

数値シミュレーションの信頼性と不確かさ



研究ノート

山口 彰*

Uncertainty of Numerical Simulation in Engineering Application

Key Words : Reactor safety, Numerical simulation, Uncertainty, reliability

数値シミュレーション

エネルギー分野, 特に原子力工学分野の伝熱流動の数値シミュレーションの研究しているが, 数値シミュレーションは果たして信頼できるのかというのが本稿のテーマである.

エネルギーシステムは大規模で複雑である. また高度の安全が求められる. 装置を実際を作って確かめなくともシステムの性能を調べたり, 異常が生じたときの影響を予め調べたり, また, 安全装置が働かないときに事故の進展の様子を予測するために, 数値シミュレーションは役に立つ. つまり, システムがその性能を発揮すること, かつそれが安全に行われることに対する確信を深めることに有用である.

高速増殖炉では液体ナトリウムが冷却材として用いられる. 核反応の観点からも伝熱流動特性に関しても優れた性能をもっていることがその理由である. ナトリウム-水の熱交換による蒸気発生器の伝熱管が破損して水蒸気がナトリウム中に噴出するとき, それをナトリウム-水反応事故という. その模擬実験の数値シミュレーション^[1]を図1に示す. 円筒容器内部に43本の模擬伝熱管を配置し, その最下端の一本から水を噴出させる. 水と液体ナトリウムとは混合し, 水, 水蒸気, 水素, 液体ナトリウ

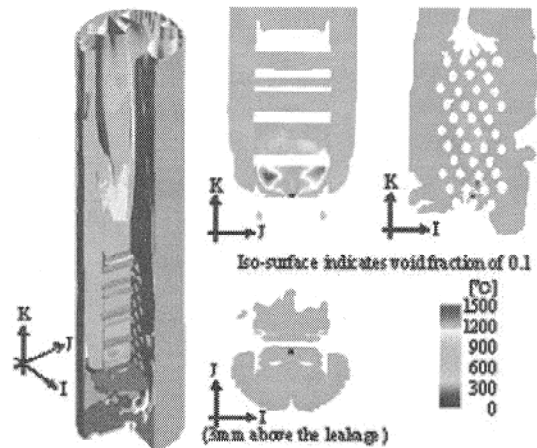
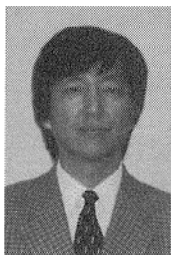


図1 Na-水反応の数値シミュレーション

ム, ナトリウム蒸気, 及び反応生成物の混相流場となる. 従って, 多くの物理量が解析結果として得られる. この現象は三次元, 非定常で空間的・時間的変動が大きく, また, 境界条件や初期条件も確定的ではない. 図1は, 複雑であるがゆえ定量的な理解が難しいシミュレーションの例である. 実験を行うとしても, 温度分布や物質分布の空間場の時間推移を測定することは容易ではない. 図1にはボイド率10%以上の領域についてガス温度分布を示している. シミュレーションによってのみ, 現象の全体像とそれぞれの変量の局所分布を把握できるであろう.

現象のモデリング

数値シミュレーションに対して, 解析結果をどのように検証をするのか, 精度はいかほどか, 実際のシステムに適用できるか, といった問いがしばしば投げかけられる. 続いて, モックアップ試験を実施してシミュレーションのクロスチェックが必要ということになる. 現象が複雑なだけに, その問いに正確に答えるのは難しいが, モックアップ試験を行っ



* Akira YAMAGUCHI
1957年3月生
1984年東京大学大学院工学系研究科博士課程
現在, 大阪大学大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻, 教授, 工学博士, 原子力工学, 熱流体力学
TEL 06-6879-7890
FAX 06-6879-7889
E-mail : yamaguchi@see.eng.osaka-u.ac.jp

ても不確かさが本質的に解消されるわけではない。現象を記述する方程式系を知れば、それを解くことによって未知の変数 y が求まる。すなわち

$$f(x, y, t) = 0 \quad (1)$$

なる保存則などの支配方程式、構成方程式 (状態方程式)、相関式などを、初期条件と境界条件のもとに y について解くことに相当する。 x は空間座標を、 t は時間座標を表す。一般には (1) 式は解けないので数値モデル

$$y = M(x, t | f, DS, BC, IC) \quad (2)$$

に変換して t について解く。ここで、 f は (1) 式で表される。 DS はシミュレーションで使用するデータセットで物性値や空間や時間の離散化や数値解法などに関連する。 BC と IC はそれぞれ境界条件と初期条件である。 M は現象の数値モデルであり、支配方程式や境界条件などが既知であるとの条件のもと、任意の位置と時間における y を求めることができる。

上に述べた問いでは、現象を記述する方程式系 (1) 式と数値モデル (2) 式が正しく対応していることを示すことが求められる。

二種類の不確かさ

日本原子力学会の確率論的安全評価実施基準 [2] では、不確かさ (uncertainty) を、「評価の過程に含まれる物理量、モデル、専門家判断等におけるばらつき」と定義し、その要因を「物理現象のランダム性に係わる偶発的不確かさ (aleatory uncertainty) と知識や認識の不足に係わる認識論的不確かさ (epistemic uncertainty)」に分類している。そして、偶発的不確かさは、「対象物が本来持っているばらつき特性によるもの」でそれ以上減じることができないが、認識論的不確かさは、「知識の欠如、モデルの詳細度、複数の専門家の解釈の相違等によるばらつき」であり、「将来、知識の増加や科学の進展によりそのばらつきを減じることが期待できる」とする。

不確かさは古くから認識されているが、統計的品質管理を提唱したウォルターシューハート (1891~1967) の考察 [3] は興味深い。ベル電話研究所の職員であったシューハートは、電話用設備の故障率を考えていた。シューハートの当時、電話用の設備は地下に埋設されることが多く、その故障率をで

きるだけ下げることが要請されていた。シューハートは当初、製品のばらつきをなくそうとしていた。彼は製品の質を改善するために多くの投資を行い、成果が上がってきたが、そのうち手間をかけた割には品質管理面の進歩が遅くなったことに気づいた。不良品を探し、それが見つかったとその原因を除去する。ところが、それを繰り返すにつれ、検査で見つかった欠陥に対応して製造工程の制御を調節すると製品の品質が下がるという不可解な事実を見出した。

そこでシューハートが考えたことは、ばらつきには二つの原因があるということだった。ひとつは“ランダムな原因 (Chance cause) によるばらつき”である。もうひとつは“つきとめられる原因 (Assignable cause) によるばらつき”である。つきとめられる原因によるばらつきとは、機械の調整不良、原料の品質のばらつき、いい加減な作業、監督不足など、具体的に特定できるものである。つきとめられるばらつきの原因が除去されると、ランダムなすなわち偶発的原因のばらつきだけが残る。先の「検査で見つかった欠陥に対応して製造工程の制御を調節すると製品の品質が下がるという不可解な事実」はランダムなばらつきの原因を除去しようとして手を加えた結果、却って製品の品質が下がったのであろう。

偶発的原因によるばらつきは本質的に除去することができないので、我々の目標はいかに適切にそれを管理するかということになる。“つきとめられる原因を除去し、それによるばらつきを排除するさらにランダムなばらつきを管理する”これが、シューハートの得た結論であった。

不確かさに関するアムダールの法則

アムダールの法則は、コンピュータ技術者であるアムダール (1922~) により提示された、システムの一部を改良したときに全体として期待できる性能向上の程度 S を与える法則であり、並列コンピューティングの分野では複数のプロセッサを使ったときの理論上の性能向上の度合いを予測するためによく使われる。プログラムの並列化された割合を F 、プロセッサ数を P とすると、 F の部分は、並列実行により F/P に短縮されるが、 $(1-F)$ の部分は、 P に関係なく $(1-F)$ のままである。

$$\frac{1}{S} = (1-F) + \frac{F}{P} \quad (3)$$

すなわち、いくらプロセッサ数を増やしても、プログラム内の並列化されない部分によって、並列実行によるスピードアップに上限ができてしまう。

不確かさの話にこれを適用すると、ばらつきのうちでつきとめられる部分（認識論的不確かさ）とランダムな部分（偶発的不確かさ）があるので、前者の割合をFとする。認識論的不確かさをP分の1に改善（低減）させたとしても全体の不確かさはS分の1にしかならないということになる。

図2に示されるとおり、認識論的不確かさの割合が0.5程度であれば、それを8分の1に低減（P=8）してもばらつき全体の低限度は2分の1（S=2）にも満たないことが分かる。

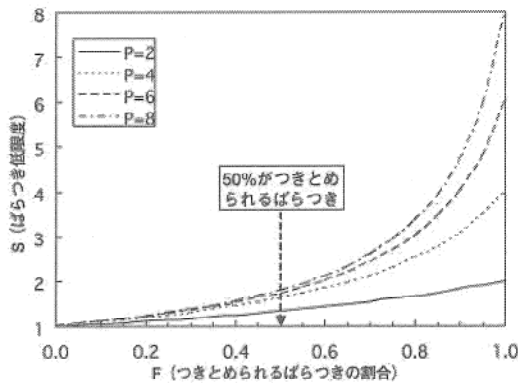


図2 不確かさに関するアムダールの法則

認識論的不確かさは、原因の除去により全体としての性能は改善されるが、偶発的不確かさの部分は改善され得ない。不確かさの原因を調べ除去して認識論的不確かさを低減させ、残る偶発的不確かさについてはその影響を知り、適切に管理すべきということを示唆している。

数値シミュレーションの信頼性

「機械は故障し、人間は過ちを犯す」[4]の言葉がある通り、人事を尽くし考へる配慮を施してもやはり“failure”は起きるものである。これは、我々の配慮が及ばない未知の現象があること、世の中には確率的な現象があり、決定論の因果則では確定的な予測が不可能であることによる。工学システムも然りである。しかし、我々是不確かながらも先の見通しを立てて、何とかうまくやっいていこうと考

える。では、どうやって見通しを立てればいいのか？不確かで不安定な現象でも、数多く集めれば、何らかの法則性が見えてくる。この、法則性を見出す方法論が統計科学である。数値シミュレーション技術の予測能力は近年向上している。これにより数多くの数値実験を行い、統計的な考察が可能となる。シミュレーションに不確かさを取り扱うプロセスはどのような姿になるかを図3に示す。我々が知りたい量（例えば（1）式のY）を出力変数とすれば、それは確率変数であり、そのばらつきの原因となるのは、システムのモデルの不確かさ、入力データの不確かさである。諸々の不確かさを偶発的不確かさと認識論的不確かさに分類し、数値実験を行って統計的な法則を調べる“不確かさの中身を解き明かし、個々の不確かさ要因の重要度を特定する”特に認識論的不確かさについては、図3に示すような入力とモデル、入力データ同士の相関を適切に考慮する：こうして数値シミュレーションは確率実行であると理解できる。数値シミュレーションの不確かさが定量化できれば、「計算結果は信頼できるのか？」といった問いに応えられるであろう。（1）式と（2）式の本質的な違いは、実は、確率的と確定的ということではないか。

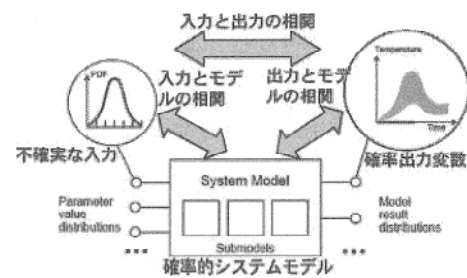


図3 不確かさを考慮した数値シミュレーション

文 献

- [1] 高田, 山口, 須田, 大島, 高速炉蒸気発生器におけるナトリウム-水反応シミュレーション, 2006年日本機械学会年次大会
- [2] <http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/sc/index/index.html>
- [3] ジョンタバク, 確率と統計 不確か性の科学, (松浦俊輔訳) 青土社 (2005)
- [4] 村上陽一郎, 安全と安心の科学, 集英社新書 (2005)

この記事をお読みになり、著者の研究室の訪問見学をご希望の方は、当協会事務局へご連絡ください。事務局で著者と日程を調整して、おしらせいたします。

申し込み期限：本誌発行から2か月後の月末日

申し込み先：生産技術振興協会 tel 06-6395-4895 E-mail seisan@maple.ocn.ne.jp

必 要 事 項：お名前，ご所属，希望日時（選択の幅をもたせてください），複数人の場合は
それぞれのお名前，ご所属，代表者の連絡先

著者の都合でご希望に沿えない場合もありますので，予めご了承ください。

