

ハンダ真球粒子の新しい製造方法に関する研究

河 合 伸 泰*

A new atomizing method for the production of solder balls

Nobuyasu Kawai

Production test of solder balls for surface mounting of the integrated circuit chip on printed circuit board was done by using a new atomizing method. At present solder balls which are produced through spheroidization of cut wire with small cross section in a hot oil bath are used for surface mounting technology, but this type of balls are thought to be difficult to decrease the production cost by increasing the productivity. A new atomization method which can produce balls directly from molten solder is therefore required in place of the above mentioned cut wire method.

This paper describes the test result of the new method, especially the effect of solder temperature, silicon oil temperature, viscosity of silicon oil and vibrating back pressure on size and degree of spheroidization of solder balls.

1. はじめに

ICの処理能力増大に伴いICパッケージは従来の周辺端子型パッケージからBGAに代表されるエリアアレイ型パッケージへのシフトが急速に進んでいる。これに伴い表面実装用のはんだも従来のはんだペーストから一定粒径の真球粒子が使用されるようになった。この粒子は、現在、カットワイヤ法という方法、すなわち、はんだインゴットから塑性加工により製造した細線を一定長さに切断後、熱浴中で溶解真球化を行って製造されているが、生産性が低く、コストが高い欠点がある。一般の粉末製造法として広く用いられているものに高圧の水やガスジェットを用いて噴霧する水アトマイズ法、ガスアトマイズ法あるいは遠心力によって熔融金属を噴霧する遠心アトマイズ法などがあるが、いずれも上記のカットワイヤ法よりも生産性は高いものの、水アトマイズ法は表面酸化が著しく、形状が不規則であること、ガスアトマイズ法は表面が清浄で球形ではあるが、真球ではなく、粒度分布幅が広く、所定粒径の歩留まりが低いこと、遠心アトマイズ法は表面が清浄で球形であるが、微粒化に限界があることなどの欠点を有している¹⁾。この

* 機械工学科

ためこれらに代わる新しい真球粒子製造法の研究が必要となっている。

本報告では溶融したはんだを細孔（オリフィス）から流下させ、分断後、高温のシリコンオイル中で直接真球化させる方法について伝熱計算により真球化の予測を行うとともに実験により真球粒子を製造する方法を試みたので、その結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材料

今回使用した材料は共晶はんだ合金 Pb-62%Sn であり、その融点は 456K (183℃) である。その化学組成を表 1 に示す。Sn は 62.5 mass % であり、Ag、Sb、Bi、C などの不純物は規格範囲内に入っている。

表1 供試はんだ合金の化学成分

	(mass %)						
	Sn	O	N	Ag	Sb	Bi	C
Pb-63Sn	62.5	0.0060	<0.005	0.0035	0.011	0.0018	0.003

2.2 実験装置

図 1 は今回用いた実験装置の概略図である。はんだ合金加熱装置(a)、はんだ溶滴球状化および冷却装置(b)、Ar ガス供給装置(c)、振動付加装置(d)から成り立っている。

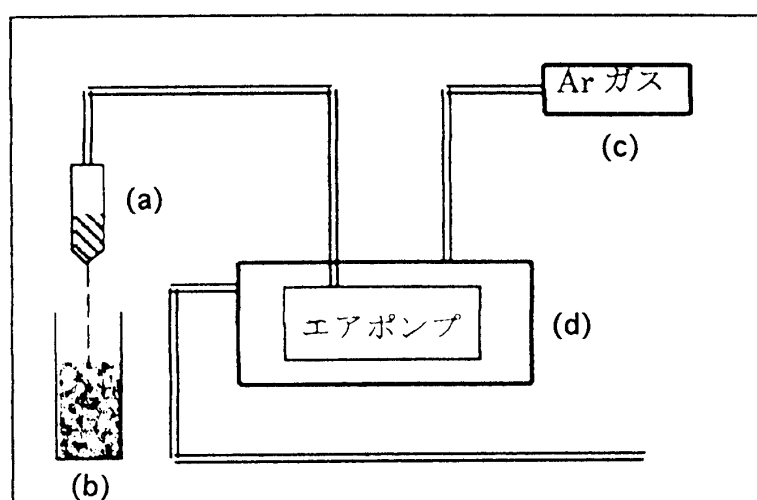


図 1 実験装置の概念図

はんだ合金加熱装置ではステンレス鋼管の底部にφ0.2mmの細孔をあけたステンレス鋼薄板（ δ 0.05mm）を取り付け、鋼管に加熱用のフレキシブルヒータを巻き付けた。加熱装置の下部 30mm に長さ 600mm のパイレックスガラス管の上端がくるように設置し、ガラス管下部はシリコンゴムで栓をし、その中に種々の粘度を持ったシリコンオイルを入れた。ガラス管の周囲に赤外線ヒータを置き、ガラス管（シリコンオイル）上部 200mm を加熱できるようにした。ステンレス鋼管上部には 60Hz の振動を付加できるように吐出量 $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$ のエアープンプを介してボンベから Ar ガスを供給できるようにした。

2.3 アトマイズ実験

外部の坩堝に共晶はんだ合金塊を入れ、ガスバーナーで加熱、溶解をした後、加熱装置のステンレス鋼管内に移し入れ、鋼管上部を Ar 配管に接続した。ガラス管に入れるシリコンオイルは 1000、3000、10000（ mm^2/s ）の動粘度のものを使用した。フレキシブルヒータではんだを 536K、556K に加熱し、0.6ks 保持した。また、シリコンオイルは赤外線ヒータによって 506K、546K に加熱した。Ar ガス背圧を熔融はんだ上部にかけたが、その際、振動を付加した条件としない条件で実験を行った。表 2 は実験条件をまとめたものである。

表2 アトマイズ実験条件

実験パラメータ	設定値
はんだの種類	Pb-63%Sn
オリフィス径(mm)	0.2
Arガス背圧(kPa)	0.2
熔融はんだの加熱温度(K)	536, 556
シリコンオイルの動粘度(mm^2/s)	1000, 3000, 10000
シリコンオイルの加熱温度 (K)	506, 546
シリコンオイル加熱長さ (mm)	200
シリコンオイル室温部長さ(mm)	300
オイル面位置 (mm,オリフィスから)	30

得られた粉末粒子は球状、涙滴状、繊維状の混合状態であったので、全体を接写レンズで写真に撮り、球状、涙滴状と繊維状に分けて画像解析するために OHP シートに別々に粒子 1 個 1 個を黒色の細いマーカーペンでトレースした。スキャナーでパソコンに画像を取り込み、1 個 1 個の粒状（球状および涙滴状）粉末と繊維状粉末の面積、粒状粉末の等価円直径、外周長さを画像解析ソフト Image-Pro Plus により求め、粒状粉末の平均粒径、粒度分布、真球度、粒状粉末と繊維状粉末の面積比を求めた。

3. 伝熱計算

粒子の真球化を検討するために伝熱計算を行い、熔融はんだの分断後から凝固が完了するまでの時間 (Δt) を粒度ごとに推定した。また、はんだ液滴の真球化に必要な時間 (Δt_{sph}) を計算して凝固時間と真球化時間の大小を比較して凝固する前に表面張力により真球化が完了するか否かを検討した。

伝熱計算ではガス背圧により噴霧された熔融はんだ粒子が温度 T から凝固が完了する温度、すなわち共晶はんだ Pb-62%Sn の凝固温度 $T_s = 456K$ ($183^\circ C$) までの経過時間を周囲のシリコンオイルにより拔熱されるとしてその熱収支により計算する。一般の粉末の製造に関わる凝固時間の計算は O.S.Nichiporenko²⁾ や H.Schmitt³⁾ が行っているが、いずれも不活性ガス中でのものであり、今回、シリコンオイル中での冷却にこれらの考え方を当てはめて、Biot 数が 1 より小さいニュートン冷却を仮定して計算を行った。全熱量 Q ($N \cdot m$) は凝固潜熱 Q_s ($N \cdot m$) と温度 T から温度 T_s までの液滴粒子の温度低下に相当する熱量 Q_t ($N \cdot m$) の和であり、これはシリコンオイル中での対流および放射により失う熱量 Q_1 ($N \cdot m$) および Q_2 ($N \cdot m$) に等しいと考える。

すなわち

$$Q = Q_s + Q_t = Q_1 + Q_2 \quad \text{----- (1)}$$

$$\begin{aligned} Q_s &= m \times q_s \\ &= 1/6 \times (\pi d^3 \rho q_s) \quad \text{----- (2)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_t &= m \times Cl \times (T - T_s) \\ &= 1/6 \times \{ \pi d^3 \rho Cl \times (T - T_s) \} \quad \text{----- (3)} \end{aligned}$$

ここで、

- m : 熔融粒子の質量 (kg)
- q_s : 単位質量あたりの凝固潜熱 ($N \cdot m / kg$)
- d : 粒子サイズ (m)
- ρ : 熔融粒子の密度 (Mg / m^3)
- Cl : 熔融粒子の比熱 { $N \cdot m / (kg \cdot K)$ }

また、

$$Q_1 = A \times \alpha \times (T - T_{si}) \times \Delta t \quad \text{----- (4)}$$

$$Q_2 = A \times Cs \times \varepsilon \times (T^4 - T_g^4) \times \Delta t \quad \text{----- (5)}$$

ここで、

- A : 粒子表面積、すなわち πd^2 (m^2)
- α : 伝熱係数 { $N / (m \cdot s \cdot K)$ }
- Δt : 熔融粒子の凝固時間 (s)
- Cs : Stefan-Boltzman 定数 { $= 5.68 \times 10^{-8}$ ($N / (m \cdot s \cdot K^4)$) }
- ε : 熔融粒子表面の熱放射率 ($= 0.25$)
- T_{si} : シリコンオイルの温度 (K)

T_g : ガラスビン内壁の温度 (K)

上記の Q1 の式中出现くる α についてはシリコンオイルの熱伝導度を $\lambda_{si} \{ N / (s \cdot K) \}$ とすると

$$Nu = (\alpha \times d) / \lambda_{si} \quad (Nu: \text{ヌッセルト数})$$

の関係から求めることができる。Nu はレイノルズ数 Re とプラントル数 Pr を用いて

$$Nu = 2 + B Re^{0.5} Pr^{0.33}$$

と書き表せる。この実験ではシリコンオイル中の粉末粒子の飛行速度は小さいので、 $Nu = 2$ と考えて差し支えない。

$$\text{ゆえに} \quad \alpha = 2\lambda_{si} / d \quad \text{----- (6)}$$

(1)式に(2)、(3)、(4)、(5)、(6)を代入して整理すると

$$\Delta t = d \times \rho \{ q_s + Cl (T - T_s) \} / 6 \{ 2\lambda_{si} \times (T - T_{si}) / d + Cs \times \varepsilon (T^4 - T_g^4) \} \quad \text{----- (7)}$$

一方、表面張力による球状化は表面張力の大きい熔融金属ほど、また、粘性の小さい金属ほど速いはずである。過去に旧ソ連の Nichiporenko は球状化速度式を提言しており¹⁾、他には見あたらないため、その式の正当性は定かではないが、ここでは下記のこの式を用いて計算を行った。すなわち、

$$\Delta t_{sph} = (3\pi \mu / 4 V_d \sigma) \times (R_d^4 - r_{st}^4) \quad \text{----- (8)}$$

ここで、

μ : はんだの静粘度 ($N \cdot s / m^2$)

V_d : 粒子1個の体積 ($= \pi d^3 / 6, m^3$)

σ : はんだの表面張力 (N / m)

R_d : 粒子半径 ($= d / 2, m$)

上式の r_{st} は何を表しているのか原論文では説明されていないが、($R_d^4 - r_{st}^4$) はプラスでなければならないので、 $R_d > r_{st}$ である。ゆえに $R_d^4 \gg r_{st}^4$ であり、上の(8)式の r_{st} を 0 とおいて計算した。

ゆえに、(8)式は

$$\Delta t = 9 \mu d / 2 \sigma$$

(7)式の凝固時間と(8)式の球状化時間の大小を比較するので、(7)式、(8)式にそれぞれの物理量を代入して計算した。

代入した各物理量は

$$d = 0.01 \sim 1.2 \text{ (m)}$$

$$\rho = 8.3 \text{ (Mg / m}^3\text{)}$$

$$q_s = 2.06 \times 10^4 \text{ (N} \cdot \text{m / kg)}$$

$$Cl = 2.13 \times 10^2 \{ N \cdot m / (kg \cdot K) \}$$

$$T = 556 \text{ (K)}$$

$$T_s = 456 \text{ (K)}$$

$$\lambda_{si} = 1.60 \times 10^{-1} \text{ {N/(s} \cdot \text{K)}} \}$$

$$T_{si} = 293 \text{ (K)}$$

$$C_s = 5.68 \times 10^{-8} \text{ {N/(m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4)}} \}$$

$$\varepsilon = 0.25$$

$$T_g = 293 \text{ (K)}$$

$$\mu = 1.97 \times 10^{-3} \text{ (N} \cdot \text{s/m}^2 \text{)}$$

$$\sigma = 0.49 \text{ (N/m)}$$

である。上記の計算ではシリコンオイルの温度を室温として計算している。すなわち、パイレックスガラス下部の 300mm 部分での冷却を扱っている(この部分での凝固時間を Δt_1 とする)。上部の加熱部分についてははんだ粒子のその部分の通過時間が実測で約 1.5 s (Δt_2 とする)であった。結果は表 3 に示すように(a)の条件では熔融金属粒子の粒径が 0.05mm よりも大きくなると凝固時間 Δt が球状化時間 Δt_{sph} より大きくなり、繊維状ではなく、球状になることが判明した。(b)の条件では全ての粒径で Δt が Δt_{sph} よりも大きいため、全てが球状で繊維状粉末は生成しない結果となった。

表3 凝固時間(Δt)、球状化時間
(Δt_{sph}) の計算結果

(a)シリコンオイル温度が室温
の場合の計算結果

d(mm)	0.01	0.05	0.1	0.3	0.5	1.0	1.2
Δt (s)	5.75×10^{-5}	1.41×10^{-3}	5.59×10^{-3}	4.88×10^{-2}	1.33×10^{-1}	5.11×10^{-1}	7.27×10^{-1}
Δt_{sph} (s)	5.68×10^{-4}	4.55×10^{-6}	5.68×10^{-7}	2.10×10^{-8}	4.55×10^{-9}	5.68×10^{-10}	3.29×10^{-10}

(b)シリコンオイルを加熱した
場合の計算結果

d(mm)	0.01	0.05	0.1	0.3	0.5	1	1.2
Δt_1 (s)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Δt_2 (s)	6.71×10^{-5}	1.66×10^{-3}	6.57×10^{-3}	5.78×10^{-2}	1.58×10^{-1}	6.12×10^{-1}	8.72×10^{-1}
Δt (s) ($\Delta t_1 + \Delta t_2$)	≈ 1.5	1.5	1.5	1.6	1.7	2.1	2.3
Δt_{sph} (s)	5.68×10^{-4}	4.55×10^{-6}	5.68×10^{-7}	2.10×10^{-8}	4.55×10^{-9}	5.68×10^{-10}	3.29×10^{-10}

4. 実験結果および考察

実験によって得られた粒子の代表的な形状を写真 1 に示す。a)の粒子は球状とともに繊維状が多く見られるが、b)の粒子はほとんどが球状または粒状である。a)には 0.1mm 以上の直径を持つ繊維状が多く見られるので、上記の計算結果とは異なる。

その原因として

- (1) 保持時間が短いために溶融はんだの温度が 556K に達せず、456K（融点）直上の可能性がある。これにより約 10^2 Δt は大きくなる。
- (2) Nichiporenko の球状化式が妥当でない可能性がある。
- (3) Nichiporenko の球状化式において $r_{is} = 0$ として計算したが、 R_d と r_{st} の値が接近しておれば、 Δt_{sph} は相当小さくなる。

などが考えられ、 Δt と Δt_{sph} の比較を厳密に行うことができなかった。

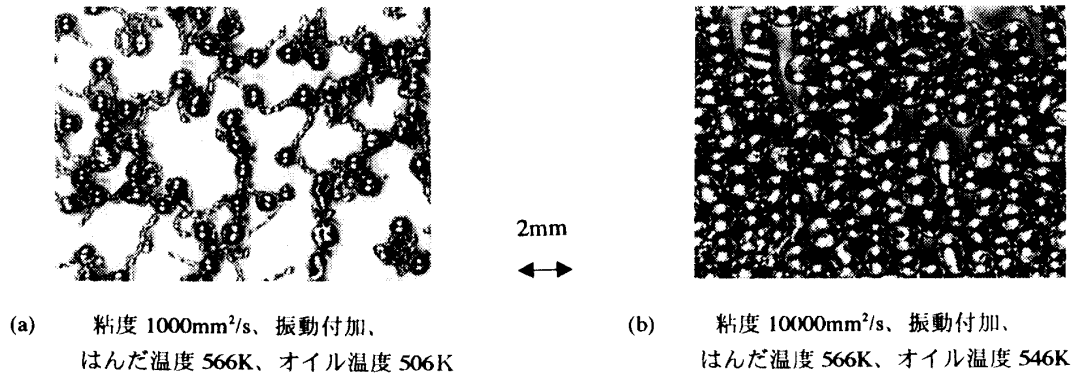


写真 1 生成粉末の外観

写真 1 の中でも認められるように、球状粉末と繊維状粉末の面積比をシリコンオイル粘度との関連で見ると図 2 のようになる。振動付加の条件ではオイル粘度の増加とともに球状粉末の割合が増加していることが分かる。振動付加なしの条件でも振動付加条件ほどではないがオイル粘度が大きいほど球状粉末の割合が増加する傾向が見られる。これはオイル粘度が高いとオイルの対流が起こりにくくなり、その結果、溶融はんだ粒子からの抜熱速度が小さくなったものと考えられる。

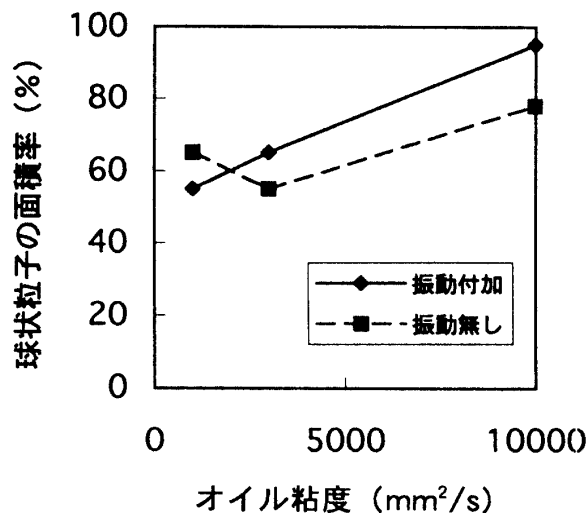


図 2 球状粒子の面積率に及ぼす
オイル粘度と振動の影響

一方、振動付加の影響については、振動付加なしの場合、オリフィスからはんだが流下する時、はんだが分断せず、ダンベル状の粒子が多かったが、振動付加条件では写真 2 のように流下はんだ流は分断され、ダンベル型は見られなくなり、ほとんどが球状化していた。

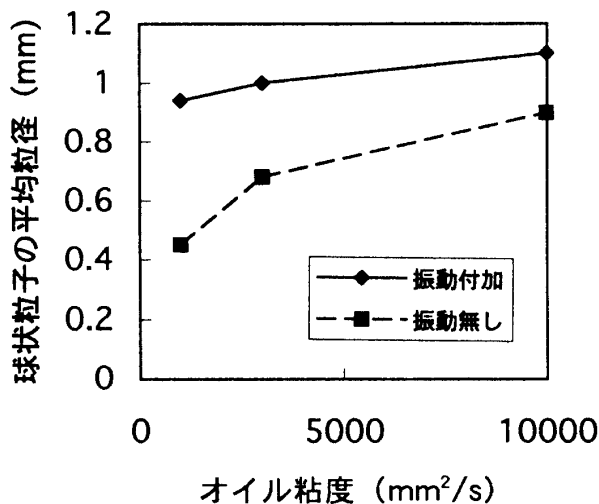


図 3 球状粒子の平均粒径に及ぼす
オイル粘度と振動の影響

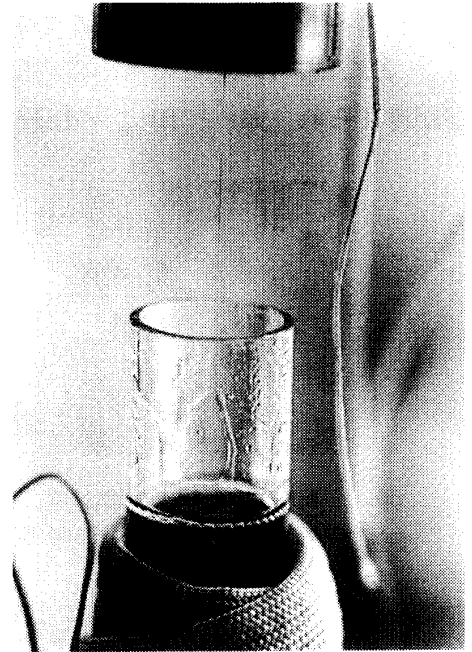


写真 2 溶融はんだの噴射状況

平均粒径に与えるオイル粘度、振動の影響を見ると、図 3 に示すようにオイル粘度の増加とともに平均粒径が大きくなり、0.5 から約 1mm になっている。この原因は明らかではないが、オイル粘度が大きいと溶融はんだ液滴の落下速度がオイル表面で大きく低下し、液滴同士が一部合体した可能性が考えられる。平均粒径として現在使用されているはんだ粉末が 0.6~0.7mm であるのに対して、今回行った実験ではオリフィス径が 0.2mm であるにも関わらず、得られた粉末の平均粒径は 0.5~1.2 mm であった。また、振動を付加した方が粒径は大きくなった。

5. おわりに

はんだの加熱温度、シリコンオイルの粘度、振動ガス背圧を変化させて行った今回の実験で、かなり真球に近い粒子が得られた。最適条件で行った実験では球状粉末の占める割合が 97% であり、その時の平均粒径は 1146 μm 、粒径のばらつきは $\pm 10\%$ と市販粉末の $\pm 5\%$ に比べてやや大きかった。今後の課題としては振動数を高めて平均粒径を小さくすること、オイル加熱長さを大きくしてさらに球状化を図るなどである。

6. 参考文献

- 1) 河合伸泰、佐藤義智、関 義和：溶接学会 溶接冶金研究委員会資料 (1988 年 8 月)
- 2) O.S.Nichiporenko : Soviet Powder Metallurgy No.9 (1976) , p.665
- 3) H.Schmitt: Powder Metallurgy International, vol.11 (1979) No.2, p.68

(平成11年12月 8 日受理)