

木材切削工具の切れ味測定と切れ味評価 (XXV)*

木材切削における切削現象の変化に及ぼす切削速度の影響

杉 山 滋

長崎大学教育学部技術教育教室

(平成15年10月31日受理)

Studies on Quantification of Sensuous Sharpness and Mechanical Sharpness of Wood Cutting Tools. XXV.*

Effects of Cutting Velocity upon Cutting Phenomena
in Orthogonal Cutting of Wood

Shigeru SUGIYAMA

Department of Technology Education, Faculty of Education,
Nagasaki University, Nagasaki 852-8521

(Received Oct. 31, 2003)

Abstract

Cutting tests of wood with the grain were made to obtain fundamental data on the effects of cutting velocity on chip formation, cutting force, and frictional coefficient by the use of an experimental apparatus designed for cutting tests (Fig. 1). The range of cutting velocity (V) employed in these tests were from 0.0023 to 52.53 m/sec. The depth of cut (feed of tool per revolution of a steel disk) was varied from 0.3 to 0.7 mm by varying the speed of the feed carriage in combination with two variable-speed motors and some pulleys (Fig. 1).

The main results obtained were :

(1) The type of chip formation, the curvature of the chip (ρ), and the checks occurring in the chip, change with V (Figs. 5~9).

(2) Although the cutting-force components change remarkably with V , the degree of their changes depends not only on the cutting conditions but also on the workpiece conditions. For instance, in the range of very-low cutting-velocity, below about 10 m/sec, the horizontal component (F_H) and the frictional force (F) of the cutting force, when cutting with air-dried workpieces, decrease remarkably with increases in V . In the range of V of about 10~30 m/sec, these components are not affected by V . In the range of V of about 30~53 m/sec, these components decrease gradually with increases in V . Compared with these, the vertical component (F_V) and the normal force (N) of the cutting force change slightly or vary little with V (Figs. 8 and 9).

(3) The frictional coefficient (μ), when cutting with water-saturated workpieces, is lower in comparison with that when cutting with air-dried workpieces, and μ , when cutting not only with water-saturated workpieces but also with air-dried workpieces, decreases with increases in V (Fig. 10).

* 本研究は、研究課題「木材切削工具の切れ味評価法（感覚切れ味と機械切れ味の定量化）に関する研究」の続報である。なお、本研究を「学校教育における木材加工（木工・工作を含む）学習指導のための技術的基礎研究（第29報） Technical and Fundamental Studies on Education of Wood Working Technical Education Lessons of School, XXIX.」とする。上記の研究（第28報）および標記の研究（XXIV）は、長崎大学教育学部紀要 —自然科学— 第69号 33~38（2003. 6）に掲載。

1. 緒 言

本研究では、新たに試作した高速木材切削実験装置¹⁾を用いて、低速度域から高速度域までの比較的広い切削速度の範囲で、木材の二次元切削実験を行い、切削現象および切削抵抗の変化に及ぼす切削速度の影響を究明し、これらに関する基礎的知見を得ようとした。さらに、切削現象とナイフすくい面の摩擦係数との関係についてを、ならびに、すくい面の摩擦係数の切削速度依存性とそれに及ぼす水分の作用についてを、摩擦理論などからの検討をも試みた。

2. 実 験

これまでの研究で検討してきた切削方法を用いて (Fig. 1~Fig. 4), 切削抵抗の各成分の測定, 摩擦係数の算出, および採取した切屑から曲率 (曲率半径の逆数) の測定, 生成形態の変化ならびに先割れの侵入の程度の観察・測定などを行った*¹。

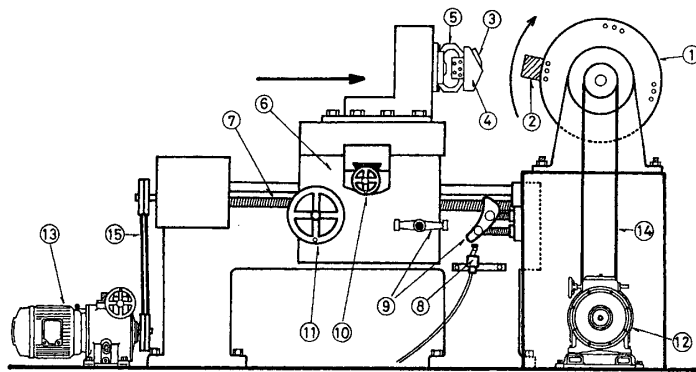


Fig. 1. Experimental apparatus for orthogonal wood cutting test (side view).

①: steel disk ; ②: test specimen ; ③: tool ; ④: base for holding tool ③ ; ⑤: octagonal elastic-ring dynamometer for measuring cutting-force components ; ⑥: feed carriage ; ⑦: lead screw ; ⑧: circuit breaker to shut off electric power ; ⑨: equipment for interrupting revolution of lead screw ⑦ ; ⑩ and ⑪: handles for cross-feed of tool ③ and traverse-feed of feed carriage ⑥ ; ⑫ and ⑬: variable speed motors ; ⑭ and ⑮: V-belts.

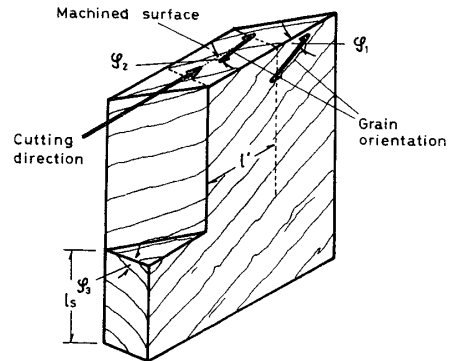


Fig. 2. Shape of test specimen.

ϕ_1 : grain angle (refer to Fig. 4) ; ϕ_2 : inclination of diagonal grain in machined surface to cutting direction ; ϕ_3 : angle of annual rings to machined surface ; l' : cutting length for measuring cutting force ; l_s : part of test specimen fixed in steel disk.

*¹ この実験に用いた工具は、その材質が高速度工具鋼SKH2で、刃先角 β は25°であり、逃げ角 α は10°一定となるように保った。切込量 t は0.3, 0.5, 0.7 mmの3段階とし、裏刃を装備させないで、二次元切削を行った。いずれの t の切削においても、試験片の繊維傾斜角 ϕ_1 を-10°(順目)、木理斜交角 ϕ_2 を0°、年輪接触角 ϕ_3 を0°~10°の範囲に入るような、いわゆる切削面が板目(木表側を切削)の目切れ材に試験片を調整した。

供試材には、切削速度依存性に関する実験結果を的確に把握するため、同程度の比重をもつ次の3樹種を用いた。即ち、ヒノキ [*Chamaecyparis obtusa*, 気乾比重(平均値) $r_u=0.40$, 含水率(平均値) $u=13.0\%$, 平均年輪幅 $l_t=2.76$ mm, 晩材率(平均値) $r_a=13.8\%$]、ベイツガ [*Tsuga heterophylla*, $r_u=0.38$, $u=14.3\%$, $l_t=0.98$ mm, $r_a=49.5\%$] およびレッドメランチ [*Shorea* sp., $r_u=0.38$, $u=13.0\%$] の気乾材を用いた。また、比較のために、上記のヒノキ材を飽水状態($u=83 \pm 5\%$)に調湿したものも用いた。

切削抵抗波形の測定では、オシログラフに描かれた切削初回から切削終了までの約30回の切削繰返しによる切削抵抗波形の中から、次のものを測定した。スチールディスクの回転軸から切削面までの距離 $D/2$ を予め決定しておき、それに対応する一つの切削抵抗波形を基準とし、その前後三つの波形、即ち、一試験片につき7回の切削抵抗波形を測定の対象とした。これを3個の試験片による繰返し(切削回数は合計21回)、その平均値をもって表した。なお、切削抵抗波形には、先割れの発生に伴う“付着(stick)ーすべり(slip)”現象が現れているが、“付着”の最大値を測定の対象とした。

切削速度 V は、0.0023 m/secの極低速度から52.53 m/secの高速度までの約9~14段階に変化させた。なお、荷重装置の追従性による切削抵抗の誤差を10%以下にするため、 V の最大限度を52.53 m/secとした。

3. 実験結果および考察

3.1 切削現象の変化に及ぼす切削速度の影響

採取した切屑から、切屑の変形様相の観察と、切屑の曲率 ρ 、先割れの侵入の程度（本実験では、先割れの侵入長さ l_c 、侵入角 ϕ_c および侵入間隔 h_c ）の測定を行った。

切屑の生成形態は、折れ型の変形形態、流れ型および両者の中間の形態が観察された*2。それらの結果を Fig. 5 に示す。切屑の生成形態は、切削速度 V の増加に伴い、折れ型から流れ型へ変化する傾向を示すようである。この傾向は、気乾材の各樹種において顕著に現れるが、ヒノキ飽水材では、 V の広い範囲（ただし、極低速度域を除く）にわたって流れ型の様相を呈した。また、いずれの被削材においても、切込量 t の小さい場合には、一般に、切屑は、 V の変化に伴う切屑の生成形態の変化に関連して、切屑の曲率 ρ および先割れの侵入程度にも変化をもたらす。最初に、 ρ と V との関係の一例 ($t=0.7\text{ mm}$ の場合) を Fig. 6 に示す。同図から明らかなように、いずれの被削材においても、 V の増加に伴い ρ は低速度で急激に減少し、中・高速度域で比較的緩やかに減少する傾向を示した。ヒノキ飽水材においても同様の傾向を示し、 ρ は気乾材の 1/2 弱であった。

つぎに、先割れの侵入の程度と V との関係の一例 ($t=0.7\text{ mm}$ の場合) を Fig. 7 に示す。気乾材の場合、いずれの樹種においても h_c は V の増加に伴い漸増の傾向を、 l_c は漸増の傾向（低速度から中速度域の範囲）か、あるいはほぼ一定の傾向（中速度から高速度域の範囲）を、また、ヒノキ飽水材の場合、 h_c および l_c は V の変化には殆ど無関係で一定の傾向をそれぞれ示した（ヒノキ気乾材 $t=0.7\text{ mm}$ の場合、 l_c は高速度域で漸減の傾向を示しているが、他の t の場合においては、中・高速度域でほぼ一定の傾向を示している。本文では、とくに特記しない限り、すべての t についての一般的傾向を述べることとする）。一方、 ϕ_c はいずれの t の場合でも、 V の増加に伴い漸減の傾向を示した。とくに低速度域で

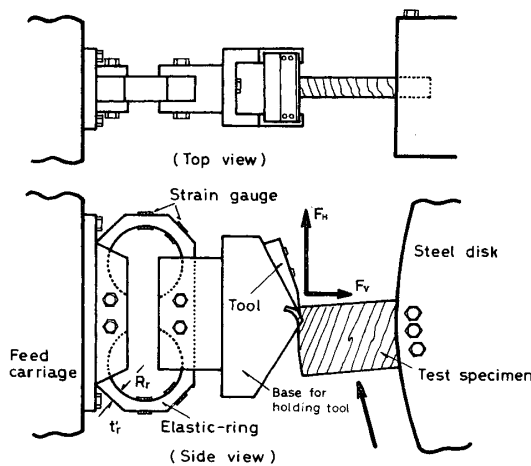


Fig. 3. Close-up view of experimental apparatus and method for measuring cutting-force components.

F_h and F_v : horizontal and vertical components of cutting-force; R_r and t_r : radius and thickness of elastic-ring.

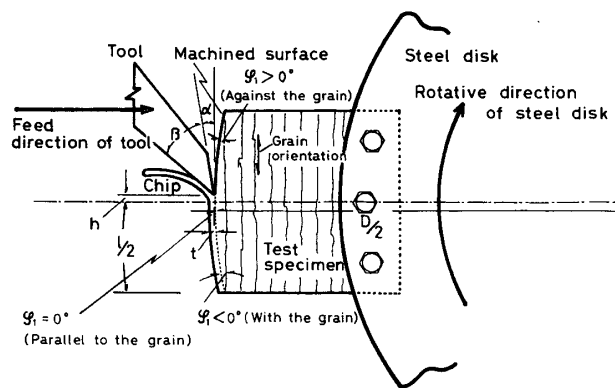


Fig. 4. Grain orientation of test specimen in relation to cutting direction.

ϕ_1 : angle of grain orientation to machined surface (grain angle); $D/2$: radius from axis of rotation of steel disk to machined surface of workpiece; l : cutting length; h : distance between tool edge and center line of steel disk; α and β : clearance and sharpness angles of tool; t : depth of cut.

*2この研究では、便宜上、つぎのように切屑の生成形態を分類した。即ち、切屑の裏面（工具切れ刃すくい面と接触する側）と側面とに、折れ型特有の破折された跡が肉眼で観察され、しかも切屑の側面からは先細りとなった一節一節の切屑の小片が明瞭に観察される場合を“順目切削における折れ型の変形形態”，上記の様相が全く観察されない場合を“流れ型”，および上記の様相の判定が不明瞭な場合を“両者の中間の形態”とした。

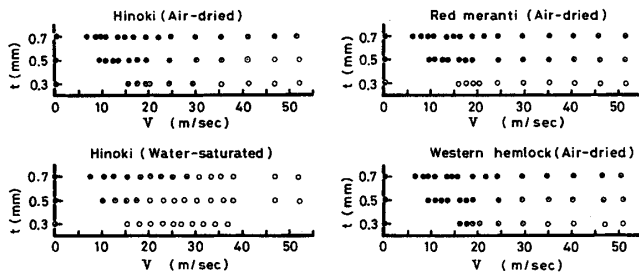


Fig. 5. Effects of cutting velocity (V) on types of chip formation.

○ : familiar type to continuous flow type of chip formation ;
 ● : split type of chip formation in cutting with the grain ;
 ◐ : intermediate type between continuous flow type and split type ;
 t : depth of cut.

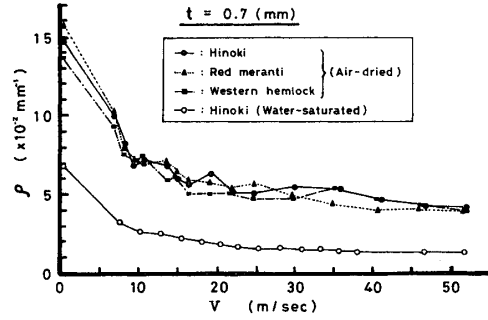


Fig. 6. Relation between cutting velocity (V) and curvature of chip (ρ).

t : depth of cut.

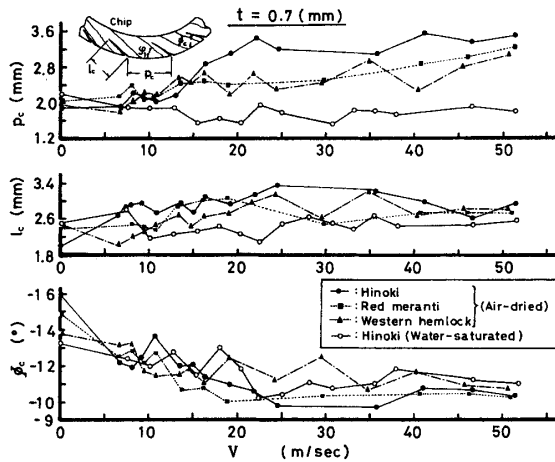


Fig. 7. Variations of length (l_c), pitch (p_c) and angle (ϕ_c) of checks occurred in chip with cutting velocity (V).

t and ϕ_1 : refer to Fig. 4.

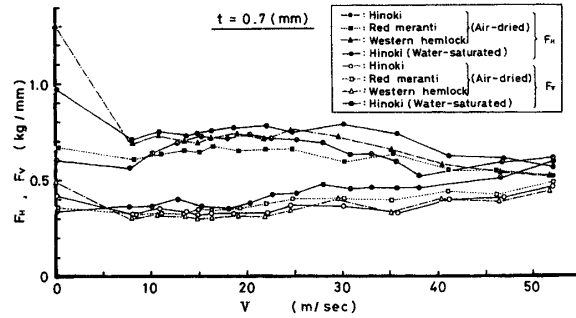


Fig. 8. Variations of horizontal component (F_H) and vertical component (F_V) of cutting force with cutting velocity (V).

t : depth of cut.

は、 ϕ_c は被削材の繊維傾斜角 ϕ_1 (この研究では、順目の 10°) より大きい角度であるが、 V の増加に伴い ϕ_c は、 $\phi_1 = -10^\circ$ に漸近する。これは先割れの二次的発達の変化を意味すると思われる。即ち、低速度域では、切れ刃の前進により刃先前方の被削材に生じた先割れは、 ϕ_1 にほぼ平行して生じるが、その後、切屑が切れ刃すくい面を擦過する過程で、切屑がすくい面により上方へ押し曲げられる。その結果、 ϕ_1 とほぼ平行して侵入した先割れの二次的発達を促し、 $\phi_1 = -10^\circ$ より傾斜の大きい角度で割れの侵入を促す。しかし、このような割れの二次的発達は、 V の増加に伴い次第に減少してくる。

以上のような V の変化に伴う切削現象の変化は、切屑の腰の強さの変化を意味すると思われる。即ち、 V の増加に伴い、より腰の強い切屑が生成される。

3.2 切削抵抗の変化に及ぼす切削速度の影響

切削速度 V の変化に伴う工具切れ刃面に加わる切削抵抗の水平分力 F_H および垂直分力 F_V の測定例を Fig. 8 に示す。同図から明らかなように、低速度域では、気乾材の場合、 V の増加に伴い F_H は漸減傾向を示すが、ヒノキ飽水材の場合、むしろ若干漸増の傾向を示す。しかし、いずれの被削材においても、中速度域では、 F_H は、 V の変化には殆ど無関係で一定の傾向を示すが、高速度域では、 V の増加に伴い、気乾材では漸減の傾向を、ヒノキ飽水材では漸増の傾向を、それぞれ示した。

一方、 F_v は、いずれの実験条件下においても正の方向(工具が材を上方へ引張る方向)に作用する。 F_v の変化に及ぼす V の影響は、低速度を除けば、いずれの被削材においても比較的類似した傾向を示した。即ち、低速度域では、 V の増加に伴い F_v は漸減の傾向(気乾材の各樹種で比較的切込量 t の大きい場合)か、あるいはほぼ一定の傾向(気乾材の各樹種で $t = 0.3 \text{ mm}$ の場合およびヒノキ飽水材の場合)を示すが、いずれの条件下でも、中速度域ではほぼ一定の傾向を、また、高速度域では漸増の傾向を、それぞれ示した。

次項では、すくい面の摩擦係数 μ について検討する。そのために、 F_H および F_v を用いて、次式により μ の成分である摩擦力 F および垂直力 N を求めた。

$$\left. \begin{aligned} F &= F_H \cos \theta - F_v \sin \theta \\ N &= F_H \sin \theta + F_v \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 θ は工具切れ刃の切削角である。

(1)式から求められる F および N の V の変化に伴う変化の一例を Fig. 9 に示す。 F は、気乾材の場合、 V の増加に伴い、低速度域では漸減の傾向を、中速度域ではほぼ一定の傾向を、また、高速度域では漸減の傾向を、それぞれ示したが、ヒノキ飽水材の場合、 V の増加に伴い、低・中速度域では緩やかに漸増する傾向(比較的 t の大きい場合)を、また、高速度域では漸減する傾向を、それぞれ示した。

一方、 N は、気乾材の場合、 V の増加に伴い、低速度域では漸減の傾向を、中・高速度域では緩やかに漸増する傾向(比較的 t の大きい場合)か、あるいはほぼ一定の傾向($t = 0.3 \text{ mm}$ の場合)を、それぞれ示したが、ヒノキ飽水材の場合、 V の増加に伴い、低・中速度域では漸増の傾向を、また、高速度域でも漸増の傾向を、それぞれ示した。

3.3 すくい面の摩擦係数の変化に及ぼす切削速度の影響

前項で求めた摩擦力 F および垂直力 N を用い、次式からすくい面の摩擦係数 μ を算出した^{*3}。

$$\mu = F/N \quad (2)$$

(2)式から求められる μ の計算例を Fig. 10 に示す。気乾材の場合、 μ は、低速度域では、

*3 一般のすべり摩擦の実験と異なり、切削における工具すくい面と切屑との摩擦では、 F および N が同時に変化する。したがって、 μ は、 N の増加(または、減少)に対する F の増加(または、減少)の割合を意味することになる。Fig. 9 から明らかなように、例えば、気乾材の各樹種の場合、低速度域で μ が V にはほぼ無関係で一定の傾向となるのは、 F および N がともに漸減の傾向を示し、しかもその減少割合(即ち、 F の N に対する割合)がほぼ等しいことを意味し、中速度域で μ がほぼ一定の傾向か、あるいは V の増加に伴い緩やかに漸減する傾向となるのは、 F が V にはほぼ無関係で一定の傾向を意味し、また N がほぼ一定か、あるいは緩やかに漸増する傾向を示すから、 F の N に対する割合が小さくなることを意味し、また、高速度域で μ が減少傾向を示すのは、 V の増加に伴い F は漸減、逆に、 N は漸増の傾向をそれぞれ示すから、 F の N に対する割合は極めて小さくなることを意味する。

このように、 V の増加に伴い F の N に対する割合が次第に小さくなると、これが原因の一つとなって切削現象に変化をもたらす。即ち、 F の N に対する割合が小さくなると、 N の割には比較的小さい F が働くことを意味するから、切屑は工具すくい面上を比較的滑らかに擦過し(工具すくい面への切屑のくいつきが小さい)、小さい曲率 ρ と低い割れの侵入角度 ϕ_c をもつに至る (Fig. 5~7)。即ち、 μ の減少は、より強い切屑を形成することになる。なお、このような μ の低下と切削現象との関係は、既往の結果²⁾⁻⁹⁾ともよく類似している。

つぎに、摩擦係数の切削速度依存性とそれに及ぼす含有水分の作用については、摩擦の凝着と潤滑の両作用に基づき、つぎのように考察し得る。繊維飽和点以上の、いわゆる自由水がある程度以上に存在する高含水率領域では、水分付与による凝着効果^{6),7)}と、この自由水による潤滑効果が現れる。極低速度においては、後者の作用が極めて小さく、もっぱら前者の効果のために、飽水材の μ は気乾材のそれより大きくなること⁸⁾もあり得る。しかし一般には、低速度域でも速度の増加に伴い潤滑効果が次第に現れるようになり、この効果のために、飽水材の μ は、気乾材のそれよりも小さくなる。さらに高速度域になれば、潤滑効果がより顕著に現れるようになり、多量の自由水による“境界潤滑的作用”をより促し、その結果、 μ は次第に減少して行く、と推察される。

本実験条件下では、前記したように、切削時に先割れの発生を伴うから、切削抵抗波形には“付着—すべり”が現れる。このうちの“付着”の最大値を測定したから、“付着”の速度依存性も考える必要がある。“付着—すべり”を起す摩擦の場合、“付着”に基づく摩擦係数 μ_c と“すべり”に基づく摩擦係数 μ_s とがあり、その速度依存性がそれぞれ異なる。 μ_c は、速度には影響されず、ほぼ一定の傾向を示すが、 μ_s は、 μ_c より大きく、しかも速度の増加に伴い減少し、ついには μ_c に漸近する傾向を示すことが報じられている⁹⁾。即ち、速度の増加に伴い“付着”は次第に小さくなり“すべり”に近づき、摩擦係数の減少をもたらす。本実験では、気乾材、飽水材いずれの場合も速度の増加に伴い μ は減少し、前記したような切削現象の変化をもたらした。このことは、速度の増加に伴い工具すくい面と切屑との“付着”が減少し、“すべり”に接近したことを意味する、と考えられる。

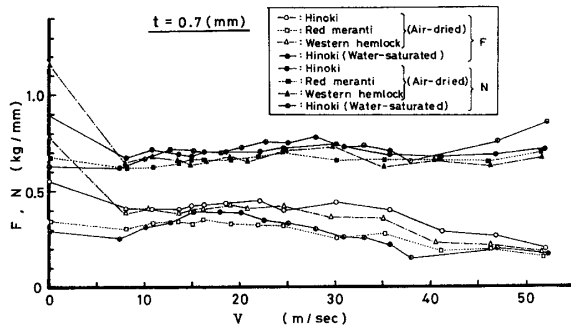


Fig. 9. Variations of frictional force (F) and normal force (N) with cutting velocity (V).

t : depth of cut.

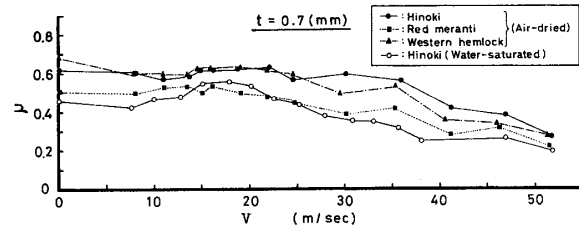


Fig. 10. Variations of frictional coefficient (μ) with cutting velocity (V).

t : depth of cut.

切削速度 V の変化にはほぼ無関係で一定の傾向を、中速度域では、ほぼ一定の傾向(比較的切込量 t の小さい場合)か、あるいは V の増加に伴い緩やかに漸減する傾向 ($t=0.7$ mm の場合) を、また、高速度域では、 V の増加に伴い漸減の傾向を、それぞれ示した。一方、ヒノキ飽水材の場合、 μ は、低・中速度域では、 V の変化にはほぼ無関係で一定の傾向(比較的 t の小さい場合)か、あるいは V の増加に伴い緩やかに増加し、のちに減少する傾向(即ち、低・中速度域で、緩やかなマキシマムカーブを描く傾向) ($t=0.7$ mm の場合) を、また、高速度域では漸減する傾向を、それぞれ示した。なお、ヒノキ飽水材の場合、気乾材の各樹種と比較して、 μ は、いずれの速度域においても一般に低い値を示した(前頁の脚注*3参照)。

4. 摘 要

高速木材切削実験装置を用いて、木材の二次元切削実験を行い、切削現象、切削抵抗およびすくい面の摩擦係数 μ の変化に及ぼす切削速度 V の影響について検討した。その結果、 V の増加は、切削現象ならびに切削抵抗、および μ に変化をもたらすことが判明した。 μ の変化に及ぼす V の影響、および切削現象の変化と μ との関係について、切削抵抗や摩擦の理論などから論じた。

文 献

- 1) 杉山 滋：長崎大学教育学部紀要 —自然科学—，第68号，29～34 (2003)。
- 2) 杉山 滋：木材学会誌，24，19 (1978)。
- 3) 杉山 滋：木材学会誌，25，719 (1979)。
- 4) 杉山 滋：木材学会誌，26，783 (1980)。
- 5) P. Koch：“Wood Machining Processes”，N. Y. Ronald Press Co.，p. 35～110 (1960)。
- 6) 村瀬安英：木材学会誌，24，865 (1978)。
- 7) 村瀬安英：木材学会誌，26，61 (1980)。
- 8) 杉山 滋：木材学会誌，23，534 (1977)。
- 9) 日本潤滑学会編：“潤滑ハンドブック”，養賢堂，p. 2～57 (1980)。