

皮膜法による切削抵抗の測定

隈部 晃*・山本 耕之*・北川 亮三**

Determination of Cutting Force by Photo-Elastic Coating Method

Akira KUMABE, Kouji YAMAMOTO and Ryozo KITAGAWA

Abstract

This paper describes a method of measuring the cutting force by the birefringent coatings. The experiment is carried out in two-dimensional machining on annealed aluminum workpiece. The coating is a sheet of the birefringent material that is the epoxy-rubber 100:100:8 of 1 mm thickness.

This method has many advantages over other methods of all kinds of tool dynamometer. It provides useful data that enable the investigator to show the complete distribution of cutting strain and to be determined of the cutting force at the same time. The residual strain by the cutting is also observed.

It is found that the photo-elastic coating method is applicable not only to elastic material but also to ductile workpiece through this experiment.

1. 緒 言

一般に歪ゲージや圧電素子等を利用した動力計によって切削抵抗は測定される。しかし二次元切削等の場合、同一被削材を一定の切削条件で切削しても動力計で測定された切削抵抗の値は一定とはならず時間経過に伴い変化することを経験している。その原因としては、ドリフトや剛性上の問題など動力計測の特性に帰因するものや、切削開始後の過渡現象及び工具摩耗の進行などが関係すると考えられる。

著者らは光弾性皮膜法を用いて二次元切削時の被削材歪を可視化し、その挙動について詳細に調べ、その結果を前報^{1),2)}で報告した。その中で残留歪の分布が一般に定性的に言われている切削時間の経過に伴う切削抵抗の変化を相似形であることを見出した。

しかし、同一工具で刃先の研ぎ直しをせずに数個の被削材を削った場合でもこの残留歪の分布パターンは変わらないこと、被削材が軟らかいアルミ焼鈍材でありしかも極低速域での軽切削であること及び切削後にすくい面の溶着物を認められるが摩耗・欠損などの変化が見受けられないことなどから切削抵抗値が一定にならない現象は工具の初期摩耗では説明できない。

切削機構上特有の喰い付き部や切り上り部での被削材内の力学的つり合いとそれによる内部歪変化もその原因の一つであると考えられる。

本報では、光弾性皮膜法による二次元切削実験で得られた等色線および等傾線を用いてこの現象を解明するための基礎的実験を行い、切削中の被削材の力学的つり合いから切削抵抗の大きさとその方向を求める方法について報告する。

皮膜法によって切削力を求めることができれば、動力計の構造上生ずる外乱要因を含まずに直接上記現象の解明の手がかりとなる切削力の変化やその作用方向、歪の分布を求めることが可能となる。

*久留米工業大学 機械工学科

**生産機械工学科

また今回は、切削実験の際に結果を確かめるための工具動力計をホルダーに設けた。これにより主分力および背分力を皮膜法と同時に測定し、それぞれの結果を比較した。以上の実験結果について検討したことを述べる。

2. 実験方法

光弾性皮膜法を用いた二次元切削実験の概要を Fig. 1 に示した。被削材には A7-P1-1 (JIS-1070) 厚さ 3 mm の焼鈍材を用いた。被削材寸法 100×60mm に切り出した際の加工歪を除くために 570K、4 時間保持後炉中冷却の焼きなまし処理した。

光弾性皮膜材にはエポキシラバー-100, 100, 8 厚さ 1 mm を無圧縮成型し使用した。接着材には皮膜材料と同一のものを用い、接着の際には特に注意を払った。

工具は材種 SKH-4 を用い、その形状はすくい角 30° 逃げ角 5°, ノーズ半径約 2 μ とした。ノーズ半径は刃先成形後に 80 倍の実体顕微鏡により観察し判断した。

工作機械にはマシニングセンターを用い、テーブル上のバイスに被削材を固定した。実験の際にはスピンドル回転をオリエンテーション位置で停止させ、コラム送り (Y 軸の負方向) で切削した。

実験は乾式で行い、切削の都度工具表面をエタノールで脱脂し、油脂介在の影響をさけた。

切削条件は切り込み量 0.05mm, 切削速度 0.5 および 400 mm/min で行った。

実験温度は室温 293±0.5K とし、切削中の被削材表面温度は放射温度計により連続観察し室温範囲内であることを確かめた。

アルミ接着皮膜の N~ε 特性は、被削材と同一材の帯板試験片に皮膜を接着し、これを用いた単軸引っ張り実験により求めた。この時の引っ張り速度は切削速度と同じ値を用いた。

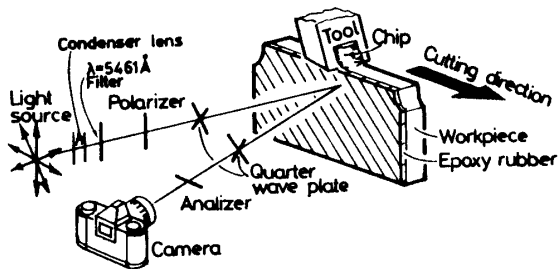


Fig. 1 Photoelastic coating method.

3. 解析方法

Fig. 2 は切れ刃の移動した各位置における切削抵抗の主分力とその時の残留歪を示す。このように被削材に生ずる残留歪は切削抵抗と対応関係にある。

そこで、被削材を連続体とみなせる加工単位、即ち結晶粒の影響を考慮しないでよい範囲の切り込み深さで二次元切削する場合について取り扱う。この時被削材に生ずる応力状態は刃先のごく近傍を除くと、マクロ的に見ればまっすぐな自由境界を持つ半無限板の自由境界上の任意の点に板厚方向に一樣な分布の集中心が作用する場合に相当する。

被削材が弾性材であればその内部に生ずる応力は、Flamant の解³⁾によって示される。

この時の応力は Fig. 3 に示すように単純半径方向分布を示す。刃先を原点とする極座標系を用いて表わすと、半径方向応力 σ_r , 接線方向応力 σ_θ , せん断面応力 $\tau_{r\theta}$ のそれぞれの応力成分は次のようになる。

$$\sigma_r = -\frac{2P \cdot \cos\theta}{\pi \cdot w \cdot r}$$

$$\sigma_\theta = 0$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

ここで P は切削力、r は被削材内の任意の点の刃先よりの距離、 θ は P の方向より時計回りに測った任意の点の位置の角度、w は被削材の厚さとする。

また、この関係は P の作用方向の如何にかかわらず成り立つ事が知られている。従って、弾性材切削時の

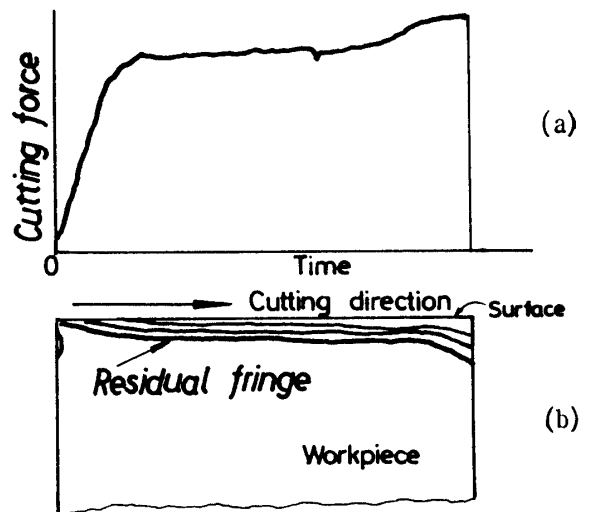


Fig. 2 Schematic representation of (a) curve of cutting force ; (b) distribution of residual fringes in orthogonal cutting under constant condition.

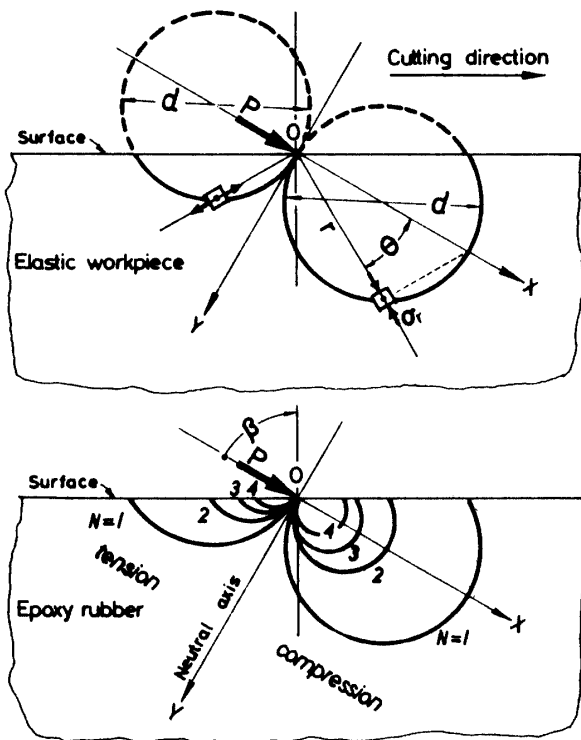


Fig. 3 Simple radial stress distribution on a elastic workpiece for a cutting force and fringe pattern on a epoxy rubber coated it.

切削力 P は次の式により求められる。

$$P = -\frac{\pi \cdot w}{2} \cdot \frac{r}{\cos \theta} \cdot \sigma_r$$

ここで切削力 P の方向に X 軸，刃先点 O でこれと直交する Y 軸を Fig. 3 のように取り，原点 O で Y 軸と接する任意の直径 d なる円周を考えると，この円周上では $d \cdot \cos \theta = r$ であるから σ_r は次のように表わされ一定値となる。

$$\sigma_r = -\frac{2P}{\pi w} \cdot \frac{1}{d}$$

従って，その円周上で生ずる最大せん断応力 τ_{max} も次式に示すように一定値を取る。

$$\begin{aligned} \tau_{max} &= \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \\ &= \frac{P \cdot \cos \theta}{\pi w r} \\ &= \frac{P}{\pi w} \cdot \frac{1}{d} \end{aligned}$$

従って，前述のように描いた任意の直径 d の円周上の位置に生ずる被削材の最大せん断応力 τ_{max} が得られれば $P = \pi \cdot w \cdot d \cdot \tau_{max}$ によって切削力を求める事ができる。一方，下地金属に完全に接着している皮膜材も弾性体である。しかも下地金属と皮膜の歪は等しい

ので被削材に上述の応力による歪が生ずれば，その歪によって皮膜材にも同様の最大せん断応力 τ_{max} が生じ，その値が一定となる軌跡もまた円周を描く。

皮膜に現れる光弾性縞次数 N は Brewster の法則⁴⁾ により $N = 4 t \alpha \tau_{max}$ なる関係で示される。従って N の軌跡も同様の円周を描く。

ここで t は皮膜の厚さ， α は光弾性感度であり一定値であるから N は τ_{max} に比例する。また下地金属が弾性範囲であれば下地金属の τ_{max} を用いて次の様に示すことができる。

$$N = 4 \cdot t \cdot \alpha \cdot \frac{E'(1+\mu)}{E(1+\mu')} \cdot \tau_{max}$$

ただし下地金属のヤング率を E，ポアソン比を μ とし，皮膜についてそれぞれ E' ， μ' で示した。これらの値は全て既知であるから接着皮膜の縞次数 N を知る事によって下地金属の τ_{max} が求められる。

また $N \sim \tau_{max}$ の関係は皮膜接着帯板試片の単軸引張り実験より求めることもできる。

切削力 P の方向 β は，Fig. 3 に示すように円分布する等色線の中心を刃先点 O を結ぶ方向として求められる。あるいは，等色線と等傾線より中位軸 OY を定め，これと O 点で直交する OX 軸の方向として求めることもできる。これより主成分力 $F_H = P \cdot \sin \beta$ ，背成分力 $F_V = P \cdot \cos \beta$ が求まる。

このようにして被削材が弾性体の場合は，皮膜法によって円分布する縞次数とその直径を測定すれば，切削力が求められる。

次に，被削材が延性材の場合は，接着皮膜の縞次数 N と下地金属の τ_{max} は比例関係にない。このため下地金属の応力を直接求めることができない。しかし，被削材の歪は接着した皮膜の歪と等しいから光弾性皮膜材を介して下地金属の塑性域での切削歪状態を知ることができる。

前報^{1),2)} で述べたように延性材切削中の接着皮膜を観察すると切削瞬間の主歪方向は Fig. 4 に示す刃先点を中心とする放射状分布であり，Fig. 5 に示す等色線も弾性材同様の円形分布をしている。ただし，N の勾配は弾性材と異なる。また，刃先後方で同一次数の縞 N の分布はややいびつな円となりその直径も前方の分布円に比べ小さくなっている。

Fig. 6 に延性材切削時の N 分布のモデル図を示した。

図中，一点鎖線で示したように加工硬化の影響で刃先後方の同次数縞 N_{ip} 分布の直径は刃先前方のそれより小さくなると考えられる。

また，加工硬化しないとして扱った場合に相当する

N_t 分布の円弧を刃先後方に破線で示した。

延性材においても切削瞬間には弾性つり合いが保たれているから中位軸後方では加工硬化しないとして扱った場合の N_t 分布に相当する加工硬化時の N_{tp} 分布が生じている事になる。つまり、切削のそれぞれの瞬間では、弾性材と同じく刃先前方の円周が閉じたとして扱えるので塑性変形をする材料においても刃先前方の N 分布直径とその位置でのその瞬間の下地金属の τ_{max} がわかれば切削力 P を求める事ができる。

下地金属が塑性域である時、接着皮膜の縞次数 N より下地金属の τ_{max} を求めるには Fig. 7に示す単軸引

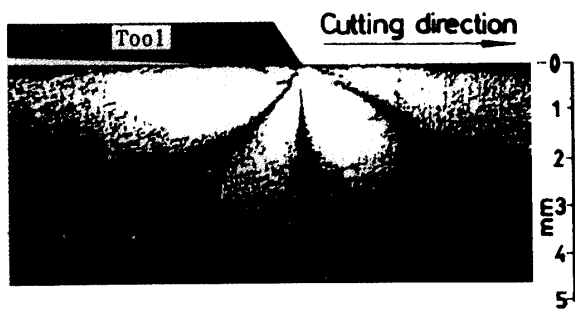


Fig. 4 Instantaneous isoclinics at the moment of cutting ($\theta=30^\circ$).

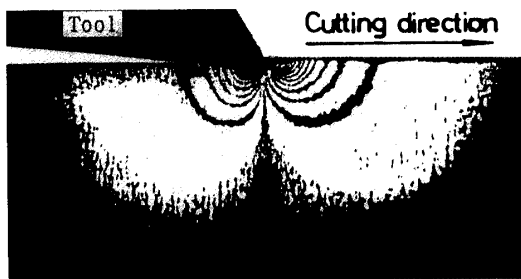


Fig. 5 Instantaneous isochromatics at the moment of cutting.

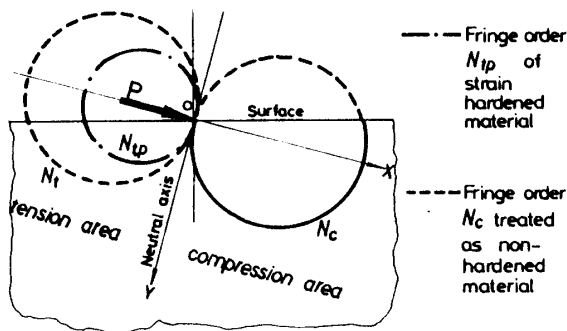


Fig. 6 Fringe pattern on a epoxy rubber coated ductile material at the moment of cutting.

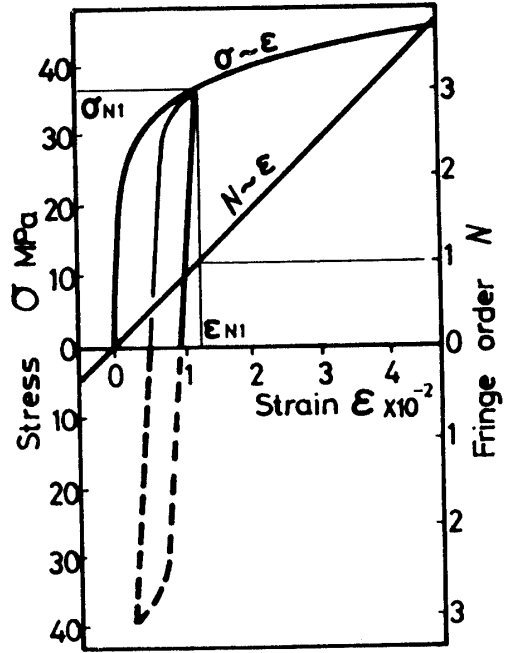


Fig. 7 Relation between ϵ and σ of aluminum, ϵ and N of epoxy rubber coated it.

張り特性 $N \sim \epsilon$, $\sigma \sim \epsilon$ 関係特性曲線を用いる。

まず切削実験によって測定された或る次数の縞 N_t に相当する皮膜の主歪 ϵ_{Nt} を求めるとこれは下地金属の主歪でもあるからこれより下地金属の主応力 σ_{Nt} が図より求まる。従ってその時の下地金属の τ_{max} が求まる。

このように塑性域でも、刃先前方の切削中の或る瞬間の縞 N の分布直径 d とその時の下地金属の τ_{max} が得られるから切削力 P を求めることができる。

4. 実験結果および考察

前加工した面を重複切削すると被削材が延性材であっても弾性的挙動を示す。この時は、切削中の被削材内歪の残留成分が少なく取り扱いが容易であるため本実験でも切込量0.1mmの前加工をほどこしたアルミ材に皮膜を接着した後、切り込み量0.05mmで切削実験をした。この時の切削中の等色線を Fig. 8に示した。

実際の切削加工は一度の切り込みで終了する事は少なく、数回の重複切削により加工される。前加工の切り込み量よりも少ない切り込み深さで仕上げる場合は Fig. 8に示すような切削状態と考えられる。

切削中の等色線と $N \sim \epsilon$, $\sigma \sim \epsilon$ 関係特性図から求めた切削抵抗値と同時測定の動力計による結果とを Table. 1に示した。測定誤差を含む3桁目を除くと両者は良く一致している。

Table 1 Cutting forces measured by photoelastic coating method in comparison with the result by tool post dynamometer.

	Cutting force P (N)	Horizontal force F_H (N)	Vertical force F_V (H)	Condition
Coating method	307	305	30.5	Cutting velocity : $V = 0.5 \text{ mm/min}$ Depth of cut : $t = 0.5 \text{ mm}$
Tool post dynamometer	—	312	31.4	
Coating method	263	262	11.5	Cutting velocity : $V = 400 \text{ mm/min}$ Depth of cut : $t = 0.05 \text{ mm}$
Tool post dynamometer	—	265	11.8	



Fig. 8 Isochromatic fringes of the Al-workpiece hardened by precutting.

参 考 文 献

- 1) 隈部・山本・北川, 山口大学工学部研究報告第38巻第1号9 (昭和62年10月)
- 2) 山本・隈部・北川, 山口大学工学部研究報告第38巻第2号17 (昭和63年3月)
- 3) Flamant; Compt. Rend., Vol. 1 1 4, P. 1465, 1982, Paris
- 4) E. G. Coker & L. N. G. Filon, A Treatise on Photo elasticity, London, Cambridge Univ., 1931, (1957)

(昭和63年4月15日受理)

5. 結 言

光弾性皮膜法を用いて被削材に加わる切削抵抗を求める方法について検討し、つぎの結言を得た。

- (1) 光弾性皮膜を接着した被削材の切削により、その切削中に得られる等色線と $N \sim \varepsilon$, $\sigma \sim \varepsilon$ 関係特性図から切削抵抗の主分力と背分力が求められる。
- (2) 計算結果と実測値はよく一致し、本報で得られた結果は残留歪の生成機構を知るうえで有益である。