

Sn-Biはんだメッキ断絶に伴う Mach世代インクジェットヘッドの接合方式移行 事例

三溝 真一 (Shinichi Samizo)

独立系半導体研究者 (元セイコーエプソン)

Independent Semiconductor Researcher (ex-Seiko Epson)

Email: shin3t72@gmail.com

GitHub: <https://github.com/Samizo-AITL>

Abstract—本稿では、Sn-Bi はんだメッキ工場の閉鎖に伴い、Mach 世代インクジェットヘッドの接合方式を Sn-Bi リフローから ACF およびはんだ接合へ移行した事例について報告する。PrecisionCore 登場直後の時期にあたり、実質エプソン全機種に関わる大規模な 4M 変更となった。本事例は、外的制約下において「不完全でも成立する解決策」を選択し、事業継続性を確保した実装技術の一例である。

Index Terms—インクジェットヘッド, Sn-Bi はんだ, ACF 接合, 実装技術, 4M 変更

Abstract (English): This paper reports a case study of the bonding method transition in Mach generation inkjet heads, from Sn-Bi solder reflow to ACF and solder bonding, due to the shutdown of the Sn-Bi plating facility. The transition took place shortly after the introduction of PrecisionCore, at a time when most Epson printers still relied on Mach heads. It represented a large-scale 4M (Man, Machine, Material, Method) change across the entire product line. This case demonstrates an example of implementation technology in which, under external constraints, an "incomplete but workable solution" was chosen to ensure business continuity.

I. 背景

Mach 世代インクジェットヘッドは、エプソンが 2000 年代後半から 2010 年代にかけて量産展開した主力プリントヘッドであり、d31 モードバルク積層 PZT アクチュエータを採用していた。この方式は、比較的高い吐出圧力と安定したインク吐出を実現できるため、コンシューマ用途から産業用途まで幅広く適用されていた。

当初、COF (Chip on Film) 配線と PZT アクチュエータとの接合には、Sn-Bi はんだメッキを用いたリフロー方式が採用されていた。Sn-Bi 系はんだは低融点であり、PZT 基板や COF への熱ダメージを抑制できること、また量産工程として安定した実績があることから選択された。

しかし、外部要因として Sn-Bi メッキ工場の閉鎖が確定し、供給ディスコン (discontinuation) が避けられない状況となった。Sn-Bi メッキは COF 端子形成の根幹であり、代替材料が存在しなかったため、この時点で従来の量産方式は継続不可能となった。

さらに、この時期は PrecisionCore が市場投入された直後であったが、量産規模はまだ限定的であり、事業の主力は依然として Mach 世代ヘッドであった。特にコンシューマプリンタから産業用溶剤インク機まで、ほぼ全てのエプソンプリンタ製品群が Mach ヘッドに依存していたため、この接合方式問題は単一機種に留まらず、**実質的にエプソン全機種に影響する全社的課題**となった。

結果として、Sn-Bi 断絶への対応は「技術課題」であると同時に、「事業継続リスク」そのものであり、短期間での大規模な 4M 変更 (Man, Machine, Material, Method) を余儀なくされる状況に至った。

II. 接合方式移行

Sn-Bi 断絶を受け、COF 端子構造を全面的に見直し、出力端子 (PZT 側) と入力端子 (基板側) で異なる接合方式を導入した。これは「一方式で全てを代替する」ことが困難であったため、用途と要求特性に応じて最適な方式を振り分けるという設計判断である。

A. 出力端子 (COF → PZT)

接合方式は ACF (Anisotropic Conductive Film) 接合を採用した。主な理由は以下の通りである。

- PZT 電極との高い表面親和性を確保できること
- 微細ピッチ端子に対応可能であり、Sn-Bi 代替として実用性があること
- すでにコンシューマ用途で実績があり、信頼性データを一定程度参照可能であったこと

接続構造は「COF Sn 端子-ACF 導電粒子-PZT 電極」となり、Sn-Bi を介さずに電氣的導通を実現した。

B. 入力端子 (COF → 基板)

接合方式は従来の延長上にあるはんだ接合を選択した。理由は以下の通りである。

- 電氣的および機械的な接合強度を安定して確保できること
- 基板側の既存プロセスを大きく変更せずに適用可能であること
- Sn-Bi ではなく Sn 単独メッキに対応した基板側はんだ材料が利用可能であったこと

接続構造は「COF Sn 端子-基板側はんだ-基板パッド」となり、リフローにより安定した接続が実現された。

TABLE I
Mach 世代ヘッドの二重接合方式（COF 出力/入力）の整理

接 続 イ ン タ 方 式 フェース	構造（簡略）	採用理由（要点）
COF → PZT ACF (出力)	COF Sn 端子- ACF 導電粒子- PZT 電極	微細ピッチ適合、 PZT 電極との親 和性、コンシュー マ用途での実績参 照可
COF → 基板 はんだ (入力)	COF Sn 端子-基 板側はんだ-基板 パッド	電気・機械強度が 安定、既存基板実 装プロセスを活か せる

C. 二重構造の意義

出力側に ACF、入力側にハンダという二重構造の導入により、Sn-Bi 断絶後も量産可能な接続体系を確立した。この方式は「単一の代替材料に依存せず、要求仕様に応じて方式を分離する」という点で、外的制約下における柔軟な実装戦略の一例となった。

III. 切り替えの背景と状況

コンシューマ（水系インク）用ヘッドは先行して ACF 接合へ切り替え済みであり、量産に支障はなかった。一方で、溶剤インク対応ヘッドについては ACF 樹脂の溶剤膨潤リスクが懸念され、評価や信頼性確認が遅れたため、切り替えが後回しとなっていた。

しかし、ここに Sn-Bi ディスコンの確定が重なり、残存在庫も限られる中で、ショーテージが目前に迫る状況となった。つまり「リスクを抱えたままでも切り替えを断行しなければ、製品供給そのものが途絶する」という、待ったなしの危機的状況であった。

このため、溶剤インクヘッドについてもリスクを許容しつつ強制的に ACF へ切り替える突貫プロジェクトが発足した。本プロジェクトには開発部門のみならず、調達部も全面的に参画し、材料供給確保・代替部材調達・製造工程切替・量産立ち上げを同時並行で進める体制が構築された。

このようにして、Sn-Bi 断絶を外的トリガーとした全社的な緊急対応が開始され、Mach 世代ヘッドの全機種を対象とする大規模な接合方式移行が実行された。

IV. 製造管理の難易度

本件は単一機種に閉じた問題ではなく、複数の溶剤インク対応ヘッド機種を同時に対象とする必要があった。さらに、COF はエプソン製・シャープ製・東芝製と複数の外部サプライヤから供給されており、それぞれの端子構造・表面処理条件・品質保証基準が微妙に異なっていた。したがって、単純な一律切替ではなく、サプライヤごとに接合条件の最適化が求められた。

また、接合工程は「COF と PZT 接合」と「COF と基板接合」の二系統が存在し、それぞれに ACF / はんだの適用方式が異なっていた。PZT 側では微細ピッチかつ材料親和性を考慮した ACF が必須であり、基板側では電氣的・機械的強度を担保するためのはんだ接合が要求された。両者のプロセス条件を矛盾なく成立させることが技術的課題となった。

TABLE II
Sn-Bi 断絶を起点とした接合方式切替のフェーズ整理

フェーズ	主要イベント／判断	主なアクション（4M 対応）
従来運用	Sn-Bi メッキ＋リフローで安定量産	—
外因顕在化	Sn-Bi メッキ工場閉鎖・ディスコン確定／在庫逼迫	代替検討プロジェクト立上げ（緊急）
リスク評価	溶剤インクで ACF 膨潤懸念（密閉＞開放）	加速試験（他部門）：密閉 × 不良／開放 × 維持
方式選択	一方式では両立困難 → 二重構造を採用	出力 = ACF（COF → PZT）、入力 = はんだ（COF → 基板）
4M 変更	Man：教育・標準化／Machine：設備条件最適化／Material：ACF・はんだ・COF Sn 化／Method：量産条件確立	複数機種 × 複数サプライヤ × 複数拠点の統制
結果	コンシューマ用途：問題なし／産業用途：交換対応条件で供給継続	事業継続性を確保

TABLE III
製造管理における三重の複雑性と統制ポイント

複雑性の軸	具体例	統制ポイント
機種の多様性	複数の溶剤インクヘッド機種が同時対象	機種別の接合条件マップ化／量産条件の共通化と差分管理
サプライヤ差	COF：エプソン／シャープ／東芝（端子構造・表面処理差）	サプライヤ別の最適条件と受入基準の明確化
拠点差	東北エプソン／秋田エプソン（設備・QA・スキル差）	標準作業・教育・立上げ監査／歩留まりフィードバックループ

さらに、製造拠点は東北エプソン・秋田エプソンの複数現法に分散していた。それぞれ異なる生産ライン設備、品質保証体制、作業員スキルレベルを持っており、統一的な切替を行うには全拠点間での工程条件共有・標準化が不可欠であった。特に量産初期には拠点ごとの歩留まり差や不良モードのばらつきが顕在化し、それを吸収するための工程調整やフィードバックループが繰り返された。

したがって、本プロジェクトの製造管理は「複数機種 × 複数サプライヤ × 複数拠点」という三重の複雑性を同時に扱う必要があり、単なる材料置換ではなく、事業全体を巻き込む大規模なプロセス統制活動であった。結果として、全社横断的な製造・調達・品質保証の協調がなければ成立しない高難度の切替プロジェクトとなった。

V. 評価試験（他部門実施）

ACF 接合は微細ピッチ適合性に優れる一方で、樹脂材料を用いるため溶剤インクとの化学的相互作用が懸念された。特に、溶剤蒸気による膨潤や劣化が接合界面に与える影響は未知数であり、信頼性リスク評価が不可欠であった。

このため、他部門により恒温槽を用いた加速試験が実施された。試験は「ACF 接合ヘッドと溶剤インクを同梱したタッパー容器を恒温環境下に放置する」という単純化され

TABLE IV
ACF 接合の溶剤蒸気環境評価（他部門試験の要約）

条件	観察された現象（要約）	動作結果
蓋あり（密閉，蒸気滞留）	ACF 樹脂の膨潤／接合界面の導通不安定化・劣化	不動作
蓋なし（開放，蒸気拡散）	膨潤は抑制／接合機能は維持	正常動作

たモデル評価である。筆者自身は試験を実施しておらず、役割は ACF 接合ヘッドのサンプル提供に限定された。試験条件（温度、時間、サンプル数）の詳細は手元に残っていないが、社内報告では以下の結果が示されている。

- 蓋あり（密閉環境で蒸気滞留）：ACF 樹脂が膨潤し、接合部の電氣的導通が失われ、ヘッドは不動作となった。
- 蓋なし（開放環境で蒸気拡散あり）：ACF の膨潤は抑制され、接合機能は維持され、ヘッドは正常動作を継続した。

これらの結果は、ACF 接合が溶剤インクの蒸気濃度環境に強く依存することを示している。密閉条件下では蒸気が滞留し、ACF 内部に吸収・膨潤が進行するため、接合不良を引き起こす。一方、蒸気が逃げる開放環境では膨潤が抑制され、実用上の動作は維持できることが確認された。

ただし、実際のプリンタ使用環境は完全密閉ではなく、むしろ開放系に近い。このため「実環境では蓋なし条件に近い挙動を期待できるが、溶剤系では膨潤リスクがゼロではない」という判断に至った。すなわち、ACF 採用は不完全解であるものの、代替が存在しない中で「動作は成立する」ことを確認した意義は大きかった。

VI. 顧客対応（他部門実施）

本件の影響を強く受けたのは、溶剤インクを用いる産業用途の顧客群であった。代表例としてミマキエンジニアリング（Mimaki）が挙げられるが、他にも同様の条件下で製品を展開している複数顧客が存在した。これらの顧客は高い印字信頼性と長期安定稼働を要求しており、接合方式変更によるリスクは極めて重大な懸念事項であった。

顧客との交渉・合意形成は他部門が担当したが、その基本方針は以下に整理できる。

- Sn-Bi 再利用は不可能であり、代替は ACF 接合方式しか存在しないことを説明した。
- ACF は溶剤環境下で膨潤リスクを伴うことを事前に明示し、技術的限界を共有した。
- リスクマネジメント策として「不具合が発生した場合は迅速にヘッド交換を行う」ことを条件とした。

結果として、顧客は「完全な解決策ではないが、事業を継続するために必要な措置」と理解し、ACF 方式での供給を受け入れた。この合意により、エプソン側は製品供給を止めることなく継続可能となり、顧客側も事業を維持することができた。

この対応は、技術的に完全無欠なソリューションが得られない状況下においても、リスクを明示し、代替策を提示し、顧客と合意形成を図ることで事業継続性を確保する一つの実践例となった。

VII. 結論

本件の接合方式移行は、PrecisionCore が市場に投入された直後の時期に実施されたが、当時の量産主力は依然として Mach 世代であった。このため、単一製品に留まらず、**実質的にエプソン全機種に関わる大規模な 4M 変更**（Man, Machine, Material, Method）となった。

Sn-Bi はんだメッキのディスコンにより、従来のリフロー接合法は存続不可能となり、接合方式は事実上 ACF に一本化せざるを得なかった。溶剤用途における ACF 膨潤リスクは完全には解決できなかったものの、「不完全でも成立する方法を提示し、製品供給を維持する」という判断が下された。

その結果、以下の成果が得られた。

- コンシューマ（水系インク）用途では、問題なく量産継続が可能であった。
- 産業用（溶剤インク）用途では、リスクを抱えつつも「不具合発生時のヘッド交換対応」を条件に供給を継続できた。
- 全社横断的な調達・製造・品質保証部門の連携により、突発的な外部要因に対しても事業継続性を確保できることが実証された。

本事例の技術的意義は、単なる材料置換にとどまらず、**複数の接合方式を役割ごとに組み合わせることで、新たな実装体系を短期間で確立した点にある**。また、事業的意義としては、完全解ではなくとも「成立可能な現実解」を選択し、顧客との合意形成を通じて供給責任を果たした点が挙げられる。

さらに、本事例から得られる普遍的な教訓として、**外部制約下では技術的最適解よりも「事業を継続可能とする実用解」の提示が優先される場合がある**ことが明らかになった。すなわち、「不完全でも使える方法」を確立することが、製品開発や生産技術において重要な戦略の一つであることを示している。

謝辞

本研究に関連する評価試験や顧客交渉を担当されたエプソン社内に関連部門、ならびに COF サプライヤ各社の協力に深く感謝する。また、溶剤インクヘッド切替に際して調達・製造・品質保証部門が迅速に対応いただいたことをここに記して謝意を表する。

References

- [1] S. Kim, H. Lee, and J. Park, “Reliability of ACF bonding for fine-pitch interconnects,” IEEE Trans. Compon. Packag. Technol., vol. 33, no. 4, pp. 957–964, Dec. 2010.
- [2] M. Nakagawa, T. Iwase, and K. Yoshino, “Development of piezoelectric inkjet printhead technologies,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 50, no. 9, pp. 09PA01, 2011.
- [3] Y. Suganuma, Lead-Free Soldering in Electronics: Science, Technology, and Environmental Impact. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [4] H. Okada, T. Kato, and K. Kimura, “High-density piezoelectric inkjet printhead with MEMS-based precision structure,” in Proc. IEEE MEMS, 2013, pp. 451–454.
- [5] J. H. Lau, Solder Joint Reliability of BGA, CSP, Flip Chip, and Fine Pitch SMT Assemblies. New York: McGraw-Hill, 1997.

著者略歴

三溝 真一 (Shinichi Samizo) は、信州大学大学院 工学系研究科 電気電子工学専攻にて修士号を取得した。その後、セイコーエプソン株式会社に勤務し、半導体ロジック／メモリ／高耐圧インテグレーション、さらにインクジェット薄膜ピエゾアクチュエータおよび PrecisionCore プリントヘッドの製品化に従事した。現在は独立系半導体研究者として、プロセス／デバイス教育、メモリアーキテクチャ、AI システム統合などの研究に取り組んでいる。連絡先: shin3t72@gmail.com.