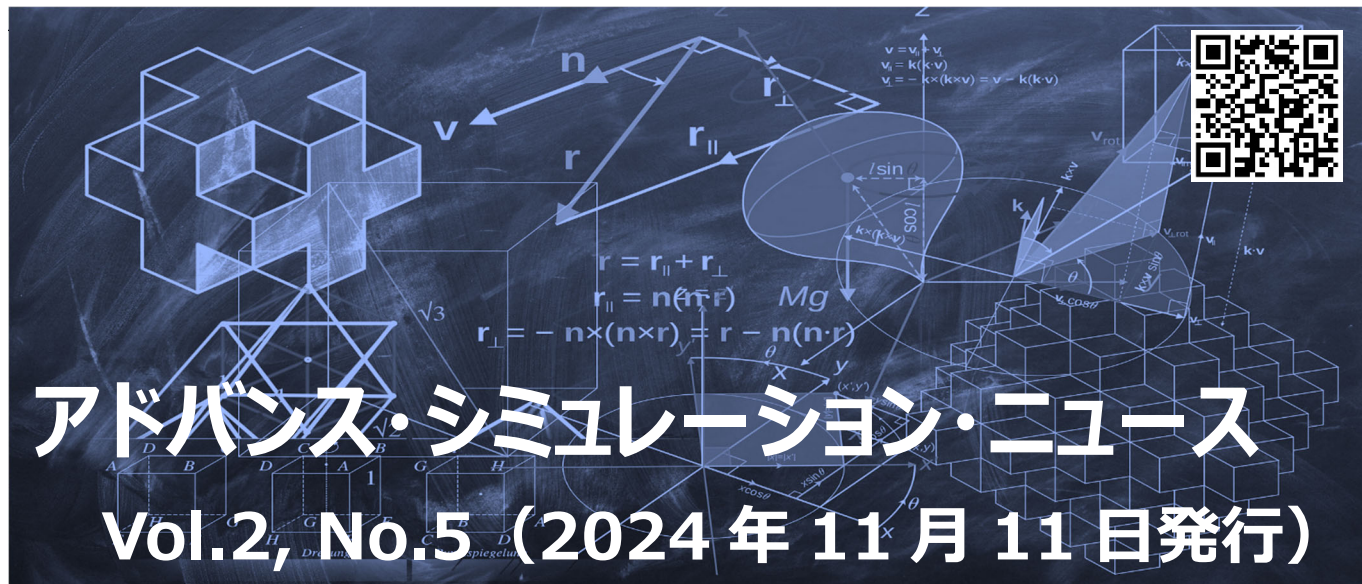




第5回アドバンス・シミュレーション・セミナー2024 開催報告

東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻

教授 高田 孝 様

「シミュレーション技術のリスク評価への適用」

アドバンス・シミュレーション・ニュースは、アドバンスソフト株式会社が2021年度から、我が国における計算科学技術の振興を目的として、幅広い分野の最先端研究を対象として開催している「アドバンス・シミュレーション・セミナー」の開催報告と今後の開催予定をご案内するサービスです。

本セミナーで紹介される多種多様な最先端研究をきっかけに、企業の研究開発を担う技術者の方が新たな視点を持つこと、最先端研究を産業に応用する起点となること、長期的には計算科学シミュレーション分野の裾野が広がること等を期待しています。

開催概要

- 日時：2024年8月23日（金）14:00～15:30
- 開催方法：オンラインセミナー（Zoomにて開催）
- 主催：アドバンスソフト株式会社 出版事業部



○講演概要

リスクとは、「目的に対する不確かさの影響」（ISO31000:2018、リスクマネジメント - 指針）であり、想定されるシナリオや発生頻度／確率、およびその影響について、不確かさを含めた評価が重要となる。

近年、これらの不確かさをシミュレーション上でモデル化し、多数の解析を統計処理することで

リスクを評価する、動的リスク評価手法の適用が検討されつつある。

本講演では、主に原子力分野で用いられているリスク評価とシミュレーション技術との関係、動的リスク評価手法や今後の課題等について概説する。

本稿は、2024年8月23日に開催した「アドバンス・シミュレーション・セミナー2024」において、高田 孝様にご講演いただいた内容をアドバンスソフトがまとめたものです。

ご講演内容

1. 講演内容

1.1. はじめに

アドバンス・シミュレーション・セミナー2024の第5回では東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻の高田先生より、「シミュレーション技術のリスク評価への適用」というタイトルでご講演いただいた。リスク評価についての基礎知識と、原子力発電所

などを対象に用いられている確率論的リスク評価手法についてのお話から始まった。そして、従来の手法の課題を解決する方法として、シミュレーション技術を援用した動的リスク評価手法を挙げられ、実際の評価例を交えながらご解説いただいた。ここではそのご講演の内容をご紹介します。

1.2. 確率論的リスク評価

リスクという用語は、概ね、不確かさの影響(influence)と定義されているが、特に産業においてリスクを考えるときには3つの要素、シナリオ／確率・頻度／影響(consequence)、が重要である。つまり、リスクとは、主に好ましくない方向への不確かさを有するシナリオ、確率・頻度および影響を組み合わせたものと言える。リスク評価とは、これらの3要素について、どのようなシナリオがあるか、それらがどの程度起こりやすいか、発生したらどのようなひどいことになるのかを定めることである。

不確かさはその特徴からいくつかの種類に分類でき、その中には、シミュレーションや確率論的リスク評価手法(PRA)に適用し易いものが存在する。シミュレーション技術を用いた不確かさ評価手法においては、入力値に対して個々の不確かさを考慮して安全性を保守的に見積もったり、統計的な信頼区間を利用して事故の起こりにくさを求めたりしている。原子力発電所の安全性評価は従来高い保守性という視点から実施されていたが、定量的なリスク評価手法であるPRAによって、その視点とは異なる状況の事故によってもリスクへ大きく寄与することがあると分かり、今ではリスク評価に基づいて対策することが合理的であり、効果的となっている。

原子力発電所のPRAはシナリオの区切りを基準に3つのレベルに分けられている。炉心損傷を防ぐためのレベル1 PRAを例にすると、事故シナリオの分岐を決めるイベントツリーとそれぞれの分岐の確率を評価するフォールトツリーに基づいて、シミュレーション技術も利用しつつ、各々のシナリオで安全停止するか炉心損傷するかという成功基準を定量化する。この手法は強力であるが課題も存在する。一つは事故シナリオを網羅できるかという点である。シナリオの分岐を決めるイベントツリーは発生しそうなイベント生起順序を工学的に判断して決めており、その順序が変化するシナリオを扱いにくい。また、イベント発生時刻によって成功基準を満たすかどうかが変わりうるような、シナリオの時間依存性を扱うことも難しい。もう一つの課題は、各イベントの影響度が代表シナリオのシミュレーションのみで評価されるため、それを網羅的に評価できないことである。

1.3. シミュレーション技術を援用した動的リスク評価

これらの課題を解決する目的から、シミュレーション技術を更に援用した動的リスク評価手法という

ものが研究開発されている。動的リスク評価手法にはいくつかの種類が存在するが、ここでは、連続マルコフ過程モンテカルロ法を紹介する。この方法では、シミュレーションに組み込まれたイベントモデルを確率論的に発生させ、事故シナリオを動的に構築していく。シミュレーションを行うことで得られる温度や圧力などのパラメタの値がイベントを構成する要素の状態遷移確率の評価に利用される。そして、モンテカルロ法によって状態を遷移させるかどうかを判定し、次の時刻のプラントの状態を決定していく。これを繰り返してシナリオを動的に構築していく。

この手法の適用例として、ナトリウム冷却高速炉における積雪や強風のリスク評価を紹介する。高速炉の場合、ナトリウムの密度が温度に強く依存するため自然循環が起こりやすい性質を利用して、発電所の屋上に空気冷却器が設置されるが、これが積雪や強風によって機能しなくなるもののリスクを評価した。

積雪時の動的リスク評価は以下の設定で行った。積雪で全電源が喪失するが原子炉は安全に停止し、自然循環による除熱が行われるところから評価を始める。積雪速度は10 cm/hとし、積雪量が多くなるにつれて空気冷却器が機能喪失する確率も高くなるとする。一方で、アクシデントマネジメントとして8時間おきに除雪を試みる。除雪は50%の確率で成功し、成功したら積雪量は0 mになるとする。この設定で100 サンプルの計算を行い、時間依存性の異なるシナリオ群を作り出し、安全評価を行った。具体的には、炉心出口最高温度の累積分布に対して正規分布近似式を求め、損傷確率や信頼区間上限値による統計的な到達最高温度を推定した。その結果、24時間以内に炉心出口の配管が設計制限温度を超えることはほぼ無く、損傷しないという結論が得られた。このような統計的な安全評価や、それに基づく合理的な検討は従来のPRAでは行えない。上記の設定に加えて、屋上へアクセスできずに除雪できなくなるイベントや、代わりに電気ヒータを起動させて除雪するイベントを加えた評価も実施した。ただし挙動は複雑になり、得られる情報量が増えるため、効果的な分析を行うことが重要であることが分かった。

一方、強風時の動的リスク評価は以下のとおりであった。この場合の起因事象は風速70 m/s以上の強風の発生で、それに伴い外部電源が喪失するが、非常用発電機が作動し、緊急停止には成功するというものである。その後は強風が12時間継続するが、その間、非常用発電機が破損して機能を喪失したり、破損の際に発電機の燃料の引火による火災が発生し、空気の温度が上昇して冷却機能が劣化したり、補助冷却設備が破損して空気冷却器の機能が喪失するというイベントが確率的に起こるとした。このとき、非常用発電機の破損確率は10%程度であり、補助冷却設備に至ってはほぼ壊れないという特徴をもつことが、積雪時の例と大きく異なる。このような条件で1000個のサンプルを作成しても、90%程のシナリオでは

イベントが何も発生していなかった。これは発生する事故のリスク評価を行うという目的からは大きな課題となる。この課題を解決する有効なアイデアとして、イベントの発生確率を変更してサンプリングを行い、得られた結果を重み関数で補正することによって評価する方法が考えられる。このとき、成功と失敗の両方のサンプルが均等に出るように、変更後の確率を 50%程度にするのがよい。この方法でサンプルを生成した結果、それまで現れなかったシナリオ、特に、イベントの発生順が工学的判断とは逆のケース（空気冷却器の機能が喪失したあとに発電機のタンクが故障するケース）が得られ、網羅的な評価が可能となった。この方法でも、全ての空気冷却器が同時に機能喪失するシナリオの発生率は理論値の 20%程度の差であった。この方法では、炉心出口最高温度の累積頻度分布も連続分布的になるが、正規分布近似の際に、最小二乗法でパラメタ推定するよりも、累積分布値が 95%と 99%になる値を用いて、2つのパラメタ値を決定する方が目的に叶った評価が行えた。考慮するイベント数が増えるとサンプル数を増やさざるを得ないが、重み付けサンプリングを行うことでその数を抑えることができる。

1.4. 今後の展開

動的リスク評価手法ではシミュレーション技術を利用することで、事故シナリオを動的かつ網羅的に生成でき、事故の影響度評価もシミュレーション結果から自然に得られる。一方で、得られる情報量が多いため、効果的に活用する上での整理の仕方が重要となる。このとき、どの機器のリスクが全体のリスクに強く影響するのかという従来の PRA が扱ってきた指標と、どの入力パラメタが影響を及ぼしているのかというシミュレーション特有の指標での整理が求められる。動的リスク評価手法においてはこれら両方の重要度指標を同時に評価できるが、これらを統一的に扱える指標の構築が望まれている。

2. 聴講における感想（アドバンスソフト）

原子力発電所の安全性を題材に、リスク評価におけるシミュレーション技術の適用というテーマでお話をいただいた。特に、従来の確率論的リスク評価手法の課題と、それを解決するために研究が進められている動的リスク評価手法の特長について分かりやすい内容となっていた。弊社よりお尋ねした、動的リスク評価手法は従来のリスク評価手法に取って代わられるようになるのかという点については、しばらくは相互に補完しながら進んでいくのではないかと予想されていた。計算科学シミュレーションを業務としている弊社として、動的リスク評価手法に役立つ技術への貢献を果たしていきたい。

【ご経歴】

1994 年 東京工業大学 大学院理工学研究科 卒業（修士）

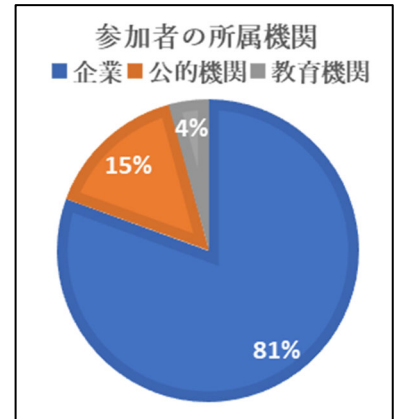
2007 年 学位取得（大阪大学、工学博士）

川崎重工業株式会社（1994～2005）、大阪大学（2005～2015）、日本原子力研究開発機構（2015～2021）を経て、2021 年より、東京大学 工学系研究科 原子力国際専攻 教授

専門は、熱流動数値シミュレーション、原子炉安全工学、リスク評価。

参加者

申込者は 117 名、当日の参加者は 72 名であった。参加者の内訳は、企業が 58 名、公的機関が 11 名、教育機関が 3 名であった。主な業種は、「エネルギー（電力・ガス・石油・原子力）」、「建築/土木」、「電機/精密機器/IT 機器」であり、主な職種は、「研究/開発」、「技術/設計」であった。



参加者のご意見

○「動的リスク評価において稀有事象が課題であり、その解決策として重み付けの適用があることなど大変参考になりました。」や、「リスク評価に関する基礎的知識から応用例まで含まれており、大変貴重なお話を賜りました。」また、「リスク評価の手法をわかりやすく説明いただき、とても参考になった。」とのお声を多くいただきました。

公開資料

ご講演の YouTube 動画は、右の QR コードからご覧いただくことができます。



ご講演の資料は、右の QR コードの「資料をダウンロードする」からログイン後、ダウンロードすることができます。ログインアカウントをお持ちでない方は、「資料をダウンロードする」から新規メンバー登録後、ログインしてダウンロードすることができます。



右の QR コードから過去のアドバンス・シミュレーション・セミナーの YouTube 動画をご覧いただくことができます。



今後の開催予定

アドバンス・シミュレーション・セミナー

2024 の開催要領

<https://www.advancesoft.jp/seminar/20299/>

No.	日程 受付状況	内容	テーマ
第1回	4月19日(金) 終了	「 ロケットと宇宙機に係る様々な自由表面流 」 東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻 教授 姫野 武洋 様	自由表面流の予測 と管理
第2回	5月17日(金) 終了	「 ペプチド創薬を加速する分子動力学シミュレーションと深層学習 」 東京工業大学 情報理工学院 情報工学系 教授 秋山 泰 様	バイオ・計算科学
第3回	6月28日(金) 終了	「 デトネーションエンジン開発状況とシミュレーション事例の紹介 」 慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 教授 松尾 亜紀子 様	航空宇宙エンジン
第4回	7月12日(金) 終了	「 シミュレーションのための情報可視化 」 お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科(兼) 文理融合 AI・データサイエンスセンター長 教授 伊藤 貴之 様	可視化・AI
第5回	8月23日(金) 終了	「 シミュレーション技術のリスク評価への適用 」 東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 教授 高田 孝 様	原子力・リスク評価
第6回	9月20日(金) 終了	「 ポスト・エкса、ポストムーア時代の HPC と AI 」 神戸大学大学院 理学研究科 惑星学専攻 特命教授 牧野 淳一郎 様	HPC・AI
第7回	10月11日(金) 終了	「 建築・都市の新たな風環境デザイン 」 千葉工業大学 創造工学部 建築学科 元教授 森川 泰成 様	建築・都市の新たな 風環境デザイン
第8回	11月22日(金) 受付中 	「 極低温超伝導コンピュータアーキテクチャ技術とその新展開 」 九州大学大学院 システム情報科学研究院 情報知能工学部門 主幹教授 井上 弘士 様	計算機アーキテク チャ
第9回	12月17日(火) 受付中 	「 スマートエネルギーマネジメントシステムのデザイン 」 東京科学大学 総合研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所 特任教授 浅野 浩志 様	エネルギーシステ ム、GX
第10回	2025年 1月17日(金) 準備中	「 AI や電気自動車用半導体単結晶育成のための数値解析と実験 」 東北大学 未来科学技術共同研究センター 特任教授 柿本 浩一 様	材料科学・AI

【お問い合わせ先】

アドバンスソフト株式会社 出版事業部

〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台四丁目3番地 新お茶の水ビルディング 17 階西

TEL: 03-6826-3971 FAX: 03-5283-6580 E-mail: office@advancesoft.jp

<https://www.advancesoft.jp/>

当社では随時人材の募集も行っております。

<https://www.advancesoft.jp/recruit/>

Copyright © 2024 Advancesoft Corporation. All right reserved.