

特別企画

第14回計算工学会講演会における特別企画として、計算工学における大きな課題となっているシミュレーションの品質保証の問題についてパネルディスカッションを開催しました(2009年5月12日、東京大学生産研にて開催)。その状況を報告します。

パネルディスカッション報告

「シミュレーションの品質保証と現実問題への適用」

～いま、なぜ解析の品質なのか、諸外国の動向と日本の取り組み～

【司会】伊藤忠テクノソリューションズの中村です。本日のパネルディスカッションは、シミュレーション技術が急速に進歩する中で、産業界を中心に強い関心のある解析の品質の問題について、有識者による解説と問題提起を行うことを目的として企画したものです。



中村 均
(CTC)

近年は、計算科学の急速な進歩により、一見して実現象と見間違ふような解析が行われるようになってきました。しかしながら解析が精緻になればなるほど、ユーザーが解析結果の妥当性を直感的に判断することが難しくなっています。最新の解析技術を、ものづくり、あるいは社会システム設計の実務に適用するためには、解析の品質を保証する方法論あるいは手順を確立する必要があります。このような課題に対して、諸外国では学会と産業界が連携した活動が強力に進められており、例えばASME(米国機械学会)では、シミュレーションの信頼性を評価する指針をまとめており、英国NAFEMSは、ISO9001に準拠して解析の品質マネジメントの標準化を進めています。

本日のパネルディスカッションでは、まずパネリストにより、解析の品質保証が求められている背景、諸外国の技術基準の動向および国内の取り組みを解説いただきます。その後、会場の皆様にも参加いただき、今後、日本が取り組むべき課題について議論したいと思います。

「今なぜ、解析の品質なのか」 白鳥 正樹

【白鳥】横浜国大の白鳥でございます。昨年の仙台で開かれた計算工学会講演会のおりに竹内会長や大富副会長らと、学会の活性化のためには先端的な研究だけでなく、ものづくりの現場にいる人たちが興味を持つような活動が必要である、そのためには計算の品質ということをまじめに取り上げる必要があるのではない

か、という話を致しました。その話を竹内会長が取り上げて下さって、まず4月に“ものづくりのための計算工学発足記念シンポジウム”が開かれ、次いで本日のパネルディスカッションにつながった、と聞いております。そのような訳で“今、なぜ計算の品質なのか”というようにお話をしてお前が口火をきれ、とのことになりました。実は今日お話しする内容は、5年ほど前に神戸で開かれた機械学会計算力学講演会の折にお話した内容と同様ですが、CAEがものづくりの中で占める重要性が当時に増して高まっている今こそ、このような問題提起は必要であると考えてあえて一言述べさせていただくことにしました。



白鳥 正樹
(横浜国大)

これはもう10年以上前、日本計算工学会発足の頃から申し上げていることですが、計算力学の使われ方に一種のパラダイムシフトが起こっています。つまり計算力学から計算工学へ、解析のツールから設計のツールへ、また解析の専門家から設計者が使うツールへ、といった変化です。すなわちFEMのような計算力学の手法は、いまや品質保証をする能力のある専門家の手を離れて、これをブラックボックスとして使っている設計者の手のなかにあります。しかもFEMを使って設計しようという時は、比較的現象の複雑な問題が対象になりますから、モデル化の技法、材料データの選択、要素分割、境界条件等、ある程度熟達した人でなければ、必ずしも正しい答えは出てこない、また出てくる結果もそれなりに複雑ですから、正しい結果なのかどうかの判断が難しい。一般の設計者がこのような判断をしないまま、出てきた計算結果は全て正しいものとして、そのまま設計のプロセスを進めてしまうと、とんでもない火傷をすることになるのではないかと、という問題提起です。

実は計算の品質保証の重要性については、伊理先生がすでに1995年に以下のように指摘しておられます。

“工業製品についていえば、品質管理がおろそかにされ、品質保証のなされていない製品には市場競争力、国際競争力が無い。製造技術においては品質と信頼性の概念は最も重要なものであり、品質に敏感でない技術は今やないといってよい。計算技術と製造技術とは同列に論じられない点も多いかもしれないが、現在までの所、計算および計算結果についての品質、信頼性の概念の重要性が関係者間で一般に広く認識されているとは言いがたいのではないかと。しかし、計算も技術の一つであるとすれば、このような現状は速やかに改善されなければならない。少々誇張して「今までの計算は、計算のやりっぱなしだ」と言ったりすることもある。計算者はその手順や結果について他人をきちんと説得し納得させることが出来なければならない。そのような方法論を我々は確立しなければならない。コンピュータの性能はどんどん向上しており、並列超高速計算技術も現実のものとなりつつある（いわゆるHPC-High Performance Computing）。扱う問題の規模の拡大にこの性能向上のすべてを当ててではなく、その一部（あるいは全部）を計算の品質の向上（すなわちHQC-High Quality Computing）にも振り向けたいものである。”（伊理，“計算の品質向上を目指して”（日本機械学会誌、Vol.98、No.920、（1995.7）、pp.538-539.）

現在では各種計算技法も格段の進歩を遂げ、計算機の容量およびスピードもアップして、大規模で複雑な解析が手近なパソコンで簡単にできるようになりました。またモデリングなどの前処理、可視化などの後処理のプログラムやさらには最適化等の各種設計支援のツールも開発されて市場に出回っており、設計者はこれらのツールを自由に使いこなして設計業務の短縮化、コストの削減をはかることができるようになりました。産業界のトップリーダー達がフロントローディングとかヴァーチャルなものづくりとかいってその有用性を説くようになりました。

しかし私はこのような風潮のなかに何か落とし穴があるような気がしてならないのです。伊理先生も言っておられるように、ハードの世界では品質のつくりこみがあっていわゆる日本製（made in Japan）が世界一という評価を得ている訳です。ものづくりのプロセスの中にヴァーチャルなシミュレーションがどんどん採用されている時に、そのシミュレーションの品質を保証する仕組みを作らなくていいのか。ここがすっぽ抜けてしまった時に出来上がった製品の品質はどのように保証されるのか。このようなことを産学のメンバーが集まっている計算工学会の場で是非議論していただきたい。そういう風に申し上げたわけです。

それでは計算の品質に影響を与える誤差発生の原因としてどのようなものがあるか、思いつく所を挙げてみますとだいたい次の8つ位かなと思います。

- (1) 自然現象を連続体力学の問題として近似することによるモデル化の誤差
- (2) 材料データの持つ誤差（構成式等）
- (3) 形状の近似による誤差

- (4) 境界条件の設定による誤差
- (5) 離散化誤差（要素分割の方法も含む）
- (6) 丸め誤差
- (7) 結果の表示に関わる誤差
- (8) 単純な間違い

我々の持っている知識を結集して、これらの要因によって発生する誤差を最小化するよう努力しなければならない、また誤差を完全に無くすることは不可能ですので、それぞれの計算においてその計算の精度、言い換えれば考えられるばらつきを表示しておくような仕組みを作っておけば、この情報は設計者にとって例えば安全裕度を見積もる際などに極めて有用な情報になります。これらの誤差をなるべく小さくする方法として、どのような対策が考えられるのか、これも思いつくままにあげてみますと以下ようになります。

- (1) モデル化の技法—標準モデルの作成—
応力集中部、き裂先端部、各種継手モデル等
- (2) 近似式、応答局面の作成、あるいは理論式の活用など
- (3) 実験による検証
- (4) 教育と認証
- (5) 品質保証書添付のすすめ

聞く所によりますと、計算の品質保証の重要性については欧米でも早くから議論が行われており、米国ASMEのV&V (Verification & Validation) およびEUでは英国を中心とするNAFEMSの一連の提言があるとのことです。わが国でもこのような機会を契機として計算工学会で取り上げていただき、研究分科会を作っただけとのことで、大変ありがたいことと思っています。諸外国の動向を踏まえながらもわが国独自の品質保証の仕組みづくりをご提案いただき、国際的な標準化の動きにうまく乗っていくことが大切であると考えています。

「シミュレーションの品質に関する技術ガイドラインの情勢」 越塚 誠一

【越塚】東京大学の越塚です。白鳥先生のおっしゃる通り、産業界においてシミュレーションが有用であるためには計算結果の信頼性の確保が極めて重要であると思います。これは品質保証の一環でもありますが、従来の目に見えるものを作ることは少し違って、シミュレーションであることの特徴を踏まえた方法論が必要であると考えます。こういった活動としては、ISO9001におけるV&V、ASMEにおけるV&V、そして関連する日本の技術基準をご紹介します、今後の展望を少しお話ししたいと思います。



越塚 誠一
(東京大学)

V&Vというのは「Verification & Validation」の略で、

訳すとどちらも「検証」ということになります。ISOでは、verificationは「客観的証拠を提出することによって規定の要求事項が満たされていることを確認すること」、そしてvalidationは「客観的証拠を提出することによって特定の意図された要素、または適応に関する要求事項が満たされていることを確認すること」となっています。これはものづくりでも使われていますし、ソフトウェアの分野でも一定の解釈があります。例えば、日本電気協会の原子力の指針に「デジタル安全保護系の検証及び妥当性確認に関する指針」というものがあります。これは原子炉の制御棒がちゃんと動作するか、安全保護系のソフトウェアの品質保証をどうするかということで、この「検証」が英語のverification、「妥当性確認」がvalidationの訳になっており、この訳がISOでは安定しています。

米国ではV&Vについては独自の考え方があります。最初のはANS、米国原子力学会でV&Vの基準が87年に出ていますが、これはISO的なV&Vです。ASMEのV&VにつながるものとしてはUSDODの1996年のドキュメントがあります。それからComputational Fluid DynamicsについてはAIAA、米国航空宇宙学会のガイドラインが98年に出ています。ASMEの2006年のガイドラインは、Computational Solid Mechanicsに対するガイドラインです。ただAIAAもASMEも、CFDやCSMに限ったものではなく非常に汎用性のある基準であり、どちらを使っても大丈夫なぐらいのものです。

ASMEのV&Vでは、verificationというのは「計算が数学モデルを正しく表現しているかどうかを決める」ため、validationは「世界の物理現象を正しく表現しているかどうかを決める」ためとあり、これも文章を読んだだけではよくわからないかと思いますが、米国のV&Vは次のような考え方になっています。

まず、我々が解きたい現実世界の問題から、例えば原子力プラントや自動車の概念モデルをつくります。これは要するに微分方程式で、流体だったらナビエ・ストークス方程式、弾性体であればフックの方程式、それをFEMや有限体積法など離散的な式に落として計算します。最初の過程がverificationで、これは微分方程式の解析解と離散化されたものの数値解とを比べて誤差を評価するわけです。例えば、メッシュ依存性があるのか、ソルバーが収束しているのか、タイムステップは十分小さいかというようなことを評価します。これにより、計算モデルが良かったかどうか分かる、それがverificationです。

verificationの後、実験と比較するという過程をvalidationと言います。つまり現実の問題を方程式に落とした時に正しいかどうか、流体でいうと乱流モデルなどは微分方程式自体が近似を含んでいるので、式が合っているかどうかは実験と比較しないと検証することができませんが、これがvalidationです。

私はなぜASMEのV&Vが好きかという「predictionの可能性」という記述にあります。「V&Vによって計算精度が保証される範囲は検証された範囲であり、シ

ミュレーションはその範囲外の現象を予測できない」ということが言われます。これは原子力では頻りに議論されている話で、実物の原子炉の実験はできないので、必ず小さなスケールで実験をして、そこで計算を合わせて、次に大きなものを計算して安全性を議論します。そこには外挿があり、スケール効果があるのでいくら小さなスケールで計算の検証をしても実物には使えないのではないかという疑念が常に付きまわっている、これがpredictionの可能性です。

これに対してASME V&Vは答を持っていて、シミュレーションに限らず科学の法則は全て経験則であり真理が保証されているわけではない。それに対して我々が取り得る最良の手段は定量的なV&Vであると言っています。ASME V&Vには科学の法則がなぜ正しいのかという科学哲学に絡むことまで書かれていて非常に面白いと思います。

2007年のサンフランシスコでのASME V&Vの特別セッションでは、predictionには必ずextrapolationが伴っていて、いくら基準を決めてもV&Vではpredictionはできないという議論がありました。これにはASME V&Vは答を持っているわけです。

またFEMではConceptual ModelやMathematical Model、さらに離散化したComputational Modelというものが、現象と密接に関連していて切り離せないということを言われた先生もいました。これは技術基準としては割り切りが必要ですので、これらのコンセプトで分離するというのでよいと思います。

V&Vを作った人たちが言っていたことは、V&Vというのはコストがかかる、つまり検証のための実験データをたくさん取らなくてはいいませんが、それを正当化する論拠としてガイドを使いたいということです。

日本の動きですが、計算工学会においてHQC研究分科会が始まります。また原子力学会の標準委員会でも、今年から計算結果の信頼性に関する技術基準の検討が開始されています。原子力学会では以前「計算結果評価法研究専門委員会」というものがあって、3年ほど議論しています。また2008年春の大会では、企画セッションで「計算結果の信頼性」をやっていますが、これらの背景の元に新しい基準を作ろうとしています。

ここでV&Vと関係のある「原子力発電プラントにおける統計的安全評価基準」という技術基準を紹介いたします。これは原子力プラント建設の際に義務づけられている安全解析、この場合はLOCA解析という冷却材喪失事故に関する標準で、従来の保守的解析と同等の最適解析+誤差を計算するための方法論です。従来の原子力プラントの安全解析というのは全部保守的に計算しなければいけません。例えばLOCA解析では一番大きな配管が瞬時に切れて大量の水が出るケースを計算します。ところが実際には大きな配管が切れるよりも、小口径の配管が切れてゆっくり水が出る方が危険なケースもあります。米国のスリーマイル島の事故では小破断で原子炉が溶ける所までいってしまった。ですから、「保守的、保守的」と言っても何が保守的か

は実はわからなくて、本当はこれがベストという解に誤差を考えてやるのが一番いい、安全解析の考え方をそういうふうに変えようという技術基準です。この基準は安全解析に限らず何にでも使えると思います。それから、PIRTとって、Phenomena Identification and Ranking Table (重要度ランク表)を駆使して個別の現象の解析精度を実験で検証するというのがこの基準に書かれています。このPIRTというのはASMEのV&Vにも取り入れられている概念です。

ここで例として、原子炉の燃料の温度変化をシミュレーションしていますが、左側がvalidationの例で、小規模なテストループで実験と計算を行って燃料の最高温度を計算しています。これで、ほぼ合っていることを根拠にして、実際の原子炉の燃料の温度変化を計算します。安全基準では最高温度が1,200度以下であればOKだとしたら、best estimateとして入力データを変えたりして、どの場合でも壊れないことを確認して、よしとします。

V&Vはシミュレーションの信頼性を確保するための一般的な考え方として世界的に認知されつつあります。日本においてもシミュレーションの信頼性の技術基準を求める機運が高まっています。

「解析業務の品質マネジメント」 吉田 有一郎

【吉田】東芝インフォメーションシステムズの吉田で



吉田 有一郎
(東芝IS)

す。私の話題は、数値解析の現場で行われている品質保証の話と、解析の品質保証システムはNAFEMSでかなり詳細に検討されていて世界中で使っている人が結構いるのではないかと話です。

ISO9001に基づく品質マネジメントは、顧客満足度の向上を目的としており、ISO9001の要求事項を満たすプロセスを作ってチェックアクションを回していくと、結果的にビジネスの成績も向上するというシステムです。お客様の要求を定義して、設計・製造して、製品認定をしてお客様に渡す。ここで顧客満足度を測定して問題があればそれを是正するためにプロセスを改善します。

実際に私どもが解析業務でISO9001の認証を受けるまでにたどったプロセスは、まず、業務プロセスの明確化、文書化でした。各作業の手順と作業項目を明確化し文書化し、ISO9001の要求事項を反映させます。解析業務では最初にお客様の要求事項を定義して、作業計画書を作ります。解析作業の途中でマイルストーンごとにレビューを実施します。レビュー用のチェックリストも作りました。作業記録の保管のために成果物管理システムを用意しました。ほかにもISO9001の要求事項はありますがメインはこのあたりです。

重要なのは頭の中であって文書化していないこと

を、文書化して繰り返せるようにすることです。解析の計画を立てたらその計画が実施できたことを検証する、これが設計検証、Verificationです。解析結果がお客様の目的に合致していることを評価すること、これが妥当性確認、Validationです。もう1つ大事なことは、使うツールの精度の検証です。ツールを使う人間の能力の管理もしなければなりません。

実は後でわかったことですが、ISO9001でやるべきことはNAFEMSのマニュアルの中にいろいろ書いてあります。これから解析業務へのISO9001の導入を考える方にはSAFESAが参考になると思います。

NAFEMSは、FEMを安心して産業に使えるようにするために、1983年にイギリスの通産省の支援のもとに作られ、90年からはNPOになっています。NAFEMSのSAFESAは、FEMによって構造物の製品認定ができるようにプロセスを定義したものです。大事なものは、実験をしなくても解析だけで製品認定ができることで、内容的にはISO9001の要求事項に合致するプロセスになっています。95年頃にSAFESAを作った時の委員会には大学、ロイド・レジスターおよびニュークリア・エレクトリックらが入っています。ロイド・レジスターはISOの審査機関で、原発のISO9001審査は恐らくここでなければできない、そういう事情があります。

SAFESAの目的意識は、本日の先生方のお話と全く同じです。SAFESA Technical Manualに書いてあるのは、“ソフトウェアが非常に良くなってきて誰でも簡単に解析ができるために、FEMの理論を余りわかっていない人でもどんどん解析をしてしまうという現実が出てきた。構造の本当の挙動と比較すると、びっくりするような解析結果が見られるようになった。この状況はなんとかしなければいけない。”という内容です。

ISO9001に基づく有限要素解析の品質保証の枠組みでは、一番上がISO9001の要求事項です。その下のNAFEMSのQuality System Supplementは、有限要素解析の各作業をISOで要求している要求事項にマッピングしたもので、これに書いてあることができていますと、ISO9001のベースができます。この要求事項までは一般的ですが、その下はSAFESAになって、実際にFEMの解析をどのようにやればいいのかということの解説になります。SAFESA Management Guidelineはマネジメントのためのガイドライン、それからSAFESA Technical Manualがあります。このQuality System Supplementは、ISO9001のバージョンが変わるとそれに応じて変わっていきます。

SAFESAの手順ですが、一番上がスコープの定義です。SAFESAの目的は製品の認定をすることですので、まず認定の基準を定義する所から始め、解析する構造を定義する、解析の計画を作る、それからどうやって検証するかも考えます。詳細評価が通常のFEMの解析作業です。まず理想化(Idealization)、次に実際のFEMの細かい計算、離散化の計算があり、その次に解析結果が力学的に妥当かどうかという検証があって、さらにその次に「認定基準を用いた予備認定」となります。

認定の基準がありますから、検討している構造物の解析結果として認定をクリアする結果を作ります。次に、実際に候補となる構造物が、その認定基準を満たす解析とどれくらい近いかを評価します。こうして認定すべき構造物が品質認定されます。一番下は、認定すべき結果を、認定して、結果のレポートを書いてお客様に報告します。

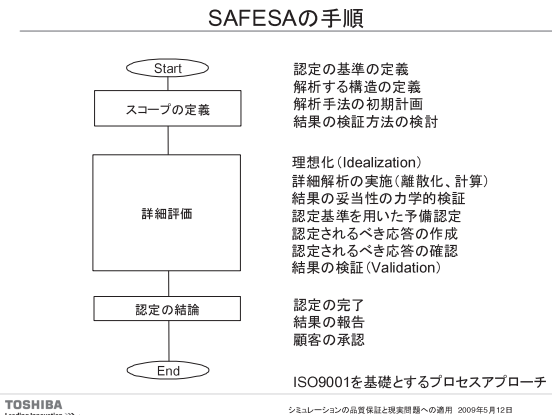


図1 SAFESAにおける解析の実施手順 (吉田氏)

SAFESAの一つの特徴は、不確実性と誤差を考えるガイドラインが与えられていることです。実構造から実構造の記述に移る時に不確実性が生じます。不確実性を扱う方法は専門家の判断、過去の実験、確率的手法、それから感度解析、これは一度計算ができた後にメッシュを使ってチェックをします。誤差には理想化の誤差とFEMの処理の中で生じる誤差がありますが、SAFESAで大事と考えているのは理想化の誤差です。他はツール等が進化すると改善すると考えられますが、理想化の誤差は人間の判断力に依存しているからです。誤差を扱う手法としては、手計算で概略の値を推定するほか、階層的なモデル化があります。これはモデルを階層的に分け、要素分割を細かくしていく方法です。

理想化の手順ですが、全体的なモデルで理想化して、部分的にそのモデルを分解した一つ一つのフィーチャーについてモデル化する。この中で、このモデル化だと、このぐらいの誤差は出るかもしれないということを個々のモデル化について評価する。さらに、モデル全体の誤差の合計を評価し、許容できなければもう一回元に戻りモデリングをする。妥当なモデルができたときと考える時に終了ということになります。

SAFESAのVerification、Validation、Qualificationの関係ですが、市販のソフトを買ってきて設計認定に使うというプロセスでは、理論マニュアルどおり方程式が解けているかというソフトの検証がVerificationです。Qualificationは指定の荷重に対して構造物が耐えられることを確認することです。この確認をするために十分信頼できる結果が得られているかどうかということを検証するのがValidation。言い方を変えると、適切な方

程式が解かれていることを確認することです。

このスライドはSAFESAを支えるインフラ、ISO9001ベースの品質保証を支えるインフラの説明です。自部門の要員の力量管理・教育と協力会社の実力の確認。自部門の解析プロセス。もう一つはソフトウェアの精度検証のためのベンチマークテストです。このようなインフラが、出来上がっていることが前提で、その上に品質保証のシステムを構築できるわけです。

最後にASMEのV&V委員会とNAFEMSのAnalysis Management Working Groupは、2007年にNAFEMSの会議で合同セッションをやっています。またNAFEMSもASMEのV&Vに刺激されてValidationのマニュアル作りを始めています。それからNAFEMSのQuality System Supplementの査読メンバーにV&V委員会の議長が入っています。つまり彼らは共同して仕事をしています。

こういう状況を見ていますと、日本はちょっと遅れていると感じます。ただ要員の力量管理という意味では、日本機械学会で既に計算力学技術者認定試験をやっておりまして、認定者の数は多分、世界一だと思います。最近、NAFEMSも、これからは教育だということに気づいたらしく、どうも日本と同じようなことをやる雰囲気が出ているようです。

「ASME V&Vの概要解説」 瀧澤 英男

【瀧澤】三菱マテリアルの瀧澤でございます。ASME



瀧澤 英男
(三菱マテリアル)

V&Vの正式な名称を日本語に訳しますと「計算固体力学における検証と妥当性確認のための指針」となり、解析精度保証のための系統だった検証方法を記述しています。本としては30ページぐらいのものですが、現段階の内容では、それに従ってステップ・バイ・ステップでやれば誰でも同じことができるという所まで書き下されて

いるわけではありません。ASME V&Vの主な目的は、検証の考え方の枠組みを提供し、議論に必要な言語の定義を整理することとされています。

背景は今までのお話とほぼ同じで、シミュレーションが頻繁に使われるようになって、物理的な実験をやる機会が少なくなっていること、また一般の人々はきれいなコンピュータグラフィックスを信用しがちであるが、会社で言うとマネジメントクラスで重要な判断を下さなければならない人でも、簡単に信用してしまう傾向があることです。解析する側も、だんだんブラックボックスをただ使うだけになっていることが背景にあります。これらに抗して社会的信頼性を維持しなければいけないというのがその動機であり、特に解析担当者の責任を明示するということです。そういう意味合いで、どのようにモデル化や解析の確かさを評価するかがverificationとvalidationです。本日は、この「検証」と「妥当性確認」の意味をもう少し

明確にするようなお話をしたいと思います。

verificationとvalidationというのは、カジュアルな訳ではほとんど同じ言葉になりますが、ASMEのV&Vの中では明確に区別されています。我々が実際にシミュレーションをするためには、対象となる現実の物理現象を数学モデルとして、一般的には微分方程式という形でモデルを作ります。次に何らかのアルゴリズムを用いて解析プログラムを作ります。解析モデルと称するのは離散化されたパラメータや、あるいは材料物性みたいなものを含んだモデルです。ここで問題になるのが解析結果には、2つのフィルターがかかっているということです。1つ目はモデルとして数学モデルに置き換えた段階でのフィルター、もう1つは数学モデルをプログラミングに落とし込む所のフィルターです。V&Vで最初にやることは、微分方程式を正しく解いていることの検証、verificationです。ここでは数学モデルがちゃんと解析結果で解けているかということだけを問うています。

次に解析結果と実験結果が一致すれば初めて数学モデルが正しかったという評価になり、これをvalidation、妥当性の確認とといいます。これは物理現象に対して正しい方程式を解いているか、つまり方程式が正しいかどうかを証明することです。「正しく問題を解いているか」、「正しい問題を解いているか」というのは、野口先生から教わった表現で、副詞的にかかるか、形容詞的にかかるかという所が、verificationとvalidationの違いだというふうに先生はおっしゃっています。

V&Vのプロセスで一番大事なことは、最初に計画をきちんと立てるといことです。つまり、そのモデルにより何を知りたいのか、何を評価するのかという利用目的の仕様を書くことから始めます。企業でいえば管理者、プロジェクトマネジャー、解析あるいは実験の担当者を含む専門家で十分議論せよという話です。

この仕様に基づいて、どれだけの精度があれば十分かということを決めます。この精度要求に合致するか否かが最終的にV&Vでの合、不合格を決定します。さらに、必要な実験は何か、どの応答を測定するかというようなことにブレイクダウンしていきます。

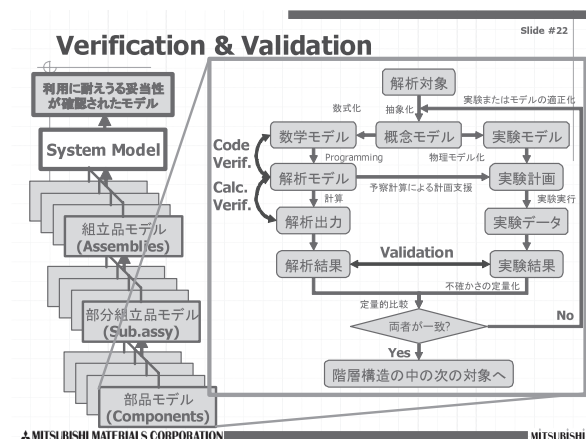


図2 階層化とV&V (瀧澤氏)

V&Vを実際に適用する時の考え方が、階層別の構造化で、まず適切に物理現象を分解します。自動車の衝突を解析するのであれば、自動車というシステムをまず組み立て品に分解し、部分組み立て品、最後は部品に分解します。次にトップダウンで分解した解析モデルを、今度はボトムアップで検証していきます。つまり部品レベルで検証して、順に部分組み立て品レベルに押し上げていきます。最初の部品レベルでは、例えば変形だとか固有振動数、座屈荷重といった基礎的な挙動の検証が中心になり、次の組み立て品では部品単独では表れなかった相互作用、例えば接合部の剛性や摩擦の問題等が検証されます。解析モデルの階層が、上がっていくと、一般的に精度は劣化していきます。ですから突然ある階層の解析をやって、たまたま実際と合っていたからOKですということはやってはいけません。各階層の解析の精度を確認しながら上に上がっていかなくてはならない。各階層でそれぞれのアイテムに対するV&Vがすべて必要になってくるという枠組みです。

個々の階層、例えばこれは部分モデルのボックスビームの圧縮曲げ試験ですが、その検証をどのように進めるかが、V&Vの中身になります。解析対象を抽象化する概念モデルを組み、数式化して数学モデルにするのが左の解析のパスです。数学モデルをプログラミングして解析モデルにし、解析モデルを実際に回して計算することによって解析の出力を得ます。右側は実験のパスで、物理現象をモデル化することによって実験室で試験可能な実験モデルを組むことになります。

基本的には実験と解析は分業してやりなさいといっています、結果がわかっていると解を誘導してしまう可能性があるからです。ただし実験計画法などによって、verificationがある程度済んだ解析モデルを使って、実験計画を支援することは重要です。最後に実験と解析の結果を付き合わせてvalidationをする、こんな流れになります。両者が一致しない場合は実験、または解析モデルの適正化をやり直します。

概念モデルから、数学モデル、数値アルゴリズムをコードに落として、パラメータを利用して解析モデルを作る経路での検証は2つあって、一つはコードがどれだけ正しいかというcode verification、もう一つはcalculation verificationです。コードが正しいかは、解析解、もしくは半解析解と比較していきます。確かさの序列としては、解析解、理論解が一番良く、やむを得ない時は高精度の数値解などを使います。また整合性の試験として質量や運動量、エネルギーが保存されているか、対称のものが対称に解かれているか等のベーシックな所も必ず検証します。これらはコード開発者に課せられる義務です。

それに対して実際に計算をするエンジニアに課せられるのがcalculation verificationであり、これは単純な問題ではなく、解析する具体的な計算モデルに対して適用され、全ての階層での実施が必要になります。

ここで気をつけるべき点は、例えば材料物性を取る

時に、その材料物性を決めるための試験と妥当性の確認試験とをごっちゃにはしてはいけないということです。当然ですが、例えばパラメータを決めるためにやった実験を、解析モデルが再現できるということは、解析モデルの表現能力が確認されただけであって、その妥当性が確認されたわけではありません。入力データを作るための実験と妥当性確認の実験を分離すべきであることが、再三注意されています。

verificationが終わる所まで来ますと、後は実験結果と解析結果を比較します。ここで注意することは、実験データに不確かさがあるのと同様に解析結果にも不確かさがある。そのばらつきを含めたものがセットになった状態で比較し、評価せよということです。

最後に要求精度と解析の精度を評価する時に、当然合格しない場合が出てきます。その時は、モデルの改良あるいは既に一度一致と思われる下位の階層を再検討します。どうしてもそれ以上の精度が出なければ、最初に決めた仕様を変更して解析モデルの適用範囲を限定します。

ASME V&Vには、文書化という言葉が何回も出ており、エビデンスの積み上げを非常に重視しています。V&Vの達成は事実の積み上げによるものですから、必ず文書が必要です。

V&Vのフレームは曼荼羅の中に曼荼羅があるような、ちょっと気の遠くなるようなプロセスです。各プロセスの責任の所在の確認という点は、やはり米国的な文書としました。大学、政府機関、商用、自作によらず、そのコードの果たす社会的な役割に対してcode verificationを必ず実施することが、開発者に要求されます。解析の担当者は、適切な物理パラメータの選定と離散化を行っていることをcalculation verificationによって示さなければならない。実験担当者と解析者は、共にvalidationに取り組んで、その結果に責任を持ち、全体を統括するマネジャーは、V&Vの計画時に要求精度を決める責任を持ちます。

ASME V&Vには、いかにも米国流のメソドロジーというか、実世界をシステマティックにモデル化しようとする非常にまじめな態度が見て取れます。また文書化は他民族国家のコミュニケーションの基本でしょう。

一方、日本ではJSMEの計算力学技術者認定制度もあり、どちらかという解析者の個々の能力を上げていくことが重視されています。V&Vそのものは、分かり易く、もっともな方法ですが、個人レベルでなく、系統立てて組織的に実施されているケースはまれではないか、特にプロジェクトの責任者が明確に精度要求を出しているケースは少ないと思います。日本の場合は、分業化の責任分担が曖昧で、例えば実験と解析、設計と解析がうまくかみ合っていないという話をよく聞きます。ベテランの解析技術者が、匠の世界に入ってしまうと中々ドキュメントが出てこないということもあります。そういう意味では日本と米国がそれぞれ特徴的な動きをしているのかなと私は思いました。

実際の技術者の認識と社会的なコンピュータ解析に

対する幻想に大きな開きがあるのをどうやって埋めていくかが今後の大きな課題と思っています。

パネル討論会

【司会】 パネラーの皆さんは、日本におけるこの分野のパイオニアですが、この問題に取り組むことになったきっかけは、どんな所にあったのでしょうか。

【越塚】 私は原子力で、精度をきっちりやらなくてはいけない部分があり、外挿の問題をどう解決するかを従来から考えていて、ASMEのV&Vを読んだ時に「あっ、これかな」と思ったということがありました。

【吉田】 私共は事業の必要性からISO9001による品質保証をしています。その前ですと、コンピュータの黎明期に、既に計算の誤差の推定をきちんとやられていた平野先生のお弟子さんの福井義成さんが同じ職場にいて、以前から誤差の話に関心を持っていました。

【瀧澤】 最初のきっかけは、お話したように解析の現場での危機感にありました。その後NPOの会合を通して、色々な方が同じような危機感を持っていることを知り、V&Vに注目しました。

【司会】 日本では、これまで解析の品質の問題を組織的に研究していく動きが、中々広がりませんでした。その理由は何かお考えがありますでしょうか。

【白鳥】 難しい問題ですが、大きな組織がバックアップして、標準をつくっていく能力は向こうのほうがあるのかなと、日本はその辺が疎くて、欧米がやって結構行ってしまうと「さあ大変だ」とそれを後追いつているというか……。

これは歴史的にいうと、川井先生などが最先端で若くてやっておられた頃に日米セミナーがあり、日本も米国もFEMの研究能力ではほとんど対等かという意識を私は学生の頃に持ちましたが、その後、ソフトウェアがちゃんと商品になっているのは米国ですね。日本はシステマティックに取り組むことの重要性を認識しないまま、現在は米国にどれだけ使用料を払っているのか。ですから、今回は、計算工学会に限らず計算に携わる関係者が横断的に、解析の品質の問題に取り組んでいくことの必要性を感じている訳です。

【司会】 ここで、計算工学会で企画しているHQC研究分科会の内容を簡単に紹介させていただきます。
(文末にて概要を記載)

【会場質問者A】 欧米では既に始まっているということですが、それはリニアなレベルですか、それともノンリニアに入った話でしょうか。

【越塚】そういうことも超越した「シミュレーションとは」という大上段な所がございます。ただ具体的にやろうとすると非線形の問題は難しいので、概念としてはできていても、いろいろな課題がまだまだこれからあると思います。

【白鳥】そういう意味では越塚先生が言うておられた、小さなモデルで実験と検証をして、実機モデルは解析だけでやるとすると、品質のいいモデルをどう作るかというの、非常に重要な課題になってきます。

【瀧澤】基本的には海外においても枠組みが先行しています。V&Vを実際に使った例として、航空機のキャビンの椅子の設計のような事例は目にしますが、非線形性の高い問題には広がっていないと思います。ASMEでも、今後、具体的な事例を出していくとのことですが、まだ実際には目にしていません。

【会場質問者B】validationと要求精度の問題ですが、ものづくりの現場としては、実測のひずみと計算の差が何%という所よりも、計算工学で壊れないと言った時にどの程度確かかという評価がほしいです。例えば100度という温度が計算された時に121度までは現象としてはあり得ると分かれば設計に生かせます。要求精度が満たされているかどうかよりも、どれだけ正しいかといった所に現場として興味があります。

【瀧澤】V&Vでは実験にばらつきがあるように計算にもばらつきがある、そのばらつきを両方含めて比較しなさい。必ず解析に対してもエラーバーをつけるというようなことがしつこく書いてあります。その辺が言われたことと対応するのかなと思います。

【会場質問者C】ひずみ精度が何%、温度精度が何度という所を突き詰めるとすると、すごく遠い所にターゲットがあるような気がします。

【越塚】タグチメソッドのような技術も発達しているので、V&Vで出てくる誤差評価とか意思決定の部分については、ロバスト設計の技術も取り入れた形でやっていくと生きてくるのかなと思います。

【白鳥】欧米の考え方を、そのまま持ってくる必要はないと思っています。日本のハードのノウハウをうまく取り込んでいけば、ロバストな評価とか、手法の開発ができるのではないかと。計算工学会の先生方がそういうことも研究課題として展開していただくと、産学連携の面白いテーマになってくるはずですよ。

【会場質問者D】数値の精度も大事ですが、変化が合えばいいのではないのでしょうか。何かを変えた時の変化分が実験と計算で合えば相当助かります。そういう微分としてのvalidationとかverificationという考え方も大

事ではないのでしょうか。

【吉田】先ほどのNAFEMSに感度解析がありましたが、あれは確かにそういうものです。設計でタグチメソッドや応答曲面法をFEMと組み合わせて使うことも、最近では盛んになってきていると思います。もう一点、妥当性確認というのは、設計者の要求するマージの中で合っていればいいので、どんぴしゃり合うことを要求していません。精度をどこまで追い求めるかはケース・バイ・ケースです。

【白鳥】V&Vは分野によって随分違うと思います。原子力のような解析によって設計して、実物でのvalidationが難しい場合には、解析自身の品質がすごく重要ですよ。車は衝突解析を用いて設計していますが、出荷前には必ず実験をやりますよね。分野ごとに解析のあり方がすごく多様なので、V&Vの標準モデルを作ったら、それをカスタマイズする必要があります。

【瀧澤】先ほどの解析により傾向がわかれば、それでうまくいってしまうというのは、エキスパートにはそれで十分だと思います。一方で、シミュレーションの裾野が広がっていることに対して、どういう手を打つかというのが多分、V&Vの一面だと思います。

【会場質問者E】私は日本の場合は、最近の教育がいいかどうかは別として、個人の能力でカバーしている。それは悪いことではないと思っています。そういう意味でいくと、V&Vの「基準」という言葉は現段階では時期尚早ではないかと思っています。

【司会】V&Vは解析技術者の常識である、基準化すべきものではないというご意見はよく伺います。

【越塚】ISOにしても、あちらはものづくりを技術基準で支配しようみたいな傾向があって、遅れを取ってはいけないのではないかと。むしろ日本が強い部分について積極的に海外に発信するぐらいの意気込みが必要ではないかと思っています。

【吉田】ドイツなどでは事故が起きた時に裁判所に呼び出されるのはエンジニアです。その時、設計が正しいことを説明する手段としてもISO9001のような基準は意味があります。これから外国へ解析により設計された日本の製品が流れていく時に、その辺をきっちり押さえておかないとまずいということもあります。

【白鳥】機械学会では今、発電関係の基準を産業界の協力を得て非常にアグレッシブにやっています。日本は特に耐震など非常に高い技術を持っていますが、それがASME基準になり、日本がそれを買って仕事をするなんてシナリオは避けたいので、やはり独自の基準を作って国際的に発信していくべきです。

解析の基準は、日本はスタートが5年ぐらい遅く、今後、欧米のものが国際標準になっていきます。日本の技術者が不利な戦いを強いられないようにするためには、きちんとフォローして欧米と同じレベルの考え方、概念でアプローチしていかないとはいけません。欧米と違う独自の基準をここで作りましょうというのではなく、日本の個性を生かしながらコンパチブルな標準化を目指すべきであると思います。

【会場質問者E】私が言いたかったのは、ASMEのV&VもNAFEMSもまだ何となくぼんやりしており、基準という言葉は早いのではという意味です。ただし標準化をゴールとして、どんどん研究を進めるべきです。

【司会】最後にうまくまとめていただきありがとうございました。研究会の活動は今後、広く学会ホームページ、講演会等で報告していきますので、ぜひご支援ください。ご清聴ありがとうございました。

パネラー紹介

白鳥 正樹(しらとり まさき)
 横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター特任教授、1942年東京都生まれ。東京大学大学院工学研究科精密機械工学専攻博士課程修了、横浜国立大学講師、同助教授を経て、1984年同教授、2006年より附属図書館長、2008年3月定年退職、同4月より同大学名誉教授、現職を兼務。専門は材料力学、材料強度学、計算力学など。日本機械学会フェロー、前日本機械学会会長。

リーリサーチセンタ(現CTC)入社、CAE系応用システム開発に従事。日本計算工学会理事。

HQC (High Quality Computing) 研究分科会の紹介

正式名:「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、主催:日本計算工学会
 主 査:白鳥正樹、副主査:越塚誠一、高野直樹(慶応大)
 幹 事:吉田有一郎、中村均
 期 間:2009年6月~2011年5月(2年間)
 趣 旨:計算力学、CAEに取り組む技術者・研究者の産業横断的な学会である日本計算工学会に本研究分科会を設置し、本課題に対する国内外の動向を調査すると共に、方法論の確立に向けて取り組むべき課題をまとめる。

越塚 誠一(こしづか せいいち)
 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻教授、1962年東京都生まれ。東京大学大学院工学系研究科原子力工学専攻修士課程修了。東京大学助手、講師、助教授を経て、2004年教授。専門は数値流体力学、計算力学、粒子法、物理ベースCG、原子炉工学。日本計算工学会理事。

内 容:1) 海外動向の調査 - NAFEMS, ISO, ASME等の動向調査、2) 国内動向の調査 - 企業での解析の品質保証への取り組みおよび国内における標準化等の調査、3) 日本として取り組むべき課題の検討 - 解析の品質マネジメントあるいは信頼性確保に関わるガイドライン等の検討、4) 学術面で取り組むべき研究課題の指針等の検討

吉田 有一郎(よしだ ゆういちろう)
 東芝インフォメーションシステムズ(株)、CAEスペシャリスト・プロフェッションングセクティブ。1981年横浜国立大学大学院機械工学専攻修了、1987年東京大学工学部講師、1989年(株)東芝総合情報システム部。電気系・機械系のCAE業務に従事。日本機械学会フェロー。

委 員: JNES、JAEA、東電、東芝、日立、トヨタ、日産、新日鉄、本田技研、竹中工務店、TEPSYS、東芝IS、JSOL、FTR、CTC、横国大、東大、法政大、慶応大、芝浦工大(順不同略称、8月現在23名)

瀧澤 英男(たきざわ ひでお)
 三菱マテリアル(株)中央研究所金属加工プロセス開発センター、主任研究員。1993年山梨大学大学院修士課程精密工学専攻修了、入社後、塑性加工(鍛造・圧延)プロセスの変形解析および工程設計技術の開発に従事。2007年工学博士。NPO非線形CAE協会理事。

状 況: 6月28日に第一回会合を東大本郷で開催。NAFEMS等の先行基準の状況を鑑み、国内向け指針案作成等、品質マネジメントに重きを置いた活動を進めている。

中村 均(なかむら ひとし)
 伊藤忠テクノソリューションズ(株)(CTC)科学システム事業部、技術企画担当部長。1981年東北大学大学院機械工学科修了、IHI原子力事業部を経て1987年センチュ

問い合わせ先: 日本計算工学会事務局
 Tel: 03-3868-8957 E-mail: office@jcses.org

編集担当: 第14回計算工学講演会実行委員
 中村 均(伊藤忠テクノソリューションズ(株))