

岩田 彩* 田邊 剛***
 小山雅弘** 出田吾朗†
 朝山真次***

リフロー温度プロファイルシミュレータ

Temperature Profile Simulator for Reflow Soldering

Aya Iwata, Masahiro Koyama, Sinji Asayama, Tsuyoshi Tanabe, Goro Izuta

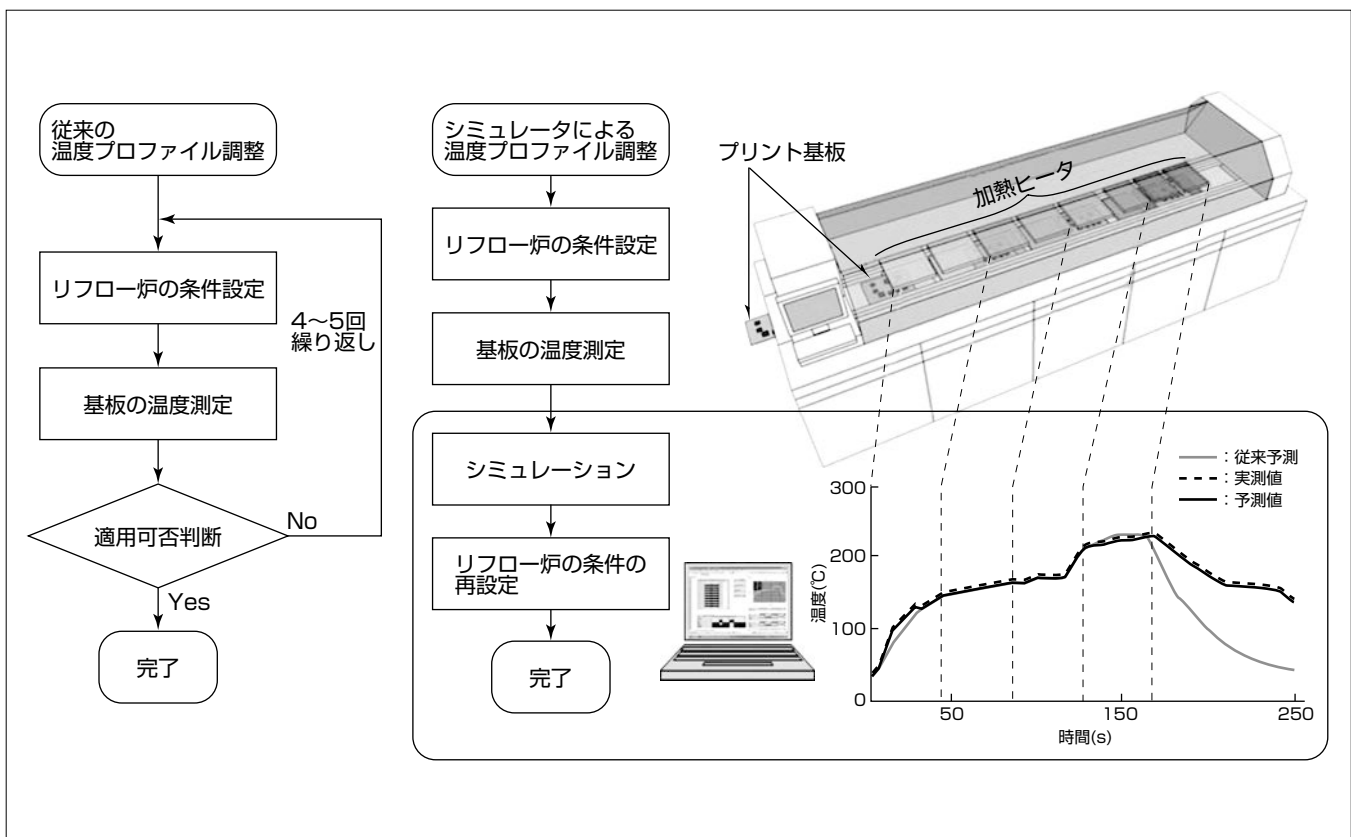
要 旨

地球環境、生態系への配慮から、三菱電機では鉛フリー化を推進してきた。一部の特殊需要製品を除くあらゆる当社製品に搭載されるプリント基板の鉛フリー化を完了して既に数年が経過している。しかし、鉛フリーはんだ材は、従来の鉛入りはんだ材に比べ、融点が30℃以上高いため、はんだ付け時の加熱温度を高める必要がある。一方、電子部品の耐熱温度は従来ほとんど変わっていないため、リフローはんだ付けで、高い実装品質を維持するためには、従来に比較して緻密な温度制御が要求される。形状、熱容量、放射率等、加熱特性の異なる数百種の電子部品を搭載するプリント基板のリフロー実装で、適切な温度プロファイルを得るためには、リフロー炉の熱風温度、風量、加熱時間等、条件設定を変更しながら温度測定を繰り返す煩雑な調

整作業が必要である。

この調整作業時間の削減を目的として、一度の温度測定データから、最適な温度プロファイルを得るための設定条件を決定できるリフロー温度プロファイルシミュレータを開発し、実用展開した。

このシミュレータは、実測したプリント基板の温度変化から、リフロー炉の加熱能力とプリント基板の熱物性値によって決定される加熱特性を算出し、任意のリフロー炉設定条件を入力することで、プリント基板の温度プロファイルを瞬時に計算するものである。新規プリント基板の量産適用時におけるリフロー炉の設定条件出し、量産ラインでのリフロー炉の変更可否判断、複数のプリント基板に対するリフロー炉設定条件の統合化等に活用できる。



適正なリフロー温度プロファイルを得るためのリフロー炉の設定条件調整

従来は、リフロー炉の設定条件を変更しながら温度プロファイル測定を何度も繰り返すことで、適正な設定条件を求めた。リフロー温度プロファイルシミュレータを使用する場合は、温度プロファイルをただ一度実測したデータを入力することで、任意のリフロー炉の設定条件での温度プロファイルを瞬時に算出可能となる。

1. ま え が き

RoHS(Restriction of the use of certain Hazardous Substances)指令以降、電気・電子機器分野で鉛フリー化が定着し、電子部品のプリント基板への実装でも、鉛入りはんだから鉛フリーはんだへの置き換えがおおむね完了している。しかし、従来のSn-Pb共晶はんだの融点183℃と比較して、鉛フリーはんだの融点は217℃前後と高く、はんだ付け工程で従来よりもはんだ付け部を高温に加熱する必要がある。一方、電子部品の耐熱温度も従来に比較して高められてはいるものの、改善幅は10℃程度と大差がない。そのため、はんだ付けの際に、はんだの溶融温度、電子部品の耐熱温度の両方を満足するよう細かな温度制御が要求される。また、はんだが凝固する瞬間の冷却速度ではんだの結晶組織が決定され⁽¹⁾⁽²⁾、信頼性に影響を与えるため、厳密に管理を行わなければならない。このように、プリント基板のはんだ付け工程で加熱から冷却までの温度設計に対し、今まで以上に緻密さが要求されている。

近年、一般にはんだ付け工程に用いられるリフロー炉は、複数の加熱/冷却ゾーンから構成されており、各ゾーンの温度設定及びコンベヤ搬送速度を調整することで、所望のはんだ付け温度プロファイルが得られる。基板ごとに適正な温度プロファイルを得るためには複数回の設定の調整/実測作業を繰り返す必要があり、この作業の工数削減が望まれている。この課題を解決するため、リフロー炉の空気温度/コンベヤ搬送速度からプリント基板の温度プロファイルを予測するリフロー温度プロファイルシミュレータを開発した。

本稿では、2章で温度プロファイルシミュレータを構築するのに用いた熱伝達理論を基にした計算方法、及びその計算を基に構築したシミュレータ4種について述べた後、3章でシミュレータの精度検討を行った結果について述べる。

2. 温度プロファイルシミュレータ

2.1 温度シミュレート方法

初めに、温度プロファイルシミュレータ構築の基礎とした熱伝達理論⁽³⁾⁽⁴⁾について述べる。

ある熱媒体内の空間に微小体積要素が存在するとし、この熱媒体は物性値が等方的で、かつ要素内の密度が一定、時間 t における要素の温度 $T(t)$ が一様であるとみなせるとする。ここで、微小体積要素の熱量の時間変化率 $\partial Q / \partial t$ は式(1)のように立式できる。

$$\frac{\partial Q(t)}{\partial t} = \rho CV \frac{\partial T(t)}{\partial t} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

- ρ : 微小体積要素の密度(kg/m³)
- C : 微小体積要素の比熱(J/(kg・K))
- V : 微小体積要素の体積(m³)

また、微小体積要素の熱量の時間変化率 $\partial Q / \partial t$ は、時間 t での微小体積要素への流入熱量 δQ_{net} と要素内で発生した熱量 δQ_{gen} の和で表され、式(2)のように表わされる。

$$\frac{\partial Q(t)}{\partial t} = \delta Q_{net} + \delta Q_{gen} \dots\dots\dots(2)$$

時間 t での流入熱量 δQ_{net} は、Newtonの冷却法則から、周囲の流体の温度 T_{∞} を用いて、式(3)のように表せる。

$$\delta Q_{net} = -h(T(t) - T_{\infty})A \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

- A : 熱と接触部の表面積(m²)
- h : 熱伝達率(W/(m²・K))

これらから、式(2)は、式(1)、式(3)を用いて次のように表わされる。

$$\rho CV \frac{\partial T(t)}{\partial t} = -h(T(t) - T_{\infty})A + \delta Q_{gen} \dots\dots\dots(4)$$

$t=0$ のとき $T = T_0$ 、要素内での発熱量 δQ_{gen} が十分に小さく無視できるとすると、次式となる。

$$\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho CV} t\right) \dots\dots\dots(5)$$

$$T(t) = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty}) \exp\left(-\frac{hA}{\rho CV} t\right) \dots\dots\dots(6)$$

ここで $t + \Delta t$ での T の値を、テイラー展開によって近似する。 $\Delta t \ll t$ である場合、 Δt が2次以上の項は0とみなせるので、式(7)となる。

$$T(t + \Delta t) \approx T(t) + (T_{\infty} - T_0) \frac{hA}{\rho CV} \exp\left(-\frac{hA}{\rho CV} t\right) \Delta t \dots\dots\dots(7)$$

$t=0$ から Δt 時間後の温度は、

$$T(\Delta t) \approx T_0 + (T_{\infty} - T_0) \frac{hA}{\rho CV} \Delta t \dots\dots\dots(8)$$

となる。解析ツールのアルゴリズムとして、 Δt 時間ごとの温度変化量を算出するため、 Δt 時間ごとに時間 t を0に初期化して、温度予測計算をする。

以降、予測で次を定義する。

$$\frac{hA}{\rho CV} = \alpha \dots\dots\dots(9)$$

$$\frac{A}{\rho CV} = \beta \dots\dots\dots(10)$$

β は温度測定部の電子部品やプリント基板に依存した定数となり、便宜上ここではリフロー熱定数と定義する。

温度プロファイルの実測値から先に述べた計算を基に温度プロファイルの予測を行うことで、高精度の予測方法の確立を目指した。予測の高精度化のために、式(9)の α の算出を4通りの方法で実施し、その精度比較を行い、最も有効なシミュレート方法を検証した。2.2節でそれぞれのシミュレート方法を述べる。

2.2 シミュレータの特徴

精度検証評価に使用したシミュレータの詳細を述べる。

シミュレータは2.1節の理論を基に作成しており、既存のものも含めて4種について検討し、それぞれシミュレータ1, 2, 3, 4と名づけた。シミュレータ1と3は、以前に当社で開発したシミュレータであり、この検証評価における比較対象とした。全てのシミュレータで、設定条件を入力することで、温度プロファイルを表示するようにした。同時に、温度プロファイルの予備加熱時間、本加熱時間、ピーク温度、加熱・冷却時の温度変化の傾きを表示するようにし、それらの値が要求仕様に合致しているかについて合否判定を自動算出するように、シミュレーションツールを構築した(図1)。

次に、各シミュレータの特徴について述べる。

シミュレータ1は、リフロー炉内の熱伝達率 h を一定と仮定し、実測温度プロファイルから a を決定し、その a を利用してシミュレータを構築する。シミュレータ1では、実測値と同一リフロー炉、同一基板測定箇所温度プロファイルを予測可能である。

シミュレータ2では、より精密に温度を算出するため、リフロー炉内での位置によって熱伝達率 h が異なる値をと

るものと考え、 a をリフロー炉中での位置ごとに細かく定め、リフロー炉内での風速の変化などの影響を加味した予測を可能にした。このシミュレータ2では、シミュレータ1と同様に、実測温度プロファイルから式(8)を基に a を隣り合う測定点ごとに逐次算出し、それを利用して温度を予測する。このシミュレータ2はシミュレータ1と同様、同一リフロー炉、同一基板測定箇所温度プロファイルを予測可能である。

シミュレータ1, 2では、予測を所望する部品の実測温度プロファイルからシミュレータを構築し、温度予測を行った。シミュレータ3は、リフロー炉依存の熱伝達率 h を当社が開発した専用の温度センサ⁽³⁾を利用して実測し、温度測定部の部品やプリント基板に依存したリフロー熱定数 β を部品の物性値である密度 ρ 、体積 V 、表面積 A 、比熱 C から計算し、それらの値を乗算して a を算出し、その a を利用して温度シミュレーションを行う手法である。

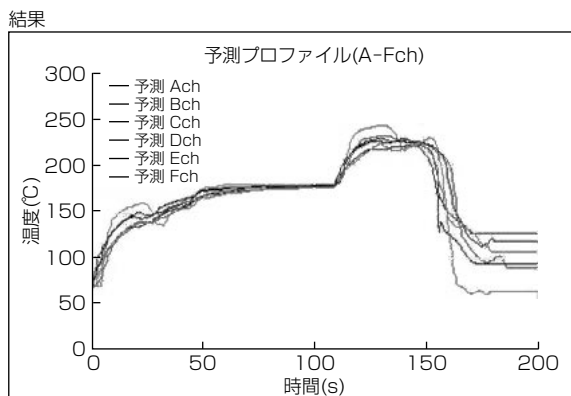
シミュレータ4は、シミュレータ2とシミュレータ3を組み合わせた手法である。シミュレータ3ではリフロー熱定数 β を電子部品の物性値から算出したが、シミュレータ4ではリフロー熱定数 β を、実測値を利用して算出し、温度予測を行う。そのリフロー熱定数 β は、シミュレータ2の方法で算出した a と先に述べた専用温度センサから算出した熱伝達率 h で求める。

シミュレータ3, 4は、シミュレータ1, 2とは異なり、 a を熱伝達率 h とリフロー熱定数 β に分離する。そのため対象プリント基板のリフロー熱定数 β を事前に算出しておくことで、加熱能力を測定済みのリフロー炉に対して、温度プロファイル予測が可能である。

例えば、台数 N のリフロー炉に対して品種数 m のプリント基板のリフロー条件を決定する時、シミュレータ1やシミュレータ2では最低1回は対象のリフロー炉とプリント基板を組み合わせた条件で測定しなければならない。そのため $N \times m$ 回の測定が必要であるのに対し、シミュレータ3, 4では、リフロー炉の能力とリフロー熱定数を別々に取り扱うので、 $N + m$ 回測定すれば、温度プロファイルの予測が可能になる。したがってリフロー温度条件出しの作業時間を大幅に削減可能である。

3. シミュレータの精度検証

2章で述べたシミュレータ4種全てを実際に使用し、その精度を評価した結果に関して述べる。この検証ではプリント基板はCEM3(Composite Epoxy Material-3)を、電子部品は部品a(Quad Flat Package : 14×14×1.6(mm))、部品b(セラミックコンデンサ : 1.0×0.5×0.5(mm))、部品c(電解コンデンサ : ϕ : 6, h : 8 mm)を、リフロー炉はリフロー炉A(仕様 : 表1)を使用した。シミュレータ3、及びシミュレータ4では各電子部品のリフロー熱定数 β を



A-F	予熱前昇温	予熱	本加熱前昇温	本加熱	冷却
判定合格数	3	6	2	4	0

A	予熱前昇温	予熱	本加熱前昇温	本加熱	冷却
開始一終了時間 s		96.4		38.6	
傾き C/s	7.8		6.3		-14.7
最高温度 C				244.4	
判定	x	o	x	x	x

B	予熱前昇温	予熱	本加熱前昇温	本加熱	冷却
開始一終了時間 s		77.3		34.1	
傾き C/s	2.3		4.6		-4.4
最高温度 C				233.2	
判定	o	o	x	o	x

C	予熱前昇温	予熱	本加熱前昇温	本加熱	冷却
開始一終了時間 s		78.2		26.8	
傾き C/s	2.1		3.8		-5.5
最高温度 C				227.7	
判定	o	o	o	o	x

D	予熱前昇温	予熱	本加熱前昇温	本加熱	冷却
開始一終了時間 s		76.0		15.5	
傾き C/s	1.9		1.6		-6.8
最高温度 C				223.0	
判定	x	o	x	x	x

E	予熱前昇温	予熱	本加熱前昇温	本加熱	冷却
開始一終了時間 s		80.5		35.0	
傾き C/s	2.4		4.4		-6.3
最高温度 C				230.4	
判定	o	o	x	o	x

F	予熱前昇温	予熱	本加熱前昇温	本加熱	冷却
開始一終了時間 s		72.7		23.2	
傾き C/s	1.8		2.4		-6.8
最高温度 C				224.4	
判定	x	o	o	x	x

図1. シミュレーションツールの操作画面例

表 1. リフロー炉Aの仕様

ゾーン	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
長さ(mm)	350	350	350	350	350	250	250	250	350	350
ゾーン間(mm)	50									
搬送速度(m/分)	1.1									

表 2. 熱定数・算出リフロー炉Bの仕様と設定温度条件

ゾーン	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
長さ(mm)	350	350	350	350	350	350	350	370	370	
上部温度(°C)	190	170	170	170	170	275	235	60	40	
下部温度(°C)	190	170	170	170	170	275	235	60	40	
ゾーン間(mm)	50									
搬送速度(m/分)	1.1									

表 3. リフロー炉Aの設定条件

ゾーン	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
条件 1 : 温度(°C)	190	170	170	170	180	260	250	235	60	40
条件 2 : 温度(°C)	190	170	180	190	190	250	245	235	60	40
条件 3 : 温度(°C)	190	170	180	190	190	260	245	235	60	40
搬送速度(m/分)	条件 1 は 1.1, 条件 2 と 条件 3 は 1.0									

表 4. 予測値と実測値との誤差(%)

電子部品 温度条件	部品a			部品b			部品c			平均 誤差
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
シミュレータ 1	17	13	14	20	15	14	17	14	14	15
シミュレータ 2	3.0	1.7	0.0	3.0	1.0	1.0	2.0	1.2	1.4	1.6
シミュレータ 3	8.5	9.0	9.0	9.8	9.0	9.0	5.4	6.0	6.0	8.0
シミュレータ 4	6.2	6.0	7.0	8.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	7.9

求める必要があるため、リフロー炉B(仕様:表 2)を用いてリフロー熱定数 β を求めた。評価は温度条件 4 条件(表 3)でのシミュレータ予測値と実測値の誤差(表 4)を電子部品 3 種に対して比較した(図 2)。評価結果を可視化するため、 $\sqrt{\frac{|\text{予測}-\text{実測}|}{\text{実測}}}$ を誤差として各予測値に対して算出し、それらの比較によって各シミュレータの精度を評価した(表 4)。なお、はんだの融点と電子部品の耐熱温度を考慮すると、リフロー温度のピーク値が 220~235°C で制御されるべきなので、この誤差式から 3% の誤差を目標精度とした。

その結果、シミュレータ 2 が他のシミュレータと比較して 5% 程度予測誤差が小さく、平均誤差も 1.6% と 3.0% の目標精度を満足しており、高精度な温度シミュレーションが可能であることを確認した。また、シミュレータ 3, 4 を比較すると、全平均誤差は同等であるが、誤差分布に関してはシミュレータ 4 の方がシミュレータ 3 よりも小さく、実測値を利用することで、シミュレータの精度向上が可能であることを確認した。

これらのことから、シミュレータ 2 が全シミュレータの中で最も精度良く予測可能である。またシミュレータ 4 は、

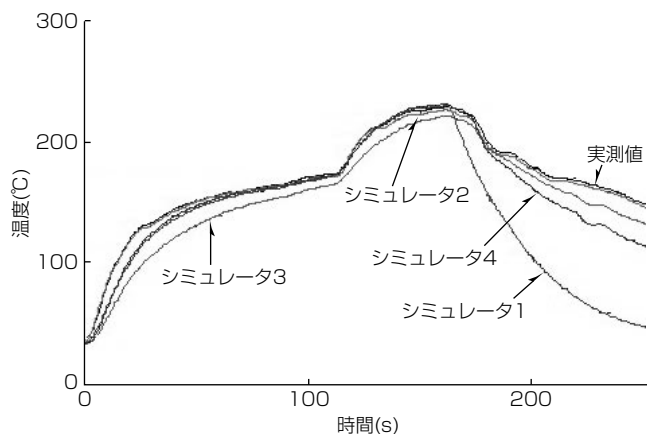


図 2. 温度プロファイルの比較

シミュレータ 2 よりも精度は劣るが、加熱能力を測定済みのリフロー炉で、対象基板の温度プロファイルデータを一度取得すれば、熱伝達率 h が既知の任意のリフロー炉での温度プロファイル予測が可能である。例えば、遠隔地に設置されたリフロー炉の適用可否判断などにも活用できる。シミュレータ 2, 4 両方を状況に応じて使い分けることで、条件出しにかかるコストを削減可能である。

4. む す び

熱伝達の理論に基づいてリフロー実装における温度プロファイルシミュレータを構築し、容易に温度プロファイルシミュレーションを可能にした。計算手法を変化させてシミュレータを 4 種類作成し、それらのシミュレータの精度を比較し、高精度なシミュレート方法を見いだした。

これらのシミュレータは、新規プリント基板の量産適用時のリフロー炉の設定条件出し、量産ラインでのリフロー炉の変更可否判断、複数のプリント基板に対するリフロー炉設定条件の統合化の目的で、実際に量産現場で活用中であり、今後、更に適用拡大を図る予定である。

参 考 文 献

- (1) 喜來省吾, ほか: Sn-Ag-Cu合金の組織形成に及ぼす添加元素と冷却速度の影響, Mate 2010, **16**, 141~146 (2010)
- (2) 渡邊裕彦: 微量元素を添加した産業用鉛フリーはんだ, エレクトロニクス実装学会誌, **8**, No 3, 183~187 (2005)
- (3) 村上政明, ほか: リフローセンサおよびリフローシミュレータの開発, Mate 2003, **9**, 405~408 (2003)
- (4) 小川邦康: 見える伝熱工学, コロナ社, 18~26, 64~68 (2011)