

第15回計算工学講演会、「シミュレーションの品質保証と標準化に向けた取り組み」
～ HQC研究分科会活動報告、OS27

シミュレーションのV&Vと品質保証

ASME,NAFEMおよび国内の取り組み

2010年5月26日

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
中村 均

目次

1. 背景と国内外動向
2. V&Vとは:それぞれの定義
3. ASME V&V 10の概略
4. ASME V&V 20の概略
5. NAFEMS SAFESAの概略
6. 日本計算工学会の取り組み
7. まとめ

1. 背景と国内外動向

- シミュレーションの品質保証が重視される背景
 - シミュレーション技術の進歩に伴い、実験の代替手段としてCAEを使用する動きが急速に進んでいる。
 - シミュレーションの精度を保証する仕組み、技術が必要
 - **精度を確保したシミュレーションの実用化 → 産業競争力に直接つながる。**
 - 計算技術者の底辺が広がり、計算業務の品質保証システムを確立する必要性に迫られている。
- ASMEを中心にV&Vの理論構築および標準整備が精力的に進行中
 - ASME V&V 10：固体力学 / V&V 20：流体力学
 - シミュレーションの精度の定量評価技術の確立
- 英NAFEMSではISO9001準拠の計算業務の品質保証規格の整備が進む。
 - QSS001, SAFESA等：計算業務に対する国際的な標準の位置づけ
 - 信頼性を確保したCAE解析実施手順、V&V的な標準手順による結果の保守性確保
 - V&Vの標準化では、ASMEとNAFEMSが連携
- 日本：原子力学会、計算工学会等で標準化の取り組みが始まる。
 - 機械学会における計算力学技術者認定は世界に先行

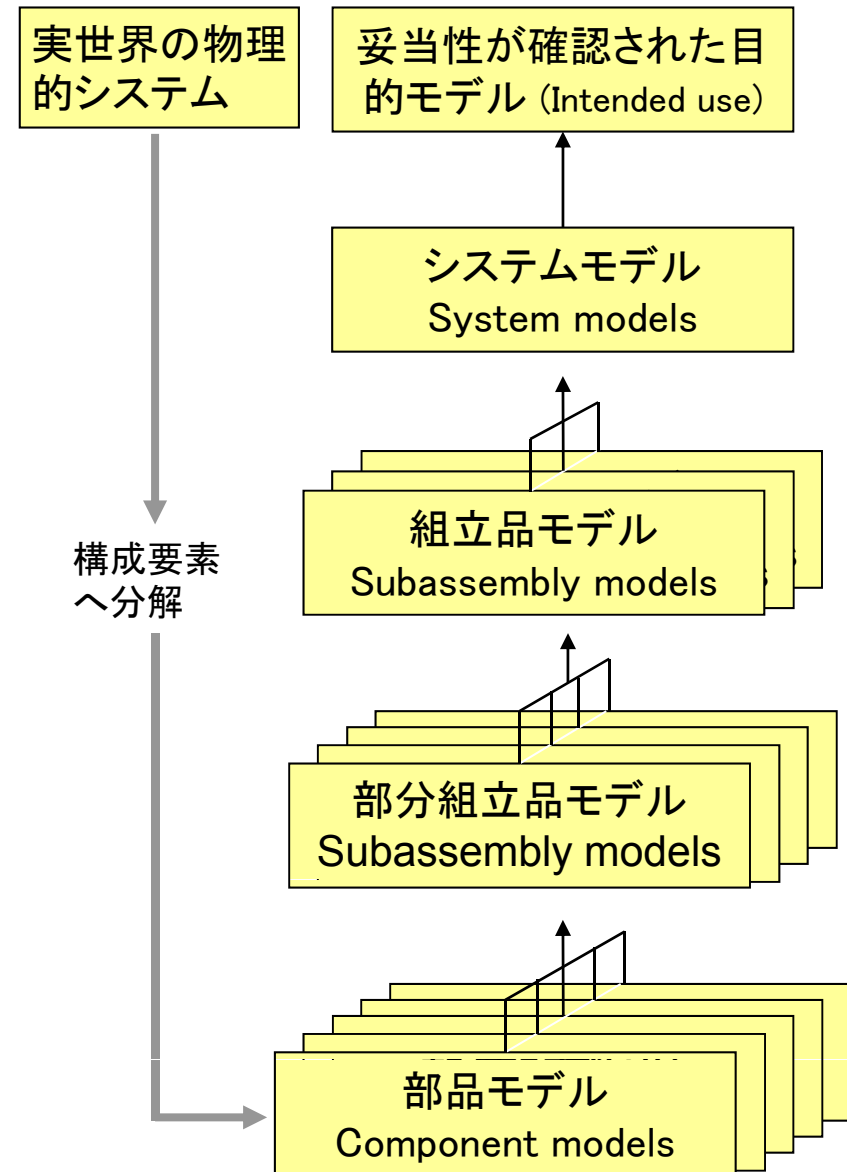
2. V&Vとは : それぞれの定義

- Verification (検証)とValidation(妥当性確認)とは : 一般的に
 - 検証 : 仕様(設計、計画)通りの成果物が得られたことの自己完結型の確認
 - 妥当性確認 : 実際に使えるかどうかの独立した視点・方法による確認
 - V&V : 成果物の品質を確保するための基本的プロセス
- ISO9001(7.3.5節)でのV&V
 - 検証 : 設計・開発のアウトプットが、インプットの要求事項を満たしていることの確認
 - 妥当性確認 : 製品が、意図した用途の要求事項を満たしていることの確認
- NAFEMS QSS001でのV&V
 - 検証 : ISO9001と同じ
 - 妥当性確認 : シミュレーション製品が、意図した工学的用途に適用できることの確認
 - 独立した手段による: 物理的試験、運転経験、破損事例の調査、代替のシミュレーション等
- ASME V&VでのV&V
 - 検証 : 計画したとおりに計算コード&計算モデルが正しく作られたことの確認
 - 妥当性確認 : 計算モデルが現実世界を正確に表現している度合いを確認
 - 精度の定量評価を含む

3. ASME V&V 10 の概略

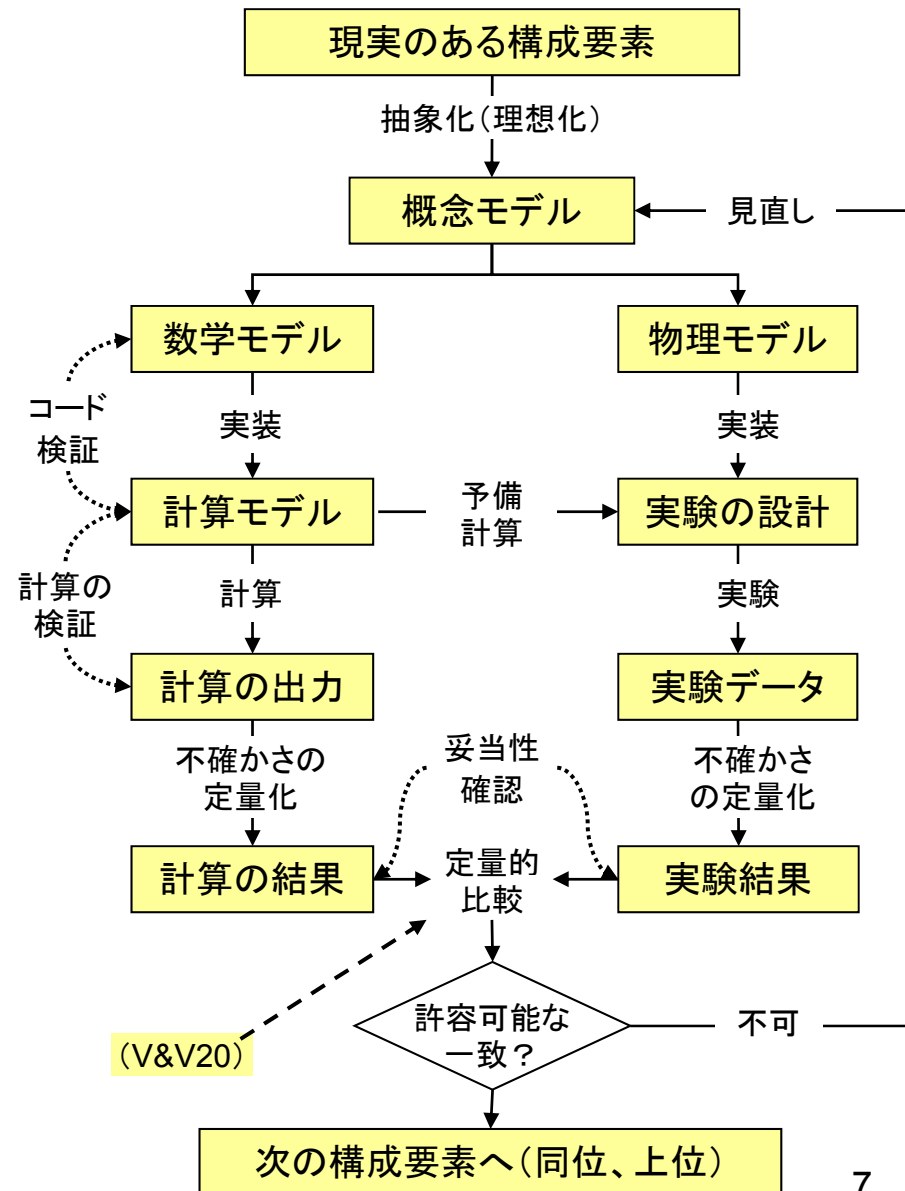
3.1 ASME V&V 10 : ①現実の対象物の階層構造化

- “Hierarchical structure of Physical Systems”
 - 物理的对象物を階層構造の構成要素へ
 - 対象システム／組立品／部分組立品
／．．／部品
- 階層構造モデルの構築とV&V
 - 最下層から構成要素の重要な物理現象を特定し記述：概念モデル
 - 理想化のための仮定を明確にすること。
 - 構成要素の計算モデルの構築
 - 概念モデル → 数学モデル → 計算モデル
 - 各計算モデルのV&Vによる確認
 - 上位モデルでは相互作用発生
 - 組立、接触、摩擦等
 - 最下層からの計算モデルの積上げによってのみ信頼度のある目的モデルを構築可
 - 上位階層でいきなり計算モデルを構築しても、信頼度低い。



3.2 ASME V&V 10:②V&Vによる計算モデルの確証

- 目的:各層の計算モデルの予測能力の評価
- 概念モデル = 理想化
 - (対象領域、物理プロセス、入力&出力)
- 計算モデルの経路 (左側経路)
 - 数学モデル : プログラム実装(FEM等)
 - コード検証:理論、半解析解等との比較
 - 計算の検証:計算モデルの精度の検証
 - 分割数、収束度合い等
 - 計算結果の不確かさの定量化
 - 入力やモデルの不確かさ→結果の不確かさ
- 実験解析の経路 (右側経路)
 - 目的:計算モデルの精度評価に必要な情報を提供
 - 予備計算の推奨、計測位置、測定法等の確認
 - 計算モデルのチューニングに実験結果を用いるのは不可 ← キャリブレーション
 - 実験結果の不確かさの定量化
 - 測定誤差、製品のばらつき、組立の差異
- 妥当性確認 : 予測精度の評価
 - 計算と実験結果の定量的比較
 - 問題あれば、一連のモデルを見直し



4. ASME V&V 20の概略

4.1 ASME V&V 20 - 2009の概要

- “Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer” 「計算流体力学および伝熱における検証と妥当性確認の標準」
- 目的: CFDのV&Vプロセスにおける検証方法と妥当性確認の精度を定量化する標準手順の明示
- 検証 : コード検証と解 (Solution)の検証
 - コード検証: ベンチマーク問題、解析解に対する収束性(誤差)の評価
 - 解の検証: 問題とする計算モデルの収束性(誤差)の評価、計算グリッドの違いによる収束性試験の実施
- 妥当性確認 : 計算結果と実験結果の定量的比較
 - 計算結果Sと実験結果Dの差E : 妥当性確認の誤差
 - Eの不確かさ(誤差バー) u_{val} : 妥当性確認の不確かさ
 - 理想化による誤差 δ_{model} の範囲を推定
$$E - u_{val} \leq \delta_{model} \leq E + u_{val}$$
 - 理想化による誤差 δ_{model} : 実現象とシミュレーションとの間の本質的な違い

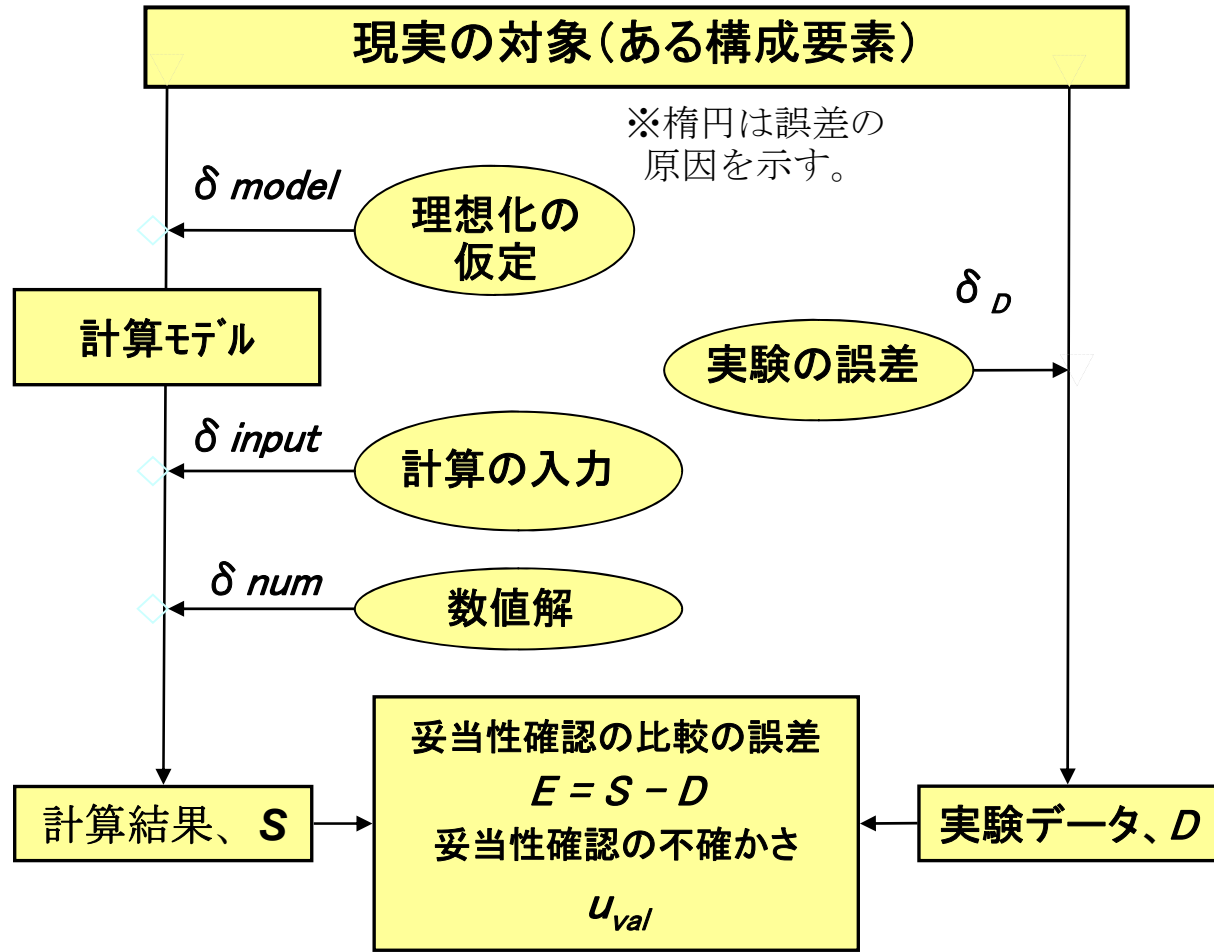
4.2 V&V 20: 妥当性確認の精度の評価

u : 不確かさ、測定(計算)値
 に対して「真の値」が存在する範
 囲。信頼区間(= error bar)

u_{input} : 入力パラメータのば
 らつきによる計算結果Sの不確
 かさ。1)感度解析 2)モンテ
 カルロ法等により算出

u_{num} : 数値計算に伴う不
 確かさ。ベンチマーク解析との
 比較 2)計算格子依存性試験
 等々

u_D : 実験、計測における不
 確かさ。計測データの統計処理
 ほか



$$E = \delta_{model} + (\delta_{num} + \delta_{input} - \delta_D)$$

$$u_{val} = \sqrt{u_{num}^2 + u_{input}^2 + u_D^2}$$

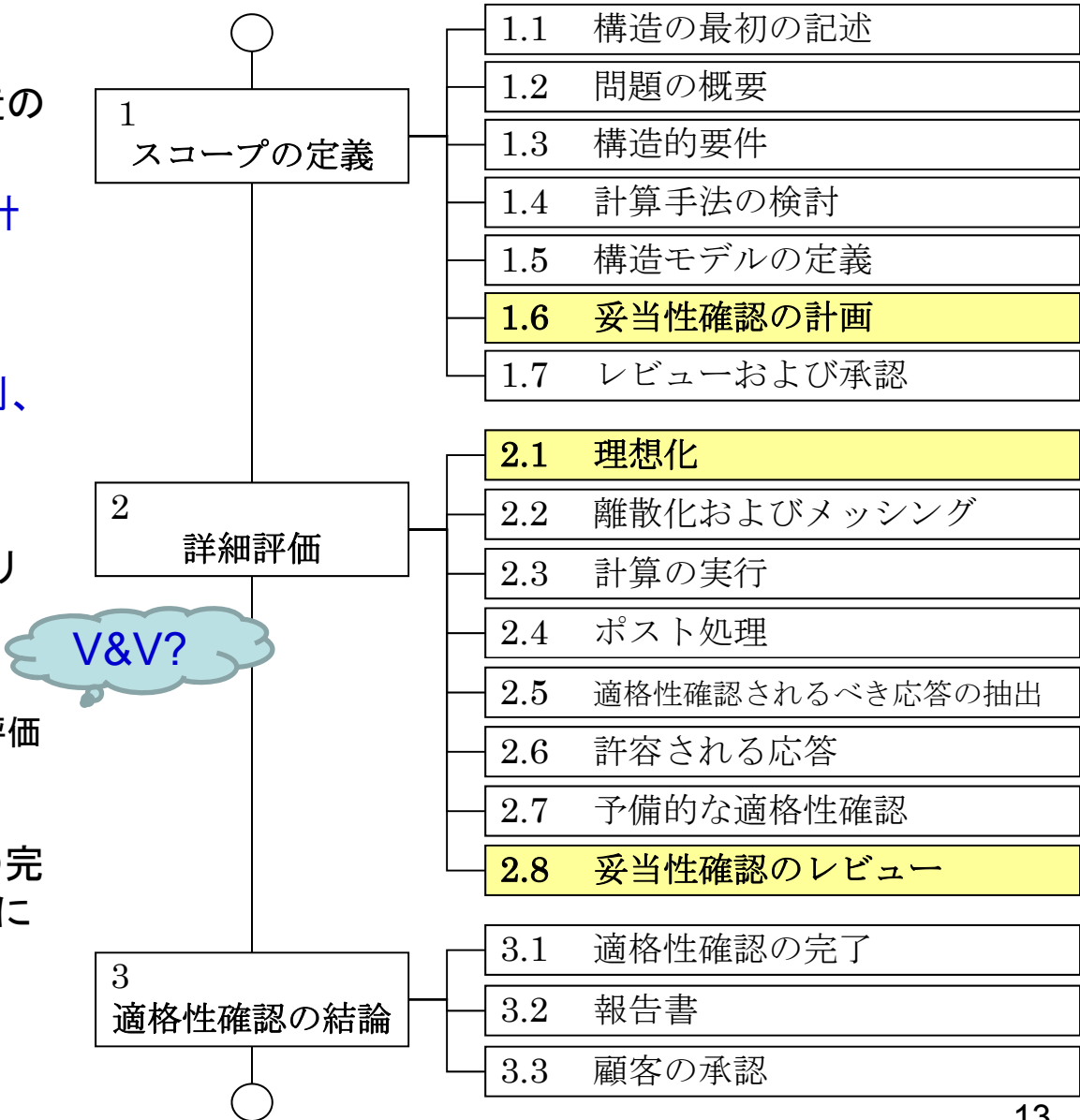
5. NAFEMS SAFESAの概略

5.1 NAFEMS SAFESAの概要

- SAFESA(SAFE Structural Analysis)
 - 英国NAFEMSによる開発されたISO9001に基づいた構造解析の品質マネジメントのガイドライン 1993年～
- 開発の背景
 - 設計環境において増加するFEMへの依存 & 確証されていない計算結果の存在
 - 構造物を計算だけを使って設計、適格性確認してよいか?
 - ツールの進歩が、計算過程の追跡、監査を難しくしている。 → 逸話の増加
- 目的 : 構造物の適格性確認を支援するFEMの使用に対する標準手法の提供
 - FEMによる適格性確認のための論理展開のテンプレートの提供
 - 適格性確認(Qualification)* : 要求される構造の性能基準を満たすことの確証
 - *)「規定要求事項を満たす能力を実証するプロセス」 対訳ISO9001:2008
- ねらい : FEM解析の誤差を最小化して適格性確認を行なうための計算手順の形式化
 - 計算技術者が誤差を把握して、適格性確認に対する保守性を確保して計算を行うとの意味合いが強い。誤差を扱う現実的アプローチを提供

5.2 SAFESAの適格性確認の手順

- 段階1 – スコープの定義
 - 適格性確認のクライテリア、構造の境界条件の定義
 - 計算結果の妥当性確認方法の計画
- 段階2 – 詳細評価
 - 理想化過程において誤差の識別、評価
 - スコープに従った計算
 - 計算結果を適格性確認クライテリアと比較し予備的な適格性確認
 - 計算結果の妥当性を確認
 - 計算モデルを用いた追跡誤差評価
- 段階3 – 適格性確認の結論
 - 計算結果を許容クライテリアとの完全な比較と、構造の健全性評価に対する結論を記述



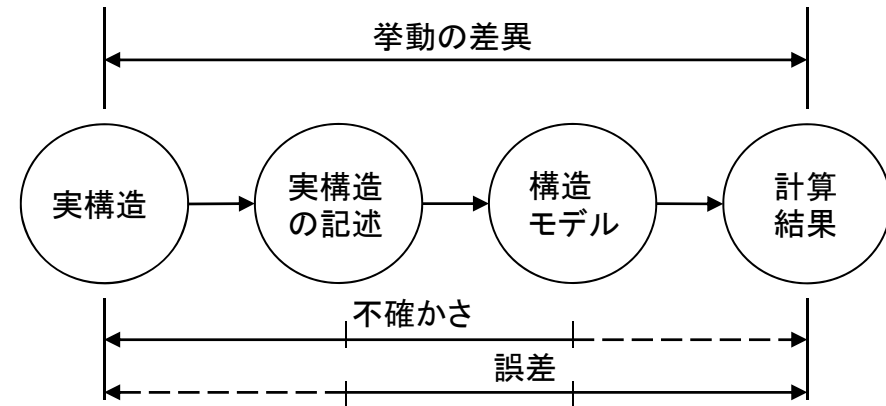
5.3 誤差の取り扱い

- 誤差処理の目的

- 適格性確認のために許容できるレベルまで、誤差を減少させる。

- 不確かさと誤差

- 構造物の物理的記述における不確かさが、計算との差の主因
 - 自然現象の不確かさ
 - 計測にともなう不確かさ
 - 知識不足からの不確かさ



不確かさと誤差

- 理想化プロセス


- 実構造を記述し、構造モデルを作成する過程 / 不確かさを確定させていくプロセス

- 誤差処理の基本的な考え方


- 理想化誤差を重視 / 理想化段階で誤差を識別・分析・処理
- 計算対象を特徴物(feature)、さらに構造要素(primitive)に分解
- 構造要素は、良好に定義された領域、境界、荷重条件および材料特性を持つ。
- 構造要素毎に誤差要因を分析し定量評価、必要ならば理想化の修正を加えていく。



5.4 理想化誤差の処理方法

- 経験に基づくルール
 - 類似の構造の適格性確認の経験、事例からの判断。計算結果あるいは試験結果のDBを参照
- 見通し計算 (scoping calculation)
 - 簡易モデルによる不確かさの推定・定量化。例：周囲の応力、境界の剛性の評価
- 実験結果との比較
 - 直接的で、真に独立な誤差の評価を行える。
 - 別の誤差の原因(試験方法、計測誤差)にもなりうる。／一般に高価で制約あり。
- 階層的モデリング(モデルの改良) ← 追跡誤差評価にて実施
 - ある理想化レベルのモデルでの計算と、さらに詳細レベルのモデルの計算の誤差を評価、モデルを改良。例：シェルモデル→ソリッドモデルの比較し、誤差を評価
- 感度解析 ← 追跡誤差評価にて実施 
 - 特定の入力パラメータの変化に対する出力パラメータへの影響度を求める解析
 - 特定の理想化手法の影響評価、妥当性の評価が目的。
 - 板厚等パラメータの変化に対する感度評価と比べ、より一般化された解釈
 - 例：境界条件を固定したり、開放したりすることにより目的量の変化を見る。

5.5 ASME V&VとSAFESAの比較

- ASME V&V とSAFESAの比較
 - ASME V&Vの「計算の信頼性を確保するための論理的な枠組みを提供する」という役割は同様
 - ASME V&Vでは、モデルの利用目的により要求精度を決めることを要求。SAFESAでのモデルの利用目的は適格性確認であり、このための保守性を含む精度確保を要求。
 - ASMEで実世界の対象をシステムレベルから部品レベルまで分解し、下位レベルからモデルのV&Vを行なっていく手法は、SAFESAの理想化手順&誤差評価の手法と類似。
 - ASMEではValidation(妥当性確認)を「実験結果との比較により数値計算結果の精度を評価する」とあり、厳密性が高い。
 - 原則、妥当性確認のための実験が必要。
 - SAFESAでは、適格性確認ができればよいので、誤差評価において保守性が確保できることが証明できればよい。
- 設計で実務的にV&Vを行なうための手法としてSAFESAを利用できる。
 - SAFESAは、熟達した計算技術者ならば当然行なう考察および計算手順を、構造化して文書化したもの。
 - 限界設計のような実験を代替する計算の品質を確証するためには、誤差の定量化が必要になり、ASMEの厳密な手法の適用が望ましい。

6. 日本計算工学会の取り組み

HQC研究分科会:

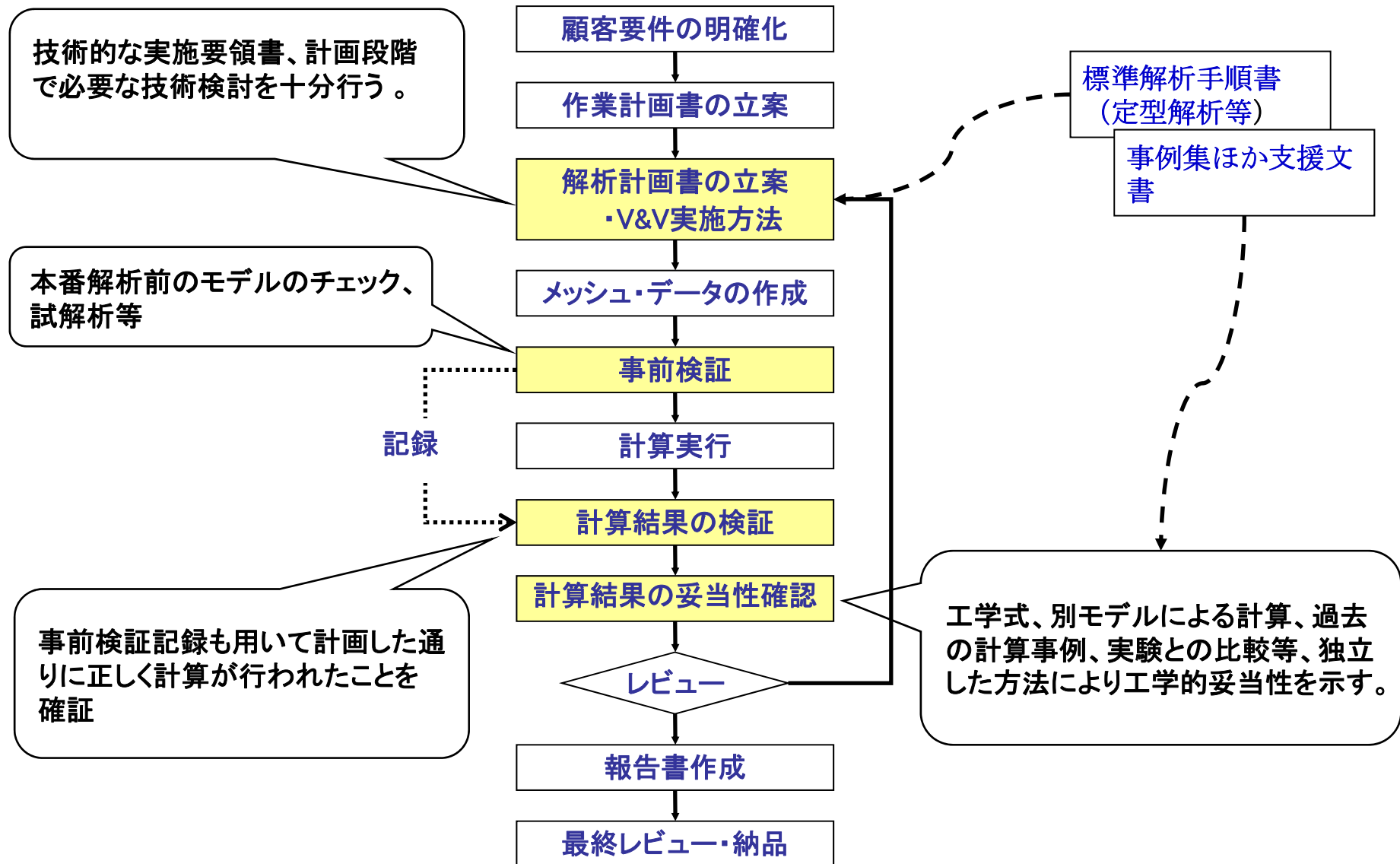
ISO9001準拠の計算業務における品質マニュアル

& 標準手順書

6.1 V&Vの解釈

- **Verification (検証)とValidation(妥当性確認)とは : ISO9001**
 - 検証 : 仕様通りの成果物が得られたことの自己完結型の確認
 - 妥当性確認 : 実際に使えるかどうかの独立した方法による確認
 - **NAFEMS QSS001**
 - 検証 : ISO9001と同じ
 - 妥当性確認 : 意図した工学的用途に適用できることの確認
 - **ASME V&V**
 - 検証 : 計算コード&計算モデルが正しく作られたことの確認
 - 妥当性確認 : 現実世界の表現度の定量評価(実験との比較)
 - **日本計算工学会 標準手順書(ドラフト初版)**
 - 検証 : 仕様に対して正しく解析が行なわれたことを確認
 - 妥当性確認 : 顧客用途に適用できること、工学的妥当性の確認
-

6.2 標準手順書(案)での解析手順



7. まとめと所感

- ASME: V&Vの理論構築および標準整備が精力的に進行中
 - V&V 10 :固体力学／V&V 20:流体力学／V&V 30:原子力／V&V 40:医療機器
 - 計算の信頼性を確保するための論理的な枠組み、標準手順を提供
 - 計算の精度の定量評価技術の確立
 - 精度を保証した計算技術の確立 → 産業競争力に直接つながる。
 - 計算による製品の開発・品質保証に近づく。ファブレスのビジネスモデル？
- NAFEMS: ISO9001準拠の計算業務の品質保証標準の整備が進む
 - QSS001: ISO9001 準拠の品質保証要求事項の国際標準
 - SAFESA : 計算業務の品質マニュアル・手順書
 - 信頼性を確保したCAE解析実施手順、V&V的な標準手順による結果の保守性確保
 - V&Vでは、ASMEとNAFEMSが連携。ASME標準を導入
- 日本: 原子力学会、計算工学会等で標準化の取り組みが始まる。
 - 機械学会 : 計算力学技術者認定は世界に先行
 - 原子力学会 : V&Vの学会基準(作成中)
 - 日本計算工学会: 品質マニュアル&標準手順書(作成中) / V&V(固体力学系)
 - V&Vによる計算技術(先端) & ISO準拠品質マネジメント(足元)、双方の確立重要

付録1 HQC研究分科会の紹介

- 「シミュレーションの品質・信頼性に関する調査・研究」研究分科会 : **HQC (High Quality Computing)** : 日本計算工学会主催
- 趣旨・目的
 - 国内外動向調査 : NAFEMS, ASME, 国内産業界の取り組み状況
 - 標準やガイドラインの整備
- 体制・期間
 - 主査: 白鳥正樹(横浜国大)、副主査: 越塚誠一(東京大学)、高野直樹(慶応義塾大学)、幹事: 吉田有一郎(東芝IS)、中村均(伊藤忠テクノソリューションズ)
 - 国機関、車・電機・原子力・土木・鉄鋼のメーカ、大学、ソフト会社の専門委員
 - 平成21年(2009年)6月～平成23年(2011年)6月(予定)
 - 原子力学会、計算科学技術部会「シミュレーションの信頼性W/G」等との連携
- **2010年度の活動予定**
 - 計算業務の品質マネジメントのガイドライン草案の作成
 - ISO9001、QSS001準拠の計算業務における品質マニュアル&標準手順書
 - 品質保証・V&Vに係わる講演会
 - 2010年5月、計算工学講演会(九州大学)
 - 2010年7月8日、安全シンポジウム(日本学術会議)

付録2 今後の講演会の予定

- 安全工学シンポジウム2010

- 開催日 : 2010年7月8日(木)
- 会場 : 日本学術会議講堂・会議室
- 講演内容
 1. 挨拶・趣旨説明 白鳥 正樹 横浜国立大学大学院
 2. 「ASME V&Vの概要」高野 直樹 慶應義塾大学
 3. 「構造解析の品質保証と標準化への取り組み-NAFEMS QSS」吉田 有一郎 東芝インフォメーションシステムズ(株)
 4. 「原子力設計とV&Vガイド」堀田 亮年 (株)テプコシステムズ
 5. 「シミュレーションのV&Vと品質保証」 中村均 伊藤忠テクノソリューションズ(株)

- 日本機械学会 年次総会

- 開催日 : 2010年9月7日
- 会場 : 名古屋工業大学