

# RC294 継続分科会

「日本の電子実装産業の復活を目指す、  
電子実装の信頼性と熱制御に関する研究分科会」

「第2小委員会/実験・計測WG 活動計画」

主査： 小金丸 正明(鹿児島大学)

幹事： 池田 徹(鹿児島大学)

# 説明内容

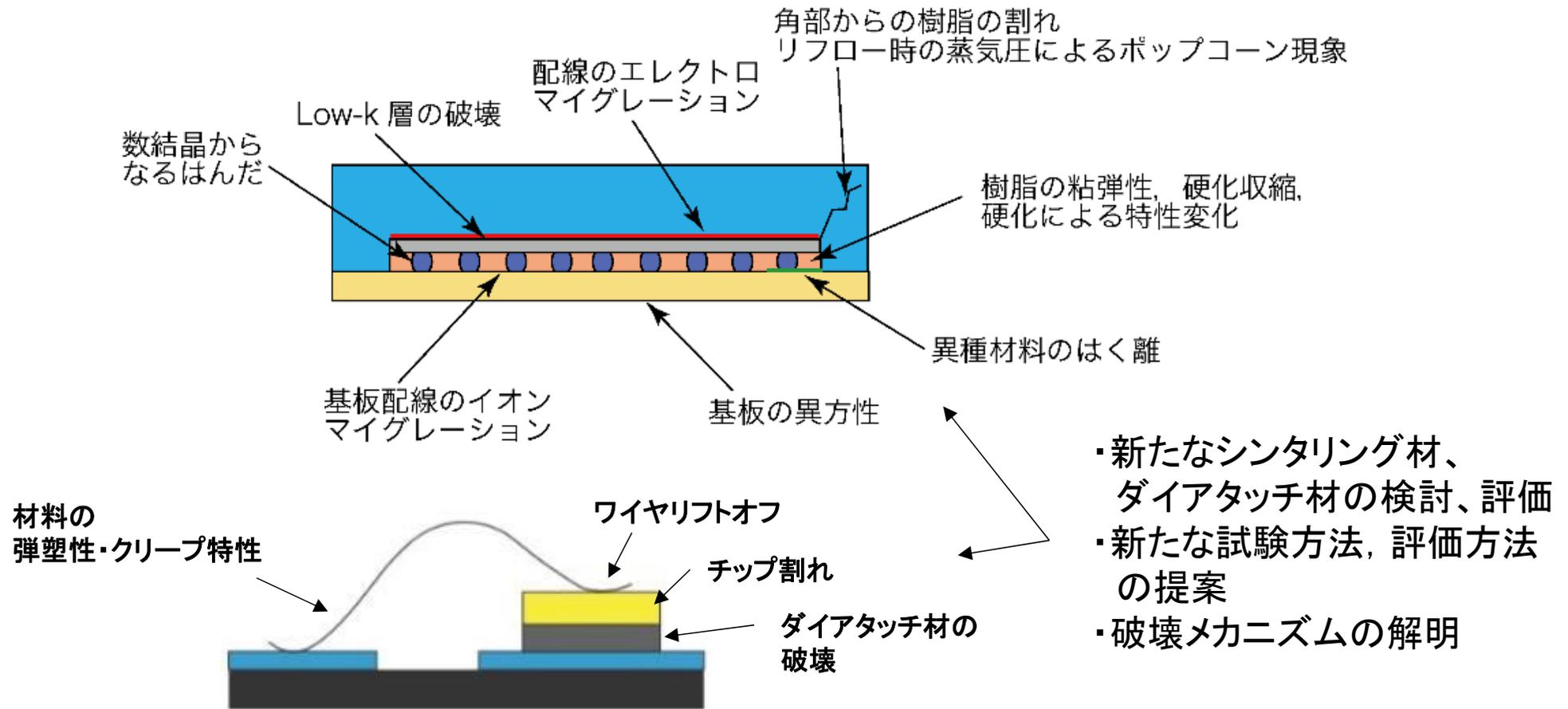
1. 第2小委員会の扱う問題

2. 活動主旨

3. 現在(今期RC294)の活動状況

4. 各研究委員テーマ概要

# 実装信頼性は強度問題のデパート



- ・変形、ひずみ、欠陥等の計測・検出・評価
- ・シミュレーションを担保する各種材料の物性計測・評価

← CAE技術との連携

# 説明内容

1. 第2小委員会の扱う問題

**2. 活動主旨**

3. 現在(今期RC294)の活動状況

4. 各研究委員テーマ概要

# 実験・計測WG活動主旨

電子実装構造、材料における材料力学的実験・計測技術の高度化とデータの共有を産学連携で推進するWGを推進する。  
企業側ニーズと研究者(大学)側シーズの整合を図る。

1. 材料物性(機械特性)評価(初期特性と寿命)
2. 局所変形、残留ひずみ、応力の測定技術
3. 微小欠陥、はく離等の非破壊検査技術

- ・材料物性、機械特性データの共有
- ・新しい実験計測法の調査、紹介、共有
- ・CAE技術との連携



- ・研究者委員の研究報告、技術紹介
- ・企業委員、外部講師からの話題提供
- ・計測器メーカー、CAEベンダー等からの最新技術の紹介

熱WG  
との連携

# 研究者委員の紹介



主査: 小金丸  
(鹿児島大)



幹事: 池田  
(鹿児島大)



笹川(弘前大)



菊谷(芝浦工大)



木下(富山県立大)



高橋(北海道大)



宍戸(近畿大)



加藤(福岡大)

# 説明内容

1. 第2小委員会の扱う問題

2. 活動主旨

3. 現在(今期RC294)の活動状況

4. 各研究委員テーマ概要

# 今期RC294での開催状況

## (研究分科会の午前中に2ヶ月に1回開催)

回	日付	講演タイトル	講演者	所属
①	2022/6/27	パワーモジュール用アルミ線材の非弾性特性評価	穴戸 信之	近畿大学
		産業用X線CTによるはんだ接合部の非破壊き裂進展評価	釣谷 浩之	富山県産業技術研究開発センター
②	2022/9/16	規則性模様の位相情報を利用した全視野変位・ひずみ測定とその応用	李 志遠	産業技術総合研究所
		近年の半導体市場と3次元積層実装に向けた微細バンプ実装技術の紹介	根本 俊介	神奈川県立産業技術総合研究所
③	2022/11/11	半導体・電子部品を『見る』X線CT解析	岡 雄介	株式会社ユー・エイチ・システム
		機械的負荷による半導体デバイスの電気特性変動：SOI-MOSデバイスに対する実験とシミュレーションによる評価	小金丸 正明	鹿児島大学
④	2023/1/17	様々な環境規制をクリアしてきたはんだ付け材料の次なる一手	西村 哲郎	株式会社日本スペリア社
		有限要素法を用いた電子部品のはんだ接合部の強度評価	木下 貴博	富山県立大学
⑤	2023/4/25	導電性接着剤内部フィラーの実分散状態をモデル化した3次元熱伝導解析	荒尾 修	株式会社デンソー
		ワイヤボンディング接合における熱疲労の非破壊、間接評価と高速寿命評価手法の提案	穴戸 信之	近畿大学
⑥	2023/6/26	動画を用いた振動解析の利便性向上について	釣谷 浩之	富山県産業技術研究開発センター
		有機薄膜トランジスタと有機エレクトロニクス用配線の機械的信頼性評価	小金丸 正明	鹿児島大学
⑦	2023/9/25	WALTSの後工程評価TEGのご紹介	堀内 整	株式会社ウォルツ
		スペックル干渉法を用いた動的微小変位装置の開発動向	有田 護	九州電子技研
⑧	2023/11/17	福岡大学半導体実装研究所での三次元実装技術に関する研究	加藤 義尚	福岡大学
		電子機器はんだ接合部の強度評価に関する研究（き裂進展解析を用いた検討結果の紹介）	木下 貴博	富山県立大学
			赤字は外部講師	

# 説明内容

1. 第2小委員会の扱う問題

2. 活動主旨

3. 現在(今期RC294)の活動状況

4. 各研究委員テーマ概要

1. Si/有機半導体デバイスにおける  
機械・電気マルチフィジックス現象の解明
2. 有機デバイスおよび材料の機械的・電氣的  
信頼性評価
3. パワーモジュール用アルミワイヤボンドの  
信頼性評価技術の開発

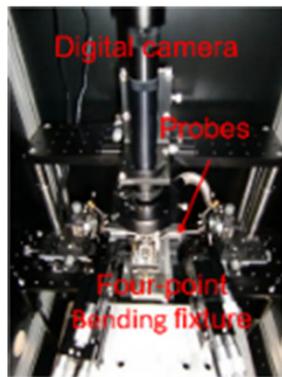
鹿児島大学 学術研究院  
理工学域工学系  
機械工学プログラム  
小金丸 正明



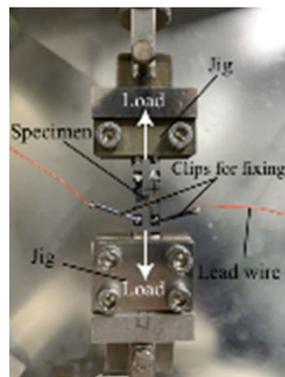
# 半導体デバイスにおける機械・電気マルチフィジックス現象の解明

- ・機械的負荷によるSiデバイス, 有機デバイスの電気特性変動評価
- ・デバイスシミュレーション手法の開発 (Siデバイス)

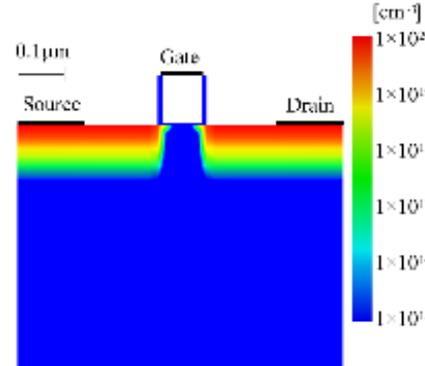
## ● 機械的負荷による電気特性変動計測・シミュレーション



Siデバイス  
(4点曲げ)



有機デバイス  
(引張, 曲げ, せん断)



応力効果デバイスシミュレーション (Siデバイス)

### 連携研究

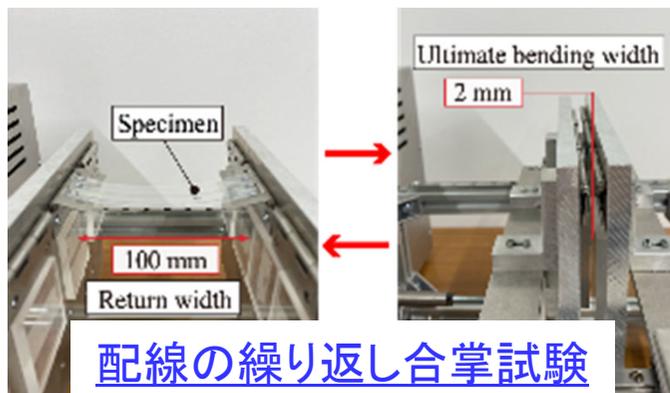
(Siデバイス)

・九州工業大学

(有機デバイス)

・物質・材料研究機構

# 有機デバイスおよび材料の機械的・電氣的信頼性評価



配線の繰り返し合掌試験

● 配線の繰り返し負荷下での信頼性評価

● 有機デバイスの繰り返し負荷下での信頼性評価

### 連携研究

・名古屋工業大学

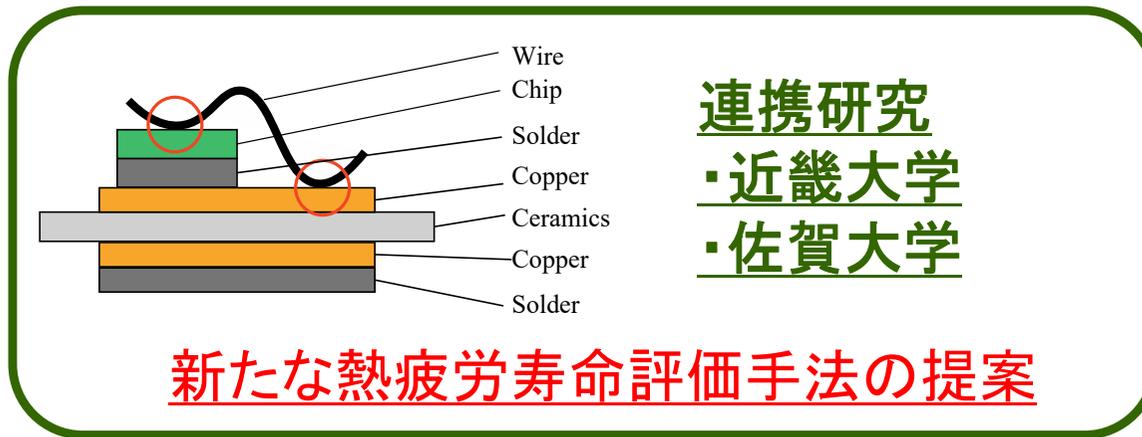
・近畿大学

・物質・材料研究機構

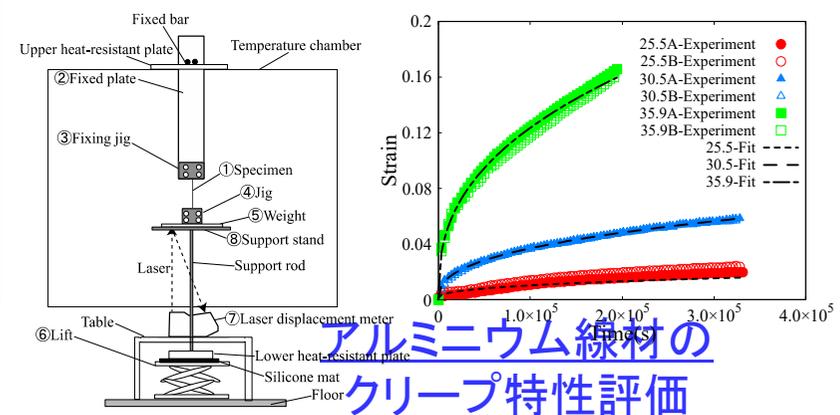
・山形大学

# パワーモジュール用アルミワイヤボンドの信頼性評価技術の開発

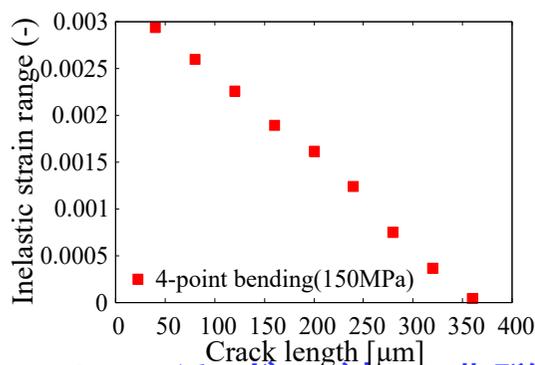
- ・実際に用いられる線材の材料特性(弾塑性・クリープ特性)の評価
- ・ワイヤボンド接合部の熱弾塑性クリープ解析
- ・4点曲げによる機械的疲労試験(熱サイクル試験の代替)



## ●アルミ線材の機械的特性評価

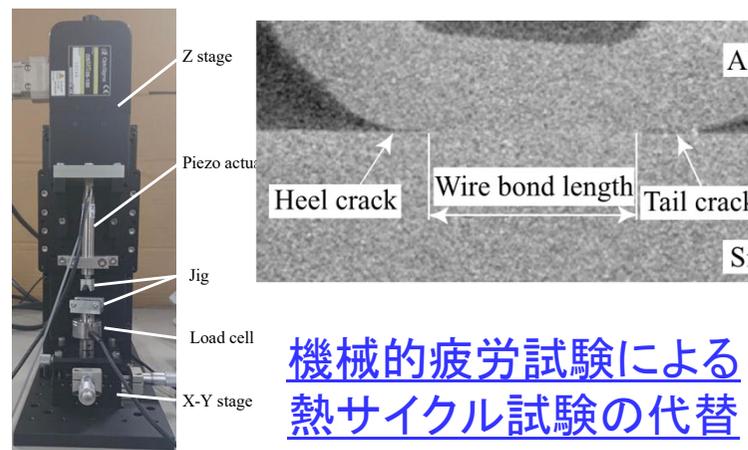


## ●ワイヤボンド構造の弾塑性クリープ解析

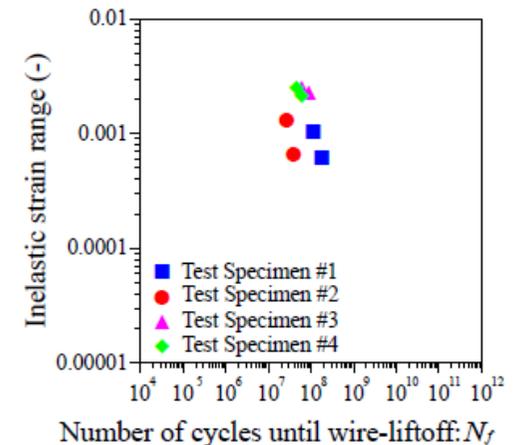


アルミワイヤボンド部の非弾性ひずみ振幅の解析

## ●4点曲げによる機械的疲労試験



## ●寿命評価



- パワーデバイスにおける封止樹脂と金属部品との熱サイクル疲労強度の機械的疲労試験による予測手法の開発
- 3次元異種材接合角部の応力拡大係数の解析手法の開発とその電子パッケージの破壊防止設計への利用
- ZnAl共析材料を用いた鉛フリー高温接合材料の開発

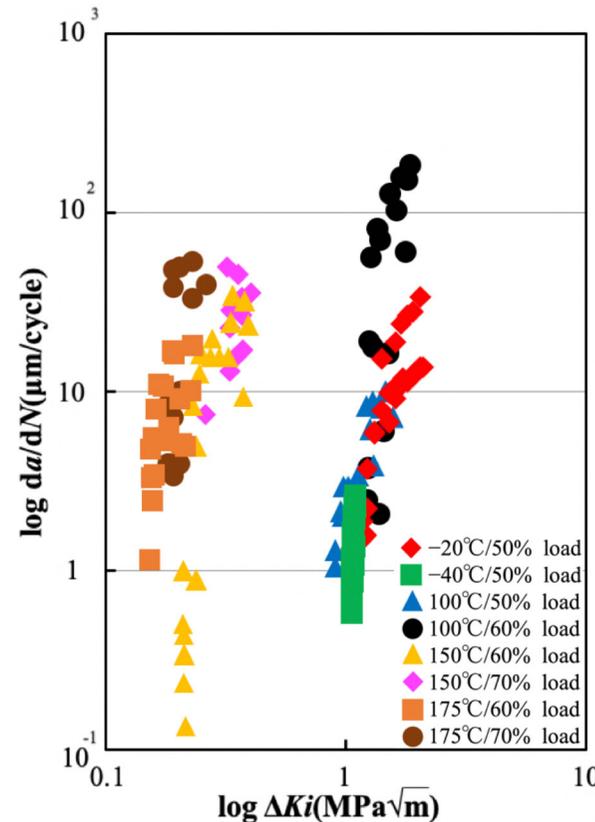
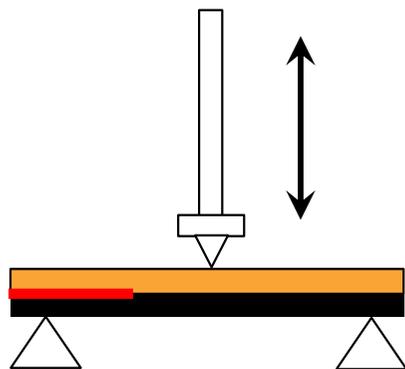
池田 徹  
(鹿児島大学学術研究院  
理工学域工学系:機械工学プログラム)



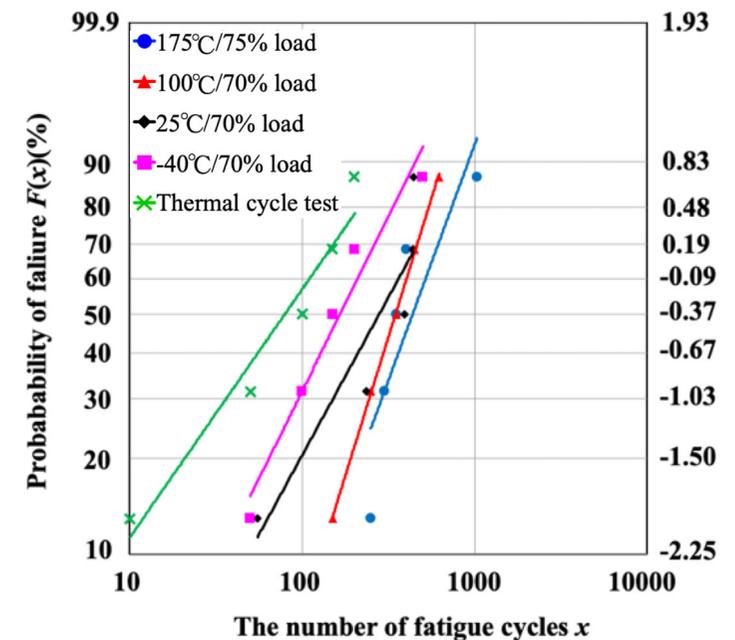
# ●パワーデバイスにおける封止樹脂と金属部品との熱サイクル疲労強度の機械的疲労試験による予測手法の開発

- ・ パワー半導体も樹脂封止によるパッケージ増えてきたが、その金属と樹脂のはく離防止技術が求められている。
- ・ 熱サイクル試験を機械的疲労試験で置き換えるために、金属と樹脂のはく離における低サイクル疲労強度の支配法則を明らかにする必要がある。

これまでの成果



静的破壊靱性値の6割以下の片振り疲労では、Paris則が成立



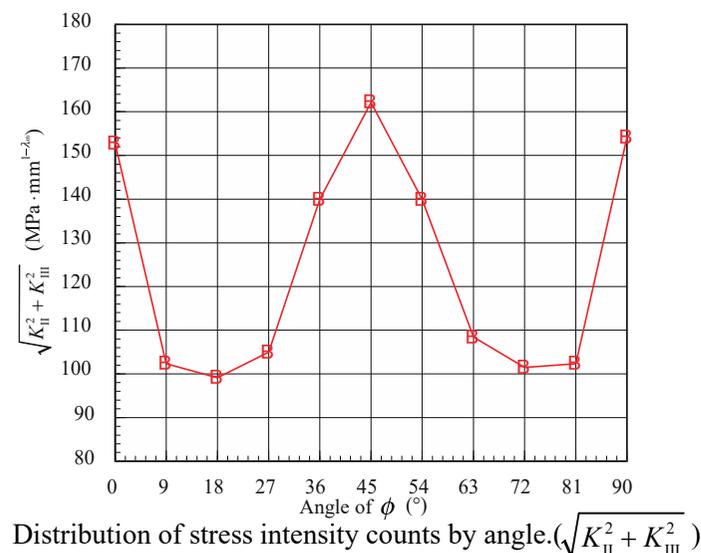
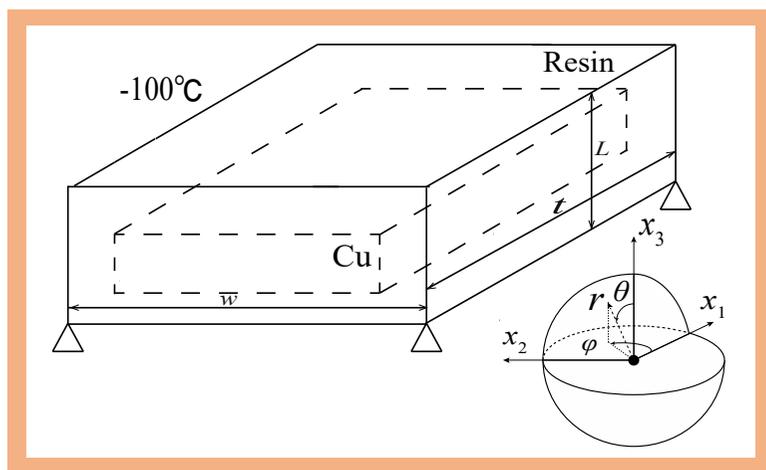
静的破壊靱性値の7割以上の片振り疲労では、脆性破壊

# ●3次元異種材接合角部の応力拡大係数の解析手法の開発とその電子パッケージの破壊防止設計への利用

$$\mathbf{K} = \begin{Bmatrix} K_{II} \\ K_I \\ K_{III} \end{Bmatrix} = \lim_{\substack{r \rightarrow 0 \\ \theta \rightarrow \theta_0}} \sqrt{2\pi r} l_k^{0.5 - \text{Re}[\lambda_1]} \mathbf{\Lambda}(\theta) \left\langle (r/l_k)^{0.5 - \lambda_m} \right\rangle \mathbf{\Lambda}^{-1}(\theta) \begin{Bmatrix} \sigma_{r\theta} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{\theta z} \end{Bmatrix}$$

$$\mathbf{\Lambda}(\theta) = \begin{bmatrix} \mathbf{F}^I(\theta) & \mathbf{F}^{II}(\theta) & \mathbf{F}^{III}(\theta) \end{bmatrix}$$

3次元接合角部の応力拡大係数の分布を解析することで、接合角部からのき裂進展方向や、進展限界を予測できる。



銅板上面における、応力拡大係数の分布

上記の例では、銅板上面における封止樹脂の界面において、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ の方向にき裂が進展することが予測される。この方法を使って、パッケージの接合界面での熱サイクル試験における、き裂の進展方向や進展限界などの予測が行えることが期待できる。

# ● ZnAl共析材料を用いた鉛フリー高温接合材料の開発<sup>16</sup>

現在、パワーデバイスなどに用いられる高温ダイアタッチ材などにおいては、鉛はんだの使用が暫定的に許可されている。

鉛フリー高温接合材料の開発が世界中で行われており、Agナノペーストが一部で実用化されているが、コストが高く、性能も十分とは言えない。

- ・Zn<sub>22</sub>AlとCuの拡散接合において、接合プロセスを改善することで、従来の20MPaの加圧から、低加圧(3~4MPa)における接合強度の改善を実現した
  - ・超塑性温度域の保持時間を省略することで接合強度が向上した
  - ・常温での圧縮速度を遅くすることで接合強度が向上した
  - ・結晶粒径を小さくすることで接合強度が向上した
- ・本研究における手法で接合したZnAlとCuの微小試験片は引張強度の3割から7割の片振り疲労試験において10000サイクルまでき裂の発生が見られなかった。
- ・鉛フリーで低コストな、高温接合材料(ダイボンディング用途など)の開発に向けて研究開発中

# 高密度電流の流れる電子配線の 信頼性評価

—フレキシブル配線, ダイアタッチ材, 半導体配線,  
プリント基板を対象として—

笹川 和彦

(弘前大学理工学研究科)

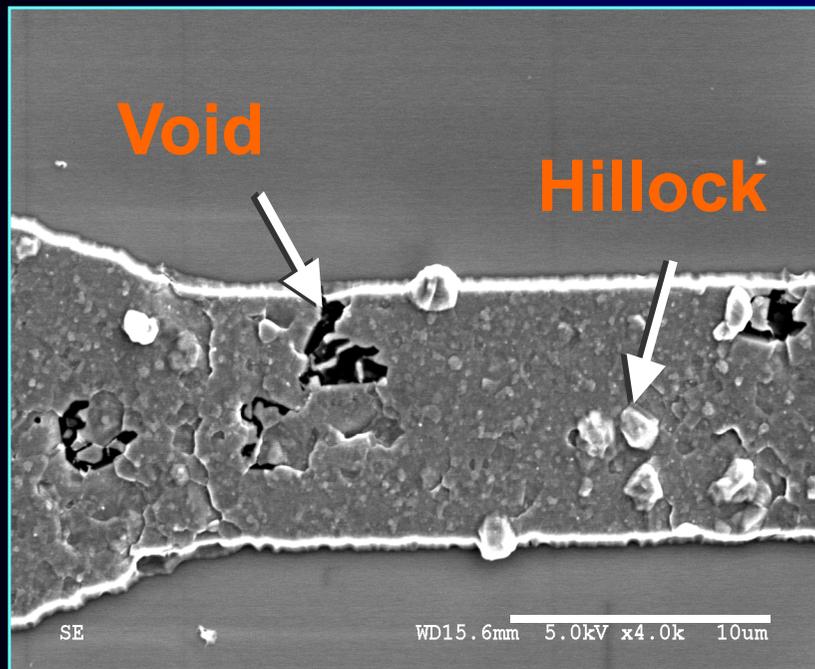
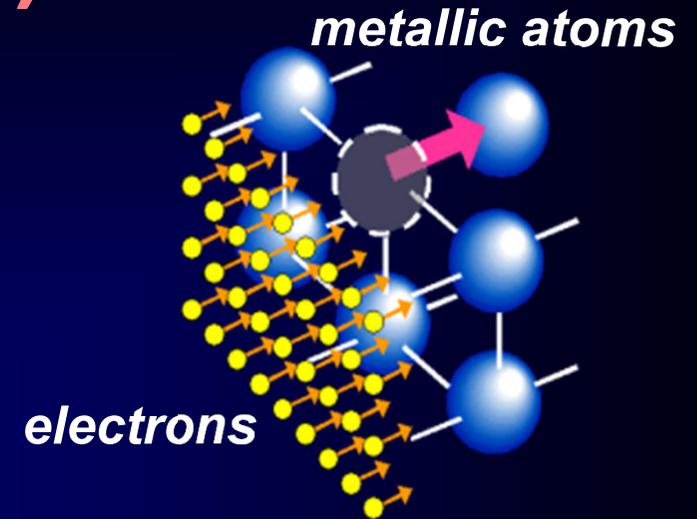


# ELECTROMIGRATION(EM)

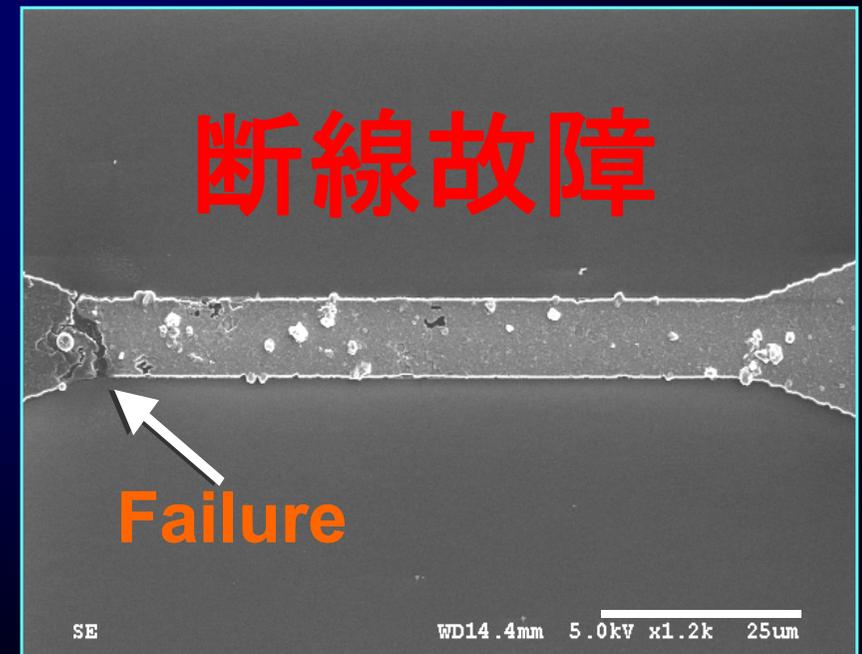
電子配線微細化に伴う高密度電子流による金属原子の拡散移動



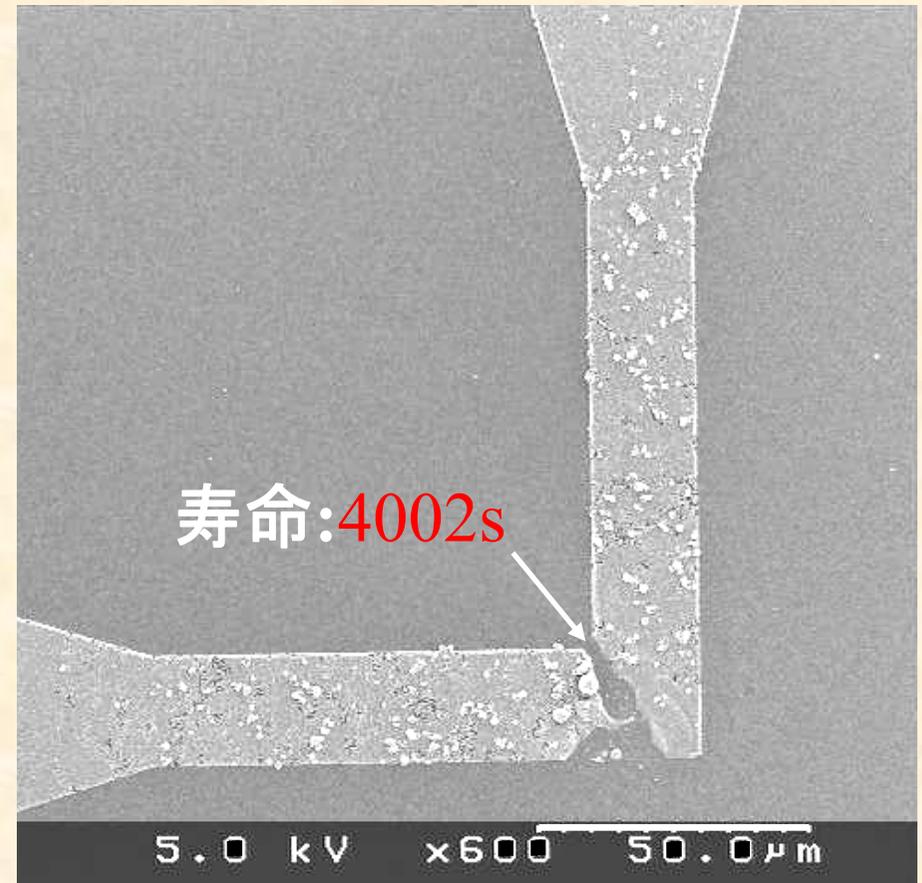
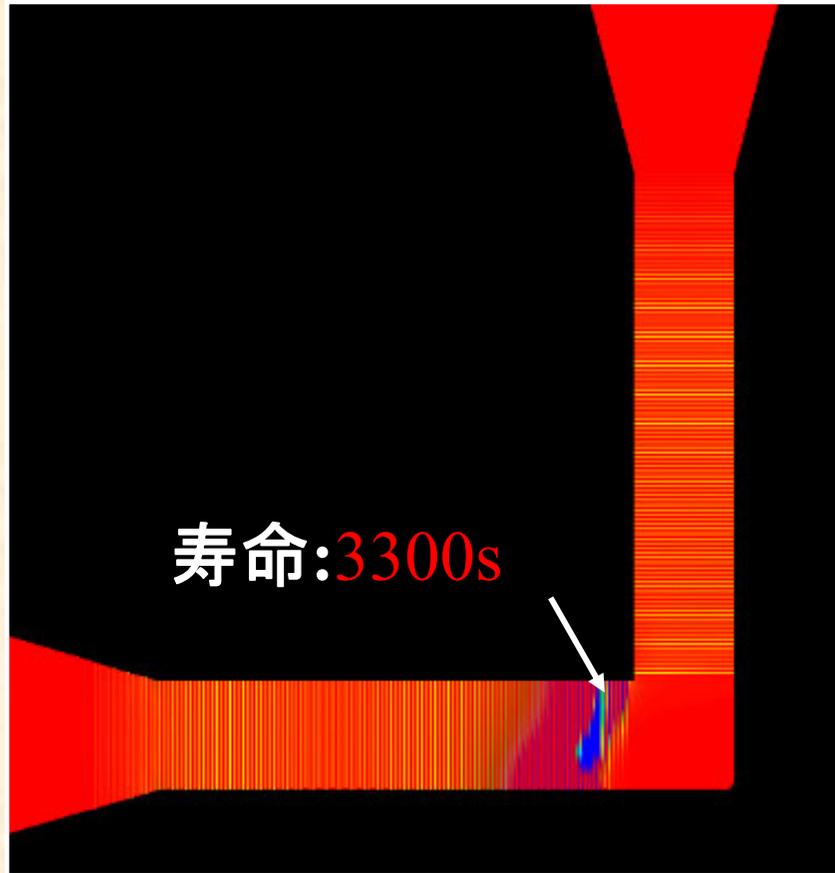
電流による電子材料の疲労損傷



ボイド  
成長



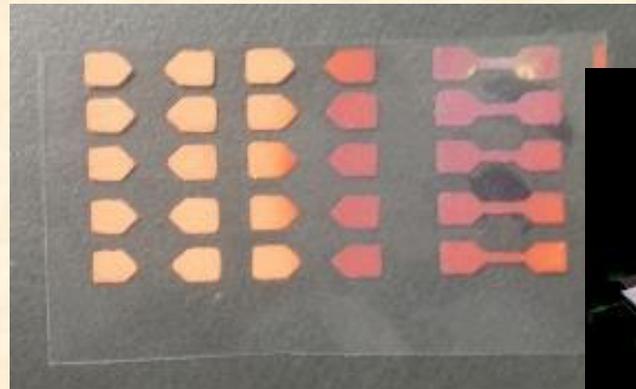
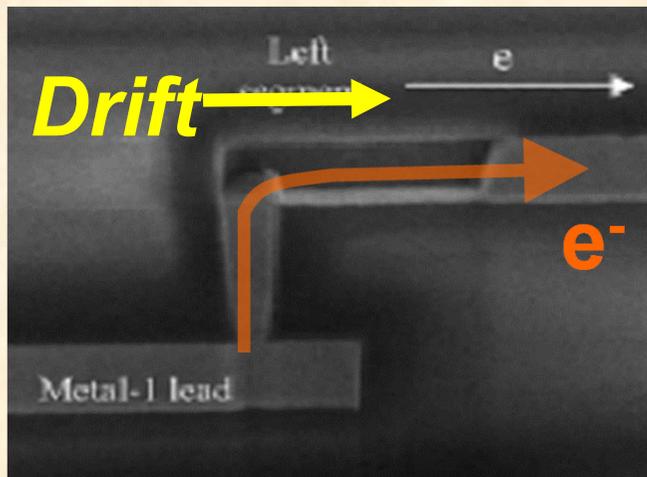
# 断線故障過程の コンピュータ・シミュレーション



寿命のみならず断線箇所の高精度予測に成功！  
電子デバイス設計時の信頼性評価に寄与

# 次期分科会において

- 金属ナノ粒子フレキシブル配線のEM信頼性評価
- 集積回路配線構造の工夫によるEM損傷強度向上
- パワー半導体に用いられるダイアタッチ材 (Agナノ粒子) のEM信頼性評価



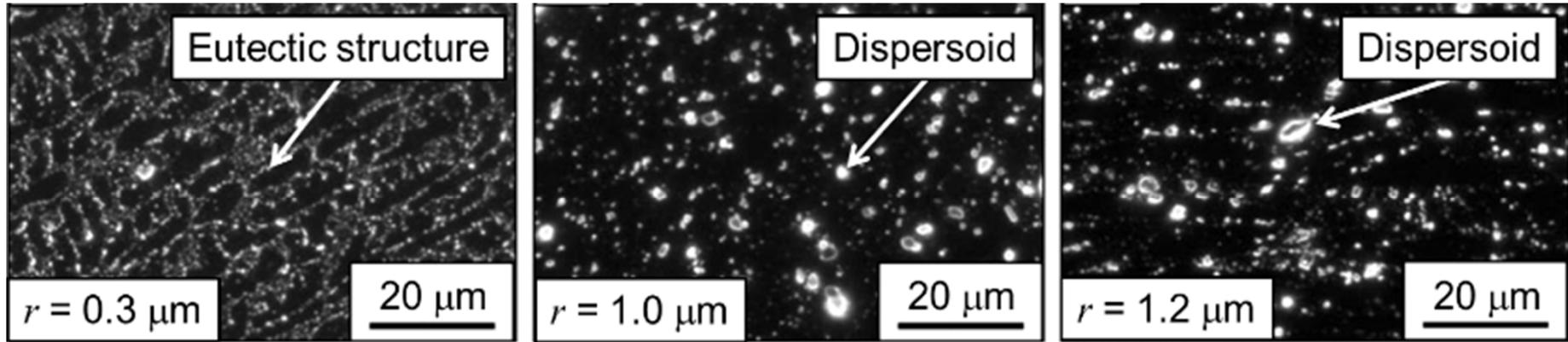
- 試料の提供があれば、はんだ等各種接続部のエレクトロマイグレーション損傷信頼性評価に取り組みたい。

- 組織粗大化を組み込んだはんだ接合部の熱疲労寿命予測
- 電力半導体デバイスダイアタッチ接合部の損傷発展シミュレーション
- UV接着剤の硬化過程シミュレーション

荻谷 義治  
(芝浦工業大学 工学部)



# 組織粗大化を組み込んだはんだ接合部の熱疲労寿命予測

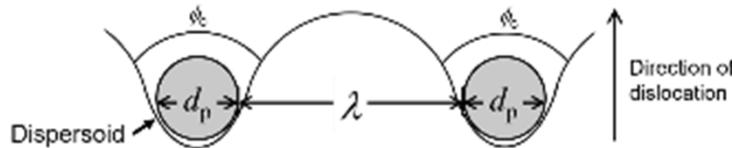


(a) 未時効初期

(b) 時効材初期

(c) 高温下でひずみを負荷

$$r = \left\{ \left[ K_1 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)t + K_1 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) K_2 \varepsilon_{in} N + r_0^m \right]^{1/m} \right\}$$



- ✓ クリープ強度は組織に依存し，車載など長期的な安全が重視される用途での熱疲労寿命予測では，組織粗大を組み込んだ構成式を用いたFEMシミュレーションが必要となる発する．
- ✓ ただし，構成式が変化し続けるため，寿命サイクルまで連続的に解析を回す必要があり，サイクルジャンプ法の開発が必要．
- ✓ 組織成長式を組み込んだクリープ構成式とサイクルジャンプ法を開発する．

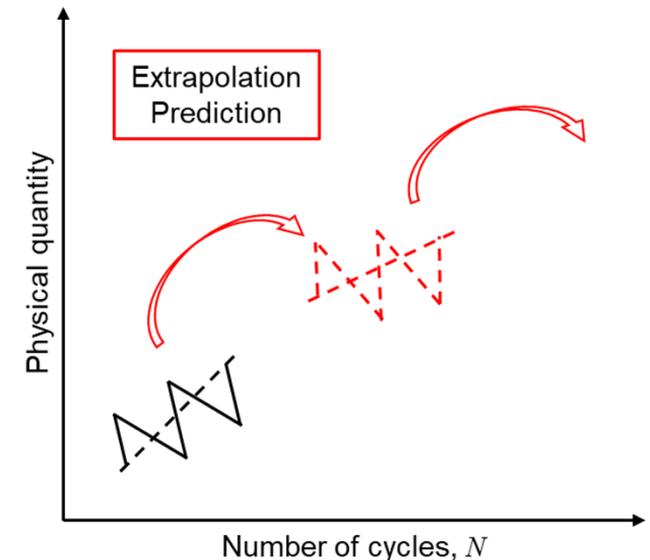
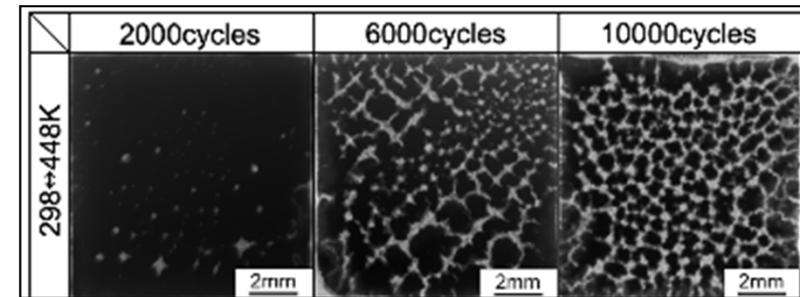
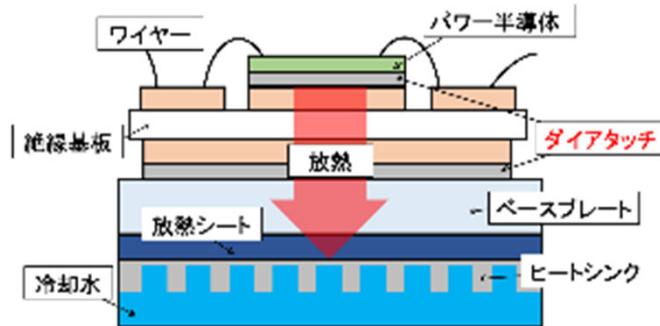
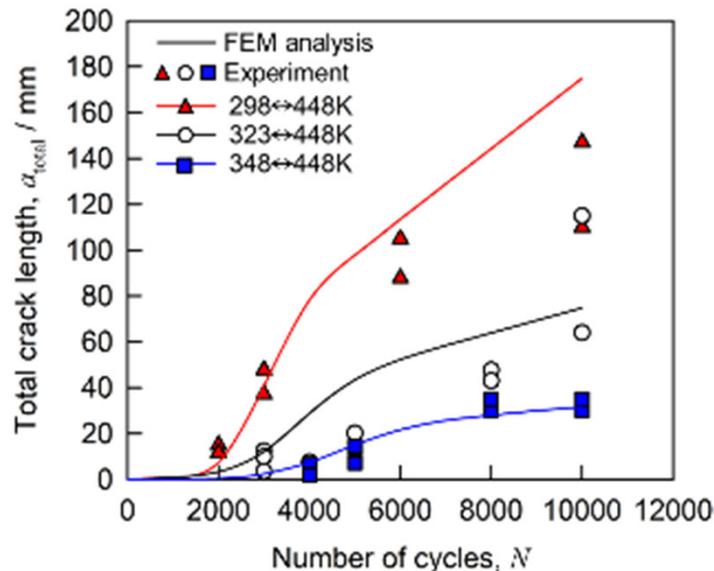


図 サイクルジャンプ法模式図

# パワーデバイスダイアタッチの疲労破壊（疲労き裂ネットワーク）の予測



パワーサイクルによるダイアタッチにおける疲労き裂の発達(上面からのSi下はんだ層のX線透過像)



ダイアタッチ接合部における疲労き裂の発達

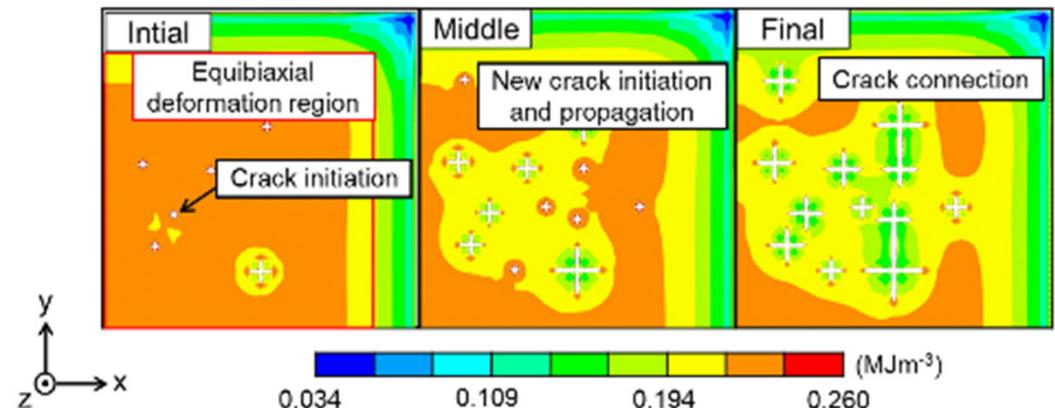


図 疲労き裂ネットワーク形成過程

- ✓ 疲労き裂ネットワーク破壊は、均一な等2軸応力場で、平面的に損傷が発達しながらジャンクション温度が上昇して製品故障に至る。
- ✓ このため、応力集中部からの単一き裂進展という従来の考え方に従わず、新たな手法が必要である。
- ✓ FEMシミュレーションを用いた疲労き裂ネットワーク寿命を予測法する開発する。

# UV接着剤の硬化過程シミュレーション

- ✓ 精密機器の部品取り付けには、UV接着剤による精密接着技術が用いられるが、接着剤の硬化収縮による部品の微小位置ずれが避けられず、硬化収縮挙動の予測技術が必要。
- ✓ UV接着剤の場合、硬化反応速度がUV光の強度や膜厚に依存し、硬化過程を再現する計算機シミュレーションは困難を極める。
- ✓ FEMによるUV接着剤の硬化収縮挙動解析手法を開発する。

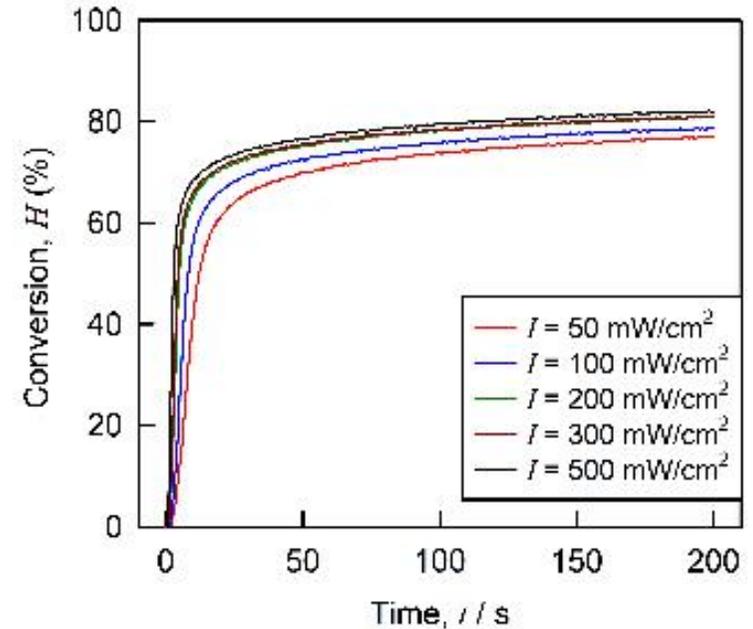


図 硬化反応速度の照度依存性

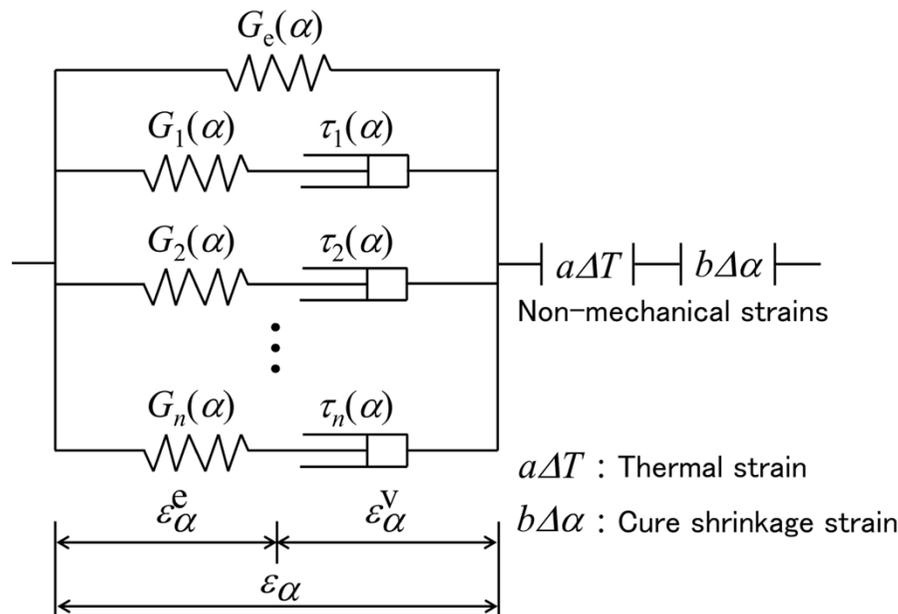


図 硬化挙動を表すレオロジカル模型

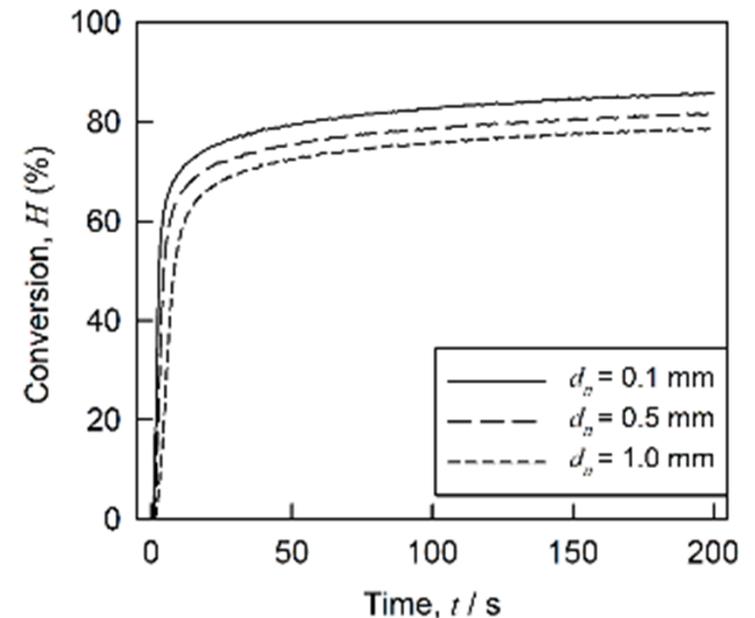


図 硬化反応速度の膜厚依存性

## 半導体パッケージの 非弾性熱応力シミュレーション

富山県立大学  
工学部 機械システム工学科

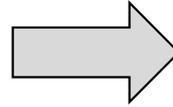
木下貴博



## パッケージ全体構造のモデル化

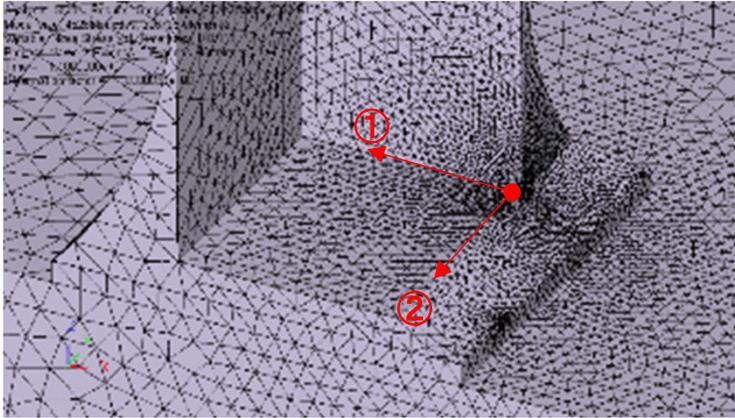
構成部品を含むPKG全体をモデル化することにより、  
変形挙動・応力状態の評価を高精度化

有限要素法

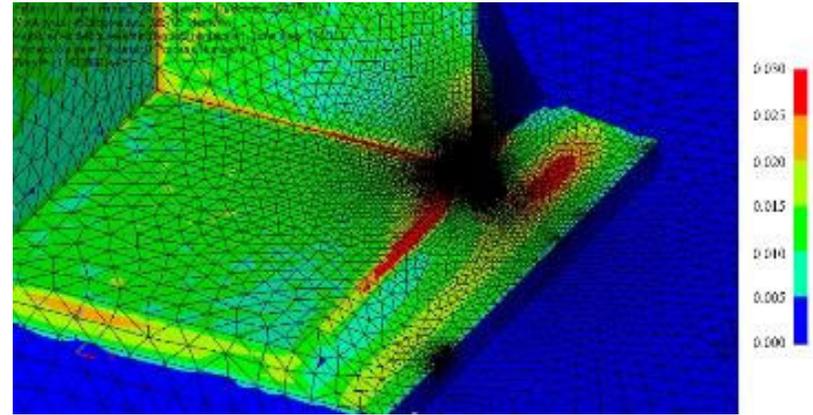


## 非弾性熱応力シミュレーション

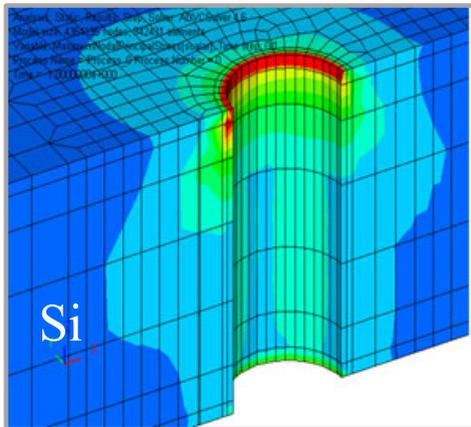
評価対象部材(はんだ・チップ・電極など)の  
応力状態や疲労寿命の検討



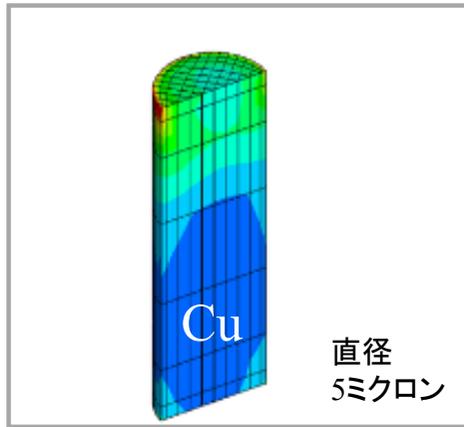
電子部品接合部(鉛フリーはんだ)の要素分割図  
(チップ部品は非表示・角点は密な要素分割)



鉛フリーはんだ材の相当非弾性ひずみ分布  
(Coffin-Manson則により寿命の評価)

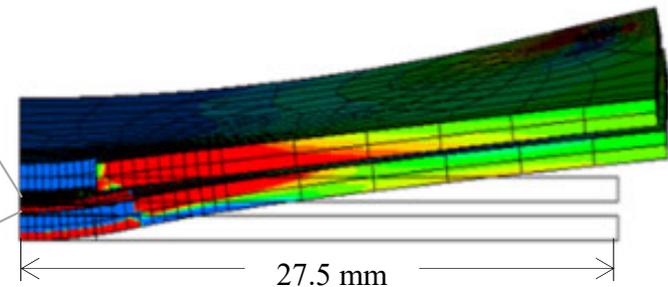


シリコンチップの貫通穴周りの  
応力状態(最大主応力)



銅製貫通電極(TSV)の  
応力状態(相当応力)

シリコン貫通電極(TSV)構造を有する  
半導体パッケージ全体の熱応力シミュレーション



パッケージの反り  
※変形倍率: ×100

# 超低速はく離における粘着テープのはく離力と糊残り条件の関係

北海道大学大学院 工学研究院 機械・宇宙航空工学部門 高橋航圭

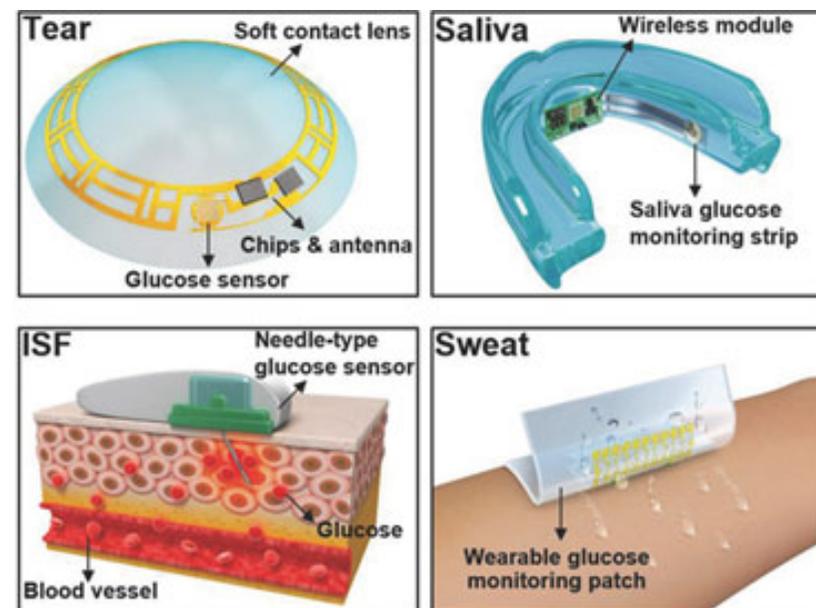


## 粘着剤のはく離強度評価技術の必要性

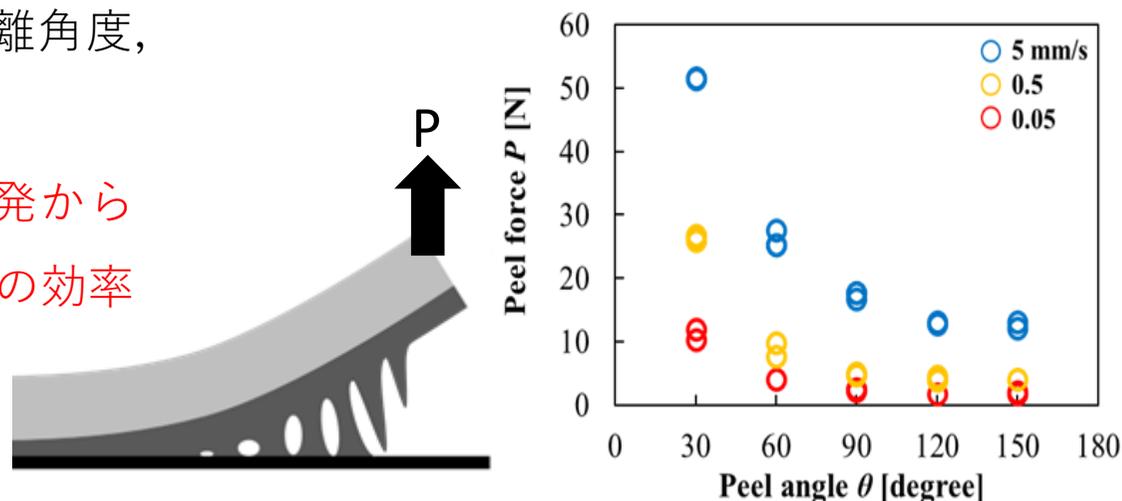
- フレキシブルエレクトロニクス, ウェアラブルデバイスにおける粘着製品の需要増大
- 粘着製品の信頼性向上に向けた粘着力の長期耐久性評価技術の確立

## ピール試験によるはく離強度評価

- はく離力に及ぼすはく離速度, はく離角度, テープ基材・粘着剤層厚さの影響
- ノウハウと試行錯誤に基づく製品開発から脱却し、CAE援用による粘着製品開発の効率化へ結び付けたい



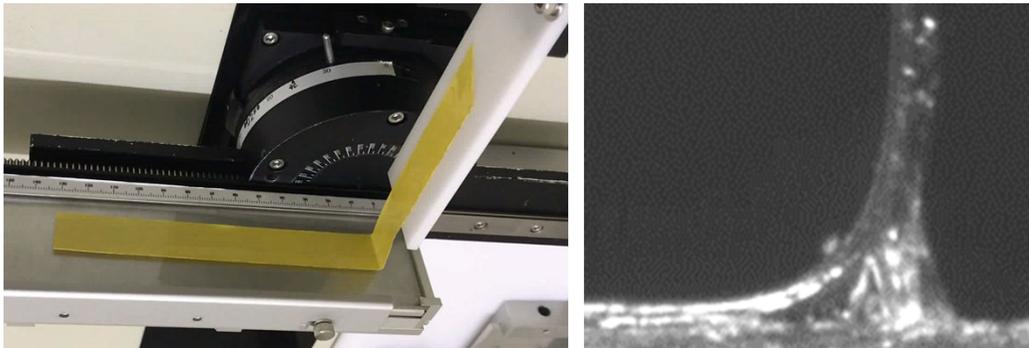
Advanced Healthcare Materials, 7(8), 1701150, 2018



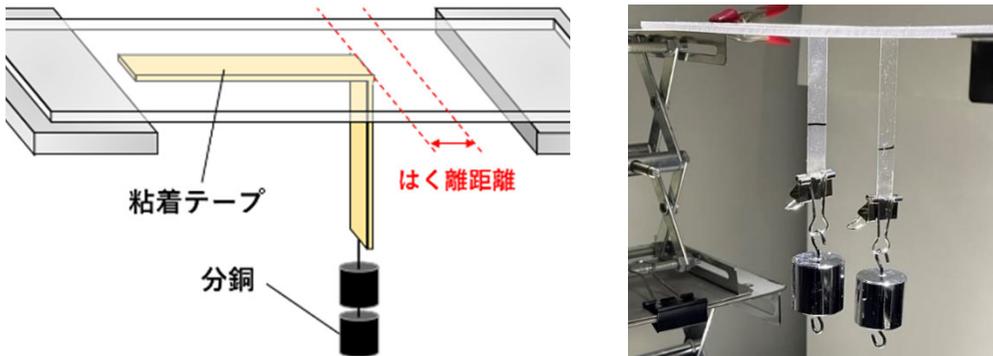
# 広範囲のはく離速度に対応したピール試験

## 90°ピール試験

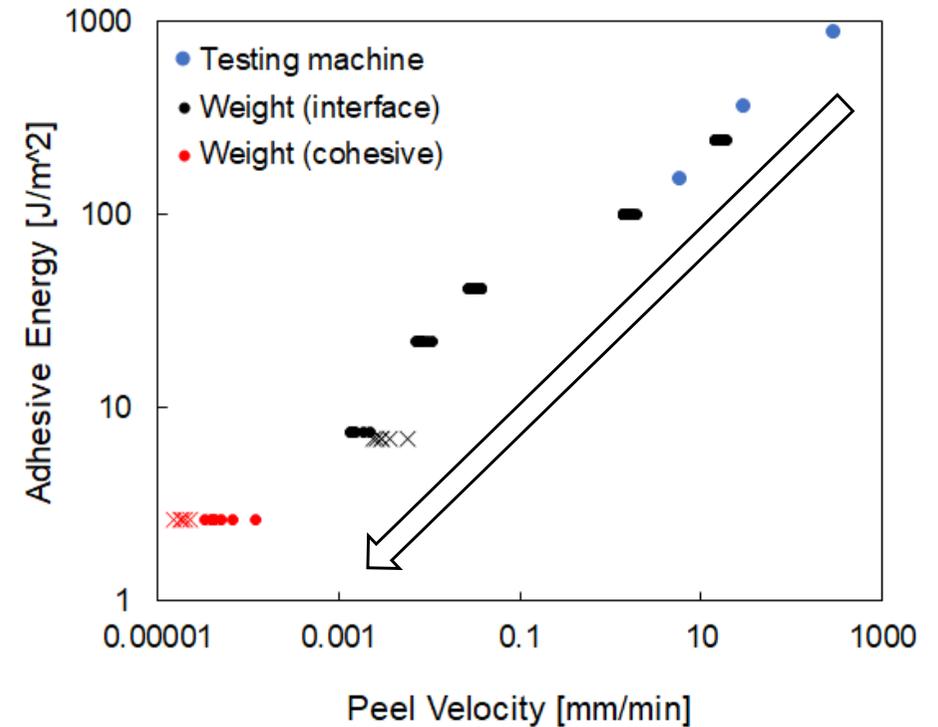
- 高速はく離試験：角度自在タイプ粘着・皮膜剥離解析装置 VPA-2
- 低速はく離試験：軽おもりつり下げとはく離面観察による速度計測



試験機による高速ピール試験



錘つり下げによる低速ピール試験



10<sup>6</sup>倍に及ぶはく離速度範囲で、  
対数軸上における直線関係を確認

## 今後の予定

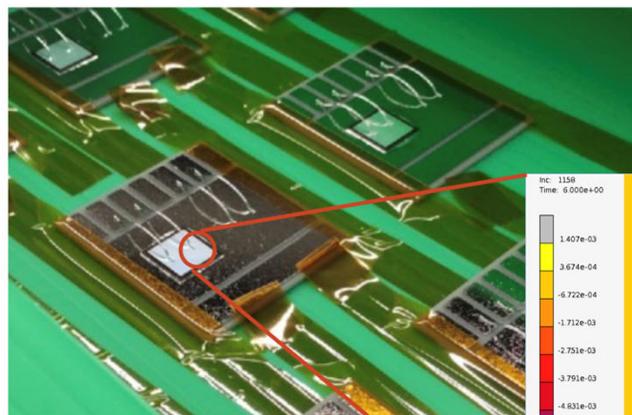
- 超低速域で観察された糊残り（赤マーカー）の発生機構の解明
- 粘着テープ厚さ、はく離角度が及ぼす影響を解明

パワーモジュール用ワイヤ接合部の信頼性に関する研究  
フレキシブルデバイスの屈曲信頼性に関する研究

近畿大学 工学部  
機械工学科 宍戸 信之

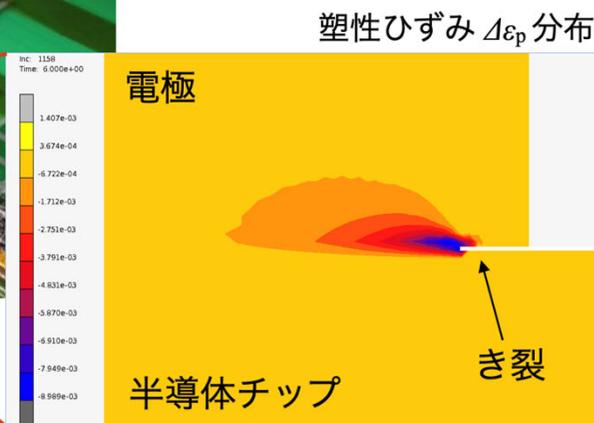


# パワーモジュール用ワイヤ接合の信頼性に関する研究



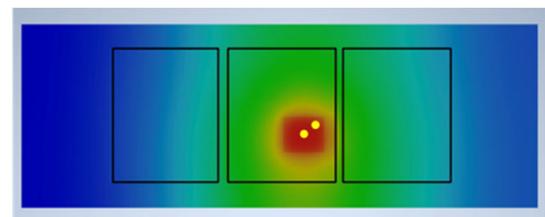
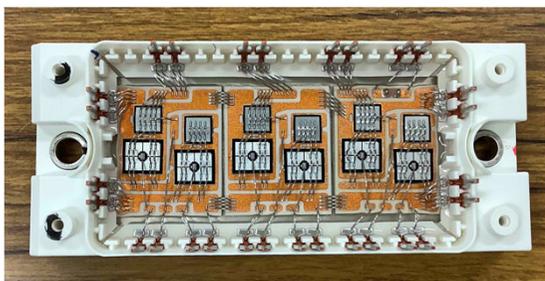
製作した試験体

## 接合部の解析結果

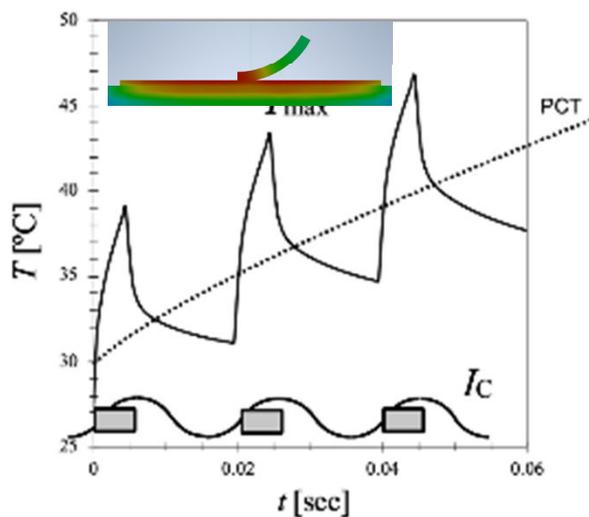


・ワイヤボンド部の温度履歴から生じる非線形変形を再現し、リフトオフ寿命を定量予測する

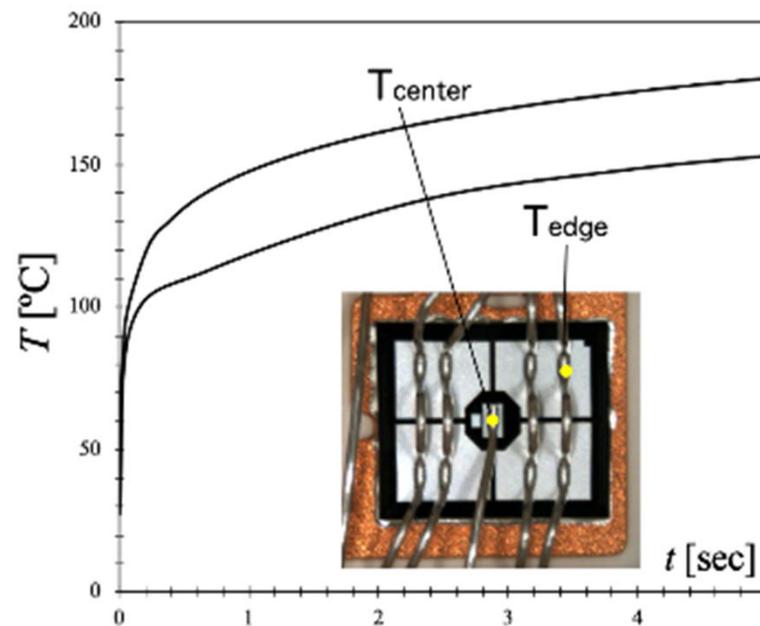
・接続抵抗のモニタリングによるき裂進展挙動の評価



既製品PMの解析モデル

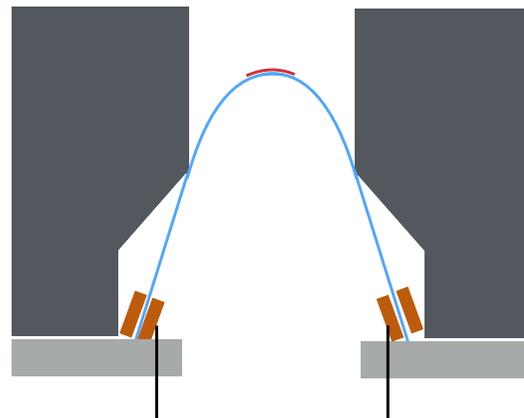
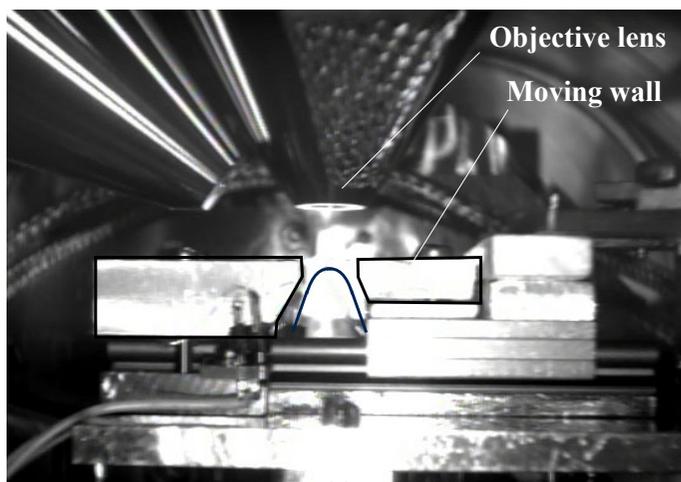


インバータ動作時の温度履歴

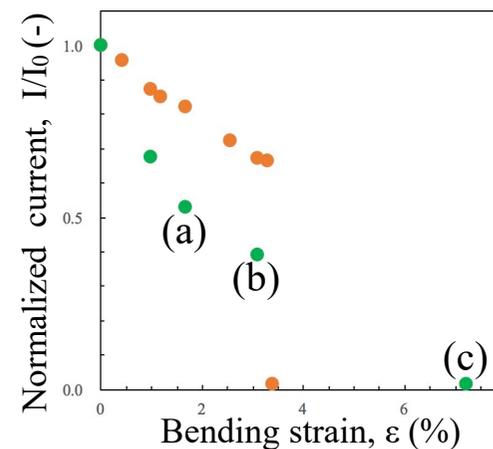


異なるボンディングサイトの温度差

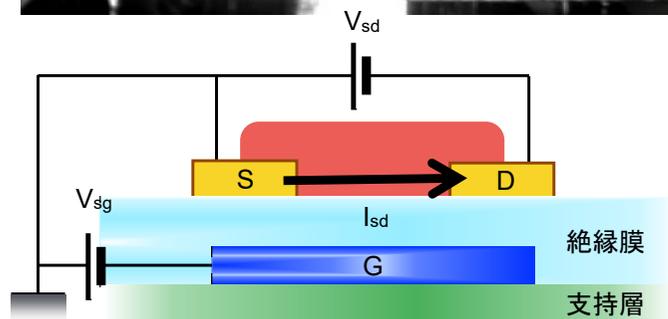
# フレキシブルデバイスの屈曲信頼性に関する研究



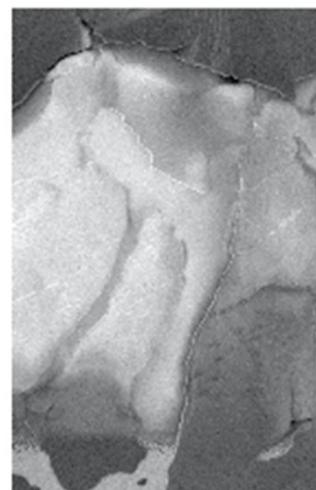
曲げ変形状態



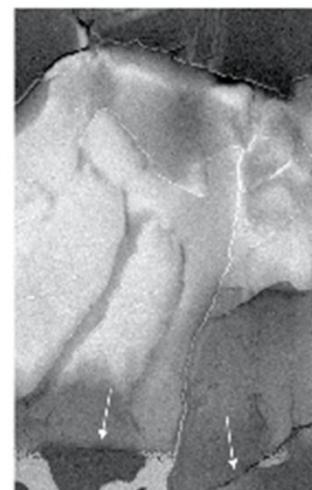
曲げ変形と特性劣化



・その場観察可能な曲げ試験による印刷有機薄膜トランジスタ構造の破壊モードと特性劣化との対応を明らかに  
 ・複雑な曲げ変形が想定されるフレキシブルデバイスの信頼性評価試験法の提案、評価



(a)  $\epsilon = 1.7\%$



(b)  $\epsilon = 3.1\%$



(c)  $\epsilon = 7.2\%$



薄膜半導体構造部におけるき裂の発生の様子

# 部品内蔵構造による 積層三次元電子モジュールの評価検討



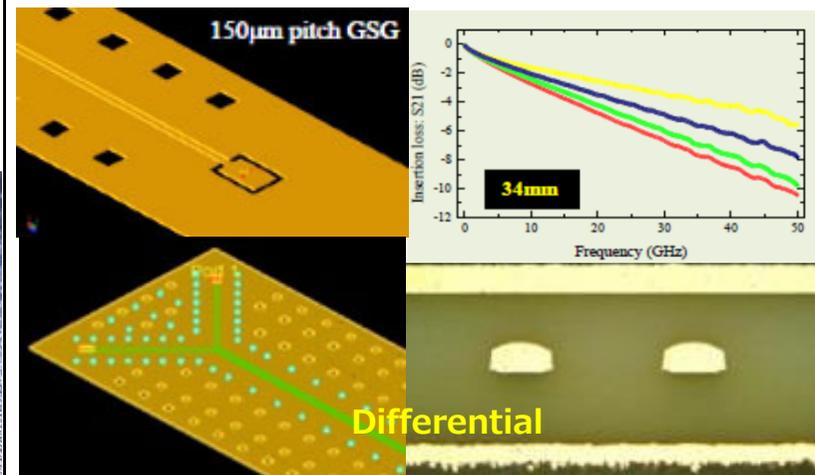
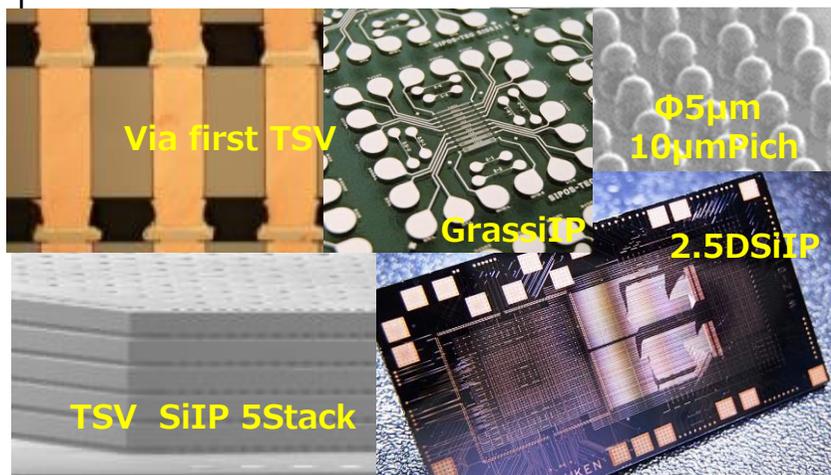
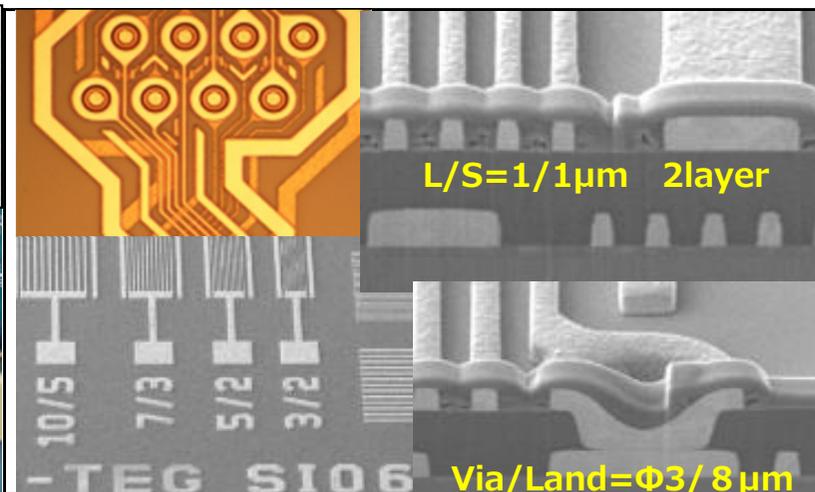
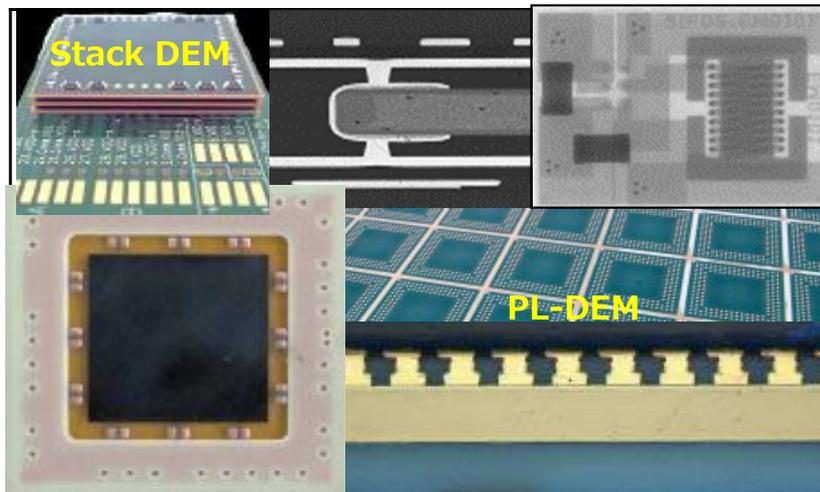
福岡大学 半導体実装研究所  
加藤義尚

# 福岡大学半導体実装研究所および

## ふくおかIST三次元半導体研究センターの研究テーマ

For FanOut&Embedded IP

For Ultra Fine Pattern for RDL



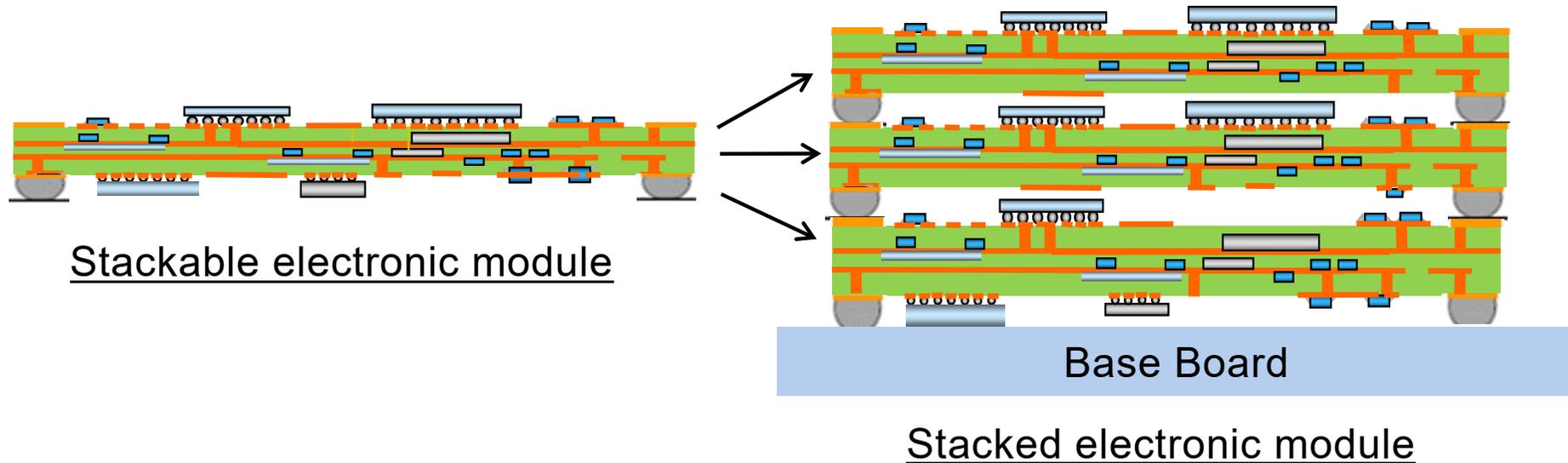
For Next generation IP

For High Frequency Evaluation

# 三次元電子モジュール積層化イメージ

## IoTモジュール、AIエッジインテリジェントモジュール

- 製造した部品内蔵モジュールを積層させ、高機能三次元電子モジュール化実現



国際標準化活動実施中 IEC/TC91

IEC 62878-2-600 series- Guideline for stacked electronic module -

- Requirements and guidelines to be specified for stacked electronic module
- Stacked electronic module is stacked by some stackable modules which are applied device embedded assembly technology and/or surface mounted assembly technology

# AIエッジインテリジェントモジュール積層化検討

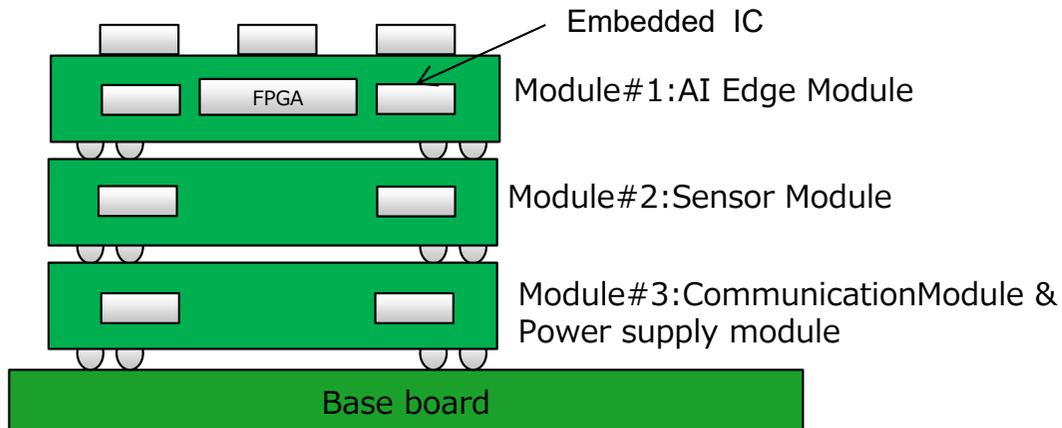
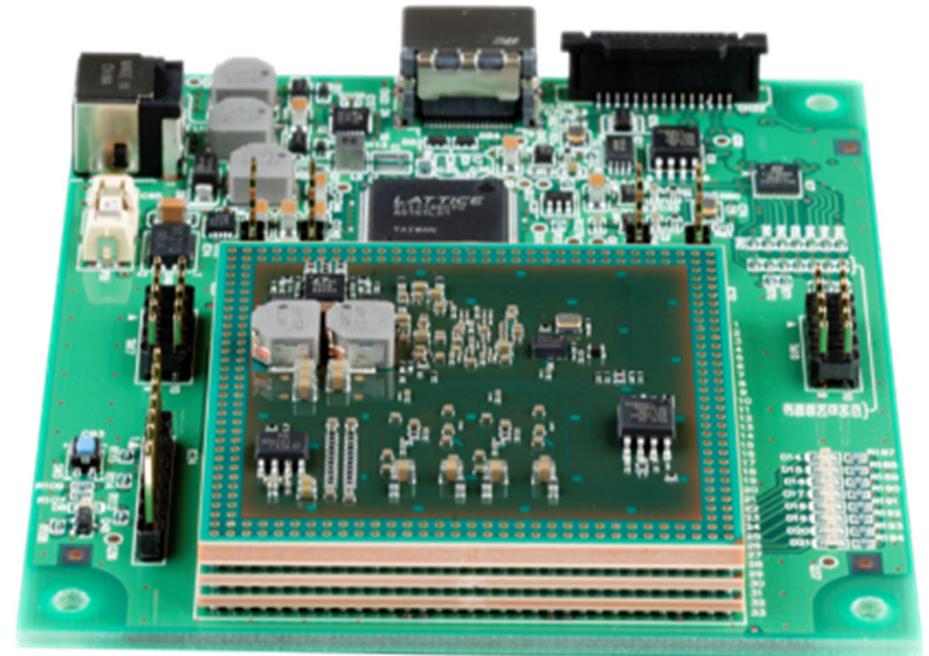


Fig. Image of the structure of AI Edge Intelligent Module



図：AIエッジ用インテリジェントモジュール  
画像センサーモジュール試作品

Module#1 : Embedded  
FPGA(17.0mm × 17.0mm × 1.4mm)1,  
DDR3(8.0mm × 14.0mm × 0.9mm)2 ,  
Sensor device (2.0mm × 3.0mm × 0.6mm)4  
4-2-4 :10Layer Structure

積層三次元電子モジュールの  
電気的特性評価の実施・国際規格化

RC294 継続分科会

第2小委員会/実験・計測WGへの  
参加をお待ちしております。