

安全安心な社会構築に 忘れてはならない雷害リスク対策

雷は通常的に発生するものではないことから、その存在を常日頃から感じることは少ない。しかし一度発生し、落雷すると、停電や人体への影響など大きな被害が発生する。

高度情報化社会は、雷リスクに対する脆弱性が高まっている。落雷による瞬間的な電圧低下や、ネットワークを通じた雷サージにより、ネットワーク機器の損傷、機能の停止や家電製品などの損害のみならず、例えば半導体製造工場などの瞬低による製造中断による歩留まり低下などの問題が増加傾向にある。落雷によって発生したノイズはサージに比べ低電圧、高周波であり、半導体など弱電機器を破壊するほどではないが、火災報知器の誤作動などの障害や、ディスク内の記憶喪失などの恐れのあるレベルの異常電圧を引き起こしている。また近年は、雷によって発生した電磁波誘導によって火傷をする被害も報告されている。

風力発電機の導入に伴って日本でも新たな雷被害が発生している。日本海側で発生する冬季雷の場合、1年で最大119回落雷した風力タービンもあり、落雷損害修復費が5年間で建設費と同等程度に達したと報告された風車もある。また、新たに風力発電やタワーなどの高層建築物ができることにより、周囲の環境が変化し落雷数が増加することがある。雷発生地域と建造物の詳細な関係図の作成、および風力発電の経済性の再検討と耐雷対策技術の研究が望まれる。

また、雷雲上空で生じている放電により、酸性雨の原因となるNO_x、電磁波、X線やガンマ線などが放射されていることが観測され、環境問題や通信障害などの問題も指摘されている。雷については、発生メカニズムは分っているものの、雲の中での放電挙動に関しては未解明部分も多い。現在、宇宙から雷の発生を観測、予報する研究開発も予定されている。現在の観測体制および技術では、局地的気象現象である雷の発生を精度よく予測する事は不可能であり、正確な雷発生数のデータの公開もなされていない。雷害被害を防ぐためには予測精度の向上と情報伝達の高度化が必要であり、現在分散されている多くのデータをまとめて、ユーザーにとって対策を選択しやすい環境の整備が必要となる。さらに一般への被害を防ぐためには、雷情報の早期伝達のためのネットワークの構築も課題である。建物への雷の侵入経路はさまざまであるが、その経路を管轄する省庁がそれぞれ異なるという問題があるため、今後は省庁を横断した対策作りが必要となる。今後の情報化社会に合わせた規格の整備などの検討も必要となり、特に海外機器の導入が増加している分野では欧米との規格の違いも認識し、建造物の設計段階からの考慮が必要である。

また、先進国共通の課題であるが、日本でも高電圧工学を含めて電気工学への学生の関心が低くなってきている。すでに、大学での高電圧に関する授業の廃止によって、この分野の後継者の育成が問題となっている。多くの国民がエネルギーの重要性を再認識できる仕組みの構築が必要である。

安全安心な社会構築に 忘れてはならない雷害リスク対策

浦島 邦子

環境・エネルギーユニット

1 はじめに

我が国では昔から怖いものたとの2番目に雷が上げられるが、通常的に発生するものではないことから、その存在を毎日感じることは少ない。しかし雷が発生し、落雷すると、停電や人体への影響など大きな被害が発生する。例えば2003年9月に、国会議事堂に落雷があった。避雷針が機能せず、雷は建物の外壁など本来落雷するはずのない箇所にも落雷し、議事堂のシンボルである中央塔（高さ65m）の避雷針周辺にも落雷し、御影石がはがれ落ちた。

当然これまでいろいろな分野で雷対策が検討されており、電源だけで動作する家電などへの被害は低減している。また、メーカーによる機器側の雷対策、そして各電力会社による供給設備側の雷対策

も進化し、落雷による停電の回数も減少している¹⁾。しかし、コンピュータシステムは、雷サージ^{注1)}に特に弱いことから、雷による情報ネットワークへの被害はむしろ拡大している。例えば、雷によりわずか20msec、30%の電圧変動が発生した場合でも、システムには打撃となり、故障発生やデータが破壊される危険性がある。もし、企業や公的機関の基幹コンピュータなら、1台の故障が個別のコンピュータシステムばかりか社会全体に悪影響を及ぼすこともありえる^{2,3)}。このようにIT環境の普及に伴い、雷害によるネットワークへのリスクは年々大きくなっており、今後ユビキタス社会になることによって、そのリスクは拡大する恐れがある。

また最近では、持続可能な社会構築のために望ましい再生可能エネルギーのひとつである風力発電への被害も報告されている^{4,5)}。地球温暖化や石油枯渇問題などへの対策として再生可能エネルギーの導入がヨーロッパを中心に進められているが、風力発電や太陽光発電などは自然を利用することから課題も多い。よって、風力発電の導入には雷害対策が必須である。

本稿では、安全安心社会の構築には忘れてはならない雷害リスクに関して、情報技術と風力発電に絞り、現状とこれからの対策について述べる。

■用語説明■

注1：雷の影響により発生するサージ電流のことで、「誘導雷」とも呼ばれる。

2 雷の発生と観測

2 - 1

雷の発生

図表1に示すように、太陽熱によって地表が熱せられることで上昇した気流によって、積乱雲いわゆる雷雲が発生する。上昇気流は、時には竜巻へと成長することもある⁶⁾。地上から5km以上の

上空では、気温が氷点下となるため、大気中の水分は細かい氷の粒へと変化する。それらが上空でぶつかり合うことによって摩擦電荷が発生し、雲の上部はプラスの電荷、下部はマイナスの電荷を帯び、やがて放電が発生する。雲の中や雲同士で放電する状態を雲放電といい、それが地表に向かって激しく放たれる現象が落雷である。雷

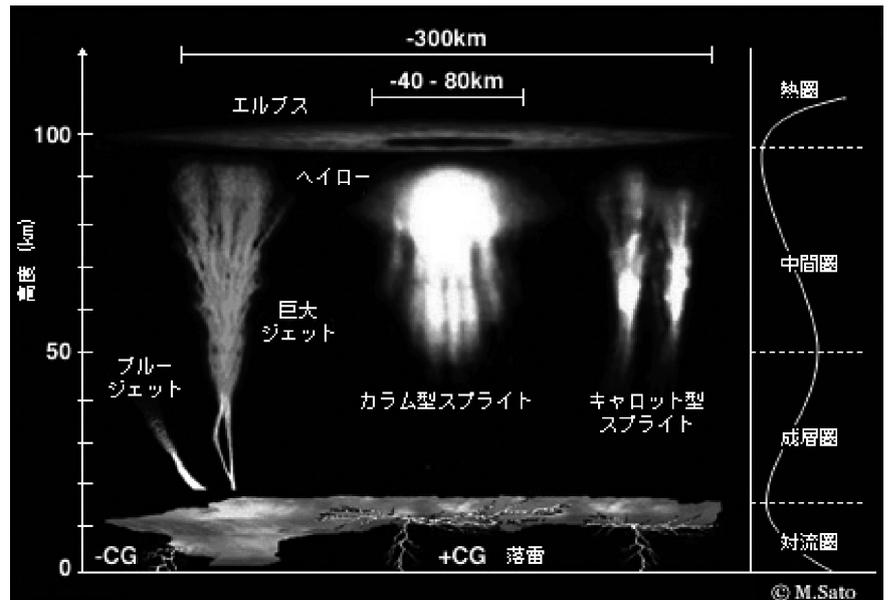
は、雷雲の位置次第で、海面、平野、山岳など、所かまわず落ちる。雲内での放電を雲放電、雷雲から地面への放電を対地雷（cloud to ground lightning：CG）と呼ぶ。対地雷には、上向きと下向き、正極性（+CG）と負極性（-CG）の4種類ある。1回の落雷の放電量は数万～数十万A、電圧は1～10億V、電力量換算で平均約90

万MWであるが、時間にするると1/1,000秒程度でしかないが、このエネルギーを電力として用いることも研究されている。

雷雲と大地の間で発生する落雷、雷雲の中で発生する雲放電のほかに、火山の噴火や竜巻の発生に伴って雷が発生することがある。落雷時の放電路の長さは数kmだが、最近の研究では、落雷した時に雷雲の上端から上空に向けて約100kmの高さまで発光を伴った放電が観測されている⁷⁾。図表1に示すように、地上からの観測や航空機やスペースシャトルなどを用いた観測により、おもに強い正極性の電荷を放電する落雷の時に、雷雲上空の成層圏、中間圏、下部熱圏で3タイプの放電(ブルージェット、スプライト^{注2)}、エルブス)が確認されている。雷雲上空で生じる放電によって、酸性雨の原因となるNO_x⁸⁾、電磁波、X線やガンマ線などが放射されていることも観測され、環境問題や通信障害などへの影響が研究されている。世界のNO_xの20~30%は、雷によって発生しているという説もあり、人為的な大気環境変化を研究する際には、雷やオーロラ現象の解明が不可欠である⁹⁾。

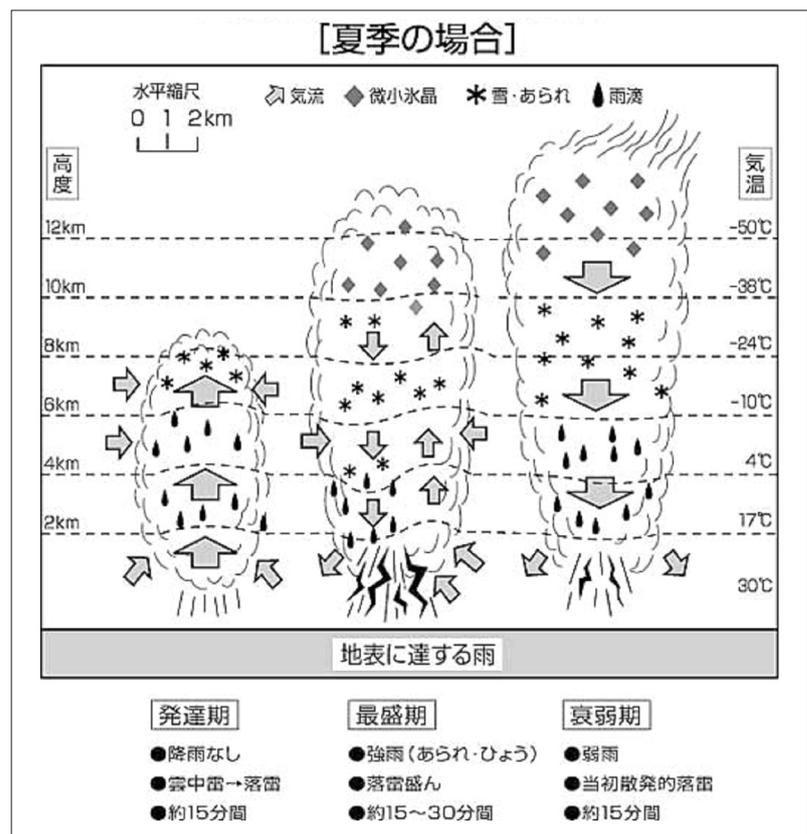
雷は季節を問わず発生するが、性質には差がある。冬の雷は、日本海沿岸に多く、海岸線から35km以上の内陸部では少なく、夏の雷に比較して落雷数は少ないが、一日中発雷する。雪やあられの前触れが多いことも特徴である¹⁰⁾。世界でも例が少ないこのような北陸地方に多発する冬の雷(冬季雷)は、夏の雷(夏季雷)の100~数百倍の大きなエネルギーを持つ雷が多い。図表2に雷雲のモデル図、図表3には雷雲の夏と冬の違いを示す¹¹⁾。

図表1 雷雲活動に伴う高々度発光現象(表紙カラー図参照)



JAXA ホームページより転載

図表2 雷雲の一生のモデル図¹¹⁾



■用語説明■

注2: 雷雲上の中間圏で起こる発光現象であり、雷とは全く別の発光現象ではあるが、雷(雷放電)に付随して発光するといわれている。近年衛星(ROCSAT-2 衛星搭載のISUAL 観測器等)からの観測も行われている。

雷の観測

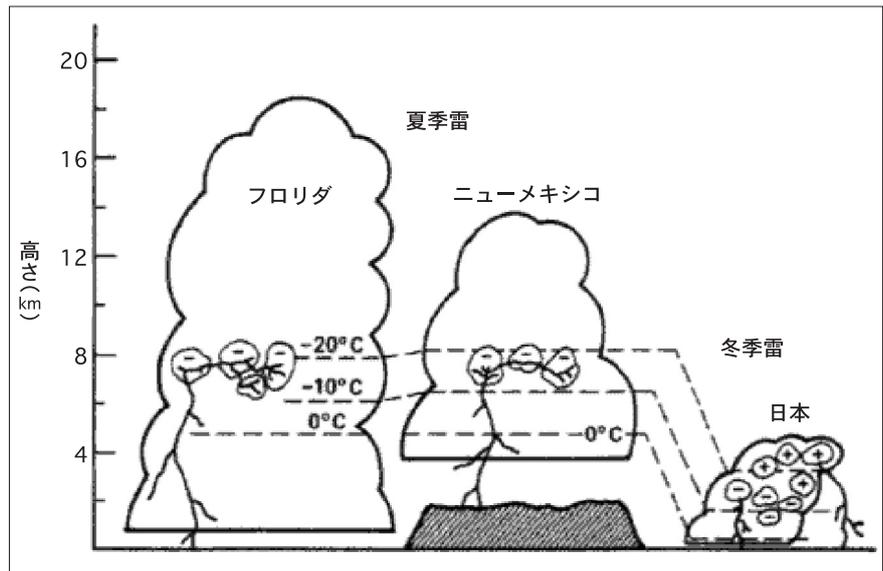
雷の基本的な発生メカニズムは分っているものの、実際に雲の中での挙動に関してはまだまだ未解明部分も多い。将来的には、雷観測センサーを用いてすべての雷光を宇宙から観測することが望まれる。宇宙から観測すれば、雲の中の放電でも高度や形状を正確に検知し、発生場所や移動方向がいち早く分かる利点がある。

過去10年の統計によると、日本では年間平均して50万回程度の落雷が観測されている。現在、電力会社や民間の気象情報会社などが落雷時に発生する電磁波を観測し、落雷点や落雷の大きさを推定する『落雷位置標定システム』によって落雷状況を把握し、情報が提供され、雷被害を低減、防止している。その観測データによると、ほとんどが夏季(4~10月)に発生している。前述したように、日本海沿岸地域に集中して発生する冬季(11~3月)の雷は、世界で観測されている地点では、日本とノルウェーでしか観測されない珍しい現象である。

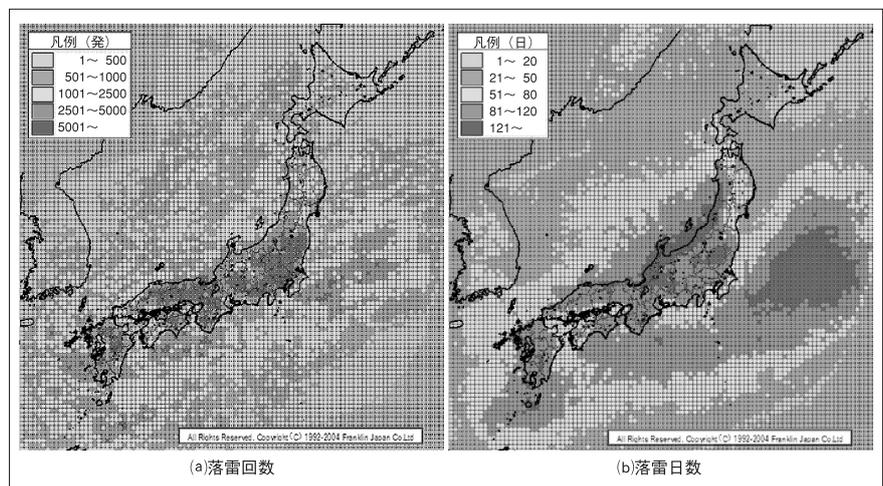
図表4は日本列島を一辺20kmのメッシュで区切り、メッシュ内の落雷数を2000年~2003年の4年間にわたって集計したものである。(a)によると、東京と大阪の大都市とその周辺の人口密集地での落雷の多さが特徴的である。また、(b)によると落雷日数では東北から北陸にかけての日本海側で非常に多くなっている。これは、夏季には関東、中部、九州の各地方に落雷が多く、冬季には、主に日本海沿岸地方に落雷が多い¹³⁾。日本海沿岸では、夏季雷の他に冬季雷が加わるため回数が増え、当該地域では雷による災害が冬季にも多く発生するのが特徴である¹⁴⁾。

1991年に設立された(株)フランク

図表3 夏と冬の雷雲¹²⁾



図表4 全国落雷密度マップと全国落雷日数マップ(表紙カラー図参照)



リン・ジャパンは、気象庁より「予報業務許可(予報許可第33号)」を取得して独自に雷および気象情報を収集し、半導体などの量産工場、ゴルフ場や遊園地などレジャー施設などを抱える様々な事業者に向けて落雷および気象の予報を提供している。同社は1998年10月より、全国規模の雷観測ネットワークとしては日本初の全国雷観測ネットワーク(JLDN: Japan Lightning Detection Network)の運用を開始した。JLDNは、全国29箇所に設置した2種類のセンサーから得られる情報をネットワーク化し、全地球測位システム(GPS: Global Positioning System)から送られてくる正確な時間情報を元に、落雷位置・時刻・電流値

などを観測し情報提供している。電力会社でも独自に同種のシステムを所有しており、電力供給エリア内の落雷情報の提供をインターネットやPHS等を用いて行っている。

大阪府の東大阪宇宙開発協同組合が打ち上げを予定している人工衛星「まいど1号」には、複数の広域帯アンテナで雷の電波を受信し、位置を確認する測定機「広帯域干渉計センサー」を搭載し、宇宙から雷の発生予報が計画されている。広帯域干渉計を宇宙で使うのは、世界でも初の試みで、この観測が実用化すれば、障害物の多い山間部や観測網の届かない海上の雷予報にも活用でき、また集中豪雨と地球温暖化の関係解明にも

役立つことも期待されている¹⁵⁾。
 カナダのトロントにある世界で一番高いCNタワー（553m）では、1976年より雷の観測を行っている^{16,17)}。通常100mくらいの送電線では年に1度くらいしか落雷しないが、東京タワー（333m）では年平均数回、CNタワーでは約60回落雷する。現在日本のみならず、世界で高層ビルが増加傾向にあることから、こうした高層物に対する対策が重要となってい

る¹⁸⁾。
2 - 3
雷の誘導
 ベンジャミン・フランクリンが凧を揚げて実験を行い、雷が電気放電であることを証明してから約250年がたつ。これにヒントを得て、ワイヤー線をつけた小型ロケットを地上から雷雲に向けて打ち上げ、雷を地上に導く「ロケット

誘雷」が1970年代にフランスで始まった。現在までに世界各地で実験が行われ、誘雷に成功している。ロケットのワイヤー線に代わり、レーザー光線で雷を地上に導く「レーザー誘雷」やジェット水で雷を地上に導く「水誘雷」の研究も行われている。確実に雷を地上に導くためには、雷雲を正確に見つけて、ロケットなどを発射させるタイミングが重要になることから、気象情報も研究には欠かせない。

3 雷被害の実態

3 - 1

直接落雷の被害

落雷によってさまざまな被害を引き起こす。一般には直接の落雷による被害と、落雷によって発生する電磁波による誘導被害の2つに分類される。図表5に落雷の分類と現象、死亡率を示す。

3 - 2

人体への被害

警察白書に書かれている1996～2005年のデータによると、日本において落雷による死者行方不明者は年1人～6人（年平均3.5人）である。1960年代には年間50人を越える年もあったことを考えると、雷に関する防御策が一般にも浸透してきていると思われる。落雷による主な死因は落雷による呼吸停止、心拍停止である。

近年の雷による大惨事は、2005年4月21日に中国重慶市で起こった死者19人、負傷者13人である。人体に雷が落ちた場合、雷の電流の流れ方には電流が体内に流れ込むタイプ（死亡率高い）と、電流のほとんどが人体表面を流って地面に流れるタイプ（直撃落雷

の生存者の大多数）がある。落雷による意識喪失や体のしびれによって、転落死あるいは溺死するケースも多い。海面に落雷した場合、落雷位置の約20m以内にいた人が、死亡あるいは重体になるケースも多い。図表6に日本と中国で起きた被害状況の一例を示す¹⁹⁾。

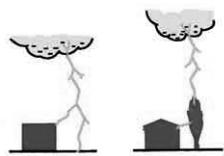
3 - 3

情報ネットワークへの被害

ITによる高度情報化社会は、より広域で快適な情報ネットワーク環境によって、利便性や生

産性の向上が図れる一方で、雷害リスクという意味では脆弱性が高まっている。近年、家電製品やコンピュータなどに使用されているICなどの電子回路は低電圧化が計られている。そのため落雷による瞬間的な電圧低下や、ネットワークに侵入した雷サージにより、ネットワーク機器の損傷、機能の停止、誤作動といった被害が増加している。落雷しなくても雷によって発生した電波は、通信線や電子回路に電磁障害（EMC：ElectroMagnetic Compatibility）を発生させる原因にもなる。

図表5 落雷の分類と現象

落雷分類	落雷の割合	落雷現象	落雷した際に死亡する確率
直撃	57%	電流の大部分が落雷対象物物件を通過するので最も大きな被害を受ける。 ●人体・家畜の死亡 ●瞬間的な高温電磁力による機械的破壊 ●火事の原因 ●電気工作物の絶縁破壊など	74% 
側撃	30%	雷の主放電路から分岐した放電路が落雷対象物物件を通る場合及び高い樹木などに落雷し、木の幹などを離れ、数m以内にいる人の体を通して、地面に達する。落雷の被害度としては直撃雷よりも小。	90% 
多点	13%	多地点にほとんど同時に落雷し、複数の死傷者が出る。	落雷1回につき平均1人

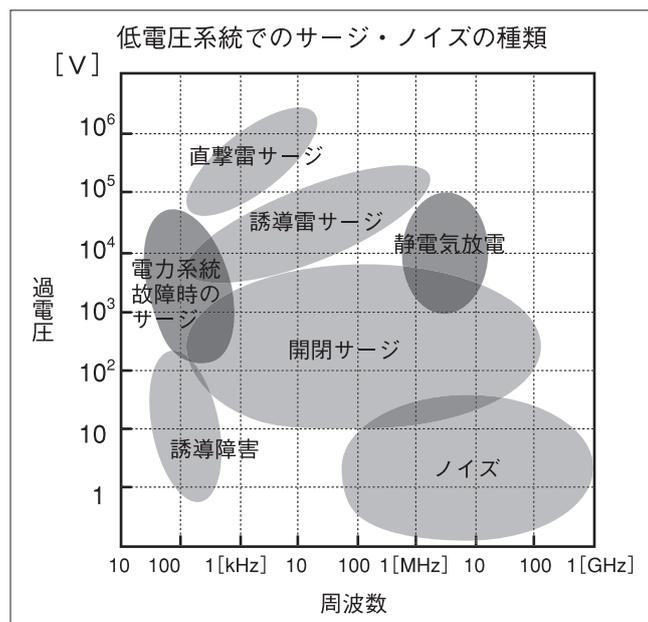
図表6 日本と中国の落雷被害の場所と状況の事例

年月日	場所	落雷箇所	被害の状況
1975/8/5	香川県大内町	ヘリコプター	自衛隊ヘリコプターが落雷を受けて墜落、4人死亡。
1989/8/12	中国 山東省	石油タンク	黄島の石油貯蔵所の貯蔵タンク1基が落雷で爆発。さらに数基が誘爆。5人死亡、12人行方不明、86人負傷。
1990/12/11	大阪国際空港	航空機整備中	大阪国際空港国際線6番スポットで、駐機中のB-747機首付近の地面に落雷。近くで作業していた作業員1人が負傷。
1994/8/31	群馬県吾妻町	電車	停車中の普通電車後部運転席に落雷。車掌1人が負傷。
2000/8/7	山梨県山中湖村	ラグビー場	中学校のラグビー部が合宿中、雨が降り出す前にグラウンド付近の木の近くに落雷。木から5～10m離れていた、ラグビー練習中の中学2年生が2人負傷。
2001/7/17	滋賀県日野町	下校中、自転車	自転車で学校から帰宅途中の小学5年生が落雷に遭い、1人重傷。
2002/5/24	北海道札幌市	学校内	小学校のボイラー室付近に落雷。隣接の給食室でマンホール蓋が飛び、食品納入業者1名負傷。
2003/9/3	佐賀県大和町	下校中	小学4年生が下校途中、町道上で落雷に遭い、1人死亡（落雷で国会議事堂の外壁が壊れた日と同日）。
2004/7/5	沖縄県名護市	電話工事	島に架ける橋の建設工事現場（橋の歩道）に落雷。電話工事の作業員が1人死亡。
2004/7/27	奈良県天川村	建設工事	送電用鉄塔解体工事中、雨のため作業中断中に落雷。2人負傷。
2005/4/21	中国 重慶市	火薬工場	激しい雷雨の中、落雷直後に民間向け火薬工場の乳化作業所が大爆発し、3階建て工場が完全に破壊された。作業員19人が死亡、10人負傷。
2005/8/23	東京都江戸川区	河川敷野球場	軟式野球試合中に、河川敷野球場の2塁ベース後方10mの芝生に落雷。高校生2人負傷、ショックで一時過呼吸状態。青空も見えていたが、遠くに雷鳴は聞こえていた。
2005/9/10	福岡県直方市	学校校庭(体育祭)	体育祭の最中に雷雨になり、体育館に避難。その後、雨が小降りになって再開し、応援合戦中、グラウンド脇の森に落雷。仮設スタンド最前列に座っていた生徒8人が負傷。
2006/7/14	千葉県佐倉市	土木工事	宅地造成現場で、配管工事中に雷雨が激しくなったので、作業を中断しようとした矢先に、落雷。現場監督1人が意識不明重体、作業員1人も負傷。
2006/8/8	東京都板橋区	歩行中	朝、土砂降りの雨が降り出したため、大木の近くでミニバイクを降り、数m先の公衆トイレに向け歩き出したところで、大木（高さ30m）に落雷。側撃を受け、1人死亡。

あおば屋ホームページより一部引用して作成

図表7に電気機器に影響を与えるサージ電圧とノイズの種類について記す。サージ電圧とは、電気回路や電気システムに通常の電圧を超えて、瞬間的あるいは、断続的に発生する過電圧のことを言う。このサージ電圧によって、電気機器は絶縁破壊や機能停止、劣化などの影響を受ける。サージは図表7に示すように、高電圧かつ低周波であり、自然現象による雷サージ（直撃雷サージ、誘導雷サージ）、電気回路システムの過渡現象による開閉サージ、故障などによる過電圧が発生原因である。また近年、雷によって発生した電磁波誘導によって人が火傷をする被害も報告されている。通常ノイズはサージ電圧に比べ低電圧かつ高周波の電磁障害をさし、半導体などの弱電機器を破壊するほどではないが、火

図表7 サージ電圧とノイズの種類



音羽電機工業(株)提供

災報知器の誤作動や記録喪失などの恐れのあるレベルの異常電圧を引き起こしている²⁰⁾。

家電製品などの損害のみならず、例えば半導体製造工場などの瞬低による製造中断によって、歩

図表 8 雷害の頻度の高い機器

雷害の頻度の高い機器	対象設備
本体と端末機器が離れている機器	監視カメラ、各種防災設備、入退出ゲート、各種プラント制御設備、給湯器、エアコンなど
通信機器およびネットワーク設備	オフィスビル：中継器、交換機だけでなく電源線と通信線のつながる多数のネットワーク端末機器など 家庭：多機能電話、FAX、モデム、PC、CATV 機器など
アンテナのある通信設備	無線中継所、放送設備、風力発電制御設備など

図表 9 業種別雷被害の例²¹⁾

1回あたりの被害金額	業種あるいは産業	被害内容
人命	石油化学プラント、火薬産業	危険な火薬類を取り扱う多くの作業であることから、人命に対する危険性がある。
数千円～数億円	鉄鋼産業	制御系から、圧延作業を主とする広範囲にトラブルとなる。工程内容も多岐になりその損失も大きい。
数百万～数千円	半導体産業	最も電圧変動に鋭敏な作業工程が多いため、瞬低により被害発生。
数十万～数百万円	繊維産業、化学フィルム産業、印刷産業、機械加工産業、表面処理産業、ソフト開発産業、ゴミ焼却場	瞬低により製品素材に品質のパラツキが発生する。これが、最終工程まで進めば大きな損失となる。 ミクロンオーダーの膜厚処理も同様。 ソフト開発中における瞬低は、データ破壊など大きなダメージを受ける。 高炉による高電圧方式で処理を行っている工程は、停電によって大きなダメージとなる。
数万～数十万円	食品産業、通信無人基地、上下水道監視舎、病院	電子制御による加工工程、特に炊飯、ベーカリー等は生産に多くの電子機器が使われており、中には瞬低により大きな損失（不良品）を出す。無人基地局の雷害トラブルは、非常用電源などにより対策がなされているが、通信、制御系での被害は多発している。

留まりの低下や原価コストの増加傾向が見られる。図表 8 に雷害の頻度の高い機器、図表 9 には業種別雷被害の例を示す。

産業用や家庭用の避雷器、避雷素子などが開発および販売されているが、雷リスクに対して 100% 安心というものはない。ファクシミリなどの通信機器は改良により雷被害を受けにくくなったものの、雷サージは電流通過型であるため、電話回線側の保安器に雷サージ電流が流れるようになり、ターミナルアダプタやルーターが破壊されるという現象が起きている。また、サージ対策用のアース端子が剥き出しになっている機器（コンセントなど）は、落雷のときに偶然触れていた場合、感電の可能性があって危険である²²⁾。雷害対策投入コストは、機器の修

理あるいは交換費用のみだけでなく、逸失損益も考慮に入れたうえで決定する必要がある²³⁾。

3 - 4

風力発電システムへの被害

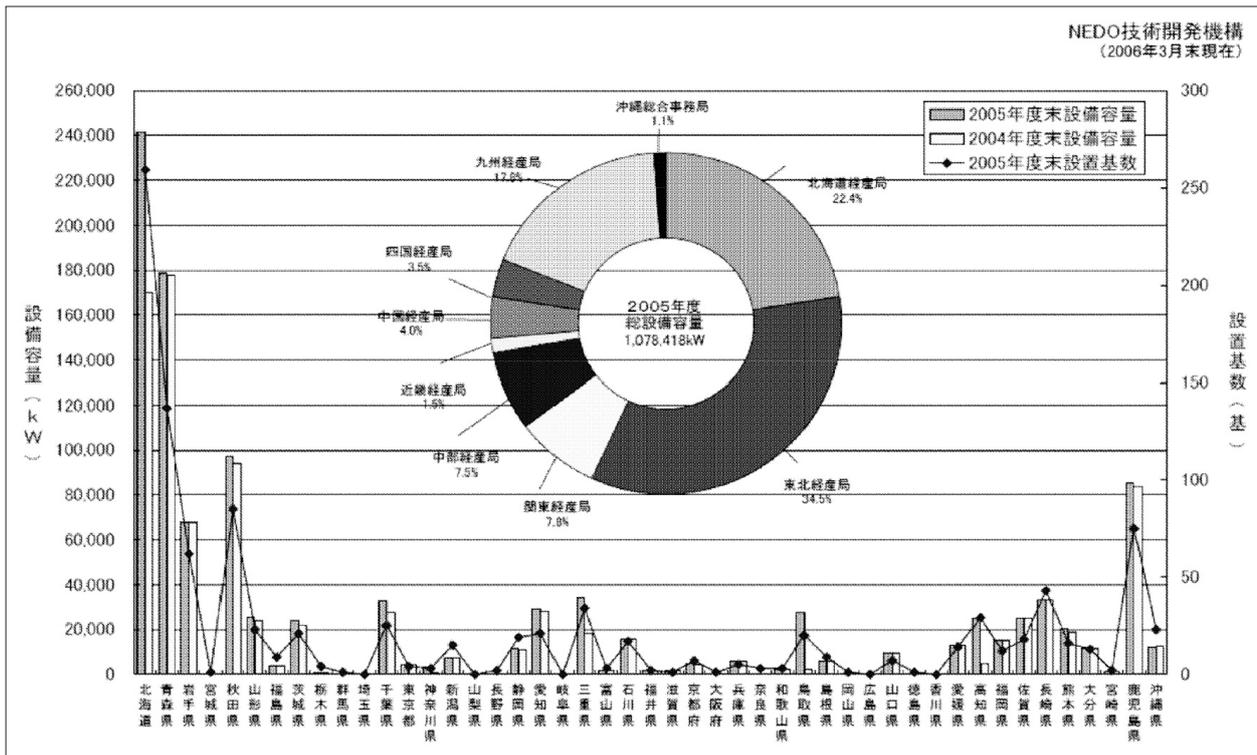
従来の雷被害は、家電や電話線、送電線への落雷による送電、発電設備の故障および被害が主であったが、風力発電設備の導入に伴って、この分野での新たな雷被害も増加している。風力発電などの高層建築物が新たにできることによって、周囲の環境が変化し、落雷数が増加することがある。カナダの CN タワーの場合、雷害は従来の 2 倍となった。このように風力発電設備の導入が増えるにしたがって、他国とは違う、日本の気象条件による問題が発生している。

日本海側の冬季雷による風力発電所への落雷被害はそのひとつである。図表 10 に都道府県別風力発電導入量を示すが、風力発電設備の設置場所は北海道・東北が多い。

日本海側で見られる冬季雷は、西北海道から山陰地方までの日本海沿岸の一带で発生し、年間の雷発生日数は 30～40 日に及ぶ。この地域には現在 46 箇所の風力発電設備があり、そのうちの 23 箇所がこれまでに落雷被害を受けている。このうち避雷鉄塔設備を備えた風力発電設備は 8 箇所ある。落雷を十分に検討された避雷鉄塔については効果が見られるものがあるが、避雷針の効果は 100% とはいえない。雷電流の程度によっては、電路の温度上昇やアークによる溶損などの熱的影響の他に機械的影響も見られる。この場合のメカニズムとしては、放電路の急激な過熱により膨張および圧縮を生じ、超音速の圧力波が周囲に伝播し衝撃圧力が発生することがシミュレーションから推定される。また、冬季雷は、夏季雷と異なり瞬間的な電流でなく、大電流がある程度の持続時間をもって流れる非常にエネルギー量の大きな雷の場合もある。したがって落雷エネルギーがブレードの水蒸気と反応して起こる爆発が原因とみられる墳破や破損をもたらすともいわれている。日本の冬季雷によって、1 年で最大 119 回も落雷した風車ブレードもある。また風車によっては、5 年間で落雷損害修復費が建設費と同等程度に達したものもある。

近年は風車の大型化が図られ顕著となってきており、大型風車はブレード先端部までの高さが 100m を越えるものも多く見られ、このため落雷被害頻度も上がってきている。大型風車のブレード被害は修復コスト、交換に要する期間（輸送、据付け等）の長期化に伴い、風車停止時間の増加による

図表 10 都道府県別風力発電導入量²⁴⁾



風車設備の稼働率、設備利用率の低下をもたらしている²⁴⁾。

欧州では風力発電が積極的に採用されており、風力発電設備に対する雷の影響は、1990年よりドイツ、デンマーク²⁵⁾、スウェーデンで観測されている。平地では10年間でそれぞれ年平均8%、3.9%、8.5%台のタービンが落雷のため故障している。この地域の丘陵部では約15%のタービンが故障している。また1回の落雷によ

図表 11 風車の構成要素別故障状況 (単位：%)

被害構成要素	デンマーク	ドイツ 450kW 以上	スウェーデン 450kW 以上
ブレード	10	35	43
電源システム	20	20	22
制御システム	51	36	18
機構部	7	4	4
その他	12	5	13

る被害額は、平均約30万円と報告されている²⁶⁾。図表11に示すように、風車落雷被害統計ではデンマーク、ドイツとスウェーデン

における風車の構成要素別故障状況が示されている²⁷⁾。

4 雷被害への対策

4-1

屋内や野外配線への対策

ビルや一般家庭への雷サージ電流の進入は、図表12に示すような経路が考えられ、このような経路には保護対策が必要となる²³⁾。雷の性質を考慮すると、サージ保護装置としての重要な機能としては、大容量のサージ電流を許容でき、火災などが発生しない構造で

あり、しかも何回でも誘導雷に耐えられることが条件となる。雷保護を目的とした市販品は色々あるが、主要な機器はバリスターやアレスターと呼ばれ、雷サージを大地アースに流して接続機器を保護する方法がとられている。

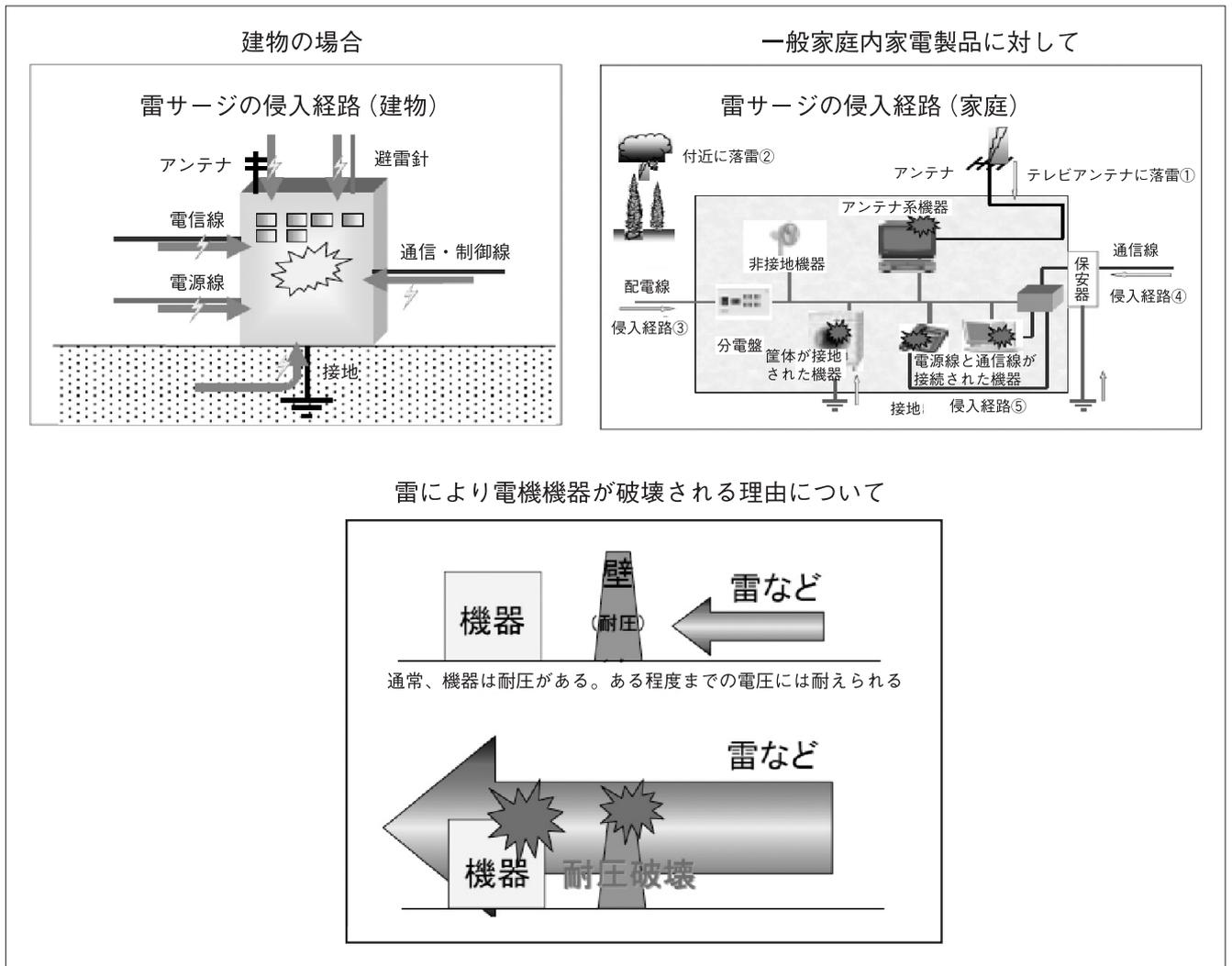
4-2

気象情報による予報

気象庁では、天気予報の中で

「ところにより雷を伴う」と表現しているが、雷の予測および精度確保は難しいため、「雷警報」は発令せず「雷注意報」を流す。現状では雷の発生源である積乱雲の発生のポテンシャルは予測できるが、発生位置や時間を高精度で予測することは困難である。また実際に発生した積乱雲が必ずしも雷を発生させるとは限らないので、さらに予測の難易度が高くなる。よって、現在は気象庁ではおもに

図表 12 雷サージの侵入経路



東京海上リスクコンサルティング(株)リスク・レーダー No.2004-4 より引用

予想時間と手法に応じて、ナウキャスト、短時間予測、短期予測の3種を予測している。図表13にそれぞれの予測の対象と目的を記す²⁸⁾。発雷予測精度を高める研究が進められており、数値モデルを利用した短期予測スケールでの新たな予測手法も検討されている。モデルの精度向上には、解像度の向上と、より現実に近い状況をモデリングするためには観測データの構築が必要不可欠である。

雷に関する最新情報は、気象庁のみならず、各地域の電力会社も積極的に発信している。

4 - 3

風力発電設備への対策

風力発電設備のブレードにおけ

図表 13 雷予報の対象と目的

分類	対象時間	目的
ナウキャスト	数分～10分先の予測	積乱雲が発生した後、発雷の前兆を捉え、発雷を予測。高頻度の観測および迅速な伝達システムが必要。
短時間予測	数十分程度先の予測	発雷を観測した雷雲群に対し、雷雲群の移動予測から雷雲の接近を予測する。急に発生した雷雲や寿命が短い雷雲群の予測は困難。
短期予測	数時間先～2日	数値予測結果を元に、大気不安定度などの発雷に関係しそうな指標を取り出し、雷雲発生のパテンシャルを予測する。

る落雷被害は、表面複合材料の層間はく離や燃焼及び落雷点の金属構成要素（レセプタ、導電体）の加熱または溶断である。ブレードの被害は雷電流が複合材料またはその層間を導電し、そのときに発生する衝撃波がブレードのエッジに沿って、内部からブレード表面を引き裂き、または破裂させる。

雷がブレードの中でアーク放電を起こしたときには、最も激しい被害となる。ブレードの被害程度は、表面のひび割れからブレードの完全破壊まで多くのパターンが見られる。このような現象への対策として材料の改良が有効である。雷被害の場合は、材料の破壊挙動が複雑でメカニズムの追求が難し

いが、改良されたガラス繊維強化プラスチックや炭素繊維強化プラスチックは、単一材料では望み得ない数々の優れた特徴を有するた

め、最近のブレードには多く用いられている。

なお、当然ながら風力発電機の設置場所についての調査も重要と

なる。(独)産業エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)では、風況に関するデータベースを構築している²⁹⁾。

5 今後取り組むべき雷対策

5 - 1

データベースの構築と正確な予報

落雷点を未然に予測できれば、雷の被害を防ぐことが容易になる。そのためには雷雲内の力学を理解し、電荷分布を明らかにすることが必要である。また、レーダと干渉計を組み合わせたシステムによって放電の進展様相を測定し、雷放電に関する研究を進めることが必要となる。観測については、宇宙から雷を観測することによって、雷活動と地球温暖化の相関関係を科学的に解明できる可能性があることから、ここでは電気工学や気象工学、宇宙工学といった分野横断的な研究が望まれる。

雷の発生は季節や地域によって差があるため、それぞれの地域の特性に合った対策が必要になる。例えば弱い雷と強い雷の電流差は100倍もあるため、中程度の雷に合わせた対策をしても強い雷には対応できない。現在は、機器の選択に際し、どこまでの対策が必要かを、ユーザー側が想定しなければならないため、雷対策が万全ではないケースが多く見られる。

気象庁からは雷発生数のデータは公開されていない。現在の観測体制および技術では、局地的気象現象である雷の発生は比較的制度よく観測されているが、予測する事は難しいことから、前述したように「雷警報」は出していない。雷害被害を防ぐためには予測精度の向上と情報伝達の普及が必要となる。

電力会社は落雷による停電発生数は把握しているが、発生雷害をすべては把握していない。よって、現在分散されている多くのデータをまとめ、ユーザーにとって雷害対策が選択しやすい環境整備が必要となる。さらに一般人への被害を防ぐためには、雷情報の早期伝達が必須であることから、ネットワークの構築も課題となる。このように各社が持っている情報を総括し、より予報しやすい状況を構築するために、民間の技術開発と予報サービスをさらに進めることも望ましい。

5 - 2

省庁間の連携と法整備

施設や一般家庭への雷電流の侵入経路はさまざまあるが、経路によって管轄する省庁がそれぞれ異なる。通信関係は総務省、電源設備は経済産業省、避雷針設置基準は国土交通省の管轄である。このため包括的な対策基準作りが難しくなっている。今後は省庁を横断した対策作りが必要となる。

日本の雷害防止技術関連のJIS規格は、1940年代に作られたものが基本となっている。最近は順次改正されているが、高層建築やネットワークへの対応は不十分である。今後、情報化社会が進むに連れて規格などの検討が必要となる。

5 - 3

建造物の設計時点での取り組み

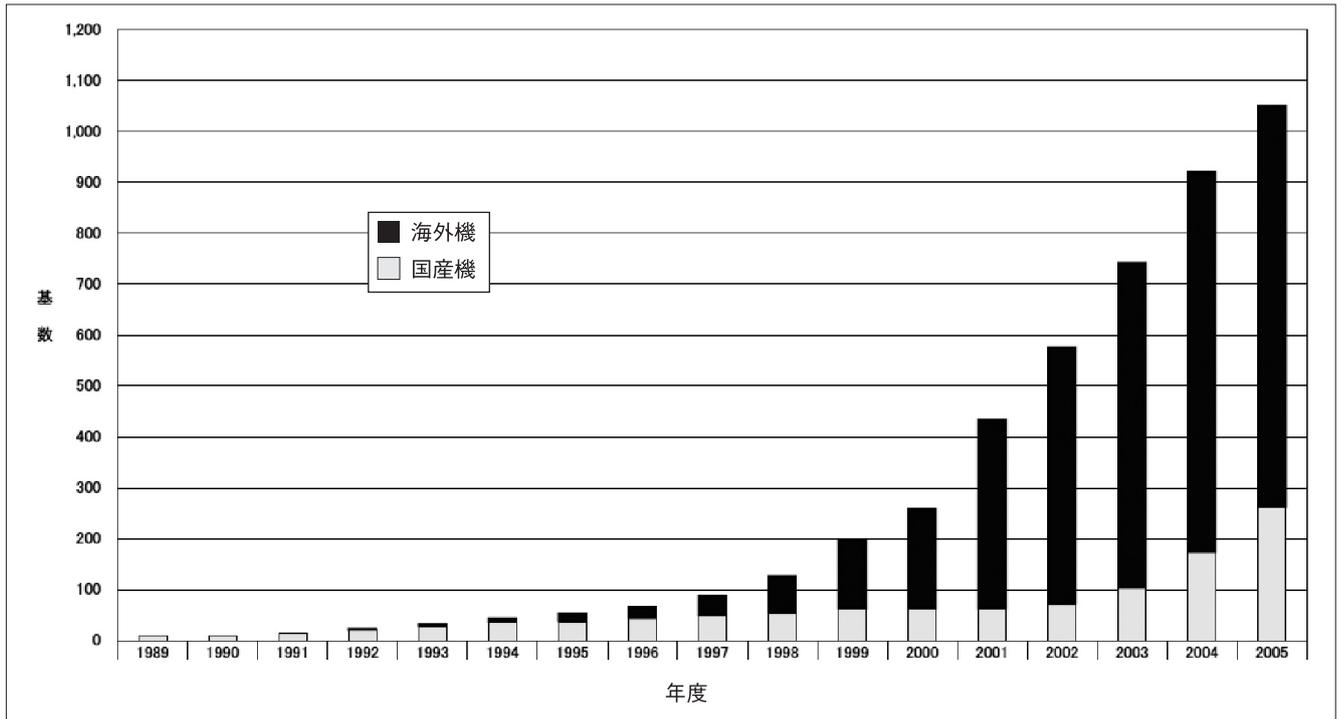
最近は特に首都圏では高層ビル

の建設が進んでいる。それに伴い、ビルに直接落雷する被害が増加している。事例として、1999年7月22日東京都庁の壁の外壁材に落雷し、41階(地上約180m)の北西角の外壁が、約20cm×20cm、深さ10cm程度はがれ、庁舎北側の遊歩道で破損した約400gの石材の塊が発見された。こうした事故への対策も必要となる。

好風況地の多い日本海沿岸の地域では、風力発電設備の導入が促進されているが、リスク回避の意味からも落雷による全国規模の風車被害調査を行い、冬季雷の計測を実施して冬季雷の特性データを収集し、それらを総合的に検討した落雷マップを作成することや落雷保護対策としてのガイドラインを作成することが必要と考えられる。現在NEDOの事業として2005年から「風力発電設備への落雷対策に関する調査」が、2006年からは「日本型風量発電ガイドライン策定」が実施されているが、落雷被害は依然として発生している。今後は雷発生地域と建造物の詳細な関連図の作成、および風力発電設備の経済性の再検討と、耐雷害技術の研究が望まれる。また、我が国で建設される第2東京タワーは、地上高約610mであり、CNタワーと同程度以上の落雷数が発生する可能性がある。もし、落雷により放送設備にダメージがあった場合、関東地区への情報伝送が長期間にわたり欠落する可能性がある。高層物に対する落雷現象の解明と落雷対策も緊急の課題と言える。

風力発電のタービンの高さは、

図表 14 日本での風力発電設備の海外機と国産機の導入基数の推移



約 100m であるが、同じ高さの送電鉄塔よりも多い頻度で落雷するというデータがある。この事象解決のために 2005 年末より EU が中心となり、世界 18 カ国約 220 人の研究者が 5 年間研究に参加する、COST プログラムが開始された。このプログラムは、雷による NO_x の発生量や電磁被害、自然災害などが、風力発電設備によってどう変化するかを研究することを目的としている。現在日本でも設置が盛んな風力発電施設の設置条件や、災害低減のメカニズム解明にもつながるものとして、我が国も積極的な取り組みが望まれる。

5 - 4

海外規格への対応

風車の国際規格 IEC（国際電気標準会議）61400 - 24 における雷被害対策の規格は、従来の欧米の風力発電設備（ブレード長 20m 以内の風車）の被害実績をもとに受雷部断面積や導電体の断面積を設定したもので、大型風力発電設備や大きなエネルギーの落雷（冬季雷等）に対しては、今後のデー

タの蓄積と実績評価が必要とされている。

海外では、通信線と電源線の接地が接続されている建物が多いため、雷サージで両者間に電位差が発生することはない。IEC 規格では数 kV のサージに対する誤作動の試験を行うことになっている。このような試験に合格した外国製品は、海外で使用するに際しては問題ないが、分離接地が多い日本国内で使用すると、20kV 程度の雷サージで簡単に破壊されてしまう。日本でも、建物レベルで接地を接続し等電位にする方法は 2003 年の改正された JIS（日本工業規格）で「建作物などの雷保護」として採用されたが、この接地方法が普及するまで年数がかかることが懸念される。

我が国でも再生可能エネルギーとして風力発電設備の普及が進んでいるが、ここでも分離接地の問題が懸念される。図表 14 の海外機と国産機の導入基数の推移のグラフからもわかるように、海外製品が伸びていることから、導入に際しては等電位接地を義務付ける必要がある³⁰⁾。

5 - 5

高電圧に携わる人材の育成

高電圧に関わる人材の育成も今後重要課題となる。これは先進国共通の課題である。雷は電気工学、特に高電圧工学で教える場合がほとんどであるが、電気工学の分野は就職率が良いにもかかわらず、近年は学生の関心が低く、不人気である。また、電気工学科の大学設置基準において、電気主任技師者の資格習得が必須ではなくなっている。このため多くの大学では、電気主任技師者の資格習得に関わる授業を削減している。今後、大学では高電圧の分野に必要な人材を育成できないと危惧され、大学以前の段階においても、実際に大学内での高電圧に関する授業の廃止や後継者の育成が問題となっている。

エネルギーの重要性と面白さを前面に出し、学生に興味を持たせることがまず必要であり、高校生は当然のこと、小学生からのエネルギー教育も重要となってくる。多くの国民がエネルギーの重要性

を認識できる仕組みの構築が必要であり、(社)電気学会などの関連学会が中心となって、産学官にわたる取り組みが必要であると考えられる。

謝 辞

本稿を執筆するに際し、多大な助言および情報を提供して下さった(財)電力中央研究所 横山茂氏、新藤孝敏氏、本山英器氏、McMaster 大学 Jen-Shih Chang 名誉教授、大阪大学 河崎善一郎教授、音羽電機工業(株) 吉田修氏、木村順一氏、東京大学先端研究所教授 妹尾堅一郎氏、雷害リスク低減コンソーシアム事務局長江幡正彦氏、(株)フランクリンジャパン 原祐司氏ならびに関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) よくわかる雷対策の基本と技術、日刊建設通信新聞社、2006、ISBN4-902611-14-7
- 2) 雷と高度情報化社会、(社)電気設備学会、1999
- 3) IT社会を雷害から守る、OHM、7月号、54-76、2004
- 4) 急増する新型被害への対策雷害リスク、妹尾堅一郎編集、ダイヤモンド社
- 5) 新電力危機を含む電力システムの過渡現象とその解析手法、電気学会技術報告、第1027号、2005年6月
- 6) 安藤晃・犬竹正明著、高電圧工学、朝倉書店
- 7) ILPC2006 (雷保護国際会議)、プロシーディング
- 8) Price C, Penner J, Prather M, "NOx from lightning .1. Global distribution based on lightning physics" Journal of Geophysical Research Atmospheres 102(D5): 5929 - 5941, MAR 20, 1997
- 9) 雷放電観測の新展開、JAXA 宇宙科学研究本部：
<http://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2006/takahashi/index.shtml>

- 10) 北陸電力ホームページ：
<http://www.rikuden.co.jp/kaminari/tokucho.html>
- 11) 雷対策マニュアル2001年改訂版、横山茂監修 GTPA レポート
- 12) Rakov VA, Uman MA, "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility 40 (4): 403 - 426, Part 2, NOV, 1998
- 13) 雷のふしぎ、電中研ホームページ：
<http://criepi.denken.or.jp/jp/pub/pamphlet/light.pdf#page=3>
- 14) (株)フランクリンジャパンホームページ：<http://www.fjc.co.jp/jldn/data.html>
- 15) 河崎氏私信
- 16) Motoyama H, Janischewskyj W, Hussein AM, Rusan R, Chisholm WA, Chang JS, "Electromagnetic field radiation model for lightning strokes to tall structures" : IEEE Trans. on Power Delivery 11 (3): 1624 - 1632, JUL, 1996
- 17) Chang J, Beuthe T, Seto L, Duft A, Hayashi N, Chisholm W, Janischewskyj W, "An investigation of the possible relationships between thundercloud electric-fields and the lightning parameters for tall structures", Journal of Geophysical Research-Atmospheres 94 (d11), 13197 - 13205, SEP 30, 1989
- 18) 横山茂、配電線の雷害対策、オーム社、2005、ISBN4-274-50043-8
- 19) あおば屋ホームページ：
<http://www.aobaya.jp/chishiki.html>
- 20) 雷サージ解析技術の現状と将来展望、電気学会誌、p.654 - 673、Vol.126、2006
- 21) JFE システムズ(株)ホームページ：
<http://www.jfe-systems.com/products/thundersafety/higairei.html>
- 22) 音羽電機工業(株)技術情報：
<http://www.otowadenki.co.jp/>

- technical/04surgenoise.php
- 23) 雷サージの実態と対策、東京海上リスクコンサルティング(株)：
http://www.tokiorisk.co.jp/risk_info/up_file/200404232.pdf
- 24) NEDO エネルギー対策本部、日本における風力発電設備・導入実績：
<http://www.nedo.go.jp/enetai/other/fuuryoku/index.html>
- 25) Type Approval Scheme for Wind turbines Recommendation for Design Documentation and Test of Wind Turbine Blades, by Danish Energy Agency, November 2002 :
<http://www.wt-certification.dk/>
- 26) 国際電気標準会議 IEC61400 - 24
- 27) 出野他、風力発電システムの雷被害に関する研究、第27回風力エネルギー利用シンポジウム
- 28) 林修吾、気象予測の現状と今後の展開、第3回雷害リスク低減普及セミナー資料
- 29) 風力発電導入ガイドブック：
<http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/pamphlets/dounyuu/fuuryoku.pdf>
- 30) NEDO 報告書：
http://www.nedo.go.jp/enetai/other/fuuryoku/kaigaikokusan_graph.pdf

執 筆 者



環境・エネルギーユニット
浦島 邦子
科学技術動向研究センター
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

工学博士。日本の電機メーカー、カナダ、アメリカ、フランスの大学、国立研究所、企業にてプラズマ技術を用いた環境汚染物質の処理ならびに除去技術の開発に従事後、2003年より現職。世界の環境とエネルギー全般に関する科学技術動向について主に調査中。