マイクロブラスト加工を用いた金属・樹脂直接接合の 接合強度を特徴づける表面性状パラメータの探求と提案*

山口昌輝** 吉田一朗*** 近藤雄基*** 山口英二† 堀江永有太†
鈴木豪太†† 木村文信††† 梶原優介†††

Research and Proposal on Surface Texture Parameters
for The Injection Molded Direct Joining Using Micro Blasting

Masaki YAMAGUCHI, Ichiro YOSHIDA, Yuki KONDO, Eiji YAMAGUCHI, Nayuta HORIE, Gota SUZUKI,
Fuminobu KIMURA and Yusuke KAJIHARA

Solving environmental problems and energy problems is global urgent task. Weight saving of transportation equipment and robot is one of the effective solutions. The direct joining of metal and resin using a blasted surface is effective for weight saving. The problem is that the parameters of JIS / ISO standard have insufficient correlation with the shear strength of the direct joining of metal and resin using a blasted surface. In this paper, new surface roughness parameters that considered various geometrical characteristics of surface texture are proposed. And, proposed parameters are confirmed that have higher correlation with the shear strength than the parameters of JIS / ISO standard.

Key words: surface texture, abrasive blasting, direct joining, injection molding, micro blasting, joint strength

1. 緒 言

環境問題やエネルギー問題の解決は世界的急務であり、その有効な解決策として樹脂と金属の直接接合技術による輸送機器が挙げられる¹⁾²⁾。本研究では、樹脂と金属の直接接合法として、成形接合に着目している。成形接合とは、金属表面に多数のマイクロ／ナノメートルオーダーの微細構造を加工し、射出成形などによって図1のように溶融樹脂を微細構造に流し込むことで、主にアンカー効果による強固な接合を実現する方法である³⁾⁴⁾⁵⁾。直接接合技術に使用される金属表面加工法としては、主に化学エッチング⁶⁾⁷⁾およびレーザ加工⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾が挙げられるが、本研究では産業界の生産ラインに導入しやすいマイクロブラストによる粗面処理を微細構造創製法として採用している¹¹⁾。マイクロブラスト処理は、ドライプロセスのため生産ラインへの導入が比較的容易、かつ、接合に適した表面凹凸を広範囲に一括で加工可能であるため、生産性に優れている。接合強度は、マイクロブラスト処理した金属表面の表面性状と密接な関係があるが、一般的な粗さパラメータ Ra , RSm , $R\Delta a$ では、接合強度との相関が得られないことが先行研究により明らかになっている¹¹⁾。

そこで本研究では、接合強度を特徴づける表面性状パラメータを探索するとともに、接合強度と強い相関をもつ JIS/ISO 規格にはない新しい粗さパラメータの開発を目的とする。具体的には、マイクロブラスト処理による接合部のアンカー効果と表面積の増大に伴う化学結合力の向上に着目し、表面微細凹凸の特徴を捉えるパラメータを開発したので報告する。加えて、実験による検証の結果、新たに開発したパラメータが JIS/ISO 規格パラ

メータより強い相関を示す結果が得られたので報告する。

2. 実験方法

本章では、マイクロブラスト処理を用いた金属と樹脂の直接接合法の実験方法について述べる。

図2は、射出成形機により成形接合を行い、金属と樹脂を直接接合した試験片（以下、本論文では接合試験片と呼ぶ）である。作製した接合試験片は、引張せん断試験¹²⁾を行うことにより、接合強度の評価を行う。本研究で用いる接合試験片の材料は、強度が高く軽量な材料として知られるアルミニウム合金（A5052）と、自動車材料として良く用いられるエンジニアプラスチックである PBT（ポリブチレンテレフタレート）を用いる。本接合試験片の寸法は、ISO 19095-2 に従い金属板が $45 \times 18 \times 1.5$ mm、樹脂側が $50 \times 10 \times 3$ mm とする¹³⁾。図2に示すとおり、本接合試験片では金属と樹脂が重なる接合試験片の中央部で金属と樹脂を接合させており、接合面積は 10×5 mm である。

Fig. 1 Schematic of the injection molded direct joining

Fig. 2 Schematic diagram of the experiment specimen

* 原稿受付 令和2年1月31日

掲載決定 令和2年3月15日

** 学生会員 法政大学大学院（東京都小金井市梶野町3-7-2）

*** 正会員 法政大学（東京都小金井市梶野町3-7-2）

† 新東工業株式会社（愛知県名古屋市中村区名駅3-28-12）

†† 元東京大学（東京都目黒区駒場4-6-1）

††† 正会員 東京大学（東京都目黒区駒場4-6-1）

Table 1 Correspondence table on grain size and grain number of alumina

	Grain size μm				
	47.5	71.5	84.5	107.5	181
Grain number	#400	#180	#150	#120	#80

Fig. 3 Primary profile of blasted surface

Table 2 Micro-blasting conditions

Grain number of alumina	#80, #120, #150, #180, #400
Injection pressure MPa	0.3, 0.5, 0.7, 1.0

Table 3 Roughness measuring conditions

Evaluation length mm	4
Sampling pitch μm	0.5
Contact stylus radius μm	0.1
Contact force μN	300
Measurement speed mm/s	0.1

Table 4 Injection molding conditions

Injection speed mm/s	100
Pack pressure MPa	90
Holding pressure MPa	60
Mold temperature $^{\circ}\text{C}$	140
Cylinder temperature $^{\circ}\text{C}$	270, 275, 265, 245

金属板の表面には、マイクロブラスト装置を用いてマイクロメートルオーダーの微細な凹凸を加工する。マイクロブラスト装置とは、圧縮気体を利用して微細砥粒をノズル先端から金属などに高速で衝突させて微細加工を行う装置である。マイクロブラスト処理では、新東工業製のマイクロブラスト装置および表1に示す番手と粒径のアルミナ砥粒を用いて、金属板の接合部分の表面に数100 nmから数10 μm 程度の凹凸構造を加工する。

マイクロブラスト処理した金属板表面の凹凸構造の測定には小坂研究所製の微細形状測定機ET4000を用い、本報では輪郭曲線によって表面性状を評価する。図3は、ET4000を用いて測定したマイクロブラスト処理面（噴射圧：1.0 MPa、粒度：#150）の断面曲線の例である。マイクロブラスト処理に用いたアルミナ砥粒と噴射圧の条件を表2に、微細形状測定機ET4000による測定条件を表3¹³⁾に示す。本報では、図3の横軸方向の値を x 、縦軸方向の値を z とする。

接合試験片の製作では、FANUC製のROBOSHOT α -S100iA（スクリー径：22 mm）を用いて、マイクロブラスト処理された金属板と樹脂を直接接合する。成形接合を行った接合試験片は、接合状態を安定化させるアニール後に、接合が完了する¹⁴⁾。表4は、成形条件である。表4のパック圧とは、金型に樹脂が完全に

充填された直後の金型内の圧力であり、金型内に設置した圧力センサで測定する。本研究では、射出樹脂量を制御することによりバック圧を90 MPaに設定する。また、表4に示すとおり、金型温度は140 $^{\circ}\text{C}$ に設定し、シリンダ内の温度は樹脂を金型に射出する先端側から樹脂ペレットを供給する側にかけて270 $^{\circ}\text{C}$ 、275 $^{\circ}\text{C}$ 、265 $^{\circ}\text{C}$ 、245 $^{\circ}\text{C}$ に設定する。

接合が完了した接合試験片は、自作の引張試験機¹⁴⁾を用いて引張せん断強度を測定する。

3. JIS/ISO規格の表面性状パラメータによる評価

本研究では、接合メカニズムを解明するため、表面性状と接合強度の関係を明らかにする。本章では、本研究で提案する表面性状パラメータについて説明する前に、JIS/ISO規格に規定されている Ra および RSm をはじめとした粗さパラメータ^{15), 16), 17)}を用いてブラスト処理面の表面性状の定量化を行い、接合強度との相関を評価する。直接接合のメカニズムは大きく分けて、界面の結合力や分子間力などの材料間にはたらく力と、金属の凹凸構造に樹脂が物理的に作用することによって発生するアンカー効果の二つによると考えられている¹⁾。これらの要因は表面の凹凸構造と密接な関係があると考察できるため、表面の凹凸構造の幾何学的な特徴を定量的に評価することは接合メカニズムを解明するために重要である。また、接合強度と表面の凹凸構造との関係について妥当性の高い検証を行う上で、凹凸構造に樹脂が充填されていることが重要であるため、先行研究において成形条件の最適化を行い凹凸構造に樹脂が充填されることを確認した¹¹⁾。

次に、本報でブラスト処理面の評価に用いたJIS/ISO規格にある輪郭曲線方式の表面性状パラメータ¹⁵⁾について説明する。輪郭曲線の算術平均高さ： Pa , Ra , Wa は、輪郭曲線の絶対値の平均である。ここで、 P は断面曲線、 R は粗さ曲線、 W はうねり曲線である。輪郭曲線の最大山高さ： Pp , Rp , Wp および最大谷深さ： Pv , Rv , Wv は、輪郭曲線の山頂までの高さの最大値および谷底までの深さの最大値である。輪郭曲線の最大高さ： Pz , Rz , Wz は、輪郭曲線の最大高さ： Pp , Rp , Wp と Pv , Rv , Wv の和である。輪郭曲線の二乗平均平方根高さ： Pq , Rq , Wq は、輪郭曲線の二乗平均平方根である。輪郭曲線要素の平均高さ： Pc , Rc , Wc は、山頂から谷底までの高さを算出して平均した値である。輪郭曲線のスキューネス： Psk , Rsk , Wsk は、輪郭曲線の三乗平均を Pq , Rq , Wq の三乗によって無次元化した値である。輪郭曲線のクルトシス： Pku , Rku , Wku は、輪郭曲線の四乗平均を Pq , Rq , Wq の四乗によって無次元化した値である。輪郭曲線要素の平均長さ： PSm , RSm , WSm は、基準長さにおける輪郭曲線要素の長さの平均である。輪郭曲線の二乗平均平方根傾斜： $P\Delta q$, $R\Delta q$, $W\Delta q$ は、ラグランジュの多項式により局部傾斜を求め、求めた局部傾斜の二乗平均平方根を算出する。

次に、ブラスト処理面の評価に用いた負荷曲線に関するJIS/ISO規格のパラメータ^{15), 16)}について説明する。輪郭曲線の負荷長さ率： $Pmr(c)$, $Rmr(c)$, $Wmr(c)$ は、任意の切断レベル差： c での輪郭曲線の負荷長さ率である。輪郭曲線の切断レベル差： $P\delta c$, $R\delta c$, $W\delta c$ は、任意の負荷長さ率に一致する高さ方向の切断レベル差である。相対負荷長さ率： Pmr , Rmr , Wmr は、 c と $P\delta c$, $R\delta c$, $W\delta c$ によって決まる負荷長さ率である。コア部の負荷長さ率 $Mr1$ は、粗さ曲線の突出山部とコア部との境界の負荷長さ率である。コア部の負荷長さ率 $Mr2$ は、粗さ曲線の突出谷部とコア部との境界の負荷長さ率である。突出谷部深さ Rvk は、

粗さ曲線のコア部の下突出谷部の平均深さである。

最後に、モチーフ法を用いたモチーフパラメータ¹⁷⁾について説明する。モチーフ法¹⁷⁾とは、輪郭曲線の凹凸上に存在する相対的に小さな凹凸を無視して、相対的な大きな構造の表面凹凸を検出する手法のことである。以降、本報では相対的に大きな構造の表面凹凸を大域山と呼称し、大きな山の間に存在する相対的に小さな構造の表面凹凸を局所山 (local peak) と呼称する。粗さモチーフ平均長さ AR は、大域山の山頂から山頂の間の x 方向の長さの平均値である。粗さモチーフ平均深さ R は、大域山の山頂から谷底までの深さの平均値である。粗さモチーフの最大深さ Rx は、大域山の山頂から谷底までの深さの中で最大の値である。

表 5~8 は、前述の JIS/ISO 規格の表面性状パラメータとせん断強度試験の実験結果から求めた相関係数 ρ である。実験では、表 2 のアルミナ砥粒の粒径と噴射圧の各条件でマイクロプラスト処理した金属板を用いる。金属板の枚数は、各条件について 8 枚ずつ準備し、合計 160 枚である。また、金属板の表面性状は微細形状測定機で測定し、小坂研究所製の表面性状解析ソフトウェア i-Star Ver. 6.77 によって前述のすべてのパラメータを算出したが、表 5~8 には代表的な結果を抜粋して示す。表 5~8 に示すとおり各パラメータとせん断強度との間に強い相関は確認できず、本研究の範囲では JIS/ISO 規格の粗さパラメータは接合強度との相関は弱かった。この実験結果より、JIS/ISO 規格にはない新しい表面性状パラメータの開発が必要であると考えられる。

4. プラスト処理面のための新しい表面性状パラメータの開発

3 章において、JIS/ISO 規格に規定されているパラメータでは、接合強度に関係する表面凹凸の特徴を捉えきれないことを実験で示した。そこで、本研究では、接合強度を特徴づける新たな表面性状パラメータを考案する。

4.1 アンカー効果に着目した新しいパラメータ

アンカー効果についての物理的考察から考案した新しい表面性状パラメータについて説明する。アンカー効果は、凹凸構造の山間にある微細凹凸が関係していると考察し、モチーフ法¹⁷⁾を応用した新たなパラメータ $pPmotif$ を開発する。図 4 は、 $pPmotif$ の計算に必要な大域山 (図 4 中の青丸) と大域山の間に存在する局所山 (図 4 中の赤丸) を検出した模式図である。 $pPmotif$ は、式 (1) に示すように大域山の間に存在する局所山の数 n_i を大域山の山頂間の距離 AR_i で除した値の平均である。計算手順は次の通りである。(1) 輪郭曲線のピーク点を検出する。(2) 検出したピーク点の中からモチーフ法を利用して大域山を検出する。(3) (1) で求めたピーク点の中から (2) で求めた大域山の間に存在する局所山 (図 4 赤丸) の数を検出する。(4) 大域山の間に存在する局所山の数をその大域山の間の距離 AR_i で除す。(5) 手順 (4) で求めた各値から、式 (1) のように平均を求める。

$$pPmotif = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{AR_i} \quad (1)$$

4.2 分子間力に着目した新しいパラメータ

3 章の JIS/ISO 規格に規定されているパラメータは、物理的引っ掛かり効果であるアンカー効果に寄与すると考えられる輪郭曲線の高さ方向や横方向の凹凸形状を評価しているにもかかわらず、本報の実験範囲では接合強度との相関が弱い結果が得られた。よって、接合強度には界面の結合力や分子間力などの化学

結合力の影響の割合が大きいと考察する。そこで、本研究では、

Table 5 Correlation coefficients between shear strength and Ra , Rz , Rv , Rsk , Rku , RSm , $R\Delta q$ in JIS/ISO parameters¹⁵⁾

	Ra	Rz	Rv	Rsk	Rku	RSm	$R\Delta q$
ρ	0.071	0.23	0.24	0.43	0.52	0.46	0.40

Table 6 Correlation coefficients between shear strength and Pa , Pz , Pv , Psk , Pku , PSm , $P\Delta q$ in JIS/ISO parameters¹⁵⁾

	Pa	Pz	Pv	Psk	Pku	PSm	$P\Delta q$
ρ	0.08	0.25	0.30	0.43	0.48	0.46	0.38

Table 7 Correlation coefficients between shear strength and $R\delta c$, $P\delta c$, Rmr , Pmr , $Mr1$, $Mr2$, Rvk in JIS/ISO parameters¹⁶⁾

	$R\delta c$	$P\delta c$	Rmr	Pmr	$Mr1$	$Mr2$	Rvk
ρ	0.52	0.51	0.44	0.42	0.55	0.59	0.41

Table 8 Correlation coefficients between shear strength and AR , R , Rx in JIS/ISO parameters¹⁷⁾

	AR	R	Rx
ρ	0.14	0.11	0.21

Fig. 4 Concept diagram of calculation method on $pPmotif$

表面の分子間力の増大に寄与する表面凹凸の特徴として挙げられる¹⁸⁾表面積について考察し、表面積の大きさを数値化する新しいパラメータを開発する。具体的には、図 5 に示すように輪郭曲線の表面凹凸の長さ、表面凹凸が平坦な場合の長さ、すなわち、測定長さとの差を計算する。式 (2) は新たに定義した $pPsa$ の計算方法である。 $pPsa$ の計算手順は次のとおりである。(1) プロファイルの長さ SA を求める。(2) 表面凹凸の平坦の長さ x を求める。(3) SA の x からの増加分 $pPsa$ を求める (式 (2))。

$$pPsa = SA - x \quad (2)$$

4.3 アンカー効果と分子間力に着目した新しいパラメータ

実験結果から接合強度と強い相関を得るためには、アンカー効果と分子間力のどちらか片方に着目するのではなく、両方に着目し複合させたパラメータも検討する必要があると考察する。

4.3.1 山頂付近の体積および谷底付近の容積を利用したパラメータ

山頂付近の体積および谷底付近の容積は、アンカー効果および分子間力に影響を与える可能性があると考えられ、新たなパラメータとして山頂付近の輪郭曲線の面積のパラメータ $pPsm$ 、谷底付近の輪郭曲線の面積のパラメータ $pPsv$ と定義する。 $pPsm$ および $pPsv$ の計算手順について、 $pPsm$ を例に説明すると次のとおりとなる。(1) 輪郭曲線の山頂の点を検出する。(2) 検出後は、図 6 に示すように検出した山頂の点の前側 2 点、後側 2 点

の計5点を検出する。(3) 図6に示すとおり、検出した5点間から台形積分を用いて面積 S_i を求める。(4) 全ての山頂の5点間面積を合計し、山頂の総数 n_m で除して平均を求め $pPsm$ (式(3))を求め、表面性状パラメータとする。谷底についても同様の計算を行い、 $pPsv$ を求める。

$$pPsm = \frac{1}{n_m} \sum_{i=1}^{n_m} S_i \quad (3)$$

4.3.2 横幅と表面積の増大に着目したパラメータ

本項では、山頂付近と谷底付近のプロファイルの横幅と表面積の増大に着目したパラメータを考案する。表面積の増大と横幅に着目したパラメータでは、山頂および谷底付近の横幅がアンカー効果の大小を、表面積の増大が分子間力の大小を評価できると考察し、山頂付近の横幅と表面積に関連するパラメータを $pPwm$ 、谷底付近の横幅と表面積に関連するパラメータを $pPwv$ と定義する。ここで、 $pPwm$ 、 $pPwv$ の単位は無次元である。 $pPwm$ および $pPwv$ の計算手順について、 $pPwv$ を例に説明すると次のとおりとなる。(1) 谷底を検出する。(2) 図7に示すように検出した各谷底の両側の山のうち小さな方の山の山頂から、検出した各谷底の両側の山のうち大きい方の山の斜面まで水平な直線を引き、この水平な直線と大きな山の斜面との交点を求める。(3) 計算手順(2)で求めた小さい方の山頂から大きい方の山の斜面の交点までのプロファイルの長さ SB_i および水平距離 xB_i を求める。(4) 式(4)に示すとおり、求めた SB_i と xB_i との差を xB_i で除した値を求め、その総和を谷底の総数 n_v で除した値 $pPwv$ を求める。山側についても同様の計算を行い、 $pPwm$ を求める。ここで、 $pPwm$ 、 $pPwv$ の単位は無次元である。

$$pPwv = \frac{1}{n_v} \sum_{i=1}^{n_v} \frac{SB_i - xB_i}{xB_i} \quad (4)$$

4.3.3 高さと表面積の増大に着目したパラメータ

引き続き、本項ではアンカー効果と分子間力の両方に着目したパラメータを提案する。4.3.2項では横方向の要素と表面積に着目したが、本項では高さ方向の要素と表面積に着目し、山頂付近の凹凸構造の高さと表面積を複合させたパラメータを $pPhm$ 、谷底付近の凹凸構造の高さと表面積を複合させたパラメータを $pPhv$ と定義する。ここで、 $pPhm$ 、 $pPhv$ の単位は無次元である。 $pPhm$ および $pPhv$ の計算手順について、谷底側のパラメータ $pPhv$ を例に説明すると次のとおりとなる。(1) 谷底を検出する。(2) 図8に示すように検出した各谷底の両端の山頂のうち、高さの低い方の山頂から高さの高い方の山の斜面まで水平な直線を引き、高い方の山の斜面と水平な直線との交点を求める。(3) 計算手順(2)で求めた低い方の山頂から斜面の交点までの水平距離 xB_i およびプロファイルの長さ SB_i を求める。(4) 小さな山から谷底までの高さ h_i を求める。(5) 式(5)に示すとおり、計算手順(3)で求めた SB_i と xB_i の差を計算し、その値を h_i で除した値を求め、その総和を谷底の総数 n_v で除した値 $pPhv$ を求める。山頂についても同様の計算を行い、 $pPhm$ を求める。ここで、 $pPhm$ 、 $pPhv$ の単位は無次元である。

$$pPhv = \frac{1}{n_v} \sum_{i=1}^{n_v} \frac{SB_i - xB_i}{h_i} \quad (5)$$

4.3.4 隣接する山の間の横幅と表面積の増大に着目したパラメータ

4.3.2項の $pPwm$ 、 $pPwv$ 、4.3.3項の $pPhm$ 、 $pPhv$ では山頂付近

と谷底付近に分けて評価したが、本項ではアンカー効果や分子

Fig. 5 Concept diagram of calculation method on $pPsa$

Fig. 6 Concept diagram of calculation method on $pPsm$

Fig. 7 Concept diagram of calculation method on $pPwv$

Fig. 8 Concept diagram of calculation method on $pPhv$

間力は金属表面の山頂付近と谷底付近の両方に総合的に作用すると考察し、ある山頂から隣接する山の山頂までの間の表面積の大小を表現するパラメータ $pPmm$ を開発する。パラメータ $pPmm$ の計算手順は次のとおりである。(1) 山頂を検出する。(2) 図9に示すように、山頂から隣接する山頂までの水平距離 xC_i および山頂から隣接する山頂までのプロファイルの長さ SC_i を求める。(3) 式(6)に示すとおり、求めた SC_i と xC_i の差を xC_i で除

した値 RC_i を求め、 RC_i の総和を谷底の総数 n_v で除した値を $pPmm$ と定義する。ここで、 $pPmm$ の単位は無次元である。

$$pPmm = \frac{1}{n_v} \sum_{i=1}^{n_v} RC_i = \frac{1}{n_v} \sum_{i=1}^{n_v} \frac{SC_i - xC_i}{xC_i} \quad (6)$$

4.4 ヒストグラムを併用したパラメータ

先行研究では、アスペクト比を利用したパラメータである Aspect ratio を提案した¹⁰⁾。Aspect ratio では、ヒストグラムを用いて微細凹凸形状が接合強度に影響している可能性を示した¹⁰⁾。Aspect ratio の単位は無次元である。そこで、本研究でも、ヒストグラムを用いて計算するパラメータを定義し、接合強度との相関を評価する。ヒストグラムを用いる本手法では、パラメータの計算過程でヒストグラムを作成し、ヒストグラムの横軸の階級に上側のしきい値と下側のしきい値を定め、その範囲内の値からパラメータを計算する。

この手法では、上側のしきい値と下側のしきい値をどう設定するかが問題となるが、実験データから図 10 のようなヒストグラムを作成し検証した結果、値の下限付近にデータが集中し、値が大きくなるにつれてデータ数が少なくなる共通傾向が明らかとなった。そのため、下側のしきい値は設定せずにデータの最小値からとし、上側のしきい値は全体の 2σ を超えない値に設定することとした。図 10 は、式(6)の RC_i のヒストグラムである。本実験データでは、上記規則に則ると下側のしきい値は 0、上側のしきい値は 0.21 となり、その範囲内に存在する RC_i の平均値をパラメータ値とする。なお、ヒストグラムを利用して算出したパラメータは、元となるパラメータの末尾に I をつける命名規則とし、 $pPmm$ の場合は $pPmmI$ と定義する。

5. 開発した表面性状パラメータの実験による有効性評価

開発した表面性状パラメータの有効性を検証するために、開発したパラメータと引張せん断強度との相関を評価する。粒度ごとに分けて相関係数を導出した方が相関係数が高くなる傾向であったが、本報では粒度ごとに分けずに各パラメータの評価・検証を行う。表 9、表 10 に、表 2 の条件でマイクロプラスト処理した接合試験片の各パラメータと接合強度との相関係数 ρ を算出した結果を示す。また、図 11~21 に、各パラメータと接合強度の散布図を示す。

表 9、表 10 に示すとおり、本研究で開発した表面性状パラメータは、 $pPmotif$ 、 $pPsa$ を除いて JIS/ISO 規格のパラメータより相関係数が高い結果が得られた。特に、 $pPmmI$ 、 $pPhv$ 、 $pPhm$ 、 $pPwm$ の相関係数は、強い相関といえる相関係数 0.7 を超える結果となった。

接合強度との相関が弱かったパラメータである $pPmotif$ と $pPsa$ は、図 11、図 12 の散布図に示すとおり表面性状パラメータの変化に対する接合強度に傾向が見られず分散していることが分かる。 $pPmotif$ と $pPsa$ の両パラメータは、アンカー効果と分子間力のどちらか片方にしか着目していないことから接合強度に寄与する表面凹凸を有効に評価できなかったため、他のパラメータよりも相関係数が低くなったのではないかと考察する。

また、山と谷を分けて評価するパラメータ $pPsm$ 、 $pPsv$ 、 $pPwm$ 、 $pPwv$ 、 $pPhm$ 、 $pPhv$ は、山と谷でほぼ同じ相関係数を示すと同時に、すべて強い相関を示した。一方、山と谷を分けて評価しないパラメータ $pPmotif$ 、 $pPsa$ 、 $pPmm$ はすべて、山と谷を分けて評価するパラメータよりも相関係数が低い値となっている。これ

らの結果は、表面凹凸のプロファイル全体をマクロに評価するのではなくミクロな視点で山と谷の幾何学的特徴をパラメータ化した方が妥当性の高い結果が得られる可能性を示唆すると同時に、山と谷の両方が接合強度に影響することを示唆していると考察する。

また、相関係数をもっとも高い $pPmmI$ は、 RC_i のヒストグラムに上側のしきい値を設定し、その範囲内に存在する RC_i の平均値からパラメータを求めたが、しきい値を設定しない $pPmm$

Fig. 9 Concept diagram of calculation method on $pPmm$

Fig. 10 Histogram of RC_i (#400, 0.5MPa)

Table 9 Correlation coefficients between shear strength and $pPmotif$, $pPsa$, $pPsm$, $pPsv$, $pPwm$, $pPwv$

	$pPmotif$	$pPsa$	$pPsm$	$pPsv$	$pPwm$	$pPwv$
ρ	-0.23	0.41	0.64	0.68	0.70	0.67

Table 10 Correlation coefficients between shear strength and $pPhm$, $pPhv$, $pPmm$, $pPmmI$, Aspect ratio

	$pPhm$	$pPhv$	$pPmm$	$pPmmI$	Aspect ratio
ρ	0.72	0.73	0.63	0.75	0.61

Fig. 11 Correlation between $pPmotif$ and shear strength in various grain numbers of alumina

Fig. 12 Correlation between $pPsa$ and shear strength in various grain numbers of alumina

Fig. 15 Correlation between $pPwm$ and shear strength in various grain numbers of alumina

Fig. 16 Correlation between $pPvw$ and shear strength in various grain numbers of alumina

Fig. 13 Correlation between $pPsm$ and shear strength in various grain numbers of alumina

Fig. 17 Correlation between $pPhm$ and shear strength in various grain numbers of alumina

Fig. 14 Correlation between $pPsv$ and shear strength in various grain numbers of alumina

Fig. 18 Correlation between $pPhv$ and shear strength in various grain numbers of alumina

Fig. 20 Correlation between $pPmml$ and shear strength in various grain numbers of alumina

Fig. 21 Correlation between Aspect ratio and shear strength in various grain numbers of alumina

よりも相関係数が高くなった。この結果から、接合強度への貢献度が大きい凹凸形状と小さい凹凸形状があると考察されるため、今後、表面凹凸の幾何学的特徴の組み合わせを分類しながらパラメータを計算するアルゴリズムの開発が必要であると考えられる。

6. 結 言

本研究では、プラスト粗面処理を利用した金属と樹脂の直接接合法の接合メカニズムを解き明かすことを目的に、JIS/ISO規格にある表面性状パラメータと接合強度との関係を解析した。また、接合表面の物理的および幾何学的な考察によって新たな表面性状パラメータを開発し、その有効性を実験により検証した。主な結論をまとめると、次のようになる。

- (1) マイクロプラスト処理による金属・樹脂直接接合の接合強度と JIS/ISO 規格の表面性状パラメータとの相関関係を実験により検証した結果、相関係数は 0.071 から 0.59 となり 0.6 未満であった。そのため、今回の実験範囲では、JIS/ISO 規格の表面性状パラメータではアンカー効果を表現できていない可能性が得られ、新たな表面性状パラメータの開発の必要性を実験により示した。
- (2) 直接接合する金属板の表面凹凸に対する物理的および幾何学的な考察により新たな表面性状パラメータを提案し、その有効性を実験により検証した。その結果、考案した 11 種類の新たな表面性状パラメータのうち 2 種を除く 9 種のパラメータが、JIS/ISO 規格のパラメータよりも強い相関を示す結果が得られた。特に、開発したパラメータ $pPmml$, $pPhv$, $pPhm$, $pPwm$ の相関係数は、それぞれ 0.75,

0.73, 0.72, 0.70 であり、強い相関といえる相関係数 0.7 を超える結果が得られた。

- (3) 本報の実験結果から、アンカー効果と分子間力のどちらか一方のみに着目して考案した表面性状パラメータでは強い相関を得ることは難しく、両方に着目してパラメータ開発を行う必要があると考察する。また、表面凹凸の幾何学的特徴やその組み合わせを分類しながらパラメータを計算するアルゴリズムの開発が必要であると考えられる。

本研究で新たに提案した表面性状パラメータは、JIS/ISO 規格に規定されている表面性状パラメータより相関係数が高くなったが、かなり強い相関といえる相関係数となっていないため、今後もプラスト処理面と相関性の高い表面性状パラメータの開発を行う予定である。具体的には、かなり強い相関といえる相関係数 0.8 以上を目指してアンカー効果や分子間力以外にも影響のある要因を探索し、新たな表面性状パラメータを開発する予定である。また、接合強度に寄与する表面凹凸の幾何学的特徴を三次元的に捉えるため、三次元の表面性状パラメータも開発する予定である。

参 考 文 献

- 1) 前田知宏：金属とプラスチックのポジティブアンカー効果を用いた直接接合技術，精密工学会誌，**84**, 5 (2018) 419.
- 2) 片山聖二，川人洋介，丹羽悠介，丹下章男，久保田修司：ステンレス鋼と非結晶性ポリアミド樹脂とのレーザ直接接合，溶接学会論文集，**25**, 2 (2007) 316.
- 3) 瀬戸雅宏，朝見芳弘，板倉雅彦，田中宏明，山部昌：樹脂—金属接合射出成形品の接合強さに与える成形条件の影響，成形加工，**27**, 2 (2015) 68.
- 4) Ramani K, Moriarty B : Thermoplastic Bonding to Metals via Injection Molding for Macro-composite Manufacture. Polymer Engineering and Science,**38**,5, (1998) 870.
- 5) Grujicic M, Sellappan V, Omar MA, Seyr N, Obieglo A, Erdmann M, Holzleitner J : An Overview of the Polymer-to-metal Directadhesion Hybrid Technologies for Load-bearing Automotive Components. Journal of Materials ProcessingTechnology, **197** (2008) 363.
- 6) 板橋雅巳：金属と樹脂の直接接合を可能にした ナノモルディングテクノロジー (NMT)，表面技術誌 **66**, 8 (2015) 359.
- 7) Fabrin PA, Hoikkanen ME, Vuorinen JE : Adhesion of Thermoplastic Elastomer on Surface Treated Aluminum by Injection Molding. Polymer Engineeringand Science , **47**, 8 (2007) 1187.
- 8) Taki K, Nakamura S, Takayama T, Nemoto A, Ito H : Direct Joining of aLaser-ablated Metal Surface and Polymers by Precise Injection Molding. MicrosystemTechnologies, **22** (2016) 31.
- 9) 早川伸哉：金属と樹脂のレーザ直接接合，日本接着学会誌，**50**, 5 (2014) 170.
- 10) 鄭光云，川人洋介，片山聖二：CFPP と各種金属とのレーザ直接接合，平成 24 年度春季溶接学会全国大会講演概要，**90** (2012) 220.
- 11) Yusuke Kajihara, Yuta Tamura, Fuminobu Kimura, Gota Suzuki, Naotake Nakura, Eiji Yamaguchi : Joining strength dependence on molding conditions and surface textures in blast-assisted metal-polymer direct joining, CIRP Annals - Manufacturing Technology, **67** (2018) 591.
- 12) ISO 19095-2:2015, Plastics — Evaluation of the Adhesion Interface Performance in Plastic-metal Assemblies — Part 2: Test Specimens.
- 13) 株式会社小坂研究所 微細形状測定機 (段差計/膜厚計) サーフコードホームページ [参照 2020-03-15]. <http://www.kosakalab.co.jp/product/precision/minute/>
- 14) 門屋祥太郎，木村文信，梶原優介：金属-樹脂直接接合評価のための引張試験装置の開発，2015 年度精密工学会春季大会学術講演会，(2015) 131.
- 15) JIS B 0601:2013 製品の幾何特性仕様 (GPS) - 表面性状：輪郭曲線方式—用語，定義及び表面性状パラメータ(ISO 4287 : 1997)，財団法人日本規格協会。
- 16) JIS B 0671-2 : 2002 製品の幾何特性仕様(GPS)- 表面性状：輪郭曲線方式—プラト構造表面の特性評価-第 2 部：線形表現の負荷曲線による高さの特性評価，(ISO 13565 - 2: 1996)，財団法人 日本規格協会。
- 17) JIS B 0631 : 2000 製品の幾何特性仕様(GPS) - 表面性状：輪郭曲線方式- モチーフパラメータ，(ISO 12085: 1996)，財団法人 日本規格協会。
- 18) 接着ハンドブック第 2 版 日本接着協会編，(1991) 131.