第4章

Known Good Die 検査システムの機械的接続信頼性

第4章の概要

今後普及が予想されるMCP(Multi Chip Package)、MCM（Multi Chip Module）や基板内蔵パッケージでは、KGD（Known Good Die:品質保証されたベアチップ）の確保が不可欠な課題であり、その検査システムの開発が望まれている[1)-3)]。本章では、その目的で開発されたマイクロバンプ付き耐熱フイルムを用いたKGD検査システムの機械的接続信頼性を解析した。まずマイクロバンプとベアチップ模擬電極との接触抵抗測定と有限要素法による接触応力解析を行い、両者の接続性評価は非常に良く整合することを確認した。次に実際のベアチップとKGD検査コネクターを用いたモデルで、バンプリードパターンの影響を解析した。これらによって、KGD検査システムの構成材料の物性面、使用条件の最適値を明らかにした。

4.1 マイクロバンプ付き耐熱薄層フイルム

通常、半導体パッケージの出荷検査には、ニードルプローブを用いて高温下で電流を流すバーンインテストが行われている。LSIの大規模、高集積化に伴いアウターリードの狭ピッチ化と多ピン化が進み、エリアパッド配列のベアチップが主流になったが、従来の検査システムでは対応が困難である。そこで、種々の検査システムの開発が進められている[4)-8)]。その検査システムのプローブカードとして開発されたマイクロバンプ付き耐熱薄層フイルムASMAT（Application Specific Materials）は、次の4つの技術により製造されている[9)]。

・線熱膨張係数が銅箔とほぼ等しいポリイミドと銅箔との接合技術
・フォトリソグラフィーによる微細回路加工技術
・ポリイミドフィルムの微細開孔加工技術
・マッシュルーム形状のマイクロバンプ形成技術

標準的なASMATの製造方法をFig.4.1 に示した。まず、銅箔にポリイミドをキャスティングして乾燥、熱硬化させる。次に回路パターンにしたがって銅箔部分をエッチングする。そしてポリイミド部分に精密孔加工を施す。最後に電解メッキによって、マッシュルーム形状のNiコアマイクロバンプを形成させている。ASMATのマイクロバンプ（直径：300μm）のSEM写真をFig.4.1 に示すが、バンプピッチは最小 15μmまで、また加工面積は最大 300mm×300mmまで可能である[9)]。なお、第 5 章でマイクロバンプの均一形成技術について解析している。

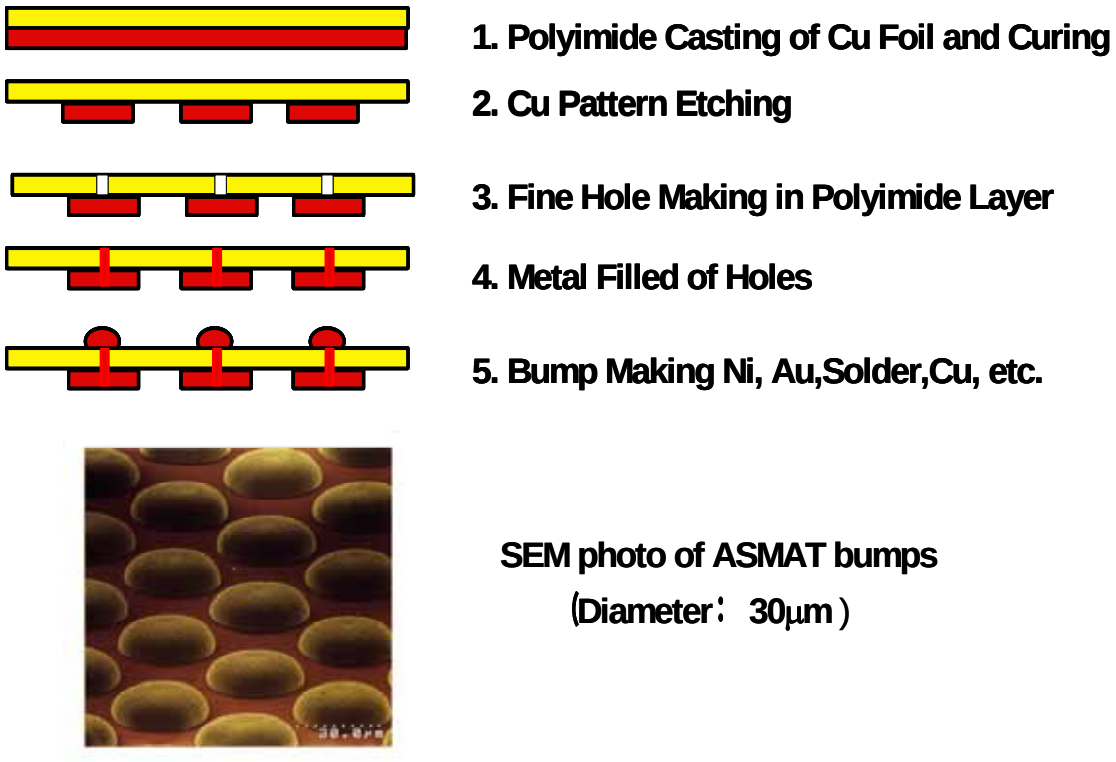


Fig.4.1 Typical manufacturing process and micro-bump of ASMAT

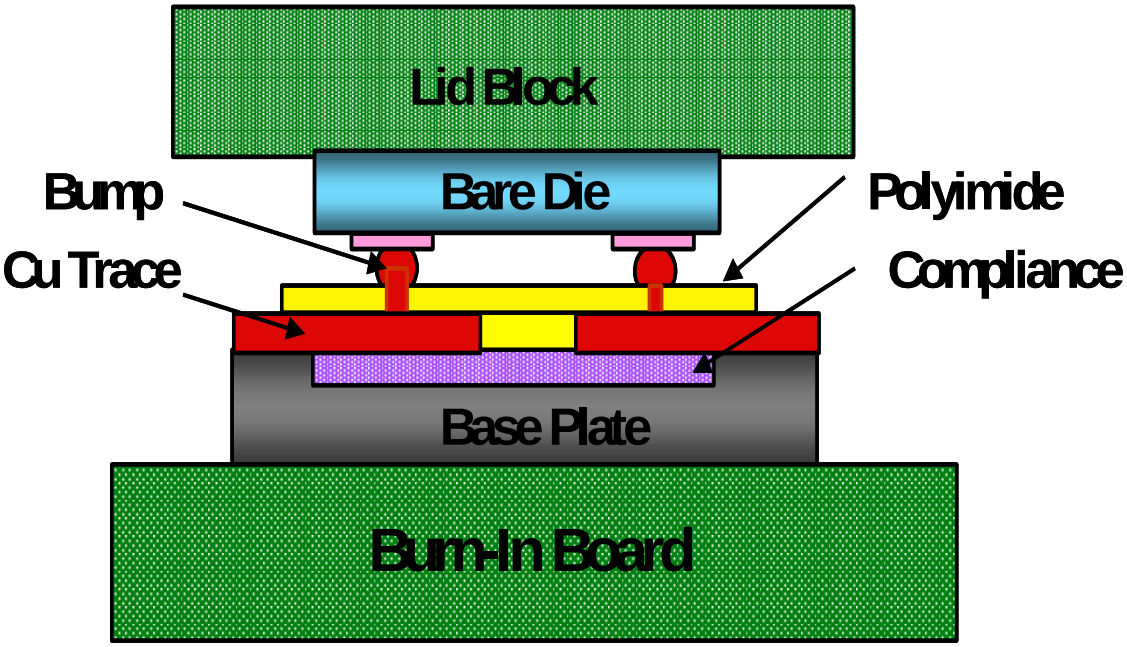


Fig.4.2 ASMAT Micro-connection system

4.2 マイクロコネクション装置の基本接続信頼性解析

ASMATを用いたKGD検査マイクロコネクッション装置の概要をFig.4.2 に示した。ベアチップのパッド電極とASMATのバンプの位置が対応する様に重ね、コンプライアンス材を介して外圧を掛けることで、バンプ高さのバラツキを吸収、接続を確実にする方式である。ここで、マイクロバンプのレイアウト加工は高精度であるが、バンプ高さは 3μm程度のバラツキがある[10)]。KGD検査システムでの電極間の接続は、金属溶融接続と違って機械的な圧接接続である。この機械的な圧接方式の接続性を確保するため、1) バンプに掛かる押圧、2) コンプライアンス材の弾性率、3) コンプライアンス材の厚み、4) バンプピッチ距離、5)バンプ高さのバラツキ、6) 試験環境温度の影響を解析した。

4.2.1 ベアチップ模擬電極とASMATバンプの接触抵抗の評価[10)]

実験方法

ベアチップを模擬した試験電極（エレクトロード）を用いて、ASMATバンプ間の接触抵抗を測定した。その試験装置の概略をFig.4.3 に示した。ASMATバンプ高さのバラツキを吸収するためにコンプライアンス材を、また、ASMATとエレクトロードに均等な圧力を掛けるため、金属製の球体を用いている。なお、バンプとエレクトロード間の接触抵抗Rcは、四端子法でバンプとエレクトロード間の電圧を自動測定した。その定電流電源の電流値は 100mA、電圧は 1.5Vに設定、測定点数は 96 点である[10)]。

四端子法による接触抵抗の測定方法を Fig4.4 に示した。ASMAT の銅箔厚みは 18μm、ポリイミドフイルムの厚みは 25μm である。ASMAT-A のバンプの直径、高さはそれぞれ 60μm、15μm、ピッチ間距離は 300μm で 400 個のバンプが格子状に形成されている。ASMAT-B と ASMAT-C は、ASMAT-A と基材の構成、バンプの寸法、個数は同じで、ピッチ間距離は各々、200μm、100μm である。

実際に接触抵抗を測定したバンプは各々 8 個で、それらのバンプには四端子法を用いた計測が出来る様に、銅箔リード線がパターニングされている。バンプは全て Ni 核に 2μm の Au メッキが施され、リード線が接続されていないバンプは、電気的に絶縁されている。なお、これら電極の金属ブロックの抵抗値は、バンプの接触抵抗と較べて無視できるほど小さい。

ベアチップを模擬した電極として、2 種を供試した。Au/Cu 電極は、鏡面研磨した Cu ブロック上に Au メッキしている。Au と Au の接続は酸化皮膜の影響を受けずに理想的な接触抵抗の測定が可能になる。Al/SUS 電極は、Si 基板と同等の弾性率である SUS 基板に純 Al を蒸着して、ベアチップに近い剛性でバンプとの接触抵抗の測定が

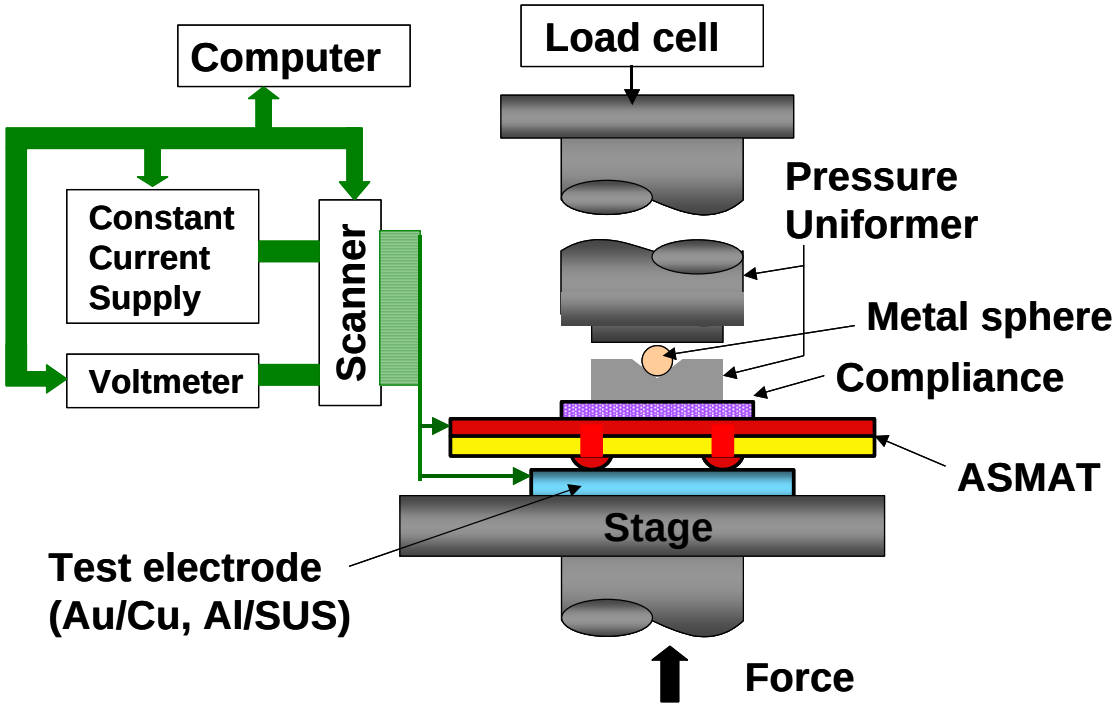


Fig.4.3 Test block diagram and measuring head configuration

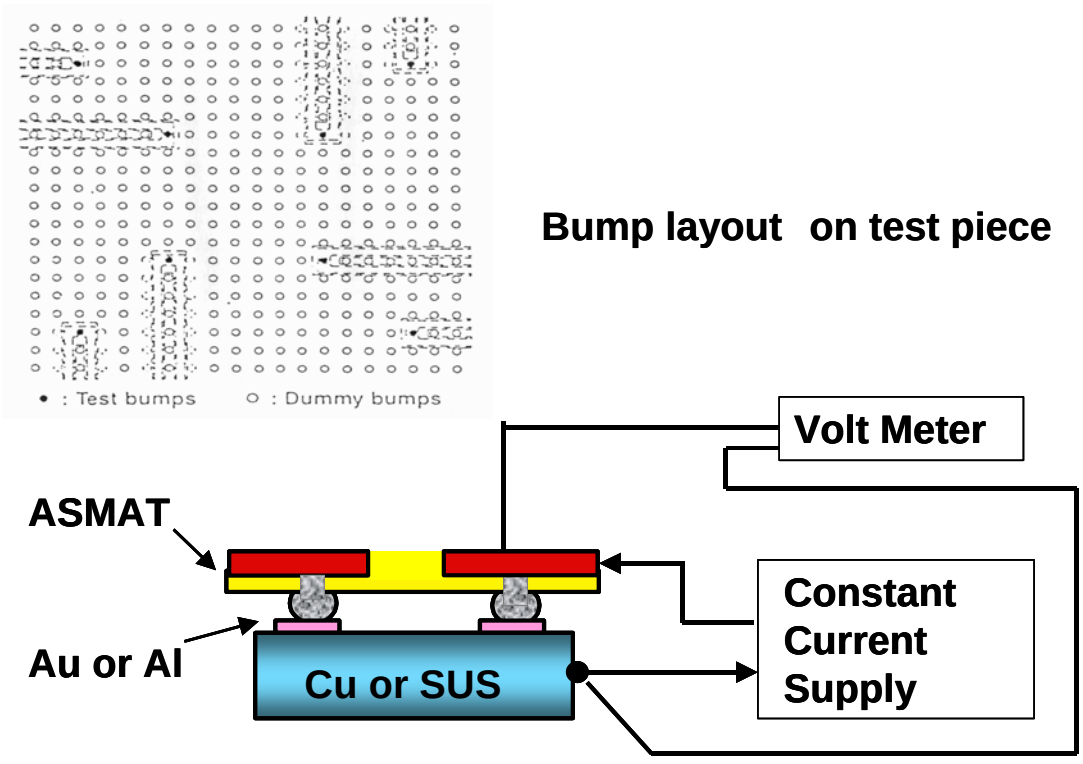


Fig.4.4 Test outline of contact resistance of ASMAT bumps

可能になる。コンプライアンス材として、非圧縮性で弾性率の小さいシリコーンゴムシート、弾性率の大きい PTFE フイルム、PI フイルムの 3 種を供した。これらのフイルムの厚みは、それぞれ 0.3 mm、0.5 mm、1.0mm のものを試験した。

接触抵抗の測定結果

種々のコンプライアンス材を用いて、ASMAT-A（バンプピッチ L＝300 μm）と Au/Cu 電極間の接触抵抗と押圧の関係を測定した結果を Fig4.5 に示した。図より、圧縮弾性率の小さいコンプライアンス材を用いる方が、低荷重で接触し接触抵抗のバラツキも小さいことが分かる。次に、接触抵抗に対するシリコーンゴム厚みの影響を検討した結果を Fig4.6 に示した。厚みが大きい程、僅かであるがバラツキが小さく、低荷重で接触すると考えられる。

ASMAT-AとAu/Cu電極、またはAl/SUS電極の組み合わせで、接触抵抗と押付け荷重の関係を測定した結果をFig4.7 に示した。実用レベルの押圧で対Auパッド、および、対Alパッドの接触抵抗は、各々20mΩ、100mΩと充分小さい結果である。次に、ASMAT-AとAu/Cu電極の組み合わせで、接触抵抗とバンプピッチの関係を測定した結果をFig4.8 に示した。バンプとパッド間の接続を得るのに、狭ピッチになるほど大きな押圧を必要とするが、バンプピッチ 100μmでも 15 x 10^{-2}N程度で接続可能と言える。

さらに、ASMAT-AとAu/Cu電極の組み合わせで、接触抵抗に対する温度の影響を調査した結果をFig4.9 に示した。25℃における接触抵抗と押圧の関係はFig4.5 に示した通りである。押し圧を 20 x 10^{-2}Nに設定して温度を 150℃に昇温すると、接触抵抗はやや小さくなっている。これは構成材料の熱膨張によって押圧が 25 x 10^{-2}Nに増加したためで、押圧を 20 x 10^{-2}Nに調整すると 25℃の接触抵抗に戻っている。

以上の結果から、バンプの接触抵抗とそのバラツキは、実用上充分小さく 150℃に加熱しても接続は確保されることが分かった。

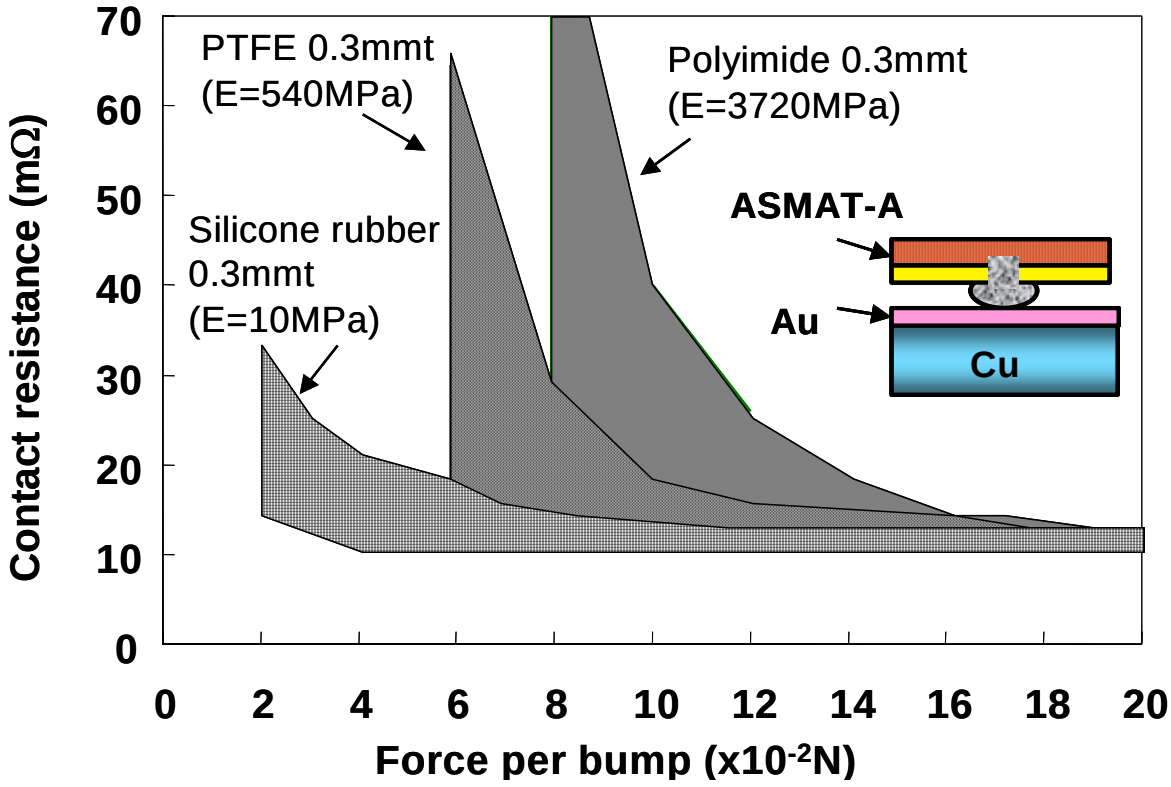


Fig.4.5 Effect of compliance material on contact resistance

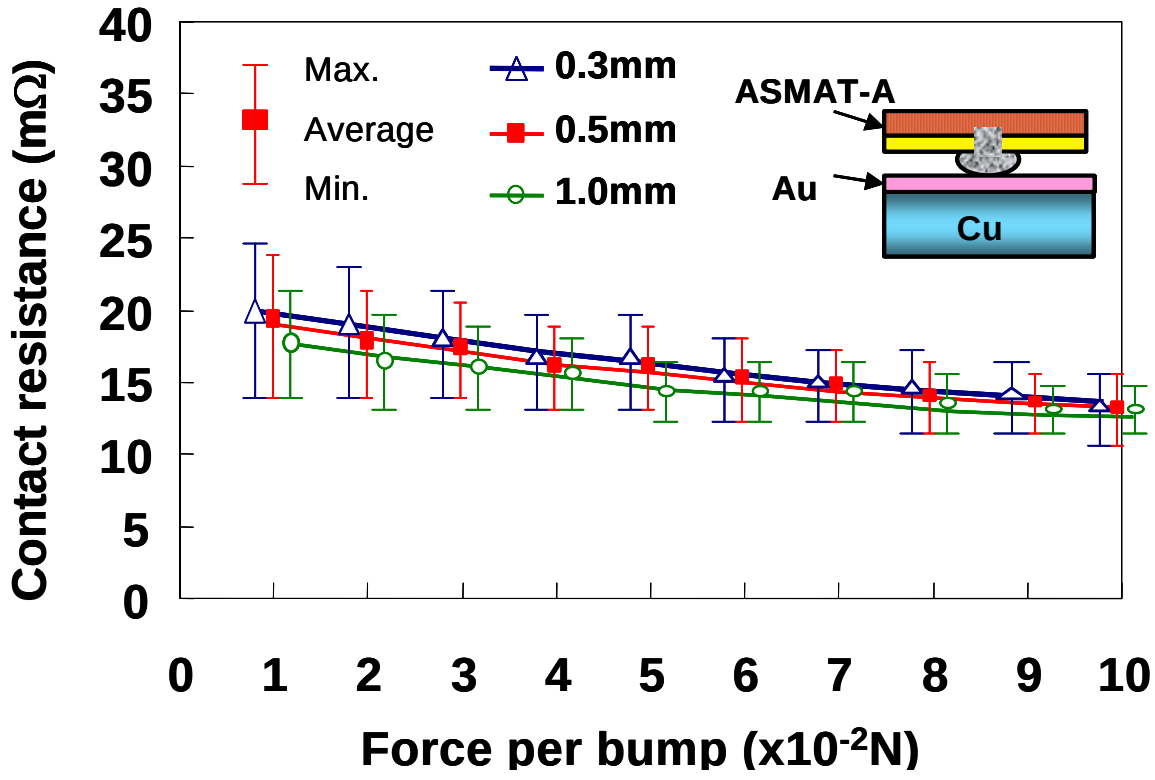


Fig.4.6 Effect of thickness of compliance on contact resistance

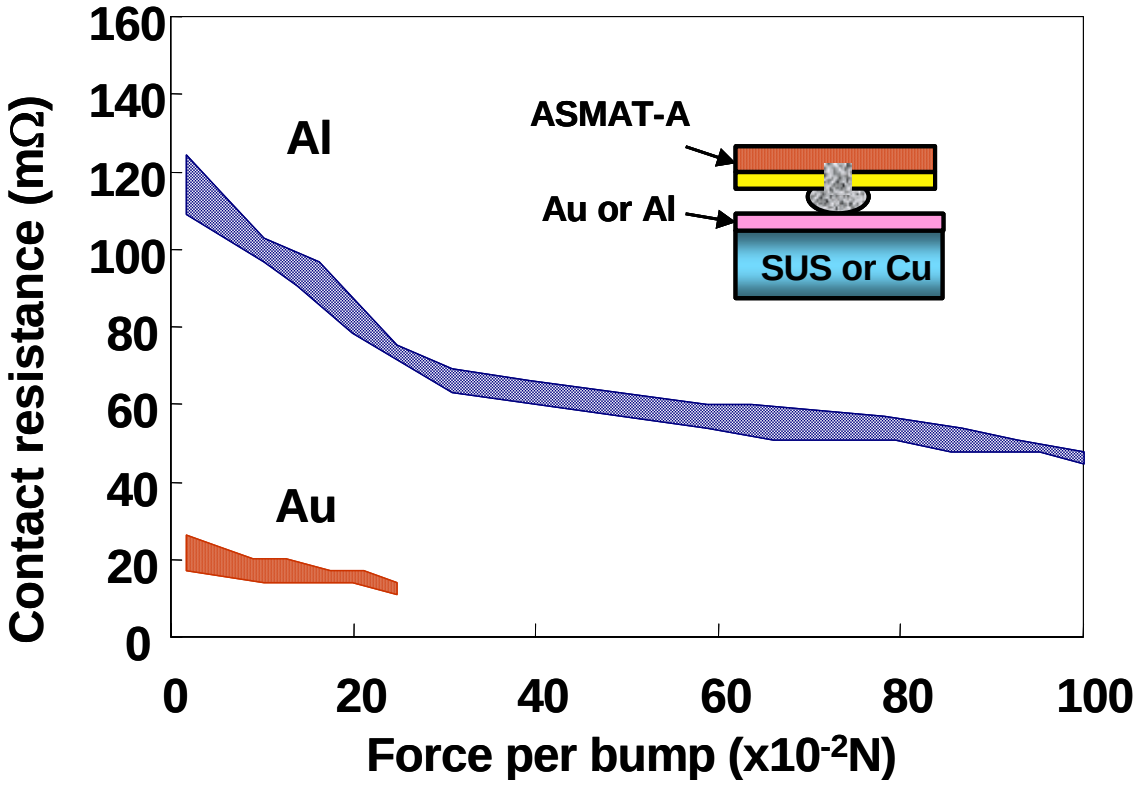


Fig.4.7 Relationship between force and contact resistance

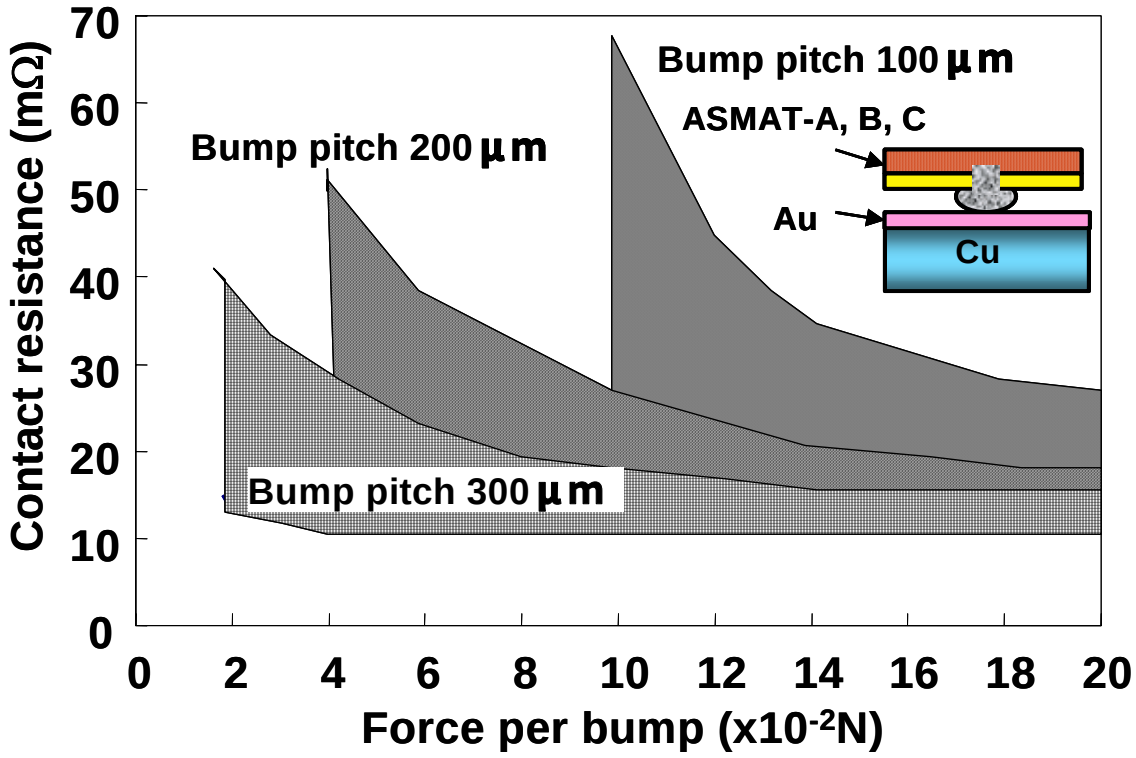


Fig.4.8 Effect of bump pitch on contact resistance

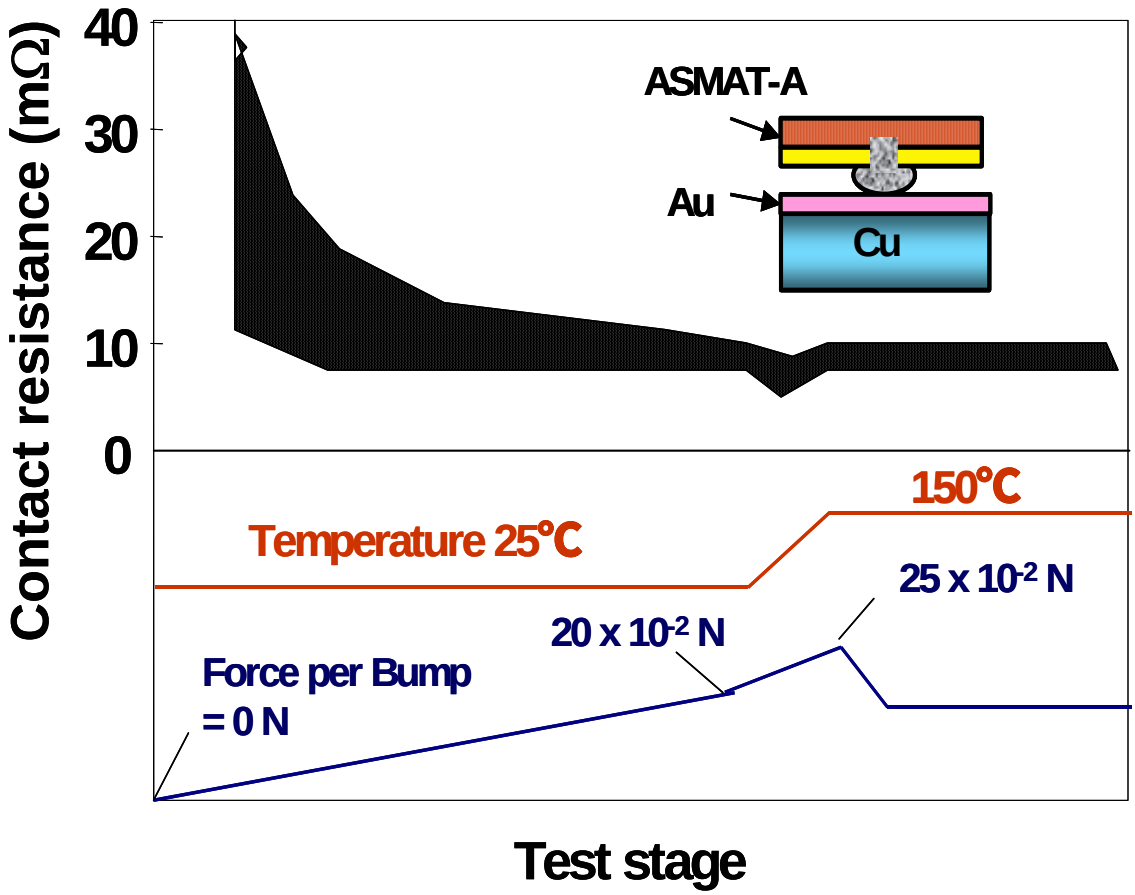


Fig.4.9 Effect of force and temperature on contact resistance

4.2.2 ベアチップ模擬電極とASMATバンプの接触応力解析[11)]

解析方法

ASMAT-B と Al/SUS 電極を用いた解析モデルを Fig4.10 に示した。隣接する高さの異なるバンプ A、B を解析対象とした。バンプ A、B の直径は 60μm、高さは 15μm、13μm である。したがって、バンプ B とパッド電極間のギャップΔH は 2μm である。また、バンプ表面の Au めっき厚は 2μm、Al パッド厚みは 1μm である。ここで、コンプライアンス材の厚み t は 50μm、300μm、電極間のギャップΔH は 1μm～5μm、バンプピッチ L は 200μm、100μm と変化させた。

有限要素モデルは、対称性を考慮し4節点平面歪み要素で近似した。バンプ A の中心を対称境界として、シリコン基板の底面は垂直方向を拘束している。バンプ A、バンプ B、PI フィルム、Al で囲まれる界面、及びコンプライアンス材、Cu 回路、PI フィルムで囲まれる界面は、接触界面を考慮した。そして、式 4.1 で計算される分布荷重 S をコンプライアンスの上部表面に垂直に掛けた。

$$S = F \times n / A \qquad (4.1)$$

ここで、F はバンプ1個当りの荷重、n はバンプ数、A はコンプライアンス面積である。

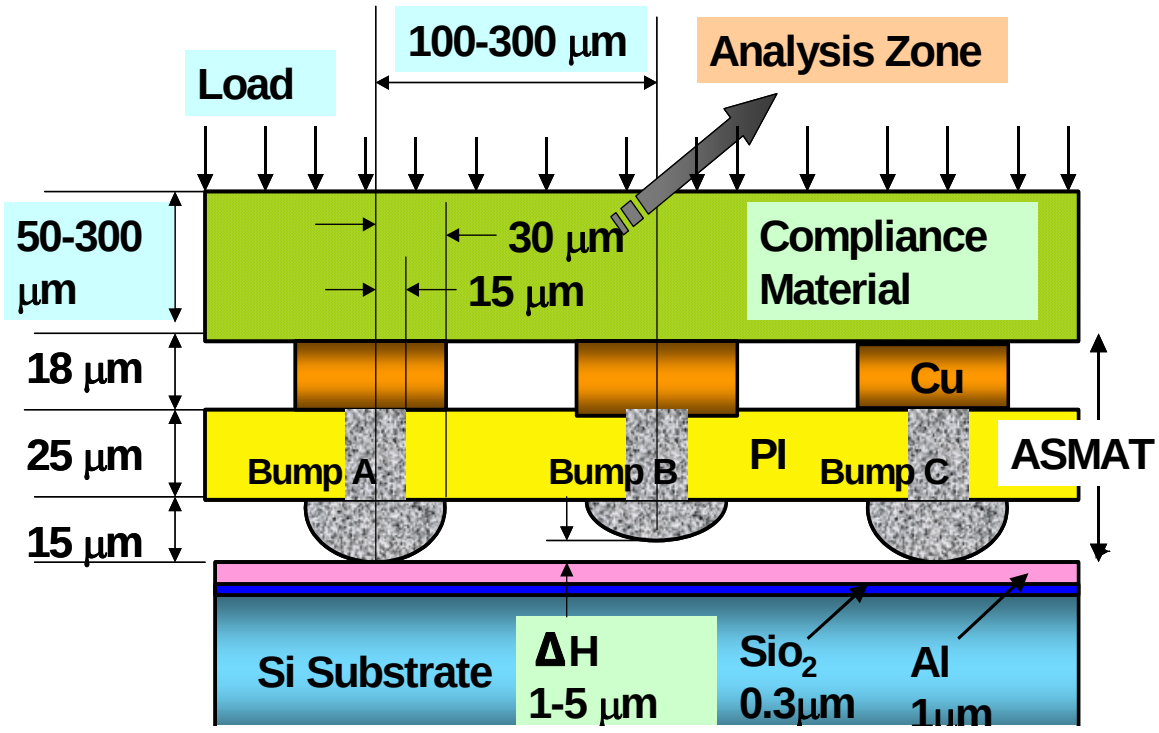


Fig.4.10 ASMAT micro-connection model for FEM Analysis

Table 4.1 Properties of materials used in this analysis

	Young's Modulus (MPa)	Poisson's ratio	Thermal expansion (ppm/℃)
Silicon	170000	0.30	3
Aluminum	72000	0.34	24
Nickel	220000	0.31	13
Gold	80000	0.42	14
Polyimide in ASMAT	4500	0.35	16
Copper	17000	0.34	16
Silicone rubber	10	0.49	330
PTFE film	540	0.30	170
Polyimide film	3720	0.30	20

Table 4.1 に本解析に用いた各材料物性値を示した。ASMAT の構成材料、および、各コンプライアンス材は耐熱性があり、25℃-150℃の範囲で温度依存性はないと仮定した。バンプと Al パッド間の接続性は、バンプ B の垂直方向の変位、あるいは、バンプ B と接触する Al パッド部の垂直方向応力で評価した。

解析結果

まず Fig.4.10 の解析モデルで、ΔH を 2μm に設定し、バンプ B の垂直方向の変位量と押し圧の関係を、種々のコンプライアンス材について解析した。その結果を Fig4.11 に示した。圧縮弾性率の小さいシリコーンゴムほど、小さな荷重でバンプ B と Al パッドが接続している。また、そのコンプライアンス材の厚みの大きい方が、小さな押圧で接続している。これらの傾向は実験結果と完全に一致しているが、バンプ B と Al パッドが最初に接続する時の押圧は、実験値より少し大き目である。これは、実験では ASMAT-A のバンプピッチ L=300μm に対して、FEM 解析では L=200μm と相違している。そこで、Fig4.12 にバンプの接続性とバンプピッチとの関係を解析した結果を示した。バンプピッチが小さいほど、バンプとパッドの接続に大きな押圧を必要とする結果となっており、実験結果と整合している。

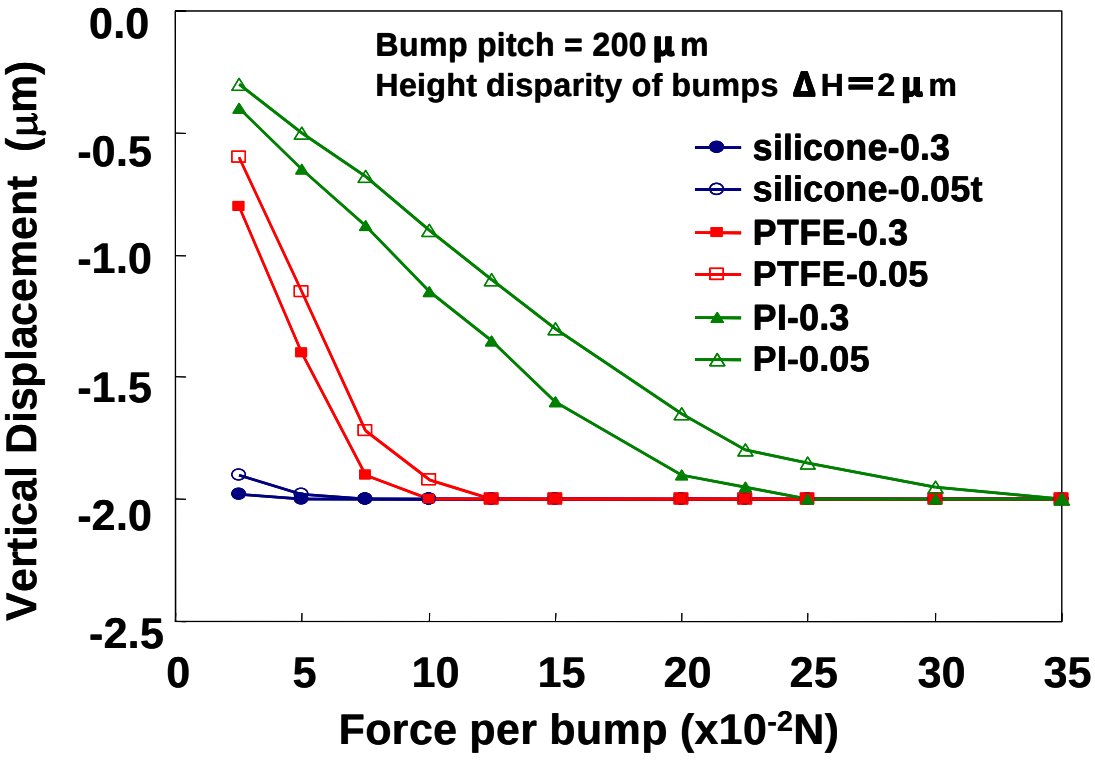


Fig.4.11 Effect of compliance material on contact resistance of Bump-B

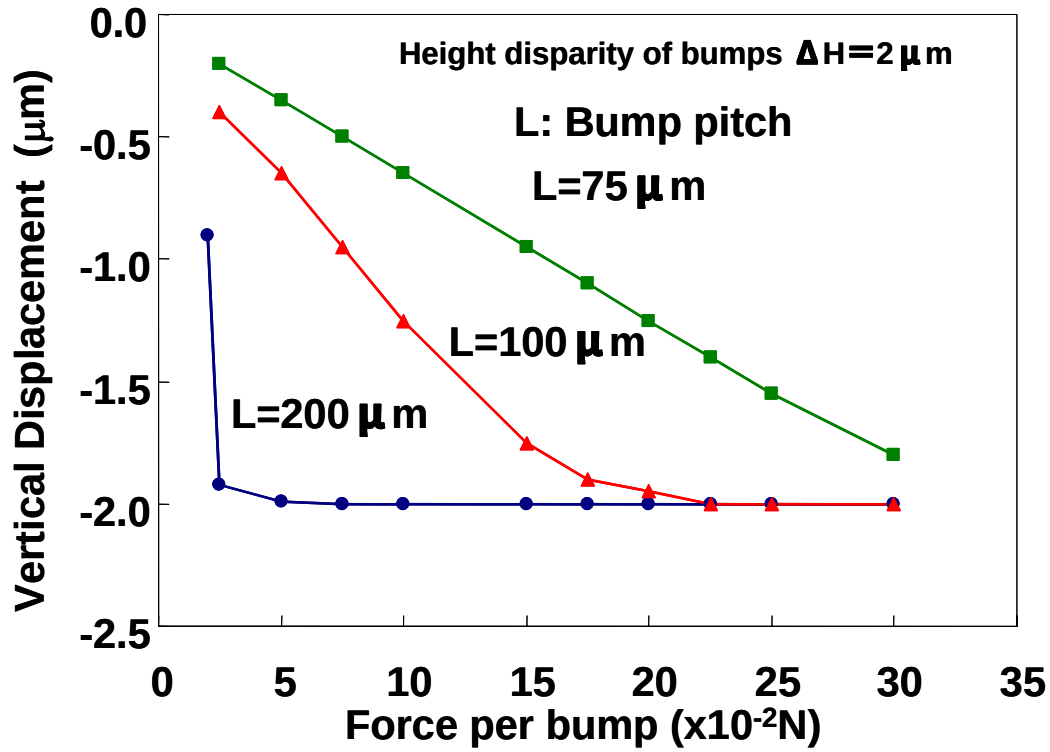


Fig.4.12 Effect of bump pitch on contact resistance of Bump-B

図からは、バンプピッチが 75 μm でも接続が可能であると推察できる。以上の結果より、本解析モデルによる計算結果には妥当性があると考えられる。

そこで、バンプ B と Al 電極のギャップ量ΔH を 1 μm～5 μm に変化させて、さらに接続性をシミュレートした結果を Fig4.13 に示した。バンプと Al パッドの接続は、ΔH が大きいほど大きな押圧が必要なことが分かる。図から、コンプライアンス材の効果で、ΔH が 5 μm でも接続が確保できると推察できる。

接続性に対する押圧と温度の影響をAlパッド部位の垂直方向応力で評価した結果をFig4.14 に示した。最初から接続されていたバンプA側の応力は、バンプBが接続された後、押圧Fに比例して増大するが、25℃から 150℃に加熱されても変化がみられない。一方、バンプBは初期には接続されていないので、対応するAlパッド部の応力値は 0Nである。押圧が $5x10^{-2}$ Nに達するとバンプBは、Alパッド部に接続、約2000MPaの応力が掛かっている。この応力値は、バンプA側に較べて3倍以上の大きな値で、さらに押圧を $20x10^{-2}$ Nまで増大しても、また、温度を 150℃まで昇温しても大きな変動がみられない。

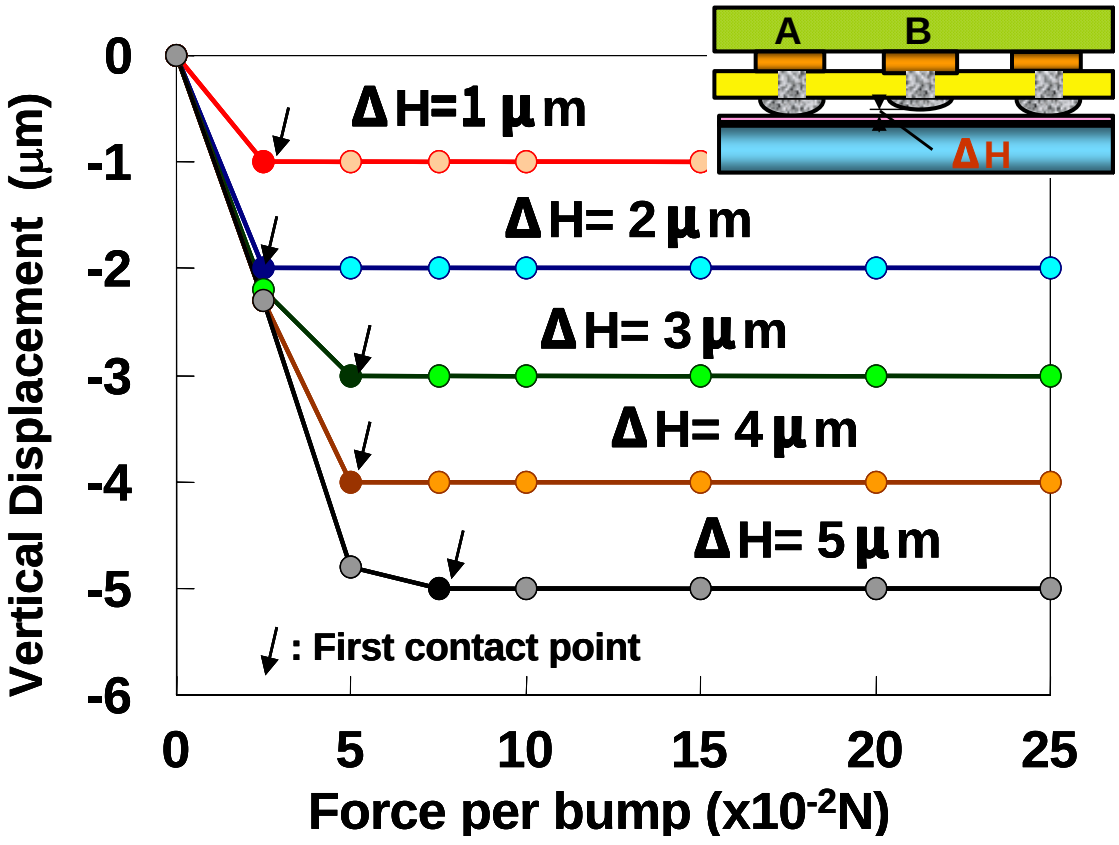


Fig.4.13 Effect of height disparity of bumps on contact of Bump-B, bump pitch: 200 μm

このように、適当な押圧条件下では温度の変動に対しても、両バンプの接続は確保されると推察される。Fig4.15-a、Fig4.15-bに、温度 25℃で押圧を 20 x 10^{-2}N掛けた場合と、さらに温度を 150℃に加熱した場合の垂直方向の変位等高線図を示した。ASMAT自体の大きな変形は起こさないで、シリコーンゴムがPIフイルムとCu回路で囲まれた部分に変形充填し、いずれもバンプBとAlパッドとの接続が確保されることが理解できる。

なお、チップ表面とAlパッドの応力推定値は、各々、300Mpa、1400Mpa程度であった。これらと、各々の破壊応力値と比較すると、チップの破壊は起きないがAlパッドには痕跡は残ると推察された。実際、接触抵抗の経時安定性を評価した結果、Alパッドには痕跡は残るが大きなダメージにならないことが確認できた[12)]。

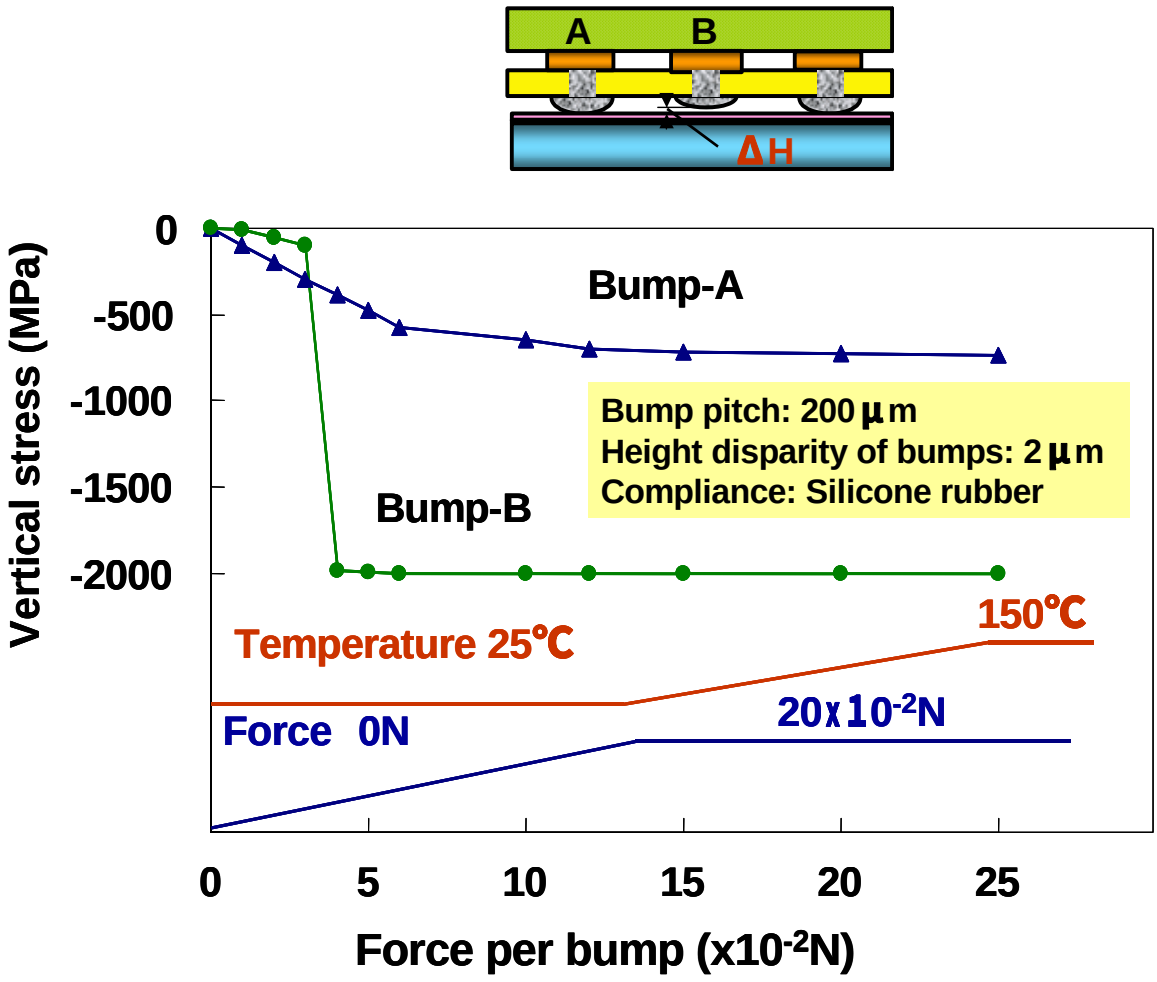


Fig.4.14 Relationship of stress at the interface between bump and Al pad to force and temperature

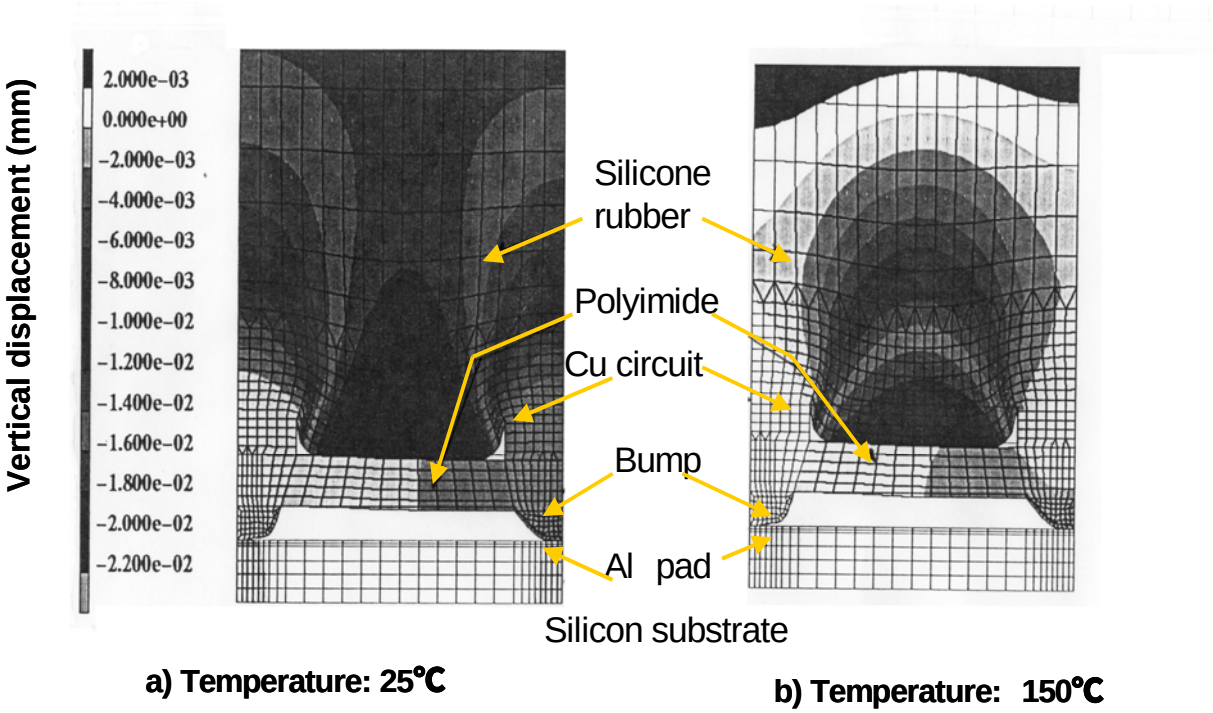


Fig.4.15 Displacement contour maps, bump pitch: 200μm, height disparity of bumps: 2, compliance: silicone rubber 0.3mmt, force per bump: 20 x10^{-2}N

4.3 KGD 検査コネクター装置の接続信頼性シミュレーション

前節で、ASMAT の KGD 検査プローブとしての基本性能が確認された。そこで、実際のベアチップを用いて接続信頼性試験を行ったところ、ASMAT のバンプリードパターンによって、接続信頼性が左右されることが分かった。本節では、その原因解明と対策のため、3 次元モデルを用いて解析した結果について述べる。

解析方法

4種の KGD コネクターの構造モデルを Fig.4.16 に示した。モデル A は前節で解析した構造に相当する。モデル B はバンプ付近に押圧が集中して掛かる様に、スペーサー（弾性率は Si チップ相当）を設置している。モデル C はバンプの沈降を抑制するステイフナー（弾性率は Alloy42 相当）を設置している。モデル D はスペーサーとステイフナーを設置している。また、ASMAT プローブバンプのリードパターンとして、実際のベアチップ電極に対応した Fig.4.17 に示す2種を検討した。パターン 0 では、リードが全て外側に配列させており、接触抵抗の測定試験では全てのバンプの接続安定性

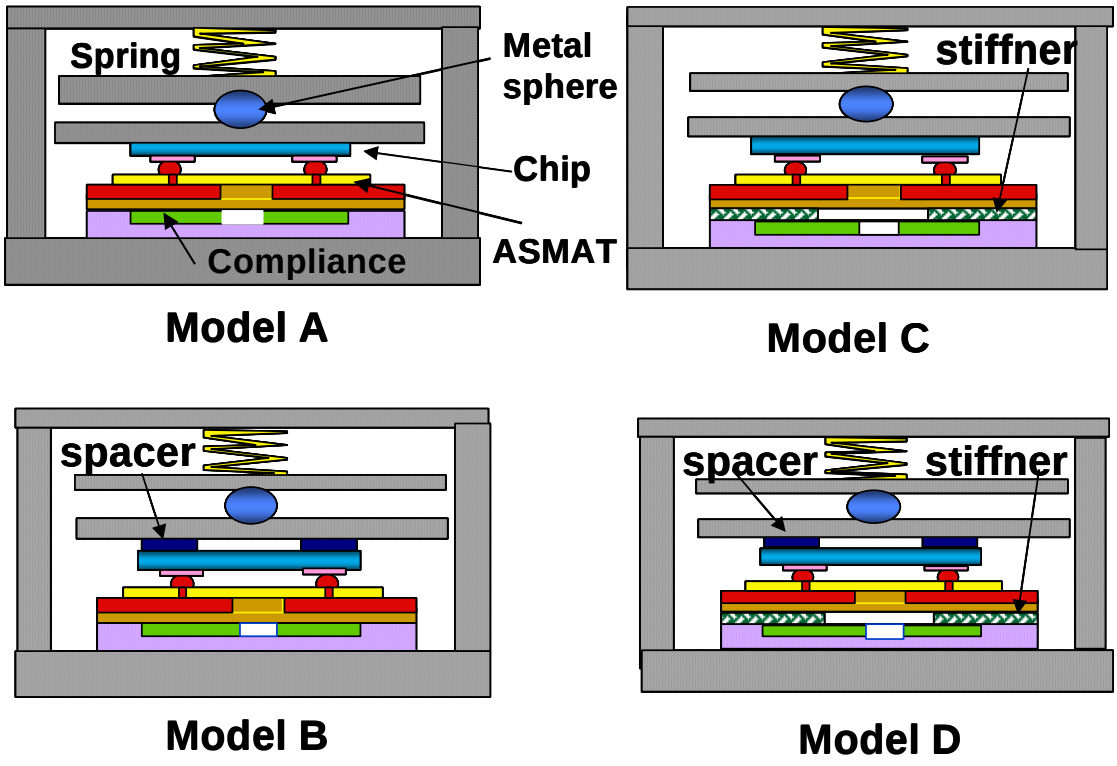
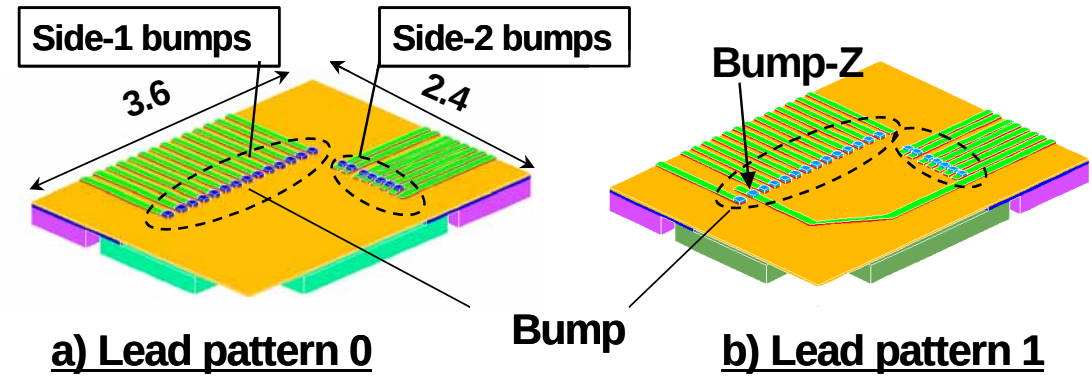


Fig.4.16 Analysis models of Burn-in Test carrier using ASMAT



Configulation of carrier	Lead pattern 0	Lead pattern 1
Standard	Model A0	Model A1
sandard with spacer	Model B0	Model B1
Standard with stiffner	Mode C0	Mode C1
Standard with spacer and stiffner	Model D0	Model D1

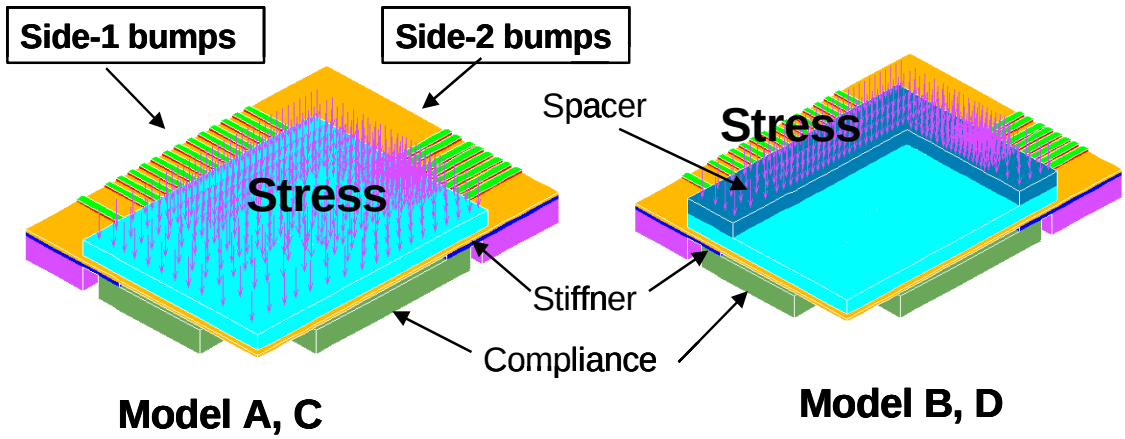
Fig.4.17 Lead pattern models of ASMAT

が確保されていた。パターン 1 では、長辺側の1本が内側を通って短辺側に配列されており、接触抵抗の測定試験ではそのリードの Bump-Z の接続性が NG であった。なお、両バンププローブカードのバンプの位置は同一で、長辺側のバンプと短辺側のバンプの合計数は 21 である。

以上のマイクロコネクター4種、ASMAT のリードパターン2種の合計8モデル（ModelA0～D0、ModelA1～D1）の組み合わせについて 3 次元応力解析を行った。解析に用いた材料物性値を Table4.2 に、また、FEM メッシュと境界条件を Fig.4.18 に示した。バンプ高さは 0.05mm で一定であるが、長辺側（side1-bump）のバンプ要素寸法は 0.1x0.1、短辺側（side2-bump）のバンプ要素寸法は 0.08x0.09 で、後者の面積は前者の約 70%である。変位境界は、対称境界部のδx ＝δy＝0、底面全体のδz＝0としている。なお、予備解析の結果、バンプとチップ界面を接触界面としても接着界面としても、バンプ応力計算値の差違は約 2%程度と微小であったので、以降は簡便な接着界面とした。チップ上面あるいはスペーサー上面に掛ける押圧は、前節と同様、式 4.1 より算出した。ただし、F=35gf/bump、n=21、A はチップ上面、あるいはスペーサー上面の面積である。

Table 4.2 Properties of materials used in this analysis

	Young's Modulus (MPa)	Poisson's ratio	Thermal expansion (ppm/℃)
Silicon chip	173000	0.28	3
Compliance	10	0.49	330
Polyimide in ASMAT	5500	0.35	18
Copper lead	12800	0.34	17
Cover polyimide	5000	0.35	21
Nickel bump	220000	0.31	13
Spacer	173000	0.35	3
Stiffner-Alloy42	204000	0.29	7



Load force

Stress = F x N / S,　F= 35gf / bump,　Number of bump = 21

S1= 7.6mm² for Model A and C,　S2=3.3mm² for Model B and D

Fig.4.18 Analytical conditions of FEM calculation

解析結果

解析モデル A0-A1、B0-B1、C0-C1、D0-D1 について、バンプ部の垂直方向の応力分布を調査した結果を Fig.4.19 に示した。長辺側バンプに較べて短辺側バンプの応力値が、全体的にやや大きくなっているのは、後者の要素面積が僅かに小さいためである。長辺側、短辺側のバンプ応力分布を個別に見ると、いずれも両端部側バンプの応力が大きく、中央側バンプでは小さくなっている。また、モデル A1 では、特に Bump-Z の応力値が最小になり、接続性が悪い実験結果をシミュレートできている。これは、リードは梁の役目をしており、パターン 0 は押し圧に対して均等に撓むのに対し、パターン 1 では Bump-Z 部分の撓みが大きくなるためと考えられる。

次に、モデル A0、B0 を比較すると、スペーサーによってチップに掛かる押圧をバンプ近傍に集中させることで、コーナ付近のバンプ応力を均一化させる効果があることが分かる。ただし、スペーサーは、モデル A1、B1 に見られるように Bump-Z の応力均一化には効果が見られない。

モデル A1 と C1、あるいは、モデル B1 と D1 を比較すると、バンプの沈降を抑制するステイフナーによって、Bump-Z の応力を均一化させる効果があることが分かる。ただし、ステイフナーはコーナ部のバンプ応力均一化には効果はないか、逆に応力差を大きくしている

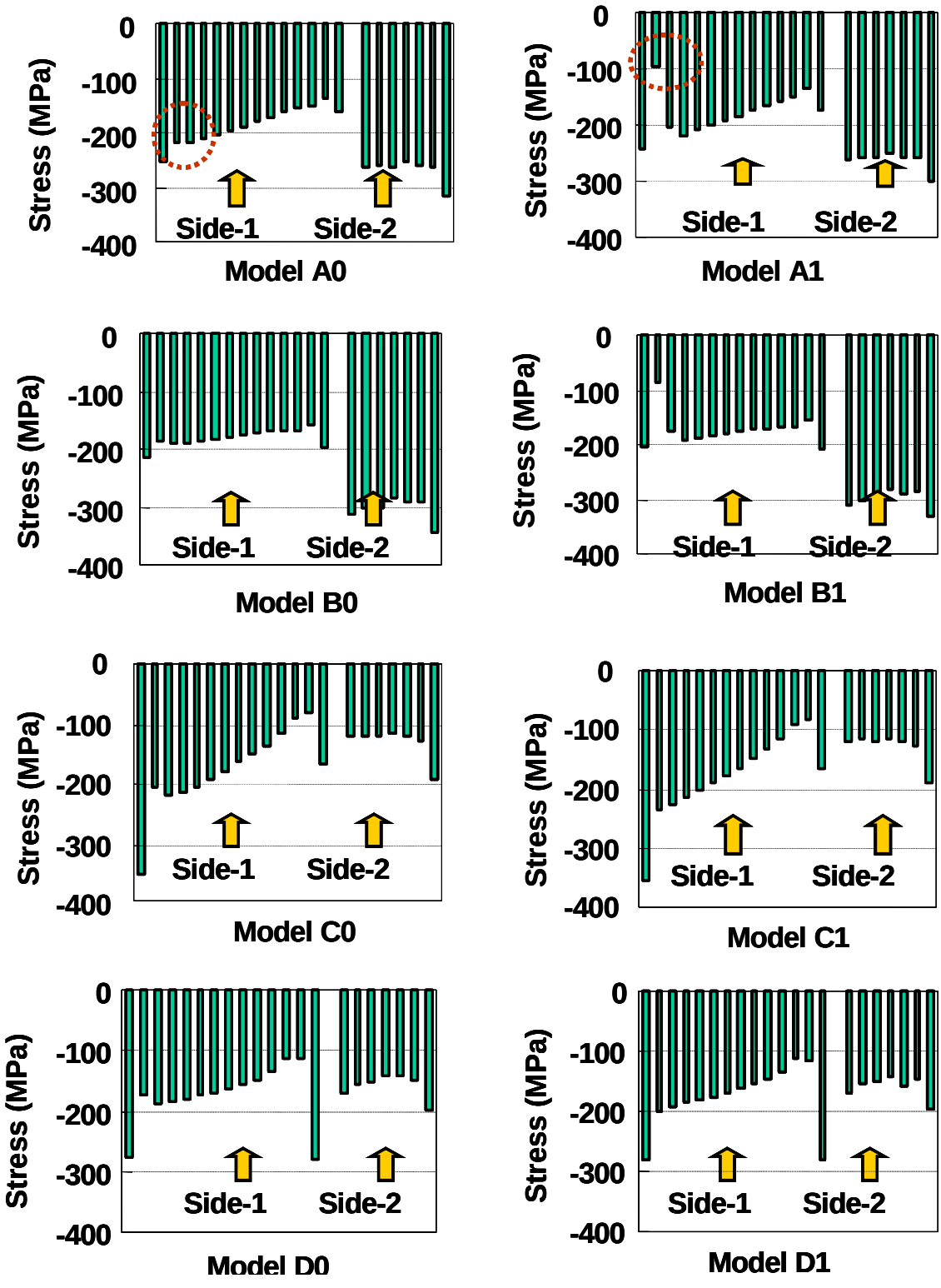


Fig.4.19 Stress distribution at bumps

以上、8 種の解析モデルについてバンプ接続信頼性をまとめると、リードパターン 0 については、スペーサーを設置することで全バンプの応力を均一化できる（Model-B0）。一方、リードパターン 1 については、スペーサーとステイフナーを設置したModel-D1 で改善されているものの満足な結果とは言えない。そこで、Model-D1 について、バンプからステイッフナー開口部までの距離δの影響をさらに調査した。長辺側と短辺側のバンプ要素サイズが完全に等しくないことから、バンプ部の応力分布の均一性を、応力値の標準偏差で評価した結果をFig.4.20 に示した。図より、距離δを 200μm～400μm程度にすることで、長辺側および短辺側バンプの応力分布は均一となり、Bump-Zの接続も可能と推察できた[13)]。

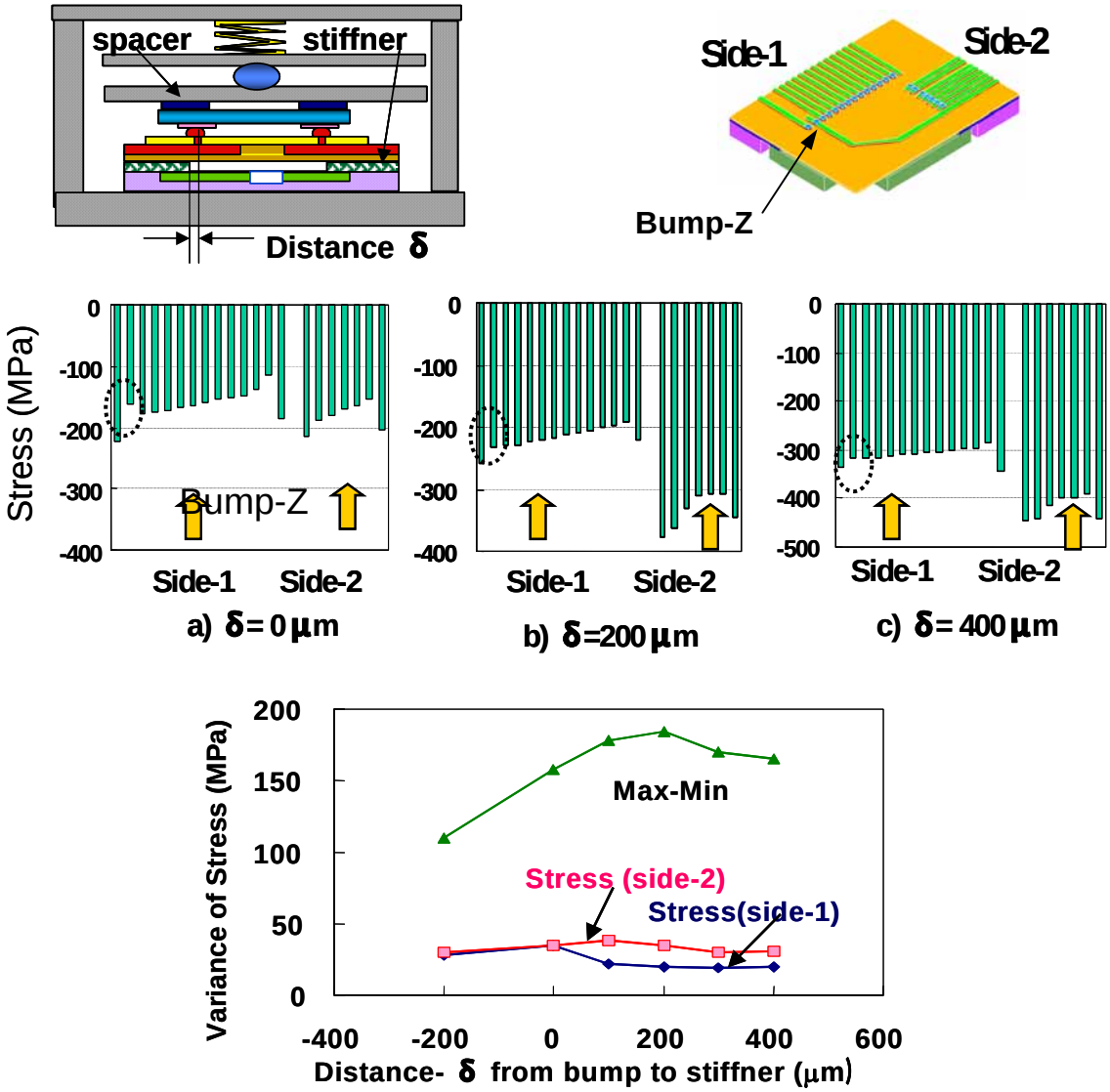


Fig.4.20 Effect of distance δ on bump contact reliability using Model D

4.4 まとめ

本章ではマイクロバンプ付き耐熱フィルムを用いた KGD 検査システムの接続信頼性を電気抵抗の測定と接触応力解析で評価した。接触抵抗と応力解析による接続性評価は、非常に良く一致した。検討したコンプライアンス材の中では、厚みの大きいシリコーンゴムが最適で、対 Au パッド、および対 Al パッドの接触抵抗は、各々20 mΩ、100 mΩと充分小さい値であった。また、バンプ高さのバラツキΔH、ピッチL、バーンインテスト温度Tの影響を解析したところ、実用レベルの押付け荷重で、ΔH は 5μm でも、L は 100μm の狭ピッチでも、また T は 150°C でも接続は可能と推定された。

さらに、実際のベアチップを用いたKGDコネクターモデルで、接続性が不安定なバンプリードパターンの影響を解析した。その結果、KGDコネクターに、1) チップに均一な押圧が掛かるスペーサーと、2) コンプライアンス材の沈降を抑制するステイフナーを適切な位置に設置することで、接続が難しかったバンプ-Zも確保できると推察できた。なお、最近、シリコン基板をマイクロマシニング技術によって、さらに信頼性の高いLSI検査プローブが開発されてきている[14)]。

第 4 章の参考文献

1) T. Corbett, ”A Process Qualification Plan for KGD ", ICEMM93 Proceedings, pp.166-171, (1993).

2) G. Cloud, T. Corbett, J. Johnson and A. Wood, " Known-Good Die: A key to Cost-effective MCMs", Electronic Packaging and Production, pp.50-51 (1992).

3) Marlene J. Begay, J. Van Zee, G. Westbrock and B. Williams, 93 ICEMM Proceeding, pp.160-165, (1993).

4) H. Kai et al., "Development of Probing Technology of High Pin Count Chip", Technical report of IEICE, ICD92-129 pp.25-30, (1992).

5) R. Roebuck, F. Agahdel & Dr. Chung Ho, " Known Good Die: A Practical Solution", ICEMM93 Proceeding, pp.177-182, (1993).

6) Y. Nakatsuka, T. Okabayashi, T. Yoshizawa and H. Kondo, " A Feasibility Study on Bonding Technique for A High-Density Interconnection System", ISHM91 Proceeding, pp.343-347, (1991).

7) Fernando J. Guarin and Kort F. Longenbach, "Contact Resistance Degradation in Z-Axis connectors Operated at Burn-In Temperatures", CHMT93 Proceeding, pp.88-92, (1993).

8) B. Beaman, D. Y. Shih and G. Walker, "A New Direction for Elastomeric Connectors ", CHMT93 Proceeding, pp.436-440, (1993).

9) M. Sugimoto, Kazuya Takayama, Amane Mochizuki, Atsushi Hino, Kazuo Oouchi, ”Ultra High Density Anisotropic Conductive Film", Nitto Technical Report, vol.30 (1), pp.45-47, (1992).

10) Yasuhiko Yamamoto, Masakazu Sugimoto, Kiyoshi Miyake, "Evaluation of New Micro-connection System Using Microbumps", ISHM93 Proceeding, pp.370-378, (1993).

11) Kiyoshi Miyake, Yasuhiko Yamamoto and Masakazu Sugimoto,” Connectivity Analysis of New 'Known Good Die' Connection System Using Microbumps”, IMC94, pp.156-161, (1994).

12)) Yasuhiko Yamamoto, Masakazu Sugimoto, Kiyoshi Miyake, Yoshihisa Mori and Ronald Blankenhorn, “Evaluation of new micro-connection system using micro-bumps”, International Journal of microcircuit and electronic packaging, Vol.17, No.17, pp.259-271, (1994).

13) 特開 2000-002746, “プローブ構造”.

14) 河野竜治, 金丸昌敏ほか, ”Si マイクロマシニング技術を応用した LSI 検査プローブ“, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.6, (2), pp.147-152, (2003).