

621.9.015 : 621-408 : 53.082.5

切削仕上げ面あらしのインプロセス測定に関する研究*

関口 博**, 竹山秀彦***, 村田良司**, 松崎 寛****

1. ま え が き

生産における自動化の要請が高まるにつれ、切削仕上げ面あらしのインプロセス測定は、品質管理や工具寿命管理の面でますますその必要性が高まってきた。それに呼応して最近この方面で興味ある研究が⁽¹⁾⁽²⁾なされるようになった。仕上げ面あらしのインプロセス測定の方法として、もっとも有望と思われるものに光学および流体ゲージ方式とがある。本報告においては光学的反射方式を用いて目的を達した経過、ならびに結果について述べる。

光反射方式による仕上げ面あらし測定としては、研削面やラッピング面などのように比較的良好な面のあらし測定に対しては、すでにいくつかの商品が開発されている。しかし、切削仕上げ面のようにあらい面に対してはいずれも適用不能とされてきた。

これまでに開発された光反射方式によるあらし測定の方法は、前記のような比較的良好な面においては、反射出力の検出角に対する分布がほぼ指数関数に近似できること、さらに加工法が同一なら、あらしプロフィールの平均傾斜角があらしそのものと一義的関係があるという経験的事実にもとづいている。

本研究の目的は、光反射方式を切削面のようなあらい面までその適用範囲を拡張すると同時に、インプロセス検出を可能ならしめることである。

2. 切削仕上げ面の反射特性

ラッピング面や研削面のような良好な面において、前述のような光反射法によってそのあらしが測定できる理由はまだ必ずしも明らかにされていない。この背景を明らかにするとともに、光反射法を切削面にまで拡張する手がかりをうるという目的で、切削によりえられた規則正しい面の反射特性を調べることから出発した。

図1は切削面の反射特性を調べるために用いた指向

装置の極めて良好なオートコリメータ光学系である。オートコリメータからの平行光線は切削面に直角に投光され、その照射ターゲットの長さは6mm(送りマークに直角方向)である。検出器は、送りマークに直角で、円筒状工作物の軸を含む面内で、検出角 β を変化しながら反射光を受光する。

図2は、0.45%炭素鋼の切削面についてオートコリメータ光学系を用い、送りを変化させ切削した種々のあらしの仕上げ面からの反射光の受光出力分布を示したものである。なお、反射出力は切削面のみぞの数に関して正規化してある(出力/みぞの数=出力×送り/ターゲット長さ)ため、その出力は仕上げ面上の単一みぞからの反射特性を示している。

この結果から、反射出力はみぞ面よりのわずかな乱反射成分にもとづくバイアスの上に、いくつかのピーク値が重畳されていることがわかる。これは、構成刃

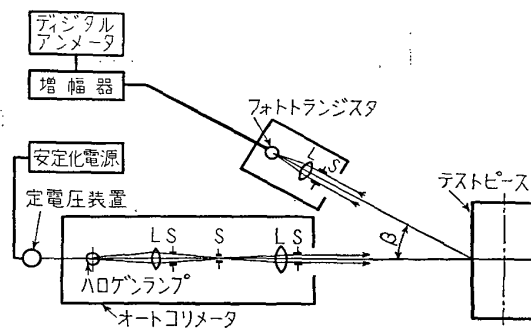
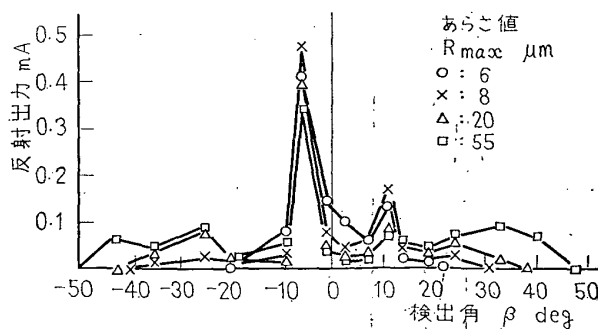
L: レンズ, S: スリット, β : 可変

図1 オートコリメータによる測定装置



被削材: 0.45%炭素鋼
 切削速度: 378 m/min
 送り: 0.10, 0.16, 0.24, 0.38 mm/rev

図2 オートコリメータによる切削面の反射光分布

* 昭和51年4月1日 第53期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和51年8月20日。

** 正員、機械技術研究所(東京都杉並区井草 4-12-1)。

*** 正員、東京農工大学工学部。

**** 小松製作所。

先のような騒音がない場合には、工具切れ刃の仕上げ面創成部分の幾何学的形状をかなり忠実にあらわしており、切れ刃は多面体の面によって構成されていることが観察される。なお、図2の中央付近に高いピーク値があらわれているのは、たまたまその位置にとくに大きな多面体面があったことを示す。また、このような指向性の鋭い光学系で検出した反射出力は、仕上げ面あらさの大小にはほとんど無関係で、みぞの数にほぼ比例することを示している。換言すれば、このような光学系での反射出力をどう処理してもこれを仕上げ面あらさ値と対応させることはむずかしい。

そこで、指向性の鈍い光学系を用いた場合の反射特性を調べるため、1本の径が $50\ \mu\text{m}$ のオプティカルファイバの675本を投光用に、同数を受光用にしたものランダムに束ねた光学系を用いた。図3はそのセットアップを示したものである。

図4は、オートコリメータ光学系とオプティカルファイバ光学系の指向性を、ガラス鏡面にアルミニウム粉末を塗布した面よりの反射光で調べたものである。その結果、オートコリメータ光学系においては出力70%での広がり角は 4° であったものが、オプティカルファイ

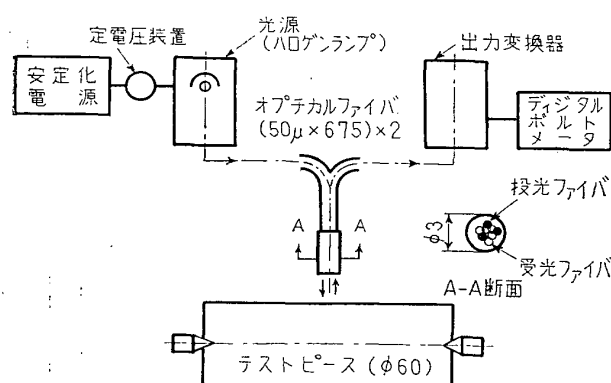


図3 オプティカルファイバによる測定装置

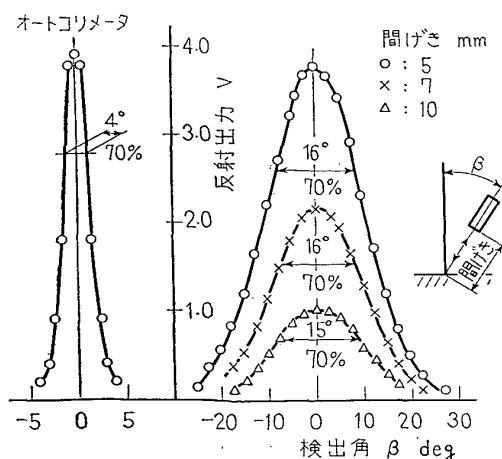
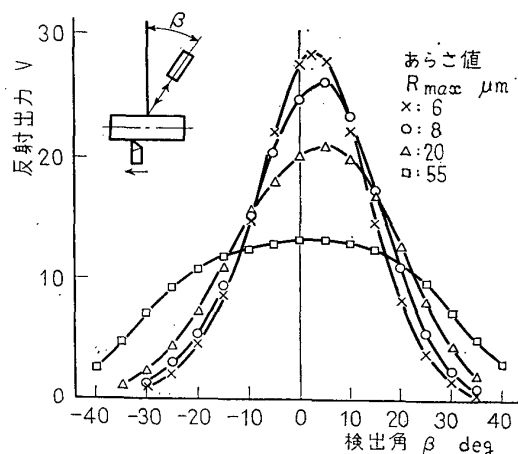


図4 オプティカルファイバとオートコリメータの指向特性

バの場合には 16° となり、オートコリメータの指向性に比べかなり鈍いものとなる。このような比較的鈍い指向性のオプティカルファイバ光学系（投光軸と受光軸は同軸）を用いて、図2と同一仕上げ面よりの反射出力分布を求めたのが図5である。さらに、黄銅とステンレス (SUS 304) の切削面における反射出力分布を図6および図7に示す。

以上の結果から明らかなように、指向性の鈍い光学系を用いると、良好な仕上げ面に対して、Schmaltz⁽³⁾、福島⁽⁴⁾らが指摘したように、切削仕上げ面のようなあらい面に対しても、その反射出力分布は検出角に対してほぼ指数関数に近い特性となる。このことは、検出器の指向性が鈍いために、被測定面上の投光ターゲット近傍の比較的広い面積からの反射光を積分した形で受光するためと考えられる。いいかえるならば、鈍



被削材: 0.45% 炭素鋼
図5 オプティカルファイバによる切削面の反射光分布

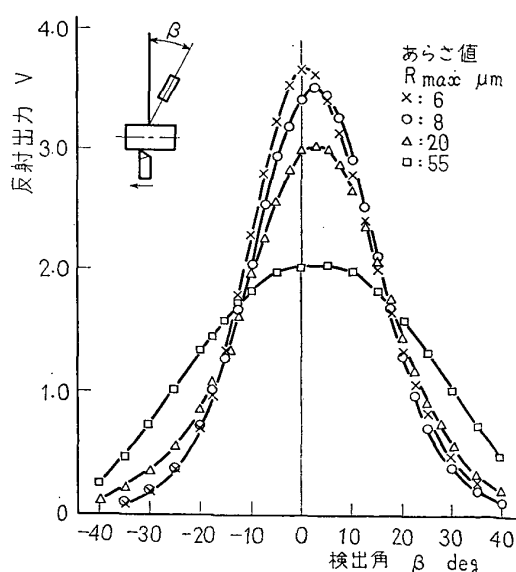


図6 オプティカルファイバによる切削面の反射光分布 (黄銅)

い指向性の検出器で受光することは、鋭い指向性の検出器で、等価的に乱反射特性を有する面からの反射を受光することと形式上同等であると仮定することができる。

3. 計算による検討

切削仕上げ面あらさのインプロセス測定のための、光学系を設計する上での指針を得る目的のために、鋭い指向性の検出器で、等価的に乱反射特性を有するという仮定のもとに、検出角度に関する反射分布関数を計算する。

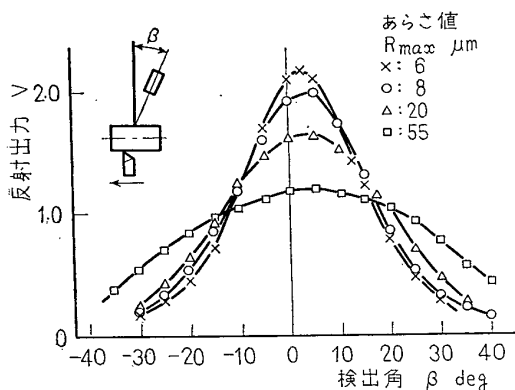
最初に、投光、受光の軸が同一の光学系を、被測定面に対する法線方向から β 傾いているときの単位入力に対する出力分布関数 $Q(\alpha, \beta)$ を求める。ここに α は図 8 における仕上げ面上のみぞの半中心角である。この計算に際して簡単のために以下の仮定を設ける。

(1) 仕上げ面素からの反射出力は、検出角 β 方向の場合、前記の仮定にしたがってつぎのように表せる。

$$dI_{\beta} = ir d\varphi \cos \frac{\theta}{2} a e^{-k|\theta|} \dots \dots \dots (1)$$

β : 検出角ならびに投光角

θ : 正反射方向と検出器のなす角



被削材: SUS 304

図 7 オプティカルファイバによる切削面の反射光分布

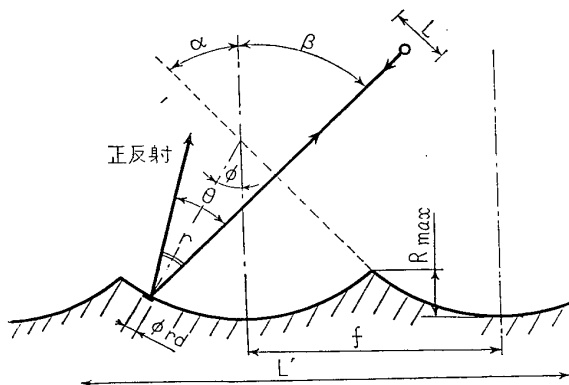


図 8 切削面における反射モデル

$$\varphi = \beta - \theta/2$$

r : 工具のコナ半径

i : 入射光強度

a : 反射率を含む定数

k : 定数

(2) 光束は平行光線で、一次元的であり、かつ被測定面上で送りマークに直角である。

(3) 光の強度は被測定面上での光のターゲット長さ L' 全長にわたり一様である。

(4) 検出器は β 方向のみの光を受光する。

(5) β は、光が面上のプロファイルによってさえぎられるほど大きくはならない。

そこで、全投光入力はずぎのようになる。

$$\text{全投光入力} = iL \dots \dots \dots (2)$$

L : 入射光の幅

一方受光出力はずぎのようにあらわされる。

$$\frac{L'}{f} \int_{-a}^a ir \cos \frac{\theta}{2} a e^{-k|\theta|} d\varphi \dots \dots \dots (3)$$

L' : 被測定面上の入射光の長さ mm

f : 送り mm/rev

したがって、

$$Q(\alpha, \beta) = \frac{(3)}{(2)}$$

$$= \frac{a}{2 \cos \beta \sin \alpha} \int_{-a}^a \cos(\beta - \varphi) e^{-2k|\beta - \varphi|} d\varphi \dots \dots \dots (4)$$

$\alpha \leq \beta$ の場合

$$Q(\alpha, \beta) = \frac{a}{2(1+4k^2) \sin \alpha \cos \beta} \times [e^{-2k(\alpha-\beta)} \{ \sin(\alpha+\beta) - 2k \cos(\alpha+\beta) \} + e^{2k(\alpha-\beta)} \{ \sin(\alpha-\beta) + 2k \cos(\alpha+\beta) \}] \dots \dots \dots (5)$$

もし、 $\alpha > \beta$ の場合には

$$Q(\alpha, \beta) = \frac{-a}{2(1+4k^2) \sin \alpha \cos \beta} \times [e^{-2k(\alpha-\beta)} \{ -\sin(\alpha+\beta) + 2k \cos(\alpha-\beta) \} - e^{-2k(\alpha+\beta)} \{ \sin(\alpha-\beta) - 2k \cos(\alpha+\beta) \} - 4k] \dots \dots \dots (6)$$

いま、 $k=2$ として式 (5) および (6) を計算し、種々の α 、したがって種々のあらさ $R_{\max}$ に対してプロットしたのが図 9 である。同図と図 5~7 と比較すると、前記の仮定のもとで計算してえた分布と、実験によって得た分布の傾向はよくあっている。このことは、等価反射特性という仮定が少なくとも形式上無理がないこと、そしてこの計算が本目的の光学系の設計に役立つことを示している。

また、図 5~7 ならびに図 9 をみてわかることは、仕上げ面のあらさの値が大きくなれば、それだけ分布

はなだらかになることである。したがって、 $\beta=0^\circ$ のときの $Q(\alpha, 0)$ と、 $\beta=\beta_1 \neq 0^\circ$ のときの $Q(\alpha, \beta_1)$ との比をとれば、仕上げ面あらさと一義的に対応するはずであり、しかもそれは被測定面の反射率とは無関係となる。このことを実現するには同一光学特性の一对の光学系を、たがいに適切な角度に組み込めばよい。図 10 はコンパクトにビルトインされたオプティカルファイバセンサを示している（この場合 $\beta_1=30^\circ$ ）。

前記の計算から近似的に導かれるように、 $Q(\alpha, 0)/Q(\alpha, \beta_1)$ は $R_{\max}/r$ の関数となるので、この方法は工具のコーナ半径が一定のときにのみ適用可能であることがわかる。したがってコーナ半径が変化する場合には、コーナ半径に関する修正係数によって仕上げ面のあらさ値と対応付けをしなければならないことを示唆している。

4. 実験結果

4.1 オフライン実験 前記の計算は、 $\beta=0^\circ$ と $\beta_1 \neq 0^\circ$ からの投光による被測定面上のターゲットがたがいに干渉しない場合、換言すれば一对の光学系で

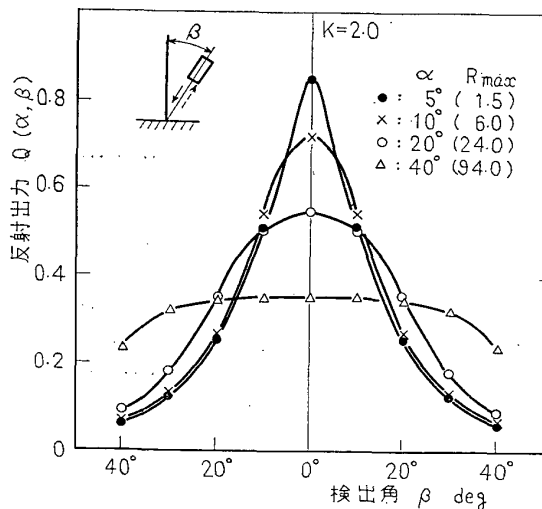


図 9 反射出力の分布計算例

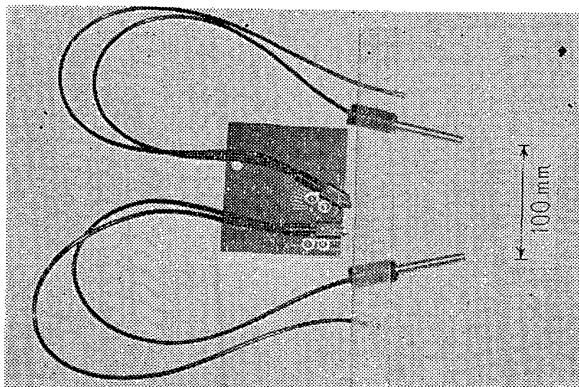


図 10 オプティカルファイバ検出器

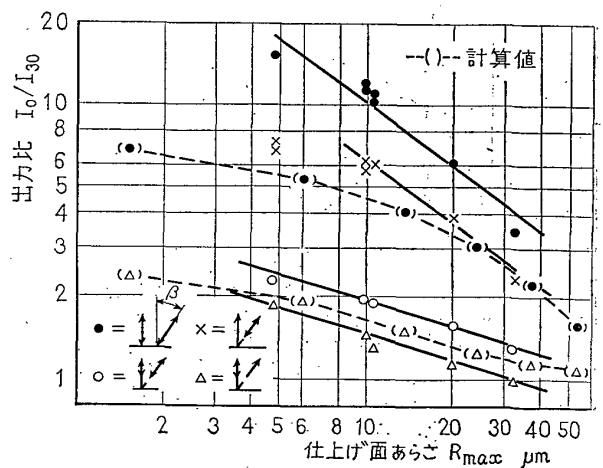
のそれぞれの測定位置は、近接してはいるが異なった場所であるとして行ったものである（この場合、それらの場所での表面状態は同じであるとする）。

図 11 は被測定面上のターゲットの干渉の有無、および投光と受光を共通または分離した場合について実験的に確かめたもので、反射出力の比 $I(\alpha, 0)/I(\alpha, 30)$ $[=Q(\alpha, 0)/Q(\alpha, 30)]$ をあらさ値に対してプロットしたものである。なお点線は図 9 より求めた計算値である。この結果、実験したあらさの範囲 $R_{\max}$ 5~30 μm において、いずれの方法とも前記出力比 I_0/I_{30} はあらさ値に対して乗べき関数的に変化する。また、計算値も上記のあらさ範囲内では近似的に乗べき関数的に変化しているとして大差ない。

一方、あらさ検出の出力は光のターゲットが干渉しない場合が最も高いことがわかったので、以後の実験ではこの方法を採用する。

図 12 は各種被削材を、コーナ半径 0.4 mm の P10 超硬バイトで、切削速度 250 m/min のもとで送りを変化させて長手削りを行い、検出角 β を 3 種類として仕上げ面あらさと、オプティカルファイバ光学系による反射出力 $I(\alpha, \beta)$ との関係を求めたものである。同図において、いずれの被削材においても検出角 $\beta=0^\circ$ のときは反射出力があらさ値の増加につれて単調に減少するが、 $\beta=30^\circ$ の場合は逆にあらさの増加につれて単調に増加する。

したがって、もし $I(\alpha, 0)/I(\alpha, 30)$ の比をとれば、



- : β_0, β_{30} からの照射ターゲットを干渉させず、その反射光を β_0, β_{30} で受光
- : β_0, β_{30} からの照射ターゲットを干渉させ、その反射光を β_0, β_{30} で受光
- ×: β_{30} からの照射ターゲットの反射光を β_0, β_{30} で受光
- △: β_0 からの照射ターゲットの反射光を β_0, β_{30} で受光

図 11 被測定面上のターゲットの干渉の有無と投受光方法の違いによるあらさ値と反射出力比の関係

極めて感度よくあらさ値を認定することができるはずである。図 13 は、図 12 の反射出力の比 I_0/I_{30} をあらさ値に対してプロットしたもので、 $5 \sim 30 \mu\text{m}$ のあらさ範囲では反射出力比 I_0/I_{30} はあらさ値に対して乗べき関数的に変化する。また、あらさが $30 \mu\text{m}$ 以上になると前記関係からずれるのは、図 11 のターゲットが干渉を起こさない場合の計算値と同じ傾向である。なお、被測定材質による相違が見られないのは前記計算からも推察されるように、出力の無次元化により被測定面の材質ないし反射率の項が消去されるためである。

検出器と被測定面との距離は、 $5 \sim 10 \text{ mm}$ の範囲であれば反射特性に影響はなく、またその距離の変動の影響も、一对の同質光学系よりの出力比をとる方法を

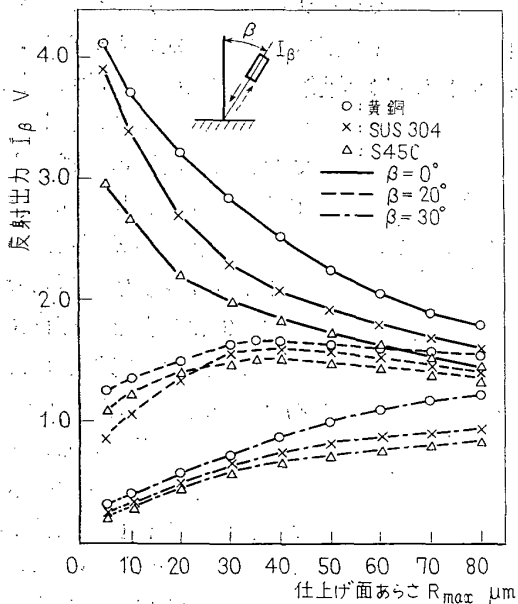


図 12 検出角を変化した場合の表面あらさと反射出力との関係

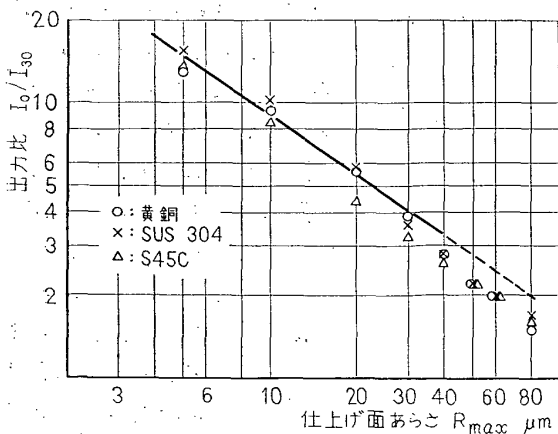


図 13 各種被削材におけるあらさ値と出力比の関係

とっているために消去できる利点がある。その他の環境騒音の影響も同様の理由で無視できるほど小さくなる。

本方法による仕上げ面あらさ検出の制約条件は、前にも触れたように工具コーナ半径が一定でなければならないことである。図 14 はいく種類かのコーナ半径について、前記出力比 I_0/I_{30} とあらさ値との関係を実験的に求めたものである。いずれの場合もあらさ値が $5 \mu\text{m}$ 以上においてはほぼ乗べき関数的に変化する。あらさが $5 \mu\text{m}$ 以下において、上記の関係からずれるのは図 11 における計算値の場合と同様である。また、あらさ値の小さい所でばらつきが大きくなるのは、切削送りが非常に小さい場合、切れ刃部に構成刃先などのじょう乱が生じ、それが原因となって仕上げ面プロフィールが乱れて周期性が低下し、このため乱反射成分が増加するためと考えられる。なお、コーナ半径 1.2 mm の場合、あらさ値が $15 \mu\text{m}$ 以上で I_0/I_{30} が大きな値を示しているのは、そのときまたまびびりを生じ、切削面のみぞ形状が周期的に変化したためと考えられる。

そこで図 13 より、あらさ値 $10 \mu\text{m}$ における I_0/I_{30}

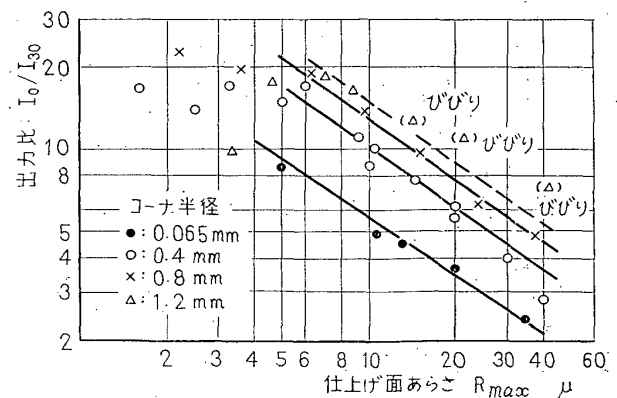


図 14 各種工具コーナ半径におけるあらさ値と反射出力比の関係

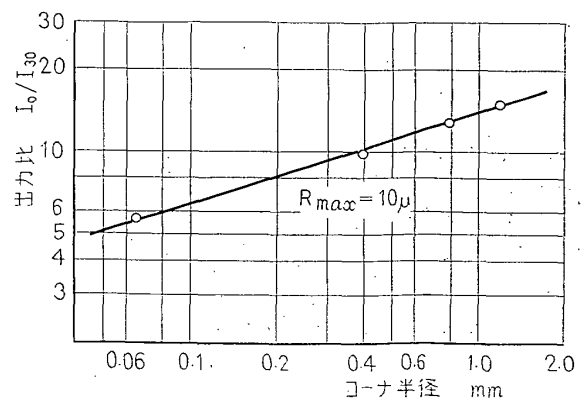
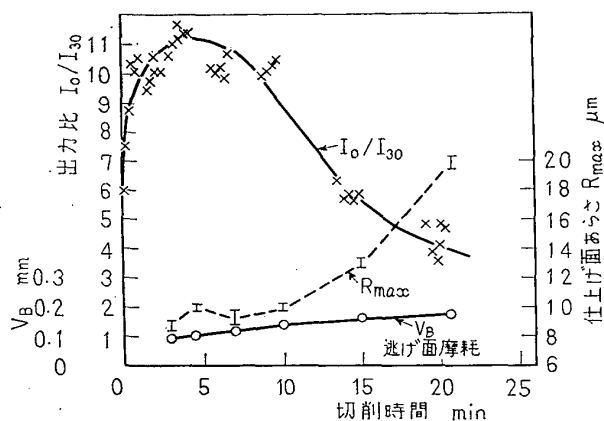


図 15 あらさ値 $10 \mu\text{m}$ R_{max} におけるコーナ半径と反射出力比の関係

とコーナ半径との関係を求めたのが図 15 である。同図で明らかなように、 I_0/I_{30} もコーナ半径に対して乗べき関数的に変化する。これらの結果より、 I_0/I_{30} と



被削材: S45C, 工具: P10, コーナ半径: 0.4 mm
切削速度: 200 m/min, 送り: 0.2 mm/rev

図 16 切削時間経過における逃げ面摩耗, 表面あらさと反射出力比の関係

あらさ値との関係は、コーナ半径の修正係数を含んだ乗べき関数として次のように表すことができる。

$$\frac{I_0}{I_{30}} = 75.1 R^{-0.74} r^{0.335}$$

R : あらさ値 μm

r : コーナ半径 mm

コーナ半径の補正に類することは、たとえラッピング面や研削面のようなよい面でも必要はらずで、加工法や用いるアプレシブの種類が同一でないときあらさとの対応がつきにくくなる大きな理由もこのためと考えられる。

さらに、コーナ半径があらさ値に比べて著しく小さい、たとえばねじ切りのような仕上げ面の場合も本方法は適用できない。しかし、通常の切削で得られる面、とくにあらさの問題となる仕上げ削りにおいては、仕上げ面は工具のコーナ部(円弧部)で創成されるので、上記のような心配はほとんどないといえる。

4.2 オンライン実験 本方法の技術的可能性と信頼

信頼を確かめるために、長手削りにおいて、時間の経過とともに工具が摩耗し、切削仕上げ面あらさも変化する過程を追いかけるオンライン実験を行った。

図 16 は切削仕上げ面あらさ R_{max} 、工具の横逃げ面摩耗幅 V_B および反射出力比 I_0/I_{30} が、切削時間の経過とともに変化する模様を示したものである。また、図 17 は切削時間が3分および15分のときの I_0, I_{30} および切削仕上げ面あらさプロファイルの例を示したものである。なお、反射出力として同出力比のシグナルは、適切な電気フィルタを使用することによって極めて安定した状態でサンプリングすることができた。

図 16 において、切削のごく初期において、あらさ値が小さいにもかかわらず予期に反して I_0/I_{30} の値が小さいのは、研削したての工具面が微視的におうとつをもっており、このために創成面も乱反射成分を比較的多くもっていることによると考えられる。そしてわずかに切削が進

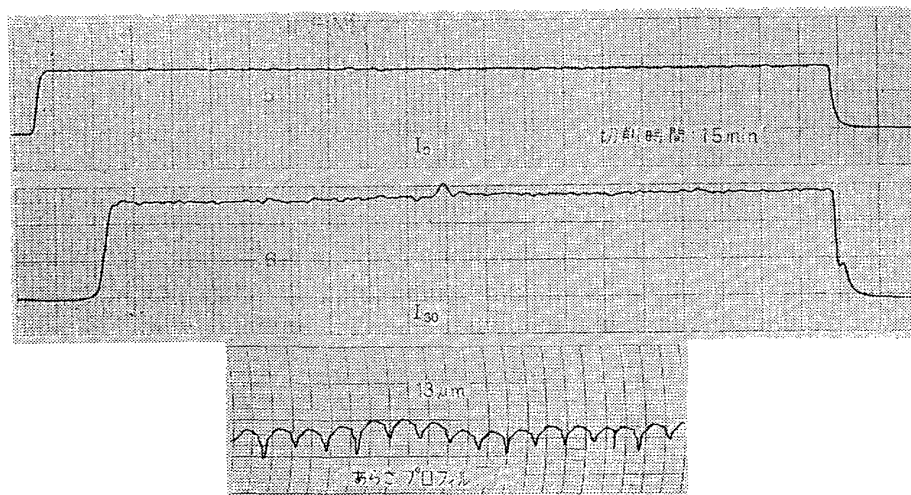
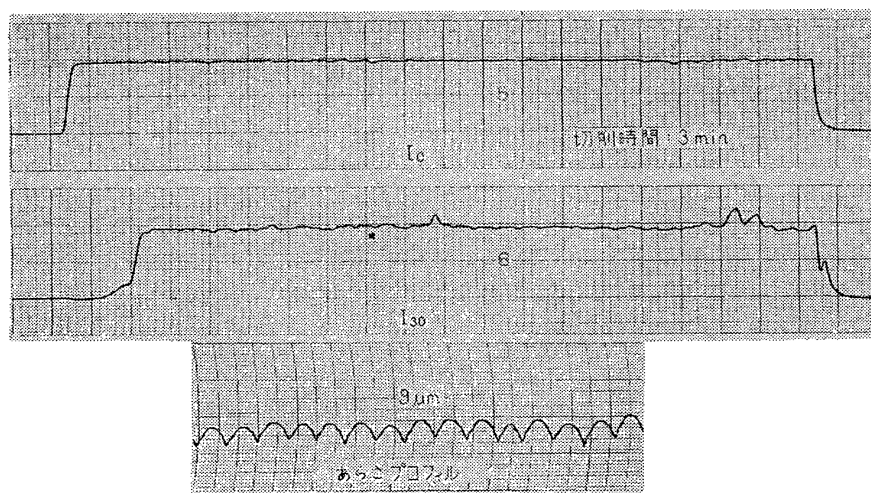


図 17 反射出力と仕上げ面あらさの記録例

めばこのようなおうとつが平滑化され、反射出力も定常状態に落ち付くと考えられる。いずれにしてもこのような遷移期間は切削初期のごく短時間である。

図 16 の結果をもとに、切削仕上げ面 あらさ値と I_0/I_{30} の関係をプロットすると図 18 のようになる。同図では、図 14 でのオフライン実験値も併記してオンライン実験値との対応を示しているが、両者はかなりよく一致しており、この結果、本方法が仕上げ面あらさのインプロセスセンサとして十分使えることが立証された。

また、本方法の応用面での著しい効果として、工具のチップング検出が可能なことである。図 19 に示すように、極めて微少な切れ刃チップングでも、切削仕上げ面のわずかな変化をとらえて、とくに I_{30} 出力が鋭敏に変化する。さらに、切りくずが切削仕上げ面をこすってできる仕上げ面の変化のうち、人間の眼でやっと認めうる程度のもので本センサによれば確実にとらえることができる。まして、工具のチップングの変化を検出することは容易で、オンライン工具管理に極めて有望な方法と考えられる。

前記の実験はいずれも乾式切削面について行ったものである。しかし、生産現場においては切削油剤を使用する場合が多い。そこで切削油剤を使用した場合の反射出力特性への影響を調べた。

図 20 は本実験のセットアップを示したもので、測定面上の切削油は空気圧によって除くようにした。空気圧は元圧を種々変化させ、測定面より 15 mm の位置より $\phi 1.5$ mm のノズルより噴射した。使用した切削油は、水溶性ソリュブルタイプ (JIS W-2 種) と 2 号スピンドル油である。図 21 はその結果を示したもので、同一切削油剤に対して空気の吹き付け圧力が $2 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$ に変化してもその差は見られず、む

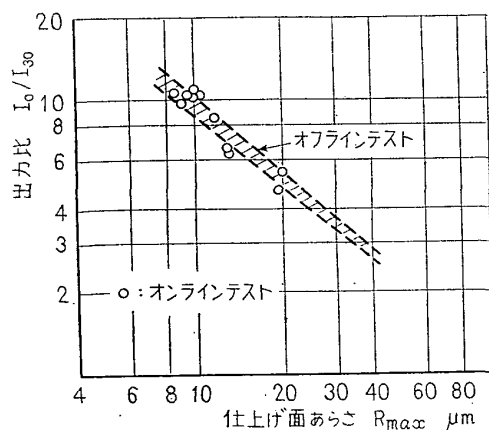


図 18 オンライン実験における表面あらさと出力比の関係

しろ切削油剤の違いによる影響が大きい。水溶性切削油の場合には、乾式切削における反射出力比とほとんどかわらず、油剤の影響はないといえる。スピンドル

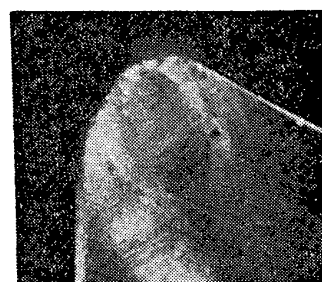
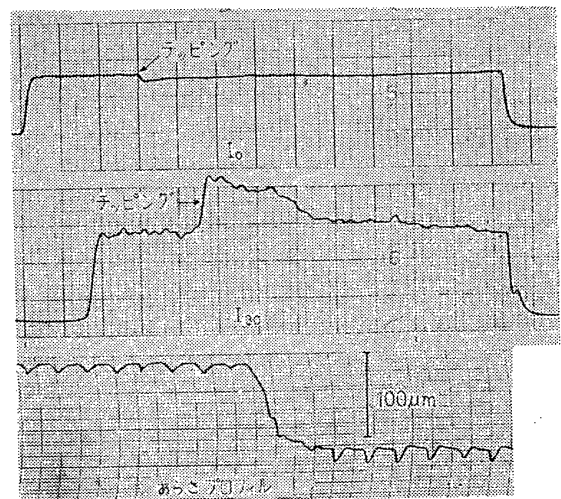
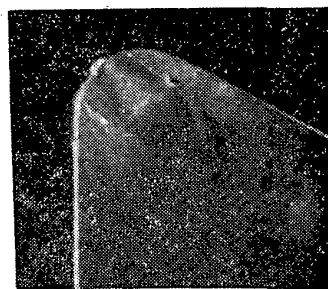
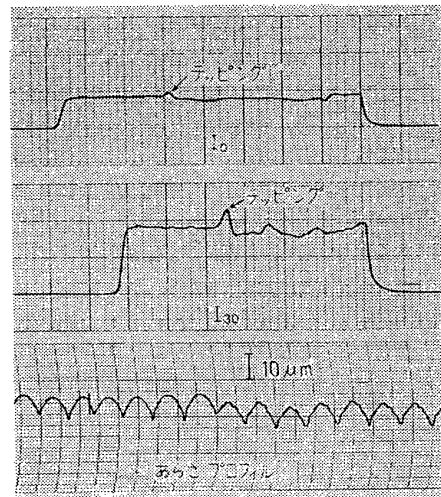


図 19 刃先チップングの検出例

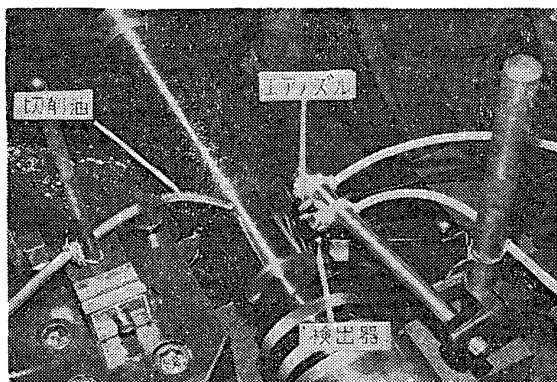


図 20 切削油剤の影響を調べた実験装置

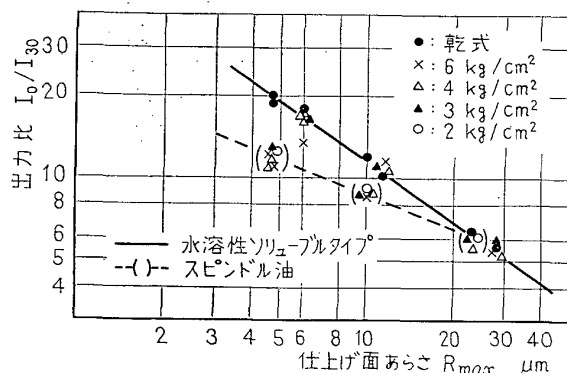


図 21 反射出力比におよぼす切削油剤の影響

油の場合、あらさ値が小さくなるにしたがって、乾式の反射出力比と大きく違ってくる。これは、粘性の高いスピンドル油の場合には空気圧で完全に除去することができず、残った油は切削面のみぞ底にたまる。

この残る油量をあらさに関係なく一定と仮定すると、あらさが小さくなると切削面のみぞ幅も小さくなりみぞ面積に占める残油面積の割合が大きくなり、反射出力 I_0 はこの油の影響を大きく受けて小さくなる。一方、反射出力 I_{30} はそれほど油の影響を受けないため反射出力比 I_0/I_{30} は小さくなるためと考えられる。あらさが $25 \mu\text{m}$ 以上になると付着油の影響は無視できるようになる。

なお、測定値にばらつきがあるのは、測定面の光のターゲット面積が比較的広いのに対して、エアノズル

径が $\phi 1.5 \text{ mm}$ と小さく、ターゲット全面に一様にエアが当たらなかったためと考えられる。

5. 結 論

(1) 切削面の反射特性を実験的ならびに理論的に分析した。鋭い指向性の光学系によれば切削仕上げ面の微視的プロフィールに対応する反射出力が求められる。しかしこの場合の出力は入射ターゲット中の送りマークのみぞ数にほぼ比例し、あらさの値とは対応しない。

(2) 鈍い指向性の検出器を用いた場合、その反射特性は検出角に関して近似的に指数関数分布となる。これは、乱反射特性を有する面を鋭い指向性の検出器を用いて測定した反射特性と等価とみなしうる。

(3) 一对の等質の光学系により、異なった検出角のもとにえられる出力の比をとれば、その比は、被測定物の材質にかかわらず、あらさ値と工具のコーナ半径との間に乗べき関数関係がある。

(4) 本方法により工具刃先のごくわずかなチップングも敏感にオンライン検出することができる。

(5) 水溶性切削油剤を使用した場合には、空気圧で油剤を吹き飛ばすことによって本方法を使用することができる。粘性の高い切削油剤の場合は補正する必要がある。

本研究は昭和 50 年度における日本機械学会工作機械システムの自動保守研究分科会の研究「群制御工作機械システムの自動保守に関する研究」の一環として行ったもので、その間貴重なご意見、ご援助を賜った関係企業、研究者側委員ならびに関係各位に深じなる謝意を表するものである。

文 献

- (1) Spurgeon, D. and Slater, R.A.C., *Proc. 15th Int. Mach. Tool Des. Res.*, (1974), 339.
- (2) Mitsui, K. and Sato, H., *Proc. 16th Int. Mach. Tool Des. Conf.*, (1975).
- (3) Schmaltz, G., *Technische Oberflächenkunde*, 19 (1936), 99, Julius Springer.
- (4) 福島, 日本航空学会誌, 8-78 (昭 16), 1070.

討 論

〔質問〕 奈良 治郎 (計量研究所)

油の除去、影響などに新しい知見を得ていることに敬意を表するが、次の 2 点について質問する。

(1) 本研究は幾何光学の範囲で反射光分布を取扱っている。この場合金属面を対象とし、二重、三重反

射がないとすれば、反射光分布は、でこぼこの傾斜角分布によって定まる。したがって、でこぼこの高さ方向の性質たとえば本論文での R_{max} と反射光分布との間には、一義的な関係はないと考えられる。

質問者は表面粗さの表示に R_{rms} を用いたが、

R_{rms} の値が同一の金属加工面であっても加工法がことなれば、すなわちでこぼこの形がことなれば、NF 粗度値[本論文の文献(4)]がことなること経験した。

(i) 上記のように考えると、本論文の方法で R_{max} を推定できるのは、 R_{max} と傾斜角分布との間に特別な関係が成立する場合のみではないか。

(ii) コーナ半径一定で加工した場合、でこぼこの R_{max} と傾斜角分布との関係はどのようなになるのか。

(iii) $Q(\alpha, 0)/Q(\alpha, \beta_1)$ が R_{max}/r の関数になることを示されたい。

(2) 図8の切削面における反射モデルと、図17の測定した表面のでこぼこの形状が非常にことになっているが、この点は理論的取扱上、問題はないのか。

[回答] (1) (i) 厳密には正しくそのとおりである。

(ii) 通常の切削では、ほとんどの場合仕上げ面プロフィールは工具のコーナ円弧によって創成され、その最大あらさは理論的に次のように求まる。

$$R_{max} \doteq \frac{f^2}{8r} \quad (f \leq 2r \sin \beta) \quad \dots\dots\dots (i)$$

R_{max} : 最大あらさ

f : 切削送り

r : コーナ半径

β : 前切れ刃角

式(i)においてコーナ半径を一定とすると R_{max} は送り f の関数となる。

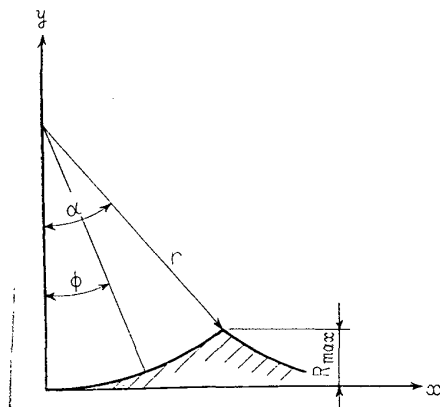
コーナ円弧によって作られる仕上げ面プロフィールを完全な円弧と仮定すると、付図1に示すように円の方程式は：

$$x^2 + (r-y)^2 = r^2 \quad \dots\dots\dots (ii)$$

弧 $\widehat{OA}$ 上の傾斜は

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x}{x-y} = \tan \phi \quad \dots\dots\dots (iii)$$

として求められ、1 プロフィール内の傾斜角分布は点O



付図 1

における傾斜角 0° から、点Aにおける傾斜角 α まで一様に分布する。

一方、測定用ターゲットの幅 L を一定とした場合、そのターゲット内のプロフィールの数 N は

$$N = \frac{L}{f} \quad \dots\dots\dots (iv)$$

となり、 N はある傾斜角が存在する度数を表す。式(i), (iv) から R_{max} と N の関係を求めると

$$R_{max} \doteq \frac{L^2}{8rN^2} \quad \dots\dots\dots (v)$$

となり、 R_{max} と N とは反比例し、これを図で示せば付図2のようになる。

また、平均傾斜角と R_{max} の関係を求めると、式(iii)より

$$\begin{aligned} \left(\frac{dy}{dx} \right)_{\text{mean}} &= \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha \tan \phi \, d\phi = \frac{-1}{\alpha} \ln(\cos \alpha) \\ &= \frac{-1}{\cos^{-1}\left(\frac{r-R_{max}}{r}\right)} \ln\left(\frac{r-R_{max}}{r}\right) \quad \dots\dots\dots (vi) \end{aligned}$$

通常 $r \geq 0.4 \text{ mm}$, $R_{max} < 0.04 \text{ mm}$ であるから、 R_{max}/r の微少項を省略すれば

$$\left(\frac{dy}{dx} \right)_{\text{mean}} \doteq \left(\frac{r}{2R_{max}} \right)^{1/2} \frac{R_{max}}{r} = \left(\frac{R_{max}}{2r} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (vii)$$

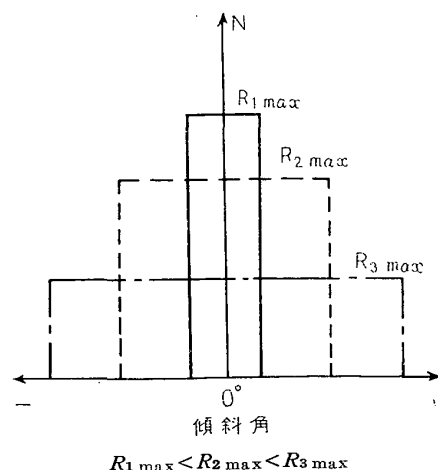
従って r が一定なら R_{max} は近似的に仕上げ面プロフィール傾斜角とある関数関係にある。

(iii) 本文の式(5)および(6)より、 F を関数形として、 k と β_1 は定数であるから、

$$Q(\alpha, 0)/Q(\alpha, \beta_1) = F(\alpha) = F\left\{ \cos^{-1}\left(1 - \frac{R_{max}}{r}\right) \right\}$$

となり、 R_{max}/r の関数となる。

(2) 図17の測定倍率は、縦倍率700倍、横倍率37.5倍で記録したもので、この縦横倍率を同じにすれば図8のモデル形状に近い形状となる。



付図 2 傾斜角分布モデル

〔質問〕 佐藤 壽 芳 (東京大学生産技術研究所)

粗さのインプロセス計測を巧みに処理されたことに敬意を表します。以下のことについて伺います。

(1) 本装置の光源としてコーヒーレントな光源であるレーザを使用できるか。

(2) 送・受光オプティカルファイバ束に含まれるファイバ総本数 (現行 675 本), 並びに個々のファイバの太さの最適値についてどう考えられるか。

(3) 工具コーナ半径が一定であることが粗さ検出の制約条件であるとされているが, インプロセス粗さ測定時にこれを自動的に補正することができれば良いと考えられる。これに関して具体案があれば伺いたい。

(4) 粗さ検出時の出力について, 光のターゲットが干渉しない場合が最も高いとし, 実験でも一対の光学系でのそれぞれの測定位置は, 異なった場所にとられている。しかし, 一対の光学系により得られる出力の比を求めて粗さを推定しているからには, 測定場所は同一であることが望ましいと考えられるがいかがか。

(5) 粗さ計測には断面曲線を測定する場合もある。インプロセス測定としてそれぞれの方法に得失が

あるかと思うが将来の展望についてどのようにお考えか。

〔回答〕 (1) レーザを使用できる。

(2) 反射光の積分値処理によるので投受光面積はある程度大きい必要があるが, あまり大きいと対象面の場所的分解能が悪くなる。本数, ファイバ径について最適値を抑えるまでには至っていない。

(3) CNC の場合は, 工具ファイルからコーナ半径の情報が取り込めるので, その補正定数を入れておけば自動補正が可能と思う。

(4) 確かにそのとおりで, 実用化の場合にはチョップなどによって光源を切替えるなど, 同一場所を測定する方法は考えられる。

(5) 断面曲線をとる方法は一次元的評価にすぎない。最近は二次元的評価の必要性を説く人が多くなってきた。しかしそれについては静的にすらなかなかむずかしいが, 本方法はある意味で二次元的評価の一方法といえる。あらさの諸パラメータと機能の関係が明らかにされ, 目的別にインプロセス測定する行き方と単なる品質管理のための測定が将来の方向として考えられる。