

工業系高校専門教科におけるハンダ付けの現状と今後について

千葉県立〇〇〇〇高等学校 〇〇 〇〇(電気科)

1 はじめに

工業系高等学校におけるハンダ付けは、アーク・ガス溶接と同様に基礎的な製造技術の一つではあるものの、必ずしもハンダ付けの技術自体を習得させることを目標とした指導が行われているわけではなく、実際にはものづくり実習の回路製作の一環として実施していることが多い。また工業技術基礎の教科書にあるハンダ付けの項目だけでは説明が不足しがちで、電気・電子・情報系学科の実技科目であっても、技術としての正しいハンダ付けの方法を指導して確実に生徒に定着させることが達成できている学校は少ないのではないかとと思われる。このことから数年前よりハンダ付けの指導法について注目し、まずは一般的なハンダ付けの指導時に配布して使える補助教材や指導法を検討し実施するなどの改善に取り組んできた。

現在のものづくり教育はハンダ付けに限らず、基本的には一点ものを製作することを前提とした各種加工の指導にとどまっている。産業教育として考えた場合、電子回路設計・製作の分野においては部品調達の面からも、民生品同様に表面実装部品を採用した基板製作及びリフローによる量産を意識したハンダ付けについて、いつかは工業系高等学校でも取り組まざるをえない時代がやって来るものと思われる。したがって電気・電子・情報系学科において、このことを体験させることが可能であるのかを探り、教育現場でも導入可能な予算・規模に抑えた関連技術に関する先行開発と、生徒への指導を試行してみることを今回の最終的な目標として研究を開始し、その過程を報告することにした。

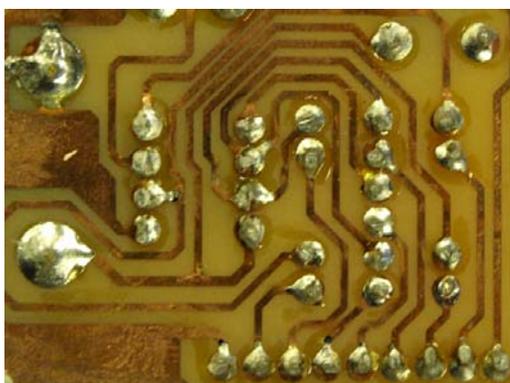


写真1 指導前の生徒ハンダ付け

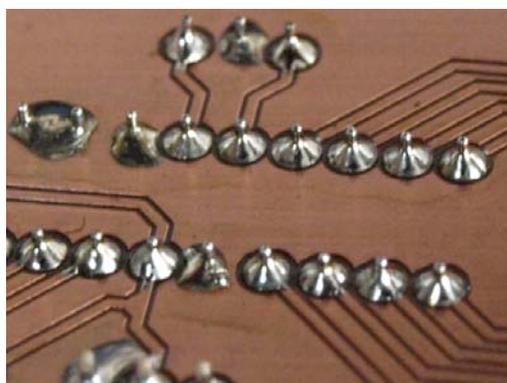


写真2 指導後の生徒ハンダ付け

2 補足資料を使用したハンダ付けの指導

資料1は平成14年度から使用しているハンダ付け指導時に配布している補足資料である。また、写真1はハンダ付け指導前の3年生のハンダ付け、写真2は資料1を使用した指導後の同じ生徒のハンダ付けの状態である。

指導前の生徒のハンダ付けは、初期加熱後にハンダを差し込み溶かす場所が適切でなく、ハンダの量も多すぎるためにイモハンダになっている部分が多い。またハンダを溶かした後すぐにハンダごてによる加熱をやめてしまうことから、ハンダが全体に馴染むに至らないケースがみられた。資料を見ながら説明と練習を行うことにより、多くの生徒で改善が見られるようになった。

ハンダ付け

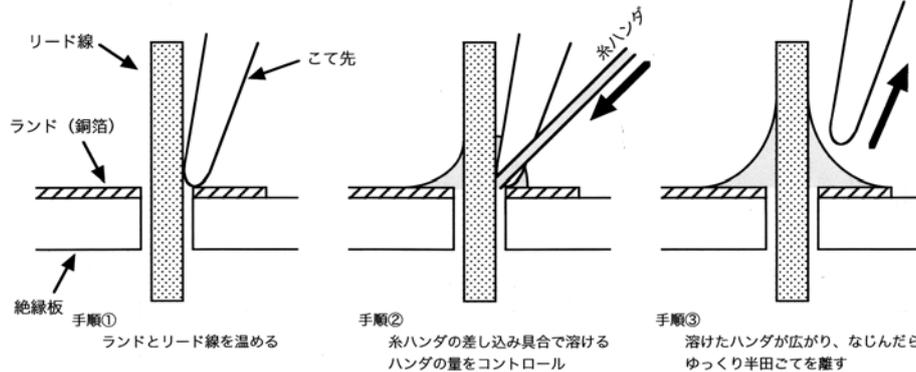
糸ハンダはスズ (Sn) を主成分とした合金の金属線で、およそ 200°C で溶けます。ハンダの金属線はストロー状をしていて、中にはフラックス (表面洗浄・酸化防止) が入っています。

ハンダの金属が溶ける前の約 90°C でまずフラックスが溶け出し、ハンダ付けをする部品表面やハンダごて先端を洗浄します。その後温度差によって後から溶けたハンダの金属がランド (銅箔) とリード線を包み、冷却することで接合 (固着) します。溶けたハンダ表面はごく短い間ですが、フラックスによって守られ酸化を防ぎます。

ハンダ付けの手順

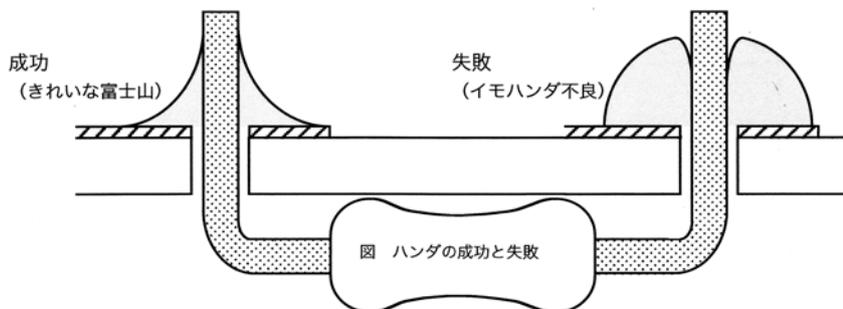
- ① ハンダごてで、ランドとリード線をしっかり温める。
- ② 温めたランドとリード線とハンダごての間に糸ハンダを差し込み自然に溶かす。
糸ハンダの差し込み具合で溶けるハンダの量をコントロールする。
- ③ ハンダが適度に周囲に広がりなじむまですこし待ってからゆっくりハンダごてを離す。
離れた後、ハンダが固まるまで部品を動かさないようにする。

注 ①から③を数秒以内に完了させること。(温めすぎると壊れる部品もあります)



最初にハンダごての先端にハンダを盛ってから、ランドとリード線にハンダをこすりつけて接合しようとする初心者を見かけますが、これは絶対にしてはならないことです。フラックスは溶け出すとすぐに蒸発をはじめ、フラックスとしての効果は1~2秒しかありません。こて先につけたハンダはすぐに酸化してベタベタになり、ランドとリード線の間うまく流れず接合不良を起こしてしまいます。

ハンダの使用量は少ないほど良く、ていねいなハンダ付けに成功すると、きれいな富士山の形になります。また逆にハンダの量が多すぎるとイモハンダ不良となり、見苦しいだけでなく、接合不良を起こしていることもあります。



資料1 ハンダ付けの補足資料

3 表面実装部品のハンダ付け方法の開発

(1) 研究の経緯

現在の中・高等学校で指導しているハンダ付けは、産業界で1970年代後半のLSIの時代に主流であったDip (Dual Inline Package) に代表される端子挿入実装技術で止まっている。現代の電子製品は製造における自動化・小型軽量化の要求が増したことから表面実装が主流で、表面実装部品 (Surface Mount Device) をハンダ付けするには「リフロー」と呼ばれる方法が一般的に用いられる。この方法は基板の電気信号が通るパターンがある面の上に「メタルマスク」と呼ばれるマスクを密着させ、その上からクリーム状のハンダ (ソルダペースト) を印刷後、部品をマウントして加熱することによりハンダ付けを行うものである。しかしながら、高等学校においてはこの方法による回路製作の (指導) 方法は確立されておらず、わずかに表面実装部品を旧来の方

法（前記 資料1の方法）によってひとつずつ手でハンダ付けをしている事例があるにすぎないのが現状である。

電子回路の工作を指導している電気・電子・情報系の教員が近い将来に向けて危惧しているのは、すべての電子部品がより小型化することにより旧来の方法では高等学校で製作を指導することができなくなることである。このことから、学校でも表面実装部品をハンダ付けするための各種方法を開発するために平成24年10月から基礎研究を始めた。

(2) メタルマスクの材料選定

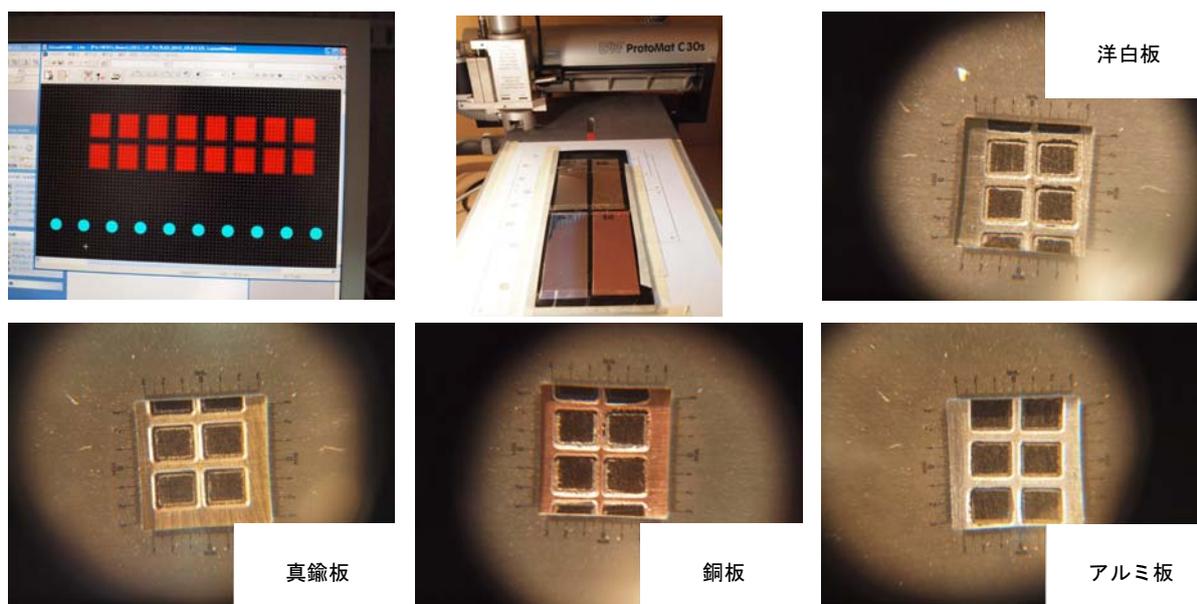


写真3 メタルマスクの材料の選定

現在、千葉県の電気・電子・情報系の学科がある工業系の高等学校には、少なくとも1台は基板加工機が導入されている。普段から回路設計は基板加工機用のソフトウェアを使用していることからデータをそのまま使用し、今回はメタルマスクをこの基板加工機にて試作することにした。

材料として0.1mm厚の洋白・真鍮・銅・アルミの4種を購入し、基板加工機にユニバーサルカッター（V溝エンドミル）を使用して、それぞれ同じ加工を行い試した。写真3にあるように真鍮が一番きれいに仕上がっているが、材料が硬くモータに負担がかかっているような印象を受けたので今後の使用はやめることにした。アルミは真鍮に比べると若干むしり取られたような部分が見られるが、満足のいく仕上がりになった。0.1mmのアルミは薄すぎて、少し爪でこすっても板に跡が付いてしまうので注意が必要であるが、基板加工機でも正式にサポートしている材料なので、これを使うのが良いと思われる。また銅と洋白はむしり取られたような跡が目立つ。この経験から以後は、ホームセンター等でも入手が容易な0.1mmのアルミ板を使用することにした。

ユニバーサルカッターを使うと板の裏と表では開口部の広さが変わってしまうので、実際にソルダペーストを塗布してどちらの面が適しているのか調べたところ、上面が広く基板に密着している面が狭い通常の削り方で問題ないことが判った。

エンドミルを使用したメタルマスクの製作というのは一般的ではなく、レーザ加工機が使用されている。近年、工業系高等学校にも機械系学科にレーザ加工機が導入されはじめているので、将来的にはより精度の良い製作が可能になるものと思われる。

(3) ソルダペーストの塗布とヒータによるリフロー試作

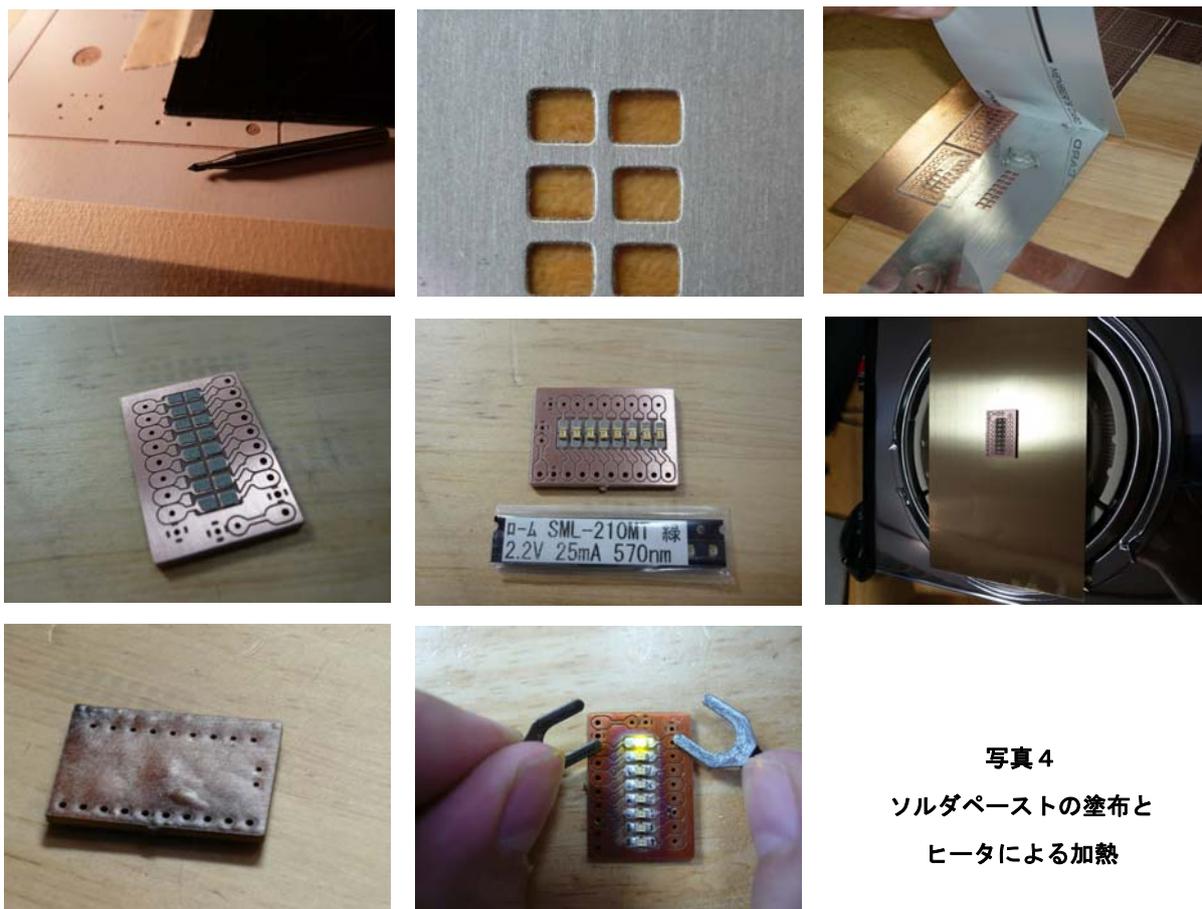


写真4
ソルダペーストの塗布と
ヒータによる加熱

90度のユニバーサルカッターで削ったアルミのメタルマスクを使ってソルダペーストを塗布したところ、かなり多くはみ出してしまったので加工データを変えて幾分小さな穴を開けるように変更した。また60度のユニバーサルカッターを使用したところ、裏表の開口部の広さもそれほど違わなく、ランドの上だけにきれいに塗布することができたことから、メタルマスクの製作はうまくいったものと判断できる。チップLEDを乗せ、0.1mm真鍮板を台にしてヒータでしばらく加熱したところ、ハンダが溶け始めた頃に煙が出始めた。裏が焦げ、基板がところどころ膨れてしまったことから、下からヒータを直接加熱した場合、少なくとも紙フェノール基板のリフローは厳しいと判断できる。電源を接続してみると8個ともLEDは点灯したので、メタルマスクによるソルダペースト塗布とリフローによるハンダ付け自体は成功した。(写真4)

パターン部分の導通には問題ないものの、加熱したことにより銅箔表面に赤茶色の酸化物が発生したため、工業用研磨パッドを用いて研磨を行いこれを除去した。

(4) ホットガンによるリフロー（ガラスエポキシ基板と紙フェノール基板）

ヒータによる下部からの直接加熱によるリフローは温度上昇が急で難しいことが判り、今度はホットガンによる加熱を試みた。産業用のリフロー炉はホットガンを複数並べ、ベルトコンベアにより移動させることによって時間による温度変化を実現している。

ホットガンは5千円程度のものを購入し使用した。風量の大きな数万円する業務用を購入することも考えたが、安価でかつこれでも350℃まで上げられることから、リフローをするには十分であると考えた。また、温度計付きテスター（Kタイプの熱電対）も同時に購入した。

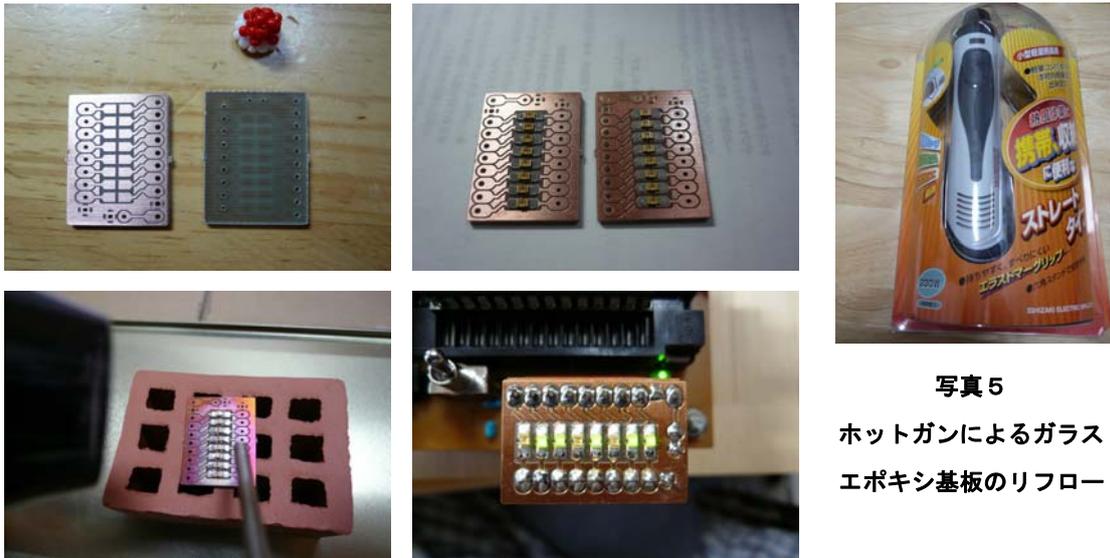


写真5
ホットガンによるガラスエポキシ基板のリフロー

ある solder paste のメーカーのホームページによると、リフローの温度はおよそ 160℃ で 120 秒、その後一気に 250℃ 程度まで上げてハンダを溶かすことになっており、この時間に対する温度の変化はグラフとして提供されていて、これは温度プロファイルと呼ばれている。

片手にホットガン、もう片手に温度計（テスター）を持ち、温度コントロールは熱電対を基板に接触させ（と同時に風で基板が動かないように押えることもできる）、ホットガンと基板の距離を変えることで行った。また溶けた後はホットガンを素早く送風にして空冷した。基板表面にフラックスを塗るべきかどうかを確認したところ、塗らない方は表面に焼き色がついたが、塗った方はきれいなまま保てたので、後々の作業を考えるとリフロー前に全面にフラックスを塗った方が良いことが判明し、これで一応のリフローの方法を獲得することができた。

ガラスエポキシ基板（写真5）と紙フェノール基板（写真6）の両方で確認したところ、共に良好な結果を得ることができた。

問題として判明したことは、今回のように LED を隣同士に配置をする場合には部品が小さいこともあって、なかなかきれいに solder paste の上にマウントすることができないことと、ホットガンで加熱すると LED の両側で溶けるタイミングが違うために部品が若干ながら動いてしまうことである。

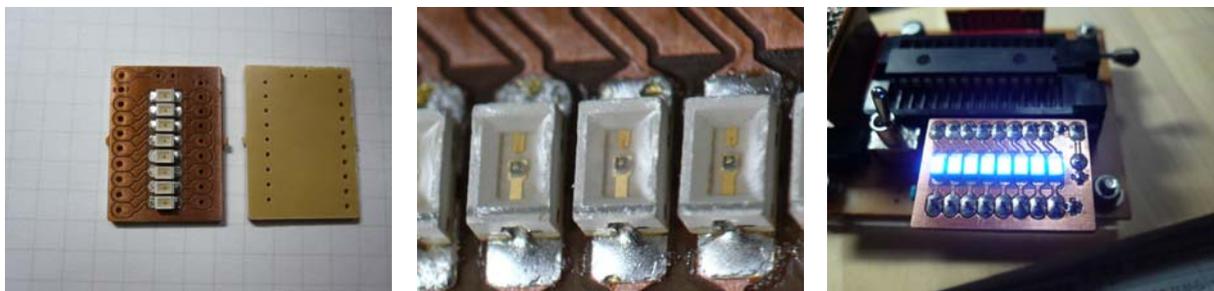


写真6 ホットガンによる紙フェノール基板のリフロー

(5) ホットガンによる各種フラットパッケージのリフロー

FP-64A パッケージのメタルマスクを作って、チップ LED をリフローしたのと同じ方法で試した。マイコンのサイズは LQFP (14×14mm, 0.8mm ピッチ)。足の先にいくらかハンダが出て、業務用リフローに近い雰囲気になった。(写真7)

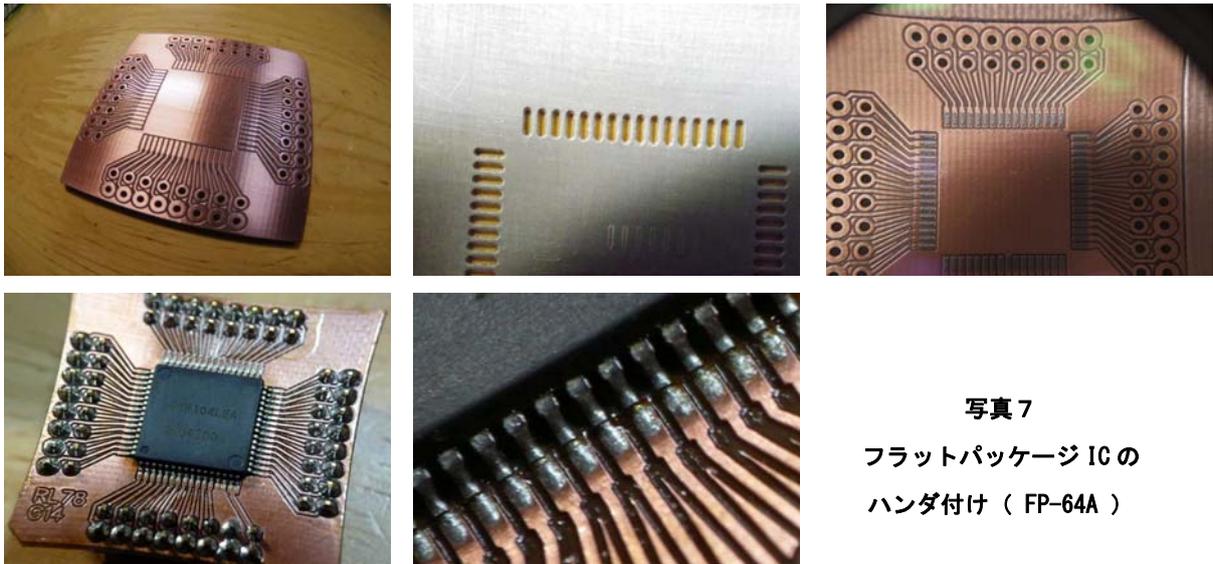


写真7
フラットパッケージ IC の
ハンダ付け（FP-64A）

ユニバーサルカッターは最小 0.2mm の太さで削ることしかできないことから、どうしてもマスクの端は丸くなってしまふ。何度か調整し、マスクの幅を 0.4mm となるようにしてみたところ、FP-64A パッケージもきれいにリフローすることができた。

写真 8 は 0.5mm ピッチ DQFN パッケージで、基板加工機でメタルマスクのデータを作る際に工夫し、切削時に少しずつ何度も行うことによって実用上問題がない程度までマスクの工作精度を上げることができるようになった。

基板にフラックスを塗らない状態でソルダペーストを載せてリフローすると、鉛フリーハンダが溶けるまでにより長い時間がかかってしまふ。さらにハンダの濡れ性も悪いことが判明した。

ホットガンを使ったリフローもコツを掴んで来て、ほぼ失敗することはなくなった。リフローを行うための初期投資が低く抑えられることから、課題研究等で一点ものを製作させる方法としては有望であり、この方法を使えば生徒に対してチップ部品のハンダ付けをなんとか体験させることはできると思われるが、ひとつのハンダ付けを行うために時間がかかりすぎてしまふとことが大きな問題である。また、長時間 200℃ を超える加熱を行う必要があることから、生徒に体験させるための安全性を確保するのは難しいと判断し、今回はこの方法を生徒に試させてデータをとることは断念した。

産業用としてのハンダ付けを体験させるためには、もっと容易で安定した何らかのリフロー用自動加熱装置を作る必要があると考え、オーブントースターを利用したリフロー炉の開発を決断した。

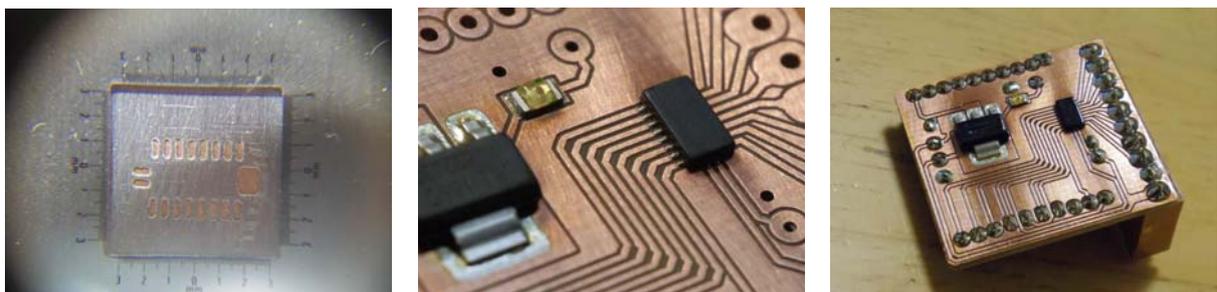


写真8 フラットパッケージ IC のハンダ付け（DQFN-20）

(6) リフロー炉コントローラの開発

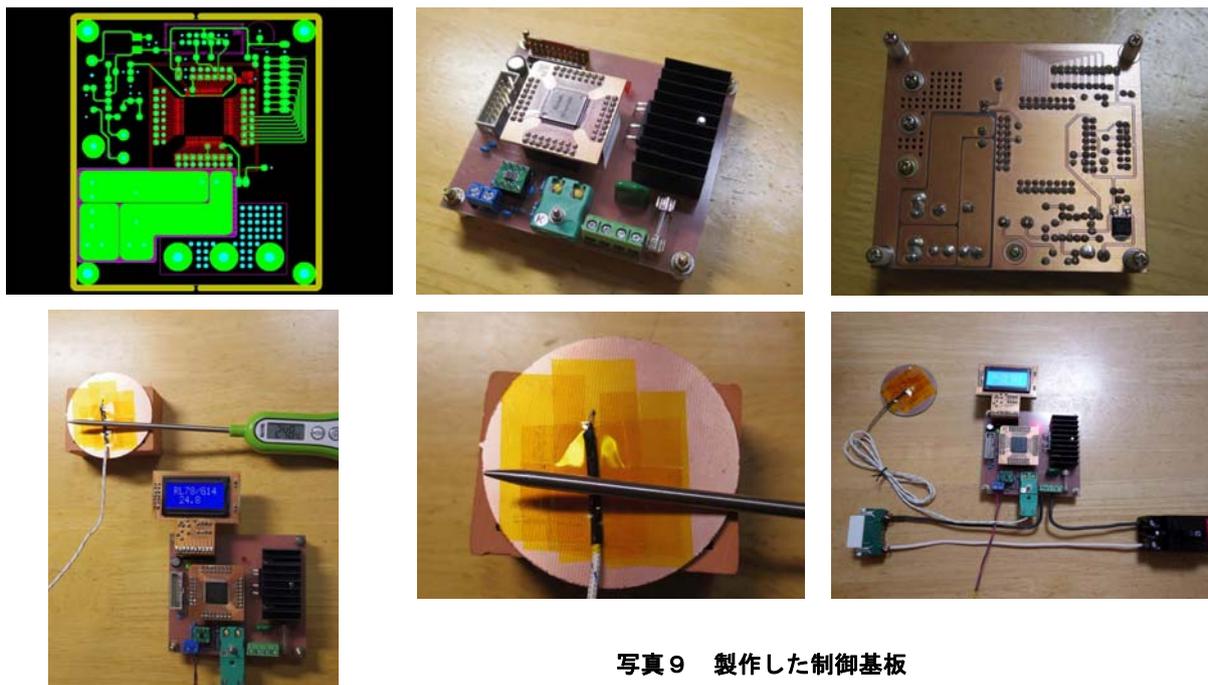


写真9 製作した制御基板

オーブントースターを使ったリフロー炉の設計を始めるのに際し、将来的に各高等学校で製作が可能である方法を考慮し、オーブントースター内部を改造して制御回路を組み込むのではなく、制御回路ユニットを外付けしてオーブントースターは購入したままにしておくことにした。またマイコンはホットガンでリフローした RL78 モジュールを使い、K型熱電対と温度保証アンプ・SSR・キャラクタ液晶を付けるように制御基板を設計・製作した。

制御基板で使っている SSR は内部でゼロクロス制御されており、半周期ごとでしか ON-OFF できないのでモータのスピード制御のようなものには向かないが、今回は応答が遅いヒータの制御なので問題はない。RL78 マイコンからは1秒の周期で PWM 制御を行い（東日本の場合）交流の50周期を10分割することにより出力のエネルギーを制御している。（50パーセントの時には1秒間の最初の25波を出力し、後半の25波は出力しないということをしている。）

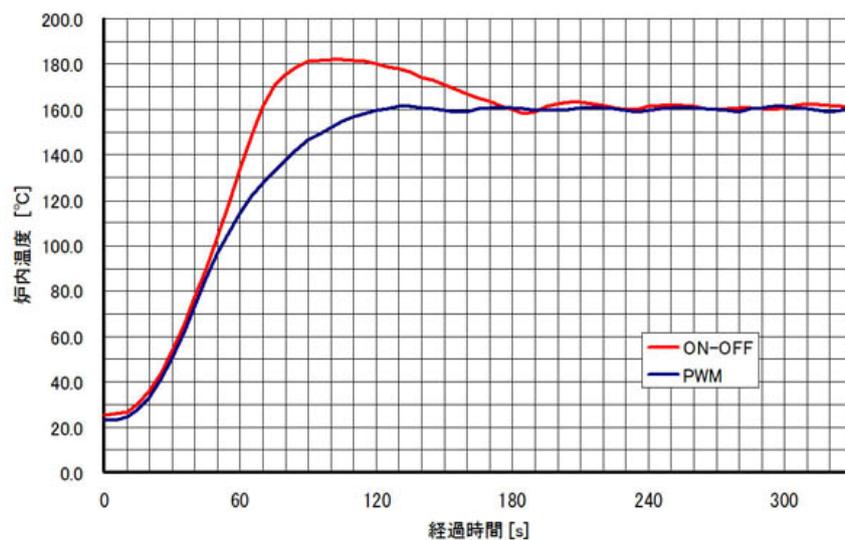
温度入力の最大値は 1.45V とし、RL78 の AD コンバータは 10bit (= 1024) の分解能、K型熱電対の温度変化が 1℃あたり 5mV であることから、マイコン内蔵 AD コンバータの最小読み取り温度は $(1.45/1024/0.005 =) 0.283203125^{\circ}\text{C}$ 、計測可能な最大温度は $(0.283203125^{\circ}\text{C} \times 1024 =) 290^{\circ}\text{C}$ となる。

リフローの工程はまず 150 ~ 180℃ まで加熱（第一昇温）後、数十秒間一定の温度で保ち（余熱部）、その後 220 ~ 260℃ までいっきに上昇（第二昇温）させてハンダ付けを行う必要がある。これは熱容量やサイズの違う部品はそれぞれ温度の上昇率が違うために、ただ温度を上げただけでは部品ごとに温度のピークが違うことになり、ハンダの品質が悪化する原因となるからである。途中でしばらく一定温度に保った後、再び上昇させることでピーク時の温度差を減らし、均一なハンダ品質を確保することができる。このことを時間に対する温度上昇を示した温度プロファイルで表すとグラフ2のようになる。また第一昇温部と余熱部は内部の溶剤を揮発させ、ソルダペースト中のペースト成分が柔らかくなることにより、中の小さなハンダの粒と基板表面および部品の酸化膜を取り去ると共に再酸化を防ぐ役割も担っている。これは産業用のベルトコ

ンベアによる温風型リフロー炉でも行われている手法である。

プログラムはまず 160℃ で ON-OFF, ON は 100%, OFF は 0% の出力で試してみた。結果はグラフ 1 の赤線となり, 一般的なフィードバック制御の波形となった。

最終的には 2℃ 程度の範囲で収束するので, ON-OFF 制御でも問題はないのかとも思われるが, オーバーシュートが大きいことが判る。そこで出力を PWM とし, 設定温度に近づくにつれて出力を絞るようにしたところ青色のグラフとなって, 良い結果が得られるようになった。また測定に使用したオーブントースターは, 最大で 2.96℃/秒 の温度上昇, 0.45℃/秒 程度の自然放熱をさせる能力があることが判明した。



グラフ 1 第一昇温部



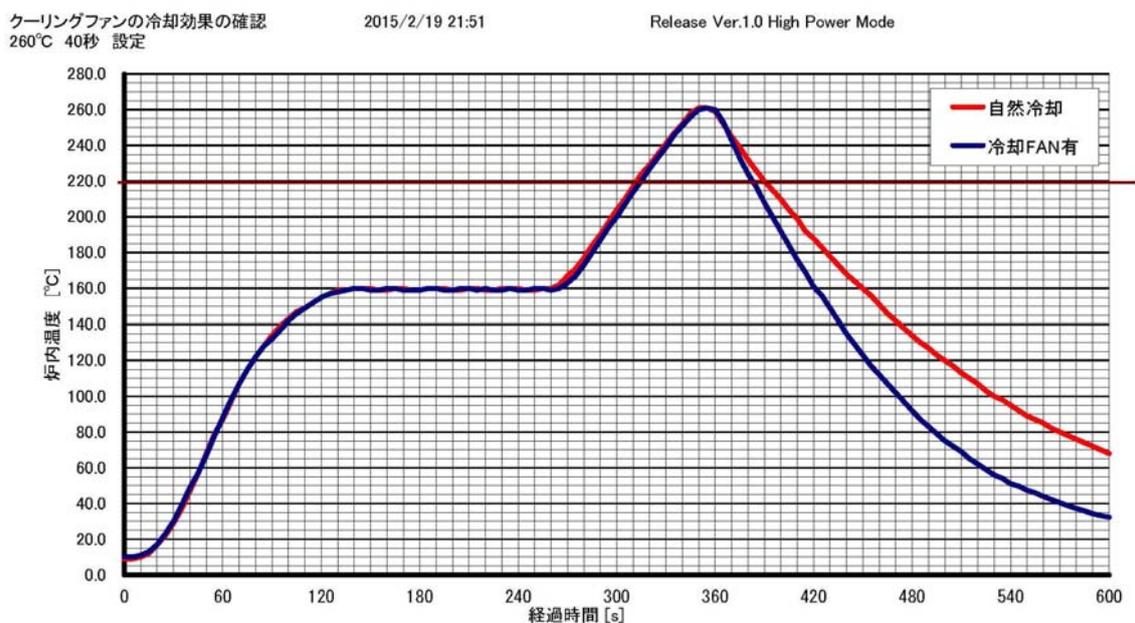
写真 10 製作したリフローコントローラと可倒式冷却装置

平成 26 年 9 月に 1 号機が完成し, 夏から冬にかけて各種動作確認を行った。当初は設定スイッチは設けずとも全自動で様々な状況に柔軟に対応できるのではないかと考えたが, 室温が温度上昇に与える影響は大きく, 1 号機でいろいろとプログラムを改変しながら実験を進めていくうちに, 「リフローの最高到達温度」と「最高温度の保持時間」を容易に設定変更できるようにす

ると、格段に使い勝手が良くなるのではないかとの結論に達したことから、平成27年1月にこの部分を改良した2号機の製作に着手した。1号機ではパラメータ設定のたびにコンピュータを接続する必要があったが、2号機は本体のスイッチによりスタンドアロンでパラメータが変更でき、電源を切ってもRL78のフラッシュROMエリアに設定を保持できるようになっている。

今回製作したコントローラ（1，2号機共に）は最高温度に達して、ある程度の時間が経過した後、冷却のためにオープンの前面の蓋を開ける必要があるので、220℃を超えてから蓋を開けるまでの時間をカウントダウン（コントロール）するようにしてある。また冷却時間を短縮するために、オープン上部に磁石で貼り付けて使用する可倒式冷却装置（写真10）を新たに製作し取り付けた。

実験したところ、グラフ2のとおり最高温度 260℃・設定時間（220℃から設定温度に向けて温度を上昇させ、ヒータを切って蓋を開けるように指示を出すまでの時間）を40秒とした場合、220℃に下がるまでにかかった時間は冷却ファンがあることによって15秒程度の短縮効果を得られるようになった。



グラフ2 製作したリフローコントローラの温度プロファイル設定例

(7) ソルダペーストについて

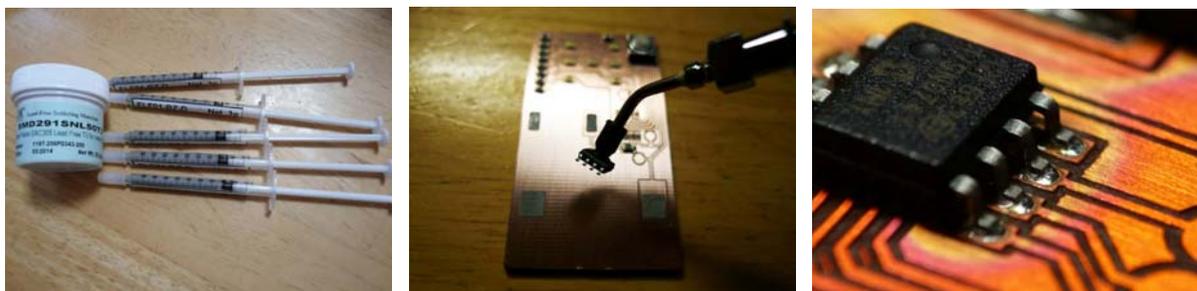


写真11 ソルダペースト

リフロー炉で使っている鉛フリーのソルダペーストは秋葉原で購入した外国製のものであり、約1年半で使い切った。いつもはビニル袋に入れて冷蔵庫に保管していて使用する前に外に出し

ていたが、開封から1年を超えるとチクソ剤（煉ると液体化，しばらくすると再び硬くなる性質）が劣化し，硬くなってうまくメタルマスクから基板にハンダが載らなくなってきたことから，国産の鉛フリーソルダペーストを購入して違いを確かめた。シリンジ（注射器）に入っているのが国産のもので3 g入り，外国製にくらべて国産は15倍ほど高価であったが計5本購入して使用した。冷蔵庫から出してすぐ使うと固めのまま使えるが，常温では柔らかすぎる感じがする。

いずれの場合にも，メタルマスクを使つてのハンダ印刷工程とリフローは問題なく行うことができた。外国製と国産のものでは特に使用感に違いは感じられなく，外国製の方がコストが安い分得であると考えられるが，気化した成分についてのデータがはっきりとはわからないことから，生徒に使用させるときには国産を使用した方がより安心なのではないかと思われる。

4 生徒のリフロー体験

(1) 事例1 複数生徒で1つの基板を製作体験

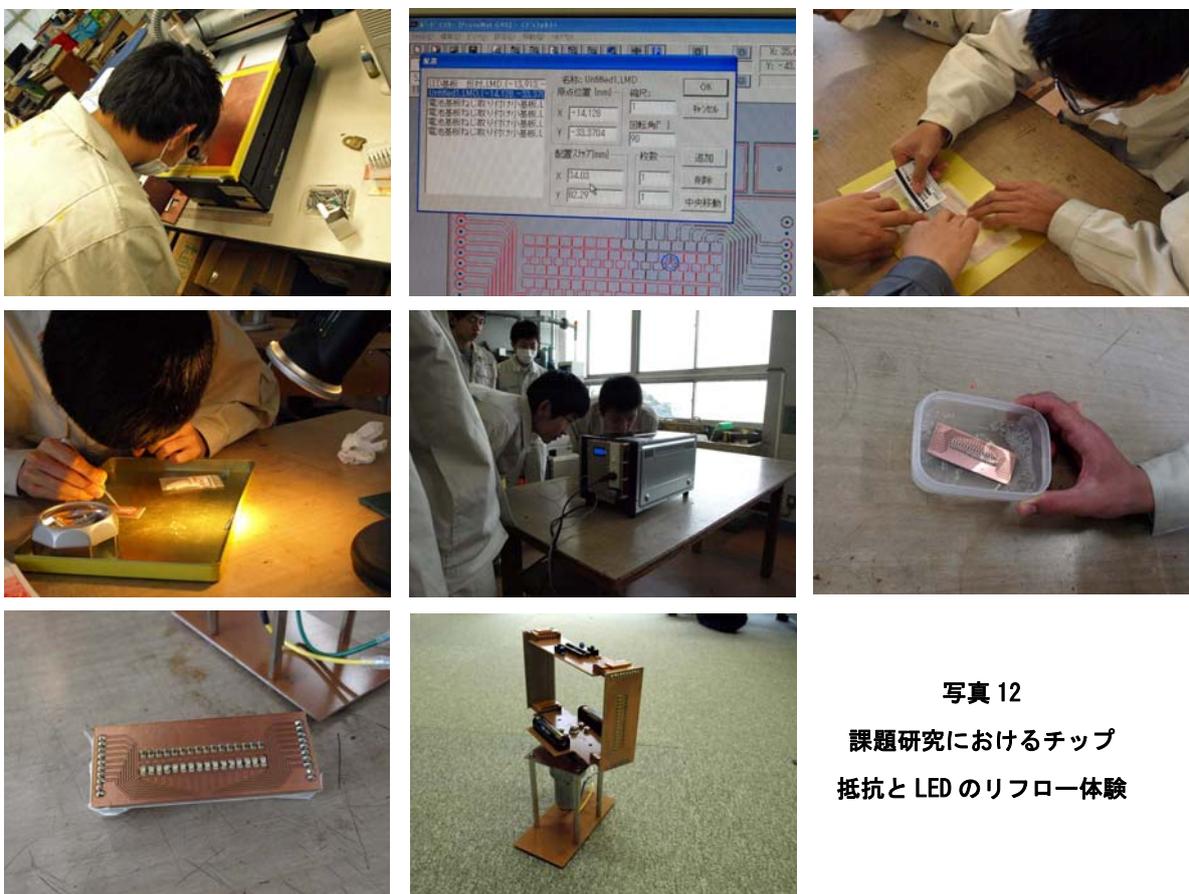


写真12
課題研究におけるチップ
抵抗とLEDのリフロー体験

平成26年度の課題研究において基板加工機を使用した基板製作・ハンダごて及びリフローによる部品実装を行い，回転型電光表示器の製作を実施し完成させた。

ハンダごてを使用したハンダ付け指導についての効果は前記した「2 補足資料を使用したハンダ付けの指導」のとおりである。またリフローについては工程ごとに生徒が順番に体験することとした。10分程度のリフローに関する説明を行った後，メタルマスクの位置合わせ・ペーストハンダ塗布・チップ抵抗及びチップLED（計32個）のマウント・リフロー炉でのハンダ付け・基板表面の酸化除去処理を体験，実際の作業時間は1時間程度であった。

リフロー後の基板表面に発生する赤茶色の酸化したものは基板表面の色合いを悪くするだけで

なく、その後のハンダごてを使用したハンダ付けを行うにあたり、ハンダの濡れ性を悪化させる原因となるので除去を行う必要がある。これまでは工業用研磨パッドを使用していたが、作業時間の短縮と安全性を考慮し、今回新たに中性のハヤブライト EX を使用して除去した。

リフローによるハンダ付けは生徒にとって初めての体験となったが、作業工程を理解し手際よく取り組んでいた。また生徒からは今回の体験に対して新鮮でとても良い経験ができたとの評価を得た。今回の経験から、リフローによるハンダ付け体験を授業で取り入れることについては、十分に実現可能であるということを確認することができた。

(2) 事例 2 将来の実習を想定した製作体験



写真 13 表面実装部品のみを使用した基板の製作模擬実習

従前のハンダ付けを一通りマスターした生徒に対するキャリア教育の一環として、平成 27 年度の課題研究において表面実装部品だけを使用したキッチンタイマーの製作模擬実習を 6 名の生徒に対して実施した。量産を意識した正確で均一なものづくりを体験させるにあたり、実習で複数生徒に同時指導することが可能なかを試すと共に、生徒の反応を確認することにした。

リフローに関する説明と注意・メタルマスクによるソルダペーストの塗布・ピンセットによる部品のマウント・リフロー炉によるハンダ付け・マイコンプログラムの転送を体験させ、3 時間の実習時間で無事に全員が完成した。チップ部品の大きさは表面実装部品としては大きめのものを選定したが、それでも最小の部品は $2\text{mm} \times 1.2\text{mm}$ であるので生徒は部品をつまんで基板上にマウントするのに初めは戸惑っていたものの、すぐに慣れてうまく取り付けができるようになった。その後リフローでハンダが溶けて色が変わる様子を観察し、全員が同じように完成した基板を見て驚いていた。

生徒からは、今までの基板のハンダ付けとは違う方法で製作したことに対して興味を持ち、その完成度にとっても満足している。今後の課題研究において表面実装部品を使用した回路を、自らの設計で試してみたい等の肯定的な感想を得ることができた。このことからリフローによるハンダ付けを体験させることは、技術の習得ができること以外にも回路設計・製作を行なう上で選択

肢が増えたことに生徒が気づくことにつながるという、副次的な効果も期待できることが判った。

リフローによるハンダ付けは個人の技量の差というものが出にくい技術なのだということを、全員の完成品を並べて実体顕微鏡を使って確認させることにより、量産というものを意識づけることはできたものの、工作の醍醐味である自分で作ったという満足感は得られにくい様子であった。一方、今後は使用する機会が緩やかに減っていくと予想されるとはいえ、従来の端子挿入実装部品のハンダ付け技術を習得させることも、これまで同様に重要であり続けることに変わりはなく、今後もしっかりとした指導を行う必要がある。これらのことから、端子挿入実装部品と表面実装部品の両方の要素をひとつの基板に組み入れることにより、産業としての均一性と製作による満足感を共に得られるような教材（製作テーマ）となるように改善し、今後再び生徒に対して効果を確認していきたい。

5 おわりに

ろう接の歴史は紀元前に遡り、それ以来人々の生活にはなくてはならない基礎的な工作技術となっている。量産分野における最先端のハンダ付け技術はマイクロソルダリング技術として他に代替がきかない分野となっていて、半導体パッケージの開発と一体となって工程・材料・機器が格段に発展し、今日においても重要な技術として日々進化している。

電気・電子系の産業は日本の高度成長に重要な貢献をし、かつては中学校の授業でも多くの生徒が一度はハンダ付けを体験していたため、高等学校において初めてハンダ付けを行う生徒というのは少数であったと聞いている。しかし現在では、ハンダごてを使用した昔ながらのハンダ付けやトーチを用いたろう付けの産業規模はどんどん縮小してきており、それに伴って学校での学習の機会が減ったり、電子工作を趣味とする人口が減少したりするのも致し方ないことなのかもしれない。

今回ハンダ付けに関する研究を行い調査する中で、電気・電子・情報系学科であってもハンダ付け技術に関しては「溶かして固める」程度の指導しかできておらず、「ろう付けとハンダ付けの違い」すら理解させられていないという現実を知った。これまで生徒に対して、本当にしっかりと指導して定着させることができていたのかということについて改めて振り返ってみると、私自身も大いに反省する点が多かった。したがって、今後も引き続き工業系高等学校が日本の基幹製造業を支えるためにも、この分野に関する教育界全体の意識改革の必要性を強く感じ発信していく良い機会となった。

最近ハンダ付けに関する世間の関心が高まる兆候が少しずつではあるが見えてきており、ハンダ付けの方法に関する専門書籍が発刊されたり、ハンダ付け検定が始まったりしてきていることから、工業系高等学校においても外部機関の協力を得て、キャリア教育としてのしっかりとしたハンダ付け指導と客観的な効果測定を導入していくチャンスが訪れたのではないと思われる。

今回開発したリフローによる表面実装部品のハンダ付けの一連の方法は、産業用の数千万円かかるリフロー装置とは違い、1～2万円と高等学校でも十分に導入可能なものである。今後教員へのリフロー体験講習会等、さまざまな機会に紹介して普及の促進を図っていくと共に、さらにこの分野の研究を続けていきたいと思っている。

最後に本研究に際して御指導いただきました、千葉県教育庁教育振興部指導課 安田指導主事、県立京葉工業高等学校 村上教諭をはじめ、県立千葉工業高等学校及び旧千工研インターフェース研究会の先生方に心から感謝申し上げます。