

超音波フリップチップボンディング接合部の
高強度化手法に関する研究

富岡泰造

2020年9月

目次

第1章 序論

1.1. 本研究の背景	1
1.2. フリップチップボンディング	9
1.3. 超音波フリップチップボンディングの構成と課題	14
1.3.1. 超音波フリップチップボンディングの構成	14
1.3.2. 超音波接合	16
1.3.3. 超音波フリップチップボンディングの課題	23
1.4. 本研究の目的	30
1.5. 本論文の構成	31

第2章 基板電極の Au 層の厚化による Au バンプとの接合部の高強度化

2.1. 緒言	35
2.2. 実験方法	37
2.3. 基板電極の Au 層厚が接合に及ぼす影響	44
2.4. せん断強度の強化機構	49
2.5. 結言	53

第3章 ランプ状接合荷重による Au バンプと基板の Au 電極の接合部の高強度化

3.1. 緒言	56
3.2. 実験方法	58
3.3. 実験結果および考察	63
3.3.1. 接合部せん断荷重および Au バンプの巨視的な塑性変形量	63
3.3.2. ランプ状接合荷重によるせん断強度の強化機構	66
3.4. 結言	74

第4章 全域フレットング接合による Chip on Chip 接合の接合性に及ぼすトップチップとボトムチップの平行度の影響

4.1. 緒言	77
---------	----

4.2. 実験方法	81
4.2.1. 供試材	81
4.2.2. 接合方法および評価方法	83
4.3. 実験結果および考察	86
4.3.1. チップ平行度が Au バンプと Al 電極の接合に及ぼす影響	86
4.3.2. 超音波印加時の Au バンプの変形応力	94
4.3.3. 接合挙動に関する考察	96
4.4. 結言	98
第5章 垂直振動印加接合による接合部の高強度化	
5.1. 緒言	100
5.2. 実験方法	103
5.2.1. 供試材	103
5.2.2. 接合方法および評価方法	105
5.3. 実験結果および考察	109
5.3.1. 接合荷重が接合部せん断強度に及ぼす影響	109
5.3.2. 超音波振幅が接合部せん断強度に及ぼす影響	112
5.3.3. Au バンプの巨視的な塑性変形量と接合部せん断強度の関係	115
5.3.4. 接合条件の接合部せん断強度に及ぼす影響に関する考察	117
5.4. 結言	119
第6章 総括	121
関連論文	124
謝辞	125

第 1 章 序論

1.1. 本研究の背景

電子デバイスは、コンピュータや通信機器などの情報機器をはじめとして、自動車や白物家電などあらゆる機器に用いられ、個々の機器への搭載数は増加傾向にある。自動車では、多数の電子デバイスで構成された Electronic Control Unit (ECU) が搭載されている。最初に自動車に搭載された ECU は燃料噴射装置の制御用である。その後、車両挙動安定化やブレーキ制御など運転支援機能を担う ECU が数多く搭載されるようになった。車への搭載が開始された 1980 年当時では 1 台あたりの ECU 搭載数は 8～10 個程度であったが、現在の高価格車には 100 個以上の ECU が搭載されている¹⁾。冷蔵庫やエアコンなどの家庭内電気製品では、インバータ駆動するためのパワーモジュールやマイコンなどが使われている。さらに、近年では電子デバイスで構成された通信モジュールを搭載した製品が上市されている。通信モジュールを搭載した製品はネットワーク家電と称されており、Local Area Network (LAN) などのネットワークへ接続され、各種操作を遠隔地から行うことができる。今後、このようなネットワーク接続機能の搭載が一般化していくと考えられる²⁾。携帯電話端末は 600～800 個と多くの電子デバイスで構成されるが、情報端末であるスマートフォン端末では電子デバイスの搭載数は約 1,000 個へ増加している。

このように、様々な機器に既に多くの電子デバイスが搭載されている。今後、高速・大容量通信および多数端末の同時接続を可能とする通信システムの稼働などにより、機器への電子デバイスの搭載数はさらに増加すると予想される。このように増加した電子デバイスを機器の大型化を抑制しつつ機器内に納めるためには、電子デバイス自体の小型化と機器への搭載密度の向上が必須であり、これらを担う実装技術の高度化が求められている。

シリコンなどの基材に形成された電子デバイスのチップは、Fig. 1-1 に示す 4 段階の実装階層を経て機器へ搭載され、デバイスチップの電極と機器のセンサやアクチュエータなどが電氣的に接続される。第 1 階層はチップレベルである。デバイスチップの電極への接続用の突起（以下、バンプ）

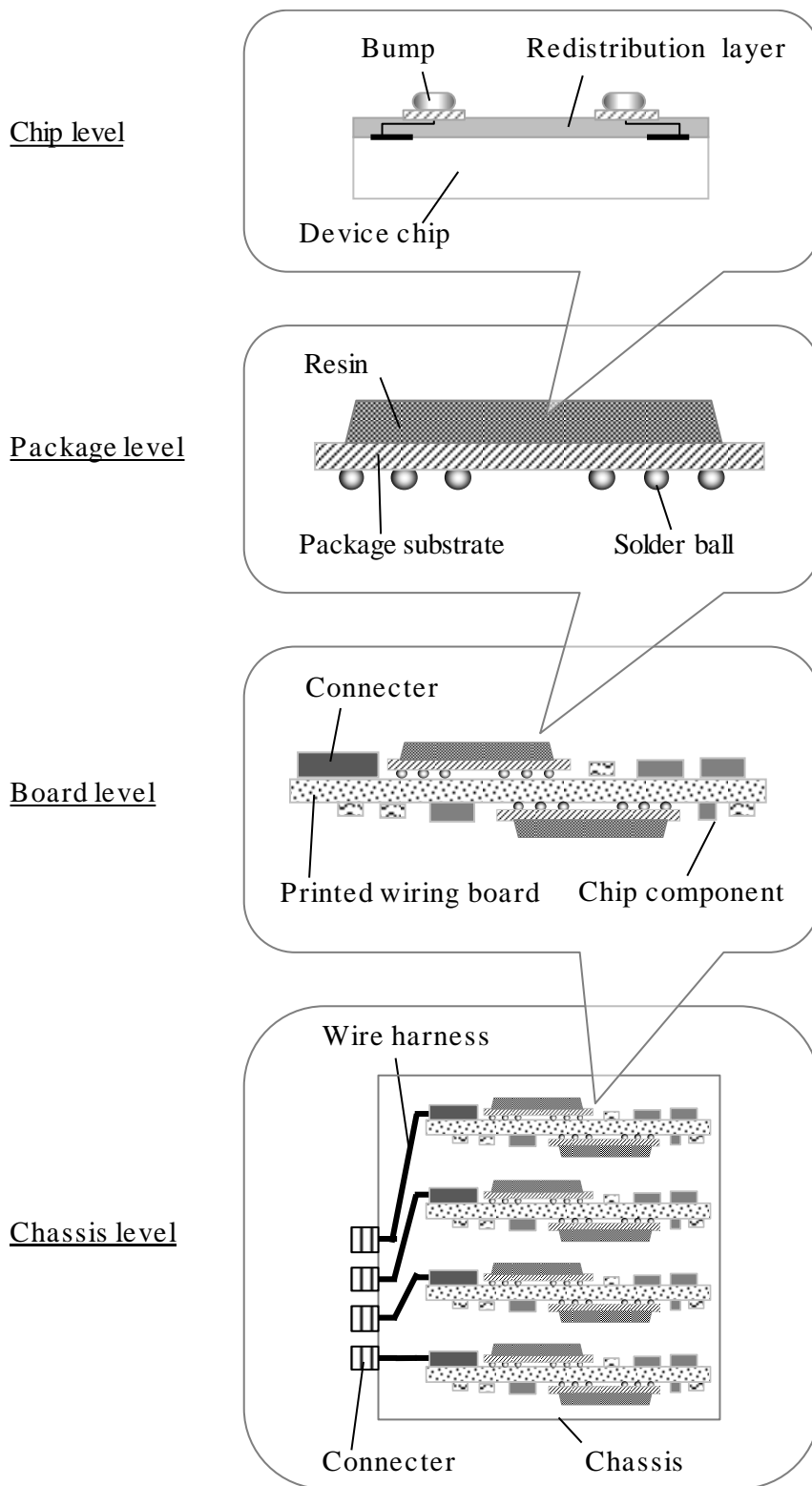


Fig. 1-1 Assembly levels of electronics.

の形成や、電極位置を変更するための配線の形成などが行われる。第2階層はパッケージレベルである。デバイスチップを配線基板などの外圍器へ搭載し、チップの電極と外圍器の電極を接続して全体を樹脂などで封止しパッケージ化する。第3階層はボードレベルである。複数の電子デバイスパッケージをコンデンサや抵抗部品などのチップ部品、コネクタと共に大型の配線基板へ搭載し、それぞれの部品の電極を配線基板の電極とはんだ付する。はんだ付は、配線基板の電極へはんだペーストをメタルマスクを用いた印刷法などにより供給し、電子部品を配線基板へ搭載した後に加熱して全点を一括ではんだ付するリフロー方式で行うことが多い。一括ではんだ付することにより接続に要する費用を削減している。第4階層は筐体レベルである。多数個の電子デバイスを搭載した大型配線基板を筐体へ収納し、ワイヤハーネスを用いて機器と接続する。この4階層のそれぞれにおいて、電子デバイスを機器へ高密度に搭載するための技術開発が行われている。本研究では、第2階層のパッケージレベルにおいてパッケージの小型化に寄与する電極間の接続技術を研究対象とした。

Fig. 1-2 に代表的な電子デバイスのパッケージの構造を示す。デバイスチップは、配線基板やリードフレームなどの外圍器にはんだや接着剤などを用いて固定される。デバイスチップの電極と外圍器の内部電極はワイヤボンディングと称される金属ワイヤを用いた方法で接続されることが

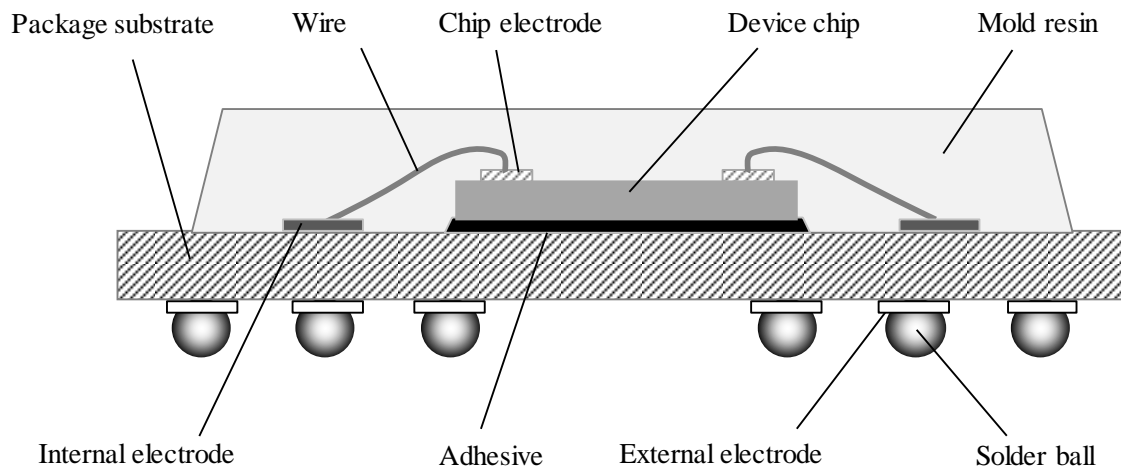


Fig. 1-2 Structure example of electronic package.

多い。金属ワイヤには例えば $\phi 15 \sim 30 \mu\text{m}$ の Au ワイヤが使用される。デバイスチップ周囲は樹脂などで封止される。配線基板と接続する外圍器の外部電極は露出するか、あるいは Fig. 1-2 に示すようにはんだボールが接合される。

デバイスチップをパッケージ化する目的の一つはデバイスチップおよび接続部の保護である。デバイスチップは、Si などの脆性材料を基材にしており、損傷し易い。また、デバイスチップの接続部の大きさは数十 μm レベルであり、さらに年々微細化している。この微細化の目的は製造費の削減である。デバイスチップメーカーは、デバイスチップの内部配線を微細化してチップ外形寸法を縮小し、1 ウェハ当りの収率を増加させる。チップ外形寸法の縮小に伴い電極間隔および電極外形は微細化される。このような電極と金属ワイヤの微細な接続部は、露出した状態では破損する可能性が高い。これらの理由により、デバイスチップをパッケージ化しない場合には、第 3 階層および第 4 階層の組立において、デバイスチップの繊細な取り扱いが必要になる。その結果、第 3 階層および第 4 階層の組立の生産性が低下してしまう。デバイスチップのパッケージ化は費用を要するが、パッケージ組立以後の階層の工程費は下がり、電子機器の全体の組立費は低減される。パッケージ化のもう一つの目的は電極間隔の拡大である。第 3 階層で用いる一般的な大型配線基板の電極間隔は数百 μm である。大型配線基板の電極間隔が大きい理由の一つは、パッケージ端子と配線基板のはんだ付工程における位置ずれに対する許容量を大きくするためである。はんだペーストを使用するリフローはんだ付では、はんだペーストの印刷位置やパッケージの搭載位置などにばらつきが有る。さらに、パッケージの搭載によりはんだペースト自身に変形する。このため、デバイスチップレベルの数十 μm の電極間隔では隣接する電極同士が短絡し易い。そこで、パッケージの外圍器の内部電極と外部電極の間で電極間隔を拡大する。

以上述べたように、電子デバイスのパッケージ化は電子機器組立において生産性および接続信頼性上の利点が多い。そのため、抵抗部品やコンデンサなどを除き、ほとんどの電子デバイスはパッケージ化される。しかし、電子デバイスをパッケージ化するとデバイスチップよりも外形寸法は

拡大する．電子デバイスパッケージには，外形寸法を可能な限り縮小して電子デバイスチップからの外形寸法の拡大量を抑えることが求められる．

電子デバイスパッケージの外形寸法を縮小する方法の一つに，デバイスチップ電極と外囲器電極の接続にフリップチップボンディングを適用することが挙げられる．Fig. 1-3 に従来のワイヤボンディングとフリップチップボンディングのチップ搭載領域の比較を示す．ワイヤボンディングでは，デバイスチップの電極面と外囲器の電極面は共に上向きである．電極同士は Au や Al, Cu などの金属ワイヤで接続される．外囲器の内部電極はデバイスチップの外側に位置する．ワイヤボンディングでは，ワイヤとチップ端が接触しないようにワイヤをガルウィング形状に成形する．極端なワイヤ成形はワイヤ自体の破損を起こすため，デバイスチップの電極と外囲器の内部電極にはある程度の距離が必要である．そのため，電子デバイスチップの搭載面積は，チップ外形に A の距離を足した領域の面積となる．A の距離はチップ自体の面積にはあまり依存しないため，小型のデバイスチップではチップ面積に対する搭載面積の比率は大きくなる．フリ

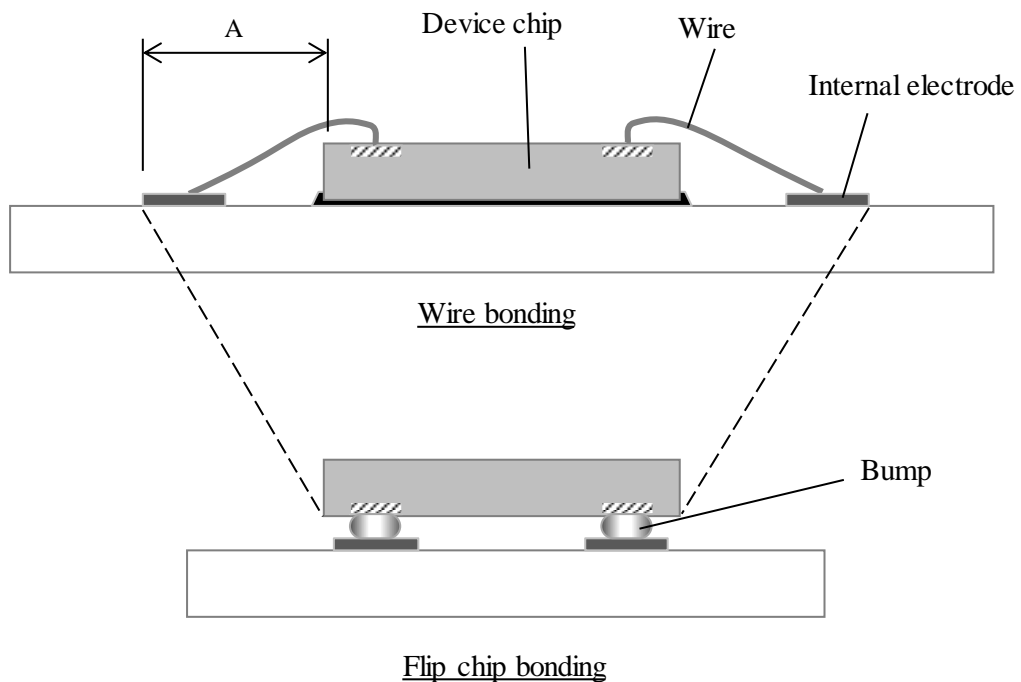


Fig. 1-3 Comparison of chip mount area between wire bonding and flip chip bonding.

ップチップボンディングは、デバイスチップの電極と外圍器の内部電極を対向させ、いずれかの電極へ形成したバンプを介して電極同士を接続する方法である。接続部はすべてチップ直下であるため、搭載面積はチップ面積と等しくなり、ワイヤボンディングを用いる場合よりもパッケージ外形寸法を縮小できる。前述したように、チップ面積が小さい場合にはチップ面積に対する搭載面積の比率が大きいため、フリップチップボンディングによるパッケージの縮小効果は大型のデバイスチップよりも大きくなる。なお、フリップチップボンディングにはパッケージの小型化に加えて電極同士の接続長が短くなる特長がある。これにより接続部のインダクタンスが減少し、高周波信号の伝送特性が向上する³⁾。また、ワイヤボンディングではワイヤ同士の交錯を防ぐためデバイスチップの電極を Fig. 1-4(a)に示すペリフェラル型に配置する必要がある。これに対して、フリップチップボンディングでは Fig. 1-4(b)に示すグリッドアレイ型で配置できる。グリッドアレイ型配置では電極間隔を縮小すること無く電極数を増やせる。増加した電極を電源に振り分けることで電源供給を安定化できる。このように、フリップチップボンディングにはワイヤボンディングと比較してパ

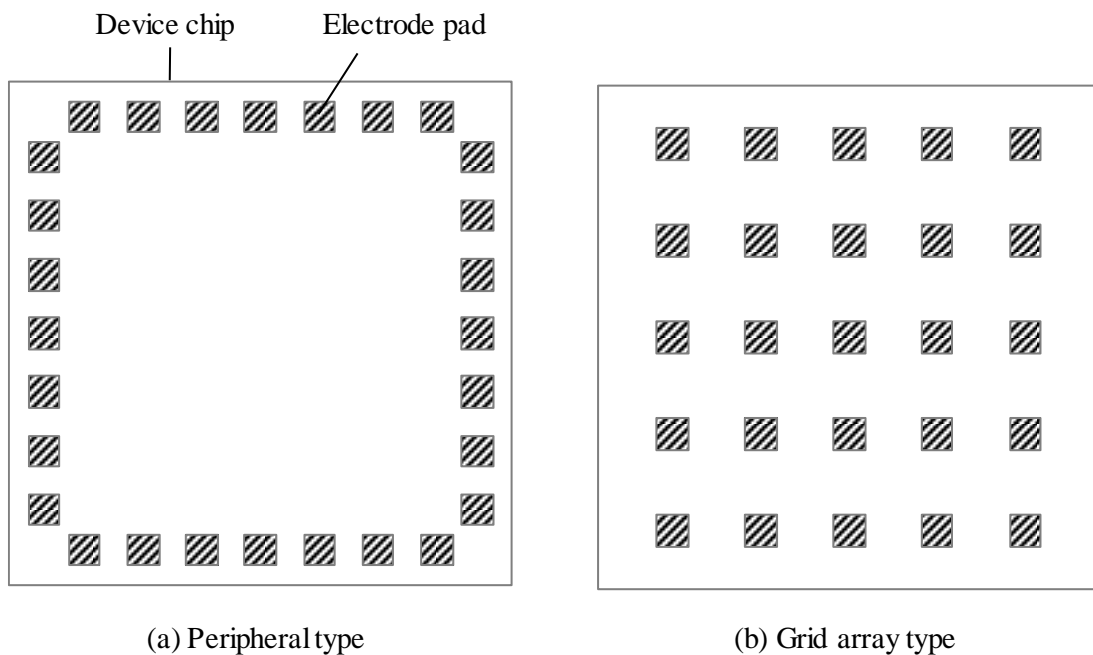


Fig. 1-4 Electrode pad layout.

パッケージ小型化と性能向上の利点がある。しかし、バンプ形成工程が必要になることや、デバイスチップを上下を反転させ外圍器に対向させて位置合わせを行う高価な設備が必要になるなどワイヤボンディングよりも接続に要する費用が高くなる傾向が有る。このため、当初は性能面での利点が大きく、デバイスチップ自体が高価で接続費用を吸収し易い **Central Processing Unit (CPU)**や **Graphics Processing Unit (GPU)**などの高価な **Large Scale Integration (LSI)**チップに用いられてきた。このような高価な電子デバイスは高機能であり、数百から数千個の多数の電極を備えている。また、チップ外形寸法は数十 mm²レベルと大きい。フリップチップボンディングでは、この多数の電極を一括で接続する。そのため、バンプの高さやチップと基板電極の距離などのばらつきを吸収し、全電極を確実に接続できる比較的費用の高い接続方法が用いられてきた。

電子機器には、高価な **LSI** チップの他に、単機能半導体デバイスや高周波フィルタなど、安価で電極数が少なく小型の電子デバイスも多数搭載されている。これらの電子デバイスへフリップチップボンディングを適用すれば高価な電子デバイスと同様にパッケージを小型化できる。しかし、高価な電子デバイス向けに開発された接続方法は、安価な電子デバイスに対しては費用が高く、適用が難しい。

超音波フリップチップボンディングは、超音波接合によりバンプと電極を直接接合する接続方法である。バンプには **Au** バンプが使用されることが多い。この接続方法には、接合時間が短く、フラックスや接着剤などの接続副資材が不要である特長がある。これらの特長により接続に要する費用が低く、安価な電子デバイスにも適用可能である。また、体積抵抗率ははんだの 1/6 程度である **Au** のバンプを直接電極と接合するため、バンプ接続部の電気抵抗が低い。この接続方法はこれまでに高周波信号のフィルタである **Surface Acoustic Wave (SAW)**デバイス⁴⁾や **Light Emitting Diode (LED)**、**Micro Electro Mechanical System (MEMS)**チップ⁵⁾、さらに、2次電池の充放電制御 **Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)** などへ適用されてきた。これらの電子デバイスは、携帯電話端末や車載機器など小型であることを求められる電子機器に搭載されるため、パッケー

ジの小型化への要求は強い。したがって、安価な電子デバイスのパッケージの小型化に有効な手段である超音波フリップチップボンディングの研究の意義は大きい。

次節以降でフリップチップボンディングを概説し、超音波フリップチップボンディングにおける課題と本研究の目的を述べる。

1.2. フリップチップボンディング

フリップチップボンディングは、1960年代に Integrated Circuit (IC)の電極とセラミック配線基板の電極を接続するために開発された⁶⁾。バンプは融点 332 °Cの高融点はんだである。ICチップの Al 電極の上に境界金属層と Pb 層, Sn 層をそれぞれ蒸着し, Pb 層と Sn 層を熔融させ Pb と Sn の組成を均質化してはんだバンプを形成する。次にはんだバンプへフラックスを塗布し, セラミック配線基板へ搭載する。全体を 360 °Cへ加熱してはんだバンプを熔融させ, セラミック配線基板の電極へはんだ付する。境界金属層によりはんだの濡れ広がりを制限して熔融時のバンプ潰れを防止することが一つの特徴であり, **Controlled Collapse Chip Connection (C4)**と名付けられた。バンプに高融点はんだを使用するのは, セラミック配線基板を他の配線基板へはんだ付する際に, バンプ接続部が再熔融することを防ぐためである。C4 は, バンプ形成からセラミック配線基板の電極との接合までの工程数が多い。また, はんだ付温度が高く, 樹脂を基材とした安価なプリント配線基板には適さない。このため, 当初は大型汎用コンピュータ向けなど限られた製品向けに用いられた。その後, 融点が 183 °Cと低い Pb-Sn 共晶はんだをバンプに用い接続部を樹脂で封止する技術や, はんだ以外の低温接合技術などが開発され, 安価なプリント配線基板へのフリップチップボンディングが行えるようになり, パソコンや携帯電話端末などへ適用範囲が拡大した⁷⁾。

Fig. 1-5 に, これまでに開発された主なフリップチップボンディングの接続方法を示す。バンプと電極の導通を得る原理は, 液相接合式と接触式, 固相接合式の 3 種類に分類される。

液相接合には前述の C4 の他に, バンプを金や銅, 高融点はんだなどで形成して低融点はんだで接合する **Other Metal Bump / Flip Chip Attach (OMB / FCA)**がある⁸⁾。いずれの方法もバンプと電極の間の真実接合面積が広く接合部の電気抵抗は低い。はんだ付プロセスは予備加熱と本加熱を連続して行い, リフロー炉で加熱する場合には 5~10 min 程度の時間を要する。

	Liquid phase bonding (Soldering)		Mechanical contact & adhesion			Solder phase bonding	
	C4	OMB	Conductive Paste	ACF ACP	NCF NCP	Thermo- compression	Ultrasonic
Bump	Solder	Au, Cu, Solder	Au	Au		Au	Au
Electrical resistance	Low	Low	High	High		Low	Low
Process temp.	360 °C	150~ 260 °C	80~ 200 °C	150~200 °C		300~ 400 °C	~200 °C

Fig. 1-5 Comparison of flip chip bonding methods.

接触式はバンプと電極を接合せず、直接あるいは中間材を介して導通を得た状態にして接着剤で固定する方法である。この方法では導電性接着剤や異方性導電接着剤などを用いる。導電性接着剤は、エポキシ樹脂などの熱硬化性樹脂へ Ag などの金属のフィラーを混合したものである。この接着剤を金バンプへ塗布し、配線基板の電極へ接触させて加熱硬化する⁹⁾。加熱温度は 80~200 °C である。加熱時間には、数 min から 120 min と接着剤の種類による幅がある。熱硬化性樹脂の硬化収縮により金属フィラー同士および金属フィラーと基板、バンプの接触が密になり、バンプと配線基板電極の導通が確保される。異方性導電接着剤は、接着剤中に球状の導電粒子を分散させたものである。半硬化フィルム状のものは Anisotropic Conductive Film (ACF)、ペースト状のものは Anisotropic Conductive Paste (ACP) と呼称される。導電粒子には、プラスチック球の表面を Au などの金属膜で被覆したものや Ni 球などが用いられる。ACF では、Fig. 1-6 に示すように配線基板へ ACF を仮接着し、バンプ付きのデバイスチップを位置合わせして加圧・加熱する。加圧により配線基板電極とバンプの間に導電粒子が挟まり導通が得られる¹⁰⁾。接着剤の硬化により電極／導電粒子／バンプ間の接触を維持する。加熱温度は 150 °C、時間は 20 s 程である。バンプおよび配線基板の両方が接触する部分ではバンプと配線基板の間に

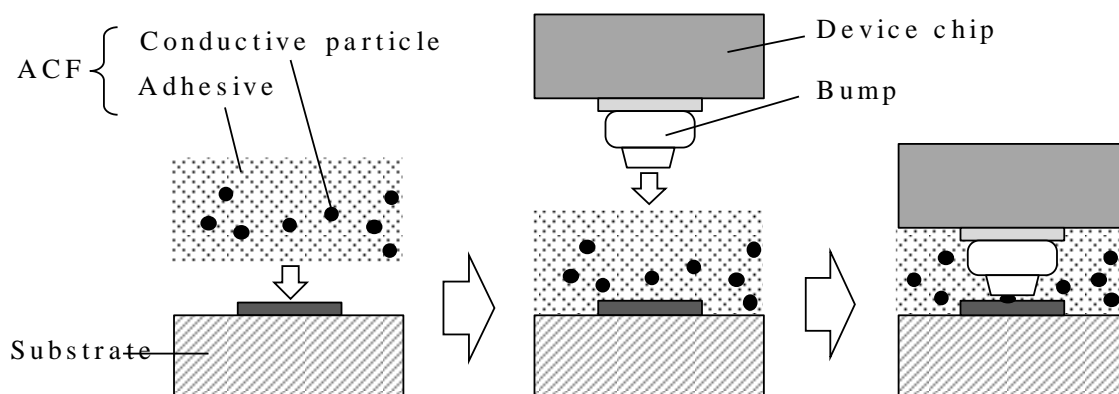


Fig. 1-6 Procedure of flip chip bonding using ACF.

導電粒子が挟まれて導通が得られるが、それ以外のところでは導通せず、隣接電極の短絡が生じ難い。微細間隔接続に適しており、液晶駆動 IC のフリップチップボンディングに用いられることが多い。異方性導電接着剤のベース接着剤のみを用いたものは、ペースト状のものが Non Conductive Paste (NCP)、フィルム状のものが Non Conductive Film (NCF) と呼称される。この接着剤ではバンプと配線基板電極を直接接触させ、ACF、ACP と同様に接着剤の硬化収縮により接触状態を保つ。これら各種接着剤を用いた方法は、比較的低温で電極間を接続できるが、バンプ、導電粒子、電極のそれぞれの接触界面における真実接触面積は少なく、接続部の電気抵抗値は他の接続方法と比較して大きい。

固相接合には、熱圧接と超音波接合がある。いずれの場合もバンプを電極へ加圧し、接合面を塑性変形させることで酸化膜や汚染層などの接合阻害物を破壊し、露出した清浄面同士を接触させて接合する。バンプは変形能が高く、表面が酸化し難い Au バンプが多用される。熱圧接は接合温度が 300~400 °C と高く、接合時間は 10 s 程度を要する^{11,12)}。超音波接合は熱圧接よりも低温の 200 °C 以下の接合温度が可能である。また、超音波の印加時間は 0.5 s 程度と短く、様々な接続方式の中で最も生産性が高い。また、バンプと電極を直接接合するため導電性接着剤やフラックスなどの副資材が不要であり、電極間の接続に要する費用が低い。この特長から、SAW デバイスなどの小型電子デバイスに適用されたが、近年は電極数が

多い大型 IC でも電極間の接続費用の削減を目的として開発が行われている¹³⁻¹⁷⁾。Au バンプの形成方法にはめっき法とスタッドバンプ法がある。超音波フリップチップボンディングではめっきバンプよりも変形能が高いスタッドバンプを用いることが多い。

Fig. 1-7 に Au スタッドバンプの形成工程を示す。φ15~30 μm の Au ワイヤをキャピラリと称されるセラミック製の円筒の中へ通し，Au ワイヤをキャピラリ先端から数 mm 垂らす。電気トーチから Au ワイヤ先端へ放電し，Au ワイヤを溶融してボール部を形成する。次にボールをキャピラリで把持して電極へ加圧し，超音波を印加して接合する。最後に Au ワイヤを上方へ引張り切断する。Fig. 1-8 に Au スタッドバンプを示す¹⁸⁾。

Au スタッドバンプは，ボールがキャピラリ先端で押しつぶされた下段と，ボール部の一部がキャピラリの開口部で成形された中段と，ワイヤが切断時に変形した上段の 3 段構造になる。上段から下段にかけて徐々に径が大きくなるため，直方体に近いめっきバンプよりも，巨視的な塑性変形時の電極との接合面積の変化が大きい。ボール部は Au ワイヤを溶融させた後に自然空冷で凝固するため，Au 結晶粒が元のワイヤよりも大きくなる。Fig. 1-9 に純度 99.99 mass% の 3 種類の Au ワイヤの先端に形成されたボール部の結晶組織を示す¹⁹⁾。これらの Au ワイヤは添加元素と調質焼鈍条件が異なるが，いずれのワイヤでもボール部およびボール部に近いワイヤ部の Au の結晶粒が各図の右端の元のワイヤ部と比較して大きくなっている。

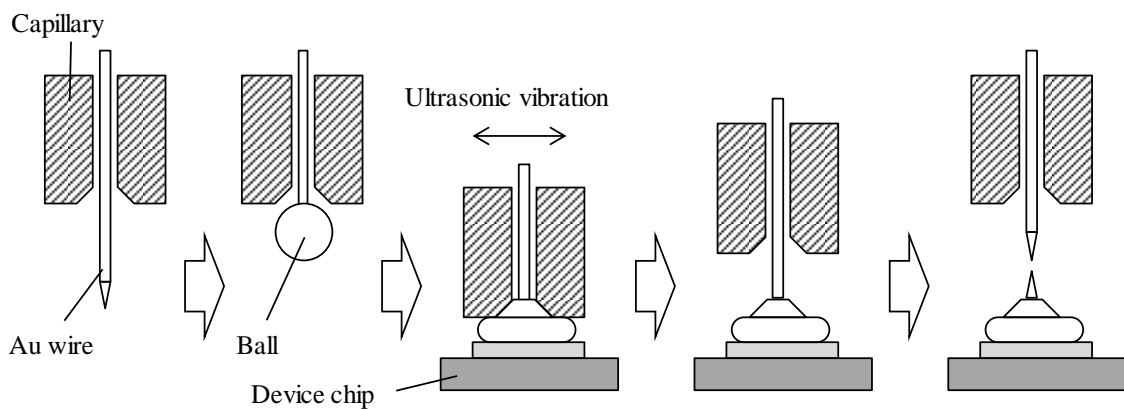


Fig. 1-7 Formation procedure of Au stud bump.

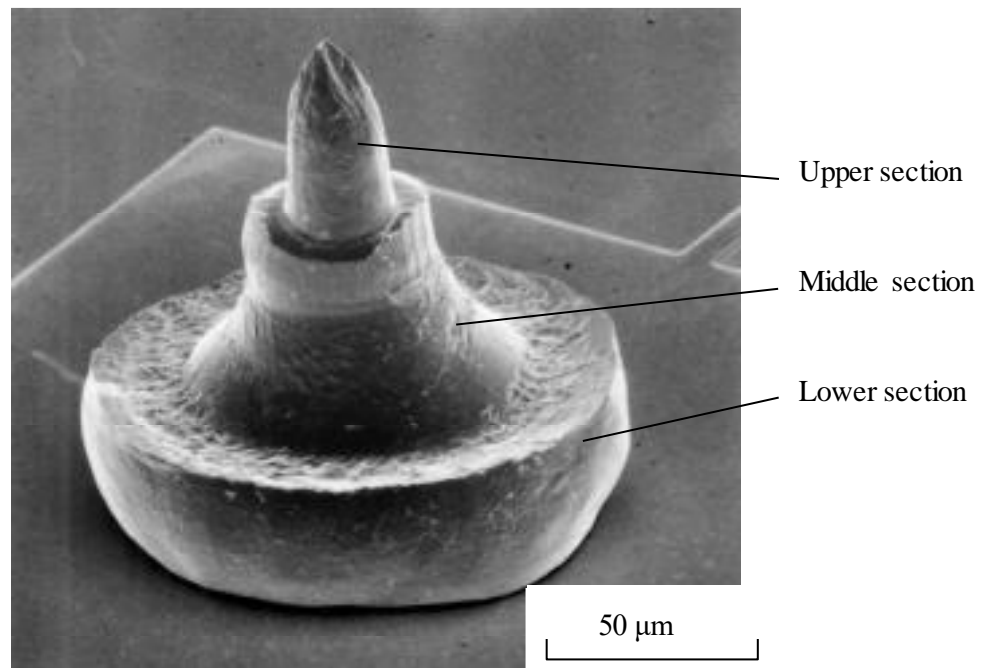


Fig. 1-8 Au stud bump¹⁸⁾ (Captions were added by author).

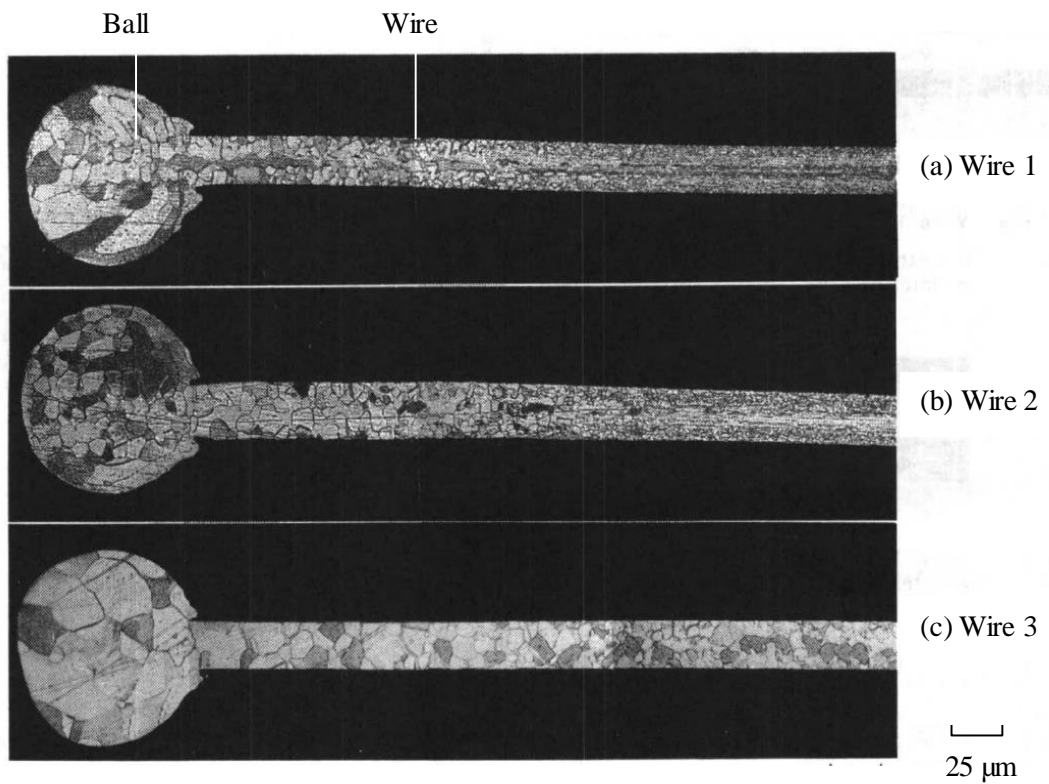


Fig. 1-9 Microstructures of Au wires and Au balls¹⁹⁾ (Captions were added by author).

1.3. 超音波フリップチップボンディングの構成と課題

1.3.1. 超音波フリップチップボンディングの構成

Fig. 1-10 に超音波フリップチップボンディング装置の構成を示す。装置は超音波発振器や超音波ホーン、接合ツール、加圧機構、ワークステージなどで構成される。超音波の振動方向は基板の接合面と平行にするのが一般的であり、超音波ホーンはワークステージ上面と平行になるよう横向きで加圧機構へ設置される。超音波ホーンの端部に装着された超音波振動子へ交流電圧を印加すると超音波の縦波が発生する。縦波は超音波ホーンを伝播し、振動子と反対側の端部に装着した接合ツールにおいて横波へ変換される。使用する超音波の周波数は 40～60 kHz が多い。

超音波フリップチップボンディングの手順を以下に記す。配線基板などの外圍器を所望の温度に昇温したワークステージへ搭載し、負圧吸着すると共に機械式クランプで固定する。次に、バンプを形成したチップをバンプ面を下向きにして接合ツール先端に吸着し、配線基板の電極とバンプの位置を合わせる。そして、接合ツールでチップを配線基板へ加圧し、所望の接合荷重において超音波を発振する。

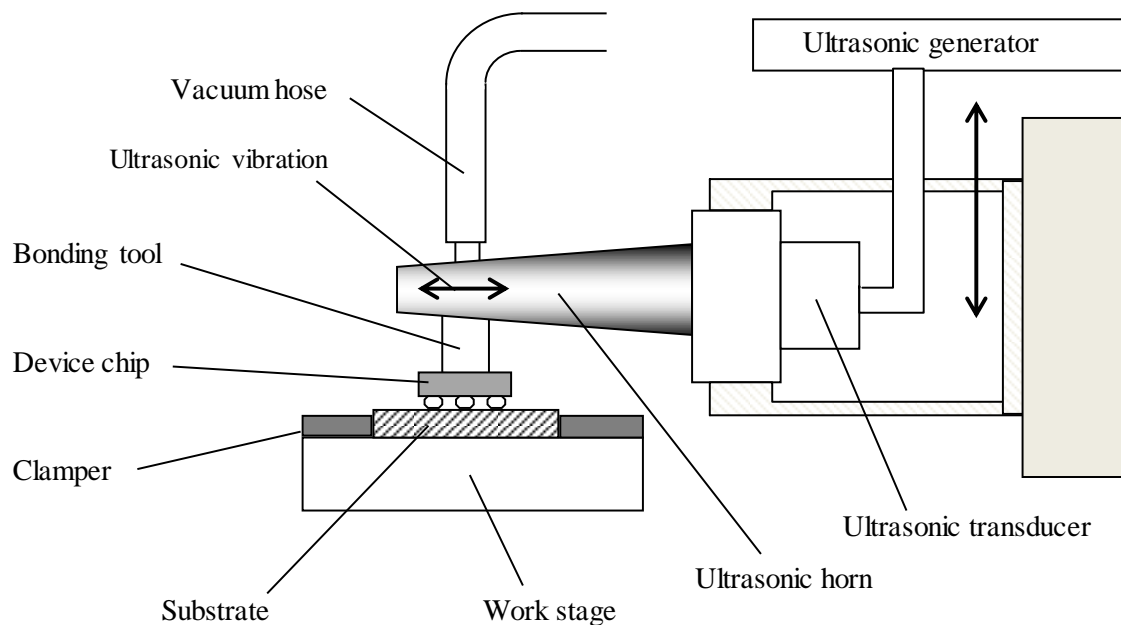


Fig. 1-10 Ultrasonic flip chip bonder.

接合荷重と超音波出力のプロファイルの例を Fig. 1-11 に示す。接合荷重および超音波出力は一定に保持することが一般的である。接合ツールの加圧面は平坦であり、超音波は加圧面とチップ裏面の間の摩擦力によってチップへ伝達される。超音波はチップから bumps と配線基板の電極の接合面へ伝わり bumps と電極が接合する。接合ツールとチップ裏面の摩擦力は接合ツールおよびチップ裏面の表面性状の変化により変動し接合ばらつきの原因となる。摩擦力の変動を嫌い、Fig. 1-12 に示すようなチップを拘束する接合ツールを用いる場合もあるが、チップ角部が損傷し易くなる課題があり、加圧面が平坦な接合ツールを使用することが多い。

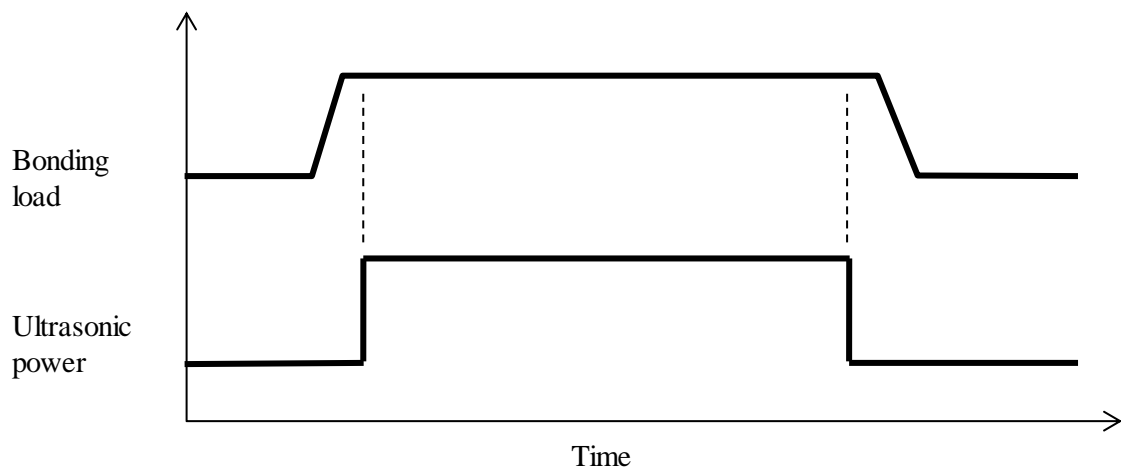


Fig. 1-11 Profiles of bonding load and ultrasonic power.

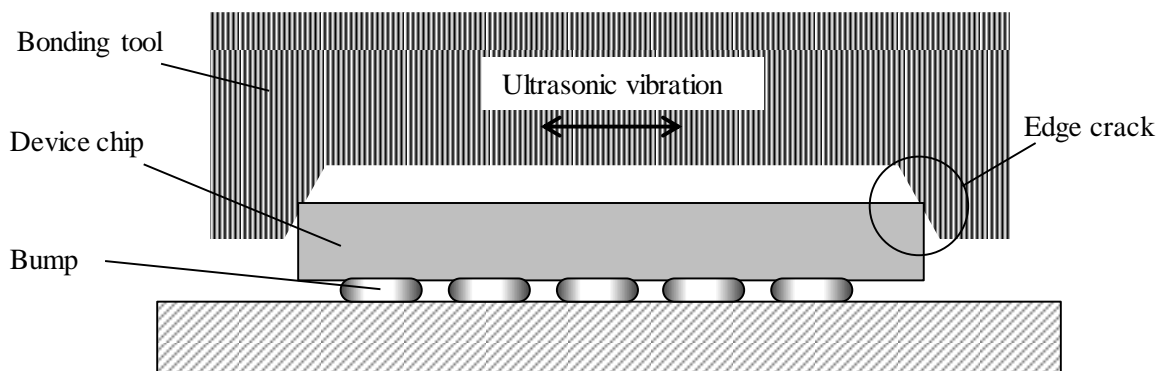


Fig. 1-12 Bonding tool having chip holding shape can cause chip edge crack.

1.3.2. 超音波接合

超音波接合は、金属同士を接触させて加圧し、接触面へ超音波を印加する固相接合方法である。加圧のみで接合する圧接と同じく、接合面の微視的な塑性変形により金属表面を覆っている酸化膜や有機付着物などの接合阻害物を破壊し、露出した清浄面同士を密着させることで接合する。Fig. 1-13 に、圧接における接合面の微視的な塑性変形による金属同士の接合過程の模式図を示す²⁰⁾。通常の金属の表面には微小な凹凸があり、金属同士を接触させると、最初は Fig. 1-13(a)に示すように複数個所での点接触となる。金属同士を加圧すると、荷重が点接触部に集中して点接触部は塑性変形する。圧接では加圧を継続することで金属のクリープ変形が起こり、個々の点接触部の塑性変形量が増えると共に接合面における塑性変形箇所が増え、接合面における真実接触面積が増加する。

電子デバイスの電極材料に多く用いられる Al には、表面に Al_2O_3 を主成分とする厚さ数 nm の自然酸化膜が形成されている。 Al_2O_3 の破壊靱性値は約 $5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であり、Al の約 $50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ よりも低い²¹⁾。破壊靱性値は延性と相関があり、延性が低い材料は破壊靱性値も低くなる。Al のように母材と酸化膜の破壊靱性値の差が大きな金属では、外力により生じる母材の変形に酸化膜が追従できない。その結果、Fig. 1-13(b)と Fig. 1-13(c)に示すように、酸化膜にき裂を生じて清浄面が露出する。バンプおよび電極の材料となる Au は、自然酸化膜が無く、表面には有機化合物や硫黄化合物などが付着している²²⁾。これらの付着膜は Au に強固に付いておらず、外力により容易にき裂を生じて Au の清浄面が露出する。Fig. 1-13(d)に示すように、清浄面の露出部が重なった部分で母材が流動して接触し、接合する。このようにして接合した部分が真実接合部である。き裂の幅が大きく、数が多いほど真実接合部の面積は増加する。このき裂は金属の塑性変形により生じるため、接合面の微視的な塑性変形量を増加させれば真実接合面積および接合部のせん断荷重は増加する。

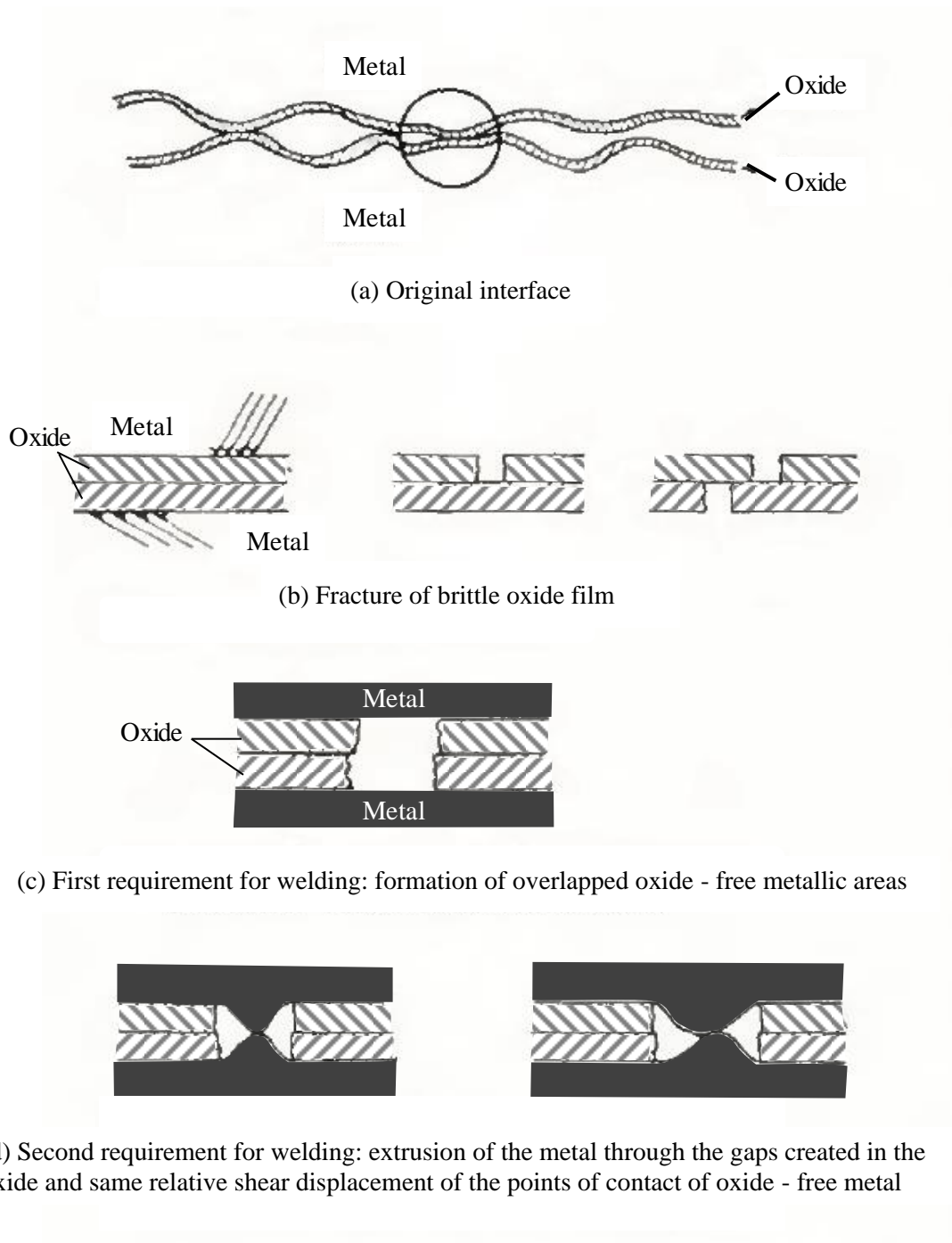


Fig. 1-13 Schematic illustration of pressure welding process²⁰⁾.

また、Au 細径ワイヤの先端に Au ボールを形成し、Au ボールを Al 電極へ熱圧接するワイヤボンディングでは、Fig. 1-14 のような接合面の塑性変形機構が示されている²³⁾。Au のすべり変形によりボール表面に凹凸が形成される過程で Al 電極の酸化膜が破壊され、Al の清浄面と Au の清浄面が接触して接合する。

圧接において接合面へ超音波を印加すると、低温、かつ、短時間で金属同士を接合できる。超音波印加の第 1 の作用は、接合面における微小距離の往復すべりの発生である。通常、金属同士の超音波接合では接合面に平行な振動方向の超音波を印加する。超音波により接合面にはせん断力が加わり、接合面において金属材料の微小距離の往復すべりが発生する。このような微小距離の往復すべりはフレットイングと呼称され、フレットイング摩耗と呼称される表面損傷を起こすことが知られている。超音波接合においては、この表面損傷は接合面の微視的な塑性変形による金属表面の接合障害物の破壊である。接合に用いる超音波の周波数はおおよそ 20 kHz から 200 kHz で、振動振幅は数 μm である。このような高い周波数のフレットイングが金属同士の接合面で発生することにより、短時間で接合障害物が破壊され接合できる。

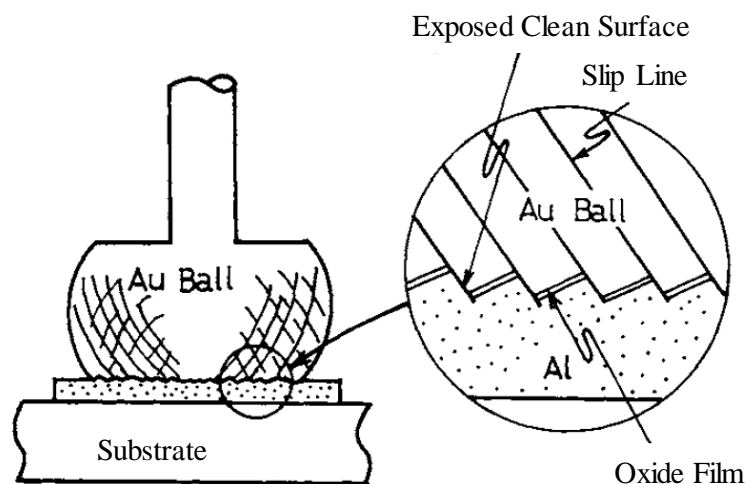


Fig. 1-14 Schematic illustration of the breakage of Al oxide film by plastic deformation at Au-Al interface²³⁾.

超音波印加の第2の作用は、金属の変形応力の低下である。この変形応力の低下は Blaha 効果と呼称されている²⁴⁾。変形応力の低下により接合面における微視的な塑性変形量は増加する。なお、大型の金属部材同士を高い接合荷重と大振幅の超音波を用いて接合する場合には、接合面が摩擦熱により昇温する作用もあり、昇温による金属の軟化と原子拡散の促進が接合へ寄与する。しかし、Au バンプのような微小物の接合では、摩擦熱による昇温は 7 °C程度であることが報告されており²⁵⁾、接合への影響は小さい。

Fig. 1-15 に Au バンプと電極の超音波接合における変形挙動の模式図を示す。Au バンプは接合荷重により巨視的に塑性変形し電極と接触する。このとき、Au バンプと電極は接合面で微視的に塑性変形する。しかし、接合温度が 200 °C程度で、かつ、例えば 1 s 程度の短時間では Au バンプと電極はほとんど接合しない。したがって、この時点の接合面での微視的な塑性変形では、接合に至る量の塑性変形が起きていないと言える。超音波が印加されると、Au バンプの変形抵抗が減少して巨視的な塑性変形が進み、Au バンプと電極の接合面が拡大すると共に接合に至る。

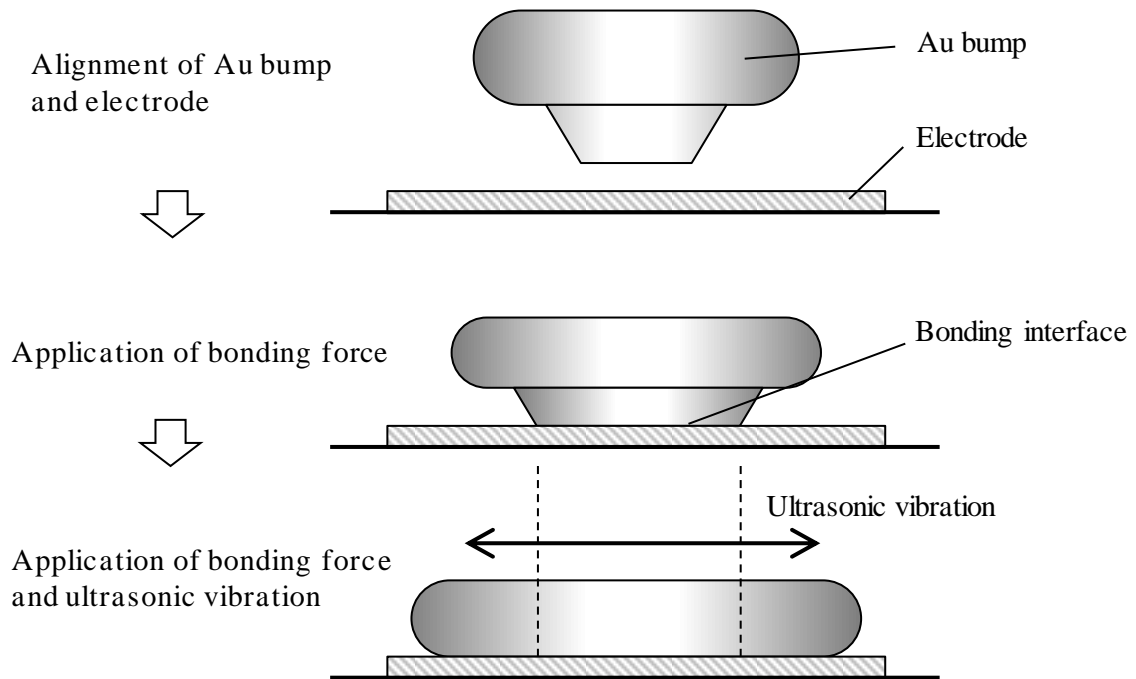


Fig. 1-15 Schematic illustration of macroplastic deformation of Au bump.

Fig. 1-16 に高橋による超音波印加時の Au バンプ各部の変位速度の計算結果を示す²⁶⁾。矢印は変位速度ベクトルを表している。超音波は図の上から Au バンプに印加され、Au バンプの下面が接合面である。超音波の振動方向は接合面と平行であり、計算結果は右向きに変位した状態のものである。Au バンプと電極の間の摩擦力により、Au バンプ内の変位速度は一樣にならない。Au バンプ上部の変位速度は高く、下部は低い。また、Au バンプの外周部の変位速度は高く、中央部は低い。すなわち、超音波印加時に Au バンプは巨視的にせん断変形する。また、接合面へ印加されるせん断力は接合面において均等ではなく、接合面の外周部に集中する。

超音波による Au バンプのせん断力が Au バンプと電極の接合面の摩擦力より大きい場合には、Au バンプと電極の接合面の全域でフレットイングが起こる。フレットイングの発生により接合面におけるせん断力の集中は緩和される。フレットイングを伴いながら、Au バンプの巨視的な塑性変形により接合面が拡大し、接合面の全域に島形状の真実接合部が分散して形成される。本研究ではこの接合を全域フレットイング接合と呼称する。Horibe らは、ワイヤボンディングにおいて Au ボールを Al 電極へ加圧した後に接合荷重を下げることで Au ボールと Al 電極の間の摩擦力を減ら

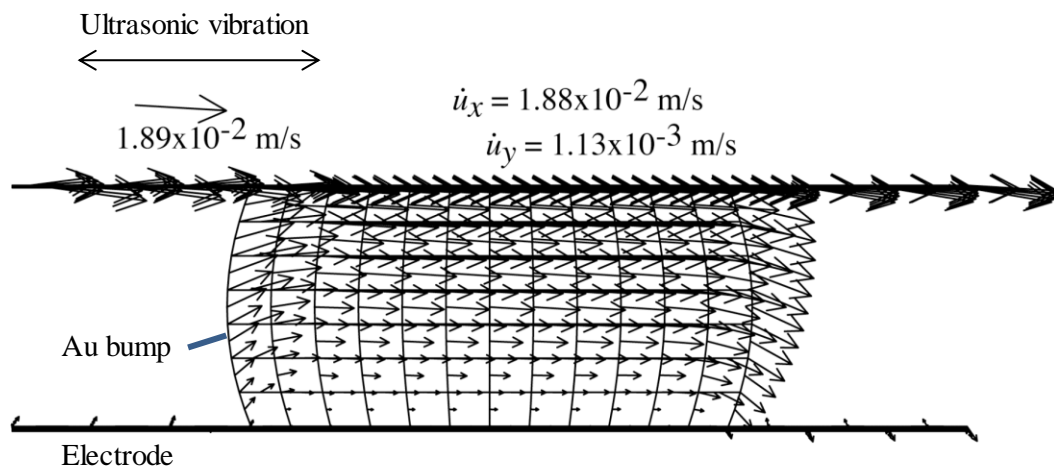


Fig. 1-16 Calculation results of displacement vectors of nodal points for barrel bump. The allows express the displacement rate vectors²⁶⁾ (Captions were added by author).

Ultrasonic amplitude: 50 nm

Ultrasonic frequency: 60 kHz

し、フレットング接合を行う方法を提案した²⁷⁾。

超音波による Au バンプのせん断力が Au バンプと電極の接合面の摩擦力より小さい場合には、接合面の全域でのフレットングは起こらない。超音波印加前の接合面は、ほぼ固着域となり、接合面端部へのせん断力の集中が助長された状態で接合面は拡大していく。Fig. 1-17 に Watanabe らが Au バンプと Al 電極の超音波接合において、接合中に Al 電極に生じるひずみ量を測定した結果を示す²⁸⁾。φ100 μm の Au バンプと Al 電極の接合面では、鉛直方向のひずみ量は小さく、水平方向のひずみ量は中心位置

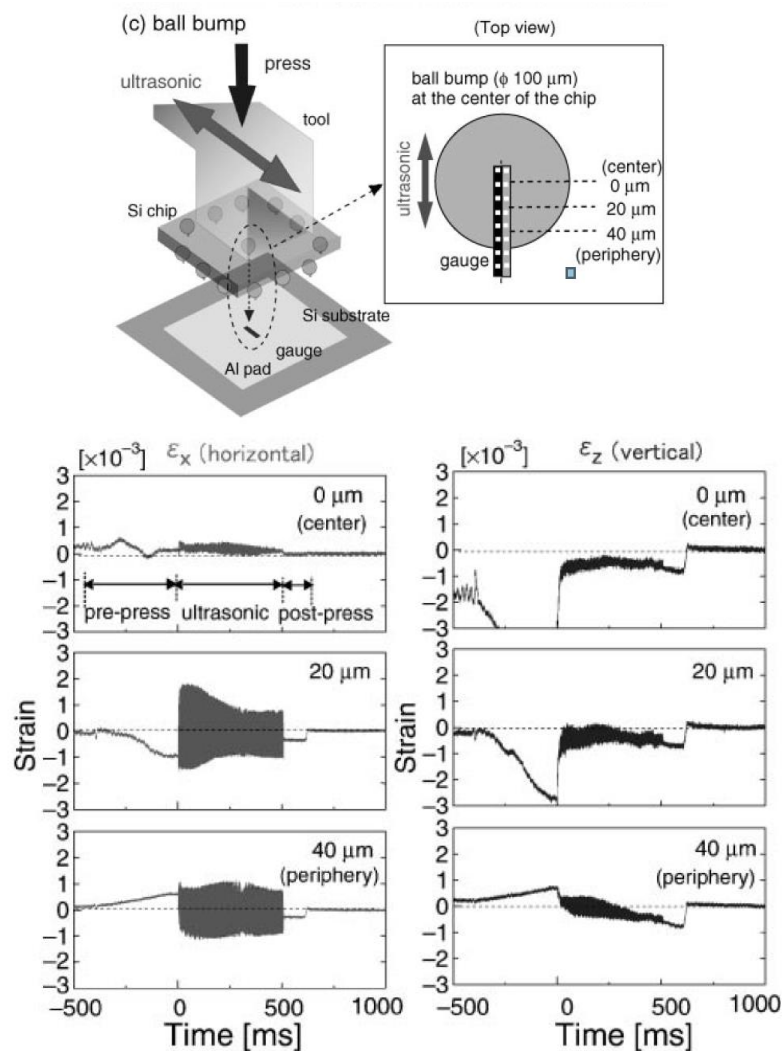


Fig. 1-17 Strain in three positions of Al electrode during ultrasonic flip chip bonding measured by using strain gauge under Al electrode²⁸⁾ .

で小さく中心から 20 μm と中心から 40 μm の位置では大きい。この結果は、超音波によるせん断力が接合面の外周部に集中することと、接合面の中央部に付加されるせん断力が小さいことを示している。接合面の拡大過程において、接合面の外周部は中央部と比較して大きく伸縮する²⁹⁾。この伸縮により、Au バンプおよび電極の表面で微視的な塑性変形が生じ、表面の接合阻害物層にき裂が生じる。接合面の外周部では、超音波による両振りのせん断力が加わって局所的なフレットィングが起り接合する。また、接合面の拡大が緩やかになっても、外周部には超音波による繰返しのせん断力が加わり続けるため Au バンプと電極の密着が進み、真実接合面積は増加する。このように、接合面の中央部がほぼ固着域となり、接合面の拡大領域で接合して真実接合部がリング状に生成される接合を本研究では局所フレットィング接合と呼称する。

1.3.3. 超音波フリップチップボンディングの課題

超音波フリップチップボンディングは、200℃以下の低温でバンプと電極の接合面に力を加え、接合面の金属材料を塑性変形させて0.5 s以下の短時間で接合する。温度を低くするのは、主に接合する電子デバイスおよび基板の熱による損傷を防ぐためである。また、短時間接合により電子デバイスパッケージの製造費用を低くできる。ところで、電子デバイスチップはSiやSiO₂などの脆性材で構成されており、接合部に加える力の大きさにも制約がある。固相接合に大きく影響する温度、時間、加える力に制約があるため、超音波フリップチップボンディングでは100%の接合効率ではなく、接合部に必要なせん断荷重を得ることを目標とすることが多い。

超音波接合では接合に影響する因子が多い。因子には接合面に加える力、バンプおよび電極の寸法、接合面の表面粗さ、接合面の清浄度などが挙げられる。また、複数のバンプを一括して接合するため、Fig. 1-18に示すチップと基板の傾きなども接合部のせん断荷重に影響する。これら接合因子の多さから、はんだ付など他の接合方法と比較して接合部のせん断荷重のばらつきが生じ易い。はんだ付では、接合中に外部から接合部に力を加えない。電極およびバンプの表面酸化や汚染などが有っても、フラックスに

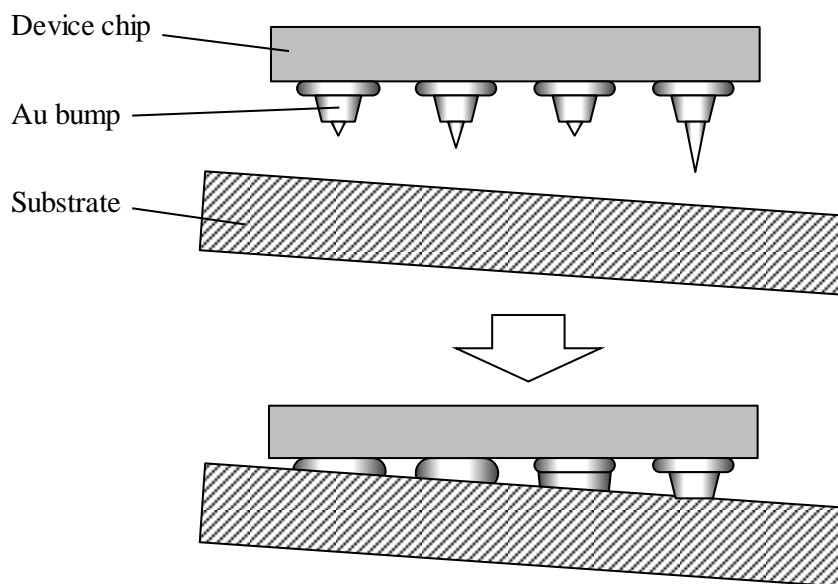


Fig. 1-18 Bonded height variation of Au bumps by low parallelism between chip and substrate.

より還元あるいは分解される。バンプの高さのばらつきは、Fig. 1-19 に示すように、フラックスと微小なはんだ粒の混合物であるはんだペーストにより吸収される。さらに、接合前のチップと基板の傾きや位置ずれなどは接合部が溶融して変形することで解消される。

接合部の周囲に樹脂を充填して補強することで接合部のせん断荷重のばらつきに対する許容量は増加する。しかし、チップ表面に弾性波を伝播させる SAW デバイスや、可動物を有する MEMS チップなどではチップ表面への樹脂付着により特性が劣化するため、樹脂による接合部の補強は難しい。

超音波フリップチップボンディングで生じる接合部のせん断荷重のばらつきの解決策の一つは、接合部のせん断荷重の平均値の増加である。せん断荷重の平均値の増加に伴いせん断荷重の最低値が増加すれば、せん断荷重にばらつきがあっても必要なせん断荷重が確保できるようになる。

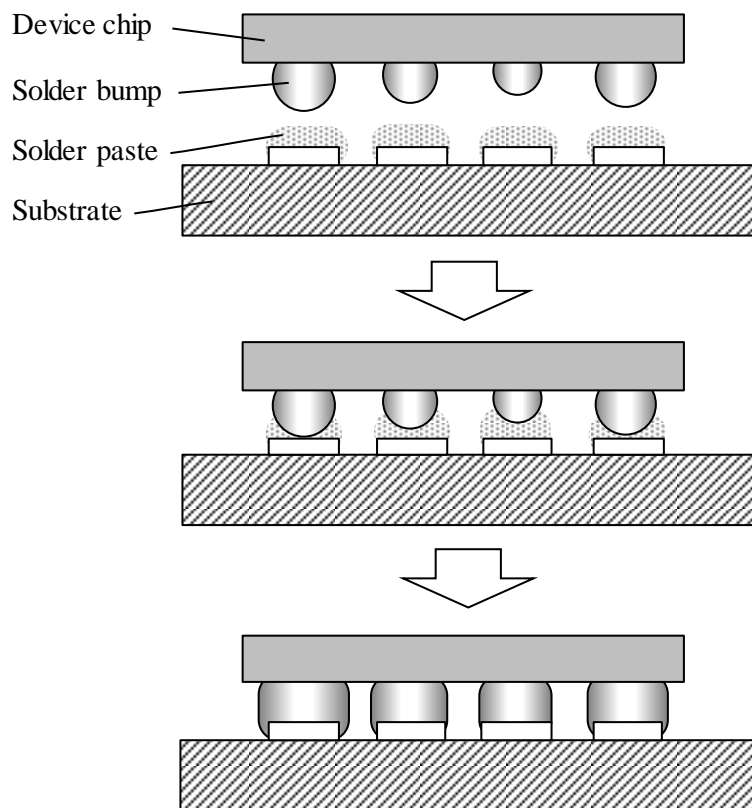


Fig. 1-19 Absorption of bump height variation by solder paste.

接合部せん断荷重の平均値の増加方法の一つに、超音波出力の増加により振動振幅を増加させ Au バンプへ印加する外力を大きくする方法がある^{4, 30)}。Au バンプと電極の接合面への外力が増加すると共に Au バンプの巨視的な塑性変形量が増加して Au バンプと電極の接合面積が増加し、せん断荷重は増加する。しかし、この方法にはチップの Al 電極の下の絶縁層が破壊される危険性の増加を伴う。また、Au バンプの巨視的な塑性変形量の増加に Au バンプと電極の位置ずれが加わると、Au バンプが電極よりはみ出し、Fig. 1-20 に示すように電極周囲のチップ保護膜を破損してしまう。さらに、Fig. 1-18 に示したようにチップと基板の平行度が低下する場合には、一部の Au バンプの巨視的な塑性変形量が大幅に増加し、Au バンプの電極からのはみ出しによる電極の破損や、隣接電極との短絡などの問題が発生する。したがって、単に Au バンプへ印加する外力を大きくして接合部のせん断荷重を増加させるのではなく、Au バンプと電極の接合面積当りのせん断荷重、すなわちせん断強度を増加させる方法が求められる。

Au バンプに印加する外力の増加以外で接合部のせん断荷重を増加させる方法については数々の研究が報告されている。これらの方法は、接合面の微視的な塑性変形への作用の観点から、接合に必要な微視的な塑性変形量の低減と、微視的な塑性変形の起こり易さの向上、接合面において接合に

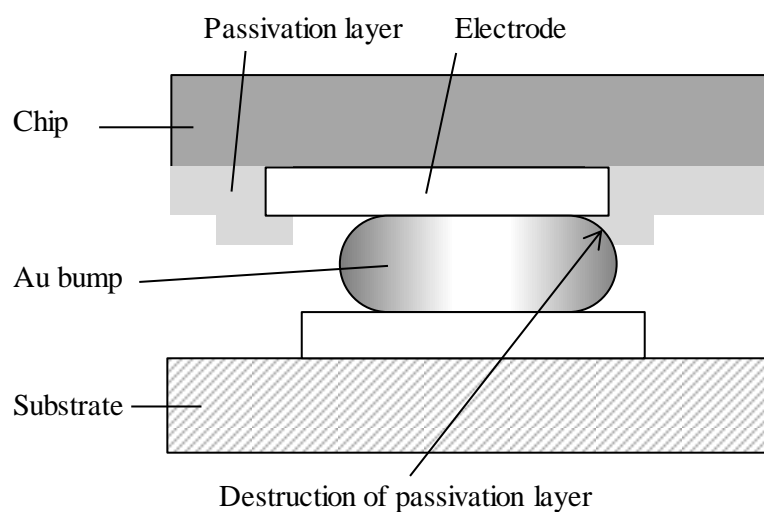


Fig. 1-20 Destruction of passivation layer around electrode by excessive bump deformation and misalignment of chip and substrate.

至る量の微視的な塑性変形を生じる面積の増加の3つに分類される。

接合に必要な微視的な塑性変形量の低減の方法は、例えば、接合する部材の表面の清浄化である。具体的な方法には、Arプラズマ照射によるAuバンプ表面の有機物皮膜除去がある^{12, 31)}。

微視的な塑性変形の起こり易さを向上させる方法では、高瀬らがAuめっきバンプにアニール処理を施す方法を示した³²⁾。アニール処理により接合部のせん断荷重が約3倍に増加している。この理由は、Au結晶粒径が成長してAuバンプの変形能が向上し、接合面におけるAuバンプの微視的な塑性変形量が増加したと推測される。また、チップ同士を接合するChip on Chip接合において、両方のチップの電極にAuスタッドバンプを形成する方法が示されている⁵⁾。チップ電極のAl層とAuバンプの接合を、Al層の10倍以上の厚さを有するAuスタッドバンプ同士の接合へ変更することで、接合面における微視的な塑性変形量が増加して真実接合面積が増加することが期待できる。基板の電極では、Auめっきを施したCuリードとセラミック基板のAu電極の接合において、電極のAu層を厚化することで接合部の引張荷重が増加することを先行研究で明らかにした³³⁾。しかし、いずれの研究においても接合部の巨視的な塑性変形量は開示されておらず、接合材の変形能が接合部のせん断強度に及ぼす影響はわかっていない。

接合面において接合に至る微視的な塑性変形を生じる面積を増加させる手段としては、Fig. 1-21に示した、超音波を印加している間に接合荷重を増加させるランプ状接合荷重が挙げられる。通常、超音波フリップチップボンディングでは、Fig. 1-11に示したように超音波印加中の接合荷重は一定に保持する。Fig. 1-22に、AuスタッドバンプとAl電極を一定に保持した接合荷重で接合した場合の、接合面に生成されたAu-Al合金層の例を示す³⁴⁾。AuとAlの接合では、Au-Al合金層の生成部が真実接合部であり、この真実接合部の面積と接合部のせん断荷重はほぼ比例する³⁵⁾。図中の白点線の円は、超音波印加前のAuスタッドバンプとAl電極の接合面積である。接合荷重が1バンプ当たり1.0NのFig. 1-22(a)は、Au-Al合金層は、接合面積の超音波印加後に拡大した領域に生成されリング状になる局所

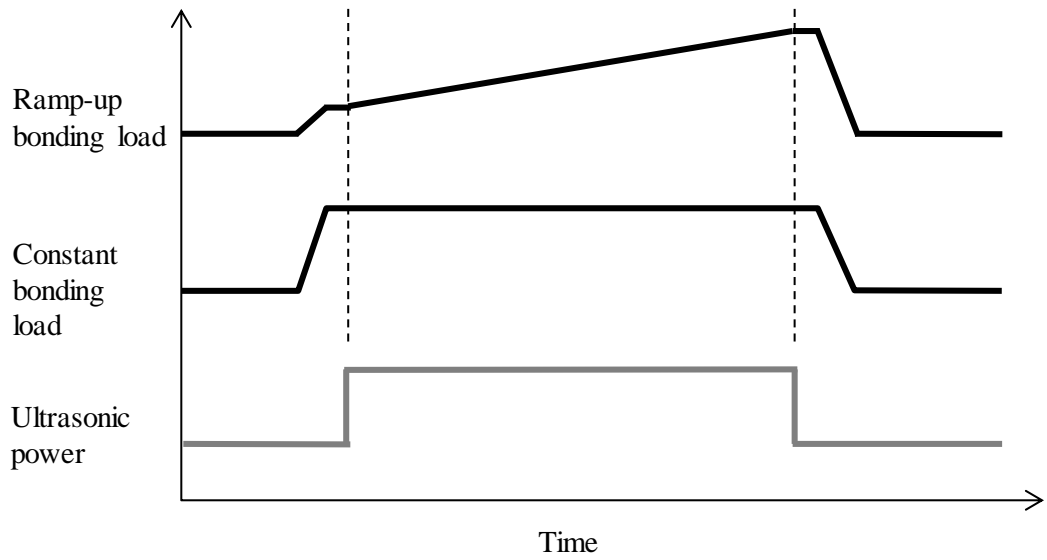


Fig. 1-21 Profiles of ramp-up bonding load profile, constant bonding load profile and ultrasonic power.

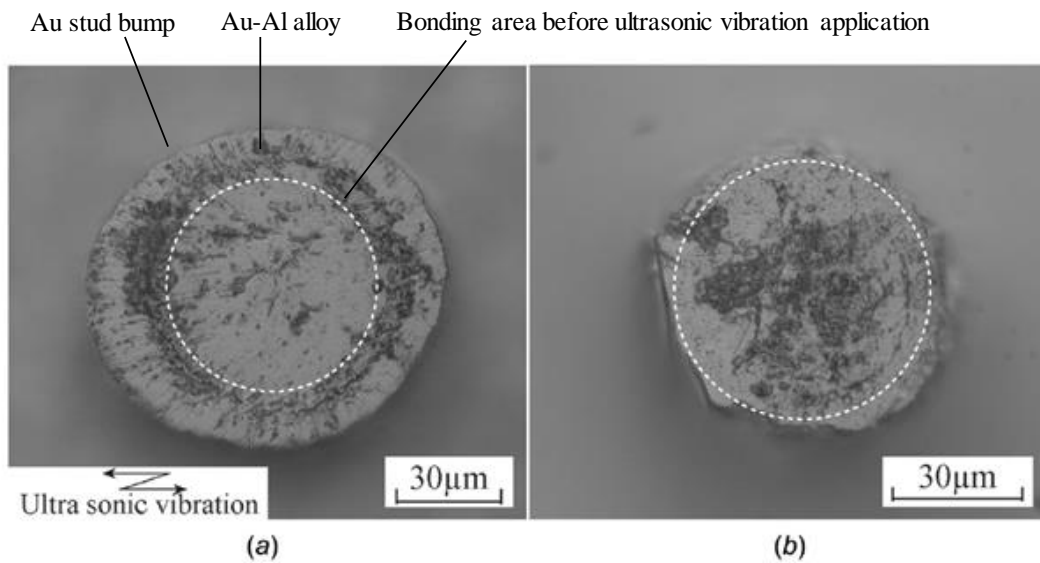


Fig. 1-22 Bonding interface of Au stud bump³⁴⁾ (Captions were added by author).
 (a) Bonding load $F = 1.0$ N/bump, Ultrasonic power $W = 300$ mW
 Ultrasonic time $t = 150$ ms
 (b) $F = 0.43$ N/bump, $W = 50$ mW, $t = 100$ ms

フレットング接合である。一方、接合荷重が 1 バンプ当り 0.43 N と低い Fig. 1-22(b)では、超音波印加により接合面積は拡大せず、Au-Al 合金層は接合面の全域に分散して生成する全域フレットング接合になっている。この結果は、低い接合荷重と高い接合荷重を組み合わせることで、接合面における真実接合面積を増加できることを示唆している。ランプ状接合荷重については、これまでに幾つかの研究において、接合実験における接合条件として示され^{5, 31, 36)}、接合部のせん断荷重が増加することが報告されている³⁶⁾。しかし、接合部の巨視的な塑性変形量は開示されず、せん断強度への影響はわかっていない。また、接合部のせん断荷重が増加する機構が明確になっているとは言い難い。

Fig. 1-22(b)に示した全域フレットング接合では、局所フレットング接合よりも、接合面積に対する真実接合面積の比率を増加できる。すなわち、接合部のせん断強度の増加方法として有効である。全域フレットング接合では、局所フレットング接合と比較して接合面の拡大面積の影響が少ない。フリップチップボンディングでは、Fig. 1-18 に示したチップと基板の平行度の低下が起こる。チップと基板の平行度が低い場合、Au バンプの巨視的な塑性変形量が減少して接合面の拡大面積が少なくなる接合部が出現する。全域フレットング接合では、接合面の拡大面積が少ない場合でも接合部のせん断荷重が極端に減少せず、接合面積に応じた接合部せん断荷重が得られる可能性がある。これまでに、チップと基板の平行度の低下はフリップチップボンディングにおける懸念事項として挙げられている³⁷⁾。しかし、実際に平行度が低下した場合の接合挙動を詳しく調べた研究例は無い。

超音波フリップチップボンディングでは、接合面に平行な振動方向の超音波振動を通常は印加する。本研究では、この接合を平行振動印加接合と呼称する。これに対して、Fig. 1-23 に示す接合面に垂直な振動方向の超音波を印加する接合方法が提案されている³⁸⁾。この接合方法を本研究では垂直振動印加接合と呼称する。既報の研究において垂直振動印加接合に期待された効果は、高い接合荷重の印加時の超音波ホーンの撓みによるチップと基板の平行度の低下の抑制であった。

垂直振動印加接合でも，平行振動印加接合と同様に，接合荷重で Au バンプと電極の接合面が形成され，超音波の印加により接合面が拡大する．接合面の拡大領域の最外端には，Au バンプの上下方向の微小な伸縮により，動荷重が加わると推測される．また，最外周以外の接合面には超音波による圧縮方向の繰返し荷重が印加される．金属加工において，加工ツールへ超音波を印加し，超音波による動荷重を金属へ印加することで金属の塑性変形量が増加することは知られており，超音波ハンマリングと呼称されている³⁹⁾．接合面の全域へ超音波による繰返し荷重を印加すると接合面における金属の微視的な塑性変形量が増加し，接合面の広い領域で接合がなされることが期待できる．しかし，Tan らの 64 個の Au バンプを備えたチップでの接合実験では，接合部のせん断荷重は 1 バンプ当たり約 0.1 N の低い値しか得られていない³⁸⁾．電極数が少ないデバイスチップではもっと高い接合部せん断荷重が必要である．例えば，SAW デバイスでは，接合部信頼性のため 1 バンプ当たり 0.4 N のせん断荷重が必要であることが示されている⁴⁾．既存研究において接合部せん断荷重が低い原因は，適正範囲外の接合条件を用いたことが推測される．垂直振動印加接合によるフリップチップボンディングの研究例は少なく，これまでに垂直振動印加接合において十分な接合部せん断強度を得た報告例は無い．高い接合部せん断強度が期待できる接合方法であるが，接合条件の選定指針や接合に支配的な接合面の微視的な塑性変形の発生機構などの研究は不足している．

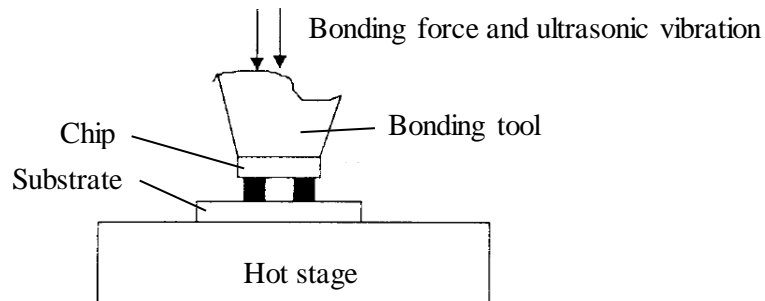


Fig. 1-23 Ultrasonic flip chip bonding using ultrasonic vibration perpendicular to bonding interface³⁸⁾ (Captions were arranged by author).

1.4. 本研究の目的

超音波フリップチップボンディングは、接合に要する費用が低く、安価な電子デバイスのパッケージの小型化を実現できる接合方法である。しかし、この接続方法には接合部のせん断荷重にばらつきが生じ易い課題がある。この課題の解決方法の一つは、平均のせん断荷重を増加させることである。その際、Au バンプの巨視的な塑性変形量を変えずにせん断荷重を増加させる、すなわち接合部のせん断強度を増加させることが望ましい。

本研究では、Au バンプと電極の接合部のせん断強度の増加を目的として、接合面における金属材料の微視的な塑性変形量の増加を図った以下に示す4つの高強度化手法を検討した。小型チップを使用した接合実験により各高強度化手法が接合部のせん断強度に及ぼす影響を明らかにし、定量的な評価が難しい接合面の微視的な塑性変形量について、接合時の接合面の増加過程などを基に考察を試みた。

- (1) 基板の Au 電極の Au 層の厚化による Au バンプと基板電極の接合部のせん断強度の高強度化手法に関する研究
- (2) 超音波の印加中に接合荷重を漸次増加させるランプ状接合荷重による Au バンプと基板 Au 電極の接合部せん断強度の高強度化手法に関する研究
- (3) Chip on Chip 接合において接合部を高強度化できる全域フレットイング接合に及ぼすチップ平行度の影響に関する研究
- (4) Au バンプと基板の Au 電極の接合面へ垂直な振動方向の超音波を印加する接合方法による接合部のせん断強度の高強度化手法に関する研究

1.5. 本論文の構成

本論文は、以下に述べる 6 章で構成される。論文の構成と各章の関連を Fig. 1-24 に示す。

第 1 章では、電子機器の製造における電子デバイスのパッケージ組立技術の位置付けと、低価格電子デバイスのパッケージの小型化に寄与する超音波フリップチップボンディング技術の概要を説明し、技術課題と本研究の目的を述べた。

第 2 章では、Au バンプと基板の Au 電極の接合において、Au 電極の Au 層の厚化による接合部せん断強度の高強度化手法を検討した結果と、強化機構を考察した結果を述べる。

第 3 章では、Au バンプと基板の Au 電極の接合において、超音波の印加中に接合荷重を漸次増加させるランプ状接合荷重による接合部せん断強度の高強度化手法を検討した結果と、強化機構を考察した結果を述べる。

第 4 章では、チップ同士を接合する Chip on Chip 接合 (以下, COC 接合) を対象として、Au バンプとチップの Al 電極の接合部を高強度化できる全域フレットング接合を採り上げ、チップ同士の平行度が接合に及ぼす影響を調べた結果を述べる。

第 5 章では、Au バンプと基板の Au 電極の接合を対象に、垂直振動印加接合を用いた超音波フリップチップボンディングによる接合部せん断強度の高強度化手法を検討した結果と接合条件の設定に関する指針を述べる。

最後に第 6 章では、本研究で得られた知見を総括する。

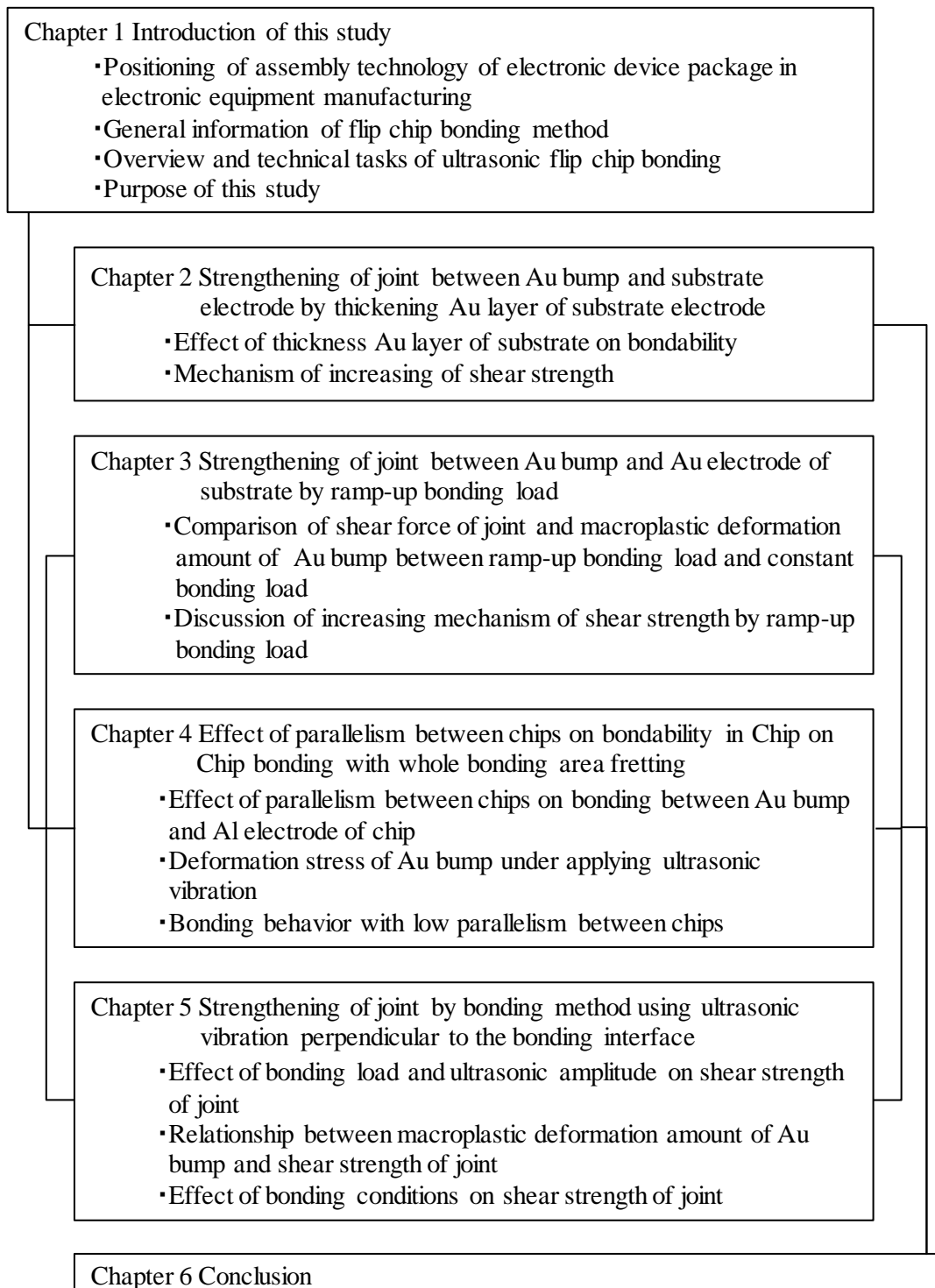


Fig. 1-24 Constitution of this dissertation.

第 1 章の参考文献

- 1) 近藤 善範: 東京大学 COE ものづくり経営研究センター ディスカッションペーパー, 198 (2008).
- 2) 坂田 毅, 岡村 和男, 小塚 雅之: 生産と技術, 65-4 (2013), 65-67.
- 3) 塚田 裕: 材料, 55-4 (2006), 385-390.
- 4) H. Yatsuda and T. Eimura: The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, 19-3 (1996), 238-244.
- 5) 中野 景介, 藤本 尚紀, 田中 昌明, 浅井 昭喜: デンソーテクニカルレビュー, 21 (2016), 150-155.
- 6) L. F. Miller: IBM Journal of Research and Development, 13 (1969), 239-250.
- 7) 折井 靖光, 佐久間 克幸, 松本 圭司, 鳥山 和重: エレクトロニクス実装学会誌, 12-7 (2009), 588-595.
- 8) 荘司 郁夫, 山田 毅, 木村 英夫, 藤内 伸一, 折井 靖光: 回路実装学会誌, 12-1 (1997), 25-28.
- 9) 熊谷 浩一, 壁下 朗, 山崎 攻: 回路実装学会誌, 10-6 (1995), 368-372.
- 10) 塚越 功: 日本接着学会誌, 43-5 (2007), 179-186.
- 11) 森 三樹, 福田 由美, 木崎 幸男, 飯田 敦子, 斉藤 雅之: 電子情報通信学会論文誌, J81-C-II-7 (1998), 628-636.
- 12) 栗田 洋一郎, 森下 佳昭, 山田 俊之, 木村 雄大: エレクトロニクス実装学会誌, 12-6 (2009), 542-550.
- 13) 岩崎 俊寛, 富田 至洋, 木村 通孝: マイクロエレクトロニクスシンポジウム予稿集, 13 (2003), 196-199.
- 14) 小林 弘, 小八重 健二, 久保田 崇, 尾崎 行雄, 夏秋 昌典, 中村 公一: エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集, 10 (2004), 271-276.
- 15) 圓尾 弘樹, 関 善仁, 宇波 義春, 大湊 忠則: フジクラ技報, 105 (2003), 29-32.
- 16) 若宮 敬一郎, 岩崎 俊寛, 西原 達人, 畑中 康道, 富田 至洋, 木村 通孝: エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集, 9 (2003), 41-44..
- 17) 関本 隆司, 中谷 直人, 小鮎 秀明: エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, 19 (2005).
- 18) 富岡 泰造, 久保 哲也, 大谷 和巳, 渥美 幸一郎, 千代間 仁, 先灘 薫: エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集, 3 (1997), 9-14.
- 19) 一山 康友, 斉藤 亨, 大野 恭秀: 溶接学会論文集, 9-4 (1991), 587-593.

- 20) H. A. Mohamed and J. Washburn: *Welding Journal*, 9 (1975), 302-310.
- 21) R. W. Messler: *The Essence of Materials for Engineers*, Jones and Bartlett Publishers, Inc (2011).
- 22) 梶原 良一, 高橋 敏幸, 坪崎 邦宏, 渡辺 宏: *溶接学会論文集*, 16-1 (1998), 93-104.
- 23) 石坂 彰利, 岩田 誠一, 山本 博司: *日本金属学会誌*, 41 (1977), 1154-1160.
- 24) F. Blaha and B. Langenecker : *Acta Metallurgica*, 7 (1959), 93-100.
- 25) 南 匡晃, 清野 伸弥, 森本 亮一, 弘田 実保: *エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集*, 8 (2002), 131-136.
- 26) 高橋 康夫: *電子情報通信学会論文誌*, J92-C11 (2009), 581-594.
- 27) H. Horibe, K. Nakamura and T. Akiyama: *Proceedings of The 3rd VSLI Packaging Workshop of Japan*, (1996), 15-17.
- 28) N. Watanabe and T. Asano: *The Japanese Journal of Applied Physics*, 42 (2003), 2193-2197.
- 29) 高橋 康夫, 亀田 真理, 荒谷 修三: *エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集*, 9 (2003), 67-72.
- 30) 富岡 泰造, 井口 知洋, 渥美 幸一郎: *高温学会誌*, 30-1 (2004), 41-46.
- 31) 谷 元昭, 渡辺 弘道, 西村 明彦, 可知 繁隆, 河田 宣久, 杉浦 慎一: *富士通テン技報*, 27-2 (2009), 19-25.
- 32) 高瀬 博行, 山邊 栄一, 小熊 広志, 田辺 慎一, 佐藤 明, 有賀 成一: *日立評論*, 91-5 (2009), 64-67.
- 33) T. Ando, T. Tomioka, M. Nakazono, K. Atsumi, Y. Tane, J. Nakano and S. Hirata: *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 16-8 (1993), 808-816.
- 34) Y. Takahashi, H. Fukuda, Y. Yoneshima, H. Kitamura and M. Maeda: *Journal of Electronic Packaging*, 139 (2017), 041010-1-13.
- 35) 大貫 仁: *エレクトロニクス実装学会誌*, 5-4 (2002), 412-417.
- 36) 山内 朗, 桑内 重喜, 佐藤 茂, 中居 誠也: *マイクロエレクトロニクスシンポジウム予稿集*, 13 (2003), 200-203.
- 37) T. S. McLaren, S. Y. Kang, W. Zhang, T. Ju and Y. Lee: *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 20-2 (1997), 152-159.
- 38) Q. Tan, W. Zhang, B. Schaible, L. J. Bond, T. H. Ju and Y. C. Lee: *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 21-1 (1998), 53-58.
- 39) 田中 芳雄, 井戸 守: *精密機械*, 38-8 (1972), 9-15.

第2章 基板電極の Au 層の厚化による Au バンプとの接合部の高強度化

2.1. 緒言

フリップチップボンディングは電子デバイスパッケージの小型化に有効な電子デバイスの接続技術である。その中でもバンプと電極を超音波接合する超音波フリップチップボンディングは、接合に必要な材料費が安く、生産性が高いという特長があり、比較的安価な電子デバイスにも適用できる。この接合技術に関しては、具体的な製品を対象とした開発¹⁻⁶⁾や、接合プロセスの解明⁷⁻¹³⁾、接合の高度化¹⁴⁻¹⁹⁾、接続信頼性の改善^{20, 21)}などこれまでに多くの研究がなされている。

Au スタッドバンプ (以後, Au バンプ) を、低温で短時間に固相状態で電極と接合する超音波接合は、接合に影響を及ぼす因子が多く、他の接合方法と比較して接合部のせん断荷重のばらつきが生じ易い。フリップチップボンディングのバンプ接合部では、熱応力や外部からの衝撃などに対する耐性を高めるため樹脂による補強を行うことが多い。補強によりせん断荷重のばらつきはある程度許容できるようになる。しかし、安価な電子デバイスでは、Surface Acoustic Wave (SAW) デバイス、Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) などバンプ接合部を樹脂で補強することが困難なものがある。そこで、接合部のせん断荷重の平均値を増加させることで、接合部のせん断荷重のある程度のばらつきを有しながら接続信頼性を確保する。接合荷重など Au バンプへ印加する外力を大きくして Au バンプの巨視的な塑性変形量を増加させると平均のせん断荷重は増加するが、電極損傷などの危険性が高まる。そこで、同じ巨視的な塑性変形量においてせん断荷重を増加させる、すなわち、せん断強度を増加させる方法が求められる。

超音波フリップチップボンディングでは Au バンプと電極の接合面における金属材料の微視的な塑性変形を起こして接合する。そのため、接合する部材の変形能を上げることで接合部のせん断強度を増加できると考えられる。Au めっきを施した Cu リードとセラミック基板の Au 電極の超音波接合に関する先行研究において、基板電極の Au 層の厚化により Cu リード接合部の引張せん断荷重が増加することを明らかにした²²⁾。セラミック基板の電極は、同時焼成した W 層へ Ni および Au をめっきして構成

される。Niめっき層の硬度は150~500 HV²³⁾であり、Auめっき層の約70 HV²⁴⁾よりも高い。Au層が厚くなると、Auの厚さ方向の塑性流動性が高まる。そして、Au層の変形能が向上し、電極表面の微小な凹凸部が変形し易くなる。その結果、接合面のAuの微視的な変形量の増加により接合面積が増加すると考えられる。したがって、Auバンプとセラミック基板のAu電極を接合する超音波フリップチップボンディングでも同様の効果が期待できる。しかし、これまでに超音波フリップチップボンディングにおいて、基板のAu電極のAu層厚が接合部のせん断荷重およびAuバンプの巨視的な塑性変形量に及ぼす影響について調査した研究は無い。

第2章では、デバイスチップのAl電極に形成したAuバンプとセラミック基板のAu電極の接合部のせん断強度の高強度化手法として、基板のAu電極のAu層の厚化を検討した結果を述べる。電極のAu層厚を変更したセラミック基板を使用した接合実験により接合部のせん断荷重とAuバンプの巨視的な塑性変形量を調べ、Au層の厚化の接合部せん断強度への影響を明らかにした。

2.2. 実験方法

Table 2-1 に、接合実験に供した Test Element Group (TEG) A のチップと基板の仕様を示す。チップの電極は、スパッタリング法で形成した厚さ 0.15 μm の Al 層であり、外形寸法は $250 \times 230 \mu\text{m}^2$ である。基板には Al_2O_3 を基材としたセラミック基板を用いた。基板電極の構成は Al_2O_3 側から W / Ni / Au である。W 層は Al_2O_3 との同時焼成で、Ni 層および Au 層は電解めっきでそれぞれ形成した。Au 層の厚さは 0.44, 0.57, 0.73, 0.91, 1.15 μm の 5 種類とした。電極の表面粗さ R_a は 0.5 μm である。表面粗さが大きいのは、焼成した W 層の表面粗さが大きいためである。チップの Al 電極には Au バンプを形成した。Au バンプは、純度 99.99 mass% の Au ワイヤを使用し Fig. 2-1 に示したワイヤボンディングを応用した方法で形成した。Au ボールの接合後、Au ワイヤを上方へ引張り切断した。Table 2-2 に Au バンプの形成条件を示す。Au バンプの平均径は 103 μm で、平均高さは 48 μm である。Au バンプの平均のせん断荷重は 0.55 N であった。

Table 2-1 Specifications of TEG A.

Items	Specifications
[Test chip]	
Chip size	$1.7 \times 1.4 \times t 0.4 \text{ mm}^3$
Electrode material	Al
Electrode thickness	0.15 μm
Number of electrodes	6
[Test substrate]	
Electrode layer composition	W / Ni / Au
W layer thickness	15 μm
Ni layer thickness	2 μm
Au layer thickness	0.44, 0.57, 0.73, 0.91, 1.15 μm

Table 2-2 Au bump bonding conditions.

Items	Value
Bonding load	490 mN
Ultrasonic power	40 mW
Bonding time	15 ms
Chip temperature	150 $^{\circ}\text{C}$

接合装置には, Au バンプと基板の Au 電極の接合面へ平行な振動方向の超音波を印加する Fig. 1-10 に示した構成の超音波フリップチップボンディング装置を用いた. 超音波ホーンの先端に装着した接合ツールのチップ加圧面の外形寸法はチップ面と同じ $1.7 \times 1.4 \text{ mm}^2$ である. 加圧面の中央には $\phi 0.8 \text{ mm}$ の負圧吸着用の穴を設けた. 基板を固定するワークステージは加熱機構と, 負圧吸着機構, 平行開閉型の機械式クランプを具備している.

フリップチップボンディングは, 最初に Fig. 2-1 に示すように Au バンプを形成したチップを接合ツールの先端に吸着し, 表面温度 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ に加熱

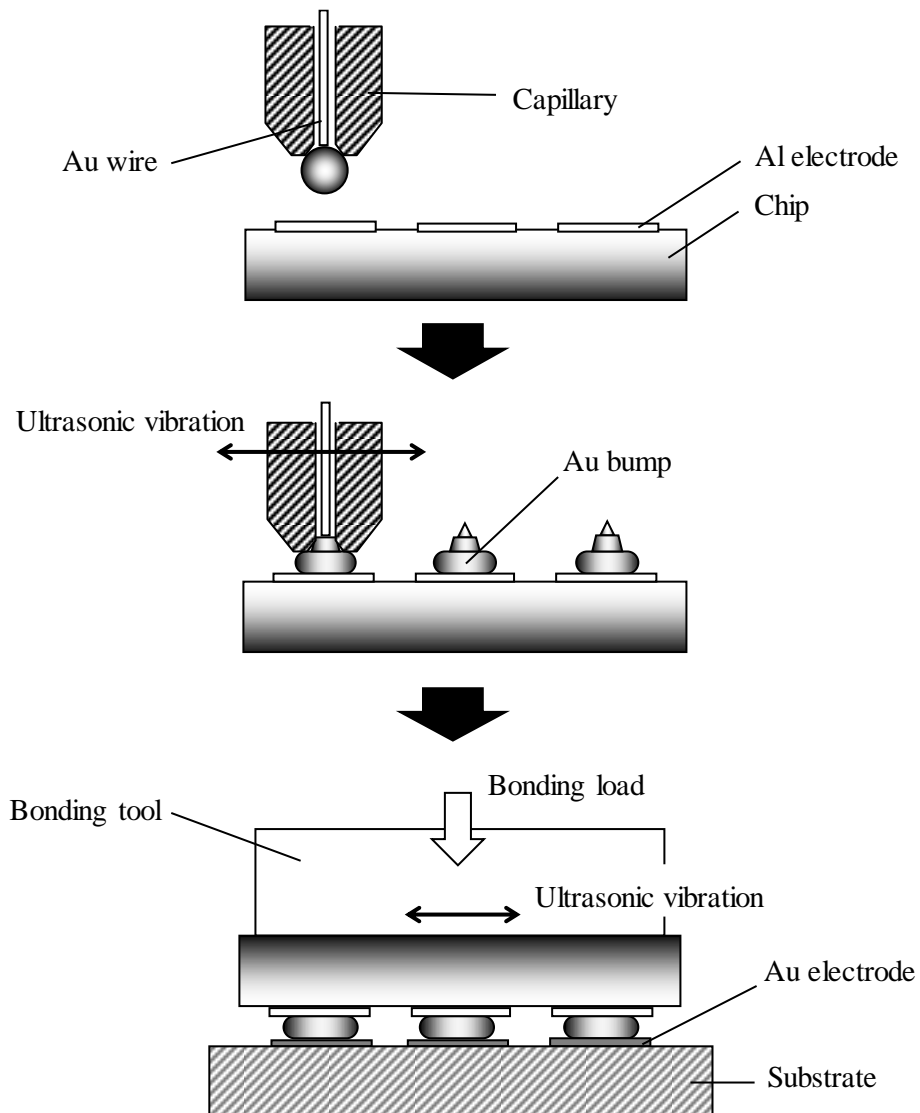


Fig. 2-1 Procedure of fabricating test piece for evaluation.

したセラミック基板へ加圧する．この加圧荷重を本研究では接合荷重と呼称する．接合荷重が1バンプ当たり3.0 Nに達したら周波数60 kHzの超音波を印加しAuバンプと基板のAu電極を接合する．超音波周波数は接合性に影響し，高周波化により接合部が高強度化することは，ワイヤボンディングに関する先行研究により明らかにした²⁵⁾．一方で，超音波の高周波化には，接合ツールの長さのばらつきや接合ツールへ加わる負荷などにより接合ツールの加圧面の振幅が変動し易くなる課題がある．また，超音波の定在波の間隔が狭くなるため，接合ツール内に定在波の節ができないように接合ツール長を短くする必要があり電子デバイスパッケージの製造工程で使用する接合装置の構成に大きな制約を生じる．そこで，本研究では接合性と超音波振幅の安定性のバランスを考慮し，60 kHzの超音波を選択した．

接合荷重および超音波出力のプロファイルをFig. 2-2に示す．接合荷重の立ち上がり時間は300 msで，その後一定に保持した．超音波は，接合荷重が立ち上がった10 ms後から500 ms印加した．この超音波の印加時間を本研究では接合時間と呼称する．接合荷重は超音波の印加を終了後に10 ms保持した後に除荷した．超音波出力は2.0 Wに設定した．超音波出力2.0 Wでの無負荷時の接合ツールのpeak to peak振幅は3.2 μmである．

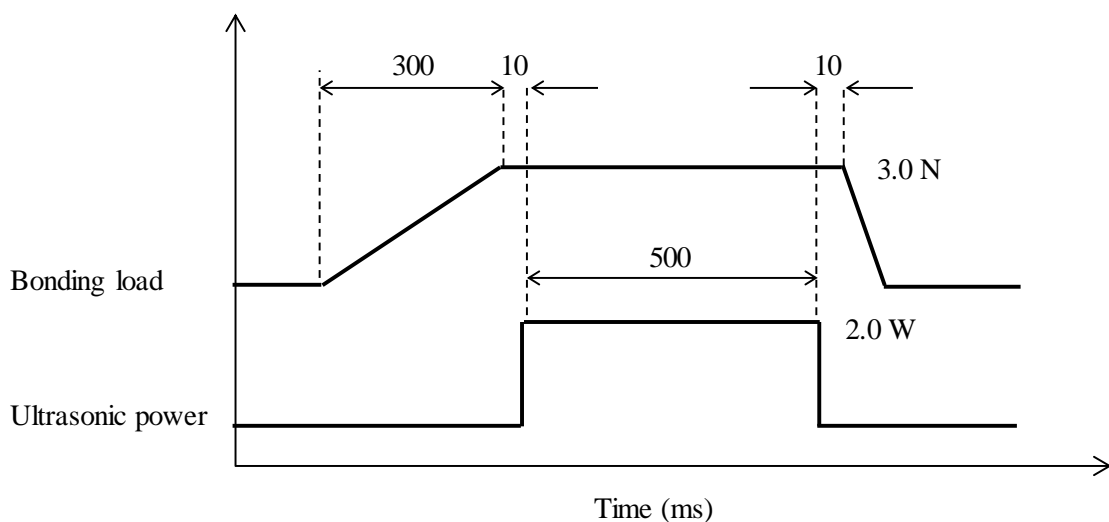


Fig. 2-2 Profiles of bonding load and ultrasonic power.

作製した接合体を用いて，Au バンプ接合部のせん断荷重と接合後の Au バンプの直径（以後，圧着径），Au バンプとチップの Al 電極の接合面に生成される Au-Al 合金層の面積を調べた．

Au バンプと基板の Au 電極の接合部のせん断荷重を，Fig. 2-3 に示すように，チップの分離後にバンプせん断試験で測定する場合，せん断試験の開始時に Au バンプとせん断ツールが点接触となる．そのため，Au バンプと Au 電極の接合状態が悪くても Au バンプ内破断を生じることがあり，得られるせん断荷重値の信頼性が低くなる懸念がある．そこで，バンプ接合部のせん断荷重を Fig. 2-4 に示すチップせん断試験で測定した．せん断

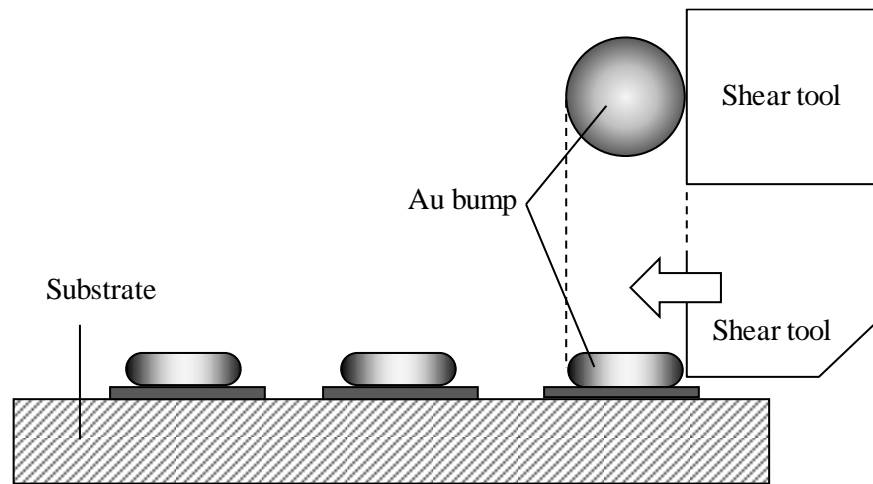


Fig. 2-3 Schematic illustration of bump shear test.

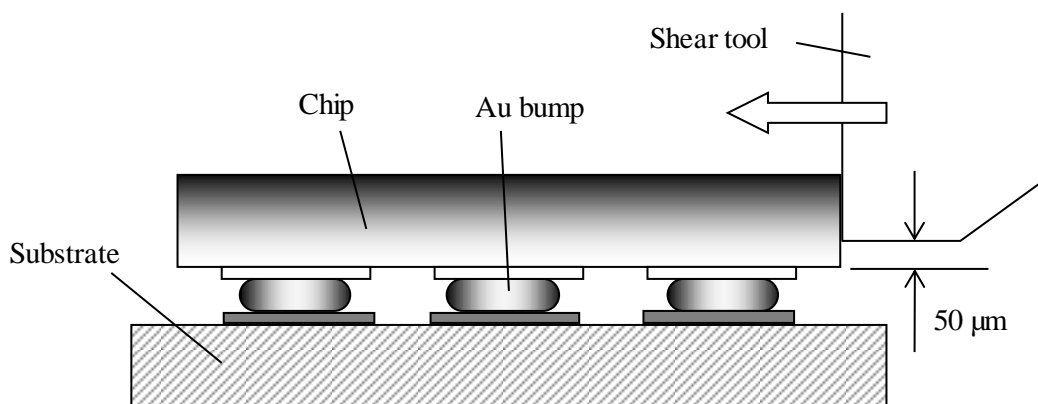


Fig. 2-4 Schematic illustration of chip shear test.

ツールの先端高さをチップの電極面から 50 μm 高い位置に設定した。せん断ツールは水平方向に 500 $\mu\text{m}/\text{s}$ の速度で移動させた。チップが加圧されることで bumps 接合部にせん断力が加わり破断する。破断時の荷重を bumps 数 6 で除した値を bumps 接合部のせん断荷重とした。

Au bumps を用いた超音波フリップチップボンディングの接合部の構成を Fig. 2-5 に示す。超音波接合箇所は Au bumps と基板の Au 電極、Au bumps とチップの Al 電極の 2 箇所である。Au bumps に印加された接合荷重および超音波により Au bumps は巨視的な塑性変形を起こし接合する。チップの電極側の Au bumps 径が拡大する場合、Au bumps と基板電極の接合と並行して Au bumps とチップ電極の接合も進行する²⁶⁾。したがって、Au bumps と基板の Au 電極のせん断荷重は、 bumps 接合部のせん断荷重だけではなく、接合部の破断モード、Au bumps とチップの Al 電極の接合部せん断荷重と併せて評価する必要がある。

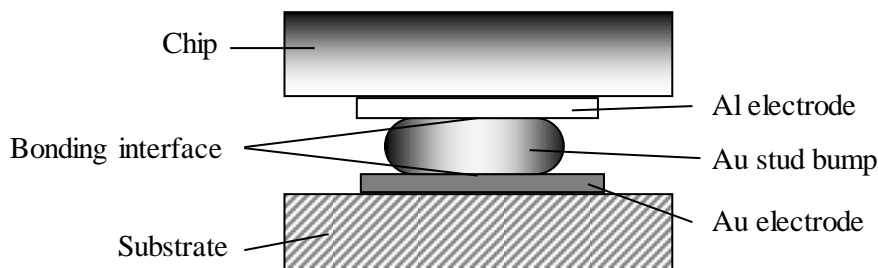


Fig. 2-5 Structure of joint of ultrasonic flip chip bonding using Au stud bump.

本研究における接合部の破断モードは Fig. 2-6 に示す Au バンプと基板の Au 電極の間の Au-Au 接合部破断と，Au バンプとチップの Al 電極の間の Au-Al 接合部破断の 2 種類に分類された．Au バンプ内の破断は起こらなかったもので，破断モードの分類から除外した．

Au バンプの圧着径は，Fig. 2-7 に示すように接合体を塩酸に浸漬してチップの Al 電極をエッチングし，Au バンプとチップを分離してから測定した．Au バンプはフリップチップボンディングにより超音波の振動方向に長手方向を有する楕円形状に変形する．そこで，Au バンプの短径と長径を測定顕微鏡で測定し，両者の積の平方根を Au バンプの圧着径とした．

Au バンプとチップの Al 電極のせん断荷重は，接合面に生成される Au-Al 合金層の面積により評価した．Au と Al の接合では，接合した箇所に Au-Al 合金層が生成され，Au-Al 合金層の面積が真実接合面積となる．接合部のせん断荷重は Au-Al 合金層の面積と比例関係にあることが知られている²⁷⁾ため，Au バンプ上面に残った Au-Al 合金層をカメラで撮影し，画像処理によりその面積を算出した．

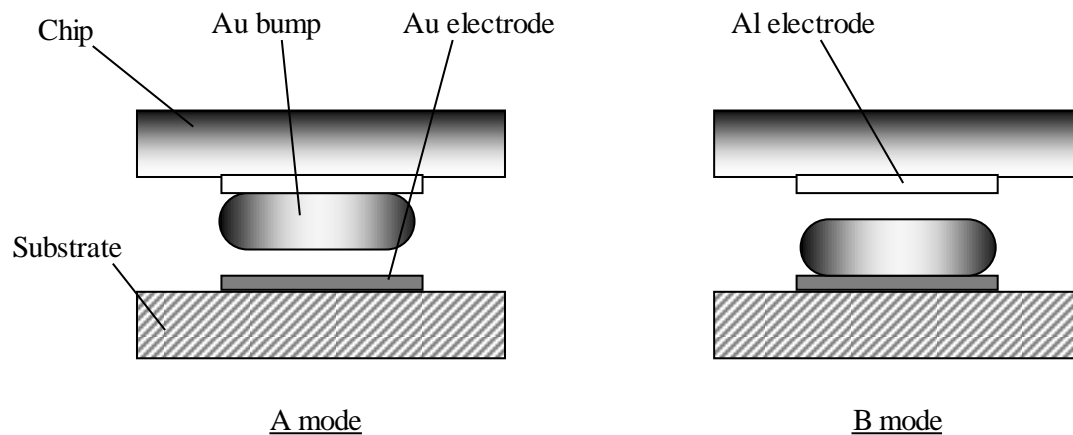


Fig. 2-6 Failure modes by chip shear test.

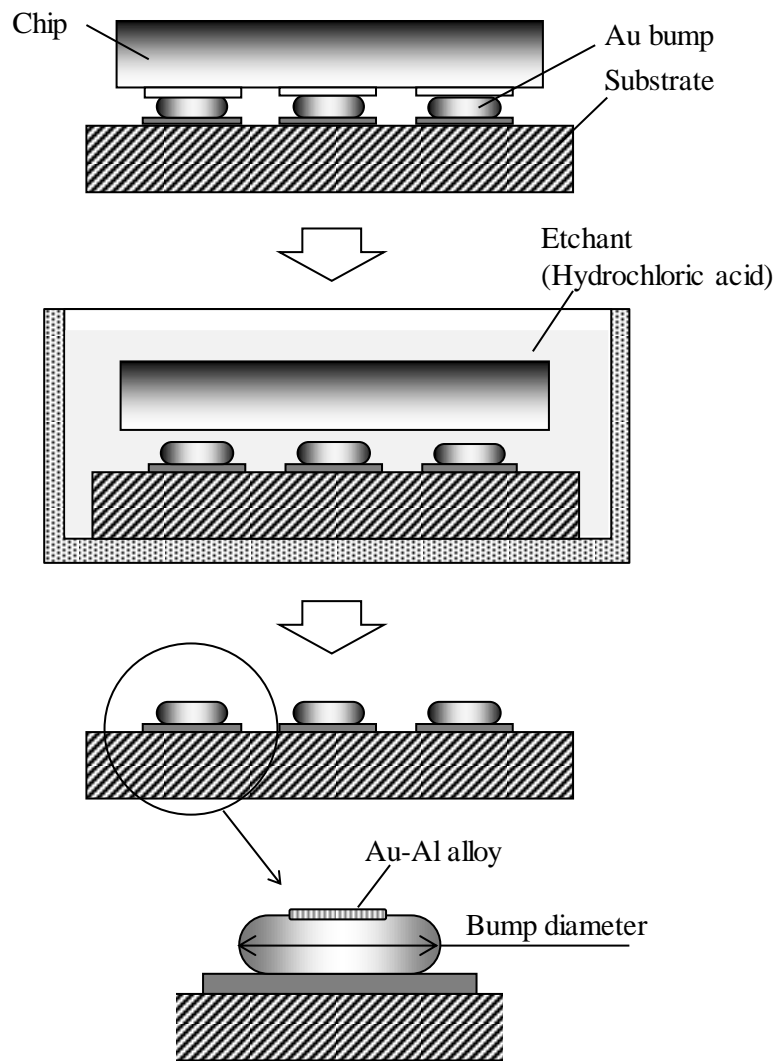


Fig. 2-7 Measurement of bonded bump diameter and Au-Al alloy area.

2.3. 基板電極の Au 層厚が接合に及ぼす影響

基板電極の Au 層厚とバンプ接合部のせん断荷重の関係を Fig. 2-8 に示す。せん断荷重は、チップせん断試験で得られた値をバンプ数 6 で除した値である。Au 層が厚化するに従いせん断荷重は増加し、Au 層厚 0.91 μm ~ 1.15 μm の範囲で一定となった。バンプ接合部の破断モードは、Au 層厚 0.44 μm ~ 0.73 μm の範囲では基板電極側の接合部が破断する A モードとチップ電極側の接合部が破断する B モードが混在した。Au 層厚 0.91 μm ~ 1.15 μm の範囲では全て B モードで破断した。したがって、Au 層厚 0.91 μm ~ 1.15 μm 以上の範囲で得られたせん断荷重は、Au バンプとチップの Al 電極の接合部のせん断荷重であり、この範囲において一定であることを示している。

Fig. 2-9 に Au バンプの圧着径を示す。圧着径は、接合前の平均 103 μm から平均 175 μm まで拡大するが、Au 層厚の影響がほとんど無いことがわかった。Au バンプの圧着径に差が無いことから、調査した範囲においては、Au バンプと基板の Au 電極およびチップの Al 電極の接合面積には Au 電極の Au 層厚の影響は無いことが明らかとなった。

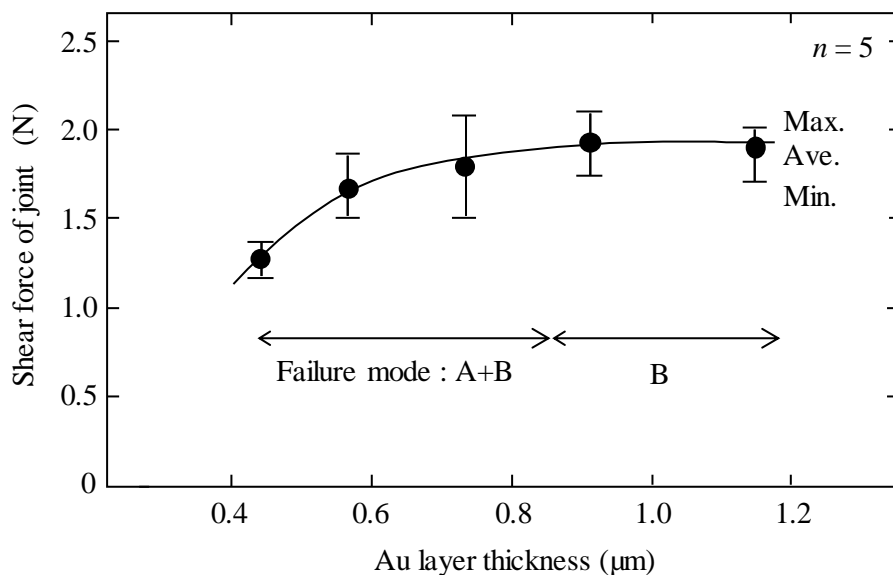


Fig. 2-8 Relationship between Au layer thickness of substrate electrode and shear force of joint.

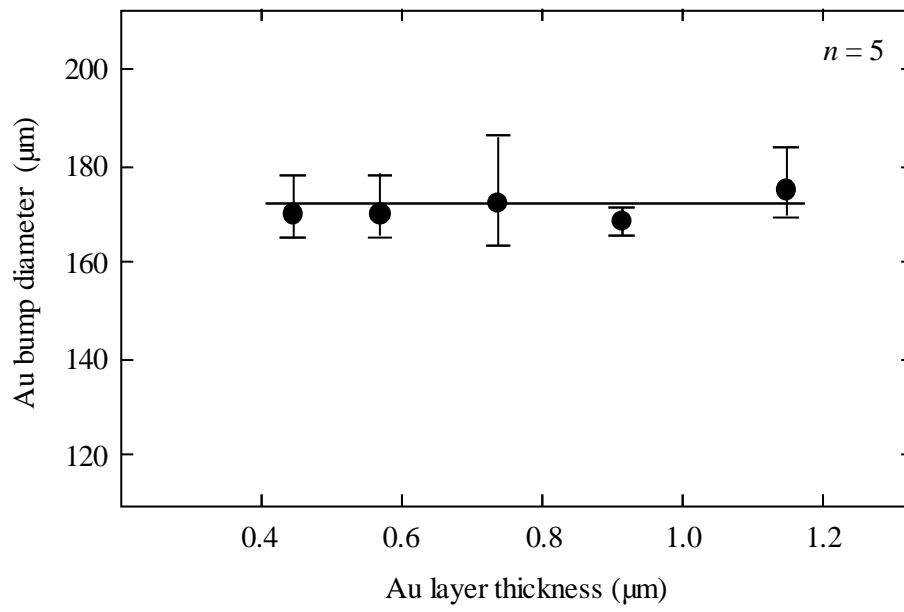


Fig. 2-9 Relationship between Au layer thickness of substrate electrode and Au bump diameter.

Fig. 2-10 に Au バンプとチップの Al 電極の間に形成された Au-Al 合金層を示す。Fig. 2-11 に Au-Al 合金層の面積を示す。この面積はチップ内の 6 バンプの平均値である。フリップチップボンディング前の Au-Al 合金層の面積の平均値は $5 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ である。フリップチップボンディングにより Au-Al 合金層の面積は 3 倍以上に増加するが、基板電極の Au 層厚の影響は見られなかった。

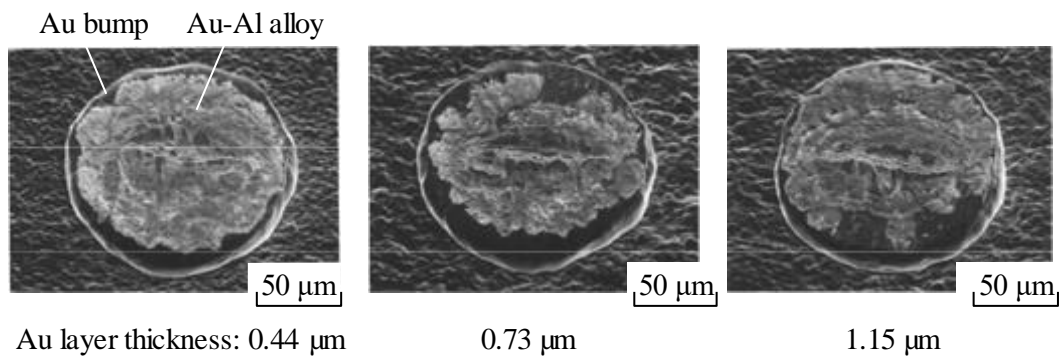


Fig. 2-10 Au-Al alloys formed between Au bump and Al electrode of chip.

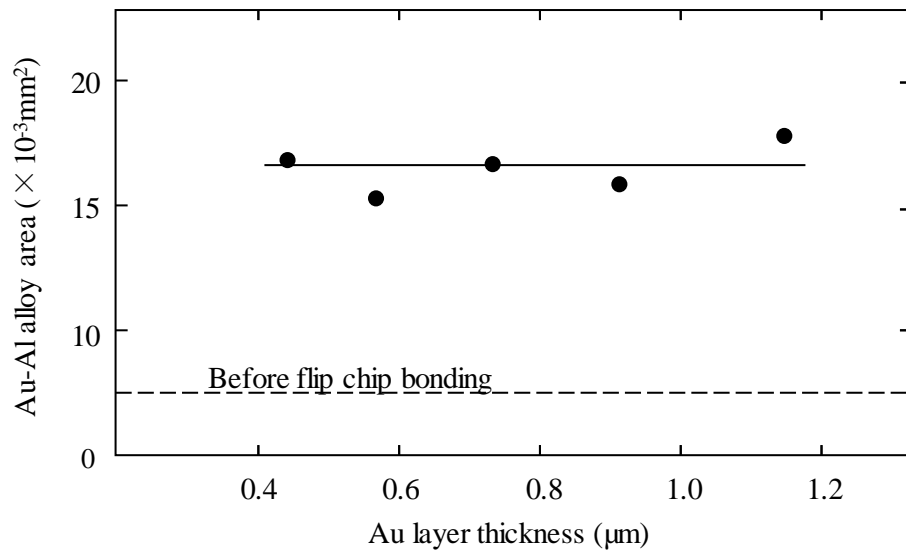


Fig. 2-11 Effect of Au layer thickness of substrate electrode on Au-Al alloy area.

Au バンプとチップの Al 電極の接合面に生成される Au-Al 合金層について X 線回折法による定性分析を行った。X 線発生装置には Rigaku RU-200 を用い、ターゲットは Cu 回転対陰極とした。測定条件を Table 2-3 に示す。Fig. 2-12 に分析結果を示す。Au-Al 合金層は Au_5Al_2 の金属間化合物であることが明らかとなった。

Table 2-3 XRD measurement conditions.

Parameters	Value
Radiation	CuK α
Voltage/current	50 kV / 300 mA
Collimator	$\phi 50 \mu\text{m}$
Scanning range(2 θ)	10~100 °
Step size	0.068 °
Measurement time	40000 sec
ϕ axis	Rotation
ω axis	+15 ° ~ +25 °
χ axis	Fixed at 0 °

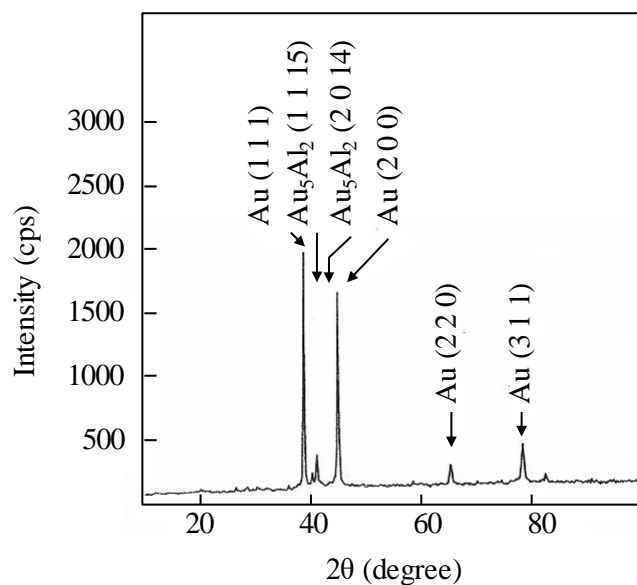


Fig. 2-12 XRD chart of Au-Al alloy.

Fig. 2-8 にて、基板電極の Au 層厚が $0.91\ \mu\text{m}$ ～ $1.15\ \mu\text{m}$ の範囲の接合部の破断モードは B モードであり、この範囲における Au バンプとチップの Al 電極の接合部のせん断荷重が一定であることを示した。Au バンプとチップの Al 電極の間に形成される Au-Al 合金層の面積が基板電極の Au 層厚 $0.44\ \mu\text{m}$ ～ $1.15\ \mu\text{m}$ の範囲において一定であることから、Au 層厚 $0.44\ \mu\text{m}$ ～ $0.91\ \mu\text{m}$ の範囲においても Au バンプとチップの Al 電極の接合部のせん断荷重は一定であると考えられる。したがって、Au 層厚 $0.44\ \mu\text{m}$ ～ $0.91\ \mu\text{m}$ の範囲において、バンプ接合部のせん断荷重が増加したのは、Au バンプと基板の Au 電極の接合部のせん断荷重が増加したためであることがわかった。Au バンプと基板の Au 電極の接合面積に基板電極の Au 層厚の影響が無いため、基板電極の Au 層の厚化は Au バンプと基板の Au 電極の接合部せん断強度の増加方法として有効であることが明らかとなった。Au 層の $0.44\ \mu\text{m}$ から $0.91\ \mu\text{m}$ への厚化により、せん断強度は約 50%増加した。

2.4. せん断強度の強化機構

基板の Au 電極の Au 層の厚化により Au バンプと Au 電極の接合部せん断荷重が増加した理由は，Au 層の厚化により Au 層の塑性流動性が増え，Au バンプとの接合面における Au 層の塑性変形量が増加したためと考えられる．一方，基板電極の Au 層厚は Au バンプの巨視的な塑性変形量および Au バンプとチップの Al 電極の Au-Al 接合面積へ影響を及ぼさなかった．この理由について以下に考察した．

金属体へ超音波の縦波を印加すると金属体の変形応力が低下することが知られており，この現象は Blaha 効果と呼称されている^{28, 29)}．変形応力の低下率は超音波の振幅に依存し，振幅が大きくなると変形応力の低下率は大きくなることが報告されてる^{30, 31)}．金属体に超音波の縦波を印加した加圧試験は Fig. 2-13³¹⁾に示す，金属体を加圧機構と積層圧電アクチュエータで挟む構成の装置で行われる．金属体を上方から加圧した状態で積層圧電アクチュエータに交流電圧を付加し，発生した超音波を金属体へ印加する．加圧機構には十分な剛性が与えられ，印加された超音波は金属内でほぼ 0 まで減衰する．つまり，加圧試験において金属体へ印加する超音波の振幅とは，金属体内部での振幅減衰量である．そのため，変形応力の低下率は振幅減衰量に依存すると言い換えられる．

本研究の接合では，Au バンプへ超音波の横波を印加した．加圧下で超音波を印加すると Au バンプの巨視的な塑性変形が進行する．さらに超音波振幅を大きくすると Au バンプの巨視的な塑性変形量は増加する²⁶⁾．このことから，超音波の横波の印加でも Blaha 効果が発現することがわかる．したがって，縦波の超音波を印加する場合と同様に，Au バンプ内の超音波の振幅減衰量が Au バンプの変形応力の低下率および Au バンプの巨視的な塑性変形量に影響を及ぼすと考えられる．

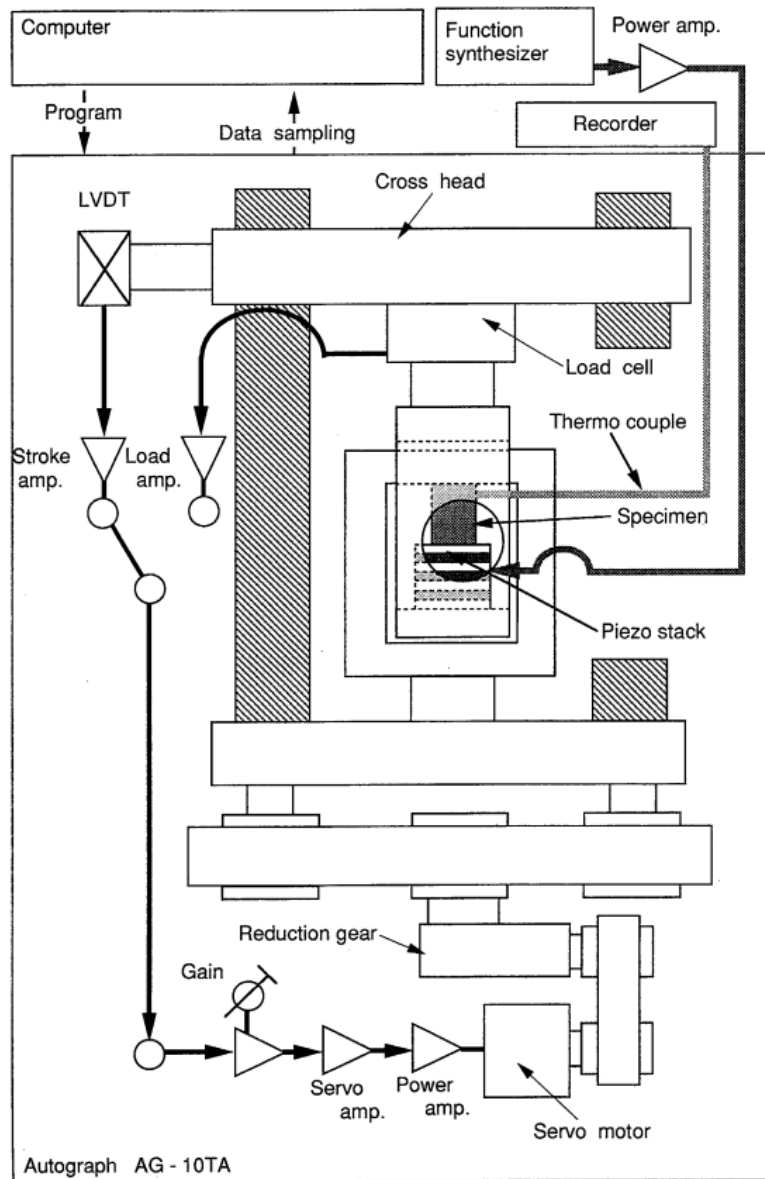


Fig. 2-13 Apparatus of compression test under applying ultrasonic vibration³⁰⁾.

Fig. 2-14 に本研究の Au バンプの接合部の模式図を示す. Au バンプ内の超音波の減衰量は, Au バンプのチップ電極側と基板電極側の超音波振幅の差分である. なお, Au バンプ内を伝播する周波数 60 kHz の横波超音波の波長は 19.9 mm であり, 圧着高さが数十 μm である Au バンプ内に定常波は発生せず, Au バンプと基板の Au 電極の接合面は振動の節にはならない.

Au バンプの基板電極側の振幅は, Au バンプと基板の Au 電極間の摩擦力と, 基板とワークステージ間の拘束力, ワークステージの剛性などに影響を受ける. この中で, 基板の Au 電極の Au 層厚の変更により変化する可能性があるのは Au バンプと基板の Au 電極の間の摩擦力である. この摩擦力は Au バンプと Au 電極の間の凝着および両者間の機械的拘束により発生する. セラミック基板の電極は, 電極の基礎部分である W 層が焼結で形成されるため表面粗さ R_a が $0.5 \mu\text{m}$ と大きい. このため, 本研究で調査した Au 層厚 $1.15 \mu\text{m}$ 以下の Au 電極では, Au バンプと基板の Au 電極の間の摩擦力に対して機械的拘束力の影響が凝着による拘束力よりも大きく, Au 層厚により Au バンプと Au 電極の凝着状態が変わっても Au バンプの圧着径がほとんど変化しなかったと推測される.

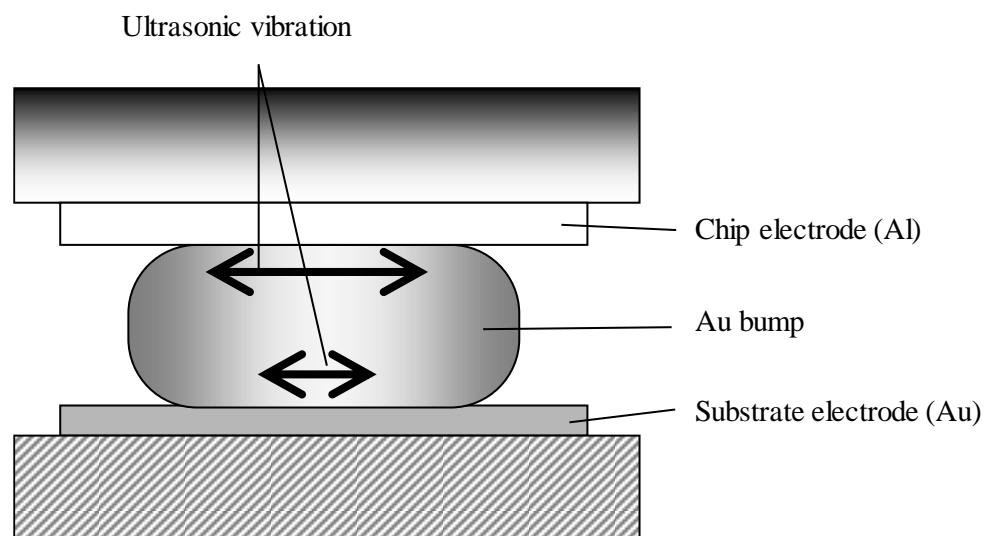


Fig. 2-14 Schematic illustration of ultrasonic vibration decaying in Au bump.

一方、Au バンプとチップの Al 電極の接合面は、超音波の伝播経路であり、この接合面へ超音波により印加されるせん断力は、Au バンプと基板の Au 電極の間の摩擦力が増えると増加する。本研究で調査した範囲においては、基板電極の Au 層厚が変わっても Au バンプと基板電極の間の摩擦力がほとんど変わらないので、Au バンプとチップの Al 電極の接合面に印加されるせん断力も変わらないと考えられる。また、Au バンプの圧着径が同じであったことから、Au バンプと Al 電極の接合面の圧力も同じであるとされる。よって、Au バンプと Al 電極の接合面に加えられるせん断力および圧力に基板電極の Au 層による差が生じないため、接合面の微視的な塑性変形量にも差が生じず、接合面の塑性変形によって生成する Au-Al 合金層の面積、すなわち真実接合面積に変化が生じなかったと考えられる。

2.5. 結言

電子デバイスチップの Al 電極に形成した Au バンプとセラミック基板の Au 電極の接合を対象に，基板電極の Au 層の厚化による接合部の高強度化を検討した．基板電極の Au 層厚を 5 水準で変更してバンプ接合部全体のせん断荷重と Au バンプの圧着径，Au バンプとチップ Al 電極の間に生成される Au-Al 合金層の面積を調べ，Au バンプと Au 電極のせん断強度の強化効果を明らかにした．得られた結果を以下に示す．

- (1) 基板電極の Au 層の厚化により，Au バンプと基板電極の接合部せん断荷重は増加した．一方，Au バンプの巨視的な塑性変形量は Au 層厚により変化しなかった．したがって，基板電極の Au 層の厚化は，Au バンプの巨視的な塑性変形量を増加することなく，Au バンプと基板電極の接合部のせん断強度を強化する手法として有効である．Au 層厚を $0.44\ \mu\text{m}$ から $0.91\ \mu\text{m}$ に増加させることでせん断強度は約 50% 増加した．
- (2) フリップチップボンディングにより，Au バンプとチップの Al 電極の接合も進行し，真実接合面積は 3 倍以上に増加したが，基板電極の Au 層厚の影響はみられなかった．
- (3) Au 層の厚化により Au バンプと基板の Au 電極のせん断荷重が増加した理由は，Au 層の塑性流動性が向上して変形能が増加し，Au バンプと Au 電極の接合面における微視的な塑性変形量が増加したためと考えられる．
- (4) Au バンプの巨視的な塑性変形量および Au バンプとチップの Al 電極の真実接合面積に基板電極の Au 層厚の影響がみられなかった理由は，Au バンプと基板電極の摩擦力に対して電極の表面粗さが支配的であり，Au 層厚の影響が相対的に小さかったためと考えられる．

第 2 章の参考文献

- 1) H. Yatsuda and T. Eimura: The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, 19-3 (1996), 238-243.
- 2) 中野 景介, 藤本 尚紀, 田中 昌明, 浅井 昭喜: デンソーテクニカルレビュー, 21 (2016), 150-155.
- 3) 谷 元昭, 渡辺 弘道, 西村 明彦, 可知 繁隆, 河田 宣久, 杉浦 慎一: 富士通テン技報, 27-2 (2009), 19-25.
- 4) 岩崎 俊寛, 富田 至洋, 木村 通孝: マイクロエレクトロニクスシンポジウム予稿集, 13 (2003), 196-199.
- 5) T. S. McLaren, S. Y. Kang, W. Zhang, T. H. Ju and Y. C. Lee: IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 20-2 (1997), 152-159.
- 6) 若宮 敬一郎, 岩崎 俊寛, 西原 達人, 畑中 康道, 富田 至洋, 木村 通孝: エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集, 9 (2003), 41-44.
- 7) 高橋 康夫, 亀田 真理, 荒谷 修三: エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集, 9 (2003), 67-72.
- 8) 福田 弘樹, 亀田 真理, 高橋 康夫, 富村 寿夫: エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集, 10 (2004), 197-202.
- 9) F. Wang, Y. Chen and L. Han: IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 3-2 (2013), 336-341.
- 10) F. Wang, Y. Chen and L. Han: IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 1-6 (2011), 852-858.
- 11) 南 匡晃, 清野 伸弥, 森本 亮一, 弘田 実保: エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集, 8 (2002), 131-136.
- 12) M. Hizukuri, N. Watanabe and T. Asano: The Japanese Journal of Applied Physics, 40 (2001), 3044-3048.
- 13) T. Shuto and T. Asano: The Japanese Journal of Applied Physics, 54-3 (2015), 030204-1~5.
- 14) T. T. Bui, F. Kato, N. Watanabe, S. Nemoto, K. Kikuchi and M. Aoyagi : Extended Abstracts of the 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials, (2013), 986-987.
- 15) K. Tanida, M. Umemoto, R. Kajiwara, Y. Tomita, Y. Akiyama and K. Takahashi: Extended Abstracts of the 2002 International Conference on Solid State Devices and Materials, (2002), 774-775.
- 16) 関本 隆司, 中谷 直人, 小鮎 秀明: エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, 19 (2005).
- 17) 前田 剛伸, 矢野 公也, 森本 亮一, 弘田 実保: エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集, 10 (2004), 265-270.

- 18) 小林 弘, 小八重 健二, 久保田 崇, 尾崎 行雄, 夏秋 昌典, 中村 公一: エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集, 10 (2004), 271-276.
- 19) 山内 朗, 桑内 重喜, 佐藤 茂, 中居 誠也: マイクロエレクトロニクスシンポジウム予稿集, 13 (2003), 200-203.
- 20) 藤原 伸一, 原田 正英, 藤田 勇次: 溶接学会論文集, 32-2 (2014), 57-63.
- 21) 松村 貴由, 吉良 秀彦, 小八重 健二, 海沼 則夫: エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集, 11 (2005), 211-216.
- 22) T. Ando, T. Tomioka, M. Nakazono, K. Atsumi, Y. Tane, J. Nakano and S. Hirata : IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology , 16-8 (1993), 808-816.
- 23) 黒坂 成吾, 佐藤 誠: 表面技術, 65-3 (2014), 118-122.
- 24) 珍田 聡: 表面技術, 62-9 (2011), 422-428.
- 25) 富岡 泰造, 井口 知洋, 森 郁夫, 大谷 和巳, 末松 睦, 渥美 幸一郎: 溶接学会全国大会講演概要, 65 (1999), 322-323.
- 26) 富岡 泰造, 井口 知洋, 渥美 幸一郎: 高温学会誌, 30-1 (2004), 41-46.
- 27) 大貫 仁: エレクトロニクス実装学会誌, 5-4 (2002), 412-417.
- 28) F. Blaha and B. Langenecker: Acta Metallurgica, 7 (1959), 93-100.
- 29) 和泉 修, 大山 致知, 鈴木 善彦: 塑性と加工, 7-61 (1966), 59-64.
- 30) O. Izumi, K. Oyama and Y. Suzuki: Transactions of the Japan Institute of Metals, 7 (1966), 162-167.
- 31) 土師 宏, 守田 俊章, 中島 英治, 吉永 日出男: 日本金属学会誌, 57-8 (1993), 884-889.

第 3 章 ランプ状接合荷重による Au バンプと基板の Au 電極の接合部の高強度化

3.1. 緒言

超音波フリップチップボンディングでは、接合ツールでデバイスチップに接合荷重を加えた状態で超音波を印加する。通常、超音波の印加中の接合荷重は一定に保持する^{1, 2)}。変形能の高い Au スタッドバンプ (以後, Au バンプ) は最初に接合荷重により変形し、超音波の印加でさらに変形する。したがって、Au バンプと基板電極の接合面には、接合荷重のみで形成された領域と、接合荷重と超音波の印加により形成された領域の 2 種類の領域がある。荷重のみで形成された領域は、超音波印加を開始するまでは熱圧接の状態である。熱圧接で Au バンプと基板電極の接合を得るには高温において高い接合荷重を長時間加える必要がある³⁻⁵⁾。超音波印加を開始する前の数十 ms の短時間に 1 バンプ当たり 1~2 N の低い接合荷重が接合面に加わってもほとんど接合しない。さらに、超音波が印加されても、印加前の接合荷重のみで形成された Au バンプと基板電極の接合面の中央部へ加えられる力は小さく、その領域では大きな塑性変形を生じないことが電極のひずみ量測定⁶⁾や接合面の変形に関する数値解^{7, 8)}などで示されている。すなわち、接合荷重のみで形成された領域の接合への寄与は少ない。この領域の面積の接合面全体に対する比率を減らすことで接合部のせん断強度は増加すると考えられる。この比率を減らす方法の一つとして、低い荷重で超音波の印加を開始して超音波印加中に接合荷重を増加させる荷重プロファイルを用いることが挙げられる。接合荷重を増加させるプロファイルには、Fig. 3-1 に示すように接合荷重を複数回に分けて増加させるステップ状や、徐々に増加させるランプ状などがある。荷重変化の滑らかさと荷重プロファイルの再現性、荷重オーバーシュートの発生し難さの点でランプ状がステップ状よりも優れている。これまでに、ランプ状接合荷重による接合には幾つかの研究例がある⁹⁻¹¹⁾。しかし、これらの研究では Au バンプの巨視的な変形量は開示されておらず、接合部せん断強度の増加効果は不明である。また、接合強度の増加メカニズムに関する考察は不足している。

第3章では、接合部せん断強度の高強度化を目的として、ランプ状接合荷重が接合部せん断強度に及ぼす影響について調査した。低荷重と高荷重をそれぞれ一定に保持する一定接合荷重と、低荷重から高荷重に直線的に増加させるランプ状接合荷重の計3種類の接合荷重プロファイルで接合体を作製し、接合部のせん断荷重およびAuバンプの巨視的な塑性変形量を比較してランプ状接合荷重の効果を明らかにすると共に、せん断強度の高強度化機構を考察した。

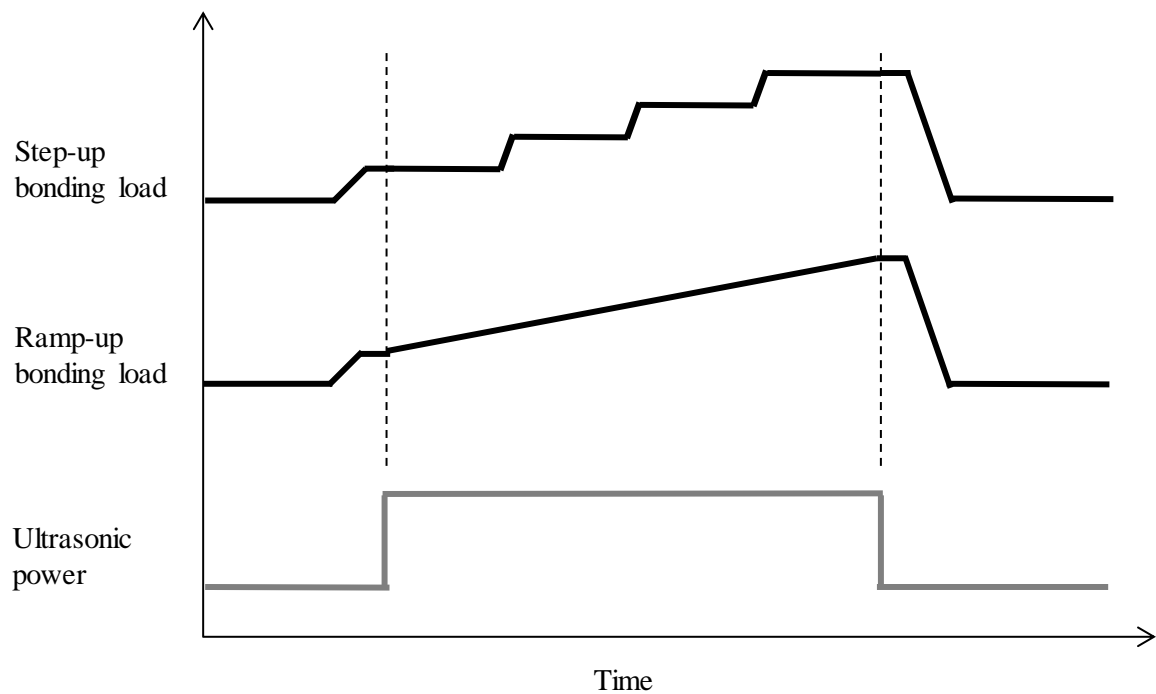


Fig. 3-1 Examples of bonding load profiles.

3.2. 実験方法

接合実験に用いた Test Element Group (TEG) B のチップと基板の仕様を Table 3-1 に示す. チップの Al 電極の材質は Al-0.5Si-0.5Cu (mass%)合金であり, スパッタリングにより形成した. Al 電極の外形寸法は $120 \times 120 \mu\text{m}^2$ で, 厚さは $0.36 \mu\text{m}$ である. 基板には Al_2O_3 を基材としたセラミック基板を用いた. 基板電極の構成は, Al_2O_3 側より W/Ni/Au で, 各層の厚さは $15/2/2 \mu\text{m}$ である. W 層は Al_2O_3 との同時焼成で形成し, Ni 層および Au 層は電解めっきでそれぞれ形成した. チップの Al 電極には純度 99.99 mass% の Au ワイヤを用いて Au バンプを形成した. Au バンプの仕様を Table 3-2 に, チップ上の配置を Fig. 3-2 に示す.

接合装置には, Fig. 1-10 に示した Au バンプと基板の Au 電極の接合面と平行な振動方向の超音波を用いる超音波フリップチップボンディング装置を使用した.

Table 3-1 Specifications of TEG B.

Items	Specifications
[Test chip]	
Chip size	$0.85 \times 1.35 \times t 0.35 \text{ mm}^3$
Electrode material	Al-0.5Si-0.5Cu (mass%)
Electrode size	$120 \times 120 \times t 0.36 \mu\text{m}^3$
Number of electrodes	11
[Test substrate]	
Electrode layer composition	W / Ni / Au
Thickness of each layer	$15 / 2 / 2 \mu\text{m}$

Table 3-2 Specifications of Au bump of TEG B.

Items	Specifications
Bump height	$78 \mu\text{m}$
Bump diameter	$120 \mu\text{m}$
Shear force	1.2 N

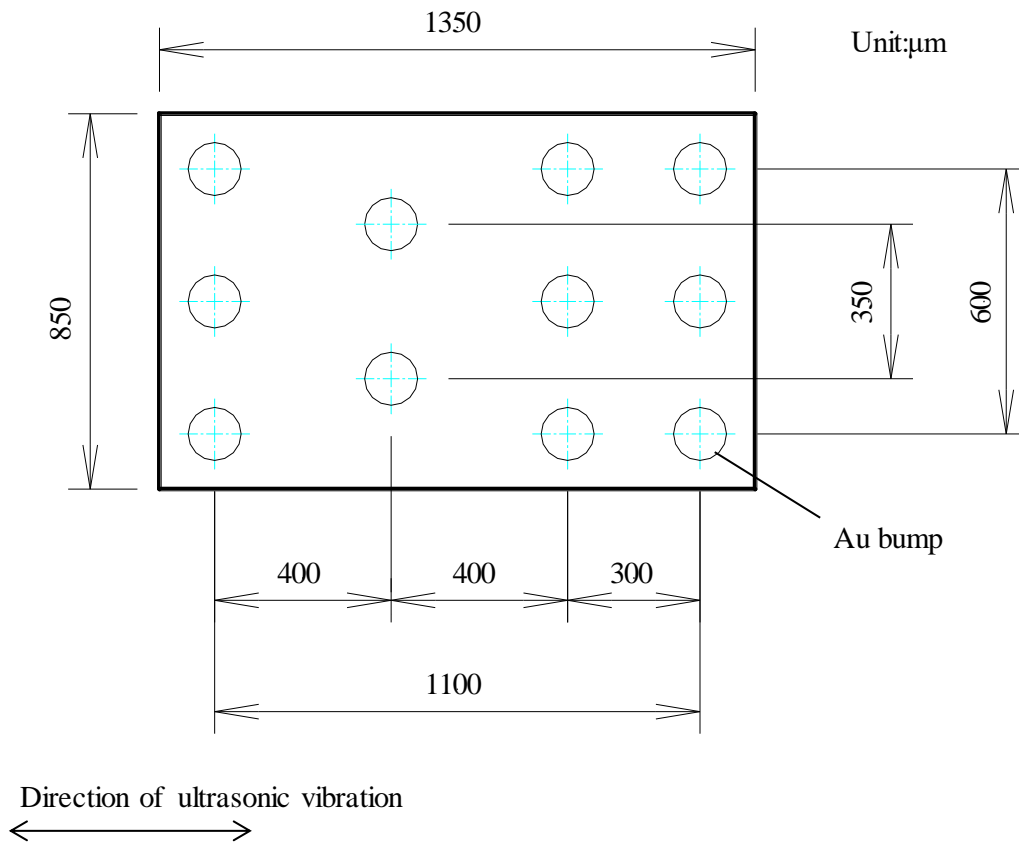


Fig. 3-2 Au bump layout of TEG B.

接合荷重プロファイルは、Fig. 3-3 に示す 1 バンプ当り 0.72 N の一定荷重と、1 バンプ当り 1.50 N の一定荷重と、1 バンプ当り 0.72 N から 1.50 N へ直線的に増加させるランプ状荷重の 3 種類とした。この 3 種類の接合荷重プロファイルで超音波出力を 0.15, 0.28, 0.42, 0.62, 0.89 W の 5 水準で変化させて接合体を作製した。超音波は、接合荷重が設定値に達してから 10 ms 後に 300 ms 印加した。以後、超音波印加時間を接合時間と呼称する。接合荷重は超音波印加を停止してから 10 ms 後に降下させた。接合温度は 25 °C に設定した。この理由は、通常の超音波フリップチップボンディングの接合温度である 150~200 °C で接合すると、Au バンプと基板の

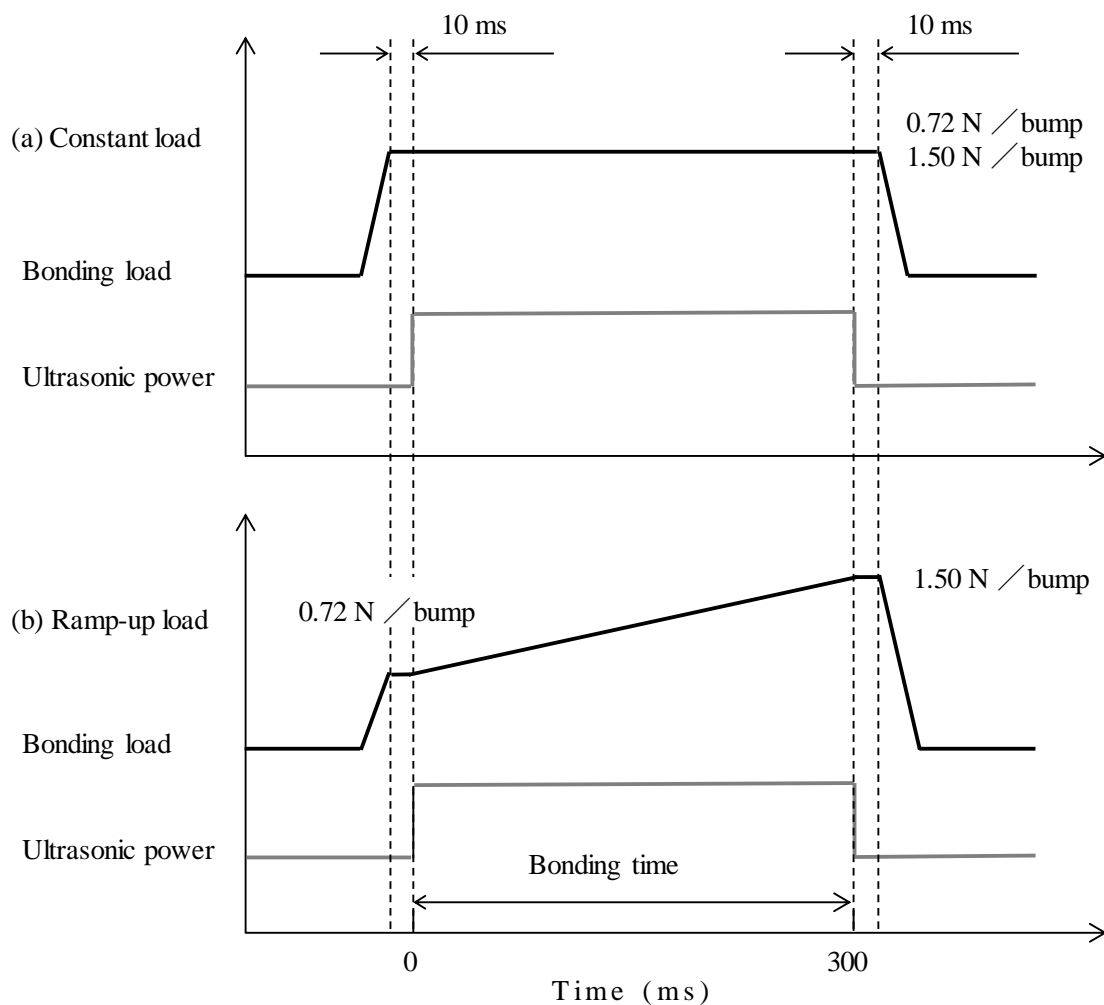


Fig. 3-3 Profiles of constant load, ramp-up bonding load and ultrasonic power.

Au 電極のせん断荷重が高くなり、チップせん断試験において Au バンプとチップの Al 電極の接合部が破断してしまい Au バンプと基板の Au 電極の接合部のせん断荷重の測定が困難になるからである。接合後に Au バンプとチップの Al 電極を分離して行うバンプせん断試験では、Au バンプの巨視的な塑性変形量が大きい場合、Au バンプと基板の Au 電極の接合面のせん断荷重が高くなり、試験時に Au バンプ内での破断が起こり易い。このため、接合部のせん断荷重に及ぼす接合荷重プロファイルの影響がわかり難くなる。

作製した接合体で Au バンプと基板の Au 電極の接合部せん断荷重と、接合後の Au バンプの高さ(以後、圧着高さ)を測定した。せん断荷重は Fig. 2-4 に示したチップせん断試験で測定した。せん断速度は $500 \mu\text{m/s}$ である。せん断ツールは全てのバンプ接合部が破断するまで移動させ、得られた最大荷重を Au バンプ数 11 で除した値をせん断荷重とした。また、接合体を Fig. 2-7 に示したように塩酸に浸漬し、チップの Al 電極をエッチングすることでチップを分離した。そして、基板の Au 電極上に残った Au バンプの圧着高さを測定顕微鏡で測定した。

フリップチップボンディングの接合部は Au-Au 接合であり、分離が難しい。そのため、Au バンプと基板の Au 電極の接合面積を直接測定することは困難である。そこで、Au バンプの圧着高さから接合面積を算出できるように、予め両者の関係式を実験により求めた。Fig. 3-4 に示すように、電極上に Au バンプを形成したチップを平坦なガラス板へ加圧するとともに超音波を印加して Au バンプを巨視的に塑性変形させ、バンプの高さ H と接合面の面積 S の関係式を求めた。平坦なガラス板へ加圧したのは、Au バンプ上面を平坦にして外形を明確にするためである。Au バンプを凹凸のある基板電極へ加圧するとバンプの外形輪郭が曖昧になる。バンプ高さ H は測定顕微鏡で測定し、接合面の面積 S は Au バンプ上面を撮影して画像処理により算出した。

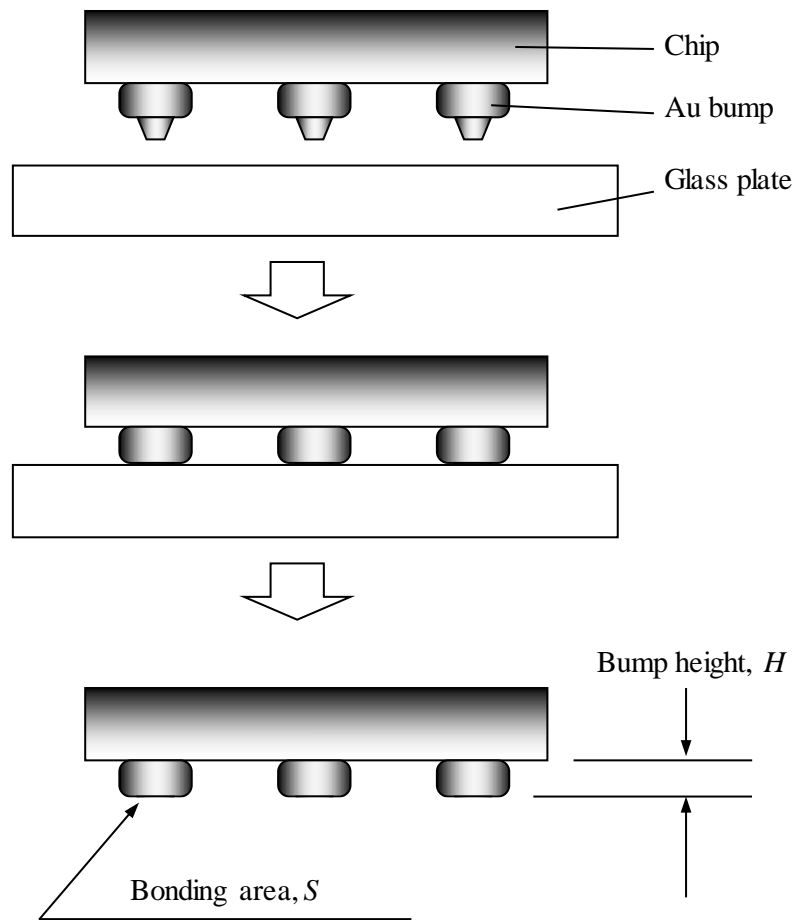


Fig. 3-4 Measurement of bump height, H and bonding area, S .

3.3. 実験結果および考察

3.3.1. 接合部せん断荷重および Au バンプの巨視的な塑性変形量

Fig. 3-5 に、0.72 N 一定荷重、1.50 N 一定荷重、ランプ状荷重の 3 種類の接合荷重プロファイルによる Au バンプの圧着高さを示す。超音波出力が増加するに従い Au バンプの圧着高さは減少した。1.50 N 一定荷重とランプ状荷重では Au バンプの圧着高さに差が無い。つまり、両者の Au バンプと基板の Au 電極の接合面積には差が無い。超音波出力 0.42 W における Au バンプの圧着高さの平均値はランプ状荷重では 29.7 μm で、1.50 N 一定荷重では 29.5 μm である。0.72 N 一定荷重の Au バンプの圧着高さは、1.50 N 一定荷重およびランプ状荷重の値よりも大きく、超音波出力 0.42 W 以上の範囲では飽和した。

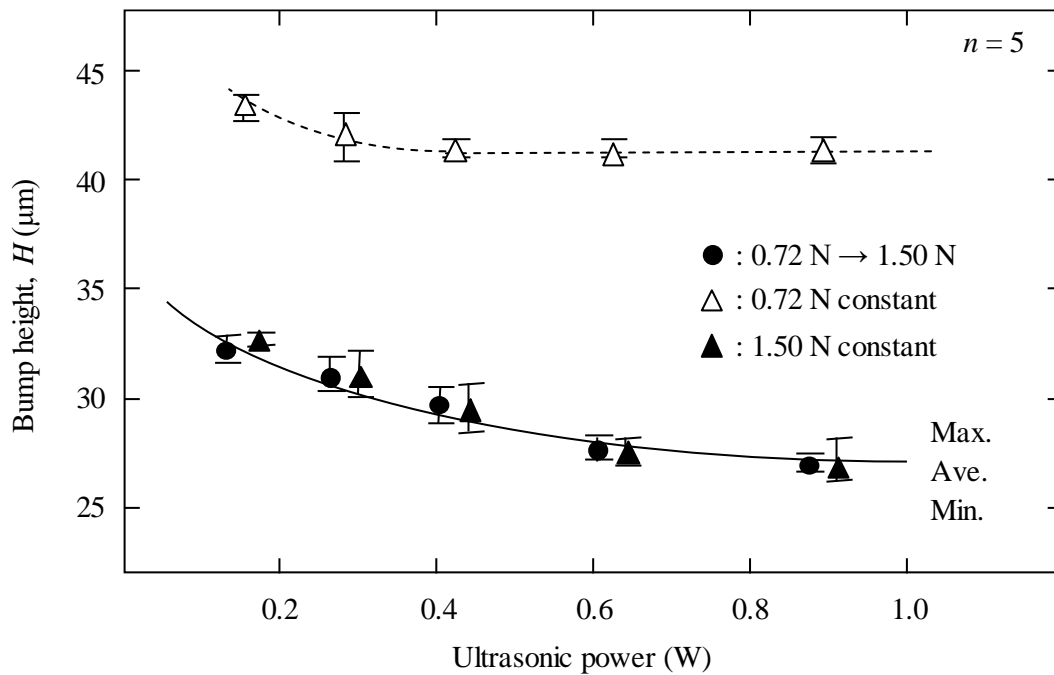


Fig. 3-5 Effect of ultrasonic power on Au bump height, H .

Fig. 3-6 に 3 種類の接合荷重プロファイルによるバンプ接合部のせん断荷重を示す。せん断荷重は、チップせん断試験で得られたせん断荷重を Au バンプ数 11 で除した値である。バンプ接合部の破断は全て Au バンプと基板の Au 電極の接合面で生じた。したがって、得られたせん断荷重は、Au バンプと基板の Au 電極の Au-Au 接合部のせん断荷重である。いずれの接合荷重プロファイルでも、超音波出力の増加に従いせん断荷重は増加した。0.72 N 一定荷重では、超音波出力 0.42 W 以上の範囲でせん断荷重が飽和した。せん断荷重が飽和する範囲で Au バンプの圧着高さも飽和していることから、接合荷重 0.72 N の場合、超音波出力を 0.42 W 以上に増加させてもチップの接合中の振幅が増えないことがわかる。これは、接合荷重が低いと接合ツールとチップ背面の摩擦力が小さくなり、接合ツールからチップへ伝達できる超音波振幅の上限が低くなるためである。0.72 N 一定荷重は、超音波出力 0.42 W 未満の範囲において、1.50 N 一定荷重よ

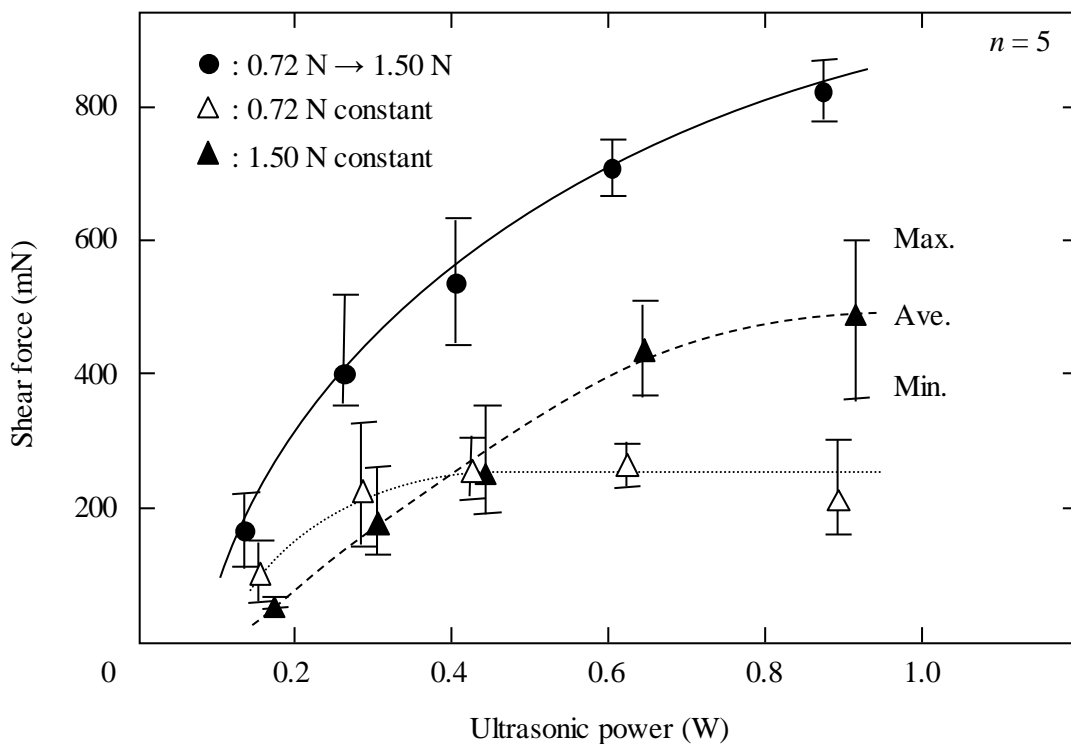


Fig. 3-6 Effect of ultrasonic power on shear force.

りも Au バンプの圧着高さが高いにもかかわらず高いせん断荷重を示した。この理由は、Au バンプと基板電極の接合面積が小さいために、超音波により Au バンプと Au 電極の接合面の全域でフレッティングが起これ接合面の面積に対する真実接合面積の比率が増加したためと推測される。1.50 N 一定荷重とランプ状荷重を比較すると、せん断荷重はランプ状荷重の方が高くなった。1.50 N 一定荷重とランプ状荷重に Au バンプと基板電極の接合面積の差が無いことから、ランプ状荷重は、Au バンプと基板の Au 電極の接合部せん断強度の高強度化に効果があると言える。超音波出力 0.42 W で比較すると、ランプ状荷重の接合部せん断強度は 1.50 N 一定荷重と比べ 110% 増加した。

3.3.2. ランプ状接合荷重によるせん断強度の強化機構

ランプ状荷重によるバンプ接合部のせん断強度の強化機構を明らかにするため、接合の過程を調べた。1.50 N 一定荷重と 0.72 N から 1.50 N に増加させるランプ状荷重の 2 種類の接合荷重プロファイルを用い、接合を 50, 100, 200 ms の時点で中断した接合体を作製した。この接合体でバンプ接合部のせん断荷重と、Au バンプの圧着高さを測定した。超音波出力は 0.42 W とした。また、Au バンプの圧着高さから Au バンプと基板の Au 電極の接合面積を算出するための関係式を検討した。Fig. 3-7 に、平坦なガラス板へ Au バンプを超音波を印加しながら加圧して取得した Au バンプの圧着高さ H と接合面の面積 S の関係を示す。この結果を基に式(2-1)に示す関係式を導出し、圧着高さから Au バンプと基板の Au 電極の接合面の面積 S を算出した。

$$S = (77 \times H^2 - 8352 \times H + 240170) \times 10^{-4} \quad (2-1)$$

S : 接合面積 ($\times 10^{-9} \text{ m}^2$)

H : 圧着バンプ高さ (μm)

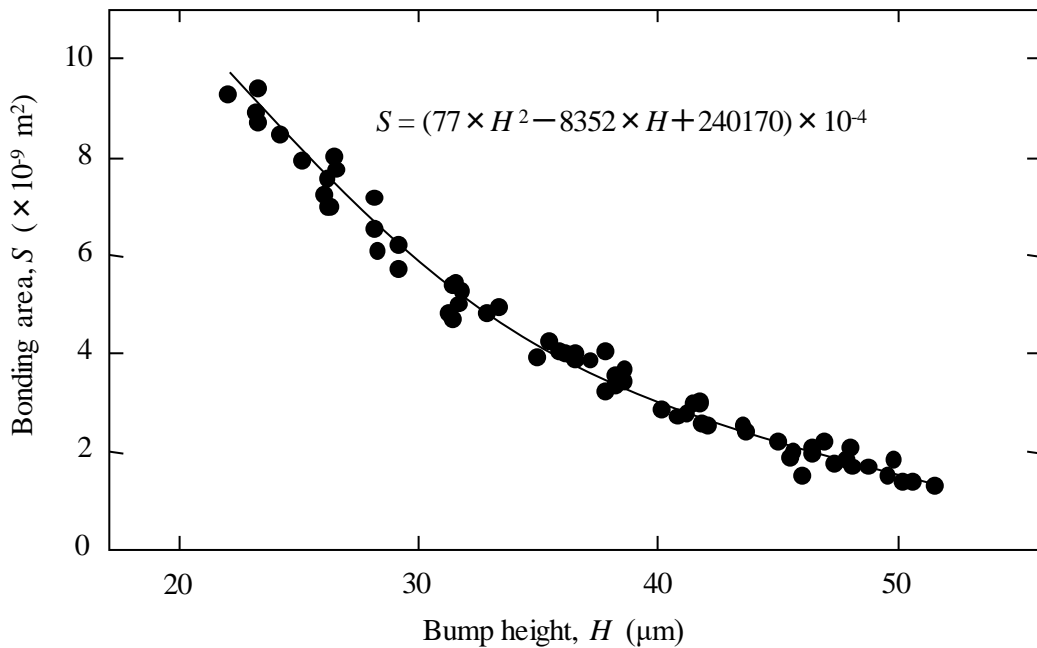


Fig. 3-7 Relationship between bump height, H and contact area, S .

Fig. 3-8 に 1.50 N 一定荷重と 0.72 N から 1.50 N のランプ状荷重の Au バンプの圧着高さの時間変化を示す. 接合時間 0 ms では, 超音波印加前に Au バンプに加えられた接合荷重の差により Au バンプの圧着高さは異なる. 時間の経過と共に圧着バンプ高さの差は減少し, 接合荷重が等しくなる接合時間 300 ms では圧着高さの差は無くなることわかる.

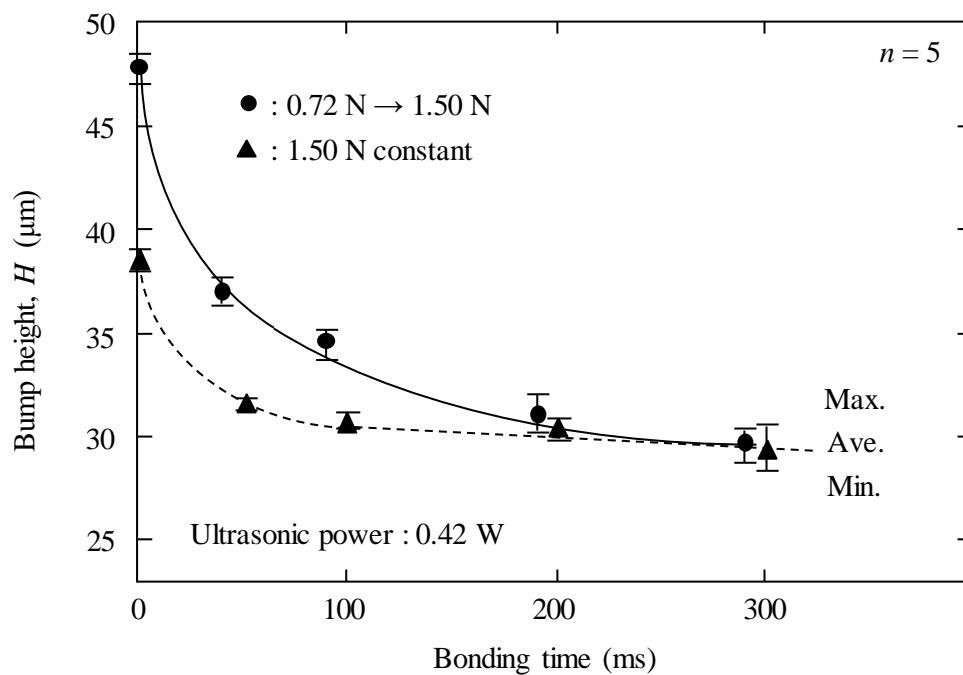


Fig. 3-8 Changes in bump height, H in bonding process.

Fig. 3-9 にせん断荷重の時間変化を示す。接合時間 0 ms ではいずれの接合荷重プロファイルもせん断荷重は 0 mN である。超音波を印加すると、時間の経過にしたがい、せん断荷重は増加した。いずれの時間においても、せん断荷重はランプ状接合荷重の方が高い。

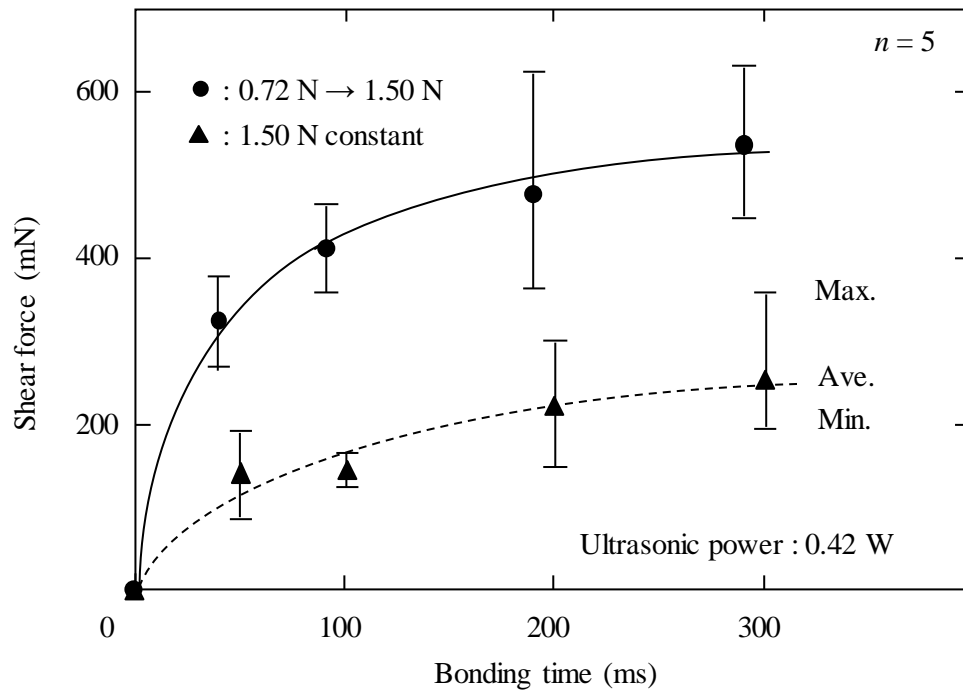


Fig. 3-9 Changes in bump shear force in bonding process.

Au バンプの圧着高さから算出した Au バンプと基板の Au 電極の接合面積を Fig. 3-10 に示す. 接合時間 0 ms でのせん断荷重は 0 mN であり, 荷重印加のみで生じた接合面積は接合に寄与していない. 1.50 N 一定荷重では接合時間 50 ms まで接合面の面積は急激に増加し, その後の変化は少ない. これに対して, ランプ状荷重では接合時間 300 ms まで接合面の面積は緩やかに増加した. 両者の接合面の面積の差は時間の経過に伴って減少し, 接合時間 300 ms では差がほぼ無くなった. 局所フレットィング接合において接合に大きく寄与する超音波印加後の Au バンプと基板の Au 電極の接合面の拡大面積は, ランプ状荷重では $3.9 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ で, 1.50 N 一定荷重の $2.6 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ の 150% であることがわかった. この超音波印加後の接合面の拡大面積が増えることが接合部のせん断荷重が増加する理由の一つであると考えられる. しかし, 超音波印加後の接合面の拡大面積の差が 1.5 倍であるのに対して, せん断荷重の差は 2.1 倍である. したがって, 接合面の拡大面積以外にせん断荷重が増加する理由があると考えられる.

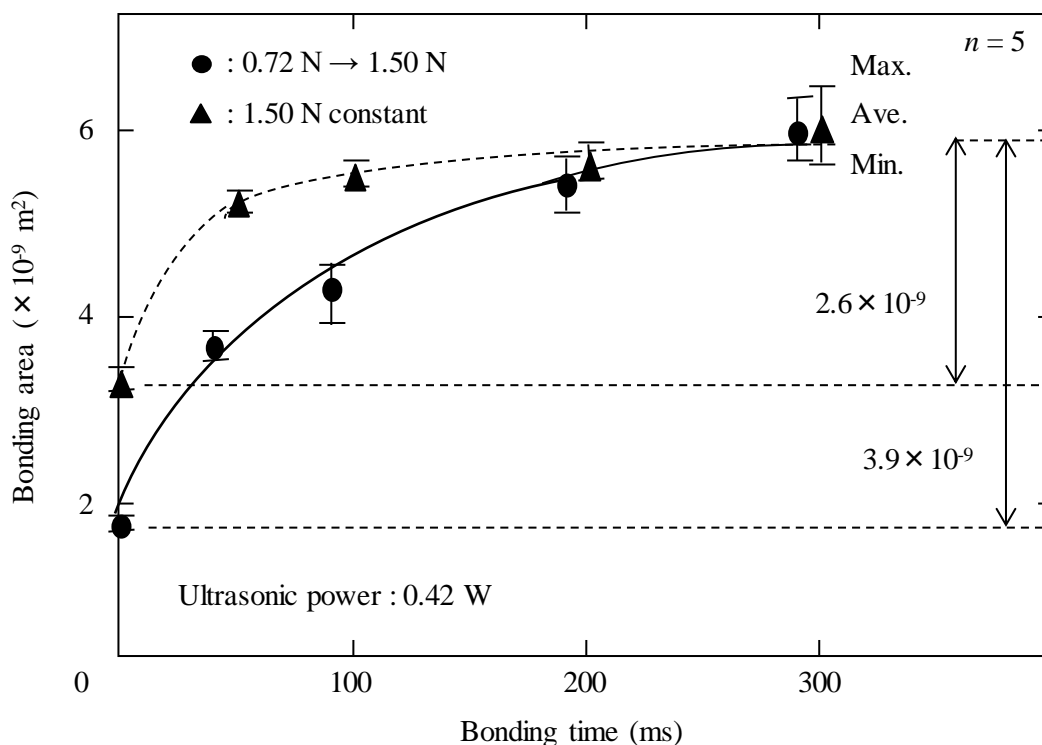


Fig. 3-10 Change in bonding area between Au bumps and Al electrodes of substrates in bonding process.

Fig. 3-11 にせん断荷重の平均値と接合面積の平均値で除して求めた接合部せん断強度の時間変化を示す。いずれの時間においても、ランプ状荷重の方が 1.50 N 一定荷重よりも接合部のせん断強度が高い。ランプ状荷重は接合初期のせん断強度が高く、その後低下し、200 ms から 300 ms の範囲では変化が少ないことがわかった。1.50 N 一定荷重では、Fig. 3-10 に示したように 100 ms から 300 ms までの接合面積の変化は少ないが、接合部せん断強度は緩やかに増加した。

Fig. 3-12 に Au バンプと基板の Au 電極の接合面の圧力の時間変化を示す。接合面の圧力は 300 ms を除き、ランプ状荷重の方が低くなっていることがわかった。ランプ状荷重では、超音波印加後に接合面の圧力が大きく減少し、その後わずかに増加する。Fig. 3-11 に示したランプ状荷重の接合部のせん断強度は 100 ms までの接合初期が高く、その後わずかに減少している。1.50 N 一定荷重では、接合面の圧力は超音波印加後に減少した後も時間の経過に従い緩やかに減少し続けた。1.50 N 一定荷重の接合部のせん断強度は時間の経過に従い緩やかに増加する。これらの結果は、接合部のせん断強度と接合面の圧力に相関があることを示している。

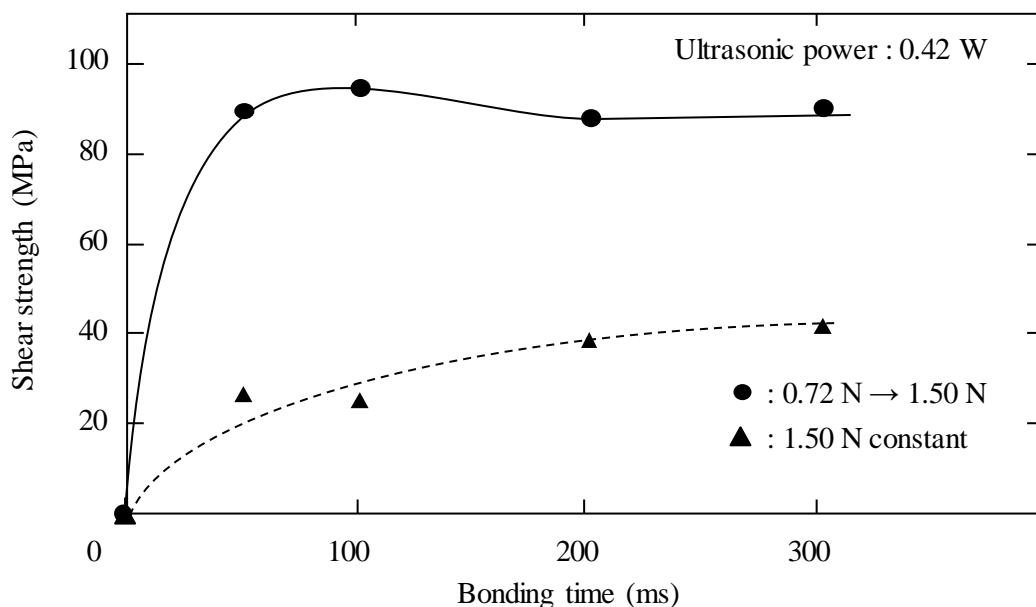


Fig. 3-11 Changes of shear strength in bonding process.

超音波接合において、部材の接合面の圧力が低い方が接合面におけるフレットングが起り易くなることがワイヤボンディング¹²⁾および超音波接合¹³⁾の研究で示されている。このことから、ランプ状接合荷重では、接合面積が小さく、かつ、接合面の圧力が低い接合初期に接合面の全域でフレットングが起って接合し、接合部のせん断強度が高くなったと考えられる。また、接合面の拡大過程においても接合面の圧力が低いために、接合面の外周部でのフレットングが一定接合荷重の場合よりも多く発生し、接合面積当りの真実接合面積が増加したと推測される。

以上の結果から、ランプ状荷重は、接合に寄与する超音波印加後の接合面の拡大面積が増加することと、接合中の接合面の圧力が低くなり接合面積当りの真実接合面積が増加することの2つの理由により、一定荷重に比べ接合部のせん断強度が増加したと考えられる。

Fig. 3-13 に、接合実験で得られた結果から推測される接合過程の模式図を示す。1.50 N 一定荷重では、接合面積は Fig. 3-10 に示したように 50 ms までの接合初期に大きく増加し、その後の変化量は小さい。接合面が大きく拡大する接合初期では、主に外周部での局所フレットングにより真実接合部が生成されると考えられる。100~300 ms の範囲では接合面積の

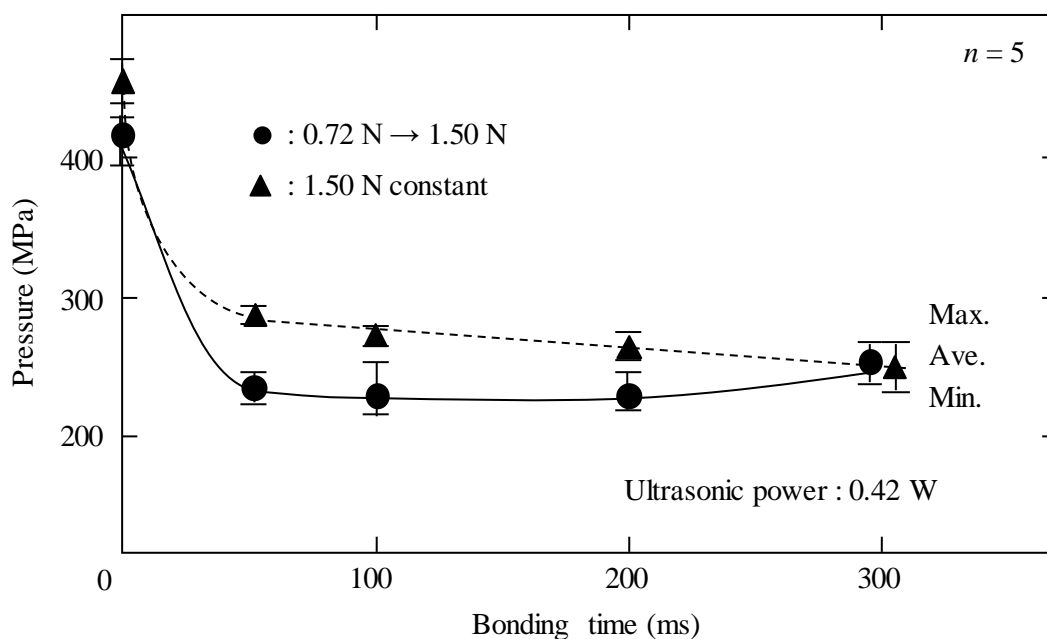


Fig. 3-12 Changes in pressure between Au bumps and Al electrodes of substrates.

変化量が小さく、局所フレットィングの真実接合部生成への寄与は減少する。しかし、この範囲において接合部のせん断強度は増加していることから、100~300 ms の範囲では、接合面の外周部へ繰返し印加される超音波起因のせん断力による Au バンプと基板の電極の密着の進行が主な真実接合部の生成機構であると考えられる。一方、ランプ状接合荷重では、接合面が小さく、圧力の低い接合初期に点線で示す全域フレットィング接合となる。真実接合部の生成により接合面の中央ではフレットィングが起こらなくなり、100 m 以降は実線で示す局所フレットィング接合へ移行する。このようにして、1.50 N 一定荷重よりも接合面の広い領域で真実接合部が生成されると推測される。

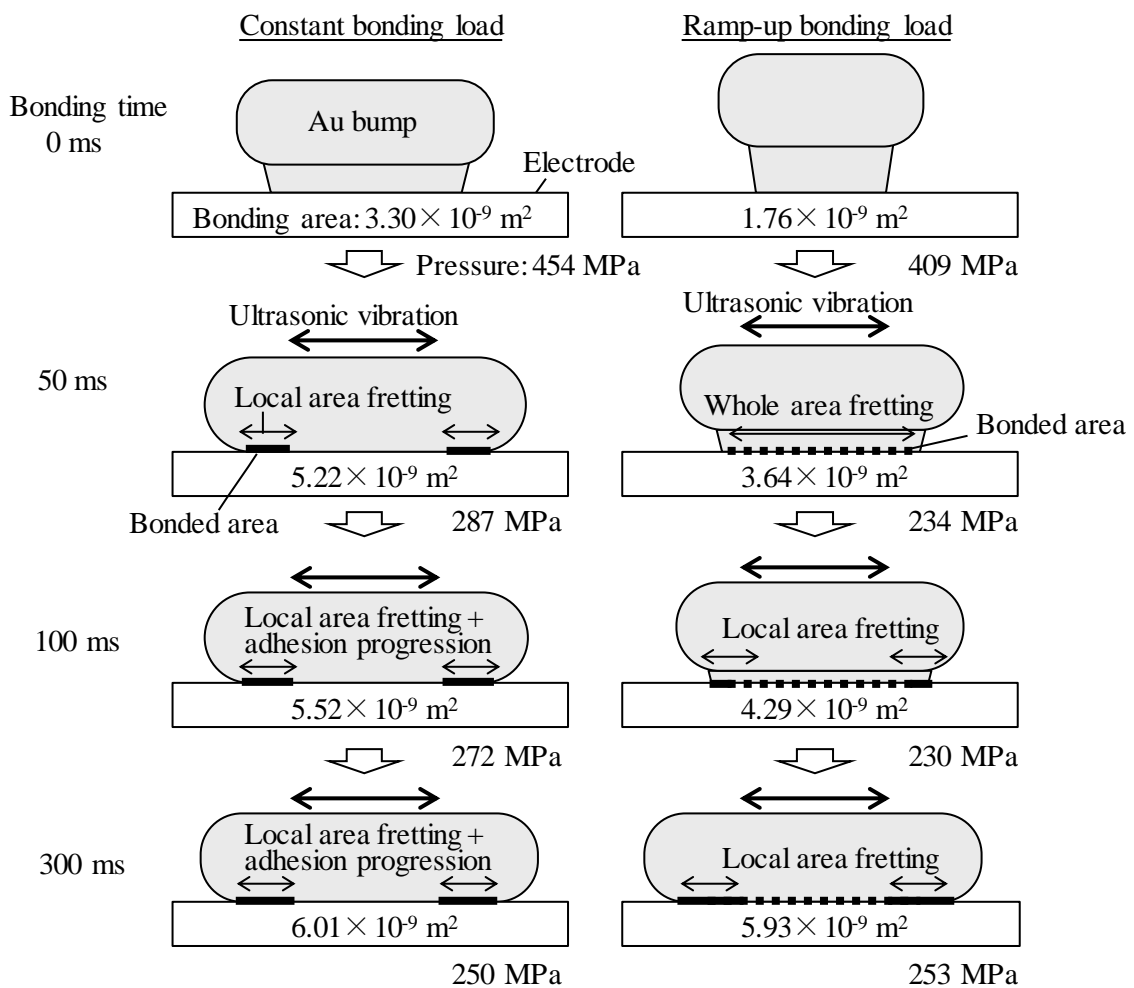


Fig. 3-13 Schematic illustrations of bonding process of constant bonding load and ramp-up bonding load.

以上で述べたランプ状荷重によるせん断強度の強化機構を検証するため、Al 電極の基板を用いて接合実験を行った。Au バンプと Al 電極の接合では接合箇所 Au-Al 合金層が生成され、真実接合部を可視化できる。1.50 N 一定荷重とランプ状荷重の 2 種類の接合荷重プロファイルで接合体を作製し Au-Al 合金層を観察した。超音波出力は 0.42 W、接合時間は 300 ms とした。25 °C の接合では Au-Al 合金層はほとんど生成されないため、基板は 100 °C に加熱した。作製した接合体は塩酸に浸漬して基板の Al 電極をエッチングすることで Au バンプと基板を分離した。Fig. 3-14 に Au バンプ表面に生成した Au-Al 合金層を示す。図中の黄色部分が Au で、明灰色部分が Au-Al 合金層である。1.50 N 一定荷重では Au-Al 合金層はリング状に分布し、かつ、疎らである。接合面の中央部の Au-Al 合金層は少なく、接合荷重のみで接合した領域はほとんど接合に寄与していないことがわかる。これに対し、ランプ状荷重では、接合面の中央部を含むほぼ全域に Au-Al 合金層が密に生成されていることが確認された。この結果は、接合の初期段階において接合面の全域フレットングを生じたことと、接合面の拡大過程におけるフレットングの量が増えたことを示している。

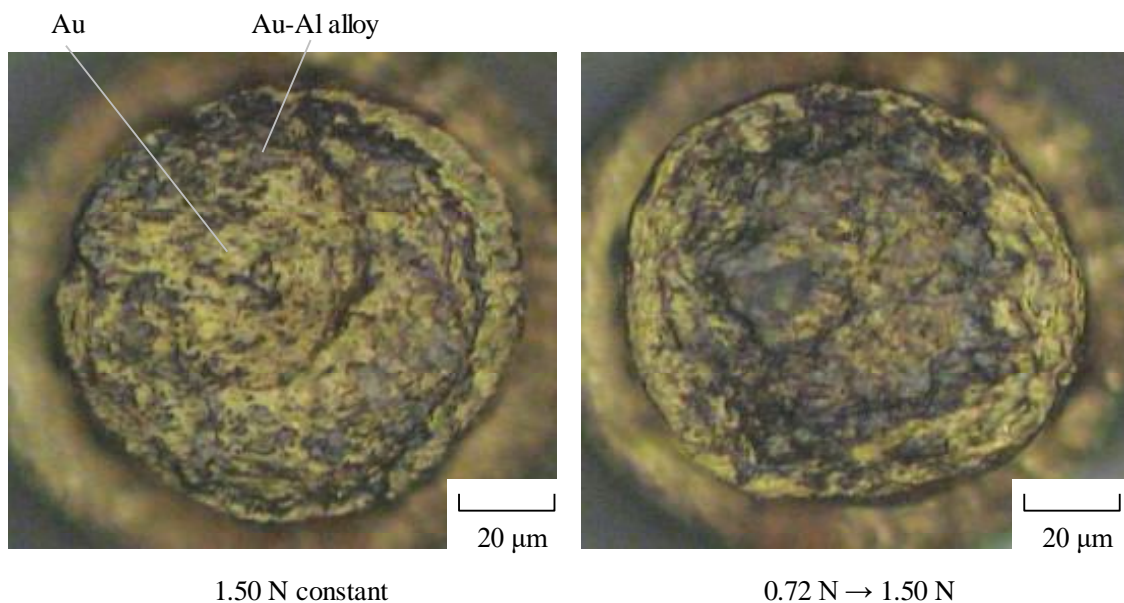


Fig. 3-14 Difference in Au-Al alloy formation by two bonding force profiles.

3.4. 結言

電子デバイスチップの Al 電極に形成した Au スタッドバンプとセラミック基板の Au 電極の接合を対象として，超音波の印加時に接合荷重を低荷重から高荷重に増加させるランプ状接合荷重による接合部せん断強度の高強度化手法を検討した．接合荷重を一定に保持する場合と接合部のせん断荷重および Au バンプの巨視的な塑性変形量を比較し，ランプ状接合荷重によるせん断強度の高強度化効果を明らかにした．また，接合過程における接合面積，接合部のせん断強度および接合面の圧力の変化から，接合部せん断強度の高強度化機構を考察した．得られた結果を以下に示す．

- (1) ランプ状接合荷重では，ランプ状接合荷重の終点荷重を超音波印加の開始時から保持する従来の一定接合荷重よりも高い接合部せん断荷重が得られた．一方，Au バンプの巨視的な塑性変形量については，ランプ状接合荷重と一定接合荷重の差がほとんど見られなかった．したがって，ランプ状接合荷重は接合部せん断強度の高強度化手法として有効である．
- (2) バンプ当りの接合荷重を 0.72 N から 1.50 N へ増加させるランプ状接合荷重により Au バンプの高さが 78 μm から 30 μm へ減少する接合において，1 バンプ当たり 1.50 N で接合荷重を一定保持する接合と比べ，接合部せん断強度が 110% 増加した．
- (3) ランプ状接合荷重で接合部せん断強度が増加した理由として，接合後の Au バンプと基板の Au 電極の接合面積に対する超音波印加後の拡大面積の比率が増加することと，接合中の接合面の圧力が低くなり接合初期に接合面の全域でフレットィングが起きると共に，接合面の面積の拡大過程においても接合面における微視的な塑性変形量が増え真実接合面積が増加したことが挙げられる．
- (4) Al 電極を備えた基板へ Au バンプを接合する検証実験により，ランプ状接合荷重では接合面の中央部および外周部の両領域において Au-Al 合金層が生成され，接合面の全域でフレットィングが起り接合することが検証された．

なお、ランプ状接合荷重による高強度化の効果は、セラミック基板の電極の Au 層厚を 2 μm より薄くしても得られる。Au 層の薄化により基板価格を下げられる。接合温度を 200 $^{\circ}\text{C}$ まで上げ、Au 層を 1 μm 弱へ薄化してもランプ状接合荷重により必要な接合部せん断荷重が得られることを確認し、ランプ状接合荷重は電子デバイスパッケージの組立工程に適用した。

第 3 章の参考文献

- 1) 岩崎 俊寛, 富田 至洋, 木村 通孝: マイクロエレクトロニクスシンポジウム予稿集, 13 (2003), 196-199.
- 2) 若宮 敬一郎, 岩崎 俊寛, 西原 達人, 畑中 康道, 富田 至洋, 木村 通孝: エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集, 9 (2003), 41-44.
- 3) 森 三樹, 福田 由美, 木崎 幸男, 飯田 敦子, 斉藤 雅之: 電子情報通信学会論文誌, J81-C-II-7 (1998), 628-636.
- 4) G. G. Zhang, X. F. Ang, Z. Chen and C. C. Wong: Journal of Applied Physics, 102-6 (2007), 63519.
- 5) C. H. Tsau, M. A. Schmidt and S. M. Spearing: Journal of Microelectromechanical Systems, 13-6 (2004), 963-971.
- 6) N. Watanabe and T. Asano: Japanese Journal of Applied Physics, 42 (2003), 2193-2197.
- 7) 高橋 康夫, 亀田 真理, 荒谷 修三: エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集, 9 (2003), 67-72.
- 8) 福田 弘樹, 亀田 真理, 高橋 康夫, 富村 寿夫: エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集, 10 (2004), 197-202.
- 9) 谷 元昭, 渡辺 弘道, 西村 明彦, 可知 繁隆, 河田 宣久, 杉浦 慎一: 富士通テン技報, 27-2 (2009), 19-25.
- 10) 中野 景介, 藤本 尚紀, 田中 昌明, 浅井 昭喜: デンソーテクニカルレビュー, 21 (2016), 150-155.
- 11) 山内 朗, 桑内 重喜, 佐藤 茂, 中居 誠也: マイクロエレクトロニクスシンポジウム予稿集, 13 (2003), 200-203.
- 12) H. Horibe, K. Nakamura and T. Akiyama: Proc. The 3rd VSLI Packaging Workshop of Japan, (1996), 15-17.
- 13) Y. Takahashi, H. Fukuda, Y. Yoneshima, H. Kitamura and M. Maeda: Journal of Electronic Packaging, 139 (2017), 041010-1-13.

第4章 全域フレットング接合による Chip on Chip 接合の接合性に及ぼすトップチップとボトムチップの平行度の影響

4.1. 緒言

超音波フリップチップボンディングでは、加圧面が平坦な接合ツールでチップを加圧すると共に超音波を印加する。接合面に平行な振動方向の超音波を印加する平行振動印加接合の場合、接合ツールからチップへの超音波の伝達は両者の摩擦力に依存する。そのため、チップの加圧荷重、すなわち接合荷重を高くして摩擦力を増加させ、チップの超音波振幅を安定化させる。本研究の対象である安価な電子デバイスでは、チップ面積当りの電極数が少ない。そのため、1 バンプ当りの接合荷重は高くなる傾向がある。接合荷重が高くなると、超音波印加前の Au スタッドバンプ (以後、Au バンプ) の巨視的な塑性変形量が増加し、Au バンプと電極の接合面積は増加する。変形し易い Au バンプでは、接合荷重だけによる変形でも接合面の微視的な塑性変形が起こり、ある程度 Au バンプと電極は密着する。Au バンプと電極の摩擦力が高くなり、1.3.2. で述べた接合面の外周部へリング状に真実接合部が生成される局所フレットング接合になり易い。接合面の中央部が真実接合部の少ない低接合領域になるため、せん断強度は低くなる傾向がある。しかし、電極数が少ないチップでも接合ツールおよびチップ裏面の表面粗さの調整や接合条件の適正化などにより、接合面の全域でフレットングが起こる全域フレットング接合を行うことは可能である。Au バンプと Al 電極の接合では、Fig. 4-1¹⁾ に示すような島形状の Au-Al 合金層が接合面の全域に生成される。

Surface Acoustic Wave (SAW) デバイスや Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Light Emitting Diode (LED) などの小型電子デバイスは単独でパッケージ化する以外に、他のデバイスへ Chip on Chip (COC) 接合してパッケージ化することがある。例として MEMS とドライバー Integrated Circuit (IC)²⁾, LED とツェナーダイオードの組合せなどが挙げられる。

COC 接合の工程には、Fig. 4-2 に示す個片化する前のボトムチップのウェハにトップチップを連続して接合する工程や、Fig. 4-3 に示すボトムチップを先に基板に搭載して電極へ Au バンプを形成しトップチップを接合

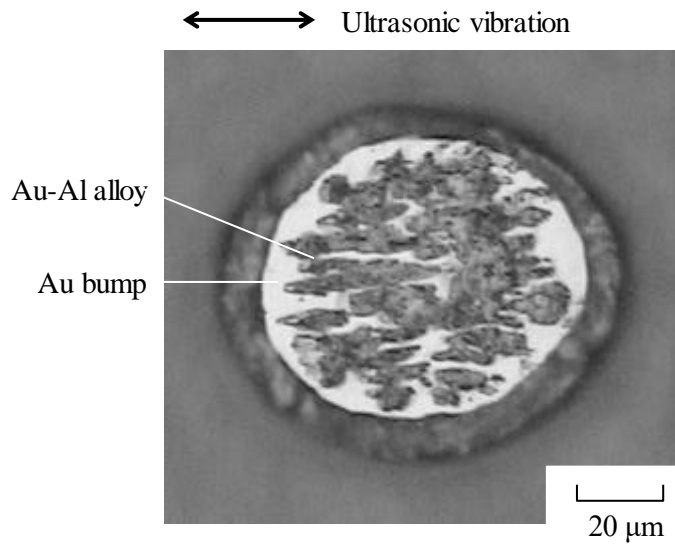


Fig. 4-1 Au-Al alloy formation in whole bonding area¹⁾.

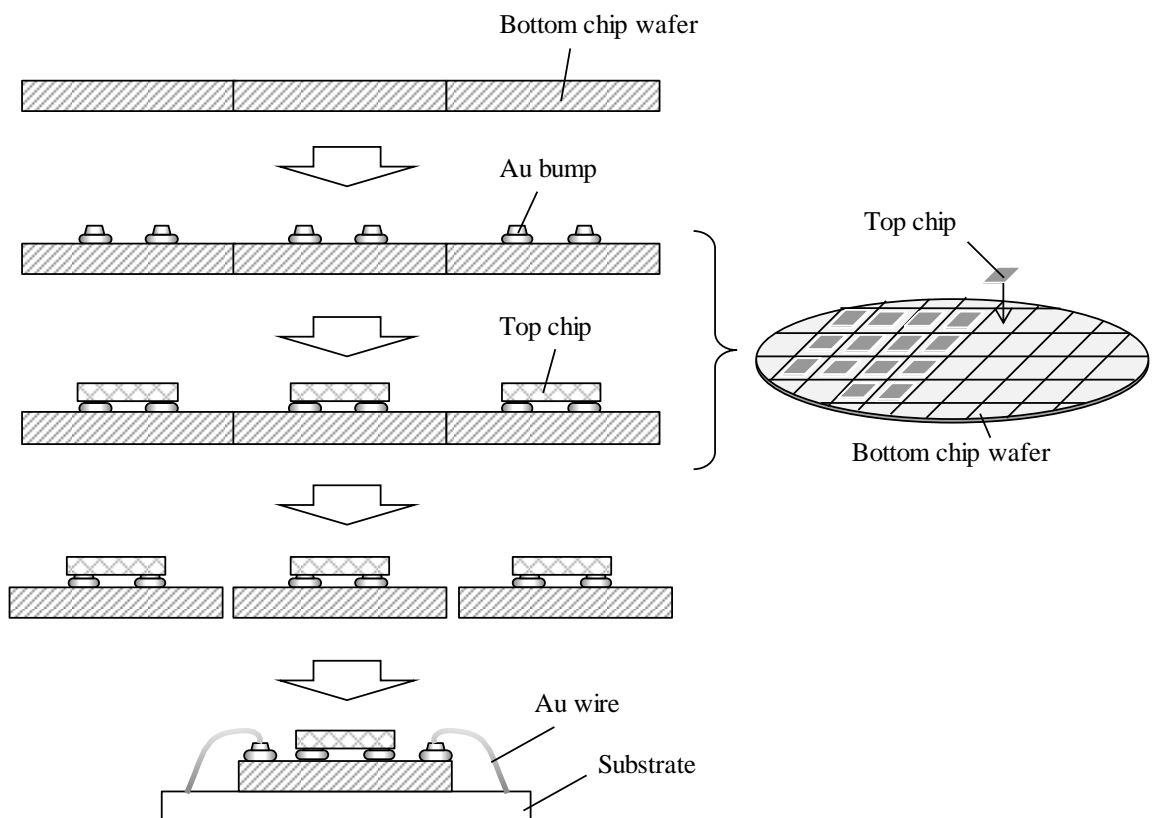


Fig. 4-2 Assembly method of Chip on Chip bonding in which top chips are bonded on bottom chip wafer continuously.

する工程などがある。

ボトムチップウェハに連続してトップチップを接合する工程は、接合毎にボトムチップを搬送する必要が無く、チップ搬送に要する時間が短くなるため生産性が高い。しかし、最初に接合したボトムチップとトップチップの接合部が最後のトップチップが接合されるまで長時間にわたって加熱される課題がある。電子デバイスの電極が Al である場合、Au バンプとの接合面には Au-Al 合金層が形成される。この Au-Al 合金層は加熱により成長して接合面に空洞を生じ接合強度が低下することがある³⁾。また、Au-Al 合金層の成長により電極の Al 層が消失して硬い Au-Al 合金層が Al 電極下の絶縁層に接触してしまう。この状態で熱応力が接合部に加わると絶縁層が損傷することがある⁴⁾。

ボトムチップを基板へ搭載してトップチップを接合する工程では、Au バンプと電極の接合後の加熱時間を短く、かつ、平準化できる。しかし、

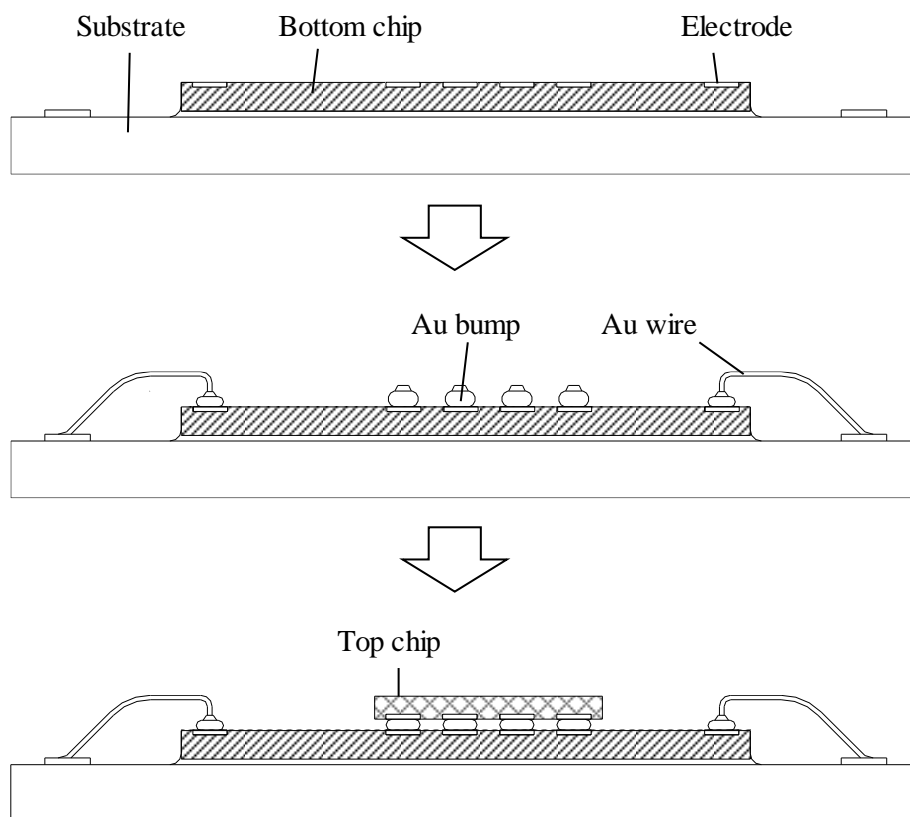


Fig. 4-3 Assembly method of Chip on Chip bonding with pre-mount of bottom chip on substrate.

この工程には、ボトムチップの基板に対する搭載傾きなどによりボトムチップとトップチップの平行度が低下する課題がある。平行度が低下すると、チップ内の個々の Au バンプに巨視的な塑性変形量のばらつきが生じる。その結果、Au バンプと電極の接合面積が小さい接合部が出現する。通常の局所フレッシング接合では、接合が主に超音波印加後に拡大する接合面の外周部で起こるため、Au バンプと電極の接合面積が小さい場合には極端に接合部せん断荷重が低くなる可能性がある。一方、全域フレッシング接合では接合部のせん断荷重の接合面積の拡大量への依存性が小さい。もし、チップ平行度が低下しても全域フレッシング接合が維持されるのであれば、接合面積が小さい接合部でも接合面積に応じたせん断荷重が得られ、チップ平行度に対する許容量を増やすことが可能となる。

これまでに、超音波フリップチップボンディングにおけるチップとチップあるいはチップと基板の平行度の影響に関して言及した研究は少なく⁵⁾、⁶⁾、さらに、チップ平行度が接合部せん断強度に及ぼす影響を対象とした研究はほとんど無い。

そこで、第 4 章では超音波フリップチップボンディングによる COC 接合を対象として、Au バンプと Al 電極の接合部の高強度化が図れる全域フレッシング接合に及ぼすチップ平行度の影響について調査した。トップチップに対してボトムチップを種々の角度で傾斜させてチップ平行度を変えた COC 接合体を製作し、接合部全体のせん断荷重や個々の Au バンプの接合部せん断強度を明らかにすると共に、その接合挙動を考察した。

4.2. 実験方法

4.2.1. 供試材

Table 4-1 に実験に供した Test Element Group (TEG) C のチップおよび基板の仕様を示す。電極数は 12 である。ボトムチップの電極は電解めっきで成膜した厚さ 1 μm の Au 膜である。トップチップの電極は、スパッタリング法で形成した厚さ 0.6 μm の Al-0.5Si-0.5Cu (mass%)膜である。ボトムチップは、表面に Ag めっきを施した厚さ 0.2 mm の 42Alloy 板へ Ag ペースト(京セラ製 CT262)を用いて固定した。Ag ペーストは 150 $^{\circ}\text{C}$ のオーブン中で 1.5 時間加熱して硬化させた。Au バンプは、純度 99.99 mass%の Au ワイヤを用いてボトムチップの個々の電極に形成した。Au バンプを Fig. 4-4 に示す。Au バンプ上面は平坦な Si 板で加圧して平坦化すると共に高さを揃えた。Au バンプの各部の平均寸法値は、下部高さが 25 μm , 総高さが 51 μm , 下部径が 108 μm である。

Table 4-1 Specifications of TEG C.

Items	Specifications
[Bottom chip]	
Chip size	2.5 × 2.0 × t0.3 mm ³
Chip material	Si
Electrode material	Au
Au layer thickness of electrode	1 μm
Number of electrodes	12
[Top chip]	
Chip size	1.4 × 0.9 × t0.3 mm ³
Chip material	LiNbO ₃
Electrode material	Al-0.5Si-0.5Cu (mass%)
Electrode thickness	0.6 μm
Number of electrodes	12
[Substrate]	
Substrate material	42 alloy
Surface material	Ag

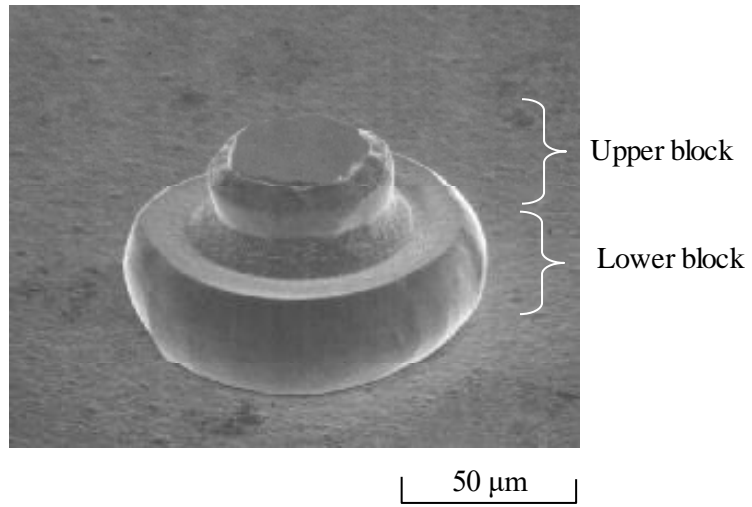


Fig. 4-4 Au bump after flattening.

4.2.2. 接合方法および評価方法

チップ平行度は、トップチップに対してボトムチップを傾斜させることにより変更した。Fig. 4-5 に実験に使用した超音波フリップチップボンディング装置の構成を示す。平行振動印加接合用の装置構成であり、超音波の周波数は 60 kHz である。ヒータおよび機械式クランプを備えたワークステージを 1 軸のゴニオステージの上に搭載し、ボトムチップの傾斜角度を変更できるようにした。

接合条件は、接合荷重 12.0 N と超音波出力 1.0 W を選択した。トップチップとボトムチップが平行な場合の 1 バンプ当りの接合荷重は 1.0 N である。接合荷重と超音波出力のプロファイルは Fig. 1-11 に示した一定保持型とした。接合時間は 300 ms で、超音波印加の前後に各々 10 ms の接合荷重保持時間を設定した。ボトムチップは 150 °C に加熱した。この接合条件では、ボトムチップとトップチップが平行な場合に Au バンプの圧着高さは 51 μm から 30 μm まで 21 μm 減少し、接合界面には Fig. 4-1 に示した超音波の振動方向に長手方向を有する島形状の Au-Al 合金層が生成される。

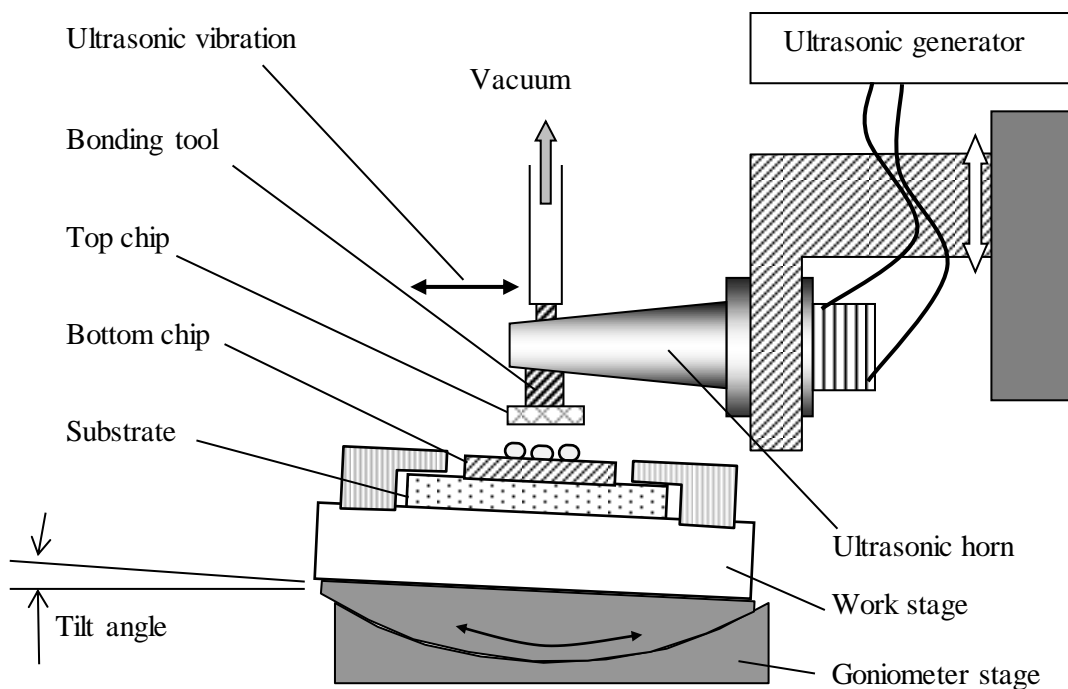


Fig. 4-5 Schematic illustration of flip chip bonder with work stage on goniometer stage.

Fig. 4-6 に示すようにトップチップは電極面が水平になるように設置し、ボトムチップは水平面に対する傾斜角度を 0 から 0.75 °の範囲で 0.25 °刻みに変化させた。ボトムチップの傾斜角度が 0.75 °の場合、Au バンプの圧着高さの差はチップ内において最大で約 15 μm となる。15 μm はトップチップとボトムチップが平行な場合の Au バンプの圧着高さの約 50% である。チップ両端の Au バンプについて、ボトムチップの傾斜により圧着高さが低くなりトップチップの Al 電極との接合面積が増加するものをバンプ A、逆に圧着高さが高くなるものをバンプ B とした。バンプ A とバンプ B の中心間距離は 1150 μm である。

作製した COC 接合体の個々の Au バンプ接合部のせん断荷重の合計値 (以後、総せん断荷重) と、Au バンプとトップチップの Al 電極の接合面に生成される Au-Al 合金層の面積、Au バンプとトップチップの Al 電極の接合面積を測定し、チップ平行度の接合への影響を調べた。

COC 接合体のバンプ接合部の総せん断荷重は、Fig. 2-4 に示したチップせん断試験で測定した。トップチップの側面にせん断ツールを当てて水平に移動させてバンプ接合部を破断し、そのときの最大荷重を測定した。せん断ツールは下端がトップチップの電極面から上方に 50 μm の位置になるよう位置決めし、水平移動速度は 500 μm/s とした。

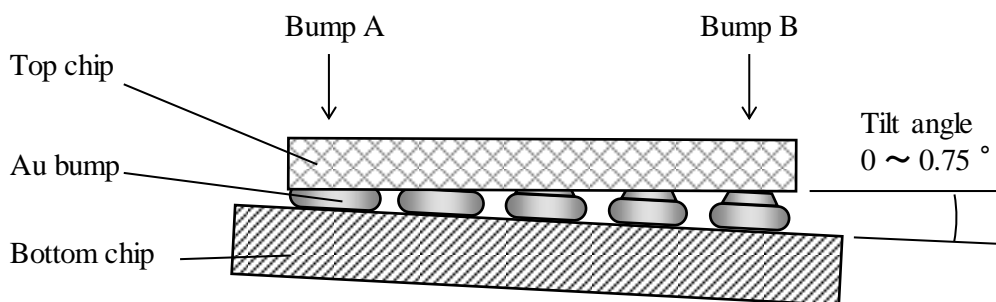


Fig. 4-6 COC bonding specimen with tilted bottom chip.

Au-Al 合金層および Au バンプとトップチップの Al 電極との接合面積は、Au バンプとトップチップを分離して測定した。Fig. 2-7 に示した方法と同様に、COC 接合体を塩酸に浸漬してトップチップの Al 電極をエッチングし、Au バンプとトップチップを分離した。ボトムチップの Au 電極は塩酸によりエッチングされないため、Au バンプは Fig. 4-7 に示すようにボトムチップ上に残る。Au バンプの上面はトップチップの Al 電極と接合した部分が平坦化されており、平坦化された面にはトップチップの Al 電極との間に生成された Au-Al 合金層が残る。Au バンプの上面を撮影し、画像処理により Au-Al 合金層の面積と、Al 電極との接合面積をそれぞれ算出した。Au バンプと Al 電極の接合では Au-Al 合金層の面積が真実接合面積であり、せん断荷重と真実接合面積の間には正の相関がある⁷⁾。したがって、Au-Al 合金層の面積を評価することにより、個々の Au バンプとトップチップの Al 電極の接合部のせん断荷重を評価することが可能となる。

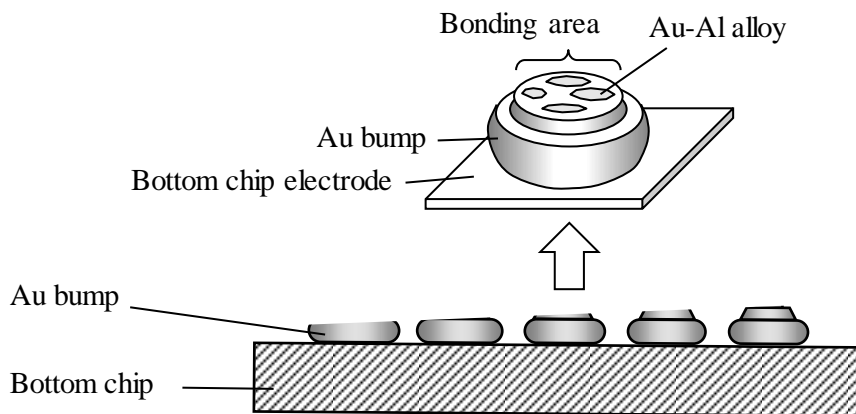


Fig. 4-7 Measurement of Au-Al alloy area and bonding area between Au bump and Al electrode of top chip.

4.3. 実験結果および考察

4.3.1. チップ平行度が Au バンプと Al 電極の接合に及ぼす影響

ボトムチップの傾斜角度と Au バンプ接合部の総せん断荷重の関係を Fig. 4-8 に示す。チップせん断試験の結果、全てのバンプ接合部において Au バンプとトップチップの Al 電極の接合部が破断した。ほとんどの破断箇所は Al 電極内部であった。すなわち、得られた Au バンプ接合部の総せん断荷重の値は、Au バンプとトップチップの Al 電極の接合部の総せん断荷重に相当する。総せん断荷重にボトムチップの傾斜角度の影響はみられず、平均 7.4 N でほぼ一定になった。つまり、チップ平行度は Au バンプとトップチップの Al 電極の接合部の総せん断荷重に影響を及ぼさないことが明らかになった。

Fig. 4-9 にボトムチップの傾斜角度を 0° とした場合のトップチップの接合中の超音波振幅の測定結果を示す。測定点はトップチップの側面中央である。測定にはレーザドップラ振動計を使用した。接合開始時のトップチップの振幅は約 $0.57 \mu\text{m}$ (peak to peak) で、時間の経過に伴い緩やかに減少し、終了時は約 $0.47 \mu\text{m}$ となった。ボトムチップ傾斜角度 $0.25^\circ \sim 0.75^\circ$ の範囲でのチップ振幅および振幅の変化の挙動に 0° との有意差は無く、チップ平行度のチップ振幅に対する影響はみられなかった。トップチップの材質である LiNbO_3 の縦弾性係数は約 170 GPa で、ボトムチップの材質 Si は 160 GPa である。いずれの縦弾性係数も十分大きく、チップ内の位置による超音波の振幅の差は極小さい。そのため、個々の Au バンプとトップチップの Al 電極の接合面に印加される超音波の振幅はチップ内での位置によらず等しいと考えられる。以上のことから、ボトムチップがトップチップに対して傾斜した場合、個々の Au バンプに印加される超音波の振幅には有意差は無く、個々の Au バンプは接合荷重のみが異なる状態で接合されていることが明らかとなった。

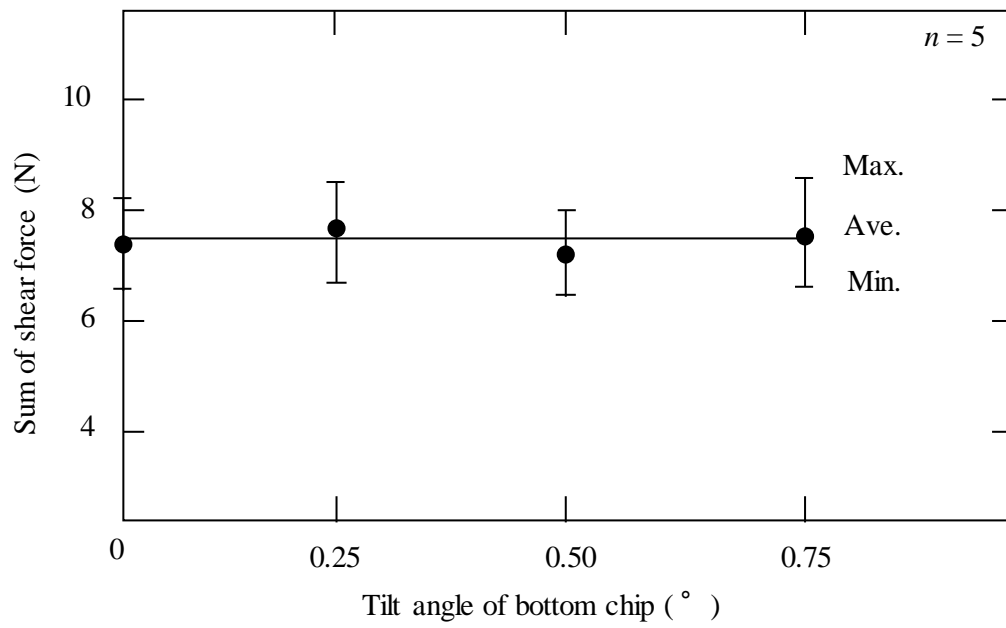


Fig. 4-8 Relationship between tilt angle of bottom chip and sum of shear force.

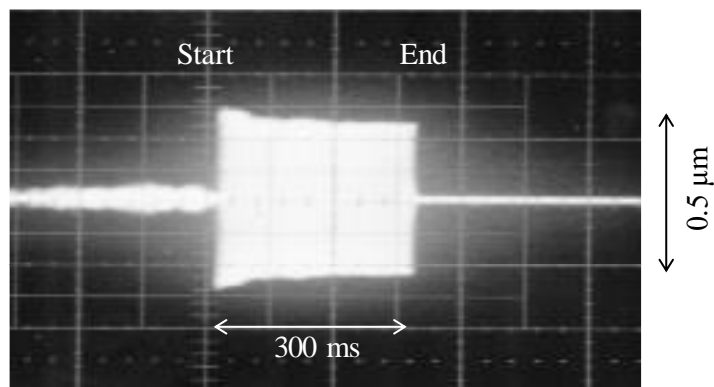


Fig. 4-9 Top chip amplitude during flip chip bonding.

Fig. 4-10 にトップチップと分離した後のバンプ A とバンプ B の上面を示す。ボトムチップの傾斜角度が増加するに従い、バンプ A とバンプ B の巨視的な塑性変形量の違いに起因してトップチップの Al 電極との接合面積の差は大きくなった。いずれの傾斜角度においても、Au バンプ上面、すなわちトップチップの Al 電極との接合面には超音波振動方向を長手方向とする島形状の Au-Al 合金層が生成された。すなわち、チップ平行度が低下し、個々の Au バンプの巨視的な塑性変形量にばらつきが生じても、本研究で調査した接合条件では、個々の Au バンプにおいて全域フレッシング接合は維持されることが明らかになった。

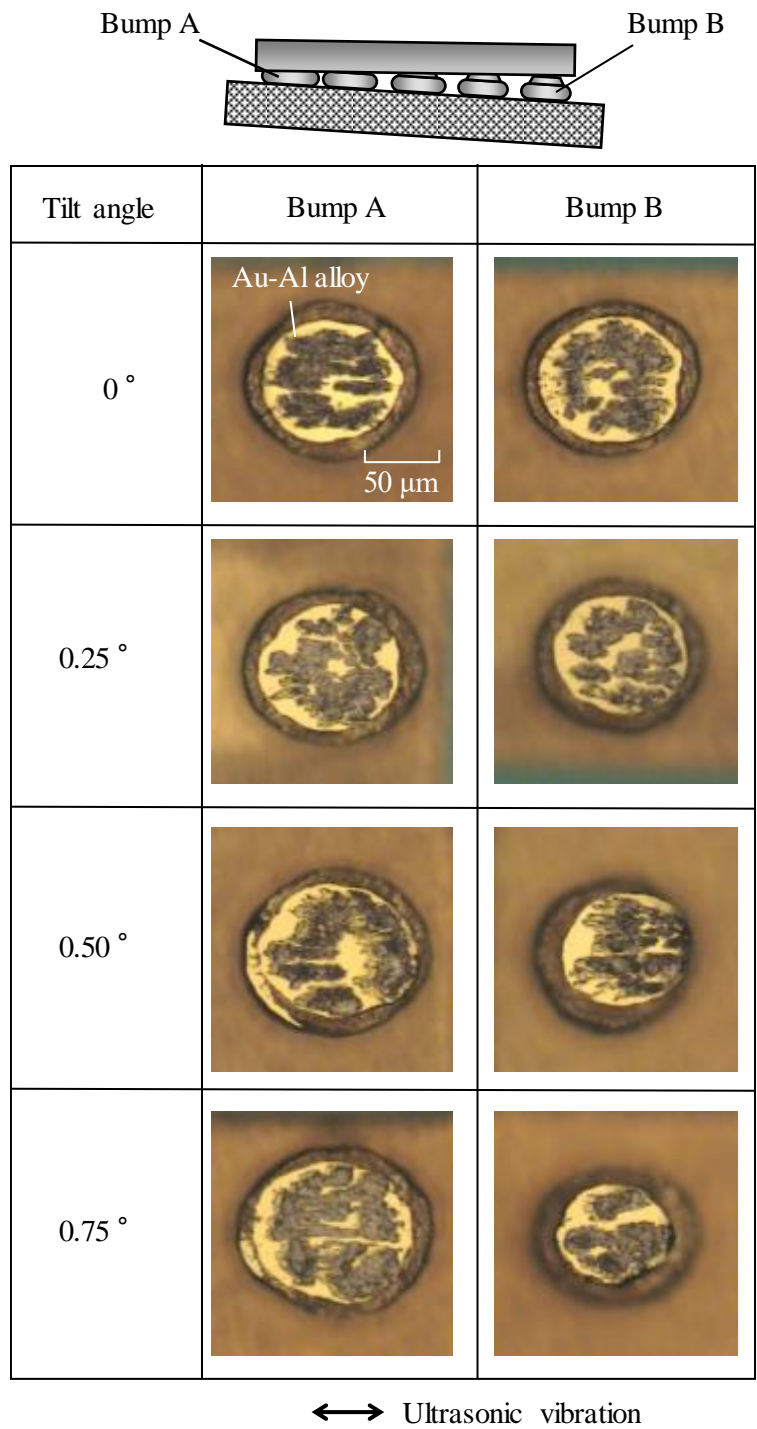


Fig. 4-10 Au-Al alloys formed at interfaces between Au bumps and Al electrodes of top chips.

Au-Al 合金層の面積の 12 バンプ分の合計値 (以後, 総 Au-Al 合金層面積)を Fig. 4-11 に示す. ボトムチップの傾斜角度が変わっても, 総 Au-Al 合金層面積は変わらず, 平均で約 $4.79 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ となった. 総 Au-Al 合金層面積にボトムチップ傾斜角度の影響がみられないことは, Fig. 4-8 に示した, Au バンプとトップチップの Al 電極の接合部の総せん断荷重にボトムチップ傾斜角度の影響が無い結果と合致する.

Fig. 4-12 に Au バンプとトップチップの Al 電極の接合面積の 12 バンプの合計値 (以後, 総接合面積)を示す. 総接合面積は, 総 Au-Al 合金層面積と同様にボトムチップ傾斜角度の影響はみられない. 平均値は $7.40 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ である.

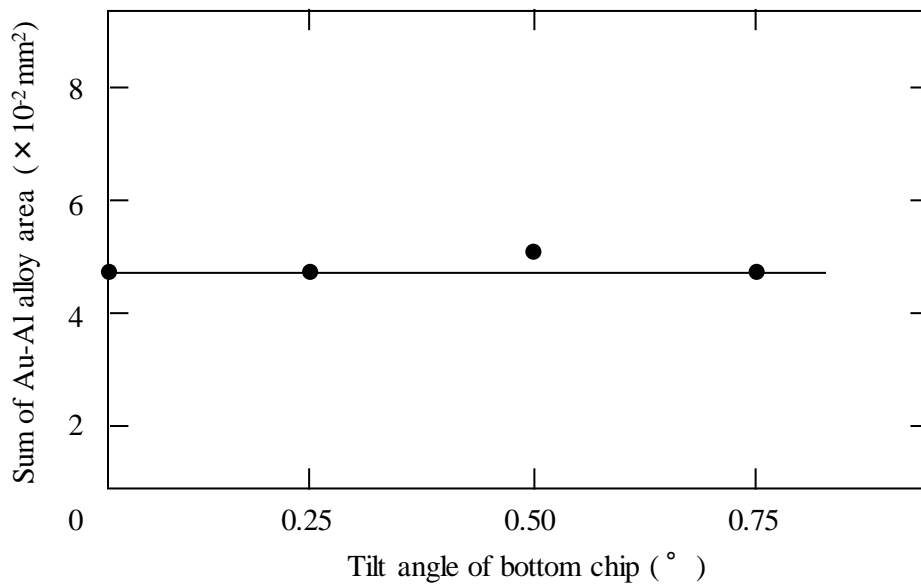


Fig. 4-11 Relationship between of tilt angle of bottom chip and sum of Au-Al alloy area.

Fig. 4-13 にボトムチップの傾斜角度 0° および 0.5° の場合の, Au バンプと Al 電極の総接合面積の時間変化を示す. 総接合面積は時間の経過に従い増加するが, ボトムチップの傾斜角度による総接合面積の差はほとんど生じないことが明らかとなった.

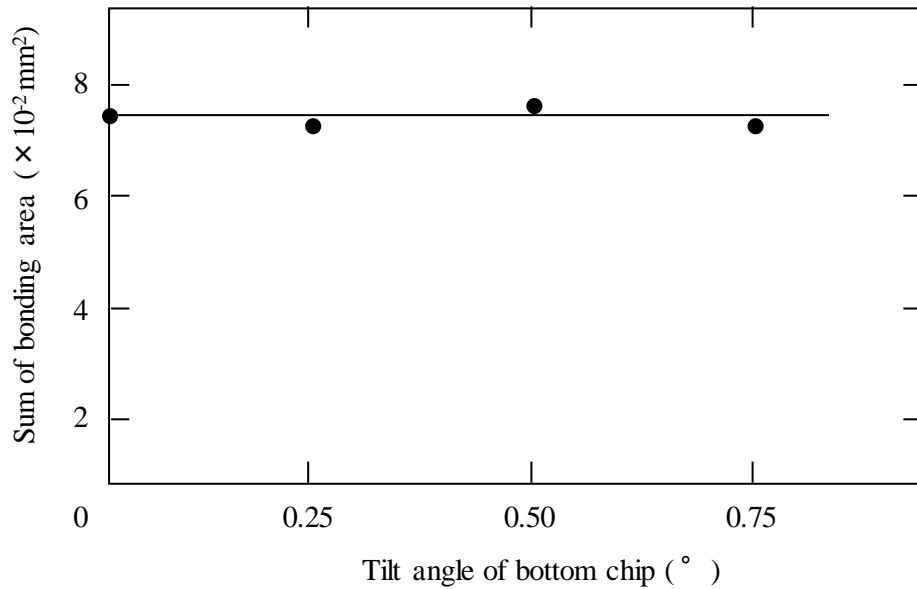


Fig. 4-12 Relationship between tilt angle of bottom chip and sum of bonding area.

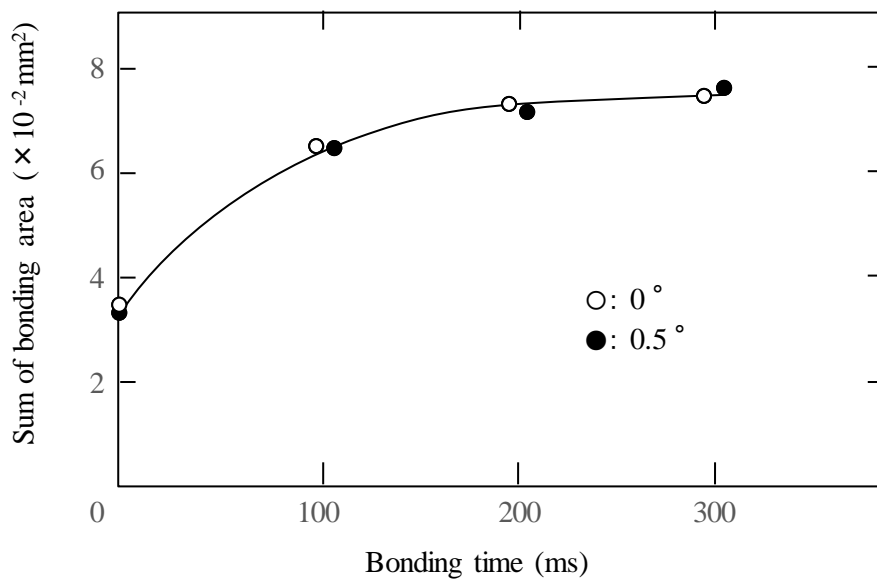


Fig. 4-13 Change in sum of bonding area during bonding.

Fig. 4-14 に、ボトムチップの傾斜角度 0° から 0.75° の範囲における個々の Au バンプのトップチップの Al 電極との接合面積と、接合面積に対する Au-Al 合金層の面積の比率の関係を示す。ボトムチップの傾斜により接合面積は Au バンプ間において最大で 2 倍以上異なる。Au-Al 合金層面積の比率は、多少のばらつきがあるものの、接合面積との相関が少なく、ほぼ一定であることがわかった。Au-Al 合金層面積の比率の平均値は 65% である。Au と Al の接合において Au-Al 合金層の面積は真実接合面積である。Au バンプの巨視的な塑性変形量が異なり Al 電極との接合面積に差が有っても、接合面積に対する真実接合面積の比率が変わらないことから、個々の Au バンプとトップチップの Al 電極の接合部のせん断強度はほぼ等しくなっていると考えられる。Fig. 4-8 に示した総せん断荷重と Fig. 4-13 に示した総接合面積から算出した Au バンプとトップチップの Al 電極の接合部のせん断強度の平均値は 100 MPa であった。

電子デバイスパッケージにおける Au と Al の接合部では、パッケージ使用時の接合部の昇温により、Au-Al 合金層が成長する。接合面積に対する Au-Al 合金層面積の比率が少ない場合、Au-Al 合金層の成長に伴い両元素の拡散速度の差から生じるカーケンダルポイドを生じ易い。Au ワイヤと Al 電極のワイヤボンディングでは、ポイドの発生を抑制して接合部の

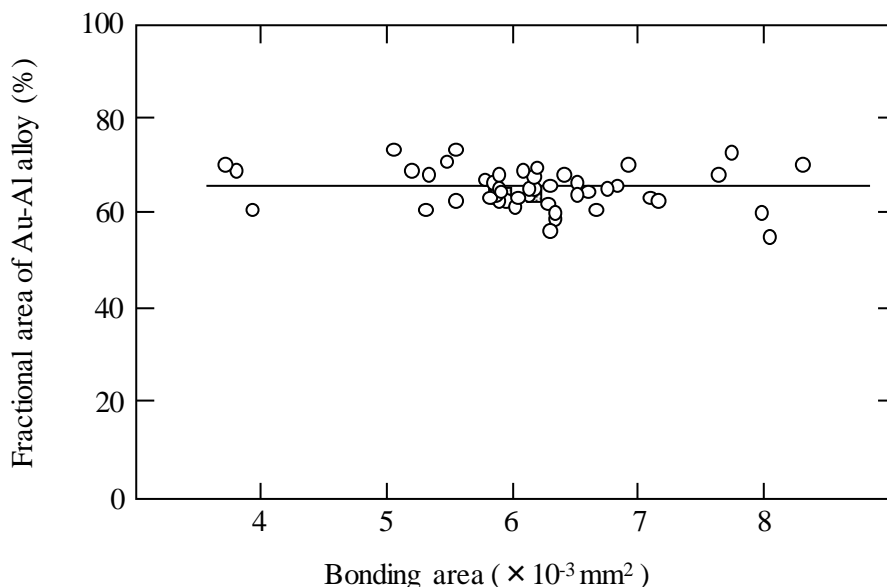


Fig. 4-14 Relationship between bonding area and fractional area of Au-Al alloy in each bump.

長期接続信頼性を確保するために必要な接合部せん断強度は約 80 MPa 以上であることが示されている⁸⁾。製作した COC 接合体における Au バンプとトップチップの Al 電極の接合部せん断強度はこの必要強度より 20% 以上高い。したがって、接合面積に対する Au-Al 合金層面積の比率 65% は長期信頼性を確保するのに十分な値であると言える。

以上述べた結果より、全域フレットング接合による超音波フリップチップボンディングでは、本研究で調査した範囲においては、チップ平行度による接合部せん断強度への影響がほとんど無いことが明らかになった。言い換えると、全域フレットング接合では、チップ同士の傾斜角度 0.75° で生じるチップ内の Au バンプの圧着高さの $15\ \mu\text{m}$ の差と Au バンプと電極の接合面積の約 2 倍の差までの範囲では、接合部のせん断強度を低下すること無く接合が可能である。Au バンプの巨視的な塑性変形量が少なくなる接合部でも高いせん断強度が得られ、チップ平行度に対する許容量を増加させる方法として全域フレットング接合は有効であることが明らかとなった。

2 mm 程度程度の小型の電子デバイスでは、チップ同士の平行度低下によるチップ内における Au バンプの圧着高さのばらつきは最大で $10\ \mu\text{m}$ 程度であり、全域フレットング接合の適用により、Au バンプの圧着高さのばらつきに対して十分な安全率を確保できる。また、チップ平行度の影響を定量的に明らかにすることは電子デバイスパッケージの生産工程において重要であり、得られた接合に関する定量データは工程管理値の選択に寄与することが可能である。

4.3.2. 超音波印加時の Au バンプの変形応力

Au は加工硬化が少なく、塑性変形域における変形応力はひずみ量との相関が少なくほぼ一定の値になる^{9,10)}。超音波を印加すると変形応力は低下するが¹¹⁾、超音波印加時の変形応力とひずみ量との関係はわかっていない。ところで、Au と同じ FCC 金属である Al では、圧縮試験において塑性変形域での超音波印加による変形応力の低下量にひずみ量による違いが少ないことが示されている¹²⁾。Au においても同様に、塑性変形域において超音波印加による応力の低下量がひずみ量に依存せず一定であるなら、超音波印加時の塑性変形域の圧縮に対する変形応力 σ_{yi} はほぼ一定となる。そこで、1 バンプ当りの接合荷重を変えた接合実験により、超音波印加時の Au バンプの塑性変形域の変形応力 σ_{yi} を求めた。

接合荷重は 4.2.2.節に示した接合条件と同じ 12.0 N とし、Au バンプの数を 6 から 24 の範囲で変更することで 1 バンプ当りの接合荷重を変更した。1 バンプ当りの接合荷重の範囲は 0.5 N から 2.0 N となる。超音波出力は 1.0 W、接合時間は 300 ms とした。トップチップとボトムチップを平行にして COC 接合体を作製した。Au バンプの数の変更により 1 バンプ当りの接合荷重を変えた理由は、接合荷重を変更すると接合ツールとトップチップの間の摩擦力が変化し、チップの超音波振幅が Fig. 4-9 に示した振幅から変化してしまうためである。

Fig. 4-15 に 1 バンプ当りの接合荷重と、個々の Au バンプとトップチップの Al 電極の接合面積の平均値を示す。接合荷重の増加により Au バンプの巨視的な塑性変形量が増えて接合面積は増加する。1 バンプ当りの接合荷重と接合面積には比例関係がみられた。Fig. 4-16 に、接合荷重と Au バンプの圧着高さの関係を示す。接合前のバンプの平均高さ 51 μm から、接合荷重 0.5 N から 2.0 N の範囲の Au バンプの圧縮ひずみ量を概算すると、0.17 から 0.62 となる。これらの結果から、接合終了時の Au バンプの変形応力 σ_{yi} を評価したところ、Au バンプの圧縮ひずみ量 0.17 から 0.62 までの広い範囲において、Au バンプの巨視的な塑性変形量に依存せず、変形応力 σ_{yi} はほぼ一定の 160 MPa 程度の値となることが明らかとなった。

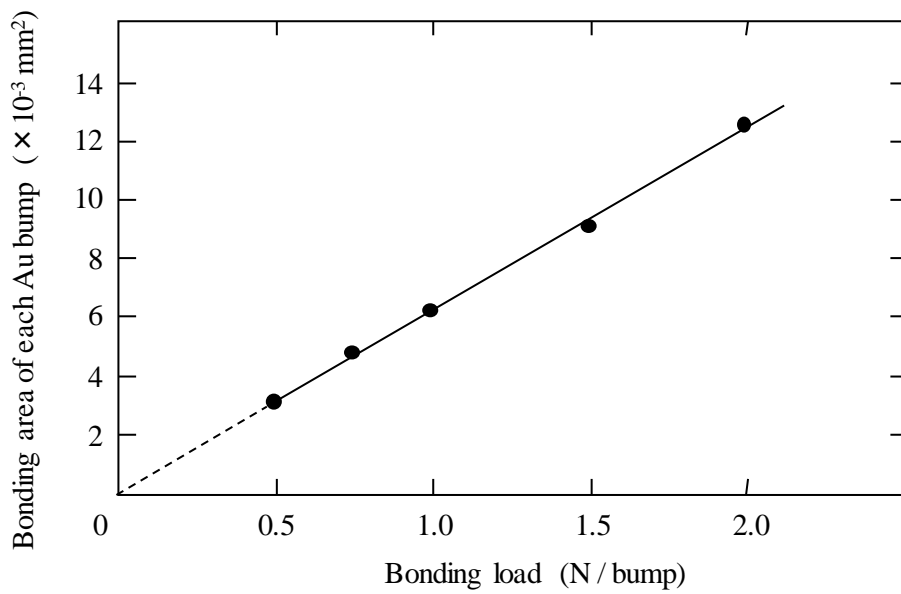


Fig. 4-15 Relationship between bonding load and bonding area of each Au bump.

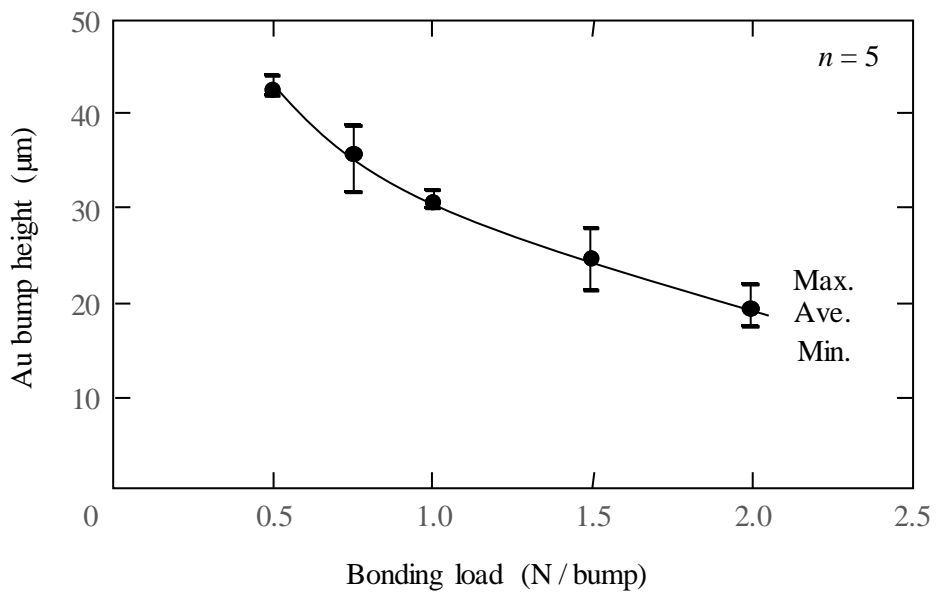


Fig. 4-16 Relationship between bonding load and Au bump height.

4.3.3. 接合挙動に関する考察

チップ同士の平行度が低下しても、チップ内の総接合面積と、個々の Au バンプとトップチップの Al 電極の接合部のせん断強度が変化しない理由について、以下に考察する。

Au バンプに印加される接合荷重 F と、接合終了時の各バンプの変形応力 σ_{yi} および各 Au バンプとトップチップの Al 電極の接合面積 S_i の間には式(4-1)に示す関係がある。

$$F = \Sigma(\sigma_{yi} \times S_i) \quad (4-1)$$

バンプの変形応力 σ_{yi} は Au バンプの巨視的な塑性変形量に依存せず 160 MPa 程度で一定であることを 4.3.2 節で示した。故に、式(4-1)は式(4-2)へ変形できる。

$$F = 160 \times \Sigma(S_i) \quad (4-2)$$

接合荷重 F は 12.0 N でボトムチップが傾斜しても変化しない。したがって、接触総面積 $\Sigma(S_i)$ はボトムチップの傾斜角度に依存せず一定となる。すなわち、ボトムチップが傾斜してチップ同士の平行度が低下しても、Au バンプとトップチップの Al 電極の総接合面積が一定の値になるように Au バンプが巨視的に塑性変形する。

Au バンプの巨視的な塑性変形の進行により接合面積は増加するため、接合過程において接合面の圧力は減少する。Fig. 4-13 に示したように総接合面積の時間変化にはチップ平行度による差が無いことから、接合終了時の Au バンプの巨視的な塑性変形量が異なっても、接合過程における個々の接合面の圧力の変化挙動には差が無いと考えられる。

固体間の短い微小距離の往復すべりであるフレッティングでは、固体表面の摩耗量が固体間の面圧およびすべり長さに依存することが知られている¹³⁾。すなわち、固体間の面圧およびすべり長さが変わらないのであれば摩耗量は等しくなる。これを接合に置き換えると、接合面の圧力および

超音波の振幅が変わらないのであれば、接合面における面積当りの微視的な塑性変形量は等しくなる。チップ平行度が変化してもチップの超音波振幅が変わらないことは4.3.1.節で述べた。以上のことから、Auバンプの巨視的な塑性変形量が異なってもせん断強度が等しくなる理由は、接合過程において、接合面の微視的な塑性変形量に影響する接合面の圧力および超音波振幅が個々のAuバンプの巨視的な塑性変形量に依存せず、接合面積当りの接合面の微視的な塑性変形量が等しくなるためと考えられる。微視的な塑性変形量が等しい場合、真実接合面積に相当するAu-Al合金層の接合面積当りの生成面積がほぼ同等となるため、AuバンプとAl電極の接合部のせん断強度は等しくなったものと考えられる。

4.4. 結言

接合部のせん断強度の高強度化手法として有効な全域フレットィング接合を用いて、Au バンプと Al 電極の組合せで Chip on Chip 接合を行った場合の、トップチップとボトムチップの平行度が接合に及ぼす影響を調査した。得られた結果を以下に示す。

- (1) Au バンプの高さが 51 μm から 30 μm へ減少する接合条件において、チップ内の Au バンプの圧着高さに 15 μm の差が生じる程度にチップ平行度が低下しても、個々の接合部のせん断荷重の合計値および接合面積の合計値は変化せず、チップ平行度の影響が無いことを明らかにした。
- (2) チップ平行度の低下により、チップ内の Au バンプの巨視的な塑性変形量にばらつきが生じても、接合面の全域でフレットィングが起こる全域フレットィング接合は維持されることがわかった。
- (3) チップ平行度の低下により、チップ内の接合面積に最大で 2 倍の差があっても、チップ内の全ての Au バンプにおいて接合面積に対する真実接合面積の比率は Au バンプの巨視的な塑性変形量に依存せずほぼ一定であり、約 65%に達することを明らかにした。この時の接合部せん断強度は約 100 MPa であり、チップ平行度が低下しても、Au-Al 接合部の長期接続信頼性を確保できる目安である 80 MPa を接合面積が t 小さくなる Au バンプ接合部でも確保できることを示した。
- (4) 超音波印加時の Au バンプの変形応力が Au バンプの巨視的な塑性変形量に依存しないため、チップ平行度が変動しても Au バンプと Al 電極の接合面積の合計値が接合荷重に応じた値になるように Au バンプは変形する。
- (5) 接合過程における Au バンプと Al 電極の接合面の圧力の変化挙動および超音波振幅にチップ平行度の影響は無く、接合面積当りの微視的な塑性変形量が一定となることで、接合面積に対する真実接合面積の比率が一定になったと考えられる。

第 4 章の参考文献

- 1) 井口 知洋, 富岡 泰造, 森 郁夫, 安藤 鉄男: エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム予稿集, 9 (2003), 51-56.
- 2) 中野 景介, 藤本 尚紀, 田中 昌明, 浅井 昭喜: デンソーテクニカルレビュー, 21 (2016), 150-155.
- 3) T. Uno, K. Tatsumi and Y. Ohno: Proc. the 1992 Joint ASME/JSME Conference on Electronic Packaging, (1992), 771-777.
- 4) 藤原 伸一, 原田 正英, 藤田 勇次: 溶接学会論文集, 32-2 (2014), 57-63.
- 5) Q. Tan, B. Schaible, L. J. Bond and Y. C. Lee: IEEE Transactions on Advanced Packaging, 22-3 (1999), 468-475.
- 6) T. S. McLaren, S. Y. Kang, W. Zhang, T. H. Ju and Y. C. Lee: IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 20-2 (1997), 152-159.
- 7) 大貫 仁: エレクトロニクス実装学会誌, 5-4 (2002), 412-417.
- 8) 巽 宏平, 宇野 智宏, 尾上 浩三, 北村 修: 新日鉄技報, 363 (1997), 32-36.
- 9) J. Greer, W. Oliver and W. Nix: Acta Materialia, 53 (2005), 1821-1840.
- 10) K. Timpano: Proc. Virginia Space Grant Consortium Student Research Conference, (2005), 1-5.
- 11) 土師 宏, 守田 俊章, 中島 英治, 吉永 日出男: 日本金属学会誌, 57-8 (1993), 884-889.
- 12) H. Zhou, H. Gui and Q. H. Qin: Journal of Material Processing Tech., 251 (2018), 146-159.
- 13) 萱場 孝雄, 岩渕 明: 日本機械学会論文集, 44-378 (1978), 692-700.

第 5 章 垂直振動印加接合による接合部の高強度化

5.1. 緒言

超音波フリップチップボンディングでは、通常 Fig. 5-1 に示すように、チップを接合ツールで加圧しながら Au バンプと電極の接合面に平行な振動方向の超音波を印加する。接合ツールからチップへの超音波の伝達は、両者の摩擦力に依存する。この摩擦力は、チップ裏面の表面粗さのばらつきや接合ツールの摩耗などにより変動する。半導体チップの製造工程において、Si ウェハは素子形成後に裏面が研削され薄化される。研削には回転砥石を用い、これを回転させると共に円周軌道で走査する。このため、チップ裏面の研削痕の方向はチップのウェハ内の位置により異なる。このようなチップ裏面の表面粗さのばらつきを許容するため、接合条件において一定高さ以上の接合荷重を選択し、超音波振動の伝達の安定化を図る。安価な電子デバイスは電極数が数個から十数個であることが多く¹⁻⁵⁾、1 バンプ当りの接合荷重は高くなる傾向がある。

接合荷重が高い場合、超音波印加前の Au バンプと電極の接合面積が大きくなり、接合面の摩擦力が増加する。このため、Au バンプと電極の接合は接合面の中央部が低接合領域となる拡大フレットング接合になり易い。

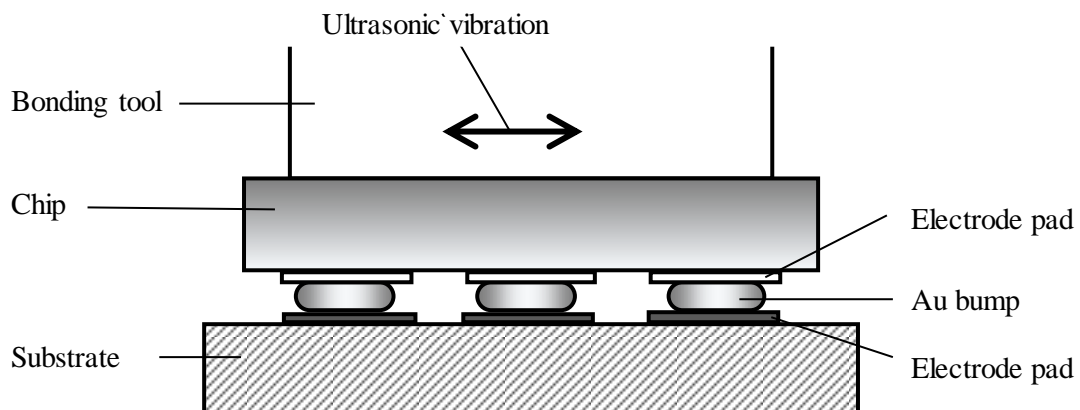


Fig. 5-1 Ultrasonic flip chip bonding using ultrasonic vibration parallel to bonding interface.

接合面の中央部が低接合領域になることへの解決策の一つとして、Fig. 5-2 に示す、接合面に垂直な振動方向の超音波を印加する接合方法（以後、垂直振動印加接合）が考えられる。垂直振動印加接合でも、平行振動印加接合と同様に接合荷重が印加されることで、Au バンプと電極は接触する。超音波が印加されると Au バンプの変形応力が低下し、接合面は拡大する。この接合方法の接合面における塑性変形機構には以下に述べる 2 通りが考えられる。第 1 の機構は、接合面の拡大過程において、Fig. 5-3 に示すように Au バンプの圧縮方向の超音波振動により接合面の外周部へ繰返し

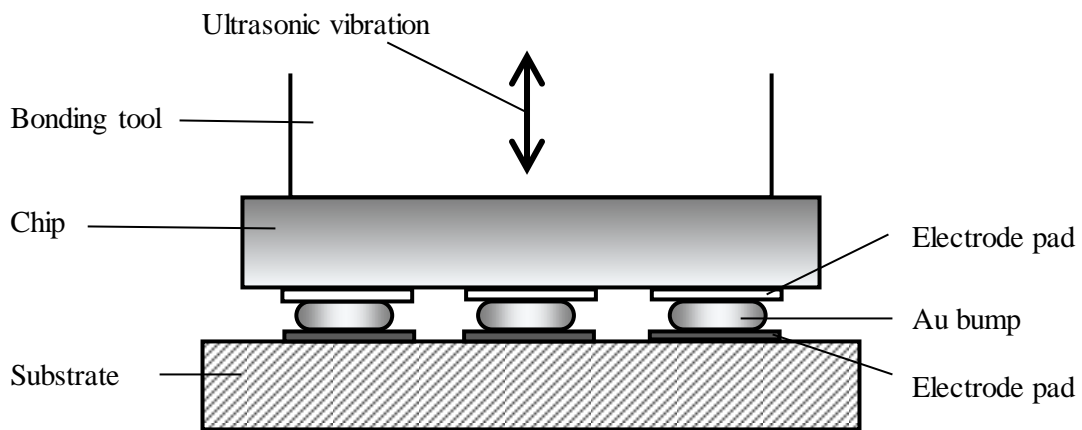


Fig. 5-2 Ultrasonic flip chip bonding using ultrasonic vibration perpendicular to bonding interface.

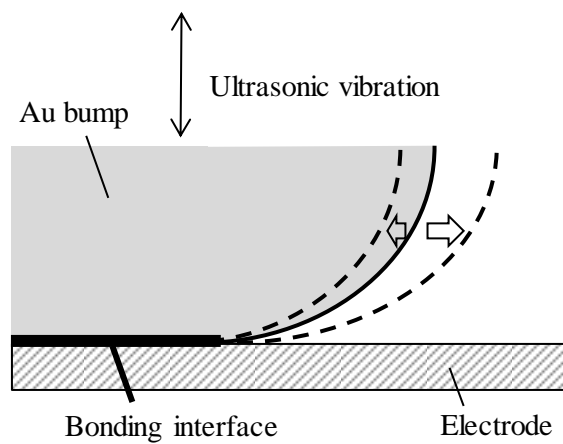


Fig. 5-3 Shear force to outer edge of bonding area by ultrasonic vibration.

せん断力が印加され，Au バンプ外形の変形により接合面に微視的な塑性変形が起こる機構である．第 2 の機構は，Au バンプと電極の接合面へ超音波による圧縮方向の繰返し荷重が印加され，接合面の微小な凹凸部が変形する機構である．第 2 の機構が主であれば，接合面の最外周を除きほぼ全域に圧縮力が加えられ，接合面の広い領域で接合することが期待できる．しかし，これまでに電子デバイスで行うような微小金属の超音波接合において垂直振動印加接合を検討した例は少ない^{6, 7)}．垂直振動印加接合を用いた超音波フリップチップボンディングには，Tan らの研究例がある．しかし，64 個の Au バンプを形成したチップで得られた接合部せん断荷重は 1 バンプ当たり約 0.1 N と低く⁶⁾接合条件の適正化には至っておらず，垂直振動印加接合の製品適用範囲が接合部への樹脂補強などの対策が可能な製品に限定される状況であった．

そこで第 5 章では，Au バンプとセラミック基板の Au 電極の接合を対象に，接合部のせん断強度の更なる高強度化を目的として垂直振動印加接合による超音波フリップチップボンディングを試みた．既存の研究で示された接合条件よりも高い接合荷重と大きい超音波振幅を使用して接合体を製作し，接合部のせん断強度を平行振動印加接合と比較した．

5.2. 実験方法

5.2.1. 供試材

接合実験に用いた Test Element Group (TEG)-D のチップと基板の仕様を Table 5-1 に示す. チップ背面の表面粗さ Ra は $0.6 \mu\text{m}$ である. チップ電極は Al-0.5Si-0.5Cu (mass%) 層であり, スパッタリング法で形成した. 電極の外形寸法は $175 \times 175 \mu\text{m}^2$ である. Fig. 5-4 にチップ電極の配置を示す. 各電極には, 純度 99.99 mass% で $\phi 25 \mu\text{m}$ の Au ワイヤを使用して Fig. 1-7 に示した方法で Au バンプを形成した. Au バンプの上面はフリップチップボンディング前に平坦なガラス板へ 1 バンプ当たり 1.0 N の荷重で加圧し平坦化した. 平坦化処理を施した後の Au バンプ径は $108 \pm 1.4 \mu\text{m}$ で, 高さは $51 \pm 0.8 \mu\text{m}$ である. バンプ径およびバンプ高さは測定顕微鏡で測定した. 基板は Al_2O_3 を基材としたセラミック基板であり, 電極面を平坦にするため個別の電極とせず全面を電極とした. 基板電極の構成は, Al_2O_3 側から W/Ni/Au で, 各層の厚さはそれぞれ 15, 2.0, 2.5 μm である. W 層は Al_2O_3 との同時焼成で, Au 層および Ni 層は電解めっきにより形成した.

Table 5-1 Specifications of TEG D.

Items	Specifications
[Test chip]	
Chip size	$1.9 \times 1.4 \times 0.4 \text{ mm}^3$
Electrode material	Al-0.5Si-0.5Cu (mass %)
Electrode thickness	$0.7 \mu\text{m}$
Number of electrodes	11
[Test substrate]	
Material	Al_2O_3
Electrode layer composition	W / Ni / Au
Thickness of each layer	15 / 2.0 / 2.5 μm

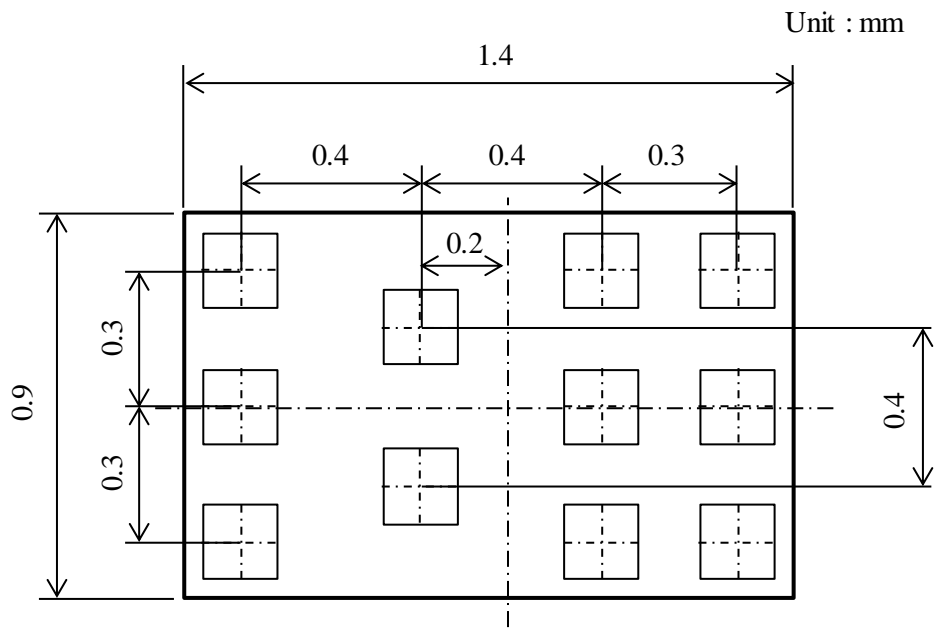


Fig. 5-4 Layout of chip electrode.

5.2.2. 接合方法および評価方法

接合実験には Fig. 1-10 に示した超音波フリップチップボンディング装置と同構成の超音波フリップチップボンダを使用し、超音波ホーンの加圧機構へのアタッチメントを変更することで平行振動印加接合と垂直振動印加接合の両方を行えるようにした。Fig. 5-5 に垂直振動印加接合用の接合装置の構成を示す。超音波ホーンは、長軸がワークステージ面と垂直になるようにアタッチメントを介して加圧機構へ取り付けられた。接合ツールは超音波ホーンの先端に装着した。垂直振動印加接合、平行振動印加接合のいずれも接合ツールのチップ加圧面の表面粗さ Ra は $0.9 \mu\text{m}$ である。

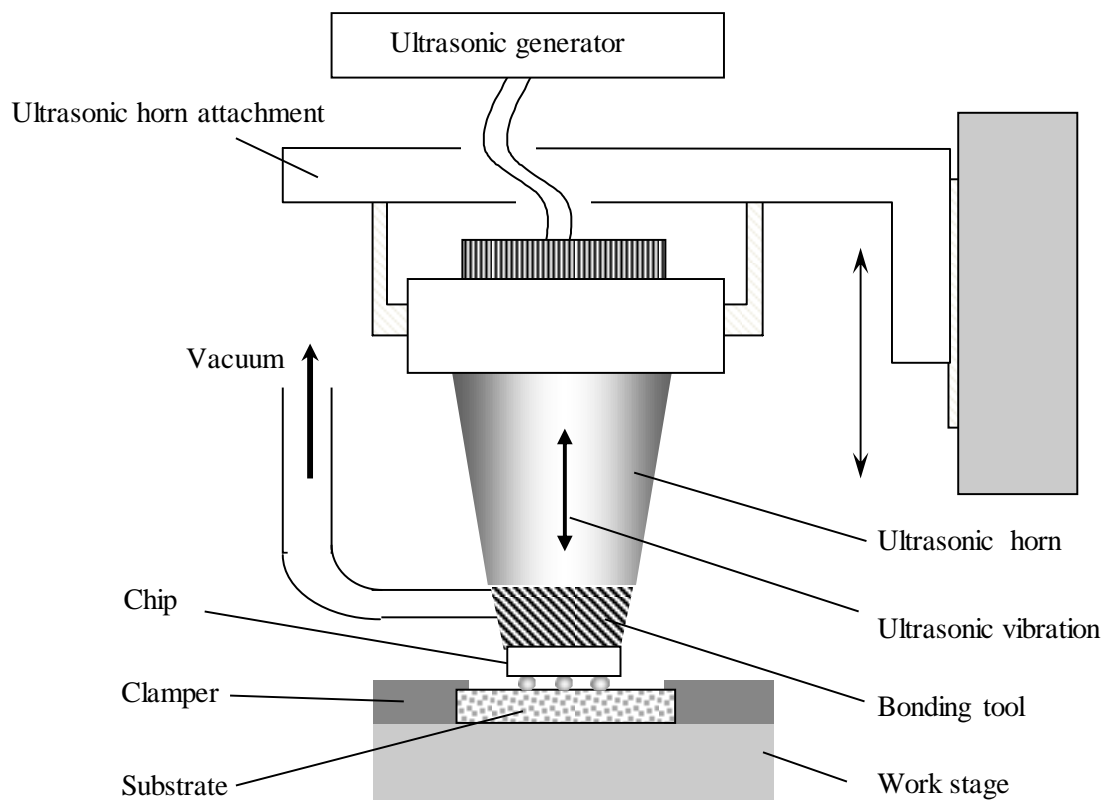


Fig. 5-5 Schematic illustration of thermosonic flip chip bonder for perpendicular ultrasonic bonding.

接合の手順を Fig. 5-6 に示す. Au バンプをチップの Al 電極上に形成した後, チップを上下反転させて接合ツールに吸着する. 接合前に平坦なガラス板へ Au バンプの上面を加圧し平坦化した. 平坦化した Au バンプの平均直径は $108\ \mu\text{m}$ で, 平均高さは $51\ \mu\text{m}$ であった. 続いて, このチップを基板へ加圧し, 超音波を印加して接合した. 基板は, ワークステージに吸着すると共に平行開閉型の機械式クランプで固定し, 表面温度が $200\ ^\circ\text{C}$ になるよう加熱した. 接合荷重と超音波出力のプロファイルを Fig. 5-7 に示す. Au バンプが基板に接触してから加圧荷重が接合荷重まで達するまでの時間を $100\ \text{ms}$ に設定した. 接合時間は $100\ \text{ms}$ である. 超音波の印加前と後にそれぞれ $10\ \text{ms}$ の荷重保持時間を設けた.

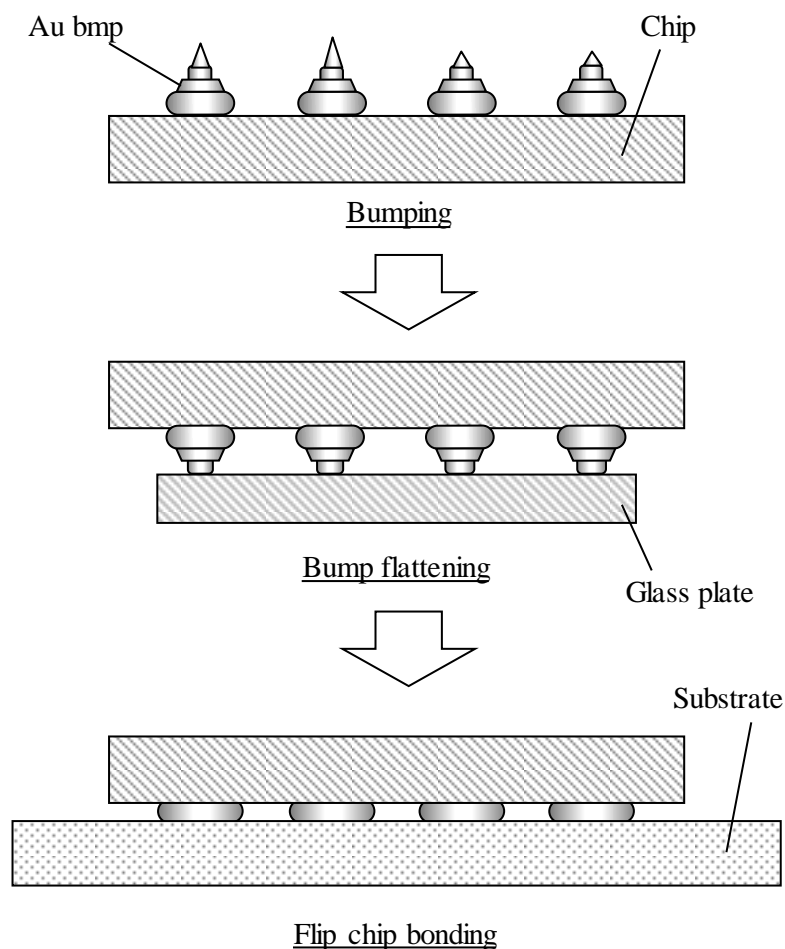


Fig. 5-6 Bonding procedure including Au bump flattening.

垂直振動印加接合の既存研究の接合荷重は1バンプ当たり0.5 N以下であり、超音波振幅は開示されていない⁶⁾。得られた接合部せん断荷重は1バンプ当たり0.1 Nと低い。そこで、本研究では1バンプ当たりの接合荷重は0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 Nの5水準とし(以下、接合荷重は全て1バンプ当たりの値を記載)、超音波の振幅は1.4, 1.9, 2.4, 2.8, 3.1 μm の5水準とした。なお、超音波の振幅は無負荷状態での peak to peak 値である。垂直振動印加接合では接合ツールの端面の振幅を、平行振動印加接合では接合ツール先端の側面の振幅をそれぞれレーザドップラー振動計で測定した。

作製した接合体でバンプ接合部のせん断荷重と Au バンプの圧着高さを測定した。せん断荷重は Fig. 2-4 に示したチップせん断試験で測定した。チップの側面にせん断ツールを当て、水平方向に 500 $\mu\text{m}/\text{s}$ の速度で移動させてバンプ接合部を破断させた。せん断ツールの先端の位置は、チップの電極面から 50 μm 上方の位置に設定した。得られた最大荷重をバンプ数 11 で除した値をバンプ接合部のせん断荷重とした。また、せん断荷重を Au バンプと基板の Au 電極の接合面積で除した値をせん断強度と定義した。Au バンプの圧着高さは、Fig. 2-7 に示した方法でチップの Al 電極をエッチングして Au バンプとチップを分離した後に測定顕微鏡で測定した。

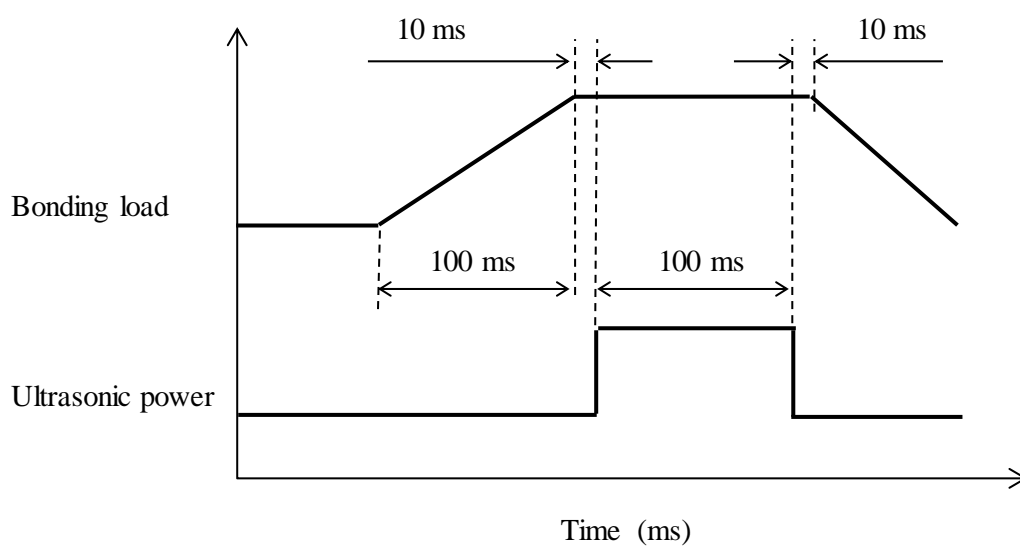


Fig. 5-7 Profiles of bonding load and ultrasonic power of perpendicular ultrasonic bonding and parallel ultrasonic bonding.

圧着高さの測定対象は各角部の計4バンプとし、平均値を算出した。この平均値から、以下に示す(5-1)式で求めたAuバンプの高さ減少率 H_r をAuバンプの巨視的な塑性変形量の指標とした。

$$H_r = (H_0 - H_b) / H_0 \times 100 \quad (5-1)$$

H_0 : 接合前のAuバンプの高さ (μm)

H_b : Auバンプの圧着高さ (μm)

Auバンプと基板のAu電極の接合面積を直接測定することは困難である。そこで、Auバンプの圧着高さから接合面積を算出できるよう、3.2節で述べたガラス板への圧着実験により、Auバンプの圧着高さとはAuバンプと基板のAu電極の接合面積の関係の近似式を導出した。Auバンプの高さと、Auバンプとガラス板の接触面積の関係をFig. 5-8に示す。このグラフから両者の関係の近似式を導出し、Auバンプのガラス板との接触面積をAuバンプと基板のAu電極の接合面積 S に、Auバンプの高さをAuバンプの圧着高さ H_b にそれぞれ見做して両者の関係の近似式(5-2)とした。

$$S = (120 \times H_b^2 - 11289 \times H_b + 295902) \times 10^{-4} \quad (5-2)$$

S : Auバンプと基板のAu電極の接合面積 ($\times 10^{-9} \text{ m}^2$)

H_b : Auバンプの圧着高さ (μm)

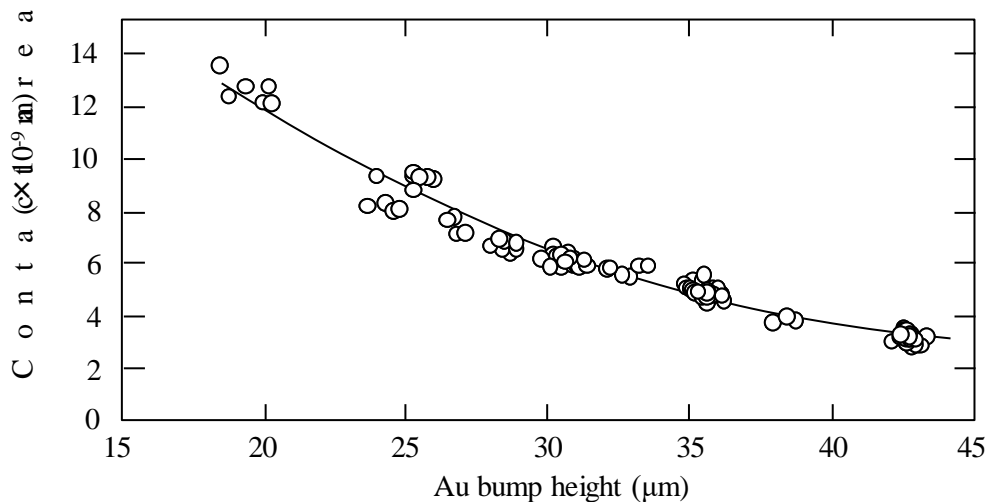


Fig. 5-8 Relationship between Au bump height and contact area with glass plate.

5.3. 実験結果および考察

5.3.1. 接合荷重が接合部せん断強度に及ぼす影響

垂直振動印加接合および平行振動印加接合において接合荷重を変化させた場合の Au バンプの高さ減少率 H_r を Fig. 5-9 に示す. 超音波の振幅は $2.4 \mu\text{m}$ である. いずれの接合方法でも接合荷重の増加に伴い Au バンプの高さ減少率は増加した.

平行振動印加接合では, 接合荷重の 0.5 N から 2.5 N への増加に伴い Au バンプ高さ減少率 H_r は 27% から 69% へ 42% 増加した. 垂直振動印加接合は $0.5 \sim 1.0 \text{ N}$ の低荷重でもバンプ高さ減少率 H_r が 55% と大きい. このため, 接合荷重 $0.5 \sim 2.5 \text{ N}$ の範囲における接合荷重の増加に伴うバンプ高さ減少率の変化は 55% から 64% の 9% と小さい. また, 接合荷重 0.5 N の垂直振動印加接合では, 接合時に接合ツール近傍から明確な打撃音が聞こえた. この打撃音は, 接合ツールの振動にチップが追従できず, 両者が衝突して発生する. このとき, Au バンプへ超音波による繰返しの圧縮力ではなく, 衝撃力が印加される. 衝撃力は, 接合ツールの質量 m と接合ツールとチップの相対速度 v の積を, 接合ツールとチップの接触する時間 Δt で除して求められる. 接合ツールとチップはそれぞれ剛体に近く Δt は短い.

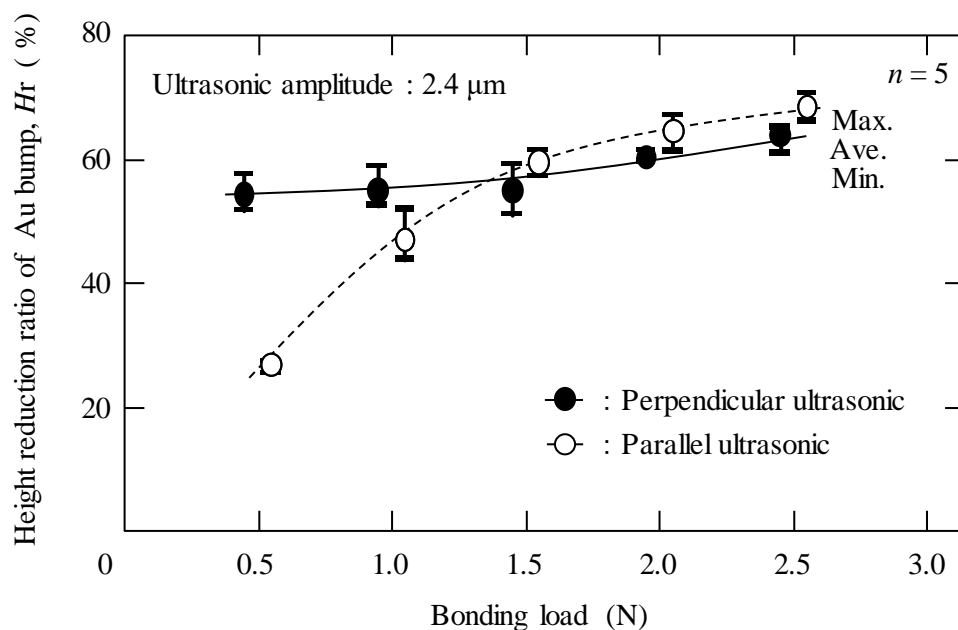


Fig. 5-9 Effect of bonding load on height reduction ratio of Au bump, H_r .

接合ツールの振幅が同じ場合、衝撃力は、接合ツールとチップが密着している場合の超音波振動による繰返しの圧縮力よりも大きくなる。そのため、接合荷重 0.5 N でも Au バンプの巨視的な塑性変形量が大きくなったと考えられる。

Fig. 5-10 に、接合部せん断荷重の測定結果を示す。いずれの接合方法でも、接合部のせん断荷重は接合荷重が増えるに従い直線的に増加した。接合部の破断箇所は、接合方法に依らず、接合荷重 0.5~1.5 N の範囲では Au バンプと基板の Au 電極の接合部である。接合荷重 2.0~2.5 N の範囲では、Au バンプと基板の Au 電極の接合部の破断と Au バンプとチップの Al 電極の接合部の破断が混在した。

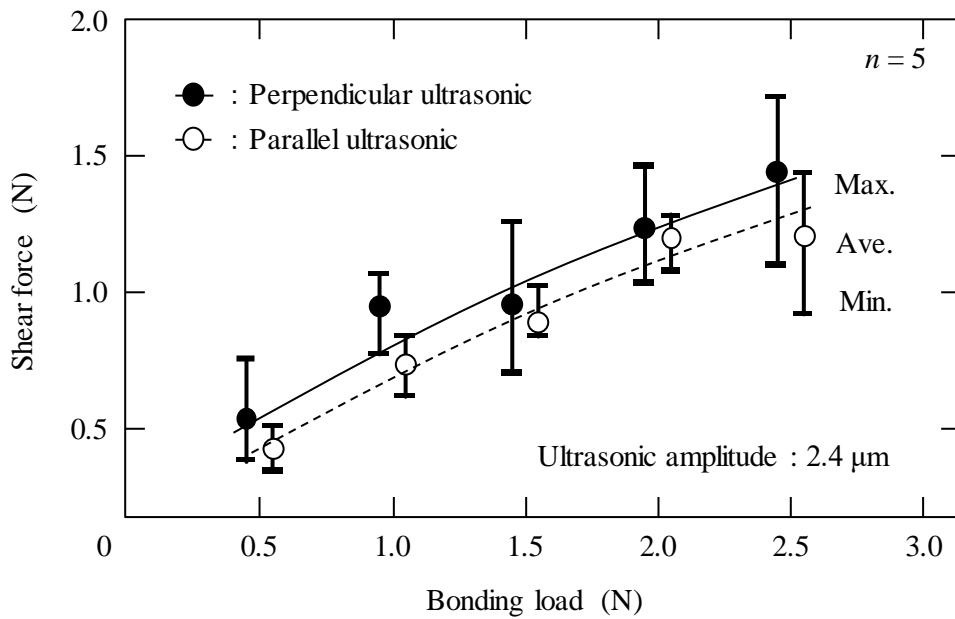


Fig. 5-10 Effect of bonding load on shear force.

Fig. 5-11 に、接合荷重を変化させた場合の接合部せん断強度を示す。接合部せん断強度は、接合部せん断荷重の平均値を Au バンプと基板の Au 電極の接合面積の平均値で除した値である。平行振動印加接合の接合部せん断強度には接合荷重の影響が少なく、ほぼ一定となることがわかった。これに対し、垂直振動印加接合では接合荷重の増加に伴い接合部のせん断強度は増加し、接合荷重 2.0~2.5 N の範囲において 100 MPa 以上のせん断強度が得られることがわかった。接合荷重 0.5 N では Fig. 5-9 に示したように Au バンプの高さ減少率 H_r が 55% と大きいため接合面積も大きくなるが、せん断荷重が低いため接合部せん断強度は低くなった。

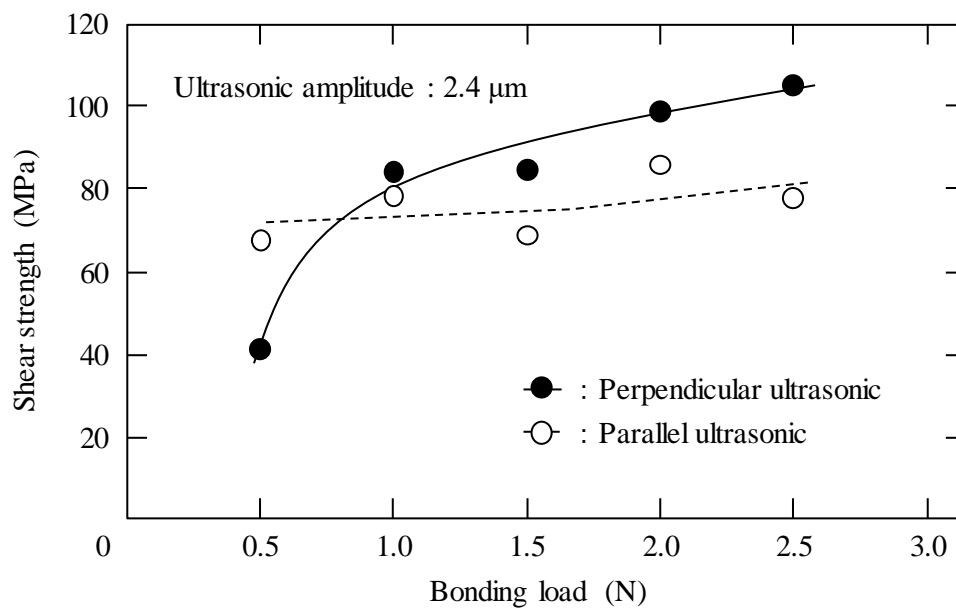


Fig. 5-11 Effect of bonding load on shear strength.

5.3.2. 超音波振幅が接合部せん断強度に及ぼす影響

Fig. 5-12 に、垂直振動印加接合および平行振動印加接合において超音波振幅を変化させた場合の Au バンプの高さ減少率 H_r を示す。接合荷重は 1.5 N である。超音波振幅が大きくなるに従い、いずれの接合方法も Au バンプの高さ減少率 H_r は増加した。

超音波振幅を変化させた場合の接合部せん断荷重を Fig. 5-13 に示す。垂直振動印加接合は、超音波振幅 1.4~1.9 μm の範囲では平行振動印加接合よりもせん断荷重は低い。せん断荷重は 1.9~2.4 μm の範囲で増加し、2.8 μm 以上の範囲では飽和した。バンプ接合部の破断は、いずれの接合方法も、超音波振幅 1.4~2.4 μm の範囲では Au バンプと基板の Au 電極の接合部で生じた。接合部のせん断荷重が飽和する超音波振幅 2.8~3.1 μm の範囲では、主に Au バンプとチップの Al 電極の接合部で破断した。したがって、超音波振幅 2.8~3.1 μm の範囲のせん断荷重の値は Au バンプとチップの Al 電極の接合部のせん断荷重に相当する。

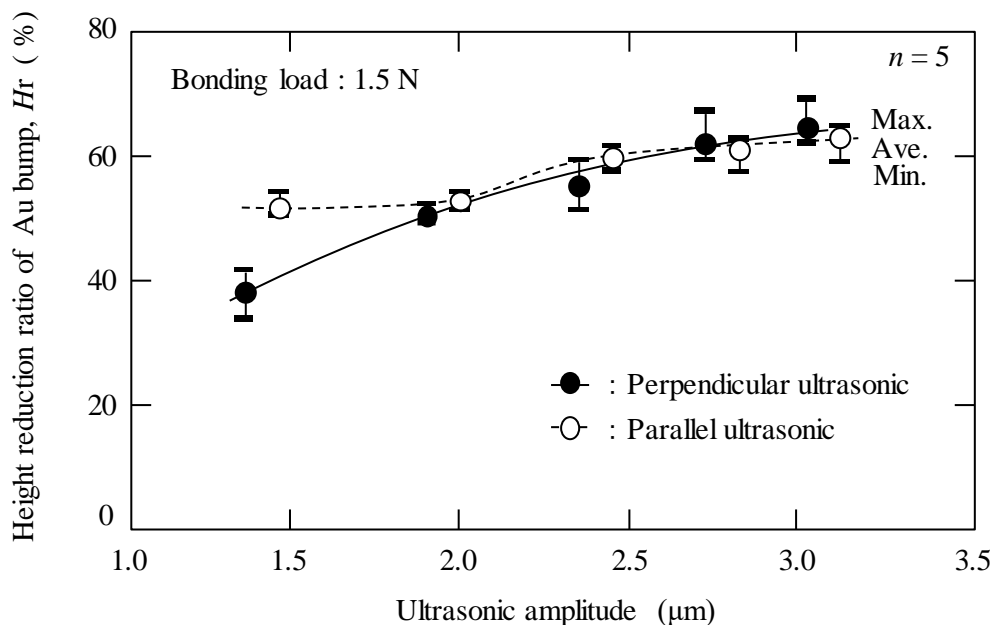


Fig. 5-12 Effect of ultrasonic amplitude on height reduction ratio of Au bump, H_r .

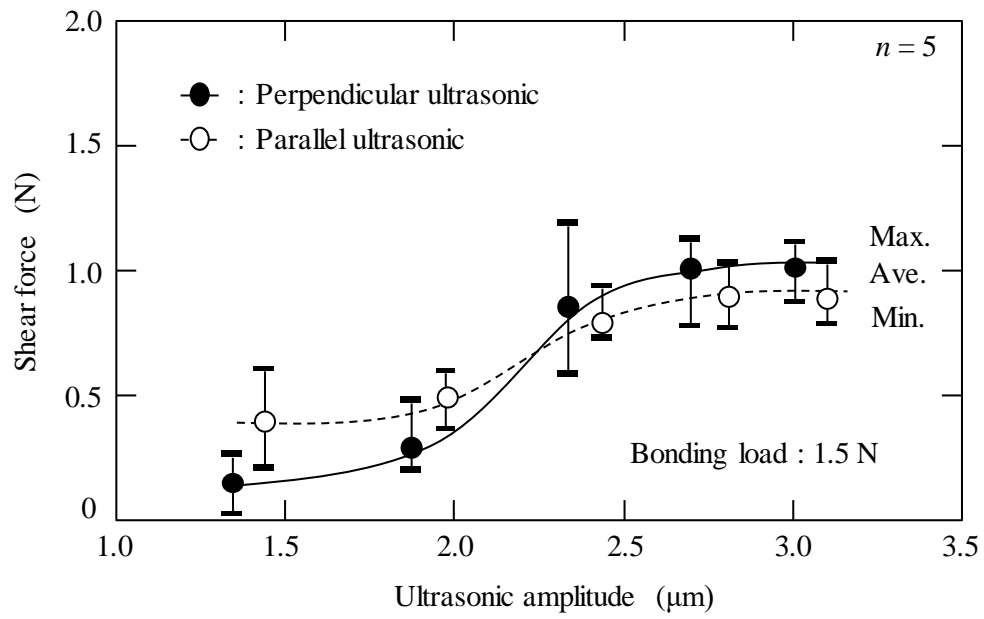


Fig. 5-13 Effect of ultrasonic amplitude on shear force.

Fig. 5-14 に超音波振幅を変化させた場合の接合部せん断強度を示す. 垂直振動印加接合では, 平行振動印加接合に比べ接合部のせん断強度に及ぼす超音波振幅の影響が大きい. せん断強度は, 超音波振幅 1.4~1.9 μm の範囲では平行振動印加接合よりも低いが, 1.9~2.4 μm の範囲で急激に増加し 2.4~3.1 μm の範囲では平行振動印加接合よりも高くなることがわかった. 接合部の破断が Au バンプとチップの Al 電極の間で生じる 2.8~3.1 μm の範囲では, せん断強度は低下する傾向を示した.

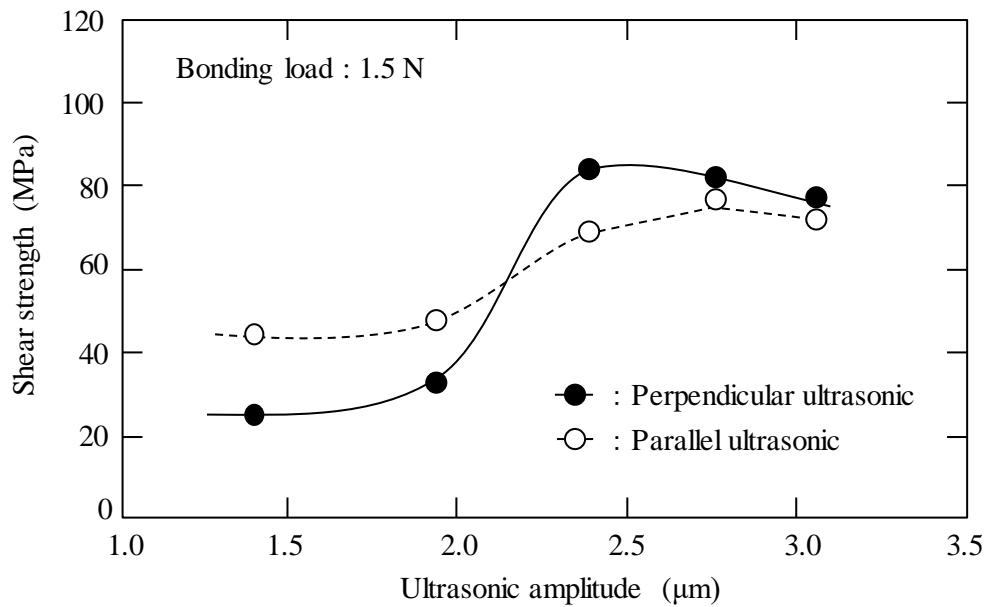


Fig. 5-14 Effect of ultrasonic amplitude on shear strength.

5.3.3. Au バンプの巨視的な塑性変形量と接合部せん断強度の関係

Fig. 5-15 に接合荷重および超音波振幅をそれぞれ変化させた場合の接合部せん断強度と Au バンプの高さ減少率 H_r の関係を示す. 垂直振動印加接合のバンプ高さ減少率 H_r の範囲は 38~64% で, 平行超音波接合は 27~69% である.

垂直振動印加接合では, 接合荷重, 超音波振幅のいずれを変更した場合でも, Au バンプの高さ減少率 H_r の 50~55% の範囲において, 接合部せん断強度が急激に変化する. さらに超音波振幅を大きくして Au バンプの高さ減少率が増加すると, Au バンプとチップの Al 電極の接合部が破断するようになり, せん断強度は低下する. 一方, 接合荷重を増加させるとせん断荷重が増加し, バンプ高さ減少率 H_r が 62~64% の範囲では 100 MPa を超えるせん断強度が得られた. バンプ高さ減少率 60~69% の範囲における平行振動印加接合のせん断強度は 80 MPa 程度であり, 垂直振動印加接合

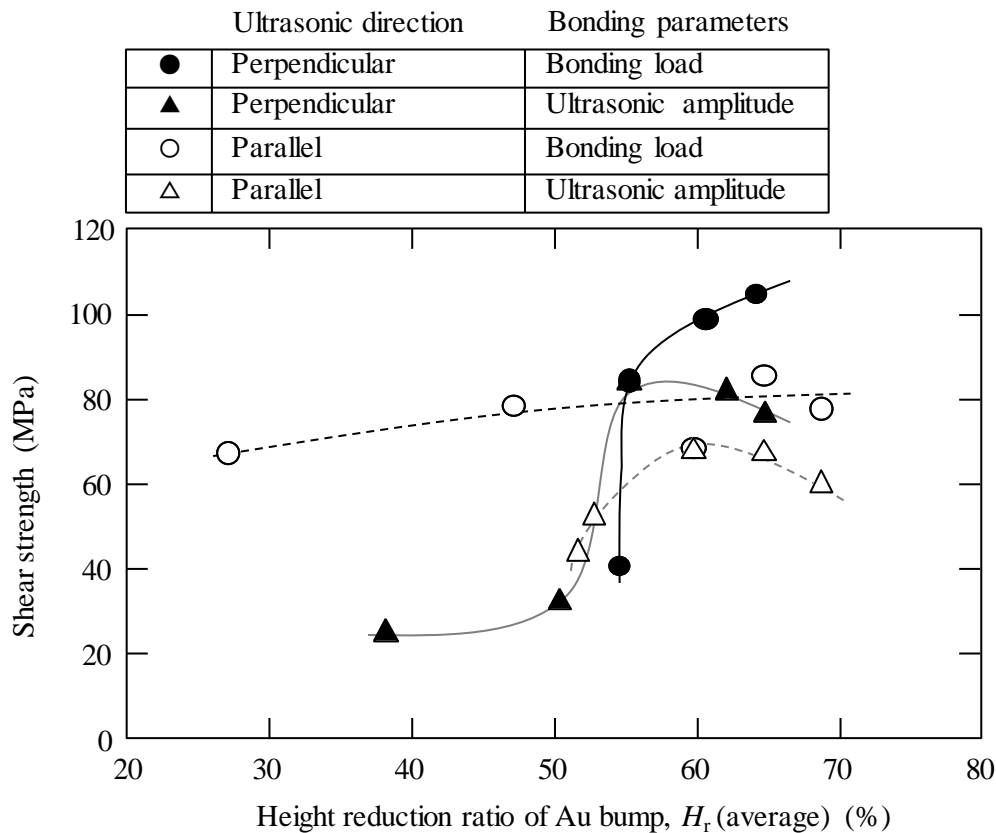


Fig. 5-15 Relationship between height reduction ratio of Au bump, H_r and shear strength.

は約 20%高いせん断強度が得られることが明らかになった．なお，Au バンプの形成に用いた純度 99.99 mass%の Au ワイヤの引張強度は 156～270 MPa である．金属のせん断強度は引張強度を $\sqrt{3}$ で除した値に相当すると言われていること，Au バンプは Au ワイヤを用いて Fig. 1-7 で示した工程で形成され，その際の熱影響によりせん断強度が元のワイヤから 30～40%低下する⁸⁾ことから，Au バンプの接合面近傍のせん断強度は 54～109 MPa と推定される．本研究の垂直振動印加接合で得られた 100 MPa を超えるせん断強度は，Au バンプのせん断強度の推定値の最大値に相当し，Au バンプの材料強度並みの強固な接合が行えていると言える．

平行振動印加接合では，バンプ減少率 H_r が大きい範囲では垂直振動印加接合よりもせん断強度は低くなるが，バンプ高さ減少率 H_r が 27%でも 60 MPa を超えるせん断強度が得られている．この時の接合荷重は 0.5 N であり，接合面に印加する外力が小さくてもある程度のせん断強度が得られることがわかった．電子デバイスの中には，パワーMOSFETのように電極の直下に外力により破損し易い半導体素子が配置されるものがある．このような電子デバイスでは，平行振動印加接合を選択し，電極への負荷を減らして接合して，せん断強度の不足を接合部への樹脂補強で補うパッケージ組立方法が適切である．

以上の結果から，垂直振動印加接合では Au バンプの巨視的な塑性変形量が大きくなる接合条件においては，高いせん断強度を得ることができると明らかになった．しかしながら，Au バンプの巨視的な塑性変形量を抑えることが要求される場合には，Au バンプの外形寸法を小さくし，Au バンプの巨視的な塑性変形による電極からののはみ出しなどを防止するなどの工夫が必要であることが明らかとなった．

5.3.4. 接合条件の接合部せん断強度に及ぼす影響に関する考察

垂直振動印加接合では平行振動印加接合と同じく、超音波印加前の接合荷重印加により Au バンプの巨視的な塑性変形が起こり、超音波印加後に変形量は増加する。したがって、5.1.節で述べたように、接合面の微視的な塑性変形機構としては、Fig. 5-3 に示した、接合面の拡大過程において接合面外周へ繰返し荷重が印加され変形する機構と、接合面に繰返しの圧縮力が印加され変形する機構が考えられる。

Fig. 5-16 に接合荷重を変化させた場合の Au バンプと基板の Au 電極の接合後の模式図を示す。接合面を円形で近似し、外円が接合後の接合面を、内円は超音波印加前の接合面を表している。円の大きさの比は、接合面積の比に合わせてある。超音波印加前の接合面積は、Fig. 4-14 のグラフに示した 0 ms 時の接合面積を基に、超音波印加直前の Au バンプと基板の Au 電極の接合面の圧力を 340 MPa と見積もって算出した。図中に示した A の数値は、接合終了時の接合面積に対する、超音波印加後の拡大面積の比率（拡大面積比率）で、B は接合終了時の接合面の圧力である。

拡大面積比率が少ない方が接合部のせん断強度が増加することから、接合面の拡大過程における接合面外周のフレッティングの寄与は少なく、接

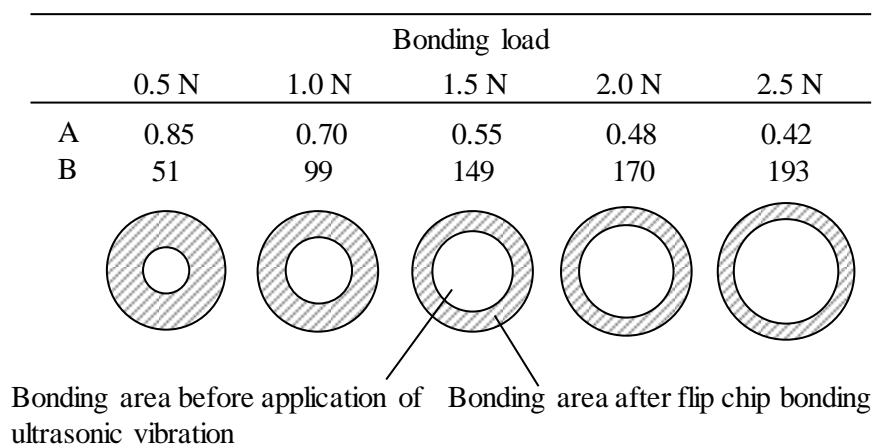


Fig. 5-16 Schematic illustration of bonding areas between Au bumps and Au electrodes.

A: Ratio of expanded bonding area by application of ultrasonic vibration

B: Pressure in bonding interface at the end of flip chip bonding (MPa)

合面への繰返しの圧縮力による接合面における Au の微視的な塑性変形が主に接合に寄与することがわかった。

金属を加圧しながら圧縮方向に振動する超音波を印加する場合、金属の変形応力は超音波の振幅に依存し、超音波振幅の増加に伴い変形応力は低下することが知られている⁹⁾。垂直振動印加接合において接合荷重の増加に伴い接合面の圧力が増加することは、Au バンプの超音波振幅が接合荷重の増加により減少することを示している。このことから、接合荷重を増加させた場合には、以下に述べる機構により接合部のせん断強度が増加したと考えられる。接合荷重の増加により超音波印加前の Au バンプの高さが減少し、Au バンプの振動吸収性が低下する。そのため、Au バンプ上面へ接合ツールの超音波振動により印加された繰返し圧縮力の Au バンプ内での緩和量が減り、接合面へ印加される圧縮力が増加する。その結果、接合面の微視的な塑性変形量が増加する。

接合荷重を変えず超音波の振幅を変化させた場合は、超音波の振幅が大きくなるに従い、Au バンプ上面に印加される繰返し圧縮力が大きくなることと、Au バンプの変形応力の低下により Au バンプの高さが減少することの相乗効果により、超音波振幅 1.9~2.4 μm の範囲では、接合面に印加される繰返し圧縮力が急激に増加し、接合部せん断荷重が増加したと考えられる。一方、超音波振幅 2.8~3.1 μm の範囲では、Al 電極と Au バンプの接合面へ過大な圧縮力が繰返し印加されることにより Al 電極内で微小き裂が生成されて¹⁰⁾ Al 電極の強度が低下し、Au バンプと Al 電極の接合部のせん断強度が低下したと考えられる。したがって、垂直振動印加接合の接合条件の選定の際には、接合に必要な最小の振幅の超音波を使用し、接合荷重を高くすることが有効であることが明らかとなった。

5.4. 結言

Au バンプとセラミック基板の Au 電極の接合を対象に、接合部のせん断強度の更なる高強度化を目的として接合面に垂直な振動方向の超音波を印加する超音波フリップチップボンディングを検討した。接合荷重と超音波振幅をそれぞれ変化させた場合の接合部のせん断荷重と Au バンプの高さ減少率を調べ、接合部のせん断強度に及ぼす影響を明らかにすると共に、接合に寄与する接合面の微視的な塑性変形機構を示した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 垂直振動印加接合では、1 バンプ当り 2.0 N 以上の接合荷重と超音波振幅 2.4 μm の接合条件により、接合面に平行な振動方向の超音波を印加する通常の接合と比較して約 20% 高い 100 MPa を超える接合部せん断強度が得られた。
- (2) 接合荷重および超音波の振幅の増加により接合部の巨視的変形量は増加すると共に接合部のせん断強度は増加する。
- (3) 垂直振動印加接合では、接合面における接合に寄与する微視的な塑性変形は、接合面へ繰返し加わる圧縮力により促進される Au バンプと Au 電極の密着過程で生じると考えられる。
- (4) 接合荷重の増加により接合部せん断強度が増加する理由は、超音波印加前の Au バンプの巨視的な塑性変形量が増加して Au バンプによる圧縮力の緩和量が減少し、接合面へ印加される圧縮力が大きくなり接合面の微視的な塑性量が増加するためであると考えられる。また、超音波の振幅を増加させると、Au バンプ上面へ印加される圧縮力の増加と、Au バンプの変形応力の低下による Au バンプの高さの減少の相乗効果により接合面へ繰返し印加される圧縮力が増加し、接合部せん断強度が増加することが示唆された。
- (5) 超音波振幅を過度に増加させると、Au バンプとチップの Al 電極の接合部への負荷が増加してせん断強度が低下するため、超音波は接合に必要な最小の振幅とし、接合荷重を高くすることが有効である。

第 5 章の参考文献

- 1) T. Tomioka, T. Iguchi and I. Mori: *Microelectronics Reliability*, 44 -1 (2004), 149-154.
- 2) R. Irwin, W. Zhang, K. Harsh and Y. C. Lee: *Proceedings of Radio and Wireless Symposium*, (1998), 293-296.
- 3) S. Seal, M. Glover, A. Wallace and H. Mantooth: *Proceedings of 4th Wide Bandgap Power Devices and Applications*, (2016), DOI: 10.1109/WiPDA.2016.7799936.
- 4) C. Lin, L. Chang, M. Jeng, C. Yen, A. Das, C. Tang, M. Tsai and M. Lai: *Microelectronics Reliability*, 50-5 (2010), 683-687.
- 5) H. Yatsuda and T. Eimura: *The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging*, 19-3 (1996), 238-244.
- 6) Q. Tan, W. Zhang, B. Schaible, L. J. Bond, T. H. Ju and Y. C. Lee: *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 21-1 (1998), 53-58.
- 7) J. Kim, B. Jeong, M. Chiao and L. Lin: *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 32-2 (2009), 461-467.
- 8) 一山 康友: *溶接学会誌*, 63-3 (1994), 202-206.
- 9) 土師 宏, 守田 俊章, 中島 英治, 吉永 日出男: *日本金属学会誌*, 57-8 (1993), 884-889.
- 10) Y. N. Lenets: *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure*, 20-2 (1997), 249-256.

第 6 章 総括

本研究では、超音波フリップチップボンディングによる電子デバイスの Au バンプと電極の接合部の高強度化を目的として、4 つの高強度化手法に関する研究を行った。Au バンプと Au 電極の接合において、電極の Au 層の厚化およびランプ状接合荷重が接合部せん断強度に及ぼす影響を調べた。また、せん断強度の増加に有効である接合面の全域でフレットイング（微小な相対すべり振動）が起こる接合を取り上げ、Chip on Chip 接合における Au バンプと Al 電極の接合に及ぼすチップ同士の平行度の影響を調査した。さらに、接合面に垂直な振動方向の超音波を印加する接合方法（垂直振動印加接合）による Au バンプと Au 電極の接合部の高強度化を検討した。

第 1 章では、電子機器の製造における電子デバイスパッケージ組立技術の位置付けを示し、安価な電子デバイスパッケージの小型化に有効な超音波フリップチップボンディングに関する研究の意義を述べた。また、当該接合技術における課題と本研究の目的を示し、論文の構成について述べた。

第 2 章では、Au バンプとセラミック基板の Au 電極の接合において、接合部のせん断強度に及ぼす基板電極の Au 層の厚化の影響を調査した。その結果、Au 層厚を $0.44\ \mu\text{m}$ から $0.91\ \mu\text{m}$ に厚化することにより、Au バンプの巨視的な塑性変形量を変えないことなく、接合部のせん断荷重が約 50% 増加することを明らかにし、Au 層の厚化はせん断強度の増加に有効であることを示した。せん断荷重が増加する理由として、Au 層が厚くなると塑性流動が発生し易くなり、接合面の微視的な塑性変形量が増加することを示した。また、Au バンプの巨視的な塑性変形量が変わらない原因として、基板電極の凹凸に起因する基板電極と Au バンプとの摩擦力が大きいため、基板電極と Au バンプとの接合状態が摩擦力に及ぼす影響が相対的に小さくなることを示した。

第 3 章では、Au バンプとセラミック基板の Au 電極の接合を対象として、超音波の印加中に接合荷重をランプ状に増加させる方法が接合部のせん断強度に及ぼす影響を調査した。Au バンプの高さを $78\ \mu\text{m}$ から $30\ \mu\text{m}$ まで減少させる接合において、接合荷重を一定に保持する通常の接合と比較して、ランプ状接合荷重の接合では接合部のせん断強度が 110% 増加す

ることを明らかにした。その理由として、接合初期の接合荷重が低い状態で接合面の全域でフレットングが起これり接合されることと、フレットングにより Au バンプおよび電極の接合阻害物を破壊しながら拡大する真実接合面積が増加することを示した。

第 4 章では、Au バンプとチップの Al 電極の接合面の全域でフレットングが起これる接合を用いた Chip on Chip 接合におけるチップ平行度の影響を調査した。平行度の低下により Au バンプと Al 電極の接合面積に約 2 倍の差が生じてても、全ての Au バンプにおいて Al 電極との接合面積に対する真実接合面積の比率が約 65%に達することを明らかにした。真実接合面積の比率が変わらない理由として、接合面において微視的な塑性変形を起これす超音波によるせん断力と接合荷重による圧力に、平行度の影響が無いことを示した。

第 5 章では、接合面に垂直な振動方向の超音波を印可する接合方法による Au バンプとセラミック基板の Au 電極の接合部の高強度化を検討した。接合部のせん断荷重および Au バンプの巨視的な塑性変形量を、接合面に平行な振動方向の超音波を印加する通常の接合方法と比較した。その結果、Au バンプの高さ減少率が 60～64%の範囲において、接合部のせん断強度が約 20%向上することを明らかにした。また、接合に寄与する主な微視的な塑性変形は接合面の拡大領域におけるフレットングではなく、Au バンプと Au 電極の密着過程で生じることが示唆され、接合部せん断強度の増加には接合荷重を高くすることが有効であることを示した。

今後の展望

様々な事象をデータ化し社会システムへ反映していく高度情報化社会において、電子デバイスの重要性は増々高まっていく。これに伴い使用される電子デバイスの数量は増加し、電子デバイスのパッケージに対する小型化や接続信頼性などの関する要求が高まっていくと考えられる。超音波フリップチップボンディングは、パッケージ小型化に有効なフリップチップボンディングを安価な電子デバイスにも適用可能にするものであり、工業的に重要な技術の一つである。一方、接合部の微視的な塑性変形の挙動

に関して、数値解析や電極のひずみ量測定など研究例は有るが、取り組みは少ない。今後、測定方法および測定装置の進化により接合部における塑性変形挙動の可視化方法が高度化され、さらに超音波接合技術が進歩することを期待したい。

関連論文

- 1) T. Ando, T. Tomioka, M. Nakazono, K. Atsumi, Y. Tane, J. Nakano, S. Hirata: Fine pitch TAB assembly technology for 820 pin ceramic PGA single point bonding technology at room temperature, IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 16-8 (1993), 808-816.
- 2) 富岡 泰造, 井口 知洋, 渥美 幸一郎: バンプ形成状態が超音波フリップチップボンディングの接合性に及ぼす影響, 高温学会誌, 30-1 (2004), 41-46.
- 3) T. Tomioka, T. Iguchi, I. Mori: Thermosonic flip-chip bonding for SAW filter, Microelectronics Reliability, 44-1 (2004), 149-154.
- 4) 富岡 泰造, 井口 知洋, 荘司 郁夫: 荷重プロファイルが超音波フリップチップボンディングの接合性へ与える影響, 溶接学会論文集, 36-1 (2018), 16-20.
- 5) T. Tomioka, I. Shohji: Bondability Investigations of Thermosonic Flip Chip Bonding using Ultrasonic Vibration Perpendicular to the Interface, Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, 12 (2019), E18-013-1~E18-013-7.
- 6) 富岡 泰造, 井口 知洋, 荘司 郁夫: 超音波フリップチップボンディングのチップ傾斜に対するロバスト性改善, 塑性と加工, 60-700 (2019), 142-146.

謝辞

本研究および学位論文の取りまとめに際し、多くのご指導とご鞭撻を賜りました、群馬大学大学院理工学府の荘司郁夫教授へ深甚なる感謝を申し上げます。

また、本学位論文の審査にあたり、ご多用中にもかかわらず多くのご助言とご指導を賜りました群馬大学大学院理工学府の半谷禎彦教授、松原雅昭教授、井上雅博准教授、小山真司准教授に心からお礼を申し上げます。

さらに、電子デバイスのパッケージングに関する接合技術の研究に関して多くのご助言を賜りました大阪大学接合科学研究所の高橋康夫特任教授ならびに大阪大学の藤本公三名誉教授に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり、株式会社東芝の生産技術センターの方々から多くのご協力とご助言を頂きました。共同研究者として、時折深夜まで接合実験を一緒に行った井口知洋氏、接合装置の開発チームの加島規安氏、末松睦氏、池谷之宏氏、大谷和巳氏、久保哲也氏、芝田元二郎氏、相澤隆博氏、研究に関する多くのご指導とご助言を頂きました渥美幸一郎氏、安藤鉄男氏、森郁夫氏に深謝致します。また、研究にご協力を頂いた株式会社東芝の電子デバイス事業部（当時）および東芝デバイス&ストレージ株式会社、東芝コンポーネンツ株式会社（当時）の関係各位に感謝を申し上げます。

最後に、本研究および論文作成は、妻である悦子からの様々な支援なくしては完遂できませんでした。深く深く感謝致します。