研 究

ショットピーニングのエリアカバレッジについて*

——噴射加工の研究 (第1報)——

飯 田 喜 介** 当 倉 勝 次**

On the Basic Properties of Shot Peening

——On the Area-Coverage (1st Report)——

Kisuke IIDA, Katsuji TOSHA

This study describes the characteristic of the area-coverage obtained from the experiments with airless blasting machine.

The results obtained are as follows;

(1) The area-coverage consists of following three factors; the first is the number of dent per unit time and unit area on the workpiece, the second is the total area of dent per unit time and unit area, and the third is the rate of area-coverage for peening time.

(2) The relation between area-coverage $\lambda(\%)$ and the total area of dent per unit time and unit area $Q(\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}^2)$ and the blasting time $t(\text{s})$ is as follows;

$$\lambda = k_\lambda \cdot Q \cdot t^m$$

here

$$m=0.6\sim 1.0, k_\lambda=0.95\sim 1.0 \text{ for } \lambda < 80\%$$

$$m=0.05\sim 0.1, k_\lambda=2.0\sim 7.0 \text{ for } \lambda > 80\%$$

1. 緒 言

現在までの噴射加工には加工量を明確に示すものがなく、加工量の記述に「ショット何キログラムを何秒間投射した」というような表現をする場合が多く見受けられるが、投射されたショットが加工面にどの程度当たって加工が行なわれたか不明である。また加工量の目安に加工した面積と加工する全面積とを比で示したエリアカバレッジ¹⁾があるが、加工条件によって加工面に生成される痕の大きさが異なり、見かけの加工量を示すだけのものであって、加工量の表現としては不適当な場合がある。

以上のような点を明確にするため、本報はショットピーニングの実験から投射条件とエリアカバレッジとの関係を求め、加工量としてのエリアカバレッジの特性を明確にしたものである。

2. 従 来 の 理 論

投射条件とエリアカバレッジとの関係は SAE¹⁾ では次のようになっている。試験片がコンベアによって投射された粒子のストリームの中を通る回数を基準にしてこ

れをサイクルと呼び、

C_1 : 1 サイクル後のエリアカバレッジ

C_n : n サイクル後のエリアカバレッジ

n : サイクルの数

とすると、

$$C_n = 1 - (1 - C_1)^n \quad (1)$$

となるとしている。

また上正原²⁾によればピーニングを受ける面積を A とし、時間 t において面積 S だけショットによる痕でおおわれたとき、単位時間あたりに単位面積内で λ だけの面積が加工されたとし、

$$dS = (A - S) \cdot \lambda \cdot dt$$

$t=0$ のとき $S=0$ として

$$C = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

ただし $C=S/A$

式(1)と式(2)は無関係ではなく、式(2)に $t=t_1 \cdot n$, $\lambda \cdot t_1 = C_1$ を代入し、 C_1 の2乗以上を0とすれば、式(1)と同じ結果になる。

しかし、式(1)ならびに式(2)はフルカバレッジになるには投射時間が無限大にならなければならない、さらにこの考え方ではフルカバレッジ以上の加工はあり得ないことになり、これまで報告³⁾してきたようなフルカバレッジ以上の加工量を論ずることができない。フルカバレッジタイム以上の加工をした場合、試験片の性質によっては

* 原稿受付 昭和47年4月5日。昭和46年度精機学会春季大会学術講演会(昭和46年4月7日)にて発表。

** 正 会 員 明治大学工学部(川崎市多摩区生田5158)

加工面の加工硬化の状態が変化する³⁾ ことなどからも, 上述の考え方で噴射加工の一般を論ずるには明らかに不十分なものがある。

3. 実験装置および方法

3.1 ショットピーニング

図1は遠心力式投射機の原理図を示すもので, 実験に用いた投射機は約30のパターンを持ち, パターンの中央部でのショットの分散状態はほぼ均一である。

3.2 投射時間 t (s)

投射時間は1秒間, 2秒間, 3秒間, 4秒間, 8秒間をそれぞれ加工したのち, エリアカバレッジの増加状態を見て適当な秒間隔によってフルカバレッジに至るまで投射を行なった。

3.3 投射速度 v (m/s)

後述する式(4)⁴⁾ により痕径と投射速度との関係からあらかじめ羽根車の回転数と投射速度の関係を求め, 羽根車の回転数より投射速度を算出した。

3.4 エリアカバレッジ λ (%)

それぞれの時間投射した後の加工面 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ を撮影し, その写真を10倍に引伸して痕の部分の切抜き, 感量 1 mg の自動天びんで重量を測定して痕の部分と加工面との比を求め, この操作を同一条件で加工した3個の試験片に対して行ない, その平均値からエリアカバレッジを決定した。

3.5 痕密度 N (個/ $\text{s} \cdot \text{cm}^2$)

1辺が 25 mm の正方形の鏡面仕上をした表面をもつ試験片をショットのパターンの中央部に固定し, 投射機のシャッタの操作により1秒間の投射を行ない, そのとき試験片に生じた痕の個数を測定し, 単位面積あたりの痕の数を求め, これを「痕密度」と呼ぶことにした。実験は5回繰返して行ない, その平均値から痕密度を決定

表1 実験条件

	材 質	組 織	かたさ H_V	寸 法 (mm)
試 験 片	S 15 C	層状パーライト (LP)	120
		球状パーライト (SP)	180	
	S 45 C	層状パーライト (LP)	220	
		球状パーライト (SP)	250	
ショット	材 質	鋳 鋼		
	かたさ H_V	800程度		
	直径 D (mm)	1.1, 1.6, 2.2, 3.7		
投射速度 v (m/s)	17, 21, 25, 29, 35			
導管の内径 D_i (mm)	12, 16, 20, 25, 31			

した。また, ショットのパターン内での痕密度の分布状態を調べる場合は, 1辺が 200 mm の正方形の表面をもつ試験片を用いた。

3.6 痕径 d (mm)

倍率が30倍の工具顕微鏡を使用して痕の縦径と横径を直角に測定し, それを平均して平均径とし, 20個の痕の平均径の平均値を求め, これを痕径とした。

3.7 実験条件

試験片, ショット, 投射速度ならびに導管の内径についての実験条件は表1に示す。

4. 実験結果および考察

ショットピーニングによって加工された表面の外観がどのようなかを示したものが図2である。図2は直径が 1.6 mm のショットを 16 mm の内径をもつ導管を使って 17 m/s と 29 m/s の投射速度で加工した場合で, 試験片の材質は S45C の層状パーライト組織である。百分率で示しているのがそのときのエリアカバレッジであり, 本報の実験結果では $10 \sim 40$ 秒の加工によりフルカバレッジに達している。フルカバレッジは30倍の顕微鏡下においても未加工部分がないことを確認した。

図3, 図4は横軸に投射時間を取り, 縦軸にエリアカバレッジをとったもので, S45C の層状パーライト組織の試験片の場合(図3)と, 加工硬化特性の異なる球状パーライト組織³⁾ の場合(図4)である。両図に示したように, ショットの直径が同一でも投射速度が変化すればエリアカバレッジも異なり, 投射速度が同一の場合でもショットの直径が異なればエリアカバレッジも変化する。なお図中の I および II については後述する。

単位時間あたりのエリアカバレッジに影響を与えるものには, ① 投射機の性能によるものと, ② 投射条件によ

図1 遠心力式投射機

試験片: S45C LP, ショットの直径: 1.6 mm, 投射速度:
(a)~(e) 17 m/s, (f)~(j) 29 m/s, 導管の内径: 16 mm

図2 エリアカバレッジの状態

るものがあり, 前者の場合はショットのパターンおよび痕密度があり, 後者の場合, ショットについては直径, 投射速度, かたさ, 試験片については表面の状態な

試験片: S45C 層状パーライト組織

図3 エリアカバレッジと投射時間との関係 (1)

試験片: S45C 球状パーライト組織

図4 エリアカバレッジと投射時間との関係 (2)

らびにかたさなどによって加工面に生成される痕の大きさの差異によるものなどである. まず前者の場合, ショットのパターンは本実験の範囲内では $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ の試験片で吟味した結果ほぼ一定であった. 痕密度は図1の構造からもわかるようにホップから羽根車へ送り出されてくるショットの流量によって決定されるものである. ホップから導管を経て羽根車の中心部に至るまでのショットの流れの過程でショットの流量に影響を及ぼすと考えられるものには, ホップにあるショットの量, 導管の内径, 導管の出口と羽根車の中心部との間隙などがある. ホップにあるショットの量は流体の場合のように量の多少によって落差が異なり, それによって流出量が異なるかどうかであり, 導管の内径は流出量そのものに直接影響する. 導管の出口と羽根車の中心部との間隙は, 図1(b)に示すように導管を流れ落ちるショットをさえぎることができる. このようなことから, これらの点を実験的に吟味した結果, ホップが本実験に用いた 60kg のショットを入れうる程度のもものでは, ホップの中のショットの量の多少にかかわらず, 一定の速度でショットは流出した. 導管の出口と羽根車の中心部との間隙はシ

9	10	12	17	22	25	18	10	8	8
12	18	29	31	31	31	25	24	10	6
16	23	34	40	42	41	35	26	14	13
20	20	41	56	54	55	42	34	21	13
27	28	43	54	57	61	50	42	24	20
33	35	43	53	55	58	51	42	27	15
21	30	45	50	57	50	49	38	26	17
20	26	35	37	48	47	46	30	24	14
10	19	23	30	36	36	35	34	28	8
8	11	17	23	23	26	16	17	8	8

(a) 導管の内径20mm

20	33	41	45	49	51	48	32	33	24
32	39	60	59	76	53	56	48	39	40
34	50	57	70	75	89	80	63	50	42
57	74	72	72	102	105	98	78	53	50
67	73	79	102	125	120	101	82	67	69
63	57	73	100	130	125	102	89	70	62
53	57	60	86	105	103	102	80	70	51
35	49	56	70	71	84	71	76	56	50
31	33	47	60	62	70	57	56	54	42
29	36	30	48	58	54	61	42	30	25

(b) 導管の内径31mm

投射条件: $D=2.2\text{ mm}$, $v=17\text{ m/s}$

図5 痕密度の分布 (個/s·cm²)

(a) 痕密度とショットの直径との関係

(b) k_{N1} と導管の内径との関係

図6

ットの流出をさえぎるような状態ではなく、自由に流出しうる状態にして実験を行なった。導管の内径は 20 mm のものと 31 mm のものを使用して同一の投射条件で実験した結果の例が図5で、図に示すような痕密度分布となり、導管の内径は流量に直接影響を与えている。投射条件はショットの直径が 2.2 mm、投射速度が 17 m/s、投射時間は 1 秒間であり、図の閉曲線は痕密度がほぼ等しいと思われるところを示すものである。投射速度を変化させて実験した結果、この閉曲線の形状はそれほど変化することなく痕密度も変化しなかった。

さらに上記以外の種々の径の導管を用いて痕密度の測定を行なった結果が図6で、

$$N = k_N \cdot D_i^2 \cdot D^{-3} \quad (3)$$

となり、痕密度はショットの投射速度には無関係であった、導管の内径の 2 乗すなわち導管の断面積と、ショットの直径の 3 乗すなわち 1 個のショットの体積に反比例

する結果を示している。前述のようにショットの流出量が導管によって一定であり、投射機によってパターンが決まることからショットの分散流出状態が定常となり、ショットのストリームの中での試験片の加工状態が決められる。したがって投射重量が投射時間とともに増加する結果、試験片表面に現われる加工状態を示す痕密度は投射時間とともに増加することになる。

次に加工面に生成される痕径と投射条件について検討した。

粒子の衝突によって試験片の表面にできる痕についての研究は W. C. Maurer と J. S. Rinehart の砂岩ならびに花崗岩などに鋼球を投射する実験³⁾と、大越と飯田の鋼に鋼球を投射する実験⁴⁾などがあるが、いずれも痕径は投射速度の 1/2 乗に比例するという結果を示しており、後者では次式に示すような投射鋼球の直径に比例するという結果が得られている。

$$d = k_d \cdot D \cdot v^{1/2} \quad (4)$$

$$k_d^2 = 3.70 \times 10^{-3} (1 - 0.148 \times 10^{-2} H_V)$$

図7および図8は S45C の組織の異なる 2 種類の試験片にショットピーニングを行ない、痕径と投射速度ならびにショットの直径との関係を示したもので、図7は層状パーライト組織の場合である。その結果、次の関係式が成立する。

$$d = k_{d1} \cdot D \cdot v^{1/2} \quad (5)$$

図8は球状パーライト組織の場合で、図に示すようにこの関係は図7の場合と同一の傾向となり、試験片の組織やかたさによる D , v の指数に変化はなく、式(5)の係数 k_{d1} のみが変わるだけであった。

さらに試験片のかたさ (H_V) と痕径との関係を検討するために、式(5)の係数 k_{d1} と試験片のかたさとの関係を求めたものが図9で、両者の関係は次式に示すようになった。

$$k_{d1} = k_d \cdot H_V^{-1/4} \quad (6)$$

以上を総合すると痕径と投射条件との関係は次式のよう表わすことができる。

$$d = k_d \cdot D \cdot v^{1/2} \cdot H_V^{-1/4} \quad (7)$$

本実験では $k_d = 0.19$ であった。

式(7)は式(4)と同一の関係をかたさの指数関数として表わしたもので、両者の差は表2に示すように、きわめて少ない。

痕密度を N (個/s·cm²)、単位時間・単位面積あたりの痕面積の総和 (すなわち加工面積) を「加工密度 Q (cm²/s·cm²)」とし、加工面にできる痕に重なりがないとした場合 (したがって最大加工面積の場合) には次の

試験片: S45C 層状パーライト組織
(a) 痕径とショットの直径との関係 (b) k_{d2} と投射速度との関係

図 7

試験片: S45C 球状パーライト組織
(a) 痕径とショットの直径との関係 (b) k_{d2} と投射速度との関係

図 8

図 9 式(5)の係数 k_{d1} と試験片の硬度との関係

関係が成立する。

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \cdot N \quad (8)$$

式(7)と式(3)より

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot k_N \cdot k_d^2 \cdot D^2 \cdot D^{-1} \cdot v \cdot H_V^{-1/2} \quad (9)$$

したがって単位時間のエリアカバレッジ ($\lambda_{t=1}$) は加工した面積 (B) と、加工する全面積 (A) との比であるから、 $\lambda_{t=1} = (B/A) \times 100$, $B = A \cdot Q$ より

$$\lambda_{t=1} = Q \times 100 \quad (\%) \quad (10)$$

表 2 式(4)と式(5)の係数 k_d の比較

かたさ (H_V)	120	150	200	250
係 数				
式(4)の k_d	0.055	0.054	0.051	0.048
式(5)の k_{d1}	0.057	0.054	0.051	0.048
式(4)の k_d 式(5)の k_{d1}	0.97	1.0	1.0	1.0

となる。

すなわち加工密度は単位時間あたりのエリアカバレッジの最大値であり、式(9)より投射条件との関係が明確になる。

エリアカバレッジの増加の状態は刻々変化するものであり、前述の SAE¹⁾ などの場合と類似して時間に対してエリアカバレッジは放物線的に増加してゆく。これを図 3, 図 4 に示したように両対数グラフ上で示すとエリアカバレッジの増加の状態は二つに分かれ、折線で示すことができ、80% 程度のエリアカバレッジを境として 2 点鎖線で区分したように I 期と II 期に分けることができる。I 期の状態はショット 1 個の加工面積と比較して未加工面積が大きい場合で、II 期の状態は未加工面積が小さい場合である。いずれの場合でもエリアカバレッジと投射時間ならびに加工密度との関係は次式のように表わすことができる。

$$\lambda = k_\lambda \cdot Q \cdot t^m \quad (11)$$

式(11)の係数 k_λ は単位時間投射した場合の痕の重なる割合を示すものであって、式(8)から明らかに d または N の小さい場合、すなわち加工密度が小さい場合は 1 に近い。 t の指数 m は投射条件によって異なり、I 期では 0.6~1.0, II 期では 0.05~0.1 で I 期に比較してかなり小さい値となる。 m が投射条件によって異なるのは図 2 にも示したように各条件でエリアカバレッジの増加の状態が異なり、痕密度や加工密度に影響されるからである。 m はエリアカバレッジの時間に対する増加割合で、これが大きいほど能率が良いわけである。この m は無次元の指数で本論文では「加工指数」と呼ぶことにする。

エリアカバレッジは前述のように痕密度とショット 1 個の加工面積との積である加工密度に関係するので、エリアカバレッジの増加率はショットが均一な分散をする場合、加工密度の n 乗に比例し、そのときのエリアカバレッジの p 乗に反比例するとすれば

$$\frac{d\lambda}{dt} = K \cdot Q^n \cdot \lambda^p$$

表3 I期とII期の m と k_λ

	I 期	II 期
m	0.60~1.0	0.05~0.10
k_λ	0.95~1.0	2.0~7.0

したがって

$$\lambda = \{(p+1) \cdot K \cdot Q^n \cdot t\}^{1/(p+1)} \quad (12)$$

$$p, K, n: \text{const}$$

となり, 式(11)と式(12)から $m=1/(p+1)=1/n$ および $K=m \cdot k_\lambda^{1/m}$ が得られる. 本実験の結果, ショットの分散はすでに述べたように均一であり, m, k_λ の値は表3に示すようになった.

5. 結 論

遠心力式投射機を用いてショットピーニングを行ない, エリアカバレッジについて検討を行なった結果, 次のような結論を得た.

- (1) エリアカバレッジには単位時間・単位面積あたりの痕の数(痕密度)と, 痕径と痕密度から決まる単位時間・単位面積あたりの痕面積の総和(加工密

度), ならびにエリアカバレッジの時間に対する増加割合(加工指数)の三つの要素がある.

- (2) エリアカバレッジ $\lambda(\%)$ と加工密度 $Q(\text{cm}^2/\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ と投射時間 $t(\text{s})$ には次式で示す関係がある.

$$\lambda = k_\lambda \cdot Q \cdot t^m$$

k_λ は痕の重なる割合を示し, m は加工指数である. k_λ と m は次のような値となる.

$$\lambda < 80\% \text{ のとき } m: 0.6 \sim 1.0, k_\lambda: 0.95 \sim 1.0$$

$$\lambda > 80\% \text{ のとき } m: 0.05 \sim 0.1, k_\lambda: 2.0 \sim 7.0$$

参 考 文 献

- 1) SAE Handbook (1971) 165.
- 2) 広瀬正吉: ショットピーニング, 誠文堂 新光社 (1961) 129.
- 3) 飯田喜介, 当舍勝次: 噴射加工の研究(第3報), 昭和45年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1970) 401.
- 4) 大越 諄, 飯田喜介: 鋼球の衝撃による Indentation について, 精密機械, **23**, 7 (1957) 312.
- 5) W. C. Maurer & J. S. Rinehart: Impact Crater Formation in Rock, J. Appl. Phys., **31**, 7 (1961) 1249.