

ASME V&V40に基づいた 木製椅子の剛性評価に対するV&V

V&V Examples for Stiffness Simulations for Wooden Chair based on ASME V&V 40

松井 和己¹⁾, 倉田 和幸²⁾, 都筑 新³⁾, 三浦 孝広⁴⁾, 杉山 裕文⁵⁾,
山本 剛大⁶⁾, 栗田 智香子¹⁾, 渡邊 大⁷⁾, 山田貴博¹⁾

MATSUI Kazumi, KURATA Kazuyuki, TSUZUKI Arata, MIURA Takahiro, SUGIYAMA Hirofumi,
YAMAMOTO Takeki, NATSUMEDA Chikako, WATANABE Dai & YAMADA Takahiro

1) 横浜国立大学大学院環境情報学府 (E-mail: kzm@ynu.ac.jp)

2) テルモ株式会社 (Email: Kazuyuki_Kurata@terumo.co.jp)

3) ダッソー・システムズ株式会社 (E-mail: arata.tsuzuki@3ds.com)

4) サイバネットシステム株式会社 (E-mail: t-miura@cybernet.co.jp)

5) 山梨大学大学院総合研究部 (E-mail: hirofumis@yamanashi.ac.jp)

6) 広島大学大学院先進理工系科学研究科 (E-mail: takeki@hiroshima-u.ac.jp)

7) 芝浦工業大学システム理工学部 (E-mail: dai-wata@shibaura-it.ac.jp)

In this study, we introduce an example for establishing the credibility goals for a computational model related to typical mechanical structures based on ASME V&V-40. As shown in the documents, the risk-informed credibility assessment concept is a key feature in V&V-40 comparing with the conventional ones (V&V-10 and -20). This paper aimed to illustrate how establishing risk-informed credibility may be put into practice, with some objectives. a) present examples that demonstrate model risk and credibility approaches that are consistent with this framework, and b) illustrate how the gradations for each credibility factor can be adapted for this example, mechanical evaluation of wooden chairs.

Key Words : V&V examples, Risk informed credibility, Mechanical simulations

1. はじめに

日本計算工学会のHQC研究会活動や、それにもとづいて発行されている学会標準^[1~3]に代表されるように、工学分野におけるシミュレーション結果の品質保証については国内外で活発に議論されている。このような活動の根底にある考え方たがV&V (Verification (検証) and Validation (妥当性確認))と呼ばれるものであり、数値シミュレーションに特化したV&Vの規格として最も広く知られているのがASME V&V^[4~6]である。AIAAやNAFEMS、土木学会なども同様の規格類を提示しているが、基本的な概念はほぼ同様であり、シミュレーションモデルや解析手法が適切であるかどうかを議論する基本的な枠組みが提示されている。しかしながら、V&Vに関する記述は概念的であることが多い、一般の技術者が通常のシミュレーション業務にどのように適用していくのかという問題に直面することが多い。

前報^[7]において筆者らは、ASME V&V-40にもとづいて、シミュレーションの信頼性評価にリスクマネジメント手法を用いるための概要を報告した。市販の木材で作成する簡単な椅子に対する強度・剛性評価を目的として、シミュレーションに生じるリスクを分析したうえで、モデルに求められるV&Vレベルを決定した。本稿では、最終

的な椅子のシミュレーションの品質を担保するために、これを階層構造に分解し、それぞれの段階においてV&V-40のプロセスを適用する手順を紹介する。

2. 木工椅子に対する強度評価

(1) 概要とQI (Question of Interest)

本稿では、Fig.1(a)に示すようなホワイトウッドなどの一般的な木材で製作する椅子を取りあげ、その強度評価に利用する数値シミュレーションモデルの信頼性を評価する。一般的な設計プロセスを念頭においてV&Vでは、PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table)を作成するなどして、複数のQIを設定することになるが、ここではJIS S1203:1998で規定される座面の強度試験をクリアすることを目指して、「通常条件下において使用中に壊れないこと」をQIに設定する。また、JIS規格を引用して、最終製品の強度を評価するプロセスにおける許容差をそれぞれ、力±5%，質量±0.5%，寸法±0.5mmと規定する。

(2) 強度評価の方針とCOU (Context of Use)

設計案が十分な強度を有していることを汎用CAEソフトによる有限要素シミュレーションを実施して、天板などの構造部材に作用する最大応力を評価する。これらのシミュレーション結果に基づいて最終設計案を決定したのち、最終案の試作品に対してJIS S 1203に基づく強度試

験を実施して設計案の合否を確認する。したがって、本稿におけるV&Vはこれらの強度評価に用いる有限要素モデル・シミュレーション（以降、シミュレーションモデル）を対象とする。なお、使用木材の材料特性（弾性特性や破壊強度）は、シミュレーションモデルのV&Vに先立って実施する材料試験で評価する。実際には、シミュレーションモデルから得られた結果（応力値）に安全率を乗じたものと材料の基準強度を比較することになる。

(3) モデルリスク

ASME-V&V40の特徴はシミュレーションモデルの影響（Model Influence）と、間違った判断によるリスク（Decision Consequence）からモデルリスクを評価してシミュレーションモデルに求めるV&Vレベルを決定する点にある。つまり、ミュレーション結果が意志決定に与える影響と、間違った判断がどのような結果につながるのかというリスクをモデルリスクとして評価する。

a) シミュレーションモデルの影響

ここでの意志決定は複数の設計案から最終案を決定することに対応するが、強度評価は基準を満たすかどうかの○×判定となることが多い。基準を満たさない設計案は確実に排除しなければならないこと、ならびに最終設計案の強度評価を試作品に対して実施する予定であることから、影響度を以下の3段階に分類することを想定したときの「MEDIUM」に設定する。

low: 安全評価にはほとんど影響しない

MEDIUM: 影響はあるものの致命的ではない

high: 安全評価に決定的な影響を及ぼす

b) 間違った結論によるリスク

シミュレーション結果に基づく工学的判断に誤りがあった場合に想定されるリスクを以下の3段階に分類する。いま検討している強度限界は椅子の天板が曲げ変形によって破壊する状況を想定しているため、ここで想定すべき誤った判断は強度不足であるにもかかわらず基準を満たすと判定することに対応する。対象物は一般的な状況下で使用されることを想定しているため、使用中に天板が破壊することは使用者に何らかの怪我を負わせることにつながる現象である。最終案に対する試験によって回避できる可能性はあるものの、Model Influenceを評価する際に「試作テストを実施すること」を理由にリスクレベルを一段階下げたことから、さらにここでも同様の理由でリスクレベルを下げるべきではないと判断して「HIGH」と定義する。

low: 使用者にも機能にも影響しない

medium: 椅子としての機能は喪失するものの使用者に危害は及ぼさない

HIGH: 使用者に怪我をさせる可能性がある

これまでのリスク分析から、シミュレーションモデルのリスクは「MEDIUM-HIGH」という評価となり、Model Risk Matrix（文献6、Fig. B-2.1.4.2-1）におけるレベル4相

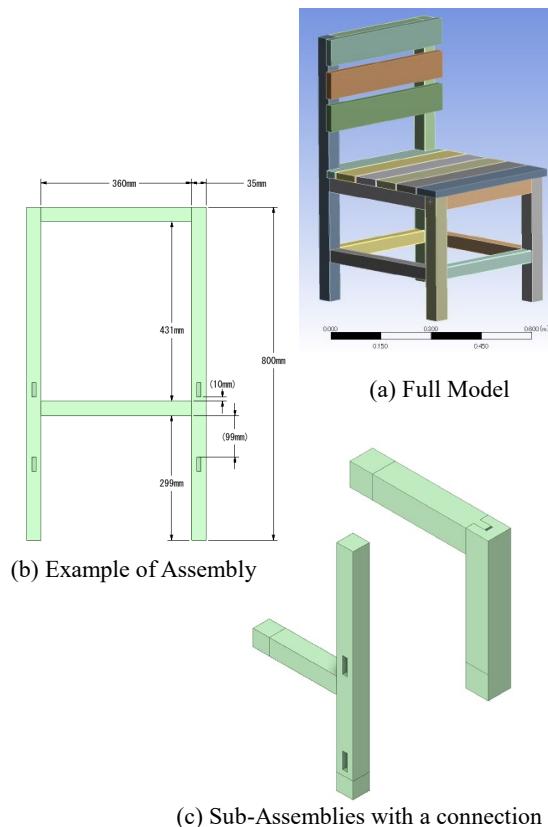


Fig.1 Wooden Chair and its Breakdown Structures

当だと判断する。さらに、このリスクレベルとValidation Metric（文献6、Tab. B-2.1.4.2-1）に基づいて、以下のようなValidation Metricを設定する。これらの指標はV&V-40の例題Bに対して定義されたものであるため、本件への適用することの妥当性は事前に検討した（他のリスクレベルに対応するValidation Metricは文献6を参照）。

Validation Metric: (リスクレベル4): 実験もしくはシミュレーションのいずれかにおいて不確かさの検討を要求するものとするが、その対象は代表的なものに限定してよく、ばらつきの統計学的な分析までは求めない。なお、実験とシミュレーション結果の差は5%よりも小さいレベルとする。

3. モデルの階層化とV&V

ASME V&Vでは完成品をアセンブリ、サブアセンブリ、部品、材料試験という階層構造に分解し、各層で設定したシミュレーションモデルに対してV&Vを実施するボトムアップアプローチ（Bottom up Approach）が推奨されている。本研究では、完成品の椅子全体をフルモデル、骨組み構造として考えられる一部の枠組構造をアセンブリ、接合部（ほぞ接ぎもしくは三方接ぎ）をひとつだけ含むものをサブアセンブリ、それらを構成する部材、構成材料のような階層構造を設定する。

このとき、椅子全体を構成するすべての部品や接合部、材料まで落とし込み（Breakdown Structures），それらひとつひとつにV&Vを実施することが最も厳格な手順である。

しかしながら、ここで対象とする木工椅子は類似の構造部材がいくつか存在するため、代表的な構造部材についてのみV&Vを実施して全体の工数を削減する。その目的を達成するために以下のような「あたりづけのシミュレーション」を実施して部材や接合部の影響度を評価する。

このシミュレーションの概要を以下のように定義する。

- RI (Reality of Interest):

JISに規定された強度試験（座面中央に載荷した際に、椅子を構成する各部材の重要度を知りたい）。

- COU (Context of Use):

椅子全体に規定の荷重を作成させたときに、部材や接合部に生じる内力を評価して、内力のパターンや、パターンごとの重要度ランクを作成する。

- シミュレーションモデルの影響: LOW

木製椅子を構成する部材間での相対的な重要度を評価するためのものであるため、「安全評価にはほとんど影響しない」と判断した。

- 間違った結論によるリスク: LOW

あくまでも事前準備のためのシミュレーションと位置づけているので、「使用者にも機能にも影響しない」と判断した。

- Validation Metric: リスクレベル1

上記のリスク分析から、あたりづけのためのシミュレーションのリスクは「LOW-LOW」という評価であり、Model Risk Matrixにおけるレベル1相当であると判断して、Validation Metricを次のように設定する。

Validation Metric: (リスクレベル1)：目視などによる比較でよい一致が見られること。

(1) あたりづけのシミュレーション（部材・接合部）

部材ごとに作用する荷重を把握することが目的であるので、椅子全体をはり要素で構成したシミュレーションモデルを準備した。このとき、接合部においてすべての荷重を伝達させることで、安全側（作用する内力を大きく評価する側）の評価とするために、すべての接合部を剛結であると設定した。

SRQ (System Response Quantities)は、各部材の軸に垂直な面に作用する軸力（引張・圧縮）とねじりトルク、せん断力、曲げモーメントとするが、後者ははり部材の座標系に依存しない不变量（最大・最小せん断力、最大モーメント）で評価する。このとき、原則として各内力パターンについて最大値と同程度のものを○、無視できるレベルで低い判断できるものを△、これだけでは判断できないものを○とまとめたものをTab.1に示す。この結果から、少なくとも重要度（影響度）が大きいと判断できる部材と荷重パターンの組みあわせ（表中の○）については、可能なかぎり部材レベルでのV&Vを実施すべきであると結論づけられる。特に、椅子側面の上部に設置する貫部材（Tab.1中のBeam in side/Upper）はほとんどのケースで○となっており、椅子全体の挙動をモデル化する際に重要な

な部材であることが推察できる。したがって、この部材に対するV&Vプロセス、あるいはその際に定義する「シミュレーションモデルの影響」は他の部材よりも高いレベルを要求するべきだろうと判断する。

(2) 材料試験とそのV&V

木材の機械的特性を把握するための材料試験はJISなどで規定されているため、原則としてはそれに従ってシミュレーションに必要な材料パラメータを同定する。そのプロセスにおけるV&Vについては別報^[8]で紹介する。

(3) 接合部の力学挙動に対するV&V

本研究で対象とする木製椅子では部材の断面寸法は天板を除いてすべて同一であるため、実質的にはほど接ぎと三方接ぎの2種類だけを比較すればよい。特に変形が小さく接触状態がほとんど変化しないような状況に対して、接合部のモデルに対するV&Vをハンマリング試験と比較しながら実施した^[9]。

4. まとめ

本稿では、木工椅子の強度評価を題材としてV&V-40が規定するリスク評価にもとづくV&V計画とその実装例を紹介した。ここで示したように、リスクマネジメント手法に基づいてV&V計画を立案・提示する際には、常にリスク評価や行動計画のレベル階層をあわせて提示することになる。

謝辞: 本研究を実施するための木工製作や試験片作成などについては、株式会社オフ・コーポレイション殿にご指導とご支援をいただきました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 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-HQC001:2014), 2014.
- [2] 日本計算工学会: 工学シミュレーションの標準手順(JSCES-HQC002:2015), 2015.
- [3] 日本計算工学会: 学会標準(HQC001&002)事例集(JSCES-HQC003:2015), 2015.
- [4] ASME: ASME V&V-10 2019 Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME 2019.
- [5] ASME: ASME V&V-20 2009 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer, ASME 2009.
- [6] ASME: ASME V&V-40 2019 Assessing Credibility of Computational Modeling Through Verification and Validation: Application to Medical Devices, ASME 2018.
- [7] 松井和己ら: ASME V&V40に基づいた木製椅子に対するシミュレーションの品質保証, 計算工学講演会論文集, 27, 2022.
- [8] 谷田紗音ら: ASME V&V40に基づいた木材の圧縮試験に対するV&V, 計算工学講演会論文集, 28, 2023 (投稿中).
- [9] 都筑新ら: ASME V&V40に基づいた木材接合部の剛性評価に対するV&V, 計算工学講演会論文集, 28, 2023 (投稿中).

