

ONO SOKKI

レーザドップラ振動計による
ワイヤボンド 超音波振動測定システム

株式会社 小野測器

1. はじめに

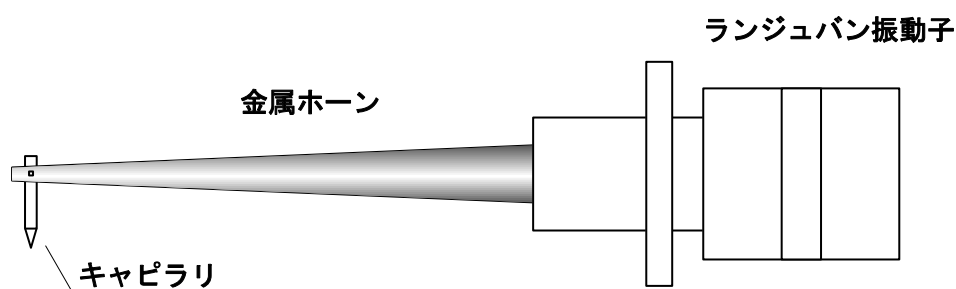
ワイヤボンダとは、IC や LSI の核となるシリコンチップとリードフレーム間に導通させるためのワイヤを接続する装置です。ボンディングの方式としては、熱を利用してスポット溶接する熱圧着方式、超音波併用熱圧着方式、超音波ウェッジ方式、およびそれらの応用である TAB 方式やフリップチップ方式等があります。超音波ウェッジ方式のものはウェッジボンダとも呼ばれ、アルミ製のワイヤを使用し、主にパワーモジュールや車載用の IC 製造の際に使用され、一定の荷重をワイヤに加えた状態で超音波振動をワイヤに印加して摩擦圧接する方式です。



一方、熱圧着方式および超音波併用熱圧着方式はボールボンディングと呼ばれ、金製のワイヤを用い、一定の荷重と熱、さらに超音波併用の場合は超音波振動をワイヤに加えて圧接します。現在、ワイヤボンディングにおいては超音波を利用する方式が一般的であり、超音波振動の印加状態がボンディングの品質を左右する重要なパラメータとしてクローズアップされてきています。

2. ワイヤボンダーの超音波機構部

ワイヤボンダに使用される超音波機構部は、振動源となるボルト締めランジュバン型振動子と振動振幅を増大させる金属ホーン、圧着子であるツール(あるいはキャピラリ)から構成され、印加する振動周波数としては、一般的に 60 kHz 前後から最近では 100 kHz 以上のものもあります。



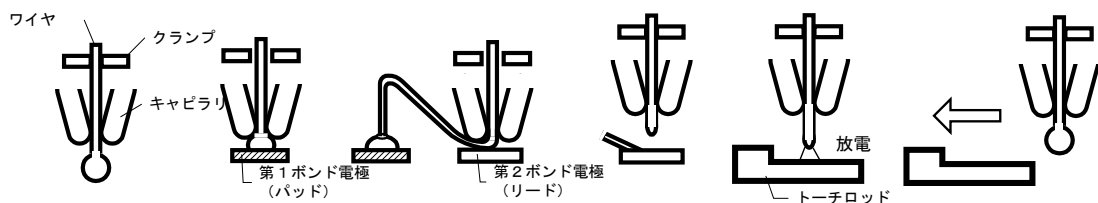
振動子は、特定の周波数で大きな振動を発生する特性（共振周波数）がありますが、条件次第で周波数が変化することがあるため、振動子を駆動する発振器にフィードバック回路を設けて周波数制御をおこなっています。また、金属ホーンを伝搬した振動は増幅されることで、ツール先端の振幅は無負荷時で数 μm 程度となります。

安定したボンディングを行うためには、ツール先端での振動振幅を安定させる必要があります。このため、ツール先端の振動をダイレクトに測定するニーズが年々増大してきています。

3. ワイヤボンディングとボンディングパラメータ

ワイヤボンディングのサイクルをボールボンダを例にすると以下のようになります。キャピラリの先端に形成されたワイヤ端のボールはキャピラリの下降に伴いチップ上に形成されたパッドと言うチップ上の接合面に押しつけられ接合します。次にキャピラリはワイヤを繰り出しながらリード上に移動し同様に接合します。その後キャピラリは上昇し、その際クランプが閉じることでワイヤがカットされます。カットされたワイヤ端にトーチより高圧放電されることでワイヤ端が溶融し再度ボールが形成されます。この時の IC パッドへのボンディングを第1 ボンド、リードへのボンディングを第2 ボンドといいます。

ワイヤボンディングの際のボンディングパラメータには以下のものがあり、第1・第2個別に設定できるようになっています。



①ヒータ加熱温度（ボールボンダのみ）

ワイヤ融着がしやすくなるよう、パッドとリードを 200℃前後で加熱します。

②荷重

キャピラリをパッド・リードに押しつける際の押圧荷重です。超音波ホーン側から約 10 ～ 100 g 程度の荷重を負荷することによって行います。

③超音波（Ultra Sonic）発振

ワイヤの塑性変形を補助し、パッド表面・リード表面との融着を促します。

④ボンディング時間

荷重と超音波を加える時間であり、数十 msec ～ 数百 msec で可変できます。これらボンディングパラメータのうち、半導体材料の多様化に伴い①の加熱温度の低温下が要求されたり、製造速度（1 サイクルあたりのタクトタイム）向上から④のボンディング時間の短縮化が求められてきています。このため、各々①④のパラメータが担っていた作用を他のパラメータで補完せざるを得ないケースも発生してきています。

このような場合、以下のような対策がとられています。

- ◆ USパワーの増加または発振周波数の高周波化
- ◆ 荷重の増加

しかしながら、ボンディングの良し悪し（ボンダビリティ）は各ボンディングパラメータの微妙なバランスの上で成立していることから、不用意なパラメータ変更は製品歩留まりに対して多大な影響を与えます。具体的には、ワイヤの剥離やネック切れにともなう断線事故あるいは荷重かけ過ぎによるチップ側の接触パッド欠損等の破壊事故が増大することがあります。

4. ボンディングパラメータ解析の問題

従来、最適ボンディングパラメータの割出しや事故原因の監視ならびに究明には以下のような手法が使用されてきましたが、近年の状況変化に伴い各種の問題が発生してきています。

① 経験則

- 利点：短期かつ比較的 low コストで対応できる。
- 欠点：理論的・数値的裏付けがないため、IC の新品种にそのまま対応できると限らない。
また、トラブル発生時の問題点が不明なため、対策は限定され歩留まりが一旦悪化するときりがなくなる。

② ピックゲージによる引っ張り強度試験

- 利点：ワイヤそのものの引っ張り強度・接合強度をみるため、簡便に検査できる。
- 欠点：結果の確認であり原因究明とはならない。また破壊検査となる。

③ 高速度カメラによる撮影

- 利点：断線事故や剥離状況の確認等に有効
- 欠点：結果の確認には有効であるが原因究明にはきわめて限定的となる。特に、US 発振のような高い周波数に起因する問題に対しては対処できない。

④ ランジュバン振動子のインピーダンス変化の測定

- 利点：各ボンダに設置することで、インライン常時監視とすることが可能
- 欠点：変化率が小さく、原因の明白な大きな事故でもないかぎり差異がわからず、導入効果もほとんどない。

5. レーザドップラ振動計による測定の有効性

ボンディングの工程は、前述したように金属ホーンの先端にネジ止めにて取り付けられているツールあるいはキャピラリと呼ばれる接続用圧着子とワイヤを挟んでパッドやリードフレームとの間で行われます。よって、ボンダビリティを検証するための測定ポイントとしては、作用点そのものであるツール先端あるいはパッドやリードフレームを直接測定できれば有効であることは容易に想像できます。

しかしながら、ツールやパッドあるいはリードフレームの測定を行うことは従来非常な困難を伴い、端的に言えば適用可能なセンサが無かったというのが実情でした。

例えばボールボンダで使用されるツールは、キャピラリと呼ばれる先端がテーパ状で細かい直径約 1.5 mm、長さ約 11 mm 中空の針であり、概して硬質セラミックまたはルビーで製作されています。このため、サイズの制約から接触式の振動センサ等を取り付けることは不可能です。

また、非接触センサの代表ともいえる三角測量方式のレーザ変位計では、60 kHz 以上という高い周波数まで測定できるものは希れであり、三角測量の原理上センサとターゲット間の測定距離と分解能がトレードオフの関係となるため測定不能となります。このため、現在レーザドップラ方式による振動計の適用が主流となっており、良好な結果が得られています。

以下にレーザドップラ方式による測定の長所・短所について述べてみます。

●長所

分解能が測定距離に依存しないため高分解能で数値化がしやすく、ボンディング作用点の近傍での測定となるため測定データの変化率も大きいため差異が出やすい。とくに振動子や金属ホーンに問題があった場合のトラブルでは、初期データがあれば比較的簡単に判別可能となる。

●短所

製造する IC の種類や使用するボンダおよびワイヤによって特性が異なるため、業界標準となるような基準を作成することはできず、個別対応となる。

このため基準作成のための時間を要し、即効性はあまりない。

また、常時監視を行うことは不可能であり、測定に多少の慣れを必要とする。

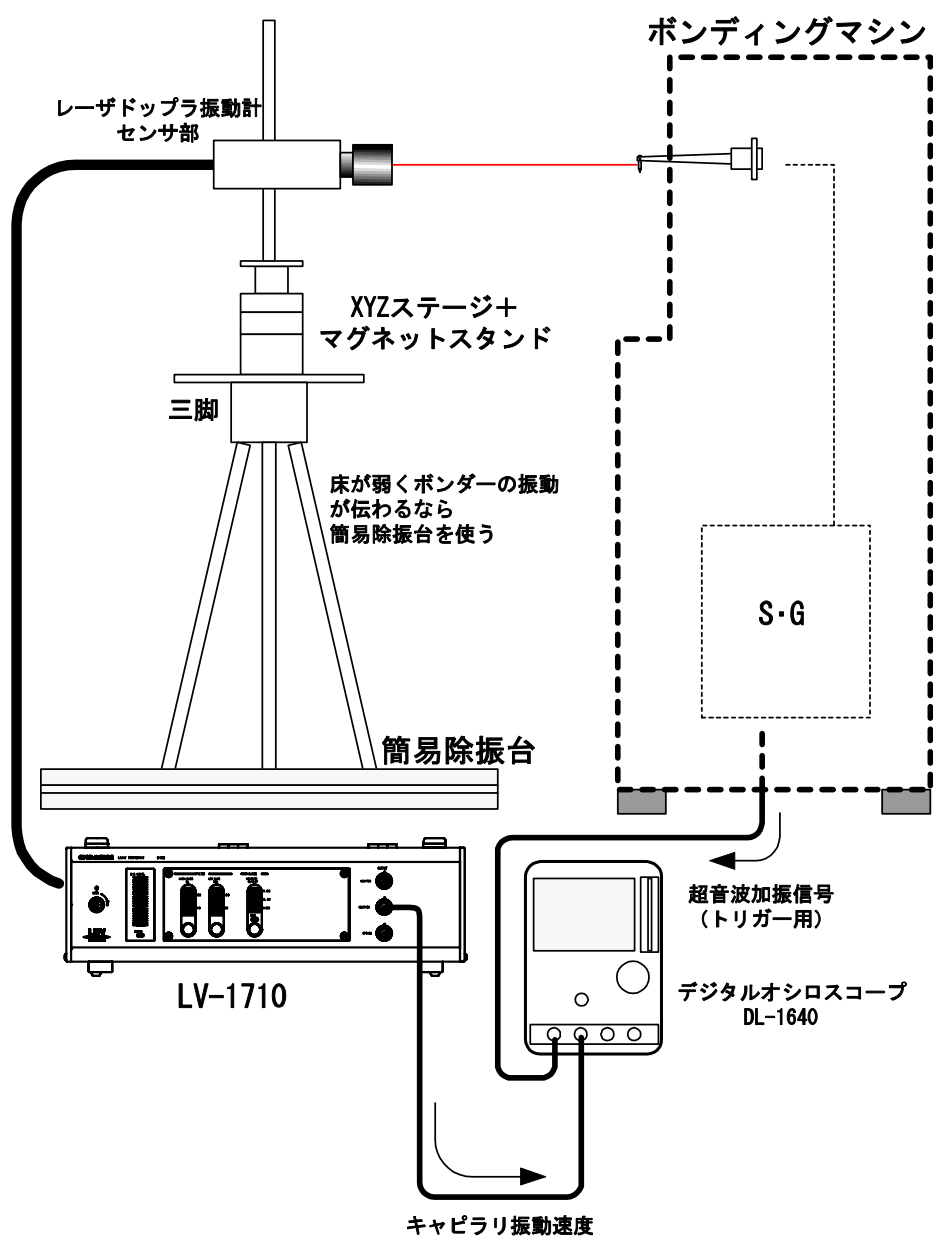
レーザドップラ振動計による測定でも問題点は存在することから、ボンダビリティの検査方法として「万能」とはいえませんが、他の測定方法を使用した場合、概して「原因不明」あるいは「効果なし」という議論の余地の無い状況下では、「現在適用しうる最善の測定方法」となります。

例えば、ツールは消耗品として交換する必要がありますが、通常、ツールの交換は手作業で行われています。ホーンに対するツールの取付位置や固定ネジの締め付けトルク次第では、ボンディングの状態が変化することがありますので、メンテナンスで評価する際などにおいてもツール先端の振動振幅の定量化は重要です。

さらに、押さえ板等搬送機構上での固定にゆるみがあったりすると、ボンディング中にリードフレームが動くことにより不具合の原因となることがあります。これらの測定にはレーザドップラ振動計をセンサとした測定システムが最適となります。

6. 測定システムの構成

LV-1710 レーザドップラ振動計をセンサとしたワイヤボンダ測定システムの構成としては以下ようになります。



7. 測定の内容

ワイヤボンダ測定システムを使用した測定例の一例として以下のような測定があります。

7-1 テスト駆動時の振動値測定（静的チェック）

ワイヤボンダでは、駆動信号をテスト入力して、ツールを振動させる機能があります。長時間使用したワイヤボンダでは、振動子やホーンに疲労が蓄積され、初期状態と違った振動をはじめることがあります。このため、新しい振動子やホーンに取り替えた際、その使用初期においてホーン先端での振動値を記録しておくこと、その後のホーン先端の振動値の変化で振動子やホーンのメンテナンスを定量的に行うことができます。とくに、駆動信号側の強度の増減に対して実際のホーン先端やツールの振動振幅が比例して増減するかどうか測定しておくことは、その後のメンテナンスに有用なデータを提供するものといえます。またワイヤボンダの導入時あるいはメンテナンス時において、振動子やホーンあるいは US 発振器をボンダメーカ純正品から専門メーカ品への変更を検討される場合、各機器の性能を比較する際の有力な検証手段となり得ます。

7-2 ツール圧着時の振動測定（動的測定）

前述したとおり、ボンディング時のツールの振動は、従来、超音波振動子の抵抗値の変化（インピーダンス）やエコーの測定結果から推測するだけでしたが、レーザドップラ振動計を使用することでボンディング中の実際のツールの振動からボンダビリティの検証が可能となります。

但し、レーザ光をボンディングに追従して当てるのが難しいため、ワイヤボンダが連続してボンディング動作をしている状況下（オートボンディング）での測定はできません。1回だけ単発的にボンディングできる機能（マニュアルボンディング）を使用することで、ボンディングの瞬間でのツールの挙動を測定することができます。

ツールを実際にチップやリードフレームに圧着させて、振動させた際の振動を測定すると、接触圧や US の違いによる振幅変調が観測されたり、リードフレームの共振周波数の関係から周波数変調（基本周波数の脇にサイドバンド周波数）が発生したりする状況が観測できます。

またツールは交換部品であるため交換作業があり、ホーンに対するツールの取付位置や固定ネジの締め付けトルク次第では、ボンディング時にツールの振幅が変化することが

あり、さらにツールの材料や形状によっても振動振幅が変化することがわかっています。

いずれにせよ、変化率の大きな測定データが得られるのはレーザドップラ方式ならではといえますが、データ取得に伴う「ボンダビリティ評価基準」の作成は、ボンディングマシン機種・事業所など個別に設定せざるを得ないため、定期的・イベント発生時等にデータ取得を行って蓄積して行く必要があります。

7-3 ツールの振動モード測定

ツールも構造物である限り、当然ながら共振周波数に起因する振動モードをもっています。とくに 60 kHz や 100 kHz 以上でツールが振動した際に、その長さ方向で複数点でのデータを測定していくことで、ツールの材質や形状の微妙な違いで振動モードがどのように変化するかを測定することが可能となります。

ツールの材質や形状を微妙に変更することでボンダビリティが変化することは一般的によく知られていますが、ツール表面や内面の仕上げとともにツールの共振周波数あるいは振動モードにより、ボンダビリティが左右されることがわかっています。このため、新しい形状や材質のツールを開発・検証する際においてもレーザドップラ振動計は有益な情報を提供してくれるでしょう。

7-4 リードフレームの共振測定

1 チップあたりの集積度の向上にともない、リードフレームも多ピン化あるいはファインピッチ化されてきています。

ワイヤボンディングに際しては、前述のように超音波によって加振されているため、リードフレームのピンが狭小化されるに従い共振現象等でボンディング中のピンの振動が他のピンに悪影響を及ぼすというケースが増加してきており、ワイヤの断線や破断という不良発生要因として注目されています。

振動を抑制する方法としては、2種類の方法が考えられます。

ひとつは、加振源の振動量を小さくしたり、リードフレームの共振周波数を外した周波数で振動させる方法であり、もうひとつはリードフレーム側の構造変更や制振材料等を使用して振動が伝搬しないように制振する方法です。

しかしながらワイヤボンダの場合、ボンディングの際の振動は必要不可欠であるため、振動量を小さくしたり周波数を変更することは事実上不可能です。よって、振動を抑制

する方法としては、リードフレームを設計変更して振動の伝搬を抑える方向で検討する必要があります。

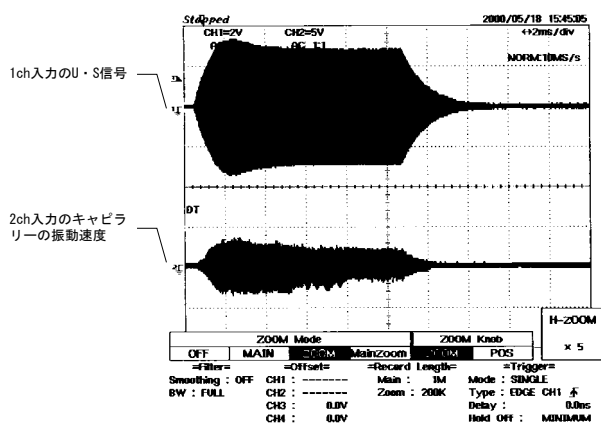
構造変更や制振材料の選択に際しては、対象となるリードフレームの材料や形態によって最適な方法が変化することが考えられ、振動テストを行いながら検討することが必要不可欠となります。

8. まとめ

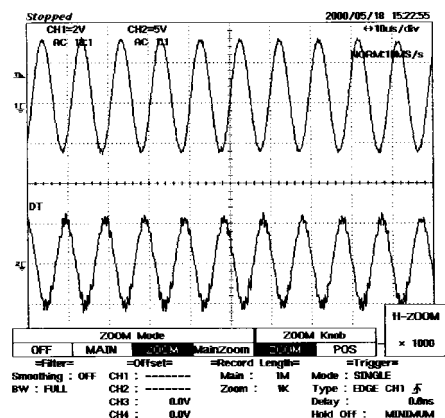
ワイヤボンディングの工程における超音波融着に関して、学術的なアプローチでの解析・検証は、一部を除いて現在まであまり行われていません。

実際の製造現場においては、ボンディングについて過去の経験則からの継続というアプローチが今もって主流であり、経験則で事なきを得ている場合も少なくありません。しかしながら、これからのワイヤボンディングには新しい材料を使用したICや多ピン・狭ピッチ化あるいはワイヤボンダ側の高速・高周波化等、不確定要素がますます増大していくことは明白であり、超音波融着に関する学術的な解析・検証は、ワイヤボンダメーカーのみならず各種デバイスを製造するデバイスメーカーにも求められてくるものと思われます。これら「ワイヤボンディングプロセスのインテリジェント化」第一歩として、レーザドップラ振動計による測定をお奨めします。

プリントアウト・データ



ズーム処理したデータ



ワイヤボンダ測定手順

1. 機器構成

- ①レーザドップラ振動計 小野測器 LV-1710
- ②XYZ ステージ付マグネットスタンド 小野測器 LV-0030 + LV-0015 + LV-0016
- ③三脚 小野測器 LV-0017A
- ④三脚取付プレート（着磁性の鉄板） 小野測器 LV-0018A
- ⑤デジタルオシロスコープ（OSC）
横河電機 DL-1640 もしくは同等の高速ストレージオシロ（1M以上メモリー搭載）
- ⑥BNC-BNC ケーブル×1，プローブ×1（機器に応じてワニ口-BNC ケーブル等）
- ⑦LV-0301 90° ミラー（リードフレームの測定時に使用）

2. 機器のセットアップ

機器を以下のようにセットします。

- ① 三脚の上に三脚取付プレートを取付、XYZ ステージ付のマグネットスタンドを固定します。
- ② LV-1710 のセンサヘッドを本体から取り出し、マグネットスタンドに取付ます。
- ③ ワイヤボンダからトランスデューサの超音波発信器※からの電圧信号を取出し、OSC の CH 1 に接続します。
※メーカーによって異なります。ボンダのマニュアル参考の事
- ④ LV-1710 からの速度出力を OSC の CH 2 に入力します。

3. センサ操作手順

- ①電源を ON にします。20 分以上のウォーミングアップを行います。
- ②キャピラリを計測したいボンディング位置にマニュアルで移動します。
- ③レーザ光をキャピラリに当て、反射レベルインジケータが緑色域で安定的に点灯するように（点滅しないように）レンズの焦点距離とマイクロステージを操作します。
この時、センサ・本体の「ERROR」が点灯もしくは点滅しないことを確認します。

※③の項目は全作業中最もテクニックを要する部分です。ボンダ本体とセンサの相対振動が計測結果に与える影響は、その振動速度の周波数成分からしてキャピラリの振動データからは観測出来ないほど軽微です。しかしボンダ、もしくは三脚を据えている床に強度が無いなど、相対的に大きく揺らぐ場合、キャピラリ円筒頭頂部にレーザ光を安定して照射する事は難しく、レベルインジケータを安定に維持して、S/N の良いデータを取得する事は出来ません。

対策として、光学除振台を三脚の下に引く事で振動の影響を軽減させる事が出来ます。

- ④キャピラリ上のレーザ焦点位置は可能な限りキャピラリ先端としますが、キャピラリの種類によっては荷重により先端がたわむことがあるため、テーパとなりはじめる位置に設定することが推奨されます。この際に重要なことは、測定のたびに焦点位置を大幅に変えるとデータの相関が取れなくなるので、ほぼ同一となるように XYZ ステージで調整します。

- ⑤速度レンジは 60kHz 以上の振動領域でしたら 1 m/s/V を選択しておきます。

※使用するレーザドップラ振動計の出力は変位よりも速度出力の使用をお奨めします。変位出力の場合、床からの低い振動変位を同時に拾いますが、振動速度の場合、キャピラリの振動速度と床の振動速度では大きく違う為、その影響がデータ上で現れません。

- ⑥フィルターは HPF・LPF ともオフの状態にしておきます。

4. オシロスコープ 仮設定手順

※実際の信号を観測して、電圧レンジなどを適切に調整して下さい。

計測はデジタルオシロを使用して US の発振波形を基準にワンショット・トリガーでレーザドップラ振動計の振動波形をメモリーし、オフラインで任意の波形の部位を拡大して解析する方法で行います。

①電源を ON します。

②表示したい波形のみ表示させる

- ・CH キー
- ・点灯

③入力カップリングを AC とする

- ・INPUT キー
- ・AC

④プローブの減衰比を設定する※

※プローブの減衰比を見て、減衰比を設定します。

- ・INPUT キー
- ・Probe
- ・1 : 1 もしくは 1 : 10

⑤電圧軸感度を最適に (2 V/div 程度) に設定する。

- ・V/DIV キー
- ・ロータリーノブ

⑥トリガモードをシングルに設定する。

- ・MODE キー
- ・SINGLE

⑦トリガレベルとトリガソースを CH 1 (0.5V 程度) に設定する。

- ・LEVEL/SOURCE キー
- ・CH 1
- ・ロータリーノブ

- ⑧トリガポジションを (-4 div) 設定する。
 - ・POSITION/DELEY キー
 - ・-4 div

- ⑨ストレージ記憶容量を 1M 以上に設定する。
 - ・ACQ キー
 - ・Length
 - ・1M

- ⑩各ボンディング時間に時間軸を (1ms/div ~ 10ms/div) 設定する
 - ・TIME/DIV ノブ

- ⑪OSC をトリガ待ちの状態にさせる。
 - ・START/STOP キー

5. ワイヤボンダのテスト発振

設定が終わったら、マニュアルでテスト発振をしてみます。その時、LV-1710 の OVER もしくは ERROR 表示が点灯しない事を確認します。OVER が点灯したら、速度レンジが低すぎるか、セッティングが悪く光量不足になっています。OSC の表示を見て、波形が片振幅で 10V を越えているようならレンジが不適切です。10V を越えないレンジに変更して行きます。

発振しても、データが表示されない様なら、スタートボタンが押されていないか、トリガレベルの設定が不適切な事などが考えられます。トリガレベルを設定しなおして、US の発振波形が表示出来る様に設定して下さい。

6. OSC解析手順

- ①波形を任意の位置で拡大表示する。
 - ・POSITION キー
 - ・ロータリーノブで拡大したい位置を画面中央にもってくる。
 - ・ZOOM キー
 - ・ロータリーノブで拡大倍率を選択する。

②スペクトル表示する。

- ・SHIFT を点灯させ、FFT キー
- ・スペクトル表示したい波形を Trace にて選択する。
- ・FFT を ON する。

③各波形をカーソル（2カ所設定可能）で読む。

- ・CURSOR キー
- ・CURSOR を ON する。
- ・ロータリーノブ

④プリントアウトする。

- ・COPY キー

参考文献

- ①波多野 孝 : 「自動車用 I C の超音波ボンディング」
 超音波テクノ Vol. 2 No. 11 ('90. 11)
- ②浜田 邦昭 : 「超音波 I C 用ボンダー」
 超音波テクノ Vol. 3 No. 4 ('91. 4)
- ③松村 勝弘 : 「I C 用超音波ボールボンダ」
 超音波テクノ Vol. 4 No. 2 ('92. 2)