表面張力法によるはんだのぬれの研究 (第1報)*

—平衡ぬれ—

高橋 栄吉** 長沢 久男**

A Study on Wetting by Solders by Surface Tension Methods (Report 1)*

—Equilibrium Wetting—

by Eikichi Takahashi** and Hisao Nagasawa**

Important factors in testing methods of quantitatively evaluating the wettability of a soldering system are discussed. It is shown that adhesion tension obtained directly by the surface tension method is a basic important factor governing wetting phenomena, and that the wetting behaviour may be interpreted from various points of view such as spreading or penetration characteristics of the soldering system. Experimental results obtained by surface tension methods on the equilibrium wetting of copper by tin-lead solders with rosin flux are described. These give an explanation of the discrepancies between the results of area-of-spread and capillary-penetration tests and give an insight into the slight difference between the results of area-of-spread tests and the practical assessments of soldering performance. It is found that adhesion tension exerts dominant influences on practical soldering, and the surface tension method can be expected to be useful for the quantitative evaluation of actual solderability.

1. はじめに

はんだ付け接合部の良否を作業前にあらかじめ推定することができれば、一度にたくさんのはんだ付けを行うようになった現在、接合部の信頼性の確保やその向上に役立つことはいうまでもない。はんだ付け性を適確に判定する試験法の確立は品質管理の面で重要なだけでなく、はんだ付け性のよい金属表面の加工やはんだの改良、あるいはフラックスの開発等を行う場合に有力な手懸かりを与えるものとして広範な重要性をもつものである。実際に MIL 等で規格化されている浸漬試験やメニスカステストをはじめ、広がり試験、毛管浸透試験等、それぞれ特長をもった試験法が利用されてきた^{1)~5)}。近年、表面張力法 (Surface Tension Method あるいは Meniscograph. 以後、ST 法と略記する) と呼ばれる試験法が提案され、はんだ付け性を定量化して客観的に評価する方法として期待され、各方面で採用される傾向にある^{6)~13)}。

ST 法とは、溶融はんだ中に試料金属片の一端を浸漬し、金属表面にはんだがぬれて行く過程を試料に作用する表面張力等による力の変化によって捉え、この力を連続的に記録する方法である。したがって、動的なぬれの

挙動を容易に、しかも定量的に把握することができる試験法である。はんだ付けにおける重要な要素である金属表面のはんだによるぬれ現象は、ろうと母材とフラックスの三者の界面における溶解や拡散あるいは合金化にともなうエネルギーの変化をも含めたポテンシャルエネルギー関係によって支配されていると考えられる。ぬれを適確に把握するためには、界面のエネルギー関係を直接測定することが最も望ましいことであろう。ST 法が、ぬれの平衡状態におけるこのような量の測定を可能にすると同時にぬれに要する時間の測定を容易にできるところに、はんだ付け性を客観的に評価する試験法として期待される理由があるものと思われる。

ぬれ性を定量的に測定する方法には広がり試験や毛管浸透試験がある。これらによる Sn-Pb はんだの組成依存性の実験結果によれば、共晶組成付近で広がり面積が最大となるが、毛管浸透試験の浸透係数は純すずで最高となり、試験法によって異なる傾向を示すことが指摘されていた^{1)~3), 14)}。このような事実は、同一の界面張力等の作用にもとづくぬれの多様性を示すものと理解するのが妥当であり、ぬれ性の評価に広がり性と浸透性を考慮すべきであることを示唆している。こうしたぬれの多様性を、平衡ぬれに限ってではあるが、ST 法という一試験で同時に把握することによって、はんだ付け性の定量化を確立することが本論文の主要な目的である。

*原稿受付 昭和52年10月26日 (昭和52年度春季全国大会にて発表)

**正 員 千住金属工業(株)附属研究所 Member, Research Laboratory, Senju Metal Industry Co., Ltd.

本報では, ロジックフラックスによる銅板に対する Sn-Pb はんだのぬれの組成依存性の実験を ST 法で行い, 従来の試験法の結果と比較し, ST 法による多様性を考慮したぬれの評価法の検討を試みた。

2. 平衡ぬれの巨視的理論

ST 法におけるぬれの平衡式についてはすでに多くの文献に見られるが²⁹⁾¹¹⁾, ここでその要点を整理し, 理論上で従来の試験法との比較を概観し, ST 法によるぬれ性の評価について考察を加える。

2.1 表面張力法におけるぬれの平衡式

フラックスを塗布した厚さ t の幅の無限に長い平板状試料を単位幅当りのばね定数が k であるような荷重検出器につけて, 垂直に d だけ溶融のはんだ中に浸漬したとき, Fig. 1 に示したように, はんだが h だけ試料側面に

Fig. 1 Equilibrium shape of meniscus shown in section

登り, 試料が ϵ だけはんだ中に引き込まれて平衡状態に達したとする。このとき, h および ϵ に依存する系の単位幅当りのポテンシャルエネルギー U は, フラックスでおおわれたはんだの表面積を $2S_{if}$ とし, 試料とフラックス, 試料とはんだおよびはんだとフラックスの間の界面張力 (界面における溶解や拡散あるいは合金化にともなうエネルギー変化をも含めて界面張力と呼ぶ) をそれぞれ σ_{sf} , σ_{is} および σ_{if} とすれば¹⁵⁾⁻¹⁷⁾,

$$U = 2(\sigma_{is} - \sigma_{sf})(h + d + \epsilon) + 2\sigma_{if}S_{if} + 2G - Mge + 1/2k(l + \epsilon)^2 + 1/2\rho g t(d + \epsilon)^2$$

となる。ここに, M は単位幅当りの試料の質量で, l は $kl = Mg$ のようにつりあうばねの変位であり, k を含む項および最後の項はそれぞればねの変位およびはんだの浮力によるポテンシャルエネルギーを表わす。 ρ ははんだの密度, g は重力加速度である。また, G はメニスカスを形成しているはんだの重力によるポテンシャルエネルギーで, メニスカスの形状を $y(x)$ とすれば, $G = (1/2)\rho g \int y^2 dx$ である。フラックスは薄い膜になってい

るとして, フラックスおよび空気に対する重力の効果は無視した。

平衡状態では U が極小になっていると考えられるから, $\partial U / \partial \epsilon$ および $\partial U / \partial h$ が 0 であり, また h が一定のとき $\sigma_{if}S_{if} + G$ が最小になっているという条件から, 次のような二つの方程式が得られる。

$$\begin{aligned} 2(\sigma_{sf} - \sigma_{is}) &= k\epsilon + \rho g t(d + \epsilon) & \dots\dots(1) \\ 2(\sigma_{sf} - \sigma_{is}) &= \sqrt{4\sigma_{if}\rho g h^2 - (\rho g h^2)^2} & \dots\dots(2) \end{aligned}$$

式 (1) は, 荷重検出器で $k\epsilon$ を実測すれば, それをはんだの浮力で補正して二つの界面張力の差, すなわち, 金属表面に対するフラックスの介在によるはんだの付着張力 (Adhesion Tension, $\sigma_{sf} - \sigma_{is} \equiv A$) が求められることを示している。ぬれに関する重要な因子である付着張力が直接に測定されるところに ST 法が有効であることがうかがえる。式 (2) は三つの界面張力とメニスカスの高さ h の関係を示すぬれの平衡式である。式 (2) を変形して,

$$\sigma_{if} = \frac{4A^2 + (\rho g h^2)^2}{4\rho g h^2} \quad \dots\dots(3)$$

によってはんだとフラックスの間の界面張力 σ_{if} が A と h の測定値から計算できる。また, Fig. 1 に示した接触角 θ を用いると式 (2) は,

$$\sigma_{sf} - \sigma_{is} = \sigma_{if} \cos \theta \quad \dots\dots(4)$$

となり, 鉛直に立てた無限幅平板に液体がぬれるとき, 重力の効果も考慮して, いわゆる Young の平衡式が成立していることを示すものである。

2.2 従来の試験法との関係

広がり試験において重力の効果が無視できる程度の微小液滴を考察する場合, はんだの形状は球の一部とみなすことができ, 式 (4) が近似的に成立していることが知られている。このとき体積 V のはんだの広がり面積 S は, 式 (4) の $\cos \theta$ を α とおくと,

$$S = \left[\frac{9\pi V^2(1+\alpha)^3}{(1-\alpha)(2+\alpha)^2} \right]^{1/3} \quad \dots\dots(5)$$

で表わされ, S の増加は α の増加に対応する。したがって, α ははんだの広がり性を示す尺度と考えられるから, この α を広がり指数 (Spreading Index) と呼ぶことにする。広がり指数 α は ST 法の平衡ぬれにおける付着張力 A とメニスカスの高さ h の測定値から,

$$\alpha = \frac{A}{\sigma_{if}} = \frac{4A\rho g h^2}{4A^2 + (\rho g h^2)^2} \quad \dots\dots(6)$$

によって求められるから, ST 法によって広がり面積を予測することができる。

また, 毛管浸透試験における平衡上昇高さ H は, 毛細管の半径あるいは平行板間隙を δ とすると, δ が小さい場合には近似的に,

$$H = \frac{2\sigma_{if} \cos \theta}{(\rho_1 - \rho_2)g\delta} = \frac{2A}{(\rho_1 - \rho_2)g\delta} \quad \dots\dots(7)$$

となる。ここで、 ρ_1 および ρ_2 はそれぞれはんだおよびフラックスの密度である。ST 法で得られる付着張力 A によって平衡上昇高さを知ることができ、浸透性についての情報が得られる。浸透性を示す尺度には他に A. Latin によって導入された有効浸透係数 k_f (Effective Penetration Coefficient) という量がある。これは一定の距離を浸透するに要する時間を測定することによって得られるもので、はんだの流動性が考慮されていて、

$$k_f = \frac{\sigma_{if} \cos \theta_a}{2(\eta_1 + \eta_2)} \frac{A}{2(\eta_1 + \eta_2)} \quad \dots\dots(8)^*$$

によって与えられる。ここで、 η_1 および η_2 はそれぞれはんだおよびフラックスの粘性係数である。有効浸透係数 k_f は ST 法の平衡ぬれの測定だけでは求められないが、粘性係数が知られているならば、付着張力 A からおよそその大きさを推定することができる。

2.3 表面張力法によるぬれ性の評価

はんだの広がりや浸透はぬれ現象の具体的な結果であるから、広がり面積や平衡上昇高さ、あるいは広がり指数や浸透係数はぬれ性を評価する指標とすることができる。これらの指標は、式(6)、(7)および(8)に見られるように、それぞれ付着張力 A と界面張力 σ_{if} 、密度 ρ および粘性係数 η との比である。A はこれらに共通に現われるから、ぬれを考察する上で基本的に重要な因子であることが理解できる。しかし、二つの系で A が等しくても単純にぬれ性が同等であると判定することはできない。 σ_{if} あるいは η の相違によってそれぞれ広がり性あるいは浸透性が異なるからである。二つの系で一方は広がり性が優れているが、他方は浸透性が優れているという相反する場合も起り得るのである。広がり性や浸透性を包括した単一な概念としてのぬれ性について優劣を判定することは不可能な問題になる。ここにぬれの多様性を考慮する必要性が生じる。A をぬれを支配する基本的な因子と考え、A で表わされる系の基本的特性を付着性と呼び、 σ_{if} 、 ρ および η を二次的な因子と考え、付着性に対するこれらの効果による系の多様な特性を式(6)、(7)および(8)で表わして、それぞれ広がり性、上昇浸透性および流動浸透性と呼ぶことにする。ぬれを考察するにはこのような多様性まで考慮すべきであると考える。

本報では平衡ぬれに限ることにして、ST 法によるぬれ性の評価法を検討する。式(7)による上昇浸透性には A と ρ が、式(8)による流動浸透性には A と η が関係している。平衡ぬれを考察する場合には、静的な浸透性という特性を考える。流動性を考慮しないから、

[脚注] θ_a は前進接触角であり、付着張力 A に関係する θ は平衡接触角であるので、A で表わした式は k_f より若干大きいと考えられる。

η は不要になり、また浸透は重力に逆った上昇だけに限るわけではないから、 ρ を考慮する必要もなくなる。したがって、静的な浸透性は A で特徴づけられることになり、付着性そのものに包含されてしまうとみなすことができよう。そこで、広がり指数が α で付着張力が A であるような系を考え、 α を横軸に A を縦軸にとった座標平面上に点 (α , A) をプロットして、この点の位置で考えている系のぬれ性を表わすことにする。ぬれ性を A と α で代表したこのような図をぬれ図 (Wetting Map) と呼ぶことにする。ぬれ図の点が上にゆくほど付着性に富み静的な浸透性が良好であり、右に寄るほど広がり性が優れていることになる。(Fig. 9 および10参照)

3. 実験方法

実験に供する有限な幅の試料に対しては式(1)の代りに、

$$\lambda(\sigma_{sf} - \sigma_{is}) = k\epsilon + 1/2\rho g t(d + \epsilon)(\lambda - 2t)$$

が成り立つ。 λ は試料の周囲の長さである。通常 ϵ および t はそれぞれ d および λ に較べて小さくすることができるから、付着張力 $A (= \sigma_{sf} - \sigma_{is})$ は近似的に、

$$A = \frac{F}{\lambda} + \frac{\rho g t d}{2} \quad \dots\dots(9)$$

によって求められる。 F は $k\epsilon$ であり、荷重検出器で実測される力である。メニスカスの高さ h を測定するためには、有限幅の両端の影響が及ばない中央部でメニスカスの先端が水平になる程度に幅の広い試料が必要である¹³⁾。どの程度の幅が必要か、また λ が異なる場合に式(9)が成立するかを検討することもかねて、本実験では厚さ $t = 0.03$ cm のタフピッチ銅板 (JIS. TCu P1-1/4 H) を長さ 3 cm、幅 1.5 cm および 2.0 cm の長方形に切断した 2 種類の試料を用いた。使用したろう材は 99.99 wt % の Sn と Pb およびそれらを合わせた組成比の異なる 10 種の Sn-Pb はんだで、等温 264℃ および 314℃ と液相線 + 50℃ および + 100℃ の 4 種類の温度で実験した。試料をアセトンで超音波洗浄し、ロジンフラックス (W. W. Rosin 30% IPA 溶液) を塗布し、 $d = 0.232$ cm だけはんだ中に浸漬して、10~15秒後の平衡状態における F を測定した。メニスカスの高さ h は、試料をはんだ中から引き上げた後はんだにぬれた長さ w を計測顕微鏡で測定して、 $h = w - d - \epsilon$ によって求めた。(Fig. 1 参照)

はんだの一組成一温度の実験に幅の異なる試料をそれぞれ 15 枚ずつ使用して実験精度の向上に努めた。実験の結果から、 h については幅 1.5 cm の試料で充分であり、式(9)は実験誤差の範囲内で成立していることが確認された。したがって、付着張力 A や界面張力 σ_{if}

等の実験値は30の試料による測定の実験値である。

4. 実験結果

等温における種々の組成の Sn-Pb はんだの付着張力 A の測定結果を Fig. 2 に示す。 A はいずれの温度においても共晶組成付近で最大になり、最大値の温度依存性はほとんどなく、その両側では温度依存性が逆になっている。このことは A の温度依存性を各組成別に示した Fig. 3 から明らかであろう。

Fig. 2 Adhesion tension of tin-lead solders on copper with rosin flux at 264°C and 314°C

Fig. 3 Effect of temperature on the adhesion tension of tin-lead solders on copper with rosin flux

付着張力 A とメニスカスの高さ h の測定から、式 (3) によって求めた界面張力 σ_{if} の液相線 + 50°C の場合の組成依存性を Fig. 4 に示す。 Fig. 5 は各組成のはんだの σ_{if} の温度による変化を示したものである。はんだの密度 ρ には L. L. Bircumshaw の結果から内挿した値を用いた¹⁸⁾。Sn 含有量の増加につれて σ_{if} は単調に増加し、どの組成においても温度の上昇にともなって直線的に減少している。これらの結果ははんだの界面張力に関する従来の各種の実験結果の傾向と一致し、特に B. Chalmers らによる液相線直上のはんだとレジンの

Fig. 4 Interfacial tension of tin-lead solders with rosin flux

Fig. 5 Effect of temperature on the interfacial tension of tin-lead solders with rosin flux

界面張力の組成による変化の傾向とはよく一致している¹⁸⁾⁻²²⁾。式 (3) によって界面張力を求める方法は液体の表面張力の測定で Wilhelmy Slide Method として古くから知られているもので、この方法がろうと母材とフラックスとから成る系にも適用できることが示されたといつてよいであろう。

次に、同じ供試材を用いた広がり試験の結果と比較した。広がり試験に供したはんだ粒は各組成で体積がまちまちであったので、実際にプランメータで測定した広がり面積を体積が 31.6 mm³ である場合に式 (5) を用いて換算した。ST 法では測定した A と h の値から式 (6) によって広がり指数 α を求め、式 (5) で $V=31.6$ mm³ として広がり面積を計算した。液相線 + 50°C の場合の結果を Fig. 6 に示す。その他の温度でも結果は同様で、はんだの組成による広がり面積の変化の傾向についてはほぼ一致しているが、絶対値に若干の差があり、ST 法

Fig. 6 Spreading of tin-lead solders on copper with rosin flux at 50°C of superheat

Fig. 7 Correlation between surface tension methods and area-of-spread tests

Fig. 8 Effective penetration coefficient of tin-lead solders on copper with rosin flux

による方が広がり性を過小に評価している。この原因は広がり試験に供したはんだ量が比較的多いため (26~33 mm³), 重力の効果ではんだの形状が球の一部よりさらに扁平になっているからであろう。広がり指数から重力

の効果を検討した実際の広がり面積を正確に計算することは簡単ではないので、重力を無視した式 (5) による ST 法の結果と広がり試験の結果との相関関係を調べてみた。結果は Fig. 7 のようになり、強相関を示しているから、ST 法による広がり性の評価が有効であることがわかる。

Fig. 8 は式 (8) によって計算した有効浸透係数 k_f の液相線 + 50°C の場合のはんだの組成依存性を示したものである。ここで、はんだの粘性係数 η_1 には足立らの測定値から内挿した値を用い^{23,24)}、ロジンの η_2 については 250°C まで回転粘度計で実測してそれより高温では実験式によって外挿した値を用いた。 k_f が共晶組成付近で極小になっているのは、 A の変化が緩慢であるのに対して液相線 + 50°C であるので η_1 も η_2 も大きくなるからである。また、共晶から純すずにかけて k_f は単調に増加している。Fig. 8 にともに示した A. Latin による毛管浸透試験の結果にも同様な傾向が見られる¹⁾。また、はんだの密度が Sn 含有量の増加にともなって減少するため、式 (7) による平衡上昇高さ H は純すずで最高に達する。これは毛管上昇試験による傾向と一致し、上昇浸透性については純すずが最も優れていることになる¹⁴⁾。

以上のように ST 法によってぬれの基本的な付着性と広がり性および浸透性を同時に知ることができる。平衡ぬれの特性を簡便に把握するために、はんだの組成依存性についてのぬれ図を Figs. 9 および 10 に示した。両温度を通じて共晶組成付近で最も付着性のよいことがわかる。広がり性は共晶より低すずの組成でよいようであ

Fig. 9 Wetting map of tin-lead solders on copper with rosin flux at 50°C of superheat. Figures indicate tin contents (wt %)

Fig. 10 Wetting map of tin-lead solders on copper with rosin flux at 100°C of superheat. Figures indicate tin contents (wt %)

るが、温度が高くなると付着性の低下にともなって広がり性も落ちてくる。ここで問題になるのは、付着性あるいは静的な浸透性に富んだ 50~63 wt % Sn のはんだと広がり性の良好な 40~50 wt % Sn のはんだとではどちらが実際のはんだ付けにおいて優れた特性を示すのであろうかということである。このような判定は非常に困難である。

5. はんだ付け性の評価について

はんだ付け性を定量的に測定することは極めて困難な問題とされていた。ぬれの理論的な考察によれば、ぬれを支配する基本的な因子は付着張力 A であり、界面張力 σ_{if} 、密度 ρ および粘性係数 η は二次的な因子として理解される。金属表面のはんだによるぬれがはんだ付け性を大局的に決定する重要な要素であるから、ぬれを支配する上記の因子がはんだ付け性の相違を起す要因と考えられる。したがって、 A および σ_{if} が高精度で測定される ST 法によってはんだ付け性を定量的に評価することが可能になる。基本的な付着性は A で決まるが、 A が等しくても同様な効果を示す系として同一視することはできない。 σ_{if} の大小によって広がり性が異なるからである。 A の他に二次的な因子としてどれを考慮するかによってぬれに対する評価が変わってくる。これがぬれの多様性である。平衡ぬれについては、ST 法によって得られるぬれ図により付着性ととも静的な浸透性および広がり性を簡便に把握することができる。こうしたぬれの多様性をも考慮したはんだ付け性の定量的な評価に関して ST 法が有効であることの一端が、本実験の結果によ

って明らかにされたと思われる。

5.1 はんだ付け性とはんだ組成

はんだのぬれの組成依存性については、試験法によって異なる傾向が得られることや試験結果が実際上の経験と一致しないことなどが早くから A. Latin や G. L. J. Bailey らによって指摘されていた。Sn 含有量が少なくなると広がり性が二段階に起ることが問題にされたり、また接触角のヒステリシスを考慮するといったことが議論されていた¹⁾²⁾。Bailey らは広がり試験と浸透試験では同じ表面張力で起る効果の異なる側面を測定しているのであるから、組成依存性の傾向が異なっても当然であるとしながらも、二段階に起る広がり性を考慮して広がり面積と浸透係数という二つのぬれの指標の一致を試みている。この問題はぬれの多様性を積極的に認めることによって解決される。ST 法という一試験法で得られる二つのぬれの指標が互に異なる傾向にありながら、それぞれ広がり試験および浸透試験の結果と同様な傾向にあることが示されたから、広がり性と浸透性は一般には一致しないことが理論と実験の両面から確認されたことになる。

実際のはんだ付けにおいて接合部に浸透する能力は極めて重要なものと考えられるのに、現実にはどちらかという広がり面積の方が実際に経験するはんだ付け性の傾向に近い評価を示す理由も説明されないままになっていた²⁾。接合部において要求される浸透能力は有効浸透係数 k_f よりもむしろ静的な浸透性の指標である付着張力 A によって評価されるべきものではないだろうか。 A の組成依存性は Fig. 2 に示したが、液相線上一定温度でも同様な傾向を示して共晶組成付近で最大となる。したがって静的な浸透性は広がり性と同様に中間組成のはんだで最高になる。接合部の浸透能力が付着張力に依存すると考えれば、実際の経験とよく一致するのである。

接触角のヒステリシスが問題にされたのは、経験上共晶組成のはんだが最もよくぬれて使い易いとされているが、広がり試験の結果では、温度にもよるが、幾分低す側面に寄った 40~60 wt % Sn のはんだが最もよく広がるのであって、この経験と広がり試験の結果との間のわずかな不一致を説明するためであった²⁾。ST 法によるぬれの考察から明らかなように、広がり性ははんだ付け性の一側面を評価するものである。したがって、わずかなずれが生ずることもありうるわけで、はんだ付け性が付着張力 A に大きく依存していることを示すものと解釈するのが妥当ではなからうか。少々広がり性はよくなくても静的な浸透性に富んだ共晶はんだが実際のはんだ付けにおいて最も優秀なはんだ付け性を示すのではないかと考えられる。はんだ付け性が近似的にはあっても広

がり性と同様な傾向を示すのは、通常の系にあっては広がり性が付着張力に大きく依存しているからであろう。Figs. 9 および 10 に示したぬれ図の各点が右上がりの線上に並ぶ傾向にあることを見れば明らかである。

5.2 母材のはんだ付け性

はんだとフラックスは同じものを使用し、母材を変えてそのはんだ付け性を調べる場合には、ST 法によれば付着張力 A の測定だけで簡便にその優劣を判定することができる。母材の異なる各系をぬれ図に表わすと、一定温度では界面張力 σ_{if} は一定であると考えられるから、 A の異なるぬれ図の各点は Fig. 9 に例示してあるような原点を通る傾き σ_{if} の直線上に並ぶはずである。したがって、 A の大きいものほど広がり性がよくなるからである。

6. おわりに

ロジン以外のフラックスを使用した場合や母材を変えた場合の同様な ST 法による実験を行ってさらに検討を進めたいと考えている。フラックスの効果が実際のはんだ付けにおいてかなり異なる場合に、浸透試験ではあまり相違が現われないが、広がり試験はそうした経験との対応をよく示すとされている問題についても¹⁾²⁾、ST 法によって何等かの理解が得られるものと期待される。

最後に、ST 法の試験と同一の素材による広がり試験およびロジンの粘性係数の測定は当研究所の須藤俊久氏の甚力に負うものであり、記して厚く感謝する。素材の調製や有益な助言等で終始本研究に協力された当研究所の諸氏に厚く御礼申し上げる。

References

- 1) A. Latin: Capillary Flow in the Soldering Process and Some Measurements of the Penetration Coefficients of Soft Solders, *J. Inst. Metals*, 72 (1946), 265-282
- 2) G.L.J. Bailey and H.C. Watkins: The Flow of Liquid Metals on Solid Metal Surfaces and Its Relation to Soldering, Brazing, and Hot-dip Coating, *J. Inst. Metals*, 80 (1951-52), 57-76
- 3) J. McKeown: The Properties of Soft Solders and Soldered Joints, Brit. N.-F. Metals Research Assoc., Research Monograph No. 5 (1948), 14-52
- 4) H.H. Manko: Solders and Soldering, McGraw-Hill, (1964), 262-272
- 5) W.B. Harding: Solderability Testing, *Proc. Plating*, 52-10 (1965), 971-981
- 6) L.G. Earle: A Quantitative Study of Soft Soldering by Means of the Kollagraph, *J. Inst. Metals*, 71 (1945), 45-72
- 7) J.A. ten Duis and E. van der Meulen: Measurement of the Solderability of Components, *Philips Tech. Rev.*, 28-12 (1967), 362-364
- 8) C. Mackay: The Solderability of Component Surfaces, *Proc. Tech. Pro. Inter/Nepcon*, (1970), 11-40-51
- 9) A.J. Mayhew and G.R. Wicks: Solderability and Contact Angle, *Proc. Tech. Pro. Inter/Nepcon*, (1971), 45-55
- 10) J.A. ten Duis: Soldering and Reliability, *Proc. Tech. Pro. Inter/Nepcon*, (1971), 56-75
- 11) A.J. Mayhew and K.S. Monger: Solderability by Meniscometry, *Proc. Tech. Pro. Inter-Nepcon*, (1972), 53-64
- 12) J.F. Shipley: Influence of Flux, Substrate and Solder Composition on Solder Wetting, *Weld. J.*, 54-10 (1975), 357-s-362-s
- 13) H. Peth: Die Benetzungswaage, ein neues Hilfsmittel bei der Prüfung von Weichlötlötlutmitteln, *Z.f. Werkstofftechnik*, 6-11 (1975), 367-376
- 14) 岡本, 大森, 玉置, 田: ろう付における広がりと浸透深さについて, 本誌, 45-2 (1976), 113-118
- 15) G.M.A. Blanc, J. Colbus and C.G. Keel: Notes on the Assessment of Filler Metals and Fluxes, *Weld. J.*, 40-5 (1961), 210-s-222-s
- 16) R.J.K. Wassink: Wetting of Solid-Metal Surfaces by Molten Metals, *J. Inst. Metals*, 95 (1967), 38-43
- 17) 和田, 福本: ろうのぬれの基礎的考察, 本誌, 37-8(1968), 845-851
- 18) L.L. Bircumshaw: The Surface Tension of Liquid Metals, *Rart V., Phil. Mag.*, 17 (1934), 181-191
- 19) A. Latin: The Influence of Fluxes on the Spreading Power of Tin Solders on Copper, *Trans. Faraday Soc.*, 34 (1938), 1384-1395
- 20) B. Chalmers and R.H. Wadie: Factors Influencing the Formation of a Smooth Coating of Tin on Copper by Hot Dipping, *J. Inst. Metals*, 66 (1940), 241-253
- 21) 美馬, 倉貫: 液体金属とフラックスとの間の界面張力に関する研究(第3報), 日本金属学会誌, 22-4 (1958), 196-199
- 22) D.W.G. White: The Surface Tensions of Pb, Sn, and Pb-Sn Alloys, *Met. Trans.*, 2-11 (1971), 3067-3071
- 23) 足立, 荻野, 白石: るつば回転振動法による溶融 Pb-Sn 系合金の粘性測定について, 日本金属学会誌, 36-9(1972), 927-933
- 24) H.R. Thresh and A.F. Crawley: The Viscosities of Lead, Tin, and Pb-Sn Alloys, *Metallurgical Trans.*, 1-6 (1970), 1531-1535