

## 重回帰モデルによる鋼の研削抵抗の統計的解析\*

福本 功\*\*, 山本 哲彦\*\*, 長谷川 嘉雄\*\*\*

## Multi-Regression Analysis of the Grinding Force in Steel

by Isao FUKUMOTO, Tetsuhiko YAMAMOTO, and Yoshio HASEGAWA

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

$$F_H = 41.049 + 1.897X - 5.511Y + 0.492Z$$

$$F_V = 54.872 + 1.829X + 16.940Y + 1.082Z$$

where  $F_H$ ,  $F_V$ ,  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  denote the tangential grinding force, the vertical grinding force, the inter-carbide distance ( $\mu\text{m}$ ), the mean free-ferrite-path from grain boundary to grain boundary ( $\mu\text{m}$ ) and the amount of cementite (%), respectively.

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

## 1. 緒 言

被研削性が特に悪い材料を難削材というが、その定義の一つに、マトリックスの機械的性質と極端に差異のある組織が存在する場合がある<sup>(1)</sup>。その観点からすると、フェライトとセメントナイト合金の場合もフェライトの硬さは、 $H_V=120$ に対し、セメントナイトは<sup>(2)</sup>、 $H_V=1200$ と十倍ほど高いことから難削材といえる。このような材料を研削すると、一方を適正条件に合わせても、他方は、その犠牲となって、被研削性は低下する。そこで、将来、研削加工において最適制御をめざす場合、必ずなんらかの評価の軸になるもの、すなわち被削材のなにかの基準と結びつけて具体的に示しておく必要がある<sup>(3)</sup>。

そこで、本研究においては、フェライト相とセメントナイト相の合金である鋼において、フェライト粒径、セメントナイト粒径およびセメントナイト量の三因子を用いて、研削抵抗の重回帰分析を行った。つまり、研削抵抗に及ぼす冶金的な因子としては、延性的なフェライト相に依存するのか、それともぜい性的なセメント

ナイト相に左右されるのか、あるいは、それらの因子の相乗効果により影響を受けるのか、それを明らかにするため重回帰分析を行った。さらに、研削抵抗を高い精度で予測するため、高次のモデルを求め、実験値との比較検討を行った。

## 2. 実験装置および方法

供試材料は、炭素含有量を変化させるため、JIS S15C, S25C, S50C, S55C, SK5およびSK3の6種類の鋼を用いた。試験片寸法は、 $8 \times 8 \times 40$  mmとし、セメントナイトを球状化する条件は、 $900^\circ\text{C}$ で30分加熱保持後、水焼入れを行い、その後 $700^\circ\text{C}$ で焼もどしを行った。その際、フェライト粒径およびセメントナイト粒径を変化させるため、焼もどし時間は1, 3, 8, 25, 50, 100および200時間の7種類とした。

粒径の算出は、試験片を5%ナイトール液により腐食し、光学顕微鏡により写真撮影を行い、その後、図1に示す正方格子を撮影し、2枚のネガを重ねせて、万能投影機(Nikon Profile Projector V-16 D)によって実測した。フェライト粒径、セメントナイト粒径およびセメントナイト量の比容積は次式<sup>(4)</sup>より算出した。

$$D = 3/2L$$

$$V = (1/4)\pi D^3 N/S$$

\* 昭和61年3月14日 東海支部第35期総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年4月26日。

\*\* 正員、琉球大学工学部 (〒903-01 沖縄県西原町千原1)。

\*\*\* 正員、大阪大学工学部 (〒565 吹田市山田丘2-1)。

D: 平均粒径

L: 球によって切り取られるラングムな線の長さ

V: セメントタイトの比容積

N: 粒子の個数

S: 単位面積

研削抵抗の測定は、八角形弾性リングにひずみゲージをはりつけ、接線および法線方向について求めた。研削条件としては、砥石は WA 60 LmV を使用し、ドレッシングは切り込み 10 μm の 2 回、ドレッシング速度 0.6 m/min, 砥石切り込み 40 μm, 工作物速度 6 m/min の乾式平面研削を行った。

3. 実験結果および考察

3-1 重回帰分析 フェライト粒径(X)およびセメントタイト粒径(Y)と焼もどし時間(T)との関係を図2に示す。図より、いずれの粒径も、焼もどし時間の増加に伴って増大しており、その関係は、 $X = 5.42T^{0.22}$ ,  $Y = 0.87T^{0.22}$  で近似される。セメントタイト量(Z)については、S15Cで2.25, S25Cで3.19, S50Cで6.27, S55Cで7.61, SK5で10.4およびSK3で15.2%である。

以上の関係を利用することにより、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



図1 粒径の算出方法

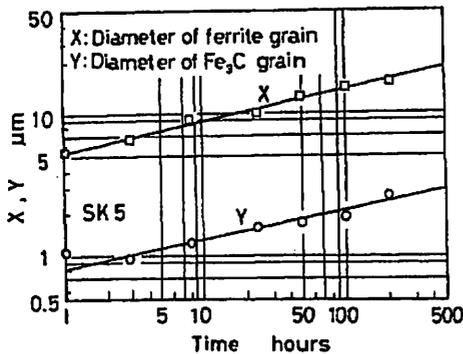


図2 焼もどし時間とフェライトおよびセメントタイト粒径との関係

は、制御することが可能である。

まず、被削材のフェライト粒径と研削抵抗との関係を図3に示す。図より、6種類の鋼において、いずれの材料も、フェライト粒径の増大に従って、研削抵抗は、接線、法線方向いずれも直線的に増加する傾向にある。

砥粒切れ刃が被削材へくいこみ、切りくずを排出するまでの過程は、被削材の弾性変形→塑性変形→クラック発生→切りくず排出のプロセスでなされているが<sup>(6)</sup>、フェライト粒径が増大すると、延性の性質が富むことより、切りくず生成においては、被削材の塑性変形に多大のエネルギーを必要とするため研削抵抗は大なるものと思われる。次に、被削材のセメントタイト粒径と研削抵抗との関係を図4に示す。この場合も、いずれの材料においても、セメントタイト粒径が増大するに従って、研削抵抗も増大する傾向にある。すなわち、セメントタイト粒径が大なる場合は、セメントタイト粒の微小破碎の様子が認められることから、砥粒が被削材

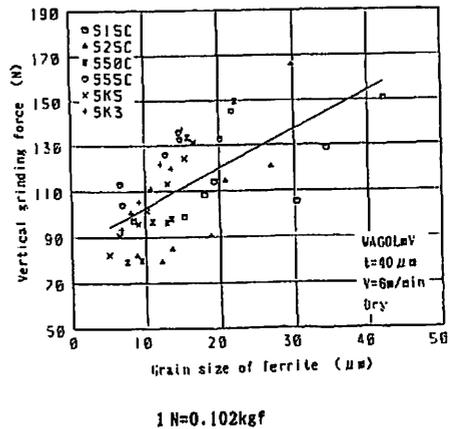
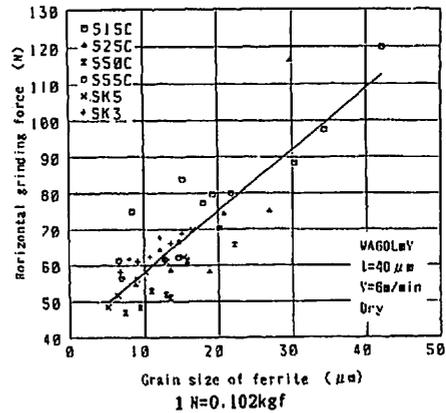


図3 フェライト粒径と研削抵抗との関係

表 1 各材料におけるフェライト粒径およびセメントイト粒径と研削抵抗との関係

	S15C		S25C		S50C		S55C		SK5		SK3	
	f	c	f	c	f	c	f	c	f	c	f	c
F <sub>H</sub>	0.91	0.95	0.82	0.89	0.94	0.93	0.88	0.98	0.97	0.99	0.94	0.92
F <sub>V</sub>	0.88	0.97	0.91	0.97	0.95	0.94	0.92	0.89	0.99	0.98	0.98	0.92

t=40 μm f: Grain size of ferrite c: Diameter of cementite

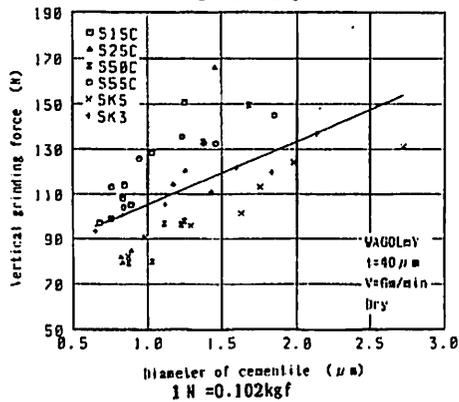
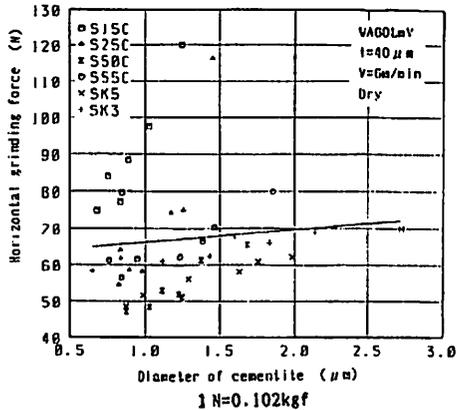


図 4 セメントイト粒径と研削抵抗との関係

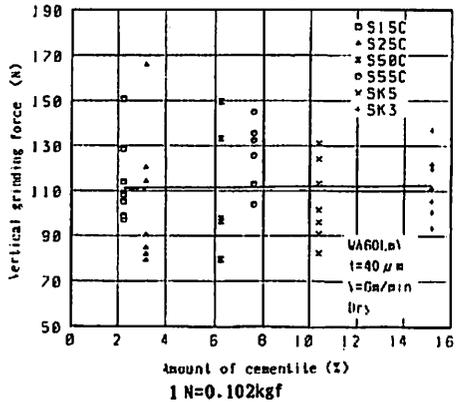
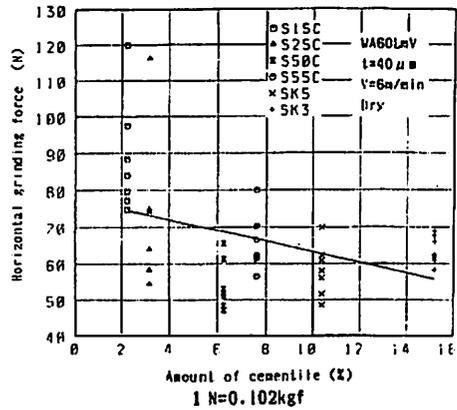


図 5 セメントイト量と研削抵抗との関係

へくいこむ際、セメントイト粒の微小破碎に多大のエネルギーを要するため、研削抵抗は大なるものと思われる<sup>(6)</sup>。

そこで、研削抵抗とフェライト粒径あるいはセメントイト粒径との対応関係を調べるため、それぞれの相関係数を比較した。その結果を表 1 に示す。接線 ( $F_H$ )、法線方向 ( $F_V$ ) のいずれの場合も、それぞれ 0.8 以上の高い値を示していることから、研削抵抗はフェライト粒径およびセメントイト粒径にかなり依存していることがわかる。

そこで、今までは、炭素含有量の異なる各材料ごとに対応関係を検討したが、今度は、炭素含有量も考慮

に入れて、鋼全般に対して統一的な説明はできないだろうかとの見点から、42 個のデータを用いて研削抵抗の重回帰分析を行った。

図 3 に、42 個のデータをフェライト粒径のみで整理した結果を実線で示す。図より、いくらかのばらつきはあるものの、フェライト粒径の増大に伴って、研削抵抗は、接線および法線方向とも増大する傾向にある。

次に、パラメータとして、セメントイト粒径を用いた場合の結果を図 4 に実線で示す。フェライト粒径の場合に比べ、いくらかのばらつきが目立つが、セメントイト粒径の増大に従って、研削抵抗はいずれも直線

的に増加する傾向にあることがわかる。次に、炭素含有量に実質的に相当するセメントイト量と、研削抵抗との関係を図5に示す。図より、全体的な傾向としては、セメントイト量の増加に伴って、接線方向においては、いくぶん減少する傾向になっているのに対し、法線方向においては、かなり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、相関係数を算出し比較検討を行った。その結果を表2に示す。表より、研削抵抗は、接線および法線方向いずれもフェライト粒径にかなり依存しており、接線方向においては、セメントイト量、法線方向においては、セメントイト粒径の順に大きくなっており、接線と法線方向においては、いくらか異なった傾向を示している。

次に、重回帰分析を行うに先だって、各因子間の相

関関係について調べた。その結果を表3に示す。これより、三因子間の相関係数はいずれも低い値を示し、重回帰式の説明変量として用いてもさしつかえないことがわかる。

そこで、この三因子を用いて、研削抵抗の重回帰分析を行った。その結果

$$F_H = 41.049 + 1.897X - 5.511Y + 0.492Z$$

$$F_V = 54.872 + 1.829X + 16.940Y + 1.082Z$$

.....(1)

で示される。図6に、式(1)による推定値(Y)と測定値(y)を比較した結果を示す。そこで、測定値yの全変動に対して、推定値Yの変動の占める割合、すなわち寄与率は、接線方向(F<sub>H</sub>)で75%、法線方向(F<sub>V</sub>)で64%になる。しかし、1次モデルで実験値と推定値を一致させることは無理であることから、次数を高くすることより、例えば、二次式の場合を考えると、

$$F_H = 93.327 - 0.020X^2 - 3.374Y^2 + 0.094Z^2$$

$$+ 2.869XY + 2.917YZ - 0.236ZX$$

$$+ 0.163X - 57.023Y - 2.173Z$$

$$F_V = 103.664 - 0.071X^2 - 8.653Y^2 - 0.406Z^2$$

$$+ 4.913XY + 3.401YZ + 0.029ZX$$

$$+ 0.290X - 87.882Y + 6.055Z$$

.....(2)

で示され、寄与率は、接線方向で84%、法線方向で80%となり、高次することにより、研削抵抗は、ある程度導き出すことが可能となる。

また、どの因子が、研削抵抗に多く寄与しているか調べるため、データを平均0、分散1に標準化し、重回帰式を作ると、

$$F_H^* = 0.955X^* - 0.155Y^* + 0.136Z^*$$

$$F_V^* = 0.678X^* + 0.350Y^* + 0.221Z^*$$

.....(3)

となり、接線方向において、フェライト粒径が多く寄

表2 三因子と研削抵抗との相関係数

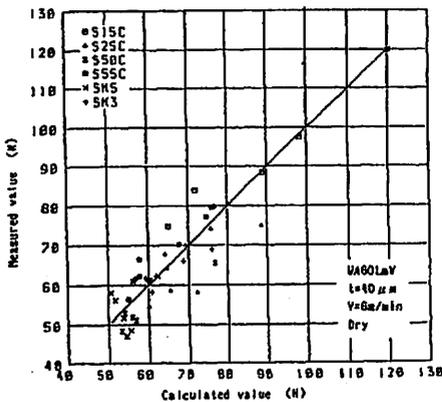
	X	Y	Z
F <sub>H</sub>	0.85	0.10	0.41
F <sub>V</sub>	0.64	0.58	0.02

t=40 μm  
 X: Grain size of ferrite  
 Y: Diameter of cementite  
 Z: Amount of cementite

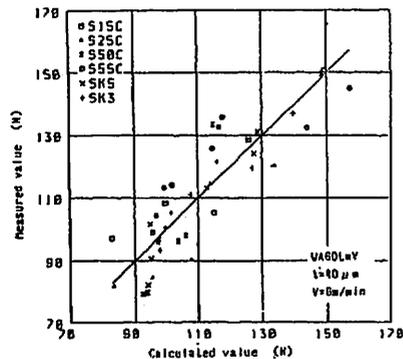
表3 三因子間の相関係数

	X	Y	Z
X	1.00	0.21	0.50
Y	0.21	1.00	0.40
Z	0.50	0.40	1.00

X: Grain size of ferrite  
 Y: Diameter of cementite  
 Z: Amount of cementite



(a) 接線方向



(b) 法線方向

図6 推定値と測定値との比較

表 4 F 検定の手順

Procedure	Term	Partial Regression Coefficient	Contribution	F Ratio	F-Test	Multiple Correlation Coefficient
1	X X	0.040	116.19		**	
	b	55.172		116.187		0.8825
2	X X	0.040	112.86		**	
	Y Y	0.393	0.171		--	
	b	54.530		56.9751		0.8631
	X X	0.410	101.88		**	
	Z Z	0.011	0.386		--	
	b	54.047		57.3955		0.8640
	X X	0.037	40.669		**	
	X Y	0.104	0.422		--	
	b	53.899		57.4655		0.8641
X X	0.040	107.40		**		
Y Z	0.086	0.159		--		
b	54.384		56.9516		0.8631	
X X	0.040	113.47		**		
Z X	0.009	0.137		--		
b	54.282		56.9093		0.8630	
X X	0.025	3.164		**		
X	0.647	1.120		--		
b	49.585		58.828		0.8666	
X X	0.040	111.87		**		
Y	0.303	0.011		--		
b	54.812		56.6625		0.8625	
X X	0.040	88.196		**		
Z	-0.008	0.000		--		
b	55.231		56.642		0.8625	

\*Significance - Rejection

与しており、法線方向においては、フェライト粒径、セメントイト粒径およびセメントイト量の順でそれぞれ寄与していることがわかる。

3・2 最良回帰式 重回帰式で、次数を高くすると、研削抵抗を高い精度で予測することは可能であるが、説明変数が多くなることから、計算も大変になるし、モデルも複雑になる。

そこで、できるだけ説明変数を少なくし、簡便的な数学モデルを得る目的で、段階的手法を用いて、最良の目的変数はなにかの目的で、変数のF検定を行った<sup>(7)</sup>。一例として、接線方向研削抵抗の場合の検定手順を表4に示す。その結果、

$$\left. \begin{aligned} F_H &= 0.04X^2 + 55.172 \\ F_V &= 1.411XY + 84.232 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

の関係が得られた。

そこで、これらの変数の物理的意味を考察すると、接線方向においては、フェライト相の面積、すなわち

延性領域の大きさに依存する。また法線方向においてはフェライト粒径とセメントイト粒径の相乗効果による影響が大きい。例えば、フェライト粒径が大でセメントイト粒径が小なる場合と、フェライト粒径が小でセメントイト粒径が大なる場合は、法線方向の研削抵抗においては、等しい場合があることを意味している。

#### 4. 結 論

鋼の研削抵抗に及ぼす冶金因子として、フェライト粒径、セメントイト粒径およびセメントイト量を用いて、重回帰分析を行った。

その結果、フェライト粒径、セメントイト粒径およびセメントイト量が既知の値であれば、研削加工することなくして、研削抵抗をある程度予測することが可能であることが明らかにされた。さらに、研削抵抗に及ぼす三因子の寄与する程度も明らかにされ、それら

を制御することにより、研削抵抗を制御することが可能となる。

最後に本研究を進めるに当たり宇都宮大学工学部の  
賀志浩三先生および江田弘先生のご指導をいただいた。  
ここに記して謝意を表す。

#### 文 献

(1) 賀志, 精密機械, 30-2 (昭48), 178.

- (2) Collins, M. J. and Woodford, D. A., *JISI*, 2 (1965), 184.  
(3) 江田・賀志, 機論, 43-372 (昭52), 3112.  
(4) Dehloff, R. T. and Rhines, F. N., *Quantitative Microscopy*, (1968), 278, McGraw-Hill.  
(5) 江田・賀志・谷山・橋本, 日本金属学会誌, 42-11 (昭53), 1077.  
(6) Fukumoto, I., Heshiki, K., Kishi, K., Eda, H. and Hasegawa, Y., *Bulletin JSPE*, 19 (1985), 63.  
(7) 河口, 多変量解析入門, (昭51), 30, 森北出版。