鉛フリーはんだに適応したリニア電磁ポンプの開発

正員 小野崎 純一, 正員 増田 二紀 (㈱タムラ製作所)

佐々木 政之, 正員 鹿野 快男 (東京農工大学)

Linear Electromagnetic Pump for the Lead Free Soldering

Junichi Onozaki, Tsugunori Masuda (Tamura Corp)

Masayuki Sasaki, and Yoshio Kano (Tokyo University of A & T)

In the soldering process of the printed circuit board, the regulation of the environmental protection will impose the use of the solder alloys without the lead. The basic characteristics of 5 kinds of representative lead free solders were evaluated. Then, new linear electromagnetic pump (abbreviated LEP) which adapted to these lead free solders has been developed. Following items were confirmed by this research.

- (1) These lead free solders generate over 10~20% large thrust in comparison with the tin lead eutectic solder. Then, it is sufficiently usable as substitute material for the tin lead eutectic solder.
- (2) Normalized thrust corrected by the conductivity agreed in the error within $\pm 6\%$. Therefore, the thrust increased in proportion to the conductivity. The conductivity of these lead free solders is about 10~30% bigger than the tin lead eutectic solder.
- (3) The maximum temperature of electric wire of the new LEP was lowered 30 degrees in comparison with the conventional LEP in the continuous running. This result shows that cooling characteristics of the new LEP have been excellent.

キーワード: リニアモータ, 電磁ポンプ, はんだ付け, 誘導モータ, 推力, 鉛フリー

1. はじめに

情報通信ネットワークの基盤整備が急速に進行しており、一般家庭においてもパソコンや携帯電話を利用して多くの情報がやり取りされている。これらを支える基盤技術としてははんだ付け接合技術があるが、今大きな変革を迎えようとしている。地球規模の環境保護に関する規制により 1990 年代初頭から、米国において電気製品に使用されるはんだ合金の鉛の使用規制が検討されたことを契機に、世界中で鉛を含有しないはんだ合金(以下鉛フリーはんだと略す)の研究が成されていた。そして実用化可能なはんだ合金がいよいよ絞り込まれ 21 世紀から鉛フリーはんだを使用した製品が市場で常識となろうとしている。

このような状況において、プリント回路基板のはんだ付け工程では溶融はんだを基板に吹き付ける噴流式はんだ付け装置が用いられているが、溶融はんだの搬送は従来の回転モータとポンプ羽根を用いた機械ポンプ方式からリニアモータを使用した電磁ポンプ方式へと急速な移行が進んでいる。従来の機械ポンプの場合には装置が大型化するだけでなく、定期的なメンテナンスも不可欠であり、装置の信頼性向上も難しかった。しかし筆者らが開発したリニア誘導モータの原理を応用した完全非接触式のリニア電磁誘導式噴流はんだポンプ(Linear Electromagnetic Pump, 以下 LEP と略す)の場合には、はんだに直接駆動力を与えるためにポンプのメンテナンスが不要となるばかりでなく、はんだ槽

の大幅な小型化が可能であり、装置の信頼性も大幅に向上することが可能となった。しかし LEP についても鉛フリーはんだ合金に対する適応性は十分に評価されているとは言えなかった。そこで絞り込まれてきた代表的な鉛フリーはんだ合金に完全対応した LEP を開発する目的から以下の研究が行われた。本論文では、鉛フリーはんだに対する LEP の適応性について研究を行った中で以下の事項を報告する。

- (1) 鉛フリーはんだの種類と導電率等の基本特性
- (2) 鉛フリーはんだの LEP 推力特性への影響
- (3) 鉛フリーはんだ対応 LEP の開発
- (4) 鉛フリーはんだ対応 LEP の推力特性

2. 鉛フリーはんだの基本特性

<2.1> 鉛フリーはんだの種類 はんだとは、融点が 450℃以下の溶融金属を用いた金属部品の接合に使用する材料であり、現行の錫と鉛の合金に替わる材料としては Sn-Ag, Sn-Zn, Sn-Bi, Sn-Cu 系などが候補となっているが、錫鉛はんだの代替となる鉛フリーはんだ材料で完全なものは決定されておらず、使用する対象製品と目的により使い分けられているのが現状である。現在一般的に使用されている錫鉛共晶はんだと、将来的に使用される可能性のある 5 種類の鉛フリーはんだの基本仕様として融点と密度を表 1 に示した。5 種類の鉛フリーはんだの融点は錫鉛共晶はんだよりも高温であり、密度は錫鉛共晶はんだの方が小さいこと

がわかる。6種類のはんだについて LEP に関係する基本特性を評価した。LEP を使用して溶融はんだに推力を与える場合、端効果、縁効果、表皮効果などが一般的には問題になる。しかしここでは 4 [mm] の狭い流路間隙をはんだは低速で移動するので 1 枚の導体板とみなし、野中氏の理論に基き基本設計を行い、これで設計可能であることを実験により確認した。⁽³⁾ LEP の推力 F [N] と各パラメータの関係は式(1)となる。使用するはんだ材料を変更する場合、はんだの導電率が推力に大きく影響することが(1)式より明らかである。

$$F = \frac{\sigma \cdot S_n \cdot v_s \cdot B_m^2}{2} (d_a \cdot h \cdot \tau \cdot p_o) \quad [\text{N}] \quad (1)$$

ここに σ : はんだの導電率 [S/m], S_n : すべり, v_s : 同期速度 [m/s], B_m : 最大磁束密度 [T], d_a : 二次導体板の厚さ [m], h : 一次鉄心幅 [m], τ : ポールピッチ [m], p_o : 極数,

<2.2> 鉛フリーはんだの導電率の測定 溶融した金属の導電率は測定例が少ないため、導電率測定治具を製作して測定を行った。内径 0.004 [m] の非導電性の樹脂チューブ内に溶融させた鉛フリーはんだ材料を気泡を形成しないように真空ポンプで充填し、各はんだ試料の融点温度より 60℃ 高温 (経験的に決められているはんだ付け条件) に温度調整されたはんだ槽内に樹脂チューブ全体を浸漬させた。液面上に 5[mm] 程度突き出した樹脂チューブ両先端から電極を挿入して LCR メータ (HP 製) を使用して、測定周波数 1 kHz, 測定電圧 1V における抵抗を測定した。測定電極外径と樹脂チューブ内径の隙間がなきように製作されている。電極と試料との接触抵抗および濡れの影響をキャンセルするために、予め測定された長さの異なる 2 種類の樹脂チューブそれぞれの抵抗を測定し、抵抗値の差から抵抗率を求め、その逆数を導電率 σ [S/m] とした。測定は 5 回行い最大値, 最小値を削除して平均値として求めた。測定結果を表 2 に示す。

<2.3> 鉛フリーはんだの始動推力特性 通常作業に使用する LEP を搭載したはんだ槽の容量は 300 kg であり、高価な鉛フリーはんだ 5 種類を評価することは費用的にも困難である。そこで容量 60 kg の LEP 搭載小形はんだ槽を製作して始動推力の測定を行った。図 1 において、LEP のはんだ流路中静圧 P_1 [Pa], はんだ流路中流速 v_1 [m/s], はんだ揚程高さ H [m], パイプ部液面静圧 P_2 [Pa], パイプ部液面上昇速度 v_2 [m/s], はんだ流路内部圧力損失 ΔP , ここでパイプ部内部圧力損失ははんだ流路内部と比較して十分小さいため、ベルヌーイの定理より式(2)の関係が成り立つ。

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 - \Delta P = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g H \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

$$\Delta P = k \rho v_1^2 \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

ここに, ρ : はんだの密度 $= 8.5 \times 10^3$ [kg/m³]

k : 圧力損失係数

LEP が停止しているとき $P_1 = P_2 =$ 大気圧, $v_1 = v_2 = 0$ [m/s], となり式(2)は釣り合っている。また LEP を運転すると溶融はんだは上昇を続け、一定のはんだ揚程高さ H [m] まで到達した時点でパイプ部液面上昇速度 $v_2 = 0$ [m/s], はんだ流路中流速 $v_1 = 0$ [m/s] となり溶融はんだの上昇は停止する。このとき $P_2 =$ 大気圧であり, LEP

表 1 鉛フリーはんだの仕様

Table 1 Specification of the lead free solder alloys.

組 成 (wt %)	融点(℃)	密度(kg/m ³)
Sn-37Pb 共晶	183	8.5×10^3
Sn-3.5Ag-0.75Cu	216~220	7.1×10^3
Sn-2.5Ag-2.5Bi-0.5Cu	217 以下	7.2×10^3
Sn-0.7Cu	227	7.0×10^3
Sn-3Bi-8Zn	197	7.1×10^3
Sn-13Bi-5Zn	197 以下	7.4×10^3

表 2 鉛フリーはんだの導電率

Table 2 Conductivity of the lead free solder alloys.

組 成 (wt%)	導電率 (S/m)
Sn-37Pb 共晶	1.6×10^6
Sn-3.5Ag-0.75Cu	2.1×10^6
Sn-2.5Ag-2.5Bi-0.5Cu	2.0×10^6
Sn-0.7Cu	2.1×10^6
Sn-3Bi-8Zn	2.0×10^6
Sn-13Bi-5Zn	1.8×10^6

図 1 LEP を搭載した揚程測定装置

Fig.1. Measurement equipment of the solder head using the LEP.

の運動により発生した圧力を P_{LEP} [Pa] とすると、はんだ流路中静圧力 $P_1 = \text{大気圧} + P_{LEP}$ [Pa] となる。このときの関係を式(2)より求めると式(4)となる。

$$P_{LEP} = \rho g H \quad [\text{Pa}] \quad (4)$$

つまり LEP の始動推力 F_S [N] は、はんだ流路断面積 S_1 と P_{LEP} の積であるから、式(5)となる。

$$F_S = \rho g H S_1 \quad [\text{N}] \quad (5)$$

錫鉛共晶はんだと 5 種類の鉛フリーはんだについてはんだ揚程高さ H [m] の測定を行い式(5)に基づき始動推力を求めた。運転周波数 60 Hz における、コイルの励磁電流と始動推力の関係を図 2 に示した。この結果から鉛フリーはんだの始動推力は錫鉛共晶はんだより 10~20 % 程度大きいことが確認された。また式(5)の計算で求めた始動推力は各材料により差があり、この原因として各材料の導電率の影響が考えられる。そこで導電率の影響を排除した推力の値として錫鉛共晶はんだの始動推力 F_{Sn-Pb} [N] を基準値とする規格化推力 F_N [N] を式(6)のように定めて、各はんだ材料について規格化推力を比較した。図 3 に励磁電流と規格化推力の関係を示した。各材料の

規格化推力は ± 6 % の誤差で一致しており、始動推力は各はんだ材料の導電率に比例して増加することが確認された。

$$F_N = F_S \times \sigma_{Sn-Pb} / \sigma_{Free} \quad [\text{N}] \quad (6)$$

ここに、 σ_{Sn-Pb} : 錫鉛共晶はんだ導電率 [S/m]

σ_{Free} : 鉛フリーはんだ導電率 [S/m]

錫鉛共晶はんだと 5 種類の鉛フリーはんだについて LEP に関係する基本特性を評価した結果、以下のことが確認された。

- (1) 5 種類の鉛フリーはんだは密度が小さいために、はんだ揚程は錫鉛共晶はんだより高く上昇する。
- (2) 始動推力は導電率に比例して増加するが、6 種類の材料の規格化推力は ± 6 % 以内の誤差で一致している。
- (3) 今回評価した 5 種類全ての鉛フリーはんだが錫鉛共晶はんだより 14~44℃ 融点が高いため、LEP の耐熱性の向上が必要である。

3. 鉛フリーはんだ対応 LEP の開発

鉛フリーはんだ材料の基本特性評価の結果から LEP に対して耐熱性向上が求められている。そこで新型 LEP を次の方針で開発を行った。

- (1) コイル占積率を向上可能な銅巻きを採用し巻き数を増加させて励磁電流を低下させる。結果としてジュール熱によるコイルの発熱を低減させる。
- (2) 漏れ磁束を低減することにより推力に寄与する磁束密度を増加させる。

<3.1> はんだ噴流装置の構造と動作原理 LEP が一体化されたはんだ槽の断面図を図 4 に示した。LEP はステンレス製の箱状はんだ槽の外側に固定された固定子と、内部に設置されたバックアイアンから構成され、固定子とバックアイアンの間のギャップは 6 [mm] (ステンレス板 2 [mm], はんだ流路 4 [mm]) に保たれている。ヒータにより 250 °C 以上に加熱された鉛フリー溶融はんだは、はんだ槽底部から吸い込まれ流路中で加速され、ノズルから

図 2 励磁電流と始動推力の関係
Fig.2. Relation between the starting thrust and the current.

図 3 導電率による規格化推力と励磁電流の関係
Fig.3. Relation between the normalized thrust and the current.

図 4 LEP を用いたはんだ槽の断面
Fig.4 Cross-section of the solder bath using the LEP
(unit: mm).

噴射されて、ノズル上方を通過するプリント回路基板に接触してはんだ付けが行われる。余剰の溶融はんだははんだ槽に流れ落ちるサイクルを繰り返す。LEPの採用によりはんだ槽下部を絞込んだ側壁にリニア誘導モータを垂直に配置して小型化が図られている。

<3.2> はんだ噴流装置駆動用 LEP の構造 図 5 に胴巻きを使用した新型 LEP の構造を示す。はんだ噴流装置は、LEP を複数台並べ大型機にも適用可能な設計がされているが、本はんだ噴流装置では 2 台の LEP を並列に設置し駆動する。LEP はバックアイアン(S15C 製)、コイル、鉄心(珪素鋼板の積層)、ステンレス、冷却用ヨークから構成される。コイルはボビンに整列巻として施し、図 6 の様にボビンの内径を鉄心の高さ、幅よりも大きくしてはめ込み、冷却用ヨークを挿入し固定する構造とした。従来使用されていた錫鉛共晶はんだの溶融温度は 250°C であるが、鉛フリーはんだ合金は種類により更に高温に耐える必要があるためにコイルには耐熱温度が 300°C の耐熱電線を、またボビンは耐熱樹脂を使用している。コイル外周と側面は放熱のための空気冷却面積が大幅に増加がされており、さらにコイル内側からも冷却可能な冷却ヨークを採用することにより、従来の分布巻きと比較し大幅にコイル全体の冷却効率を向上させている。

ここで図 5 に示す主要諸元として、 L : モータ長、 h : 鉄心積み厚、 h_g : モータ間距離、 d_t : バックアイアン厚さ、 d_a : はんだ流路、 d_s : スロット深さ、 d_y : 継鉄幅、 d_c : 冷却ヨーク高さ、 d_b : ボビン幅、 w_s : スロット幅、 z_t : 歯幅等がある。

図 5 新型 LEP の構造

Fig.5. Structure of the developed LEP.

図 6 ボビンを用いたコイルの挿入法

Fig.6. Insertion method of coils using bobbins.

<3.3> 有限要素法による鉄心形状の最適化 新型 LEP は搭載されるはんだ噴流装置のスペース制約条件を満たした設計が必要である。はんだの噴流高さの均一性を保つためにモータ間距離 h_g は 64 [mm] に決定した。スロット深さ d_s はモータ間距離 h_g とボビン幅により決定される。そこでボビン幅 25 [mm] 、巻線の冷却の隙間 5 [mm] として、スロット深さ d_s は 30 [mm] と決定した。はんだ流路 d_2 が 4 [mm] と大きく、一次漏れリアクタンス x_l が増大してしまうため、漏れ磁束を低減した鉄心形状の最適化設計が必要である。歯幅・スロット幅については、有限要素法(FEM)による磁場解析ソフト(JMAG-Works)を用いてはんだ流路中の磁束密度、スロットにおける漏れ磁束の解析を行い決定した。歯幅 3 [mm] 、 5 [mm] 、 7 [mm] 、 12 [mm] の 4 種類についてスロットピッチを一定とし、スロット幅・巻数を変えたモデル A、B、C、D を作り解析を行った。表 3 にモデルの歯幅、スロット幅、巻数の仕様を示す。

表 3 FEM 解析モデル
Table 3 Models for FEM calculation

項目	[単位]	A	B	C	D
歯幅 z_t	[mm]	3	5	7	12
スロット幅 w_s	[mm]	24	22	20	15
巻数 N	[回]	407	363	319	209

これらのモデルをそれぞれ解析し LEP のはんだ流路内の最大磁束密度を求めた。また図 7 に示すような一極分の歯下端の磁束密度 B_b と歯上端の磁束密度 B_t を FEM により計算しその磁束密度分布の近似式を求め、近似式について積分を行い、歯下端の磁束鎖交数 ϕ_b と歯上端の磁束鎖交数 ϕ_t を求め、磁束鎖交数比 ϕ_t/ϕ_b をとり、各モデルのスロット部における漏れ磁束の割合を求めた。図 8 は歯幅を変えたときの磁束鎖交数比 ϕ_t/ϕ_b と最大磁束密度の関係を示す。歯幅が小さくなるにつれて最大磁束密度は増加して行くが、歯幅 7 [mm] 以下では大きな変化は見られない。また歯幅が最も広い 12 [mm] のモデルにおいて有効磁束の割合が最も多いが、歯幅が小さくなるにつれて有効磁束が減少する。これらの結果から磁気特性、耐久性を考慮し、最も効率が良い歯幅は 7 [mm] のモデルと決定した。

図 7 歯上端と歯下端の磁束密度解析位置

Fig.7. Calculation points of magnetic flux density on the top and bottom of the tooth.

図8 歯幅と磁束鎖交数比および最大磁束密度の関係
Fig.8 Relation between the tooth width and the flux linkage ratio, maximum magnetic flux density.

図9 はんだ流路中磁束密度の計算値と実測値 (電気角 90 度)
Fig.9 Calculation value and measurement of magnetic flux density in the solder route (Electrical angle = 90°).

図9 はんだ流路中磁束密度の FEM による計算値と実測値との比較を示している。実測値の最大磁束密度は 249 [mT]、最大誤差は 34 [%] 程度あるが、定性的にはほぼ一致しており、FEM による解析が有効であることを確認した。

4. 新型 LEP の推力特性と耐熱特性

<4.1> 新型 LEP と従来型 LEP の始動推力の比較

はんだ噴流装置に内蔵可能なスペース制約条件を満足する新型 LEP と従来型 LEP は、両者とも極ピッチ 72 [mm] 3 相 3 極のリニア誘導モータであり、デルタ結線により最大電圧は 200 [V] まで印加可能である。従来型 LEP は 60 ターン 2 層分布巻であるが、新型 LEP は 319 ターン胴巻である。両者の始動推力を比較するために錫鉛共晶はんだを使用し、運転周波数と印加電圧を変化させたときのはんだ揚程 H [m] の測定を行った。図 10 に新型 LEP と従来型 LEP のはんだ揚程と励磁電流の関係を示す。電流値が同じ場合は、新型 LEP の方が高推力を発生している。この結果から同一推力で比較した場合は、新型 LEP の方が電流値は低くなりジュール熱

図10 新型電磁ポンプと従来型電磁ポンプの電流と揚程の関係
Fig.10 Relation between the solder head and the current of the developed LEP and the conventional LEP.

によるコイルの発熱を低減させる効果があると考えられる。しかし、消費電力において両者に大きな優位性は認められなかった。

<4.2> 電線の耐熱耐久性の向上 従来から使用してきた錫鉛共晶はんだの融点 183℃に対して LEP 運転時のはんだ溶融温度は 250℃である。鉛フリーはんだを使用した場合にはんだの融点から判断すると溶融温度を上昇させる必要があると予測される。図 11 は LEP が使用している耐熱電線の連続使用温度と予測寿命の関係がメーカーにより示されている。プリント基板に使用するフローはんだ付装置の場合、実用に耐えるためには 20,000~50,000 時間の耐久性が求められている。

開発した新型 LEP と従来型の LEP について、鉛フリーはんだ Sn-3.5Ag-0.75Cu を 270℃に溶融させて連続運転テストを行った。その結果から電線の最終的に飽和した最高温度は従来型 LEP が 280℃であるのに対して、新型 LEP は 240℃以内におさまり実用レベルに達していることを確認した。

図11 LEP に使用する電線の寿命
Fig.11 Life of the wire for the LEP.

5. まとめ

プリント回路基板のフローはんだ付け工程において、鉛を使用せずにはんだ付け接合を可能にする多くの鉛フリーはんだ材料が研究されている。これらの中で代表的な5種類の鉛フリーはんだ材料について基本特性の評価を行い、鉛フリーはんだ材料に適応した新型リニア電磁ポンプが開発された。この研究をとおして以下のことが確認された。

- (1) 評価した5種類の鉛フリーはんだ材料は錫鉛共晶はんだと比較して10~20%程度大きな推力を発生することが可能であり、現行の錫鉛共晶はんだの代替え材料として十分に使用可能である。
- (2) 鉛フリーはんだ材料は密度が小さいために、はんだ揚げは錫鉛共晶はんだより高く上昇することが確認された。
- (3) 導電率で補正した規格化推力が±6%以内の誤差で一致したことにより、推力が導電率に比例して増加することが確認された。導電率が錫鉛共晶はんだより10~30%程度大きい5種類の鉛フリーはんだ材料は、錫鉛共晶はんだと比較して10~30%の効率向上が期待できる。
- (4) 鉛フリーはんだ材料の場合、錫鉛共晶はんだと比較して融点が14~44℃高いため、LEPの耐熱性が求められるが、新型LEPは連続運転における電線の最高温度が従来LEPより30℃低下しており、優れた冷却特性が確認された。

謝辞 本研究に多くの協力を頂いた斎藤浩司、高橋和彦、白井大の3氏に謝意を表する。

(平成12年5月8日受付, 同12年8月30日再受付)

文 献

- (1) 竹本正：「世界の鉛含有はんだ規制と環境調和型鉛フリーはんだ化の最新状況」, 溶接学会誌, Vol.69, No.2, 6~13 (2000)
- (2) 小野崎純一・高橋和彦・斎藤浩司・増田二紀・佐々木政之・山口昌樹・鹿野快男：「リニア電磁ポンプの推力特性」, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-99-142, 11 (1999)
- (3) 野中作太郎：「LIM 推力のわかりやすい設計法」, 日本応用磁気学会応用磁気研究会資料 MSJ 68-2, 9~16, (1991)
- (4) 伊賀元一・佐藤安雄・山田一：「板ガラスの熔融金属中の沈降における電磁力による直立安定性」電学論D, 117, 1269~1275(1997-10)
- (5) 工藤靖之・馬場旬平・大崎博之・正田 英介：「熔融金属のリニア駆動に関する数値解析」, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-96-8, 1 (1996)

- (6) 小野崎純一, 斎藤浩司, 増田二紀, 山口昌樹, 鹿野快男：「リニア電磁誘導式噴流はんだポンプの開発」, 日本応用磁気学会誌, Vol.23, No.4-2, 1701~1704 (1999)

- (7) R.J.Klein.Wassink：「ソルダリング・イン・エレクトロニクス」, 日刊工業新聞, 12~51(1986)

(平成12年05月08日受付, 平成12年08月30日再受付)

小野崎 純一 (正員) 1956年9月9日生。1980年, 日本大学理工学部航空宇宙工学科卒業。同年(株)アイデンティティ入社。1986年より(株)タムラ製作所中央研究所に勤務。主に環境保護の為に自動化装置の開発に従事。1998年より東京農工大学鹿野研究室とリニア誘導モータ方式はんだ付け装置を協同で研究開発。

増田 二紀 (正員) 1942年4月13日生。1966年信州大学工学部精密工学科卒業。同年(株)タムラ製作所入社。FAシステム(事)技術部長, 工場長を歴任後, 1995年中央研究所勤務。主に環境保護の為に新技術、鉛フリーはんだ対応はんだ付け技術、VOC(揮発性有機溶剤)フリーはんだ付け技術開発に従事。

佐々木 政之 1977年2月27日生。1999年3月東京農工大学工学部電子情報工学科卒業。同年4月同大学大学院生物システム応用科学研究所博士前期課程に入学。鹿野研究室に所属。研究室では(株)タムラ製作所と協同研究で熔融金属搬送用リニア誘導モータの開発および研究に従事。

鹿野快男 (正員) 1938年8月4日生。1960年明治大学大学院博士課程修了。同年東京農工大学工学部 助手。現在, 同大学院生物システム応用科学研究科 教授。工学博士。主として磁気回路, 電磁アクチュエータの基礎研究とその医用・福祉機器への応用、及び、農業, 土木, 生物に関する応用計測の研究に従事。計測制御学会、応用物理学会、農業機械学会、日本生物環境調節学会などの会員。