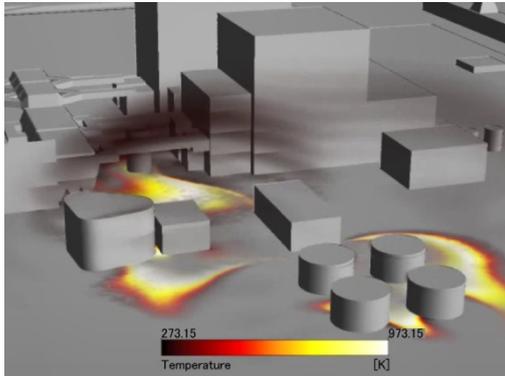


社会インフラのレジリエンス向上に貢献する 防災シミュレーション技術

Disaster Prevention Simulation Technologies for Improving Resilience of
Social Infrastructures



四條 利久磨*¹
Rikuma Shijo

米田 次郎*²
Jiro Yoneda

岡藤 孝史*³
Takashi Okafuji

杉山 貞人*²
Sadato Sugiyama

藤田 豊*⁴
Yutaka Fujita

西川 豊治*⁵
Toyoharu Nishikawa

気候変動に起因する気象災害が近年国内外で激甚化しており、今後社会インフラには、気候変動リスクに対する分析・適応とレジリエンス(強靱性・回復力)の向上が求められる。三菱重工業株式会社(以下、当社)は、レジリエンスを向上させるインフラ製品・サービスの顧客への提供を通じ、安全・安心な社会の構築に貢献することを目指している。当社総合研究所は、洪水、津波、地震、台風、火災、漏洩爆発など多様な災害に対して、インフラの被害を予測し被害軽減対策を検討できる独自のシミュレーション技術を有しており、実機への適用を推進している。本報では、これらの解析、評価技術の概要、実機への展開例などを紹介する。

1. はじめに

2019年の台風15号、19号などの気象災害(風水害等)は、建物の損傷や停電、操業停止など直接的な影響に加え、広範囲の冠水によるサプライチェーンや物流の断絶等を通じて、間接的な影響も及ぼした。将来的に、地球温暖化の進行により、豪雨や台風などの風水害や乾燥による山火事などの気象災害のリスクが更に高まることが予測されており、被災した場合のレジリエンス(強靱性・回復力)は、持続可能な社会や企業活動における重要テーマである。一方、レジリエンス向上には、都市を管轄する各省庁・地方自治体や、電力・物流等のインフラを提供する企業における予算の問題が障壁となるため、人的被害や経済的被害等のリスクを適切に評価した上で効率的なインフラ投資が求められる。これらリスクの程度や対策効果はインフラ設置箇所の地形特性や流域特性によって異なり、このような諸条件が及ぼす影響の検討には数値シミュレーションが有効と考えられる。当社は、表1に示すように発電プラント、化学プラント、橋梁、風力発電所等向けに防災シミュレーションを実施し、そのノウハウを蓄積してきた。そこで本報では、当社防災シミュレーションの概要を説明後、具体的なモデル地形・インフラを対象とした当社防災シミュレーション活用によるレジリエンス向上の検討事例を示す。

*1 総合研究所 流体研究部 主席 博士(工学) 技術士(建設部門)

*2 総合研究所 流体研究部 主席

*3 総合研究所 強度研究部 主席 P.E. 技術士(機械部門)

*4 総合研究所 流体研究部 技術士(機械部門)

*5 総合研究所 伝熱研究部

表1 各シミュレーションの適用実績事例

シミュレーション分類	適用実績例	シミュレーション分類	適用実績例
洪水	ゲリラ豪雨による新駅の被害影響調査・対策検討	台風	NEXCO 西日本 日見大橋気流解析 ⁽⁶⁾
津波	原町火力発電所 津波影響評価 ⁽¹⁾		火力発電所基本設計
	NEXCO 総研 橋梁津波影響評価 ⁽²⁾		各種風車サイト適合性検討
	気仙沼大橋 津波対策検討 ⁽³⁾	火災	LNG プール火災評価
地震	原子炉格納容器・貯水タンクの座屈強度評価及び補強検討 ⁽⁴⁾	漏洩爆発	化学プラント ベント解析
			LNG 漏洩爆発評価

2. 防災シミュレーション技術とは

2.1 防災シミュレーション技術の概要

当社防災シミュレーションは、①単一の災害だけではなく、多種多様な災害に対するレジリエンス向上対策をパッケージングで検討可能、②被害を予測するだけではなく、鉄構構造物、プラント機器等の設計技術や知見を活かした対策提案が可能、③模型実験や3次元大規模シミュレーションも活用し、対策効果の検証が可能、④模型実験や実被害との比較でシミュレーション精度を検証し、高い信頼性を確保済み、である点に特徴がある。

防災シミュレーションによる評価フローを図1に示す。防災シミュレーションは、洪水、津波、地震、台風、火災、漏洩爆発等の自然災害や人災が起きた際に、インフラに与える被害の程度を予測し、レジリエンスの向上が期待される各種対策効果の比較評価を行うことができる一連の計算手法である。洪水であれば降雨量時刻歴、地震であれば震度、台風であれば発生再現期間等のハザード規模を任意に設定できる。シミュレーションの入力条件となる地形形状や津波断層モデルはデータベース化されており、評価したいプラント、物流センター、建築物等の構造物サイズ、配置をインプットすることで任意の地点に対するシミュレーションが可能である。また、シミュレーションの結果は、洪水や津波は浸水マップ、地震や台風は構造物への作用応力や圧力コンター、火災や漏洩爆発は拡散侵入経路やエリア等のビジュアル画像、動画で出力されるため、被害や対策効果の定量的かつ面的な把握が可能である。

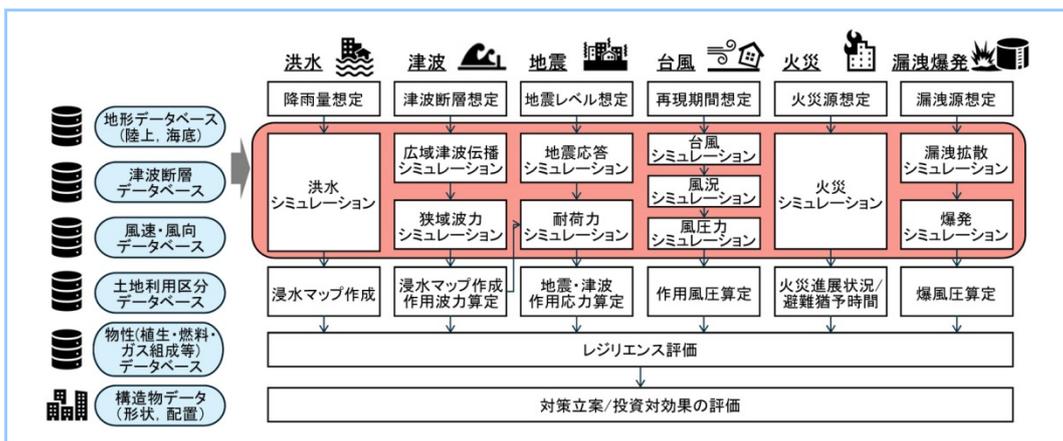


図1 防災シミュレーションにおける評価フロー

2.2 シミュレーションの精度

各シミュレーションの精度は、表2に示すように過去の災害における被害や模型実験との比較により検証し、設備計画や設計に使用できる信頼性を確保してきている。

表2 各シミュレーションの解析精度

シミュレーション分類	精度	検証事例
洪水	・ ハザードマップの浸水深 0.5m 以内	・ 長崎県八郎川流域ハザードマップとの比較(社内検討)
津波	・ 敷地内の浸水深さ±11%以内 ・ 津波の到達時間 0.5min 以内	・ 東日本大震災津波時の原町火力発電所における実被害との比較 ⁽¹⁾
地震	・ 座屈荷重 10%以内	・ 模型実験で得られた座屈変形・荷重との比較 ⁽⁴⁾
台風	・ 設計風速±10%以内 ・ 平均風圧力±10%以内	・ 長崎海洋気象台の実測データとの比較 ・ 既往の風洞実験との比較(社内検討)
火災	・ 延焼、煙流の方位再現	・ 物流センター火災事故の実被害及び事故調査結果との比較 ⁽⁶⁾
漏洩爆発	・ 漏洩ガス濃度 0.5~2.0 倍以内 ・ 火炎伝播速度 20%以内	・ 低温メタンガスを用いた拡散風洞実験との比較(社内検討) ・ 水素爆発大規模実験との比較(社内検討)

3. 当社防災シミュレーションの適用事例

本章では、モデル地形・インフラを対象に当社防災シミュレーションを活用したレジリエンス向上の検討事例を示す。

3.1 評価対象とした地形・インフラモデル、想定災害

図2に示すように、海と山に囲まれ、河川が流れる地形をモデルケースとして作成し、仮想インフラとして発電プラント、物流センター、橋梁、市街地を配置した。本地形に各種災害を発生させてインフラが受ける被害影響を評価し、レジリエンスを向上させる対策を検討した。なお、本報では紙面の都合上、洪水シミュレーションは市街地及び発電プラント、津波シミュレーションは橋梁、台風シミュレーションは物流センター、地震耐荷力シミュレーションは発電プラント、火災シミュレーションは物流センター及び市街地、漏洩爆発シミュレーションは発電プラントにおける検討事例を示す。

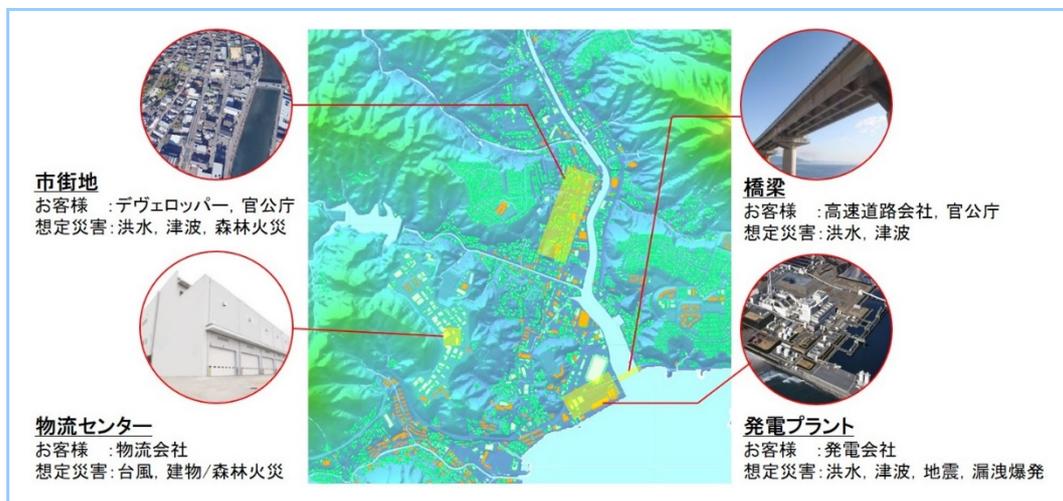


図2 想定したインフラと周辺地形

3.2 シミュレーション評価事例

(1) 洪水シミュレーション

近年、地球温暖化等による集中豪雨や洪水流量の増大が顕著となっており、住民の生命や財産の安全を確保するには、治水整備水準を高める必要がある。そこで、上述したモデル地形を対象に洪水シミュレーションを活用したレジリエンス向上の検討事例を紹介する。

河川上流の影響及び河川周辺の浸水領域を包含できるよう東西 2.5km、南北 5.3km の領域を対象に、国土地理院基盤地図情報の数値標高モデル(5m メッシュ)及び国土数値情報ダウンロードサービスの土地利用細分データ(100m メッシュ)を用いて地形モデルを作成し、土地利用区分に応じた粗度係数を考慮した非定常平面二次元解析により流出計算を実施した。計算メッシュサイズは 10m、計算時間間隔は 0.1 秒とした。本報で用いた想定降雨波形を図3左

に示す。長崎県の過去最大降雨実績をベースに、国土交通省ガイドライン⁽⁷⁾に則り、九州北部の降雨継続時間と流域面積、最大降雨量の関係から求まる最大総雨量に一致するよう実績降雨波形を引き延ばした。これは、1000年に1度の雨量に相当する。

図3右に浸水深の時系列を示す。降雨に伴い市街地の最大浸水深は増加し、最大 2.05m の浸水が発生している。一方、発電所内の浸水深は最大でも 0.17m であり問題ないレベルである。市街地の浸水被害を低減させるため、対策として、市街地近傍の河川堤防の嵩上げ(3m)、河道掘削、上流への遊水池(深さ 10m)の整備を取り上げ、効果を評価した。市街地における最大浸水深の時系列を図4左に示す。堤防嵩上げは効果が得られず、河道掘削は河口標高の制約から河床標高 0.2m までが限界で最大浸水深は 1.8m までの低減に留まる。遊水池設置は、700m 四方を確保することで 0.77m まで最大浸水深を低減できることが分かる。また、図4右に対策前、対策後の最大浸水深の比較を示すが、遊水池の設置により河川水位の上昇を抑えることで、市街地に降った雨水の河川への排水が行われ市街地の浸水深を低減できていることが分かる。

以上のように、浸水リスクや対策効果は流域特性や地形特性によって異なるが、シミュレーションを活用することで危険箇所の特定制、レジリエンスを向上させる対策の目途付けができる。

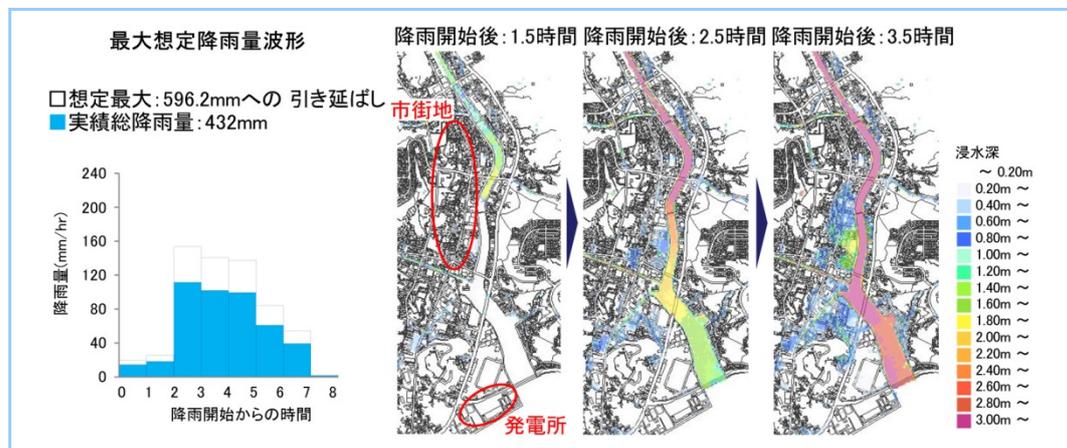


図3 洪水シミュレーションによる浸水リスク評価

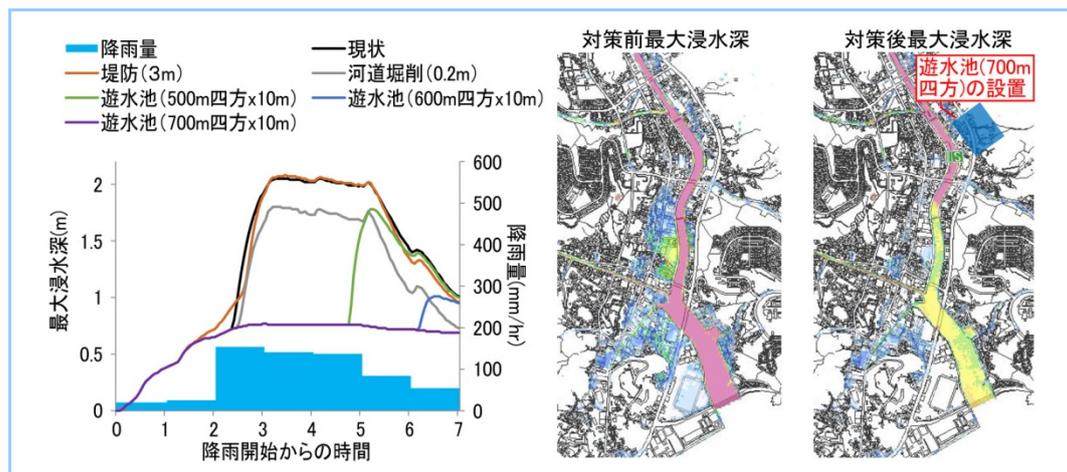


図4 洪水シミュレーションによる浸水対策検討

(2) 津波シミュレーション

日本は歴史的に幾度も巨大地震に伴う津波に襲われており、特に 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、従来の想定を超える巨大な地震に伴う津波により数多くの構造物が損壊するなど甚大な被害を受けた。今後、南海トラフ地震などの巨大地震の来襲が危惧される中、ライフラインを担うインフラにおいては、津波に対する被害リスク評価、及びレジ

リエンス向上の重要性がより一層高まっている。当社は、広域津波伝播シミュレーションと狭域3次元シミュレーションを組み合わせたハイブリッド手法と、船舶・海洋分野で培った、様々な波形を再現可能な水路実験により、津波の発生、伝播、沿岸域の遡上、さらには波力評価までの挙動を評価する技術を開発している^{(1),(8)}。そこで、本技術を橋梁に適用し、波力低減デバイスにより津波に対するレジリエンスを向上させた事例を紹介する。

図5に津波波力評価・対策立案・効果検証までの一連のプロセスを示す。はじめに、非線形長波理論による数100km四方の広域津波伝播シミュレーションにより、橋梁を含む対象沿岸に襲来する津波の水位・流速・流向を求めた。次に、その水位・流速・流向の時系列データを境界条件として、海水と空気の2相流VOF (Volume of Fluid) 法により、狭域の非定常3次元シミュレーションを実施し、橋梁に作用する津波波力を算出した。ここで、解析領域は橋梁周辺領域の数kmとし、メッシュサイズを橋梁近傍では0.1mまで細かくすることで、波力を精緻に予測した。検討の結果、対策無しの場合、橋桁を支える支承が破断して橋梁が流出するリスクがあったため、スライド式造波板を用いた津波水路実験装置による津波形状を再現した実験にて、波力を低減可能なデバイスを開発した。その結果、耐風対策として橋梁に適用されているフェアリングの適用により津波波力を低減し、橋梁の流出を未然防止できることを確認した。

以上のシミュレーション、実験技術により、インフラの津波被害リスクに応じて優先度を付けた上で適切な対策を施すことが可能となり、効率的な津波対策に貢献できる。

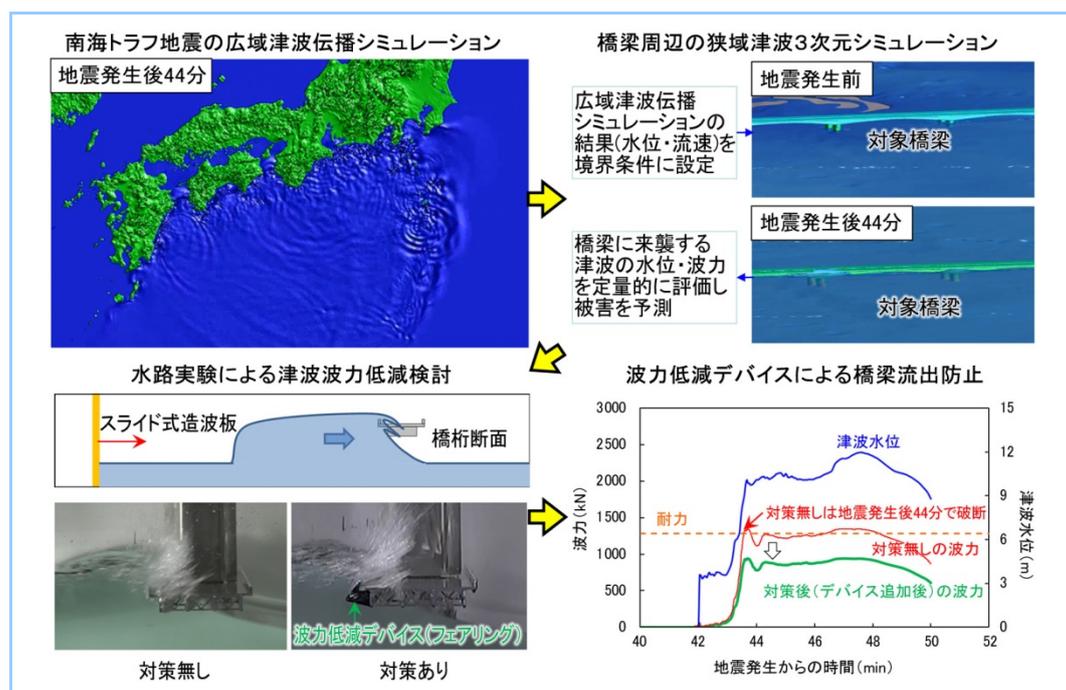


図5 津波シミュレーションや水路実験による橋梁のレジリエンス向上

(3) 台風シミュレーション

建築物は、再現期間50年相当(平均すると50年に1回発生する事象)の暴風に対して、構造耐力上主要な部分に損傷が生じないように設計され、再現期間500年相当の暴風に対しては、建築物が倒壊、破壊しないように設計される。しかしながら、昨今、地球温暖化による台風の激甚化が懸念されており、巨大台風来襲時の被害予測とレジリエンス向上が重要になっている。そこで、台風シミュレーションを活用した物流センターのレジリエンス向上の検討事例を紹介する。

本手法では、はじめに、過去の台風データを統計処理した確率分布と乱数を用いて仮想台風を発生させる“①台風シミュレーション”により、仮想台風来襲時の平坦地の風速・風向を求める。次に、地形影響を考慮した“②風況シミュレーション”により、建設地点の風速・風向を求

め、最終的に建築物を再現した“③風圧シミュレーション”で建屋に作用する風圧力を評価する。この3つのシミュレーションを統合し、1万年間に発生する台風を繰り返し計算することで長期間に発生する台風に対する被害予測が可能となる。

図6に、再現期間 1000 年の風速に相当するシミュレーション結果を示す。台風最接近時に海上より南東風が建設地点に吹き込むことにより、南側壁面に作用する風圧力が上昇していることが分かる。この風速・風向及び風圧力パターンは、1万年間に発生させた仮想台風に対する風速上位 10 位全てに対して当てはまっており、南側壁面のレジリエンス向上が特に重要である。

対象とした物流センターでは、図2に示したように大型シャッターが壁面に設置されるため、シャッターが破損した場合、シャッター自身の被害に留まらず、内部設備や保管物の破損等の2次被害が発生し、復旧に時間を要する恐れがある。対策として、計画段階では建屋の配置計画の変更、運用後であれば防風ネットの設置等が考えられる。図7にシャッターに作用する再現期間 1000 年の瞬間風圧力分布及び最大瞬間風圧力を示す。シャッターに作用する最大瞬間風圧力は、基本配置案では耐風圧力を超過するが、配置変更や防風ネット設置により、耐風圧力以下に低減できていることが分かる。

以上のシミュレーション技術により、建築物における危険箇所を特定し、レジリエンスを向上させる対策の目途付けができる。

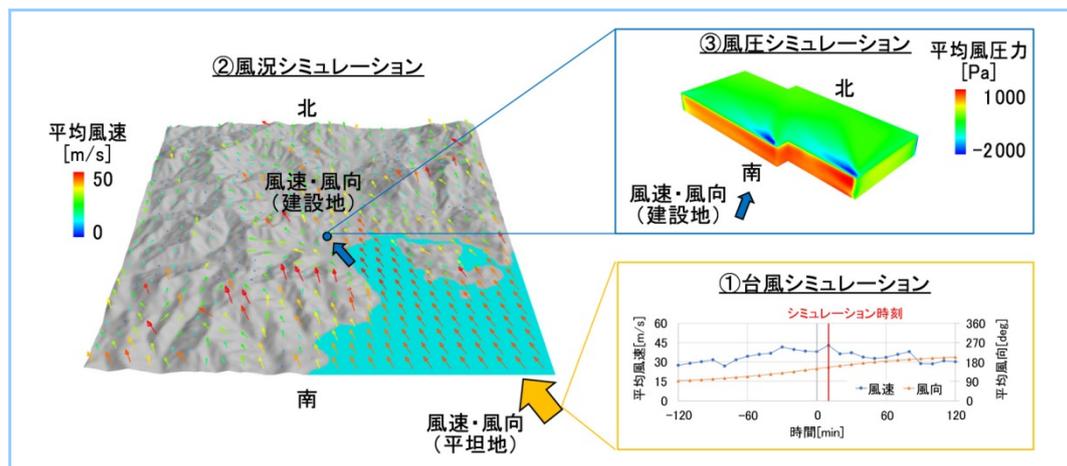


図6 台風・風況・風圧シミュレーションによる風被害リスク評価

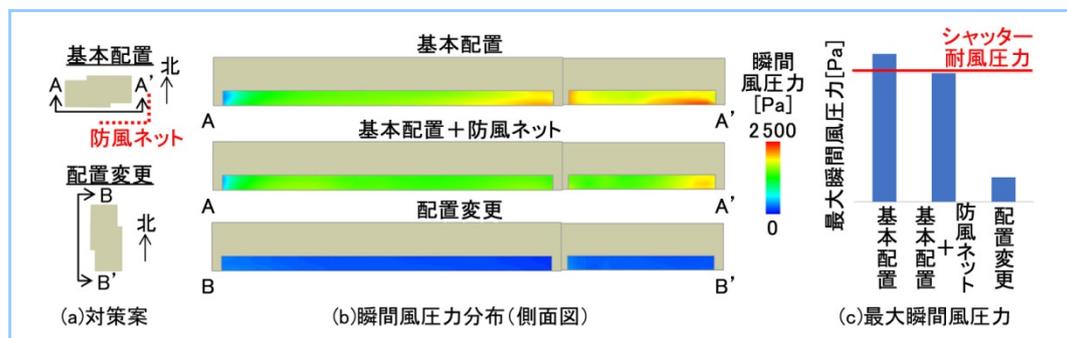


図7 シャッターに作用する風圧力低減検討

(4) 地震及び付随する津波に対する耐荷力シミュレーション

近年、日本国内では震度6を超える強地震を幾度も経験しており、発電所などの重要インフラにおいても多数の被害が生じてきた。例えば、消防庁消防研究所の報告書⁽⁹⁾によると、阪神・淡路大震災(1995年1月17日)では7基の円筒貯槽に座屈損傷が生じ、内容物が漏洩した貯槽も確認されている。また、東北地方太平洋沖地震(2011年3月11日)では、地震に加え、津波の浸水による被害が甚大であり、海岸沿いに立地する原町火力発電所では重油タンクの側

板の面外変形・座屈などが生じた⁽¹⁰⁾。

本検討では、発電所の屋外に設置される大型円筒貯槽(直径 30m 弱, 円筒高さ 20m 強)を例題に、地震による曲げ座屈及び浸水による外圧座屈に対する耐荷力評価と、座屈補強策の効果検証のため、地震加速度による慣性力や浸水時の静水圧を荷重とした弾塑性座屈解析による耐荷力シミュレーションを適用した。なお、曲げ座屈に対する補強としては、側板の交換等による厚肉化も考えられるが、ここでは過去の大型座屈実験⁽¹¹⁾の知見を取り入れたリング補強を適用した。リング補強は側板交換に比べ、工事を小規模・短期間に抑えられるとともに、溶接の自動化が可能など施工性に優れるといった利点がある。また、リング補強は外圧座屈に対しても有効なため、地震、浸水に対して兼用の補強策として活用できる。

地震荷重に対する耐荷力シミュレーションの結果例を図8に示す。満水条件での無補強の円筒貯槽は、高压ガス設備等の耐震設計に関する基準(レベル2)⁽¹²⁾水平加速度を用いた地震応答シミュレーションにより算出される荷重(液圧)に対し座屈しない体格だが、震度6強の地震加速度(1000Gal)に対しては基部で曲げ座屈を生じる。それに対し、リング補強を適用することで、基部の曲げ座屈の抑制により座屈強度が 19%向上し、震度6強の地震荷重に耐えられる結果となった。なお、座屈強度はリング補強の配置・本数により調整可能なため、必要な耐荷力に応じた補強構造を提案できる。次に、津波による浸水を想定して、過去の事例⁽¹⁾を参考に仮想プラントサイトでの浸水高さを 13m とし、空の貯槽の基部から浸水高さまで静水圧が外圧として作用する耐荷力シミュレーションを実施した。その結果例を図9に示す。無補強の場合、浸水高さ 13m の静水圧を大きく下回る外圧で座屈するが、リング補強構造では、胴板の座屈範囲の限定により座屈圧力が 5.6 倍となり、浸水高さ 13m に対して座屈しない結果となった。このように、検証された耐荷力シミュレーションにより、構造物のレジリエンスを向上させる補強構造を提案できる。

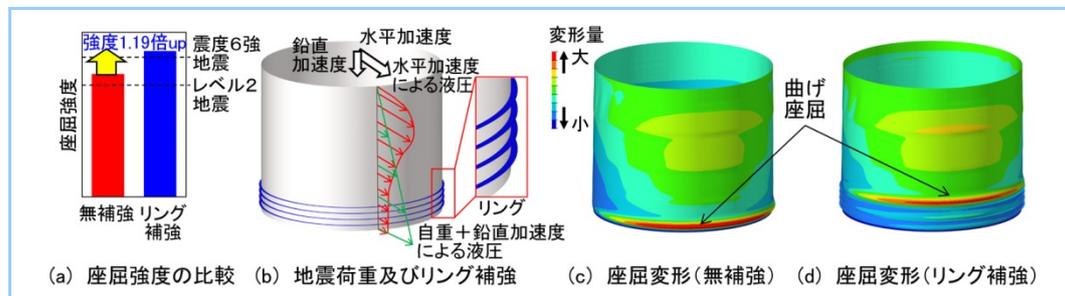


図8 地震に対する大型円筒貯槽の座屈補強構造の検討

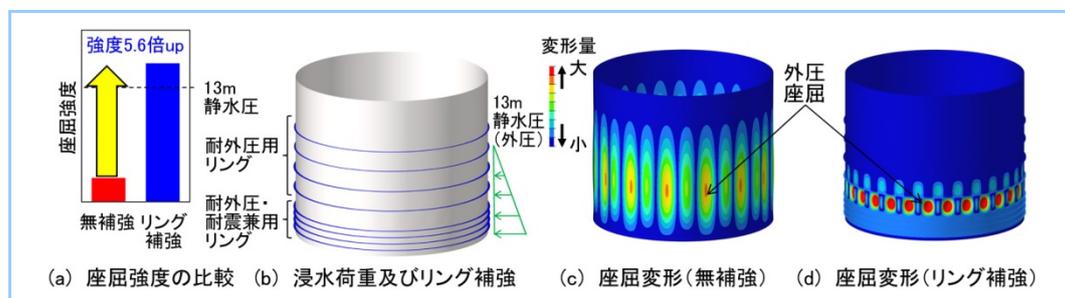


図9 津波による浸水に対する大型円筒貯槽の座屈補強構造の検討

(5) 火災シミュレーション

1) 屋内火災シミュレーション

屋内火災は、人為的ミスや電気ショートなどによって発生するが、構造物建設時点で消防法や建築基準法に基づく設計がなされているため、防火扉やスプリンクラーなどの対応設備は整っていると考えられる。一方で、火災事故が発生した場合に、初期消火・消防対応で消火できない場合、被害が甚大化する可能性がある。実際に 2017 年に起きた物流センター火災⁽⁶⁾で

は、スプリンクラー、消火器による初期消火ができなかったことに加え、火災が原因で生じたショートにより作動しない防火扉などがあったため、鎮火まで 12 日要し、3階建ての建屋の2, 3階がほぼ全焼する被害が発生した。

この事例をもとに、物流センター火災が発生した区画を図 10 に示すように再現し、火災シミュレーションを実施した。火災シミュレーションはFDS (Fire Dynamics Simulator)コード⁽¹³⁾を用いて3次元非定常流体・燃焼解析を行った。図 11 左に示すように、対策前は、火災発生から 150 秒後に煙濃度が 10%を超えたとき検知器が反応し、スプリンクラーが起動したが、既に火災が発達しているため消火できなかった。そこでレジリエンス向上のため、画像分析技術を用いた早期火災検知カメラの導入により、スプリンクラーを2分早く起動できることを仮定し、スプリンクラー起動時間の違いが火災延焼に及ぼす影響を評価した。その結果、図 11 右で示すように、対策後は火災発達前に初期消火が可能となった。このようにシミュレーション活用によって、対策の効果を事前に確認することができ、被害低減や避難時間確保につなげることができる。

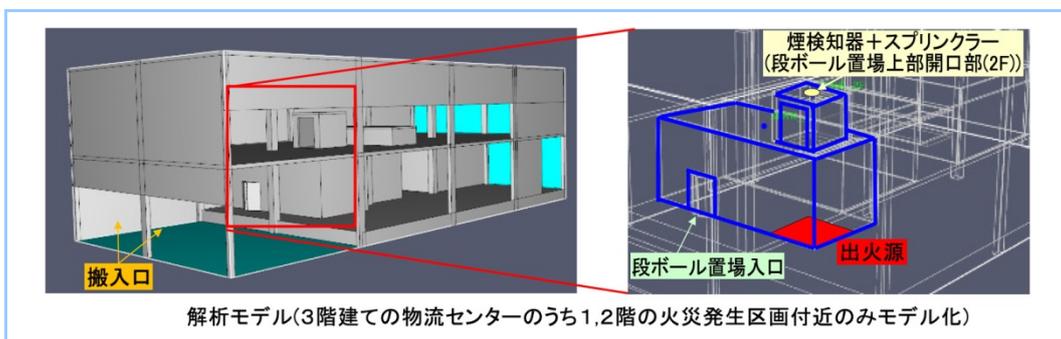


図 10 火災シミュレーション解析対象区画

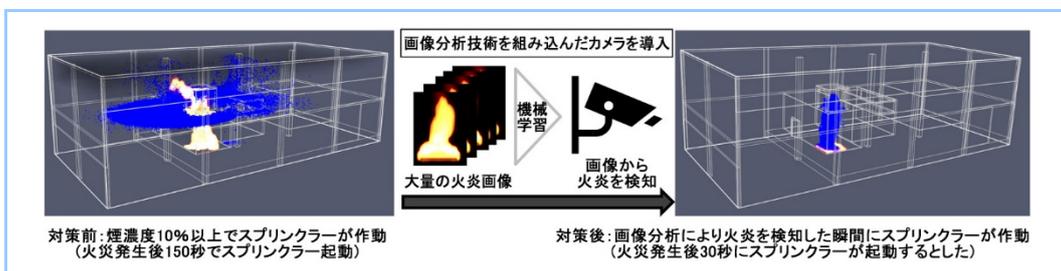


図 11 画像分析技術を用いた早期検知効果の火災シミュレーションによる検証

2) 森林火災シミュレーション

森林火災は米国や豪州で発生することが多いが、令和3年足利市山林火災に見られるように日本でもしばしば発生している。森林火災は、出火源がたばこの不始末など人為的ミスによるものが多く予測不可能であることと、いったん延焼が進むと消火は困難であることから、いち早く延焼情報を把握して避難することが重要となる。

本事例では、キャンプ場を想定する山岳部で出火することを想定し、仮定の気象予測条件(風向一定)で、物流センターや市街地に火災が延焼していく様子を森林火災シミュレーションで評価した。ここで、風向予測に誤差が生じた場合には被害を見逃し、避難が遅れる恐れがあるため、風向の不確実性を考慮した延焼予測を行った。森林火災シミュレーションでは、事象進展にセルオートマトン法を用いており、この手法では隣接セルへの延焼は確率を考慮した条件分岐で判断するため、熱量の収支を解く物理モデルに比べて高速評価が可能である。その特徴を活かし、図 12 左に示すように、予測した風向には正規分布に基づく出現確率分布があるとして、様々なパターンの風向を考慮したシミュレーションを実施・整理することで、経過時間ごとの延焼範囲を到達確率分布で表現することを可能な手法を開発した。本手法により、図 12 右で示すように、単一風向の評価では延焼が到達しない物流センターにおいても、“24

時間後に 27%の確率で延焼範囲が到達する可能性がある”, という確率論に基づく情報をリアルタイムに提供することが可能となるため, 避難時間の確保/避難遅れの防止が期待できる。

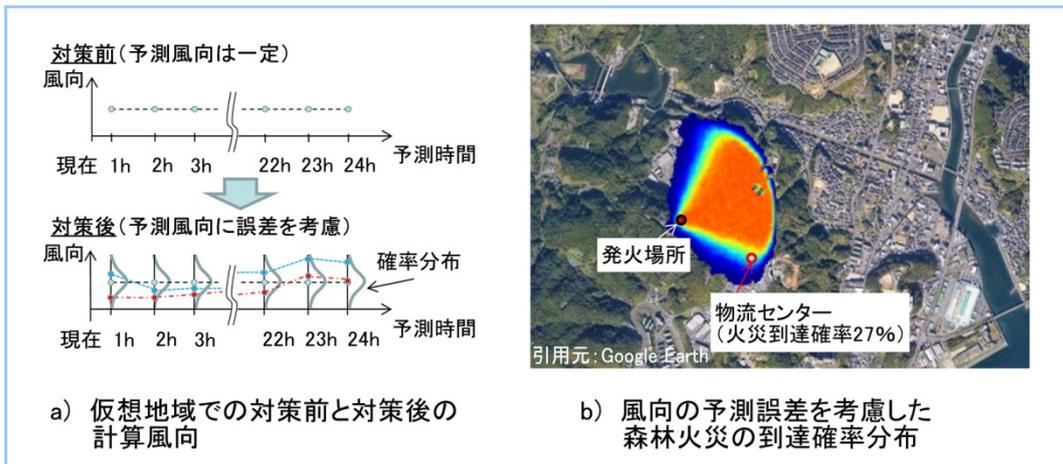


図 12 風向予測における不確かさを考慮した森林火災シミュレーション

(6) 漏洩爆発シミュレーション

漏洩・爆発事故はプラント内での操作ミス, 劣化損傷などの偶発的な原因や, テロ行為による作為的な原因で発生すると考えられる。レジリエンスの考え方に基づけば, いずれの条件においても, 状態異常の素早い検知や, 被害軽減などが求められる。

本事例では, 仮想プラントのプロパンタンクからガスが漏洩し, 周囲に可燃ガスが充満した後火災が発生することを想定した漏洩・爆発シミュレーションを行った。シミュレーションには汎用 CFD コードである FLUENT を使い, 3次元非定常流体解析で漏洩シミュレーションを実施した後, 反応進行度モデルによる爆発シミュレーションを行った。その結果, 図 13 に示すように漏洩箇所のタンク周辺にプロパンガスが充満し, 着火後, プラント内の地点Aにおいて, 高い爆風圧・温度が到達することが分かった。そこで, 仮に爆発が発生した場合でも重要施設を保護し早期復旧を可能とすることを狙い, 図 14 左に示すような防護壁を地点Aの前方に予め設置し, シミュレーションで効果を評価した。その結果, 図 14 右に示すように, 爆発時の地点Aの圧力は約 1/3 となり, 建屋にかかる負荷を大幅に低減できることを確認できた。

従来は個々のタンクや建物に対して設計段階で各種指針に基づき耐圧性などを評価するが, このようなシミュレーションを活用することで, タンクや建屋配置の影響も設計時に評価でき, プラント全体のレジリエンス向上につなげることができる。

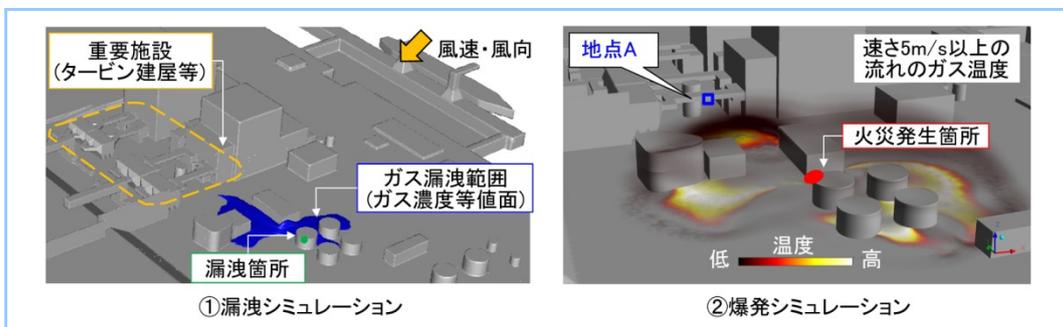


図 13 漏洩爆発シミュレーション結果

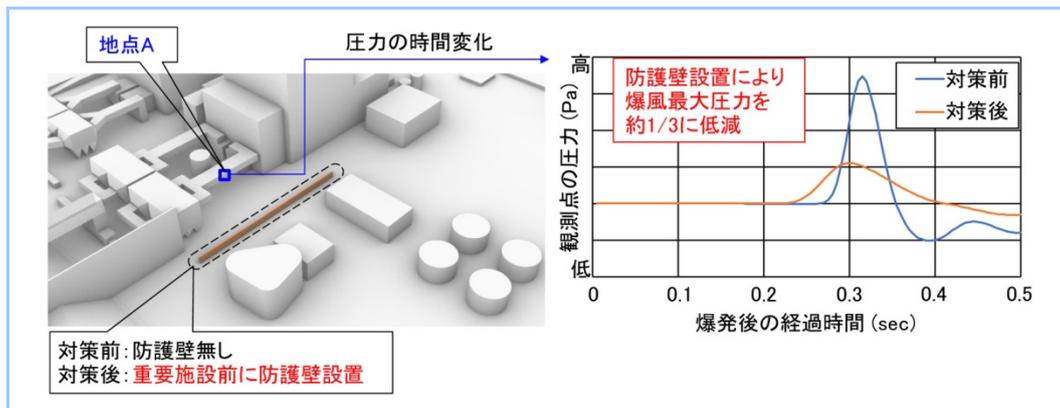


図 14 防護壁設置による爆風圧低減検討

3.3 ハザードの可視化事例

当社は、顧客が保有・管理するインフラの被害リスクの把握や対策の要否判断を迅速にできるよう、災害リスクの可視化システム構築に取り組んでいる。以下では、当社のWEBアプリ基盤上に構築した津波ハザードの可視化アプリの事例を示す。

今後 30 年以内に 70~80%という高確率で発生することが予想されている南海トラフ地震⁽¹⁴⁾について、想定される複数の断層ケースと太平洋沿岸全地点を対象に、広域津波伝播シミュレーションを実施して結果をデータベース化している。これにより、図 15 に示すように、顧客が任意地点を画面上で選択することで、データベースの中から津波伝播動画、到達する津波の最大浸水深とその到達時間の定量的情報を瞬時に把握できる。

引き続き他の防災シミュレーションの可視化システムを構築するとともに、本可視化システムと当社のバーチャルリアリティ(VR)システム⁽¹⁵⁾を用いた3次元立体可視化を連携させることで、対象地域の構造物周辺に入り込んだ災害の様子を様々な視点から可視化し、より実感を伴った現象把握や避難シミュレーションにつなげていく予定である。

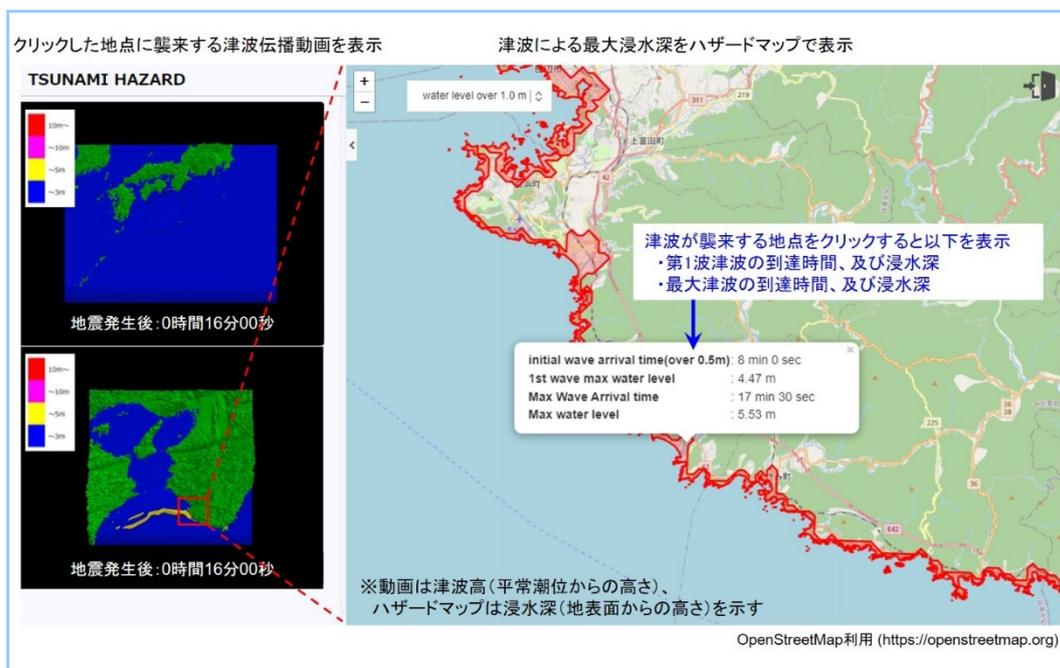


図 15 津波ハザードの可視化事例

4. まとめ

モデル地形・インフラを対象に、洪水、津波、地震、台風、火災、漏洩爆発等の自然災害や人災を想定し、防災シミュレーションを活用した被害影響評価やレジリエンス向上の検討事例を示した。本手法により、危険箇所の特定や、レジリエンスを向上させる対策の目途付けができ、安全・安心な街づくりや災害に強いインフラ構築に貢献できると考える。

今後、地球温暖化の進行とともにハザードレベルも増大していくと想定される中、国内のみではなく、海外展開されるインフラについてもレジリエンス向上を図り、持続可能な社会や企業活動の実現に貢献できる技術開発を続けていく所存である。

※本報の図2, 図3右, 図4右, 図5の地図は、国土地理院の数値標高モデル及び土地利用細分データを使用して作成した。

参考文献

- (1) 四條利久磨ほか, 発電所における東北地方太平洋沖地震津波の3次元数値シミュレーション, 日本機械学会論文集(B編), 79巻 801号(2013) p.253~264
- (2) 四條利久磨ほか, 津波入射波の形状が橋梁上部構造に作用する津波波力に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.71 No.3(2015) p.277~294
- (3) 四條利久磨ほか, 3次元津波シミュレーションによる橋梁への津波作用時の影響評価, 橋梁と基礎(2015-9)p.41~46
- (4) 岡藤孝史ほか, 弾塑性座屈解析による鋼製原子炉格納容器の座屈強度設計手法の提案, 日本機械学会論文集, 第86巻 892号(2020) p.20~00248
- (5) 宮永憲一ほか, 並列するエクストラード橋の耐風安定性検討 長崎自動車道 日見夢大橋, プレストレストコンクリート工学会誌, Vol.61 No.1(2019)
- (6) 総務省消防庁, 埼玉県三芳町倉庫火災を踏まえた防火対策及び消防活動のあり方に関する検討会報告書, (2017)
- (7) 国土交通省, 水管理・国土保全局, 浸水想定(洪水, 内水)の作成等のための想定最大外力の設定方法, (2015)
- (8) 鈴木俊光ほか, 橋梁に対する巨大津波作用時の挙動の解明-津波水路による実験とシミュレーション技術-, 三菱重工技報 Vol.51 No.3(2014)p.44~48
- (9) 消防庁消防研究所, 阪神・淡路大震災における石油タンクの座屈強度に関する調査報告書, 消防研究所技術資料, 第31号(1996)
- (10) 土木学会, 東日本大震災におけるエネルギー施設(火力・水力・送変配電・ガス)の被害状況と今後への展開について 報告書(最終報告), (2014)
- (11) 高橋忠男ほか, “もんじゅ”原子炉格納容器の大型座屈実験, 三菱重工技報 Vol.23 No.6(1986)p.683~688
- (12) 高圧ガス保安協会, 高圧ガス設備等の耐震設計に関する基準(レベル1) KHKS 0861(2018), 高圧ガス設備等の耐震設計に関する基準(レベル2) KHKS 0862(2018)
- (13) K McGrattan et al., Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication 1018-1 Sixth Edition(2021)
- (14) 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 長期評価による地震発生確率値の更新について, (2018)
- (15) 山崎知之ほか, 3DVR 技術の活用とユーザエクスペリエンス価値向上の取り組み, 三菱重工技報 Vol.55 No.2(2018)p.1~5