1-3 ろう付およびマイクロソルダリング*

竹本 正**

Brazing and Micro-soldering*

by TAKEMOTO Tadashi**

キーワード ろう付, はんだ付, マイクロソルダリング, むれ, 溶解, 鉛フリー, フィラー

1. はじめに

ろう付とはんだ付を総合してろう接^①と記され、母材を溶融させることなく接合できる低温接合技術として古くから多用されてきた。しかし、レーザなど新熱源の出現や、継手品質並びに性能向上の要求が高くなってきたことと対応して、トーチを利用した昔ながらのろう付は日本における産業規模が縮小しており、研究対象としても扱われなくなっている。とはいえ、ろう接には多点を一括して接合できる特長から、各種熱交換器類の製造には不可欠の技術として進化している^②側面もあり、技術力の高い日本での適用が皆無になるわけではない。

一方で、はんだ付は電子部品実装には不可欠のマイクロソルダリング技術^③として、ここ20年間に、材料、機器およびプロセスの三点セットで格段の発展を遂げてきて

おり、今も日本の電気・電子産業を支える重要技術として進化している^{④-⑦}。

本稿では、多点一括接合ならびに低温接合技術として発展しているろう付およびマイクロソルダリングを念頭に置き、ろう接の基礎論を記述する。

2. ろう付とはんだ付

2.1 定義と特徴

ろう付とはんだ付は使用する溶加材（溶融させて母材を接合する材料でろうおよびはんだ）の液相線温度450℃で区分され、両者を併せてろう接と標記される^⑧。両方とも、①接合母材の融点以下で接合する、②いわゆるむれが接合のきっかけあるいは継手品質に大きく関与する、など接合の原理原則は類似しているが、異なる点も多々ある。その一例を表1に示す。接合界面組織としては、

表1 ろう付とはんだ付の定義と区分およびそれぞれの差異や特徴など

定義・区分	ろう付	はんだ付
溶加材の名称と定義	ろう (filler, brazing filler metal, brazing filler alloy)	はんだ (solder)
	液相線温度 450℃以上	液相線温度 450℃未満
溶加材と母材との反応	通常は固溶体を形成	Sn基のはんだは通常金属間化合物を形成
接合界面の特徴	溶融溶加材中への母材のエロージョン	金属間化合物形成に伴う脆さ
フラックスの活性度	高い	低い
フラックス残さの腐食性	強い	弱い
作業中の酸化および還元	酸化速度が速い	酸化速度は遅い
	水素ガス雰囲気など還元雰囲気中作業では還元能力は大きい	例えば水素雰囲気中であっても還元能力は低い
接合継手の使用温度	ろうの $0.5 T_m$ を超えることはめったにない	しばしば、はんだ材料の $0.8 T_m$ を超えて使用される
主な用途	各種熱交換器類、パイプ、各種工業製品、装飾品	電気・電子機器

注) 溶加材（フィラー）は、厳密にはろうおよびはんだの両者を総称する言葉であるが、多くの場合（特に英文では）、ろうを指す。

T_m ：絶対温度(K)で表記したフィラーの融点

*原稿受付 平成20年7月18日

**正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, JWRI, Osaka University

ろう付ではろう／母材界面に母材の固溶体が形成されている例が多いが、Sn 基はんだ付では金属間化合物が形成される。ろう付用フラックスは塩化物・フッ化物など腐食性の極めて高い無機フラックスが使用され、活性力が高いけれども、はんだ付では腐食性の極めて低いロジンベースの有機系フラックスが主流であり、ろう付用フラックスに比べると活性力が低いので、ぬれ性の確保が重要となる。ろう付は温度が高いため、酸化しやすいが還元性雰囲気中では還元速度も速い。はんだ付では、低温作業なので酸化速度は遅いが還元雰囲気を使用しても還元能力は弱い。ろう付継手がろうの融点 (T_m 、単位 K) の $0.5 T_m$ を超えて使用されることはほとんど無いが、はんだ付継手では常に $0.5 T_m$ を超えて使用されており、 $0.8 T_m$ を超えることも珍しいことではない。どちらも多点一括接合に強みがあるが、ろう付は熱交換器類のフィン／プレート（チューブ）接合、はんだ付はプリント基板への部品実装に不可欠のキーテクノロジーである。

2.2 ろうおよびはんだ

図 1 に、JIS に規定されている各種ろうおよびはんだの最高液相線温度および最低固相線温度を組成あるいは系別に示す。最低融点ろうはアルミニウムろう（表中の略記：BAI）であり、最高液相線はパラジウムろう（BPd）である。

熱交換器製造用など主要ろう付に利用されるろう材料の組み合わせを表 2 に示す。我が国で最大のろう付産業は、自動車用各種アルミニウム熱交換器類の製造であり、Al-Si 系ろうを 3003 (Al-Mn) 系合金とろう付している。主要ろう付法は、 $KAlF_4$ - K_2AlF_5 ・ H_2O 系非腐食性フラックスによる窒素ガス雰囲気中でのろう付である。エバポレータは真空ろう付される。瞬間湯沸かし器ではりん

銅ろうを用いて銅がろう付される。その他、耐食性や耐熱性が必要な箇所には母材として、ステンレス鋼、チタン、ニッケル基合金などが使用され、真空ろう付される。

表 3 は、ろうおよびはんだ（フィラー）の供給形状の分類と変遷を示す。初期はフィラー単体であり、その後、フィラーは母材またはフラックスと合体して供給されるようになる。ろう接技術の進化と材料形態の変遷とは密接に対応しており、アルミニウム熱交換器製造にはブレージングシート、高密度電子基板実装には溶ダペーストの開発が不可欠となっている。ステンレス鋼や Ni 基超合金のろう付には非晶質ろうや粉末が使用される。

図 1 JIS に規定されるろう (a) およびはんだ (b) の各合金系における液相線温度の最高値と固相線温度の最低値

表 2 熱交換器類および主要ろう付に使用されるろう

熱交換器の使用分野	主要ろう合金系	主要母材	主なろう付方法
自動車（ラジエータ、エバポレータ、コンデンサ、オイルクーラー、その他）	Al-Si	アルミニウム合金 (A 3003, A 1100)	炉内ろう付、非腐食性フラックス法、窒素ガスろう付
	Al-Si-Mg	アルミニウム合金(A 3003, A 1100)	真空
瞬間湯沸かし器	Cu-P, Cu-Ag-P	銅	フラックスレス
インタークーラー	Cu-Ni-Sn-P	銅、黄銅	フラックスレス、雰囲気ろう付
化学プラント	Ni-Cr-Si-P	ニッケル基超合金	真空
高圧流体、アンモニアチラー	Ni-Cr-Si-P	ステンレス鋼 (SUS 316, 304, 321)	真空
海水用、船、薬品製造ライン、超純水製造、化学工業、医用機器	チタン基、Ti-Cu-Ni	純チタン、チタン合金	真空

表 3 ろうおよびはんだの各種形状の分類とその変遷、【 】内は進化の方向

世代	ろう			はんだ	
	ろう+母材	ろう+フラックス	フィラー単体	はんだ+母材	はんだ+フラックス
初代(第一世代)			塊 (インゴット)、棒、竿、線、板、粒、粉末、【各種プリフォーム】		
第二世代	ブレージングシート* (ろう (皮材) を母材 (心材) にクラッド)	フラックス含有線材 (ほとんど普及せず)	非晶質ろう ↓	めっき (ディップ、浸せき)	やに入りはんだ (線はんだの中にフラックス) 【線径の減少】
第三世代	↓ 【薄肉化、組織制御】	ペースト* (粉末+非腐食性フラックス)	↓ ↓ 微細はんだボール	↓	溶ダペースト (はんだ粉末 ↓ + フラックス) 【粉末サイズの減少、非酸化粉末の使用】
現代	↓	ペースト* (Si+フラックス)	↓ ↓ ↓ 【微細鉛フリーはんだボール】	↓ 【鉛フリーはんだめっき】	↓ ↓ 【鉛フリーや入りはんだおよび溶ダペースト】

↓：上の欄の製品が現代まで継続して使用されてきていることを示す。
*：アルミニウムろう付用

図2 ろう接において重要な三要素と各影響要因

図3 一般的な多点一括炉内ろう接における温度設定プロファイルの一例と、ろう接時に生じる現象および炉内のろう接実体における温度上昇の差異

はんだでは Sn-In が最も低融点で、Zn 系が最高融点をもつ。現在、EU（欧州連合）の有害物質規制（RoHS⁸⁾）に関係して、電気電子機器では Pb, Cd, Hg 等の有害物質含有はんだは基本的に使用できない。電気・電子機器実装用はんだについては、いわゆる鉛フリーはんだが記載されている JIS Z 3282 (2006)「はんだ—化学成分及び形状」を参照願いたい⁹⁾。

微細・微小電子部品をプリント基板上に実装するいわゆるマイクロソルダリング³⁾では、はんだ付技術が製品の信頼性に直結しており、特に、現在の鉛フリーはんだ付では日本の優れた製造技術が世界の信頼を得ている。図2にろう接における重要因子を示す。材料（フィラー、フラックス、母材）、装置・機器と雰囲気およびプロセス・設計が三要素であり、詳細は省くがこれらの各因子のいずれが劣っていても健全な継手は得にくい。

3. ろう接の原理

3.1 めれ

フラックスを用いる一般的な多点一括接合用炉内ろう接過程を図3に示す。各接合部において接合過程が同時に進行することが望ましいために、接合対象品全体を均一加熱することが大事であり、予熱工程を含めた温度プロファイルの設定がノウハウとなる。温度上昇に伴い、①フラックスの活性化と、②それに伴う酸化皮膜除去がフィラーの溶融前に完了する。③フィラー溶融後、④母材とのめれが起こり、両者が金属的に接触すると、⑤母材の溶融フィラーへの溶解が始まる。⑥同時に界面には固溶体や金属間化合物の反応層を形成してろう接が完了する。

図4 一般的なぬれの説明図, 良好なぬれ (a), あまりよくぬれない (b), ぬれない (c) および, フラックスろう接におけるぬれの Young の式を用いた釣り合いの説明図 (d)

ぬれを促進するフラックスの役割を簡単にいうと腐食作用による酸化皮膜除去である。例えば, 活性成分としてハロゲン化物を使用すると式 (1) のように, フラックスに可溶性ハロゲン化物を形成して除去することにより, 下地の酸化していない活性な金属を出現させ, 溶融フィラーと母材とのぬれを促進する。

ここに, M: 二価の金属 X: 一価のハロゲン

古典的な説明では図4に示すように, ぬれの良否がろう接性を左右しており, 接触角を低下させることが良好なろう接のキーポイントとされる。フィラーの表面張力を下げることが有効な対策の一つであり, 活性力の強いフラックスの使用, フィラーへの表面張力低下元素の添加などが試みられる。

図4 (d) における液滴 (フィラー融液) と固体 (母材) の釣り合いは, Young の式で表される。

$$\gamma_{sf} = \gamma_{lf} \cos \theta + \gamma_{sl} \quad (2)$$

ここに, γ_{sf} : 母材/フラックス間の界面張力

γ_{lf} : 溶融フィラー/フラックス間の界面張力

γ_{sl} : 溶融フィラー/母材間の界面張力

θ : 接触角

変形すると,

$$\cos \theta = (\gamma_{sf} - \gamma_{sl}) / \gamma_{lf} \quad (3)$$

ぬれの向上すなわち, 接触角の低下には適切なフラックスを用いて γ_{lf} を低下させることが一つの解決策であり, マイクロソルダリングにおけるぬれ向上対策として有効な手法である。

ぬれが重要視されてきた経緯の一つに, パイプの接合などでフィラーを隙間に十分浸透充填することが, 継手強度やリーク防止に有効であったことがあげられる。しかし, 熱交換器類のフィンと板あるいはチューブとの接合においてはフィラーが長距離を浸透充填する必要は無い。旧来型のスルーホール基板のはんだ付ではスルーホール内をはんだが良好にぬれて, 基板上面で十分なフィレットを形成するまで上昇することが望ましく, ぬれ性の確保が重要となっているが, 最近の表面実装ではすき間浸透性よりもフィレット形成能力の方が大事である。

図5 Al-Si ろうを用いて純アルミニウム母材をろう付するときの, ろうへの母材の溶解の駆動力に関する Al-Si 二元状態図による説明

基板スルーホール内のぬれ上がりは毛管上昇と類似の過程で, 基板スルーホール壁と挿入されたアキシアルリードの隙間を溶融はんだが上昇していく。溶融フィラーの毛管上昇高さは静水圧の式とラプラスの式から求まる³⁾。

$$h = 2\gamma \cos \theta / \rho g r \quad (4)$$

ここに, h : 毛管上昇高さ

γ : 液体 (はんだ) の表面張力

θ : 毛管 (スルーホール) との接触角

ρ : 液体 (はんだ) の密度

g : 重力

r : 毛管 (スルーホール) の半径

式 (4) から, ぬれが良好なほど (接触角 θ が小さいほど) 上昇高さは大きくなることが明かである。

3.2 溶融フィラーと母材間の反応

溶融フィラーと母材がぬれた後は, 母材とフィラー間の金属学的な反応が進行する。これを Al-Si 二元状態図で例示したのが図5である。Al-Si 共晶ろう (Al 濃度 D) を用いて温度 T_B で純アルミニウムをろう付すると, 溶融ろうが図5の矢印で示した Al 濃度 n_s に到達するまで母材の純アルミニウムが溶融ろう中に溶解する。いわばろうの濃度が濃度 n_s に達するまで, 母材アルミニウムが溶解しろうの Si 濃度を薄め続けることになる。溶解反応は次式で表すことができる^{10, 11)}。

$$dC/dt = K (A/V) (C_s - C) \quad (5)$$

ここに,

C : 反応時間 t (s) 後の液体中の溶質濃度

K : 定数

A : 固体と液体の界面積

V : 液体の体積

C_s : 液体中の飽和溶質濃度 (図5における n_s)

一定のろう付 (実験) 条件下では, K , A , V が決まっているので, $C_s - C$ が溶解の駆動力であることは式から明かである。図5の矢印はこのろう付条件における溶解の駆動力に対応し, 式 (5) の $C_s - C$ に対応する。純 Al 母材は, ろうとの界面で Si を含有する固溶体を形成する。

ろう付よりも低温接合であるはんだ付においても図6

図6 Sn-Cu 二元状態図を用いた溶解はんだへの Cu 溶解の説明，純 Sn はんだを用いて Cu を 250℃ ではんだ付するとき， $(C_s - C)$ は矢印 A に対応，Sn-0.7Cu はんだを用いると $(C_s - C)$ は矢印 B となり小さくなる，同様に，はんだ付温度上昇で $(C_s - C)$ が大きくなり，はんだ付温度低下では小さくなる． $(C_s - C)$ が溶解の駆動力であることがよくわかる．

に，Cu 母材を純 Sn ではんだ付する例を示すように溶解が生じる．溶解の駆動力は矢印 A であり，250℃ のはんだ付では，はんだ中の Cu 濃度が C_s に達するまで母材の Cu が溶解し続ける．もし，純 Sn の代わりに，Sn-0.7Cu 共晶はんだを使用すると，溶解の駆動力は矢印 B となり，母材の溶解は減少する．母材の溶解抑制を目的に母材元素をフィラーに添加しておくことは有効であり¹²⁾，Ni-P，Ni めっき，Cu，Ag などの溶解速度のはんだ組成依存性が報告されている¹³⁻¹⁶⁾．

接合温度上昇により溶解量が増大することは図 6 に示すように，駆動力 $C_s - C$ の増大で説明することができる．逆に，接合温度の低下により溶解量が少なくなることも駆動力 $C_s - C$ の縮小と対応することが明かである．

同様に，図 5 に示したアルミニウムろう付では Si 濃度の低い亜共晶ろうを使用すれば母材アルミニウムの溶解量は減少でき，ろう付温度の上昇は駆動力が大きくなり，溶解量も増える．

Sn 基はんだを用いたはんだ付では接合界面に Cu あるいはめっき材料との金属間化合物を形成し，一般的にその厚さが厚くなると継手の機械的性能劣化となる(図 7¹⁷⁾) ので，母材やめっき材料の溶解量は少ない方が好ましい．可能な限りの低温短時間はんだ付が基本となる．

アルミニウムろう付では母材の溶解とそれに続く母材へのろう成分(代表的には Si)の母材中への拡散が，熱交換器など多段ろう付における素材の座屈要因となることはもちろん，薄肉フィンの機械的劣化やいわゆる溶け落ちなどを招くため，ろうと母材の反応は抑制した方がよい．溶融フィラーと母材間における溶解および拡散の両反応をエロージョン(侵食)と表現する¹⁸⁾．

エロージョン速度(量，深さ)には，フィラーおよび母材組成，温度が関係することはもちろん，母材結晶粒

図7 リードレスチップキャリア表面実装はんだ付継手部における継手強度と金属間化合物平均厚さの関係¹⁷⁾．

図8 アルミニウム二元合金母材のエロージョン深さに及ぼす母材組成並びに結晶粒径の影響

径などの微細組織が影響する¹⁸⁾．図 8 は，アルミニウム合金のエロージョン深さに及ぼす母材組成並びに結晶粒径の影響を示す¹⁸⁾．各元素添加量は 0.05～最大 2 at% の範囲であり元素によって最大および最小添加量に差がある．図 8 から，エロージョン深さは母材組成に影響を受けると共に，結晶粒径が小さくなると共に大きくなることが明かである．さらに，アルミニウム合金においては，アルミニウムと金属間化合物を形成する Zr，Fe，Ni よりも固溶体を形成する Si の方が，同一結晶粒径におけるエロージョン深さが大きい傾向となっており，Zr < Fe < Ni の順といえよう．

ろう付におけるエロージョン，はんだ付における金属間化合物成長のいずれもが継手性能や品質を劣化させる．このため，ろう接では「十分なぬれを確保しつつできるだけ低温短時間接合を行う」ことが基本となる．熱交換器，プリント基板など大型品や熱容量の異なる部品の搭載では均一加熱が困難となり，熱交換器周辺部や熱容量の小さい部品などでは温度上昇が速く，高温長時間接合¹⁹⁾，熱交換器中心部や熱容量の大きい部品などでは温度上昇が遅く，低温短時間接合となる．当然，後者において十

分なぬれと継手品質を確保することを最重点として接合温度プロファイルが設定されるから、高温長時間接合部の過剰エロージョンや金属間化合物成長抑制のために均一加熱が極めて大事となる。

図3のろう接温度プロファイルにろう付物実体の温度上昇を模式的に併示した。熱交換器外周部や熱容量の小さい部品では温度上昇が速いが、熱交換器中心部（内部）や熱容量の大きい部品では温度上昇が遅くなる。接合不良を出さないために、温度上昇の遅い部分が十分にぬれるように温度プロファイルを設定するので、温度上昇しやすい部分では、高温長時間接合となる。この部分での過剰反応抑制が大事となる。

3.3 フィレット形成

ろう接におけるフィレット（すみ肉）の大小は継手強さや機械的信頼性と関係するため接合性の目安とされる。この大きさはフィラーの物理定数である程度決まる。図9は溶融フィラー融液中に無限長さの垂直板を浸せきしたときに、板とフィラーが接触角0 radでぬれた場合のフィラーの上昇メネスカス形状をいくつかの代表的なろうおよびはんだについて示す²⁰⁾。

図9 フィラー融液中に垂直に浸せきした無限板に、フィラーが接触角0 radでぬれ上がった場合のメネスカス形状、最大上昇高さは距離0 mmにおける値で、アルミニウムろう（BAI）が最大ではんだ（solder）が最低値を示す。

垂直板に最も高くぬれ上がるのがアルミニウムろう（Al-12Si）で、最も上昇高さが低いのははんだ（Sn-37Pb）であり、接触角0 radでぬれた場合の最大上昇高さは次式で表される。

$$\sqrt{2\gamma / \rho g} \quad (6)$$

ここに、 γ ：液体（はんだ）の表面張力

ρ ：液体（はんだ）の密度

g ：重力

ここで、代表的な Sn-3.0Ag-0.5Cu 鉛フリーはんだ（ γ ：0.5 N/m, ρ ：7400 kg/m³）で最大上昇高さを求めると、3.7 mm となり、従来の Sn-Pb 共晶（3.1 mm）よりはわずかに大きくなる。

図9から、アルミニウムろうは最も大きなフィレットを形成できることになるが、逆にはんだでは大きなフィレット形状は期待できない。もちろん実際にはぬれが劣ることや凸接合面の曲率の影響で上昇高さは図9よりも低くなる²⁰⁾。アルミニウムろうが大きなフィレット形成能を持っていることは熱交換器の性能向上には有意義であることを示している。

4. ろう付

図10にろう付方法に関する分類例を示す。熱源、機器、プロセスおよび雰囲気別分類がある。熱交換器類のろう付は炉内ろう付であり、フラックス使用の有無やフラックスの種類などろう付雰囲気によって呼称が変わる²⁾。

図2に示したように、材料、プロセス、機器の三要素の組み合わせにより接合性は変わるので、それぞれ用途に適した組み合わせが必要となる。フラックスレス法ではフラックス法に比べて酸化皮膜除去能力が低いので、炉内雰囲気、特に酸素濃度と露点が大きな影響をもつ。もちろん、両者ともに低い程良い。雰囲気中の酸素や水分の除去には酸化しやすい金属をゲッターとして用いることがある。

Mgには下記、式（7）および式（8）のゲッター作用があるとされ²¹⁾、真空ろう付用アルミニウムろうには1 mass%程度のMgが添加される。蒸気圧の高いMgが真空中で蒸発しゲッター作用をする。また、アルミニウムろう付では式（9）も考えられている。

図10 ろう付の分類方法の例

図11 主要はんだ付方法の分類 (a) とマニュアル (b)、ウェーブ (c) およびリフロー (d) の各方法を示す模式図

ろう付方法や応用などに関しては単行本を参照願いたい²²⁻²⁴⁾。

5. マイクロソルダリング

図11にマイクロソルダリング方法の分類を示す。はんだごてを使用するマニュアルはんだ付、溶融はんだを熱源と接合材として使用するフローはんだ付およびソルダペースト（JIS Z 3284参照）を印刷塗布して炉内はんだ付するリフローはんだ付の三つが主要工法であり、簡単な模式図を併示した。

プリント基板上のはんだ付は、マニュアルはんだ付やフローはんだ付の挿入実装から、リフローはんだ付で行われる表面実装へと進化し、現在では、はんだバンプを用いるバンプ実装が増えている。2006年7月以降、EU（欧州連合）のRoHS[®]（有害物質規制）に対応して、鉛フリーはんだ実装^{25, 26)}時代となっており、エレクトロニクスパッケージの微細微小化も継続していることから、マイクロソルダリングや微細接合技術の向上は益々重要になっている^{4-7, 27-31)}。

6. ま と め

ろう付およびはんだ付（ろう接）は、安価な簡便接合法としてトーチを熱源として管の接合などに多用されてきたが、このような簡便接合法は継手強度や耐食性などが十分ではなく、継手の高信頼性が重視されるハイテク製品へは適用しがたく、いわゆるローテクと認識されて久しい。このため、手作業のトーチ接合は日本での重要性は薄れてきており、その技術の伝承が問題視される状況といってもよい。一方で、ろう接は多点一括接合技術としての特性を生かし、熱交換器類やプリント基板への

部品搭載技術として不可欠の接合法として進化してきている。日本の優れたアルミニウム素材製造技術とろう付技術が一体化して、薄肉・軽量・高性能・高耐食性の熱交換器製造を可能としており、自動車工業の隆盛を支えている。同様に、微細・高信頼性プリント基板実装技術は日本の電気・電子産業の進化の源泉である。アルミニウムろう付では環境対応の炭酸ガス冷媒用高耐圧熱交換器の製造、微細実装では鉛フリーはんだ対応の微細バンプ実装や継手の耐衝撃性改善要求など、両技術とも一層の進化が期待されている。接合技術の困難性が上がるほど、日本の優れた素材や接合技術が一層顕著になるので、これらの技術は日本の基幹製造業を支えるために今後とも開発努力が必要である。

参考文献

- 1) JIS Z 3001-3 (2008) 溶接用語－第3部：ろう接。
- 2) 軽金属溶接構造協会：アルミニウムブレージングハンドブック（改訂版），（社）軽金属溶接構造協会，(2003)，3-12。
- 3) 竹本 正，佐藤了平：高信頼度マイクロソルダリング，工業調査会，(1991)。
- 4) 竹本 正：鉛フリーはんだの信頼性とJIS化および海外標準化動向，実装技術ガイドブック2005，電子材料，44-7 別冊(2005)，17-25。
- 5) 竹本 正：電子機器実装における鉛フリーはんだ化の進展状況，真空，48-6 (2005)，372-377。
- 6) 竹本 正：鉛フリーはんだ実装技術の最新状況と課題，高温学会誌，32-4 (2006)，192-199。
- 7) 竹本 正：鉛フリーはんだ技術の現状，溶接学会誌，75-7 (2006)，37-42。
- 8) Official Journal of the European Union, Directive 2002/95/EC of the European parliament and of the Council of 27 Jan. 2003 on the restriction of the certain hazardous substances in electrical and electronic equipment, Feb. 13, (2003), L 37/19-L37/23, L 37/24-L37/38。
- 9) T. Takemoto: Introduction of JIS Related to Lead-free Solder and Soldering, Proc. 2005 6th International Conference on Electronics Packaging Technology, August 30-September 2, Shenzhen, China, (2005)，8-12。
- 10) E. A. Moelwyn-Hughes, *The Kinetics of Reaction in Solution*,

- 2nd. Ed., Clarendon Press, Oxford, (1947), 374-377.
- 11) Y. Shoji, S. Uchida, and T. Ariga, Dissolution of Solid Copper Cylinder in Molten Tin-Lead Alloys under Dynamic Conditions, *Met. Trans. B*, Vol. 13B-3, (1982), 439-445.
 - 12) I. Okamoto and T. Yasuda: Selection of Optimum Cu Content in Cu Bearing Tin-Lead Solder, *Trans. JWRI*, 15-2 (1986), 245-252.
 - 13) A. Sharif, Y. C. Chan: Liquid and solid state interfacial reactions of Sn-Ag-Cu and Sn-In-Ag-Cu solders with Ni-P under bump metallization, *Thin Solid Films*, 504-1, 2 (2006), 431-435.
 - 14) M. N. Islam, Y. C. Chan, A. Sharif and M. J. Rizvi: Effect of 9 wt.% In addition to Sn3.5Ag0.5Cu solder on the interfacial reaction with the Au/NiP metallization of Cu pads, *J. Alloys and Compounds*, 396-1, 2 (2005), 217-223.
 - 15) A. Sharif, Y. C. Chan, M. N. Islam and M. J. Rizvi: *J. Alloys and Compounds*, 388-1 (2005), 75-82.
 - 16) Y-W. Yen, W-T. Chou, Y. Tseng, C. Lee and C-L. Hsu: Investigation of Dissolution Behavior of Metallic Substrates and Intermetallic Compound in Molten Lead-free Solders, *J. Electronic Materials*, 37-1 (2008), 73-83.
 - 17) Y. C. Chan, Alex C. K. So and J. K. L. Lai: Growth kinetic studies of Cu-Sn intermetallic compound and its effect on shear strength of LCCC SMT solder joints, *Materials Sci. and Eng.*, B55-1 (1998), 5-13.
 - 18) 岡本郁男, 竹本 正, 内川 啓: 金属間化合物を含むアルミニウムのろう付性と熔融ろうとの反応, *軽金属溶接*, 20-2 (1982), 53-58.
 - 19) 竹本 正, 岡本郁男: 3004合金の長時間フラックスレスろう付試験, *軽金属*, 35-7 (1985), 405-413.
 - 20) 宮崎 誠, 竹本 正, 松縄 朗: 円柱周囲に形成されるメニスカス形状の解析 溶接学会論文集, 15-4 (1997), 674-680.
 - 21) J. R. Terill, C. N. Cochran, J. J. Stokes and W. E. Haupin: Understanding the Mechanisms of Aluminum Brazing, *Weld. J.*, 50-10 (1971), 833-839.
 - 22) D. M. Jacobson and G. Humpston: *Principles of Brazing*, ASM International, Ohio, USA, (2005).
 - 23) M. Schwartz: *Brazing, Second Edition*, ASM International, Ohio, USA, (2003).
 - 24) G. Humpston and D. M. Jacobson: *Principles of Soldering and Brazing*, ASM International, Ohio, USA, (1993).
 - 25) J. W. Evans: *A Guide to Lead-free Solders, Physical Metallurgy and Reliability*, Springer, USA, (2007).
 - 26) J. Bath: *Lead-Free Soldering*, Springer, USA, (2007).
 - 27) S. Ganesan and M. Pecht: *Lead-free Electronics*, Wiley-Interscience Publication, USA, (2006).
 - 28) G. Humpston and D. M. Jacobson: *Principles of Soldering*, ASM International, Ohio, USA, (2004).
 - 29) Y. Zhou: *Microjoining and nanojoining*, Woodhead Pub. Ltd., Cambridge, England, (2008).
 - 30) 竹本 正: 鉛フリーはんだ特性に対応した評価試験方法, *電子材料*, Vol. 47-1 (2008), 26-32.
 - 31) K-N Tu: *Solder Joint Technology, Materials, Properties, and Reliability*, Springer, USA, (2006).