

円筒重研削における研削要因および数学モデル (第3報)

— SUS304, SUS403 に対する40SH 砥石の場合 —

田 中 秀 穂・中 島 繁

(受理 昭和57年 5 月 31日)

GRINDING FACTORS AND MATHEMATICAL MODELS IN THE HEAVY CYLINDRICAL GRINDING (3rd Report)

— The Performances of 40SH Grinding Wheel for Stainless Steels —

Hideho TANAKA and Shigeru NAKAJIMA

The performances of 40SH wheel for stainless steels were investigated in the same manner as in the former reports. When SUS304 and SUS403 are ground with 40SH36M8V wheel, the effects of three factors A) work speed B) table speed and C) radial infeed of wheel on the next items 1) wear of wheel 2) wear rate of wheel 3) metal removal rate 4) grinding ratio 5) grinding force 6) grinding power and 7) grinding cost were analyzed by using the analysis of variance. And the mathematical models showing the quantitative relations between that 3 factors and the each items were estimated by applying the "Design of Factorial Experiment".

1. は じ め に

筆者のうち1人は、いままでに^{1)~3)}、高切込みの重研削において、その性能がよいといわれる 19A 砥石の性能を知るため、被削材周速度、テーブル速度、砥石切込みなどを外的研削要因として、これらの要因が、砥石の損耗、削除率、研削比、消費動力などの各測定項目に対する影響の程度を、実験計画法を応用し、分散分析による寄与率から知ることができた。また、一方では、要因計画により3要因3水準として、上記3要因と各測定項目に対する数学モデルを推定し、それらの間の定量的関係を知った。すなわち、被削材として S45C, SCM3 に対して、19A 砥石の粒度、結合度をかえた一連の実験を行い、円筒重研削時の体系的一応の結論を得た

本報では、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砥石の性能を調べようとするものである。すなわち、従来、難削材といわれるステンレス鋼の研削に関しては、まとまった研究もあまりなされていず、近年、開発された、焼結砥粒である 40SH 砥粒が、ステンレス鋼の研削に比較的良好な性能

を発揮するといわれているが、これのまとまった研究成果も見当たらないようである。

そこで、本報では、40SH ビトリファイド砥石により(従来は、結合材にベークライトなど樹脂系のものが多用されていた)、被削材として、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304、マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS403 を代表的に選び、いままでと^{1)~3)} 同様な方法で、円筒重研削を行い、A) 被削材周速度、B) テーブル速度、C) 砥石切込みの3要因が、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どのような影響を与えるかを調べるとともに、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に、実験条件を示す。研削抵抗 F_t (接線方向)の測定に、研削盤主軸面板の回し金止めに、ストレンゲージを貼布し、研削時のトルクを測定した以外は、第1報²⁾、第2報³⁾と同じであるので、実験方法、装置については省略する。

表1 実験条件

研 削 盤	円筒研削盤, 豊田工機 RU28-50 主軸モーター2.6KW		
砥 石	クレノートン社 (SUS 304) (SUS 403)	40SH36M 8 VBE 外径×幅×内径 φ293×50×φ127 φ268×50×φ127を幅25mmに修正	
被 削 材	SUS 304 SUS 403	外径×内径×長さ φ90×φ50×50 φ90×φ50×50	
熱 処 理 条 件	SUS 304 SUS 403	一次1100°C 水冷, 焼入硬度 Hv=252 (平均) 一次1000°C 油冷, 焼入硬度 Hv=400 (平均) 二次 370°C 空冷	
研削条件と対数変換された変数		砥石回転数 N rpm	1750 (一定)
	(A) 要因	被削材周速度 V m/min (被削材回転数 n rpm)	低 (-1) 中 (0) 高 (+1) 21.7 38.0 67.9 (76.8) (134.4) (240)
	(B) 要因	テーブル速度 f m/min	低 (-1) 中 (0) 高 (+1) 0.1 0.2 0.4
	(C) 要因	砥石切込み Δ μm	低 (-1) 中 (0) 高 (+1) 40 70 120
研 削 液	ジョンソンワックス1.25%液 30 l/min		
砥石損耗測定	ベークライト転写法による		

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、砥石および研削盤の加工限界を調べたものである。使用した 40SH36M8VBE 砥石は、S45C (一般鋼代表として参考のため加工限界のみを調べた) に対しては、研削可能域がせまく、その性能を発揮できないのに対して、ステンレス鋼に対しては、いずれも研削可能域が広く、この砥石が、ステンレス鋼の研削に適していることがわかる。また、一方、SUS403 にみられるよりも SUS304 に対する方が切込みを大きくできることがわかる。

テーブル速度の増加により、主として、研削焼けの発生を伴って加工限界は、急速にせばまるが、いずれの場合も被削材の周速度の大きい方が加工限界は広い。

3.2 各研削要因の影響

研削要因として選定した、A) 被削材の周速度 v m/min, B) テーブル速度 f m/min, C) 砥石切込

み $\Delta \mu\text{m}$ の3要因が、1) 砥石損耗量 W_s mm³, 2) 砥石損耗速度 W_{s3} mm³/mm·sec, 3) 実削除率 q mm³/mm·sec, 4) 研削比 G , 5) 研削抵抗 F_t kg, 6) 消費動力 T kw, 7) 研削コスト K 円/mm³ に対して、どの程度の影響を与えるかを知るため、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。同図より選定した3要因の各測定項目に与える影響の程度を知ることができる。しかし、この図からは、これら3要素の変化に対する各測定項目の増減の傾向を知ることとはできない。そこで、本実験は、前報^{1), 2)} 同様、直交実験であるので、図3に示す傾向線⁴⁾ から、それぞれの要因の変化が、各測定項目の増減の動向に与える定性的傾向を調べることにする。以下に、図2、図3について、各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、砥石切込み Δ (C 要因) が最も大きな寄与率を示し、その影響が最も大きい。SUS403 に対して、テーブル速度 (B 要因) の影響が少しみられるが、両材ともに、被削材周速度 (A 要因) の影響をうけない (図2, 附表 (1))。図3にてわかるように、砥石切込みの増加につれ、砥

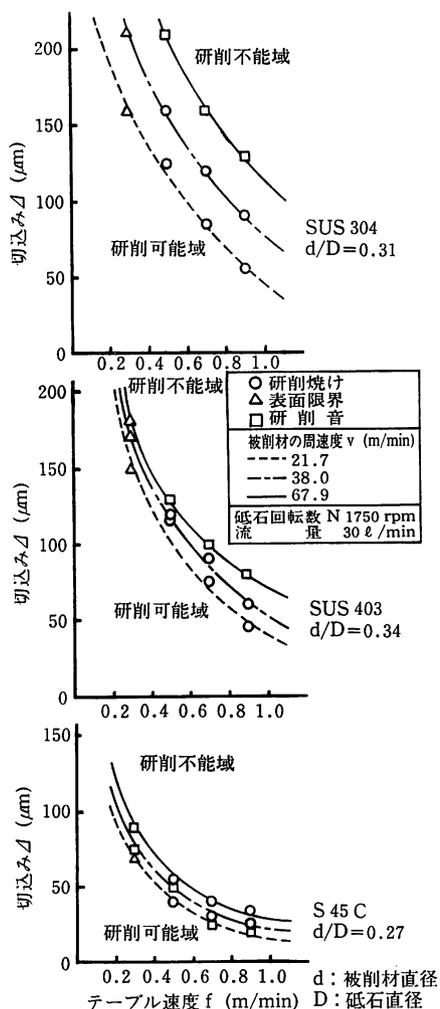


図1 研削加工限界

石損耗量は、急激に増加の傾向を示し（同図（ハ））、テーブル速度の増加に対しやや増加の傾向を示す（同図ロ）が、被削材周速度の変化に対しては、何ら変化しない。一般に、被削材周速度が大きくなると、砥粒切込み深さが大きくなり、砥粒に加わる力が大きくなるため、砥粒の破碎脱落により、砥石は、軟かく作用するといわれる（所謂、動的硬度の低下）。したがって、砥石の損耗も大きくなる筈で、第1報、第2報でも、そのような結果を確認している^{2), 3)}。しかし、本実験で採用した40SH砥粒は、焼結砥粒であるがため、通常の結晶性砥粒の場合とその破碎脱落の様相を異にするためであると推察される。すなわち、砥粒切込み

深さが大きくなって砥粒にかかる力が大きくなっても、靱性が高いため微少破碎が起りにくいこと、また微少破碎が起きても、引きつづいての砥粒摩耗進行がおそいことなど、その摩耗形態に大きな相異があると考えられる。また一方、両被削材の間では、SUS304に対する方が同一研削条件で砥石損耗量が大きい。

ii) 砥石損耗速度 W_{s3} について

砥石損耗速度は、両材に対して、ともに、ほぼ同じ割合で、テーブル速度、砥石切込みの影響を受けるが、やはり、被削材周速度の影響はうけない（図2, 附表(2)）。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するのに対して、被削材周速度が大きくなっても、砥石損耗速度に変化はみられない。両材のうちで、SUS304に対する方が、やや砥石損耗速度が大きい（図3, (ニ)（ホ）（へ））。

iii) 実削除率 q について

実削除率は、テーブル速度、ついで砥石切込みの影響を受け、ここでも、被削材周速度は影響しない（図2, 図3, (ト), (チ), (リ)にてわかるように、テーブル速度、砥石切込みの増加とともに、実削除率は増加し、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。SUS304に対する方が、砥石損耗速度が大きいので、同一研削条件での実削除率は劣る。

iv) 研削比 G について

SUS304 に対しては、砥石切込みだけが影響しているが、SUS403 に対しては、テーブル速度、砥石切込みが影響し、僅かに、被削材周速度の影響もみられる（図2, 附表3）。SUS403 に対しては、テーブル速度、砥石切込みの増加とともに、研削比は減少するが、SUS304 の場合、これらを変化させても何ら変らない。SUS403 に対する方が研削比は大きい（図3, (ヌ), (ル), (ヲ)）。

v) 研削抵抗 F , 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もっとも大きく、ついで、砥石切込みが影響し、被削材周速度はSUS403において僅かに影響している（図2）。テーブル速度、砥石切込みの増加につれ、研削抵抗、消費動力ともに増加するが、被削材周速度を変化させても、研削抵抗、消費動力は、ほとんど変化しないといえる。僅かにSUS403に対する方がSUS304に対するよりも大きい（図3, (ワ), (カ), (ヨ), (タ), (レ), (ソ)）。

vi) 研削コスト K について

研削コストには、テーブル速度、砥石切込みの順で

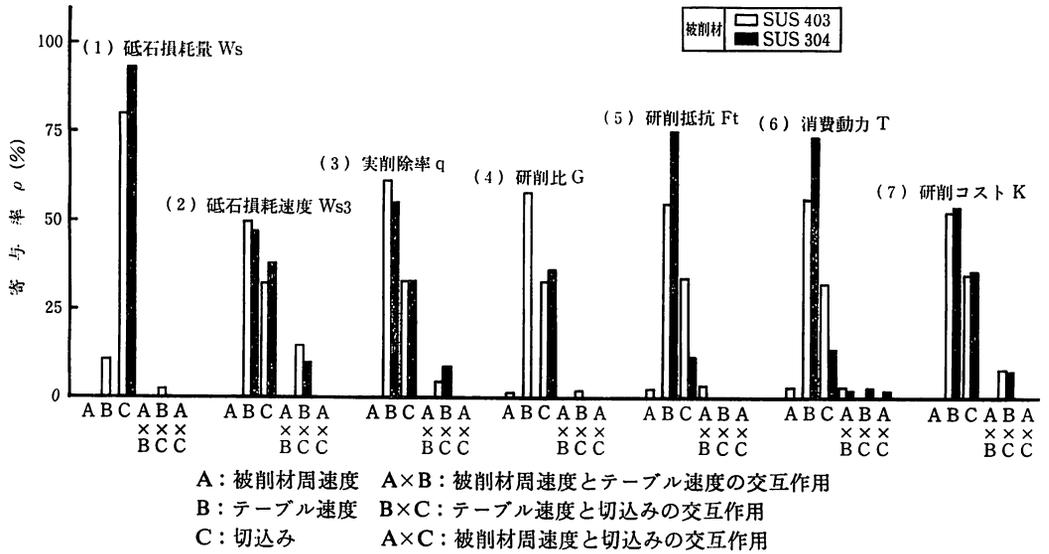


図2 各研削要因と寄与率の関係

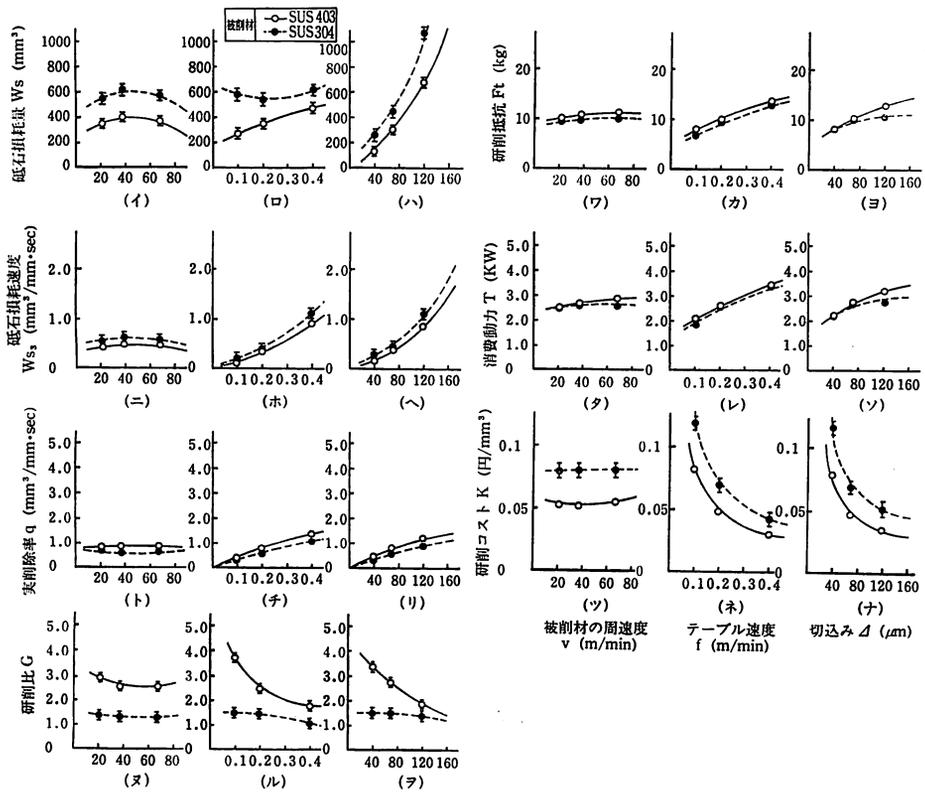


図3 各要因の影響

影響し、被削材周速度に、何らの影響も与えない（図2）。テーブル速度、砥石切込みの増加につれ、研削コストは減少し、SUS403 にくらべ SUS304 は、実削除率において劣るため、同一研削条件の下では、研削コストが高つく（図3、(ツ)、(ネ)、(ナ)）。

以上のことから、各研削要因が各々の測定項目に与える影響、および、増減の傾向を知ることができる。

一般に、採用した3要因のうち、被削材周速度は、他の2要因（テーブル速度、砥石切込み）にくらべ、それぞれの測定項目に与える影響が極めて小さいか、殆んど影響を与えないことがわかる。

図4は、研削コストと実削除率の関係を調べたものである。いずれの被削材周速度においても、実削除率

の増加につれ、研削コストは減少の傾向を示すが、特に、実削除率1.0までの減少率が大きく、以後、実削除率の増加による減少率はゆるやかである。一般に、研削コストは、実削除率に対して最小値を示す最適な研削条件が存在する筈であるが、全研削コスト中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³⁾、実削除率を大きくする条件の方が全研削コストは小さくなる傾向にある。すなわち、現状では、砥石の損耗費に対して人件費の時間単位がかなり大きいことを示している。SUS304 が、SUS403 にくらべ、同一削除率を得るのに研削コストが高つくているのは、SUS304 は、SUS403 にくらべ、材質はかなり粘いため、同一研削条件での削除率

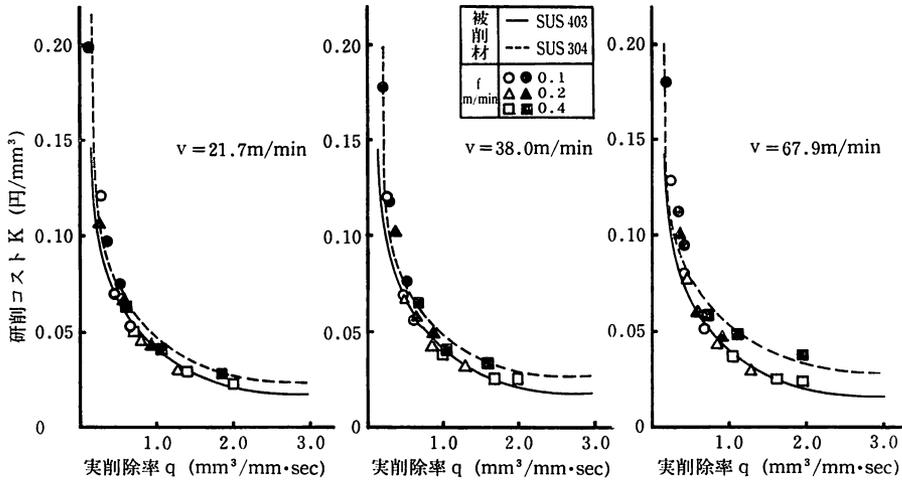


図4 研削コストと実削除率の関係

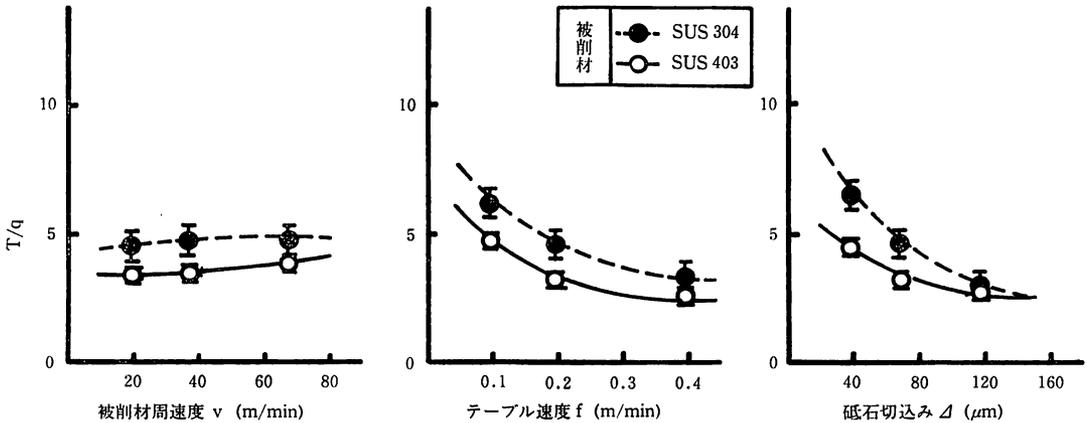


図5 実削除率当りの消費動力の比較

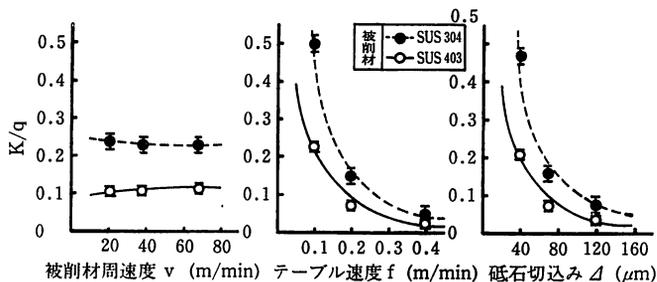


図6 実削除率当りの研削コストの比較

が低い(図3, (ト), (チ), (リ))と考えられる。

図5は、実削除率当りの消費動力 T/q を、図3を求めたと同じ方法で調べたもので、 T/q は、被削材周速度には影響をうけず、テーブル速度、砥石切込みの増加とともに減少する。したがって、同一削除率を得るに必要な電力費は、テーブル速度、砥石切込みが研削盤および砥石の能力の範囲内で可能なかぎり大きい方が安くつくことを意味する。また、SUS304の方が、SUS403の場合にくらべて同一削除率をうるに大きな電力を必要とする事もわかる。

図6は、実削除率当りの研削コスト K/q を、やはり、図3と同じ方法で求めたものであるが、 K/q は、

被削材周速度に無関係で、テーブル速度、砥石切込みの増加につれ、減少していく。すなわち、テーブル速度、砥石切込みの大きい方が K/q が安くなるので、研削盤、砥石の性能の範囲内で、なるべく、大きなテーブル速度と砥石切込みの採用が有利となる。ここでも、SUS304の方が、同一研削条件の下では、 K/q は高くなっている。

3.3 数学モデルの推定

図3により、第1報²⁾にならって、同じ方法で、各研削要因と各測定項目の関係を、つぎの(1)式で推定できるものとする。

表2 計算された回帰係数と判定結果の例 40SH36M8VBE 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	2.702**	0.017	0.027	0.306**
	SUS403	2.496**	0.023*	0.121**	0.329**
砥石損耗速度 W_{s_3}	SUS304	-0.356**	0.011	0.334**	0.304**
	SUS403	-0.502**	0.029**	0.413**	0.318**
実削除率 q	SUS304	-0.246**	-0.003	0.267**	0.209**
	SUS403	-0.100**	0.005	0.252**	0.191**
研削比 G	SUS304	0.110**	-0.014	-0.068**	-0.095**
	SUS403	0.402**	-0.024*	-0.160**	-0.127**
研削抵抗 F_t	SUS304	0.972**	0.005	0.133**	0.046**
	SUS403	1.024**	0.031**	0.114**	0.094**
消費動力 T	SUS304	0.396**	0.004	0.128**	0.045**
	SUS403	0.420**	0.031**	0.109**	0.088**
研削コスト K'	SUS304	-1.161**	0.005	-0.224**	-0.169**
	SUS403	-1.323**	-0.002	-0.210**	-0.159**

** 99%有意 * 95%有意

表3 計算された数学モデルの係数および指数 40SH36M8VBE 砥石

測定項目	係数・指数	ξ	ζ	η	ν	誤差%
	被削材					
砥石損耗量 W_s	SUS304	3.363	0.071	0.091	1.281	17.1
	SUS403	2.424	0.091	0.401	1.380	7.3
砥石損耗速度 W_{s_3}	SUS304	0.014	0.046	1.110	1.273	17.5
	SUS403	0.015	0.113	1.372	1.333	8.4
実削除率 q	SUS304	0.054	-0.014	0.886	0.877	5.0
	SUS403	0.112	0.020	0.838	0.799	7.1
研削比 G	SUS304	3.839	-0.059	-0.225	-0.197	19.0
	SUS403	7.215	-0.093	-0.532	-0.533	8.0
研削抵抗 F_t	SUS304	9.034	0.020	0.441	0.194	8.0
	SUS403	5.796	0.123	0.379	0.394	7.6
消費動力 T	SUS304	2.372	0.078	0.424	0.189	7.6
	SUS403	1.572	0.121	0.364	0.367	7.1
研削コスト K	SUS304	0.454	0.020	-0.743	-0.708	6.7
	SUS403	0.256	-0.008	-0.697	-0.668	9.0

$$f(x) = \xi(v/V)^{\zeta} f^{\eta} d^{\nu} \tag{1}$$

但し $f(x)$ は、1でのべた1)~7)までの各測定項目を表わす。

ここで、推定した(1)式の妥当性の検討の方法については、第1報²⁾にゆずる。

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

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \tag{2}$$

この表において、推定した係数 b_0 と、B および C 要因に対応する係数 b_2, b_3 は、SUS304 の b_2 に有意性が認められない以外は、全て、99%有意となり、その妥当性が認められるが、A 要因に対応する b_1 には、その1部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、或る限られた項目 (**印のついた項目)のみとなり、図2、図3における結果と一致する。

表3は、これらの係数から計算された数学モデル(1)式における係数および指数をまとめたものであり、これらの指数評価からも、各要因の影響の程度を知ることができる。

附図1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。

4. おわりに

40SH36M8VBE 砥石を用いて、SUS304、および SUS403 を円筒重研削して、つぎのことがわかった。

1. 採用した3研削要因のうち、A 要因すなわち、被削材周速度は、他の2要因 (B 要因、テーブル速度、C 要因、砥石切込み) にくらべ、それぞれの測定項目に与える影響は殆どないか、あっても極めて小さいものである。
2. 各測定項目と3要因の関係を、つぎの数学モデルで表現できる。

$$f(x) = \xi(v/V)^{\zeta} f^{\eta} d^{\nu}$$
3. 40SH砥石は、SUS304 に対するよりも SUS403 に対する方が、やや、その性能がよい。

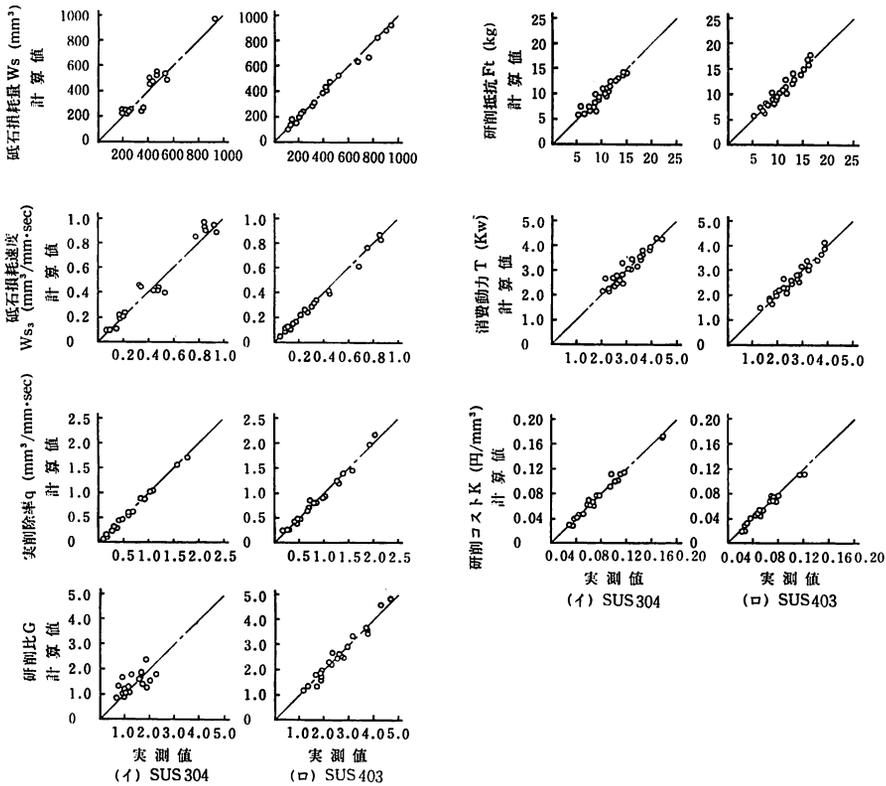
あ と が き

本実験に協力された、青山博史、石井義海、夏越悦郎の3君に対し、また、種々の測定装置の設計製作、その他、種々御協力をいただいた是枝賢一助手に対し、深甚の謝意を表する次第である。

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巻 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1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巻 4号 39 昭56・1.
 - 4) 例えば, 田口玄一 実験計画法 (上) 丸善 1962 15ページ.



附図1 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	21906	2	10953	2.04	
B	26396	2	13198	2.45	
C	3229431	2	1614715	300.24	93.65**
A × B	72414	4	18103	3.37	
B × C	18368	4	4592	0.85	
A × C	25380	4	6345	1.18	
e	43028	8	5378		

(ロ) SUS403

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	13085	2	6542	2.34	
B	197807	2	98903	35.40	11.37**
C	1369187	2	684593	245.02	80.64**
A × B	7256	4	1814	0.65	
B × C	65387	4	16497	5.90	3.24*
A × C	15387	4	3846	1.38	
e	22357	8	2794		

(2) 砥石損耗速度 (W_{s3}) に対する分散分析表
(イ) SUS304

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	59803	2	29901	3.65	
B	3888316	2	1944158	237.12	47.16**
C	3168867	2	1584433	193.25	38.39**
A×B	122371	4	30592	3.73	
B×C	850152	4	212538	25.92	9.95**
A×C	55609	4	13902	1.70	
e	65593	8	8199		

(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	494	2	247	0.21	
B	9477	2	4738	4.08	
C	20154	2	10077	8.67	35.95**
A×B	6221	4	1555	1.34	
B×C	2794	4	699	0.64	
A×C	1144	4	286	0.25	
e	9303	8	1162		

(ロ) SUS403

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	27675	2	13837	4.54	0.35**
B	3126660	2	1563330	512.57	50.59**
C	2020560	2	1010280	531.24	32.66**
A×B	30634	4	7658	2.51	
B×C	933716	4	233429	76.53	14.94**
A×C	4615	4	1153	0.38	
e	24400	8	3050		

(ロ) SUS403

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	7569	2	3784	6.66	2.11*
B	177527	2	88763	156.27	57.75**
C	101124	2	50562	89.02	32.73**
A×B	1343	4	335	0.59	
B×C	8750	4	2187	3.85	2.12*
A×C	4592	4	1148	2.02	
e	4551	8	568		

(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	85	2	42	2.00	
B	30051	2	15025	715.48	55.64**
C	18241	2	9120	434.29	33.74**
A×B	165	4	41	1.95	
B×C	5065	4	1266	60.29	9.24**
A×C	157	4	39	1.86	
e	171	8	21		

(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	ρ (%)
A	4576	2	2288	0.46	
B	1496809	2	748404	151.41	75.52**
C	241084	2	120542	24.39	11.74**
A×B	66705	4	16672	3.37	
B×C	69272	4	17318	3.50	
A×C	51008	4	12752	2.58	
e	39548	8	4943		

(ロ) SUS403

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	141	2	70	1.59	
B	46501	2	23250	528.41	60.72**
C	25253	2	12626	286.95	32.92**
A×B	295	4	73	1.66	
B×C	3687	4	921	20.93	4.59**
A×C	208	4	52	1.18	
e	356	8	44		

(ロ) SUS403

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	80538	2	40269	18.77	2.93**
B	1449781	2	724890	337.94	55.58**
C	900289	2	450144	209.86	34.45**
A×B	110801	4	27700	12.91	3.93**
B×C	14387	4	3596	1.68	
A×C	27711	4	6927	3.23	
e	17165	8	2145		

(6) 消費動力 (T) に対する分散分析表
(イ) SUS304

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	551	2	275	1.51	
B	94891	2	47445	260.69	73.86**
C	18116	2	9058	49.77	13.87**
A×B	4046	4	1012	5.56	2.59*
B×C	5000	4	1250	6.87	3.34*
A×C	3910	4	977	5.37	2.49*
e	1461	8	182		

(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	ρ (%)
A	9	2	4	0.07	
B	29746	2	14873	270.42	54.37**
C	19638	2	9819	178.53	35.83**
A×B	78	4	19	0.35	
B×C	4368	4	1092	19.85	7.61**
A×C	220	4	55	1.00	
e	447	8	55		

(ロ) SUS403

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	5153	2	2576	17.06	3.42**
B	80592	2	40296	266.86	56.53**
C	46830	2	23415	155.07	32.76**
A×B	5469	4	1367	9.05	3.43**
B×C	1239	4	309	2.05	
A×C	1534	4	383	2.54	
e	1209	8	151		

(ロ) SUS403

要因	S	ϕ	V	F_0	ρ (%)
A	26	2	13	0.62	
B	12480	2	6240	297.14	53.46**
C	8400	2	4200	200.00	35.93**
A×B	100	4	25	1.19	
B×C	2045	4	511	24.33	8.43**
A×C	44	4	11	0.52	
e	169	8	21		