

木製家具製作のための CAE 適用手法の開発

Development of the CAE application method for manufacturing wooden furniture

会津若松技術支援センター 産業工芸科 関澤良太 吉田智
電子・機械技術部 機械・加工科 坂内駿平

本研究では、CAE に必要な県産杉材のパラメータをひずみゲージを用いた圧縮試験によって取得し、万能試験機で取得したデータと DIC の比較を行うことで DIC の妥当性を検証した。また、強度試験と CAE の比較を行うことで、CAE の妥当性を検証した。本研究より、DIC 測定ではヤング率 E_L において妥当な物性値が得られた。また、CAE において物性値に直行異方性を設定した場合、強度試験の結果と概ね合致する妥当な結果を得られることができた。

Key words: 木材、木製家具、強度設計、CAE

1. 緒言

木製家具を設計する際、経験則や既存製品に基づく強度設計をしていることが多いため、必要強度を狙って設計できないことや強度不足による再設計のため、開発に材料・時間的コストがかかることが課題である。

そこで、自動車などの工業分野で活用されている CAE (Computer Aided Engineering, 以下 CAE) を適用することで、試作前にあらかじめコンピュータ上で強度解析を行うことにより、試作回数の低減、強度面での品質・性能の向上、開発期間の短縮などが期待できる。しかし、木材は材料の方向によって強度が異なる性質 (異方性) があることや木材の接合方法の違いにより強度が変わることから、工業分野における CAE の手法をそのまま利用することができず、業界に普及していない。また、CAE 解析には物性のパラメータが必要であり、主にデータの取得に使用されるひずみゲージは、接触測定のため信頼性が高いデータを取得できる反面、範囲外での物性を取得することが出来ない。代わりに画像相関法 (Digital Image Correlation, 以下 DIC) による物性の取得が考えられるが、DIC で得られたパラメータが妥当か検証する必要がある。

そこで本研究では、木製家具の強度を CAE により解析する手法の確立を目標とし、本年度は、ひずみゲージを用いた圧縮試験による CAE に必要な木材 (県産杉材) のパラメータを取得し、DIC とひずみゲージ、及び万能試験機で得たデータを比較することで、DIC の妥当性を検証することとした。また、以前に実施した家具強度試験と CAE との比較を行うことで、CAE の妥当性を検証した。

2. 実験

2. 1. CAE に必要な木材の物性パラメータ

CAE 解析には、ヤング率 (E)、せん断弾性係数 (G)、ポアソン比 (μ) のパラメータが必要である。ただし、

前述したとおり、木材は材料の方向によって強度が異なる性質 (異方性) があるため、直行する 3 軸方向を繊維方向 : L、半径方向 : R、接線方向 : T と定義した。木材の直交する 3 軸方向を図 1 に示す。また、ここから切り出した圧縮試験体を図 2 に示す。

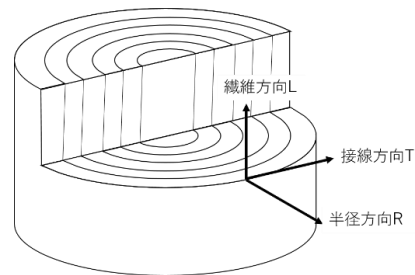


図1 木材の直交する3軸方向

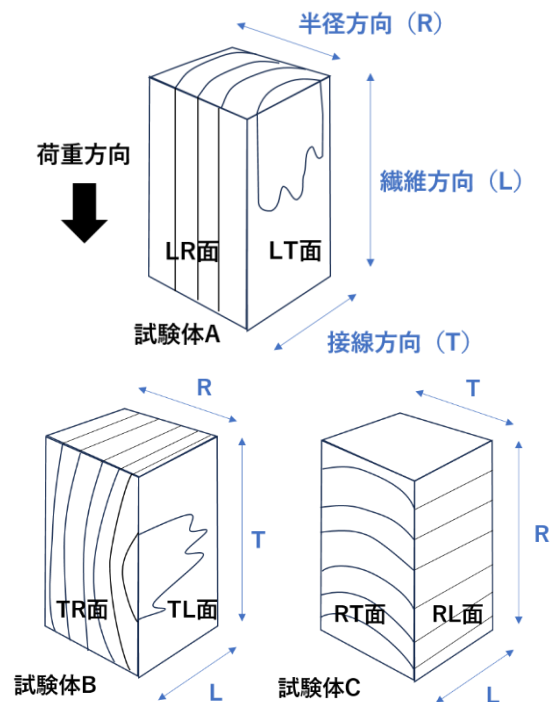


図2 試験体A、B、C

試験体としては、圧縮方向を繊維方向:Lとした試験

体 A、接線方向:T とした試験体 B、半径方向:R とした試験体 C の 3 種類の試験体を準備した。

また、本研究報告書において、ポアソン比 μ_{LR} などの記号は、最初の文字が圧縮試験の荷重が作用する方向、次の文字がその垂直（横）方向となる面を測定したことを示す。試験体 A における LR 面を図 3 に示す。

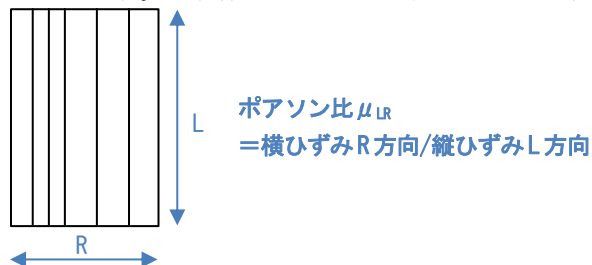


図3 試験体A LT面 ポアソン比 μ_{LR}

例えば、ポアソン比 μ_{LR} は荷重方向=L 方向、その垂直方向=R 方向となる面においてのポアソン比であり、ポアソン比 μ_{LR} = 横ひずみ（R 方向）/ 縦ひずみ（L 方向）と定義した。

なお、ポアソン比に関しては、 μ_{LR} 、 μ_{LT} 、 μ_{RT} 、 μ_{RL} 、 μ_{TL} 、 μ_{TR} の 6 個が必要であるが、参考文献 (1) より、 $\mu_{LR}E_R = \mu_{RL}E_L$ 、 $\mu_{RT}E_T = \mu_{TR}E_R$ 、 $\mu_{LT}E_T = \mu_{TL}E_L$ で近似できることから、 μ_{TL} 、 μ_{TR} 、 μ_{RL} の 3 個で代表した。

そして、CAE 解析に必要な各々のヤング率を E_L 、 E_T 、 E_R 、せん断弾性係数を G_{LR} 、 G_{LT} 、 G_{RT} 、ポアソン比 μ_{TL} 、 μ_{TR} 、 μ_{RL} をとした。表 1 に CAE 解析に必要な合計 9 個の物性値一覧を示す。

表 1 CAE 解析に必要な物性値一覧

ヤング率 E_L
ヤング率 E_T
ヤング率 E_R
ポアソン比 μ_{TR}
ポアソン比 μ_{TL}
ポアソン比 μ_{RL}
せん断弾性係数 G_{LR}
せん断弾性係数 G_{LT}
せん断弾性係数 G_{RT}

2. 2. 試験方法および試験体

材料のパラメータを取得するにあたって、引張試験、3 点曲げ試験、いす型試験など様々な方法があるが、参考文献 (2)、及び実際の木製家具の使用シーンにおいて圧縮による負荷が多いことから、圧縮試験を採用した。

JIS Z 2101 木材の試験方法 10 縦圧縮試験を参考

に、精密万能試験機（オートグラフAG-2000E、(株) 島津製作所製）を使用して試験体長軸方向に圧縮を行い、圧縮ひずみを測定した。試験荷重速度は2[mm/min]とした。なお、圧縮治具は垂直方向の負荷を重視したため、固定式を採用した。

試験体は、県産杉材（(株) 光大から提供）、試験体 A、B、C を各5つ、計15のサンプルを用意した。試験体のサイズは幅20×厚み20×高さ40[mm]とした。なお、材料の芯材・辺材、アテ、節などに関しては、厳密に考慮せず、サンプル提供企業の材料品質の水準を満たすものを試験体とした。

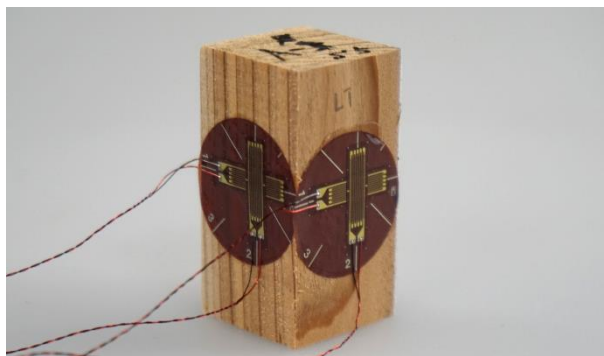


図4 ひずみゲージを張り付けた試験体

図4にひずみゲージを張り付けた試験体を示す。ひずみゲージ（(株) 共和電業、汎用箔ひずみゲージ KFGS-10-120-D16-11 N1M2 ゲージ長10[mm]）はポアソン比測定のために2軸のものを使用し、各試験体の隣り合う2面の中央に貼り付けて、ひずみを測定した。

圧縮試験より得られた荷重とひずみから応力-ひずみ曲線を求め、直線領域（＝弾性変形範囲）とみられる範囲で、以下に示す 3 条件からヤング率とポアソン比を求めた。

- (1) 試験機のカロスヘッド変位（＝ストローク）から算出したひずみと応力から求めた値。
- (2) ひずみゲージで取得したひずみと応力から求めた値。
- (3) DIC 解析で取得したひずみと応力から求めた値。

なお、木材の応力-ひずみ曲線は、明確な直線領域がないため比例限度応力および領域を定義できない。そのため本研究では、比例限度領域を以下の方法で定義した。

- (1) ひずみゲージが観測していない初期挙動（応力のみが増加する領域）を除外した値を開始点とする。
- (2) 開始点から 200[MPa]間の応力-ひずみ曲線の傾きを a とする。
- (3) 開始点から 400[MPa]、600[MPa]…と領域を増加させて、傾きが $0.95a$ を下回った時点を比例限度応力、開始点～比例限度応力間を比例限度領域とする。

ヤング率、ポアソン比は以下の式より算出した。

- ・ ヤング率 $[N/mm^2] = \text{応力}[N/mm^2] / \text{ひずみ}[\mu ST]$
- ・ ポアソン比 $= \text{横ひずみ}[\mu ST] / \text{縦ひずみ}[\mu ST]$

せん断弾性係数は、参考文献(2)を参考に、以下の式から算出した。

- ・ $G_{LR} \doteq 0.10E_L$
- ・ $G_{LT} \doteq 0.05E_L$
- ・ $G_{RT} = 0.003E_L$

また、DIC解析のためにランダムドットパターンを試験体AはLT面、試験体BはTL面、試験体CはRL面に施した。DIC解析動画は、カメラ（SONY $\alpha 5100$ 、解像度 1920×1080 [px]、約 17 [Mbps]）を使用し、ズーム倍率 $\times 50$ 、試験体観察面までの距離 240 [mm]で撮影した。圧縮試験の様子を図5に示す。

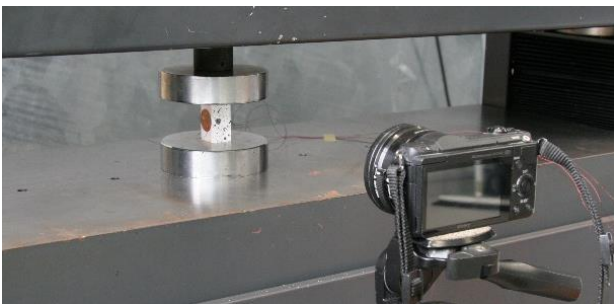


図5 圧縮試験の様子

また、DIC解析では、全体(R0)、上段(R1)、中段(R2)、下段(R3)の4つ領域を観察した。ひずみゲージは、各試験体の中央に貼り付けたため、DIC解析における中段(R2)と近い領域を観察した。試験体Aのランダムドットパターンの一例とDICの観察領域(R0~3)を図6に示す。

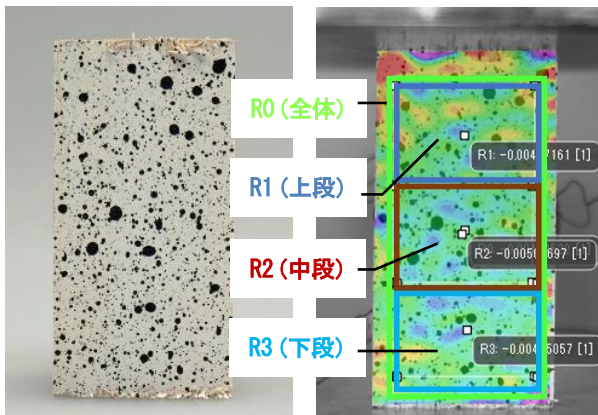


図6 試験体Aのランダムドットパターンの一例
及びDICの観察領域(R0~3)

2. 3. 実物の家具強度試験とCAE解析の比較方法

過去に実施した(株)光大製の組立式木製テーブルの圧縮試験を参考に、CAE解析を実施して結果を比較した。本テーブルの部品構成を図7に示す。本テーブ

ルは天板、脚4本、貫2本、ダボ16本で構成される。ダボの径は 8 [mm]で、径 7.8 [mm]の穴に圧入することで部品同士を結合している。圧縮試験の結果を図8に示す。縦軸が試験力[N]、横軸が変位[mm]を示し、テーブルの最大試験力は 9054 [N]、最大変位は 12.7859 [mm]であった。

CAE解析はANSYSを使用し、テーブルの天板に圧縮荷重を負荷した際の変形量と応力を計算する構造解析を実施した。解析モデルの材質は直交異方性を適用し、実物のテーブルの部品の木目と同じになるよう各部品に異方性を設定した。

境界条件として、ダボ結合部分には、ダボ圧入による初期応力を設定した。部品同士の接触面は、滑りは許容しないが分離は許容する設定とした。圧縮試験の結果から、変形量が大きくなることが予想されるため、大変形オプションを適用した。

固定箇所は図9のとおり4本の脚の底面とした。荷重は図9のとおり、天板の中心に圧縮試験の圧子を想定した直径 100 [mm]の面を作成し、前述の最大試験力 9054 [N]を負荷した。

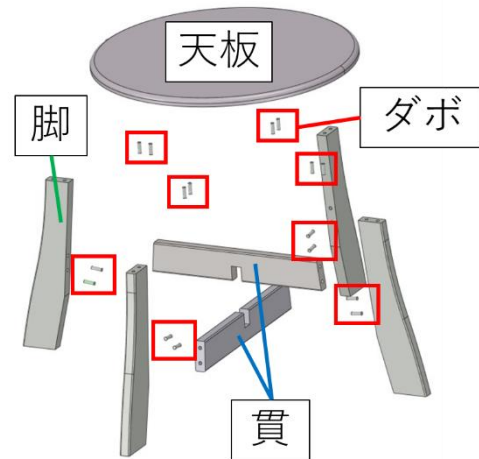


図7 テーブルの部品構成

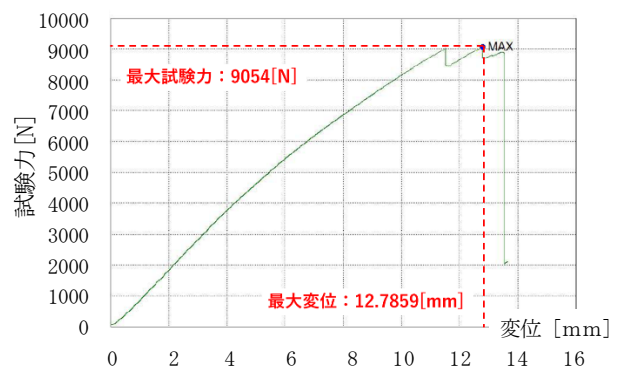


図8 テーブル圧縮試験結果

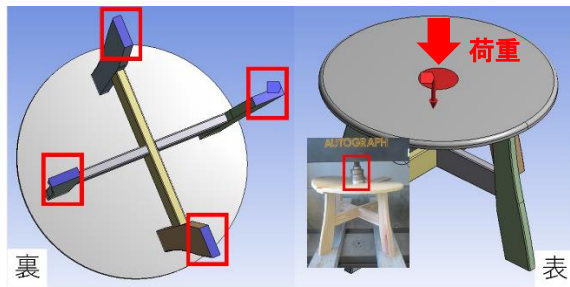


図9 テーブルの解析モデル

3. 結果と考察

3. 1. 圧縮試験の各取得データとDIC解析との比較

DIC とひずみゲージ及び万能試験機のサンプリング周期を 0.1 秒で同期させて解析した。

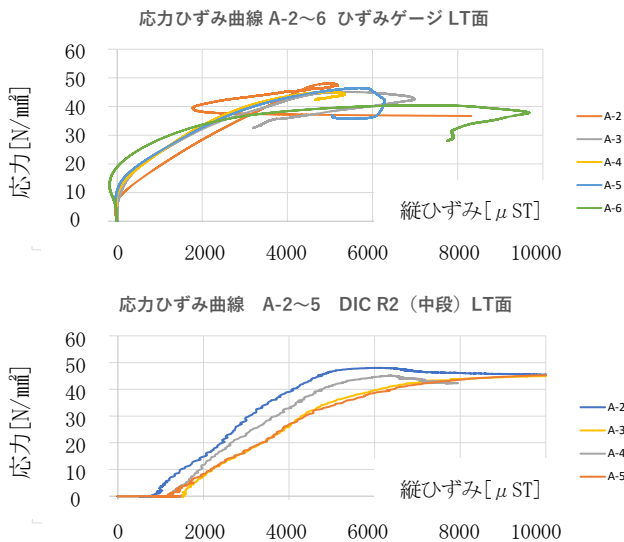


図10 試験体A LT面の応力-ひずみ曲線

圧縮試験より得られた試験体AのLT面における応力-ひずみ曲線を図10に、同試験およびDIC解析で得られた試験体Aのヤング率 E_L 、ポアソン比 μ_{LR} 、 μ_{LT} を表2に示す。試験体AのLT面において、ひずみゲージとDIC R2データを比較した結果、平均ヤング率 E_L は、1591.6[MPa]の差となり、DIC R2はひずみゲージの約0.87倍となった。また、平均ポアソン比 μ_{LT} に関しては0.284の差となり、DIC R2はひずみゲージの約1.5倍となった。なお、試験体A-1に関しては球座式圧縮治具を使用したことにより、有効なデータと判定できなかったため除外した。また、試験体A-6に関しては、DIC測定面がLR面であるため、比較データとして記載していない。

次に、試験体Bの応力-ひずみ曲線を図11に、同試験で得られた試験体Bのヤング率 E_T 、ポアソン比 μ_{TR} 、 μ_{TL} を表3に示す。

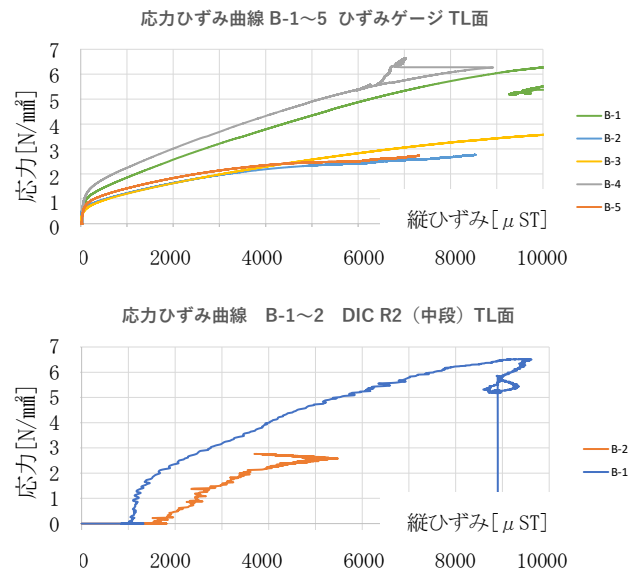


図11 試験体B TL面の応力-ひずみ曲線

試験体BのTL面において、ひずみゲージとDIC R2データを比較した結果、平均ヤング率 E_T は1241.4[MPa]の差があり、DICはひずみゲージの約3.2倍となった。また、平均ポアソン比 μ_{TL} に関して、0.428の差があり、DIC R2はひずみゲージの約11.4倍となった。この大きな差は、特に年輪構造（早材、晩材の幅）の個体差が原因として考えられる。

最後に、試験体Cの応力-ひずみ曲線を図12に、同試験で得られた試験体Cのヤング率 E_R 、ポアソン比 μ_{RT} 、 μ_{RL} を表4に示す。

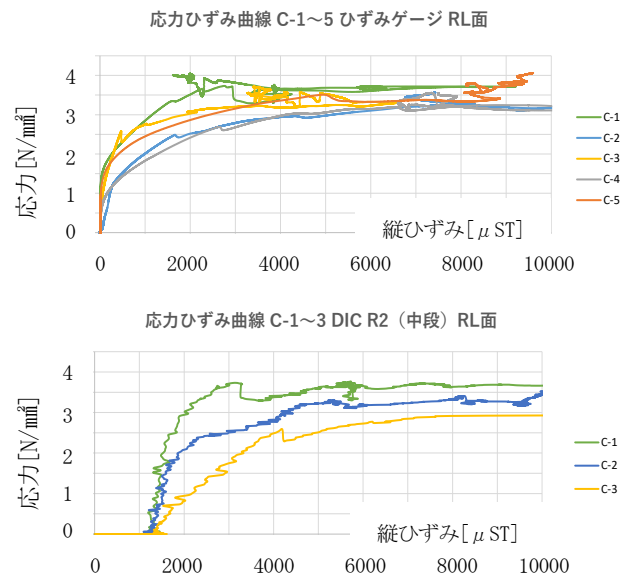


図12 試験体C RL面の応力-ひずみ曲線

試験体CのRL面においてひずみゲージとDIC R2データを比較した結果、平均ヤング率 E_R は261.4[MPa]の差があり、DIC R2はひずみゲージの約0.84倍となった。また、平均ポアソン比 μ_{RL} に関しては0.07の差でDIC R2はひずみゲージの約2.25倍となった。試験体Bと

表2 試験体Aのヤング率 E_L [MPa]とポアソン比 μ_{LR} , μ_{LT}

ヤング率 E_L (文献値「木材工業ハンドブック (丸善)」: 7335[MPa]) ³⁾							
試験体	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	平均	標準偏差
試験機ストローク	3908.7	3620.9	3958.4	3583.6	3020.3	3618.4	334.3
ひずみゲージLR面	9225.4	8345.7	14592.1	9268.3	13218.3	10930.0	2489.7
ひずみゲージLT面	9856.5	12277.0	12620.6	11914.7	14553.5	12244.5	1502.3
DIC R0 (LT面)	13535.9	11727.9	13006.6	10618.5	LR面測定	12222.2	1135.5
DIC R2 (LT面)	12557.2	9222.5	11809.4	9022.4	LR面測定	10652.9	1554.7
ポアソン比 μ_{LR} , μ_{LT} (文献値「木材工業ハンドブック (丸善)」 μ_{LR} : 0.4, μ_{LT} : 0.6) ³⁾							
試験体	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	平均	標準偏差
試験機ストローク							
ひずみゲージLR面	0.566	0.583	0.585	0.456	0.516	0.541	0.049
ひずみゲージLT面	0.484	0.578	0.521	0.377	0.561	0.504	0.071
DIC R0 (LT面)	0.849	0.891	0.715	0.641	LR面測定	0.774	0.100
DIC R2 (LT面)	0.814	0.919	0.734	0.684	LR面測定	0.788	0.089

表3 試験体Bのヤング率 E_T [MPa]とポアソン比 μ_{TR} , μ_{TL}

ヤング率 E_T (文献値「木材工業ハンドブック (丸善)」: 294[MPa]) ³⁾							
試験体	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	平均	標準偏差
試験機ストローク	434.6	235.7	300.2	428.3	231.0	326.0	89.6
ひずみゲージTR面	841.8	626.3	624.3	863.3	541.6	699.5	128.9
ひずみゲージTL面	652.4	467.1	406.5	778.3	476.7	556.2	138.0
DIC R0 (TL面)	832.2	1192.4	-	-	-	1012.3	180.1
DIC R2 (TL面)	936.1	2658.4	-	-	-	1797.6	861.2
ポアソン比 μ_{TR} , μ_{TL} (文献値「木材工業ハンドブック (丸善)」 μ_{TR} , μ_{TL} : 記載なし) ³⁾							
試験体	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	平均	標準偏差
試験機ストローク							
ひずみゲージTR面	0.398	0.378	0.538	0.381	0.381	0.313	0.119
ひずみゲージTL面	0.053	0.027	0.027	0.045	0.051	0.041	0.011
DIC R0 (TL面)	0.209	0.262	-	-	-	0.236	0.027
DIC R2 (TL面)	0.257	0.681	-	-	-	0.469	0.212

表4 試験体Cのヤング率 E_R [MPa]とポアソン比 μ_{RT} , μ_{RL}

ヤング率 E_R (文献値「木材工業ハンドブック (丸善)」: 588[MPa]) ³⁾							
試験体	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	平均	標準偏差
試験機ストローク	615.0	317.2	487.4	328.3	321.7	413.9	119.2
ひずみゲージRT面	1663.0	725.6	2602.1	1171.0	1031.6	1438.7	655.7
ひずみゲージRL面	1116.2	905.6	4050.1	1233.5	729.4	1607.0	1233.8
DIC R0 (RL面)	1773.5	1006.6	651.7	-	-	1143.9	468.2
DIC R2 (RL面)	2095.2	1406.3	535.2	-	-	1345.6	638.3
ポアソン比 μ_{RT} , μ_{RL} (文献値「木材工業ハンドブック (丸善)」 μ_{RT} : 0.90, μ_{RL} : 記載なし) ³⁾							
試験体	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	平均	標準偏差
試験機ストローク							
ひずみゲージRT面	0.745	0.672	0.680	0.742	0.710	0.710	0.030
ひずみゲージRL面	0.079	0.035	0.073	0.059	0.038	0.056	0.019
DIC R0 (RL面)	0.106	0.005	0.165	-	-	0.092	0.066
DIC R2 (RL面)	0.143	0.071	0.165	-	-	0.126	0.040

同様に、この差も個体差が原因として考えられる。

各試験体のヤング率、ポアソン比は、ひずみゲージと DIC R2 に差が生じている。これは DIC 解析範囲とひずみゲージ範囲が異なっているためと考えられる。試験体 A を例に、DIC 解析範囲とひずみゲージ範囲の比較画像を図 13 に示す。

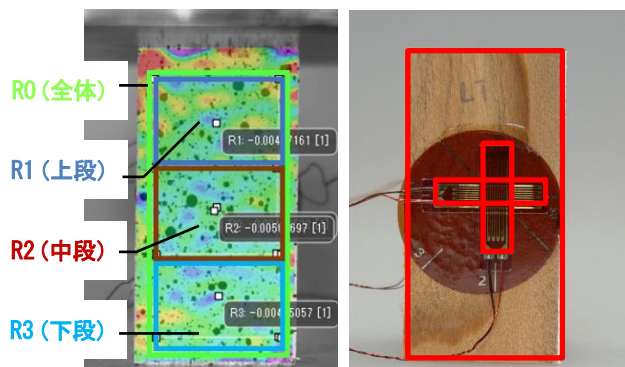


図 13 DIC 解析範囲とひずみゲージ範囲の比較画像

ひずみゲージは、長さ 10[mm]×幅 3[mm]の領域を観察しているのに対して、DIC は、長さ約 10[mm]×幅 16[mm]の領域を観察している。これにより、ひずみゲージと DIC R2 の結果に差が出たと考える。

また、試験体 B の代表的な DIC 解析の縦ひずみ-時間のグラフを図 14 に示す。

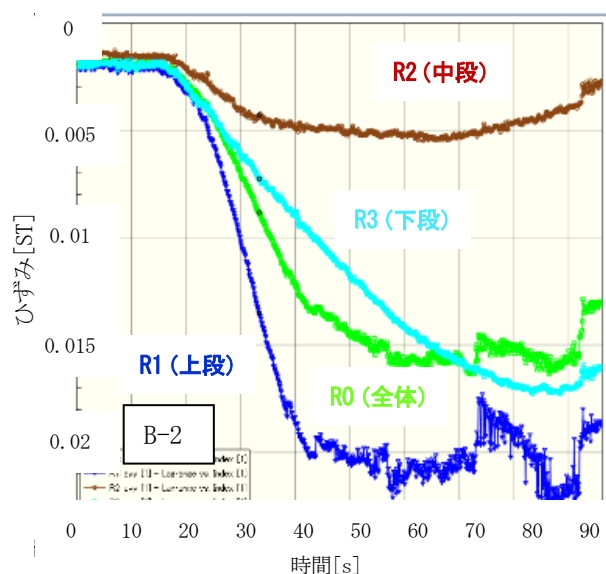


図 14 DIC の縦ひずみ-時間グラフ 試験体 B

縦軸が圧縮方向のひずみ[ST]、横軸が時間[s]を表す。各曲線は、DIC の観察領域 R0 (緑)、R1 (青)、R2 (茶)、R3 (水色) を示している。一定時間経過、約 22～23 秒後からバラつきが確認され、各領域によって同時間のひずみが異なることが読み取れる。このことから DIC により挙動をシミュレーションするにあたっては、局所的な特性 (R1～3 領域) ではなく、全体特性 (R0 領域、もしくは万能試験機のスロークによる見かけのひずみ) が重要と考える。また、平均値を CAE 解析デ

ータとして利用する際は、標準偏差および上記グラフから、個々の物性の不均一性を考慮して解析する必要がある。

3. 2. 実物の強度試験と CAE 解析の比較結果

3. 1 で得られた結果を基に、物性値を ANSYS に入力し、構造解析を実施した。入力した物性値を表 5 に示す。CAE の解析には、万能試験機のスロークを用いて算出したヤング率およびポアソン比を採用した理由は以下 2 点である。

- (1) 局所的ではなく全体的な物性を優先するため。
- (2) 安全性を考慮し、求めたパラメータの絶対値の小さいものを採用したため。

表 5 物性値一覧

ヤング率 E_L	3618 [MPa]
ヤング率 E_T	326 [MPa]
ヤング率 E_R	413 [MPa]
ポアソン比 μ_{TR}	0.313
ポアソン比 μ_{TL}	0.041
ポアソン比 μ_{RL}	0.056
せん断弾性係数 G_{LR}	361 [MPa]
せん断弾性係数 G_{LT}	180 [MPa]
せん断弾性係数 G_{RT}	11 [MPa]

CAE の解析結果と圧縮試験後の実際の変形を比較したところ、図 15 のとおり隙間が生じている様子が確認できた。

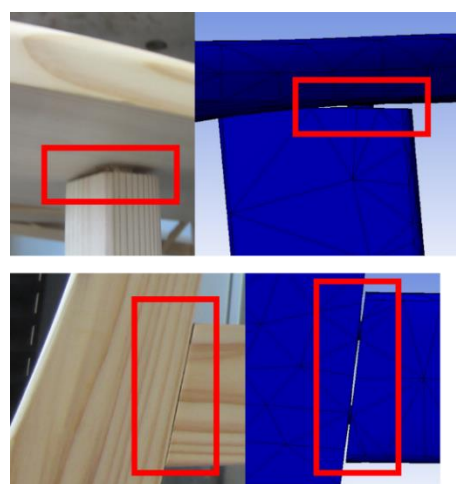


図 15 圧縮試験後と解析の変形比較
(左：圧縮試験後、右：解析)

最大変形量は図 16 の通り 17.309[mm] となり、圧縮試験の最大スローク 12.7859[mm] と差が生じた。これは、木材の物性値は前述の通りバラつきがある事、また、今回のせん断弾性係数は前述の変換式で算出し

ている事から、圧縮試験の結果と差が生じたと考えられる。

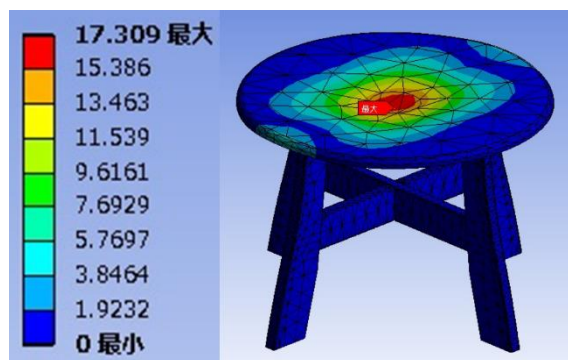


図 16 変形量解析結果

最大相当応力は図 17 のとおり天板と脚を結合する 2 本のダボのうち、外側のダボの midpoint から若干脚側で発生した。金属等の異方性が無い材料であれば、最大相当応力はダボの midpoint で発生するが、今回の解析モデルでは木材の異方性により、ダボを曲げる方向の力に対して天板側は剛性が低く、脚側は剛性が高いため、ダボが脚側で固定された片持ち梁の様な挙動を示し、最大相当応力発生箇所が脚側に遷移したと考えられる。

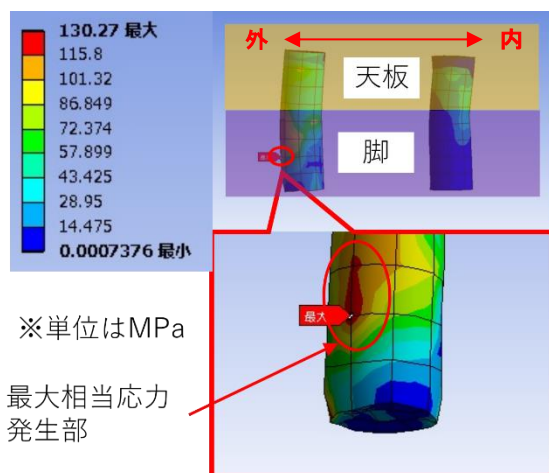


図 17 最大相当応力発生箇所

4. 結言

本研究では、ひずみゲージを用いた圧縮試験による CAE に必要な木材（県産杉材）のパラメータを取得し、DIC とひずみゲージ及び万能試験機で得たデータを比較することで、DIC の妥当性を検証した。また、実物の強度試験と CAE の比較を行うことで、CAE の妥当性を検証した。結果は以下のとおり。

- (1) DIC とひずみゲージで得たデータを比較した結果、ヤング率 E_L に関しては、DIC で妥当な結果が得られたと考える。他ヤング率 (E_R 、 E_T)、ポアソン比 (μ_{LR} 、 μ_{LT} 、 μ_{RT}) は差が見られた。今後更なる妥当性の検証が必要である。

- (2) 実物の家具強度試験と CAE 解析を比較した結果、物性値に直交異方性を設定し、ダボ結合部分に初期応力を設定することで、圧縮試験の結果と概ね合致する妥当な結果を得ることができた。

本研究結果をもとに、更に CAE 解析の精度を高めていくとともに、次年度は木材の接合部におけるせん断試験と CAE 解析を行い、両者の比較を行っていく。

謝辞

本研究を進めるにあたって、県産杉材をご提供くださった株式会社光大 代表取締役 根本昌明 様をはじめ社員のみなさまに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 澤田稔. 直交異方性材料としての木材の弾性および強度. 「材料」第 12 巻 第 121 号, (昭和 38 年 10 月), p751.
- 2) 澤田稔. 木材の変形挙動. 「材料」第 32 巻 第 359 号, (昭和 58 年 8 月), p839-840.
- 3) 農林省林業試験場. 司 忠. 木材工業ハンドブック. 丸善株式会社, 昭和 45 年 9 月.