

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22580184

研究課題名（和文）木材の低速二次元縦切削における Type II 切屑の生成機構の解明

研究課題名（英文）Mechanism of Type II chip formation in slow-speed orthogonal cutting of wood along the grain

研究代表者

奥村 正悟 (OKUMURA SHOGO)

京都大学・大学院農学研究科・教授

研究者番号：40109046

研究成果の概要（和文）：すくい面の傾き（切削角）が 30～90° の工具を用いて、0.05～0.5 mm の切込量（切屑の厚さ）で木材（スギ、ヒノキ、マカンバ、ホウノキ）を繊維方向に 10 mm/s の速度で切削し、各条件における切屑生成過程を高速度で拡大撮影した動画、生成した切屑の高分解能 X 線 CT 像などに基づいて、Type II と呼ばれる切削型が生起する条件、わが国で「縮み型」と一括されている Type II と III の境界を明らかにするとともに、動画から画像相関法によって切削応力（ひずみ）を測定する手法について検討した。

研究成果の概要（英文）：Workpieces of sugi, hinoki, makanba and honoki were orthogonally cut along the grain using tools with cutting angles of 30-90 degrees at undeformed chip thicknesses of 0.05-0.5 mm and a cutting speed of 10 mm/s. Movies of chip formation recorded with a high-speed video microscope and CT images of chips with a high-resolution X-ray scanner clearly showed the combinations of cutting angle and chip thickness for Type II chip formation and the boundaries between Types II and III chips, which are together called CHIJIMI-GATA in Japan. The application of digital image correlation to movies was also examined to measure cutting strains.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	400,000	120,000	520,000
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・木質科学

キーワード：木材・切削型・Type II・高速度カメラ・高分解能 X 線 CT・画像相関

1. 研究開始当初の背景

(1) 切削は、工具（刃物）によって母材の一部を切屑として分離し、それを変形・破壊・排除する過程であるが、切削機構などを検討する場合は、切屑の分離・変形・破壊の状態に基づいてそれらをパターン化し、切削型（切屑型）として整理するのが普通である。木材切削では、二次元縦切削における切削型として、わが国では青山（1955）の知見など

に基づき、一般に流れ型（Type 0）、折れ型（Type I）、縮み型（Type II または III）に分類している。ここで、Type 0～III の記号は Franz (1958) および McKenzie (1972) が提唱したもので、流れ型と折れ型についてはそれぞれ Type I と II が対応する。一方、縮み型は Type II と III を包含するものと一般に理解されているが、切れ刃から伸びた平面での連続的な剪断破壊と良好な仕上面が特徴である

Type II と、切れ刃前方での間欠的な剪断破壊と仕上面の毛羽立ちを伴う Type III を縮み型として一まとめに扱うことには問題がある。

(2) Type II は金属切削における連続剪断モデルに基づいて提唱されたものであるが、木材の縦切削では剪断応力によって細胞壁が細胞の長軸に対して垂直に細かいピッチで折りたたまれるように変形し、その結果として切屑の長さが短くなる。また、その変形が生じる際にかなりの発熱を伴うことが研究代表者らによって明らかにされている。このように、Type II 切屑は木材の機械加工で良好な仕上面を得るために不可欠の切削型であり、きわめて特徴的な切屑の変形・破壊形態をとるにもかかわらず、この切屑の生成条件、生成機構についてはほとんど検討が進んでおらず、とくに我が国における切削型の用語にも若干の混乱をきたす結果になっている。

2. 研究の目的

本研究は、木材の機械加工において主要な位置を占める切削型である Type II を取り上げ、その生成機構を解明することを目的とする。そのため、比重の異なる数樹種の木材について、切削角と切込量を因子として低速二次元縦切削を行い、切屑生成過程を高速ビデオマイクロスコープで観察するとともに切削抵抗を同時記録し、さらに生成した切屑の高分解能 X 線 CT 装置などによる詳細な観察、マイクロスコープの画像に画像相関法を適用して切れ刃周辺の被削材におけるひずみ計測などを行う。それらの結果に基づき、(1) Type II 切削 (切屑) を、既往の研究成果も踏まえて明確に再定義した上で、(2) Type II 切屑が生成される条件 (切削角と切込量) を樹種 (比重) ごとに明らかにし、さらに (3) 実際の機械加工で Type II の切削によって良好な仕上面を生成するための指針を提示する。

3. 研究の方法

(1) 低速二次元縦切削と高速ビデオマイクロスコープによる撮影

① 被削材

被削材は、針葉樹 (ヒノキ、スギ) と広葉樹 (マカンバ、ホウノキ) から作製した幅 5 mm (板目方向)、長さ 50 mm (繊維方向) の試片 (気乾材の柁目面縦切削用試片) を用いた。

② 切削工具

切削工具は、切れ刃の摩耗の影響を極力避けるため、CrN で逃げ面をコ

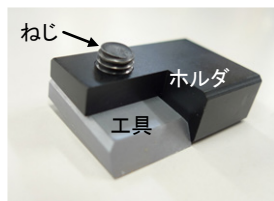
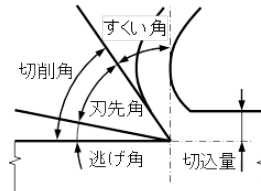


図 1

表 1 切削工具

工 具	1	2	3	4	5	6	7
逃げ角	5						
刃先角	25	35	45	55	65	75	85
すくい角	60	50	40	30	20	10	0
切削角	30	40	50	60	70	80	90

(°)



ーティングした高速度工具鋼製とし、種々の切削角で切削できるようにするため、ホルダにねじ止めして用いる替刃式 (図 1) の 7 種を用意した (表 1)。

③ 切削実験

金属加工用小型フライス盤のオーバームに二分力工具動力計を介して工具を取り付け、テーブルに装着した自動送り装置にバイスによって被削材を固定した。被削材は自動送り装置によって 10 mm/s で移動させ、二次元縦切削した。切込量 (表 1 の図) は 0.05 ~ 0.5 mm とし、同一条件での切削は 3 回繰り返した。

④ 高速度ビデオマイクロスコープによる撮影

工具の端面 (切れ刃に垂直な面) を被削材の幅方向の片側端面にほぼ一致させて切削を行い、そのときの切れ刃近傍の領域 (幅 3.8 mm × 高さ 2.6 mm) を切れ刃に平行方向から高速度ビデオマイクロスコープ (キーエンス VW-6000) を用いて撮影速度 250 fps、シャッタ速度 1/500 s で撮影した。その際、工具動力計の出力はデータロガーで同時記録した。

(2) 高分解能 X 線 CT 装置による切屑の計測と解析

高分解能 X 線 CT 装置 (島津 SMX-60CT-SV3、焦点サイズ 0.4 μm) によって切屑の断層像を得、低倍率像から切屑の長さ方向の縮み率 (切屑長さの被削材長さに対する比) を計測するとともに、高倍率像で切屑における細胞壁の変形・破壊の状態を詳細に観察した。とくに、Type II 切削の特徴である細胞壁の細かい褶曲の状態、切屑型の境界領域にある切屑の縮み率と変形・破壊状態に注目した。

(3) 画像相関法による切れ刃周辺のひずみ計測

① 撮影条件

マイクロスコープの画像を解析の対象にするための撮影条件を検討し、切削速度を 5 mm/s、シャッタ速度を 1/1000 s、撮影速度を 250 fps とし、(1) の③と同様に撮影した。なお、マイクロスコープのレンズ収差がひずみ計測に及ぼす影響を排除するため、レンズは

自動送り装置に固定して被削材と一緒に移動させた。

② 切削条件

被削材としてヒノキを用い、Type 0～Ⅲの切屑を生成するため表 2 の条件で切削した。なお、Control では切屑を生成しないように被削材移動のみを行った。

表 2 ひずみ計測時の切削条件

切削型	切削角 (°)	切込量 (mm)
Type 0	30	0.1
Type I	50	0.3
Type II	60	0.1
Type III	90	0.5
Control	—	—

③ ひずみ測定

カラー動画を 256 階調のグレースケールに変換し、連続した画像ファイルから変形前と変形後の画像 (640×480 pixel) を抽出した。変形前画像上で 15 pixel 間隔で 22×11 個の注目点 (約 2×1 mm² に相当) を設定し、各注目点を中心とする 31×31 pixel の領域 (サブセット) の濃淡値に対して最も高い相関係数を示す濃淡値をもつサブセットを変形後画像上で探し、その中心を注目点の移動先とした。その際、精度向上のため、Cubic B-スプライン関数を用いて画素の補間をした。4 個の注目点に囲まれた領域についてひずみ量 (切削方向成分 ε_X 、垂直方向成分 ε_Y 、剪断成分 ε_{XY}) を計算し、カラー画像として可視化した。

4. 研究成果

(1) 各切削条件における切削型の分類

高速度ビデオマイクロスコープで撮影した動画における切屑の分離、変形、破壊の状況、そのときの切削抵抗の安定性、背分力の方向 (正負) (図 2)、高分解能 X 線 CT 装置による切屑の断層像における切屑の縮み率、切屑内の細胞壁の変形などの計測・観察 (図 3) に基づいて、切削角と切込量の各組合せにおいて生成される切削型を被削材ごとに決定した (図 4)。図 4 で切削型の二つの記号が重ねて表示されているのは、被削材を 50 mm 切削する間に二つの切削型の特徴が表れ、優越する切削型を決められなかったことを示す。例えば、ヒノキを切削角 70°、切込量 0.2 mm で切削した場合、切屑の細胞壁が細かく折り畳まれる Type II と、平滑な細胞壁と切屑の折損を示す Type I の特徴が認められた (図 3(b))。また、スギのプロットで記号を薄く表示したところは、切削型を判定するための切屑が十分得られなかったことを示す (図 4(b))。

図 4 の結果は、青山 (1955) や Franz (1958)

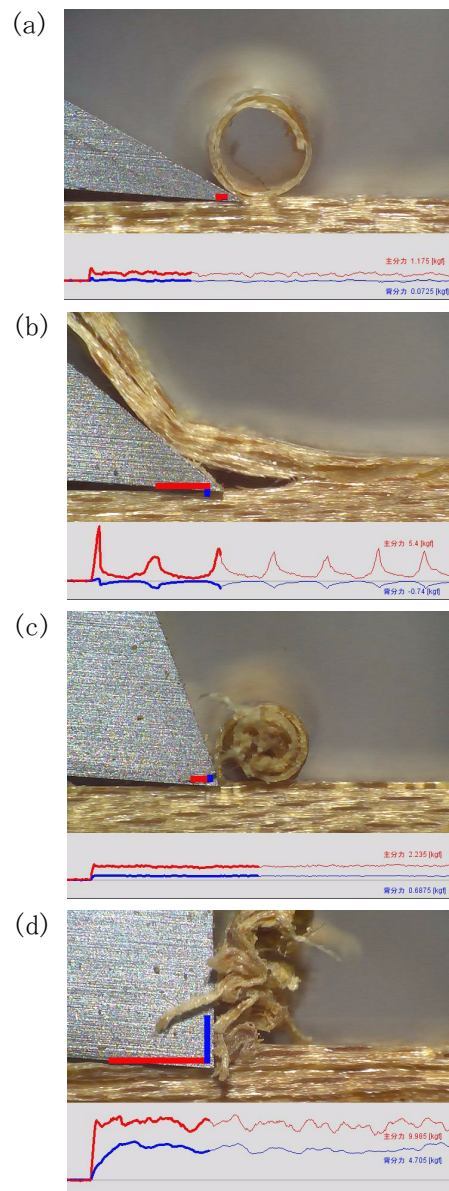


図 2 動画から抽出した画像と切削抵抗波形の例 (被削材はマカンバ)

(a) Type 0 (切削角 30°、切込量 0.05 mm)、(b) Type I (40°、0.30 mm)、(c) Type II (70°、0.05 mm)、(d) Type III (90°、0.20 mm)。

切削抵抗波形は主分力 (赤) と背分力 (青、工具を上方に押し上げる方向が正) の 1.776 s (切削距離で 17.76 mm) 間の変化を示し、太線部の先端 (そのときの値は右端の数値および刃先部の直線で示す) が各画像を抽出した時点に相当。

の知見と基本的には一致している。しかし、スギのみを用い、0.13～0.75 mm の切込量を採用し、Type II と III を区別していない青山の知見とは十分な比較は困難である。また、Type II と III の境界は Franz の結果よりも切削角の小さい側に位置する傾向を示したが、Type 0 と I、Type I と II の境界については、

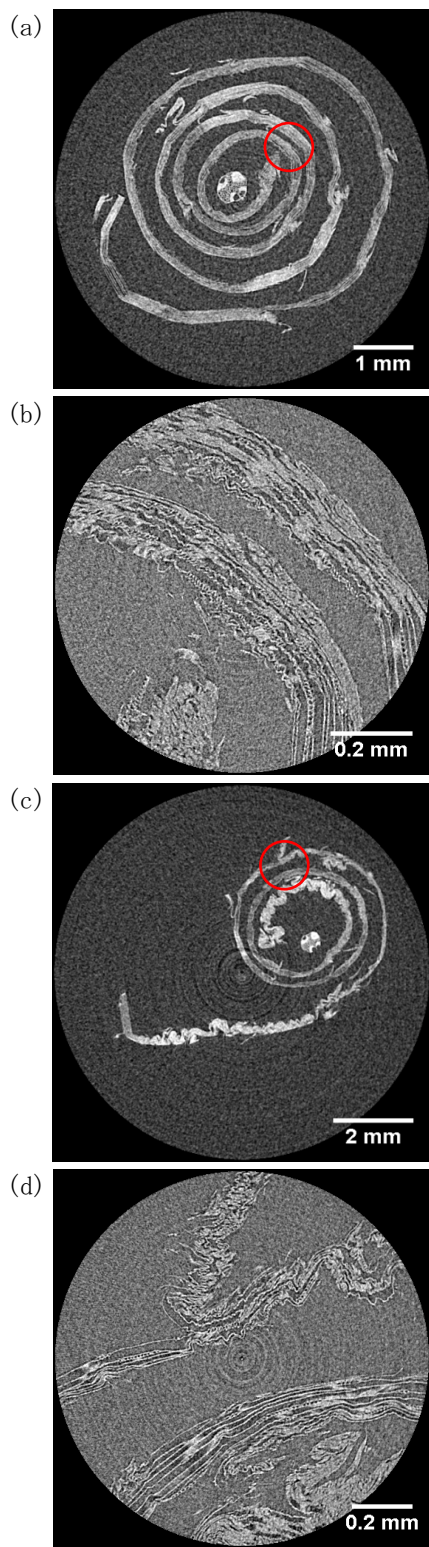


図3 切屑横断面のX線CT像
 (a) Type I と II の移行型 (ヒノキ、70°、0.20 mm)、(b) (a) の赤円部の拡大、(c) Type III (ヒノキ、80°、0.20 mm)、(d) (c) の赤円部の拡大。

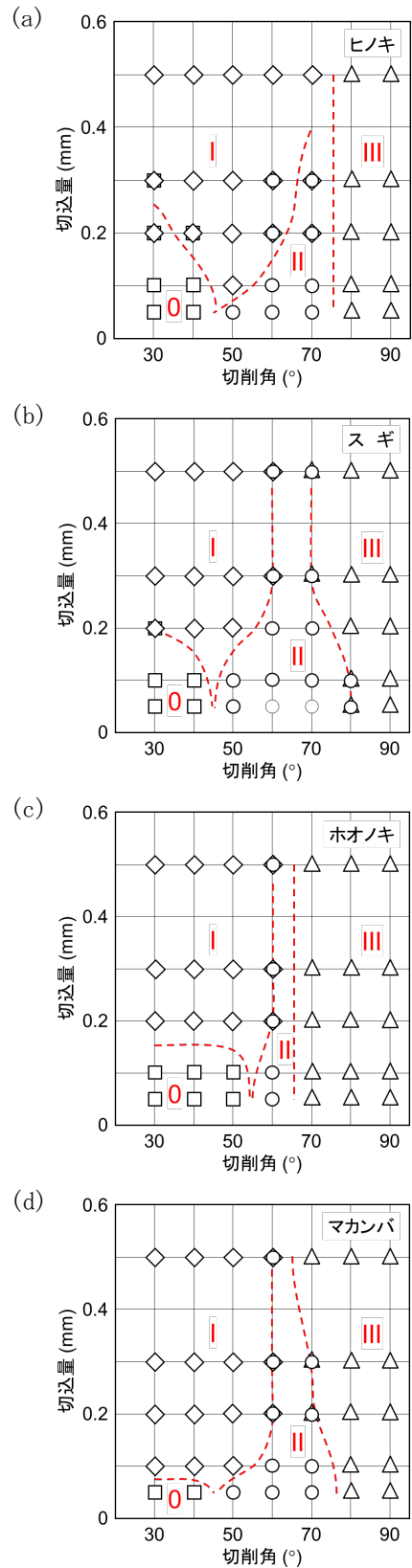


図4 切削条件と切削型の関係
 □ Type 0 ○ Type II
 ◇ Type I △ Type III

Franz が 60°以上の切削角しか採用していないため比較できない。

木材の切削型に関しては古くから研究されているが、複数の樹種を用い、比較的広い切削角と切込量について、しかも切屑の生成過程のみならず切屑内の細胞壁の詳細な観察による明確な根拠に基づいて切削型の類別を行った研究はほとんどない。その点で、本研究の成果(図4)は画期的なものであり、今後の切削機構研究の一つの基準となり得るものとする。とくに、わが国で「縮み型」と一括されてきた Type II と III の境界を、研究者間で再認識するための貴重な資料である。

切削型は、切削機構の解明に資するだけでなく、良好な仕上面を生成するための切削条件の選定、工具の開発にも大いに役立つ。とくに、切込量が 0.1 mm 以下の領域における切削型については、木材の機械加工で主要な役割を果たす回転削りにおいても、仕上面の生成に関係するのは切込量がきわめて小さいときのみであるため、非常に重要である。逆目の場合も含めて、良好な仕上面のためには Type II の切削型が望ましいが、図4は Type II が生起する範囲をかなり明確に示しており、今後の工具開発の貴重な指針になるはずである。

なお、図2に示した切屑生成過程の動画は、研究代表者の講義資料として大学から正式に公開されており、切削加工に携わる関係者からきわめて有用な資料としての評価を得ている。

(2) 切れ刃周辺の被削材におけるひずみ分布

図5は、Type 0～IIIの切屑生成および切屑生成なし(Control)の進行に伴う、被削材の約 $2 \times 1 \text{ mm}^2$ の領域におけるひずみの消長を示したものである。ここで、各画像の右下にある数字は、各切削型の動画の各フレームに付した一連の番号である。

図5から、Type 0では被削材に顕著なひずみはほとんど生じていないこと、Type Iでは先割れの基部で曲げ破壊が生じるときに直下の被削材でひずみが大きくなる傾向があること、Type IIでは被削材のひずみはそれほど大きくないが、切れ刃通過後の仕上面直下にひずみが残存する傾向があること、Type IIIでは切れ刃の前方にある被削材に大きなひずみ(とくに垂直方向の圧縮ひずみ)が、仕上面のかなり下方まで発生し、それが切れ刃通過後も残存することなどが確認できる。

このように、本研究では画像相関法で切削時のひずみを計測できることを内外で初めて明らかにした。これは、これまで計測が難しかった切削ひずみを、比較的容易に計測できることを意味し、木材の切削機構の解明が

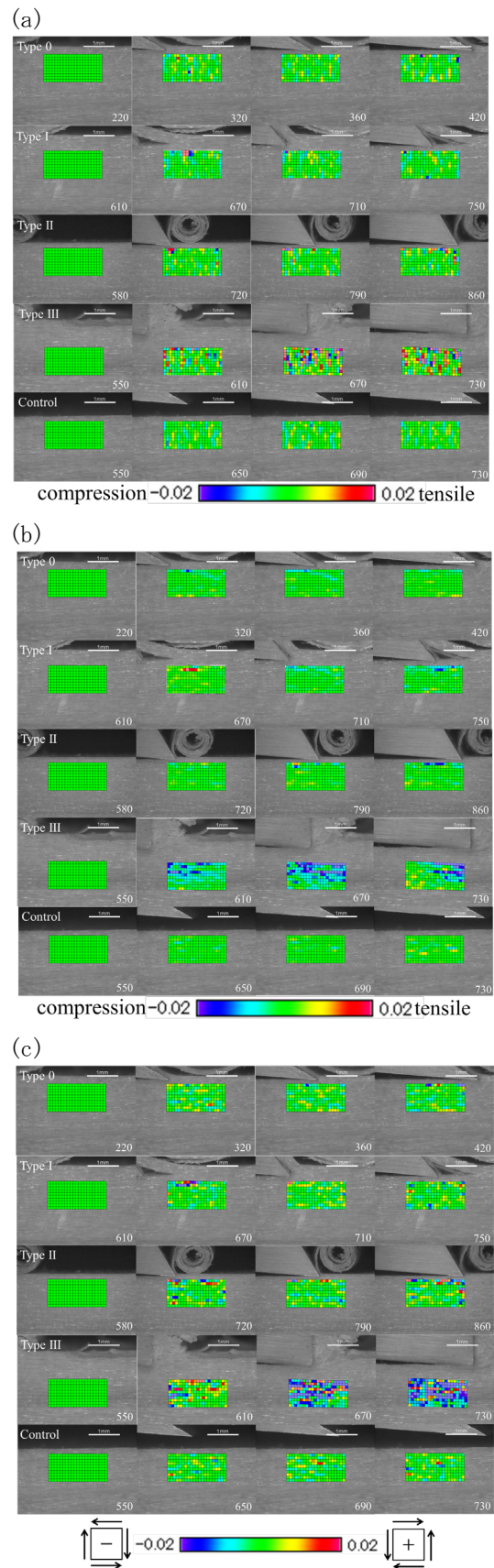


図5 Type 0～IIIおよびControlにおけるひずみの(a)切削方向成分 (ϵ_x)、(b)垂直方向成分 (ϵ_y)、(c)剪断成分 (ϵ_{xy}) の分布

飛躍的に進むことを約束するものである。

ただし、図 5(a)~(c)の Control に見られるように、被削材には全く力が付加されていない状態でもかなり大きなひずみが計測されている。これは、ランダムな分布をしていること、垂直方向成分にはそれほど現れていないことなどから、レンズの送り方向の振動に起因するものと考えられる。これは、自動送り装置の駆動機構（ステッピングモータ）に深く関係している。したがって、今後はレンズの振動をできるだけ抑制した切削系を構築するとともに、最適なデータ処理を採用することなどにより、ひずみの計測精度をさらに向上させる必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 4 件)

- ① Yosuke Matsuda, Yuko Fujiwara, Koji Murata, Shogo Okumura: Measurement of strain during slow-speed orthogonal cutting of wood using a digital image correlation method. 21st International Wood Machining Seminar, Tsukuba, Japan, August 5-7, 2013
- ② 松田陽介、藤原裕子、村田功二、奥村正悟: 低速二次元切削における切削ひずみの画像相関法による測定. 第 63 回日本木材学会大会, 岩手大学, 2013 年 3 月 29 日
- ③ 岩井朋奈、藤原裕子、奥村正悟: 木材の低速二次元縦切削における切削型「縮み型」とその生成条件について. 第 62 回日本木材学会大会, 2012 年 3 月 16 日
- ④ 村田功二、藤原裕子、岩井朋奈、奥村正悟: 画像相関法による切削応力解析の試み. 第 62 回日本木材学会大会, 北海道大学, 2012 年 3 月 15 日

[その他]

京都大学オープンコースウェア (農学部, 木材加工学 I (奥村正悟), 2012 年度)

<http://ocw.kyoto-u.ac.jp/ja/faculty-of-agriculture-jp/6767000/video>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥村 正悟 (OKUMURA SHOGO)
京都大学・大学院農学研究科・教授
研究者番号: 40109046

(2) 研究分担者

村田 功二 (MURATA KOHJI)
京都大学・大学院農学研究科・助教
研究者番号: 00293910

藤原 裕子 (FUJIWARA YUKO)
京都大学・大学院農学研究科・研究員
研究者番号: 60506088