

# ASME V&V40に基づいた 木材接合部の剛性評価に対するV&V

Verification and Validation for Stiffness Evaluation of Wood Joints based on ASME V&V40

都筑 新<sup>1)</sup>, 油川 英史<sup>2)</sup>, 福谷 勇輝<sup>2)</sup>, 倉田 和幸<sup>3)</sup>, 松井 和己<sup>2)</sup>, 三浦 孝広<sup>4)</sup>  
山本 剛大<sup>5)</sup>, 杉山 裕文<sup>6)</sup>, 渡邊 大<sup>7)</sup>, 呂 学龍<sup>2)</sup>, 棗田 智香子<sup>2)</sup>, 山田 貴博<sup>2)</sup>

Arata Tsuzuki, Hidefumi Yukawa, Yuki Fukutani, Kazuyuki Kurata, Kazumi Matsui, Takahiro Miura  
Takeki Yamamoto, Hirofumi Sugiyama, Dai Watanabe, Xuelong Lyu, Chikako Natsumeda & Takahiro Yamada

- 1) ダッソー・システムズ株式会社 (Email: arata.tsuzuki@3ds.com)
- 2) 横浜国立大学大学院環境情報学府 (Email: kzm@ynu.ac.jp)
- 3) テルモ株式会社 (Email: Kazuyuki\_Kurata@terumo.co.jp)
- 4) サイバネットシステム株式会社 (Email: t-miura@cybernet.co.jp)
- 5) 広島大学大学院先進理工系科学研究科 (Email: takeki@hiroshima-u.ac.jp)
- 6) 山梨大学大学院総合研究部 (Email: hirofumis@yamanashi.ac.jp)
- 7) 芝浦工業大学システム理工学部 (Email: dai-wata@shibaura-it.ac.jp)

Numerical simulation is used as a means of providing scientific evidence regarding the performance and safety of medical devices. The ASME V&V40 guidelines are useful in clarifying the degree of credibility of computational models and the degree to which they can be used to make judgments when using numerical simulation. In order to create an easy-to-understand example for ASME V&V40, we have been studying the subject of woodworking chairs, and this submission reports on the status of our activities focused on joint modeling.

**Key Words :** ASME V&V40

## 1. はじめに

2018年11月に発行されたASME V&V40-2018<sup>1)</sup>, Assessing Credibility of Computational Modeling through Verification and Validation: Application to Medical Devicesは、医療機器における数値シミュレーションの規格である。ASME V&V40のNONMANDATORY APPENDIX Bに事例が示されているもののend-to-endの事例になっていないなどの理由により、容易に理解することは困難である。筆者らはこれまでにFig.1に示す木工椅子を題材としてより簡単な事例でASME V&V40に基づくV&Vプロセスを示してきた<sup>2)</sup>。

本稿では木工椅子の接合部に対して振動特性から剛性評価する数値シミュレーションモデルについてASME V&V40に基づくこれまでの活動を紹介する。

## 2. 用語の説明

ASME V&V40における主要な用語についてまとめる<sup>13)</sup>。

- ・ **Question of Interest** (対象とする問題) : 取り組むべき具体的な疑問, 意思決定, 懸念事項。
- ・ **Context of Use** (以下COU, 適用範囲) : 定義したQuestion of Interest を解決するために使用される数値シミュレーションの具体的な役割と範囲。
- ・ **Model Risk** (モデルリスク) : 数値シミュレーションを使用することにより有害な結果をもたらす可能性。Model

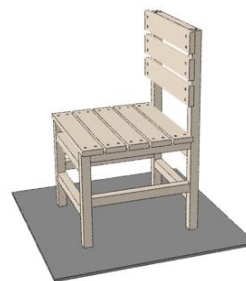


Fig.1 Wooden chair for the subject structure

InfluenceとDecision Consequenceの組み合わせ。

- ・ **Model Influence** (モデルの影響) : 数値シミュレーションの寄与度 (僅か⇔主要因)。証拠が数値シミュレーションの結果のみか, それ以外の証拠も存在するか。
- ・ **Decision Consequence** (判断の帰結) : 数値シミュレーションの結果による誤った意思決定に起因する有害な結果の重要性 (軽微⇔致命的)。
- ・ **Model Credibility** (モデルの信憑性) : COUに対する数値シミュレーションモデルの予測能力に対する信憑性。

## 3. Question of Interest とCOU

Fig.1に示す木工椅子の設計案に対し, 接合部の剛性に着目して「接合部を含むアセンブリとしての自由振動を有限要素モデルが表現できるか。」というQuestion of Interestを定義する。このQuestion of Interestには, それぞれ

の部品の剛性はもちろんのこと、接合部の剛性が大きく影響することが予想されるため、COUを複数に分けて定義する。このとき、数値シミュレーションには汎用有限要素ソフトウェアAbaqusを用いる。

COU1：応答曲面の作成

木材の剛性は Fig.2に示すようにばらつきが大きいため、サンプルごとに計測した密度と1次固有振動数から繊維方向ヤング率を同定できるように、実験計画法を使って木材の繊維方向ヤング率と密度をパラメータとする部品単体の固有値解析を実施し、1次固有振動数の結果を出力とする応答曲面を作成する。

COU2：部品単体のシミュレーション

部品のサンプルごとに対してハンマリング試験から1次固有振動数、計測した質量から密度を求めCOU1で得られた応答曲面から繊維方向ヤング率を同定する。この繊維方向ヤング率を使って数値シミュレーションによる部品単体の固有値解析を実施する。そして、ハンマリング試験と数値シミュレーションによる固有振動数の結果を比較し妥当性を確認する。

COU3：接合部アセンブリのシミュレーション

三枚継ぎのアセンブリに対して数値シミュレーションによる固有値解析を実施する。アセンブリに対するハンマリング試験を実施しシミュレーションの結果と比較し妥当性を確認する。

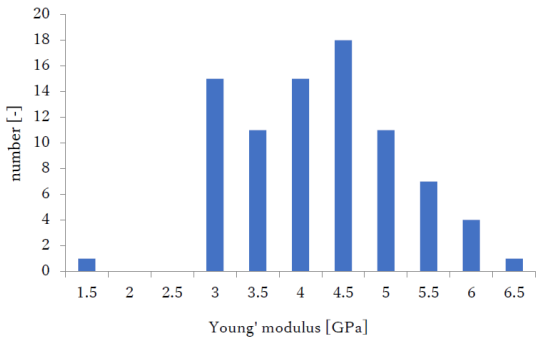


Fig.2 Compression test result

4. Model Risk

(1) Model Influence

このCOUに対するModel InfluenceはV&V40の例にならってTable1から「LOW（僅か）」を選択した。部品単体およびアセンブリに対して試作によるハンマリング試験(ベンチテスト)を複数実施し数値シミュレーション以外の証拠が存在するためである。また、静的な試験による接合部の評価を別途検討していることも理由である。

(2) Decision Consequence

このCOUに対するDecision ConsequenceはV&V40の例にならってTable2から「LOW（軽微）」を選択した。最終設計の根拠にするものではないためである。

(3) Model Risk

以上によりこの数値モデルのModel RiskはFig.3に示すように「LOW-LOW」とする。

Table1 Classification for model influence<sup>1)</sup>

Model Influence	Description
LOW	The output of the model has a small influence on a design or safety decision.
MEDIUM	The output of the model has an important role in a design or safety decision.
HIGH	The output of the model has a dominant role in a design or safety decision.

Table2 Classification for Decision Consequence<sup>1)</sup>

Decision Consequence	Description
LOW	A poor decision may result in increased clinician monitoring, no increased patient risk.
MEDIUM	A poor decision may result in short-term patient risk and increased clinician monitoring.
HIGH	A poor decision may result in immediate danger to the patient (e.g., injury or death), thus requiring significant clinician intervention up to and including immediate replacement of device.

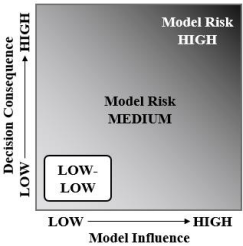


Fig.3 Model Risk for this COU

5. COU1（応答曲面の作成）のV&V活動

(1) メッシュサイズVerification

メッシュサイズは特徴形状であるほどの幅を2分割するように5mmを選択した。Model Riskが「LOW-LOW」であることからV&V40の例にならってTable3よりメッシュサイズのverificationを実施しないことを選択してもよいだろうが、長い脚と三枚継ぎについてより粗いメッシュサイズの10mmと比較し検証した。Table4に示すように長い脚と三枚継ぎの両モデルに対して、5mmから10mmのメッシュサイズに変更しても1～5番目までのモード形状はよく一致しており、固有振動数の結果もよく一致しているため、5mmのメッシュサイズは妥当と判断した。また、数値モデルの計算時間は約1分であり、計算コストについても利用上問題ないと判断した。

Table3 Credibility scale for discretization error<sup>1)</sup>

Credibility	Description
A	No grid convergence analyses are performed.
B	Applicable grid convergence analyses are performed; conservation equation balances are not checked.
C	Applicable grid convergence analyses are performed, but not for problem-specific QOIs. Conservation equation balances are checked; no estimation of discretization error is performed.
D	Conservation equation balances are checked; estimation of discretization error is performed for problem-specific QOIs.

Table4 Mesh size verification

	Mesh Size	Mesh Image	mode no.1	mode no.2	mode no.3	mode no.4	mode no.5
Part of Long Leg	10mm		284.88Hz	286.55Hz	734.36Hz	740.81Hz	765.30Hz
	5mm		284.77Hz	286.48Hz	732.44Hz	739.15Hz	764.84Hz
		Relative Error	0.04%	0.02%	0.26%	0.22%	0.06%
Assembly of Three way joint	10mm		166.24Hz	248.20Hz	530.98Hz	580.16Hz	637.79Hz
	5mm		166.67Hz	247.51Hz	530.80Hz	579.66Hz	636.70Hz
		Relative Error	0.34%	0.28%	0.03%	0.09%	0.17%

(2) 応答曲面の作成

実験計画法により繊維方向ヤング率と密度を入力パラメータとして部品単体の固有値解析を100回実施し、1次固有振動数の結果を出力とした応答曲面を作成した。Fig.4は長い脚に対して得られた応答曲面を示す。

木材の剛性は強い異方性を示すため、直交異方性を定義するのに必要な繊維方向ヤング率以外のパラメータを参考文献4)より求める。

$$E_Y = \frac{1}{10} E_X$$
 (1)

$$E_Z = \frac{1}{20} E_X$$
 (2)

$$G_{XY} = \frac{1}{10} E_X$$
 (3)

$$G_{YZ} = \frac{3}{1000} E_X$$
 (4)

$$G_{XZ} = \frac{1}{20} E_X$$
 (5)

$$\mu_{XY} = 0.4$$
 (6)

$$\mu_{YZ} = 0.7$$
 (7)

$$\mu_{YZ} = 0.55$$
 (8)

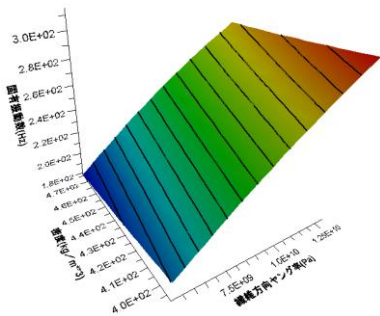


Fig.4 Response surface of long leg

(3) Use Error

固有値解析のAbaqus入力ファイルおよび出力結果の処理を解析者自身によって検証した。Model Riskが「LOW-LOW」であることからV&V40の例にならってTable5より内部および外部の検証は実施しないことを選択した。COU2とCOU3に対しても同様である。

Table5 Credibility gradation of Use Error activities<sup>1)</sup>

Credibility	Description
A	Inputs and outputs are not verified.
B	Key inputs and outputs are verified by the practitioner.
C	Key inputs and outputs are verified by internal peer review.
D	Key inputs and outputs are verified by reproducing important simulations as part of an external peer review.

6. COU2 (部品単体のシミュレーション) のV&V活動

(1) 物性データの同定

接合部アセンブリを構成する長い脚、短い脚、貫部品各7本に対して、あらかじめハンマリング試験から1次固有振動数、計測した質量から密度を求めておく。その後、

COU1で得られた応答曲面を使って繊維方向ヤング率を同定した。Table6は長い脚に対して同定した繊維方向ヤング率の値を示す。

(2) 部品モデルの妥当性確認

上記のように繊維方向ヤング率を同定した部品モデル(計21本)について、それぞれ固有値解析を実施してTable6に示すように得られた固有振動数がハンマリング試験の結果とよく一致することを確認した。

Table6 Identified Young's Modulus, Comparison of Eigenfrequencies by hammering test and Abaqus

sample #	Eigenfrequency from hammering test	Density from measured mass	Young's modulus(E <sub>x</sub> ) identified	Eigenfrequency from Abaqus	Relative error hammering test vs. Abaqus
#1	285.00 Hz	475.8 kg/m <sup>3</sup>	12900 MPa	284.77 Hz	0.08 %
#2	251.25 Hz	395.7 kg/m <sup>3</sup>	8330 MPa	250.93 Hz	0.13 %
#3	296.00 Hz	413.8 kg/m <sup>3</sup>	12100 MPa	295.74 Hz	0.09 %
#4	293.75 Hz	465.7 kg/m <sup>3</sup>	13400 MPa	293.37 Hz	0.13 %
#5	249.75 Hz	391.7 kg/m <sup>3</sup>	8190 MPa	250.08 Hz	-0.13 %
#6	277.75 Hz	397.3 kg/m <sup>3</sup>	10200 MPa	277.11 Hz	0.23 %
#7	282.75 Hz	406.0 kg/m <sup>3</sup>	10800 MPa	282.07 Hz	0.24 %

7. COU3 (接合部アセンブリのシミュレーション) のV&V活動

(1) 接合部アセンブリのシミュレーション

COU2で用いた7組の部品モデルを使って、三枚継ぎ接合部に着目したアセンブリモデルを作成した。三枚継ぎのみに着目するために、もう一方の接合部はアルミ板で挟み固定した。接触している部品同士の表面は固着として固有値解析を行った。

(2) 接合部モデルの妥当性確認

7組のアセンブリに対して、かつFig.5に示す3番目までのモードに対して数値シミュレーションとハンマリング試験による固有振動数の結果を比較した。Fig.6に示すようにおおむね傾向は一致しているものの数値シミュレー

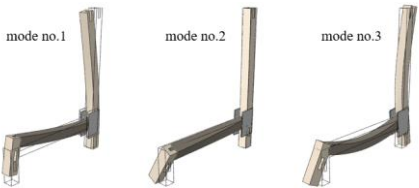


Fig.5 Mode shapes for three-piece joint assembly models

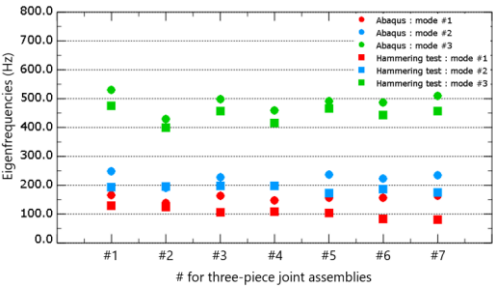


Fig.6 Comparison of Eignfrequencies by hammering test and Abaqus for three-piece joint assemblies

ションに対してハンマリング試験の固有振動数は低い傾向にある。数値モデルでは接合部の部品同士が接触する領域を固着（結合拘束）としているために実験より高い固有振動数になったと考えられる。

また、その相対差は0.1%から50.8%であった。COU2において部品単体モデルの妥当性は確認されているため、この相対差のばらつきは接合部の影響であると考えられる。

### (3) 接合部アセンブリ・シミュレーションの更新

接合部アセンブリ#1に対してFig.7に示すように5タイプの結合領域が異なる接合部モデルを作成し固有値解析を行った。結合領域を減らすことで3番目のモードの固有振動数は変化し小さくなっている。Fig.5に示すようにこのモードは、短い脚と長い脚を互いに開閉するモードであり接合部の影響が大きいと考えられる。

一方で2番目のモードは貫がねじれ短い脚が回転するモードであり接合部の影響を含むが、結合領域を変更しても固有振動数の変化はわずかであった。

さらに、1番目のモードは結合領域を減らしても固有振動数の結果に変化がほとんど見られなかった。貫および長い脚の曲げモードであり、貫と短い脚の接合部は90度に保たれ接合部の影響を含まないためと考えられる。

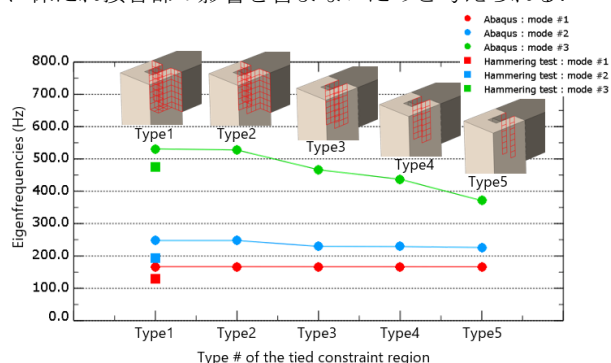


Fig.7 Effect of varying the tied region in the three-piece joint assembly model #1

## 8. まとめ

振動特性から同定した繊維方向ヤング率を使って、部品ごとの数値モデルから求まる固有振動数と実験結果がよく一致した。接合部を含むアセンブリは、今回最大50.8%の相対差を生じて接合部の影響によるばらつきが大きいことがわかった。接合部の結合領域を変更することで両脚の開閉モードに対する数値モデルの固有振動数を実験の固有振動数に近い値を得ることができた。一方で、近い値を得られなかった接合部の影響を含むモードがあり今後の課題である。また、接合部のばらつきを考慮したV&V40に基づくV&Vプロセスを今後検討する予定である。

## 参考文献

- [1] ASME : ASME V&V 40-2018 Assessing Credibility of Computational Modeling Through Verification and Validation: Application to Medical Devices, ASME 2018.
- [2] 松井和己, et al.: 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.
- [3] 山田貴博: 米国機械学会医療機器向けシミュレーション規格V&V40の考え方, 医療機器学, Vol.91, No.4, pp363-366, 2021.
- [4] 沢田稔: 直交異方性材料としての木材の弾性および強度, 材料, 12巻, 121号, pp749-753, 196