

各種の金属材料の切削仕上面のあらさ

竹 中 規 雄

2. ま え が き

機械部品の仕上面の品質がその機能および強度にきわめて密接な関係のあることは良く知られているところであり、その部分に要求される精度および加工物の材質に応じて種々の仕上方法が選定適用されている。面の品質としては、その幾何学的形状の誤差と面のあらさの他に表面に生ずる加工変質層の存在を考えなければならない。これらの問題の中で、ここでは主としてあらさについて述べることにする。

バイトによる旋削および平削仕上（中ぐりも同様に考えられる）は、機械部品の最終仕上としても、また次の精密加工の前加工としても、きわめて広く用いられている。しかしながら、その仕上面のあらさが、バイトの双先半径および送りから定まるその理論値に比べて相当大きく、場合によっては十数倍に達することもしばしば経験するところである。そこで各種の金属材料に対し指定されたあらさの面を仕上げるためには、いかなる形状の双物および切削条件で加工すればよいかを知ることができれば、仕上面の状態をも考慮に入れて最も経済的な作業条件を指定して作業を行わせることができるのである。

また一般に金属材料の仕上面のあらさは、加工物の材質によってかなり異った様相を示しており、これを金属材料の切削加工性（Machinability）の中の一項目として掲げている。⁽¹⁾ この表面仕上性は材料の組織によっても大いに異なるもので、アメリカでは各種の材質についてその比較値が求められているが、⁽²⁾ 上述のようにあらさは作業条件によっても異なるので、その比較の基準とすべき作業条件をいかに定めるかが問題である。

そのためにはまず切削作業の諸条件と、その条件の下に仕上げられた面のあらさとの関係を明らかにしなければならない。

仕上面のあらさに影響すると思われる項目としてはつぎの諸点が考えられる。

A. 使用する工作機械に関するもの (1) 各部分の剛性、すなわち主軸、往復台、ベッド等の振動 (2) 各部分の静的精度、とくに送りの均一性

B. 双物に関するもの (1) 双物の材質および熱処理 (2) 双物の形状、すなわち双先各部分の角度、双先半径等 (3) 双物の仕上程度、切刃の鋭さおよびすくい面、前

逃面等のあらさ (4) 双物の剛性、双物合への取付法等

C. 加工材料に関するもの (1) 加工材料の加工性に含まれる仕上面のあらさに関する特性 (2) 加工材料の形状及びその剛性 (3) 工作機械への取付方法

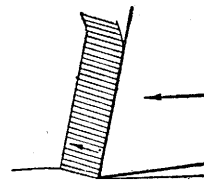
D. 切削条件 (1) 切込 (2) 送り (3) 切削速度 (4) 切削剤

これらの諸点の中、静的精度が良好で弾性的変形並に振動を発生せぬような理想的な工作機械及び双物を用いる場合でも、なお仕上面あらさはその理論値と異なる場合もあると思われるが、それは加工材料自身のあらさに関する特性にもとづくものである。もちろんこれは双物の形状、切削条件とも関連するものであるが、以下この特性について考察を進めることにする。

2. 加工材料のあらさに関する特性

この特性をさらに区分して考えて見ると、(1) 切屑の型の種類、(2) 構成双先、(3) 切削力にもとづく弾性的塑性的変形の3項目を考えることができる。

切屑の型は周知のごとくローゼンハイン (Rosenhain) およびスターネイ (Sturney)⁽³⁾ によって次のごとく分類されている。(1) 流れ型 (flow type)、(2) 剪断型 (shear type)、(3) 裂断型 (tear type)。この外、大越教授はむしり型の存在を区分し⁽⁴⁾、またエルンスト (H. Ernst) は流れ型を構成双先をとまなう場合と、これをともなわない場合とに区別している。⁽⁶⁾

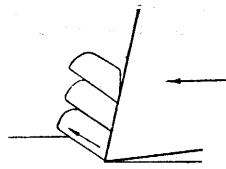


第1図

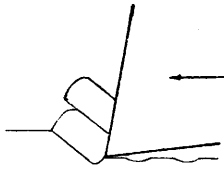
これらの各種の型の切屑を発生する場合の仕上面の形状について考察して見よう。いうまでもなく最も仕上面の良いのは流れ型で構成双先をとまなわない場合で、第1図の如く双物の進行にともない双先から或る方向の面内で剪断応力のために連続的に滑りを発生し、切屑が双物のすくい面に沿って流れるごとく削り出される場合である。このときは切削抵抗も刃物の進行にともなってほとんど変動しない。一般に流れ型は鋼や七三黄銅等のごとく、靱性ある材料を切屑の厚さを小さく、切削速度を高く、すくい角を大きくして切削する場合に生ずるもので、とくに刃物のすくい面を平滑に仕上げ、切刃を鋭くし、かつ構成双先が附着することを妨げるように適当な切削剤を供給する場合に構成刃先の

発生を防ぐことができるといわれている。

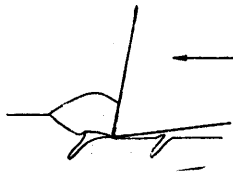
剪断型は第2図の如く流れ型における剪断面の間隔がある程度大きくなったもので、仕上面としては流れ型と同様の場合もあるが、多くは切削抵抗の変動を伴うために多少の凹凸を生ずるものであり、また第3図のごとく刃先から剪断面までの間に亀裂が入るため仕上面に独特の凹凸を生ずる場合もある。この型は靱性のある材料を、切屑の厚さを大きく、すくい角を小さく、切削速度を低くして削る場合や、比較的脆い材料を切屑の厚さを小さく、すくい角を大きくして削る場合に発生する。



第2図



第3図



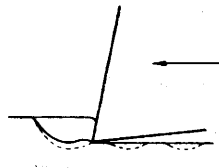
第4図

むしり型というのは第4図のごとく、刃先から切削方向に亀裂を生じつつ削られるが、切屑になった部分が刃物のすくい面に附着しある程度圧縮

されると始めて、剪断応

力によって分離されるもので、このため仕上面に図のごときむしり跡を残すのである。これは靱性ある材料を、剪断型切屑を生ずるようなすくい角より更に小さいすくい角で削る場合に発生する。

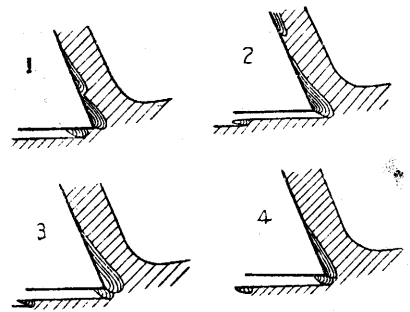
裂断型は脆い材料を削る場合に生ずるのであるが、第5図のごとく刃物がある程度進行すると、瞬間的に前方に亀裂が入り切屑が分離し、ときには細かく砕けるのである。この場合の仕上面はすくい角が大きい場合は、亀裂が刃先の進行線より上方に向うためにあまり悪くならないが、すくい角が小さい場合には第5図に点線で示すように亀裂が刃先から一旦下方に向ってから上方に向うので仕上面に凹凸を生ずることとなる。また切削抵抗の変動が甚しいことによっても仕上面を悪くする。



第5図

次に構成刃先 (Built-up edge) とは、切屑の一部が切削抵抗による高圧および刃先に生ずる高温のために刃物の刃先の部分に圧縮され附着し、これが実際の切削を行うのであるが、切削の進行に伴い次第に成長し、ある程度大きくなると分裂脱落を起し、また新しく発生するというを繰返し、このために仕上面に鱗状の凸起を残

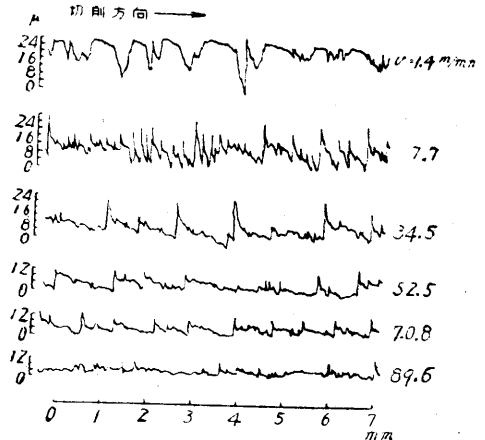
すものであることをシュウエルト (Schwerdt) が高速顕微鏡写真に撮映して明らかにしている⁽⁷⁾。これを模型的に



第6図

図示すると第6図のような経過を辿っているものと考えられている。シュウエルトの研究によれば、構成刃先は低速の場合には著しく発達し、高速となるに従い次第に小さくなり、ある速度(材料および切込、送り等により異なる)以上になると消滅する。また低速で構成刃先が極めて著しく発達している場合でも、適当な潤滑剤を刃先に滴下するとただちに消滅することが報告されている。⁽⁶⁾

次に加工物の弾性的、塑性的変形であるが、切削方向のあらさに関しては切削抵抗に変動のある場合には、ただちにその影響が生ずるわけである。また切削方向に直角な断面内のあらさには、切削抵抗に変動がない場合にも加工物が横方向に変形し盛り上がるのが考えられる。⁽⁸⁾ 前者については大越教授の詳細な研究が発表されているが、後者についての研究報告はまだ見当たらない。しかしいずれも構成刃先によるあらさよりは程度が低いものと思われる。

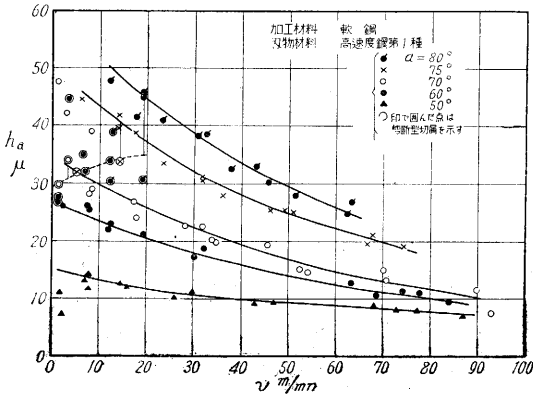


切削角=70° 横すくい角=0° t=6/100mm

第7図

以上の説明の具体的な例として比較的構成刃先のでき易い軟鋼を高速鋼刃物で削った場合を述べよう。⁽⁹⁾ 2次元的な切削を行い切削方向のあらさを測定した場合の実験記録の一例を第7図に示す。これはすくい角20°(切削角70°)、前逃角8°の刃物を用い、切込0.06mmとしていろいろの切削速度で削った面のプロフィールである。切

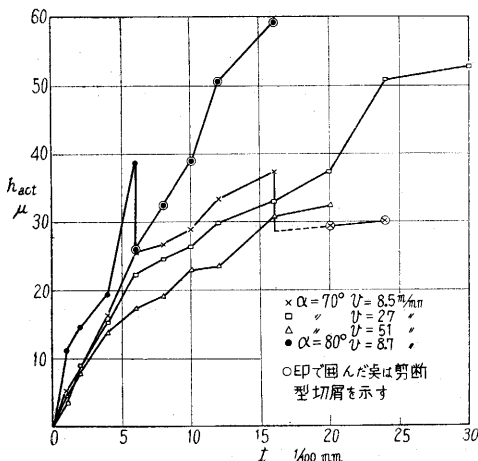
削速度が低い間は剪断型切屑を生じ、仕上面は図の如く特有の形状を示している。プロフィールの中、平坦な部分は光沢のある縞模様をなし、谷の部分は深くえぐられている。切削速度が 7.7m/mn の場合には流れ型となり、構成刃先が発生するため前節に述べたように仕上面は鋸歯状の凹凸を示すことがよく認められる。さらに切削速度が増すと構成刃先の高さは次第に減少し、これにともなう仕上面のあらさも良好になっている。切削の型の変化する点の付近では、ごくわずかの条件の変化により両種の切屑を生ずることがある。



第 8 図

すくい角の異なる場合のあらさを求めて図示すると第 8 図に示すごとくなり、切削角が大きくなると一般にあらさが大きくなると共に、切削の型の変化する点は切削速度の高い方に移り、切削角が小さい場合にはこの点は切削速度の低い方に移る。

次に切削速度を一定とした場合に切込みの影響を求めると第 9 図のようになる。すなわち切削角 70° の場合に切削速度 8.5m/mn で削ると、切込みの小さい間は流れ型切屑を生じ鋸歯状の仕上面プロフィールを呈するが、切込みが 0.15mm になると剪断型切屑に変わり特有のプ



第 9 図

ロフィールを示すようになる。切削速度が高くなるとあらさは一般に小さくなると共に切屑の型の変化する点が切込みの大きい方へ移る。また切削角が大きくなるとあらさも大きくなりかつ切削の型の変化する点が切込みの小さい方へ移る。切削角が 70° の場合には切込みの小さい間は大体切込みの値の 1/4 の高さの凹凸が生じており極めて切込みの小さい場合にもなお構成刃先によるあらさが認められるのである。このことはブローチ、リーマ一等による仕上の場合に相当注意を要する点であろう。

なおすくい面を種々のあらさに仕上げて実験を行った結果、すくい面のあらさの小さい刃物により仕上げた面の方があらさが小さくなっていることが認められた。

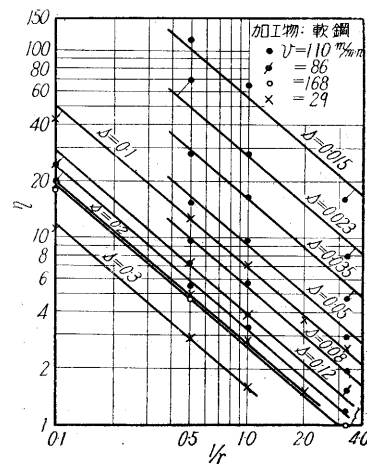
3. 旋削および平削仕上面のあらさ

次に実際の仕上面のあらさは切削方向に直角な断面内のあらさをいい、これを横方向のあらさと称しているが横方向のあらさは理想的な場合にはあらさの理論値と一致する筈である。旋削および平削の場合の横方向のあらさの最大高さの理論値は、使用した刃物の刃先半径を r 、送りを s とすれば $h_t = s^2/8r$ で表わされる。しかし一般に実際のあらさ h_a は h_t より大きくなっているの

$$\eta = \frac{h_a}{h_t} \dots \dots \dots (1)$$

をとり、これを“あらさ係数”と称し、これにより仕上面のあらさの比較を行うこととする。

まず軟鋼に対し切込みを $t=0.06\text{mm}$ とし、各種の切削速度の場合に刃先半径と送りを変えて実験を行い、その仕上面のあらさを測定してあらさ係数を求め、刃先半径



第 10 図

の係数に対しプロットすると切削速度 v および送りをパラメータとする平行直線群として表わされた。特にこの実験に用いた 3 種類の旋盤によって仕上げた結果がいずれも平行直線となったので、実験結果の一部を第 10 図に掲げる。一般に刃先半径の減少、送りの増加に伴ないあらさ係数は減少しており、従来の実験結果と一致しているが、本実験では切込みが小さいのであらさ係数は $\eta > 1$ となっており、送りの小さい場合には相当大きな値になって

いることが認められる。

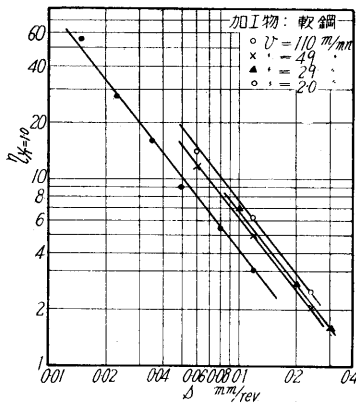
他の金属材料の場合もほぼ同様な結果が得られた。一般に半硬鋼のあらさ係数は最も大きく、黄銅は軟鋼とほぼ同程度で、砲金および鋳鉄は、はるかに小さな値を示し切削速度による変化もほとんど認められなかった。

これらの実験結果から、 $r=1.0$ に対する η を求めて送り s に対して両対数方眼紙上にプロットすると、やはり切削速度をパラメーターとする直線群として表わされた。その一例として軟鋼の場合を第11図に示す。

以上の実験により、切込みおよび削り速度一定の場合には、あらさ係数は次式のように表わされることになる。

$$\eta = k \cdot (1/r)^{\mu} \cdot S^{-\nu} \dots\dots\dots (2)$$

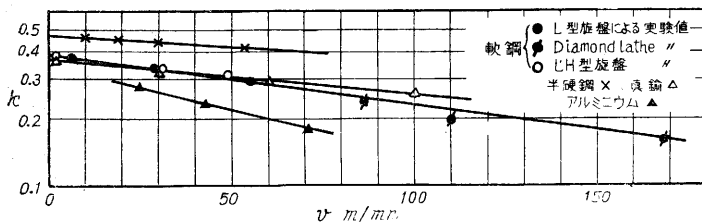
ここに、 k, μ, ν はいずれも加工物の材質による常数で、 k は切削速度および切込みに関係し μ および ν は切削速度には無関係で切込みによると思われる常数である。



第 11 図

上記の実験結果から、削り速度

の増加に伴ないあらさ係数が減少することが認められる。軟鋼の場合に第2式の k の値を削り速度に対してプロットすると、第12図のように3種類の旋盤による実験



第 12 図

値がいずれもほぼ同一直線上にのることが認められた。したがって、これらの旋盤のようにある程度以上の精度を有する場合には、特別に精度の高い加工を行う場合のほかは大体同程度のあらさ係数になるものと思われる。

第12図から k は次式のように表わされる。

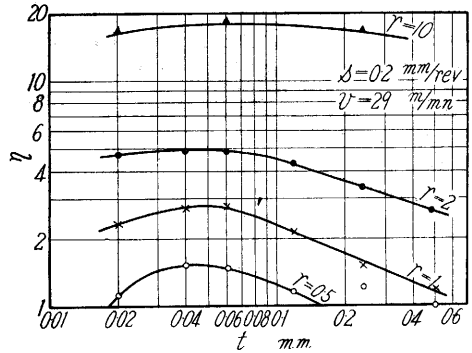
$$k = k_0 e^{-\xi \nu}$$

半硬鋼、黄銅およびアルミニウムの場合も同様な結果となっている。ただし半硬鋼およびアルミニウムの場合には切削速度のおそい場合にはせん断型切屑となって仕上面の形状が全く異なるので、この場合は除外してある。

砲金および鋳鉄は構成刃先を生じないので、削り速度

の影響はほとんど認められない。

従来切込みの増加に伴ない仕上面のあらさはわずかに増加するか、またはほとんど変化ないといわれているが、切込みがきわめて小さい場合には仕上面が良好となることもしばしば経験する所である。



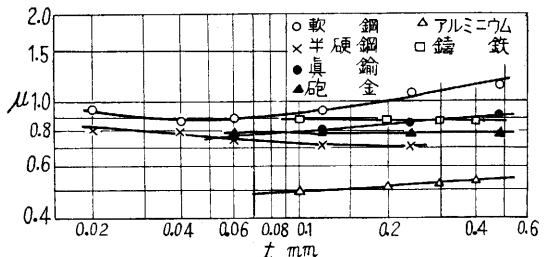
第 13 図

まず軟鋼の場合の実験結果は第13図のように、はじめはあらさは切込みと共に次第に増加し、0.04~0.06mmの辺で max. となり、それ以上の切込みでは次第にあらさ係数が減少しており、大体 0.5mm 以上ではほぼ一定となることが認められる。この傾向は刃先半径が小さいほど著しくなっている。

半硬鋼の場合にはこの傾向がさらに著しく、あらさが max となる点がさらに切込みの大きい方へよっている。また黄銅の場合にはほぼ軟鋼と同様の結果が得られ、アルミニウムは、この傾向はあまり著しくはなかった。

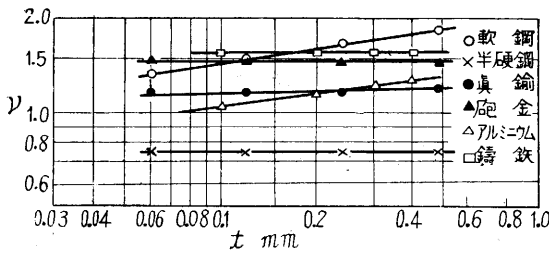
砲金および鋳鉄は予想されるように切込みにはほとんど無関係にほぼ一定のあらさになっている。

次に切込みの値が異なった場合に第2式が成立するか否かを確かめるために、送りを変えて同様の実験を行った結果は、切込み一定の場合にはそれぞれ第2式が成立するが、 k, μ および ν の値は切込みによって変ることが認められた。ただし μ および ν の切込みによる変化は、それぞれ第14図のように余り大きくはな



第 14 図 (a)

いが、 k は第15図のようになり変化し、切込みがあらさにおよぼす影響の大きいことを示している。この図お

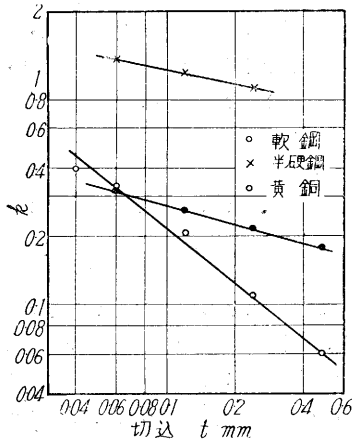


第 14 図 (b)

よび前述の削り速度の影響から、 k は

$$k = ct - \lambda e - \xi \mu$$

の形で表わされることがわかる。



第 15 図

よび ν は第 14 図に示すように切込みによって多少変化するものであり、その他の常数の値は第 1 表に示す通りである。

第 1 表

材 料	C	ξ	λ	μ (平均)	ν (平均)
軟 鋼 (0.1%C. 引張り強さ 42.5 kg/mm ²)	0.043	0.0053	0.78	1.1	1.7
半硬鋼 (0.48%C. 引張り強さ 60.3kg/mm ²)	0.71	0.0024	0.22	0.71	0.74
鋳 鉄 (B. H. N. 183)	0.11	—	—	0.87	1.6
黄 銅 (63%Cu)	0.16	0.0034	0.29	0.85	1.2
砲 金	0.078	—	—	0.79	1.5
アルミニウム (電線用引抜材)	0.097	0.0091	0.44	0.52	1.2

ただし、この式は大體 $0.06 \leq t < 0.48$, $0.05 \leq s < 0.3$ の範囲に成立するもので、刃物は高速度鋼、すくい角 20° の場合である。

なお、 μ および ν の切込みによる変化は第 14 図のように余り著しくないので、仕上削りの範囲として $t = 0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ に対しその平均値を用いて常数として近似的に取扱ってもよい、この平均値も第 1 表に加えてある。

また砲金および鋳鉄のように、切込みおよび切削速度には余り関係しない材料に対しては

$$\eta = 1 + \frac{C}{h_t} \dots \dots \dots (4)$$

の形に表わすこともできる。ここに C は加工物材料、刃物、材料並びに刃先角度等による常数で、すくい角 20° の場合に、砲金に対し $C=1.3$ 、鋳鉄に対し $C=3.0$ となっている。

これらの常数を用いて材料の表面仕上性の比較を行うことができるが、材料によって最も異なっているのは、 λ および C であるが、 C は $v=0$, $1/r=1.0$, $s=1.0$ の場合のあらさ係数の値であって、実際には用いられない切削条件である。特に切込みの影響が著しいので、実際に使用する切込みに近い値の所で比較するのが望ましく、筆者は仕上削りの場合におけるあらさに対する特性を比較するには、たとえば $v=30 \text{ m/min}$, $t=0.1 \text{ mm}$, $1/r=1.0 \text{ mm}^{-1}$, $s=0.1 \text{ mm/rev}$ のときの η で比較するのがよいと思っている。上記の各材料に対しこの値 η_r を計算すると第 2 表のようになる。

第 2 表

材料	軟鋼	半硬鋼	鋳鉄	黄銅	砲金	アルミニウム
η	5.00	6.09	3.98	4.00	2.31	2.96

上述のように実際のあらさが理論値より大きくなるのは主として構成刃先の発生によるものと思われるので、この点について詳細な研究を行ったが、⁽⁹⁾ これについては別の機会に譲ることとする。

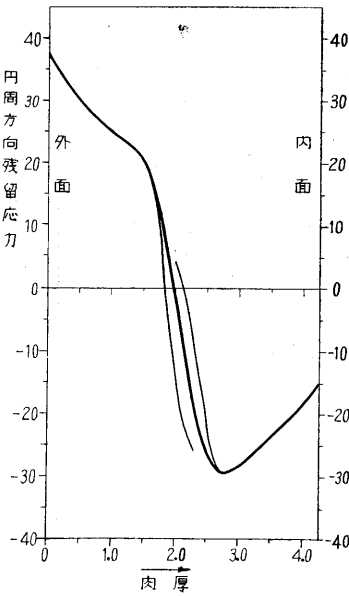
4. 刃先半径および切削条件の選定法

仕上面のあらさを指定するには普通その最大高さ H を用いるが、仕上面の品質を問題にするときにはさらに Schmalz の提唱した形状係数 $K^{(10)}$ をも指定することが望ましい。刃先半径 r 、送り s の場合の理論的プロファイルについて形状係数を計算すると、 s/r のみの函数となつて、 s/r が普通に用いられる $0.01 \sim 1.0$ の範囲では $0.5 \sim 0.29$ となっている。

しかし実際の仕上面ではあらさ係数のためにこの値よりはるかに小さくなっているものと思われるので、旋削または平削の場合の仕上面の品質を表わすものとして、あらさ係数 η を用いることが適当であろう。H. Moll⁽¹¹⁾ および 齋藤氏⁽¹²⁾ はこれを品質係数と称している。仕上面を指定されたあらさおよびあらさ係数に仕上げるための刃先半径および切削条件を選定するためには、まずその材料についてのあらさ係数の実験式を求めておかなければならない。前節の実験結果からこの実験式は比較的簡単な形に表わすことができるので、この第 3 式 (10 ページへ続く)

後の微小変位の測定に適用することが行われ、これに関する報告も見受けられる。

残留応力はこの2方向の長さの変化を測定し、次の式を用いて計算される。



第 7 図

43.0φ×4.25 より 40.0φ×4.25 に空引きした鋼管の残留応力分布

$$S_L = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ (F_b - F) \frac{dA}{dF} - A \right\}$$

$$S_T = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ (F_b - F) \frac{d\theta}{dF} - \left(\frac{F_P + F}{2F} \right) \theta \right\}$$

$$S_R = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \left(\frac{F_b - F}{2F} \right) \theta \right\}$$

ここに F_b は全断面積、 F は旋削した面積、 $A = (\lambda + \nu\delta)$ 、 $\theta = (\delta + \nu\lambda)$ で λ 、 δ はそれぞれ長さ方向および切線方向のひずみである。

このひずみの測定に Wire Strain gauge を利用する

(15ページから続く)

の各常数を実験によって求めればよい。

多くの場合に切込みの値は削りしろから定まるので、最後の仕上げ削りの場合には切込みは与えられたものと考えることができる。また切削速度は大体予想される切削面積に対する刃物の寿命の点と、使用機械のこわさから経験上大体決定されるので、選定すべき条件は刃先半径と送りとなる。

この場合には、実際のあらさは

$$h_a = \eta h_t = k \cdot \mu \cdot s \cdot \nu \cdot 1/8 \cdot (1/r) s^2$$

$$= k/8 \cdot (1/r)^4 \cdot \mu \cdot \nu \dots \dots \dots (5)$$

で表わされる。

あらさ H のみが指定された場合には、この式から $h_a = H$ として、 r または s の一方もしくは s/r を適当に選定して $1/r$ と s の組み合わせを求めて切削条件とすればよい。

さらにあらさ係数 K をも指定されたときには、第3式において、 $\eta = K$ として、第5式との連立方程式を解

のであるが、切削に当って多少の発熱と振動は避けることができないのでいろいろな問題がおこる。すなわち Paper gauge では温度上昇に耐えないので bakelite gauge を使用し、gauge の絶縁性の保持には絶えず十分な監視を行うことが必要である。温度の問題は最も重要で抵抗の温度係数と測定すべき Strain による抵抗変化の order とが比較的近いので、測定のとときの温度の均一性が保たなければならない。試料に貼付された gauge は試料とともに冷却し、dammy gauge はその温度の影響を受けないので meter の読取値は時間とともに変化し、両 gauge が同一温度に到達したとき一定値を示す。その所要時間はパイプの材質、外径、肉厚などにもよるが本実験では約40分であった。またこの gauge はこのように温度履歴を経るので、その抵抗に温度ヒステリシスのあるものは当然使用不可能で、そのため gauge の抵抗線の素材の加工経歴なども問題となる。実験に際しては active gauge に温度変化を加えてヒステリシスのないことを確かめる必要があった。

またこの gauge の使用は測定精度は高いが、測定する場所がせいぜい 20mm という限られた長さであるのでパイプの偏肉偏心の影響をうけやすい。これは鋳物や引抜鋼管の場合始めから真の円および肉厚の同心は期待し難いので、旋削の第1回の値は信頼し難くなる。

以上の諸点からいってこの方法の実際適用にはかなりの困難があり、殊に外径の小さいパイプでは一層困難が増される、われわれも今のところ内面切削による外半分の残留応力しか結果を得ていないので、こゝに切欠法との比較を行うことができず、誠に遺憾であるが、以上この方法の欠点と長所を挙げることにした。(1954. 8. 21)

いて r と s を決定すればよい。しかしこれでは面倒であるからあらかじめ図表を作成しておけば簡単に求められる。(1954. 8. 13)

文 献

- (1) Tool Engineers' Handbook (1949) p. 320
- (2) Am. Machinist. Oct. 2. (1950) p. 125
- (3) Rosenhain of Sturney : Proceeding of I. M. E Bd. 1 (1925) p. 141
- (4) 大越：理研叢報，11輯，p. 616
- (5) Ernst : ASM. Machining of Metals (1938)
- (6) 同上
- (7) Schwerd : Zeitschrift des VDI Bd. 76 (1932) p. 1257
- (8) 大越：精機協会誌 1. (1934) p. 16 大越，福井：火兵学会誌 26 (1932) p. 299
- (9) 竹中：東京大学生産技術研究所報告。1巻6号 (1951)
- (10) 竹中：生産研究，2巻10号 (昭和25年) p. 362
- (11) H. Moll : Maschinenbau, Bd. 19 Ht. 10 (1940)
- (12) 齋藤，鶴川：機械学会論文集 16巻 53号 (昭和25年) p. 11