機械加工面における表面おうとつの 評価に関する研究*

——表面おうとつ微小突起の傾斜の評価（第1報）——

塚 田 忠 夫** 阿 武 芳 朗**

An Estimation of Machined Surface Topography

——On Slope Distribution of Projections (1st Report)——

Tadao TSUKADA, Yoshiro ANNO

Characteristics of surface asperities are generally represented by a statistic of projection slopes and asperity heights. This paper deals with a distribution of projection slopes and its standard deviation. Surfaces dealt with in this paper are ground, turned, milled, shaped and lapped. The data of surface asperities are handled in a discrete type. Results were as follows.

- (1) The theoretical slope distribution induced about ground surfaces can be applied to others.
- (2) The relationship between the standard deviation of slopes and that of asperity heights is given quantitatively.
- (3) The suitable sampling space of surface asperities are revealed.

1. 緒 言

一般に、機械加工された金属表面には微小な表面おうとつが存在し、そのために固体2平面間の接触問題、たとえば接触変形、伝熱、気密性、摩擦摩耗等が工学的問題として重要となってくる。そして、これらの問題は単に加工表面の微小突起の幾何学的性質だけではなく、表面工学的な立場からも取組む必要があると思われる。しかしながら、表面おうとつを考慮した接触変形のように機械構造の剛性等に関係する問題は、構造設計の段階で配慮されることが必要であり、工業的に測定し得る表面おうとつの幾何学的性質から推定できることが望ましい。

接触変形問題で必要とする表面おうとつの幾何学的性質は、従来の研究で明らかなように^{1)~3)}、微小突起の傾斜と高さに関する統計量で代表することができる。このことから、本研究は機械加工された2平面の接触変形機構解析に必要な表面おうとつ微小突起の傾斜を、触針式あらさ計から得られるデータをもとに解明し、研削加工面を対象に明らかにされた微小突起の傾斜分布の理論⁴⁾を他の加工面に適用し、その有用性を検討する。本報で取

扱う機械加工面は、平面研削加工面、フライス加工面、シェーブ加工面、ハール加工面、旋削加工面、ラップ加工面である。

2. 微小突起の傾斜分布

表面おうとつを定量的に測定する方法としては、現在のところ触針式あらさ計によるものが最も一般的である。しかしながら、一般の触針式あらさ計における触針は $2\sim4\mu\text{m}$ の先端半径をもつために、得られる表面おうとつは必ずしも真の突起形状に一致していない。図1はその一例を示すもので、(a)は一般のあらさ計で得られる表面おうとつのプロファイルであり、(b)は横倍率を拡大したものである。これからわかるように、突起先端はすべて丸味をもち、突起間の谷部はかなり鋭くなっている。これは突起の先端に多少の丸味があることにもよるが、主として上述した触針先端の丸味による影響であると考えられる。

図1 触針式あらさ計で得られる表面おうとつプロファイル

* 原稿受付 昭和48年3月24日、北陸信越地方講演会(昭和46年9月9日、昭和46年12月3日)および東北地方講演会(昭和47年6月1日)にて発表。

** 正会員 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山2-12-1)

図2 ξの定義

筆者らは表面おうとつを考慮した金属2平面の接触変形機構を解析してきたが^{1)~3), 5)}, そこでは, 微小突起の形状を等傾斜のくさび形あるいは円すい形として考えてきた. 本研究においても, 真の突起の形状はくさび形および円すい形で近似できるものとする.

触針先端半径および実際に存在する多少の突起先端の丸味を含んだ図1の表面おうとつプロフィールから得られる突起の傾斜をξとおけば, ξの確率密度関数 $H(\xi)$ は次式で与えられる⁴⁾.

$$H(\xi) = \frac{\int_{\xi}^{\infty} q(\tan \theta) h(\xi) d \tan \theta}{2 \int_0^{\infty} \int_{\xi}^{\infty} q(\tan \theta) h(\xi) d \tan \theta d \xi} \quad (1)$$

ここで, ξは図2に示すように触針式あらさ計で得られた表面おうとつプロフィール上で, 横方向に等間隔にとった位置での傾斜であり, $\tan \theta$ は前述したように突起の真の形状を対称のくさび形で仮定した場合の傾斜(解析上, 図1(b)の突起プロフィールを双曲線近似したときの漸近線の傾斜)である⁴⁾. また, $q(\tan \theta)$ は $\tan \theta$ の確率密度関数であり, $h(\xi)$ は $\tan \theta$ を一定としたときのξの確率密度関数で, それぞれ次式で与えられる⁴⁾.

$$\left. \begin{aligned} h(\xi) &= 1/\tan \theta \\ q(\tan \theta) &= \frac{m}{\alpha} \frac{1}{\tan \theta_a} \left(\frac{\tan \theta}{\tan \theta_a} \right)^{m-1} \exp \left\{ -\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\tan \theta}{\tan \theta_a} \right)^m \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$\tan \theta_a$: $\tan \theta$ の平均

式(2)の $q(\tan \theta)$ はワイブル分布をあてはめたもので, 寸法パラメータ α と形状パラメータ m を有する. $\tan \theta$ の平均が $\tan \theta_a$ であることから, α と m の間には次式が成立し, α は m によって決定されることになる.

$$\alpha = \left\{ \frac{1}{\Gamma(1/m+1)} \right\}^m \quad (3)$$

式(2), (3)を式(1)に代入し数値計算した結果は図3のようになり, $H(\xi)$ は形状パラメータ m によって異なった分布形をとることがわかる.

ξの標準偏差 σ_{ξ} は突起が対称形であることから次式で計算される.

$$\begin{aligned} \sigma_{\xi}^2 &= 2 \int_0^{\infty} \xi^2 H(\xi) d\xi \\ &= \tan^2 \theta_a \cdot 2 \int_0^{\infty} (\xi/\tan \theta_a)^2 H(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (4)$$

図3 $H(\xi)$ の形状

式(4)において $\sqrt{2} \int_0^{\infty} (\xi/\tan \theta_a)^2 H(\xi) d\xi$ は, $m=2 \sim 4$ の範囲ではほぼ 0.65 の一定値をとる. したがって, $\tan \theta_a$ と σ_{ξ} との間には次式が成立する.

$$\tan \theta_a = 1.54 \sigma_{\xi} \quad (5)$$

3. 実験方法およびデータの処理方法

3.1 実験方法

実験試料は加工機械の精度等から受ける形状誤差(大きな周期のうねり)をできる限り取除くため, 剛性の高い工作機械を使用し, 加工に際しては十分に注意を払った. 本研究で用いた試料形状と加工方法等の詳細は表1に示すものである.

表面おうとつの情報は次のように処理した. まず, 触針式あらさ計からのアナログ出力をデータレコーダに記録し, それをA-D変換器によりデジタル量にした後, 電算機によりξ, σ_{ξ} , $H(\xi)$ を求めるようにした. この場合の測定条件は次のようにした.

- (1) 表面おうとつの測定にはスキッドを使用しない.
- (2) 触針走査速度 0.2 mm/s, 触針先端半径約 4 μm.
- (3) 倍率の校正は校正用試料とする.
- (4) 表面おうとつの測定方向は, 表面おうとつの方向(切削工具切れ刃の切削方向)に対し直角な方向とする.
- (5) 測定長は 3 mm (高さの標準偏差 $\sigma \leq 2 \mu\text{m}$ に入る研削加工面の一部) と 6 mm とする*.

3.2 データの処理方法

表面おうとつのデータを離散量として処理する場合, 微小突起の傾斜ξは図2に示す隣接データの高さの差 $4Z$ とサンプリング間隔 ϵ とから次式で計算される.

* 測定長については後に詳細に報告するが, この条件で十分であることが確かめられている.

表1 試料形状および加工条件

加工方法	試料材質	試料形状	加工条件	加工機械	かたさ $H_V(0.5)$
平面研削加工	SK 3, S 38 C, FC 15	40φ×20 端面 20×80×20	砥石: WA 46 J, A 36 N, 湿式, 周速: 1400 m/min, テーブル速度: 4~25 m/min, 研削方法: トラバ ース, プランジ, ドレッサ送り: 0.02~0.5 mm ピッチ, 加工物切込み: 5~40 μm	日立精工 GHL-300 S	200~700
旋削加工	S 38 C, FC 15	100φ×50 端 面および外周	工具: P 20(0°, 6°, 6°, 6°, 15°, 15°, r), r: 0.1, 0.3, 0.6, 1.0, 2.0, 切削速度: 23~396 m/min, 切込み: 0.1~1.0 mm, 送り: 0.05~0.4 mm/rev 工具: SKH 4(0°, 10°, 6°, 6°, 10°, 10°, r), r≒ 0~0.1 mm, 切削速度: 15~100 m/min, 切込 み: 0.1~0.2 mm, 送り: 0.05~0.4 mm/rev	池貝鉄工 A-20	200~300
正面フライス 加工	S 38 C, SS 41, FC 20	100□×60	工具: F 120 S (三菱ワルター), 切削速度: 30~ 80 m/min, 切込み: 0.2~0.5 mm, 1 刃あたり 送り: 0.02~0.1 mm	静岡鉄工 SH 2 V	200~300
平フライス加 工	SS 41, FC 20	100□×200	工具: 100φ×127, 刃数: 10, STi 20 (ダイヤチ タニット), 切込み: 0.05~0.12 mm, 1 刃あたり 送り: 0.5~1.0 mm	日立精工 2 ML	250~300
エンドミル加 工	SS 41	100□×200	工具: 30φ, 刃数: 6, SKH 2, 切込み: 0.5~3 mm, 1 刃あたり送り: 0.01~0.05 mm	日立精工 2 ML	250~300
シェーパ加工	FC 20	工作機械部品	—	—	—
ヘール加工	FC 25	定盤面	—	—	—
ラップ加工	SK 3, S 38 C, FC 15	40φ×20 端面	C # 320~# 1200, WA # 2000~# 5000, 湿式	Lapmaster 12	200~700

平面研削加工面, SK 3, S 38 C, FC 15, $\sigma = 0.2 \sim 3 \mu\text{m}$

図4 微小突起の傾斜に及ぼすサンプリング間隔の影響

$$\xi = \Delta Z / \varepsilon \quad (6)$$

式(6)で計算される ξ は ε の値により変化するため, 真の実験値を示す範囲内で適切な ε を設定する必要がある。

図4は ξ の標準偏差 σ_ξ とサンプリング間隔 ε との関係を示すもので, 実験値は $\varepsilon = 1 \mu\text{m}$ でサンプリングされたデータを任意間隔で取出し計算したものである。ここで, ε_s は表面おうとつ曲線の分布形を等傾斜正規分布とすると, 連の理論から導かれる最小独立間隔で, 任意のサンプリング間隔 ε で得られたデータから次式で計算されるものである⁶⁾。

$$\varepsilon_s = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\sigma_\varepsilon}{\tan \theta_{as}} = 0.8138 \frac{\sigma_\varepsilon}{\sigma_{\xi\varepsilon}} \quad (7)$$

また, σ_ξ は $\varepsilon = 1 \mu\text{m}$ でサンプリングしたときの値であり, $\tan \theta_{as}$, $\sigma_{\xi\varepsilon}$, σ_ε は任意の間隔 ε で得られた値である。したがって, σ_ε , $\sigma_{\xi\varepsilon}$ に σ , σ_ξ (十分なサンプリング間隔と測定長で得られた値)を代入すれば, その表面おうとつ曲線の最小独立間隔が得られる。図4からわかるように, ε の減少に伴い $\sigma_{\xi\varepsilon}/\sigma_\xi$ は1に漸近しており,

本研究の範囲($\sigma \leq 0.05 \mu\text{m}$)では $\varepsilon/\varepsilon_s \leq 0.2$ で $\sigma_{\xi\varepsilon}/\sigma_\xi = 1$ にみなすことができる。したがって, $\varepsilon = 1 \mu\text{m}$ で得た σ_ξ はその表面おうとつを代表する値であると考えられる。

ε_s が任意サンプリング間隔で得られたデータから計算される値であることから, $\sigma_{\xi\varepsilon}$ から σ_ξ を推定することができる。すなわち, 図4の実験点を実線のように近似すれば, 次式が得られる。

$$\sigma_\xi = \sigma_{\xi\varepsilon} \left\{ 1 + 2.7 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_s} \right)^8 \right\} \quad (8)$$

本研究では, 表面おうとつの小さいものに対しては $\varepsilon = 1 \mu\text{m}$, 比較的大きなものに対しては $\varepsilon = 2 \mu\text{m}$ としているが, $\varepsilon/\varepsilon_s \leq 0.2$ を満足しないものに対しては, 式(8)により σ_ξ を推定している。

4. 種々の加工面に対する傾斜分布

4.1 平面研削加工面

研削加工面は表1の条件で加工されたもので, 測定は研削方向(砥粒の切削方向)に対して直角な方向である*。得られた表面おうとつのプロファイルの一例を図5(a)に示す。これらのデータから得た微小突起の傾斜 ξ の分布は図6(a)のようになる。ここで, ξ の分布形は $\xi = 0$ に対してほぼ対称になることから, 図6では $\xi \geq 0$ の範囲について示してある。図3を参考にすれば, 実験値は $m = 1.8 \sim 2.6$ とした式(1)の計算結果で近似することができる。実験値の平均は $m = 2.3$ とした式(1)の値(実線)

* 研削方向についての表面おうとつの性質は, 文献4)に詳しい。

図 5 各種加工面の表面おうとつプロフィール

ではほぼ表わすことができる。

4.2 旋削加工面

旋削条件を表 1 に、得られた表面おうとつのプロフィールの一例を図 5(b) に示す。図 6(b) は実験により求めた ξ の分布を示すもので、 $m=1.8\sim 2.3$ とした式 (1) の値で近似することができ、実験値の平均は $m=2.0$ とした計算値でほぼ表わすことができる。この図から、規則的な切削送りマークのみみられる旋削加工面においても、不規則な表面おうとつと考えられる研削加工面とほぼ同様な ξ の分布をもつことがわかる*。

ここで、切削バイトの先端形状がそのまま転写される理想面と図 6(b) の現実の加工面に対する ξ の比較を検討してみる。バイトのノーズ半径 r がそのまま加工面を形成する場合を例にとれば、図 7 に示す理想表面おうとつが得られる。この理想面における ξ の分布は次のようにして得られる。すなわち、図 7 において $x_{\max} \ll r$ と仮定すれば

$$\left. \begin{aligned} z &= x^2/2r \\ \xi &= dz/dx = x/r \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ξ の確率密度関数 $H(\xi)$ と x との間には、確率要素について次式が成立する。

$$H(\xi) d\xi = dx/2x_{\max} \quad (10)$$

式 (9), (10) より次式が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} H(\xi) &= 1/2\xi_{\max} \\ \xi_{\max} &= x_{\max}/r \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

また、 ξ の標準偏差 σ_ξ は

$$\sigma_\xi = \left\{ 2 \int_0^{\xi_{\max}} \xi^2 H(\xi) d\xi \right\}^{1/2} = \xi_{\max}/\sqrt{3} \quad (12)$$

したがって、式 (11) は次式となる。

$$H(\xi) = 1/2\sqrt{3}\sigma_\xi \quad (13)$$

図 8 は ξ の確率密度の実験値と式 (13) の理想面に対する値 (実線) を比較したもので、式 (13) の値は実験値に対してかなりかけはなれていることがわかる。バイトの切れ刃形状が加工面にそのまま転写されない原因については、従来多くの研究がみられる⁹⁾ ため検討はそれら文献にゆずることとする。以上、バイトのノーズ半径を例として理想面との比較を試みた結果、本実験の範囲では、理想加工面を想定して ξ の分布を推定することは定性的にも無理があるといえる。

4.3 フライス加工面, シェーパ加工面, ヘール加工面

表 1 の加工条件で得られた表面おうとつのプロフィールの一例を図 5(c) に示す。平フライス、エンドミルの側面切削を除いてすべて切削方向に直角に測定したものである。微小突起の傾斜 ξ は突起の頂点に対してほぼ対称であり、図 6(c) に実験値の範囲を示す。これらの実験値は、式 (1) において $m=1.8\sim 2.3$ とした計算値で近似することができ、実験値の平均はほぼ $m=2.0$ とする式 (1) の値で表わすことができる。

4.4 ラップ加工面

表 1 の条件により加工された表面おうとつのプロフィールの一例を図 5(d) に示す。実験による ξ の分布は図 6(d) のようになり、 $m=1.8\sim 2.3$ とした式 (1) の計算値で近似することができ、実験値の平均はほぼ $m=2.0$ とする式 (1) で表わすことができる。式 (1) は方向性のある表面おうとつを対象に導かれたものであるが、ラップ加工面のように方向性のない表面おうとつにも十分適用できることがわかる。これは、式 (1) の誘導過程で用いられた仮定⁹⁾、すなわち、真の突起形状 (くさび形) と触針式あらさ計で得られる突起形状との関係についての仮定が、方向性のないもの (真の突起形状を円すい形としたものに相当する) にも適用できることによるものと考えられる。

* ダイヤモンドバイトで黄銅を旋削し、かなり規則的な表面おうとつをもつ面で得た久保らの傾斜分布の結果⁸⁾ も図 6(b) に近いものである。文献 8) では、 ξ の平均はゼロになっていないが、これはダイヤモンドバイトのセットによる影響と考えられる。

(a) 研削加工面

(b) 旋削加工面

各加工面データのうち、同一の ξ/σ_z におけるばらつきの幅は一緒に示してある

(c) フライス加工面, シェーバ加工面, ヘール加工面

(d) ラップ加工面

図6 微小突起の傾斜分布

5. 表面おうとつ曲線の高さの標準偏差と突起傾斜の関係

表面おうとつ曲線の高さの標準偏差 σ と微小突起の傾斜の標準偏差 σ_ξ は、密接な関係にあることが認められている⁷⁾。この関係が各加工法について定量的に明らかにされれば、 σ から容易に σ_ξ を推定することができる。

図9は各加工法に対する σ と σ_ξ の関係を示すもので、 σ と σ_ξ とは非常によい関係にあることがわかる。各実験値を実線のように近似すれば、 σ と σ_ξ に関する実験

図7 理想旋削加工面

6. 結 言

式として表2の各式をあてはめることができる。表2からわかるように表面おうとつが単一切削刃により生成される旋削加工面、フライス加工面等は互いに近い係数をもち、同様に、不規則な配列の切れ刃により生成される研削加工面、ラップ加工面も互いにかなり近い係数をもっている。

また、 σ の大きい範囲では $\sigma_\xi = 0.26 \sim 0.30$ となり、式(5)による突起の平均傾斜 $\tan \theta_0$ (突起プロファイルを双曲線で近似したときの漸近線の傾斜) は、 $22^\circ \sim 26^\circ$ になる。ASA B 46.1-1962 で測定器のチェックに用いられる precision reference specimens の頂角 150° の形状は、十分上記の値に入るもので、実際の表面おうとつ突起の頂角に近いものである。

破線部は理想加工面に対する分布

図8 旋削加工面における \$\xi\$ の分布

(a) 研削加工面

(b) 旋削加工面

(c) フライス加工面,
シューバ加工面,
ヘール加工面

(d) ラップ加工面

図9 各種加工面における σ と σ_ϵ の関係

研削加工面, 旋削加工面, フライス加工面, シューバ加工面, ヘール加工面, ラップ加工面を対象に表面おうとつ微小突起の傾斜について実験を試みた結果, 次の結

表2 σ_ϵ の実験式

加工方法	σ_ϵ (σ : μm 単位)	実験範囲
研削加工	$0.26\{1 - \exp(-0.98\sigma)\}$	$\sigma=0.05 \sim 3.6 \mu\text{m}$
ラップ加工	$0.26\{1 - \exp(-1.33\sigma)\}$	$\sigma=0.05 \sim 0.7 \mu\text{m}$
旋削加工	$0.30\{1 - \exp(-0.55\sigma)\}$	$\sigma=0.2 \sim 7.6 \mu\text{m}$
フライス, シューバ, ヘール加工	$0.30\{1 - \exp(-0.45\sigma)\}$	$\sigma=0.4 \sim 5.2 \mu\text{m}$

論を得た。

- (1) 表面おうとつ微小突起の傾斜を離散データにより求める場合, そのサンプリング間隔は, $0.2\epsilon_s$ (ϵ_s は式(7)による) 以下にする必要があり, それが満足されない場合には, 式(8)の補正により傾斜を推定することができる。
- (2) 表面おうとつ曲線の高さの標準偏差 σ と微小突起の傾斜の標準偏差 σ_ϵ との関係を, 表2のように与えることができ, σ から容易に σ_ϵ を推定できるようにした。
- (3) 微小突起の傾斜の分布は式(1)に含まれる形状パラメータ m を適当に選ぶことにより実験値をよく近似することができ, 本研究で対象とした加工面では $m=1.8 \sim 2.6$ であった。

文 献

- 1) 塚田忠夫, 阿武芳朗, 林 国一: 表面おうとつによる接触部剛性 (第1報), 日本機械学会論文集, **36**, 291(1970) 1923.
- 2) 塚田忠夫, 阿武芳朗: 表面おうとつによる接触部剛性 (第4報), 日本機械学会論文集, **37**, 304 (1971) 2400.
- 3) 塚田忠夫, 阿武芳朗: 表面おうとつによる接触部剛性 (第5報), 日本機械学会論文集, **38**, 307 (1972) 655.
- 4) 塚田忠夫, 阿武芳朗: 表面おうとつによる接触部剛性 (第2報), 日本機械学会論文集, **37**, 304 (1971) 2387.
- 5) 塚田忠夫, 阿武芳朗: 不規則な表面おうとつをもつ二平面の接触部剛性, 日本機械学会福井地方講演会前刷 (1971.12) 93.
- 6) 甲藤好郎: 表面あらさ曲線の統計的解析 (第1報), 日本機械学会論文集, **22**, 122 (1956) 693.
- 7) たとえば, 速沼 宏: 表面あらさの統計的性質, 精密機械, **31**, 5 (1965) 366.
- 8) 久保盛唯, 浅野都司: 表面あらさの傾斜分布統計装置, 昭和39年度精機学会春季大会 學術講演会前刷 (1964) 125.
- 9) たとえば, 岩城 晃, 森 昌幹: 表面あらさの生成について, 日本機械学会論文集, **23**, 130 (1957) 360.
G. Babo (志津野訳): 旋削加工における表面あらさについて, 応用機械工学, **6** (1969) 155.