

日本型風力発電ガイドライン

落雷対策編

概要版

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

今般、NEDOの「日本型風力発電ガイドライン策定事業」において、日本国内で風力発電設備を設置する事業者向けに、風車被害の低減に資することを目的として、風力発電設備設置にかかる環境条件のうち台風、乱流及び雷に対して風条件の設定、風車選定に関する検討結果等をガイドラインとしてとりまとめた。

本概要版は、「日本型風力発電ガイドライン～落雷対策編～」から重要な部分の抜粋であり、事業者が風力発電設備の設置を検討する上で考慮すべき最低限の事項について記したもので、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したマニュアル的な位置付けのものである。

なお、本事業の観測データ、試験データ及び調査結果等の詳細については、「日本型風力発電ガイドライン」本編を参照されたい。

適用範囲

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していることを踏まえて、主に事業者が風車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し、小形風車は対象外である。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取りまとめているが、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。

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、ガイドライン本編に付属資料として提示している。

目 次

序 文

適用範囲

目 次

1 . 日本 の 雷 と 雷 被害 実態	1
1 . 1 日本 の 雷 の 特徴	2
1 . 2 雷 被害 実態	3
2 . 落雷 マ ップ	5
2 . 1 落雷 頻 度 ・ 被 害 マ ッ プ	6
2 . 2 落雷 リ スク マ ップ	9
3 . 雷 保 護	11
3 . 1 雷 被害 の 様 相 と 雷 保 護 対 策	13
3 . 2 風 車 本 体 の 雷 保 護 対 策	16
3 . 3 独 立 避 雷 鉄 塔 に よ る 雷 保 護 対 策	19
4 . 雷 被害 の リ スク 及 び リ スク 低 減 対 策	20
4 . 1 雷 被害 リ スク 低 減 の た め の 雷 保 護 対 策	21
4 . 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	24
4 . 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	26

1 . 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。

1.1 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。冬季では雲底高度が0.3km~0.5kmの低い雷雲が存在する。

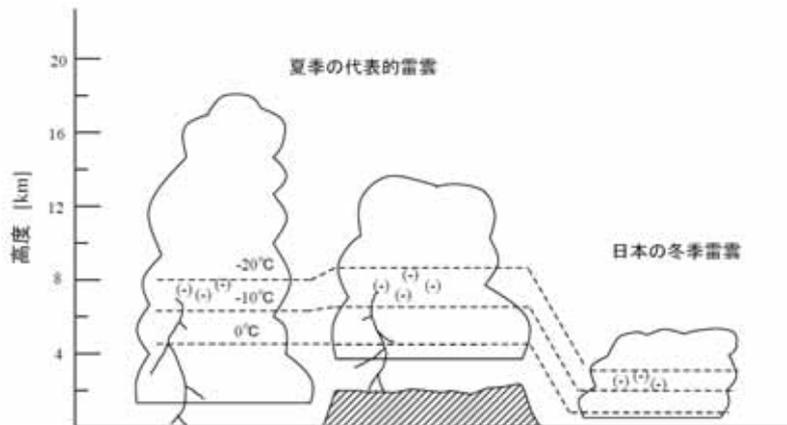


図1.1 夏季、冬季に発生する雷雲の高度比較

- (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。

1.2 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 1.2 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 1.2 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)

2 . 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。

2.1 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（本編付属書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。

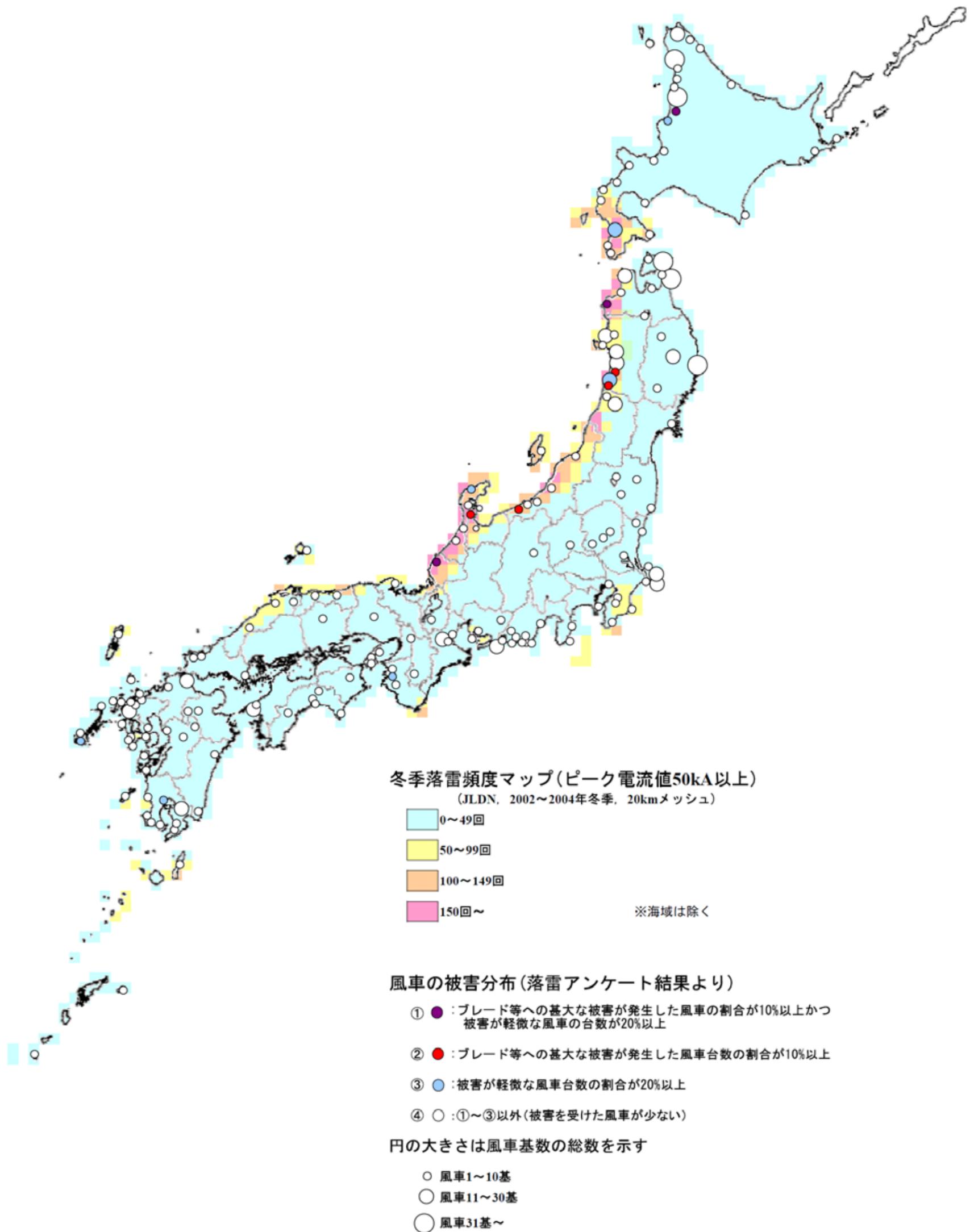
上述のとおり、既存の落雷マップは主として頻度について考慮された落雷マップである。「風力発電設備に対する落雷マップ」を検討する上では、被害に繋がりやすい雷様相を反映させるべきであるが、現状では雷被害と雷パラメータの関係は明確ではない。これまでの知見や本編付属書Cに示す大電流試験結果から、風力発電設備への被害程度は電荷量や比エネルギーのようなピーク電流値以外のパラメータも影響することが推測されるが、電荷量等を計測した全国規模の雷データは現時点では存在しない。

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と落雷数を比較すると、被害数は冬季が多い一方、落雷数は夏季の方が多い傾向にある。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。

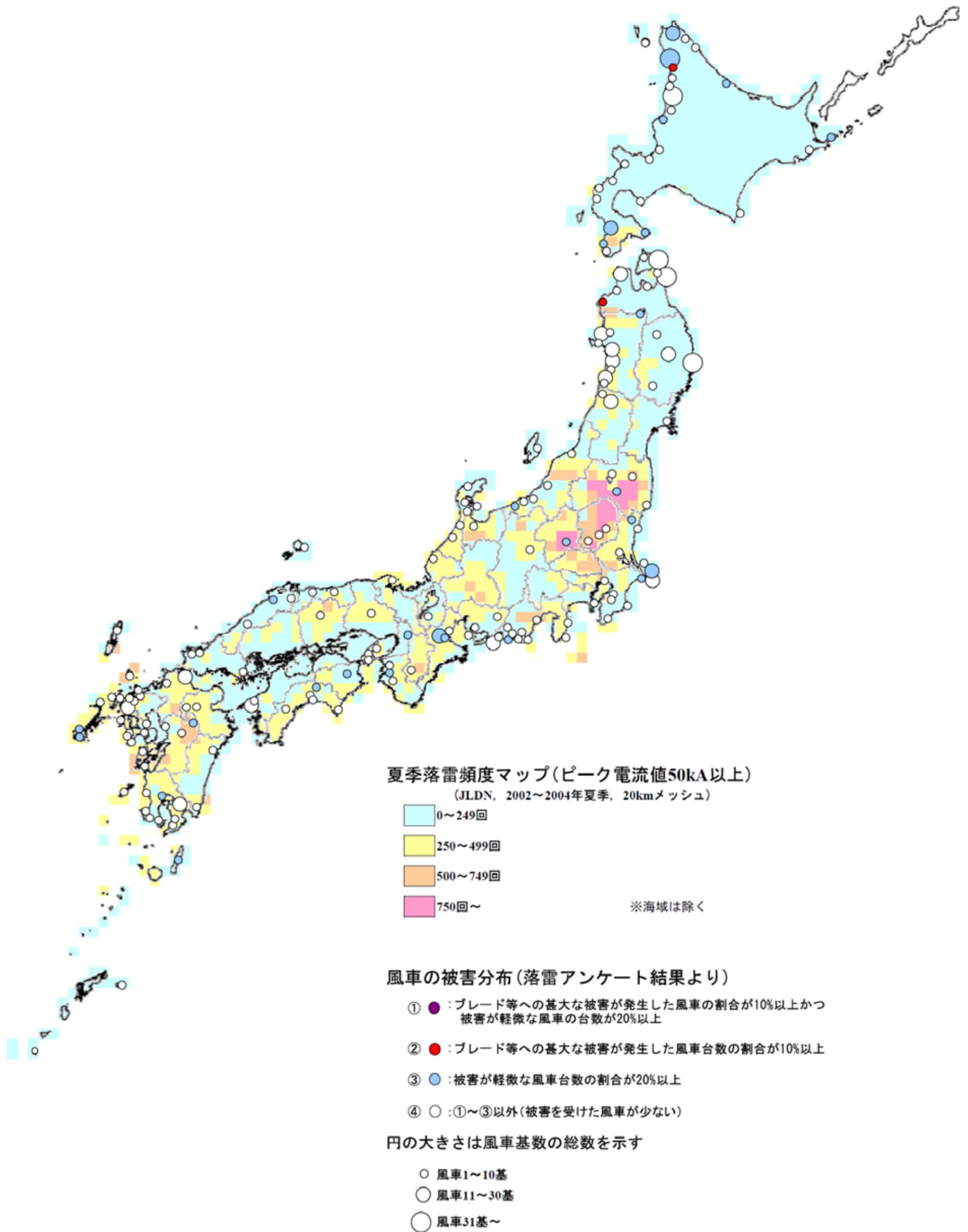
上記電流値及び頻度のデータと、雷被害アンケート結果を重ね合わせたマップを図2.1、図2.2に示す。

冬季（図2.1）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2.2）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2.1 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2.2 夏季の落雷頻度・被害マップ

2.2 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2.1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2.2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・東北地域・九州などであるが、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2.3に示す。

「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、具体的に施す効果的な対策については3章の雷保護の章で示す。

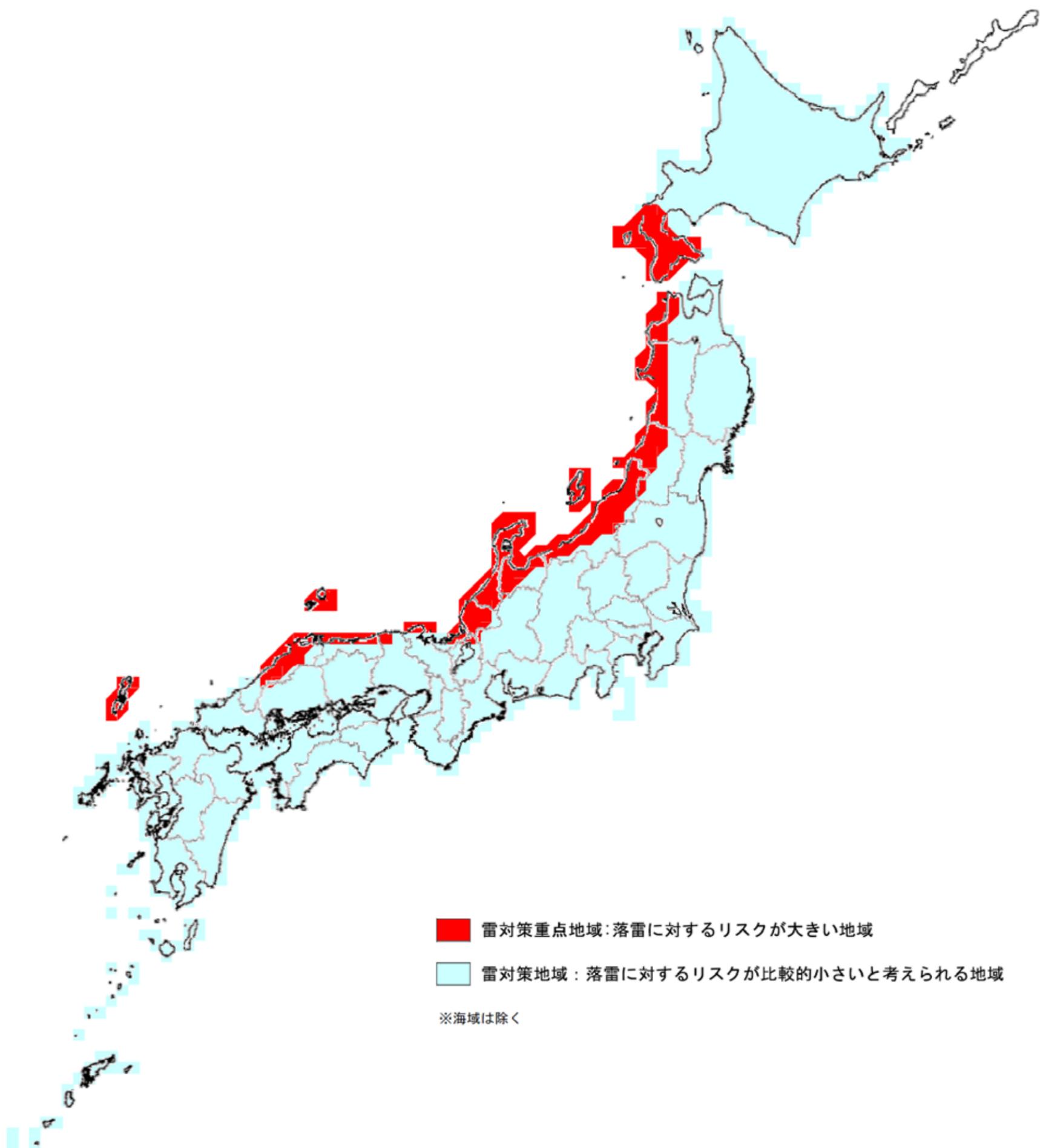


図 2.3 落雷リスクマップ

3 . 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、各風力発電メーカー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。

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（本編付属書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ている。

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可能性があるため、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。

3.1 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3.1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。

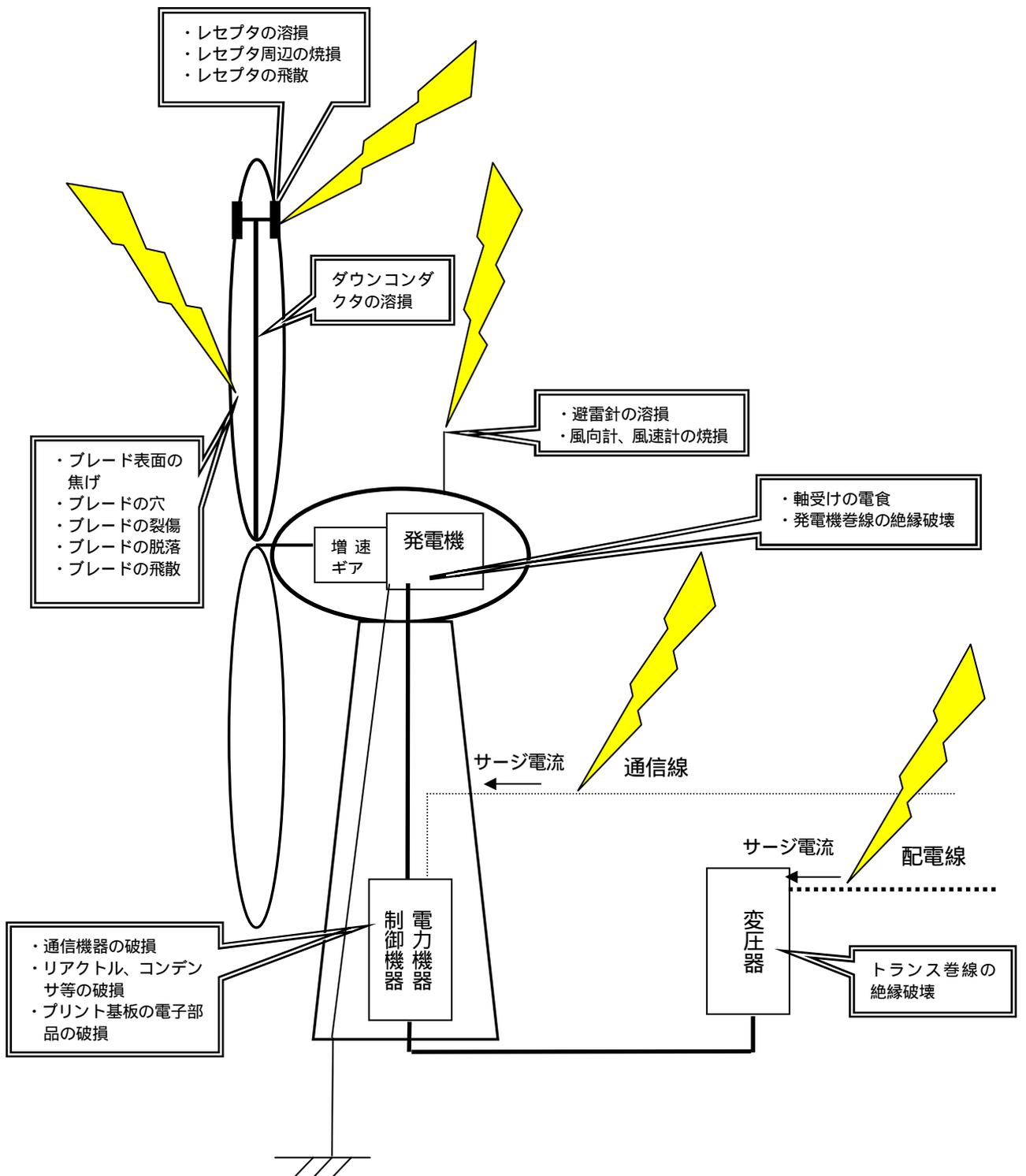


図 3.1 風力発電設備への雷撃時の被害発生様相

図3.1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3.2に示す。

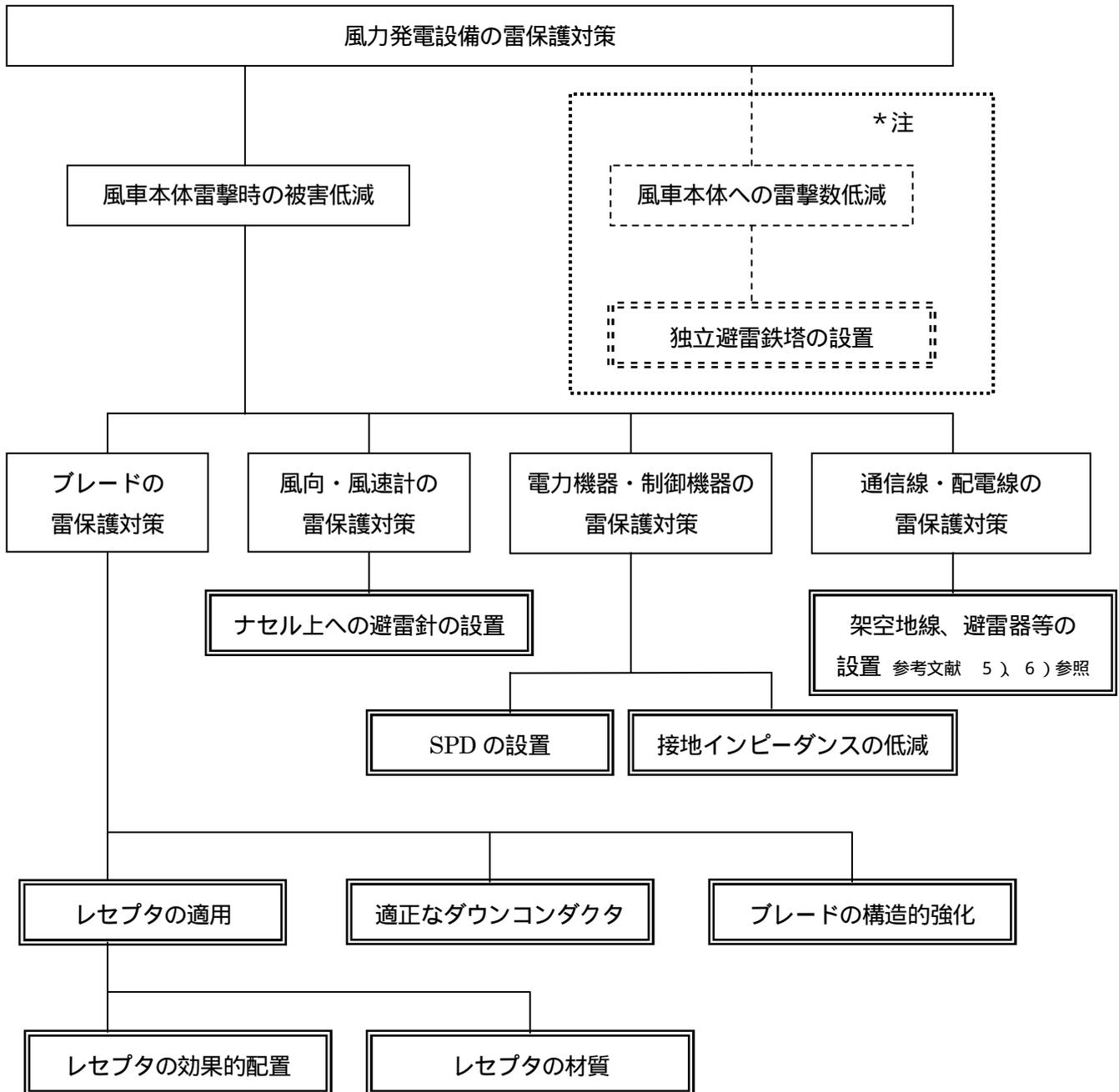


図3.2 風力発電設備の雷保護対策

*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。

3.2 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

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、確率的にはブレードに被雷することは十分考えられる。また、一旦ブレードに避雷すると、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（本編付属書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（本編付属書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可能性がある。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、本編付属書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。

ただし、この対策は、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。

(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 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、ギャップ型的气体入り放電管 (GDT)、アパランシェブレイクダウンダイオード (ABD)、半導体型の金属酸化物バリスタ (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。

3.3 独立避雷鉄塔による雷保護対策

風車本体だけ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。

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。

4 . 雷被害のリスク及びリスク低減対策

概 要

3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2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。

また、リスクの定量的評価手法についても検討し、ガイドライン本編の**付属書B**に記載したので、参照されたい。

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)

- ・風車での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。

4.1 雷被害リスク低減のための雷保護対策

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4.1に、発生する雷被害を分析したものを図4.1に示す。

なお、表4.1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。

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。

2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2.3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6.2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 4.1 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： は、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。

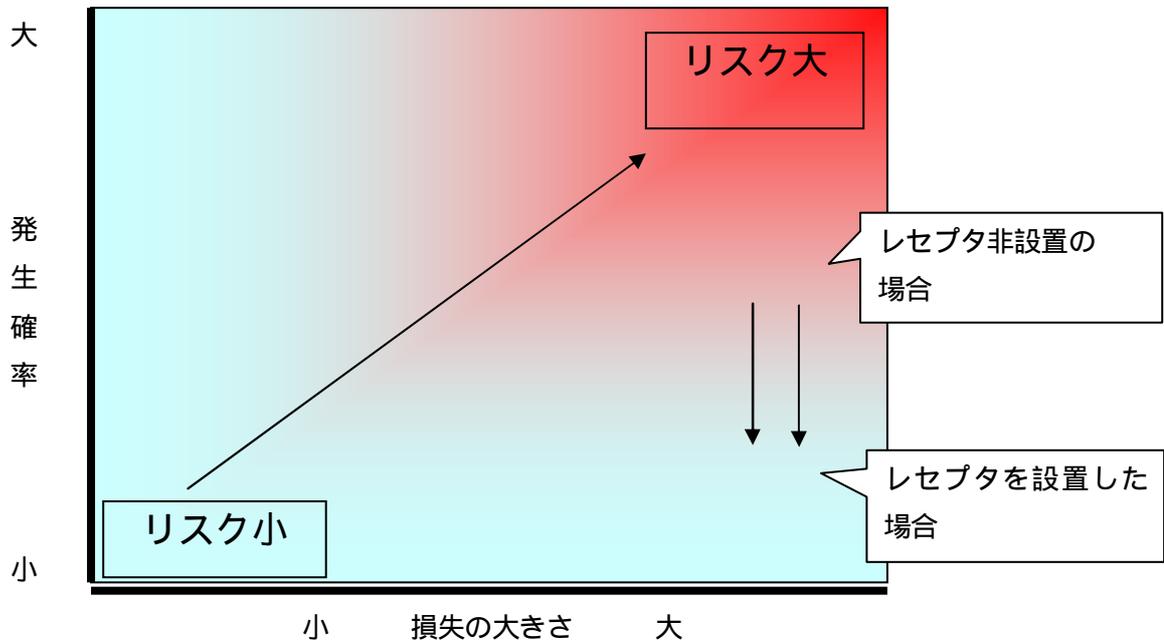


図 4.1 風車で想定される雷被害の頻度と損失の大きさ
(斜体 はレセプタ非設置、 はレセプタを設置した場合)

表 4.2 雷保護対策の重要度

対策内容	表 4.1 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 2.3 の 雷対策地域で 設置する場合	マップ図 2.3 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。

4.2 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

北海道南部の日本海側から山陰にかけての雷対策重点地域（図2.3参照）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な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4.1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4.1である。図4.1で、左下から右上方面に近づくほど、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、右上方面に近づくに従い、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4.1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堅牢である必要がある。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 4.2 に示す。これは、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であり、300 クーロン以上の電荷量の落雷が複数観測されている（最大は 430 クーロン）。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。本事業の観測期間は 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する。

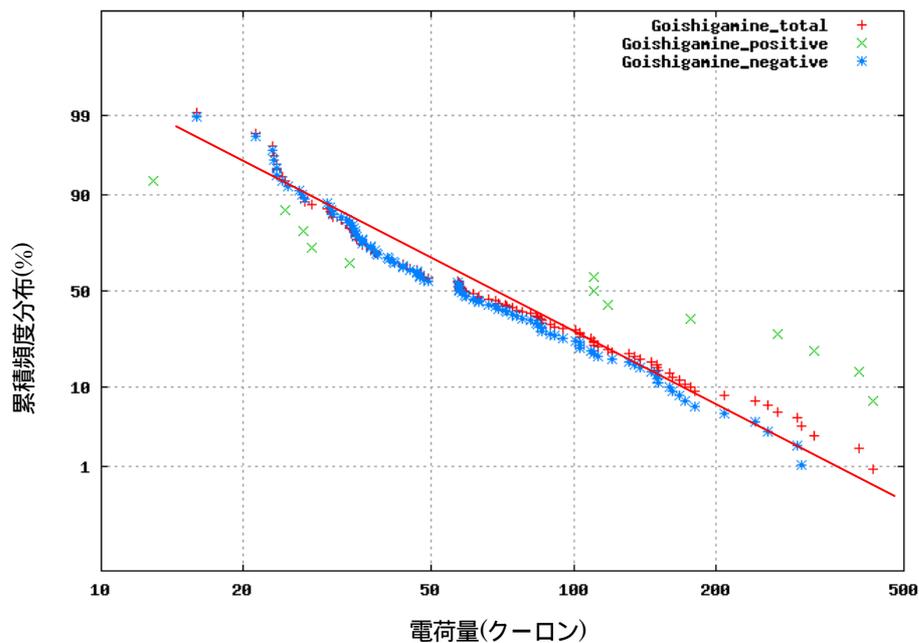


図 4.2 石川県碓石ヶ峰風力発電所で観測された雷の電荷量累積頻度分布
(2004～2006 年、冬季)
(赤：総数 緑：正極雷のみ 青：負極雷のみ)

(2) 電力機器・制御機器

雷対策重点地域においては、表4.2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)

3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。

4.3 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2.2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4.2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。