

耐落下衝撃特性に優れた 鉛フリーはんだボール材料 LF35 の開発

田中 将元¹⁾ 寺嶋 晋一²⁾ 佐々木 勉³⁾

1. はじめに

半導体実装技術分野では、BGA (Ball Grid Array), CSP (Chip Size Package), 更には FC (Flip Chip) と呼ばれる新しい実装技術が発展してきた。従来の QFP (Quad Flat Package) ではリードフレームを介してパッケージと基板をはんだ接続していたが、BGA や CSP では直接はんだボール自体でパッケージと基板を接続する。BGA や CSP はデバイス下部全面を I/O 接続に活用できることから、実装基板の高密度 & 小型化に適しており、高性能携帯電話やモバイルデジタル機器に積極的に活用されてきた。特に半導体の高機能高密度小型化に伴う信号端子数増に対応するため、 $\phi 0.76 \text{ mm}$ ~ $\phi 0.3 \text{ mm}$ のはんだボールを用いて接続する BGA 実装は急速に発展を遂げ、直近では $\phi 0.1 \text{ mm}$ クラスのはんだボール接続する実装技術も実用化している⁽¹⁾⁽²⁾。現時点において BGA は、主流実装接続形態であり、各種半導体機器の高密度小型化の重要な要素技術となっている。携帯電話基板上に搭載されている各種半導体部品の大半は BGA パッケージといっても過言ではない。BGA や CSP に使用されているはんだボールは、信号伝達の導電部材機能と半導体パッケージを支える構造部材機能を兼ね備えた非常に重要な役割を担う金属材料となっている。

一方、はんだ材料においては、EU 規制 (RoHS 指令) に端を発する家電・デジタル製品の鉛フリー化に伴い、Sn-Ag 系、Sn-Cu 系、Sn-Zn 系、Sn-Ag-Cu 系 (SAC 系) 等の各種鉛フリーはんだ合金成分が、従来の Sn-Pb 系はんだ代替として広く使われるようになってきている。また、鉛フリーはんだ

合金の規格化も並行して進められ、日本では JEIDA 推奨成分である Sn-3.0Ag-0.5Cu 合金成分が JIS 化、米国では NEMI 推奨成分である Sn-4.0Ag-0.5Cu が標準化、更に EU でも ITRI が鉛フリーはんだ規格化を推進している。しかしながら従来 SnPb 共晶はんだとの種々の材料特性の違いが大きいため、各種用途に応じてそれぞれ特徴ある鉛フリーはんだ合金が使分けられているのが現状である。

本報告では、著者らが新たに開発した従来の標準鉛フリーはんだでは得ることが出来なかった高耐落下衝撃特性を有する鉛フリーはんだ LF35 の特性およびその高耐落下衝撃メカニズムについて述べる。

2. 鉛フリーはんだ材料の現状と問題点

従来の Sn-Pb 共晶はんだでは機器オンオフによる熱サイクル疲労特性が問題視されていた。一方、Sn-Pb 共晶はんだは、はんだ材料自体が軟らかいため耐落下衝撃特性は優れていた。一般的に鉛フリーはんだ合金は、機械的強度が高いため熱サイクル疲労特性は余り問題とならなかったが、貧弱な耐落下衝撃特性が問題であった。携帯電話やモバイルデジタル機器では使用時の不注意により、しばしば落としてしまう危険性が非常に高い。鉛フリーはんだ合金は、はんだ自体が硬いため、耐落下衝撃特性が従来 Sn-Pb 共晶はんだ合金より低い。BGA 鉛フリーはんだボール評価進展に伴い、この問題が明らかになり、携帯電話やモバイルデジタル機器への適用に大きな障害となっていた。標準鉛フリーはんだを携帯電話等で使用する場合は、アンダーフィル樹脂と呼ばれる高コスト樹脂でのデバイス補強が必須であった。

3. 耐落下衝撃鉛フリー材料 LF35 の特徴

環境対応からの家電製品の鉛フリー化要請がなされ、Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC 系, SAC305) 等の標準規格鉛フリー材料が主流となった。携帯電話やモバイルデジタル機器における半導体デバイス接続でも SAC305 は使用されるようになって

* 新日本製鐵株式会社技術開発本部 先端技術研究所
新材料研究部：1) 主幹研究員 (総括)

2) 主任研究員 3) 主幹研究員

Development of High Drop Shock Reliability Pb-free Solder Alloy LF35; Masamoto Tanaka, Shinichi Terashima and Tsutomu Sasaki (Nippon Steel Corporation, Advanced Technology Research Laboratories)

2008年11月11日受理

たが、BGA 接続においては耐落下衝撃特性など靱性改善が大きな問題となった。耐落下衝撃特性の規格はセットメーカーにより異なるが、耐落下評価は JEDEC により実装基板に加速衝撃値 1500 G、作用時間 0.5 msec の落下衝撃を与えた際、何回耐えられるかという新たな規格が世界レベルで制定された。当該業界では、耐落下衝撃回数30回程度が一応の基準であった。

従来標準鉛フリーはんだである SAC 系はんだは、融点と熱サイクル疲労の観点から開発され、3.0Ag や 4.0Ag 等の高 Ag 系が世界の主流であった。また、携帯電話機器で使用される実装基板は Cu 電極が主流であり、同基板で使用される鉛フリーはんだボールで、高耐落下衝撃特性を発現する鉛フリーはんだ材料が世界中から待望され、その期待に応え開発した鉛フリーはんだ料ボール材料が LF35 である。

本開発 LF35 はんだは、耐落下衝撃特性改善のために高延性の活用に注目して開発したものである。即ち、当時の常識に反して、低 Ag 系(1.2Ag)を取って世界で最初に選択し、実用化したものである。本開発 LF35 の主要技術開発点は以下の2点である。

第一は、はんだ材料の軟質化である。Sn 基はんだの低 Ag サイド(1.2Ag)着眼により、BGA 実装基板に負荷が掛かる衝撃変形を“軟らかい材料”で吸収により高耐落下特性を発現させた。低 Ag サイド組成は、液相線&固相線の幅は5°C以上高くなるデメリットはあったが、落下衝撃改善のため取って低 Ag 系を選択した。

第二は金属間化合物の制御である。落下衝撃を与えた場合、破断亀裂は主に金属間化合物層(Inter-metallic Compound: IMC)間を伸展する。この課題を改善するため、形成される IMC 層厚さ制御や IMC に内在する歪応力を緩和するため、微量 Ni 元素添加(500 ppm)により落下衝撃特性を飛躍的に改善した。これにより図1の従来はんだとの比較で示す様に、通常の標準鉛フリーはんだに比して数倍高い耐落下衝撃特性を発現する。

4. LF35 の高耐落下衝撃特性のメカニズム

LF35 の高耐落下衝撃改善主因は、上述の如く、低 Ag 軟質材と微量 Ni 添加による IMC 改善であり、そのメカニズムを以下に説明する⁽³⁾⁽⁴⁾。鉛フリー標準はんだ(SAC305)の

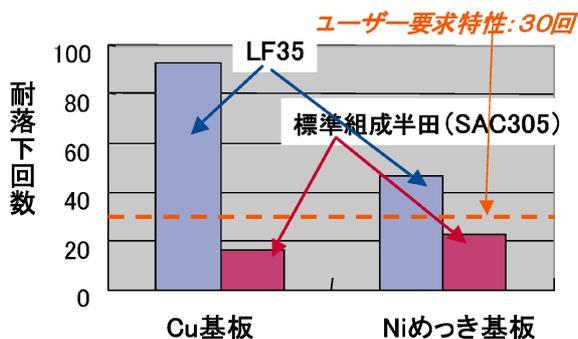


図1 LF35と標準はんだの各基板における耐落下衝撃特性。

場合、接合界面に形成される金属間化合物層(IMC)は半島状 IMC が形成され、当該 IMC 中の Cu_6Sn_5 金属間化合物には高圧縮歪みが内在する⁽⁵⁾。一方、本開発 LF35 はんだ材料の接合界面に形成される IMC は平滑である(図2)。

これは、本開発 LF35 材料には微量に Ni を 500 ppm 添加したことが有効に作用しているものである。溶融はんだは Cu と濡れ Cu_3Sn を形成し、その後、微量添加 Ni が Ni_3Sn_4 初晶として IMC 部位に析出濃化する。濃化した Ni_3Sn_4 は包晶反応過程を経て、 Cu_6Sn_5 の Cu サイトが Ni 置換され、 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ を形成する。図3に示す様に、実際 LF35 の IMC 部位を TEM-EDX 分析してみると、はんだ中に 500 ppm 添加された Ni は、 Cu_6Sn_5 金属間化合物中に約5%検出される。一方 Cu_3Sn 中に Ni は全く検出されない。原子半径の小さい Ni (0.124 nm) が原子半径の大きい Cu (0.128 nm) を置換することにより、当該 IMC 層中の応力歪み差、即ち Cu_6Sn_5 の圧縮歪みと Cu_3Sn の引張り歪みの IMC 層間歪みを緩和している(図4)。

本開発 Ni 置換は、落下衝撃の際クラック発生箇所となり易い $\text{Cu}_6\text{Sn}_5/\text{Cu}_3\text{Sn}$ 界面での脆化を、 Cu_6Sn_5 (高圧縮歪)/ Cu_3Sn (引張歪)の組み合わせから $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ (低圧縮歪)/ Cu_3Sn (引張歪)の組合せに緩和し、高耐落下衝撃特性を発現しているものである。図5にそれらの歪緩和関係とクラック伸展を示す。

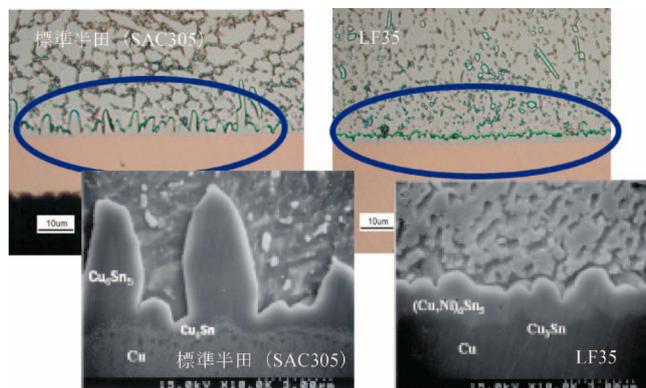


図2 LF35 と標準はんだの接合部に形成される金属間化合物の断面写真。

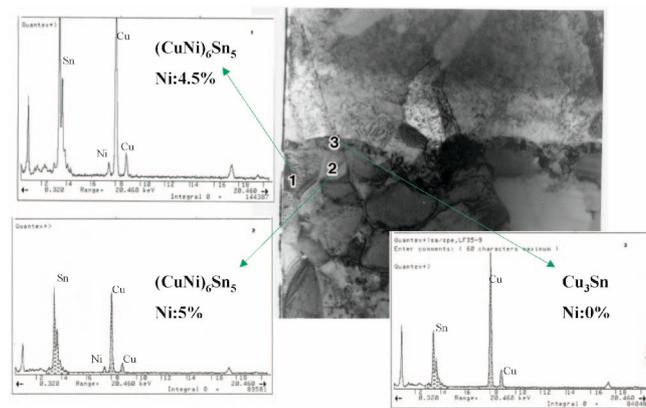


図3 LF35 の金属間化合物部位の TEM & EDX 分析結果。(部位1&2は Cu_6Sn_5 、部位3は Cu_3Sn)

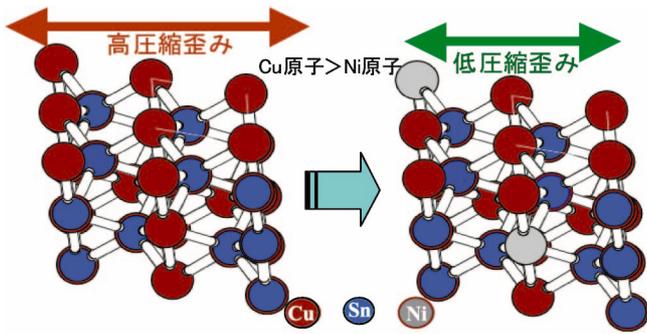
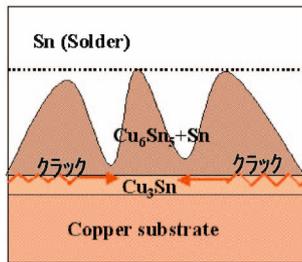


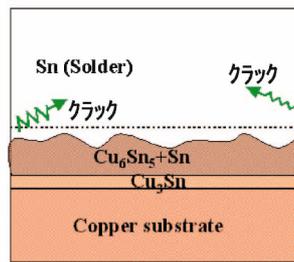
図4 LF35の微量添加NiによるCu₆Sn₅金属間化合物のCuサイトのNi置換による歪緩和機構。

通常鉛フリーはんだ(SAC305)



SAC305の歪み応力状態
SAC305-Cu₆Sn₅:高圧縮歪み
SAC305-Cu₃Sn:引張り歪み

LF35はんだ組成



LF35の歪み応力状態
LF35-Cu₆Sn₅:低圧縮歪み
LF35-Cu₃Sn:引張り歪み

図5 LF35の微量添加Niによる金属間化合物の歪緩和により落下衝撃改善されたクラック伸展状態説明。

5. 特許および実用化状況

本開発鉛フリーはんだLF35特許および関連特許は2001年から順次出願しており、既にLF35および関連は特許登録されている⁽⁶⁾。また本開発LF35は新日鐵関連会社である日鉄マイクロメタル(Nippon Micrometal Corp.: NMC)より、製造供給され、BGA用はんだボール材料として世界各地で使用されている。2002年製品化、2003年に半導体DSP世界最大手メーカーと携帯電話世界最大手メーカーの本格採用に始まり、世界大手半導体各社や世界大手携帯各社の大半で使用されるに到っている。携帯電話の世界的普及に伴い、高耐落下衝撃特性ボール使用も急増し、LF35のデファクト化も世界的認知の下にある。φ0.3mmクラスの鉛フリーはんだボールにおいて、LF35の全世界シェアは約50%であり、累積出荷数は10000億個に達している。

更に本開発LF35技術をコアとしてLF70、LF75等の改善材料を開発した⁽⁷⁾。LF70はLF35の耐熱疲労特性を微量元素添加により、更に改善したものである。特に次期実装形態の主力となると考えられるWLCSPでの使用に適するように改善したものである⁽⁸⁾。図6にLF70のTCT結果を示す。

また、LF75⁽⁸⁾は、LF35がCu-OSP基板で優れた耐落下衝撃特性を発現するように、Ni/Au基板においても優れた耐落下衝撃特性を発現するように、各種の極微量添加元素から選択し開発した材料である。図7にLF75の落下衝撃評価結果を示す。

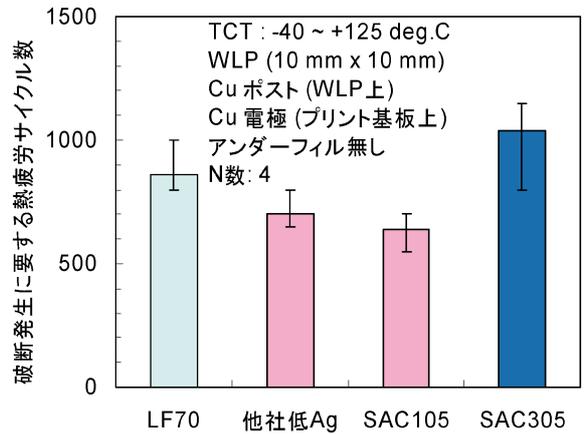


図6 LF70,SAC105,SAC305のWLPでのTCT結果。

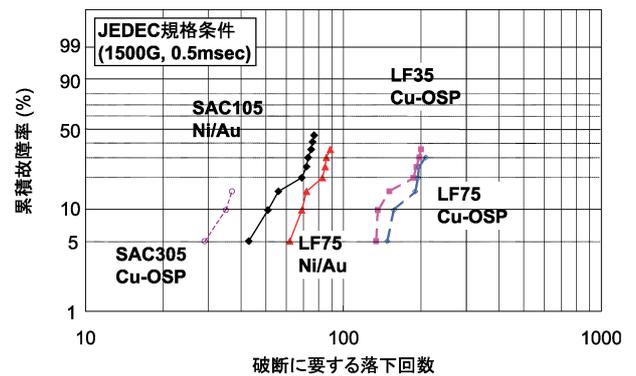


図7 LF75, LF35, SAC105のNi/Au基板やCu-OSP基板での落下衝撃テストのワイブルプロット。

6. まとめ

本報告では、優れた耐落下衝撃特性を発現する鉛フリーはんだ材料LF35やそれをベースに改善したはんだ材料であるLF70やLF75について報告した。携帯電話やモバイル電子機器の需要はここ数年で爆発的の広がりを見せており、今後も需要を拡大していくものと考えられる。また、平行して高機能小型化も更に発展するものと考えられ、そこではBGA, CSP, FC接続等のはんだボール接続が主体となる。はんだボール接続での各種接合信頼性の中でも、特に耐落下衝撃特性の重要度は益々高まる。低Ag系鉛フリーはんだに着眼し、接合金属間化合物中のNi置換格子歪緩和により、高耐落下衝撃特性を有する鉛フリーはんだボールLF35を世界に先駆け開発実用化し、世界に供給し、携帯電話の信頼性向上に貢献した。本開発LF35等の耐落下衝撃特性に優れた鉛フリーはんだ材料技術は、世界を支える重要技術であると確信する。

文 献

- (1) S. Ishikawa, et al.: Proc. 57th ECTC2007, 872-877.
- (2) 巽 宏平, 他: エレクトロニクス実装技術・材料大全集(2007) 14-22.
- (3) M. Tanaka, et al.: Proc. 56th ECTC2006, 78-84.
- (4) 田中將元: 工業調査会「図解最先端半導体パッケージ技術のすべて」(2007) 220-225.
- (5) C. Xu, et al.: ECTC2005, iNEMI Tin Whisker Modeling Committee.
- (6) 特許番号 JP4152596, 特許番号 JP3796181.
- (7) 特願 2006-064125, 特願 2006-064126, 特願 2006-064127, 特願 2006-064128.
- (8) S. Terashima, et al.: TMS Annual Meeting 2008. (DOI: 10.1007/s11664-008-0560-y).