リニア電磁ポンプを使用したフローはんだ付け装置の開発

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 Flow Soldering Equipment

Junichi Onozaki, Tsugunori Masuda (Tamura Corp)

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

In the assembly process of a printed circuit board, automatic flow soldering equipment has been used for more than 50 years. Authors have succeeded in the practical use of a perfectly noncontact linear electromagnetic pump (abbreviated LEP). As a result of the optimization of thrust characteristics, the considerable improvement in the solder performance was confirmed. In this paper, the following subjects are described.

- (1) The considerable reduction of the bridge defects between adjacencies electrodes is possible, when following conditions are satisfied, solder rise height $y=0.01$ [m], substrate desorption angle $\theta=20$ [deg], square of solder flow velocity $v_{sy}^2>0.14$.
- (2) As a result of evaluating the LEP, it was confirmed that required thrust 15[N] were generated. And then, it became clear that soldering equipment using the LEP surpassed the system using a mechanical pump with regard to soldering performance.

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

1. はじめに

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フローはんだ付け装置が約 50 年以上に渡り使用されている。はんだ付け装置はフラックス塗布装置、プリヒータ、はんだ槽、冷却ファン、コンベヤから構成されている。はんだ付け性能は主にはんだ噴流ポンプの性能に依存している。従来は図 1(a) に示す回転モータとポンプ羽根を用いた機械ポンプ方式で溶融はんだを循環していたが、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、サイズの異なるプリント基板に対応するための連通管設計の良し悪しにより、波高さの変動 Δy [mm]が大きくなりはんだ付け性能が低下する。さらに装置の信頼性向上も難しいという多くの問題を抱えていた。これらの問題の解決方法として、筆者らは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(以下、電磁ポンプ: LEP と略す)を搭載したフローはんだ付け装置の実用化に成功した。電磁ポンプの場合は、図 1(b) に示すようにはんだに直接駆動力を与えるために、はんだを噴流するとき均一な波高分布を得ることが可能である。またポンプのメンテナンスがほとんど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である。

しかし目覚ましい技術革新によりプリント回路基板の実装密度は大幅に向上しており、フローはんだ付け装置のはんだ付け性能もより一層の向上が求められている。そこで噴射ノズルにジェットノズルを採用し、はんだ流速および基板離脱角度等の最適はんだ付け条件を満足するように、電

磁ポンプ発生推力の最適制御を行った結果、不良ブリッジは大幅に低減し、はんだ付け性能の大幅な向上が確認された。本論文では、以下の項目について述べるものである。

- 1) はんだ付け性能向上に必要な条件
- 2) はんだ付け装置に使用する電磁ポンプに必要な条件
- 3) 電磁ポンプの特性

図 1 従来機械ポンプと LEP の断面図

Fig.1. Cross section of the conventional mechanical pump and the LEP (unit: mm).

＜2.1＞電磁ポンプの構造と基本仕様

＜2.1＞電磁ポンプの構造と基本仕様 電磁ポンプが一体化されたはんだ槽の断面図を図2に示した。電磁ポンプは、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、はんだ槽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 ℃ に加熱された熔融はんだは、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。余剰の熔融はんだははんだ槽に流れ落ちるサイクルを繰り返す。電磁ポンプの採用によりはんだ槽下部を絞り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。200 [V] 3 相 3 極の電磁ポンプの基本仕様を表1に示した。固定子鉄心には厚さ 0.5 [mm] の

図 2 はんだ槽と電磁ポンプの断面図
Fig.2. Cross section of the LEP and the solder bath (Unit : mm).

表 1 リニア電磁ポンプの仕様

Table 1 Specifications of the linear electromagnetic pump.

項目	数値	(単位)
極 数	3	
ポールピッチ	72	(mm)
スロット数	12	(mm)
スロットピッチ	24	(mm)
スロット幅	14	(mm)
歯 幅	10	(mm)
スロット深さ	62	(mm)
鉄心材質	珪素鋼板	
バックアイアン厚さ	16	(mm)
ギャップ	6	(mm)
相 数	3	
一次電圧	120	(V)
周波数	100	(Hz)
一次電流	8	(A)
コイル巻数	60	(/coil)

図 3 電磁ポンプの構造
Fig.3. Structure of the LEP (Unit : mm).

ケイ素銅板を積層して製作しており、バックアイアンは S15C のブロック材を用いている。電線は特殊耐熱電線を使用して製作している。電磁ポンプの構造を図 3 に示した。スズと鉛の共晶はんだの使用温度は 250 °C なので、固定子鉄心とその巻線は 250 °C 以上の温度に定常的に耐える必要がある。そこではんだ槽から 0.5 [mm] 離れた位置に固定子鉄心を設置して、溶融はんだからの熱伝導を極力小さくしている。また鉄心の形状に開放スロットを採用し、各スロットに空冷装置から送風を行うためのエアチューブを装備し易くして、放熱性を向上させている。

＜2.1＞はんだ付け性能向上に必要な条件 自動はんだ付け装置を使用するプリント回路基板のはんだ付け工程では、電子部品電極とのはんだ未接合、隣接電極間のはんだブリッジ形成等のはんだ付け不良を可能な限り低減することが望まれている。はんだ付け性能向上のための必要条件の中で最も重要なのは、波高の変動 Δy [mm]を最小にすることである。この点において電磁ポンプは機械ポンプ方式と比較して優位性がある。また不良ブリッジ低減に有利な高速はんだ流のジェットノズルと電磁ポンプの組合せ実現に向けて、最適なポンプ推力を発生可能な電磁ポンプを開発することにより、はんだ付け性能の向上が期待される。以下にそのメカニズムについて説明する。図4はジェットノズルの運転状態を示している。ジェットノズルの吐出口より流速 v_2 [m/s]で噴射された溶融はんだは、吐出口からの高さ y [mm]にあるP点を流速 v_{sP} [m/s]で流れる。そのはんだ流の上面を

プリント回路基板が搬送速度 $-V_c$ [m/s] で通過する間に電子部品電極は溶融はんだに接触し接合が完了する。ここで流速 v_{sy} [m/s] とジェットノズル吐出口の流速 v_2 [m/s] との間にベルヌーイの定理が成り立ち、(1) 式となる。

$$v_2^2 = v_{sy}^2 + 2gy \quad (1)$$

図 5 は、P 点にはんだ接合継ぎ手が形成される様子を示している。一般にプリント回路基板には数多くの接合用電極が配置されている。その中の 2 本のリード電極間にはんだ合金により橋渡しされる不良ブリッジが発生することは許されない。この不良ブリッジを低減する条件について説明する。はんだの流速 $= 0$ [m/s] の静止した溶融はんだ合金にリード電極が接触すると、はんだは濡れ広がりリード電極の上方に表面張力により吸い上がる。このときのはんだ継ぎ手の表面張力による圧力差を ΔP_0 [Pa] とすると、(2) 式のラプラスの式となる。⁽¹⁾

$$\Delta P_0 = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

ここに

- γ : 溶融はんだの表面張力 $= 0.4$ [J/m²]⁽¹⁾
- R_1 : 曲面の曲率半径 [m] (図 2 参照)
- (半径中心が継ぎ手外部のとき R_1 は負の値となる)
- R_2 : リード線周りの曲率半径 [m]
- (半径中心が継ぎ手内部のとき R_2 は正の値となる)

ジェットノズルの噴射による流速 v_{sy} [m/s] の流れの中において圧力差 ΔP_{sy} [Pa] は水平方向動圧による減少と、鉛直方向動圧による増加のために (3) 式の右辺となる。

$$\Delta P_{sy} = \Delta P_0 - \frac{1}{2} \rho (v_{sy} \cos \theta)^2 + \frac{1}{2} \rho (v_{sy} \sin \theta)^2 \quad (3)$$

ここに、

- θ : 基板の離脱角度 [deg]
- ρ : はんだ密度 $= 8.5 \times 10^3$ [kg/m³]

このはんだ流速が v_{sy} のときの R_1 、 R_2 と対応するそれぞれの極率半径を R_3 、 R_4 とすると、

$$\Delta P_{sy} = \gamma \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) \quad [\text{Pa}] \quad (4)$$

(2) 式、(4) 式を (3) 式に代入すると (5) 式となる。

$$\gamma \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - \frac{1}{2} \rho v_{sy}^2 (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (5)$$

プリント配線基板に実装される電子部品のリード間ピッチは、最近では 1.27 [mm] ピッチが増加している。そこで 1.27 [mm] ピッチのリード部品において不良ブリッジが発生しない条件について計算する。はんだ継ぎ手の曲率半径が

リードピッチ 1.27 [mm] の半分以上、つまり R_1 、 R_2 が 0.7×10^{-3} [m] 以上のとき図 5 の破線で示す不良ブリッジが発生すると考えられる。吐出口からの高さ y [m] は、部品リードがノズル上を通過可能な最小限の値として 0.01 [m] に決定した。ジェットノズルを使用するはんだ付けにおいて、基板の離脱角度 θ は大きい方が有利であるが、20 [deg] 以上のとき流速 v_{sy} が低下することが確認されている。また、はんだ継ぎ手内部の圧力は負の値が望ましいことが経験的に求められており、(5) 式の左辺の値を負にする必要がある。この不良ブリッジを解消する流速 v_{sy} の条件を (5) 式より計算すると (6) 式となる。

$$0 > 0.4 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - 8137 \cdot v_{sy}^2 \quad (6)$$

- y : 吐出口からの高さ $= 0.01$ [m]
- θ : 基板の離脱角度 $= 20$ [deg]
- $R_1 = R_2 = 0.7 \times 10^{-3}$ [m]

$$v_{sy}^2 > 0.140 \quad (7)$$

(7) 式の結果を (1) 式に代入するとノズル吐出流速 v_2 が計算できる。

$$v_2 > 0.580 \quad [\text{m/s}] \quad (8)$$

図 2 の電磁ポンプの断面図において、各点での流速、圧力を v_1 、 P_1 、 v_2 、 P_2 とすると、 P_2 は大気開放であり無視できるので、ジェットノズル吐出口高さ h [m] から流速 v_2 で噴流するために必要な圧力 P_1 [Pa] は、ベルヌーイの定理から (9) 式となる。

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho gh - \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \Delta P \quad [\text{Pa}] \quad (9)$$

図 4 ジェットノズル運転状態
Fig.4. Operation of the JET nozzle.

図 5 はんだ付け継ぎ手形成プロセス
Fig.5. Process of forming the soldering joint.

ここに

$$v_1 = \frac{S_2}{S_1} v_2 \quad [\text{m/s}] \quad (10)$$

$$\Delta P = k \rho v_1^2 \quad [\text{Pa}] \quad (11)$$

(11)式において圧力損失 ΔP [Pa] は、はんだ流路を溶融はんだが通過するときの総合的な粘性抵抗係数 k により決定される。我々の以前の実験から同様のノズルにおいて圧力損失 $\Delta P = 14 \sim 16$ [kPa] が得られている。⁽²⁾

ここでジェットノズル吐出口高さ $h=0.03$ [m]、ジェットノズル吐出口断面積 $S_2=7.5 \times 10^{-4}$ [m²]、はんだ流路断面積 $S_1 = 8 \times 10^{-4}$ [m²]、における必要な圧力 P_1 および電磁ポンプの必要推力 F [N] は以下となる。

$$P_1 = 18.7 \times 10^3 \quad [\text{Pa}] \quad (12)$$

$$F = P_1 \times S_1 \\ = 15.0 \quad [\text{N}] \quad (13)$$

3. はんだ付け装置に使用する電磁ポンプに必要な条件

図 6 は LEP の外観を示している。図 1(b)に示すはんだ槽の LEP 搭載部分の容積 ($L \times W \times H=288 \times 272 \times 138$) に収まる形状にする。さらに供給電源の制約条件として 200 [V]、12 [A]以内で運転可能な LEP の設計を行った。推力を大きくするために、ポールピッチ τ 、巻数 N を大きくする必要がある。そこで一次積層鉄心の長さおよび幅は設計スペースとして許容される最大値 $L \times W=288 \times 272$ [mm] に決定した。極数 p_0 は設計スペースに収まる 2 極、3 極、4 極モータについて検討を行った結果、ポールピッチ τ 、巻数 N を最も大きく取れる 3 極を採用して $\tau=0.072$ [m] に決定した。スロット深さは、漏れ磁束を低減させるために、空冷チューブと巻線の収納可能な最小値として 62 [mm] を採用した。また、スロット形状寸法は有限要素法により解析し決定した。二次導体板の厚み d_a ははんだ中の不純物やはんだ付け用フラックスによる目詰まりが起こらない最小値、 $d_a=0.004$ [m] に決定した。すべり S_n は運転条件により異なるが電磁ポンプの場合 $S_n=0.9 \sim 0.95$ となる。その結果 $v_1 \approx 0.1 \times v_s$ となる。

図 6 電磁ポンプの概観図
Fig.6. External appearance of the LEP.

同期速度 v_s は $v_s = v_1 \times 1 / (1 - S_n) = 5.4$ [m/s] となる。

電磁ポンプを使用して溶融はんだに作用する推力は、一次鉄心表面からの距離が 3[mm]以上離れると急激に低下すると解析されている。⁽⁵⁾ LEP の場合も隙間を 6 [mm]以上にするると推力の低下傾向が現れるが、隙間 4 [mm]におけるはんだ流路内の流れは渦の影響の少ない定常流と考えても問題は少ない。リニア誘導モータの端効果、縁効果、表皮効果などの影響による複雑な解析を行わずに、電磁ポンプの設計法という目的から野中氏の理論に基付き推力の計算を行った。⁽³⁾

はんだの導電率 σ は 250 °C で実測により $\sigma = 1.6 \times 10^6$ [S/m]とした。最大磁束密度 B_m [T]は有限要素法 (日本総合研究所(株) JMAG-Works)を用いてはんだ流路中の磁束密度分布を計算した結果、励磁電流 8[A]において最大磁束密度 $B_m = 0.11$ [T]、10[A]において最大磁束密度 $B_m = 0.125$ [T]を得た。(14) 式は LEP の推力と各パラメータの関係を示している。

$$F = \frac{\sigma \cdot S_n \cdot v_s \cdot B_m^2}{2} (d_a \cdot h \cdot \tau \cdot p_0) \quad [\text{N}] \quad (14)$$

各パラメータの値を (14) 式に代入して設計推力を算出した結果が (15) 式である。

$$F = 15.2 \quad [\text{N}] \quad (15)$$

4. 電磁ポンプの特性

前述に従い製作された LEP について以下の評価を行った。

<4.1> 始動推力特性 流体による始動推力を測定するために、図 6 に示す揚程を測定するパイプを設計した。電磁ポンプのはんだ流路内静圧力 P_1 [Pa]、はんだ流路内流速 v_1 [m/s]、はんだ揚程 h [m]、はんだ噴流パイプ部静圧力 P_3 [Pa]、パイプ部はんだ流速 v_3 [m/s]、はんだ流路内部圧力損失 ΔP [Pa]、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と仮定すると、ベルヌイの定理により(16) 式の関係が成り立つ。

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 - \Delta P = P_3 + \frac{1}{2} \rho v_3^2 + \rho gh \quad [\text{Pa}] \quad (16)$$

大気圧を静圧力の基準として考えると、 $P_3 \approx$ 大気圧となり P_3 は無視できる、電磁ポンプを運転すると 250°Cの溶融はんだは上昇を続け、一定のはんだ揚程 h [m] まで到達した時点でのパイプ内部はんだ流速 $v_3 = 0$ [m/s]、はんだ流路内流速 $v_1 = 0$ [m/s]となり溶融はんだの上昇は停止する。この停止状態の関係を (16) 式より求めると (17) 式となる。

$$P_1 = \rho gh \quad [\text{Pa}] \quad (17)$$

つまり電磁ポンプの始動推力 F_s [N] は (18) 式となる。

$$F_s = \rho gh S_1 \quad [\text{N}] \quad (18)$$

これらの関係に基づき、電磁ポンプをインバータにより駆動し、運転周波数と印加電圧を変化させて、それぞれの状態での始動推力を測定した。図 8 は溶融はんだ揚程と励磁電流の関係、図 9 は溶融はんだ揚程と有効電力の関係を示す。プリント回路基板のはんだ付けを行うために必要な設計推力=15.2 [N]以上を満足するためには図 8 の結果から運転周波数 100 [Hz] で 10 A 以上の励磁電流を流す必要があることが確認された。図 9 の結果では運転周波数が 40~100 [Hz]の範囲において推力に大きな差は見られない。この原因として電磁ポンプを使用してはんだに推力を与える場合、周波数を増加させて同期速度を増加させてもスベリが増加し推力に寄与できないものと考えられる。また、鉄心の鉄損による影響も含まれている。

図 7 はんだ 揚程の測定方法
Fig.7. Measurement method of the solder head.

<4.2> 磁気特性 はんだ槽から溶融はんだを抜き取り、ホール素子をはんだ流路内に挿入して移動磁界の測定を行った。運転周波数 100 [Hz]で励磁電流 8 [A]における磁束密度の分布を図 10 に示す。局所的な最大磁束密度は 128 [mT]で有限要素法の予測結果より大きな値で 15 % の誤差があるが、全体的には数%の誤差におさまっている。

<4.3> はんだ付け性能評価 波高変動 Δy と運転周波数の関係を図 11 に示した。機械ポンプ方式は ± 0.4 [mm] 程度の変動が有るが、LEP は非常に波高が安定している。さらにジェットノズルにより流速が高速化しており、はんだ付け性能の向上が期待できる。そこで、隣接電極間のはんだブリッジ不良の低減効果を試すためにはんだ付け性能評価を行った。表 2 は電磁ポンプを量産プリント基板に適用した

図 8 はんだ揚程と電流の関係
Fig.8. Relation between the solder head and the current.

図 9 はんだ 揚程と有効電力の関係
Fig.9. Relation between the solder head and the active power.

図 10 はんだ流路の磁束密度分布
Fig.10. Magnetic flux density in the solder flow route.

場合のはんだ付け性能評価結果である。実験は A,B,C,D, 4 種類の基板について行った。それぞれの基板におけるチップ部品およびリード部品のはんだ付けポイント数が表示されている。電磁ポンプの運転条件は 3 章の条件に従い調整を行い、

電子部品を実装したプリント回路基板を製造ラインに流し実験を行った。その結果、機械式ポンプにジェットノズル搭載のはんだ付け装置における不良率を基準値 100 としたとき、電磁ポンプを搭載したはんだ付け装置は不良率が 1/10～1/20 に低減されていることが確認された。⁽⁵⁾ この結果は電磁ポンプが性能面においても機械式ポンプを使用した従来のはんだ付け装置に勝っていることを示している。

図 11 LEP の運転周波数と波高の関係
Fig.11. Relation between the wave height and the operating frequency.

表 2 量産プリント基板によるはんだ付け性能評価結果
Table 2 Solderability evaluation result for the mass production of a printed circuit board.

種 類	チップ 部品数	リード 部品数	はんだ付け不良率 電磁 [※] ソ [※] / 機械 [※] ソ [※]
A	170	250	5 / 100
B	1000	450	11 / 100
C	700	200	6 / 100
D	770	360	67 / 100

5. まとめ

フローはんだ付け装置のはんだ付け性能向上を目的に溶融はんだに与える推力の最適設計を行い、開発された電磁ポンプについて評価した結果以下の結論が得られた。

- (1) 不良ブリッジを低減するためには、吐出口からののはんだ上昇高さ $y=0.01$ [m]、基板の離脱角度 $\theta=20$ [deg] において電磁ポンプの推力 F は 15.0 [N] 必要である。
- (2) 野中氏のリニア誘導モータの理論を溶融金属の流体搬送に置き換えて設計した推力 15.2 [N] の電磁ポンプは、運転周波数 100 [Hz]、励磁電流 10 [A] 以上で始動推力 15 [N] を満足した。はんだ流路隙間が 4 [mm] 程度と狭い場合の溶融金属の流体搬送においては、固体物質の搬送理論で設計が可能である。
- (3) ジェットノズルを使用したはんだ付け性能評価において、電磁ポンプ搭載のはんだ付け装置は、機械式ポンプ搭載の従来のはんだ付け装置に勝ることが確認された。

謝辞 本研究に多くの協力と指導を頂いた山口昌樹氏（富山大学 助教授）に謝意を表する。

（平成 12 年 3 月 31 日受付，平成 12 年 11 月 6 日再受付）

文 献

- (1) 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.
- (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) 工藤靖之・馬場旬平・大崎博之・正田 英介: 電気学会リニアドライブ研究会資料，LD-96-8, 1 (1996).
- (5) 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, (1999)

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)アイダエンジニアリング入社。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。F A 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 月同大学院 生物システム応用科学研究科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溶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。