

## 論文 (Original article)

# 国産早生樹種の被削性 —2次元切削における切削力—

松田 陽介<sup>1)\*</sup>、松村 ゆかり<sup>1)</sup>、藤本 清彦<sup>1)</sup>、伊神 裕司<sup>1)</sup>

### 要旨

国産早生樹種の被削性を明らかにすることを目的として、国産早生樹種5樹種(コウヨウザン、センダン、ユーカリ2樹種、ユリノキ)とスギの辺心材を2次元切削したときの切削力を測定した。切削角は22°, 32°, 42°, 52°, 62°の5条件とし、切込量は0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mmの4条件とした。縦切削時の切削面はまさ目面とし、横切削時は板目面とした。縦切削では、どの樹種でも切削角や切込量の増加とともに主分力は増加した。また、容積密度数の大きい樹種ほど主分力は大きかった。したがって、スギと比較的容積密度数の近いユリノキ、コウヨウザン、センダンはスギと同程度の主分力となった。背分力は切込量や容積密度が大きいほど増加したが、切削角との明確な関係は認められなかった。横切削では、主分力は切削角や切込量の増加とともに増加したが、容積密度数との明確な関係は認められなかった。横切削時の背分力は、切込量が増加するほど増加する傾向があったが、切削角や容積密度数との明確な関係は認められなかった。樹種や切削方向によらず、辺心材で切削力の大きさはほとんど変わらなかった。切削角や切込量を小さくすることで、樹種間の切削力の違いは小さくなった。容積密度数の大きい早生樹種でも、小さい切削角や切込量を設定することで容積密度数の影響を抑え、小さい切削力で切削できると考えられた。

キーワード：早生樹、2次元切削、切削力

### 緒言

我が国の主要な造林樹種であるスギやヒノキと比較して短伐期で収穫可能な早生樹種は、収穫サイクルの短縮による林業経営の収益性の向上が見込めるほか、高い炭素固定能から地球温暖化対策への貢献も期待できる(松村 2006) ため、近年その生産と利用が注目されている。スギやヒノキなどのこれまで利用されてきた樹種については、材質や物理特性、乾燥特性、被削性などの基礎的データが整備されている(森林総合研究所 2004) が、国産早生樹種のそうしたデータの整備は進んでいない。

早生樹種の材質や物理特性に関する研究は、2000 年ごろから活発に行われてきた。米木ら(2005) は、国産のユーカリ6樹種の年輪幅や容積密度、収縮率、曲げヤング率などを測定し、6樹種のうち *Eucalyptus botryoides* は密度が大きい割に収縮率が低いことを明らかにし、同樹種の製材としての利用可能性を見出した。松村ら(2006, 2007) は、熊本県産のセンダン (*Melia azedarach*) とチャンチンモドキ (*Choerospondias axillaris*) の年輪幅や気乾密度、木部繊維長、道管要素長、ミクロフィブリル傾角、圧縮強さなどを測定し、その樹幹内変動を明らかにした。広橋ら(2012) は、国産ユーカリ6樹種の年半径成長量、成長応力解放ひずみ、伐採直後の心割れ率、気乾密度、ミクロフィブリル傾角などを測定し、その中でも特に *E. smithii* が、密度が大きい点、成長応力解放ひずみが小さい点、ミクロフィブリル傾角が小さい点などから、利用

が期待できることを明らかにした。涌嶋・渡辺(2017) は、広島県産と茨城県産のコウヨウザンの実大試験体の曲げ強度試験を行い、産地による違いやスギ・ヒノキとの違いを明らかにし、コウヨウザンが建築用材として十分に利用できる材質を有することを示した。このように、国産早生樹種の材質・物理特性に関する知見は蓄積されつつある。その中で、材質や物理特性の観点から次世代の造林樹種として期待できる樹種も見つかっている。

切削加工とは、切削工具によって材料の一部を切屑として除去し、材料の分割や寸法の調整、表面の仕上げを行なう基本的な加工法である。木質資源を住宅や家具に利用する場合には製材や木工などの技術が必要であり、紙やエネルギーなどに利用する場合にはチップ加工が必要である。いずれの場合も、木材を用途に適した寸法や形状に調整する必要があり、切削加工が重要な役割を担っている。したがって、国産早生樹の利用には、その樹種の材質・物理特性だけでなく被削性も明らかにする必要がある。被削性の評価に用いられる切削力とその反力である切削抵抗は、切削動力だけでなく工具寿命、仕上面性状、加工精度などに影響するため特に重要である(番匠谷ら 2007)。これまで、最も基本的な切削方式である2次元切削を対象に切削力を測定した研究は内外で多くなされてきており、切削角や切込量(Franz 1958, Stewart 1979, Huang 1994)、切削速度(Inoue and Mori 1979)、気乾密度(杉山 1980)、繊維傾斜角(木下 1960, Stewart

原稿受付：令和3年9月24日 原稿受理：令和4年1月24日

1) 森林総合研究所 木材加工・特性研究領域

\* 森林総合研究所 木材加工・特性研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

1971) などの諸因子の影響が調べられてきた。国内の主要な樹種についても切削力は調べられてきたが(中村・青山 1957)、国産早生樹の被削性に関する報告はまだ少ない。松村ら(2020)は、国産ユーカリ 6 樹種についてフリッチから厚さ 5 mm の薄板を帯鋸で製材したときの切削力を測定し、気乾密度の大きい樹種ほど切削力が大きい傾向があることを明らかにした。一方、基本的な切削方式の 2 次元切削を対象とした報告はまだない。

本研究は国産早生樹種利用のため、その被削性を明らかにすることを目的として、国産早生樹種 5 樹種を 2 次元切削したときの切削力を測定した。縦切削と横切削の両方を行い、切削角と切込量が切削力に及ぼす影響について検討した。従来樹種の代表としてスギの切削試験も行った。

## 実験方法

### 被削材

被削材は、静岡県産のコウヨウザン (*Cunninghamia lanceolata*)、福岡県産のセンダン (*Melia azedarach*)、静岡県産のユーカリ 2 樹種 (*Eucalyptus maidenii*, *robusta*; 以下 *E. maidenii* をユーカリ M、*E. robusta* をユーカリ R とする)、静岡県産のユリノキ (*Liriodendron tulipifera*)、茨城県産のスギ (*Cryptomeria japonica*) の心材と辺材とした。被削材の寸法は、縦切削のとき 50 (L: 繊維方向) × 10 (R: 半径方向) × 50 (T: 接線方向) mm、横切削のとき 10 (L) × 50 (R) × 50 (T) mm とした (Fig. 1a, b)。コウヨウザンとユリノキは 2 個体から、センダンとユーカリ、スギは 1 個体から被削材を採取した。後述の切削試験後、切削面と反対の面から 30 mm の位置で被削材を 2 分割し、切削面を含まない方の高さ、幅、厚さをノギスで測定し未乾燥時の体積を求め、重量を測定した。全乾後、再び重量を測定し、容積密度数(全乾重量÷未乾燥材の体積)と含水率を計算した。被削材の含水率の平均値は心材、辺材

の順に、コウヨウザンで 73% と 78%、センダンで 74% と 77%、ユーカリ M で 75% と 57%、ユーカリ R で 71% と 42%、ユリノキで 73% と 78%、スギで 38% と 165% であった。容積密度数の平均値は心材、辺材の順に、コウヨウザンで 361 kg/m<sup>3</sup> と 351 kg/m<sup>3</sup>、センダンで 387 kg/m<sup>3</sup> と 451 kg/m<sup>3</sup>、ユーカリ M で 633 kg/m<sup>3</sup> と 663 kg/m<sup>3</sup>、ユーカリ R で 716 kg/m<sup>3</sup> と 688 kg/m<sup>3</sup>、ユリノキで 350 kg/m<sup>3</sup> と 385 kg/m<sup>3</sup>、スギで 292 kg/m<sup>3</sup> と 288 kg/m<sup>3</sup> であった。

### 切削試験

切削試験には、落下衝撃試験機(東洋精機製作所; Z-138)(藤本 2018)を使用した。切れ刃を上向きにして固定した切削工具に向かって被削材を降下させることで 2 次元切削した (Photo 1)。切削工具は切れ刃の長さが 20 mm の平刃とし、その材質は高速度鋼 (SKH51) とした。切削方向は、縦切削 (Fig. 1a) と横切削 (Fig. 1b) とした。縦切削では、手がんなによる平削りのように切削方向と繊維方向が平行であり、横切削ではベニヤレースによる単板切削のように切削方向と繊維方向が垂直である。縦切削時の切削面はまさ目面 (LR 面) とした。横切削時の切削面は樹皮側の板目面 (LT 面) とした。縦・横切削ともに、切削幅は 10 mm とした。切削速度は 5 m/s、切削長さは 50 mm としたため、切削に要した時間は 10 ms である。切削工具の刃先角は 20°, 30°, 40°, 50°, 60° の 5 条件とした。逃げ角は 2° としたので、切削角は 22° ~ 62° となった。なお、バイアス角は設定しなかった。切込量は 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm の 4 条件とした。縦切削では、手がんなによる平削りのように気乾材を用いることが多いと考えられたが、横切削との比較のため、本研究では縦・横切削で未乾燥材を用いた。

任意の切削角で、1 個の被削材を各切込量の設定で 1 回ずつ切削し、その後新しい被削材に替えた。この一連の手順を各切削角で 4 回繰り返した。すなわち、全切削

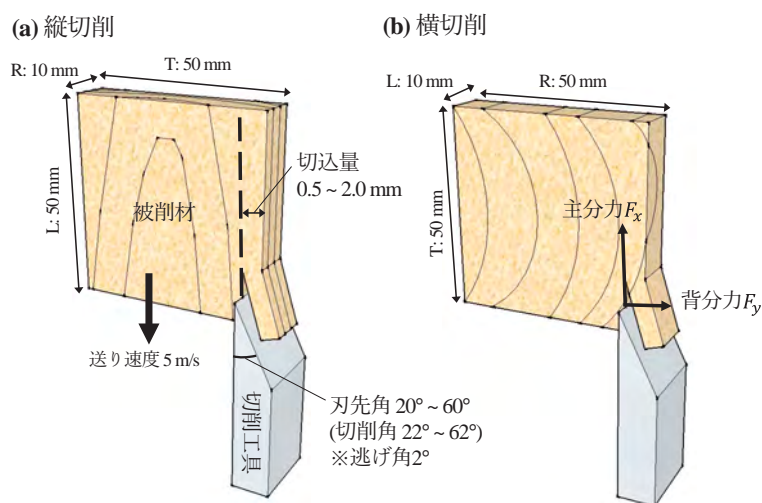


Fig. 1. 切削試験の模式図  
(a) 縦切削 (b) 横切削

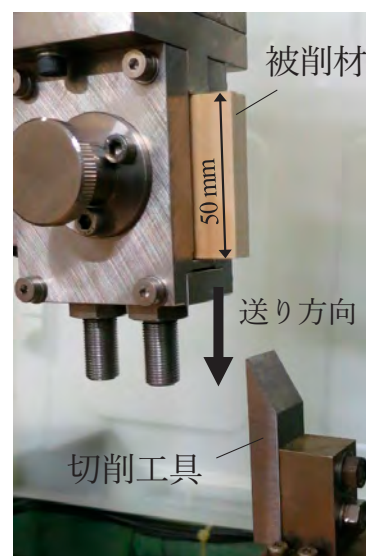


Photo 1. 切削試験の様子

角においてそれぞれ4個の被削材を用いるものとし、同一の被削材では全切込量で1回ずつ切削を行った。使用した被削材の個数は、1樹種につき5(切削角の数)×4(繰り返し回数)×2(心or辺材)×2(縦or横切削)=80個となった。ただし、ユーカリRの辺材の被削材が不足したため、切削角50°の条件の横切削は繰り返し3回とし、切削角60°の横切削は行わなかった。

切削時の主分力(切削方向と平行方向の力) $F_x$ と背分力(切削方向と垂直方向の力) $F_y$ を切削工具の固定治具の下部に取り付けた2分力ロードセルで測定した。主分力については、切削方向に作用する力を正、その逆向きに作用する力を負とした。背分力については、切屑側に向かって作用する力を正、母材側に向かって加わる力を負とした。ロードセルの出力電力のサンプリング周波数は10 kHzとした。

## 結果と考察

### 縦切削における切削力

コウヨウザンの心材を切削角42°、切込量1.5 mmの条件で縦切削したときの切削力の時間変化の一例をFig. 2に示す。グラフの横軸が時間(ms)、縦軸が切削力(N)を示す。切削力が変動しはじめたのが1149 msであり、そこから切削が始まったことが読み取れた。切削に要した時間は10 msであるので、1159 msまで切削したと考えられた。このとき得られた切屑の写真を上に示す。写真の切屑の両端がグラフの切削の始まりと終わりにそろうように写真のスケールを調整した。刃先が木材に最初に切り込むと、木材は割裂し、き裂の終端で切屑が曲げ破壊していること、その後3回割裂が発生したことが写真からわかった。切屑の形態から、Franz (1955) の切削型

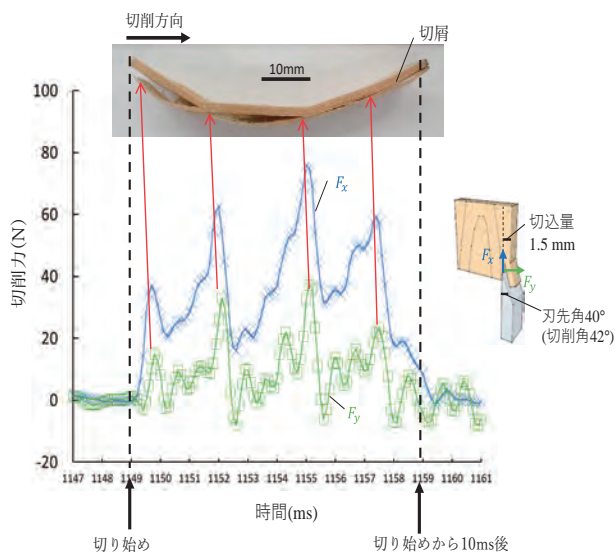


Fig. 2. コウヨウザン心材の縦切削時における切削力の一例

青線が主分力、緑線が背分力を示す。写真はこの切削試験で得られた切屑を示す。切削角は42°、切込量は1.5 mm。

のType I (折れ型) に分類される切削が行われたと考えられた。Type Iの切削では、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。先割れの進展とともに、切屑は片持ち梁の状態を持ち上げられ、曲げ破壊する。Type Iの切削では、先割れと切屑の曲げ破壊が繰り返される。今回採用した切削角と切込量の範囲では、どの樹種でもType Iの切削型となった。Fig. 2では、赤矢印で示した通り、先割れの発生と切削力のピークの位置が一致しているように見える。写真の切屑が折れ曲がっているため、グラフの時間軸と切屑が平行でない箇所があることから、先割れの発生と切削力のピークの位置がわずかにずれているが、先割れの発生する直前に最も大きな切削力が作用したと考えられた。縦切削における切削力のピークと割れの発生の対応は、Triboulot et al. (1983) や Merhar・Bučar (2012) の研究でも確認されている。

以上の切削力の経時変化と切屑の形態の検討から、ピークを示した切削力と先割れの発生が連動していることがわかった。先割れは、逆目切削の場合、母材側に進展し、仕上面の一部が掘り取られてしまい、「逆目ばれ」と呼ばれる加工欠点が生じることがある。このように、切削力のピークは仕上面性状を検討する上でも重要なデータであるといえる。そこで、切削力の最大値に着目して評価することとした。切削中の主分力の最大値を $F_{x,max}$ とした。同じ切削角と切込量の組合せでの切削の繰り返し4回の $F_{x,max}$ の平均値を $\overline{F_{x,max}}$ とし、樹種間で比較した。一方、背分力については、同一条件下であっても4回の繰り返しの中で正の方向に大きい場合と負の方向に大きい場合の両方が確認された場合があった。その場合、繰り返し4回の平均値を計算すると背分力がほとんど発生しなかったようにみえてしまうため、背分力はその絶対値の最大値( $|F_{y,max}|$ )で評価することとした。同一条件下での切削の繰り返し4回の $|F_{y,max}|$ の平均値を $\overline{|F_{y,max}|}$ とした。

各樹種を縦切削したときの $\overline{|F_{y,max}|}$ と切込量および切削角の関係をFig. 3に示す。上2段が心材、下2段が辺材の結果である。全ての樹種において、切削角や切込量の増加とともに主分力は増加した。容積密度数の比較的大きいユーカリMが他の樹種と比べて主分力が大きかった。一方、スギと比較的容積密度数の近いユリノキ、コウヨウザン、センダンはスギと同程度の主分力となった。このように、容積密度数の大きい樹種ほど主分力が大きい傾向があった。この傾向は、杉山(1980)の研究でも確認されている。一方、ユーカリRは、ユーカリMと比べて容積密度数が大きいのに関わらず主分力は小さかった。同じユーカリでもユーカリRの方が小さい切削力で加工でき、加工しやすいと考えられた。全ての樹種において、辺材と心材で切削力の大きさはほとんど変わらなかった。これは、どの樹種も辺材と心材で容積密度数がほとんど変わらないためと考えられた。主分力は、切込量0.5 mmかつ切削角22°の条件では、容積密度数によら



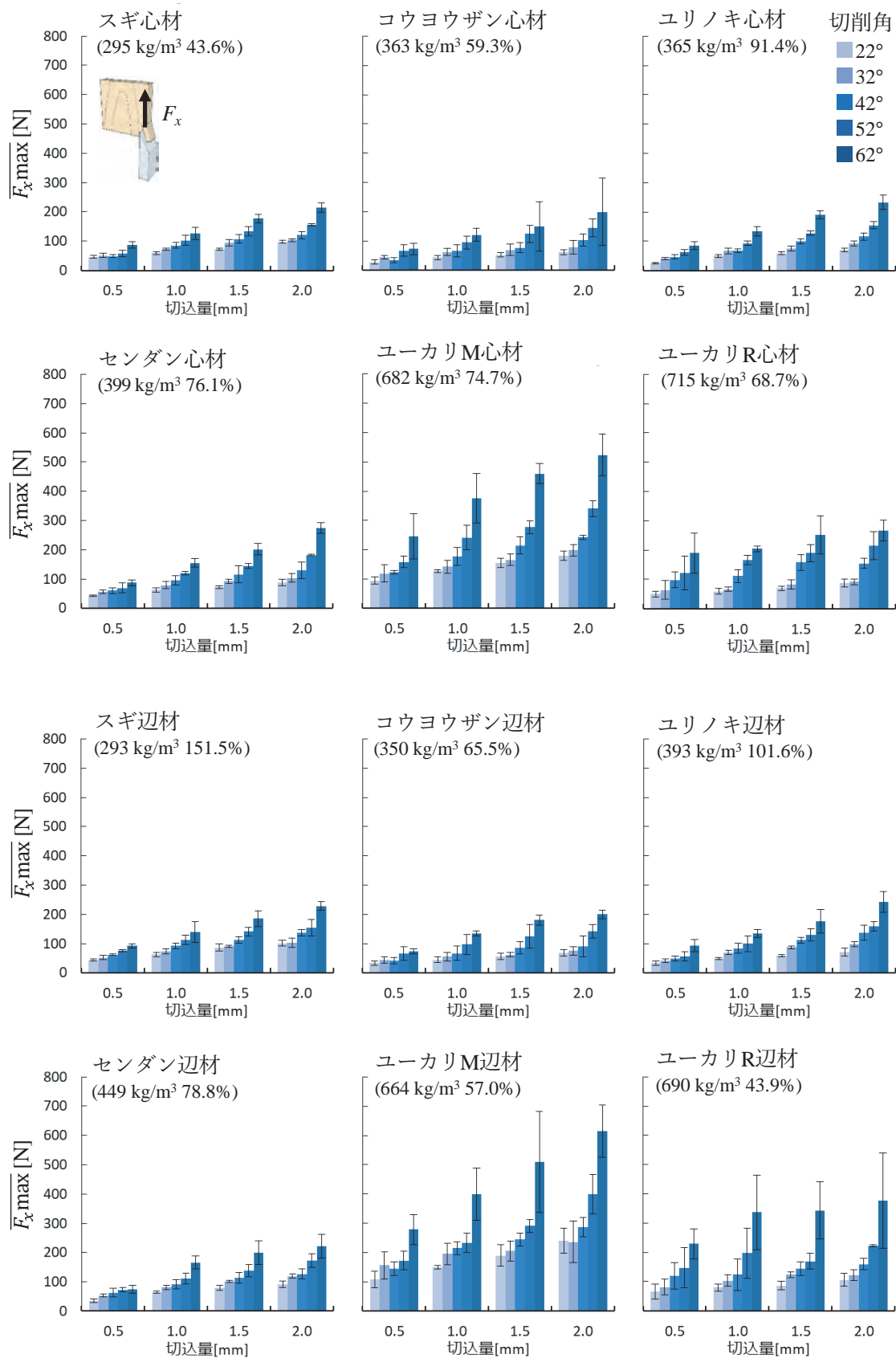


Fig. 3. 縦切削における主分力と切削角および切込量の関係

上2段が心材、下2段が辺材の結果を示す。エラーバーは標準偏差を示す。樹種の下括弧内の数値は被削材の容積密度数と含水率の平均値を表す。

ず 110 N 以下となった。容積密度数の大きい早生樹種でも、小さい切削角や切込量を設定することで容積密度数の小さい樹種と同等の小さな切削力で切削できると考えられた。

縦切削時の  $|F_y|_{\max}$  と切込量および切削角の関係を Fig. 4 に示す。いずれの樹種においても、主分力と比べて背分力は小さかった。背分力は切込量が大きいほど増加する傾向がみられたが、切削角との明確な関係は認められなかった。背分力も主分力と同様、容積密度数の大きい樹種ほど大きい傾向があった。特に、ユーカリ 2 樹種の背分力の大きさは顕著で、切込量が最低の 0.5 mm の条件でも、ユーカリ以外の樹種では 20 N 程度であったが、ユーカリ 2 樹種の場合は 40 ~ 80 N もあった。また、ユーカリの標準偏差はほかの樹種と比べて大きかった。ユーカリ属の中には旋回木理のものがあり (Thinley et al. 2005)、本研究で用いたユーカリ 2 樹種についても木理が通直でなかったことで、切削方向に対する繊維方向の傾き (繊維傾斜角) が被削材ごとに一定でなかった。その結果、先割れの進展方向が変動し、同じ切込量を設定したとしても、切屑の厚さが一定とならなかったことが標準偏差の大きい原因として考えられた。このことから、本研究で用いたユーカリ 2 樹種のように、木理が通直でない場合は同一切削条件を採用しても再現性の高い切削は難しいと考えられた。心材と辺材で背分力の傾向の違いは認められなかった。

#### 横切削における切削力

センダンの心材を切削角 32°、切込量 2.0 mm の条件で横切削したときの切削力の時間変化の一例を Fig. 5 に示す。ベニヤレースによる単板切削では、裏割れと呼ばれる切れ刃から切屑に向かって侵入する割れが発生することが知られている。単板切削を模した今回の横切削でも、

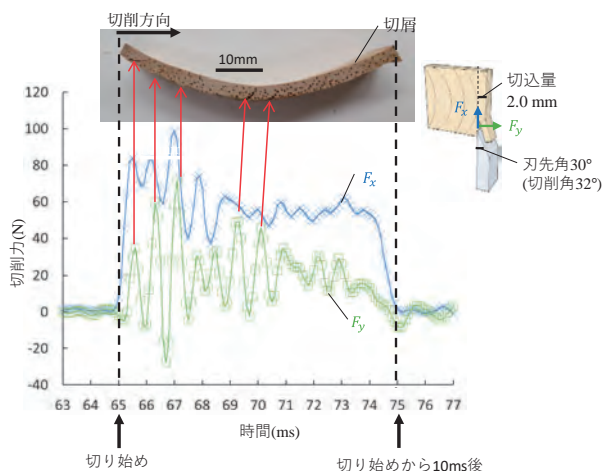


Fig. 5. センダン心材の横切削時における切削力の一例  
青線が主分力、緑線が背分力を示す。写真はこの切削試験で得られた切屑を示す。切削角は 32°、切込量は 2.0 mm。

赤矢印で示したように、切屑の下側から上に向かって裏割れが 5 か所認められた。縦切削時の先割れの発生直前に切削力のピークが検出されたときと同様、この 5 か所の裏割れの発生時に切削力のピーク、特に背分力の顕著なピークが認められた。横切削における切削力のピークと裏割れの発生の対応は、Takano and Fujimoto ら (1999) の研究でも確認されている。70 ms 以降裏割れは認められなかったが、上述の 5 か所のピークよりも小さな背分力のピークが認められた。この区間では、写真では確認できない微視的な裏割れが発生している可能性がある。大きな切削力の作用と裏割れの発生が深く関係していると考えられたため、横切削も縦切削と同様、切削力の最大値 ( $F_{x\max}$  と  $|F_y|_{\max}$ ) で評価することとした。

各樹種を横切削したときの  $F_{x\max}$  と切込量および切削角の関係を Fig. 6 に示す。縦切削時と同様、どの樹種も切削角や切込量の増加とともに主分力は増加した。スギやセンダン、ユーカリ M で主分力の大きさが顕著であった一方で、コウヨウザンやユリノキが比較的主分力が小さかった。このように、縦切削とは異なり、容積密度数との明確な関係は認められなかった。一方で、切込量 0.5 mm かつ切削角 22° の条件では、どの樹種も主分力は 50 N 程度となった。切削角や切込量を小さく設定することで、樹種に関係なく小さい切削力で切削が可能になると考えられた。どの樹種も辺材と心材間で主分力に違いはほとんどなかった。

横切削における  $|F_y|_{\max}$  と切込量および切削角の関係を Fig. 7 に示す。スギ以外の樹種で、切込量が増加するほど背分力は増加する傾向があったが、切削角や容積密度数との明確な関係は認められなかった。どの樹種も辺材と心材間で背分力に違いはほとんどなかった。主分力と同様、コウヨウザンやユリノキを切削した時の背分力が比較的小さかった。これらの樹種では裏割れを発生させずに切削できると考えられた。ただし、これらの容積密度数の小さい樹種では、小さい切削力でも簡単に割れが生じてしまう場合もありえるため、裏割れとの関係はさらに検討する必要がある。

#### 重回帰分析

切削角や切込量が切削力に与える影響について樹種間で定量的に比較検討するため、切削角と切込量を説明変数とする 1 次式で切削力 ( $F_{x\max}$ ,  $|F_y|_{\max}$ ) を表現した場合の切片  $a$  と偏回帰係数  $b$ ,  $c$  を最小 2 乗法によって樹種ごとに求めた。ただし、 $b$  は切削角、 $c$  は切込量の係数である。なお、辺材と心材を区別せずに回帰分析を行った。

主分力の重回帰分析の結果を Table 1 に示す。なお、 $R^2$  は自由度調整済み決定係数である。縦切削について、切削角の係数  $b$  に注目すると、ユーカリ R とユーカリ M の係数が比較的大きかった。切込量の係数  $c$  に着目すると、ユーカリ M 以外の樹種は 40 ~ 50 程度であるのに対し、ユーカリ M は 100 以上であった。ユーカリは切削角や切

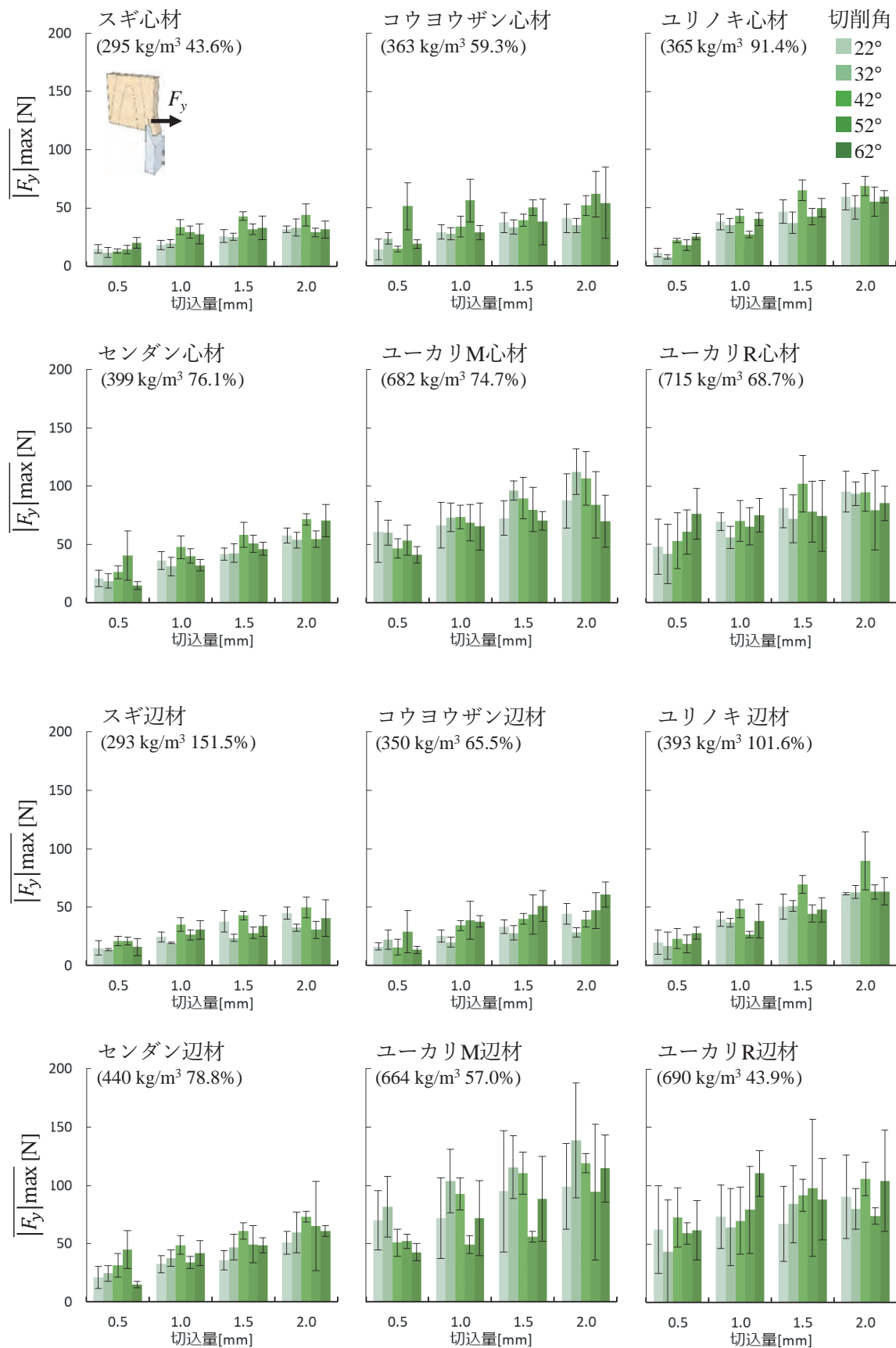


Fig. 4. 縦切削における背分力と切削角および切込量の関係

上2段が心材、下2段が辺材の結果を示す。エラーバーは標準偏差を示す。樹種の下に括弧内の数値は被削材の容積密度数と含水率の平均値を表す。なお、ユーカリR辺材の切削角32°、切込量0.5 mmのエラーバーの下端は-0.98である。

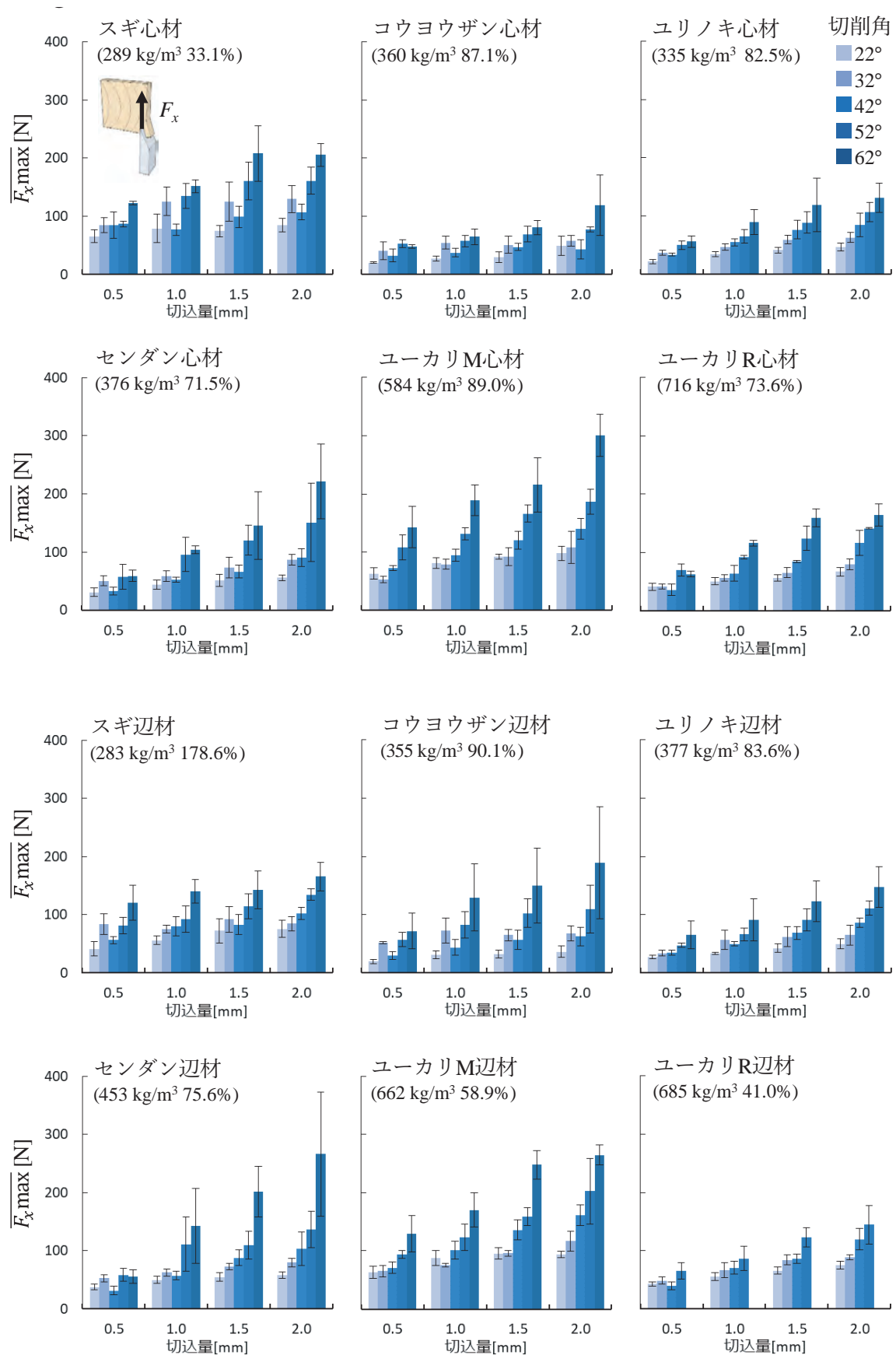


Fig. 6. 横切削における主分力と切削角および切込量の関係

上2段が心材、下2段が辺材の結果を示す。エラーバーは標準偏差を示す。樹種の下括弧内の数値は被削材の容積密度数と含水率の平均値を表す。

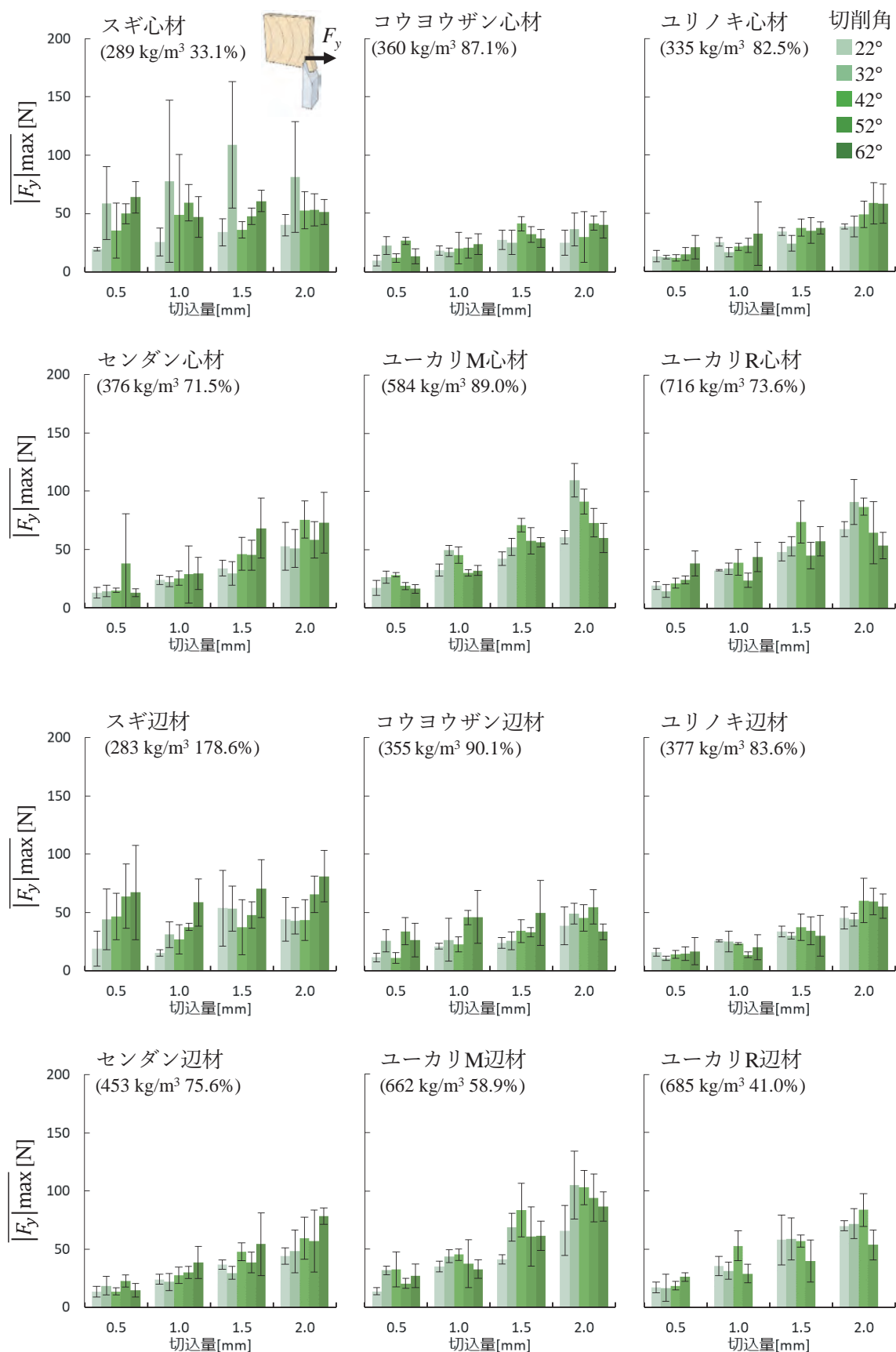


Fig. 7. 横切削における背分力と切削角および切込量の関係

上2段が心材、下2段が辺材の結果を示す。エラーバーは標準偏差を示す。樹種の下括弧内の数値は被削材の容積密度と含水率の平均値を表す。なお、スギ心材の切削角 42°、切込量 1.0 mm 及びセンダン心材の切削角 52°、切込量 0.5 mm のエラーバーの下端はそれぞれ -2.71 と -5.34 である。



Table 1. 主分力  $F_x$  max の回帰式の係数と切片

樹種	切削方向	$a$	$b$	$c$	$R^2$
スギ	縦	-49.81	2.07	53.52	0.83
コウヨウザン	縦	-66.38	2.33	43.41	0.64
ユリノキ	縦	-80.88	2.57	55.80	0.82
センダン	縦	-68.28	2.51	58.40	0.79
ユーカリ M	縦	-153.89	6.28	108.89	0.70
ユーカリ R	縦	-105.19	4.85	41.65	0.63
スギ	横	-12.23*	1.98	28.61	0.58
コウヨウザン	横	-40.01	1.71	24.84	0.43
ユリノキ	横	-40.57	1.57	32.95	0.73
センダン	横	-78.15	2.41	51.07	0.57
ユーカリ M	横	-69.61	3.07	54.30	0.77
ユーカリ R	横	-36.68	1.70	41.22	0.80

$a$ : 切片  $b$ : 切削角の係数  $c$ : 切込量の係数  $R^2$ : 決定係数

\*  $p > 0.05$

込量によって主分力が急激に変化すると考えられるため、特に慎重に切削条件を設定する必要があると考えられた。横切削では、センダンやユーカリ M の係数  $b$  と  $c$  が比較的大きく、これらの樹種の主分力は切削角や切込量に大きく依存して変化することがわかった。

背分力の重回帰分析の結果を Table 2 に示す。切削方向によらず、切削角の係数  $b$  はどの樹種も 1 以下で主分力の場合と比べて小さかった。背分力と切削角の関係は Fig. 4 では判断できなかったが、重回帰分析により切削角の影響は小さいことが確認できた。縦切削時のユーカリやコウヨウザン、横切削時のスギやコウヨウザンなどの  $R^2$  が特に小さかった。また、コウヨウザンやユリノキなど統計的に有意でない係数や切片が存在している樹種があった。これらの樹種では、切削力が切込量や切削角などの切削条件だけでなく、繊維傾斜角や年輪接触角などの木材側の条件に強く影響を受けている可能性があり、切削条件の調整による切削力の制御が難しいと考えられた。

### 結言

国産早生樹種の被削性を明らかにするために、国産早生樹 5 樹種とスギの心材と辺材を対象に、切削角と切込量を因子として 2 次元縦切削と横切削を行い、そのときの主分力と背分力を測定した。対象とした国産早生樹種は、コウヨウザン、センダン、ユーカリ 2 樹種、ユリノキであった。切削角は 22°, 32°, 42°, 52°, 62° の 5 条件とし、切込量は 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm の 4 条件とした。

縦切削では、どの早生樹種も切削角や切込量の増加とともに主分力は増加した。スギと同程度の容積密度数の樹種はスギと同程度の主分力となった。背分力はどの早生樹種も切込量の増加とともに増加したが、切削角との明確な関係は認められなかった。また、容積密度数の大きい樹種ほど主分力と背分力は大きかった。しかし、容積密度数の大きい早生樹種でも、小さい切削角や切込量を設定することで低い容積密度数の早生樹種と同程度の

Table 2. 背分力  $|F_y|$  max の回帰式の係数と切片

樹種	切削方向	$a$	$b$	$c$	$R^2$
スギ	縦	6.88	0.09	13.67	0.48
コウヨウザン	縦	0.21*	0.36	15.96	0.39
ユリノキ	縦	3.34*	0.06*	29.25	0.68
センダン	縦	7.10*	0.16	23.54	0.55
ユーカリ M	縦	60.40	-0.45	30.74	0.33
ユーカリ R	縦	37.17	0.29	21.43	0.19
スギ	横	18.09	0.53	7.68	0.08
コウヨウザン	横	0.35*	0.29	13.30	0.32
ユリノキ	横	-6.42	0.16	23.92	0.64
センダン	横	-15.68	0.42	28.51	0.57
ユーカリ M	横	-1.76*	0.04*	41.22	0.68
ユーカリ R	横	3.43*	-0.01*	33.97	0.65

$a$ : 切片  $b$ : 切削角の係数  $c$ : 切込量の係数  $R^2$ : 決定係数

\*  $p > 0.05$

小さい切削力で切削ができることが明らかとなった。

横切削では、主分力は切削角や切込量の増加とともに増加した。横切削時の背分力は、切込量が増加するほど増加したが、切削角との明確な関係は認められなかった。ユリノキやコウヨウザンなどはスギと同程度の容積密度数であったが、主分力や背分力はスギと比較して小さかった。このように、横切削時の切削力と容積密度数との明確な関係は認められなかった。一方で、樹種や切削方向によらず、辺心材で切削力の大きさはほとんど変わらなかった。

本研究で明らかとなった早生樹種の 2 次元切削時の切削力と切削角や切込量、容積密度数の関係性は、早生樹種を切削加工時の条件決定の際に有用なデータとなりえる。容積密度数の大きい早生樹ほど切削力が大きくなりやすいことが判明したが、そのような樹種でも小さい切削角や切込量を採用することで、切削力の増加を抑えることができた。そのような切削条件では、大きな先割れに起因する逆目ばれや裏割れなどの加工欠点の発生を抑制することができると考えられた。一方で、容積密度数の小さい早生樹においては、小さい切削力でも簡単に割れが生じることが考えられ、逆目ばれや裏割れとの関連については詳細な検討が必要である。

### 謝辞

本研究の一部は (国研) 森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト (課題番号 201905) の研究成果である。供試材を提供いただいた東京大学樹芸研究所と静岡県農林技術研究所森林・林業研究センターに謝意を表する。

### 引用文献

- 番匠谷 薫・奥村 正悟・服部 順昭・村瀬 安英編 (2007) 木材科学講座 6 切削加工第 2 版・海青社, 37-40pp.  
独立行政法人森林総合研究所監修 (2004) 改訂 4 版 木材工業ハンドブック・丸善, 63-64, 133-138, 273, 279,

- 334pp.
- Franz, N. C. (1955) An analysis of chip formation in wood machining. *Forest Prod. J.*, 5 (5), 332–336.
- Franz, N. C. (1958) *Analysis of the wood-cutting process*. Dissertation, University of Michigan.
- 藤本 清彦 (2018) 実験講座 (58) 木材の被削性評価のポイント. *木材工業*, 73 (5), 208–211.
- 広橋 亜希・児嶋 美穂・吉田 正人・山本 浩之・渡邊 良広・井上 広喜・鴨田 重裕 (2012) 国産早生樹ユーカリ 6 樹種の材質特性. *木材学会誌*, 58 (6), 339–346.
- Huang, Y. (1994) Cutting force components in orthogonal cutting parallel to the grain (90-0) I. Effects of rake angles. *Mokuzai Gakkaishi*, 40 (10), 1134–1140.
- Inoue, H. and 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.
- 木下 直治 (1960) 木材の精密加工法の研究. *理化学研究所報告*, 36(5), 486–557.
- 松村 順司・井上 真由美・横尾 謙一郎・小田 一幸 (2006) 高炭素固定能を有する国産早生樹の育成と利用 (第 1 報) センダン (*Melia azedarach*) の可能性. *木材学会誌*, 52 (2), 77–82.
- 松村 順司・田上 美里・緒方 利恵・玉泉 幸一郎・牟田 信次・上脇 憲治・長谷川 益己・小田 一幸 (2007) 高炭素固定能を有する国産早生樹の育成と利用 (第 2 報) チャンチンモドキ (*Choerospondias axillaris*) の可能性. *木材学会誌*, 53 (3), 127–133.
- 松村 ゆかり・伊神 裕司・児嶋 美穂・鴨田 重裕 (2020) 国産ユーカリの鋸断特性と製材品品質. *木材工業*, 75 (4), 156–161.
- Merhar, M. and 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.
- 中村 源一・青山 経雄 (1957) 木材の削り抵抗について. *林業試験場研究報告*, 93, 69–88.
- Stewart, H. A. (1971) Chip formation when orthogonally cutting wood against the grain. *Wood Sci.*, 3 (4), 193–203.
- Stewart, H. A. (1979) Analysis of orthogonal wood cutting across the grain. *Wood Sci.*, 12 (1), 38–45.
- 杉山 滋 (1980) 木材切削における工具切れ刃面および裏刃すくい面に加わる切削抵抗に及ぼす気乾容積重の影響. *木材学会誌*, 26 (12), 783–789.
- Takano, T. and Fujimoto, K. (1999) Development of surface defects in softwood veneer peeling. *Proceedings of 14th International wood machining seminar*, 417–424.
- Thinley, C., Palmer, G., Vanclay, J. K., and Henson, M. (2005) Spiral and interlocking grain in *Eucalyptus dunnii*. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 63, 372–379.
- Triboulot, P., Asano, I., and Ohta, M. (1983) An application of fracture mechanics to the wood-cutting process. *Mokuzai Gakkaishi*, 29 (2), 111–117.
- 涌嶋 智・渡辺 靖崇 (2017) コウヨウザンの材質. *森林遺伝育種*, 6 (4), 148–154.
- 米木 剛史・小田 一幸・松村 順司・長谷川益己 (2005) 国産ユーカリの木材性質. *九州森林研究*, 58, 91–94.

## Machining properties of fast-growing tree in Japan —Cutting force in orthogonal cutting—

Yosuke MATSUDA<sup>1)\*</sup>, Yukari MATSUMURA<sup>1)</sup>, Kiyohiko FUJIMOTO<sup>1)</sup> and Yuji IKAMI<sup>1)</sup>

### Abstract

In order to clarify the machining properties of fast-growing trees in Japan, the cutting force were measured during the orthogonal cuttings of the heartwood and sapwood of sugi (*Cryptomeria japonica*) and five fast-growing tree species, namely koyozan (*Cunninghamia lanceolata*), sendan (*Melia azedarach*), two species of eucalyptus (*Eucalyptus maidenii* and *robusta*), and yurinoki (*Liriodendron tulipifera*). The cutting angles and depth of cut were 22°, 32°, 42°, 52°, and 62° and 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 mm, respectively. The quarter-sawn surface was finished by cutting along the grain, whereas the flat-sawn surface was finished by cutting across the grain. When cutting was done along the grain, the parallel cutting force increased with increasing cutting angle and/or depth of cut for all species tested. The parallel cutting force increased with the basic density of the specimen. The cutting forces of yurinoki, koyozan, and sendan, whose basic densities were close to that of sugi, were similar to that of sugi. The normal cutting force increased with increasing depth of cut and/or basic density, however the relationship with the cutting angle was unclear. When cutting was done across the grain, the parallel cutting force increased with increasing cutting angle and/or the depth of cut, but the relationship with the basic density was unclear. The normal cutting force increased with increasing depth of cut, but no dependence on the cutting angle or basic density was observed. No difference was found in the cutting force between the heartwood and sapwood regardless of the species or cutting direction. The difference in the cutting force between the species became smaller with decreasing cutting angle and depth of cut. Thus, we found that fast-growing trees could be cut with a small cutting force by setting a small cutting angle and depth of cut, even if their basic densities were high.

**Key words :** Fast-growing tree, Orthogonal cutting, Cutting force

---

Received 24 September 2021, Accepted 24 January 2022

1) Department of Wood Properties and Processing, Forestry and Forest Products Research Institute(FFPRI)

\* Department of Wood Properties and Processing, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; E-mail : yosukem@ffpri.affrc.go.jp