

## 竹材の被削性に関する研究 (VI)\*

竹材の二次元切削におけるナイフすくい面の摩擦係数

杉 山 滋

長崎大学教育学部技術教育講座  
(平成13年10月31日受理)

## Studies on Machinability of Bamboo Culm. VI.\*

Frictional Coefficients on the Knife Rake-Face  
in Orthogonal Cutting of Bamboo Culms

Shigeru SUGIYAMA

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

(Received Oct. 31, 2001)

### Abstract

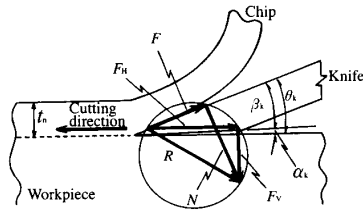
In the cutting of bamboo culms, it is important to clarify variations of the cutting-force components acting on the knife and the frictional coefficient on the rake face of the knife, but few studies have dealt with the effects of various cutting conditions and various workpiece conditions on them. Therefore, the main purpose of this report is to supply quantitative information on these aspects.

Orthogonal, linear cutting tests of bamboo culms with  $0^\circ - 90^\circ$  and  $90^\circ - 0^\circ$  cutting directions were made ( Figs. 1 and 3 ). Air-dried specimens of mosochiku (*Phyllostachys pubescens* MAZEL), which were fixed to the experimental apparatus equipped with a two-dimensional dynamometer, were cut. The normal ( $N$ ) and frictional ( $F$ ) forces acting on the rake face were measured. Using these components, the frictional coefficient ( $\mu$ ) on the rake face was calculated by  $\mu = F / N$ . The effects of the distance ( $l_R$ ) from the outer layer in the radial direction of the internodes of bamboo culms and cutting directions, as shown in Fig. 3, on  $\mu$  were clarified.

### 1. 緒 言

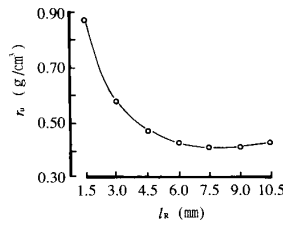
竹材の被削性や切削機構などを検討しようとする場合には、木材切削の場合と同様に、竹材切削における切削力の分力の大きさや、ナイフすくい面における切屑との摩擦挙動などを明らかにすることが必要となる。これらのうち、すくい面における切屑との摩擦挙動について検討する一つの方法として、切削力の分力を用いてナイフすくい面の摩擦係数(以下では、摩擦係数と略記する)を算出し、これを用いて検討する方法がある。筆者は、こ

\* 本研究を「竹材の組織構造と被削性に関する研究 (その7) Studies on Microscopic Structure and Machinability of Bamboo Culm ( Part VII )」とする。前報 (その6) および標記の研究 (V) は、長崎大学教育学部自然科学研究報告 第54号 21~36 (1996) に掲載。

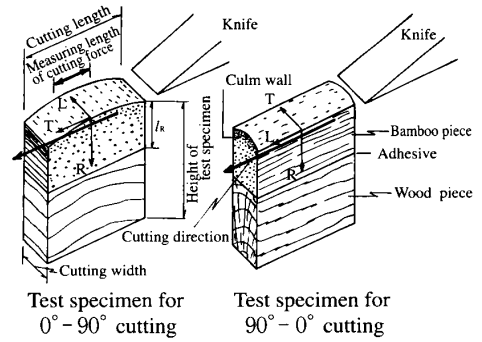


**Fig. 1.** The knife-work geometry in orthogonal cutting.

Notes :  $\alpha_k$  : clearance angle;  $\beta_k$  : sharpness angle;  $\theta_k (= \alpha_k + \beta_k)$  : cutting angle;  $R$  : cutting force;  $F_H$  and  $F_V$  : horizontal and vertical components of  $R$ , respectively;  $F$  and  $N$  : frictional and normal forces, respectively;  $t_n$  : depth of cut.

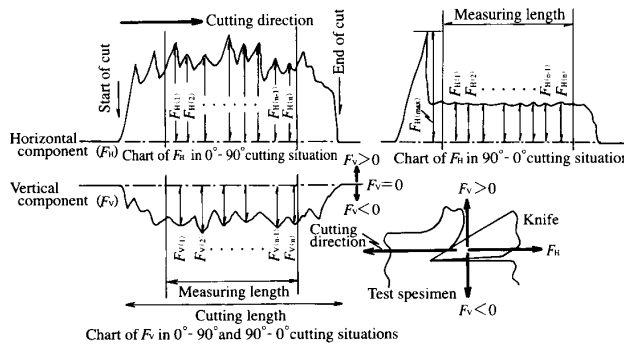


**Fig. 2.** Variation of specific gravity ( $r_u$ ) of culm wall of internode in the radial direction with the distance ( $l_r$ ) from outer layer.



**Fig. 3.** Test specimens for orthogonal cutting of bamboo.

Notes :  $l_r$  : refer to Fig.2; L - , R - , and T - directions : longitudinal, radial, and tangential directions of culm, respectively.



**Fig. 4.** An example of cutting-force components acting on the knife on recording chart.

Notes :  $F_H = \{F_{H(1)} + F_{H(2)} + \dots + F_{H(n)}\} / n$ ;  $F_V = \{F_{V(1)} + F_{V(2)} + \dots + F_{V(n)}\} / n$ ;  $F_H$  and  $F_V$  : refer to Fig. 1 .

れまでに、木材切削における摩擦係数を求めるために数々の切削実験を行い、得られた摩擦係数を用いて木材の被削性や切削機構などについて検討してきた<sup>1)~4)</sup>。

これらの木材切削実験に引き続き、本研究では、竹材の被削性や切削機構などを検討するための基礎資料を収集することを目的として、竹材の節間部稈壁の二次元の横切削 ( $0^\circ - 90^\circ$  切削) 実験と縦切削 ( $90^\circ - 0^\circ$  切削) 実験とを行い、主として稈壁半径方向距離 (円筒状の稈壁の半径方向距離をいい、本報では、表皮層側から内皮層側へ向う方向、即ち、向心方向の距離で表す) や切込量の相異に伴う切削力 2 分力の変化を測定し、それらの分力を用いて摩擦係数を算出し、これの大きさの違いを明らかにしようと試みた。

## 2. 実験方法

### 2.1 切削実験の方法

既報<sup>5)</sup>と同じ切削実験装置を用いて、竹材の切削実験を行った (Fig. 1)。ナイフには、この切削実験のために作成した鍛接ナイフ (刃部の材質は合金工具鋼 SKS 2) を使い、刃先角  $\beta_k$  が  $23^\circ$  になるように研磨したのち、逃げ角  $\alpha_k$  が  $1^\circ 30'$  (即ち、切削角  $\theta_k$  が  $24.5^\circ$ ) となるように、切削実験装置の片持梁型支持アーム (ストレインゲージ式切削力 2 分力測定装置を兼ねる) の先端に裏刃方式で固定した。このナイフに向って、試験片を一定速度

で送り込む方式で切削実験を行った。実験に先だち、試験片の表面を予めナイフによって微小な切込量によりならし切削を行い、切削基準面を作成した。そののち、所定の切込量  $t_n$  を与えて切削実験を開始した。なお、試験片送り速度  $f_w$  は 10 mm/sec 一定とした。 $t_n$  は、0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 および 1.0 mm の 7 段階に変化させた。このような切削実験により、ナイフに加わる切削力 2 分力が片持梁型支持アームに貼付されたストレインゲージにより測定される。

本研究では、通常の実験用に製作したナイフを用いて竹材の切削実験<sup>\*1</sup>を行い、ナイフに加わる切削力 2 分力（水平分力  $F_H$  および垂直分力  $F_V$ ）をそれぞれ測定し（Fig. 1）<sup>\*2</sup>、これらの測定値を用いて、摩擦力  $F$  および垂直力  $N$  を次式により算出した（切削角を  $\theta_k$  とする）。

$$F = F_H \cos \theta_k - F_V \sin \theta_k \quad (1)$$

$$N = F_H \sin \theta_k + F_V \cos \theta_k \quad (2)$$

#### \*1 切削実験の種類および試験片

切削実験のために採取した竹稈壁の一部と、切削力 2 分力の測定の対象とした切削方向・切削面を、模式図にして Fig. 3 に示した。図に示すように、本研究では、切削面が稈壁接線断面（Fig. 3 における T および L の 2 方向を含む断面）で切削方向が稈軸方向（Fig. 3 における L 方向）に垂直な横切削（ $0^\circ$ – $90^\circ$  切削）と、切削方向が稈軸方向に平行な縦切削（ $90^\circ$ – $0^\circ$  切削）の 2 種類の切削実験を行うが、いずれの切削実験の場合も二次元切削方式で行い、プレッシャバーと裏金は作用させないで行うこととした。切削実験に先だち、実験の対象となる節間部の稈壁半径方向距離（表皮層側から内皮層側への距離） $l_r$  の変化に伴う気乾容積重  $r_v$  の変化を測定した。 $r_v$  の測定結果を Fig. 2 に示した。図のような  $l_r$  の変化に伴う  $r_v$  の変化は、主として、稈壁半径方向距離の変化に伴う維管束の集合形態の相異、即ち、維管束の分布の相異および維管束鞘の量的比率（靱皮繊維の量的比率）の相異に起因している<sup>6)</sup>。したがって、切削力の測定に際しては、 $l_r$  の変化を考慮に入れることが必要であると考えられるため、本研究では、Fig. 3 のような特殊な形状の試験片を作成し、同試験片を用いて、切削力 2 分力の変化を  $l_r$  との関係で明らかにする。なお、 $l_r$  は、表皮層側から内皮層側に向かって、1.5–10.5 mm の範囲で 1.5 mm 間隔おきに 7 段階に変化させた。竹稈壁半径方向の長さは、節間部稈壁では 11.0–12.5 mm で極めて小さいため、切削実験装置への固定と切削実験の遂行を容易にするため、Fig. 3 に示すように、円弧状の内皮層側の稈壁の一部を平坦に削り取り、接着剤を介して木材小片を接合している。

横切削実験のための試験片は、切削方向に対して、竹稈壁が円弧状を呈しているから、直線状の切削方向の切削力測定長さが大きいと、その分だけ設定した  $l_r$  に対応する切削面からのずれが大きくなる。また、縦切削実験のための試験片は、ナイフ切れ刃線に対して竹稈壁が円弧状を呈しているから、切れ刃線方向（即ち、切削方向に垂直な方向）の切削幅が大きいと、その分だけ設定した  $l_r$  に対応する切削面からのずれが大きくなる。そのような切削面のずれを少なくするため、横切削実験の場合には切削力の測定長さを小さく、また、縦切削実験の場合には試験片の切削幅を小さくした。

横切削実験、縦切削実験のいずれの場合も、試験片の切削長さ方向の寸法は 30 mm であるが、横切削実験の場合では、切削長さの中央約 10 mm を切削力の測定長さとした。また、試験片の切削幅は、横切削実験の場合では 13 mm としたが、縦切削実験の場合では 8 mm とした。横切削実験、縦切削実験のいずれの場合も、気乾状態に調湿された試験片を用いた（試験片の竹稈部分の含水率の平均は 13.0 % であった）。いずれの切削実験の場合も、表皮層側から切削を行うが、ナイフ刃先位置が稈壁の所定の  $l_r$  の位置に達するまで、予め予備の切削を繰り返し行い、所定の  $l_r$  の位置に達したときの切削力波形を記録紙に描かせた。

#### \*2 切削力の測定方法

横切削実験、縦切削実験のいずれの場合も、切削力 2 分力を測定した。1 試験片につき、所定の  $l_r$  位置をそれぞれ 1 回ずつ切削し、 $l_r$  位置における切削力 2 分力波形をオシログラフに描かせた。1 実験条件ごとに 5 個の試験片を用いて繰返し実験を行った。横切削実験、縦切削実験の各場合における分力波形の変動パターンを比較すると、垂直分力の波形は比較的類似したが、水平分力の波形は著しく異なった。それらの分力波形の一例を Fig. 4 に示した。描かれたそれぞれの分力波形のうち、試験片の切削長さの 30 % に相当する切削長さの中央部分の波形を用いて、その波形に現れた極大値を全て測定し、その平均値を予め求めた荷重と波形の高さとの較正結果にあてはめて荷重に換算し、試験片の切削幅で除して切削力の水平分力  $F_H$  (kgf/mm) および垂直分力  $F_V$  (kgf/mm) とした。

縦切削実験の場合には、横切削実験の場合と異なり、切削初期に、瞬時に最大波形を示すが、そののちに波形の大きさは小さく安定する（Fig. 4 参照）。本研究では、縦切削実験の場合には、横切削実験の場合と同様に、 $F_H$  および  $F_V$  の測定を行うが、これとは別に、切削初期の最大波形をも測定し、これを切削初期の最大水平分力  $F_{H(\max)}$  とした。したがって、縦切削実験の場合には、 $F_H$ 、 $F_V$  を用いて、(1)、(2) 式により算出される摩擦力  $F$ 、垂直力  $N$  に基づく摩擦係数  $\mu$  とは別に、 $F_{H(\max)}$ 、 $F_V$  を用いて、(1)、(2) 式により算出される  $F_{(\max)}$  と  $N_{(\max)}$  に基づく摩擦係数を  $\mu_{(\max)}$  として、 $\mu$  とは区別して表した。

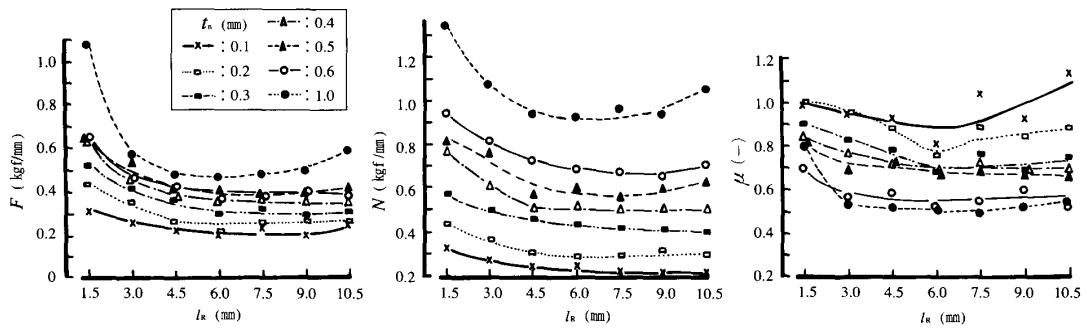


Fig. 5. Variation of frictional ( $F$ ) and normal ( $N$ ) forces acting on the knife and frictional coefficient ( $\mu$ ) on the rake face of the knife with the distance ( $l_R$ ) from outer layer in a  $0^\circ - 90^\circ$  cutting situation.

Notes :  $t_n$  : depth of out.

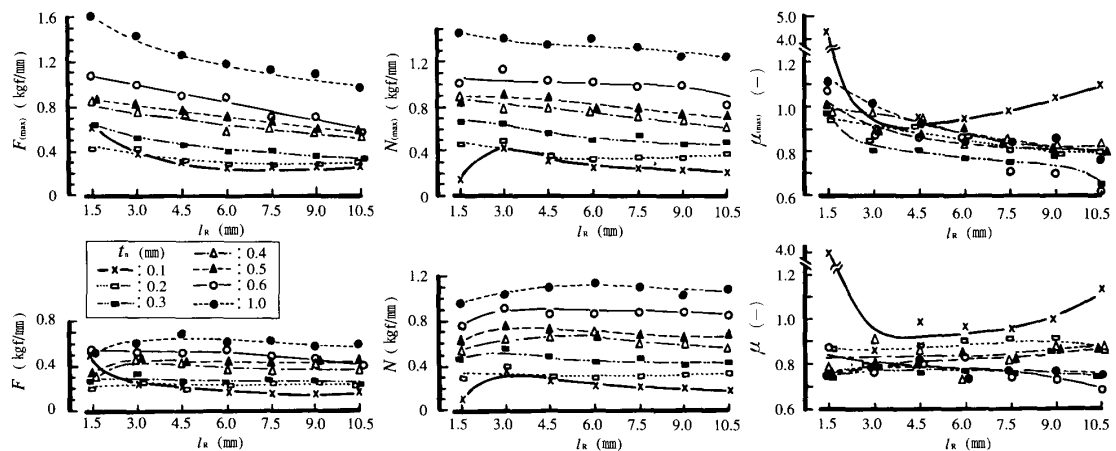


Fig. 6. Variation of  $F$ ,  $N$ , and  $\mu$  with  $l_R$  in a  $90^\circ - 0^\circ$  cutting situation.

Notes :  $F$ ,  $N$ ,  $\mu$ ,  $l_R$ , and  $t_n$  : refer to Figs. 1 and 5 ;  $F_{(\max)}$ ,  $N_{(\max)}$ , and  $\mu_{(\max)}$  :  $F$ ,  $N$ , and  $\mu$  based on  $F_V$  and  $F_{H(\max)}$  in Fig. 4.

$F$  および  $N$  を用いると,  $\mu$  は次式で求められる。

$$\mu = F / N \quad (3)$$

## 2.2 供試材

供試材には, モウソウチク (*Phyllostachys pubescens* MAZEL) を用いた。同材は, 8 ~ 11月に伐採された健全材であり, そのうちの地上高2,000 mm以下の竹稈を採取した。採取した部分の竹稈は, その節間部長さが300~380 mm, 稈壁の外半径が節間部で58 mm, 節部で62 mmであり, 稈壁半径方向の厚さ(竹稈の肉厚)が節間部で11.0~12.5 mm, 節部で15.0~17.0 mmであった。

## 3. 実験結果

竹材の節間部稈壁の二次元の横切削 ( $0^\circ - 90^\circ$  切削) 実験と縦切削実験 ( $90^\circ - 0^\circ$  切削) 実験とを行ない, 稈壁半径方向距離  $l_R$  や切込量  $t_n$  の変化に伴う切削力2分力の変化を測定し, それら分力を用いて, ナイフすくい面の摩擦係数  $\mu$  を算出した (縦切削実験の場合には,  $\mu$  のほかに, 切削初期の水平分力  $F_{H(\max)}$  に基づいた  $\mu_{(\max)}$  も求めた)。得られた摩擦係数 ( $\mu$  および  $\mu_{(\max)}$ ) について (その大きさと変化の傾向について) を, つぎのように要約した。

(1) 横切削における  $\mu$  は、表皮層側に向う ( $l_r$  の減少) に伴い、いずれの  $t_n$  の場合も増加傾向を示したが、内皮層側に向う ( $l_r$  の増加) に伴い、 $t_n=0.1$  および  $0.2$  mm の場合には増加傾向を、 $t_n=0.3\sim 1.0$  mm の場合にはほぼ一定で変化のない傾向を示した (Fig. 5)。

(2) 横切削における  $l_r$  の変化に伴う  $\mu$  の大きさの変化は、 $t_n=0.3\sim 1.0$  mm の場合には、 $0.5\sim 0.9$  の範囲であったが、 $t_n=0.1$  および  $0.2$  mm の場合には  $0.7\sim 1.2$  の範囲であった (Fig. 5)。

(3) 横切削における  $\mu$  の大きさは、概ね  $t_n$  の小さい場合ほど大きい値を示した (Fig. 5)。

(4) 縦切削における  $\mu_{(\max)}$  および  $\mu$  は、表皮層側に向うに伴い、いずれの  $t_n$  の場合も増加傾向を示したが、内皮層側に向うに伴い、 $t_n=0.1$  mm の場合には増加傾向 ( $\mu_{(\max)}$  および  $\mu$  の場合) を、 $t_n=0.2\sim 1.0$  mm の場合には減少傾向 ( $\mu_{(\max)}$  の場合) あるいはほぼ一定で変化のない傾向 ( $\mu$  の場合) を示した (Fig. 6)。

(5) 縦切削における  $l_r$  の変化に伴う  $\mu_{(\max)}$  の大きさの変化は、 $t_n=0.1$  mm の場合には  $0.9\sim 4.5$  の広い範囲に及んだが、 $t_n=0.2\sim 1.0$  mm の場合には  $0.6\sim 1.2$  の範囲であった。また、 $\mu$  の大きさの変化は、 $t_n=0.1$  mm の場合には  $0.7\sim 4.0$  の広い範囲に及んだが、 $t_n=0.2\sim 1.0$  mm の場合には  $0.5\sim 0.7$  の範囲であった (Fig. 6)。

## 4. 考 察

### 4.1 切込量の変化に伴う摩擦係数の変化

摩擦係数  $\mu$  は、(3)式に示したように、垂直力  $N$  に対する摩擦力  $F$  の比で求められるから、 $\mu$  は  $F$  と  $N$  の増加や減少などの変化の割合を意味し、ナイフすくい面上における切屑の付着 (いわゆる、切屑のすくい面への喰い付き) の程度の違いを表している。即ち、 $N$  の増加割合よりも  $F$  の増加割合が小さい場合や、 $N$  の増加割合が  $F$  の増加割合よりも大きい場合に、 $\mu$  は小さい値を示すことになる。このように、 $\mu$  は、 $N$  の大きさを一定にした場合における  $F$  の大きさの相対的な違いを意味するから、 $\mu$  が小さい値を示すことは、ナイフすくい面への切屑の付着の程度が小さいことを意味すると考えられる。

木材切削の場合<sup>2)~4)</sup>と同様に、竹材切削の場合においても、横切削、縦切削のいずれの場合においても、切込量  $t_n$  の小さい場合ほど  $\mu$  は大きい値を示した。これは、 $t_n$  の減少に伴い  $F$  の減少割合よりも  $N$  の減少割合の方が大きくなり、すくい面への切屑の付着が大きくなることを意味する。

### 4.2 稈壁半径方向距離の変化に伴う摩擦係数の変化

竹稈壁は、その半径方向距離  $l_r$  の変化に伴い維管束の集合形態の相異、即ち、維管束の分布の相異および維管束の量的比率 (靱皮繊維の量的比率) の相異<sup>6)</sup>に起因して、容積重  $r_v$  の変化をもたらす。Fig. 2 に示したように、 $l_r$  の増加に伴い、 $r_v$  は表皮層側から内皮層側の稈壁に向うに伴い減少傾向 (表皮層側から中心部の稈壁までの範囲)、ほぼ一定で変化のない傾向 (中心部から内皮層の稈壁に向う範囲)、および漸増傾向 (内皮層に近い範囲) を、示した (内皮層に近い範囲では、維管束の配列の若干の増加が原因している<sup>7)</sup>)。

このような竹稈壁を横切削や縦切削を行う場合には、 $F$  および  $N$  が、 $l_r$  の変化に伴っての  $r_v$  の変化の影響を少なからず受ける。とくに、横切削における  $\mu$  および縦切削における  $\mu_{(\max)}$  は、その影響を受け易い。 $l_r$  の増加、即ち、表皮層側の稈壁から内皮層側の稈壁に向うに伴い、横切削における  $\mu$  および縦切削における  $\mu_{(\max)}$  は減少傾向を示した ( $t_n=0.1$  mm のときは、表皮層側から中心部の稈壁に向っての減少傾向と、内皮層側に向っての

増加傾向とを示した)。なお、縦切削における $\mu$ は、 $t_n=0.2\sim 1.0$  mmの場合には、 $l_r$ の変化に伴っての $r_0$ の変化の影響は顕著に現れなかった( $t_n=0.1$  mmの場合には、 $\mu_{(\max)}$ の場合と同様に、 $l_r$ の変化に伴っての $r_0$ の変化の影響は顕著に現れた)。

#### 4.3 竹材切削と木材切削における摩擦係数の変化

木材の縦切削における $\mu$ の大きさは、 $t_n=0.2\sim 0.8$  mmの場合で $0.4\sim 1.0$ の範囲であり(種々の樹種の通直木理材の二次元切削における $\mu$ )、 $t_n$ の小さい場合ほど $\mu$ の大きさは大きくなる<sup>2)~4)</sup>。このような $\mu$ の大きさと $t_n$ の変化に伴う $\mu$ の変化の傾向( $t_n=0.1$  mmの場合を除く)から判断して、竹材の縦切削における $\mu$ の大きさと木材の縦切削における $\mu$ の大きさととは、比較的類似しているといえる。筆者は、これまでに数多くの樹種についての縦切削実験を行い、 $\mu$ の大きさと樹種の相異との関係について調べてきた。このような木材の縦切削実験と、本研究の竹材の縦切削実験とから判断すれば、木材の樹種の相異や、木材と竹材の相異は、縦切削における $\mu$ の大きさには大きな違いをもたらさないようである。

### 5. 摘 要

竹材の被削性や切削機構などを検討するための基礎資料を収集することを目的として、竹材の節間部稈壁の二次元の横切削( $0^\circ\sim 90^\circ$ 切削)実験と縦切削( $90^\circ\sim 0^\circ$ 切削)実験を行い、主として稈壁半径方向距離 $l_r$ (円筒状の稈壁の半径方向距離を意味し、本報では、表皮層側から内皮層側へ向う方向、即ち、向心方向の距離で表している)や切込量 $t_n$ の相異に伴う切削力2分力の変化を測定し、これら分力を用いてナイフに作用する摩擦力 $F$ および垂直力 $N$ を算出し、 $F$ および $N$ を用いて、ナイフすくい面の摩擦係数 $\mu(=F/N)$ を算出した。これらの結果に基づいて、横切削、縦切削のそれぞれの場合における $l_r$ の変化や $t_n$ の相異に伴う摩擦係数の大きさの変化を明らかにし、横切削、縦切削の相異や $l_r$ 、 $t_n$ の相異に基づく摩擦係数の大きさの違いについて論じた。

### 文 献

- 1) 杉山 滋：木材学会誌，**23** (1)，534~539 (1977)。
- 2) 杉山 滋，他1名：同上，**24** (10)，698~704 (1978)。
- 3) 杉山 滋，他1名：材料，**28** (310)，597~602 (1979)。
- 4) 杉山 滋：木材学会誌，**30** (10)，819~826 (1984)。
- 5) 杉山 滋：同上，**37** (2)，109~117 (1991)。
- 6) 鈴木 寧：材料，**12** (121)，734~739 (1964)。
- 7) 杉山 滋：木材工業，**24** (9)，418~421 (1969)。