多層プリント配線板の全自動生産システムの開発

鈴木 政男*, 藤掛 勝彦**, 井上 道也**, 梶川 雅夫**, 武田 等**

Development of Full Automatic Production System of Multilayer Printed Wiring Board

Masao SUZUKI*, Katsuhiko FUJIKAKE**, Michiya INOUE**, Masao KAJIKAWA** and Hitoshi TAKEDA**

*ファナック株式会社 (〒191 東京都日野市旭が丘3-5-1)

**ファナック株式会社電子回路製造部 (〒191 東京都日野市旭が丘3-5-1)

*Fanuc Ltd. (3-5-1 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo 191)

**Electronic Circuit Manufacturing Department, Fanuc Ltd. (3-5-1 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo 191)

寄稿にあたって

多層プリント配線板の製造プロセスはきわめて複雑で自動化が困難なため、従来世界各国とも程度の差はあれ、労働集約型の生産形態をとっているのが一般的である。もし高度な技術で単純労働を自動化し、クリーンな環境の工場で低コスト生産ができれば、将来の業界に明るい展望が開かれる。ファナックは約4年間にわたりこの困難な課題に挑戦し、最先端のED法・ダイレクトプレーティング法・積層法等の製造技術を確認し、また、高度な自動化技術によって無人機仕様の各種加工装置をシステム化してラインを構築した。そしてホストからの生産指令で、自動搬送車が倉庫から基材を最初の内層回路形成装置に供給すると、後は連続する各工程を停滞なく加工・搬送されて出荷検査まで全自動で完了する。ワークと治工具にはIDコードが付いているので、物と情報の流れが一体化され、自動加工と共に生産管理のペーパーレス化も実現できた。こうして今まで例のない全自動の多層プリント配線板工場が完成し、低コスト・短納期・高歩留りでフル操業を続けている。これらは、プリント板事業の空洞化回避と生き残りに1つのモデルを提供するものであると考え、本誌に寄稿した。困難な環境の中で奮闘中の、関係各位の参考になれば幸いである。

1. まえがき

我が国のプリント配線板産業を回想してみると、高い品質意識を共有する良質な労働力と意欲的な技術者・経営者により、電子産業の発展に呼応して急成長をなし遂げ、1980年代には品質・技術・生産性とも世界のトップレベルに立っていた。しかし、1990年代になると、長い不況と円高により大きな打撃を受け、一転してマイナス成長に陥り、設備投資や開発投資も次第に勢いを失い、産業の衰退が懸念されるようになった。一方、台湾をはじめとする東南アジアの地域では、低コストの労働力・材料・設備・エネルギー等の恵まれた環境を活用して、かつて日本がアメリカに

迫ったような勢いで急速に発展し、年を経るごとに競争力を高め、日本のメーカは品質面はともかく、コストの面では厳しい状況に直面するようになってきた。

ファナックはこのような状況を打破し、自社の商品であるCNCやロボットにとっての重要部品—高信頼性多層板—を安定的に確保するために、クリーンで自動化された近代的工場の建設を計画した。部分的自動化ではなく工場全体の有機的な自動化を目指す。どこにも負けない価格競争力がある自動工場にする。これから建設するからには21世紀にも十分通用するものにする。このような考え方でいろいろな課題に挑戦し、約4年間の長い研究開発により、数々の製造技術を開発し、人の動作をロボットに置き換える自動化技術を駆使して、理想的な全自動生産システムを完成した。工場の操業はすでに3年余におよび、改善に継ぐ改善で品質・納期・コストのいずれの要素においても、所期の目標を達成し、十分な競争力を持ってフル稼働している。

2. 開発の基本方針

これからの産業はコスト競争で後れをとったら、いかなる先端技術を駆使しても生き残ることはできない。それゆえ開発の目標を低コスト自動化の実現に置いた。至難と言われる多層プリント配線板の自動化を実現するために、思い切った発想の転換を行い、方針を決定した。

- a. コストが高く自動化できないプロセスは採用しない。
- b. 最少、最短の工程にし、費用は可能な限り低減させる。
- c. 将来の環境規制に該当する薬品を一切使用しない。

2.1 低コスト対策

コストを構成する、主要な3科目についての徹底削減策。

2.1.1 人件費

1) 1/5以下の労務費のところで戦える企業体質にするために直接人員を1/5以下にする。その手段として単純労働やハンドリング動作を、すべてロボットと自動機に置き換えてしまう。

2) IDコードを工場内で使うすべてのワークと治工具に付与し、物と情報が工程を一体になって進み、治工具の選択交換も加工条件管理も自動化し、生産管理もペーパーレスにし間接人員も省人化する。

2. 1. 2 設備費

1) シンプルで低コストの無人仕様の装置にするため、機能本位の設計に徹する。

2) 工場を流れる基板のサイズを1つに統一し、すべての装置の構造を簡単にする。

3) 工場スペースを必要最小限にし、設備もコンパクトにし、エネルギー費や諸経費を節減する。

4) 工程を可能な限り単純にし短くするため、めっきはパネルプレーティング1工程のみにし、基板の仕上げ仕様はソルダコートに統一する。

2. 1. 3 材料費

1) 完全自動化と低コスト化と高密度に対応するため、感光性ドライフィルムを使用せず、内層はネガタイプ、外層はポジタイプの液体レジストのED法にする。

2) ダイレクトプレーティングを採用し、規制の対象になるホルムアルデヒドを含む無電解銅を使用しない。

3) 洗浄工程にトリクロロエタンを使用しない。

4) 鏡板を使用しない積層法を開発する。これと関連して当板を使用しない穴あけ法を開発する。

5) 電気検査用治具に異方性感圧導電ゴムを採用する。

6) 製造法と品質管理を工夫して抜群の歩留りにする。

7) 無停滞のラインにして工程在庫を最少に抑える。

3. システム開発の経過

3.1 1988年

この基本方針とコスト削減策を実現するため、3月に工場の構想に着手し、内外の技術情報調査から最新技術動向を把握して、具体化の作業に入った。プロセスの選定、小規模な実験から生産規模の実験・評価を繰り返した。

一方で専用の無人機仕様の装置の設計から製作・テストを進め、コンピュータ統合のFMS自動化システムの構築のための膨大なソフト開発に着手した。

3.2 1990年

装置の搬入・設置・試運転でレイアウトをほぼ完成し、プロセスの本格的生産テスト・評価に取り組んだ。実験と生産との間には超えねばならない厳しい壁があり、特に前例のない新技術を導入したプロセスにおいて、難しい問題が発生し、その解決に予想以上の時間を費やし、工場の完成を遅らせることになった。

難航した代表的な問題点を列举すると次の通りである。これらの解決・改善の内容については次章で述べる。

3.2.1 プロセス

1) ED法：液体感光性レジストの電着液から、強くても無欠陥の膜を得ること。液を安定にすること。

2) 銅／銅箔：積層から穴あけ加工中は密着していて、鏡板と当板の役割を果たし、用済み後は自動機で確実にはく離できる接着強度にコントロールすること。

3) ダイレクトプレーティング：スローイングパワーが優れ、ボイドのないめっき層が得られ、内層接続の信頼性の高い、安定したプロセスにすること。

4) レジストスプレー：耐切削油性の優れたソルダレジストで、自動スプレー方式に適合するアルカリ現像タイプのインクを開発すること。

5) ソルダレベラ：QFPを搭載しはんだ付けするパッド上に均一平滑なはんだをコーティングすること。

3.2.2 自動化機器

全工程を連続させて停滞なく流れるラインにするために、独自開発の機器を製作する。

1) 自動基材供給装置：コンピュータからの生産指令により、層数別のコンテナに収容されている基材を、ロボットが加工装置の入口に投入するもの。

2) 先入れ先出しパッファ：大工程ごとに加工終了後のワークを、約1時間分、順序良く格納するもので、次工程にトラブルが起きた時は緊急避難用に、自工程のトラブルのときは次工程への供給用に使用し、トラブルが1時間以内に復帰すれば後工程にラインストップを発生させずに連続生産できるようにするもの。

3) バーコードリーダ：各工程の入口に設置しておき、コンベアでワークが搬送されてくるとワークに付いているバーコードを自動的に読み取って、無人加工させるためのユニット。

4) ホールコードリーダ：化学処理工程などでは薬品にバーコードが侵されてしまっていて使えないので、代わりに使用するホールコード用のリーダ。

5) X線バーコードリーダ：積層によって内層上のバーコードは隠蔽されてしまい、このままでは情報が断絶するので、X線で読み取り、プリンタで外層に転写するもの。

6) ワーク自動整列装置：穴あけ工程の前と外層工程の前に設置し、それまでの加工中に乱れた状態になった同一図番のワークを、IDコードで読み取りロボットで揃えて整列棚に格納し、後工程の治工具段取り回数を減らし生産効率を向上させるもの。

3.3 1991年10月

これらの開発が成功し、装置の整備も完了し、工場生産がスタートした。操業後1年余りは生産技術の問題や不況による物量の低迷等があった、赤字操業が続く。

3.4 1993年度

総力を上げて諸改善を行い、工場は軌道に乗り、次第に歩留り・生産性・コスト低減等の成果が上がり、操業1年半で黒字に転ずることができた。

3.5 1994年度～

長い不況を抜け出し、受注の回復と共に生産量が急増し、

品質・生産効率が著しく改善され、費用は低減され、所期の目的通り強いコスト競争力を持つに至った。

4. 開発の内容と特徴

前章までに概説した多くの問題や開発課題について、逐次詳述する。

4.1 自動化に不可欠な基材の開発

4.1.1 そりと寸法

連続する自動ラインの搬送の確実性を期するため、使用する基材のそり、ねじれ、寸法変化をできるだけ小さくすることが重要な課題である。基材メーカーと協同して素材の加工工程・成形工程・仕上げ工程に改良を加え、そりは従来の1/2（0.3%）以下に抑えることができ、また寸法変化率を±0.01%以内にする事ができた。

4.1.2 耐電食基材¹⁾ (図1)

高密度化でvia hole間、ライン間距離が次第に接近し、使用環境が劣悪の場合は電食による絶縁劣化が起こる危険性が増している。そこで長期にわたる改善開発に取り組み、樹脂の純度と配合比やガラス界面の特性を改善し、従来の約5倍の絶縁特性を備えた基材を開発することができ、商品化に成功した。

4.1.3 ボイドレスPP

低圧真空積層法においてボイド、かすれ、ミーズリングをなくし、絶縁障害を防止し、信頼性の高い多層成形を実現するため、障害の原因である気泡をなくしたブリブレグをメーカーと協力して開発し、合わせてレイアップで発生する樹脂の粉塵を防止するための端面処理を行った。その結果、加工環境の著しい改善と、エポキシスポットによる不良や打痕を大幅に低減することができた。

4.1.4 銅キャリア付きUTC箔 (図2)

積層自動化を実現するため、UTCがロボットで取り扱えしかも外層回路の傷不良を防止できるという、画期的な特徴を持った外層材の開発を行った。5~9μmのUTCと支持

- 特徴
- 1. 樹脂配合の改良により、めっき銅の溶出量を低減
⇒『ガラス繊維／樹脂』の界面に発生するCAF（Conductive Anodic Filaments）低減による絶縁信頼性の向上
 - 2. 85℃、85%、100V印加（TH／TH 350μm）で600時間以上

図1. 耐電食基材の試験結果

する70μmのキャリア銅箔のマット面・シャイニー面とピール界面の、析出結晶の成長技術や粗化のための電解処理条件を改善して、ピール強度を50~120g/cmの範囲にコントロールして接着する技術を確認して、自動ピールを含め実用化に成功した。キャリアを背合わせしてスポット溶接して使うことにより、レイアップの高能率化と樹脂粉の付着防止ができ、さらに鏡板なしの積層成形を実現し、次の穴あけ工程では、エントリフォイルとしてのアルミ箔を省略でき、世界で初めて積層穴あけ工程の一貫した全自動化に道を開いた。

4.2 プロセス技術の開発

当工場で採用したプロセスの中で特徴のある、ED法、自動AOI検査、積層、穴あけ、めっき、仕上げ加工および電気検査について、工程順に記述する。

4.2.1 ED法²⁾ (図3)

高密度回路技術の進歩を予測して、ドライフィルム of 解像度の限界を超える、電着フォトレジスト法（ED法）を選び、内層も外層もフォトレジストはEDだけに絞り、実用化に挑戦した。

内層はネガタイプのカチオン型の液状レジストで、ポリマーがコロイド状分子やミセルを含むエマルジョンの形をとり、電解槽中でステンレス陽極と基材の銅箔陰極に直流電圧をかけると、正電荷に帯電したレジスト分子が、電気泳動で銅箔上に析出凝固する。これを加熱乾燥するとレベリングされて平滑な6μm前後のレジスト膜が得られる。

図2. 70μm銅箔／9μmUTC箔

図3. ED法の原理

外層はポジタイプのカチオン型の液状レジストを用い、穴あけ・めっきを終わった基板を陽極に配置して電着すると、基材の凹凸やきずを完全に被覆するレジストとなる。ポジであるから露光した部分がアルカリに溶解し、保護しなければならない小径スルーホールの内壁の部分のレジストは、エッチングが終了するまでは強固に密着している。

両者とも約3年に及ぶ実験・評価を繰り返して、液管理・電着条件・乾燥法を確立し、さらに弱いレジスト膜を傷つけないよう搬送の全自動化を採用した。そしてついに99%を超える歩留りを達成し、経済的にも実用化に成功した。この工程もハンドリングから人手を一切省くことができたのが、成功の一因であると思う。

重要管理項目

- 1) NV (加熱残分)、溶剤を高めに維持管理
- 2) 現像液pHの連続モニタリング
- 3) 使用前フィルムのAOI検査
- 4) 装置全体の念入りの5S/PM励行

4. 2. 2 自動AOI検査 (図4)

高密度回路をイメージセンサでパターン認識し、特徴抽出法で高速高精度に検査するAOIは世の中に多いが、それらの中から自動ラインに向くものとして、搬送機構のついた機種を選定し、ソフト・ハードに改善を加えて性能を向上させ、表面回路用と裏面回路用を2台シリーズに配置し、省人化された停滞のない検査システムを構築した。自動ラインの効率化の阻害要因は不良と疑似欠陥である。改善によってこれらをゼロに近づけることが課題である。

重要管理項目

- 1) 回路設計の線端処理を徹底
- 2) 銅回路の防錆処理を確立
- 3) 防除塵の徹底

4. 2. 3 積層 (図5)

検査をパスした内層は酸化銅処理をした後、コンベアでレイアップ室に進入する。入口でバーコードリーダが内層の図番を読み取る一コンピュータの指令で、ロボットが待機している積層金型にダミー板をセットする一前述の銅キャリア付きUTC箔を重ねる一ボイドレスプリプレグを所定枚数のせる一内層を重ねる一またボイドレスプリプレグを重ね内層を重ねる一これを層数分だけ繰り返す、銅キャリ

ア付きUTCを重ねる一このサイクルを10数ページ分繰り返して、最後に上金型をセットしコンベアに並べる一真空積層プレスの段数分だけ揃うとロボットでプレスに送入される一プレスが終わりアンロードされた積層板は、自社製の自動セパレータで1枚ずつ分離される一積層板はトリミングされた後、パッファにストックされて完了する。一方、積層金型は清掃ロボットで表面もガイド穴も丹念に異物が除去され、再びレイアップ室に還流・使用される。

重要管理項目

- 1) 銅/銅キャリア箔のピール強度
- 2) 金型の精度管理
- 3) レイアップ装置・セパレータのPM

4. 2. 4 穴あけ (図6)

ワークが積層後のパッファから1枚ずつ搬出される一X線バーコードリーダで図番を読み取ると、印刷したバーコードラベルを外層上に貼付する一ロボットが図番を認識し小径穴のあるワークは2枚重ね、ないワークは3枚重ねて自動ピン打ちされ、コンベアで穴あけに送られる一ボール盤のスピンドルヘッド数の分だけたまると、AGVがコンピュータの指令通り運んで行く。

十数台のボール盤はループ状に配置され、ホストコンピュータとDNC 1プロトコルによりCNC群管理で運転されている。AWCからワークが供給されると、ボール盤はワークに付いているバーコードを読み取り、加工情報をホストコンピュータから呼び出して自律的に加工をする一終了したワークはAGVが受け取って帰り、ピンを抜いてロボットが1枚ずつピーラに投入する一ここで積層・穴あけを通じて大切な役割を果たしたキャリア銅箔は自動はく離さ

図5. ロボットによるレイアップ

図4. 内層回路の自動AOI検査

図6. 無人穴あけライン

れ、基板は整面工程に進む。

重要管理項目

- 1) 全スピンドルヘッドの有効活用のための整列
- 2) 24時間ノートラブル無人稼働
- 3) ボール盤と搬送の定期メンテナンス

4. 2. 5 めっき (図7)

めっきは当システムの中でも、プロセス確立に最も苦心した工程である。無電解銅めっき液中のホルムアルデヒドやキレート化合物が環境や人体に好ましくない影響を与え、一部欧米の先進国において使用を規制する動きが始まっており、21世紀には使用できなくなる懸念もある。そこで無電解銅めっきに代わる方式としてダイレクトプレーティング法を導入した。多層板に全面採用するため長期にわたる研究を行った。量産経験にもとづく参考資料のない当時、すべてが自社技術陣の実験・評価データの積み上げが頼りであった。他に代わるべき補助ラインを考えず、3年余の長期にわたり、数十回の実験・評価を経て各種の問題を解決し、軌道に乗せることができた。

重要管理項目

- 1) デスミア液の電解管理
 - 2) 中和液の活性剤の洗浄性
 - 3) 導電化溶液の最低必要濃度の自動補充管理
 - 4) ソフトエッチング溶液の適正濃度自動補充管理
 - 5) 内層銅表面の活性化と維持
- #### 4. 2. 6 仕上げ工程 (ソルダマスク・マーク印刷・ソルダコート)

めっきを施されたワークは、外層フォトリソエッチング工程で回路形成され、外形のルータ加工を経て、AOIにより外

層パターンが検査されたあと、仕上げ工程に入る。

ワーク表面は整面され、連続自動スプレーコーティングでアルカリ水溶性レジストを塗布し、自動アラインメント機構付き露光装置 (図8) で露光し、現像・乾燥する。

部品マークは自動版交換機能を備えた全自動スクリーン印刷機で印刷される。

最後に、実装のための予備はんだのコーティングは、平滑均一なはんだを水平式ホットエアレベリング装置 (図9) を用いて行い、多層プリント配線板が完成される。

4. 2. 7 電気検査 (図10)

すべての加工が完了した多層板は、全数電気検査される。SMT多層プリント配線板の検査は、図番ごとに専用検査治具を必要とし、従来の接触プローブ方式では段取りを含めた無人化はほとんど不可能に近い。そこで、異方性感圧導電ゴムをインタフェースボードとセットにした治具を採用した。当日使用する検査治具を格納ラックに収容しておき、工程の入口で基板のバーコードが読み取られると、ロボットが格納ラックから該当治具を取り出し、検査台にセットし、次に基板を運んできて、ビジョン整合位置合わせ装置で両者を正確に重ね、CADデータで十数秒で検査を行い可否を判定する。これらの無人ユニットの統合で初の全自動検査ラインを実現することができた。

5. 全自動生産システム

5.1 自動化の基本方針

- 1) 初工程から完成まで無停滞の連続一貫ラインとする
- 2) 単純繰り返し作業やハンドリングから人手を解放する
- 3) IDコードの採用で物と情報の流れを一体化する

図7. めっきと内層銅界面の接続

図9. 水平型ソルダレベラ

図8. レジスト自動露光装置

図10. 自動電気検査

この方針に沿って、約4年の歳月をかけて開発した前述の各種最新技術と無人機は、コンピュータシステムによる統合で多品種少量生産にも対応できる、フレキシブルな全自動製造ラインとして完成した。

5.2 生産管理

生産オーダーはホストコンピュータからLAN経由で工場ホストが受け、生産計画・生産指示・治工具準備・諸材料の発注を行う。

LANで接続された工程パソコンが、各工程ごとに設置されているIDコードリーダーからの情報で、リアルタイムに進捗管理、工具交換、治具交換を自動で行う。

PM情報は部品寿命管理、故障部品の原因統計を行う。原価管理データとして主材料、補助材料、消耗治具等の発注・在庫・消費量の集計を行う。

5.3 CAM情報の一元供給管理

本社CADシステムと全社LAN／工場LANの結合により、CAD／CAMデータの一元供給管理を行っている。ファイル転送されたデータにより、フォトマスク・CNCデータの作成と供給を行う。

5.4 工程監視

最適なプロセスコントロールを行い、品質の作り込みと不良防止を行うため、各装置は自動分析計・圧力計・流量計・積算電流計等の維持管理センサを設置して監視し、管理限界に近づくと異常アラームを出し、限界を超えると自動的に停止する機能を設けた。

5.5 製造自動化システム (図11)

各工程は工程管理セルによってコントロールされる。セルは工程パソコン・ID^{*1}コードリーダー・PLC・ロボットコントローラによって構成されている。前工程からワークが到着すると、入口でIDコードリーダーが読み取り、その情報が工程パソコンに入り、工場ホストから加工情報を呼び出し、同時にPLCに制御情報を伝え、無人加工機・ロボット・コンベア・バッファが制御され、自律的に加工が行われる。同時にワークの流れに同期して、工程状況がホストに送信され、稼働状況・進捗状況が収集され、ペーパーレスで管理される。

5.6 工場レイアウト図 (図12)

このような自動工程を工程順に連続ラインに集大成したものを工場レイアウト図に示す。工程(番号)順に説明すると、まず、受注データから作成したホストコンピュータの生産計画にもとづく投入指令で、自動倉庫〔1〕から基材がAGVに積載され、ロボットで最初の工程である内層回路形成ライン〔2〕に供給され、電着・露光・現像・エッチング・はく離・乾燥後ガイド穴加工する。次に内層検査〔3〕室に進みAOIで回路欠陥を検査する。積層〔4〕では銅箔・PP・内層材を重ねてプレスされる。穴あけ〔5〕

図11. 詳細な工程自動化モデル

は群管理により24時間無人で加工が行われる。電解めっき〔6〕はダイレクトプレーティングを採用した。ここまでは1階で、めっきされた基板は2階に自動搬送し、外層回路形成〔7〕でポジのEDを用いて高密度加工をし、外形加工〔8〕ではルータで精度よくスリット加工をし、外層検査〔9〕でAOIにより断線・欠け・残金を検査し、欠陥を修正する。ソルダマスク〔10〕では銅回路部分をコーティングし、マーク印刷〔11〕で部品のシンボルと文字を自動印刷し、ソルダレベラ〔12〕では予備はんだを薄く被覆して、最後に出荷検査〔13〕工程で電気検査と目視検査を行う。その後、所定の条件で除湿乾燥し真空包装して出荷する。以上の工程がすべて工程モデルで示した無人仕様の自動システムをインテグレートした、一貫全自動ラインとなっている。

6. 開発の成果

ここに初めて紹介した、多層プリント配線板の全自動生産システムは、工場生産開始以来3年余り経過して順調にフル操業しており、次のような成果が得られている。

(1) 品質

工程管理の充実と人手の解放により品質は安定し、歩留りは97%台で、SMT多層のみの工場としては高い水準にある。

脚注 ※1: IDコード(バーコードとホールコードの総称)

図12. 全自動工場レイアウト

(2) リードタイム

連続ラインのため特急2日，通常5日で大幅な短縮となり，在庫の削減や新製品の開発期間の短縮にも寄与している。

(3) 3Kからの転換

これまでのプリント配線板工場の暗いイメージを一変して清潔でクリーンな環境になり，仕事の内容は，知的なものが主になった。

(4) ロボットによる省人化

35台のロボットが人の単純労働にとって代わり，人件費格差によるコスト競争力の低下という課題を解決し，材料経費の削減効果と相まって外地生産の必要はなくなった。

7. むすび

当工場は生産性，納期，コストとも，建設当初に設定し

た目標を達成し，品質信頼性も高く，採算性は良好である。しかし技術の進歩の速い現在は，開発が完成した時が陳腐化の始まり，といわれる。今後も新技術を学び，時代と共に進化する工場に発展してゆくよう努力を続ける必要がある。

(1995.3.10—受理)

文 献

- 1) 村井 曜，他：“高密度配線板用耐熱性改良多層材料MCL-E-67 (Y)”，日立化成テクニカルレポート，No.20,pp.23～26,1993-1.
- 2) 木村俊哉，他：“ピン間5本プリント配線板の量産化”，NEC技報，Vol.45,No.9,pp.77～81,1992-9.