

木材切削時に発生するひずみの画像相関法による測定^{*1}

松田陽介^{*2}

Measurement of Strain in Wood Cutting Using Digital Image Correlation Method^{*1}

Yosuke MATSUDA^{*2}

When a cutting force is applied to the workpiece in wood cutting processes, stress and strain are distributed near the cutting edge. Fracture occurs and a chip is produced when the local stress and strain exceed the threshold corresponding to the mechanical strength of wood. In order to control the chip production, the strain distribution near the cutting edge is necessary to be controlled, or otherwise machining defects such as torn grain and fuzzy grain may occur. This paper summarized the author's works on the measurement of the strain near the cutting edge in slow-speed orthogonal cutting of wood by using a digital image correlation method.

Keywords : wood cutting, digital image correlation.

木材切削では、切削工具によって加えられた切削力に対抗して刃先の周辺に応力とひずみが発生し、これが木材の強度に対応するいき値を超えると木材に割れが入り、切屑が分離する。したがって、ひずみの発生を制御しないと切屑の分離が制御できず、逆目ほれや毛羽立ちなどの加工欠点が生じる。本稿では、筆者が取り組んできた木材の低速二次元切削時に刃先周辺で発生するひずみ分布を画像相関法によって測定した研究について概説する。

1. はじめに

木質資源は、建築や家具、食器や紙などの生活用品、エネルギーなどの形態で我々の生活に利用されている。木材を建築や家具、食器に利用する場合は製材や木工などの切削加工の工程が、紙やエネルギーに利用する場合はチップ化という切削加工の工程が必要である。切削加工とは、切削工具を用いて被削材の一部を切屑として除去し、材料の分割や寸法の調整、表面の仕上げなどを行なう基本的な加工手法であり、木材利用において重要な役割を担っている。

切削工具の刃先が被削材に入り切削力を加えると、材内にはそれに対抗して応力・ひずみが発生する。刃先周辺のひずみが被削材の強度に対応するいき値を超えると、木材に割れが入り、切屑が分離する。このとき、ひずみは刃先になるべく近い領域で限定的に生じることが望ましい。ひずみの大きい範囲が刃先以外の範囲にも広がって分布していると、刃先から離れた場所で切削されてしまい、意図した寸法や形状、仕上面に加工できないためである。したがって、適切な切削条件を設定し、ひずみの発生を制御する必要がある。

木材切削時に発生する応力やひずみの測定には、格子法や光弾性被膜法などの手法が用いられてきた。格子法とは、試験体表面に直接転写した格子状のグリッドパターンを読み取ることでひずみを測定する手法である。McKenzie ら¹⁾ は、単板切削における刃先周辺のひずみ分布を木口面に転写したグリッドパターン（格子の大きさ0.2 mm）を用いて測定し、ノーズバーの形状や刃先とノーズバーの間隔が

^{*1} Received September 30, 2022; accepted November 9, 2022.

^{*2} 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 Forest Research and Management Organization, Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba 305-8687, Japan

Corresponding author: Y. Matsuda (yosukem@ffpri.affrc.go.jp)

ひずみ分布に及ぼす影響を明らかにした。一方、光弾性被膜法とは、試験体材面に接着した光弾性被膜に生じる縞模様から応力を測定する手法である。木下²⁾は、光弾性被膜法によって単板切削における刃先周辺（約5 mm 以内）の応力分布を求め、刃先とノーズバーの間隔と裏割れの形成の関係について明らかにした。

格子法や光弾性被膜法では試験体表面への前処理が必須であり、測定の効率や精度に課題があった。本稿では、前処理を省略可能な画像相関法と呼ばれる手法を用いて木材切削時のひずみを測定した研究について紹介する。

2. 画像相関法

画像相関法は、試験体の変形前後で試験体表面のデジタル画像を取得し、両画像を比較することでひずみを計算する手法である。特徴として、測定する試験体表面にランダムドットパターンが備わっていれば、試験体表面への前処理が不要という点^{3,4)}や、画像さえ取得できれば、試験体の大小に依存しない測定が可能である点^{5,6)}などが挙げられる。

画像相関法は、1980年ごろに Peters ら⁷⁾や Sutton ら⁸⁾によって確立された。木材の研究分野では1991年に Choi ら⁹⁾が画像相関法を木材に初めて適用して以降、内外で多くの適用例が報告されている¹⁰⁻¹⁷⁾。Zink ら¹⁰⁾は、シュガーパイン (*Pinus lambertiana*) を縦圧縮したときのひずみ分布を画像相関法によって明らかにした。Hassel ら¹¹⁾は、ノルウェースプルース (*Picea abies*) のせん断ひずみ分布を画像相関法で測定し、有限要素法で得られた分布とよく一致することを示した。Keunecke ら¹²⁾は、木材の含水率が変化させたときに発生するひずみ分布を画像相関法によって測定し、密度分布との関係を明らかにした。Jeong ら¹³⁾は、スギ (*Cryptomeria japonica*) を含む4樹種の引張試験時のひずみを画像相関法によって測定し、ヤング率やポアソン比などを求めた。

国内では、村田ら⁵⁾が、木材の横圧縮時に木口面上で発生するひずみ分布を画像相関法によって測定し、横圧縮が進むにつれてせん断ひずみの発生範囲が遷移していくことを明らかにした。Murata ら¹⁴⁾は、木材細胞の膨潤によるひずみを画像相関法によって測定し、木材細胞の膨潤率の異方性を明らかにした。宮内ら¹⁵⁾は、伝統的な木造建築の接合部に用いられる蟻継手の引張試験を行い、接合部に生じるひずみを画像相関法によって測定し、接合部の形状とひずみ分布や引張強度との関係を明らかにし

た。Nagai ら¹⁶⁾は、スギの引張試験時に節の周辺で発生するひずみを画像相関法によって明らかにした。

以上のように、木材のひずみを画像相関法で測定した研究は多く存在するが、木材切削を対象とした研究はほとんどない。Hellström ら¹⁷⁾が、チップ加工時に刃先周辺で発生するひずみを画像相関法で測定したが、切削条件とひずみ分布の関係は明らかにしていない。

3. 画像相関法による木材切削時に発生するひずみの測定

筆者は、二次元縦切削を対象として、刃先から約0.5 mm 以内の領域で発生するひずみを画像相関法によって測定し、ひずみ分布に対する切込量や切削角、繊維傾斜角の影響を調べた^{18,19)}。

被削材はヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) (50 mm(L) × 5 mm(R) × 50 mm(T)) とした。被削材に向かって切削工具を5 mm/s の速度で送ることで、LR 面を低速二次元縦切削した。その様子をLT 面側から高速度カメラ (250 fps) によって撮影し (Fig. 1), 切削前と切削中のデジタル画像を得た。

切削前の画像上に注目点を格子状に20 pixels (0.04 mm) 間隔で設定した。画像相関法では、この注目点が切削中の画像上でどこに移動したか求めることでひずみを計算する。しかし、注目点1画素分の画素値だけでは、探索に必要な情報量が不足する。そこで、注目点とその周囲の画素も含めたサブ

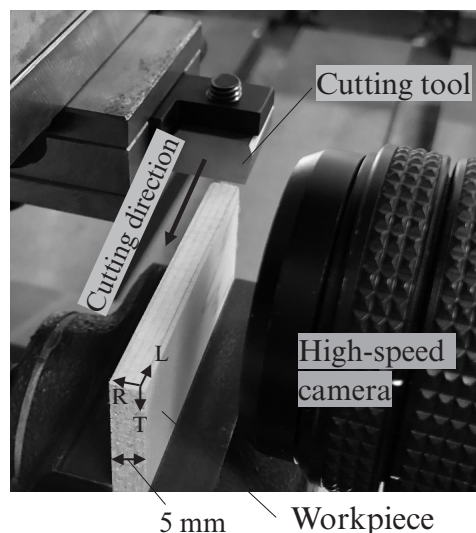


Fig. 1 Cutting experiment.

Note: This figure was modified from the figure in the reference¹⁸⁾.

セットと呼ばれる小領域（ここでは 21×21 pixels）を定義し、サブセットと最も画素配列が似ている領域を切削中画像から見つけ出すことで、注目点の位置を決定した。注目点の移動量を決定した後、隣接する注目点4点に囲まれた四角形の領域における主分力方向のひずみ、背分力方向のひずみ、せん断ひずみを計算した。なお、測定可能な最小のひずみは約0.08%であった。

得られたひずみ分布の一例をFig. 2に示す。図は、刃先の前方で背分力方向（T方向）の引張ひずみが発生していることを示している。刃先がさらに進むと、この引張ひずみがさらに大きくなり、最終的にこの領域で先割れが発生し切屑が分離すると考えられた。切削角が 60° 以下のとき、このような背分力方向の引張ひずみが刃先前方で検出され、切込量の増加とともに増加した。切削角が 70° 以上になると、背分力方向の圧縮ひずみが刃先下方（母材側）で検出された。今回用いた画像相関法プログラムでは、主分力方向のひずみをほぼすべての切削条件でほとんど検出することができなかった。これは、ヒノキの繊維方向の弾性係数が接線方向と比べて大きいためと考えられた。せん断ひずみについては、切屑になる部分で検出され、切削角に依存してその正負が変わることが確認された。ひずみの発生範囲が刃先周辺で小さくなる切込量と切削角の組合せを明らか

にし、切削条件を調整することで破壊ひずみの発生範囲を制御し加工欠点の生成を抑止できることを示した。

木材特有の加工欠点である逆目ぼれとの関連が深い繊維傾斜角に注目し、これがひずみ分布に及ぼす影響を調べた¹⁹⁾。順目切削の方が逆目切削よりもひずみの発生範囲が小さいこと、逆目切削においても切削角や切込量を調整することで逆目ぼれの原因となる過大なひずみの発生を制御できることを明らかにした。

切削中だけでなく切削後の画像も用いることで、母材側で過大なひずみが発生した場合、それが切削後どの程度残留するかを調べた²⁰⁾。切削角が 60° 以下のとき検出された背分力方向の引張ひずみは切削後ただちに回復した一方で、切削角 70° 以上のときの圧縮ひずみは切削後も残留することが明らかになった。圧縮ひずみが残留した条件では、仕上面表層に微小な圧壊部分が存在していることをX線コンピュータ断層撮影により確認した²¹⁾。切削時に母材側で発生した過大なひずみは切削後も残留し、仕上面の性状に影響を及ぼすことが明らかになった。

一連の研究によって、木材切削におけるひずみ測定に画像相関法が有効であることがわかったが、適用する上で注意すべき点もあった。例えば、切削工具の影が観察表面にできると、木材の変形とは関係

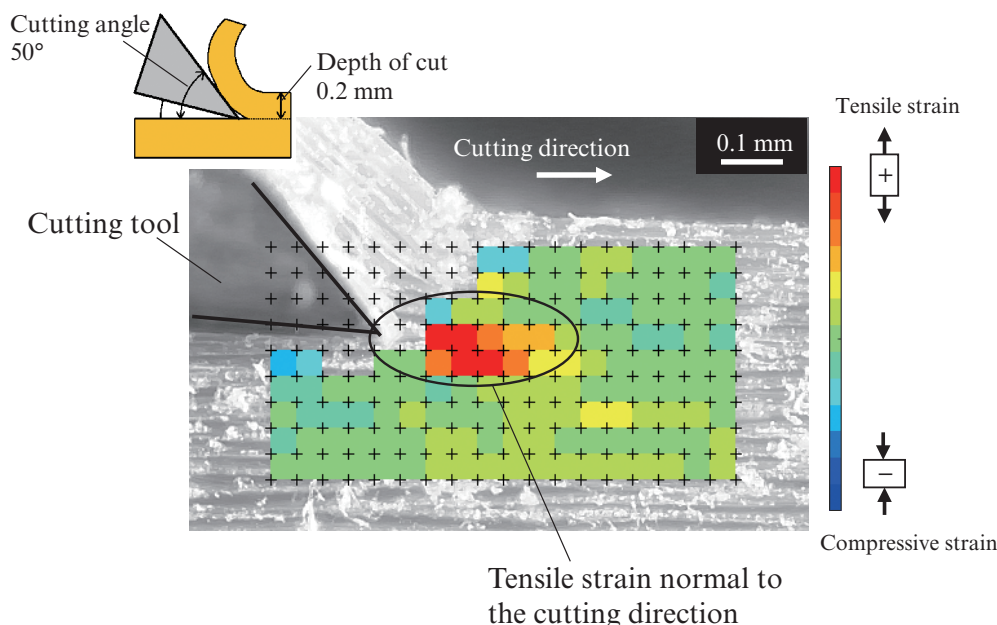


Fig. 2. Distribution of strain normal to the cutting direction.

Note: This figure was modified from the figure in the reference¹⁸⁾.

のない画素配列の変化が生じ、測定精度が低下した。影ができないような方向から照明を当てる工夫や切削工具と木材をなるべく面一にする工夫などが必要であった。

画像相関法は、画素の移動量をもとにひずみを計算するため、応力がわずかである場合や応力が大きくても弾性係数が大きい場合、ひずみの検出が困難となった。筆者の研究では、縦切削を対象としたため、主分力方向（繊維方向）のひずみの検出が困難であった。撮影倍率を高くすることなどが対策として挙げられる。逆に、今回用いた画像相関法プログラムの場合、大変形領域では画素配列が著しく変化するため、サブセットと似た領域を切削中画像から見つけることができずひずみの測定精度が低下した。筆者は、画像処理ソフト（MATLAB Release 2017, The MathWorks, Inc.）を用いて任意の画像に拡大・縮小処理を行い、疑似的にひずみを付与した画像を作成し、その疑似ひずみを画像相関法で測定することで測定精度を評価した。その結果、数十%以上の圧縮ひずみは測定できないと考えられた¹⁸⁾。これの対策としては、変形前と大変形後の2枚の画像だけでなく、その間に撮影された画像も用いて、ひずみを段階的に計算し、それらを積算して大ひずみを算出するアルゴリズムの導入などが考えられる。木材と切削工具の境界付近では、サブセットに切削工具が干渉するため測定精度が低下した。そのため、刃先に最も近い領域（0.1 mm 以内）のひずみの測定はできなかった。他にも面外方向のひずみなど、正確な測定のために考慮すべき項目があった²²⁾。このように、測定できるひずみの大きさや測定領域に限界や制限があったものの、画像相関法によって木材切削における刃先周辺のひずみ分布に対する切削条件の影響を明らかにすることができた。

4. おわりに

本稿では、木材切削において発生するひずみを画像相関法によって測定した研究について紹介した。これらの研究によって木材の切削現象の解明が進んだといえる。一方で、刃先最近傍の領域などひずみ分布が測定できなかった箇所も残っている。これらの領域のひずみの解明により、さらに木材切削への理解が深まると考えられる。

文 献

- 1) McKenzie, W.M., Karpovich, H.: Measured strains in slow linear veneer cutting: Effects of nosebar form and gap. *Wood Sci. Technol.* **9**, 213-231 (1975).
- 2) 木下毅幸: 単板形成過程の解析 (第3報) 光弾性被膜法による切削応力の解析. 木材学会誌 **30**(1), 32-37 (1984).
- 3) Pan, B., Qian, K., Xie, H., Asundi, A.: Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Meas. Sci. Technol.* **20**(6), 062001 (2009).
- 4) Pan, B., Lu, Z., Xie, H.: Mean intensity gradient: An effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation. *Opt. Lasers Eng.* **48**, 469-477 (2010).
- 5) 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 **45**(5), 375-381 (1999).
- 6) 宇京齊一郎: 木材の変位 (ひずみ) 分布観察—デジタル画像相関法による測定—, 木材工業 **70**(5), 230-233 (2015).
- 7) Peters, W.H., Ranson, W.F.: Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Opt. Eng.* **21**(3), 427-431 (1982).
- 8) Sutton, M.A., Wolters, W.J., Peters, W.H., Ranson, W.F., McNeill, S.R.: Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image Vis. Comput.* **1**(3), 133-139 (1983).
- 9) Choi, D., Thorpe, J.L., Hanna, R.B.: Image analysis to measure strain in wood and paper. *Wood Sci. Technol.* **25**, 251-262 (1991).
- 10) Zink, A.G., Davidson, R.W., Hanna, R.B.: Strain measurement in wood using a digital image correlation technique. *Wood Fiber. Sci.* **27**(4), 346-359 (1995).
- 11) Hassel, B.I., Berard, P., Modén, C.S., Berglund, L.A.: The single cube apparatus for shear testing—Full-field strain data and finite element analysis of wood in transverse shear. *Compos. Sci. Technol.* **69**, 877-882 (2009).
- 12) Keunecke, D., Novossetz, K., Lanvermann, C., Mannes, D., Niemz, P.: Combination of X-ray and digital image correlation for the analysis of moisture-induced strain in wood: opportunities and challenges. *Eur. J. Wood Prod.* **70**, 407-413 (2012).
- 13) Jeong, G.Y., Park, M.J.: Evaluate orthotropic

- properties of wood using digital image correlation. *Constr. Build. Mater.* **113**, 864-869 (2016).
- 14) Murata, K., Masuda, M.: Observation of microscopic swelling behavior of the cell wall. *J. Wood Sci.* **47**, 507-509 (2001).
- 15) 宮内一成, 増田 稔, 村田功二: 画像相関法による伝統的蟻継手のひずみ分布解析. *材料* **55** (4), 367-372 (2006).
- 16) Nagai, H., Murata, K., Nakano, T.: Strain analysis of lumber containing a knot during tensile failure. *J. Wood Sci.* **57**, 114-118 (2011).
- 17) Hellström, L.M., Gradin, P.A., Carlberg, T.: A method for experimental investigation of the wood chipping process. *Nord. Pulp Pap. Res. J.* **23**(3), 339-342 (2008).
- 18) Matsuda, Y., Fujiwara, Y., Fujii, Y.: Strain analysis near the cutting edge in orthogonal cutting of hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) using a digital image correlation method. *J. Wood Sci.* **64**(5), 566-577 (2018).
- 19) Matsuda, Y., Fujiwara, Y., Fujii, Y.: Effect of grain angle on the strain distribution during orthogonal cutting of hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) measured using a digital image correlation method. *J. Wood Sci.* **65**, 44 (2019).
- 20) Matsuda, Y., Fujiwara, Y., Murata, K., Fujii, Y.: Residual strain analysis with digital image correlation method for subsurface damage evaluation of hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) finished by slow-speed orthogonal cutting. *J. Wood Sci.* **63**, 615-624 (2017).
- 21) Matsuda, Y., Fujiwara, Y., Fujii, Y.: Observation of machined surface and subsurface structure of hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) produced in slow-speed orthogonal cutting using X-ray computed tomography. *J. Wood Sci.* **61**, 128-135 (2015).
- 22) Sutton, M.A., Orteu, J.J., Schreier, H.W.: Practical considerations for accurate measurements with DIC. "Image correlation for shape, motion and deformation measurements", Springer New York, NY, 2009, pp. 229-252.