微細はんだ形状の予測と接続寿命評価への適用*

谷 江 尚 史^{*1}Shape Prediction of Micro-Molten Solder and
Its Application to Evaluating Fracture LifeHisashi TANIE^{*2}^{*2} Hitachi, Ltd.,

832-2 Horiguchi, Hitachinaka-shi, Ibaraki, 312-0034 Japan

The reliability of a solder joint in a semiconductor structure greatly depends on its solder shape. However, predicting the solder shape of miniaturized and lead-free joints is difficult because of its large deformation, topology change, and the difference in solder wettability. Therefore, we developed a new method for shape prediction based on the moving-particle semi-implicit (MPS) method. The MPS method is suitable for calculating incompressible flow and can easily express large deformation and topology changes. However, the original MPS method cannot sufficiently express the effect of solder wettability. Therefore, we enhanced the surface tension formulation of the MPS method, making it possible to express this effect. We applied this method to predicting the solder shapes of various semiconductor packages and found that the method is effective in predicting the solder shapes of miniaturized joints. Moreover, we evaluated the fracture life of a solder joint with the predicted solder shape by coupling the shape prediction method with our crack propagation analysis method. Crack initiation points and propagation paths are automatically calculated using this crack propagation analysis, and the fracture life is evaluated quantitatively by finite element analysis. We applied these combined methods to evaluating the fracture life of solder joints that had different shapes due to different wettability conditions. As a result, we found the differences in crack initiation points and evaluated crack propagation paths and fracture lives in different wettability conditions.

Key Words : Shape Prediction, Molten Solder, MPS Method, Life Prediction, Crack Propagation, Finite Element Method

1. 結 言

微細化が進む半導体製品において、はんだ接続部の信頼性確保は大きな課題となっている。はんだ接続信頼性には、はんだ形状が大きく寄与する。しかし、微細な形状のはんだ接続部では、リフロー工程においてははんだが溶融することではんだの表面形状が大きく変化する場合や、はんだの分裂や結合、ボイドの発生や消滅などの位相幾何学的（トポロジー）変化が生じる場合があり、はんだ形状の予測が困難であった。また、近年環境対応のために様々な組成の Pb フリーはんだが開発されており、これらのぬれ性が従来広く用いられてきた Pb-Sn 共晶はんだとは異なることも、はんだ形状予測を困難にしている。

そこで本報では、粒子法の一手法である MPS (Moving-Particle Semi-implicit) 法^{1,2)}を適用することで、上記課題を解決する溶融はんだ形状予測を可能にした。MPS 法で溶融時のはんだを非圧縮性流れと扱うことで大変形や位相変化を表現し、表面張力の算出方法を拡張することではんだぬれ性を表現した。

さらに、MPS 法によるはんだ形状予測を、これま

で筆者らが開発したき裂進展解析手法^{3,4)}と組合せることで、はんだ形状の違いが接続寿命に及ぼす影響を解析できることを示した。これらの手法により、組み立て工程（リフロー工程）から製造後の接続信頼性までの一貫した評価を可能にした。

2. 溶融はんだ形状予測手法

2-1 微細溶融はんだ形状予測 半導体製品に温度サイクル試験などの繰り返しの熱負荷が作用する場合、半導体パッケージと基板の熱変形量差によって、これらを接続するはんだ接続部が破断することが懸念される。はんだ接続部の寿命を支配する因子には、半導体パッケージや実装基板の寸法や材料、使用環境など様々な要因が考えられるが、はんだ形状も主たる支配因子の1つである。はんだ形状が異なると、はんだ接続部に同じ負荷が作用した場合でもき裂が発生するまでの寿命（サイクル数）やその後のき裂進展挙動が異なる。特に、微細なはんだ接続部では、はんだ内部にボイドを含む場合にき裂の進展が速く接続寿命の低下が顕著であることが報告されている^{5,6)}。したがって、はんだ接続部の寿命を高精度に予測するためには、はんだ形状の予測が重要である。

* 原稿受付 2008 年 3 月 14 日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所(〒312-0034 ひたちなか市堀口 832-2)。

E-mail : hisashi.tanie.fb@hitachi.com

ところで、微細なはんだ接続部では、はんだ量が少ないため、溶融前後でははんだ形状が大きく変化することが考えられる。また、隣接する接続部間の距離が短いため、溶融時にははんだが隣接するはんだと結合や分裂といった位相変化を起こすことがある。これらの位相変化は、電氣的短絡などの不良原因となり得る一方、積極的に活用することで微細な接続を行うこともできる⁹⁾。これらのことから、溶融はんだ形状の予測手法は、はんだの大変形や位相変化を扱える必要がある。

また、はんだ形状は、はんだが接する部材表面のぬれ性に大きく支配される。はんだとの接続部材（ランドや端子）はぬれ性を良くするための表面処理が施されるのに対して、ランドの周辺に設けるソルダレジストには積極的にぬれ性の悪い材料が用いられる。また、使用するはんだ材料や接続部材の表面処理や保管の条件などによってもぬれ性が異なり、これらの違いがはんだ形状の違いとして現れることが知られている。したがって、溶融はんだ形状の予測手法は、各部材とはんだのぬれ性を考慮できる必要がある。

2・2 従来手法の課題 溶融時のはんだ形状を予測する手法はこれまでに様々提案されている。北野⁹⁾は、表面張力と重力や外力の釣り合いと体積一定の条件を満たすはんだ形状の理論解を算出する手法を提案した。この手法は軸対称形状に近似できる BGA(Ball grid array)はんだバンプ形状の算出などにおいて非常に有力であるが、複雑な形状の扱いは困難である。永田¹⁰⁾は、溶融はんだを粘性流体としてモデル化し、FEM(Finite Element Method)を用いてはんだ形状を算出する手法を提案した。また、Brakke⁽¹⁰⁾は、はんだ挙動だけでなくはんだ溶融時の半導体パッケージの剛体変形も解析できる手法を提案した。これらの手法では、はんだを複数の要素に分割し、各要素の変形の組み合わせで溶融形状を表現するため、複雑な形状の扱いが容易となる。しかしながら、内部ボイドの発生や消滅、結合、分裂といった位相変化は要素の変形だけでは表現できないため、これらの位相変化の扱いは困難である。

2・3 MPS 法による溶融はんだ形状解析 大変形や位相変化の扱いを容易にするため、本報では溶融はんだ形状予測に粒子法を適用した。粒子法は、連続体を複数の粒子の集合体として表現して連続体の挙動を計算する手法である。FEM などとは異なって連続体を要素分割する必要が無いので、大変形や位相変化を比較的容易に表現することができる。これまでに様々な粒子法が提案されているが、本研究では越塚ら¹²⁾に

Fig.1 Surface tension of each particle

よって提案された MPS 法を用いた。MPS 法は非圧縮性流れの解析を目的に開発された手法であり、溶融はんだの挙動の表現に適した手法と考えられるが、これまではんだの形状予測に適用した例は報告されていない。その原因として、溶融はんだは一般の非圧縮性流れと比べて接続する部材のぬれ性が挙動に大きく影響するといった特徴を持つことが挙げられる。そこで、本報では、越塚らが提案した非圧縮性流れの解析手法を基に、各部材のぬれ性を扱うために表面張力の算出方法を拡張することで、はんだ形状予測に適用した。

2・3・1 ぬれ性を考慮した表面張力算出 MPS 法による非圧縮流れ解析では、各粒子の運動は質量保存則と運動量保存則を満たす様に計算される。本報では MPS 法による一般的な非圧縮流れ解析手法の計算方法¹²⁾は省略し、本節ではぬれ性を考慮するために拡張した表面張力の算出方法の概要のみを示す。

MPS 法の各粒子に作用する表面張力 $\mathbf{f}$ は次式で表される。

$$\mathbf{f} = \frac{1}{\rho} \sigma \kappa \delta \mathbf{n} \quad (1)$$

ここで、 ρ は密度、 σ は表面張力係数、 κ は曲率、 δ は表面張力が表面のみに働くことを示すデルタ関数、 $\mathbf{n}$ は表面と垂直な方向の単位ベクトルである。このとき、密度 ρ と表面張力係数 σ は材料や温度などによって決定されるので、曲率 κ と方向ベクトル $\mathbf{n}$ が求まれば、表面張力 $\mathbf{f}$ を算出することができる。

MPS 法では、着目する粒子近傍に位置する粒子数を基に曲率 κ を算出する。すなわち、図 1 の様に着目する粒子 i を中心とする一定半径 (r_e^{st}) の領域に含まれる粒子数を数え、粒子数が少ない場合には曲率が大きい、粒子数が多いほど曲率が小さい、さらに多い場合には曲率が負と判定する。また、方向ベクトル $\mathbf{n}$ も着目する粒子近傍に位置する粒子数を基に算出される。粒子 i 近傍の複数箇所においてその位置を中心とする半径 r_e^{st} の領域に含まれる粒子数を数えることで粒子 i での粒子数分布の勾配が求まるので、この勾配に基づ

(a) Highwettability condition (b) Lowwettability condition

Fig.2 Expression of Wettability

いて方向ベクトルを決定する。この様に、MPS法では、各粒子近傍の粒子数を基に表面張力 f が算出される。

ところで、ぬれ性の良い部材を用いた場合と悪い部材を用いた場合では、はんだの曲率や表面張力の方向ベクトルが異なる。しかしながら、全ての粒子を同様に数える上記方法では、部材毎のぬれ性の違いを表すことはできない。そこで、本報では、はんだぬれ性に応じて重みをつけた粒子数をカウントすることで、各部材のぬれ性の違いを表現した。すなわち、着目する粒子 i を中心とする半径 r_i の領域に含まれる各部材の粒子（例えば、はんだ粒子やランド粒子）の数をそれぞれ求め、各部材について粒子数に重みを乗じた値を計算した後、全部材の値の和を求めた。

図2に重みの違いによる溶融はんだ形状の違いを模式的に示す。はんだを表す粒子（はんだ粒子）の重みを1.0、はんだと接続して電極となるランドを表す粒子（ランド粒子）の重みを w とし、図(a)に $w=1.0$ の場合、図(b)に $w=0.0$ の場合を示す。図(a)では、曲率や方向ベクトルの算出において、はんだ粒子とランド粒子は区別されないで、はんだ粒子とランド粒子が一体で1つの表面を作る。その結果、ぬれ性の良い（接触角の小さい）状態を表すことができる。一方、図(b)では曲率や方向ベクトルの算出においてランド粒子は無視され、はんだ粒子のみで表面を作る。その結果、ぬれ性の悪い（接触角の大きい）状態を表すことができる。なお、本報において接触角とは、固体と液体の接触端面での固体の表面と液体の表面との角度のうち液体側の角度を指すものとする。この様に、ランド粒子

Fig.3 Analysis object for verification

の重みを変化させることで、ぬれ性の異なる条件を表現することが可能である。なお、図2では極端な重み条件を示したが、 w は連続的に変化させることができるので、わずかなぬれ性の違いを表現することも可能である。

2・3・2 解析結果の検証 図3に示す例題を用いて、本手法で得られる溶融はんだ形状の妥当性を検証した。ランド上に設けられた円形のはんだを初期形状として溶融形状が安定するまでの解析を行ない、その結果を北野の手法⁸から求まる理論解と比較した。なお、はんだ粒子は細かい振動運動によって完全には停止しないため、全体の形状がほぼ安定した状態を溶融はんだの定常形状と定義した。各部材のはんだぬれ性は、ランドのぬれ性は $w=1.0$ 、ソルダレジストは $w=0.0$ の条件とした。紙面に垂直な方向の曲率は0とした。すなわち、解析対象は紙面垂直方向に無限長のランド上に設けられた円柱はんだの溶融形状である（ボール形状ではない）。初期の各粒子間距離は $25\mu\text{m}$ とし、解析には自作プログラムを用いた。

図4に、初期のはんだ直径0.7, 0.5, 0.3 mm条件での解析結果を理論解と並べて示す。初期に円形であった溶融はんだは、定常形状ではいずれの寸法の条件でもぬれ性の良いランドを覆い、その一方でぬれ性の悪いソルダレジストとは接続していない。このことから、本手法によって、ランドとソルダレジストのはんだぬれ性の違いを表現できていることが確認できる。

図5に、本手法で得られた溶融はんだの定常形状の高さを理論解と比較して示す。横軸に初期はんだ直径、縦軸にはんだ高さを示す。いずれの条件においても、本手法で得られたはんだ高さは、理論解と誤差5%以下の精度で一致している。これらのことから、本手法によって溶融はんだの定常形状を定量的に算出できることが確認できる。ただし、図4(a)の初期はんだ直径0.3mmと最も小さい条件では、本手法で得られた溶融

Fig.4 Verification of molten-shape prediction

Fig.5 Comparison with theoretical shape

はんだの定常形状はランド端部まではんだが到達していない。これは、はんだ全体の形状に対して1つのはんだ粒子が表す領域が大きく、十分な形状表現が行えなかったためと考えられる。粒子数を増やして1つのはんだ粒子が表す領域を小さくすることで対策可能と考えられるが、その一方で MPS 法では各ステップで粒子数の連立一次方程式を解くので粒子数の増加は計算コストの増加につながる。今後適切な粒子数の選定方法を検討する必要がある。

なお、本報告では予測形状の検証に理論解を用いた。今後、実際の形状との比較を行っていく予定である。

3. 溶融はんだ形状解析の例題

3・1 TSOP のはんだ接合部形状解析 本手法を、図6に示す TSOP (Thin small outline package) のリード端子接続部の溶融はんだ形状解析に適用した。解析には2次元モデルを用い、厚さ方向の曲率は0とした。また、ランドや端子は固定し、はんだ粒子のみが移動するものとした。各部材のぬれ性は、ランドと端子は

Fig.6 Analysis object of TSOP solder joint

$w=1.0$ 、ソルダレジストと端子根本のモールド樹脂は $w=0.0$ の条件とした。

図7に初期形状から定常形状までの推移を示す。初期にランドやソルダレジストの上部に平らに設けられていたはんだは、表面張力によってぬれ性の良い端子の側面をぬれ上がり、TSOPのはんだ接続部に見られるフィレット形状⁽¹⁾を形成した。また、初期形状ではソルダレジスト上部にもはんだを設けたにも係わらず、定常形状ではぬれ性の悪いソルダレジストとはんだは接続していない。これらのことから、ランドとソルダレジストなど各部材のぬれ性の違いを考慮した溶融形状を表現できていることが分かる。

次に、端子のはんだぬれ性が異なる条件での溶融はんだ形状を解析した。図8に、端子の w を 1.0, 0.8, 0.0 の3条件で求めた溶融はんだの定常形状を示す ($w=1.0$ の条件は図7で示した結果である)。端子のぬれ性の良い条件では、はんだは端子の根元にある

Fig.7 Molten solder behavior of TSOP joint
 $w=1.0$: Lead and land,
 $w=0.0$: Mole resin and solder resist

Fig.8 Comparison with different wettability conditions

樹脂近傍までぬれ上がるのに対して、端子のぬれ性が悪い条件では、端子をぬれ上がるはんだの量が少なくなり、はんだと端子の接触角が大きくなる。

この様に、端子形状やはんだ量などの条件が同じであっても、端子の表面状態などによってぬれ性が異なる場合には、はんだ形状が大きく異なることを

Fig.9 Initial shape of example 2

Fig.10 Solder shape with topology change
 $w=1.0$: Stud bump and land
 $w=0.0$: Other materials

解析で表現することができた。

なお、MPS法では前述の様に各粒子が質量保存則を満たしながら移動するので、はんだ内部の粒子密度は一定のはずである。しかしながら、図8(a)の定常形状でははんだ内部に粒子の密度が小さい領域が見られる。この原因として、今回の解析で用いたはんだ粒子の数が図8(a)の複雑なはんだ形状の表現に十分でなかったことなどが考えられる。この点からも今後適切な粒子数の選定方法を検討する必要がある。

3・2 スタッドバンプ接続部 次に、本手法を図9に示すスタッドバンプ接続部のはんだ形状解析に適用した。スタッドバンプ接続はフリップチップ

接続などに用いられる接続方式の1つであり、複数のランド（今回の解析対象では2つとした）と、各ランドと対になる位置に設けられたスタッドバンプを重ねて配置し、はんだを溶融することで微細な接続を行う接続方式である。はんだはマスクなどを用いてそれぞれのランド上のみにはけられる場合もあるが、本例題では一体のはんだで全てのランドを覆う形状を初期形状とした。このとき、溶融前に一体であったはんだは、溶融後に分裂してそれぞれのスタッドバンプ側面をぬれ上がる。その結果、スタッドバンプとランドが接続されると同時に、隣接するランド間の電氣的導通を遮断することができるため、微細なピッチの接続が可能になる。すなわち、はんだの位相変化（分裂）を積極的に活用した接続方法である。この位相変化を伴うはんだ形状を表現できるか否かを検証した。各部材のぬれ性は、ランドとスタッドバンプは $w=1.0$ 、その他の部材は $w=0.0$ の条件とした。

図10に、初期形状から定常形状までのはんだ形状を示す。初期形状では一体であったはんだは、まず2つのランドの中間近傍で分裂し、それぞれのランド側面をぬれ上がることで各ランドの中央部に集まる。次に、ランドの中央部に集まったはんだがスタッドバンプの側面をぬれ上がることで、スタッドバンプとランドが接続される。また、溶融後の定常形状では、2つのランドをつなぐはんだは存在せず、電氣的導通を遮断できている。

この様に、本手法を用いることで、分裂といった大きな位相変化を伴う溶融はんだ形状を表現することができることを確認した。

4. 微細はんだ接続寿命評価

4.1 接続寿命評価手法 図8に示した様に、溶融時のはんだと接続部材との接触角は接続部材のはんだぬれ性が良いほど小さく、ぬれ性が悪いほど大きい。この接触角は、はんだ凝固後には接続端部のひずみ特性を表す指標となり、接触角が大きいほど接続端部の界面近傍に発生するひずみが大きくなる。したがって、接続部材のはんだぬれ性が悪いほど接続端部でき裂が発生しやすくなる。一方、接続部材のぬれ性が良い場合には、接続端部には大きなひずみが発生しないので、き裂は界面以外の箇所（はんだ母材部分）で発生する。この様に、接続部材のはんだぬれ性によって、はんだにき裂が発生する位置が変わる。さらに、き裂の発生位置が異なればその後のき裂進展の経路や挙動が変わるので、破断に至るまでの寿命が異なる。した

Fig.11 Translation from MPS model to FE model

がって、接続部材のはんだぬれ性は接続部の信頼性に大きく寄与する。しかしながら、これまでその影響を解析で評価することは困難であった。そこで本報では、今回開発したはんだ形状予測手法と、筆者らがこれまでに開発したき裂進展解析手法⁽³⁴⁾を組み合わせることで、接続部材のはんだぬれ性が接続寿命に及ぼす影響を評価できる手法を開発した。組み合わせるき裂進展解析手法は、FEMを用いて繰り返し負荷によってはんだに累積するダメージを求めてき裂の発生や進展の挙動を予測する手法であり、き裂の発生位置や進展経路を自動的に算出しながら破断までの寿命を定量的に求めることができる。

4.2 解析モデルの変換 MPS法では、はんだなどの連続体を粒子の集合体（粒子モデル）として表現する。一方、FEMでは、連続体を有限要素の集合（有限要素モデル）として表現する。特に、今回用いるき裂進展解析では、一定寸法の正方形要素（3次元解析の場合は立方体要素）を用いた有限要素モデルを用いる⁽⁴⁾。したがって、これら2つの解析手法を組み合わせるためには、粒子モデルから有限要素モデルへの変換が必要である。本報では、以下の手順によってモデルの変換を行った。

はじめに粒子モデルで求めた定常形状に一辺の長さ L の格子を重ねる。次に、重ねた格子によって分割される各領域において $1/2$ 以上の面積に粒子が存在する場合にははんだが存在し、 $1/2$ 未満の場合にははんだが存在しないと定義して、はんだ形状を2値化する。次に、はんだが存在すると判定された領域にのみ正方形の有限要素を設けることで、要素寸法 L の有限要素モデルが生成される。

なお、3.1節で述べた様に、今回の解析でははんだ内部に粒子の密度が小さい領域が見られるが、これは実際に空孔が生じたのではなく、粒子数などの計算条件によって生じたものと考えられる。そこで、今回は上記2値化によってはんだ内部に生じる空孔は無視して、はんだと気相の境界の情報のみを粒子モデルから有限要素モデルに引き渡すこととした。

Fig.12 Fracture life evaluation in high wettability condition

Fig.13 Fracture life evaluation in low wettability condition

図 11 に、粒子モデルから有限要素モデルへの変換例として、ぬれ性が良い場合のはんだ形状の変換結果を示す。粒子モデルでの平均粒子間距離は $10\ \mu\text{m}$ 、有限要素モデルのはんだを表す要素の寸法(L)は $5\ \mu\text{m}$ とした。

4.3 寿命評価例 解析例題として、図 12~14 に示す仮定の TSOP パッケージの接続信頼性評価を実施した。実装基板上に両面実装されたパッケージにおいて、パッケージ左右に設けられたリードのはんだぬれ性が両側とも良い場合、両側とも悪い場合、左右

で異なる場合（左側が良く右側が悪い）の 3 条件の接続寿命を比較した。リード形状やはんだ量は 3.1 節の例題と同じとし、はんだ形状は図 8 で示した $w=1.0$ と 0.0 の条件での解析結果を用いた。温度サイクル条件は $125^\circ\text{C}/25^\circ\text{C}$ である。各材料は、はんだのみ温度依存性を考慮した弾塑性体、その他の材料は温度依存性の無い弾性体と仮定した。き裂進展解析には自社開発 FEM コードを用いた。

図 12 に両側リードのはんだぬれ性が良い場合のき裂進展解析結果を示す。解析条件は左右対称であるため、片側だけの解析結果を示す。1000 サイクル時点において、はんだ母材部分でき裂が発生してリードまで進展した。その後、き裂はリードとはんだの界面に沿って進展し、6600 サイクルで破断に至った。き裂がリードとはんだの接続端部の界面では無くはんだ母材部分で発生したのは、リードとはんだの接触角が小さく接続端部でのひずみ特異性が小さいためと考えられ、フィレット形状を形成する実際の TSOP はんだ接続部のき裂発生位置¹⁰⁾と一致する。

図 13 に両側リードのはんだぬれ性が悪い場合のき裂進展解析結果を示す。き裂はリードとはんだの接続端部の界面近傍で発生し、その後界面に沿って進展して 5700 サイクルで破断に至った。ぬれ性が良い場合とき裂発生位置が異なるのは、ぬれ性が悪いことでリードとはんだの接触角が大きくなり、界面がひずみ特異性となって母材部分よりもダメージが大きくなるためと考えられる。また、破断に至るサイクル数が早くなるのは、界面でのダメージが大きくなることでき裂の発生が早くなることが一因と考えられる。

図 14 に左右リードのはんだぬれ性が異なる場合（左側リードはぬれ性が良く、右側リードはぬれ性が悪い）のき裂進展解析結果を示す。1000 サイクル時点において、ぬれ性の良い条件（左側）でははんだ母材部分に微小なき裂が発生したのみであるのに対して、ぬれ性の悪い条件（右側）ではリードとはんだの界面をき裂が大きく進展した。さらに、3300 サイクル時点において、ぬれ性の良い条件（左側）でははんだ母材を進展したき裂がリードとの界面に到達した後に界面に沿って進展している（破断には至っていない）のに対して、ぬれ性の悪い条件（右側）ではリードとの界面をき裂が進展して破断に至った。左右ではんだ形状が異なり片側（右側）の接続部のみにき裂が発生した場合、左右接続部の剛性の違いが大きくなり、剛性の小さい側（右側）の変形量が大きくなってダメージ累積が加速される。これらの要因によって左右の接続寿命に大きな違いが生じたと考えられる。

Fig.14 Fracture life evaluation in Asymmetry wettability condition

この様に、両側ともリードのぬれ性が良い場合と比較して、リードのぬれ性が悪い場合には接続寿命が低下することを解析で示すことができた。また、片側のみのリードぬれ性が悪い場合では、両側のリードぬれ性が悪い場合よりもさらに寿命が低下し、両側ともリードぬれ性が良い場合と比較すると $1/2$ 以下の寿命となった。品質のばらつきが大きい場合には、信頼性の低下が顕著になるため注意が必要であることを示している。

なお、本手法では、ぬれ性によるはんだ形状の違いのみに着目しており、ぬれ性が異なることによるはんだとリードの界面強度の違いは未考慮である。今後、これらの影響を評価し、実製品寿命との比較を行う予定である。

5. 結 言

微細はんだ接続部のはんだ形状予測と、予測形状に基づく接続寿命評価を目的に解析手法を開発し、以下の結論を得た。

- (1) 粒子法の1手法であるMPS法を用い、表面張力の算出方法を拡張することで、微細はんだ接続部で課題となる大変形や位相変化を容易に扱い、はんだぬれ性の影響を考慮した溶融はんだ形状予測を可能にした。
- (2) 本手法で予測したはんだ形状は、誤差5%以下の精度で理論形状と一致した。
- (3) 本手法をTSOPやフリップチップはんだ接続部に適用し、大変形や位相変化を伴うはんだ挙動を再現できることを確認した。
- (4) 溶融はんだ形状解析手法とき裂進展解析手法を組み合わせることで、ぬれ性によるはんだ形状の違いが接続寿命に及ぼす影響を評価できることを示した。これらの手法により、組み立て工程（リフロー工程）から製造後の接続信頼性までの一貫した評価を可能にした。

参考文献

- (1) Koshizuka et al., Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, Nucl. Sci. Eng., Vol.123, pp.421-434 (1996)
- (2) Koshizuka, "Particle method", Maruzen (2005)
- (3) H.Tanie et al., Transactions of the Japan Society of the Mechanical Engineers, Series A, Vol.72, No.717, (2006), pp.638-645
- (4) H.Tanie et al., Transactions of the Japan Society of the Mechanical Engineers, Series A, Vol.73, No.727, (2007), pp.58-64
- (5) Terasaki et al., 11th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics", (2005), pp.313-318
- (6) Terasaki et al., 12th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics", (2006), pp.247-252
- (7) Japan institute of electronics packaging, "Dictionary of electronics packaging technology", Kogyo Chosakai Publishing Co., Ltd., (2000)
- (8) Kitano et al., InterPACK 7, ASME EEP-Vol.19-2, pp.1407-1412.
- (9) Nagata, 8th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics" (2002)
- (10) K. Brakke, Experimental Mathematics, Vol. 1, No. 2 (1992), pp.141-165
- (11) Terasaki et al., "7th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics", (2001), pp.441-44