エレクトロニクス実装における非線形CAEの現状と課題

澁谷 忠弘*

State-of-the-Art in Nonlinear CAE for Electronic Packaging

Tadahiro SHIBUTANI*

* 横浜国立大学 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-7)

* Yokohama National University (79-7 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 240-8501)

1. はじめに

実装信頼性解析技術においても、Computer Aided Engineering (CAE) 技術の普及が進んでいる。例えば、はんだ接合部の熱疲労評価においては、部品と基板の熱膨張係数によってひずみが発生するため、挙動の把握にはCAEを用いた構造解析が有効な手段となる。はんだ材料は融点が低いため、信頼性試験の温度域において塑性変形とクリープ変形が発生する。このため、塑性特性やクリープ特性を考慮した解析が必要となる。また、基板やアンダーフィル材などの樹脂系材料では、弾性特性の時間依存性(粘弾性)を示すため、これを考慮した解析が必要な場合も生じている。このように、実装信頼性解析では複雑な非線形挙動を伴う変形とそれに起因する破壊挙動の評価が求められる。

CAEソフトウェアの高機能化が進んでおり、多くの市販のソフトウェアにおいて、上記の非弾性挙動や大規模モデルの解析が可能となっている。ユーザインターフェースなども洗練され、解析技術を専門としない技術者も容易に解析の実施が可能となっている。反面、CAEソフトウェアのブラックボックス化に起因したリスクが懸念されている¹⁾。例えば、1991年に北海のSleipner Fieldにある海上プラットフォームの基礎が崩壊した事例では、設計時のCAEによる応力の計算結果における大きな誤差が主要因であることが指摘された²⁾。崩壊した部分において不適切な有限要素の使用により約50%応力を低く見積もっていることが判明し、補強部材なども適切に施されないまま、水圧によって基礎部分の壁が崩壊したものと推定されている。このように、計算エラーや結果の判断エラーは、製品の設計/製造プロセスに致命的な影響をもたらす場合があるため、計算結果の検証や妥当性についての議論が欧米では活発になりつつある。国内でも、計算力学技術者の認定事業や計算における品質マネジメントのガイドラインなどが発行されている。

本稿では、近年発行されている計算結果の検証や妥当性

確認に関するガイドラインなどを紹介し、電子デバイスにおける非線形CAEの現状と課題について概説する。

2. 計算の検証と妥当性確認

固体力学分野の有限要素法による計算で発生しうる代表的な誤差発生要因として以下のものがある¹⁾。

- (a) 自然現象を近似することによるモデル化の誤差
- (b) 材料データのもつ誤差(構成式など)
- (c) 形状の近似による誤差
- (d) 境界条件の設定による誤差
- (e) 離散化誤差(要素分割の方法も含む)
- (f) 丸め誤差
- (g) 結果の表示にかかわる誤差
- (h) 単純な間違い

これらの生じうる誤差を完全になくすことは不可能であるが、できる限り最小にする必要がある。また、各因子による誤差の範囲を定量的に評価する必要がある。

このような観点から、CAEをものづくりに適用する上で、解析結果の検証と妥当性確認(Verification & Validation; V&V)についての議論が活発になっている。分野などによって言葉の意味に若干の差異があるが、ここではRoacheの定義に基づき前者が“与えられた方程式を正しく解いているか”、後者が“与えられた方程式は正しいか”と定義する。欧米では、すでにCAEの品質を評価するための指針やISO9001に準拠した解析の品質マネジメントの標準化などが進められている。米国機械学会(ASME)は、検証と妥当性確認について2006年計算固体力学を対象としたガイドラインを発行した^{4),5)}。また英国では、有限要素法を産業界で使うために1983年に通産省の支援の下設立したNAFEMSが、有限要素解析の品質保証に関するガイドラインを作成している⁶⁾。近年、日本でも計算工学会においてCAEにおける検証と妥当性確認のありかたについて議論が行われており、計算の品質マネジメントについてのガイドラインが発行されている⁷⁾。また、日本原子力学会ではASME V&Vを参考にしつつ原子力産業向けの標

準案の作成を進めている。

検証プロセスは、大別すると計算プログラム (Code) の検証と計算プロセス (Calculation) の検証がある。商用ソフトウェアについては、プログラムの中身をユーザである解析者が完全に検証することは不可能であり、通常はベンダー側で行われた大規模な検証作業に頼らざるを得ない。しかし、ドキュメントや解析環境の確認、厳密解が存在するモデルでの検証など、ユーザでも可能な限りの検証作業を実施することは重要である。後者は、主にユーザが設定する部分の検証であり、確認ミスや誤判断によるものが多い。要素や解析アルゴリズムなど適切に選択されていない場合大きな誤差要因となる。

妥当性確認では、主に (a) の実現象とのモデル化の誤差を定量評価する。最も一般的な方法は、実験との比較である。とくに、測定や計算における不確かさまでを考慮して定量的に妥当性を評価することが求められる。しかし、個々の解析において実験と比較していくことは膨大な費用と時間を要する。また、大規模な社会システム（発電プラントなど）では、実験自体が不可能な場合も多い。実験以外の手法として、実験計画法を用いた感度解析やベンチマーク評価のような手法があるが、妥当性を保証するための定量的な面で若干問題が残る。

3. エレクトロニクス実装における非線形CAEの検証

3.1 はんだ接合線形／非線形構造解析のベンチマークテスト

本節では、日本機械学会研究協力部会RC181エレクトロニクス実装における信頼性設計に関する研究分科会においてはんだ接合部の熱疲労解析を対象にCAEベンチマーク検証を行った事例を示す。

BGA (□25.4mm) モデルの1/4領域を対象に要素と汎用ソフトウェアに関するベンチマークテストを実施した。はんだ接合部は、評価対象となる部分のみを詳細にモデル化し、それ以外は解析時間の短縮のため等価な剛性をもつ立方体形状とした。要素は、3次元立体要素である8節点適合要素、8節点非適合要素、20節点適合要素についてそれぞれ検討し、最小要素サイズはすべてのモデルについて共通の12.5 μm とした。ここで、非適合要素は曲げ変形挙動を表現するための要素であり、標準の変位自由度に加え、非適合変形のための自由度が内挿関数に組み込まれている。はんだ材料はSn-Pb共晶はんだとし、解析条件に応じて、弾性、クリープ特性、降伏応力を定義した。ほかの材料はすべて等方弾性体を仮定している。

解析は、弾性解析、弾塑性解析、および弾塑性クリープ解析について実施した。対称面を拘束し、中央部をY方向に拘束しており、初期温度は20 $^{\circ}\text{C}$ とした。熱伝導は考慮せずに全節点に温度変化を与えた。弾性解析および弾塑性解析は、125 $^{\circ}\text{C}$ まで温度を上昇させ、終了温度における応

力およびひずみについて評価した。なお、簡略化のため、弾塑性解析については降伏応力の温度依存性を考慮せずに降伏応力を37MPaとしている。また、疲労寿命評価として-40 $^{\circ}\text{C}$ ⇔125 $^{\circ}\text{C}$ の温度サイクルを与えた弾塑性クリープ解析を行い、ひずみ履歴などについて評価した。

エレクトロニクス実装構造の大きな特徴として、基板／はんだ／パッケージなどが積層された多層構造が挙げられる。このため、変形特性のミスマッチに起因した反り変形は重要な指標の1つとなる。そこで、はんだの評価に際し、反り変形を確認したが、要素による結果の差異は小さく、たわみ量で差は1 μm 以下となっている。なお、曲げ変形の再現を考慮した非適合要素の方が20節点適合要素の結果に若干近い値を示していた。

図1は、弾性解析におけるはんだ接合部の応力解析結果の比較を示す。端部近傍のひずみ集中部について、各積分点の値をプロットしたものであり、横軸は、積分点の座標の端部からの距離を示している。端部最近接点において、値が負となっているのはバンプ形状のためである。A～Dはソフトウェアの種類を示す。ソフトウェアによって、端部において応力値が異なっているが、10 μm 以上離れた部分では応力分布は近い値を示している。また、非適合要素においては、要素間の不連続性に起因して応力分布が若干変動している。また、要素のアルゴリズムの違いからソフトウェアによっても若干の差異が認められる。

図2は、弾塑性解析（温度200 $^{\circ}\text{C}$ ）におけるバンプ端部近傍の相当塑性ひずみ分布を示す。いずれの要素においても塑性域の大きさはほとんど変化しないのに対して、1次適合要素と2次要素の間のひずみ分布は大きく異なっている。これは、本ベンチマークでは、要素サイズを一定にしているため、2次要素と1次要素で積分点の密度が異なっているためである。すなわち、非線形解析においては要素サイズや選択する要素を適切に選択することが重要となる。

図3は、弾塑性・クリープ解析における積分点に生ずる相当非線形ひずみ履歴を示す。はんだ接合部コーナから約10 μm 程度離れた積分点についてプロットしている。各ソルバー間の差異は小さく、非線形ひずみに基づく疲労寿命評価においてはほとんど差が出ない結果となっている。一方、2次要素と1次要素の間におけるひずみの絶対量の差は大きい。これは、ほかの評価したすべての積分点でも同様の傾向が認められる。1,000サイクル程度で信頼性を保証する必要があるはんだ接合部においては無視できない程度の差であり、解析の品質保証の重要性を示唆している。前述の弾塑性解析の場合と同様に、積分点の粗密度がひずみ分布全体に対して大きく影響しており、解析結果の品質保証のためには同一種類の要素で要素分割の粗密度を一定に保つことが1つの対処策になりうると考えられる。

(a) 適合要素

(b) 非適合要素

図1. 弾性解析におけるはんだ接合部の相当応力

図2. 弾塑性解析におけるはんだ接合部の相当塑性ひずみ分布

図3. 熱サイクル疲労評価における弾塑性クリープひずみ履歴

3.2 電子部品の熱疲労信頼性におけるばらつき評価

はんだ接合部の熱疲労には、部品のサイズやはんだ接合部の機械的・熱的材料物性などいくつかの要因が影響している。複数の設計因子に対してばらつきを評価する手法としてさまざまな方法が提案されているが、ASMEのV&Vガイドラインにも示されているように実験計画法を用いた感度解析は有効な手法の1つである。そこで、各設計要因が疲労寿命に及ぼす影響を評価するため、実験計画法に基づきパラメトリック解析を行い、感度解析を行った事例を示す⁸⁾。

設計要因として表1に示すような7要因を設定し、ばらつき範囲は3水準とした。直交表に基づいて、18個の有限

要素解析モデルを作成した。各解析モデルにおける疲労寿命の結果から、設計因子の多項式関数として、疲労寿命の応答曲面が作成できる。18個の各解析モデルに対して、破断寿命を求める際には、チップ部品におけるき裂進展寿命の占める割合が大きいことに配慮して著者らが考案したき裂進展評価を含めた寿命評価を実施している。18ケースの解析の結果、疲労寿命の範囲は449サイクルから1,165サイクルと大きなばらつきを示していた。また、この結果に対して応答曲面法を用いて各設計要因の寿命に対する影響度を算出すると、プリント回路板とチップ部品の熱膨張係数が、大きい影響度を示していた。電極下のはんだ層厚さも寿命に対して大きく影響している。このよう

表1. チップ部品の疲労寿命評価における設計因子

設計因子	水準の範囲		
	1	2	3
部品CTE [ppm/K]	2.8	3.5	4.2
部品のヤング率 [GPa]	128	160	192
基板のCTE [ppm/K]	12	15	18
基板のヤング率 [GPa]	14.4	18	21.6
はんだフィレット幅 [μm]	600	750	900
電極下接合部の幅 [μm]	600	750	900
はんだ接合部高さ [μm]	10	30	50

に、それぞれの設計要因の値が変化したときの破断寿命の傾向を把握することで、解析における実験との差に関する情報を定量的に分析することが可能になる。ばらつきを含めた寿命評価については、プロセスのばらつきや実験結果のばらつきを考慮した評価も行われている^{9),10)}。

実験との比較においては、多くの場合平均寿命を用いる場合が多い。しかし、このように設計因子によって大きくばらつく場合、平均値のみの比較には限界がある。このような場合、実験と解析それぞれの統計的性質を確認していくことが解析結果の妥当性を確認する有効な指標となりうる。

4. おわりに

電子デバイスにおける非線形CAEの普及に伴い、計算の検証や妥当性確認について現状と課題について解説した。複雑な非線形変形や破壊を伴う場合が多いエレクトロニクス製品の信頼性解析において、計算結果の検証や妥当性確認のプロセスを確立することは容易ではない。とくに、実験結果のばらつきも大きくなる場合が多く、検証や妥当性確認では実験計画法やモンテカルロシミュレーションのようなばらつきを考慮した評価が不可欠となる。欧米の圧力容器の規格では、すでに非線形解析に関するガイドラインの作成なども進められている。非線形CAEの活用状況は分野により異なるため、エレクトロニクス実装分野にそのまま適用することは無理があるが、実装構造の特性

に配慮した解析のガイドラインの策定が今後望まれる。

(2012.6.5- 受理)

文 献

- 1) 中村 均：“シミュレーションの品質保証と現実問題への適用,” 日本計算工学会誌, Vol. 14, No. 4, pp. 37–45, 2009
- 2) SINTEF: “Sleipner A GBS Loss Report 16 Quality Assurance,” STF38 A97428, 1997
- 3) P. J. Roache: “Verification of Codes and Calculations,” AIAA Journal, Vol. 36, No. 5, pp. 696–702, 1998
- 4) ASME: ASME V&V 10-2006 Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, 2006
- 5) 高野直樹, 小國健二, 澁谷忠弘, 長谷川浩志: “ASME V&Vの概要,” 計算工学講演会論文集, No. 15, pp. 31–32, 2010
- 6) NAFEMS: “NAFEMS QSS001 Engineering Simulation Quality Management—Systems Requirements—,” 2007
- 7) 日本計算工学会, HQC研究分科会, <http://www.jsces.org/research/hqc/index.html>
- 8) 宮内裕樹, 于 強, 澁谷忠弘: “チップ部品の鉛フリーはんだ接合部における疲労寿命のばらつき,” 日本機械学会論文集A編, Vol. 75, No. 755, pp. 815–822, 2009
- 9) 高木寛二, 于 強, 澁谷忠弘, 宮内裕樹, 野呂幸弘: “チップ部品におけるはんだ接合部の信頼性設計手法に関する研究(第二報)～はんだ接合寿命に及ぼす実装プロセスのばらつきの影響～,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 12, No. 7, pp. 643–650, 2009
- 10) 松崎富夫, 于 強, 澁谷忠弘, 松本 翼: “はんだバンプ接続の熱衝撃試験寿命ワイブル分布傾きと破壊モードの関係,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 12, No. 4, pp. 320–332, 2009

著者紹介

澁谷忠弘 (しぶたに ただひろ)