

木材の材料試験における不確かさと信ぴょう性の評価

Uncertainty and Credibility Assessments in Material Tests for Woods

松井和己¹⁾, 大石愛¹⁾, 森茂智彦^{1,2)}, 山田貴博¹⁾

Kazumi Matsui, Megumi Ohishi, Tomohiko Morimo and Takahiro Yamada

1) 博(工) 横浜国立大学大学院環境情報研究院 准教授

(〒240-8501 横浜市保土ケ谷区常盤台79-7, E-mail: kzm@ynu.ac.jp)

2) 修(工) 岐阜県生活技術研究所 研究員 (〒506-0058 岐阜県高山市山田町1554)

Bending tests specified by the JIS are carried out on wood, and the material parameters to be used in simulating wood are identified from the series of material tests. While evaluating the uncertainty of each test result and the material parameters obtained from it, the reliability of representative parameters integrated with the overall material test results is evaluated.

Key Words : Verification & Validation, Uncertainty Quantification, Credibility Assessment, Wood

1. はじめに

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が、このような活動において広く知られているキーワードがV&V (Verification (検証) and Validation (妥当性確認))とUQ (Uncertainty Quantification (不確かさの定量化))である。特にASME VVUQ委員会が発行した標準書[1]~[4]は、工学シミュレーションの品質保証を取り扱う規格として広く知られている。また、AIAAやNAFEMS、土木学会、日本計算工学会なども同様の規格や事例を提示しており、それぞれの分野においてシミュレーションモデルならびにその結果に対する信ぴょう性を評価する枠組みを提案している。

ASME VVUQ 1-2022[4]による定義によれば、シミュレーションモデルの信ぴょう性 (Credibility) とは、ある特定の用途 (Context of Use, COU) に対するシミュレーションモデルの予測性能に対する信用であり、客観的な証拠の積み上げによって評価するものである。ASME V&V-40[3]では、これを実現するための項目 (信ぴょう性要因, Credibility Factor) を定義し、それぞれに対する要求レベルを設定する枠組みが提唱されている。例えば、妥当性確認に分類される信ぴょう性要因にはモデル形式 (Model Form) やモデル入力 (Model Inputs) があり、前者はシミュレーションモデルの仮定 (材料モデルや境界条件など)、後者は設定するパラメータ (寸法や荷重値, 材料パラメータなど) に対応する。これら要因ごとの信ぴょう性を評価する活動の中核を成すものがこれまでの妥当性確認であると位置づけており、あくまでもシミュレーションモデルの予測性能そのものではなく、予測に対する信用度合いが評価対象であるという姿勢が明確になっている。さらに、要因ごとの信ぴょう性評価を等級で表現する手法を導入していることもASME V&V-40の特徴であり、これによって相対的な評価が容易になるだけでなく、モデル

を更新する際の指針となることが期待されている。

本研究では、ASME V&V-10[1]が提示する階層型アプローチにおける最下層である材料試験を取りあげて、木材の物性値を同定するための曲げ試験に対するV&Vプロセスを実施することによって、ASME VVUQが提示するシミュレーションモデルの評価事例を示す。特に、材料試験によるパラメータ同定に限定すると、実験から得られた試験体の応答を再現するようにパラメータを決定する行為であるため、モデル・パラメータの組み合わせによる実験結果の再現能力 (Reproduce Capability) は変わりようがない。このような状況に議論を限定することによって、材料試験とそれによるパラメータ同定に対する信ぴょう性の優劣だけを議論する。

曲げ試験によって算出する曲げヤング係数については、Bernoulli-Eulerはりの曲げ理論から導出する方法が提示されているので、この行為についてVVUQの観点からその不確かさと信ぴょう性をモデル形式とモデル入力という指標で評価する。次に、この現象に対してTimoshenkoはりモデルを使って表現するモデル変更を想定し、変更後モデルの信ぴょう性を評価して比較することで両者の違いを比較する。

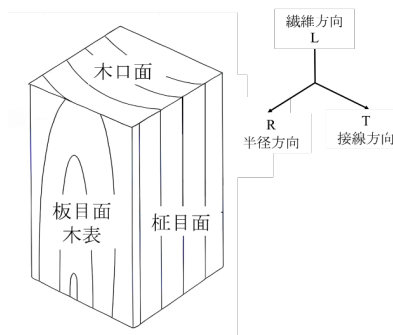


図-1 木材の直交異方性を示す模式図

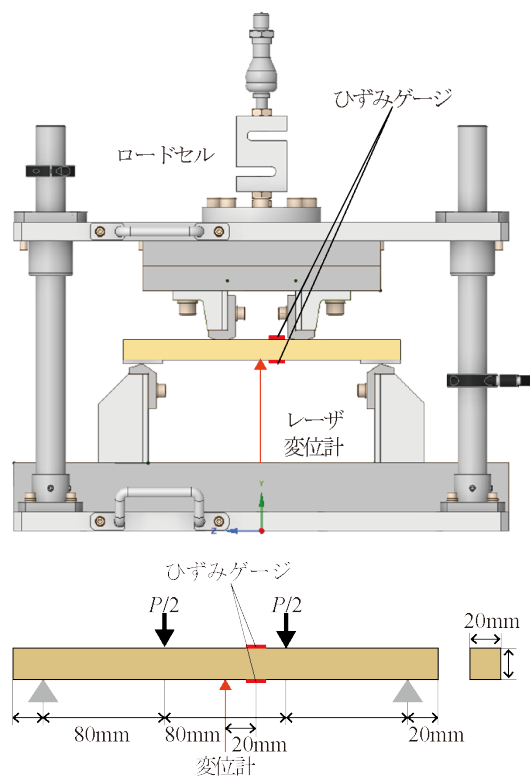


図-2 曲げ試験装置と試験体の概要

2. 材料試験の信ぴょう性評価

(1) 木材の曲げ試験 [5]

木材の試験方法を定めたJIS Z2101:2009S[5]に従って、4点曲げ試験により材料のヤング係数を同定するプロセスを対象にして、その信ぴょう性と不確かさを評価する。

ホホワイトウッド材の2×4または2×8製材120本を対象とし、各製材から2体ずつ、計240体の試験体を採取した。2体の試験体がほぼ同一の機械特性であると考えられるように、同じ製材のほぼ同じ場所から2体ずつの試験体を採取した。これらの試験体に対して、図-1に示すような木材の繊維方向を試験体の長手方向として、それぞれ木表から半径方向に、柃目面から接線方向というように载荷方向を変えて試験を実施した。ただし、ひとつの製材から採取した試験体や部材の向きを統一するため、木取り前の製材の状態で「木表」を定義したため、試験体断面に現れる木表や柃目とは必ずしも一致しない。

曲げ試験にはテンシロン万能試験機（RTF-1350、荷重容量50 kN）を使用した。支点間距離Lを240 mm、载荷点間距離は支点間距離の1/3である80 mmとなるような曲げ試験用のジグを作成した（図-2）。なお、このジグ上部には万能試験機とは独立したロードセルを設置できるようにしており、本研究では荷重容量10 kNのS字型ロードセル（PSD-S1-1000kg）を使用した。試験体中央のたわみを計測するために支点間中央にレーザ変位計（KEYENCE IL-065）を設置した。载荷速度は毎分1 mmとなるように設定したが、繰り返し载荷に関する制御はマニュアル操

表-1 ASME V&V-40 における信ぴょう性要因[3]

分類		信憑性要因
検証	コード検証	1) ソフトウェアの品質保証
		2) 数値的なコード検証
	計算検証	3) 離散化による誤差
		4) 数値ソルバーによる誤差
		5) ユーザによる間違い
妥当性確認	計算モデル	6) モデル形式
	比較実験	7) モデル入力
		8) 試験体
	評価	9) 試験条件
		10) 入力の等価性
適用可能性		11) 出力の比較
		12) 対象とする物理量の等価性
		13) 妥当性確認と COU の関係に関する等価性

作で実施したため上下限の荷重・変位を厳密に制御していない。

また、試験体に生じる曲げひずみを計測するために、試験体中央から20 mm離れた位置（レーザ変位計によるたわみ計測との干渉回避）の上下面軸方向にそれぞれひずみゲージ（東京測器研究所FLAB-5、ゲージ長 5mm）を貼付した。ただし、JISにおける曲げヤング係数の計測においては、これらのひずみ計測は求められていない。

(2) ASME V&V-40にもとづく信ぴょう性要因

ASME V&V-40では、シミュレーションモデルの信ぴょう性を評価するための項目として、表-1に示すような13個の信ぴょう性要因（Credibility Factors）を提示しており、それぞれについて2~4段階の等級を例示している。本研究で取り扱うモデル形式とモデル入力については、これを参考にして以下のように定義する（a → b → cの順に高評価）。

モデル形式（Model Form、認識論的不確かさ） [7]

A) Epistemic uncertainty of model form was not explored
モデル形式における認識論的不確かさを議論していない（モデル形式を説明するのみ）

B) Ignored assumptions of model form were described to be distinguished from epistemic uncertainty
or Previously validated model form for same COU
認識論的不確かさと区別するためにモデル形式に採用しなかった仮定を明記している（PIRTなどにより採用しなかった物理現象も明記する）。
または、過去に同様のCOUについて妥当性が確認されたモデル形式である。

C) Comprehensive evaluation of model form assumptions to minimize epistemic uncertainties was conducted
認識論的不確かさを可能なかぎり小さくするために、モデル形式に採用しなかった仮定についても結果に与える影響が小さいことを確認している（感度解析などを実施して、結果への影響が小さいことを確認

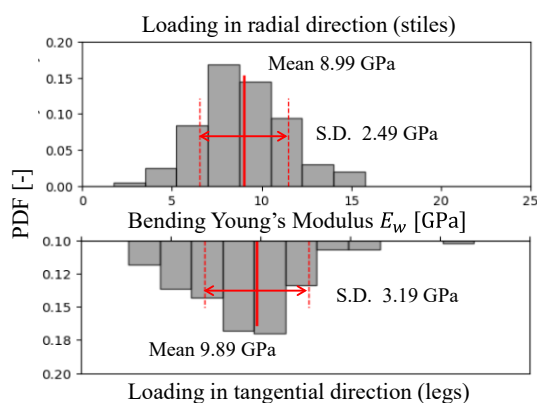


図-3 曲げ試験から得られた曲げヤング係数

する)。

モデル入力 (Model Input, 不確かさの定量化) [3]

- (a) 偶発的不確かさ (Aleatory Uncertainty) を特定しない
- (b) 重要な入力パラメータの偶発的不確かさを定量化するが、シミュレーション結果への影響までは調査しない
- (c) すべての入力パラメータにおける偶発的不確かさを定量化して、シミュレーション結果への影響も評価する

ここで、筆者らの既報[6]にもとづいて、UQ分野における不確かさの分類 (偶発的不確かさと認識論的不確かさ) のうち、偶発的不確かさはモデル入力で、認識論的不確かさ (Epistemic Uncertainty) はモデル形式で取り扱うものとしている。

(3) JISによる材料試験結果のまとめ

JISにおいては、「荷重点間距離が支点間距離の1/3のときの木材の曲げヤング係数 (E_b) は、次の式によって計算し、0.1GPaまで表示する」と定められている。

$$E_b = \frac{\Delta Pl^3}{432I\Delta y} \quad (1)$$

また、試験結果の統計的評価として、算術平均、標準偏差、平均値の標準偏差、百分率変動係数などが求められているので、これに基づいて試験結果をまとめると図-3のようになる。なお、载荷方向を区別せずに評価すると曲げヤング係数の算術平均は9.45GPa (標準偏差2.93GPa) となる。

この結果からも木目に由来する異方性 ($p < 0.05$ で有意差あり) が確認できるが、JISでは弾性特性の異方性には言及しておらず、試験結果において載荷面 (今回の場合は木表 (板目面) もしくは柁目面) を報告するにとどまっている。

JISは規格文書であることもあって、式(1)の詳細には一切言及していない。しかしながら、材料力学の心得があれば、この式がはりたわみの式から導出されているだろうことは明かであり、実際、4点曲げに対するたわみ式からの式変形によって確認できる。規格文書に規定されているものであるため、十分に信頼できると考えるのが一

般的であるが、VVUQという観点でこの式を評価すれば、その根拠 (Eulerはり理論) さえも明記されていないため、モデル形式に対する信ぴょう性要因は“a” (もしくはそれ以下) であり、基本的な統計量を求めているためモデル入力は“b”と評価することになる。ただし、基本統計量だけを評価している点において、「不確かさの定量化」に対応するのか? という議論が必要であることには注意されたい。

(4) モデル形式に対する信ぴょう性評価の向上

JIS文書においてモデル式の背景がまったく説明されていないことは前述のとおりであるが、材料力学的観点からは次のように説明できる。

試験体の弾性挙動だけに注目すると、この挙動は Eulerはり理論で記述できるものと仮定する。このとき、現象を記述するパラメータははりの長さや断面寸法などの寸法データと、構成材料のヤング率となる。ただし、はり理論における変形は中立面での挙動を記述していることになるため、たわみ計測などは中立面のたわみを計測するべきである。

この記述は、学術論文や技術文書によく見られる一般的なものを想定したものであり、先に定義したモデル形式に対する信ぴょう性等級 (a-c) を厳格に適用すれば、このような説明があつてはじめてモデル形式を“a”評価とできる。本節では、この記述をもとにして、モデル形式の信ぴょう性等級を“b”とするための方策を提示する。

筆者らが前報[7]で提案したモデル形式の信ぴょう性評価等級では、モデルに採用しなかった力学現象を説明することが要点となる。したがって、例えば次のような説明となる。

この試験体に生じる物理現象を可能なかぎり列挙したのちに、実際のモデルとして採用されたものとそうでないものをまとめ、その理由とともに表-2に示す。

取り上げた現象が単純であるため、PIRTに挙げた現象のほとんどを採用していないモデル形式であるが、“b”の説明であれば何らかの技術的な判断を実施したという点で「認識されている」ことは確認できる。一方で“a”の説明では、モデル形式の説明に含まれていないもの (表-2で×としたもの) すべてが認識論的不確かさとなるため、この観点で“b”の説明は“a”と比較して信ぴょう性が高い、つまりモデル形式の信ぴょう性が高いと評価する。もちろん、表-2における○×の妥当性については議論の余地はあるだろうが、これはモデルの妥当性確認という観点で評価する指標であつて信ぴょう性とは切り離して考えるものである。

表-2 JIS による曲げヤング係数を決定する材料試験に対するモデル形式の PIRT

要因	可否	採用/不採用の根拠
変形に関するもの		
はりの曲げ変形	○	Euler はり理論に従うことを仮定する
はりのせん断変形	×	はり理論における仮定、十分に細長いと考えてせん断変形を考慮しない
断面の変形	×	はり理論における仮定（断面変形を無視）
大変形の定式化	×	はり理論における仮定（微小変形の仮定が成立する範囲の現象）
材料挙動に関するもの		
弾性特性の異方性	×	はり理論における仮定（等方性材料であることは積極的に仮定しないが軸方向のヤング率のみで現象を記述している）
塑性変形	×	弾性変形のみを取り扱う（弾性範囲に収まる荷重を載荷）
粘性挙動	×	載荷速度が十分に遅いため粘性効果は発現しないことを想定
破壊現象	×	破壊は考慮しない
寸法効果	×	材料特性が試験片寸法などに依存しないことを想定する
形状に関するもの		
部品の寸法	○	（モデル入力）各試験編の実測寸法を利用する
載荷治具の形状	×	載荷治具と部材は線接触であることを仮定する
支持部の形状	×	支点と部材が線接触であることを仮定する（JIS で規定された支持板を無視する）
その他		
載荷・支持治具の変形	×	試験片に比べ十分に剛性が大きいため無視
載荷・支持点での摩擦	×	それぞれ十分に滑らかに運動することを仮定して摩擦は無視
載荷・支持治具のめりこみ（局所的な断面変形）	×	載荷治具の曲率半径は 30mm（JIS 参照）、支持部は十分な大きさの金属板があること、弾性変形の範囲の荷重であるため考慮しない

なお、前節で用いたモデルとモデル形式そのものは同一であるため、同定したヤング係数も同一であり、この信ぴょう性を評価するモデル入力に対する信ぴょう性等級も”b”のままである。

3. モデル形式の変更とその信ぴょう性等級

前節での曲げ試験において、ほぼ同じ場所から採取した2本の試験体を軸まわりに90°回転させて、それぞれヤング係数を同定した。Eulerはり理論においては軸方向の剛性のみが支配的となるため、このモデルでは図-3で確認されたヤング係数の差異を説明できない。実際のVVUQプロセスにおいては、表-1に示した「11. 出力の比較」もしくは「13. 妥当性確認とCOUの関係に関する等価性」の信ぴょう性要因において等級が低く評価されることに対応する。

そこで、これらの実験結果（たわみ）にはせん断変形の影響が含まれているものと考え、モデル形式を変更する。具体的には、せん断変形を無視して定式化されたEulerはり理論から、それを考慮して定式化されたTimoshenkoはり理論にモデルを変更する。このとき、はり中央部でのたわみは以下ようになる。

$$w_{\text{center}}\left(\frac{L}{2}\right)=\frac{23}{1296}\frac{PL^3}{EI}+\frac{1}{6}\frac{EIPL}{GA EI}$$

(2)

また、はり中央部での曲げモーメントと曲げひずみの関係はEulerはりと同じく

$$\varepsilon=\frac{h}{2I}\frac{M}{E}=\frac{Lh}{12I}\frac{P}{E}$$

(3)

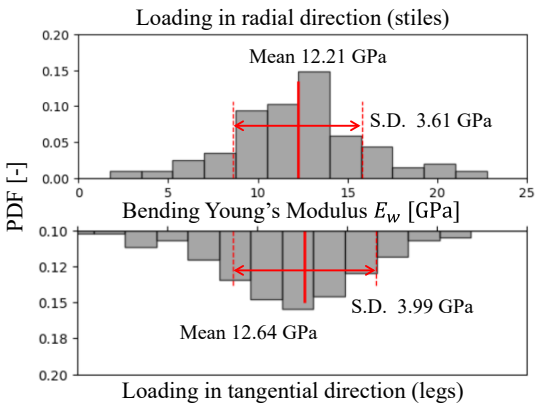


図-4 Timoshenko はり理論で同定した曲げヤング係数

と書けるので、これらの関係を用いれば、曲げひずみからヤング係数を同定したのち、たわみが一致するようにせん断剛性係数が同定できる。先の実験結果に対してこれらの式を適用して同定したヤング係数の分布を図-4に示す。正規性の検定により、木表から載荷、柃目面から載荷のいずれの試験結果のデータも正規分布に従うことを確認した。その後スチューデントのt検定を行い、木表から載荷した試験と柃目面から載荷した試験とで、同定した曲げヤング係数に有意差(p<0.05)がないことを確認した。

このように、Timoshenkoはりによってせん断変形の影響を考慮できるモデルを使用することで、載荷面の向きにかかわらず軸方向のヤング係数をほぼ等しく評価できるようになった。つまり、実験で観察されている載荷面の方向による変形（ヤング係数）の違いは、主にせん断変

表-3 Timoshenko モデルによる材料パラメータ同定に対するモデル形式の PIRT

要因	可否	採用/不採用の根拠
変形に関するもの		
はりの曲げ変形	○	曲げ変形だけでなくせん断変形も考慮できる Timoshenko はりも理論に従うことを仮定する
はりのせん断変形	○	木材は繊維方向の軸剛性に対してせん断剛性が著しく低いため、せん断変形の影響を考慮する
断面の変形	△	はり理論における仮定 面内の剛性が低いので曲げ変形によって断面変形が生じている可能性があるものの、はり要素で考慮することが難しいため見送り (現状ではこれを考慮するためには3次元ソリッドモデルが必要)
大変形の定式化	×	はり理論における仮定 (微小変形の仮定が成立する範囲の現象)
材料挙動に関するもの		
弾性特性の異方性	○	曲げヤング係数とせん断弾性係数をそれぞれ独立であると仮定した、簡易的な異方性モデルを採用して表現する
塑性変形	×	弾性変形のみを取り扱う (弾性範囲に収まる荷重を載荷)
粘性挙動	×	載荷速度が十分に遅いため粘性効果は発現しないことを想定
破壊現象	×	破壊は考慮しない
寸法効果	×	材料特性が試験片寸法などに依存しないことを想定する
形状に関するもの		
部品の寸法	○	(モデル入力) 各試験編の実測寸法を利用する
載荷治具の形状	×	載荷治具と部材は線接触であることを仮定する
支持部の形状	×	支点と部材が線接触であることを仮定する (JIS で規定された支持板を無視する)
その他		
載荷・支持治具の変形	×	試験片に比べ十分に剛性が大きいため無視
載荷・支持点での摩擦	×	それぞれ十分に滑らかに運動することを仮定して摩擦は無視
載荷・支持治具のめりこみ (局所的な断面変形)	△	載荷治具の曲率半径は 30mm (JIS 参照)、支持部は十分な大きさの金属板があること、弾性変形の範囲の荷重であるため考慮しない (せん断剛性や繊維方向に直交する方向の軸剛性が低いため、その影響を明確に否定できないが、はりモデルでは表現できない)

形に関する剛性が異なるためであり、試験体を設置した向きによって支配的なせん断弾性特性が異なるためであると主張できる。これは木材のせん断弾性係数に強い異方性があるという既知の事実とも一致する[8]

以上の説明だけであれば、2.3節と同様に「Timoshenko はりモデルを使用した」という説明でしかないため、このモデル形式に対する信ぴょう性要因は”a”と評価せざるをえない。ここで示した例は、モデルを変更して現象に対する再現能力 (Reproducibility) は向上しているため、総合的な「モデルの信ぴょう性」は向上していると考えられなくもないが、材料試験の結果を再現 (結果に一致させる) するという意味においては前節でのEulerはりモデルと同じ性能である。

モデル形式としての信ぴょう性等級を”b”とするためには、前節と同様に、表-3に示すようなモデル形式を説明するPIRTが必要となる。このような表形式でモデルの構成要素をまとめることによって、過去のモデル (例えば表-2) と比較しながら利用しているモデルとの差異や変更点などを把握しやすくなる。

4. おわりに

木材の材料試験から機械的特性を同定するプロセスに対して、最新のVVUQの観点からその信ぴょう性を評価

した。特に、信ぴょう性要因のモデル形式について新しい評価基準を提示し、それに基づいて具体的に評価することで、モデル形式に対する信ぴょう性等級が評価する内容を提示した。あくまでもモデル形式に対する評価は「そのモデルを採用した根拠」に対する信ぴょう性であるため、その再現能力が向上することと区別して議論することが大切である。

参考文献

[1] ASME: ASME V&V-10 2019 Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME, 2020.

[2] ASME: ASME V&V-20 2009 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer, ASME, 2009.

[3] ASME: ASME V&V-40 2018 Assessing Credibility of Computational Modeling Through Verification and Validation: Application to Medical Devices, ASME 2018.

[4] ASME: Verification, Validation, and Uncertainty Quantification Terminology in Computational Modeling and Simulation VVUQ1-2022, ASME, 2022.

[5] 日本規格協会: JIS Z 2101:2009 木材の試験方法, 2009.

[6] 梶田智香子ら: ASME V&V-40にもとづく木材の曲げ試験における信憑性評価, 土木学会論文集, Vol.80, 2024.

[7] 福谷勇輝ら: 認識論的不確かさによるシミュレーションモデルの信ぴょう性評価, 計算工学講演会論文集, Vol.29, 2024.