

計算科学技術部会セッション

解析コード V&V の現状と実施例

Current Status and Practical Examples of Code V&V

*巽 雅洋¹, *中村 秀夫², *越塚 誠一³¹原子力エンジニア, ²原子力機構, ³東大

近年、数値解析モデルの進歩と計算機性能の飛躍的向上により、様々な工学分野において数値シミュレーションの果たすべき役割が増大し、それに伴ってシミュレーション結果の信頼性を確保することが重要な課題となっている。計算科学技術部会では、設立当初から計算結果の精度に関する検討を行う活動を継続しており、特に 2010 年からは「シミュレーションの信頼性ワーキンググループ」を設置し、モデリング&シミュレーションの V&V（検証と妥当性確認）に関する新しい標準に関する検討を進めてきた。それを受け、2012 年には日本原子力学会標準委員会基盤・応用技術専門部会の下に「シミュレーションの信頼性分科会」を設置して、核、熱流動および構造分野でのシミュレーション信頼性確保に関する検討を行い、「シミュレーションの信頼性確保のためのガイドライン」を策定した（現在、発行に向けた審査中）。ただし、原子力工学を構成する各分野により解析コードの開発・整備状況が大きく異なるため、現状のガイドラインは各分野を包含する一般的な考え方の提示に留まっており、具体的な V&V 手段の標準例については明示されていない。

本セッションは、炉物理分野、熱流動分野、および異分野（土木・建築分野）における解析コード V&V の現状および実施例を紹介し、実際の V&V 手順やその有効性に関する議論を行うことにより、各分野の V&V の具体的実施手順（ガイドライン）に関して大まかな方向性を示し、具体化の参考情報としていただくことを企図している。

1. 炉物理分野における解析コード V&V の現状

炉物理解析の目的は、個々の核種の微視的な反応確率のデータを用いて中性子のバランス方程式を解き、様々な核種が混在するシステムの巨視的な挙動を予測することである。核反応断面積や中性子束などの物理量から構成される中性子輸送方程式は、上記目的を達成する概念モデルとして定式化される。決定論的手法と確率論的手法（統計的手法）に大別される数学的モデル化を経て具現化された解析コードを用いて、同方程式を数値的に解くことで上記目的を果たしている。解析コードの V&V の現状は数学的モデル化の方法により大きく異なるため、以下では確率論的手法と決定論的手法に分けて述べる。

確率論的手法として様々な分野で応用されているモンテカルロ法では、位相空間（空間、エネルギー、時間）の離散化をする必要が無いという利点がある。したがって、物理現象を正確にモデル化しておけば、近似を伴わない正確な物理量を求めることができる[1]。数学的モデル化の誤差として、評価済み核データ表現形式の制限に起因する誤差、物理モデルをモンテカルロコードに実装する際の近似によるバイアス、幾何形状モデリングから生じる不確かさ、統計的な取り扱いに起因する不確かさ（いわゆる統計誤差）などが存在する。しかしながら、その大きさは非常に小さい。これが、連続エネルギーモンテカルロ法に基づく評価結果が、しばしば決定論的手法の検証における参照解として用いられる所以である。モンテカルロ法に基づく計算コード自体の V&V においては、それぞれのモデル毎に検証や妥当性確認を行うことは難しく、解析コード全体として実施されているのが現状である。臨界性評価や炉物理試験に関する妥当性確認のためのデータベースが ICSBEP[2]や IRPhEP[3]としてまとめられて

おり、計算コードや評価済み核データライブラリの妥当性確認に活用されている。

決定論的手法の V&V の一例として、以下では軽水炉向けの炉心解析コードにおける実施例を述べる。現在主流の炉心解析コードは、定数計算コードと炉心計算コードから構成される 2 ステップ法に基づいている。前者においては、集合体程度の体系を対象として、中性子の空間及びエネルギー分布を詳細に解き、炉心計算で用いるための少数群断面積を準備する。燃料温度や減速材温度など、各パラメータを変化させた複数の条件に関して予め断面積を予め計算しておき、少数群の定数ライブラリとして炉心計算コードに供している。炉心計算コードでは、炉心内の中性子の空間分布を求め、最終的に着目する物理量の評価を行う。定数計算コードの検証については、解析解との比較やベンチマーク問題の解析を通じて、計算モデルやソルバーが適切に動作していることを確認している。また、妥当性確認については、積分実験や PIE 結果との比較により実施している。なお、妥当性確認において連続エネルギーモンテカルロ法による参照解も補助的に使用している。一方、炉心計算コードの検証は、ベンチマーク問題の解析や定数計算コードとの整合性確認を通じて実施している。また、妥当性確認は、各種実験の測定結果や実機データとの比較により実施している。

参考文献

- [1] 長家, “粒子輸送モンテカルロ計算の基礎原理とそこに潜む不確かさ”, 第 44 回炉物理夏期セミナーテキスト, (2012)
- [2] International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project, <https://www.oecd-nea.org/science/wpncs/icsbep/>
- [3] International Reactor Physics Experiment Evaluation (IRPhE) Project, <https://www.oecd-nea.org/science/wprs/irphe/>

2. 熱流動分野における解析コード V&V と Scaling

熱流動分野における解析コードの V&V（検証と妥当性確認）と現象の Scaling（内挿、外挿、縮小モデルでの現象の相互作用など）は、軽水炉の開発当初から問われてきた古典的課題の 1 つであるが、Scaling については、土木、建築、航空、化学工学など多くの工学分野に共通であり、原子力に限った課題ではない。軽水炉で対象となる現象は、巨大かつ高温高压など特殊環境の実機設備に生じる現象である。その様子を知らするための試験は、実機と同一の条件で行われる実証試験も有るが、ごく一部であり、大部分はサイズや流体物性の片方ないし両方について縮小モデルを利用する。このため、様々な現象が組み合わさり相互作用を伴って時系列に変化する事故時のレスポンスをはじめ、実機に生じる伝熱流動現象の実像を完全に把握することは困難であり、縮小実験を基に開発されるモデルや解析コードを用いて実機の性能予測を行うことになるが、その予測結果を実機の現象と錯覚する笑えない事態も生じうる。

軽水炉の設計の妥当性確認を行う安全評価では、解析コードを用いた安全解析の結果において「炉心の最高燃料表面温度が 1200℃を超えない」などの判断指標を十分な余裕を持って合格することが求められる。この評価を行う安全解析では不確かさの評価が問われるため、解析コードの性能（妥当性）確認に関して V&V は不可欠のプロセスとなる。

このような事情を背景に、特に V&V については、その方法や影響について多くの議論や対応がなされている。計算科学技術部会が春の年会での企画セッション（2010、2013、2014、2015）[1]や学会誌の解説シリーズ[2,3]にて議論を行うほか、海外では ASME や AIAA、ANS などが標準やガイドを出している。（[2]第 1 回、[3]第 3 回）最近では原子力学会の標準委員会が「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン」をまとめたところである。これらの議論では、いずれも、解析コード（計算手法）を用いた実機での

現象予測の妥当性や信頼性、特に不確かさの定量的な把握など、方法論に焦点を当てた議論がされているが、現象予測に際する内挿や外挿に係る **Scaling** については、実施の妥当性を系統的に述べているものは主に、システム解析コードを対象にしており、件数も少ない。また、CFD、特に 3 次元 2 相流の数値解析手法については、途についたところ、の印象が強い。このためここでは、**Scaling** の意味や影響について、解析コードの妥当性検討、不確かさ評価に際する考え方や今後の現象模擬解析など、熱流動分野における到達点や理解を共有すると共に、今後の課題に関する議論を行う。なお、OECD/NEA は現在、**Scaling** の最新情報 (State-of-Art) レポートの策定を進めており (3 月現在、未公開)、その一部を議論の参考に用いる。

参考文献

- [1] 計算科学技術部会ホームページ : http://csed.sakura.ne.jp/archives/category/4_session
- [2] シミュレーションの V&V の現状と課題、日本原子力学会誌 (解説シリーズ) : 第 1 回 : 笠原文雄 Vol.56 (No.11) (2014) 49、第 2 回 : 村松健 Vol.57 (No.1) (2015) 36、第 3 回 : 中村均 Vol.57 (No.2) (2015) 33
- [3] モデリング・シミュレーションの高度化、日本原子力学会誌 (解説シリーズ) : 第 1 回 : 松本昌昭 Vol.56 (No.1) (2014) 37、第 2 回 : 岡本孝司 Vol.56 (No.2) (2014) 45、第 3 回 : 笠原文雄 ibid. 50

3. 原子力分野以外における解析コード V&V の現状

解析の品質については、わが国においては白鳥正樹先生が 2003 年に日本機械学会計算力学講演会のオーガナイズドセッション「解析モデルと計算の品質」において今日に至る問題提起をしている[1]。そこで強調されているのは、工学シミュレーションを実際に設計-生産に利用する場合に、それが可能となるようなツールを整備するとともに「解析した結果の品質が保証されていること」が重要であるということである。また、HPC(High Performance Computing)と HQC(High Quality Computing)を両輪とする研究のバランスを説いている。その後、欧米での V&V に関する規格化の動きに触発され、2009 年に日本計算工学会に「シミュレーションの品質・信頼性にかかわる調査・研究」研究分科会が発足した[2]。この研究分科会は白鳥先生が主査に就任し、HQC(High Quality Computing)研究分科会と略称されることになった。メンバーには、大学、研究所、電力、電機、重工業、プラント、自動車、鉄鋼、建設、ソフトベンダーといった工学シミュレーションに関係する幅広い分野から集まった。

HQC 研究分科会では工学シミュレーションにおける V&V に関する調査、情報交換、計算工学講演会でのセッションの企画、講習会の開催、標準の策定などの活動が行われている。これまでに 3 種類の品質マネジメントにおける V&V(品質 V&V)の学会標準が策定された[3-5]。これらは、品質マネジメントに関する一般的な国際規格である ISO9001 に沿って、工学シミュレーションの業務を行う場合の要求事項をまとめたものである。HQC001 は、ISO9001 に対する工学シミュレーション特有の追加要求事項をまとめた文書であり、2011 年に初版が出版された。2014 年版ではこれに「シミュレーション業務の委託プロセス」および「シミュレーション業務への ISO9001 導入の手順」などの記述が追加されている。HQC002 は、HQC001 に従った具体的な解析業務の手順をまとめた文書であり、2011 年に初版が出版され、2015 年に改訂版が発刊されている。HQC003 事例集には、フランジ継手の熱過渡・弾塑性応力解析、原子炉建屋の固有振動解析、自動車開発における定型構造解析、自動車開発におけるシミュレーションの品質マネジメントの 4 例が収められている。原子力産業の品質マネジメントにおいては日本電気協会の規格 JEAC4111[6]が一般的に用いられており、これも ISO9001 に基づいている。今後は、JAEC4111 に工学シミュレーションの品質 V&V をどのように取り入れていくかが課題であろう。

土木学会では 2014 年に応用力学委員会の中に「土木分野の数値解析における V&V に関する小委員会」

が発足した。主査は地盤工学を専門とする徳島大学の渦岡良介教授である。2014年の土木学会全国大会において研究討論会「数値解析におけるV&V（検証と妥当性確認）をご存知ですか？」が企画され、多くの聴衆を集めた。2015年の全国大会においても研究討論会「V&Vのススメ：土木分野における数値解析の課題」が企画されている。

日本機械学会では計算力学技術者資格認定事業を2003年より実施しており、2016年の時点で、3分野（固体力学、熱流体力学、振動）、4段階（初級、二級、一級、上級）の体系となっており、既に延べ約5,000人が認定されている。2014年からはNAFEMSとの国際相互認証制度が始まり、日本機械学会の国際上級アナリストを取得すると英国の非営利組織であるNAFEMSのPSE(Professional Simulation Engineer)を称することができる。これは品質V&Vにおいては力量管理に位置づけられ、HQC001の中に本事業が引用されている。一方、資格認定事業においてもそのテキストの中にV&Vの内容が加えられている。

参考文献

- [1] 白鳥正樹, "今, なぜ解析の品質か" 日本機械学会第16回計算力学講演会講演論文集, 2003.11.22-24, 神戸, p.731-732
- [2] 白鳥正樹, 越塚誠一, 吉田有一郎, 中村均, 堀田亮年, 高野直樹, "工学シミュレーションの品質保証とV&V" 丸善出版 (2013)
- [3] 日本計算工学会, "工学シミュレーションの品質マネジメント" JSCES S-HQC001:2014 (2014)
- [4] 日本計算工学会, "工学シミュレーションの標準手順" JSCES S-HQC002:2015 (2015)
- [5] 日本計算工学会, "学会標準(HQC001&002)事例集" JSCES S-HQC003:2015 (2015)
- [6] 日本電気協会, "原子力安全のためのマネジメントシステム規定" JEAC4111-2013 (2013)

*Masahiro Tatsumi¹, *Hideo Nakamura² and *Seiichi Koshizuka³

¹NEL, ²JAEA, ³Univ. of Tokyo