

# 伝統木造接合部の復元力特性に関する基礎研究 —画像解析を用いた木材めり込み時の大ひずみ計測法—

Fundamental Study on Restoring Force Characteristics of Japanese Historic Timber Joints  
-A method for large strain measurement of wood elements under compression perpendicular to grain using digital image analysis -

遠藤俊貴<sup>1</sup>・青野翔<sup>1</sup>・荒木慶一<sup>2</sup>

Toshiki Endo, Sho Aono and Yoshikazu Araki

<sup>1</sup>京都大学大学院生 工学研究科建築学専攻 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂C2-314)

Graduate Student, Kyoto University, Dept. of Architecture and Architectural Engineering

<sup>2</sup>京都大学大学院准教授 工学研究科建築学専攻 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂C2-314)

Associate Professor, Kyoto University, Dept. of Architecture and Architectural Engineering

We propose a method for measurement of large strains of wood elements under compression perpendicular to grain using digital image analysis. In the proposal method, dot patterns are given to the wood specimen at constant intervals. Variation of the position of each dot is traced based on the principle of the pattern matching. Strain distribution is obtained by using the measured displacement of the dots using interpolation functions, which are used in the finite element method. We demonstrate the proposed method through some compression tests perpendicular to grain.

**Key Words** : wood, compression perpendicular to grain, digital image analysis, elasto-plasticity, large strain measurement

## 1. 序

伝統木造建築の水平力に対する主要な抵抗機構のひとつとして、柱一貫接合部の復元力特性が挙げられる。柱一貫接合部では、柱と貫の相対回転角の増減に伴い、柱による貫や楔へのめり込みが進行する。このため柱一貫接合部の復元力特性は木材のめり込み特性に大きな影響を受ける<sup>1,2)</sup>。李ら<sup>3)</sup>は、特定の仕口部を対象とし、柱と貫の相対回転角に応じためり込み特性に関する実験データを収集し、その結果から接合部のモーメントー回転角骨格曲線を予測する手法を提案した。しかし、提案手法を用いるには樹種や仕口形状に応じためり込み実験が必要となるため、汎用性の面で課題が残る。この問題を解消するには、めり込み実験や接合部復元力特性を再現できる有限要素法を用いたシミュレーション環境の構築が必要となる。

柱一貫接合部におけるめり込み挙動は、通常、弾塑性レベルの変形であり、そのひずみは数%を超える。そのため伝統木造建築の主要な耐震要素である柱一貫接合部の性能を有限要素法を用いて評価するためには、弾塑性レベルのめり込み挙動をモデル化する必要がある。しかし、木材めり込み挙動を有限要素法によって弾塑性レベルでモデル化し解析を行った事例は数少ない<sup>4,5)</sup>。その原因として、(1)降伏歪・降伏応力・降伏後の剛性などの弾塑性有限要素解析に必要な材料データが不足している、(2)ひずみが数%を超える領域（以下大ひずみ領域）での弾塑性材料データを得るための実験方法（ひずみ計測手法など）が確立されていない、といった問題点が挙げられる。

そこで本論では、(1)弾塑性レベル（大ひずみ領域）まで計測可能な画像解析によるひずみ計測手法の提案、

(2)ひずみゲージ・変位計との比較による提案手法の妥当性の検討、(3)提案手法を用いた部分圧縮試験によるめり込み挙動予測のための基礎データ収集の三点を目的として研究を行った結果を報告する。

## 2. 画像相関法

画像解析によるひずみ計測方法として、デジタル画像相関法と呼ばれる手法が知られている<sup>6-8)</sup>。この方法の概要は以下の通りである。図1のように、試験体に付与されたランダムパターンを頼りに変形前の画像とよく似た場所を変形後の画像から探し出し、その変位量（平行移動量）を測る。実際の演算は、変形前画像の任意の点に関してその周りの一定範囲（図1左黒枠部分）を切り出し、以下の式(1)で定義される変形後画像の一定範囲（図1右黒枠部分）との間の相関係数 $C_{fg}$ （画像の一致度）を求め、変形後画像の黒枠を平行移動させて、相関係数が最も高くなる位置を見つけ出す。

$$C_{fg} = \frac{\sum \sum f_{ij} \cdot g_{ij}}{|f| \cdot |g|} \quad (1)$$

ただし式(1)において、 $f_{ij}$ 、 $g_{ij}$ は図1の黒枠内のある画素に関する輝度値を表わし、 $f$ と $g$ はその輝度値の集合としての多次元ベクトルを表す。すなわち相関係数の分子は $f$ と $g$ の内積を表し、相関係数は余弦を表す。

画像相関法を用いたひずみ分布計測は数多くなされており、微小ひずみの計測精度は非常に高い精度の結果が得られている。また、計算負荷や計測誤差の削減のために様々な研究が行われている。しかし、画像相関法では、ランダムパターンを試験体に付与する必要があるが、これを適切に付与できなかった場合、パターンの判別が難しく誤探索を起しやす。また、本論では材料塑性化後の観察を主たる目的としているが、既往の手法では変形が増大したときランダムパターンが損なわれ、大ひずみ領域におけるひずみ計測が正常に行いにくくなることが予測される。

## 3. 提案手法

本論では、試験体にランダムパターンを付与する方法ではなく、図2のようにある程度の大きさのドットを一定間隔に付与し、ドットの変位を測定し、ドットの移動から有限要素法と同様の内挿関数を用いてひずみを算出する。これにより、任意の位置の移動情報を得ることはできなくなるが、対象とするドットの移動情報はほぼ確実に得ることができ、大ひずみ領域を対象としたひずみ測定が可能となる。

本手法における解析処理は画像相関法とほぼ同様のものであるが、(1)任意の点（画素）の変位を割り出すのではなく、付与した特定のドットの変位に注目すること、(2)ドット部分以外の変形情報を無視するために二値化処理を施し、ドットの形を抽出することが異なる。（解析手順を図3に示す。）また、ひずみの計測精度を上げるために、画素間を補間処理し解像度を上げる必要があるが、今回は線形関数を用いて補間した。

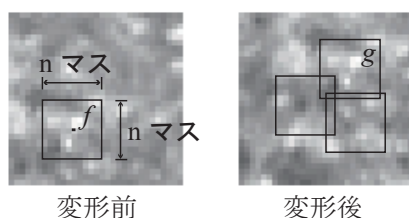


図1 画像相関法

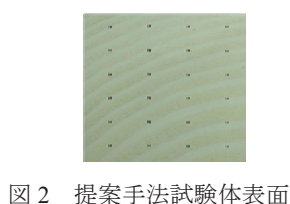


図2 提案手法試験体表面

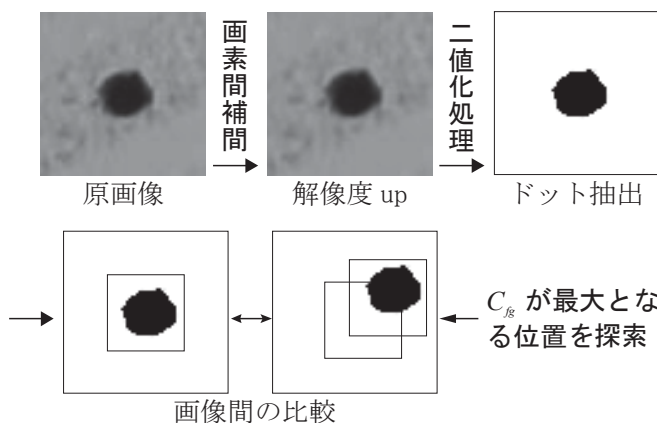


図3 解析手順

#### 4. 提案手法の妥当性の検討

弾性域における計測精度の検証として全面圧縮試験を行い、ひずみゲージとゲージ近傍のドットを画像解析した結果を比較した(図4)。試験体は、繊維方向長さ 50mm、半径方向長さ 60mm、接線方向長さ 105mm のベイマツを採用し、载荷方向は半径方向とした。試験体には、薄いアクリル板に錐で等間隔に孔を開けたテンプレートを作成し、これを用いて黒インクペンでドットを付与した。JIS による半径方向圧縮試験と比較して、繊維方向長さ、接線方向長さを大きく設定しているが、これは JIS 標準の寸法で大ひずみの圧縮試験を行う場合、試験体が括れ座屈してしまうので、弾塑性レベルまで画像解析を行う予定の本論では適さないためである。なお試験体のサイズが大きいため、年輪のカーブが見られる。このため応力度分布やひずみ分布が複雑になる。本実験は画像解析によるひずみ分布の計測を目的としているため、これを許容できるが、材料定数を得ることを目的とする場合は、小さいサイズの試験体を用いるべきと考える。また実験は3体行った。各試験体の含水率、密度、平均年輪幅を表1に示す。応力は試験機付属のロードセルで計測した荷重を断面積で除した値を用いて比較する。

比較結果の代表例を図5に示す。同図は試験体 BMAC-1 において、試験体上下面と年輪接線方向が平行となる部分のひずみをひずみゲージで計測した値(青線)と、その近傍の解析範囲1を画像解析した結果(紫線)、及び解析範囲2を画像解析した結果(水色線)を示す。また、紺色の線はひずみゲージで計測した結果を表す。ゲージ計測値と画像解析値の片方が弾性範囲で精度良く一致した。またひずみゲージが 0.5%程度までしか計測できていない。これは木材のひずみが大きくなるとひずみゲージが剥がれてしまったり、ゲージの抵抗部分が座屈してしまうためと考えられる。これに対し、画像解析値は計測の大きな乱れはなく、塑性域まで正常に計測できた。他の実験においても、同様もしくはこれ以上に一致した結果を得ている。

また、大ひずみ領域における提案手法の計測精度の検証として、材端間変位を载荷試験機付属の変位計とレーザー変位計によって計測し、その得られた変位を材せいで除し平均ひずみを求め、画像解析より得られた各ドット間のひずみの平均値との比較を行った。なお、強制変位はひずみが 40%程度に達するまで与えた。

表1 全面圧縮試験試験体諸量

試験体 番号	含水率 [%]	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	平均年輪幅 [mm]
BMAC-1	11	0.539	3.53
BMAC-2	11	0.536	3.33
BMAC-3	10	0.533	3.53

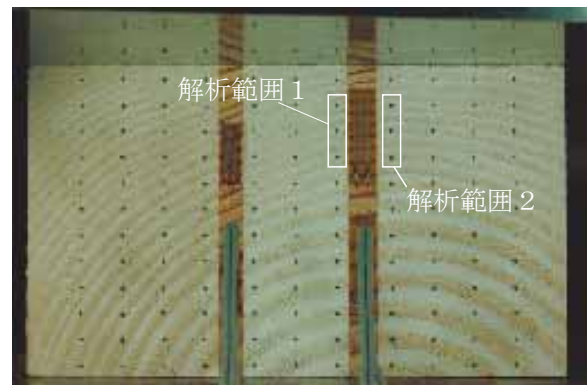


図4 全面圧縮試験

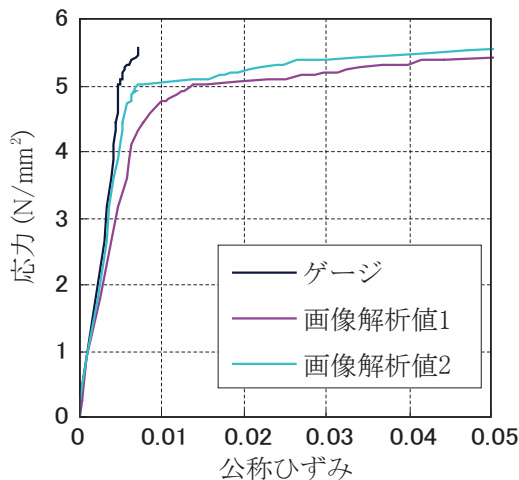


図5 歪ゲージと画像解析値の比較

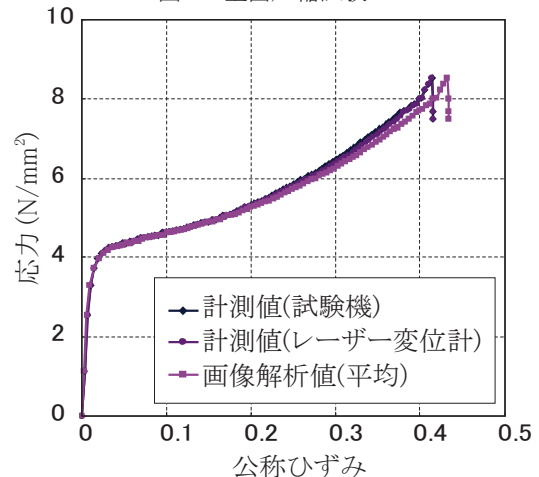


図6 変位計と画像解析値の比較

結果を図 6 に示す。なお、図 6 は図 5 に示した試験体とは別の結果である。図中紺色の線は荷重試験機付属の変位計により計測した値、濃紫色の線はレーザー変位計により計測した値、薄紫色の線は画像解析値の平均値を示す。画像解析値は最終的に変位計の値と 2%程度のみずみの違いが生じているが、ほぼ一致した形が得られた。よって 40%程度まで正常に計測できたとと言える。他の検証結果も図 6 と同等、もしくは、これ以上に一致した結果となった。

## 5. 部分圧縮試験

実際に提案手法を用いて部分圧縮試験を行った。試験体は繊維方向長さ 150mm、半径方向、接線方向の長さが共に 75mm のベイマツ材で、繊維直交半径方向（半径方向）に鋼板をめり込ませた（図 7）。鋼板の幅は 25mm、50mm、75mm、100mm の 4 通りとし、各 1 体ずつ試験を行った。各試験体の材料諸量を表 2 に示す。画像計測は Nikon D50 を用いて行った。また、荷重は変位制御で、荷重速度を 0.025mm/sec とし、めり込み量 0.25mm ごとに画像計測を行った。これは、荷重を荷重制御として、大ひずみ時（塑性変形時）の荷重速度が過剰な値となり、画像計測ステップ間のめり込み量の差が大きくなることを避けるためである。また画像解析に用いるドットは縦に 5mm 間隔、横に 2.5mm 間隔で付与した。めり込み量は荷重試験機付属の変位計とレーザー変位計、荷重は荷重試験機付属のロードセルで計測した。得られためり込

表2 部分圧縮試験試験体諸量

試験体 番号	荷重板幅 [mm]	含水率 [%]	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	平均年輪幅 [mm]
BMPC-1	25	8	0.56	1.56
BMPC-2	50	9.5	0.544	2.34
BMPC-3	75	8.5	0.518	1.6
BMPC-4	100	12	0.537	2.34

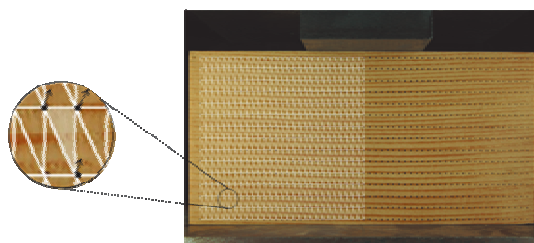


図 7 部分圧縮試験

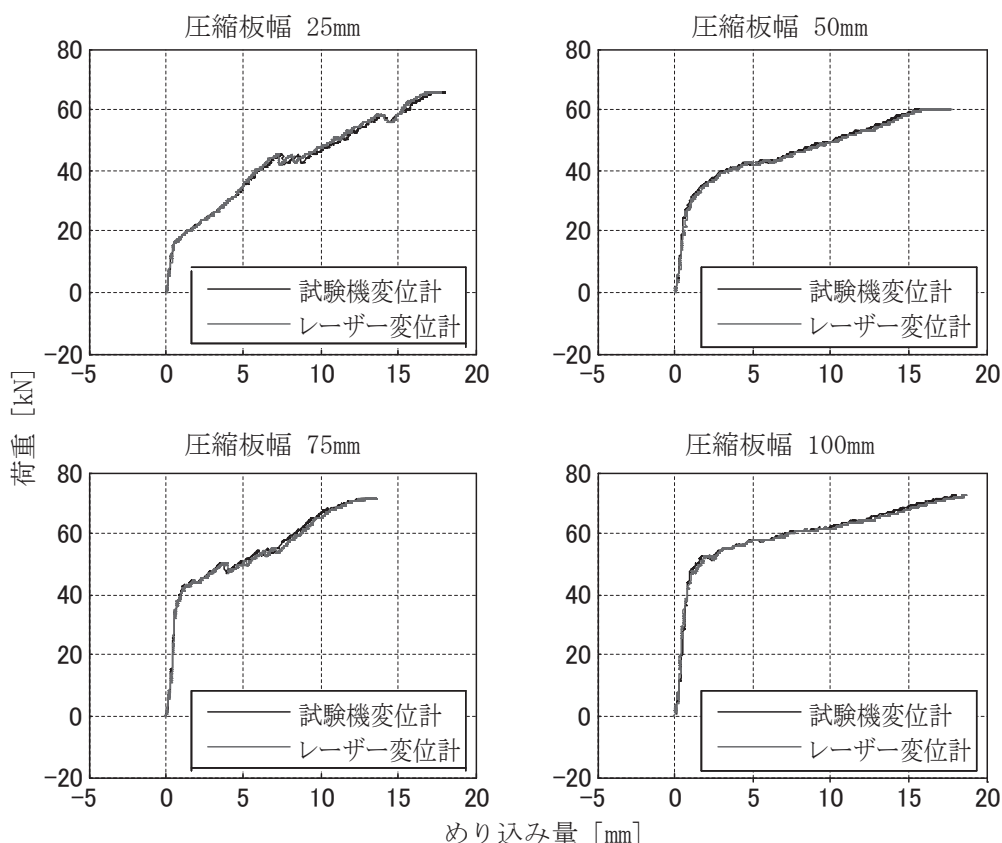


図 8 部分圧縮試験 荷重—めり込み量関係



み量-荷重関係を図 8 に示す。図中黒線は載荷試験機付属変位計で計測した値であり、灰色線はレーザー変位計で計測した値である。

図 7 のように試験体に付与したドットの囲む領域を有限要素法の一様ひずみ三角形要素とし、各ドットを三角形要素の節点とすれば、画像解析より得られたドットの変位を用いて各要素のひずみ  $\{\varepsilon_m\}$  を下式で表すことができる。

$$\{\varepsilon_m\} = [B_m(x, y)] \{u_m\} \quad (2)$$

$$[B_m] = \frac{1}{\det A} \begin{bmatrix} y_2 - y_3 & 0 & y_3 - y_1 & 0 & y_1 - y_2 & 0 \\ 0 & x_3 - x_2 & 0 & x_1 - x_3 & 0 & x_2 - x_1 \\ x_3 - x_2 & y_2 - y_3 & x_1 - x_3 & y_3 - y_1 & x_2 - x_1 & y_1 - y_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\det A = x_2 y_3 + x_1 y_2 + x_3 y_1 - x_1 y_3 - x_2 y_1 - x_3 y_2 \quad (4)$$

ただし、 $\{\varepsilon_m\}^T = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xz}\}$ 、 $\{u_m\}^T = \{u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3\}$  である。 $x_i$ 、 $y_i$  はそれぞれある要素の  $i$  番目節点の  $x$  座標、 $y$  座標であり、 $u_i$ 、 $v_i$  は  $i$  番目節点の  $x$  方向変位、 $y$  方向変位である。

図 9 に圧縮幅 50mm の試験におけるめり込み量 1mm ごとの鉛直方向ひずみ分布を示す。図中赤色の部分はひずみが 30% を超えており、圧縮部上縁にひずみが集中している。また紫色の部分では引張ひずみが生じ

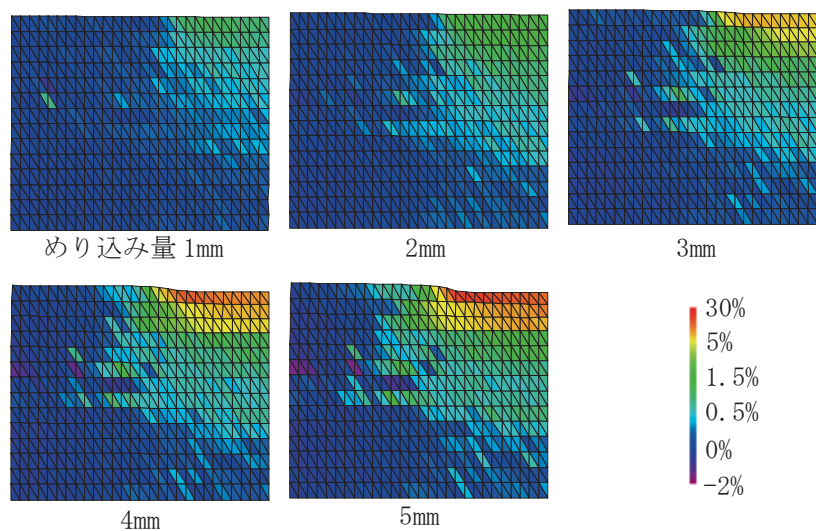


図 9 鉛直方向ひずみ分布 (圧縮幅 50mm)

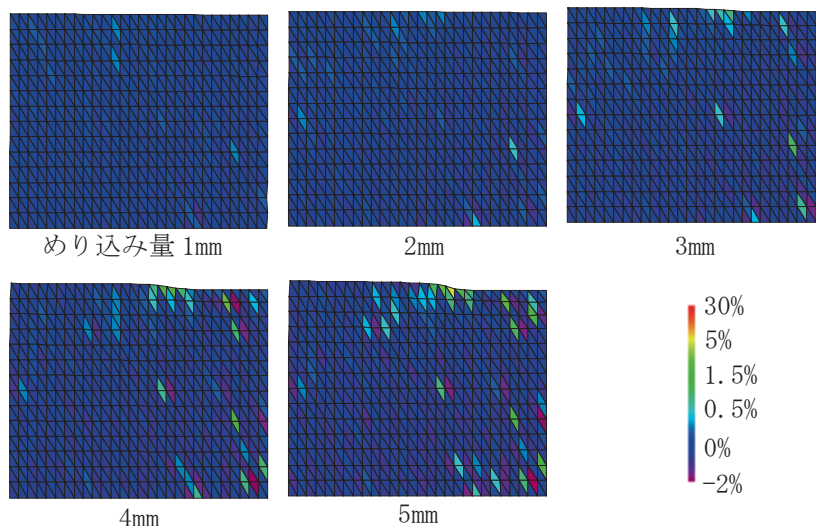


図 10 水平方向ひずみ分布 (圧縮幅 50mm)

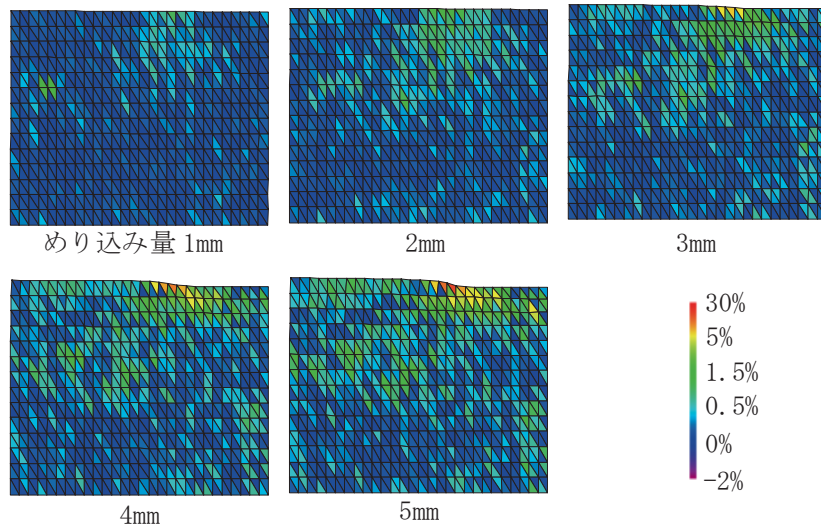


図 11 せん断ひずみ分布 (圧縮幅 50mm)

ており、めり込み量が大きくなったとき左側材端で引張が生じたことがわかる。めり込みをさらに進行させると、引張ひずみが生じている部分で割れが生じた。図 10 に圧縮幅 50mm めり込み量 1mm 毎の水平方向ひずみ分布を示す。鉛直方向圧縮試験のため水平方向には引張ひずみが生じていることが観察できるが、載荷板エッジ部分に圧縮ひずみが生じていることが分かる。図 11 に圧縮幅 50mm めり込み量 1mm 毎のせん断ひずみ分布の経過を示す。せん断ひずみに関しては圧縮境界付近を中心にひずみが広がる様子が観察できる。

## 6. 結

弾塑性レベル (大ひずみ領域) まで計測可能な画像解析によるひずみ計測手法を提案し、提案手法により弾塑性レベルの大変形領域でも良好な精度でひずみを計測できることを全面圧縮試験を通じて例証した。また提案手法を用い、部分圧縮試験のひずみ分布を大ひずみ領域まで計測した。これによって、(1)圧縮縁に 30%以上の圧縮ひずみが集中的に生じたこと、(2)材端周辺に引張ひずみが生じたこと、の二点が新たな知見として得られた。今後、(1)本論で得られた知見を基に簡易な弾塑性構成則を提案し、これを有限要素法に適用して部分圧縮試験結果と比較すること、(2)本論で提案している画像解析を用いて弾塑性レベルでの圧縮試験やせん断試験を行い、材料特性データベースの構築を行うことを課題として研究を進める予定である。

## 参考文献

- 1) 前野将輝：寺院建築物における伝統木造軸組の構造力学特性と耐震性能、京都大学博士論文、2007
- 2) 棚橋秀光、清水秀丸、鈴木祥之：パステルナーク・モデルに基づく直交異方性木材の部分圧縮による弾性表面変位、日本建築学会構造系論文集、No.609、pp.129-136、2006
- 3) 李東潤、荒木慶一、遠藤俊貴、吉田亘利、上谷宏二：めり込み実験に基づく伝統木造柱一貫半剛接合特性の推定、日本建築学会構造系論文集、Vol.73 No.631、pp.1577-1584、2008
- 4) Ping YANG、Yoshikyuki SUZUKI、Hideo HORIE：Computer Simulation of Structural Performance of Ladder-like Timber Beam Used in Reinforcement of Japanese Traditional Wooden Temple、10th World Conference on Timber Engineering 2008
- 5) 瀧野敦夫：有限要素解析における木材の材料モデルに関する基礎研究、第 59 回日本木材学会大会研究発表要旨集、pp.39、2009
- 6) 村田功二、増田稔、市丸美幸：画像相関法を用いた木材の横圧縮挙動の解析、木材学会誌、Vol.45 No.5、pp.375-381、1999
- 7) 村田功二、増田稔、宇京斉一郎：デジタル画像相関法による木材のひずみ分布解析、可視化情報学会論文集、Vol.25 No.9、pp.57-63、2005
- 8) 河田聡、南茂夫：科学計測のための画像データ処理法、CQ出版社