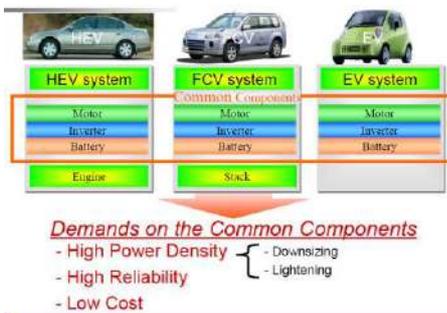
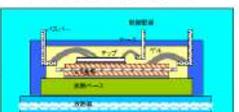
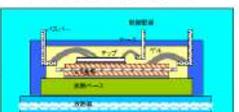
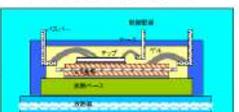


■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

<p>パワーモジュールのシミュレーション</p> <p>于 強 横浜国立大学大学院工学研究院</p>				
<p><b>内容</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 車載用電子機器の高信頼化に向けた解析技術の概要</li> <li>2. 車載パワーモジュールなどの開発における信頼性上の問題点</li> <li>3. 解析事例</li> <li>4. 電気-熱-構造連成解析結果</li> <li>5. はんだ接合部とワイヤボンド部との複合的破壊モード</li> <li>6. 実装プロセスの解析事例</li> <li>7. その他の課題(樹脂はく離、高温実装材料)とまとめ</li> </ol>				
<p><b>背景</b></p> <p>車載用電子機器の信頼性問題</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 小型化と高密度化             <ul style="list-style-type: none"> <li>・パワーモジュールの小型化によって生じる発熱密度の増加</li> <li>・使用温度の高温化</li> </ul> </li> <li>2. 使用する材料の組み合わせの多様化             <ul style="list-style-type: none"> <li>・Sn-Pbと樹脂、金属基板→鉛フリーはんだと樹脂、金属基板</li> <li>・Sn-Ag-Cu → 低コスト高温鉛フリーはんだSn-Cu-Ni系</li> <li>・複合基板、・高温実装材料(高温はんだ、Agナノ、Snナノ、Cuナノ)</li> </ul> </li> <li>3. 使用する条件の多様化             <ul style="list-style-type: none"> <li>・温度サイクル→温度サイクル+パワーサイクル</li> <li>・均一の環境温度変化→環境温度変化+局所発熱</li> <li>・温度負荷+機械的な負荷</li> </ul> </li> </ol>				
 <p><b>Demands on the Common Components</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- High Power Density</li> <li>- High Reliability</li> <li>- Low Cost</li> <li>- Downsizing</li> <li>- Lightening</li> </ul>				
<p><b>パワーモジュールの開発動向1</b></p> <p>産業用モジュールの進化 &lt;小型・低コスト化&gt;</p>  <p>車載用モジュールの進化 &lt;信頼性向上&gt;</p> <table border="0"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <p><b>産業用</b></p> <p>&lt;使用環境&gt; ほぼ一定</p> <p>&lt;構造、材料&gt; Cu回路 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>セラ基板 Cuベース</p> </td> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;">  </td> <td style="vertical-align: top;"> <p><b>車載用</b></p> <p>&lt;使用環境&gt; 様々</p> <p>&lt;構造、材料&gt; Al回路(めっき付) AlN高熱伝導セラ基板 Cu-Meベース(めっき付)</p> </td> </tr> </table>	<p><b>産業用</b></p> <p>&lt;使用環境&gt; ほぼ一定</p> <p>&lt;構造、材料&gt; Cu回路 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>セラ基板 Cuベース</p>		<p><b>車載用</b></p> <p>&lt;使用環境&gt; 様々</p> <p>&lt;構造、材料&gt; Al回路(めっき付) AlN高熱伝導セラ基板 Cu-Meベース(めっき付)</p>	
<p><b>産業用</b></p> <p>&lt;使用環境&gt; ほぼ一定</p> <p>&lt;構造、材料&gt; Cu回路 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>セラ基板 Cuベース</p>		<p><b>車載用</b></p> <p>&lt;使用環境&gt; 様々</p> <p>&lt;構造、材料&gt; Al回路(めっき付) AlN高熱伝導セラ基板 Cu-Meベース(めっき付)</p>		

■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

### パワーモジュール

#### 車載用パワーモジュール

- 車載用製品は産業用製品に比べ使用環境、使用条件が厳しいため車載用製品は高い信頼性が求められている。
- 車載用製品は小型軽量化、低コスト化が求められている。
- 車載用製品は高信頼性を求められているため信頼性評価に時間がかかるため、開発期間が長期になる。

#### 信頼性評価技術

- パワーモジュールの信頼性を解析シミュレーションを用いて評価する技術。
- パワーモジュールの信頼性を評価するには応熱解析、構造解析を実施せねばならず、高度な技術が必要。
- 問題点として解析結果と実機結果との差異が挙げられ、この差異を減少させることが課題である。

小型軽量化と高信頼性を両立させるためには高精度にモジュールを評価するFEM技術

#### パワーモジュールの構造

パワーモジュールの基本構造であるワイヤ接合構造において信頼性評価技術の構築

### Performance Required for Semiconductor

Diversity of customers needs was the driving force behind semiconductor development

High-speed processing

Large memory capacity

Low power consumption

Multi functions & Miniaturization

High resolution

High reliability

### 高性能パワーモジュールの開発において要求される技術の特徴

大型化 ↑ / ↓ 小型化

信頼性

First order

Second order

設計高度化

信頼性評価の定量化

### 出力パワー密度の推移

出力パワー密度 [W/cm<sup>2</sup>]

年

SiC時代

SiCインバータ (10~30W/cm<sup>2</sup>)

サイリスタバルブ

ポード電源

汎用インバータ

ユニット電源

パッケージ電源

HEVインバータ

エアコン用インバータ

	第1世代 '07~'08	第2世代(現状) '08~'09	第3世代 '10~'11	未来世代 '12~'15
デバイス形態				?
デバイス	Si	Si	Si	SiC(GaN)?
パワー密度	5~20W/cm <sup>2</sup>	20~30W/cm <sup>2</sup>	30~80W/cm <sup>2</sup>	100W/cm <sup>2</sup>
使用温度	125°C	140°C	150°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: 1.5ppm
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: 高導はんた 方式: 溶融	材料: Au, Ag+粒子 方式: 焼結

■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

<table border="1"> <tr> <td>接合部温度</td> <td>150℃</td> <td colspan="3">175℃ ~ 300℃</td> </tr> <tr> <td>接合材料</td> <td>鉛リッチはんだ</td> <td>鉛フリー高温はんだ</td> <td>Agナノ粒子</td> <td>Au</td> </tr> <tr> <td>接合工法</td> <td>リフロー</td> <td>リフロー</td> <td>高温加圧</td> <td>高温加圧</td> </tr> <tr> <td>材料特性評価・構造解析・シミュレーション技術</td> <td colspan="2">バルク材データ</td> <td colspan="2">薄膜材料データ</td> </tr> <tr> <td>信頼性評価</td> <td colspan="4">高温放置、熱サイクル、パワーサイクル</td> </tr> </table>	接合部温度	150℃	175℃ ~ 300℃			接合材料	鉛リッチはんだ	鉛フリー高温はんだ	Agナノ粒子	Au	接合工法	リフロー	リフロー	高温加圧	高温加圧	材料特性評価・構造解析・シミュレーション技術	バルク材データ		薄膜材料データ		信頼性評価	高温放置、熱サイクル、パワーサイクル				
接合部温度	150℃	175℃ ~ 300℃																								
接合材料	鉛リッチはんだ	鉛フリー高温はんだ	Agナノ粒子	Au																						
接合工法	リフロー	リフロー	高温加圧	高温加圧																						
材料特性評価・構造解析・シミュレーション技術	バルク材データ		薄膜材料データ																							
信頼性評価	高温放置、熱サイクル、パワーサイクル																									
<p><b>車載用電子・パワー部品における要求</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•高信頼性の高効率評価手法の確立 (開発期間の短縮と大量生産)</li> <li>•設計品質の保証技術の確立 (プロセスなどの高精度の評価技術)</li> <li>•新材料の効率かつ実用的な評価技術 (新構造と新材料の導入)</li> </ul>																										
<p>車載用電子・パワー部品における実装工学確立の可能性</p> <p>全プロセスを考慮した評価技術</p>																										
<p>BGAはんだ接合部の実装信頼性に与えるボイドの影響</p> <p>CSP試験片(はんだ材:SnAgCu)    はんだ接合部の断面</p> <p>試験片1    試験片2</p> <p>各試験片に与えられた相対変位      試験片1 5.00μm      試験片2 3.77μm</p>																										
<p>機械的せん断疲労試験の結果(試験片1)</p> <p>ボイドなし</p> <p>試験前    試験後(1100cycle)</p> <p>チップ側Φ80μm(チップ側ランド直径の30%)</p> <p>試験前    試験後(750/1100cycle)</p>																										

■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

### Results of shear fatigue test(1)

Low position void (Φ110μm)  
 Before test / After test (1150 / 920cycle)

Low position void (Φ100μm)  
 Before test / After test (950 / 920cycle)

Y-Laboratory Yokohama National University

### 機械的せん断疲労試験の結果(試験片2)

チップ側Φ140μm(チップ側ランド直径の60%)

試験前 / 試験後(1100/1600cycle)

基板側Φ140μm

試験前 / 試験後(1650/1600cycle)

Y-Laboratory Yokohama National University

### ボイドのサイズと位置の影響

試験片1: ボイドの直径(μm) vs 疲労寿命(Cycle)

試験片2: ボイドの直径(μm) vs 疲労寿命(Cycle)

ボイドなし / チップ側のボイド / 基板側のボイド

Y-Laboratory Yokohama National University

### はんだ接合部の解析モデル(1/2モデル)

	Element	Node
はんだ接合部	28409	5500
全体	99701	19372

解析条件  
 上側の面: Y、Z軸方向拘束  
 下側の面: X、Y、Z軸方向拘束

Y-Laboratory Yokohama National University

### 解析モデル

ボイドなし

チップ側Φ80μm (チップ側ランド直径の30%)

基板側Φ80μm (チップ側ランド直径の30%)

チップ側Φ140μm (チップ側ランド直径の60%)

Y-Laboratory Yokohama National University

■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

はんだ接合部の塑性ひずみ分布

Y. Lohmeyer Yokohama National University

はんだ接合部の疲労寿命

サイクル数	792cycle (0.5)	1337cycle (0.8)	1595cycle (1.0)	1953cycle (1.2)
-------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------

Y. Lohmeyer Yokohama National University

Comparison of experimental and analytical results

Void size	High $\Phi 80\mu\text{m}$	High $\Phi 140\mu\text{m}$	Low $\Phi 80\mu\text{m}$
Effect on life	16% drop	50% drop	20% rise

Y. Lohmeyer Yokohama National University

解析事例

有限要素解析(FEM)を用いた信頼性評価法

- パワーモジュールの小型軽量化が進むなか、チップに発熱量を均一に与える温度分布や冷却性能を評価するだけでは不十分
- 本解析ではパワーモジュール使用時に発生する不均一な温度分布を再現し、さらに熱応力により発生するひずみ(変形)が生じる様子を再現することができる
- パワーモジュールに発生するひずみを考慮することで、ひずみの進展モードや変形に発生する複雑な温度分布を再現し、より高精度な信頼性評価を可能にする

ワイヤ接合構造

チップ下はんだ接合部	ワイヤボンダ部
<ul style="list-style-type: none"> <li>結核部は熱膨張、電気性能に影響しない</li> <li>ひずみが進展すると冷却性能の低下、電気伝導の悪化</li> <li>ひずみが進展すると信頼不良を引き起こす</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>接合面積がはんだ面に比し非常に小さい</li> <li>小型のひずみが発生すると断裂してしまうため、信頼性に大きく影響</li> <li>ひずみは伝熱性能を大きく低下させる</li> </ul>

FEMを用いたパワーデバイスの変化を考慮した信頼性評価法の開発  
 はんだ接合部とワイヤボンダ部における複合的破壊メカニズムの特定  
 パワーデバイスの信頼性に影響する因子(はんだ接合部、ワイヤボンダ接合部)を特定することにより、高精度な信頼性評価法を提案する

解析フロー

各特性を連成させることで、初めて高精度な信頼性評価が可能となる

多尺度シミュレーション

- 電気-熱連成解析
- き裂進展モデル
- き裂進展解析
- 熱-構造連成解析
- 非線形ひずみデータ (非線形ひずみデータ)

各接点の温度分布データ

多尺度シミュレーションにより劣化(き裂進展)を考慮した信頼性評価解析が可能となる

■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

### Manson-Coffin則とMinar則

**Manson-Coffin則(SnAgCu)**  
 非線形ひずみから疲労寿命を算出する

$$N_f = 1000 \left( \frac{\Delta \epsilon_p}{0.01} \right)^{-1.24}$$

$N_f$ : 疲労発生寿命  
 $\Delta \epsilon_p$ : 非線形ひずみ振幅

例:  $\Delta \epsilon_p = 0.01$ であれば、左の式より、1000cycleであることが分かる  
 ⇒ 本研究室では初期き裂の長さ(μm)に達したときのサイクル数をき裂発生寿命と定義している

**Minar則**  
 複数のひずみ振幅(Δε)が加えられた場合、あるレベルの疲労寿命(N<sub>f</sub>)に対する累積損傷率(q)を次式で定義する:

$$q = \sum \left( \frac{\Delta \epsilon_i}{\Delta \epsilon_{ref}} \right)^m$$

例: ほんた接合部に疲労寿命N1=1000、N2=2000であるひずみ振幅レベルΔε1、Δε2をそれぞれ50%加えた場合の累積損傷率はq=0.75となる

累積損傷率: q 繰り返し数: N  
 疲労寿命: N<sub>f</sub>

⇒ q=1になったときに破壊が生じるものと考える

### Manson-Coffin則

Manson-Coffin's law

$$N_f = 1000 \left( \frac{\Delta \epsilon_p}{0.01} \right)^{-1.24}$$

$$\Delta \epsilon_p = 1000 \left( \frac{1}{N_f} \right)^{-0.79}$$

純Alの疲労強度はSn-Ag-Cuほんたの2~5倍高い

### 疲労特性の定量評価

**熱サイクル疲労試験**

試験時間が4~5ヶ月以上必要となるため、多大な労力と時間が必要とされる

**機械的疲労試験**

ほんた材料の特性(降伏応力、クリープ特性など)の温度依存性、時間依存性などを考慮した応力・ひずみ計量から得られた非線形ひずみ振幅を用いて、熱サイクルの平均温度などに関係なく統一した熱疲労強度評価法によって、ほんた接合部の熱サイクル熱疲労強度を評価することができる

⇒ 実装置においてはほんた接合部に機械的疲労を負荷する。熱サイクルは費用をかけるほんた接合部に与える熱ひずみ(非線形ひずみ)を100%とする。よって、ほんた接合部の熱疲労強度評価を評価することができる

本研究室では実用的なほんた接合部の寿命評価手法の確立を目指してきた

### 機械的疲労試験によるManson-Coffin則の導出

試験片: 上層の銅層がはんだの試験片を熱で作り出す

1. ビデオカメラを用いた試験機によりサンプルに変位を加えた。変位量を量えることで多くのサンプルについてデータの抽出を行った。
2. 試験中におけるほんた(上層と下層の変位差)を取り、き裂が発生した際のサイクル数を取得することで、疲労寿命サイクル数と相対変位の関係を抽出した。

疲労寿命サイクル数 ⇔ 相対変位

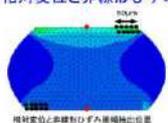
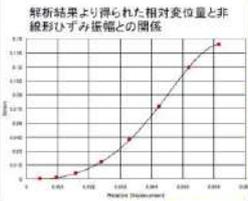
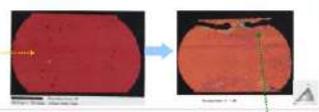
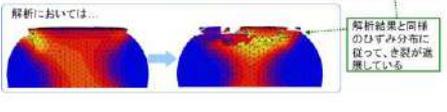
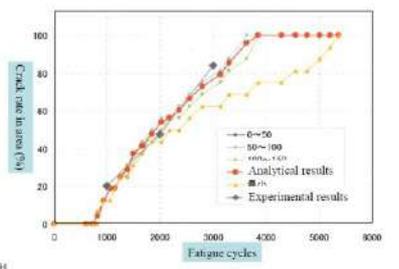
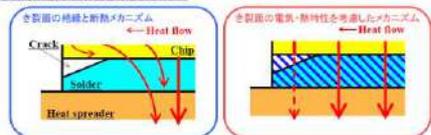
### 機械的せん断疲労解析によるひずみ振幅値の抽出

BGA試験片のFEAモデルを用いることで相対変位とひずみ振幅値の関係を抽出した  
 ほんたは弾塑性クリープ体とし、その他については弾性体として解析を行った  
 変位量を量えることで複数のデータの抽出を行った

	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	CTE [10 <sup>-6</sup> / °C]
Sn-Cu	50	0.3	26
Cu	129	0.3	16.7
Fl4	22.8	0.19	15

Sn-Cu系はほんた  
 Bond(F4)

■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

<p>相対変位と非線形ひずみ振幅値抽出方法</p>  <p>相対変位</p> <p>解析ステップの1ステップ目と4ステップ目の結果より、赤点の位置の変位差で抽出した</p> <p>非線形ひずみ振幅</p> <p>2ステップ目と4ステップ目の結果より、黒点の位置の平均値で抽出した。下側に比べ、上側のほうがひずみ振幅値が大きかったため、上側の値を用いた</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Step</th> <th>Displacement[mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.002</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>-0.002</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.002</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>-0.002</td> </tr> </tbody> </table> <p>相対変位量 ↔ 非線形ひずみ振幅</p>	Step	Displacement[mm]	1	0.002	2	-0.002	3	0.002	4	-0.002	
Step	Displacement[mm]										
1	0.002										
2	-0.002										
3	0.002										
4	-0.002										
<p>相対変位と非線形ひずみ振幅値抽出結果</p> <p>解析結果より得られた相対変位量と非線形ひずみ振幅との関係</p>  <p>せん断試験と解析の結果からManson-Coffin則の導出が行える</p> <p>機械的せん断疲労試験</p> <p>疲労寿命サイクル数 ↔ 相対変位量</p> <p>機械的せん断疲労解析</p> <p>相対変位量 ↔ 非線形ひずみ振幅</p> <p>疲労寿命サイクル数 ↔ 非線形ひずみ振幅</p>											
<p>実験との比較</p> <p>Sn-Ag-Cuはんだの場合</p> <p>実験においては...</p> <p>非常に小さい部品であるため、全体が一様に冷却され、単結晶に近い状態になっている</p>  <p>解析においては...</p> <p>解析結果と面積のひずみ分布に従って、き裂が進展している</p> 											
<p>Confirmation of analytical results by experimental data</p>  <p>34</p>	<p>レ</p>										
<p>き裂進展部要素分割</p> <p>き裂面の電気・熱特性を考慮したモデル</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>本解析事例では、はんだ接合部の要素を削除(不活性化)することによりき裂の進展を再現している</li> <li>き裂面が絶縁、断熱状態ではクラック発生部(要素削除部)には熱伝導、電気伝導能力がなく、クラック発生による温度上昇が過多になってしまう</li> <li>クラックが発生するはんだ接合部には要素を二重にすることで、クラックが発生しても一方の要素がわずかな熱伝導、電気伝導能力を有するために過多な温度上昇はみられない</li> </ul>											



■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

### き裂進展解析結果

銅線ワイヤ構造体

はんだ中央部温度上昇

- 上図ははんだ部銅線ワイヤ構造体であり、白色の部分がき裂部分である
- 図から大きなき裂が発生していたはんだ中央部からき裂が発生し、中央部のき裂がある程度進展したもにはんだ外周部にもき裂が進展している
- はんだ中央部の温度はき裂が進展すると上昇する

### き裂進展解析結果 (Wire Structure Model)

銅線ワイヤ構造体

ワイヤボンド部温度上昇

- 上図はワイヤボンド部銅線ワイヤ構造体である
- ワイヤのき裂は①チップと接続される面に発生する
- ワイヤボンド部にき裂が発生すると温度の上昇が過度である

### 疲労寿命算出

Sn:  $N_f = 10000 \left( \frac{\Delta \sigma}{\sigma_{TS}} \right)^{-10}$

Cu:  $N_f = 10000 \left( \frac{\Delta \sigma}{\sigma_{TS}} \right)^{-10}$

はんだ中央部温度

評価パス

- 右下図に示すように、はんだ中央部からき裂発生までの評価パスを作成する
- 評価パス上の各節点で、①②③④を評価することで、はんだ部の疲労寿命を算出する
- ①②③④が疲労寿命であり、き裂が発生すると、①②③④で評価することができた
- ワイヤボンド部の疲労寿命ははんだ部と比べ、高寿命であることがわかった

### はんだ接合部とワイヤボンド部との複合破壊

温度上昇 (ワイヤボンド部)

ワイヤボンド部疲労寿命

Sn:  $N_f = 10000 \left( \frac{\Delta \sigma}{\sigma_{TS}} \right)^{-10}$

Cu:  $N_f = 10000 \left( \frac{\Delta \sigma}{\sigma_{TS}} \right)^{-10}$

Sn-Cu:  $N_f = 10000 \left( \frac{\Delta \sigma}{\sigma_{TS}} \right)^{-10}$

- はんだのき裂が進展することでワイヤボンド部の温度上昇がみられる
- 特にはんだのき裂が大きく進展するとワイヤ部温度に影響を及ぼす
- はんだのき裂が進展による温度上昇のため、ワイヤ部が疲労し、疲労寿命に影響が表れた
- はんだのき裂はワイヤ部疲労寿命に大きな影響はないが、高サイクルでは大きな影響を与える

### 設計因子が信頼性に与える影響

サンプリング

- パワーデバイスの信頼性に影響する因子(はんだ接合部、ワイヤ接合部)を特定するためにパラメータを変更させ、結果をおこなう
- はんだ厚さ、印加電流を右表のように設定する
- 各モデルにおいて、はんだ接合部及びワイヤ接合部の疲労寿命を比較する

モデル番号	はんだ厚さ(mm)	印加電流(A)
Model 1	50	80
Model 2	50	80
Model 3	50	80
Model 4	100	80
Model 5	100	80
Model 6	100	80
Model 7	100	40
Model 8	100	50
Model 9	100	60

■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

<p style="text-align: center;"><b>クラスター分析結果</b></p> <p>クラスター分析</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>特性値にてクラスター分析</li> <li>ほんだ厚みによらず、発生する熱による影響が強い</li> <li>温度が上昇するにつれ、ほんだ及びワイヤの寿命が短くなる</li> <li>より高温になるとほんだ、ワイヤのき裂発生時期は同等となる</li> </ul>	
<p style="text-align: center;"><b>プロセス評価の事例</b></p> <p style="text-align: center;">Problem in thermal fatigue reliability</p> <p>The fatigue lives show large scatter in the thermal cycle test</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Solder joints are minute and complex shape. It is difficult to evaluate the dispersion of solder joint shape by an experimental approach.</li> </ul> <p>To establish the evaluation technique for the dispersion of solder joint reliability in chip components by using a simulation approach.</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Contents of study</b></p> <p>Dispersion of solder joint shape mainly depends on manufacturing process.</p> <p style="text-align: center;">Reflow process of a chip component</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reflow process simulation by CFD (Computational Fluid Dynamics) code. The dispersion of solder joint shape was evaluated.</li> <li>2. Evaluation of thermal fatigue life by thermo-mechanical FEA. The relation between the shape and fatigue life of solder joint was evaluated.</li> <li>3. Application of these method to a worst-case evaluation</li> </ol>	
<p style="text-align: center;"><b>Development of reflow process simulation</b></p> <p style="text-align: center;">~ Evaluation of material properties ~</p> <p>Contact angle : <math>\theta</math>, Surface tension : <math>\Gamma</math>          (Solder material: Sn-3.0Cu-0.5Ag)</p> <p><b>Spreading test</b></p> <p><b>Wetting balance test</b></p> <p>Contact angle <math>\theta</math> : 32.5°, Surface tension <math>\Gamma</math> : 0.47N/m</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Development of reflow process simulation</b></p> <p style="text-align: center;">~ Analysis model ~</p> <p>Analytical model (3216 chip component)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Initial condition of solder was set as a fluid.</li> <li>It computed until the equilibrium of force could be established.</li> <li>The chip component was defined as a moving object to consider the movement of component with solder melting.</li> </ul>	

■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

### Development of reflow process simulation ~ Analysis results ~

Analysis result (Animation)

Final shapes of solder joint

Analysis Experiment

Comparison of analysis and experiment results

	a	b	c	d
Analysis	252	550	550	25
Experiment	257	559	554	23

The analyzed solder shapes agreed well with experimental result.

### Dispersion evaluation of solder joint shapes ~ Analysis models ~

Factors that influence the dispersion of solder joint shape

- Mounting offset of chip
- Electrodes unbalance
- Solder volume unbalance

Level-A, Level-B, Level-C

Factor	Reference	Level-A	Level-B	Level-C
Mounting offset [μm]	0	100	200	300
Electrode length [μm]	Left	400	500	550
	Right	400	400	350
Solder Volume [%]	Left	100	100	100
	Right	100	93.33	86.67

### Dispersion evaluation of solder joint shapes ~ Analysis results ~

Analyzed solder joint shapes at Level-C

Relation between the level of dispersion and dimensional ratio of both solder joints

- The level of asymmetry changes greatly on reaching Level-C.
- The thickness of solder layer under the electrode is small in the solder joint with large width of the fillet.

### Dispersion evaluation of solder joint shapes ~ Verification by actual production ~

The shapes of cluster 2 and cluster 3 were the same as the shape of asymmetrical solder joints obtained by the simulation.

Hierarchical cluster analysis: A method to classify the objects into clusters that have similar characteristics.

### Relation between the shape and fatigue life ~ FEA model and condition ~

Simulated solder shapes → Thermo-mechanical FEA

FEA condition

- The temperature range: +125°C ~ -40°C
- The time of temperature change: 15min.cool
- The dwelling time: 3min.hold

■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

### Relation between the shape and fatigue life ~ Crack path simulation ~

Number of cycles to not only fatigue crack initiation but also crack propagation was evaluated.

Results of a crack path simulation (Reference model)

Removed elements which satisfied no criteria of fatigue damage

Manson-Coffin's law  $N_f = A \times (\Delta \epsilon_p / \epsilon_0)^{-b}$  Miner's rule  $\eta = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{f,i}}$

Final Fatigue life of solder joint

Relation between the cyclic numbers and the crack length

Extracted line of inelastic strain range,  $\Delta \epsilon_p$  (solder's case strain range)

### Relation between the shape and fatigue life ~ Analysis results ~

Difference of failure mode

Failure mode: Solder layer along the side of electrode

Failure mode: Solder layer crossing the fillet

When the shape of two solder joints differed greatly and the volume of solder fillet decreased, the fatigue cracks propagated into the solder fillet.

Fillet cracking mode

### Worst-case evaluation

Analytical conditions

No.	Electrode length [mm]	Solder volume [%]	Other joint		
1	500	300	100	100	0
2	400	400	100	90	0
3	400	400	100	100	300.0
4	400	300	100	90	0
5	400	300	80	100	0
6	500	300	100	100	300.0
7	500	300	100	100	300.0
8	400	400	100	90	300.0
9	400	400	80	100	300.0
10	500	300	100	90	300.0
11	600	300	100	80	300.0
12	600	300	80	100	300.0
13	600	300	80	100	300.0

Reflow process simulation

Thermo-mechanical FEA

Evaluation of the final fatigue life of solder joint

Several combinations when each factor was level C were examined and the worst-case condition that the fatigue life decrease most was investigated.

### Worst-case evaluation

Final fatigue life

No.	Electrode length [mm]	Solder volume [%]	Other joint	Failure mode: Size of electrode	Failure mode: Solder Fillet
1	500	300	100	0.0	0.0
2	400	400	100	0.1	0.1
3	400	400	100	0.0	0.0
4	400	300	100	0.1	0.1
5	400	300	80	0.1	0.1
6	500	300	100	0.0	0.0
7	500	300	100	0.0	0.0
8	400	400	100	0.1	0.1
9	400	400	80	0.1	0.1
10	500	300	100	0.0	0.0
11	600	300	100	0.1	0.1
12	600	300	80	0.1	0.1
13	600	300	80	0.1	0.1

Equivalent final fatigue life

Efficient and practicable evaluation of worst-case could be carried out.

### 新たな信頼性問題

【はんだの動向】

車載用電子部品等において求められる条件

- ・低コスト (Sn-Ag-Cu → Sn-Cu系)
- ・FR4基板 → Al基板 (基板の多様化)
- ・大型の電子部品 (パワーデバイス)

Sn-Ag-Cuはんだ

Sn-Cu(+α)4元はんだ

- ・Agを含まないため低コスト
- ・食われ現象が起こりにくいため、設備のランニングコストを抑えられる

Sn-Cu(+α)4元はんだ

■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

<p><b>Sn-Cu系はんだManson-Coffin則導出結果</b></p> <p>試験片形状のばらつきによるものを考慮しても、寿命にばらつきが生じている...</p> <p>↓</p> <p>き裂発生後のサンプルを見直してみると、き裂が発生している領域にいくつかの破壊モードが確認できた</p> <p>↓</p> <p><b>破壊モードの違いによる寿命のばらつきに着目</b></p> <p>同一負荷において寿命のばらつきが生じている</p>	
<p><b>破壊モードが寿命に及ぼす影響</b></p> <p>界面進展      内部進展</p> <p>き裂が発生した箇所の破壊モードを見直してみると、界面方向にき裂が進展しているものと、内部方向にき裂が進展しているものの2つのき裂進展モードが確認できた。</p> <p>き裂進展モードごとのデータを取った</p> <p>き裂発生サイクル数に着目すると、内部進展モードに比べ、界面進展モードの方が長寿命となる傾向が確認できる</p> <p>↓</p> <p>き裂進展モードに影響を与えるものとして、ミクロの構造を考慮していく必要がある</p>	
<p><b>Sn-Ag-Cuはんだにおいても、冷却速度による問題がある</b></p> <p>パワーデバイスにおけるリフロー時の問題</p> <p>チップ はんだ</p> <p>リフロー工程での冷却時、部品大型化と熱容量の増加によってはんだ溶融のプロセスが異なって、はんだ接合層に不均質的な界面が形成される。</p>	
<p><b>Sn-Ag-Cuはんだにおいても、冷却速度による問題がある</b></p> <p>パワーデバイスにおけるリフロー時の問題</p> <p>冷却速度の違い</p> <p>リフロー工程での冷却時、はんだ上端と下端から冷え始めるため、フィレットに段差が生じる</p> <p>この位置からき裂が進展</p>	
<p>結晶を考慮せずにき裂進展解析を行うと...</p> <p>き裂進展前      き裂進展後</p> <p>はんだ上部にひずみが集中      はんだ上部からき裂が進展</p> <p>チップ はんだ パワースト</p> <p><b>課題</b> Sn-Ag-Cuはんだでも大型の部品になるとミクロの構造を考慮していく必要がある</p>	

■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

**界面進展** **内部進展**

Sa-Cu系はんだなど、様々な元素が混ざった新しい材料だと、積層が複雑になる

大型の部品においては、冷却時の温度分布の差により、結晶の配列に影響を与える

マイクロ構造がき裂進展に与える影響を考慮した定量的な寿命評価手法が必要となる

**マイクロ構造の観察**

**界面進展モード発生部**

界面近傍の結晶粒の観察がしにくい

試験前

**内部進展モード発生部**

結晶粒層が均一に近い

試験前

**界面方向へき裂進展**

試験後

**内部方向へき裂進展**

試験後

**パワーデバイスにおけるリフロー時の問題**

パワーデバイスにおけるリフロー時の問題

- パワーデバイスは電子機器部品と比べ、構造が大きなものとなる
  - リフロー冷却時に各部材の温度分布が不均一となる
  - はんだ接合部においてはリフロー冷却時に、はんだは固体化する
  - はんだ部において冷却時に温度分布の差が発生すると、はんだの結晶配列に影響を与える

使用前

サイクル後

新設サンプルにも直線的な粒界がみられる。

直線的な粒界が観察できる

※新設サンプルは2022/11/1

**パワーデバイスにおけるリフロー時の問題**

パワーデバイスのマイクロ構造の再現

解析モデル

- c:チップ厚さ
- d:はんだ厚さ
- e:ベース高さ

面材寸法		チップ寸法	
部材	材料	長さ[mm]	高さ[mm]
チップ	Si	6.0	0.2
上層はんだ	SnAgCu		0.15
ベース	Al	10	2.0

材料特性			
材料	ヤング率[MPa]	熱膨張係数[PPM]	線膨張係数[1/K]
Si	1.80E+05	0.3	4.20E-06
SnAgCu	3.10E+04	0.4	2.10E-05
Al	6.90E+04	0.25	2.30E-05

※はんだは無重力リフロー法、60の熱膨張係数として定義  
 ※結晶粒界の厚さは実数として102とした

**パワーデバイスにおけるリフロー時の問題**

パワーデバイスのマイクロ構造の再現

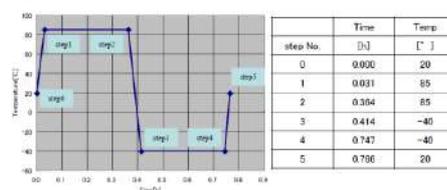
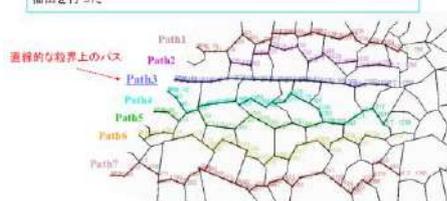
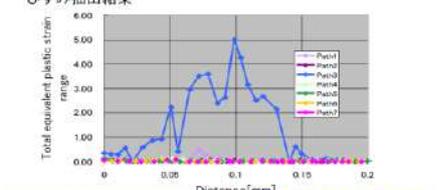
直線的な粒界

粒界性質	スケールサイズ[μm]
結晶粒界	10
結晶粒内	10
はんだ	100
チップ	100
ベース	200

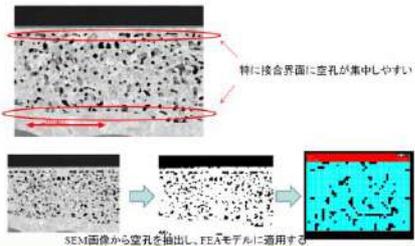
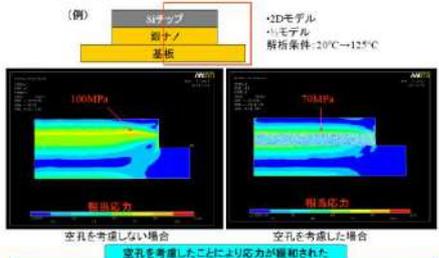
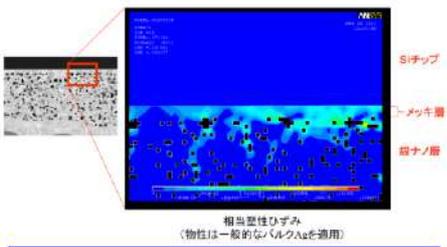
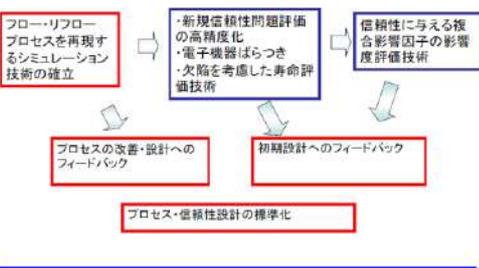
拡大図

直線的な粒界を再現

■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

<p>パワーデバイスにおけるリフロー時の問題</p> <p>解析条件</p> <p>マイクロ構造を考慮した解析モデルに以下の温度負荷をかける</p>  <table border="1" data-bbox="430 302 614 459"> <thead> <tr> <th>step No.</th> <th>Time [h]</th> <th>Temp [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0.000</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0.031</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.354</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.414</td> <td>-40</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.747</td> <td>-40</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0.786</td> <td>20</td> </tr> </tbody> </table>	step No.	Time [h]	Temp [°C]	0	0.000	20	1	0.031	85	2	0.354	85	3	0.414	-40	4	0.747	-40	5	0.786	20	
step No.	Time [h]	Temp [°C]																				
0	0.000	20																				
1	0.031	85																				
2	0.354	85																				
3	0.414	-40																				
4	0.747	-40																				
5	0.786	20																				
<p>パワーデバイスにおけるリフロー時の問題</p> <p>ひずみ抽出箇所</p> <p>図に示す通りのパターンについてひずみ抽出ラインを設け、ひずみの抽出を行った。</p> 																						
<p>パワーデバイスにおけるリフロー時の問題</p> <p>ひずみ抽出結果</p>  <p>明らかにPath3のひずみ値が大きくなっている</p> <p>Path3の境界にひずみが集中している</p> <p>ひずみの集中しやすい箇所を特定し、設計改善に必要となる</p>																						
<p>これまでの解析手法</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>マクロ的な構造(形状等)しか考慮していない</li> <li>部材を均質的なものとして評価</li> </ul> <p>しかし...</p> <p>電子部品の小型化に伴い、材料を均質的なもの(ex. パルク材)としてみなすことができなくなってきた</p> <p>↓</p> <p>マイクロ構造を考慮していく必要がある</p> <p>プロセスの問題を明らかにすることが重要となる</p>																						
<p>高耐熱実装構造と信頼性評価</p> <p>高力接合の信頼性を確保するだけでなく、接合される基板配線側に与える新しい高耐熱実装構造のコンセプトを提案</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"> <li>接合部は数十µm程度の薄膜接合構造となっている</li> <li>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</li> <li>微小な構造が信頼性に影響を与える可能性がある</li> </ul>																						

■ A8 【パワーモジュールのシミュレーション】 于講師

<p><b>銀ナノの構造解析</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>銀ナノ接合層には多数の空孔があり強度、信頼性に大きな影響を与えている。そこで、空孔を考慮した解析手法の検討を進めている。</li> </ul>  <p>特に接合界面に空孔が集中しやすい</p> <p>SEM画像から空孔を抽出し、FEモデルに適用する</p>	
<p><b>銀ナノの構造解析</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>焼結状態により、接合層の剛性が大きく変化する。</li> </ul> <p>(例)</p>  <p>2Dモデル      ・シモデル      解析条件: 20°C → 125°C</p> <p>空孔を考慮しない場合      空孔を考慮した場合</p> <p>空孔を考慮したことにより応力が緩和された。</p>	
<p><b>銀ナノの構造解析</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>接合界面では空孔の影響により応力集中が発生しやすい。</li> </ul>  <p>Siチップ      ・メッキ層      銀ナノ層</p> <p>相当変性ひずみ      (物性は一般的なバルクAgを適用)</p>	
<p><b>シミュレーション技術を用いた実装信頼性工学</b></p>  <p>フロー-リフロープロセスを再現するシミュレーション技術の確立</p> <p>新規信頼性問題評価の高精度化      ・電子機器ばらつき      ・欠陥を考慮した寿命評価技術</p> <p>信頼性に与える複合影響因子の影響度評価技術</p> <p>プロセスの改善・設計へのフィードバック</p> <p>初期設計へのフィードバック</p> <p>プロセス・信頼性設計の標準化</p>	