定荷重研削切断加工に関する研究 (第1報)*

—実験計画法に基づく研削切断特性の解析—

長谷川 素由** 中 西 佑 二***

Study on the Abrasive Cut-off Operation by
the Constant Load (1st Report)
—Characteristics of Abrasive Cut-off Operation
based on the Experimental Design—

Motoyoshi HASEGAWA and Yuji NAKANISHI

The characterization of the abrasive cut-off operation by the constant load system has been evaluated with the experiment of the high carbon steel, S50C, by the number of cut-off operations, the volume of metal removed, the cumulative grinding time, the grinding force, the cumulative volume of wheel consumed, the workpiece feed rate, the grinding ratio and the surface roughness under a 2^3 factorial design. It has been shown that the optimal grinding condition selected from the comprehensive viewpoint of all characteristic values is obtained by

the grinding velocity ($V=4800$ m/min) at the high level and the length of cut ($l=5$ mm under the constant width 22 mm) and the load ($W=98$ N) at the low level. To obtain the maximum grinding ratio, the optimal condition is realized by the grinding velocity ($V=4800$ m/min) and the length of cut ($l=5$ mm) at the high level and the load ($W=98$ N) at the low level. On the other hand, the best condition from the viewpoint of the workpiece feed rate is attained by the grinding velocity ($V=4800$ m/min) and the load ($W=196$ N) at the high level and the length of cut ($l=5$ mm) at the low level. Multiple regression equation for each characteristic values is derived at the high significance.

Key words: abrasive cut-off operation, grinding ratio, workpiece feed rate, optimal grinding condition, multiple regression.

1. 緒 論

研削切断加工法に関する研究を概観すると、それらは被削材の送りを一定とする定速送り研削切断機構の解明もしくはその加工能率の向上に重点が置かれている^{1)~6)}。しかし、研削切断加工としては定荷重研削加工方式による場合も多く、この方面の研究に関しては二三の報告⁷⁾⁸⁾を見る程度である。そこで、定荷重送り方式による研削切断加工法の加工特性を解析し、その加工能率の向上を図るための最適加工条件を明らかにするため 2^3 要因計画法に基づき炭素鋼を各水準で100回まで切断実験を行った。切断加工特性としては、特に砥石損耗容積、研削比、研削切断所要時間、送り速度、研削切断抵抗および仕上面粗さを取り上げた。これらの加工特性値と加工条件との定量的、定性的傾向を把握するため多変量解析を試み、その主効果および交互作用要因を明らかにするとともに最適加工条件について考察した。

2. 実 験

2.1 実験装置および実験条件

岡本製作所製平面研削盤に7.5 kW電動機と無段変速

機を取付け、砥石速度6000 m/min (回転数5000 rpm)まで研削できる装置を試作し、これを実験装置として使用した。図1は、実験装置および切断機構の概略を示す。切断方法は、定荷重研削切断方式で動力計(佐藤工機製)に被削材を取付けて図の移動式試料台に固定し、所望の荷重で強制切込み切断を行った。表1は、採用した実験条件を示す。実験は 2^3 要因計画法に基づき表2の実験マトリクスに従い各水準につき切断回数100回まで実験を行った。また、各実験を行うに当たり、砥石の半径方向の形状誤差を精度5/100 mm以内に保つため同一の被削材を用いて予備研削切断を行った。砥石の半径方向の損耗量は、砥石外周を8等分割した8か所で精度1/100 mmのダイヤルゲージで測定しその平均値から求めた。実験は 2^3 要因計画の中水準についても行った。

2.2 実験結果

2.2.1 切断回数と切断特性

定荷重研削切断加工の加工特性として、ここでは、累積砥石半径損耗量 ΔR (mm)、累積砥石損耗容積 V_c (cm^3)、平均研削比 $\bar{G}$ 、中心線平均粗さ R_a (μm)、平均法線・接線研削抵抗 $\bar{F}_t$, $\bar{F}_n$ (N)、2分力比 η ($=\bar{F}_t/\bar{F}_n$)、累積切断所要時間 T (s)、平均送り速度 $\bar{v}$ (mm/s)、およびその標準偏差 σ と変動係数 c をもって表すことを考えた。図2(a)~(h)は、表2の実験番号に対応する切断特性の測定結果である。研削比 $\bar{G}$ は、被削材の切断容積と切

* 原稿受付 昭和55年7月9日。昭和55年度精機学会春季大会学術講演会(昭和55年3月30日)にて発表。

** 正 会 員 防衛大学校(横須賀市走水1-10-20)

*** 正 会 員 東京都立工業高等専門学校(東京都品川区東大井1-10-40)

(a) 装置の概要

(b) 切断機構

図1 定荷重研削切断装置と切断機構の概要

表1 実験条件

項目	内容
切断砥石	A 30 TB (半径 202.5 mm)
被削材 および 寸法形状	S 50 C (H _B =216) 幅 $b=22$ mm (一定) 高さ $l=5, 15$ mm 切断幅 $b=3.8$ mm
研削条件	砥石周速度 $V=2\,000, 4\,800$ m/min 送り荷重 $W=98\{10\}, 196\{20\}$ N {kgf} 乾式切断

表2 実験マトリクス

実験 番号	コード化されない計画マトリ クス		コード化された 計画マトリクス			
No.	砥石周速度 V (m/min)	被削材 高さ l (mm)	送り荷重 W (N) {kgf}	X_1	X_2	X_3
1	2 000	5	98 {10}	-1	-1	-1
2	4 800	5	98 {10}	+1	-1	-1
3	2 000	15	98 {10}	-1	+1	-1
4	4 800	15	98 {10}	+1	+1	-1
5	2 000	5	196 {20}	-1	-1	+1
6	4 800	5	196 {20}	+1	-1	+1
7	2 000	15	196 {20}	-1	+1	+1
8	4 800	15	196 {20}	+1	+1	+1
9	3 400	10	147 {15}	0	0	0

断で損耗した砥石の容積との割合である。各図の $\bar{G}$ は、10回切断したときの平均値をプロットしてある。実験結果はばらつくが、図は各特性値の切断回数 t に対応する実験条件の違いによる応答をよく示している。また、実

験条件の違いによる特性値の変化をその平均値で整理すると表3ようになる。この実験結果の特徴は、二分力比 η が $0.43 \sim 0.56$ の範囲でほぼ一定していること、実験番号 No. 3, 4, 5 の平均送り速度の変動係数 $c(=\sigma_v/\bar{v})$ の値が高いことである。最適な加工条件を判定するに当たり、ここでは研削比 $\bar{G}$ と送り速度 $\bar{v}$ は最大に、累積砥石損耗容積 V_c 、法線研削抵抗 $\bar{F}_n$ 、二分力比 η 、送り速度の変動係数 c 、累積切断所要時間 T および表面粗さ R_a は最小になる条件を最適加工条件と考えた。その順位表を作成すると表4ようになる。いま、8項目の特性値に関して上位3位までの総合順位を実験番号で列記すると、No. 2, No. 6, および No. 4 の順になる。この分析結果は次のことを示している。すなわち、定荷重研削切断加工の加工能率の向上を図るためには、砥石速度は高水準 ($V=4\,800$ m/min) に、被削材の高さおよび荷重は低水準 ($l=5$ mm, $W=98$ N) に設定する必要がある。しかし、特に研削比だけを大きくしたい場合は、砥石速度と被削材の高さを高水準 ($V=4\,800$ m/min, $l=15$ mm) に、荷重は低水準 ($W=98$ N) に設定するのがよい。また、無振動、高速、最少切断所要時間に重点を置く場合は、砥石速度と荷重を高水準 ($V=4\,800$ m/min, $W=196$ N) に、被削材の高さは低水準 ($l=5$ mm) に設定するのが最適である。また、砥石損耗容積をできるだけ少なくするためには、当然予想されることであるが被削材の高さに関係なく、荷重は低水準に、砥石速度は高水準に設定する必要がある。

2.2.2 切断特性の多変量解析

特性値に及ぼす加工条件の影響を定量的に明らかにするために多変量解析を試みる⁹⁾。多変量解析を行うに当たって、加工条件 V, l, W を次式でそれぞれ X_1, X_2, X_3 に変数変換し、表3のデータを用いる。

$$X_1 = \frac{V-3\,400}{3\,400-2\,000}, \quad X_2 = \frac{l-10}{10-5}, \quad X_3 = \frac{W-15}{15-10} \quad (1)$$

コード化された加工条件 X_1, X_2, X_3 は、表2にあわせて示してある。特性値、ここでは累積砥石半径損耗量 ΔR (mm)、累積砥石損耗容積 V_c (cm³)、平均研削比 $\bar{G}$ 、中心線平均粗さ R_a (mm)、累積研削切断所要時間 T (s)、および平均送り速度 $\bar{v}$ (mm/s) に関する解析結果は下記のようになった。式には決定係数 R^2 の値も付記してある。

$$\begin{aligned} \Delta R = & 21.989 - 13.17X_1 + 2.819X_2 + 12X_3 \\ & - 1.089X_1X_2 - 6.659X_1X_3 - 1.039X_1X_2X_3 \\ & (R^2 = 99.6\%) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_c = & 96.027 - 54.71X_1 + 11.15X_2 + 49.46X_3 \\ & - 3.215X_1X_2 - 24.8X_1X_3 - 3.338X_1X_2X_3 \end{aligned}$$

$l \times h = 5 \times 22$ mm, $V = 2000$ m/min, $W = 98$ N
(a) No. 1

$l \times h = 15 \times 22$ mm, $V = 2000$ m/min, $W = 98$ N
(c) No. 3

$l \times h = 5 \times 22$ mm, $V = 4800$ m/min, $W = 98$ N
(b) No. 2

$l \times h = 15 \times 22$ mm, $V = 4800$ m/min, $W = 98$ N
(d) No. 4

図2 定荷重研削切断の

$l \times h = 5 \times 22$ mm, $V = 2000$ m/min, $W = 196$ N
(e) No. 5

$l \times h = 15 \times 22$ mm, $V = 2000$ m/min, $W = 198$ N
(g) No. 7

$l \times h = 5 \times 22$ mm, $V = 4800$ m/min, $W = 196$ N
(f) No. 6

$l \times h = 15 \times 22$ mm, $V = 4800$ m/min, $W = 196$ N
(h) No. 8

加工特性 (S 50 C)

表3 炭素鋼 (S 50 C) の 100 回切断後の切断特性値

No.	V_c (cm^3)	$\bar{G}$	R_a (μm)	$\bar{F}_t$ (N)	$\bar{F}_n$ (N)	$\eta = \bar{F}_t / \bar{F}_n$	T (s)	$\bar{v}$ (mm/s)	σ_v (mm/s)	$c = \sigma_v / \bar{v}$
1	69.35	0.603	7.38	48.31	98.78	0.489	298.3	7.38	0.264	0.036
2	9.28	4.505	3.40	42.04	82.71	0.508	130.4	16.87	1.733	0.103
3	83.58	1.500	0.86	48.12	108.19	0.445	1091.6	2.02	0.390	0.186
4	24.02	5.220	0.94	45.37	97.31	0.466	706.7	3.11	0.595	0.184
5	203.39	0.206	5.23	95.16	219.23	0.434	163.7	13.44	2.744	0.219
6	57.47	0.727	7.24	99.18	190.02	0.522	47.8	46.07	1.176	0.025
7	246.62	0.509	0.92	122.11	218.83	0.558	423.1	5.20	0.281	0.054
8	74.49	1.683	3.86	94.86	177.18	0.535	173.8	12.66	0.842	0.050
9	59.34	1.869	3.70	71.15	128.87	0.552	203.1	10.83	0.285	0.026

表4 実験条件に対する特性値の順位表

No.	実験条件			特性値								順位
	V (m/min)	l (mm)	W (N)	V_c	$\bar{G}$	$\bar{F}_n$	η	$\bar{v}$	c	T	R_a	
1	2000	5	98	4	6	3	4	5	2	5	8	6
2	4800	5	98	1	2	1	5	2	5	2	4	1
3	2000	15	98	6	4	4	2	8	8	8	1	5
4	4800	15	98	2	1	2	3	7	7	7	3	3
5	2000	5	196	7	8	8	1	3	6	3	6	7
6	4800	5	196	3	5	6	6	1	1	1	7	2
7	2000	15	196	8	7	7	8	6	4	6	2	8
8	4800	15	196	5	3	5	7	4	5	4	5	4

備考 特性値の順位判定規程: $V_c, F_n, \eta, c, T, R_a \rightarrow \min, \bar{G}, \bar{v} \rightarrow \max$

$$(R^2=99.75\%) \quad (3)$$

$$\bar{G} = 1.8689 + 1.164X_1 + 0.3586X_2 - 1.088X_2$$

$$+ 0.0584X_1X_2 - 0.7414X_1X_3$$

$$+ 0.1039X_1X_2X_3 \quad (R^2=99.9\%) \quad (4)$$

$$R_a = 3.729 + 0.131X_1 - 2.084X_2 + 0.584X_3$$

$$+ 0.624X_1X_2 + 1.106X_1X_3 - 0.391X_1X_2X_3$$

$$(R^2=99.6\%) \quad (5)$$

$$T = 379.41 - 114.7X_1 + 219.4X_2 - 177.3X_3$$

$$- 43.8X_1X_2 + 23.43X_1X_3 + 10.47X_1X_2X_3$$

$$(R^2=86.3\%) \quad (6)$$

$$\bar{v} = 13.34 + 6.334X_1 - 7.596X_2 + 5.999X_3$$

$$- 4.196X_1X_2 + 3.689X_1X_3 - 2.096X_1X_2X_3$$

$$(R^2=95.53\%) \quad (7)$$

表5は、一例として研削比 $\bar{G}$ に関する回帰分析表および分散分析表を示したものである。上式はそれぞれの決定係数 R^2 の値がかなりよいことから有意性が極めて高いことを示している。また、この点に関しては、各式を表3の中水準 ($X_1 = X_2 = X_3 = 0$) の実験結果 No. 9 と比較しても、また表5の t 分布値の計算結果からも適合性の高いことがよくわかる。従って、上式(2)~(7)は、所望の特性値を得るための加工条件、また加工条件が与えられたときに、その特性値の平均値を定量的に予測す

表5 平均研削比 $\bar{G}$ の回帰分析表

a)			
要因	単純相関	回帰係数	t 分布値
X_1	0.647	1.1640	26.23
X_2	0.199	0.3586	8.08
X_3	-0.605	-1.0880	-24.52
X_1X_2	0.032	0.0584	1.31
X_1X_3	-0.412	-0.7414	-16.71
$X_1X_2X_3$	0.058	0.1039	2.341

備考 推定値の標準誤差=0.1255
 t 分布値=2.34 (有意水準 5%)

b)				
変動因	自由度	平方和	分散	分散比
回帰平方和	6	0.016	4.3089	272.72
残差平方和	1	25.853	0.0158	
全変動	7	25.869		

備考 $F(1, 7)$ 値=5.59 (有意水準 5%)

る上からも有用である。次に各特性値に及ぼす加工条件の主効果および交互作用の重要度を、この解析結果を基に調べると、

- (1) 砥石半径損耗量、累積砥石損耗容積、研削比に關しては、① 砥石速度、② 荷重、③ 砥石速度と荷重の交互作用
- (2) 中心線平均粗さに関しては、① 被削材の高さ、② 研削速度と被削材の高さの交互作用
- (3) 累積研削切断所要時間に関しては、① 被削材の高さ、② 荷重、③ 砥石速度
- (4) 平均送り速度に関しては、① 被削材の高さ、② 砥石速度、③ 荷重

の順にその効果が大きいことがわかる。また、加工条件、すなわち砥石速度、被削材の高さおよび荷重が各特性値に及ぼす効果を分析すると、

- (1) 砥石速度を増加させると、砥石半径損耗量、累積砥石損耗容積および累積研削切断所要時間を減少させ、平均研削比および平均送り速度を増大させる。

- (2) 被削材の高さを大きくすると、中心線平均粗さと平均送り速度を減少させ、累積研削切断所要時間を増大させる。
- (3) 荷重を増大させると、砥石半径損耗量、累積砥石損耗容積および平均送り速度を増大させ、平均研削比および累積研削切断所要時間を減少させることがわかった。

3. 結 論

炭素鋼 S 50 C の定荷重研削切断の加工特性を 2³ 要因計画法で各水準につき切断回数 100 回まで実験し、解析した結果、下記の諸点が明らかになった。

- (1) 各特性値を総合した最適加工条件は、砥石速度は高水準 (4 800 m/min) に、被削材の高さおよび荷重は低水準 (5 mm, 98 N, ただし幅 22 mm 一定) に選定した場合に得られる。
- (2) 研削比を最大にするためには、砥石速度と被削材の高さは高水準 (4 800 m/min, 15 mm) に、荷重は低水準 (98 N) に設定するのが最適である。また、研削比に及ぼす加工条件の重要度は、① 砥石速度、② 荷重、そして ③ 被削材の高さの順である。
- (3) 無振動、高速、最少研削切断所要時間を重点に置く場合は、砥石速度と荷重を高水準 (4 800 m/min, 196 N) に、被削材の高さは低水準 (5 mm) に設定するのが最適である。
- (4) 加工条件と各特性値との関係は、① 砥石速度を増加させると、砥石の損耗や研削切断所要時間を減少させ、研削比と送り速度を増大させる効果がある。
- ③ 荷重を増加すると、砥石の損耗と送り速度を増大

させ、研削比と研削切断所要時間を減少させる効果がある。

- (5) 各特性値と加工条件との関係を多変量解析した結果、有意水準 5% のもとで決定係数が 86.3% から 99.9% の高有意性を備えた回帰方程式が導出できた。

最後に、本研究を行う上で有益なご助言を頂きました東京都立工業高等専門学校山崎慎三教授、ならびに実験装置の試作に当たりご指導を頂きました大内順教授、鈴木林造教授に深甚なる謝意を表します。

文 献

- 1) M. C. Shaw, D. A. Farmer & K. Nakayama: Mechanics of the Abrasive Cut-off Operation, Trans. ASME, Ser. B, **89**, 3, (1967) 495.
- 2) D. A. Farmer & M. C. Shaw: Economics of the Abrasive Cut-off Operation, Trans. ASME, Ser. B, **89**, 3, (1967) 514.
- 3) 白山政敏, 能登谷久公, 村中利吉: 研削切断砥石による切断機構と最適切断条件, 国立富山高専紀要, **5**, 1 (1971) 85.
- 4) M. C. Shaw: Cost Reduction in Stock Removal Grinding Ann. CIRP, **24**, 2, (1975) 539.
- 5) R. Murata & M. C. Shaw: The Abrasive Cut-off Operation with Oscillation, Trans. ASME, Ser. B, **98**, 2, (1976) 410.
- 6) 松尾哲夫, 小田博道: 研削切断の高効率化に関する研究, 精密機械, **44**, 2 (1978) 1489.
- 7) 小野浩二, 藤井則久: 加圧研削機構について, 防衛大学校理工学研究報告, **7**, 2 (1969) 315.
- 8) 佐藤耕吉, 山本富才, 木村康之: 軟鋼片の研削切断, 防衛大学校理工学研究報告, **8**, 1 (1970) 9.
- 9) R. M. Bethea, B. S. Duran and T. L. Boullion: Statistical Methods for Engineers and Scientists, Marcel Dekker, New York, N. Y., (1975) 297.