ベア・チップ

チップ取り付けとワイヤー・ボンディング

アセンブリ工程設定の手引き

	ページ
保管および取り扱い	2
ESD の注意	2
はんだおよび共晶	3
チップのはんだ取り付け	3
エポキシによるチップ取り付け	4
チップ取り付けの検査	5
金線ボンディング	6
アルミニウム線ボンディング	7
アルミニウム線ボンディングの設定	7
プル・テスト結果の解釈	9
参考文献	9

2004 年 4 月 21 日作成

©インターナショナル・レクティファイアー・ジャパン
この文献の無断複製・転載を禁じます。

保管および取り扱い

ベア・チップのアセンブリを開始する前に、すべての部品をしっかりと検査しておくことが大切です。アセンブリ工程がいかに良く管理されていても、アセンブリの最終品質は環境などの要素に依存します。
すべての部品は真にクリーンであり、酸化、油脂、微粒子など、いかなる汚染もなく、かつ滑らかで平坦である必要があります。すべての部品は使用するまで密封バッグ（真空パックまたは窒素封入バック）や窒素乾燥キャビネットに保管しておくいてください（取り扱いおよび保管のアプリケーション・ノート AN1060 を参照してください）。

パッケージやチップを取り扱う際は、用途に合わせて特別に設計されたツールを使うことが極めて重要です。特に、チップは非常に壊れやすいものです。割れやすいだけでなく、柔らかいコーティングが施されているため、非常に傷つきやすく、特に金属ピンセットに弱くなっています。PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）付き真空ペンを使ってください。高温での操作で、先端に金属やセラミックが付いたツールが必要な場合は、部品の表面や裏面ではなく、エッジ部だけに触れるように設計されたものを使ってください。

絶対に素手で部品に触れないでください。手袋や指サックを使うときでも、一方の面からもう一方の面へ汚染を伝播する可能性があります。皮膚、または露出した皮膚に触れた面は塩分を含む油脂でコーティングされたことになるため、ボンディング工程の障害となり、高温では汚染度の高いアルカリ性となります。
手袋などの潤滑剤として広く使われているタルクも、皮膚の断片、毛や繊維、シリコンやアルミニウムの塵埃粒子と同様に汚染物質です。従って、チップのすべてのアセンブリ操作は、クラス 1000 以上のクリーン度に維持された環境で行ってください。
プリント配線基板を使う場合、包装材に酸化防止コーティングが含まれているものがあり、チップ取り付けやワイヤー・ボンディングの障害になることがあります。はんだ処理で使われるフラックスのように、次の工程に進む前に完全に除去すべきです。

ベア・チップの取り扱いのまずさが目視検査で分からないと、短絡、断線、リークなどの致命的な故障、あるいは局所的リークやホット・スポットなどのような潜在的な障害の原因となります。潜在的障害とは、周囲温度がデータシートの最大値に近づくと初めて顕在化し、局所的なホット・スポットにより安全動作領域外に移動して、アバランシェ領域に入るようになることなどです。

＜ESD に関する注意＞
すべての半導体は、偶発的な静電放電（ESD）により永久的な損傷を受けることがあります。特に FET は ESD に弱い構造です。人体では 25,000V を超えることがあります。通常、私たちはこのことに気付かずにいますが、自動車から出るとき、または寒い朝に鍵を差し込むときに衝撃を受けたことがあるはずです。プラスチック製の座席、ナイロン製のコート、ネオプレン手袋、風防ガラスなどでは、クリーンで乾燥した環境で、数ミリ秒でこの電荷が蓄積されます。
チップへの最大の危機は、大きな金属の上に置いたとき、または電気的に接地された表面に置いたときです。こういう状況で生じる損傷を回避する簡単な方法は、すべての作業員、装置、トレイ、その他のツールを確実に接地した後に、チップに触れるようにすることです。半端な対策は、なにも対策しないことよりも悪いことがあります。
ESD 損傷を発生させる可能性が高い例を２つ挙げます。１つは、仕上がり品を接地された人から接地していない人に渡す場合です。もう１つは、接地されていない作業者が接地されているテスト・ソケットに挿入する場合です。

はんだおよび共晶

「はんだ」という用語は一般に、それよりも高い融点を持つ金属同志を接合するときに使われる合金に対して使われます。はんだボンディングは、材料の融合によるもの（溶融）ではなく、はんだと金属との間の緊密な接触によりボンディングが形式されるという意味で接着ボンディングに似ています。

広く使われているはんだは、スズ 60%/鉛 40%です。鉛の融点は 327℃、スズは 232℃ですが、合金の融点は、はるかに低くなります。スズ/鉛のような２種類の金属による単純な合金では、特定の組み合わせで 1 つの融点を持つ特有の構造が形成されます。このような合金に対に対して冶金学上では「共晶」という言葉を使い、スズ/鉛合金の場合はスズ 63%/鉛 37%です。

電子機器のパッケージングで用いる「共晶チップ取り付け」は当初、金 97%/シリコン 3%の合金を意味しました。これは、純粋シリコンを加熱してクリーンな金メッキ表面に接触させたときに自然に形成されました。つまり、２つの金属が混合されて合金を形成しました。この合金は共晶融点が 363℃で、得られるボンディングは信頼性が高く、かつ柔軟です。従って、その用途はセラミック・パッケージを使う小型チップに限定される傾向がありました。

大型チップ（特に銅ヘッダーに取り付けるもの）の場合、チップ自体の裏面が適切にコーティングされているときは、他の合金を使うことができます。IR 社が使っている３種類の金属で裏面処理したデバイス（接着層および銀コーティングされたニッケル）は、さまざまな合金を使って取り付けることができます。

一般的なはんだと、その融点を次表に示します。数値が 1 つしか示していないものは、真の共晶です。

合金の組成	融点 (°C)
鉛 95%/ スズ 5%	310 ～ 314
金 80%/ スズ 20%	280
鉛 90%/ スズ 10%	278 ～ 305
スズ 65%/銀 25%/アンチモン 10%	228 ～ 395
スズ 96.5 %/ 銀 3.5%	221
スズ 60%/ 鉛 40%	183 ～ 188
スズ 63%/ 鉛 37%	183
インジウム 80%/鉛 15 %/銀 5%	149
インジウム 52%/ スズ 48%	118

チップのはんだ取り付け

合金を選択するときに最初に考慮すべきことは、融点です。材料にシリコンを使ったチップの多くは、非常に短時間なら永久的な損傷なしに約 400℃に加熱することができます。ただし、データシートに記載されているように、最大保管温度を超えるとメーカーはチップの特性や信頼性を保証できなくなります。IR 社のベア・チップ製品のデータシートでは一般に、最適な電気的特性が得られるチップ取り付け時の最大温度を 300℃に定めています。

２番目に考慮すべき事項は、熱ストレスの影響です。すべての材料は加熱/冷却されると、伸び/縮みします。温度に対する伸び率は CTE（熱膨張係数）と呼ばれています。シリコンの CTE は 2～4 ppm/°Cと比較的小さく、アルミナ・セラミックの CTE は 5～7 ppm/°C、銅のプリント配線基板は約 17 ppm/°Cです。

大型のシリコン・チップは、金/シリコン共晶を使って銅ヘッダーに直接取り付けると割れます。このため、パワー・トランジスタでは直接はんだ処理できるように、「３種金属」による裏面処理が行われています

最も安全な方法は、ディスクリート・パッケージ部品にチップを組み込む際に、チップ・サプライアである IR 社と同じ工程、同じ材料を使う方法です。この工程と材料は、生産開始前の段階で信頼性の基準を満たしています。一般に、IR 社が提供する大部分のベア・チップ製品は、ベア・チップ形式でリリースする前に、パッケージ部品形式で 6 カ月の製品化実績があります。

パッケージに実装するときは、チップ取り付け材料の融点が、最終アセンブリでのリフローはんだ処理温度よりも非常に高くなければなりません。ただし、ベア・チップを直接、回路基板に実装するときは（FR4、FR5、BT-レジンのような有機材料の基板を使う場合は特に）、高温により基板自体が損傷されることがあります。従って、低温はんだまたは接着剤が必要になります。

他の部品と同時に、またはその後で、チップを実装するのがよいでしょう。いかなる場合でも、はんだペーストを使ってチップを直接実装すること、また、リフロー時にチップを固定するためにフラックスを使うことは避けるべきです。「非クリーン」フラックスや「水洗浄可能な」フラックスでも、チップ表面に回復不能な損傷を与えることがあります。また、フラックスや溶剤が閉じ込められるとチップの下に空洞が発生して、接触抵抗とチップの放熱能力に悪い影響を与えます

最も望ましい方法の 1 つは、チップ取り付けパッドにペーストをプリントして、リフローを行い、基板をしっかり洗浄する方法です。その後で、窒素またはフォーミング・ガス（窒素 95%/ 水素 5%）のようなクリーンな雰囲気中でチップを実装します

エポキシによるチップ取り付け

「エポキシ」や「レジン」という用語は、「サーモ・プラスチック」、「ポリイミド」、「エステル・シアン化物」などのような他の形式の接着を説明するときに使われます。これらすべての材料には、同様な物質の組み合わせが含まれています。

- 充填材 - 次のようなものがあります。
  - 導電性を持つ接着剤としての銀または金。
  - 非導電性接着剤として銅酸化物またはアルミナ。
- チップを基板に接続するボンディング材。
- 材料の粘性を一定に維持した後、高温で消散させるさまざまな有機レジン。
- 材料の調合やプリントを可能にする揮発性溶剤。

これら材料の主な利点は、第１に、汚染を起こすフラックスが含まれないためチップをウェット・ペースト内に直接置けること、第２に、特別管理雰囲気中でなくてもよいことです。３種金属による裏面処理は、機械的に信頼性の高いインタフェースとしては、必要ありません。

すべての接着剤は、保管期間が制限されており、冷蔵保管しなければなりません。吸湿性を持っているものもあり、特に寒いときには雰囲気から湿気を吸収します。材料から出て基板とチップのワイヤー・ボンディング・パッドに移動するレジンにより、別の信頼性問題が発生することがあります。これらの材料は、ダイオード、トランジスタ、信頼性の高い裏面接続を必要とするその他のデバイスへの使用は避けてください。

はんだと同様に、材料の選択や厚さの維持が信頼性を高める鍵になります。エポキシ材料の多くは比較的固いため、大抵のはんだよりも CTE の不一致に対する許容度が低くなります。これらは一般に、はんだよりも厚く堆積させる必要があり、ウェットな厚さは硬化した材料の２倍になります。フィルム接着では厚さの管理が保証されますが、硬化する間、機械的に固定する必要があります。

チップをウェット・ペースト内に配置するときは、十分な注意が必要です。チップは基板に対して平坦かつ水平に配置してください。下向き圧力が大き過ぎると、チップ取り付け材料がチップの下から押し出されて、チップと基板との間隔が狭くなります。

エポキシの乾燥と硬化のときには、部品の表面に揮発性材料が再度蒸着することがあるため、換気機能を持つオーブンの使用が不可欠です。過熱すると材料によっては融けて有害物質を発生する危険があるため、問題になることがあります。チップがはんだ付けされていて、基板上の他の部品がエポキシ材料で接着されている場合には、特に注意してください。このような材料の組み合わせがある場合には、回路基板アセンブリ・メーカーの選択が重要になります。

露出した皮膚や目に対してアレルギ反応や炎症の危険性もあります。このため、メーカーのデータシートに記載されている情報や健康および安全に関する情報に注意して従ってください。

チップ取り付けの検査

一般に、チップ取り付けの外観は MIL-STD-883、メソッド 2010b、パラグラフ 3.2.3 に準拠する必要があります。

目視検査だけでは、信頼度の高い裏面接続を保証することはできません。従って、工程の最適化、装置認定、材料受け入れ検査に加えて、別の方法を採用した方がよいでしょう。

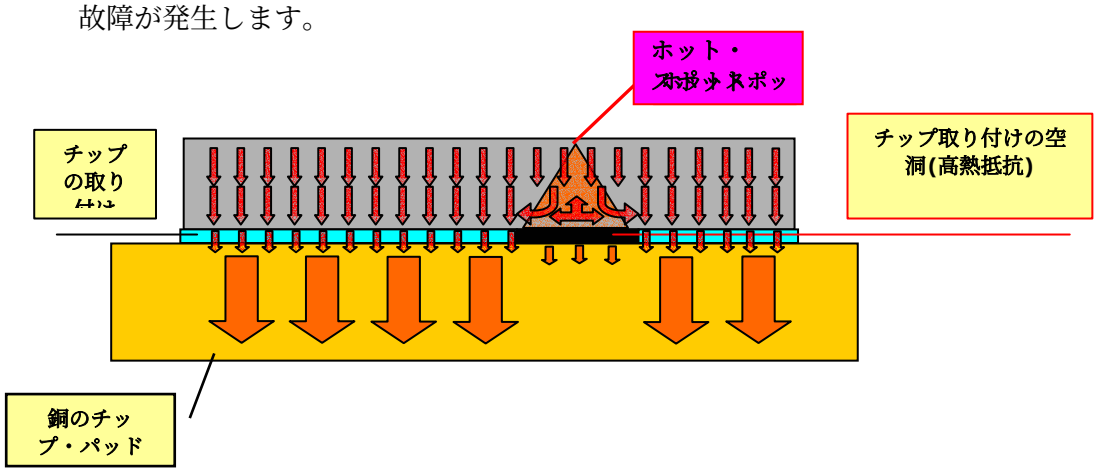
最も一般的なのは、チップ・シーア・テスト（MIL-STD-883、メソッド 2019）です。フォース・ゲージに取り付けた平坦なツールをチップ側に向かって駆動し、チップの取り外しに必要な力を記録します。このテストのバリエーションにプル・テストがあります。棒をチップ表面に接着して、上に引き上げます。この場合にも、故障が生じるときの力を記録します。両テストとも破壊検査なので、材料、SPC、最終サンプリングの初期評価のみに使われます。

100%の非破壊スクリーニングが必要なときは、定加速度テスト、X 線テスト、超音波スキャン・テスト、熱過渡特性テストを採用すればよいでしょう。

定加速度テスト（メソッド 2001）では、チップの裏面を中心に向けて遠心機内に置きます。高速回転により、チップに加わる力を増加させることができ、通常、重力の 30,000 倍以上にできます。

X 線テスト（メソッド 2012）と超音波テスト（メソッド 2030）は目視検査の強化といえるでしょう。チップと基板を透過してチップ取り付け材料を見ることができます。これらのテストは、チップ取り付け材料内に空洞または剥離があるかを調べるときに有効です。チップ取り付け内に空洞があると、デバイスの通常動作時に次のような問題を生じる可能性があります。

- 動作部の接合からの熱フローが崩れて、ホット・スポットや熱的なアバランシェ故障が発生します。



- 通常動作時に差動的な伸長と収縮が発生して、誘電体での微小亀裂やシリコン基板での亀裂といった機械的損傷に発展します。

トランジスタやダイオードなどのシングル・チップに対して最も有効な非破壊スクリーニング方法は、熱過渡特性テストです。電気的、熱的、機械的な正常性のテストを同時に行うことができます。このテストでは、外力を加える手段と、その効果をモニターする手段としてデバイス自体を使います。先ず、チップをパッケージまたは基板にワイヤー・ボンディングして、電源とメーターまたはオシロスコープを接続できるようにします。次に、ダイオードの順方向抵抗または他の適切な温度検出パラメータ（TSP）を、温度範囲にわたって記録します。最後に、自然空冷かつ室温でデバイスに電源を加えて、動作中の TSP をモニターします。このモニター値はデバイス表面温度に直接変換することができます。最適なチップ取り付け工程は、電気抵抗と熱抵抗の安定な最小値によって特徴づけられます。

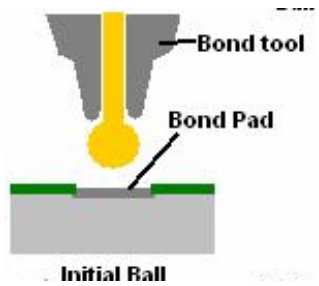
このテストを拡張して、電源サイクリング、熱衝撃、熱サイクリング、高温保存、機械的衝撃や振動をモニターできます。

金線ボンディング

電流供給が小さく、それによる熱の発生が比較的小さい用途では、アルミニウム・ボンディング・パッドへの接続に金線を使えます。

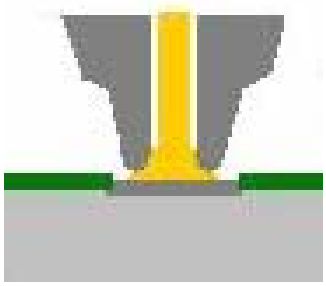
チップのアセンブリで使われる最も一般的な金線ボンディング方法は、「サーモソニック・ボール・ボンディング」です。最適な温度、力、超音波エネルギを使って信頼性の高いボンディングを形成します。

この工程は、特別な形状の毛細管の中心にある穴を細いワイヤーが通ることから始まります。突き出したワイヤーを放電（または水素火炎）により加熱して、毛細管の口径より大きなボールを形成するようにします



毛細管の先端にあるこのボールを、所定の温度に加熱したボンディング表面に移動します。代表的なサーモソニック・ボンディングでは、温度は 100℃～175℃の範囲です。

サーモソニック・ボンディング工程では、ボンディングが行われるときの超音波エネルギで毛細管が振動します。この振動を打ち消すために、正弦波の電気信号を逆向きの動作に変換するトランスジューサに毛細管を実装しています。加える信号の周波数は、無負荷状態でトランスジューサの共振周波数に近づけるように調整します。



正しく「調整」されると、トランスジューサの実効長が変化してボンディング動作を自分で制限するため、表面にボンディングが行われるとき、システムはエネルギを失います（「ラグ・ダウン」と呼ぶ）。調整が正しくないときは、ボンダーが表面条件に過度に敏感になり、エネルギの追加供給を続けます。これにより、ボンディングの破壊またはボンディング・パッドの下の構造に損傷を与えます。

アルミニウム線のボンディング

大電力と高温動作には、アルミニウム線を使うことが推奨されます。アルミニウム線を使う最も一般的なワイヤー・ボンディング方法は、超音波ウエッジ・ボンディングです。

タングステン「ウエッジ」が超音波トランスジューサに取り付けてあります。ワイヤーがチャンネルを通過して、右図の矢印で示すフロント「フット」の下を通ります。

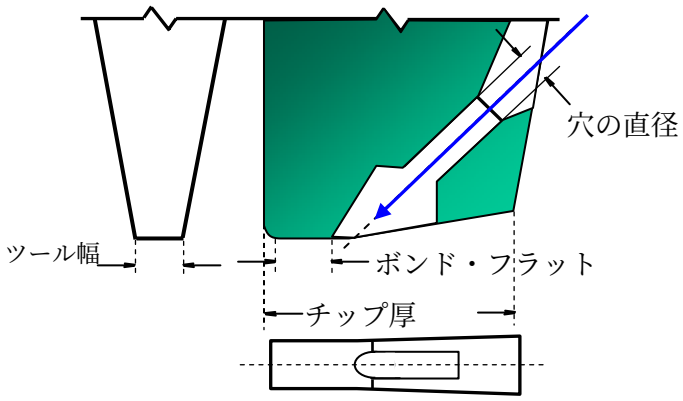
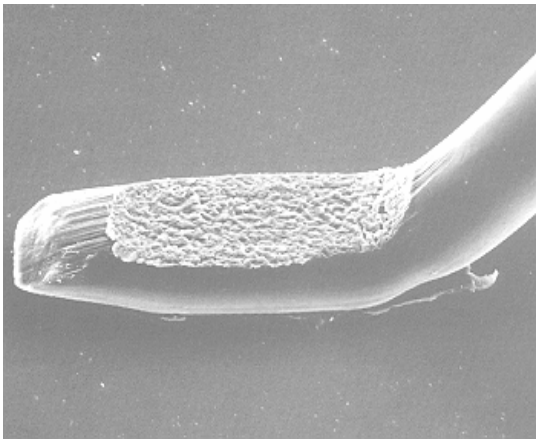


Figure 1 – 基本的なウエッジの機能

次に、超音波エネルギにより、ワイヤー前面のボンディングと平坦化が同時に行われます。そして、ウエッジが上に移動して、２番目のボンディング位置の真上の位置にワイヤー長に沿って戻ります。ワイヤーに沿ってさらに戻る位置に置かれたクランプが閉じるため、ウエッジが降りるに連れてワイヤーが曲げられます。２番目のボンディングが形成された後、ウエッジは「ステップ・バック」して、ワイヤーにブレーキをかけて、フット・フロントからの突き出しを短くしたままにして、プロセス全体を繰り返すことができるようにします。



ウエッジ・ボンディングの例が左図です。アルミニウム線ボンディングは一般に室温で行われるため、ワイヤーは非常に固いまま使います。トランスジューサのラグ・ダウンがないため、1 番目のボンディング時間がかなり重要になっています。エネルギ、力、または時間が大き過ぎると、ボンディング・パッドとその下の構造に損傷を与える可能性があります。特に、誘電体、酸化ゲート、不純物シリコンのような壊れやすい障壁層は損傷を受ける可能性が高くなります。

アルミニウム線ボンディングの設定

アルミニウム・ボンディングの設定では、３つの主要変数を同時に最適化しなければなりません。最適条件が決まった後に機能テストを実施して、構造が損傷されていないことを確認してください。

＜IR 社がボンディング・パラメータを「推奨」しない理由＞

室温のアルミニウム・ウエッジ・ボンディングは、アルミニウム線とチップのアルミニウム表面との超音波ボンディング（溶融）によって形成されます。このボンディングが成功するためには、工程の３つの主要パラメータを注意深く最適化して、装置、材料、チップ、環境の組み合わせのバランスをとる必要があります。ボンディングの力が大き過ぎると、超音波動作がチップに機械的損傷を与えるポイントに制限され、さらにはジェネレータが停止させられることになり、ボンディングの力

が小さ過ぎると、超音波ボンディング・サイクル時の密接な接触が妨げられます。同様に、超音波エネルギが小さ過ぎると、ボンディング形成が制限されます。

＜設定手順の例＞

1) メーカーの説明書に従い、超音波ジェネレータの調整が正しいことを確認します。
2) 最初に 1 番目のボンディング力をワイヤー直径の 1 ミクロン当たり 1.5～2.0cN に設定します。1 番目のボンディング時間を 50ms に設定して、最適エネルギを次のように決めます。
    i. クリーンなアルミニウム・メッキ表面を熱コラムに固く取り付けます。
    ii. ボンディングが付くまで 1 番目のエネルギを段階的に増やします。
    iii. 大きな変形が発生するまで 1 番目のエネルギを増やし続けます。
    iv. 両極端の中間に 1 番目のエネルギを設定します。
    v. アルミニウム・メッキ表面を標準的なチップで置き換えます。
    vi. ボンディングが付かなくなるまで 1 番目のエネルギを段階的に減らします。
    vii. iii～vi の範囲を均等な 10 ステップに分割します。
    viii. 各設定で、10 回のボンディングを行います。
    ix. 各設定で、5 個のボンディングにプル・テストを行います（初期）。
    x. 300℃で 4 時間（または 200℃で 24 時間）のベークを行います。
    xi. プル・テストを繰り返します（エージング）。
    xii. 1 番目のエネルギを許容結果から得られる範囲の中央値に設定します。
    xiii. 1 番目のボンディング時間を 20ms に減らして、さらに 10 回ボンディングを行います。
    xiv. プル・テストを繰り返します。
3) 1 番目のエネルギを最適値として、1 番目のボンディング力の最小値（最初の接触）と最大値（大きな変形）を決めます。
4) 1 番目のボンディング力を範囲の中央に設定して、1 番目のボンディング時間の最小値と最大値を決定して、次に 1 番目のボンディング時間を範囲の中央に設定します。
5) 装置の設定が正しい場合でも、規定の範囲内で 1 番目のボンディング・エネルギ、力または時間を、特定の種類のデバイスに対して微調整する必要があります。実験は、注意深く行ってください。「DOE ガイダンス・ノート」を参照してください。

Mil-Std-883、メソッド 2011、テスト条件 D で規定されているワイヤー・プル・テストは一般に、ボンディング品質の評価に使われます。

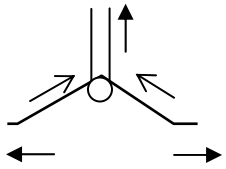
ボンディングの後、ワイヤーのほぼ中心にフックを挿入して、チップ表面に垂直な方向に引っ張ります。故障が発生したときの力と故障モードを記録します。ただし、受け入れ検査基準としては、最小の力に設計されます。

プル・テスト時のフックの位置決めには十分な注意を払って、誤った結果が発生しないようにしてください。このテストは、ワイヤーの両端が同じレベルにあるときに最適に機能します。それでもワイヤー長が測定値に大きな影響を与えます。このため、記録値に関係なく、許容故障モードとしてワイヤー断線のみを許容し、かつボンディング故障が発生した部品だけを不合格とすることが一般的に行われているようです。

プル・テスト結果の解釈

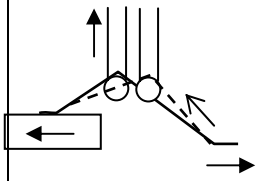
以下のケースについて検討します。すべてのケースで、ワイヤーの破断強度を 10cN と仮定します。

ケース 1　ウエッジ・ボンディング - 同レベル 、ワイヤー長：1mm、ワイヤーの角度：30 度

	基板に固定したワイヤーによって反対方向に引っ張り、垂直負荷を加えます。ワイヤーの角度 30 度の力を、垂直成分と水平成分に分解します。ただし、測定するのは垂直成分のみです。 記録される最大の力は、次のように表されます。 F = 2 × 10sin30° = 10cN

ループの高さが高くなるほど、測定値が角度の sin に比例して大きくなることに注意してください。従って、無限長の平坦なワイヤーのときは、測定値はゼロに近づき、両ボンディングが同じ位置にあるときは、測定値は 20cN まで大きくなります。重要なことは、ワイヤーが破断する場合、フックと破断が発生した側のボンディングとの間に 10cN が加わっていなければならないということです。

ケース 2　ウエッジ・ボンディング - 0.5mm ステップ、ワイヤー長：1mm、ワイヤーの角度 : 30 度

	フック位置がループの最大高のポイントにある場合にだけ、測定値は 10cN になります。 フックが中央に位置している場合は、次のように最大力が記録されます。 F = 10sin20° + 10sin45° = 3.42 + 7.07 = 10.49

フックがワイヤーの中央に位置する場合、基板側よりもチップ側での角度の方が小さくなります。ワイヤーやボンディングに変化がなくとも、最大測定値は 0.5cN だけ大きくなります。ただし、大きな懸念は、力が基板に集中して、ボンディングからチップに加わる力が実質的に小さくなるために、基板側でのワイヤー破断が発生しやすくなることです。また、両ボンディングのかかとの部分が疲労のため弱くなります。

以上をまとめると、プル・テストで記録された値は一般にボンディングの品質に関係なく、全体としてフック位置、ループ高、ワイヤー長に依存します。唯一注目すべき情報は故障モードであり、記録しておいても、MIL 規格テストの合格基準として使われません。

参考文献

- Mil Std 883E – さまざまなメソッドがこの文献にクロスレファランスとして掲載されてきました。Mil Std 883E マニュアルはホームページから入手できます。例えば、www.dscc.dla.mil があります。 この文献はマイクロエレクトロニクスや半導体製品の品質の国際標準と認められているものの１つです。
- JEDEC Document JESD 49 – 良品チップ（ＫＧＤ：Known Good Die)に対する調達の標準。JEDEC のホームページ（www.jedec.org）から入手できます。
- 国際電気標準会議, IEC 62258 – 半導体チップ製品。
  - Part 1 - Requirements for Procurement and Use
  - Part 3 – Recommendations for Good Practice in Handling, Packing and Storage.