

## 鉛フリーはんだの疲労初期損傷に対する 結晶塑性論アプローチ

豊田中研 ○鈴木智博 辻彩 瀬戸山大吾 池畠秀哲 長廻尚之  
トヨタ自動車 山中政彦 田中淳二

### A Crystal Plasticity Approach on Early Fatigue Damage in Lead-Free Solder

Tomohiro SUZUKI, Aya TSUJI, Daigo SETOYAMA, Hideaki IKEHATA,  
Naoyuki NAGASAKO, Masahiko YAMANAKA and Junji TANAKA

#### 1 緒 言

自動車では近年、多くの電子システムが搭載されているため、電子制御を担うECU(Electronic Control Unit)の搭載スペースが課題となる場合があり、ECUの小型化が望まれている。自動車のECUに用いるICパッケージとしては従来、QFP(Quad Flat Package)と呼ばれる、Siチップからリード端子を取り出したパッケージが主に用いられてきたが、このリード端子は冷熱サイクルにおける熱膨張率の差による熱応力に対して、熱応力を緩和する役割を果たしていた。一方、携帯電話等ではBGA(Ball Grid Array)やWLCSP(Wafer Level Chip Size Package)によって小型化が達成されている。QFPおよびWLCSPの模式図をFig.1に示す。BGAやWLCSPの場合、熱応力を緩和する構造が無くなるので、はんだ接合部に付与される繰返し熱ひずみは顕著になる。

さらに、環境問題からはんだの鉛フリー化が進められている。しかし、鉛フリーはんだは従来の鉛はんだと比べて主相のSnの結晶異方性の影響を大きく受け、寿命ばらつきが大きくなる。このことは、結晶粒数が少ない微小接合部において顕著である<sup>1)</sup>。すなわち、BGAやWLCSPといった微小接合部での鉛フリーはんだの寿命予測においては、予測精度の向上が大きな課題となる。

そこで、本報では、電子部品の小型化に貢献する微小はんだ接合部の寿命ばらつきの明確化、寿命予測精度向

	Conventional IC "QFP"	Compact IC "WLCSP"
Cross section view		
Top view		
Packaging area / Chip size	10	1

Fig.1 A comparison of packaging area.

上を目的として、鉛フリーはんだの結晶異方性が疲労初期損傷に及ぼす影響を定量化する。

#### 2 方 法

**2.1 結晶塑性論による異方性の定量化** 疲労損傷の初期過程では、材料を構成する結晶が外的に加えられる繰り返し応力によってすべり面に沿った変形を生じる<sup>2)</sup>。そこで、試験片表面の結晶粒一つ一つに着目し、その結晶方位と損傷発生寿命の対応付けを試みた。すなわち、結晶のすべりはせん断応力がすべり面に作用して起こり、このせん断応力（分解せん断応力）は外力に対して Schmid 因子によって求められる。従って、Schmid 因子によって個々の結晶の損傷発生寿命を評価できると仮定する。

Schmid 因子は Fig.2 に示すように、すべり面の単位法線ベクトル  $n$  と応力軸の単位ベクトル  $d_\sigma$  のなす角  $\theta$ 、すべり方向の単位接線ベクトル  $s$  と応力軸の単位ベクトル  $d_\sigma$  のなす角  $\phi$  によって、 $(\cos \phi \cdot \cos \theta)$  で表されるパラ

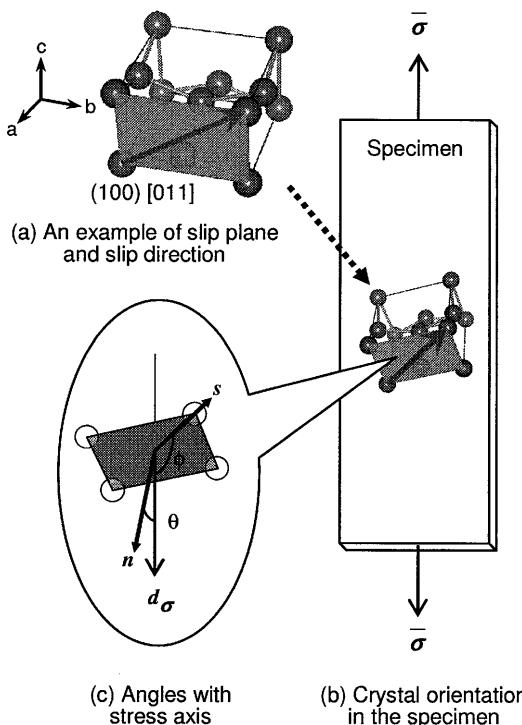


Fig.2 Schematic of slip plane, slip direction, crystal orientation in the specimen and stress axis.

メータである。ここで重要な点としては、Schmid 因子を求めるためのすべり面とすべり方向（すべり系）を決める必要性である。しかし、Sn の活動すべり系については幾つかの説がある<sup>3)</sup>。Fig.2(a)では例として(100)[011]を挙げたが、他のすべり系が活動する可能性もある。そこで、本報においては、第一原理計算によって求めた一般化積層欠陥エネルギー<sup>4)</sup>と試験片表面に現れたすべり線を参考に、Schmid 因子算出に必要なすべり系を同定した。

## 2.2 鉛フリーはんだの疲労試験 結晶粒の損傷発生寿命は以下の疲労試験によって観測した。

試験片の供試材としては、一般的な鉛フリーはんだ Sn-3Ag-0.5Cu を用い、素材の圧延、機械加工によって 50mm×15mm×1.5mm の板状試験片を作製した。その際、圧延や機械加工によって生じる残留ひずみの除去、また、結晶粒径の調整を目的として、150°Cにおいて 24 時間の焼鈍熱処理を行った。作製した試験片の結晶構造の観察を EBSD(Electron Back Scattering Diffraction)によって行った。その結果を Fig.3 に示す。この結果から結晶粒個々についての Euler 角を結晶方位として読み取った。

疲労試験では、試験片長手方向に繰返し負荷を付与した。負荷波形については、三角波で両振り引張圧縮（応力比  $R=-1$ ）を与える変位制御とした。また、試験速度は 0.2Hz であり、応力振幅は 17.3MPa である。実験は室温大気中で行った。疲労試験中、一定サイクルごとに試験片表面を CCD カメラで観察し、繰返し数に伴う表面の変化を撮影した。

## 3 結 果

疲労試験中の試験片表面の観察では、繰返しに伴って表面に黒色の斑点が生じ、増加した。この斑点は、SEM (Scanning Electron Microscope)による観察から、すべり変形が生じた結晶粒であることがわかった。すなわち、繰返しに伴って生じる結晶粒のすべり変形を黒色の斑点として結晶個々に観測できたと考える。

黒色の斑点として観察された繰返し数を個々の結晶の疲労初期損傷寿命とし、あらかじめ EBSD によって測定した結晶方位とを対比させることにより、結晶方位と寿命の関係を定量化した。すなわち、個々の結晶粒について、Fig.4(a)に示すように結晶粒表面にすべり変形による凹凸が現れて黒色斑点となって観察される損傷発生

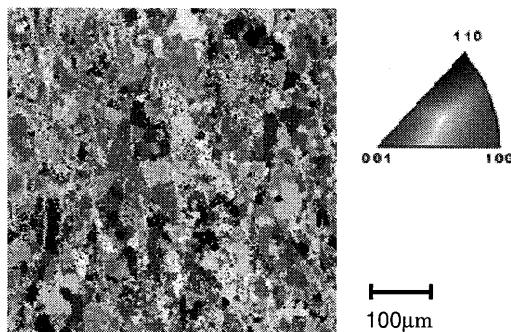


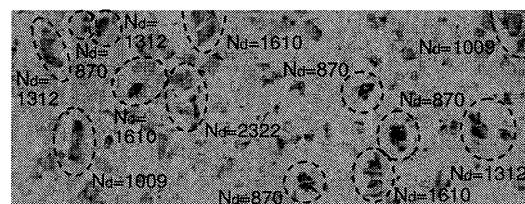
Fig.3 Crystal orientations of a lead-free solder specimen for fatigue test by EBSD.

繰返し数  $N_d$  を観測し、それぞれについて、Fig.4(b)に示す試験前に行った EBSD から Schmid 因子を求めた。

Schmid 因子  $m_s$  と損傷発生繰返し数  $N_d$  との関係を示したもののが Fig.5 である。Fig.5 から Schmid 因子  $m_s$  が大きいほど寿命が短くなる傾向がわかる。すなわち、結晶異方性の影響については、結晶面に作用する分解せん断応力の大きさを決定する Schmid 因子によって定量化ができると考える。

## 参考文献

- 1) 莢谷ら, Proc. of 13th Symposium "Micro joining and Assembly Technology in Electronics", (2007).
- 2) 例えば、日本材料学会編、材料強度学, (1986).
- 3) B. Duzgun and I. Aytas: Jpn. J. Appl. Phys., 32(1993), 3214.
- 4) 池畠ら、日本金属学会 2012 年春期(第 150 回)大会講演予稿集, (2012).



(a) Cycles to damage of crystals  $N_d$



(b) Corresponding crystal orientations by EBSD

Fig.4 Examples of cycles to damage of crystal on specimen, and corresponding crystal orientations by EBSD.

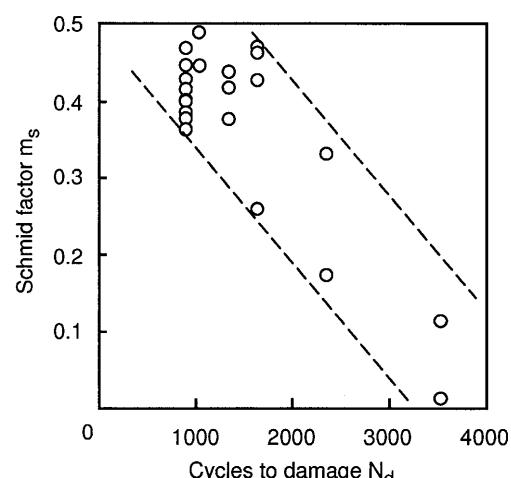


Fig.5 Relationship between Schmid factor and cycles to crystal damage.