

円筒重研削における研削要因および数学モデル (第4報)

—SUS 304, SUS 403 に対する 19A 砥石の場合—

田中秀穂・中島 繁・是枝賢一・友野春久
(受理 昭和 58 年 5 月 31 日)

GRINDING FACTORS AND MATHEMATICAL MODELS IN THE HEAVY CYLINDRICAL GRINDING (4th report)

—The Performances of 19A Grinding Wheel for Stainless Steel—

Hideho TANAKA, Shigeru NAKAJIMA, Ken'ichi KORE'EDA and Haruhisa TOMONO

The performances of 19A wheel for stainless steels were investigated in the same manner as in the former reports. When SUS 304 and SUS 403 are ground with 19A 36M8V10W wheel, the effects of three factors; work speed, table speed, and radial in-feed of wheel on the following seven items; wear of wheel, wear rate of wheel, metal removal rate, grinding ratio, grinding force, grinding power, and grinding cost were analyzed by means of the analysis of variance. The mathematical models showing the quantitative relations between the 3 factors and each of the seven items were estimated by applying the "Design of Factorial Experiment".

1. はじめに

筆者のうち 1 人は、これまでに^{1)~3)}、高切込みの重研削において、その研削性能のよいといわれる 19A 砥石の粒度、結合度をかえて、S45C, SCM3 に対する一連の円筒重研削実験を行い、一応の体系的結論を得、19A 砥石が、上記被削材に対し優れた性能を発揮することを確認した。

また、一方、前報⁴⁾では、被削材 SUS 304, SUS 403, の 2 種類のステンレス鋼について、近年、開発された、40SH ビトリファイド砥石による円筒重研削を行い、この 2 種類のステンレス鋼に対して、40SH 砥石が、比較的良好な性能を発揮することを確認した。

そこで、本報では、被削材 S45C, SCM3 に対して良好な結果を得た 19A 砥石を用いて、難削材といわれるステンレス鋼の円筒重研削について、いままでと同様な方法で、19A 砥石の性能を調べようとするものである。すなわち、被削材として、前報⁴⁾で用いたオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304, マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS 403 を代表的に選び、こ

れまでと^{1)~4)}、同様な方法で円筒重研削を行い、外的研削要因として選んだ A) 被削材周速度, B) テーブル速度, C) 砥石切込み, の 3 要因の 1) 砥石損耗量, 2) 砥石損耗速度, 3) 実削除率, 4) 研削比, 5) 研削抵抗, 6) 消費動力, 7) 研削コストなどの各測定項目に対する影響の程度を調べ、また、上記 3 要因と 1)~7) までの各測定項目の関係を示す数学モデルを推定した。

2. 実験装置および方法

表 1 実験条件

研削機	円筒研削機、豊田工機RLC28-50、主輪モータ出力12.6kW			
砥石	日本陶器製 外径×幅×内径	19A 36M 8 V 10W φ273×50×φ127を幅25mmに修正		
被削材	SUS 304 SUS 403	外径×内径×長さ φ90×φ50×50mm		
熱処理条件	SUS 304	焼入温度1000℃、水冷、焼入硬度Hv=264(平均) SUS 403 焼入温度1000℃、水冷、焼入硬度Hv=425(平均)		
研削条件と研削速度を比較された	砥石回転数 N rpm	1750 (一定)		
		A) 要因 被削材周速度 V m/min	水準	低 中 高
			(-1) (0) (+1)	21.7 38.0 67.9
			B) 要因 テーブル速度 I m/min	水準
(-1) (0) (+1)	0.1 0.2 0.4			
C) 要因 砥石切込み Δ μm	水準	低 中 高		
	(-1) (0) (+1)	40 70 120		
	研削速度	ジョンソンワックス1.25%液、30t/min		
砥石損耗測定	ベークライト転写法による			

表1に、実験条件を示す、砥石の種類と被削材の熱処理条件が異なる以外は、前報⁴⁾と同様であるので、実験装置および方法については省略する。

3. 実験結果および考察

3.1 研削加工限界

図1は、実験にさきだち、研削盤および砥石の研削限界を調べたものである。テーブル速度が小さい場合、ややSUS403の方が限界がせばまる以外、両被削材間に研削限界の差異は認められず、両材とも、テーブル速度の増加につれ、また、被削材周速度の小さい方が研削限界はせばまる。

3.2 各研削要因の影響

研削要因として選定した、A)被削材周速度 v m/min , B)テーブル速度 f m/min , C)砥石切込み $\Delta\mu m$ の3要因が、1)砥石損耗量 W_s mm^3 , 2)砥石損耗速度 W_{s3} $mm^3/mm \cdot sec$, 3)実削除率 q $mm^3/mm \cdot sec$, 4)研削比 G , 5)研削抵抗(接線方向) F_t kg , 6)消費動力 T KW , 7)研削コスト K $円/mm^3$ に対して、どの程度影響するかを知るために、分散分析(附表1~7参照)による寄与率をまとめたのが図2である。この図から、各研削要因の各測定項目に対する影響、程度を知ることができる。しかし、各要因の変化に対する各測定項目の増減の傾向は知ることはできない。本実験は、いままで^{1)~4)}と同

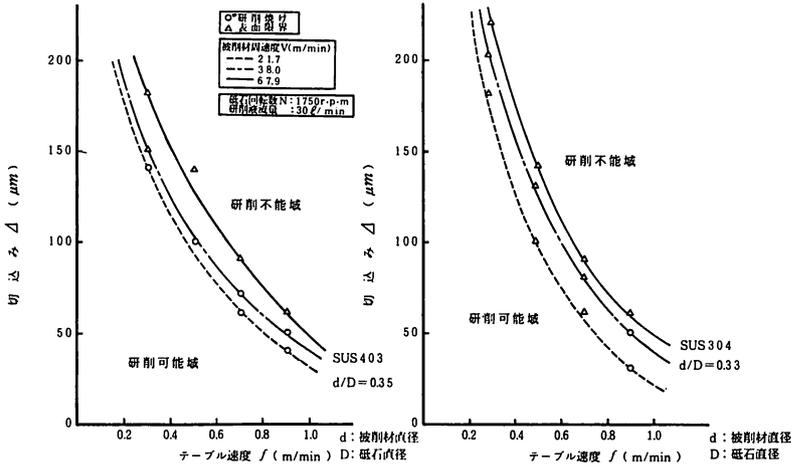


図1 研削加工限界

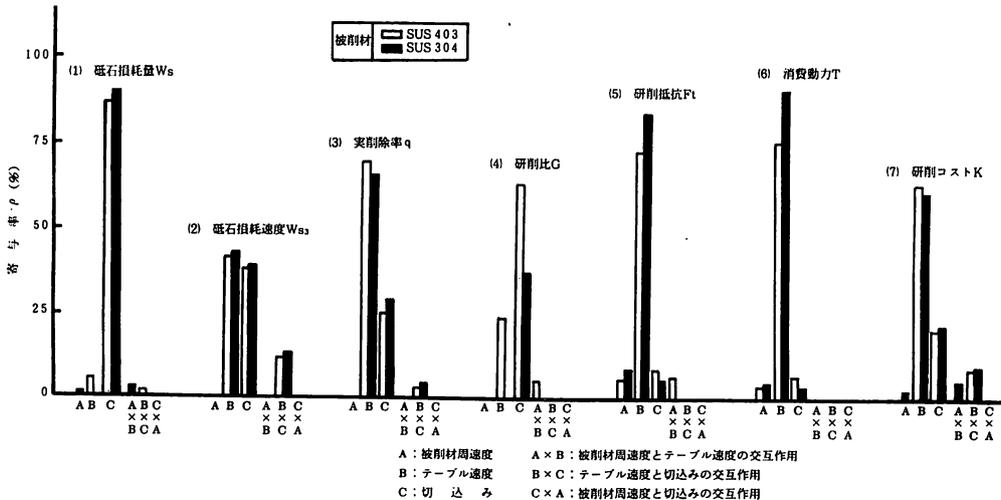


図2 各研削要因と寄与率の関係

様、直交実験⁵⁾であるので、図3に示す傾向線⁵⁾を求めることにより、各要因の変化が、各測定項目の増減の動向に与える定性的傾向を知ることができる。なお、図中、 \pm 印は、95%信頼限界を示す。以下、各測定項目ごとに検討を加える。

i) 砥石損耗量 W_s について

砥石損耗量に対しては、3要因のうち、両材ともに砥石切込みの影響が寄与率約90%と最も大きく、その他の要因の影響は、殆どないか、あっても極めて小さい(図2)、図3、(i)、(ii)、(iii)からわかるように、砥石の切込みの増加とともに、損耗量は増加する。テーブル速度の影響は、寄与率としては小さいものであるが、テーブル速度の増加につれ、また、被削材周速度の増加につれ、やや、損耗量は増加の傾向を示す。これは、いままでの報告^{2), 3)}ともよく一致し、砥石損耗量には、砥石切込みが最も大きく影響を与えることを示している。両材の間では、SUS 304 に対する方が、同一研削条件で、砥石損耗量が多い。

ii) 砥石損耗速度 W_{s3} について

砥石損耗速度は、テーブル速度を変化させることの影響が最も大きく、両材とも、約42%程度の寄与率を示す。ついで、砥石切込みの影響が約38%を示し、被削材周速度を変化させる影響はない。図3、(ii)、(iv)、(v)より、テーブル速度、砥石切込みの増加につれ、砥石損耗速度は増加し、SUS 304の方が、同一研削条件では、やや、砥石損耗速度が大きい。

iii) 実削除率 q について

実削除率に対しては、テーブル速度の影響が大きく、約69~66%の寄与率を示している。ついで、砥石切込みが、約29~25%の寄与率を示し、被削材周速度の影響はない。テーブル速度、砥石切込みの増加につれ、実削除率は増加する(図3、(vi)、(vii))が被削材周速度を変化させても、何ら実削除率は変化しない(図3、(h))。

iv) 研削比 G について

SUS 403 の場合、砥石切込みと、テーブル速度に

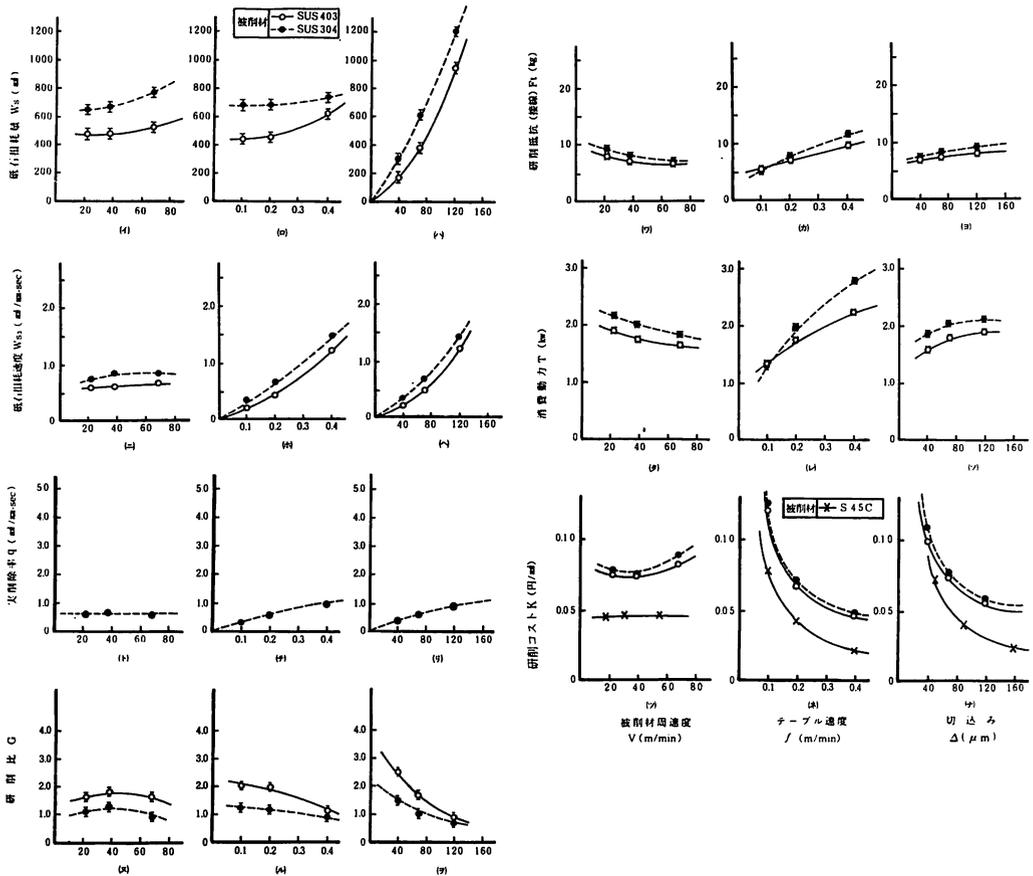


図3 各要因の影響

対して、その影響がみられるが、SUS 304 の場合、影響をうけるのは、砥石切込みだけで、他は何ら影響しない(図2)。研削比は、砥石切込みの増加につき、減少する傾向を示し(図3(ア))、テーブル速度の変化、被削材周速度の変化の影響は殆どない(図3、(ヌ))、ちなみに、第2報において、19A 砥石による S45C の研削時には、全条件の平均で約9の研削比が得られたのに対し、本実験では、SUS 403 で、約1.7、SUS 304 で約1.09の研削比で、極めて小さい。このことから、19A 砥石は、ステンレス研削には、十分、その性能を発揮していないことが予想される。

v) 研削抵抗 F_t 、消費動力 T について

研削抵抗、消費動力ともに、テーブル速度の影響が最も大きく、ついで、砥石切込みが影響し、被削材周速度は、殆ど影響しない(図2)。研削抵抗、消費動力ともにテーブル速度、砥石切込みの増加につれ増加し、僅かに、SUS 304 に対する方が、研削抵抗、消費動力ともに大きい(図3、(ウ)、(カ)、(ヨ)、(タ)、(レ)、(リ))。

vi) 研削コスト K について

研削コストには、テーブル速度、約60%、砥石切込み、約30%の寄与率を示し、被削材周速度は殆ど影響しない(図2)。また、テーブル速度、砥石切込みが大きくなるにつれ、研削コストは減少し、同一研削条件では、SUS 304 の方が、僅かに大きい(図3、(ネ)、(ハ))。図3、(リ)、(ハ)、(ニ)に、参考までに、第2報での S45C の場合を併記してあるが、19A でステンレス鋼を研削する場合の方が、テーブル速度、砥石切

込みの小さい場合で、約40%、大きいときは、約140%高くつくことを示している。

以上のことから、3要因が各測定項目に与える影響の程度を、図2の寄与率から、また、3要因の水準を3段階に変化させることによる各測定項目の増減の動向を図3の傾向線から知ることができた。

採用した3要因のうち、テーブル速度、砥石切込みは、各測定項目に影響を与えるが、被削材の周速度は殆ど影響しないか、しても、極めて僅かである。

図4は、研削コストと実削除率の関係を調べたもので、いずれの被削材周速度の場合でも、実削除率の増加につれ、研削コストは減少する。特に、実削除率0.8程度までは急激な減少を示し、以後、その減少率はゆるやかとなっている。一般に、研削コストは、或る実削除率において最小値を示す最適条件が存在するはずであるが、本実験条件の下では、最小値を示す最適条件が存在しない。これは、全研削コストに占める砥石コストが、人件費を含むランニングコストにくらべ、極端に小さいため、砥石の損耗費に対して、人件費の時間単価がかなり大きいことを示している。

図5は、実削除率 q あたりの消費動力 T の変化、 T/q を図3と同じ方法で調べたものである。 T/q は、テーブル速度、砥石切込みの増加とともに減少し、被削材周速度の影響は殆どうけていない。このことは、同一削除率を得るのに、研削盤および砥石の性能の許す限り、早送り、高切込みの方が電力費が安くつくことを示している。

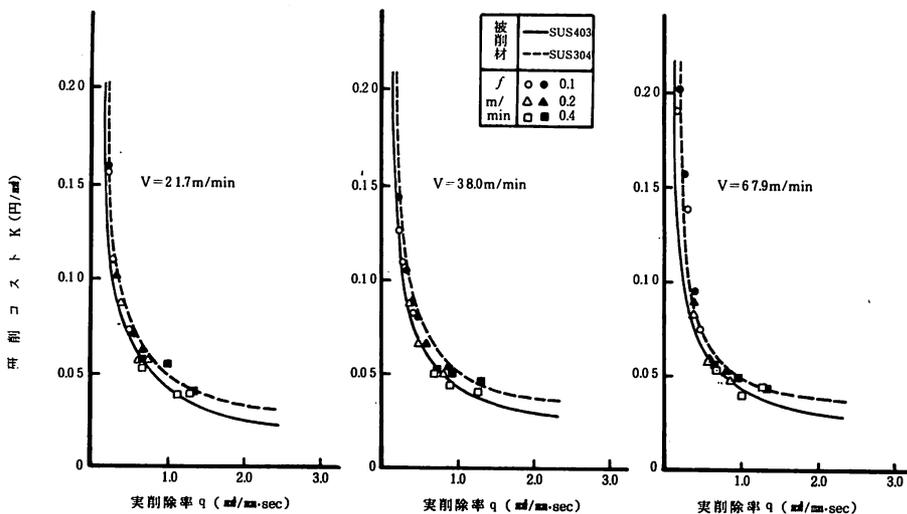


図4 研削コストと実削除率の関係

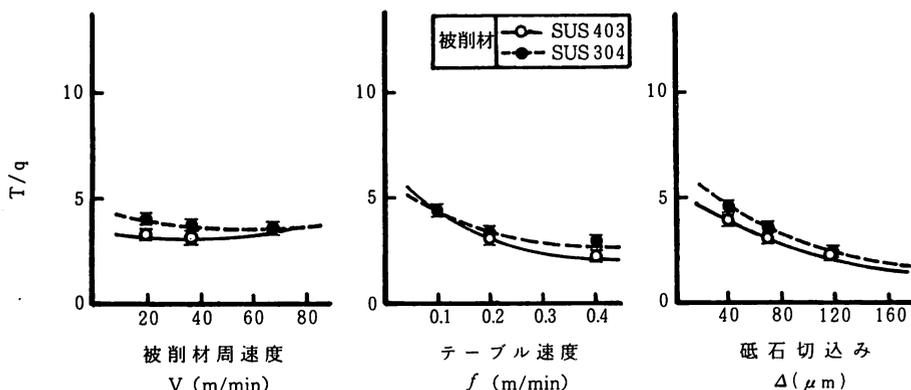


図5 実削除率当りの消費動力の比較

3.3 数学モデルの推定

図3の傾向線より、3要因と各測定項目の関係を、第1報²⁾同様、つぎの(1)式で推定できるものとする。

$$f(x) = \xi(v/v)^{\epsilon} f^{\zeta} \Delta^{\eta} \quad \text{--- (1)}$$

ここで、 $f(x)$ は、(1)~(7)までの各測定項目を表し、 V は、砥石周速度 (m/min) を表わす。

ここで、推定した(1)式の妥当性の検討については、第1報にて報告したので、詳細は省略する。

められない以外は、すべて99%有意となり、その妥当性が認められる。A要因に対応する b_1 には、その1部のみに有意性が認められ、被削材の周速度を変化させる影響は、ある限られた項目のみとなり、第1報から第3報までと同様な傾向を示す。また、このことは、図2、図3の結果とも一致する。

表3は、これらの係数から計算された数学モデルの係数および指数をまとめたものであり、この指数評価からも、各要因のおよぼす影響の程度を知ることができる。

附図に、各測定項目における、表3による計算値と実測値の比較を示す、砥石損耗を含む項目以外は、かなりの精度を示し、推定した数学モデルの妥当性がうかがえる。なお、砥石の損耗に関する測定精度を高められれば、さらに、数学モデルの精度も向上が期待できるものと考えられる。

表2 計算された回帰係数と判定結果の例 19A 砥石 一次モデル

測定項目	被削材	b_0	b_1	b_2	b_3
砥石損耗量 W_s	SUS304	2.750**	0.326	-0.130	0.277**
	SUS403	2.587**	0	0.081**	0.373**
砥石損耗速度 W_{s_1}	SUS304	-0.251**	0.025	0.316**	0.317**
	SUS403	-0.430**	-0.002	0.378**	0.376**
実削除率 q	SUS304	-0.259**	-0.016	0.243**	0.157**
	SUS403	-0.254**	-0.010	0.246**	0.150**
研削比 G	SUS304	-0.008**	-0.041	-0.073**	-0.159**
	SUS403	0.176**	-0.008	-0.131**	-0.226**
研削抵抗 F_t	SUS304	0.883**	-0.057**	0.181**	0.041**
	SUS403	0.855**	-0.024**	0.115**	0.038**
消費動力 T	SUS304	0.281**	-0.044**	0.166**	0.026**
	SUS403	0.237**	-0.022**	0.111**	0.034**
研削コスト K	SUS304	-1.137**	0.019*	-0.192**	-0.109**
	SUS403	-1.160**	0.011	-0.199**	-0.105**

** 99%有意, * 90%有意

表2は、(1)式の数変換された1次モデル(2)式における各係数と、その判定結果である。

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad \text{--- (2)}$$

この表において推定した係数 b_0 と、B要因およびC要因に対応する係数 b_2 、 b_3 は、SUS 304における研削比の項の b_0 と砥石損耗量の b_2 に有意性が認

表3 計算された数学モデルの係数および指数 19A 砥石

測定項目	被削材	ϵ	ζ	η	ν	誤差%
砥石損耗量 W_s	SUS304	6.363	0.140	-0.043	1.162	19.1
	SUS403	0.779	-0.002	0.269	1.566	11.4
砥石損耗速度 W_{s_1}	SUS304	0.016	0.106	1.049	1.328	15.4
	SUS403	0.003	-0.007	1.255	1.577	14.3
実削除率 q	SUS304	0.097	-0.068	0.808	0.658	7.8
	SUS403	0.125	-0.040	0.819	0.628	8.0
研削比 G	SUS304	5.979	-0.174	-0.241	-0.668	19.8
	SUS403	36.490	-0.033	-0.435	-0.947	15.3
研削抵抗 F_t	SUS304	3.962	-0.244	0.600	0.172	6.0
	SUS403	4.654	-0.099	0.380	0.161	5.7
消費動力 T	SUS304	1.467	-0.187	0.553	0.111	5.8
	SUS403	1.234	-0.090	0.369	0.142	5.1
研削コスト K	SUS304	0.243	0.081	-0.638	-0.455	10.8
	SUS403	0.181	0.046	-0.661	-0.439	10.9

4. おわりに

19A36M8V10W の砥石を用いて、ステンレス鋼を円筒重研削して、つぎの結論を得た。

1. 各測定項目に対して、採用した3要因のうち、テーブル速度と砥石切込みの2要因が大きく影響し、被削材周速度の影響は、ほとんどない。
2. 推定した数学モデル

$$f(x) = \xi(v/v)^{\epsilon} f^{\eta} \Delta^{\nu}$$
 は、砥石損耗量、砥石損耗速度、研削比など砥石損耗に関係する項目については、誤差が大きいがそれ以外は誤差も小さく、充分適用できる。
3. 一般鋼材に対しては、その性能のよかった19A砥石も、ステンレス鋼に対しては、その性能を十分に発揮しない。

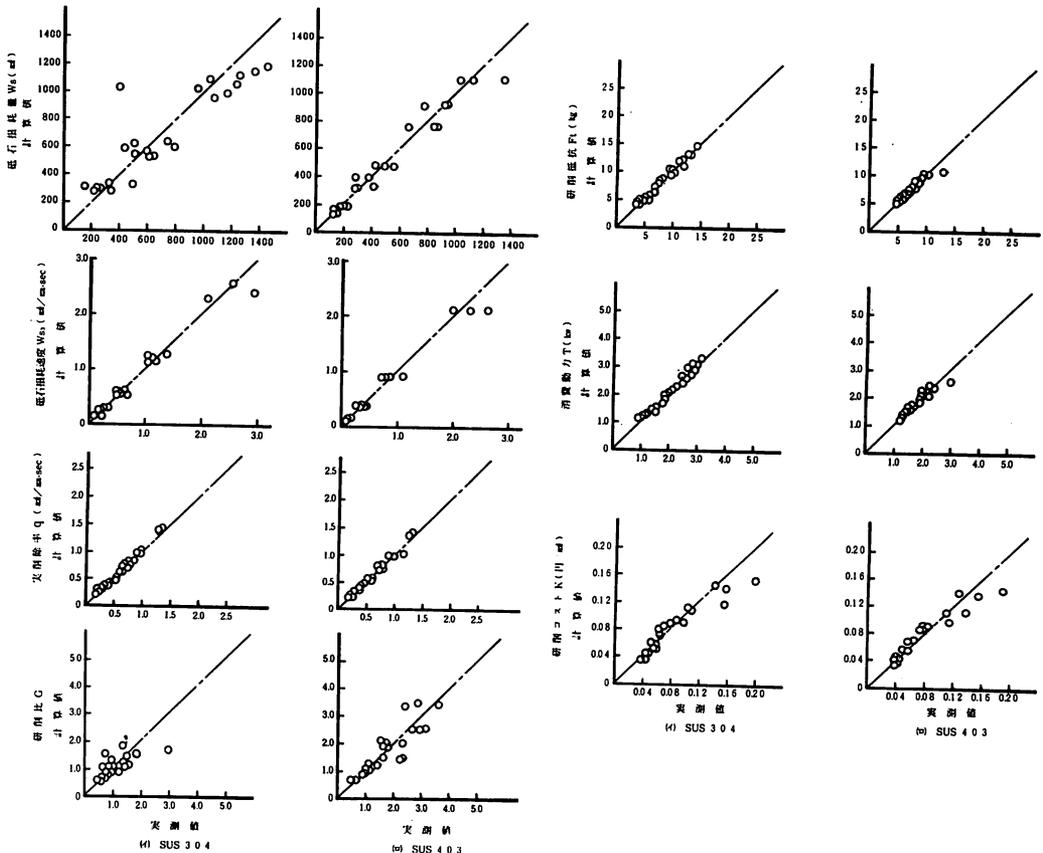
あ と が き

本実験に協力された、増永守志、分田伸二の両君に

対し深い謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 田中秀穂 円筒重研削における研削要因. 鹿大工研究報告第20号, 25 昭 53. 9 および, 砥粒加工研究会会報, 22 卷 4 号 3, 昭 54. 2
- 2) 田中秀穂 円筒重研削における研削要因および, 数学モデル (第一報) 鹿大工研究報告 第 21 号. 43. 昭 54. 9
- 3) 田中秀穂 円筒重研削における研削要因および数学モデル (第 2 報) 鹿大工研究報告 第 22 号. 57 昭 55. 9 および砥粒加工研究会会報 24 卷 4 号 39 昭 56. 1
- 4) 田中秀穂, 中島繁 円筒重研削における研削要因および数学モデル (第 3 報) 鹿大工研究報告 第 24 号 91 昭 57. 10
- 5) 例えば 田口玄一 実験計画法 (上) 丸善 1962 52 ページ



付図 実測値と計算値の比較

附表 各測定項目における分散分析表

(1) 砥石損耗量 (W_s) に対する分散分析表

(イ) SUS304

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	78453	2	39226	4.56	1.50*
B	17174	2	8587	1.00	
C	3688517	2	1844258	214.37	90.01**
A×B	150455	4	37613	4.37	2.85*
B×C	21954	4	5488	0.64	
A×C	53412	4	13353	1.55	
e	68824	8	8603		

(ロ) SUS403

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	6925	2	3462	0.82	
B	207595	2	103797	24.65	5.97**
C	2924548	2	1462274	347.25	87.35**
A×B	40796	4	10199	2.42	
B×C	83356	4	20839	4.95	1.99**
A×C	41335	4	10338	2.45	
e	33963	8	4211		

(2) 砥石損耗速度 (W_{ss}) に対する分散分析表

(イ) SUS304

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	25246	2	12623	0.43	
B	5901861	2	2950930	101.03	42.59**
C	5386990	2	2693495	92.21	38.84**
A×B	61861	4	15465	0.53	
B×C	1963883	4	490970	16.81	13.46**
A×C	146429	4	36607	1.25	
e	233672	8	29209		

(ロ) SUS403

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	15780	2	7890	0.51	
B	5065686	2	2532843	164.12	41.72**
C	4575891	2	2287945	148.25	37.66**
A×B	28865	4	7216	0.47	
B×C	2145702	4	536425	34.76	12.27**
A×C	113865	4	28466	1.86	
e	123471	8	15433		

(3) 実削除率 (q) に対する分散分析表

(イ) SUS304

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	4247	2	2123	0.96	
B	1940755	2	970377	439.88	66.01**
C	838113	2	419056	189.96	28.42**
A×B	17216	4	4304	1.96	
B×C	109736	4	27434	12.44	3.44**
A×C	5836	4	1459	0.66	
e	17648	8	2206		

(ロ) SUS403

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	2914	2	1457	0.39	
B	2122230	2	1061115	285.32	69.39**
C	763033	2	381516	102.59	24.79**
A×B	13106	4	3276	0.88	
B×C	98675	4	24668	6.63	2.75*
A×C	17892	4	4473	1.20	
e	29756	8	3719		

(4) 研削比 (G) に対する分散分析表

(イ) SUS304

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	5870	2	2935	2.23	
B	7414	2	3707	2.81	
C	29742	2	14871	11.29	37.09**
A×B	13989	4	3497	2.66	
B×C	245	4	61	0.05	
A×C	5278	4	1319	1.00	
e	10542	8	1317		

(ロ) SUS403

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	652	2	326	0.65	
B	45233	2	22616	45.41	23.77**
C	117570	2	58785	118.04	62.63**
A×B	11182	4	2795	5.61	4.94*
B×C	6993	4	1748	3.51	
A×C	527	4	131	0.26	
e	3984	8	498		

(5) 研削抵抗 (F_t) に対する分散分析表

(イ) SUS304

要因	S	ϕ	V	F_0	$\rho(\%)$
A	175301	2	87650	32.57	7.29**
B	1950253	2	975126	362.37	83.40**
C	125962	2	62986	23.40	5.17**
A×B	17802	4	4450	1.65	
B×C	35792	4	8948	3.33	
A×C	5246	4	1311	0.49	
e	21535	8	2691		

(ロ) SUS403

要因	S	ϕ	V	F_0	$\rho(\%)$
A	51874	2	25937	8.38	4.85*
B	686319	2	343159	110.88	72.23**
C	81534	2	40767	13.17	8.00**
A×B	70769	4	17692	5.72	6.20*
B×C	6828	4	1707	0.55	
A×C	19519	4	4879	1.58	
e	24767	8	3095		

(6) 消費動力 (T) に対する分散分析表

(イ) SUS304

要因	S	ϕ	V	F_0	$\rho(\%)$
A	4706	2	2553	22.41	4.21**
B	96113	2	48056	457.68	89.81**
C	3001	2	1500	14.29	2.61**
A×B	1163	4	290	2.76	
B×C	819	4	204	1.94	
A×C	138	4	34	0.32	
e	843	8	105		

(ロ) SUS403

要因	S	ϕ	V	F_0	$\rho(\%)$
A	2173	2	1086	4.62	3.57*
B	36166	2	18083	76.95	74.82**
C	3587	2	1793	7.63	6.53*
A×B	2693	4	673	2.86	
B×C	271	4	67	0.29	
A×C	936	4	234	1.00	
e	1886	8	235		

(7) 研削コスト (K) に対する分散分析表

(イ) SUS304

要因	S	ϕ	V	F_0	$\rho(\%)$
A	943	2	471	9.61	1.94**
B	26378	2	13189	269.16	60.45**
C	9112	2	4556	92.98	20.73**
A×B	2183	4	545	11.12	4.57**
B×C	4147	4	1036	21.14	9.09**
A×C	312	4	78	1.59	
e	399	8	49		

(ロ) SUS403

要因	S	ϕ	V	F_0	$\rho(\%)$
A	331	2	165	1.46	
B	24597	2	12298	108.83	62.61**
C	7836	2	3918	34.67	19.55**
A×B	996	4	249	2.20	
B×C	3812	4	953	8.43	8.63**
A×C	448	4	112	0.99	
e	905	8	113		

** : 99%有意

* : 95%有意