

画像相関法を用いたひずみ解析による
木材切削機構の解明

松田陽介

2019

目次

緒論	1
第一章 既往の研究と本研究の目的	3
1.1 切削型に関する既往の研究	3
1.2 木材切削における応力・ひずみの測定・解析に関する既往の研究	4
1.2.1 格子法	4
1.2.2 光弾性被膜法	5
1.2.3 数値解析	5
1.3 木材への画像相関法の適用例	7
1.4 仕上面表層の損傷に関する既往の研究	9
1.5 木材への X 線コンピュータ断層撮影技術の適用例	11
1.6 木材切削における繊維傾斜角の影響に関する既往の研究	11
1.7 既往の研究の総括と本研究の目的	13
第二章 木材切削における切れ刃近傍のひずみ分布の 画像相関法による測定 15	
2.1 実験方法	15
2.1.1 試験体	15
2.1.2 切削試験	15
2.1.3 画像相関法によるひずみ測定	16
2.1.4 画像相関法によるひずみ測定の精度検証	18
2.1.5 増分法	21
2.1.6 面外方向の変位の影響	21
2.2 結果と考察	22
2.2.1 切削型と切れ刃近傍のひずみ分布の関係	22
2.2.2 切削条件が切れ刃近傍の背分力方向のひずみに及ぼす影響	26
2.2.3 切削条件が刃先進行線上の背分力方向のひずみに及ぼす影響	29
2.3 本章の要約	31
第三章 仕上面表層の残留ひずみ測定及び X 線コンピュータ断層撮影	33
3.1 実験方法	33
3.1.1 切削試験	33
3.1.2 画像相関法によるひずみ測定	34
3.1.3 画像相関法によるひずみ測定の精度検証	37
3.1.4 X 線コンピュータ断層撮影	39

3.2 結果と考察	40
3.2.1 主分力方向の残留ひずみ	40
3.2.2 背分力方向の残留ひずみ	41
3.2.3 X線CT画像からみた切削型ごとの仕上面の特徴	45
3.3 本章の要約	49
第四章 繊維傾斜角が切れ刃近傍のひずみ分布に及ぼす影響	51
4.1 実験方法	51
4.1.1 試料	51
4.1.2 切削試験	51
4.1.3 画像相関法によるひずみ測定	53
4.2 結果と考察	56
4.2.1 繊維傾斜角が切削型に及ぼす影響	56
4.2.2 繊維傾斜角が切れ刃近傍のひずみに及ぼす影響	57
4.2.3 繊維傾斜角が切屑になる部分で発生するひずみに及ぼす影響	61
4.2.4 繊維傾斜角が刃先前方の最大主ひずみに及ぼす影響	63
4.3 本章の要約	65
第五章 ひずみ分布からみた木材切削の特徴	67
5.1 実験方法	67
5.2 木材及び塩化ビニル材の切削時のひずみ分布	68
5.3 本章の要約	72
結論	73
謝辞	77
参考文献	79
略語・専門用語の一覧	85
付録 画像相関法の設定パラメータがひずみ測定に及ぼす影響	87

緒論

木材切削は、被削材の寸法の調整や形状の付与、さらに表面を仕上げることを目的として、切削工具を用いて被削材の一部を切屑として除去する加工である。切削工具の鋭利な先端である切れ刃が木材に進入し、切削力を加えると材内にはそれに対抗して応力及びひずみが発生する。切れ刃近傍でひずみが被削材の強度に対応する閾値を越えると、破壊が生じるとともに切屑が生じ、仕上面が現れる。切削によるひずみは切れ刃の進行線付近において限定的に生じることが望ましい。これは、ひずみの発生範囲が拡大すると、進行線から離れた領域に破壊が拡大し、切れ刃の軌跡と仕上面は一致しなくなり、所定の寸法や形状、仕上面は得られないためである。

切削時のひずみは切込量や切削角といった切削条件、さらには木材の強度特性やその異方性にも依存し、これらは最適な切削加工のための重要な制御因子である。さらに、木材切削に特有の加工欠点として知られる逆目ぼれは繊維傾斜角（縦切削における切削方向と平行かつ切削面に垂直な断面において繊維方向と切削方向のなす角度）に依存して発生するため、その抑止には、繊維傾斜角とひずみ分布の関係、さらにこれに対する切削条件の影響を知り、切削条件を最適化する必要がある。このように、木材切削における切屑や新生面の生成には切れ刃近傍のひずみ分布及びその時間変化が直接的に関与しているため、これらと生成する切屑や仕上面との関係を明らかにし、上述の切削条件や繊維傾斜角の影響を明らかにすることは、最適な切削条件を得るための基礎的知見である。

木材切削における切れ刃近傍の応力・ひずみの測定には、光弾性被膜法（木下 1984）や格子法（McKenzie・Karpovich 1969, 1975）などが用いられてきた。しかし、これらの手法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。有限要素法などの数値解析によって木材切削時に発生する応力分布を解析した研究も存在するが、これらの研究では仕上面の性状との関連が高い仕上面表層の残留ひずみは求めておらず、これと切削条件との関係も不明である。また、木材切削に対する繊維傾斜角の影響についても多くの研究があるが、繊維傾斜角と切れ刃近傍のひずみの関係は明らかにされていない。

近年、非接触で試験体表面のひずみを測定する手法として画像相関法（Digital Image Correlation Method；以下、DIC 法）が木材の研究分野でも定着しつつある

(1.3 参照)。DIC 法は、試験体の変形前後でデジタル画像を取得しこれを解析することでひずみを計算する手法であり、解析する試験体表面にランダム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特徴がある。一方、木材切削時に発生するひずみ測定への適用例はほとんど存在しない。Hellström ら (2008) が、木材のチップ加工時に発生するひずみを DIC 法で検出しているが、切削条件がひずみ分布に及ぼす影響を明らかにしていない。

本研究は、木材切削機構の解明、すなわち木材切削における切屑と仕上面の生成をひずみ分布の観点から説明することを目的とし、気乾ヒノキ材の二次元縦切削における切れ刃近傍のひずみ分布とその時間変化を DIC 法によって測定し、切削条件や繊維傾斜角との関係について検討した。さらに、DIC 法を適用するにあたり、同手法の測定精度やその有効性について検証した。

本論文は全五章で構成される。第一章では、木材切削に関する既往の研究、特に木材切削時に発生する応力・ひずみの測定・解析に関する研究、さらに DIC 法を木材に適用した研究について総括し、本研究の目的を明確化した。第二章では、木材切削における切れ刃近傍のひずみ分布を DIC 法によって求め、これと切削角や切込量との関係を明らかにするとともに、同手法の測定精度を検証した。第三章では、切削後に仕上面表層に残留するひずみを明らかにし、さらに仕上面表層の変形や破壊の形態を X 線コンピュータ断層撮影によって評価した。第四章では、逆目ぼれの発生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について明らかにした。第五章では、木材に比べて稠（ちゅう）密、延性、均質性、等方性とみなせる塩化ビニル材切削時のひずみ分布と比較しながら木材切削現象の特徴を説明した。以上の全五章を通じて、木材の切削現象をひずみ分布の観点から説明した。

第一章 既往の研究と本研究の目的

本章では、木材切削に関する既往の研究を整理してまとめ、本研究の目的を明確化する。

1.1 切削型に関する既往の研究

木材の切削現象を把握するために、木材切削における切屑生成の形態や切屑の形状を詳細に観察し、これに基づいて切削型に分類することが行われてきた。本節では、切削型に関する主な研究について整理した。

Franz (1955, 1958) は、縦切削を 3 種類の切削型 Type I (折れ型)、Type II (せん断型)、Type III (縮み型) に分類し、切削型と切削力との関係、さらに切込量や切削角、含水率、切削工具の刃先の摩耗が切削型の発生に及ぼす影響について明らかにした。McKenzie (1967) は Franz (1955, 1958) の切削型に Type 0 (流れ型) を加えた分類方法を考案した。Type 0–III の特徴は以下の通りである：

Type I (折れ型) では、刃先前方に先割れと呼ばれる割裂が生じることで切屑が分離される。先割れは切削工具の前進とともに拡大し、切屑は片持ち梁の状態を持ち上げられ、切屑は曲げ破壊する。先割れの拡大と切屑の曲げ破壊が繰り返されることで切屑が生成する。

Type II (せん断型) は、金属切削における流れ型に相当し、刃先進行線よりも上側の領域 (切屑になる部分) がすくい面によって切削方向に圧縮した際に、刃先付近から斜め上方に向かってせん断破壊が生じ、切屑が生成する。

Type III (縮み型) では、切屑になる部分がすくい面によって Type II よりも顕著に圧縮され、圧縮破壊された切屑は一塊ごとに排出される。

Type 0 (流れ型) では、Type I よりも小規模な先割れによって切屑が分離し、切屑には Type I のような顕著な曲げ破壊が生じない。

Franz (1955, 1958) 及び McKenzie (1967) によって定義された切削型 (Type 0–III) はその後の木材切削に関する研究において広く用いられてきた。例えば、黄、林ら (1972) は、マコンバ (*Betula Maximowicziana*) の縦切削を Type I–III に分類し、切削角や切込量が切削型、切削力、切屑の縮み及びカール半径に及ぼす影響について明らかにした。Inoue、Mori ら (1979) は二次元縦切削を Type 0–III 及びそれらの中間型に分類し、切削速度が切削型や切削力、切屑縮み率に与える

影響について明らかにした。

Franz や McKenzie 以外にも Walker・Goodchild (1960) は、縦切削における切屑を Riven Type、Plastic Type 及びその中間型に分類した。我が国でも木材切削を切削型に分類する試みは行われてきた。例えば、田中・津和 (1948) は、縦切削における切屑を連断型切屑 (Continue type of chip)、折断型切屑 (Break type of chip)、流断型切屑 (Flow type of chip) の 3 種類に分類した。坂井 (1951) は、流れ型切屑、剪断型切屑、亀裂型切屑、耚 (むし) れ型切屑の 3 種類に分類した。青山 (1955) は、スギ (*Cryptomeria japonica*) 気乾材のまさ目面を縦切削について、流れ型 (Type 0 に相当)、折れ型 (Type I に相当)、縮み型 (Type II もしくは III に相当) に分類し、切込量と切削角の組み合わせによって切削型が変化することを示した。

1.2 木材切削における応力・ひずみの測定・解析に関する既往の研究

木材の切削機構を明らかにするためには、切削工具から加えられた切削力に対抗して発生する応力、特に切屑生成と関連する応力を知ることが不可欠である (杉山・森 1973)。本節では、木材切削時に発生する応力・ひずみの測定・解析に関する研究について用いられた手法ごとにまとめた。

1.2.1 格子法

本項では、材面に直接転写した格子状のグリッドパターンの変形を読み取ることでひずみを測定した研究の概要を述べる。

Peters ら (1968) は、ローラバーを用いた単板切削において、バー下方の被削材が圧縮していることを木材表面に転写したグリッドパターンの変形から測定した。黄・林 (1972) は、Type II の切屑内のせん断変形を定性的に観察するためにグリッドパターンを用いた。木下 (1983a) は、単板切削時の裏割れ形成にともなう切込深さの変化の測定にグリッドパターンを用いた。しかし、これらの研究では定性的な変形を読み取っているものの、ひずみを計算するに至っていない。

McKenzie・Karpovich (1969, 1975) は、単板切削における切れ刃近傍で発生するひずみ分布を木口面に転写したグリッドパターン (グリッドの大きさ: 0.2 mm)

によって測定し、ノーズバーの形状やノーズバーと切れ刃間の垂直距離がひずみ分布に及ぼす影響について明らかにした。杉山・森（1971a）は、単板切削におけるプレッシャバーによる木材の変形挙動をグリッドパターンによって測定した。さらに、プレッシャバーによる圧縮変位量が除荷後瞬間的に回復することを明らかにした（1971b）。

1.2.2 光弾性被膜法

光弾性被膜法とは、試験体材面に光弾性被膜を接着し、複屈折によって生じる縞模様から応力を測定する手法である。木下（1984）は、単板切削における刃先とノーズバー先端間の刃口間隔と裏割れの形成の関係について明らかにするために、光弾性被膜法によって単板切削における刃先周辺（5 mm 以内）の応力分布を求め、刃口水平方向間隔が広くなると、刃先周辺でせん断応力と切削方向と直交方向の引張応力が高くなり、裏割れが発生しやすいことを明らかにした。

Tochigi・Tadokoro（1985）は、横切削における刃先後退量が刃先周辺（解析範囲の大きさ 20×20 mm）の応力分布に及ぼす影響について明らかにするために、光弾性被膜法で得られた刃先周辺の応力分布から、主分力方向（切削方向と平行方向）の応力の発生範囲が刃先後退量の増加によって拡大すること、背分力方向（切削方向と垂直方向）の引張応力が刃先後退量の増加によって圧縮応力に転じることを示した。

1.2.3 数値解析

本項では、木材切削における応力を数値解析した研究を整理した。

黄・林（1973）は、切削応力と切削型との関係を明らかにするために、マカンバの気乾材の縦切削における切屑を半無限梁とみなし、先割れ先端の繊維直交方向の応力を半無限梁の理論に基づいて計算し、切削角 60°前後で起こる圧縮から引張への応力変化に応じて切削型が Type II（せん断型）から Type I（折れ型）に変化することを示した。Triboulot・Ohta（1983）は、Type I 及び Type II に分類される縦切削のき裂進展時に切屑内部で発生する応力分布を破壊力学に基づいて解析することで、先割れが発生する位置を推定できることを示した。Merhar・Bučar（2012）も、破壊力学の理論に基づいて Type I におけるき裂進展について検討し、切屑内の曲げ破壊が起こる間隔が切込量とともに増加することや、応力

拡大係数が臨界応力拡大係数と同等かつ主分力方向の圧縮応力が曲げ強度より小さくなった場合にき裂が進展することを示した。

横切削（単板切削）を対象とした応力解析の研究も多数存在する。栃木・林（1974）は、単板のカール現象の解明とその抑制を目的として、単板切削時のすくい面上の応力分布を解析し、すくい面上に発生する摩擦応力によって単板の裏と表でのひずみに差が生じ、カール現象が誘発されることを示した。Palka（1975）は、有限要素法を用いて得られた単板切削時の応力分布から単板の厚さと粗さ、裏割れの深さを推定できることを示した。

杉山（1974a）は、プレッシャバーの無い場合の単板切削における刃先近傍（2 mm 以内）の応力分布を有限要素法によって求め、等応力線図を作成した。また、杉山（1975）は、刃先角や切込量が単板切削における刃先近傍の応力分布に及ぼす影響について検討し、刃先角の増加によって刃先前方の背分力方向の引張応力の範囲は拡大し、すくい面上側の背分力方向の圧縮応力は増大すること、切込量の増加によって刃先進行線より上側（切屑になる部分）の圧縮応力の範囲が拡大することを示した。

杉山・森（1973a, 1973b）は、プレッシャバーのある場合についても検討し、プレッシャバーの圧縮力に対抗して発生する応力分布を明らかにした。さらに、杉山（1974b）は、シャープバーの作用により刃先前方で発生する背分力方向の引張応力が著しく減少することを有限要素法解析によって明らかにした。杉山（1977）は、単板切削時の工具すくい面の垂直応力と摩擦応力を明らかにした。

木下（1983b）は、単板切削における裏割れの形成過程における刃先近傍（20 mm 以内）の応力を有限要素法によって求め、裏割れが形成されてから次の裏割れが形成されるまでの間、主分力方向応力、背分力方向応力、せん断応力のいずれも切削の進行とともに増加すること、主分力方向の引張応力が刃物のすくい面及び刃先前方で集中していること、背分力方向の引張応力が刃先前方で拡大すること、すくい面上方の単板表側で局所的に背分力方向の圧縮応力があること、すくい面及び逃げ面においてせん断応力が大きいことなどを明らかにした。

以上のように、木材切削時に発生する応力やひずみを測定・解析した研究は多く見られる一方で、仕上面の生成と関連が深い仕上面表層で発生・残留するひずみを測定した例はない。

1.3 木材への画像相関法の適用例

画像相関法（以下、DIC 法）とは、試験体の変形前後でデジタル画像を取得し、両画像の画素配列を比較することで試験体のひずみを計算する手法である（Sutton ら 2009）。DIC 法には、解析する試験体表面にランダムパターンが備わっていれば、光弾性被膜法などで行われる試験体表面への前処理が不要という特徴がある（Pan ら 2009, 2010）。また、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という特徴もある。例えば、Jeong ら（2009）は、早材と晩材それぞれから採取した数ミリの小試験体の荷重試験を行い、そのときのひずみを DIC 法によって求めている。

このような特徴を持つ DIC 法は Peters・Ranson（1982）や Sutton ら（1983）によって開発されて以来、金属やプラスチックなどのひずみの測定に用いられてきた（Sutton ら 2009）。木材の研究分野でも Choi ら（1991）が DIC 法を木材に初めて適用して以降、多数の適用例が報告されてきた。本節では、木材に DIC 法を適用した研究についてまとめた。

Zink ら（1995）は、サトウマツ（*Pinus lambertiana*）の試験体（101.6 mm（繊維方向（L 方向））×25.4 mm（放射方向（R 方向））×25.4 mm（接線方向（T 方向）））の縦圧縮したときのひずみ分布を DIC 法によって測定し、さらに等方性材料のアルミニウムとひずみ分布の傾向を比較し、アルミニウムではひずみが一様に分布するのに対し、木材では局所的にひずみが集中する傾向があることを示した。一方、村田・増田・市丸（1999）は、木材を横圧縮したときの木口面画像から DIC 法によってひずみ分布を求め、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示した。

Samarasinghe・Kulasiri（2000a, b）は、繊維方向・繊維直交方向に木材を引張った時の変位を DIC 法によって求め、荷重方向に対するわずかな繊維の傾きが原因で等方性材料であるゴムの変位分布よりも複雑な変位分布が生じることを示した。さらに、き裂が存在する試験体に引張荷重を与えたときにき裂付近に生じる変位分布を明らかにした。

Murata・Masuda（2001）は、共焦点レーザー走査型顕微鏡によって木材細胞の膨潤過程におけるひずみを DIC 法によって求め、細胞間層から離れるほど膨潤率は増加することを明らかにし、さらに木材細胞の膨潤率の異方性を確認した。

Keunecke ら (2012) も、DIC 法によって測定した木材の膨潤によるひずみ分布と X 線透過画像から得られた密度分布を比較し、膨潤の大きさが密度に依存することを示した。

村田・増田 (2003) は、年輪構造が横圧縮時の変形挙動に与える影響について検討するために、スプルース (*Picea spp.*) 及びベイマツ (*Pseudotsuga menziesii*) の立方試験体 (一辺 20 mm) の横圧縮時の木口面画像から DIC 法によってひずみ分布を求め、木材を R 方向に圧縮すると試験体の外縁の年輪境界付近で大きなせん断ひずみが発生し、これにより早材・年輪境界付近に局所的な破壊が発生することを示した。

宮内ら (2006) は、伝統的蟻継手における接合部形状と引張強度との関係を明らかにすることを目的として、引張時に伝統的蟻継手の接合部付近に生じるひずみを DIC 法によって測定し、切り欠き隅の早材部に引張ひずみが集中するが晩材部ではひずみがほとんど発生しないこと、切り欠き部分の傾斜角が大きいほど切り欠き隅にせん断ひずみが集中することを示した。

2000 年代後半では、DIC 法を木材に適用した際の測定精度や妥当性を検討した研究も存在する。Hassel ら (2009) は、立方体試験片 (一辺: 40 mm) のせん断試験を行い、DIC 法で得られた試験体中央のせん断ひずみの分布が有限要素法で得られたものと傾向が一致したことを示した。Jeong ら (2010) は、木材の引張試験における試験体の厚さや荷重速度が DIC 法を用いたヤング率及びポアソン比の測定の精度に及ぼす影響を明らかにした。

近年では、DIC 法を用いてひずみ分布を測定するだけでなく、測定結果から引張強度などのパラメータを算出した研究が多い。Nagai ら (2011) は、節を含む木材の破壊機構の解明を目的として、スギの引張試験における節付近のひずみを DIC 法で測定し、節付近のき裂の最大ひずみと引張強度の関係を示し、さらにその領域では応力とひずみの関係の非線形性が認められることを示した。Lin ら (2015) は、コウヨウザン (*Cunninghamia lanceolata*) の引張試験において試料表面に現れるひずみの時間変化を DIC 法で求め、引張強度を推定した。Jeong・Park (2016) は、スギを含む 4 樹種の弾性係数とポアソン比、引張強度、せん断強度を DIC 法によって求めた。

以上のように、木材へ DIC 法を適用した研究は多いが、木材切削に関連する

ひずみの測定への適用例はほとんどない。Hellström ら (2008) は、木材のチップ加工時に切れ刃近傍で発生するひずみを DIC 法によって検出しているが、切込量や切削角といった切削条件がひずみ分布に及ぼす影響については議論していない。また、チップが主製品であるため、仕上面との関連でひずみ分布を議論していない。

1.4 仕上面表層の損傷に関する既往の研究

仕上面表層の細胞に変形や破壊が生じた場合、細胞は空気中の水分や接着剤・表面塗装剤などの水分によって膨潤し、毛羽立ちが発生する可能性がある (Stewart・Crist 1982、Scholz・Laugel 2001)。したがって、良好な仕上面をえるためには、切れ刃近傍のひずみが母材側にまで拡大しそれが残留しないよう、ひずみの発生範囲を制御する必要があるといえる。しかし、仕上面表層で発生・残留するひずみを測定した研究はない (1.2 参照)。一方で、仕上面表層の損傷の形態を顕微鏡等によって観察した研究は多い。

Thunell・Aoyama (1967) は帯鋸、丸鋸、プレーナ、手鉋などで仕上げた板目面と垂直の面 (まさ目面) を光学顕微鏡で観察し、切削方式によって細胞の破壊や変形の度合いが異なることを示した。

林ら (1970) は、横切削で得られた仕上面と垂直の面からマイクロームで薄片を切り出し、光学顕微鏡で観察した。仕上面を構成する全細胞のうち細胞膜が切断され U 型となっている細胞の割合を U 型切断率と定義し、切込量と刃先角の増加によって U 字型切断率が減少することを示した。同研究では、薄片を切り出す際に、細胞の形状が変形しないように融解したパラフィン液で切削後直ちに仕上面を固定している。

林ら (1971a, 1971b, 1972, 1975) は、放射組織斜行角が U 型切断率に及ぼす影響について明らかにした。また、裏割れの長さや深さが放射組織斜行角に依存して特徴的に変化や、ノーズバーが U 型細胞切断率や裏割れに及ぼす影響についても明らかにした。

1980 年代ごろから、光学顕微鏡だけでなく走査型電子顕微鏡 (SEM) などが用いられるようになった。Stewart・Crist (1982) はプレーナ加工または研削加工した仕上面に垂直な面を SEM で観察し、仕上面表層の損傷が及ぶ範囲を調べ、

被削材の圧縮強度や密度が仕上面表層の損傷の度合いに影響を及ぼすことや、切削抵抗が小さくなるように切削条件を調整することで仕上面表層の損傷を抑制できることを示した。Stewart (1989) は縦切削時の主分力・背分力・横分力を測定するとともに、仕上面表層の細胞の形態を SEM で観察し、プレッシャバー有の縦切削では背分力が小さくなり、仕上面表層の損傷の度合いも小さくなることを示した。

Stehr・Östlund (2000) は鋸挽き加工、研削加工もしくはプレーナ加工した面と垂直の面を環境制御型走査電子顕微鏡 (ESEM) で観察し、早晚材間の割れの発生頻度は、鋸挽き加工では年輪接触角の増加とともに増加したが、プレーナ加工では年輪接触角が小さいほど増加することを示した。Carrano ら (2004) はプレーナで横切削した仕上面表層を SEM で観察し、損傷の深さ・長さとそのばらつき、空隙の面積などを評価し、切削条件との関係を明らかにした。

2010 年代ごろからは、仕上面表層の損傷が接着性能に及ぼす影響についても検討されてきた。Cool・Hernández (2011a, 2011b, 2011c, 2012) は、フライス、三次元切削、ベルトサンダーで仕上げたブラックスプルス (*Picea mariana*) の板目面とその垂直の面 (木口面) を SEM で観察し、加工方法や加工条件が仕上面表層の損傷や接着性能に及ぼす影響について明らかにした。特に、研削加工は切削角が 90°以上の二次元切削 (Type III) ととらえられることから、研削加工では仕上面表層の細胞の破壊が顕著となることを示した。Kuljich ら (2013) は、切削・研削条件が接着性能に与える影響を明らかにするために、プレーナ仕上げ及び研削仕上げしたブラックスプルスの板目面に垂直な面 (木口面) を SEM で観察し、プレーナ加工の方が研削加工よりも仕上面表層の損傷が小さく、接着性能が低いことを示した。

1.5 木材への X 線コンピュータ断層撮影技術の適用例

前節の研究のように仕上面表層を顕微鏡で観察するためには、仕上面と垂直な断面を切り出さなければならず、このとき細胞の形態が変化しないよう樹脂等で固定する必要がある（林ら 1970 など）、観察の効率性に問題があった。

近年、木材の内部構造を非破壊的に計測するために X 線コンピュータ断層撮影（X 線 CT）が用いられつつある。X 線 CT は、試験体を回転させながら連続的に X 線を照射し、得られた複数枚の X 線透過画像を合成することで試験体の三次元的な密度分布を取得する手法である（田中 2015）。本節では、木材や竹材の計測に X 線 CT を適用した研究についてまとめた。

服部・金川（1985）は、医療用 CT スキャナで得られた木材の密度分布とそれらの全乾状態での密度分布を比較することで含水率が推定できることを示した。さらに、金川・服部（1985）は、乾燥時の木材を CT スキャナで断続的に撮像することで木材の乾燥過程における含水率変化を計測した。Sepúlveda ら（2002）は、工業用の X 線 CT スキャナを用いて丸太のらせん木理の角度を推定した。Oja ら（2001）はオウシュウトウヒ（*Picea abies*）を X 線 CT で撮像し、心材率と心材密度が推定できることを示した。

Watanabe ら（2015）は、竹材害虫であるチビタケナガシクイの食害生態を明らかにするために、マイクロフォーカス X 線 CT 装置を用いて食害材内部の直径数ミリの穿孔を検出し、同害虫の接触量の定量化に成功した。このように高い空間分解能を持った X 線 CT 装置を用いることで、仕上面表層を細胞レベルで評価しうることが示唆された。

1.6 木材切削における繊維傾斜角の影響に関する既往の研究

繊維傾斜角（縦切削における切削方向と平行かつ切削面に垂直な断面において繊維方向（L 方向）と切削方向のなす角度）は、木材切削における代表的な加工欠点とされる逆目ぼれの発生との関連が深い。本節では、繊維傾斜角が木材切削に及ぼす影響について検討した研究をまとめた。なお、本研究では繊維傾斜角の範囲を -90° から $+90^{\circ}$ とし、切削方向と L 方向が平行のときの繊維傾斜角を 0° 、垂直（木口切削）のとき $\pm 90^{\circ}$ とした。順目切削のとき（切れ刃からみて切削工具

側の母材に向かって L 方向が傾いているとき) の繊維傾斜角を正、逆目切削のときを負とした。

繊維傾斜角と切削力の関係について、木下 (1960) は、繊維傾斜角を -90° から $+90^{\circ}$ まで変化させたときの主分力と背分力を測定し、順目切削のとき、繊維傾斜角が増加すると主分力は増加するが、繊維傾斜角がある角度になると、せん断強度の最も弱い細胞間層でせん断破壊が発生し切屑が分離するため、特異的に切削抵抗が小さくなることを明らかにした。Stewart (1969) も、繊維傾斜角を -90° から $+90^{\circ}$ まで変化させ二次元縦切削を行い、順目切削では繊維傾斜角に関係なく背分力はほぼ一定となることを示した。森 (1969, 1970) は、主切削力が繊維傾斜角 -10° から -5° の間で最小となることを示した。山下 (1980) は、裏金後退量、屑返し角度、水平刃口距離が逆目切削 (繊維傾斜角 -10°) における切屑排出や切削抵抗に及ぼす影響について検討し、水平分力は裏金後退量の影響を受けないが、垂直分力は裏金後退量の減少とともに負に転じることを示した。しかし、これらの研究において繊維傾斜角と切削力の関係は必ずしも同様の傾向を示しておらず、これは両者の関係が材質や切削速度に大きく依存するためであると考えられている (森 1971)。

繊維傾斜角が切削型の発生に及ぼす影響について、McKenzie・Hawkins (1966) は、繊維傾斜角 $+5^{\circ}$ の順目切削、繊維傾斜角 -10° の逆目切削を行い、Franz (1955, 1958) の切削型 Type I-III に Type 0_1 を加えた 4 種類の切削型に分類して、切削型の生成に及ぼす切削角、切込量、バイアス角、繊維傾斜角の影響を明らかにした。Stewart (1971) は、繊維傾斜角を 0° から -30° まで変化させたときの切削型について検討し、負の繊維傾斜角が大きくなるにつれて刃先前方の背分力方向の圧縮応力が増加し、Type III が発生する傾向があることを示した。

繊維傾斜角が仕上面表層の損傷や加工欠点に及ぼす影響について、枝松 (1973) は、仕上げかな盤による切削において、繊維傾斜角を -15° から $+15^{\circ}$ まで変化させ、繊維傾斜角が切込深さ、切屑の縮み率、切削抵抗、表面粗さに及ぼす影響を明らかにした。山下 (1977) は、ヒノキ、ブナ、ケヤキの逆目切削を繊維傾斜角 -5° から -20° まで変化させて行い、裏金のない条件では、繊維傾斜角が -5° のとき、逆目ぼれの長さが最大となることを示した。杵淵 (1979) は、繊維傾斜角 -5° から $+5^{\circ}$ まで変化させたときの切削抵抗や切屑の形状を明らかにし、順目切削において先割れ発生後に残った傾斜部分を切削する際、刃先が鋭利でない場合、毛羽

立ちが生じやすいことを示した。Stewart (1983) は、逆目切削（繊維傾斜角 0° から -90° ）を行い、逆目ぼれが繊維傾斜角が 0° から -20° の範囲で発生する傾向があることを示した。

以上のように、木材切削における繊維傾斜角が切削力や切削型、仕上面性状に及ぼす影響について検討した研究は多くあるものの、繊維傾斜角が切れ刃近傍のひずみ分布に及ぼす影響については検討されていない。

1.7 既往の研究の総括と本研究の目的

本章では、木材切削に関連する既往の研究のうち、特に切削型、切削時の応力・ひずみの測定・解析、仕上面表層の損傷の評価、繊維傾斜角が木材切削に及ぼす影響に関する研究について整理した。さらに、DIC 法及び X 線 CT を木材へ適用した研究についても整理した。

1950 年代から、切屑やその生成をその形態に基づいて切削型に分類する試みが行われてきた。それらの多くは、切削型と切削力や仕上面との関係について検討しているが、切削型ごとの切れ刃近傍のひずみ分布の特徴を明らかにしていない。切削型の分類方法はいくつか提唱されているものの、ほとんどの研究では Franz (1955, 1958) 及び McKenzie (1967) による分類 Type 0–III を採用していた (1.1 参照)。

木材切削時に発生する応力・ひずみの測定には、格子法や光弾性被膜法が用いられてきた (1.2.1, 1.2.2 参照)。しかし、これらの研究は単板切削（横切削）を対象としており、縦切削におけるひずみ分布は測定していない。また、仕上面の生成やその性状と関連が深い仕上面表層で発生・残留するひずみを測定していない。さらに、逆目ぼれの発生と関連が深い繊維傾斜角が切れ刃近傍のひずみ分布に及ぼす影響を明らかにした例はなかった (1.6 参照)。一方、木材の研究分野において定着しつつある DIC 法は格子法や光弾性被膜法と比較して測定の効率が高いことが示唆された (1.3 参照)。木材切削におけるひずみ測定への DIC 法の適用例は、Hellström ら (2008) らの研究のみであったが、この研究では切削条件とひずみ分布の関係は詳細に議論されていない。

既往の研究では、仕上面の生成やその性状と関連が深い仕上面表層で発生・残留するひずみは測定されていないが、仕上面表層を光学顕微鏡や SEM によって

観察した研究は多かった（1.4 参照）。X 線 CT は、光学顕微鏡や SEM と比較して、観察断面の切り出しや樹脂による固定などといった試験体への前処理が不要となるため、木材の内部構造を鑑別かつ非破壊的に評価する手段として定着しつつあることが明らかとなった。しかし、仕上面表層の損傷の評価に X 線 CT を用いた研究はなかった（1.5 参照）。

以上を踏まえて、本研究では、木材切削における切屑や仕上面の生成に対応する切れ刃近傍のひずみとその時間変化、さらにこれらに及ぼす切削条件や繊維傾斜角の影響を明らかにし、木材切削現象とその制御についてひずみ分布の観点から説明することを目的とした。切屑の生成に関係する切れ刃近傍のひずみ分布の解析には DIC 法を用い、同手法の測定精度や有効性について検証した。仕上面の生成やその性状との関連が深い仕上面表層の残留ひずみも DIC 法によって測定し、マイクロフォーカス X 線 CT 装置によって評価した仕上面表層の変形や破壊の形態との関連性を検討した。

なお、切削型に関しては既往の研究で広く用いられている Franz (1955, 1958) 及び McKenzie (1967) による切削型 (Type 0 (流れ型)、Type I (折れ型)、Type II (せん断型)、Type III (縮み型) の 4 種類) を採用することとした。

第二章 木材切削における切れ刃近傍のひずみ分布の 画像相関法による測定

本章では、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) の二次元縦切削時に切れ刃近傍 (0.5 mm 以内) の領域で発生するひずみを画像相関法 (DIC 法) によって測定し、切れ刃近傍のひずみ分布に対する切削角 θ や切込量 d の影響について検討する。さらに切削型ごとのひずみ分布の特徴について述べる。さらに、DIC 法を適用するにあたり、同手法の測定精度について検証する。

2.1 実験方法

2.1.1 試験体

被削材はヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) 心材の気乾材で、寸法は 50(L)×5(R)×50(T) mm とした。密度は 0.38 g/cm³、含水率は 10.6%、平均年輪幅は 1.1 mm であった。解析をする表面 (LT 面) は自動 1 面かんな盤で仕上げた。このとき、材面に不規則に毛羽立ちが発生し、これと仮道管や放射組織の配列によって DIC 法適用に必要なランダムパターンが得られた。

2.1.2 切削試験

切削試験は LR 面の二次元縦切削とした (図 2.1)。切削工具を一軸送り装置に取り付けた工具フォルダに固定し、被削材に向かって移動させた。被削材の L 方向に対して切れ刃は直交、切削工具の送り方向は平行とした。切削速度は 5 mm/s で一定とした。切削工具の材質は高速度鋼 (SKH51) とした。厚さ 5 μ m の窒化クロムコーティングを切削工具に施し、研磨により逃げ面のコーティングのみ除去した。刃先角は 25°, 35°, 45°, 55°, 65°, 75°、逃げ角は 5° で一定としたので、切削角 θ は 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80° である。切込量 d は 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 mm とした。切削角 θ と切込量 d の組み合わせごとに 5 回繰り返し切削を行い、切削の都度被削材を入れ替えた。

切削時の切れ刃近傍を高速度カメラ (VW-6000、KEYENCE) で録画した。カメラのレンズ (VH-Z150、KEYENCE) の光軸は被削材の LT 面に垂直とした。被写界深度は 0.05 mm、フレームレートは 250 fps、シャッタースピードは 1/2000 または 1/3000 s で撮影した。撮影範囲は幅 1.42(L)×高さ 1.07(T) mm (640×480

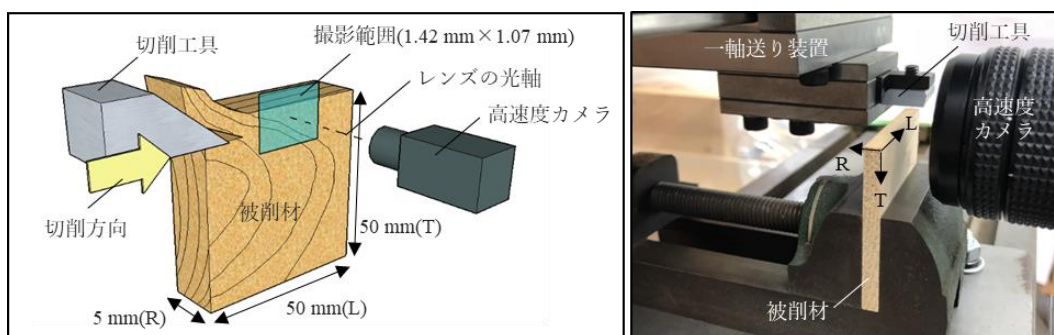


図 2.1 切削試験の模式図 (左) と切削試験の様子 (右)

pixels) とし、撮影範囲に対して幅方向を x 方向、高さ方向を y 方向と定義した。切屑生成は Franz (1955, 1958) と McKenzie (1967) による切削型 Type 0 (流れ型)、Type I (折れ型)、Type II (せん断型)、Type III (縮み型) に分類した。DIC 法を適用するために、動画はすべて 8 bit のグレースケールのイメージシーケンスに変換した。変換には ImageJ (ver1.50e) (Schneider ら 2012) を使用した。

2.1.3 画像相関法によるひずみ測定

DIC 法によるひずみ測定には、MATLAB 言語 (2017a) (The MathWorks, Inc.) で作成した DIC 法プログラムを使用した。切削前の画像と切削中の画像をそれぞれ参照画像 (変形前) と対象画像 (変形後) とした。参照画像上に測定範囲 (Region of Interest ; ROI) を定義した (図 2.2 黄色部)。ROI の寸法は幅 360(L)×高さ 120–220(T) pixels (0.80×0.27–0.49 mm) で、ROI の高さは切込量 d に応じて調整した。ROI の位置を、対象画像上の切れ刃の 90 pixels (0.20 mm) 後方から

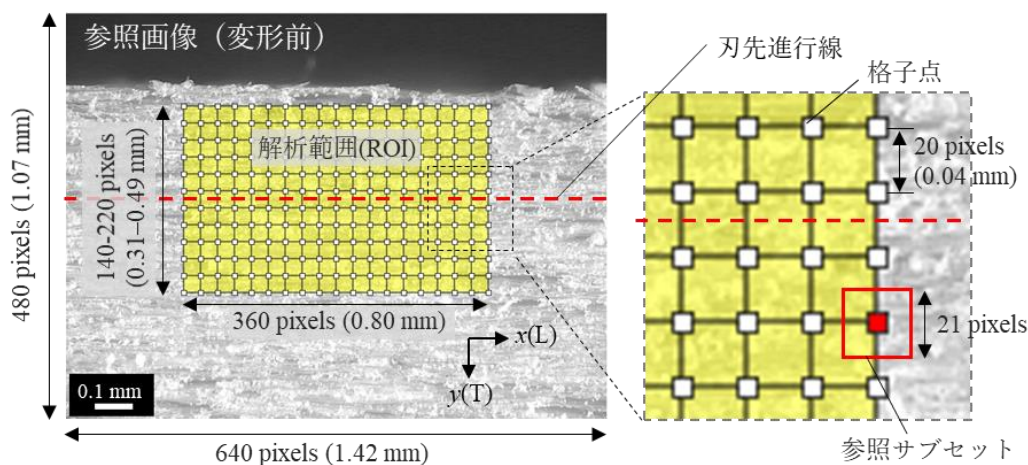


図 2.2 解析範囲と格子点

270 pixels (0.60 mm) 前方までの範囲を含み、ROI の下縁が切れ刃から 110 pixels (0.24 mm) 下方となるように調整した。

ROI 内のひずみ分布を求めるため、ROI 内に格子点 (図 2.2 白四角) を x, y 方向ともに 20 pixels (0.04 mm) ごとに設置した。格子点を中心とした 21×21 pixels (0.05 \times 0.05 mm) の領域を参照サブセット (図 2.2 赤四角) とし、対象画像において参照サブセットと最も似ている領域 (対象サブセット) を探し出した。両サブセット間の類似度評価には相関係数 C_{ZNCC} (式 2.1) を用いた：

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{F(i,j) - \bar{F}\} \times \{G(i+u, j+v) - \bar{G}\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{F(i,j) - \bar{F}\}^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{G(i+u, j+v) - \bar{G}\}^2}} \quad (-1 \leq C_{ZNCC} \leq 1) \quad (2.1)$$

ただし、 u と v はそれぞれ格子点の x 方向と y 方向の移動量、 $F(i,j)$ と $G(i+u, j+v)$ は、参照画像上の格子点 (i,j) と対象画像上の点 $(i+u, j+v)$ の画素値、 \bar{F} と \bar{G} は参照サブセットと対象サブセットの画素値の平均値、 n はサブセットの一辺の長さである。相関係数 C_{ZNCC} を最大にする格子点の移動量 (u, v) を求めることで対象画像上の格子点の位置を特定した。

対象画像上の格子点の位置を特定した後、図 2.3 のように、隣り合う格子点 4 点に囲まれた四角形要素について主分力方向 (切削方向；L 方向) のひずみ ε_x 、背分力方向 (T 方向) のひずみ ε_y 、せん断ひずみ γ_{xy} を式 2.2, 2.3, 2.4 で求めた：

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2} \left[\frac{\{(x_b + u_b) - (x_a + u_a)\} - (x_b - x_a)}{(x_b - x_a)} + \frac{\{(x_d + u_d) - (x_c + u_c)\} - (x_d - x_c)}{(x_d - x_c)} \right] \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{2} \left[\frac{\{(y_a + v_a) - (y_c + v_c)\} - (y_a - y_c)}{(y_a - y_c)} + \frac{\{(y_b + v_b) - (y_d + v_d)\} - (y_b - y_d)}{(y_b - y_d)} \right] \quad (2.3)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left[\left\{ \begin{array}{l} \frac{(y_d + v_d) - (y_c + v_c)}{(x_d + u_d) - (x_c + u_c)} \\ + \frac{(y_b + v_b) - (y_a + v_a)}{(x_b + u_b) - (x_a + u_a)} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \frac{(x_a + u_a) - (x_c + u_c)}{(y_a + v_a) - (y_c + v_c)} \\ + \frac{(x_b + u_b) - (x_d + u_d)}{(y_b + v_b) - (y_d + v_d)} \end{array} \right\} \right] \quad (2.4)$$

ただし、 $x_{a, b, c, d}$ と $y_{a, b, c, d}$ は、図 2.3 の参照画像上の四角形要素を構成する 4 個の格子点の x 座標と y 座標、 $u_{a, b, c, d}$ と $v_{a, b, c, d}$ は各格子点の移動量である。格子点は

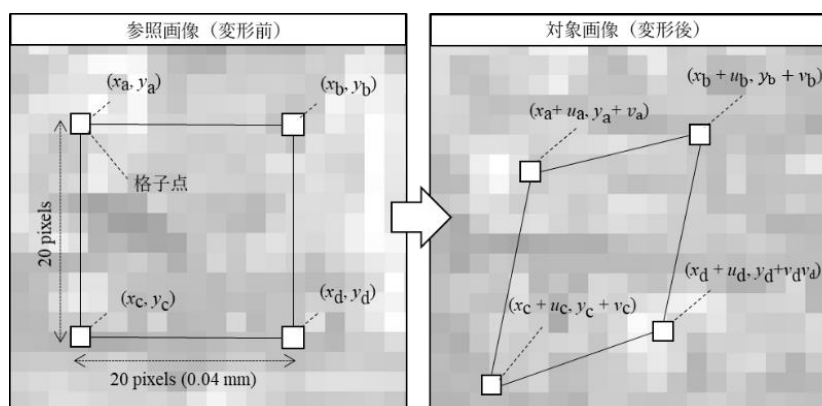


図 2.3 変形前後の四角形要素を構成する格子点の座標

x, y 方向ともに 20 pixels (0.04 mm) ごとに設置したので、ひずみ分布の空間分解能は 0.04 mm であった。

格子点の移動量(u, v)をサブピクセル単位の精度で求めるために、coarse-to-fine アルゴリズムを用いた。このアルゴリズムでは、まず対象画像上を 1 pixel 単位で走査し、相関係数 C_{ZNCC} が最大となる対象サブセットを探し出した。次に、 C_{ZNCC} が最大となった対象サブセットの中心の画素とその隣接する 8 個の画素の中間に仮定の補画素を 8 個設定した。補画素の画素値は spline 関数によって計算した。走査ステップを 1/2 pixel に変え、前回 C_{ZNCC} が最大となった画素とその周囲の 8 個の補画素の中から C_{ZNCC} が最大となる点を特定した。この手順を (u, v) が $(1/2)^5 \cong 3.13 \times 10^{-2}$ pixel (6.94×10^{-5} mm) 単位で計算されるまで繰り返した。四角形要素の大きさ (格子点間の間隔) は 20 pixels であったため、測定可能な最小のひずみは、 $\{(1/2)^5 \div 20\} / 2 \cong 0.08\%$ となった。

2.1.4 画像相関法によるひずみ測定の精度検証

DIC 法によって求めたひずみの確度と精度を検証するために、画像処理で任意の参照画像にひずみを疑似的に付与することで対象画像を作成し (図 2.4)、疑似ひずみ ε_{x_nom} 、 ε_{y_nom} 、 γ_{xy_nom} と DIC 法で求めたひずみ ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} を比較した。実際の木材の変形過程を撮影した画像ではなく、疑似的にひずませた画像を使用することで、光源のちらつきやレンズの収差などによる画像のゆがみなどの影響を排除した (Pan ら 2010)。

参照画像を水平方向 (L 方向) に ε_{x_nom} に対応する画素列だけ等間隔で減らす

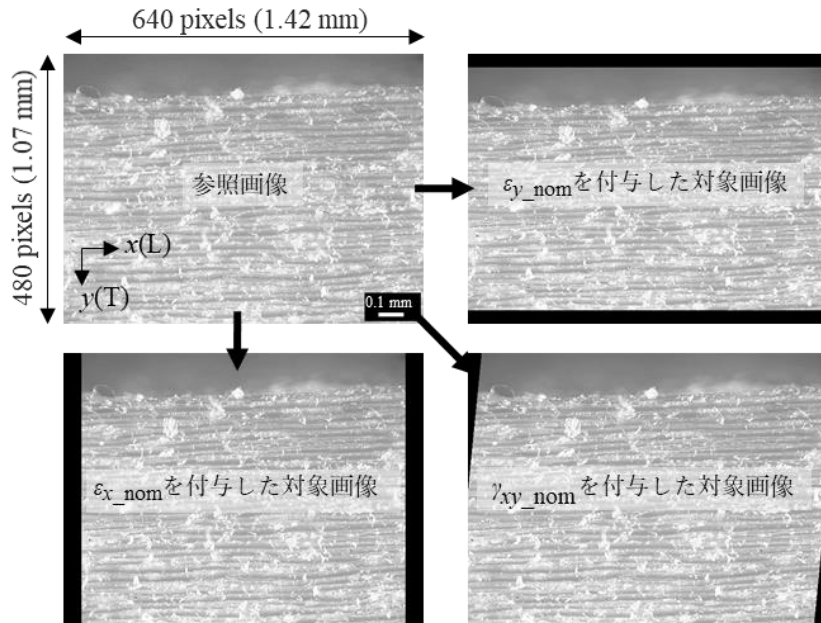


図 2.4 精度検証用の対象画像の例

ことで疑似圧縮ひずみ ε_{x_nom} を付与し、対象画像を作成した。このとき、参照画像の画素配列を bicubic 関数で近似し、対象画像の画素値を再設定した。同様に、参照画像を垂直方向（T 方向）に ε_{y_nom} に対応する画素列だけ等間隔で減らすことで疑似圧縮ひずみ ε_{y_nom} を付与した。参照画像の画素を γ_{xy_nom} に応じた分だけ水平方向に移動させることで、せん断変形させ、疑似せん断ひずみ γ_{xy_nom} を付与した。疑似ひずみを付与するこれらの画像処理には、MATLAB (2017a) (The MathWorks, Inc.) を用いた。

ROI は 100×100 pixels (0.22×0.22 mm) の大きさとし、参照画像中央に配置した。ROI 内には x, y 方向に 20 pixels (0.04 mm) 間隔で格子点を設置し、ROI を $5 \times 5 = 25$ 個の四角形要素に分割した。25 個の四角形要素のひずみの平均値 $\bar{\varepsilon}_x$ 、 $\bar{\varepsilon}_y$ 、 $\bar{\gamma}_{xy}$ と標準偏差 SD_{ε_x} 、 SD_{ε_y} 、 $SD_{\gamma_{xy}}$ を求めた。DIC 法の測定精度を示す変動係数 CV_{ε_x} 、 CV_{ε_y} 、 $CV_{\gamma_{xy}}$ (%)と測定確度を示す誤差率 ER_{ε_x} 、 ER_{ε_y} 、 $ER_{\gamma_{xy}}$ (%)を式 2.5a, b, c 及び 2.6a, b, c で計算した。

$$CV_{\varepsilon_x} = SD_{\varepsilon_x} / \bar{\varepsilon}_x \times 100 (\%) \quad (2.5a)$$

$$CV_{\varepsilon_y} = SD_{\varepsilon_y} / \bar{\varepsilon}_y \times 100 (\%) \quad (2.5b)$$

$$CV_{\gamma_{xy}} = SD_{\gamma_{xy}} / \bar{\gamma}_{xy} \times 100 (\%) \quad (2.5c)$$

$$ER_{\varepsilon_x} = (\bar{\varepsilon}_x - \varepsilon_{x_nom}) / \varepsilon_{x_nom} \times 100 (\%) \quad (2.6a)$$

$$ER_{\varepsilon_y} = (\bar{\varepsilon}_y - \varepsilon_{y_nom}) / \varepsilon_{y_nom} \times 100 (\%) \quad (2.6b)$$

$$ER_{\gamma_{xy}} = (\bar{\gamma}_{xy} - \gamma_{xy_nom}) / \gamma_{xy_nom} \times 100 (\%) \quad (2.6c)$$

精度検証の結果を表 2.1 に示す。ただし、 ε_y のデータについては、 $\varepsilon_{y_nom} = 25\%$ のとき一部の四角形要素で引張の ε_y が検出され、移動量の計算が明らかに正確に行われていないと考えられたので表 2.1 に記載していない。また、このことから 20% 以上のひずみについては議論しないこととした。ひずみの測定確度は、誤差率で $\pm 2\%$ 以内であったのに対し、測定精度は、変動係数で約 17% であった。

表 2.1 疑似ひずみ ε_{x_nom} 、 ε_{y_nom} 、 γ_{xy_nom} に対して計算されたひずみ ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy}

		疑似ひずみ ε_{x_nom} 、 ε_{y_nom} 、 γ_{xy_nom} (%)								平均
		-0.94	-0.83	-1.04	-5.00	-10.00	-15.00	-20.00	-25.00	
平均 \pm	$\bar{\varepsilon}_x \pm$	-0.90			-4.96	-10.02	-14.95	-19.35	-24.44	
	SD_ ε_x	± 0.21			± 0.44	± 1.32	± 2.25	± 3.39	± 4.99	
標準偏差 (%) (n = 25)	$\bar{\varepsilon}_y \pm$		-0.78		-5.06	-10.10	-14.93	-20.08	No	
	SD_ ε_y		± 0.17		± 0.52	± 1.14	± 1.90	± 2.92	Data	
	$\bar{\gamma}_{xy} \pm$			-1.00	-5.07	-10.12	-15.17	-20.22	-25.37	
	SD_ γ_{xy}			± 0.34	± 0.91	± 1.72	± 2.70	± 3.70	± 5.10	
変動係数	CV_ ε_x	-24			-9	-13	-15	-18	-20	-16
	$\frac{SD_{\varepsilon,\gamma}}{\bar{\varepsilon},\bar{\gamma}} \times 100(\%)$		-20		-10	-11	-13	-15	No	-14
	CV_ γ_{xy}			-34	-18	-17	-18	-18	-20	-21
誤差率	ER_ ε_x	-4.00			-0.81	0.16	-0.33	-3.27	-2.23	-1.75
	$\frac{\bar{\varepsilon}_y - \varepsilon_{y_nom}}{\varepsilon_{y_nom}} \times 100(\%)$		-6.62		1.19	0.97	-0.50	0.41	No	-0.91
	ER_ γ_{xy}			-3.99	1.53	1.17	1.10	1.12	1.48	0.40

2.1.5 増分法

前項 2.2.1 で求めた相関係数 C_{ZNCC} は ε_{x_nom} 、 ε_{y_nom} 、 γ_{xy_nom} の増加とともに減少した。このことは、大変形が発生すると、ランダムパターンも大きく変化し、その結果サブセットのパターンマッチングができなくなることを意味している。そこで、切れ刃近傍の大ひずみを計算するために増分法アルゴリズムを採用した。対象画像から 0.02 s 前に撮影された画像をサブ対象画像とし、参照画像とサブ対象画像間の格子点の移動量、サブ対象画像と対象画像間の格子点の移動量をそれぞれ計算して、これらの合算値を参照・対象画像間の移動量とした。

2.1.6 面外方向の変位の影響

本実験では、横分力による面外方向 (R 方向) の変位が発生しないよう、バイアス角を設定しなかった。しかし、L もしくは T 方向のひずみが発生したとき、ポアソン効果によって面外方向の変位が生じ、カメラと LT 面間の距離が変わった可能性があった。さらにカメラや一軸送り装置の振動もカメラと LT 面間の距離の変動を引き起こした可能性があった。LT 面がカメラの被写界深度外へ移動すると、画像がぶれてしまい格子点の追跡ができないが、本研究で用いた画像はすべて焦点が合っているとみなせたため、LT 面は切削中常に被写界深度 (0.05 mm) 内に位置していたと考えられた。一方、LT 面が被写界深度内に収まっていたとしても、参照・対象画像間でカメラと LT 面間の距離が変動した場合、ひずみの測定値にはみかけのひずみが含まれていることになる。そこで、面外方向の変位によるみかけのひずみについて検討した。

最も焦点が合うようにカメラと LT 面の位置を調整し、そこから LT 面と垂直方向 (光軸方向) に ± 0.25 mm カメラを移動させ画像を撮影し、それぞれ参照画像と対象画像とし、面外方向の変位によるみかけのひずみを DIC 法によって求めた。なお、ROI の寸法や位置、格子点の間隔は 2.1.4 と同一とした。その結果、面外方向の変位によるみかけの ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} は、それぞれ $0.23 \pm 1.00\%$ (平均 \pm 標準偏差)、 $0.13 \pm 0.40\%$ 、 $-3.7 \times 10^{-2} \pm 0.95\%$ となり、切削によって発生するひずみと比べて極めて小さく、その影響は無視できるとみなした。

2.2 結果と考察

2.2.1 切削型と切れ刃近傍のひずみ分布の関係

切削型 Type 0–III における切れ刃近傍のひずみ分布の例を図 2.5 に示す。DIC 法を用いることで光弾性被膜法（木下 1984）よりも高空間分解能のひずみ分布を取得することができた。なお、図中の+記号は、格子点を示す。四角形要素を構成する4個の格子点のうち一点でも相関係数 C_{ZNCC} が0.5以下であった場合、移動量 (u,v) が正確に計算されていないと判断し、ひずみを示していない。各切削型のひずみ分布の特徴は以下のとおりである。

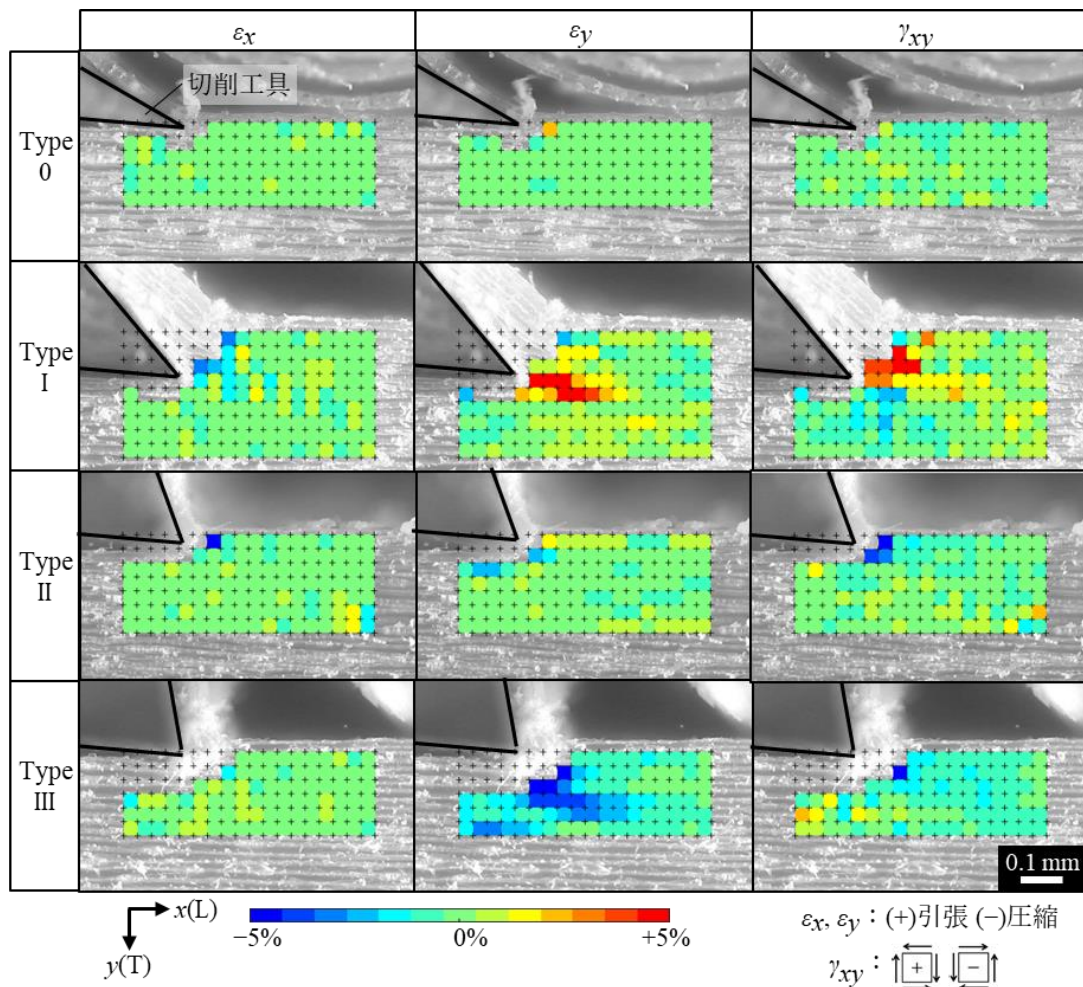


図 2.5 Type 0–III のひずみ分布

Notes: 切削角 θ は、Type 0, I, II, III の順に、 $30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ である。

切込量 d は、Type 0, I, II, III の順に、 $0.05, 0.2, 0.1, 0.05$ mm である。

Type 0 (流れ型)

Type 0 (流れ型) の切屑生成における切れ刃近傍のひずみ分布の一例を図 2.5 の最上段に示す ($\theta = 30^\circ$, $d = 0.05 \text{ mm}$)。Type 0 の ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} は Type I (折れ型) や Type III (縮み型) と比較して小さく、発生範囲も狭いことがわかる。先割れは切れ刃から 0.1 mm 以内の領域で発生していると考えられ、ほとんど視認できなかったが、切込量 d が増加すると先割れが画像上で視認できるようになり切削型は Type I に変化した。Type I では先割れの先端で引張の ε_y が検出されていることから、Type 0 でも引張の ε_y が切れ刃の極めて近傍 (0.1 mm 以内) で発生していたと考えられたが、ひずみ分布の空間分解能が十分ではなく、そのような小さな領域のひずみを検出するには至らなかった。

Type I (折れ型)

Type I における切れ刃近傍のひずみ分布を図 2.5 の二段目に示す ($\theta = 50^\circ$, $d = 0.2 \text{ mm}$)。Type I の切削力は周期的に変化し、先割れが発生する直前で極値を取ることが知られている (Franz 1958, Merhar・Bučar 2012)。したがって、ひずみ分布も切屑生成と対応して時間変化し、切削力が最大となる先割れ発生直前でひずみの大きさや発生範囲が最大となると考えられた。そこで、図 2.5 では先割れ発生直前のひずみ分布を示した。

主分力方向のひずみ ε_x について、刃先進行線よりも上側 (切屑になる部分) で圧縮のひずみが検出された。主分力は背分力よりも一般的に大きいことが知られ、これに対抗する顕著な圧縮応力が刃先前方で発生していると考えられたが、背分力方向のひずみ ε_y と比べて、その大きさや発生範囲は小さかった。これは、木材の弾性係数に異方性があり、L 方向 (主分力方向) の弾性係数は T 方向の約 10 倍であること (福山 1983) が原因であると考えられた。

背分力方向のひずみ ε_y について、刃先前方で引張の ε_y が検出され、先割れは Type 0 よりも遠方に進展した。先割れは T 方向の引張応力が木材の横引張強度を超えると発生することが知られており (黄・林 1973, Stewart 1971)、この引張の ε_y が先割れの原因となっていると考えられた。図 2.5 の Type I のひずみ分布について、その 0.032 s 後のひずみ分布 (図 2.6) を見ると、先割れの進展に伴い、図 2.5 で検出された引張の ε_y は回復したが、先割れの先端で再び引張の ε_y が検出されていた。これは、図 2.5 における先割れ先端の領域でひずみエネルギーが解

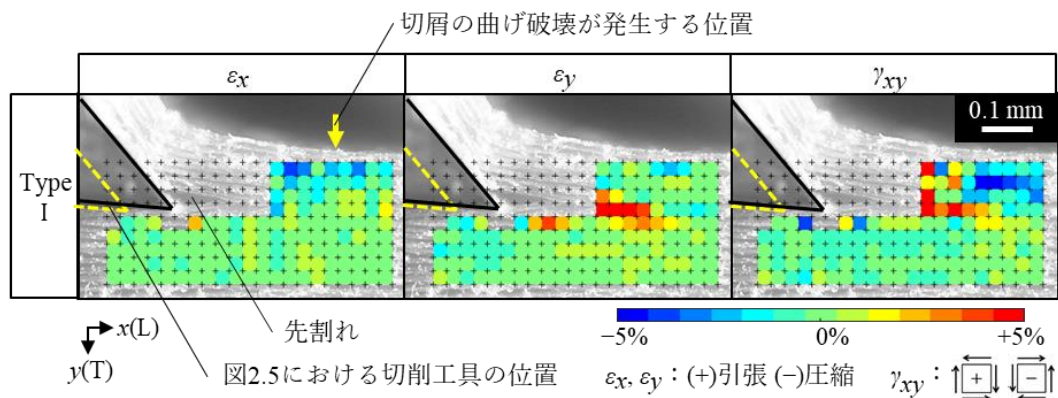


図 2.6 Type I（折れ型）における切屑の曲げ破壊前のひずみ分布

Notes: 図 2.5 から 0.032 s 後の画像である。黄色点線で囲まれた領域は図 2.5 における切削工具の位置を示す。黄色矢印は曲げ破壊が発生した位置を示す。

放されたため引張の ε_y が回復し、先割れ先端では新たな先割れの進展（切屑の分離）につながる引張の ε_y が発生していることを表している。

先割れの進展は切屑が曲げ破壊するまで続いた。切屑の曲げ応力が曲げ強度を超えると切屑は曲げ破壊することが知られており（Franz 1958）、図 2.6 の切屑上側の圧縮の ε_x は切屑の曲げ破壊と関係していると考えられた。しかし、切屑下側では引張の ε_x はほとんど認められなかった。この部分は曲げられると同時にすくい面によって押されており、それに対抗して発生する主分力方向の圧縮応力との重ね合わせの結果、曲げ応力の引張応力が小さくなったと考えられた。

せん断ひずみ γ_{xy} について、正の向きの γ_{xy} が刃先進行線よりも上側で検出されていることから（図 2.5）、切屑がL方向にせん断変形し、切屑は切込量 d よりも薄くなっていることが示唆された。この正の向きの γ_{xy} は切屑の伸長を引き起こしていると考えられたが、Type I の切屑の全長は切削長さとはほぼ同じであることが知られている（陳ら 2001）。一方、切屑の曲げ破壊が起こる領域では負の向きの γ_{xy} が検出された（図 2.6）。負の向きの γ_{xy} は切屑がT方向にせん断してL方向に縮み、切込量 d よりも厚くなることを示唆している。このように、Type I の切屑ではL方向の伸長と収縮が繰り返され、結果として切屑の長さは切削長さとはほぼ同じになると考えられた。

Type II (せん断型)

Type II(せん断型)のひずみ分布を図 2.5 の三段目に示す($\theta=70^\circ, d=0.1 \text{ mm}$)。Type Iと同様、刃先前方で圧縮の ε_x が検出された。刃先前方約 0.2 mm での ε_y は、Type Iよりも小さく、画像では Type Iのような先割れは視認できなかった。この図では、切れ刃から 0.02 mm 以内のひずみは測定できていないが、その領域で先割れが発生し、その原因となる引張の ε_y が発生していた可能性がある。

Type Iでは正の向きの γ_{xy} が刃先前方で検出されたが、Type IIでは負の向きの γ_{xy} が検出された。この傾向は、図 2.7 の模式図のような切屑の変形から説明することができる。Type Iが発生するような切削角 θ の小さい条件では、図 2.7 左のように切屑が変形し、切屑は切込量 d よりも薄くなり、切削長さより長くなる。一方、Type IIが発生するような θ の大きい条件では、図 2.7 右のように切屑は変形し、Type IIの切屑は切込量 d より厚くなり切削長さよりも切屑は縮むと考えられた。

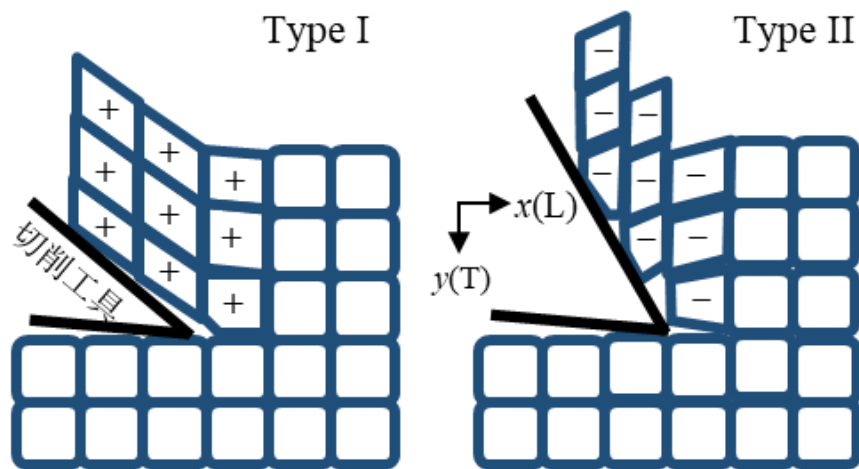


図 2.7 Type I (折れ型) と Type II (せん断型) における切屑のせん断変形の模式図

Type III (縮み型)

Type III (縮み型) のひずみ分布の一例を図 2.5 の最下段に示す ($\theta = 80^\circ$, $d = 0.05\text{mm}$)。Type III のひずみ分布の特徴は Type II と同様、刃先前方で負の向きの γ_{xy} が顕著である一方、Type I のような引張の ε_y は認められなかった。ひずみの大きさやその発生範囲は、Type II よりも Type III の方がより顕著であった。切削角 θ が大きくなるにつれて、Type III が発生するようになり、刃先前方の圧縮の ε_x が微増した。これは、Tochigi・Tadokoro (1985) の研究で、刃先の鈍化によって主分力方向の応力の発生範囲が拡大することと傾向が一致している。切削工具は T 方向に材を圧縮しているように見え、圧縮の ε_y が刃先の下方で検出された。

2.2.2 切削条件が切れ刃近傍の背分力方向のひずみに及ぼす影響

前項 2.2.1 より、 ε_y が切削条件に依存して変化し、その結果先割れの発生に影響を及ぼすことが確認された。そこで本項では、 ε_y と切削条件の関係についてさらに詳しく検討する。本実験では、同一条件で繰返し 5 回切削し、5 個のひずみのデータを得ている。この 5 回分の ε_y の平均値を ε_{y_ave} と定義し、その分布を等高線図によって可視化し、切削角 θ 及び切込量 d との関係を示した (図 2.8)。

切れ刃近傍の ε_y のひずみ分布は θ 及び d により特徴的に変化した。例えば、 $\theta \leq 60^\circ$, $d \geq 0.1\text{mm}$ のとき、+3%以上の引張の ε_{y_ave} が切れ刃から 0.2 mm 前方にまで及んだ。この引張の ε_{y_ave} の発生範囲は切込量 d の増加とともに拡大し、 $\theta = 40^\circ$, $d = 0.3\text{mm}$ で最大となった。このとき、+5%以上の引張の ε_{y_ave} は切れ刃から 0.3 mm 前方にまで及んだ。一方、 $\theta \geq 70^\circ$ のとき、 d によらず圧縮の ε_{y_ave} が切れ刃下方で検出された。この圧縮の ε_{y_ave} は $\theta = 80^\circ$, $d = 0.05\text{mm}$ のとき最大となり、-2%以上のひずみ分布は切れ刃から 0.15 mm 下方にまで及んだ。この圧縮の ε_y は切屑が生成する刃先前方ではなく下方で検出されたため、切屑生成には直接関与していないが、仕上面表層の損傷との関係していると考えられ、仕上面性状の観点からは重要なひずみである。刃先前方の ε_y が引張から圧縮に転じる切削角 θ は、黄・林 (1973) が報告している切削角とほぼ一致した。

図 2.8 の ε_{y_ave} の分布の右下の記号は切削角 θ と切込量 d の各組合せで発生した切削型を示す。図 2.8 で示した切削型の発生と切削角 θ 及び切込量 d の関係は、既往の研究 (Franz 1958、Stewart 1971、Inoue・Mori 1979) とほとんど一致

した。Type I は、刃先前方の引張の ε_{y_ave} によって特徴付けられ、引張の ε_{y_ave} が検出された切削条件と先割れの発生した条件は一致した。Type III は切れ刃下方の圧縮の ε_{y_ave} によって特徴づけられた。Type 0 と Type II で検出された ε_{y_ave} は Type I や Type III と比べて小さかった。このように、DIC 法で求めたひずみ分布の特徴から切削型を分類できることが示された。また、単板切削（横切削）における切れ刃近傍の応力分布の等応力線図は既に報告されているが（杉山 1974, 1975 など）、本研究によって縦切削における切れ刃近傍の等ひずみ線図、さらに切削角や切込量との関係が初めて明らかとなった。

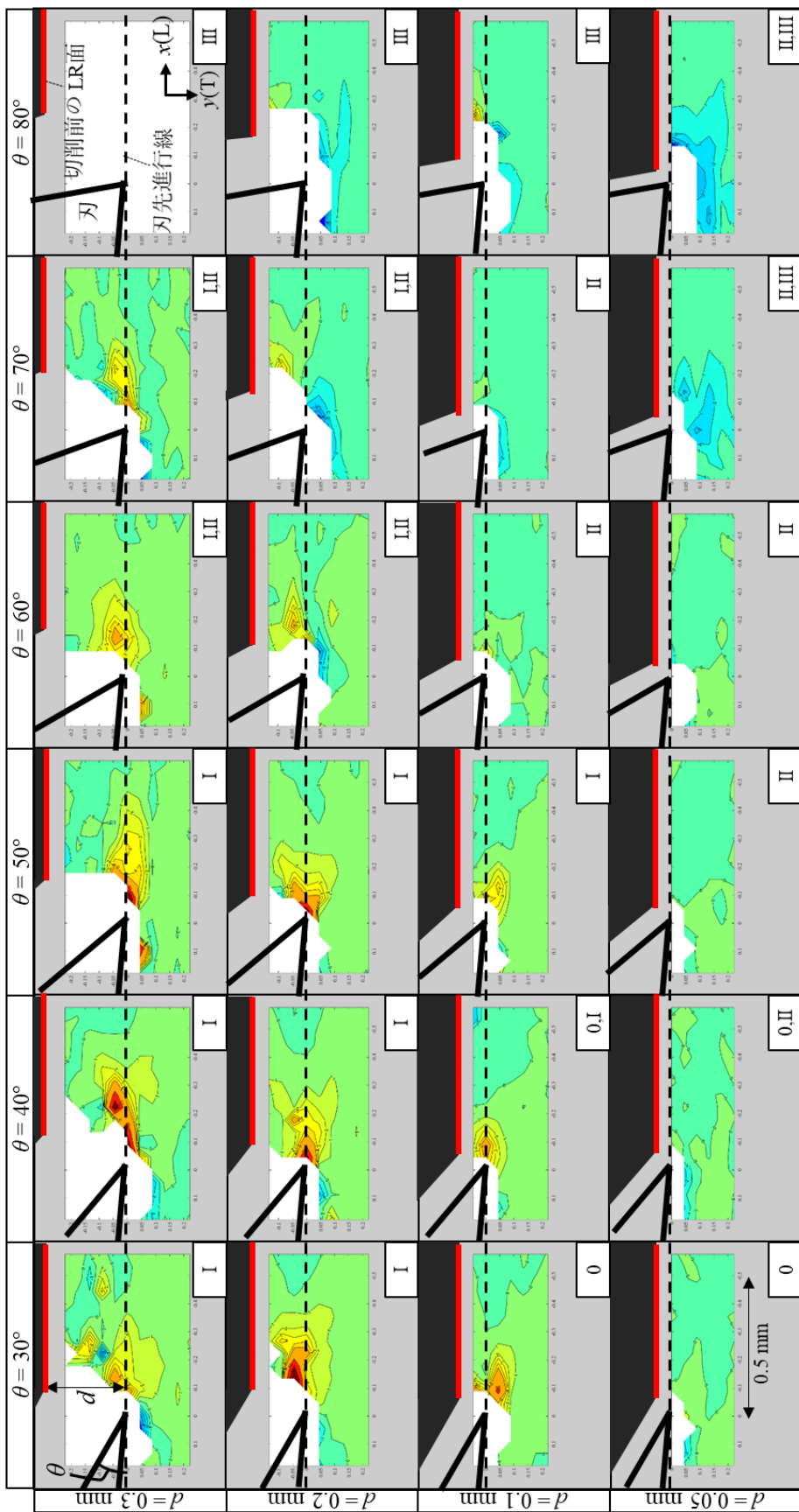


図 2.8 切削角 θ や切込量 d と ϵ_{y_ave} の関係

2.2.3 切削条件が刃先進行線上の背分力方向のひずみに及ぼす影響

先割れが刃先進行線に沿って進展する傾向が認められたため、先割れの原因となる引張の ε_y は刃先進行線上に集中していると考えられた。そこで、先割れと関連する ε_y を評価するために刃先進行線上（図 2.8 の黒点線上）の ε_{y_ave} を切れ刃からの距離（ D ）に対してプロットした（図 2.9）。ほとんどの条件で、切れ刃に近いほど（ D が小さいほど）刃先進行線上の引張の ε_{y_ave} は増加し、その増加率は切込量 d が大きいほど大きくなったが、切れ刃に近づくにつれて、引張の ε_{y_ave} が減少する場合もあった。これは、切削方向に対する L 方向のわずかな傾きが原因で、先割れが刃先進行線上で発生しないときがあり、引張の ε_y が常に刃先進行線上で最大とならないことがわかった。切削角 θ が 60° 以下かつ $d = 0.05$ mm のとき、 $D = 0.09$ mm の ε_{y_ave} の絶対値が小さくなった。このとき、ひずみの発生は切れ刃から 0.1 mm 以内に抑えられており、常に刃先進行線上で切屑の分離が行われ、理想的な切削が行われていると考えられた。

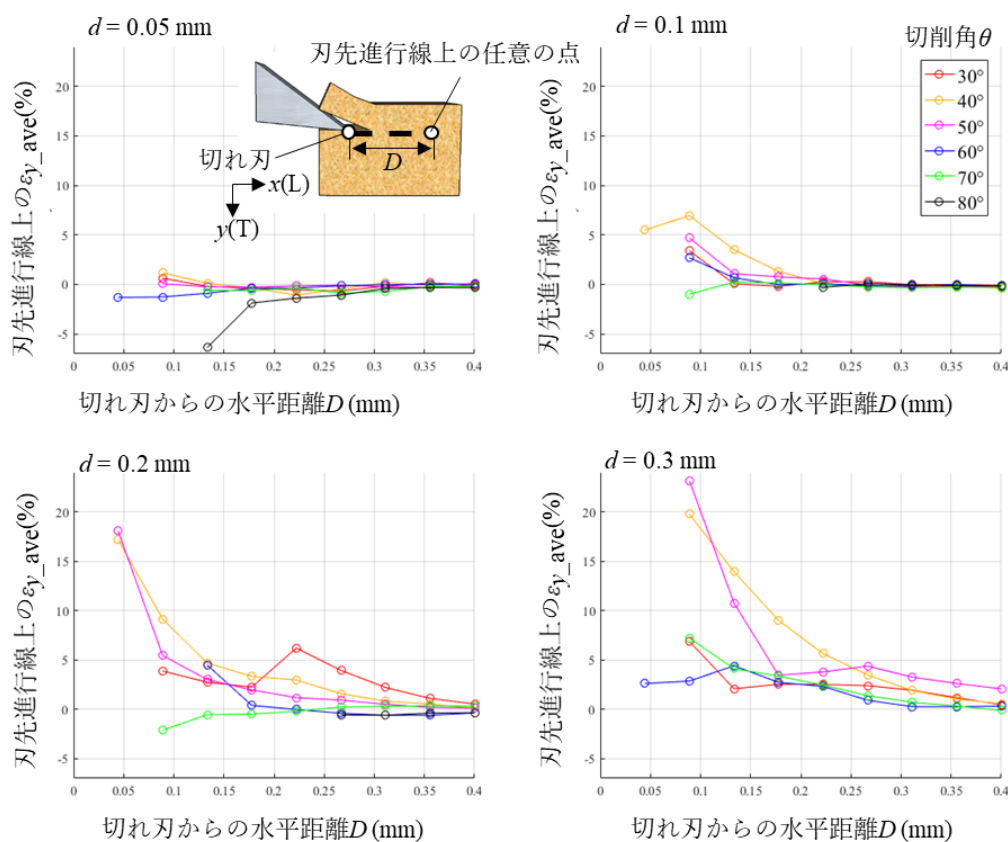


図 2.9 刃先進行線上の ε_{y_ave} と切削角 θ や切込量 d 、切れ刃からの距離 D の関係

図 2.10 は $0.09 \leq D \leq 0.40$ mm 間の刃先進行線上の ε_{y_ave} の平均値 ($\overline{\varepsilon_{y_ave}}$) を切込量 d ごとに切削角 θ に対してプロットした結果を示す。切削角 θ の増加とともに $\overline{\varepsilon_{y_ave}}$ は減少する傾向を示し、その傾向は切込量 d が大きいほど顕著となった。また、 $\overline{\varepsilon_{y_ave}}$ は切込量 d の増加とともに増加した。これらの結果から、DIC 法によって切れ刃近傍のひずみを評価し、切削条件や被削性を定量的に評価できる可能性が示唆された。

総じて、木材切削における切削角や切込量が切れ刃近傍のひずみ分布に影響を及ぼし、結果として切屑生成や切削型に影響を及ぼすことが確認された。また、木材切削における切屑生成に関連するひずみの測定に DIC 法が有効であり、DIC 法によって切削条件や被削性を評価できることが明らかとなった。一方で、DIC 法は画像内の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り、本研究の場合主分力方向の応力を過小評価した可能性があった。

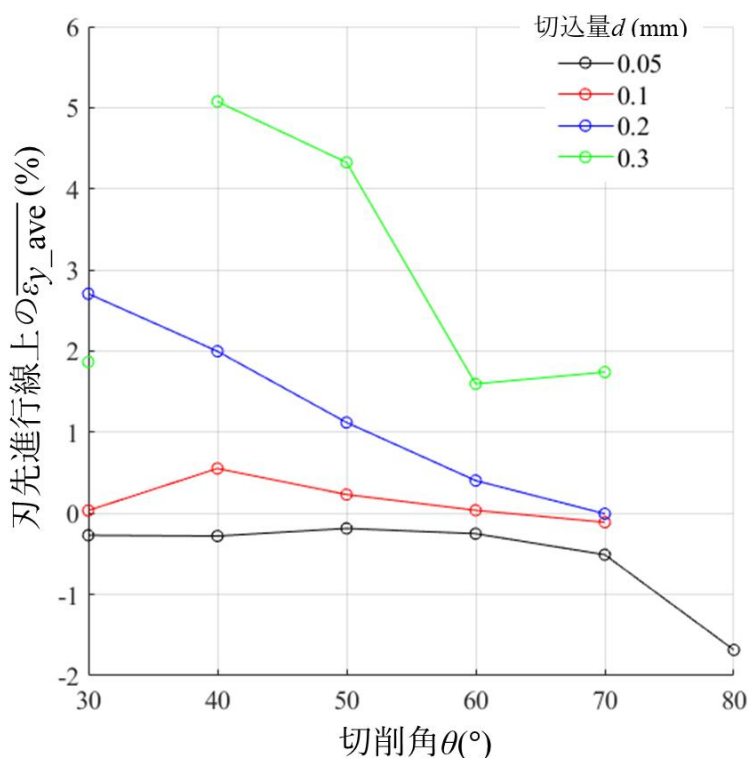


図 2.10 刃先進行線上の $\overline{\varepsilon_{y_ave}}$ と切削角 θ や切込量 d の関係

2.3 本章の要約

本章では、ヒノキのまさ目面を二次元縦切削し、切削中の板目面を高速度カメラによって撮影し、得られた画像を画像相関法（DIC法）によって解析し、切れ刃近傍の小領域（ $0.80(L) \times 0.27-0.49(T)$ mm）で発生した主分力方向のひずみ ε_x 、背分力方向のひずみ ε_y 、せん断ひずみ γ_{xy} を測定した。ひずみは、0.04 mm 間隔で測定され、測定可能な最小・最大のひずみはそれぞれ 0.08%、20%であった。DIC法の確度（誤差率）は $\pm 2\%$ 以内で、精度（変動係数）は約 17%であった。

切れ刃近傍のひずみの大きさや発生範囲は切削角 θ や切込量 d によって特徴的に変化した。先割れの原因となる引張の ε_y が $\theta \leq 60^\circ, d \geq 0.1$ mm のとき、刃先前方の領域で検出され、その範囲は d の増加とともに拡大した。一方、 $\theta \geq 70^\circ$ のとき、 d によらず圧縮の ε_y が切れ刃下方で検出された。この圧縮の ε_y は切屑生成には直接関与していないと考えられたものの、仕上面表層の損傷と関係していると考えられた。また、切削型間で切れ刃近傍の ε_y の分布の特徴が異なることが確認され、DIC法によって切屑生成を切削型に分類しうることが示唆された。刃先進行線よりも上側の領域で γ_{xy} が検出され、その向きは θ に依存して変化した。この γ_{xy} は切屑の伸長や収縮に関与していると考えられた。一方、すべての切削条件において、 ε_x はほとんど検出されず、 θ や d の関係は不明瞭であった。

木材の研究分野で一般的になりつつある DIC 法は、木材切削における切屑生成に関連するひずみの測定にも有効であった。一方で、DIC 法は画像内の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る。このことは、木材のように異方性のある材料のひずみ分布から応力状態を推定する際の注意点であるといえる。

第三章

仕上面表層の残留ひずみ測定及び X 線コンピュータ断層撮影

第二章では、木材切削時に切れ刃近傍で発生するひずみを画像相関法(DIC法)によって測定した。切削中に切れ刃近傍で発生した過大なひずみは切削後も残留し、仕上面表層の残留ひずみは仕上面表層の損傷(1.4参照)と密接に関係し、毛羽立ちなどの加工欠点との関連が深い。木材加工において良好な仕上面を得るためには、仕上面表層でひずみが残留しない切削条件を見出すことが重要である。本章では、ヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)の二次元縦切削後に仕上面表層に残留するひずみをDIC法によって測定するとともに、X線コンピュータ断層撮影(X線CT)によって仕上面表層の細胞の形態を調べ、これと切削角 θ や切込量 d との関係を検討する。

3.1 実験方法

3.1.1 切削試験

切削試験の模式図を図3.1に示す。切削工具を一軸送り装置に取り付けた工具ホルダーに固定し、被削材に向かって5 mm/sの一定速度で送ることによりまき目面を二次元縦切削した。切れ刃はL方向に対して垂直とし、バイアス角は設定しなかった。切削方向はL方向に対して平行とした。被削材はヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)心材の気乾材で、寸法は50(L)×5(R)×50(T) mmとした。被削材の気乾密度は0.38 g/cm³、含水率は10.6%、平均年輪幅は1.1 mmであった。

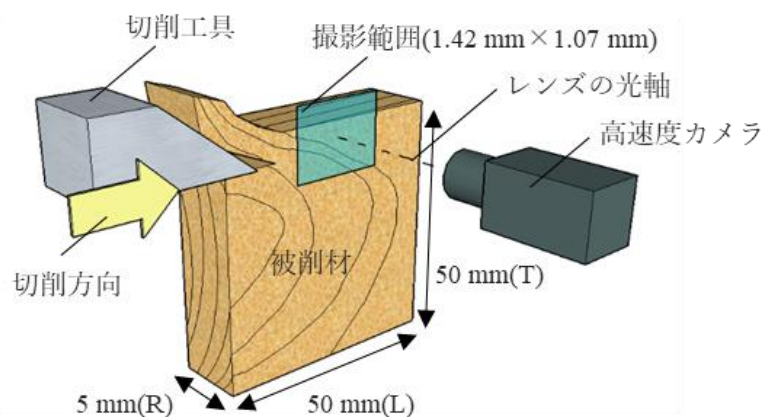


図 3.1 切削試験の模式図

た。ひずみを測定する表面 (LT 面) は、自動 1 面かな盤で仕上げた。このとき、材面に不規則に毛羽立ちが発生し、これと仮道管や放射組織の配列によって、DIC 法適用に必要なランダムパターンが得られた。

切削工具の材質は高速度鋼 (SKH51) とした。厚さ $5\mu\text{m}$ の窒化クロムコーティングを切削工具に施し、研磨により逃げ面のコーティングのみ除去した。刃先角は $25^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ, 75^\circ$ 、逃げ角は 5° で一定としたので、切削角 θ は $30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ である。切込量 d は、 $0.05, 0.1, 0.2, 0.3\text{ mm}$ とした。切削角 θ と切込量 d の組み合わせごとに 5 回繰り返し切削を行い、切削の都度被削材を入れ替えた。

切削時の切れ刃近傍を高速度カメラ (VW-6000、KEYENCE) で録画した。カメラのレンズ (VH-Z150、KEYENCE) の光軸は被削材の LT 面に垂直とした。カメラの撮影範囲は幅 $1.42(\text{L})\times$ 高さ $1.07(\text{T})\text{ mm}$ ($640\times 480\text{ pixels}$) とし、撮影範囲に対して幅方向を x 方向、高さ方向を y 方向と定義した。カメラの被写界深度は 0.05 mm 、フレームレートは 250 fps 、シャッタースピードは $1/2000$ または $1/3000\text{ s}$ とした。すべての動画を ImageJ (ver1.50e) (Schneider ら 2012) によって 8 bit のグレースケールのイメージシーケンスに変換した。

3.1.2 画像相関法によるひずみ測定

DIC 法によるひずみ測定には、MATLAB 言語 (2016a) (The MathWorks, Inc.) で作成した DIC 法プログラムを使用した。切削前の画像を参照画像 (変形前)、切削中の画像及び切削工具が通過した 1 s 後の画像を対象画像 (変形後) と定義した。参照画像の刃先進行線より下側の領域に測定範囲 (Region of Interest; ROI) を設定した (図 3.2 黄色部)。ROI の寸法は、幅(L)300×高さ(T)100 pixels ($0.67\times 0.22\text{ mm}$) とした。

ROI 内のひずみ分布を求めるため、ROI 内に格子点 (図 3.2 白四角) を x, y 方向ともに 10 pixels (0.02 mm) ごとに設置した。格子点を中心とした幅 $61(\text{L})\times$ 高さ $31(\text{T})\text{ pixels}$ ($0.14\times 0.07\text{ mm}$) の領域を参照サブセット (図 3.2 赤四角) とし、対象画像において参照サブセットと最も類似度の高い領域 (対象サブセット) を探し出した。両サブセット間の類似度評価には相関係数 C_{ZNCC} (式 3.1) を用いた:

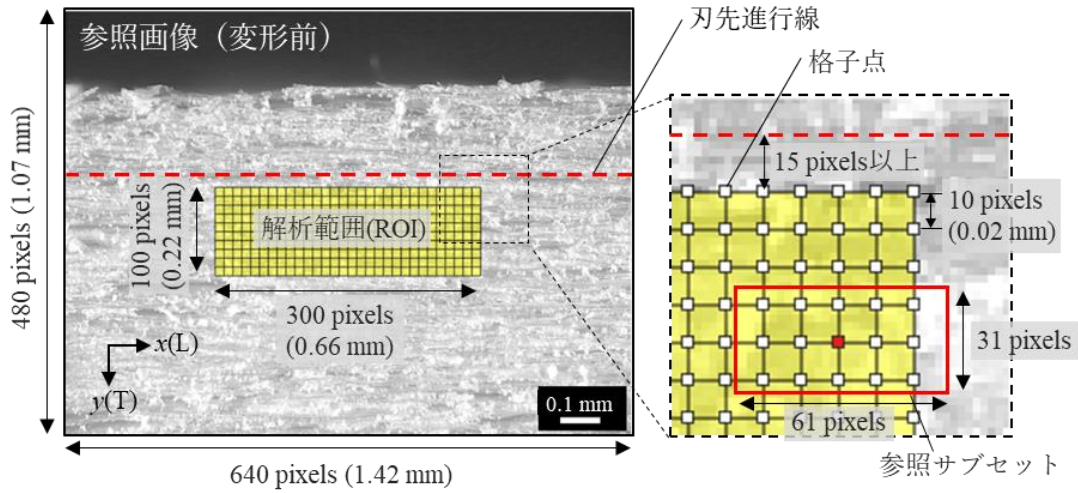


図 3.2 解析範囲と格子点

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{F(i,j) - \bar{F}\} \times \{G(i+u,j+v) - \bar{G}\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{F(i,j) - \bar{F}\}^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{G(i+u,j+v) - \bar{G}\}^2}} \quad (-1 \leq C_{ZNCC} \leq 1) \quad (3.1)$$

ただし、 u と v はそれぞれ格子点の x 方向と y 方向の移動量、 $F(i,j)$ と $G(i+u,j+v)$ は、参照画像上の格子点 (i,j) と対象画像上の点 $(i+u,j+v)$ の画素値、 \bar{F} と \bar{G} は参照サブセットと対象サブセットの画素値の平均値、 m と n はサブセットの幅と高さである。相関係数 C_{ZNCC} を最大にする格子点の移動量 (u,v) を求めることで、対象画像上の格子点の位置を特定した。

刃先進行線付近に格子点を設置すると、切削後のそのサブセットには、木材が割裂しランダムパターンのない空気部分が含まれてしまうため、 C_{ZNCC} が低下し、移動量が正確に求められない。そこで、ROI の上縁が刃先進行線 (図 3.2 赤点線) から少なくとも 15 pixels (0.03 mm) 離れるように ROI の位置を調整した。

切削中の対象画像における格子点の位置を特定した後、図 3.3 のように、隣合う格子点 4 点に囲まれた四角形要素について主分力方向 (L 方向) のひずみ ε_x 、背分力方向 (T 方向) のひずみ ε_y を式 3.2, 3.3 によって求めた。同様に、切削後の対象画像についても主分力方向の残留ひずみ ε_{xr} 、背分力方向の残留ひずみ ε_{yr} を式 3.2, 3.3 によって求めた。

$$\varepsilon_{x,rr} = \frac{1}{2} \left[\frac{\{(x_b + u_b) - (x_a + u_a)\} - (x_b - x_a)}{(x_b - x_a)} + \frac{\{(x_d + u_d) - (x_c + u_c)\} - (x_d - x_c)}{(x_d - x_c)} \right] \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_{y,xr} = \frac{1}{2} \left[\frac{\{(y_a + v_a) - (y_c + v_c)\} - (y_a - y_c)}{(y_a - y_c)} + \frac{\{(y_b + v_b) - (y_d + v_d)\} - (y_b - y_d)}{(y_b - y_d)} \right] \quad (3.3)$$

ただし、 $x_{a,b,c,d}$ と $y_{a,b,c,d}$ は、図 3.3 の参照画像上の四角形要素を構成する 4 個の格子点の x 座標と y 座標、 $u_{a,b,c,d}$ と $v_{a,b,c,d}$ は各格子点の移動量である。格子点は x, y 方向ともに 10 pixels (0.02 mm) ごとに設置したので、ひずみ分布の空間分解能は 0.02 mm であった。

格子点の移動量(u, v)をサブピクセル単位の精度で求めるために、coarse-to-fine アルゴリズムを用いた。このアルゴリズムでは、まず対象画像上を 1 pixel 単位で走査し、相関係数 C_{ZNCC} が最大となる対象サブセットを探し出した。次に、 C_{ZNCC} が最大となった対象サブセットの中心の画素とその隣接する 8 個の画素の中間に仮定の補画素を 8 個設定した。補画素の画素値は spline 関数によって計算した。走査ステップを 1/2 pixel に変え、前回 C_{ZNCC} が最大となった画素とその周囲の 8 個の補画素の中から C_{ZNCC} が最大となる点を特定した。この手順を(u, v)が $(1/2)^7 \cong 7.81 \times 10^{-3}$ pixel (1.74×10^{-5} mm) 単位で計算されるまで繰り返した。四角形要素の大きさ (格子点の間隔) は 10 pixels であったため、測定可能な最小のひずみは $\{(1/2)^7 \div 10\} / 2 \cong 0.04\%$ となった。

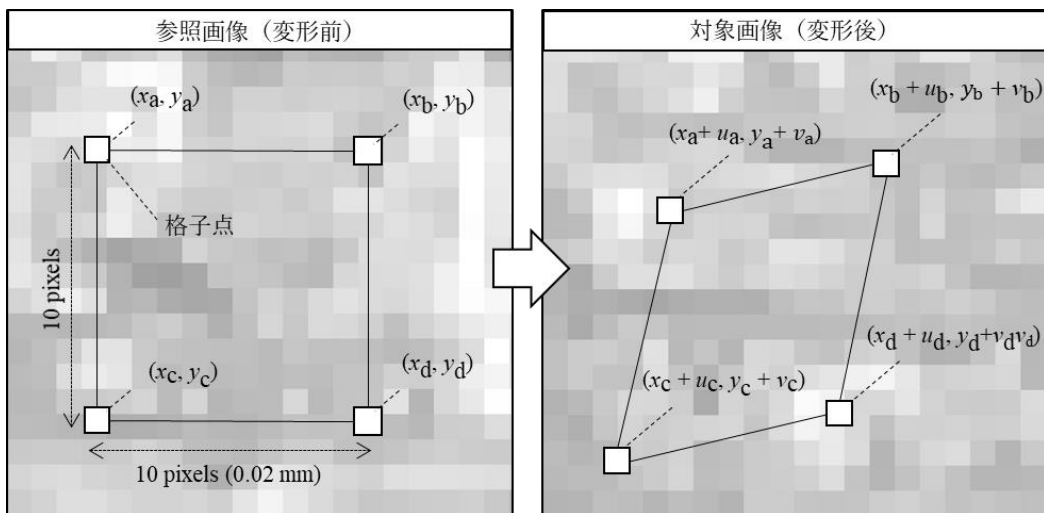


図 3.3 変形前後の四角形要素を構成する格子点の座標

3.1.3 画像相関法によるひずみ測定の精度検証

切削が行われなように切削工具と被削材の位置を調整し、切削工具を送っている間に 1 s 間隔で 2 枚の画像を撮影し、それぞれ参照画像と対象画像とした。参照画像上に、3.1.2 と同じ大きさの ROI (幅 300(L)×高さ 100(T) pixels (0.67×0.22 mm)) を設置した。3.1.2 と同様に、ROI 内に x, y 方向ともに 10 pixels (0.04 mm) 間隔で格子点を設置し、ROI を $30 \times 10 = 300$ 個の四角形要素に分割した。これら四角形要素のひずみの平均値と標準偏差を求めた。

切削を行っていないのにも関わらず、得られた画像からひずみが検出された。検出されたみかけの ϵ_x は、 $2.6 \times 10^{-4} \pm 5.9 \times 10^{-2} \%$ (平均±標準偏差)、みかけの ϵ_y は、 $3.4 \times 10^{-3} \pm 6.2 \times 10^{-2} \%$ であった。これらのみかけのひずみは、光源のちらつきやカメラの振動に起因するものと考えられた。一方で、これらのひずみは切削によって発生するひずみと比べて極めて小さかったので、結果の解析において考慮する必要はないと判断した。

2.1.4 と同様に、画像処理によって任意の参照画像にひずみを疑似的に付与することで対象画像を作成し、付与した疑似ひずみ ϵ_{x_nom} 、 ϵ_{y_nom} を DIC 法によって測定したひずみ ϵ_x 、 ϵ_y と比較した (図 3.4)。参照画像を水平方向 (L 方向) に ϵ_{x_nom}

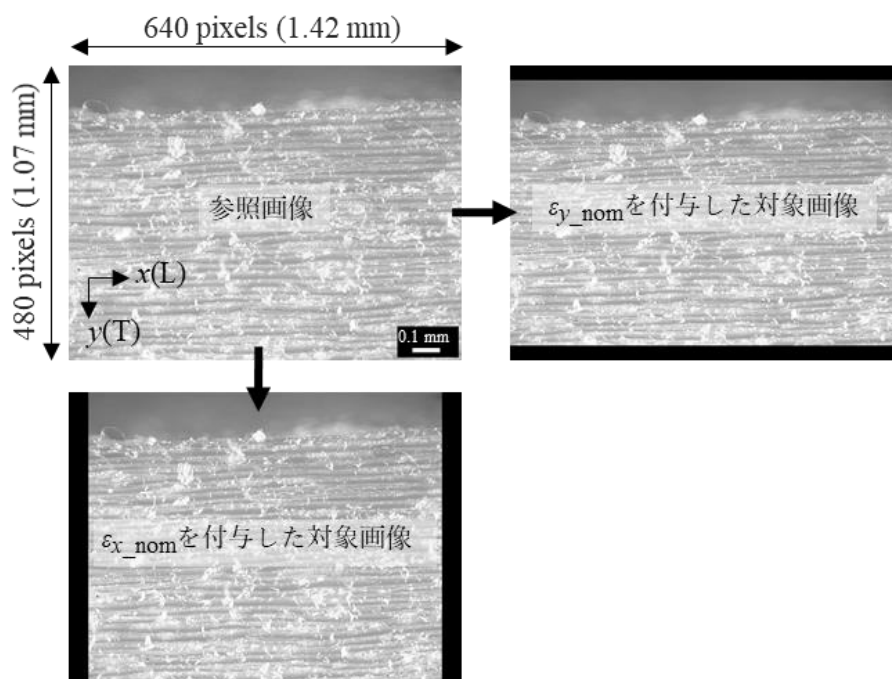


図 3.4 精度検証用の対象画像の例

に対応する画素列だけ等間隔で減らすことで疑似圧縮ひずみ ε_{x_nom} を付与した。このとき、参照画像の画素配列を bicubic 関数で近似し、対象画像の画素値を再設定した。参照画像を垂直方向 (T 方向) に ε_{y_nom} に対応する画素列だけ等間隔で減らすことで疑似圧縮ひずみ ε_{y_nom} を付与した。これらの画像処理には、MATLAB (2016a) (The MathWorks, Inc.) を用いた。300×100 pixels (0.66×0.22 mm) の大きさの ROI を参照画像の中央に配置した。ROI 内に x, y 方向ともに 10 pixels (0.02 mm) 間隔で格子点を設置し、ROI を 30×10=300 個の四角形要素に分割した。300 個の四角形要素の ε_x 、 ε_y の平均値を計算し、 ε_{x_nom} 、 ε_{y_nom} と比較した (図 3.5)。疑似ひずみと計算された ε_x 、 ε_y の平均値はほぼ一致した一方で、疑似ひずみが大きくなるにつれて ε_x 、 ε_y の標準偏差は増加することがわかった。

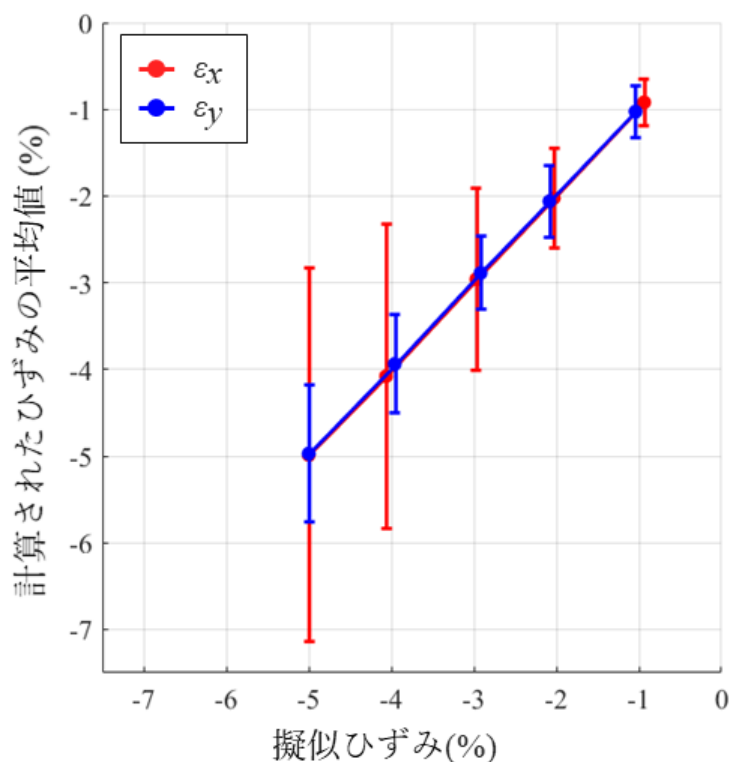


図 3.5 擬似ひずみと DIC 法で計算したひずみの比較

Notes: エラーバーは標準偏差を示す ($n = 300$)。

3.1.4 X線コンピュータ断層撮影

仕上面表層をマイクロフォーカス X 線 CT 装置 (SMX-100CT、SHIMADZU) (図 3.6) で撮像するため、装置内の試験台に収まるように被削材から仕上面全体を含む試験片 (50(L)×5(R)×5(T) mm) を切り出した。X 線源と被削材間の距離は 15.0 m、X 線源とイメージインテンシファイア間の距離は 500.0 mm とした。このとき、撮像範囲は 0.7(L)×0.7(R)×0.7(T) mm、ボクセルサイズは $1.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{voxel}$ であった。管電圧は 30 kV、管電流は 100 μA とした。

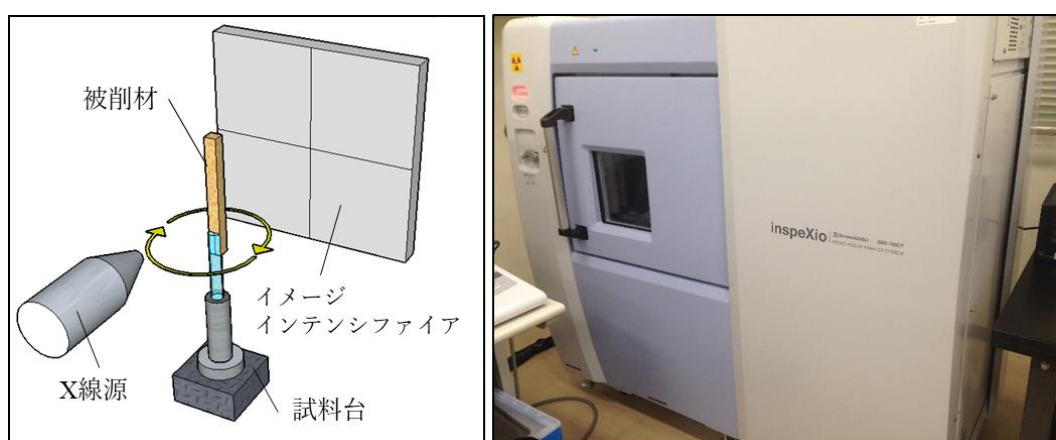


図 3.6 X線 CT の模式図 (左) とマイクロフォーカス X 線 CT 装置 (右)

3.2 結果と考察

3.2.1 主分力方向の残留ひずみ

切削中に刃先進行線より下側（母材側）で検出された主分力方向（L方向）のひずみ ε_x の分布と切削工具通過1 s後に母材側で検出された主分力方向の残留ひずみ ε_{xr} の分布を図3.7に示す（ただし、 $\theta = 40^\circ$, $d = 0.1$ mm）。切削中、母材側では1%程度の引張の ε_x が検出された（図3.7左）が、切削後、残留ひずみ ε_{xr} はほとんど検出されず（図3.7右）、仕上面表層の細胞はL方向にほとんど変形していないと考えられた。これは、L方向の弾性係数が高いからであると考えられた。

図3.7よりも切削角 θ や切込量 d が大きい条件下において母材側で検出された ε_x と ε_{xr} の分布を図3.8に示す（ただし、 $\theta = 70^\circ$, $d = 0.3$ mm）。切削角 θ や切込量 d が増加すると主分力が増加し、ROI内で1%以上の引張の ε_x と ε_{xr} が不規則に検出された。これは、材内に不規則に分布する放射組織に応力が集中したためであると考えられた。

刃先進行線から0.10 mm下方で検出された ε_{xr} の同一切削条件での繰り返し5回分の平均値 $\overline{\varepsilon_{xr}}$ を切込量 d ごとに切削角 θ に対してプロットした（図3.9）。切削角 θ や切込量 d の増加とともに引張の ε_{xr} は微増した。これは前述のように、増加した主分力に対抗して、母材側の応力も増加したためであると考えられた。

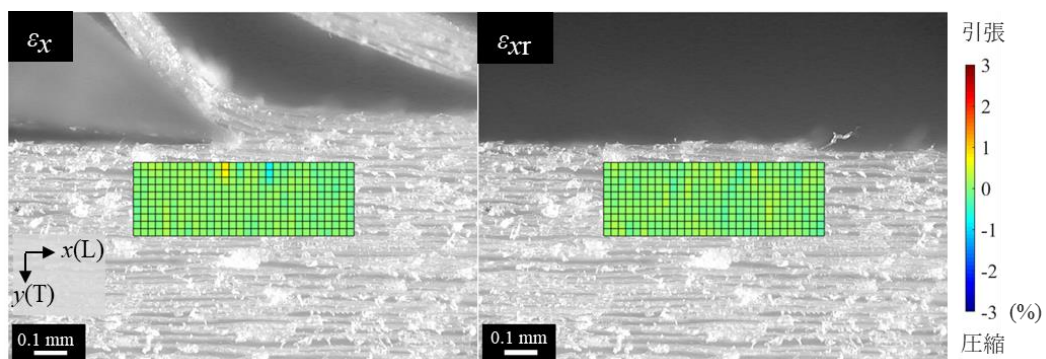


図3.7 仕上面表層の主分力方向のひずみ ε_x の分布（左）と残留ひずみ ε_{xr} の分布（右）（ $\theta = 40^\circ$, $d = 0.1$ mm）

Notes:右図は左図の1 s後に撮影された。

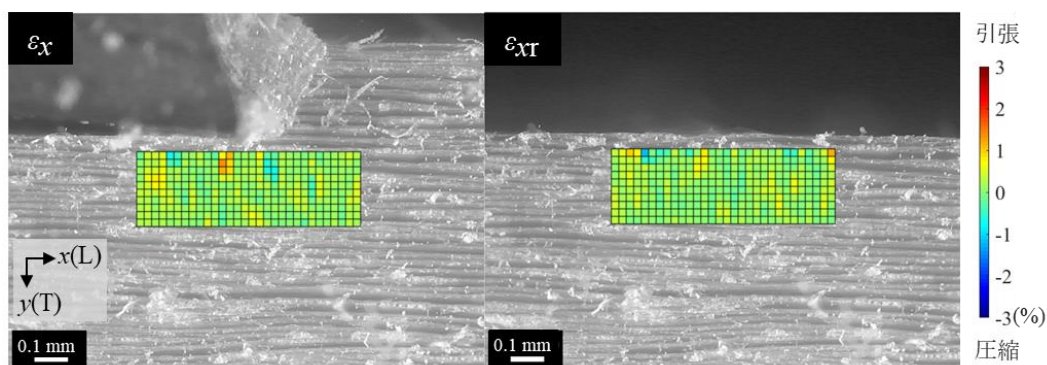


図 3.8 仕上面表層の主分力方向のひずみ ε_x の分布（左）と残留ひずみ ε_{xr} の分布（右）（ $\theta = 70^\circ, d = 0.3\text{mm}$ ）

Notes:右図は左図の 1 s 後に撮影された。

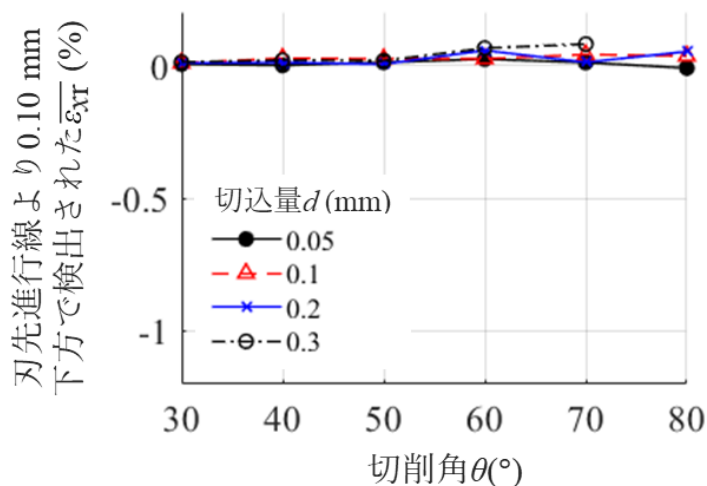


図 3.9 刃先進行線から 0.10 mm 下方で検出された ε_{xr} と切削角 θ 及び切込量 d の関係

3.2.2 背分力方向の残留ひずみ

母材側で検出された背分力方向（T 方向）のひずみ ε_y の分布と切削工具通過 1 s 後に母材側で検出された背分力方向の残留ひずみ ε_{yr} の分布、X 線 CT によって得られた仕上面表層の木口面断層図を図 3.10 に示す（ただし、 $\theta = 50^\circ, d = 0.05\text{mm}$ ）。CT 画像では、画素の濃淡が密度と対応し、明るく見える部分が細胞壁（高密度）、暗く見える部分が空気部分（低密度）を示す。図 3.10 のように、 $\theta \leq 60^\circ, d = 0.05\text{mm}$ の条件下では母材側で ε_{yr} はほとんど検出されず、CT 画像では仕上面表層の細胞はすべて原形を保っていた。

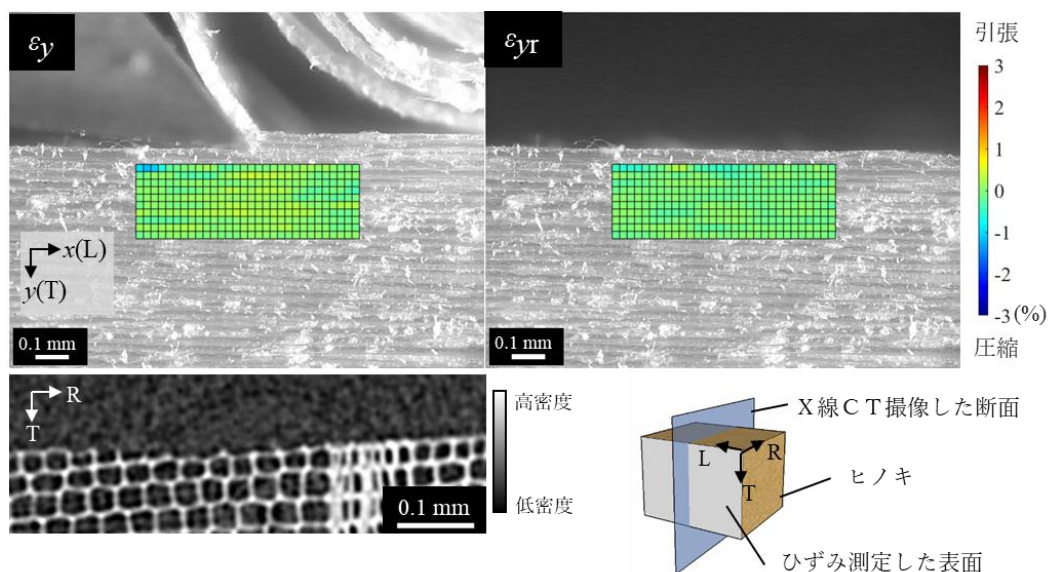


図 3.10 仕上面表層の背分力方向のひずみ ϵ_y の分布（左上）と残留ひずみ ϵ_{yr} の分布（右）及び木口面断層図（左下）（ $\theta = 50^\circ$, $d = 0.05$ mm）

Notes: 右上図は左上図の 1 s 後に撮影された。

図 3.10 よりも切込量 d が大きい条件下で母材側で検出された ϵ_y の分布、 ϵ_{yr} の分布、仕上面表層の木口面断層図を図 3.11 に示す（ただし、 $\theta = 50^\circ$, $d = 0.3$ mm）。図中右下のグラフは、ひずみ分布の破線 a, b 上で検出された ϵ_y と ϵ_{yr} を刃先進行線からの距離に対してプロットしたものである。切削条件が $\theta \leq 60^\circ$, $d \geq 0.1$ mm になると、顕著な先割れが視認できるようになり、先割れの先端付近で+2%以上の引張の ϵ_y が母材側で検出された（図 3.11 左上）。この引張の ϵ_y は切れ刃通過後約 1 s で回復した（図 3.11 右上）。CT 画像においても仕上面表層の細胞はすべて原形を保っているようにみえた（図 3.11 左下）が、先割れによって細胞間層で組織が分離し、切削後再び元の位置に戻った可能性も考えられる。その場合、細胞間層に沿って割れが発生しているはずであるが、CT 画像の分解能ではそのような分離は検出できなかった。

図 3.10 よりも切削角 θ の大きい条件下で検出された ϵ_y の分布、 ϵ_{yr} の分布、仕上面表層の木口面断層図を図 3.12 に示す（ただし、 $\theta = 80^\circ$, $d = 0.05$ mm）。切削条件が、 $\theta \geq 70^\circ$ のとき切込量 d によらず母材側で圧縮の ϵ_y が検出され、切削後も残留した。圧縮の ϵ_y と ϵ_{yr} は ROI 内で不規則的に検出され、これは材内に不規則に分布する放射組織が原因と考えられた。CT 画像では、仕上面から 0.05 mm 以内に位置する細胞が T 方向に圧潰していることが確認できた（図 3.12 左下）。

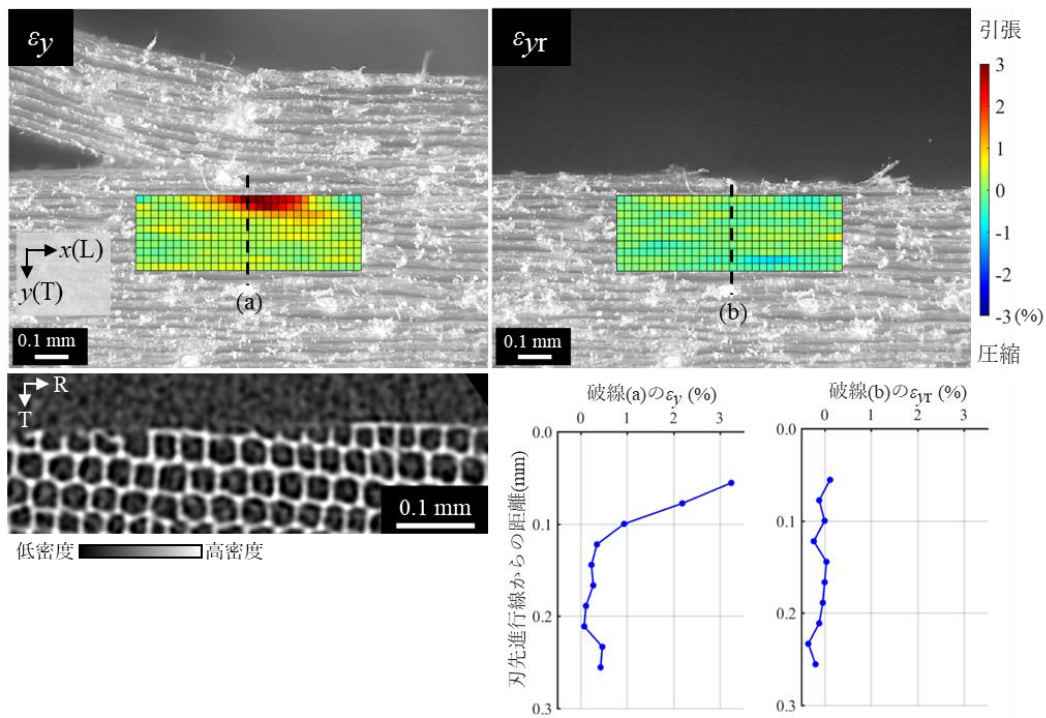


図 3.11 仕上面表層の背分力方向のひずみ ϵ_y の分布（左上）、残留ひずみ ϵ_{yr} の分布（右上）と木口面断層図（左下）、破線(a), (b)上の ϵ_y 及び ϵ_{yr} （右下）（ $\theta = 50^\circ$, $d = 0.3$ mm）

Notes: 右上図は左上図の 1 s 後に撮影された。

刃先進行線から 0.10 mm 下方で検出された ϵ_{yr} の同一切削条件での繰り返し 5 回分の平均値 $\overline{\epsilon_{yr}}$ を切込量 d ごとに切削角 θ に対してプロットした（図 3.13）。切込量 d によらず、 $\theta \leq 60^\circ$ のとき、刃先進行線から 0.10 mm 下方の $\overline{\epsilon_{yr}}$ はほとんど検出されなかったが、 $\theta \geq 70^\circ$ のとき急激に増加した。Stewart (1989) は、同様の切削角のときに大きな下向きの背分力によって仕上面表層の損傷が引き起こされると述べている。切削角の増大とともに増大した背分力に対抗して圧縮の ϵ_y が増加し、その結果切削後も圧縮の ϵ_y は残留するため、仕上面表層の損傷も大きいことが示唆された。L 方向よりも T 方向の強度は小さいため、 $\overline{\epsilon_{yr}}$ は $\overline{\epsilon_{xr}}$ よりも大きかった。

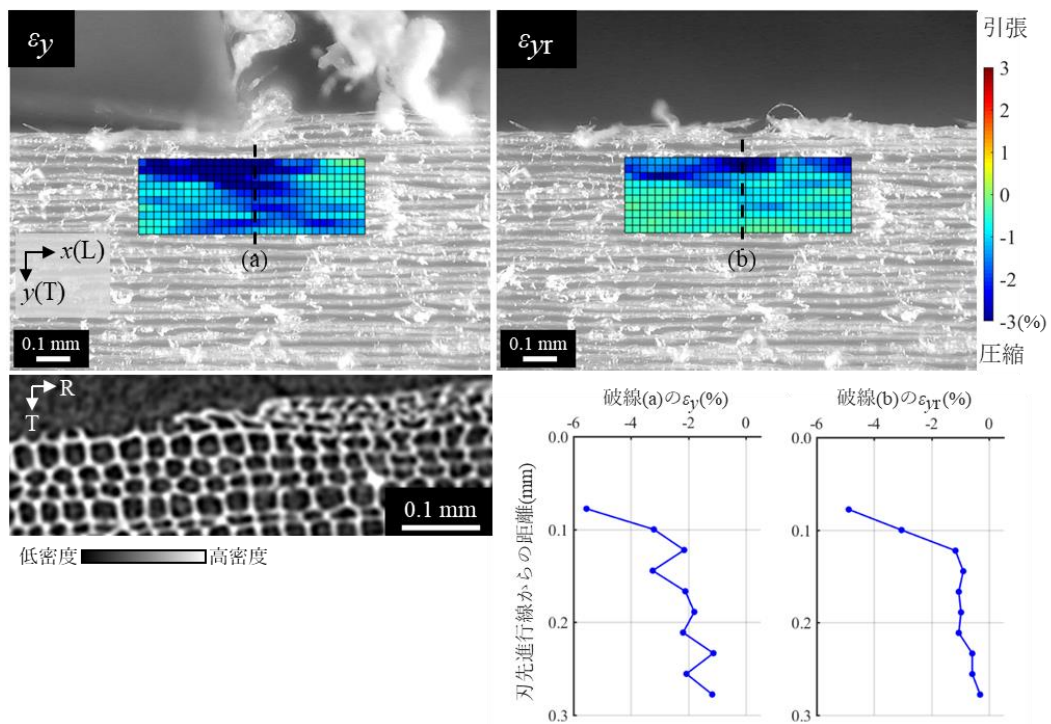


図 3.12 仕上面表層の背分力方向のひずみ ε_y の分布 (左上)、残留ひずみ ε_{yr} の分布 (右上) と木口面断層図 (左下)、破線(a), (b)上の ε_y 及び ε_{yr} (右下) ($\theta = 80^\circ, d = 0.05 \text{ mm}$)

Notes: 右上図は左上図の 1 s 後に撮影された。

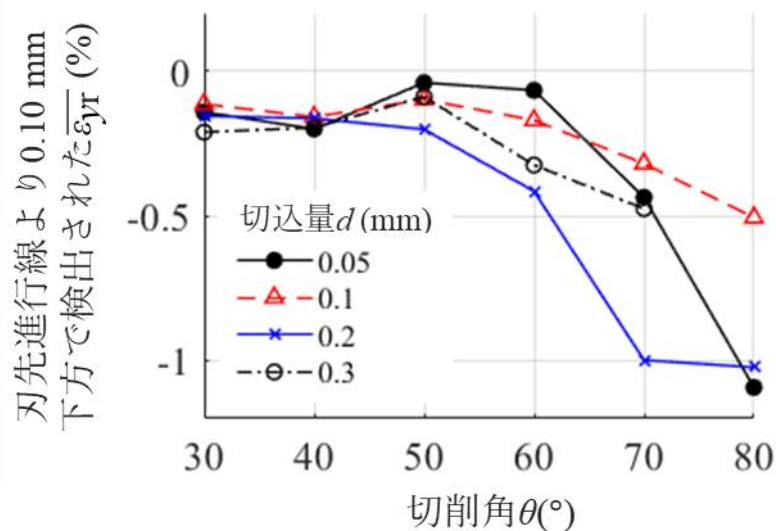


図 3.13 刃先進行線から 0.10 mm 下方で検出された $\overline{\varepsilon_{yr}}$ と切削角 θ 及び切込量 d の関係

3.2.3 X線CT画像からみた切削型ごとの仕上面の特徴

Type 0–IIIの仕上面表層の木口面断層図を図 3.14 に示す。Type 0（流れ型）では、先割れが切れ刃から 0.1 mm 以内の領域で発生するため、仕上面は刃先進行線とほとんど一致し、仕上面を構成する細胞の多くは、元の形を保っているようにみえた。McKenzie（1967）は Type 0 の仕上面が最も損傷が少ない傾向があると述べており、本研究でもその傾向が確認された。

Type I（折れ型）では、Type 0 と比べて大きな先割れが発生し、先割れの伸展と切屑の曲げ破壊が繰り返されることで、切屑が生成した。仕上面は、Type 0 と同様、刃先進行線とほぼ一致し、仕上面を構成する細胞の多くは原形を保っているようにみえた。しかし、年輪接触角が大きいと、一部が掘られ仕上面に凹凸が生じる場合があった（図 3.14 白矢印）。また、仕上面表層を構成する細胞のうち、林ら（1970）の研究で議論されていた細胞壁が切断され U 型となっている細胞はほとんど認められなかったことから、先割れは常に細胞間層に沿って発生していることが示唆された。

Type II（せん断型）の仕上面は刃先進行線とほとんど一致していたものの、圧潰部分（図 3.14 赤矢印）が散見された。この圧潰部分では、内腔がほとんど認められないほど細胞は著しくつぶれていた。圧潰部分は、Type I の仕上面においてもわずかに認められた。繊維方向のわずかな傾きによって順目切削となると、Type I 切屑生成における先割れの発生後、刃先進行線よりも上側の部分が分離されずに残り、これが切削工具によって Type II に分類される切屑として切り取られるが（図 3.15 黒矢印）、この際に圧潰部分が生成すると考えられた。

Type III（縮み型）のとき、圧潰部分の発生頻度や大きさは最も顕著となった。Type III は他の切削型よりも仕上面の損傷が顕著となることが知られており（Franz 1958、Cool、Hernández ら 2011b）、本研究でもこの傾向が確かめられた。

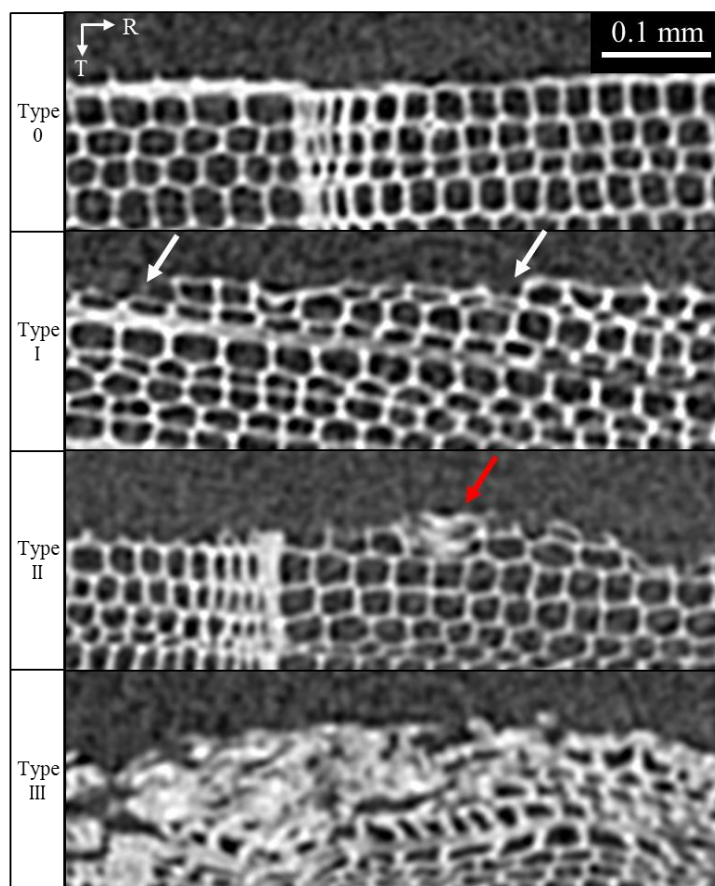


図 3.14 Type 0–III の仕上面表層の木口面断層図

Notes: Type 0 の切削条件は $\theta = 40^\circ$, $d = 0.05$ mm、
 Type I では、 $\theta = 40^\circ$, $d = 0.2$ mm、
 Type II では、 $\theta = 60^\circ$, $d = 0.1$ mm、
 Type III では、 $\theta = 80^\circ$, $d = 0.1$ mm

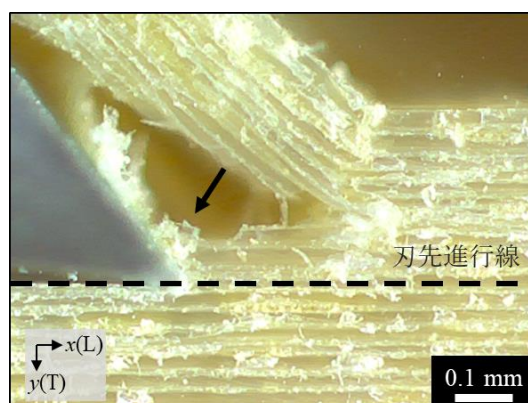


図 3.15 Type I における先割れ発生後に生成した Type II 切屑 (矢印)

Notes: $\theta = 50^\circ$, $d = 0.3$ mm

圧潰部分の生成機構について検討する。図 3.16 は、Type III の切屑生成の一例（図 3.16a）とそのとき生じた圧潰部分付近の板目面断層図及び木口面断層図である。なお、図 3.16c,d は、圧潰部分付近の板目面断層図（図 3.16b）における赤破線 c,d における木口面断層図である。図 3.16b をみると、圧潰部分（図 3.16d）の手前には掘り取られた部分（図 3.16b 黄線部）があることがわかる。このことから、この圧潰部分は刃先進行線よりも下側の部分が掘り起こされたものの、切屑として除去されずに切削工具によって押しつぶされ、仕上面上に残留した結果生じたと考えられた。この圧潰部分は空気中の水分によって膨潤し毛羽立ちになりうるため（Stewart、Crist 1982；Scholz、Laugel 2001）、これが発生しない切削型を選択することが仕上面性状の観点では重要であると考えられた。

Type 0–III のうち、Type 0 の仕上面は刃先進行線と一致し、最も圧潰部分が少なかったことから、最も良好な仕上面であると考えられた。一方、Type 0 を生成するためには、切削角を極めて小さくする必要があり、そのような鋭利な切削工具は回転切削のような高速切削では短い切削長で摩耗が顕著になり、実用に耐えないと考えられた。

総じて、仕上面表層の残留ひずみ測定に DIC 法が有効であることが確認された。これまで仕上面表層の損傷の評価には、仕上面断面を顕微鏡で観察する手法が用いられてきたが（1.4 参照）、DIC 法による背分力方向のひずみ測定によって仕上面表層の損傷を評価可能であることが示された。一方で、仕上面から 0.1 mm 以内の残留ひずみの測定ができない場合があった。これは、刃先進行線付近に格子点を設置した場合、そのサブセットには切削後ランダムパターンのない空気部分が含まれるため、解析が正確に行われなかったためであった。しかし、その領域では顕著な ε_{yr} が残留していることが CT 画像から示唆された。この領域のひずみを明らかにすることによって、さらに仕上面表層の損傷と切削条件との関係がさらに明確になると考えられた。

これまでの仕上面表層の損傷の評価に関する研究（1.4 参照）では、主に木口面断面のみ評価されてきたが、X 線 CT によって板目面断面も同時に評価可能となり、圧潰部分の生成機構を初めて検討することができた。また、顕微鏡観察するには観察断面を切り出す必要があり試験の効率性に課題があったが、X 線 CT を用いることで非破壊的かつ効率的に評価が行えることが確かめられた。Franz（1958）によって仕上面性状と切削型との関係はある程度明らかとなっていたが、

X線CTを用いることで仕上面表層の圧潰部分の大きさや発生頻度と切削型の関係について明らかとなり、切削型と仕上面性状の関係がより明確になった。

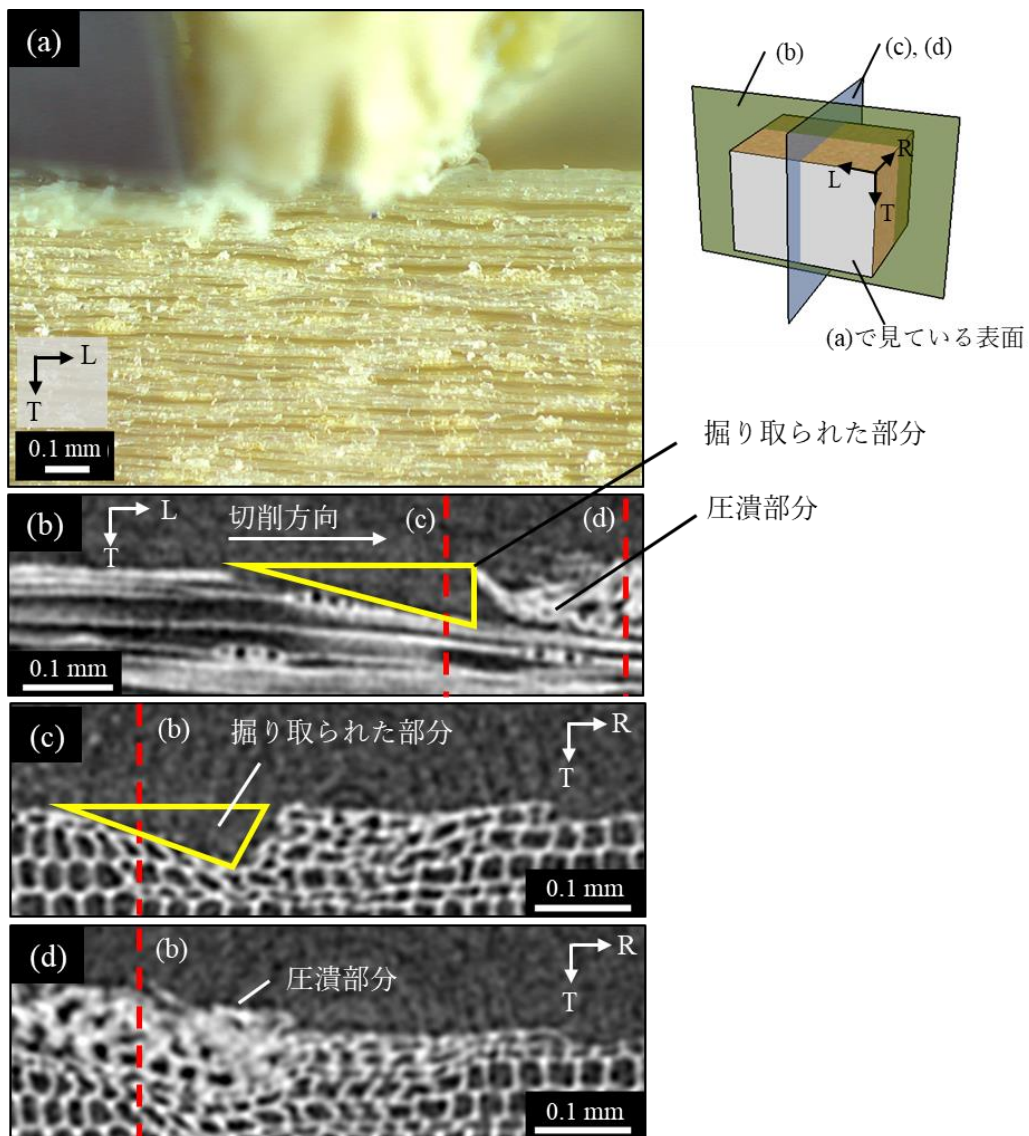


図 3.16 仕上面表層の圧潰部分の生成メカニズム ($\theta = 80^\circ$, $d = 0.05$ mm)
 Notes: **a** Type III 切屑生成の様子 **b** 仕上面表層の板目面断層図
c, d **b** の赤破線 **c, d** における木口面断層図

3.3 本章の要約

仕上面の性状と関連が深い仕上面表層の残留ひずみを画像相関法 (DIC 法) で測定し、切削角 θ や切込量 d との関係を検討した。解析範囲は刃先進行線から 0.03 mm 下方の母材側の領域 (0.67×0.22 mm) とし、ひずみ分布の空間分解能は 0.02 mm であった。さらに、X 線コンピュータ断層撮影 (X 線 CT) によって仕上面表層の破壊や変形の形態を評価した。

主分力方向の残留ひずみ ε_{xr} は、 θ や d が大きくなるにつれて微増したが、 ε_{xr} は背分力方向の残留ひずみ ε_{yr} と比べて非常に小さかった。切削角が小さいとき ($\theta \leq 60^\circ$)、引張の ε_y が検出されたが切削後ただちに回復した。切削角が大きくなると ($\theta \geq 70^\circ$)、圧縮の ε_y が検出され切削後も残留した。顕著な圧縮の ε_{yr} が検出された切削条件では、仕上面から 0.05 mm 以内に位置する細胞が T 方向に圧潰していることが CT 画像から確認できた。切削角、切込量が共に小さいとき ($\theta \leq 60^\circ$, $d = 0.05$ mm)、 ε_{yr} はほとんど検出されず、CT 画像においても仕上面表層の細胞はすべて原形を保っているようにみえた。

X 線 CT を用いることで、仕上面表層の変形や破壊の形態を細胞レベルで検出することができた。仕上面表層の X 線 CT 画像より仕上面上に毛羽立ちの原因となりうる圧潰部分が存在し、その大きさや発生頻度が切削条件や切削型に依存して変化することが明らかとなった。この圧潰部分は刃先進行線よりも下側の一部が掘り取られた後、切屑として除去されずに仕上面に残留したものであることが CT 画像から推定された。

DIC 法による仕上面表層の残留ひずみ測定が有効であり、それによる仕上面表層の損傷の評価が可能であることが示された。しかし、DIC 法の原理上、仕上面直下 (刃先進行線から 0.03 mm 以内) のひずみの測定は困難となる場合があった。その領域では顕著なひずみの残留が CT 画像によって示唆された。この領域のひずみを明らかにすることで、仕上面表層の損傷と切削条件の関係がさらに明確になると考えられた。

第四章 繊維傾斜角が切れ刃近傍のひずみ分布に及ぼす影響

切削時に発生するひずみ分布を加工欠点の発生の観点から評価することで、加工欠点の発生抑止に役立てることができる。例えば、繊維傾斜角（縦切削における切削方向と平行かつ切削面に垂直な断面において繊維方向（L方向）と切削方向のなす角度）は、木材特有の加工欠点である逆目ぼれの発生との関連性が高い。本章では、繊維傾斜角が切れ刃近傍のひずみ分布に及ぼす影響について検討した。

4.1 実験方法

4.1.1 試料

被削材にはヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) の心材の気乾材を用いた。被削材の寸法は 50(L)×45(R)×5(T) mm とした。被削材の気乾密度は 0.36 g/cm³、含水率は 10.9%、平均年輪幅は 1.1 mm であった。解析をする面（まさ目面；LR 面）は自動 1 面かな盤で仕上げた。このとき、材面に毛羽立ちが不規則に発生し、これと仮道管や放射組織の配列によって DIC 法適用に必要なランダムパターンが得られた。LR 面の最大高さ粗さ (R_z ; JIS B 0601:2013) は、カットオフ値 0.8 mm で測定したとき 14.9 μm であった。

4.1.2 切削試験

一軸送り装置によって切削工具を被削材に向かって送り、木表側の板目面 (LT 面) を二次元縦切削した (図 4.1)。繊維傾斜角 φ は 0° , $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$ とした。ただし、 $\varphi < 0^\circ$ のとき逆目切削、 $\varphi > 0^\circ$ のとき順目切削である。切れ刃は L 方向に対して垂直とし、バイアス角を設定しなかった。切削速度は 5 mm/s で一定とした。切削工具の材質は高速度鋼 (SKH51) とした。厚さ 5 μm の窒化クロムコーティングを切削工具に施し、研磨により逃げ面のコーティングのみ除去した。刃先角は 25° , 45° , 65° 、逃げ角は 5° で一定としたので、切削角 θ は 30° , 50° , 70° であった。切込量 d は 0.1, 0.2, 0.3 mm とした。切削角 θ 、切込量 d 、繊維傾斜角 φ の組み合わせごとに 3 回繰り返し切削を行い、切削の都度被削材を入れ替えた。なお、主分力方向を x 方向、背分力方向を y 方向とそれぞれ定義した。

高速度カメラ (VW-6000、KEYENCE) のレンズ (VH-Z150、KEYENCE) の光

軸が被削材の LR 面に垂直となるように高速度カメラを設置し、切削過程を録画した。カメラの被写界深度は 0.05 mm、フレームレートは 250 fps、シャッタースピードは 1/2000 s とした。カメラの撮影範囲は幅 1.42×高さ 1.07 mm (640×480 pixels) とし、撮影範囲に対して幅方向 (主分力方向) を x 方向、高さ方向 (背分力方向) を y 方向と定義した。切屑生成はすべて Franz(1955, 1958) と McKenzie

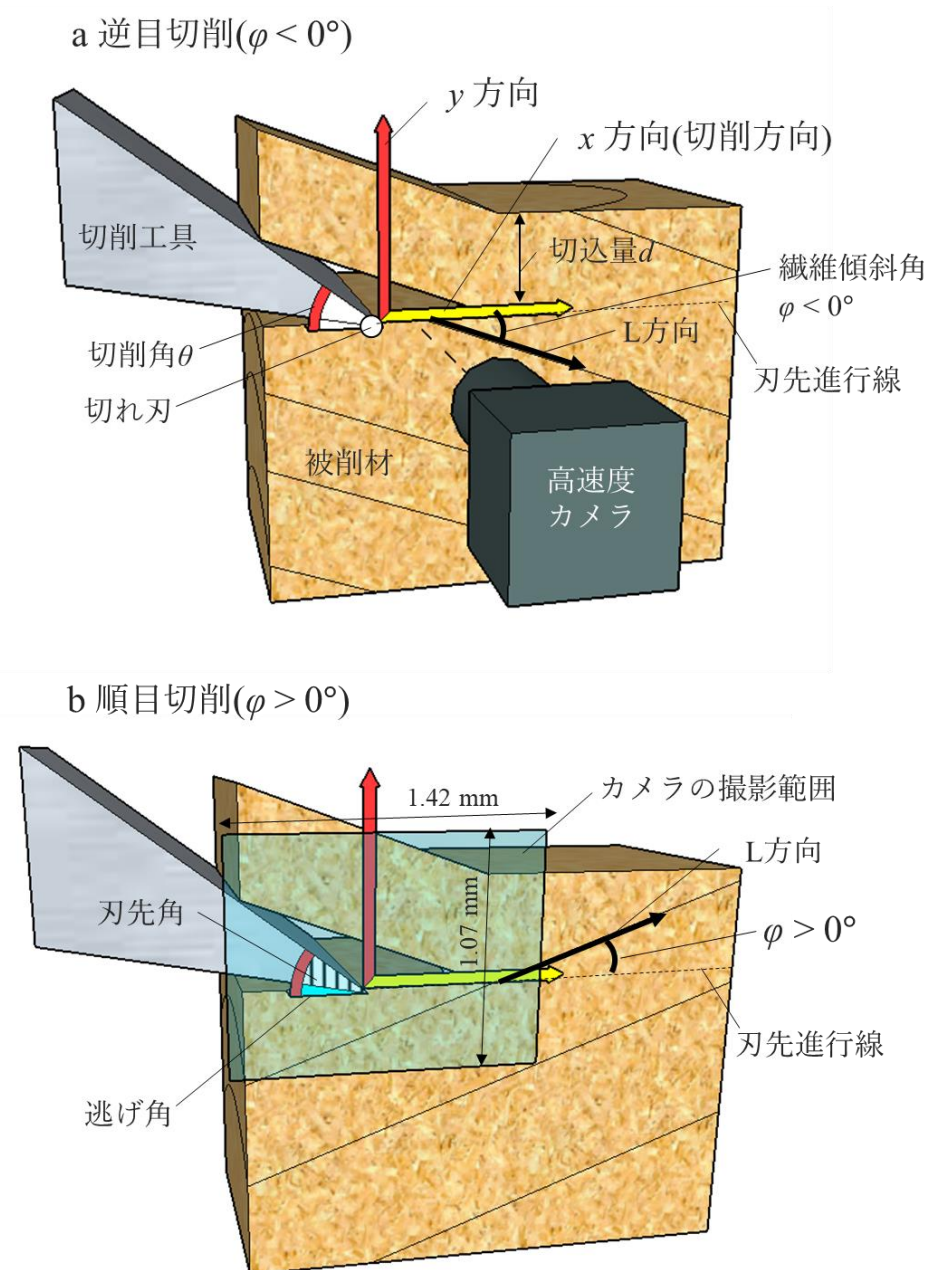


図 4.1 切削試験の模式図

Notes: a 逆目切削 b 順目切削

(1967) による切削型 Type 0 (流れ型)、Type I (折れ型)、Type II (せん断型)、Type III (縮み型) のいずれかに分類した。得られた動画はすべて、ImageJ (ver1.50e) (Schneider ら 2012) によって 8 bit のグレースケールのイメージシーケンスに変換した。

カメラと解析する木材表面 (LR 面) 間の距離が変動した場合、みかけのひずみが検出されてしまう。そのため、横分力による面外方向 (T 方向) の変位が発生しないように、本実験ではバイアス角を設定しなかった。一方で、ポアソン効果による面外方向のひずみ、さらにはカメラや一軸送り装置の振動によって、カメラと LR 面間の距離が変動すると考えられたが、2.1.6 よりこれらの影響は無視できると判断した。

4.1.3 画像相関法によるひずみ測定

DIC 法によるひずみ測定には、MATLAB 言語 (2017a) (The MathWorks, Inc.) で作成した DIC 法プログラムを使用した。切削前の画像及び切削中の画像をそれぞれ、参照画像 (変形前) と対象画像 (変形後) と定義した。参照画像上に測定範囲 (Region of Interest ; ROI) を定義した (図 4.2 黄色部)。ROI の寸法は幅 (x 方向) 360×高さ (y 方向) 140–220 pixels (0.80×0.31–0.49 mm) とした。なお、ROI の高さは切込量 d に応じて調整した。ROI の位置を、対象画像上の切れ刃の 90 pixels (0.20 mm) 後方から 270 pixels (0.60 mm) 前方までの範囲を含み、その下縁が切れ刃から 110 pixels (0.24 mm) 下方となるように調整した。さらに、晩材部が含まれないように ROI の位置を調整した。

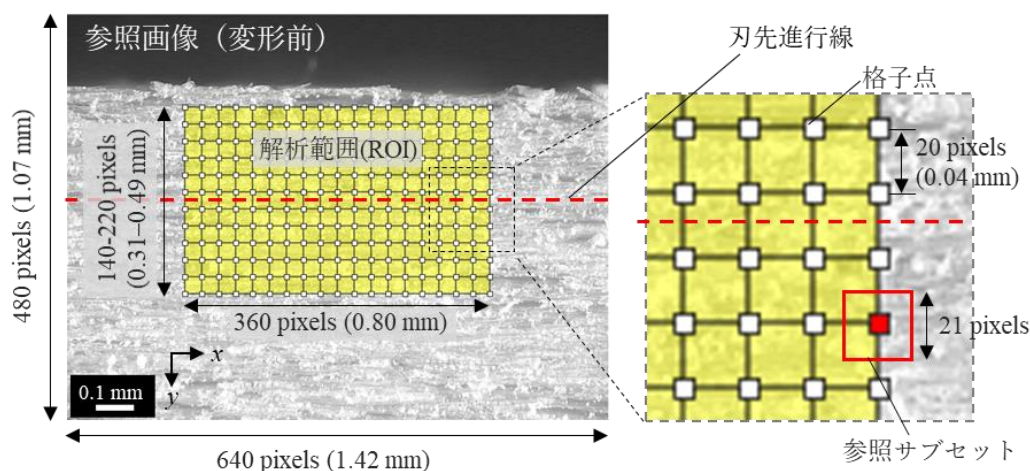


図 4.2 解析範囲と格子点

ROI内のひずみ分布を求めるため、ROI内に格子点(図4.2 白四角)を20 pixels (0.04 mm)ごとに設置した。格子点を中心とした21×21 pixels (0.05×0.05 mm)の領域を参照サブセット(図4.2 赤四角)とし、対象画像において参照サブセットと最も似ている領域(対象サブセット)を探し出した。両サブセット間の類似度評価には相関係数 C_{ZNCC} (式4.1)を用いた:

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \{F(i,j) - \bar{F}\} \times \{G(i+u, j+v) - \bar{G}\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \{F(i,j) - \bar{F}\}^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \{G(i+u, j+v) - \bar{G}\}^2}} \quad (-1 \leq C_{ZNCC} \leq 1) \quad (4.1)$$

ただし、 u と v はそれぞれ格子点の x 方向と y 方向の移動量、 $F(i,j)$ と $G(i+u, j+v)$ は参照画像上の格子点 (i,j) と対象画像上の点 $(i+u, j+v)$ の画素値、 \bar{F} と \bar{G} は参照サブセットと対象サブセットの画素値の平均値、 n はサブセットの一辺の長さである。相関係数 C_{ZNCC} を最大にする格子点の移動量 (u,v) を求めることによって対象画像上の格子点の位置を特定した。

対象画像上の格子点の位置を特定した後、隣り合う格子点4点に囲まれた四角形要素(図4.3)における主分力方向のひずみ ε_x 、背分力方向のひずみ ε_y 、せん断ひずみ γ_{xy} を式4.2, 4.3, 4.4で求めた:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2} \left[\frac{\{(x_b + u_b) - (x_a + u_a)\} - (x_b - x_a)}{(x_b - x_a)} + \frac{\{(x_d + u_d) - (x_c + u_c)\} - (x_d - x_c)}{(x_d - x_c)} \right] \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{2} \left[\frac{\{(y_a + v_a) - (y_c + v_c)\} - (y_a - y_c)}{(y_a - y_c)} + \frac{\{(y_b + v_b) - (y_d + v_d)\} - (y_b - y_d)}{(y_b - y_d)} \right] \quad (4.3)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{(y_d + v_d) - (y_c + v_c)}{(x_d + u_d) - (x_c + u_c)} \right) + \left(\frac{(x_a + u_a) - (x_c + u_c)}{(y_a + v_a) - (y_c + v_c)} \right) \right] + \left[\left(\frac{(y_b + v_b) - (y_a + v_a)}{(x_b + u_b) - (x_a + u_a)} \right) + \left(\frac{(x_b + u_b) - (x_d + u_d)}{(y_b + v_b) - (y_d + v_d)} \right) \right] \quad (4.4)$$

ただし、 $x_{a,b,c,d}$ と $y_{a,b,c,d}$ は、図4.3の参照画像上の四角形要素を構成する4個の格子点の x 座標と y 座標、 $u_{a,b,c,d}$ と $v_{a,b,c,d}$ は各格子点の移動量をそれぞれ示す。四角形要素(図4.3)における最大主ひずみ ε_1 を式4.5によって求めた。

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (4.5)$$

格子点の移動量(u, v)をサブピクセル単位の精度で求めるために、coarse-to-fine アルゴリズムを採用した。このアルゴリズムでは、まず対象画像上を 1 pixel 単位の走査し、相関係数 C_{ZNCC} が最大となる対象サブセットを探し出した。次に、 C_{ZNCC} が最大となった対象サブセットの中心の画素とこれと隣接する 8 個の画素の中間に仮想の補画素を 8 個設定した。補画素の画素値は spline 関数によって計算した。走査ステップを 1/2 pixel に変え、前回 C_{ZNCC} が最大となった画素とその周囲の 8 個の補画素の中から C_{ZNCC} が最大となる点を特定した。この手順を、(u, v)が $(1/2)^5 \cong 3.13 \times 10^{-2}$ pixel (6.94×10^{-5} mm) 単位で計算されるまで繰り返した。四角形要素の大きさ (格子点間の間隔) は 20 pixels であったため、測定可能な最小の ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} は $\{(1/2)^5 \div 20\} / 2 \cong 0.08\%$ となった。

DIC 法の測定条件は 2.1 と同一であったため、ひずみの測定確度は誤差率で $\pm 2\%$ 以内、測定精度は変動係数で約 17% であった (2.1.4 参照)。格子点は 20 pixels (0.04 mm) ごとに設置したので、ひずみ分布の空間分解能は 0.04 mm であった。

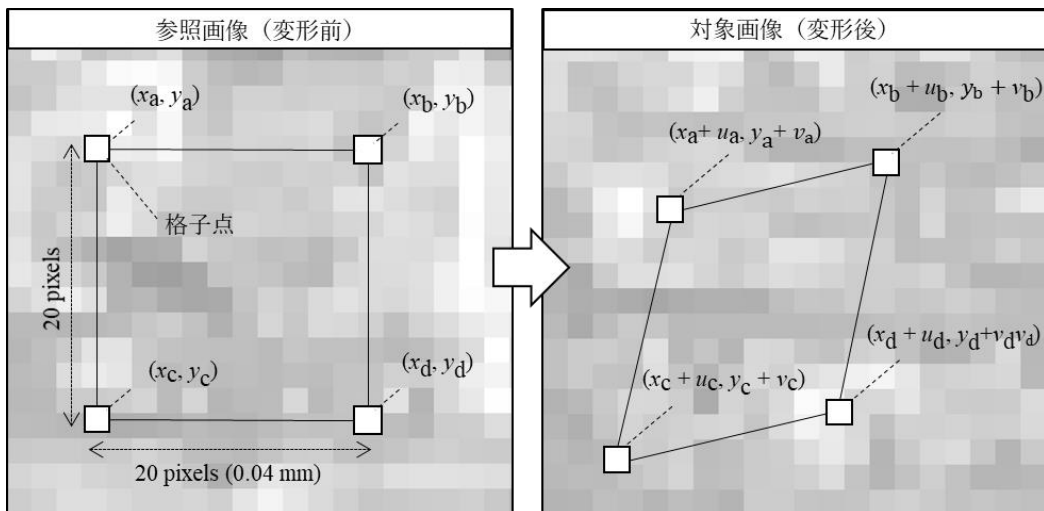


図 4.3 変形前後の四角形要素を構成する格子点の座標

4.2 結果と考察

4.2.1 繊維傾斜角が切削型に及ぼす影響

切削型に対する切削型に対する切削角 θ 、切込量 d 、及び繊維傾斜角 φ の関係を表 4.1 に示す。切削型が示されていない条件では、切削工具が被削材に侵入して最初に発生した先割れで被削材が割れたため切れ刃近傍のひずみを測定できていない。切削角 θ が 30° のとき、Type 0（流れ型）もしくは Type I（折れ型）に分類される切屑生成が発生し、切屑は刃先前方の先割れによって分離された。先割れは d の増加とともにより遠くまで進展し、それに伴い切削型は Type 0 から Type I に変化した。一方、切削型に対する φ の影響はほとんど認められなかった。切削角 θ が 50° のとき、 $\varphi = 0^\circ$ 付近で Type I が発生し、逆目切削 ($\varphi < 0^\circ$) と順目切削 ($\varphi > 0^\circ$) で Type II（せん断型）が発生する傾向が見られたが、 d が大きいと φ によらず Type I が発生した。切削角 θ が 70° のとき、 φ の増加とともに Type II から Type III（縮み型）に変化した。Stewart (1971) は、 φ の減少に伴い Type III に変化すると述べられているが、本研究では φ が減少しても Type II が認められた。この違いは、森 (1971) が述べているように樹種や切削速度の違いによるものと考えられた。

表 4.1 切削型 (Type 0–III) と切削角 θ 、切込量 d 、及び繊維傾斜角 φ との関係

切削角 θ ($^\circ$)	切込量 d (mm)	繊維傾斜角 φ ($^\circ$)						
		-15	-10	-5	0	5	10	15
30	0.1	0	0	0	0	0	0	0
	0.2	0	No Data	No Data	0	I	I	I
	0.3	No Data	No Data	No Data	0/I	I	I	I
50	0.1	II	II	I/II	I/II	II	II	II
	0.2	II	II	I/II	I	I/II	I/II	II
	0.3	II	I	I/II	I	I	I/II	I
70	0.1	II/III	II/III	II	II	II	II	III
	0.2	II	II	II	II/III	II/III	III	III
	0.3	II	II	II	III	III	III	III

4.2.2 繊維傾斜角が切れ刃近傍のひずみに及ぼす影響

切れ刃近傍で検出されたひずみ分布と繊維傾斜角 φ の関係の一例を図 4.4 に示す（ただし、 $\theta = 30^\circ, d = 0.2 \text{ mm}$ ）。なお、図中の+記号は格子点を示す。四角形要素を構成する4個の格子点のうち一点でも相関係数 C_{ZNCC} が 0.5 以下であった場合、移動量 (u, v) が正確に計算されていないと判断し、ひずみを示していない。

刃先進行線よりも上側の領域（切屑になる部分）では圧縮の ε_x が検出された。これは、この部分が進行する切削工具のすくい面によって押されるためである。背分力よりも主分力の方が一般的に大きく、これによる応力変化が発生していると考えられたが、L方向の弾性係数が他の方向に比べて高いため、検出された ε_x は ε_y と比較して小さかった。この圧縮の ε_x の発生範囲は φ の増大とともに、すなわち逆目切削から順目切削になるにつれて縮小した。

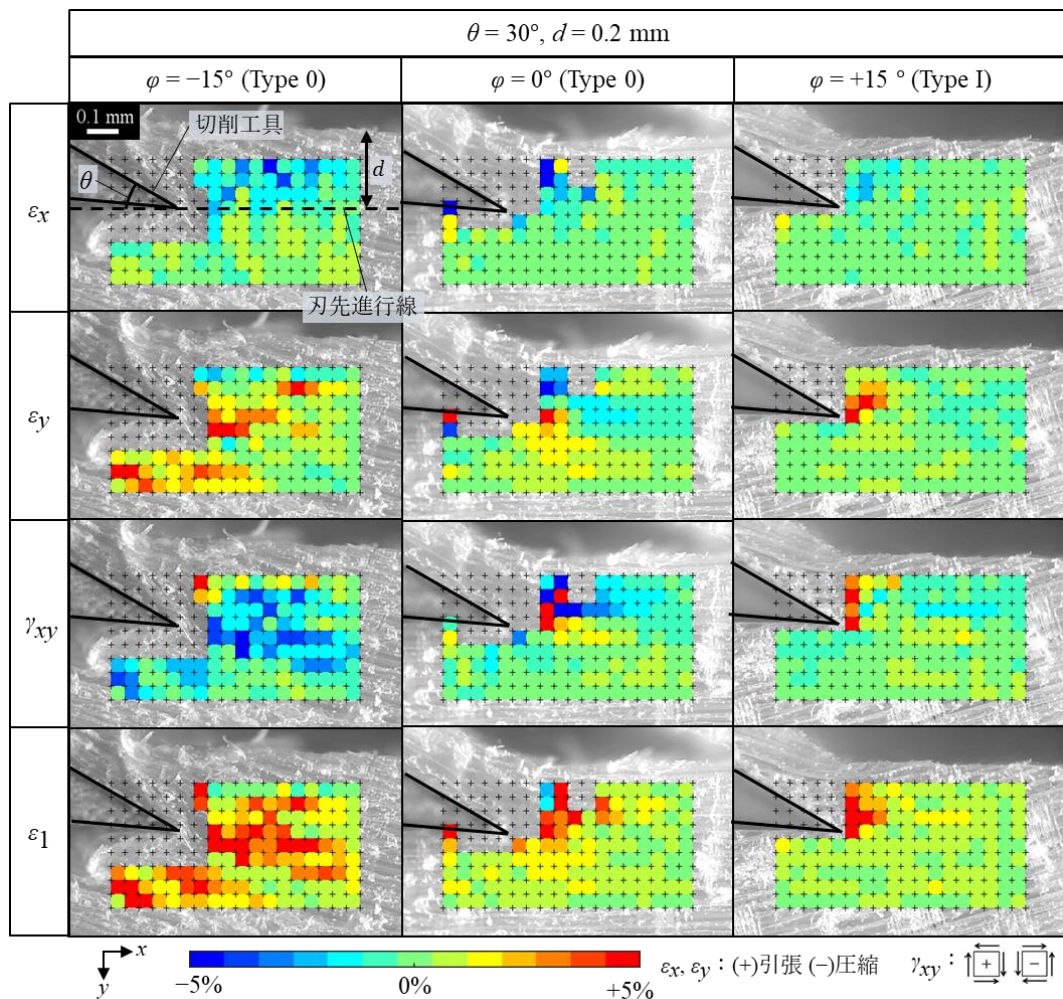


図 4.4 4 種のひずみ $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}, \varepsilon_1$ と繊維傾斜角 φ の関係
 Note: $\theta = 30^\circ, d = 0.2 \text{ mm}$

刃先前方において引張の ε_y が顕著に認められた。この引張の ε_y は先割れ発生の原因になっていると考えられた。この引張の ε_y の発生範囲は φ の増大とともに、すなわち逆目切削から順目切削になるに従い縮小した。順目切削ではこの引張の ε_y は、刃先進行線よりも上側（切屑になる部分）に分布する傾向があったのに対し、逆目切削では、刃先進行線よりも下側（母材側）に拡大する傾向があった。これは、先割れの伸展する方向が、繊維傾斜角に依存することを示唆している。圧縮の ε_y が $\varphi=0^\circ$ のときは刃先進行線よりも上側で検出され、切屑が設定した切込量よりも薄くなっていることが示唆された。

切屑になる部分において、逆目切削では顕著な負の向きの γ_{xy} が顕著に検出された一方で、順目切削では正の向きの γ_{xy} が検出された。負の向きの γ_{xy} によって切屑はL方向に縮み切込量よりも厚くなると考えられた。一方で、正の向きの γ_{xy} によって切屑はL方向に伸び、切込量よりも薄くなると考えられた。このことから、切屑の長さや厚さが繊維傾斜角に依存して変化すると考えられた。

最大主ひずみ ε_1 と φ の関係は ε_y や γ_{xy} と同様の傾向を示し、 φ の増加とともに ε_1 の分布は縮小した。順目切削では、 ε_1 の分布は切れ刃の0.1 mm以内に収まっており、切屑はその範囲で分離し、切削が制御されていると考えられた。逆目切削では、顕著な ε_1 が刃先進行線よりも下側に及んだ。刃先進行線よりも下側で発生したひずみは、残留すると加工欠点の原因となりうる。逆目ぼれの発生しにくい順目切削の方が逆目切削よりも仕上面が良好であることが知られているが、このことがひずみ分布の観点からも確認することができた。

切れ刃近傍のひずみ分布と φ の関係を図4.5に示す（ $\theta=50^\circ$, $d=0.2$ mm）。切削角が 30° のときと同様、切屑になる部分で圧縮の ε_x が検出されたが、繊維傾斜角との関係は不明瞭であった。逆目もしくは順目切削のとき、 $\varphi=0^\circ$ のときと比較して引張の ε_y は減少し、切屑生成はType IからIIへ変化した。これは、第二章でType IIの方がType Iと比較して ε_y の分布が縮小したことと一致している。また、逆目切削時の引張の ε_y は、 $\theta=30^\circ$ のときよりも小さかった。順目切削時の切屑になる部分において、 $\theta=30^\circ$ （Type I）のときでは正の向きの γ_{xy} が検出されたのに対し、 $\theta=50^\circ$ （Type II）のときでは負の向きの γ_{xy} が検出され、この負の向きの γ_{xy} は、 φ の増加とともに大きくなった。切れ刃近傍の ε_1 の分布の繊維傾斜角は

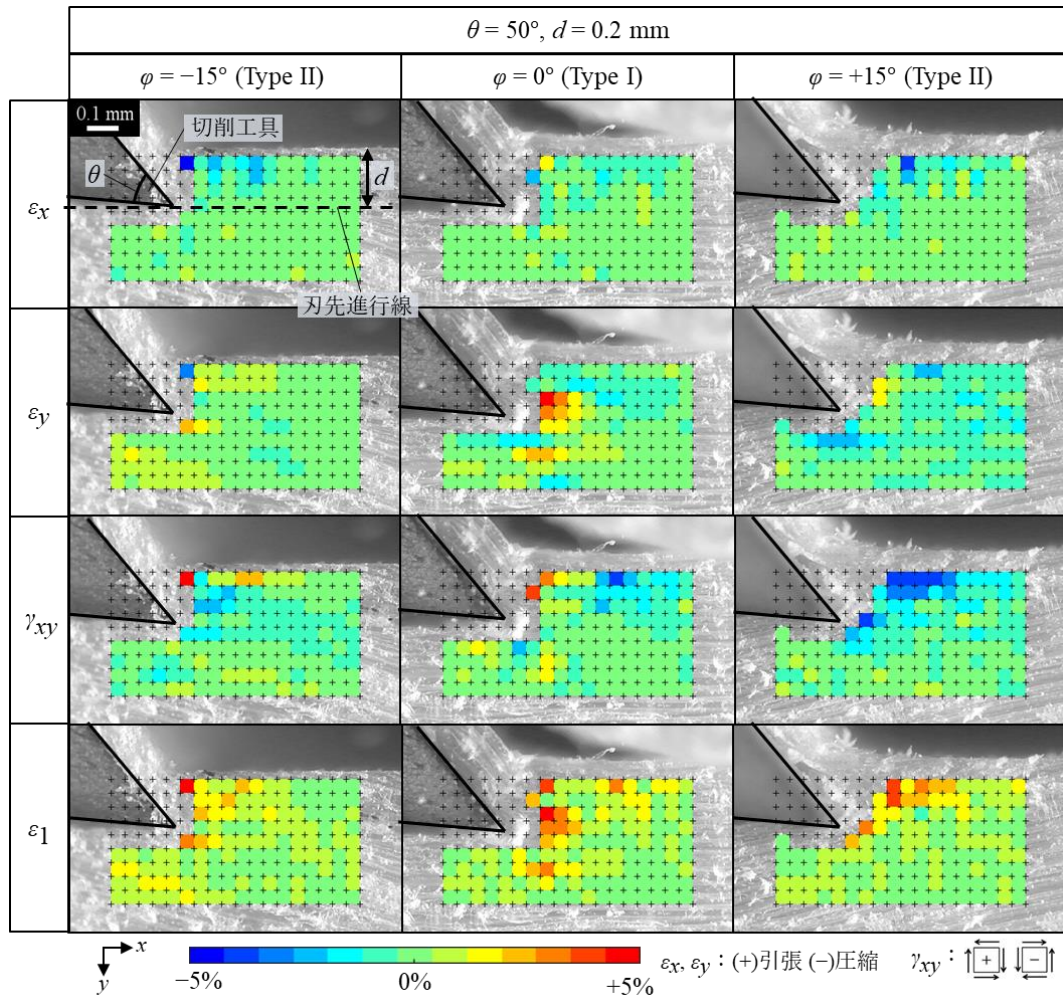


図 4.5 4 種のひずみ ϵ_x 、 ϵ_y 、 γ_{xy} 、 ϵ_1 と繊維傾斜角 φ の関係
 Note: $\theta = 50^\circ$, $d = 0.2 \text{ mm}$

$\theta = 30^\circ$ のときと比べて小さかった。逆目切削のときの ϵ_1 の分布は、繊維傾斜角依存性 $\theta = 30^\circ$ のときよりも縮小したことから、逆目切削では $\theta = 50^\circ$ の方がひずみの発生を最小限に制御できると考えられた。

切れ刃近傍のひずみ分布と φ の関係を図 4.6 に示す ($\theta = 70^\circ$, $d = 0.2 \text{ mm}$)。他の切削角と同様、切屑になる部分で圧縮の ϵ_x が検出され、 φ の増加とともに減少した。順目切削のとき、刃先進行線より上側の領域 (切屑になる部分) では、 $\theta = 30^\circ$ のときに見られた引張の ϵ_y ではなく、圧縮の ϵ_y が検出された。圧縮の ϵ_y が検出された領域では、 $\theta = 50^\circ$ のときよりも顕著な負の向きの γ_{xy} が検出された。これらひずみは φ の増加とともに増加した。逆目切削のとき、母材側で顕著な ϵ_1 が検出された一方で、順目切削では、 ϵ_1 は主に切屑側に分布した。この傾向は、他の

切削角でも認められた。

全ての切削角 θ 、切込量 d 、繊維傾斜角 φ の組み合わせにおいて、ひずみの発生は切れ刃から 0.5 mm 以内で顕著であった。Stewart (1983) は、逆目ぼれが φ が 0° から -20° の範囲で発生すると述べており、本研究においても $\varphi < 0^\circ$ 、 $\theta = 30^\circ$ の条件で母材側に顕著な引張の ε_y が検出されたため、この φ の範囲で最も逆目ぼれが発生しやすいと考えられた。一方で逆目切削の場合でも、 θ の増大とともに引張の ε_y は縮小し Type I から Type II へ遷移するため、逆目ぼれの発生頻度は減少すると考えられた。

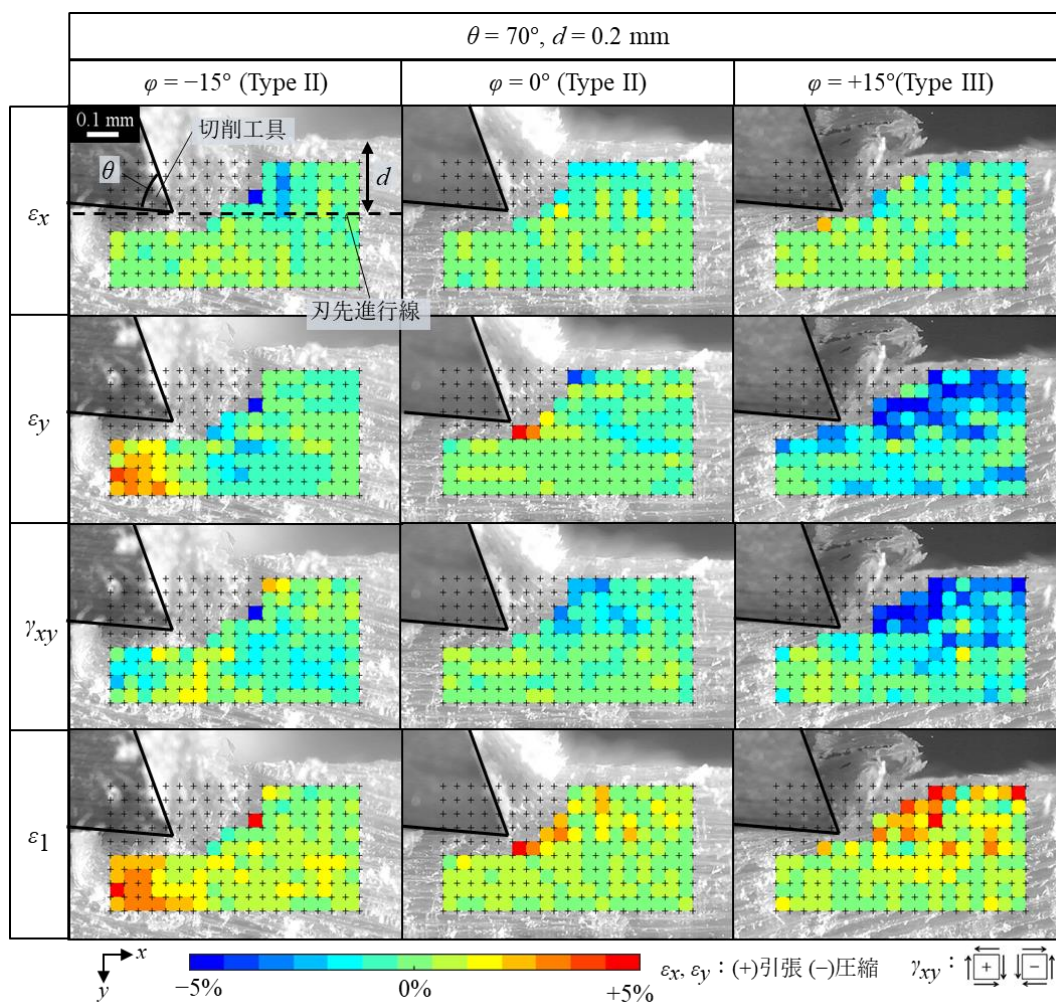


図 4.6 4 種のひずみ ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} 、 ε_1 と繊維傾斜角 φ の関係
 Note: $\theta = 70^\circ$, $d = 0.2 \text{ mm}$

4.2.3 繊維傾斜角が切屑になる部分で発生するひずみに及ぼす影響

図 4.4–4.6 より、刃先進行線より上側の領域（切屑になる部分）で発生するひずみが繊維傾斜角 φ の影響を強く受けていると考えられたため、同領域のひずみについて詳細に議論することとする。刃先進行線より上側の領域（図 4.7 青色部；幅 140×高さ 80 pixels (0.31×0.18 mm)) で検出されたひずみ ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} 、 ε_1 の平均値をそれぞれ ε_{x_chip} 、 ε_{y_chip} 、 γ_{xy_chip} 、 ε_{1_chip} と定義した。これらのひずみの同一条件下での繰り返し三回の平均値を $\overline{\varepsilon_{chip}}$ 及び $\overline{\gamma_{chip}}$ とし、 φ ごとに棒グラフで示した（図 4.7）。なお、図 4.7 青色部の位置を、その左端が切れ刃から 50 pixels (0.11 mm) 前方となるように調整した。ただし、 $\theta = 30^\circ$ 、 $\varphi = -10^\circ$ 、 -5° のとき、切削工具は被削材に切り込んだ際に最初に発生した先割れによって被削材が割れてしまったため、切屑になる部分でのひずみは検出できておらず、棒グラフは表示していない。

刃先進行線より上側の領域の主分力方向のひずみ ε_{x_chip} は φ や θ によらず常に圧縮となったが、 φ や θ に対する変化傾向は不明瞭であった。背分力方向のひずみ ε_{y_chip} は φ の増加とともに圧縮に変化し、この傾向は θ の増大とともに顕著となった。負の向きのせん断ひずみ γ_{xy_chip} も φ や θ の増加とともに増加した。刃先進行線より上側の領域の最大主ひずみ ε_{1_chip} は、 $\theta = 30^\circ$ のとき φ の増加とともに減少したのに対し、 $\theta = 70^\circ$ のときは φ の増加とともに増加する傾向があった。その一方で、 $\theta = 50^\circ$ のとき、 ε_{1_chip} の繊維傾斜角依存性はほとんどなく、また総じてひずみの値そのものも小さかった。このことは、 $\theta = 50^\circ$ のとき繊維傾斜角 φ の影響を受けずに安定した切削が行えることを示唆している。これらの結果は、繊維傾斜角 φ によってひずみ分布は特徴的に変化し、その関係は切削角 θ に大きく依存することを示唆しており、逆目切削においても切削条件を調節することによって切屑生成を制御できることが示唆された。

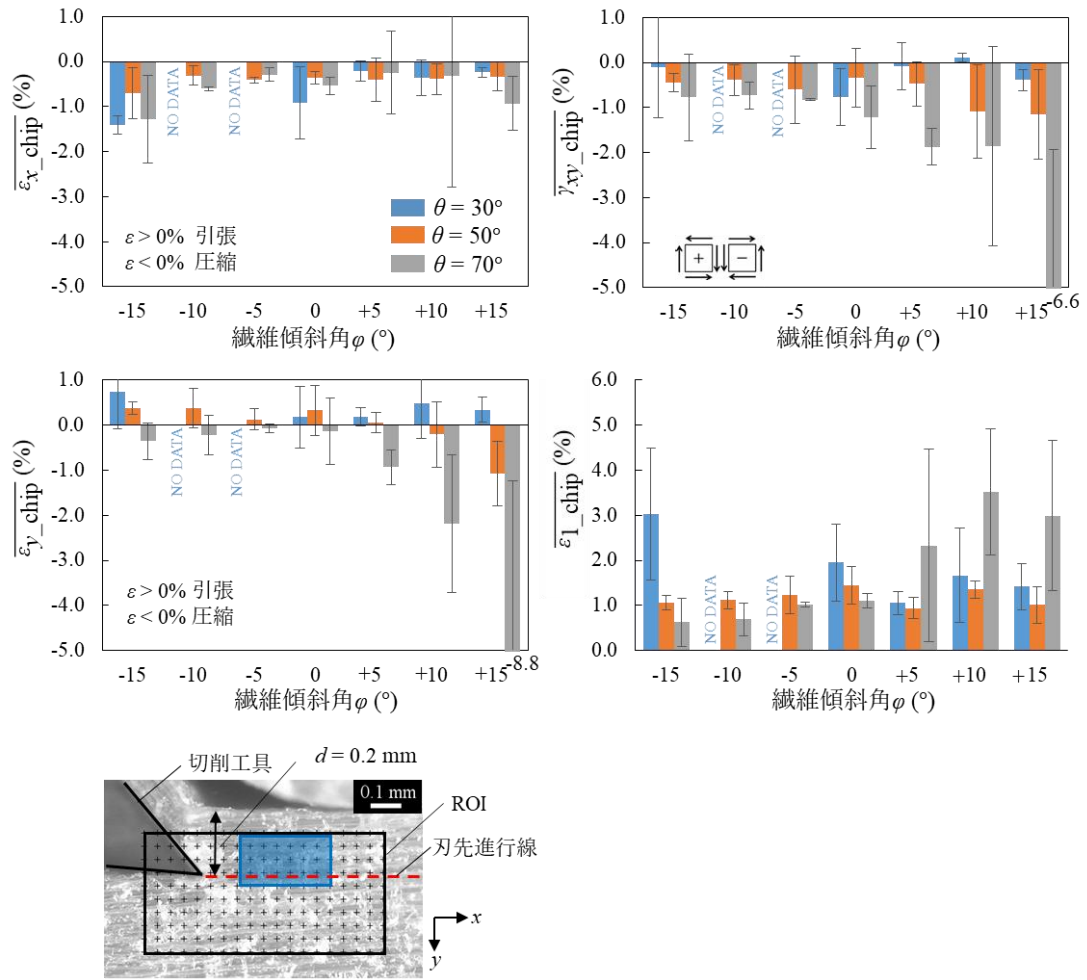


図 4.7 切屑側のひずみ $\overline{\varepsilon_x}_{chip}$ 、 $\overline{\varepsilon_y}_{chip}$ 、 $\overline{\gamma_{xy}}_{chip}$ と繊維傾斜角 φ 及び切削角 θ の関係($d = 0.2$ mm)

4.2.4 繊維傾斜角が刃先前方の最大主ひずみに及ぼす影響

本項では刃先前方のひずみ状態と繊維傾斜角との関係性を評価する。これまで議論してきた4種のひずみすべてについて評価するのは複雑となるため、主分力方向のひずみ、背分力方向のひずみ、せん断ひずみから計算され、これら3種のひずみの代表値とみなしうる最大主ひずみ ε_1 でのみ評価することとした。刃先前方の領域（図4.8 緑色部）で検出された ε_1 の平均値を ε_{1_ahead} とし、同一条件での繰り返し3回分の平均値 $\overline{\varepsilon_{1_ahead}}$ を求めた（図4.8）。図4.8の緑色部の寸法は、幅140×高さ180 pixels (0.31×0.40 mm)とし、その左端は切れ刃から50 pixels (0.11 mm)前方とした。総じて、 $+5^\circ \leq \varphi \leq +10^\circ, \theta = 50^\circ$ のとき、 ε_{1_ahead} は小さくなった。このとき、ひずみの発生は切れ刃近傍に最も集中し、それにより切屑が分離していると考えられ、切削が最も制御されていると考えられた。森（1969, 1970）は、切削角が 60° の場合、主切削力は $-10^\circ \leq \varphi \leq -5^\circ$ で最小になると述べており、本実験においてもその範囲で ε_{1_ahead} が最小となると推察されたが、実際には順目切削のとき最小となった。この原因として、ひずみの抽出範囲と切削力の及ぶ範囲が異なっていることが考えられた。

総じて、切れ刃近傍のひずみ分布が繊維傾斜角によって特徴的に変化し、両者の関係が切削角や切込量に依存することが確認された。切削条件を調整することによって、逆目切削においてもひずみの発生を制御し加工欠点の発生を抑制しうることが示された。

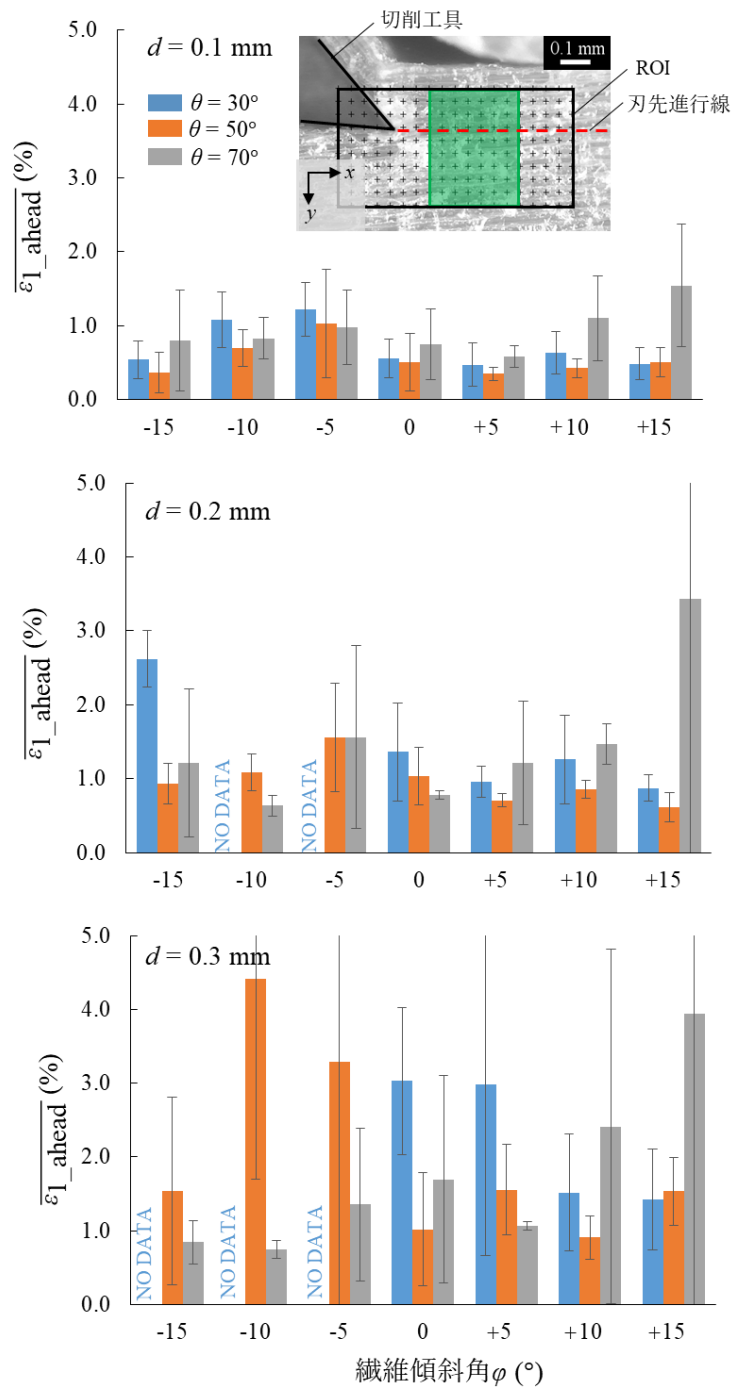


図 4.8 刃先前方の最大主ひずみ ε_{1_ahead} と繊維傾斜角 φ 、切削角 θ 、切込量 d との関係

4.3 本章の要約

繊維傾斜角 ($-15^\circ \leq \varphi \leq +15^\circ$) が切れ刃近傍 (0.5 mm 以内) のひずみ分布に与える影響を明らかにすることを目的として、順目、逆目切削時に発生するひずみを画像相関法 (DIC 法) によって測定した。

木材はL方向の弾性係数が他の方向と比べて高く、刃先進行線よりも上側の領域 (切屑になる部分) で検出されるはずの圧縮の主分力方向のひずみ ε_x がほとんど検出されなかったため、繊維傾斜角 φ との関係は不明瞭であった。切れ刃近傍の背分力方向のひずみ ε_y の分布と φ の関係は切削角 θ に依存した。切削角 θ が 30° のときは、Type 0 や Type I の切屑生成に関連する引張の ε_y が刃先前方で検出され、 φ の増加とともにその発生範囲や大きさは減少した。切削角 θ が 50° のときは、 φ が 0° 付近で引張の ε_y は最大となった。切削角 θ が 70° のとき、圧縮の ε_y が刃先進行線よりも上側の領域で検出され、 φ の増加とともに増加した。逆目切削時の引張の ε_y は、切削角の増加に伴い減少した。せん断ひずみについては、刃先進行線よりも上側の領域では負の向きの γ_{xy} が検出され、これは φ の増加とともに増加した。

刃先進行線より上側の領域の最大主ひずみ ε_{1_chip} は、 $\theta = 50^\circ$ のとき、繊維傾斜角に対する依存性は認められず、またひずみの値も低かったことから、このとき安定した切削が行われることが示唆された。また、刃先前方の最大主ひずみ ε_1 は、切込量が小さいほど減少し、 $\theta = 50^\circ$ かつ $+5^\circ \leq \varphi \leq +10^\circ$ の条件下で最小となった。

繊維傾斜角と切れ刃近傍のひずみ分布の関係、さらにこれに対する切削角や切込量の影響が明らかとなった。切削条件を調整することによって、逆目切削においてもひずみの発生を制御し加工欠点の発生を抑制しうることが示された。

第五章 ひずみ分布からみた木材切削の特徴

これまでの検討で、木材切削におけるひずみ分布は、切削角や切込量といった切削条件だけでなく、木材の材質や物性、すなわち繊維方向に配列した組織構造に由来する木材の多孔性、脆性、不均質性や異方性にも依存することが示唆された。本章では、木材と比較して、稠（ちゅう）密、延性、均質性、等方性とみなせる塩化ビニル材の切削時のひずみ分布を検討し、改めてひずみ分布からみた木材切削の特徴を総括する。

5.1 実験方法

工作用塩化ビニル材（キョードーKP プレート；密度 1.38 g/cm^3 ）の切削における切れ刃近傍のひずみ分布を画像相関法（以下、DIC 法）によって測定し、ヒノキの縦切削時に発生するひずみ分布と比較した。塩化ビニル材の高さは 50 mm 、切削幅は 3 mm 、切削長さは 50 mm とした。DIC 法適用に必要なランダムパターンを得るために、被削材の表面を研磨紙（240 番）で仕上げた。切削角 θ は 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° とし、 θ ごとに 1 回ずつ切削を行った。逃げ角は 5° で一定とし、切込量 d は 0.1 mm とした。

切削前の画像（参照画像）及び切削中の画像（対象画像）を撮影し、両画像を DIC 法によって解析することで切れ刃近傍の主分力方向のひずみ ε_x 、背分力方向のひずみ ε_y 、せん断ひずみ γ_{xy} を測定した。なお、切削過程の撮影条件は、2.1.2 と同一である。解析範囲（ROI）の寸法は幅 $360 \times$ 高さ 140 pixels ($0.80 \times 0.31 \text{ mm}$) とし、それ以外の測定条件については、2.1.3 と同一である。切削中の画像の一例を図 5.1 に示す。

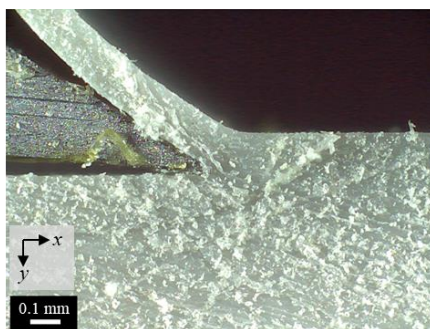


図 5.1 塩化ビニル切削の切屑生成の様子
Notes: $\theta = 30^\circ$, $d = 0.1 \text{ mm}$

5.2 木材及び塩化ビニル材の切削時のひずみ分布

塩化ビニルとヒノキを $30^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$, $d = 0.1 \text{ mm}$ の条件下で切削したときの切れ刃近傍の主分力方向のひずみ ε_x の分布を図 5.2 に示す。塩化ビニル（左列）では、切屑になる部分がすくい面によって切削方向に押されることで発生する刃先前方の圧縮の ε_x が切削角 θ の増加とともに顕著になった。切削角 θ が大きくなることで主分力が増加し、これに対応して主分力方向の圧縮応力やひずみが増大すると考えられる。一方、ヒノキ（右列）においても、切削角 θ の増大とともに主分力方向の応力は増大すると考えられたが、L 方向の弾性係数が高いためひずみはわずかししか検出されず、結果として切削角 θ と刃先前方の圧縮の ε_x の関係は明瞭ではなかった。

塩化ビニルとヒノキを $30^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$, $d = 0.1 \text{ mm}$ の条件下で切削したときの切れ刃近傍の背分力方向のひずみ ε_y の分布を図 5.3 に示す。ヒノキの場合、前述(2.2)のように $\theta \leq 60^\circ$ では、刃先前方において引張の ε_y が特徴的に検出された。またこの引張の ε_y が刃先の進行とともに増大することで、先割れが発生し、切屑が分離すると考えられる。 $\theta = 70^\circ$ のときは、顕著な引張の ε_y は認められなかった。塩化ビニルについては、すべての切削角 θ において、ヒノキのような顕著な引張の ε_y は検出されなかった。

塩化ビニルとヒノキを $30^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$, $d = 0.1 \text{ mm}$ の条件下で切削したときの切れ刃近傍のせん断ひずみ γ_{xy} の分布を図 5.4 に示す。塩化ビニルの場合、顕著な負の向きの γ_{xy} が切屑になる部分で認められ、切削角 θ の増加とともにその発生範囲や大きさは増大した。塩化ビニルでは、切屑になる部分がすくい面の法線方向に近い方向をせん断面とするようなせん断作用によって切屑が分離されることが示唆された。ヒノキの場合には $\theta = 30^\circ$ の場合には、刃先近傍には正の方向の γ_{xy} が検出されたが、 $\theta \geq 40^\circ$ 以上ではこのようなひずみはほとんど検出されず、 θ の増大とともに負の向きの γ_{xy} が顕著になる傾向が認められた。正の向きの γ_{xy} は先割れ後の切屑の伸長(2.2.1)に関係していると考えられる。一方、ヒノキの場合でも θ が 70° 以上では先割れの原因となる引張の ε_y はほとんど検出されず、負の向きの γ_{xy} が支配的であることから、これらの条件ではヒノキもせん断作用によって切屑が生成し、ひずみ分布の観点からは塩化ビニルに近い切削現象であるといえる。

総じて、塩化ビニルは切屑になる部分がせん断作用によって切屑として分離されるのに対して、ヒノキは横引張作用によって発生する先割れが優先的に作用して切屑が分離されたと考えられる。木材の繊維直交方向のせん断強度よりも横引張強度が小さいため、せん断破壊ではなく先割れが選択されることが確認された。ただし、切削角が増大すると先割れの原因である背分力方向のひずみが減少し、ヒノキも塩ビと同様にせん断作用によって切屑が生成することが確認された。

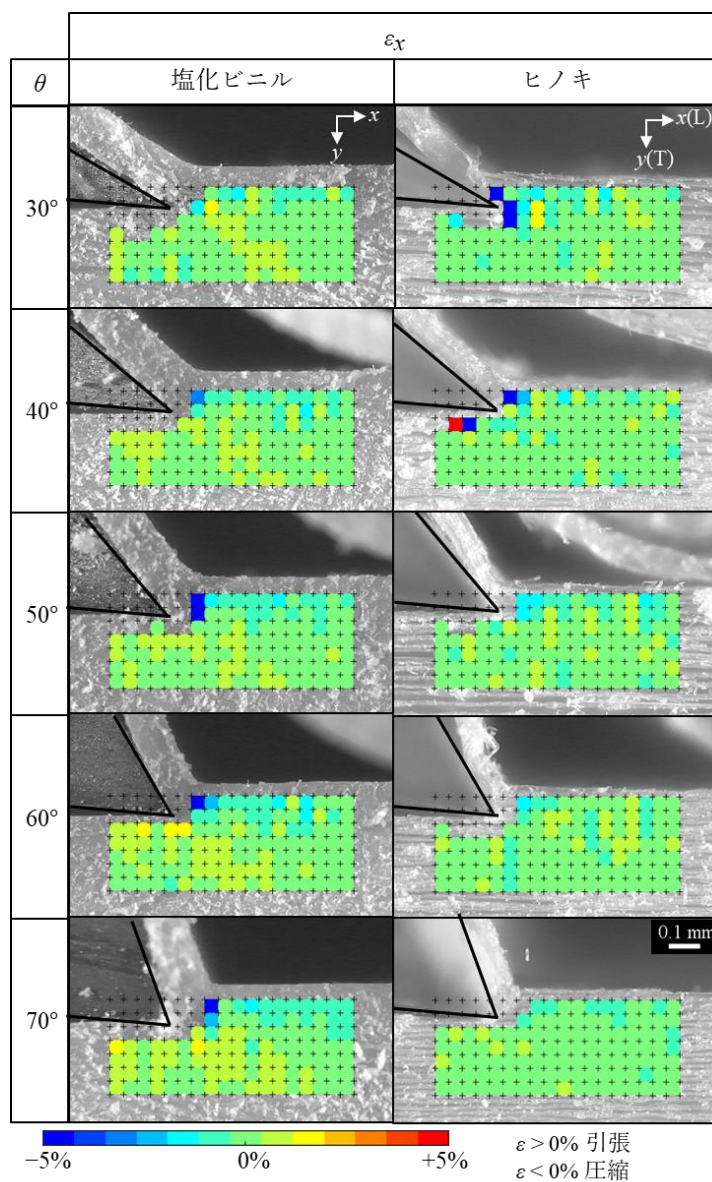


図 5.2 塩化ビニル（左列）とヒノキ（右列）の主分力方向のひずみ ϵ_x の分布

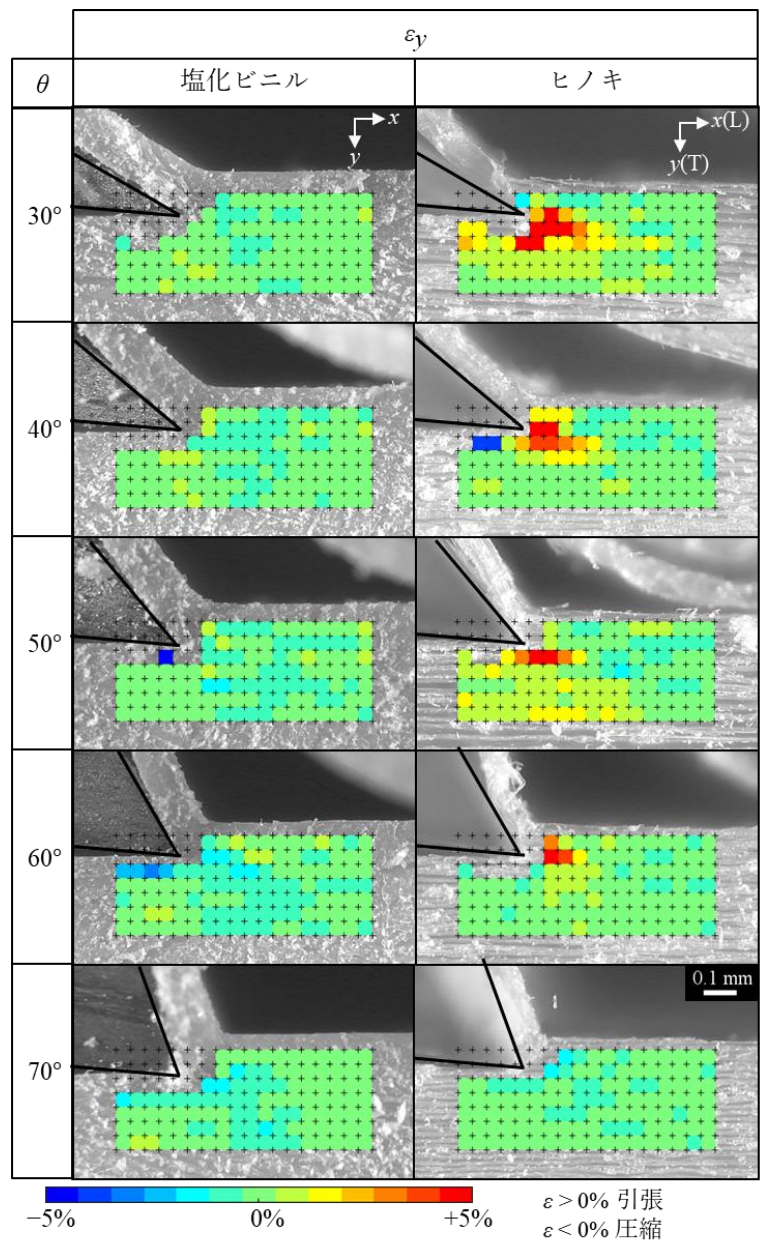


図 5.3 塩化ビニル（左列）とヒノキ（右列）の背分力方向のひずみ ε_y の分布

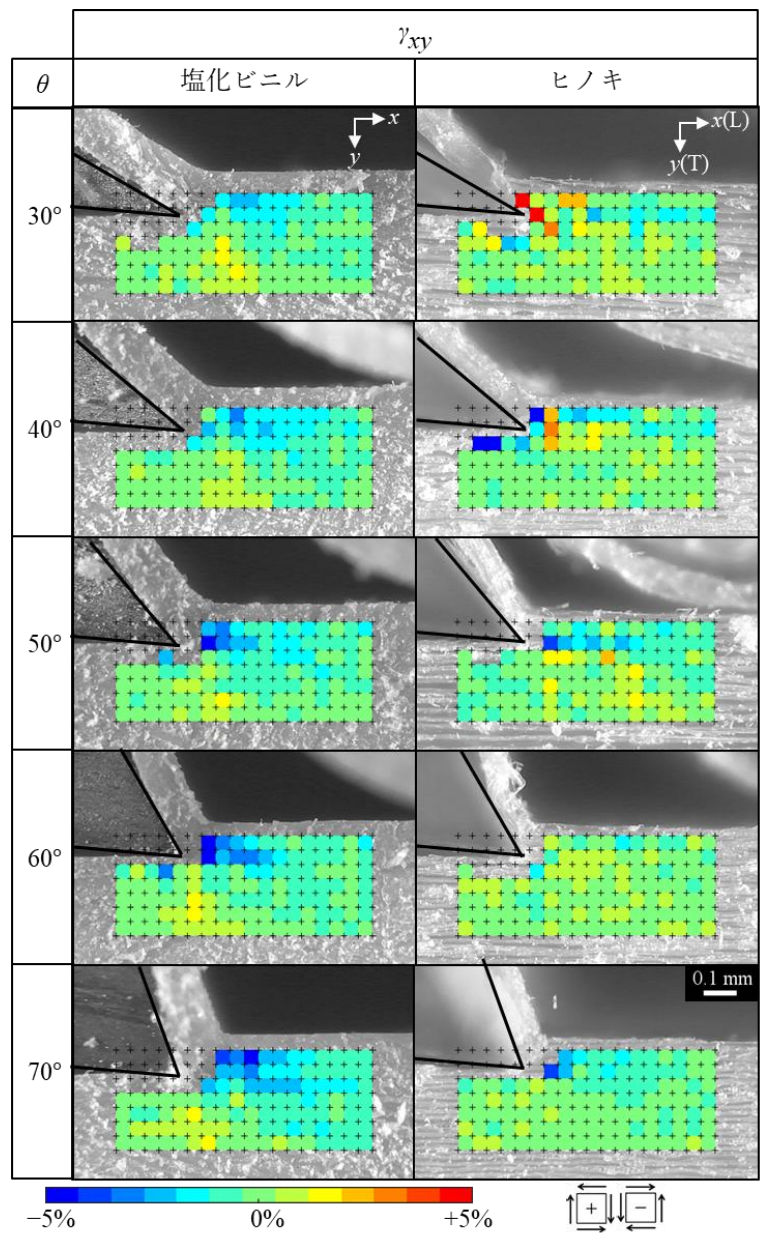


図 5.4 塩化ビニル（左列）とヒノキ（右列）のせん断ひずみ γ_{xy} の分布

5.3 本章の要約

本章では、木材と比較して、稠（ちゅう）密、延性、均質性、等方性とみなせる塩化ビニル材の切削時のひずみ分布を木材のそれと比較し、ひずみ分布からみた木材切削の特徴を検討した。塩化ビニルでは、切屑になる部分がせん断破壊によって切屑として分離されるのに対して、繊維方向に比べて繊維直交方向の強度の低いヒノキでは、繊維直交方向の引張によって発生する先割れが優先的に作用して切屑が分離した。この傾向は、切削角が小さい場合により顕著に現れた。

結論

本研究は、木材切削機構の解明、すなわち木材切削における切屑と仕上面の生成をひずみ分布の観点から説明することを目的として、気乾ヒノキ材の二次元縦切削を対象として、切削時の切れ刃近傍でのひずみ分布とその時間変化を画像相関法 (DIC 法) によって測定し、切削条件や繊維傾斜角との関係について検討した。さらに DIC 法を適用するにあたり、同手法の測定精度やその有効性について検証した。

本実験では、切削角を 30° – 80° 、切込量を 0.05 – 0.3 mm として、切削速度 5 mm/s で気乾ヒノキ材の柁目面の二次元縦切削を行い、切削時の切れ刃近傍のデジタル画像を獲得した。刃先近傍の $0.80(L) \times 0.27$ – $0.49(T)$ mm の領域の主分力方向 (L 方向)、背分力方向 (T 方向) のひずみ及びせん断ひずみの分布 (空間分解能 0.04 mm) を DIC 法によって求めた (第二章)。また、切屑の生成状況を観察し切削型の分類を行った。さらに、仕上面表層に残留するひずみを DIC 法及び X 線コンピュータ断層撮影によって評価した (第三章)。さらに、気乾ヒノキ材の板目面の逆目・順目切削 (繊維傾斜角 -15° から $+15^{\circ}$) も行い、逆目ぼれとの関係が深い繊維傾斜角がひずみ分布に及ぼす影響についても検討した (第四章)。

切削角が 60° 以下の縦切削では、切削工具が被削材に進入すると、刃先前方の領域で背分力方向の引張ひずみが発生し、これが被削材の強度に対応する閾値を越えると、横引張による先割れが細胞間層に沿って生じ切屑が分離する。工具の進行とともに先割れが連続的に発生し、生成した切屑は曲げ変形を受け、この一連の現象に対応するひずみ分布とその変化が DIC 法によって検出された。また、切込量が大きいくほど背分力方向の引張ひずみが発生する範囲は拡大し、これに応じて顕著な先割れが発生し、切削型も Type 0 (流れ型) から Type I (折れ型) に変化する。この背分力方向の引張ひずみは母材側にまで及ぶが、切削後ただちに回復するため、仕上面表層に割れなどの損傷は認められなかった。

切削角が上述の範囲よりも大きくなると、上述の先割れに対応する背分力方向の引張ひずみは小さくなりその範囲も限定的になるが、切屑になる部分で負の向きのせん断ひずみが顕著に発生する。その結果、先割れよりもせん断破壊が優先され、塩化ビニルと同様切屑になる部分がせん断破壊によって切屑として分離され、Type 0 や I ではなく Type II (せん断型) の切屑生成となる。このせん

断ひずみは、切屑の収縮にも関与しており、生成する切屑の全長は切削長さよりも短くなる。切屑になる部分は切削工具のすくい面によって主分力方向に圧縮され、これに対抗して顕著な主分力方向の圧縮応力が発生しているはずであるが、ヒノキの繊維方向の弾性係数が直行方向と比べて大きいために、主分力方向の圧縮ひずみは顕著に現れなかった。

切削角がさらに大きくなると、背分力方向の圧縮ひずみが切れ刃下方で発生し、切削後も残留する。残留ひずみは仕上面に近いほど大きく、仕上面から 0.1 mm 以内の残留ひずみは DIC 法で検出できないほど大きい。このとき仕上面表層の細胞は繊維直交方向につぶれており、毛羽立ちの原因となりうる圧潰部分を形成する。

このように、切削角や切込量に依存して、切屑や仕上面の生成や形態に関わるひずみが特徴的に変化し、その結果切屑の形態によって分類される切削型もひずみ分布によって特徴付けられることが明らかとなった。その中で、切れ刃近傍のひずみの発生する範囲や大きさが最小となる条件が認められた。これらの条件では、切れ刃近傍でのみ切屑が分離するため、刃先進行線に沿って切屑が分離していくため、仕上面が切れ刃の軌跡と一致する。また、切屑生成の原因となるひずみが小さいことから、低負荷かつ効率的に切削が進行し、その仕上面に残留する細胞のひずみは小さいことが示唆された。

繊維傾斜角に依存して切れ刃近傍のひずみ分布が特徴的に変化することが認められ、逆目切削よりも順目切削の方が切れ刃近傍のひずみの発生範囲が限定的であった。一方で、繊維傾斜角依存性が小さくなる切削角と切込量の組み合わせも存在し、繊維傾斜角の影響を受けず安定して切屑が生成される切削条件の存在が明らかとなった。切削条件を調整することによって逆目切削においてもひずみの発生を制御し逆目ぼれなどの加工欠点の発生を抑制しうることが示された。

本研究によって、木材切削における刃先近傍での破壊によって生成する切屑や仕上面と切削条件との関係をひずみ分布から定性的・定量的に解析できた。その一方で、DIC 法によってひずみを評価する際には、木材の異方性を考慮した解釈が必要であることが確認された。また、切屑生成の直前に発生する大ひずみの解析には限界があることが確認された。このように、測定できるひずみの大きさ

や解析範囲に限界や制限があるものの、木材切削時のひずみ測定に DIC 法が有効であることが示され、同手法によって木材切削や木材の被削性を評価できることや木材切削の制御条件を見出すことが可能であることが示された。また、X線コンピュータ断層撮影によって仕上面表層に存在する微小な圧潰部分を検出し、これと仕上面表層の残留ひずみや切削型との関係を明らかにすることができた。

本研究で測定できていない切れ刃最近傍（0.1 mm 以内）のひずみは切屑生成に最も密接に関係していると考えられる。また、切屑生成後の切屑内ではひずみの追跡ができなかった。今後、これらひずみを明らかにすることで、より木材切削現象への理解が深まると考えられる。さらに、本研究で用いた手法の測定性能を向上させることによって、切削だけでなくそれ以外の木材の破壊現象の解明への応用も可能となる。

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、懇切なご指導とご教示を賜りました京都大学大学院農学研究科教授藤井義久先生に衷心より感謝申し上げます。本論文のとりまとめに際し、多くのご教示とご指導を賜りました京都大学大学院農学研究科教授清水浩先生ならびに京都大学大学院農学研究科講師村田功二先生に深く感謝申し上げます。

課題研究より多くのご教示を賜った京都大学大学院農学研究科名誉教授奥村正悟先生に深く感謝申し上げます。実験の遂行に際し、多大なご協力とご助言を賜りました京都大学大学院農学研究科研究員藤原裕子様にご深く感謝申し上げます。また、多くのご助言とご激励を賜りました京都大学大学院農学研究科助教澤田豊先生ならびに京都大学大学院農学研究科准教授築瀬佳之先生に深く感謝申し上げます。本論文で使用した切削工具を賜りました兼房株式会社様に感謝申し上げます。

最後に私の研究生活を支えてくださいました京都大学大学院農学研究科森林科学専攻林産加工学分野ならびに国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所木材加工・特性研究領域の皆様にご感謝申し上げます。

2019年 1月

松田陽介

参考文献

- Carrano AL, Taylor JB, Lemaster RL (2004) Machining-induced subsurface damage of wood. *Forest Prod J* **54**(1):85-91
- Choi D, Thorpe JL, Hanna RB (1991) Image analysis to measure strain in wood and paper. *Wood Sci Technol* **25**:251-262
- Cool J, Hernández RE (2011a) Evaluation of four surfacing methods on black spruce wood in relation to poly(vinyl acetate) gluing performance. *Wood Fiber Sci* **43**(2):194-205
- Cool J, Hernández RE (2011b) Improving the sanding process of black spruce wood for surface quality and water-based coating adhesion. *Forest Prod J* **61**(5):372-380
- Cool J, Hernández RE (2011c) Performance of three alternative surfacing processes on black spruce wood and their effects on water-based coating adhesion. *Wood Fiber Sci* **43**(4):365-378
- Cool J, Hernández RE (2012) Effects of peripheral planing on surface characteristics and adhesion of a waterborne acrylic coating to black spruce wood. *Forest Prod J* **62**(2):124-133
- Franz NC (1955) An analysis of chip formation in wood machining. *Forest Prod J* **5**(5):332-336
- Franz NC (1958) Analysis of the Wood-cutting Process. Dissertation, University of Michigan
- Hassel BI, Berard P, Modén CS, Berglund LA (2009) 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
- Hellström LM, Gradin PA, Carlberg T (2008) A method for experimental investigation of the wood chipping process. *Nordic Pulp & Paper Research J* **23**(3): 339-342
- Huang Y, Hayashi D (1972) Basic analysis of mechanism in wood-cutting –chip deformation in orthogonal cutting (90-0)– (in Japanese). *Mokuzai Kogyo* **27**(5):14-17
- Inoue H, Mori M (1979) Effects of cutting speed on chip formation and cutting resistance in cutting of wood parallel to the grain. *Mokuzai Gakkaishi* **25**(1):22-29
- Jeong GY, Zink-Sharp A, Hindman DP (2009) Tensile Properties of earlywood and latewood from loblolly pine (*Pinus Taeda*) using digital image correlation. *Wood Fiber Sci* **41**(1):51-63
- Jeong GY, Zink-Sharp A, Hindman DP (2010) Applying digital image correlation to wood strands: Influence of loading rate and specimen thickness. *Holzforschung* **64**:729-734
- Jeong GY, Park MJ (2016) Evaluate orthotropic properties of wood using digital image correlation. *Constr build mater* **113**:864-869
- Keunecke D, Novosseletz K, Lanvermann C, Mannes D, Niemz P (2012) Combination of X-ray and digital image correlatiofor the analysis of moisture-induced strain in wood: opportunities and challenges. *Eur J Wood Prod* **70**:407-413
- Kuljich S, Cool J, Hernández RE (2013) Evaluation of two surfacing methods on black spruce wood in relation to gluing performance. *J Wood Sci* **59**:185-194

- Lin FC, Chiu CC, Chang FC (2015) Analysis of wood transversal tension mechanical behavior by digital image correlation. In: Proceedings of 19th international Nondestructive testing and evaluation of wood symposium, Rio de Janeiro, Brazil, 22 Sept - 25 Sept 2015, pp 140-147
- Matsuda Y, Fujiwara Y, Fujii Y (2015) 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**(2):128-135
- Matsuda Y, Fujiwara Y, Murata K, Fujii Y (2017) 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**(6):615-624
- Matsuda Y, Fujiwara Y, Fujii Y (2018a) 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
- Matsuda Y, Fujiwara Y, Murata K, Fujii Y (2018b) Effect of grain angle on strain distribution in orthogonal cutting of hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) measured using a digital image correlation method. *J Wood Sci* (Submitted)
- MATLAB Release 2016a and 2017a, The MathWorks, Inc., Natick, United States.
- McKenzie WM, Hawkins BT (1966) Quality of near longitudinal wood surface formed by inclined cutting. *Forest Prod J* **16**(7):35-38
- McKenzie WM (1967) The basic wood cutting process. In: Proceedings of the second wood machining seminar, Richmond, USA, 10 Oct - 11 Oct 1967, pp 3-8
- McKenzie WM (1969) applying grid patterns to wood surfaces using photosensitive lacquers. *Forest Prod J* **19**(2):43-44
- McKenzie WM, Karpovich H (1975) measured strains in slow linear veneer cutting effects of nosebar form and gap. *Wood Sci Technol* **9**:213-231
- Merhar M, Bučar B (2012) Cutting force variability as a consequence of exchangeable cleavage fracture and compressive breakdown of wood tissue. *Wood sci technol* **46**:965-977
- Murata K, Masuda M (2001) Observation of microscopic swelling behavior of the cell wall. *J Wood Sci* **47**:507-509
- Nagai H, Murata K, Nakano T (2011) Strain analysis of lumber containing a knot during tensile failure. *J Wood Sci* **57**:114-118
- Oja J, Grundberg S, Grönlund (2001) Predicting the stiffness of sawn products by X-ray scanning of Norway Spruce saw logs. *Scand J Forest Res* **16**(1):88-96
- Palka LC (1975) Veneer-cutting analysis by an elastic finite-element model: a case study. *Wood Sci* **8**(2):97-104
- Pan B, Qian K, Xie H, Asundi A (2009) Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Meas Sci Technol* doi:10.1088/0957-

0233/20/6/062001

- Pan B, Lu Z, Xie H (2010) 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
- Peters CC, Zenk RR, Mergen A (1968) Effects of roller-bar compression and restraint in slicing wood 1-inch thick. *Forest Prod J* **18**(1):75-80
- Peters WH, Ranson WF (1982) Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Opt Eng* **21**(3):427-431
- Samarasinghe S, Kulasiri GD (2000a) Displacement fields of wood in tension based on image processing: Part 1. Tension parallel and perpendicular-to-grain and comparisons with isotropic behaviour. *Silva Fennica* **34**(3):251-259
- Samarasinghe S, Kulasiri GD (2000b) Displacement fields of wood in tension based on image processing: Part 2. Crack-tip displacements in Mode I and mixed-mode fracture. *Silva Fennica* **34**(3):261-274
- Schneider CA, Rasband WS, Eliceiri KW (2012) NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat Methods* **9**:671-675
- Scholz F, Laugel J (2001) Compression of the surface layer by upmilling and detection method. In: Proceedings of the 15th International Wood Machining Seminar, Los Angeles, USA, 30 Jul- 1 Aug, pp 419-436
- Sepúlveda P, Oja J, Grönlund A (2002) Predicting spiral grain by computed tomography of Norway spruce. *J Wood Sci* **48**:479-483
- Skog J, Oja J (2009) Heartwood diameter measurements in *Pinus sylvestris* sawlogs combining X-ray and three-dimensional scanning. *Scand J Forest Res* **24**(2):182-188
- Stehr M, Östlund S (2000) An investigation of the crack tendency on wood surfaces after different machining operations. *Holzforschung* **54**(4):427-436
- Stewart HA (1969) Effect of cutting direction with respect to grain angle on the quality of machined surface, tool force components, and cutting friction coefficient. *Forest Prod J* **19**(3):43-46
- Stewart HA (1971) Chip formation when orthogonally cutting wood against grain. *Wood Sci* **3**(4):193-203
- Stewart HA, Crist JB (1982) SEM examination of subsurface damage of wood after abrasive and knife planing. *Wood Sci* **14**(3):106-109
- Stewart HA (1983) A model for predicting wood failure with respect to grain angle in orthogonal cutting. *Wood Fiber Sci* **15**(4):317-325
- Stewart HA (1989) fixed-knife pressure-bar planing method reduces or eliminates subsurface damage. *Forest Prod J* **39**(7,8) 66-70
- Sutton MA, Wolters WJ, Peters WH, Ranson WF, McNeill SR (1983) Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and Vis Comput* **1**(3):133-139

- Sutton MA, Orteu JJ, Schreier HW (2009) Image correlation for shape, motion and deformation measurements Basic concepts, theory and applications. Springer, New York
- Thunell B, Aoyama T (1967) Microscopic observations on the machined surface of wood. *Mikroskopie* **21**(7) 189-196
- Tochigi T, Tadokoro C (1985) change of cutting stress in the progression of the dulling of the tool edge. *Mokuzai Gakkaishi* **31**(11):880-887
- Triboulot P, Asano I, Ohta M (1983) An application of fracture mechanics to the wood-cutting process. *Mokuzai Gakkaishi* **29**(2):111-117
- Valla A, Konnerth J, Keunecke D, Niemz P, Müller U, Gindl W (2011) Comparison of two optical methods for contactless, full field and highly sensitive in-plane deformation measurements using the example of plywood. *Wood Sci Technol* **45**:755-765
- Walker KJS, Goodchild R (1960) Theory of cutting Part 1 experiments in rectilinear cutting. Forest Products Research special report No.14
- Watanabe H, Yanase Y, Fujii Y (2015) Evaluation of larval growth process and bamboo consumption of the bamboo powder-post beetle *Dinoderus minutus* using X-ray computed tomography **61**:171-177
- Zink AG, Davidson RW, Hanna RB (1995) Strain measurement in wood using a digital image correlation technique. *Wood Fiber Sci* **27**(4):346-359
- 青山径雄：木材切削の顕微鏡的観察. 第 64 回日本林学会大会講演集, 1955, pp.347-348.
- 枝松信之：仕上げかんな盤による木材の切削加工 (2) 完. *木材機械* **61**, 7-12 (1973).
- 金川靖, 服部善昭：医療用 X 線 CT スキャナによる含水率分布の非破壊測定 (第 2 報) 乾燥過程における含水率分布の変化 **31**(12), 983-989 (1985).
- 木下直治：木材の精密加工法の研究. *理化学研究所報告* **36**(5), 486-557 (1960).
- 木下敍幸：単板形成過程の解析 (第 1 報) 単板切削時における裏割れ形成過程および切削力. *木材学会誌* **29**(12), 871-876 (1983a).
- 木下敍幸：単板形成過程の解析 (第 2 報) 有限要素法による裏割れ形成過程における切削応力の数値解析. *木材学会誌* **29**(12), 877-883 (1983b).
- 木下敍幸：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).
- 坂井秀春：木工用刃具. *木材工業* **6**(8), 380-383 (1951).
- 杉山滋：単板の切削機構に関する基礎的研究 (第 5 報) 被削材応力分布の数値解析(pressure bar の作用しない場合). *木材学会誌* **20**(6), 250-256 (1974a).
- 杉山滋：単板の切削機構に関する基礎的研究 (第 6 報) 被削材応力分布の数値解析(sharp bar を作用させた場合). *木材学会誌* **20**(6), 257-263 (1974b).
- 杉山滋：単板の切削機構に関する基礎的研究 (第 7 報) 被削材応力分布の数値解析(pressure bar の作用しない場合) (2). *木材学会誌* **21**(1), 15-21 (1975).

- 杉山滋：単板切削における工具—切屑接触境界面に働く応力および摩擦に関する基礎的研究（第2報）工具すくい面応力分布について. 木材学会誌 **23**(10), 480-486 (1977).
- 杉山滋, 森稔：単板の切削機構に関する基礎的研究（第1報）Pressure bar による木材内部の圧縮変形挙動について. 木材学会誌 **17**(3), 96-102 (1971a).
- 杉山滋, 森稔：単板の切削機構に関する基礎的研究（第2報）単板切削における動的平衡の解析. 木材学会誌 **17**(3), 103-110 (1971b).
- 杉山滋, 森稔：単板の切削機構に関する基礎的研究（第3報）Pressure bar の圧縮力による被削材応力分布の数値解析(1). 木材学会誌 **19** (8), 385-391 (1973a).
- 杉山滋, 森稔：単板の切削機構に関する基礎的研究（第4報）Pressure bar の圧縮力による被削材応力分布の数値解析(2). 木材学会誌 **19**(9), 427-433 (1973b).
- 田中孝：X線透過像を利用した各種計測技術の林産学への応用. 木材工業 **70**(12), 572-577 (2015).
- 田中義信, 津和秀夫：木材の切削に関する研究（第1報）木材の切削機構に就て.精密機械 **14**(11,12), 5-10 (1948).
- 陳先宝, 木村志郎, 尾崎士郎, 横地秀行, 米延仁志：木材の二次元切削において生成された切屑の膨潤に及ぼす木理斜交角の影響.木材学会誌 **47**(4), 295-303(2001).
- 栃木紀郎, 林大九郎：ナイフ・単板接触距離拘束によるベニヤ切削におけるナイフすくい面上の切削応力分布. 木材学会誌 **20**(11), 528-537 (1974).
- 服部善昭, 金川靖：医療用 X線 CT スキャナによる含水率分布の非破壊測定（第1報）推定精度と誤差の要因 **31**(12), 974-982 (1985).
- 林大九郎, 栃木紀郎, 山崎雅郎：単板切削の微視的観察に関する研究—木材細胞膜の破壊形態について—. 木材学会誌 **16**(2), 70-75 (1970).
- 林大九郎, 栃木紀郎, 井上裕之：横切削における切削面の微視的観察（第1報）—放射組織斜行角の影響による切削抵抗とU型切断率について—. 木材工業 **26**(7), 306-312 (1971a).
- 林大九郎, 栃木紀郎, 井上裕之：横切削における切削面の微視的観察（第2報）—放射組織斜行角の影響による先割れ, 裏割れと切削面状態について—. 木材工業 **26**(8), 358-363 (1971b).
- 林大九郎, 栃木紀郎, 井上裕之：横切削加工面の顕微鏡写真. 木材工業 **27**(5), 242-245 (1972).
- 林大九郎, 栃木紀郎, 井上裕之, 小笠原和彦：横切削における切削面の微視的観察（第3報）—ノーズバーのセッティング条件が切削面におよぼす影響—. 木材工業 **30**(12), 544-548 (1975).
- 福山萬治郎：木材の物理. “改訂基礎木材工学”, 越島哲夫, 杉原彦一, 浜田良三, 福山萬治郎, 布施五郎共著, 文教出版, 大阪, 1983, pp.107.
- 杵淵恭宏：木材加工における平削りに関する研究(I)—一枚刃による切削時の切削抵抗と切削及び切屑の形態について—. 信州大学教育学部紀要 **41**, 211-224 (1979).

- 宮内一成, 村田功二, 増田稔: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).
- 村田功二, 増田稔:画像相関法による針葉樹の横圧縮ひずみ分布解析. 材料 **52**(4), 347-352 (2003).
- 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).
- 森稔:木材の周刃フライス削りにおける切削仕事量の解析(第1報)上向き・縦切削の1刃あたり仕事量について. 木材学会誌 **15**(3), 93-98 (1969).
- 森稔:木材の周刃フライス削りにおける切削仕事量の解析(第2報)上向き・縦切削における切削力, 切削動力および切削エネルギー. 木材学会誌 **16**(1), 1-9 (1970).
- 森稔:木材の周刃フライス削りにおける切削仕事量の解析(第3報)ルータバットのくり抜き加工における切削力の変動. 木材学会誌 **17**(10), 437-442 (1971).
- 山下晃功:かんなによる木材の平削りの研究(第1報)逆目切削面の性状におよぼす裏金後退量及び切込量の影響. 木材学会誌 **23**(2), 82-88 (1977).
- 山下晃功:かんなによる木材の平削りの研究(第4報)逆目切削における切りくず排出と切削抵抗におよぼす裏金とくず返しの影響. 木材学会誌 **26**(2), 66-73 (1980).
- 黄彦三, 林大九郎:木材の切削機構に関する基礎的解析—縦切削における切屑の変形—. 木材工業 **27**(5), 236-239 (1972).
- 黄彦三, 林大九郎:木材の切削機構に関する基礎的解析—縦切削の応力解析—. 木材工業 **19**(1), 7-12 (1973).

略語・専門用語の一覧

本論文で使用した略語や記号、木材切削に関する用語の一覧を以下に示す。

表1 略語一覧

略語	定義
θ (°)	切削角
d (mm)	切込量
φ (°)	繊維傾斜角 ($\varphi < 0^\circ$ 逆目切削、 $\varphi > 0^\circ$ 順目切削)
D (mm)	切れ刃からの水平距離
L、R、T 方向	順に、繊維方向、半径方向、接線方向
ε_x (%)	主分力方向のひずみ
ε_y (%)	背分力方向のひずみ
γ_{xy} (%)	せん断ひずみ
ε_1 (%)	最大主ひずみ
	$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \gamma_{xy}^2}$
ε_{nom} 、 γ_{nom} (%)	疑似ひずみ
ε_{ave} (%)	同一条件下での切削の繰り返しのひずみの平均値
ε_{chip} 、 γ_{chip} (%)	切屑になる部分で検出されたひずみの平均値
ε_{1_ahead} (%)	刃先前方の領域 (0.31×0.40 mm) の最大主ひずみ
CV (%)	変動係数
ER (%)	誤差率
DIC 法	画像相関法
C_{ZNCC}	相関係数
ROI	ひずみ測定範囲
k	補間回数
m, n	サブセットの幅と高さ
i, j	格子点の x, y 座標
u, v	格子点の x 方向と y 方向の移動量
X 線 CT	X 線コンピュータ断層撮影

表2 木材切削に関する用語の一覧

略語	定義
縦切削	繊維方向と切削方向が一致している切削
切削力	切削工具が被削材に加える力
主分力方向	切削方向に平行の方向
背分力方向	切削方向に垂直の方向
すくい面	切削工具を構成する面のうち、切屑と接する面
逃げ面	切削工具を構成する面のうち、仕上面側の面
切れ刃	すくい面と逃げ面の交線
逃げ角	切削方向と逃げ角のなす角度
刃先角	すくい面と逃げ面のなす角度
切削角	切削方向とすくい面のなす角度（逃げ角と刃先角を合わせた角度）
バイアス角	切削面において切削方向と切れ刃のなす角度
逆目ぼれ	仕上面から繊維束が掘り取られた部分。逆目切削時に現れる。
毛羽立ち	仕面上上の繊維束が浮き出た部分

付録 画像相関法の設定パラメータがひずみ測定に及ぼす影響

画像相関法 (DIC 法) によるひずみ測定では、参照画像上に格子点を等間隔に設定した後、格子点ごとにサブセットを設定し、サブセットと最も似ている領域を対象画像上から探し出すことで、対象画像上における格子点の位置を特定する。参照画像と対象画像間での格子点の移動量(u,v)は、画素補間を複数回行いサブピクセル単位で計算することが定法となっている (村田ら (1999) など)。

本研究で作成・利用してきた DIC 法プログラムでは、格子点間の距離、サブセットの大きさ及び画素補間の回数 k を解析の都度自由に設定でき、設定したパラメータによって、測定の性能や精度が変動すると考えられる。そこで、パラメータがひずみの測定精度に及ぼす影響について検証した。

1. 画像相関法プログラムで設定するパラメータ

本研究の DIC 法プログラムで設定可能なパラメータは以下の 3 種類である。

サブセットの大きさ

四角形のサブセットの幅と高さがそれぞれ設定可能である。サブセットの大きさが小さすぎると、格子点の追跡に必要な情報量が不足し、格子点の追跡が正確に行われないと考えられる。

格子点間の距離

ひずみ計算式の分母に相当する。格子点間の距離が大きいほど、格子点の移動量(u,v)の誤差が相対的に小さくなり、ひずみの測定精度は向上すると考えられる。一方で、距離が大きくなると、ひずみ分布の空間分解能が低下する。

補間回数 k

格子点の移動量(u,v)をサブピクセル単位で計算するために、coarse-to-fine 法と呼ばれるアルゴリズムを採用し、対象画像の画素補間を繰り返し行う。coarse-to-fine 法では、最初に対象画像上を 1 pixel 単位で走査し、相関係数が最大となる対象サブセットを探し出し、その中心の画素と隣接する 8 個の画素の中間に仮想のサブピクセルを 8 個設定する。走査ステップを 1/2 pixel に変え、前回相関係数が最大となった画素とその周囲の 8 個のサブピクセルの中から相関係数が最大となる点を特定する。この手順を k 回繰り返すことで、移動量(u,v)を $(1/2)^k$ pixel 単位で計算する。補間回数 k が大きいほど、より微小なひずみを測定でき

るが、サブピクセル間の距離が実際の木材を構成する物理的なユニットよりも小さくなると、物理的な意味をなさないと考えられる。

2. 検証用の対象画像の作成

ヒノキの板目面 (LT 面) を撮影した画像 (幅 1.42(L)×高さ 1.07(T) mm (640×480 pixels)) を 1 枚用意し、参照画像とした (図 A1)。参照画像を水平方向 (L 方向) に ε_{x_nom} に対応する画素列だけ等間隔に減らすことで疑似圧縮ひずみ ε_{x_nom} を付与した。このとき、参照画像の画素配列を bicubic 関数で近似し、対象画像の画素値を再設定した。参照画像を垂直方向 (T 方向) に ε_{y_nom} に対応する画素列だけ等間隔に減らすことで疑似圧縮ひずみ ε_{y_nom} を付与した。参照画像の画素を γ_{xy_nom} に応じた分だけ水平方向に移動させることでせん断変形させ、疑似せん断ひずみ γ_{xy_nom} を付与した (図 A1)。疑似ひずみ ε_{x_nom} 、 ε_{y_nom} 、 γ_{xy_nom} を付与するこれらの画像処理には、MATLAB (2017a) (The MathWorks, Inc.) を用いた。

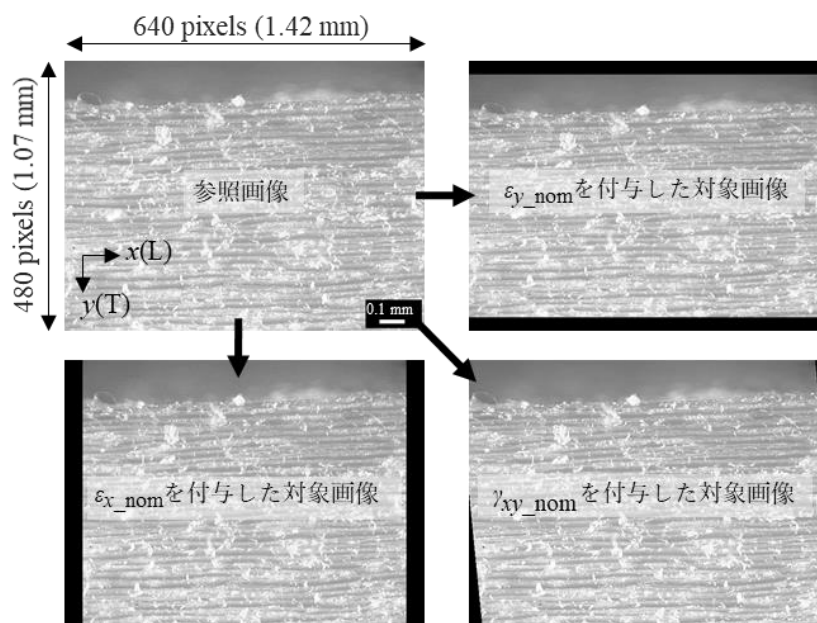


図 A1 検証用の対象画像の作成

3. サブセットの大きさがひずみ測定に及ぼす影響

2.で作成した参照画像と対象画像を DIC 解析し、 ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} を計算した。計算する際に、サブセットの大きさを 5×5 pixels (0.01×0.01 mm) から 51×51 pixels (0.11×0.11 mm) まで変化させ、計算される ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} がどのように変化するか調べた。測定条件については以下の通りである：

解析範囲 (ROI) の寸法：200×200 pixels (0.44×0.44 mm)

格子点間の距離：20 pixels (0.04 mm) (四角形要素の数 $n = 100$)

サブセットの大きさ：5×5 pixels–51×51 pixels (0.01×0.01 mm–0.11×0.11 mm)

補間回数 k ：5 回

表 A1,2,3 は設定したサブセットの大きさごとに計算された ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} を示す。なお、相関係数が 0.5 以下となった格子点が存在した場合、格子点の追跡が正確に行われていないと判断し、No Data で示した。疑似ひずみ ε_{x_nom} の大きさやサブセットの大きさに依存せず、誤差率 ER_{ε_x} は常に±数%以内であった。疑似ひずみ ε_{x_nom} が3%以下のとき、サブセットが大きい方が変動係数 CV_{ε_x} は小さくなる傾向があった。木材はL方向の弾性係数が高く、切削時には数%の ε_x しか検出されないことから、 ε_x の検出にはサブセットは大きい方が望ましいと考えられた。

サブセットの大きさが 5×5 pixels のとき、変動係数 CV_{ε_y} は極端に増加した。このとき、引張の ε_y が検出された四角形要素が存在したことから、サブセットの情報量が不足し、格子点の追跡が正しく行われなかったと考えられる。サブセットの大きさが 21×21 pixels 以上であれば、誤差率 ER_{ε_y} は数%以内となり、変動係数 CV_{ε_y} は十数%となった。誤差率 $ER_{\gamma_{xy}}$ は、疑似ひずみ γ_{xy_nom} によらずサブセットが小さいほど小さくなった。変動係数 $CV_{\gamma_{xy}}$ とサブセットの大きさの関係は明確でなかった。

表 A1 サブセットの大きさが ε_x に与える影響($n = 100$)

単位 (%)

疑似ひずみ ε_{x_nom} (%)	ε_x (%)	サブセットの一辺の長さ(pixels)					
		5	11	21	31	41	51
-0.94	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-0.97±0.29	-0.95±0.26	-0.95±0.27	-0.95±0.29	-0.95±0.27	-0.95±0.26
	CV $_{\varepsilon_x}$	-29	-27	-29	-30	-28	-27
	ER $_{\varepsilon_x}$	3.2	1.7	1.3	1.4	1.4	1.4
-1.88	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-1.93±8.78	-1.91±0.36	-1.90±0.31	-1.89±0.33	-1.89±0.30	-1.88±0.26
	CV $_{\varepsilon_x}$	-456	-19	-16	-17	-16	-14
	ER $_{\varepsilon_x}$	2.7	1.7	1.3	1.0	1.0	0.2
-2.97	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-2.96±0.48	-2.95±0.46	-2.96±0.40	-2.97±0.49	-2.97±0.53	-2.96±0.54
	CV $_{\varepsilon_x}$	-16	-15	-14	-17	-18	-18
	ER $_{\varepsilon_x}$	-0.3	-0.7	-0.4	-0.1	0.1	-0.3
-3.91	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-3.88±0.37	-3.87±0.36	-3.89±0.48	-3.92±0.68	-3.92±0.74	-3.91±0.78
	CV $_{\varepsilon_x}$	-10	-9	-12	-17	-19	-20
	ER $_{\varepsilon_x}$	-0.7	-0.8	-0.5	0.3	0.4	0.2
-5.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-5.00±0.15	-4.98±0.26	-4.99±0.57	-5.00±0.96	-5.02±1.32	-4.98±1.51
	CV $_{\varepsilon_x}$	-3	-5	-11	-19	-26	-30
	ER $_{\varepsilon_x}$	0.0	-0.3	-0.2	-0.1	0.4	-0.5
-10.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-10.00±0.27	-9.96±0.71	-9.95±1.73	-9.97±2.96	-10.06±3.57	-9.93±4.46
	CV $_{\varepsilon_x}$	-3	-7	-17	-30	-36	-45
	ER $_{\varepsilon_x}$	0.0	-0.4	-0.5	-0.3	0.6	0.7
-15.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-15.00±0.46	-13.35±11.26	-14.87±2.97	-15.00±5.12	-14.90±7.22	-15.11±8.49
	CV $_{\varepsilon_x}$	-3	-84	-20	-34	-48	-56
	ER $_{\varepsilon_x}$	0.0	-11.0	-0.9	0.0	-0.7	0.7
-20.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-19.99±12.80	-18.46±10.63	-19.81±4.74	No Data	No Data	No Data
	CV $_{\varepsilon_x}$	-64	-58	-24	No Data	No Data	No Data
	ER $_{\varepsilon_x}$	0.0	-7.7	-1.0	No Data	No Data	No Data
-25.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-24.98±26.76	-23.56±9.97	-24.74±6.98	No Data	No Data	No Data
	CV $_{\varepsilon_x}$	-107	-42	-28	No Data	No Data	No Data
	ER $_{\varepsilon_x}$	-0.1	-5.7	-1.0	No Data	No Data	No Data

SD : 標準偏差、CV : 変動係数 (%)、ER : 誤差率 (%)

表 A2 サブセットの大きさが ε_y の測定に与える影響($n = 100$) 単位 (%)

疑似ひずみ $\varepsilon_{y_nom}(\%)$	ε_y (%)	サブセットの一辺の長さ(pixels)					
		5	11	21	31	41	51
-0.83	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-0.89±18.52	-0.88±0.25	-0.87±0.24	-0.87±0.26	-0.86±0.24	-0.86±0.23
	CV_ ε_y	-2091	-29	-28	-29	-28	-27
	ER_ ε_y	6.3	5.3	4.8	4.3	2.8	3.2
-1.88	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-2.71±17.84	-1.80±0.42	-1.81±0.39	-1.82±0.38	-1.81±0.35	-1.84±0.28
	CV_ ε_y	-659	-24	-21	-21	-20	-15
	ER_ ε_y	44.4	-3.7	-3.4	-2.8	-3.7	-2.0
-2.92	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-2.94±20.75	-2.93±0.42	-2.91±0.40	-2.89±0.39	-2.85±0.36	-2.84±0.34
	CV_ ε_y	-707	-15	-14	-13	-13	-12
	ER_ ε_y	0.7	0.3	-0.1	-0.8	-2.3	-2.6
-3.96	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-3.42±23.32	-3.90±0.42	-3.91±0.38	-3.92±0.49	-3.89±0.50	-3.90±0.59
	CV_ ε_y	-681	-11	-10	-13	-13	-15
	ER_ ε_y	-13.5	-1.5	-1.1	-0.9	-1.8	-1.6
-5.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-4.99±0.15	-4.98±0.29	-4.97±0.40	-4.92±0.75	-4.84±1.01	-4.78±1.35
	CV_ ε_y	-3	-6	-8	-15	-21	-28
	ER_ ε_y	-0.3	-0.5	-0.7	-1.5	-3.2	-4.3
-10.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-9.97±0.32	-9.93±0.71	-9.90±1.35	-9.76±2.38	-9.69±2.95	No Data
	CV_ ε_y	-3	-7	-14	-24	-30	No Data
	ER_ ε_y	-0.3	-0.7	-1.0	-2.4	-3.1	No Data
-15.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-13.71±15.19	-13.97±18.92	-14.75±2.22	No Data	No Data	No Data
	CV_ ε_y	-111	-135	-15	No Data	No Data	No Data
	ER_ ε_y	-8.6	-6.9	-16	No Data	No Data	No Data
-20.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-19.78±27.10	-19.81±35.47	No Data	No Data	No Data	No Data
	CV_ ε_y	-137	-179	No Data	No Data	No Data	No Data
	ER_ ε_y	-1.1	-1.0	No Data	No Data	No Data	No Data
-25.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-21.22±46.54	-22.09±32.50	No Data	No Data	No Data	No Data
	CV_ ε_y	-219	-147	No Data	No Data	No Data	No Data
	ER_ ε_y	-15.1	-11.6	No Data	No Data	No Data	No Data

SD : 標準偏差、CV : 変動係数 (%)、ER : 誤差率 (%)

表A3 サブセットの大きさが γ_{xy} の測定に与える影響($n = 100$) 単位 (%)

疑似ひずみ γ_{xy_nom} (%)	γ_{xy} (%)	サブセットの一辺の長さ(pixels)					
		5	11	21	31	41	51
1.04	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	1.00±0.35	0.98±0.26	0.98±0.22	0.98±0.25	0.97±0.23	0.97±0.27
	CV $_{\gamma_{xy}}$	35	27	23	26	24	27
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-4.0	-6.2	-5.8	-5.6	-6.8	-6.4
2.08	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	2.00±0.49	1.98±0.45	1.98 ± 0.26	1.99 ± 0.45	1.97 ± 0.35	1.98 ± 0.48
	CV $_{\gamma_{xy}}$	25	23	13	23	18	24
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-4.2	-4.8	-5.2	-4.5	-5.6	-5.1
3.13	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	2.97±0.51	2.95±0.50	2.96±0.56	2.96±0.50	2.93±0.44	2.93±0.54
	CV $_{\gamma_{xy}}$	17	17	19	17	15	19
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-4.8	-5.7	-5.3	-5.3	-6.4	-6.2
4.17	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	3.99±0.35	3.97±0.44	3.94±0.74	3.96±0.67	3.91±0.69	3.96±0.58
	CV $_{\gamma_{xy}}$	9	11	19	17	18	15
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-4.3	-4.7	-5.5	-4.9	-6.2	-5.1
5.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	4.99±0.18	4.96±0.38	4.91±1.40	4.94±0.87	4.86±1.04	4.93±0.61
	CV $_{\gamma_{xy}}$	4	8	29	18	21	12
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-0.3	-0.8	-1.8	-1.2	-2.9	-1.4
10.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	9.97±0.36	9.92±0.88	9.70±3.76	9.82±2.63	9.64±3.06	9.78±1.89
	CV $_{\gamma_{xy}}$	4	9	39	27	32	19
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-0.3	-0.8	-3.0	-1.8	-3.6	-2.2
15.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	14.95±0.59	14.85±1.66	14.49±8.84	14.63±4.75	14.48±6.45	14.63±3.02
	CV $_{\gamma_{xy}}$	4	11	61	32	45	21
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-0.4	-1.0	-3.4	-2.4	-3.5	-2.5
20.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	19.91±0.89	19.81±2.43	19.06±14.21	19.32±7.70	19.18±10.10	19.42±4.45
	CV $_{\gamma_{xy}}$	4	12	75	40	53	23
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-0.4	-1.0	-4.7	-3.4	-4.1	-2.9
25.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	22.84±14.80	24.75±3.03	No Data	24.27±10.83	24.02±14.81	24.28±6.15
	CV $_{\gamma_{xy}}$	65	12	No Data	45	62	25
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-8.7	-1.0	No Data	-2.9	-3.9	-2.9

SD : 標準偏差、CV : 変動係数 (%)、ER : 誤差率 (%)

4. 格子点間の距離がひずみ測定に及ぼす影響

2.で作成した参照画像と対象画像を DIC 解析し、 ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} を計算した。計算する際に、格子点間の距離を 5 pixels (0.01 mm) から 40 pixels (0.09 mm) まで変化させたときに、計算される ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} がどのように変化するか調べた。測定条件については以下の通りである：

ROI の寸法：200×200 pixels (0.44×0.44 mm)

格子点間の距離：5–40 pixels (四角形要素の数 $n = 25$ –1600)

サブセットの大きさ：21×21 pixels (0.05×0.05 mm)

補間回数 k ：5 回

格子点間の距離に依存して、ROI 内に含まれる四角形要素の数 n は異なった ($n = 25$ –1600)。そのため、全四角形要素からランダムで四角形要素を 20 個選んだ。その際、MATLAB (2017a) (The MathWorks, Inc.) の randperm 関数を用いて整数を 20 個発生させ、その整数に対応する四角形要素を選出した。

表 A4,5,6 は設定した格子点間の距離ごとに計算された ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} を示す。疑似ひずみ ε_{x_nom} や格子点間の距離に依存せず、誤差率 ER_{ε_x} は±数%以内となった。格子点間の距離が大きくなるほど変動係数 CV_{ε_x} は小さくなった。これは、格子点の移動量(u,v)の誤差に対して四角形要素の元の長さが相対的に大きくなったためと考えられる。格子点間の距離が 10 pixels 以上のとき誤差率 ER_{ε_y} は±数%以内となった。また、 ε_x と同様、格子点間の距離が大きくなるほど変動係数 CV_{ε_y} は小さくなった。誤差率 $ER_{\gamma_{xy}}$ と格子点間の距離の明瞭な関係は認められなかった。格子点間の距離が大きくなるほど変動係数 $CV_{\gamma_{xy}}$ は小さくなった。

表 A4 格子点間の距離が ε_x の測定に与える影響($n = 20$)

単位 (%)

疑似ひずみ ε_{x_nom} (%)	ε_x (%)	格子点間の距離(pixels)				
		5	10	20	25	40
-0.94	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-0.83±0.46	-0.98±0.38	-0.91±0.27	-1.01±0.24	-0.95±0.14
	CV_ ε_x	-55	-39	-30	-24	-14
	ER_ ε_x	-11.7	4.2	2.9	7.7	1.5
-1.88	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-1.88±0.55	-1.87±0.31	-1.89±0.31	-1.89±0.20	-1.92±0.15
	CV_ ε_x	-30	-17	-16	-11	-8
	ER_ ε_x	0.0	-0.4	0.8	0.8	2.2
-2.97	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-2.89±1.09	-2.55±0.91	-2.89±0.36	-2.88±0.32	-2.99±0.20
	CV_ ε_x	-38	-36	-12	-11	-7
	ER_ ε_x	-2.6	-14.2	-2.8	-3.1	0.8
-3.91	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-3.69±1.37	-4.34±0.74	-3.95±0.45	-3.80±0.35	-3.88±0.18
	CV_ ε_x	-37	-17	-11	-9	-5
	ER_ ε_x	-5.6	11.0	1.2	-2.6	-0.8
-5.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-4.84±1.74	-5.29±0.88	-4.97±0.55	-5.08±0.46	-5.06±0.24
	CV_ ε_x	-36	-17	-11	-9	-5
	ER_ ε_x	-3.1	5.8	-0.6	1.6	1.2
-10.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-9.84±4.09	-9.55±3.46	-9.93±1.57	-9.99±0.97	-10.02±0.88
	CV_ ε_x	-42	-36	-16	-10	-9
	ER_ ε_x	-1.6	-4.5	-0.7	-0.1	0.2
-15.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-15.41±9.19	-15.41±6.24	-14.99±3.29	-14.47±1.85	-14.75±1.41
	CV_ ε_x	-60	-40	-22	-13	-10
	ER_ ε_x	2.7	2.8	-0.1	-3.5	-1.7
-20.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-18.86±10.62	-20.42±7.31	-18.28±4.86	-19.34±2.86	-20.07±2.10
	CV_ ε_x	-56	-36	-27	-15	-10
	ER_ ε_x	-5.7	2.1	-8.6	-3.3	0.4
-25.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-27.81±24.16	-21.59±13.63	-24.50±7.82	-25.18±6.28	-25.71±2.81
	CV_ ε_x	-8	-63	-32	-25	-11
	ER_ ε_x	11.3	-13.7	-2.0	0.7	2.8

SD : 標準偏差、CV : 変動係数 (%)、ER : 誤差率 (%)

表 A5 格子点間の距離が ε_y の測定に与える影響($n = 20$)

単位 (%)

疑似ひずみ ε_{y_nom} (%)	ε_y (%)	格子点間の距離(pixels)				
		5	10	20	25	40
-0.83	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-0.91±0.36	-0.77±0.27	-0.85±0.23	-0.85±0.22	-0.86±0.11
	CV $_{\varepsilon_y}$	-39	-35	-27	-26	-13
	ER $_{\varepsilon_y}$	8.7	-7.2	1.7	2.4	2.9
-1.88	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-2.06±0.77	-1.70±0.38	-1.92±0.39	-1.79±0.20	-1.79±0.21
	CV $_{\varepsilon_y}$	-37	-22	-21	-11	-12
	ER $_{\varepsilon_y}$	10.0	-9.6	2.5	-4.3	-4.6
-2.92	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-2.78±0.73	-2.85±1.05	-2.88±0.42	-2.88±0.22	-2.94±0.16
	CV $_{\varepsilon_y}$	-26	-37	-15	-8	-5
	ER $_{\varepsilon_y}$	-4.6	-2.2	-1.2	-1.3	0.8
-3.96	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-3.53±1.49	-3.70±0.95	-3.94±0.38	-3.93±0.23	-3.92±0.17
	CV $_{\varepsilon_y}$	-42	-26	-10	-6	-4
	ER $_{\varepsilon_y}$	-10.8	-6.6	-0.4	-0.6	-0.9
-5.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-5.20±1.96	-4.95±0.98	-4.93±0.40	-4.91±0.41	-4.95±0.18
	CV $_{\varepsilon_y}$	-38	-20	-8	-8	-4
	ER $_{\varepsilon_y}$	4.1	-0.9	-1.3	-1.8	-0.9
-10.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-10.33±3.65	-9.98±3.10	-10.08±1.17	-10.02±0.59	-10.07±0.56
	CV $_{\varepsilon_y}$	-35	-31	-12	-6	-6
	ER $_{\varepsilon_y}$	3.3	-0.2	0.8	0.2	0.7
-15.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-16.27±5.16	-13.51±4.45	-13.25±2.14	-14.39±2.43	-14.97±1.11
	CV $_{\varepsilon_y}$	-32	-33	-16	-17	-7
	ER $_{\varepsilon_y}$	8.4	-9.9	-11.7	-4.0	-0.2
-20.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	No Data	No Data	No Data	No Data	-19.71±1.61
	CV $_{\varepsilon_y}$	No Data	No Data	No Data	No Data	-8
	ER $_{\varepsilon_y}$	No Data	No Data	No Data	No Data	-1.4
-25.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
	CV $_{\varepsilon_y}$	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
	ER $_{\varepsilon_y}$	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data

SD : 標準偏差、CV : 変動係数 (%)、ER : 誤差率 (%)

表 A6 格子点間の距離が γ_{xy} の測定に与える影響($n = 20$)

単位 (%)

疑似ひずみ γ_{xy_nom} (%)	γ_{xy} (%)	格子点間の距離(pixels)				
		5	10	20	25	40
1.04	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	0.83±0.68	0.98±0.46	1.02±0.27	1.03±0.22	0.99±0.19
	CV $_{\gamma_{xy}}$	81	47	27	21	19
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-20.4	-5.5	-2.1	-1.3	-5.3
2.08	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	2.14±1.00	2.21±0.95	2.01±0.56	2.02±0.22	1.97±0.17
	CV $_{\gamma_{xy}}$	47	43	28	11	9
	ER $_{\gamma_{xy}}$	2.7	6.2	-3.4	-3.2	-5.3
3.13	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	3.48±1.57	3.06±1.24	2.88±0.42	3.07±0.43	2.95±0.25
	CV $_{\gamma_{xy}}$	45	40	15	14	8
	ER $_{\gamma_{xy}}$	11.4	-2.0	-8.0	-1.9	-5.6
4.17	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	4.08±2.07	4.18±1.25	4.20±0.57	3.85±0.38	3.97±0.27
	CV $_{\gamma_{xy}}$	51	30	14	10	7
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-2.0	0.2	0.7	-7.6	-4.7
5.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	5.88±1.96	5.26±1.59	4.91±0.42	4.89±0.52	4.96±0.29
	CV $_{\gamma_{xy}}$	33	30	9	11	6
	ER $_{\gamma_{xy}}$	17.6	5.3	-1.7	-2.3	-0.7
10.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	9.78±6.13	8.75±5.00	9.67±1.92	9.39±1.00	9.90±0.81
	CV $_{\gamma_{xy}}$	63	57	20	11	8
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-2.2	-12.5	-3.3	-6.1	-1.0
15.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	14.38±12.01	15.46±6.38	13.33±3.05	14.83±1.77	14.88±1.43
	CV $_{\gamma_{xy}}$	84	41	23	12	10
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-4.2	3.1	-11.1	-1.1	-0.8
20.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	23.08±12.39	18.11±9.79	19.04±3.86	19.57±3.26	19.89±2.13
	CV $_{\gamma_{xy}}$	54	54	20	17	11
	ER $_{\gamma_{xy}}$	15.4	-9.5	-4.8	-2.2	-0.6
25.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	24.51±14.11	20.19±13.87	24.87±5.41	24.59±4.94	24.58±3.35
	CV $_{\gamma_{xy}}$	58	69	22	20	14
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-2.0	-19.2	-0.5	-1.6	-1.7

SD : 標準偏差、CV : 変動係数 (%)、ER : 誤差率 (%)

5. 補間回数 k がひずみ測定に及ぼす影響

節 2. で作成した参照画像と対象画像を DIC 解析し、 ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} を計算した。計算する際に、補間回数 k を 1 から 10 回まで変化させたときに、計算される ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} がどのように変化するか調べた。測定条件については以下の通りである：

ROI の寸法：200×200 pixels (0.44×0.44 mm)

格子点間の距離：20 pixels (0.04 mm) (四角形要素の数 $n = 100$)

サブセットの大きさ：21×21 pixels (0.05×0.05 mm)

補間回数 k ：1–10 回

表 A7,8,9 は設定した補間回数 k ごとに計算された ε_x 、 ε_y 、 γ_{xy} を示す。補間回数の増加によって、変動係数と誤差率は減少する傾向がみられたが、 $k \geq 5$ では変動係数と誤差率はほぼ一定となった。

表 A7 補間回数 k が ε_x に与える影響 ($n = 100$)

単位 (%)

疑似ひずみ ε_{x_nom} (%)	ε_x (%)	補間回数 k						
		0	1	2	3	4	5	10
-0.94	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-1.00±2.01	-1.00±1.23	-1.00±0.56	-0.99±0.38	-0.94±0.29	-0.95±0.27	-0.95±0.28
	CV_ ε_x	-201	-123	-56	-38	-31	-29	-29
	ER_ ε_x	6.7	6.7	6.7	5.3	0.3	1.3	1.5
-1.88	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-2.00±2.16	-2.00±0.97	-1.96±0.44	-1.88±0.30	-1.89±0.28	-1.90±0.31	-1.90±0.29
	CV_ ε_x	-108	-49	-23	-16	-15	-16	-15
	ER_ ε_x	6.7	6.7	4.7	0.3	1.0	1.3	1.3
-2.97	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-2.73±2.33	-3.00±0.89	-2.97±0.54	-2.94±0.45	-2.96±0.40	-2.96±0.40	-2.95±0.40
	CV_ ε_x	-86	-30	-18	-15	-13	-14	-14
	ER_ ε_x	-8.2	1.1	0.0	-1.1	-0.4	-0.4	-0.5
-3.91	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-3.55±2.20	-3.98±1.07	-3.89±0.64	-3.89±0.48	-3.89±0.48	-3.89±0.48	-3.89±0.48
	CV_ ε_x	-62	-27	-16	-13	-12	-12	-12
	ER_ ε_x	-9.1	1.8	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
-5.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-5.00±0.00	-5.00±0.25	-4.98±0.53	-5.00±0.62	-4.99±0.57	-4.99±0.57	-4.99±0.56
	CV_ ε_x	0	-5	-11	-12	-11	-11	-11
	ER_ ε_x	0.0	0.0	-0.5	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3
-10.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-10.00±1.28	-9.94±1.97	-9.97±1.66	-9.96±1.74	-9.95±1.73	-9.95±1.73	-9.95±1.74
	CV_ ε_x	-13	-20	-17	-17	-17	-17	-17
	ER_ ε_x	0.0	-0.6	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5
-15.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-14.88±3.08	-14.88±3.20	-14.85±2.90	-14.88±2.97	-14.87±2.95	-14.87±2.97	-14.87±2.96
	CV_ ε_x	-21	-21	-20	-20	-20	-20	-20
	ER_ ε_x	-0.8	-0.8	-1.0	-0.8	-0.8	-0.9	-0.8
-20.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-19.85±4.74	-19.78±4.89	-19.80±4.76	-19.80±4.70	-19.80±4.74	-19.81±4.74	-19.81±4.74
	CV_ ε_x	-24	-25	-24	-24	-24	-24	-24
	ER_ ε_x	-0.8	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
-25.00	$\bar{\varepsilon}_x \pm SD_{\varepsilon_x}$	-24.97±6.76	-24.76±6.97	-24.73±7.05	-24.75±6.96	-24.74±6.94	-24.74±6.98	-24.74±6.97
	CV_ ε_x	-27	-28	-29	-28	-28	-28	-28
	ER_ ε_x	-0.1	-1.0	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0

SD : 標準偏差、CV : 変動係数 (%)、ER : 誤差率 (%)

表 A8 補間回数 k が ε_y の測定に与える影響 ($n = 100$)

単位 (%)

疑似ひずみ ε_{y_nom} (%)	ε_y (%)	補間回数 k						
		0	1	2	3	4	5	10
-0.83	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-1.00±1.81	-1.00±1.10	-0.84±0.30	-0.87±0.30	-0.87±0.27	-0.87±0.24	-0.87±0.24
	CV_ ε_y	-181	-110	-62	-35	-31	-28	-28
	ER_ ε_y	-20.0	-20.0	1.2	5.0	5.0	4.8	4.5
-1.88	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-1.50±2.22	-1.98±1.01	-1.76±0.59	-1.80±0.41	-1.82±0.39	-1.81±0.39	-1.81±0.39
	CV_ ε_y	-148	-51	-33	-23	-22	-21	-21
	ER_ ε_y	-20.0	5.3	-6.0	-3.8	-3.2	-3.4	-3.3
-2.92	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-3.00±2.46	-3.00±1.17	-2.97±0.64	-2.90±0.42	-2.91±0.38	-2.91±0.40	-2.91±0.39
	CV_ ε_y	-82	-39	-21	-15	-13	-14	-13
	ER_ ε_y	2.9	2.9	1.8	-0.5	-0.3	-0.1	-0.1
-3.96	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-3.62 ± 2.02	-3.98 ± 1.06	-3.95 ± 0.55	-3.93 ± 0.41	-3.92 ± 0.40	-3.91 ± 0.38	-3.92 ± 0.38
	CV_ ε_y	-56	-27	-14	-10	-10	-10	-10
	ER_ ε_y	-8.4	0.4	-0.2	-0.8	-1.1	-1.1	-1.1
-5.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-5.00±0.00	-5.00±0.00	-4.99±0.33	-4.97±0.50	-4.97±0.41	-4.97±0.40	-4.97±0.41
	CV_ ε_y	0	0	-7	-10	-8	-8	-8
	ER_ ε_y	0.0	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7
-10.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-9.95±0.35	-9.89±1.79	-9.90±1.29	-9.91±1.31	-9.90±1.34	-9.90±1.35	-9.90±1.35
	CV_ ε_y	-4	-18	-13	-13	-14	-14	-14
	ER_ ε_y	-0.5	-1.1	-1.0	-0.9	-1.0	-1.0	-1.0
-15.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	-14.88±2.29	-14.78±2.21	-14.76±2.19	-14.77±2.21	-14.76±2.21	-14.75±2.22	-14.75±2.22
	CV_ ε_y	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15
	ER_ ε_y	-0.8	-1.5	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
-20.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
	CV_ ε_y	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
	ER_ ε_y	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
-25.00	$\bar{\varepsilon}_y \pm SD_{\varepsilon_y}$	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
	CV_ ε_y	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
	ER_ ε_y	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data	No Data

SD : 標準偏差、CV : 変動係数 (%)、ER : 誤差率 (%)

表 A9 補間回数 k が γ_{xy} の測定に与える影響 ($n = 100$)

単位 (%)

疑似ひずみ γ_{xy_nom} (%)	γ_{xy} (%)	補間回数 k						
		0	1	2	3	4	5	10
1.04	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	0.83±1.51	1.00±1.05	1.00±0.50	0.98±0.28	0.97±0.28	0.97±0.27	0.97±0.27
	CV $_{\gamma_{xy}}$	183	105	50	28	28	27	28
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-20.8	-4.0	-4.0	-6.1	-6.7	-6.4	-6.5
2.08	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	2.00±2.44	2.00±1.06	2.00±0.63	1.98±0.50	1.97±0.46	1.98±0.48	1.98±0.47
	CV $_{\gamma_{xy}}$	122	53	31	25	23	24	24
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-4.0	-4.0	-4.0	-5.2	-5.3	-5.1	-5.1
3.13	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	2.83±2.24	2.97±1.16	2.93±0.69	2.93±0.53	2.93±0.52	2.93±0.54	2.93±0.54
	CV $_{\gamma_{xy}}$	79	39	24	18	18	19	18
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-9.6	-4.9	-6.2	-6.1	-6.2	-6.2	-6.1
4.17	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	4.00±1.59	4.00±1.06	3.95±0.68	3.94±0.64	3.95±0.57	3.96±0.58	3.95±0.58
	CV $_{\gamma_{xy}}$	40	27	17	16	14	15	15
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-4.0	-4.0	-5.2	-5.4	-5.1	-5.1	-5.2
5.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	5.00±0.00	4.94±0.32	4.94±0.68	4.92±0.62	4.93±0.63	4.93±0.61	4.93±0.62
	CV $_{\gamma_{xy}}$	0	6	14	13	13	12	13
	ER $_{\gamma_{xy}}$	0.0	-1.1	-1.1	-1.6	-1.3	-1.4	-1.4
10.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	9.70±1.82	9.75±2.05	9.80±1.79	9.78±1.89	9.78±1.87	9.78±1.89	9.78±1.88
	CV $_{\gamma_{xy}}$	19	21	18	19	19	19	19
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-3.0	-2.5	-2.0	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2
15.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	14.68±3.2	14.54±3.1	14.61±3.0	14.61±3.0	14.63±3.0	14.63±3.0	14.62±3.0
	CV $_{\gamma_{xy}}$	7	5	0	7	1	2	2
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-2.2	-3.1	-2.6	-2.6	-2.5	-2.5	-2.5
20.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	19.43±4.7	19.28±4.4	19.38±4.4	19.42±4.4	19.42±4.4	19.42±4.4	19.42±4.4
	CV $_{\gamma_{xy}}$	4	5	4	0	5	5	5
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-2.9	-3.6	-3.1	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9
25.00	$\bar{\gamma}_{xy} \pm SD_{\gamma_{xy}}$	24.23±6.9	24.17±5.9	24.24±6.1	24.29±6.1	24.29±6.1	24.28±6.1	24.29±6.1
	CV $_{\gamma_{xy}}$	4	9	6	6	3	5	4
	ER $_{\gamma_{xy}}$	-3.1	-3.3	-3.0	-2.8	-2.8	-2.9	-2.8

SD : 標準偏差、CV : 変動係数 (%)、ER : 誤差率 (%)

6. 測定したひずみと疑似ひずみの差の原因について

図 A2 は、対象画像 ($\varepsilon_{y_nom} = 1.88\%$) について、DIC 法によって求めた ε_y の分布の一例を示す。他の領域よりも圧縮ひずみが大きい領域が縦縞模様を形成している。このことは、対象画像を作成する際の画像処理において、画素値を求める際に丸め誤差が発生したことで、疑似ひずみが画像上に均一に分布していないことを示唆している。このことが、算出したひずみが疑似ひずみと一致しないことの一つの原因と考えられた。また、DIC 法プログラムでは、画素補間を繰り返すことによって移動量 (u,v) を $(1/2)^k$ pixel 単位で計算するため、真の移動量が $(1/2)^k \times m$ (m は整数) の形で表すことができない場合、必然的に誤差が生じることになる。

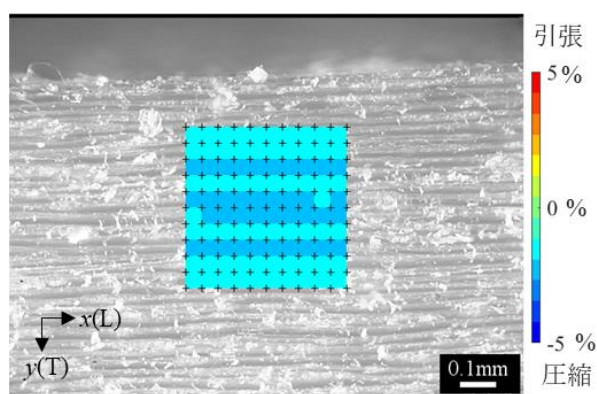


図 A2 DIC 法によるひずみ測定の一例

Notes: $\varepsilon_{y_nom} = 1.88\%$ 、サブセットの大きさ
21×21 pixels、格子点間の距離 20 pixels、補間
回数 k 5 回

7. まとめ

本付録では、本研究で作成・利用してきた DIC 法プログラムで設定するパラメータ（格子点間の距離、サブセットの大きさ及び画素補間の回数 k ）がひずみの測定精度に及ぼす影響について検証した。設定したパラメータによって、測定の性能や精度が変動することが確認され、その影響は測定するひずみの大きさに依存した。このことは、測定するひずみの大きさに応じてパラメータを適切に調整する必要があることを示唆するものである。

