Sn-3.0 Ag-0.5 Cu 鉛フリーはんだ材の衝撃引張特性*

上 西 研^{*1}, 関 根 務^{*2}
丸 市 毅^{*2}, 大 崎 修 平^{*1}

Impact Tensile Characteristics of Sn-3.0 Ag-0.5 Cu Lead-Free Solder

Ken KAMINISHI^{*3}, Tsutomu SEKINE,
Takeshi MARUICHI and Shuhei OSAKI^{*3} Department of Mechanical Engineering, Yamaguchi University,
2-16-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi, 755-8611 Japan

In order to investigate the tensile characteristics of lead-free solder at high strain rates, impact tensile test equipment for solder materials was developed, on the basis of the direct tension split Hopkinson bar technique. By using this equipment, tensile stress-strain characteristics data of the Sn-3.0 Ag-0.5 Cu lead-free solder and the Sn-Pb conventional solder up to fracture were measured with a high accuracy at strain rate of 1.66×10^3 and compared with those at quasi-static strain rates of 1.2 and 1.2×10^{-2} . The results show that the proof stress and tensile strength of the Sn-3.0 Ag-0.5 Cu lead-free solder increase significantly with increasing strain rate comparing with the Sn-Pb conventional solder. It is also shown that the fracture morphology of Sn-3.0 Ag-0.5 Cu solder changes from ductile fracture to brittle fracture with increase in the strain rates.

Key Words: Sn-3.0 Ag-0.5 Cu Solder, Lead-Free Solder, Hopkinson Bar Method, Impact Tensile Test, Constitutive Equation

1. 緒 言

電子機器の小形・モバイル化に伴い、はんだ接合部の衝撃強度信頼性の評価は重要な課題の一つになってきている。しかし、鉛フリーはんだ材はもちろんのこと従来の Sn-Pb はんだ材についても衝撃強度特性に関するデータはほとんど得られていないのが現状である。衝撃荷重下における固体材料の力学的挙動を調べる実験法はこれまでに数多く提案されている⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。その中でも、Nicholas⁽²⁾らにより考案された反射引張形ホプキンソン棒法は高ひずみ速度下における材料の応力-ひずみ関係を精度よく計測できる試験法として知られている。しかし、この方法では引張応力波が試験片に入射する前に圧縮応力波が一度試験片内を通過するため、耐力が低いはんだ材ではその影響が無視できない。また、この試験装置では伸びが10%程度までしか計測できないため、はんだ材の試験を破断まで実施できない問題点があった。

そこで本研究では、はんだ試験片の衝撃特性を高精

度に計測するために、試験片に直接引張応力波が入射し、しかも大きなひずみ(50%程度)まで計測可能なはんだ用高精度衝撃引張試験装置を開発した。そして、その装置を用いて Sn-3.0 Ag-0.5 Cu 鉛フリーはんだ試験片の高ひずみ速度域における引張応力-ひずみ特性について調べた。また、Sn-3.0 Ag-0.5 Cu 鉛フリーはんだ材のひずみ速度依存性を調べるために、2種類の準静的試験(ひずみ速度: 1.2 および 1.2×10^{-2} s⁻¹)も行った。さらに、従来の Sn-Pb はんだ材についても準静的試験と衝撃試験を行い、Sn-3.0 Ag-0.5 Cu 鉛フリーはんだ材との違いについて調べた。

2. 実験方法

2.1 供試体 本研究で用いた Sn-3.0 Ag-0.5 Cu 鉛フリーはんだ材と Sn-Pb はんだ材の鋳造ブロックの概略寸法を図1に示す。図1に示すように、鋳造欠陥が少なく組織が安定している鋳造ブロック下部より 10 mm × 10 mm × 30 mm の小片を採取し、その小片を加工して衝撃引張試験片を作製した。なお、準静的試験にも衝撃試験と全く同じ形状・寸法の試験片を用いた。試験片の形状と寸法を図2に示す。

波長分散形蛍光 X 線(WDX)分析装置を用いて各はんだ試験片の化学組成の分析を行った結果(元素量の

* 原稿受付 2003年4月21日。

^{*1} 正員, 山口大学工学部(〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)。^{*2} 山口大学大学院理工学研究科。

E-mail: kaminishi@yamaguchi-u.ac.jp

平均値)を表1に示す。Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材はほぼ所定の成分となっているが、Sn-Pb はんだ材ではPbが約34%と共晶となる量(38%)より若干少ないので、以後、Sn-34 Pbと記すこととする。WDX 解析により得られたSn-3.0 Ag-0.5 Cuの元素分布を図3に示す。図3より、SEM画像において黒い部分がSnで白い部分がAgとSnおよびCuとSnの共晶組織であることがわかる。図4に両はんだ材のSEM組織写真を示す。Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材(図4左側)では、 β -Sn初晶(黒色)を取り巻くように Ag_3Sn 、 Cu_6Sn_5 と思われる共晶組織(白色)が現れている⁽⁷⁾。一方、Sn-34 Pb はんだ材(図4右側)では、 β -Sn初晶(写真中では黒色で広く析出している部分)を取り巻くように共晶組織(黒色 Sn, 白色 Pb)が現れているのが確認できる。 β -Sn初晶は量的にはわずかで、その他は共晶組織になっており、Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材と比較すると組織が非常に細かいことがわかる。なお、図4(b)下に見られる数ミクロン程度の黒い粒は研磨の際に残留したダイヤモンド粒である。

2.2 準静的引張試験 準静的試験には引張試験機(新興通信工業)を用い、2種類のひずみ速度(1.2お

よび $1.2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)で実験を行った。評点間変位はき裂開口変位測定用クリップゲージ(共和電業, DTC-A-5)、荷重は最大荷重1 kNの小形ロードセル(共和電業, LTZ-100 KA)により計測した。

2.3 衝撃引張試験装置 本研究で開発した高精度衝撃引張試験装置の概要を図5に示す。本装置は直接引張形衝撃試験装置⁽⁶⁾を50%程度のひずみまで計測できるように弾性棒(入出力棒)長さを長くするなどの工夫をしたもので、入出力棒にはSn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材と同程度の機械的インピーダンスを有するAl 2017-T 4材(直径15 mm)を採用した。また、本装置はガンパレル(JIS G 3454)、衝撃管(Al 2017-T 4)、エアーチャンバ(SUS 304)、負荷ブロック(Al 2017-T 4)および測定系から構成されている。本装置の動作原理を以下に示す。まず、入力棒をまたぐように設置されたエアーチャンバ内の圧縮空気を開放することにより、衝撃管を入力棒に沿って打ち出す。

Table 1 Chemical compositions

	Sn	Ag	Cu	Pb	Fe
Sn-3.0Ag-0.5Cu	96.1	3.10	0.57	-	0.253
Sn-Pb	66.4	-	-	33.5	0.112

Fig. 1 Shape and dimensions of solder casting block

Fig. 2 Tensile test specimen

Fig. 3 WDX analysis

(a) Sn-3.0 Ag-0.5 Cu

(b) Sn-34 Pb

Fig. 4 Microstructures

Fig. 5 Impact tensile test system

打ち出された衝撃管は負荷ブロックに衝突し、反射引張応力波を入力棒に伝える。入力棒内を通過する引張応力波は試験片を通り一部は反射し、一部は透過する。この入射、反射、透過パルスを所定の位置に貼付した半導体ひずみゲージにより検出する。このように計測した入射、反射、透過パルスを一次元波動伝ば理論より得られた次式に適用することにより、高ひずみ速度域における応力-ひずみ曲線を得ることができる。

$$\epsilon(t) = -\frac{2C_0}{L_0} \int_0^t \epsilon_r(t') dt' \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L_0} \dot{\epsilon}_r(t) \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{AE}{A_s} \epsilon_i(t) \quad (3)$$

ここで、 C_0 は棒内を一次元的に伝ばする波の速度、 L_0 は標点距離、 ϵ_r は反射波によるひずみ、 ϵ_i は透過波によるひずみ、 E は縦弾性係数、 A は棒の断面積、 A_s は試験片の断面積である。また、 t' は反射波と透過波の波頭を一致させるために導入した積分変数である。

2・4 衝撃引張試験法 はんだ試験片を入出力棒の端面のねじ穴(M8×1.0)に取付ける。2本の弾性棒間には、端面の摩擦をできるだけ少なくして完全に密着させるために潤滑剤(ダウコーニング社、モリコート G-n ペースト)を付着させる。高圧タンク内の圧縮空気を作動弁によりエアーチャンバを通じて瞬時に開放することにより、銃身内の衝撃管を入力棒の外周に沿って発射させる。この衝撃管は入力棒の左端の負荷ブロック(フランジ)端面に衝突して圧縮応力波を発生

Fig. 6 Lagrangian diagram for present impact tensile test

させるが、その自由端でただちに引張応力波に反転される。この引張応力波は入力棒内を一定の縦弾性波速度で左から右へと伝ばし、入力棒と試験片、および試験片界面で衝撃インピーダンスの違いにより一部は反射するが、残りは試験片内に通過し、内部で反射・透過を繰返しながら出力棒へ透過する。弾性棒中における応力波の伝ばのようすから(図6参照)、入出力棒のひずみゲージ No.1 により入射(引張り)ひずみパルス ϵ_i と反射(圧縮)ひずみパルス ϵ_r が測定され、出力棒上のひずみゲージ No.2 により透過(引張り)ひずみパルス ϵ_t が測定される。入射・反射・透過波は、応力波が干渉することなく測定できるように、試験片取付面より 1200 mm (Gage No. 1)、300 mm (Gage No. 2) の位置に曲げひずみの影響を消去するように上下面に貼付した2枚のp形半導体ひずみゲージ[(株)共和電業, KSP-2-120-E4, ゲージ長 2 mm, ゲージ率 124]により検出した。ブリッジ回路の抵抗は 120 Ω で、直列に組んで 240 Ω の抵抗とした。計測データはディジ

タルオシロスコープ [横河電機(株), DL 1200] にサンプリングタイム 0.1 μ s で取り込んだ。

本装置で得られる衝撃引張試験(Sn-3.0 Ag-0.5 Cu)のオシロスコープ波形の一例を図7に示す。新しく開発した引張試験装置を用いると、図7に示すように破断するまでの時間(透過波の時間)が反射波の範囲(約 350 μ s)内に収まるので、正確な動的応力-ひずみ曲線を得ることができることがわかる。

Fig. 7 Oscilloscope records from present Impact tensile test

(a) Sn-3.0 Ag-0.5 Cu

(b) Sn-34 Pb

Fig. 8 Influence of strain rates on stress-strain curves

3. 実験結果および考察

3・1 応力-ひずみ関係 本研究で開発した装置から得られるオシロスコープ波形の入射波、反射波、透過波を一次元波動伝ば理論 [式(1)~(3)] に基づきデータ処理することにより、衝撃引張応力-ひずみ線図を求めた。図8に各はんだ材の衝撃引張試験結果と準静的試験結果を示す。なお、比較のために従来のSn-34 Pb はんだ材の結果も示す。図8より Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材は、Sn-34 Pb はんだ材と比較して衝撃引張強さ、伸びともかなり大きい値を示すことがわかる。

引張試験によって得られた結果をまとめて表2に、また、耐力および引張強さとひずみ速度の関係を図9に示す。図9より両はんだ材ともに耐力および引張強さとひずみ速度との間には両対数表示でほぼ直接関係とみなせることがわかる。また、Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材のひずみ速度依存性は Sn-34 Pb はんだ材に比べて大きいことがわかる。

パッケージの衝撃解析を行うためには、高ひずみ速度域におけるはんだ材の構成式が必要となる。そこで本研究では、多くの汎用 FEM 解析コードに標準的に

Table 2 Experimental results

	Strain rate (1/s)	Sn-3.0Ag -0.5Cu	Sn-34Pb
Proof stress (MPa)	1.20×10^{-2}	31.1	21.9
	1.2	42.4	28.5
	1.67×10^3	106.0	59.8
Tensile strength (MPa)	1.20×10^{-2}	45.3	34.4
	1.2	71.7	50.8
	1.67×10^3	176.6	108.7
Elongation (%)	1.20×10^{-2}	154.5	99.9
	1.2	150.4	109.2
	1.67×10^3	45.6	29.1

Fig. 9 Strain rate dependency

Fig. 10 Appearance of tension specimens fractured at high and low strain rates

されている Cowper-Symonds の式について検討した。Cowper-Symonds の式は、動的降伏応力 σ_d と準静的降伏応力 σ_s の関係を表したもので、次式で与えられている。

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/P} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 D と P は材料定数であり、次のようにして決定した。まず、式(4)を両対数にとり整理すると次式が得られる。

$$\log_{10} \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s} - 1 \right) = \frac{1}{P} \log_{10} \dot{\epsilon} - \frac{1}{P} \log_{10} D \dots\dots\dots (5)$$

そこで、本研究により得られた各ひずみ速度における耐力(表2 参照)を式(5)に代入し、最小二乗法により、両はんだ材についての P と D を求めた。その結果、Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材に対しては $D=90.0 \text{ s}^{-1}$ 、 $P=3.57$ 、Sn-34 Pb はんだ材に対しては $D=204 \text{ s}^{-1}$ 、 $P=4.55$ が得られた。 P の値が小さいほど降伏点(耐力)のひずみ速度依存性が大いことを意味しており、軟鋼に対しては約5であることが知られている。Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材は軟鋼よりかなり小

Fig. 11 SEM micrographs of quasi-static and impact fracture surface of tension specimen for Sn-3.0 Ag-0.5 Cu

さい値を示しており、高速変形時に強度が著しく上昇することがわかった。

3・2 破壊形態 図10に衝撃引張りおよび準静的引張試験後の破断部近傍の変形を示す。Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材は破断部近傍の変形もひずみ速度に大きく依存しており、衝撃引張試験片の絞り率が64.1%に対して、準静的では92.5%とかなり大きいことがわかった。これに対してSn-34 Pb はんだ材の衝撃引張試験片の絞りは35.1%とSn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材の半分程度であることがわかった。

図11(a₁)~(c₃)にSn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材の準静的および衝撃引張試験後の破面のSEM写真を示す。Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材では準静的引張試験後の高倍率破面写真(a₂), (a₃), (b₂), (b₃)から破面全体に延性破壊の特長であるディンプルが粒内に確認でき、すべりによる空孔合体形の破壊が支配的であることがわかる⁽⁸⁾。ただし、ひずみ速度 1.2 s^{-1} の準静的引張試験後の破面(b₃)はひずみ速度 $1.2\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ の破面(a₃)と比較してディンプルが小さく(浅く)なっ

ている。したがって、同じ粒内延性破壊であってもディンプルの大きさはひずみ速度に依存するものと考えられる。また、低倍率破面(a₁), (b₁)からは最終的にチゼル状になって破断したことが確認できる。

これに対して衝撃引張試験後の破面写真(c₁)~(c₃)からは、準静的引張試験では存在した繊維状域がほとんどみられず脆性的な破壊を示していることがわかる。また、高倍率破面写真(c₃)からファセットの面にへき開段が多数確認できる。したがって衝撃破壊が一つのへき開面だけでなく平行ないくつかのへき開面で同時に起こっているものと考えられる。

これらの結果より、ひずみ速度の増加に伴い転位の移動が拘束され、粒内延性破壊(ディンプル大)から粒内延性破壊(ディンプル小)を経て粒内へき開破壊へと遷移するものと思われる。ただし、Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材の耐力および引張強さのひずみ速度依存性(図9参照)には急激な変化が見られなかった。

図12(d₁)~(f₃)にSn-34 Pb はんだ材の準静的および衝撃引張試験後の破面のSEM写真を示す。準静的

Quasi-static (strain rate $1.2\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$) Quasi-static (strain rate 1.2 s^{-1}) Impact (strain rate $1.67\times 10^3\text{ s}^{-1}$)

Fig. 12 SEM micrographs of quasi-static and impact fracture surface of tension specimen for Sn-34 Pb

引張試験後の破面写真(d_2), (e_2)から Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材と同様にディンプルが粒内に確認できるが、同時に粒界にも存在することがわかる。このため、Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材と異なり、Sn-34 Pb はんだ材ではチゼル状の破断には至らなかったものと考えられる。また、高ひずみ速度域における破面(f_2), (f_3)ではほとんどが粒界延性破壊(結晶粒が明確でかつ粒界にディンプルが存在する)であり、準静的引張試験後の破面(e_3)と比較して結晶粒界に現れているディンプルが小さく浅いことがわかる。また、Sn-34 Pb はんだ材では Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材とは異なり、ひずみ速度の増加に伴う延性破壊から脆性破壊への変化は見られない。これは Sn-34 Pb はんだ材の結晶粒界の臨界応力が低い場合、粒内へき開破壊に至らないためだと考えられる。

これらの結果を整理すると表3のようになる。すなわち、Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材は低ひずみ速度域で粒内延性破壊、高ひずみ速度域で粒内脆性破壊(へき開破壊)となる。一方、Sn-34 Pb はんだ材は低ひずみ速度域で粒内延性破壊と粒界延性破壊が混在しており、ひずみ速度の上昇に伴い粒界延性破壊の破面占有率が多くなる。そして、高ひずみ速度域では粒界延性破壊が支配的となる。なお、表中の T(D)は粒内延性破壊、T(B)は粒内脆性破壊、I(D)は粒界延性破壊を表している。また、下添字 L は占有率が多く、S は占有率が少ないことを意味している。

4. 結 言

高ひずみ速度域での鉛フリーはんだ材の引張特性を調べるために、直接引張形ホプキンソン棒法による衝撃試験装置を開発し、Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材の衝撃引張試験を行った。その結果、本研究で開発した衝撃試験装置により高精度に鉛フリーはんだ材の動的応力-ひずみ曲線を計測できることが確認できた。また、Sn-3.0 Ag-0.5 Cu 鉛フリーはんだ材の耐力および引張強さは Sn-34 Pb はんだ材よりもひずみ速度依

Table 3 Fracture morphology

	Quasi-static (strain rate $1.2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Quasi-static (strain rate 1.2 s^{-1})	Impact (strain rate $1.8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$)
Sn-3.0Ag-0.5Cu	T(D)	T(D)	T(B) _(C)
Sn-34Pb	T _L (D) + I _S (D)	T _S (D) + I _L (D)	I(D)

T(D): Transgranular ductile fracture

T(B): Transgranular brittle fracture

I(D): Intergranular ductile fracture

(C): Cleavage fracture

存性が高いことがわかった。さらに、Sn-3.0 Ag-0.5 Cu はんだ材は低ひずみ速度域で粒内延性破壊、高ひずみ速度域で粒内脆性破壊となることがわかった。

終わりに、本実験にご協力をいただいた山口大学の黒崎誠君、福岡県工業技術センターの小川俊文氏に深く感謝の意を表す。また、本研究の一部は科学研究費補助金 [基盤研究(C)(2)] 14550080 によることを記す。

文 献

- (1) 林卓夫・田中吉之助, 衝撃工学, (1988), 169-202, 日刊工業新聞社.
- (2) Nicholas, T., Tensile Testing of Materials at High Rates of Strain, *Exp. Mech.*, **21** (1981), 177-185.
- (3) Harding, J., Wood, E. O. and Campbell, J. D., Tensile Testing of Material at Impact Rates of Strain, *J. Mech. Eng. Sci.*, **2** (1960), 88-96.
- (4) Kawata, K., ほか2名 (Harding, J. 編), Mech. Props. at High Rates of Strain 1979, *Inst. Phys. Conf., Ser. No. 47* (1979), 71-80, Bristol, London.
- (5) Staab, G. H. and Gilat, A., A Direct-tension Split Hopkinson Bar for High Strain-rate Testing, *Exp. Mech.*, **31**-3 (1991), 232-235.
- (6) 横山隆・小川恒一, 衝撃引張荷重下における S 15 C 炭素鋼摩擦圧接継手の応力-ひずみ特性, 溶接学会論文集, **19**-3 (2001), 513-520.
- (7) 菅沼克昭, はじめてのはんだ付け技術, (2002), 44-68, 工業調査会.
- (8) 加納誠・菊池正紀・町田健司, 金属の疲労と破壊, (1999), 111-246, 内田老鶴園.