

パワーモジュールの信頼性向上に向けた デバイスの電気・熱・応力解析



弘前大学 大学院理工学研究科
JEITA 半導体 & システム設計技術委員会
金本 俊幾



目次

1. 信頼性と故障
2. 故障率の低減、耐圧の向上
3. 摩耗故障モデルと寿命予測
4. 熱・電気連成、熱応力解析
5. 寿命ばらつき
6. まとめ

目次

1. 信頼性と故障
2. 故障率の低減、耐圧の向上
3. 摩耗故障モデルと寿命予測
4. 熱・電気連成、熱応力解析
5. 寿命ばらつき
6. まとめ

背景と目的

パワーデバイスの適用拡大

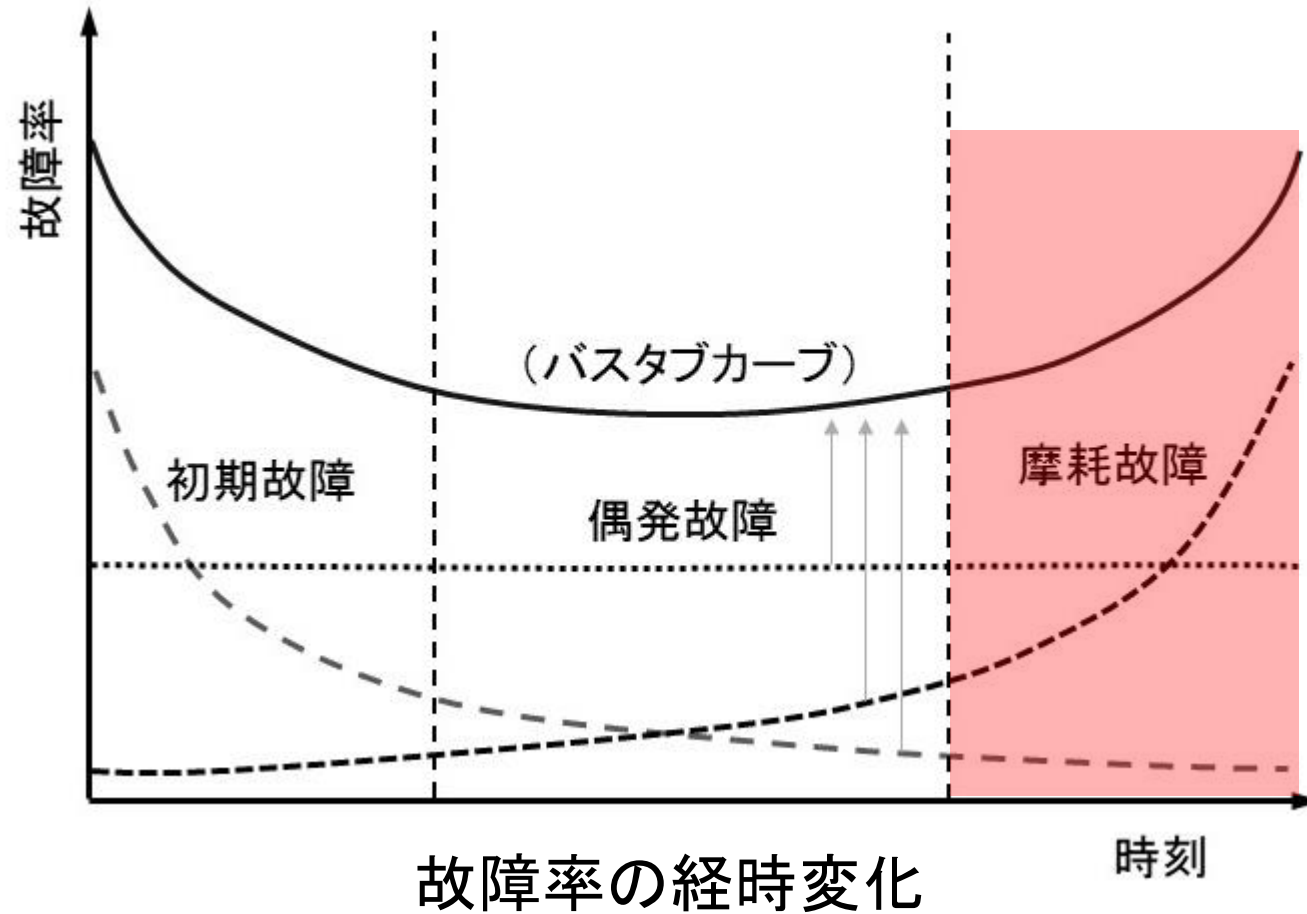
→ 故障とともに寿命が信頼性問題として重要に

パワーデバイスはモジュールの寿命を規定

→パワーデバイスの寿命予測がシステム全体の設計に重要

背景と目的 ～信頼性の向上

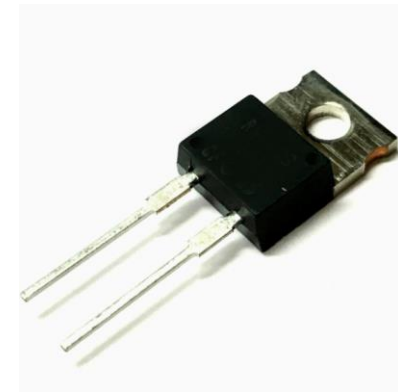
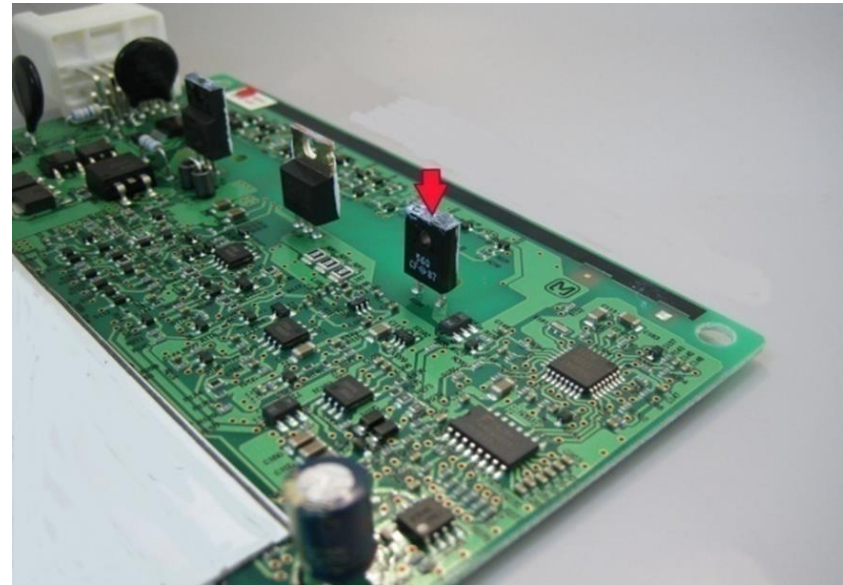
故障率の低減、摩耗故障(寿命)の予測、予知



背景と目的

目的: パワーデバイスの故障低減

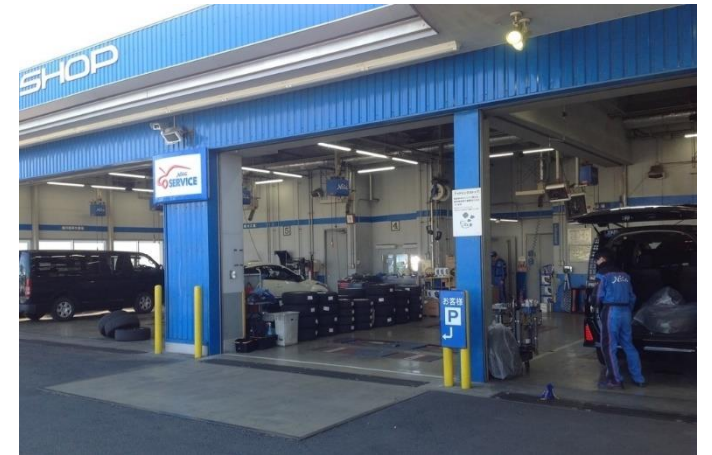
✓ 故障率の低減、耐圧の向上



背景と目的

目的: パワーデバイスの寿命予測

✓ 劣化因子、劣化過程の解明 → 摩耗故障を事前に察知、予告



目次

1. 信頼性と故障
- 2. 故障率の低減、耐圧の向上**
3. 摩耗故障モデルと寿命予測
4. 熱・電気連成、熱応力解析
5. 寿命ばらつき
6. まとめ

2. 故障率の低減、耐圧の向上

Ryosuke Watanabe, Keita Izawa, Shota Kajiya, Daiki Tsunemoto, Koki Kasai, Atsushi Kurokawa, Toshiki Kanamoto, Effective thermal modeling of a thin film snubber resistor for power modules, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, 2020, 11 巻, 2 号, p. 253-266, 公開日 2020/04/01, Online ISSN 2185-4106
https://www.jstage.jst.go.jp/article/nolta/11/2/11_253/_article/-char/ja/

SASIMI 2021

**The 23rd Workshop on Synthesis And System Integration of Mixed Information Technologies
Regular Poster Session IV (3-min. live short presentations of R4 posters at the beginning)**

Time: 14:30 - 16:00, Tuesday, March 30, 2021 Location: Gather Room

R4-7

Title Thermally Optimization of the Trimming Shape of Thin Film NiCr Resistors to Improve Pulse Durability

Author *Ryosuke Watanabe (Hirosaki Univ., Japan), Keita Izawa (Nikkohm, Japan), Shota Kajiya, Tomohiro Aoba, Ryo Arima, Atsushi Kurokawa, Toshiki Kanamoto (Hirosaki Univ., Japan)

<http://sasimi.jp/new/sasimi2021/>

目次

1. 信頼性と故障
2. 初期故障の低減、耐圧の向上
- 3. 摩耗故障モデルと寿命予測**
4. 熱・電気連成、熱応力解析
5. 寿命ばらつき
6. まとめ

寿命予測

アレニウスモデル → 半導体デバイスの寿命予測

✓ 劣化因子の解明がキー

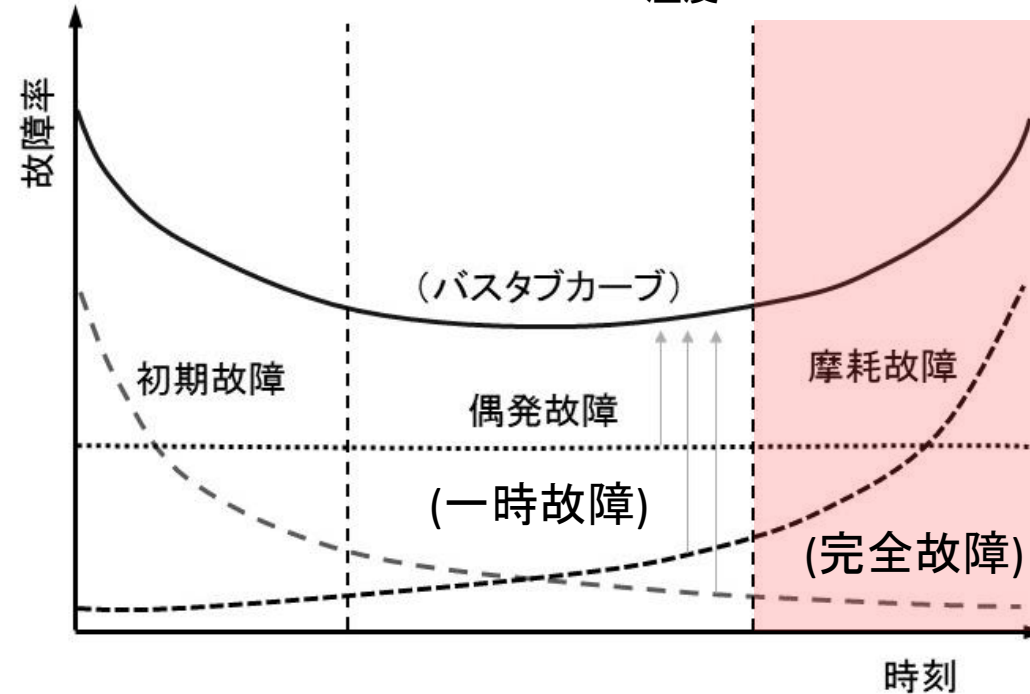
$$\text{寿命} = \underline{A} \exp\left(\frac{E}{kT}\right)$$

A: 劣化因子で規定されるパラメータ

E: 材質で規定される活性化エネルギー

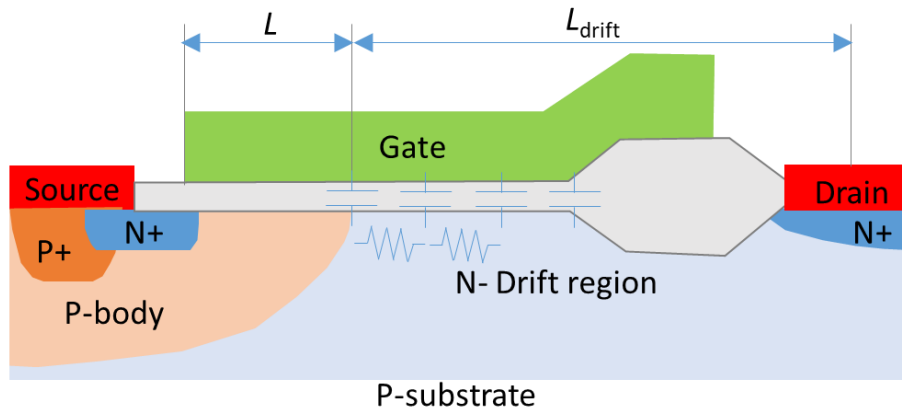
k: ボルツマン定数

T: 温度

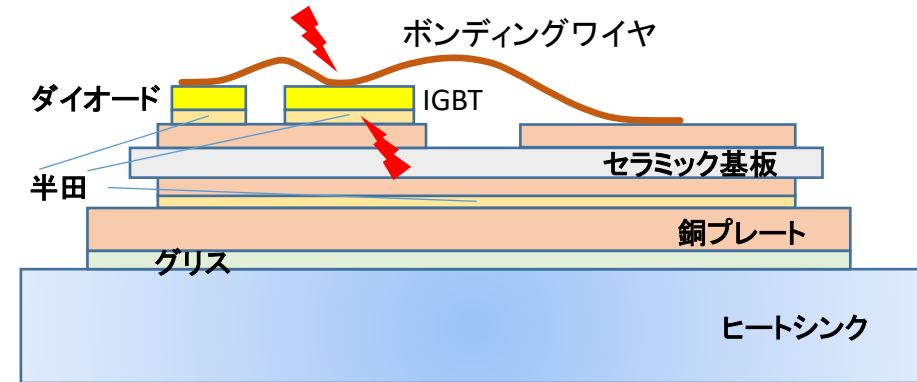


故障モデル

パワーデバイスの摩耗故障：デバイス内部よりも接合部分で発生



パワーMOSFET(LDMOS)の断面



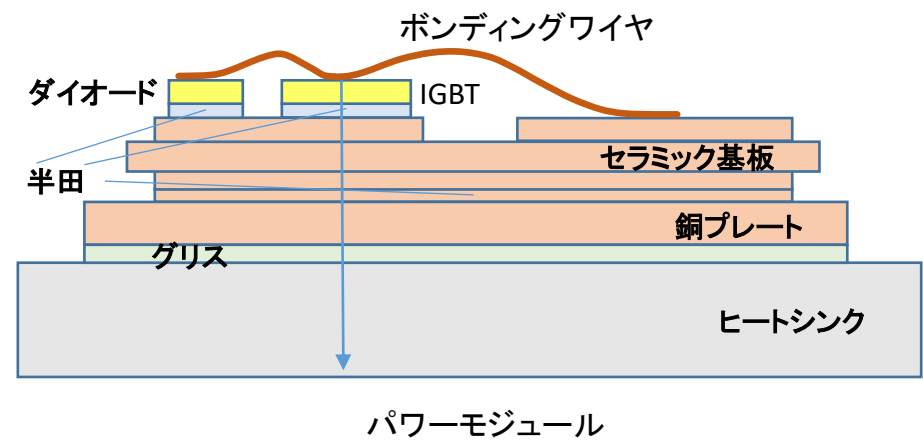
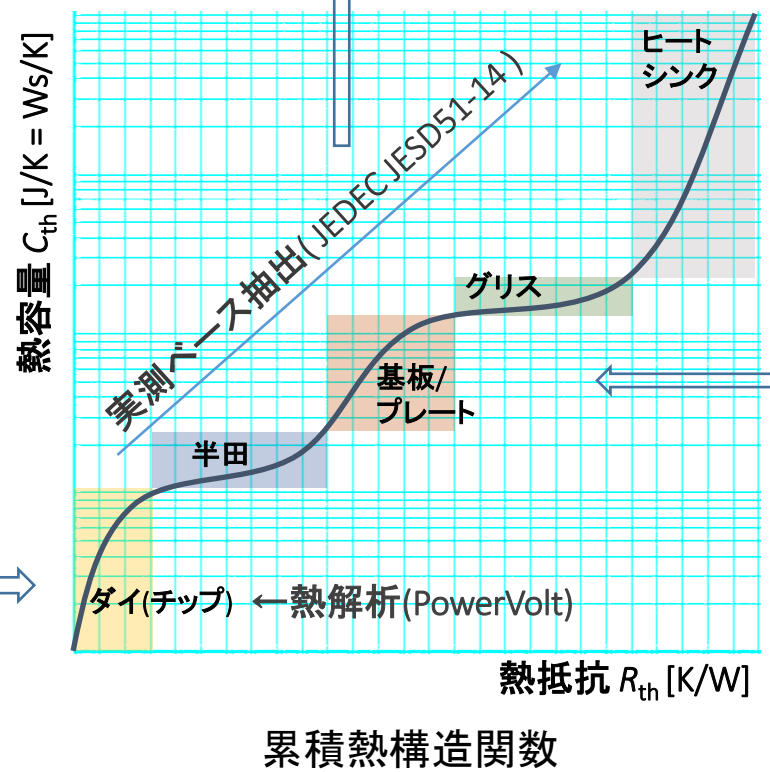
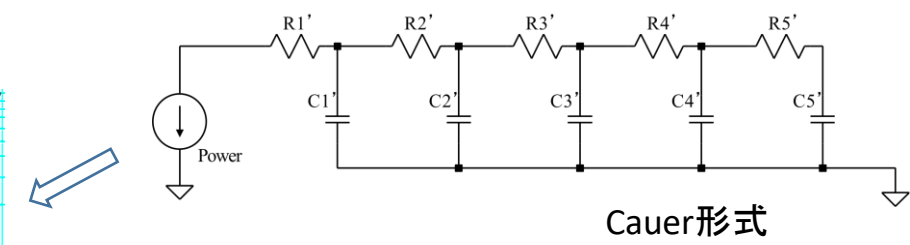
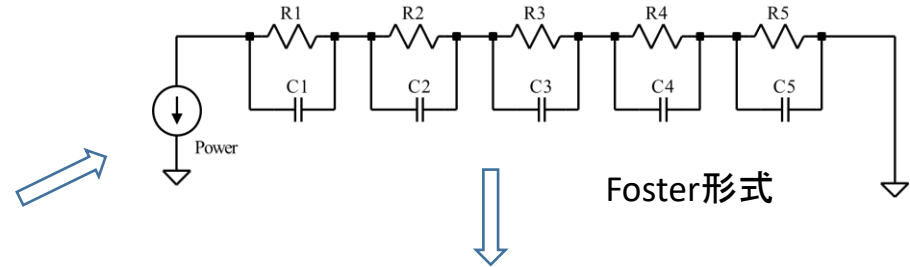
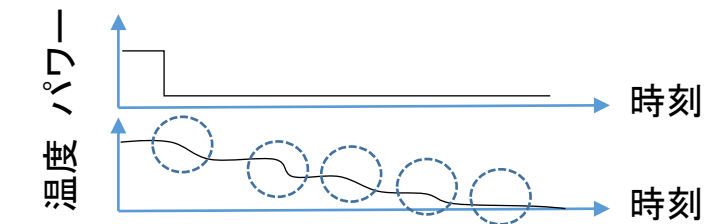
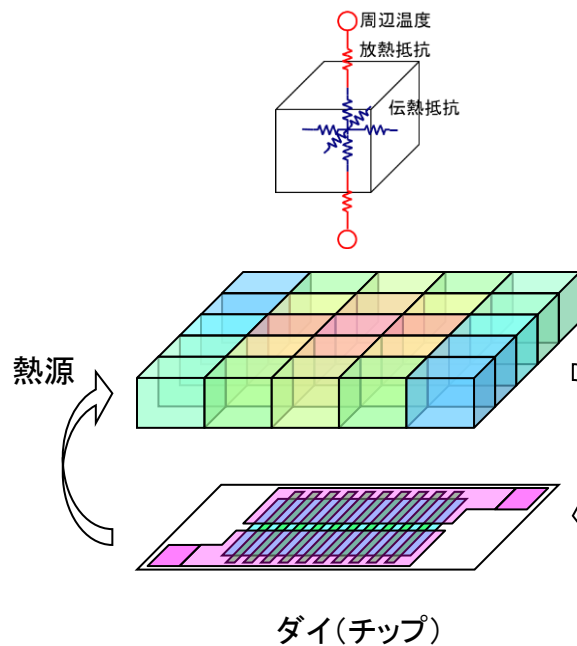
パワーモジュール(IGBT)の断面

パワーデバイスのスイッチング → 熱応カストレス → 接合部分における疲労
→ 摩耗故障(完全故障)

目次

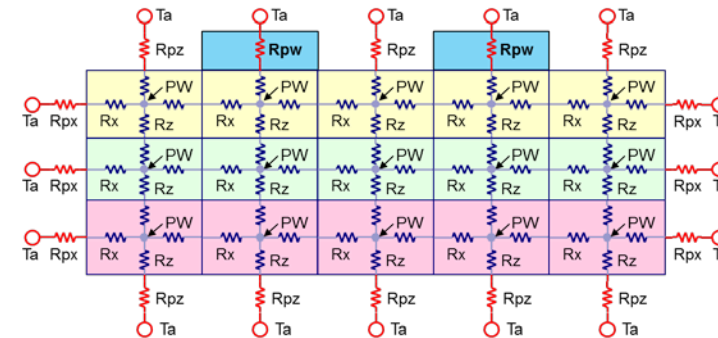
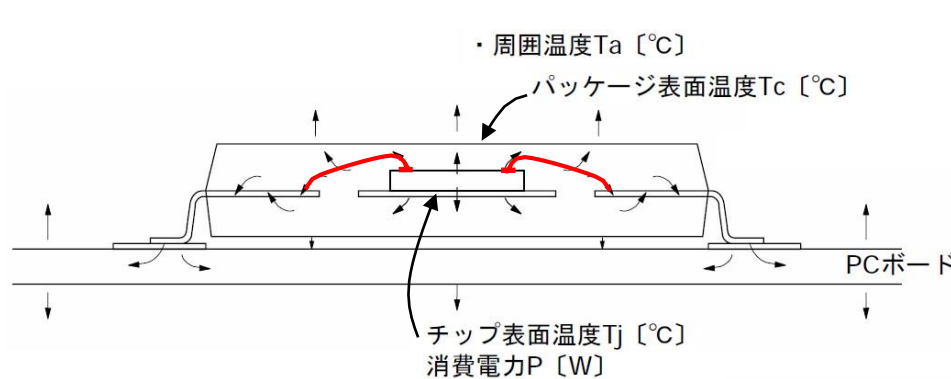
1. 信頼性と故障
2. 故障率の低減、耐圧の向上
3. 摩耗故障モデルと寿命予測
4. 熱・電気連成、熱応力解析
5. 寿命ばらつき
6. まとめ

熱解析とは？



熱・電気連成解析～熱解析

ボンディングワイヤによる放熱を考慮して、境界の放熱抵抗を設定



$$\frac{1}{\theta_{ja}} = \frac{1}{\theta_{ji}} + \sum \frac{1}{R_{pw}}$$

$$\frac{1}{\theta_{ji}} = \sum \frac{1}{R_{px}} + \sum \frac{1}{R_{py}} + \sum \frac{1}{R_{pz}}$$

$$R_{px} = \frac{A_i}{d_y \cdot d_z} \theta_{ji} \quad R_{py} = \frac{A_i}{d_x \cdot d_z} \theta_{ji} \quad R_{pz} = \frac{A_i}{d_x \cdot d_y} \theta_{ji}$$

θ_{ja} : パッケージ抵抗

R_{px}, R_{py} : 側面メッシュの熱抵抗

R_{pz} : 上面、下面の熱抵抗

d_x, d_y, d_z : メッシュサイズ

θ_{ji} : ボンディングワイヤを除くパッケージ抵抗

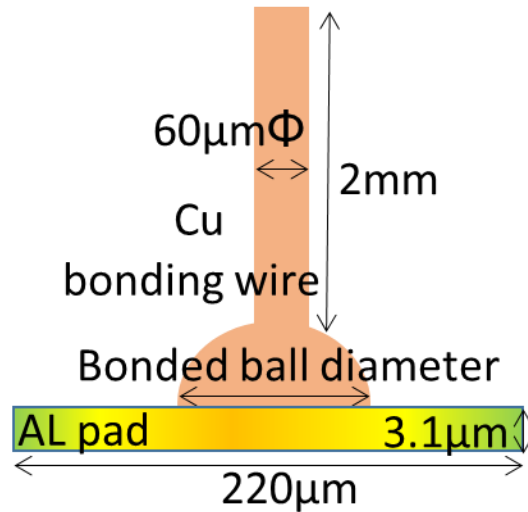
R_{pw} : 1個のボンディングワイヤの熱抵抗

A_i : ボンディングを除くチップの表面積

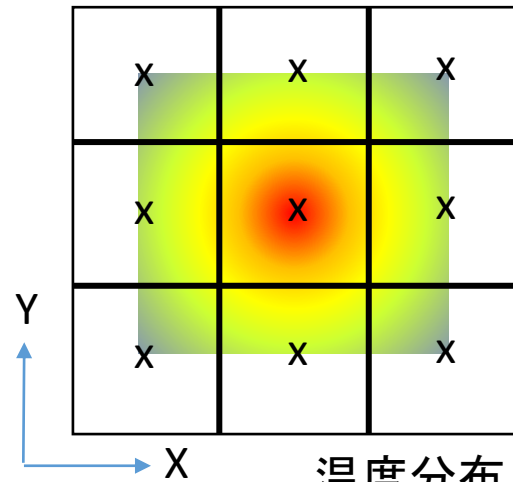
熱応力解析

LDMOS のワイヤボンディング部に対して熱応力解析を実行

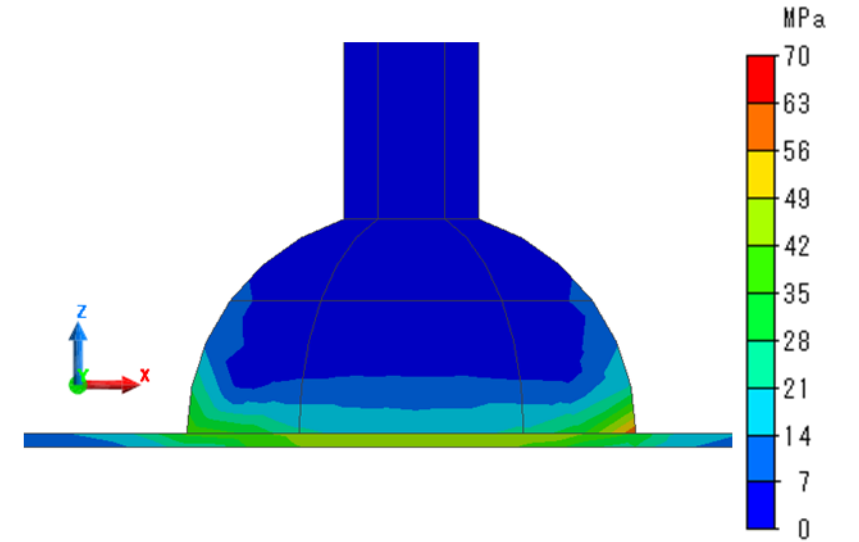
✓ 熱電気連成解析で求めたボンディングパッドの温度分布を入力



熱電気連成解析



温度分布



熱応力解析
(ムラタソフトウェア社製Femtet)

ワイヤボンディング部の熱応力連成解析

目次

1. 信頼性と故障
2. 故障率の低減、耐圧の向上
3. 摩耗故障モデルと寿命予測
4. 熱・電気連成、熱応力解析
5. 寿命ばらつき
6. まとめ

寿命ばらつき

ひずみ振幅と疲労寿命の関係式(Manson-Coffin の式)を用いて試算

✓ 熱応力解析で求めた応力の大きさが20%変化 → 寿命が倍半分

$$\epsilon = A \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \longrightarrow \frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \frac{\Delta\epsilon_{el}}{2} + \frac{\Delta\epsilon_{pl}}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f (2N_f)^c$$

アレニウスの式

Manson-Coffin の式

$\Delta\epsilon_t$: range of total stress

$\Delta\epsilon_{el}$: range of elastic stress

$\Delta\epsilon_{pl}$: range of plastic stress

σ_f : fatigue strength coeff.

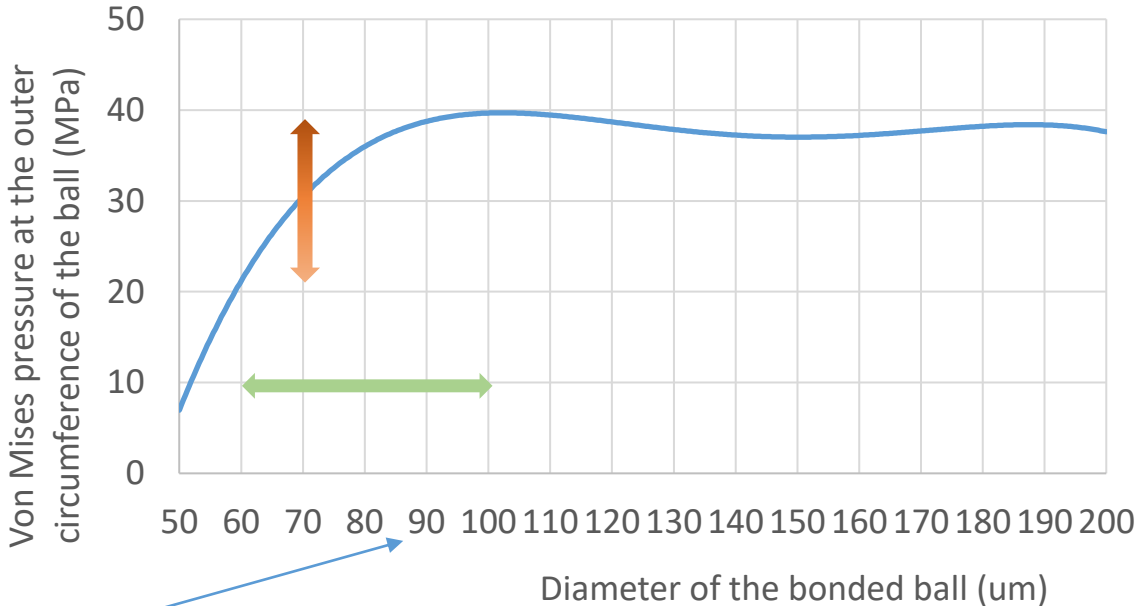
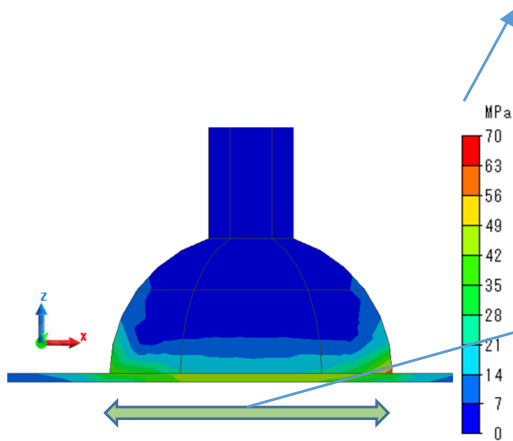
E : Young's modulus

b : fatigue strength exponent ~ -0.12

ϵ_f : plastic fatigue coefficient

c : plastic fatigue strength exp.

N_f : fatigue cycle number



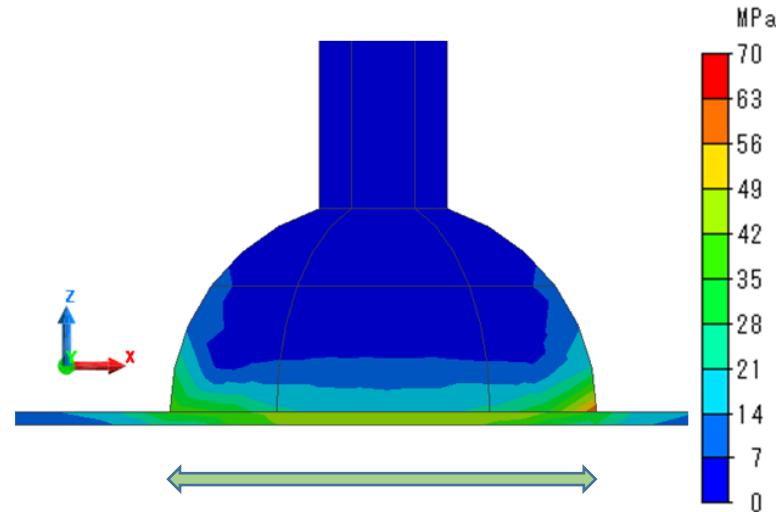
Variability in thermo-mechanical stress at the bonding edge
(Detailed plot of pressure with refined meshes)

寿命ばらつき

ひずみ振幅と疲労寿命の関係式(マンソン・コフィン)の式を用いて試算

✓ 熱応力解析で求めた応力の大きさが20%変化→寿命が倍半分

→ 接合部分の物理パラメータ(形状パラメータ、寸法)に依存



今後の取り組み

✓ 劣化過程(スイッチング→熱応力→疲労→特性変化→完全故障)の解析に基づくパワーデバイスの寿命予知

目次

1. 信頼性と故障
2. 故障率の低減、耐圧の向上
3. 摩耗故障モデルと寿命予測
4. 熱・電気連成、熱応力解析
5. 寿命ばらつき
6. まとめ

まとめ

- ✓ パワーデバイスの適用拡大 → 故障率の低減、**寿命予知**
- ✓ 故障率の低減、耐圧の向上 → **熱現象の解析**が重要
- ✓ 寿命予測 → **劣化因子、劣化過程**の解明がキー
- ✓ パワーデバイスの摩耗故障: **熱応力**ストレス → 接合部分における疲労
- ✓ 熱・電気連成解析 → 熱応力解析に接続
- ✓ 寿命ばらつき → 接合部の物理パラメータに依存
- ✓ 今後の取り組み: 劣化過程の解析に基づくパワーデバイスの寿命予知