

ベイマツ気乾材切削の工具摩耗に及ぼす電圧印加の影響と 静電気電圧の測定*1

福田英昭*2, 番匠谷薫*3, 村瀬安英*4

Effect of Electrical Potentials on Tool Wear and Measurement of Electrostatic Voltage in Machining of Air-dried Douglas-fir*1

Hideaki FUKUDA*2, Kaoru BANSHOYA*3 and Yasuhide MURASE*4

To clarify the effect of electrical potentials on the tool-wear progression of high-speed steel tools in the machining of air-dried Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* FRANCO), tool-life tests of planer knives or machine bits were conducted by applying electrical potential of -2 , -1 , 0 , $+1$, or $+2$ kV to the tool. When applying -2 kV to the tool, tool wear for each tool progressed extremely slowly due to the suppressive effect of cathodic protection on corrosive wear. However, when applying $+2$ kV to the tool, tool wear for each tool progressed rapidly. In the machining of air-dried Douglas-fir, the effect of the electrical potentials was clearly seen, producing the same results as with wood of high moisture content. The effect was more remarkable with the machine bit than the planer knife. Furthermore, cutting tests with a sharp knife or a worn knife were carried out without applying any electrical potential. The voltage of the static electricity of the knife during cutting was measured, and the electrostatic effect as the cause of tool wear was discussed. During cutting, electrical discharges between tool and work piece occurred repeatedly. The measured voltage of static electricity was higher for the sharp knife than for the worn knife.

Keywords: wood cutting, tool wear, corrosive wear, electrical suppression, static electricity.

生材や高含水率材切削における工具摩耗の進行では、腐食摩耗が大きく関与しているため、工具に負の直流電圧を印加しながら切削を行うと、腐食摩耗抑制効果によって工具摩耗の進行を大幅に抑制できることがこれまで明らかにされている。本研究では、ベイマツ気乾材を供試して、高速度鋼工具による平削り加工と穴あけ加工を行い、両加工法における工具摩耗に及ぼす直流電圧印加の影響を調べた。平かな刃、穴あけビットともに、工具側に正の直流電圧を印加することによって、工具摩耗の進行が促進されるのに対し、負の直流電圧を印加した場合は工具摩耗の進行が抑制され、平削り加工よりも穴あけ加工において電圧印加の影響が顕著に現れた。さらに、鋭利刃と摩耗刃による平削り加工について、切削中に発生する静電気電圧について測定を行った。その結果、平削り加工中に工具に発生する静電気に基づく電圧は、摩耗刃よりも鋭利刃の方が高い値を示した。また、工具と被削材の間で放電が繰り返し発生していることがわかった。この結果に基づき、工具摩耗の原因としての静電気の関与について考察を行った。

1. 緒 言

生材や高含水率材切削における工具摩耗の進行では、腐食摩耗が大きく関与し、場合によっては支離的であることが明らかにされている¹⁻⁵⁾。したがって、工具に負の直流電圧を印加しながら切削を行う

と、カソード防食法の原理によって、工具摩耗の進行を大幅に抑制することができる。

一方、気乾材切削において、ベイスギヤクリなどの樹種では、他の樹種に比べて工具摩耗が著しく進行することが明らかにされており⁶⁻⁹⁾、これは工具腐食性抽出成分による腐食作用によるものと考えら

*1 Received April 15, 2005; accepted September 16, 2005 本研究の一部は、第47回日本木材学会大会(1997年4月、高知)において発表した。

*2 琉球大学教育学部 College of Education, University of the Ryukyus, Okinawa 903-0213

*3 広島大学大学院教育学研究科 Graduate School of Education, Hiroshima University, Hiroshima 739-8524

*4 九州大学大学院農学研究院 Graduate School of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-8581

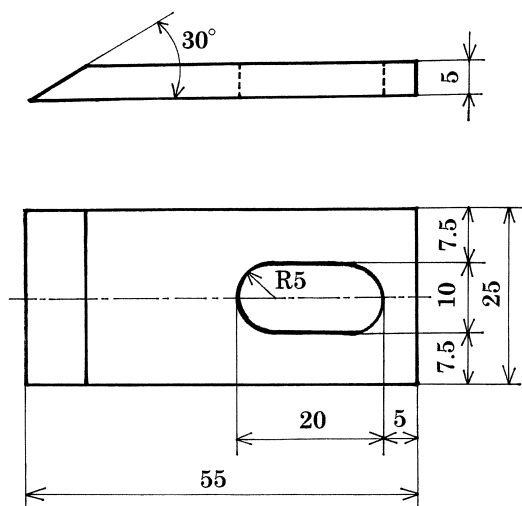


Fig. 1. Shape of high-speed steel knife.

れる。また、気乾材切削の場合も木材実質中の結合水に起因する腐食摩耗が関与し、上記の生材や高含水率材切削の場合と同様に、工具に負の直流電圧を印加しながら切削を行うと、工具摩耗の進行を抑制できる可能性が考えられる。しかしながら、この気乾材切削での直流電圧印加による腐食摩耗抑制効果についての研究報告はこれまで全く見られず、気乾材切削の工具摩耗に関与する腐食要因の影響については十分検討されていないのが現状である。

ところで、気乾材やMDF切削では、被削材と切削工具間に電位差が生じ、静電気が発生すると指摘¹⁰⁻¹²⁾されている。すなわち、Stewartら¹⁰⁾とKingら¹¹⁾によって、MDFの旋削加工中に工具に静電気が発生し、時には帯電した電荷が工具側から被削材側へ移動し放電すること等の静電気による電荷の発生と放電に関するメカニズムが検討されている。気乾材切削における工具摩耗の進行においては、静電気が関与する放電摩耗の存在も考えられるが、その検討例は乏しい。

本研究では、以上のような背景から、ベイマツ気乾材を供試して、高速度鋼工具による平削り加工と穴あけ加工を行い、両加工法における工具摩耗に及ぼす直流電圧印加の影響を調べた。さらに、鋭利刃と摩耗刃による平削り加工について、切削中の静電気電圧を測定し、工具摩耗の原因としての静電気の関与について考察を行った。

2. 実 験

2.1 供試工具と被削材

平削り加工では、Fig. 1に示すような刃幅25

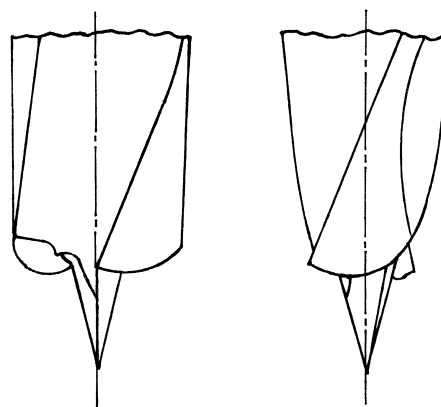


Fig. 2. Shape of high-speed steel spur machine-bit.

mm、厚さ5 mm、刃先角30°で材質がSKH51の高速度鋼平かなな刃を、穴あけ加工では、Fig. 2に示すような直径8 mm、全長125 mmのセンタ・けづめ付きの高速度鋼ビットを供試した。

被削材には、平均比重0.51、平均含水率12.5%、pH 3.8のベイマツ (*Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) FRANCO) の気乾材を用いた。ベイマツは、建築材として汎用されており、工具摩耗に占める腐食摩耗の割合が比較的大きい樹種⁷⁾として選択した。平削り加工での被削材の寸法は、幅20 mm、長さ100 mm、厚さ50 mmであり、その20 mm×100 mmの木端面を切削した。穴あけ加工での被削材の寸法は、幅20 mm、長さ200 mm、厚さ26 mmである。なお、pHは木粉10 gを添加した蒸留水100 mlを15°Cの恒温水槽中で24時間放置後、懸濁液をろ過し、ろ過液についてガラス電極 pHメータにより測定した。

2.2 実験方法

平削り加工は、円盤かなな盤を改造したワーリングディスク式木材切削試験装置¹³⁾を用いて行った。円盤の直径は640 mmであるが、被削材を固定するアクリル製のバイスを円盤の中心から45°おきに8個取り付けることとし、その取り付け位置はバイスにクランプする幅20 mm、長さ100 mmの被削材の切削面の中心点が円盤の中心から280 mm離れた位置とした。平削り加工は、被削材を取り付けた円盤を回転させ、テーブル上にセットした供試平かなな刃を回転面に対して垂直方向からステッピングモータで送り込むことによって2次元縦切削を行った。Fig. 3に示すように、工具と被削材を機械系から絶縁したのちに、切削速度135 m/min、切込み量0.1 mm、切削角40°、逃げ角10°の加工条件で、ベイマツ気乾材を切削長4.0 kmまで連続切削した。なお、

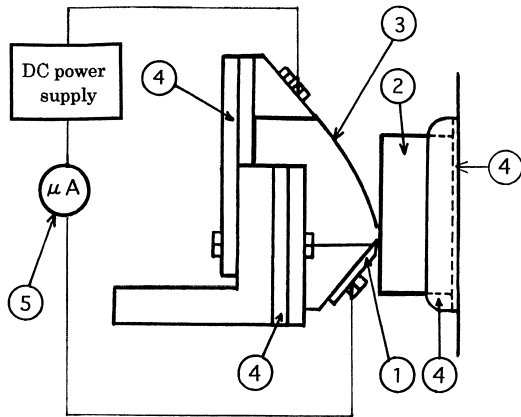


Fig. 3. Experimental setup.
 ① Cutting tool, ② Work piece,
 ③ Metal electrode (flat spring),
 ④ Acrylic insulator,
 ⑤ Direct current microammeter.

平削り加工における切削長は、各被削材の切削面における円弧状の切削距離の和で表した。かな刃の刃先後退量は、すくい面上の刃幅中央及びその左右の3カ所について、あらかじめ切れ刃線から任意の位置に刻印し、工具顕微鏡を用いて各刻印点から刃先までの距離を測定して各すくい面後退量を求め、その平均値をかな刃摩耗量として表した。

一方、穴あけ加工は、主軸定速送り自動昇降式に改造した直立ボール盤を用いて行った⁴⁾。実験では、ビットとドリルチャック、被削材とバイスをそれぞれ絶縁したのちに、主軸回転数1680 rpm、1回転あたり送り量0.1 mm/rev、切削速度42.2 m/minの加工条件で、ベイマツ気乾材に深さ20 mmの止まり穴あけ加工を、被削材の木表側から切削長3.3 kmに相当する穴あけ個数650個まで行った。なお、穴あけ加工における切削長は、ビット外周切れ刃の1個の穴あけにおけるつまき線の総長さとの穴あけ個数の積で表した。ビットの刃先後退量は、あらかじめ左右のけづめ外周面に刻印し、工具顕微鏡を用いて各刻印点からけづめ先端までの距離を測定して各後退量を求め、その平均値をビット摩耗量として表した。

平削り加工、穴あけ加工ともに、直流電源を用いて、切削中の工具側に0 V、±1 kV、±2 kVの計5段階の直流電圧を印加した。いずれの印加電圧の場合も、所定の切削長ごとに、かな刃の刃先摩耗量あるいはビット摩耗量を求めるとともに、マイクロアンペア計を用いて、切削中に流れた電流の最大値を測定した。なお、電流値は刃物と被削材が接触しているところで電流が刃物から被削材に流れたとき

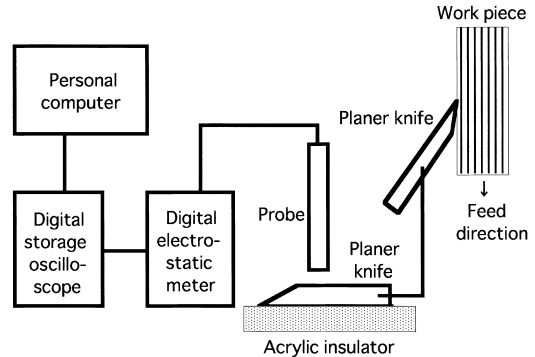


Fig. 4. Diagram of testing apparatus for measurement of electrostatic voltage.

をプラスで表示した。さらに、実験終了後の工具摩耗面のSEM観察を蒸着処理なしで行い、写真撮影した。

また、気乾材切削時における静電気発生の手動を調べるため、鋭利刃と、刃先をすくい面上で約50 μm 摩耗させた摩耗刃の2種類の平かな刃によるベイマツ気乾材の平削りを前述のワーリングディスク式木材切削試験装置を用いて行った。直流電圧を印加していない状態で切削中に工具側に発生する静電気に基づく電圧を、デジタル低電位測定器(春日電機社製 KSD-0303)を用いて測定した。Fig. 4に示すように、平かな刃と被削材を機械系から絶縁させたのちに、切削用の平かな刃から10 mm離れた位置に同一材質の別の静電気電圧測定用の平かな刃をアクリル板上に置いた。両かな刃をリード線で電気的につないで、測定用の平かな刃表面に対して垂直方向から非接触式のセンサーを向けて静電気電圧を測定した。実験時の気温は17.1~17.5°C、湿度は55.1~56.4%であった。

デジタル低電位測定器からアナログ出力された静電気電圧に比例した直流電圧は、2チャンネル式デジタル・ストレージオシロスコープ(Tektronix社製 TDS-2002)からデジタル出力され、RS-232ケーブルでパーソナルコンピュータに入力した。データ処理は、解析ソフト Tektronix WaveStar (Tektronix社製)を使用して行った。なお、デジタル・ストレージオシロスコープによる計測時のレコード長は2500ポイント、最高サンプル・レートは1.0 GHz、周波数帯域は0~60 MHzであった。

3. 実験結果と考察

3.1 工具摩耗の進行に及ぼす印加電圧の影響

工具摩耗の進行経過と加工中に流れた電流値の変

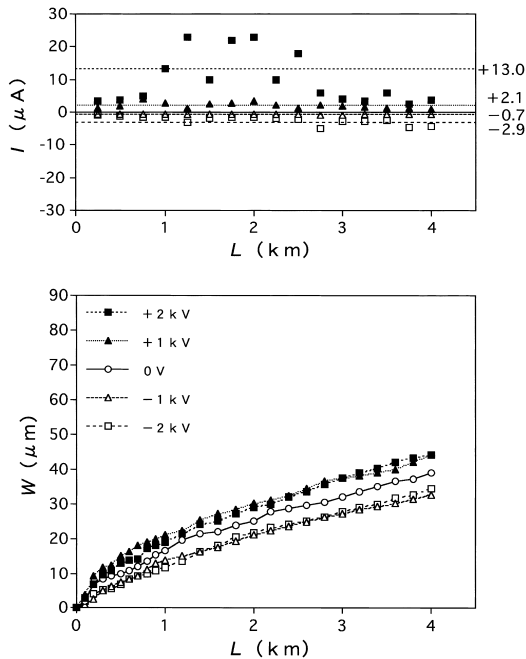


Fig. 5. Progression of tool wear (W) and variation of current (I) for high-speed steel planer knives with total cutting length (L) at various applied voltages.

化を、直流電圧をパラメータとして、Fig. 5と Fig. 6に示す。Fig. 5は平削り加工、Fig. 6は穴あけ加工の結果である。また、Fig. 7に、最終切削長におけるかな刃摩耗量あるいはビット摩耗量と印加電圧の関係を示す。

Fig. 5と Fig. 6より、両加工法ともに、0 Vの場合に比べると、工具側に+1 kVや+2 kVの正の直流電圧を印加することにより、工具摩耗の進行が促進されるのに対し、工具側に-1 kVや-2 kVの負の直流電圧を印加すると、工具摩耗の進行が抑制されていることがわかる。また、平均電流値は、平かな刃では-2.9~+13 μA 、穴あけビットでは-120~+210 μA を示し、穴あけビットの方が大きい値を示している。前報⁴⁾のベイマツ高含水率材に-400 Vの電圧を印加して流れた平均電流値は、約-30 mAであった。このように、いずれの印加電圧の場合も、高含水率材切削の場合に比べて電流値のオーダーが異なり、かなり小さい値を示しているが、気乾材切削においても上記のように電圧印加によって工具摩耗の促進や抑制が見られることは、工具摩耗の進行に腐食作用が関与することを示唆するものと考えられる。

Fig. 7より、0 Vの場合の工具摩耗量を基準とすると、直流電圧を印加した工具摩耗量は、+2 kV

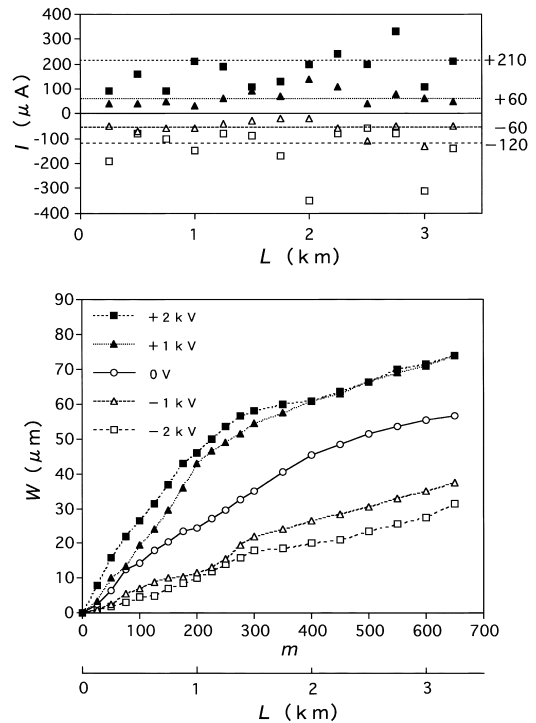


Fig. 6. Progression of tool wear (W) and variation of current (I) for high-speed steel bits with number of holes (m) and total cutting length (L) at various applied voltages.

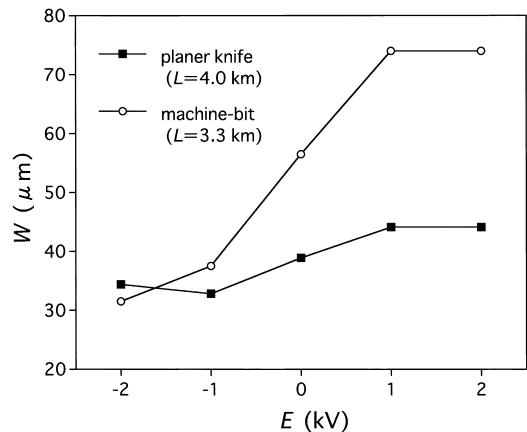


Fig. 7. Relationships between amount of tool wear (W) and voltages applied (E) at final cutting length (L).

印加では、平かな刃で1.13倍、穴あけビットでは1.31倍の値を示すが、-2 kV印加では、平かな刃では0.88倍、穴あけビットでは0.56倍の値を示した。このように、気乾材切削においても、ベイマツ高含水率材の穴あけ加工の場合⁴⁾と同様に、工具に負の

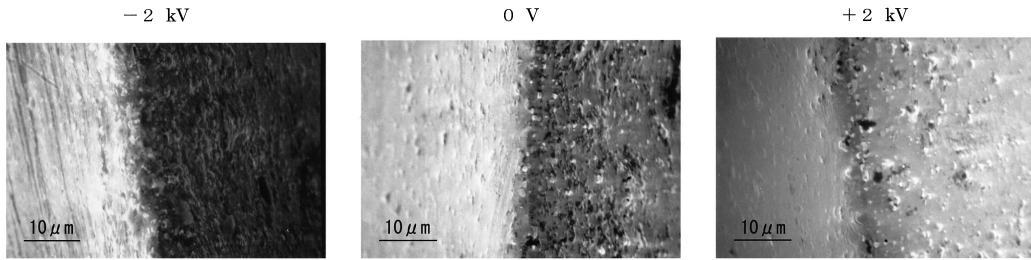


Fig. 8. SEM micrographs of rake face and back face of planer knives at three applied electrical potentials.

Note: The line at center is the cutting edge, the left side is the rake face, and the right side is the back face.

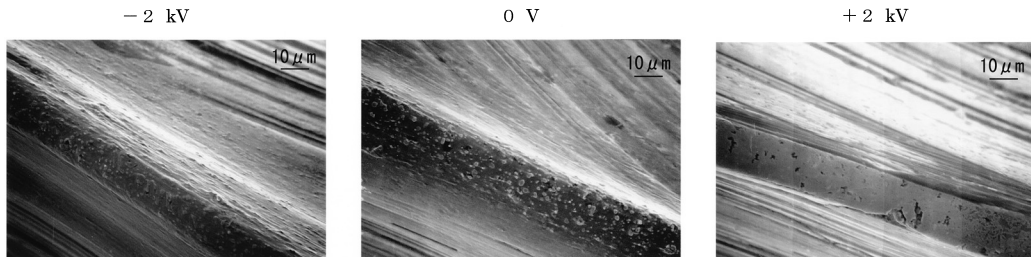


Fig. 9. SEM micrographs of spur edge of machine-bits at three applied electrical potentials.

Note: The line at center is the extreme top of the spur edge, the upper right side is the inside surface of the spur edge, and the lower left side is the outside surface of the spur edge.

直流電圧を印加しながら切削を行うと、工具摩耗の進行が遅くなっており、カソード防食法の原理によって、腐食摩耗が抑制されたものと考えられる。とくに穴あけ加工では、穴あけ深さに伴ってビットと被削材の接触面積が広くなり、流れた電流値が大きくなるため、その抑制効果が平削り加工よりも顕著になったと考えられる。

既報⁴⁾と同様に、0Vの場合の工具摩耗量を力学的摩耗と腐食摩耗に起因するもの、-2kV印加時の工具摩耗量を力学的摩耗に起因するものと見なして、0Vの場合の工具摩耗量に占める腐食摩耗の割合を求めると、平かな刃で12%、穴あけビットで44%の割合を示した。とくに穴あけビットでは、既報⁴⁾のベイマツ高含水率材切削における高速度鋼ビットの腐食摩耗割合の77%に比べると、気乾材切削における割合は低い値を示すものの、平かな刃に比べるとかなり高い値を示しており、腐食摩耗の割合が意外に高いことが明らかになった。

3.2 工具摩耗面のSEM観察

切削試験終了後の平かな刃と穴あけビットの工具摩耗面のSEM観察の結果をFig. 8とFig. 9に示す。

Fig. 8の平かな刃のSEM写真では、中央部が切れ刃、中央から左側部がすくい面、右側部が逃げ面

を示している。0V印加の場合は、腐食作用を受けて、逃げ面において基質部が著しく腐食され、炭化物粒子が顕著に浮き出している。平かな刃に-2kV印加して腐食摩耗を抑制した場合は、左側のすくい面上に切れ刃と平行に研削跡と見られる条痕が確認できる。これは、既報¹³⁾の高速度鋼かな刃によるベイマツ高含水率材の平削り加工における結果と同様である。平かな刃に+2kV印加して腐食摩耗を促進した場合は、炭化物粒子の浮き出しが観察され、逃げ面とすくい面全体が平滑になっており、刃先先端部の一部に、炭化物粒子の脱落と見られる比較的大きいくぼみが幾つか観察された。

Fig. 9の穴あけビットのSEM写真では、中央部がけづめ先端部であり、斜め上方がけづめ先端のビット中心軸側部分、斜め下方がけづめ外周面側を示している。0Vと-2kV印加の場合は、穴あけビットの切れ刃摩耗面の様相は、平かな刃と概ね同様であり、ビットに-2kV印加して腐食摩耗を抑制した場合は、けづめ先端部において、炭化物粒子の浮き出しが少なくなっている。一方、ビットに+2kV印加して腐食摩耗を促進した場合は、けづめ先端部に炭化物粒子の脱落と見られるくぼみが平かな刃と同様に多数観察された。

上記のように、気乾材切削においても、工具に印加した直流電圧の極性によって工具摩耗面の様相が異なり、また、工具摩耗の進行経過も異なることは、気乾材切削においても腐食作用が大きく関与していることを示すものである。

3.3 気乾材切削における工具摩耗の原因としての静電気関与についての一考察

ベイマツの気乾材切削では、電圧を印加しない通常切削における工具摩耗の進行は、力学的摩耗が主体になるが、腐食摩耗の影響も大きいことは前述したとおりである。ところで、気乾材やMDFの切削では静電気が発生し、工具摩耗の進行において、静電気が関与する放電摩耗等の電気的影響の存在も指摘されている^{10,11)}。そこで、気乾材切削時における静電気発生の挙動を、Fig. 4に示した平削り加工の平かな刃について検討する。

鋭利刃と摩耗刃で平削りした時に発生した静電気電圧の代表的な波形をFig. 10に示す。(a)の鋭利刃の静電気電圧は、 $-500 \sim +1020$ Vの範囲で変化しており、平均値は $+221$ Vである。一方、(b)の摩耗刃の静電気電圧は、 $-200 \sim +920$ Vの範囲で変化しており、平均値は $+70$ Vである。これらの測定値から、鋭利刃の方がより多くの電荷を切削時に発生していることがわかる。工具側で測定した電圧波形は、Stewartら¹⁰⁾が指摘しているように、工具と被削材との間で放電が繰り返し発生していることを示している。それは、波形における上下に突出したパルス状の波形変化から読み取ることができる。すなわち、切削によって発生し工具表面に帯電した電荷(静電気)が、ある一定値を超えたときに一気に外部に放電することで、このような突出した波形が現れたと考えられる。

鋭利刃と摩耗刃のいずれも、工具側の静電気電圧の平均値は正の値を示していることから、切削時に発生した静電気は、被削材側または切り屑側に電子が移動することによって生じたものといえる。切削の初期段階では、鋭利な刃先に切削抵抗が集中的に加わり、微細な欠けが生じるといわれているが、摩耗刃よりも鋭利刃の方が多くの静電気を発生していることから、この微細な欠けを起こす原因として、Stewartら¹⁰⁾が指摘している静電気による放電摩耗が関与している可能性がある。なお、木材切削における静電気発生のメカニズムは複雑で、発生原因の詳細は明らかではないが、工具と被削材の摩擦帯電のほかに、加工時の木材塑性変形域での木材間の剥離帯電等が複雑に関連して発生しているものと推測できる。また、切削時に発生する静電気電圧は、切

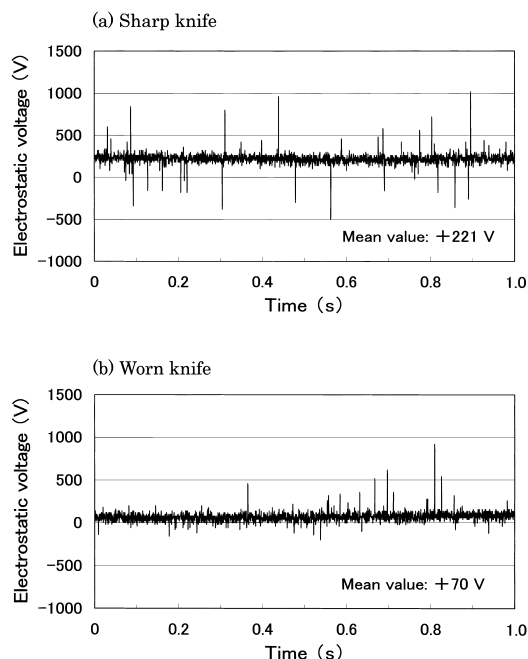


Fig. 10. Waveform of electrostatic voltage from planer knife while planing.

削時の雰囲気、とくに関係湿度の影響を大きく受けるため¹⁴⁾、関係湿度が低い状態で切削を行うと、測定される静電気電圧はさらに大きい値を示すことが予測され、工具摩耗にも影響を与えると予想される。

4. 結 論

本研究では、ベイマツ気乾材を供試し、高速度鋼工具に直流電圧を印加しながら平削り加工と穴あけ加工を行い、これらの工具摩耗の進行に及ぼす直流電圧印加の影響を検討した。さらに、電圧を印加しない状態で平削り加工において発生した静電気電圧を工具側から測定し、工具摩耗の原因としての静電気関与について考察を行った。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 平かな刃、穴あけビットともに、工具側に正の直流電圧を印加することによって、工具摩耗の進行が促進されるのに対し、負の直流電圧を印加した場合は工具摩耗の進行が抑制された。

(2) 工具摩耗の進行に及ぼす直流電圧印加の影響は、平かな刃よりも穴あけビットにおいて顕著に現れた。

(3) 工具に直流電圧を印加しない通常切削における工具摩耗量を力学的摩耗と腐食摩耗に起因するもの、 -2 kV印加時の工具摩耗量を力学的摩耗に起因するものと見なして、通常切削における工具摩耗

量に占める腐食摩耗の割合を求めると、平かな刃で12%、穴あけビットで44%であった。

(4) 平削り加工中に発生する静電気に基づく電圧(工具側)は、摩耗刃よりも鋭利刃の方が高い値を示した。また、測定した電圧波形から工具と被削材との間で放電が繰り返し発生していることがわかった。

(5) 気乾材切削における工具摩耗の原因として、力学的摩耗、腐食摩耗のほかに、静電気の関与について考察した。

謝 辞

静電気の測定等に対して種々ご指導賜った千葉大学山野芳昭教授に感謝の意を表します。

文 献

- 1) Kivimaa, E.: *Holz als Roh-und Werkstoff* **10**(11), 425-428 (1952).
- 2) Hillis, W. E., McKenzie, W. M.: *Forest Prod. J.* **14**(7), 310-312 (1964).
- 3) Klamecki, B. E.: *Holz als Roh-und Werkstoff* **36**, 107-110 (1978).
- 4) 福田英昭, 番匠谷薫, 村瀬安英: 木材学会誌 **38**(8), 764-770 (1992).
- 5) 福田英昭, 番匠谷薫, 萬谷哲朗, 村瀬安英: 木材学会誌 **40**(7), 687-693 (1994).
- 6) 番匠谷薫: 木材学会誌 **32**(6), 418-424 (1986).
- 7) 村瀬安英, 中嶋 章: 木材学会誌 **36**(10), 837-843 (1990).
- 8) “木材化学(上)”, 右田伸彦, 米沢保正, 近藤民雄編, 共立出版, 東京, 1968, pp. 458-461.
- 9) 佐藤公彦, 岸 孝雄, 西尾 茂: 鳥取県工試研報 **2**, 20-24 (1980).
- 10) Stewart, H. A., Srinivasan, S., Stiffler, A. K., Miller, D. B.: *Tribology International* **27**(5), 343-348 (1994).
- 11) King, A. F., Stewart, H. A., Mazzola, M. S.: Proc. 12th International Wood Machining Seminar, Kyoto, 1995, pp. 292-301.
- 12) 佐藤公彦: 第38回日本木材学会研究発表要旨集, 旭川, 1988, p. 13.
- 13) 福田英昭, 番匠谷薫, 村瀬安英: 琉球大学教育学部紀要 **64**, 207-219 (2004).
- 14) 上田 實: “静電気の事典”, 上田 實編, 朝倉書店, 東京, 1988, pp. 106-107.