

ショットピーニングにおけるカバレッジ分布の計測と関数化

太田 高裕^{*1} 大津 浩太郎^{*2} 平賀 大記^{*2}

Measurement and Functional Approximation of Coverage Distribution in Shot Peening

by

Takahiro OHTA^{*1}, Koutaro OHTSU^{*2} and Daiki HIRAGA^{*2}

(Received on Mar. 24, 2016 and accepted on Jul. 7, 2016)

Abstract

Shot peening is widely applied in the automotive and aerospace industries in order to improve fatigue strength of metal components by compressive residual stress. In the case of large components, the peening process is generally performed by moving peening equipment following a trajectory on the component using a robot. Surface coverage is a major parameter of shot peening and has a large effect on the uniformity of this process. In order to make up robot program of shot peening for large components, this study aims at obtaining functional approximation of coverage distribution in the shot stream. Coverage distribution is measured using pressure measurement film and image luminance analysis in the small region. Coverage distributions under several standoff distance conditions between a nozzle and film approximate Gaussian distribution functions and cosine functions. Calculated coverage distributions of two-pass shot peening by Gaussian distribution function are good agreement with experimental results. Nozzle tilt angle is small effects on coverage distributions, but rebounded shots interfere shot stream located near the center under the large tilt angle conditions.

Keywords: Shot peening, Coverage, Gaussian distribution function

1. まえがき

ショットピーニングは鋼球やガラスビーズを金属表面に打ち付けることで、金属表面に圧縮残留応力を導入する技術である。簡便に疲労強度を向上することができるため、自動車産業や航空機産業で幅広く採用されている。また、強度向上だけでなく、航空機の主翼外板のショットピーン成形や、潤滑性向上などの目的でも使用されている¹⁻³⁾。ショットピーニングの適用範囲の拡大とともに複雑形状の部品に適用されるが、ノズルと材料の間の傾斜角、ショットの跳ね返りの干渉、施工範囲でのショット衝突密度の分布など複雑な事象が発生しており、部品全面での均一なショットピーニングの条件を決定することは難しい。大型部品においてロボットでノズルを走査して施工を行う場合、適正にノズルを走査するとピーニング強度（アルメンストリップという薄板のアーチ高さを指標とする）はほぼ一定となるが、間隔が広いとピーニング強度が低下する領域が発生し、間隔を狭くするとピーニング強度が高くなる領域が発生し、余分に施工することになる。現状は最低のピーニング強度が得られるように複数の位置にアルメンストリップを設置して、作業者の経験と試行錯誤で施工条件を決定しているため、

施工時間が増加し、余分なエネルギーとコストを消費している。ピーニング強度に影響を与える物理的因子の一つにカバレッジがある。カバレッジとは、加工面全体の面積に対して、ショットの当たった面積を比率であらわした値である⁴⁾。ショットピーン成形においてカバレッジの分布に注目して行った研究として、圧痕の個数から分布を求めた Kopp らの研究や飛行中のショットを観察した Garipy らの研究があるが、単純な板を対象としている^{1,3)}。ショットのランダムな衝突に注目して有限要素解析を行った Bagherifard らの研究もあるが、板を対象とした単純なモデルである⁵⁾。また、Nguyen らは CFD を利用して、タービンブレードなどの単純な形状におけるカバレッジ分布を解析結果を報告している⁶⁾。しかし、これらの研究ではノズルと材料の間の傾斜角とショットの跳ね返りの干渉の問題点は検討されていない。以上のように、複雑な部品に対して、ノズルと材料の間の傾斜角やショットの跳ね返りの干渉が施工範囲でのカバレッジ分布に及ぼす影響の学術的な検討はほとんどされていないのが現状である。

本研究では、複雑形状部品に対するショットピーニングにおいて、部品全体に均一なカバレッジを与える施工条件決定方法を提案する第 1 ステップとして、吸引式のサンドブラスト装置を用いて、カバレッジ分布と施工条件（ノズル、スタンドオフ距離、ノズルと材料の間の傾

*1 工学部動力機械工学科准教授

*2 工学部動力機械工科学部生

斜角、重ね施工) の関係を調査し、ショット噴流中のカバレッジ分布の関数化を行った。カバレッジ分布の計測に当たって、感圧紙を用いた簡易な計測方法を提案した。カバレッジ分布の関数化を行うことによって、施工条件を簡便に決定することができる。さらに、決定した関数をロボットのオフラインティーチングシステムに組み込むことにより、広く展開することが可能になる⁷⁾。このような取り組みは世界的にも行われておらず、今後の航空機、自動車産業などにおけるショットピーニング施工の効率化や省エネルギー化に大きく貢献できる。

2. 実験方法

本研究で使用した実験設備は、吸引式のサンドブラスト装置(株式会社イリイ製 TR-135SB)である。使用したショットは、粒度 60 のガラスビーズ(不二製作所 FGB 粒径 212~300 μ m)である。用いたノズルの穴径は Φ 4mm と Φ 7mm である。ノズルの前にシャッターを用意し、シャッターを置いたまま噴射を開始、圧力が安定したタイミングでシャッターを外し 1s 間感圧紙にショットを投射し、再びシャッターを用いて遮断した。感圧紙は富士フィルム製 PRESCALE 超高压型 HHS であり、計測可能な面圧は 130~300MPa である。実験設備を Fig. 1 に示す。

カバレッジの計測には画像解析ソフトを用いた。ピーニングを行った感圧紙をスキャナーで読み込み、光度を基準にカバレッジの計測を行った。光度の最小値は 0、最大値は 255 である。数値が低いほど黒に近く、0 をカバレッジ 100% とした。ピーニングパターンの中心を通るように 5mm \times 5mm のマスを感じ紙内に描き、マス内の平均光度 A を計測し、式 (1) に代入してカバレッジを算出した。

$$C_a = 100 \times (1 - A/255) \quad (1)$$

本研究では、ノズルと感圧紙のスタンドオフ距離 L_o の影響試験、重ね施工時のノズルピッチ X_o の影響試験、傾斜角 θ の影響試験、を行った。Fig. 2 に試験のパラメータを模式的に示す。実施した試験条件を Table 1 に示す。

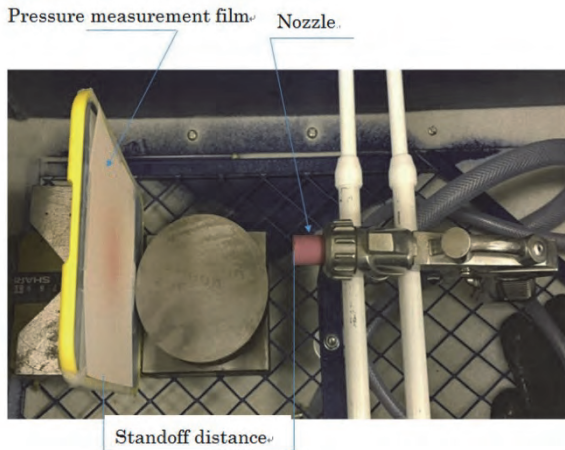


Fig. 1 Appearance of experimental equipment.

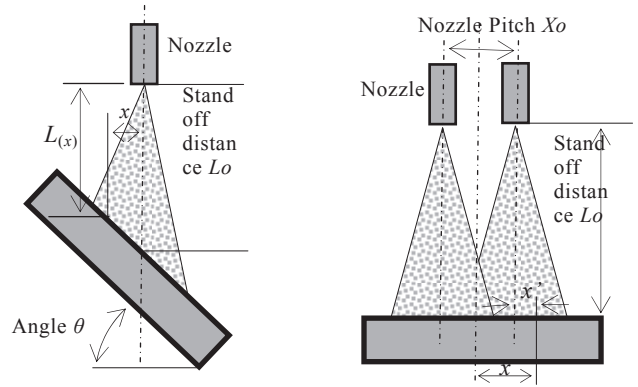


Fig. 2 Schematic illustration of experimental parameters.

Table 1 Experimental conditions.

Case	Nozzle diameter / mm	Pressure / MPa	L_o / mm	X_o / mm	θ / deg
1	4	0.3	100	None	0
2			110		
3			120		
4			130		
5			140		
7	7	0.25	110	None	20
8			30		40
9					0
10	7	0.25	40	30	0
11			100		
12			120		
13			150		
14	100	30			

3. 実験結果と考察

3.1 カバレッジ分布へのスタンドオフ距離の影響

ノズルと感圧紙のスタンドオフ距離 L_o を変化させて試験を行った。代表的なケースとして Case2 の感圧紙の計測結果を Fig. 3 に示す。ショットの衝突により感圧紙が発色し、衝突パターンが計測されている。ショットの衝突は中央部に集中している状況がわかる。中央部では色が濃く、カバレッジが高く、周辺では色が薄く、カバレッジが低い。ノズル穴径が Φ 4mm のノズルを用いて、空気圧 0.3MPa でスタンドオフ距離 L_o を変化させた場合 (Case1~5) のカバレッジの計測結果を Fig. 4 に示す。スタンドオフ距離 L_o が変化してもピーニングを受ける範囲はほとんど変化がない。ノズル中央部付近にはカバレッジが一定の領域が存在している。 $L_o=110$ mm 以上ではスタンドオフ距離とともにカバレッジのピークは減少する。

Fig. 5 にはノズル穴径が Φ 7mm のノズルを用いて、空気圧 0.25MPa でスタンドオフ距離 L_o を変化させた場合 (Case11~13) のカバレッジの計測結果を示す。ノズル穴径が大きく、圧力も低いため、初期ショット速度は Fig. 4

に比べて遅い条件である。Fig. 4 の結果と比較して、ピークのカバレッジが低く、スタンドオフ距離 L_o の影響が明確である。また、Fig. 4 において中央部付近にみられたカバレッジの均一な領域は見られない。しかし、ピーニングを受けた領域はスタンドオフ距離 L_o の影響を受けず、ほぼ一定である。

Fig. 6 にはノズルから出た後のショットの速度分布の模式図を示す⁸⁾。ノズルを出た直後はほぼ均一な速度である。噴流の拡散とともに、周辺部は速度が減少していくが、中央部は均一な速度分布が保持されている領域がある。この領域が Fig. 4 に示したカバレッジ分布の領域で、中央部付近にカバレッジが均一の範囲が確認される。さらにスタンドオフ距離 L_o が長くなると、噴流の拡散が大きくなり、中央部の流速も低下し、均一な速度分布の領域がなくなる。この領域が流速の遅い $\phi 7\text{mm}$ ノズルで計測した Fig. 5 に示したカバレッジ分布の領域で、中央部付近からなだらかにカバレッジは減少する。この傾向は圧縮性流体下での粒子速度を計算した南部らの結果と一致する⁸⁾。今回用いた感圧紙の計測できる圧力の範囲は $130\sim 300\text{MPa}$ である。ショット速度がある値以下に減速されると、感圧紙に計測可能な圧力を与えることができない。Fig. 6 に示した破線は感圧紙で計測できる限界の速度を模式的に示したものである。噴流が拡散するとショット速度が低下するため、結果として感圧紙で計測できる範囲は変化が少なかったと考えられる。

3.2 カバレッジ分布の関数化

カバレッジ分布は Fig. 4 と Fig. 5 に示すように釣鐘状の分布となっている。この形状を関数化するため、次の2つの関数の適用を検討した。ガウス分布を式(2)に、Cos 関数を式(3)に示す。いずれの関数も2つの変数で釣鐘状の分布を表現可能である。

$$C_G = a_i / \sqrt{\pi\sigma^2} \times \text{Exp}(-x^2/2\sigma^2) \quad (2)$$

$$C_C = a_t \times \{1 + \cos(x/R)\} \quad (3)$$

ここで、 a_i と a_t はカバレッジのピークを表す定数、 σ と R はピーニングの影響範囲を示す定数である。いずれの定数もスタンドオフ距離 L_o 、圧力など施工条件で変化する。

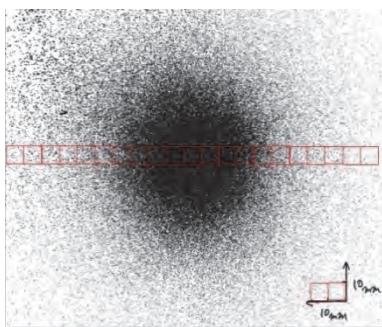


Fig. 3 Pressure measurement result of Case2.

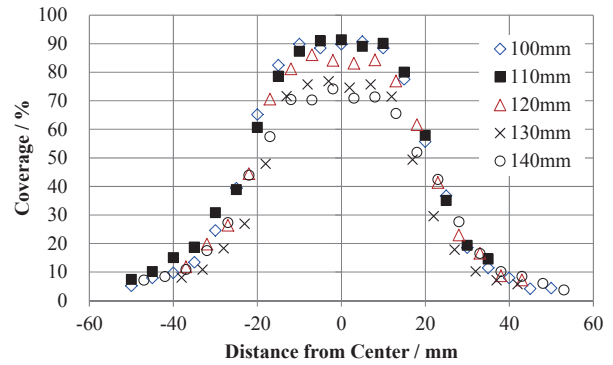


Fig. 4 Effect of standoff distance on coverage distributions using $\Phi 4\text{mm}$ nozzle (Case1~Case5).

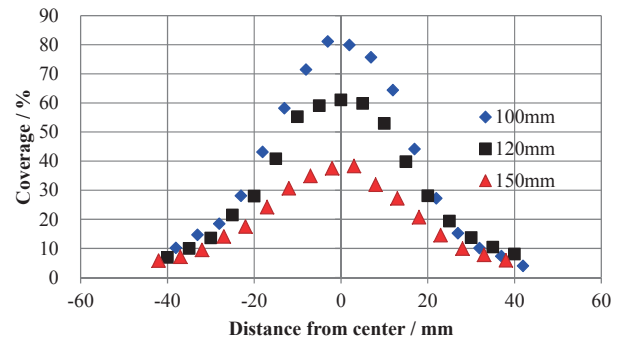


Fig. 5 Effect of standoff distance on coverage distributions using $\Phi 7\text{mm}$ nozzle (Case11~Case13).

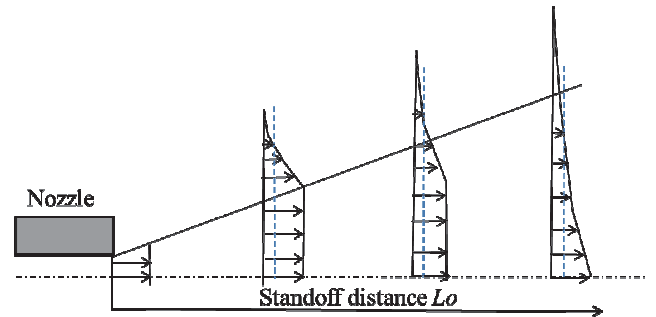
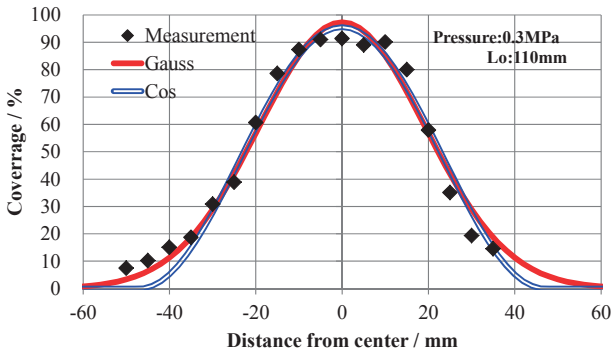


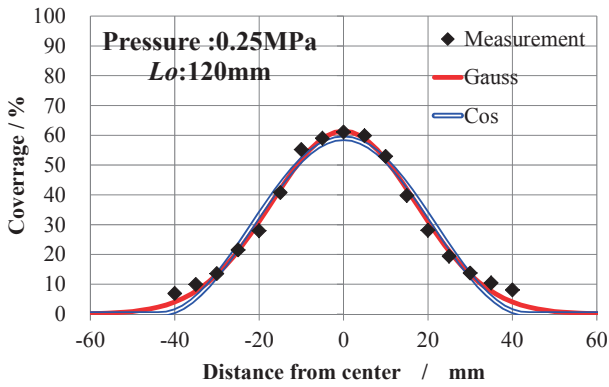
Fig. 6 Schematic illustration of shots velocity distribution.

x はノズル中心からの距離である。

代表的なケースとして Case2 と Case12 に対して、ガウス分布および Cos 関数で係数をフィッティングした結果を Fig. 7 に示す。いずれのケースもカバレッジ分布の形状をガウス分布、Cos 関数共に概略一致する。細かく見ると、Case2 では中心部分では計測値ではカバレッジ分布がほぼ一定の領域があるが、ガウス分布、Cos 関数共に均一領域は関数の特性から表現できない。しかし、誤差は小さいため、実用上は問題ないと判断した。一方、Case12 のようにピーズが十分に広がった条件では、ガウス分布、Cos 関数共によく一致する。本研究の試験条件では中心から離れた位置でのカバレッジ分布はガウス分布が Cos 関数に比べて、計測結果に近いので、ガウス分布を採用した。

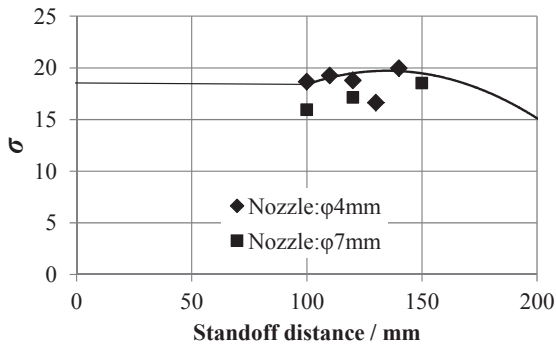


(a) Case2

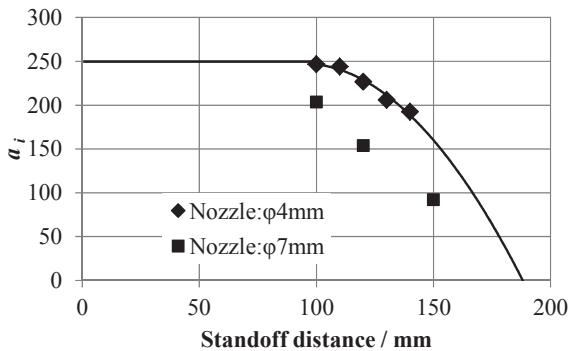


(b) Case12

Fig. 7 Comparison of coverage distribution between measurement and fitting functions.



(a) a_i



(b) σ

Fig. 8 Relation between standoff distance and constant in Eq. (2).

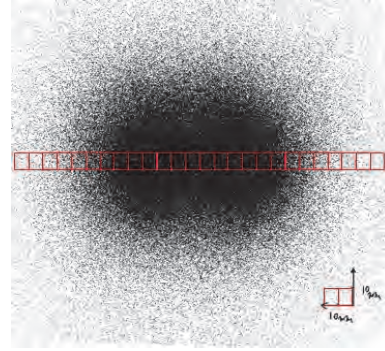


Fig. 9 Pressure measurement result of Case11.

Case1~Case5 および Case11~Case13 の関数へのフィテイングした場合の定数, a_i と σ を Fig. 8 に示す. a_i は 100mm から 150mm の範囲で減少する. 一方, σ は 100mm から 150mm の範囲ではほとんど変化がない. この傾向は Fig. 4 と Fig. 5 に示したカバレッジ計測結果と一致する.

3.3 重ね施工時のノズルピッチの影響

ノズルを用いたショットピーニングでは広い面に施工する場合, ピッチ X_0 を変えて重ね施工を行う場合が多い. そこで, ノズルを固定して, 感圧紙を移動させることで重ね施工を実験を行った. 試験の模式図と試験パラメータを Fig. 2 に示した.

$\phi 4\text{mm}$ のノズルを用いて, X_0 を 30mm で重ね施工を実施した場合 (Case9) の感圧紙の計測結果を Fig. 9 に示す. 2 回の施工のピッチ X_0 が狭いと図に示すように施工の隙間がなく均一化なカバレッジが得られる.

Fig. 10 には X_0 が 30mm と 40mm の場合のカバレッジ分布を示す. ノズル中心は 1 回目が -15mm と -20mm , 2 回目が $+15\text{mm}$ と $+20\text{mm}$ である. Fig. 9 に示したように $X_0=30\text{mm}$ では 2 回のノズル中心間 ($-15\sim+15\text{mm}$) の間ではほぼカバレッジが均一になっている. 一方, $X_0=40\text{mm}$ では 2 回のノズルの間 (0mm 付近) にカバレッジの低い領域が発生した. 重ね施工におけるカバレッジ分布を予測するため, 式(2)に示したガウス分布を適用した. 2 回のピーニングにおける重なり部のカバレッジの計算式として, 式(4)を導入した.

$$C_{n(x')} = 1 - (1 - C_{1(x')}) \times (1 - C_{2(x')}) \quad (4)$$

ここで, $C_{1(x')}$ は 1 回目のピーニングで計算される位置 x' でのカバレッジ, $C_{2(x')}$ は 1 回目のピーニングで計算される位置 x' でのカバレッジを示している. x' は $x \pm 0.5X_0$ である.

式(2)と式(4)を用いて計算したカバレッジ分布を Fig. 10 に示す. 式(2)と式(4)を用いることで, $X_0=30\text{mm}$ では $-15\sim+15\text{mm}$ の範囲でカバレッジがほぼ均一になり, $X_0=40\text{mm}$ では 0mm 付近にカバレッジの低い領域が発生することを計算可能であることを確認した. Fig. 11 には $\phi 7\text{mm}$ のノズルで $X_0=30\text{mm}$ の場合のカバレッジの計測値と式(2)と式(4)を用いた計算結果の比較を示すが, ノズルが異なっても両者は一致する. このように簡便な式で

重ね施工後のカバレッジ分布を表現できることは、施工ピッチ X_o 設定のために有効である。

3.4 カバレッジ分布への傾斜角の影響

Fig. 2に示したように板を傾斜させた場合のカバレッジ分布を調査した。計測結果を Fig. 12に示す。横軸の一方がノズルに近い側、+側がノズルに遠い側になるように傾斜させている。 $\theta=20$ 度では傾斜によるカバレッジ分布の変化は明確ではない。一方、 $\theta=40$ 度ではピーク付近でカバレッジは右下がりに減少しており、左右対称となっていない。

傾斜した板にピーニングする場合にスタンドオフ距離が場所により変化する。そこで、位置 x のスタンドオフ距離 $L(x) = x + \tan \theta$ で計算した (Fig. 2 参照)。

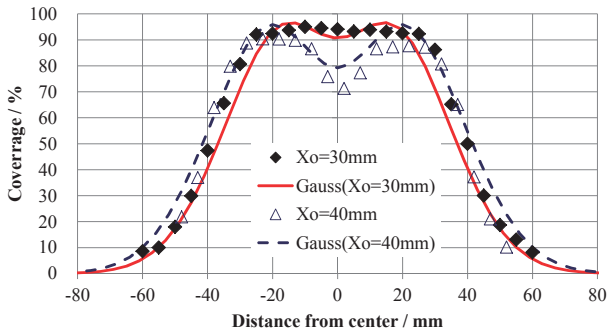


Fig. 10 Effect of nozzle pitch on coverage distributions using $\Phi 4$ mm nozzle (Case9 and Case10).

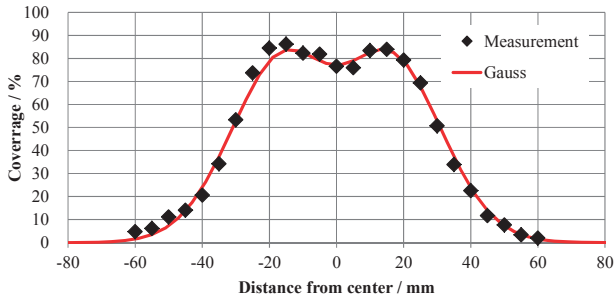


Fig. 11 Comparison of coverage distribution between measurement and Gauss function (Case14).

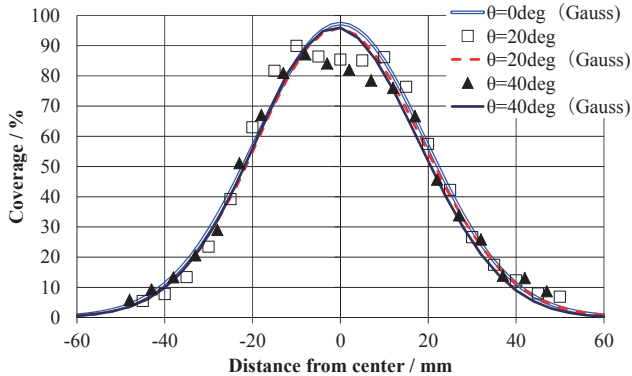


Fig. 12 Comparison of coverage distribution between measurement and Gauss function.

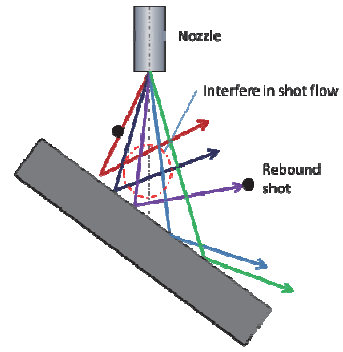


Fig. 13 Schematic illustration of interfere in shot stream.

$L_o=110$ mmにおいて、 $\theta=40$ 度では $x=-40$ mmで $L(x)=76$ mm、 $x=+40$ mmでは $L(x)=143$ mmと大きくスタンドオフ距離 $L(x)$ が変化する。傾斜した板でのカバレッジ分布を予測するため、式(2)における定数、 a_i 、 σ を $L(x)$ の関数として取り扱う。

$$C_G = a_{i(L(x))} / \sqrt{\pi \sigma^2} \times \text{Exp}(-x^2 / 2\sigma_{(L(x))}^2) \quad (2)'$$

式(2)'において、 $a_{i(L(x))}$ 、 $\sigma_{(L(x))}$ を Fig. 8の実線で実験結果を外挿して、計算を行った。計算結果を Fig. 12に示す。計算結果において、傾斜の影響は少なく、 $\theta=0$ 度とほとんど差がない結果となった。一方、実験で確認された中央部付近のカバレッジの低下は Fig. 13に模式的に示す跳ね返ったショットとの干渉であると考えられる。 $\theta=20$ 度では影響が少ないため、カバレッジ予測には適用可能である。 θ が大きくなると、式(2)'では跳ね返ったショットの影響は考慮できないため、今後 CFDなどを活用した数値解析により検証する必要がある。

4. まとめ

吸引式のサンドブラスト装置を用いて、カバレッジ分布と施工条件 (スタンドオフ距離、傾斜角、重ね施工) の関係を調査し、カバレッジの関数化を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) カバレッジ分布は感圧紙を用い、光度評価を行うことで簡単に計測できることを確認した。
- (2) スタンドオフ距離 $L_o=100 \sim 150$ mmにおいて、ショットピーニングにおけるカバレッジ分布は以下の関数で模擬できることを確認した。

$$C_G = a_i / \sqrt{\pi \sigma^2} \times \text{Exp}(-x^2 / 2\sigma^2)$$

$$C_c = a_t \times \{1 + \cos(x/R)\}$$

ここで、 a_i と a_t はカバレッジのピークを表す定数、 σ と R はピーニングの影響範囲を示す定数、 x はノズル中心からの距離である。

- (3) 決定した関数を用いて、ノズルピッチを変化させた2回の重ね施工後のカバレッジ分布を表現できることを確認した。

(4) 傾斜した板への施工に対して、式(2)のガウス分布の定数 a_i と σ をスタンドオフ距離の関数とすることで、カバレッジ分布を表現できることを確認した。但し、傾斜角 θ が大きい場合は、板に衝突後に跳ね返ったショットの影響で、ノズル中央部付近のカバレッジが減少する事象が発生しており、式(2)では表現が難しいことを確認した。今後CFDなどを活用した数値解析により検証する必要がある。

参考文献

- 1) Kopp, R., Wüstefeld, F. : Modern simulation and optimization of peen forming process, Proc. Int. Conf. Shot Peening-4, 561-572 (1990).
- 2) 山田毅, 高橋孝幸, 池田誠, 杉本周造, 太田高裕 : コンチネンタルビジネスジェット主翼インテグラルスキンのショットピーン成形技術開発, 三菱重工技報, Vol.39 No.1, pp6-39 (2002).
- 3) Gafipy, A., Larose, S., Perron, C., Bocher, P., Levesque, M. : On the effect of the peening trajectory in shot peen forming, Finite Elements in analysis & Design 69 ,pp48-61 (2013).
- 4) 飯田喜介, 当舎勝次 : 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)—, 精密機械 Vol/39 No.3, 45-50 (1973).
- 5) Bagherifard, S., Glelichi, R., Guagliano, M. : On the shot peening surface coverage and its assessment by means of finite element simulation : A critical review and some original development, Applied Surface Science 259, pp186-194 (2012).
- 6) Nguyen, V. B., Poh, H. J., Zhang, Y. W. : Predicting shot peening coverage using multiphase computational fluid dynamics simulations, Powder Technology 256, pp100-112 (2014).
- 7) 宮脇国男, 斎藤幸男, 平井靖男, 宮崎健雄, 大窪 博 : ロボット塗装における施工法の定量化と制御, 日本機械学会論文集(C編)65巻629号, pp361-368(1999).
- 8) 南部紘一郎, 伊藤健一, 江上 渡 : 微粒子衝突処理における圧縮性流体下での粒子速度に関する数値解析, 日本機械学会論文集(C編)76巻772号, pp3728-3735 (2012).