半導体パッケージにおける Cu ワイヤボンディングの接合界面について

株式会社アイテス 解析技術

キーワード： 半導体パッケージ、Cu ワイヤボンディング、Au ワイヤボンディング、Pd 被覆 Cu ワイヤ、超音波併用熱圧着接合、1st ボンド、CuAl 金属間化合物、Al スプラッシュ、Al 電極、Al 酸化膜、塑性変形、すべり線、ボイド、拡散、グレイン、エッチング、SEM、EDX、EBSD、AFM

1. 緒言

電子部品や半導体パッケージ内の電極間を接続する方法としては、はんだボールやバンプで接続させる BGA（Ball Grid Alley）や FCA（Flip Chip Attachment）接合と、ワイヤを超音波により加圧接続するワイヤボンディングによる方式が代表的なものであり、これらはいずれもほぼ完成された技術である。はんだ接合は Pb の環境問題のため SnPb 共晶はんだから Sn 基主体のはんだへの移行が進んだが、ワイヤによる接合は特に LSI 半導体では Au ワイヤに変わって低コストの Cu ワイヤ等が期待されているものの、そのワイヤ素材の特性から、広く普及するには至っていない。すなわち Cu ワイヤの普及には Cu が酸化しやすいことや硬度が高いこと等から、不活性ガスの導入による設備変更や、新たなボンディング条件の設定が必要であること、さらに接合界面の挙動等を含め信頼性的に十分解明されていないこと等が挙げられる。特に分析の面では、信頼性試験や実使用環境下での Al 電極接合界面の Cu-Al 金属間化合物の生成挙動等を解明することが重要な課題である。そこで本報では、Cu ワイヤボンディングにおける初期及び高温放置後の Cu-Al 接合界面の現象について得られた知見を報告する。

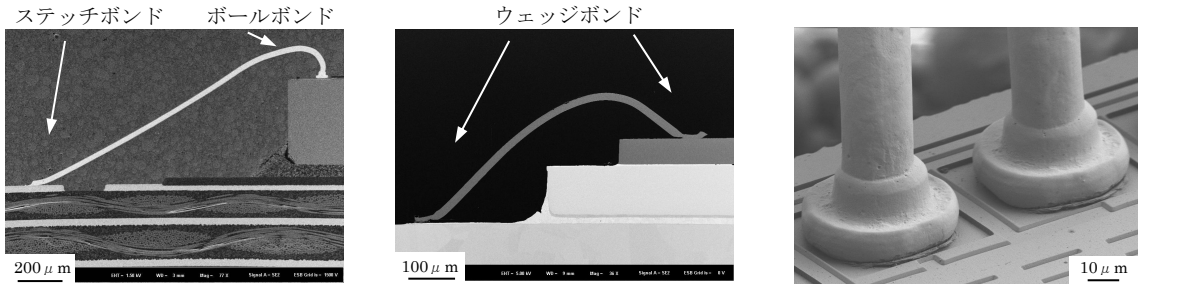
2. 試料及び方法

超音波併用熱圧着接合法により Cu ワイヤボンディングを行った QFP パッケージ（ワイヤは Pd 被覆有りのものと無しのもの）について断面を作製し、その断面から Pd の分布や接合界面の Cu-Al 金属間化合物（以降、化合物と表記）の生成・成長について、SEM 観察、EDX（エネルギー分散型 X 線分析）による元素分析及び EBSD（電子線後方散乱回折；TSL-OIM）による結晶方位解析を行った。試料は初期品の観察後、120℃1450hr の高温放置を行った。さらに Pd 被覆有り試料については薬品による開封、エッチングを行い、Cu と接合していた Al 表面について SEM 観察及び EBSD による解析を行った。また、その Al 面に対して AFM（原子間力顕微鏡：BRUKER-Icon）による観察も行った。本報では、接合部として電極との化合物形成が重要となるボールボンドによる 1st 側を取りあげた。ワイヤ径は 20μm、ボンド潰れ径は約 55μm、チップの Al 電極（Al-Si-Cu）膜厚は約 0.8μm である。

3. 各種ワイヤボンディング

基板とチップ素子の電極間を接続させるワイヤ接合には、ワイヤ素材として、Au、Cu、Al 等が用いられる。Al は主にパワー系の大電流用途として、Au は酸化、腐食に関して高い信頼性が要求される LSI 半導体に使用されており、一方 Cu は安価で導電性がよいため一部の LSI や自動車向けとして使用されている。接合方式として Au ワイヤや Cu 細ワイヤは主にキャピラリを用いたボールボンド、ステッチボンド（ウェッジボンド）が、そして Al ワイヤや Cu 太ワイヤは主に太線に使用されているボール形成を伴わないウェッジボンドが主流である。図 1 に Au ワイヤと Al ワイヤの 1st、2nd ボンディング形状、ループ断面形状、及び Cu ワイヤの

パッケージ開封後の 1st ボンディング形状を示す。また図 2 に Cu ワイヤ 1st ボンド部の X 線観察像を示す。



a)Au ワイヤボンディング　b)Al ワイヤボンディング　c)Cu ワイヤボンディング（1st 部）

図 1　各種ワイヤボンディング

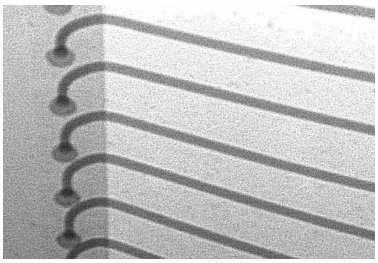


図 2　X 線透視による Cu ワイヤの非破壊観察

ワイヤボンディング法としては、熱圧着法、超音波併用熱圧着法、超音波法があるが、Au ワイヤボンディングの熱圧着接合については、ワイヤ先端を溶融させてボールを形成させ、Al 電極への加圧時にボールが塑性変形することにより Au 側にすべりが生じ、その変形がパッドの Al 表面に押し付けられ、その際に Al 表面の酸化膜が破壊されて新生面（清浄な面）が生じることで Au と Al の合金反応、化合物化が生じるとされている（図 3）[1]。量産で主に採用されている超音波併用熱圧着法は、上記に超音波が加わることにより複合化するとされている [2]。一方で異種材間の超音波接合時の接合界面や酸化膜の挙動に対して、また疲労き裂部や引張り時のすべり変形挙動に対して、AFM や EBSD 等を用いた種々の研究が行われている [3]-[5]。Au-Al 系のワイヤボンディングとしては、その接合界面現象の観察や解析例は多く見られるが [6] [7]、Cu ワイヤの解析例は比較的少なく、Al 電極への接合機構に関しても Au と同様であると推測されているが報告例はほとんど見られない。

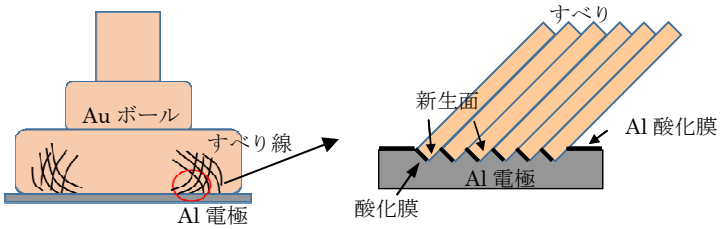


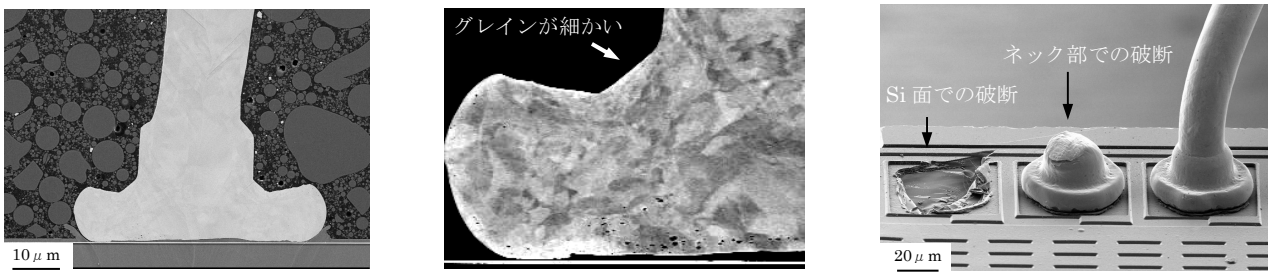
図 3　Au ボールと Al 電極の接合（熱圧着接合）

4. 結果及び考察

4−1. ボンディング部の観察

Cu ワイヤは、硬度が高いことからボンディング時にチップ割れや Al スプラッシュ（ボール周辺部での Al の盛り上がり）が生じやすく、Au ワイヤに比べてチップへの負荷は大きいといえる。Cu ワイヤボンディング

部の断面観察を行った結果、1st ボンド形状及び結晶粒は Au ワイヤとよく似ており、ボール部の結晶粒は比較的大きいが、キャピラリで押さえられる箇所については、変形をより受けるため微細となっていることが観察された（図 4、9、10）。Al 電極との界面に生じる Cu-Al 化合物は、一般的に Au-Al 化合物に比べて特に初期では生成量が非常に少ないため観察は容易ではなく、精密な断面作製が要求される。この化合物はその後の成長も遅いことから長期的にも機械的安定性は良いとされるが、長期間の高温信頼性や高温高湿下では信頼性的に劣化すること等が、また、パッケージ封止樹脂内のハロゲン元素に敏感で腐食しやすい化合物が生成して電気的不具合を起こすこと等が指摘されている。本報においても、ボンディング直後のワイヤ引張り応力に対する接合強度は、Si チップ内での割れやネック部での破断が生じることから、初期においても比較的高いといえる（図 4c）。

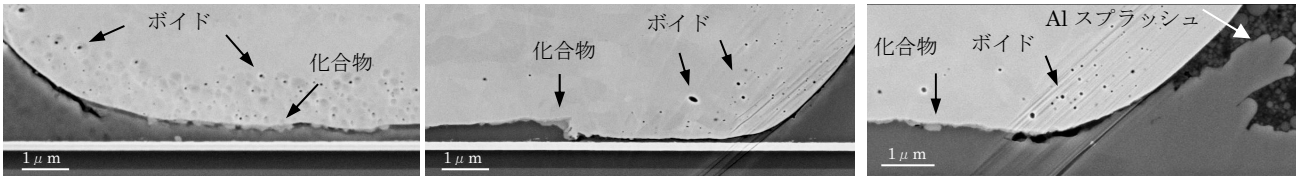


a)1st ボンド　　b)1st ボンド部グレイン像（左図部分拡大）　　c)ワイヤボンド引張り

図 4　Cu ワイヤの 1st ボンド（ボールボンド）部

4－2. 断面作製法の選択

SEM 観察のための断面作製手法としては一般的には機械研磨法と、アルゴンイオンミリングによる CP 法とがある。機械研磨法では、作製した断面の Cu-Al 界面等に素材の硬度差による段差が生じやすいことや種々のダメージが生じやすいことから、微小領域の観察及び分析には精度的・信頼性的に問題となることがある。今回の例では Cu ボールの側面や底面付近には Au ボールには見られない微小なボイド（φ20～100nm）が多数内在しており、このボイドは CP 法では断面作製直後からでも観察できるが、機械研磨法では適切な手法（条件）を施す必要がある。Cu-Al 系の生成化合物に関しても、特に初期では微小なため機械研磨法では断面作製が容易ではないが CP 法では容易に断面作製が行える。このように CP 法は、詳細な観察や分析には信頼度の高い断面が得られる方法であるが、加工すじ等のダメージが入ることや観察範囲が狭い、目的箇所に対する位置精度が低い、加工時の温度上昇等、考慮すべき点もある。元素分析や結晶方位解析の EDX、EBSD はどちらの加工法でも実施可能であるが、高倍率での観察・分析には CP 法が適する。本報ではそれぞれの特徴を生かし、比較、検証のためにも両手法を併用した（図 5）。なお、Cu ボールの側面や底面付近に多数内在する微小ボイドは、Pd 被覆なしのワイヤでも見られることから、溶融によるボール形成時に生成するものと思われる。



a)Pd 被覆有り、機械研磨法　　b)Pd 被覆有り、CP 法　　c)Pd 被覆無し、CP 法

図 5　機械研磨法と CP 法による接合部断面の比較（初期品）

4－3. 被覆 Pd の分布

Cu ワイヤは酸化しやすいことから不活性ガス雰囲気下でのボンディングが必要となり、設備の追加、変更が余儀なくされるが、さらにワイヤ自体にも Pd を表面に被覆させたり、ワイヤを合金化させたりしたものが開発され、評価されている[8]。図 6 は表面に約 0.1μm の厚みで Pd が被覆された Cu ワイヤの 1st ボンド部の断面 EDX 分析結果で、Pd はボール部では明瞭な境界を持たずに表面付近に分布しており、高温放置（120℃ 1450hr）を行っても内部への大きな拡散（広がり）は見られなかった。なお、この Pd は腐食を引き起こす元素の外部からの侵入に対しては有効であるとされている。

ボンディング後の Cu ボール底部（Al 接合面）については、Pd はボール周囲に押し出されて少なくなっているものが多く見られたが、微小ボイドとともに、底面に分布するものも見られた（図 7）。このように Pd は未溶融の上部ワイヤ部では約 0.1μm の厚みの層として見られるが、ボール部では Pd 層/ Cu 界面は不明瞭で

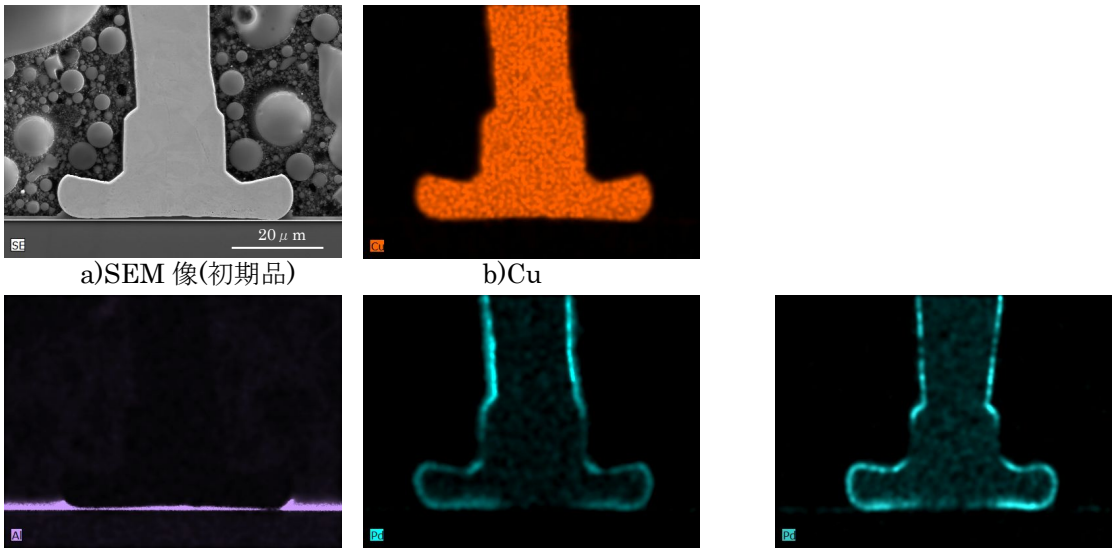


図 6　被覆 Pd の分布（初期品と高温放置品）

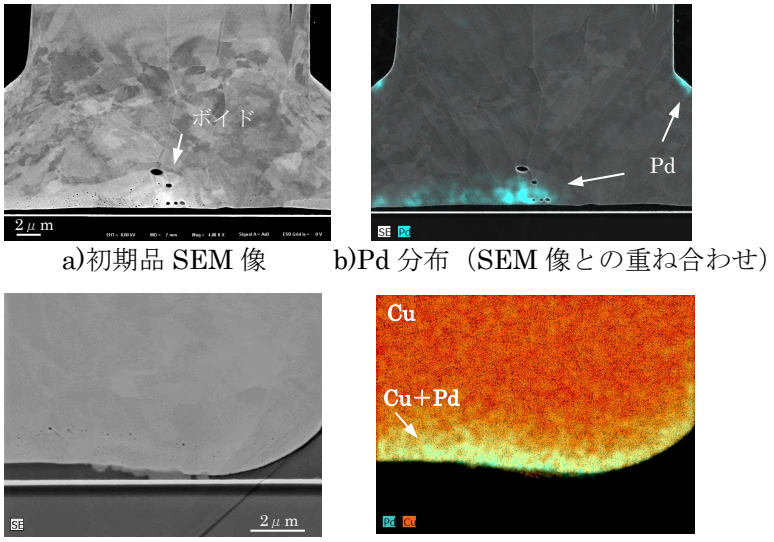


図 7　被覆 Pd 分布の詳細（初期品と高温放置品）

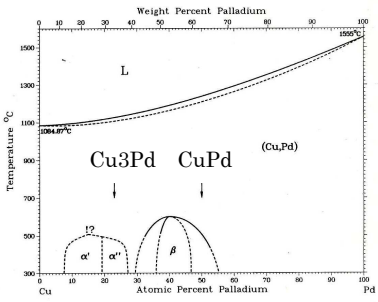
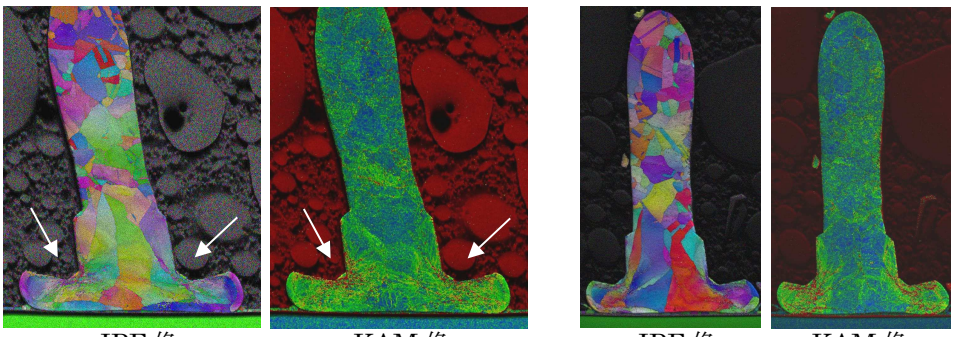


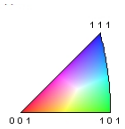
図 8　Cu-Pd 状態図 [9]

連続的な濃化層（一定の広がり）として存在しており、Cu-Pd 合金系は部分的に Cu-Pd 化合物を形成する組成を有するが（図 8)、ボール底面付近で観察される Pd も連続的な組成分布を示すことから、いずれも Cu-Pd 化合物としての存在は不明瞭である。EDX による半定量分析の結果、図 7b）のボール底面中央の Pd 分布の強い箇所で、Cu/Pd 比は最大で 8～10at%Pd であり Cu-Pd 化合物（Cu3Pd、CuPd）の組成域とは若干差異が見られた。

4－4. EBSD による Cu グレインの観察

初期と高温放置（120℃1450hr）におけるボンディング部のグレインを EBSD で観察した結果を図 9 に示す。図 10 にはワイヤ接合部の結晶粒サイズを比較した結果を示す。Cu ワイヤも Au ワイヤと同様に特にボール部では大きなグレインを形成しており、接合時の加圧変形のためボール部のグレインは、ワイヤ方向に長く底面で横方向へ広がった形状となっている（IPF 図)。またキャピラリ押さえ部では図 4b）の SEM 像でも見られるように結晶が細かくなり、応力の偏りも見られる（図 9a 矢印)。これは高温放置してもあまり変化は見られない（KAM 図)。ここで IPF 図は結晶方位を表すマップで、KAM 図は隣接する部位との方位差で局所的な歪を表したものである。また図 10 の EBSD 各図のように、平均粒径は、Au ワイヤの 5.4μm に対し Cu ワ





IPF マップカラーキー

矢印：キャピラリ押さえ部

ND：試料面垂直方向、以後の分析も全て同じ

図 9　EBSD による初期と高温放置における Cu グレイン及び応力状態の観察

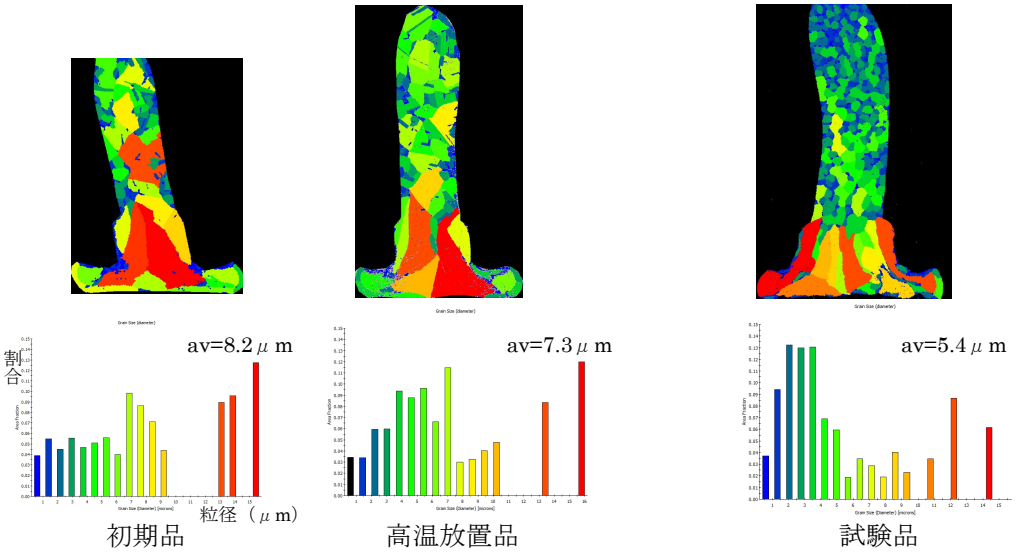


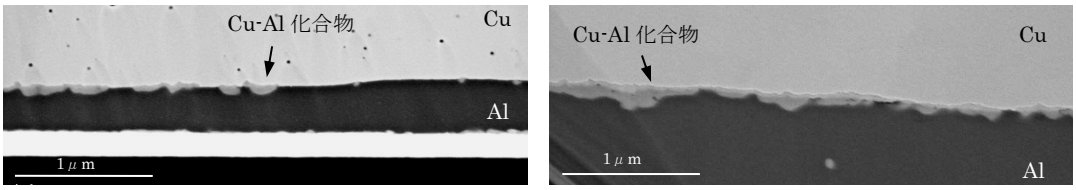
図 10　Cu ワイヤと Au ワイヤのグレインサイズの比較（等倍比較、下段は粒径分布）

イヤは初期で 8.2μm、高温放置で 7.3μm とやや大きく、ボール部及び上部ワイヤ部ともに全体的に大きく観察された。なお、ここで結晶粒径は方位差 15° 以上を大傾角粒界とし、平均粒径は結晶粒の占有面積を基に算出した値を採用した。

4－5. Cu-Al 接合界面

4－5－1. 接合界面の Cu-Al 化合物と酸化膜

断面観察を行った結果、Cu と Al の化合物は、電極接合界面の Al 側にわずかに生成していることが観察された。この化合物は被覆 Pd 無しの試料に比べて Pd 有りワイヤのボンディングでは若干少ない傾向に観察されたことから（図 11)、Pd 濃化層の偏析状態によっては影響をより受けることも考えられる。この Cu-Al 化合物は接合中央付近と端部では生成状態が異なっており、中央部では図 11 のように点在しているが、端部では部分的に層状に生成したものが多く見られた（図 12)。いずれも Cu-Al 化合物は接合界面に対してほとんどが Al 側に生成しており、高温放置を実施すると成長が見られるが、今回の条件では中央部に点在する化合物は若干大きくなるにとどまり、端部では Al が消失し層状化合物も厚みを増すものの、電極全面には広がらず成長速度は遅い。同じ接合方式でも島状や層状に厚く成長する Au-Al 系の化合物とはかなり様相が異なり、Cu におけるボンディングパラメータにも起因している可能性がある。



a)被覆有り　　b)被覆無し

図 11　Cu ワイヤの被覆 Pd 有無における電極接合界面の Cu-Al 化合物（初期品中央部）

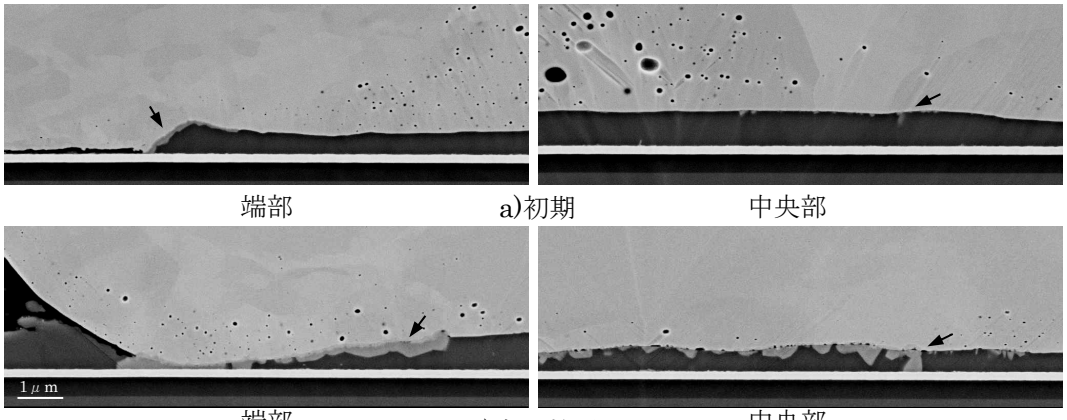


図 12　接合界面の Cu-Al 化合物の初期と高温放置、及び端部と中央部の比較（被覆 Pd 有り試料）

また高温放置を行うと、SEM による観察では接合端部の Cu-Al 化合物は接合界面を挟んで Al 側と Cu 側に 1 相ずつ、計 2 相が観察された。Al 電極への Cu ワイヤ接合時の化合物としては、主に Al 側に CuAl2 が大きく生成し、Cu 側には Cu9Al4 が生成するとされる。本報でも、図 13 の接合端部で Al 側に観察された化合物（Cu-Al①）の Cu/Al 比が EDX による半定量分析により、34～37at%Cu と得られたことから CuAl2 と推定された。Cu 側に生成した薄い化合物（Cu-Al②）に関しては微小なため有効な値が得られなかったが、上記

から Cu9Al4 と推測される（図 14）。

さらに、高温放置を行うと端部では化合物が厚く成長するものの、化合物内に初期の Cu-Al 界面（酸化膜界面）の一部がそのまま残存している箇所が見られた（図 13）。このような箇所では高温放置後も依然として Cu-Al 化合物を形成せず、その界面からは EDX 分析により酸素の分布が厚く見られた（図 15）。断面作製手法として機械研磨法では、微小領域の酸素有無についての分析は精度的に問題があるためここでは CP 法を採用した。従って化合物成長により分断されて残存した Al 酸化膜は容易には消失しないこと、高温放置しても特に厚く残った箇所では化合物は形成されずに EDX の分析精度でも検出できるほどの酸化膜が見られることから、化合物の形成と酸化膜とは密接な関係があることが分かる。

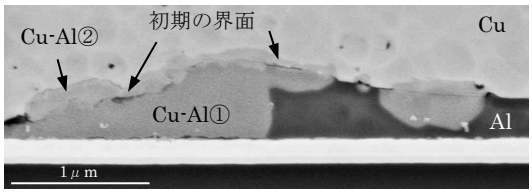


図 13　接合界面の Cu-Al 化合物（端部）

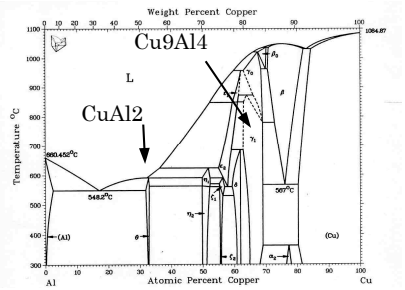
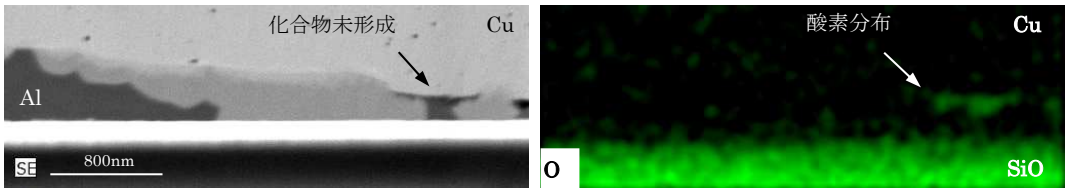


図 14　Al-Cu 系状態図[9]



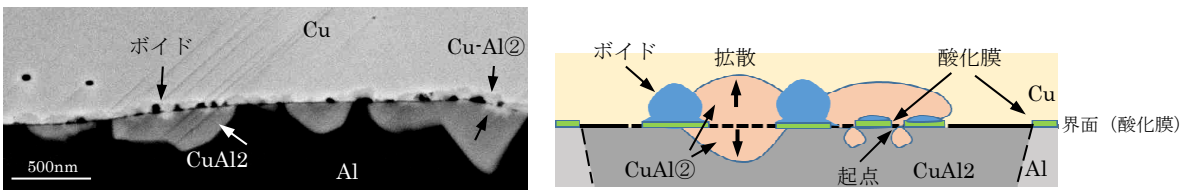
a)分析位置　　b)O 分布

図 15　接合界面の EDX 分析（高温放置品、CP 加工）

4－5－2. 接合界面中央部の Cu-Al 化合物と微小ボイド

Cu-Al 化合物は主に接合界面の Al 側に形成されるが、接合部中央部ではほとんどが多角形状の単独粒である。また初期の接合界面にはボイドはほとんど見られないが、高温放置により Cu-Al 化合物が成長した界面の Cu 側には微小ボイドが多く観察された（図 16）。このボイドは接合中央部で点在している化合物生成箇所に多く見られ、化合物が厚く層状に生成した Cu ボール端では見られなかった（図 13、15）。

また、これらボイドとボイドの間の Cu 側にも、Al 側に生成した CuAl2 とはわずかに組成の異なる微小な化合物（第２相）が SEM 像コントラストより確認された。この化合物は微小ではあるが界面から Cu 側に円形状に広がっていることから、Al 原子が Cu 側に拡散したことを表し、従って Al 側に生成したものに比べて Cu 組成の高い化合物といえる。同様にこの化合物は先に生成した Al 側の化合物 CuAl2 へも拡散したように観察される箇所が見られた。この微小な Cu-Al 化合物は、接合部端部で層状に見られる化合物のうち、Cu 側

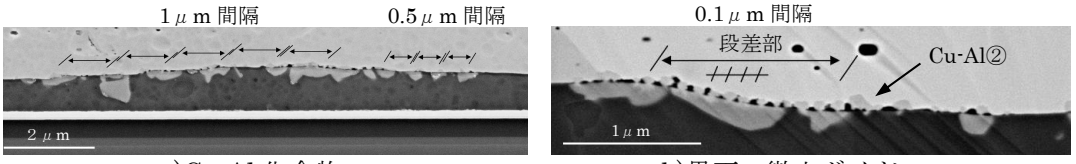


a)Cu-Al 化合物と接合界面の微小ボイド　　b)模式図

図 16　接合中央部の Cu-Al 化合物と接合界面の微小ボイド

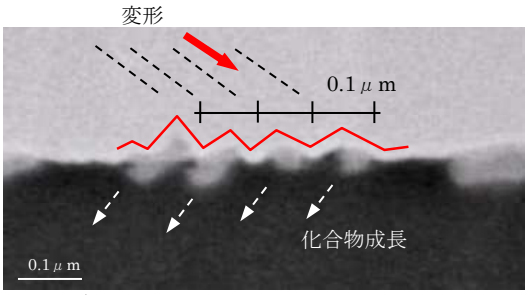
に生成した薄い化合物（図 13 の Cu-Al②）と同じものと推測される。

さらにこの接合部中央付近で点在する化合物 CuAl2 は、ほぼ一定の間隔で生成している箇所が見られた。図 17a)におよそ 0.5μm 及び 1μm 間隔で見られるものを示した。また界面に生じた微小ボイドも、ほとんどが Al 側の化合物（CuAl2）が生成した底面境界の Cu 側で見られ、ボイド間隔も 0.1μm や 0.2μm とほぼ一定間隔という特徴的な箇所が見られた。図 17b）に緩やかな斜面に見られるおよそ 0.1μm 間隔のボイド列を示した。また接合部中央付近の Cu-Al 化合物生成箇所の界面には、図 18 の様に階段状或いはジグザグ状のステップが数段見られる箇所があり、このような箇所では各ステップは平坦で、ステップと水平面とは 30 度前後から平行に近いものまで一定のパターンで変形を受けていることが観察された。化合物についてもその平坦面に対して概ね垂直方向に成長しているように観察された。図 18a）では初期品で非常に微細な間隔（約 0.1μm）で特定側の面で化合物の生成が見られ、図 18b)、c）では高温放置品でこれもほぼ等間隔に化合物が成長し（b では約 0.5μm 間隔、c では水平面に近い面で主に成長し約 1μm 間隔）、界面には微小ボイドも観察された。このように、Cu-Al 化合物や界面の微小ボイド、平坦な階段状ステップが一部分でも等間隔という特徴的な状態を示すことは、ボンディング時の塑性変形によるすべりの影響を受けていると考えることができる。超音波を併用した本接合法では、熱圧着時の荷重以外に超音波振幅の影響も受けることにより Al 酸化膜が破壊されていると考えられる。

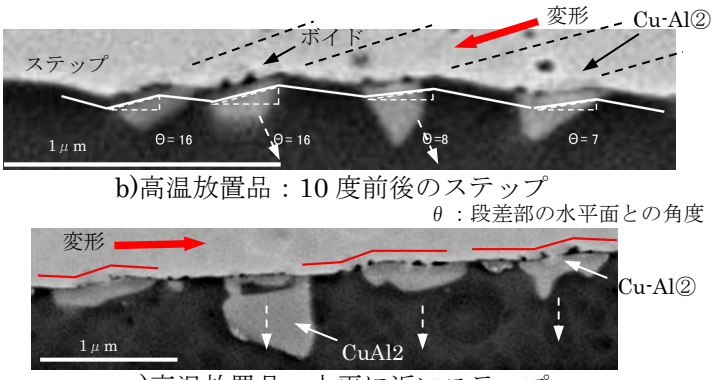


a)Cu-Al 化合物　　b)界面の微小ボイド

図 17　Cu-Al 化合物の間隔と微小ボイドの間隔



a)初期品：30 度前後のステップ



b)高温放置品：10 度前後のステップ

c)高温放置品：水平に近いステップ

図 18　接合界面の階段状ステップと Cu-Al 化合物及び微小ボイド

4－5－3. Cu-Al 化合物の成長（拡散）

接合界面に生成する化合物は、特にはんだ接合では放物線則 $x=\sqrt{(Dt)}$、$D=D_0\exp(-Q/kT)$に従うとされ、ワイヤボンドにおける化合物も初期には従うとされる。

x は厚み、D は拡散係数、D_0は振動項、Q は活性化エネルギー、k はボルツマン定数、T は温度

今回の Cu-Al 化合物は高温放置を行っても中央部で点在し、端部では部分的な層状であり全体としても生成量は少ないが、SEM 断面観察像の Al 電極中の化合物面積から求めた平均化合物生成量（接合部長さにおける平均化合物厚みで S(Cu-Al)/L：S は化合物面積、L は接合有効径とすると、0.093μm）と、上式に文献値 [10] を代入することで得られる計算上の生成量（0.074μm）とは比較的近い結果が得られた。ここでは、

D_0(Al-Cu)=1.5x10^{-5}m^2/s、Q＝1.26eV、k＝8.62x10^{-5}eV/K、T=393K とした。このことから本系においても生成量の少ない状態ではあるが、Cu-Al 化合物の成長（拡散）は初期には放物線則に従うことが推測され、また、このように断面観察像の化合物面積から求めることも有効な手段と思われる（図 19）。なお、上記の高温放置条件を Au-Al 系に適用した場合には、Au-Al 化合物の厚みは、約 3μm（Au/Al2O3/Al 薄膜対で Q=1.1eV、柘植ら[6]）が得られ、これは現実的に接合界面に観察される化合物の厚みと同程度であることから、これらと比較しても Cu-Al 化合物の成長速度はかなり遅いということが分かる。

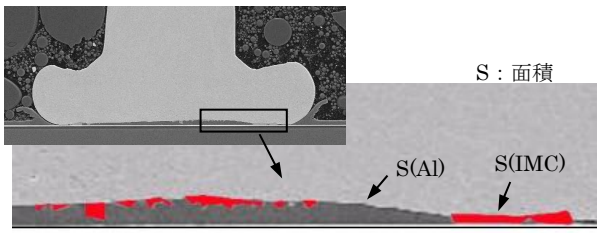
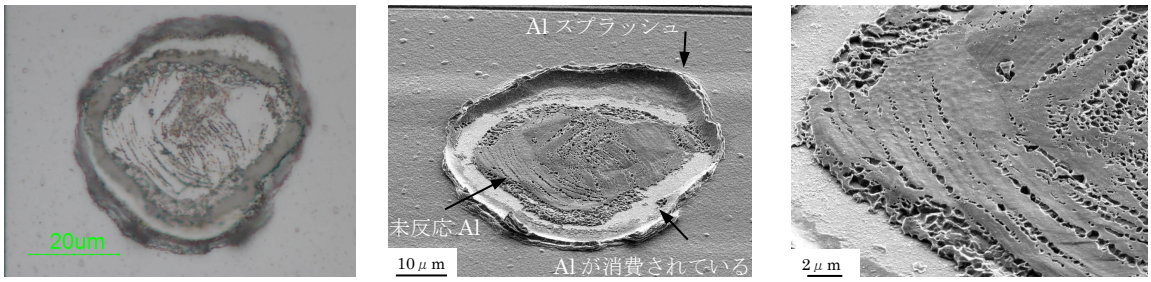


図 19　Cu-Al 化合物（IMC）の抽出（色付け部）

4－6. 開封エッチング後の Al 接合面の観察

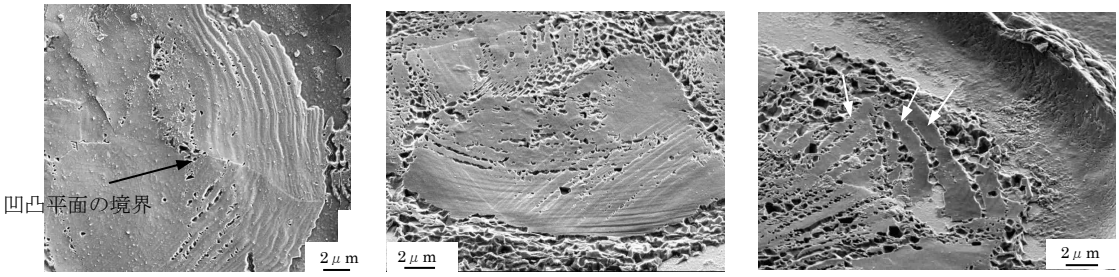
4－6－1. Al 接合面の観察

高温放置した試料について、Cu ボール及び Cu-Al 化合物を薬品により溶解させた後に、接合していた Al 表面の観察を行った結果、Cu ボールが存在していた周囲には加圧時に生じた Al のスプラッシュが明瞭に観察された。さらに、ボンディング部中央の円形部は接合していた未反応の Al 面であり、緩やかな凹凸平面がいくつか見られ、その表面には幾重ものしわ状の線状パターンが観察された（図 20、21）。Al 面に見られるこの線状パターンは接合中心部では比較的少なく、端部にかけてはっきりと見られ、最外端では Al はほぼ消費されている。さらに、この線状パターンは平行に何本も見られ、段差を伴うステップ状でほぼ一定間隔のものが多く、端部ほど間隔が広く段差が大きい傾向に見られた。また、なかには交差するものや外周端部で部分的



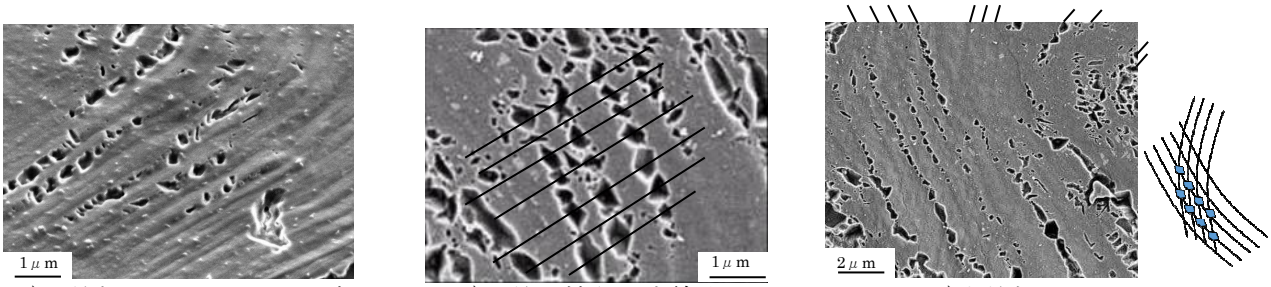
a)光学像　　b)SEM 像（傾斜）　　c)SEM 像拡大

図 20　開封による Al 接合面の観察



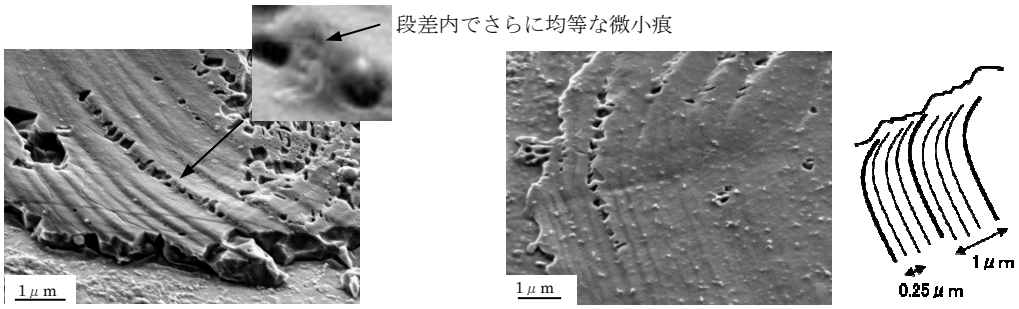
a)しわ状パターン　　b)交差するパターン　　c)端部での広がり（矢印）

図 21　Al 接合面に見られる種々の線状パターン



a)段差部に見られる ETG 痕　b)段差を越えて直線状に等間隔に並ぶ ETG 痕　c)交差部

図 22　Al 接合面の線状パターン上における ETG 痕

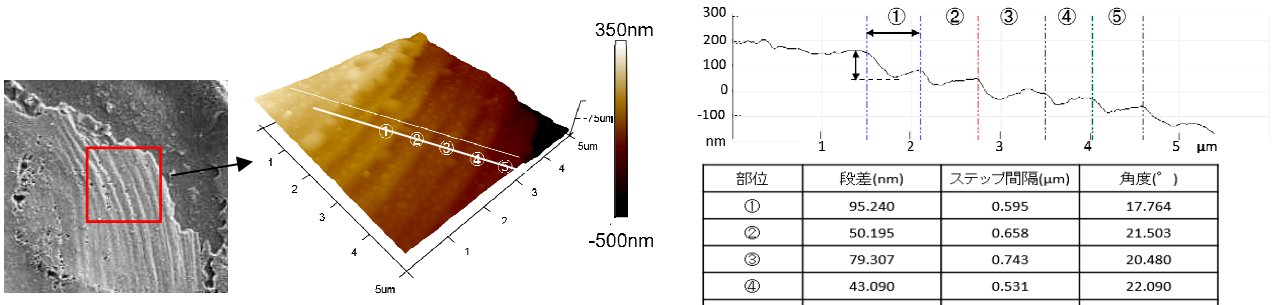


a)段差内に見られる均等な微小痕　b)大小の段差

図 23　Al 接合面の特徴的パターン

に、より変形を受けたステップの広いもの等が見られた。これら線状の形状は塑性変形の際に見られるすべり線と酷似しており、Au-Al 系の熱圧着法による接合界面で見られるパターン[1]とよく似ている。この線状パターンの間隔は最小で 0.1～0.2μm、大きなもので 1～2μm のものが観察され、さらにその線上に沿ってピット状のエッチング（ETG）痕が多く観察された。この ETG 痕はほぼ線状パターンの段差部に沿って連続的に分布しており、2 方向からパターンが交差する箇所ではその交差部にも観察された。段差内で連続して見られるこれら ETG 痕は、大きさや形状の似たもの、等間隔で並ぶもの等が多く観察された。また、断面観察時（図 17、18）に一定範囲のステップ段差間で化合物が見られたように、接合表面からでもすべり線の段差ごとにほぼ直線状に並ぶ ETG 痕も観察された（図 22）。この他に、ひとつの段差内で ETG 痕がさらに垂直方向に細かく均等に並ぶ箇所や、深い段差の間隔内にさらに微細で等間隔に小さな段差が生じている箇所（すべり帯）等の特徴的な形状も観察された（図 23）。

次にこの Al 接合面の AFM による観察結果を図 24 に示す。その結果、これまでの表面及び断面 SEM 観察



部位	段差(nm)	ステップ間隔(μm)	角度(°)
①	95.240	0.595	17.764
②	50.195	0.658	21.503
③	79.307	0.743	20.480
④	43.090	0.531	22.090
⑤	45.232	0.573	16.925

a)表面 SEM 像（図 21a)と同一視野）　b)AFM 鳥瞰像　c)断面形状と各測定結果

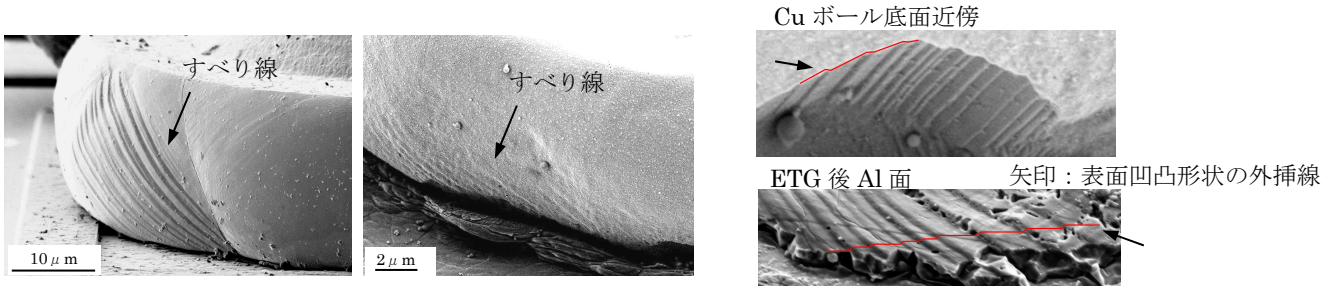
図 24　Al 接合面の AFM 測定結果

で見られた段差ステップと同様の形状が観察され、そのステップ幅や段差、段差角度もほぼ同じであることが確かめられた。このように AFM は表面を非破壊で垂直方向を含めて高分解能に観察や測定ができる有効な手段である。

4－6－2. Cu ボール表面及び Al 電極表面のすべり線

Au ワイヤでは Au ボール表面にすべり線が比較的明瞭に見られるが、Cu ワイヤでも観察され、図 25 は部分的に底部付近で観察されたものである。これは上記の開封した Al 接合面で観察された階段状の線状パターンと同形状であることから、断面観察時に見られた接合界面のステップ（図 18）や、開封 Al 面の線状パターンはこの Cu ボール側のすべり線が Al パッド面に押し付けられたものと判断できる。しかし、特に端部付近のすべり線上には、すべり線方向とは直角にボール中心部から外周方向に向かってわずかに線状模様が見られることから、垂直方向だけではなく水平・外周方向への応力が加わっていることが分かる（図 26）。

また、接合部周囲の Al 電極表面にも線状パターンが見られる箇所があり、Al グレインごとに或いはグレインを挟んでその向きが変わっている。ボンディングの影響が周囲の薄い Al 電極にも及んでいることを示している（図 27）。



a)Au ボール表面　　b)Cu ボール表面　　c)Cu ボールのすべり線と Al 面上のパターンの対比

図 25　1st ボンドボール表面に見られるすべり線との比較

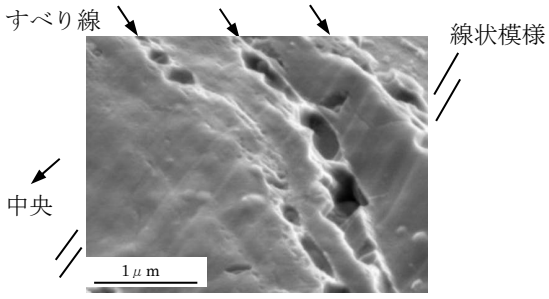


図 26　Al 接合表面のすべり線間の線状模様

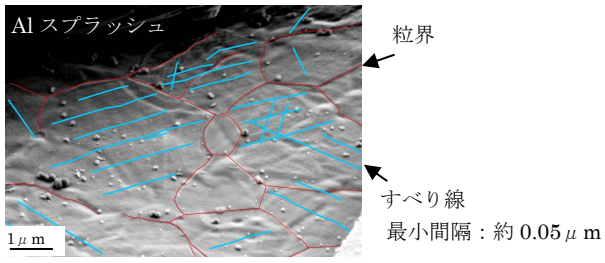
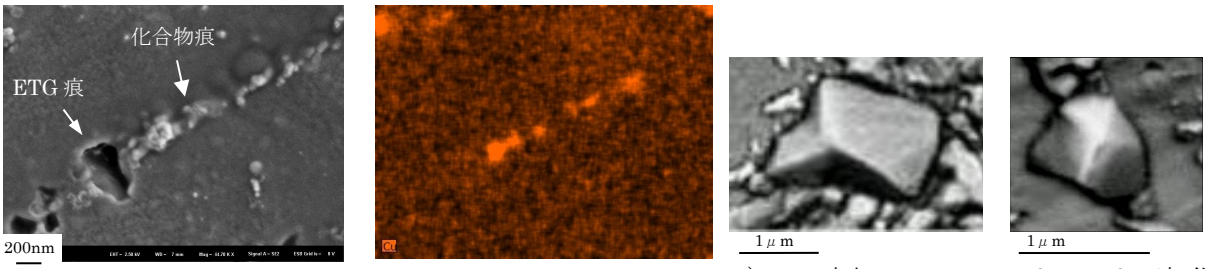


図 27　ボンディング周囲の Al 電極表面に見られるすべり線
（SEM 像に粒界と代表的なすべり線を外挿）

4－6－3. Al 接合面の化合物形成

Al 接合面のすべり線段差部や 2 方向のすべり線の交差部（2 重すべり）で観察される ETG 痕は、その未エッチング残存部の EDX 分析結果から Cu-Al 化合物痕であると判断できる（図 28）。すなわち、開封した Al 面上のすべり線パターンや ETG 痕（化合物痕）の分布状況は、Al 面の中心から端部にかけて異なっており、これは断面観察における化合物の分布状況の観察結果と一致する。さらにその ETG 痕の SEM 像コントラストを反転することにより、Al 面側に生成する化合物の本来の形状が得られ、図 28c のような多角形の化合物形状であることが分かる。これは図 16 等の断面観察で見られた接合部中央付近界面の Al 側に生成する CuAl2

化合物の断面形状とよく似ている（以降 ETG 痕を化合物痕と表記）。

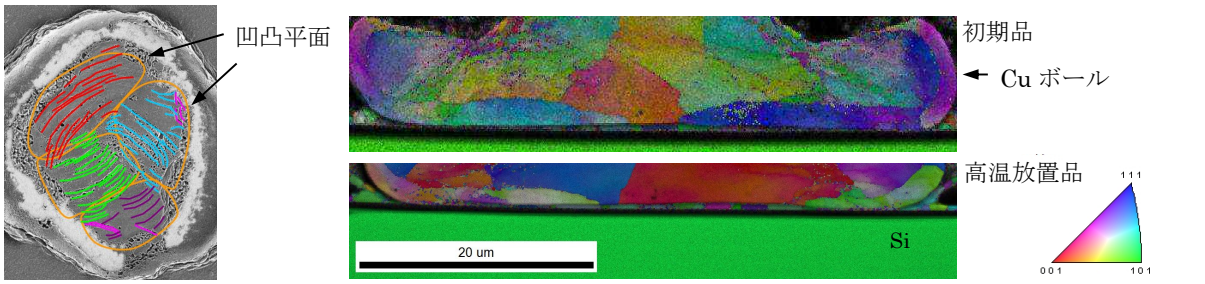


a)Al 接合表面　　b)Cu 分布　　c)ETG 痕部の SEM コントラスト反転像（Cu-Al 化合物の形状を表す）

図 28　Al 接合面に見られる ETG 痕（化合物痕）の EDX 分析

4－6－4. Al 接合面のすべり線とグレイン

Al 接合表面には図 29 に示すように 4～5 個程度の緩やかな凹凸平面が見られ、その面ごとにすべり線は円

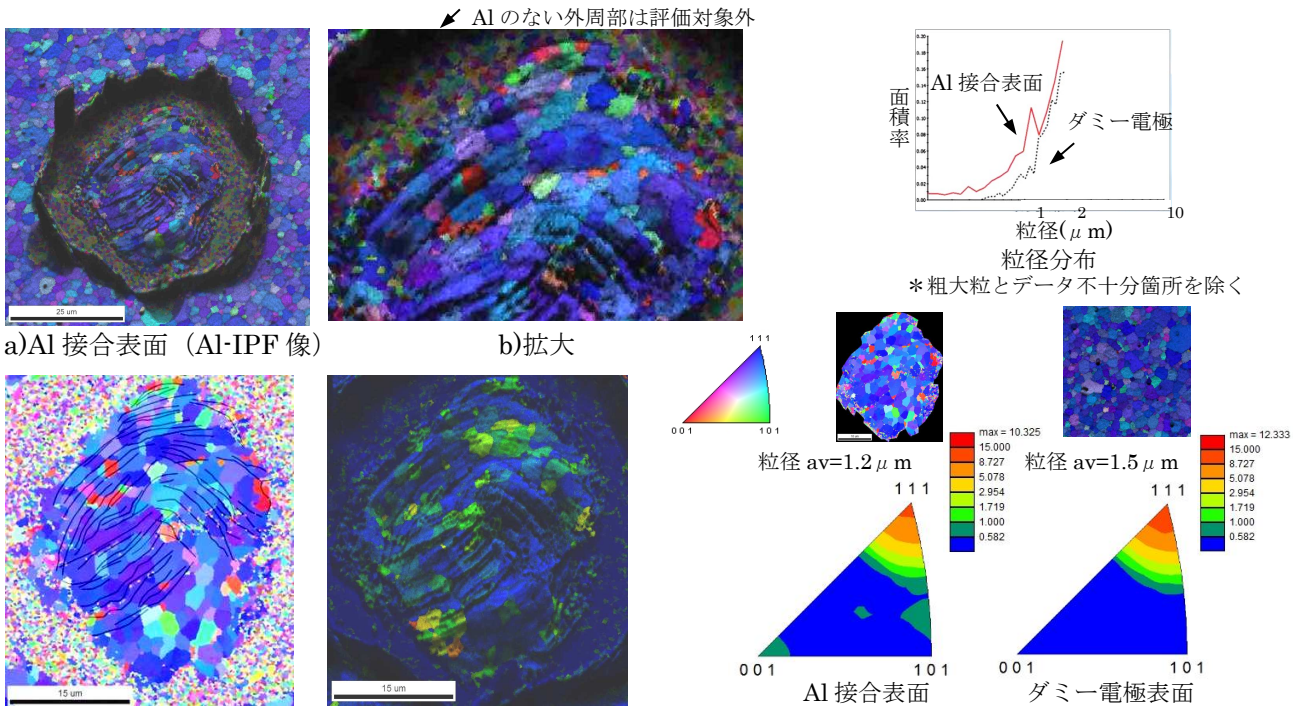


a)Al 接合表面のすべり線
すべり線を外挿

b)断面における接合界面近傍の EBSD 分析（Cu IPF 像）　＊a, b）は別箇所

＊a)の各すべり線の配色と EBSD の結晶方位配色とは無関係

図 29　Al 接合面のすべり線と接合断面における Cu グレイン



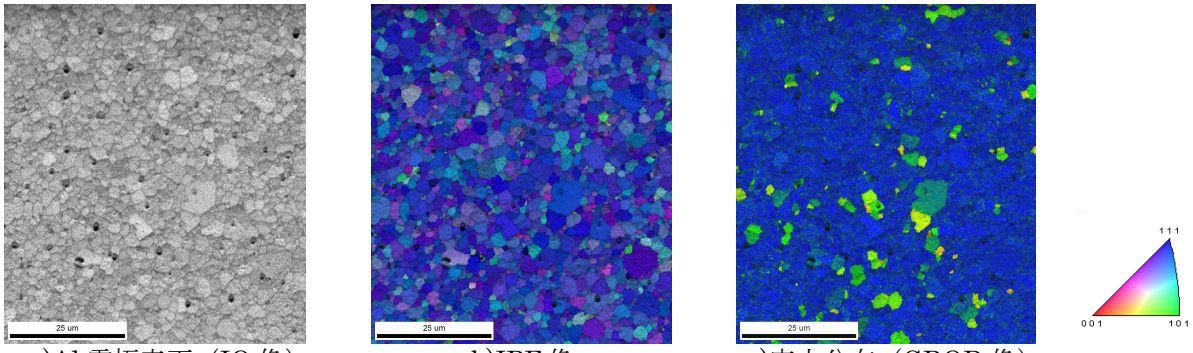
a)Al 接合表面（Al-IPF 像）　b)拡大

粒径分布
＊粗大粒とデータ不十分箇所を除く

c)Al 接合表面の IPF 像とすべり線の重ね合わせ　d)応力分布（GROD 像）　e)Al 表面の結晶方位（ND 逆曲点図）と平均粒径の比較

＊図 29a)と同一電極

図 30　Al 接合面のすべり線パターンと EBSD 分析による Al グレイン及び応力分布との関係



a)Al 電極表面（IQ 像）　b)IPF 像　c)応力分布（GROD 像）

図 31　ダミー電極の Al グレイン及び応力分布

弧状に広がり、方向が異なっている。ボンディング部断面の EBSD 観察結果でも界面付近の Cu のグレインは同程度と少なく、Cu グレインごとに方位が異なっていることから、Al 接合面のこの凹凸平面ごとの各すべり線は、それぞれの Cu グレインにより加圧、押し付けられたものと考えることができる。

次に、Cu ボール側はエッチングにより消失しているのでその対称面側となる Al 接合面の表面で実施した EBSD 分析結果を図 30 に示す。また、ボンディングされていないダミー電極表面の分析結果を図 31 に示す。Al 接合表面に観察されるすべり線パターンは、方位の異なる Al グレイン上に広がっており、一部には粒界と一致する箇所も見られ（図 30a～ｃ）、また接合表面の凹凸平面上は、ダミー電極に比べて応力状態が高く、その応力分布もすべり線パターン方向に沿う傾向が見られた（図 30d)。さらに接合面上における Al の結晶方位は、(111）面が主体でボンディング箇所以外の電極面やダミー電極に比べてわずかに方位の変化が見られ、細かい粒径のものがやや多く観察された（図 30e)。これらのことからも前述のように、Al 表面に見られる線状パターンは Al 自体のすべりではなく（微視的には Al も塑性変形している)、Cu ボールの加圧パターン（Cu のすべり）に起因したものと考えることができる。なお、ボンディングされていないダミー電極では、グレインの大きさ、方位、応力分布ともにほぼ均等である（図 30、31)。ここで IQ 像は結晶性を表すマップで、GROD 像は結晶粒内の平均方位からのずれを示したもので歪分布を表し、逆極点図は ND 方向を法線として配向した結晶面の分布強度を表したものである。

4－6－5. Cu-Al 化合物と微小ボイドの生成機構

Cu ワイヤの超音波併用熱圧着接合でも、熱圧着法と同様に Cu ボールの塑性変形によるすべりが Al 面に押し付けられ、その段差部で Al の酸化膜が破壊されて新生面が露出し、その面上で化合物の生成核が、ある一定範囲では規則的に点状に形成される。その後 Cu 原子が接合界面から Al 側に拡散して Al 側で化合物 CuAl2 が生成し、Cu 側では Cu 組成の高い化合物が薄く生成してやがて化合物はすべり段差内や段差を越えて連続的に繋がる。すべり線には間隔の狭いものや広いもの、段差の浅いものや深いもの、段差が大小一定間隔で現われるものや（微小なすべり線からなるすべり帯に相当)、段差内でもさらに細かく均等に加圧を受けていると思われるもの、2 方向から交差するもの等がある。また図 18 の接合中央付近の断面観察時に見られた階段状ステップのように、水平面に対するすべり線の角度が平行に近いものまで等、種々が観察される。これは結晶方位によるすべり変形の向き以外に、超音波を併用した熱圧着法であることや接合材が球状であること、半導体部品の電極としての Al 自体の薄さや硬さ等が影響していると考えられる。さらに Al 接合面の中央部と端部では化合物の生成形態が異なる。これは中央部と端部での超音波による振幅差と塑性変形のすべりの大小の

影響の違いによるためと考えられるが、本報の作製試料では、Al 表面にすべり形状が明瞭に見られることから、ボンディング条件として超音波振幅に比べて熱圧着の影響が強いと考えられる。これらのことから化合物の生成は、Al 表面の酸化膜を破壊するために必要な塑性変形として、外周方向へ押し広げられるようにすべり変形し、その変形量やすべり線の間隔（幅）、水平面に対するすべり線の角度、その深さや 2 方向からなる交差すべりの間隔等に左右されることで起点が生じ、さらに超音波振幅によって起点の大小や数が促進されることにより、同一すべり線段差内やすべり線を越えて次のすべり線へと部分的に一定間隔となったり、偏りが生じたりする等の特徴的な状態になると考えられる。

一方、高温放置による Cu-Al 化合物の成長に伴い、接合中央付近の Cu と化合物の界面（第 2 相の周囲）には初期には見られない微小なボイドが生成する。この高温放置で見られるボイドは接合中央付近の化合物の点在箇所で見られるが、層状に厚く生成した端部では見られないこと、初期には酸化膜が存在した Al 界面を反映していると思われる Cu と化合物との平坦な界面でのみ見られることから、元素の拡散速度差による生成要因以外に、酸化膜の状態（端部では大きく分断されるため界面を取り囲むように第 2 相が広く成長するが中央部では細かく分断され第 2 相は少量）により相互拡散が不均一になることによって生じたカーケンダルボイド

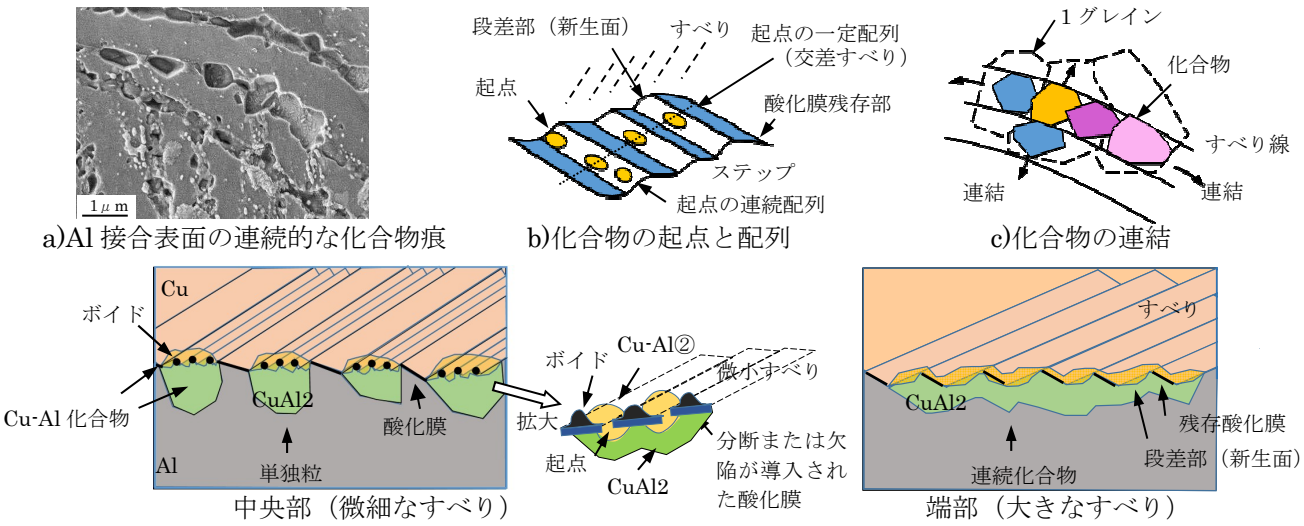


図 32　Cu-Al 化合物及び接合界面部の微小ボイドの生成

と思われる。すなわちこのボイドも一定間隔（0.1～0.2μm）で見られるものがあり、Al 接合面で見られるすべり線のなかで微細なものが同様の間隔であることから、接合時の新生面内でもさらに微小間隔で加圧された影響（酸化膜の分断、破壊や欠陥の導入）を受けてこの部分で不均一拡散が生じ、Cu-Al 間の拡散速度差に由来する Al 側への Cu 原子の流出量が多い結果、このボイドの生成についても Cu 側で短い範囲ながらも一定のパターン（配列）が生じることがあると考えることができる（図 32）。

これら化合物やボイド生成の規則性は比較的化合物生成初期の段階に相当し、接合状態は化合物反応が進むにつれて他の一般的な系と同様に、化合物の粗大成長、多相化、ボイドの凝集、粗大化へと進んでいくと考えられる。同じすべり変形による接合であり、熱ストレスにより化合物やボイドの粗大化が見られる Au-Al 系ワイヤボンディングにおいても、このような過程を経ていくものと推測される。

５．結言

Cu ワイヤパッケージの高温放置試験を行い、Cu ワイヤと Al 電極との接合部の観察を行って得られた結果は以下の通りである。

1）Pd 被覆 Cu ワイヤでは高温放置後も Pd は内部へはほとんど拡散せず、接合への関与はほとんど見られなかった。

2）断面観察の結果、接合界面には Cu-Al 化合物が複数見られ、主体となる Al 側に生成したものは CuAl2 の組成比が得られた。

3）Al 電極接合界面には階段状のステップ状箇所が見られ、化合物は主にそのステップ段差部で生成し、しかも一定間隔で生成している箇所も見られた。特に中央部では接合界面にカーケンダルボイドと思われる微小ボイドが発生しており、これも一定間隔のものが見られた。

4）Cu と Al の初期の接合界面がそのまま広く残る中央部では化合物は点在する単独粒として見られるが、端部では厚く成長し Al が消費された状態や部分的に接合界面が化合物内部に残存する箇所が見られ、その界面からは酸素の分布が確認された。すなわち化合物の生成は、Al 電極面に存在する酸化膜の状態（破壊や分断）に左右されていることが確認された。

5）パッケージをエッチングにより開封し、接合中央の未反応の Al 表面を観察した結果、その面上には断面観察時の接合界面に見られたステップに相当する、しわ状の線状パターンが円弧状に幾重も観察された。それらにはほぼ一定間隔の段差や間隔が大小異なるもの、交差するもの等が見られた。この線状パターンは Cu ボール表面の側面や底面部で見られるすべり線と同じと判断できることから、加圧時に Cu のすべり変形が Al 電極面に押し付けられたものと考えることができる。すなわち、Cu-Al 系も Au-Al 系と同様の接合機構であることが確かめられた。

6）Al 接合表面のすべり変形段差部には、すべり段差部内や段差間を越えて化合物痕の連続的な分布が見られた。これは断面から観察される Cu-Al 化合物の生成形態と一致した。すなわち、Cu ボールのすべり変形により Al 面上の酸化膜が破壊されて新生面が露出したのち、外周方向へ押し広げられるようにすべり変形し、そのすべり変形量や間隔、2 方向からなる交差すべり等の状態により化合物生成の起点が生じ、さらに超音波振幅の影響も加わり一定のパターン（配列）となったり、偏りが生じたりすることがあることが判明した。

7）断面観察時に接合中央部の化合物と Cu ボールとの界面で見られた微小ボイド（カーケンダルボイド）にも、化合物と同様に一定の大きさ、形状、間隔のものが見られることから、これらボイドは拡散速度差以外にすべりのなかでも特に微小間隔のすべりによって生じた酸化膜の破壊、分断や欠陥による Cu と Al の不均一拡散に由来していることが考えられる。

8）Cu-Al 系化合物の生成量は、Au-Al 系と比べても少なく、その生成量（厚み）の少ない比較的初期の段階においても化合物は放物線則に従うものと考えられる。

9）ボンディング部断面からの EBSD 観察により、電極との接合に関与するグレインは比較的少なく、Al 面上で見られた数個の緩やかな凹凸平面ごとにすべり線の方向が異なることと一致した。

10）その Al 電極接合表面の EBSD 観察により、Al 表面の線状パターンは方位の異なる Al 結晶上に広がっており、しかもそれに沿った若干の方位変化と応力分布の偏りが観察されたことからも、この Al 電極面の線状パターンは Cu ボールのすべり変形により押し付けられたものと考えることができる。

11）AFM による Al 接合表面の観察においても同様のすべり形状が認められ、ステップ幅や段差、段差角度

等の微小部の定量的評価に有効なツールであることが確認された。

以上より、超音波併用熱圧着法 Cu ワイヤも、熱圧着法 Au ワイヤと同じ接合機構であることが確かめられた。すなわち、ボール側のすべり変形が押し付けられることにより、Al 電極面の酸化膜がすべり段差部で破壊、分断され、新生面が生じ、その面で Cu と Al の化合物化が起こり接合する。接合界面に生じる Cu と Al の化合物は２相が認められるが高温条件でもその生成量は少なく、接合中央部では単独の多角形形状で点在する第１相（CuAl2）と、高温条件で接合界面周囲にボイドを伴いわずかに生成する第２相があり、接合端部では２相ともに層状に生成し第１相は特に厚く成長する。これら化合物の成長の差異は、中央が細かいすべり変形で小さく分断されるのに対し、端部では大きなすべり変形により大きく分断されることに起因していると考えられる。特に中央部では交差すべり、微小すべりが原因となり、化合物ばかりでなくボイドも短範囲では一定配列として生じることがあると考えられる。

このようなステップ段差に伴う化合物やボイドの生成は、接合がすべり変形機構であることを示し、特にその連続的な規則性は特徴的な現象であり、指標ともなると考えられる。

参考文献

（1）石坂彰利、岩田誠一、山本博司：日本金属学会誌、41（1977）、1154
（2）渥美幸一郎、安藤鉄男、森郁夫：スマートプロセス学会誌、2-1（2013）、31
（3）例えば、藤井、吉田、佐藤、粉川：平成 26 年春季溶接学会全国大会講演概要集、94（2014）、188
（4）渡辺健彦、米田秋彦、柳沢敦、小沼静代、大橋修：溶接学会論文集、17-2（1999）、234
（5）例えば、中井善一、菅田淳：材料、52-3(2003)、325
（6）例えば、柘植敦子、水野薫、宇野智裕、巽宏平：日本金属学会誌、59（1995）、1095
（7）宇野智裕、巽宏平：日本金属学会誌、63-7（1999）、828
（8）小野寺、新間、目黒、田中、河西：エレクトロニクス実装学会誌：11-6（2008）、444
（9）Thaddeus B.Massalski ：BINARY ALLOY PHASE DIAGRAMS（1986）
（10）金属データブック（日本金属学会編）等より引用