

新型鉛フリーリフロー炉の開発

Development of a New Model Reflow Oven for Lead-Free Soldering

山根 基弘*
Motohiro Yamane

折田 伸昭*2
Nobuaki Orita

宮崎 浩一*2
Koichi Miyazaki

周 偉銘*2
Weiming Zhou

概要 リフロー炉における性能改善の最大のテーマは、はんだ溶融時に基板各部に発生する温度差 ΔT を極限まで小さく押さえ込むことにある。鉛フリー化により従来より厳しいプロセスマージンでの温度管理が必要となるため、ここでは、リフロー炉の基本加熱性能である熱風熱伝達率 α の大幅な向上を開発の達成目標とした。本開発では熱風発生エンジンの見直し、特に熱風パネルのデザイン変更を行い、従来に比べて加熱性能を大幅に向上させた鉛フリーリフロー炉を開発した。開発手法として熱伝達率測定・流れ場の可視化といったこれまでに培ったプロセス診断技術を効率的に活用することにより、5ヶ月という短期間で開発目標を達成することができた。

1. はじめに

鉛フリー実装用のリフロー炉に求められる要求性能は、このところの本格的な鉛フリー実装機の普及により、一層明確かつ高度なものとなってきた。鉛フリー表面実装の現状を要約すると、

- 1) 融点の高い錫／銀ベース系の組成が鉛フリー材料としてデファクトスタンダード化したこと。錫／亜鉛系などの中融点タイプの材料に、錫／銀ベース系にとって代わる主力材料としての見通しが立っていないこと。
 - 2) 部品耐熱性の改善が短期に全面的に進むことは期待できず、現実問題としては、耐熱性対策が間に合っていない部品に合わせて、旧来レベルのリフロー温度域で実装しなくてはならないこと。
 - 3) リフロー炉の性能改善によって、はんだ材料、部品耐熱問題の現状をカバーしてゆく必要があること。
- 以上のような状況にある。

リフロー炉における性能改善の最大のテーマは、はんだ溶融時に基板各部に発生する温度差(ΔT)を極限まで小さく押さえ込むことにあり、この課題はすなわち熱風による基本加熱能力の向上を図ることに帰着される。

2. リフロー炉の要求性能と改善目標

リフロー炉の最も基本的な性能である加熱能力は、目標とする温度プロファイルに対する追従精度を目安にして推し測るこ

とができる。鉛フリー実装用温度プロファイルの基本条件を図に示す。部品の耐熱性からくる実装温度の上限規定を240℃とすると、Sn-Ag-Cu系はんだでのプロセスウインドウは20℃となる。さらに、はんだ溶融温度の下限管理値を230℃に設定すると、許容される ΔT は10℃以下となり、従来のSn-Pb系共晶はんだに比べて1/4程度の狭いプロセスマージンでの温度管理が必要となる。

リフロー炉の開発に際して設定した主な改善テーマを以下に挙げる。

- ① ΔT 性能の改善：基本加熱能力(熱風熱伝達率 α)の改善
- ②冷却能力の強化
- ③フラックス回収性能の向上
- ④窒素消費量の低減(窒素炉)

この中で最も本質的な課題は基本加熱性能(熱風熱伝達率 α)の改善にある。さらに鉛フリー実装では、部品の耐熱問題で制約を受ける高温滞留時間も同様に重要な管理の対象となるため、温度プロファイルの冷却カーブをコントロールするための冷却能力の強化も重要な検討テーマである。

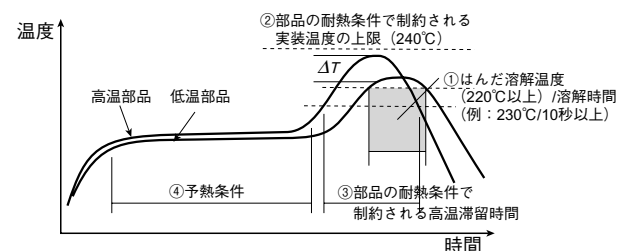


図1 鉛フリー実装用温度プロファイルの基本条件
Basic condition of temperature profile for lead-free soldering

* 電装・エレクトロニクスカンパニー
エレクトロニクス・コンポーネント事業部 産業機器部

*2 設備部 生産技術開発センター

3. 基本加熱性能の改善

一般に伝熱のメカニズムには3つがある。温度の高いところから低いところに熱が輸送される熱伝導、運動している流体によって熱が運ばれる対流伝熱、熱エネルギーを電磁波として放射/吸収することにより伝達媒体なしに熱が伝わる熱輻射の3つである。このうち、リフロー炉の加熱能力として制御可能なものは対流伝熱と熱輻射の2つである。これまでのサラマダ®リフロー炉においても、衝突噴流による強制対流伝熱と遠赤外線による輻射加熱を併用することで所望の加熱能力を達成してきた。しかし、本開発における加熱能力向上の手段としては熱輻射を利用せず、噴流デザインの見直しによる基本加熱能力の向上を命題とした。これには2つの理由がある。1つには基板を従来よりも均一に加熱する必要があるため、熱容量の大小により基板温度差のつきやすい赤外線加熱を使用するのは不利であること、もう1つには赤外線ヒータのような部品許容温度以上に加熱される物体をリフロー炉の中に入れること自体が嫌われていることである。強制対流伝熱においては、基板は熱風温度以上に加熱されることはない、より部品に"やさしい"加熱ができるといえる。

図2のように表面積 A (m²)、厚さ s (m)の基板がある一定温度 T_{gas} (°C)の熱風によって加熱されるモデルを考える。基板温度を T_{board} (°C)とすると、単位時間あたりに熱風から基板へと与えられる熱量 Q (W)は、

$$Q = \alpha A (T_{\text{gas}} - T_{\text{board}}) = \rho A s C_p \frac{\partial T_{\text{board}}}{\partial t}$$

ここに、

α : 熱伝達率 (W/m²·K) ρ : 基板の密度 (kg/m³)

C_p : 平均比熱容量 (J/(Kg·K))

である。熱伝達率 α は定数ではなく、一般に流体の種類、流れの状態などにより定まる値である。この α こそが加熱能力をあらわす指標であり、熱風噴出しノズルの形状、サイズ・径、ピッチなどにより基板面に吹き付けられる熱風の流れの状態が決まるとおのずと α は定まる。基板面における熱風風速が早いと α は大きくなるが、リフロー炉においては基板上の熱風風速は部品が飛ばない程度に抑える必要がある。

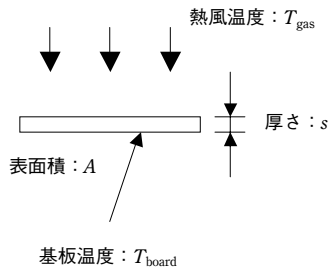


図2 対流伝熱による基板加熱モデル
Heating model of PCB by convection heat transfer

上式は一次の微分方程式なので、初期値を与えることにより以下のように解析的に解ける。

$$T_{\text{board}} = T_0 + T_{\text{gas}} \left[1 - \exp \left(-\frac{\alpha}{\rho s C_p} t \right) \right]$$

ここに、

T_0 : 時刻 $t=0$ での基板温度(°C)

である。指数の t の係数 $(\alpha/\rho s C_p)$ は基板温度の応答速度を表し、この値が大きいと基板温度は早く上昇する。すなわち、 α が大きいと基板は早く温まり、また基板の比熱容量 C_p が大きいと基板は温まりにくい。このことを利用して、比熱容量の異なる部品の実装された基板をリフロー炉に流し、それぞれの部品の温度を熱電対で測定し、各測定温度のピーク値の最大と最小の差 ΔT をもってリフロー炉の加熱能力を評価することができる。部品の実装された基板の代わりに、1枚のSUS板で厚みを部分的に変えることで熱容量の異なる部品が実装された基板を模擬することができ、上述の ΔT の評価ができる。

図3に、リフロー炉の本加熱2ゾーンにおける基板加熱をシミュレートした結果を示す。図はそれぞれ横軸が時間(s)、縦軸が基板温度(°C)である。図中の青色の線はSUS板で厚さが1mmの部分の温度、赤色は厚さが2mmの部分の温度で、灰色の直線は熱風温度である。基板は1つのゾーンで25秒間滞在した後次のゾーンに移ると仮定、またこの2ゾーンに入るまでの基板においては厚さが1mmの部分と2mmの部分はそれぞれ190°C、180°Cまで予備加熱されているものとした。

本加熱1ゾーン目出口において厚さ1mmの部分の温度が240°Cまで加熱されるように1ゾーン目の熱風温度が定められている。また、2ゾーン目では常に240°Cの熱風を吹付けているので、厚さ1mmの部分の基板は昇温されず、厚さ2mmの部分のだけ加熱されることになる。2ゾーン目出口での基板の温度差 ΔT を比較すると、熱伝達率 α が110 W/(m²·K)の場合 $\Delta T=11.0^\circ\text{C}$ に対し、 α が150 W/(m²·K)の場合 $\Delta T=7.2^\circ\text{C}$ まで改善される。我々の開発目標は、この ΔT を10°C以下にすることに設定された。

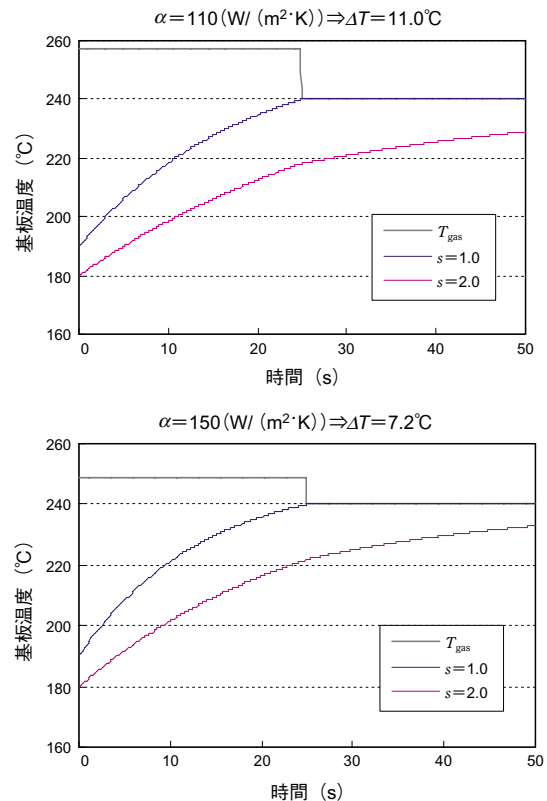


図3 熱伝達率 α と ΔT の関係
Relationship between heat transfer coefficient α and ΔT

4. 熱伝達率向上への取り組み

前述のとおり、基本加熱性能を向上させることは熱伝達率を向上させることに他ならない。しかし基板上の風速が規定されている以上、むやみに熱風風量を増やすだけではなく、いかに効率よく基板へ熱を伝えることのできる流れ場をデザインできるかを念頭に置かねばならない。我々はこの課題を解決するための取り組みとして、熱風エンジンの見直しを行った。特に熱風パネルのノズル配置、ノズル径およびノズルピッチの設計変更を行い、より効率の良い熱伝達を行えるパネルデザインを模索した。そのためにまず、熱風噴出しノズル径および穴ピッチと熱伝達率の関係を加熱モデル実験により調べた(図4参照)。実験方法は、熱風ヒータにより加熱された窒素を種々の径およびピッチのノズル(4個)から噴出して熱電対付き基板に吹き付け、その昇温時間から熱伝達率を計算するというもので、窒素流量は流量コントローラにより基板上風速が一定になるように調節した。

測定結果を図5に示す。図5よりノズルピッチ/穴径と熱伝達率の間には反比例の関係があることがわかり、ノズルピッチを狭く、穴径を大きくすることが熱伝達率を向上させることが分かる。これは基板単位面積あたりの熱風風量を大きくすることと同値である。

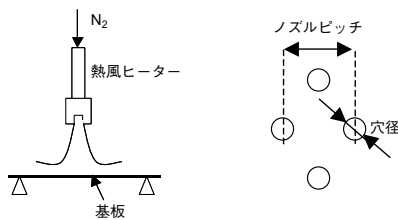


図4 加熱モデル実験の概略図
Schematic viewgraph of heating model experiment

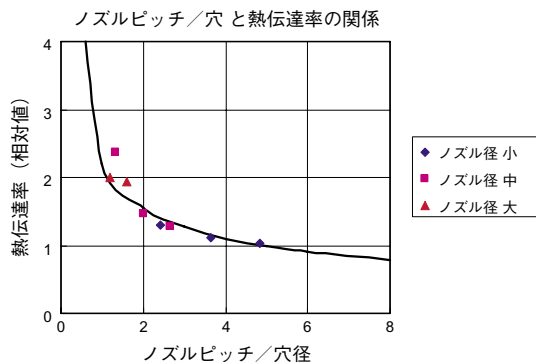


図5 ノズルピッチ/穴径と熱伝達率の関係
Relationship between the (nozzle pitch)/(nozzle diameter) ratio and heat transfer coefficient

実際のリフロー炉のパネルを考えると、噴出しと吸込みの風量バランスを考慮しなければならない。上述のノズル径およびピッチの関係は噴出しノズルの熱伝達率だけを考慮していたため、たとえば噴出し流れを基板面の範囲で均一にするためにはそれに見合う量の大きな吸込みスリットが必要になり、その結果、吸込みスリット部で加熱能力を大きく下げてしまうことになってしまう。そこで吸込み部をスリットからパイプに変更

し、噴出しノズルの間に配置する構造を提案した。このようにすることにより加熱能力を下げることなく噴出し/吸込みのバランスを取ることができた。

5. 熱風パネル評価

前章まで述べてきた新デザインパネルの加熱能力および流れ場の評価には、ノズル群による加熱モデル実験を経た後、写真1に示す1ゾーン実験機を用いたスケールアップ実験を行い、実機レベルの評価を行った。具体的には、①熱電対付き基板を用いた熱伝達率測定、②熱画像カメラを用いた基板加熱均一性評価、③スモーク法による流れ場の可視化等、これまで培ったプロセス診断手法を応用した。そのおかげで開発にかかる費用および時間を少なく抑えることが可能となった。以下に、それぞれの具体的手法について詳しく述べる。

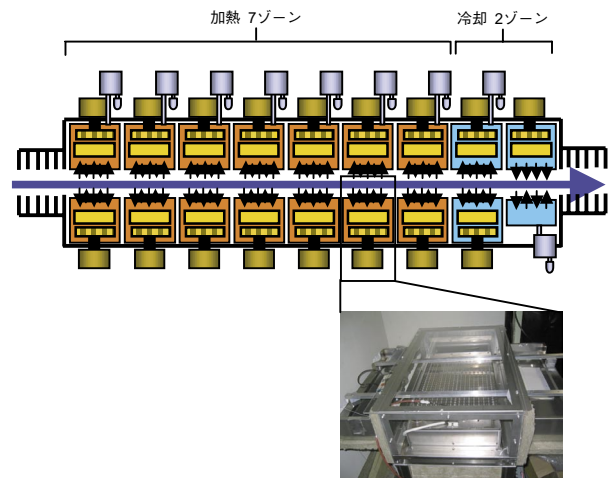


写真1 1ゾーン実験機
One-zone experimental machine

5.1 熱電対付き基板を用いた熱伝達率測定

ステンレス(SUS)製の基板に熱電対を接着し、その近傍に炉内温度測定用熱電対を併設した温度測定用基板を、雰囲気温度200℃に加熱した1ゾーン実験機に投入、手動搬送して基板昇温速度を測定し、熱伝達率を測定した。同様の測定を種々の熱風パネルについて行い、パネル同士の加熱能力の相対比較を行った。図6にその測定結果の一部を示す。その結果最も加熱能力の高かったパイプ排気タイプを量産型パネルのベースデザインと決定した。

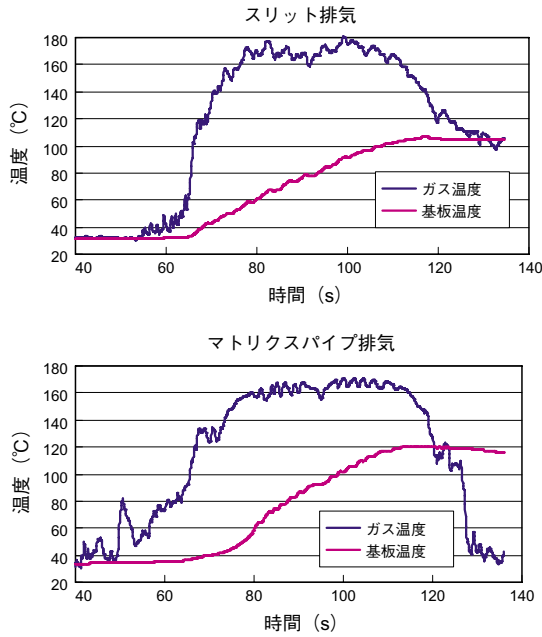


図6 基板・ガス温度測定結果
Measured results of board temperature and gas temperature

5.2 熱画像カメラによる基板加熱均一性評価

写真2に示すような実験構成で噴出し熱風の加熱均一性を評価した。1ゾーン実験機の上部蓋の一部を石英ガラス製にし、一定雰囲気温度に達した実験機へガラエポ基板を投入し、投入直後／10秒後／20秒後／30秒後の熱画像を撮影した。図7に撮影した熱画像の一例を示す。マトリクスパイプ排気の新デザインパネルの方がスリット排気の旧デザインよりも基板が均一に加熱されていることが分かる。



写真2 熱画像撮影
Thermal imaging using pyrometer

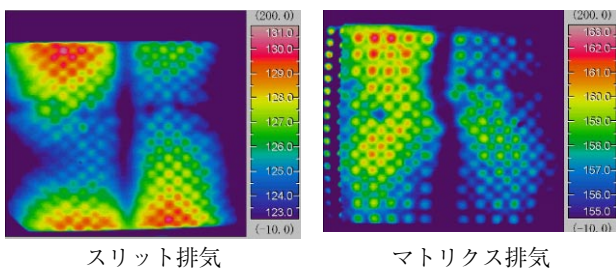


図7 基板投入30秒後の熱画像の一例
An example of thermal image: 30 seconds after PCB insertion

5.3 スモーク法による流れ場の可視化

1ゾーン実験機の側面および上面をアクリル製にし、常温雰

囲気中での炉内流れをスモーク法により可視化した。着目したノズルからスモークを導入し、その流れをポリゴンミラーでシート状にしたレーザー光で照らし、CCDカメラで撮像した(写真3)。写真4に撮影画像の一例を示す。この映像と、風速プローブ付き微動ステージによる風速分布の詳細な調査結果から、弊社のリフロー炉の噴き出し噴流は基板到達位置でその向きを変え、吸い込み穴から効率的に吸引されていることが分かっている。この現象は基板加熱後の冷えた熱風を炉内から速やかに取り除く効果もあり、また、1ゾーン内で上側パネルと下側パネルの噴流がお互いに干渉せず、結果として上下パネルで炉内設定温度に差をつけることが可能であるという効果もある。これは、部品本体の温度を上げずにはんだ接合部の温度を上げることができるという点で有利である。さらに、基板搬送ライン上に基板がある場合にも流れ場が乱されないことから、炉内雰囲気低酸素濃度に保つための窒素消費量が少なく済み、一般のリフロー炉と比較してランニングコストの大幅な削減が可能となっている。弊社では、この現象を起こす構造は総合的に判断して有効だと考えている。

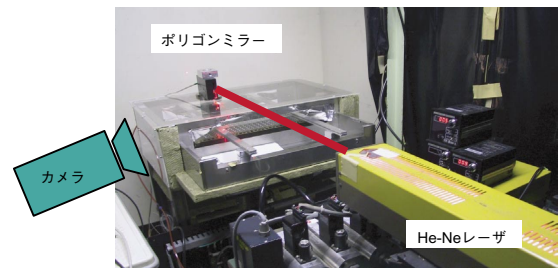


写真3 可視化実験の構成
Setup for flow visualization experiment

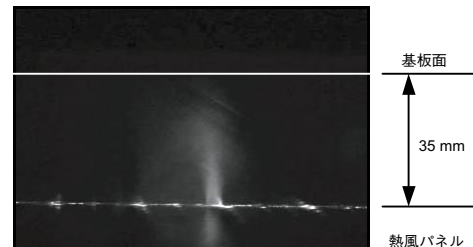
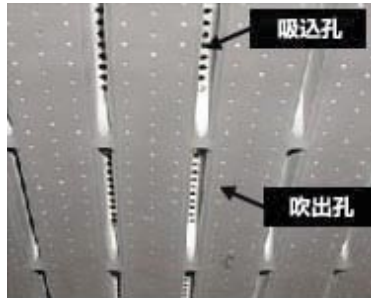


写真4 スモーク法による流れ場の可視化
Flow visualization by smoke method

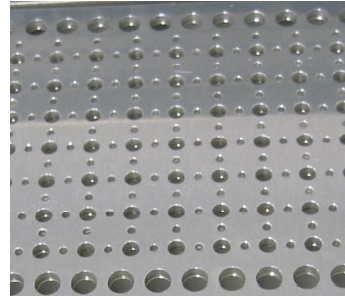
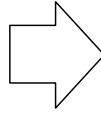
6. 新型パネルデザイン

前章までの基礎実験およびパネル評価方法を用いることにより、今回開発されたリフロー炉の熱風パネルは写真5のようなデザインに決定した。従来型と大きく違うのは吸い込みの形状をスリットからパイプに変更し、噴き出しノズルの間に配置した点である。この変更により吸い込みスリット部で加熱能力をロスしていた従来型に比べて、より効率の良い加熱ができるようになり、パネル全体としての熱伝達率が大幅に向上した。

また、パネルのゾーン出入口側には噴き出し穴の列が1列設けてある。この列は、隣のゾーンとの熱風干渉を防止するために設けたシール領域である(写真6)。このゾーンの効果も前章の流れ場の可視化により確認されている(写真7)。



従来型（スリット排気）
SUS板 $\Delta T=11^{\circ}\text{C}$ /実装基板 $\Delta T=13.5^{\circ}\text{C}$



新型（パイプ排気）
SUS板 $\Delta T=8.7^{\circ}\text{C}$ /実装基板 $\Delta T=9.6^{\circ}\text{C}$

写真5 新パネルデザイン
Appearance of the newly designed panel

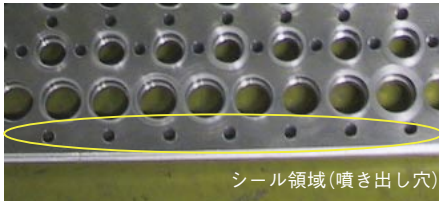


写真6 シール領域（吹き出し穴列）
Sealing region (a row of blowing nozzles) newly designed

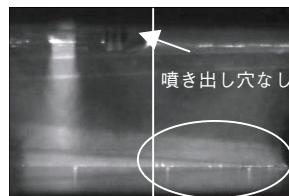
リフロー炉性能評価などで多大な協力をいただいた社内外の多くの関係者の方々に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 柴村求:「鉛フリー実装用熱風炉の開発と評価」, 実装技術, **219** (2003), 48.
- 2) 水科篤郎, 荻野文丸: 輸送現象, 産業図書
- 3) 中尾剛介, 平泉敦嗣, 岩崎悦子:「鉛フリー対応のリフロー装置」, 古河電工時報, 106号, (2000), 25.



ゾーン間干渉なし



ゾーン間干渉あり

写真7 シール領域の効果
Effects of the sealing region

7. おわりに

本開発は、衝突噴流によるプリント基板の強制対流伝熱方式というこれまでの鉛フリーリフロー炉開発の経緯を継承しつつ、その加熱能力を従来に比べて大幅に向上させることを目標に行ってきたもので、新開発のパネルデザインによりその目標をクリアすることができた。今後、①基本加熱能力の更なる向上、②高密度実装基板における部品間加熱能力性向上、③炉内雰囲気制御の安定性向上（窒素消費量の低減）といった開発を行うことで、より高品質な鉛フリーはんだ付けを行うことのできるリフロー炉を市場に提供できる。これまで我々の培ってきたプロセス診断技術（熱解析・流動解析）の応用もさることながら、今後は、より高度な可視化技術（高温流れ場の可視化）・流動解析シミュレーションの援用を視野に入れて開発を進めてゆきたい。

新型鉛フリーリフロー炉は、量産化に向けた最終詳細評価中である。また、同時に中国の古河電子蘇州有限公司で新型機の量産体制を整えつつある。製造拠点を中国に移転したことにより、従来より大きなコストダウンメリットが得られている。

今後も鉛フリーはんだ付け技術の動向をいち早く先取りして高性能かつ低価格なリフロー炉開発を継続してゆく。最後に、