

# 電子機器の信頼性向上を支える 大規模構造解析・寿命予測技術

Large-Scale Structure Analysis and Fatigue Life Estimation Technology to Improve Reliability of Electronic Devices

廣畑 賢治      木内 英通      川村 法靖  
 ■HIROHATA Kenji      ■KIUCHI Hidemichi      ■KAWAMURA Noriyasu

電子機器の信頼性向上には、設計段階で品質とコストを両立できる信頼性設計技術と、機器稼働時での想定外の使い方に対しても不良発生リスクを低減できる寿命予測技術の開発が必要である。

東芝は、デザインレビューを強化するための大規模構造解析に基づく信頼性設計技術や、アベイラビリティ（可用性）と保守サービス力の向上を目指した、故障予兆を検知し寿命を予測するためのPHM (Prognostics and Health Monitoring/Management) 技術の開発を進めている。

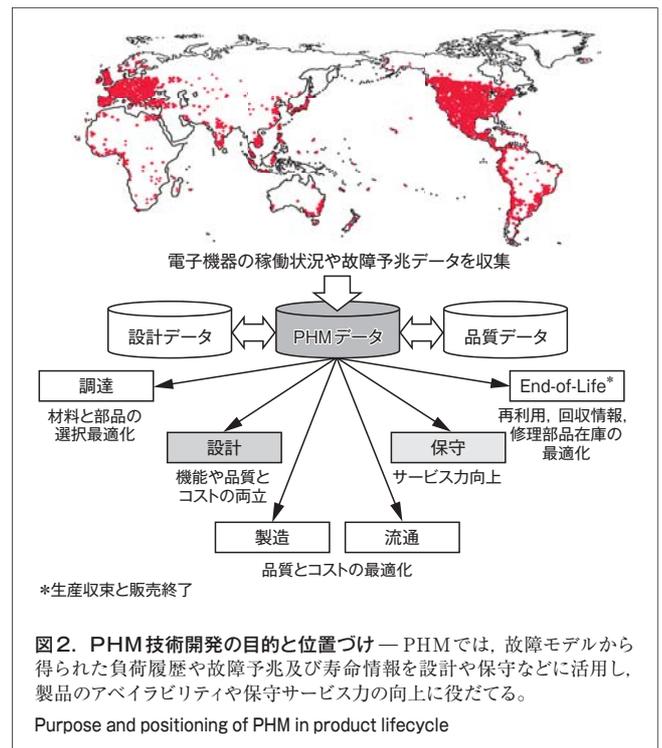
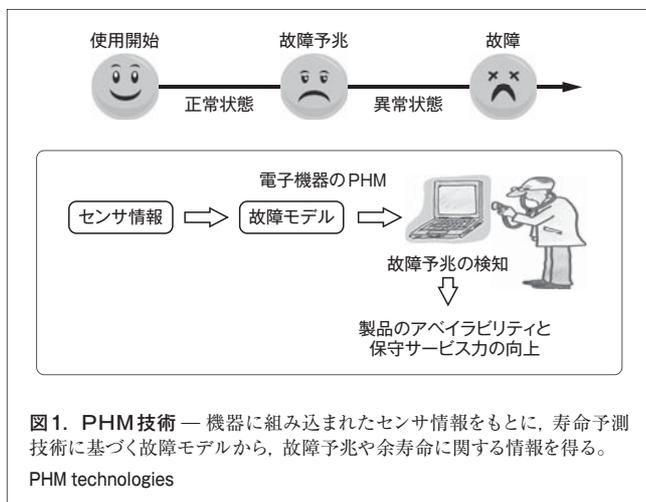
With the increased risk of electronic device failure due to unanticipated forms of use and different usage environments, new technologies to achieve higher reliability are required in order to avoid unexpected failures and facilitate the comfortable use of electronic devices.

To meet these requirements for electronic devices, Toshiba has developed a technology consisting of a large-scale structure analysis methodology to enhance the design review process, and a fatigue life estimation methodology based on prognostics and health monitoring/management (PHM) to increase availability and serviceability, including the reduction of downtime and realization of effective maintenance.

## 1 まえがき

電子機器の信頼性向上には、設計段階で品質とコストを両立できる信頼性設計技術と、それに加え、機器稼働時における想定外の使い方に対しても不良発生リスクを低減できる寿命予測技術の開発が必要である。東芝はこれまで、CAEを活用した電子機器の信頼性設計技術や、故障予兆を検知し寿命を予測するためのPHM (Prognostics and Health Monitoring/Management) 技術<sup>1)</sup>の開発に取り組んできている。

PHMは、図1と図2に示すとおり、機器に組み込まれたセンサにより稼働状況や故障予兆状態を監視して検知する技術を活用し、製品のアベイラビリティと保守サービス力の向上を



目指す取組みである。これは、故障予兆を検知することで、故障発生前に対応策を講じることや、故障時の原因究明時間を短縮（アベイラビリティ向上）させること、保守を効率化させることが狙いである。また、故障予兆を算定するための情報として収集している負荷履歴や疲労度合データを品質データと照合することで、設計時の負荷を想定したり信頼性試験の加

速係数を適正化したりすることも可能であり、後継機種の信頼性を向上させるにも有用である。

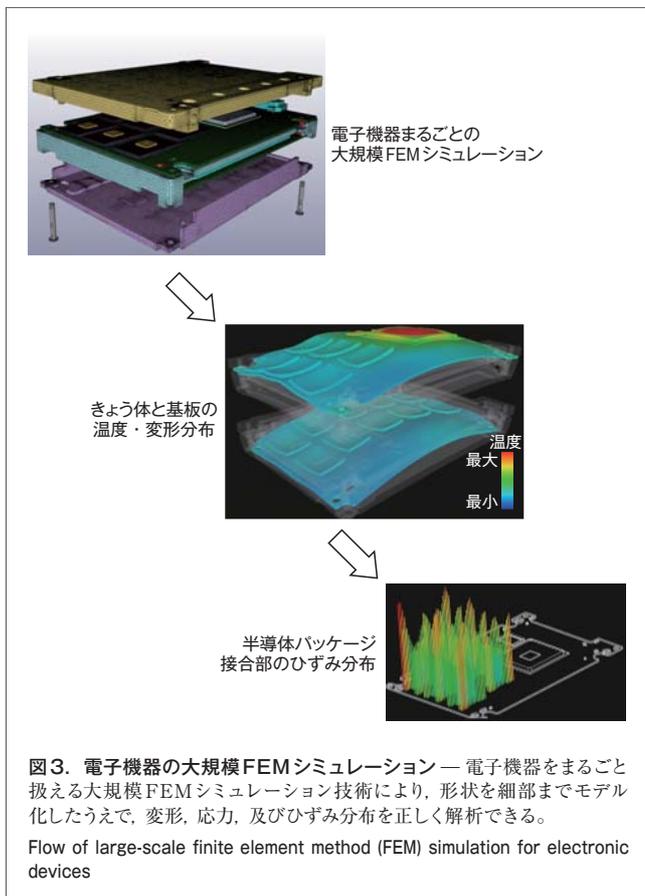
ここでは、これらの信頼性技術を支える大規模構造解析・寿命予測技術について、SSD（ソリッドステートドライブ）やPC（パソコン）といった電子機器への適用例と、信頼性向上に向けた取組みについて述べる。

## 2 大規模構造解析に基づく故障モデルを活用した信頼性向上技術

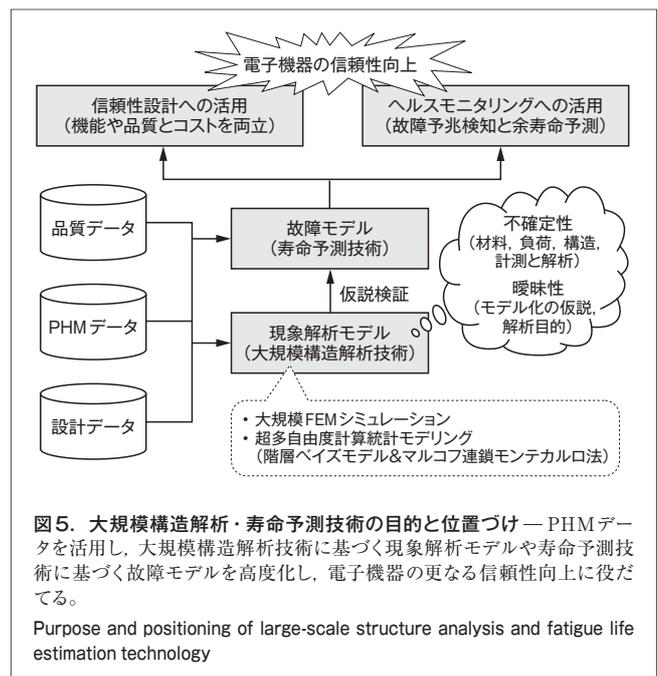
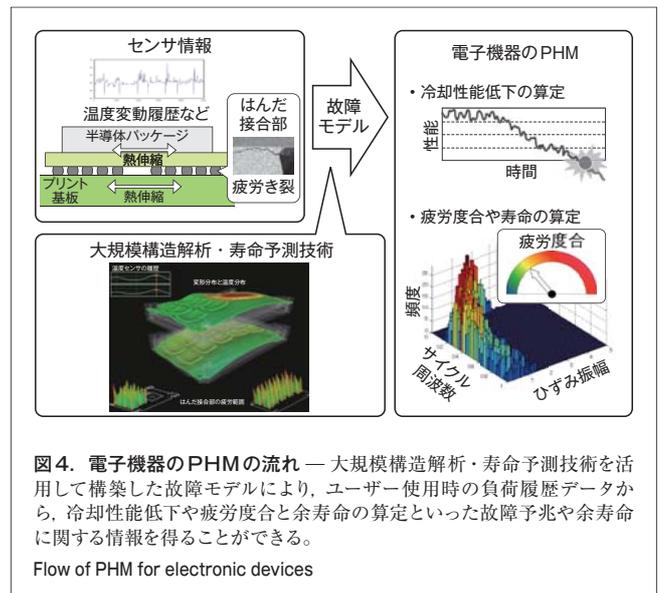
### 2.1 課題と目的

電子機器の機械的な強度は信頼性の要であり、設計段階で応力や、ひずみ、変形状態が正しく評価できる数値解析技術が必要とされる。当社では3次元CADデータを利用し、電子機器の信頼性設計の際に機器をまるごと扱える大規模有限要素法（FEM：Finite Element Method）シミュレーション技術（図3）の開発に取り組んできた<sup>(2)</sup>。形状を細部までモデル化することで、温度変化や機械的な負荷に対する製品のふるまいをより忠実に再現し、部品の応力やひずみを的確に捉えることができる。

一方、電子機器のものづくりにおいて、CADやCAEツールを製品開発に適用するための環境構築を進めている。このな



かで、モニタリング技術と、ネットワークやデータベースなどのICT（情報通信技術）インフラの進歩により、製品の設計データや品質データと、PHMデータ（負荷履歴、故障モード、故障予兆情報、寿命）がオンラインで得られる環境が整いつつある。これらのデータを設計や保守へフィードバックし、信頼性や保守サービスの向上に役だてる試みも進めている。しかし、市場での潜在的な不良発生リスクを可視化し、合理的な信頼性向上を実現するには、前記のCAEやICTだけではなく、不良現象解析と信頼性評価に関する、継続的に蓄積された知識及び技術と、これらの技術を有機的にマージするためのPHM技術（図4、図5）が求められている。



従来の原因追求と対策方法確立という受身の方法論だけでは、温度変動や機械荷重、ユーザーの使用形態など市場での不良問題における多岐にわたる原因が劣化や破損へ及ぼす影響を合理的に特定し、故障を予知するのは容易でない。現象解析や寿命予測結果と、材料や、製造、検査、試験、負荷、品質モニタリングに関するデータを積極的に蓄積し、不良現象情報の未知の部分に対して、信頼性に関する情報抽出を能動的に行い、不良の発現機構が不明確な状況に対しても、有効に対応できる方法論を構築することが望まれている。

## 2.2 信頼性向上での大規模構造解析・寿命予測技術の位置づけ

当社では、電子機器の潜在的な不良発生リスクに対して、現象論に基づく不良現象解析と信頼性評価技術の深耕と蓄積、及び統計・確率論的手法を活用したPHM技術の構築を進めている。

PHMでは、図4に示すように、機器に組み込まれたセンサから得られるモニタリング変数のデータ履歴から、故障モデルにより、対象とする不具合現象に関連する温度や変形量といった物理量の分布を算出する。この分布から、例えば電子機器の冷却性能低下や疲労寿命の算定など、故障予兆や余寿命に関する情報を得ることができる。正しい寿命予測を行うには故障モデルの高度化が鍵となる。大規模構造解析や寿命予測技術により作成した故障モデルを、PHMデータを拡充しながら、校正し更新していくための方法論も重要である。

現象解析をモデル化する過程では、材料特性や形状寸法にばらつきが存在し、境界条件や負荷条件が不確定な場合があるため、モデルに関する仮説検証が必要な場合がある<sup>(3)</sup>。

電子機器は、半導体実装に用いられる材料の複合化や、微細化、非均質化に伴い、材料の微視構造や残留応力が異なることもあり、パルク材<sup>(注1)</sup>や構成を単純化した試験片による試験データだけでは、実機の現象を再現するのに不十分な場合がある。特に、半導体実装に用いられる複合材料や多孔質材料などの非弾性特性や異方性に関する材料モデルを事前に高精度に同定するのは容易ではない。

不確定要素を全て除去できるように試験法や、観測法、評価技術を改良することが大事であるが、開発期間や費用対効果、あるいは技術的な問題で困難な場合も多い。一方、実際の複合的な信頼性問題を統計的手法だけで解決するには大量のデータが必要となり、経費的にも時間的にも困難な場合が多い。そのため、不良発生の物理的側面を捉えた故障モデルや現象解析モデルを活用して、不確定性や曖昧性のなかで想定される複数の仮説の中で、能動的に不良現象に関するモデルを当てはめ、その時点での最良の統計的推定を行うための仕組みが必要である。

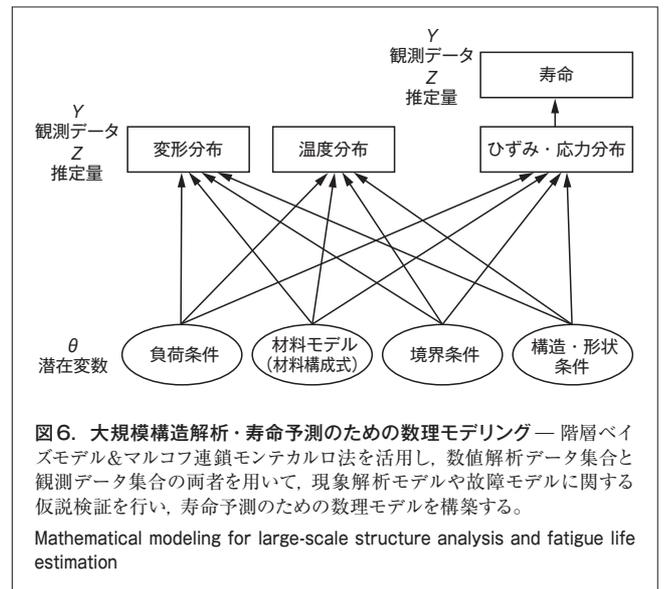
(注1) 対象とする微細材料よりも寸法が大きな材料試験片。

## 2.3 大規模構造解析・寿命予測のための数理モデリング

そのための手法として、図6に示すような超多自由度計算統計技術、つまり階層ベイズモデル&マルコフ連鎖モンテカルロ法<sup>(4)</sup>を活用する。シミュレーションによる数値実験データ集合と実測による観測データ集合の両者を用いて、複合的な不良現象に関する統計的な数理モデルを推定する。

具体的には、大規模構造解析とモンテカルロ法を活用して事前分布を算出することで、観測データや現象解析結果に不確定性を持っている場合でも、適切なデータ分布と事前分布の導入により、観測データ集合と現象解析結果という系統の異なるデータを用いた柔軟な統計的推定が可能になる。統計モデルを階層構造  $P(Y|Z)P(Z|\theta)P(\theta)$  に表現する。ここで  $Y$  は温度や変形量といった観測データ (物理量)、 $Z$  は推定量、 $\theta$  は潜在変数、 $P$  は確率分布を示している。推定量  $Z$  についての事前の情報や知識を事前分布  $P(Z|\theta)$  で表現し、ベイズ論に基づいて事後分布  $P(Z|Y) \propto P(Y|Z)P(Z|\theta)$  で表現することで、超多自由度のパラメータについて統計的に安定した推定を行うことが可能になる。

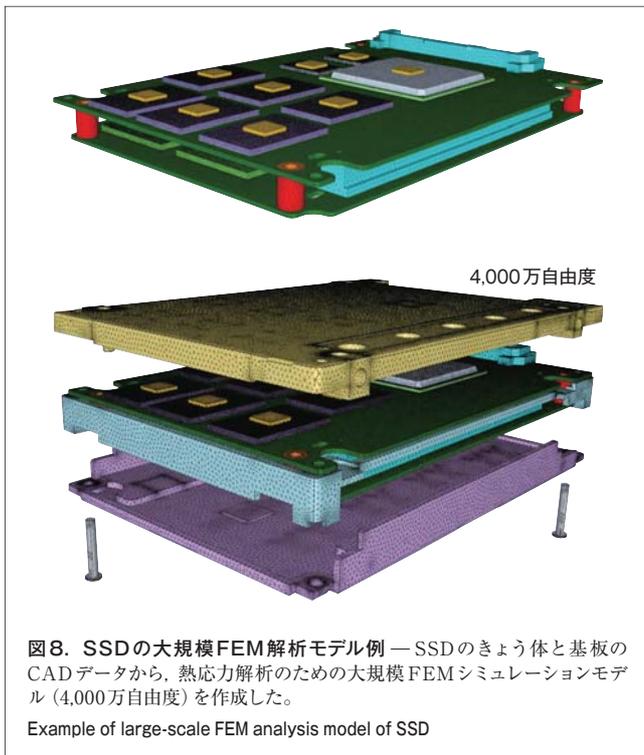
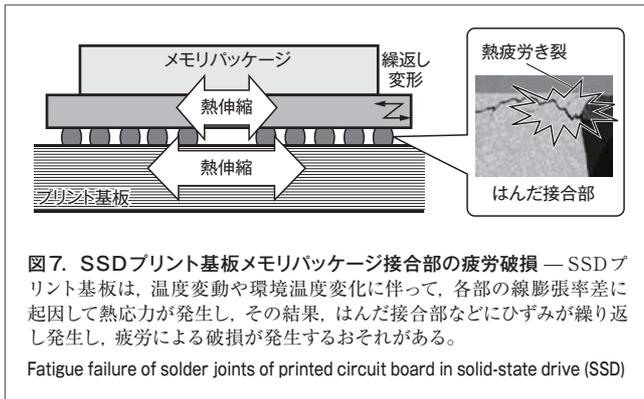
図6に示すように、観測できる温度分布や変形分布から、現象解析モデルでの潜在変数を同定し、得られた潜在変数の物理量をもとに実測が不可能な応力分布やひずみ分布を推測でき、寿命予測のための故障モデルの構築に活用できる。



## 3 電子機器の信頼性向上技術への適用例

### 3.1 SSDの疲労寿命予測への適用例

SSD<sup>(5)</sup>のプリント基板では、フラッシュメモリの実装の高密度化が進み、メモリパッケージと基板を結ぶ接合部が微細化するとともに熱負荷も厳しくなる方向にある (図7, 図8)。SSDの信頼性向上に向けては、想定する使用条件内<sup>(6)</sup>で破損しな

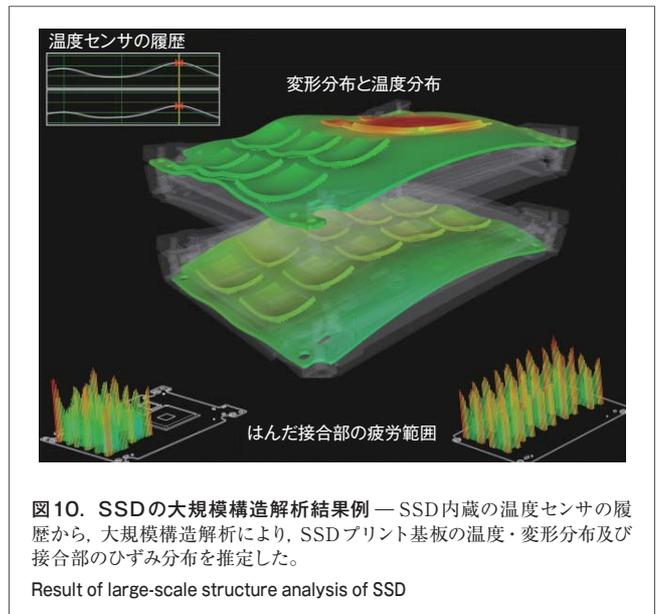
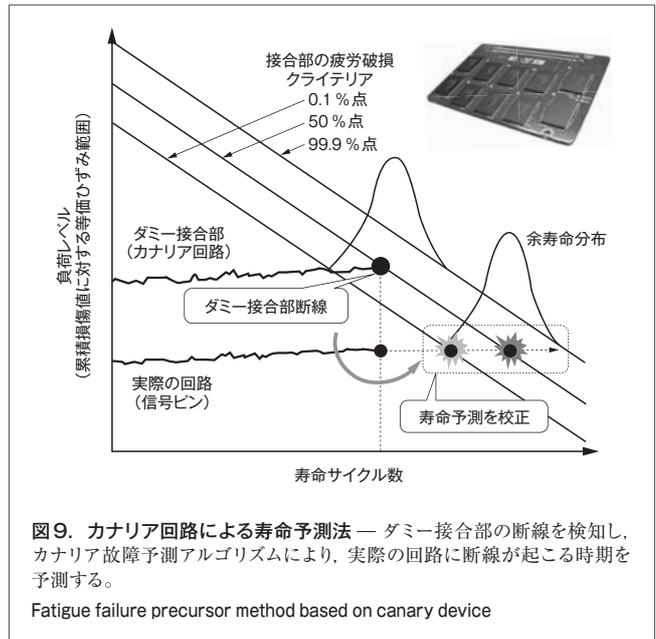


い信頼性設計を目指すことはもちろん、想定外の使い方に対しても、市場での不良発生リスクを低減するための故障予兆検出技術が期待される。

ダミー接合部(カナリア回路)の断線を検知し、実際の回路(信号ピン)に断線が起こる時期を予測する故障予測アルゴリズムを開発した(図9)。大規模構造解析(図10)と加速寿命試験により統計的な寿命ばらつきを考慮して、破損メカニズムが信号ピンと同じで、応力状態が厳しくなるようなダミー接合構造を見いだした。この技術により、SSDの大容量・小型化と、信頼性の両立を目指すことができる。

### 3.2 PCヘルスマニタリングへの適用例

当社は、ノートPCの稼働状態を多面的に監視して故障の前兆となる状態を検出することを目指したTOSHIBA PC Health Monitor<sup>(7)</sup>を開発している。



ここでは、PCプリント基板の温度履歴をもとに、大規模構造解析に基づく故障モデルにより熱疲労寿命予測を試みた事例について述べる。温度変化と線膨張率差に起因してプリント基板には熱応力が繰り返し発生する。その結果、はんだ接合部などにひずみが繰り返し発生し、疲労による損傷が蓄積されていく。繰返し負荷の故障モードでは、どのような大きさの負荷が何回作用するかという頻度に関する情報がたいせつである。

この事例では、機器のオン/オフなどに起因して生じる温度変化によりプリント基板に繰り返し生じる熱ひずみを現象解析して予測した。その増減を一つのサイクルとし、発生頻度を振幅と周期(サイクル時間)の大きさごとにカウントした。プ

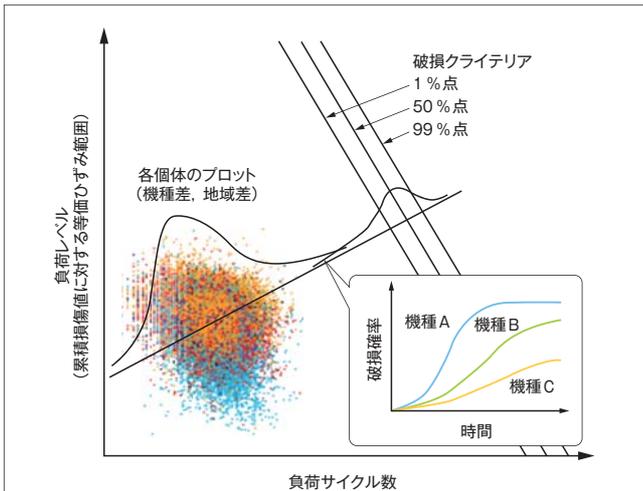


図 11. 熱疲労度合と破損確率の算定例 — 熱疲労寿命予測用の故障モデルを活用し、負荷履歴による累積損傷値と接合部材の破損クライテリアを照合して熱疲労寿命分布 (破損確率) を算定することができる。機種差、地域差、ユーザーの使い方に応じた、保守や信頼性設計へのPCヘルスマモニタリングの活用が期待できる。

Example of thermal fatigue life and failure probability estimation based on PHM

プリント基板における半導体パッケージのはんだ接合部の熱疲労破損を対象として熱疲労度合 (累積損傷値) を算定した結果を図 11 に示す。接合部材の疲労線図 (破損クライテリア)<sup>(6)</sup> と照合して熱疲労寿命分布 (破損確率) を算定することも可能であり、機種差や、地域差、ユーザーの使い方に応じた、保守や信頼性設計へのPCヘルスマモニタリングの活用が期待できる。

#### 4 あとがき

電子機器の信頼性向上を支える大規模構造解析・寿命予測技術について、SSD やPCへの適用事例をもとに当社の取り組みについて述べた。

今後も、不良現象に関するPHMデータを拡充し、故障モデルや現象解析モデルの高度化を進め、製品のいっそうのオペラビリティ向上と保守サービス力の向上を目指していく。

#### 文献

- (1) Pecht, M.G. Prognostic and Health Management of Electronics. New York, USA, John Wiley & Sons, 2008, 319p.
- (2) 川上 崇 他. 大規模応力シミュレーションによるモバイル機器の強度設計. 東芝レビュー. **63**, 8, 2008, p.7-10.
- (3) 萩原一郎. “ものづくり支援のための計算力学シミュレーションの品質保証に向けて”. 日本学術会議. <<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/2011.html>>, (参照2012-06-07).
- (4) 松本 隆 他. 階層ベイズモデルとその周辺. 岩波書店, 2004, 270p.
- (5) 木内英通. 高性能と高信頼性を両立させたエンタープライズ向けSSD MK4001GRZB. 東芝レビュー. **66**, 8, 2011, p.40-43.
- (6) Mukai, M. et al. Thermal Fatigue Life of Solder Bumps in BGA. International Journal of Japanese Society of Mechanical Engineers. **41**, 2, 1998, p.260-266.
- (7) 儘田 徹. ノートPCの故障予兆技術. 東芝レビュー. **64**, 5, 2009, p.64-65.



廣畑 賢治 HIROHATA Kenji, D.Eng.

研究開発センター 機械・システムラボラトリー主任研究員、工博。電子機器の信頼性設計技術の開発に従事。日本機械学会、電子情報通信学会、エレクトロニクス実装学会会員。Mechanical Systems Lab.



木内 英通 KIUCHI Hidemichi

セミコンダクター&ストレージ社 ストレージプロダクツ事業部 SSD 製品技術部グループ長。エンタープライズSSDの設計に従事。Storage Products Div.



川村 法靖 KAWAMURA Noriyasu

デジタルプロダクツ&サービス社 設計開発センター デジタルプロダクツ&サービス設計第一部メカニカル開発主幹。ノートPCの開発に従事。日本機械学会会員。Design & Development Center