

セル構造の視点からみた切削プロセスにおけるせん断域の解析

城市 大輔¹⁾, 大谷 忠²⁾, 臼杵 年³⁾,

¹⁾ 島根大学大学院総合理工学研究科 材料プロセス工学専攻

²⁾ 茨城大学教育学部 技術教育講座

³⁾ 島根大学総合理工学部 材料プロセス工学科

Analysis of shear area in the cutting process that watched from a viewpoint of cell structure

Daisuke SHIROICHI¹⁾, Tadashi OHTANI²⁾, Hiroshi USUKI³⁾

¹⁾ *Master Course of Natural Resource Process Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Shimane University*

²⁾ *Department of Technology, The College of Education Ibaraki University*

³⁾ *Department of Natural Resource Process Engineering, Faculty of Science and Engineering, Shimane University*

Abstract

It performed a orthogonal cutting experiment and observed materials to process with a high definition microscope from the side, and observation analyzed the point that a chip generated and the shear angle that it was at a level of cell structure. It observed a shear angle in aluminum and spruce materials and was able to confirm affected layer which a metal color changed into between a base material and a chip in aluminum and deformation of the intercellular layer in spruce. Based on an image at the time of these cutting, defined three methods of analysis and demanded shear angle ϕ . In addition, examined it about relations with shear angle and cutting distance. The results obtained are as follows: (1)It changed in spruce materials in a range from 60 degrees to 80 degrees whereas a shear angle changed to 40 degrees from 30 degrees in aluminum, and the shear angle in wood grew big in comparison with metal. (2)Broke a value of shear angle ϕ s and ϕ s which evaluated from deformation of a cell of wood, and it was good, and a chip of split type coped with a generated process and changed. (3)It compared a method to parse a value of ϕ s which it found from deformation of an individual cell in the case of ϕ t and understood that it coped with a phenomenon including outbreak of last breaking and changed.

Key words: cutting process, deformation behavior, shear area, shear angle

1. はじめに

近年、コンピュータの発達等により設計段階における加工の解析が重要となり、シミュレーションや数値解析を通して、材料の歩留まりを抑えることや生産コストの削減、種々の条件における切削状態の予測などが可能となってきた。ところが、木材の加工の力学解析においては、木材がセルの構造による多孔性やセルの配列による強度の異方性を有するため、木材の引張と圧縮変形における応力ひずみの挙動は異なり、そのような力学的な相違は、切削時の工具と材料が接触する付近での応力場にも何らかの影響を与えており、正確なシミュレーションや数値解析を難しくさせている。このような設計段階の最適化を実現するためには、木材の切削プロセスにおける降伏条件や破壊

条件などの検討が必要であり、加工の力学における弾塑性挙動や破壊挙動を明らかにすることが重要となる。本研究では、木材が切り屑を生成するプロセスを外部負荷、弾性変形、塑性変形、破壊および切り屑生成というプロセスの中で捉え、塑性変形までの弾塑性力学挙動の解析を目的としている。また、金属材料において切り屑が生成するポイントとなるせん断角 ϕ を取り上げ、細胞(セル)レベルの変形に焦点を当てて、木材の切削プロセスの解析を行い、加工の力学の検討に向けた第一歩として、切り屑生成のせん断域の解析を試みた。

2. 実験方法

2.1 加工の力学解析

金属では切り屑が生成する面のせん断応力が最大にな

った時に切り屑が分離する Krystof による最大せん断応力説が適用でき、この理論を用いて加工の力学解析が行われる場合がある。このような理論を用いた場合には、切り屑が生成するポイントとなるせん断面におけるせん断角 ϕ の決定は重要な要素となる。そこで、木材に対しても、まずこの理論の適用を試み、切削プロセスにおけるセルの弾塑性変形の情報を基にして、せん断角 ϕ を求めることにした。

2.2 供試材

供試材には、表 1 に示すように等方性材料の代表例として純アルミニウム(99.6mass%)を用い、木材では針葉樹のスプルースを用いた。

2.3 二次元切削実験

切削実験は、刃先角が 40° 、すくい角が 40° 、逃げ角が 10° の二次元切削工具モデル(SKH 材)を用いた。二次元切削実験では、図 1 に示すように試験片をテーブル上の動力計に固定し、工具を水平に移動させて材料を切削する方式とした。この時の工具の切込み量は $50\mu\text{m}$ ~ $400\mu\text{m}$ の範囲とした。切削方向は、金属では圧延方向に平行、木材では繊維方向に平行として切削実験を行った。また、切削時に高解像カメラで加工する材料を側面から観察し、セル構造のレベルでせん断角 ϕ の観察および解析を行った。

表1 本実験における二次元切削の条件

Work	Metal : Aluminum Wood : Spruce
Tool material	SKH
Rake angle	40°
Clearance angle	10°
Cutting direction	Metal : Parallel to rolling Wood : Parallel to grain
Cutting speed	9(mm/min)
Depth of cut	50,100,200,400(μm)

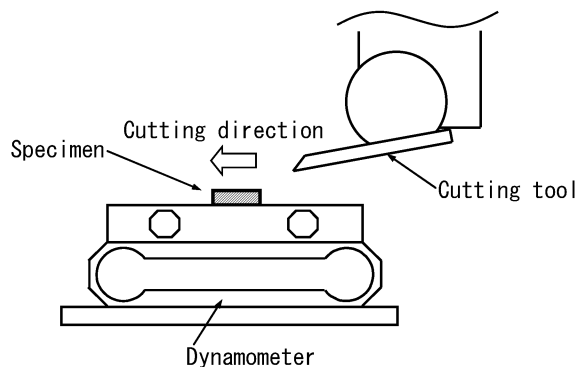


図.1 二次元切削の模式図

3. 結果及び考察

3.1 アルミニウムとスプルース材におけるせん断角の解析

高解像マイクロスコープを使って、アルミニウム及びスプルース材の切削時における観察を行い、以下の結果を得た。図 2 は、アルミニウムを切込み深さが $100\mu\text{m}$ で切削した時の画像の一例である。画像を見ると、いずれの切削距離においても金属の色が変色している加工変質層が認められ、母材と切り屑との間の色が変化しているのが認められる。また切削距離の進行に伴って変色している部分の傾きが小さくなっていく傾向にあることが観察できた。これに対して、図 3 に示すスプルース材を $100\mu\text{m}$ で切削した時の画像を見ると、いずれの切削距離においても工具の進行に従って細胞間層の変形が生じていることがわかる。また、細胞間層の曲げによる変形は、切削距離の変化に対して、依存しない傾向にあることが観察できた。次に図 4 に、アルミニウムを $200\mu\text{m}$ で切削した時の画像を示す。切込み深さが大きい条件である $200\mu\text{m}$ で切削した時の画像を見てみると、 $200\mu\text{m}$ の結果においても、 $100\mu\text{m}$ の結果と同様に、いずれの切削距離においても加工変質層が認められ、母材と切り屑との間の色が変化しているのが認められる。また切削距離の進行に伴って変色している部分の傾きが小さくなっていく傾向にある。これに対して、図 5 に示すスプルース材を $200\mu\text{m}$ で切削した時の画像を見てみると、 $100\mu\text{m}$ の結果と同様に、細胞間層の変形が生じていることがわかる。さらに、切込み深さがより大きい条件になると工具先端に先割れが生じており、先割れによって細胞間層の曲げに影響を与えていることがわかる。

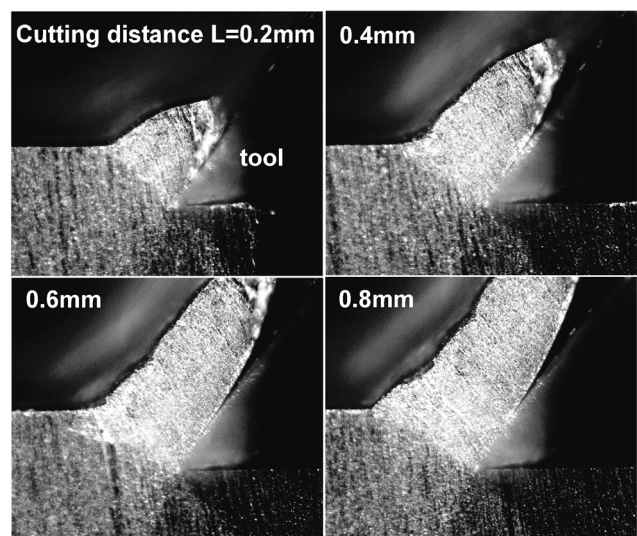


図.2 アルミニウムの二次元切削のプロセス
切込み深さ $t=100\mu\text{m}$

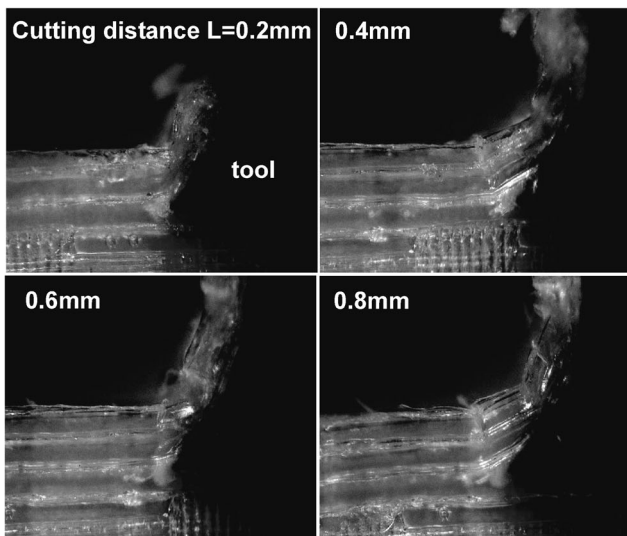


図.3 スプルース材の二次元切削のプロセス
切込み深さ $t=100\mu\text{m}$

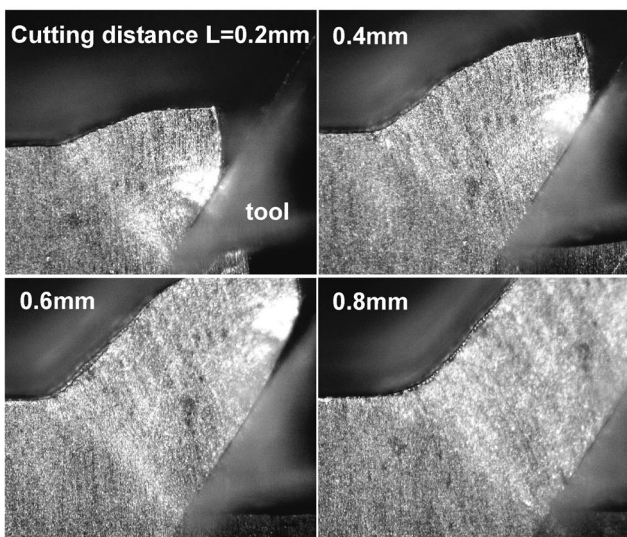


図.4 アルミニウムの二次元切削のプロセス
切込み深さ $t=200\mu\text{m}$

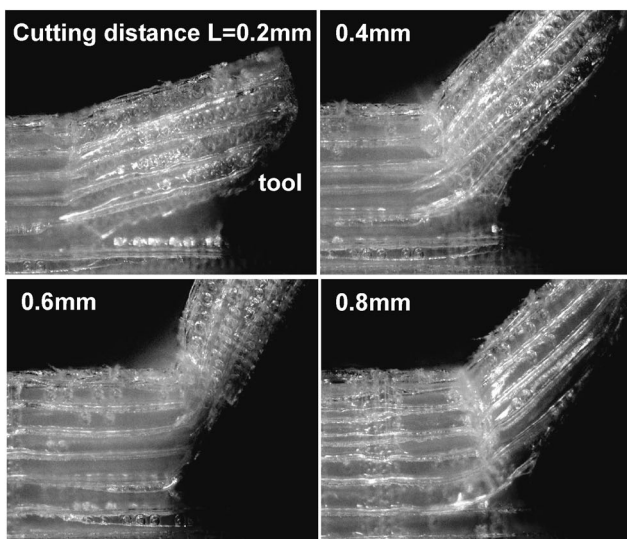


図.5 スプルース材の二次元切削のプロセス
切込み深さ $t=200\mu\text{m}$

3.2 切削時におけるせん断角の変化

3.1 においてアルミニウムとスプルース材におけるせん断角の観察を行ったところ、アルミニウムでは母材と切り屑との間に加工変質層が観察でき、一方スプルース材では細胞間層の変形が観察できた。これらの観察できたポイントを考えて、せん断角 ϕ の定義を行い、画像の解析を試みてみることにした。せん断角 ϕ の解析方法は、図 6(a)~(c)のように、今回新しい試みとして提示する個々の木材細胞間層が変形したり、金属結晶がすべりを起こし、最も折れ曲がるポイントを近似したせん断角 ϕ_s (図 6(a))、切削面上の材料が変形し最も折れ曲がるポイントと刃先先端を結ぶせん断角 ϕ_t (図 6(b))、従来の切削加工学で一般的に用いられる方法である切削前と切削後の切り屑厚さから求めたせん断角 $\phi_{t1/t2}$ (図 6(c)) を解析することによって、せん断角 ϕ を求めた。

Shear angle	Aluminum	Wood
ϕ_s	(a) - Al 	(a) - Wood
ϕ_t	(b) - Al 	(b) - Wood
$\phi_{t1/t2}$	(c) - Al 	(c) - Wood

図.6 せん断角 ϕ の解析方法

図 6 の解析方法から求めたせん断角 ϕ の切削時における変化を調べるため、せん断角 ϕ と切削距離 L との関係について調べた。図 7 は、アルミニウムの切込み深さが $50\mu\text{m}$ 及び $100\mu\text{m}$ で切削した時のせん断角 ϕ と切削距離 L との関係について調べた結果である。アルミニウムの $50\mu\text{m}$ と $100\mu\text{m}$ の結果においては、せん断角 ϕ のいずれの条件においても、また各切込み量においても切削距離の増加に伴って、せん断角は小さくなり、切り屑を排出しやすい条件に近づいていることがわかる。また、3つの解析方法でせん断角を調べた結果、せん断角は $30^\circ \sim 40^\circ$ に推移し、差がないことがわかる。これに対して、図 8 に示すスプルース材の $50\mu\text{m}$ 及び $100\mu\text{m}$ の結果において

は、いずれの切込み量の条件においても切削距離の増加に伴って、せん断角は金属の場合と異なり低下せず、 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ の範囲で推移することがわかる。また、3種類の解析方法によって今回新たに解析を試みたせん断角 ϕ_s と ϕ_t は、折れ型の切り屑を生成するプロセスに従って変化した。次に、図9にアルミニウムを切込み深さ $200 \mu\text{m}$ 及び $400 \mu\text{m}$ で切削した時のせん断角 ϕ と切削距離 L との関係について調べた結果を示す。切込み深さの大きい $200 \mu\text{m}$ 、 $400 \mu\text{m}$ においても、図7の切込み深さの小さい条件における結果と同様に、せん断角 ϕ のいずれの条件においても、また各切込み量においても切削距離の増加に伴って、せん断角は小さくなり、切り屑を排出しやすい条

件に近づいていることがわかる。また、3つの解析方法でせん断角を調べた結果においても、せん断角は $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ に推移し、差がないことがわかる。アルミニウムでは、切込み深さ $50 \sim 400 \mu\text{m}$ の結果で同様の傾向が得られた。図10に、スプルー材を切込み深さ $200 \mu\text{m}$ 及び $400 \mu\text{m}$ で切削した時の結果を示す。切込み深さが大きい $200 \mu\text{m}$ 、 $400 \mu\text{m}$ の結果では、図8の切込み深さの小さい条件における結果に比べ、木材特有の破壊である先割れの影響を受け、せん断角 ϕ_s と ϕ_t の結果に変化が見られた。この結果から、 ϕ_s がよりせん断角を適切に表現できることが推察された。

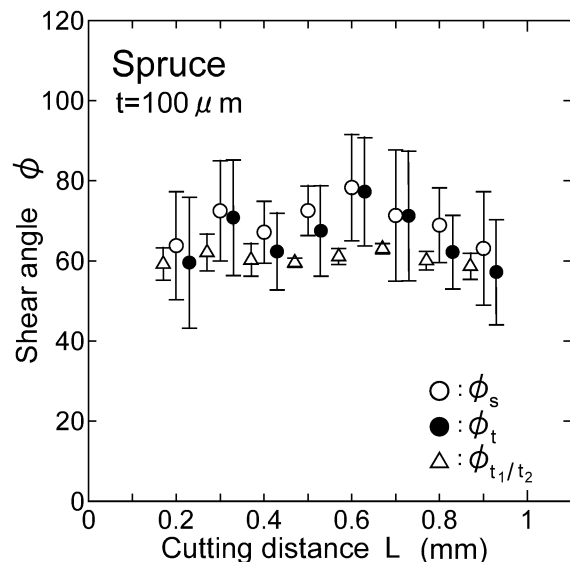
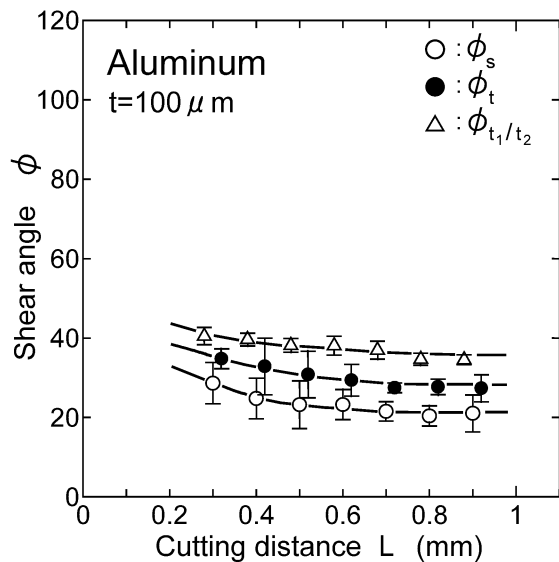
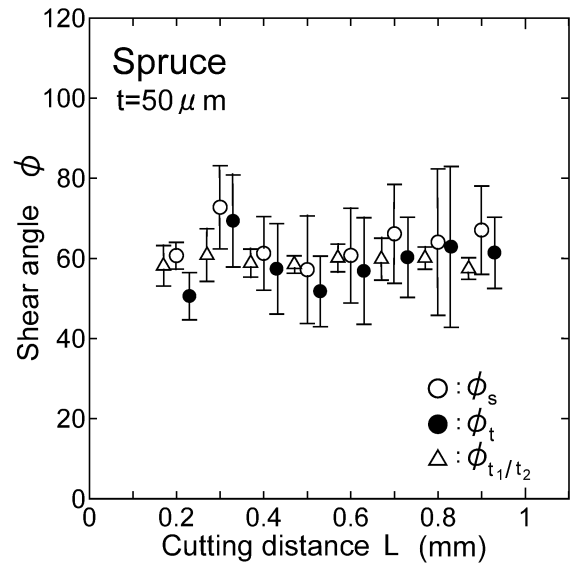
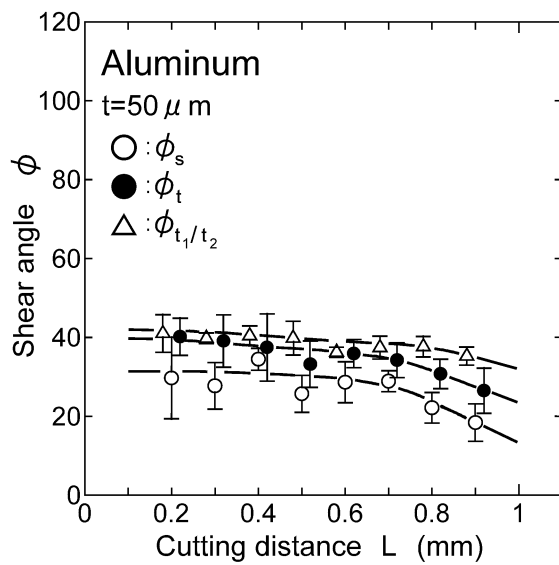


図.7 切込み深さ $50 \mu\text{m}$ 及び $100 \mu\text{m}$ におけるアルミニウムのせん断角 ϕ と切削距離 L との関係

図.8 切込み深さ $50 \mu\text{m}$ 及び $100 \mu\text{m}$ におけるスプルー材のせん断角 ϕ と切削距離 L との関係

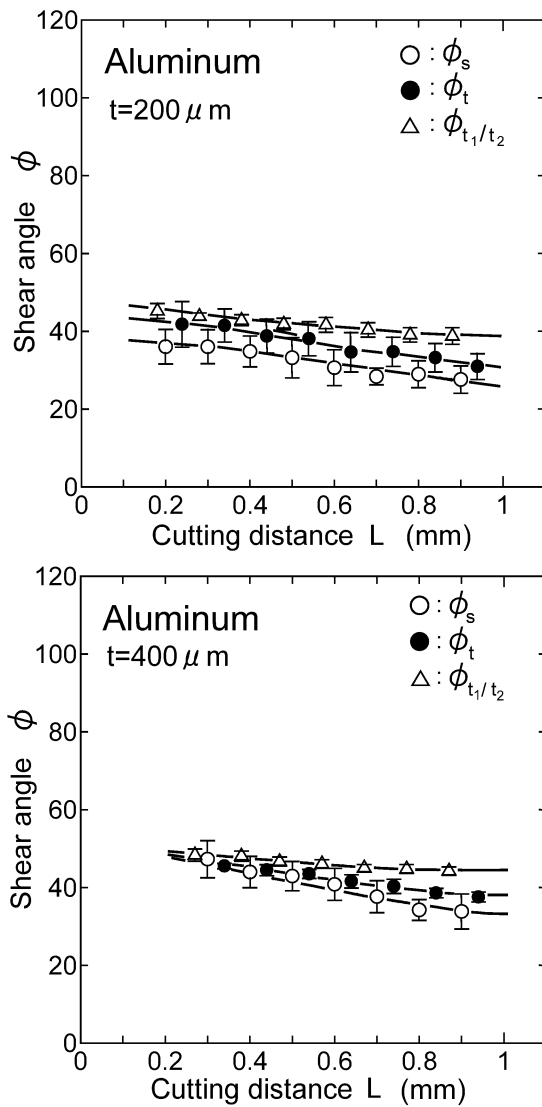


図.9 切込み深さ $200 \mu\text{m}$ 及び $400 \mu\text{m}$ におけるアルミニウムのせん断角 ϕ と切削距離 L との関係

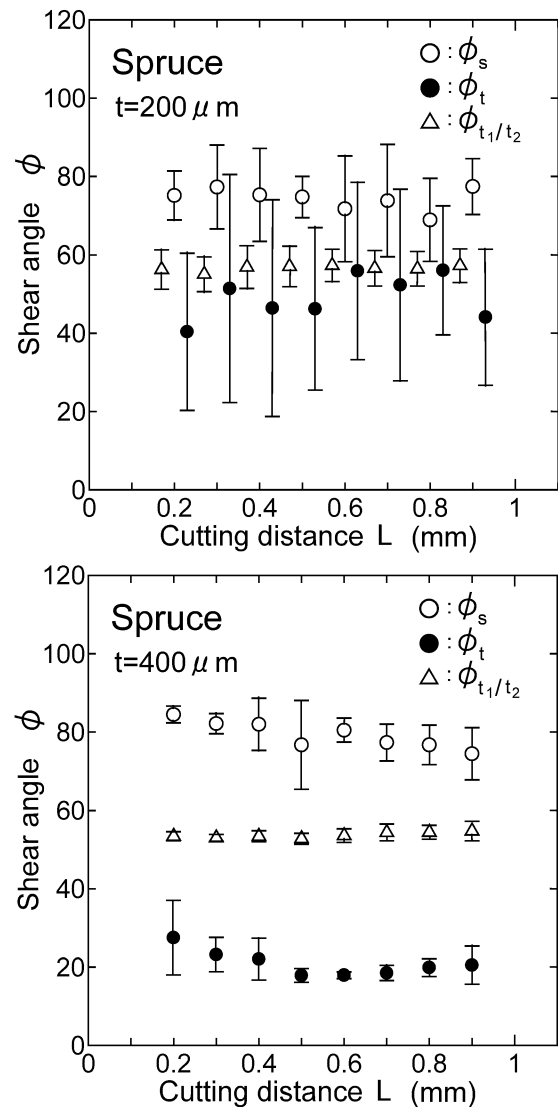


図.10 切込み深さ $200 \mu\text{m}$ 及び $400 \mu\text{m}$ におけるスプルース材のせん断角 ϕ と切削距離 L との関係

3.3 切削時の工学的せん断ひずみにおよぼす切込み深さの影響

3.2 において、アルミニウムとスプルース材の各切込み深さにおけるせん断角 ϕ と切削距離 L との関係について調べ、各切削プロセスにおいてせん断角がどのように変化するのがわかった。アルミニウムにおいては、切削距離の増加に伴ってせん断角は小さくなり、スプルース材では切込み深さの小さい条件においてせん断角 ϕ_s と ϕ_t は折れ型の切り屑を生成するプロセスに従って変化し、大きい条件では ϕ_s と ϕ_t に変化が見られた。これらの結果を基に、さらに詳しく調べるため、せん断角 ϕ と切込み深さ t との関係についても調べることにした。図 11 はアルミニウムにおけるせん断角 ϕ と切込み深さ t との関係について調べた結果である。アルミニウムの結果においては、切

込み深さの増加に伴って3つの解析方法によるせん断角の値はほぼ一定となり、同様な傾向を示した。これに対して、図 12 に示すスプルース材の結果においては、3つの解析方法によるせん断角の値は切込み量が大きい $200 \mu\text{m}$ の当たりから ϕ_s は増加し、 ϕ_t は減少していく傾向にあり、 ϕ_{t_1/t_2} はほぼ一定であることがわかった。スプルース材では、3つの解析方法によるせん断角で異なる傾向が得られた。このせん断角 ϕ_s の結果では、3つの解析方法の中で最も先割れを含んだ現象に対応して変化することがわかった。また、アルミニウムとスプルース材においてせん断角と切込み深さの関係について調べた結果には違いが見られた。次に、切削時の工学的せん断ひずみを算出し、せん断ひずみにおよぼす切込み深さの影響について調べた。図 13 は、アルミニウムにおける工学的せん断ひずみ γ_s と切込み深さ t との関係について調べた結果であ

る。アルミニウムの結果においては、各切込み深さで3つの解析方法によるせん断角の値は同様な傾向を示し、工学的せん断ひずみ γ_s は切込み深さに依存しない結果となった。一方、図14に示すスプルース材の結果においては、せん断角 ϕ_t が切込み深さの増加に伴って著しく増加するのに対して、 ϕ_s と $\phi_{t1/t2}$ はほぼ一定となった。この ϕ_s の結果は、先割れの発生に伴ってひずみが生じる前に材内部に破壊が起こるため、工学的せん断ひずみの値は、各切込み深さにおいて低い値を示したのではないかと考えられる。

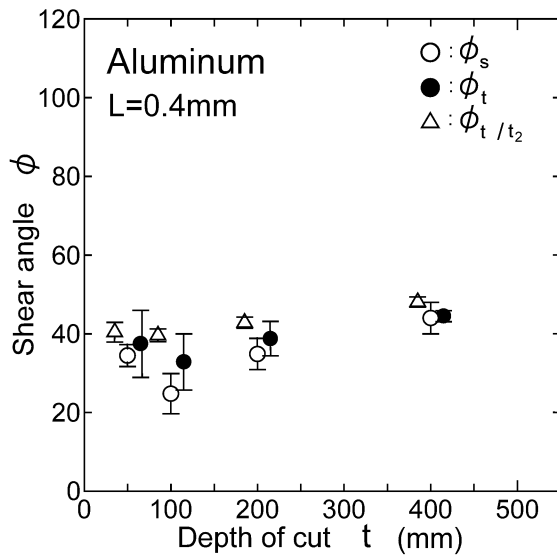


図.11 アルミニウムにおけるせん断角 ϕ と切込み深さ t との関係(切削距離 $L=0.4\text{mm}$)

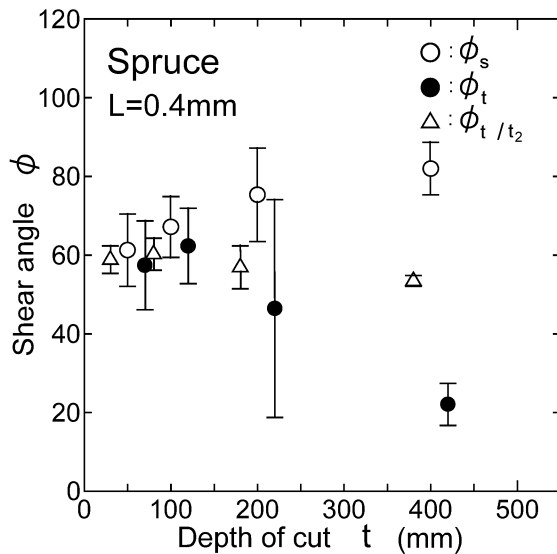


図.12 スプルース材におけるせん断角 ϕ と切込み深さ t との関係(切削距離 $L=0.4\text{mm}$)

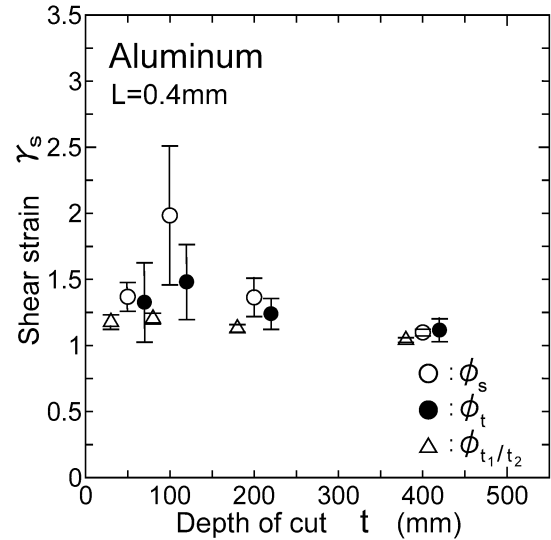


図.13 アルミニウムにおける工学的せん断ひずみ γ_s と切込み深さ t との関係(切削距離 $L=0.4\text{mm}$)

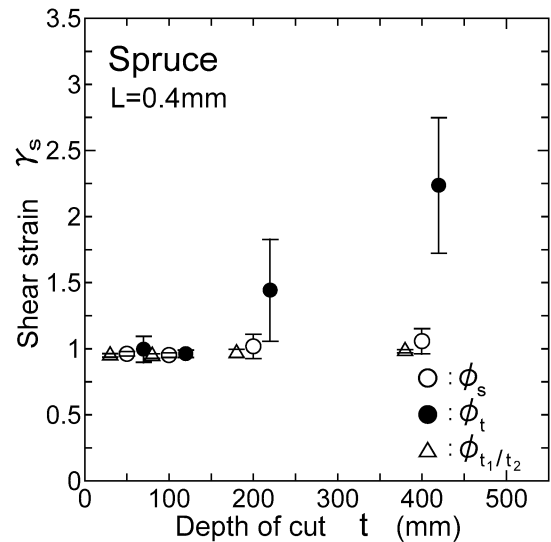


図.14 スプルース材における工学的せん断ひずみ γ_s と切込み深さ t との関係(切削距離 $L=0.4\text{mm}$)

4. まとめ

- (1) アルミニウムではせん断角が $\phi=30^\circ \sim 40^\circ$ に推移したのに対して、スプルース材では $\phi=60^\circ \sim 80^\circ$ の範囲で変化し、金属に比べて木材の縦切削におけるせん断角は大きくなった。
- (2) 木材では細胞の変形から評価したせん断角 ϕ_s と ϕ_t の値は、折れ型の切り屑が生成されるプロセスによく対応して変化した。
- (3) 個々の細胞の変形から求めた ϕ_s の値を解析する方法は、 ϕ_t の場合に比べて、先割れの発生を含んだ現象に対応して変化することがわかった。

