自動車の高機能化・電子化における 設計支援技術*

于 強^{*1}, 白鳥正樹^{*2}, 荒木敏弘^{*3}

Design Support System for High Performance Vehicle and Car Electronics System

Qiang YU^{*4}, Masaki SHIRATORI and Hiroaki ARAKI

^{*4} Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Yokohama National University,
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 240-8501 Japan

This paper presents a methodology (Computer Aided Principle CAP) of quantifying the interaction of each design factor for helping the design engineers to understand the complicated design principle. In this method, correlative parameters are extracted by using a cluster analysis with parametric study. The results can supply a guidance to the engineer for understanding the fundamental mechanism of the structural phenomena. The CAP is applied to two design problems. An numerical example of an offset frontal crash against deformable barrier (ODB) is demonstrated to express the effectiveness of the presented method. And thermal fatigue reliability of BGA solder joints was assessed with the consideration of the interaction between design factors, and it is made clear that fatigue mechanism can be understood easily by the warpage of BGA and PCB.

Key Words: Finite Element Method, Design Support System, Reliability, Electronics Packaging

1. 緒 言

近年の自動車の高機能化と電子化の進歩とともに、車体構造において部品数の増加と集積化が進んでいる。このような傾向に伴って、製品の構造がより複雑になり、複数の機能を実現するための要素を限られている設計空間に詰め込んで設計を行わなければいけなくなりつつある。そのため、複数の機能が同一構造によって果たされる設計コンセプトが求められている。一方、環境問題などのニーズから自動車の軽量化およびコンパクト化も求められている。この軽量化・小型化の傾向に伴い、製品の強度などを支える構造の軽量化も余儀なくされ、それに伴う強度信頼性の確保も不可欠な課題となっている。さらに、自動車のハイブリッド化や電化などによって、このような傾向がますます加速している。設計問題の複雑化や強度信頼性評価の問題などは既存の構造のみならず、車載用電子部品とシステムにも及んでいる。例えば、電子デバイスと基板を接合するために利用されているはんだ接合部などもモジュールの小型化に伴って微細化され、部品と基板の熱膨張差によるはんだ接合部の疲労破壊が重要な課題となっている^{(1)~(5)}。

設計者にはこのような強度の問題を対処しながら、多様の車種の設計条件を満たす設計変更を期間内に完成することが求められているが、多様かつ複雑な形状を有する構造では設計因子間に強い交互作用が発生するケースが多いため、的確な設計改善を実施することが難しくなりつつある。さらに、製品開発競争の激化が進んでいる現在、技術リードタイムを維持するために、開発期間の短縮が重要な課題となっている。すなわち、問題が発生してから解決することではなく、問題の発生の基本メカニズムを予め理解し、問題の発生しない設計を実現することが求められている。そのため、技術者に複雑な設計問題のメカニズムを理解してもらうための設計支援手法が求められている。

本稿ではこれまでの複雑な設計に対する支援手法の問題点を指摘し、設計技術者や信頼性評価技術者が複雑な設計問題の設計原理や問題発生メカニズムを理解するための支援技術として提案しているCAP (Computer Aided Principle)の基本的な考え方、またその性能設計の適用として、自動車車体の衝突における新たな設計コンセプトを抽出する事例を示す。また、信頼性解析の事例として、車載用電子部品の一種であるBGA (Ball Grid Array) パッケージの熱サイクル強度問題のメカニズムを解析した内容を紹介する。

著者らが提案したCAEの適用技術の1つであるCAPは、完成度の高いコンピュータによる物理現象などのシミュレーション技術を用いたパラメータスタディの結果を相似の物理現象毎に分類し、それと関連の高い物理パラメータを抽出することで現象のメカニ

* 原稿受付 2009年9月3日。

^{*1} 正員、横浜国立大学大学院工学研究科(☎240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)。

^{*2} 正員、フェロー、横浜国立大学安心・安全の科学研究教育センター。

^{*3} 正員、日産自動車(株)テクニカルセンター(☎243-0192 厚木市岡津古久560-2)。

ズムなどを理解するためのヒントを設計者に与える手法である。今回紹介する事例ではCAPの基本技術であるクラスタ分析手法^{(6)~(16)}に基づいて構造の形状や材料物性などの設計因子間の交互作用の強さを評価することで設計因子と特性の複雑な関係について明らかにするものである。そして、ここで得られた結果に基づいて特性に対する設計変動による影響のメカニズムについて検討を試みた事例を紹介する。

2. これまでの設計支援技術の問題点

ここでは、まずこれまでのもの作りにおける問題点について整理する。これまでは技術者は既知の物理現象と原理に関する知見を踏まえて設計を行い、経験やノウハウを積み上げながら、設計指針(設計ルール)を構築してきた。この場合は技術者が技術のメカニズムや設計原理などを熟慮しながら、製品の完成を実現していくプロセスは一般的であると考えることができる。しかし、近年になって、市場が飽和状態となり、作りたいものよりは市場(法的な規制も含む)に求められているものの開発が主流になりつつあるため、従来のものづくりの流れが逆になるケースも増えている。すなわち、製品の用途のコンセプトが先にできて、それに対応するための技術は何であるかなどが求められ、技術者がよく理解していない技術も短期間での作りに導入しなければいけないケースが多くなっている。さらに、より高度なものづくりを実現するために、これまでの比較的簡単な構造からより複雑なものに、線形的な現象から非線形的なものに、干渉しないパーツの組み合わせから複数機能をすり合わせながら統合的なシステムにもものづくりのトレンドが移っている。

このようなものづくりの現状に対して設計技術において以下のような問題点が顕在化しつつある。

(1) 技術者の経験とノウハウの問題

これまでの既知の設計原理などは比較的簡単なものが多かった。したがって、複雑かつ非線形な設計ノウハウの蓄積はまだ充実していない。また、ニーズに合わせた設計の場合は設計原理が明確になっていないものもあるため、問題が発生してからその問題のメカニズム(あるいは原理)を探らなければならない。一種の逆問題である。しかしながら、技術者はこのような問題を解決するための基礎教育はほとんど受けていない。

(2) 評価・解析手法の問題

これまでの理論的な解析手法では、複雑な非線形問題に対して対応できる範囲は狭く、複雑な実際問題を解決するための汎用的な理論解析・評価手法の確立が

遅れている。このような状況を補うために、コンピュータによる数値シミュレーション技術(CAE技術)の発達と普及が進んでいる。また、製品の改善などに対してCAE技術をベースにした最適化設計技術も開発されている。しかし、このような技術の問題点は設計のメカニズムが明らかにされることが難しく、新たな設計問題を毎回同じプロセスで解決する必要がある。また、事前に問題の発生を予知し、解決することができていないケースが多い。

(3) 統計的な要因分析手法の問題点

設計問題において要因分析の手法として古くから田口メソッドに代表されている直交表に基づく統計的な要因分析手法などが用いられている。しかし、このような手法は要因同士に交互作用が存在していないこと、あるいは交互作用が既知であることを前提としている。前述した今の設計状況に十分に適していると言えない。また、応答局面法に基づいた要因の影響度解析を行うことで各因子の影響度を定量的に評価する方法もあるが^{(17)~(19)}、特性と因子間の定量関係を数式で近似的に表現しているため、その結果から設計の基本原理を分析することが難しい。

3. CAP(Computer Aided Principle)手法の提案

3・1 CAPの流れ 著者らは上記の問題点を認識し、複雑な設計問題の根本的な解決策としては、設計問題のメカニズムについて技術者の理解を支援し、新たな設計原理の確立を前提とした設計支援手法CAP(Computer Aided Principle)を提案している⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。CAP技術は以下のステップによって構成され、そのフローを図1に示す。

(1) 問題の設定を行う。ここでは、設計性能の目

Fig.1 Flow of CAP technology

標と、説明要因(explaining variable), すなわち, 設計性能を支配する物理現象の解明に用いる設計要因を定義する。

(2) 説明要因に対応したパラメータスタディ解析を実施する。

(3) 階層化クラスタリング分析手法を用いて, 類似性のある現象毎にケースを分類する。

(4) クラスタ間(現象間)を遷移させる説明要因と物理現象の特徴を表す特性の相関関係に着目しながら設計原理に関する仮説を立てる。

また, (4)で合理的な仮説が立てられない場合, (3)または(1)に戻る。なお, CAPはここまでで, 得られた仮説を元に, 現象の理解をし, 新しいコンセプトを作るのは, エンジニアが考える領域になる。

3・2 階層的クラスタリング ここでは階層的クラスタリングの手法を用いて複雑な物理現象の類似度を評価し, 類似度の高い現象をグループ化し, 各グループ内に属する個体(設計)の特徴を解析し, グループの変動に対してその特徴の寄与を調べることによって, 設計要因あるいは説明要因と設計結果(物理現象)の関係を調べる方法を提案している。本提案では, ユークリッド平方距離によるウォード法によって階層的クラスタリング解析を用いている。ユークリッド平方距離では,

個体 i と j との距離 d_{ij} を

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^m (x_{ki} - x_{kj})^2 \dots\dots\dots (1)$$

により定義する。 m は個体の特徴を表すベクトルの自由度であり, x はそのベクトルの各項の値である。一般的にはこの距離の値の小さい個体を集めてグループを作って, クラスタとする。ユークリッド平方距離によるウォード法では各クラスタ内のこの距離の偏差平方和 S を,

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (x_{ki} - \bar{x}_k)^2 \dots\dots\dots (2)$$

と表す。ウォード法では, 平方和 S が小さいグループに属する個体の類似度が高いと評価し, その集合をクラスタとして定義する。階層的クラスタリングはまず全ての個体の1つずつを構成単位とするクラスタから出発する。もっとも類似性の高い二つのクラスタを融合して, 高い階層の新しいクラスタを作る方法である。検討対象の個体の特徴を表すベクトルの選定については色々と考えられるが, ここで紹介するCAPでは個体の特徴を解析の結果で抽出する評価特性で定義している。

4. 自動車の前面衝突現象への適用

CAEの適用技術として現在よく活用されているのが最適化解析であり, 製品開発で成果を上げつつあるが, 前面衝突解析への実適用には課題が多い。例えば, 計算能力の問題がある。前面衝突解析は, 部品の接触などの干渉により性能が大きく変化し, 多数の部品の接触問題として解析する必要がある。また, 塑性域の材料特性を考慮する必要があること等の非線形性の強い問題であり, 現在の計算機能力をもってしても半日単位の計算時間を要する。また, 他の性能に関係する部品も多いことから, 前面衝突性能だけの最適化解析でも最終的に構造を決定することが困難である。実際の製品開発では実用強度, 剛性等の他性能との両立解になっていること, ロバストに性能を保証できていること, 生産要件, 造形要件を満足していること等の制約条件も併せて満たす必要がある。これら全てを考慮した前面衝突の最適化解析は, 現状, 非現実的であると言わざるを得ない。ここではCAPを用いて新たな設計コンセプトの抽出の試みについて紹介する⁽²⁰⁾。

4・1 解析モデル 図2に例として評価に使用したミニバンの解析モデルを示す。衝突条件は日本自動車アセスメントが公表しているJNCAP条件64[km/h] オフセット衝突実験を模した解析(図2参照)を例題とし, “車体変形量とエンジンコンパートメント部(エンコン部)のメインロードパス間にある現象”を理解するヒントの抽出を目的に, CAPを適用した。CAP適用の前提条件として, 実験と十分に相関の取れたモデルが必要になる。ここで使用したベースとなる解析モデルは図3に示すように十分な精度を持っていることが確認されている。なお, 解析計算には市販の衝突解析ソフトPAM-CRASH Ver. 2002を用いている。

図4に示すとおり, ミニバンのエンコン部メインロ

Fig. 2 Deformation mode of minivan under the JNCAP offset condition

Fig. 3 Deceleration-total displacement curve

Fig. 4 Main load paths at the engine compartment

Fig. 5 Section force of main load paths

ードパスは HOODLEDGE, FRONT SIDE MBR (FR S/MBR), SUSPENSION MBR (SUB MBR) の 3 本である。これら 3 本のロードパスの板厚を増減させた 36 ケースのパラメータスタディを実施し、ダッシュボード 3 箇所の後退量を目的特性としている。

前面衝突は時間に依存する現象であることから、説明変数もまた時刻暦である必要がある。エンコン部メインロードパス 3 本の断面通過力の時刻暦を図 5 に示す。グラフ形状から、40~60 [ms], 60~80 [ms], 80~110 [ms] の各時刻区間における最大反力、平均反力を説明変数とした。

35 ケースの解析結果についてウォード法による階層化クラスタリングを行った結果を図 6 に示す。ダッシュボード 3 箇所の後退量の大きさの順にクラスタ 1, 2, 3……6 とした。クラスタリングにより、ダッシュボード 3 箇所の後退量が単に小さい、大きいでの分類ではなく、類似度を基準とした分類が可能になる。

図 7 は、横軸にエンコン部メインロードパス 3 本の

Fig. 6 Hierarchical cluster analysis

Fig. 7 Response of explaining variable of each cluster

各時刻区間、縦軸に最大反力を示す。各クラス毎にそのクラスに属する設計の説明変数の平均値を出力したものである。クラスと説明変数に着目すると、元々は低かった HOODE LEDGE 反力は高ければ高いほど、後退量の良いクラスに遷移する。FR S/MBR 反力も、高ければ高い程良い様に見えるが、どちらかと言えば飽和状態にあると言ってよい。特徴的なのは元々高い反力を出していた SUS MBR で、クラス 6→2 までは低ければ低い程良いが、クラス 2 と 1 では、1 の方が高くなっている。つまり低ければ低い程良いというわけではない。以上より、HOODLEDGE 反力と SUS MBR 反力には、何らかのバランス問題があるとされている。

HOOD LEDGE と SUS MBR の時刻暦反力のグラフと、2 本のロードパスの位置関係を確認する (図 8, 9 参照)。HOODLEDGE と FR S-MBR の距離を 1.0 とすると、FR S-MBR と SUB FRAME の距離は 1.25 になる。最良のクラス 1 に属するケース (31) の場合、40~60 [ms] における SUS MBR 最大反力を 1.0 とすると、HOODLEDGEFR 最大反力は 1.28 であり、S/MBR まわりのモーメントの比 $M1/M2$

は,

$$M1/M2 = (1.28 \times 1.0) / (1.0 \times 1.25) = 1.02$$

となる。また、最悪のクラスタ6に属するケース(16)も同様に計算すると、0.26となる。他のクラスタについても調べた結果、後退量の少ないクラスタ程 $M1/M2$ が1に近いことが確認できた。以上より、後退量は HOOD LEDGE と SUS MBR の反力によるモーメントの釣り合いに支配されている、という仮説が導かれる。

CAP の領域はここまでで、以後はエンジニアが考察する領域になる。後退量は HOOD LEDGE と SUS MBR の反力によるモーメントに支配されている、という仮説から、ダッシュボード後退量に関する以下のストーリーが考えられる。

- HOOD LEDGE と SUS MBR の反力によるモーメントがつりあう
- 車両のピッチングが減少することで沈み込みも減少する(①)
- エンジン位置は変化しないので(②)、エンジンとエアボックス、ダッシュボードの干渉量が減る(③)
- ダッシュボードの後退量が減少する

そして、実際各クラスタのピッチング量から、後退量が良いクラスタほどピッチングの少ないのが確認できた。したがって、新たな設計コンセプトとして、フロントの構造で前後方向の衝突エネルギーを吸収する特性のみならず、車体の高さ方向のバランスを安定させ、ピッチングの少ない衝突形態を実現することがよ

Fig. 8 Time history of section force of main load paths (cluster 1, 6)

Fig. 9 Main load paths and new moment concept

り合理的にダッシュボードの後退量を低減することができるとされている。

5. BGA 部品のはんだ接合部の疲労強度のクラスタ分析

自動車の車体設計よりさらに高密度化が進んでいるのは車載用電子システムである。自動車の性能の高度化に伴って、電子制御システムなどの使用範囲が増加している。さらに設計空間の制限によって小型化のニーズはますます高まっている。したがって、高密度実装電子部品の使用と厳しい信頼性の要求を同時に満たすために電子部品の信頼性設計の高度化が求められている。

ここでは自動車の電子化に伴って使用し始めている高密度実装電子部品の信頼性と実装構造などの間に生じる非常に複雑な関係を取り上げる。設計要因同士に多数の交互作用関係が存在する BGA (Ball Grid Array) 実装部品の実装はんだ接合部の疲労問題に対して CAP 技術を適用し、複雑な疲労強度の設計問題の説明要因の抽出を試みた結果について説明する⁽²¹⁾。

5.1 評価モデルおよびクラスタ分析 図 10 に、今回対象とした BGA 部品の形状と設計範囲を示す。これまでの経験では BGA パッケージの見かけの熱膨張係数は基板と異なるため、温度変化が発生する場合は部品と基板間に熱変形のミスマッチが生じ、コーナ一部のはんだ接合部に大きなひずみを発生させ、はんだ接合部の疲労を引き起こす原因となることが分かってきた。また、これまでの研究でははんだ接合部の弾塑性・クリープ特性とその温度依存性を考慮した有限要素法解析から得られる接合部の相当非線形ひずみ幅を用いれば、はんだ接合部の疲労寿命を正確に評価できることが明らかになっている^{(22)~(25)}。ここでは、温度サイクル負荷を受けるとき、BGA 部品と基板を接続するはんだ接合部に生じる最大の非線形ひずみの幅

Fig. 10 Analysis model of the BGA assembly

を信頼性設計の特性として設定した。

まず、ケーススタディとして直交表(L 27 と L 64)⁽¹⁷⁾に基づいて様々な設計条件における解析モデルを作成し、 $-40^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$ の温度サイクル負荷(高温と低温の保持時間は 20 分)を受けるときの有限要素法解析を行った。そこから抽出されたコーナー部のはんだ接合部に生じる非線形ひずみ幅のデータを図 11 に示す。縦軸は特性値である非線形ひずみ振幅で、横軸はデータの数を示している。図のようにデータは非線形ひずみ振幅の大きさの順に並べられ、似た傾向を持つ結果を今回は 4 つのグループにクラスタリングした。その後各設計因子と非線形ひずみ振幅の関係を調べるために、各クラスタに分類された全てのモデルにおける設計因子のそれぞれの平均を取り、クラスタごとに比較を行った。

得られたクラスタ分析結果を図 12 に示す。縦軸は設計範囲で正規化された各クラスタに属する設計の設計因子の平均値を示しており、横軸は設計因子を示している。図中の Cluster I のデータは非線形ひずみ振幅が最も小さいグループであり、II, III, IV の順に従って非線形ひずみ振幅の値がより大きい時の各設計因子のデータを示している。図 12 で設計因子ごとにクラスタ I ～IV の平均値がどう分布しているかを比較す

Table 1 Design factors of the BGA assembly

ID	Design factors	Levels		
		1	2	3
X1	Thickness of chip [μm]	300	400	500
X2	Thickness of substrate [μm]	300	400	500
X3	Thickness of PCB [μm]	800	1000	1200
X4	Thickness of encapsulant [μm]	1000	1200	1400
X5	Young's modulus of substrate [GPa]	15	19	23
X6	CTE of substrate [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	12	15	18
X7	Young's modulus of PCB [GPa]	15	19	23
X8	CTE of PCB [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	13	16	19
X9	Young's modulus of encapsulant [GPa]	13	16	19
X10	CTE of encapsulant [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	12	15	18

Fig. 11 Clustering into four subsets based on the equivalent inelastic strain range

ることで、様々な情報が得られる。まずは、このグラフの設計因子ごとの I ～IV の振れ幅が設計因子の影響度の大きさを示している。例えば、封止材の厚さと線膨張係数、Substrate の厚さと線膨張係数は Cluster I と Cluster IV で大きく値が変わっていることが分かる。これらの設計因子の値が変化することで熱疲労寿命に大きな影響を及ぼすことを示している。

このクラスタ分析の結果から、封止材の厚さと線膨張係数の値を小さくし、Substrate の厚さと線膨張係数の値を大きくすると、非線形ひずみが小さくなる傾向にあることが分かる。これらの 2 つの設計条件に近いケーススタディの解析結果の変形図を図 13 に示す。

この解析結果を見ると、Substrate の厚さと線膨張係数が大きく封止材の厚さと線膨張係数が小さい場

Fig. 12 Trends of average values of design factors for clusters I to IV

(a) Typical case of lowest inelastic strain range

(b) Typical case of highest inelastic strain range

Fig. 13 Deformation of BGA assemblies at 125°C

合, Substrate が膨張するのに対し封止材の伸びが少なく厚さも薄いため, 図中の矢印で示しているように部品全体が上に反ることとなる。その結果, 部品の底面部が曲げによって引き伸ばされ, 大きく膨張している基板とのミスマッチが緩和されはんだ接合部の非線形ひずみ振幅が減少する結果となっている。またこの反対の設計条件の場合では, 封止材の厚さと線膨張係数が大きい場合封止材が膨張し, 部品全体は下に反ることとなる。その結果, 部品の底面部が曲げにより収縮し, 基板とのミスマッチをさらに大きくすることとなる。以上のように, このクラスタ分析の結果から温度負荷時の部品の反りが信頼性に対して大きな影響を持っていることが分かる。

5・2 設計要因の交互作用 この部品の反りは設計因子同士の交互作用により決定される。そこで, 一つ一つの設計因子に注目したより詳しく交互作用を明らかにする手法について検討した。例として, Substrate 厚さの設計因子に注目して検討を行った。先ほどの図 10 に示した様々な設計条件における非線形ひずみ振幅のデータの中から Substrate 厚さに注目し, Substrate 厚さの設計条件が下限値と上限値となっているデータのみを抜き出し, 図 11 と同様に非線形ひずみ振幅の大きさの順に並べる。すると, 図 15 のようなグラフが得られる。縦軸, 横軸は図 11 と同様であり, ◆と■が Substrate 厚さ最小の場合の解析結果を表し, ◇と□が Substrate 厚さ最大の場合の解析結果となっている。

このデータを図のように非線形ひずみ振幅の値で I, II の 2 つのグループにクラスタリングし, 各クラスタで設計因子の平均を取り, 比較した。図 16 のようなグラフを得ることが出来る。この結果は, Substrate 厚さの値が変化するとき, 他の因子にどのような影響を及ぼすかを表している。

Fig. 15 Clustering into four subsets based on the equivalent inelastic strain range in cases of substrate thickness is maximum and minimum

この図の Chip 厚さの項目に注目すると, Substrate 厚さが最小の場合は Chip 厚さを薄くすることで非線形ひずみ振幅の値が小さくなるが, 逆に Substrate 厚さが最大の場合は Chip 厚さを厚くすることで非線形ひずみ振幅の値が小さくなるが見えてとれる。すなわち, 熱疲労寿命改善のための設計変更の方向が逆転していることが分かる。また, Substrate 線膨張係数の値を見ると, Substrate 厚さが小さい場合にはこの設計因子はあまり影響度を持っていないが, Substrate 厚さが大きい場合には大きな影響度を示していることが見てとれる。このように, Substrate 厚さの値が変動することで他の設計因子に影響を与えていることがこのグラフから分かる。すなわち, Chip 厚さ, Substrate 線膨張係数, ENCAP 線膨張係数の 3 つの設計因子が Substrate 厚さの因子と強い交互作用を持っているとされている。

さらに, このクラスタ分析手法によって全体の交互作用が把握可能となる。Substrate 厚さだけでなく, すべての設計因子についてこの手法を適用することにより, 設計因子全体の交互作用を明確にすることが可能となる。さらに, ある設計因子が最大のときと最小のときの Cluster I での他の設計要因の値の変動を算出することで, 交互作用の強さを定量的に算出することが可能となる。この方法で算出した全因子の交互作

Table 2 Matrix of interaction coefficient between all design factors

	Chip Thickness	Sub' Thickness	PCB thickness	Encap thickness	Sub' E	Sub' CTE	PCB E	PCB CTE	Encap E	Encap CTE
Chip thickness	-	0.19	0.01	-0.15	0.19	0.10	0.07	0.03	-0.15	0.21
Sub' Thickness	0.25	-	0.01	0.04	-0.01	0.17	0.07	0.04	0.01	-0.28
PCB thickness	-0.11	0.03	-	0.11	0.15	0.00	0.19	0.04	0.28	-0.03
Encap thickness	-0.37	0.01	0.06	-	0.06	-0.01	-0.13	0.00	0.01	0.00
Sub' E	0.43	0.07	0.10	0.04	-	0.06	-0.14	0.04	0.04	0.14
Sub' CTE	0.15	0.25	-0.11	0.14	0.01	-	-0.01	0.22	0.04	-0.32
PCB E	0.01	0.25	0.21	0.08	-0.01	-0.03	-	0.18	0.14	0.11
PCB CTE	-0.04	0.04	0.13	0.13	0.10	0.31	0.19	-	0.13	0.33
Encap E	-0.14	-0.08	0.29	0.13	0.14	0.08	0.15	-0.07	-	-0.11
Encap CTE	-0.13	-0.25	-0.03	-0.08	0.28	-0.32	-0.04	0.24	-0.25	-

Fig. 16 Clustering result for interaction relation

Fig. 17 The correction of curvature radius

用の強さを表2に示す。この数値の絶対値が大きいほど、2つの設計因子の間に強い交互作用が働いていることを示している。この結果を見ると、部品の設計因子だけでなく基板の設計因子も含めたほぼすべての設計因子間に交互作用が働いていることが分かる。

この結果から部品の設計要因だけでなく部品の設計要因と基板の設計要因との間にも交互作用が発生していることが判明した。すなわち、部品の反りに基板の設計要因がなんらかの形で関連している可能性があることが分かる。

5.3 変形メカニズムと疲労強度 すでにクラスタ分析で明らかにされたように、部品の反りとはんだ接合部の疲労強度の間に強い関係がある。また、部品と基板の間に顕著な交互作用が示されていることに基づいて、実装前後の部品と基板それぞれの挙動について考える。部品と基板がはんだによって接合される前、それぞれが高温状態になると部品は設計因子同士の交互作用によって反りが生じ、基板は単純な横方向の膨張が生じる。この状態で部品と基板を実装させることを考えると、図17に示すように縦方向のミスマッチと横方向のミスマッチという2つのミスマッチが発生していることが分かる。

これまでの方法ではこの横方向のミスマッチにのみ注目した。しかし、この縦方向のミスマッチも実装時に解消されるため、そのときに部品と基板の反りに変化が生じる。図17に縦方向のミスマッチが解消された後の部品と基板の状態を示した。縦方向のミスマッチを解消された後は部品と基板とが同じ曲率となって反り、さらにこの曲率は部品と基板の曲げ剛性の比によって決定される。つまり、基板の曲げ剛性が高いと部品の反りが基板によって修正される形となり、逆に基板の曲げ剛性が低いと基板も部品と同じように大きく反るため、ミスマッチに変化が起こる。この縦方向のミスマッチが解消された状態で図中に示す新しい曲率で修正された部品と基板間に生じる熱膨張のミスマッチがはんだ接合部に負荷されるダメージを決定する、というのがより実際の現象に近いメカニズムだと

されている。

これまでの部品と基板の見かけの熱膨張のミスマッチを考える場合はこのような曲げ剛性に関連したメカニズムが考慮されていないため、基本設計の段階で正確な設計の傾向を見積もることができていない。しかし、部品の反り変形、部品と基板の曲げ剛性を考慮に入れた新たな部品と基板間のミスマッチを抑える設計原理が確立できれば、部品設計の段階で既に信頼性問題について考慮しつつ、設計の方向を決めることができるため、問題を引き起こす前に対応できていると言える。

6. ま と め

本稿では、複雑な製品設計の問題点について述べ、これらの問題点を克服するために提案しているCAP技術の基本構成について説明した。CAP技術の応用事例として車体構造の衝突特性の分析と新たな設計コンセプトの提案を試みた。また、CAPにおいて重要な技術であるクラスタ分析手法を用いた設計因子間の交互作用を明確化する手法について、例としてBGAパッケージのはんだ接合部の疲労強度を用いて説明した。

今回示したような手法を適用することによって、複雑な設計問題や信頼性設計のノウハウを実用的な形で蓄積することができる。このような設計支援ツールを設計上流段階においても利用することができ、コンセプト設計段階においてより短期間で的確な設計の実現が可能となると考えられる。

文 献

- (1) Dupont, L., Khatir, Z., Lefebvre, S. and Bontemps, S., Effects of metallization thickness of ceramic substrates on the reliability of power assemblies under high temperature cycling, *Microelectronics Reliability*, Vol. 46 (2006), pp. 1766-1771.
- (2) Yamada, Y., Takaku, Y., Yagi, Y., Nishibe, Y., Ohnuma, I., Sutou, Y., Kainuma, R. and Ishida, K., Pb-free High Temperature Solders for Power Device Packaging, *Microelectronics Reliability*, Vol. 46 (2006), pp. 1932-1937.
- (3) Ishiko, M., Usui, M., Ohuchi, T. and Shirai, M., Design concept for wire-bonding reliability improvement by optimizing position in power devices, *Microelectronics Journal*, Vol. 37 (2006), pp. 262-268.
- (4) Yu, Q., Shibutani, T., Tanaka, A., Koyama, T. and Shiratori, M., Low-cycle fatigue reliability evaluation for lead free solders in vehicle electronics devices, *Proceedings of Inter PACK '07, IPACK 2007-33250* (2007).
- (5) Castellazzi, A. and Ciappa, M., Novel simulation approach for transient analysis and reliable thermal management of power devices, *Microelectronics Reli-*

- ability, Vol. 48 (2008), pp. 1500-1504.
- (6) Anderberg, M. R., Cluster Analysis for Applications, Academic Press, New York, (1973).
 - (7) Torn, A. A., Cluster analysis as a tool in a global optimization model, *Proceedings of Third International Congress of Cybernetics and Systems*, Bucharest, Springer Verlag, (1975), pp. 249-260.
 - (8) Torn, A. A., Cluster analysis using seed points and density-determined hyperspheres with an applications to global optimization, *IEEE trans. On Systems, Man and Cybernetics* 7 (1977), pp. 610-616.
 - (9) Bezdek, J. C., Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, (1981).
 - (10) Bezdek, J. C., Coray, C. and Gunderson, R., Detection and Characterization of Cluster Substructure I. Linear Structure Fuzzy c-Lines, *SIAMJ. Appl. Math.*, (1981).
 - (11) Torn, A. A., Clustering methods in global optimization, *Preprints of the Second IFAC Symposium on Stochastic Control*, Vilnius, (1986), pp. 138-143.
 - (12) Okamoto, F. and Imaizumi, T., 3-Dimensional dataanalysis—Multi-dimentional scaling and clustering analysis, Kyoritsusyupan, (1990).
 - (13) Miyamoto, S., Introduction for clustering analysis, Morikitsyupan, (1999).
 - (14) Ueda, N., Clustering analysis, Asakursyoten, (2003).
 - (15) Okuno, T. and Haga, T., Multivariate Statistical Methods, Nikkagiren, JUSE Press, (1981).
 - (16) Manly, B. F. J., Multivariate Statistical Methods A Primer, Chapman and Hall, (1986).
 - (17) Taguchi, G., Experimental designs, MARUZEN, (1976).
 - (18) Myers, R. H. and Montgomery, D. C., Response Surface Methodology : Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & sons, (1995).
 - (19) Kashiwamura, T., Shiratori, M. and Yu, Q., Optimization of non-linear problems using Design of experiments, Asakura, (1998).
 - (20) Natori, S. and Yu, Q., An Application of CAP (Computer-Aided Principle) to Structural Design for Vehicle Crash Safety, 07 B-156 SAE 07_061220, (2006).
 - (21) Jin, J. C., Yu, Q., Shibutani, T., Abe, H. and Shiratori, M.: The assessment of influence of design factors on the reliability of BGA solder joints, *Key Engineering Materials*, Vol. 297-300, (2005), pp. 1822-1827.
 - (22) Yu, Q. and Shiratori, M., Fatigue-Strength Prediction of Microelectronics Solder Joints Under Thermal Cyclic Loading, *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part. A*, Vol. 20, No. 3 (1997), pp. 266-273.
 - (23) Kitano, M., Kumazawa, W. and Kawai, S., A New Evaluation Method for Thermal Fatigue Strength of Solder Joint ASME, *Advances in Electronic Packaging EEP*-vol. 1-1, (1992), pp. 301-306.
 - (24) Miura, H. and Kumazawa, T., Effect of Delamination at Chip/Encapsulant Interface on Chip Stress and Transistor Characteristics, *Applications of Experimental Mechanics to Electronic Packaging*, EEP-Vol. 13, (1995), pp. 73-78.
 - (25) Hirohata, K., Kawamura, N., Mukai, M., Kawakami, T., Aoki, H. and Takahashi, K., Mechanical fatigue test method for chip/underfill delamination in flip-chip packages, *IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 25, No. 3, (2002), pp. 217-222.