

CAE 解析に向けた PB、MDF のヤング率導出

工芸科

船井 孝

田村克浩*

ユニバーサルデザイン科

及川貴康

長澤 正

Young's modulus derivation of PB and MDF for CAE analysis

FUNAI Takashi, TAMURA Katsuhiro, OIKAWA Takayasu and NAGASAWA Tadashi

In recent years, furniture manufacturers have been considering the introduction of CAE (Computer Aided Engineering) analysis as a technology to reduce prototyping and testing. In CAE analysis, Young's modulus is essential. Therefore, in this study, the Young's moduli of PB (Particle Board) and MDF (Medium Density Fiberboard), which are commonly used for furniture, were derived in two ways: one considering infinitesimal deformation theory and the other large deformation theory. Comparison of the two and the good reproducibility of three-point bending tests by CAE analyses using the derived Young's moduli suggest that infinitesimal deformation theory can be applied to PB and MDF up to a stress of at least 18 MPa, and that the linearization of this range can provide Young's modulus utilized in CAE analysis.

Keywords: CAE, FEM (finite element method), PB, MDF, Young's modulus, furniture

CAE (Computer Aided Engineering) 解析は、製品開発において試作と評価試験を削減できる技術として知られている。そのため、近年では家具製造業においても CAE 解析の導入が検討されている。本研究では、家具試験を再現する CAE 解析の実施に向けて、家具に使用される材料である PB (Particle Board) と MDF (Medium Density Fiberboard) のヤング率を「微少変形理論に基づいた手法」及び、「大変形を考慮した手法」で導出した。両者を比較・検証することで、PB と MDF は応力が少なくとも 18 MPa 程度まで微少変形理論が適用でき、この範囲を直線近似することで CAE に活用できるヤング率が導出できることを示した。

キーワード：CAE、FEM（有限要素法）、PB、MDF、ヤング率、家具

1 はじめに

近年の家具は、デザイン重視で設計される傾向がある。すなわち、設計段階で強度や耐久性は考慮されていない。そのため、JIS 等¹⁾で定義される家具試験を実施して、初めて強度不足が明らかになることがある。強度不足となった家具は、再設計、再試験が必要となる。この再設計と再試験は、試験に合格するまで繰り返されるため、開発コストを増加させる要因となる。この問題を解決できる技術として、試作と試験を行うことなく開発中の製品の強度を評価できる CAE (Computer Aided Engineering) 解析が挙げられる。

家具の CAE 解析を実施するためには、使用される材料である木材や木質材のヤング率が必要となる。ヤング率は、引張試験等の材料試験結果から取得で

きるが、木材や木質材については、多くの場合曲げ試験から導出される^{2, 3)}。三点曲げ試験から金属のヤング率を導出する場合、微少変形理論⁴⁾に基づいて導出することが多い。これに対して、木材は金属と比較して柔らかく、変形量が大きいため、大変形を考慮^{5~10)}しなければならない可能性がある。しかしながら、これまでの木材や木質材のヤング率導出では、大変形導入の必要性が検討されず、盲目的に微少変形理論で導出されてきた。

本研究では、家具に使用されることが多い PB (Particle Board) と MDF (Medium Density Fiberboard) を対象に、CAE 解析に活用できるヤング率の導出を目指した。具体的には、PB、MDF に対する三点曲げ試験を、複数の支点間距離で実施した。また、得られた結果から「微少変形理論に基づ

* 現 富士工業技術支援センター 製紙科

く手法」と、「大変形を考慮した手法」でヤング率を導出し、両者を比較した。さらに、導出した値を使って三点曲げを再現する CAE 解析を実施し、実試験の再現性を評価した。これらの比較及び評価から PB、MDF のヤング率を導出するにあたり、大変形導入の必要性和 CAE 解析に活用できるヤング率の導出方法を検討した。

2 方法

2.1 PB、MDF の三点曲げ試験

PB 及び MDF に対して、JIS A5908: 2022 パーティクルボード²⁾及び JIS A5905: 2022 繊維板³⁾を参考とした三点曲げ試験を行った。使用した試験片は、断面積 50 mm×12 mm、長さ 230 mm の直方体形状とした。試験は、精密万能試験機 オートグラフ AG-X plus 50kN (株式会社島津製作所) と付属の三点曲げ試験治具を使用して実施した (図 1)。圧子 の下降速度は 1 mm/min. とし、支点間距離は 120 mm と 180 mm の 2 パターンとした。

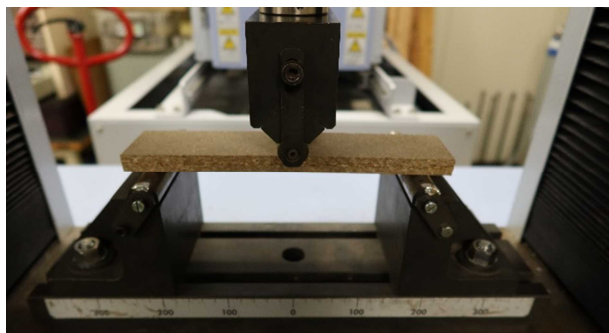


図 1 三点曲げ試験

2.2 ヤング率の導出

三点曲げ試験の結果からヤング率の導出を行った。ヤング率は、微少変形理論に基づいた手法⁴⁾と、堀部らが提案した大変形を考慮した手法⁵⁾の 2 パターンで導出した。

微少変形理論に基づくヤング率は、式(1) 及び式(2) による公称応力と公称ひずみを、JIS Z2101: 2009 木材の試験方法¹¹⁾を参考に、7~18 MPa の範囲を直線近似して導出した。ここで、 σ は公称応力、 P は圧子が試験片を押す荷重、 L は支点間距離、 b は試験片の幅、 h は試験片の厚さ、 ε は公称ひずみ、そして z は試験片のたわみ量である。

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{6hz}{L^2} \quad (2)$$

大変形を考慮した導出には、式(3) を使用した⁵⁾。ここで、 E はヤング率、 P は式(1) と同様に圧子が試験片を押す荷重、 L は支点間距離の 1/2、 I は試験片の断面二次モーメント、そして無次元荷重 β^2 ($=PL^2/EI$) は式(4) で定義される値である。式(4) の無次元中央たわみ δ_y は式(5) で定義され、式(5) の z は式(2) と同様に試験片のたわみ量である。大変形を考慮したヤング率は、式(1) の公称応力が 18 MPa のときの荷重 P とたわみ量 z を使用して導出した。

$$E = \frac{Pl^2}{\beta^2 I} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \beta^2 = & 0.650322 \sin\left(\frac{\pi}{1.669} \delta_y\right) \\ & + 0.312678 \sin\left(\frac{2\pi}{1.669} \delta_y\right) \\ & + 0.0741728 \sin\left(\frac{3\pi}{1.669} \delta_y\right) \\ & + 0.0196732 \sin\left(\frac{4\pi}{1.669} \delta_y\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\delta_y = \frac{z}{l} \quad (5)$$

2.3 三点曲げ試験を再現する CAE 解析

導出したヤング率を使って、三点曲げ試験の再現 CAE 解析を実施した。解析は、図 2 に示すように試験片、支点、および圧子で構成された 1/4 モデルで実施した。支点と圧子は剛体扱いとした。境界条件として、図 2 に示すように試験片の切断面に対称条件を定義した。支点と試験片、及び圧子と試験片には接触条件を定義した。また、図 2 のように圧子に対して矢印の方向に 250 N の荷重を負荷し、支点は固定とした。解析は ANSYS Workbench 18.2 (ANSYS Inc.) で実施し、荷重増分は 0.1 (25 N ずつ増加) とした。ポアソン比は 0.29 とした。解析結果から圧子に負荷した荷重と試験片のたわみ量の関係を出し、2.1 節で実施した三点曲げ試験の結果と比較した。

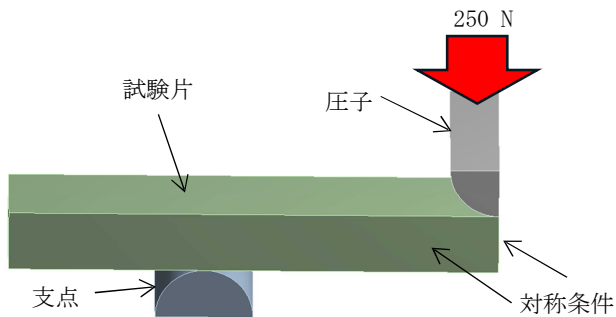


図2 三点曲げ試験の再現 CAE 解析に使用した解析モデル (図1の1/4 モデル)

3 結果

PB、MDF に対する三点曲げ試験の結果を図3及び図4の実線に示す。また、三点曲げ試験の結果に基づき、式(1)及び式(2)による公称応力と公称ひずみの関係を図5及び図6の実線に示す。図中のプロットは式(1)で計算された公称応力7 MPaと18 MPaの点である。図5及び図6のプロット間を直線近似（図中の破線）して得られた傾きを微少変形理論によるヤング率として表1に示す。また、式(1)による公称応力が18 MPaのときの荷重値とたわみ量を式(3)～(5)に代入して得られた大変形を考慮したヤング率も表1に示す。さらに、図5及び図6に、大変形を考慮したヤング率を傾きとした

直線を一点鎖線で示す。続いて、導出したヤング率を使った CAE 解析結果から、圧子に負荷した荷重と試験片のたわみ量を出力して図3及び図4に破線（微少変形理論に基づいたヤング率で計算）と一点鎖線（大変形を考慮したヤング率で計算）で示す。

4 考察

まず、微少変形理論によるヤング率と大変形を考慮したヤング率の違いについて議論する。堀部らが提案した式(3)～(5)には無次元変位 δ_r に対して適用範囲があり、 $0 \leq \delta_r \leq 1.669$ とされる。表1から、今回導出したヤング率はすべてこの範囲に入っているため、大変形を考慮したヤング率は適切に導出されていると判断する。また、表1からは、PB、MDF また支点間距離120 mm、180 mmのいずれにおいても、微少変形理論に基づいて導出したヤング率は、大変形を考慮したヤング率と大きな違いは無い。式(1)及び式(2)は、微少変形理論で仮定された変形⁴⁾をする際に成立する式であるため、仮定された微少な変形を超える大きな変形が生じると、これらの式からの適切なヤング率の導出は期待できない。これに対して式(3)～(5)は、微少変形理論を超えた大きな変形が生じても適切なヤング率を導出できる式として提案されている。これら2種類の式から導

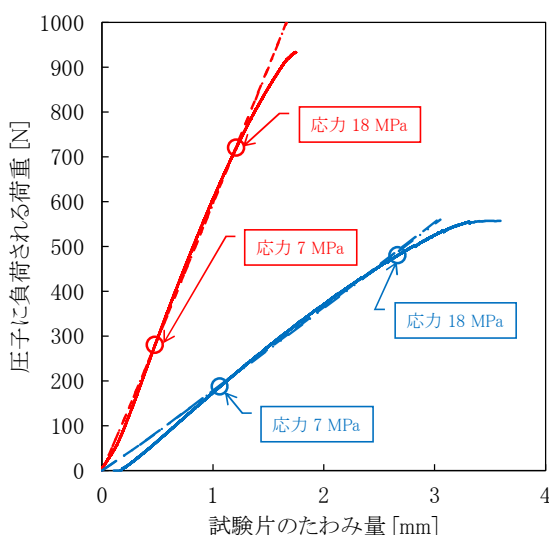


図3 圧子に負荷される荷重とたわみ量の関係 (PB)

- 三点曲げ試験結果(支点間距離120 mm)
- - - CAE 解析結果(支点間距離120 mm、微少変形理論)
- · - CAE 解析結果(支点間距離120 mm、大変形を考慮)
- 三点曲げ試験結果(支点間距離180 mm)
- - - CAE 解析結果(支点間距離180 mm、微少変形理論)
- · - CAE 解析結果(支点間距離180 mm、大変形を考慮)

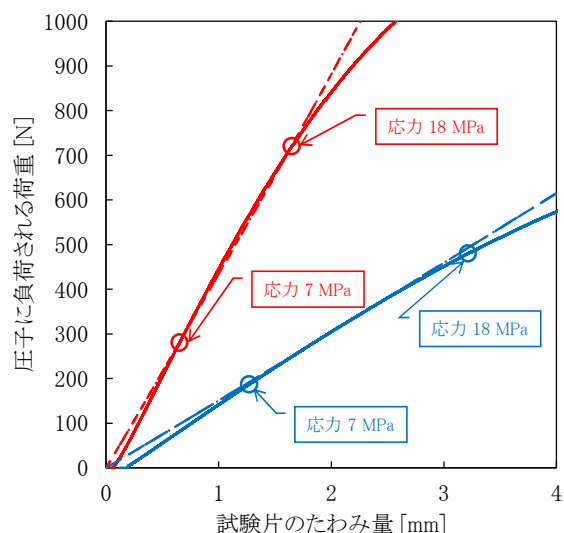


図4 圧子に負荷される荷重とたわみ量の関係 (MDF)

- 三点曲げ試験結果(支点間距離120 mm)
- - - CAE 解析結果(支点間距離120 mm、微少変形理論)
- · - CAE 解析結果(支点間距離120 mm、大変形を考慮)
- 三点曲げ試験結果(支点間距離180 mm)
- - - CAE 解析結果(支点間距離180 mm、微少変形理論)
- · - CAE 解析結果(支点間距離180 mm、大変形を考慮)

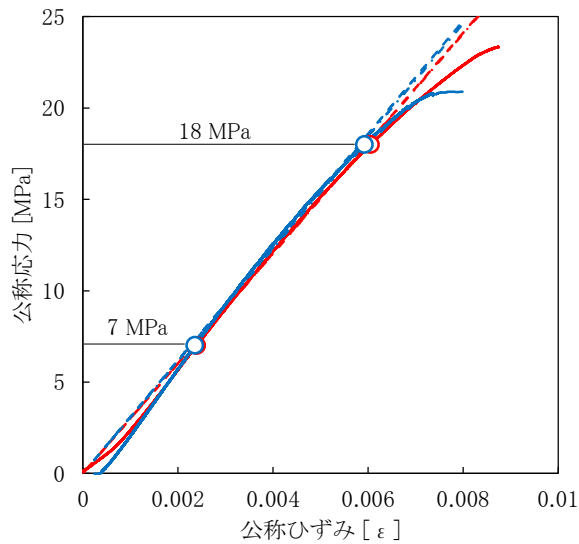


図5 公称応力と公称ひずみの関係 (PB)

- 支点間距離120 mm
- - - 微少変形理論(支点間距離120 mm の試験から導出)
- · - 大変形を考慮(支点間距離120 mm の試験から導出)
- 支点間距離180 mm
- - - 微少変形理論(支点間距離180 mm の試験から導出)
- · - 大変形を考慮(支点間距離180 mm の試験から導出)

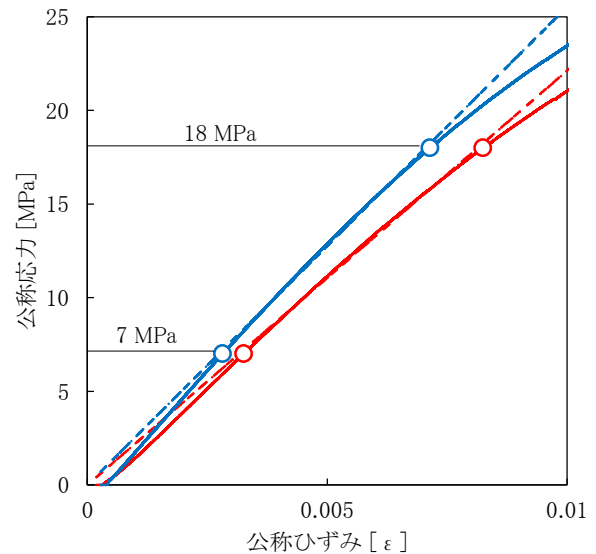


図6 公称応力と公称ひずみの関係 (MDF)

- 支点間距離120 mm
- - - 微少変形理論(支点間距離120 mm の試験から導出)
- · - 大変形を考慮(支点間距離120 mm の試験から導出)
- 支点間距離180 mm
- - - 微少変形理論(支点間距離180 mm の試験から導出)
- · - 大変形を考慮(支点間距離180 mm の試験から導出)

表1 導出されたヤング率

	支点間距離 [mm]	18 MPa の荷重とたわみ量		ヤング率 [MPa]		δ_y
		荷重 [N]	たわみ量 [mm]	微少変形理論	大変形を考慮	
PB	120	719.9	1.211	3013.9	3007.2	2.018×10^{-2}
	180	480.0	2.667	3096.5	3076.4	2.963×10^{-2}
MDF	120	719.9	1.649	2212.5	2210.7	2.748×10^{-2}
	180	479.8	3.214	2552.0	2553.5	3.574×10^{-2}

出されたヤング率に大きな違いが無いことは、本研究が対象とした PB、MDF は少なくとも式(1) による公称応力が 18 MPa までの範囲であれば微少変形理論が適用できる材料といえる。このことは、図3 及び図4 の荷重とたわみ量の関係が、式(1) による応力値で 18 MPa 程度までほぼ線形の関係となっていることからもうかがえる。

続いて、導出したヤング率を使った CAE 解析結果について議論する。図3 及び図4 から、CAE 解析は微少変形理論のヤング率、大変形を考慮したヤング率、いずれも公称応力 18 MPa までの範囲で試験結果を良好に再現できていると判断する。これは、PB、MDF の三点曲げ試験で微少変形理論が仮定できる

ことから自明だが、本研究では導出したヤング率が CAE 解析に活用できることを確認するために実施した。

最後に、支点間距離 120 mm と 180 mm の違いについて議論する。PB、MDF の三点曲げ試験から導出されたヤング率を見ると、PB では支点間距離 120 mm と 180 mm で大きな違いは無い。しかしながら、MDF では 16% 程度の違いが確認できる。MDF において、支点間距離 120 mm、180 mm いずれの試験も公称応力約 18 MPa までは微少変形理論が適用できることが示されている。また、MDF のいずれのヤング率も、CAE 解析において導出元となった三点曲げ試験を良好に再現できている。これらのことから、MDF の

ヤング率はいずれも適切に導出できていると考えられるため、支点間距離 120 mm と 180 mm の違いは、MDF のばらつきに由来するものであると判断する。

以上のことから、本研究が対象とした PB、MDF は、式(1) による公称応力約 18 MPa までの範囲であれば微少変形理論が適用できる。本研究で使った精密万能試験機をはじめとした多くの試験機は、微少変形理論による式(1)、及び式(2) を実装している。そのため、直線近似を行う範囲（本研究が対象とした PB、MDF の場合 18 MPa まで）を指定するだけで容易にヤング率を導出することができる。これにより、本研究が対象とした MDF のようにばらつきが大きい材料でも、製品ごと、あるいは材料のロットごと等、適宜曲げ試験を実施してヤング率を導出することで、材料のばらつきに対応することが可能である。また、そのようにして導出したヤング率は、そのまま CAE 解析で活用でき、応力 18 MPa までの範囲だが、PB と MDF の変形挙動を良好に再現することができる。

5 まとめ

本研究では、家具試験を再現する CAE 解析実施のため、近年の家具によく利用される PB と MDF のヤング率を「微少変形理論に基づく手法」及び、「大変形を考慮した手法」で導出し、両者を比較した。得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 本研究が対象とした PB、MDF に対する三点曲げ試験は、少なくとも応力 18 MPa 程度までは微少変形理論が適用できる。
- 本研究が対象とした PB、MDF のヤング率は、材料力学（微少変形理論）に基づいて計算された三点曲げ試験の「応力」と「ひずみ」を 18 MPa までの範囲で直線近似することで導出できる。
- 導出したヤング率は、応力 18 MPa までの範囲で PB、MDF の変形挙動を良好に CAE 解析で再現できる。

参考文献

- 1) 日本産業規格：家具－収納ユニット－強度及び耐久性試験方法. JIS S1200, (2012). など
- 2) 日本産業規格：パーティクルボード. JIS A5908, (2022).

- 3) 日本産業規格：繊維板. JIS A5905, (2022).
- 4) 前澤成一郎訳：改訂材料力学要論, 改訂版（コロナ社, 東京), (1972). など
- 5) 堀部忠志 他：はりの大たわみの近似式に基づくヤング率測定法（片持ちはりおよび 3 点曲げの場合）. ばね論文集, 2020 (65), 43-49 (2020).
- 6) Khatam H. et al. : On the evaluation of the elastic modulus of soft materials using beams with unknown initial curvature. Strain, 49(5), 420-430 (2013) .
- 7) 大槻敦巳 他：圧縮円リングを用いた薄板／細線の新ヤング率測定法. ばね論文集, 2002(47), 27-31 (2002).
- 8) 大槻敦巳 他：片持ちはりを用いた可撓性積層薄肉材料の革新的ヤング率測定法. ばね論文集, 2009 (54), 41-48 (2009).
- 9) Ohtsuki A. : An innovative method for measuring Young's modulus of multi-layered materials using postbuckling behavior. Procedia Engineering, 10, 1041-1046 (2011) .
- 10) 大槻敦巳 他：円リングにおける自重大たわみ変形を利用した薄肉積層材料の新ヤング率測定法（自重大変形積層円リング法）. ばね論文集, 2018 (63), 53-62 (2018).
- 11) 日本産業規格、“木材の試験方法”、JIS Z2101、(2009)