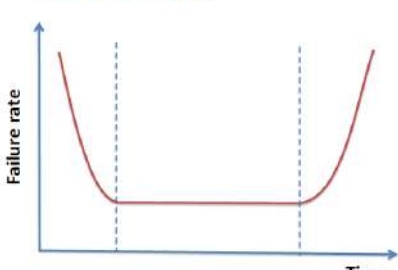
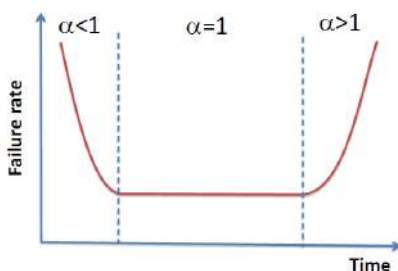
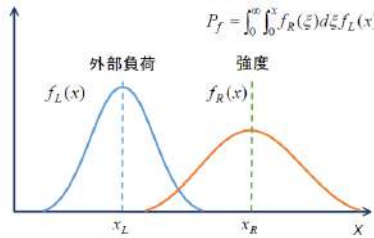


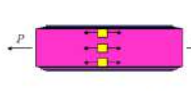
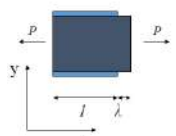
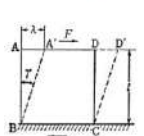

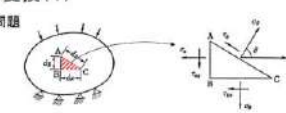
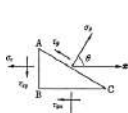
■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

<p>パワーデバイス実装信頼性</p> <p>横浜国立大学 渋谷 忠弘</p>	
<p>講義内容</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 信頼性工学、材料の基礎 2. パワーデバイス実装の動向と信頼性の課題 3. パワーデバイス実装における故障モード 4. 次世代パワーデバイスの信頼性 	
<p>バスタブ曲線</p> 	
<p>故障率関数</p> <ul style="list-style-type: none"> • ある時間tまでに動作していたアイテムがその後の単位時間で故障する確率 • 条件付き確率 (時間tまで故障しない確率R(t)の条件で、そのアイテムが故障する確率) $h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$	
<p>指数分布 (故障率が一定の場合)</p> $h(t) = \lambda$ $R(t) = \exp\left\{-\int_0^t h(t) dt\right\} = \exp(-\lambda t)$ $F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$ $f(t) = -\frac{R(t)}{dt} = \lambda \exp(-\lambda t)$ $MTTF = \frac{1}{\lambda}$	

■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

<p>ワイブル分布</p> $f(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left\{ - \left(\frac{t-\gamma}{\beta} \right)^\alpha \right\}$ $F(t) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{t-\gamma}{\beta} \right)^\alpha \right\}$ $h(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1}$																																				
<p>バスタブ曲線とワイブル分布</p> 																																				
<p>破壊確率の算定モデル</p>  <p>破壊確率</p> $P_f = \int_0^\infty \int_0^x f_R(\xi) d\xi f_L(x) dx$																																				
<p>例題. 強度・応力とも正規分布に従う場合</p> <p>破壊確率</p> <p>例題. 以下の条件で破壊確率を求めよ</p> <p>$\bar{x}_R = 200 \text{ MPa}, \bar{x}_L = 100 \text{ MPa}$ $\sigma_R = 40 \text{ MPa}, \sigma_L = 20 \text{ MPa}$</p> <p>$P_f = \int_{-\infty}^0 f_L(z) dz$</p> <p>$z = x_R - x_L$</p> <table border="1" data-bbox="247 1489 630 1668"> <thead> <tr> <th rowspan="2">\bar{x}_R / \bar{x}_L</th> <th colspan="5">$\eta = \sigma_R / \bar{x}_R = \sigma_L / \bar{x}_L$</th> </tr> <tr> <th>0.07</th> <th>0.10</th> <th>0.15</th> <th>0.20</th> <th>0.25</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.20</td> <td>0.03369</td> <td>0.10021</td> <td>0.19687</td> <td>0.26103</td> <td>0.30428</td> </tr> <tr> <td>1.50</td> <td>0.00004</td> <td>0.00277</td> <td>0.03223</td> <td>0.08276</td> <td>0.13363</td> </tr> <tr> <td>2.00</td> <td>0.00000</td> <td>0.00000</td> <td>0.00143</td> <td>0.01267</td> <td>0.03682</td> </tr> <tr> <td>3.00</td> <td>0.00000</td> <td>0.00000</td> <td>0.00001</td> <td>0.00078</td> <td>0.00571</td> </tr> </tbody> </table>	\bar{x}_R / \bar{x}_L	$\eta = \sigma_R / \bar{x}_R = \sigma_L / \bar{x}_L$					0.07	0.10	0.15	0.20	0.25	1.20	0.03369	0.10021	0.19687	0.26103	0.30428	1.50	0.00004	0.00277	0.03223	0.08276	0.13363	2.00	0.00000	0.00000	0.00143	0.01267	0.03682	3.00	0.00000	0.00000	0.00001	0.00078	0.00571	
\bar{x}_R / \bar{x}_L		$\eta = \sigma_R / \bar{x}_R = \sigma_L / \bar{x}_L$																																		
	0.07	0.10	0.15	0.20	0.25																															
1.20	0.03369	0.10021	0.19687	0.26103	0.30428																															
1.50	0.00004	0.00277	0.03223	0.08276	0.13363																															
2.00	0.00000	0.00000	0.00143	0.01267	0.03682																															
3.00	0.00000	0.00000	0.00001	0.00078	0.00571																															
<p>材料の機械的性質</p> <p>名称と定義(社団法人 日本材料学会編"機械材料学"より抜粋)</p> <table border="1" data-bbox="151 1780 614 1982"> <thead> <tr> <th>名称</th> <th>定義</th> <th>備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ヤング率</td> <td>比例限度以下の応力とひずみの比</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ポアソン比</td> <td>横ひずみと縦ひずみの比</td> <td></td> </tr> <tr> <td>弾性限度</td> <td>塑性ひずみを生じない最大応力</td> <td></td> </tr> <tr> <td>引張強さ</td> <td>公称引張応力-ひずみ線図での最大応力</td> <td></td> </tr> <tr> <td>破断応力</td> <td>破断時の公称応力</td> <td></td> </tr> <tr> <td>0.2%耐力</td> <td>0.2%塑性ひずみを生ずる応力</td> <td></td> </tr> <tr> <td>伸び</td> <td>破断時における公称ひずみ</td> <td></td> </tr> <tr> <td>加工硬化指数</td> <td>真応力ひずみ線図をべき乗関数で近似したときの指数</td> <td>n値</td> </tr> </tbody> </table>	名称	定義	備考	ヤング率	比例限度以下の応力とひずみの比		ポアソン比	横ひずみと縦ひずみの比		弾性限度	塑性ひずみを生じない最大応力		引張強さ	公称引張応力-ひずみ線図での最大応力		破断応力	破断時の公称応力		0.2%耐力	0.2%塑性ひずみを生ずる応力		伸び	破断時における公称ひずみ		加工硬化指数	真応力ひずみ線図をべき乗関数で近似したときの指数	n値									
名称	定義	備考																																		
ヤング率	比例限度以下の応力とひずみの比																																			
ポアソン比	横ひずみと縦ひずみの比																																			
弾性限度	塑性ひずみを生じない最大応力																																			
引張強さ	公称引張応力-ひずみ線図での最大応力																																			
破断応力	破断時の公称応力																																			
0.2%耐力	0.2%塑性ひずみを生ずる応力																																			
伸び	破断時における公称ひずみ																																			
加工硬化指数	真応力ひずみ線図をべき乗関数で近似したときの指数	n値																																		

■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

<p>応力 (Stress)</p>  <p>断面全体では</p> $\int_A \sigma \cdot A_1 = \int_A f_1$ $\sigma \int_A A_1 = \int_A f_1$ <p>単位断面における垂直応力</p> $\sigma = \frac{f_1}{A_1}$ $\sigma \cdot A_1 = f_1$ <p>$\sigma \cdot A = P$ 釣合い方程式 内力の合計 = 外部負荷</p>	
<p>ひずみ (Strain)</p> <p>フックの法則と弾性係数</p> <p>引張り・圧縮</p>  <p>σ: 垂直応力 ϵ: 垂直ひずみ E: 縦弾性係数 (ヤング率) ν: ポアソン比</p> $E_x = \frac{\lambda}{l}$ $\epsilon_y = -\nu \times \epsilon_x$	
<p>せん断変形</p>  <p>単位厚さの正方形板 ABCD において、せん断力の作用する面 DA 及び BC の面積を l とすると</p> $\tau = \frac{F}{A} \quad \gamma = \frac{\lambda}{l}$ $\lambda = \tau l = \frac{\tau}{G} l = \frac{F l}{A G}$  <p>釣り合う 釣り合わない 釣り合う</p>	
<p>応力の変換 (1)</p> <p>二次元応力問題</p>  <p>x 方向、y 方向について力の釣り合いより</p> $\left. \begin{aligned} \sigma_x \cos^2 \theta - \tau_x \sin \theta \cdot ds - \sigma_y \sin^2 \theta - \tau_{xy} ds = 0 \\ \sigma_y \sin \theta \cdot ds + \tau_x \cos \theta \cdot ds - \tau_{xy} dy - \sigma_x dx = 0 \end{aligned} \right\}$ <p>両辺を ds で割り、さらに</p> $\left. \begin{aligned} \frac{dy}{dx} = \cos \theta \quad \frac{dx}{dy} = \sin \theta \quad \text{より} \\ \sigma_x \cos^2 \theta - \tau_x \sin \theta = \sigma_y \cos^2 \theta + \tau_{xy} \sin \theta \\ \sigma_y \sin \theta + \tau_x \cos \theta = \tau_{xy} \cos \theta + \sigma_x \sin \theta \end{aligned} \right\}$	
<p>応力の変換 (2)</p>  $\left. \begin{aligned} \sigma_x \cos^2 \theta - \tau_x \sin \theta = \sigma_y \cos^2 \theta + \tau_{xy} \sin \theta \\ \sigma_y \sin \theta + \tau_x \cos \theta = \tau_{xy} \cos \theta + \sigma_x \sin \theta \end{aligned} \right\}$ <p>ここで $\tau_{xy} = \tau_{yx}$</p> <p>σ_x, τ_x について解くと</p> $\left. \begin{aligned} \sigma_x = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2 \tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \tau_x = -(\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{aligned} \right\}$ <p>書き直すと</p> $\left. \begin{aligned} \sigma_\theta = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \\ \tau_\theta = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \end{aligned} \right\} \dots (*)$	

■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

<p>von Misesの降伏条件</p> <p>相当応力</p> $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \}}$ <p>✓ 塑性変形⇒すべり変形(せん断変形)の集積 ✓ せん断変形が臨界値に達したときに降伏の開始</p> <p>✓ 金属材料の延性破壊などでは良く一致する。 ✓ 数値解析のアルゴリズムにおいて適用しやすい。</p>	
<p>ひずみの変換</p> <p>応力の変換</p> $\sigma_x = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$ $\tau_{xy} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta$ <p>ひずみの変換</p> $\epsilon_x = \epsilon_x \cos^2 \theta + \epsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \cos \theta \sin \theta$ $= \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin 2\theta$ $\gamma_{xy} = -(\epsilon_x - \epsilon_y) \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta$	
<p>金属材料の応力・ひずみ関係</p> <p>単軸応力状態</p> <p>σ: 垂直応力 ε: 垂直ひずみ E: 縦弾性係数(ヤング率) σ_Y: 降伏応力 ε_p: 塑性ひずみ ε_e: 弾性ひずみ ε: 全ひずみ (= ε_p + ε_e)</p>	
<p>応力集中</p> <p>α: 応力集中係数 無限板: α=3 有限板: α=2~3</p>	
<p>き裂先端の応力場</p> <p>破壊力学: き裂を有する構造物の変形・破壊</p> <p>σ₀ = $\frac{K}{\sqrt{2\pi r}}$ f(θ) K: 応力拡大係数 遠方負荷を受ける無限体中のき裂(長さ2a)では $K = \sigma_0 \sqrt{\pi l}$</p>	

■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

<p>材料のじん性とエネルギー</p>	
<p>応力特異場とエネルギー解放率</p>	
<p>応力拡大係数と破壊靱性</p>	
<p>界面近傍における破壊</p>	
<p>フリーエッジ効果</p>	

■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

信頼性の基礎

✓信頼性工学
 バスタブ曲線、破壊確率の算出

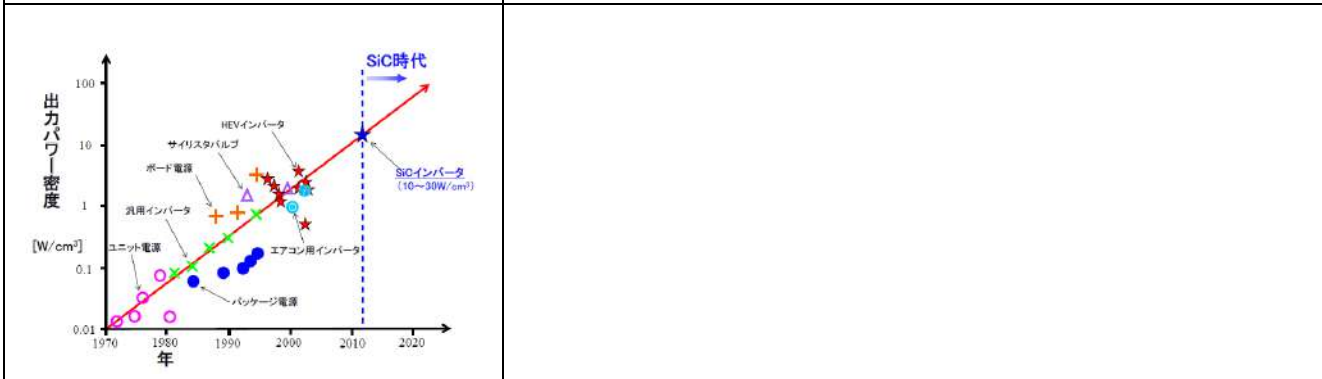
✓材料強度の基礎
 応力、ひずみ、応力集中、界面の効果、
 多軸応力状態

Power Electronics の基本要素

W. E. Newell, "Power Electronics - emerging from limbo", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. IA-10, no. 1, pp. 7-111, 1974

Scope in Power Electronics Reliability

	第1世代 '07~'08	第2世代 '08~'09	第3世代 '10~'14	第4世代 '15~'20
デバイス 形態				?
デバイス	Si	Si	Si	SiC(GaN)?
パワー密度	5~20W/cm ²	20~30W/cm ²	30~80W/cm ²	100W/cm ²
使用温度	125°C	140°C	150°C	200~300°C
封止材	耐熱性 : 150°C 熱伝導率: 2.5W/mk 熱膨張率: 40ppm	耐熱性 : 200°C 熱伝導率: 5.0W/mk 熱膨張率: 40ppm	耐熱性 : 200°C 熱伝導率: 10W/mk 熱膨張率: 30ppm	耐熱性 : 300°C 熱伝導率: 15W/mk 熱膨張率: 15ppm
信頼性 評価	構造解析	電気・熱・構造 一貫設計手法確立	電気・熱・構造 およびプロセス 一貫設計手法確立	SiC実装を対象とした 新材料接合技術の 信頼性評価手法確立
接合技術	材料: はんだ 方式: 溶融	材料: 鉛フリーはんだ 方式: 溶融	材料: 高温はんだ 方式: 溶融	材料: Au, Ag/鉛 方式: 焼結



■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

<p>次世代パワー半導体</p>																			
<p>次世代パワー半導体実装の課題</p> <p>SiCやGaNによる作動温度の高温化 (200~300℃)</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓材料の信頼性(耐熱性、疲労強度) ✓異種材料接合部の信頼性 (線膨張係数差に起因したミスマッチの増大) ✓他の破壊モードの顕在化 (クリープ破壊など) 																			
<p>パワエレ実装信頼性の課題</p>																			
<p>線膨張係数</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Materials</th> <th>CTE (ppm/K)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Bi-42Sn</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Sn-37Pb</td> <td>21</td> </tr> <tr> <td>Sn-3.5Ag</td> <td>22-30</td> </tr> <tr> <td>95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu</td> <td>17 (< 100 C)</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>FR4</td> <td>13</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>4.2</td> </tr> <tr> <td>AlN</td> <td>4.6</td> </tr> </tbody> </table>	Materials	CTE (ppm/K)	Bi-42Sn	15	Sn-37Pb	21	Sn-3.5Ag	22-30	95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu	17 (< 100 C)	Cu	16	FR4	13	Si	4.2	AlN	4.6	
Materials	CTE (ppm/K)																		
Bi-42Sn	15																		
Sn-37Pb	21																		
Sn-3.5Ag	22-30																		
95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu	17 (< 100 C)																		
Cu	16																		
FR4	13																		
Si	4.2																		
AlN	4.6																		
<p>線膨張係数のミスマッチ</p> <p>部品(線膨張係数: 小) $\epsilon = (\alpha_{comp} - \alpha_{sub})\Delta T$</p> <p>基板(線膨張係数: 大)</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓材料特性のミスマッチにより発生 ✓接合部(はんだ)の特性には無関係 ✓塑性変形の繰り返し 																			

■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

<p>はんだ接合部の変形メカニズム</p> <p>グローバル ローカル</p> <p>低温時(40°C) 高温時(125°C)</p> <p>チップの線膨張 はんだの線膨張</p>	
<p>EBSD(1300 cycle TCT)</p> <p>Boundary levels: 15° 200.0 μm = 100 steps IPF [001]</p> <p>110 001</p>	
<p>EBSD 2/2 (1300 cycle TCT)</p> <p>110 001</p>	
<p>低サイクル疲労</p> <p>低いサイクル数での疲労破壊 ($N_f < 10^4$)</p> <p>Coffin-Manson's law $\Delta \epsilon_p = C N_f^{-\alpha}$</p>	
<p>Manson-Coffin則</p> <p>$\Delta \epsilon_p \cdot N^\alpha = C$ $C \propto \epsilon_f$: 静的破断延性 $\text{slope} = -1/2$</p>	

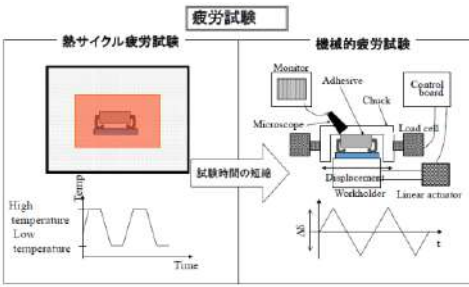
■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

Mansonの共通勾配法

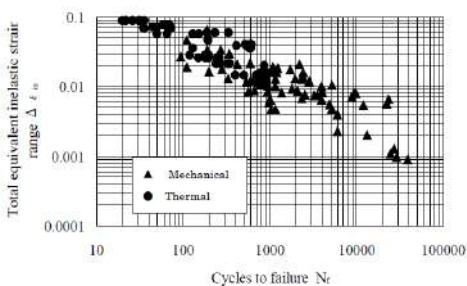
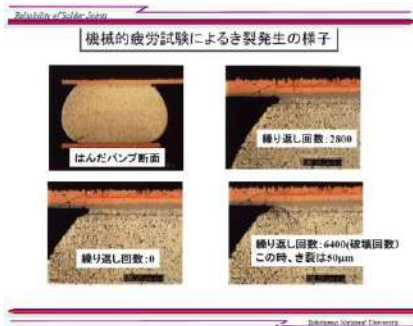
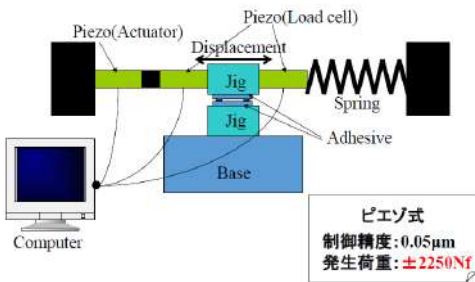
・破断ひずみと引張強度、ヤング率から推定

$$\Delta \varepsilon_t = 3.5(\sigma_B / E) N_f^{-0.12} + \varepsilon_f^{0.6} N_f^{-0.6}$$

↑ 引張強度 ↑ ヤング率 ↑ 破断延性
 破断時の伸びから算出



Isothermal fatigue-testing equipment

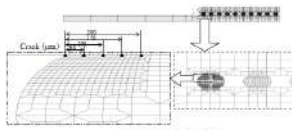
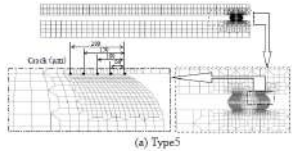


■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

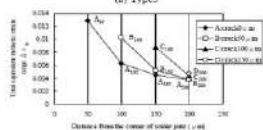
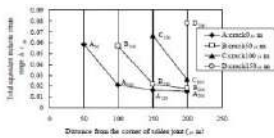
損傷被害則(マイナー則)

- 実際の荷重: 様々な負荷変動の組み合わせ
- 変動荷重による疲労寿命の推定
累積被害則
- 接合部のき裂進展解析

$$\sum_{i=1}^M \frac{n_i}{N_i} = 1$$

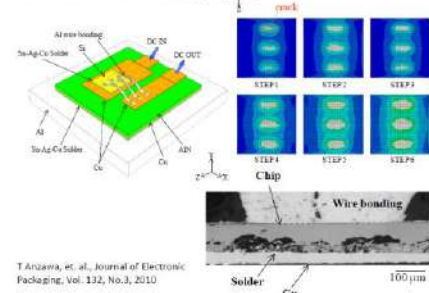


(b) BGAアセンブリ
接合界面のき裂を模擬した解析モデル

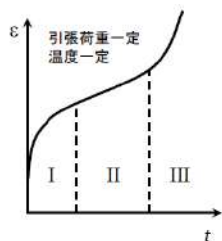


(b) BGAアセンブリ
き裂の進行方向(接合界面)に対する各点近傍に生じる
非線形ひずみ振幅の平均値 $\Delta\epsilon_{ZAV}$ の分布

パワーデバイスでの評価事例



クリープ



- I. 遷移クリープ
- II. 定常クリープ
- III. 加速クリープ

Norton's Law
 $\dot{\epsilon} = A\sigma^n$

■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

<p>Deformation map 単軸引張</p>	
<p>定応力クリープ試験</p>	
<p>クリープ定数(A)、指数(n)の求め方(ひずみ速度一定時)</p> <p>各温度においてひずみ速度が最小2パターンが必要</p>	
<p>クリープ定数(A)、指数(n)の求め方(保持時)</p> <p>各温度において1パタンのひずみ速度でクリープ材料特性(A,n)が求められる</p>	
<p>クリープ破壊</p> <ul style="list-style-type: none"> 高温低応力状態で発生する変形(クリープ) 粒界すべりや拡散により空洞(キャビティ)の形成/成長 クリープき裂の発生 	

■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

<p style="text-align: center;">Bonding wire lift-off</p>  <p style="text-align: center;">Typical length of the joint*</p> <p><small>*M. Ciappa / Microelectronics Reliability 42 (2002) 653-657</small></p>	
<p style="text-align: center;">Bonding wire heel cracking</p>  <p><small>M. Ciappa / Microelectronics Reliability 42 (2002) 653-667</small></p> $\epsilon_f = \frac{r}{\rho_0} \left(\frac{\cos^{-1}(\cos \Psi_0)(1 - \Delta T \Delta \alpha)}{\Psi_0} - 1 \right)$	
<p style="text-align: center;">Die attach 接合材の信頼性</p> <p>✓高温材料の多様化 ✓はんだ接合 ✓Agナノシンター材</p>	
<p style="text-align: center;">Agシンター接合材</p>  <p>高純度、高強度な接合材 Ag遷移で応力を緩和</p> <p>温度サイクルによる、高耐熱接合部の疲労特性の評価手法</p> <ul style="list-style-type: none"> 接合部は数μm程度の薄膜接合構造となっている メッキなどの、数μm程度の微小な構造から破壊が生じていることが確認 微小な構造が信頼性に影響を与える可能性がある 	
<p style="text-align: center;">Agシンター材の構造解析</p>  <p>相当位置はずみ (物性は一般的なバレルAgを適用)</p>	

■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

<h3 style="text-align: center;">Agシンター材の破壊モード</h3> <p>1. 焼成でのAgナノ粒子層の亀裂長さがAu基板よりAl2O3基板の方が長い 2. 焼成でのAgナノ粒子層の亀裂長さがサイクル数の増加とともに長くなった 3. ナノ粒子層の亀裂によるチップ直下でのAu層部分の亀裂 4. チップの破壊が起っていた 5. 2000サイクル後の材料のチップ直下のAu層に亀裂が起っていた</p>																																
<h3 style="text-align: center;">封止樹脂の信頼性</h3> <p>✓ 伸びは数%程度。塑性挙動はほとんど見られない。 ⇒熱膨張係数による強制的なひずみに対して不利。</p> <p>✓ プロセス依存性が大きい。界面の接合状態は不完全接合状態になる。 ⇒界面密着評価が複雑になる。</p>																																
<p>Table Mechanical properties</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Sample</th> <th colspan="3">Flexural properties</th> </tr> <tr> <th>Strength [MPa]</th> <th>Modulus [GPa]</th> <th>B. E. [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A¹⁾</td> <td>143</td> <td>16.8</td> <td>1.40</td> </tr> <tr> <td>B¹⁾</td> <td>94</td> <td>12.1</td> <td>1.26</td> </tr> <tr> <td>C¹⁾</td> <td>123</td> <td>12.5</td> <td>1.75</td> </tr> <tr> <td>D²⁾</td> <td>112</td> <td>9.6</td> <td>0.80</td> </tr> <tr> <td>E²⁾</td> <td>132</td> <td>9.8</td> <td>0.92</td> </tr> <tr> <td>F¹⁾</td> <td>122</td> <td>11.8</td> <td>2.00</td> </tr> </tbody> </table> <p>1) Size of specimens flexural tested: 41.5×10.00×2.00mm 2) Size of specimens flexural tested: 41.5×10.00×4.00mm</p> <p style="text-align: right;">KAMOME Phase 3, 封止樹脂WG資料より</p>	Sample	Flexural properties			Strength [MPa]	Modulus [GPa]	B. E. [%]	A ¹⁾	143	16.8	1.40	B ¹⁾	94	12.1	1.26	C ¹⁾	123	12.5	1.75	D ²⁾	112	9.6	0.80	E ²⁾	132	9.8	0.92	F ¹⁾	122	11.8	2.00	
Sample		Flexural properties																														
	Strength [MPa]	Modulus [GPa]	B. E. [%]																													
A ¹⁾	143	16.8	1.40																													
B ¹⁾	94	12.1	1.26																													
C ¹⁾	123	12.5	1.75																													
D ²⁾	112	9.6	0.80																													
E ²⁾	132	9.8	0.92																													
F ¹⁾	122	11.8	2.00																													
<h3 style="text-align: center;">DMA特性</h3> <p>Fig. DMA charts of resins 材料厚さ (D,E:4mm, 他 2mm)</p>																																
<h3>密着強度試験概要</h3> <p>解析対象: プリンカップ試験</p> <p>治具を用いて水平に押し出し、樹脂と基板の界面をせん断分離</p> $P = \frac{F}{S}$ <p>P: 密着強度[kg/mm²]or[MPa] F: 所乗荷重[kg]or[N] S: 密着面積[mm²]</p>																																

■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

有限要素解析(弾性解析)

降伏応力 [143MPa]
 相当応力分布
 最大相当応力 > 降伏応力 (373MPa)

- ・密着面端部に応力が集中
- ・端部においては法線方向への引張応力が支配的

応力 [MPa]
 弾出し負端部からの距離 [mm]

相応力分布
 0 400 [MPa]

最大相当応力 > 降伏応力 (373MPa) (143MPa)
 密着面端部に応力が集中
 端部においては法線方向への引張応力が支配的
 応力性が低く弾性変形のみ起こる場合には引張り荷重によるはく離モード

はく離の様子

変形スケール100倍
 はく離開始前 是く離開始直後 是く離継続中
 変形スケール1倍 (実寸位置)

4.21 [μm]
 0

樹脂/銅基板の信頼性評価

・樹脂には1/4モデルを使用

部材	材料	ヤング率[GPa]	ポアソン比	メッシュサイズ[mm]
封止樹脂	Resin	-	-	1.0(接着面:0.5)
板	Cu	120	0.3	1.0
フレーム	Cu	120	0.3	1.0

KAMOME Phase 3, 封止樹脂WG資料より

応力解析の例

TCT 225°C 最大応力箇所
 TCT -40°C 最大応力箇所
 最大応力 12.7[GPa]
 最大応力 3.93[GPa]

KAMOME Phase 3, 封止樹脂WG資料より

界面はく離の例

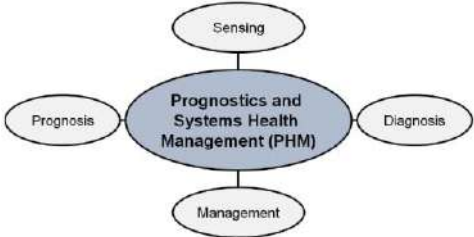
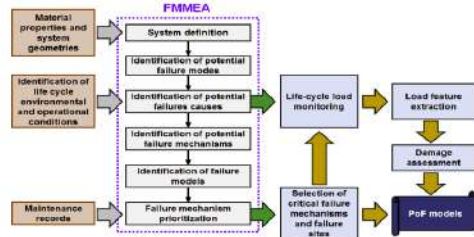
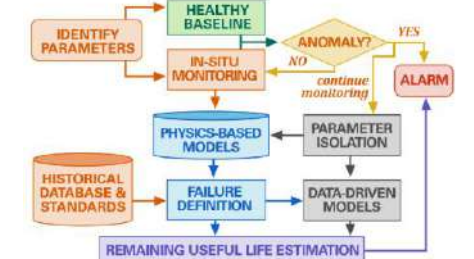
反射像 (15MHz) 透過像 (15MHz)
 樹脂中のボイド 一部はく離している 表面のボイド

KAMOME Phase 3, 封止樹脂WG資料より

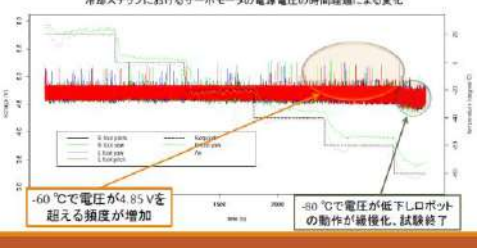
■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

<p>Observation of Interfacial Structure</p>	
<p>樹脂-シリコンの接合層の観察</p>	
<p>実験と解析結果の比較</p>	
<p>リフロー工程を考慮したCSPの信頼性評価</p> <p>基板実装後のパッケージの反りの計測</p> <p>デジタル画像相関法による基板実装後のパッケージの反りの計測</p> <p>25°C → 25°C → 125°Cの時のパッケージの反りを測定する</p> <p>方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ①加工厚さ→490 μm ②銅厚4.5 μm (厚さ) (厚さ)→4 μm ③銅厚(厚さ)→1.8 μm (厚さ) ④Cu厚→7000 Å ⑤Cu厚(厚さ)→0.5 μm ⑥Cu厚(厚さ)→0.5 μm ⑦Cu厚(厚さ)→0.5 μm ⑧Cu厚(厚さ)→0.5 μm ⑨Cu厚(厚さ)→0.5 μm ⑩Cu厚(厚さ)→0.5 μm 	

■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

<p>パワーエレクトロニクスの故障モード</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 接合部の高温強度 はんだ接合、ボンディングワイヤー ✓ 接合部の多様化 高温はんだ、Agシンター材 ✓ 封止樹脂の信頼性 材料の耐熱性、密着強度 																
<p>実装信頼性の課題と将来</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Current</th> <th>Future</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>信頼性試験</td> <td>想定されたモードを対象とする信頼性試験 (MIL規格等)</td> <td>想定外を考慮した極限環境試験による脆弱性診断</td> </tr> <tr> <td>維持管理技術</td> <td>定期点検(TBM) 状態監視(CBM)</td> <td>使用環境を考慮した故障予知(リスクベース)</td> </tr> <tr> <td>余寿命診断</td> <td>想定された負荷に対する定量評価</td> <td>モニタリングによる想定外の負荷にも対応した評価</td> </tr> <tr> <td>IoT社会への対応</td> <td>個々の信頼性のポトムアップにより信頼性を確保</td> <td>異なる電子製品間の複合的な故障も考慮した診断手法の開発</td> </tr> </tbody> </table>		Current	Future	信頼性試験	想定されたモードを対象とする信頼性試験 (MIL規格等)	想定外を考慮した極限環境試験による脆弱性診断	維持管理技術	定期点検(TBM) 状態監視(CBM)	使用環境を考慮した故障予知(リスクベース)	余寿命診断	想定された負荷に対する定量評価	モニタリングによる想定外の負荷にも対応した評価	IoT社会への対応	個々の信頼性のポトムアップにより信頼性を確保	異なる電子製品間の複合的な故障も考慮した診断手法の開発	
	Current	Future														
信頼性試験	想定されたモードを対象とする信頼性試験 (MIL規格等)	想定外を考慮した極限環境試験による脆弱性診断														
維持管理技術	定期点検(TBM) 状態監視(CBM)	使用環境を考慮した故障予知(リスクベース)														
余寿命診断	想定された負荷に対する定量評価	モニタリングによる想定外の負荷にも対応した評価														
IoT社会への対応	個々の信頼性のポトムアップにより信頼性を確保	異なる電子製品間の複合的な故障も考慮した診断手法の開発														
<p>PHMの基本要素</p> 																
<p>FMMEAによる故障予知</p> 																
<p>モニタリングを取り入れた故障予知</p> 																

■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

<h3>High Accelerated Limit Test (HALT)</h3>  <p>特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計段階での製品に潜む弱点の顕在化 製品の部品ごとでなくシステム全体としての評価 信頼性試験に比べて短期間での評価 (市場不良の再現) 	
<h3>HALTの一般的な手順</h3> <ul style="list-style-type: none"> 冷却ステップ <ul style="list-style-type: none"> -10℃/10 min, -100℃まで降温可能 このステップで製品の低温側の限界を調べる 加熱ステップ <ul style="list-style-type: none"> +10℃/10 min, +200℃まで昇温可能 このステップで製品の高温側の限界を調べる 振動ステップ <ul style="list-style-type: none"> 10 G_{rms}/10 min, 90 G_{rms}まで振動の印加が可能 このステップで製品の振動に対する限界を調べる 温度急変ステップ <ul style="list-style-type: none"> 高温側は高温限界-10℃, 低温側は低温限界+10℃の範囲で熱衝撃を与える 複合ステップ <ul style="list-style-type: none"> 温度急変ステップと振動ステップを同時に行う 	
<h3>実施例</h3> <p>試料・装置</p> <p>HALT, 電圧計, 小型ロボット(Rapiro[®]), 熱電対</p> <p><small>※Rapiroはマイコン(Arduino), サーボモータ, 距離センサー, 外装からなるロボット</small></p>  <p>実験方法</p> <ul style="list-style-type: none"> 低温ステップで温度は20℃から-20℃/10 minで変化させた ロボットの目的の機能を歩行とHALT装置内で歩行させた 歩行に障害が発生した場合は試験を終了し条件を記録した 足のサーボモータの電源電圧を電圧計, 表面温度を熱電対で測定した 	
<h3>実施例</h3> <p>冷却ステップにおけるサーボモータの電源電圧の時間経過による変化</p>  <p>-60℃で電圧が4.85Vを超える頻度が増加</p> <p>-80℃で電圧が低下しロボットの動作が緩慢化, 試験終了</p>	
<h3>機械学習による異常検知</h3> 	

■ A10 【パワーモジュールの信頼性評価】 渋谷講師

<p>HALTの特徴*</p> <ul style="list-style-type: none"> •従来の信頼性試験では見逃されていた試料の弱点の顕在化 •試料の部品ごとでなくシステム全体としての評価 •故障(フィールド環境)の再現可能性 <p><small>*益田 新彦,未然防止技術におけるHALT/HASS,エレクトロニクス実装学会 Vol. 11 No. 5, 2008</small></p>	
<p>まとめ(信頼性)</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤信頼性工学の基礎 ➤パワーエレクトロニクス実装について顕在化している信頼性 主に接合部の強度と樹脂の密着性 ➤次世代デバイスのための信頼性評価技術 	