

E 電子デバイスのエレクトロマイグレーション解析

MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) やIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) などの各種の半導体デバイスから構成されるパワーモジュールは、電力制御にもちいられる省エネ実現のための重要製品であり、小型化・高出力化に向けた研究開発が進められている。小型化・高出力化のためには、パワーモジュールの電流密度増加および耐熱性向上が必要となる。近年、パワーモジュールでは200°C以上の高温条件下での使用が想定されており、特に、耐圧性・耐熱性に優れた炭化ケイ素 (SiC) をもちいたパワー半導体では250°Cでの動作が実現されている¹⁾。また、そのような高温動作時の接合部の信頼性についても検討が行われている²⁻⁵⁾。一方、電流密度増加および動作温度上昇にともない、エレクトロマイグレーションの危険性が高まることが予想される。本稿では、パワーモジュールの重要部位であるワイヤと半導体チップの接合部 (ワイヤボンド部) におけるエレクトロマイグレーションを対象とし、有限要素法による電気・熱・濃度拡散・応力連成解析の事例を紹介する。



技術本部
計算科学センター
ふじもと ようへい
藤本 洋平



技術本部
計算科学センター
やまなか たくみ
山中 拓己



技術本部
計算科学センター
こが けんじ
古賀 健治



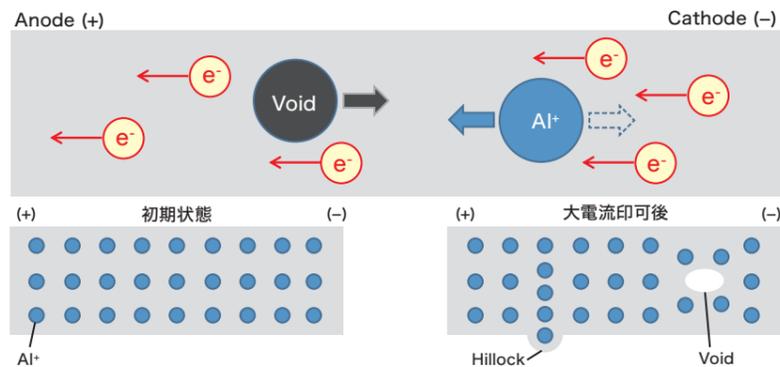
技術本部
計算科学センター
たかashi よういち
高岸 洋一

E-1 エレクトロマイグレーションとは^{6,7)}

エレクトロマイグレーションは、金属配線や接合部を流れる電子が金属原子と衝突し、金属原子を輸送する現象である。第1図にエレクトロマイグレーションのイメージを示す。金属原子の移動によりポイド (空孔) やヒロック (突起) が発生・成長すると、最終的に、金属原子が減少する箇所 (ポイド) は断線し、堆積する箇所 (ヒロック) は隣の配線との間隔が狭まり配線間が短絡する。したがっ

て、エレクトロマイグレーションは、配線や接合材の長期信頼性に関係する重要な物理現象である。なお、高温、高電流密度下で発生しやすい。一般に、エレクトロマイグレーションが発生すると、カソードでは、アノードに原子が輸送され、原子密度が減少するため、引張応力が発生する。一方、アノードでは、カソードから輸送されてきた原子が堆積し、原子密度が増加するため、圧縮応力が

第1図 エレクトロマイグレーションのイメージ



発生する。すなわち、カソードとアノードで応力勾配が発生し、これが新たな原子輸送の駆動力となる。金属接合部における原子輸送の主な駆動力は、応力勾配のほかに、原子濃度勾配、温度勾

配、電位勾配がある。したがって、エレクトロマイグレーションによる配線の劣化現象を予測するためには、電気・熱・濃度拡散・応力の複合的な現象を考慮する必要がある。

E-2 解析方法

2.1. 解析モデル

本解析では、第2図に示すようなIGBT[®]を考え、ワイヤボンド部を対象とした解析を行った。第3図にモデル形状と要素分割図 (メッシュ図) を示す。メッシュは全てテトラメッシュで作成し、総要素数は215,824である。

2.2. 支配方程式

本稿では、エレクトロマイグレーションによる電位、温度、空孔密度、応力の挙動を予測するため、電流保存則、熱伝導方程式、空孔密度保存則、応力の平衡方程式を解く。

電流保存則は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{J}_e &= 0 \\ \mathbf{J}_e &= \sigma_e \mathbf{E} \\ \mathbf{E} &= -\nabla V \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 \mathbf{J}_e は電流密度、 σ_e は電気伝導率、 \mathbf{E} は電場ベクトル、 V は電位である。

熱伝導方程式は以下で表される。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ρ は密度、 C_p は比熱、 k は熱伝導率、 T は温度、 Q はジュール発熱による発熱密度である。

空孔密度フラックスは、一般に密度勾配だけでなく電位勾配 (電子流)、応力勾配および温度勾配に依存するが、本解析では簡単のため空孔密度の勾配のみに依存すると仮定する。空孔密度の保存則は以下で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_v}{\partial t} &= -\nabla \cdot \mathbf{J}_v \\ \mathbf{J}_v &= -D_v \frac{C_v |Z^*| e}{k_B T} \nabla V \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 C_v は空孔密度、 \mathbf{J}_v はフラックス、 D_v は拡散係数、 Z^* は実効原子価、 e は電荷、 k_B はボルツマン定数である。

空孔密度による応力発生および緩和は十分速いものと仮定する。応力の平衡方程式は、 σ を応力テンソルとして以下のように表される。

$$\nabla \cdot \sigma = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、以下の式より熱ひずみ ϵ_{th} を求める。

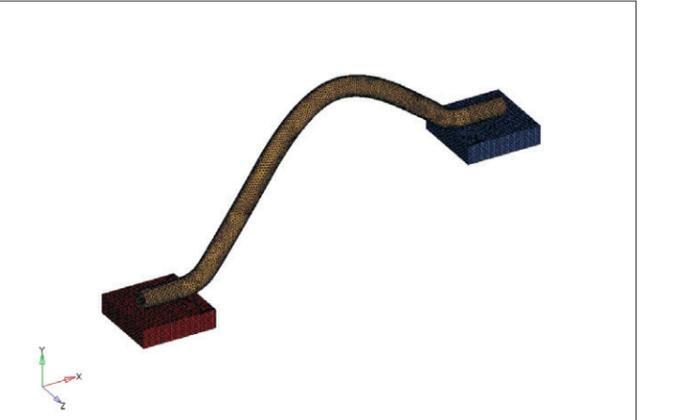
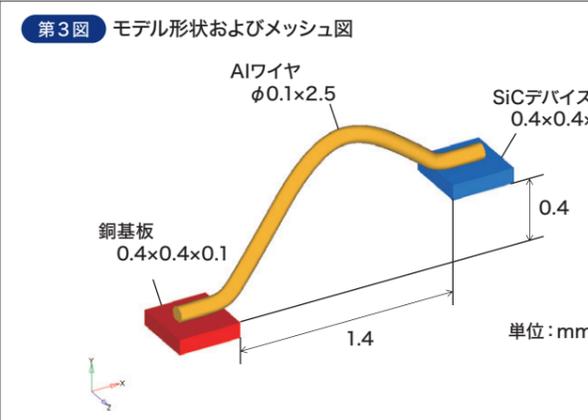
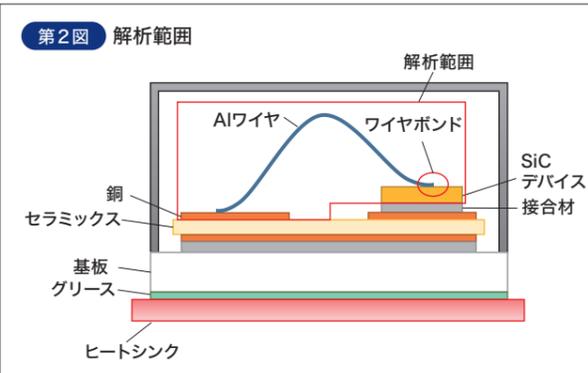
$$\epsilon_{th} = \alpha \Delta T \quad \dots\dots\dots (5)$$

なお、 α は線膨張率である。

さらに、空孔ひずみ ϵ_v は空孔密度に比例するとし、以下の式より求める。

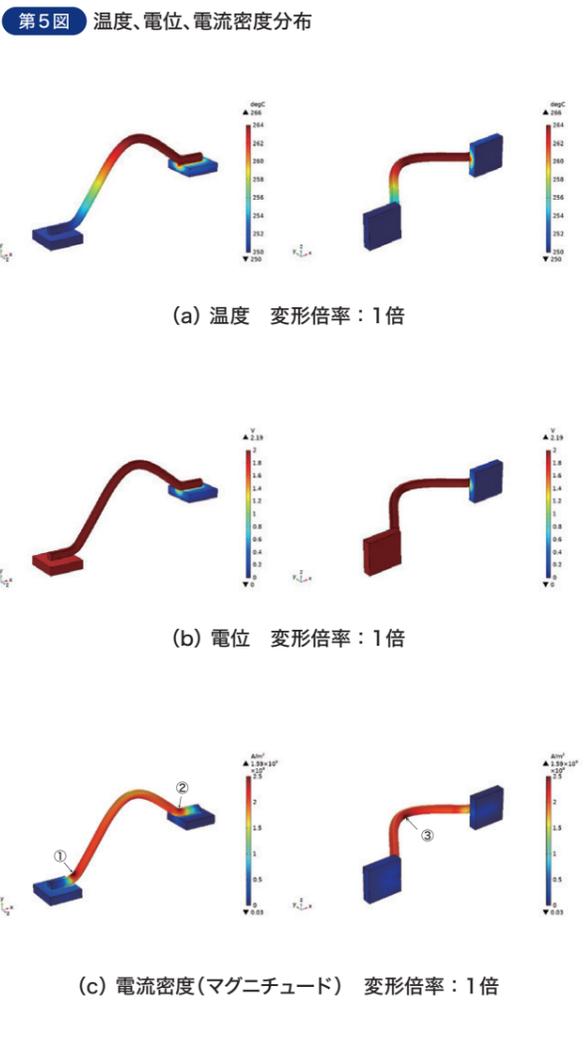
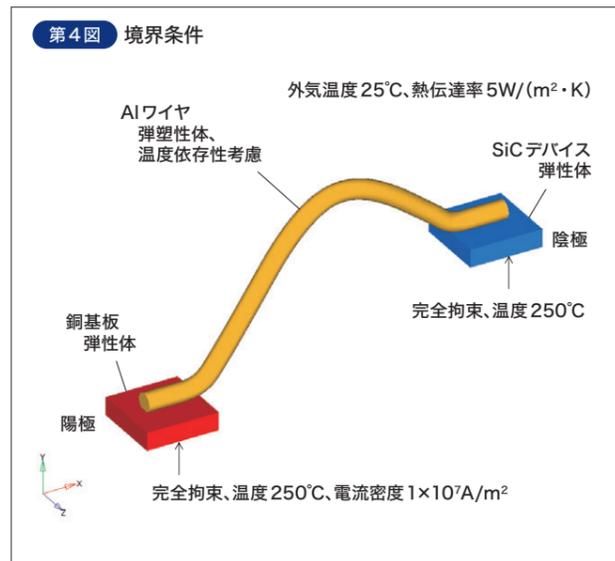
$$\epsilon_v = \epsilon_{max} \frac{C_v}{C_{vmax}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ϵ_{max} は最大体積膨張率、 C_{vmax} は最大空孔密度を表す。

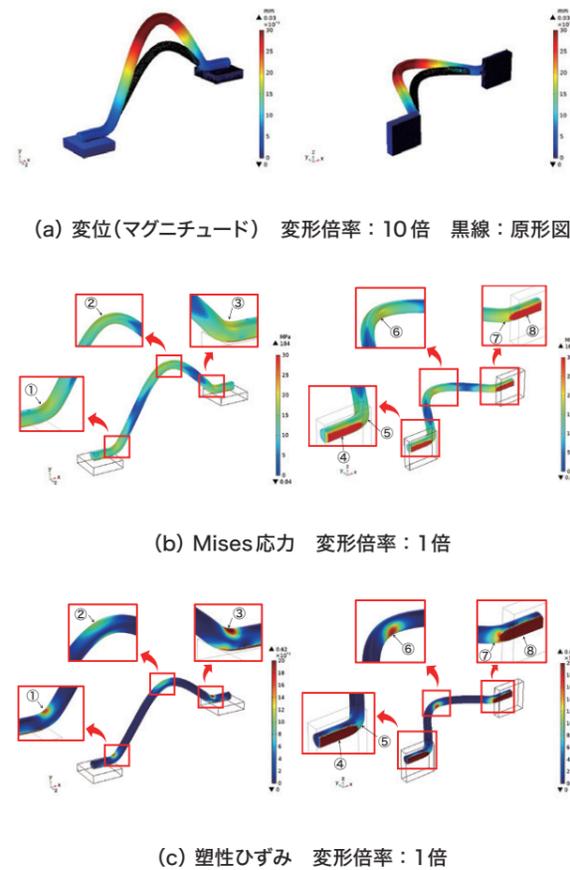


2.3 解析条件

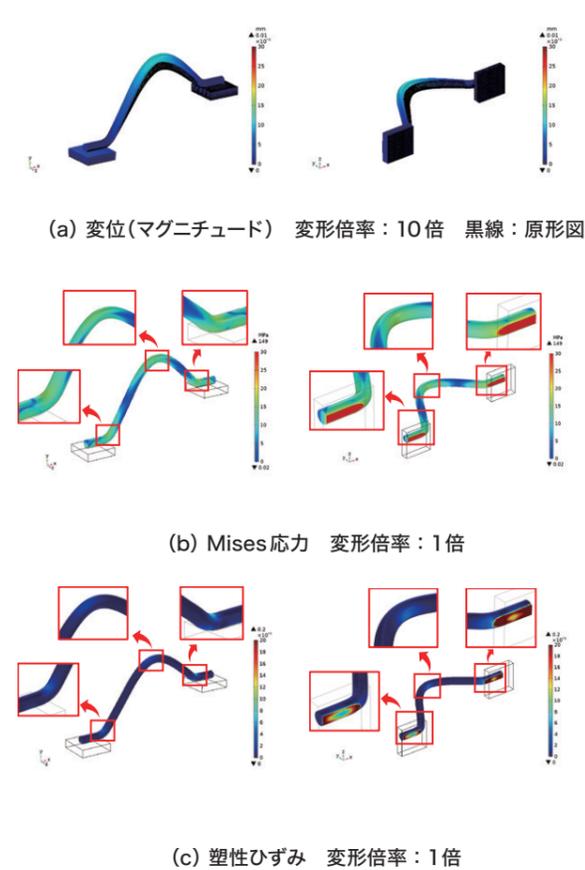
本稿では、将来のパワーモジュールの小型化・高出力化を想定し、予想される高温・高電流密度の使用条件下における解析を行った。第4図に境界条件を示す。Alワイヤは温度依存性を考慮した弾塑性体とし、材料特性は文献値⁸⁾をもちいた。銅基板およびSiCデバイスは弾性体とし、材料特性は典型値をもちいた。銅基板およびSiCデバイスの底面を完全拘束し、一定温度250°Cを与えた。また、銅基板底面には電流密度 $1 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ を与えた。外気温度は25°Cとし、モデル外表面の熱伝達率は自然対流を想定して $5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ とした。モデル上では、Alワイヤ-銅基板間およびAlワイヤ-SiCデバイス間の接触抵抗は無視した。なお、エレクトロマイグレーションを考慮した場合の解析(Case1)に加え、式(3)および式(6)を省くことでエレクトロマイグレーションを考慮しない場合の解析(Case2)も行い、両者の結果を比較した。解析は、汎用有限要素法ソルバCOMSOL Multiphysics™ ver.5.6をもちいて行った。



第6図 Case1の変位、Mises応力、塑性ひずみ分布



第7図 Case2の変位、Mises応力、塑性ひずみ分布



E-3 解析結果

第5図に、十分な時間が経過後の温度、電位、電流密度、および、濃度分布を示す。電位分布を見ると、Alワイヤとの界面近傍において電位が低下していることが分かる。これは、Alワイヤおよび銅基板と比較してSiCデバイス領域の電気伝導率が非常に小さいためと考えられる。電流密度分布を見ると、ワイヤの湾曲部(第5図(c)中の①~③)で電流が集中し、湾曲部内側の電流密度が高くなっている。一方、温度分布ではSiCデバイス側で高くなっており、銅基板側にかけて温度勾配が形成されている。電流密度(発熱密度)は両側で差はほとんど見られないことから、熱伝導率の違いが上記の結果に大きく影響したものと思われる。

第6図および第7図に、エレクトロマイグレーションを考慮した場合(Case1)としない場合(Case2)の、十分な時間が経過後の変位、Mises応力、および、塑性ひずみ分布をそれぞれ示す。Case1の応力は熱ひずみと空孔ひずみを複合して求まる応力であり、Case2の応力は熱ひずみのみから求まる応力である。エレクトロマイグレーションを考慮することにより、変位、Mises応力、および、塑性ひずみが大きくなっていることがわかる。特に、Mises応力および塑性ひずみは、第6図(b)および(c)中に示した①~⑧の箇所で顕著に大きくなっている。カソード側の③、⑦、⑧では、アノード側に原子が輸送され、原子密度が減少するため、ボイドが形成されていると推察される。一方、アノード側の①、④、⑤では、カソード側から輸送されてきた原子が堆積し、原子密度が増加するため、ヒロックが形成されていると推察される。また、②および⑥は、ワイヤの変形が最も大きくなる箇所である。第1表は、上記の結果の最大値をまとめたものである。エレクトロマイグレーションを考慮することにより、エレクトロマイグレーションを考慮しない場合に比べ、変位は218%、Mises応力は23%、塑性ひずみは208%増加した。Mises応力および塑性ひずみは疲労破壊などの破壊の要因になることから、エレクトロマイグレーションはボイドやヒロックの形成だけでなく、他の破壊現象に対しても影響を及ぼすと考えられる。

第1表 エレクトロマイグレーションの有無による最大値の比較

	Case1	Case2
変位(mm)	0.035	0.011
Mises応力(MPa)	184	149
塑性ひずみ(%)	62.3	20.2

本稿では、ボンディングワイヤにおけるエレクトロマイグレーションを対象とした、電気・熱・濃度拡散・応力連成解析の事例を紹介した。エレクトロマイグレーションによる電位、温度、空孔密度、応力の挙動を予測するため、電流保存則、熱伝導方程式、空孔密度保存則、応力の平衡方程式をもちいて、有限要素法による連成解析を実施した。また、エレクトロマイグレーションを考慮した場合としない場合の解析を実施し、両者の結果を比較した。その結果、エレクトロマイグレーションにより、変位、Mises応力、および、塑性ひずみが1.2~3倍程度大きくなることがわかった。Mises応力および塑性ひずみは疲労破壊などの破壊の要因になることから、エレクトロマイグレーションはボイドやヒロックの形成だけでなく、他の破壊現象に対しても影響を及ぼす可能性が示された。本稿ではボンディングワイヤについての事例を紹介したが、本技術の応用として、CuSn系はんだなどへの適用も期待される。

参考文献 *1) S. Tanimoto et al., IEEE Trans. Electron device, Vol.62, pp.258-269, (2011)
 *2) Y. Yamada et al., Microelectronics Reliability, Vol.47, No.12, pp.2147-2151, (2015)
 *3) S. Tanimoto et al., ECS Trans, Vol.58, No.4, pp.33-47, (2013)
 *4) 加藤ほか, 第34回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 3C5-01, (2020)
 *5) 加藤ほか, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J103-C, No.3, pp.129-136, (2020)
 *6) 山中, 第28回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 7B-05, (2014)
 *7) C. M. Tan, World Scientific Publishing, (2010)
 *8) 葉山他, スマートプロセス学会誌, Vol.9, No.5, pp.216-223, (2020)