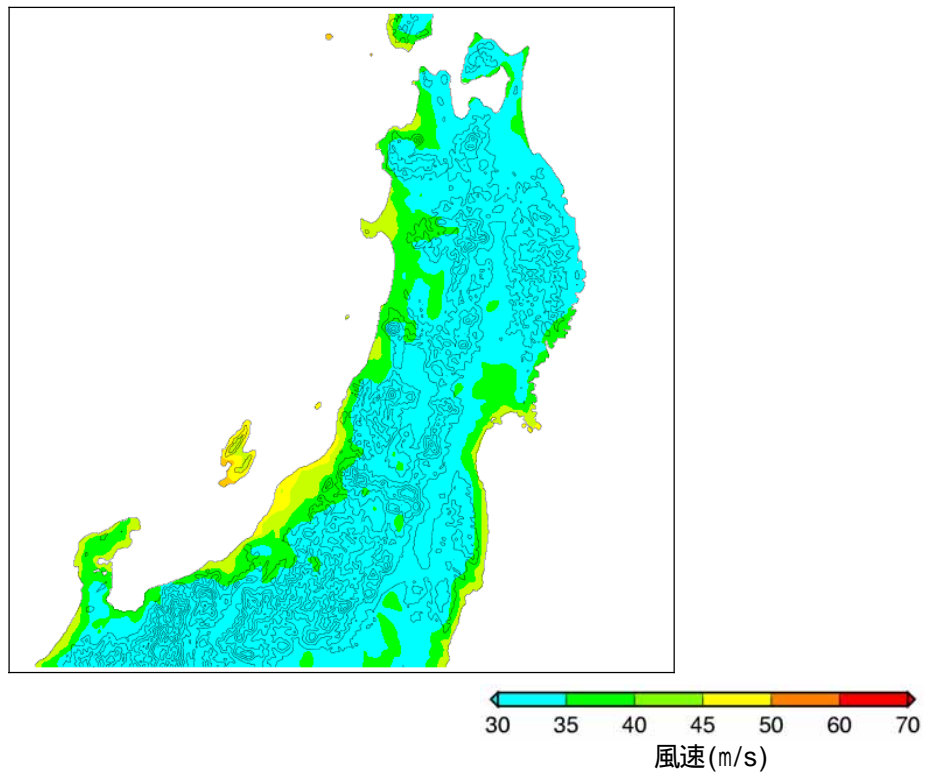


図6.8 極値風速マップ：東北エリア（地上高50m）

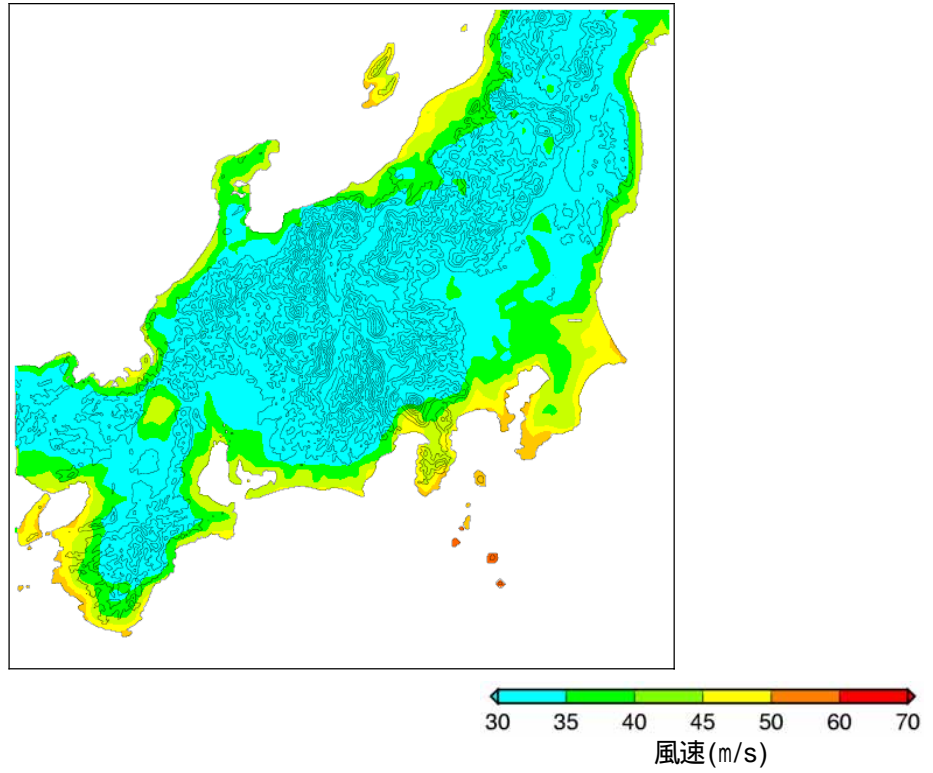


図6.9 極値風速マップ：関東・中部・近畿エリア（地上高50m）

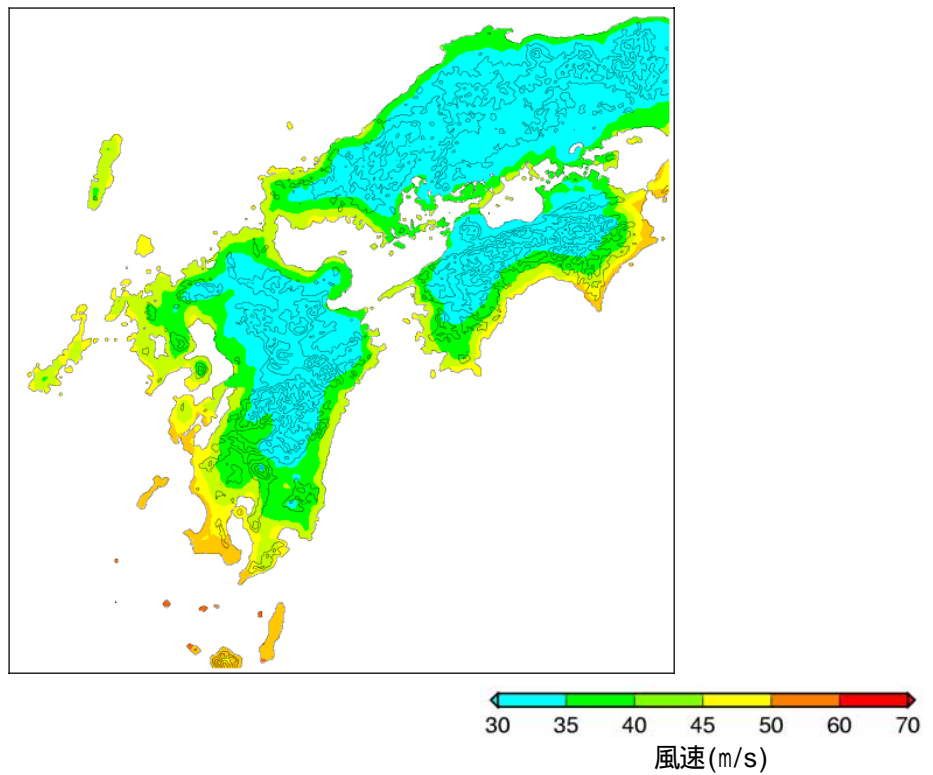


図6.10 極値風速マップ：中国・四国・九州エリア（地上高50m）



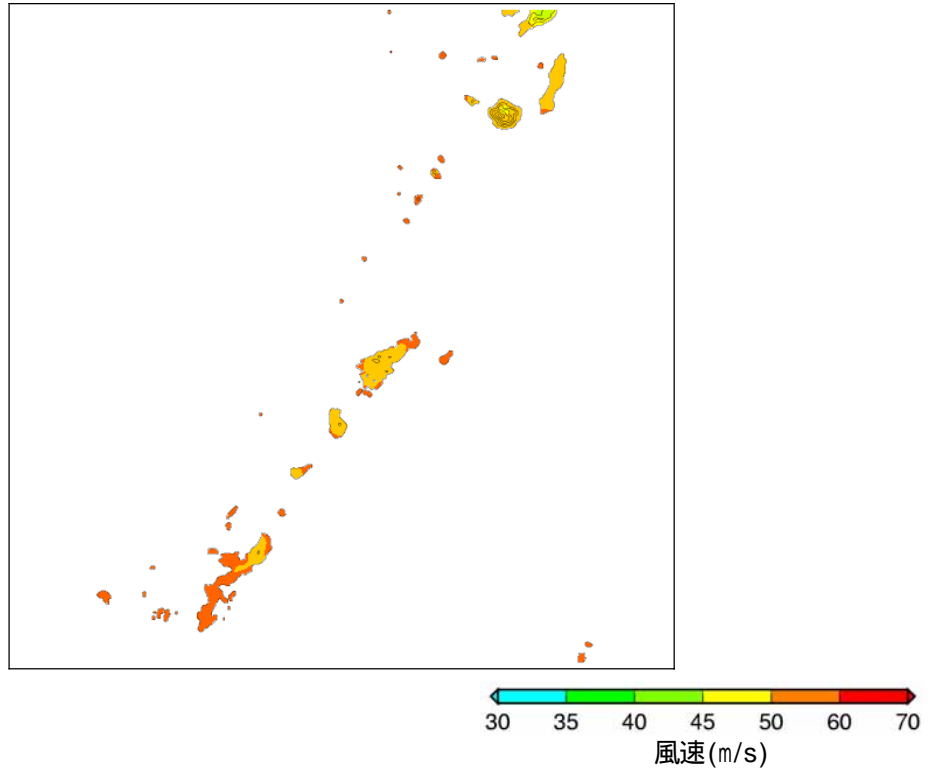


図6.11 極値風速マップ：沖縄エリア（地上高50m）

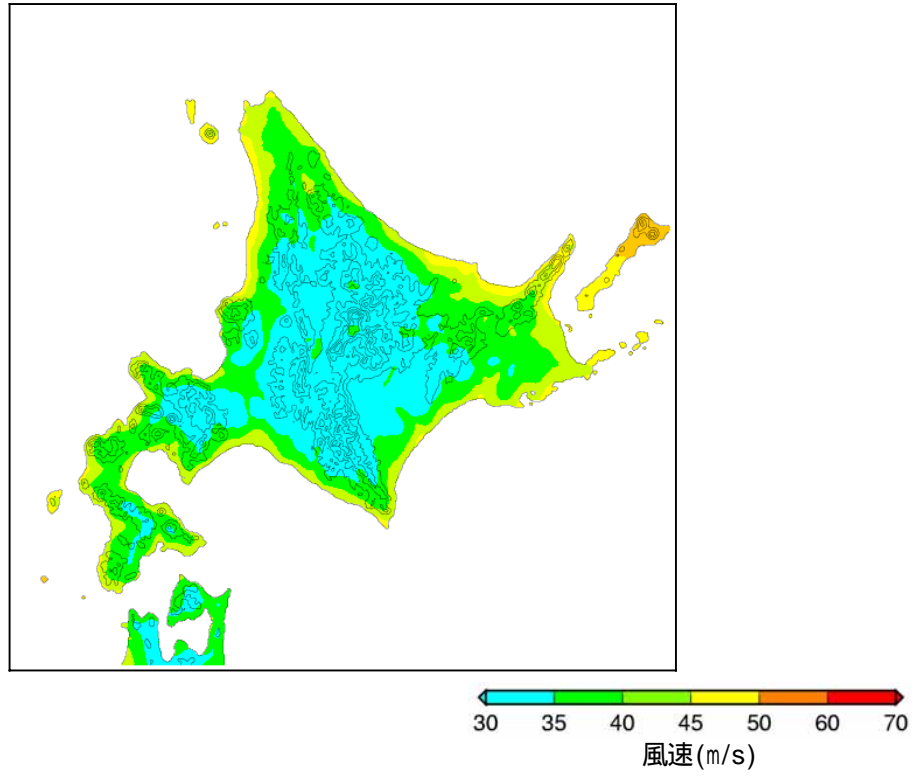


図6.12 極値風速マップ：北海道エリア（地上高70m）

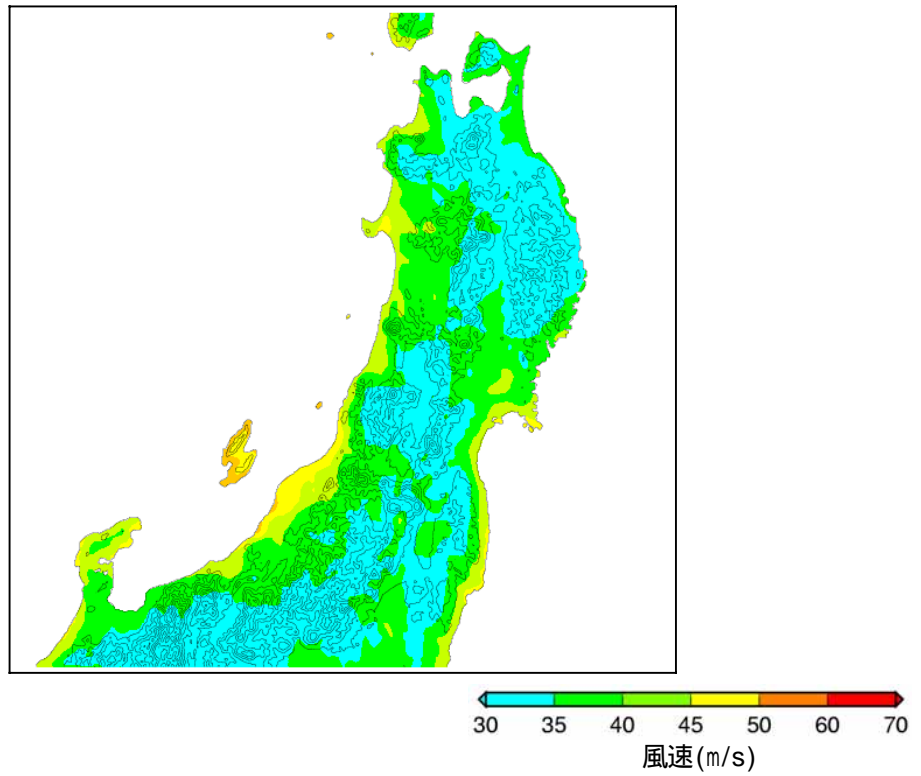


図6.13 極値風速マップ：東北エリア（地上高70m）

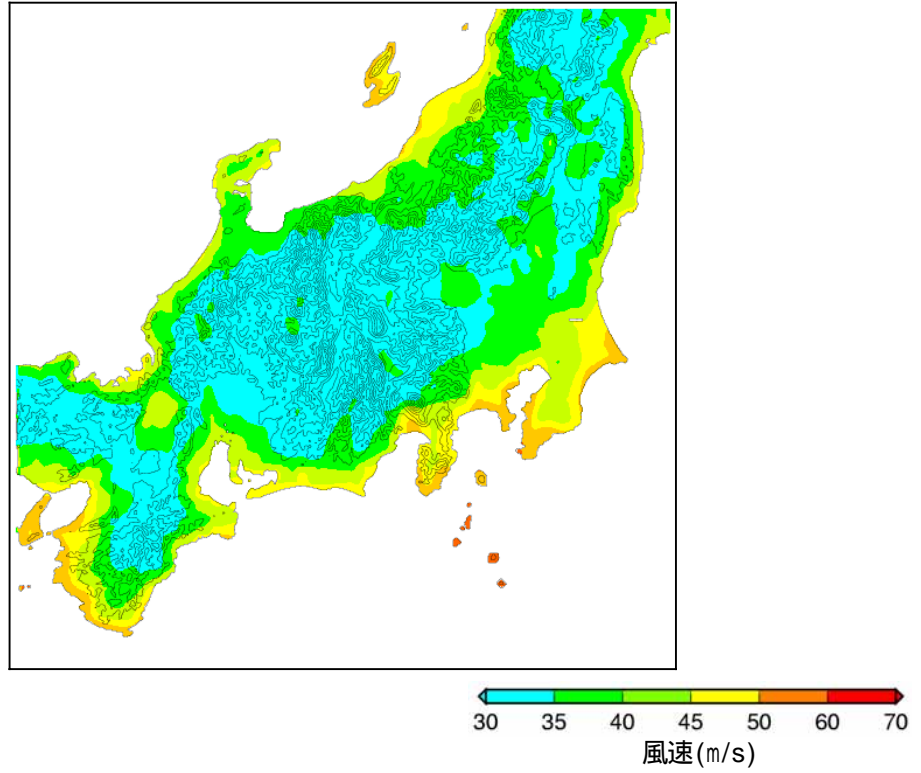


図6.14 極値風速マップ：関東・中部・近畿エリア（地上高70m）

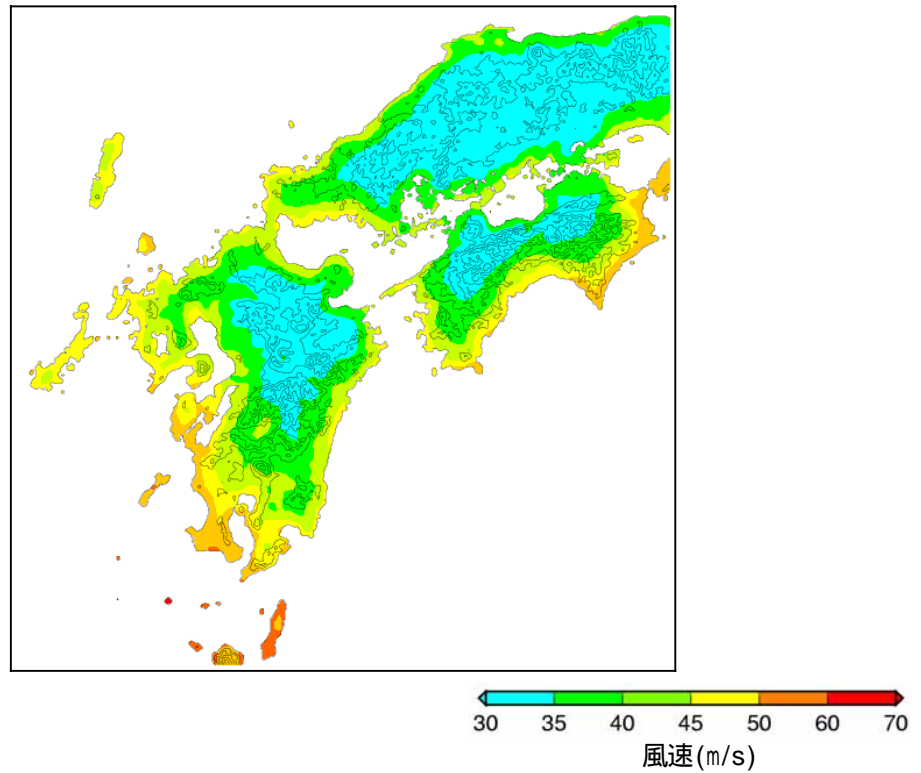


図6.15 極値風速マップ：中国・四国・九州エリア（地上高70m）

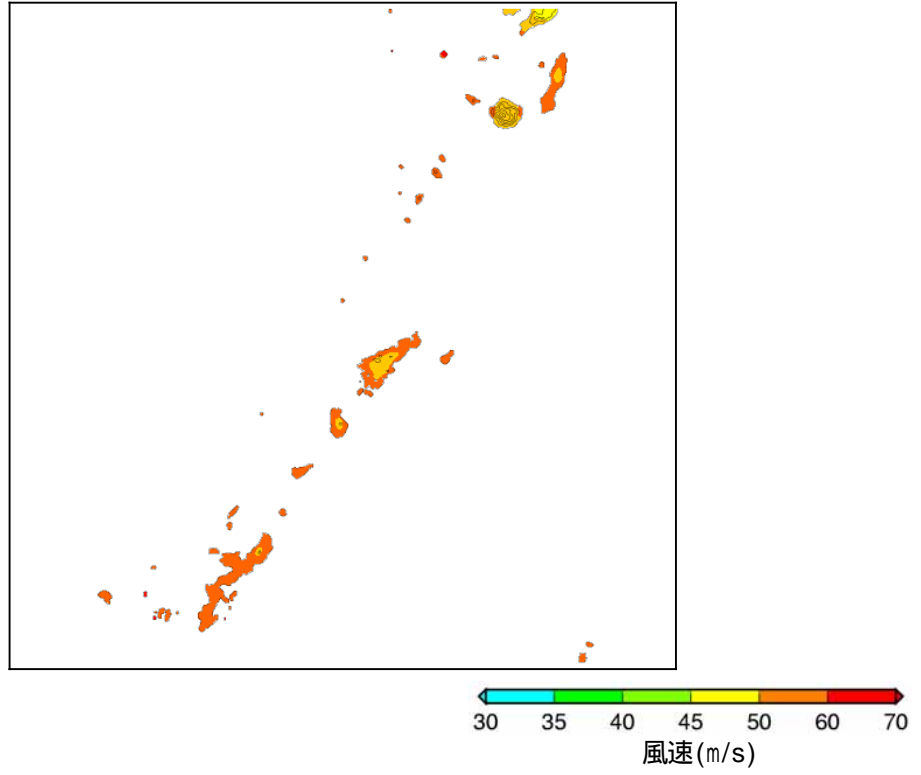


図6.16 極値風速マップ：沖縄エリア（地上高70m）

ここで、気象官署位置のメッシュ上で、建築物荷重指針・同解説(2004)に基づく50年再現期待値を疑似突風率から算出されたべき指数・粗度区分を用いて地上高70mの風速に換算した値と極値風速マップの値とを比較すると、-10~+10m/s程度の差が生じている(図6.17および図6.18)。この差は、極値風速マップ/データベース作成時において、高度補正係数 $E_{pv}(P)$ を気流解析結果の風速鉛直分布から算出していることによる手法の差の結果であって、直接に誤差を示す数値ではないが、マップ値が過大もしくは過小の双方に評価されている可能性を示すものと考えられる。

従って、その利用には以下の留意が必要である。

図6.18に示す風速差の絶対値が、3.0m/s以内の気象官署が周辺にある場所以外では、極値風速の推定は他の方法を優先すべきであり、マップ値の使用は大きな誤差が生ずる恐れがある。

風速差が3.0m/s~7.0m/sの気象官署に囲まれた地域において、他の手法の選択と共にマップ値を使用することが避けられない場合においては、実際に観測したデータを用いて、マップ値や複数の気象官署値との相関を取るなど、自ら検証を行うことが必要である。

極値風速データベースの値を非線形モデルに入力する場合は、周辺気象官署値を用いるなど他の手法と、その結果を比較して評価することが望ましい。

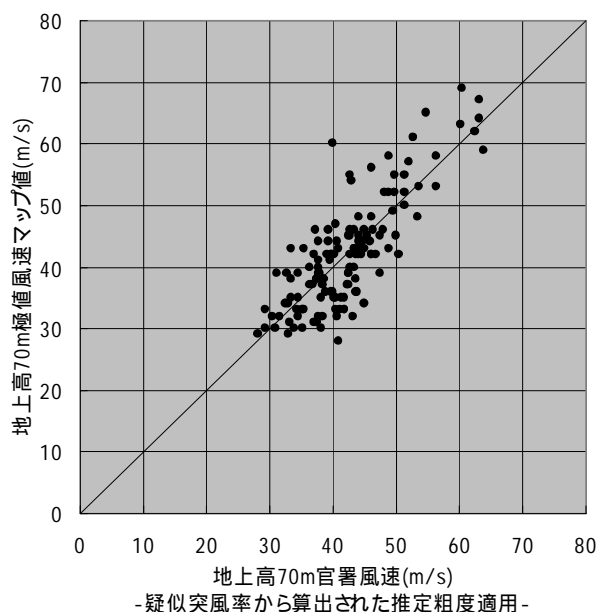


図6.17 気象官署位置における極値風速の比較(地上高70m)

地上高70mにおける気象官署における極値風速マップ値と気象官署極値風速算定値との差異を図6.18に示す。

(図6.17の横軸・縦軸の風速差  $V$  の絶対値をプロットしたものが図6.18である)

- ・極値風速マップは地上高70mの極値風速を示す。
- ・気象官署極値風速算定値は建築物荷重指針・同解説(2004)による再現期間50年換算値と気象官署位置における2000年推定粗度を使用して地上高70mの値を計算したものである。
- ・気象官署の位置は気象庁HPの位置図から概定。

風速差  $V$  の絶対値  
|  $V$  |  $\leq$  3.0m/s : ●  
3.0m/s < |  $V$  |  $\leq$  7.0m/s : ●  
7.0m/s < |  $V$  | : ●

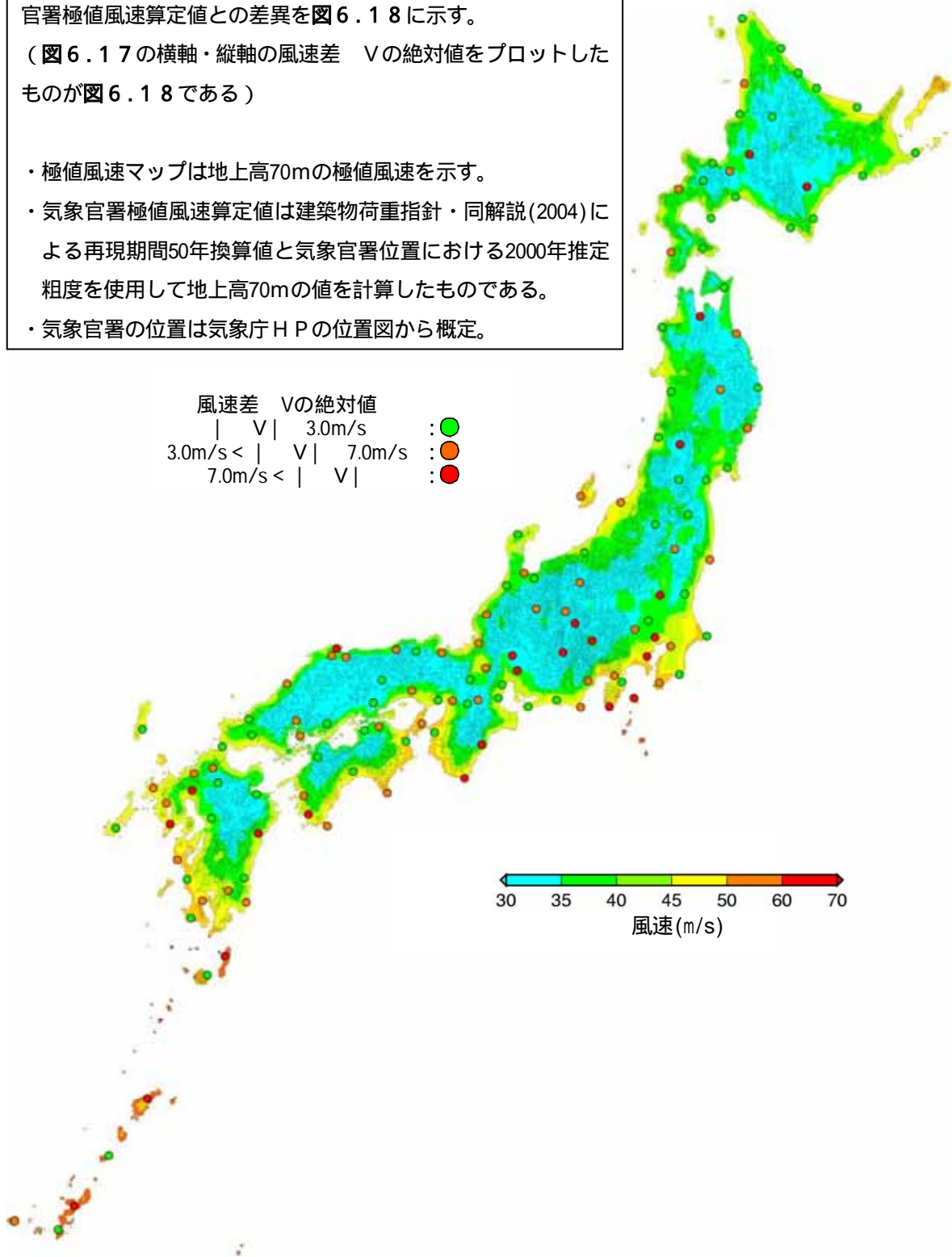


図6.18 気象官署位置における極値風速マップ値と気流解析による算定値の比較(地上高70m)

また、風車設置場所での極値風速を数値シミュレーション（あるいは非線形モデル）によって求める場合においては、その入力値として気象官署位置での 50 年再現期待値を用いることを妨げるものではない。

### 6.3.3 極値風速データベース

風車設置場所が平坦地形でないと判定される場合には、「極値風速データベース」を用いて極値風速を評価すること。その際には、小地形の影響は6.3.4項に記載する方法により評価すること。数値シミュレーションを行う場合には、極値風速データベースに代わり気象官署における50年再現期待値を用いることを妨げない。

6.2節で複雑地形と判定された場合は、地形による増速効果を評価する式、数値シミュレーション、風洞実験などにより小地形の影響を評価し、極値風速を算定する必要がある。地形による影響は、風上側の地形に起因し、風向によってその影響の度合いが異なることから、風向別の極値風速である「極値風速データベース」をもとに検討する必要がある。

なお、「極値風速データベース」は、「極値風速マップ」と同様に1kmメッシュの極値風速であるが、以下の点で「極値風速マップ」と異なる。

- ・風向別（8風向）の極値風速であること。
- ・上空（地上高250m）の風速であること。
- ・小地形影響評価のためのデータベースとして数値情報の形で提供していること。

「極値風速データベース」を風向別および高度250mの風速の形で提供する理由は、以下のとおりである。

- ・ある地点における小地形影響は、風上側の地形や粗度分布に大きく左右される。よって、その評価には、風向毎の検討が必要となるため、風向別の極値風速を提供する。
- ・数値シミュレーション等で、現地の粗度分布を考慮した詳細な解析を実施する場合を想定して、上空（地上高250m）の極値風速を提供する。なお、この高度は、データベースのもととなった建築物荷重指針・同解説(2004)における極値風速の取り扱い方を考慮して、決定されたものである。
- ・極値風速を上空250mの風速で与えることにより、利用者が250m以下の任意の高さにおける極値風速を設定できる。



### 極値風速データベースの例

極値風速データベースのデータファイルは、以下のような構成となっている。

・1ファイルは、100km×100kmの領域。

・ファイルフォーマットは、テキスト形式とし、1行目がヘッダ、2行目から101行目まで(南から北へ)が極値風速であり、1行100メッシュ分で100列(西から東へ)となっている。なお、ヘッダの内容は、領域番号、領域西端経度、領域東端経度、領域南端緯度、領域北端緯度、Xメッシュ数、Yメッシュ数、X格子間隔(km)、Y格子間隔(km)の順となっている。図6.19に極値風速データベース概念図を示す。

ヘッダ	1行目	0436	133.85983	134.94090	33.00419	33.90566	100	100	1.0	1.0											
極値風速	2行目	70	70	71	71	71	72	72	72	72	72	71	71	71	71	71					
		70	70	71	71	72	72	72	72	72	72	72	71	71	71	71					
		70	70	70	70	71	72	71	71	71	71	71	72	71	71	71	71				
		70	70	70	71	72	72	72	72	72	71	71	71	71	71	71	71				
		70	70	70	71	71	71	71	72	72	72	71	71	71	71	71	71				
		70	70	70	71	71	71	71	71	72	72	72	71	71	71	71	71				
		70	70	71	71	71	71	71	71	71	72	72	72	71	71	71	71				
		70	70	71	71	71	71	71	71	71	72	72	72	71	71	71	71				
		70	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	72	72	71	71	71				
		70	70	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	72	71	71	71				
		70	70	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71				
		70	70	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71				
	101行目	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.					

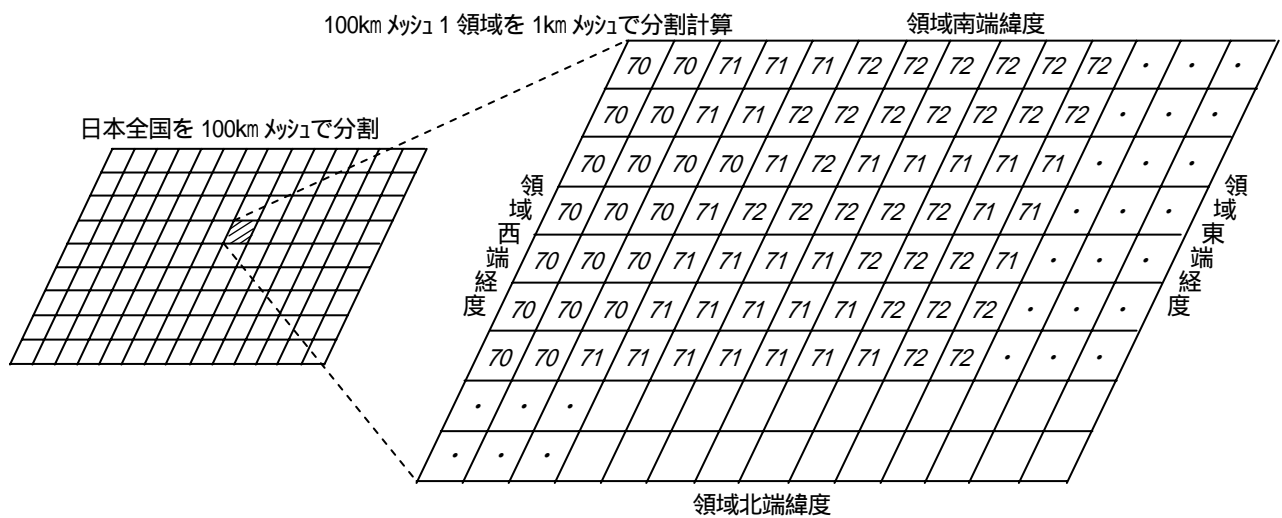


図 6.19 極値風速データベース概念図

#### 6.3.4 数値シミュレーションまたは風洞実験による小地形影響評価

数値シミュレーションまたは風洞実験により小地形の影響を評価する場合、必要な境界条件（流入風条件）を適切に設定すること。

線形モデルの代表である WAsP では、計算領域における標高と粗度長マップおよび風況観測点における観測データを入力値として、任意の地点における風速を求めることができる。WAsP の計算結果は、粗度長マップおよび計算領域の影響を受けるため、十分注意する必要がある。

非線形モデルを用いて小地形影響を正しく評価するためには、境界条件（流入風条件）を適切に設定する必要がある。境界条件の設定方法としては、ネスティング手法、理想化された上流風を設定する手法等がある。

一般的に、ネスティング手法は、低解像度の広領域の計算結果を境界条件として、高解像度の小さな領域をネスティングさせることにより、小地形の影響を受けた風速を求める。

一方、理想化された上流風を設定する手法の代表例として、標準実風況変換と呼ばれる手法がある。標準実風況変換は、低解像度の計算結果により予測された風と高解像度の計算結果により予測された風速との差を補正することにより、小地形の影響を受けた風速を求める(図 6.20)。この手法では、まず仮想領域での標準風況を求め、次に対象地点の実風況に変換する。

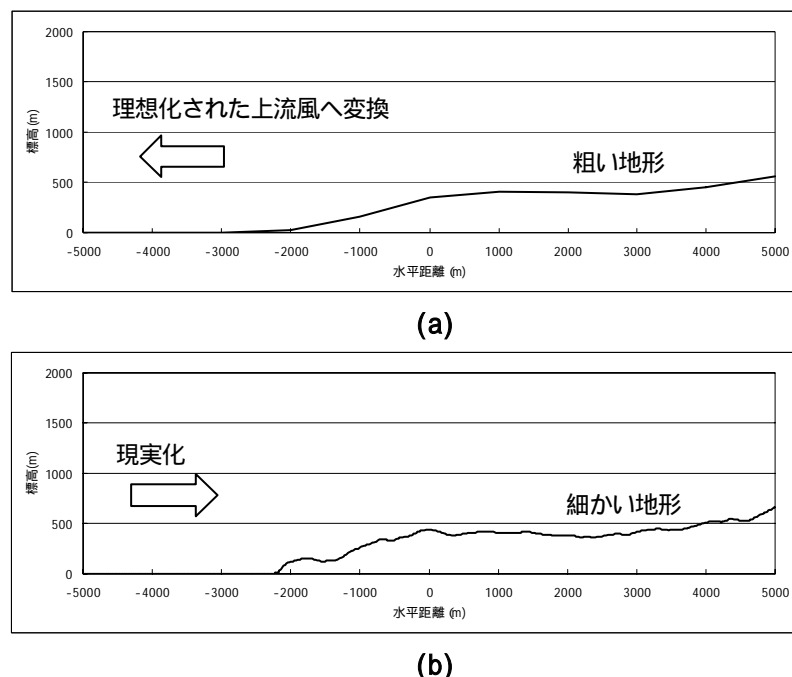


図 6.20 標準実風況変換概念図

具体的には、1km 程度の解像度を持つ粗い地形と地表面粗度を用い、数値シミュレーションを行い、地域風況から仮想領域の風況への変換を行う(図 6.20 (a))。次に、10~50m 程度の解像度を持つ細かい地形と地表面粗度を用いた数値シミュレーションを行い、仮想領域の風況から

対象地点での実風況へと変換する（図6.20(b)）。

風洞実験は、十分な実績を有する機関および設計者が信頼性を確認した設備において実施しなければならない。実験条件や測定方法を適切に設定して、風向別（8 風向）に実施することを推奨する。

#### 6.4 風観測データの統計解析および推定式による乱流強度の設定方法

乱流強度は、現地観測結果により 10 分間平均風速に対する非超過確率 90%に相当する乱流強度、および風速 15m/s における期待値  $I_{ref}^*$ により評価すること。

任意の地点における  $I_{ref}^*$ は、複雑度に応じて推定すること。

- (1) 複雑度が小の場合は、IEC 規格の方法を用いる。
- (2) 複雑度が中の場合は、単純地形モデルおよび線形モデルによる方法を用いる。
- (3) 複雑度が大きい場合は、非線形モデルまたは風洞実験による方法を用いる。

ただし、風況観測点における  $I_{ref}^*$ は、観測値を用いて導出すること。

IEC 61400-1 Ed. 3 (2005) では、正常風条件として、10 分間平均風速に対する流れ方向の乱流強度分布を表わす式 (NTM 式) を規定しており、15m/s における乱流強度の期待値である  $I_{ref}$ を用いて A、B、C の 3 つのカテゴリーに区分している。また、乱流強度の横および縦方向に対しては、流れ方向との比で表わしている。

風車を選定するに当たり重要なパラメータである乱流強度カテゴリーに関しては、基本的に現地における風況観測の結果をもとに決定すること。観測されたデータは、風向ビン (8 または 16 風向) 毎および風速ビン毎 (通常 2m/s の刻み) に統計処理し、非超過確率 90%に相当する乱流強度を求め、風車規格の乱流強度との大小関係により判定する。

近年、風車が大型化しているため、高高度での風況観測データの取得がより重要となるが、高高度における風況観測にあたってはドップラソダやライダ等を用いた方法もある。ただし、ドップラソダやライダの計測による乱流強度の評価は困難である。また、複雑地形上で乱流強度の評価を行うためには、風速の 3 成分計測や、スペクトル取得のための高速サンプリング計測に効力を発揮する超音波風速計等の計測器の利用も有用である。

また、風車設置範囲が広域にわたり、風況観測点での観測値をもとに設置範囲にわたる補正が必要な場合には、地形の複雑度に応じて、単純地形モデルあるいはシミュレーションもしくは風洞実験など、適切な方法で補正を加える必要がある。

以下では、観測点から離れた場所における乱流強度を推定する方法について記載する。乱流強度の推定は、風況観測地点における平均風速および乱流強度をベースとする。乱流強度の補正に関しては、十分実績を有するか、または設計者が精度を検証したその他の適切な方法により評価すること。

日本における風速に対する乱流強度の平均的な分布は、IEC 61400-1Ed. 3 (2005) の NTM 式の形状とほぼ相似なものと理解されているため (小垣ら、2007) <sup>2)3)</sup>、ここでの乱流強度の補正は、IEC 61400-1 Ed. 3 (2005) の定める NTM 式の  $I_{ref}$ に対して行うものとしている。ただし、複雑度が大きな地形では、乱流強度の分布が NTM 式では近似できない場合もあることに注意しなくてはならない。

#### 6.4.1 観測データからNTM式パラメータの導出

乱流強度は、風車設置予定地近くの風況観測点で観測した風況データを用いて、10 分間平均風速に対する非超過確率 90%に相当する乱流強度、および風速 15m/s における期待値  $I_{ref}$  \*により評価すること。

IEC 61400-1 Ed. 3(2005)において、10 分間平均風速に対する流れ方向の乱流強度分布を表わすNTM 式は式 (6.4.1)、(6.4.2) のように与えられている。

$$\sigma_{90q} = I_{ref}(0.75V + b) \quad (6.4.1)$$

$$I_{90q} = \frac{\sigma_{90q}}{V} = \frac{I_{ref}(0.75V + b)}{V} \quad (6.4.2)$$

ここで、式中の記号はそれぞれ次の通りである。

- $b$  : パラメータ、 $b=5.6$  [m/s]
- $I_{ref}$  :  $V=15$ m/s における乱流強度の期待値
- $I$  : 乱流強度
- $V$  : 10 分間平均風速 [m/s]
- $\sigma$  : 風速の標準偏差 [m/s]
- 添え字 90q : 非超過確率 90%

しかしながら、IEC 61400-1 Ed. 3(2005)中では、風速のデータから乱流強度の非超過確率 90%値や  $I_{ref}$ を算出する方法が明確に記述されていないため、以下にその算出方法を記載する。

$I_{ref}$ は、15m/s における乱流強度の期待値であり、 $I_{90q}$ を求める式 (6.4.2) に  $V=15$ m/s を代入することで得られる次の式 (6.4.3) で算出する。

$$I_{ref} = I_{90q, V=15} / 1.12 \quad (6.4.3)$$

また、風速ビンにおける  $\sigma_{90q}$ は、正規分布、対数正規分布を仮定する方法および直接求める方法の3つの算出法があるが、正規分布による方法≒対数正規分布による方法としてもよいことから、IEC 規格で用いていると考えられる正規分布を仮定して式 (6.4.4) によって求める。

$$\sigma_{90q} = E(\sigma) + 1.28Std(\sigma) \quad (6.4.4)$$

ここで、 $E(X)$ はある確率変数  $X$ の期待値、 $Std(X)$ はある確率変数  $X$ の標準偏差である。

#### 6.4.2 単純地形モデルおよび線形モデルを用いた乱流強度の設定

複雑度が中程度の場合、単純地形モデルおよび線形モデルを用いて乱流強度  $I_{ref}^*$  を推定すること。ただし、推定した  $I_{ref}^*$  を風況観測点における観測値と比較し、推定した  $I_{ref}^*$  が風況観測点における観測値と著しく異なる場合、非線形モデルまたは風洞実験による評価を行うこと。

地形の複雑度が中程度と判定された場合、単純地形モデルを用いる。単純地形モデルによる乱流強度の補正方法には、建築物荷重指針・同解説(2004)の小地形による乱れの強さの補正係数を用いる方法や、WAsP Engineering 2000(Risoe 研究所、2002)等により推定する方法がある。ただし、これらの方法では、NTM 式で表わされる乱流強度の風速変化を考慮していないため、 $I_{ref}$  を推定するための補正が必要である。以下では、建築物荷重指針・同解説(2004)の単純地形モデルによる手法を記載する。

建築物荷重指針・同解説(2004)では、平坦地における乱流強度  $TI_{rz}$  は地表粗度区分に応じて次式(6.4.5)で算出する。この算出方法は、地表粗度区分Ⅱに相当する気流中で行われた滑らかな表面をもつ高さ50m程度の傾斜地や尾根状地形に関する風洞実験結果に基づいている。

$$TI_{rz}(\theta_i) = 0.1(z/z_0)^{-\alpha-0.05} \quad (6.4.5)$$

ここで、 $TI_{rz}$  は、風向別に算出し、風向  $\theta_i$  の関数とする。また、 $z$  は地表面からの高さ (m) であり、 $z_0$  および  $\alpha$  は風速の鉛直分布によるパラメータで、粗度区分に応じて与えられている。

小地形による補正は、傾斜地および尾根状形状に風が直角に当たる場合の補正係数  $E_{gI}$  として次式(6.4.6)で算出する。

$$E_{gI}(\theta_i) = E_I(\theta_i) / E_g(\theta_i) \quad (6.4.6)$$

ここで、 $E_I$  は、変動風速の標準偏差の割り増し係数であり、計算式および斜面の傾斜角の条件による算定式および関連するパラメータの表が与えられている。また、 $E_g$  は、風速の割り増し係数であり、 $E_I$  と同様な算定式および関連するパラメータの表が与えられている。以上のパラメータを用いることで、小地形による乱流強度  $TI_z$  は以下の式(6.4.7)で与えられる。

$$TI_z(\theta_i) = E_{gI}(\theta_i) TI_{rz}(\theta_i) \quad (6.4.7)$$

式(6.4.6)および式(6.4.7)式を用いて算出された乱流強度は、IEC規格の定める風速に依存したNTM式とは異なり、高風速域側における期待値と解釈され、NTM式の  $I_{ref}$  に相当しないことから、以下の方法による補正が必要となる。

NTM式(式(6.4.2))の高風速における実測値の期待値と簡易式(式(6.4.7))で算出された

$TI_z(\theta_i)$ が一致するものと仮定すると、次式 (6.4.8) が導かれる。

$$I_{ref}(\theta_i) = TI_z(\theta_i) / 0.75 \quad (6.4.8)$$

上式は風向別に算出されるため、サイトの任意の評価点を代表する  $I_{ref}$  は、風向別出現頻度  $PO(\theta_i)$  と風向別  $I_{ref}(\theta_i)$  との積により、次式 (6.4.9) のように算出される。

$$I_{ref} = \sum_{i=1}^N PO(\theta_i) I_{ref}(\theta_i) \quad (6.4.9)$$

参照地点（風況観測地点）以外の任意の場所において  $PO(\theta_i)$  を見積もる手法として、WAsP を用いる方法がある。なお、参照地点における実測値から求めた  $I_{ref}$  が、上式で算出された値と著しく異なる場合は、**6.4.3項**の方法による乱流強度の補正を行う必要がある。

また、上記以外に方法として、GL ガイドライン（2003）は評価地点の上流側地形の影響を風向別（8風向）に対して、

- ・ 流れ方向の乱流強度を最大 25%まで割り増しする。
- ・ 横方向、鉛直方向の乱流強度を流れ方向の乱流強度と等しくする。

と定めている。これは、IEC 規格の定める標準の風条件における乱流強度に対して過大に評価することとなり、クラス S 風車での対応となる。

### 6.4.3 非線形モデルまたは風洞実験による乱流強度の設定

複雑度が大きい場合、非線形モデルまたは風洞実験により乱流強度  $I_{ref}^*$  を推定すること。 $I_{ref}^*$  は、観測値を用いて補正すること。

ただし、地形の複雑度が大きであっても、単純地形モデルおよび線形モデルにより妥当な数値が算出可能な場合もある。

#### (1) 非線形モデルによる乱流強度の評価

地形の複雑度が大きいと判定された場合、複雑地形の影響が大きく、風速および乱流強度も場所によって大きく変化することが多いことから、平坦地や単純地形による補正では不十分であるため、ここでは複雑地形上の複雑な流れ場解析手法として有効と考えられる非線形モデルによる数値シミュレーションによる方法について記載する。非線形モデルによる数値シミュレーションは、アルゴリズム、物理モデル、格子、境界条件等が予測精度に与える影響に留意しながら、十分実績を有するか、または設計者が精度を検証したコードを使用し、格子分割や境界条件などの解析条件を適切に設定して風向別に風況解析を実施する必要がある。

非線形モデルにより求められた乱流強度は、シミュレーションのモデルの違い、境界条件等により異なることが考えられるため、その補正方法として、参照地点（風況観測地点）および高さにおける乱流強度と平均風速との比較を行うことにより、風向  $\theta$  毎に NTM 式 (6.4.1) における推定値  $I_{ref\_e}(\theta_i)$  を補正した  $I_{ref}^*(\theta_i)$  を式 (6.4.10) により決定する。

$$I_{ref}^*(\theta_i) = I_{ref\_e}(\theta_i) + \Delta I_{ref}(\theta_i) \quad (6.4.10)$$

ただし、 $\Delta I_{ref}(\theta_i)$  は、十分大きい風速における乱流強度の実測値を NTM 式で近似した期待値との差とし、次式 (6.4.11) で表わされる。

$$\Delta I_{ref}(\theta_i) = E_{obs.\infty}(\theta_i) - E_e(\theta_i) \quad (6.4.11)$$

ここで、 $E_{obs.\infty}(\theta_i)$  および  $E_e(\theta_i)$  は、それぞれ、風向別の実測値を NTM 式で近似した場合の十分大きい風速における乱流強度の期待値および非線形モデルにより求めた乱流強度の期待値である。この方法の概念図を図 6.21 に示す。



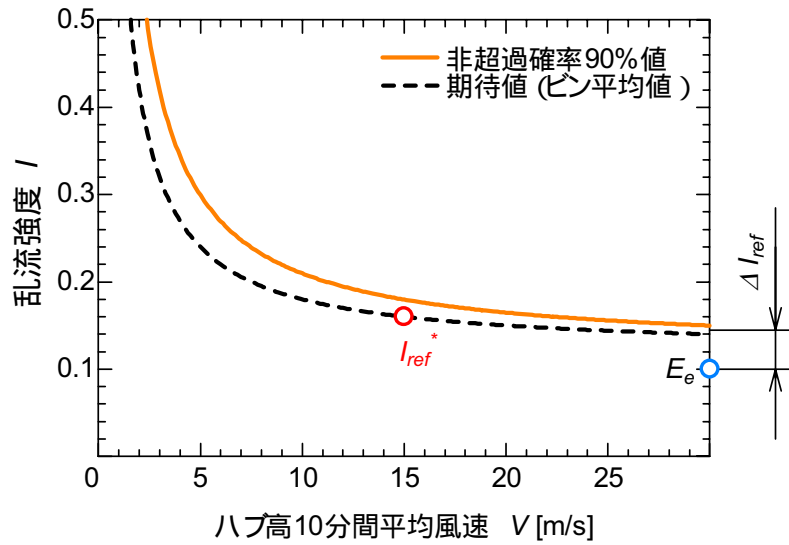


図 6. 2 1  $I_{ref}^*$ の補正量  $\Delta I_{ref}$ の決定方法

参照地点において風向別に求めた  $\Delta I_{ref}(\theta_i)$  を用いて、サイトの任意の評価地点における  $I_{ref}$  は、風向別出現頻度  $PO(\theta_i)$  と風向別  $I_{ref}^*(\theta_i)$  との積により、式 (6. 4. 12) のように再定義する。これは、NTM 式が全風向の乱流強度に対して定義されているためである。ここで、 $\Delta I_{ref}(\theta_i)$  は、場所によらず一定と仮定している。

$$I_{ref}^* = \sum_{i=1}^N PO(\theta_i) I_{ref}^*(\theta_i) \quad (6. 4. 12)$$

非線形モデルによる数値シミュレーションを行うことで、計算領域内の乱流強度のマップも作成することが可能となり、リスクに対する評価として有効となる。

非線形モデルとして、 $k-\varepsilon$  モデルに代表される RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation) と LES (Large Eddy Simulation) があげられるが、乱流強度の算出方法が異なるため、以下にその方法を記載する。

$k-\varepsilon$  モデルの場合：

土木学会指針では、乱れエネルギー  $k$  を用いて流れ方向の乱流標準偏差  $\sigma_u$  を式 (6. 4. 13a)、(6. 4. 13b) により算出する。

$$\tilde{\sigma}_u^{Surface} = 0.93\sqrt{k} \quad (6. 4. 13a)$$

$$\tilde{\sigma}_u = \tilde{U} \times \sqrt{\left(\frac{\tilde{\sigma}_u^{Surface}}{\tilde{U}}\right)^2 + I_a^2}, \quad I_a=0.1 \quad (6.4.13b)$$

ここで、 $\tilde{U}$ は、参照高さにおける風速である。詳細は、土木学会指針を参照のこと。

LES の場合：

LES では、計算格子における速度場の時系列変化を計算するため、実測から算出する方法と同じ手法により乱流強度を求めることができる。このとき、実時間で10分間以上のデータを取得できるようなシミュレーションを行うことが適切である。また、横方向、鉛直方向の乱流強度についても、流れ方向と同様に算出することができる。

## (2) 風洞実験による乱流強度の評価

風洞実験は、十分実績を有する機関および設計者が信頼性を確認した設備において実施しなければならない。実験条件や測定方法を適切に設定して、風向別（8風向）に実験を実施することを推奨する。

このような風車設置場所周辺を対象とした風洞実験により、小地形の影響を考慮した風況が得られることから、以下の式で風向別平均風速・乱流強度 $\phi(\theta)$ をそれぞれ式(6.4.14)により算出する。

$$\phi(\theta) = \varphi_p(\theta) \times \varphi_{pm}(\theta) \times \varphi_{in}(\theta) \quad (6.4.14)$$

ただし、

- $\varphi_p$  : 代表点における値 ( $V_{ave}$ ,  $I_{ref}$ )
- $\varphi_{pm}$  : 風車設置場所における実験結果
- $\varphi_{in}$  : 実験入力値

であり、風向 $\theta$ に依存する値である。

## 6.5 風条件の設定例

風条件の設定について、本ガイドラインに記載される極値風速および乱流強度の推定方法に基づき、事業者は、複雑度の大きさに対応した評価方法について慎重に検討を行い、判断すること。

また、単純地形モデル、線形モデルおよび非線形モデルを用いて評価を行う場合は、粗度(粗度区分、粗度長)を適切に判断すること。

### 6.5.1 風況観測例

本事業では、表6.2に示す7つのA地点～G地点において風況観測および風車の荷重計測を行った。7つの地点は、日本型風力発電ガイドライン作成に資するデータ収集を目的としているため、台風通過地域および複雑地形のいずれかを含むように選択されている。

風況観測では、3杯式風速計・矢羽式風向計と超音波風速計を併用した高速サンプリングを実施し、計測値より10分平均風速、風速の標準偏差、吹き上げ角等を導出した。また、風車の荷重計測では、歪み(ブレード基部、タワー頂部・基部、主軸)等の計測を実施した。なお、計測装置および方法の詳細は、付属書Cを参照のこと。

表6.2 風況観測地点および供試風車の情報

	A地点	B地点	C地点	D地点	E地点	F地点	G地点
風況観測高さ (max.) [m]	57.8	29.8	68	35	65	35.3	35
観測機器 <sup>*)</sup>	C,S,B/B/ B (1.5m 高 T,P)	C,S,B/B/ B (1.5m 高 T,P)	C,S/S/ S (1.5m 高 T,P)	C,S/S/ S (1.5m 高 T,P)	C,S/S (T,P)	C,S,B/B/ B (1.5m 高 T,P)	C,S,B/B/ B (1.5m 高 T,P)
観測地点標高 [m]	EL 152	EL 237	EL 332	EL 431	EL 1.8	EL 77.5	EL 70.5
風車ハブ高さ [m]	60	30.5	68	37	65	35.3	35
風車定格出力 [kW]	990	300	1000	600	2000	660	600

注) C:3杯式風速計および矢羽式風向計, S:超音波風速計, B:風車型風速計  
T:温度センサ, P:気圧センサ

本事業にて計測対象とした地点において、現実に計測された風の統計量の特性を表6.3に示す。また、表6.4には、観測地点における強風の発生状況をあわせて示した。

表6.3から、乱流強度に関して、IEC規格で規定しているNTM式のように風速に対して減少する分布でなく、高風速側で非超過確率90%値の分布が増加している地点・風向が存在することがわかる。本ガイドラインでは、乱流強度の分布はIEC規格のNTM式で近似するものとしているが、このような分布に対しては適用外となることに注意が必要である。

表 6.3 観測点における風の統計量 ( 1 )

	A 地点		B 地点		C 地点		D 地点	
周辺状況								
風向・風速頻度分布	風向頻度分布	風速頻度分布	風向頻度分布	風速頻度分布	風向頻度分布	風速頻度分布	風向頻度分布	風速頻度分布
風速の鉛直分布	風向 1 ( 328 ~ 8 ° )	風向 2 ( 107 ~ 262 ° )	風向 1 ( 0 ~ 180 ° )	風向 2 ( 180 ~ 360 ° )	風向 1 ( 289 ~ 26 ° )	風向 2 ( 124 ~ 206 ° )	風向 1 ( 345 ~ 89 ° )	風向 2 ( 176 ~ 253 ° )
吹き上げ角								
乱流強度								



表 6.3 観測点における風の統計量 ( 2 )

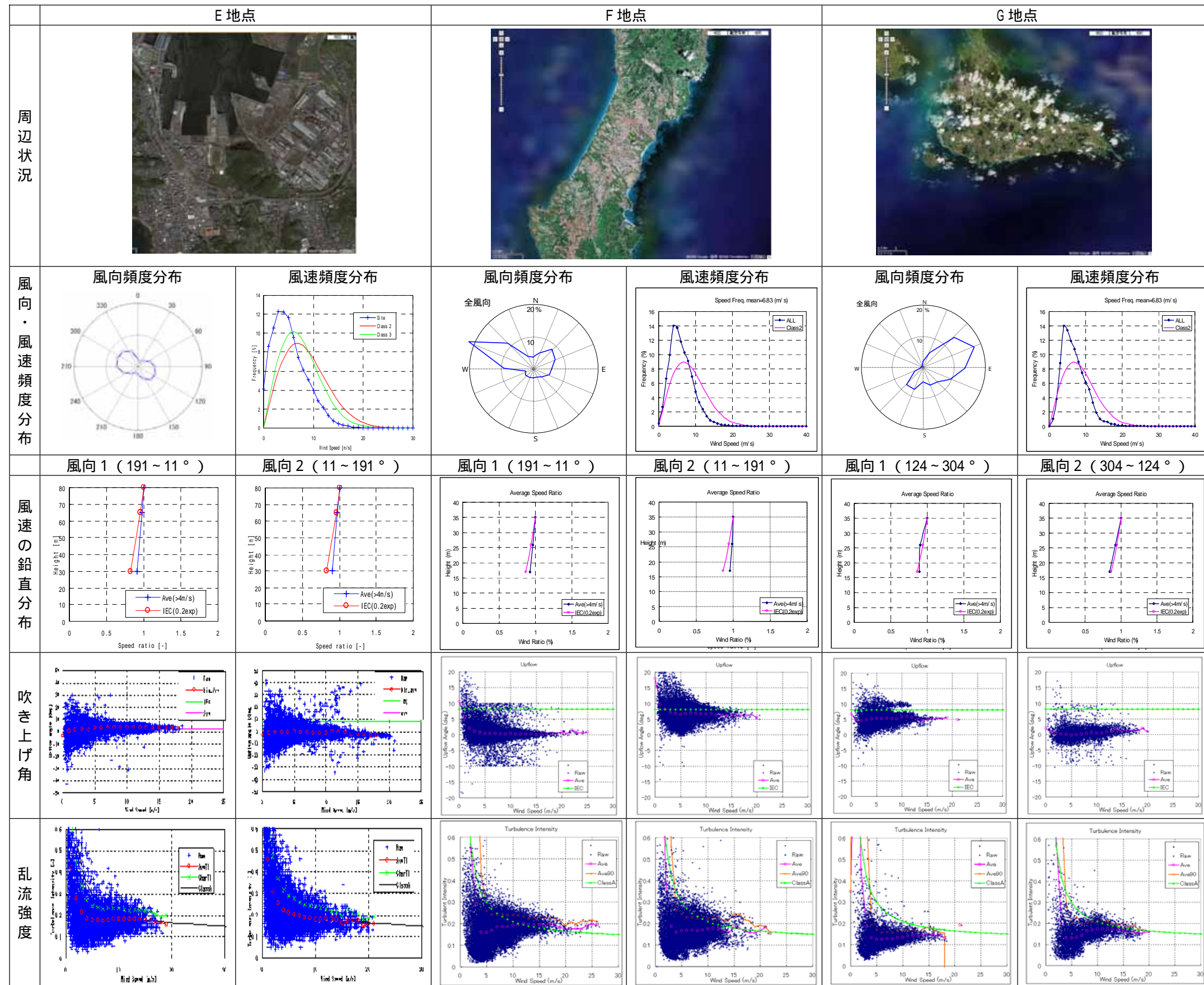


表 6.4 観測地点における強風の発生状況 (1)

強風ベスト5 特定時系列  MET ハブ高度3杯式風速計記録 発生日(気象要因、風向) 最大瞬間風速 最大風速(10分間平均) 突風率	A地点 2007/7/13 (台風0704:南風) 73m/s 52m/s 1.40	B地点 2007/01/06 (前線・低気圧:西風) 47m/s 26m/s 1.81	C地点 2006/09/18 (台風0613:南風) 48m/s 25m/s 1.92	D地点 2007/10/27 (台風0720:北東風) 58m/s 40m/s 1.45
A地点のみプロペラ風速計記録	2007/9/14 (台風0711:南風) 46m/s 33m/s 1.39	2007/12/22 (前線・低気圧:北東風) 40m/s 26m/s 1.54	2007/05/17 (前線・低気圧:南風) 44m/s 23m/s 1.91	2006/10/06 (台風0616:北東風) 56m/s 36m/s 1.56
	2006/7/8 (台風0603:南風) 43m/s 31m/s 1.39	2007/4/13 (西風) 39m/s 21m/s 1.86	2006/6/15 (前線・低気圧:南風) 44m/s 27m/s 1.63	2007/9/6 (台風0709:北東風) 52m/s 32m/s 1.63
	2006/11/22 (竜巻?南風) 41m/s 20m/s 2.05	2006/11/7 (前線・低気圧:西風) 39m/s 21m/s 1.89	2007/3/5 (前線・低気圧:南南東風) 42m/s 28m/s 1.5	2007/04/01 (前線・低気圧:南西風) 49m/s 25m/s 1.96
	2006/09/16 (台風0613:南風) 41m/s 29m/s 1.41	2007/5/10 (前線・低気圧:西風) 38m/s 21m/s 1.81	2007/8/3 (台風0705:南風) 39m/s 20m/s 1.95	2007/02/14 (前線・低気圧:南西風) 47m/s 25m/s 1.89

表 6.4 観測地点における強風の発生状況(2)

強風ベスト5 特定時系列  MET ハブ高度三杯風速計記録 発生日(気象要因、風向) 最大瞬間風速 最大風速(10分間平均) 突風率	E地点 2007/09/07(台風0709:東風) 34m/s 21m/s 1.60	F地点 2007/07/14(台風0704:南南東風) 48m/s 28m/s 1.69	G地点 2007/09/18(台風0712:東南東風) 46m/s 32m/s 1.54
	2007/02/14(前線・低気圧:東南東風) 33m/s 21m/s 1.50	2007/08/02(台風0705:西風) 44m/s 26m/s 1.82	2007/10/06(台風0715:南東風) 45m/s 28m/s 1.58
	2007/12/29(前線・低気圧:東南東風) 32m/s 21m/s 1.55	2007/01/07(前線・低気圧:西北西風) 43m/s 20m/s 1.76	2007/11/27(台風0723:東北東風) 41m/s 22m/s 1.72
	2007/01/07(前線・低気圧:北北西風) 31m/s 23m/s 1.49	2007/03/06(西北西風) 40m/s 23m/s 1.64	2007/07/12(台風0704:北東風) 38m/s 19m/s 1.71
	2007/05/26(前線・低気圧:南東風) 30m/s 20m/s 1.57	2006/12/29(西北西風) 36m/s 18m/s 1.63	2007/08/08(台風0706:東南東風) 36m/s 20m/s 1.52



## 6.5.2 風条件の評価方法の適用例

### (1) 地形判定

図6.2.2に本事業で計測した7地点の地形図を、表6.5にそれぞれの地点における地形判定結果を示す。

図6.2.2は、地形評価ツール（電力中央研究所）の数値出力を示したものであり、16方位の断面図である。

表6.5は、6.2節に記載してある地形の複雑度の判定法を用いた結果である。地形データには国土地理院の50m間隔の数値標高データを用い、表中に判定の目安値を記載してある。RIXはWAsPの出力結果を用いており、地形判定法(5)に対応する。表中の着色部が目安値を超える値である。

また、表6.5により、A地点およびC地点を除き、地形図等から判断される主観的な複雑度とほぼ対応していることがわかり、5つの指標を用いる妥当性が示されている。増速率の判別は、1.1を超えているが、これはあくまで目安であることから、1.1の値を示す地点AおよびGは複雑度中とも判定してもよい。

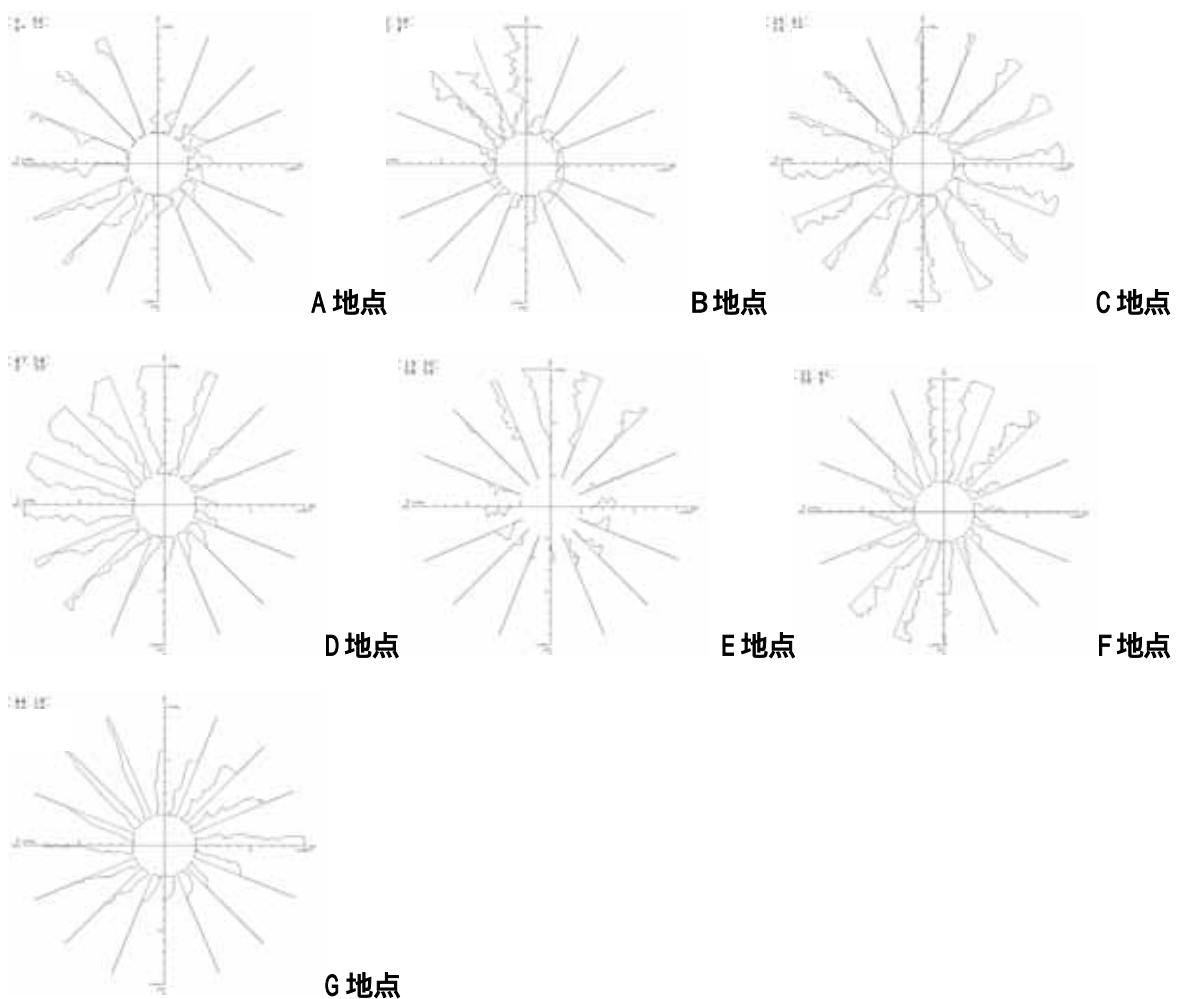


図6.2.2 7地点の方位別地形断面図（16断面）



表 6.5 地形判定結果

判別方法	地点	A	B	C	D	E	F	G	判定の目安値
	想定ハブ高さ [m]	60	30	69	32	65	35	35	
	主観的複雑度	中	大	大	大	小	中	小	
(1)	斜面傾斜角	6.6	7.0	10.4	16.0	0.0	2.1	1.4	10度以上
(2)	半径5km								1.5×ハブ高さ
	平均標高	51.4	68.8	133.3	413.7	36.6	58.6	28.1	
	標準偏差	62.2	81.5	108.9	246.3	54.2	42.6	32.5	
(3)	半径(5×ハブ高さ)	300.0	150.0	345.0	160.0	325.0	175.0	175.0	0.5×ハブ高さ
	平均標高	51.1	169.3	260.8	344.2	1.0	82.8	52.7	
	標準偏差	26.4	22.4	34.2	20.7	1.0	5.4	6.8	
	半径(10×ハブ高さ)	600.0	300.0	690.0	320.0	650.0	350.0	350.0	0.8×ハブ高さ
	平均標高	48.8	174.0	164.3	391.9	5.7	82.4	49.4	
	標準偏差	29.7	31.2	42.7	54.3	16.0	7.4	6.3	
半径(20×ハブ高さ)	1200.0	600.0	1380.0	640.0	1300.0	700.0	700.0	1.4×ハブ高さ	
平均標高	89.6	171.7	227.7	228.8	32.6	70.2	50.6		
標準偏差	49.7	41.7	71.2	57.1	31.1	14.4	6.1		
(4)	増速率 (Max)	1.1	1.2	1.2	1.4	1.0	1.2	1.1	1.1を超える場合
	発生風向	N	NW	N	E	-	SE	N	
(5)	RIX(max, 風向)	12.3(N)	43.9(NW)	25.4(ESE)	38.5(N)	13.8(SSE)	8.7(ESE)	2.7(NE)	30を超える場合
	複雑度の判別結果	小	大	中	大	小	中	小	

\* 国土地理院の50mピッチの数値地図データに基づく処理結果

\* 着色部分で判定の目安値を超えている

(2) 極値風速および乱流強度の評価例

表 6.6 は、6.3 節および 6.4 節に記載されている極値風速および乱流強度の推定法を適用した結果を示している。着色部が、本ガイドラインに記載されている手法により評価した値である。各数値は、風況観測地点のハブ高さにおける値である。本ガイドラインでは、地形の複雑度に対応した評価方法を提案しているが、その手法の妥当性を評価するために、ここでは地形の複雑度によらず全ての方法を適用している。

表中で粗度区分が 2 つ設定されている地点は、上欄が風況観測塔の建築確認申請時の粗度区分、下欄が地表面状況から推定した区分を表している。極値風速および乱流強度の推定値からわかるように、推定値は粗度の評価によってその値が異なることから、現地粗度の評価を適切に行うことが重要である。

表 6.6 の極値風速は、建築物荷重指針・同解説(2004)に記載されている単純地形モデルによる方法と、極値風データベースの値から WASP および LAWEPS を用いた方法、および相関法等を用いて推定した値である。

極値風速の評価フローに準ずると、各地点の  $V_{ref}^*$  は次の通りとなる。

- ・ A 地点(複雑度小) : 70m/s
- ・ B 地点(複雑度大) : 79m/s
- ・ C 地点(複雑度中) : 37m/s または 53m/s
- ・ D 地点(複雑度大) : 73m/s
- ・ E 地点(複雑度小) : 45m/s
- ・ F 地点(複雑度中) : 51m/s または 72m/s
- ・ G 地点(複雑度小) : 83m/s (参考値)

なお、G 地点は複雑度が小であるが、極値風速マップの値がないので、小地形影響評価式によ

る値を用いているため参考値である。本ガイドラインで提供している極値風データベースの値は、6.3節に記載されているように、±10m/s程度の不確かさを含んでおり、これに各評価手法の誤差が付加されることに注意すべきである。複雑度中の地点では、手法の違いにより20m/sの差がある。

乱流強度  $I_{ref}$  の実測値は、0.18~0.22の値を示している。一般に、乱流強度は、風速と乱流標準偏差の高さ方向の関数であるため、観測点において高さ方向に減少する傾向がある。このため、複雑度が小と判定された地点でも観測高さが低い場合は、乱流強度が高いことがある。

乱流強度の評価には、6.4節の(2)に記載されている単純地形モデルによる方法を用いてある。CFD(Computational Fluid Dynamics)による評価方法は、参照地点(観測地点)における値を用いた補正を前提にしていることから、参照地点の値を比較している本節では評価の対象外とした。なお、CFDによる評価方法の詳細については参考資料を参照のこと。

簡易法による乱流強度の推定値は、複雑度が小および中の地点では、観測値から0.00~0.04の誤差になっている。また、複雑度が中の地点では、乱流強度の誤差は0.02~0.18と極めて大きい。

簡易法による乱流強度の評価は、複雑度が小および中であれば、予測精度が比較的高いといえるが、乱流強度のカテゴリは、0.02の幅で定義されていることから、0.01を超える誤差であれば、観測結果による補正を行うCFDによる評価方法を用いた方が安全であるといえる。なお、乱流強度の評価に対しても粗度の影響は大きいですが、乱流強度の観測値を簡易式から導出した値と比較することで、現地粗度評価の目安になる。

表6.6 極値風速および乱流強度の評価例

地点		A		B		C		D		E		F		G	
地形の複雑度		小		大		中		大		小		中		小	
粗度区分		I		II		I		III		II		I		I	
ハブ高 [m]		60		30.5		68		37		65		35.3		35	
極値風速マップ(ハブ高換算値) [m/s]		70		50		35		47		46		60		-	
建築基準法	基準風速(10m高) [m/s]	46		40		32		36		34		42		46	
	ハブ高風速 [m/s]	68	60	55	40	43	44	37	45	59	64				
建築物 荷重指針	基本風速(10m高) [m/s]	47		43		29		37		30		42		46	
	ハブ高風速 [m/s]	69	61	59	42	38	45	39	39	58	64				
	小地形モデルハブ高風速 [m/s]	84	74	77	56	53	63	54	39	72	83				
極値風DB	250m高風速(出現風向) [m/s]	79(S)		71(SE)		45(N)		63(S)		50(SE-W)		72(N,E)		-	
	WAsPハブ高風速(出現風向) [m/s]	69(SE)		77(E)		37(N,S,W)		59(S,W)		38(S,W)		51(SE)		-	
	LAWEPSハブ高風速(出現風向) [m/s]	69(W)		79(W)		52(E,SE)		73(N)		35(N,W)		48(E,W)		-	
相関法	直近官署	沖縄		室戸岬		鳥取		網代		室蘭		種子島		宮古島	
	直近官署風速計高さ [m]	14.1		41.8		13.6		12.5		10.4		10.5		11.4	
	直近官署の極値風速 [m/s]	39.5		62.0		25.2		31.6		28.1		39.8		54.3	
	直近官署既往最大風速(ハブ高換算) [m/s]	54	58	68	66	37	46	49	39	48	68				
	直近官署・風観測点風速の相関係数	0.78		0.91		0.68		0.65		0.81		0.72		0.85	
	直近官署・風観測点風速の回帰係数	1.435		0.969		1.799		1.862		1.257		0.961		1.349	
乱流強度( $I_{ref}$ )	相関法によるハブ高風速 [m/s]	57		60		45		59		35		38		73	
	観測値	0.15		0.17		0.15		0.19		0.19		0.20		0.19	
小地形モデル		0.16	0.18	0.24	0.35	0.19	0.17	0.21	0.19	0.18	0.19				

\* 粗度区分が2つ設定されている地点は、左欄が風況観測塔の建築確認申請時の粗度区分、右欄が地表面状況から推定した区分を表す。  
 \* ハブ高風速は、DBはCFD計算、簡易法は粗度区分毎のべき乗則、指針は荷重指針マップに簡易手法を適用

表 6.6 に示したデータを用いて、複雑度に対応した評価方法により数値を決定し、IEC 61400-1(2005)に規定された Class IA を基準に対して、各項目の上限値と比較して総括したものを表 6.7 に示す。本表から、現在の IEC 規格の標準風条件に対して規格がカバーできていない箇所が存在することが判る。ただし、これらの評価は、統計的な評価であり、不確かさがある。また、表 6.3 に示すように項目毎の統計量にはバラツキが存在するため、表 6.7 における 印 においてもリスクはゼロでは無い。

本ガイドラインでは、何れかの項目が規格を上回った場合の現実的な対処方法を 7 章のリスク評価に記載する。

表 6.7 現地での風特性と規格における標準仕様との比較

No.	項目	A	B	C	D	E	F	G	IEC ( A)
1	基準風速							( )	50m/s
2	年平均風速								10m/s
3	乱流強度								0.16
4	吹き上げ角								8°
5	鉛直分布								0.2

注) : IEC 規格の標準仕様 (Class IA) 以内、 : IEC 規格での標準仕様を部分的にまたは風向により超える。  
: IEC 規格での標準仕様を超える。

## 7. リスク評価

### 7.1 風車の風による被害とその分析

風力発電設備の機械的リスクは、以下に示すような種々のレベルが想定され、事業者は風車導入時および導入後に関しても、メーカーとの連携・協力のもと、必要に応じて運転制限や人の風車近傍への立ち入り制限などリスク管理を行うこととする。

- ① 甚大な損傷をとまなうリスク
- ② 風力発電設備としての機能が損なわれ、修復が必要なレベルのリスク
- ③ 外板、付属機器の損傷に関わるリスク
- ④ 油漏れ、異音の発生など、何らかの異常が発生するリスク

#### (1) ブレードの被害

暴風により、風車のブレードが被害を受けることがある。これらの事象が発生すると、風力発電設備としての機能が損なわれ、修復を必要とする。特に、運転時のブレード折損に関しては、飛散したブレードによって二次災害が発生しないように、立ち入り制限などの措置を講じる必要がある。

また、落雷による被害が発生した後に強風が作用する等の複数要因から事故となる場合もある。

(図7.1、図7.2)



(<http://www.nbu.ac.jp/CE/kounot/miyako/miyako.htm>)

図7.1 台風0314号によるブレード被害



(<http://niraikanai4792.ti-da.net/e1773003.html#comments>)

図7.2 台風0715号によるブレード被害

### (2) タワーの被害

暴風による系統故障（停電）が原因で風車タワーが座屈した事故も報告されており、これは甚大なレベルのリスクに相当する。これらの座屈は、マンホール周辺での応力集中などにより発生する。(図7.3)



(<http://www.cosmos.ne.jp/~miyako-m/photo/030923/6-1.JPG>)

図7.3 台風0314号による風車タワーの被害

### (3) 基礎の被害

風車の運転管理の問題で基礎が破壊される事故も報告されており、これも甚大なレベルのリスクに相当する。これらの被害は、過回転などにより基礎の耐力を超える荷重が作用する場合などに発生する。(図7.4)



(<http://kankyo44.jugem.jp/?eid=66>)

図7.4 風車基礎の倒壊例

(4) 風車被害の実例

これらの悲惨な結果を招いた実例について、要因分析を行った一例が図7.5であり、我が国において特徴的な「台風・暴風」と「乱れ」による故障・事故発生の連鎖を示す。

実際に設置されて稼働している風車に対して、台風・乱流が損傷を与えた事例から要因を抽出して、分析した一例を以下に示す。

なおこれは、平成16年から平成18年にかけて稼働していた風車に対する強風・乱流を発生要因とする風車の故障・事故に関するもので、NEDO事業「風力発電故障・事故等調査委員会」において、アンケート形式により事業者からの協力のもと収集されたデータによる。

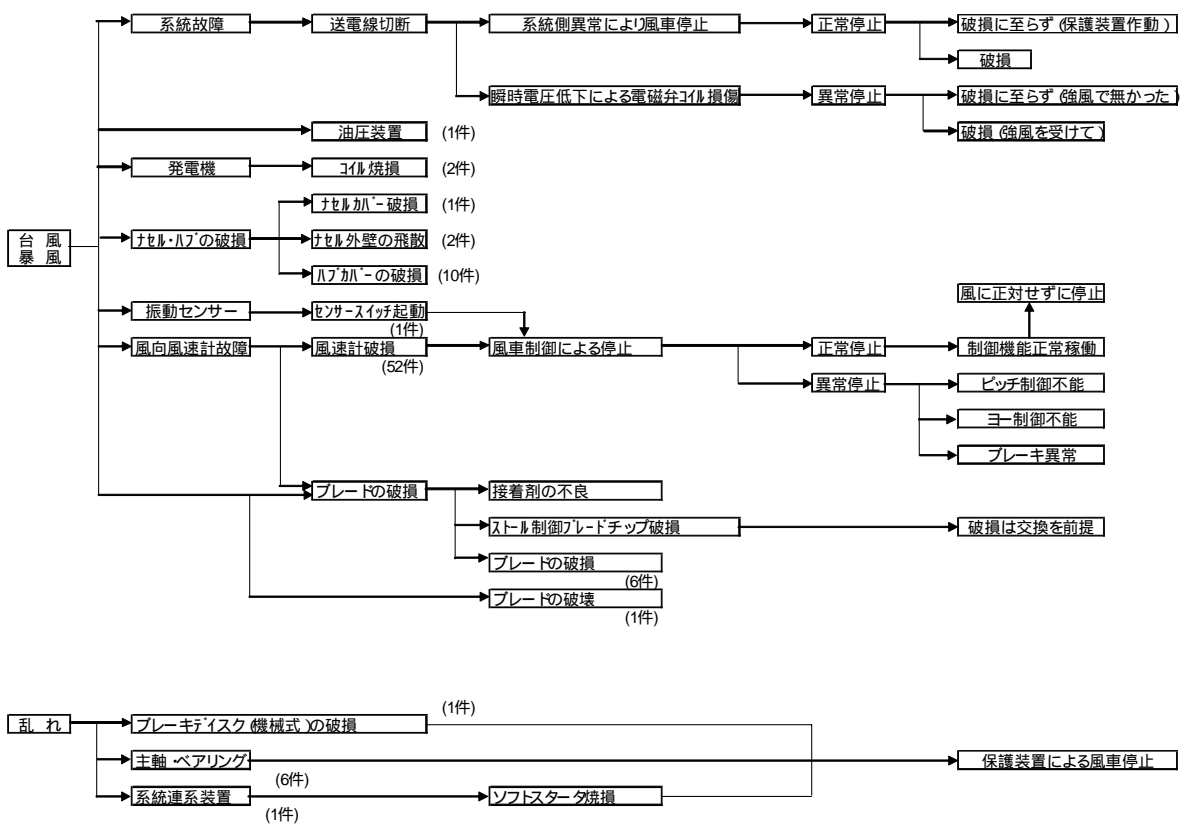


図7.5 風車の被害に関する流れ図(国内事例・1)

また、海外事例としては、CWIFの資料（Wind Turbine Accident Compilation：2006Caithness Windfarms Information Forum）に基づく、2005年までの主にヨーロッパにおける風車事故データより、ブレード破損に関するもの67例を抽出し分析すると、図7.6の通りとなる。

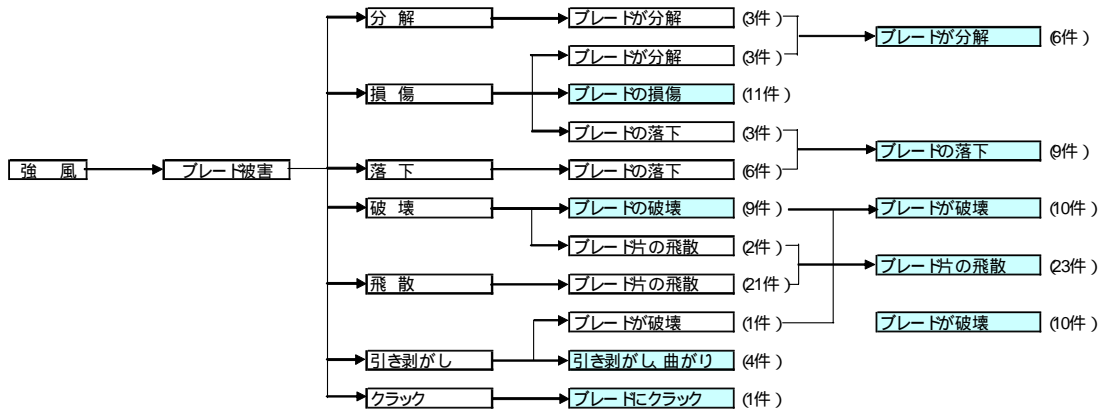


図7.6 風車の被害に関する流れ図（海外事例）

さらに、ブレードの被害が、落雷によるブレード損傷により引き起こされる場合もあることから、落雷被害からブレード損傷等の被害を生じた例を抽出した結果、**図 7.7**に示すような数例を得ることができた。なお、落雷による軽微な損傷の場合、運転に支障がないとの判断で運転を継続する場合もある。このような場合のリスクは、運用面でのものと考えることができる。

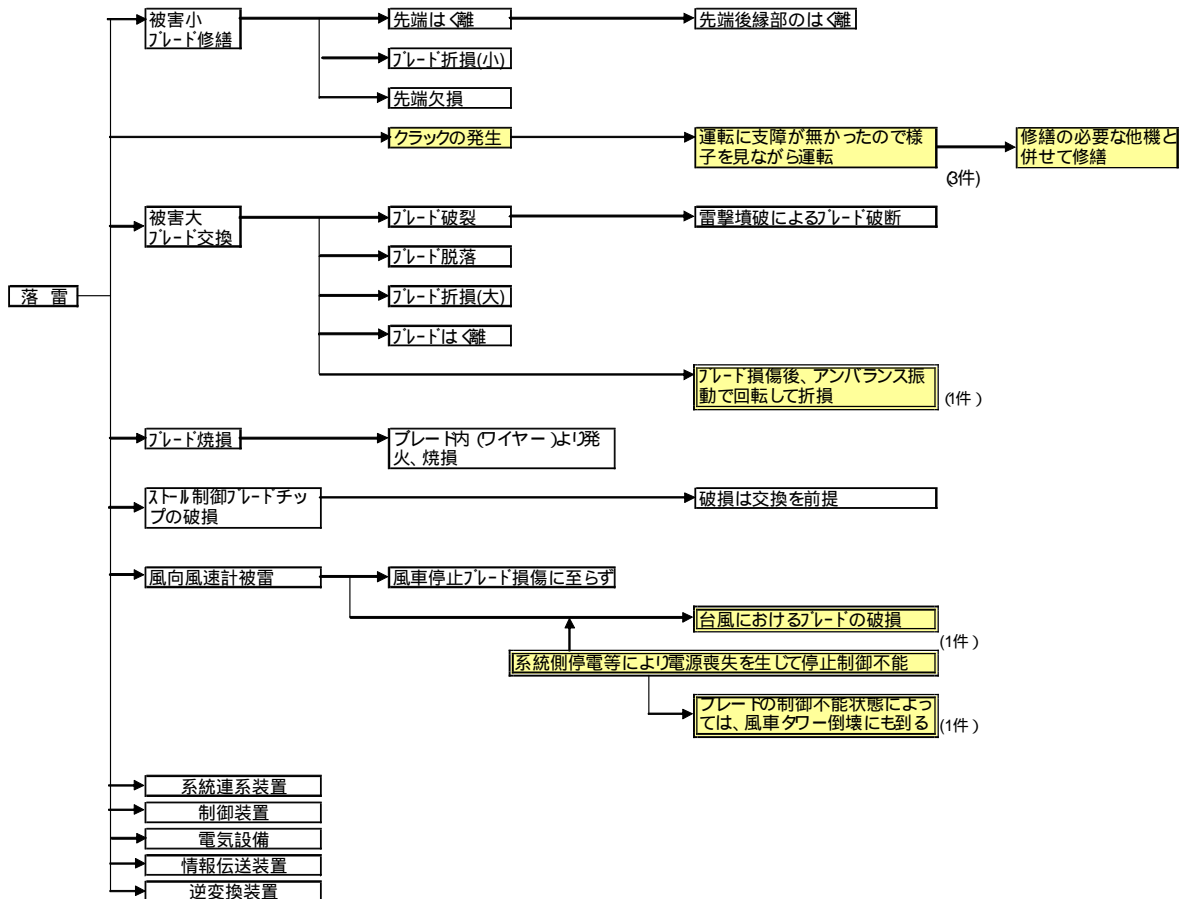


図 7.7 風車の被害に関する流れ図 (国内事例・2)



これら風力発電事業特有のリスクの原因となる要因が発生する段階としては、以下の3つが考えられる。

#### 1) 計画段階

建設地点に関する条件整備が、計画段階では最も大きなリスク要因となる。その主なものは、以下の通りである。

- ・風況条件：建設予定地点の風速、風向、乱流強度
- ・土地条件：土地所有、地形起伏、地形粗度

特に、この段階において風車機種を選定を誤ると、以降の全ての段階に関わるため重要である。

#### 2) 施工段階

施工段階のリスクとしては、風力発電設備の物的損害と運転開始日時の遅延に対するリスクが上げられる。

なお、施工・組立中における風力発電設備への物的損害や風車基礎等の施工不良による物的損害のリスクは、工事施工業者にその責があることになる。しかし、台風や落雷などの不可抗力といえるものにより風力発電設備に生じる物的損害に対しては、別途保険対応を講じる必要がある。

#### 3) 運転開始後

運転を開始してからのリスクとしては、物的損害リスクと発電量不足リスクが挙げられる。物的損害リスクは、何らかの原因で風力発電設備が破損し発電することが出来なくなるリスクを指す。原因としては、台風（強風）被害、乱れ（乱流）被害、落雷被害、操作ミス等が挙げられる。風力発電設備に物的損害が生じれば発電量不足、稼働率低下をもたらすこととなる。この場合、故障内容や修復内容によって発電停止期間が異なり、いかに早期復旧を図るかによってリスクを軽減できる。

また、最近事故例の多い過回転に関しても、回転機械である風車において、メンテナンス時の操作を誤った場合などには、想定を超える荷重が作用することとなる。このようなことがないように、メンテナンス上のマニュアルが用意されているのが通常である。

一方、風況の悪化により計画通りの発電量が得られないことがあるが、これは天候に関するリスクとして保険対応を図ることもできる。

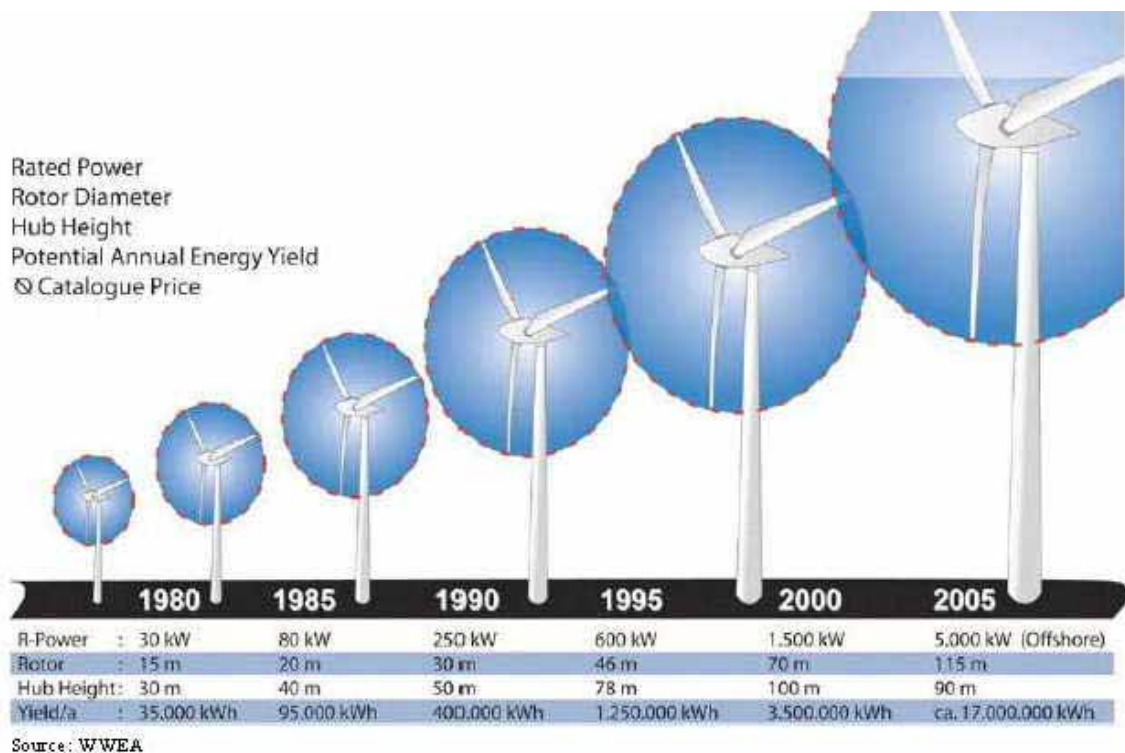
## 7.2 風車のリスクと風車の国際規格

欧州においては、風車の国際規格を設けて大量生産を可能とし、コスト低減を図ることで風力エネルギーの導入を促進してきている。この国際規格は、風車設計の全般を網羅するものであり、風車のクラス分け及び認証制度ともあいまって、リスクの低減への貢献は大きい。現在国内においても国際規格に基づき設計・製作された風車が多数を占めている。

しかしながら、規格の外部条件(external condition)における風条件は、必ずしも毎年のように熱帯性低気圧が襲来し、地形の起伏に富んだ我が国の風の特徴を反映したモデルではない。我が国における風の特徴は極めて複雑であることから、風工学の分野にて多くの研究が行われ、我が国に即した風車の規格の策定が望まれる。

また「規格」は、風車特有の種々の運転状態におけるリスクの考え方を示しているが、前節において示したような被害に応じて更新され、恒久的なものではないために、ここでは、現行の風車の国際規格におけるリスクの考え方を整理し、事業者のリスク判断の一助とする。

近年の風車の開発スピードは著しく、その大型化の変遷と規格の制定年度を図7.8に示す。



Germanischer Lloyd (GL)

★1993 初版

★2003 年

International Electrotechnical Commission (IEC)

★1994 年初版 ★1999 年

★2005 年

図7.8 風車の大型化の変遷と風車の国際規格の制定年

同図をみてわかるように、現在では一般的になりつつある風車の規格も、初版が発行されて僅か12～13年であり、これらの規格ができる以前に設計・製作された風車も現存し、稼動している。

規格制定前の風車のリスクを評価するには、当時の設計資料を細かに紐解く必要があり、設計仕様そのものが標準化されたものではないために、その作業は容易ではない。

これらの規格も、欧州における風の特徴を念頭に定められ、我が国のような熱帯性低気圧の襲来が頻繁にあり、地形の起伏に富んだ場所を十分に配慮するには至っていないのが現状である。

風車の国際規格においては、風車のリスクを具体的に設計荷重ケース (DLC : Design Load Case) として整理し、終局荷重及び強度 (Extreme Load & Strength) および、疲労荷重及び強度 (Fatigue Load & Strength) とに分けて考え、その中で通常の運転状態のみならず、故障、停電などとの組み合わせに関しても考慮してリスクの低減を図っている。

また、これらの DLC は、それまでに被害の生じた事例を分析した結果に基づくものであり、**表 7.1** に示すように改訂・増補により項目が変更・追加されるもので、必ずしも普遍的なものではない。このため、風車のリスクを評価するには、適用規格の種類のみならず、適用版も重要である。

なお、**表 7.1** に関しては、原著における正確な意味合いが、翻訳により伝わらないことを危惧して、英文のまま記載している。

表 7. 1 IEC 61400-1 の ed. 2 と ed. 3 の変更点

Design situation	IEC61400-1 ed.2(1999)					IEC61400-1 ed.3(2005)				
	DLC	Wind Condition	Other Conditions	Type of analysis	Partial safety factor	DLC	Wind Condition	Other Conditions	Type of analysis	Partial safety factor
1) Power production	1.1	NTM $V_{hub}=V_r$ or $V_{out}$		U	N	1.1	NTM $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$	For extrapolation of extreme events	U	N
	1.2	NTM $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$		F	*	1.2	NTM $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$		F	*
	1.3	ECD $V_{hub}=V_r$		U	N	1.3	ETM $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$		U	N
	1.4	NWP $V_{hub}=V_r$ or $V_{out}$	External electrical fault	U	N	1.4	ECD $V_{hub}=V_r-2m/s, V_r, V_r+2m/s$		U	N
	1.5	EOG1 $V_{hub}=V_r$ or $V_{out}$	Loss of electrical connection	U	N	1.5	EWS $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$		U	N
	1.6	EOG50 $V_{hub}=V_r$ or $V_{out}$		U	N					
	1.7	EWS $V_{hub}=V_r$ or $V_{out}$		U	N					
	1.8	EDC50 $V_{hub}=V_r$ or $V_{out}$		U	N					
	1.9	ECG $V_{hub}=V_r$		U	N					
2) Power production plus occurrence of fault	2.1	NWP $V_{hub}=V_r$ or $V_{out}$	Control system fault	U	N	2.1	NTM $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$	Control system fault or loss of electrical network	U	N
	2.2	NWP $V_{hub}=V_r$ or $V_{out}$	Protection system or preceding internal electrical	U	A	2.2	NTM $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$	Protection system or preceding internal electrical fault	U	A
	2.3	NTM $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$	Control or protection system fault	F	*	2.3	EOG $V_{hub}=V_r \pm 2m/s$ and $V_{out}$	External or internal electrical fault including loss of electrical network	U	A
						2.4	NTM $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$	Control, protection, or electrical system fault including loss of electrical network	F	*
3) Start up	3.1	NWP $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$		F	*	3.1	NWP $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$		F	*
	3.2	EOG1 $V_{hub}=V_{in}, V_r$ or $V_{out}$		U	N	3.2	EOG $V_{hub}=V_r \pm 2m/s$ and $V_{out}$		U	N
	3.3	EDC1 $V_{hub}=V_{in}, V_r$ or $V_{out}$		U	N	3.3	EDC $V_{hub}=V_r \pm 2m/s$ and $V_{out}$		U	N
4) Normal shut down	4.1	NWP $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$		F	*	4.1	NWP $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$		F	*
	4.2	EOG1 $V_{hub}=V_r$ or $V_{out}$		U	N	4.2	EOG $V_{hub}=V_r \pm 2m/s$ and $V_{out}$		U	N
5) Emergency shut down	5.1	NWP $V_{hub}=V_r$ or $V_{out}$		U	N	5.1	NTM $V_{hub}=V_r \pm 2m/s$ and $V_{out}$		U	N
6) Parked (standing still or idling)	6.1	EWM $V_{hub}=V_{e50}$	Possible loss of electrical power network	U	N	6.1	EWM 50-year recurrence period		U	N
	6.2	NTM $V_{hub}<0.7V_{ref}$		F	*	6.2	EWM 50-year recurrence period	Loss of electrical network connection	U	A
						6.3	EWM 1-year recurrence period	Extreme yaw misalignment	U	N
						6.4	NTM $V_{hub}<0.7V_{ref}$		F	*
7) Parked and fault conditions	7.1	EWM $V_{hub}=V_{e1}$		U	A	7.1	EWM 1-year recurrence period		U	A
8) Transport, assembly, maintenance and repair	8.1	<i>to be stated by the manufacturer</i>		U	T	8.1	NTM <i>V<sub>maint</sub> to be stated by the manufacturer</i>		U	T
						8.2	EWM 1-year recurrence period		U	A

注 1)  $V_{in}$ : カットイン風速,  $V_r$ : 定格風速,  $V_{out}$ : カットアウト風速、注 2) 解析方法の記号は以下のとおり。 U: 終局強度解析、F: 疲労強度解析

注 3) 部分安全係数の記号は以下のとおり。詳細に関しては後述 N: Normal (1.35)、A: Abnormal(1.1)、T: Transport and erection(1.5)

注 4) NTM などの風モデルの詳細に関しては、IEC 61400-1 規格を参照

NTM: Normal turbulence model

ECD: Extreme coherent gust with direction change

EOG: Extreme operating gust

EDC: Extreme direction change

ETM: Extreme turbulence model

EWS: Extreme wind shear

NWP: Normal wind profile

EWM: Extreme wind speed model

ECG: Extreme coherent gust

### 7.2.1 風の外部条件

現行の風車の国際規格における外部条件としての風モデルには、熱帯性低気圧である台風、ハリケーンあるいはサイクロンのほか、竜巻、ダウンバーストなどの局所的な気象現象は考慮されていない。

地形の起伏に富んだ我が国においては、地域に特有な風も観測され、現在も風工学の分野における研究が行われている。よって、事業者はこれらの現象に関しては、設置地点及び周辺での調査に基づき、適切にリスク判断を行うこととする。

また、風の統計量の他に、数秒の時間間隔での風速・風向の変化特性に関しても、本事業の観測において現行規格のモデルを超える風の変化状況が散見されたため、その影響度に関しては荷重を含めてリスク判断を行う必要がある。(7.3節参照)

#### (1) 特異な気象現象

本事業の観測において、A地点で2006年11月22日に観測されたデータは、台風の接近が無いにもかかわらず、風速が急激に上昇する観測結果が得られ、極めて特異な気象現象と考えられる。



図7.9 A地点で観測された特異な気象現象

図7.9における風速の変化を見ると、最大風速が急激に立ち上がり40m/s程度に達し、このときの風向は、130°程度変化している。当初観測機器の誤作動が考えられたが、図7.10に示すように、他の風速計も同様な傾向を示していることから、極めて局所的な強風が発生し、観測されたものと考えられる。

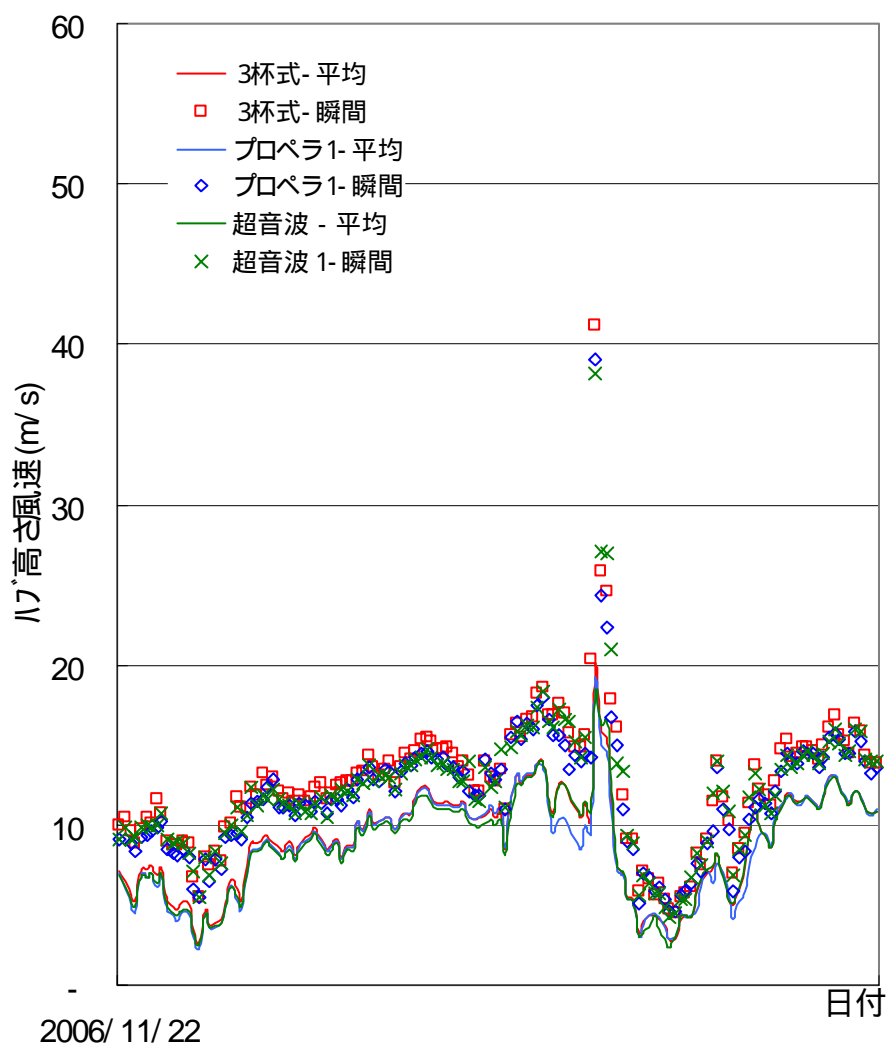


図 7.10 ハブ高さに相当する 3 種類の風速計（3 杯、プロペラ、超音波）の観測値

本データが観測された当日は、沖縄県北部で竜巻の発生が報告されており、特異な気象条件であったものと考えられる。風車の国際規格においてこのような気象現象は想定外である。

(2) 風の時刻歴の変化特性

風車に作用する荷重については、暴風時以外にも様々な風モデルや他の条件と組み合わせることを国際規格では想定している。その中で外的に与えられる特徴的な条件として、以下に示すような風モデルが設定されている。

風の変化の例として、EOG (Extreme Operating Gust) に対しては、風速変化のモデルとして風速の変化幅  $V_{gust}$  が式 (7.2.1) で定義されている (IEC 61400-1 Ed. 3 (2005)による)。その大きさは、風速の他、乱流強度に依存する値である。

$$V_{gust} = \text{Min} \left\{ 1.35(V_{e1} - V_{hub}), 3.3 \left( \frac{\sigma_1}{1 + 0.1 \left( \frac{D}{\Lambda_1} \right)} \right) \right\} \quad (7.2.1)$$

$$V_{e1} = 0.8V_{e50} = 0.8 \times 1.4V_{ref}$$

$$\sigma_1 = I_{ref}(0.75V_{hub} + b); \quad b = 5.6 \text{ m/s}$$

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0.7z & z \leq 60 \text{ m} \\ 42 \text{ m} & z \geq 60 \text{ m} \end{cases}$$

ここで、ハブ高さ 60m、ロータ径 60m の風車 (クラス I) を例とした場合のハブ高さにおける平均風速  $V_{hub}$  と風速の変化幅  $V_{gust}$  との関係を図 7.1.1 に示す。

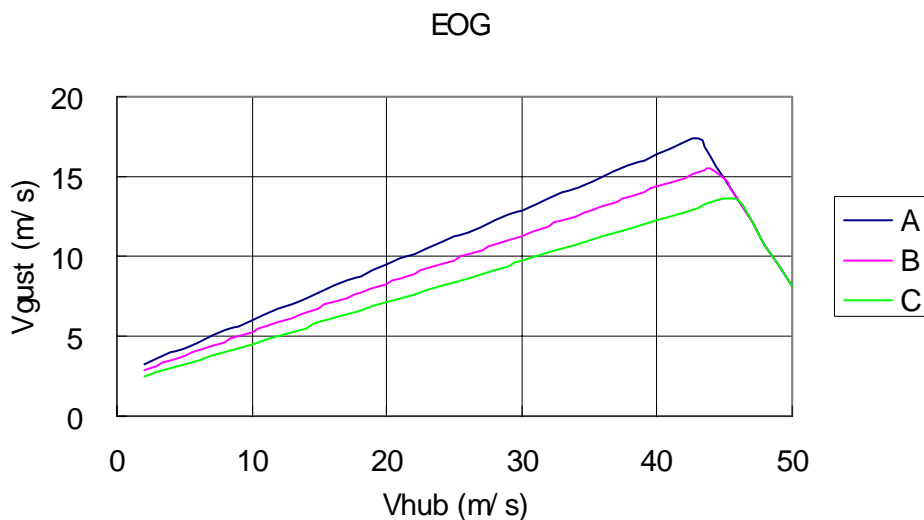
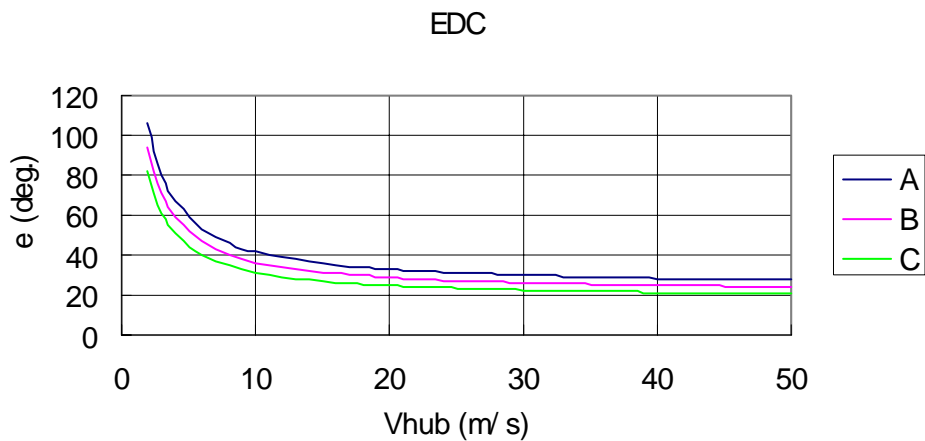


図 7.1.1 風速の変動幅  $V_{gust}$  の大きさ

また、EDC (Extreme Direction Change) に対しては、同様に風向の変化幅  $\theta_e$  が式 (7.2.2) に示すように乱流強度により変化する特性で定義されている。

$$\theta_e = 4 \arctan \left( \frac{\sigma_1}{V_{hub} \left( 1 + 0.1 \left( \frac{D}{\lambda_1} \right) \right)} \right) \quad (7.2.2)$$

この式から、ハブ高さにおける平均風速  $V_{hub}$  と風向の変化幅  $\theta_e$  の関係を図示したものが、**図 7.12** である。



**図 7.12 風向の変動幅  $\theta_e$  の大きさ**

これらは何れも、数秒で風速もしくは風向が変化する風のモデルであり、風車の発電状態が不連続に切り替わる（定格風速やカットアウト風速）状態に組み合わせて照査される。

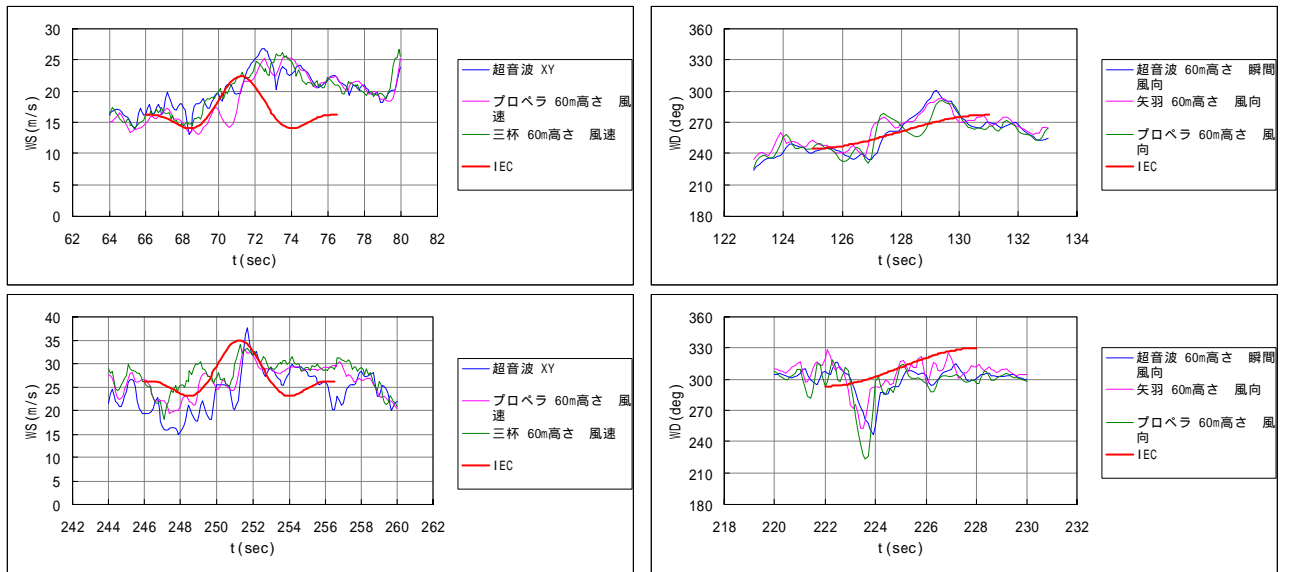
ここでは、一例として、本事業の観測対象の A 地点における風の実測結果（プロペラ風速計の出力）と上記の風モデルとを、風向及び風速の変動幅についてその大小の観点から比較した。

まず、A 地点の強風記録より短時間（数秒～十数秒）内で、風速もしくは風向の急激な変化がみられる例を抽出し、IEC 61400-1 Ed.3 (2005)が定める EOG、EDC と比較した結果を**図 7.13**に示す。図中の IEC 規格のラインはクラス IA が想定している EOG もしくは EDC の変動波形であり、この例のように規格を超える急激な変動が生じていることは必ずしも珍しくない。

このような風速あるいは風向の急激な変動がどのように生じているかを系統的に把握するため、一つの方法として、一定時間内（EOG や EDC の生じる時間長さを考慮し 5 秒とした）の該当値の最大増加量あるいは最小減少量を採用した。これは他の研究でも変動波形の指標（風速についてはアップガスト、ダウンガストと称される）として提案されているものである（**図 7.14**）。



これらは、いずれも風速及び風向の変化幅を、統計量から類推するものであり、これらの式の妥当性に関して、風および荷重に対する検証が一つの着目点になる。



風速の変化(EOG との比較)

風向の変化(EDC との比較)

図 7.13 風速あるいは風向の急激な変化 (A 地点の例)

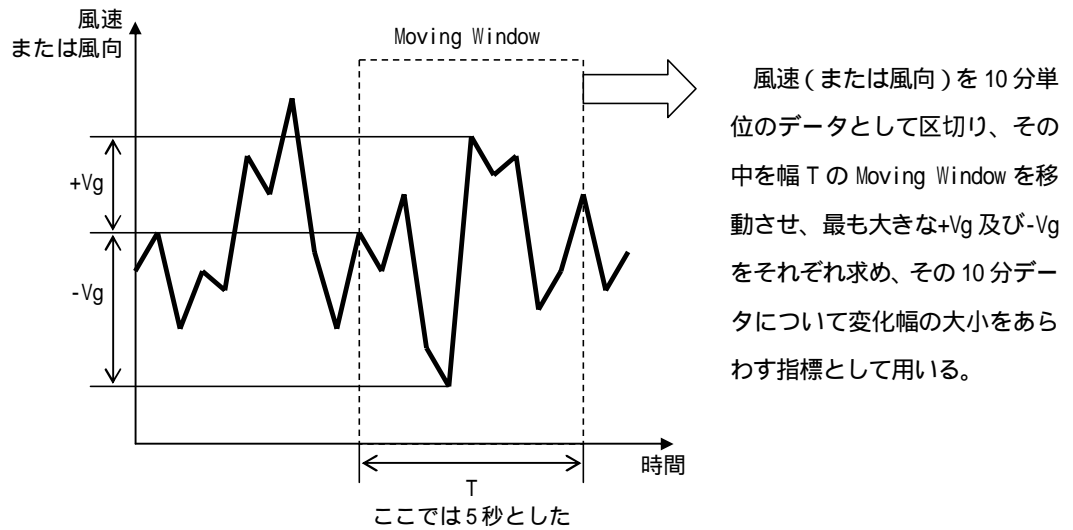


図 7.14 風速あるいは風向の変化幅の指標の定義

次に、上記の風速あるいは風向の変化幅について、統計的な変動の指標である乱流強度との相関をみた結果を図7.15、図7.16に示す。

縦軸に示す変動幅の IEC 比は、IEC クラス A が規定する EOG、EDC の想定する変動幅に対する相対的な大きさを示す。

横軸に示す乱流強度の IEC 比は、IEC クラス A が規定する乱流強度の想定値に対する相対的な大きさを示す。

IEC 61400-1 Ed. 3 (2005) で想定される風速と風向の変動幅は、乱流強度に比例する形で与えられ、絶対値は乱流強度の特性値で決めることとしている。一方、乱流強度にはバラツキが見られるが、このバラツキの効果は特性値を 90% タイル値として定義して NTM (Normal Turbulence Model) なるケースとし、さらに別に ETM (Extreme Turbulence Model) と呼ばれる乱流強度が特大 (特性値の 1.5~2 倍程度) とするケースを別に想定することで対処している。

本事業で観測された風速と風向の変動幅を乱流強度の関係からみると、以下のことがいえる。

- a) 風速あるいは風向の変動幅は、乱流強度とほぼ比例する関係にある。
- b) ただし、その変動幅の絶対値は IEC が想定する関係よりは 1.5 倍程度大きめである。
- c) 乱流強度にばらつきがあるため、特性値 (NTM で想定した横軸 1.0) よりも大きな乱流強度が作用し、そのときの変動幅は大きくなる。

先に図7.13 でみられたような大きな風速あるいは風向の変動は、上記の b) 及び c) が理由で生じているものである。特に c) からすると、IEC 61400-1 Ed. 3 (2005) の EOG や EDC で定める変動幅は必ずしもその極値をカバーするものではないものと考えられる。

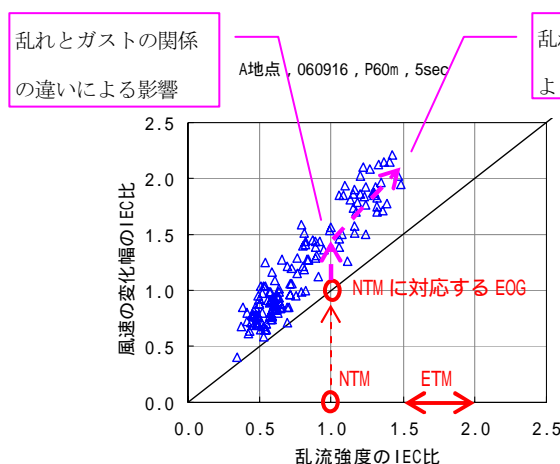


図7.15 風速変化幅と乱流強度の関係

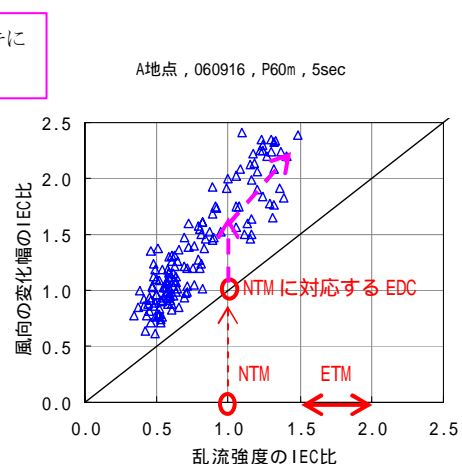


図7.16 風向変化幅と乱流強度の関係

## 7.2.2 風車の運転モードに応じたリスク

風車の被害を生じる場合、正常な運転モードにない場合が少なくない。

風車の国際規格に基づき設計する場合に想定されていない状態が発生すると、想定外の荷重を受け大きなリスクを伴う場合がある。

よって事業者は、風車の運転開始後において想定外の事態が生じないように監視を行うとともに、メンテナンス要員の教育などに細心の管理を行うこと。

風車の設計において想定される条件は、表7.1に整理されているが、言い換えればここに想定されていない状態は設計では考慮されていないといえるため、ひとたび発生すると大きなリスクを伴う場合がある。表7.1で想定されている主な運転モードの内容を下の(1)～(4)に示す。

### (1) 発電時の故障(DLC 2. x)

発電中に制御や保護装置の故障が生じ、オーバースピードに至るような状況を想定する。考慮する風速としては、カットアウト風速以下である。

### (2) 緊急停止(DLC 5. x)

緊急停止による荷重の増加を見込んで、荷重算定を行う。考慮する風速としては、カットアウト風速以下である。

### (3) 故障による休止(DLC 7. x)

何らかの故障によって、風車の運転を休止している状況。再現期間1年の風速まで考慮する。

### (4) 輸送、メンテナンス(DLC8. x)

建設中の輸送や、メンテナンスの為に休止している状況では、再現期間1年の風速まで考慮する。

これらの想定する状況に対して、種々の故障状態における風車の姿勢（ピッチ角、風向偏差）あるいは回転数（周速比）が、正常に制御されないというリスクを事前に評価することが重要である。

これらを調査するために、風洞実験により、風車の形態と運転状態による風荷重の基本的な特性を調べた結果を示す。

図7.17は、暴風時に風車を受ける荷重を風洞実験の結果から示したものであるが、風車の風向偏差と翼のピッチ角により荷重は大幅に変化している。すなわち、ピッチ制御風車及びストール制御風車では、それぞれ荷重が低減するような風向偏差は以下のように異なる。

- ・ ピッチ制御風車では、暴風時に翼をフェザリング状態とする。このとき、ロータが風上を向く状態（風向偏差 0 度）もしくは風下を向く状態（180 度）で、風車に作用する荷重が低減する。
- ・ ストール制御風車では、翼はファイン状態に固定されている。このとき、ロータが風直角方向を向く状態（風向偏差 90 度、270 度）で、風車に作用する荷重が低減する。ただし、ピッチ制御風車に比べればその値は大きい。

これらは何れも、ヨーの制御が停電などで停止した場合には、荷重が増大するリスクを示している。また、ピッチ制御機においてカットアウト風速付近でピッチ角がフェザリングからファインに切り替わると、スラスト力方向の荷重が増大することを示し、これらの動作によるリスクを認識する必要がある。

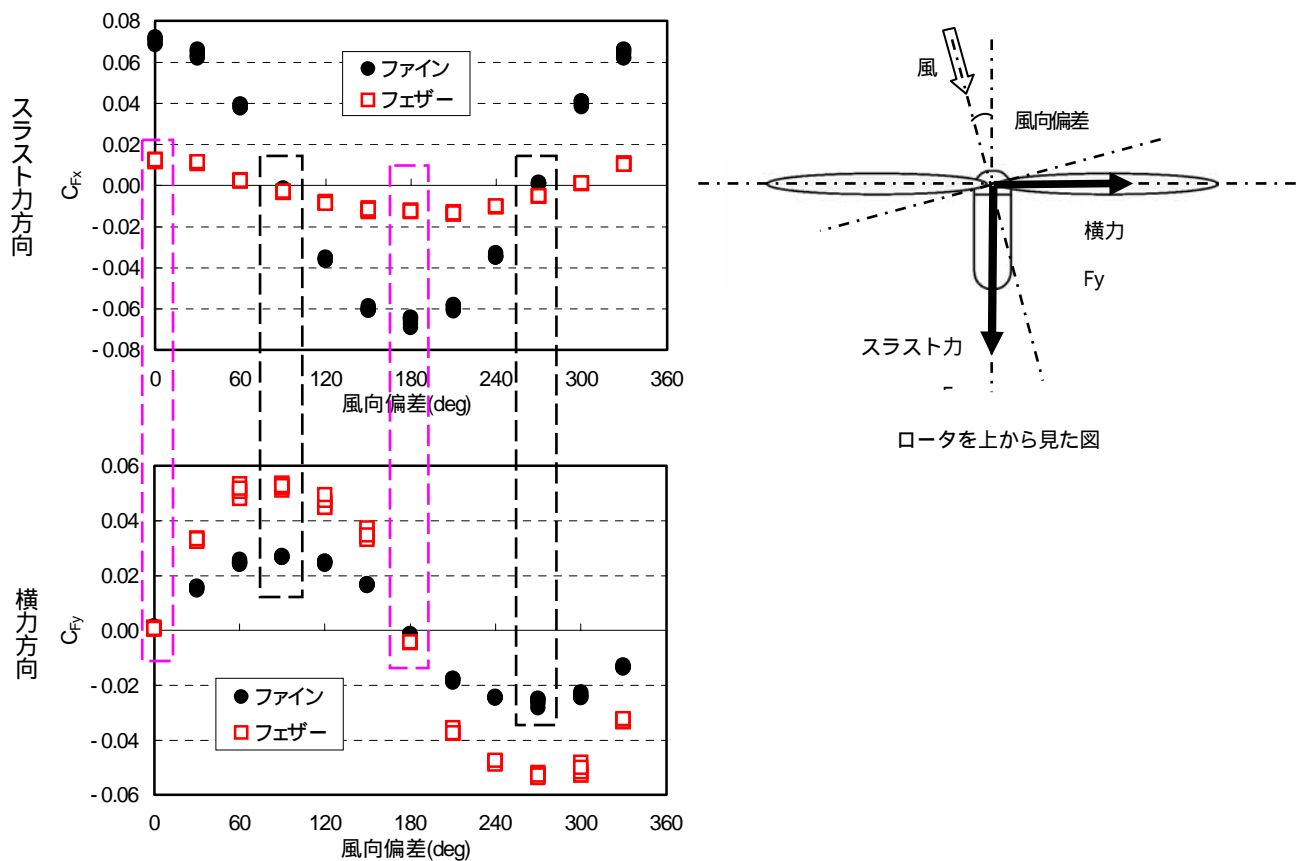


図 7.17 暴風時における風車の荷重の作用状況（風洞実験によるパラメータスタディ結果）

また、図 7. 1 8 は発電状態の荷重であるが、定格風速を上回る際には風力係数が大幅に低下している傾向が認められている。これは、制御あるいは安全装置の故障により、カットアウト風速付近でロータ回転数やピッチ角が正常に機能しなかった場合、スラスト方向の風力係数は急激に増大するリスクを伴うことを示している。

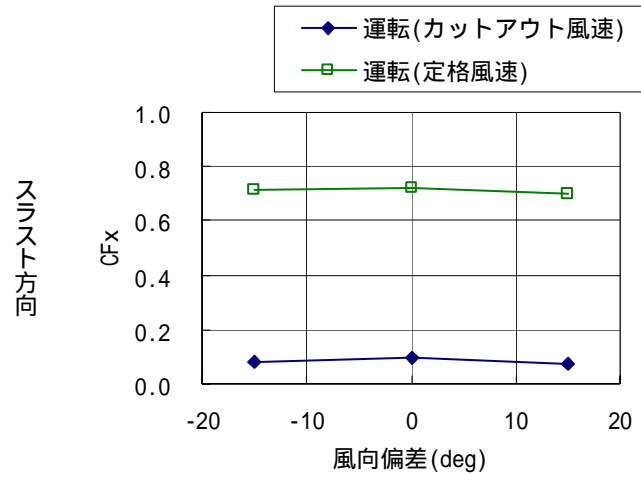
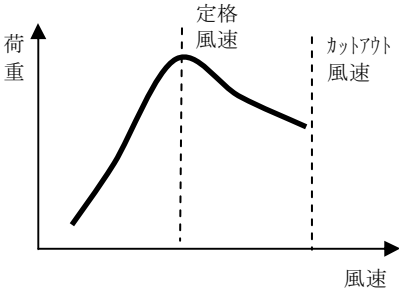
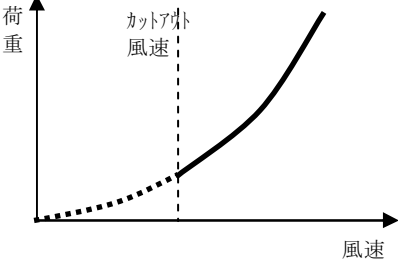
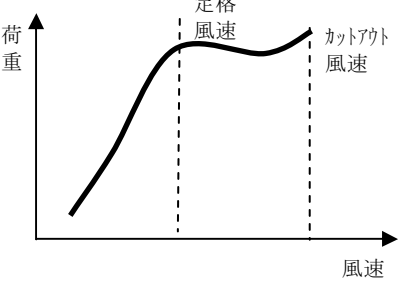
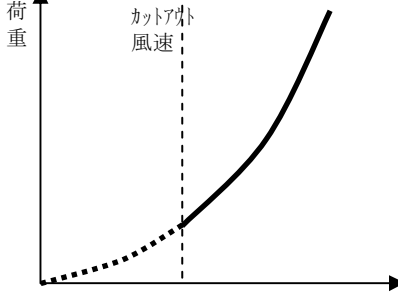


図 7. 1 8 発電時における風車の荷重の作用状況 (風洞実験によるパラメータスタディ結果)

以上の結果を模式的にまとめると、表7.2のようになる。

表7.2 風車の形態・運転状態と風荷重

風車の種類	運転時	暴風時
<p>ピッチ制御風車</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>翼ピッチ角はファイン状態</li> <li>ヨー角はロータが風に正対する状態</li> <li>風力係数は風速とともに変化するが、定格風速以上では一般に低下する</li> <li>平均風荷重は定格風速付近までは増加するが、その後は減少に転じ、定格風速付近で最大となるが、最大風荷重は定格風速以後も増大する（図7.19）</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>翼ピッチ角はフェザリング状態</li> <li>ヨー角はロータが風に正対する状態（風下に向けるケースもあり）</li> <li>停電時等、ヨー角が制御できない可能性も有している</li> <li>風荷重はおおむね風速の二乗で増加</li> </ul> 
<p>ストール制御風車</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>翼ピッチ角はファイン状態</li> <li>ヨー角はロータが風に正対する状態</li> <li>定格風速以上の風力係数は、ピッチ制御風車ほどの減少はしない</li> <li>風荷重は定格風速付近までは増加するが、その後も漸増し、カットアウト風速付近で最大となる</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>翼ピッチ角はファイン状態</li> <li>ヨー角はロータが風に直交する方向を向いた状態（ロータ面が風に平行）</li> <li>停電時等、ヨー角が制御できない可能性も有している</li> <li>風荷重はおおむね風速の二乗で増加</li> </ul> 

※上記は一般的な内容を示し、個別の風車はこれにあてはまらない特性を有している場合がある。

### 7.3 風車に作用する風荷重とリスク

事業者は、以下の場合に、風車に作用する風荷重に対するリスクの評価を行う必要がある。

#### (1) 風の特徴

現地において予測された風のパラメータが、規格でのパラメータを超える場合には、荷重に基づくリスク判断を行う必要がある。これは、風車の設計データに基づく詳細検討が必要であり、その結果に基づく判断は事業者が行う必要がある。

#### (2) 風車の運転状態

風車に作用する風荷重のリスクに関しては、一般の構造物とは異なり、風車の姿勢と運転状態によって荷重が大きく左右される。このことは、前節にあるように風特性が規格の範囲内であっても、翼のピッチ角、風向偏差などが想定する状態と異なる状況が発生すると、荷重の増大を招き、風車の甚大な損傷に繋がる場合もある。よって、故障による運転休止状態が長期にわたる場合や、緊急でメンテナンス作業時を必要とする場合には細心の注意が必要である。

上記の場合に、以下の項目に関してリスクを判断する。

- ① 終局荷重：暴風時などに生じる単発的な最大荷重
- ② 疲労荷重：繰り返し荷重
- ③ 荷重安全係数：荷重のバラツキを考慮した安全係数

なお、荷重を算定するにあたり、用いる以下の諸量に関しては、適切に設定するものとする。

- ・ 空気密度：気圧、気温によって求まる密度
- ・ 風力係数：停電などでヨー制御が不能になった場合等を想定して、考慮すべき風向・風車姿勢から求まる風力係数。

一般の構造物では、風荷重は風速の二乗に比例して大きくなり、設計上考慮すべき最大風速時に風荷重も最大となる。このとき、風力係数は、構造物の形状により定まる定数であり、風向のみに依存する。

一方、風車においては、風向が一定でも風に対する姿勢（ヨー角やピッチ角）及び運転状態（ロータ回転数）が変化し、これに応じて風力係数そのものも変化する。従って、風荷重が最大となるのは最大風速時に限らないことになる。さらに、ヨー角の変化により、風向によらず風力係数が最大となる可能性が常に存在することになる。

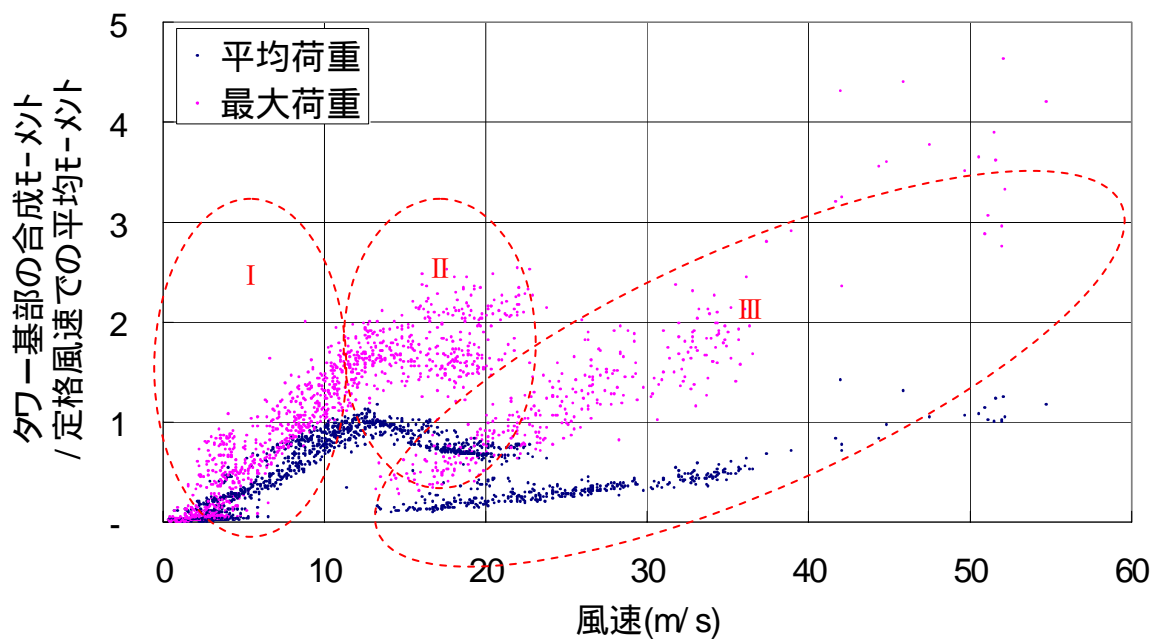
風車に作用する風から荷重を求める方法としては、大別して以下に示す方法が考えられる。

- ① 等価静的アプローチ
- ② 時刻歴の非定常アプローチ

風車の場合には、ピッチ角、ヨー角など種々の制御を伴う機械であるために、実設計段階では

後者の非定常アプローチとなる。しかしながら、この方法はメーカー以外では実施することができないので、ここでは前者の近似的な方法を述べるものとする。

たとえば、**図7.19**は本事業において計測を実施したA地点～D地点の4種類の風車タワー基部における（合成）曲げモーメント荷重の時間平均値及び最大値を、定格風速でのタワー基部モーメントで正規化した値を風速に対してプロットした例である。本図からわかるように、それらの風車規模はそれぞれ異なり、定格出力が最大3倍近くも異なるが、ほぼ類似したプロットとなる。一方、最大値のバラツキは、各地の乱流強度や風車の動特性の相違が原因と考えられる。



**図7.19** 風車タワー基部における荷重の実測結果例（風車A～D）

本図から、荷重の風速に対する依存性は、以下の3つの領域に分類される。

領域Ⅰ：定格風速以下の領域で、ほぼ風速の2乗に比例して荷重が増大する。

領域Ⅱ：定格風速～カットアウト風速の領域で、ピッチ角及び周速比により、平均風荷重は風速の増大に伴い低減するが、最大風荷重は定格風速以後も増大することに注意を要する。

領域Ⅲ：カットアウト風速以上の領域で、ピッチ角をフェザリングにして遊転状態とし、更に荷重を低減する。

よって、**7.2節**に示したように、何らかの故障でピッチ角、ロータ回転数が正常に制御できない場合には、作用する荷重は大幅に増大することとなる。

**表7.3**には、本事業の風車観測における各地点での最大の風速が得られた状態での、各種データを時系列で示す。



表 7.3 風車に作用する荷重 (各地点での最大風速時における時系列) (1)

項目	A 地点 (A-①)	B 地点 (B-①)	C 地点 (C-①)	D 地点 (D-②)
MET 観測 (ハブ高さ) <ul style="list-style-type: none"> <li>3 杯式風速計 (平均風速、最大風速)</li> <li>ベーン式風向計 (平均風向)</li> </ul>				
MET 観測 (ハブ高さ) <ul style="list-style-type: none"> <li>超音波風速計 (3成分乱流強度)</li> </ul>				
ナセル観測 <ul style="list-style-type: none"> <li>最大加速度 (風方向、風直角方向)</li> <li>ナセル風速</li> </ul>				
タワー基部モーメント <ul style="list-style-type: none"> <li>平均</li> <li>最大</li> </ul>				
備考	台風による停電発生			

表 7.3 風車に作用する荷重 (各地点での最大風速時における時系列) (2)

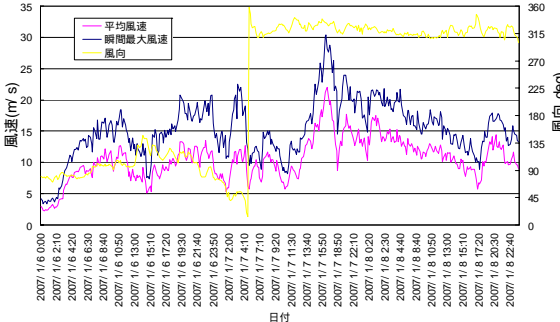
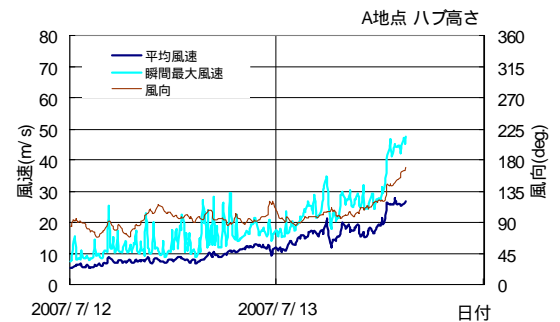
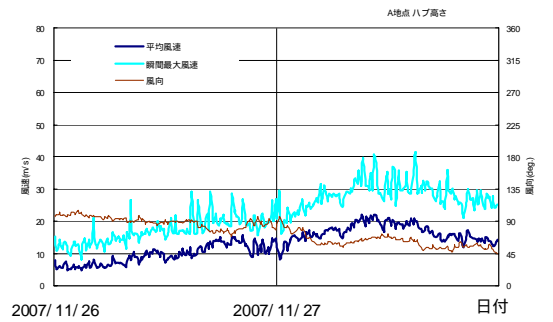
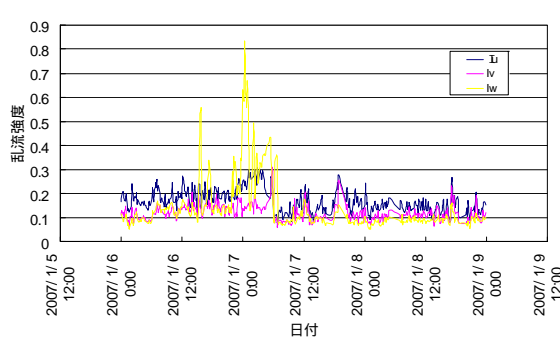
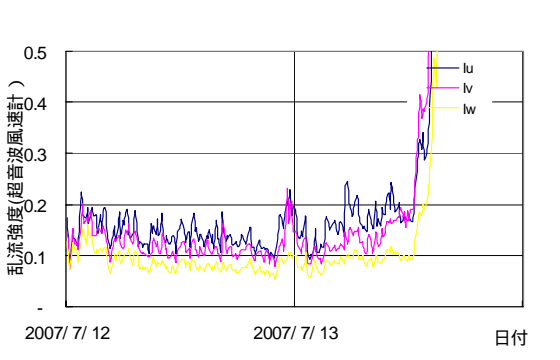
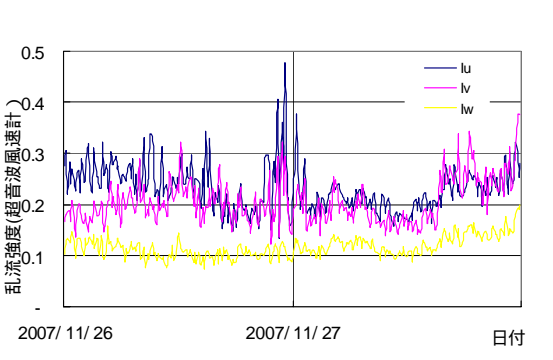
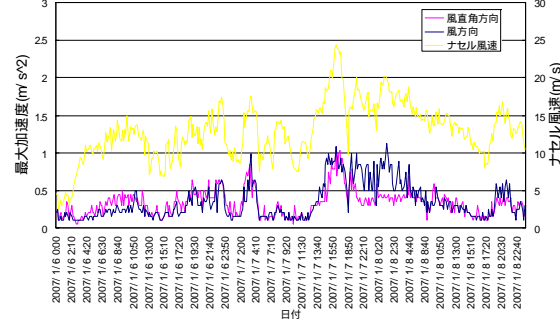
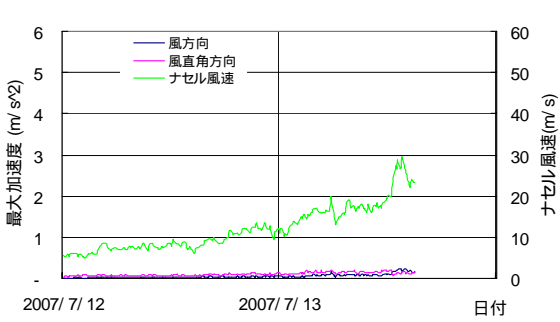
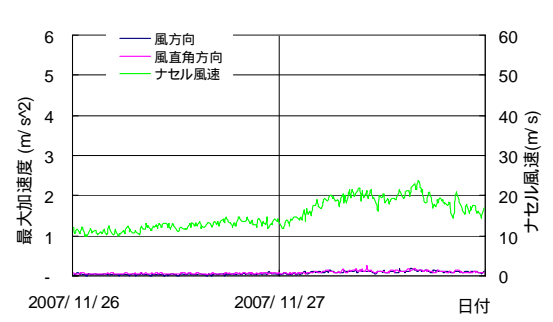
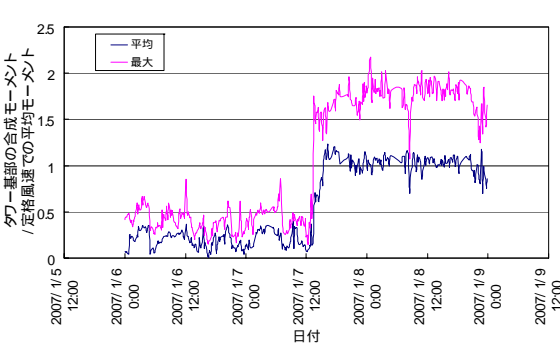
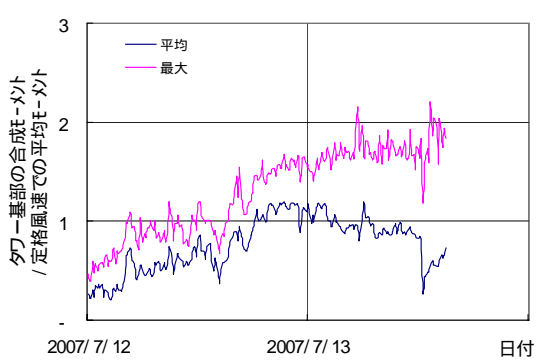
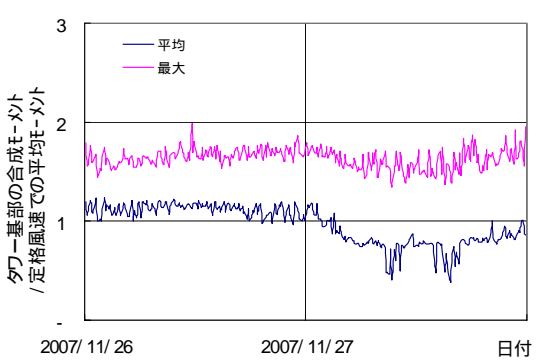
項目	E地点 (E-④)	F地点 (F-①)	G地点 (G-③)
MET 観測 (ハブ高さ) <ul style="list-style-type: none"> <li>3 杯式風速計 (平均風速、最大風速)</li> <li>ベーン式風向計 (平均風向)</li> </ul>			
MET 観測 (ハブ高さ) <ul style="list-style-type: none"> <li>超音波風速計 (3成分乱流強度)</li> </ul>			
ナセル観測 <ul style="list-style-type: none"> <li>最大加速度 (風方向、風直角方向)</li> <li>ナセル風速</li> </ul>			
タワー基部モーメント <ul style="list-style-type: none"> <li>平均</li> <li>最大</li> </ul>			
備考			

図7.20には、D地点(D-②)においてカットアウト風速付近で、発電を停止するためにピッチ角をファイン状態からフェザリング状態に変化させた状態を含んでおり、その前後におけるナセル上の加速度方向の変化を示している。

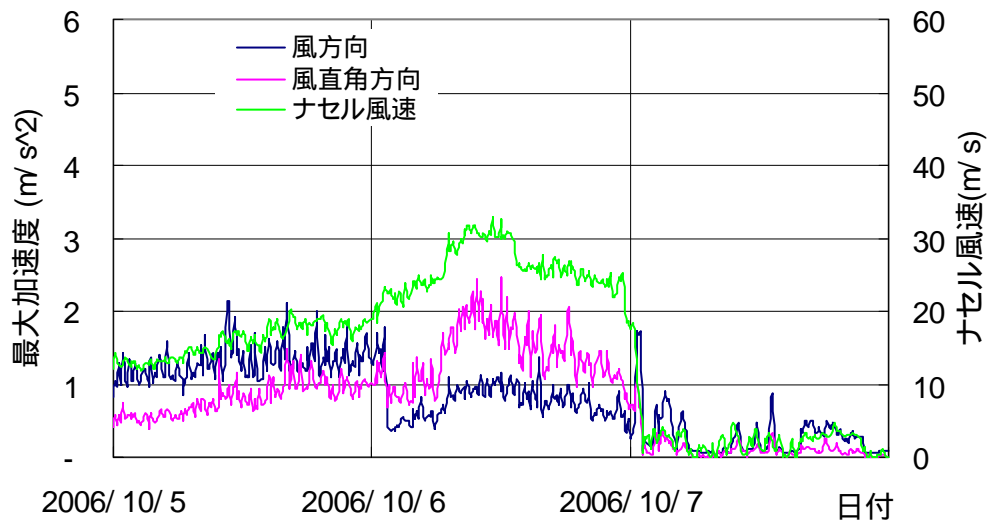


図7.20 風速に応じた加速度の方向性の変化 (風車D)

すなわち、発電時では風方向の加速度（青色）が卓越しているが、風速（緑色）が上昇してカットアウト状態に推移するためピッチ角をフェザリングにした場合に、風直角方向の加速度（ピンク色）が卓越することが判る。

特に、暴風時に作用する風直角方向の風荷重に対しては、支配的なのは水平方向の風速変動標準偏差 ( $\sigma_2$ ) であり、局所的な地形の影響などで水平方向と主流方向の乱流強度比が大きくなった場合には、注意が必要である。

### 7.3.1 終局荷重

表7.1における解析種類の欄に「U」が記入してある DLC では、終局荷重としての評価が必要である。ロータに回転過速度などが発生した場合の損傷は終局荷重によるものが多い。これらを厳密に求めるには、風車の詳細な諸元、制御パラメータなどが必要となり、メーカーから提示された荷重を用いて、発電事業者が評価する。

また暴風時の概略の数値は、事業者においても求めることができ、リスクの評価を行うこととする。

- (1) 暴風時風荷重: フェザリング状態で待機している場合の荷重は、風直角方向が卓越し、主流直角方向の風向変動 $\sigma_2$ が重要である。また、風車に作用する荷重の変動分は、風の変動動圧 ( $\rho U \sigma$ ) と高い相関がある。
- (2) 風向・風速の急変に伴う荷重変動: 現在の規格で想定されている風向・風速の変動は上記の実態を加味して、観測される極値ではなく、低めに設定されていると考えるのが適当である。

これらの DLC において、支配的な DLC 及びその順序は、風車によって異なる可能性があるが、ここでは、あくまで一般論として近似的な判断手法を述べる。

代表的な DLC として 6.1 節の再現期間 50 年に相当する暴風時があり、この荷重値は以下のパラメータに依存して変化する。

- ・ 基準風速 ( $V_{ref}$ )
- ・ 乱流強度 ( $I_{ref}$ )

#### (1) 暴風時の風荷重

図7.21には、本事業で計測を実施した、ナセルでの平均風速とタワー基部の合成モーメントを定格風速での平均モーメントで除し正規化した値の関係の事例を示したもので、遊転状態に限定した場合の実測値をプロットしてある。この時の最大荷重と平均荷重の比率は4程度を示し、平均風速の増大に伴い、荷重もべき乗に増大する傾向が判る。

また、図中には土木学会指針を用いて算定した直線(図中で JSCE と記載)もあわせて示しており、実測値の最大値と比較的良好な対応を示している。

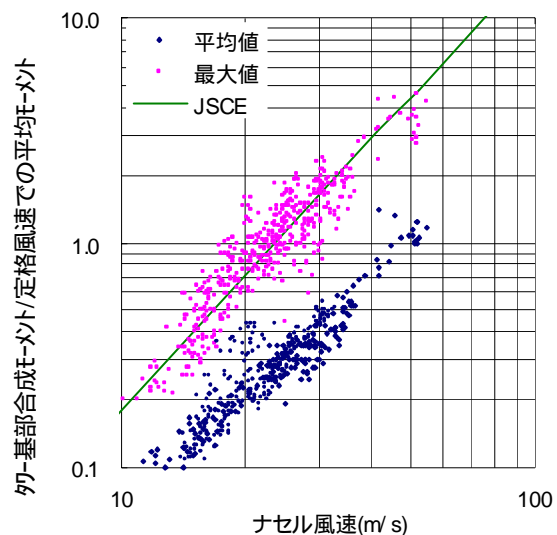


図7.21 遊転時のタワー基部モーメント荷重

また、観測された遊転時の風車は、ピッチ角がフェザリング状態で、風向角が正面からの風によるものが多数を占める。このときのモーメント方向は、風と直角方向が卓越するために、空気密度： $\rho$ 、平均風速： $U$  及び主流直角方向の風速変動の標準偏差： $\sigma_2$ の積と、無次元化した（合成）タワー基部モーメントの変動量との関係の事例を図7.22に示す。

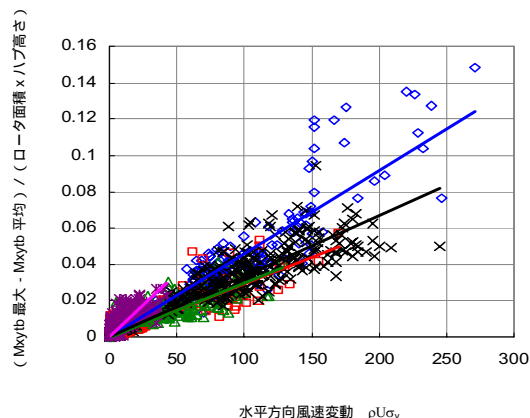


図7.22 タワー基部モーメントと風速変動の関係

上記関係は、風車によって若干のばらつきはあるものの、概ね直線的な関係にあり、荷重は乱流強度と平均風速の二乗の積に依存するとして評価することもできる。なお、本図におけるバラツキを詳細に評価するには、時刻歴応答解析を行うなど詳細な解析が必要となる。

## (2) 風速・風向の急変に伴う荷重

風車の荷重においては、前述の表7.1に示されるように、暴風時以外にも様々な風モデルや他の条件と組み合わせることを国際規格では想定している。その中で外的に与えられる特徴的な条件が、7.2.1項(2)に示したガストモデルと呼ばれる風モデルである。

実際の風車設計においては、風車の荷重計算は風の時間的な変化だけでなく、風車のアクティブな応答（例えば、制御に基づくピッチ角の変化）を含めて実施される。ここでは、簡単のため、制御は無視した条件で、急激な風向変化（EDC に対応）を想定し、風洞実験により計測された荷重を荷重計算用ソフトウェアで求められる値と比較した結果を図7.23に示す。

この図からわかるように、過渡的な波形には多少の違いがあるものの、時間的に生じる荷重の変化とその最大値の把握という観点からは、両者は比較的良好に一致しており、荷重計算用ソフトウェアはこのような過渡的な応答に対しても実用に耐えらると思える。

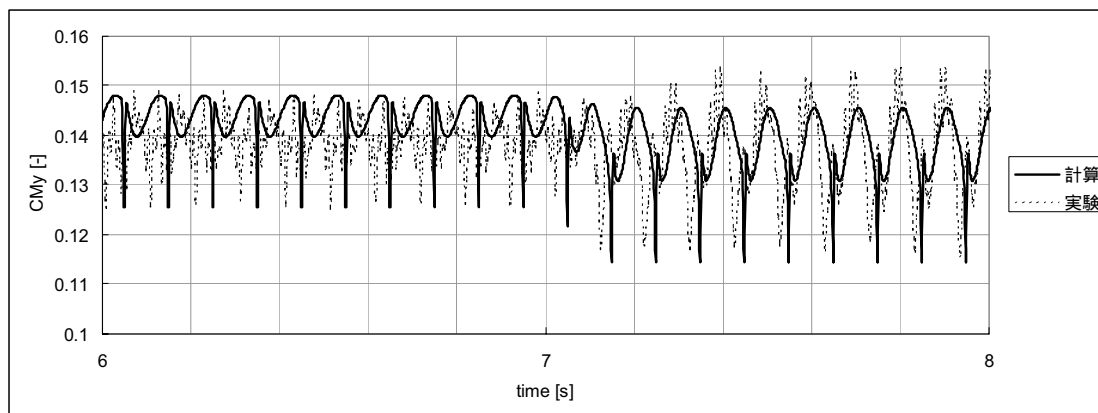


図7.23 急激な風向変動に対する荷重の実験値と計算値

(3) 運転状態と終局荷重

また、風車の終局荷重は、**図7.19**のように運転状態によっても作用状況が異なることが予想される。ここでは、風車の運転状態を**図7.19**の3種の領域に分類し、それぞれの状態で荷重（タワー基部において発生するモーメント）から見た突風率（最大値の平均値に対する比）を求めた。それらの結果を**図7.24**に示す。横軸は風の特徴を表すパラメータとし、**図7.15**と**図7.16**から、風速や風向の変化幅が乱流強度と強い相関関係にあることを考慮し、乱流強度（ただし、IEC 61400-1 Ed.3 (2005)のClass Aに対する相対値）を横軸とした。同図からは、通常発電時は乱流強度とともにガスト応答倍率が増加する傾向がみられるのに対し、高風速停止時には応答倍率自体が大幅に増加し、最大荷重の発生が運転状態に大きく依存していることが分かる。これは、通常発電時には風方向荷重が支配的であるのに対し、高風速停止時には風車がフェザリング状態にあって、風直角方向の荷重が支配的になることによるものと考えられる。

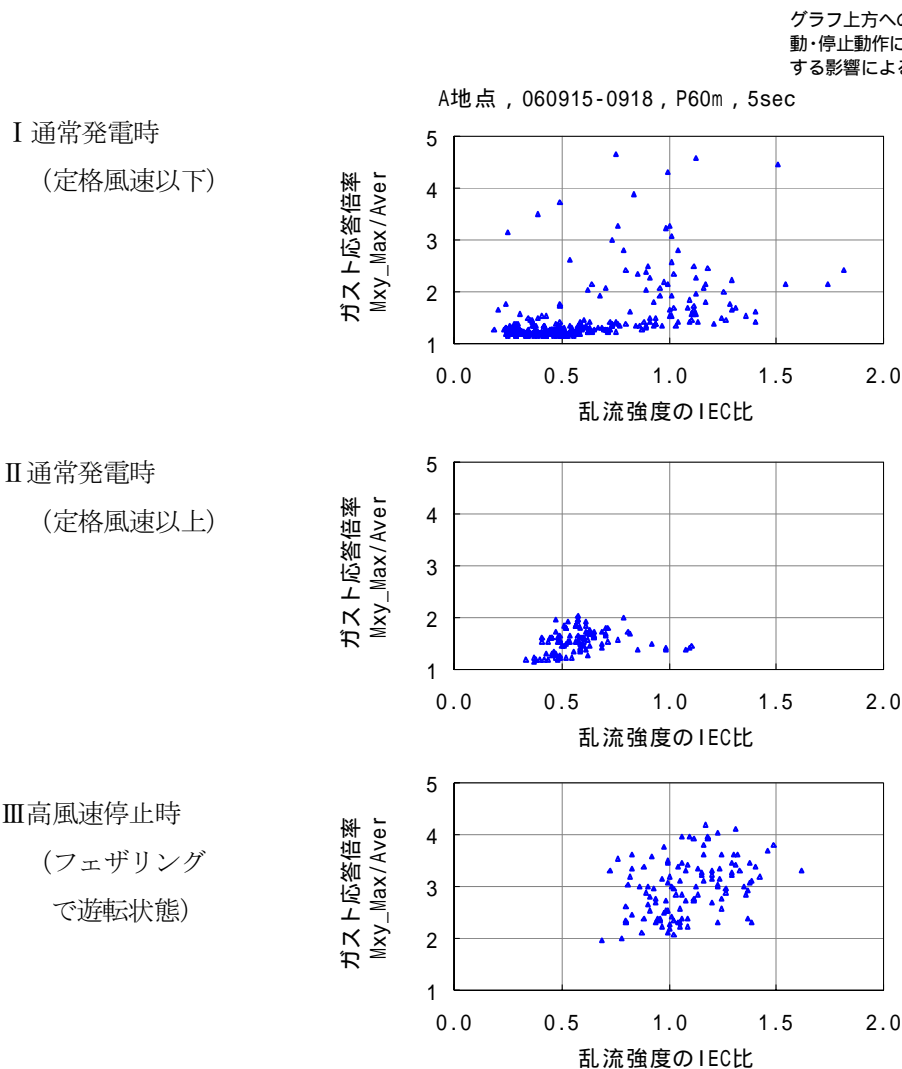


図7.24 荷重でみたガスト応答倍率と乱流強度の関係

### 7.3.2 疲労荷重

表 7.1 における解析種類の欄で「F」の標記がある DLC に関しては、疲労荷重として評価する必要がある。

具体的には、風車設置地点周辺の地形によって、風向により作用する風の乱流強度が大きい場合や、近接する風車の背後に入って大きな乱れを含む風が作用する場合に関しては、風車の運転を停止して疲労荷重を低減する方法を取ることができる。

これらの詳細に関しては、風力発電事業者はメーカーと連携の下、リスク回避を行うこととするが、本節においては事業者も可能と考えられる風速の頻度分布と、乱流強度の特性のみによる疲労荷重の簡易推定手法を示した。

風車を導入する際には、設置機種の設置場所への適用性を検討する必要がある。設置場所への適用性の検討とは、当該設置場所の風況から予想される風荷重が、設置機種の設計荷重を超過しないことを確認するものである。荷重の種類として、台風等の強風による終局荷重 (Extreme load) と風の変動に伴う疲労荷重 (Fatigue load) があることは既に述べた。本項では、疲労荷重に関する概説と観測結果から類推される当該設置場所における疲労荷重の簡易推定手法について記述する。

疲労荷重に作用する風況の影響因子は、代表的なものとして以下のものが挙げられる。

- ・ 平均風速 (あるいは風速頻度分布)
- ・ 乱流強度の分布
- ・ 空気密度
- ・ 吹上角
- ・ ウインドシア

風車が複数存在するサイト (ウインドファーム) においては、さらに風車の相互干渉 (ウェイク) による疲労荷重の増加を別途考慮する必要がある。

6章に示す設置場所への適用性検討の第一段階では、設置場所の風況パラメータと設計風況とを比較検討する。設置場所の風況が上述の全ての風況パラメータを超過しないことが確認されれば、当該機種の適用は可能であると判断される。しかしながら、6章で示した風況の実測結果のように、一部のパラメータについては設置場所の風況が設計風況を下回るものの、他のパラメータでは設置場所の風況が設計風況を超過するようなケースがある。例えば、設置場所の平均風速が設計平均風速より低い、乱れ度が設計乱れ度より大きい場合などであり、このようなケースは日本国内で多く見られる。この場合、風況パラメータの比較のみによる設置場所への適用性の



判断は困難であり、別の評価手法が必要である。

例えば、ドイツの認証機関 Germanischer Lloyd によるサイト認証 (Site certification) のように、上記ケースにおけるサイト適用性の評価手法として、設置場所の風況パラメータを入力値とする風車の時刻歴応答計算を行い、得られた設置場所における疲労荷重を設計荷重と比較することで適用性を判断する手法がある。しかしながら、同手法は当該機種の数値空力弾性モデルが必要であることから、数値モデルを所有するメーカーのみが実施可能であり、事業者による検討は困難である。したがって、風況比較のみで結論できなかった場合において設置場所への適用性を事業者で判断可能とするためには、風況データから算出可能な疲労荷重に相当する新たな指標を導入する必要がある。

そこで、本節では風況および荷重の実測データの分析結果をもとに、その導入可能性を検討する簡易手法を検討する。

設置場所における疲労荷重の設計荷重に対する増減を設置場所の風況パラメータから一次的に推定する簡易手法を検討する。この手法は、前節に示したように、疲労荷重が風の変動動圧 ( $\rho U \sigma$ ) と強い相関を有することを前提としている。

風速ビン  $i$  における単位時間当たりの疲労等価荷重を  $L_i$  とすると、風速頻度分布を考慮した年間の疲労等価荷重  $L_{eq}$  は一般的に式 (7.3.1) で表される。

$$L_{eq} = \sqrt[m]{\frac{\sum_i L_i^m h_i}{H}} \quad (7.3.1)$$

ここで、 $m$ : 材料特性の S-N 線図における傾き (金属材料: 4、複合材: 10 程度が一般的)

$i$ : 風速 bin を表す添え字

$L_i$ : 風速 bin  $i$  における変動荷重

$h_i$ : 年間出現時間 [h]

$H$ : 年間時間 (8766 [h])

である。

一方、単位時間当たり疲労等価荷重が風の変動動圧 ( $\rho U \sigma$ ) の  $\gamma$  乗に比例すると考えれば、年間の疲労等価荷重に相当する量  $LI$  (荷重指標: Load Index) は、以下の式 (7.3.2) で与えられる。

$$LI = \sqrt[m]{\frac{\sum_i (\rho U_i \sigma_{90,i})^m h_i}{H}} \quad (7.3.2)$$

ここで、 $\rho$ : 年平均空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]



$U_i$ : 風速 bin 中央風速 [m/s]

$\sigma_{90i}$ : 風速変動の標準偏差 90 パーセンタイル値 (IEC に合わせた) [m/s]

である。

この式より、IEC クラス II A などの風車設計風況に基づく荷重指標  $LI_{des}$  と、実測等によって得られる当該設置場所の風況パラメータに基づいた荷重指標  $LI_{site}$  を計算し、その比率  $LIR$  (*Load Index Ratio*) =  $LI_{site}/LI_{des}$  を求めることで、設置場所への適用性が概略把握される。概念的なフローを図 7.25 に示す。

ただし、以下の点に関しては、設計条件を超過する場合においては (例: べき指数が 0.2 を超える、吹上角が  $8^\circ$  を超える、風車干渉が大きい) 別途考慮が必要である。

- ・ 他のパラメータ (吹上角、ウインドシア) の影響は未考慮
- ・ 風車干渉による影響は未考慮

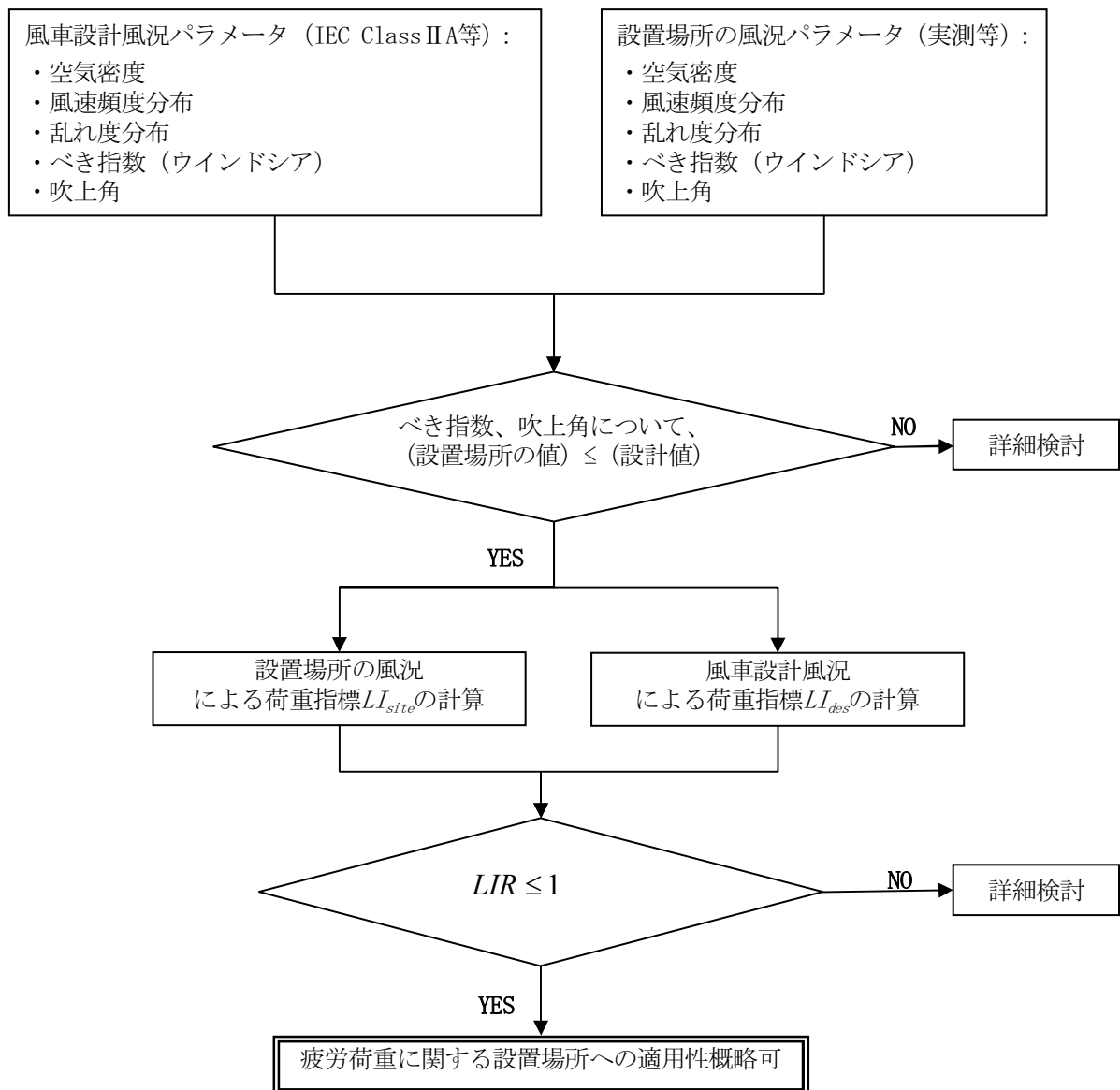


図 7.25 荷重指標による疲労に関するサイト適用性簡易評価のフローチャート（概略図）

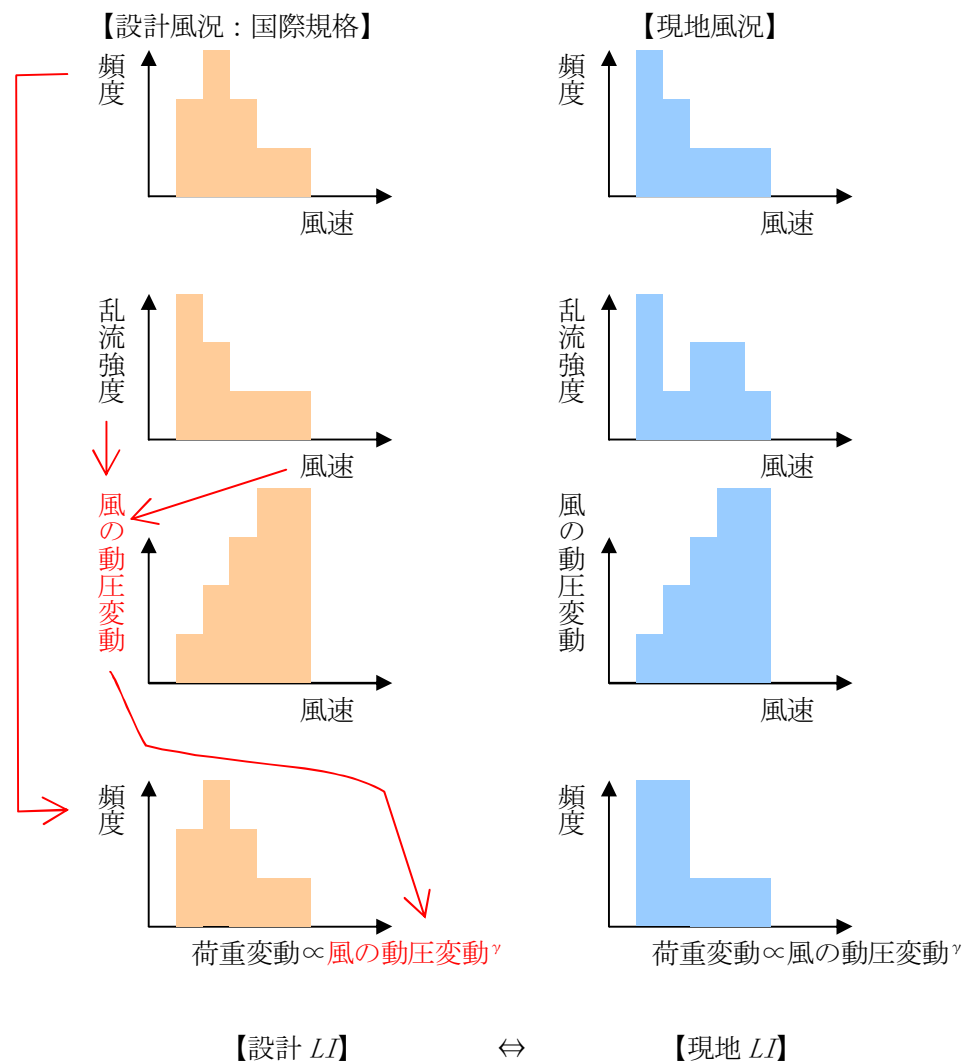


図 7.26 疲労荷重指標の算定手順

図 7.25 における LI (Load Index) での簡易判定の部分を図示したものが図 7.26 である。すなわち、候補となる風車の設計条件としての風況（設計風況）と、現地で予測される風況（現地風況）を対象に、以下の手順で LI を求めて、大小関係を比較する。

- (1) 乱流強度と平均風速の関係（2 段目）から、動圧変動と平均風速の関係（3 段目）を求める。
- (2) 平均風速の頻度分布（1 段目）と、上記動圧変動と平均風速の関係（3 段目）から、動圧変動と頻度分布の関係（4 段目）を求める。（ $\gamma$  が 1 でない場合には、動圧変動を  $\gamma$  乗して荷重の頻度分布に変換しておく。）
- (3) 上記を着目材料ごとの  $m$  を用いて、式 (7.3.2) により積分計算を行い、LI を求める。

この疲労荷重指標  $LI$  によれば、風車の設計風況に応じて、適用可能な設置場所の風況の範囲が概略把握できる。図 7.27 に  $\gamma=1$  を仮定し、IEC クラス IA に対する疲労荷重指標  $LI$  の比を示す。同図より、以下のことがわかる。

- ・ 設置場所の乱流強度が設計乱流強度より大きくても、設置場所の平均風速が設計平均風速より低ければ、当該風車が適用可能な場合がある。
- ・ 設置場所の平均風速が設計平均風速より高くても、設置場所の乱流強度が設計乱流強度より小さければ、当該風車が適用可能な場合がある。
- ・ 風車 A は風車 B より適用範囲が広いものの、設置場所への適用性は平均風速  $V_{ave}$  と乱流強度  $I_{ref}$  の組み合わせにより決まるので、風車 A の適用は過剰となる場合もある。例えば、設置場所の乱流強度がクラス A と等しい 0.16 である場合でも、設置場所の平均風速が風車設計平均風速より低ければ、必ずしもクラス A で設計された風車は必要ではなく、クラス B (クラス II B) で設計された風車 B が適用できる可能性がある。

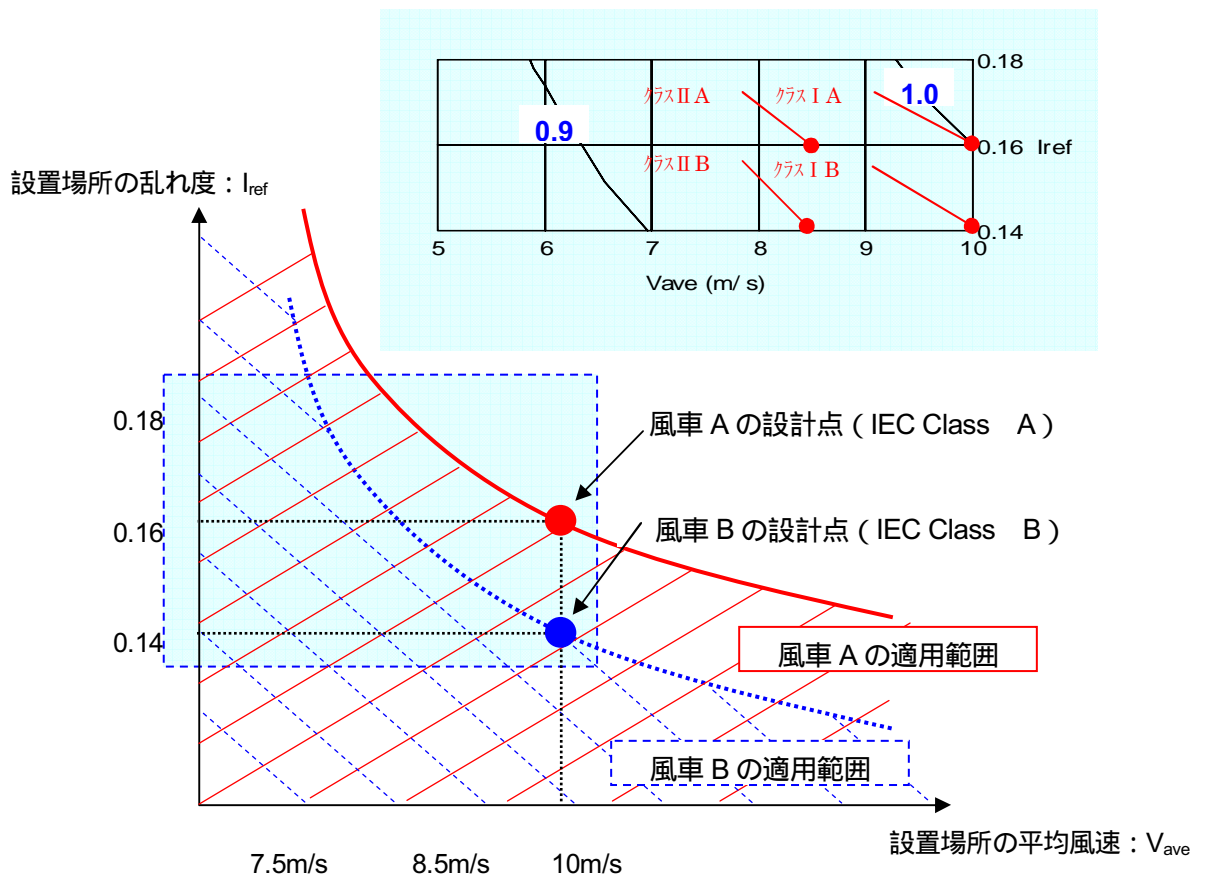


図 7.27  $\gamma=1$  の場合の、クラス IA を基準とした疲労荷重指標 ( $LI$ ) 比率

これまで設置された風力発電設備における計測結果や、本ガイドライン事業において実施された風力発電設備実機における観測、計測結果から以下の結果がもたらされている。

- ① 平均風速、乱流強度が高いほど疲労ダメージ等価荷重 (DEL:Damage Equivalent Load) は増加する。
- ② 吹き上げ角の増加により疲労ダメージ等価荷重は若干増加するが、影響は小さい。
- ③ 平均風速、乱流強度、ウインドシア、吹き上げ角を用いて疲労荷重ダメージ解析が可能。
- ④ 乱流強度が一定の時、平均風速を 7.5m/s から 8.5m/s にすると、等価疲労荷重が 8%、8.5m/s から 10m/s にすると等価疲労荷重は 12%増加する。
- ⑤ 平均風速が一定の時、乱流強度を 2%増加させた場合は、等価疲労荷重は約 10%増加する。

### 7.3.3 荷重の部分安全係数

現在の国際規格における風車の設計は、限界状態設計法に基づくものであり、荷重の不確からしさを評価するために、荷重に対する部分安全係数を用いている。

これに対して、国内の設計体系でよく用いられている許容応力度設計法では、荷重安全係数と強度安全係数を一つの安全係数として評価している。

風車のリスクを評価する際に、両者の設計体系に基づく安全係数の取り扱いには注意が必要であり、後述の7.5節や実測に基づく荷重安全係数の軽減などには十分留意することとする。

図7.19におけるデータを見ても、平均風速に対して荷重値はばらつきを有している。風車の国際規格においては、荷重安全係数が設定され、それに伴い設計が行われる。ただし、IECなどの規格では、風車により十分な実測データが存在する場合、この安全係数の低減も可能である旨の記載がある。採用している安全係数に関しては、事業者がメーカーに確認することが必要である。

図7.28に実測結果の荷重と設計に用いられる空力弾性コードによる応答計算結果の相関を示す。

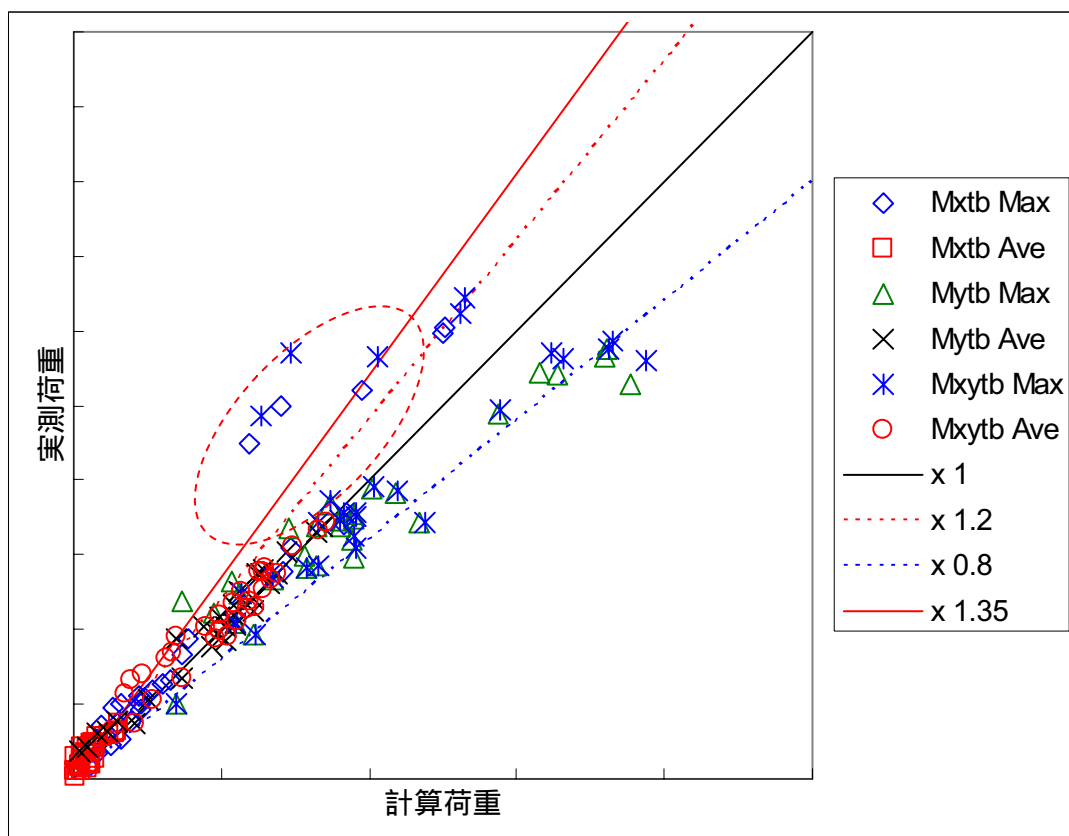


図7.28 風車実測荷重と計算結果の相関

図中点線で囲ったものは、実測荷重が計算荷重と比べて大きいですが、これは乱流強度の方向による比率を規格通りとしたものであり、現実の水平方向乱流強度を用いた計算では、その差は減少する。

## 7.4 強度に関わるリスク

現地において予測された荷重に対して、以下の観点に基づき強度算定を行うこととする。なお、具体的な算定は風車メーカーあるいは施工者に依頼することを推奨する。

- ①終局強度
- ②疲労強度
- ③強度安全係数

### (1) 初期状態の健全度

風車の風に起因したリスクを考える場合、風以外の要因（例えば落雷など）に起因した損傷の有無が重要なファクタである。また中古の翼を流用する場合など、過去の累積疲労を考慮する必要がある場合には注意を払う必要がある。

### (2) 終局強度

例えば、風車基礎の部分における鉄筋コンクリートの耐力に関する FEM 解析を実施するなど、終局強度に関する詳細検討が必要となる場合がある。また、海外の規格に基づく材料を国内で使用する場合には、必要に応じて確認の性能試験などを実施することとする。

### (3) 疲労強度

ボルト接合や溶接部分に生じやすく、特に施工段階での強度低下が想定される場合には、そのリスク管理が必要である。上記(2)と同様。

### (4) 強度安全係数

荷重と同様に IEC などの国際規格における設計体系と、我が国における適用法規の設計体系の相違により、安全係数の取り方には注意が必要である。特にダブルセーフティーや、部材の重要度に応じて安全係数を変えるなど、参考とすべき点が多い。

## 7.5 法規上の要件

国際規格に基づき認証を受けた風車を日本で設置する場合、建築基準法など適用を義務付けられる関係法規を満たす必要がある。

・現地において予測された風条件（極値風速、乱流強度、年平均風速）に基づき計算された荷重のもとで、構造物の状態が国内で許容されるレベルにあること。

ここで国際規格と比較する場合、日本国内で要求される設計法と比較した場合、設計体系が異なることから、メーカーの情報、技術協力が必要となる。

現在の建築基準法においては、風に対しては「まれに発生する荷重」のレベルを設定している。これらは、具体的には「許容応力度の範囲にある」に対応するものである。

風車に建築基準法を適用した場合の耐風設計手順は、以下の通りである。（図7.29）

- ① ハブ高さにおける50年再現期間に対応する風速期待値を求める。
- ② ハブ高さにおける乱流強度を求める。暴風時の風荷重を求める。
- ③ 暴風時に関しては短期扱いであるため、発生する応力は国土交通大臣が定める基準強度（H12 建告 2464）以下になるように設計を行う。（レベルI）

ここで、建築の骨組は、一般に高次の不静定構造物なため、その一箇所でも終局耐力を超過した（塑性ヒンジが形成された）としても、それが直ちに骨組の崩壊につながるわけではない。一方、風車のタワーは片持ち梁の様な不静定次数の低い構造であり、その一箇所でも終局耐力を超過（座屈）したことで、タワーの崩壊につながるため、両者の相違は大きいといえる。

建築基準法では、短期荷重に対する基準強度は、降伏に対応する応力に相当する。一方、風車の国際規格における、暴風時に相当するDLC 6.1での設計手順は、以下の通りである。

- ① ハブ高さにおける風速の50年再現期待値を求める。
- ② ハブ高さにおける乱流強度を求める。
- ③ 暴風時の風荷重は風車の動的効果を考慮した等価静的法により求める。

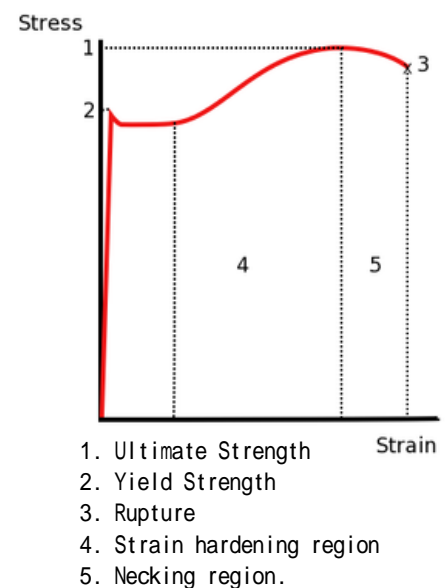


図7.29 代表的構造用鋼材の応力・ひずみ曲線

- ④ 暴風時の荷重に関しては短期荷重として扱い、構造物の強度は構造設計指針または FEM 解析により評価する。構造設計指針を用いる場合には全体安全率が評価式に含まれる。また FEM 解析により評価する際には想定する限界状態に対応した全体安全率を用いる。

上記の建築基準法と風車の国際規格である IEC 61400-1 とを比較した表を**表 7.4**に示す。

**表 7.4 風力発電設備支持物の構造設計の比較**

項目	建築基準法	IEC 61400-1	備考
設計法	性能設計法	限界状態設計法	
再現期間	50年相当	50年	
風荷重	等価静的法	時刻歴応答解析	
強度	評価式または FEM 解析	評価式または FEM 解析	
荷重安全係数	—	1.35 (正常) 1.1 (異常) 1.0 (疲労)	<b>表 7.1 参照</b>
強度安全係数	全体安全係数 (荷重と強度安全係数の両方)	1.2 (座屈)	



## 7.6 リスク軽減のための対応策

風車の運転開始後、風車の異常を検知してリスクを最低限に留めるには、以下の監視が有効である。

- ① 経年変化：主要部材の金属疲労や劣化など
- ② 部分損傷：異音発生など

また、リスクを低減するために実施可能な対策としては、以下の方策があるが、発電事業者の判断で採否を決定する。

- ③ 運転条件制限：軽微な損傷の場合の限定された範囲における稼働など

強風による被害のフォールトツリーの一例は、図7.30のように考えられる。

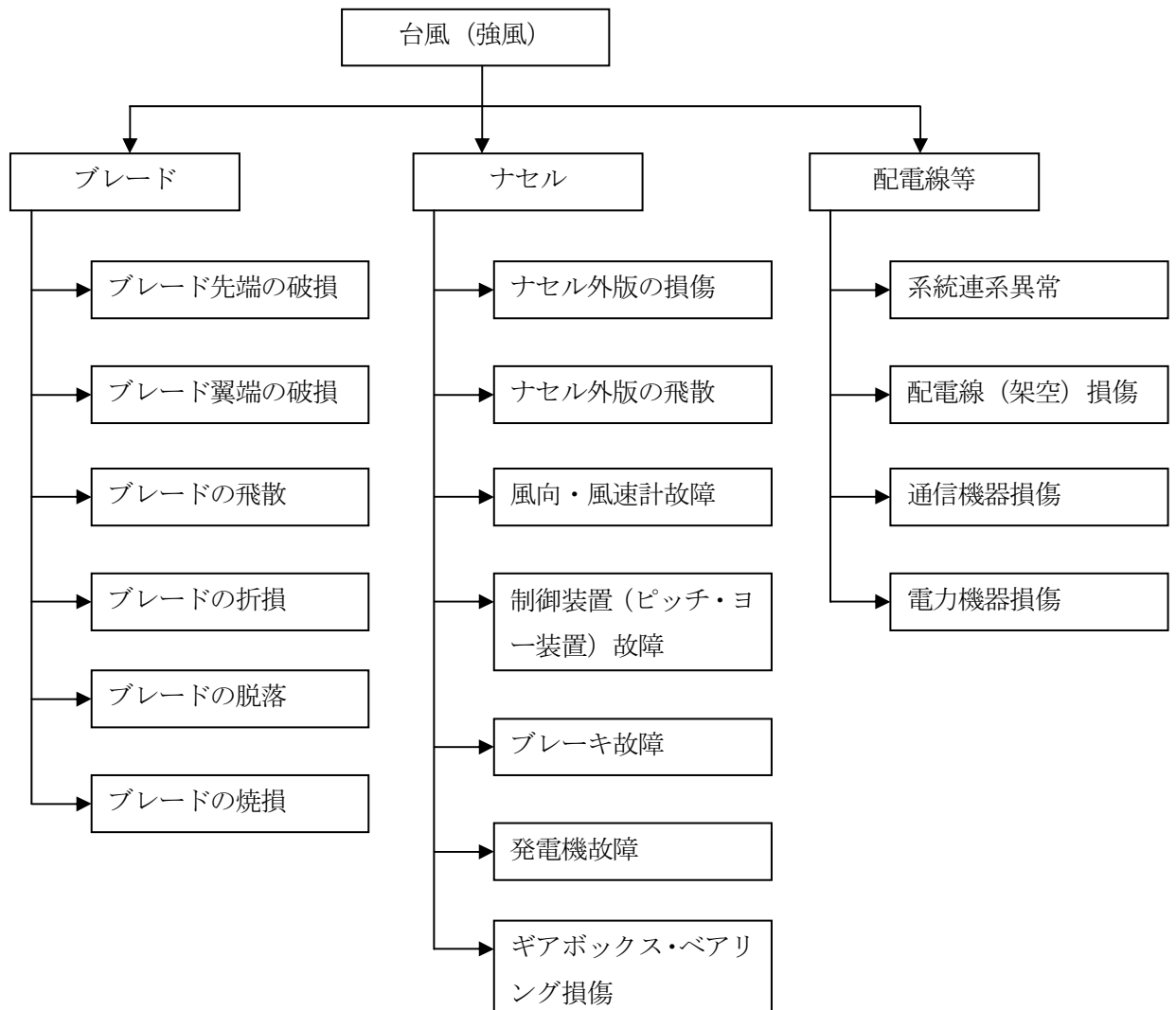


図7.30 風車の強風による被害のフォールトツリーの一例

### 7.6.1 経年変化・部分損傷

本格的な風力発電設備の導入が始まって以来、風車の耐用年数に相当する約 20 年近くが経過し、さらにこの期間で風車の規模は図 7.8 に示したように飛躍的に大型化してきている。

風車の構成要素には、部分的な損傷や累積損傷の形で内在している可能性もある。すなわち、これらの検知・診断・補修に関するものが、今後必要となるものと考えられる。

現在の商用風車の多くは、国際規格に則って設計・製作されている。これらの規格においては、荷重・強度の両方で、図 7.31 に示す確率分布を想定して、安全係数が定められている。荷重が強度を超えたときに損傷が発生し、両者の差異によって損傷の度合いが異なることとなる。すなわち、風車が通常に運転され発電するという事は、累積疲労を含め何らかの部分的な損傷を繰り返し受けていると理解するべきである。

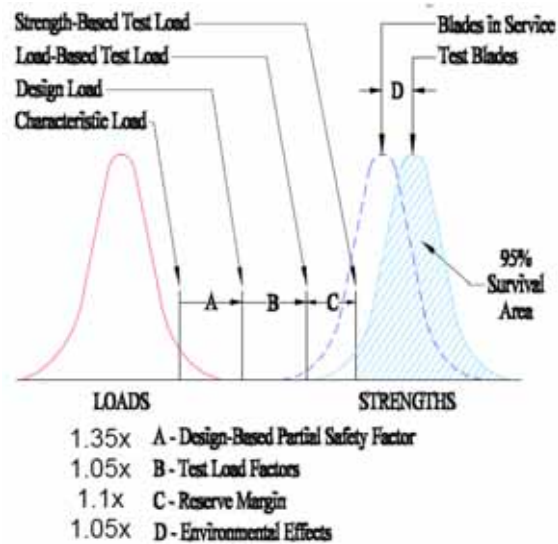


図 7.31 荷重・強度の確率的分布

以上の理解のもとで、日増しに増大して行くリスクを放置した場合、結果的に莫大な損害を被ることも考えられる。一方で、健全度を評価して余寿命を診断し、適切な補修により延命化を図る方法もあるが、その方法はリスクと比較して安価である必要がある。

今後、老朽化した風車が増大することは明白であり、これらに必要な以下に示す技術をもとに現実的なモニタリングシステムの開発が行われつつある。(図 7.32)

更に今後、風力発電が洋上へ展開するに伴い、O&M (オペレーション&メンテナンス) コストの低減には、このモニタリングシステムが重要となると考えられる。

Component Failures Reported in Denmark  
4th Quarter 2001

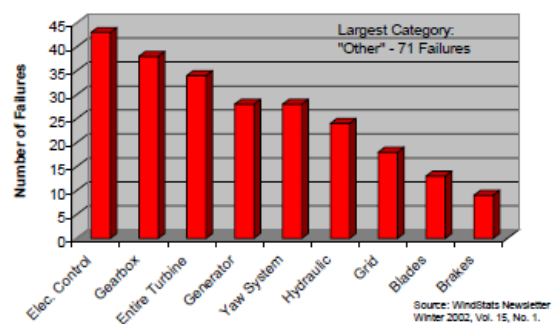
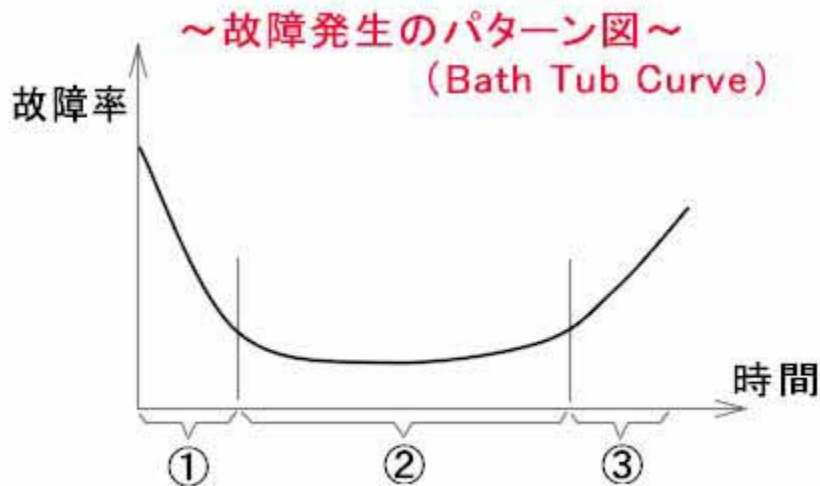


図 7.32 損傷箇所の分析例

風力発電設備は、数多くの部品、機器、構造物によって構成されている。補修または交換を必要とする機器の故障は、経験的に使用時間に応じて初期故障、偶発故障、摩耗故障の3つに分けられる。機器の使用時間と故障のし易さの関係は、**図7.33**の故障曲線で表される。使用時間により初期故障域では故障しやすく、一方偶発故障域では故障のし易さはほぼ一定となり、さらに使用が進むと機器の摩耗等で故障し易くなってくる。

摩耗故障の要因の一つとして、材料の経年変化による劣化現象がある。材料の劣化現象には、疲労、熱疲労、摩耗、腐食、熱による電気抵抗等の物理的性質の変化等が挙げられる。

このような材料の劣化現象は、必ずしも想定された経年変化に従って起きるものばかりではなく、当初設定した目標使用年数に達しないのに、条件や使用環境等の要因が重なって劣化現象が顕在化して損傷を起こすこともある。



- ① 初期故障期間：施設・設備の不具合要因（設計ミス等）による故障が使用初期に顕在化する時期。
- ② 偶発故障期間：初期故障が収まった後、故障率がほぼ一定となる期間。
- ③ 摩耗故障期間、経年劣化期間：偶発故障期間に続き、故障率が暫時高くなる期間、設備の摩耗、疲労などにより寿命が尽きることによる。設備寿命を延ばすためには、この段階を迎える前に適切な維持補修が必要となる。

**図7.33 故障曲線**

### 7.6.2 小規模損傷等の観察、判定条件の可能性について

図7.34に示す疲労破壊などに関しては、目視での認知は困難な場合も少なくない。



図7.34 ブレードの小中規模損傷の例

これらの小規模損傷を放置した場合には、損傷が進展し大規模損傷につながる結果となる。そのため、可能な限り損傷が小規模なうちにこれを感知して、修復を行うことができれば風車の延命化を促し、維持補修の費用を低減できる。

また、これらの結果を受けて、疲労損傷によるリスクを低減するには、ブレードの回転に起因する成分が比較的大きいため、風向・風速などに対して制約を設けて運転を制限することは被害対策として有効と考えられるが、その結果発電量も減少するために、延命化による支出の減少とのバランスに基づき判断することが肝要であろう。

また、風力発電設備の計測項目としては、これまで電気事業法や風力発電規程に基づく項目が主であった。風車に関しては回転速度、軸受温度、振動および風速があり、発電機に関しては軸受温度、電流、電圧、固定端子巻線温度、無効電力および力率がある。これらの計測値は主に風車の運転監視面からの計測項目である。

風力発電設備の部材における構造損傷や温度を検出するというのがモニタリングの概念である。振動や変形を検知するセンシングデバイス技術の技術進歩に伴い、光ファイバー等を用いた振動制御や損傷検知システムの応用が図られている。今後は構造の健全性を評価し、構造内の亀裂や破損個所の状況を検知するとともに、修復や応急処置が行えるようなシステム構築も可能となると考えられる。

### 7.6.3 モニタリング、監視事例

風力発電設備のモニタリングとして、これまでは外部環境条件に関するものが主として対象となっていた。パラメータとしては、風向、風速、気温、湿度、空気密度等が主流であった。現在は、これらのパラメータに風力発電設備の運転状態に関するパラメータがモニタリングされ、稼働に対する重要な情報源となっている。次の段階としては、近年の様々な風車に対するリスクを軽減する方法として、風車の状態をモニタリングすることが有効と考えられてきている。風力発電設備の大型化に伴い、様々なリスクの対象として大きな要素といえるのが風車ブレードである。

炭素繊維複合材料（CFRP）に代表される風車ブレードの破壊挙動については、未知の部分があり、金属に代表される従来の材料には見られない複雑な破壊挙動を呈している。特に、風車ブレードについては、積層構成の性格上、層間はく離や繊維破断、母材の亀裂などの内部損傷が発生しやすい。これらの損傷は、積層板の面外方向からの衝撃荷重や繰り返し作用する荷重が原因といわれており、表面上損傷が認められなくても、衝撃点や作用点の層間に生じる事が知られている。

軽微な衝撃等によって形成される層間はく離は、材料表面からの検査ではほとんど検出できず、微細なものであっても風車ブレードの耐荷能力の低下、圧縮座屈応力の低下を招くことになる。本来であれば非破壊検査を行い、構造の健全状態を確認することで安全性を確認する事が重要である。しかし、従来の非破壊検査法は、風車の稼働停止を必要とし非経済的な上にヒューマンエラー等信頼性に劣る部分が見られた。

近年用いられているのが、構造ヘルスマニタリングと呼ばれるもので、構造部材にセンサ・ネットワークと損傷検知等の診断アルゴリズムを付加し、構造と一体化させることによって、計測情報から構造の健全性判断を自動的に行う技術である。損傷モニタリングとしては、割れの検知、疲労損傷の検知、はく離の検知等が行われるようになっている。ヘルスマニタリングにおいては、センシング技術の技術開発に伴い、センシングデバイスとして従来のひずみゲージからセラミクスや形状記憶合金、光ファイバーへと技術開発が進んできている。

本ガイドラインにおける風車応力計測は、既設風車を利用したことからセンシングデバイスは後付であったが、計測には支障なかった。しかし、今後は予めモニタリングできるブレードを選択できるようにするか、センサの後付が容易なような構造を考えておく必要がある。

このようなヘルスマニタリングは、将来的には新素材における高機能化、多機能化へ結びつくものと考えられている。風車ブレードへの応用は別としても、温度変化に応じて剛性を変化させることで、形状・寸法を安定的に保持するという変形制御機能、形状安定機能や振動制御機能、一部には亀裂や破損を検知して自己修復が可能な構造の提案もなされている。

風車の大型化に伴う新素材としての複合知的材料が、風車ブレードへの適用として開発されていき、同時にヘルスマニタリング機能を併せ持つようになることを期待するものである。

以下に、現在の海外における監視事例を示す。

(1) WT- $\Omega$ プロジェクト (ECN)

Lagerway 50/750 及び GE1.5s を対象に、以下のモニタリングを実施している。(図 7.35)

- ① 対象部位：翼、ピッチ駆動装置、主軸増速機、発電機、ヨー駆動装置、タワー
- ② センサ種類：光ファイバーセンサ
- ③ 遠隔観測システム

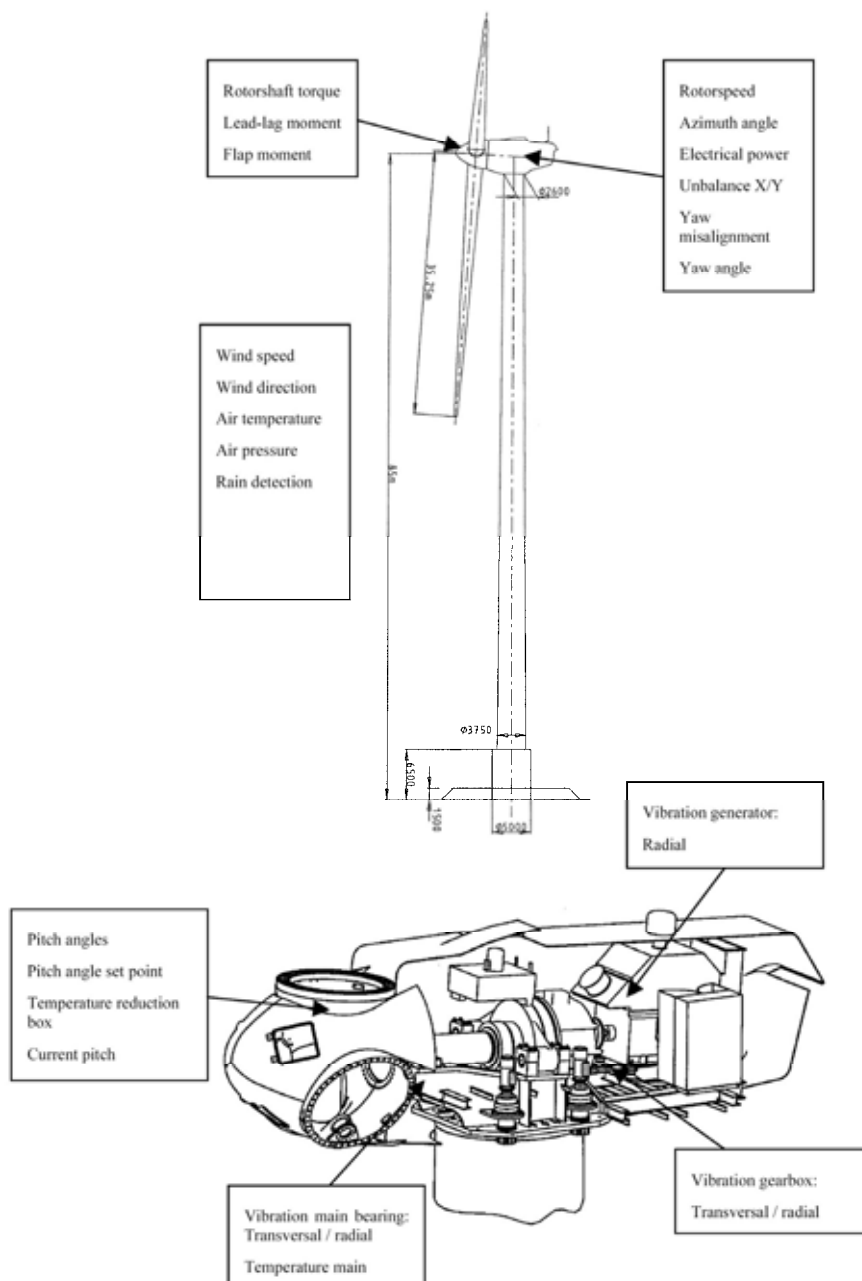


Figure B1: Overview of Siemens wind turbine measurement system

図 7.35 モニタリングシステム (WT- $\Omega$ プロジェクト (ECN))

(2) DOEプロジェクト (NREL)

翼に関して Smart センサを設置したモニタリングを検討している。(図 7.36)

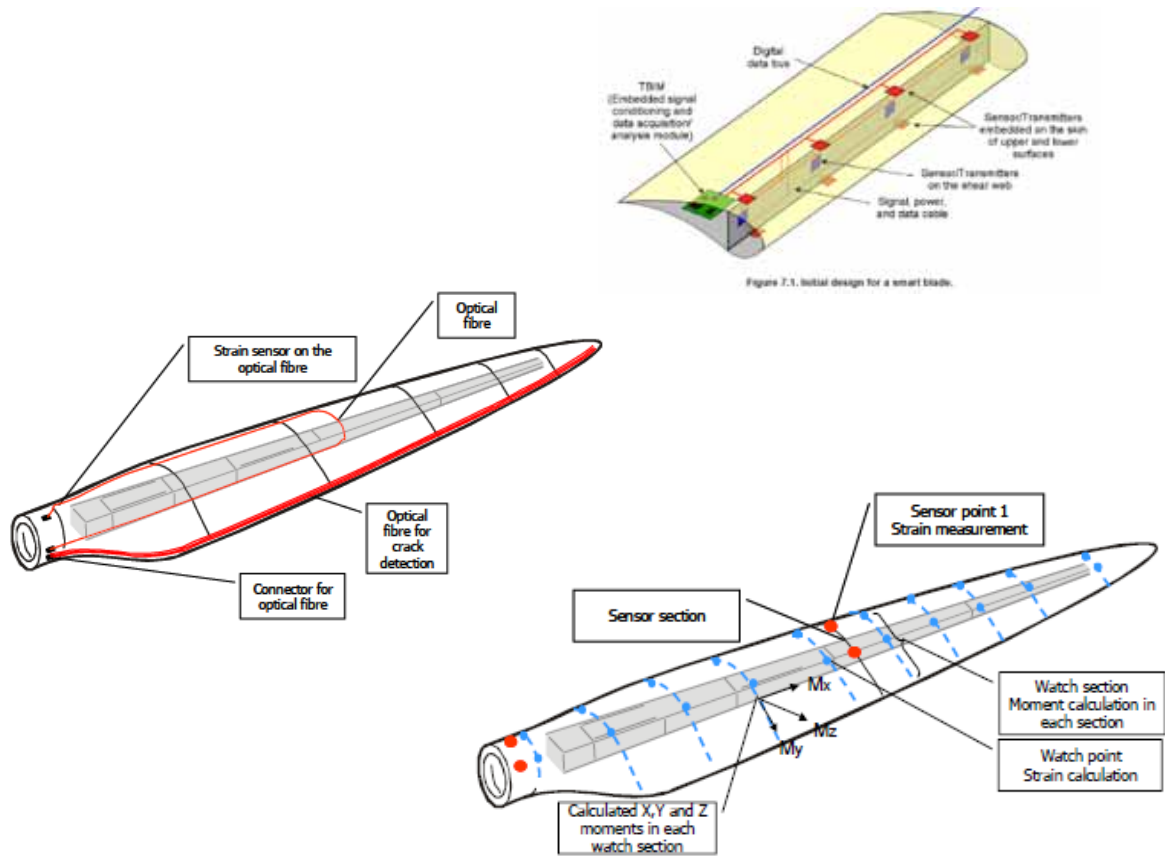


図 7.36 翼のモニタリング (DOEプロジェクト)

## 8 . 今後の課題

本ガイドラインは、我が国特有の風による風車被害の軽減と、風車の安全な運転に寄与することを目的として、計画地点において発生が予想される最大風速や風の乱れに対処するため、主に風車を設置する事業者が、計画地点で予想される風況を把握する手法と、風車の選定手順、参考となる技術情報を示したものである。

本ガイドラインの作成にあたっては、現時点で得られた知見を最大限に活用しているが、得られるデータの質・量および解析手法には限界があり、ガイドラインの今後の更なる改善が必要である。そのための課題としては以下のものが挙げられる。

### 1) 地形判定法に関する課題

本ガイドラインでは、IEC 規格の複雑地形判断指標と、地形の増速率を考慮する手法及び WAsP で用いられている RIX の算定結果を組み合わせる新手法を提案している。今後は、更に実測データおよび数値シミュレーションを用いた計算例を蓄積することにより、地形判定法の適合性を調べ、手法を確立することが求められる。

### 2) 極値風速に関する課題

我が国は台風常襲地域であり、IEC 規格において対象外となっていることから、設置可能な風車仕様の特定のために、現状に即した極値風速 ( $V_{ref}$ ) のクラスを設定する必要がある。

観測により極値風速を得ることが困難であることから、CFD (数値流体力学) を用いた技術的手法により、極値風速を求める方法を確立する必要がある。また、算出された風速の妥当性の検証を十分に行うことが必要である。

また、強風時における風速の鉛直分布を検証するなど、気象官署等における長期の観測データとの整合を図れるよう、小地形影響を適切に反映できる評価法を確立する必要がある。

気象官署の風向別 (8 風向) の極値風速を、観測データと台風等の影響を評価する確率的な手法を組合わせて、再評価するとともに、風向毎の極値風速に基づいたシミュレーションを行い、8 風向の最大値をその地点の極値風速としてマップを作成するなど、より正確なシミュレーションを行う。また、気象官署とは異なる観測データを長年蓄積するなど、シミュレーション手法の信頼性を確認していくとともに提案した極値風速マップや極値風速データベースの精度向上を図ることが必要である。

### 3) 乱流強度の評価に関する課題

乱れ成分 (主風向直角方向など) 毎の設定方法を確立するとともに、我が国の実状に即した乱れのクラス ( $I_{ref}$ ) の新規格を策定する必要がある。

現時点では、乱流強度の評価は観測データに頼るところが大きく、数値計算で求める手法が確立されておらず、コンピュータの処理能力も十分ではない。今後のコンピュータ処理能力の向上が待たれるが、乱流強度を数値計算により求める手法の確立が必要である。



#### 4) リスク評価に関する課題

事業リスクとは別に、IEC 規格等の風車の国際規格では設計面での風車リスクとして、終局荷重と疲労荷重を荷重ケースで組み合わせることによりリスク軽減を図っている。終局荷重として暴風時の概略数値を求めることで、リスク評価は可能となる。また、疲労強度に関する風車設置場所の適用性について、概略判断手法を提示した。今後はこの材料強度（終局・疲労）に対するリスクや事業者側の運転条件、運転監視・メンテナンス等のリスクについて複合的な低減方法を策定する必要がある。

風力発電設備の故障・事故のみならず、風力発電設備の損傷等による周辺への被害拡大防止など安全性を考慮した上でのリスクについて検討することも課題である。

#### 5) 現地計測の効果的な利用

本ガイドラインにおいて実施された7地点における風況と風力発電設備の応力同時計測によって得られたデータは、我が国における風条件が風力発電設備に与える影響を、実測データとして得ることのできた有益なものである。

ガイドラインにおける検証のみでなく、これらの現地計測結果を用いることで、今後様々な検討が可能となり、これらのデータが広く我が国に導入される風力発電設備の性能向上、安全性向上に寄与するものとなることが期待される。

#### 6) 風車基礎構造に関する課題

本ガイドラインにおいては、風車基礎構造については触れていないが、最近の風車倒壊事故や我が国における地震災害を考慮して、(社)土木学会の「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」の耐震安全性検討も考慮の上、風車特有の動的解析や振動特性も考慮した検討を行うことが課題となる。

## 9 . 参考文献

- (1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2004)
- (2) 小垣哲也、松宮 輝、阿部裕幸、小川 晋、：「日本における風特性と風力タービン設計のための風モデル：第1報、 NEDO FT データの乱流強度解析とその結果を反映した通常乱流モデルの提案」日本機械学会論文集 B、 vol73、 pp1845-1852、 (2007)
- (3) 小垣哲也、松宮 輝、阿部裕幸、小川 晋、：「日本における風特性と風力タービン設計のための風モデル：第2報、超音波式風向風速計等を使用した実計測データの解析」：日本機械学会論文集 B 編、 vol 73、 pp1853-1859、 (2007)
- (4) Eghchi, Y : Proc.15th ICONE、 (2007)
- (5) Fernand, P-A. et al : J.Fluid Mech.、 vol.415、 pp261、 (2007)
- (6) Hattori, Y. et al : Proc. CWE2006、 (2006)
- (7) Inagaki, M. et al : Trans、 ASME J.Fluid Eng.bvol27. pp1
- (8) Kaltenbach, H-J. : Phys.of Fluids. Vol.15、 pp3048、 (2003)
- (9) Keating, A. et al. : Phys.of Fluids. Vol.16、 pp4696、 (2004)
- (10) Suto, H. et al. : Proc.IHTC13、 (2006)
- (11) Templeon, J.A. et al. : Phys.of Fluids.Vol.17
- (12) 電力中央研究所：送電設備の風荷重・風応答評価技術、電中研レビュー第48号、(2003)
- (13) IEC : Wind Turbines Part1 Design Requirements、 IEC61400-1 Ed.3.(2005)
- (14) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：「風力発電フィールドテスト事業に係る風況データ均質化処理等に関する調査報告書」、(2007)
- (15) Mortensen, N.G、 Bowen、 A.J. and Antoniou、 :Improving WAsP Prediction in (Too) Complex Terrain、 Proceedings of EWEC2006、 p.9.(2006)
- (16) 谷川亮一、高木哲朗、小垣哲也、松宮輝：「複雑地形上における性能計測の基礎検討」、第26回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集、pp.251-254.(2005)
- (17) 山口 敦、石原 孟、藤野陽三：「力学統計的局所化による新しい風況予測手法の提案と実測による検証」土木学会論文集 No.808/I-74、 pp.147-162、 (2006)
- (18) 石原 孟、日比一喜、加藤央之、大竹和夫、松井正宏、：「日本各地の年最大風速データベースの構築と測器補正」日本風工学会誌、第92号、pp5-15、 (2002)
- (19) 中村秀治、石川智己、大熊武司、田村幸雄、田中伸和、北嶋知樹、：「風向別基本風速マップ作成の試み」日本風工学会論文集、第97号、pp121-136、 (2005)
- (20) 気象庁予報部予報課：「レーダー・アメダス解析雨量の解析手法と精度」測候時報、62、pp279-339、 (1995)
- (21) (社)土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説(2007)
- (22) Windstats Newsletter Winter 2002,Vol 15,No.1
- (23) Reliability Modeling and General Redundancy Techniques,1978, Bill D. Garroll

- (24) Smart Sensor System for Structural Condition Monitoring of Wind Turbines 2002 ~ 2006  
NREL
- (25) Wind Turbine Operation & Maintenance based on Condition Monitoring WT- , Final Report ,  
ECN-C-03-047, 2003.

## 日本型風力発電ガイドライン制定の経緯

### 平成17年度

平成17年11月7日	平成17年度第1回日本型風力発電ガイドライン策定委員会
平成17年11月15日	平成17年度第1回落雷ガイドライン検討委員会
平成17年11月15日	平成17年度第1回複雑地形における乱流ガイドライン検討委員会
平成17年11月16日	平成17年度第1回台風(強風)ガイドライン検討委員会
平成18年2月3日	平成17年度第2回落雷ガイドライン検討委員会
平成18年2月6日	平成17年度第2回複雑地形における乱流ガイドライン検討委員会
平成18年2月9日	平成17年度第2回台風(強風)ガイドライン検討委員会
平成18年2月16日	平成17年度第2回日本型風力発電ガイドライン策定委員会

### 平成18年度

平成18年5月16日	平成18年度第1回台風・乱流ガイドライン検討委員会
平成18年5月17日	平成18年度第1回落雷ガイドライン検討委員会
平成18年5月26日	平成18年度第1回日本型風力発電ガイドライン策定委員会
平成18年10月16日	平成18年度第2回台風・乱流ガイドライン検討委員会
平成18年10月24日	平成18年度第2回落雷ガイドライン検討委員会
平成18年12月8日	平成18年度第2回日本型風力発電ガイドライン策定委員会
平成19年1月26日	平成18年度第3回落雷ガイドライン検討委員会
平成19年1月29日	平成18年度第3回台風・乱流ガイドライン検討委員会
平成19年2月27日	平成18年度第3回日本型風力発電ガイドライン策定委員会

### 平成19年度

平成19年5月14日	平成19年度第1回台風・乱流ガイドライン検討委員会
平成19年5月16日	平成19年度第1回落雷ガイドライン検討委員会
平成19年5月29日	平成19年度第1回日本型風力発電ガイドライン策定委員会
平成19年10月16日	平成19年度第2回落雷ガイドライン検討委員会
平成19年10月24日	平成19年度第2回台風・乱流ガイドライン検討委員会
平成19年11月20日	平成19年度第3回台風・乱流ガイドライン検討委員会
平成19年12月14日	平成19年度第2回日本型風力発電ガイドライン策定委員会
平成20年1月21日	平成19年度第3回落雷ガイドライン検討委員会
平成20年1月23日	平成19年度第4回台風・乱流ガイドライン検討委員会
平成20年2月26日	平成19年度第3回日本型風力発電ガイドライン策定委員会

2008年3月 発行

本ガイドラインの内容を引用する際には、あらかじめ独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の許可を受けて下さい。

エネルギー対策推進部

電話 044-520-5180

FAX 044-520-5186