

県産広葉樹活用技術の開発

- 降伏関数による破壊基準の検討 -

工芸科 船井 孝 前田研司 大竹正寿* 村松重緒

Advanced Utilization Technologies of Prefectural Hardwood

- Assessment of Fracture Criterion Using Yield Functions -

FUNAI Takashi, MAEDA Kenji, OTAKE Masatoshi and
MURAMATSU Shigeo

The Industrial Research Institute of Shizuoka Prefecture embarked on a two-year research project in FY2024 on new industrial technologies with the aim of reviving the Shizuoka wooden furniture industry. This research establishes the use of DX technology, specifically CAE (Computer Aided Engineering), in wooden furniture design and manufacturing. In FY2024 (the first year of the project), tension/compression tests in three directions and shear tests in six directions were conducted on hardwoods found in Shizuoka prefecture, such as oak. Fracture stresses were obtained from each test. Based on these stresses, the parameters of Hoffman's yield function were derived as a fracture criterion and implemented in a CAE system to evaluate the fracturing of a wooden chair with a seat frame connected to the front and rear legs by mortise joints. The evaluation results indicated that there was a possibility of fracture around the mortise joints. The introduction of this technology, which is not yet found in other regions of Japan producing furniture, will contribute to the revival of the Shizuoka furniture industry and become a symbol of Shizuoka like Hida bentwood.

Keywords : CAE, FEM, finite element method, hardwood, broadleaf tree, yield function, Hill, Hoffman

当研究所では、2024 年度から 2 年計画で、静岡県の家具産業の復興を目的とした新しい木製家具の生産技術開発に関する研究を開始した。本研究では、DX 技術である CAE (Computer Aided Engineering) を導入した木製家具の設計・製造技術を確立する。また、確立した技術を県内の家具製造業者に普及することで、飛騨の曲木のような、産地を象徴する家具の生産技術の創出を目指す。初年度である 2024 年度には、県産広葉樹であるカシを対象に、3 方向の引張り/圧縮試験、および 6 方向のせん断試験を実施した。各試験から得られた破壊応力を基に、Hoffman の降伏関数のパラメータを導出し、これを CAE システムに実装することで、木製家具の破壊評価環境を構築した。さらに構築した環境の活用事例として、座枠が前脚と後脚に「ほぞ」で結合された椅子において使用者が着席した際の破壊評価を行い、「ほぞ」周辺に破壊の可能性があることが示された。

キーワード : CAE、FEM、有限要素法、広葉樹、県産広葉樹、降伏関数、Hill、Hoffman

1 はじめに

静岡県経済産業部商工業局が 2024 年 3 月に発行した「静岡の家具」振興方針¹⁾では、木製家具の出荷額が、全国、静岡県ともに 1991 年以降急激

に減少していることが報告されている。また、2020 年経済産業省生産動態統計年報繊維・生活用品統計編の主要木製家具 5 品目の出荷額内訳²⁾を見ると、静岡県が得意とするたんすの出荷額は全体の

* 現 企業局 西部事務所

1%程度であり、出荷額の大半は机、椅子、テーブルといった脚物家具が占めている。これは、たんすより脚物家具のニーズが高いことを示している。さらに、2020年工業統計調査³⁾に基づく、6大産地の家具総出荷額に対する生産家具の内訳を見ると、静岡県はたんすへの依存率が他県に対して突出して高く、脚物家具の割合は最も低いことがわかる。これは、他産地はすでにニーズの高い脚物家具への転換をはたしていることを示している。特に岐阜県は、曲木という高度な生産技術による差別化に成功しており、脚物家具の出荷額は全国1位となっている。また、北海道は道産広葉樹を積極的に活用することで他産地との差別化を図っている。静岡県も、これらに負けない差別化技術確立し、付加価値が高い高価格帯の脚物家具の生産に注力する必要がある。そのためのシーズとして、当研究所にはDX技術であるCAE (Computer Aided Engineering) の知見がある。このDX技術を木製家具の設計に活用している産地は他には無く、導入できれば静岡県独自の差別化技術になる可能性がある。また、静岡県には未利用の広葉樹が多く存在しており、これらを活用することで他産地との差別化が期待できる。以上のことを踏ま

えて、静岡県の木製家具産業の復興を目指し、CAEと県産広葉樹を活用した木製家具の生産技術確立を目的として、2024年度から2年間の研究を実施している。

初年度である2024年度は、静岡県産広葉樹であるカシを対象とし、CAEで活用可能な降伏関数で記述された破壊基準の構築を行った。具体的には、対象樹種に対して3方向の引張り/圧縮試験と、6方向のせん断試験を実施し、それぞれの基準強さを取得した。この基準強さを安全率で除した許容応力を基に、破壊基準となる降伏関数のパラメータを導出した。本研究では、異方性降伏関数として、Hillの二次降伏関数⁴⁾を垂直応力の正負で異なる値に対応できるように拡張したHoffmanの降伏関数⁵⁾を採用した。この降伏関数を実装することで、木材の破壊を評価できるCAE環境を構築した。さらに、構築したCAE環境の活用事例として、脚物家具である椅子の強度評価を実施した。

2 方法

2.1 県産広葉樹の破壊基準の構築

(1) 材料試験

県産広葉樹であるカシを対象に、材料試験を実

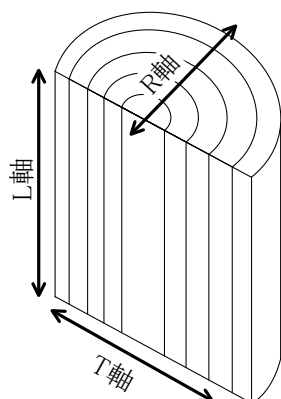
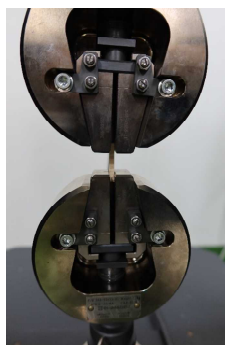


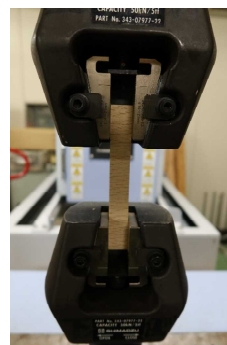
図1 座標系の定義



L 軸

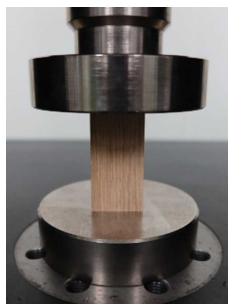


R 軸



T 軸

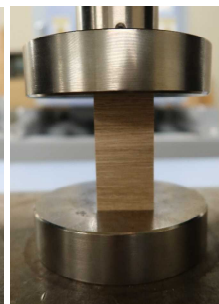
図2 カシ引張り試験



L 軸

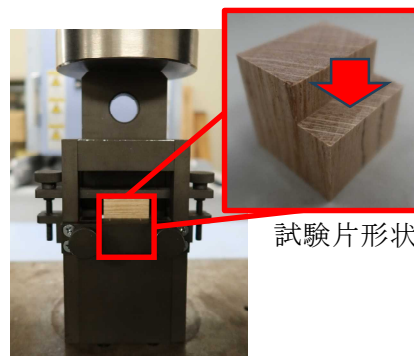


R 軸



T 軸

図3 カシ圧縮試験



試験片形状

図4 カシせん断試験

施した。図 1 に示すように、繊維方向：L 軸、年輪の接線方向：T 軸、年輪の半径方向：R 軸を定義し、各軸方向の引張り/圧縮試験 6 パターンを実施した。また、LR（L 軸に垂直な面に対して R 軸方向のせん断力を負荷する試験：以下同様）、RL、LT、TL、RT、TR 方向のせん断試験を実施した。各試験のサンプル数は 15 とした。試験は、精密万能試験機 AG-50kNXDplus および、AGX-100kNV（いずれも（株）島津製作所製）を使用し、JIS Z2101：2009 を参考に実施した。ただし、R 軸方向の引張り試験片は、JIS 規格の形状を作製するのに十分な長さの材料を確保できなかったため、JIS の比例試験片とした。同様に、R 軸方向の圧縮試験片の長さも、作製可能な最大の長さとした。試験速度は、試験開始から破断までの時間が 1 ～ 2 分程度となるように調整した。図 2 に引張り試験、図 3 に圧縮試験、図 4 にせん断試験の様子と試験片を示す。

機械や構造物は、式 (1) で計算される許容応力 σ_a を超えないように設計される⁶⁾。ここで σ_s は基準強さ、 S は安全率である。本研究では、材料試験から得られた応力-変位曲線から基準強さを導出するため、試験中の最大応力、および JIS に記載されている ISO 式比例限度を求めた。また、それぞれの平均値と標準偏差から、5%下限値⁷⁾を導出した。基準強さは、最大応力または ISO 式比例限度のいずれかの 5%下限値とする必要があるが、本研究では標準偏差が小さい方を採用した。

$$\sigma_a = \frac{\sigma_s}{S} \quad (1)$$

(2) 降伏関数パラメータの導出

前項で求めた基準強さと安全率に基づき、破壊基準を構築するための許容応力を導出した。本研究では、木材に静荷重を負荷した状態の評価を目的とし、安全率は 7 とした⁶⁾。破壊基準を記述する降伏関数として、式 (2) に示す Hoffman の降伏関数を採用した。 σ は木材に働く垂直応力、 τ はせん断応力であり、例えば σ_L は L 軸方向の垂直応力、 τ_{LR} は L 軸に垂直な面に対して R 軸方向のせん断力が加わった際のせん断応力を意味する。係数 $A \sim I$ は材料固有の値であり、式 (3) ～ (11) の σ と τ に許容応力を代入することで算出した。なお、式中の (+) は引張り、(-) は圧縮の試験から得られた許容応力を示す。

$$A(\sigma_L - \sigma_R)^2 + B(\sigma_R - \sigma_T)^2 + C(\sigma_T - \sigma_L)^2 \quad (2)$$

$$+ D\tau_{LR}^2 + E\tau_{RT}^2 + F\tau_{TL}^2 + G\sigma_L + H\sigma_R + I\sigma_T = 1$$

$$A = -\frac{\sigma_R^{(+)}\sigma_R^{(-)}(\sigma_T^{(+)}\sigma_T^{(-)} - \sigma_L^{(+)}\sigma_L^{(-)}) + \sigma_T^{(+)}\sigma_T^{(-)}\sigma_L^{(+)}\sigma_L^{(-)}}{2\sigma_R^{(+)}\sigma_R^{(-)}\sigma_T^{(+)}\sigma_T^{(-)}\sigma_L^{(+)}\sigma_L^{(-)}} \quad (3)$$

$$B = \frac{\sigma_R^{(+)}\sigma_R^{(-)}(\sigma_T^{(+)}\sigma_T^{(-)} - \sigma_L^{(+)}\sigma_L^{(-)}) - \sigma_T^{(+)}\sigma_T^{(-)}\sigma_L^{(+)}\sigma_L^{(-)}}{2\sigma_R^{(+)}\sigma_R^{(-)}\sigma_T^{(+)}\sigma_T^{(-)}\sigma_L^{(+)}\sigma_L^{(-)}} \quad (4)$$

$$C = -\frac{\sigma_R^{(+)}\sigma_R^{(-)}(\sigma_L^{(+)}\sigma_L^{(-)} + \sigma_T^{(+)}\sigma_T^{(-)}) - \sigma_T^{(+)}\sigma_T^{(-)}\sigma_L^{(+)}\sigma_L^{(-)}}{2\sigma_R^{(+)}\sigma_R^{(-)}\sigma_T^{(+)}\sigma_T^{(-)}\sigma_L^{(+)}\sigma_L^{(-)}} \quad (5)$$

$$D = \frac{1}{\tau_{LR}^2} \quad (6)$$

$$E = \frac{1}{\tau_{RT}^2} \quad (7)$$

$$F = \frac{1}{\tau_{TL}^2} \quad (8)$$

$$G = \frac{\sigma_L^{(+)} + \sigma_L^{(-)}}{\sigma_L^{(+)}\sigma_L^{(-)}} \quad (9)$$

$$H = \frac{\sigma_R^{(+)} + \sigma_R^{(-)}}{\sigma_R^{(+)}\sigma_R^{(-)}} \quad (10)$$

$$I = \frac{\sigma_T^{(+)} + \sigma_T^{(-)}}{\sigma_T^{(+)}\sigma_T^{(-)}} \quad (11)$$

2.2 CAE による脚物家具の強度評価

前脚、後脚、座板、笠木、座枠で構成される椅子を対象とした CAE 解析を実施した。椅子の前脚と座枠、および後脚と座枠は「ほぞ」で連結され、接着剤等で滑りや分離が無いように固定されているものと仮定した。また、椅子の各部品は、長手方向（座板は前後方向、笠木は上下方向）を L 軸とするカシで作製されていると仮定した。解析では、人が着席した際の各部品および接着部の破壊の可能性の評価として、体重約 80 kg の使用者が着席し、笠木に約 40 kgf の力が掛かった状態を模擬した。解析モデルは二分の一モデルとして、座面に 400 N、笠木に 200 N の荷重を負荷した状態を想定した。解析は、ANSYS Workbench 18.2 で実施した。ヤング率は、イチイガシ（L 軸）の 16.18 GPa を採用した⁸⁾。ポアソン比は、同じくイチイガシの、L 軸方向の引張り（圧縮）ひずみに対する R 軸方向のひずみの比である 0.4 を採用した⁸⁾。

3 結果

3.1 県産広葉樹の破壊基準の構築

(1) 材料試験

材料試験の結果の代表として、図5にL軸引張り試験結果、図6にL軸圧縮試験結果、図7にRL方向のせん断試験結果を示す。図中にプロットされた○がISO式比例限度、△が試験中の最大値を示す。なお、一部の試験では変位の増加に伴い、荷重が増加し続ける傾向が見られた。そのような試験では、ISO式比例限度のみを取得した。試験結果から求めた平均と標準偏差（ISO式比例限度あるいは最大値から算出）、そして基準強さとなる5%下限値を表1に示す。なお、 τ_{LR} と τ_{LT} は荷重を負荷した方向へのせん断破壊が確認されなかったため、数値を算出しなかった。また、 τ_{RT} と τ_{TR} は共役関係にあるため、これらのうち小さい値を基準強さとして採用した。

(2) 降伏関数パラメータの導出

取得した基準強さを安全率7で除した許容応力を表2に示す。さらに、許容応力を基に、式(3)～(11)から導出したパラメータを表3に示す。式(2)から、Hoffmanの降伏関数は楕円または双曲線の関数であることがわかる。そのため、パラメータA、B、Cのいずれかが負の場合、式(2)は双曲線を描く。表3より、表2の許容応力からは $\sigma_z - \sigma_x$ 空間において双曲線を描くパラメータが導出されたことがわかる。本研究では、これを楕円にするため、表4のように許容応力を絶対値が小さくなる方向に調整した。この調整は表2より小さい応力で破壊判定を出すため、安全側にシフトした基準となる。調整後の許容応力を用いて再計算したパラメータを表5に示す。

3.2 CAEによる脚物家具の強度評価

CAEによる強度評価は、表5のパラメータで実施した。椅子を構成する各部品の強度評価結果を図8に示す。式(2)より、評価値が1を超えると破壊の可能性があることを示す。評価の結果、今回対象とした椅子はほとんどの部位で評価値が1未満であった。しかしながら、前脚、後脚、そして座枠の「ほぞ」周辺では1を超える領域があることが確認された（図中の丸で示した領域）。

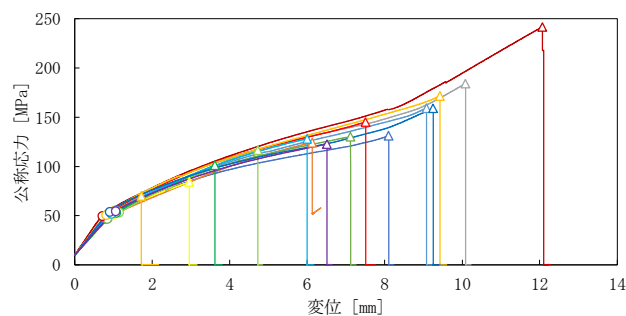


図5 カシL軸引張り試験結果

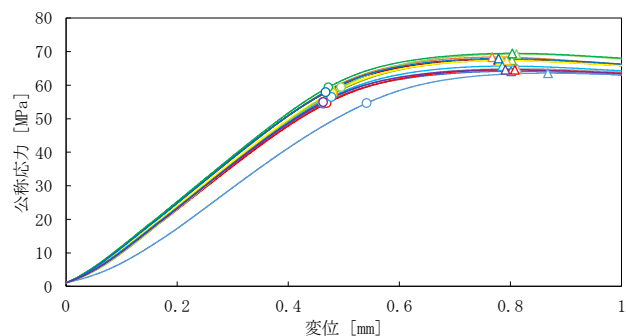


図6 カシL軸圧縮試験結果

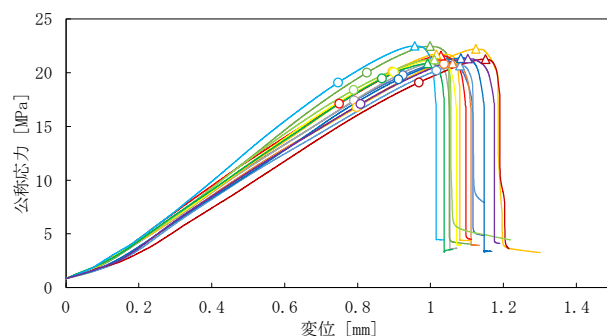


図7 カシRLせん断試験結果

4 考察

本研究では、県産広葉樹であるカシを対象に、CAEで活用できる異方性を考慮した破壊基準の構築を行った。また、その基準を用いて脚物家具の強度評価を行い、破壊の可能性がある部位の特定を試みた。まず、CAEの評価結果について考察すると、本研究で構築した破壊基準は、5%下限値に安全率7を適用しているため、かなり安全側に設定された基準である。ところが、図7の結果からは、部位によっては破壊の危険があるものの、破壊の恐れがない領域が支配的であることが確認された。したがって、今後は試作と試験による強度評価を進めることが可能と判断することができる。本研究で用いた降伏関数を使った破壊基準は、鉄鋼材におけるvon Mises stressのように様々な方向の破壊基準を1つの判定基準（図8の場合1

表1 カシの基準強さ

			サンプル数	平均 [MPa]	標準偏差	基準強さ [MPa]	備考
引張り試験		$\sigma_L^{(+)}$	15	51.54	2.862	46.84	ISO 式比例限度
		$\sigma_R^{(+)}$	15	10.28	1.148	8.389	ISO 式比例限度
		$\sigma_T^{(+)}$	15	8.877	1.391	6.589	最大値
圧縮試験		$\sigma_L^{(-)}$	15	57.01	1.827	54.01	ISO 式比例限度
		$\sigma_R^{(-)}$	15	17.10	0.5053	16.26	ISO 式比例限度
		$\sigma_T^{(-)}$	15	11.38	1.011	9.713	ISO 式比例限度
せん断試験	共役	τ_{LR}	15	—	—	—	せん断破壊せず
		τ_{RL}	15	21.42	0.5837	20.46	最大値
	共役	τ_{LT}	15	—	—	—	せん断破壊せず
		τ_{TL}	15	19.34	0.5772	18.39	最大値
	共役	τ_{RT}	15	13.16	1.162	11.25	最大値
		τ_{TR}	15	11.19	0.4896	10.39	最大値

$\sigma_L^{(+)}$	$\sigma_R^{(+)}$	$\sigma_T^{(+)}$	$\sigma_L^{(-)}$	$\sigma_R^{(-)}$	$\sigma_T^{(-)}$	$\tau_{LR(LI)}$	$\tau_{LT(TI)}$	$\tau_{RT(TR)}$
6.691	1.198	0.941	-7.715	-2.323	-1.388	2.923	2.628	1.484

A	B	C	D	E	F	G	H	I
-0.1344	0.4936	0.2721	0.1170	0.4541	0.1448	0.9328	0.4041	0.3417

$\sigma_L^{(+)}$	$\sigma_R^{(+)}$	$\sigma_T^{(+)}$	$\sigma_L^{(-)}$	$\sigma_R^{(-)}$	$\sigma_T^{(-)}$	$\tau_{LR(RL)}$	$\tau_{LT(TL)}$	$\tau_{RT(TR)}$
0.941	1.198	0.941	-1.388	-2.324	-1.388	2.923	2.628	1.484

A	B	C	D	E	F	G	H	I
0.1796	0.1796	0.5861	0.1170	0.4541	0.1448	0.3417	0.4041	0.3417

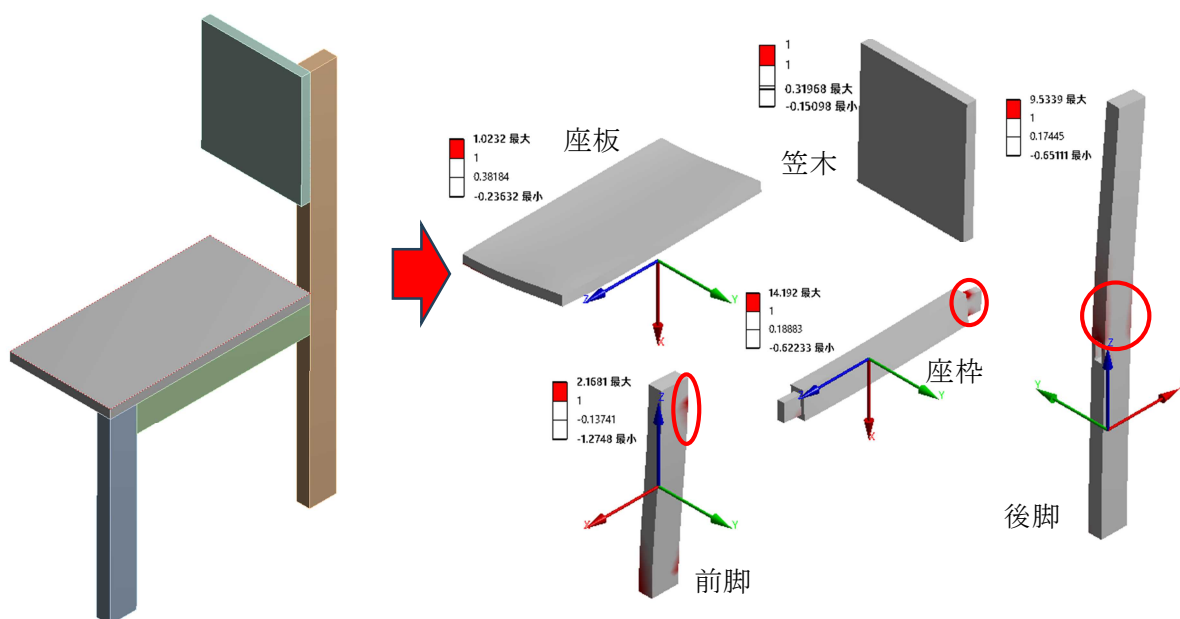


図8 評価結果

次に、本研究で導入した降伏関数について考察する。木材の破壊基準として一般的に使用されるのは、異方性に対応した Hill の二次降伏関数であるが、本研究では、垂直応力の正負で異なる基準を導入できる Hoffman の降伏関数を採用した。本研究の結果から、Hoffman の降伏関数パラメータは、各軸方向の引張り/圧縮試験結果と 3 つのせん断試験結果から導出可能であることが確認された。しかしながら、各試験から得られた破壊基準、例えば L 軸引張り側の破壊基準は、式(2)で描かれる曲面と L 軸の正の側の交点のデータでしかない。そのため、例えば L、R 軸方向に同時に力が加わった場合の破壊基準を式(2)が適切に表現できているかは未確認である。この確認のためには、各軸に対して 45 度傾斜した方向の引張り/圧縮試験やせん断試験、さらには二軸引張り試験を実施する必要がある。

5 まとめ

本研究では、静岡県の木製家具産業の復興を目指し、他産地にはない新しい生産技術の確立として、DX 技術である CAE による木製家具の強度評価環境を構築した。得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 県産広葉樹であるカシを対象に、各軸方向にどの程度の応力が加わると破壊するか of 基準となるデータを、標準偏差を含めて取得した。
- 得られたデータに基づき、安全率を考慮した破壊基準を、降伏関数により記述した。
- 記述した降伏関数を CAE システムに実装することで、脚物家具の強度評価が実施できた。
- Hoffman の降伏関数の妥当性検証には、例えば L 軸に対して 45 度傾斜した方向への引張り/圧縮試験やせん断試験、さらには二軸引張り試験の導入が必要である。

本研究は、静岡県新成長戦略研究「政策課題指定枠」の事業により実施された。

参考文献

- 1) 静岡県経済産業部商工業局：「静岡の家具」振興方針。(2024 年 3 月公表)
- 2) 経済産業省：経済産業省生産動態統計年報

繊維・生活用品統計編。(2021.6.9 公表)

- 3) 経済産業省：工業統計調査。(2021.8.13 公表)

4) Hill R.: A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 193(1033), 281-297 (1948).

5) Hoffman. O.: The Brittle Strength of Orthotropic Materials, Journal of Composite Materials, 1(2), 200-206 (1967).

6) 日本機械学会：第 2 章応力とひずみ, 「JSME テキストシリーズ材料力学」, 初版 ((一社) 日本機械学会, 東京), pp. 28-29 (2007).

7) 日本木材学会：第 6 章実大材からの各種基準強度の誘導, 「ティンバーメカニクス」, 初版 (海青社, 滋賀), pp. 146-150 (2015).

8) 農林省林業試験場編：2. 木材の性質, 「木材工業ハンドブック」, 第 2 版 (丸善 (株), 東京), p 132 (1959).