



Title	木材切削工具の切れ味測定と切れ味評価(XXIII): 木材切削における切削抵抗と工具すくい面上の切屑接触長さの変動(川尻 伸也 教授退官記念)
Author(s)	杉山, 滋
Citation	長崎大学教育学部紀要. 自然科学. vol.68, p.15-21; 2003
Issue Date	2003-03-26
URL	http://hdl.handle.net/10069/6119
Right	

This document is downloaded at: 2019-06-25T22:03:20Z

木材切削工具の切れ味測定と切れ味評価(XXIII)*

木材切削における切削抵抗と工具すくい面上の切屑接触長さの変動

杉 山 滋

長崎大学教育学部技術教育講座

(平成14年10月31日受理)

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

On the Variation of the Cutting-Force Component and the Chip-Tool Contact-Length in Orthogonal Cutting of Wood

Shigeru SUGIYAMA

Department of Technology, Faculty of Education,

Nagasaki University, Nagasaki 852-8521

(Received Oct. 31, 2002)

Abstract

In order to make clear the cutting mechanisms which are related to cutting forces, tool wear, properties of veneer and so on, a more systematic research under actual cutting conditions should be carried out. For that purpose, it is important and necessary to make clear the actual variations of the cutting force components and the contact length on the interface between the tool and the chip in orthogonal wood cutting. In the present paper, their variations are measured under various cutting conditions.

1. 緒 言

工具すくい面上の切削応力分布を測定した研究は非常に乏しく、これまでに、筆者が試作・考案した分割工具を用いての切削応力分布の測定^{1)~3)}があるのみにとどまっている。切削応力分布の測定が非常に困難を極めているその主な理由として、切削中のすくい面上の切屑接触長さが極めて小さいし、その大きさ自体が著しく変動していること、その原因である切削された切屑が加工面粗さをもち、これがかなり大きく切削中に変動すること、などがあげられる。本報では、筆者がこれまでに測定して明らかにしてきた工具すくい面上の切削応力分布^{1)~3)}やそれらに基づいて算出される工具すくい面の摩擦係数⁴⁾が、実際の切削時の変動を考慮した場合に、どのような切削状況での切削応力分布や摩擦係数であるかを、種々の切削条件下で切削抵抗の変動や工具すくい面上の切屑接触長さの変動

* 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27報) Technical and Fundamental Studies on Education of Wood Working in Technical Education Lessons of School, XXVII.」とする。上記の研究(第26報)および標記の研究(XXII)は、長崎大学教育学部紀要 - 自然科学 - 第65号 p. 21~27 (2001. 6)に掲載。

との関係から、求められた切削応力分布や摩擦係数の測定値の位置付けやそれを求める意義について明らかにする。

2. 切削抵抗とすくい面上の切屑接触長さの変動の測定方法

分割工具、あるいは通常工具を用いて切削する状態を Fig. 1 に示す。いずれの工具の場合も、切削実験装置に一定の逃げ角を保つよう固定されている。試験片は、送りテーブル台上に固定された八角形弾性リング荷重装置に固定され、昇降テーブルの移動により試験片に所定の切込量を与えたのちに、送りテーブルの移動により切削される。このような実験装置での切削において、八角形弾性リング荷重装置から検出されるものは、いずれの工具の場合も、工具によって試験片（被削材）に加えられる切削力の水平分力 F_H および垂直分力 F_V であり、工具を固定する側から検出されるものは、分割工具の場合には、切削抵抗の垂直成分 N （垂直力）および摩擦成分 F （摩擦力）であり、通常工具の場合には、切削抵抗の水平分力 R_H および垂直分力 R_V である。分割工具による切削実験の様子を Photo. 1 に、通常工具による切削実験の様子（工具を保持するアームにストレインゲージが貼付されている、即ち、片持梁方式の切削抵抗測定装置を兼ねる）を Fig. 2 に示す。このような実験装置を用いて、切削抵抗とすくい面上の切屑接触長さを測定し、それらの変動について検討する。

3. 実験と考察

3.1 実験例 1

3.1.1 実験方法（脚注*1参照）

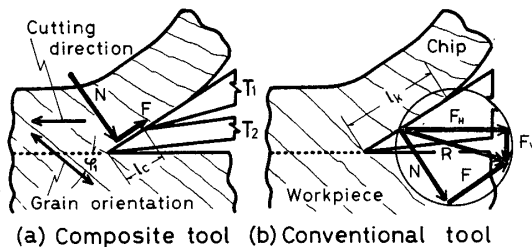


Fig. 1. Tools used in this study and cutting forces measured.

ℓ_c : rake face length of T_2 -knife; ℓ_k : actual tool-chip contact length; φ_1 : angle made between cutting direction and grain orientation of wood being cut (grain angle); N, F : normal and frictional forces acting on T_2 -knife of composite tool or normal and frictional forces acting on conventional tool; R : resultant force of cutting force; F_H, F_V : horizontal and vertical components of cutting force.

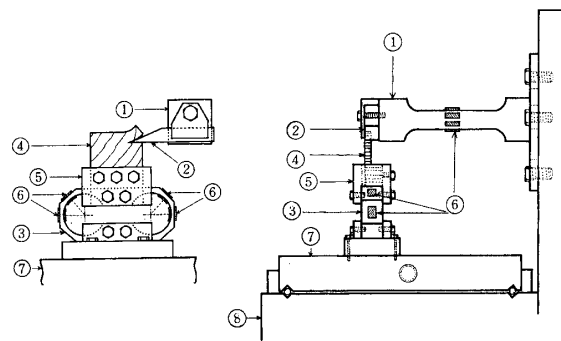


Fig. 2. Cutting method with conventional tool and experimental apparatus.

①: tool carriage of canti-lever type, ②: conventional tool, ③: octagonal elastic-ring dynamometer, ④: test specimen, ⑤: bracket for fixing test specimen, ⑥: strain gauge, ⑦: feed carriage, ⑧: lift table.

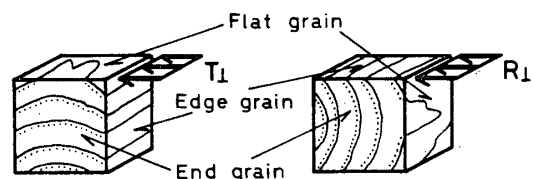


Fig. 3. Cutting direction.

*1 実験装置の概要は、既報^{3), 4)} とほぼ同様である。模式図に示すと、Fig. 1 のようである。供試工具は、兼房刃物⁵⁾製のナイフ（刃先角 21° ）で材質はSKH2である。このナイフは、切削実験装置上方の定盤に逃げ角 1° を保つよう固定されている。

供試材は、フィリピン産レッドラワン材の同一原木から辺材をとり除いた部分から、70（切削長） \times 60 \times 8~10（切削幅）mm の寸法に採取された。気乾状態（平均気乾比重0.51, 含水率10.1~12.5%）と飽水状態（4~6カ月水中に浸漬し、水中に沈んだ状態）に調整後、それぞれ供試された。

切削方向は、Fig. 3 に示すように、切削面が柎目の横切削 R_1 （木表側より切削）と切削面が板目の横切削 T_1 の2方向と、それらの縦切削（ R_2, T_2 ）も行った。切込量 t は、0.3~7.0 mm の範囲の16段階で、プレッシャバーなしの二次元低速（試験片送り速度 144.9 mm/min）の切削を行い、それぞれの t に対して約20回繰り返し切削を行った。1回の切削では、切削長さによって電磁オシログラフに記録された切削抵抗のそれぞれ極大波高さを測定し、それらの平均値を荷重に換算し、切削幅で除して単位切削幅当りの切削抵抗として表現した。

すくい面上の切屑接触長さ ℓ_k は、つぎのようにして測定した。切削中の工具側面観察が可能な片持梁方式の工具保持装置を用い、通常工具を取り付け、それらを装備した切削実験装置の前面からモータドライブ付きカメラにより、全切削長さの中央付近について40コマの撮影（3.5コマ/sec）をそれぞれの試験片について行い、そのネガフィルムを20倍に拡大して切削中の ℓ_k の測定を行った。

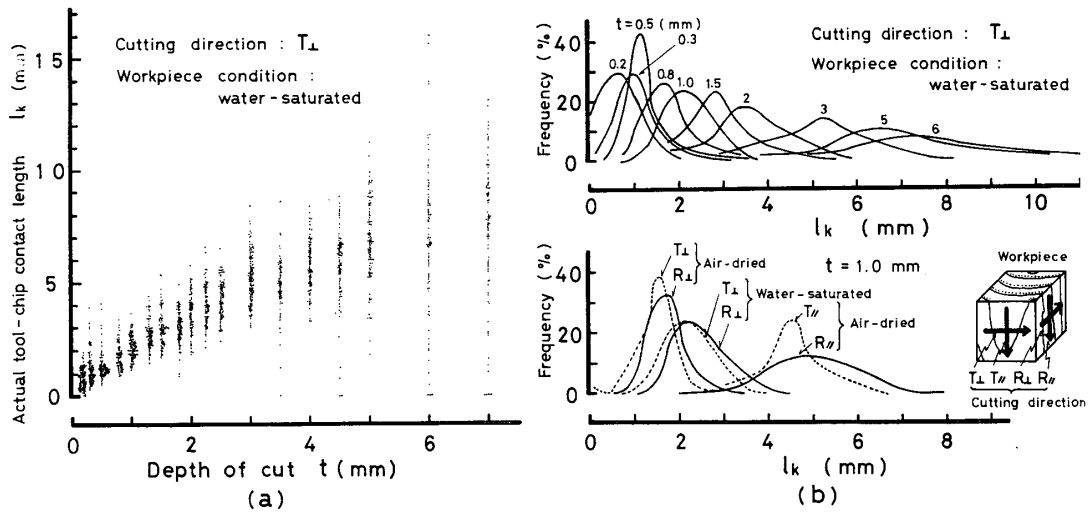


Fig. 4. Variation of actual chip-tool contact length (l_k).

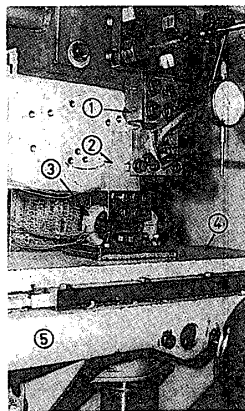


Photo. 1. View of experimental apparatus. ①: composite tool for cutting resistance measurement, ②: test specimen, ③: octagonal elastic-ring dynamometer for cutting force measurement, ④: feed carriage, ⑤: lift table.

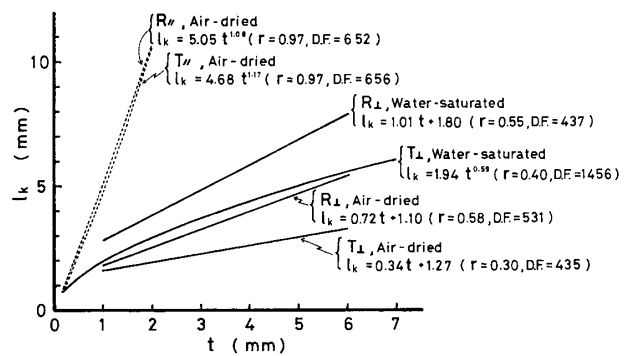


Fig. 5. Relation between chip-tool contact length (l_k) and depth of cut (t). T_{\perp} , T_{\parallel} , R_{\perp} and R_{\parallel} refer to Fig. 3; r : correlation coefficient; $D.F.$: degree of freedom.

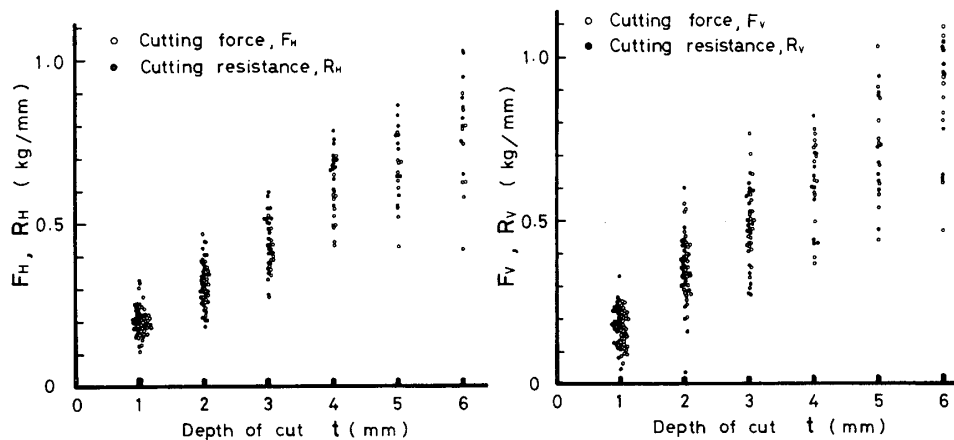


Fig. 6. Comparison of cutting force with cutting resistance. workpiece: air-dried red lauan; cutting direction: T_{\perp} in Fig. 3; cutting condition: $\alpha = 1^\circ$, $\beta = 21^\circ$, cutting speed $f = 144.9$ mm/min, without pressure bar.

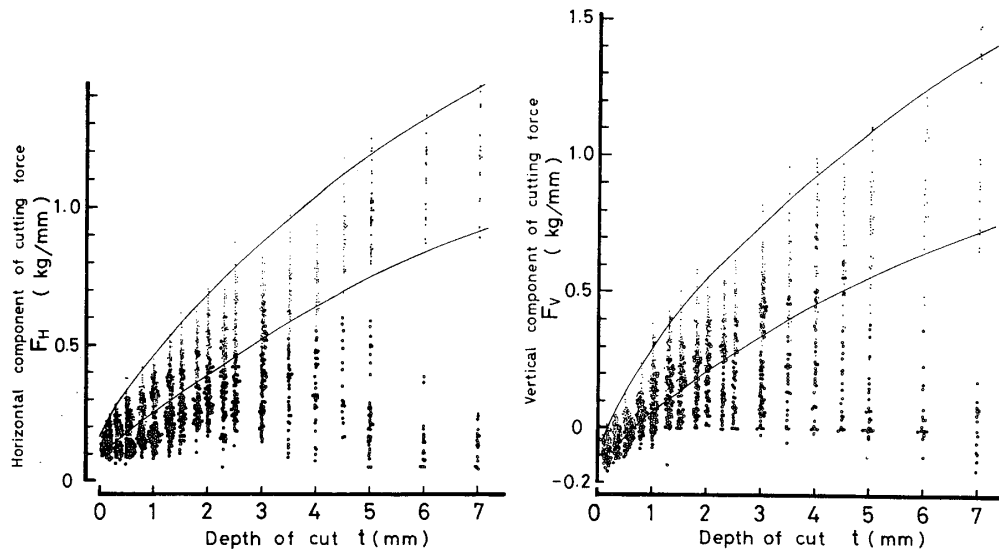


Fig. 7. Variation of horizontal component (F_H) and vertical component (F_V) of cutting force. cutting condition: refer to Fig. 6.

Table 1. Values of coefficient (α_o, β_o) in Eq. (2).

Cutting direction	Workpiece condition	Depth of cut (mm)	F_H (kgf/mm)				F_V (kgf/mm)			
			α_o	β_o	r	D. F.	α_o	β_o	r	D. F.
T_{\perp}	W	$t=0.2\sim 7.0$	0.15	0.17	0.94	1156	0.16	-0.01	0.90	931
T_{\perp}	A	$t=1.0\sim 6.0$	0.15	0.13	0.93	285	0.14	0.01	0.90	264
R_{\perp}	W	$t=1.0\sim 6.0$	0.13	0.15	0.95	192	0.12	0.00	0.93	172
R_{\perp}	A	$t=1.0\sim 6.0$	0.11	0.14	0.95	315	0.15	-0.04	0.94	285

Cutting direction, T_{\perp} and R_{\perp} : refer to Fig. 3; workpiece condition; A (W): air-dried (water-saturated) condition; t : depth of cut (mm); cutting condition: refer to Fig. 6; r : correlation coefficient; D. F.: degree of freedom; F_H (F_V): horizontal (vertical) component of cutting force (kgf/mm).

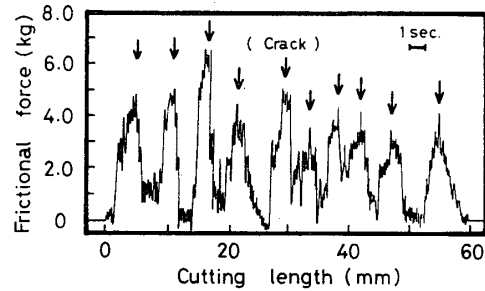


Fig. 8. Oscillograph record of frictional force. depth of cut: 4 mm; cutting width: 9.9 mm; workpiece: water-saturated red lauan; cutting direction: T_{\perp} in Fig. 3.

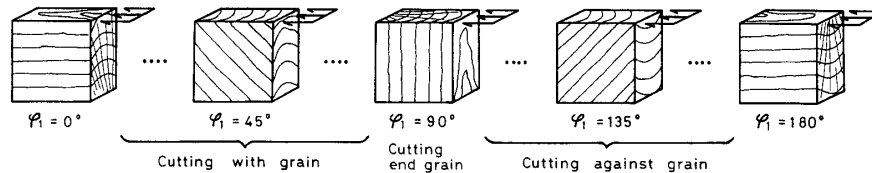


Fig. 9. Relative grain orientation of test specimen to cutting direction. ϕ_1 : refer to Fig. 1. Arrows in the figure show the cutting direction of the tool.

3. 1. 2 実験結果および考察： 工具すくい面上の切屑接触長さ l_k の測定結果の一例を Fig. 4 (a), (b)^{*2}に示す。 l_k の変動から考えてみても、工具すくい面上の切削応力分布やすくい面の摩擦係数の測定が極めて難しいことが判る。また、仮に、切削応力分布や

*2 Fig. 4 (a)は、被削材として飽水材を用い、板目の横切削の例であるが、平均的に考えれば、 l_k と切込量 t との関係は指数曲線で表される。プレッシャーなしの切削では、 t が増加するほど折れ型切屑の要素が大となり、 l_k の変動は激しく、裏割れの発生する直前、直後で、その l_k に大きな差が生じる。この変動状態を頻度曲線にすると、Fig. 4 (b)のようである。図のように、平均値付近に最も度数集積がみられ、 t が大きくなるほど平均値付近の度数集積が減少する。この正規分布に類似した頻度曲線から考えると、実際の切削中のすくい面上の任意位置における応力の変動も同様な傾向になることが推測される。とくに、すくい面の刃先からの位置によっては、裏割れの存在のため、みかけ上の接触長さとなる部分が存在し、その結果、生じる切削抵抗の変動はきわめて激しいことが予想される。

Fig. 4 (b)に示した切削方向による l_k と t との関係を Fig. 5 に示す。同図は Fig. 4 (a)のような測定結果を統計的処理によって実験式にまとめたもので、実際には、上記のような変動の平均的なものである。 t の範囲の相異と相関性から、直線で近似した方がよいように思われる場合には図のように直線で示した。当然予想されるように、横切削よりも縦切削の方が、切削面が板目より柾目の方が、および気乾材よりも飽水材の方が、 l_k がより大きい。 l_k が大きくなれば、それだけすくい面に働く応力分布の測定が容易になることを意味する。しかし、Fig. 4 (b)の $t=1$ mm の場合を一例とした切削方向別の頻度曲線からも明らかなように、縦切削よりも横切削の方が、柾目よりも板目の方が、および飽水材よりも気乾材の方が、平均値付近の度数集積率が大きく(標準偏差が小さい)、工具すくい面で安定した切屑接触長さを与えている(柾目の縦切削では交錯木理の影響による変動と考えられる)。

摩擦係数を測定できたとしても、それらの値の変動は切込量 t の増加とともに大きくなり、すくい面全体で応力分布や摩擦係数の変化の傾向を知ることは容易なことではないことが判る。このような l_k 変動を考慮しつつ切削応力分布や摩擦係数の測定を進めるには、Fig. 5の平均的な切屑接触長さ l_k を用いることにより、工具すくい面から切屑の離脱点までの長さを概ね知ることができ、この範囲における切削応力分布や摩擦係数を求めることができる。

つぎに、切削力（水平分力 F_H ，垂直分力 F_V ）と切削抵抗（水平分力 R_H ，垂直分力 R_V ）を比較検討した実験結果を Fig. 6 に示す。図より明らかなように、 F_H と R_H ，および F_V と R_V は、本実験の低速実験（材の送り速度144.9 mm/min）では切屑の排出力が問題にならないため、いずれの両者の間には有意差が認められず同一とみなし得た（即ち、 $F_H \doteq R_H$ ， $F_V \doteq R_V$ ）。このような F_H （あるいは R_H ）， F_V （あるいは R_V ）と垂直力 N および摩擦力 F との関係は、次式で表される。即ち、切削角を θ とすれば、

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

分割工具は、一種の通常工具とみなし得る使い方ができるから、このような分割工具による切削で、八角形弾性リング荷重装置から測定される F_H ， F_V を用い、(1)式によって N ， F に換算すると、それらの N ， F は分割工具による N ， F の測定値と一致した。

プレッシャバーを作用させない場合の切削では、切削抵抗の変動は極めて著しい。切削抵抗（水平分力 F_H および垂直分力 F_V ）の変動を、Fig. 7 に示す。同図のように、 F_H の極大値（図中の●印）と極小値（図中の○印）との差、および F_V の極大値（●印）と極小値（○印）との差は、切込量 t が大きくなるほど著しい。この研究で対象としているレッドラワン横切削では、 F_H ， F_V と t との間には、

$$\left. \begin{aligned} F_H \\ F_V \end{aligned} \right\} = \alpha_0 t + \beta_0 \quad (2)$$

の関係が成立するが、そのうち切削抵抗が極大値を示す値をそれぞれ測定し、(2)式に示す係数 α_0 ， β_0 および相関係数 r などを Table 1 に示す。同表のように割れの発生の直前では、比較的 t との相関が高い。このような変動の中で、工具すくい面上の切削応力分布や摩擦係数の変化を比較的正確に測定するためには、工具と切屑とが最も接触すると考えられる個々の割れの発生する直前の抵抗波形が、極大値を示す部位を測定することが、最も妥当と考えられる。

このような測定方法を採用として、オシログラフに描かれた抵抗波形を、 F を一例として Fig. 8 に示す。同図によれば、工具切れ刃による割れの繰返しである現象がよく判る。このような切屑が工具すくい面を擦過するから、 F の波形は巨視的にみれば、ノーズ部を含め工具すくい面と切屑との接触による一種のスティックスリップ現象ともみなし得る。さらに微視的にみた場合、割れの発生前後の一塊の切屑発生をみるにいたる間でもスティックスリップが現れている。切削の場合、垂直荷重 N が時々刻々変化するから、一般の物理現象でいう摩擦のスティックスリップとは様子を異にしている。前者のようなスティックスリップは割れの発生による木材切削特有の現象であり、後者のそれとは本質的に異なる。前述のような測定方法を採用すれば、それぞれの割れにいたるまでのスティックスリップの極大値をそれぞれ測定することになるから、このような測定方法

における F は、静摩擦力の極大を意味することになるから、切削応力（垂直応力 σ および摩擦応力 τ ）の分布から求め得るすくい面の摩擦係数 $\mu (= \tau / \sigma)$ 、または N , F から求め得る摩擦係数 $\mu (= F / N)$ は、いずれも静摩擦係数を意味する。

3.2 実験例 2

3.2.1 実験方法 (脚注*参照)

3.2.2 実験結果および考察： 通常工具による切削実験を、試験片の繊維傾斜角 φ_1 を変化させて行い、切屑接触長さ l_k を測定した。その結果を Fig. 10 に示す。また、 F_H および F_V の測定結果（片持梁方式の切削抵抗測定装置から測定される R_H および R_V とは、 $F_H \equiv R_H$, $F_V \equiv R_V$ とみなし得た）を Fig. 11 に示す。なお、 θ を用い、(1)式により N および F を求めた結果を Fig. 11 に図示している。さらに、 F , N とから $\mu (= F / N)$ を求め、その結果をも Fig. 11 に示した。

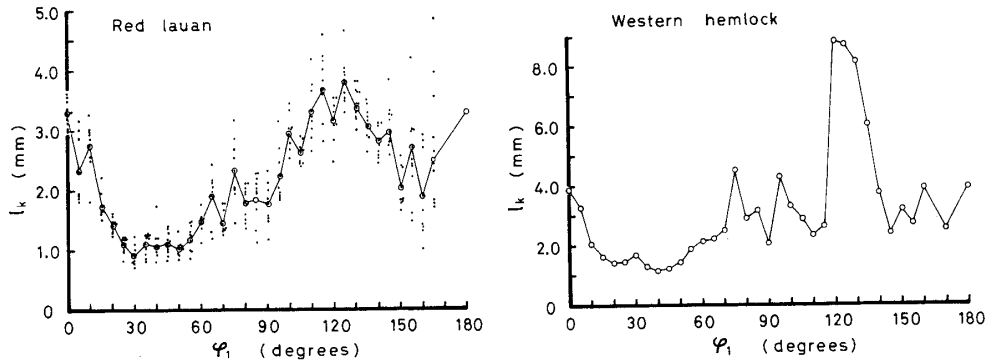


Fig. 10. Relation between actual tool-chip contact length (l_k) and grain angle (φ_1).

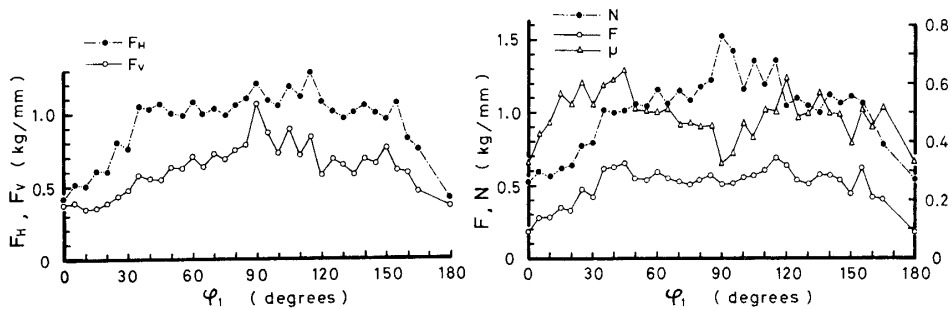


Fig. 11. Variation of cutting force with grain angle (φ_1) in wood cutting with conventional tool. material: red lauan; N , F , F_H and F_V : refer to Fig. 1; $\mu (= F / N)$: frictional coefficient calculated using F and N .

*3 分割工具、通常工具いずれも材質はSKH2（兼房刃物製）で、切れ刃となる刃先角は 25° 、逃げ角は 5° とした。切込量は 0.8 mm 一定とし、二次元低速切削（被削材の送り速度 144.9 mm/min ）を行った。 N , F および F_H , F_V の測定は、1条件ごとに3～5個の試験片を用い、1個の試験片につき約3回（合計9～15回）切削を行い、オシログラフに描かれた抵抗波形のうちの中央部分（切削長さ 60 mm の中央部約 10 mm の長さ）の極大値の平均を求めた（この平均値を3～5個の試験片について求め、それら全測定個数の平均値で表した）。

供試材には、レッドラワン Red lauan (*Shorea* sp.) の心材部、平均気乾比重 0.52 、含水率 12.5% 、板厚 $10\sim 12\text{ mm}$ の柎目材あるいは若干追柎目気味の材料（ $0^\circ \leq \varphi_3 \leq 10^\circ$ 、ただし φ_3 は年輪接触角を表し、レッドラワンでは φ_3 は軸方向細胞間道と材面との交差角度を意味する）、およびベイツガ Western hemlock (*Tsuga heterophylla* SARG.) の心材部、平均気乾比重 0.49 、含水率 11.9% 、平均年輪幅 1.1 mm 、晩材率 54.0% 、板厚 $9\sim 12\text{ mm}$ の柎目材あるいは追柎目板（ $0^\circ \leq \varphi_3 \leq 20^\circ$ ）とを用いた。

上記の各供試材から、Fig. 9 に示すように、繊維傾斜角 φ_1 （木材の繊維走向と切削方向の交差角度）が $0^\circ\sim 180^\circ$ の範囲で、 0° から 5° 間隔おきに変化する1組3～5個の試験片を木取りした。したがって、 $\varphi_1 = 0^\circ$, 180° はそれぞれ材の木表面、木裏面から繊維走向と平行に切削する縦切削を意味し、また、 $0^\circ \leq \varphi_1 \leq 90^\circ$ は順目切削、 $\varphi_1 = 90^\circ$ は木口切削、 $90^\circ < \varphi_1 < 180^\circ$ は逆目切削を、それぞれ意味する。

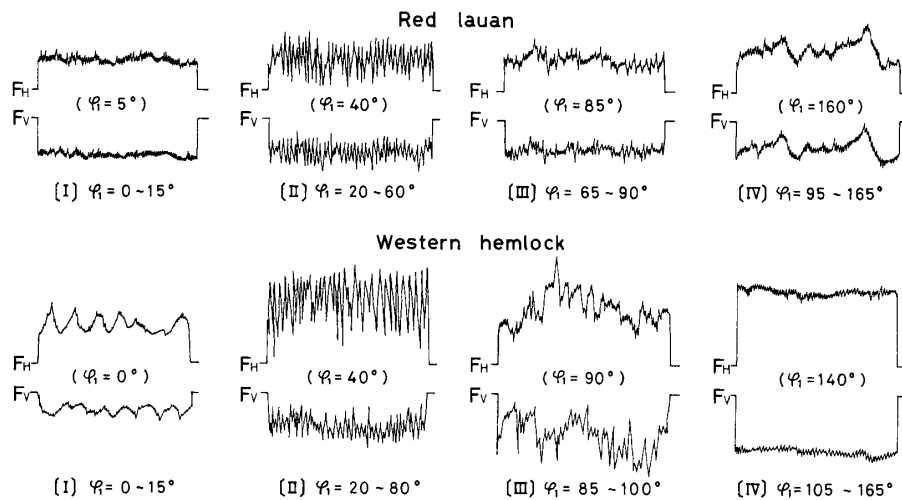


Fig. 12. Examples of oscillograph records of cutting forces.
 φ_1 : refer to Fig. 1.

いま、一例として、通常工具による切削実験によりオシログラフに描かれた抵抗波形を Fig. 12 に示す。図では、煩雑になることを防ぐため、抵抗波形をタイプに分けて示した。図のように、切削抵抗は、繊維傾斜角 φ_1 の変化に伴い著しい変動を示す。このような変動の中で、上記のような切削抵抗の測定方法を用いると、切削中に起る被削材の先割れあるいは剪断すべりの発生直前の切削抵抗を対象とすることになる。したがって、このような測定方法で得られた切削抵抗を用いて N , F を算出するから、 N , F も先割れまたは剪断すべり発生直前の力を意味する。また、 F の波形 (Fig. 12 の波形に類似) におけるスティックスリップの極大値をそれぞれ測定することになるから、 F は静摩擦力を意味し、それら F , N から求め得る μ は静摩擦係数を意味する。

4. 結 言

すくい面上の切削応力分布を正確に測定することは極めて難しい。しかも、単板切削のように切屑 (単板) の割れ、粗さなどの形成される加工面 (つぎの切削における切屑の表面) の性状を考えると実測は容易ではない。しかしながら、工具-切屑接触境界面の機械的な接触状態をある一つの限定した立場から、すくい面上の切削応力分布状態を究明し、簡単でわかり易い形に整理しておくことは、今後の切削理論を検討するうえで重要であり、意味のあることと考えられる。このような主旨で、工具すくい面上の切削応力分布の変化や摩擦係数の変化をわかり易い形で表現する方法をみい出した。

文 献

- 1) 杉山 滋: 木材学会誌, 23 (10), 472~479 (1977).
- 2) 杉山 滋: 同上, 23 (10), 480~486 (1977).
- 3) 杉山 滋: 長崎大学教育学部紀要 - 自然科学 -, 第67号, 39~43 (2002).
- 4) 杉山 滋: 同上, 第67号, 45~51 (2002).