

## 重回帰モデルによる鋼の研削仕上げ面粗さの統計的解析\*

福 本 功<sup>\*1</sup>, 平 敷 兼 貴<sup>\*1</sup>Multi-Regression Analysis of the Grinding Surface  
Roughness in Steel

Isao FUKUMOTO and Kenki HESHIKI

Some correlations between microstructural factors and grinding surface roughness have been investigated experimentally on the spheroidized cementite structure of 0.1-1.0 % C steels. The ferrite grain size, diameter of the cementite and cementite quantity were determined by micrographs and multi-regression analysis was conducted on the relation of these factors to the grinding surface roughness. An example of the squared regression obtained is given by

$$R_{\max} = 1.815 + 0.050X - 0.965Y + 0.065Z + 0.058XY + 0.057YZ - 0.004XZ - 0.002X^2 - 0.168Y^2 - 0.004Z^2$$

where  $R_{\max}$ ,  $x$ ,  $y$  and  $z$  denote the grinding surface roughness (maximum height roughness), the mean free-ferrite-path from grain boundary to grain boundary ( $\mu\text{m}$ ), the inter-carbide distance ( $\mu\text{m}$ ) and the amount of cementite(%), respectively.

**Key Words:** Grinding, Metallic Materials, Grain Size, Steel, Prediction, Roughness

## 1. 緒 言

研削加工は、ミクロン単位の切り込みを与えることによって、高精度を要求される精密加工であると位置づけられている。そこで、被削材の金属組織が、数ミクロン単位の硬質粒子あるいは、数十ミクロンの結晶粒から構成されている場合、それぞれの因子は、研削加工において仕上げ面粗さの生成に大いに関与するものと思われる<sup>(1)</sup>。したがって、研削加工を行うにあたり、材料側の立場から、精度の向上を検討する場合には、いずれの因子を抑制、制御するかは極めて重要な問題である<sup>(2)</sup>。

前報<sup>(3)</sup>では、冶金学的因子を用いて、研削抵抗を予測するのに統計的手法が非常に有効であることが確認されたので、本報においては、その手法を仕上げ面粗さに適用した。そこで、前報と同様に、炭素鋼の代表的な二相金属であるパーライト組織に着目し、軟質相のフェライトと硬質相のセメンタイトが研削仕上げ面粗さにどのように影響するかを検討を行った。

すなわち、被削材の冶金学的因子として、基地組織で

あるフェライト粒径および第二相として存在するセメンタイトのセメンタイト粒径およびセメンタイト量の三因子を用いて、研削仕上げ面粗さの重回帰分析を行った。

その結果、どの因子が研削仕上げ面粗さに最も寄与しているかを明らかにした。また、仕上げ面粗さを冶金学的因子を用いることにより、定量的表現すなわち関数表示が可能となり、熱処理の段階から、目的とする仕上げ面粗さを得ることができることを示す。

## 2. 実験装置および方法

供試材料は、セメンタイトの含有量を変化させるため JIS S 15 C, S 25 C, S 40 C, S 50 C, SK 5 および SK 3 の 6 種類の炭素鋼を用いた。またフェライト粒径およびセメンタイト粒径を変化させるため、7 種類の熱処理条件を設定し、合計 42 個のサンプルを用いて研削仕上げ面粗さの統計的解析を行った。熱処理と粒径算出の方法は、前報<sup>(3)</sup>に詳述したので、ここでは省略する。

ドレッシング条件は単石ダイヤモンドドレッサを用い切り込み 10  $\mu\text{m}$  の 8 回、送り速度 0.6 m/min で行った。研削実験としては、砥石は WA 60 LmV を使用し、砥石切り込み 20  $\mu\text{m}$ 、工作物速度 6 m/min、研削

\*昭和 62 年 4 月 3 日 第 64 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 8 月 18 日。

\*1 正員、琉球大学工学部 (〒903-01 沖縄県西原町千原 1)。

液は日本石油(株)の商品名ユニソルブル ソリューション CC タイプを用い湿式平面研削を行った。仕上げ面粗さは、触針式粗さ計を用いて、研削方向に直角方向に最大粗さ ( $R_{max}$ ) を測定し比較検討を行った。

### 3. 実験結果と考察

**3-1 工作物の測定位置における最大高さ粗さの変動**  
砥石の砥粒切れ刃は、ランダムな分布状態を呈しているため、研削後仕上げ面粗さは工作物の測定位置によるばらつきが考えられる。そこで、6種類の炭素鋼の代表として、SK 5 材を用いて測定位置による最大高さ粗さの比較を行った。その結果を図1に示すが、わかりやすくするため三次元的に図示してある。これより、最大高さ粗さ ( $R_{max}$ ) は、工作物の中央部分が比較的安定しているのがわかる。その理由として、両端部では自由端になっているため、研削砥石と工作物の接触面の研削温度が瞬間的に非常に高温に上昇することにより研削熱による材料の変形が起りやすいのに対し、中央部分は両端から拘束されているため、端部よりは変形の影響が少ないものと考えられる。以上のことより、今後の測定には中央部分の粗さをデータとして用い比較検討する。

**3-2 冶金因子による仕上げ面粗さの解析**  
機械的性質が大きく異なる二相から構成されている金属を研削加工するときには、変形に対する強度が大きく異なるため、研削仕上げ面粗さは、基体組織に左右されるのか、それとも強化相の役割をもつ第二相に依存するのか、それを知ることは極めて重要である。そこで冶金因子として、フェライト粒径 ( $X$ )、セメンタイト粒径 ( $Y$ ) およびセメンタイト量 ( $Z$ ) の三因子を

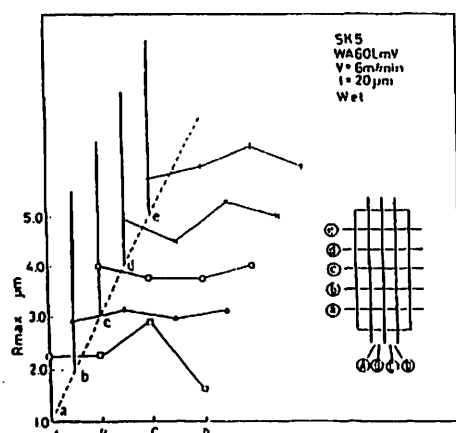


図1 測定位置による  $R_{max}$  のばらつき

用いて、研削仕上げ面粗さ ( $R_{max}$ ) との対応関係を調べた。サンプル 42 個の材料を研削加工したときの、実験結果を表1に示す。そこで、これらの結果をもとに、それぞれの因子と仕上げ面粗さとの対応関係を調べてみた。

まずフェライト粒径と最大高さ粗さ ( $R_{max}$ ) との関係を図2に示す。いずれの材料も、フェライト粒径が増大すると、 $R_{max}$  も直線的に増加する傾向にあることがわかる。これはフェライト粒径が増大するにつれて、延性の性質が富むことより、切りくず生成においては研削抵抗も増大し、研削表面に凹凸が生じやすいため、仕上げ面粗さも増大する傾向にあると思われる。次に、セメンタイト粒径と仕上げ面粗さとの関係を図3に示す。同様にセメンタイト粒径の増大につれて、 $R_{max}$  も直線的に増加する傾向にあることがわかる。これは、セメンタイト粒径が大きくなるにつれて、切りくず生成においては、セメンタイトの微少破砕の現象が生じたり<sup>(4)</sup>、またセメンタイトの粒子間隔が大

表1 実験結果

	X	Y	Z	$R_{max}$
S15C	8.41	0.67	2.25	2.01
	15.37	0.75	2.25	2.08
	18.11	0.83	2.25	2.10
	19.37	0.84	2.25	2.13
	30.25	0.89	2.25	2.15
	34.34	1.03	2.25	2.21
S25C	42.21	1.25	2.25	2.23
	8.82	0.82	3.19	1.80
	12.21	0.83	3.19	2.02
	13.68	0.89	3.19	2.24
	18.81	0.97	3.19	2.32
	20.82	1.18	3.19	2.41
S50C	26.91	1.26	3.19	2.60
	29.83	1.46	3.19	2.56
	7.45	0.67	6.27	1.75
	9.46	1.03	6.27	1.77
	11.07	1.12	6.27	1.87
	13.11	1.23	6.27	2.06
S55C	13.71	1.25	6.27	2.03
	15.95	1.38	6.27	2.09
	22.26	1.68	6.27	2.30
	6.67	0.76	7.61	2.00
	6.93	0.84	7.61	2.09
	12.94	0.94	7.61	2.29
SK5	14.77	1.23	7.61	2.30
	14.91	1.39	7.61	2.36
	20.23	1.47	7.61	2.45
	21.79	1.85	7.61	2.42
	5.19	0.87	10.40	1.85
	6.51	0.98	10.40	1.96
SK3	9.66	1.30	10.40	2.01
	10.24	1.63	10.40	2.04
	12.16	1.75	10.40	2.12
	15.48	1.88	10.40	2.15
	16.70	2.73	10.40	2.19
	6.76	0.65	15.20	1.84
	8.01	0.83	15.20	1.86
	9.15	1.12	15.20	1.89
	10.79	1.44	15.20	2.04
	12.22	1.60	15.20	2.13
	13.75	1.83	15.20	2.17
	15.23	2.14	15.20	2.29

X : Grain size of ferrite ( $\mu\text{m}$ )  
Y : Diameter of cementite ( $\mu\text{m}$ )  
Z : Amount of cementite (%)  
 $R_{max}$  : Maximum height roughness ( $\mu\text{m}$ )

なることより塑性変形が生じやすいためと思われる。

そこで、具体的にこれらの二因子と  $R_{\max}$  との相関係数を求め、その結果を表 2 に示す。いずれも相関係数は 0.9 以上の高い値を示しており、仕上げ面粗さはフェライト粒径およびセメントタイト粒径にかなり依存していることがわかる。

次にセメントタイト量と仕上げ面粗さとの対応関係を調べた。図 4 にその結果を示すが、セメントタイト量の増加につれて、 $R_{\max}$  は逆に減少する傾向が見られるが、前述の二因子の場合に比較するとばらつきがひどく相関がないように見受けられる。

そこで、炭素鋼の研削仕上げ面粗さに対する統一的な説明はできないだろうかとの観点から、42 個のデータを用いて、各因子との相関を調べた。最小二乗法により求めた近似式は次式で示され、その結果を図 2、3、4 に破線で示す。

$$\left. \begin{aligned} R &= 0.016X + 1.882 \\ R &= 0.175Y + 1.915 \\ R &= -0.011Z + 2.214 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

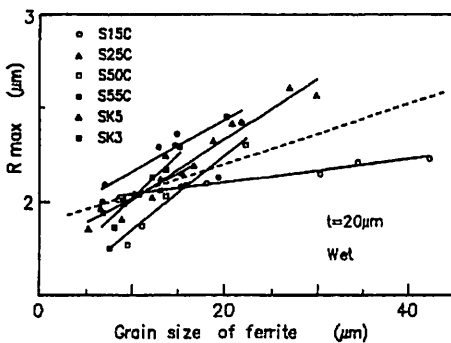


図 2 フェライト粒径と  $R_{\max}$  の関係

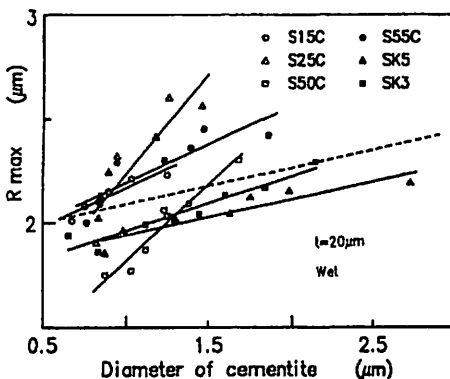


図 3 セメントタイト粒径と  $R_{\max}$  の関係

それぞれの場合における重相関係数は、0.66, 0.39, 0.25 で示され、仕上げ面粗さは、フェライト粒径、セメントタイト粒径およびセメントタイト量の順に依存していることがわかる。

3・3 仕上げ面粗さの重回帰分析 研削仕上げ面粗さを冶金学的因子を用いて予測できないだろうかとの観点から、重回帰分析を行った。

そこで三因子間の相関がないことは前報において確認されていることから、目的変数  $R_{\max}$  の説明変数として、フェライト粒径、セメントタイト粒径およびセメントタイト量の三因子を用いた。

まず一次式の場合における  $R_{\max}$  の結果を示すと次式のように示される。

$$R_{\max} = 1.815 + 0.011X + 0.192Y - 0.012Z \dots (2)$$

二次式の場合は、

$$\begin{aligned} R_{\max} &= 1.815 + 0.050X - 0.965Y + 0.065Z \\ &\quad + 0.058XY + 0.057YZ - 0.004ZX \\ &\quad - 0.002X^2 - 0.168Y^2 - 0.004Z^2 \dots\dots (3) \end{aligned}$$

そこで、これらの式に基づく計算値と実測値との対応関係を図 5、6 に示す。

これらの式による寄与率は

一次式の場合 52.6 %

二次式の場合 76.9 %

で示される。

これより次数を高くすることにより、研削仕上げ面

表 2 冶金学的因子と  $R_{\max}$  の関係

	S15C	S25C	S50C	S55C	SK5	SK3
f	0.97	0.96	0.97	0.95	0.98	0.96
c	0.94	0.90	0.97	0.87	0.93	0.96

f: Grain size of ferrite C: Diameter of cementite  
V480LmV t=20 μm V=6m/min Wet

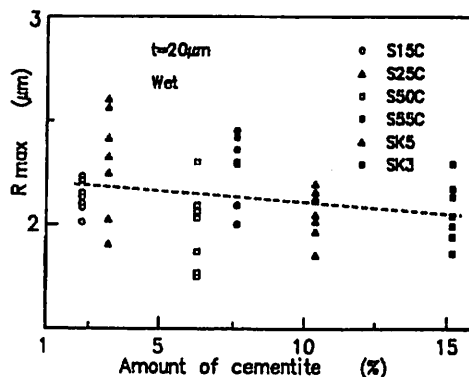


図 4 セメントタイト量と  $R_{\max}$  の関係

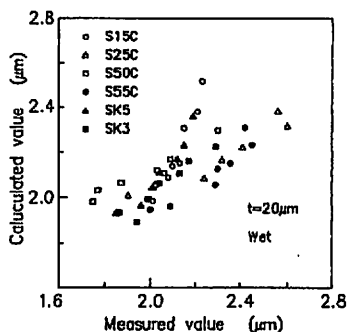


図5 一次式における測定値と計算値の比較

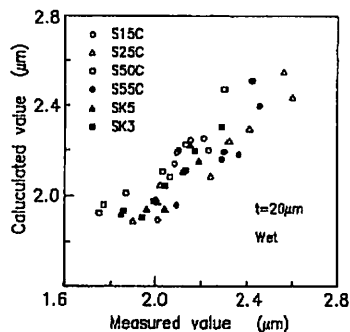


図6 二次式における測定値と計算値の比較

粗さを高い精度で予測することが可能であり、材料側の立場から、仕上げ面粗さをある程度抑制または制御することが可能であることが見い出された。

#### 4. 結 論

炭素鋼の代表的な二相金属であるパーライト組織の冶金因子であるフェライト粒径、セメントライト粒径およびセメントライト量の三因子を用いて、研削仕上げ面粗さの重回帰分析を行った。

その結果、重回帰モデルを用いることにより、仕上げ面粗さを極めて高い精度で予測することが可能であ

り、またそれぞれの冶金的因子を制御することにより、材料側の立場より仕上げ面粗さを抑制、制御することが可能であることを明らかにした。

最後に本研究遂行にあたり、熱心に協力された当時卒研生の京田元志〔現ホンダ技研(株)〕、上原英人〔現富士通(株)〕の両氏に感謝する。

#### 文 献

- (1) 賀志・ほか3名, 精密機械, 44-5(昭53), 627.
- (2) 江田・賀志, 複論, 43-372(昭52), 3112.
- (3) 稲本・ほか2名, 複論, 52-477, C(昭61), 1701.
- (4) Fukumoto, I., ほか4名, *Bull. JSPE*, 19(1985), 63.