

平成 30 年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「実験・シミュレーション融合評価技術による高耐熱パワー半導体モジュールの
信頼性設計・評価システムの開発」

研究開発成果等報告書

令和元年五月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 株式会社先端力学シミュレーション研究所

目 次

第1章 研究開発の概要	4
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	4
1-2 研究体制	6
1-3 成果概要	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口	9
第2章 本論	10
2-1 高耐熱接合材料の材料特性ならびに構成モデルの取得	10
2-2 PCT ならびに熱応答評価シミュレーション機能の開発	13
2-2-1 パワーサイクル試験(PCT)用シミュレーション機能の開発	13
2-2-2 温度解析結果	15
2-2-3 熱応力解析結果	16
2-3 実機試験における寿命評価指標の定量測定、ならびに寿命予測式による信頼性の統計評価システムの開発	19
2-4 損傷パラメータと疲労寿命を関連づける寿命予測式の作成	21
2-4-1 実装モジュールの TCT、PCT 試験による疲労寿命評価	22
2-4-2 実装モジュールの疲労寿命予測式の構築	23
2-5 バーチャル実装評価システムの開発	27
2-5-1 開発システム概要	27
2-5-1-1 チップ周辺構造設定機能	28
2-5-1-2 バルク領域メッシュ生成機能	30
2-5-1-3 標準モジュール生成機能	31
2-5-1-4 TCT/PCT 試験条件の設定機能	30
2-5-2 開発システムの検証解析	35
2-5-2-1 検証解析1 阪大実装モジュールでの TCT 試験	35
2-5-2-2 検証解析2 阪大実装モジュールでの PCT 試験	41
2-5-2-3 KAMOME プロジェクトモジュールによる検証解析	45

第3章 全体総括	50
3-1 複数年の研究開発成果	50
3-2 研究開発後の課題・事業化展開	50

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

パワー半導体の世界市場規模は2030年時点で231億ドル、平均成長率は6.5%と拡大が予測されている。その巨大な市場を狙い我が国を含め重点的に研究開発が行われている。特に、増大するパワー密度と高温安定動作要求に向け耐熱性・放熱性・信頼性を満たす実装材料と実装技術の研究開発は信頼性設計・評価期間の長期化が大きな問題となっている。特に、環境や安全への意識の高まりと情報化の進展に伴い自動車産業でその解決方法が求められている。

現状の信頼性設計・評価手法はTCT,PCT等の信頼性試験において、SAT画像などの試験結果の観察の試行錯誤の経験値を設計へフィードバックする方法がとられている。一方、解析的（理論的）な取り組みは、物理現象の難しさや解析用材料物性値の不足、データ作成の困難さなどのため市販の汎用熱応力解析プログラムを用いての応力集中、温度分布計算を確認する定性的評価の域を脱しておらず、長期に渡り実測したデータが生かされず信頼性と結びつける科学的な分析が課題となっている。

そこで、多くの実験データと解析（シミュレーション）を融合した信頼度の高い工学的モデルと評価基準（TCT,PCTサイクルの基準と故障基準など）を獲得することでパワー半導体モジュールのフロントローディング設計を導入する。同時に、パワー半導体モジュールの評価基準作りで我が国が国際的なイニシアティブを獲得するためにも、このようなシステムの研究開発が待ち望まれ、大阪大学が開発した実装材料や実装構造など優れた研究成果を海外に先んじて本件システムとの組み合わせで実証し、次世代のものづくりに生かすチャンスである。

(2) 研究目的及び目標

本研究開発は、省エネルギーのキーデバイスである高耐熱パワー半導体モジュールの信頼性設計・評価システムを構築するものである。信頼性試験の実測値データベースと回路-熱-構造のマルチフィジックスシミュレーションによる損傷パラメータを統計的手法で相関をとり、寿命予測式を導出し評価する。図1.1に従来技術に対する本開発システムの特徴を示す。

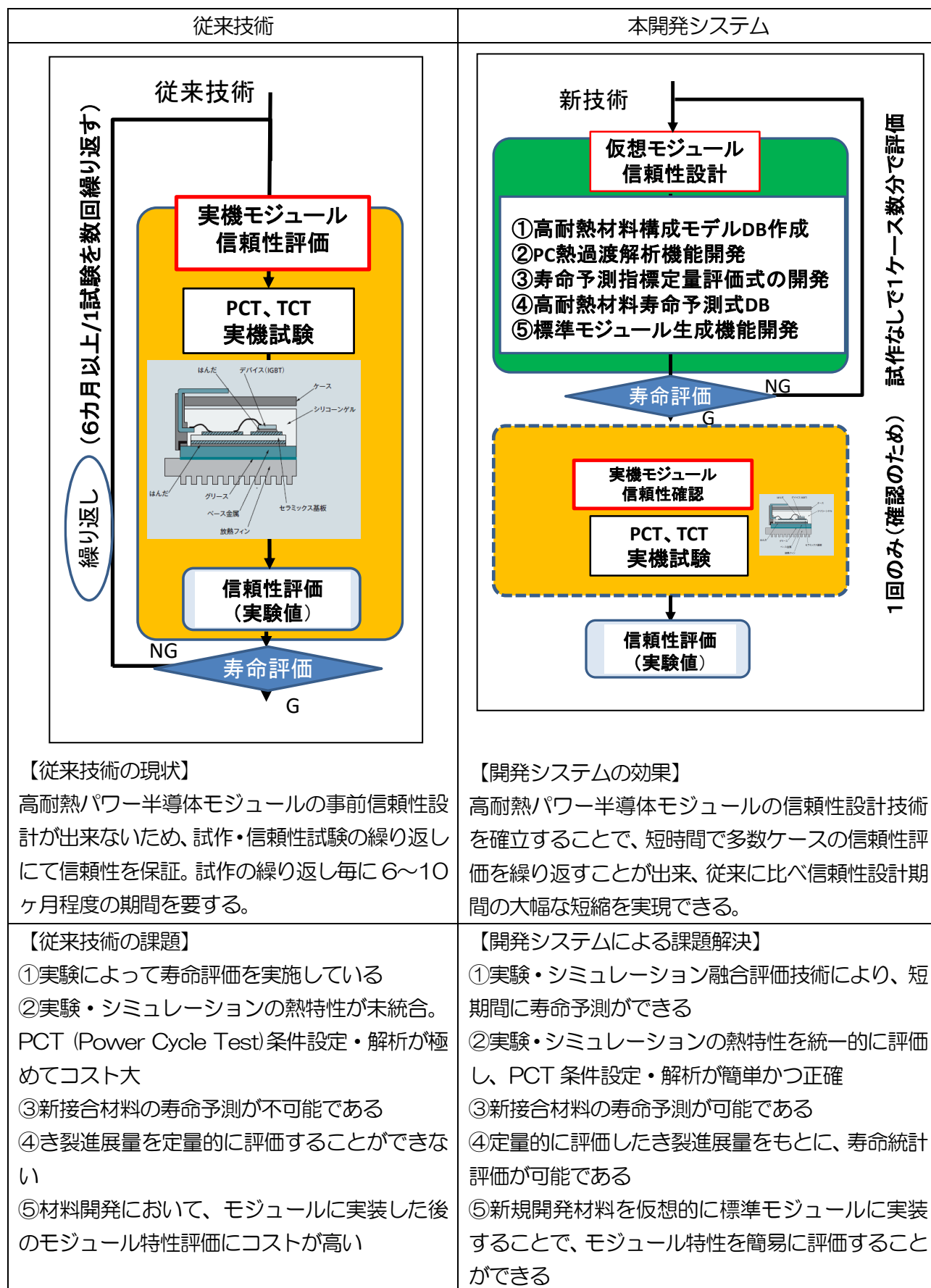


図 1-1 本開発システムの特徴

このようなシステムを実現するために、下記の5つのサブテーマを定めて研究開発を実施した。また、各サブテーマに対して技術的目標値を設定した。

表 1-1 開発サブテーマと技術的目標値

サブテーマ	技術的目標値
1. 高耐熱接合材料の材料特性ならびに構成モデルの取得	①応カーひずみ線図を取得するサンプル数は $n=5$ 以上 ②試験で得られた応カーひずみ線図とシミュレーションで利用する応カーひずみ関係の差異を 20%以内
2. PCT ならびに熱応答評価シミュレーション機能の開発	①PCT の T_j 、 ΔT_j 目標値に対して、電流・電圧の自動設定機能でシミュレーションした結果との差異は 5%以内 ②シミュレーション結果の T_j と、測定データとして得られる T_j との差異は 5%以内 ③熱-構造シミュレーションを回路シミュレーションと連成することによる計算時間の増加は 50%以内
3. 実機試験における寿命評価指標の定量測定、ならびに寿命予測式による信頼性の統計評価システムの開発	①き裂面積の自動検出値が、作業者の手動計測値との差異は 20%以内 ②熱抵抗変化によるき裂面積推定と、SAT によるき裂面積推定の差異が 20%以内 ③き裂面積率と寿命予測値を結びつける回帰式を作成する
4. 損傷パラメータと疲労寿命を関連づける寿命予測式の作成	①TCT/PCT 試験用の実装モジュールのサンプル数は $n=5$ 以上 ②TCT/PCT 試験における T_j 、 ΔT_j の設定値と実測値の差異は 10%以内 ③作成した予測式による寿命の予測値が、実験結果のバラツキの範囲内であること
5. バーチャル実装評価システムの開発	①標準試験モジュールの CAE 形状モデル生成の操作が 5 分以内で完了 ②TCT/PCT 試験の標準条件の設定操作が 5 分以内で完了 ③材料の単体特性を設計変数として、モジュールの信頼性特性を DB に蓄積可能 ④信頼性評価の工程が、簡易統計評価の場合は 1 秒以内、詳細 CAE 評価の場合は 1 日以内に完了

1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

本事業は、図 1-2 に示すような体制で研究開発を実施した。事業管理機関は先端力学シミュレーション研究所であり、年に 2 回の推進会議において、研究実施機関、アドバイザーとの意見交換を行いながら本事業を推進した。

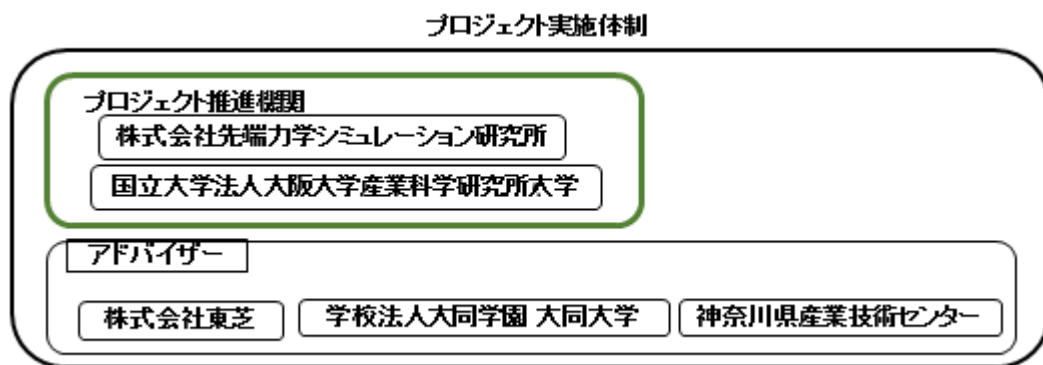


図 1-2 本事業の実施体制

事業管理機関：株式会社先端力学シミュレーション研究所

研究実施機関：①株式会社先端力学シミュレーション研究所

研究者：大浦 賢一（総括研究代表者）

小池 邦昭

伊勢谷 健司

青野 昌弘

下斗米 貴之

安藤 知明

鶴飼 修

山田 和夫

②国立大学法人 大阪大学産業科学研究所

研究者：菅沼 克明（副総括研究代表者）

下山 章夫

アドバイザー：八坂 慎一 独立行政法人 神奈川県産業技術研究所

山田 靖 学校法人 大同大学 電気電子工学科 教授

井口 知洋 東芝デバイス&ストレージ株式会社

1-3 成果概要

サブテーマ 担当した研究実施機関	成果概要	目標達成度
1. 高耐熱接合材料の材料特性 ならびに構成モデルの取得 【大阪大学、(株) 先端力学シミュレーション研究所】	高耐熱接合材料として、大阪大学の開発したマイクロフレーク焼結銀、ならびに、リファレンスの高温はんだ（Pb-5Sn）、鉛フリーはんだ（Sn-Cu-Ni）の3種の接合材料のクリープ試験を実施した。ここで、材料特性は動作保証温度の範囲内で温度依存性がある	100%

	ため、複数温度条件（30℃、100℃、175℃、250℃）に対して実施した。 ここで取得したクリープ特性値は、実験結果ならびにクリープモデルの応力ひずみ速度関係との差異は20%以下に収まっており、開発したバーチャル実装評価システムにおける高耐熱接合材料の材料物性値として組み込むことが出来た。	
2. PCT ならびに熱応答評価シミュレーション機能の開発 【(株)先端力学シミュレーション研究所】	パワーサイクル（PC）試験を模した、回路—熱—応力シミュレーションシステムを構築し、熱解析を行わないサーマルサイクル（TC）試験と比べて9.4%の計算コスト増でPC試験のシミュレーションを実現した。 また、PC試験において目標のジャンクション温度（Tj）ならびにジャンクション温度振幅（ΔT_j）に対する投入電力（電流、電圧）を自動的に最適計算するシステムを開発し、目標値と解析値の差異が0.1%以下でPC試験のシミュレーションが実現した。	100%
3. 実機試験における寿命評価指標の定量測定、ならびに寿命予測式による信頼性の統計評価システムの開発 【(株)先端力学シミュレーション研究所】	試験サイクル進展における連続的なSAT観察データを読み込むことで、試験サイクル進展に伴うき裂面積率の増大を画像処理で評価可能な寿命評価指数取得システムを開発した。本開発ソフトウェアでは、熟練作業者の目視による計測と比べて平均4%程度の計測精度が得られた。 また、計測した破壊進展指標とシミュレーションの計算で得られる損傷パラメータとの相関である寿命予測式を作成し、バーチャル実装評価システムに組み込んだ。	100%
4. 損傷パラメータと疲労寿命を関連づける寿命予測式の作成 【大阪大学、(株)先端力学シミュレーション研究所】	高耐熱接合材料として、大阪大学の開発したマイクロフレック焼結銀、ならびに、リファレンスの高温はんだ（Pb-5Sn）、鉛フリーはんだ（Sn-Cu-Ni）の3種の接合材料を用いた試験モジュールを製作し、TC、PC試験による接合材料の破壊進展を、SATならびに構造関数による熱抵抗の増大で評価した。 ここで取得した試験モジュールの破壊進展指標は、対応するシミュレーションによる損傷パラメータと組み合わせる寿命予測式を作成した。 TC試験による作成した寿命予測式は、バーチャル実装評価システムに組み込まれて、寿命予測式による予測結果は実験結果ならびにクリープモデルの応力ひずみ速度関係と一致した。	100%

	ひずみ速度関係との差異は 20%以下に収まっており、開発したバーチャル実装評価システムにおける高耐熱接合材料の材料物性値として組み込んだ。	
5. バーチャル実装評価システムの開発 【(株)先端力学シミュレーション研究所、大阪大学】	パワーモジュールの実装材料メーカー向けに、信頼性試験の標準試験モジュールをあらかじめビルトインで生成可能な自動生成機能、ならびに、標準的な TC・PC 試験条件を簡単に設定可能な標準試験解析機能を組み込んだバーチャル実装評価システムを開発し、標準モジュールのメッシュ形状生成ならびに TC・PC 試験の標準条件をそれぞれ 5 分以内に設定し、解析実行できるようになった。 ここで、開発したバーチャル実装評価システムにはサブテーマ1，サブテーマ4にて取得した焼結銀接合材料が組み込まれており、予測式をあらかじめ構築済みの簡易評価の場合は 1 秒以内、1 からシミュレーションを実施する詳細 CAE 評価の場合は 1 日以内に評価が完了できることを確認した。	100%

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社先端力学シミュレーション研究所

技術開発部 大浦賢一

〒112-0002 東京都文京区小石川 5-5-5

TEL : 03-5981-8116

E-mail : ohura@astom.co.jp

第2章 本論

2-1 高耐熱接合材料の材料特性ならびに構成モデルの取得

焼結銀接合材料ならびにリファレンスの鉛フリーはんだ（Sn-Ag-Cu）、高温はんだ（Pb-5Sn）のクリープ特性を取得するために、大阪大学産業科学研究所にクリープ試験装置を導入した。

本クリープ試験機の外観図ならびに主要諸元を図 2-1 ならびに表 2-1 に示す。また、本クリープ試験機で用いる試験片は、図 2-2 に示すような幅 5mm×厚さ 0.5mm の平行部を持つダンベル型の試験片とした。

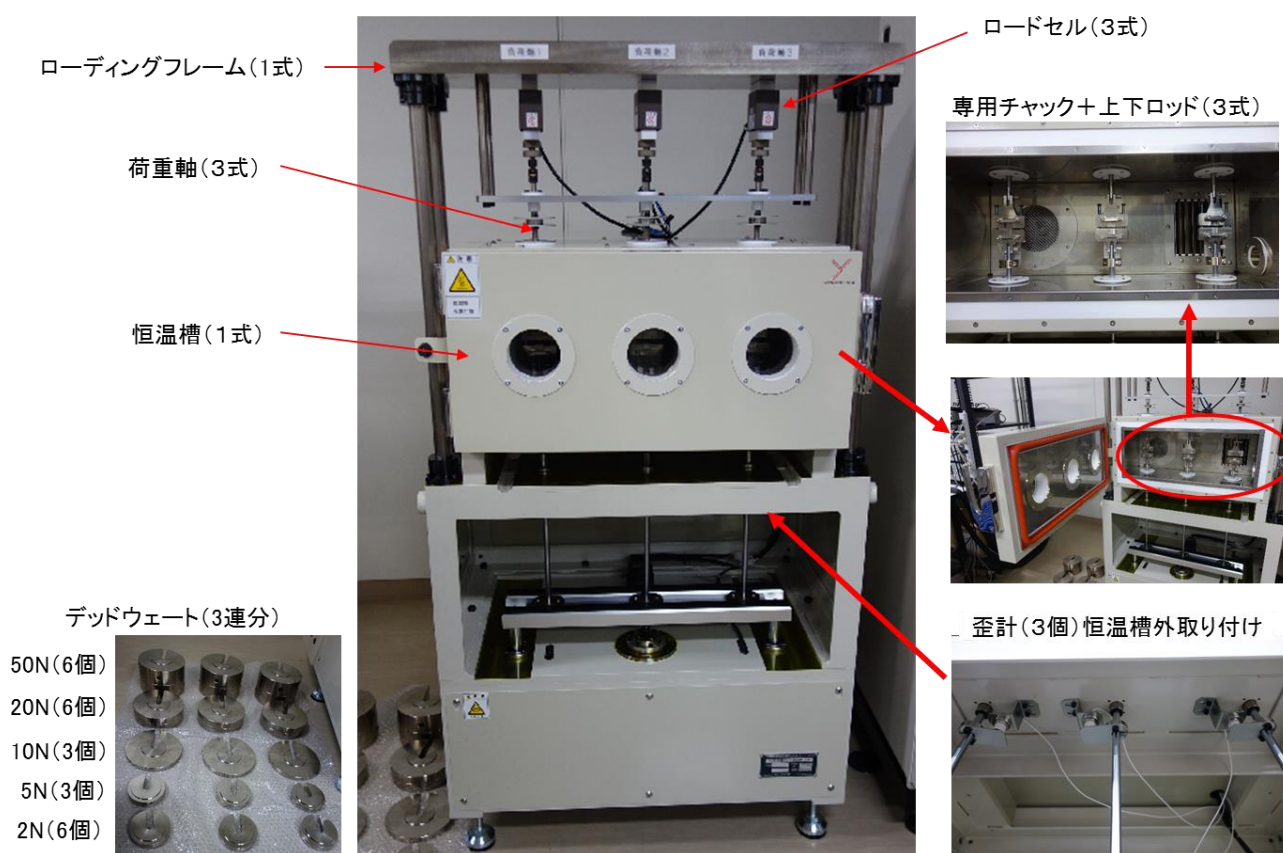


図 2-1 クリープ試験機外観図

表 2-1 クリープ試験機主要諸元

同時試験本数	3本掛け
方式	デッドウェイト式
試料形状	ダンベル形状 幅 5mm×0.5t
容量	MAX150N (60MPa)
荷重検出用ロードセル	200N/FS
ストローク	20mm 程度

歪測定 渦電流式変位センサー	4000 μ /FS
使用温度範囲	200℃迄
変位測定位置	チャック間の変位を測定
大きさ（高さ×幅×奥行き）mm	1200×800×600 程度
重量	200kg
恒温槽温度範囲	RT～250℃（温風式）

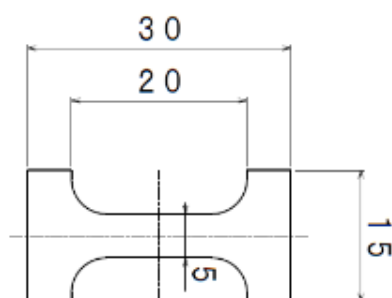


図 2-2 ダンベル型試験片形状

導入したクリープ試験装置を用いて、焼結銀接合材料ならびにリファレンスの鉛フリーはんだ（Sn-Ag-Cu）、高温はんだ（Pb-5Sn）のクリープ特性を取得した。

図 2-3、図 2-4に焼結銀のクリープ試験結果を示す。

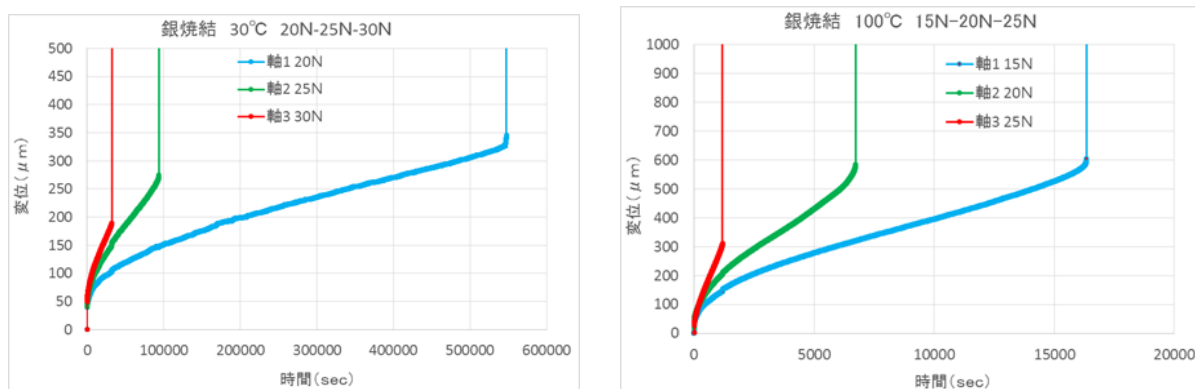


図 2-3 焼結銀クリープ試験結果（左：30℃、右：100℃）

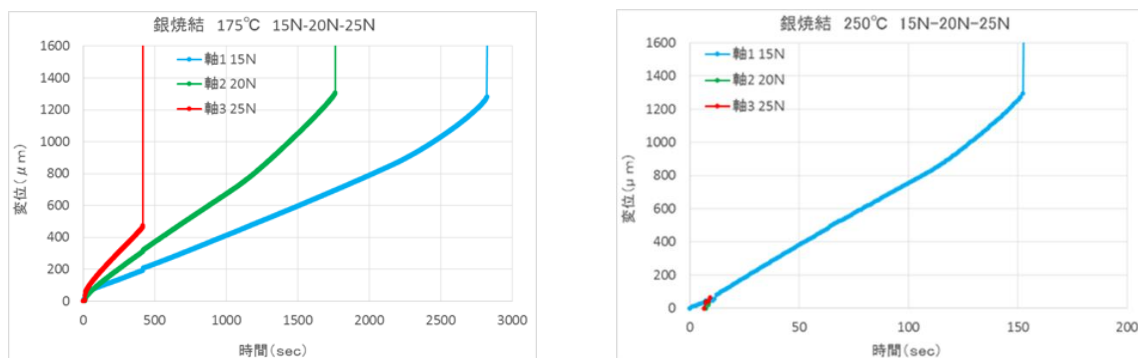


図 2-4 焼結銀クリープ試験結果（左：175℃、右：250℃）

また、クリープ試験結果より Norton 型クリープ構成則のパラメータ A、n 値を導出した。図 2-5～図 2-7 に示す応力-ひずみ速度線図を用いて得られた高温はんだのクリープパラメータを、表 2-2 に示す。これにより、バーチャル実装シミュレータによるパワーモジュールの信頼性シミュレーションにおいて、各種の接合材料を用いることが出来る。

表 2-2 高温はんだのクリープ特性

温度(°C)	A	n
30	8.9214E-22	13.43
100	1.6595E-11	5.99
175	1.0172E-10	7.96

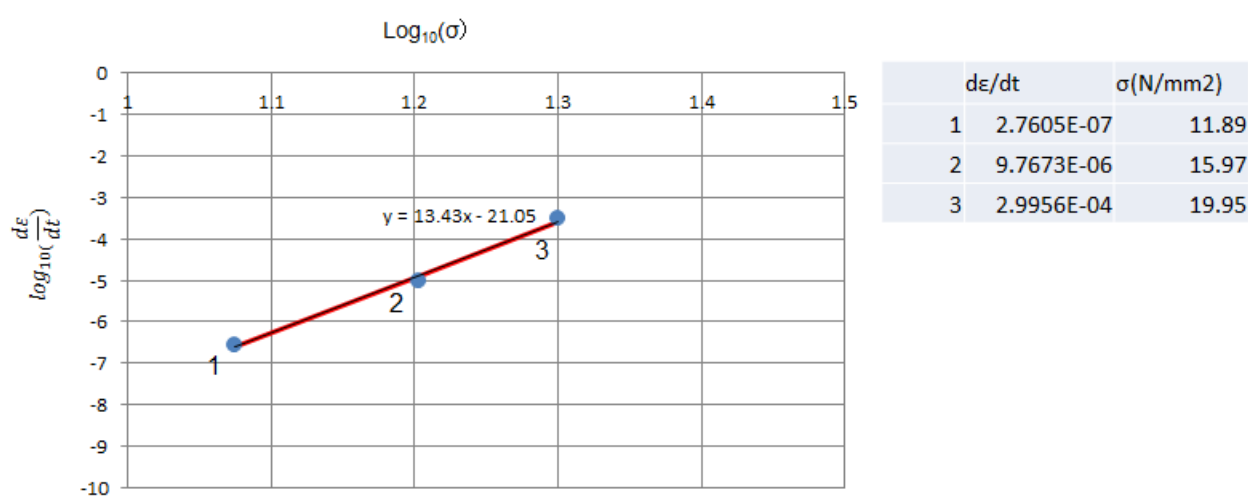


図 2-5 高温はんだの応力-ひずみ速度線図 (30°C)

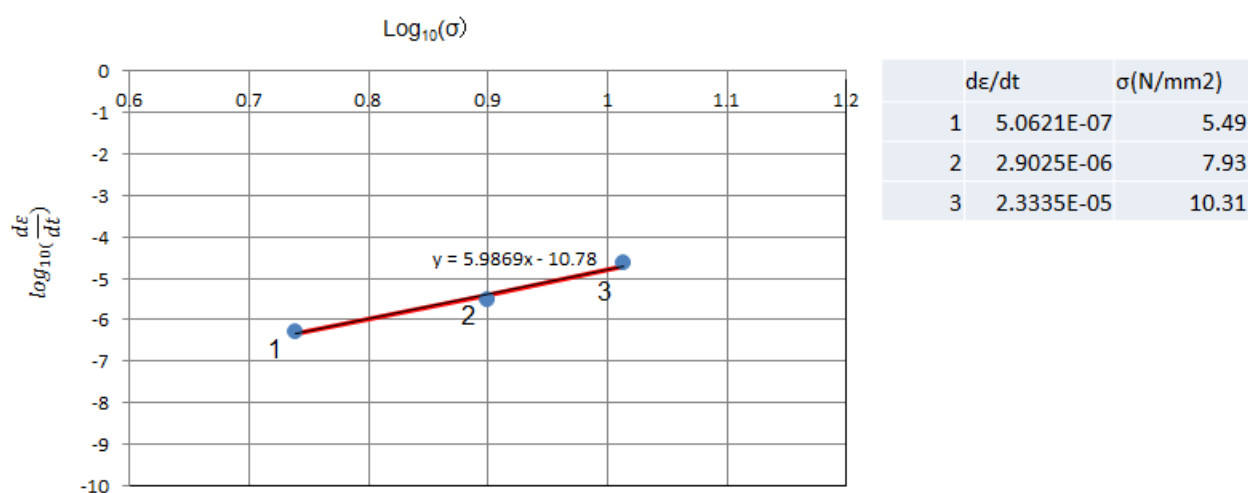


図 2-6 高温はんだの応力-ひずみ速度線図 (100°C)

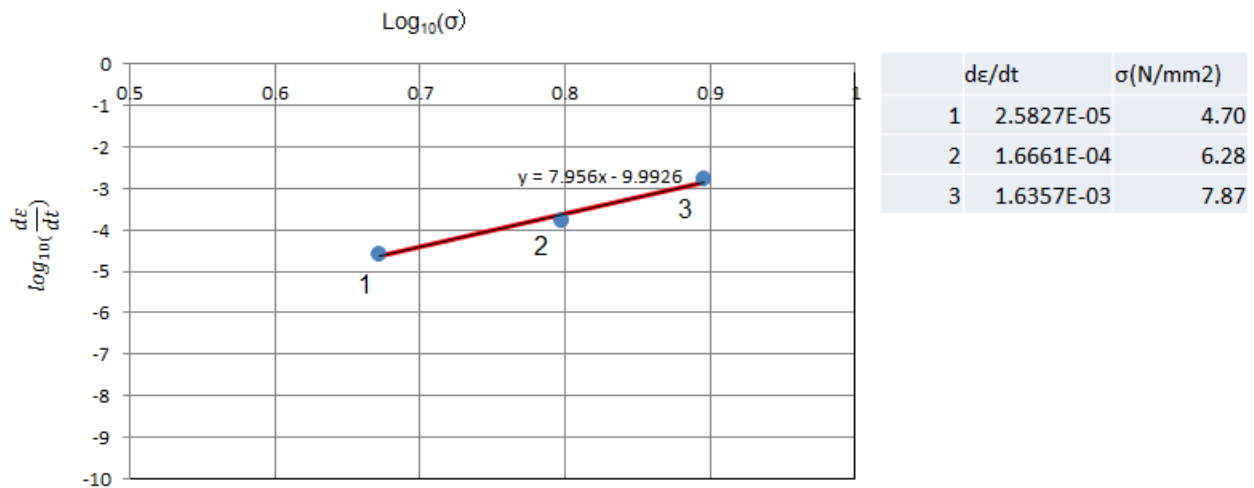


図 2-7 高温はんたの応力ひずみ速度線図（175℃）

2-2 PCT ならびに熱応答評価シミュレーション機能の開発

パワー半導体の信頼性試験項目として重要なパワーサイクル試験(PCT)においては回路-熱-構造が連成した複合的な物理現象が作用する。そこで、本問題を統一的に取り扱うことが可能なシミュレーションシステムを開発した。

開発する連成機能の概要を図 2-8 に示す。

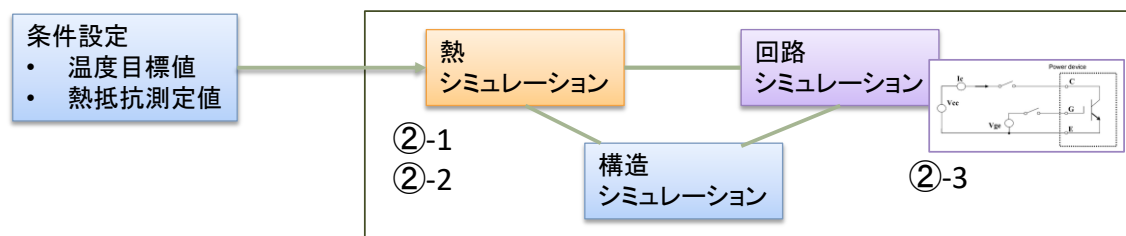


図 2-8 回路-熱-構造連成シミュレーション

本連成シミュレーションは熱、回路および構造シミュレーション部分から構成される。ユーザーはPCT試験で行う温度目標値や熱抵抗の測定値のようなデータを入力することでシミュレータ側では目標値を達成するための計算条件を自動的に最適化する。

2-2-1 パワーサイクル試験(PCT)用シミュレーション機能の開発

本開発により PCT 試験を行うための自動最適化を行うための計算フローを図 2 9 に示す。

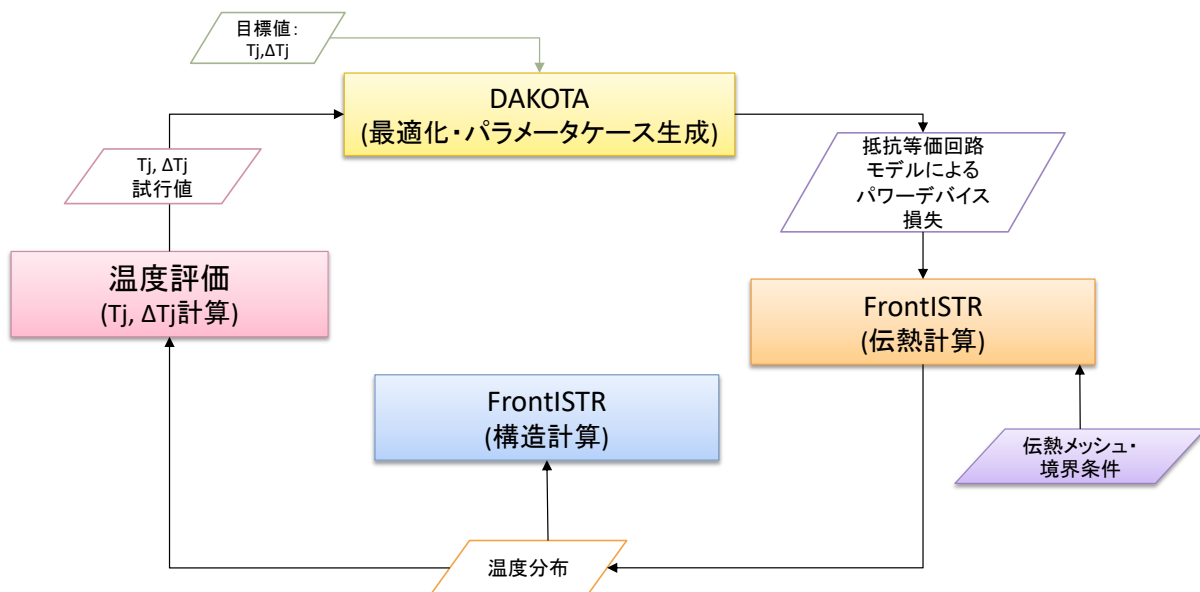


図 2-9 自動最適化による伝熱解析・熱応力解析 計算フロー

ユーザーは最適化の目標値である T_j または ΔT_j を指定する。この目標値を達成するように最適化エンジンである DAKOTA がパワーデバイスの損失の試行値を計算する。次に FrontISTR を用いて損失の試行値から与えられたメッシュ構造・境界条件から PCT サイクル時の過渡温度分布を計算する。過渡温度分布から T_j の試行値を求め、目標値からの偏差を計算する。この偏差からフィードバックを行い DAKOTA は次ステップの損失試行値を計算することで最適化ループを計算する。十分に T_j または ΔT_j の試行値が目標値に近づいたところで、最適化計算を終了し FrontISTR による熱応力解析を行い、応力分布を計算する。

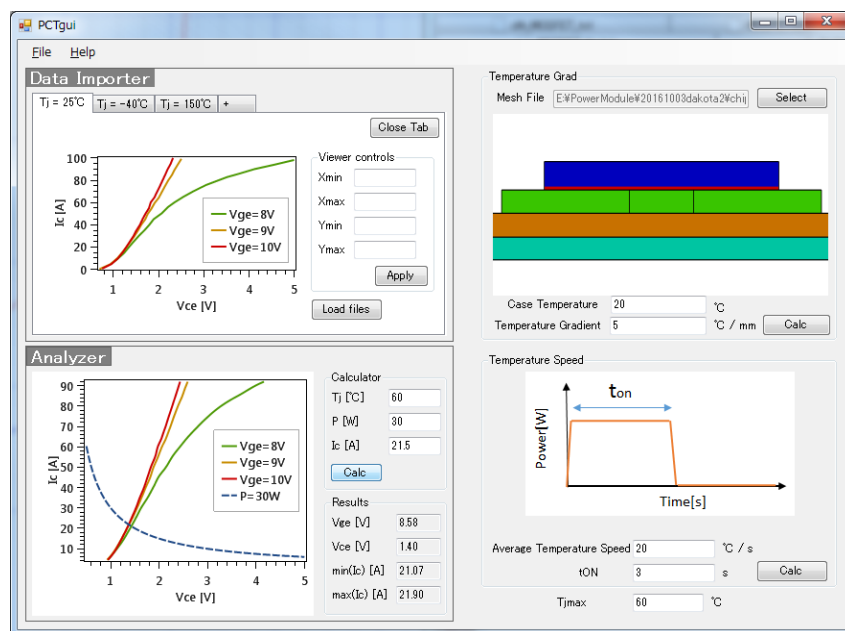


図 2-10 PCT GUI 温度勾配・昇温速度入力機能

2-2-2 温度解析結果

自動最適化計算によるジャンクション温度 T_j の推移を、図 2-11 および図 2-12 に示す。

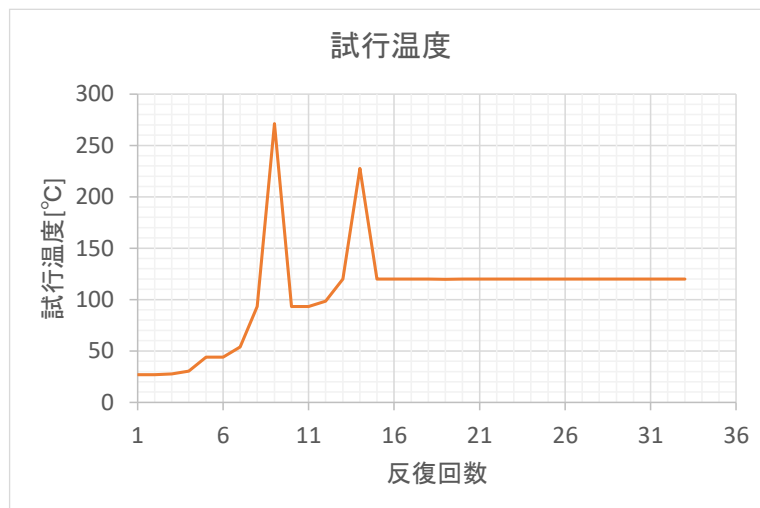


図 2-11 自動最適化 試行温度履歴

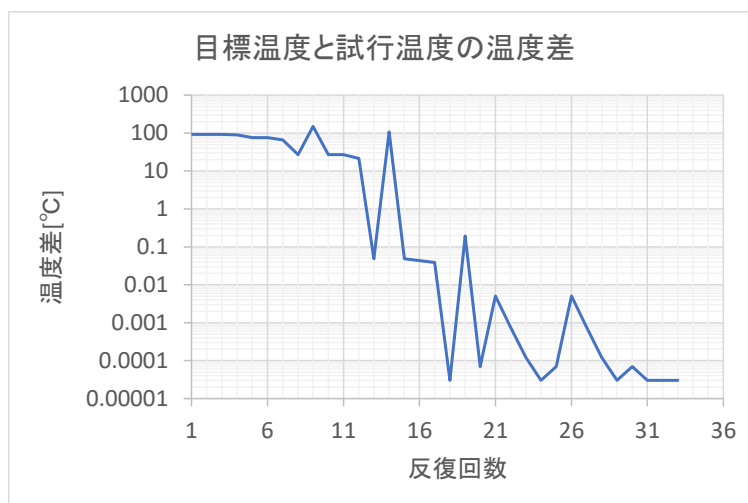


図 2-12 自動最適化 目標温度と試行温度の温度差履歴

これらの結果より、自動最適化機能により T_j を目標温度へ収束させることができていることがわかる。このとき T_j 最大値は狙い通りの温度（120°C）となっていることが、図 2-13 により確認できる

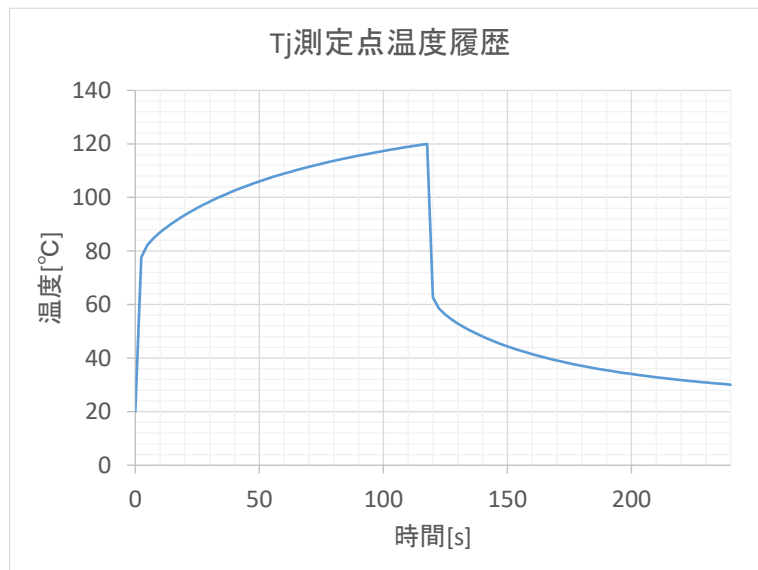


図 2-13 自動最適化 目標温度と試行温度の温度差履歴

2-2-3 熱応力解析結果

温度解析によって得られた温度分布を構造解析計算に引継ぎ熱応力解析を行った。各時刻に対応する応力分布を図 2-14～図 2-16 に示す。

t=48.0 s

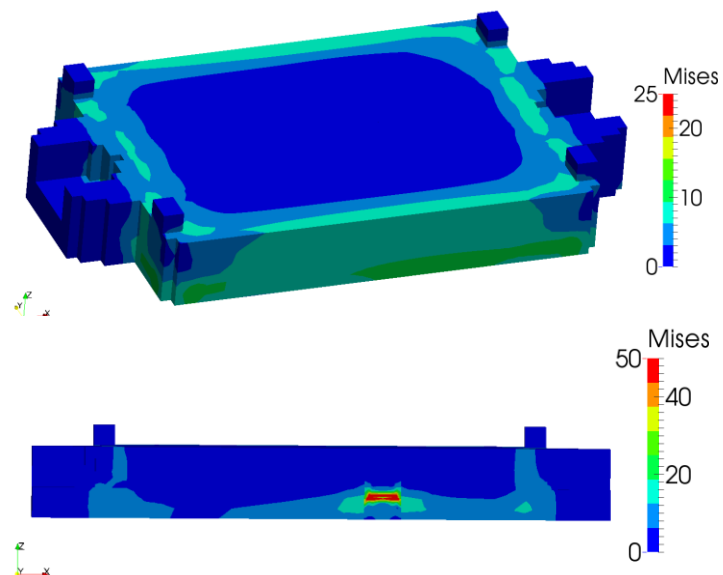


図 2-14 PCT 試験解析 応力分布[MPa] t=48.0 s

t=96.0 s

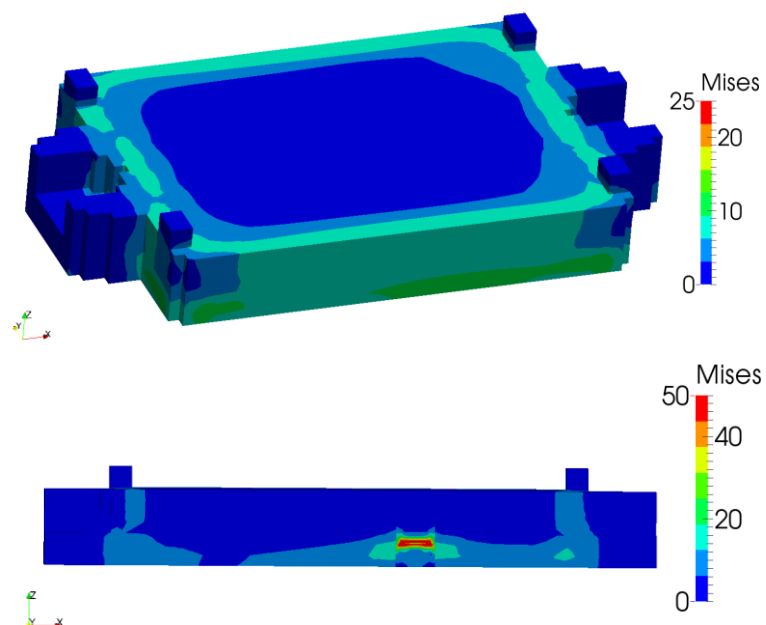


図 2-15 PCT 試験解析 応力分布[MPa] t=96.0 s

t=144.0 s

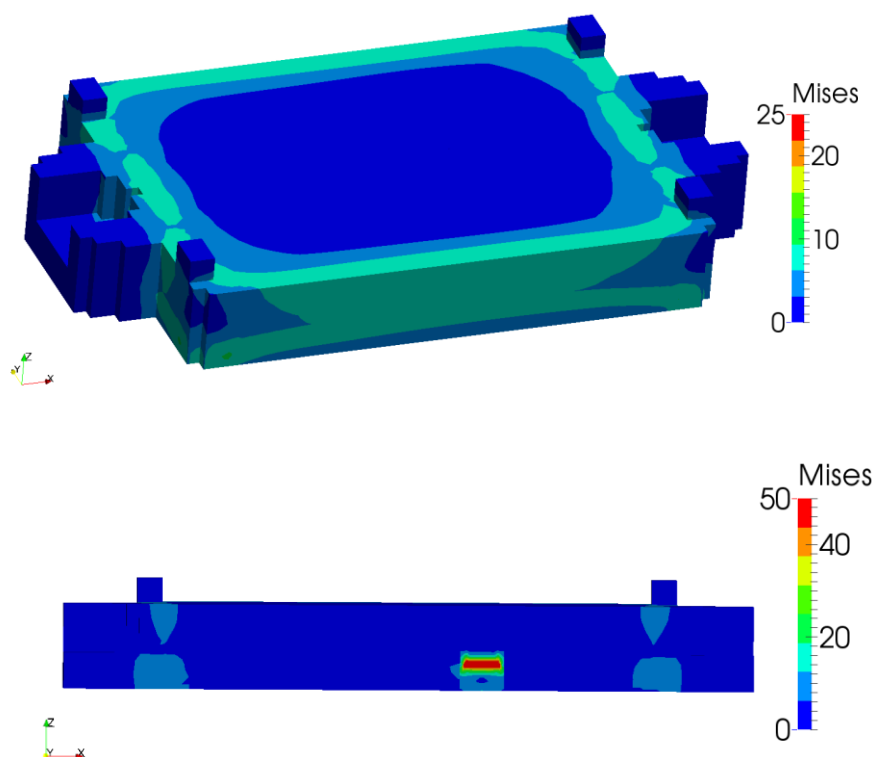


図 2-16 PCT 試験解析 応力分布[MPa] t=144.0 s

はんだ部温度分布と応力分布の比較

図 2-14～図 2-16 の結果からはんだ部の温度分布と応力分布を抽出した結果を図 2-17～図 2-19 に示す。

t=48.0 s

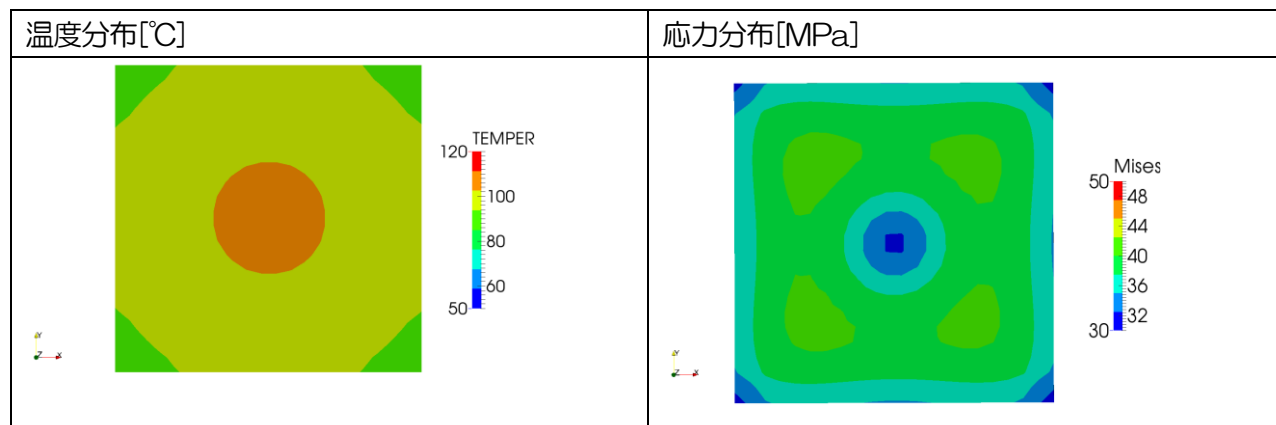


図 2-17 PCT 試験解析 はんだ応力分布 t=48.0 s

t=96.0 s

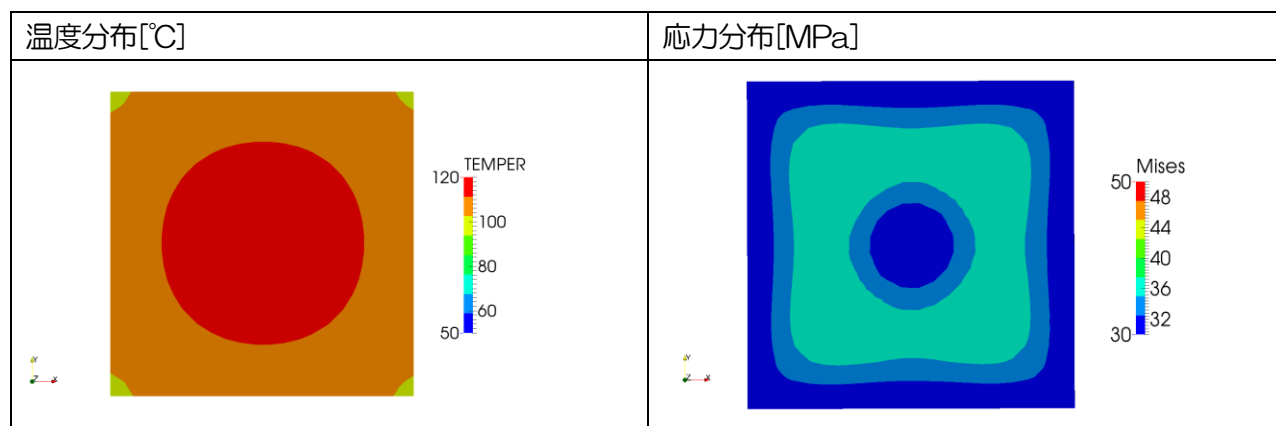


図 2-18 PCT 試験解析 はんだ応力分布 t=96.0 s

t=144.0 s

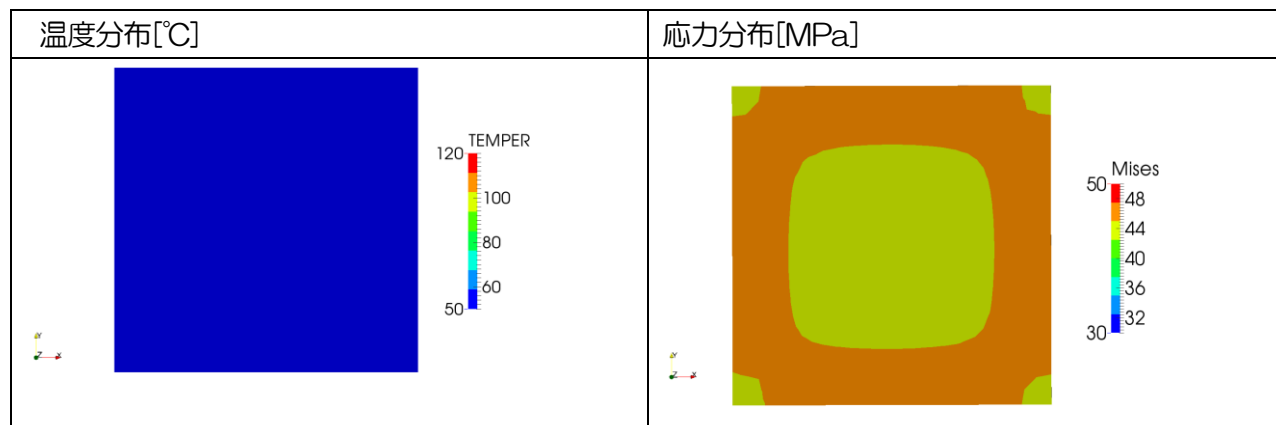


図 2-19 PCT 試験解析 はんだ応力分布 t=144.0 s

図 2-17～図 2-19 より、はんだの温度分布は図 2-13 の T_j の温度変化と同様の変化をすることが確認できた。温度サイクル試験(TCT)ではパワーモジュール全体が一様温度になっていたが、PCT ではチップの発熱を考慮するためはんだの中に温度の勾配ができる。このように温度勾配が発生することにより応力分布も温度分布を反映した空間的な勾配が見られた。TCT 試験解析では応力分布ははんだの四隅のコーナー部に集中する傾向があり、実験のき裂発生位置と同様の場所になっていた。一方、PCT 試験ではコーナー部以外の中央部でも応力の振動がみられ、これによりき裂の進展が進む可能性がある。このように PCT 試験特有のき裂進展現象について TCT 試験とは異なる傾向があることがわかった。

2-3 実機試験における寿命評価指標の定量測定、ならびに寿命予測式による信頼性の統計評価システムの開発

SAT 画像を基に客観性を担保出来るき裂進展量の自動評価システムの開発

現状多くのメーカーではチップのき裂進展の度合いを評価するため、超音波撮像画像（以下 SAT 画像と略）を使用している。超音波を放射した場合き裂面で反射を起こし画像化すると白くなり、き裂部分が判断しやすいため、非破壊な検査法として用いられている。

サブテーマ【3-1】では、接合層破壊の客観的な指標として用いることを目的に、画像処理により SAT 画像からき裂進展量を自動評価する機能を開発した。

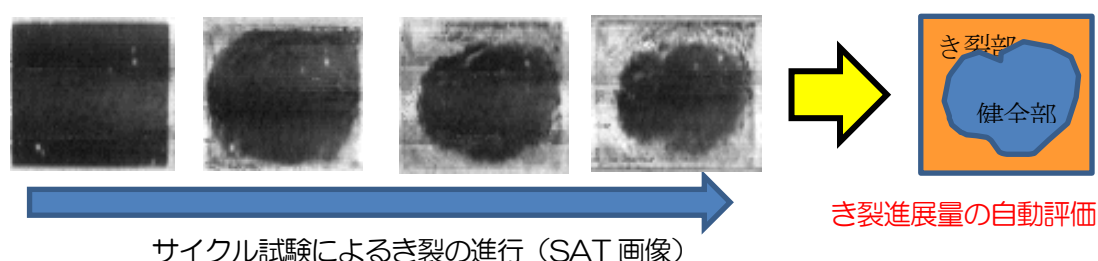


図 2-20 サイクル試験によるき裂の進行の SAT 画像による自動評価

本システムが想定するユースケースとしては、実験の過程で得られる同じ型（または同じサンプル）モジュールの SAT 画像をサイクルにわたって複数枚撮影し、き裂進展度の推移を求める事を想定する。前処理として、画像位置合わせ処理、チップ領域切出し、クラック面積率（亀裂進展度）計算を目標として開発を進めた。

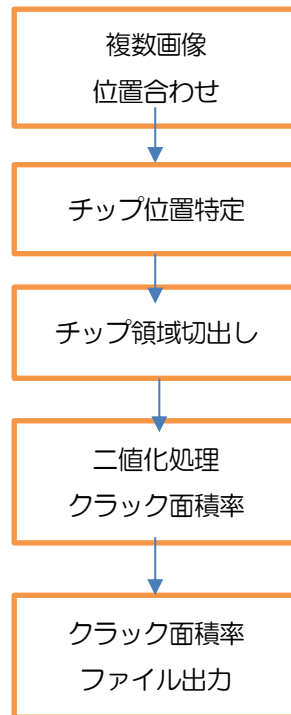


図 2-21 画像処理の流れ

開発したき裂面積自動計測システムの実行結果を、図 2-23 に示す。また、本開発システムの検証に使用したテストデータを図 2-22 に示す。本テストデータは、温度サイクル試験の途中でモジュールを取り出し、SAT 試験によって接合材のき裂の進展を画像評価したものである。

図 2-23 に得られた結果は、各サイクルにおいてき裂の進展量を SAT 画像より自動的に計測したものであるが、熟練作業者の目視による読み取りとの誤差は平均 4%程度の差異でき裂面積の計測が可能であることを確認した。

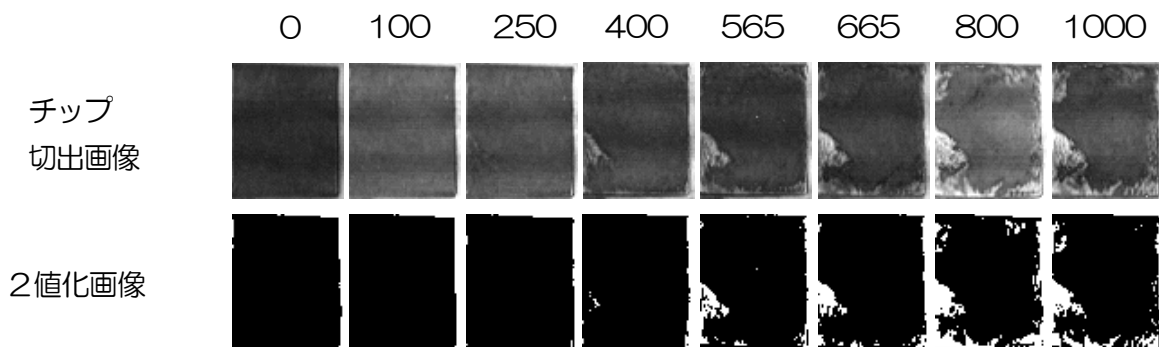


図 2-22 温度サイクル試験の接合材の画像

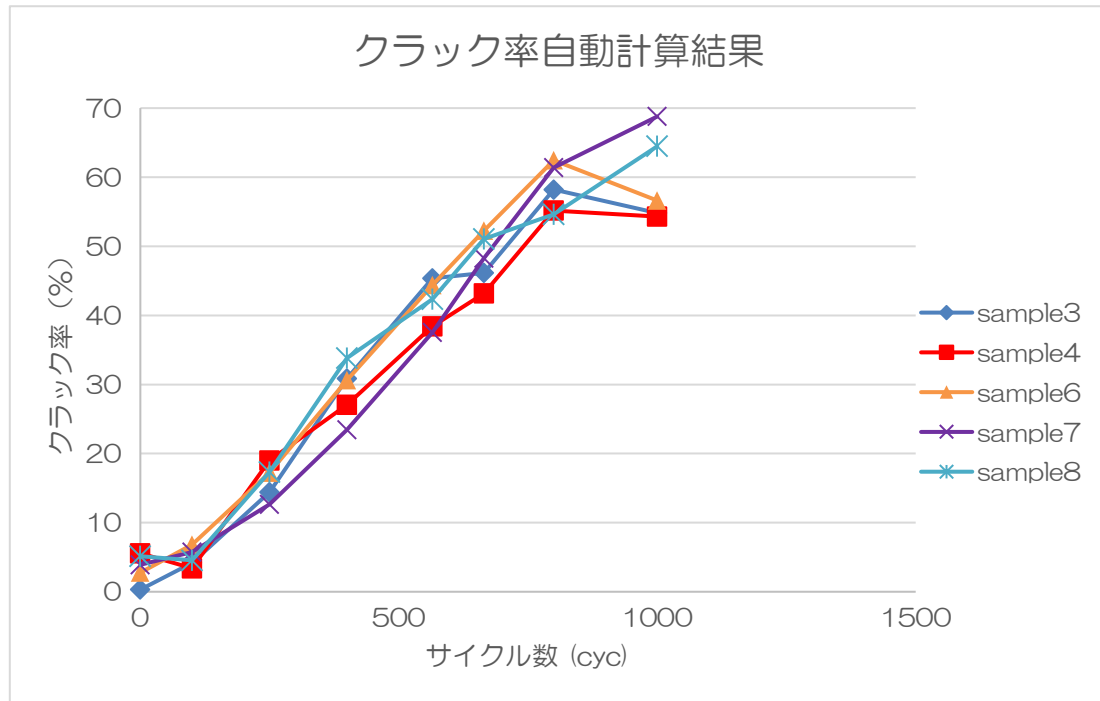


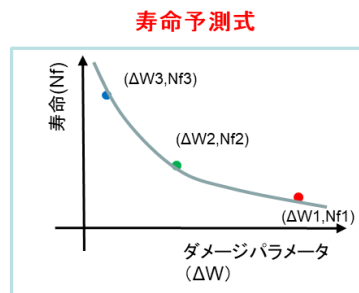
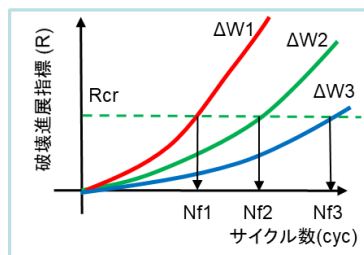
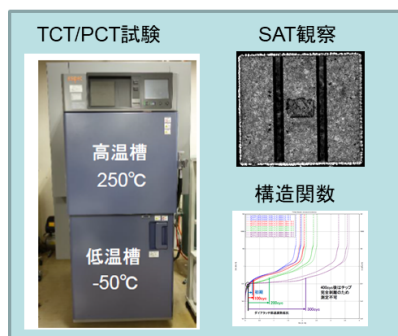
図 2-23 クラック率の自動計測結果

2-4 損傷パラメータと疲労寿命を関連づける寿命予測式の作成

CAE を用いた信頼性評価の精度を向上させるためには、損傷パラメータと故障サイクルの相関式（寿命予測式）を精度よく取得することが重要である。寿命予測式は、いわゆる Coffin-Manson 則をベースに作成される実験回帰式であるが、材料や温度範囲によってその係数が異なる。本開発において対象とする接合材料は、マイクロ銀粒子を用いた阪大開発の焼結銀ペーストと、比較のための鉛フリーはんだ、ならびに高温はんだとした。

すなわち、本サブテーマ4では焼結銀、ならびにはんだを接合材料として用いた実モジュールを TCT、PCT 試験機に投入し、数値シミュレーションで評価される損傷パラメータと寿命の相関式(寿命予測式)を作成するものである。

実験により取得する破壊進展指標(R)



シミュレーションにより評価するダメージパラメータ(ΔW)

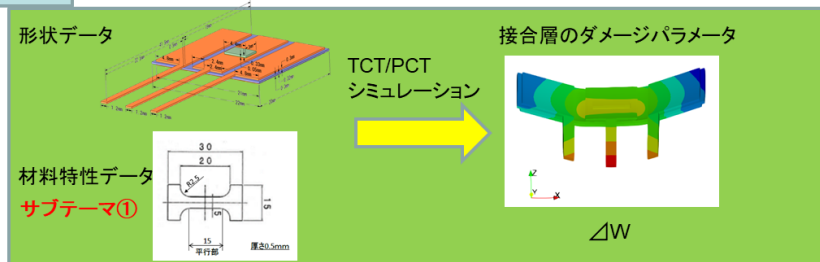


図 2-24 寿命予測式の作成手順

2-4-1 実装モジュールの TCT、PCT 試験による疲労寿命評価

サンプルNo	Ag1	Ag2	Ag3
初期			
100 サイクル			
300 サイクル			

図 2-25 TCT -50/250℃ 銀焼結モジュールの超音波映像

図 2-25 において、モジュール中心部の四角い黒色部が接合層である。サイクルが進むにつれ黒色部の外周部が欠けていっている様子が分かる。これは接合層の外周部で剥離が生じた後、内部へ拡大していることを示している。

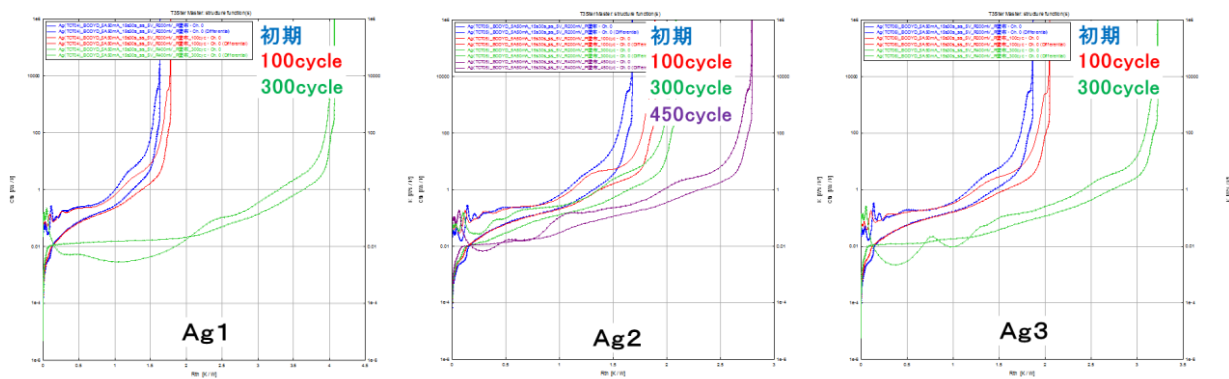


図 2-26 TCT -50/250°C 銀焼結モジュールの過渡熱抵抗測定

2-4-2 実装モジュールの疲労寿命予測式の構築

TCT 疲労試験の際に接合層が受ける損傷を評価するため、温度サイクル下における熱応力シミュレーションを実施しダメージパラメータを評価した。図 2-27 にモデルの構造および寸法を示す。また、解析に使用したメッシュを図 2-28 に示す。

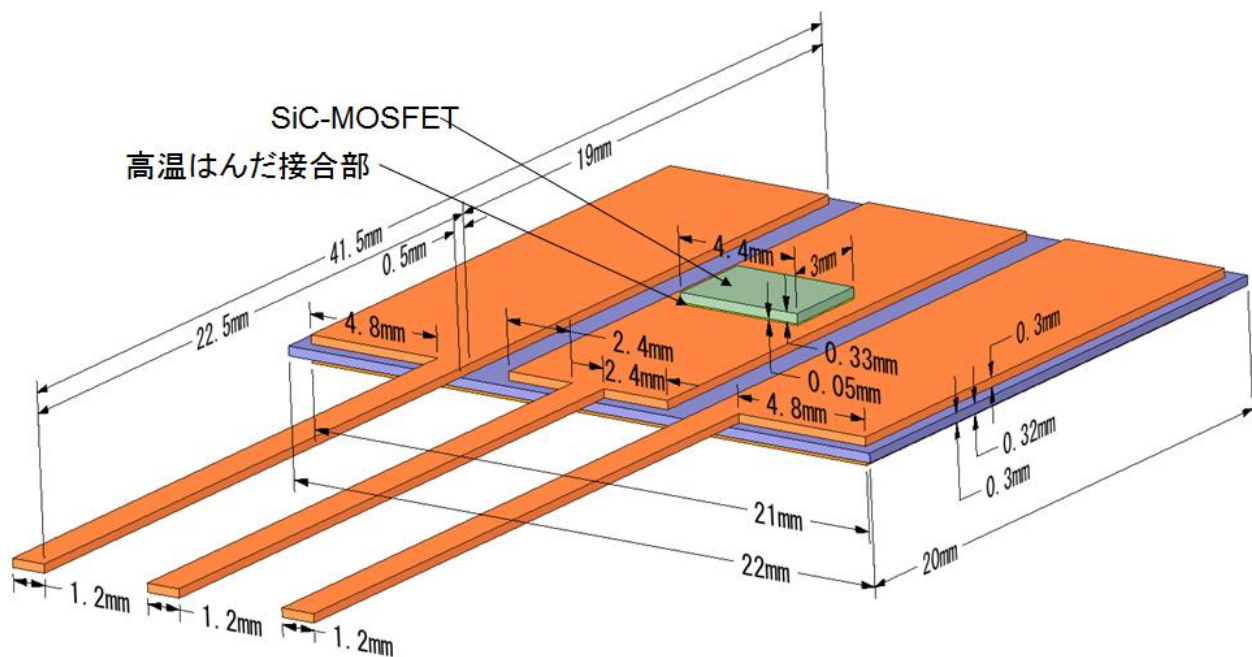


図 2-27 TCT シミュレーションモデル寸法図

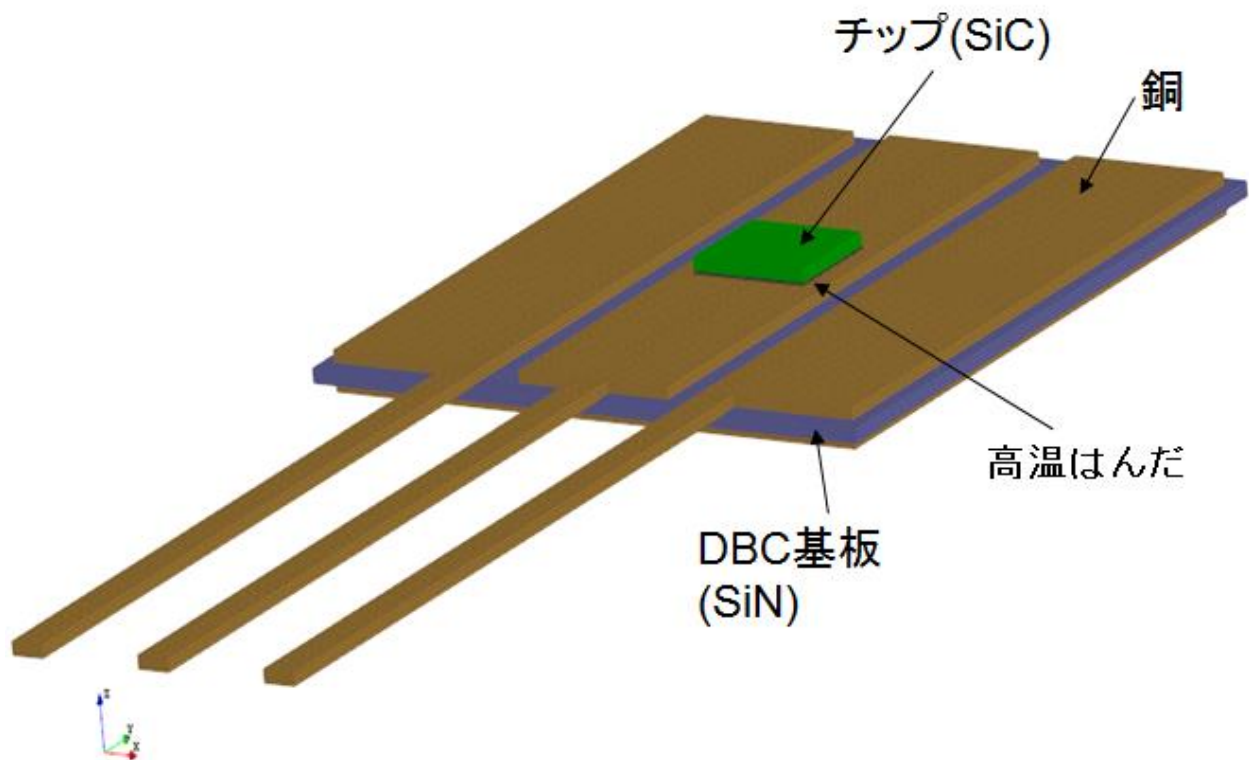


図 2-28 TCT シミュレーションモデルメッシュ図

エラー! 参照元が見つかりません。に TCT シミュレーションモデルの物性値を示す。また、高温はんだの接合層には表 2-3 のクリープ特性を設定した。ここでの Norton 則パラメータの温度依存性はサブテーマ1で示した温度依存性パラメータから算出した値である。

表 2-3 TCT シミュレーションモデル 高温はんだクリープ特性

温度[°C]	A	n
30	1.05E-20	12.24
100	4.67E-14	8.81
175	3.06E-09	6.32
250	8.37E-06	4.54

図 2-29 に本解析で使した二種類の入力温度プロファイルを示す。また、図 2-29 中の A 点、B 点で取得した接合層の Mises 応力分布を図 2-30、図 2-31 に示す。いずれの場合も接合層角部で応力最大となっている。図中に示した箇所でダメージパラメータを算出したところ、温度サイクル[-50/250°C]ではダメージパラメータ $\Delta W = 0.0324$ MPa、[-50/200°C]では $\Delta W = 0.0233$ MPa となった。

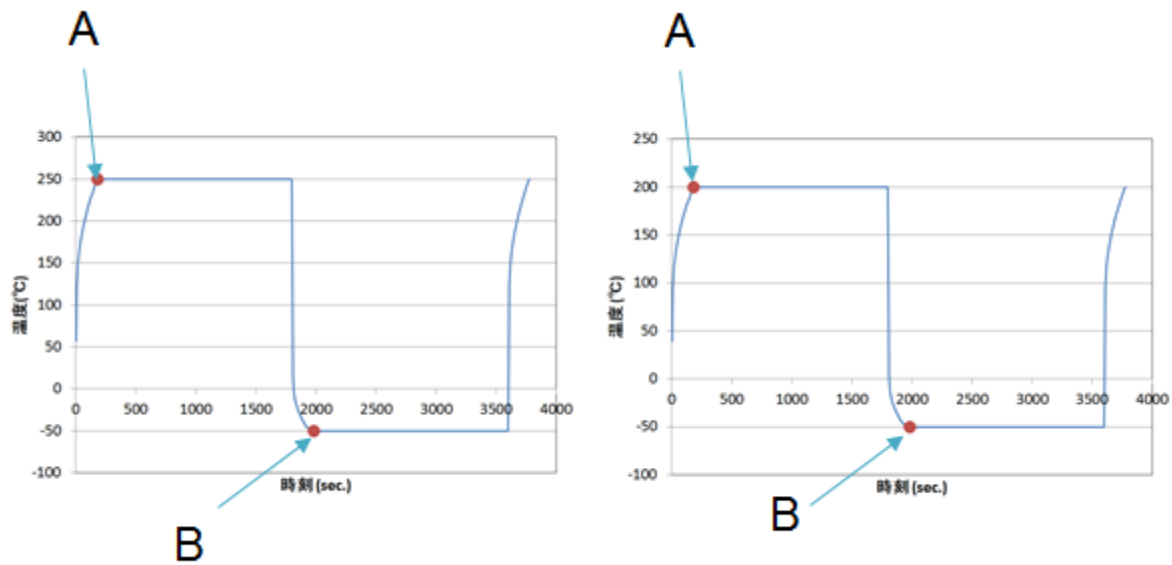


図 2-29 TCT シミュレーションモデル入力温度プロファイル

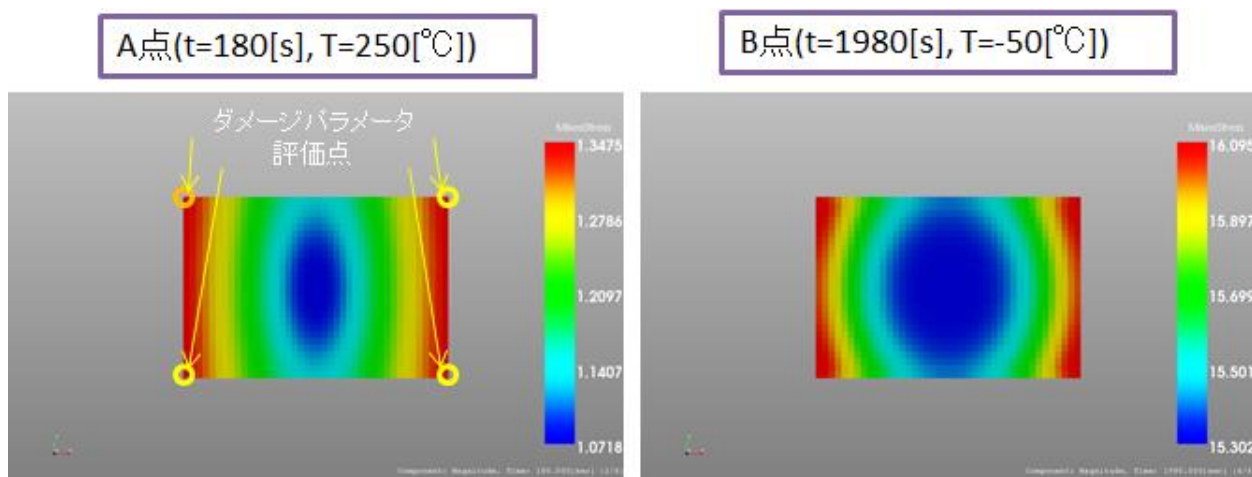


図 2-30 TCT シミュレーションモデル[-50/250°C] 接合層 Mises 応力分布

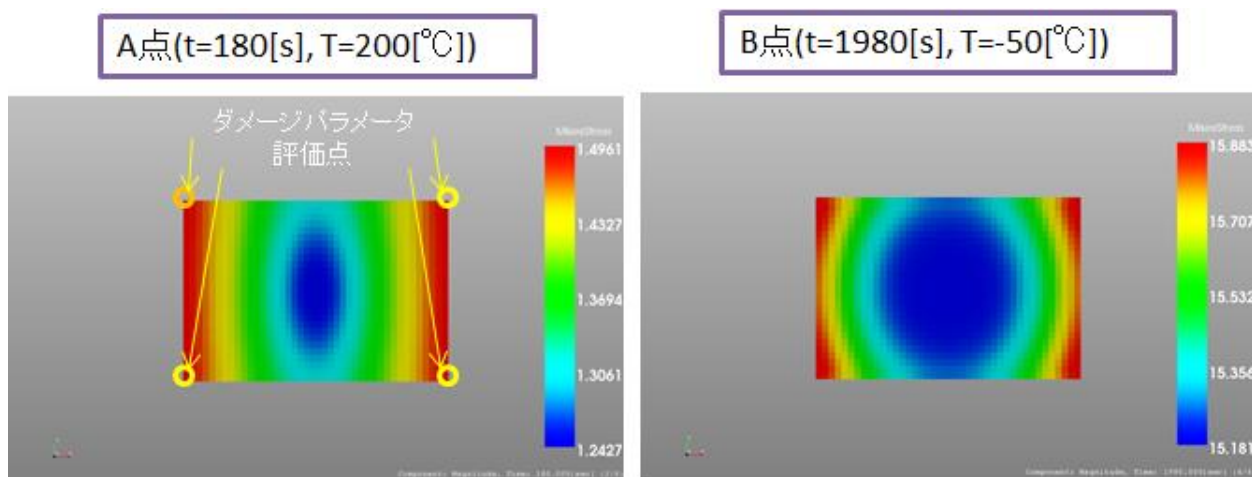


図 2-31 TCT シミュレーションモデル[-50/200℃] 接合層 Mises 応力分布

表 2-4 に高温はんだ Pb5Sn について得られた寿命サイクル数 N_f とダメージパラメータ ΔW の値をまとめた。以下の N_f と ΔW の関係式に対して表 2-4 の結果をフィッティングすることで、高温はんだ寿命予測式を作成した。寿命予測式のフィッティング結果のプロットを図 2-32 に示す。

$$N_f = \frac{1}{c_1(\Delta W)^{c_2}}$$

$$= \frac{1}{23821.777731(\Delta W)^{4.571944}}$$

表 2-4 高温はんだ 寿命サイクル数 N_f とダメージパラメータ ΔW

サンプル名	温度サイクル	N_f	N_f (平均値)	ΔW
pb5sn1	-50/250℃	321	270	0.0324
pb5sn2		219		
pb5sn11	-50/200℃	1279	1226	0.0233
pb5sn12		1173		

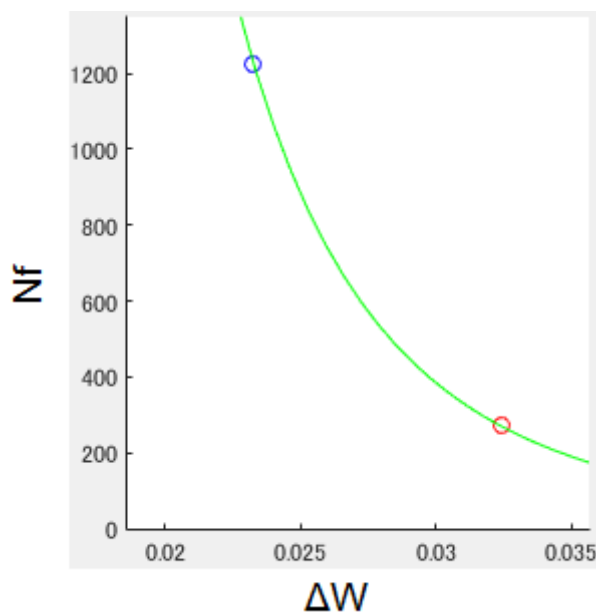


図 2-32 高温はんだ寿命予測式フィッティング結果

2-5 バーチャル実装評価システムの開発

他の開発項目の成果となる高耐熱パワー半導体モジュールの信頼性予測を可能とする各技術基盤を統合し、高耐熱パワー半導体の新規モジュール開発、新規材料開発で利用可能なソフトウェアシステムの開発と実験結果との整合性検証を行った。

2-5-1 開発システム概要

解析モデルはどのような手段を用いても最終的には連続的ではなく離散化なデータとして作成され、数値的求解に利用される。その際、解に影響が小さい箇所は細部まで再現する必要はなく、一方設計者が注視する箇所は十分元の形状を維持する必要がある。

また、設計が定まっていない箇所、例えばベースプレート厚さ、チップ位置等を変数として可変に扱えることが必要であり、設計変数変更によるモデル変更作業工数は十分小さくする必要がある。モデル形状について具体的には、下記 2 点の前提条件を与えた。

- ・ チップ形状は 4 辺形であり、座標軸と平行に配置されることを前提とする
- ・ バルク領域形状は一般に 4 辺形とは限らないが、いくつかの重要な寸法値を除き角の R 等、細部再現の必要性は低い（解析結果に与える影響は小さい）

これらの前提条件下において諸要件を満たすため、本システムにおけるモデル生成処理の基本設計を下記のように定めた。

- ・ チップ周辺領域とモジュール全体（バルク領域）を別々にモデリングする
 - チップ形状は寸法値を入力し 6 面体要素にてモデリングを行う
 - バルク領域形状は CAD データ等であらかじめ定義し、内外判定による 6 面体城郭メッシュ（Castellated Mesh）を作成する
- ・ チップ周辺領域とバルク領域メッシュは配置をパラメータにより指定し、統合した計算モデルを作成する

バルク領域の有限要素生成には、形状再現性を上げるため一般に 4 面体要素を用いるが、モデル作成コストが高くなり、また求解安定性にも問題がある。そのため上記 6 面体城郭メッシュ生成手法を用いる。

本設計による作業フローを下図に示す。

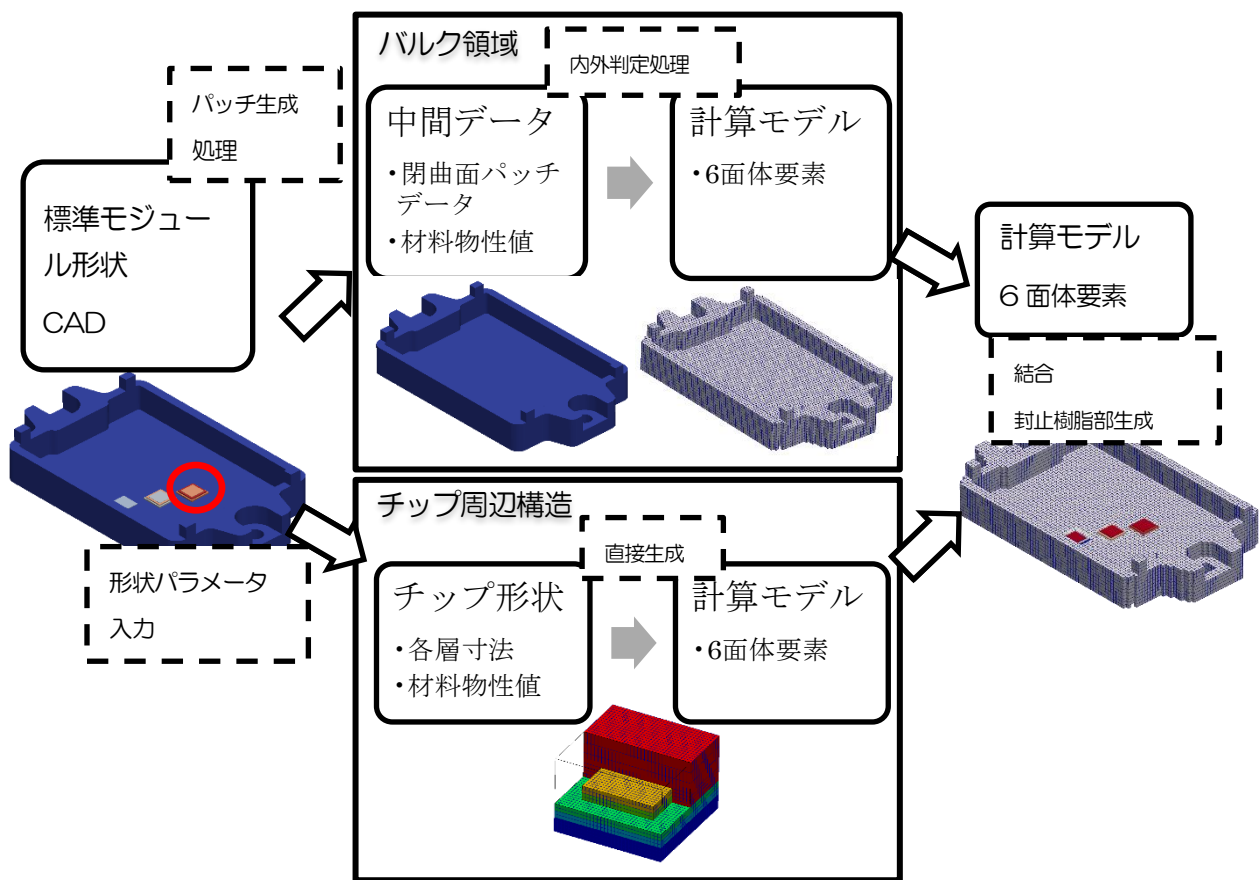


図 2-33 解析モデルの生成フロー

2-5-1-1 チップ周辺構造設定機能

チップ部およびその周辺領域の計算格子は、主に寸法および材料物性値の各パラメータから作成し、相互に節点共有の6面体格子とする。周辺領域とバルク領域は節点共有とする必要はないが、各部位の厚さ、高さ方向配置は一致させる。生成される格子の節点間隔はすべて等間隔とする。ユーザーは下記手順により本設定を行う。

- ① チップ各部位の材料物性値をあらかじめすべて登録しておく
- ② チップの層数を指定し、厚さおよび材料物性値を指定する。
- ③ チップおよび周辺領域の面内方向寸法を指定する。領域中心にチップが配置される

上記操作手順に対応するソフトウェア画面および格子生成結果を下図に示す。

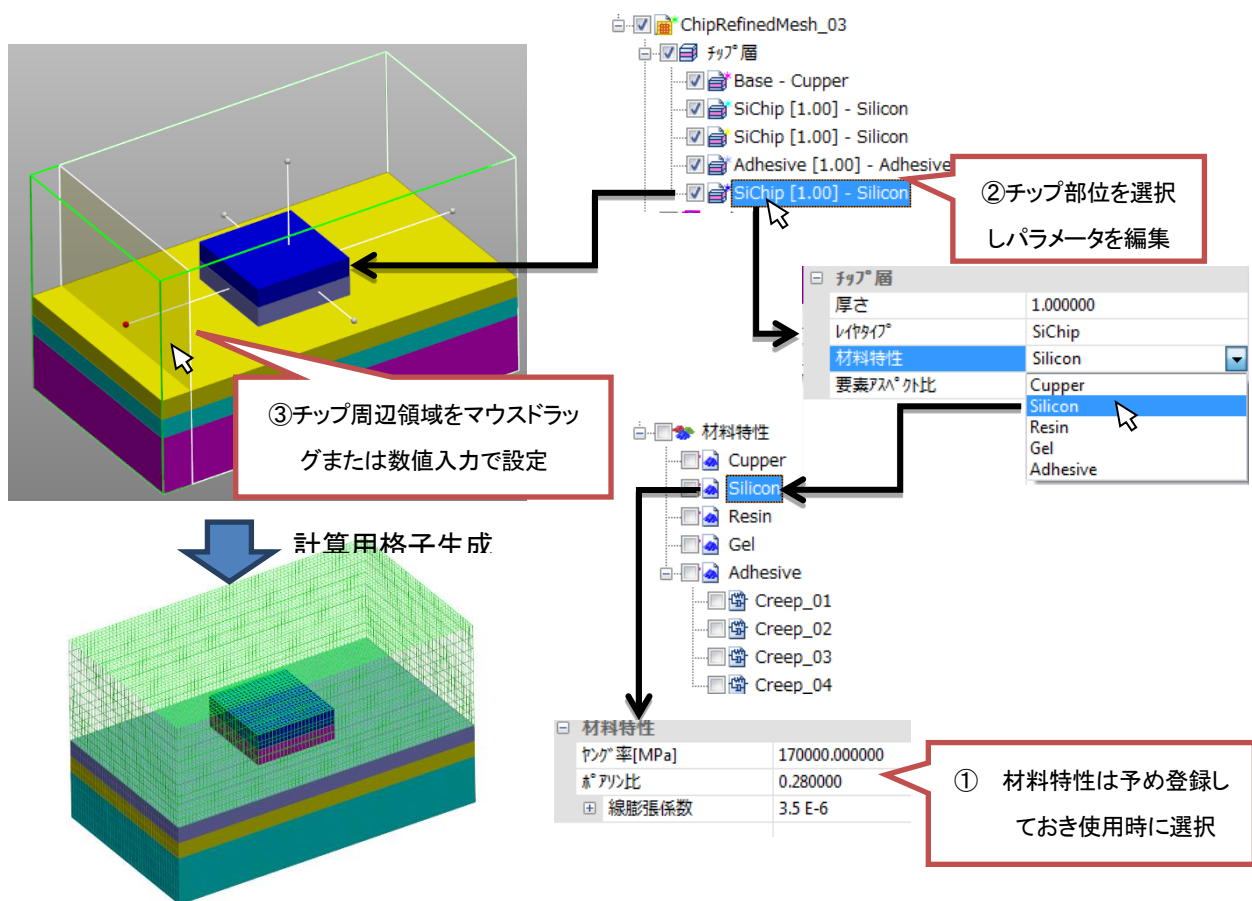


図 2-34 チップ周辺構造設定機能

2-5-1-2 バルク領域メッシュ生成機能

バルク領域の計算格子は、ユーザーの用意した CAD データ、あるいは、後述の本システム標準モジュール生成機能が提供する形状データをもとに、6面体城郭メッシュとして生成する。生成の流れを下図に示す。

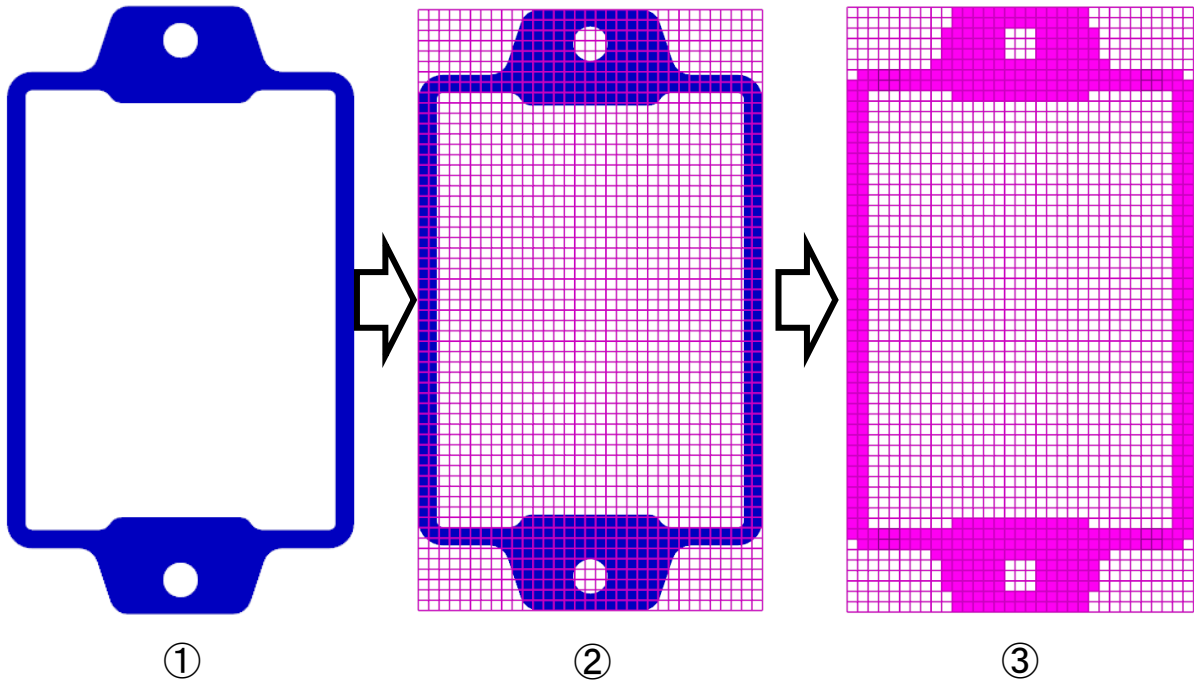


図 2-35 バルク領域メッシュ生成機能

まず元の形状①をユーザーが定義する。それを包含するブロックメッシュ②を生成し、最後に①と②の論理積から③の城郭メッシュを得る。

2-5-1-3 標準モジュール生成機能

新規モジュールの設計段階から本システムを使用する場合はユーザー定義形状から城郭メッシュを作成するフローとなる。一方、材料開発等においては既存の代表的なモジュールに対しモジュール以外のパラメータを変更した設計検討を実施することになる。その際、ユーザーが形状を定義することなく、あらかじめ用意された標準モジュールデータを利用することで、作業時間を減少させることができる。本システムでは下表の2モデルに対応した。なお、他のモジュールも容易に追加可能な内部設計としている。

表 2-5

名称	概要
TO-247	汎用モジュール
Mモデル	温度サイクル／パワーサイクル試験品
KAMOME PCT	温度サイクル／パワーサイクル試験品
阪大 PCT	温度サイクル／パワーサイクル試験品

本機能の使用手順を下図に示す。

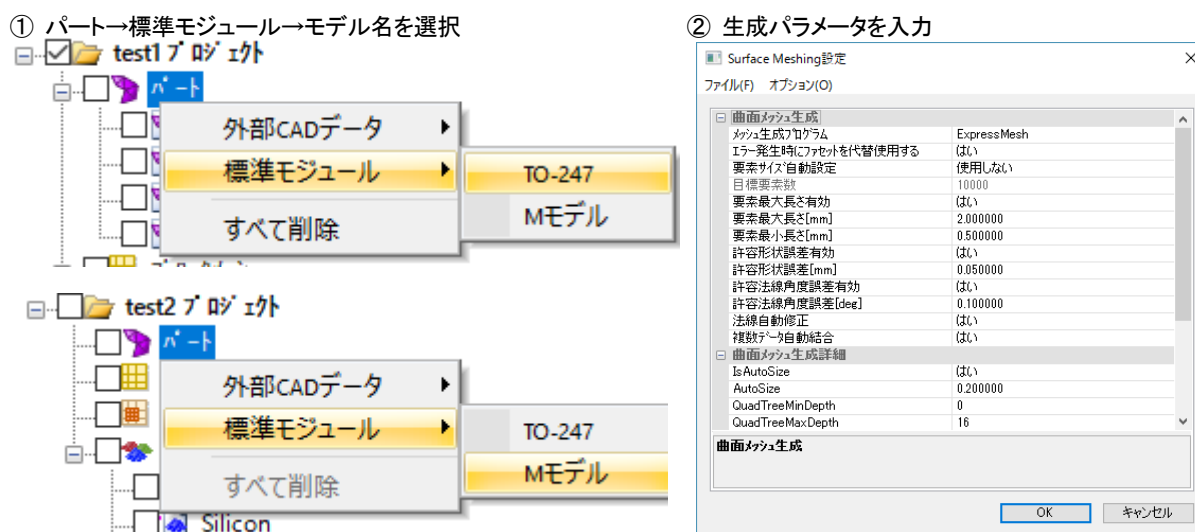


図 2-36 標準モジュールの生成

③ 標準モジュールパートが自動生成される。

以降、外部 CAD 入力と同様の手順にて城郭メッシュを生成する

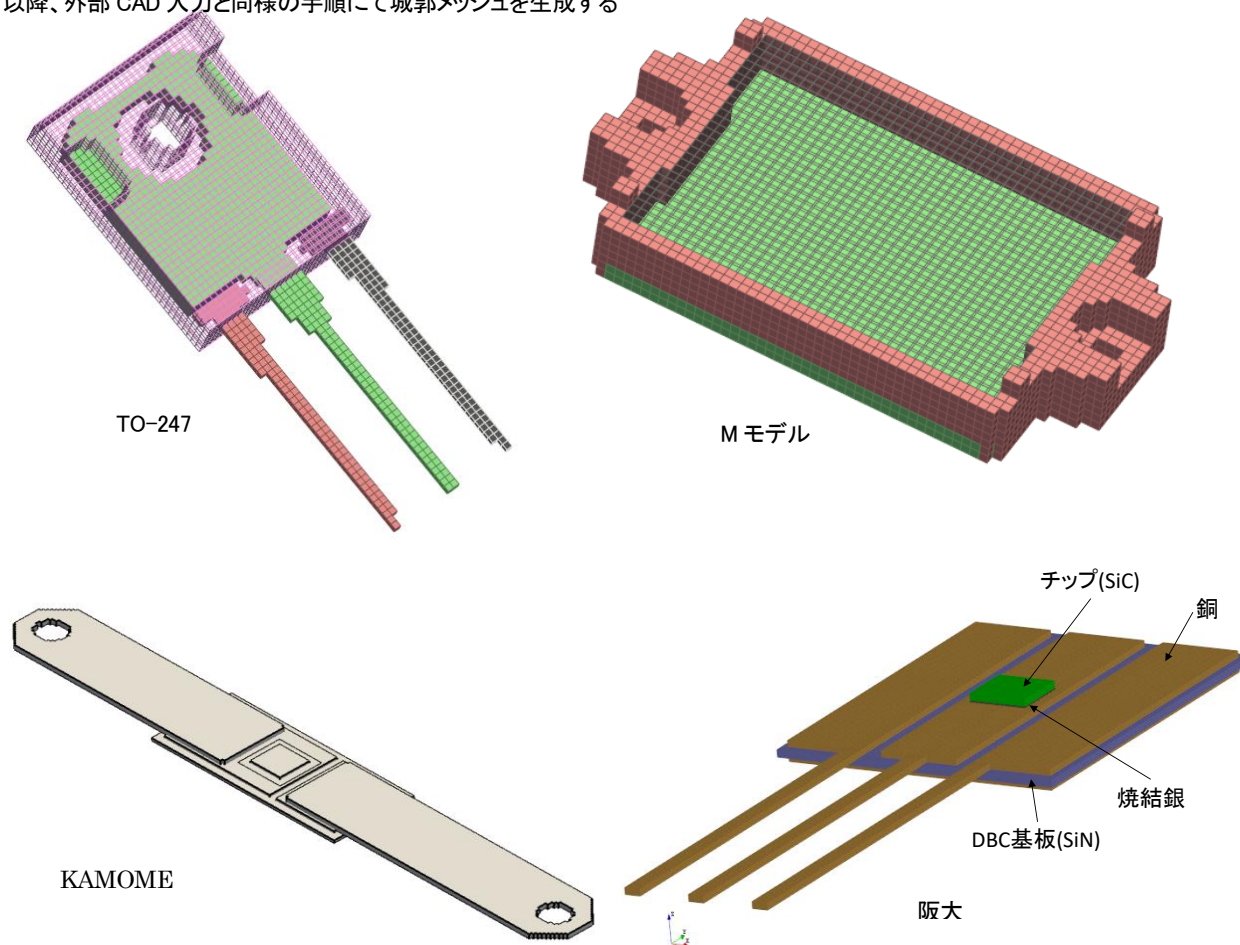


図 2-36 組み込み済み標準モジュール

2-5-1-4 TCT/PCT 試験条件の設定機能

TCT、PCT 試験を模擬した解析は、いずれも計算用格子全節点に温度プロファイルを与えた熱応力解析であり、設定する温度プロファイルが異なる点以外は共通する。TCT 試験解析では全節点に一樣な温度プロファイルを設定する。一方、PCT 試験解析では、まずチップ部にパルス状の温度履歴を与え FISTR 非定常伝熱解析結果を繰り返し実行し、チップ上部中央が目標 T_j に達した際の温度分布を得る。伝熱解析結果には各節点の温度プロファイルが含まれるので、その結果を用いて熱応力解析を実施する。

PCT 試験解析では設定したパルス状の温度条件から伝熱解析により各節点の温度プロファイルが得られるので、それらを熱応力解析条件として使用する。

TCT 試験解析では、幾つかのパラメータを入力するだけで標準プロファイルを生成する機能を開発した。標準プロファイルとして、温度さらし試験で一般に用いられる JESD22-A104C のプロファイルを作成する機能を作成した。

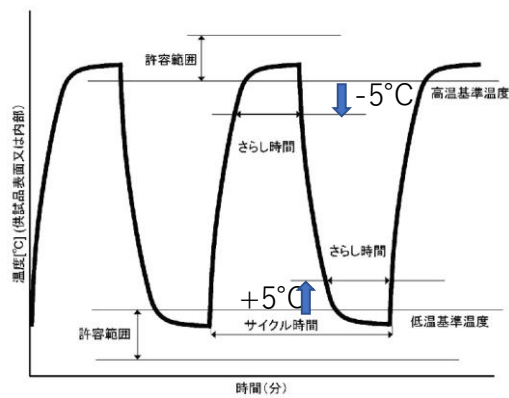


図 1—温度プロフィール

図 2-37 温度さらし試験 JESD22-A104C プロファイル

A104C のパラメータは到達温度に関する「温度条件」11 ケース・さらし時刻に関する「さらし条件」4 ケースから選択する。

過渡曲線はニュートンの冷却の法則における常微分方程式により生成する。使用するパラメータは熱伝達率、熱容量、表面積である。

パラメータを選択

- 温度条件 (11通り)
- さらし条件 (4通り)

最高・最低基準温度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ の範囲に達した時刻からさらし時間をカウント

ニュートンの冷却の法則により過渡曲線を生成

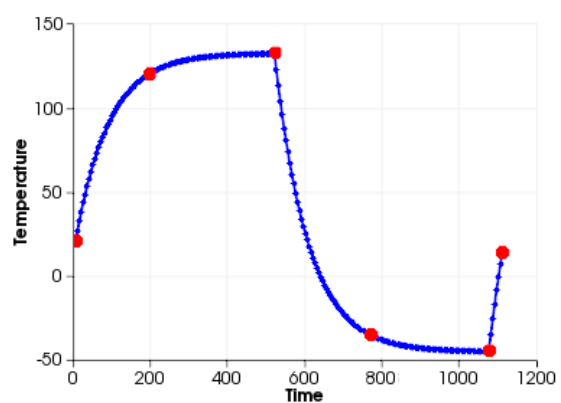
$$T = (T_0 - T_m) \exp\left(-\frac{\alpha S}{C} t\right) + T_m$$

- α, S, C の値を直接入力する
- S, C はメッシュと材料DBからも算出可能 (開発中)
- T_m は最高・最低基準温度に 許容温度 $\times 0.5$ を加えた値を使用

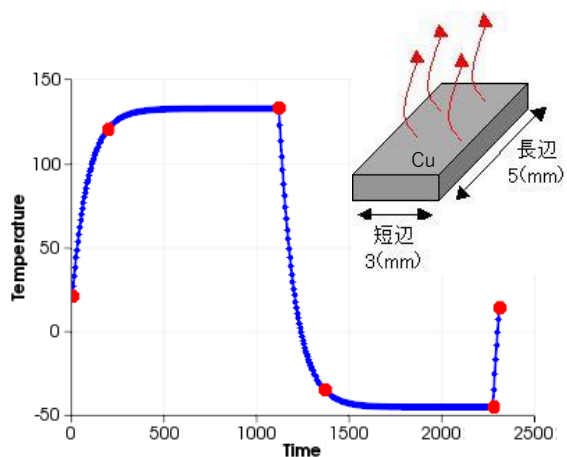
温度プロフィール	
ファイル定義方法	JESD22-A104C
可視化出力ステップ	1, 39, 104, 154, 215, 222
時間刻み	5.000000
開始温度	20.000000
JESD22-A104C	
温度条件	G: [-40, +125]
さらし条件	2: 5min
Newton冷却法則係数	
熱伝達率 α	20.000000
熱容量C	0.052000
表面積S	0.000030
JESD22-A104C	
温度条件	G: [-40, +125]
さらし条件	A: [-55, +85] B: [-55, +125] C: [-65, +150] G: [-40, +125] H: [-55, +150] I: [-40, +115] J: [-0, +100] K: [-0, +125] L: [-55, +110] M: [-40, +150] N: [-40, +85]
JESD22-A104C	
温度条件	G: [-40, +125]
さらし条件	2: 5min
Newton冷却法則係数	
熱伝達率 α	1: 1min 2: 5min 3: 10min 4: 15min
熱容量C	
表面積S	

図 2-37 標準プロフィールパラメータ設定および冷却曲線方程式

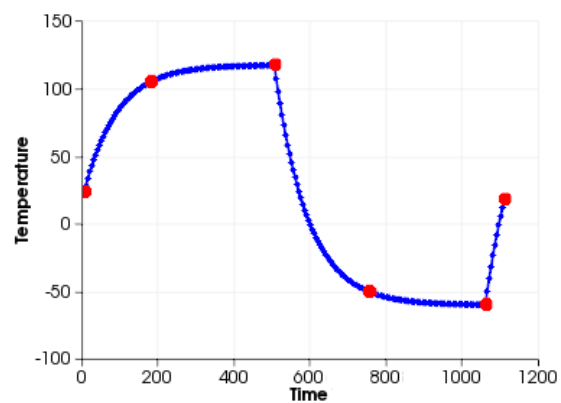
本機能により作成したプロフィールの例を下図に示す。簡易な方法であるが、伝熱解析を必要とせず、数個のパラメータを入力するだけで温度プロフィールを作成することができる。



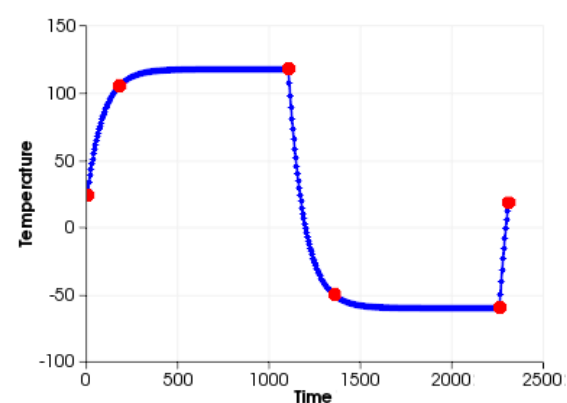
温度条件:G, さらし条件:2



温度条件:G, さらし条件:4



温度条件:L, さらし条件:2



温度条件:L, さらし条件:4

図 2-38 標準プロファイル作成結果

2-5-2 開発システムの検証解析

2-5-2-1 検証解析1 阪大実装モジュールでのTCT試験

サブテーマ「【4-2】実装モジュールのTCT、PCTによる疲労寿命評価」において実際にPCT、TCTを実施した試験モジュールについて検証解析を行う。モデルの構造及び寸法を図2-39に示す。

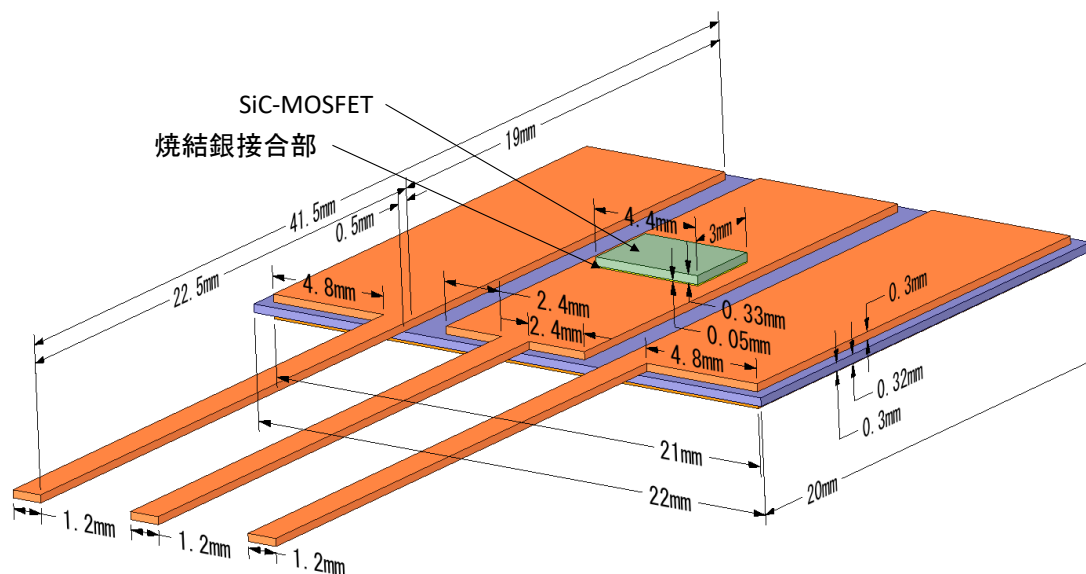


図 2-39 検証解析に用いる試験モジュール 寸法図

また、図2-39のモデルから図2-40のようなボクセルメッシュを作成した。

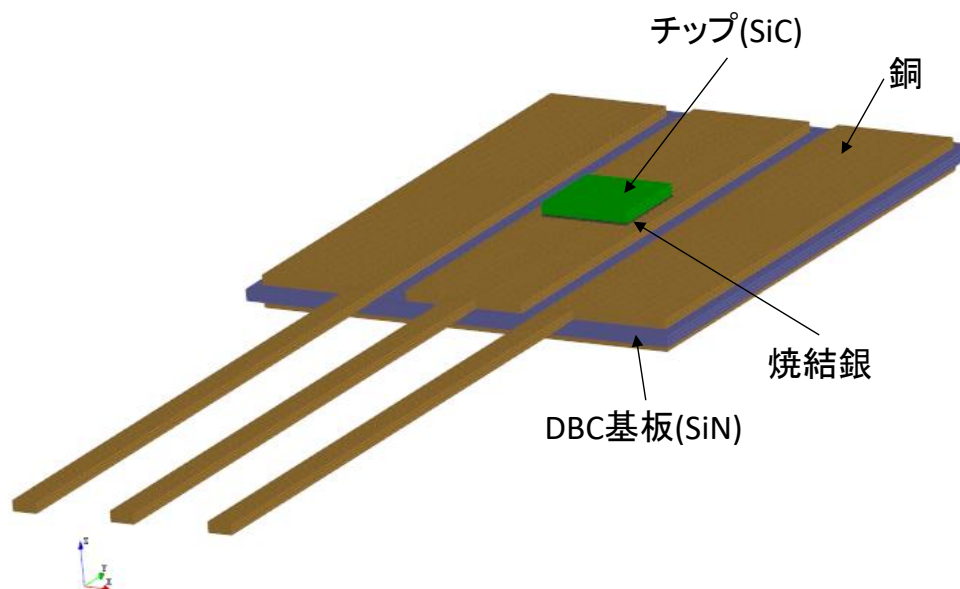


図 2-40 試験モジュール メッシュ図

図2-39の試験モジュールで温度サイクル試験（TCT）を模擬した熱応力解析を行い、接合部へのダメージを評価した。図2-41に温度サイクル試験を模擬した熱応力解析の温度プロファイルを示す。

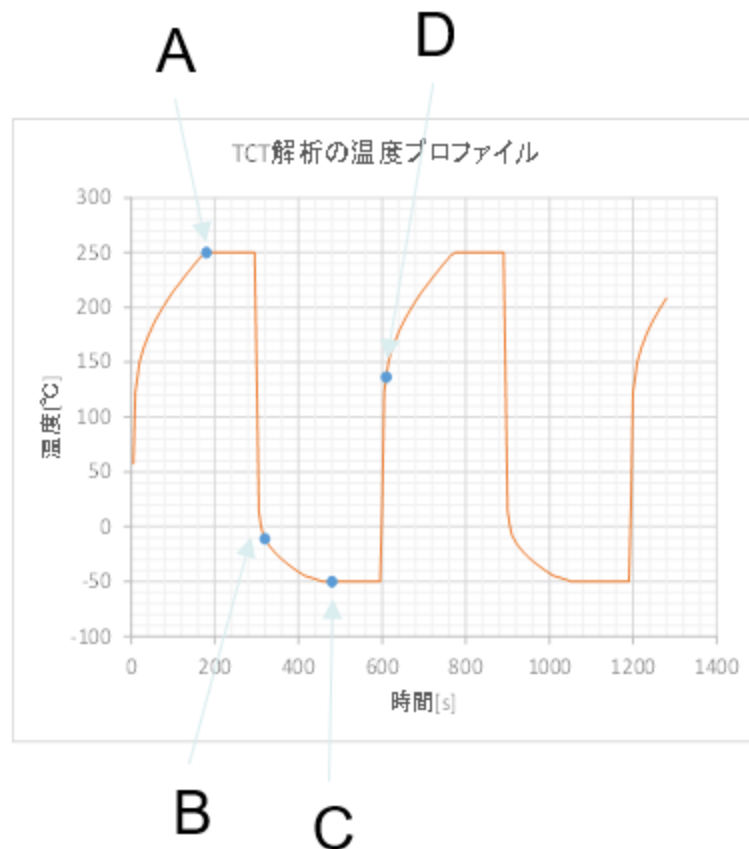


図 2-41 TCT 検証解析 入力温度プロファイル

モジュール変形および接合層の応力分布は図 2-41 の A~D 点で取得した。また、応力ひずみ曲線およびダメージパラメータは図 2-41 の 980~2560s の範囲で計算している。これは応力ひずみ曲線のサイクルが一定になる範囲で応力ひずみ曲線およびダメージパラメータを計算したためである。

TCT 検証解析結果 モジュール変形図

図 2-42 から図 2-45 に熱応力解析の変位コンターおよび変形図を示す。

時間 A 点での変形図($t=180[s]$, $T=250[^\circ\text{C}]$) :

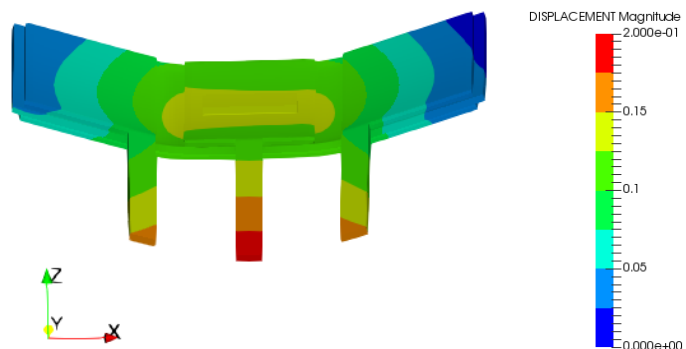


図 2-42 TCT 検証解析 変位コンター+変形図(A 点)

時間 B 点での変形図($t=320[s]$, $T=-11[^\circ\text{C}]$) :

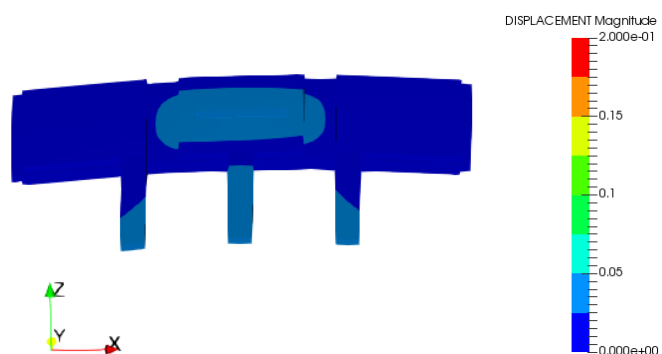


図 2-43 TCT 検証解析 変位コンター+変形図(B 点)

時間 C 点での変形図($t=480[s]$, $T=-50[^\circ\text{C}]$) :

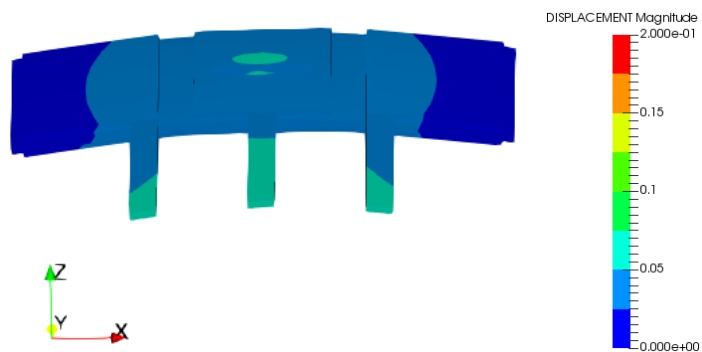


図 2-44 TCT 検証解析 変位コンター+変形図(C 点)

時間 D 点での変形図($t=610[s]$, $T=137[^\circ\text{C}]$) :

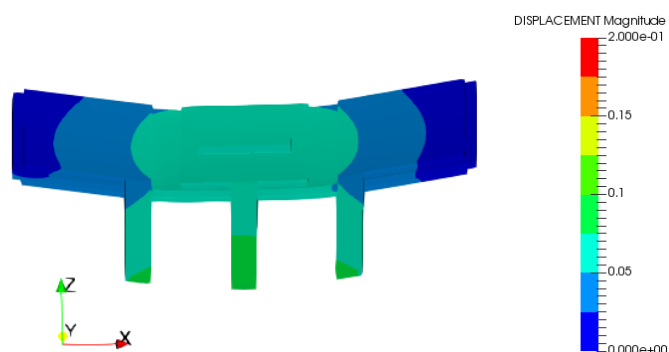


図 2-45 TCT 検証解析 変位コンター+変形図(D 点)

これらの結果より、温度サイクルの各点に対応するモジュールのそり変形が発生していることがわかる。

TCT 検証解析結果 接合層応力分布

時間 A 点でのミーゼス応力コンター図($t=180[s]$, $T=250[^\circ\text{C}]$) :

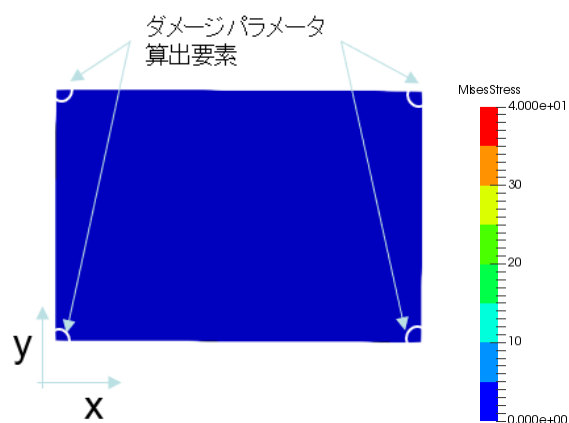


図 2-46 TCT 検証解析 接合層ミーゼス応力コンター図(A 点)

時間 B 点でのミーゼス応力コンター図($t=320[s]$, $T=-11[^\circ\text{C}]$) :

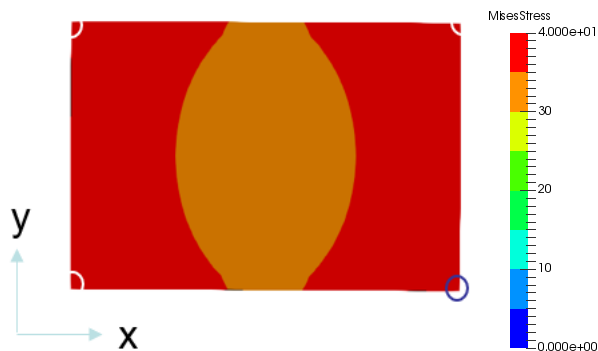


図 2-47 TCT 検証解析 接合層ミーゼス応力コンター図(B 点)

時間 C 点でのミーゼス応力コンター図($t=480[s]$, $T=-50[^\circ\text{C}]$) :



図 2-48 TCT 検証解析 接合層ミーゼス応力コンター図(C 点)

時間 D 点でのミーゼス応力コンター図($t=640[s]$, $T=137[^\circ\text{C}]$) :

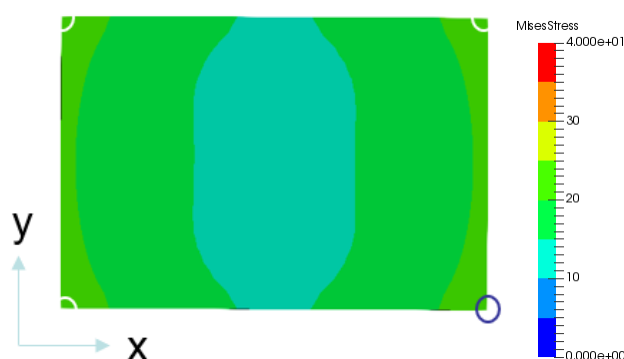


図 2-49 TCT 検証解析 接合層ミーゼス応力コンター図(D 点)

図 2-46 から図 2-49 に試験モジュールの接合層におけるミーゼス応力の分布図を示す。変位同様に温度サイクルに対応してミーゼス応力の変化が生じている。焼結銀接合の温度サイクル試験についても接合部の端部に応力集中が発生する現象が見られた。

また、高温→低温時の遷移時に大きな応力が発生し、温度保持している期間については応力緩和が見られる。

TCT 検証解析結果 応力-ひずみ線図

図 2-50 に試験モジュールの熱応力解析での最大ダメージパラメータ点での応力ひずみ線図を示す。ここで、最大ダメージパラメータ点は図 2-50 中の x+y 側の要素となった。

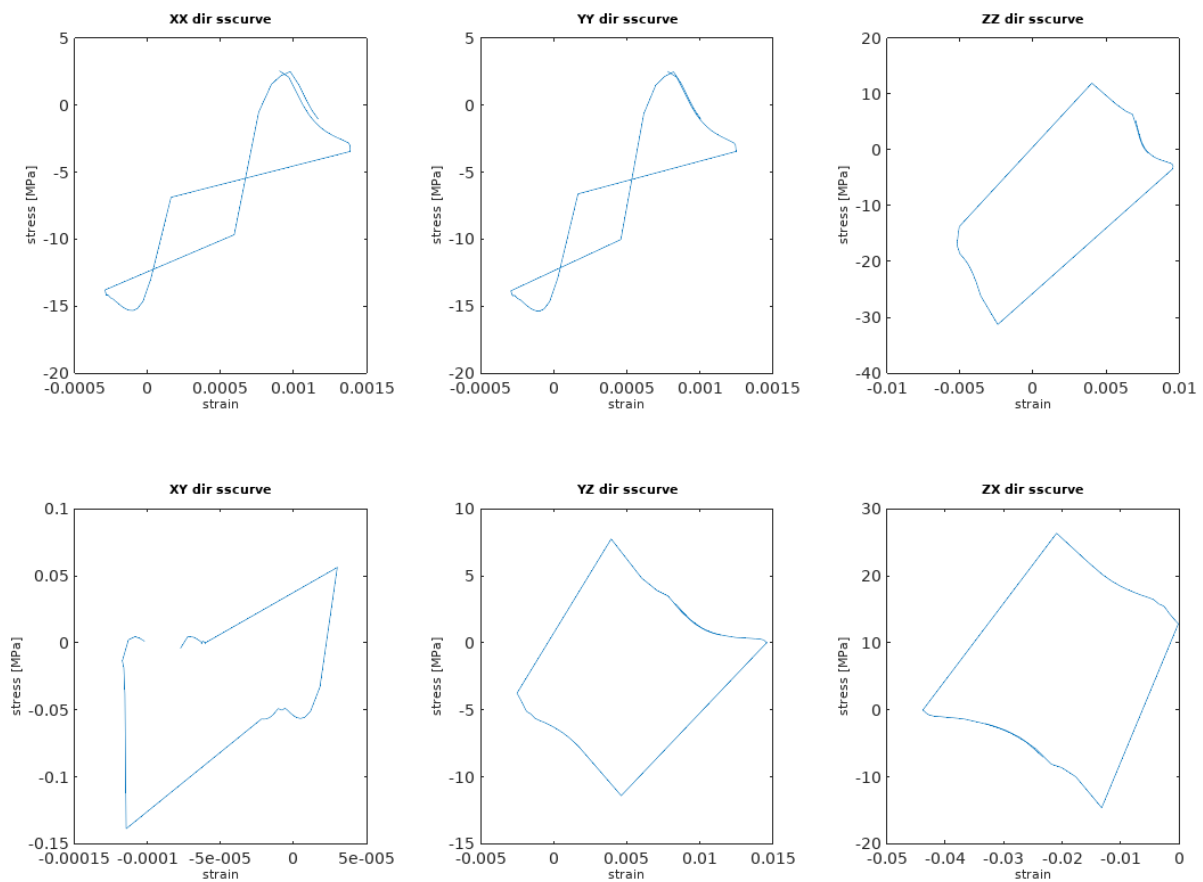


図 2-50 TCT 検証解析 最大ダメージパラメータ点 応力ひずみ線図

図 2-41 における温度プロファイル 980~2560s の範囲で図 2-50 からダメージパラメータを計算したところ、 $\Delta W=1.36\text{MPa}$ となった。

2-5-2-2 検証解析2 阪大実装モジュールでのPCT試験

図 2-39 の試験モジュールでパワーサイクル試験（PCT）を模擬した熱応力解析を行い、接合部へのダメージを評価した。

伝熱境界条件

PCT 検証解析の伝熱境界条件を図 2-51 に示す。

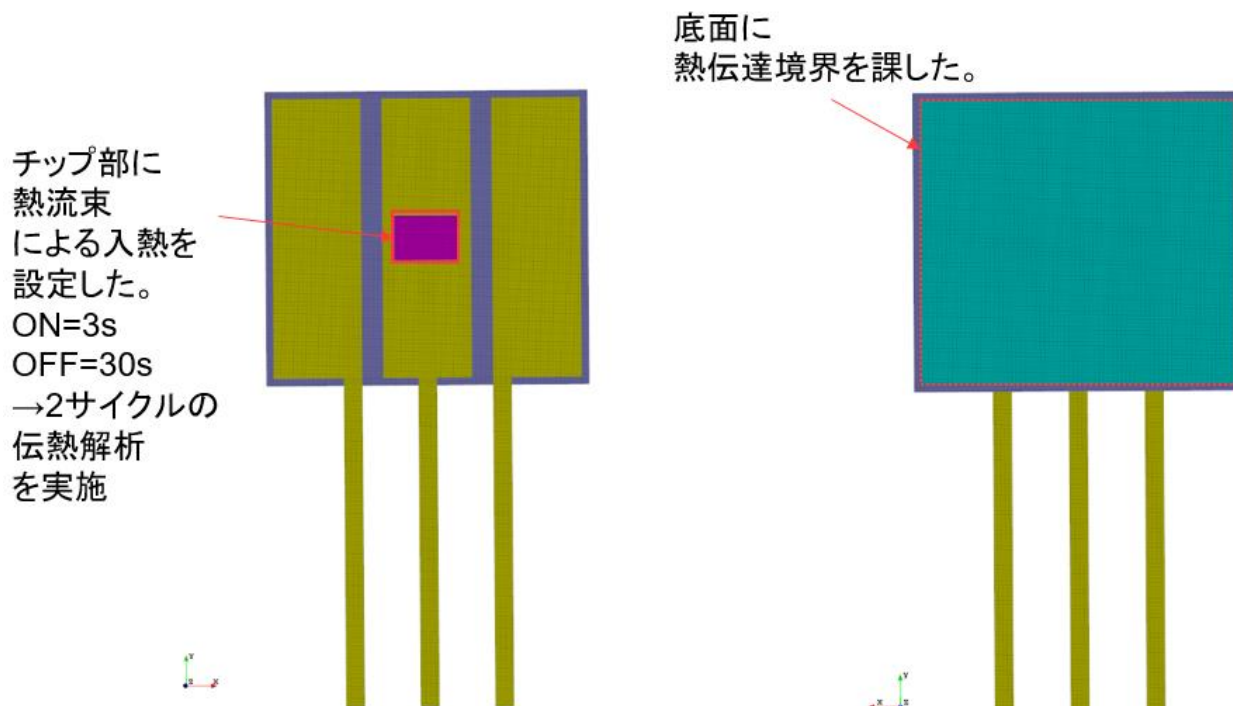


図 2-51 PCT 検証解析 伝熱境界条件

PCT 検証解析 伝熱解析

PCT 検証解析の伝熱計算結果を、図 2-52 ならびに図 2-53 に示す。

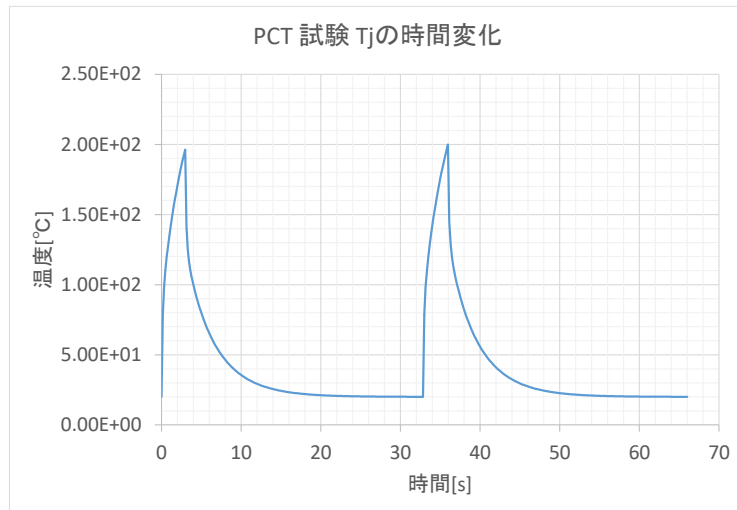


図 2-52 PCT 検証解析 ジャンクション温度 T_j の時刻応答

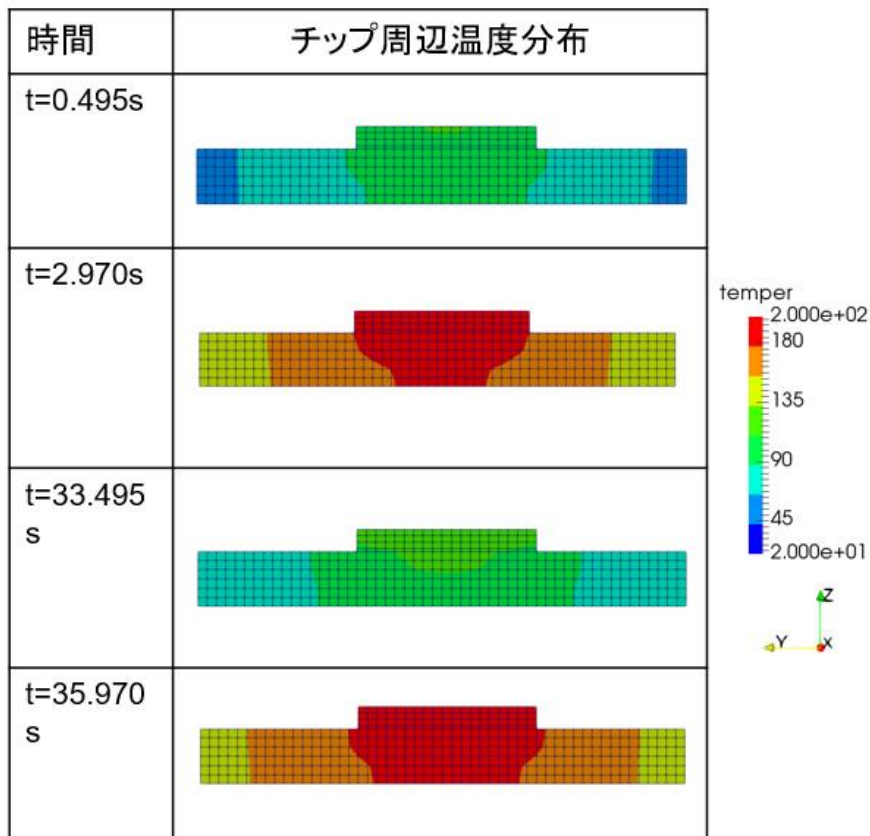


図 2-53 PCT 検証解析 チップ周辺温度の変化

PCT 検証解析結果 接合層応力分布

ミーゼス応力コンター図($t=0.660[s]$) :

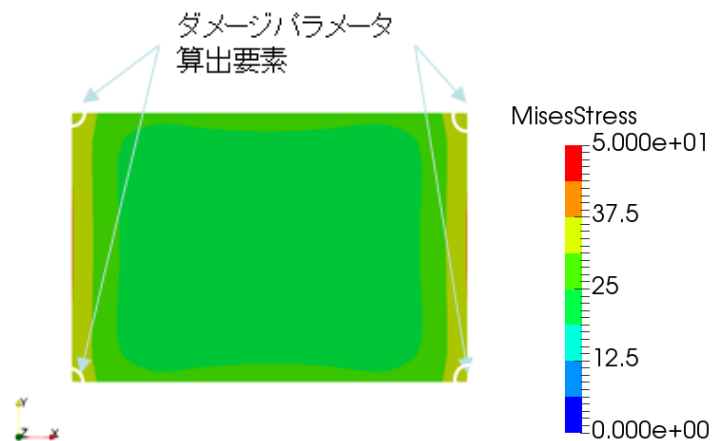


図 2-54 PCT 検証解析 接合層ミーゼス応力コンター図($t=0.660$)

ミーゼス応力コンター図($t=2.970[s]$) :

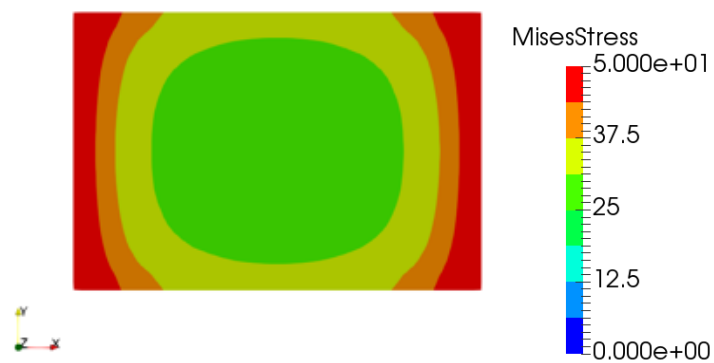


図 2-54 PCT 検証解析 接合層ミーゼス応力コンター図($t=0.290$)

ミーゼス応力コンター図($t=3.960[s]$) :



図 2-55 TCT 検証解析 接合層ミーゼス応力コンター図($t=3.960$)

ミーゼス応力コンター図($t=20.130[s]$) :



図 2-56 TCT 検証解析 接合層ミーゼス応力コンター図($t=20.130$)

図 2-53 から図 2-56 に試験モジュールの接合層におけるミーゼス応力の分布図を示す。パワーサイクルの温度変化に対応してミーゼス応力の変化が生じている。焼結銀接合のパワーサイクル試験についても接合部の端部に応力集中が発生する現象が見られた。

PCT 検証解析結果 応力-ひずみ線図

図 2-57 に試験モジュールの熱応力解析での最大ダメージパラメータ点での応力ひずみ線図を示す。ここで、最大ダメージパラメータ点は図 2-57 中の x-y+側の要素となった。

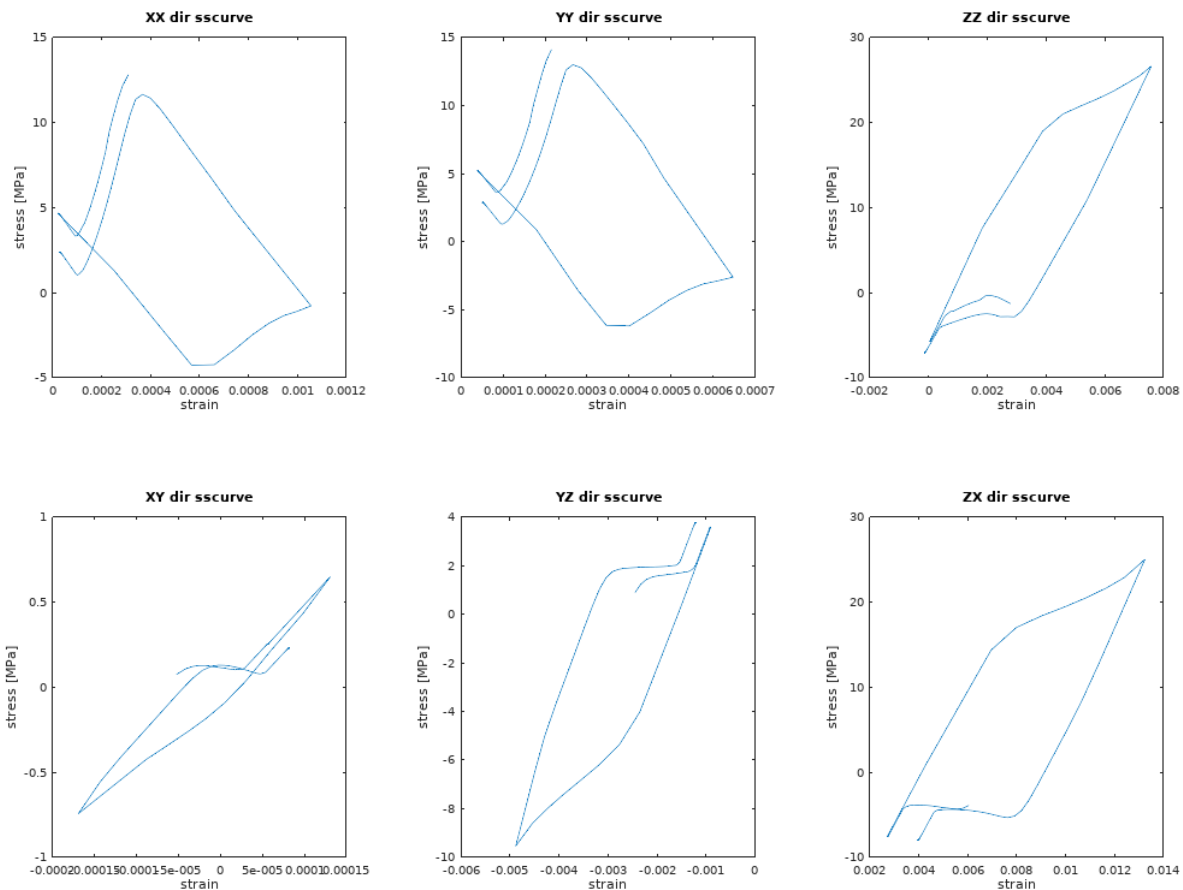


図 2-57 PCT 検証解析 最大ダメージパラメータ点 応力ひずみ線図

図 2-52 に示す T_j 温度時刻応答に対して、図 2-57 からダメージパラメータを計算したところ、 $\Delta W=0.239\text{MPa}$ となった。

2-5-2-3 KAMOME プロジェクトモジュールによる検証解析

KAMOME-PJ (Kanagawa Advanced Module for Material Evaluation Project) は横浜国大を中心に日本を代表する実装材料メーカーが参加する「実装材料評価PJ」であり、高温動作パワーモジュールの実装材料評価のためのプラットフォーム試験モジュールの開発と、開発した試験モジュールを用いたパワーサイクル、サーマルサイクル試験等の信頼性試験により、放熱／封止／接合材料の特性を評価している。

本開発システム「バーチャル実装評価システム」を、KAMOME プロジェクトにおける実装材料評価モジュールに適用し、本システムの検証を行った。

KAMOME モジュール

KAMOME プロジェクトで用いられる接合材料評価モジュールを、図 2-58 に示す。本評価モジュールは「【5-1】信頼性試験の標準モジュールモデルの自動生成機能の開発」にて、すでにバーチャル実

装評価システムに組み込み済みである。

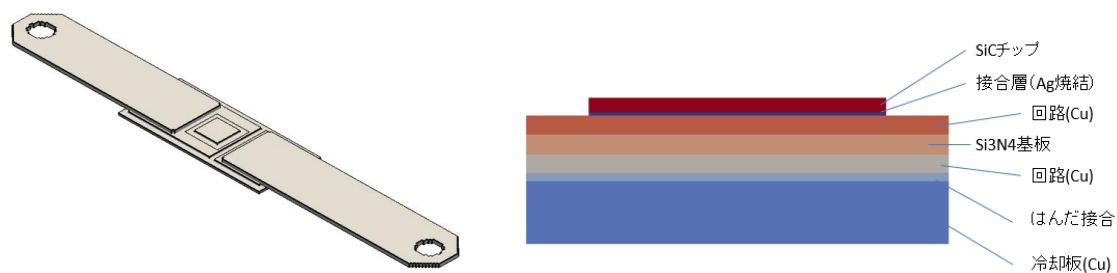


図 2-58 KAMOME モジュール

KAMOME モジュール検証解析 温度プロファイル

温度サイクル試験に対するKAMOME モジュール検証解析を行う。TCT 温度条件は-40/250℃でさらし時間は 30 分とする。図 - 59 に温度プロファイルを示す。

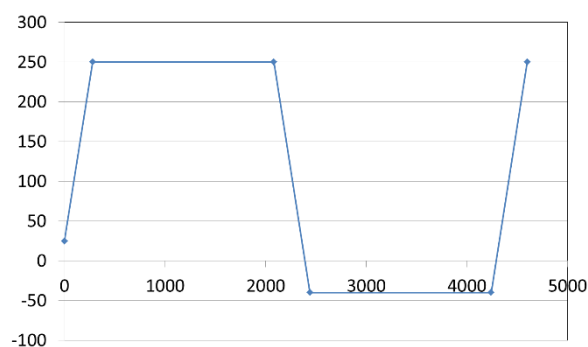


図 2-59 KAMOME モジュール検証解析 TCT 温度プロファイル

KAMOME モジュール検証解析

TCT 検証解析における 250℃、-40℃の Mises 応力分布を下記に示す。

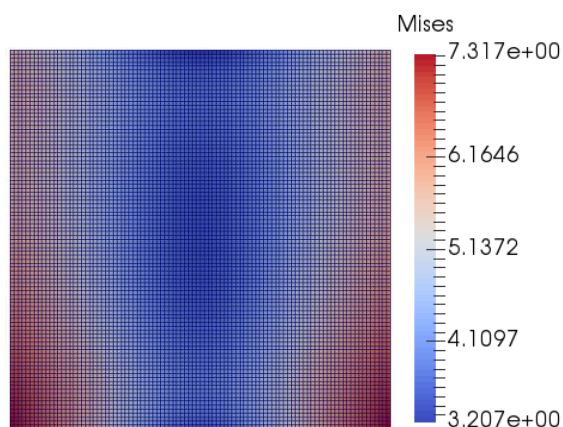


図 2-60 KAMOME モジュール検証解析 接合材の Mises 応力 (250℃)

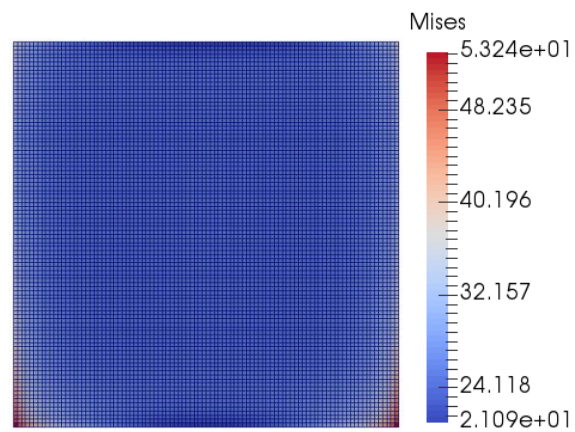


図 2-61 KAMOME モジュール検証解析 接合材の Mises 応力 (-40°C)

また、接合材に発生するダメージパラメータ ΔW は、図 2-62 に示す接合材内の応力-ひずみ関係より、 $\Delta W=0.389\text{MPa}$ と計算される。

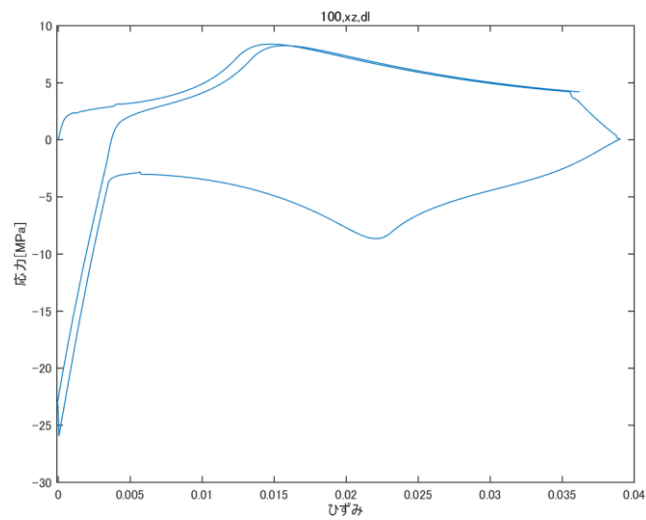


図 2-62 接合材の応力-ひずみ線図

KAMOME モジュールにおけるダメージパラメータ ΔW 予測式の作成

前節で計算した ΔW に対して、材料特性値を変化させた場合の変化を評価するためには、再度シミュレーションを実行する必要があるが、計算コストが高い。

一方で、材料パラメータを変数とした回帰式（ ΔW 予測式）をあらかじめ作成しておけば、一時的には複数のシミュレーションを実行する必要があるが、一旦作成してしまえば ΔW 予測式を使うことで瞬時に ΔW を計算する事ができる。

また、サブテーマ【4. 損傷パラメータと疲労寿命を関連づける寿命予測式の作成】で作成した疲労寿命予測式（ ΔW と寿命サイクルの相関式）を組み合わせることで、瞬時に寿命を評価する事が可能である。

ここでは、材料特性として接合材（焼結銀）の Young 率、CTE、クリープ緩和特性、クリープ温度依存性の4つのパラメータを考える。

したがって、解析ケースとして 2^4 の16 ケースの計算により ΔW 予測式を作成する。

リファレンス材料に対して、各材料特性を $\pm 20\%$ で振る

因子	材料特性	Min	Max
A	接合材 Young率	▲20%	+20%
B	接合材 CTE率	▲20%	+20%
C	接合材 クリープ緩和特性	▲20%	+20%
D	接合材 クリープ温度依存性	▲20%	+20%

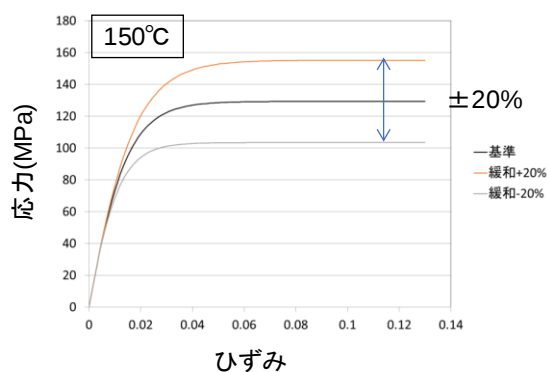
$$\dot{\epsilon}^{cr} = A\sigma^n$$

$$\dot{\epsilon}^{tot} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^{cr} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + A\sigma^n$$

$$\sigma_{sat} = \left(\frac{\dot{\epsilon}^{tot}}{A} \right)^{\frac{1}{n}}$$

上記を満たす応力 σ_{sat} の温度依存性、ひずみ速度依存性をパラメータとする

クリープ緩和特性



クリープ温度依存性

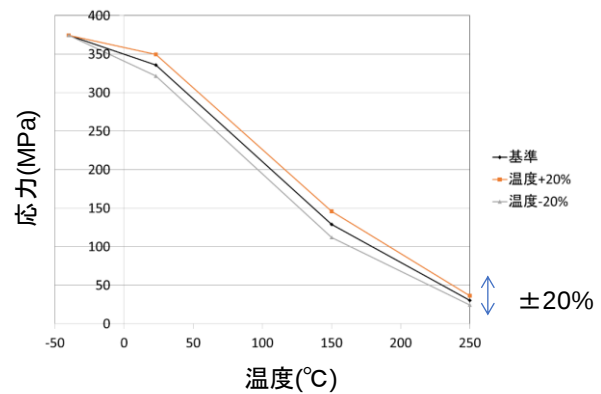


図 2-63 ANOVA 直交表の4因子

ANOVA表 各物性値の変化率(±0.2)をパラメータとし、ANOVAを実施。

	ヤング率変化率	CTE変化率	クリープ緩和特性変化率	クリープ温度依存性変化率
	A	B	C	D
P[%]	1.4752E-04	4.1545E-04	8.9552E-05	2.0866E-05
		A × B	A × C	A × D
P[%]		0.4293E+00	3.4549E+00	6.1813E+00
			B × C	B × D
P[%]			30.141E+00	15.913E+00
				C × D
P[%]				3.5822E+00

セル凡例

P < 0.1%	
0.1% ≤ P < 1%	
1% ≤ P < 5%	

回帰式

1%の水準で有意な因子ならびに交互作用を用いて回帰式を作成

$$\Delta W = 0.607 + 0.008A - 0.016B - 0.141C - 0.189D + 0.120AB$$

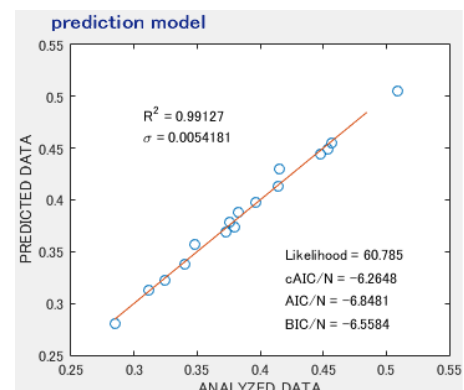


図 2-64 ダメージパラメータ予測式の作成

本検討で作成したダメージパラメータ予測式の具体的な形は、

$$W_{reg} = 0.607 + 0.008A - 0.016B - 0.141C - 0.189D + 0.120AB$$

となる。この式は「バーチャル実装評価システム」より excel 形式で出力可能であり、本機能を用いて瞬時に寿命が計算できる。

また、本検討により得られた技術的知見は以下のようなものであり、本検討内容は KAMOME プロジェクトの定例会議、ならびに、学会等（エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム）に報告済みである。

- ・ 取得したクリープ特性を用いて温度サイクル試験のシミュレーションを実施し、寿命予測パラメータとして非弾性エネルギー密度 ΔW を使う場合には、温度遷移領域での材料構成モデルが重要であることを示した
- ・ 焼結銀接合材料の機械的特性値に対して、4 因子、2 水準の要因配置実験を行い、分散分析によって寿命予測パラメータ ΔW に対する有意性を検討し、回帰式を作成した
- ・ ΔW 回帰式における各因子の影響は、温度軟化係数(=D) > 飽和応力(=C) > ヤング率(=A) > CTE(=B) の順に大きい

第3章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

3年間の開発の成果として、高耐熱パワー半導体モジュールの信頼性設計・評価システムの開発を完了した。ここで、第2章で記載した各サブテーマに対する成果概要と目標達成度の詳細については、1-3節の成果概要に掲載している。

現状では、開発システムの適用について一部の事例があるのみであるが、今後は様々な事例への本システムの適用を進めて精度検証、利便性の向上を図り、商品化を進める。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

成果・効果：

車載用のパワー半導体モジュールは、小型・高出力で、かつ高信頼性であることが求められており、そのための次世代デバイス、ならびに、必要な実装材料の開発競争が本格化している。しかしながら、パワーモジュールの信頼性を解析的に評価するためには、ナノレベルの界面接合科学から得られる知識・知見が必要なため、実用に叶う信頼性データを整備するためには相当の年数を要する。したがって、パワーモジュールの信頼性は、主にPC、TC試験による実験的評価が行われている。

したがって、TC、PC試験の期間短縮のために、シミュレーション手法が求められている。本補助事業にて開発したシステムでは、実験（TC および PC）から得られるデータを利用し、統計的手法と力学的解析を用いて仮想的に PM の進展破壊を予測することが可能である。すなわち、信頼性を科学的に解析できる有効な手段として、試験期間の大幅な短縮ならびにコスト削減が期待される。

具体的ユーザー：

本事業にて開発した PM 用の信頼性評価システムは、車載用 PM を開発するモジュールメーカー、および PM 用の封止材料、接合材料を開発する材料メーカーが利用するシステムを想定する。

マーケット及び世界市場規模：

PM の主要市場は、電力化率の向上に伴い高信頼性が要求される車載市場である。

当該システムの利用が想定される研究開発の市場規模は、

車の販売台数は 5,000 万台/年、150 万円/台×5,000 万台×0.05（半導体の占める価格割合）×0.1（PM 使用率）×0.1（研究開発費に占める PM の割合）÷400 億円と想定する。国内市場はそのうちの 15%の 60 億円が対象市場である。

事業化見込み時期

本補助事業終了年からの事業化を計画している。これは、実測に対する誤差を目標値に収め信頼性の高い

システムとして提供を計画。そのために、解析手法の改良等のチューニングが必要と見込んでいる。

想定される具体的販売先

新電元工業株式会社、デンソー株式会社、トヨタ自動車株式会社、日本ケミコン株式会社、富士電機株式会社、日産自動車、東芝、三菱電機、サンケン電気、オリジン電気、デンソー
三菱マテリアル株式会社、千住金属株式会社

1) YJC コンソーシアムが実施しているカモメプロジェクトおよび本補助事業の共同体を形成する大阪大学産業科学研究所菅沼研究室が実施する WBG コンソーシアムの実測データを利用し「ASU-PM/Lifetime」の有用性を実証事例で示す。

2) 2018 年1月に mate2018 で途中成果を発表、プログラム紹介展示、2018 年4月にテクノフロンティアで講演を実施した。2019 年にカモメおよび大阪大学と共著論文発表と展示を行う予定である。

事業化スケジュールのイメージ図（申請書より）

