

論 文

ボールエンドミルによる木材の三次元曲面加工
—平面加工による予備実験—

藤野勝徳*・澤田 豊*・藤井義久*・奥村正悟*

Machining of Curved Surface of Wood by Ball End Mill
—A preliminary study on flat surface machining—

Katsunori FUJINO*, Yutaka SAWADA*, Yoshihisa FUJII* and Shogo OKUMURA*

ボールエンドミルによる木材の三次元曲面加工の最適化を目的とした予備実験として、CNCルータを用いてマカンバとヒノキを平面加工したときの仕上げ面性状におよぼす、樹種、切削面、繊維走行に対する工具送り方向、送り速度、工具軸の傾斜の影響を検討した。仕上げ面性状は断面曲線の三次元的測定と目視観察によって評価した。その結果、工具送り方向が繊維走行に対して平行の場合は仕上げ面に形成された溝の底部が粗く、直交する場合は仕上げ面の工具送り方向に形成される稜線部の形が不揃いとなった。また、送りが繊維走行に平行の場合には、工具軸を傾斜させることによって理論的に近い仕上げ面を得ることができた。さらに、送り速度の低下にともなって仕上げ面は平滑になった。

キーワード：ボールエンドミル、平面加工、仕上げ面、工具軸の傾斜、送り速度

In order to optimize the cutting conditions for machined surface by ball end mills, flat and edge grain surfaces of boards of makanba and hinoki were cut by flat surface machining through the successive feed in an increment of 2 mm using a CNC router, and the effects of species, feed direction to the grain, feed speed, and tool inclination angle on machined surface were examined. Machined surface were visualized three dimensionally and also observed by the naked eye. The bottom of grooves, which were produced on workpiece surfaces, was not smooth when the feed direction was parallel to the grain, while the ridge of grooves was rougher when perpendicular to the grain. The tool inclination resulted in the smooth surface for the parallel feed to the grain, and the surface roughness was improved with the decrease of feed speed for all conditions.

Key words: ball end mill, flat machining, machined surface, tool inclination, feed speed

1. はじめに

ボールエンドミルは、工具先端部が球状になっているために三次元自由曲面の加工が可能であり、金属切削においては金型の型彫り加工などに多用されているフライスの一種である。この工具は、バイオリン響板などの木材の切削加工にも一部使用されているものの、使用例は少ない。その理由の一つとして、工具の回転中心では切削速度が0となり切削作用が行なわれないという切削機構上の問題が存在するため、良好な仕上げ面を精度良く得ることが難しいということが挙げられる。ボールエンドミルによる仕上げ面の凹凸は、工具の送り間隔（ピッチ）であるピックフィード量を小さくして送り速度を遅くすれば小さくなるが、加工時間が長くなってしまふ。そこで、加工時間を長くしないためには、切り込み深さおよび幅を小さくし、主軸の回転数を上げ、送り速度を速くした高速切削を行なうことが有効な手段となる²⁾。また、切削速度が0となる工具回転中心での切削を避け

るために主軸を傾斜させて切削を行なう方法が用いられている³⁾。

ボールエンドミルによる加工後の仕上げ面の性状を良くするために、後工程としての研削が施されるが、研削は手作業となり、能率が悪いいため、そのコストが全加工コスト中のかなりの割合を占めることになる³⁾。その結果、ボールエンドミルを用いて三次元的な自由曲面を加工することは、現段階においては今日の木材加工業にとって必ずしも有効な技術ではない。しかし、研削を極力省略できれば、我が国の木材加工業において将来的に有用な技術となり得る。

金属切削においては、ボールエンドミル加工における表面粗さの生成過程の解析³⁾、最適傾斜角の決定方法⁶⁾、ボールエンドミルを用いた5軸制御加工用工具経路生成システムの開発⁵⁾などが行なわれている。一方、木材の自由曲面加工に関する研究としては、海外では自由曲面形状を持つ木材を開発するためのフライス加工の提案¹⁾が、国内では木工用5軸制御NC工作機械のための

* 京都大学大学院農学研究科森林科学専攻

* Division of Forest and Biomaterials Science, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

ポストプロセッサの開発⁴⁾などが行なわれているものの、被削材を木材としてボールエンドミル加工の切削条件を考慮した研究は行なわれていない。

そこで本研究では、ボールエンドミルによる木材の三次元曲面加工の最適条件を探る予備的な実験として、木材を平面加工したときの仕上げ面の性状に及ぼす樹種、切削面、工具送り方向、工具傾斜角、送り速度の影響について検討した。

2. 実験

2.1. 装置

切削実験には同時3軸制御式CNCルータ（庄田鉄工株式会社，NC16-ROA）を用い（Fig.1），この主軸端に工具を固定し，被削材をテーブル上で移動させることによって平面加工を行なった。なお，被削材は吸着定盤によって固定した。

2.2. 工具

工具として，Fig.2に示す2枚の切れ刃をもつ，ボー

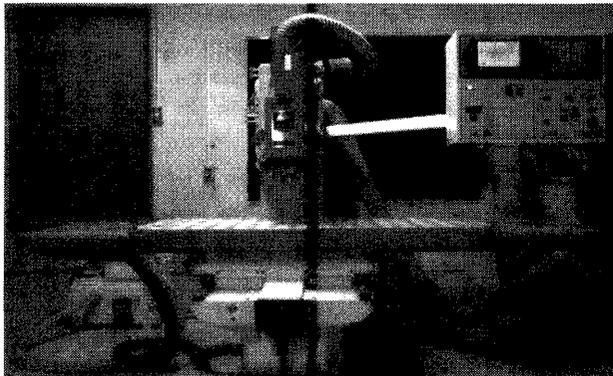


Fig.1. CNC router

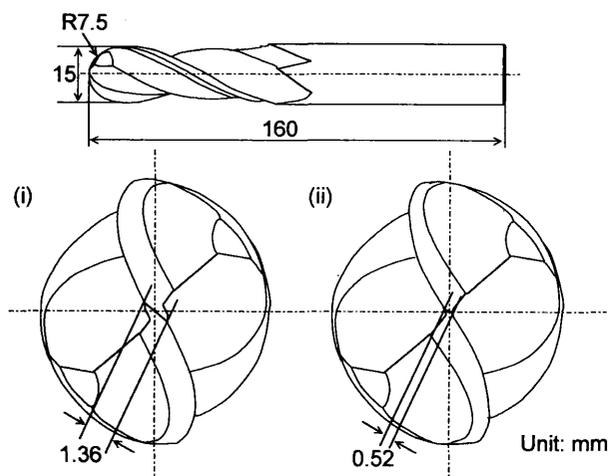


Fig.2. Shape of ball end mills (i) and (ii)
Note: Tools (i) and (ii) have chisels on their tops, of which width is 1.36 and 0.52 mm, respectively.

ル部分の刃形がS字型のボールエンドミル（兼房株式会社）を用いた。Fig.2に示した(i)と(ii)の工具とも，先端部で二つの切れ刃が交差する部分には切れ刃がなく，ドリルのチゼル部のようにになっているが，その形状は両者で若干異なっており，工具(i)では1.36mm，工具(ii)ではその半分以下の0.52mmの長さであった。なお，先端切れ刃のすくい角と逃げ角（Fig.3）は，工具(i)では23.4°と12.5°，工具(ii)では22.3°と12.0°であった。

2.3. 被削材

被削材は，マカンバ（*Betula maximowicziana* Regel，気乾比重0.68，含水率11.2%）とヒノキ（*Chamaecyparis obtusa* Endlicher，気乾比重0.40，含水率10.8%）を用い，それらの板目面および柁目面を切削した。被削材の寸法は150×150mmで厚さ15mmとし，板目面は木表側を切削した。

2.4. 切削方法と切削条件

切削実験ではボールエンドミルを木材表面に平行に一定長さ（ストローク）送って切削し，さらに送りと直交方向に一定量移動（ピックフィード）させて，繰り返し

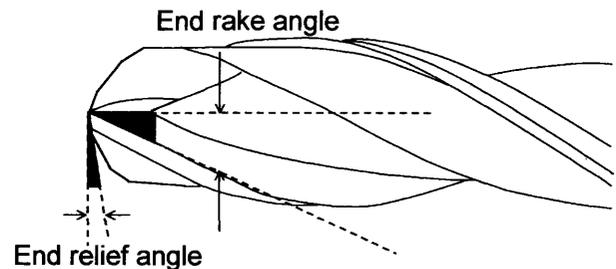


Fig.3. Rake angle and relief angle of ball end mill
Notes: End rake angle: (i) 23.4°, (ii) 22.3°. End relief angle: (i) 12.5°, (ii) 12.0°.

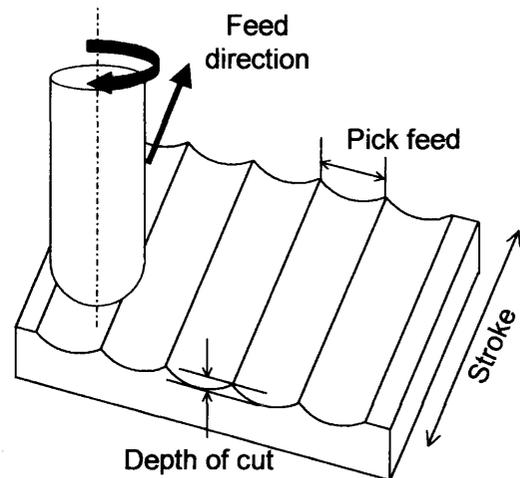


Fig.4. Scheme of cutting

切削することによって平面を加工した (Fig.4). 本研究では, 工具 (i) を用いて送り速度を一定とした実験 (実験 1) と, 工具 (ii) を用いて送り速度を 4 段階に変化させた実験 (実験 2) を行なった. Table.1 にそれらの実験条件を示す. なお, 工具の傾斜は送り方向と直交する面内とし, 工具傾斜時の送りは被削材をアップカットで切削する方向とした (Fig.5).

Table.1. Experimental conditions

Experiment	1	2
Tool	i	ii
Radius of ball nose (mm)	7.5	
Inclination angle	0°, 15°	
Wood species	Makanba, Hinoki	
Cut surface	flat-grain edge-grain	flat-grain
Feed direction	along and across the grain	
Feed speed (m/min)	3.0	0.4, 0.8, 1.5, 3.0
Spindle rotation (rpm)	12000	
Depth of cut (mm)	0.5	
Stroke (mm)	50	
Pick feed (mm)	2.0	

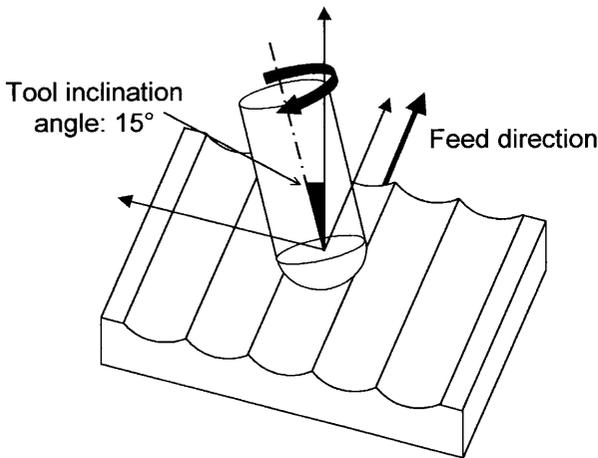


Fig.5. Tool inclination
Note: Tool was inclined in the plane perpendicular to feed direction and rotated to up cut the surface.

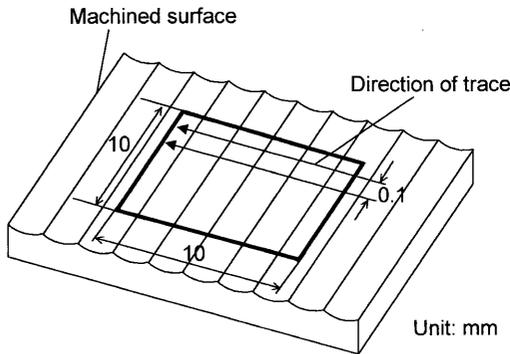


Fig.6. The area of measurement of primary profile

2.5. 仕上げ面性状の評価

仕上げ面の性状は触針式表面粗さ測定機 (東京精密株式会社, サーフコム1400A-3DF) で三次元的に測定した断面曲線および目視によって評価した. 断面曲線は, 各条件で切削した面の中央の一辺10mmの領域について測定し, 触針の送り方向は工具の送り方向に直交する方向とした (Fig.6). また, 断面曲線のサンプル間隔は 5 μm, 触針の送り速度は0.6mm/sとし, 0.1mm間隔で101本の断面曲線を得た. なお, 工具先端部が完全な円弧であり, 刃先が通過した部分は全て削り取られると仮定すると, 理論的にはハーフパイプ状の溝を並べたような仕上面が得られる (Fig.7). ちなみに, 先端が完全な円弧である場合の凹凸の高さ R_1 は, p をピックフィード (mm), r を工具半径 (mm) として, $R_1=r-\sqrt{r^2-(p/2)^2}$ で表される. また, 工具先端に切れ刃のない部分が存在し, その部分の幅を a (mm) とすると $R_2=R_1-(r-\sqrt{r^2-(a/2)^2})$ として表される (Fig.8).

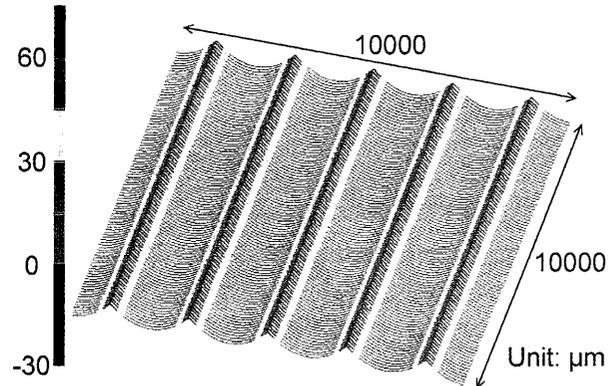


Fig.7. Machined surface estimated theoretically
Note: The origin of height is set at the bottom of profiles.

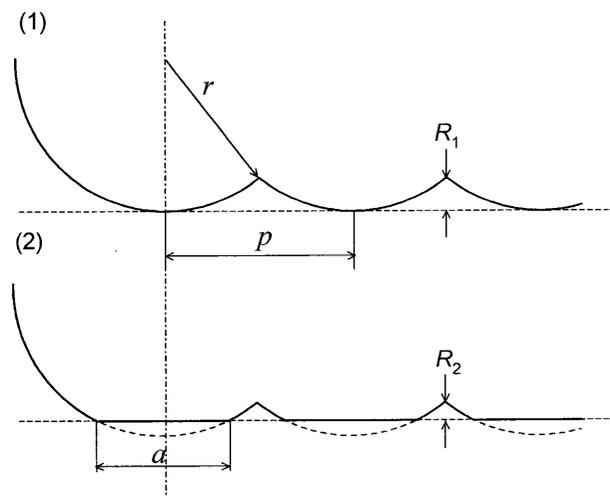


Fig.8. Geometric profile by cutting edge
Notes: (1) Ideal edge. (2) Actual edge with chisel.

3. 結果と考察

3.1. 工具送り方向と工具傾斜角の影響

実験1で得たマカンバとヒノキの板目面の仕上げ面の断面曲線（三次元表示）を、送り方向および工具傾斜角別にFig.9に示す。また、理論的に期待される断面曲線と実測した断面曲線（101本）の比較をFig.10に示した。

工具傾斜角 0° の場合、Fig.10a, c, e, gから分かるように、マカンバ、ヒノキともに工具送り方向にかかわらず溝の底部に平坦部が存在しているが、これはこの実験に用いた工具の先端に切れ刃のない部分が存在するためである。このとき、送りが繊維方向の場合には、溝の

底部に局所的な凹みや繊維の突き出しがみられるのに対し、送りが繊維直交方向の場合には溝の稜線の形が崩れている。これは、送りが繊維方向では溝の底部での切削が横切削となるため良好な仕上げ面とならず、送りが繊維直交方向では稜線部で木口切削となることによるものと考えられる。一方、送りが繊維直交方向では溝の底部での切削が縦切削となるため、仕上げ面は平滑であった。

工具傾斜角 15° の場合には、工具先端部の切れ刃のない部分が切削に関与しなくなるため、マカンバ、ヒノキともに送りが繊維方向の場合にはおおむね理論的に期待される通りの円弧状の溝が形成されていた（Fig.9b, f, Fig.10b, f）。この場合、マカンバでは溝の底部に道管

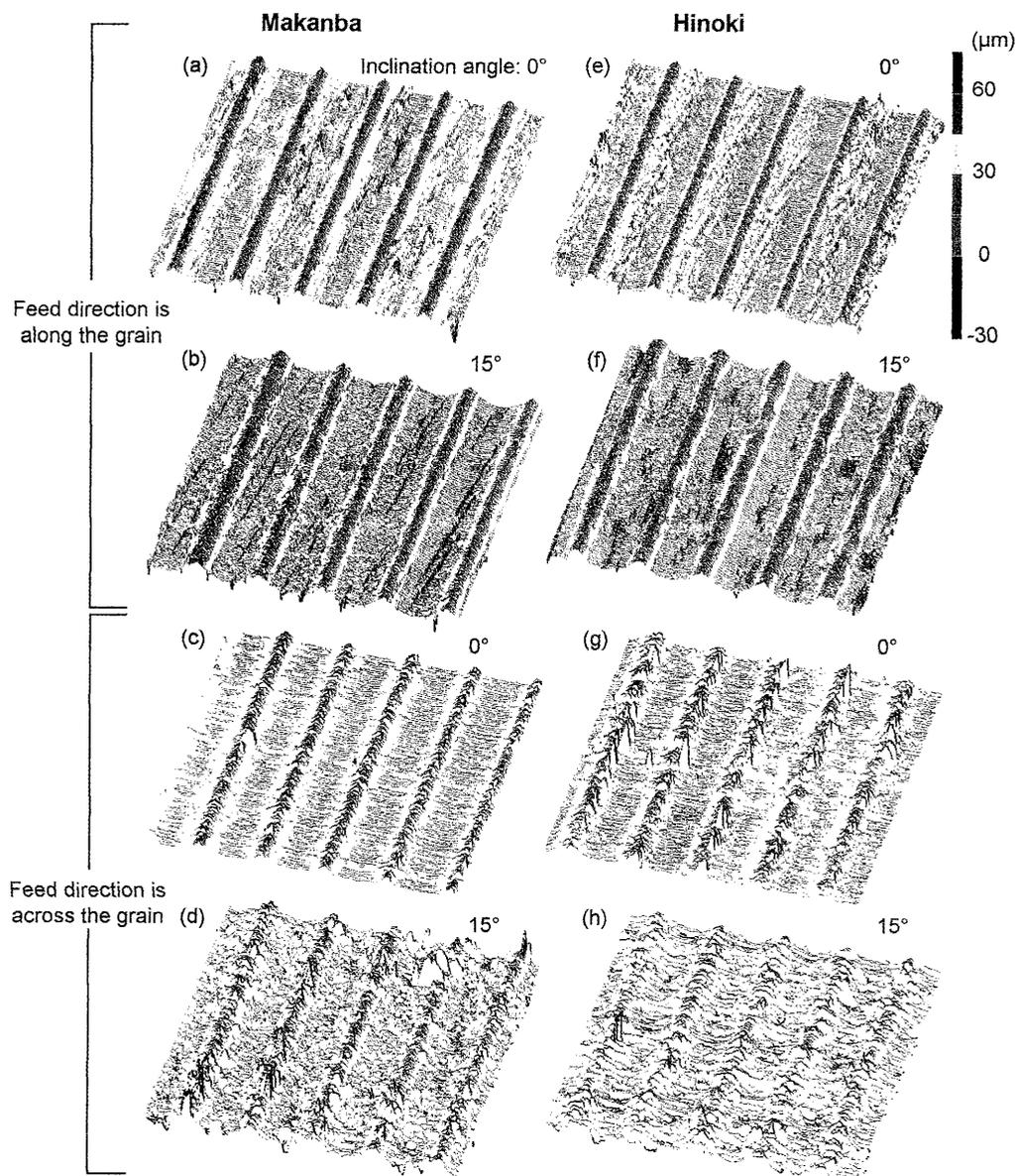


Fig.9. Three-dimensional distribution of primary profiles of machined surfaces for Experiment 1
Notes: Cut surface: flat grain. The origin of height is arbitrarily set.

に由来する凹みが鮮明に表れ、良好な仕上げ面となっているが、ヒノキでは仕上げ面に目ぼれのように大きく繊維を掘り取った部分が生じた (Fig.9f)。一方、送りが繊維直交方向の場合には、溝の底部、稜線部とも横切削ないし木口切削となるため、良好な仕上げ面が得られていない。

なお、柾目面の切削でも板目面と同様の結果が得られたが、マカンバの場合には送りが繊維直交方向で工具傾斜角 15° のときの仕上げ面上の凹凸は板目面よりも小さかった (Fig.11)。

3.2. 送り速度の影響

実験2におけるマカンバとヒノキの仕上げ面の断面曲線 (三次元表示) を、送りが繊維方向の場合について Fig.12と13にそれぞれ示す。なお、送り速度が0.4, 0.8, 1.5, 3.0m/minのときの1刃当たり送り量はそれぞれ0.017, 0.033, 0.063, 0.125mmである。

実験2では、用いた工具の先端部の切れ刃のない部分が実験1で用いたものよりも狭いため (Fig.2a, b)、実験1よりも溝の底部の平坦部は狭くなり、より深くまで切削されている。工具を傾斜させずに切削したマカンバ

の場合、送り速度が1.5, 3.0m/minと大きい場合は溝の底部に深い凹みが生じるなど、実験1の場合よりも仕上げ面がかなり荒れているが、送り速度が0.8m/min以下になると、比較的平滑になり、理論的な形状に近い仕上げ面となった。ただし、送り速度が小さくなると仕上げ面上に現れる凹部は小さくなっていたが、この場合も削れ残った繊維の起き上がりからなる凸部が散在していた。ヒノキの場合も、溝の底部の仕上がりが実験1より悪く、送り速度を小さくしても溝の底部で局所的に繊維が掘り取られることが多く、マカンバほど良好な仕上げ面は得られていない。

工具を 15° 傾斜させた場合は、送り速度が3.0m/minであっても理論的に期待される断面が円弧状の仕上げ面が得られた。マカンバの場合、送り速度が3.0m/minのときに顕著であった道管による凹みが、送り速度が小さくなるにつれて、仕上げ面に現れにくくなる傾向があった。これは、送り速度が小さくなると切り込み量が極端に小さくなるため、正常な切り屑生成が不可能となり、研削のような状態で表面が削られたことによるものと考えられる。一方、ヒノキの場合は、送り速度にかかわらず溝の底部に大きな凹みが存在し、実験1でみられた目

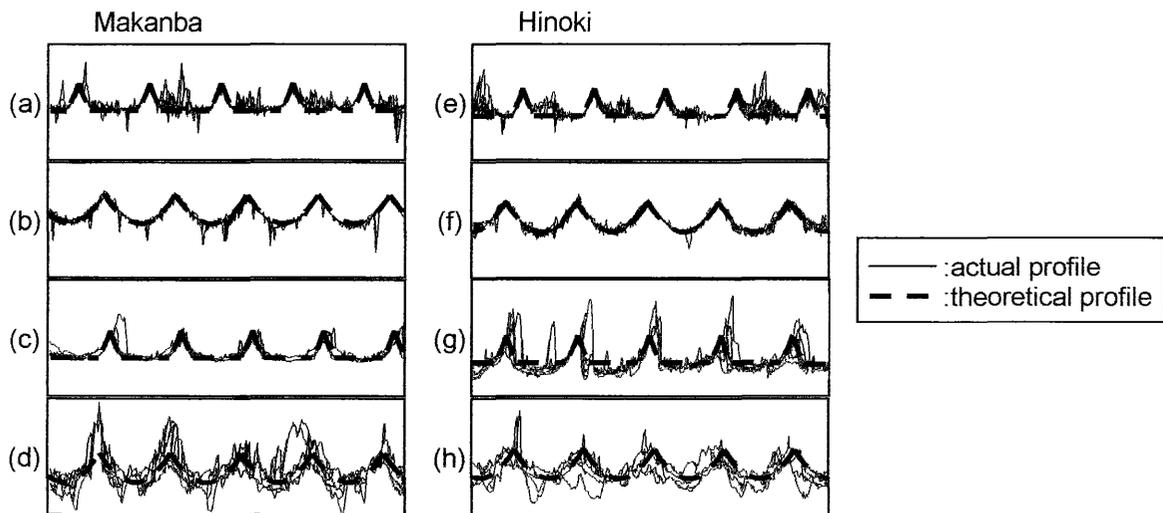


Fig.10. Comparison of actual and theoretical primary profiles for Experiment 1
Note: Characters, a - h, correspond to those in Fig.9.

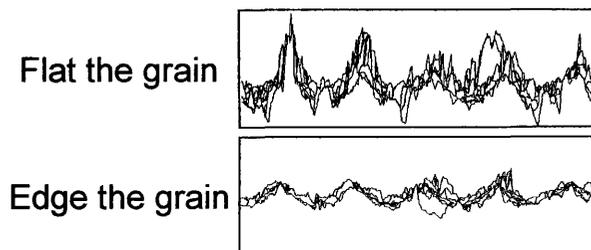


Fig.11. Comparison of actual profiles between flat and edge grain surface of makanba
Notes: Feed direction: across the grain. Tool inclination angle: 15° .

ぼれのような跡も確認できた。また、送り速度が小さくなくても、晩材の上にある早材部がめくれ取られた一連の凹みも存在した (Fig.13e, f, g, h)。なお、送りが繊維直交方向の場合は、樹種にかかわらず、送り速度の低下にともなって仕上げ面は平滑になった。

本研究で用いた工具には切れ刃のない部分が存在し (Fig.2), この部分が仕上げ面に大きく影響を及ぼしていることが確認できた。同じ送り速度の場合, 工具(i)に比べて工具(ii)のほうが工具中心付近まで切削できていたが, 工具の送りが繊維方向の場合に生じる仕上げ面の溝の底部の凹凸は, 工具(ii)で切削した場合のほうが

大きいものであった。その原因が回転中心付近の切削機構にあるのか, 工具の形状にあるのか, 現段階では明確に説明することはできない。今後, ボールエンドミルによる切り屑の生成と分離のしくみや詳細な切削機構を検討する必要がある。

4. 結言

今回の研究では, ボールエンドミルを用いて木材を切削した場合のいくつかの切削条件と仕上げ面性状の関係がある程度明らかにできたが, 仕上げ面上の凹凸が発生

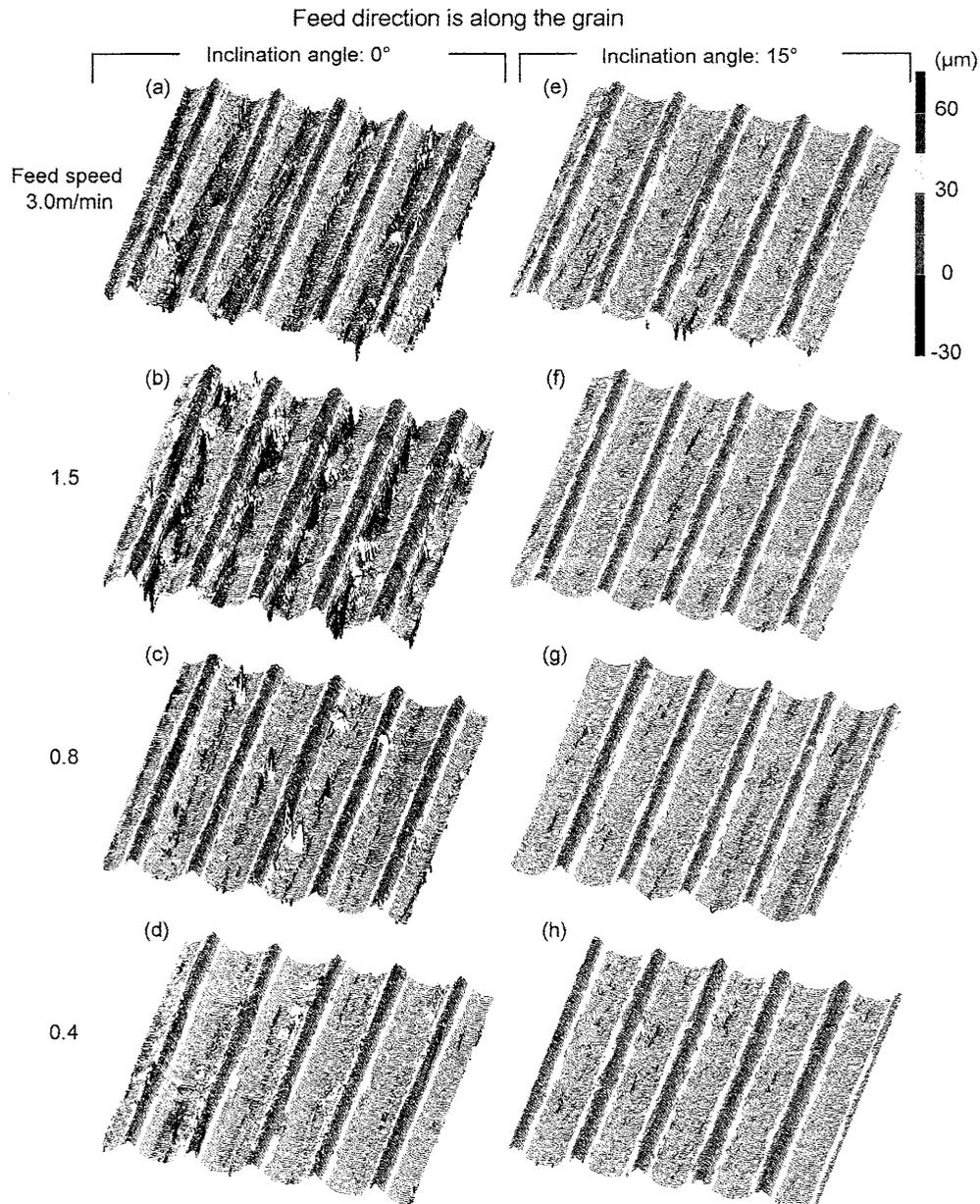


Fig.12. Three-dimensional distribution of primary profiles of machined surfaces for makanba in Experiment 2.

Notes: Cut surface: flat grain. The origin of height is arbitrarily set.

する原因などについて十分に解明できなかった。今後は、そのような仕上げ面の凹凸がどのように発生するのかをボールエンドミルの切削機構を考慮して検討する必要がある。また、樹種に応じた工具形状や最適切削条件を検討するとともに、表面粗さの定量的な評価方法も検討する必要がある。

謝辞

本研究をするにあたり、工具を提供していただいた兼房株式会社に厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) H.-W.Hoffmeister・T.Wietfeld(1997) Formfräsen von Massivholz. HOB. 5. 206-210
- 2) 岸本 潔 (2001) ボールエンドミル加工のキーポイント。(加工技術データファイル 基礎編 (切削加工編). 168pp, (財)機械振興協会 技術研究所), 103
- 3) 是田規之・江川庸夫・黒田基文・渡部 健・井伊良治 (1993) ボールエンドミル加工における表面粗さの生成過程の解析. 精密工学会誌. 59(9). 1537-1542
- 4) 永田寅臣・渡辺桂吾 (1996) 木工用スピンドルチルト型5軸制御NC工作機械のためのポストプロセッサの開発. 精密工学会誌. 62(8). 1203-1207

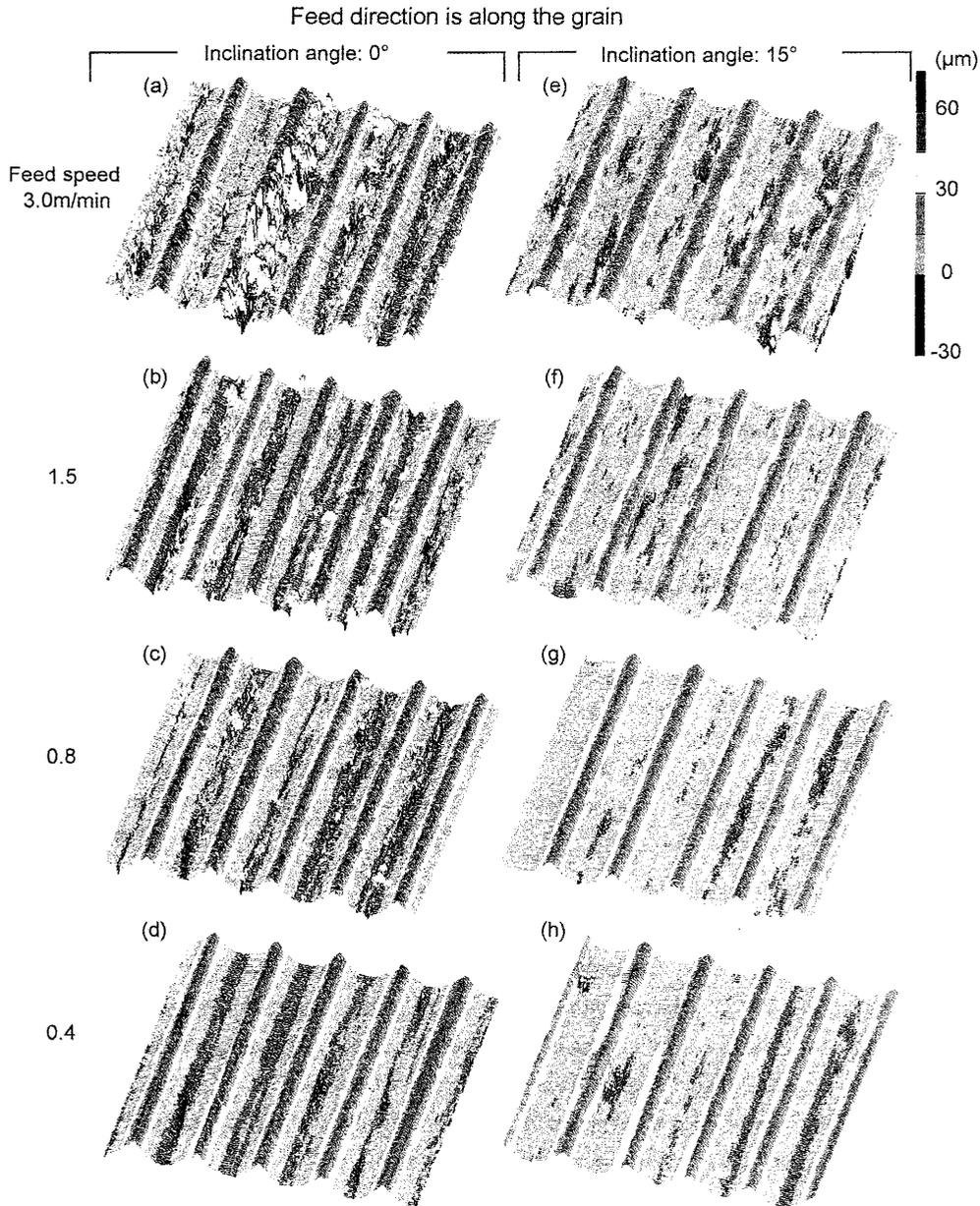


Fig.13. The same as Fig.12, but for hinoki

- 5) 竹内芳美・長坂 学・森重功一 (1995) ボールエンドミルの先端切れ刃・側面切れ刃を併用した5軸制御加工. 精密工学会誌. 61(4). 561-565
- 6) 趙 晓明・堤 正臣・是田規之・葛 東方・陳 亮 (1996) 5軸制御加工におけるボールエンドミルの最適傾斜角決定方法－仕上げ面粗さを基準にした決定方法とニューラルネットワークの応用－. 精密工学会誌. 62(7). 1019-1023