

## 電子システムインテグレーションの研究

大阪大学・工・生産科学専攻 藤本公三、金 鍾珉、安田清和  
大阪大学・先端科学技術共同研究センター 岩田剛治、佐藤了平

### 1. はじめに

日本のエレクトロニクス産業は、この20年間、高機能化、高信頼化、小型化、低コスト化の技術開発に支えられ、新たな電子デバイス・部品を組み込んだ電子システム創成の下、日本の高度成長を牽引してきた。現在、エレクトロニクス産業は経済、経営、雇用環境、科学技術などのグローバル化に伴って、世界の産業を牽引する観点で、より高いグローバル最適化が求められている。また、このようなグローバル化してきたエレクトロニクス産業において、日本が世界をリードして行くには、ものづくりにおける創造的付加価値を生み出す技術の探求とその技術を基盤とした世界初の新たな製品提案が必要となっている。

こうした状況下において、我々のグループでは、21世紀COEプログラムのもと、「構造・機能先進デザイン研究拠点の形成」を目指し、今後5年間にわたって、次世代電子システムインテグレーション構築における(1)協調設計システムの構築と(2)低温・高精度実装プロセスの確立を目指して、研究・開発を行う予定である。

本稿では、本年度までに検討を行ってきた電気回路・熱協調概略設計システムのコンセプトと樹脂材料を用いたセルフアライメント実装について紹介する。

### 2. 電気回路・熱協調概略設計システムの構築

#### 2-1 本研究の目的と背景

近年の電子機器の小型化、高機能化、製品サイクルの短縮に伴い設計に対する要求設計精度、設計期間の短縮等への要求はますます厳しいものとなっている。トップダウン設計は、ラフデザイン 基本設計 詳細設計と進むが、多様な設計対象・観点が共存しているため、その相互影響が詳細設計で露見するようになってきている<sup>1),2)</sup>。現在、電子回路基板のレイアウト概略設計は、総配線距離を最小な配置を元に、各デバイスのTDP(Thermal design power)に対応する放熱構造を実現している<sup>3)-8)</sup>。これらは基板での熱流の相互干渉が少ない対象では、効率よく熱設計と回路設計が切り分けられる。しかし、相互干渉がある場合においては、設計者の経験や勘が設計効率に大きく影響しているのが現状であるが、設計対象の高速化・小型化による要求設計精度の上昇により各設計の裕度が減少し、この方法では的確な設計の切り分けができなくなってきている。これは回路設計側が設定する設計裕度がないので、熱設計の可能領域と重ならないために起こる。この矛盾を解消するには、本来両設計が設計可能となる領域を出し合い、それらの設計可能領域の重なりを算出し、その

中で解を探すことにより設計する必要がある。従って、これらの問題を解決し、熱・回路設計を協調して設計を行うには、詳細設計より上流の基本設計において、相互影響を相互の設計に伝達し、協調して決定する裕度配分設計手法が基板のレイアウト設計のようなトップダウン設計時には必要である。

そこで、本研究では、基板のレイアウト概略設計において熱・回路の両設計に共通する設計パラメータを最低限の相互影響である境界条件として着目し、協調設計に必要なモデル構造と個別設計手法及びそれを用いた協調設計手法およびその支援システムを検討した。

#### 2-2 熱・回路設計協調概略レイアウト設計コンセプト

まず、協調設計を行う流れについて検討を行った。設計者が初期にイメージした初期設計解と設計目標を与え、それを個別の観点で解析を行い、設計者により問題点を抽出し、その設計修正を各設計の設計修正可能範囲を設計者に提示する設計支援手法を用いて行う。これを全問題点で繰り返すことにより進めていくことを考える。その具体的なフローが図1である。ここで重要な要素技術は、協調設計を行う上での設計モデルと対応した高速個別概略解析技術、設計修正時における設計修正可能領域作成技術の3つである。

#### 2-3 熱・回路協調設計モデルの検討

本設計手法における協調設計統合モデルと協調設計メタモデルについて図2に示す。協調設計統合モデルはトップダウン設計の協調設計を考慮して各製造技術に対応し、さらに各設計観点での機能でモジュール化され、基板モジュールとデバイスモジュール、配線モジュールの各モジュールに分割され、それらの数・位置および接続関係から成る。また、協調設計パラメータとして、熱設計、回路設計の共通パラメータを組み込んだ。

#### 2-4 モジュール型熱概略解析・設計支援手法

##### 2-4-1 モジュール型熱概略解析・設計モデル

図3は、モジュール型熱概略解析手法の熱解析モデルである。この図に示すように、システム全体がモジュールに分割され、各モジュール間に境界条件が設定している。これには2つの理由がある。一つは、設計過程でのデバイスレイアウト変更によるモデル変更を簡略にするためである。もう一つは、全体の熱解析において、熱流の相互影響を考慮しつつ各モジュールにおける解析の独立性を維持できるようにするためである。さらに、このサブモジュールへの分割には、製造

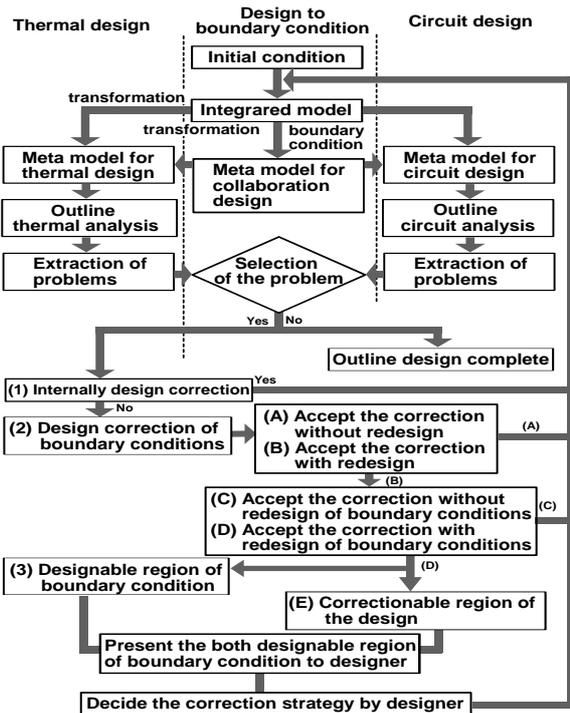


図1 熱・回路概略協調設計アルゴリズム

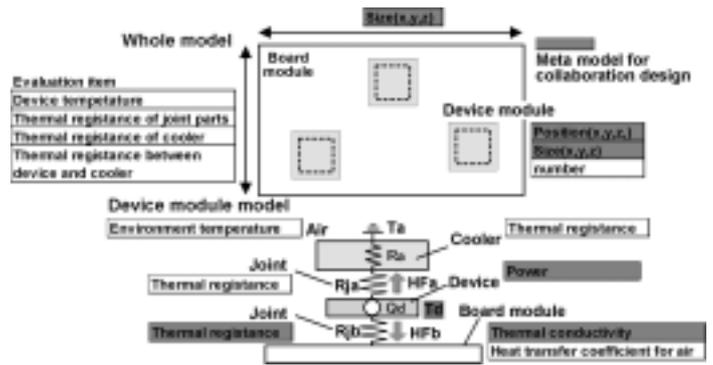


図3 概略熱設計モデル

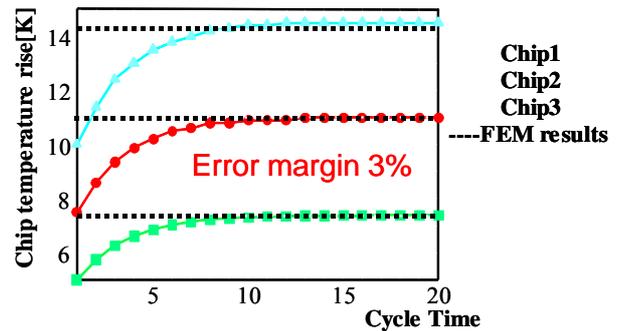


図4 デバイス温度のシミュレーション結果

スモジュールからの熱流が作る温度分布の重ね合わせで算出できる。ここで、デバイスモジュールは2つの境界条件を前提とした熱回路網法によって算出できる。

本概略熱解析法では、図4に示すように3%以下の解析誤差でデバイス温度を解析できることをFEMとの比較により検証した。

#### 2-4-3 モジュール型熱概略設計支援

本解析手法を設計の観点から評価した時、デバイスモジュールの境界条件を変更しなければ、デバイスモジュールのあらゆる設計変更は他のデバイスモジュールの設計に影響を与えない。また、本解析手法は、各デバイスモジュールが基板モジュールに流す熱流が他のデバイスモジュールの境界条件に与える影響を各々定量的に評価できる。さらに、あるデバイスモジュールが境界条件を変えた場合、本解析手法は他のデバイスの境界条件の変化量も定量的に評価できる。また、個別のデバイスモジュールの設計は、従来の設計技術を利用することが可能である。このことから、問題が解決するのに必要なデバイスモジュールの境界条件の変更量の決定を支援できる。さらに、デバイスモジュールの境界条件の変更による他のデバイスモジュールへの影響をなくす他のデバイスモジュールの設計変更を定量的に決定できる。

これらの結果、モジュール間境界条件に着目することにより、設計者が取り扱う設計パラメータを減らすことができ、トップダウン設計で行う必要のある裕度分配設計ができる設計コンセプト、及びその設計支援手法の構築が出来た。この

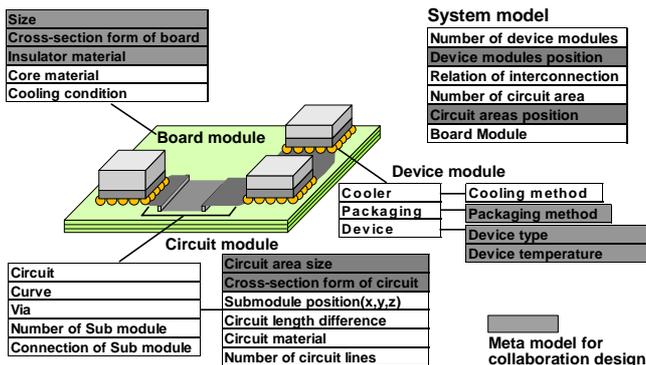


図2 熱・回路概略協調設計のためのモジュール化モデル

技術という観点から基板、半導体デバイス、パッケージ、ヒートシンク等に分割されている。

図に示すように、各デバイスからの熱流が相互に影響する基板モジュールでは、基板材料、冷却条件、基板サイズとしてモデル化されており、基板モジュールの熱的な状態としては基板の温度分として表現される。

#### 2-4-2 モジュール型熱概略解析手法

本手法は、一般的な有限要素法による熱解析とは違い各デバイスモジュールと基板モジュールの境界条件が整合する条件を算出することによって、シミュレーションを行うものである。この境界条件の決定手法は、基板への入熱量と、他のデバイスモジュールからの熱流による温度上昇の2つの境界条件間での整合を取ることで決定する。この時、各モジュールでの解析は、基板モジュールの解析は熱伝導方程式の1次の線形性より、モジュール間境界条件である各デバイ

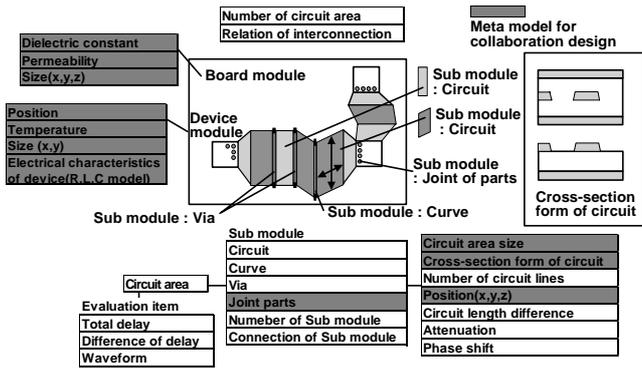


図5 概略回路設計モデル

場合、下記の4つの観点から設計修正案を作成し、設計者を支援する。

- ・境界条件を変更しない設計修正
- ・境界条件の基板への熱流を変更する設計修正
- ・境界条件のモジュール位置を変更する設計修正
- ・熱相互影響場である基板設計を変更する設計修正

## 2-5 モジュール型回路概略解析

### 2-5-1 モジュール型回路概略解析モデル

図5は、モジュール化設計に対応した回路レイアウト設計モデルである。本研究では、信号が伝送される際の電磁界の条件がほぼ同じ所は同種の伝送条件として取り扱い、線路の減衰、遅延、特性インピーダンスの基本特性を、線路の構造毎に事前に既存の手法で解析したデータを用いてデータベースを構築しておくことによって解析を行う。この結果、伝送線路をモジュール分割し、パッケージング部、デバイス直下の領域、パッケージ近傍領域、ビア、使用配線層毎の直線配線領域等に分割する。

### 2-5-2 モジュール型回路概略解析手法

モジュール分割線路モデルの信号解析コンセプトは、各モジュールの影響度を適切に評価できる機能を提供し、設計修正時に設計者を支援することである。また、信号の減衰、反射、遅延に対する配線サブモジュールの影響度を推定する機能が必要である。また、減衰、反射、遅延の状態が周波数により異なるので、矩形波を高調波成分に分解し、最後に各高調波成分の結果を合成して波形を作成する必要がある。図6に、各モジュールでの反射・減衰・遅延の特性を統合する手法の概略図を示す。図6では、下方向を時間軸にとってあり、配線サブモジュール内での信号速度で傾きが変わる。この手法は一般的な矩形波の反射計算をモジュール化モデルにあわせて改良したもので電圧を時間関数にし、減衰の影響を入れたものである。これらを時間軸ごとにプロットすれば、受信端到達時の高調波の変化がわかる。最終的には、各高調波成分について同様の計算を行い、それらを加算し、時間軸に従いプロットすれば線路通過後の信号波形が求まる。

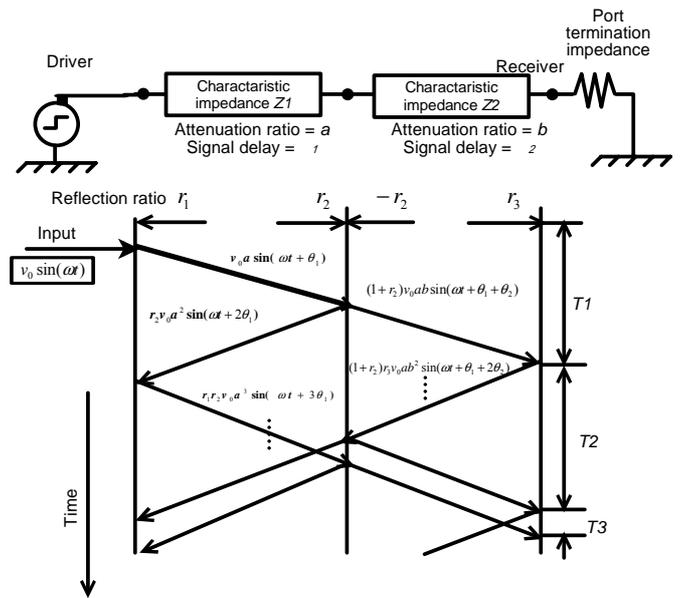


図6 連結モジュールにおける信号伝播特性の統合化手法

## 2-6 まとめ

- レイアウト概略設計において、モジュール型熱・回路設計協調による設計手法について得られた結論について述べる。
- (1) 熱・回路協調概略レイアウトのトップダウン設計における協調設計用のモジュール化モデルの構築を行った。
  - (2) 両設計でのモジュールへの裕度分配可能範囲に対応する設計修正可能範囲を用いた協調設計フローを提案した。
  - (3) モジュール間境界条件に着目したモジュール型熱概略解析手法を従来FEMに対しての誤差3%以下で構築した。
  - (4) モジュール間境界条件に着目した線形化モデルによる、設計修正量の定量評価による設計支援手法を構築した。
  - (5) 伝送線路の電磁気学的状況によりモジュール化したモデルによる、モジュール型回路概略解析モデルを構築した。
  - (6) モジュール毎の特性データベースにより、減衰、位相差、反射を考慮した波形解析手法を構築した。

## 3. 樹脂材料による低温・高精度実装プロセスの開発

### 3.1 樹脂材料による低温・高精度実装プロセス

近年、高度情報化・マルチメディア化に向け、膨大な情報を高速に伝送・処理するために光・電子融合システムが注目されている。特に、これらの高密度微細実装や光デバイス・素子の実装においては、高精度な位置決め技術が要求されている。しかしながら、一般には、画像センシングと高精度な移動ステージを用いて行われているが、サブミクロンオーダーの位置決めには高価な装置と位置決め時間を要する。電子デバイス実装の接続材料として用いられているソルダの表面張力に基づくセルフアライメント機能を積極的に高精度位置決めに応用しようとする試みが報告されている。しかし、ソルダを用いたセルフアライメントプロセスでは、ソルダの融点以上に加熱する必要があり、さらに、一般にはフラックスを用いる必要がある。

本研究では、図7に示すように次世代光・電子融合システムの高精度セルフアライメント実装構造を想定し、今後の光・電子融合実装や3次元実装への適用においては、低温、鉛フリー、無フラックスでアライメント実装が可能な新たな材料によるセルフアライメントプロセスの開発が必須である。低温実装プロセスが可能で、フラックスレスや鉛フリー化が可能な新たな接続材料として導電性接着剤による実装に関する研究が進められている。しかし、樹脂材料の表面張力は、溶融ソルダの1/10以下と小さく、セルフアライメント機能を発現させるのが困難とされており、実用化に際して高い障壁となっている<sup>9)</sup>。本研究では、セルフアライメント機能発現が実装材料表面との接触角に起因する位置決め境界の存在という点に着目し、濡れ性が大きく異なる境界をパッドを立体的に形成することにより位置決め境界を作り出すことに成功した。この基本考え方を用い、表面張力の小さい樹脂材料のアライメント機能を発現させるために作られた立体パッドを用い、液状樹脂によるセルフアライメントプロセスとして、図8に示すプロセスを研究・開発した<sup>10)-12)</sup>。一つ目は、一般

の溶融はんだによるセルフアライメント実装と同様に、位置決め対象の部品を上方から供給された液状樹脂に接触搭載するプットダウン方式である。二つ目は、部品上に液状樹脂を供給し、基板を上方から液滴に接触させた後、上方に吊り上げるプルアップ方式である。このプロセスの特徴はチップ部品と基板の位置を変え、チップ部品を基板の下方から実装することにより液滴にかかるチップの重量を液滴形状が凹形になることにより吸収し、液状樹脂がパッドの側面にぬれ広がることを無くし、より簡易なプロセス制御で樹脂材料によるセルフアライメント機能を発現させることができる。

### 3.2 数値シミュレーション

より安定なアライメントプロセスを構築するために、図9に示す液滴バンプ形状モデルを提案し、図10に示す数値シミュレーション手法を構築した。静的釣合い下において、液滴の表面形状はラプラス式で示される。

$$\Delta P = P_0 - P_a = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

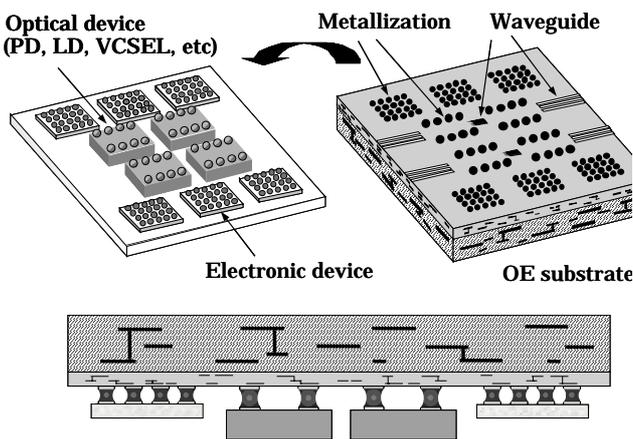


図7 次世代光・電子融合システムの高精度セルフアライメント実装構造の概略図。

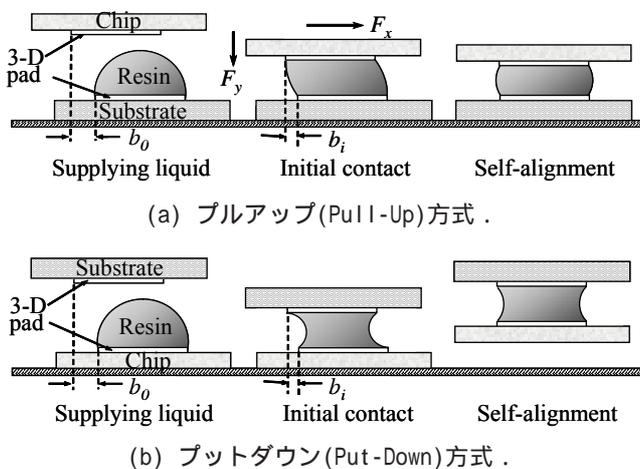
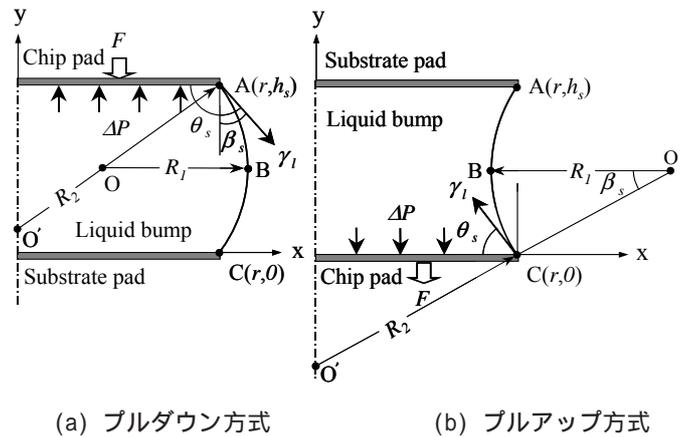


図8 樹脂材料の表面張力を用いた新たなセルフアライメントプロセス。



(a) プルダウン方式 (b) プルアップ方式

図9 液滴バンプ形状モデル。

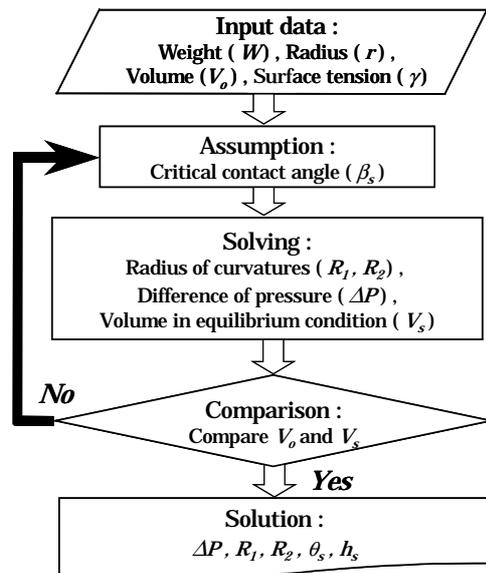


図10 数値シミュレーションのアルゴリズム。

ここで、 $P_0$ 、 $P_a$  は液滴の内部圧力、外部圧力、表面張力を表す。 $R_1$ と $R_2$ はチップ高さ $h_s$ での液滴表面の主曲率半径で液滴内側にある場合を正にとる。両プロセスの静的釣り合いの液滴最上部での垂直方向の力の釣り合いは、

$$\begin{aligned} (\text{put down}) \quad & \gamma_l \cos \beta_s \cdot 2\pi r + mg = \Delta P \cdot \pi r^2 \\ (\text{pull up}) \quad & \gamma_l \cos \beta_s \cdot 2\pi r - mg = \Delta P \cdot \pi r^2 \end{aligned} \quad (2)$$

の関係が成立する。主曲率半径 $R_2$ は液滴の幾何学的形状から求められ、 $R_1$ は式(1)の関係式から求められる。

$$R_2 = \frac{r}{\cos \beta_s}, \quad R_1 = \frac{\gamma \cdot R_2}{\Delta P \cdot R_2 - \gamma} \quad (3)$$

また、液滴の体積 $V_s$ は

$$V_s = 2 \cdot \pi \int_0^{R \sin \beta_s} x^2 dy \quad (4)$$

と求められる。液滴形状を決定するパラメータとして、液滴体積 $V_s$ 、表面張力と液滴内・外部の圧力差 $P$ が挙げられ、圧力差はチップの重量 $W$ 、パットの半径 $r$ と表面張力との関数であり、液滴形状を決められるパラメータであると言える。

数値シミュレーション手法としては、最初に初期供給する液滴の体積 $V_0$ とチップの重量 $W$ とパット半径 $r$ を決め、液滴とパットとの接触角 $\beta_s$ を任意に仮定する。この接触角を用いて静的釣り合い状態の垂直方向の力の平衡方程式と液滴内・外部の圧力差と式(3)を用いて主曲率半径を求める。そして、初期供給した体積 $V_0$ と数値計算で得られた体積 $V_s$ とを比較し、一致するまで数値計算を繰り返すことで液滴形状を決めるパラメータ( $R_1, R_2, h, \beta_s$ )を求めている。さらに、本研究で構築した数値シミュレーションの妥当性を表面エネルギーに基づくSurface Evolver<sup>13)</sup>によるシミュレーションと合わせて検証を行った結果、Evolverの結果との対応がよく取られており、より簡単に、効率的にプロセスパラメータの設計が可能であることを立証した。

### 3.3 セルフアライメント挙動および精度

セルフアライメント実装が可能である重さの部品を搭載してアライメントを行い、そのアライメントされた状態から強制的にズレを与えて、再度アライメントさせた時の時間による実際のチップの挙動を高速カメラを用い、パットの側面を撮影した写真を図11に示す。ここではプルアップ方式のアライメント挙動で、材料は粘度が低いエポキシ樹脂を用い、位置ズレを $100 \mu\text{m}$ とし、搭載部品の重量は $64 \times 10^{-5}\text{N}$ とした。これらの結果を見ると所定の位置ズレから時間とともにサブミクロンオーダの高い精度でアライメントされていることが分かる。

これは、プットダウン方式でも同じく短時間で高い精度でアライメントされている。さらに、位置決め対象と基板の位置を変えることで液滴の下部にチップの重量が掛かるため、液滴パンプの形状が凹形になっており、表面張力が小さい材

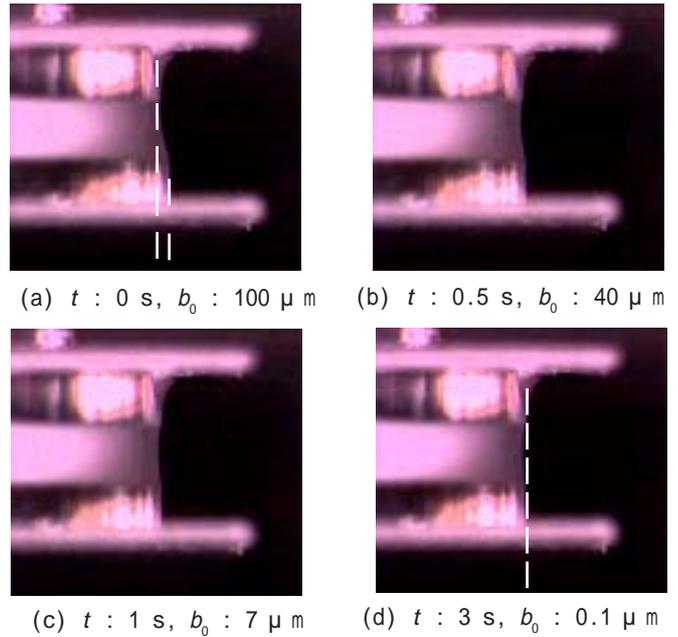


図11 エポキシ樹脂を用いたアライメント挙動。

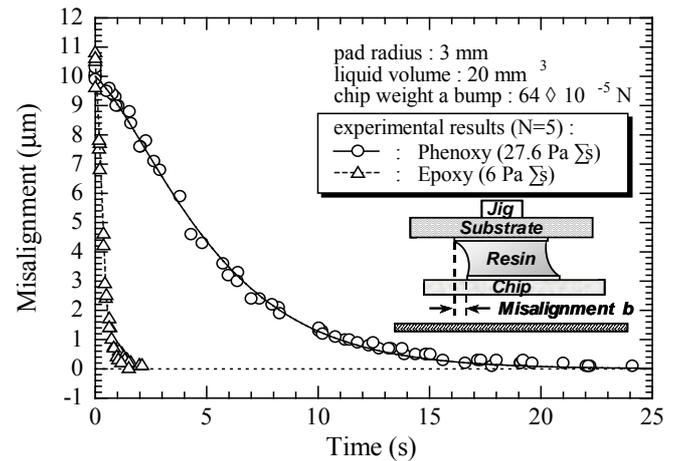


図12 プルアップ方式でのセルフアライメント挙動および精度。

料においても立体的に形成されたパットの外側に濡れ広がる可能性が低くなっている。また、粘度が相対的に高いフェノキシ樹脂とエポキシ樹脂を用いた時のアライメント挙動と精度の比較を図11に示す。実験は各5回ずつ行い、データを最小二乗フィッティングして示した。結果から見られるようにアライメント挙動は一般の溶融ソルダの流体的な減衰振動 (underdamped oscillation) 挙動と大きく異なり、過減衰 (overdamped) 挙動をすることが分かる。エポキシ樹脂では与えられたズレ $10 \mu\text{m}$ に対して、約3秒以内でアライメントされているがフェノキシ樹脂を用いた場合は約25秒と大きな時間差が見える。この原因としては樹脂の粘度が一般の溶融はんだの粘度より非常に大きく(数万倍~数十万倍)、アライメントされる際に樹脂の粘度により生じる内部摩擦力である減衰力(damping force)が大きくなるからである。したがって、液

滴樹脂材料の表面張力を用いたアライメントプロセスではセルフアライメント機能を発揮させるには表面張力だけではなく粘度も考慮する必要がある。

特に、一旦チップを動かす粘度範囲以内での樹脂材料であれば粘度がアライメント精度には緊密な影響は見られなかったが、プットダウン方式とプルアップ方式、いずれの方式においても平均アライメント精度が $0.4\ \mu\text{m}$ 以下で安定にアライメントが行われており、樹脂材料によるサブミクロンオーダーの安定なセルフアライメント実装の可能であった。さらに、レーザ変位センサーの振れ範囲が $\pm 0.1\ \mu\text{m}$ であるのでアライメント精度はセンサーのバラツキ範囲であると言え、この精度以上は纏められていないが、実際の精度はより高いと言える。これらの実験結果から分かるように、表面張力が小さい材料を用いても樹脂材料によるサブミクロンオーダーの安定なセルフアライメント実装の可能性が示唆された。

## 5 . 参考文献

- 1) P.A.SANDBORN, et al, "Analyzing Packaging Trade-Offs During System Design", IEEE Design & Test of Computers, p.10-19, 1998
- 2) S.Jain, et al, "PCB Layout Design Using a Genetic Algorithm", ASME Design Engineering Technical Conferences, DE-Vol.82, pp.529-536, 1995.
- 3) 坂主他, BSG構造に基づく配置・概略配線同時最適化手法の提案, 電子情報通信学会技法CAS97-40, VLD97-40, DSP97-55, (1997), pp.175-182
- 4) 高玉他, 組織学習エージェントによるプリント配線版設計問題への接近, 電子情報通信学会論文集D-IVol, J81-D-1 No.5, (1998), pp.514-522
- 5) 久保田他, 線分展開法を拡張した多層グリッドレス配線手法, 電子情報通信学会論文集A Vol, J76-A No.3(1993), pp.410-420
- 6) 川口他, 配線可能性検証のための容量判定グラフとフロー導出グラフ, 電子情報通信学会論文集A Vol, J80-A No.1 (1997), pp.135-142
- 7) Isao Kaneda, et al, "Characteristic Impedance Control of Multilayer PWB in Dual Strip Line Structure", ICEP Proceedings, pp.546-550, 2002
- 8) Y.j.Hang, et al, "Thermal Placement Design for MCM Application", Trans. ASME Journal of Electronic Packaging, Vol.122, No.2, pp.115-120, 2000.
- 9) P. G. Harris, Soldering & Surface Mount Technology, 20 (1995) 19.
- 10) K. Fujimoto, M. M. Kim, S. Nakata, IEICE Transaction on Electronics, 12 (2001) 1967.
- 11) J. M. Kim, K. Yasuda, K. Fujimoto, S. Nakata, Quarterly Journal of the JWS, 3 (2001) 346.
- 12) J. M. Kim, K. Yasuda, Y. E. Shin, K. Fujimoto, IEICE Transaction on Electronics, 7 (2002) 1491.
- 13) K. A. Brakke, Surface Evolver Manual, (1998)