

傾斜した板へのショットピーニングにおける カバレッジ分布の関数近似法

太田 高裕^{*1}

Functional Approximation of Coverage Distribution in Shot Peening for Tilted Plates

by

Takahiro OHTA^{*1}

(Received on Sep.20, 2016 and accepted on Nov. 10, 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 construct a robot program for the shot peening of complex components, this study aimed to obtain a functional approximation of the coverage distribution in the shot stream. Coverage distributions under several standoff distance conditions between the nozzle and workpiece were approximated by modified Gaussian distribution functions which included the saturation curve. Coverage distributions of two-pass shot peening calculated by modified Gaussian distribution functions were in good agreement with experimental results. In the case of tilted plates, coverage distributions are complex because standoff distance at each position on the plate was different and rebounded shots interfere with the shot stream located near the center. A new function which considered standoff distance variation and effect of rebounded shots is developed. Coverage distributions of tilted plates calculated by the new functions were in good agreement with experimental results for tilt angle ranging from 10 to 50 degrees.

Keywords: Shot peening, Coverage, Gaussian distribution function

1. まえがき

ショットピーニングは簡易に金属表面への圧縮残留応力付与や表面硬化が可能であり、疲労強度向上のため、広く産業界で使われている。また、圧縮残留応力の付与だけでなく、航空機主翼の成形や潤滑性能の向上など新しい機能付与にも用いられている。例えば、自動車部品では、クランクシャフト、ピストン、コネクティングロッド、各種のばねなど多くの部品に適用されている。

ノズル式ショットピーニング（エアによりノズルからショットを吹き出す方式）の施工パラメータは、ノズル径、エア圧、ショット径・材質、ノズルとワークのスタンドオフ距離、ノズルとワークの角度、ピーニング時間（速度×回数）などが挙げられる。一般的には、ピーニング強度とカバレッジで施工条件の管理を行っている^{1,2)}。ピーニング強度はアルメンストリップと呼ばれる鋼片にショットピーニングを行い、アルメンストリップのアー

クハイトで定義される。カバレッジはワーク表面積に対するショットの圧痕面積の比率で定義される。カバレッジとアークハイトの間には次のような関係がある。ピーニング時間 t_1 のアークハイト h_1 と t_1 の2倍の時間 t_2 のアークハイト h_2 の差が10%以下であれば、 t_1 時のカバレッジを100%と定義する³⁾。ショットピーニング効果の均一化のため、カバレッジは100%が望まれるため、ピーニング時間が長くなる傾向にある。

傾斜した板に施工する場合、Fig. 1(b)に示すように跳ね返ったショットと投射されたショットの干渉（衝突）が起こり、カバレッジ分布は左右非対称となる。Fig. 1(a)には板を40度傾けた場合（ $\theta=40^\circ$ ）のカバレッジ分布の実験結果を示す⁴⁾。Fig. 1(a)で横軸の0はノズル中心の位置であり、プラス側の位置はノズルからのスタンドオフ距離が遠くなる側である。Fig. 1(a)の実験結果に示すように、 $\theta=40^\circ$ では $\theta=0^\circ$ に比べて、中心からの距離 $x=-15\sim15\text{mm}$ 付近ではショットの干渉（衝突）が多く発生し、カバレッジが低下しており、左右非対称のカバレッジ分布となる。

ショットピーニングにおいてカバレッジの分布に注目

^{*1} 工学部動力機械工学科准教授

した研究として、圧痕の個数から分布を求めた Kopp らの研究や飛翔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^{5,6)}。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⁷⁾。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。

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、適正な間隔でノズルを走査するとピーニング強度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。塗装ロボットでは塗膜厚さを関数近似して、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手法が開発されている⁸⁾。しかし、ショットピーニングではショットの干渉や施工時間とカバレッジが非線形の関係にあるなど現象が複雑で、塗装と同じ関数近似が適用できない。このため、ショットピーニング施工時のノズルの軌跡は作業者の試行錯誤と経験で設定されており、軌跡の最適化が行われているとは言えない。

前報では、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ノズル軌跡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、距離、衝突角度、2回施工）の関係を調査し、ガウス分布を用いてショット噴流中のカバレッジ分布の関数近似を行った⁴⁾。しかし、Fig. 1(a)に実線で示すように、傾斜した板では、ショットの跳ね返りの影響による左右非対称のカバレッジ分布をガウス分布では近似できていなかった。そこで、本研究では傾斜した板へのカバレッジ分布の関数近似の精度向上を目的に、基本的な直角投射時のカバレッジ分布の関数近似法を修正し、カバレッジ分布への距離の影響を調査した。次に、傾斜した板におけるカバレッジ分布の関数近似法に発展させた。

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 μm ）である。用いたノズルの穴径 $\phi 4\text{mm}$ 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た。感圧紙は富士フィルム製 PRESCALE 超高圧型 HHS であり、計測可能な面圧は 130~300MPa である。感圧紙を用いて計測した結果を Fig. 2 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。Fig. 2 に示すように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。

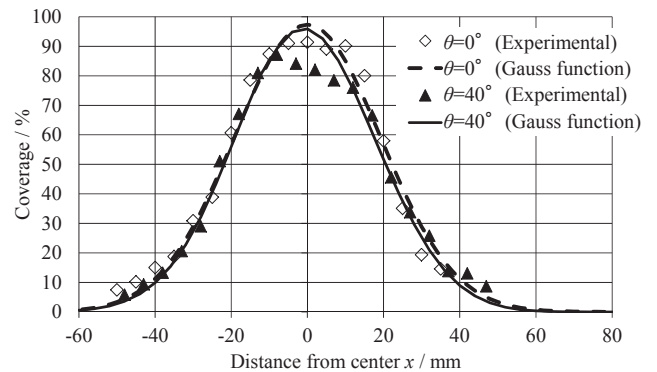
$$C_a = 100(1 - A/255) \quad (1)$$

Fig. 3 に試験のパラメータを模式的に示す。本研究では、直角投射（ $\theta=0^\circ$ ）において、ノズルと感圧紙のスタンドオフ距離 L_0 の影響試験および2回施工時のノズルピッチ X_0 の影響試験で、カバレッジ分布の関数近似を行い、近似関数を決定した。次に、傾斜した板におけるカバレッジ分布の関数近似法に発展させた。

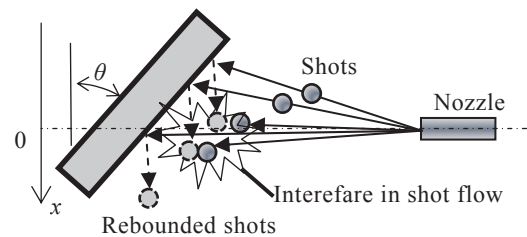
3. 直角投射における実験結果と関数近似

3.1 カバレッジ分布の関数近似

本研究ではカバレッジ分布を関数近似の精度向上のため



(a) Coverage distribution



(b) Schematic illustration of interfere in shot stream

Fig. 1 Comparison of coverage distributions between experimental and analysis in case of tilted plate.

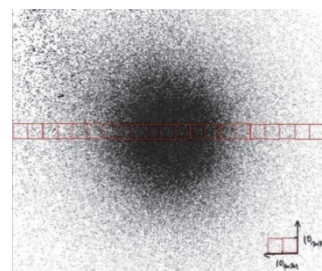


Fig. 2 Pressure measurement result.

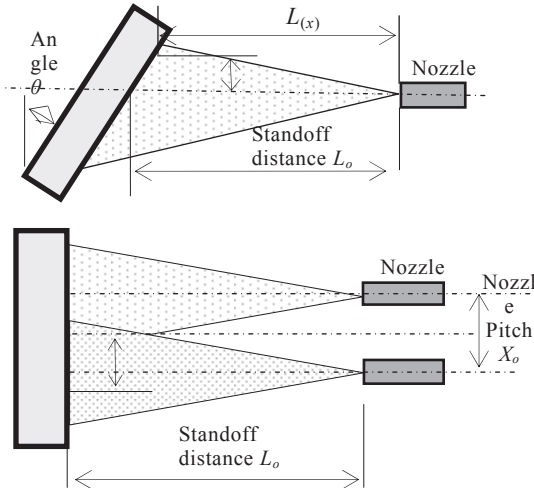


Fig. 3 Schematic illustration of experimental parameters.

め、前報⁴⁾で用いたガウス分布と複数回施工時のカバレッジの飽和曲線の式²⁾を複合させた式(2)を提案する。

$$C(x) = 1 - \left\{ 1 - \frac{b}{a\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{a^2}\right) \right\}^n \quad (2)$$

ここで、 $C(x)$ はノズル中心からの距離 x でのカバレッジ、 a と b はガウス分布の定数であり、 b はカバレッジのピークを示す定数、 a はピーニング領域を表す定数である。 n はショットの衝突回数を示す定数である。 $n=1$ でガウス分布となる。

Fig. 4 には $L_0=100\text{mm}$ ($\theta=0^\circ$) の実験結果に対して、式(2)を用いて実験との誤差の2乗和を最小にするようにフィッティングした計算結果を示している。Fig. 5 にはフィッティング後の実験結果と式(2)を用いた計算結果との誤差の2乗和と定数 n の関係を示す。定数 n を1~9まで変化させた場合、 n が大きくなると、誤差の2乗和は減少するが、 $n=4$ で飽和する。カバレッジ分布を比較すると、 n が大きくなると、ピーク付近のカバレッジがフラットに近づくことがわかる。カバレッジの飽和曲線の式を複合させることで、前報⁴⁾で適用したガウス分布($n=1$)に比べて、関数近似の精度が向上した。

3.2 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 L_0 を 100mm ~ 140mm で変化させて試験を行った。エア圧は 0.3MPa 、 θ は 0° である。ノズルからショットを連続で投射し、 1s 間で計測を行った。Fig. 6 には代表ケースとして、 L_0 が 100mm 、 120mm および 140mm のカバレッジ計測結果を示す。 L_0 が増加するとカバレッジのピークは減少するが、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。

Fig. 5 に示したように誤差の2乗和は n が4以上で飽和するので、本条件では $n=4$ に固定して、 L_0 毎に実験との誤差の2乗和を最小にするように a と b と決定した。計算結果を Fig. 6 に示すが、誤差の2乗和は $L_0=100\text{mm}$

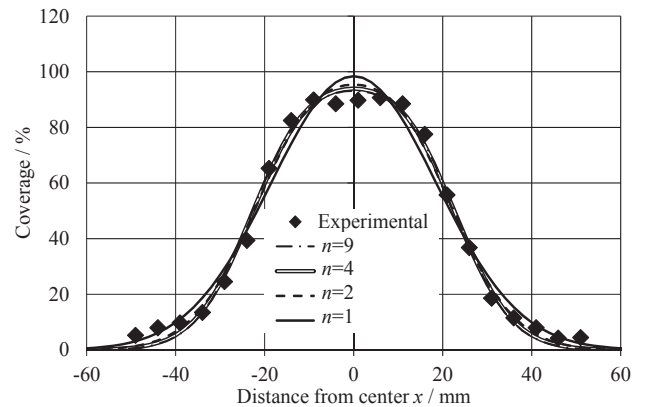
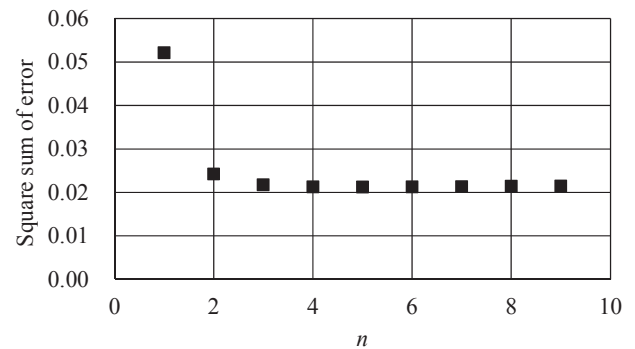
で 2.1×10^{-2} 、 $L_0=120\text{mm}$ で 3.4×10^{-2} 、 $L_0=140\text{mm}$ で 1.3×10^{-2} であり、 $n=1$ のガウス分布 ($L_0=100\text{mm}$ で 5.2×10^{-2}) よりも近似精度が向上している。

$L_0=100\sim 140\text{mm}$ の実験結果を式(2)にフィッティングした場合の、定数 a と b を Fig. 6 に示す。 n は4とした。カバレッジピークを示す定数 b は L_0 が増加すると、減少する。ピーニング領域を表す定数 a では L_0 の影響は小さいが、 L_0 が大きくなると a はわずかに増加する傾向にある。この傾向は Fig. 6 に示した実験結果と一致する。

3.3 2回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、ノズルピッチ X_0 を変えて複数回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2回施工の実験を行った。試験の模式図と試験パラメータを Fig. 3 に示した。 X_0 を 30mm および 50mm で2回施工を実施した場合のカバレッジの計測結果を Fig. 8 に示す。 L_0 は 110mm 、エア圧は 0.3MPa 、 θ は 0° である。 X_0 が 30mm では図に示すように2回施工のノズル間 ($-15\sim 15\text{mm}$) で均一なカバレッジが得られる。一方、 X_0 が 50mm では2回施工の隙間 (横軸が0付近) にカバレッジの低い部分ができ、均一に施工できない。

2回施工におけるカバレッジ分布を予測するため、式(2)を適用した。2回のピーニングにおける重なり部のカ

Fig. 4 Effect of constant n in Eq.(2) on coverage distributions ($L_0=100\text{mm}$, $\theta=0^\circ$).Fig. 5 Effect of constant n in Eq.(2) on square sum of error between experimental and analysis using Eq.(2) ($L_0=100\text{mm}$, $\theta=0^\circ$).

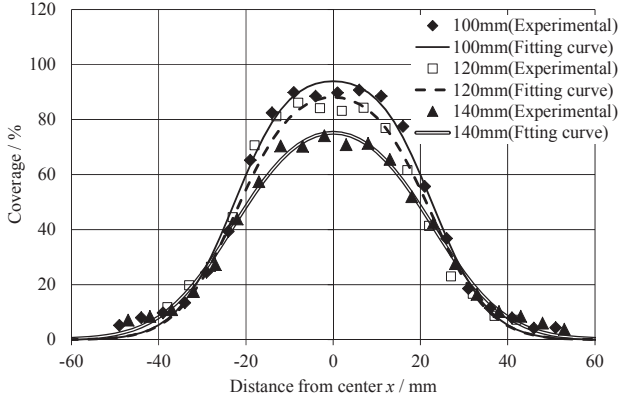


Fig. 6 Effect of standoff distance on coverage distributions ($\theta=0^\circ$).

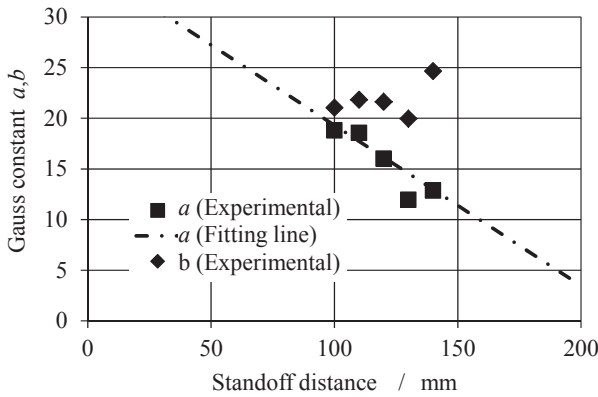


Fig. 7 Relation between standoff distance and constant a and b in Eq.(2).

バレージの計算式として、式(3)を導入した。

$$C_{n(x)} = 1 - (1 - C_{1(x)}) (1 - C_{2(x)}) \quad (3)$$

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2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 $x \pm 0.5X_o$ である。

式(2)と式(3)を用いて、2回施工のカバレッジ分布を計算した。 n は4、 a と b はFig. 7に示した値を用いた。計算結果をFig. 8に示すが、 X_o が30mmでは x が ± 20 mmで均一なカバレッジが得られ、 X_o が50mmでは x が0mm付近でカバレッジが低下する現象を計算で予測できることを確認した。このように簡便な式で2回以上の施工後のカバレッジ分布を表現できることは、 X_o 設定のために有効である。

4. 傾斜した板への投射実験結果と関数近似

Fig. 1に示したように、傾斜した板にショットピーニングする場合、跳ね返ったショットと投射されたショットの干渉（衝突）が起こり、 $\theta=40^\circ$ 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、左右非対称となる。

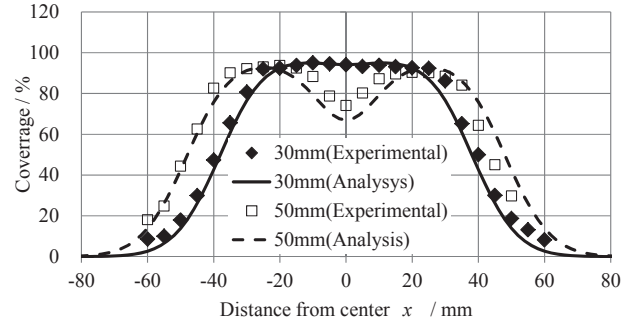


Fig. 8 Effect of nozzle pitch X_o on coverage distributions ($L_o=110\text{mm}$, $\theta=0^\circ$).

傾斜した板にピーニングする場合、スタンドオフ距離が場所により変化する。そこで、ノズル中心からの距離 x のスタンドオフ距離 $L(x)$ は $L_o + x \tan \theta$ で計算した (Fig. 3 参照)。 $L_o=110\text{mm}$ において、 $\theta=40^\circ$ では $x=-40\text{mm}$ で $L(x)=76\text{mm}$ 、 $x=+40\text{mm}$ で $L(x)=143\text{mm}$ と大きく $L(x)$ 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 と b を $L(x)$ の関数として定義する。また、跳ね返ったショットと投射されたショットの干渉（衝突）の影響を考慮するため、簡易な式を導入した。本研究で提案する傾斜した板への施工時のカバレッジ分布の式を以下に示す。

$$C_{(x)}^* = 1 - \left\{ 1 - \frac{b_{L(x)}}{a_{L(x)} \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{a_{L(x)}^2}\right) \right\}^n - c_{(\theta)}(x + d_{(\theta)}) \quad (4)$$

ここで、 $c_{(\theta)}$ および $d_{(\theta)}$ は傾斜角ごとに決まる定数で、跳ね返りショットと投射ショットの干渉の影響を示す定数である。

Fig. 9に傾斜角 θ を $0^\circ \sim 50^\circ$ 変化させた場合の実験結果を示す。 $\theta=20^\circ$ では直角投射 ($\theta=0^\circ$) との差は小さいが、 $\theta=40^\circ$ と 50° では明らかに左右非対称となり、傾斜の影響が表れている。

式(4)を用いて、 θ 毎に誤差の2乗和を最小するように係数のフィッティングを行った。但し、 $d_{(\theta)}$ は-15で一定、 n は4で一定とし、 $b_{L(x)}$ はFig. 7に示した実験結果の直線近似を関数として用いた。各傾斜角の板に対して計算した定数 $a_{L(x)}$ とノズル中心からの距離 x のスタンドオフ距離 $L(x)$ の関係をFig. 10に示す。 $\theta=0^\circ$ での実験結果に比べて、傾斜角がある場合、 $a_{L(x)}$ は大きい傾向にある。そこで、各角度の平均値（1点鎖線）を $a_{L(x)}$ の関数として定義した。定数 $c_{(\theta)}$ と θ の関係をFig. 11に示す。 θ が 30° 以下では $c_{(\theta)}$ は0であり、跳ね返りショットの影響は無視できる。一方、 30° 以上では急激に大きくなり、跳ね返りショットと投射ショットの干渉の影響が発生する。 $c_{(\theta)}$ はFig. 11に直線で示した関数で定義した。

以上のように、式(4)の定数 $a_{L(x)}$ 、 $b_{L(x)}$ 、 $c_{(\theta)}$ 、 $d_{(\theta)}$ 、 n を統一して決定したので、これらの定数を用いて、各傾斜角についてカバレッジ分布を計算した。式(4)を用い

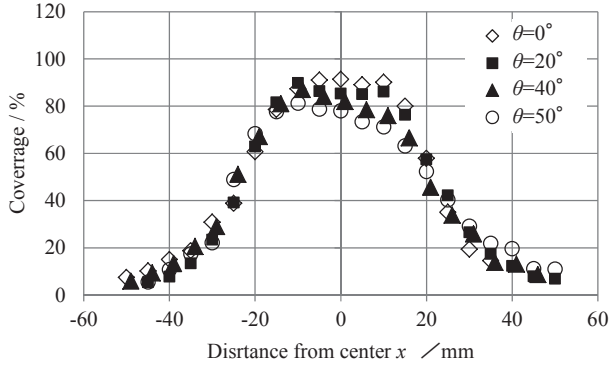


Fig. 9 Effect of incline angle θ on coverage distributions ($L_0=110\text{mm}$).

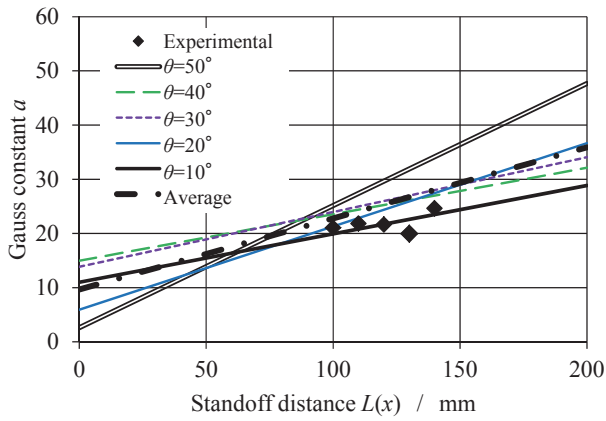


Fig. 10 Relation between standoff distance and $a_{L(x)}$ fitted to results of tilted plate experimental.

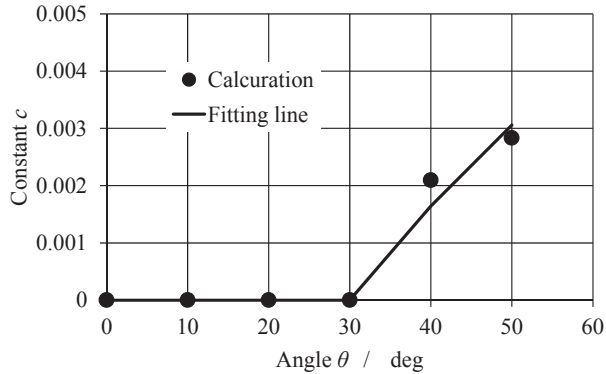


Fig. 11 Relation between incline angle θ and $c_{(\theta)}$ fitted to results of tilted plate experimental.

た計算結果を Fig. 12 に示す. 式(4)を用いることで $\theta=40^\circ$ と 50° で発生する左右非対称のカバレッジ分布を近似できた. 実験結果と式(4)で計算した結果の誤差の2乗和は, $\theta=10^\circ$ で 7.3×10^{-2} , $\theta=20^\circ$ で 2.9×10^{-2} , $\theta=40^\circ$ で 2.9×10^{-2} , $\theta=50^\circ$ で 4.6×10^{-2} である. Fig. 1(a)に示した $\theta=40^\circ$ の実験結果をガウス分布で近似した場合の誤差の2乗和は 1.2×10 であり, 式(4)を適用することにより, 近似精度は大きく向上した. 式(4)の5つの定数を決定することで, 傾斜した板で発生するショットの跳ね返りの影響を考慮したカバレッジ分布の予測が可能となった.

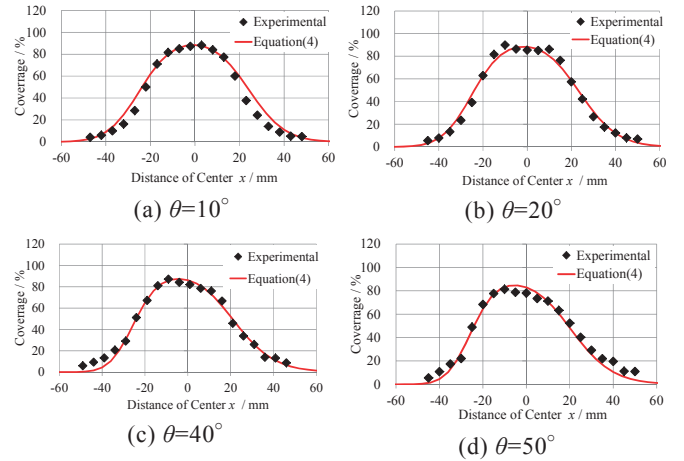


Fig. 12 Comparison of coverage distributions between experimental and analysis using Eq.(4) in case of incline plates.

5. 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の関係を調査し, カバレッジ分布の関数近似を行った. 得られた結果を以下にまとめる.

1) スタンドオフ距離 $L_0=100 \sim 150\text{mm}$ において, 直角投射 ($\theta=0^\circ$) の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近似できる.

$$C(x) = 1 - \left\{ 1 - \frac{b}{a\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{a^2}\right) \right\}^n \quad (2)$$

ここで, $C(x)$ はノズル中心からの距離 x でのカバレッジ, a と b はガウス分布の定数であり, b はカバレッジピークを示す定数, a はピーニング領域を表す定数である. n はショットの衝突回数を示す定数である.

2) 決定した関数を用いて, ノズルピッチ X_0 を変化させた2回施工後のカバレッジ分布を以下の式で近似できる.

$$C_{n(x')} = 1 - (1 - C_{1(x')})(1 - C_{2(x')}) \quad (3)$$

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2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.

3) 傾斜した板への施工では, スタンドオフ距離が板面上の位置毎に異なること, 板面で跳ね返ったショットが投射ショットと干渉することで左右非対称の複雑なカバレッジ分布を示す. 傾斜した板に対して, カバレッジ分布の近似式として下式を導入した.

$$C_{(x)}^* = 1 - \left\{ 1 - \frac{b_{L(x)}}{a_{L(x)}\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{a_{L(x)}^2}\right) \right\}^n - c_{(\theta)}(x + d_{(\theta)}) \quad (4)$$

ここで, $L(x)$ はノズル中心からの距離 x のスタンドオフ

距離である． $a_{L(x)}$ と $b_{L(x)}$ はガウス分布の定数で，スタンドオフ距離 $L(x)$ の関数とした．また， $c_{(\theta)}$ および $d_{(\theta)}$ は傾斜角ごとに決まる定数で，跳ね返りショットと投射ショットの干渉の影響を示す定数である．傾斜角 $\theta=10^\circ \sim 50^\circ$ に対して統一した定数 $a_{L(x)}$ ， $b_{L(x)}$ ， $c_{(\theta)}$ ， $d_{(\theta)}$ ， n を決定し，カバレッジ分布を計算したところ， $\theta=40^\circ$ と 50° で発生する左右非対称のカバレッジ分布が近似できることを確認した．

参考文献

- 1) 久松定興：ショットピーニング技術の応用(1)，機械の研究 Vol.38 No.11, pp.1225-1228 (1986).
- 2) 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, pp.45-50 (1973).
- 3) Garipy, A., Larose, S., Perron, C., Levesque, M. : Shot Peening and peen forming finite element modeling - Toward a quantitative method, Inter. j. Solids and Structure, Vol.48, pp.2859-2877 (2011).
- 4) 太田高裕，大津浩太郎，平賀大記：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，東海大学紀要工学部，Vol.56 No.1, pp. 95-100 (2016).
- 5) Kopp, R., Wüstefeld, F. : Modern simulation and optimization of peen forming process, Proc. Int. Conf. Shot Peening-4, pp.561-572 (1990).
- 6) Garipy, 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, pp. 48-61 (2013).
- 7) Nguyen, V. B., Poh, H. J., Zhang, Y. W. : Predicting shot peening coverage using multiphase computational fluid dynamics simulations, Powder Technology 256, pp.100-112 (2014).
- 8) 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, pp.361-368 (1999).