

# グラビアオフセット印刷による微細はんだバンプ形成： 所望のバンプ径に形成するための凹版セル形状の設計式

原口峻一, 小山千慧, 臼田幸太郎, 大山芳弘, 池田英樹

抄録 グラビアオフセット印刷は、最小直径  $6\ \mu\text{m}$  のバンプを 5%の誤差で形成することに成功した。指定されたバンプ径まで正確にプリントするために、インタリオセル形状の設計式を導出することを試みた。実験の結果、セル開口部を先細りにすることで、インタリオから放出されるペーストの量が増加することがわかった。セルのポア径が $10\ \mu\text{m}$ 以下であれば、印刷されたバンプ径は開口部の直径に依存し、当社開発したはんだペーストの程度になる。IDW '23で報告したことを一般化し、あらゆるペーストや印刷条件に適用される設計式を導き出した。具体的な例題に設計式を適用し、その有用性を検証した。

キーワード：フリップチップボンディング、マイクロLED、ミニLED、ソルダーペースト、プリントドエレクトロニクス

## 1. Introduction

マイクロLEDは、ディスプレイ機器や自動車機器など、高画素を必要とする製品への応用が期待されている<sup>1-2)</sup>。例えば、超高解像度テレビモニター、スマートウォッチなどの小型スクリーン、視聴距離の短いVR/ARゴーグルなど。

これらの高画素製品の製造には、多数のマイクロ LED チップを基板上に正確、迅速、確実に接着することが重要である。特に、マイクロLEDには、小型、ファインピッチ、多量という3つの技術的な問題がある。まず、マイクロLEDと定義されるチップサイズは $100\ \mu\text{m}$ 以下であり、電極サイズはその約3分の1であるため、数ミクロンから $30\ \mu\text{m}$ の小さなコンタクトとなる。第二に、LEDは細かいピッチで配置されているため、電極間の間隔が狭く、ボンディングの位置精度が要求される。第三に、ディスプレイ表面全体が欠陥がないように、収率を高くしなければならない。

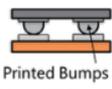
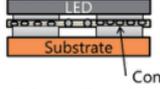
### 1.1 従来のボンディング方法の問題点

現在、マイクロ LED の接合には ACF (異方性導電膜) が使用されている。導電性粒子を樹脂中に分散させたものである。電極で挟み、熱圧縮下で接着する。電気伝導は、導電性粒子が圧力下で電極に接触し、周囲の樹脂が隣接する電極とのショートを防止することで起こる。

接触は圧力点のみで行われるため、位置決め精度は、ACFアフィクシング時に位置決めを必要としないという利点がある、クレンジング時に上部電極と下部電極を単純にアライメントすることで決定される。しかし、ACFボンディングでは、圧力によるチップ損傷のリスクがある。一度切断すると、欠陥のある結合を再構築することは困難であり、収率が低下する危険性がある。

したがって、はんだボンディングが望まれる。この方法は、低融点合金であるはんだを用いて電極とLED端子を接合する。溶融金属を用いた拡散接合であるため、接合点の電気抵抗はACFよりも低い。降伏の利点は、欠陥部品を局所的に加熱することで、そのチップのみを交換し、再加工できることである。比較結果を表 1 にまとめる。

表1 マイクロLEDのボンディング方法

Material	Solder Paste	Anisotropic Conducting Film
Image	 Printed Bumps	 Conduction
For Micro LED	Under Development	Conventional
Conductivity	Reliable	Low (dependence on particle density)
Pressure	3-100 kPa (printing)	1 MPa (compression bonding)
Heating	150-250 °C	100-200 °C
Positional Precision	Printing + Bonding precision	Only Bonding precision
Rework	Easy	Difficult

Received March 25, 2024; Revised June 9, 2024; Accepted July 8, 2024 † Komori Corporation Tsukuba Plant (Ibaraki, Japan)

# Micro Solder Bumps Forming by Gravure Offset Printing: The design formulas for intaglio cell shape to print your desired bump diameters

Shunichi Haraguchi<sup>†</sup>, Chisato Oyama<sup>†</sup>, Kotarou Usuda<sup>†</sup>,  
Yoshihiro Ohyama<sup>†</sup> and Hideki Ikeda<sup>†</sup>

**Abstract** Gravure offset printing succeeded in forming bumps with a minimum diameter of 6  $\mu\text{m}$  within 5% errors. We attempted to derive the design formulas for the intaglio cell shape in order to accurately print to the specified bump diameter. As a result of experiments, it is found that tapering the cell openings increased the amount of paste released from the intaglio. If the bore diameter of the cell was less than 10  $\mu\text{m}$ , the printed bumps diameter depended on the aperture diameter, about our developed solder paste. We generalized what we reported at IDW '23 and derived the design formulas that are applied to any paste or printing conditions. We applied the design formulas to a specific example and verified their usefulness.

**Keywords:** Flip chip bonding, Micro LED, Mini LED, Solder paste, Printed electronics.

## 1. Introduction

Micro LED is expected to be applied to products that require a high-pixel, such as display devices and automotive equipment<sup>1-2)</sup>. Examples include ultra-high resolution TV monitors, small screens such as smart watches, or VR/AR goggles with short viewing distances.

In the manufacture of these high-pixel products, it is important to bond a large number of micro LED chips on the substrate accurately, quickly and reliably. In particular, micro LEDs have three technical issues: small size, fine pitch, and large quantity. First, the chip size defined as micro LEDs are less than 100  $\mu\text{m}$ , and the electrode size is about one third of that, making it a small contact ranging from a few micron to 30  $\mu\text{m}$ . Second, since LEDs are arranged at a fine pitch, the spacing between the electrodes is narrow, and bonding positional precision is required. Third, the yield must be high so that the entire display surface is free of defects.

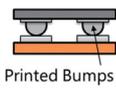
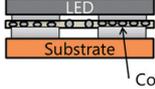
### 1.1 Problems with conventional method for bonding

Currently, ACF (anisotropic conductive film) is used for bonding micro-LEDs. It is made of dispersing conductive particles in resin. It is sandwiched between electrodes and bonded under thermo compression. Electrical conduction occurs when the conductive particles contact the electrode under pressure, and the

surrounding resin prevents shorting with adjacent electrodes. Since contact is made only at the pressure point, positioning accuracy is determined by simply aligning the upper and lower electrodes during crimping, which has the advantage of not requiring positioning when ACF affixing. However, with ACF bonding, there is a risk of chip damage due to the pressure. Once crimped, it is difficult to rework defective bonding and there is a risk of lower yield.

Therefore, solder bonding is desired. This method uses solder, a low melting point alloy, to bond electrodes and LED terminals. Because it is diffusion bonding using molten metal, the electrical resistance at the bonding point is lower than that of ACF. The yield advantage is that by locally heating the defective parts, only that chip can be replaced and reworked. The comparisons are summarized in Table 1.

**Table 1** Bonding methods for micro LEDs.

Material	Solder Paste	Anisotropic Conducting Film
Image	 Printed Bumps	 Substrate Conduction
For Micro LED	Under Development	Conventional
Conductivity	Reliable	Low (dependence on particle density)
Pressure	3-100 kPa (printing)	1 MPa (compression bonding)
Heating	150-250 °C	100-200 °C
Positional Precision	Printing + Bonding precision	Only Bonding precision
Rework	Easy	Difficult

Received March 25, 2024; Revised June 9, 2024; Accepted July 8, 2024

<sup>†</sup>Komori Corporation Tsukuba Plant  
(Ibaraki, Japan)

表2 ソルダペーストの粒径

solder paste	Type Ave or D50 Size range(μm)	Type4 Φ25μm 20-38	Type5 Φ18μm 15-25	Type6 Φ11μm 5-15	Type7 Φ8μm 2-11	Type8 Φ5μm 1-8	Type9 Φ3μm 1-5
Application	SMT use						
	High Density Interconnect(HDI)						
	Substrate-like-PCB (SLP)						
	System in Package(SIP)						
	Mini,microLED						

複数の電極にはんだバンプを形成する代表的な方法として、ボールマウント、メッキバンプ、はんだペースト印刷がある。ボールマウンティングは、はんだを電極の大きさまで球状にあらかじめ形成し、各電極にボールを1つずつ置く方法である。ボールの寸法精度を制御することで、均一なバンプ形成が可能となる。しかし、現在のところ、ソルダボールの最小直径は $30\mu\text{m}^3$ であり、マイクロLEDには大きすぎる。一方、プレーティングバンプ法は、細かいパターンニングに優れている。フォトレジストでマスクを形成し、電極位置の開口部にはんだをメッキしてバンプを成長させる。欠点は、マスクの形成と除去、メッキの成長に時間がかかり、その結果、生産効率が悪くなることである。

これら2つの方法とは対照的に、はんだペースト印刷は小型化と生産効率の両方を達成することができる。はんだペーストは、はんだ粉末を樹脂に混和して流動性を与えることで作る。ステンシル板と呼ばれるマスクの穴から印刷される。表2に示すように、マイクロLED電極サイズに適した直径の中央値が約 $3\mu\text{m}$ のタイプ9に分類されるはんだ粉末が実用化されている。さらに細かいタイプ10と11の開発も進んでいる。しかし、この方法の欠点は、位置精度が低いことである。その理由は、ステンシルの開口部が小さいほど、ペーストを絞り出すのに必要な圧力が高くなり、プレートが歪んでしまうからである。スクリーン印刷の実用的な最小径は約 $45\mu\text{m}$ で、位置精度は $\pm 10\mu\text{m}$ である。マイクロLEDでは、溶融はんだの表面張力によって接着位置が自然に補正されるセルフアライメントを期待していたとしても、これらは大きすぎる。

### 1.2 グラビアオフセット印刷

図1に示すグラビアオフセット印刷は、位置精度の高い印刷方法である。これは、グラビアプレートにはステンシルプレートのような貫通孔がないため、剛性が高く、圧力による変形が小さいため<sup>3)</sup>。

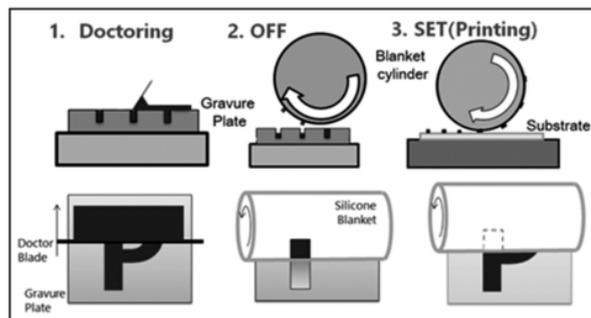


図1 グラビアオフセット印刷

また、直接グラビア印刷とは異なり、ブランケットと呼ばれる柔軟な中間転写体を使用することで、硬質基板やウエハーへの印刷が可能である。印刷されたエレクトロニクスでは、導電性ペーストをパターンニングして回路配線を形成する技術として使用されている<sup>4-5)</sup>。

我々は、この印刷方法をバンプ形成に適用するための研究開発に取り組んできた。これまでのところ、ウェーハレベルBGA(ボールグリッドアレイ)アプリケーション<sup>3)</sup>において、直径 $30\mu\text{m}$ 、位置精度 $\pm 5\mu\text{m}$ 以下のフラックス印刷を実現している。また、FHE(フレキシブル・ハイブリッド・エレクトロニクス)用途の直径 $10\mu\text{m}$ のさらに細かいバンプを印刷することにも成功している<sup>6)</sup>。マイクロLEDの電極サイズはこれらと同じかそれ以下であり、グラビアオフセット印刷によるはんだバンプ形成も適用できると期待される。

本研究の目的は、グラビアオフセット印刷により、マイクロLEDはんだバンプの直径が $10\mu\text{m}$ 以下の、より微細なはんだバンプを形成することである。重要な評価ポイントは、印刷されたバンプの直径の正確さである。これは、直径が大きすぎると短絡のリスクが高くなり、直径が小さすぎるとボンディングの信頼性が失われるからである。一方、同じ位置で繰り返しプリントすることで、段差の高さを調整することができる<sup>6)</sup>。マルチプルプリンティングでは、直径精度も同様に重要である。そこで、本論文では、単層印刷における直径制御に着目した。

グラビアオフセットで印刷されるバンプの大きさは、

**Table 2** Particle size of solder paste.

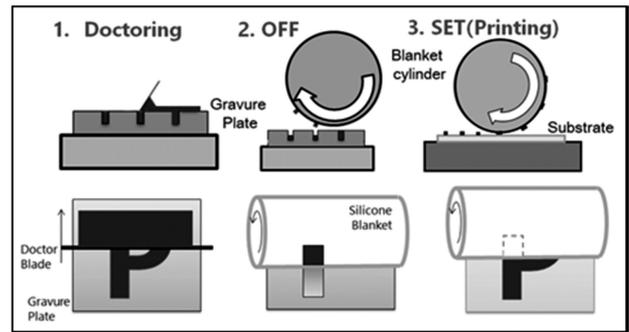
solder paste	Type Ave or D50 Size range( $\mu\text{m}$ )	Type4 $\Phi 25\mu\text{m}$ 20-38	Type5 $\Phi 18\mu\text{m}$ 15-25	Type6 $\Phi 11\mu\text{m}$ 5-15	Type7 $\Phi 8\mu\text{m}$ 2-11	Type8 $\Phi 5\mu\text{m}$ 1-8	Type9 $\Phi 3\mu\text{m}$ 1-5
Application	SMT use						
	High Density Interconnect(HDI)						
	Substrate-like-PCB (SLP)						
	System in Package(SIP)						
	Mini,microLED						

Typical methods for forming solder bumps on multiple electrodes are ball mounting, plated bumps, and solder paste printing. Ball mounting is a method in which solder is preformed into a spherical shape to the size of an electrode, and one ball is placed on each electrode. By controlling the dimensional precision of the balls, uniform bump formation is possible. However, currently the minimum solder ball diameter is  $30\ \mu\text{m}$ <sup>3)</sup>, which is too large for micro LEDs. On the other hand, the plating bump method is superior in fine patterning. A mask is formed with photoresist, and bumps are grown by plating solder into the openings made at the electrode positions. The disadvantage is that it takes time to form and remove the mask, and to grow the plating, resulting in poor production efficiency.

In contrast to these two methods, the solder paste printing is able to achieve both miniaturization and production efficiency. Solder paste is made by kneading solder powder into resin to give it fluidity. It is printed through holes in a mask called a stencil plate. As shown in Table 2, solder powder classified as Type 9, having a median diameter of around  $3\ \mu\text{m}$ , which is suitable for micro LED electrode size, has been put into practical use. Development of even more minute types 10 and 11 is also progressing. However, the disadvantage of this method is that the positional precision is poor. The reason is that the smaller the opening in the stencil, the more pressure is required to squeeze out the paste, which distorts the plate. The practical minimum diameter for screen printing is about  $45\ \mu\text{m}$ , and the positional precision is  $\pm 10\ \mu\text{m}$ . These are too large for micro LEDs even if it expected self-alignment in which the bonding position is naturally corrected due to the surface tension of the molten solder.

**1.2 Gravure offset printing**

Gravure offset, shown in Fig. 1, is a printing method with high positional precision. This is because gravure plates do not have through-holes like stencil plates, so they have high rigidity and are small deformation due to



**Fig. 1** Gravure offset printing.

pressure<sup>3)</sup>. Also, unlike direct gravure printing, printing on hard substrates and wafers is possible by using a flexible intermediate transfer medium called a blanket. In the printed electronics, it is used as a technology for patterning conductive paste to form circuit wiring<sup>4-5)</sup>.

We have been working on research and development to apply this printing method to bump formation. So far, we have achieved flux printing with a diameter of  $30\ \mu\text{m}$  with a positional precision of less than  $\pm 5\ \mu\text{m}$  for wafer-level BGA (ball grid array) applications<sup>3)</sup>. We have also succeeded in printing even finer bumps with a diameter of  $10\ \mu\text{m}$  for FHE (flexible hybrid electronics) applications<sup>6)</sup>. The electrode size of micro LEDs is the same as or smaller than these, and it is expected that solder bump formation by gravure offset printing can be applied as well.

The purpose of this research is forming finer solder bumps with a diameter of  $10\ \mu\text{m}$  or less for micro LED solder bumps by gravure offset printing. An important evaluation point is the accuracy of the printed bumps diameter. This is because if the diameter is too large, there is a high risk of short circuiting, and if the diameter is too small, the bonding reliability will be lost. On the other hand, the height of the bumps can be adjusted by repeatedly prints on the same position<sup>6)</sup>. Diameter accuracy is equally important in multiple printing. Therefore, in this paper, we focused on diameter control in single-layer printing.

The size of bumps printed with gravure offset depends

グラビアプレートから放出されるペーストの量と中間転写体の押圧力に依存する。印刷圧力を上げると型材の放出量は増える傾向があるが、ブランケットの変形量も増える<sup>3)</sup>。特にLED電極のような凸面に印刷する場合、ブランケットが板の凹面に接触している場合と、電極の凸面に接触している場合では、変形場に違いが見られる。したがって、印刷圧力が高くなるにつれて、パターンの歪みが大きくなり、位置精度が低下する<sup>3)</sup>。

したがって、印刷圧力をできるだけ低く保ちながら、金型を放出する量を増やすことが重要である。はんだペーストの粘度が高いため、型から完全に離すことができず、インタリオセルの壁面にペーストが残っている。小さなインタリオセルを使用する場合、体積に対する壁面の比率が大きく、残留しやすい。したがって、小径のバンプを正確に印刷するためには、ペーストの残留によるサイズ縮小を見越して、インタリオセルの形状を設計する必要がある。

最小限の印刷圧力で金型を放出する量を増やすために、インタリオセルの開口部を広げるというアイデアを試みた。より正確なバンプ径形成を可能にするセル形状設計式を考案し、検証した。

## 2. 提案手法

2.1 インタリオセル開口部の拡幅の評価  
開口部拡幅時の金型放出量と拡幅しない場合の金型放出量を比較し、アイデアの有効性を評価した。図2に示すように、アパーチャ直径 $a$ とボア直径 $b$ は、インタリオセル形状を表すパラメータとして定義される。以下の実験では、インタリオ細胞の深さを $10\mu\text{m}$ に統一し、テーパ角を $45^\circ$ に設定した。

$a=b=15\mu\text{m}$ の直線状と、 $a=25\mu\text{m}$ 、 $b=15\mu\text{m}$ のテーパ状の2つのセル形状を比較した。

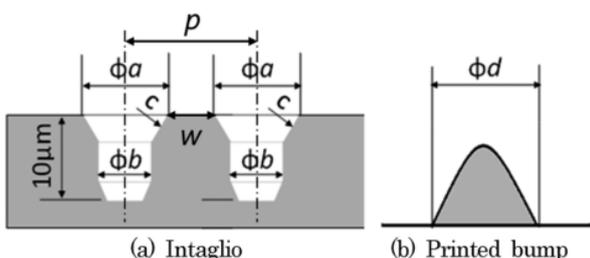


図2 クロスセクションの寸法

中間転写体でペーストを放出した直後から、インタリオセルの内部を観察した。

共焦点レーザー顕微鏡を用いて、残ったペーストの表面を探索し、その深さを測定した。

以下の実験では、すべての印刷試験はSERIA Engineering社製のグラビアオフセット印刷機PEPIO-F12SCを用いて行った。グラビアオフセット印刷に応用したはんだペーストを開発し、平らなガラス基板上に印刷した。圧力、速度、時間間隔などの印刷条件はあらかじめ設定されていた。これらの値は、中間転写体上にペーストが残らないように設定した。つまり、セル形状  $a = b = 15\mu\text{m}$  で印刷した場合、基板上に印刷されたペーストの量とインタリオセルから放出されたペーストの量の比を最大にすることにした。

2.2 最適なインタリオセル形状の導出  
インタリオプレートのセル形状とプリントバンプサイズの実験的に求めた。逆に、所望のバンプ径を印刷できるように最適なセル形状を提供する設計式は、以下のように導出される。

まず、セル開口部とボア径を様々に組み合わせてグラビアプレートを作製した。そして、これらのプレートによって印刷されたバンプの直径を顕微鏡を用いて測定した。印刷されたバンプ形状が完全な円でない場合は、円周上の円の直径を使用した。これらの測定結果から、セル形状パラメータ( $a, b$ )とプリントバンプ径 $d$ の関係が得られる。必要であれば、区分線形回帰を行うことで、フィッティングの分散を小さく保つことができる。

$$\frac{a}{d} = Ab + B \quad (1)$$

後述する逆解析では、4つの算術演算だけで簡単に計算できる。係数 $A$ および $B$ は、ペーストの特性および印刷条件に依存する。コンテンツに基づき、IDW' 23<sup>7)</sup>で報告し、任意のペーストと条件に適用できる一般化された設計式を導出した。所望のバンプ径を達成するセル形状を得るために、指定された直径を式(1)に代入する。

$$d = s \quad (2)$$

したがって、式(1)と式(2)から設計式が導かれる。

$$a = (Ab + B)s \quad (3)$$

Next, we formulated the cell shape. The taper size  $t$  is

on the amount of paste released from the gravure plate and the pressing force of the intermediate transfer medium. Increasing the printing pressure tends to increase the amount of mold release, but the amount of blanket deformation also increases<sup>3)</sup>. Especially when printing on convex surfaces such as LED electrodes, there is a difference in the deformation field when the blanket contacts the concave surface of the plate and when it contacts the convex surface of the electrode. Therefore, as the printing pressure increases, pattern distortion increases and positional accuracy decreases<sup>3)</sup>.

Therefore, it is important to increase the amount of mold release while keeping the printing pressure as low as possible. Due to the high viscosity of the solder paste, it cannot be completely released from the mold and some paste remain on the wall of intaglio cell. If a small intaglio cell is used, the ratio of the wall surface to the volume is large, and it is easy to remain. Therefore, in order to accurately print small-diameter bumps, it is necessary to design the intaglio cell shape in anticipation of the size reduction due to paste remaining.

In order to increase the amount of mold release with minimal printing pressure, we tried the idea of widening the aperture of the intaglio cell. We devised and verified a cell shape design formula that allows for more accurate bump diameter formation.

## 2. Proposal Method

### 2.1 Evaluation of intaglio cell aperture widening

The effectiveness of the idea was evaluated by comparing the amount of mold release when the aperture was widened and when it was not. As shown in Fig. 2, the aperture diameter  $a$  and bore diameter  $b$  are defined as parameters to express the intaglio cell shape. In the following experiments, the intaglio cell depth was unified to  $10\ \mu\text{m}$ , and the taper angle was set to  $45^\circ$ .

We compared two cell shapes; a straight shape with  $a = b = 15\ \mu\text{m}$ , and a tapered shape with  $a = 25\ \mu\text{m}$ ,  $b = 15\ \mu\text{m}$ . Immediately after the paste was released mold by

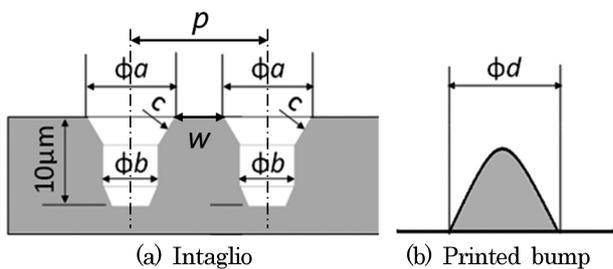


Fig. 2 Cross-sectional dimensions.

the intermediate transfer medium, the inside of the intaglio cell was observed. Using a confocal laser microscope the surface of the remaining paste was searched and the depth of it was measured.

In the following experiments, all printing tests were performed using a gravure offset printing machine PEPIO-F12SC manufactured by SERIA Engineering. We developed a solder paste that was applied to gravure offset printing and printed it on a flat glass substrate. Printing conditions such as pressure, speed, and time interval were preset. These values were set to ensure that no paste remains on the intermediate transfer medium. In other words, we decided to maximize the ratio of the amount of paste printed on the substrate to the amount of paste released from the intaglio cell when printing with cell shape  $a = b = 15\ \mu\text{m}$ .

### 2.2 Derivation of optimal intaglio cell shape

The relationship between the cell shape of the intaglio plate and the printed bump size was experimentally obtained. And conversely, a design formula that provides an optimal cell shape so that desired bump diameter can be printed is derived as follows.

First, gravure plates were made with various combinations of cell aperture and bore diameters. And the diameter of the bumps printed by these plates was measured using a microscope. If the printed bump shape was not a perfect circle, the diameter of the circumscribed circle was used. From these measurement results, the relationship between the cell shape parameters ( $a$ ,  $b$ ) and the printed bump diameter  $d$  is obtained. If necessary, the variance of the fitting can be kept small by performing piecewise linear regression.

$$\frac{a}{d} = Ab + B \quad (1)$$

It is easy to calculate using only four arithmetic operations in the inverse analysis described later. Coefficients  $A$  and  $B$  depend on paste characteristics and printing conditions. Based on the content, we reported at IDW'23<sup>7)</sup>, we have derived a generalized design formula that can be applied to any paste and conditions. To obtain a cell shape that achieves the desired bump diameter, the specified diameter is substituted into the equations (1).

$$d = s \quad (2)$$

Therefore, a design formula is derived from equations (1) and (2).

$$a = (Ab + B)s \quad (3)$$

Next, we formulated the cell shape. The taper size  $t$  is

は以下のように定義される。

$$t = a - b \quad (4)$$

細胞形状をテーパ状にする方法は、サブトラクティブ処理とプレーティングなどのアディティブ処理に分類される。減法処理の場合、面取り $t$ と準備した穴の直径 $b$ を指定する必要がある。一方、添加剤処理の場合、準備した穴の直径 $a$ とビルドアップの厚さ $t$ を指定しなければならない。加法処理の直径を与える設計式は、式(4)を式(3)に代入し、開口直径 $a$ について解くことによって得られる。

$$a = \frac{(B - At)s}{1 - As} \quad (5)$$

一方、ボア径 $b$ を解くと、減算処理の設計式が得られる。

$$b = \frac{Bs - t}{1 - As} \quad (6)$$

最後に、要求を満たすことができる適切なセル形状パラメータの範囲を導出した。グラビアプレートの耐久性とセル形状の精度に対する要求に従うため、セル間の必要な壁厚は材料強度によって制限される。したがって、図2に示すように、バンプ間のピッチ $p$ の指定に関して、開口部の直径に上限がある。

$$a \leq p - w \quad (7)$$

一方、ボア径ははんだ粒子径より大きくなければならない。したがって、ボア径の下限値 $m$ が存在する。

$$b \geq m \quad (8)$$

式(5)、(6)および式(7)、(8)は、 $t$ の可能な範囲を制限する。

$$\text{if } s < \frac{1}{A}, \quad v \leq t \leq u \quad (9)$$

$$\text{if } s = \frac{1}{A}, \quad t = Bs \quad (10)$$

$$\text{if } 0 < \frac{1}{A} < s, \quad u \leq t \leq v \quad (11)$$

$$\text{if } A \leq 0, \quad t \leq u, v \quad (12)$$

where

$$u = (mA + B)s - m \quad (13)$$

$$v = \frac{As - 1}{As}(p - w) + \frac{B}{A} \quad (14)$$

Then, you select  $t$  from these range. By substituting  $t$  into equations (5) and (6), cell shape ( $a, b$ ) can be obtained.

### 2.3 設計式の検証

提案された方法は、設計の具体的な例に適用された。提案手法の利用方法を示し、その有用性を検証する。指定されたバンプの直径  $s$  に対する設計式を用いて、最適なセル形状のグラビアプレートを作製した。印刷されたバンプの直径を顕微鏡で測定し、仕様値に対する誤差を評価した。

$$e = \frac{d - s}{s} \quad (15)$$

例えば、指定されたバンプの直径は、 $s = 6, 6.5, 7, 15, 20 \mu\text{m}$ でした。印刷条件および印刷材料は、2.1 に記載したとおりである。ボア径の下限は  $m = 3 \mu\text{m}$  とした。グラビアプレートは比較的安価なニッケル電気成形品で作られた。添加剤処理のビルドアップ厚さは、めっき処理時間に依存する。次に、1枚のグラビアプレート内のすべてのセルについて、ビルドアップの厚さが一定であることを考慮する必要がある。ニッケルは軟質金属であるため、必要な肉厚は $15 \mu\text{m}$ 程度と大きい。本論文の目的は、プリントバンプの直径の精度を検証することであるため、ピッチを指定することなく、十分な間隔を設けた。

さらに、確認された設計値を用いて、石英ガラス製のグラビアプレートを作製した。この材料は高価であるが、必要な肉厚を薄くできるという利点がある。

## 3. 結果と考察

3.1 インタリオセル開口部の拡幅効果図3は、ブランケットを用いてインタリオからペーストを放出した後のセルの断面図である。薄い曲線はレーザー顕微鏡でスキャンしたペースト表面を表し、太い線はセル壁表面を表す。ペーストは細い線と太い線に囲まれた部分に残っていた。開口部をテーパ状にしたセル(b)では、残留ペーストの深さはストレートセル(a)の2倍であった。したがって、セル開口部を広げることで、ペーストの放出性が向上することが確認された。

### 3.2 設計式を適用する

セル形状パラメータと印刷バンプ径の関係を図4にプロットした。縦軸はゲインの逆数であり、指定されたバンプ径を得るために必要な開口径と解釈することができる。

defined as follows.

$$t = a - b \quad (4)$$

Methods for making the cell shape tapered are classified into subtractive processing and additive processing such as plating. In the case of subtractive processing, it is necessary to specify chamfer  $t$  and the diameter of the prepared hole  $b$ . On the other hand, in the case of additive processing, the prepared hole diameter  $a$  and the build-up thickness  $t$  must be specified. The design formula that gives the diameter of additive processing is obtained by substituting equation (4) into equation (3) and solving for the aperture diameter  $a$ .

$$a = \frac{(B - A t) s}{1 - A s} \quad (5)$$

On the other hand, solving for bore diameter  $b$ , the design formula of subtractive processing is obtained.

$$b = \frac{B s - t}{1 - A s} \quad (6)$$

Finally, we derived the appropriate range of cell shape parameters that can satisfy the requirements. In order to follow the demands for durability and cell shape accuracy of the gravure plate, the required wall thickness between the cells are limited by material strength. Therefore, as shown in Fig. 2, there is an upper limit to the aperture diameter with respect to the specification of the pitch  $p$  between bumps.

$$a \leq p - w \quad (7)$$

On the other hand, the bore diameter must be larger than the solder particle diameter. Therefore, there is a lower limit  $m$  to the bore diameter.

$$b \geq m \quad (8)$$

Equations (5), (6) and inequations (7), (8) limit the possible range of  $t$ .

$$\text{if } s < \frac{1}{A}, \quad v \leq t \leq u \quad (9)$$

$$\text{if } s = \frac{1}{A}, \quad t = B s \quad (10)$$

$$\text{if } 0 < \frac{1}{A} < s, \quad u \leq t \leq v \quad (11)$$

$$\text{if } A \leq 0, \quad t \leq u, v \quad (12)$$

where

$$u = (m A + B) s - m \quad (13)$$

$$v = \frac{A s - 1}{A s} (p - w) + \frac{B}{A} \quad (14)$$

Then, you select  $t$  from these range. By substituting  $t$  into equations (5) and (6), cell shape  $(a, b)$  can be obtained.

### 2.3 Verification of the design formula

The proposed method was applied to a specific example of design. We demonstrate how to use the proposal method and verify its usefulness. Using a design formula to the specified bumps diameter  $s$ , a gravure plate with the optimal cell shape was made. The diameter of the printed bumps was measured using a microscope and the error to the specification value was evaluated.

$$e = \frac{d - s}{s} \quad (15)$$

For example, the specified bump diameters were  $s = 6, 6.5, 7, 15, \text{ and } 20 \mu\text{m}$ . Printing conditions and materials are as described in 2.1. The lower limit of the bore diameter was set to  $m = 3 \mu\text{m}$ . The gravure plate was made of relatively inexpensive nickel electroforming. The build-up thickness of additive processing depends on the plating processing time. Then, it must be taken into consideration at the design that build-up thickness is constant for all cells in a single gravure plate. Because nickel is a soft metal, the required wall thickness is large, around  $15 \mu\text{m}$ . Since the purpose of this paper is to verify the accuracy of the printed bumps diameter, a sufficient interval was provided without specifying the pitch.

In addition, a gravure plate was made of quartz glass using the confirmed design values. Although this material is expensive, it has the advantage of thin the required wall thickness.

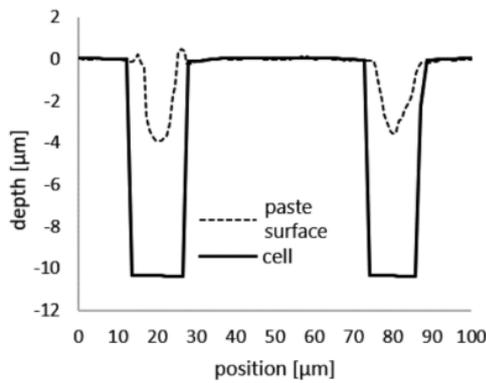
## 3. Results and Discussion

### 3.1 Effectiveness of intaglio cell aperture widening

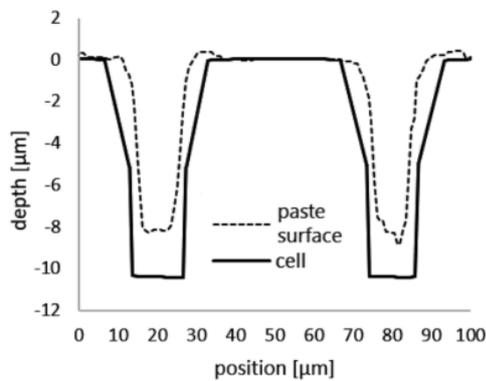
Figure 3 shows a cross-sectional view of the cell after paste was released from the intaglio using the blanket. The thin curve represents the paste surface scanned by a laser microscope, and the thick line represents the cell wall surface. Pastes remained in the area surrounded by the thin and thick lines. In cells (b) with tapered openings, the depth of residual pastes was twice as deep as in straight cells (a). Therefore, it was confirmed that mold releasability was improved by widening the cell opening.

### 3.2 Applying design formulas

The relationship between the cell shape parameters and the printed bump diameter was plotted in Fig. 4. The vertical axis is the inverse of gain, it can be interpreted as the aperture diameter necessary to obtain the specified bump diameter. That is, with this solder



(a) straight cells



(b) tapered openings

図3 インタリオセルに残ったペースト

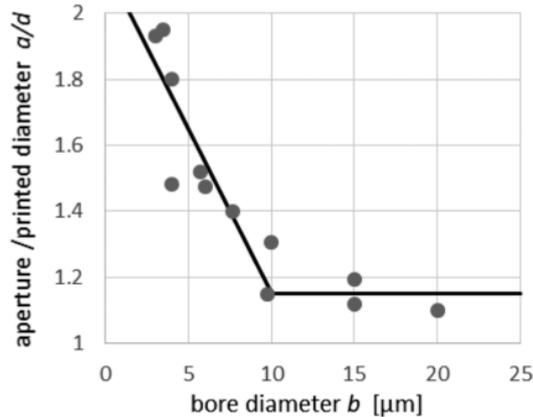
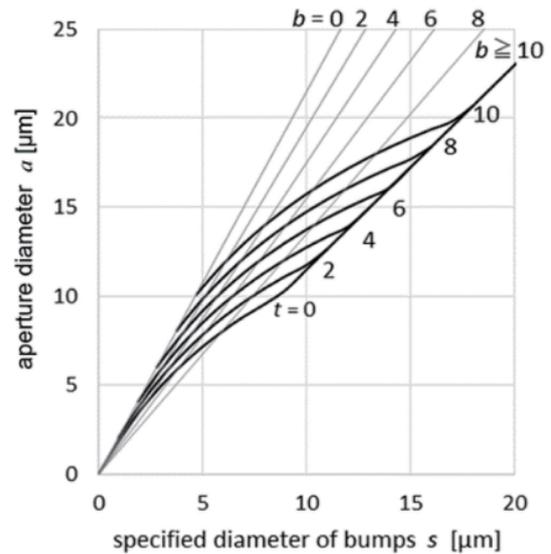
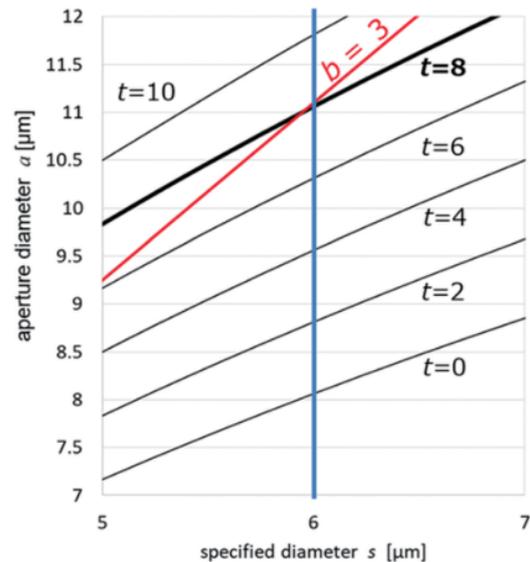


図4 印刷バンプの直径とインタリオセル形状の関係。

つまり、このんだペーストでは、同じ印刷直径を得るために、ボア直径が小さければ小さいほど、開口部を大きくしなければならぬ。ボア径が10 μm以上の場合、開口径のボア径依存性が遅くなることがわかる。したがって、これらの関係をボーリング径10 μmを境界とする2本の直線に線形回帰することにより、式(1)の係数が得られた。



(a) Overall view

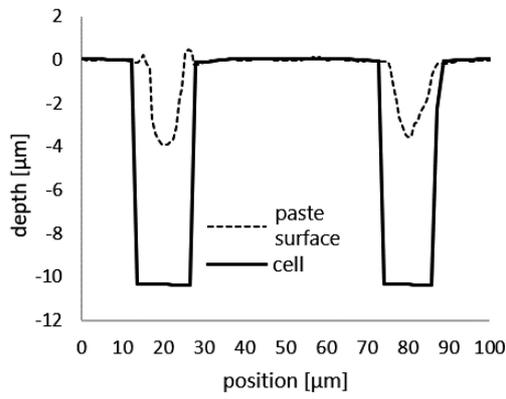


(b) Enlarged view for a specific design example

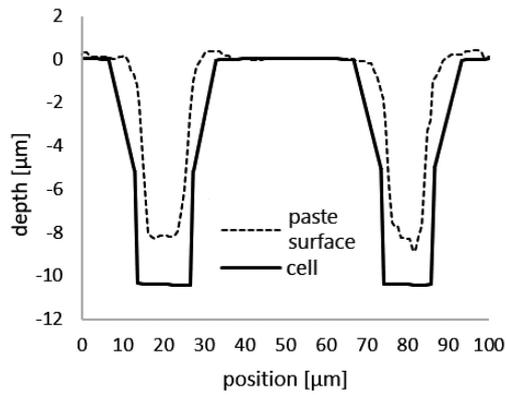
図5 設計図

$$(A, B) = \begin{cases} (-0.10, 2.15) & (0 < b < 10 \mu\text{m}) \\ (0, 1.15) & (b \geq 10 \mu\text{m}) \end{cases} \quad (16)$$

したがって、設計式(5)が得られ、tをパラメータとして関係曲線が図5に描かれる。式(12)はテーパサイズtの可能な範囲に適用される。ピッチを指定せずに十分な間隔を設けたため、tの上限は式(13)で与えられる。指定されたバンプの直径に比例する。したがって、指定されたバンプの直径が最小であれば、tに最も厳しい制限が課される。図5(b)の赤線は、bをパラメータとして式(3)を用いて描いた関係曲線である。これらの線はtの上限を表している。テーパサイズが最も大きくなるように選択した。



(a) straight cells



(b) tapered openings

Fig. 3 Paste remaining in intaglio cell.

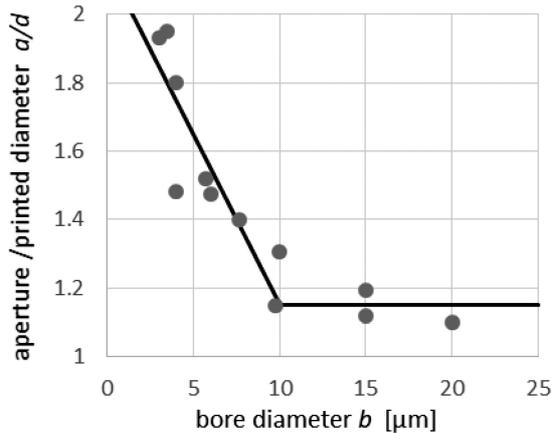
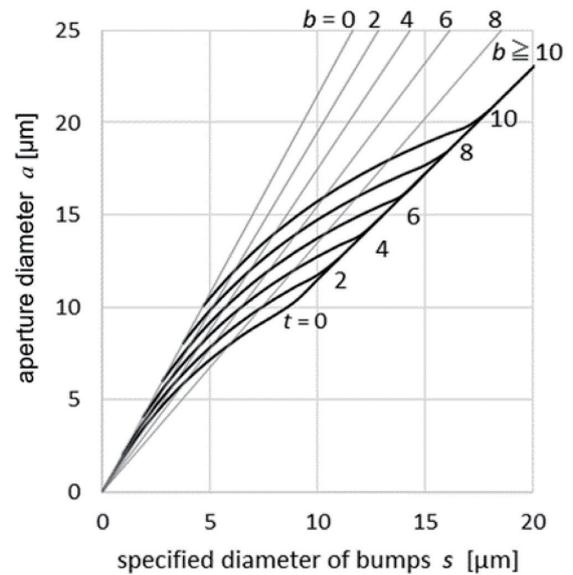
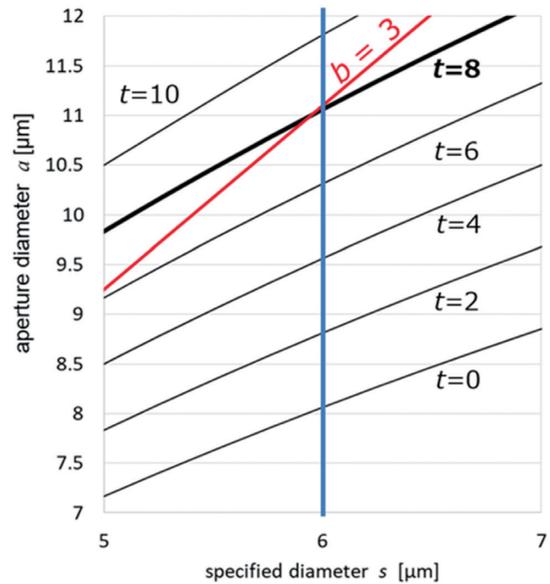


Fig. 4 Relationship between printed bumps diameter and intaglio cell shape.

paste, in order to obtain the same printing diameter, the smaller the bore diameter, the larger the aperture must be made. It can be seen that when the bore diameter is 10  $\mu\text{m}$  or more, the dependence of the aperture diameter on the bore diameter becomes slow. Therefore, by linearly regressing these relationships into two lines with bore diameter of 10  $\mu\text{m}$  as a boundary, the coefficients of equation (1) were obtained.



(a) Overall view



(b) Enlarged view for a specific design example

Fig. 5 Design diagram.

$$(A, B) = \begin{cases} (-0.10, 2.15) & (0 < b < 10 \mu\text{m}) \\ (0, 1.15) & (b \geq 10 \mu\text{m}) \end{cases} \quad (16)$$

Therefore, the design formula (5) is obtained and the relationship curves are drawn in Fig. 5 with  $t$  as a parameter. Inequation (12) is applied to the possible range of the taper size  $t$ . Since a sufficient interval was provided without specified pitch, the upper limit for  $t$  is given by Equation (13). It is proportional to the specified bump diameter. Therefore, the smallest specified bump diameter imposes the most stringent limit on  $t$ . The red line in Fig. 5 (b) is relational curves drawn using equation (3) with  $b$  as a parameter. These lines express the upper limit of  $t$ . We chose the taper size to be the highest.

Table 3 Design examples.

Target	Specified diameter $s$	6	6.5	7	15	20
Calculation	Aperture $a$	11.1	11.6	12.1	17.7	23.0
Design ( $t = 8$ )	Aperture $a$	11	11.5	12	18	23
	Bore $b$	3	3.5	4	10	15
Results	Printed Bump (Average) $d$	5.7	5.9	8.1	13.8	19.3
	Error $e$	-3.5%	8.0%	16%	-9.2%	-5.0%

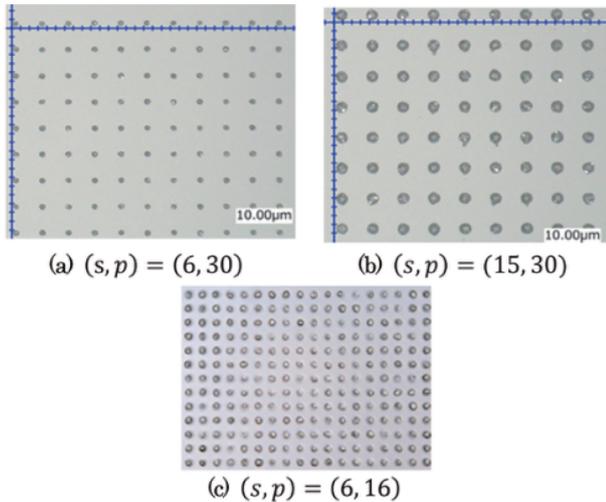


Fig. 6 Printed bumps ( $\mu\text{m}$ ).

$$t = 8 \leq u = (-0.1 \cdot 3 + 2.15)6 - 3 = 8.1 \quad (17)$$

設計式(5)から、開口部の直径は、指定されたすべてのバンプの直径について求められる。

### 3.3 印刷バンプ径の精度検証

表3は、式(4)を用いて計算した値、求めた設計値、印刷結果をまとめたものである。目標バンプ径 $6\mu\text{m}$ を誤差5%で達成し、設計式は有用である。直径 $7\mu\text{m}$ では誤差が大きいが、より多くの測定結果に基づいて式(1)の係数を更新することで、設計式を変更することが可能である。平均直径 $6\mu\text{m}$ と $15\mu\text{m}$ のバンプを印刷したものを図6に示す。また、ピッチ $16\mu\text{m}$ のバンプを石英ガラス板で印刷した。今後の課題は、精度を評価することである。

本論文で紹介した設計式を導出する方法は汎用的な方法であり、様々なペーストの試験結果に基づいて導出することができる。この設計式は4つの算術演算しか使わず、設計図を用いて誰でも簡単に最適解を得ることができるため、実用に適している。

## 4. Conclusion

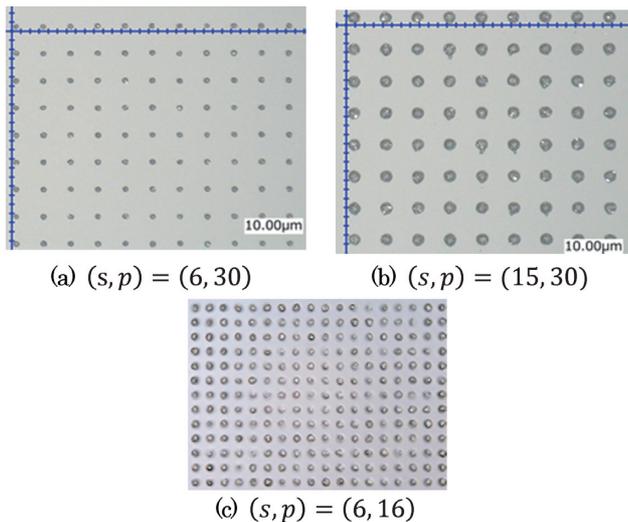
本論文では、マイクロ LED の電極サイズに適した  $10\mu\text{m}$  未満の高精度直径のハンダバンプを形成する方法を報告した。グラビアオフセット印刷は、5% ローラー内に最小直径 $6\mu\text{m}$ のハンダバンプを形成することに成功した。我々は、グラビアプレートのセル形状がペーストの放出量に影響すること、および、孔径が $10\mu\text{m}$ 以下の場合には、開口部が広がることに適していることを発見した。我々が提案したセル形状の最適設計式は汎用的であり、異なるはんだペーストに対して同じ手順で導出することができる。さらに微細な粒径のはんだペーストが発達すれば、 $6\mu\text{m}$ より小さいバンプを形成することが可能になる。様々なチップサイズのマイクロ LED が実用化される予定である。

## References

- 1) G. Biwa, M. Doi, A. Yasuda and H. Kadota: "Commercialization of the Crystal LED Display System Using Micro LEDs to Realize Scalable and High-Quality Images," The journal of the Institute of Image Information and Television Engineers, 74 (1), pp.174-179 (2020)
- 2) S.I. Park, Y. Xiong, R.H. Kim, P. Elvikis, M. Meitl, D.H. Kim, J. Wu, J. Yoon, C.J. Yu, Z. Liu, Y. Huang, K.C. Hwang, P. Ferreira, X. Li, K. Choquette and J.A. Rogers: "Printed Assemblies of Inorganic Light-Emitting Diodes for Deformable and Semitransparent Displays," Science 325, pp.977-981 (2009)
- 3) S. Haraguchi, C. Oyama, K. Usuda and H. Ikeda: "A Technique to Mount Narrow-Pitch Micro Solder Balls," Proc. 2021 ICEP, pp.15-16 (2021)
- 4) M. Lahti, S. Leppävuori and V. Lantto: "Gravure-offset-printing technique for the fabrication of solid films," Appl. Surface Sci., vol. 142, pp.367-370 (1999)
- 5) S. Leppävuori, M. Väänänen, M. Lahti, J. Remes and A. Uusimäki: "A novel thick-film technique, gravure offset printing, for the realization of fine-line sensor structures," Sensor Actuators A, vol. 41-42, pp.593-596 (1994)
- 6) S. Haraguchi, I. Sugimoto, O. Sakata, C. Oyama, N. Shimoishizaka and Y. Kutsuzawa: "Forming High Aspect Ratio Bumps Available Bonding at Low Temperature on Fine Pitch Line Wire by Gravure Offset Printing," Proc. 2019 ICFPE, pp.72 (2019)
- 7) S. Haraguchi, C. Oyama, K. Usuda, Y. Ohyama and H. Ikeda: "Micro Bumps by Gravure Offset Printing Method," Proc. IDW '23, FMC5-2 (2023)

**Table 3** Design examples.

Target	Specified diameter $s$	6	6.5	7	15	20
Calculation	Aperture $a$	11.1	11.6	12.1	17.7	23.0
Design ( $t = 8$ )	Aperture $a$	11	11.5	12	18	23
	Bore $b$	3	3.5	4	10	15
Results	Printed Bump (Average) $d$	5.7	5.9	8.1	13.8	19.3
	Error $e$	-3.5%	8.0%	16%	-9.2%	-5.0%

**Fig. 6** Printed bumps ( $\mu\text{m}$ ).

$$t = 8 \leq u = (-0.1 \cdot 3 + 2.15)6 - 3 = 8.1 \quad (17)$$

From design formula (5), the aperture diameters are obtained for all specified bump diameters.

### 3.3 Accuracy verification of printed bumps diameter

Table 3 summarizes the values calculated using equations (4), the design values we determined, and the printing results. The target bump diameter of  $6 \mu\text{m}$  was achieved with errors of 5%, and the design formula is useful. Although the error was large for a diameter of  $7 \mu\text{m}$ , it is possible to modify the design equation by updating the coefficients of equations (1) based on more measurement results. Printed bumps with average diameters of 6 and 15 are shown in Fig. 6. Also, the bumps with the pitch of  $16 \mu\text{m}$  were printed using a quartz glass plate. The future challenge is to evaluate them precision.

The method for deriving the design formula presented in this paper is a general-purpose method, and it can be derived based on test results for various pastes. This design formula uses only four arithmetic operations, and anyone can easily obtain an optimal solution using a design diagram, so it is suitable for practical use.

## 4. Conclusion

In this paper, we reported a method for forming solder bumps with a high accuracy diameter of less than  $10 \mu\text{m}$ , which is suitable for the electrode size of micro LEDs. Gravure offset printing succeeded in forming solder bumps with a minimum diameter of  $6 \mu\text{m}$  within 5% errors. We discovered that the cell shape of the gravure plate affects the amount of paste release, and that a wider aperture is especially suitable when the bore diameter is  $10 \mu\text{m}$  or less. The optimal design formula for cell shape that we have proposed is general-purpose and can be derived using the same procedure for different solder pastes. If solder pastes with even finer particle sizes will develop, it will be possible to form bumps smaller than  $6 \mu\text{m}$ . Micro LEDs of various chip sizes will be on the way to practical use.

## References

- 1) G. Biwa, M. Doi, A. Yasuda and H. Kadota: "Commercialization of the Crystal LED Display System Using Micro LEDs to Realize Scalable and High-Quality Images," The journal of the Institute of Image Information and Television Engineers, 74 (1), pp.174-179 (2020)
- 2) S.I. Park, Y. Xiong, R.H. Kim, P. Elvikis, M. Meitl, D.H. Kim, J. Wu, J. Yoon, C.J. Yu, Z. Liu, Y. Huang, K.C. Hwang, P. Ferreira, X. Li, K. Choquette and J.A. Rogers: "Printed Assemblies of Inorganic Light-Emitting Diodes for Deformable and Semitransparent Displays," Science 325, pp.977-981 (2009)
- 3) S. Haraguchi, C. Oyama, K. Usuda and H. Ikeda: "A Technique to Mount Narrow-Pitch Micro Solder Balls," Proc. 2021 ICEP, pp.15-16 (2021)
- 4) M. Lahti, S. Leppävuori and V. Lantto: "Gravure-offset-printing technique for the fabrication of solid films," Appl. Surface Sci., vol. 142, pp.367-370 (1999)
- 5) S. Leppävuori, M. Väänänen, M. Lahti, J. Remes and A. Uusimäki: "A novel thick-film technique, gravure offset printing, for the realization of fine-line sensor structures," Sensor Actuators A, vol. 41-42, pp.593-596 (1994)
- 6) S. Haraguchi, I. Sugimoto, O. Sakata, C. Oyama, N. Shimoishizaka and Y. Kutsuzawa: "Forming High Aspect Ratio Bumps Available Bonding at Low Temperature on Fine Pitch Line Wire by Gravure Offset Printing," Proc. 2019 ICFPE, pp.72 (2019)
- 7) S. Haraguchi, C. Oyama, K. Usuda, Y. Ohya and H. Ikeda: "Micro Bumps by Gravure Offset Printing Method," Proc. IDW '23, FMC5-2 (2023)



**Shunichi Haraguchi** received his B.E. and M.S. degrees from Tsukuba University, Ibaraki, Japan, in 2017. He joined KOMORI Corporation in 2017. He is currently working on the development of printing materials and machines mainly about printed electronics.



**Chisato Oyama** received her B.S. and M.S. degrees from Yamagata University, Yamagata, Japan, in 2018. She joined KOMORI Corporation in 2018. She is currently working on the process development of printed electronics mainly about flip chip bonding.



**Kotarou Usuda** joined SERIA Engineering in 2018. He engaged in the mechanical design of screen printing. He has been engaged in the mechanical design and development of gravure offset printing at KOMORI Corporation since 2019.



**Yoshihiro Ohyama** received his B.E. degree from Fukui University, Fukui, Japan, in 2001. He joined Tokai Shoji in 2001. He engaged in the development of screen printing technology mainly about plate making. He has been engaged in the process development of printed electronics at KOMORI Corporation since 2022.



**Hideki Ikeda** received his B.E. degree from Nihon University, Tokyo, Japan, in 1993. He engaged in the development of the electrophotography toner at CASIO Computer. He joined KOMORI Corporation in 2018. He is currently working on the R&D management of printed electronics.



**Shunichi Haraguchi** received his B.E. and M.S. degrees from Tsukuba University, Ibaraki, Japan, in 2017. He joined KOMORI Corporation in 2017. He is currently working on the development of printing materials and machines mainly about printed electronics.



**Chisato Oyama** received her B.S. and M.S. degrees from Yamagata University, Yamagata, Japan, in 2018. She joined KOMORI Corporation in 2018. She is currently working on the process development of printed electronics mainly about flip chip bonding.



**Kotarou Usuda** joined SERIA Engineering in 2018. He engaged in the mechanical design of screen printing. He has been engaged in the mechanical design and development of gravure offset printing at KOMORI Corporation since 2019.



**Yoshihiro Ohyama** received his B.E. degree from Fukui University, Fukui, Japan, in 2001. He joined Tokai Shoji in 2001. He engaged in the development of screen printing technology mainly about plate making. He has been engaged in the process development of printed electronics at KOMORI Corporation since 2022.



**Hideki Ikeda** received his B.E. degree from Nihon University, Tokyo, Japan, in 1993. He engaged in the development of the electrophotography toner at CASIO Computer. He joined KOMORI Corporation in 2018. He is currently working on the R&D management of printed electronics.

---