

日本型風力発電ガイドライン

落雷対策編

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

落雷対策編

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とりまとめたものであり、風力発電設備予定地の環境条件のうち雷に関する情報をまとめるとともに、風車選定及び雷保護設備選定に関する有用な情報及び雷被害を考慮したリスクと対策に関する検討結果をまとめたものである。

策定にあたっては、国際基準的な技術報告書(TR)である IEC/TR 61400-24、並びにその国内の標準仕様書(TS)である TS C 0041 をもとにして、日本の気象とその気象が与える風力発電設備への影響を加味して検討している。

主な内容は、日本特有の冬季雷に対する雷被害対策に関するものであり、本検討結果の一部は、今後の精査を経て IEC へ提案されることも期待される。

一方で、自然現象である雷の性状を的確に予測することは難しく、現段階では落雷に対する被害発生リスクを完全にゼロにすることは困難である。したがって、事業者においては被害発生リスクと対策コストの兼ね合いにより、雷性状に応じた雷保護対策の選定を行うことが最良の策と考えられる。

については、本ガイドラインは複数の雷保護対策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のものとしている。また、検討過程で得られた情報についても付属資料として提示している。

今後、研究の進展、現場での経験や知見の蓄積によって、本ガイドラインが改訂され、その充実がさらに図られることを期待する。

日本型風力発電ガイドライン策定委員会

委員長 牛山 泉

落雷ガイドライン検討委員会

委員長 横山 茂

日本型風力発電ガイドライン策定委員会及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) 落雷ガイドライン検討委員会

落雷ガイドライン検討委員会			
NO	氏名	所属	備考
1	横山 茂	(財)電力中央研究所・首席研究員	委員長
2	石井 勝	東京大学・教授	
3	松村 年郎	名古屋大学・教授	
4	蜂屋 一雄	電源開発(株)・室長代理	
5	有永 眞司	三菱重工業(株)・主席研究員	
6	加藤 裕司	富士重工業(株)・課長	
7	吉田 兵吾	(株)日本製鋼所・グループマネージャ	
8	鈴木 和夫	(株)日立エンジニアリング・アット・サービス・副本部長	
9	飯田 秀重	(財)日本気象協会・技師	平成 17・18 年度委員
10	新藤 孝敏	(財)電力中央研究所・上席研究員	平成 17・18 年度委員
11	黒沢 雅人	(株)ユーラスエネルギー・副部長	平成 19 年度委員

備考欄が空欄の場合は、平成 17～19 年度委員

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 法規及び省令	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	4
3. 用語及び定義	5
4. 記号及び略語	9
5. 日本の雷と雷被害実態	10
5.1 日本の雷の特徴	11
5.2 雷被害実態	12
6. 落雷マップ	14
6.1 落雷頻度・被害マップ	15
6.2 落雷リスクマップ	18
7. 雷保護	20
7.1 雷被害の様相と雷保護対策	22
7.2 風車本体の雷保護対策	25
7.3 避雷鉄塔による雷保護対策	30
8. 雷被害のリスク及びリスク低減対策	31
8.1 雷被害リスク低減のための雷保護対策	33
8.2 雷対策重点地域に風力発電設備を設置する場合における雷保護対策	36
8.3 雷対策地域に風力発電設備を設置する場合における雷保護対策	38
9. 今後の課題	39
参考文献	40

付属書

A	現状の落雷マップ	41
B	8章補足 雷リスクの計算例	44
C	落雷模擬試験結果	47
D	落雷による風車被害事例	66

日本型風力発電ガイドライン制定の経緯

1 . 適用範囲

概要

本ガイドラインは、日本特有の自然現象により風力発電設備の運転停止や機器の損傷等の被害が増大している中、特に落雷によるブレードへの被害が設備の長期間停止を余儀なくされる状況もあり、主に事業者が風車設置場所及び雷保護対策を選定する際に考慮すべき事項、技術情報及び被害の発生に関するデータ等を提示するものであり、今後の被害発生を軽減することを目的としている。

本ガイドラインの適用範囲は「水平軸プロペラ式」風力発電設備を対象とする。

主な項目は、日本の雷と雷被害実態、落雷マップ、雷保護対策、雷被害リスク及びリスク低減対策である。

なお、本ガイドライン策定にあたっての根拠や試験結果等の資料は、付属資料として提示する。

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、小形風車は対象外とする。

あわせて、本ガイドラインでは現在把握されている日本の雷現象の風力発電設備への影響についても記載している。

また、主にブレードに対する雷保護対策を対象としているが、風力発電設備全体の雷保護対策についても取りまとめている。

2 . 関連法規、規格

日本国内で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する必要がある。

2.1 法規及び省令

- ・ 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)

2.3 技術規格

風力発電の設計に関わる技術規格 (Technical Standards) としては、IEC (International Electrotechnical Commission) で定めるところの「IEC 61400 シリーズ」規格が広く国際的に適用されており、日本で設置される風力発電設備の大部分がこれらの規格に従って設計、製造されたものである。

一方、雷保護に関する規格としては、「IEC/TR 61400-24」が制定されているが、技術報告書 (Technical Report) の段階である。また、国内では「IEC/TR 61400-24」を基本とした TSC 0041(風車の雷保護)が標準仕様書(TS)として制定されている。

IEC の雷保護に関する規格としては、他に IEC 61024、IEC 61312、IEC 61662 が制定されているが、風力発電設備の雷保護に関しては、ブレードの保護対策と発電機内ベアリング等への被害防止策が未解決となっており、現在その検討が引き続き行われている。

本ガイドラインは、IEC/TR 61400-24 及び国内版標準仕様書(TS)TSC 0041 をもとに、それらの補完的役割を担うことを期待して作成されたものである。IEC で問題とされている項目はもちろん、「冬季雷」といわれる日本特有の事象に対する検討も行い、取りまとめている。

以下に雷に関する技術規格を示す。

風力発電設備に関する国内規格・標準

- ・ TSC 0041、第 1 版(2005)、風力発電システム - 第 24 部:風車の雷保護(IEC/TR 61400-24)(TR)

風力発電設備に関する海外規格

- ・ IEC/TR 61400-24、第 1 版(2002)、風力発電システム - 第 24 部:風車の雷保護(TR)

雷に関する他の国内規格

- ・ JIS A 4201、第 6 版(2003)、建築物等の雷保護(IEC 61024-1)
- ・ JIS C 0367-1、第 1 版(2003)、雷による電磁インパルスに対する保護-第 1 部:基本的原則
- ・ JIS C 60364-4-43、第 1 版(2006)、建築電気設備-第 4-43 部:安全保護-過電流保護
- ・ JIS C 60364-4-44、第 1 版(2006)、建築電気設備-第 4-44 部:安全保護-妨害電圧及び電磁妨害に対する保護
- ・ JIS C 5381-1、第 1 版(2004)、低圧配電システムに接続するサージ防護デバイスの所要性及び試験方法
- ・ JIS C 5381-12、第 1 版(2004)、低圧配電システムに接続するサージ防護デバイスの選定及び適用基準
- ・ JIS C 5381-21、第 1 版(2004)、通信及び信号回線に接続するサージ防護デバイスの所要性能及び試験方法
- ・ JIS C 0704、第 2 版(1995)、制御機器の絶縁距離・絶縁遅効及び耐電圧
- ・ JIS C 6950、第 2 版(2006)、情報機器の安全性

雷に関する他の海外規格

- ・ IEC 61024-1(1990) 構造物の雷からの保護 - 基本的原則
- ・ IEC 61024-1-1(1993) ガイド A - 雷保護システムの保護レベルの選択
- ・ IEC 61024-1-2(1998) ガイド B - 雷保護システムの設計、設置、保守及び検査
- ・ IEC 61312-1(1995) 電磁波インパルスに対する保護-第 1 部:一般原則
- ・ IEC 61312-2(1999) 電磁波インパルスに対する保護-第 2 部:構造物シールド、内部構造物の結合及び設置
- ・ IEC 61312-3(1995) 電磁波インパルスに対する保護-第 3 部: サージ保護デバイスの要求事項
- ・ IEC 61312-4(1998) 電磁波インパルスに対する保護-第 4 部:既存構造物の機器保護
- ・ IEC 61662(1995) 落雷による損害リスクの評価
- ・ IEC 61663-1(1999) 雷保護 - 通信線 - 光ファイバ設備
- ・ IEC 61663-2(2001) 雷保護 - 通信線 - 金属配線

- ・ IEC 61819(2000) 雷保護装置(LPS)構成要素の効果を模擬する試験パラメータ(TR)

注) IS: 国際規格(International Standard)

TS: 技術仕様書(Technical Specification)

TR: 技術報告書(Technical Report)

2.4 関連するハンドブック・マニュアル類

- ・ 風力発電導入マニュアル(1997、環境庁企画調整局地球環境部)
- ・ 風力発電システム導入促進検討の手引き(1998、新エネルギー財団)
- ・ 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)
- ・ 風力発電設備への落雷対策に関する調査(2007、NEDO)

3 . 用語及び定義

本ガイドラインでの用語及び定義は、JIS A 4201 : 2003 (建築物の雷保護) と TS C 0041:2005 (風力発電システム第 24 部 : 風車の雷保護) の用語集に従った。使用した用語及び関連用語を以下に示す。

- 3.1 **落雷** Lightning flash to earth
雲と大地間の大気が発生する放電で、1 回以上の雷撃を含む。
- 3.2 **雷撃** Lightning stroke
落雷における 1 回の放電。
- 3.3 **雷撃点** Point of strike
雷撃が大地、建築物等または雷保護システムと接触する点。
(備考) 落雷は、二つ以上の雷撃点をもつことがある。
- 3.4 **上向放電** Upward flash
接地した構造物から雲までの間を上向き先駆放電によって始まる雷放電。
一般的にトリガード雷(triggered lightning)と呼ばれる。
- 3.5 **正極性放電** Positive flash
主として正電荷による雷放電。
- 3.6 **負極性放電** Negative flash
主として負電荷による雷放電。
- 3.7 **ピーク値** Peak value
雷電流の最大値。
- 3.8 **電荷量(C)** Electric charge
全雷撃継続時間中の雷電流積分値。
- 3.9 **比エネルギー(W/R)** Specific energy
全雷撃継続時間中の雷電流二乗積分値。雷電流によって単位抵抗体中で放散されるエネルギーを表す。
- 3.10 **雷保護システム** Lightning protection system(LPS)
雷の影響に対して被保護物を保護するために使用するシステムの全体。
これには外部及び内部雷保護システムの両方を含む。
(備考) 特別の場合、雷保護システムは外部雷保護システムまたは内部雷保護システムの片方を指すことがある。
- 3.11 **外部雷保護システム** External lightning protection system
受雷部システム、引き下げ導線システム及び接地システムからなるシステム。
- 3.12 **内部雷保護システム** Internal lightning protection system
被保護物内において雷の電磁的影響を低減させるため、外部雷保護システムに追加する

- 全ての措置で、等電位ボンディング及び安全離隔距離の確保を含む。
- 3.13 **等電位ボンディング** Equipotential bonding
内部雷保護システムのうち、雷電流によって離れた導電性部分間に発生する電位差を低減するため、その部分間を直接導体によってまたはサージ保護装置によって行う接続。
- 3.14 **受雷部システム** Air-termination system
外部雷保護システムのうち、雷撃を受けるための部分。
- 3.15 **引き下げ導体** Down-conductor
外部雷保護システムのうち、雷電流を受雷部システムから接地システムへ流すための部分。
- 3.16 **接地システム** Earth-termination system
外部雷保護システムのうち、雷電流を大地へ流し拡散させるための部分。
(備考) 抵抗率の大きい土壌において、接地システムは付近の大地への落雷によって土壌に流れる雷電流を捕捉することがある。
- 3.17 **接地極** Earth electrode
大地と直接電氣的に接触し、雷電流を大地へ放流させるための接地システムの部分またはその集合。
- 3.18 **環状接地極** Ring earth electrode
大地面または大地面下に建築物を取り巻き閉ループを構成する接地極。
- 3.19 **基礎接地極** Foundation earth electrode
建築物等の鉄筋または鉄筋コンクリート基礎によって構成する接地極。
- 3.20 **等価接地抵抗** Equivalent earth resistance
接地電圧と接地電流のピーク値の比。一般にこのピーク値は同時に発生しないが、接地システムの効率を表すため、この比を慣例的に使用する。
- 3.21 **接地電圧** Earth-termination voltage
接地システムと無限遠大地間との電位差。
- 3.22 **雷保護システムの“構造体利用”構成部材** Natural component of an LPS
その目的のため特別に設置したものではないが、雷保護機能を果たす構成部材。
(備考) この用語の使用例を、以下に示す。
 - “構造体利用” 受雷部
 - “構造体利用” 引下げ導線
 - “構造体利用” 接地極
- 3.23 **危険な火花放電** Dangerous sparking
雷放電によって被保護物内に発生する好ましくない放電。
- 3.24 **安全離隔距離** Safety distance
危険な火花放電を発生しない被保護物内の2導電性部分間の最小距離。
- 3.25 **サージ保護装置** Surge suppressor

- 火花ギャップ、サージ抑制器または半導体装置等、被保護物内の2点間におけるサージ電圧を制限するための装置。
- 3.26 **被保護物から独立した外部雷保護システム** External LPS isolated from the space to be protected
雷電流の経路が被保護物に接触しないように受雷部システム及び引き下げ導線システムを配置した雷保護システム。
- 3.27 **被保護物から独立しない外部雷保護システム** External LPS not isolated from the space to be protected
雷電流の経路が被保護物に接触する受雷部システム及び引き下げ導線システムを配置した雷保護システム。
- 3.28 **保護レベル** Protection level
雷保護システムを効率に応じて分類する用語。
(備考)保護レベルは、雷保護システムが雷の影響から被保護物を保護する確率を表す。
- 3.29 **許容雷放電頻度(Nc)** Accepted lightning flash frequency
構造物に被害を及ぼし得る許容雷放電の年平均頻度の最大値。
- 3.30 **受雷部** Air-termination system
構造物などへの直撃雷を防止するように意図された外部 LPS の一部。
- 3.31 **構造物への直撃雷頻度(Nd)** Direct lightning flash frequency to a structure
構造物への直撃雷の年平均推定値。
- 3.32 **有効高さ(h)** Effective height
ブレード先端が到達する最も高い点の高さ。すなわち、ハブ高さとロータ半径の和。
- 3.33 **LPS の効率(E)** Efficiency of LPS
構造物に被害を引き起こすことがない直撃雷年平均数の全構造物直撃雷数に対する比率。E は防止効率(Ei)と、LPS が構造物を直撃雷から保護する確率であるサイズ決め効率(Es)の積としても表すことができる。
- 3.34 **等価捕集面積(Ae)** Equivalent collection area
構造物の等価捕集面積は、構造物と同じ年間直撃雷頻度をもつ地上表面の面積と定義する。
- 3.35 **放電電荷(Q_{flash})** Flash charge
全雷撃継続時間中の雷電流積分値。
- 3.36 **大地雷撃密度(Ng)** Ground flash density
年平均大地放電密度は、構造物が位置する地域において年間に km² 当たりに落ちる雷放電の数。
- 3.37 **雷保護ゾーン** Lightning protection zone(LPZ)
そこで雷電磁環境を定義及び制御することになっている区域。
- 3.38 **被害のリスク** Risk of damage

雷が原因で構造物に起こり得る年間損失。

3.39 **避雷器** Surge arrester

電気装置を過渡高電圧から保護し、続流の継続時間と振幅を制限するように設計されている装置。

3.40 **IKL マップ** Isokeraunic Level map

年間雷雨日数の地域分布を示した地図。

4 . 記号及び略語

以下に本文中に用いた単位記号を示す。

A	アンペア	電流	s	秒	時間
C	クーロン	電荷・電気量	V	ボルト	電位差・電圧
F	ファラド	静電容量	W	ワット	仕事率・電力
m	メートル	長さ		オーム	電気抵抗
Pa	パスカル	圧力・応力			
K	キロ	10 ³	c	センチ	10 ⁻²
M	メガ	10 ⁶	m	ミリ	10 ⁻³
			μ	マイクロ	10 ⁻⁶

以下に本ガイドラインに使用されている略語を示す。

JIS	Japanese Industrial Standards
	日本工業規格
IEC	International Electrotechnical Commission
	国際電気標準会議
JLDN	Japanese Lightning Detection Network
	全国雷観測ネットワーク
LPS	Lightning Protection System
	雷保護システム
SPD	Surge Protective Device
	サージ保護デバイス
SUS	Stainless Used Steel
	ステンレス鋼
FRP	Fiber Reinforced Plastics
	繊維強化プラスチック
GDT	Gas Discharge Tube
	ガス入り放電管
ABD	Avalanche Breakdown Diode
	アバランシェブレイクダウンダイオード
MOV	Metal Oxide Varistor
	金属酸化物バリスタ

5 . 日本の雷と雷被害実態

概 要

本章では、日本の雷の特徴と、近年頻発している風力発電設備の雷被害の実態について調査結果をもとに述べる。

日本の雷の特徴として、夏季(4~10月)と、冬季(11~3月)で発生する雷の様相が大きく異なっていることが挙げられる。

- (1) 夏季における雷雲高度は高く、冬季の雷雲高度は低い。
- (2) 夏季雷の 90%程度は負極性放電であるが、冬季雷は 30~50%程度が正極性放電である。
- (3) 冬季雷には電流継続時間が長く電荷量大きいものがある。電荷量 300C(クーロン)を超える観測事例があり、通常の夏季雷の 100 倍を超えるものもある。
- (4) 夏季雷ではほとんどが下向放電であるが、冬季雷では上向放電の雷が多く観測される。

また、各風力発電事業者へのアンケート調査結果より、雷被害の実態として以下の状況が把握されている。

- (5) 季節別に分けると、冬季の被害発生件数が多い。
- (6) 回答基数に対する被害件数の割合は、中部日本海側が多い。
- (7) 風車が大型化すると、ブレード被害の割合が高くなる傾向がある。
- (8) ブレード被害の地域別割合は、通年では中部日本海側、夏季では関東甲信、冬季では中部日本海側が多い。
- (9) 制御機器被害の地域別割合は、通年では中部日本海側、夏季では東海、冬季では中部日本海側が多い。
- (10) 冬季にブレード被害を被った場合、復旧までの期間が長くなる傾向がある。

5.1 日本の雷の特徴

- (1) 雷雲が発生するためには、大規模で強い上昇気流が必要とされている。雷雲は夏季に多く発生し、雲頂高度は12km以上もの高さとなる。一方、日本における冬季の場合、対馬暖流による比較的暖かい海面に、シベリアからの強い寒気が吹き込み、上昇気流が発生することによって雷雲が発生する。また、夏、冬以外にも、地域的に大気的不安定な状況で雷雲が発生して落雷に至る場合がある。

雷雲の高度は、雷雲が発生する季節や地域により異なるが、冬季の雷雲は高度が低いことが特徴である(図5.1)。冬季では雲底高度が0.3km~0.5kmの低い雷雲が存在する。

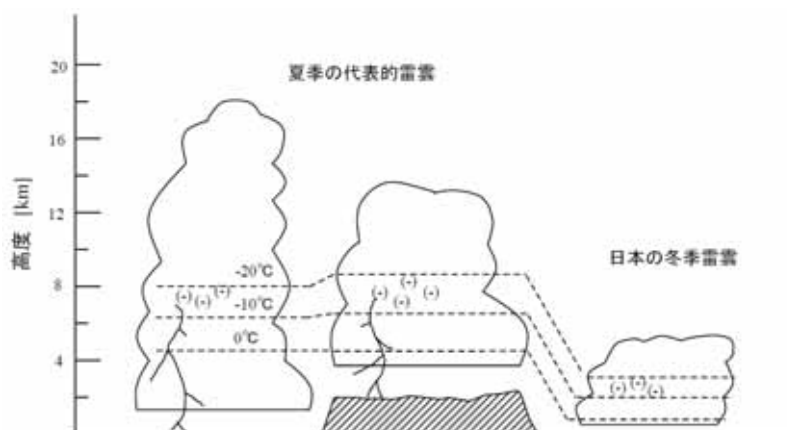


図5.1 夏季、冬季に発生する雷雲の高度比較

- (2) 冬季雷の特徴として、正極性放電の割合が多いということが挙げられる。夏季雷は90%程度が負極性放電であるが、冬季雷では正極性放電の割合が30%~50%程度に増えるとの報告が多い。
- (3) 冬季雷の特徴として、電荷量が大きいもの、雷電流の継続時間が長いものがあるということが挙げられる。電荷量は、瞬時の雷電流の時間積分値で表され、夏季雷では0.1~数10クーロン程度の雷が多いと言われているが、冬季雷では300クーロンを越す例が多数観測されており、通常の夏季雷の平均的な値の100倍を超えるものもある。
- (4) 夏季雷では、極端な高構造物を除き、放電は雷雲から発生し地上へ向けて進展する下向き放電である。一方、冬季雷では、地上の高構造物先端から放電が発生し、雷雲へ向かって上向きに進展を開始する上向き放電の例が多く観測される。このような雷放電は一般にトリガード雷と呼ばれ、冬季は雷雲中の電荷の高度が低く、地表面突起物での初期の電界が夏季に比べ強くなるため、発生しやすくなると考えられている。

5.2 雷被害実態

平成 16～18 年度に実施された NEDO 事業「風力発電設備への落雷対策に関する調査」において雷被害のアンケート調査が行われている。この調査の集計結果から得られた被害状況の概要を以下に示す。このアンケート調査は、風力発電フィールドテスト事業、新エネルギー事業者支援対策事業、地域新エネルギー導入促進事業など、NEDO 及び経済産業省の補助事業により風力発電設備を設置した事業者を対象としたものである。

なお、アンケートの対象は、平成 14 年 4 月から平成 18 年 3 月の 4 年間に発生した風力発電設備の雷被害を対象としている。対象期間が限定されており、得られた回答基数が少なく、データとしての有意性が低い地域も含まれている。

- (1) ブレードの季節別被害発生件数では冬季が 64%、夏季が 36%である。一方、制御機器等の季節別被害発生件数では冬季が 58%、夏季が 42%となり、いずれも冬季の発生件数が多い。
- (2) 回答基数に対する基数当り被害件数の割合は、多くの地域は 30～70%であるが、中部日本海側では 120%と突出している（100%を超えるのは、アンケート期間内で複数回の被害を被った風力発電設備が存在することを表している）。
- (3) 1000kW 未満の風車では、ブレード被害の割合は全体のおよそ 40%を占めているのに対し、1000kW 以上の風車では、ブレード被害の割合は全体のおよそ 75%を占めている。風力発電設備の大型化が進み、風車の地上高が高くなることに伴い、ブレードの被害割合が高くなってきている。
- (4) 全国を図 5.2 で示した 14 の地域に分けて、地域ごとのブレード被害率を年間 100 基当りの被害件数として集計した結果、被害率が高いのは夏季では関東甲信及び山陰、冬季では中部日本海側及び近畿太平洋側となっており、通年で高いのは中部日本海側、近畿太平洋側及び山陰となった。ただし、近畿太平洋側と山陰については得られた回答基数がそれぞれ 2 件と少ない為、データとしての有意性は低い。
- (5) 同様の地域区分による制御機器被害は、被害率が高いのは夏季では近畿太平洋側、四国太平洋側及び東海、冬季では中部日本海側及び近畿太平洋側となっており、通年では中部日本海側、近畿太平洋側及び四国太平洋側が多い結果となった。ただし、近畿太平洋側、四国太平洋側については得られた回答基数がそれぞれ 2 件、3 件と少ない為、データとしての有意性は低い。

(6) ブレードの交換を必要とする被害が発生した場合、ブレード交換には大型クレーン車と、相応の作業スペースが必要となる。冬季には積雪によってこれらクレーン車の搬入や作業スペースの確保が出来ないことから春先まで復旧作業が出来なくなる。そのため、冬季のブレード被害においては復旧期間が長期間となる。

なお、上記は、NEDO 事業「風力発電設備への落雷対策に関する調査」平成 18 年度成果報告書の p34～p56 の結果に基づいているので、詳細なデータを確認する場合は該当箇所を参照されたい。



図 5.2 被害分析に使用した地域区分図
(滋賀県は近畿太平洋側に含む)

6 . 落雷マップ

概 要

風力発電設備を設置する事業者は、設置場所における雷被害がどのようなものであるかを事前に情報として把握して雷保護対策を施すべきである。

しかしながら、日本における雷性状についてはまだ十分に解明されているとは言い難く、不明確な部分も多い。一方で、風力発電設備の増加に伴い雷被害が頻発している状況にもある。

本章では上記のような現状を考慮し、日本において雷被害の発生の可能性が高いと考えられる地域を示す落雷マップを提示する。これは風力発電設備の導入にあたって被害予想の一助となる。

[落雷頻度・被害マップ]

落雷頻度と風車被害との関係には、以下の特徴がある。

- (1) ブレードの甚大な被害については、主として冬季に発生している。さらに、発生地点はピーク電流値 50kA 以上の落雷が多い地域とほぼ重なっている。
- (2) 夏季については、殆どが制御機器またはブレードの軽微な被害であるが、全国的に発生しており地域の偏在性は見られない。

[落雷リスクマップ]

冬季雷に対する対策を優先的に考慮すべき地域を「雷対策重点地域」とする。一方、その他の地域を「雷対策地域」とする。

- (3) 雷対策重点地域は、北海道南部から山陰地方にかけての日本海側の地域に分布している。
- (4) 雷対策重点地域では、特に冬季雷を考慮した雷保護対策を施すことが必要である。

6.1 落雷頻度・被害マップ

これまでに公表されている落雷マップ（付属書A参照）は、落雷の頻度について検討されたものが多い。本ガイドラインにおいては、その落雷頻度マップをもとにして、風力発電設備へのリスクを考慮した落雷頻度・被害マップを検討している。

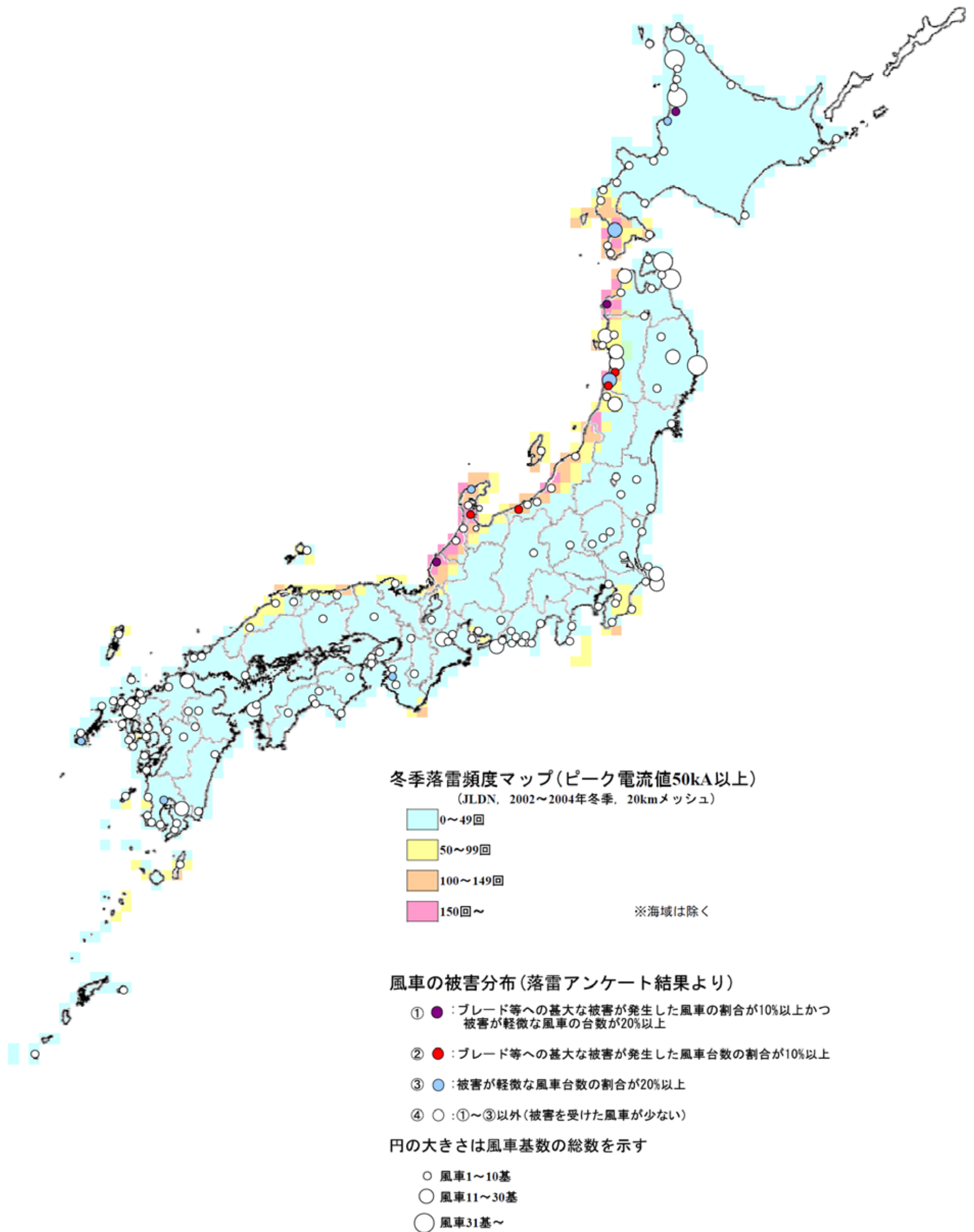
上述のとおり、既存の落雷マップは主として頻度について考慮された落雷マップである。「風力発電設備に対する落雷マップ」を検討する上では、被害に繋がりやすい雷様相を反映させるべきであるが、現状では雷被害と雷パラメータの関係は明確ではない。これまでの知見や付属書Cに示す大電流試験結果から、風力発電設備への被害程度は電荷量や比エネルギーのようなピーク電流値以外のパラメータも影響することが推測されるが、電荷量等を計測した全国規模の雷データは現時点では存在しない。

一方で、NEDO 事業「風力発電設備への落雷対策に関する調査」の6章において、ピーク電流値の大きな雷は比エネルギーも大きいことが示されている。この事を考慮し、落雷頻度・被害マップを検討するにあたっては、JLDN（フランクリン・ジャパン社の雷放電位置標定システム）のデータから、ピーク電流値の高い（50kA以上）データのみを抽出した落雷頻度マップを基本としている。

また、冬季と夏季での被害数を比較すると、5.2節で述べたように冬季の被害数が多く、一方、冬季と夏季の落雷数は夏季の方が多傾向にある。このため、冬季と夏季の落雷数と被害数との関係を比較すると、冬季では落雷数と比較して風力発電設備の被害数が多いことがいえる。これより、冬季と夏季とを分けてデータを整理している。

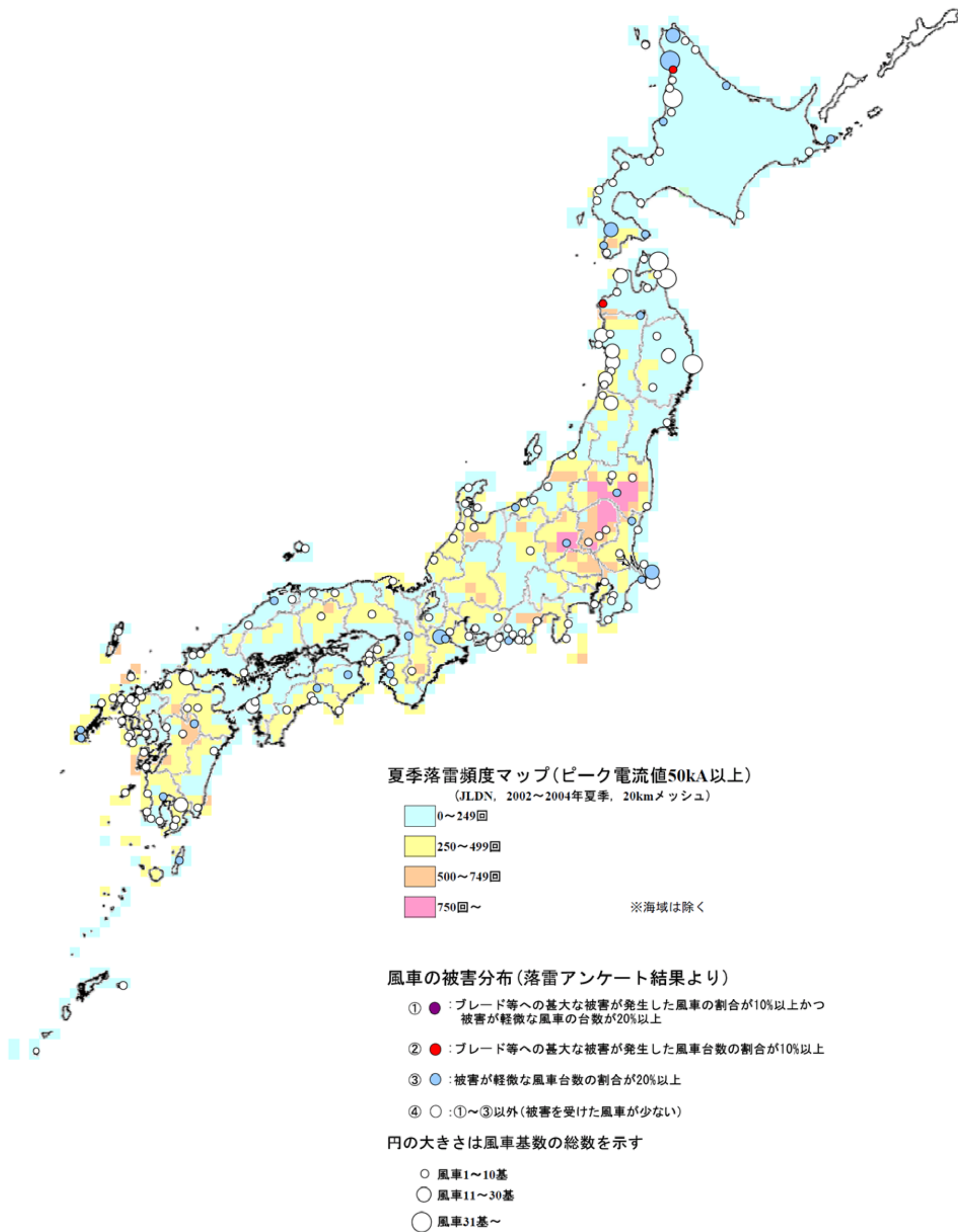
上記電流値及び頻度のデータと、雷被害アンケート結果を重ね合わせたマップを図6.1、図6.2に示す。

冬季（図6.1）においては落雷頻度の多い地域に雷被害、特にブレードの甚大な被害が集中していることが分かる。その為、この地域ではブレードへの対策を優先的に実施することが重要である。一方、夏季（図6.2）においてはブレードへの甚大な被害は殆ど見られないが、それ以外の被害は全国的に発生している結果となっており、電力機器、制御機器等への対策については全国一律で実施することが妥当である。



※甚大な被害とは1ヶ月以上の稼働停止を余儀なくされる場合とした。
風力発電所の位置は2005年NEDOガイドブックによる。

図6.1 冬季の落雷頻度・被害マップ



※甚大な被害とは1ヶ月以上の稼働停止を余儀なくされる場合とした。
 風力発電所の位置は2005年NEDOガイドブックによる。

図6.2 夏季の落雷頻度・被害マップ

6.2 落雷リスクマップ

本節では、前節で提示した落雷頻度・被害マップをもとにして、雷被害予想の一助となる落雷リスクマップを検討する。

図6.1の冬季の落雷頻度・被害マップから、落雷の頻度が多い地域とブレードに甚大な被害が発生した風力発電設備の場所は、ほぼ重なっていることがわかる。また、冬季雷の計測において、北陸地域では400～500クーロンの電荷量を持つ落雷も計測されている。このことから、冬季雷が風車に落雷すると、甚大な被害につながる可能性が高いことが推測される。

一方、図6.2の夏季の落雷頻度・被害マップからは、落雷頻度が多い地域は、北関東・東北・九州地域などであるが、風車の雷被害発生場所は落雷頻度が多い地域に限定されず、全国的に広がっている。また、甚大なブレード被害はほとんど発生しておらず、制御機器等の軽微な被害が大部分である。

これらの結果を総合的に判断して、冬季雷に対する対策を優先的に考慮すべき地域を『雷対策重点地域』として指定した「落雷リスクマップ」を作成した。「落雷リスクマップ」を図6.3に示す。

なお、冬季雷の頻度が多い地域としては、山陰から北海道にかけての日本海側の地域、太平洋側の一部地域及び種子島・屋久島地方があげられるが、太平洋側の一部地域及び種子島・屋久島地方はブレードの甚大な被害も報告されていないこと及び、この地域は冬季の気温が比較的高く、冬季雷としては日本海側で見られる雷の性状とは異なる可能性があることから、落雷リスクマップの雷対策重点地域からは除外している。

図6.3の「落雷リスクマップ」で雷対策重点地域とされる地域に風力発電設備を設置する場合は、特に冬季雷に対しての保護対策を優先的に考慮する必要がある。

この雷対策重点地域において施す具体的な対策については7章の雷保護の章で示す。

なお、本マップは、最優先で雷保護対策を考慮すべきと考えられる地域を現状得られている知見を最大限活用して抽出したものであるが、前述のとおり、日本における雷性状についてはまだ十分に解明されているとは言い難く、不明確な部分も多い。今後の調査等で雷性状の解明が進むことにより、「落雷リスクマップ」の更なる精度の向上が図られることが期待される。

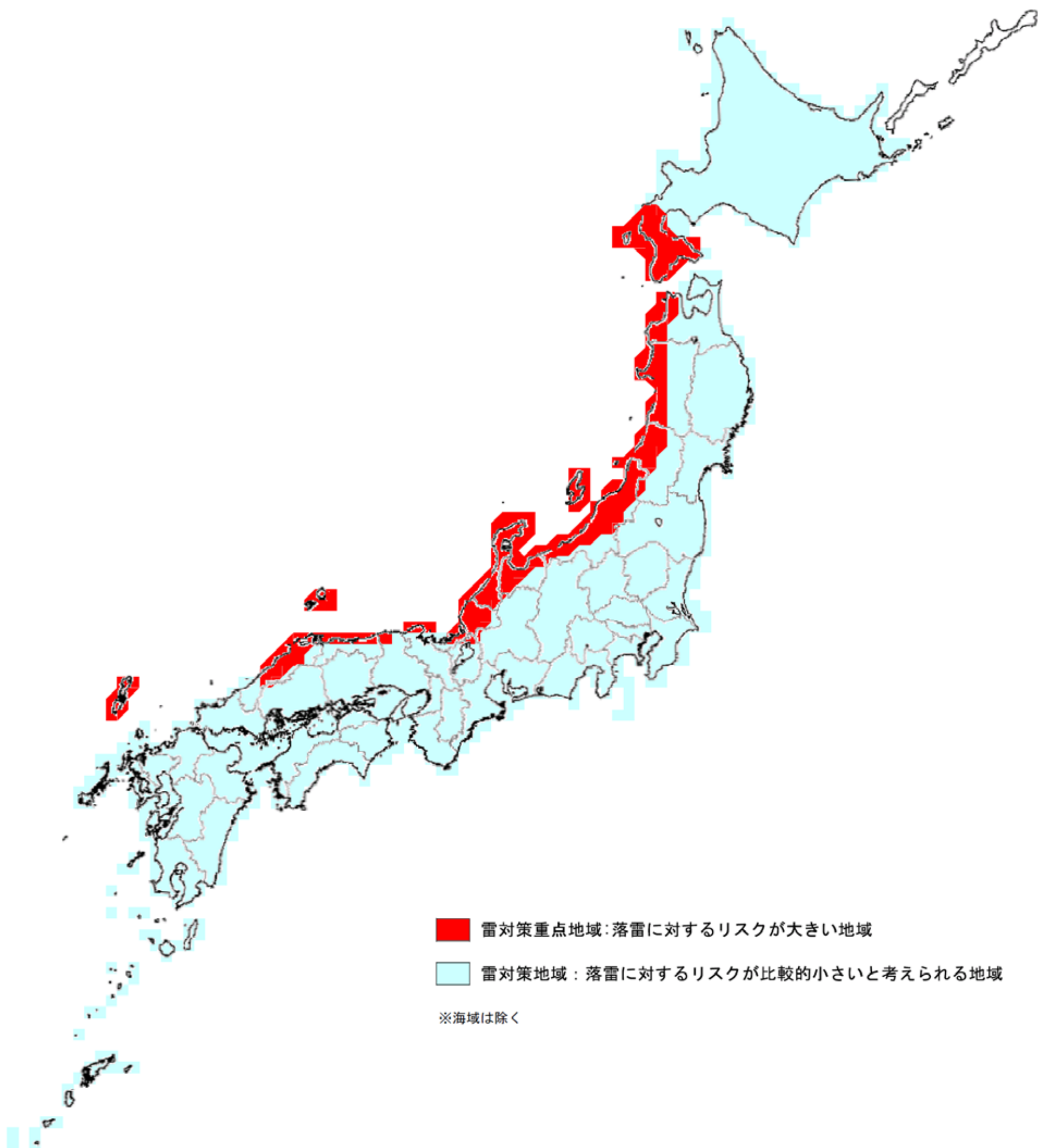


図6.3 落雷リスクマップ

7. 雷保護

概要

風力発電設備の雷保護は現在確立した理論が構築されていないことから、各風力発電メーカ及び事業者が独自に検討し、それぞれ有効だと考えられる対策が施されている。

実際の耐雷効果について客観的な指標を導く為には、実フィールドでの調査、長期にわたる観測が必要であり現状そこまでの検証には至っていないが、現時点でも、有効であると考えられている様々な雷保護対策が存在する。

本章では、IECなどの既存の雷保護資料などを調査し、風力発電設備の各部位における雷保護対策を整理するとともに、本事業で実施した落雷模擬試験（付属書C参照）雷性状のデータ、及び雷被害状況資料等をもとに風力発電設備の雷保護対策を取りまとめた。

以下に示す「(1)風車本体での雷保護対策」は、被雷した時の被害の防止または軽減に効果があるものであり、全ての風力発電設備に有効と考えられることから、優先的に実施を検討するものとする。一方で、「(2)独立避雷鉄塔による雷保護対策」は、環境によっては風車の被雷回数の低減に有効と考えられ、特にブレードの雷保護対策としての効果は高いと考えられる。しかし、完全に被雷を防ぐものではないこと、及び、電力機器・制御機器のサージに対する保護としても十分では無いことから、(2)のみの対策で留めるべきではない。

風力発電設備の雷保護としては、(1)風車本体の雷保護対策、(2)独立避雷鉄塔による雷保護対策の手法がある。

(1) 風車本体の雷保護対策

風車本体での雷保護対策としては、ブレード、電力機器・制御機器及び風向・風速計に対する、それぞれの保護対策が必要である。

1) ブレードの雷保護対策

ブレードの雷保護対策は、以下に示す手法がある。

レセプタの適用

a) レセプタの設置

大型風車のブレードには、雷保護装置としてレセプタを設置すること。

b) レセプタの配置

ブレードへの雷撃は、侵入方向が特定出来ない。そのため、レセプタは、ブレードの大きさに応じて複数設置する、あるいは雷撃の損傷を受けやすいブレード先端及びエッジ部分に配置することが効果的である。

c) レセプタの材質（物性・サイズ）

レセプタは、雷を受けると熱により溶融する場合があるため、レセプタに用いる材料は、その物性やサイズを考慮すること。

適正なダウンコンダクタ（引き下げ導体）

ダウンコンダクタは、雷電流を安全に大地に放電できる設備構造とすること。そのために、当該地域の雷性状を考慮し、十分な電流容量をもつ導体で施設するとともに、接続部も雷電流を安全に流せる設備構造とすること。

ブレードの強化

レセプタを設置した場合であっても完全に雷撃からブレードを保護することは難しく、レセプタ部位以外への雷撃によりブレード表面の損傷や貫通破壊などが発生する可能性がある。したがって、ブレードも機械的強度を高めた構造を選択することにより、雷被害の減少効果がある。

2) 電力機器・制御機器の雷保護対策

電力機器・制御機器の雷保護に関しては、電気事業法、電気設備技術基準、及び IEC/TR61400-24 に準拠した対策とすること。

例としては、以下の保護対策がある。

入力ライン等への避雷器 (SPD) の設置

低インピーダンスの接地システム

その他にも、シールド変圧器の設置等があげられる。

3) 風向・風速計の雷保護対策

風向・風速計設備に対して、ナセル上に避雷針を設置するなどにより、安全に保護できる構造とする。

(2) 独立避雷鉄塔による雷保護対策

前述した風車本体における雷保護対策が十分でないと予想され、雷雲の襲来方向がある程度限定されている場合には、独立避雷鉄塔を設けることにより、避雷効果を高めることができる。

独立避雷鉄塔は、当該鉄塔の高さや風車との位置関係などが、その効果の重要な要因となる。

7.1 雷被害の様相と雷保護対策

風力発電設備に落雷があった場合、被害発生の様相は被雷部位によって異なる。落雷を大きく分けると、風車のブレードに被雷する場合、ナセル部に被雷する場合、通信線・配電線に被雷する場合がある。この他に、雷サージが電気機器・電子機器に伝搬し破壊に至る場合もある。それぞれの被害発生の様相をまとめたものを図7.1に示す。

雷は自然現象であり風力発電設備への被雷部位を制御できるものではない為、雷保護対策としてはそれぞれの部位について当該地域での雷性状に耐えうる構造としなければならない。

ただし、通信線・配電線への落雷については風力発電設備に特有なものではなく、一般的電気設備としての対策が確立されているため、既存の対策を適用するものとする。なお、通信線・配電線の対策については、参考文献5)及び6)等を参照して対策されたい。

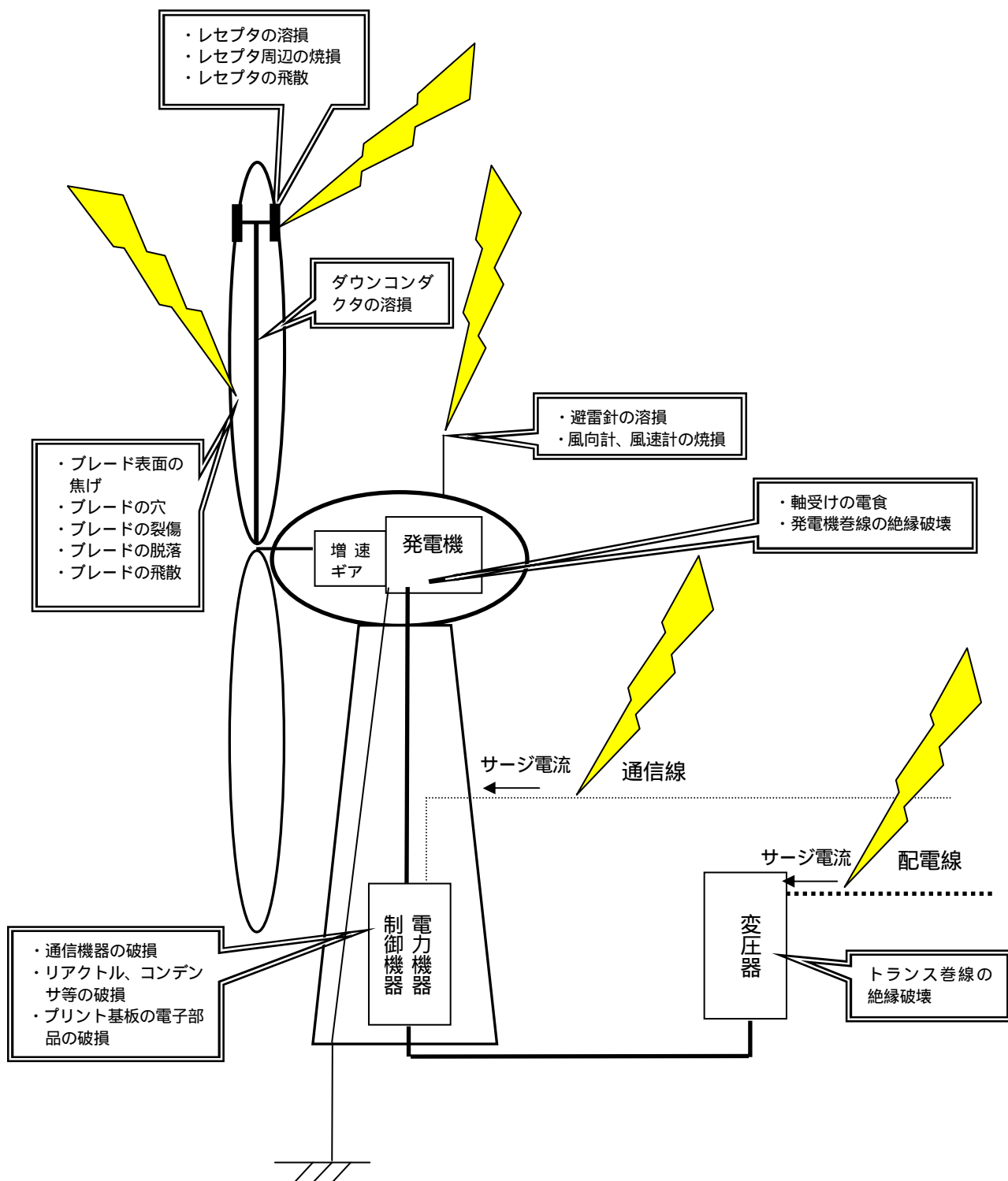


図 7.1 風力発電設備への雷撃時の被害発生様相

図7.1にもとづき、必要となる雷被害に対する保護対策をまとめたものを図7.2に示す。

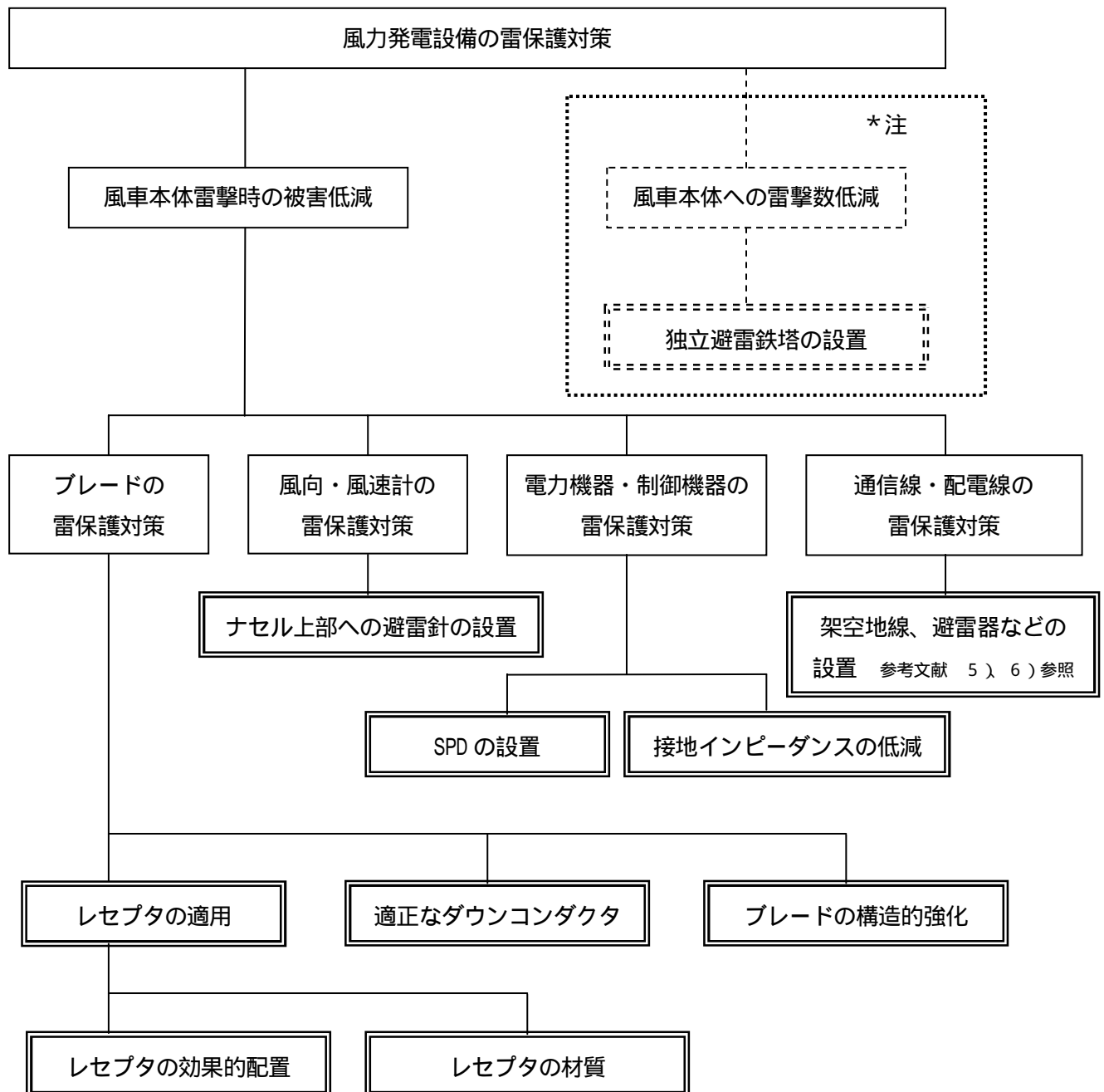


図7.2 風力発電設備の雷保護対策

*注：風車本体による雷保護対策が十分でないと予想され、雷雲の襲来方向がある程度限定されている場合には、独立避雷鉄塔を設けることで風車本体への雷撃数を低減できる。

7.2 風車本体の雷保護対策

(1) ブレードの雷保護対策

風力発電設備の雷被害の中でも、ブレードの被害は損害が大きくなるため、ブレードへの避雷対策を十分に実施することは特に重要である。本ガイドラインでは、各種文献調査及びヒアリングに加え、実ブレード（先端部 3m）を用いた落雷模擬試験により、ブレードの雷保護対策の有効性について検討を行っている。以下、これらの結果から導き出された雷保護に有効な対策手法を示す。

ただし、他の対策により同等の効果が得られると推測される場合は、その対策を優先しても良い。また、ブレードの絶縁性能や機械的強度に革新的技術が適用される場合も同様である。

レセプタの適用

a) レセプタの設置

接地側に配置された清浄な絶縁物は、放電電圧に影響を与えない可能性が高いことが実験的に明らかにされている。したがって、レセプタの無い絶縁物ブレードの場合、特にブレードが清浄状態であればブレードへの雷撃を増加させる要因とはならないと考えられるが、「雷撃を回避」する効果も無いことからブレードに被雷することは十分考えられる。また、実風車の場合はナセル部が大地と等電位であるため、ナセルへと向かう放電過程においてブレードに放電する可能性が高い。さらに、ブレードが汚損している場合は、ブレードへの雷撃確率が高くなる。

さらに、絶縁物ブレードの場合は、ブレードに雷撃が生じると、貫通破壊によるブレード内部への放電に進展する可能性が高い。ブレード内部でアークが発生した場合は、ブレードの破損に至ることが考えられ、これは落雷模擬試験でも確認されている。したがって、絶縁物ブレードでは、雷撃に対してのブレードの破損対策が重要になるものとする。

以上を踏まえて、ブレードに種々のレセプタを配置して落雷模擬試験を行った結果、レセプタ付きブレードでは、高い確率でレセプタに直接被雷し、レセプタ以外のブレード部分への雷撃を防ぐ効果があることが確認できた。なお、エッジにレセプタを配置した場合、垂直方向からの雷撃は、ほぼ 100%雷撃を捕捉する結果となっている（付属書C 表C 1.5 参照）。

したがって、ブレードへの雷保護対策としてレセプタを設置することは有効であると言える。

b) レセプタの効果的配置

ブレードに種々のレセプタを配置して落雷模擬試験を行った結果、以下のようにブレードにレセプタを配置することは、ブレードの雷保護に対して有効であると考えられる結果が得られている。

i) レセプタを複数個配置する

ブレードへの雷撃は侵入方向が特定出来ないことから、レセプタをブレードのサイズに応じて複数個設置して、レセプタによる雷捕捉の可能性を高くすることが有効である。

ii) ブレード先端部分・エッジ部にレセプタを配置する

ブレード先端部にレセプタを配置すること、あるいはエッジ部にレセプタを配置することは、雷捕捉により効果があるといえる（付属書C p56～p60 参照）。

c) レセプタの材料（物性・サイズ）

レセプタ材料は、雷を受けると熱により溶融する場合がある。このため、熱による温度上昇を考慮して十分な性能を維持出来るレセプタを選定する必要がある。

レセプタの雷に対する耐久性を高める為に、以下の項目を考慮すること。

i) 溶損の少ない材質で製造されたものを用いる

レセプタへの適用にあたっては、付属書Cの p66「4. レセプタ選定のための基礎試験結果」等を参考として、材質及び特性を考慮して選定する必要がある。

ii) 適正サイズ（大きさ、厚み）のレセプタを用いる

エネルギー（電荷量）の大きい雷撃に対しての耐久性を考慮したレセプタのサイズ（大きさ、厚み）形状とすること。

ダウンコンダクタ（引き下げ導体）

ダウンコンダクタ（引き下げ導体）は、雷電流を安全に大地に放電できる設備構造とする。ダウンコンダクタのサイズ等の具体的な規定は、IEC/TR61400-24 に記載されており、十分な耐雷性能（材料及び太さ）を持つ導体で施設し、導体接続部についても雷電流を安全に流せる構造とすることが必要である。

ブレード自身の機械的強化

ブレードにレセプタを設置した場合でも、レセプタ以外のブレード部分に被雷して、ブレード内部へアークが進展し、内部圧力上昇からブレードの破壊を生じる可能性がある。このため、レセプタの設置に加えてブレードそのものを機械的に強化することは、ブレードの貫通破壊防止及びブレード内部にアークが発生した時の圧力上昇によるブレード破壊の防止に有効であると考えられる。

また、現状では現実的とはいえませんが、ブレード全体を金属とすること、もしくは金属程度の導電性を持たせ、また、雷撃電流にも耐えられるようにすることができれば、ブレード内部へのアーク進展による圧力上昇は生じず、極めて有効な対策となる。

ただし、これらの対策は、重量増など他の問題も発生するため、さらなる技術開発が必要である。

その他

これまでの検討に加え、雷保護の観点から以下の点を考慮することも、雷被害の拡大防止に寄与すると考えられる。

・水分の混入について

ブレード内部に水を入れて水中でアークを発生させた試験では、水が無い場合より損傷が大きくなる傾向が見られた（付属書C p65 水の影響を参照）。このことから、実ブレード内部においても結露等の理由で内部に水分が含まれていた場合、被雷による内部圧力の上昇によりブレード破損に至る可能性があるといえる。したがって、ブレード内部に水が溜まらないような手法を講じることも雷対策として有効であると考えられる。実際に製作されているブレードの中には、先端部に水抜き穴を設けて回転時に遠心力により水が抜けるようにしている構造のものもある。

なお、これらの知見は 1000kW クラスの実風車ブレードの先端 3m 部分を用いた落雷模擬試験によって得られた結果であり、実風車における様相とは異なる可能性がある。今後、実際の風力発電設備における雷撃様相、被害状況などのデータの蓄積が望まれる。

(参考) ブレードの材質・構造

これまで、国内外のメーカーにより種々の形式、材質の耐雷性能を考慮したブレードが開発されてきたが、それらは以下に示すタイプに分類できる。

ブレード内導線方式

絶縁物であるブレード本体に導体（金属製）のレセプタを設け、レセプタに接続した導線をブレード内部に配線することにより雷電流を接地へと流す方法。

ブレード外導線方式

基本的な考え方は と同様であるが、導線をブレードの表面に設け、導線に受雷効果を持たせる方法。

導電性素材を使用したブレード

ブレード材質として導電性の炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を使用し、雷撃電流をブレード全体で流そうとする方法。表面に導電性の物質を塗布する方法及びブレード全体を金属製とする方法もこれに分類される。

絶縁物ブレード

雷電流を大地に安全に放電させることを目的とする上記 ~ のブレードとは異なり、雷撃そのものを阻止することを目的として、ブレード全体を絶縁物とする方法。

近年生産されている風車に用いられているブレードは、 または としたものが多い。 については実験室レベルか試験的に導入されているのみであり、 については中型までの風車に使用されていたが、風車の大型化にともない最近では生産されていない。

また、レセプタ形状等は各風車メーカーにより異なる。これは、保護対策を各メーカーが独自の設計思想に基づいて検討し、それぞれ有効と考える手法を取り入れているためである。

(2) 電力機器・制御機器等の雷保護

電力機器の雷保護

電力機器に対する雷保護対策は、電気事業法、電気設備技術基準、及び IEC 規格に規定されており、これに準拠して実施することとなる。

具体的には、避雷器等によるサージの抑制、絶縁変圧器による機器内部と外部との絶縁、導電物による機器のシールドなどがあげられる。

また、冬季雷では、構造物への雷撃が配電設備に逆流し、配電線に設置されている避雷器を焼損した事例が報告されており、このような被害への対策は配電線耐雷設計ガイドに示されている。

制御機器への雷保護

制御機器の低圧回路に対しては、雷サージに対する保護システムを施す必要がある。以下に、これらの低圧回路における対策の例を示す。

i) 雷サージ侵入の抑制

低圧回路への雷サージ侵入を抑制する方策としては、金属シース付きケーブルを用いること、絶縁変圧器を用いることなどが有効である。必要に応じて、サージ抑制素子 (SPD) を適用することも有効である。また、サージ電流は、電源線や信号線を伝わって侵入するので、信号線については銅線を用いずに光ファイバーケーブル及びフォトカプラを使用することで、サージ電流の侵入を防止することもできる。

これらの対策により、風力発電設備への落雷時に風車塔体やダウンコンダクタに流れる雷撃電流の一部流入や、電磁的結合で低圧回路に生じるサージ電流による障害の防止を図ることができる。

ii) 侵入サージの低減

低圧回路に対するサージ電圧を抑制するには、ギャップ型のガス入り放電管 (GDT)、アバランシェブレークダウンダイオード (ABD)、半導体型の金属酸化バリスタ (MOV) などの SPD を用いることが有効である。保護システムの設計に当たっては、保護すべき機器の耐電圧などを考慮して、適切な素子を選択する必要がある。

接地システム

風力発電設備への雷撃電流は、速やかに大地に分散させて人間及び装置に危険な過電圧を制限する必要があり、そのためには低インピーダンスの適切な接地システムを備えることが必要である。接地については IEC/TR61400-24「9. 接地」及び電気設備技術基準を参考に施設する。なお、「発電所及び地中送電線の耐雷設計ガイド」などにその考え方が記載されている。

(3) 風向・風速計の雷保護

風車の運転を制御する上で重要な観測機器である風向・風速計を保護する避雷設備も重要である。これら観測機器の損傷は風車制御系の不備に繋がり、強風等でブレードに過負荷がかかり破損に至ることが考えられる。このため、これら観測機器を安全に保護できる構造とする必要がある。保護手法としては、避雷針を風車のナセル上部に取り付ける方法が有効である。

7.3 独立避雷鉄塔による雷保護対策

風車本体だけでの雷保護対策だけでは十分でないと考えられ、雷雲の襲来方向がある程度限定されている場合には、独立避雷鉄塔を設置することは、風車の雷保護の効果を高めることとなる。この際、この独立避雷鉄塔は風車との位置関係を考慮する必要がある。

冬季雷では、風上側に高構造物が設置されていると、風下側の構造物への雷撃が減少することが知られている。これは、雷雲が風に乗って移動する際に、高構造物から上向き放電が発生し、雷雲との間で放電を生じるためと考えている。このことから、冬季における卓越風向風上側に独立避雷鉄塔を設置することにより、エネルギーが大きい冬季雷の風車本体への雷撃を有効に回避できると考えられる。なお、このような独立避雷鉄塔の接地は、ウインドファームの共通メッシュ接地や他の風車の接地を含めて十分検討する必要がある。

このように、風車本体だけでの雷保護対策だけでは十分でないと考えられる場合には、独立避雷鉄塔を設置することにより、ある程度のブレードへの落雷を回避することが出来る。

ただし、夏季雷に対しては、雷撃の侵入方向に明確な方向性が認められない場合が多いため、冬季雷に対するほどの雷保護効果は期待できない。

8 . 雷被害のリスク及びリスク低減対策

概 要

7章で述べたような対策を全て施すことにより雷被害を限りなく低減することは可能であるが、多くの事業者にとって、コスト面等の事情により全ての対策を施すことはできない場合もあると考える。また、日本では6章で述べたように特に雷に対するリスクの大きな地域が存在し、このような地域とそれ以外の地域では、必要とされる雷保護対策の程度が異なると考えられる。

そこで本章では、風力発電設備が被る様々な雷リスクを評価することで、風力発電設備を設置する際に施すべき対策の指針を示す。まず雷リスクに対する考え方を定義し、リスクの発生頻度・被害程度に基づいた各リスクを評価する。さらにリスクの高い被害に対して効果的な対策を示す。

なお、風力発電設備の雷被害のリスクと一言で言っても、安全、環境、経済性など極めて広範にわたるが、雷のリスクの大小の評価は雷被害による経済的損失を考慮して評価している。

なお、リスクの定量的評価手法についても検討しているが、こちらは付属書Bに提示した。

風力発電設備は、設置地点により雷リスクが異なる。そこで、被害リスク低減対策を検討する際には、北海道南部から山陰にかけての日本海側の雷対策重点地域とその他の地域を考慮すること。

(1) 雷対策重点地域に風車を設置する場合

雷対策重点地域においては、特に冬季に電荷量が300クーロンを超える雷が観測されている。このため、大電荷量を考慮した上で、以下の対策を十分に施すことが必要である。

1) ブレードの雷保護

- ・複数のレセプタやブレード先端部のレセプタなど、保護効果の高い方式の採用。
- ・300クーロン以上の電荷量を考慮したダウンコンダクタなどの設置。

2) 電力機器、制御機器の雷保護

- ・入力ラインへの避雷器(SPD)の設置。
- ・風向・風速計保護のためのナセル上部避雷針の設置。
- ・低インピーダンスの接地システムの導入。

3) 設備全体への雷保護(独立避雷鉄塔)

- ・風車で雷保護が十分に出来ない場合、雷雲の襲来方向がある程度限定されている場合には、独立避雷鉄塔を風車の近辺に設置することも被雷数の低減に有効。

(2) 雷対策地域に風車を設置する場合

雷対策地域では、下記に示す比較的対策効果が高いと考えられる対策について検討し、可能な限り実行すること。

- ・レセプタを取り付けたブレードの採用。
- ・制御機器等の入力ラインへの避雷器 (SPD) の設置。
- ・風向・風速計保護のためのナセル上部避雷針の設置。
- ・低インピーダンスの接地システムの導入。

8.1 雷被害リスク低減のための雷保護対策

雷リスク評価手法は、最近研究が開始されたところである（参考文献 8）参照。

本ガイドラインにおいては、雷被害のリスクを評価する際には、人的被害、物的被害を事業者にとってのコストの損失と考え、「損失の大きさ」「被害の発生確率」の二つをパラメータとして検討する。

上記の被害（コストの損失）を「損失の大きさ」「被害の発生確率」の二つのパラメータで評価したものを表 8.1 に、発生する雷被害を分析したものを図 8.1 に示す。

なお、表 8.1 の「損失の大きさ」は、以下のように設定している。

被害小：レセプタの溶損など、被害が少なくすぐに復帰できるもの。

被害中：補修を必要とするが、補修することによりすみやかに復帰が可能なもの。

被害大：被害程度が大きくすぐに運転できない、部品交換後に復帰が可能なもの。

極めて大：ブレードの交換を必要とする被害のように、長時間運転出来ない状態となるもの。

実際には、事業者によって部品の手配の早さが異なる場合があるので、同等の被害でも事業者によって損失が異なるが、今回は一律に評価をおこなうために、風力発電設備の立地条件・メンテナンス条件については同等として評価している。

また、「被害の発生確率」の大中小については、被害報告の多さで設定している。

6章で述べたように、特に冬季雷地域においてブレードの雷被害が多いという結果が得られていることから、これまでに挙げられた各雷保護対策の中でも、特に「雷保護対策の効果が大きいと考えられるもの」「ブレードへの対策となるもの」は、冬季雷地域において優先して対策を施すべき事項であると考えられる。

については、図 6.3 における雷対策重点地域は、冬季雷地域であり、落雷に対するリスクが高い地域と考えられるので、雷保護対策は重要である。このことを考慮して検討した結果を表 8.2 に示す。雷保護対策は全て検討が必要であるが、「優先的に検討」「最優先で検討」と書いた項目については、特に重要であることを示している。

表 8.2 の中で、「対策効果の大きさ」については、ブレードへの甚大な被害につながりやすい被害様相「ブレードの裂傷」「ブレードの脱落」に対して効果が見られるものを効果『大』、複数の被害様相に効果が見られるものを効果『中』（ただし、「風向・風速計の破損」は、風向・風速計に対する保護手段が限られていることから、「ナセル上部避雷針」の重要度が高いと判断して例外的に『中』としている）その他を『小』としている。

表 8.1 風力発電設備で想定される損失の大きさと被害確率

番号	部位	被害内容	損失の大きさ C (修復費用・時間)	被害の発生 確率 Ps ()
	ブレード	レセプタの溶損	小	- (中)
		レセプタ周辺の焼損	小	- (大)
		レセプタの飛散	中	- (小)
		ブレードの貫通痕	中	中(中)
		ブレードの裂傷	極めて大	中(小)
		ブレードの脱落	極めて大	中(小)
		ブレード表面の損傷	小	大(大)
		ダウンコンダクタの溶断	大	- (小)
	ナセル	風向・風速計の破損	小	小
		発電機・ギアの軸受けの電食	大	小
		発電機の絶縁破壊	大	小
	制御機器 電力機器	電力機器の絶縁破壊	大	小
		低圧回路の絶縁破壊	中	小
		電子部品の誤動作、損傷	小	大

括弧内はレセプタ設置の場合。発生頻度が「-」となっている項目：レセプタ等受雷部に関する損傷を想定したものであるため、レセプタ非設置の場合は被害自体が想定されない。

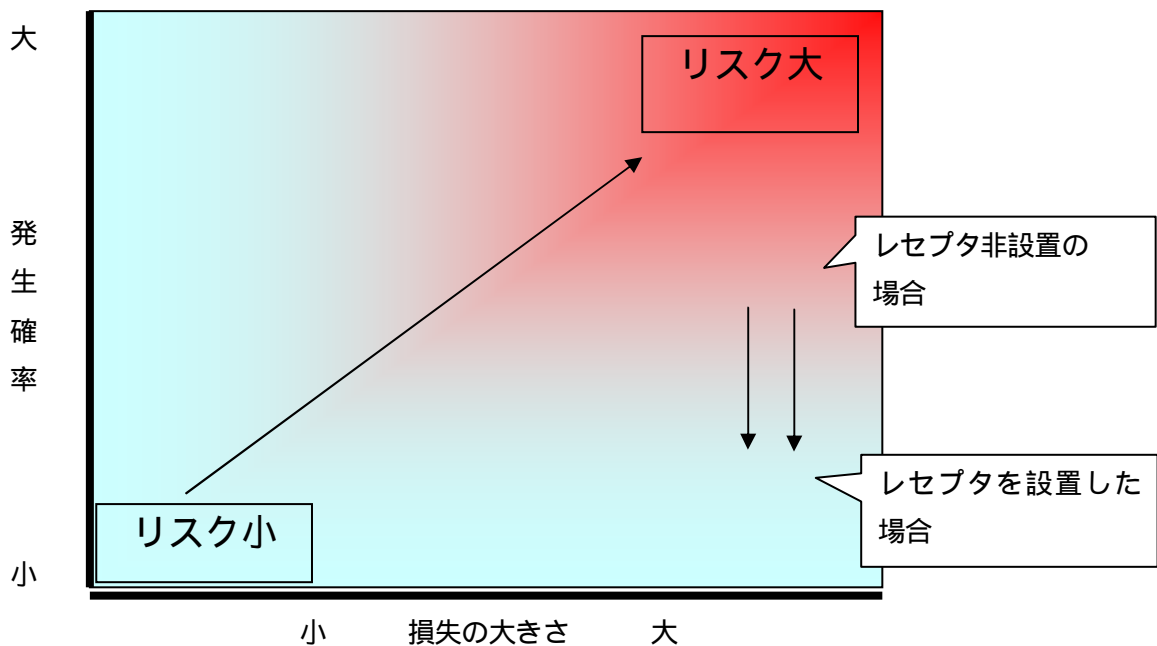


図 8.1 風車で想定される雷被害の頻度と損失の大きさ
(斜体 〃 はレセプタ非設置、 〃 はレセプタを設置した場合)

表 8.2 雷保護対策の重要度

対策内容	表 8.1 の 被害様相番号の対応	対策 効果の 大きさ	必要な雷保護対策()	
			マップ図 6.3 の 雷対策地域で 設置する場合	マップ図 6.3 の 雷対策重点地域 で設置する場合
レセプタの大型化	, ,	小	検討	検討
レセプタの複数化	, , , , ,	中	検討	優先的に検討
ブレードの先端レセプタ	, , , , , ,	大	優先的に検討	最優先で検討
ブレード先端の金属化	, , , , , ,	大	優先的に検討	最優先で検討
ダウンコンダクタの強化		小	検討	最優先で検討
ナセル上部避雷針		中	優先的に検討	優先的に検討
ギアボックス, 発電機の軸受けに 絶縁軸受けの使用とアースブラシの併用		小	検討	検討
ギアボックス, 発電機の絶縁		小	検討	検討
耐雷トランスの適用	, ,	中	優先的に検討	優先的に検討
機器の入出力端への避雷器取り付け	, ,	中	優先的に検討	優先的に検討
信号線の光ファイバー使用	,	中	優先的に検討	優先的に検討
接地システムの強化	, , ,	中	優先的に検討	優先的に検討

この表は、雷保護対策の優先順位を示したものである。

雷対策は全て検討が必要であるが、「最優先で検討」、「優先的に検討」、「検討」の順で重要度が高いことを示している。

8.2 雷対策重点地域に風力発電設備を設置する場合における雷保護対策

北海道南部から山陰にかけての日本海側の雷対策重点地域（図6.3参照）に風車を設置する場合、十分な雷保護対策を施すべきである。特に冬季には電荷量が大きい雷撃が観測されていることから、ブレードへの保護対策を施すことが重要である。ただし、他の雷保護対策により、同等の効果が得られると推測されるのであれば、この限りでは無い。

（1）レセプタ・ダウンコンダクタの適用

表8.1にあげた項目について、損失の大きさと被害発生確率の関係をグラフ化したものが図8.1である。図8.1で、左下から右上領域に近づくほど、被害の発生確率も損失も大きくなることを示す。すなわち、右上領域に近づくに従い、リスクが大きいことになる。現時点では、各項目の定量的評価を行うにはデータが十分ではないが、損失の大きさを考慮した場合、項目の「ブレードの裂傷」及び「ブレードの脱落」が最も優先して対処を施す必要がある項目となる。図8.1の中で「ブレードの裂傷」及び「ブレードの脱落」についてレセプタの有無によるリスク（発生確率）の変化を示したが、レセプタの設置により項目の「ブレードの裂傷」及び「ブレードの脱落」のリスクが減少し、全体としてリスクの小さな領域に事象が収まっていることとなる。

雷対策重点地域では、ブレードの雷保護対策としてレセプタ設置は重要である。

また、レセプタの複数設置、先端レセプタの設置は、「ブレードの裂傷」及び「ブレードの脱落」のリスクの低減効果に大きく寄与するものと考えられる。雷対策重点地域で風力発電設備を設置する場合は、このようなレセプタを取り付けたブレードを選定することが雷保護対策として有効である。

また、レセプタ、ダウンコンダクタは、その地域の雷性状に合わせて適切である必要がある。ダウンコンダクタのサイズは国際的規格である IEC/TR61400-24 で規定されており、保護レベルの場合は 300 クーロンの電荷量を想定したものとなっている。

一方、日本の雷対策重点地域における落雷の例として、NEDO 事業「風力発電設備への落雷対策に関する調査」で計測した電荷量分布を図 8.2 に示す。図 8.2 は石川県碓石ヶ峰において 2004～2006 年の 3 年間の冬季に計測できたもの（夏季も一部計測したが観測値無し）であり、当該地点においてこの 3 年間で 110 回の落雷が観測され、このうち 300 クーロン以上の電荷量の落雷が 3.6% 観測されている（最大は 430 クーロン）。風車の耐用年数とされる 20 年間の運用を想定すると、冬季には約 733 回の落雷があり、300 クーロン以上の雷の回数は約 27 回と推定される。なお、福井県の高さ 200m の煙突への冬季の雷撃を観測した例でも、300 クーロン以上の雷が多数観測されている。

以上のことから、このような雷対策重点地域に設置する風力発電設備の場合は、IEC 保護レベル、電荷量 300 クーロンを想定した雷保護対策では不十分であるといえる。本事業の観測期間が 3 年間という短期間の観測であるが、500 クーロン以上の電荷量に耐えられる雷保護対策を施す必要があるものと考えられる。

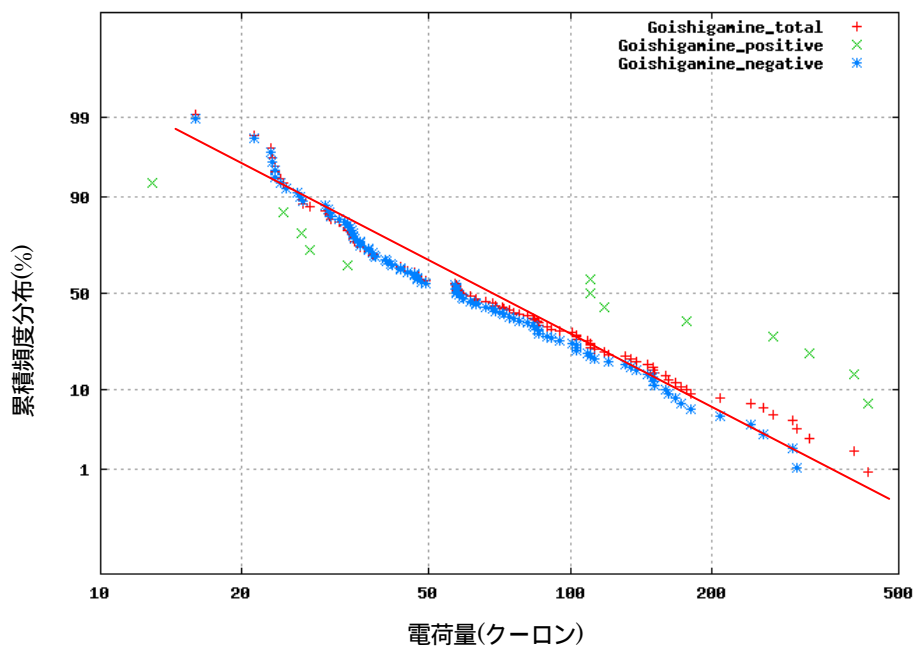


図 8.2 碓石ヶ峰風力発電所で観測された雷の電荷量累積頻度分布
 (赤：総数 緑：正極雷のみ 青：負極雷のみ)

(2) 電力機器・制御機器

雷対策重点地域においては、表 8.2 に示す電力機器・制御機器への対策（「電力機器の絶縁破壊」、「低圧回路の絶縁破壊」及び「電子部品の誤動作、損傷」）も重要である。耐雷トランスの設置、SPD の設置、信号線の光ファイバー化、及び接地の強化が特に検討すべき項目となる。また、風車の制御上重要な位置付けにある「風向・風速計の破損」防止の為にナセル上部避雷針の設置も重要であるといえる。

(3) 設備全体への雷保護（独立避雷鉄塔）

7章でも述べたが、風車本体の雷保護対策だけでは十分でないと考えられ、雷雲の襲来方向がある程度限定されている場合には、独立避雷鉄塔を風車近傍に設置することも、被雷回数低減による効率的な雷保護対策となる。

特に雷対策重点地域は冬季雷による雷害リスクが高い地域であり、冬季は季節風による卓越風向が顕著である。したがって、風車設置場所の冬季卓越風向風上側に独立避雷鉄塔を設置すれば、エネルギーが大きい冬季雷の風車本体への雷撃を効率的に回避できると考えられる。

設置場所の確保、コスト面等の問題もあり、独立避雷鉄塔の設置が難しい場合もあるが、条件によっては大きな対策効果が望める雷保護対策である。

8.3 雷対策地域に風力発電設備を設置する場合における雷保護対策

図 6.2 の夏季の落雷頻度・被害マップにも示すように、雷対策重点地域以外でも軽微な雷被害は全国で発生している。したがって、基本的には雷対策地域においても、風力発電設備を設置する場合には雷保護対策は必須であると考えられる。

したがって、表 8.2 に示すようにブレードへのレセプタの複数設置、耐雷トランスの設置、SPD の設置、信号線の光ファイバー化、接地システムの強化、及びナセル上部避雷針設置等の検討が必要となる。

9 . 今後の課題

本ガイドラインでは NEDO 事業「風力発電設備への落雷対策に関する調査」で得られた落雷に関するデータ、本事業で実施した落雷模擬試験と、落雷に関するアンケート調査、及び各種文献調査より得られた知見に基づいて、風力発電設備への有効な雷保護対策を整理し記載している。併せて、国内でも雷被害のリスクが大きい雷対策重点地域をマップで提示し、同地域で風力発電設備を設置する場合に、留意すべき事項について記載している。

しかし一方で、ガイドライン作成に際し現時点で得られた知見を最大限活用しているが、雷放電現象は学術的に解明されていない点も多くあるので、今後さらなるデータの蓄積を行い、ガイドラインとして充実していく必要がある。その為の課題として、以下のような点があげられる。

1) 落雷リスクマップの精度向上

本事業では、日本における季節別の落雷の頻度、ピーク電流値のデータ、及び雷被害の調査結果をもとにして、落雷リスクマップを提案した。この落雷リスクマップで雷対策重点地域を示したことにより、事業者に対して落雷保護の必要性を示すことができたと言える。

一方で、風力発電設備の雷被害を減少させるには、電荷量等のピーク電流値以外の雷に関するパラメータを把握することも必要であることが示されているが、地域毎の雷エネルギーの定量的評価は、これまで十分になされてきていない。また、雷現象を把握するには多くの気象データの蓄積が必要であり、落雷リスクマップの精度を向上させるには、長期的及び全国的なデータの蓄積が必要である。

これらの状況から、全国各地の雷性状を実雷観測等により把握し、正確にマップに反映させて落雷リスクマップの精度向上が図れるならば、より実状に即した効果的な雷保護対策の指針になる。したがって、今後さらなる実雷データの収集等の調査研究が望まれる。

2) 模擬試験とその検証データの有効性の確認

本事業では、発電出力 1000kW クラス風車の実ブレード先端部 3m の模擬ブレードを製作し、これを用いて高電圧放電試験、大電流エネルギー試験の落雷模擬試験を実施した。模擬試験では、試験設備の制約より、高電圧と大電流を同時に印加することが出来ないことから、それぞれ個別な試験となったが、この試験から得られたレセプタの有効性などのデータが、ブレードの雷保護対策としてガイドラインに反映された。

ただし、今回実施した落雷模擬試験法については、研究者の間でも色々な意見があり、将来的には実際の雷撃様相の観測などに基づく試験法の妥当性検証と合理的試験法の確立が望まれる。

3) 雷リスク評価の定量的検討

今回のガイドラインでは、落雷リスクマップと雷保護の知見から、地域毎の落雷リスクを評価したが、限られたデータでの評価であり、現時点では定性的な評価に留まらざるを得なかった。

より効果的な雷保護対策の確立のためには、今後さらに落雷模擬試験、保護対策の実用上の効果を実雷環境下で確認すること、及び被害動向に関する事業者への調査などで、雷保護の有効性を検証するデータの蓄積を行い、定量的な落雷リスク評価を行っていく必要がある。

4) 洋上風力発電設備における雷保護検討

日本の風力発電は、今後洋上に建設するケースが予想されている。今回のガイドラインは、陸上における落雷リスクマップや雷保護対策を示してきたものである。一方、洋上では雷の様相及びそれに対する雷保護対策は異なるものと考えられる。ついては、洋上における雷観測、塩害等に関する洋上での影響把握等の洋上風力雷保護対策の検討も進める必要がある。

参考文献

- 1) 新藤, 浅川, 松浦 「絶縁物への放電特性 (風車雷撃の一検討)」 平成 18 年電気学会全国大会 No.7-136, 2006.
- 2) 新藤, 浅川, 松浦 「絶縁物への放電特性 (その 2) - 印加電圧極性の影響 - 」 平成 18 年電気学会基礎・材料・共通部門大会 2006.
- 3) NEDO 「風力発電設備への落雷対策に関する調査」 2006.
- 4) JIS - A4201 : 2003 「建築物等の雷保護」 2003.
- 5) 電力中央研究所耐雷設計委員会配電分科会 「配電線耐雷設計ガイド」 電力中央研究所総合報告 No.T69, 2002.
- 6) 電力中央研究所耐雷設計委員会発变电分科会 「発变电所及び地中送電線の耐雷設計ガイド」 電力中央研究所総合報告 No.T40, 1995.
- 7) 新藤, 相原 「上向きリーダの発生を考慮した雷遮蔽理論の検討」 電気学会論文誌 B, Vol.112-B, No.5, pp.401-407, 1992.
- 8) 新藤, 須田: 「雷リスクマネジメントの基本的考え方」 電力中央研究所報告 No.H06008, 2007.
- 9) 新藤他 「独立高構造物に対する冬季雷雷撃特性」 電力中央研究所総合報告 No.T58, 1999.

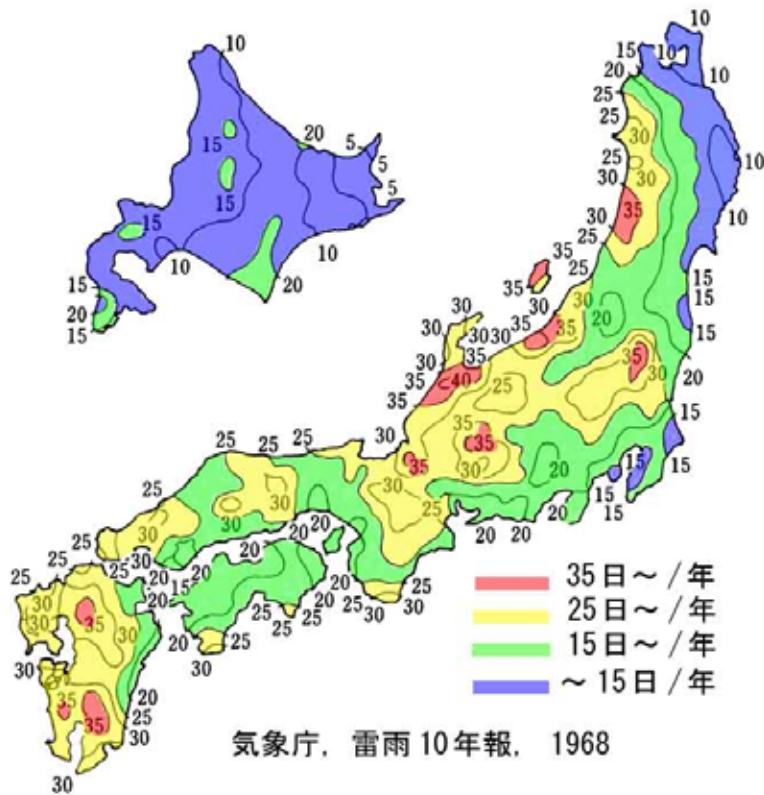
付属書A
(参考)

現状の落雷マップ

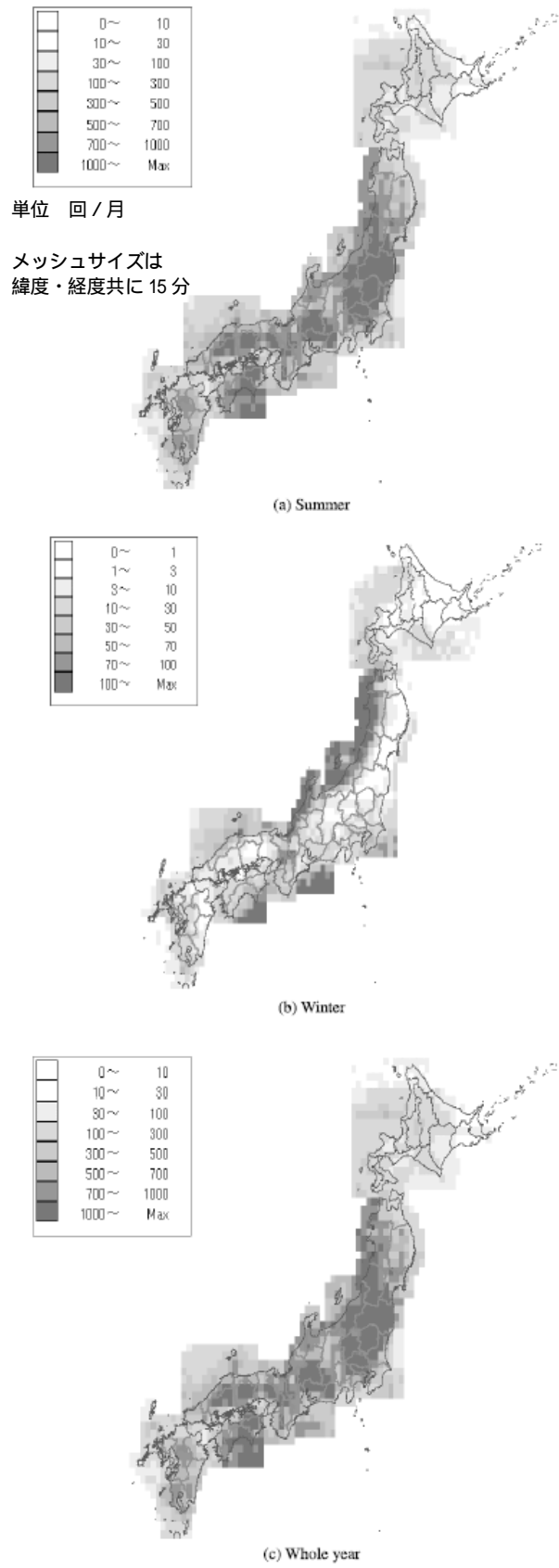
- 現状の落雷マップからは下記の特徴が得られる。
- (1) 落雷が頻繁に発生している地域は、関東北部、東北日本海側、北陸、岐阜県、九州南部などである。
 - (2) 夏季と冬季では、地域的な落雷分布が異なる。
 - (3) 冬季の落雷は東北から北陸にかけての日本海沿岸部に集中している。
 - (4) 夏季は関東の内陸部で落雷が集中している。

現在落雷情報を得ることの出来るマップ形式の資料としては以下のものが挙げられる。

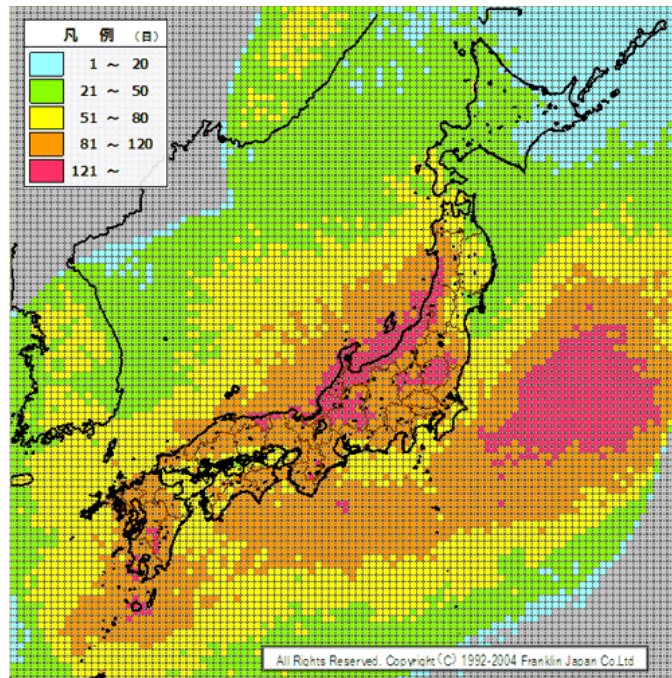
- 年間雷雨日数分布図(気象庁) 図A.1
- 落雷頻度マップ(電力中央研究所) 図A.2
- 全国落雷日数マップ(フランクリン・ジャパン提供) 図A.3



図A.1 年間雷雨日数分布図(気象庁 1968年)



図A.2 落雷頻度マップ（電力中央研究所）



図A.3 全国落雷日数マップ(2000~2003年積算値)
 (フランクリン・ジャパン提供 アドレス <http://www.fjc.co.jp/jldn/data.html>)

付属書 B (参考)

8章補足 雷リスクの計算例

表 8.2 の対策はコストを度外視したものとなっているが、特にブレードへの被害が大きいと見られる地域においては効果が大きいものを優先して対策を施すべきである。

B.1 雷リスクの計算法

雷リスクは、前述したように被害の発生頻度 P と損失 C の積で与えられる。

B.2 被害の発生頻度

各種被害の発生頻度 P (回/年) は、その地域において、風車への雷撃の発生頻度 N_d (回/年)、風車に被害が生じる確率 P_s 、及び各種対策により被害を防止できる確率 P_k で与えられる^(B1)。

$$P = N_d \cdot P_s \cdot (1 - P_k) \quad [B.1]$$

簡単にするため、対策の効果を考えないとすれば $P_k = 0$ となり、

$$P = N_d \cdot P_s \quad [B.2]$$

被害を生じる可能性のある雷撃が、実際に風車へ雷撃する頻度 $N_d \cdot P_s$ は当該地域の大地雷撃密度 N_g (件/年/ km^2)、被害を生じるような大きな雷の発生頻度 p 、及び風車の等価的な受雷面積 A_s (km^2) から求められる。

$$P = N_d \cdot P_s = N_g \cdot A_s \cdot p \quad [B.3]$$

B.3 雷リスクの計算

雷リスク R は上記の被害発生頻度 P と損失 C の積で与えられる。

$$R = P \cdot C \quad [B.4]$$

雷リスクの計算の一例を以下に示すが、現時点では対象とする地域の雷性状や雷被害メカニズムの詳細が必ずしも明確にされてはならず、以下の検討結果も定性的な評価と考えるべきである。雷リスクの定量的評価手法の確立は今後の重要な課題である。

[B.3]式にある p 及び A_s は風車の大きさや構造、対象とする被害によっても異なるものである。これらについては今後の検討が必要であるが、以下、損失の最も大きいと考えられる風車ブレードへの雷撃について簡略化した計算をおこなってみる。

高建造物への雷撃発生頻度 N_s (回/年) と高建造物高さ H (m) は以下の関係がある^(B2)。

$$N_s = 2.4 \times 10^{-5} H^{2.05}$$

ただし、上式では大地雷撃密度 N_g は 1 (回/km²・年) に規格化されている。この式が風車へも適用可能と仮定すると、雷リスク R は損失を C として、以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} R &= N_d \cdot P_s \cdot C \\ &= N_g \cdot 2.4 \times 10^{-5} H^{2.05} \cdot P_s \cdot C \end{aligned}$$

仮に $N_g = 3$ (年間雷雨日数 30 日相当)、 $H = 100$ 、 $C = 1$ 千万円 (= 10^7 円) とし、ブレードへの雷撃の 10% が被害を生じる ($P_s = 0.1$) とすれば、リスク R は

$$\begin{aligned} R &= 3 \times 2.4 \times 10^{-5} \times 100^{2.05} \times 0.1 \times 10^7 \\ &= \underline{9 \times 10^5 \text{ (円/年)}} \dots \text{(夏季雷を対象とした予想される損失)} \end{aligned} \quad [B.5]$$

となる。

レセプタなどの対策で、被害を 10 分の 1 に減少できるとすれば、リスクは 9×10^4 (円/年) となる。

上記は夏季雷を主対象としたものであるが、冬季雷については高建造物への雷撃数と構造物高さの関係について、福井、柏崎、中能登地点における雷観測の結果から、以下の関係式が得られている^(B3)。

$$N_d = H / 8$$

冬季雷はエネルギーが大きいものが多いことが知られているため、冬季では風車への雷撃の 50% が被害を生じるとすると、高さ 100m の風車へのリスク R は以下ようになる。

$$\begin{aligned} R &= N_d \cdot P_s \cdot C \\ &= 100 / 8 \times 0.5 \times 10^7 \\ &= \underline{6.3 \times 10^7 \text{ (円/年)}} \dots \text{(冬季雷を対象とした予想される損失)} \end{aligned} \quad [B.6]$$

夏季雷を対象とした予想される損失[B.5]式と、冬季雷を対象とした予想される損失[B.6]式を比較すると、冬季雷による損失は夏季雷による損失の 70 倍の値となっている。したがって、冬季雷は夏季雷に比べて 70 倍の雷リスクがあることがわかり、冬季雷地域においては、風車への雷対策は夏季雷地域よりも強化すべきとの結論が得られる。

ただし、上記の高建造物への雷撃数の関係式が大地雷撃密度や地形の異なる地点に対しても有効かどうかは確認されていない。上記の地域の冬季の雷撃密度は 0.2 件/km² のオーダーであるので、これらを用いて他の地域へ適用することも考えられるが、冬季雷のエネルギー (電荷量) 分布の地域特性も未解明であり、冬季雷に対する雷リスクの正確な評価には、広域にわたる雷観測が必要である。

なおここでは、計算を簡単にするため、被害発生や被害額を単純化して計算したが、実際の対策にあたっては、被害発生をより詳細に検討し、社会的インパクトも考慮した許容できるリスクレベル、さらには雷被害防止対策に必要な費用などを総合的に勘案して決定すべきである。

参考文献

(B1) 新藤 , 須田 : 「 雷リスクマネージメントの基本的考え方 」 電力中央研究所報告 No.H06008, 2007.

(B2) A. J. Eriksson et al., "The incidence of lightning strikes to power lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.PWRD-2, pp.859-870, 1987.

(B3) 耐雷技術ワーキンググループ : 「 日本海沿岸における冬季雷性状 」 電力中央研究所総合報告 No.T10, 1989.

付属書C (参考)

落雷模擬試験結果

C.1 風車ブレード高電圧・放電試験

1. 試験概要

風車ブレードへの雷撃特性を明らかにするため、1MW級風車ブレードの先端3m部分を用いて、長ギャップ放電試験を実施した。試験は、電力中央研究所電力技術研究所塩原実験場で実施した。

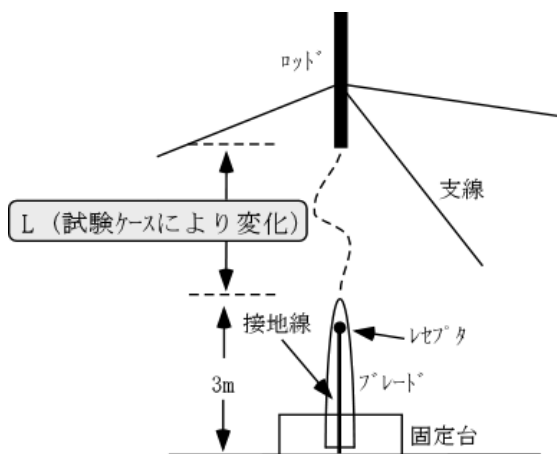
本試験の実施項目は以下のとおりである。

- 1) レセプタの有無によるブレードへの雷撃様相の確認
- 2) ブレードへの雷撃箇所の放電履歴と雷撃箇所固定化の可能性を検討
- 3) マルチレセプタなど、レセプタ形状とブレード雷撃特性の関係を解明
- 4) 上向き雷に対するレセプタの効果の検証
- 5) 上記に対する汚損の影響評価

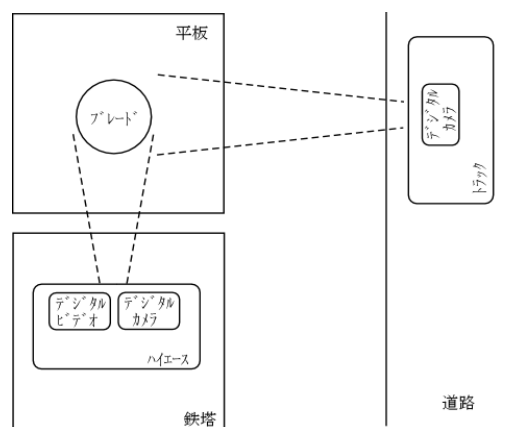
2. 試験方法

2.1 試験パラメータ

風車の配置と観測装置の配置を図C1.1ならびに図C1.2に示す。印加電圧には開閉インパルス(250/1200 μ s)を使用した。



図C1.1 ブレード周辺の回路構成



図C1.2 観測装置の配置状況

モデルブレード試験には以下の形状のブレードを使用した。

- 1) レセプタを設置しないもの
- 2) DISK レセプタ 1 個を設置したもの
- 3) DISK レセプタ 3 個に加えブレード先端に金属突起レセプタを設置したもの (図 C . 3)
(以下、突起付ブレード)
- 4) ブレードのエッジに金属箔を設置、先端部を金属箔で覆ったもの
(以下、先端金属ブレード)

また、その他の試験パラメータを以下に示す。

- 1) 印加電圧極性 (正、負)
- 2) モデルブレード配置 (垂直、水平及び高圧側 (図 C 1 . 4))
- 3) 汚損 (塩化ナトリウム 10g / l 溶液を使用) の有無

試験回路と発生電圧波形を 図 C 1 . 5、 図 C 1 . 6 に示す。

2.2 試験方法

各種条件において、50%スパークオーバレベルの電圧を 20 回程度印加し、放電状況を目視及びカメラにて観測した。

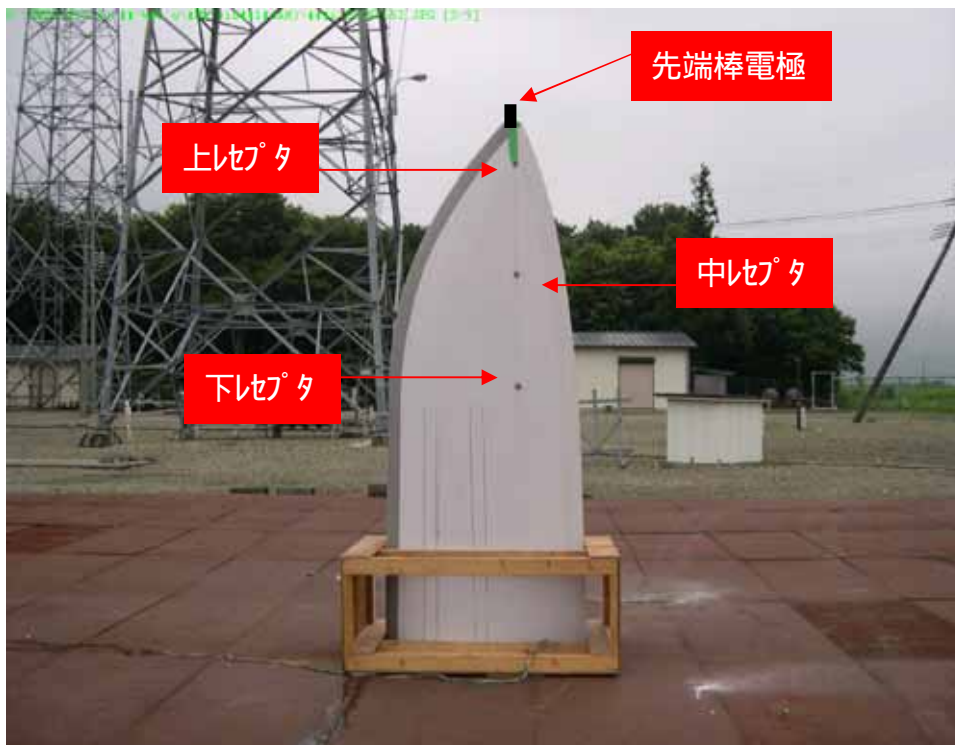
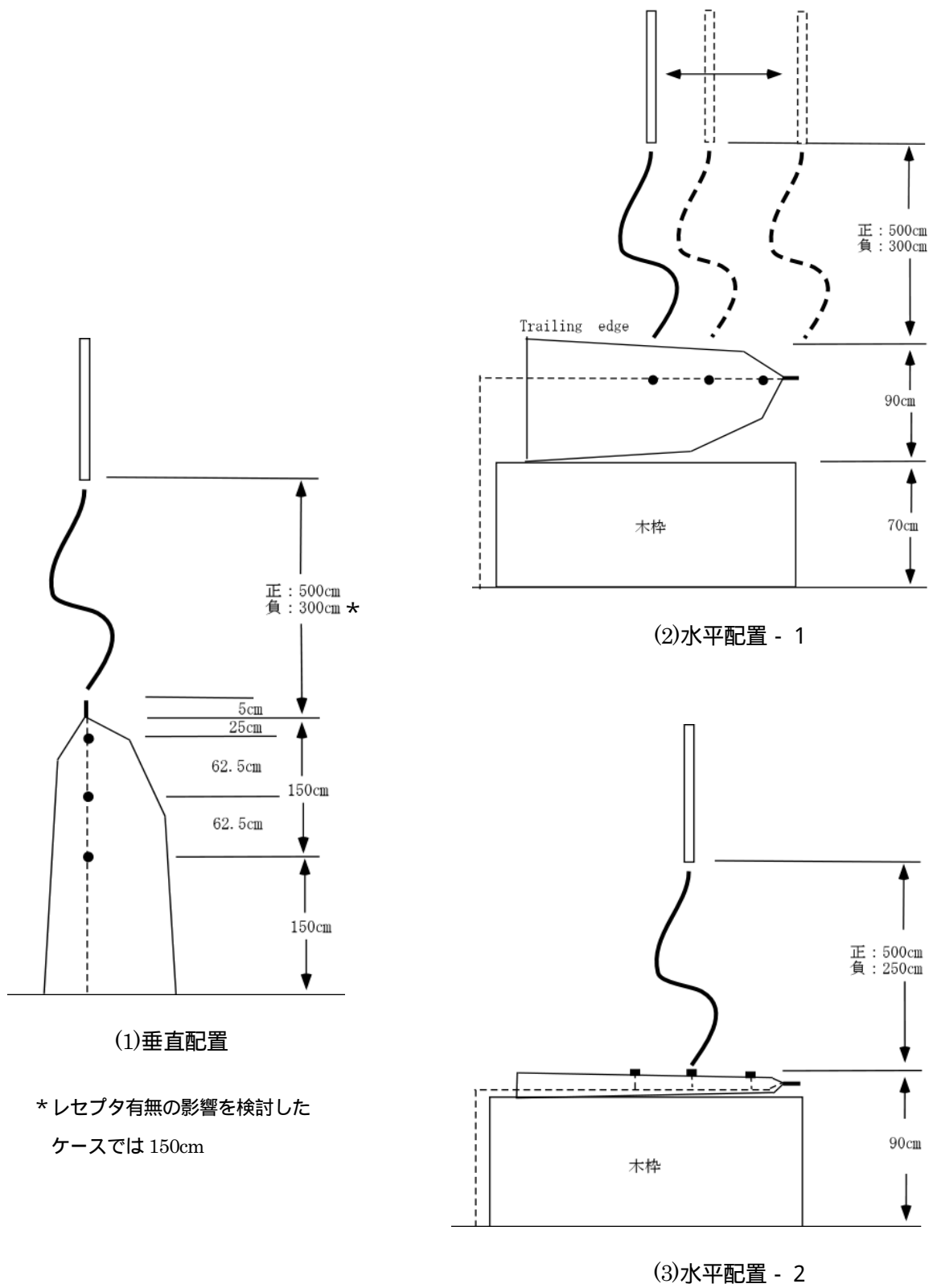
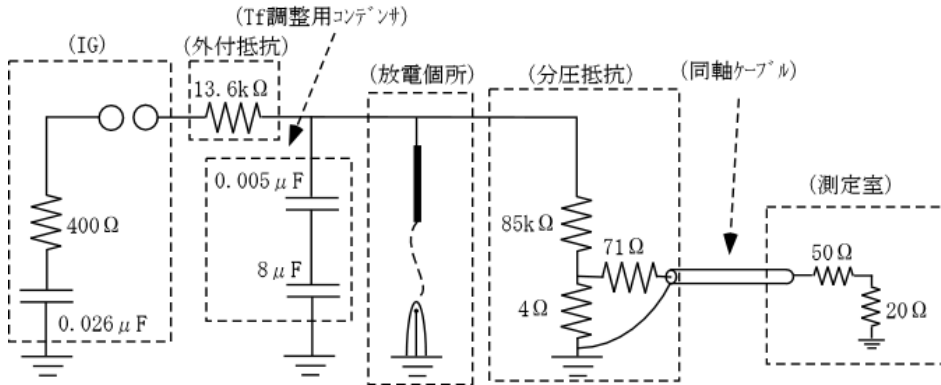


図 C 1 . 3 レセプタの配置 (垂直配置の例)

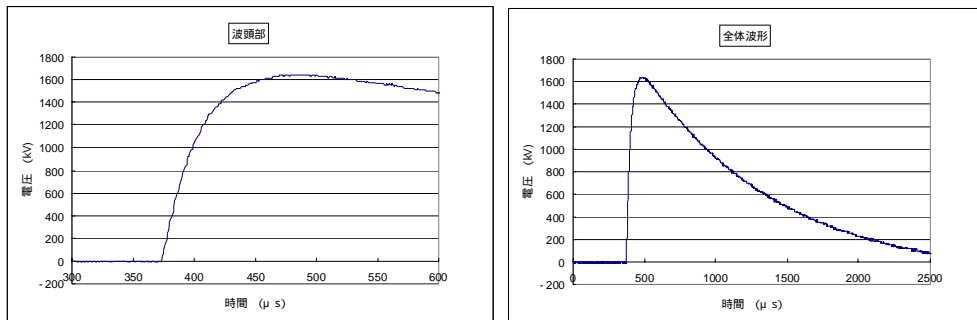


* レセプタ有無の影響を検討した
ケースでは 150cm

図C 1.4 ブレードの配置



図C 1.5 試験回路構成



図C 1.6 印加電圧波形

3. 試験結果

3.1 レセプタの有無の影響

表C1.1～表C1.4に、レセプタ無しブレードとDISK型レセプタ1個を設置したブレード(図C1.3の上レセプタのみ)への放電特性を示す。なお、ブレード配置は垂直配置とし、ギャップ長は正極性の場合5m、負極性の場合1.5mとした。

表C1.1 レセプタの影響確認試験結果1(開閉インパルス電圧・正極性・レセプタなし)

箇所別放電回数(回)				ブレード雷撃 比率	ブレードへの放電箇所		同一箇所への放電回数	
放電回数	大地	ブレード	その他(固定台)		I _ツ	I _ツ 以外	I _ツ	I _ツ 以外
41	25	13	4	31.7%	9	4	2	2

(大地とブレードへの同時放電1回を含む)

表C1.2 レセプタの影響確認試験結果2(開閉インパルス電圧・正極性・レセプタあり)

箇所別放電回数(回)				ブレード雷撃 比率	レセプタ雷撃 比率
放電回数	大地	ブレード	レセプタ		
23	0	22	1	95.7%	4%

表C1.3 レセプタの影響確認試験結果3(開閉インパルス電圧・負極性・レセプタなし)

箇所別放電回数(回)				ブレード雷撃 比率	ブレードへの放電箇所		同一箇所への放電回数	
印加回数	大地	ブレード	NFO()		I _ツ	I _ツ 以外	I _ツ	I _ツ 以外
19	1	10	8	91%	0	10	0	8

()NFO (No Flash Over) : 放電せず

表C1.4 レセプタの影響確認試験結果4(開閉インパルス電圧・負極性・レセプタあり)

箇所別放電回数(回)				ブレード雷撃 比率	レセプタ雷撃 比率
放電回数	大地	ブレード	レセプタ		
15	0	0	15	0%	100%

注)表C1.1、表C1.3のエッジとは、モデルブレードの「へり」の部分(平面部分ではない)への放電を示す。また、表C1.2、表C1.4のレセプタとは、沿面放電を経由せず、レセプタに直接放電した回数を示す。

試験結果は、以下のようにまとめられる。

(1)レセプタの有無にかかわらず、絶縁物であるブレードに放電する。ただし、同一箇所への放電回数は表C 1.1にあるように、ごく限られており、一度放電した箇所に再放電しやすくなる傾向は見いだせなかった。またレセプタが設置されることにより、接地電位点を引き上げる効果が生じ、ブレードへの落雷回数が増える可能性がある。

(2)レセプタが設置された場合、正極性インパルス印加時にはブレードへの落雷箇所は主としてレセプタ周辺部であり、その後、沿面放電もしくは貫通破壊してレセプタもしくは引き下げ導線に放電した。このためブレード表面の損傷及びブレード内部での放電発生の可能性が高くなることから、レセプタの形状や設置位置等の検討が必要である。負極性インパルス印加時のレセプタの効果については、なお検討の必要があるが、正極性と同等以上の吸引効果があると考えられる。

3.2 種々のレセプタ形状の効果の検討

3.2.1 突起付ブレードの効果の検証

突起付ブレードの効果検証のため、種々の配置で放電試験を行い、放電点を観測した。結果を表C 1.5～表C 1.9に示す。

表C 1.5 突起付ブレードの効果検証試験結果1（垂直配置）

汚損	極性	雷撃点							避雷導体捕捉率(%)	損傷確率(%)
		先端導体	レセプタ			ブレード		大地		
			上	中	下	沿面	貫通			
なし	正	18(2)	0	0	0	2	0	0	90.0%	0.0%
	負	20	0	0	0	0	0	0	100.0%	0.0%
あり	正	18(1)	1	0	0	1	0	0	95.0%	0.0%
	負	20	0	0	0	0	0	0	100.0%	0.0%

() : 先端導体近傍のブレード部にまず放電し、

そこから沿面放電して先端導体に雷撃した数

避雷導体捕捉率 : (先端導体 + レセプタ) / (先端導体 + レセプタ + ブレード)

損傷確率 : (貫通) / (先端導体 + レセプタ + ブレード)

表C1.6 突起付ブレードの効果検証試験結果2
(水平配置 - 1、ロッドが先端導体の上部にある場合)

汚損	極性	雷撃点							避雷導 体捕捉 率(%)	損傷 確率 (%)
		先端導 体	レセプタ			ブレード		大地		
			上	中	下	沿面	貫通			
なし	正	3(3)	4(1)	0(1)	0(4)	9	0	3	43.8%	0.0%
	負	20	0	0	0	0	0	0	100.0%	0.0%
あり	正	7(0)	4(2)	1(3)	0(2)	7	0	2	63.2%	0.0%
	負	6(0)	0(18)	0(5)	0	23	2	0	19.4%	6.5%

(): ブレードから沿面放電して雷撃した数

表C1.7 突起付ブレードの効果検証試験結果3
(水平配置 - 1、ロッドがレセプタ(中)の上部にある場合)

汚損	極性	雷撃点							避雷 導 体 捕 捉 率(%)	損傷 確率 (%)
		先端 導 体	レセプタ			ブレード		大地		
			上	中	下	沿面	貫通			
なし	正	-	-	-	-	-	-	-		
	負	-	-	-	-	-	-	-		
あり	正	-	-	-	-	-	-	-		
	負	0	0	0(7)	0(3)	10	0	0	0.0%	0.0%

(): ブレードから沿面放電して雷撃した数

表C1.8 突起付ブレードの効果検証試験結果4
(水平配置 - 1、ロッドがレセプタ(下)の上部にある場合)

汚損	極性	雷撃点							避雷 導 体 捕 捉 率(%)	損傷 確率 (%)
		先端導 体	レセプタ			ブレード		大地		
			上	中	下	沿面	貫通			
なし	正	0(2)	2(1)	1(1)	0(4)	8	2	2	23.1%	15.4%
	負	0	0	1(4)	9(4)	8	1	0	52.6%	5.3%
あり	正	0	0(2)	0(2)	2(8)	12	1	4	13.3%	6.7%
	負	0	0	0	0(20)	20	0	0	0.0%	0.0%

(): ブレードから沿面放電して雷撃した数

表C 1.9 突起付ブレードの効果検証試験結果5 (水平配置 - 2)

汚損	極性	雷撃点							避雷導 体捕捉 率(%)	損傷 確率 (%)
		先端導 体	レセプタ			ブレード		大地		
			上	中	下	沿面	貫通			
なし	正	2	1	2(1)	4(1)	2	1	7	75.0%	8.3%
	負	2	3	11	4	0	0	0	100.0%	0.0%
あり	正	2(1)	1	0	5(3)	4	1	5	61.5%	7.7%
	負	1	2	12	5	0	0	0	100.0%	0.0%

(): ブレードから沿面放電して雷撃した数

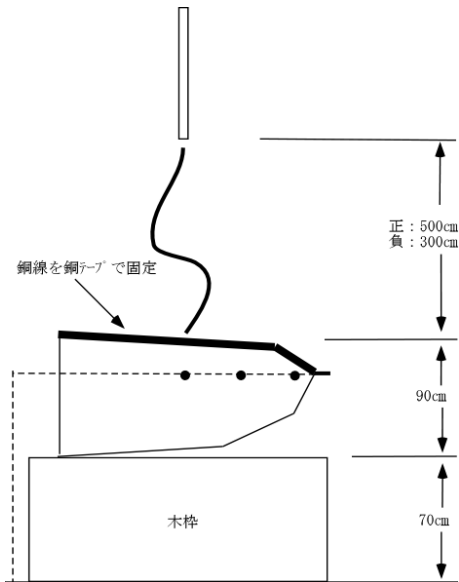
以上の結果をまとめると以下のようなになる。

1) 垂直配置では汚損の有無に関わらず、負極性印加時では100%、正極性印加時でも90%以上の確率で先端導体(レセプタ)で放電を捕捉でき、レセプタの効果がある。

2) 水平配置 - 2 (DISK レセプタが高圧側電極と対向) の場合も、負極性印加時では汚損の有無に関わらず、DISK レセプタもしくは先端電極で放電を捕捉でき、レセプタが有効に働いている。しかし、正極性印加時には、ブレード面に放電後、ブレード表面を沿面放電してレセプタに至るケースが見られた。一方、水平配置1 (DISK レセプタがブレード側面に配置) の場合には、沿面放電後、レセプタに至るケースが多く発生した。この傾向は、印加電圧が負極性、汚損有りの場合に著しい。これは、水平方向からの雷撃に対しては、レセプタが設置されていても、ブレード表面で沿面放電が発生する可能性があることを示している。

3.2.2 エッジ電極の効果検証

エッジ電極の効果検証ため、図C 1.7の配置で試験を行った。結果を表C 1.10に示す。結果は全てエッジ電極に放電は捕捉され、その効果が示された。



図C 1.7 エッジ電極付ブレードの試験配置

表C 1.10 エッジ電極の効果検証試験結果

汚損	極性	雷撃点							避雷導 体捕捉 率(%)	損傷 確率 (%)
		エッジ	レセプタ			ブレード		大地		
			上	中	下	沿面	貫通			
なし	正	9(0)	0	0	0	0	0	6	100.0%	0.0%
あり	正	9(0)	0	0	0	0	0	0	100.0%	0.0%

() : ブレードから沿面放電して雷撃した数

3.2.3 先端金属ブレードの効果の検証

先端金属ブレードの効果検証のため、接地側に水平配置して放電試験を行った。なお、先端金属部分は50cmである。試験は正極性、汚損なしで行った。試験状況を図C1.8に、結果を表C1.11に示す。



図C1.8 先端金属ブレードへの放電状況の例（正極性、汚損なし）

表C1.11 先端金属ブレードの効果検証試験結果

雷撃点			避雷導体		備考	
レセプタ		ブレード	捕捉率			
上	中	先端金属	沿面	貫通		
0	0(1)	3(9)	10	0	23.1%	ロッドはレセプタ(上)の真上、ブレードエッジから5m Trailing edgeを下側
0	0	14(5)	5	0	73.6%	ロッドはブレード先端の真上 ロッド高さは上と同じ Trailing edgeを下側
0	0	7(6)	6	3	43.8%	ロッドはレセプタ(上)の真上、 ブレードエッジから5m Leading edgeを下側

突起付きブレードを水平に配置した条件（水平配置 1）で正極性、汚損なしの条件で、ロッドをブレード先端の導体上部に配置した場合、及びブレード中央部のレセプタ上部に配置した場合の避雷導体捕捉率は、それぞれ44%（表C1.6、最上段の行参照）、23%（表C1.8最上段の行参照）であった（ただし水平配置 1はLeading Edgeを下側にしている）。一方、ブレード先端部を金属で覆ったブレードによる今回の実験では、表C1.11に示すように、ロッドをブレード先端上部に配置した場合の避雷導体捕捉率は73.6%、ロッドをブレード中央上部に配置した

場合の避雷導体捕捉率は 23.1% ~ 43.8%となった。表C 1.6や表C 1.8の結果と比較すると、全体的に先端金属部への放電割合が増加しており、またロッドをブレード先端上部に配置した場合の避雷導体捕捉率も、先端部全体を金属とすることで若干多くなる。しかし、この場合でも、ブレード沿面を経由する放電は少なからず生じており、今回の試験回数などを考慮すると、ブレード先端を金属としてもブレード先端に突起電極を設置しても、避雷特性の差はさほど大きくないといえる。

3.3 上向き雷に対するレセプタの効果

ブレードからの上向き雷に対するレセプタの効果を検証するため、高圧側にブレードを吊り下げ、大地（平面電極）との間で放電を発生させた。なお、この試験では、先端導体は設置していない。ブレードは垂直配置及び水平配置にて試験を行った。

試験状況を図C 1.9、図C 1.10に、結果を表C 1.12、表C 1.13に示す。



図C 1.9 ブレード垂直配置

表C 1.12 上向き雷に対するレセプタの効果検証試験結果1（ブレード垂直配置）

汚損	極性	雷撃点					避雷導体捕捉率(%)	備考
		レセプタ()			ブレード			
		上	中	先端	沿面	貫通		
あり	正	0	0	2(19)	19	0	9.5%	Gap長5m
	負	0	0(1)	0(19)	20	0	0.0%	Gap長2.5m
なし	正	0	0	15(1)	1	0	93.8%	Gap長5m
	負	0	0	0(3)	3	2	0.0%	Gap長2.5m

() 表C 1.6までの標記とは異なる

(): ブレードから沿面放電して雷撃した数



図C1.10 ブレード水平配置の貫通放電例（負極性、汚損無し）

表C1.13 上向き雷に対するレセプタの効果検証試験結果2（ブレード水平配置）

汚損	極性	雷撃点					避雷導体 捕捉率 (%)	備考
		レセプタ			ブレード			
		上	中	先端	沿面	貫通		
なし	正	0	0	11(5)	5	0	68.7%	レセプタ高 ⁽¹⁾ 5m Leading edge を下側
なし	負	0	0	0(1)	1	11	0.0%	レセプタ高2.5m Trailing edge を下側

() 大地からレセプタまでの距離

(): ブレードから沿面放電して雷撃した数

以上の結果をまとめると、以下のようになる。

1) 正極性の上向き雷が発生する場合（負極性雷）、レセプタは雷を捕捉する効果があるが、ブレード表面で沿面放電する可能性がある。特に、表面に汚損がある場合には、沿面放電の可能性は著しく高くなる。

2) 負極性の上向き雷が発生する場合（正極性雷）、ブレード内部で放電が発生し、貫通破壊を生じる可能性が高い。ただし、今回の試験では絶縁被覆のない編線導体を内部導体として用いており、絶縁された内部導体を用いればブレード内部の放電を防止できる可能性がある。

C.2 風車ブレード大電流エネルギー試験

1. 試験概要

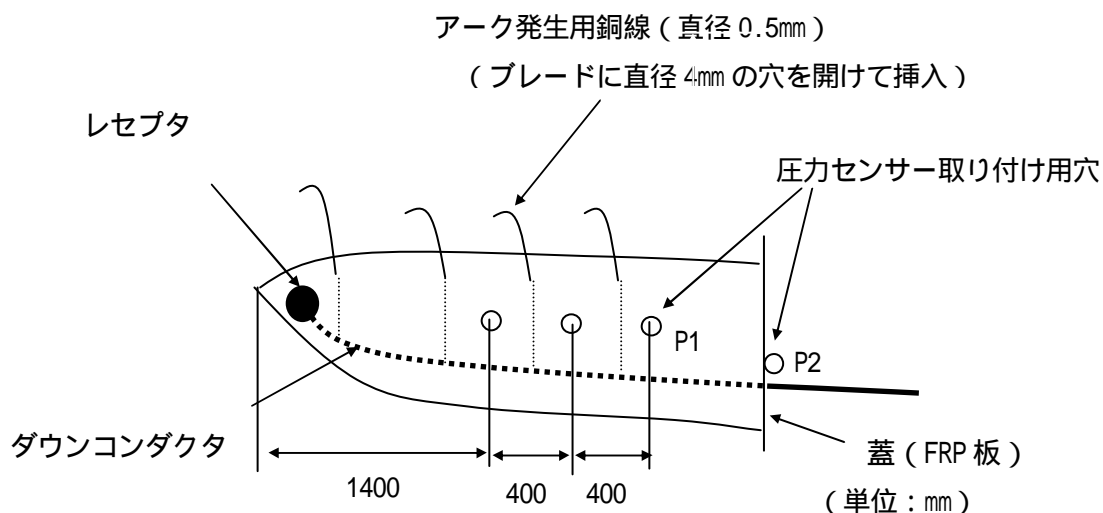
風車ブレードに落雷した場合のブレード損傷様相を明らかにするため、1MW 級風車ブレードの先端 3m 部分を用いて、大電流エネルギー試験を実施した。試験は、電力中央研究所電力技術研究所大容量電力短絡試験設備で実施した。

本試験の実施項目は以下のとおりである。

- 1) 風車ブレードに落雷した場合のブレード損傷様相の解明
- 2) 上記に及ぼすブレード内部の水分の影響の検討
- 3) 上記に及ぼす電流波形の影響の検討
- 4) レセプタ雷撃時のレセプタ損傷様相の解明

2. 試験方法

試験に用いた供試品を図 C 2.1 に示す。



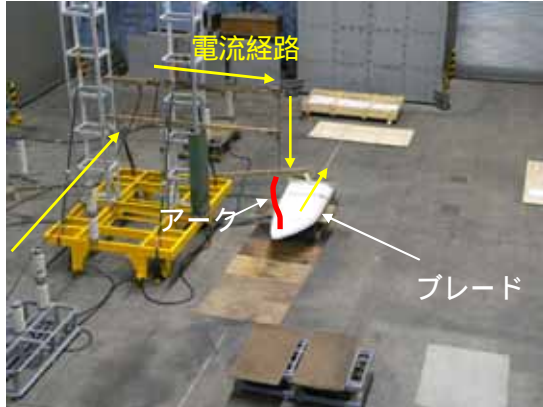
アーク発生用銅線の先端からの距離

: 1200mm、 : 1600mm、 : 2000mm、 : 450mm (水ありの場合のみ使用)

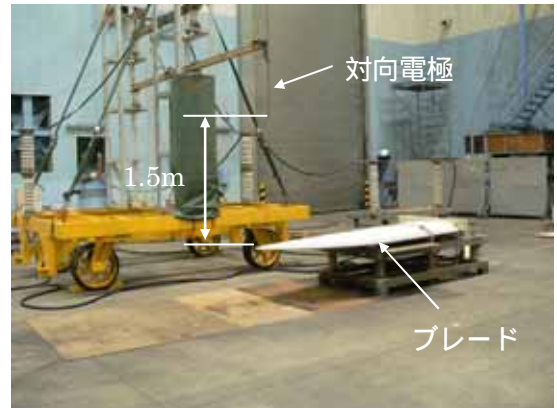
図 C 2.1 ブレードの銅線の取り付け状況及び圧力測定箇所

上記の供試品にレセプタもしくはブレード貫通破壊を模擬してアーク発生用銅線から直流電流を印加し、ブレード内部の圧力上昇、損傷状況を確認した。直流電流のピーク値や注入電荷量はパラメータとして変化させて行った。

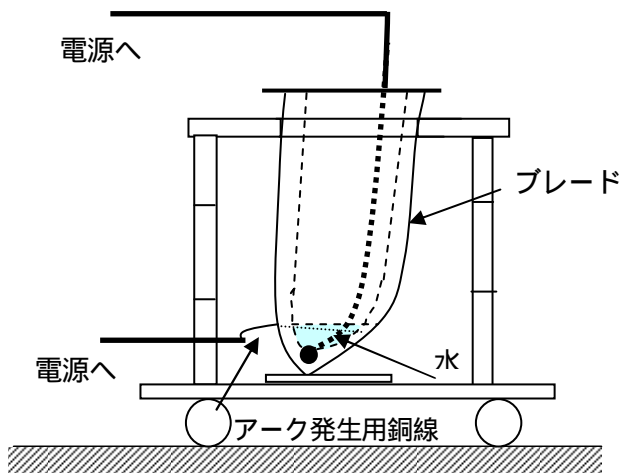
また、レセプタの溶損特性についても、レセプタを水平に 1.5m 間隔で配置してアーク放電を発生させ、溶損量の測定を行った。



図C 2.2 試験回路



図C 2.3 供試器の配置（水平配置）



図C 2.4 ブレード内部水分の影響検討時の供試器の配置（垂直配置）



3 . アーク発生試験結果

試験結果の一覧を表C 2 . 1 に示す。試験結果をとりまとめると以下ようになる。

3 . 1 レセプタへの雷撃模擬試験

- 1) レセプタと対向電極間 (1.5m) に電流波高値約 9kA、電荷量約 1000 クーロンの直流アークを発生させたところ、レセプタは溶損したがブレードは破損しなかった。
- 2) レセプタに雷撃が発生し雷アークがレセプタに固定されれば、レセプタとダウンコンダクタのサイズ、取り付け方法などを適切に選定すると、1000 クーロンの高エネルギー雷によってもブレードは破損しない。

3 . 2 ブレード内部での雷アーク模擬試験

- 1) ブレード外部の対向電極 (ブレードの上方向約 1.5m) とブレード内部のダウンコンダクタ間に銅線を張り、電流を通电して雷を模擬したアークを発生させた。ブレード内部にアークが発生すると内部の圧力が上昇しブレードが破損する場合がある。

- 2) 破損に影響するパラメータの影響の検討

水の影響

ブレード内部に水を入れ水中でアークを発生させた (試験番号 251、252、253) と、水が無い場合より損傷が大きい傾向がみられた。

電流波高値の影響

同じ電荷量 (約 40 クーロン) で電流波高値を変化させ試験したところ (試験番号 309、310、312、315)、電流波高値 6.6kA でブレードが破損したが、2.2kA、1.3kA では破損せず、電流波高値が大きい方が損傷が大きい傾向であった。

また、ブレード内部の圧力上昇も電流波高値が大きい方が大きい結果となり、電流波高値が損傷様相に影響することが示された (図C 2 . 5)。

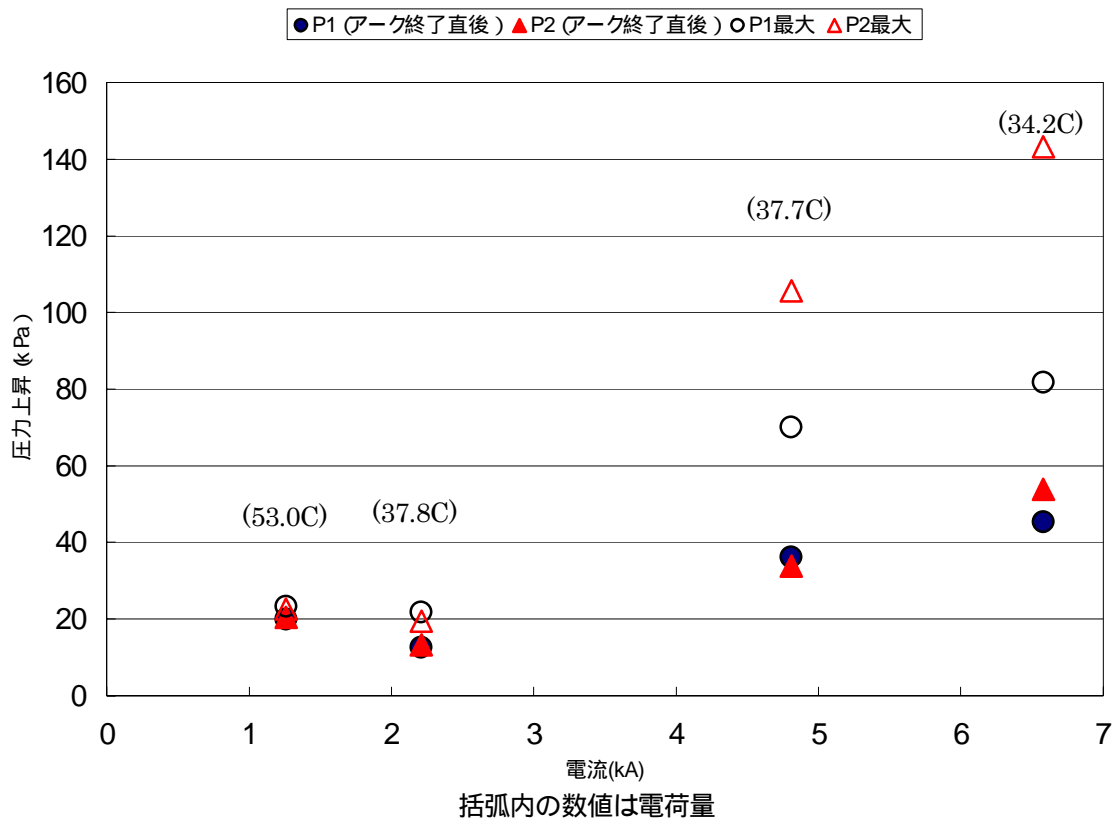
4 . レセプタ選定のための基礎試験結果

レセプタを選定するための基礎資料として、銅タングステン、SUS、アルミ電極 (直径 30mm 及び 20mm) を用いて電荷量を変化させてアーク試験を実施し、アークによる溶損特性に関する以下の結果を得た。

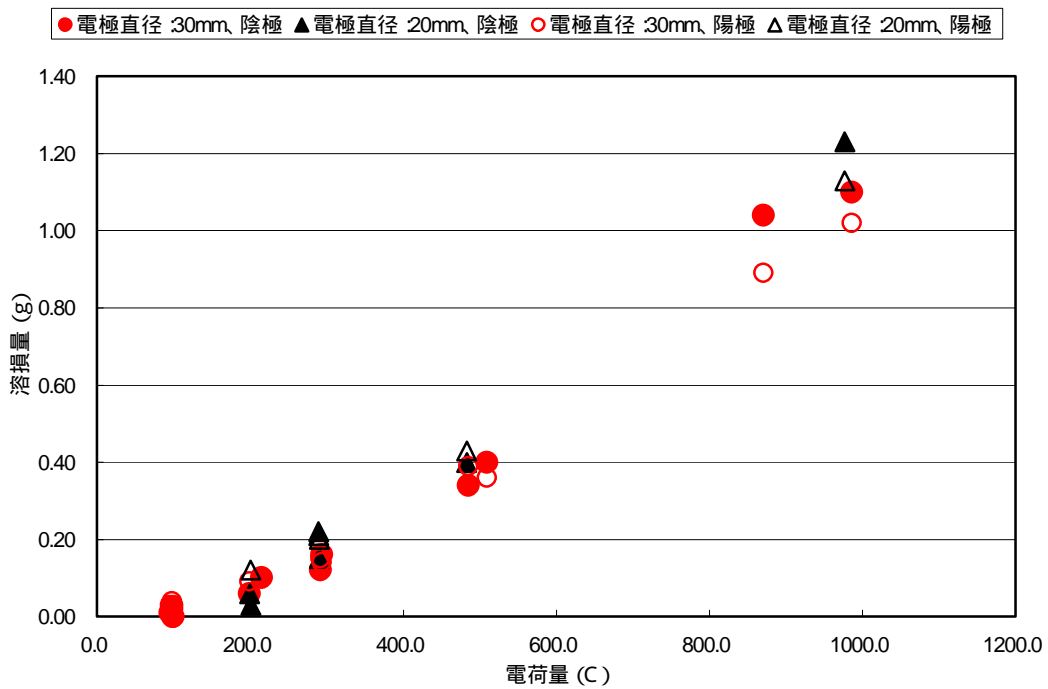
- 1) 銅タングステン、SUS、アルミは電荷量に比例して溶損量が増大する。
(図C 2 . 6 ~ 図C 2 . 8)。
- 2) 銅タングステン電極の溶損量が最も少ない。
- 3) SUS の場合、陰極の溶損量が陽極よりも多いが、銅タングステン、アルミの場合は大差ない。

表C2.1 風車ブレードの大電流エネルギー試験結果

試験 番号	供試器		アーク発生箇 所 銅線の位置 (図1参照)	フラン ジ側の 状態	電荷量 (C)	電流 波高値 (kA)	試験後のブレ ードの状況
	供試器	配置					
1	1-3 (No.7)	水平	レセプタ	蓋有り	1001	8.80	・レセプタ部 が溶損した。 ・破損無し。
2	1-3 (No.7)	水平		蓋有り	30.7	1.28	・破損無し。
3	1-2 (No.6)	水平		蓋有り	98.0	1.21	・破損無し。
4	1-4 (No.8)	水平		蓋有り	280	5.27	・破損
5	1-1 (No.5)	水平		蓋無し	289	5.27	・破損無し。
6	1-1 (No.5) 試験番号5の後	水平		蓋無し	904	7.25	・破損無し。
251	2-1, 水入り	垂直	先端 水中	蓋有り	95.2	1.21	・破損無し。 ・先端部にひ び有り。
252	2-2, 水入り	垂直	先端 水中	蓋有り	290	5.18	・破損
253	2-3, 水入り	垂直	先端 水中	蓋有り	49.4	1.12	・破損無し。
254	2-4	水平		蓋有り	92.3	2.79	・破損
255	2-3, 試験番号253の後	水平		蓋有り	90.8	1.95	・破損
309	3-1 (No.9)	水平		蓋有り	37.7	4.81	・亀裂有り。 ・破損無し。
310	3-2 (No.10)	水平		蓋有り	34.2	6.58	・破損
312	3-1 (No.9) 試験番号309の後	水平		蓋有り	37.8	2.21	・破損無し。
315	3-1 (No.9) 試験番号309の後	水平		蓋有り	53.0	1.26	・破損無し。



図C 2.5 ブレード内部の圧力上昇特性（電流波高値の影響）



図C 2.6 溶損特性（銅タンゲステン）

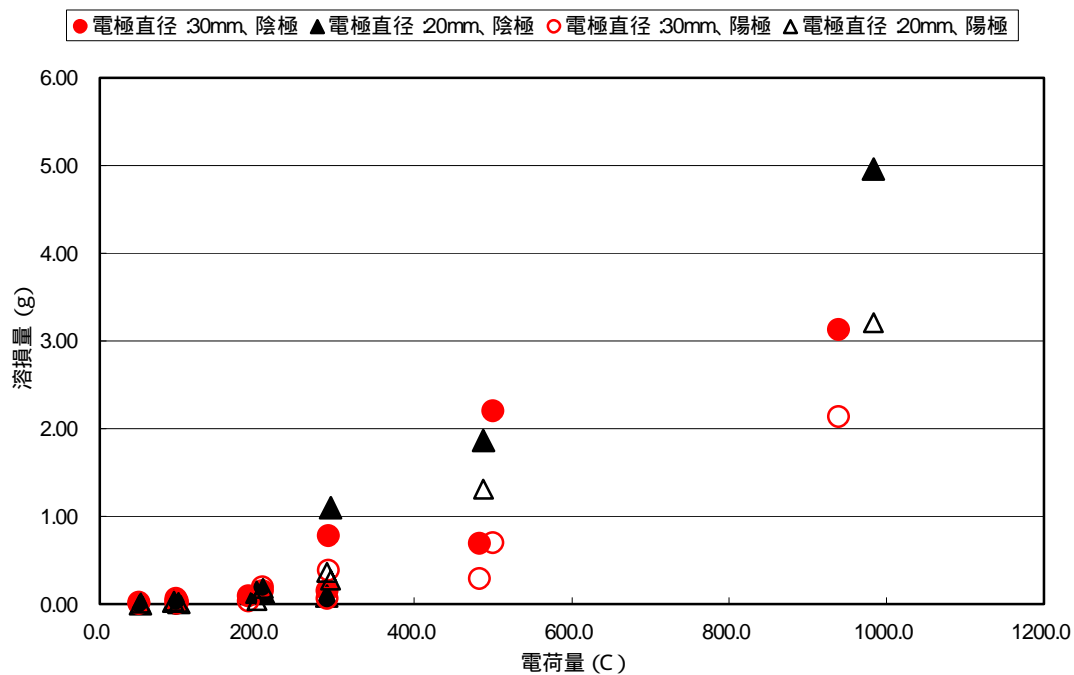


図 C 2.7 溶損特性 (SUS)

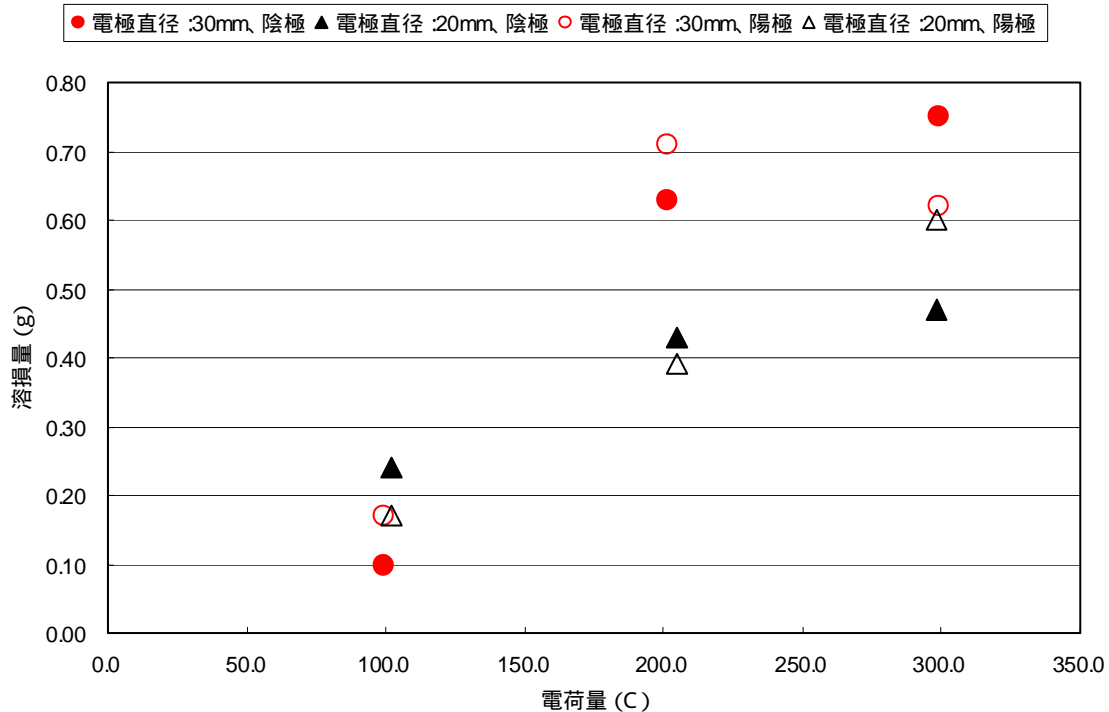


図 C 2.8 溶損特性 (アルミ)

付属書D
(参考)

落雷による風車被害事例

風車への落雷箇所としては、図D.1、図D.2に示すように一般的にブレードへの雷撃が多い。冬季雷のようなエネルギーの大きな雷を受けた場合は、大きな被害になることがある。

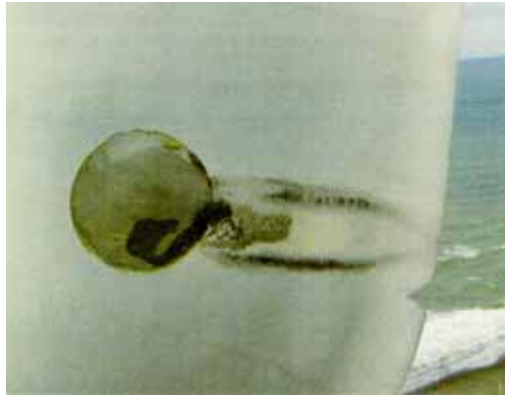


図D.1 ブレードへの雷撃例1



図D.2 ブレードへの雷撃例2

落雷によりブレードが被害を受けた事例を図D.3～図D.5に示す。図D.3、図D.4はレセプタが損傷した事例、図D.5はブレード先端部が破損した事例である。



図D.3 レセプタに落雷してその周辺が焦げた事例



図D.4 落雷でレセプタが脱落した事例



図D.5 落雷によりブレード先端部が破損した事例

さらに、落雷によるブレード破損の大規模な被害例を図D.6、図D.7に示す。いずれの事例も図6.3における雷被害重点対策地域上に位置する風力発電所で、ブレードが大きく損傷している様子がわかる。図D.6の事例では、損傷したブレード片の一部は風に飛ばされ、風車から少し離れたところに落下したが、幸いにも人身事故にはならなかった。(発電所は幹線道路に隣接している)また、図D.7の事例では、雷撃がブレード内のストール制御用ワイヤーガイド等に焼損を与え、さらにブレード(GFRP製)に引火してブレードが焼失した事例である。



図D.6 ブレードの損傷事例1



図D.7 ブレードの損傷事例2

参考文献

(D1) 電気設備学会中部・北陸支部 風力発電設備の雷撃調査研究委員会：「風力発電設備への雷被害とその対策手法および規格に関する調査」 平成 16 年度電気設備学会全国大会講演論文集, No.P-14, pp.355-356, 2004

(D2) 延命, 出野：「風力発電設備の雷害実態」 平成 19 年電気学会全国大会講演論文集, No.7-S8-2, pp.S8(5)-S8(8), 2007

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