

鉛フリーはんだによるアセンブリ技術

Assembly Technology Using Lead-free Solder

あらまし

2006年7月に、欧州RoHS（restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment）指令が施行される。この指令に向けて対応する最大の技術課題は、対象6物質のうち最も広範に使用されている鉛の代替である。とくに、エレクトロニクス実装の基本材料とも言うべき「はんだ」の鉛フリー化では、主流となっている^{すず}錫-銀-銅（Sn-Ag-Cu）はんだを採用した場合、はんだ付け温度が高温化するため、電子部品の耐熱管理、リフローはんだ付けの均熱化対応が必要である。また、はんだ材料の代替に当たっては、その材料特性と品質、信頼性^のの見極めが重要であった。富士通は、これまで鉛フリーはんだの基礎的材料の開発をはじめとして、製品への鉛フリーはんだ適用に向けた総合的な技術開発を進めてきた。

本稿では、こうした鉛フリーはんだ付け技術にかかわる課題解決のための富士通の取り組みを紹介する。

Abstract

To comply with the RoHS (restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment) Directive to be enforced on July 1, 2006, the major technical issue that must be addressed regarding the six substances restricted by RoHS is replacing lead, which is used in said equipment in a variety of ways. In order to replace lead, especially with regard to solder (the so-called basic material of electronic assembly), the heat resistance of electronic components must be strictly controlled. Moreover, a means must be devised to maintain uniform temperature for each material and component at reflow soldering since commonly used Tin-Silver-Copper (Sn-Ag-Cu) solder, if adopted, requires a higher soldering temperature than lead containing solder. Additionally, it is important to clarify the properties, quality, and reliability of any new, alternative solder materials. Fujitsu has been pursuing comprehensive engineering, such as developing basic lead-free solder materials, to apply lead-free solder to the products. This paper introduces Fujitsu's activities toward addressing the technical issues posed by lead-free soldering technology.



松村唯伸（まつむら ただのぶ）
実装技術統括センター 所属
現在、規制物質対策推進業務に
従事。



山本 剛（やまもと つよし）
実装技術統括センター 所属
現在、規制物質対策推進業務に
従事。

ま え が き

2006年7月以降、欧州でのRoHS (restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment) 指令の施行により、鉛 (Pb)、水銀 (Hg)、カドミウム (Cd)、六価クロム (Cr⁶⁺)、および臭素系難燃材のPBB (Polybrominated biphenyls: ポリ臭化ビフェニル)、PBDE (Polybrominated diphenyl ethers: ポリ臭化ジフェニルエーテル) の6物質群が規制物質となる。こうした環境保護規制は世界的な流れとなり、電機メーカー各社は対応を急いでいる。RoHS指令の対象6物質で最も広範に使われているのは鉛であり、エレクトロニクス実装において、基本とも言うべきはんだ材料の代替は最重要課題である。

富士通では、これまで鉛フリーはんだの基礎的材料の開発をはじめとして、製品への鉛フリーはんだ適用に向けた総合的な技術開発を進めてきた。

本稿では、鉛フリー化にかかわる課題解決のための富士通の取組みについて紹介する。

鉛フリー化の課題

これまで各方面で鉛フリーはんだの実用化研究が行われているが、現在の代替はんだ材料は信頼性の面で安心感が高い錫-銀-銅 (Sn-Ag-Cu) はんだ合金が主流となっている。しかし、既存の電子部品は、従来の錫-鉛 (Sn-Pb) 共晶はんだでの接合を前提としており、融点が35℃高いSn-Ag-Cuはんだ使用によりリフローはんだ付け温度^(注)が高温化することで、電子部品が破損する恐れがあるなどの大きな問題があった。

また、はんだ材料を鉛フリーはんだに代替するには、その接合材料の特性を十分把握した接合品質と信頼性が見極めが重要であり、電子部品の端子表面処理との相性ほか、製品機器の採用部品、実装構造への適用性確認が必要となる。

つまり、鉛フリー化においては、

- (1) はんだ接合温度の高温化への対応
- (2) 鉛フリー材料特性と品質・信頼性検証の大きく二つの課題への対応に集約される。

(注) はんだ (ペースト) を印刷した後で電子部品を搭載し、オープン (リフロー炉) を用いて一括で加熱することではんだ付けを行う、リフロー工法のはんだ付け温度。

はんだ接合温度の高温化への対応

リフローはんだ付け温度が高温化することによる電子部品の耐熱問題について触れ、富士通の対応として、耐熱要求基準とリフロー温度の均熱化について述べる。

● リフローはんだ付け温度の高温化

リフローはんだ付けに必要な接合温度と、電子部品の耐熱温度との温度幅 (ΔT) は、図-1に示す模式的な関係でほぼ決まる。

Sn-Pb共晶はんだの場合には、リフローはんだ付けに必要な接合温度を低く抑えることができるため ΔT が約30℃あり、言い換えれば、電子部品が破損する恐れがある温度までに約30℃の余裕があった。Sn-Ag-Cuはんだの場合には接合温度が高くなることから10℃程度の ΔT で実装する必要がある。しかし、現状の一般的なプリント板では ΔT が10～20℃必要とされ、さらに大型サーバ向けの大規模なプリント板や搭載部品の熱容量差が大きいものでは、従来はんだ同様の ΔT が20～30℃必要とされるレベルに達してしまう場合がある。このため、鉛フリーに対応した部品の耐熱性は高温化が要求される。

● 電子部品の耐熱要求基準

富士通では、2001年に図-2に示す富士通 新耐熱ランクと呼ぶ部品耐熱要求基準を部品メーカー各社に説明し、鉛フリー化に向けた協力をお願いした。基本的に耐熱要求は260℃とし、既存の電子部品の分類のため245℃と235℃の3段階の耐熱ランクとした。

この耐熱基準は富士通の製造工場におけるリフ

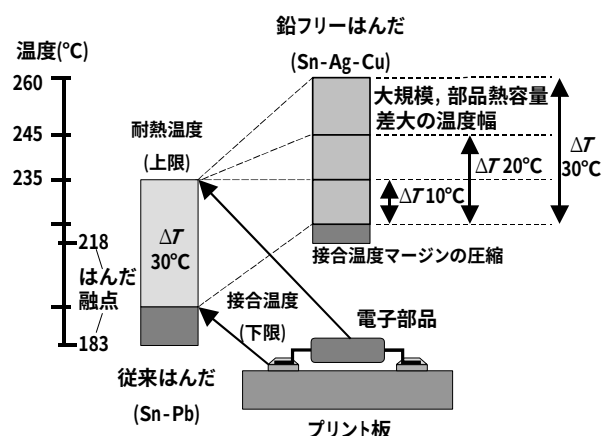


図-1 リフローはんだ付け温度の高温化
Fig.1-Reflow soldering temperature rise.

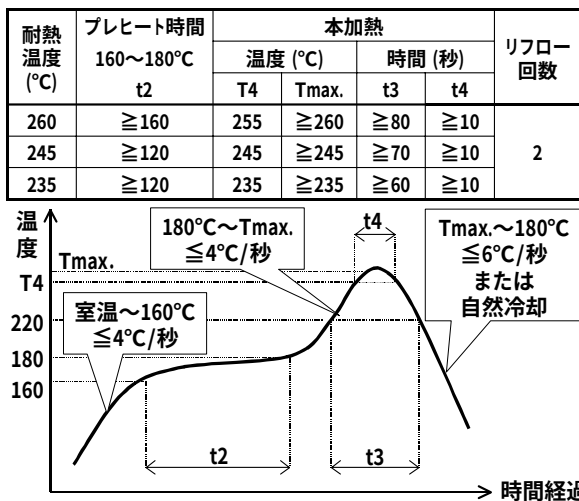


図-2 富士通の部品耐熱要求基準

Fig.2-Heat-resistance requirement standard of electronic components by Fujitsu.

ローはんだ付け温度プロファイル条件を調査して、Sn-Ag-Cuはんだ実装を可能とする条件として決定したものである。その後2002~2004年に、半導体部品の規格化団体であるJEDEC (Joint Electron Device Engineering Council) の耐熱規格は、鉛フリー対応の部品において260°Cを含む3段階の耐熱温度保証に改版された⁽¹⁾

部品メーカー各社では電子部品の鉛フリー対応努力が続けられているが、とくに耐熱性向上は部品構造や構成材料の根本にかかわる場合があり、一部の部品で対応が遅れているのが現状である。

● リフロー温度の均熱化

元来、プリント板に実装される電子部品には様々な種類がある。図-3に示すようにリフロー炉で加熱中の部品には、部品熱容量の違いから部品の温度上昇に差があり、Sn-Ag-Cuはんだではリフロー温度の高温化のため、プリント板上での温度ばらつきも大きくなりがちである。このため、製造工場では温度分布を均一化する高性能なリフロー炉を導入している。

● リフローシミュレータ

ΔT を小さくするためには、実装設計段階で部品の熱容量の平準化を意識した部品配置の調整により、リフロー温度分布を均一化する取組みも行っている。富士通では伝熱解析によるリフロー用伝熱シミュレーションソフトを開発・販売している⁽²⁾

このリフローシミュレータを用いると電子部品の

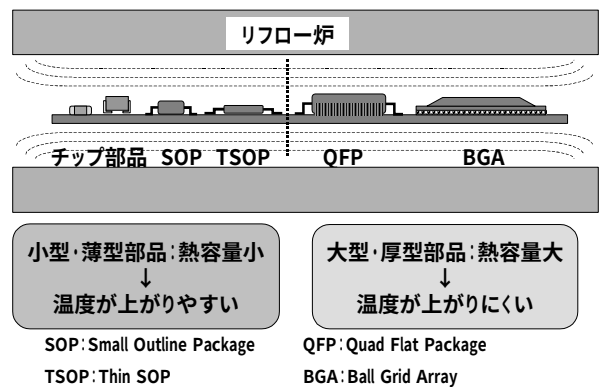


図-3 リフローはんだ付け時の電子部品温度

Fig.3-Electronic components temperature during reflow soldering.

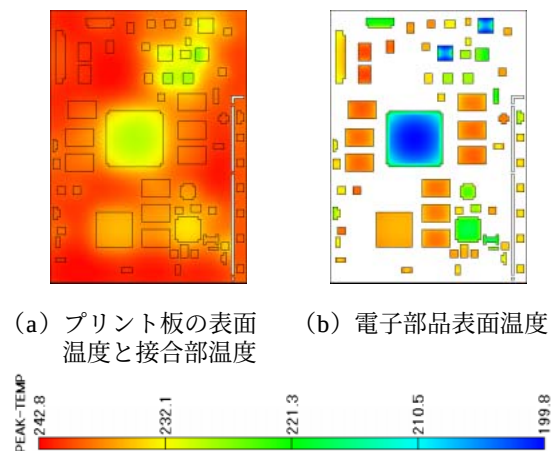


図-4 プリント板上の温度分布

Fig.4-Reflow temperature simulation of PCBA (Printed Circuit Board Assembly).

配置によるプリント板上の温度分布が一目瞭然となる。また、プリント板上の搭載部品の温度上昇を把握するため、搭載部品の温度を一度に測定することは熱電対の取り付け本数などの制約から現実的にはできない。リフローシミュレータであれば、モデル化した部品本体と接合部の温度をすべて検証することができるため、製造性確認には非常に有用である。プリント板上のリフロー温度分布をシミュレーションした例を図-4に示す。

鉛フリー材料特性と品質・信頼性検証

セットメーカーにとっては、電子部品耐熱の問題は、Sn-Ag-Cuはんだを使用した実装を阻む原因にもなっている。富士通はその打開策として、より低温の融点を持つはんだ材料の検討と開発を行ってきた。

ここでは、従来のSn-Pb共晶はんだに比較した鉛フリーはんだの材料特性と品質・信頼性について述べる。

● 各はんだの基礎物性比較

富士通では、高温系Sn-Ag-Cuはんだのほか、錫-亜鉛（Sn-Zn）はんだ合金にアルミニウム（Al）を微量添加した中温系のSn-Zn-Alはんだ、錫-ビスマス（Sn-Bi）合金に銀（Ag）を添加した低温系のSn-Bi-Agはんだの3種類を選択し、開発した。各鉛フリーはんだと従来はんだ（Sn-Pb）の基礎物性比較を表-1に示す。

これらの物性値は、材料試験の方法や測定条件の違いで各物性の計測値が違ってくるため取扱い上、注意を要するが、実装設計の参考情報として整理した。各はんだの機械的物性値を比較すると、従来のSn-Pb共晶はんだに比べて鉛フリーはんだはヤング率（縦弾性係数）が高く伸びが減少し硬くなる傾向にある。材料強度としては強くなる方向であるが、反面、部品やプリント板へのストレスが大きくなる場合があるため、使用上留意する必要がある。

はんだの疲労特性は、ねじり疲労試験による動的粘弾性測定などにより、繰り返し歪みの耐性を確認している^③。一般にSn-Ag-Cuなど鉛フリーはんだ合金の疲労特性は、Sn-Pb共晶はんだより優れる傾向がある。

表-1 各はんだの基礎物性比較

はんだ 物性値	Sn-Pb	Sn-Ag-Cu	Sn-Zn-Al	Sn-Bi-Ag	単位
融点	183	218	199	138	℃
密度	8.5	7.4	7.3	8.6	g/cm ³
熱膨張係数	24	21	24	15	10 ⁻⁶ /℃
比熱	197	234	243	170	J/(kg・K)
熱伝導率	50	55	66	21	W/(m・K)
熱拡散率	30	31	37	14	mm ² /s
表面張力	420	450~500	518	380~390	mN/m
ヤング率	22	31	36	24	GPa
ポアソン比	0.37	0.4	0.44	0.43	
引っ張り強さ	41	35	46	60	MPa
剪断強さ	27	30	32	36	MPa
降伏応力	28	27	27	35	MPa
伸び	38	23	25	40	%
硬度	13	15	19	15	Hv
電気抵抗率	15	11	12	34~58	μΩ・cm

向がある。

● 鉛フリー部品の品質・信頼性確認

部品メーカーによって、各電子部品の端子材料の鉛フリー化は進んできている。端子部分に使われるめっきの種類は様々であるが、はんだ接合時の濡れ性や接続強度の相性確認は重要である。鉛フリー化に取り組んだ当初、端子めっきに対するはんだ接合評価を行うため、国内めっき薬剤メーカーの協力を得て、各種鉛フリーめっき処理条件を振ったQFP（Quad Flat Package）リード部品サンプルを作製した。とくにSnベースのめっきは、純SnめっきとSn-Ag、Sn-Bi、Sn-Cuの各合金めっきで添加元素の析出組成比を調整し、0~5%の範囲でAg、Bi、Cuを変化させた基礎評価を行い、はんだ濡れ性と接続強度に起因する信頼性に問題がないことを確認した。

また、Sn系めっきではヒゲ状の結晶がめっき表面から成長する、Snウィスカの確認評価を行っている。

● 構造解析シミュレーション

プリント板上に実装する各部品のはんだ接合信頼性は、構造解析シミュレーションにより、はんだ接合継手のストレスレベルを予測しつつ実際の実装評価実験によって確認を行っている。構造解析シミュレーションでは、はんだ合金の応力-歪み特性やクリープ特性を非線形の物性値として用いている。BGA（Ball Grid Array）やCSP（Chip Scale Package）部品などでは構造解析シミュレーションがよく利用されているが、ここでは一例としてリード端子型の部品の中で部品構造的にストレス緩和レベルが低い、TSOP-I（Thin Small Outline Package Type-I）部品の接合寿命評価例を挙げる（図-5）^④。

TSOP-Iは、部品とプリント板の熱膨張の違いで発生する温度上昇による伸縮の差（熱歪み）が大きく、そのストレスはLQFP（Low profile Quad Flat Package）や、TSOP-II（TSOP Type-II）よりも大きいことが予想される。図-5（a）に示すようにリード端子の高さが低いことと、部品パッケージからの端子引き出しが長手方向であり距離が長いことが原因である。

本評価例は、部品のリード端子材質と接合はんだ量、はんだ材料をパラメタとして、温度サイクル試験での熱歪みをシミュレーションし、疲労寿命を求

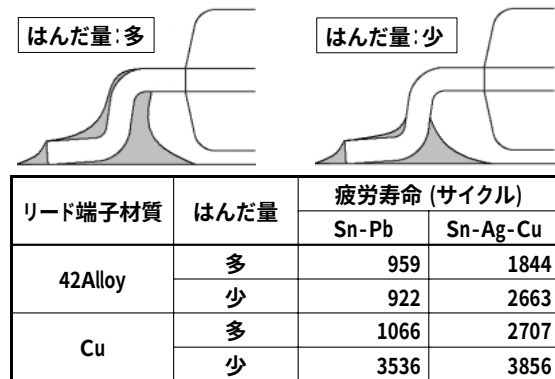
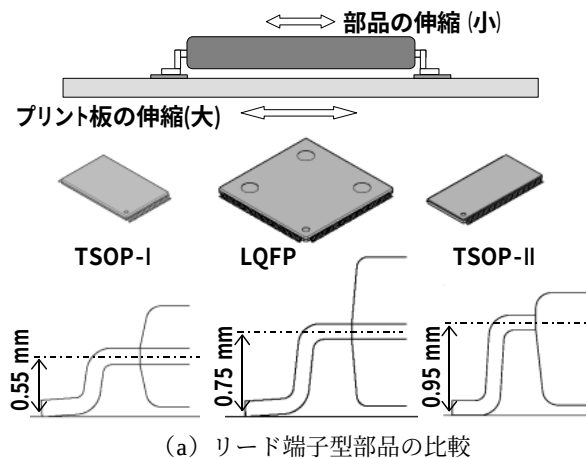


図-5 TSOP-Iの接合寿命評価例
Fig.5-Joint fatigue life evaluation of TSOP-I.

めたものである。この解析結果から、図-5 (b) に示すとおりSn-Ag-Cuはんだの疲労寿命が優れていることが分かる。リード端子材質では、鉄-ニッケル (Fe-Ni) 合金の42Alloyより柔らかいCuの方が高寿命である。また、はんだ量によっても疲労寿命は変化するが、はんだ量と疲労寿命の関係ははんだ材料で傾向が異なることが分かる。

● 各はんだの特徴と適用製品

高温系Sn-Ag-Cuはんだ、中温系Sn-Zn-Alはんだ、低温系Sn-Bi-Agはんだのそれぞれについて、特徴と適用製品を以下に示す。

(1) 高温系Sn-Ag-Cuはんだ

Sn-Ag-CuはんだはSn-Pb共晶はんだと比較して高い接合信頼性を有するはんだ材料として、富士通グループにおける大半の鉛フリー製品の生産に適用している。

(2) 中温系Sn-Zn-Alはんだ

Sn-Zn-Alはんだは、従来のSn-Pb共晶はんだに近い融点を持ち、貴金属を含まない安価な合金として有望なものである。Alの添加は酸化しやすいZnより先にAlが表面酸化することで、Zn酸化によるはんだ濡れ性劣化の抑制に効果がある⁹⁾ Sn-Zn-Alはんだは、液晶ディスプレイ製品から適用を拡大し、すでに100万台以上の製造実績がある。

(3) 低温系Sn-Bi-Agはんだ

Sn-Bi-Agはんだは、富士通のメインフレームで製品への適用実績がある。低温プロセスでの接合が可能のため実装時の歪みを低減し、大型部品の実装やSn-Ag系合金との組合せによる温度階層をつけた

実装を実現した。Agの添加は、従来のはんだ (Sn-Pb) に比べて硬いSn-Bi合金の伸びを向上させ、熱ストレスや振動・衝撃に対する接続信頼性を高めることを目的としている¹⁰⁾

高温鉛フリーはんだ対応の技術開発

こうした鉛フリー化の取組みを行ってきたが、Sn-Ag-Cuはんだ使用による高温プロセス化に伴い、やはり部品交換などのリワーク作業における熱ストレスの緩和とプリント板Cu導体の溶食の問題への対策が必要であった。ここでは、その対策技術を紹介する。

● BGA部品交換 (リワーク) の対策

BGA部品などの部品交換は、通常ホットエアによる局所加熱工法が用いられるが、リフロー炉による一括加熱と違い周囲温度の上昇を抑える必要があるため条件制御が難しい。熱ストレス抑制を図るため、図-6に示すように、プリント板上のリワーク部品の周囲に熱容量増加と断熱を目的とした部材を配し、リワークしないほかの部品とプリント板表面の温度上昇を低減する工法を開発した。

● プリント板Cu導体の溶食対策

溶融はんだ浸漬^{せき}ではんだ付けを行うフロー (DIP: Dipping and Pulling) 工法で挿入部品の交換を行う際は、局所的な加熱のために交換部品周辺の溶融温度まで上げるための作業時間が長くなり、プリント板導体がはんだ中へ拡散するCu溶食が顕著となる。Cu溶食の対応には、富士電機によって開発されたSn-Ag-Cuにニッケル (Ni) とゲルマニ

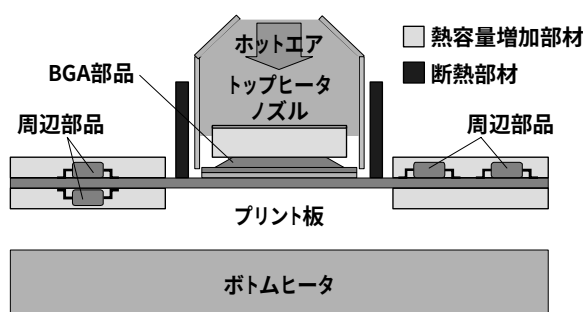


図-6 BGA部品交換（リワーク）の工法
Fig.6-Rework process idea of BGA.

ウム（Ge）を微量添加したはんだ（Sn-Ag-Cu-Ni-Geはんだ）を使用することで、図-7に示すようにSn-Ag-Cuはんだに比べてCu溶食速度を低減できることを確認している。

中低温鉛フリーはんだの適用課題

低耐熱の部品やプリント板を使用可能とする、中低温系のSn-Zn-AlはんだやSn-Bi-Agはんだでは、Sn-Ag-Cuはんだとは異なる適用課題があり、各材料の弱点を踏まえた使いこなしの技術が重要である。

● Sn-Zn-Alはんだの課題

Sn-Zn系はんだは、Znの反応性が高くリフローのプレヒート時における温度、時間の許容範囲が狭いなど使い難さがあったが、最近、はんだペーストのフラックスの改良によってZn反応性が抑えられ、以前より製造性も向上している⁹⁾ Sn-Zn系はんだでは、部品端子が厚い金（Au）めっきの場合に、はんだ中に金-亜鉛（Au-Zn）合金が膜状に残る現象が起こることがある。このAu-Zn合金膜がはんだの亀裂進展の起点となる懸念があるため、評価の結果、Sn-Zn-Alはんだ適用製品の搭載部品は、Auめっき厚を0.25 μm 以下に制限しており、Sn-Zn-Alはんだ適用では部品選定に留意して進めている。

● Sn-Bi-Agはんだの課題

Sn-Bi-Agはんだでは、部品端子に鉛を含有している場合に融点が96℃前後と低融点のSn-Pb-Bi相を生成するため、部品端子表面処理の鉛フリー化が必須となる。またBiは、JGPSSI（Japan Green Procurement Survey Standardization Initiative：グリーン調達調査共通化協議会）によるガイドラインにおいてレベルB化学物質群に指定されている。規制物質ではないが、リサイクル性の観点から使用

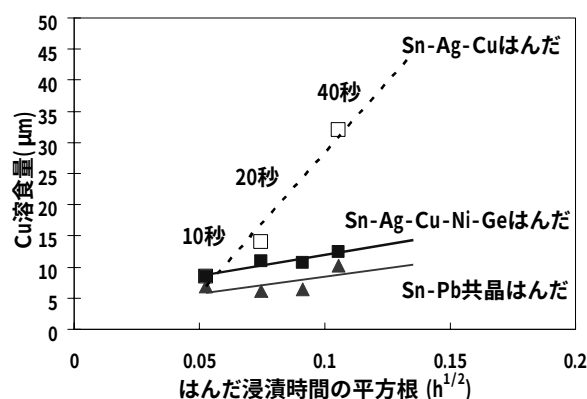


図-7 はんだ種類によるCu溶食速度比較
Fig.7-Cu dissolution speed of solders.

管理が求められることがその理由とされている。

中低温鉛フリーはんだに関しては、経済産業省の研究開発事業としてMETIプロジェクトによる産学官共同の実用化研究が進行中である。2008年3月まで「低温鉛フリーはんだ実装のための基盤技術確立と標準化」をテーマとして活動する⁹⁾ こうした研究開発で、中低温はんだ適用拡大へのブレークスルーが期待される。

む す び

本稿では、富士通のこれまでの鉛フリー技術への取り組みについて紹介した。

今後、RoHS指令に限らず地球温暖化やリサイクルなどの環境保護への対応規制が拡大していくことが予想される。生態系への影響やリサイクル性など、環境影響の評価・研究が進み、新たな規制物質の追加も考えられる。

また、リサイクルを容易にする解体性への配慮や、高寿命化によるリユース促進など、環境配慮設計に貢献する実装技術の確立が望まれる。その意味で、はんだ付け接合の鉛フリー化技術は、取り外すことが可能な可逆の解体性と、より高い接続信頼性の双方を実現するアセンブリ技術として、ますます重要となり洗練されるべき分野であると考えらる。

富士通は、地球環境保護にかかわる意識から、今後もエレクトロニクス実装の環境対応技術開発を積極的に推進する所存である。

参考文献

- (1) JEDEC | FREE Download Area | J-STD-020C.
<http://www.jedec.org/download/search/jstd020c.pdf>
- (2) 永浜由徳ほか：リフロー用伝熱シミュレーションソフト：RS-Station－鉛フリーはんだへのアプローチ. *FUJITSU*, Vol.51, No.5, p.314-317 (2000).
- (3) M. Ochiai et al. : Reliability of Solder Joints Assembled with Lead-Free Solder. *FUJITSU Sci. Tech. J.*, Vol.38, No.1, p.96-101 (2002).
- (4) 八木晴見ほか：鉛フリーはんだ材料物性と電子機器実装の信頼性. M&M2002 機械学会 材料力学部門講演会予稿集, 山口, 2002, p.225-226.
- (5) 北嶋雅之ほか：^{すず}錫-亜鉛-アルミニウム系鉛フリーはんだの実用化. *FUJITSU*, Vol.54, No.2, p.154-160 (2003).
- (6) 堀越英二ほか：先端実装技術. *FUJITSU*, Vol.54, No.4, p.337-342 (2003).
- (7) 渡邊裕彦：微量元素を添加した産業用鉛フリーはんだ. *エレクトロニクス実装学会誌*, Vol.8, No.3, p.183-187 (2005).
- (8) 斎藤俊ほか：ブロック化カルボン酸技術のはんだ実装関連材料への応用 (第2報). 10th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics" (Mate2004) 論文集, 横浜, 2004, p.51-56.
- (9) 社団法人電子情報技術産業協会 実装技術標準化委員会：鉛フリーはんだ実用化検討の2005年成果報告書. p.87-163 (2005年6月).

