

電中研の研

電中研ニュース

No.480
2015 Apr



原子力発電

原子力発電所を 竜巻災害から守るために

—竜巻影響評価ツールと飛来物防護技術の開発—



竜巻の一例

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震によって巨大津波が引き起こされ、津波が来襲した東京電力・福島第一原子力発電所では過酷事故が起きました。この大規模な自然災害を教訓として、国の原子力規制委員会により策定された原子力発電所に係る新規規制基準が2013年7月に施行され、地震、津波への対策が強化されるとともに、竜巻、火山噴火、森林火災による影響を評価し、必要な防護対策を講じることが新たに追加されました。竜巻による影響を評価する指針としては、同委員会により制定された「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」があります。

電力中央研究所では、そのガイドで求められている**竜巻の最大風速の評価を支援するツール**や、竜巻によって空中に巻き上げられた**物体(飛来物)が原子力発電所に衝突する速度の評価手法・評価ソフト**を開発しました。また、竜巻飛来物の衝撃エネルギーを吸収できる**防護ネット**を開発しました。こうした研究を通して、事業者が実施する竜巻影響評価や竜巻対策を支援しています。

原子力発電所で考慮すべき竜巻最大風速の評価

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(https://www.nsr.go.jp/data/000069162.pdf、以下「竜巻評価ガイド」と略す)では、原子力発電所の設計に反映させる竜巻の最大風速や衝撃荷重を設定する流れが示されています。図-1はその概要です。竜巻の影響評価は新規規制基準の施行により新設されましたので、当研究所は各種の評価方法や評価ツールを開発して、事業者が速やかに影響評価を実施できるよう支援しています。

図-1①の竜巻検討地域の設定では、竜巻発生観点から気象条件が当該発電所の立地地域と類似の地域を特定する必要があります。竜巻は、地面に平行な渦が上昇気流で垂直に向きを変え、渦が強化される現象です。そこで、当研究所が開発した長期・高解像度気象・気候データベースCRIEPI-RCM-Era2(電中研ニュースNo.477参照)を利用して、上昇気流の発生しやすさを示す指数(CAPE: Convective Available Potential Energy)と渦の発生しやすさを示す指数(SReH: Storm Relative Helicity)を過去50年間分にわたって計算しました。そして、両指数がそれぞれの閾値(境目となる値)を同時

に超過する頻度の分布図を作成しました(図-2)。この図を見ると、同時超過頻度が高い地域は茨城県以西の太平洋側および九州の沿岸域に分布しており、特殊な要因(局所的な地形影響など)で発生した北海道の佐呂間竜巻を除いて、実際に日本最大級の竜巻(F3^{※1})が発生した地域(図-3)を包含することから、竜巻の発生しやすさの地域性を表していると考えられます。このことから、同時超過頻度が当該発電所の立地地域と類似する地域を竜巻検討地域として設定することを提案しました。

つぎに、図-1②における V_B 設定の作業効率を向上させるため、気象庁の「竜巻等の突風データベース」を用いた確率論的ハザード評価ツールを開発し、竜巻検討地域における竜巻風速の発生確率を簡便に評価できるようにしました。さらに、図-1③の V_D の設定で考慮すべき発電所立地地点の特性に関する知見(地形の起伏や地表面粗度の変化による竜巻の増幅・減衰など)を取りまとめました。

これらの評価方法・評価ツールや知見は、事業者が原子力発電所の安全審査資料を作成する際の V_B や V_D の設定に役立てられています。

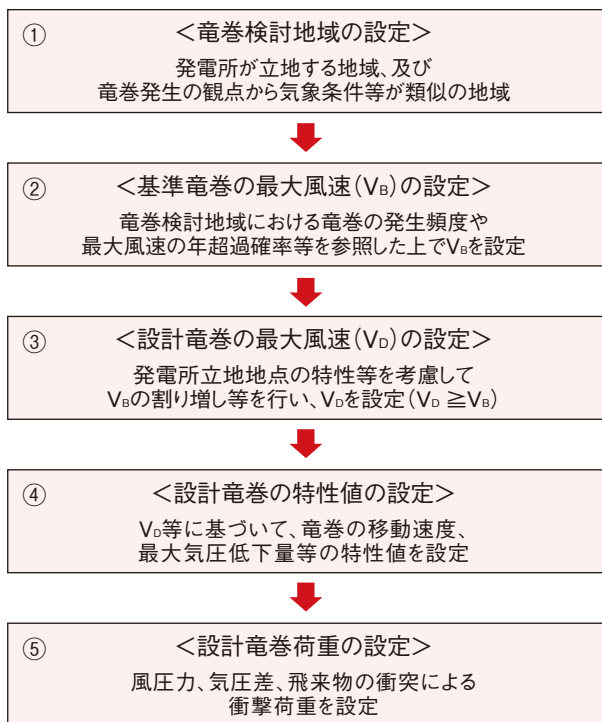


図-1 基準竜巻・設計竜巻・設計竜巻荷重の設定の流れ
「竜巻評価ガイド」を基に作成

※1 藤田(F)スケール: 1971年にシカゴ大学の藤田哲也博士が考案した竜巻等の規模を表す指標。通常F0~F5までの区分が用いられ、区分ごとに風速の範囲が定義されています。日本ではこれまでF4以上の竜巻は観測されていません。

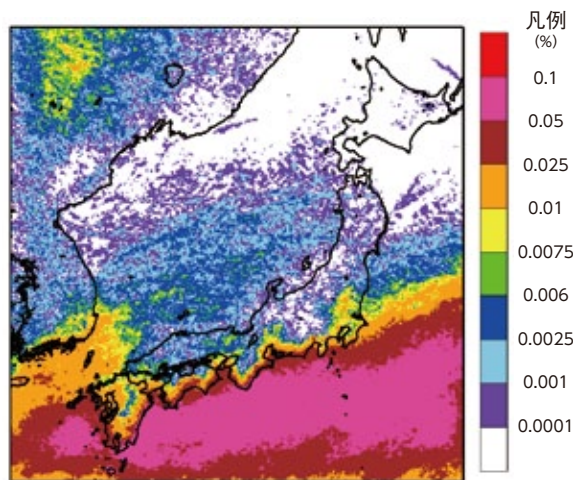


図-2 CAPE/SReH同時超過頻度

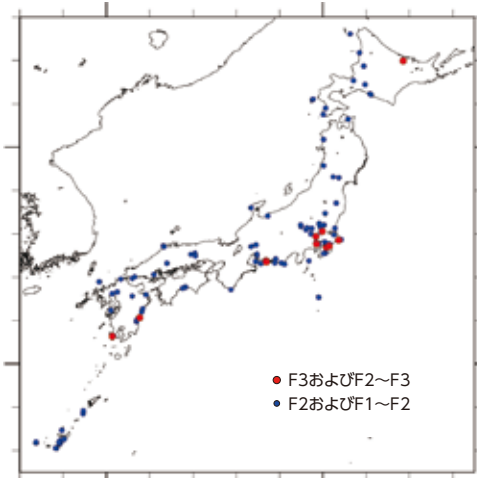


図-3 F2およびF3竜巻の発生箇所

2

竜巻による飛来物の衝突速度や飛散距離の評価

図-1⑤では、竜巻飛来物が原子力発電所の重要施設に衝突した場合の衝撃荷重を設定します。これを評価するには、飛来物の衝突速度を設定することが必要です。

わが国の「竜巻評価ガイド」や米国原子力規制委員会から発行されている同様のガイドには、竜巻飛来物として想定すべき物体（自動車、鉄骨部材など）と、数値シミュレーションにより算出された物体の設計飛来物速度が掲載されています。設計飛来物速度は、日米ともに、竜巻の中で高さ40mから物体を空中に放出し、地面に落下するまでに達した物体の最大飛来速度を採用しています。ただし、米国では高さ40mの特定位置から1個の物体を放出しますが、わが国では高さ40mの広範囲から多数個の物体を放出し、最も高速に達した物体の最大飛来速度を採用しています。そのため、「竜巻評価ガイド」で例示されている設計飛来物速度は、巨大な竜巻が数多く発生する米国よりも大きな値となっています。

当研究所は、高さ40mから物体を放出するという計算条件は科学的根拠に乏しいと考え、地上に置かれた物体の浮上・飛散現象を再現できる竜巻飛来物評価手法を提案し、評価ソフトTONBOS (TOrNado-BORne miSsile analysis code)を開発しました。その評価手法では、竜巻の風速モデルとして前出の藤田スケールで有名な藤田博士が提案したフジタモデルを用いています。このモデルは、地表面付近で渦の中心に向かう水平方向の風の流れがモデル化されており(図-4)、実現象をよく再現できる特徴があります。開発した評価ソフトの妥当性を検証したところ、2006年に北海道佐呂間町で発生した佐呂間竜巻(F3)によって、4トントラックが約40m移動した現象を再現することができました(図-5)。

この竜巻飛来物評価手法と評価ソフトTONBOSは、事業者が原子力発電所の安全審査資料を作成する際の飛来物衝撃荷重の設定に活用されています。

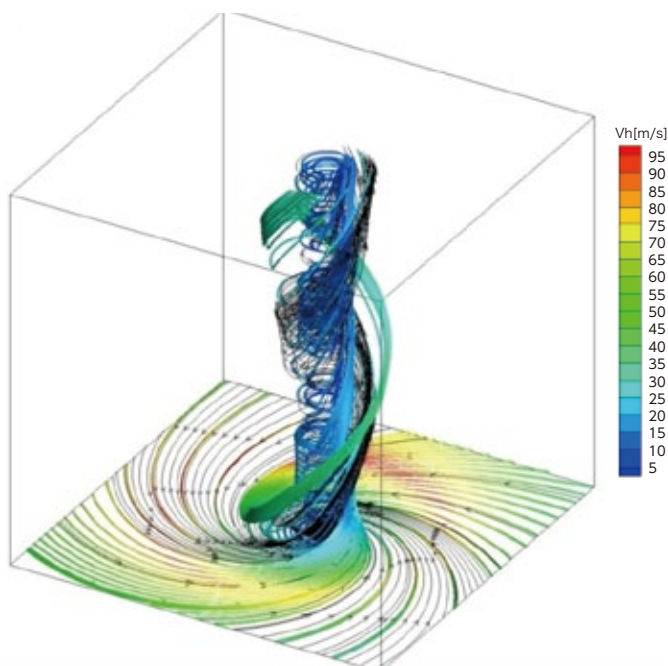


図-4 フジタモデルによる竜巻の風の流れ再現例
線の色は水平風速の大きさVh

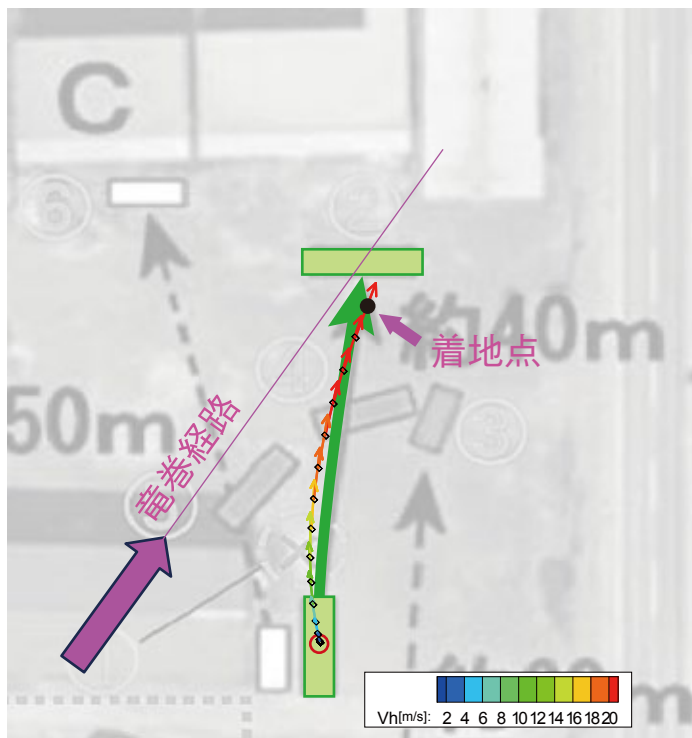


図-5 佐呂間竜巻で被災したトラックの移動経路

灰色の背景図は実際の被害調査結果。緑色の4トントラックは、図の下から上に約40m移動しました。評価ソフトTONBOSにより計算したトラックの移動方向・移動距離は実際にほぼ再現しています。

背景図の出力: 札幌管区気象台、「災害時気象調査報告 平成18年11月7日から9日に北海道(佐呂間町他)で発生した竜巻等の突風」、災害時自然現象報告書2006年第1号、2006。

3

竜巻飛来物に対する防護ネットの開発

竜巻飛来物が高速で原子力発電所の重要施設^{※2}に衝突する可能性がある場合、原子力発電所の安全性へ影響が及ばないように適切な防護対策をとることが必要です。

当研究所では、耐風性・耐震性を考慮して、ネットによる竜巻防護方策を考案しました。具体的には、汎用的なネット材料の中から耐衝撃性に富んだ防護ネット材(高強度金網)を選定し、「竜巻評価ガイド」に例示されている

※2 重要施設:ここでは、外殻となる施設により防護が期待できない設備などを指します。海水ポンプや重油タンクなどが該当します。

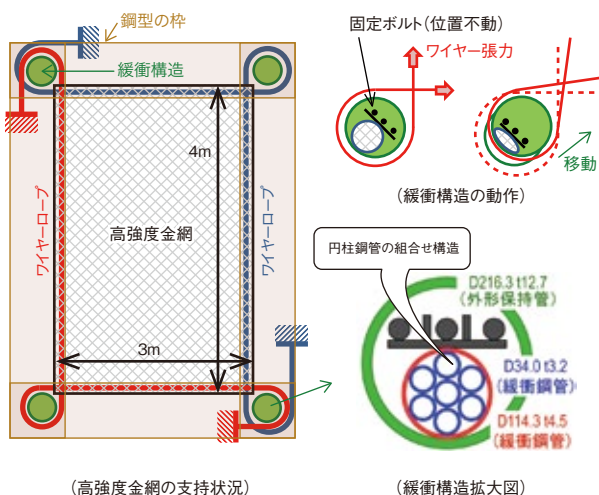


図-6 ネットによる竜巻飛来物の防護方策案

高強度金網の全周をワイヤーロープにより可動支持し、飛来物衝突時に金網が広い範囲で荷重を分配できるように工夫しました。また、飛来物衝突時の衝撃荷重によるワイヤーロープの破断を防止可能な緩衝構造(円柱鋼管の組合せ構造がつぶれてワイヤー張力を緩和する構造)を提案しました。

竜巻飛来物の衝撃エネルギーを吸収しうる設置工法(図-6)を提案しました。この設置工法の耐衝撃性能を評価するため、高所から重量物を落下させる評価試験(図-7)を行うとともに、金網の変形形状から限界吸収エネルギー量を算定する手法を開発しました。これらの知見により、所定の耐衝撃性能をもつ竜巻飛来物防護ネットを設計できるようになりました。

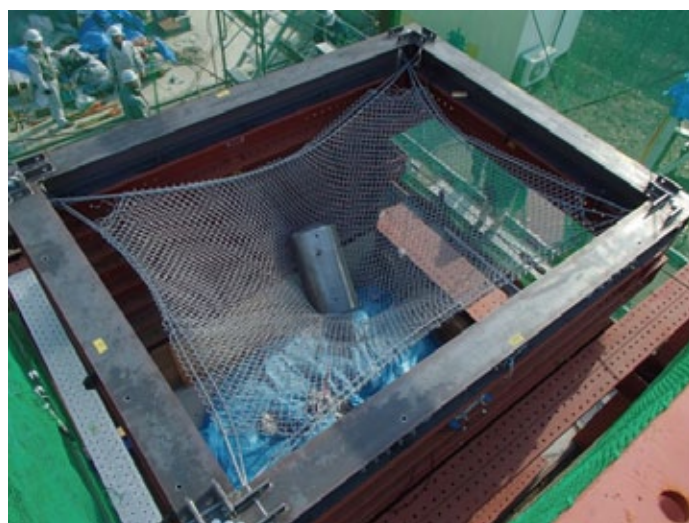


図-7 ネットによる飛来物衝突エネルギーの吸収性能評価試験

1500kgのおもりを15.4mの高さから4m×3mサイズの実物大高強度金網に落下させました。1枚目の金網は破断しましたが、2枚目の金網でおもりを捕捉できました。

ひとこと

原子力リスク研究センター 自然外部事象研究チーム 主任研究員 杉本 聡一郎 研究参事 江口 譲

新規基準で新たに要求された原子力発電所の竜巻影響評価について、気象・流体力学・衝撃などの多くの当研究所専門家が丸となって取り組み、電力会社の現場の方に役立つ成果を提供することができたものと考えています。ご協力を頂いた電力会社・関連会社の方にこの場をお借りして厚くお礼を申し上げます。

今後は、原子力規制委員会より提示された「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」の竜巻飛来物速度の例示値が、対応する米国諸基準よりも大きな値となっている点などについて、その原因を分析し、対応策などを積極的に情報発信したいと考えています。



| 関連する研究報告書 |

N14002「竜巻による物体の浮上・飛来解析コードTONBOSの開発」
N13014「竜巻飛来物に対する防護ネットの評価手法と対策工法の提案」

報告書は当所ホームページよりダウンロードできます