



Title	低誘電率絶縁膜デバイスの超微細ピッチ接合法における接合部および下部配線層の応力低減に関する研究
Author(s)	久田, 隆史
Citation	大阪大学, 2014, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/34464
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

低誘電率絶縁膜デバイスの超微細ピッチ接合法における
接合部および下部配線層の応力低減に関する研究

久田 隆史

2013 年 12 月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 半導体素子の高集積化・高速化	1
1.1.2 半導体製品の多ピン化・高密度化	2
1.2 半導体素子の高速化に伴う層間絶縁膜の変遷	4
1.3 チップの外部端子接続技術の動向	6
1.3.1 ワイヤボンディング	6
1.3.2 フリップチップボンディング	7
1.4 配線層ダメージの課題と研究目的	9
1.4.1 ワイヤボンディングにおける外部端子接続時の接合荷重・超音波印加による層間絶縁膜の破壊	9
1.4.2 フリップチップボンディングにおける外部端子接続時のチップと基板の熱応力による層間絶縁膜の破壊	10
(1) 低温はんだによる応力低減	10
(2) 貫通電極を有するインターポーザ上に複数チップを搭載するパッケージにおける応力場の解析	12
1.5 研究の構成と流れ	14
第2章 ワイヤボンディングにおける下部配線層構造最適化による配線層ダメージの低減	16
2.1 緒言	16
2.2 パッド下部配線構造の複合弾性率の導出	16
2.3 外部端子接続時の配線層に生じる応力場の解明	20
2.3.1 FEM 解析モデル	20
2.3.2 外部端子接続時の荷重によって配線層に生じる応力の解析	21
2.3.3 外部端子接続時の超音波印加によって配線層に生じる応力の解析	25
2.4 ワイヤプル試験におけるパッドはがれ発生率と配線層の応力の相関の解明	37
2.4.1 ワイヤボンディング実験	37
2.4.2 パッド下部配線構造と配線層ダメージの関係	38
2.4.3 パッド下部配線構造の複合弾性率と線層ダメージの関係	39
2.5 結言	40
第3章 フリップチップ接合用材料の機械的特性がフリップチップのパッド下部配線層の熱応力に与える影響	41
3.1 緒言	41

3.2	はんだ微細試験片による引張試験	41
3.2.1	試験方法	41
3.2.2	組織観察	42
3.2.3	引張試験結果	42
3.2.4	クリープ特性	47
3.3	フリップチップ接合の冷却時の応力場の解明	49
3.3.1	FEM 解析モデル	49
3.3.2	解析結果	52
3.4	結言	54
第4章	貫通電極を有するインターポーザ上に複数チップを搭載するパッケージの マイクロ接合部およびチップ下部配線層の応力低減	55
4.1	緒言	55
4.2	インターポーザ上に複数チップを平面配置するパッケージと MCM FCPBGA の 熱機械的解析	56
4.2.1	インターポーザ上に複数チップを平面配置するパッケージと MCM FCPBGA の 設計検討	56
4.2.2	FEM 解析モデル	62
4.2.3	インターポーザの機械特性による応力・反りへの影響	64
4.2.4	チップ・インターポーザの接合順序とインターポーザ厚みによる応力への影響	70
4.3	インターポーザ上に複数チップを積層するパッケージの熱機械的解析	80
4.3.1	FEM 解析モデル	80
4.3.2	トップチップの厚みとインターポーザの厚みによる接合部応力・ チップ反りへの影響	84
4.3.3	ミドルチップの積層数・インターポーザの厚みおよび接合部の機械特性による 接合部応力・チップ反りへの影響	87
4.4	結言	91
第5章	結論	94
	謝辞	97
	参考文献	98
I.	本研究に関する発表論文	105
II.	本研究に関する学会発表	105

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 半導体素子の高集積化・高速化

トランジスタの発明に始まる半導体素子は、素子プロセスの微細化を推し進めることで、集積回路 (IC: Integrated Circuit)、大規模集積回路 (LSI: Large-scale Integration)、超大規模集積回路 (VLSI: Very Large Scale Integration) と集積度を高め続けてきた。半導体素子の黎明期から現在に至るまで、バイポーラから CMOS への転換など大きな技術的革新を伴いながらも、主に素子サイズの微細化が高速化・高性能化を牽引してきた¹⁻³⁾。このことは有名なムーアの法則^{4,5)}として、その内容は多少の変遷があるものの現在では一般的に“集積回路上のトランジスタ数は18ヶ月ごとに倍になる”と要約される。ムーアの法則を実現すべく策定されてきた半導体技術のロードマップ⁶⁾は半導体技術の研究開発の指針として関連する材料技術、プロセス技術、解析技術、設計技術などの発展に大きな役割を果たしてきた。2000年前後からは微細化による様々な物理制約が顕現するようになり、配線抵抗を低減するためのCu配線⁷⁾、Siサブストレートとの浮遊容量を低減するSOI (Silicon on Insulator)⁸⁾、電子移動度を高める歪Si⁹⁾、配線層の寄生容量を低減する低誘電率のLow-k/Ultra low-k (ULK) 絶縁膜¹⁰⁻¹²⁾、ゲート酸化膜からのリーク電流を低減するHigh-kメタルゲート¹³⁾などの新技术が微細化と共に導入されてきた。2010年にIBMが発表したPOWER7プロセッサ¹⁴⁾では45nmのテクノロジ・ノードでSOI・Cu配線・Low-k/ULK絶縁膜を用いて567mm²のチップに12億個のトランジスタが集積されている。Fig. 1.1はPOWER7のチップの写真であり、図中には各機能ブロックを示した。

本研究では、パッケージとの接続を行うチップ上の外部接続端子の下部構造で破断等の故障を起こしやすいLow-k/ULKを用いたデバイスを研究対象とする。配線層の層間絶縁膜については後で詳述する。

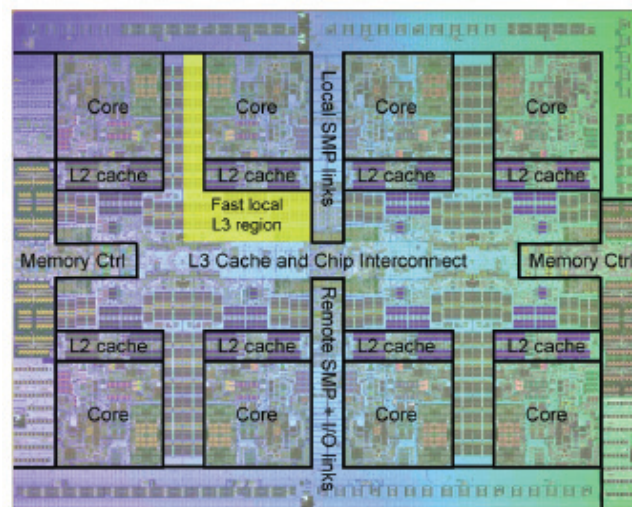


Fig. 1.1 The photograph of the IBM POWER7 chip¹⁴⁾.

1.1.2 半導体製品の多ピン化・高密度化

半導体素子の高集積化・高速化に伴い、メモリのバス幅の拡大や多様な外部インターフェースの拡張が行われ、モバイル向け半導体からハイエンドサーバー向け半導体まであらゆる製品セグメントでパッケージの入出力端子の多ピン化が進められてきており、その傾向は今後も続くものと予想されている^{6, 15)}。Fig. 1.2 は筆者が 2013 年度版日本実装技術ロードマップ¹⁵⁾の数値をもとに作成したグラフであり、各製品セグメントごとのパッケージの最大端子数のロードマップを示している。サーバー向けプロセッサなどの高性能製品は、最大端子数が 2012 年に 4600 であるのに対し 2022 年には 5500 まで増加すると予測されている。携帯電子機器製品においても 2012 年の 1360 ピンから 2022 年の 1900 ピンに大きく端子数の増加が見込まれている。Wide I/O メモリ¹⁶⁾は 2016 年から 2018 年の間でバス幅の拡大によって大きくピン数が増えることが予想されている。また、他の製品セグメントでも上記の製品セグメントほどではないがピン数は増えるものと考えられている。一般的に端子数が 1000 ピン以上の製品ではチップ接合技術としてフリップチップボンディングが多く用いられ、低価格で 1000 ピン以下の半導体にはワイヤボンディングが多く用いられてきた。後述するように、ピン数の増加に伴ってチップ上の接続端子のピッチは微細化が進むことになる。

本研究では、ワイヤボンディング、フリップチップボンディングを用いたパッケージを研究対象とする。Fig. 1.3 は PBGA (Plastic Ball Grid Array) の断面図である。有機基板上にチップをダイアタッチ材で接着し、チップ上の外部接続端子と基板上の接続端子をワイヤボンディングで結線した後に、モールド封止、BGA ボール付けを行う。Fig. 1.4 は FCPBGA (Flip Chip Plastic Ball Grid Array) の断面図である。チップ回路面に形成されたバンプを有機基板上の接続端子に接続し、バンプ接続部を保護する

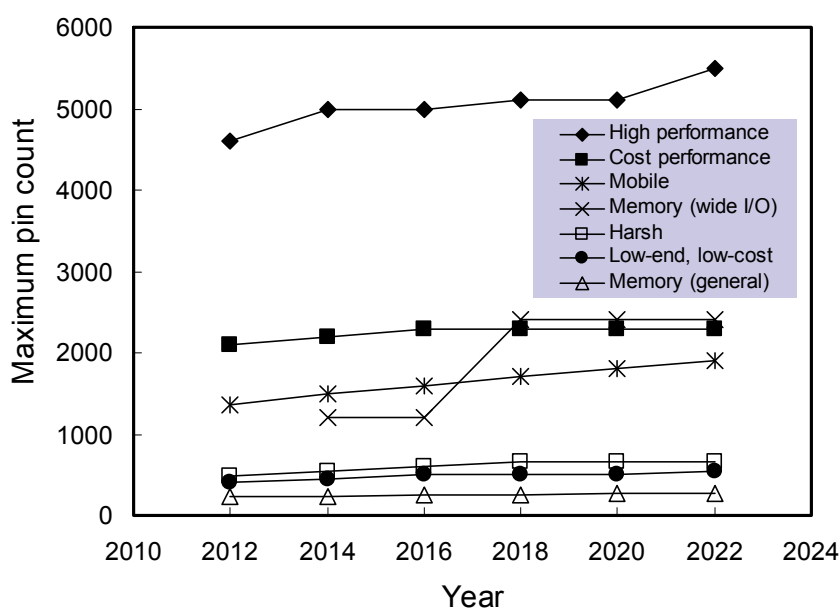


Fig. 1.2 Roadmap of maximum pin count by product segment¹⁵⁾.

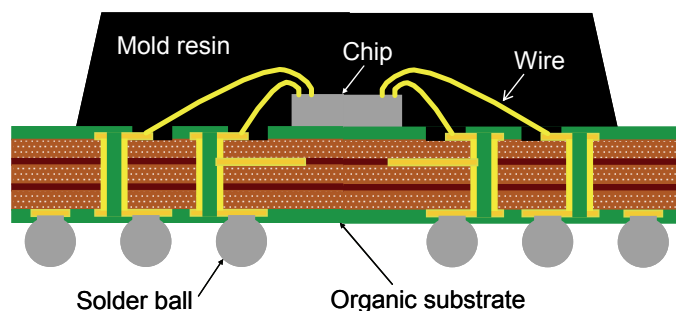


Fig. 1.3 Schematic cross-section of PBGA.

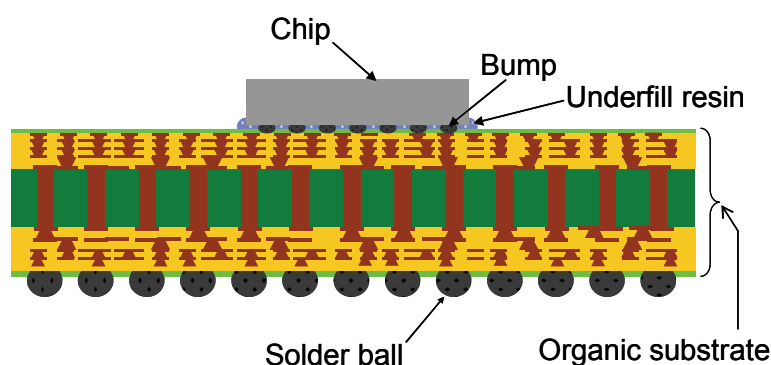


Fig. 1.4 Schematic cross-section of FCPBGA.

ためのアンダーフィル材をチップと基板間に塗布する．Fig. 1.4 には封止材のない構成を示したが，チップ裏面に TIM (Thermal Interface Material) を介して金属製のふたを取り付けて封止するパッケージ形態が使われることも多い．

FCPBGA は高性能品に使用されてきたが，有機基板上の配線幅が $10\ \mu\text{m}$ 以上であり今後も配線幅の微細化は見込まれているが^{6,15)}，高集積化の進む半導体素子の性能を十分に活用できなくなりつつある．このため， $2\sim3\ \mu\text{m}$ 以下の微細配線を形成でき，貫通電極を有するシリコン・インターポーザやガラス・インターポーザなどを有機基板上に搭載し，そのインターポーザ上に複数チップを搭載することでチップ間の配線距離を短くし，高性能化と高密度化を図る 2.5D と呼ばれるパッケージ形態の研究開発が活発に行われてきた¹⁷⁻²⁷⁾．2.5D パッケージは Xilinx により FPGA (Field Programmable Gate Array) への応用が 2011 年に発表された²⁸⁾．また複数チップを積層し，TSV (Through Silicon Via) を介してチップ間の伝送経路を形成する 3D-IC パッケージも JEDEC (JEDEC Solid State Technology Association) による Wide I/O メモリの MPGA (Micropillar Grid Array Package) の標準策定²⁹⁾，Micron による HMC (Hybrid Memory Cube) の発表³⁰⁾，Altera と TSMC によるヘテロジニアス 3D-IC の試作品開発の発表³¹⁾などで本格的な普及への期待が高まっている．本研究では，有機基板とインターポーザ，インターポーザとチップ，チップとチップの各積層面で多くのマイクロ接合を有する 2.5D および 3D-IC パッケージも研究対象とする．Fig. 1.5 は 2.5D パッケージの断面図で，有機基板上にインターポーザを搭載し，その

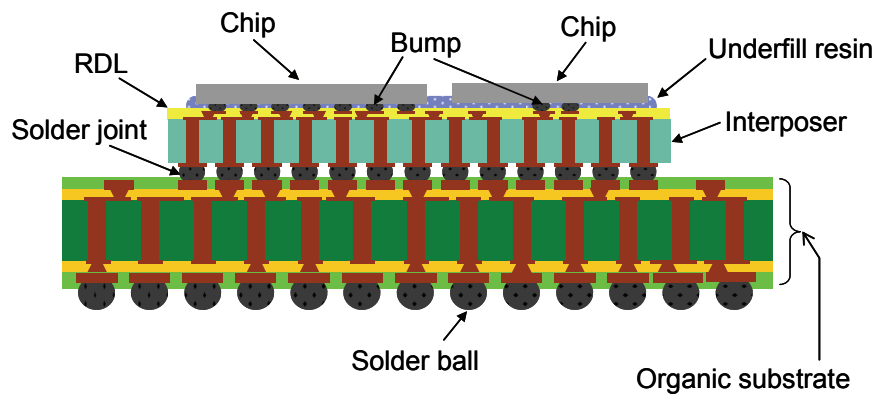


Fig. 1.5 Schematic cross-section of 2.5D package.

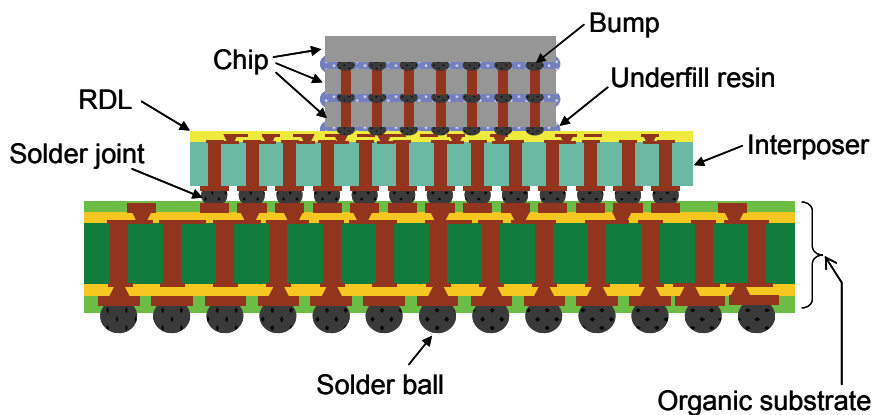


Fig. 1.6 Schematic cross-section of 3D-IC package.

上に複数チップを平置きで搭載する．インターポーザ上には図に示す RDL (Re-distribution Layer) と呼ばれるポリイミドを絶縁層にした再配線層を形成する場合と，Si インターポーザの場合には半導体の後工程と同じ配線プロセスを使って配線層を形成する場合がある．またインターポーザはチップ接続面と基板接続面をつなぐ貫通穴が形成されている．Fig. 1.6 に示す 3D-IC パッケージではチップは積層して接続される．最上部のチップとインターポーザの間に置かれる中間のチップには貫通穴を設け上下の伝送経路とし，他の構成は 2.5D パッケージと同様である．

1.2 半導体素子の高速化に伴う層間絶縁膜の変遷

半導体集積回路の高性能化はトランジスタ素子の微細化により実現されてきた．素子の微細化・高集積化に合わせてメタル配線の微細化も進められてきたが，配線層の微細化が進むとメタル配線層での RC (Resistive-Capacitive) 遅延が高速動作を実現する上での課題となってくる．これに対してメタル配線の材料を Al から Cu に変更して配線抵抗を低減する技術開発^{1-3, 7)}と層間絶縁膜の誘電率を低減する技術開発^{1-3, 10-12)}が行われてきた．Fig. 1.7 は半導体のテクノロジー・ノードと配線層における新技術導入の概念図である．横軸にテクノロジー・ノードを取り，縦軸は性能を目安として示す．180 nm の世代で Cu 配線の導入が始まり，130 nm の世代で SiO₂ に F を添加して比誘電率を 3.6 程度に下げた FTEOS (Fluorinated Tetraethyl Orthosilicate, SiOF)^{2, 32, 33)} が配線層の絶縁膜として適用され，その後 Low-k 材，

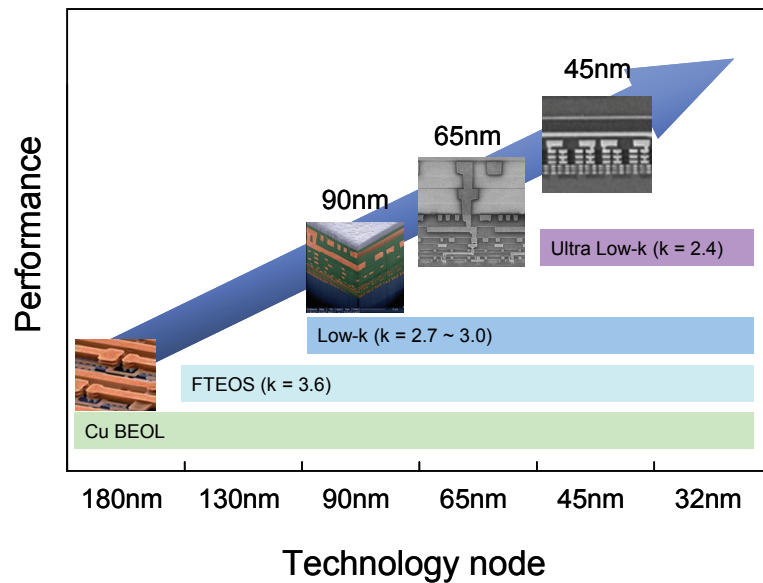


Fig. 1.7 Conceptual chart for innovations in the back-end-of-line (BEOL) layers.

Table 1.1 Material properties of dielectric films.

	SiO ₂	FTEOS	Low-k (SiCOH)	ULK (porus SiCOH)
Dielectric constant	4.1	3.6	2.7~3.0	2.4
Elastic modulus (GPa)	70	66	9.0	4.6
Poisson's ratio	0.20	0.18	0.28	0.28
CTE (ppm/°C)	0.7	0.57	16.4	14

ULK 材の導入が進んできた。Low-k 材は SiO₂ に C を添加した SiOC や SiCOH などが使われ^{2, 32-34)}，一般的に比誘電率が 3.0 以下のものを指す。ULK 材は SiOC や SiCOH を多孔質化したポーラス SiOC やポーラス SiCOH などが用いられ^{2, 12, 34-36)}，一般的に比誘電率が 2.5 以下のものを指す。

Table 1.1 に本研究で解析に用いた層間絶縁膜の材料特性を示す。比誘電率の小さい層間絶縁膜は弾性率が小さくなる傾向があり，Low-k 材，ULK 材は SiO₂ に比べて線膨張係数(CTE: Coefficient of Thermal Expansion) が一桁大きい。また層間絶縁膜の機械的強度に関しては標準化された測定手法が確立されておらず比較可能な数値が整理されていないが，低誘電率化は空孔率を高めることが主たる方法であり，空孔率を高めると弾性率と機械的強度が低下すると考えられている^{33, 36)}。

半導体デバイスの配線層の断面図の一例を Fig. 1.8 に示す。ここでは 1x, 2x, 8x 層の各層の積層数を使って(a) 5-2-1, (b) 5-2-2 と表記した 2 つの異なる構造を示している。層構成はシリコン基板の上に low-k, ULK, FTEOS, SiO₂, Al パッドの順で積層されたものである。1x と示した層は最も微細な配線ルールを適用する配線層で最下層に low-k 材，その上の 4 層に ULK 材を適用する。2x と 8x の層はそれぞれ 1x の 2 倍と 8 倍の配線ルールを適用すると仮定し，2x 層に ULK，8x 層に FTEOS を用いる。本稿では 1x 層を 5 層・2x 層を 2 層・8x 層を 1 層積層した構成を 5-2-1 と表記し，1x 層を 5 層・2x 層

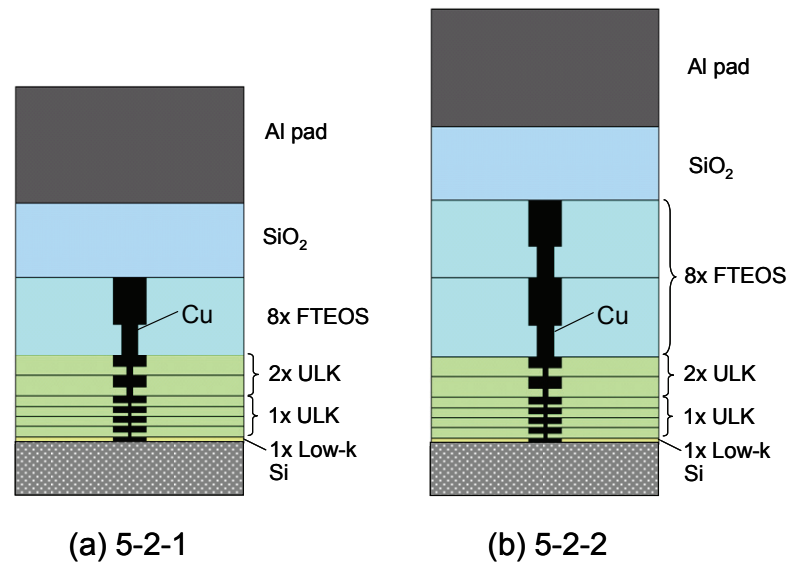


Fig. 1.8 Cross-sections of film stacks in the back-end-of-line layers (a) 5-2-1 and (b) 5-2-2.

を 2 層・8x 層を 2 層積層した構成を 5-2-2 と表記する．一般的にシリコンサブストレート直上はローカル配線のために微細な配線ルールを適用し，Al パッドに近い上部の配線層はグローバル配線のために緩い配線ルールを適用する．図中ではおおよその配線ルールの倍数を用いて最も微細な配線層を 1x とし，その約 2 倍のルールの配線層を 2x，約 8 倍のルールの配線層を 8x と記している．この例では 1x および 2x の層に RC 遅延を低減するため Low-k あるいは ULK の低誘電率絶縁膜を用いている．先端テクノロジーのデバイスでは導電材料に Cu を用い，デュアルダマシンのメッキ工法で Cu 配線を形成する．ワイヤボンド部やフリップチップ接合部のパッド下部も有効な配線エリアとして配線パターンを形成するのが一般的である．配線層の積層数や配線パターンは多様な組み合わせが可能で，デバイスの性能仕様やコスト目標などに応じて選択する．ワイヤボンド部あるいはフリップチップ接合部のボンドパッド下部構造全体の機械的特性は，配線層の積層構造や配線パターンに影響される．外部端子接続時にパッド下部で破壊が発生しないようにすることは重要な設計要件である．

1.3 チップの外部端子接続技術の動向

1.3.1 ワイヤボンディング

ワイヤボンディングはチップの外部端子接続技術として最も普及した技術であり様々なタイプのパッケージで用いられてきた．チップの高集積化によって多ピン化の進展してきたロジック半導体においてはボンドパッド(接続端子)ピッチの微細化が大きな技術トレンドであった．1990 年代には 100 μm ピッチの壁を越えるべく技術開発が進められていたが³⁷⁾，2000 年代以降も 100 μm 以下の技術開発が進み³⁸⁻⁴⁰⁾，現在では 35 μm ピッチの技術確立がなされている¹⁵⁾．ワイヤボンディングの微細化には，ボンディング時の超音波の高周波化^{41, 42)}，微小ボール形成時の形状安定化^{43, 44)}，細線でのループ形状の安定化⁴⁵⁾，パッド上のプローブマークの影響の最小化⁴⁶⁻⁴⁹⁾ など様々な取り組みが行われてきた．低コストのフリップチップパッケージの普及に伴い，ワイヤボンドパッケージのピン数は大きな伸びは

見込まれておらず、今後のパッドピッチの微細化は 2022 年でも 30 μm と考えられている¹⁵⁾。近年では先端テクノロジーの Low-k/ULK デバイス上でのワイヤボンディングの研究開発が活発に行われており、その課題については次節で述べる。

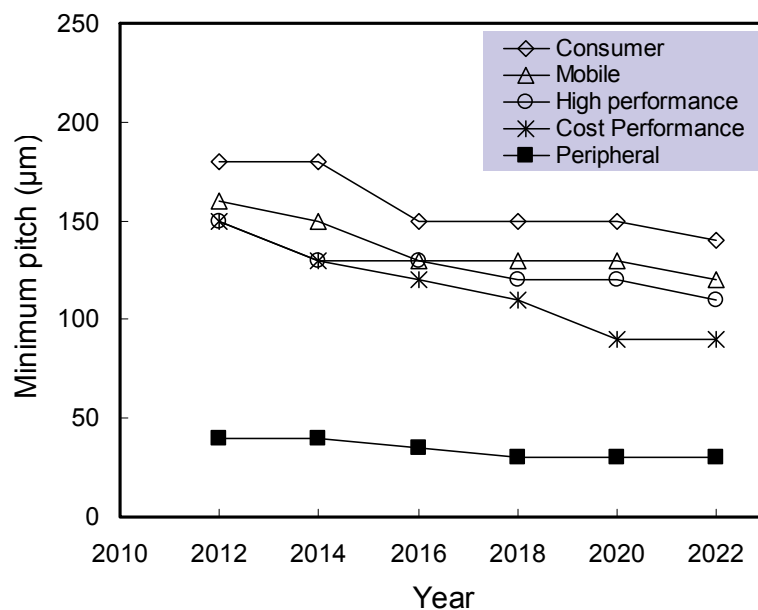
1.3.2 フリップチップボンディング

フリップチップボンディングによるチップ接続技術は 1960 年代に IBM によってメインフレームコンピュータ向けに商業生産されたのを初めとし、主に高性能コンピュータ向けの半導体で長年に渡って使用されてきた。開発当初はチップ上に形成されるバンプには、はんだめっきされた銅コアが用いられていたが、1970 年代初頭には Pb が 95% 以上の高融点はんだが使われるようになった⁵⁰⁻⁵²⁾。はんだバンプを持つチップをリフローを用いてフリップチップボンディングで接続する技術は C4 (Controlled Collapse Chip Connection) と呼ばれ、現在でもこの呼称は広く使われている。チップを接続する基板は長年セラミックが使われてきたが、感光性ポリイミドを用いてフォトビアを形成したビルドアップ基板にフリップチップボンディングを行う技術が 1992 年に開発された^{53, 54)}。有機材料を使うビルドアップ基板は Cu 配線などとの複合材として線膨張係数が 17 ppm/°C 程度であり 8 ppm/°C 程度のアルミナセラミック基板と比べると、3 ppm/°C の Si チップとの線膨張係数のミスマッチが大きくなる。このためビルドアップ基板上のフリップチップボンディングでは接合部を保護するためチップと基板間にアンダーフィル樹脂を用いる手法が採られた。現在ではフォトビアよりも信頼性に優れるレーザービアを用いたビルドアップ基板が主流になっている⁵⁵⁾。山中らは、15 mm 角で 0.15 mm 厚のチップと Sn-2.5Ag はんだを用いて 0.30 mm 厚の基板に 100 μm ピッチのフリップチップボンディングを行うと、基板の線膨張係数が 3 ppm/°C, 8 ppm/°C, 15 ppm/°C の場合、接合部の歪がそれぞれ約 0.7%, 約 1.0%, 約 2.0% であり、微細ピッチのフリップチップボンディングには低線膨張係数基板が重要であることを示した⁵⁶⁾。2013 年度版日本実装ロードマップでは、ビルドアップ基板のコア材、ビルドアップ材それぞれに低線膨張係数化の要求があることを示している¹⁵⁾。一例を挙げるとコストパフォーマンス電子機器向けビルドアップ基板では、コア材で 2012 年の 8 ppm/°C に対して 2022 年では 6 ppm/°C が、またビルドアップ材では 2012 年の 45 ppm/°C に対して 2022 年では 20 ppm/°C の線膨張係数 (X-Y) が求められている。

2006 年 7 月に施工された RoHS (特定有害物質使用規制) によって鉛の使用が規制されることになり、接合材であるはんだは鉛フリーはんだへの移行が進んできた^{57, 58)}。フリップチップボンディングに関する鉛の使用は規制の適用除外が続いている⁵⁹⁾ が大型チップでも鉛フリーはんだでの技術確立が進んできている^{60, 61)}。ビルドアップ基板でのフリップチップボンディングで鉛入りはんだを用いる場合には、バンプに鉛が 95wt% 以上の高融点はんだと基板上のプリソルダに Sn-37Pb 共晶はんだを使うのが代表的である。鉛フリーはんだを用いる場合は、Sn と数 wt%Ag の組成のバンプと SnAgCu (SAC) のプリソルダを使うのが代表的である。Table 1.2 に鉛入りおよび鉛フリーはんだの融点とヤング率を示す。鉛入りはんだでフリップチップボンディングを行う場合、プリソルダの SnPb 共晶はんだの融点である 183°C 近辺が凝固点となるが、鉛フリーはんだの場合には凝固点が 220°C 近辺と約 40°C 高くなる。また鉛入りはんだでの接合部は高融点はんだの特性が支配的となり、鉛フリーはんだの接合部の

Table 1.2 Material properties of solders ⁶²⁾.

	Melting temperature (°C)	Young's modulus (GPa)
Sn-95Pb	300	18.4
Sn-37Pb	183	31.7
Sn-3Ag	221	42.0
Sn-3Ag-0.5Cu	217	41.6

Fig. 1.9 Roadmap of maximum pin count by product segment ¹⁵⁾.

ヤング率は鉛入りはんだの接合部に比べて約2倍高くなると考えられる。さらに高融点はんだはPbの延性が高い。このため鉛フリーはんだでビルドアップ基板を用いてフリップチップボンディングを行うとチップと基板の線膨張係数のミスマッチにより接合部周辺の熱応力が、鉛入りはんだの場合に比べて高くなる。

Fig. 1.9 は筆者が2013年度版日本実装技術ロードマップ ¹⁵⁾ の数値をもとに作成したグラフであり、各製品セグメントごとのフリップチップボンディングの最小パッドピッチのロードマップを示している。低価格民生品、携帯電子機器、コストパフォーマンス、高性能の各カテゴリーはエリアレイを想定している。2012年では低価格民生品、携帯電子機器、コストパフォーマンス、高性能の各カテゴリーで、最小パッドピッチはそれぞれ180 μm, 160 μm, 150 μm, 150 μmである。これらは今後も微細化が進み、2022年にはコストパフォーマンスで90 μmピッチにまで縮小される見込みである。先に述べた山中らの解析では100 μmピッチのフリップチップボンディングで、基板の線膨張係数が15 ppm/°Cの場合、接合部の歪が約2.0%であると報告されており、さらにピッチが50 μmに微細化されると接合部の歪は約3.5%まで大きくなることが示されている ⁵⁶⁾。フリップチップボンディングの微細化に伴い今後も接合部の歪・熱応力は増大するものと考えられる。Fig. 9中のペリフェラルはパッドがチップ周

辺に配置されたものである。現在でも最小ピッチ 40 μm が実現されており、2022 年には 30 μm まで微細化が進むと考えられている。ペリフェラルのフリップチップボンディングは、特に日本において携帯電話やデジタルカメラなどに搭載される薄型パッケージ向けで Au スタッドバンプによる Au-はんだ接合^{63, 64)}などが使われてきた。近年では接合信頼性や耐エレクトロマイグレーション性に優れる Cu ピラーを用いたフリップチップボンディング技術が開発され^{65, 66)}、モバイル製品のアプリケーションプロセッサなどで量産されている。また Cu ピラーはシングルチップパッケージのみならず、2.5D パッケージや 3D-IC パッケージでチップとインターポーザあるいはチップとチップを微細ピッチで接合する際の重要な技術と考えられている。

1.4 配線層ダメージの課題と研究目的

Low-k や ULK を用いたチップ配線層の層間絶縁膜の機械的強度が低く、パッケージング工程中、パッケージング後の 2 次実装中あるいは製品使用時にパッケージからかかる応力によってチップ内部のメタル配線層が破断する課題がある。Low-k/ULK デバイスは、デバイス単体では正常に機能するように製造されていてもパッケージに組み込むと、特に端子接続部において、パッケージからの機械的応力によってデバイス内部に破壊を起こし正常な機能を失うことがある。これはチップとパッケージの相互作用(CPI: Chip-package interaction)の問題として Low-k/ULK 世代のデバイスで顕在化している⁶⁷⁻⁷⁰⁾。本研究の目的は、ワイヤボンディングとフリップチップボンディングのそれぞれの接合技術において、接合後の初期製造品質で問題となるクラックやダメージの原因となるチップ配線層および接合部の応力に着目し、この応力に影響を与える因子を調べ、応力低減を実現する手法を求めることである。

1.4.1 ワイヤボンディングにおける外部端子接続時の接合荷重・超音波印加による層間絶縁膜の破壊

チップ側の接合は最大 1%程度の Si あるいは Cu を添加した Al パッド上にボールボンドで行われる。Al パッド表面には不動態の酸化膜が形成されるため超音波併用の熱圧着方式が用いられている。ワイヤ先端に放電による熔融で形成されたボールはキャピラリによってパッドに圧着され、ボールの塑性変形と超音波印加によって酸化膜を破り Al の新生面と接合を形成する。ボールボンドにおけるボールの塑性変形挙動や接合の形成メカニズムはボールボンドのプロセス安定性、信頼性の確保に重要であり、詳細な研究報告がなされてきた^{71, 72)}。

ワイヤボンディングによる Low-k/ULK チップのパッド下部配線層の破壊はボンディング時の荷重・超音波印加によって起こると考えられており、ボールボンド後のルーピング中にパッドが剥がれる、ワイヤプル試験でパッドが剥がれる破断モードで十分な強度が得られない、信頼性試験で配線が破断するといった問題となる⁷³⁻⁷⁶⁾。ワイヤボンド部の接合強度を測定する試験としては Fig. 1.10 に示すワイヤプル試験が広く用いられている。ワイヤプル試験は本来はルーピングされたワイヤの強度を測定する試験で、Fig. 1.11 (a) に示すワイヤのネック部での破断が正常モードとなる。Low-k/ULK 配線膜を用いたデバイスでボンディング時にパッド下部配線層にダメージがある場合、Fig. 1.11 (b) に示すようにボールボンドされたパッドの下の配線層から剥れるモードが発生する。

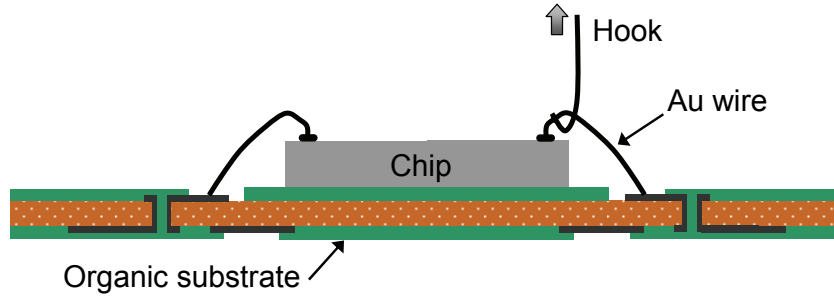


Fig. 1.10 Wire pull test.

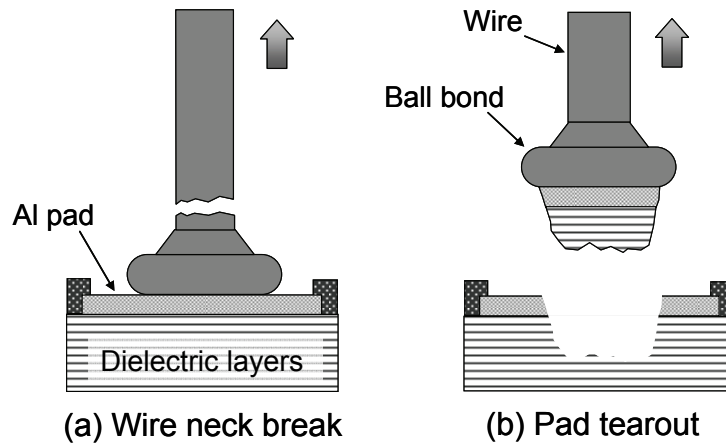


Fig. 1.11 Breakage modes in wire pull testing (a) wire neck break and (b) pad tearout.

ワイヤボンディングによって Low-k/ULK 層で剥がれが発生する現象については、ワイヤの機械的特性の影響⁷⁴⁾、ボンディング条件による影響⁷⁷⁾を調べた実験的解析やパッド下部配線構造の影響を調べた数値解析⁷⁸⁻⁸⁰⁾など多数の報告がなされている。本研究においては、デバイスの配線層の構造パラメータ（絶縁膜積層数、絶縁膜厚み、配線パターン）を変動させた場合の複合特性を求め、ワイヤボンディングのプロセス条件下（ボンド荷重、超音波振動印加）で、Low-k/ULK 層内に発生する応力場がいかに変動するかを FEM (Finite Element Method) を用いて調べた。また、配線層の構造パラメータを変動させたときの応力とワイヤボンディング実験から求めたパッド剥がれ発生率の相関を求め、ワイヤボンディングにおいて配線層内の応力低減を実現する配線層構造の条件を求めた。

1.4.2 フリップチップボンディングにおける外部端子接続時のチップと基板の熱応力による層間絶縁膜の破壊

(1) 低融点はんだによる応力低減

FCPBGA パッケージにおいて、チップ接合はチップキャリア基板上の電極にプリソルダおよびフラックスを塗布した後にチップを搭載しリフローではんだ接合を行う方式が主流となっている。デバイスの絶縁膜の Low-k/ULK 化と鉛フリーはんだによる接合温度の高温化により、Fig. 1.12 に示すようにシリコンチップと基板の線膨張係数の差に起因するパッド下部への熱機械的応力によって、特に、チ

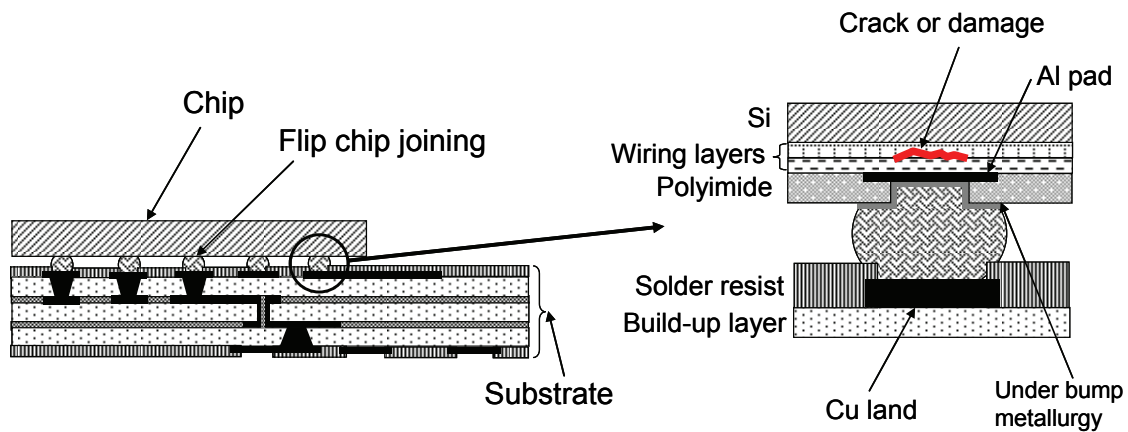


Fig. 1.12 Schematic diagram of damage in ULK dielectric layer under the pad.

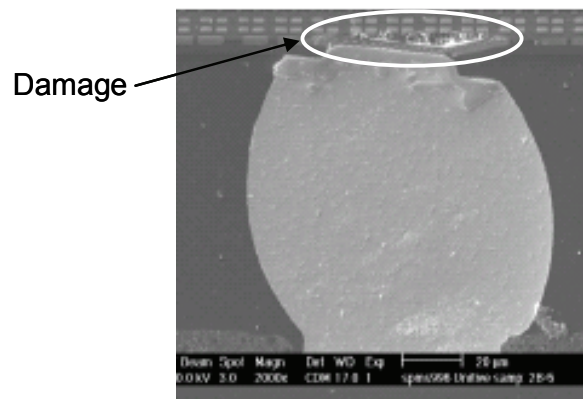


Fig. 1.13 Cross section photograph of flip chip joint and damage in ULK layer.

チップコーナー部のパッド下部配線層にクラック、ダメージが発生する問題が顕在化する。これは超音波顕微鏡でチップ裏面から観察すると白いスポットとなるため、ホワイトバンプと呼ばれており⁵⁰⁾、パッド下部配線構造の影響^{81, 82)}、チップサイズと冷却時のチップ温度の不均一性の影響⁸³⁾、チップキャリア基板の機械特性の影響⁸⁴⁾、基板上のパッドの組成と接合部の Sn の過冷却の影響⁸⁵⁾などの様々な解析が報告されてきた。Fig. 1.13 にフリップチップボンディング後のパッド下部 Low-k/ULK 層に発生したダメージの断面写真を示す。写真の上部はチップであり、下部が基板である。チップ側のボンダパッドの下（写真では上側）の配線層にダメージが見られる。

フリップチップボンディングにおけるチップとパッケージの相互作用の問題を低減するためには、従来の FCPBGA のプロセスでのフリップチップボンディングのパラメータ最適化などに加えて以下のような方式も検討されてきた。

- 熱機械的応力の原因であるチップと基板の線膨張係数のミスマッチを小さくするために基板の線膨張係数を下げる⁵⁶⁾。
- フリップチップボンディング後のフラックス洗浄の不要な無洗浄フラックスを用いて、フリップ

チップボンディング後に高温保持したままアンダーフィルを塗布・硬化し、室温まで冷却することなく接合部周りの保護を行う⁸⁶⁾。

- チップあるいは基板上にアンダーフィルを先塗りして、フリップチップボンディングとアンダーフィル塗布を同時に行い、室温まで冷却することなく接合部周りの保護を行う⁸⁷⁾。
- 低融点はんだを用いて接合温度を下げ、接合温度と室温の温度差を小さくすることで熱機械的応力の低減を図る⁸⁸⁾。

上記の Low-k/ULK チップの配線層の応力低減手法の中から、本研究では低温はんだによる応力低減を取り上げた。低融点はんだは環境負荷低減の観点からも注目され Sn-Bi 系や In 系など各種組成で広範な研究が進められている^{89, 90)}。現在多く使われている SnAg はんだバンプと SnAgCu プリソルダのチップ接合では、過冷却を考慮しなければ接合温度が 220°C 近辺であり、低融点はんだによって 140~150°C 程度に接合温度を下げるとチップと基板の線膨張係数のミスマッチによってパッド下部の配線層に生じる応力が低減されることは自明と考えられる。しかし、パッド下部配線層の応力は、はんだ接合部の弾性率やクリープ特性にも依存するため、一概に接合温度の低下で期待する応力低減が実現されないこともあり得る。低融点はんだの機械的特性は先行研究で報告されているものもある^{89, 91-95)} が、チップ接合のようなマイクロ接合の大きさでは粒界の大きさや結晶方位の影響が顕著になる⁹⁶⁾。本研究では荻谷らが開発した微細試験片の引張試験法⁹⁷⁾を用いて融点 139°C の Sn-58Bi, 融点 143°C の In-3Ag および比較として融点 217°C の Sn-3Ag-0.5Cu (SAC305) の機械的特性を評価し、これを用いて FCPBGA におけるボンドパッド下部配線層に生じる応力場の解析を行った。

(2) 貫通電極を有するインターポーザ上に複数チップを搭載するパッケージにおける応力場の解析

先に述べたように半導体デバイスの性能向上を維持し高密度実装を実現する技術として 2.5D/3D-IC パッケージの研究開発が活発に行われている。2.5D/3D-IC パッケージでは有機基板上では実現できない微細配線をシリコンインターポーザ上に形成し、さらに 3D-IC パッケージではチップ間を TSV を用いて接続することで、伝送経路の短縮と電源・グランド配置の均一性を高め、シグナルインテグリティとパワーインテグリティを向上し¹⁷⁾、バスのクロック周波数は抑えながらもバス幅を広げることでデータ転送レートを高める^{16, 30)}。2.5D/3D-IC パッケージを実現する上で重要なチップおよびインターポーザの TSV 技術に関しては様々な研究開発が進められており^{17, 18, 98, 99)}、2022 年にはシリコンインターポーザの TSV ピッチは 20 μm まで、TSV 径は 10 μm まで微細化することが求められている¹⁵⁾。高アスペクト比で微細な TSV を形成するには穴空け加工、導体金属の穴埋め加工それぞれで困難を伴うためシリコンインターポーザは 100 μm 程度まで薄化する必要がある。チップとチップあるいはチップとシリコンインターポーザの接合では、チップの配線層やインターポーザ上の配線層の影響を考慮しても線膨張係数のミスマッチによる接合部にかかる熱機械的応力は大きなものではない。しかしながら薄化されたインターポーザは有機基板上に接合されるため、インターポーザ上に搭載するチップとの接合部には基板の熱収縮による影響が出ることが報告されている^{100, 101)}。また、近年ではシリコンに代わり安価なガラスをインターポーザに用いる研究開発も進展している^{22, 26, 27)}。ガラスの線膨張係数

は Si に近いものもあるが、一般的には 8~10 ppm/°C 程度であり、ガラスインターポーザを用いた場合には、シリコンインターポーザと異なる応力場が発生すると考えられる。チップ接合のピッチは TSV ピッチと等しく 50 μm 以下が必要とされ、従来のはんだバンプではなく Cu ピラーが用いられる。2.5D/3D-IC パッケージでは複数回の接合が行われるため複数回の加熱時にも安定性を保つために Cu ピラーと基板のパッド間のはんだ接合部を金属間化合物化する IMC (Intermetallic Compound) 接合が好ましいとの考えがある。この場合 Cu の弾性率($E=117\text{ GPa}^{100,101}$)と CuSn の金属間化合物の弾性率($E=110\text{ GPa}^{100,101}$) は SnAg はんだや SnAgCu はんだよりも高くなるため接合部周りの応力が大きくなる課題がある。

本研究ではチップとインターポーザの接合およびインターポーザと基板の接合によってマイクロ接合部と Low-k/ULK 層に生じる応力場を調べた。シリコンおよび 2 種類の異なるガラスのインターポーザの機械的特性、インターポーザの TSV 密度、チップとインターポーザそれぞれの厚みを主要な因子として取り上げ、また Fig. 1.14 に示すチップ、インターポーザ、有機基板の接合の 3 つの異なる組み立てプロセスフローをに着目して接合後に発生する応力との関係を解明した。Fig. 1.14 のプロセスフローは、インターポーザにチップを接合してアンダーフィルを封入した後、インターポーザを基板に接合する 2 段階接合(a)、基板にインターポーザを接合してアンダーフィルを封入した後、チップをインターポーザに接合する逆の順序の 2 段階接合(b)、チップをインターポーザ上に、インターポーザを基板上にマウントし、同時に接合を行う(c)、という 3 つのパターンを仮定した。

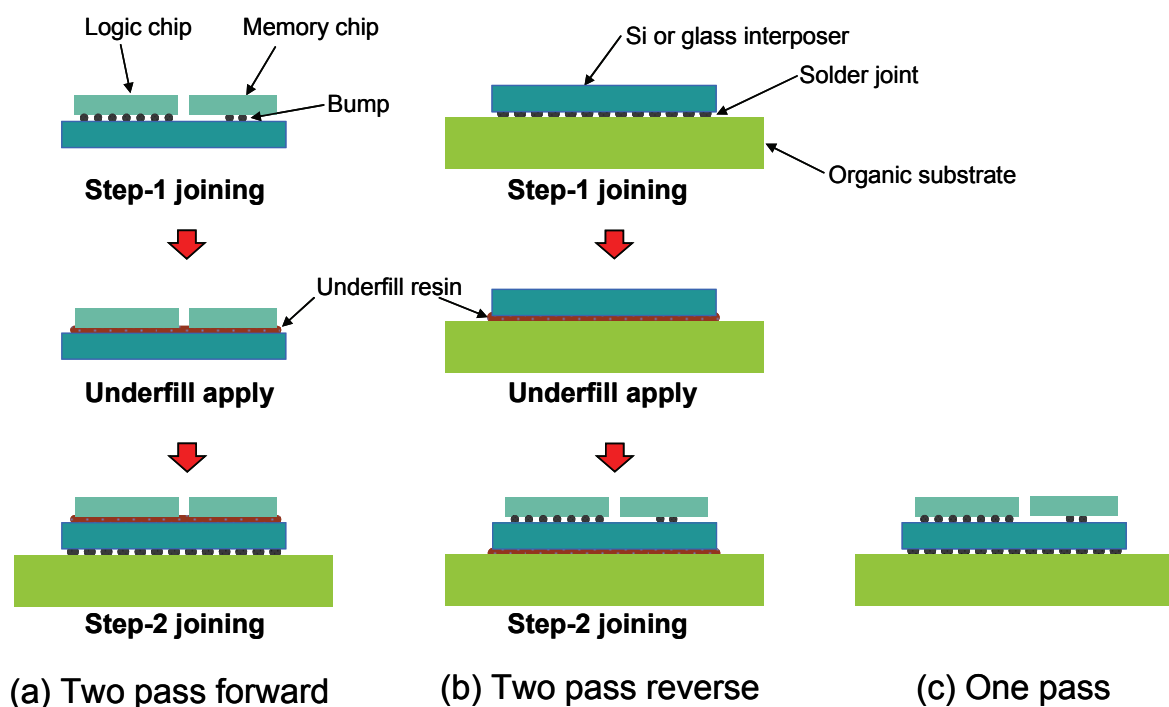


Fig. 1.14 Three different process flows of chip and interposer joining for 2.5D package.

3D-IC パッケージではインターポーザ上に多数のチップを積層する場合に、チップおよびインターポーザの厚み、チップの積層数、接合部のはんだの機械的特性の各因子に着目し、マイクロ接合部とチップ配線層に生じる応力に与える影響を調べた。解析を行ったパッケージ構成の概略は次の通りである。有機基板上にインターポーザが積層されたその上にミドルチップとトップチップを積層した構成を基本として、トップチップの厚みを 100 μm から 725 μm に変化させたケース、ミドルチップは 100 μm に固定してその積層数を 2 段、3 段と変化させたケース、さらにこれらの組み合わせでインターポーザの厚みを 50 μm から 300 μm まで変化させた。これらの因子が各チップ間およびチップとインターポーザ間の接合部とチップ配線層にかかる応力に与える影響の解明を行い、応力低減につながる各因子の設計指針を得た。

1.5 研究の構成と流れ

Fig. 1.15 に本研究の流れを示す。第 1 章では研究の背景となる半導体素子の微細化とそれに伴う配線層の層間絶縁膜の Low-k/ULK 化の動向と Low-k/ULK 材の特徴、ワイヤボンディングとフリップチップボンディングの 2 つのチップ接合技術の動向について述べた。次にこれら 2 つのチップ接合技術を Low-k/ULK チップに用いた時に課題となる Low-k/ULK 絶縁膜のダメージと、それぞれの接合技術で Low-k/ULK 絶縁膜を用いた配線層の応力を低減するための影響因子について詳述した。最後に全体の研究の流れを示した。

第 2 章では、ワイヤボンディングのパッド下部配線層の構造による応力場への影響を解析するため、均質化法によって異なるパッド下部構造ごとに複合機械特性を求めた。その特性を用いてワイヤボンディングの荷重と超音波印加によって発生する応力場と応力低減に有効な配線構造を解明した。さらにワイヤボンディングの実験からパッド剥がれの発生率とパッド下部配線層の複合弾性率のとの間の相関を求め、複合特性を用いた配線構造の最適化の有用性を検証した。

第 3 章では、フリップチップボンディングでのパッド下部配線層の応力を低減する手法として Sn-58Bi と In-3Ag の 2 種類の低融点のはんだによる接合を取り上げた。2 種類の低融点のはんだと SAC305 はんだの微細試験片を用いて引張試験を行い、これらのはんだのマイクロ接合の大きさでの機械的特性を求めた。ここで得られた応力歪み曲線とクリープ特性を用いて、バンプとプレソルダーの材料を変えた組み合わせで熱機械的応力の解析を行い、はんだの融点、弾性率、0.2%耐力、クリープ特性がパッド下部配線層に生じる応力に与える影響を論じた。

第 4 章では、微細配線の可能なインターポーザ上にフリップチップボンディングで複数チップを接合し、構造的にも複雑度の高い 2.5D パッケージと 3D-IC パッケージを取り上げた。2.5D パッケージと 3D-IC パッケージで接合部とパッド下部配線層の応力場に影響を与える特徴的な因子として、インターポーザの機械特性、チップ・インターポーザ・有機基板の接続順序、チップとインターポーザの厚みの組み合わせ、チップ積層数に着目した。これらの因子を変化させて FEM 解析により応力場と反り挙動を解明し、プロセスでの実装性を考慮して接合部・パッド下部配線層の応力を低減する指針を論じた。

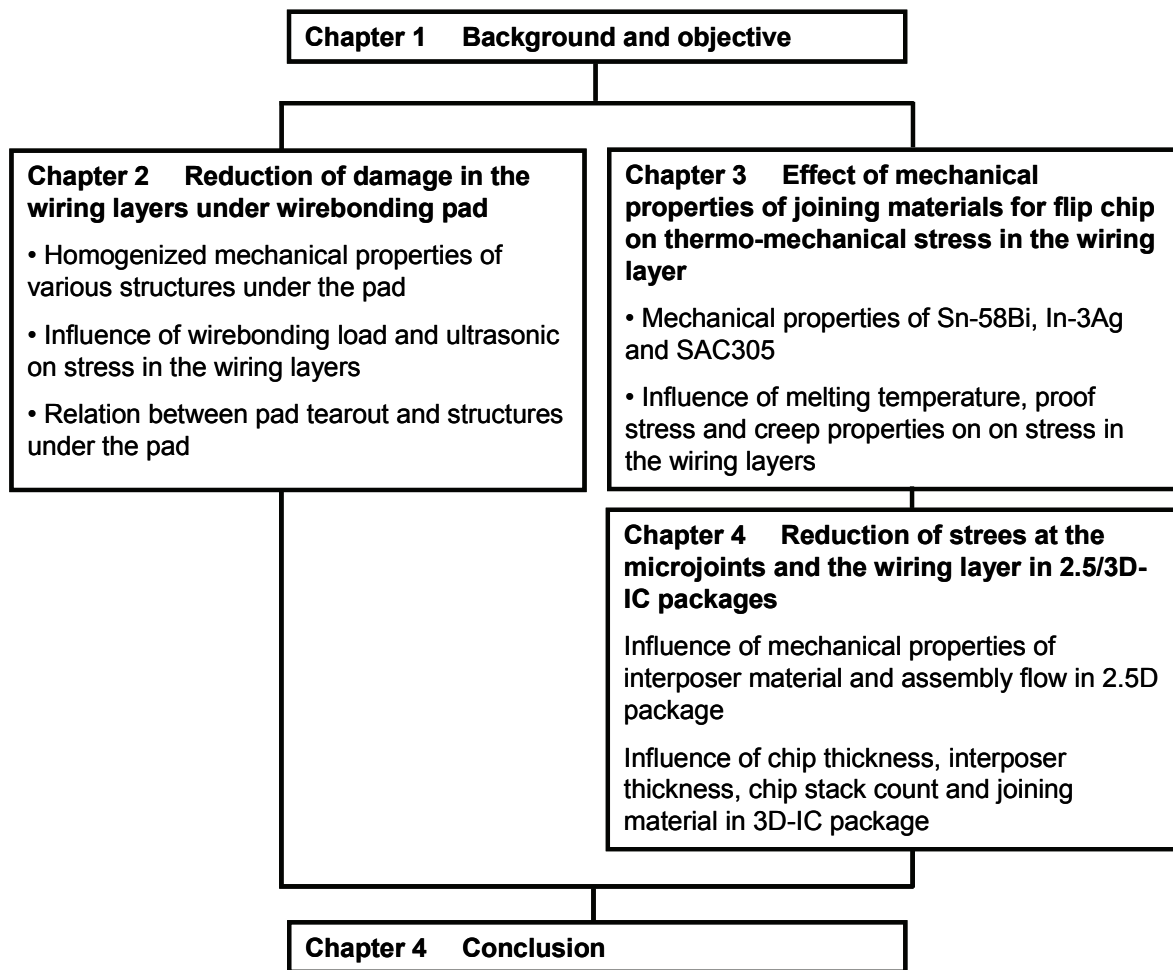


Fig. 1.15 Research flowchart of this study.

第 2 章 ワイヤボンディングにおける下部配線層構造最適化による配線層ダメージの低減

2.1 緒言

低誘電率絶縁膜の Low-k 材や ULK 材を用いたチップでは、パッケージング工程中、パッケージング後の 2 次実装あるいは製品使用時にパッケージからかかる応力によってチップ内部のメタル配線層が破断する課題がある。ワイヤボンディングを用いる場合では、Fig. 1.11 に示したようにワイヤプル試験において正常モードであるワイヤネック切れ(a)ではなく、異常モードであるボンドパッドがメタル配線層から剥がれる不良モード(b)がよく知られている⁷³⁻⁷⁶⁾。

筆者は、2D FEM (Finite Element Method) によりワイヤボンディング中の荷重と超音波の印加時に最大主応力の発生箇所が ULK 層の Cu 配線とビアの近傍であることを見出した。本研究では、3D FEM を用いてパッド下部の配線構造を因子として配線層内の応力場を求め、パッド下部配線層の最適化による接合時の応力低減手法を検討した。本来、パッド剥がれの原因となる絶縁層内の応力場は、絶縁層内の微細配線構造を再現したモデルによって解析を行うことが望ましい。しかし、ワイヤボンディングの接合のスケールでデバイスの微細配線を忠実に再現したモデルでは、解を得られるシミュレーション条件を設定するまでに多くの試行が必要であり、またひとつのモデルの解析時間も非常に長くなる。それに対して本研究では、繰返し性のある配線パターンで配線層の構造を均質化する方法に着目し、均質化により求めた複合特性を用いて応力解析を行うことで簡便に積層配線構造の比較評価を行う方法の確立を試みた。絶縁膜の厚みや配線密度を変化させた様々なパッド下部の配線構造を均質化によって求め、その特性を用いてワイヤボンディング荷重と超音波印加によりパッド下部の絶縁層にかかる応力の変化と、応力を低減できるパッド下部構造を解明した。ここでは Cu 配線やビアと関連絶縁膜の密着性は完全であると前提した。また、ここで求めた応力場は均質化した材料中のものであり、破断箇所と直接の相関を求めるにはマイクロモデルでの詳細解析が別途必要となる。

FEM の結果を検証するため、ULK 材を用いた 32 nm 世代のチップでワイヤボンディングの実験を行った。実験結果からパッド剥がれの発生率とパッド下部構造の関係を調べ、均質化特性を用いた FEM 解析結果とワイヤプル試験でのパッド剥がれの結果に高い整合性が見られることを実証した。

2.2 パッド下部配線構造の複合弾性率の導出

Fig. 2.1 にワイヤボンド・Al パッド・配線層およびシリコン基板のモデルを示す。解析空間としてワイヤボンドを中心に X 方向に 50 μm 、Y 方向に 25 μm の領域を設定したハーフモデルを用いた。ボール径は 27 μm 、ワイヤ径 15 μm 、キャピラリのボールとの接触面の最大径 25 μm 、ボール厚み 7 μm で、35 μm ピッチのワイヤボンディングを想定した。

パッド下部の配線層は、Fig. 1.8 に示す 2 種類の積層を解析対象とした。各構成材料のバルク特性を Table 2.1 に示す。ここではバルク材料を等方材料として扱う。Al パッド、Cu 配線は半導体工程でそれぞれ化学気相成長、めっきによって形成される。筆者らの過去の実験結果、解析結果との整合性を考慮し、表中の数値を採用した。また絶縁膜材料についても同様に表中の数値を用いた。1x, 2x, 8x の

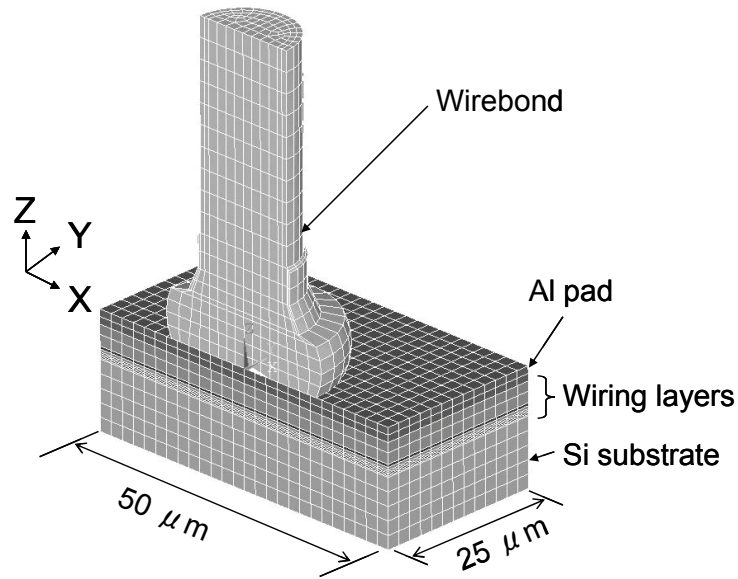


Fig. 2.1 Half model of wirebond, Al pad, wiring layers and Si substrate.

Table 2.1 Material properties.

	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio
Au ball	78	0.33
Al pad	48	0.33
Cu wiring	110	0.33
SiO ₂	70	0.20
FTEOS	66	0.18
Low-k	9	0.28
ULK	4.6	0.28
Cap dielectric	104	0.28
Si	165	0.22

各配線層における配線構造として Fig. 2.2 に示すような 2 種類の構造を検討する. Cu 配線に用いるデュアル・ダマシン工法では配線とビアを一度のめっきで形成し, Cu の絶縁膜への拡散を防止するためビア層の底部に薄いキャップ絶縁膜を配するのが一般的である. 配線とビアを合わせた 1 層の厚みを h とし, そのうち配線部分の厚みを h_1 , ビア部分の上層の絶縁膜の厚みを h_2 , ビア部分のキャップ絶縁膜の厚みを h_3 と定義した.

Fig. 2.2 (a)はビア・スタックと呼ぶ構造で正方のメタル配線パターンの中央にビアを配置したもので, Fig. 2.2(b)はサーペントインと呼ぶビアを持たない配線のみのパターンである. Table 2.2 はこれらの寸法を示す. この中で, 評価モデルのバリエーションとして配線間スペース($s1, s2$) をメタル配線の 1 倍,

2 倍, 3 倍とした条件を与え, ビア・スタック構造・サーペンタイン構造でそれぞれ VS-1, VS-2, VS-3, Serp-1, Serp-2, Serp-3 と呼ぶ. 2x, 8x の各層の厚みは, 1x の厚みのそれぞれ 2 倍, 8 倍としているが, キャップ絶縁膜の厚みはこれよりも低い倍率を用いている点には注意を要する.

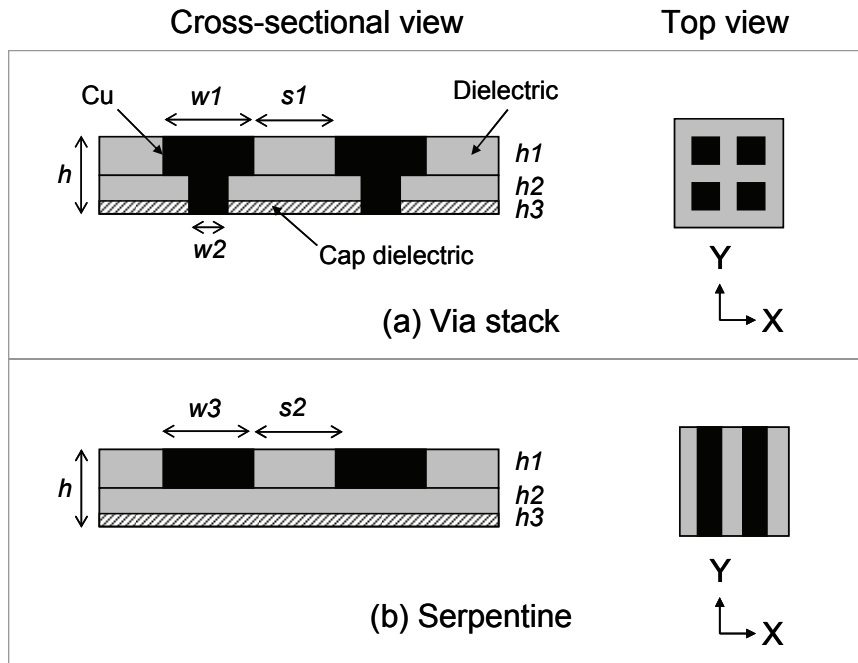


Fig. 2.2 Cu line and via structures for homogenization (a) Via stack and (b) Serpentine.

Table 2.2 Dimensions of Cu line and via (unit: nm).

			8x	2x	1x
h			1600	800	200
$h1$			960	240	120
$h2$			520	100	40
$h3$			120	60	40
Via stack	$w1$		1760	440	220
	$w2$		400	100	50
	$s1$	VS-1	1760	440	220
		VS-2	3520	880	440
		VS-3	5280	1320	660
Serpentine	$w3$		1760	440	220
	$s2$	Serp-1	1760	440	220
		Serp-2	3520	880	440
		Serp-3	5280	1320	660

1x 層に Low-k と ULK, 2x 層に ULK, 8x 層に FTEOS の絶縁材料を用い, ビア・スタック, サーペンタインそれぞれに 3 種類ずつの構造の組み合わせで, ANSYS Multiscale.Sim[®]を用いて均質化モデルを作成し複合則によりこれらの構造それぞれで弾性率とポアソン比の複合特性を求めた. ここでは, 1x Low-k 層, 1x ULK 層, 2x ULK 層および 8x FTEOS 層それぞれで, Fig. 2.2 に示すような配線部絶縁膜, ビア部絶縁膜, キャップ絶縁膜, Cu 配線および Cu ビアで構成されるビアスタックおよびサーペンタインの構造を繰返しの基本単位として均質化を行なった. 弾性率の複合則は, Fig. 2.3(a)に示すような応力に平行に 2 つの材料が配置された構造では以下の(2.1)式に従い, Fig. 2.3(b)に示すような応力に垂直に 2 つの材料が配置された構造では(2.2)式に従う.

$$E_c = V_1 E_1 + V_2 E_2 \quad (2.1)$$

$$E_c = (V_1 / E_1 + V_2 / E_2)^{-1} \quad (2.2)$$

ここで E_c は複合特性, E_1 は材料 1 の特性, E_2 は材料 2 の特性, V_1 は材料 1 の体積率, V_2 は材料 2 の体積率であり, V_1 と V_2 は,

$$V_1 + V_2 = 1 \quad (2.3)$$

の関係を満たす. ANSYS Multiscale.Sim[®]では(2.1)式, (2.2)式を組み合わせ複合特性の計算を行う. ポアソン比も同様の計算となる.

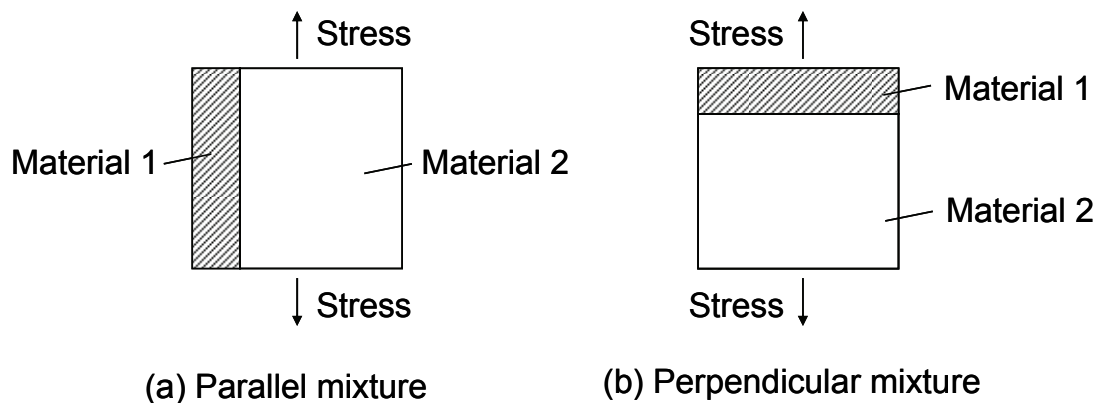


Fig. 2.3 Schematic of mixture of two materials (a) parallel mixture, and (b) perpendicular mixture.

Fig. 2.4 に求められた複合弾性率を示す．この図では 1x 層の low-k 材での結果は省略した．バルク材料は等方であるが，配線構造の非対称性によって X, Y, Z 方向のそれぞれの弾性率 E_x , E_y , E_z は異なる数値が得られる．ビア・スタックについては X, Y 方向が対称のため E_x と E_y は同じ数値となる．1x 層と 2x 層を比較すると 2x 層の弾性率のほうが低くなる．これは 2x 層のほうが弾性率の高いキャップ絶縁膜の体積比率が小さいためである．VS-1, VS-2, VS-3 の比較と Serp-1, Serp-2, Serp-3 の比較から，弾性率の高い Cu の配線密度を高くする（配線間隔を狭くする）ほど複合弾性率が高くなること分かる．

2.3 外部端子接続時の配線層に生じる応力場の解明

2.3.1 FEM 解析モデル

Au ボール，Al パッド，SiO₂ 膜，Si 基板にはバルク材料特性を適用し，1x, 2x, 8x 層には均質化モデルで求めた複合特性を用いて，ワイヤボンディング荷重および超音波印加によって発生する応力を ANSYS Mechanical® Ver.14 で解析した．Au ボールは接合時の変形後の形状で解析を行っているため弾性体として扱い，Al パッドには硬化則を適用した．ここで用いた Al パッドの降伏応力は 70 MPa である．本研究で調べたモデルのマトリックスを Table 2.3 に示す．モデル 1, 2, 3 は，1x, 2x, 8x 各層をビア・スタックとし，その配線スペースを変化させた VS-1, VS-2, VS-3 を用いるものである．同様に

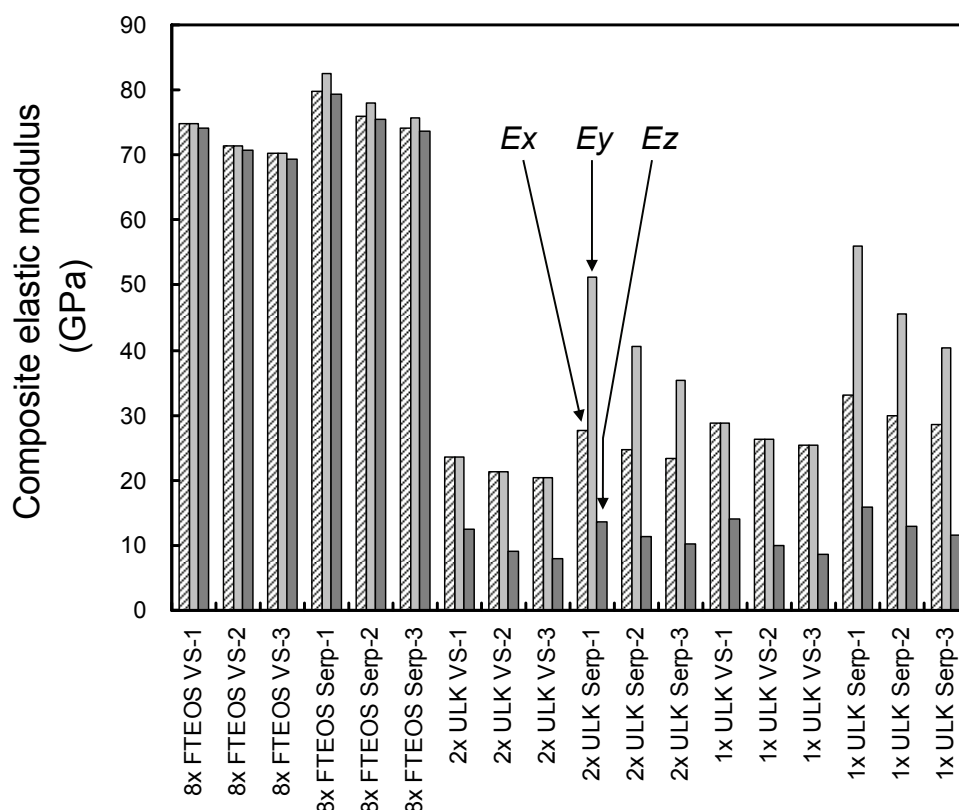


Fig. 2.4 Composite elastic modulus of various combination of different dielectric films and wiring structures.

Table 2.3 Model matrix of various structures.

Model type	Structures in 1x, 2x and 8x	SiO ₂ thickness (μm)	8x layer stack	Al thickness (μm)
			count	
1	VS-1	1.4	1 L	2.1
2	VS-2	1.4	1 L	2.1
3	VS-3	1.4	1 L	2.1
4	Serp-1	1.4	1 L	2.1
5	Serp-2	1.4	1 L	2.1
6	Serp-3	1.4	1 L	2.1
7	VS-1	0.7	1 L	2.1
8	VS-1	2.1	1 L	2.1
9	VS-1	1.4	0 L	2.1
10	VS-1	1.4	2 L	2.1
11	VS-1	1.4	1 L	1.2
12	VS-1	1.4	1 L	4.0

モデル 4, 5, 6 はサーペントインの配線スペースを変化させた Serp-1, Serp-2, Serp-3 を用いるものである。モデル 7 と 8 は配線構造を VS-1 に固定し, Al パッド下の SiO₂ の厚みを変化させたものである。モデル 9 と 10 は同じく配線構造を VS-1 に固定し, 8x 層を用いないものと 2 層入れたものとなる。モデル 11 と 12 は VS-1 構造で Al パッドをそれぞれ 1.2 μm と 4.0 μm としたものである。

2.3.2 外部端子接続時の荷重によって配線層に生じる応力の解析

それぞれのモデルでボールボンドのキャピラリ接触面に対してボンディング中にかかる荷重を想定して 68.6 mN を与え, パッド下部の配線絶縁膜に発生する応力を調べた。Fig. 2.5 はモデル 1 の第一主応力のコンター図であり, Z 方向の変位は強調表示されている。Fig. 2.6 はモデル 1 の FTEOS 層(a),

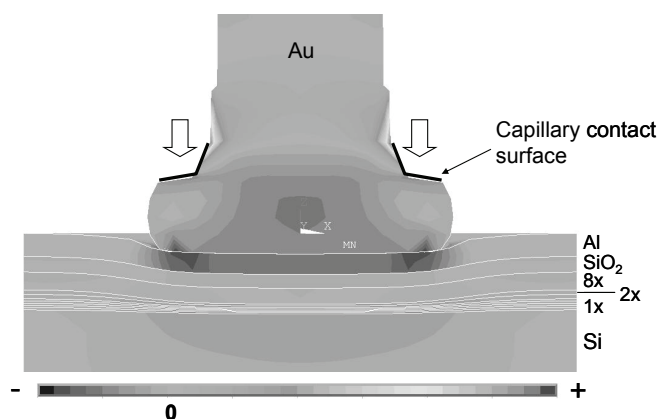
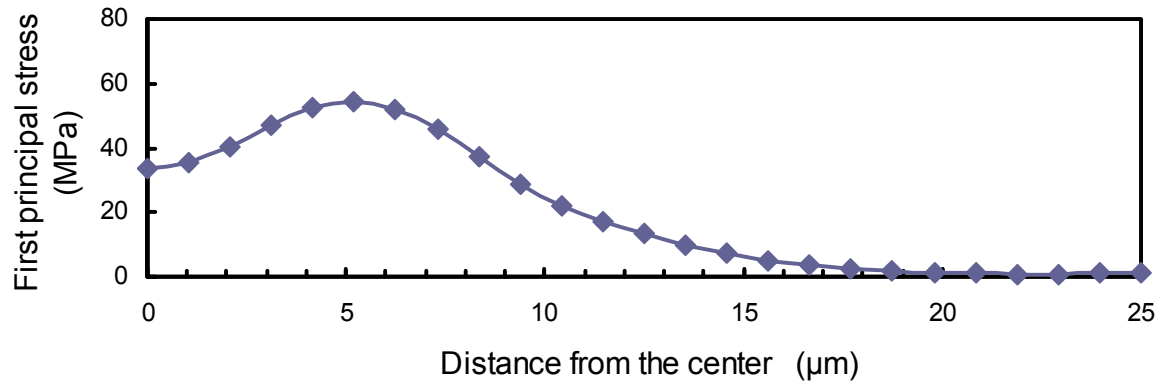
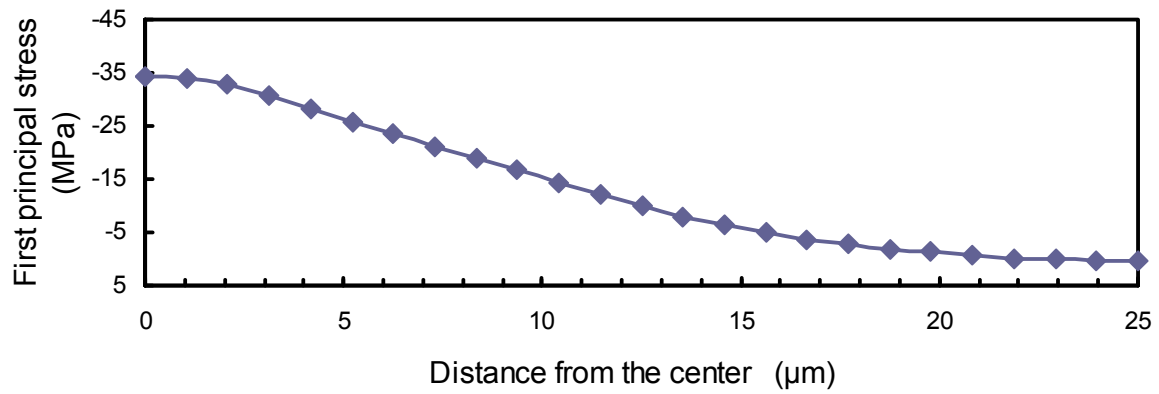


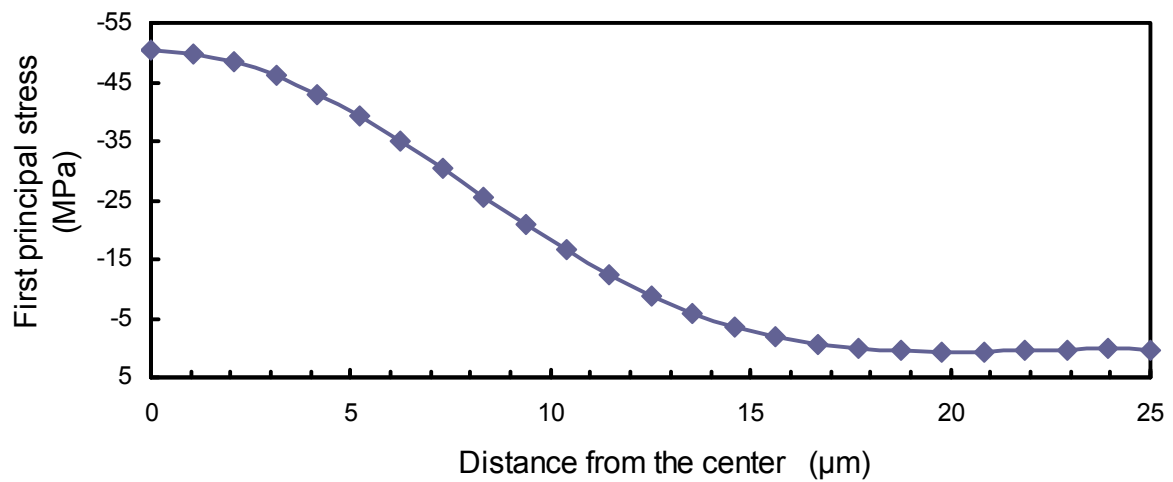
Fig. 2.5 Contour diagram of first principal stress of model-1.



(a) FTEOS layer



(b) 2x ULK layer



(c) 1x ULK layer

Fig. 2.6 Stress distribution from the center of model-1.

2x ULK 層(b), 1x ULK 層(c)の各層の厚みの中心を通る面でのボールボンドの中心からの応力分布を示す。コンター図からの判別は難しいが、8x FTEOS 層内での第一主応力は、引張応力として働き、ボールボンド中心から 5 μm ほど外側で最大となっている。これに対し 2x ULK, 1x ULK の層内では最大の第一主応力はボールボンドの中心に位置し、圧縮応力となる。また 1x ULK 層の最大主応力は 2x ULK 層の最大主応力よりも高い。ここではモデル 1 の応力分布のみ示したが他のモデルでも同じ傾向が見られた。以下の配線構造、配線密度および積層構造の影響は ULK 層で最大主応力の発生している 1x ULK 層を対象に検討する。

配線構造と配線密度による応力低減の評価

Fig. 2.7 はモデル 1 から 6 までのボールボンドの中心部の下部の 1x 層内での第一主応力を示したものであり、すべて圧縮応力である。ここでは相対比較のためモデル 1 の最大主応力を基準として任意単位でプロットした。モデル 1, 2, 3 のビアスタックの配線間隔を変化させた比較では、配線間隔が広がる、すなわち 1x, 2x, 8x の各層で複合弾性率が低くなるほど応力が大きくなりほぼ直線の関係が見られる。また同様の関係がモデル 4, 5, 6 のサーペンタインでも得られる。ビアスタックとサーペンタインでは配線間隔の変化に対する応力の変化の程度が異なっている。Fig. 2.4 でビアスタックとサーペンタインで E_z の変化に大きな差は見られないため、応力の変化の程度が異なるのは X, Y 方向での構造の対称性の違いに起因しているものと推察される。VS-1 と Serp-1 ではほぼ同じ最大主応力であるが、配線間隔の広い VS-3 と Serp-3 を比較すると VS-3 の方が 9.9%高い最大主応力となる。配線密度の低い配線ではビア接続を行わないサーペンタイン構造が応力抑制に有利であることが分かる。

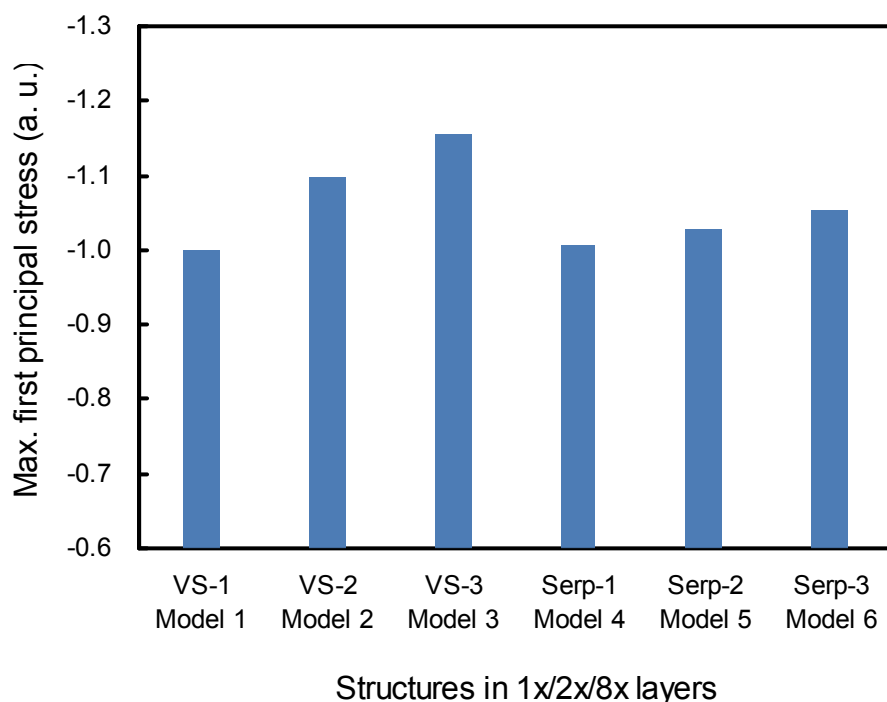


Fig. 2.7 First principal stress (compressive stress) in 1x ULK layer under the center of ball bond (model-1, 2, 3, 4, 5 and 6).

積層構造による応力低減の評価

第一主応力に対する Al パッド直下の SiO₂ の厚みの影響はモデル 1, 7 および 8 の比較となる (Fig. 2.8). SiO₂ 厚みが 1.4 μm から 0.7 μm になると応力が 6.5% 高くなり, SiO₂ 厚みが 1.4 μm から 2.1 μm になると応力が 6.5% 低くなるため SiO₂ の厚みが増すと 1x ULK 層内の最大主応力が減少する相関関係が見られる. 同様に 8x FTEOS 層の比較をモデル 1, 9 および 10 で行う (Fig. 2.9) と FTEOS 層が厚いほど 1x ULK 層で応力が低下することが分かる. モデル 1 に比べるとモデル 10 は FTEOS の厚みが 2 倍になっており, 1x ULK 層に発生する応力は 14% 低くなっている. また FTEOS 層のないモデル 9 はモデル 1 に比べて 14% 応力が高く, FTEOS の厚みと 1x ULK 層内の最大主応力の間に相関関係が見られる. ULK 層の上部に配する SiO₂, FTEOS は 2x ULK に比べて Ez で 7 倍程度弾性率が高く, これらの層の厚みを大きくすることで 1x ULK 層内に発生する第一主応力を低減できることが分かる.

Fig. 2.10 は Al パッドの厚みと 1x ULK 層の最大主応力の関係を示したものである. モデル 1 の 2.1 μm の Al パッドの場合に比べてモデル 11 の 1.2 μm の場合では 25% 最大主応力が高くなるのに対して, モデル 12 の 4.0 μm の場合では 13% 最大主応力が減少する. ここでも Al パッドの厚みが増すにつれて 1x ULK 層の最大主応力が減少する相関が認められる.

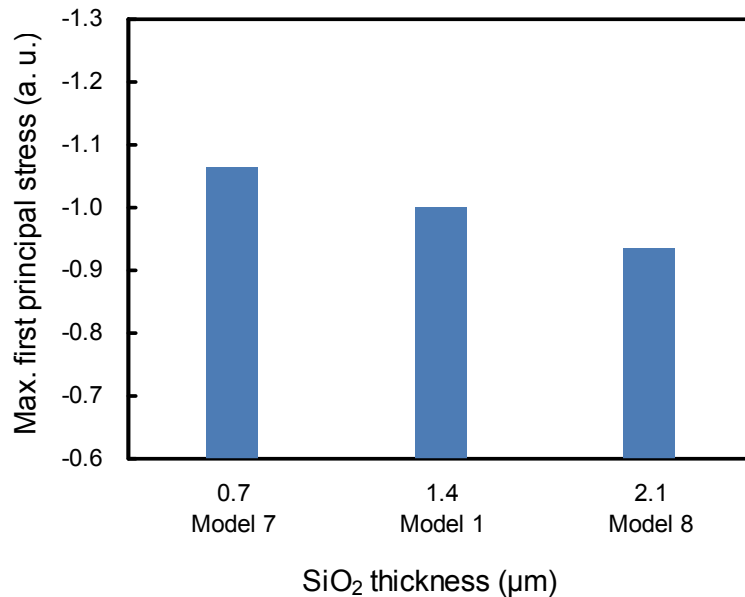


Fig. 2.8 First principal stress (compressive stress) in 1x ULK with variable SiO₂ thickness (model-1, 7 and 8).

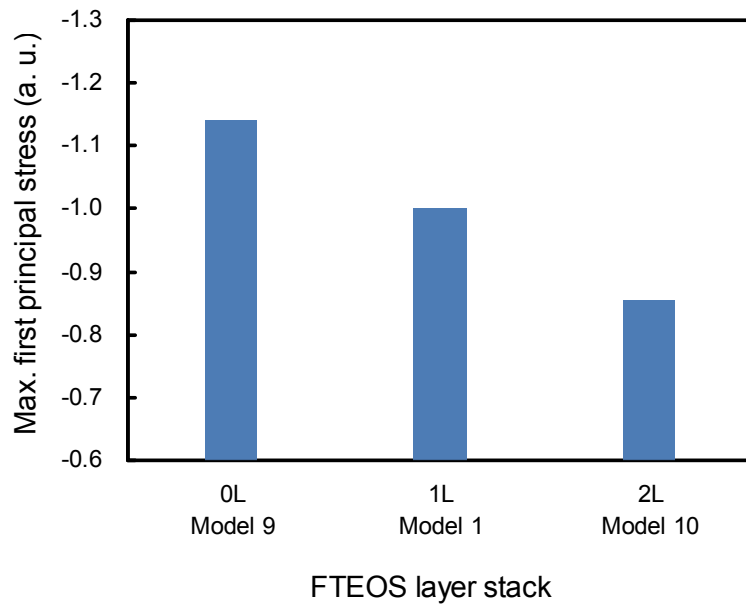


Fig. 2.9 First principal stress (compressive stress) in 1x ULK with variable 8x FTEOS thickness (model-1, 9 and 10).

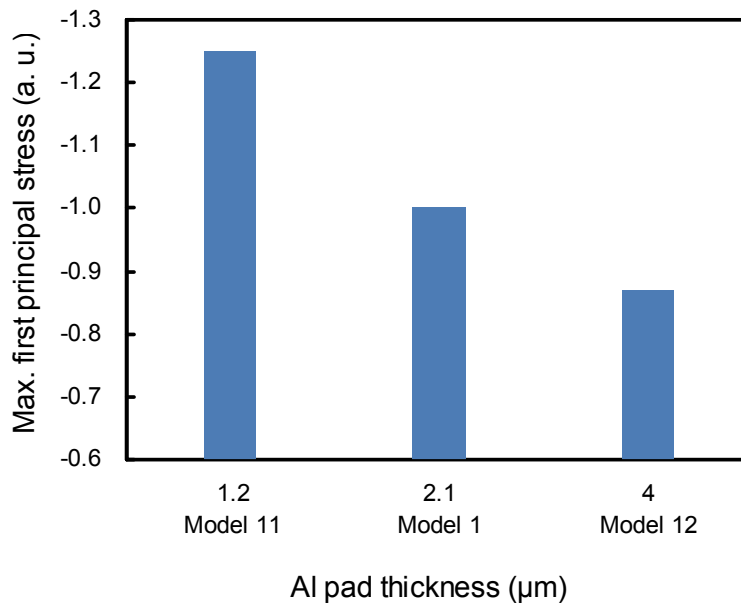


Fig. 2.10 First principal stress (compressive stress) in 1x ULK with variable Al pad thickness (model-1, 11 and 12).

2.3.3 外部端子接続時の超音波印加によって配線層に生じる応力の解析

超音波印加の影響を調べるため、Fig. 2.11 に示す 4 ステップのモデルを作成した。ステップ 1 は前節と同じようにキャピラリ接触面に荷重を与えたモデルである。ここで与えた荷重は 49 mN である。ステップ 2 では同じ荷重を付与した状態で X 軸上で $-0.1 \mu\text{m}$ の変位を与えた。この時、Au ボールと Al パッドの界面には固着モードの設定を用いた。次にステップ 3 では $+0.1 \mu\text{m}$ の変位を与えて初期ボンディング位置に戻し、さらにステップ 4 でも $+0.1 \mu\text{m}$ の変位を与えて $0.1 \mu\text{m}$ の振幅の振動の各過程で発生

する応力を解析した。モデルの組み合わせは前節と同じく Table 2.3 に示した 12 通りの組み合わせである。

Fig. 2.12 は、ステップ 1 から 4 に 2x ULK 層の上面つまり FTEOS 層との界面で発生する最大の第 1 主応力を各モデルごとに示したグラフである。同様に Fig. 2.13 は 2x ULK 層の中央面で発生する最大の第 1 主応力、Fig. 2.14 は 1x ULK 層の上面つまり 2x ULK 層との界面で発生する最大の第 1 主応力、Fig. 2.15 は 2x ULK 層の中央面で発生する最大の第 1 主応力を示すものである。ここで示す応力はすべ

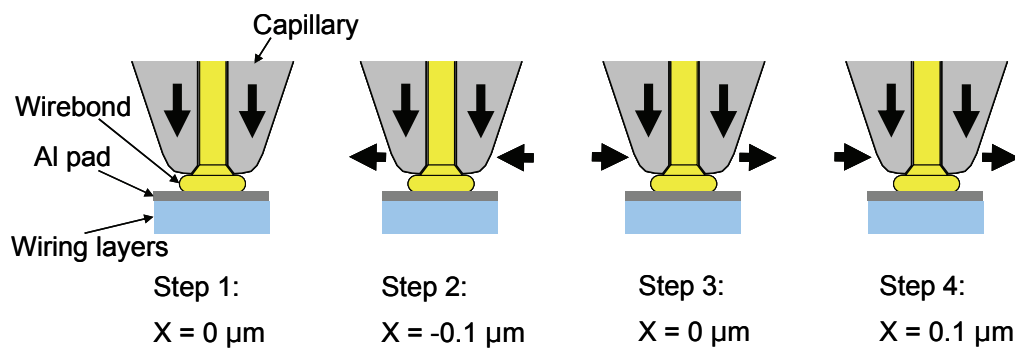


Fig. 2.11 Analysis steps to simulate ultrasonic vibration during wirebonding.

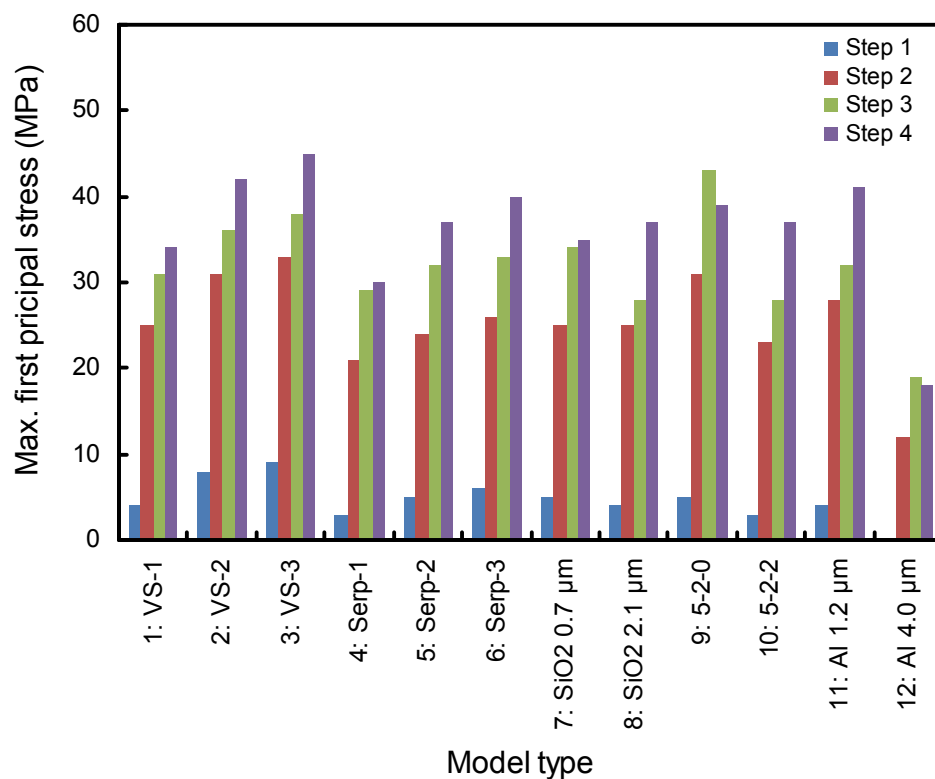


Fig. 2.12 Maximum first principal stress at the top of 2x ULK layer.

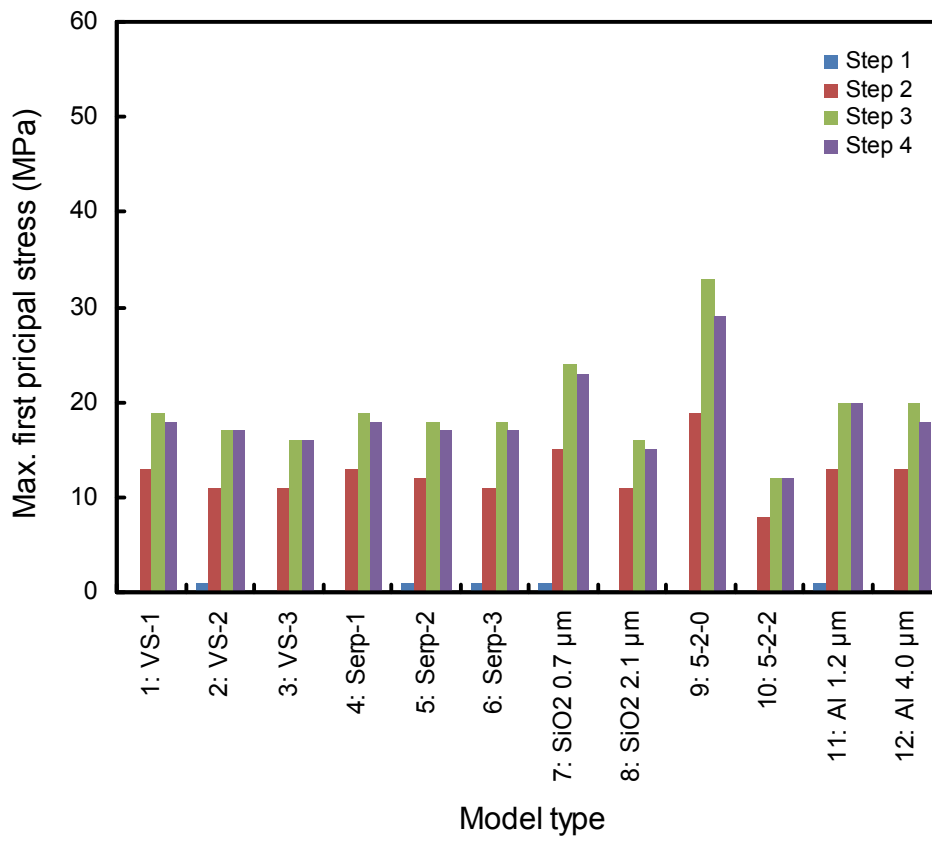


Fig. 2.13 Maximum first principal stress at the middle of 2x ULK layer.

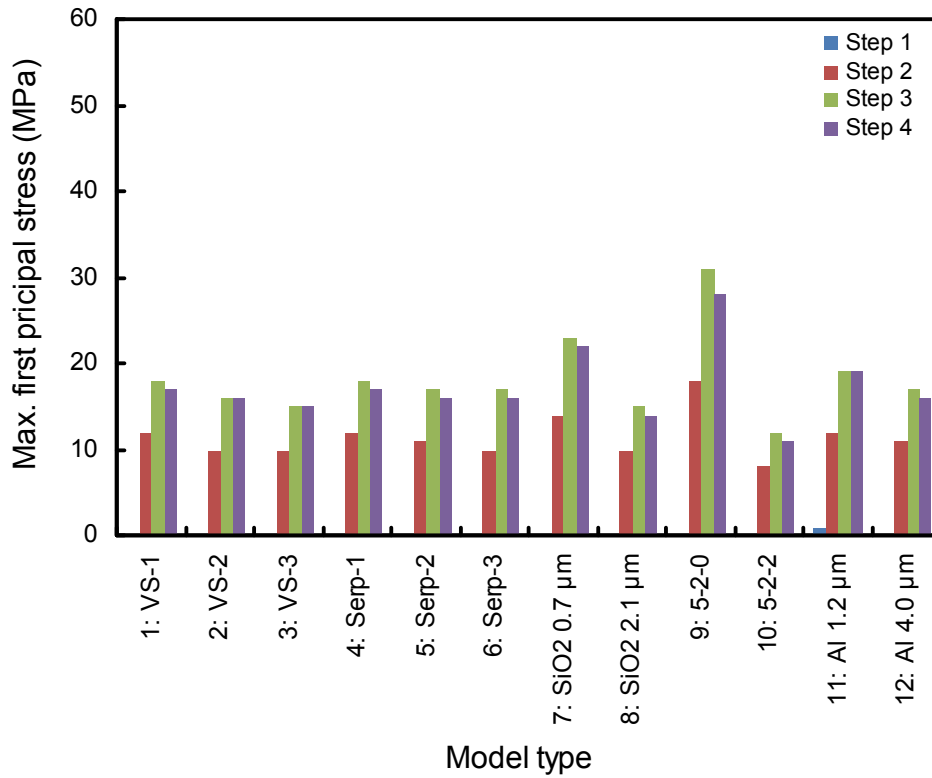


Fig. 2.14 Maximum first principal stress at the top of 1x ULK layer.

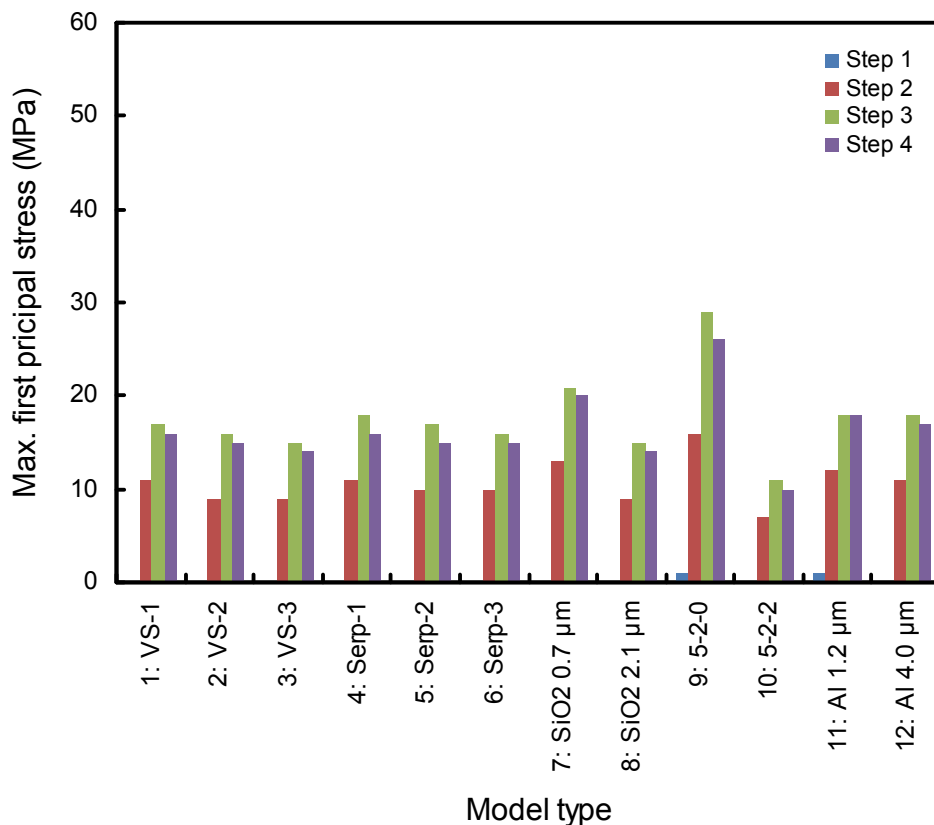


Fig. 2.15 Maximum first principal stress at the middle of 1x ULK layer.

で引張応力である。これらのグラフを比較すると 2x ULK 上面の応力はモデル 12 の Al パッド厚み 4 μm の場合を除いて、下部の 2x ULK 中央面、1x ULK 上面、1x ULK 中央面よりも概ね 1.5 倍以上大きい。また各モデルごとに発生している応力の傾向は 2x ULK 中央面、1x ULK 上面、1x ULK 中央面で非常に類似しているが、2x ULK における傾向のみが異なっている。ステップ 1 の荷重のみの場合の応力は、2x ULK 中央面、1x ULK 上面、1x ULK 中央面ではすべてのモデルで 1 MPa 以下と非常に小さい。一方で 2x ULK 上面ではモデル 12 を除いて 10 MPa 未満ではあるが明らかに他の面よりも大きな応力が生じている。2x ULK 上面では、モデル 9 と 12 を除いて最大応力はステップ 4 で発生しているが、2x ULK 中央面、1x ULK 上面、1x ULK 中央面ではすべてのモデルでステップ 3 で最大応力が発生している。ただしこれらのうちいくつかのモデルではステップ 3 と 4 でほぼ同じ応力値となるものがある。2x ULK 上面で見られる応力の発生の傾向はその下部の他の面と大きく異なっている。これは 2x ULK が弾性率の違いの大きな FTEOS 層との界面であるためであると考えられる。しかしながら硬化則を適用した Al パッドの厚みが 4 μm の場合のみ 2x ULK 上面と他の面での顕著な違いは認められない。

Fig. 2.16, Fig. 2.17, Fig. 2.18, Fig. 2.19 はそれぞれステップ 1, ステップ 2, ステップ 3, ステップ 4 でのモデル 1 の 2x ULK 上面におけるボンディング中心を通る X 軸上での応力分布を示すものである。ステップ 1 ではボールの中心部付近で圧縮応力となるが、キャピラリ接触部分のやや内側の中心から 7.3 μm の位置で引張応力のピークがある。荷重のみの場合、応力分布は正負の方向で対称となる。ステップ 2 で -0.1 μm の変位を与えると負の側のキャピラリ接触部分の内側近辺で 25 MPa の最大応力を

発生し、正の側ではキャピラリ接触部分の内側近辺で 10 MPa の低いピークとボールの外側で 20 MPa のピークを発生する。ステップ 3 で+0.1 μm の変位を与えてボンディング中心位置に戻すと正の側のキャピラリ接触部分の内側近辺のピークは 24 MPa まで上昇し、ボールの外側のピークは負の側に移動する。さらにステップ 3 で+0.1 μm の変位を与えると正の側のキャピラリ接触部分の内側近辺のピークは 34 MPa まで上昇し、これがステップ 1 から 4 での最大の応力値となる。ここで図示はしないが、各ステップでの応力のピークの傾向は配線密度を変化させたモデル 1 から 6 では非常によく類似している。また SiO_2 層, FTEOS 層, Al パッドをそれぞれ厚くしたモデル 8, 10, 12 では中心付近の 2 つのピークの分離は消滅して 1 つのピークとなる。逆に SiO_2 層, FTEOS 層, Al パッドをそれぞれ薄くしたモデル 7, 9, 11 では 3 つのピークの分離はより明確になる。

Fig. 2.20, Fig. 2.21, Fig. 2.22, Fig. 2.23 はそれぞれステップ 1, ステップ 2, ステップ 3, ステップ 4 でのモデル 1 の 2x ULK 中央面におけるボンディング中心を通る X 軸上での応力分布を示すものである。2x ULK 中央面ではステップ 1 の荷重のみの印加ではパッド両端部を除き圧縮応力が発生し、ボンディング中心部で最大の応力となる。ステップ 2 では 2x ULK 上面と異なり変位を与えた方向と反対の正の側のボール端部付近で急激に応力値が大きくなり最大の引張応力のピークが生じる。ステップ 3 と 4 の変位方向を正の向きに反転させた場合では、ステップ 2 の応力分布を正負に反転させた分布形状に近いものとなり、負の側のボール端部付近で最大の引張応力のピークが生じる。全ステップ中での最大の応力はステップ 3 で発生している。この応力分布の傾向は、 SiO_2 層, FTEOS 層, Al パッドの厚みを変化させたモデルも含めてすべてのモデルでほぼ同様のものとなる。

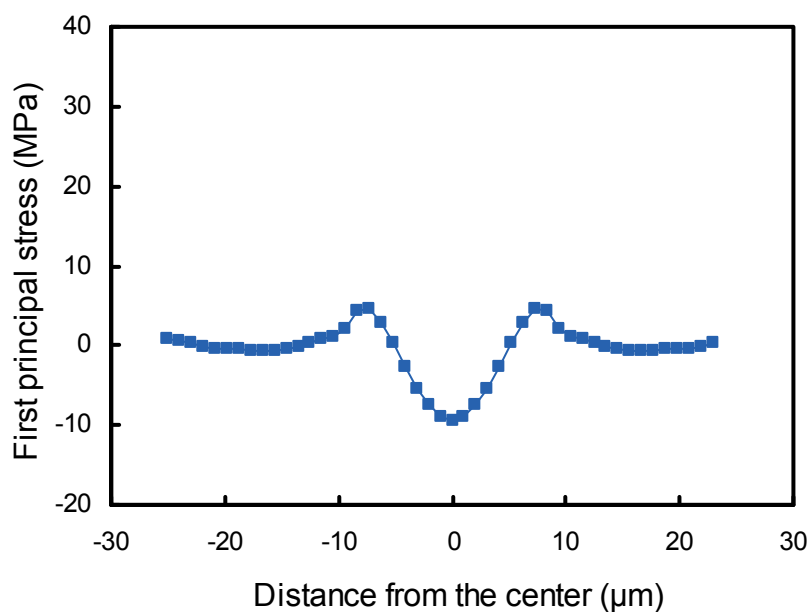


Fig. 2.16 Stress distribution at the top of 2x ULK layer of model-1 at step 1.

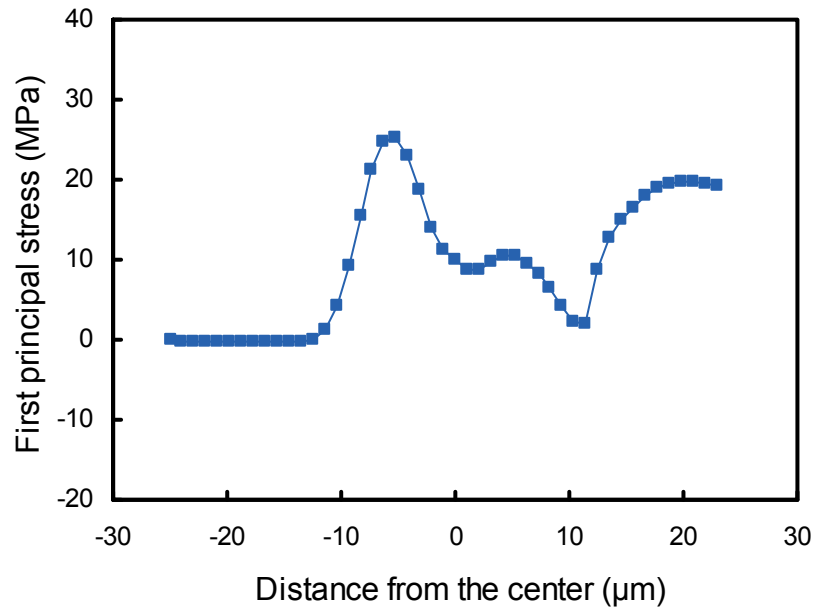


Fig. 2.17 Stress distribution at the top of 2x ULK layer of model-1 at step 2.

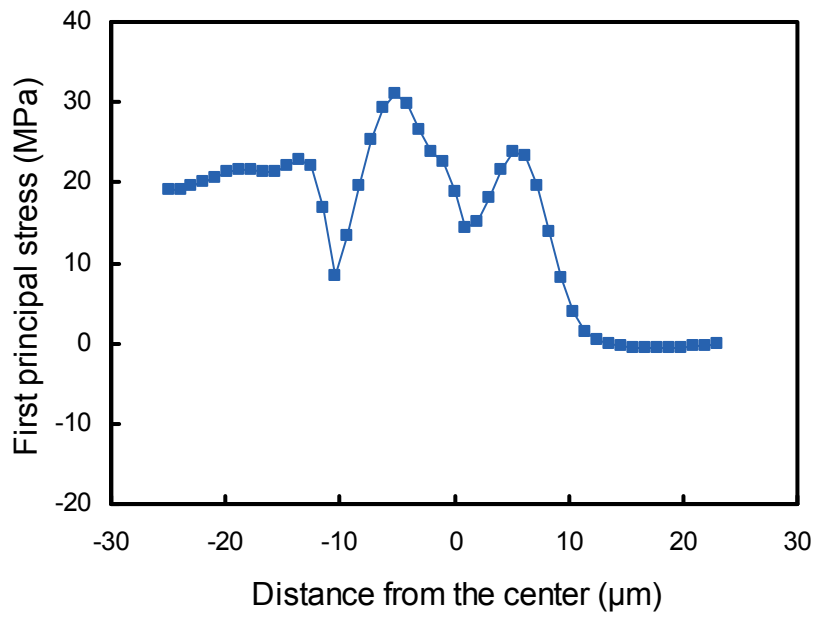


Fig. 2.18 Stress distribution at the top of 2x ULK layer of model-1 at step 3.

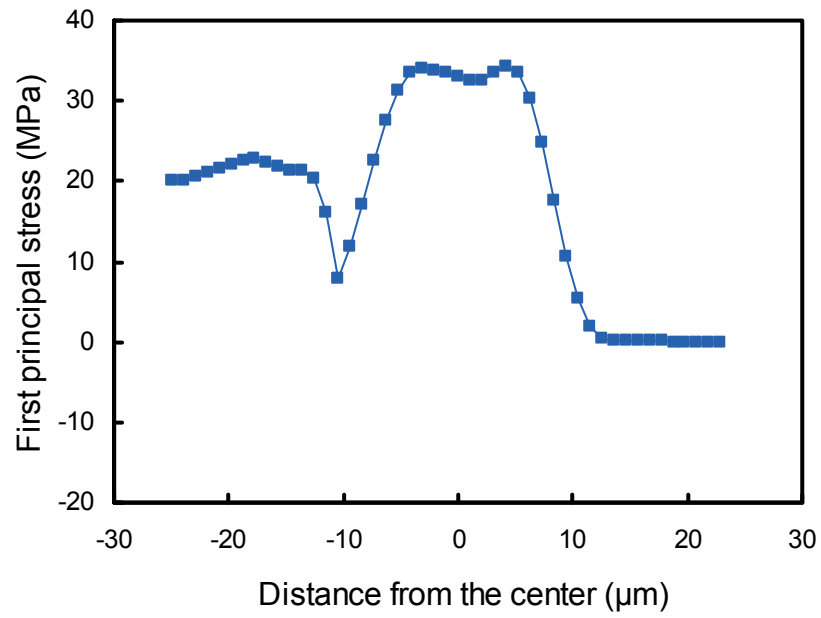


Fig. 2.19 Stress distribution at the top of 2x ULK layer of model-1 at step 4.

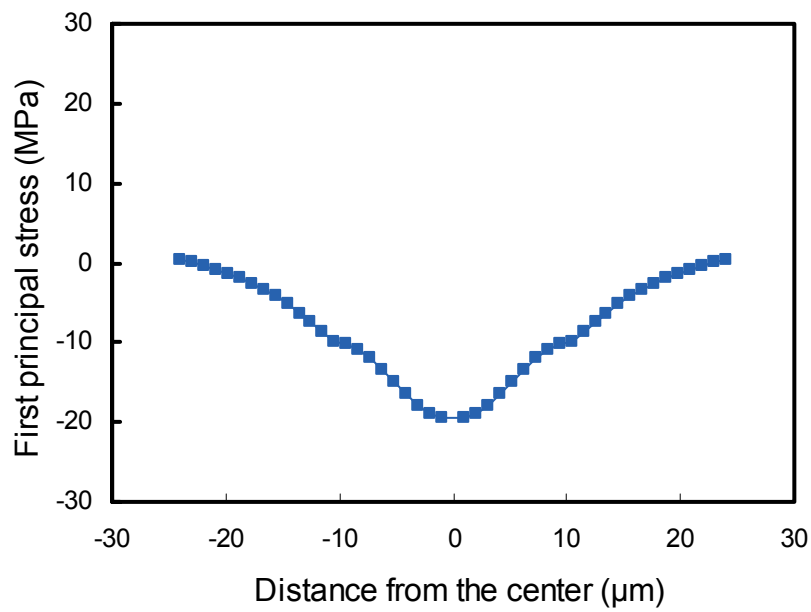


Fig. 2.20 Stress distribution at the middle of 2x ULK layer of model-1 at step 1.

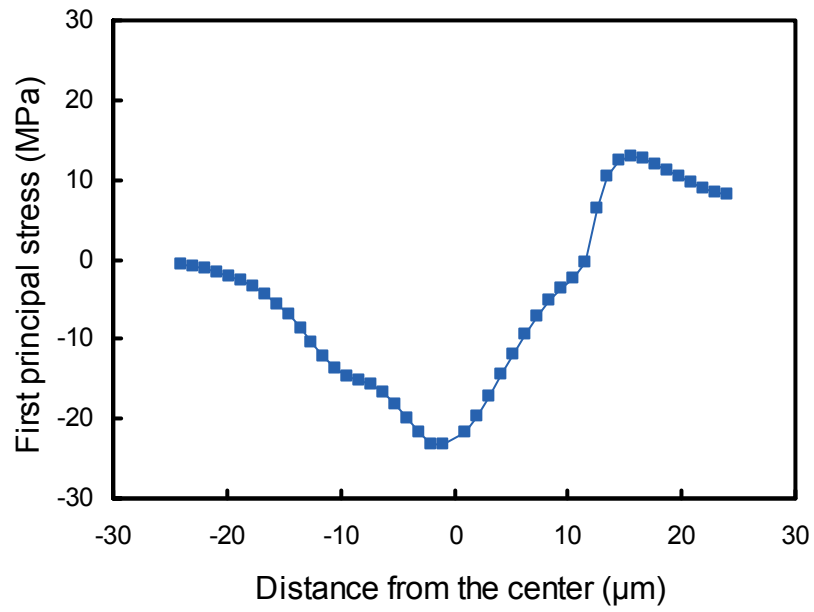


Fig. 2.21 Stress distribution at the middle of 2x ULK layer of model-1 at step 2.

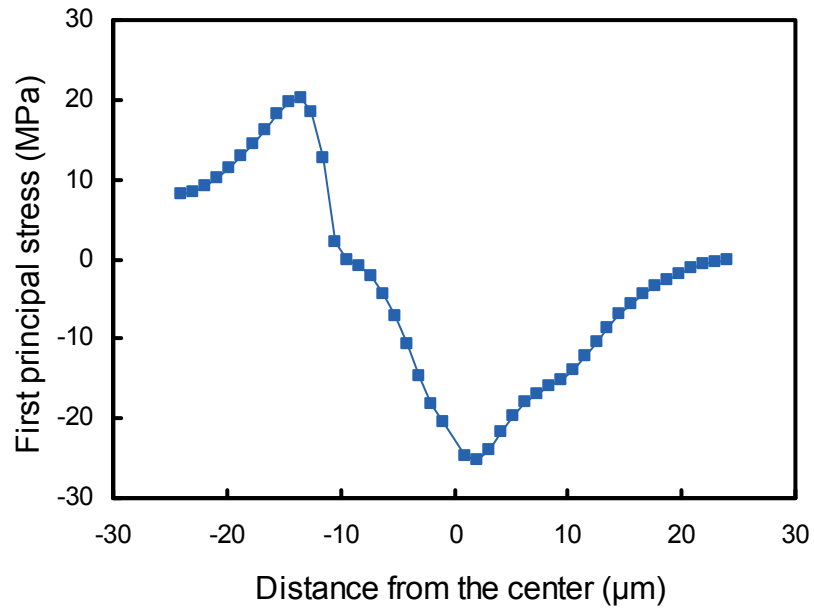


Fig. 2.22 Stress distribution at the middle of 2x ULK layer of model-1 at step 3.

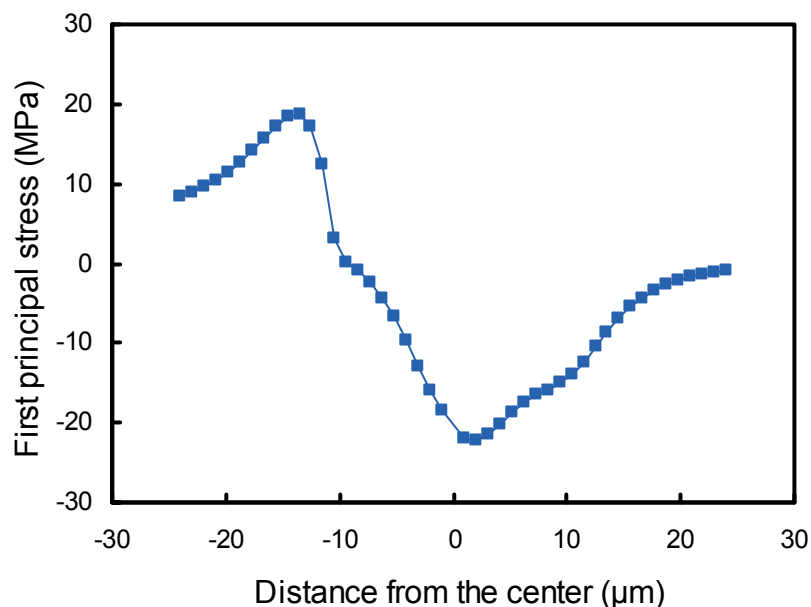


Fig. 2.23 Stress distribution at the middle of 2x ULK layer of model-1 at step 4.

配線構造と配線密度による応力低減の評価

Fig. 2.24 に配線構造ビア・スタックとサーペンタインの2種類でそれぞれ配線密度変化させたモデル1から6の2x ULK 上面および中央面ですべてのステップの中で発生する最大の応力を示す．ここではモデル1の2x ULK 上面で生じる最大応力を基準として任意単位で表示した．2x ULK 上面に生じる引張応力の傾向は、先述の荷重の影響を調べた結果と一致している．VS-3はVS-1に比べて32%高い応力値となり、Serp-3はSerp-1に比べて34%高い応力値となっており、ビア・スタック、サーペンタインそれぞれの構造で配線密度が低くなると応力は大きくなる．またSerp-1はVS-1に比べて12%低い応力値であり、サーペンタイン構造のほうが応力低減に有利である．一方、2x ULK 中央面で発生する最大の応力は2x ULK 上面とは異なる傾向を示している．VS-3はVS-1に比べて16%低い応力値となり、Serp-3はSerp-1に比べて5%低い応力値となっており、ビア・スタック、サーペンタインそれぞれの構造で配線密度が低くなると応力は小さくなる．またSerp-1はVS-1に比べて1%未満の応力値の差であり、構造の違いによる影響はわずかである．2x ULK 上面に生じる応力が2x ULK 中央面に生じる応力よりも大きいことから、応力低減には2x ULK 上面での傾向を踏まえて、ビア・スタック構造よりもサーペンタイン構造を採り、配線密度を高めることが応力低減に有効であると考ええる．

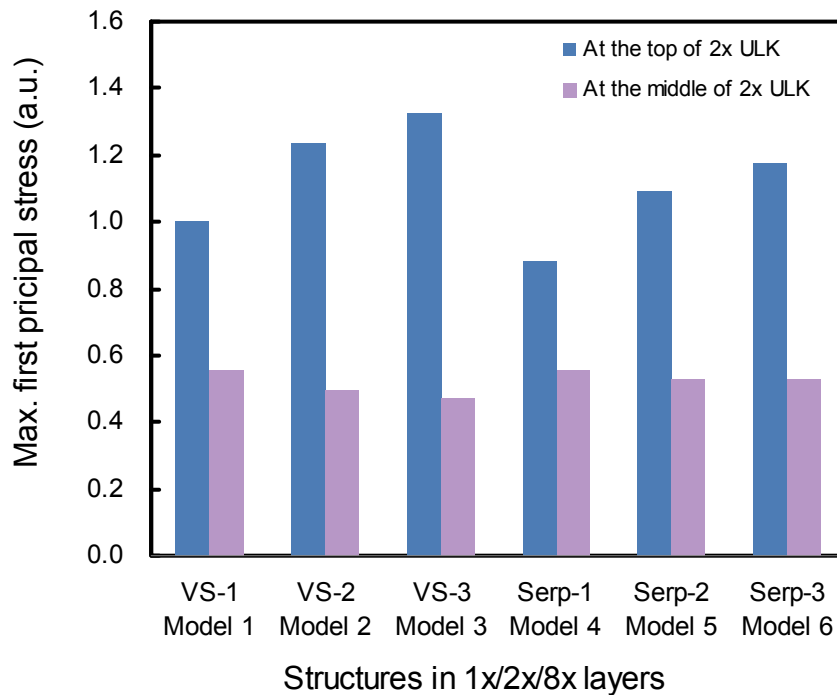


Fig. 2.24 Maximum first principal stress (tensile stress) in the 2x ULK layer (model-1, 2, 3, 4, 5 and 6).

積層構造による応力低減の評価

積層構造による応力低減を評価するため SiO_2 層, FTEOS 層, Al パッドそれぞれの厚みが応力に与える影響を調べた. Fig. 2.25 は SiO_2 層の厚みを $0.7\ \mu\text{m}$, $1.4\ \mu\text{m}$, $2.1\ \mu\text{m}$ に変化させたモデル 7, 1, 8 の最大応力を Fig. 2.24 と同様にプロットしたグラフである. 2x ULK 上面においては応力と SiO_2 層の厚みに明確な関係は認められないが, 2x ULK 中央面では SiO_2 層の厚みが増加すると応力も単調に減少する関係が認められる. Fig. 2.26 は FTEOS 層の層数を 0 層, 1 層, 2 層に変化させたモデル 9, 1, 10 の最大応力を Fig. 2.24 と同様にプロットしたグラフである. ここでも Fig. 2.25 と同様に 2x ULK 上面においては応力と FTEOS の層数の間に明確な関係は認められないが, 2x ULK 中央面では FTEOS の層数が増加すると応力も単調に減少する関係が認められる. 一般的には ULK 上部に積層される弾性率や破断強度の高い SiO_2 層や FTEOS 層の厚みを増すとパッド剥がれは発生しにくくなると考えられているが, 2x ULK 上面で得られた最大応力の結果はこれと合致しない. 一方で 2x ULK 中央面で得られた最大応力の結果は上記の考えに合致している. パッド剥がれの現象が発現するのはワイヤのルーピング中やワイヤプル試験でワイヤからの引張荷重がかかる時であり, この時には SiO_2 層や FTEOS 層の厚みの 2x ULK 上面に生じる応力への影響は異なってくると考えられる. ワイヤからの引張荷重により生じる ULK 層での引張応力はここでは解析を行っていないため今後研究すべき課題となる. Fig. 2.27 は Al パッドの厚みを $1.2\ \mu\text{m}$, $2.1\ \mu\text{m}$, $4.0\ \mu\text{m}$ に変化させたモデル 11, 1, 12 の最大応力を Fig. 2.24 と同様にプロットしたグラフである. 2x ULK 上面において Al パッド厚みが増加すると応力が単調に減少する関係が見られる. Al パッド厚み $4.0\ \mu\text{m}$ のモデルでは $1.2\ \mu\text{m}$ のモデルに比べて 56% 応力が減少して

おり、Al パッドを厚くすることによる応力低減の効果は大きい。一方で 2x ULK 中央面では応力と Al パッド厚みの間に明確な関係は認められない。SiO₂ 層、FTEOS 層の厚みを変化させた結果と異なる傾向となっているのは、Al パッドの弾性率が低く硬化則を適用した塑性変形の影響と考えられる。

ここでは SiO₂ 層、FTEOS 層の厚みを増しても最大応力の生じる 2x ULK 上面では応力低減が見られない結果が得られた。ワイヤに引張荷重がかかる場合に SiO₂ 層、FTEOS 層の厚みが ULK 層の応力に与える影響は今後の研究課題である。Al パッド厚みを増すと ULK 層内での最大主応力を大きく低減できることが分かった。しかし厚い Al パッド上のワイヤボンディングでは Al スプラッシュが大きくなりやすく、特にファインピッチのボンディングで接合条件のプロセスウィンドウが小さくなる懸念があるため Al パッドを無制限に厚くはできない。このためデバイスの配線ルールやワイヤボンディングピッチの仕様を踏まえて ULK 層の応力低減を図る各層厚みと構造の最適化が必要となる。

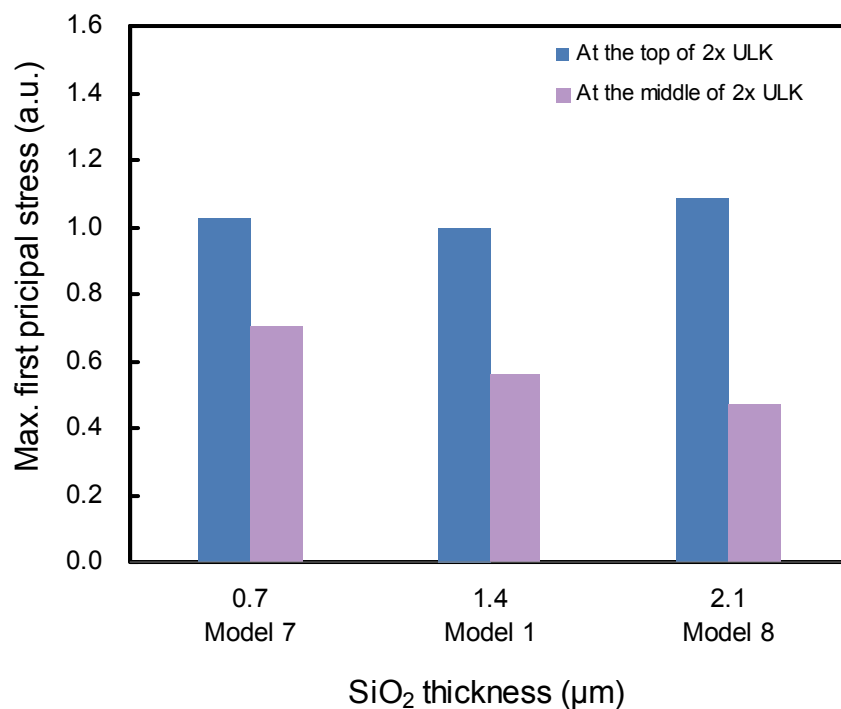


Fig. 2.25 Maximum first principal stress (tensile stress) in the 2x ULK layer (model-1, 7 and 8).

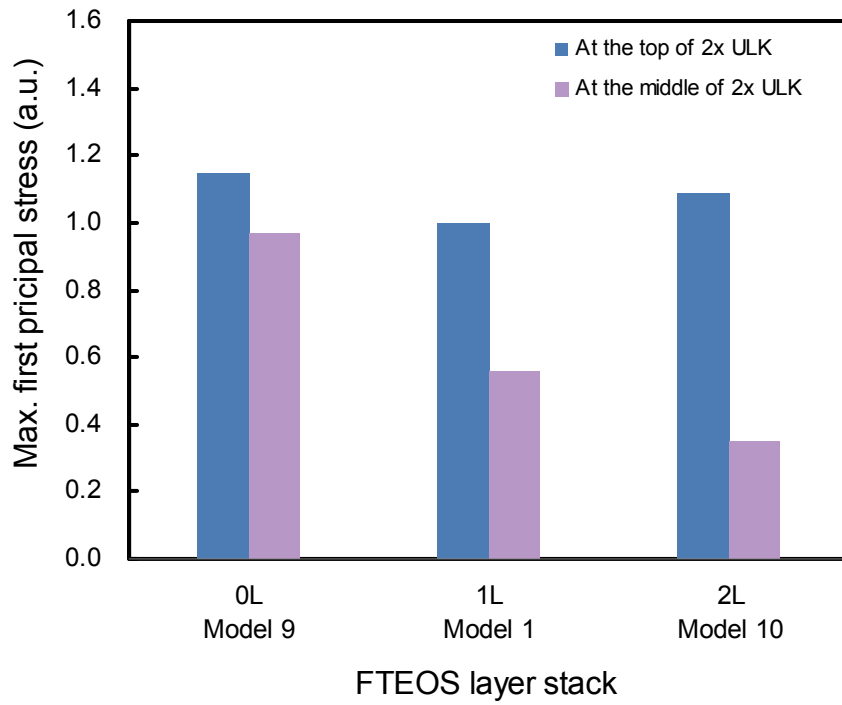


Fig. 2.26 Maximum first principal stress (tensile stress) in the 2x ULK layer (model-1, 9 and 10).

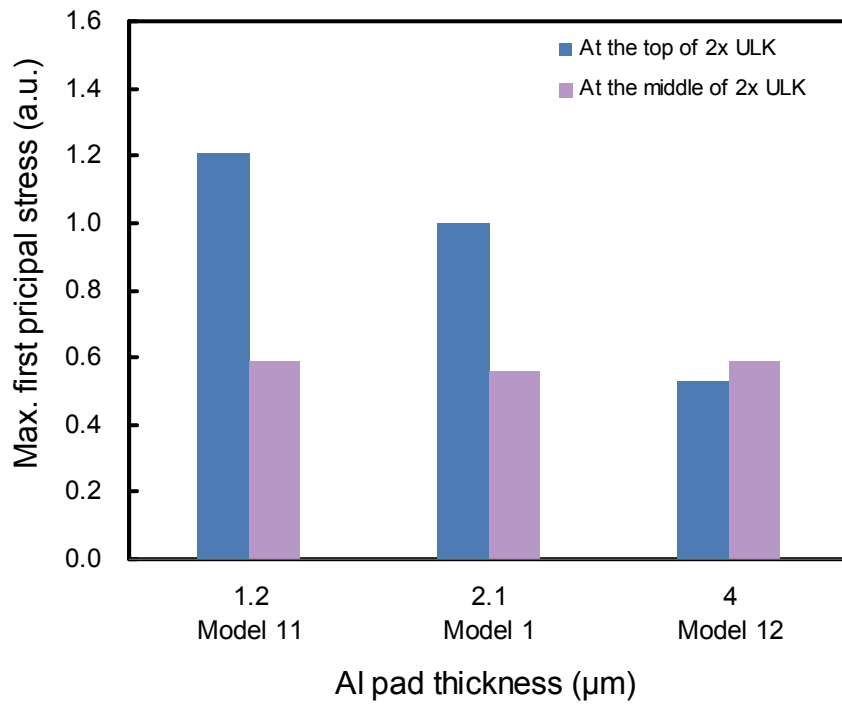


Fig. 2.27 Maximum first principal stress (tensile stress) in the 2x ULK layer (model-1, 11 and 12).

2.4 ワイヤブル試験におけるパッドはがれ発生率と配線層の応力の相関の解明

2.4.1 ワイヤボンディング実験

実験で用いた試料は 32 nm テクノロジーのチップで、パッドピッチ 35 μm 、パッド開口幅 29 μm のワイヤボンディング・パッドが配置されている。パッドの組成は Al-0.5%Cu で 2.1 μm の厚みである。Fig. 2.2 で示した 5-2-1 と 5-2-2 の 2 種類のメタル配線層の構成のチップを準備した。このチップはパッド下部に様々な種類の配線構造を持つが、ここでは Fig. 2.28 に示すサーペンタイン、ビア・チェーン、ビア・スタックの 3 種類の配線構造を持つパッド上にワイヤボンディングした結果を考察する。ビア・チェーン構造は各配線層をビア接続し、デージー・チェーンを形成したものである。図示したようにビア・チェーン配線間にビア・スタック構造を配置し、配線のピッチを変えることで配線密度を変化させたバリエーションがある。同様にサーペンタインでも配線密度を変化させたバリエーションがある。5-2-1 のチップではこれら全ての構造で実験を行い、5-2-2 のチップではビア・チェーン構造のみで実験を行った。

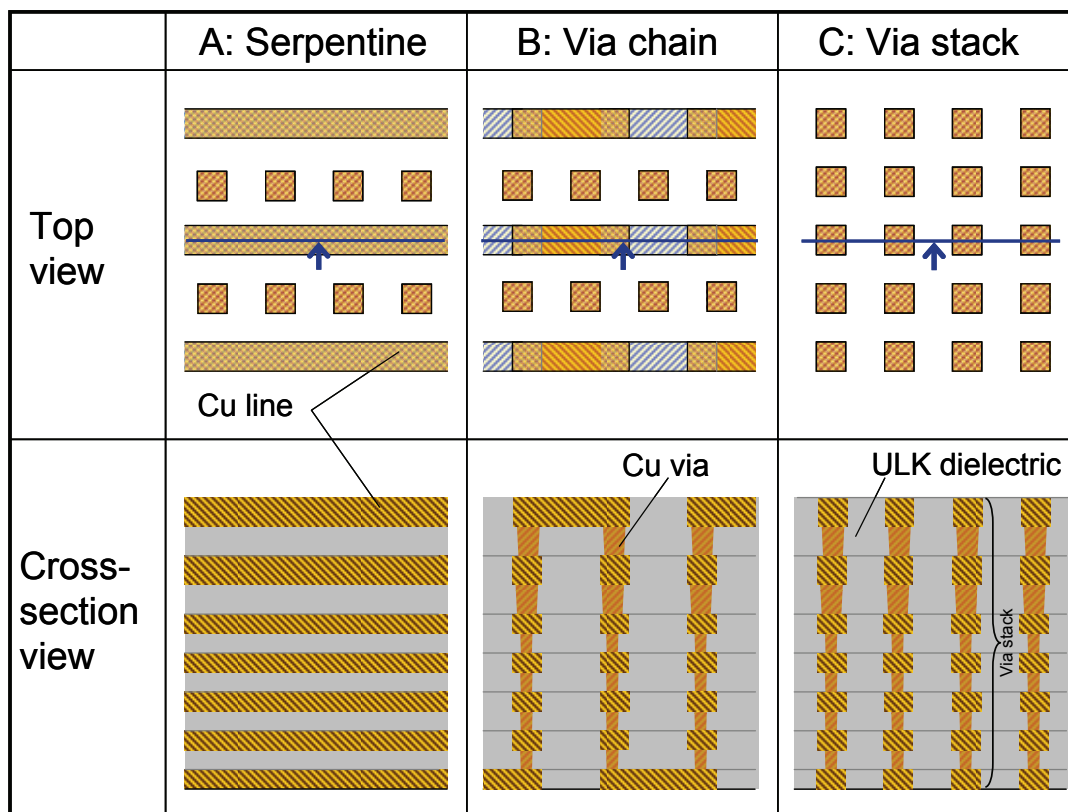


Fig. 2.28 Via chain structure under the bond pad of the test chip.

2.4.2 パッド下部配線構造と配線層ダメージの関係

試料のチップを PBGA (Plastic Ball Grid Array) 基板にチップ付けした後、15 μm 径の 99.99% Au の金線を用いてワイヤボンディングし、ワイヤプル試験を行った。破断モードは、ワイヤネック切れを正常モードとし、パッド剥がれを不良モードとした。それぞれの破断モードは Fig. 1.11 (a), (b) に示したものである。Fig. 2.29 はワイヤプル後にパッド剥がれが発生したパッドを FIB (Focused Ion Beam) で加工した後に SEM (Scanning Electron Microscope) で観察した写真である。破断の最下部は ULK 層にあり、初期クラックがこの層で発生したと考えられる。

5-2-1, 5-2-2 それぞれの積層のチップで配線構造・配線密度の異なる下部構造を持つパッドにワイヤボンディングしワイヤプル試験でのパッド剥がれ発生率を調べた。パッド下部の配線密度の指標としてビアの密度を算出し、ビア・スタック構造のビア量を基準とした相対ビア密度とパッド剥がれ発生率の関係を求めたグラフを Fig. 2.30 に示す。図中の相対ビア密度が 0% は、サーペンタイン構造の配線パターンは存在するものの上下配線をつなぐビアがまったく使われていないものを指す。

5-2-1 の構成では、ビア・チェーンの相対ビア密度が約 10% のところでパッド剥がれの発生率が一番高く、相対ビア密度が 35% 程度まで高くなるとパッド剥がれ発生率は著しく低下する。サーペンタインとビア・チェーンで約 20% の相対ビア密度の場合においてパッド剥がれ発生率に顕著な差が見られる。ビア・スタックは相対ビア密度が 100% であり、パッド剥がれが発生していない。5-2-2 の積層のチップではビア・チェーンのどのビア密度でもパッド剥がれは発生しておらず、5-2-1 の結果と顕著な差が現れている。

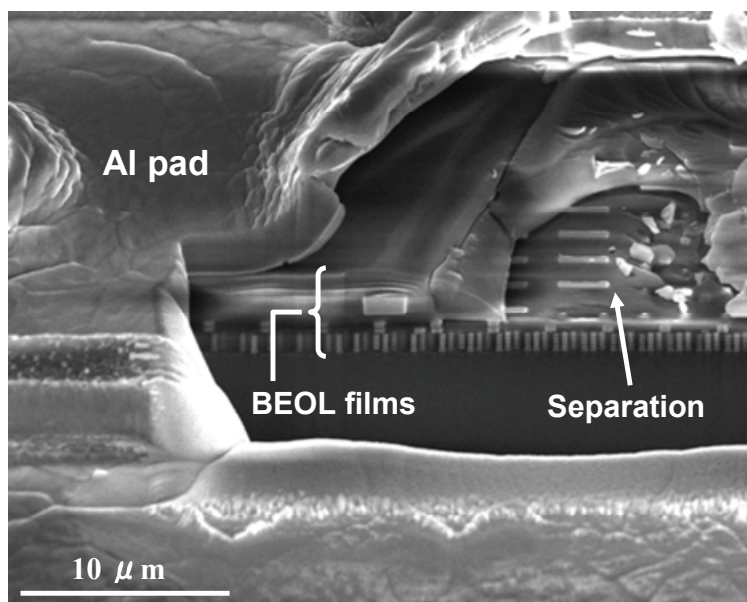


Fig. 2.29 SEM photograph of a pad tearout after FIB sectioning.

2.4.3 パッド下部配線構造の複合弾性率と線層ダメージの関係

5-2-1 のビア・チェーン構造では相対ビア密度とパッド剥がれ発生率に明らかな相関が見られるが、5-2-1 のサーペントライン構造および 5-2-2 のビアチェーン構造ではパッド剥がれ発生率が低く相対ビア密度との相関は明確ではない。さらに各配線構造で 1x 層から SiO₂ 層まで積層された構造体としての Z 方向の実効弾性率を複合則を用いて算出し、パッド剥がれ発生率との相関を求めた (Fig. 2.31)。これより積層構成や配線構造によらず、実効弾性率がある閾値を下回ると急激にパッド剥がれ発生率が高くなることを確認できる。しかしながらここで得られたサーペントラインとビア・スタックでのパッド剥

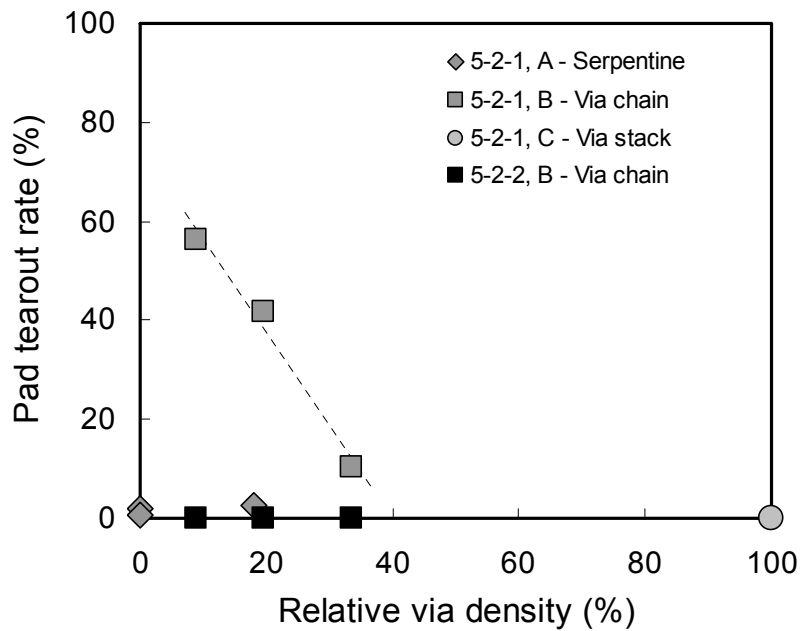


Fig. 2.30 Pad tearout rate as a function of relative via density.

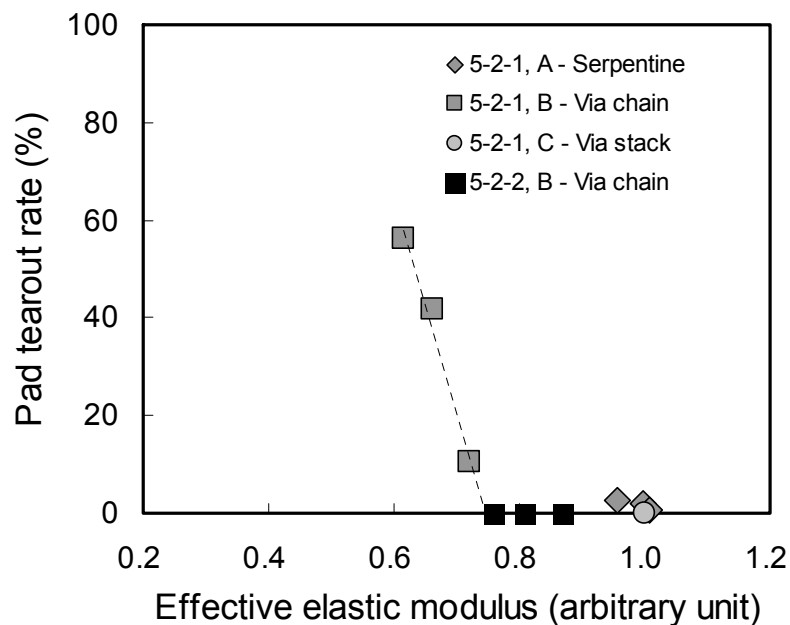


Fig. 2.31 Pad tearout rate as a function of effective elastic modulus

がれ発生率は低いものであり、サーペントインとビア・スタックそれぞれの構造で急激にパッド剥がれ発生率が増える実効弾性率の閾値はFig. 2.31で見られるビア・チェーンのものとは異なることもあり得る。

2.5 結言

Low-k, ULK を層間絶縁膜に用いるチップのボンドパッド下部の層構成・配線構造を変化させたときの各層の複合特性を均質化モデルから算出し、3D FEM モデルでワイヤボンディング荷重および超音波印加によって ULK 層内に発生する応力を FEM 解析により求めた。ビアスタック構造、サーペントイン構造ともに配線密度が高い方が応力を低減できる。配線構造を比べるとビア・スタック構造よりもサーペントイン構造の方が応力が低くなる。Al パッドの厚みを増すと ULK 層内での最大主応力を低減できる。SiO₂, FTEOS の厚みを増すと 2x ULK 層の中央面では応力低減が期待できるが、最大応力の生じる 2x ULK 層の上面では超音波印加による引張応力の低減は見られない。SiO₂, FTEOS の厚みの影響はワイヤから引張荷重がかかる場合についても研究する必要があると考える。

ボンドパッド下部に異なる層構成・配線構造を持つチップを用いて行ったワイヤボンディングの実験から、積層された配線構造体としての実効弾性率を因子としてパッド剥がれとの関係を求めるとパッド剥がれが急激に増える閾値となる実効弾性率が容易に推定できることが分かった。ただし配線構造のタイプが異なる場合に閾値は変動することが予想され、さらなる実験データでの検証が必要であるが、配線構造ごとの実効弾性率と応力の関係からパッド剥がれを低減する層構成や配線構造の比較検討を行うことは初期段階での設計パターンの絞込みに有用であると考ええる。

本研究で調べた繰返し性のある基本的な配線構造は均質化によって複合特性を求める方法に適しているが、特異性・局所性の高い配線パターンでは均質化で求める複合特性から応力を推定することができない場合もあり得る。そのようなケースでは詳細なマイクロモデルでの解析が必要となる。

第 3 章 フリップチップ接合用材料の機械的特性がフリップチップのパッド下部配線層の熱応力に与える影響

3.1 緒言

現在、鉛フリーはんだは電子機器の実装において広く普及しており、フリップチップ接合ではチップ上に Sn-Ag バンプと基板上の Sn-Ag-Cu のプレソルダーを用いるのが代表的である。鉛フリーはんだは、Sn-Pb 共晶はんだに比べて融点が高く、かつ弾性率も高いため、はんだ接合部やチップのパッド下部の配線層の応力が高くなる。Fig. 1.12 に示すように、フリップチップ接合の冷却時にチップと基板の線膨張係数のミスマッチにより発生する応力で、特にチップコーナー付近のパッド下部の配線層に用いられる Low-k / Ultra low-k (ULK) 絶縁膜においてクラックやダメージが起こりやすい。この現象は、チップ裏面から超音波顕微鏡で観察すると白いスポットに見えるためホワイトバンプと呼ばれている⁵⁰⁾。この課題に対してフリップチップの接合温度を下げることで熱機械的応力を低減するために、様々な低融点はんだの検討が行われてきた^{88, 92)}。

アレイ配置のフリップチップのピッチは 150 μm 程度まで微細化されてきており、接合部は 80 μm 程度となっている。チップ接合のような微小サイズにおいては粒界の大きさや結晶方位がその機械特性に影響を与えることが知られている⁹⁶⁾。本研究では、低融点はんだでパッド下部配線層に生じる応力を低減することに着目し、低融点の 2 種類のはんだ、Sn-58 mass%Bi(以降 Sn-58Bi, 融点 139°C)と In-3 mass%Ag(以降 In-3Ag, 融点 143°C), と従来から広く用いられている Sn-3 mass%Ag-0.5 mass%Cu(以降, SAC305)の計 3 種類のはんだを用意し、微細試験片(直径 0.5 mm, 標点距離 2.0 mm)を作製して引張試験を行い、機械的特性を求めた。ここで得られた 0.5%耐力とクリープ特性を用いて、はんだバンプと Cu ピラーの 2 種類のバンプ構造と各はんだのプレソルダーとの組み合わせで FCPBGA のフリップチップ接合後にパッド下部配線層にかかる熱応力を FEM (Finite element method) で解析し、接合温度とフリップチップ接合用材料の機械的特性がフリップチップ接合材料のフリップチップのパッド下部配線層の熱応力に与える影響を解明した。

3.2 はんだ微細試験片による引張試験

3.2.1 試験方法

本研究では Sn-58Bi, In-3Ag, SAC305 の 3 種類のはんだを準備し、荻谷らが開発した溶融はんだを射出形成する方法⁹⁷⁾で微細試験片を作製した。それぞれのはんだインゴットを各はんだの融点直下の温度で押し出し加工し、直径 1.2 mm の線材を作製した。その後、金型を用いてホットプレート上にて線材を融点+30°Cの温度で溶融させ、直径 0.5 mm, 標点距離 2.0 mm のダンベル形状の微細試験片を作製した。溶融はんだの凝固時の冷却速度は 4~5°C/s であった。この試験片には時効処理は施さなかった。引張試験には鷺宮製作所製微小加重試験機 LMH-207-10 を用い、4 条件の歪み速度($5.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $5.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)と 3 条件の温度(室温(25°C), 80°C, 120°C)で測定を行った。歪み速度はクロスヘッドの変位で制御し、試験片の破断が発生するまで初期歪み速度を維持した。3 種類のはんだの試験片それぞれで各条件の測定を行った。

初期試料を中央部付近でカッターで切断し、研磨紙およびアルミナ研磨材を用いて断面研磨を行った。さらに In-3Ag の試料はクロスセクションポリッシャーを用いてイオンビームによる研磨を施した。それぞれの試料の断面は SEM (Scanning electron microscope) と EDX (Energy dispersive X-ray spectrometry) により観察した。

3.2.2 組織観察

Fig. 3.1(a)は Sn-58Bi の初期試料の SEM 写真である。EDX の結果から濃灰色の領域は Sn 相、淡灰色の領域は Bi 相である。Fig. 3.1(b)は In-3Ag の組織を示す。EDX の結果から淡灰色の粒状の組織は AgIn_2 であり、その大きさは約 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ から約 $10\text{ }\mu\text{m}$ である。また濃灰色の領域は In 相である。Fig. 3.1(c)は SAC305 の組織を示す。EDX の結果より淡灰色の微細粒は Ag_3Sn である。ほとんどの Ag_3Sn 粒の大きさは $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下である。また濃灰色の領域は Sn 相である。SnCu の金属間化合物はこの試料では特定することができなかった。

3.2.3 引張試験結果

Fig. 3.2, Fig. 3.3, Fig. 3.4 は引張試験から求めた Sn-58Bi, In-3Ag, SAC305 の歪み速度 $5.0 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 、室温(25°C)における応力-歪み曲線である。ここでは試料の標点部分は体積一定で変形すると考えて、測定ポイントごとの断面積を用いて応力値を求めた。同じく体積一定の変形として歪みは次式を用いて求めたものである。

$$\varepsilon = \ln[(L + \Delta L) / L] \quad (3.1)$$

ここで ε は歪み、 L は初期標点距離、 ΔL は変位である。各図の直線は、弾性変形領域のデータから最小二乗法で求めた傾きを持ち、歪み 0.2%、応力 0 の点を通るものである。この直線と応力-歪み曲線の交点から各はんだの 0.2%耐力を求めた。これらは Sn-58Bi で約 80 MPa, In-3Ag で約 10 MPa, SAC305 で約 42 MPa となる。融点の近い Sn-58Bi と In-3Ag であるが 0.2%耐力に大きな違いが現れている。また SAC305 は両者の中間に近い 0.2%耐力である。

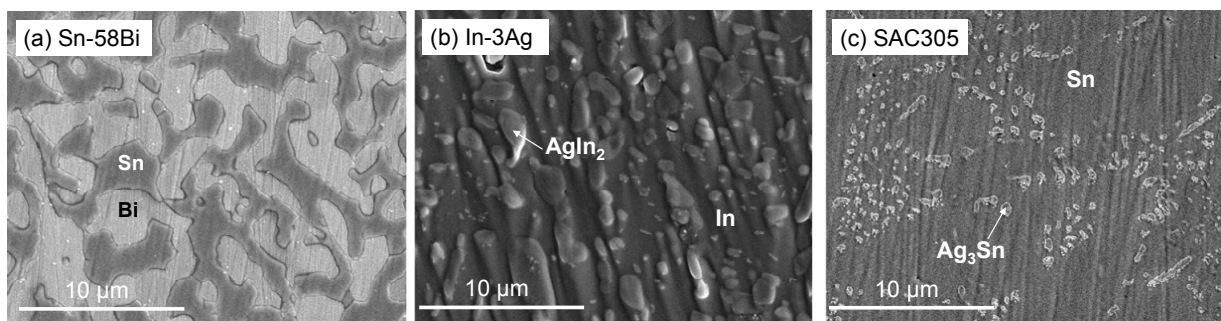


Fig. 3.1 SEM photographs of sectioned initial specimens for (a) Sn-58Bi, (b) In-3Ag and (c) SAC305.

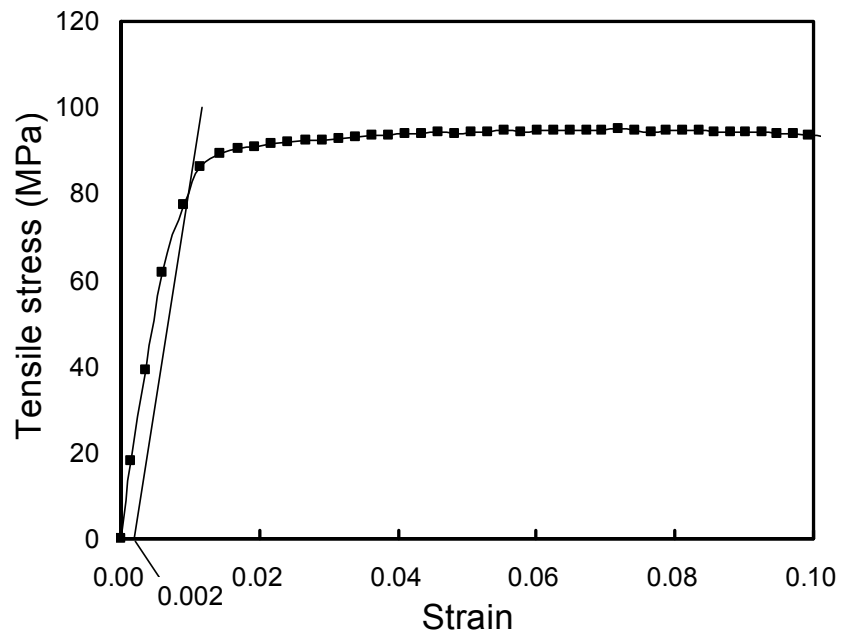


Fig. 3.2 Stress-strain curve for Sn-58Bi at the strain rate of $5.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ at R. T.

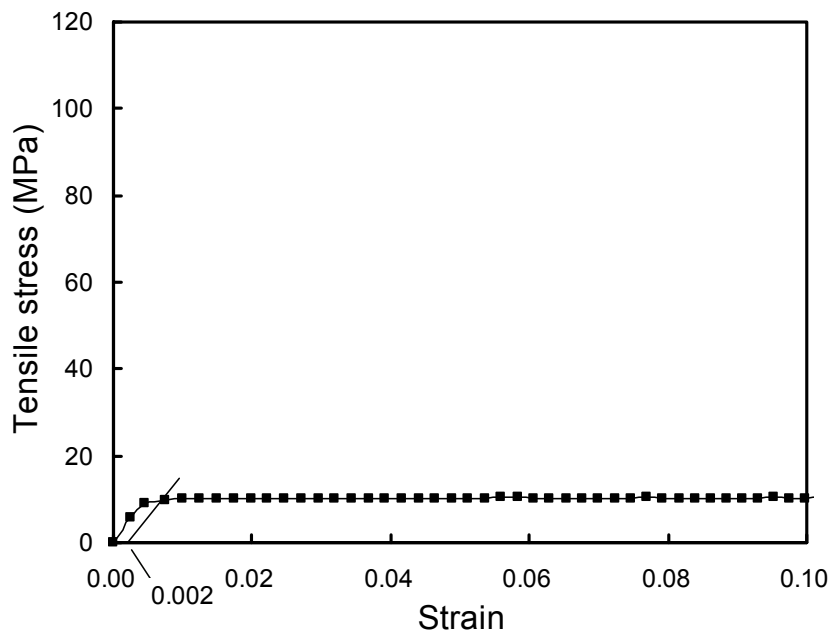


Fig. 3.3 Stress-strain curve for In-3Ag at the strain rate of $5.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ at R. T.

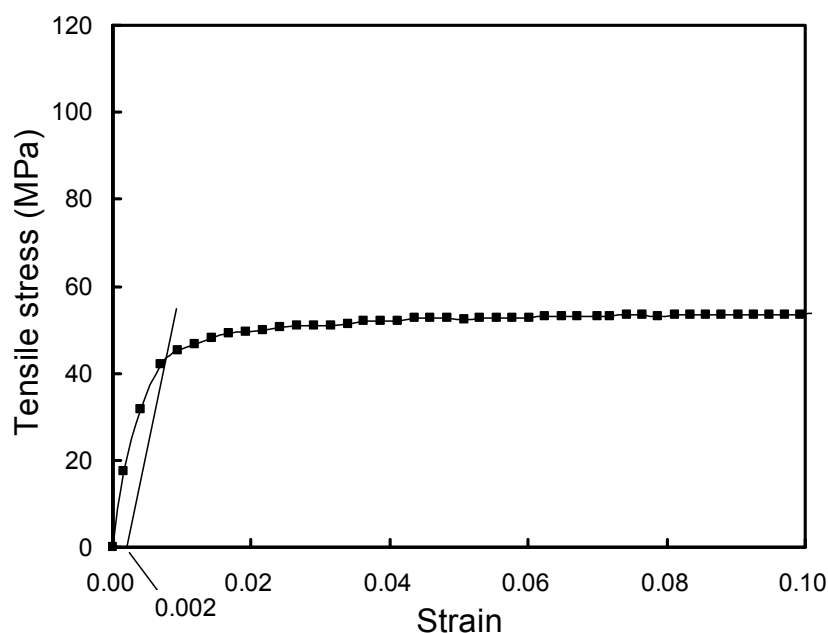


Fig. 3.4 Stress-strain curve for SAC305 at the strain rate of $5.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ at R. T.

Fig. 3.5, 3.6, 3.7 はそれぞれ室温(25℃), 80℃および 120℃における引張応力と歪み速度の相関を示す. Fig. 3.8, 3.9, 3.10 はそれぞれ室温, 80℃および 120℃における伸びと歪み速度の相関を示す. また Fig. 3.11 は歪み速度 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ における引張応力と温度の相関を示す.

Fig. 3.5 から室温では 3 種類のはんだで引張応力が大きく異なることが分かる. Sn-58Bi が最も引張応力が高く 71~100 MPa, 次いで SAC305 の引張応力が 41~53 MPa であり, In-3Ag が最も低く 8.3~12 MPa となり, それぞれ歪み速度が増加すると引張応力が増加する傾向が見られる. Fig. 3.6, Fig. 3.7 のそれぞれ 80℃および 120℃の場合でも Sn-58Bi と In-3Ag は歪み速度の増加にしたがって引張応力が増加しているが, SAC305 は歪み速度の増加による引張応力の増加は顕著ではない. Fig. 3.11 から温度上昇による引張応力の低下は Sn-58Bi で最も大きく, 120℃では Sn-58Bi と SAC305 の引張応力が同等になることが分かる. また, In-3Ag の引張応力は室温から 120℃の間で大きな変化を示していない.

Fig. 3.8 で示すように室温での Sn-58Bi, In-3Ag, SAC305 の伸びは最も高歪み速度の場合を除いて大きな差異はない. Fig. 3.9, Fig. 3.10 で見られるよう Sn-58Bi は温度の上昇とともに伸びは大きくなり, 歪み速度と伸びの相関も認められる. 歪み速度 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ の 120℃での伸びは 25℃の場合の約 3 倍である. これは Sn-58Bi の融点が 139℃であることによると考えられる. 一方で In-3Ag と SAC305 では温度上昇による伸びの大きな増大は見られない. In-3Ag の融点(143℃)は Sn-58Bi に近いが顕著な違いが認められる.

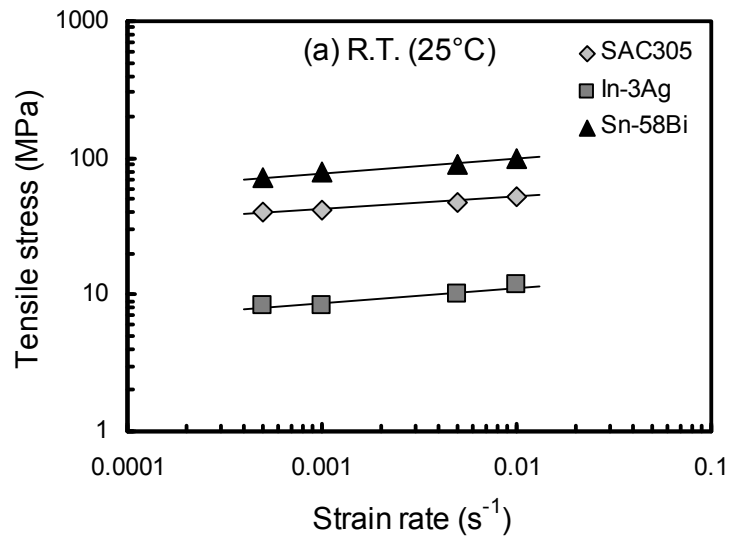


Fig. 3.5 Relationship between tensile stress and strain rate at R. T.

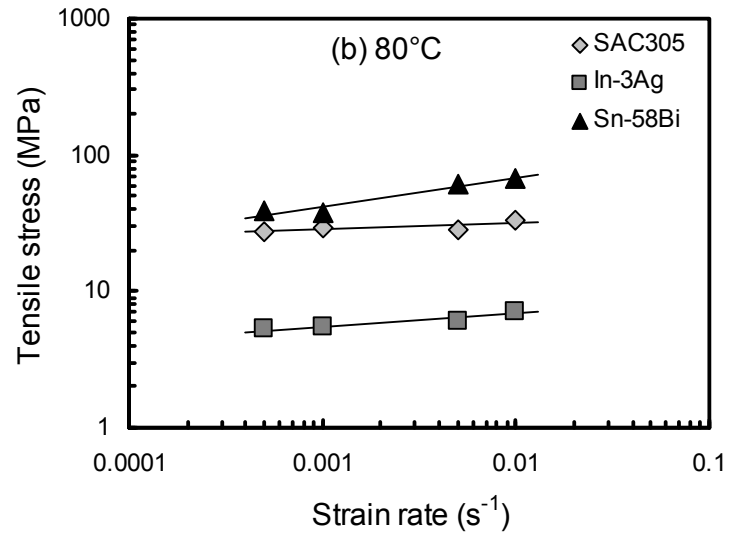


Fig. 3.6 Relationship between tensile stress and strain rate at 80°C.

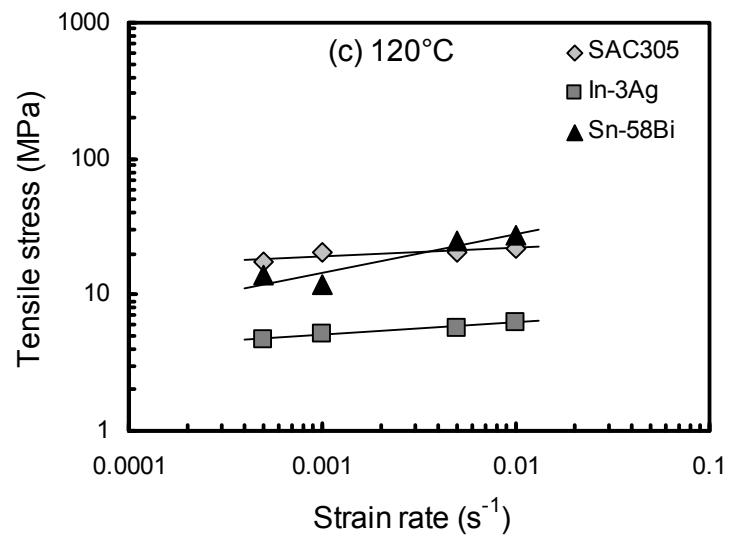


Fig. 3.7 Relationship between tensile stress and strain rate at 120°C.

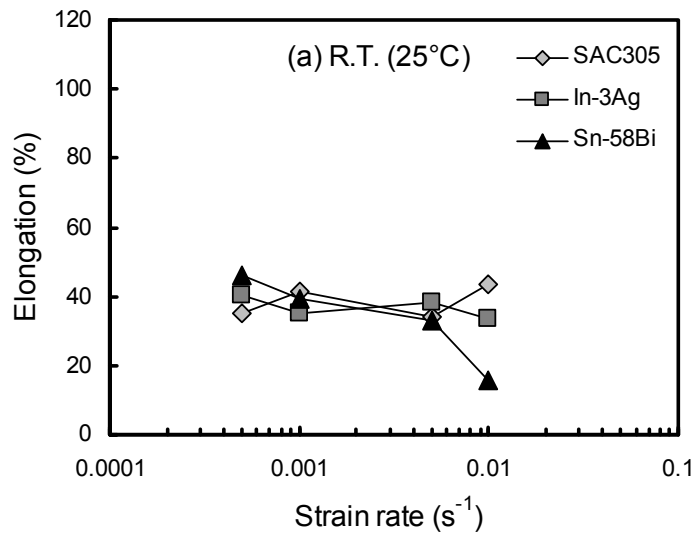


Fig. 3.8 Relationship between elongation and strain rate at R. T.

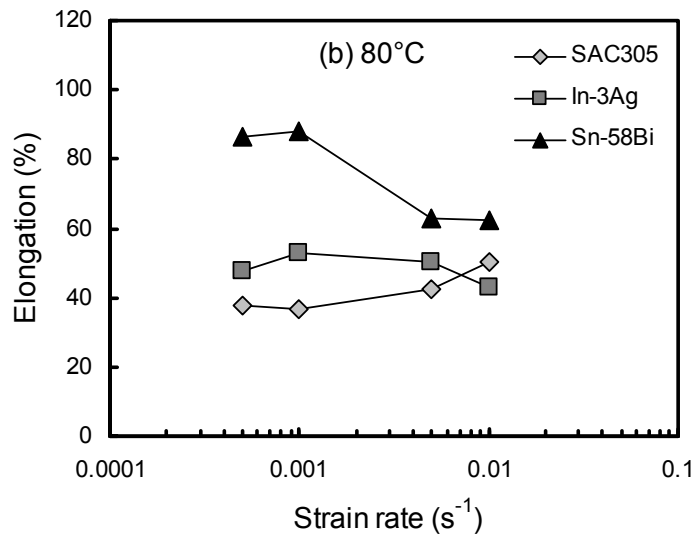


Fig. 3.9 Relationship between elongation and strain rate at 80°C.

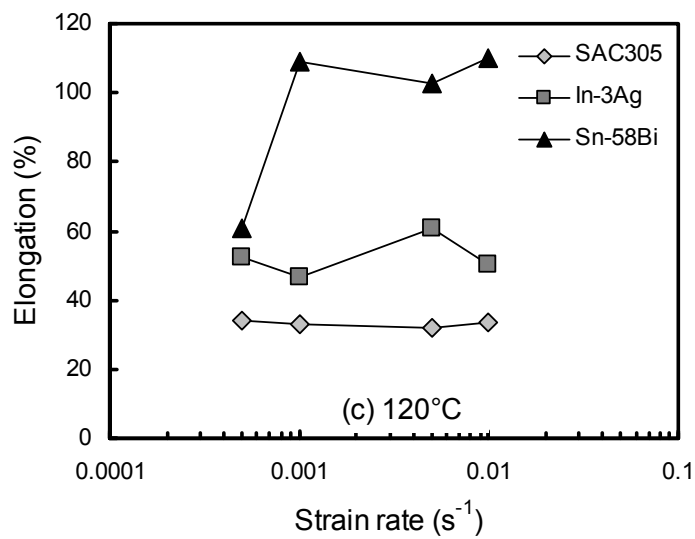


Fig. 3.10 Relationship between elongation and strain rate at 120°C.

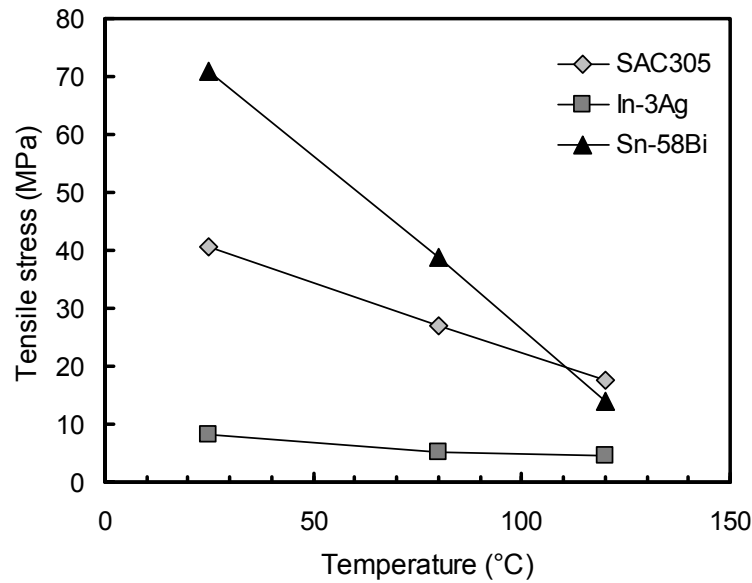


Fig. 3.11 Relationship between tensile stress and temperature at strain rate of $5.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

3.2.4 クリープ特性

一般的に定常クリープを表すのにノートン則が用いられる.

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \quad (3.2)$$

ここで $\dot{\epsilon}$ は歪み速度, A は係数, σ は引張応力, n は応力指数である. Fig. 3.12, Fig. 3.13, Fig. 3.14 はそれぞれ室温, 80°Cおよび 120°Cでの真歪み速度と真応力の相関を両対数グラフで示したものである. 近似直線はデータより最小二乗法で求め, それぞれの近似直線から係数 A と応力指数 n を求めた.

Table 3.1 はそれぞれのはんだの係数 A と応力指数 n をまとめたものである. 係数 A はすべてのはんだで温度の上昇とともに大きくなる. Sn-58Bi の係数は, ここで調べた温度範囲では 10^{12} のオーダーで変化するが, In-3Ag の係数は 10^1 のオーダーでわずかにしか変化しない. また SAC305 の係数は 10^2 のオーダーの変化となる. Sn-58Bi の応力指数 n は温度の上昇とともに減少する. ここで得られた Sn-58Bi の応力指数は直径 10 mm の試料を用いて測定された既報⁹³⁾の数値と同様の傾向を示している. In-3Ag の応力指数は 80°Cで最大値 10.4 となり, 調べた温度範囲で単調増加あるいは単調減少の傾向は示していない. この温度範囲での In-3Ag の応力指数の傾向を示すにはさらに多くの温度での測定が必要と考えられる. SAC305 の応力指数は温度の上昇とともに増加し, いずれの温度でも大きな値(> 10)となっている. この値は Sn-3.5Ag-0.75Cu のクリープ特性を求めた既報¹⁰²⁾の値と近いものである.

Sn-58Bi と In-3Ag の融点は近いところにあるが, 80°Cと 120°Cの応力指数は大きく異なっている. また室温と 120°Cにおける係数も大きく異なるものである. 本研究では試料に時効処理を行わなかった. 微細試験片における時効処理のクリープ特性に与える影響についてはさらに今後の研究が必要である.

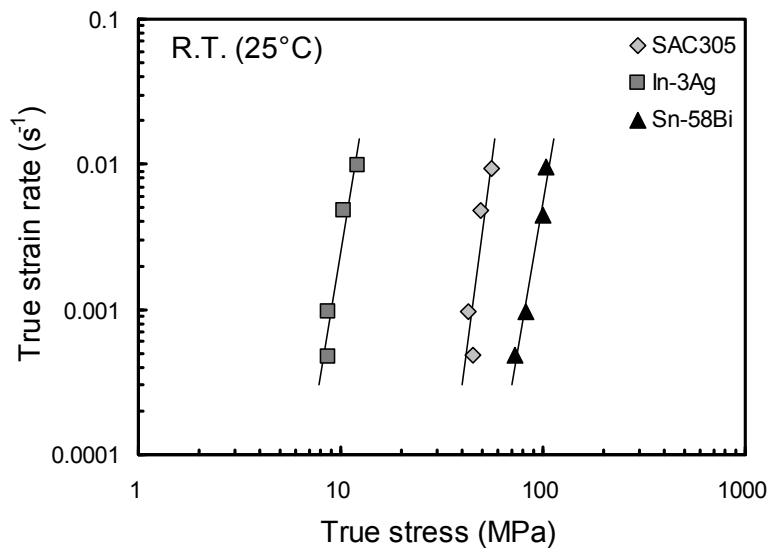


Fig. 3.12 Relationship between true strain rate and true stress at R. T.

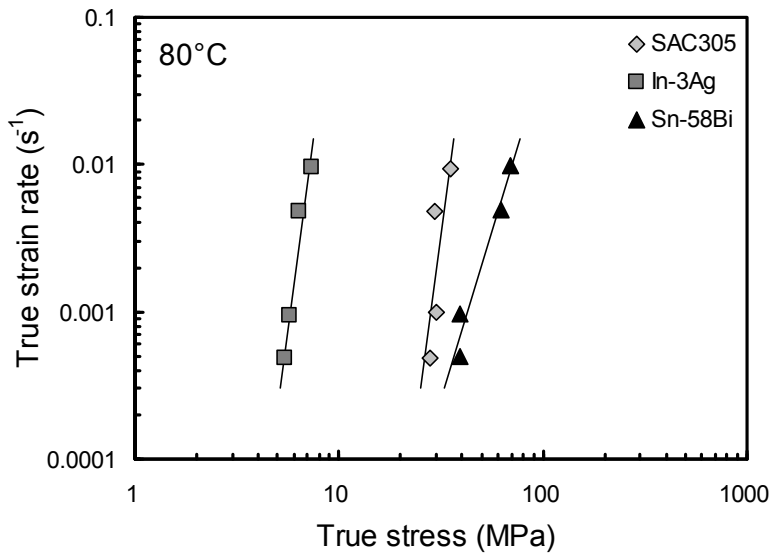


Fig. 3.13 Relationship between true strain rate and true stress at 80°C.

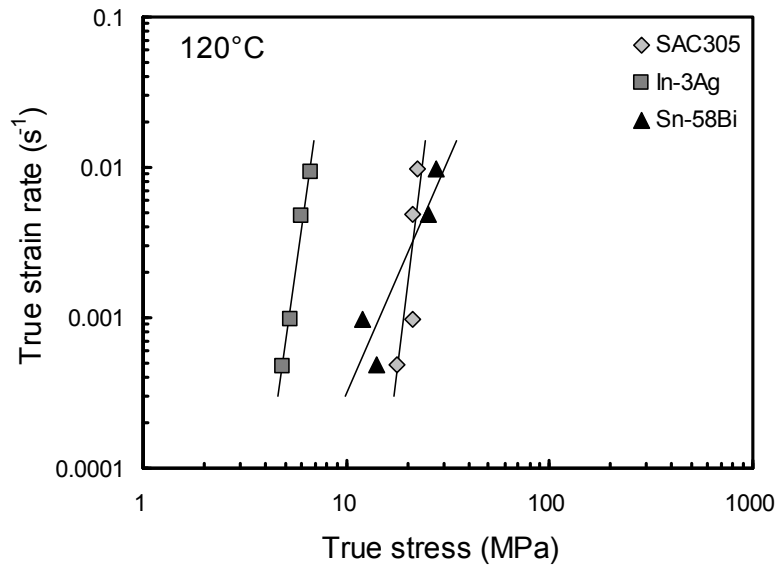


Fig. 3.14 Relationship between true strain rate and true stress at 120°C.

Table 3.1 Creep properties obtained with 0.5-mm-diameter specimens.

Solder	Temperature (°C)	Constant A (MPa/s)	Stress exponent n
Sn-58Bi	25	1.48×10^{-19}	8.3
	80	4.07×10^{-11}	4.5
	120	2.51×10^{-07}	3.1
In-3Ag	25	1.30×10^{-11}	8.3
	80	1.30×10^{-11}	10.4
	120	1.20×10^{-10}	9.6
SAC305	25	1.08×10^{-20}	10.3
	80	4.41×10^{-19}	10.6
	120	4.63×10^{-18}	11.2

3.3 フリップチップ接合の冷却時の応力場の解明

3.3.1 FEM 解析モデル

上で得られた各はんだの機械特性を用いてフリップチップ接合時のパッド下部配線層に発生する応力を ANSYS Mechanical® Ver.14 のマルチスケール解析により調べた。Fig. 3.15 はここで用いた FCPBGA の 1/4 のマクロモデルを示す。固定点(ZDOF: Zero degrees of freedom)はチップ・基板の中心で基板のチップ搭載面上に設定した。ミクロモデルはチップコーナーのプレソルダー、バンパ、UBM(Under bump metallurgy)とチップの Si、パッドおよびパッド下部配線層を含むモデルとした。バンパは Fig. 3.16(a) に示すはんだバンパと Fig. 3.16(b)に示す Cu ピラーバンパの 2 種類の構成を用いた。Table 2 に各部の寸法を示す。UBM は Al パッド上に Cu, Ni の順で形成し、その上にバンパを形成すると仮定している。基板のチップより大きな外周部分はフリップチップ接合部の応力にほとんど影響しないことが以前の解析で確認されており、本研究では基板の大きさはチップよりもわずかに大きい 11.85 mm 角とした。接合部の高さは UBM からプレソルダーまでを含めて 50 μm とした。はんだバンパの先端部はモデルの

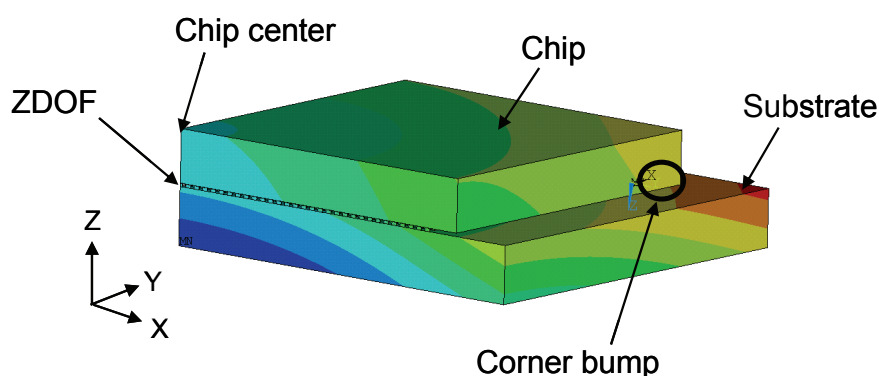
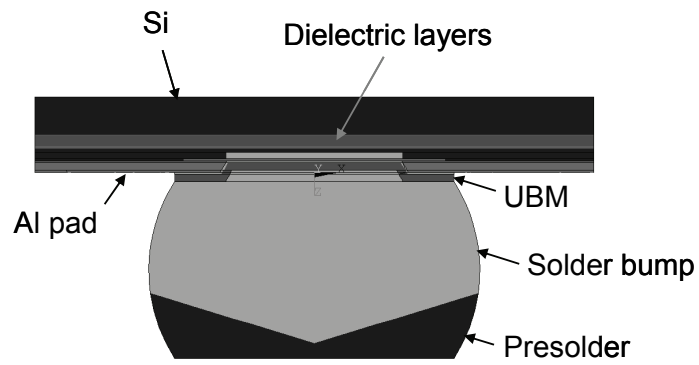
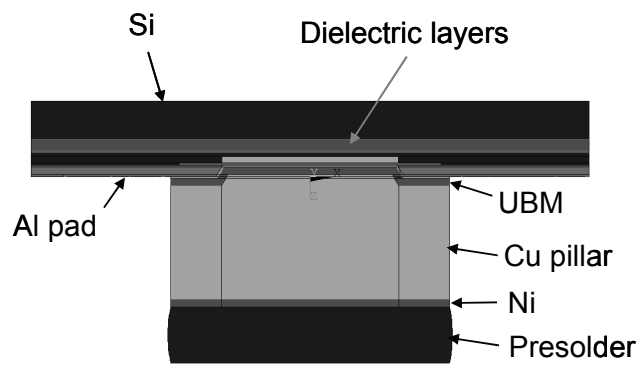


Fig. 3.15 Macro model of FCPBGA (1/4 model).



(a) Solder bump



(b) Cu pillar bump

Fig. 3.16 Micro model of (a) solder bump and dielectric wiring layer, and (b) Cu pillar bump and dielectric wiring layer.

Table 3.2 Dimesnions used in this analysis.

Chip size	10.05 mm x 10.05 mm
Chip thickness	0.785 mm
Bump pitch	0.15 mm
Bump diameter	Solder: 0.089 mm
	Cu pillar: 0.075 mm
UBM diameter	0.075 mm
UBM thickness	Cu: 0.45 μm
	Ni: 2.0 μm
Joint height	0.050 mm
Substrate size	11.85 mm x 11.85 mm
Substrate thickness	0.856 mm

簡素化のため円錐形状とし中央部は基板のパッド表面から 5 μm 、外周部でパッド表面から 17.5 μm の位置に設定した。はんだバンプの最大直径は約 89 μm である。Cu ピラーは先端に 2 μm の厚みの Ni を有し、プレソルダーは 15 μm の厚みと設定とし、UBM からプレソルダーまで円柱形上とした。なおバンプは 150 μm ピッチでフルアレイ配置とした。

フリップチップ接合から室温までの冷却をマクロモデルで解析し、室温降下後の歪み条件を使ってマイクロモデルの解析を行った。レファレンス温度は各はんだの融点とし、各はんだの融点から 70°C までの冷却が 64 s、70°C から室温までの冷却が 113 s となるプロファイルを用いた。各はんだ部分には定常クリープ則と硬化則を適用した。定常クリープ則には先の測定で得られた数値を用いた。硬化則には歪み速度 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で得られた応力-ひずみ曲線から代表的な数値を採り、多直線近似のパラメータを設定した。Table 3.3 に本研究で用いた材料特性を示す。基板の各数値は、一般的なビルドアップ基板の樹脂材、Cu 配線、ガラス繊維などを想定した複合特性である。各はんだの弾性率は硬化則の多直線近似で ANSYS Mechanical[®]により求めた数値である。一般的に公表されている数値⁶²⁾ よりもかなり低いものであるが、弾性率のみ一般的な数値を用いると解析内で整合性が取れなくなるためここではこの数値をそのまま用いた。本解析では Al, Cu, Ni は弾性体として扱った。なお UBM とバンプ、バンプとプレソルダー、プレソルダーと基板上の Cu ランドの各界面付近では金属間化合物(IMC: Intermetallic compound)が形成される。一般的に金属間化合物は弾性率が高く、金属間化合物化による接合部の機械的特性の変化は無視できない場合があるが、ここでの解析では金属間化合物の形成が無視できる程度であるとの仮定を置いている。

Table 3.4 には本解析で用いたバンプとプレソルダーの組み合わせを示す。モデル a, b, c, d はバンプとプレソルダーに同じはんだを用い、モデル d, e はバンプを SAC305 としプレソルダーのみ低融点はんだとした。接合はプレソルダーによって行われると仮定しレファレンス温度は低温はんだの融点とした。モデル g, h, i, j はバンプを Cu ピラーとし、プレソルダーで接合される前提である。モデル b と h は SAC305 で Sn の過冷却を仮定してレファレンス温度を 180°C にしたケースである。

Table 3.3 Material properties (at R. T.) used in this analysis.

	E (GPa)	Poisson's ratio	CTE (ppm/°C)
Si	165	0.22	3.2
Dielectric layer	7.5	0.28	14
Substrate	22	0.30	17
Al	69	0.30	22
Cu	117	0.32	17
Ni	207	0.31	13
Sn-58Bi	12	0.40	15
In-3Ag	2.3	0.40	22
SAC305	12	0.41	22

Table 3.4 Model matrix.

Model type	Bump	Presolder	Ref. temp. (°C)
a	SAC305	SAC305	220
b	SAC305	SAC305	180
c	Sn-58Bi	Sn-58Bi	139
d	In-3Ag	In-3Ag	143
e	SAC305	Sn-58Bi	139
f	SAC305	In-3Ag	143
g	Cu pillar	SAC305	220
h	Cu pillar	SAC305	180
i	Cu pillar	Sn-58Bi	139
j	Cu pillar	In-3Ag	143

3.3.2 解析結果

Fig. 3.17 はフリップチップ接合後に室温まで冷却された状態での、チップコーナーのパッド下部の絶縁層における各モデルの第一主応力のコンター図である。各図の右上がチップのコーナー方向で左下がチップの中央方向である。各コンター図の応力のスケールはすべて同一に設定した。SAC305 と Sn-58Bi を用いたモデルではチップ中央側に最大の圧縮応力が発生し、チップコーナー側に最大の引張応力が発生していることが分かる。また In-3Ag を用いたモデルではバンプ中央部付近に最大の圧縮応力が発生している。最大の引張応力はこのコンター図からは判別しにくいですがチップコーナー側に発生している。

Fig. 3.18 は各モデルのチップコーナーのバンプ下部の絶縁層に発生する最大の第一主応力を示す。これはすべて引張応力であり、比較のためモデル a を基準として任意単位で表示した。モデル a と b はバンプ、プレソルダーともに SAC305 でありレファレンス温度が 220°C から 180°C に下がると応力が約 10% 低減する。これに対しモデル c の Sn-58Bi の場合はレファレンス温度が 139°C にもかかわらずモデル a に対する応力は約 6% の減少にすぎない。これは接合部の主体となる SAC305 のクリープが Sn-58Bi に比べて大きいことと 0.2% 耐力が小さいことによると考えられる。ここで用いた室温での SAC305 の 0.2% 耐力は約 42 MPa であるのに対し、Sn-58Bi の 0.2% 耐力は約 80 MPa である。モデル d の In-3Ag の場合、モデル a に比べて応力は約 65% 減少する。これはレファレンス温度、クリープ特性、0.2% 耐力の違いが大きく影響していると考えられる。室温での In-3Ag の 0.2% 耐力は約 10 MPa である。モデル e と f はバンプを SAC305 とし、プレソルダーを低融点はんだとしたものである。モデル c に対してモデル e の応力は約 14% 減少している。モデル e では SAC305 の機械的特性が接合部の機械的特性で支配的となり、モデル c に比べてクリープが大きく、0.2% 耐力が小さいためと考えられる。またモデル d に対してモデル f の応力は約 24% 大きい。これは In-3Ag に比べてクリープが大きく、0.2% 耐力の大きい SAC305 の機械特性が支配的になったためと考えられる。モデル g~j の Cu ピラーバンプの場合、

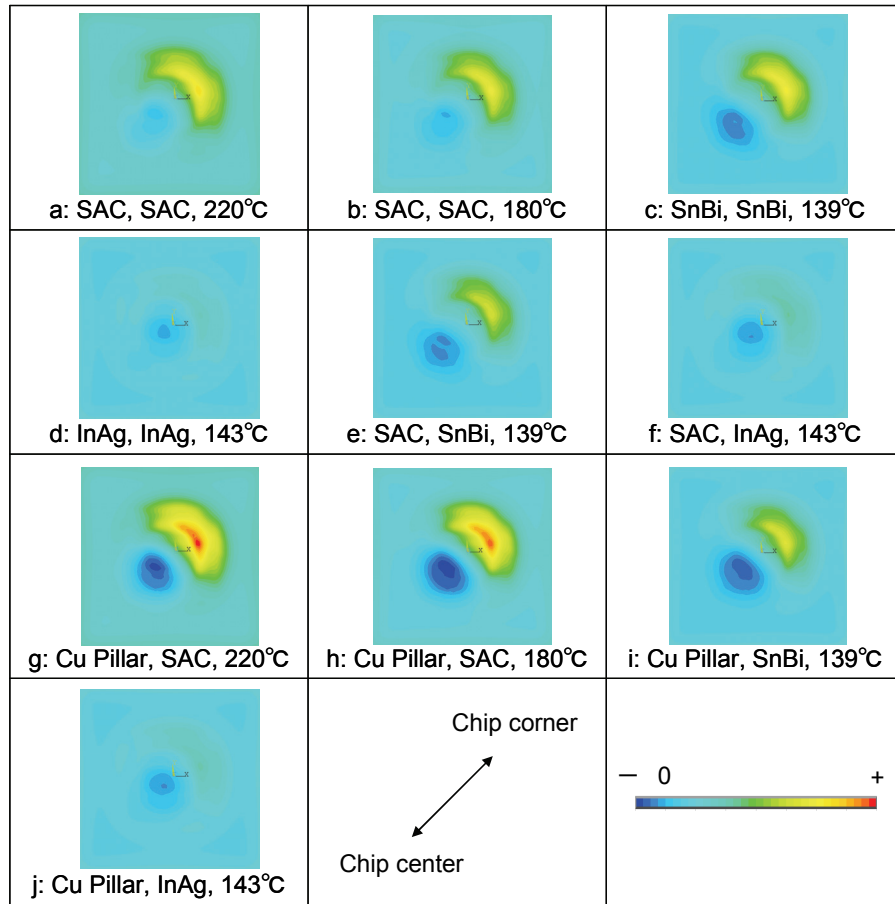


Fig. 3.17 Contour diagrams of first principal stress in the dielectric layer under corner bump for model a to j.

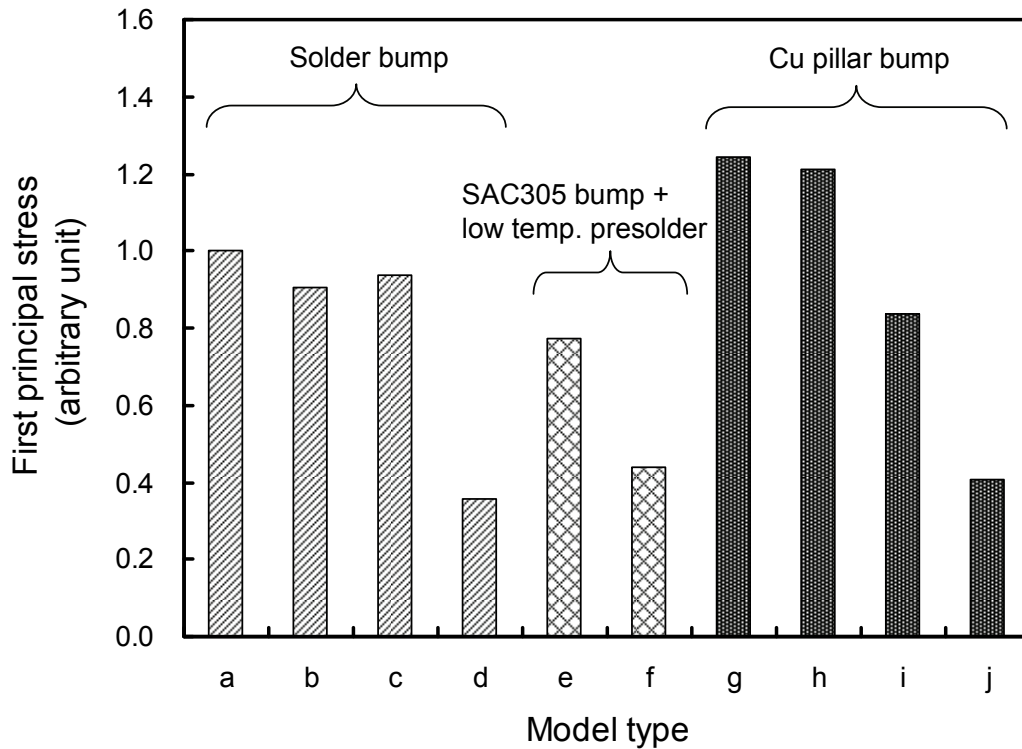


Fig. 3.18 First principal stress in the dielectric layer under corner bump for model a to j.

SAC305 のプレソルダーのモデル g, h に対し Sn-58Bi のモデル i では 30%以上応力が減少し, In-3Ag のモデル j では 65%以上応力が減少する. またはんだバンプのモデル a~d と g~j をそれぞれ比較すると SAC305 の場合は Cu ピラーのほうで 20%以上応力が増加し, In-3Ag の場合は Cu ピラーのほうで約 14%応力が増加する. これは Cu の高い弾性率によるものと考えられる. 一方で Sn-58Bi の場合は Cu ピラーのほうで約 10%応力が減少する. Sn-58Bi は 0.2%耐力が 80 MPa と高いため弾性変形域が大きく, バンプ形状の影響が大きいのではないかと推察する.

これらのモデルによる解析では, In-3Ag を用いた接合部のフォン・ミーゼス応力は 10 MPa 程度であり, SAC305 を用いた接合部のフォン・ミーゼス応力は 47 MPa 程度である. これら 2 つのはんだ接合部は塑性変形域に到達している. 一方で Sn-58Bi の接合部のフォン・ミーゼス応力は 65~72 MPa 程度であり弾性変形域にとどまる. このことが低融点である Sn-58Bi はんだで大きな応力低減効果を得られない要因であると考えられる. また Cu ピラーバンプも同様に弾性変形域にとどまることから SAC305 バンプよりも応力が増加すると考えられる.

以上より In-3Ag を用いるとフリップチップのパッド下部絶縁層の応力を低減する効果が大きいことが分かった. Sn-58Bi の場合, バンプは SAC305 の場合が最も応力低減効果がある. Cu ピラーを用いると SAC305 プレソルダーとの組み合わせでは, はんだバンプの場合よりも 20%以上応力が増加することになる.

3.4 結言

Sn-58Bi と In-3Ag の 2 種類の低融点のはんだと SAC305 の計 3 種類のはんだで直径 0.5 mm の微細試験片を作製し, 3 つの温度条件および 4 つの歪み速度条件で引張試験を行った. この試験から, 歪み速度 $5.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 室温(25°C)の条件で Sn-58Bi, In-3Ag, SAC305 の 0.2%耐力はそれぞれ約 80 MPa, 約 42 MPa, 約 10 MPa となった. また室温でのクリープは In-3Ag, SAC305, Sn-58Bi の順で大きいことが分かった. ここで得られた各はんだの機械的特性を用いて, FCPBGA のフリップチップ接合の冷却後にチップ上のパッド下部配線層の絶縁膜に発生する応力を FEM で解析した. Sn-58Bi と In-3Ag の融点はほぼ等しいが, 機械的特性の違いによりパッド下部にかかる応力は両者で顕著に異なっている. クリープが大きく, 0.2%耐力が約 10 MPa と非常に小さい機械的特性により, In-3Ag を用いた接合部は塑性変形域に達し, 応力低減の効果が大きいことが分かった. 一方, Sn-58Bi を用いた接合部は 0.2%耐力が約 80 MPa と高いため弾性変形域にとどまり, 応力低減の効果は限定的である. また Cu ピラーバンプと SAC305 のプレソルダーを用いる場合, SAC305 のはんだバンプと SAC305 のプレソルダーの場合に比べて 20%以上応力が増加するとの結果を得た. これは Cu ピラーバンプが弾性変形域にとどまることによると考えられる.

本研究では, フリップチップ接合後の応力に着目し, その低減手法を解明した. In-3Ag の接合直後の応力低減効果は大きい, 塑性変形は大きくなると考えられる. パッケージ設計時には, 熱サイクルでの繰り返し応力によるフリップチップ接合部の累積歪みが信頼性に与える影響を考慮して, 歪みを抑制する適正なアンダーフィル材を選択するなどの工夫が重要となると考えられる.

第 4 章 貫通電極を有するインターポーザ上に複数チップを搭載するパッケージのマイクロ接合部およびチップ下部配線層の応力低減

4.1 緒言

本章では、貫通電極を有するインターポーザ上にフリップチップボンディングで複数チップを搭載するパッケージのチップ接合後のマイクロ接合部およびチップ下部配線層の応力低減を研究対象とした。構造として、インターポーザ上に複数チップを平面配置する 2.5D パッケージとインターポーザ上に複数チップを積層する 3D-IC パッケージの 2 つを取り上げた。2.5D パッケージでは、応力に影響を与える因子としてチップとインターポーザの接続順序、インターポーザの機械的特性、インターポーザの厚みに着目した。3D-IC パッケージでは、応力に影響を与える因子としてチップの厚み、インターポーザの厚み、チップの積層数、接合部の機械的特性に着目した。ここではチップ接合後の応力低減を議論し、パッケージ使用時の信頼性に関わる接合部の歪みについての議論は行っていない。

2.5D パッケージは、微細配線を形成できるインターポーザを有機基板上に搭載し、そのインターポーザ上に複数チップを平面配置して搭載する構造となる。2.5D パッケージでは複数チップを搭載するためインターポーザが大型になり、チップとインターポーザ、インターポーザと有機基板でそれぞれのマイクロ接合面を持つ。またインターポーザの材料はシリコン、ガラスおよび有機基板などが提案されておりその機械的特性もそれぞれ異なるものである。このためパッケージ組み立てプロセスで考慮すべきマイクロ接合部にかかる応力や各部の反りに影響する要因は従来の FCPBGA に比べて複雑になる。2.5D パッケージに搭載するチップは、FPGA のように同一設計のチップを複数搭載するホモジニアス構成を取る場合と、ロジックチップ、メモリチップ、アナログチップ、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)チップなどの異種チップを混在させるヘテロジニアス構成を取る場合がある。本研究ではロジックチップと Wide I/O メモリの 2 種類のチップを搭載する構成の 2.5D パッケージを想定し、従来から用いられている有機基板上に複数チップを搭載する MCM (Multi Chip Module)-FCPBGA と比較し、応力と反りの検討を行った。インターポーザとしてシリコン、機械的特性の異なる 2 種類のガラス、有機基板のビルドアップ層のみを積層したコアレス基板の計 4 タイプを取り上げた。シリコンおよびガラスのインターポーザと有機材料のコアレス基板では配線の設計ルールが異なるため同じロジックチップとメモリチップを搭載する場合でも同じサイズのインターポーザを用いることができない。同一のチップサイズや I/O 数などの前提条件に基づき、2.5D パッケージと MCM-FCPBGA それぞれの代表的な設計ルールを用いてパッケージ設計を検討した。設計検討により得られたパッケージ構成を基に、シリコン、2 種類のガラスおよびコアレス基板でそれぞれ異なる機械的特性を持つインターポーザを用いて FEM モデルを作成し、インターポーザの機械的特性がマイクロ接合部の応力とインターポーザの反りに与える影響を調べた。また、チップ、インターポーザ、有機基板の 3 層構造となる 2.5D パッケージでは、各接合の順序によってプロセス中にかかる熱応力が変化する。先にチップをインターポーザに接合する場合、先にインターポーザを有機基板に接合する場合、チップとインターポーザおよび有機基板を同時に接合する場合の 3 つのパターンの FEM モデルを作成し接合順序がマイクロ接合の応力と反りに与える影響を調べた。接合順序の影響の解析ではコアレス基板のインターポー

ザは除外したが，シリコンおよびガラスの各インターポーザの厚みによる影響も同時に調べた．

3D-IC パッケージではインターポーザ上に搭載されるチップは積層構造となる．チップの積層数や各チップの厚み，インターポーザの厚みはプロセスコストにも影響する重要な設計要素である．またチップ間接合には微細なピッチが必要とされるため，はんだブリッジを低減し接合部の形状安定性を高めるため Cu ピラーバンプが用いられる．Cu ピラーバンプを用いると接合部のはんだ量が少なく，接合部をすべて金属間化合物化する IMC 接合が接合部の安定性を高める有効な方法であると考えられている．しかしながら IMC 接合部は弾性率が高く接合部の応力は高くなると考えられており，はんだと Cu の間にバリアメタルを置き，CuSn の金属間化合物化を抑えて接合部に金属間化合物に比べて低弾性率のはんだを残すほうが望ましいとも考えられる．本研究では，3D-IC パッケージに搭載するチップの積層数，最上部のチップの厚み，シリコンインターポーザの厚みおよび接合部分の機械的特性を変えて，各因子がチップの反りとマイクロ接合部にかかる応力に与える影響を解析し，チップの反りとマイクロ接合部の応力を低減する条件を解明した．

4.2 インターポーザ上に複数チップを平面配置するパッケージと MCM FCPBGA の熱機械的解析

4.2.1 インターポーザ上に複数チップを平面配置するパッケージと MCM FCPBGA の設計検討 前提条件

Fig. 4.1(a) にここで用いるロジックチップのバンプ配置を，Fig. 4.1(b) にメモリチップのバンプ配置を示す．また Table 4.1 にはチップとパッケージの各部の詳細な前提条件を示す．ロジックチップは 15 mm 角のチップに 150 μm ピッチのバンプがフルアレイで配置されるとした．メモリチップは JEDEC の策定した Wide I/O メモリの MPGA の標準規格²⁹⁾に基づいたバンプ配置を想定した．Fig. 4.1(b) に示すようにバンプはチップ中央に 4 つのブロックに分かれて配置され，それぞれのブロック内では 40 μm x 50 μm のピッチで格子状に配列されている．有機基板上にチップを搭載する場合には，有機基板の配線ルールでこのピッチのバンプから引き出しを行うことができないため，メモリチップ上で再配線によってバンプを 200 μm ピッチに再配置すると仮定した．ここではメモリの I/O 数は規格の数値を近似して 800 とした．

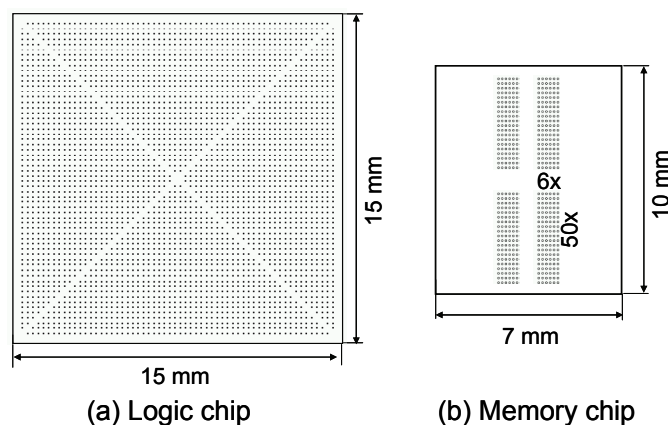


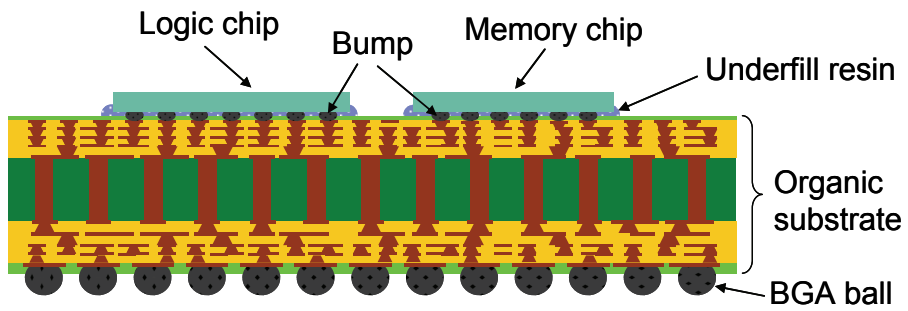
Fig. 4.1 Bump layout images (not to scale) for (a) logic chip and (b) memory chip.

Table 4.1 Features of chip and package.

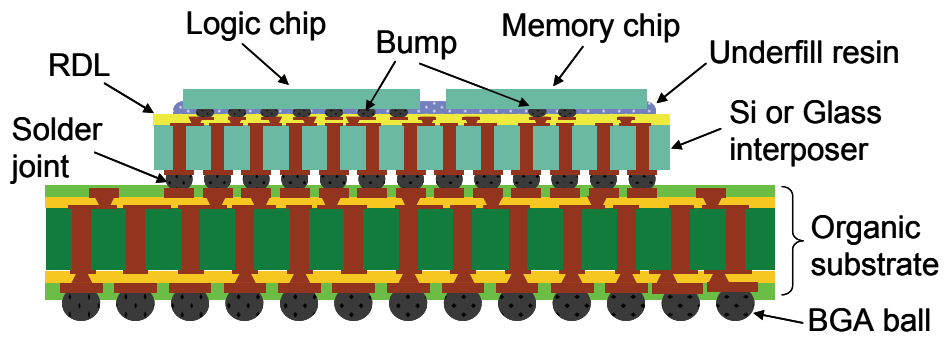
Chip size (logic)	15 mm x 15 mm
Chip size (memory)	10 mm x 7 mm
Chip thickness (logic and memory)	786 μm
Bump matrix (logic)	94 x 94
Bump matrix (MPGA memory)	(6 x 50) x 4
Bump matrix (custom memory)	30 x 40
Signal I/O count (logic)	1600
Signal I/O count (memory)	800
Direct wiring between logic and memory	800
Bump pitch (logic)	150 μm
Bump pitch (MPGA memory)	40 μm x 50 μm
Bump pitch (custom layout memory)	200 μm
Package size	42.5 mm x 42.5 mm
Package BGA pitch	1.0 mm
Package BGA ball count	1600
Thickness of one build-up layer	45 μm including Cu

パッケージ構成と配線ルール

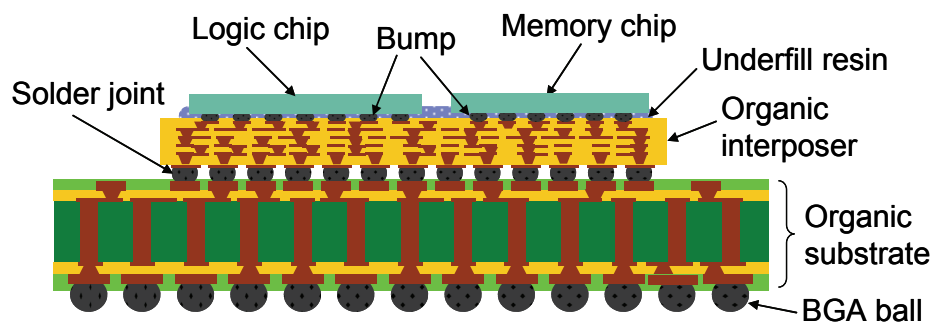
Fig 4.2 にここで用いたパッケージ構成の断面の概略図を示す. Fig 4.2(a) はビルドアップ基板を用いた MCM FCPBGA である. 前述のように現行の有機基板の配線ルールでは Wide I/O メモリのバンプピッチから配線を引き出すことができないため, メモリチップ上で再配線しバンプを 200 μm ピッチに再配置すると仮定した. Fig 4.2(b) はシリコンあるいはガラスをインターポーザに用いた FCPBGA である. インターポーザ上にはロジックチップおよびメモリチップからの配線を行う配線層を設け, その配線層から有機基板への伝送路として TSV (Through Silicon Via) あるいは TGV (Through Glass Via) がインターポーザ中に形成されている. TSV および TGV はインターポーザ全面に格子状に配置されるのが一般的である. インターポーザと有機基板ははんだでマイクロ接合されると仮定した. Fig 4.2(c) はコアレス基板の構成を用いた有機インターポーザを用いた FCPBGA である. ここでも MCM FCPBGA と同様にメモリ上のバンプは再配置したと仮定している. Table 4.2 にはここで用いた各パッケージのインターポーザの厚みと設計ルールをまとめた. 有機基板とシリコンおよびガラスインターポーザそれぞれで現在適用可能な配線ルールを採用した.



(a) MCM FCPBGA



(a) Si or glass interposer FCPBGA



(a) Organic interposer FCPBGA

Fig. 4.2 Schematic cross-sections of package configurations used in this study.

Table 4.2 Design ground rules assumed in this study.

Build-up layer (FCPBGA, organic interposer)	
Line / space	15 / 15 μm
Via land diameter	85 μm
Si interposer	
TSV diameter	60 μm
Line / space in RDL	4 / 4 μm
Glass interposer	
TGV diameter	80 μm
Line / space in RDL	4 / 4 μm

基板とインターポーザの寸法の導出

Fig 4.3 にインターポーザ上にロジックチップとメモリチップを搭載する代表的な配置を示す．ここではシリコンおよびガラスインターポーザ上に 2 チップを配置した時のチップ間のクリアランスを 0.375 mm, 有機インターポーザ上に 2 チップを配置した時のチップ間のクリアランスを 3.0 mm と想定した．またメモリチップの 800 I/O はすべてロジックチップの I/O と直接配線するとし，ロジックチップの残りの 800 I/O はインターポーザを介してパッケージの外部接続端子に配線されると想定した．メモリの 4 つのバンプブロックのうちロジックチップ側の 2 つのブロックはロジックチップの右面から直接配線し，メモリチップのロジックチップから見て後方の 2 つのブロックにはロジックチップの上下面からそれぞれ 200 I/O ずつ配線することになる．ロジックチップの上下面からの配線に必要な領域の幅を Fig 4.3 中に示すように S1 と定義した．ロジックチップから TSV あるいは TGV に接続する配線のうち，同図中の右上部あるいは右下部の TSV/TGV に配線するために必要な配線領域の幅を S2 と定義した．シリコンおよびガラスインターポーザの配線・スペースのルール 4 / 4 μm を用いると S1, S2 は共に約 1.6 mm となる．インターポーザの最小サイズは，ロジックチップの大きさ，S1, S2 および TSV/TGV からインターポーザ端面までの最小距離 (0.5 mm と想定) により約 23 mm となる．ここではインターポーザと有機基板の接続ピッチを FBGA (Fine-pitch Ball Grid Array) 等で標準的な 0.65 mm ピッチとして 40 x 40 マトリックスで 1600 I/O を確保できる 27 mm 角のインターポーザサイズを後の解析に用いることとした．さらに同様の検討によってコアレス基板を用いる有機インターポーザは 0.8 mm の接合ピッチ 33 mm 角の大きさを比較対象として選択した．

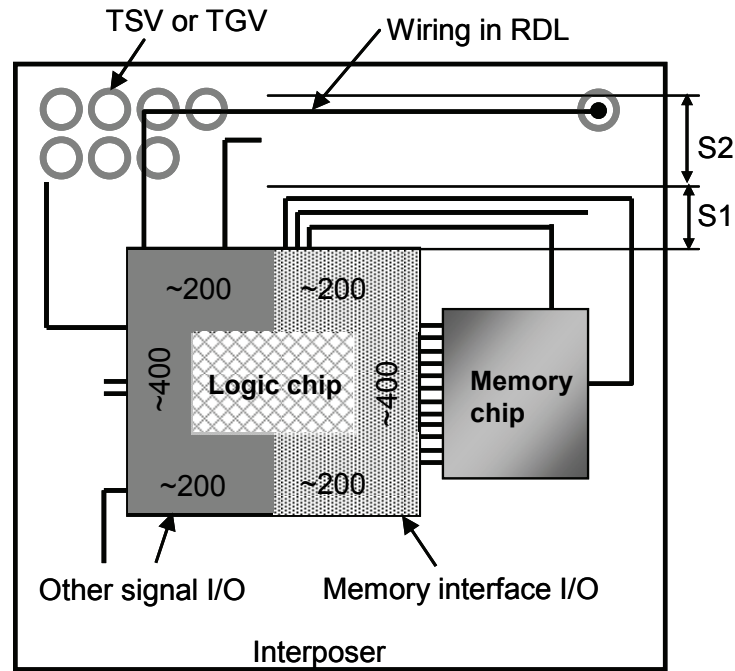


Fig. 4.3 Typical layout of logic chip and memory chip.

Fig. 4.4 はビルドアップ有機基板でのフリップチップ接合部からの引き出し線の代表的な設計を示す。チップ最外周部のバンパとその内側のバンパから順次ビルドアップ層の最上層で引き出し配線を配置し、バンパのランド間を抜けることができなくなった内側のバンパからは図に示すビア・オン・バンパパッドの構造により 2 層目のビルドアップ層で引き出しを行う。ビルドアップ層の 1 層で引き出せる配線数は次式で求まる。

$$EscapedTraceCount = \frac{P - D - L}{2L} \quad (4.1)$$

ここで P はバンパピッチ, D はビアランドの直径, L は配線幅あるいは配線スペース幅である。FCPBGA ではコア層よりも上側のビルドアップ層をシグナルの引き出しに使うため、ビルドアップ層の総数はコア上面のシグナル引き出しに必要な層数によって決まる。ここでの FCPBGA の場合ではシグナルの引き出しに 4 層のビルドアップ層が必要となり、ビルドアップ基板の層数の一般的な記法では 4-2-4 の構成が必要となる。コアレス基板の有機インターポーザもシグナル引き出しに必要な層数は FCPBGA 基板と同じであり、通常電源とグランドに 1 層ずつのビルドアップ層を割り当て、コアレスではパッド層に 1 層用いるため、コアレス基板の一般的な記法では 6+1 の構成が必要となる。またシリコンおよびガラスインターポーザ上の RDL 層は配線ルールが $4/4\ \mu\text{m}$ のため 1 層ですべての引き出しが可能となり、TSV/TGV のランドを設ける層と合わせて 2 層の配線層で十分となる。

Table 4.3 にこれらの検討により得られた各基板のサイズ、構成、厚みを整理した。これらの寸法に基づいて次の解析モデルの作成を行った。

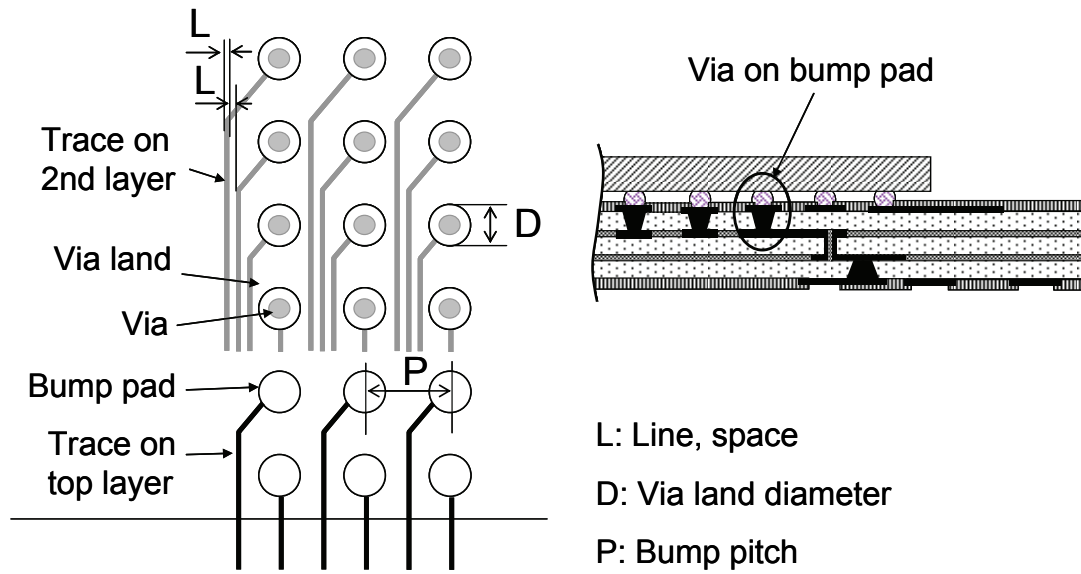


Fig. 4.4 Typical escape design from flip chip joints.

Table 4.3 Design ground rules assumed in this study.

MCM FCPBGA	
Substrate layer stack-up	4-2-4
Thickness of MCM FCPBGA's substrate	1267 μm
Si/glass interposer FCPBGA	
Layer count in RDL	2
TSV pitch	0.65 mm
Interposer size	27 mm x 27 mm
Substrate layer stack-up	1-2-1
Thickness of base organic substrate	970 μm
Organic interposer FCPBGA	
Layer stack-up	6+1
Solder joint pitch (interposer to substrate)	0.8 mm
Interposer size	33 mm x 33 mm
Substrate layer stack-up	1-2-1
Thickness of organic interposer	285 μm
Thickness of base organic substrate	970 μm

4.2.2 FEM 解析モデル

解析には Ansys Mechanical® を使用した。Fig. 4.5 に示すように、チップとインターポーザの接合とインターポーザと有機基板の接合の3つのプロセスフローを考慮して3Dのハーフモデルを作成した。Fig. 4.5(a) は先にチップをインターポーザに接合し、その後有機基板にインターポーザを接合する場合であり、これを順接続と呼ぶ。Fig. 4.5(b) は先にインターポーザを有機基板に接合し、その後チップをインターポーザに接合する場合であり、これを逆接続と呼ぶ。Fig. 4.5(c) はチップとインターポーザおよび有機基板を同時に接合する場合で、これを同時接続と呼ぶ。Fig. 4.5(a), (b) の2度の接合を解析するためにそれぞれ1度目の接合時の構成と2度目の接合時の構成のモデルを作成した。2度目の接合時の構成のモデルでは、1度目の接合部分にはアンダーフィル封止された構造とした。解析のリファレンス温度はすべて180℃とし、25℃に冷却後の応力と反りを調べた。はんだの融点は約220℃であるが、以前の評価で過冷却を想定した180℃でのリファレンス温度を用いると実験との相関が高いことが分かっており、ここではこのリファレンス温度を採用した。フリップチップ接合パッドの下部配線層にかかる応力の解析には、マルチスケール解析の手法を用いた。25℃冷却後のはんだ接合部とパッド下部の境界の歪み条件を Fig. 4.6 に示すマイクロモデルに適用し、パッド下部配線層の応力分布を求めた。

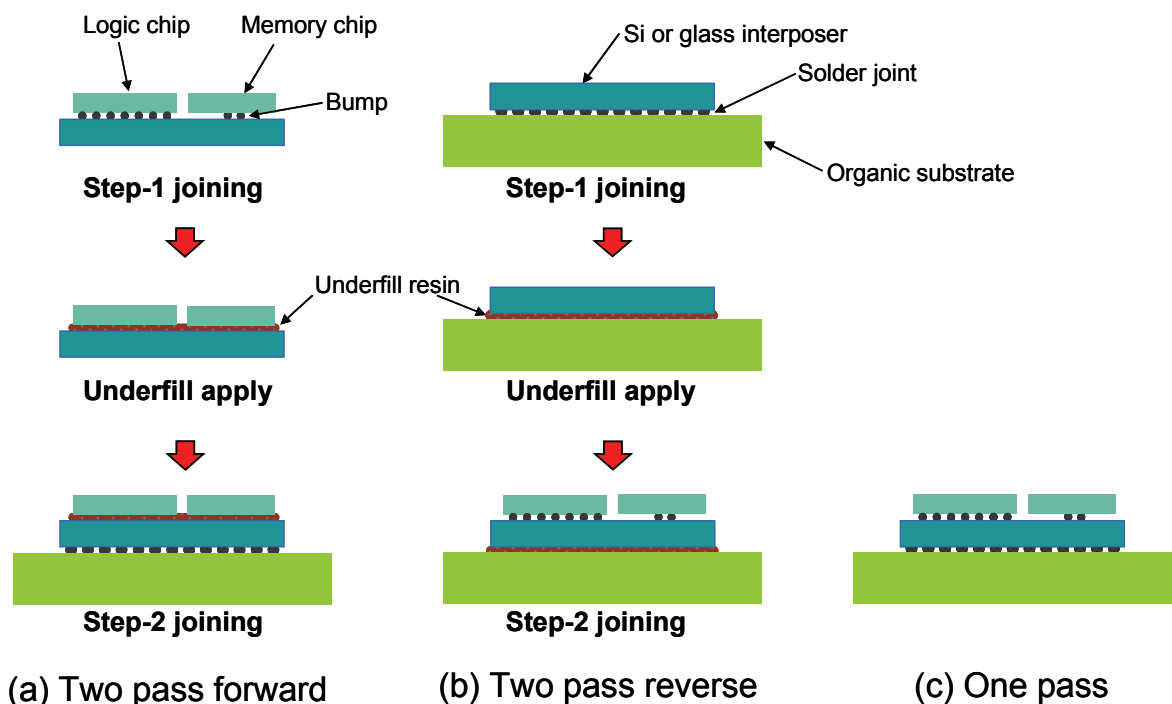


Fig. 4.5 Three different process flows of chip and interposer joining for 2.5D package.

Table 4.4に2.5Dパッケージの解析に用いた材料特性をまとめた.2種類のガラスはAとBで識別し,主たる特性の違いは線膨張係数である. RDL はポリイミドと Cu の複合特性, ビルドアップ層はビルドアップ材と Cu との複合特性, ガラス繊維入りビルドアップ層とコア材はそれぞれの樹脂材と Cu およびガラス繊維との複合特性であり, それぞれ複合則を用いて算出した.

シリコンとガラスのインターポーザは上面に RDL の配線層を設けた構成となる. コアレス基板を用いる有機インターポーザは4層をガラス繊維なしのビルドアップ材とし, 残りの3層をガラス繊維入りのビルドアップ材とした.

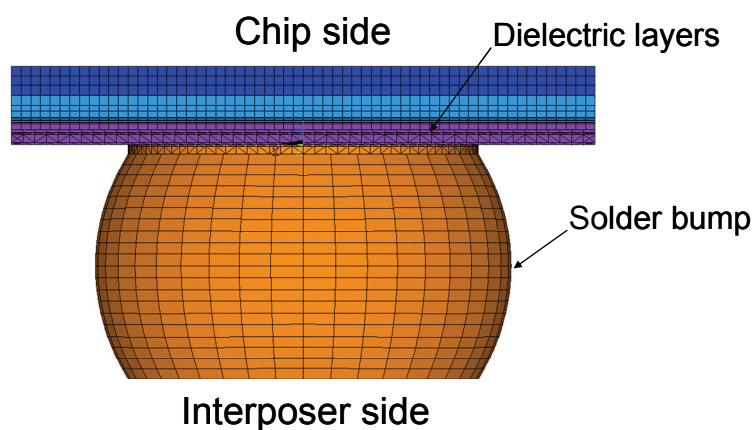


Fig. 4.6 Micro model of a flip chip joint and dielectric layers.

Table 4.4 Material properties used in this analysis.

	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	CTE (ppm/°C)
Si	165	0.22	3.2
Glass-A	77	0.22	3.8
Glass-B	74	0.22	6.0
RDL ^{*)}	28	0.24	17
Build-up layer ^{**)}	17	0.34	27
Build-up layer with glass fiber ^{***)}	20	0.29	24
Core ^{***)}	25	0.33	15
Underfill resin	9.5	0.35	25
Solder	27	0.35	25

^{*)} Composite property with Cu

^{**)} Composite property with Cu and solder resist

^{***)} Composite property with Cu and glass fiber

4.2.3 インターポーザの機械特性による応力・反りへの影響

本節では Fig. 4.5(a) の順方向接続のみを取り扱う。またインターポーザの厚みは 200 μm とした。Table 4.5 に本節で取り上げたモデルの組み合わせをまとめた。シリコンおよびインターポーザの有機基板への接続ピッチは設計検討の結果 0.65 mm ピッチと定めた。TSV/TGV は接続パッドの直上に配置するのが一般的であり、格子状に並べられた TSV/TGV の Cu 密度を算出し、シリコンと 2 種類のガラスそれぞれのインターポーザと Cu で複合特性を求めて解析を行った。また I/O 数との整合は取れないが TSV/TGV のピッチを 0.5 mm と 0.8 mm と仮定しそれぞれの Cu 密度から複合特性を求めたケースを追加した。0.65 mm ピッチに比べると、0.5 mm ピッチの場合は Cu 密度が高く、0.65 mm ピッチの場合は Cu 密度が低くなる想定である。

チップとインターポーザ接合時のインターポーザの反り

Fig. 4.7 はモデル j のチップとインターポーザ接合後の Z 方向の変位のコンター図である。1/2 モデルであるため図中の下面がパッケージ中央でのカット面である。パッケージ中央の Z 軸を固定軸として解析を行った。インターポーザのロジックチップ搭載側のコーナーをポイント A とし、メモリチップ搭載側のコーナーをポイント B とした。シリコンおよびガラスインターポーザはポイント A-B 間は 27 mm、有機インターポーザは 33 mm であり、MCM FCPBGA は有機基板のコーナーを A と B としその距離は 42.5 mm となる。

Fig. 4.8 と Fig. 4.9 は、各解析モデルのポイント A とポイント B それぞれのチップ・インターポーザ接合後の Z 方向の変位である。シリコンと 2 種類のガラスのインターポーザ（モデル b-j）はポイント A および B ですべて正の変位であり、反りの形状は凹形である。これらすべてのモデルでポイント B の変位のほうが大きい。これはインターポーザ材と RDL の線膨張係数のミスマッチによるもので、

Table 4.5 Model matrix in this analysis.

Model type	Configuration	Equivalent via pitch
a	MCM FCPBGA	-
b	Si interposer	0.5 mm
c	Si interposer	0.65 mm
d	Si interposer	0.8 mm
e	Glass-A interposer	0.5 mm
f	Glass-A interposer	0.65 mm
g	Glass-A interposer	0.8 mm
h	Glass-B interposer	0.5 mm
i	Glass-B interposer	0.65 mm
j	Glass-B interposer	0.8 mm
k	Organic interposer	-

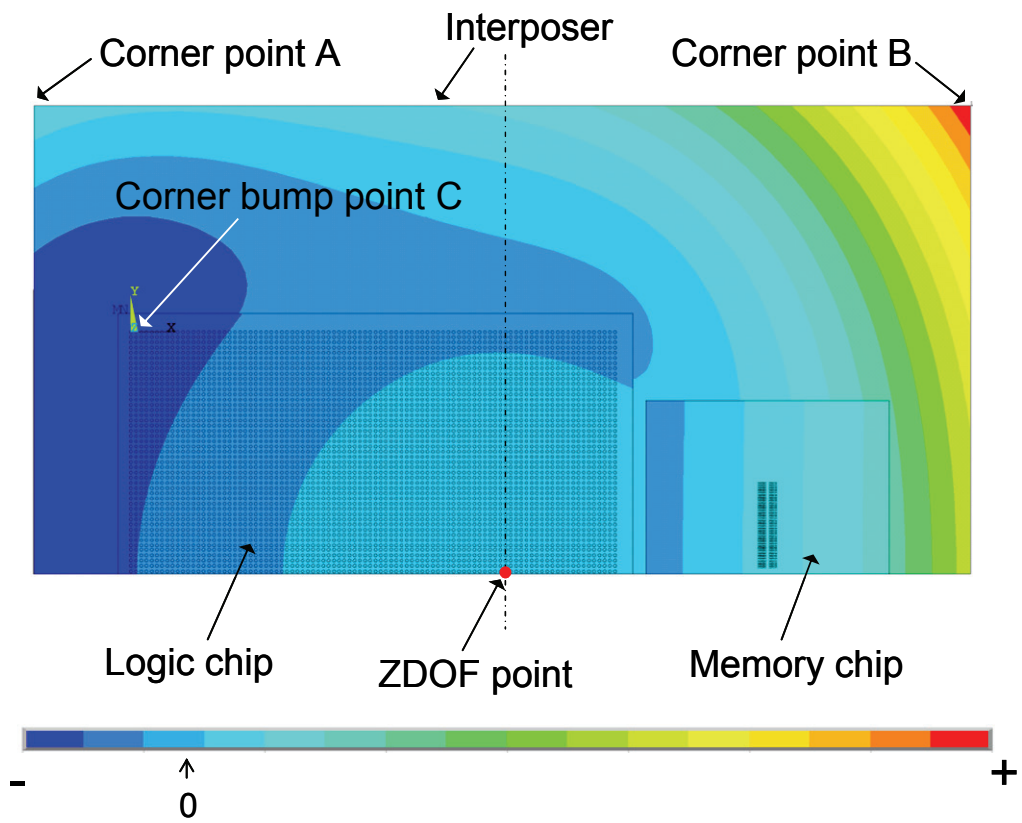


Fig. 4.7 Contour diagram of Z-direction displacement of an interposer and chips (model-j).

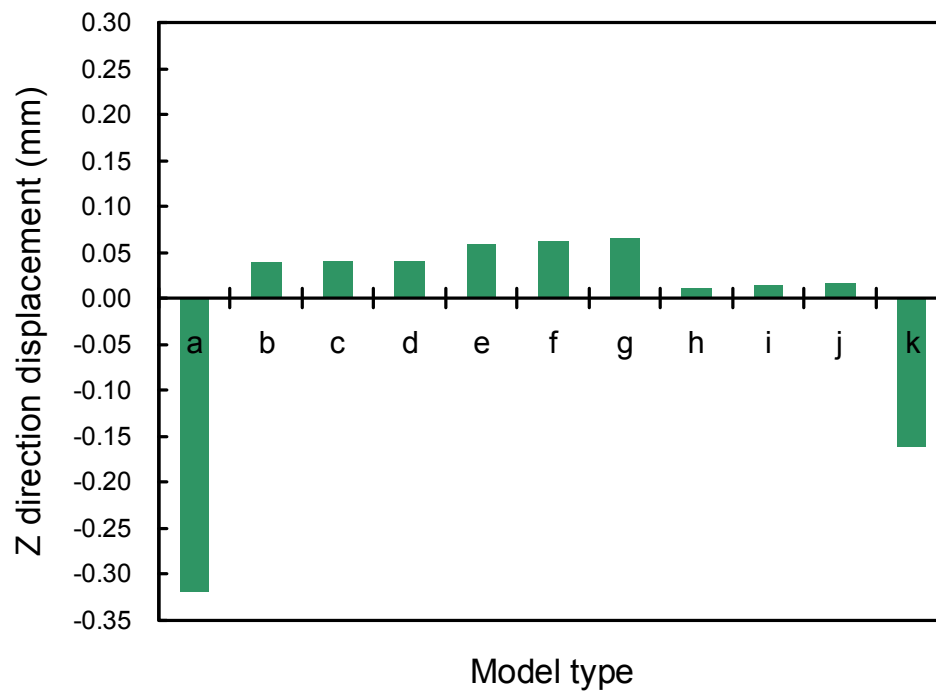


Fig. 4.8 Z-direction displacement at point A after flip chip joining.

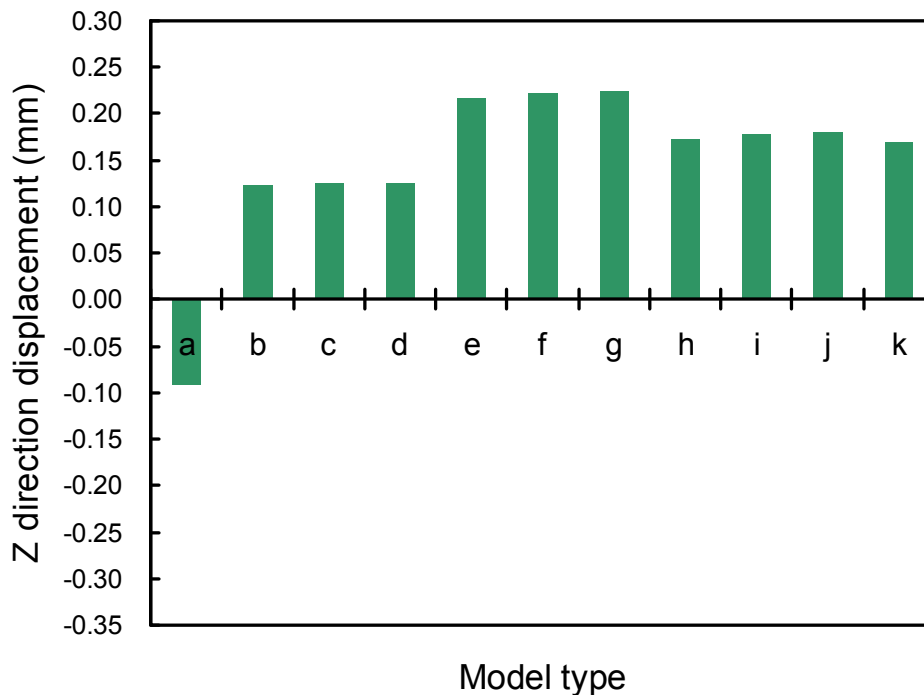


Fig. 4.9 Z-direction displacement at point B after flip chip joining.

メモリチップが小さいためチップ搭載エリアの少ない右上部に最大の変位が現れると考えられる。Fig 4.7 から見て取れるようにチップ搭載エリアは低線膨張係数のチップとインターポーザに高線膨張係数の RDL が挟まれる構造となり反りは小さくなっている。ビアピッチ 0.5 mm, 0.65 mm, 0.8 mm でのビア密度の差は 1%未満であったため、等価ビアピッチによる差は小さいがビアピッチが小さくなる、すなわちビア密度が高くなると変位が小さくなる傾向が認められる。これはビア密度が高いほどインターポーザの複合線膨張係数が大きくなり RDL との線膨張係数のミスマッチが小さくなるためと考えられる。ガラス A インターポーザはシリコンと近い線膨張係数を持ち、弾性率はシリコンの約 1/2 であることにより、シリコンインターポーザに比べて約 2 倍の変位となると考えられる。ガラス B インターポーザは、弾性率がガラス A とほぼ同等で線膨張係数が大きくなることから RDL との線膨張係数のミスマッチの低減により、ガラス A インターポーザよりも小さな変位となると考えられる。MCM FCPBGA (モデル a) はチップと有機基板の線膨張係数のミスマッチにより凸形の反りとなっており一般的な形状である。メモリチップよりも大きなロジックチップの搭載されたエリアのポイント A で大きな変位が現れる。ここでは 42.5 mm 角の基板のコーナーの変位であるため大きな数値となっている。有機インターポーザ (モデル k) の場合はポイント A で正、ポイント B で負の変位となる。これはコア材のない有機インターポーザは弾性率が低く、線膨張係数が大きく、2 つの異なるサイズのチップの影響による複雑な反り形状となるためと考えられる。

ここで得られたインターポーザの変位はいずれも 0.1 mm 以上であり有機基板に接合する際には、はんだの濡れ不良やブリッジの懸念が大きい。RDL や有機インターポーザの線膨張係数の低い材料を用いたり、工程中でインターポーザを平坦化して接合するなどの工夫が重要と考えられる。

チップとインターポーザ接合時のフリップチップパッドパッド下部配線層の応力

チップとインターポーザの接合のマクロモデルの解析結果から得た接合部の歪みの境界条件を適用し、マイクロモデルの解析を行った。Fig. 4.10 は、Fig. 4.7 に示すロジックチップのコーナーバンプのポイント C におけるパッド下部配線層の第一主応力の分布を示すコンター図である。ここではモデル a, c, f および i のコンター図を示した。各図の応力のスケールは同一に揃えた。図の左上がパッケージコーナーの方向で、右下がパッケージ中心の固定点の方向である。バンプ下のパッケージ中心方向では圧縮応力が生じ、パッケージコーナー方向では引張応力が生じている。Fig. 4.11 は各モデルの最大の第一主応力を示すグラフである。MCM FCPBGA の応力を基準に任意単位で表示し、すべて圧縮応力である。ガラス A インターポーザの応力はシリコンインターポーザの場合の約 2 倍であり、ガラス B インターポーザの応力はガラス A インターポーザの約 2 倍となっている。これは各インターポーザ材の線膨張係数とチップの線膨張係数のミスマッチが支配的要因であると考えられる。ガラスインターポーザでは等価ビアピッチが大きくなるとわずかに応力が低下する傾向が見られる。これは Cu 密度が小さくなるとインターポーザの複合線膨張係数が小さくなるためチップとの線膨張係数のミスマッチが低減されることによると考えられる。MCM FCPBGA と比べるとシリコンインターポーザの場合には約 10% の応力値であり、ガラス B インターポーザでも約 40% の応力値であるためパッド下部配線層への応力低減の効果は大きい。一方で有機インターポーザの場合は MCM FCPBGA に比べ約 1.9 倍の応力が生じており、本研究で調べたものよりも低線膨張係数のビルドアップ材料を用いる等で応力低減を行わなければ配線層に与えるダメージが問題となりうる。

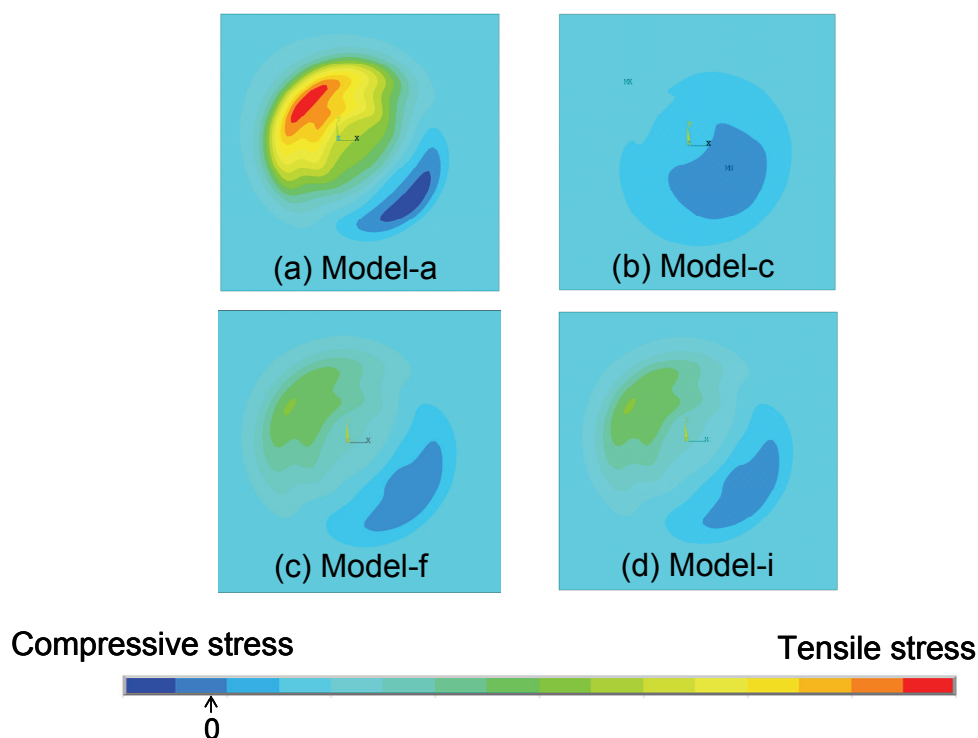


Fig. 4.10 Contour diagrams of first principal stress in the low-k dielectric layer under corner bump point C for (a) model-a, (b) model-c, (c) model-f and (d) model-i.

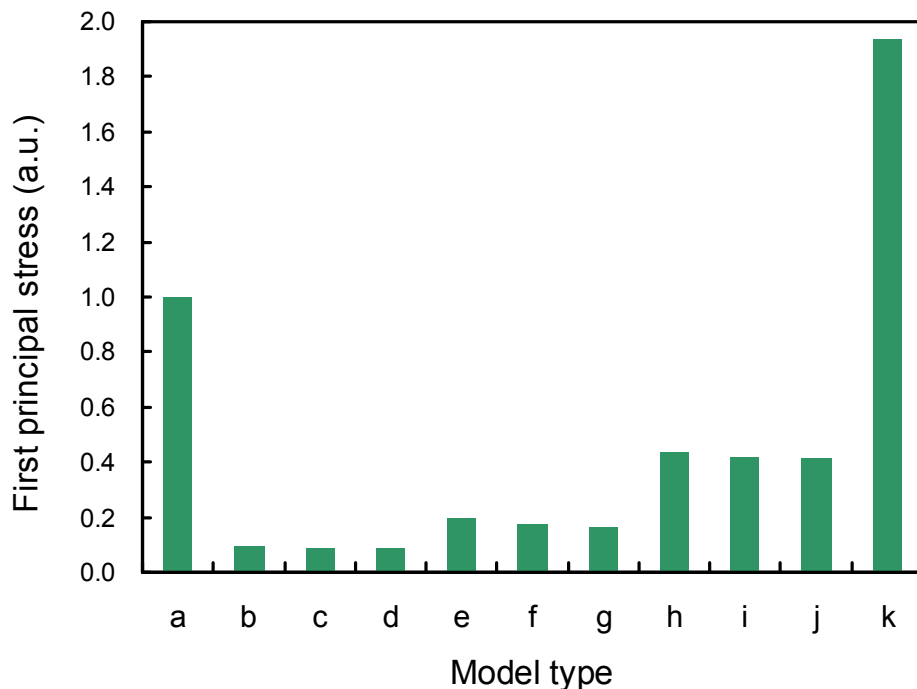


Fig. 4.11 First principal stress in the low-k dielectric layer under corner bump point C.

インターポーザと有機基板接合時のマイクロ接合部の応力

インターポーザと有機基板の接合の解析では、インターポーザ上のチップはアンダーフィルで封止されていると想定した。モデルではチップとインターポーザ間にアンダーフィルを充填した形状を作成し、アンダーフィル材とはんだの複合特性を適用した。Fig. 4.12 はモデル c の Z 方向の変位のコンター図である。インターポーザを有機基板に接合した後では、2 つのチップサイズが異なるにも関わらずパッケージ中心から同心円状に変位が変化している。Fig. 4.13 は、Fig. 4.12 に示したポイント B での Z 方向の変位である。また Fig. 4.14 は、Fig. 4.12 に示したポイント D での接合部の体積平均のフォン・ミーゼス応力である。ここでは MCM FCPBGA のモデルは検討対象から外した。Fig. 4.13 からインターポーザ接合後には有機基板の収縮によってすべてのインターポーザ材で変位が負になっている。Fig. 4.9 のチップ接合後ではすべて正の変位であったものが、インターポーザ接合後には正負が反転している。チップ接合後には一番変位の小さかったシリコンインターポーザが、インターポーザ接合後には一番大きな変位を示している。これは有機基板との線膨張係数のミスマッチがシリコンインターポーザが最も大きいことによると考えられる。ガラス B インターポーザでは線膨張係数がシリコンより大きく、有機基板の線膨張係数に近くなるため、Z 方向の変位は小さくなりシリコンインターポーザの場合よりも約 40 μm 反りを低減できる。Fig. 4.14 からはシリコンインターポーザがポイント D の接合部で最も応力が高く、次いでガラス A インターポーザが約 20% 応力が下がり、ガラス B インターポーザではシリコンインターポーザよりも約 38% 応力が下がる。これにはシリコンインターポーザとガラ

ス A インターポーザでは弾性率がおよそ 2 倍近く異なっていることが大きく寄与している。またガラス A インターポーザとガラス B インターポーザの応力の差には、線膨張係数が 3.8 ppm/°C と 6.0 ppm/°C の違いが大きく寄与していると考えられる。インターポーザの線膨張係数と弾性率はインターポーザの接合部にかかる応力の影響因子としてパッケージの構造設計の上で重要である。

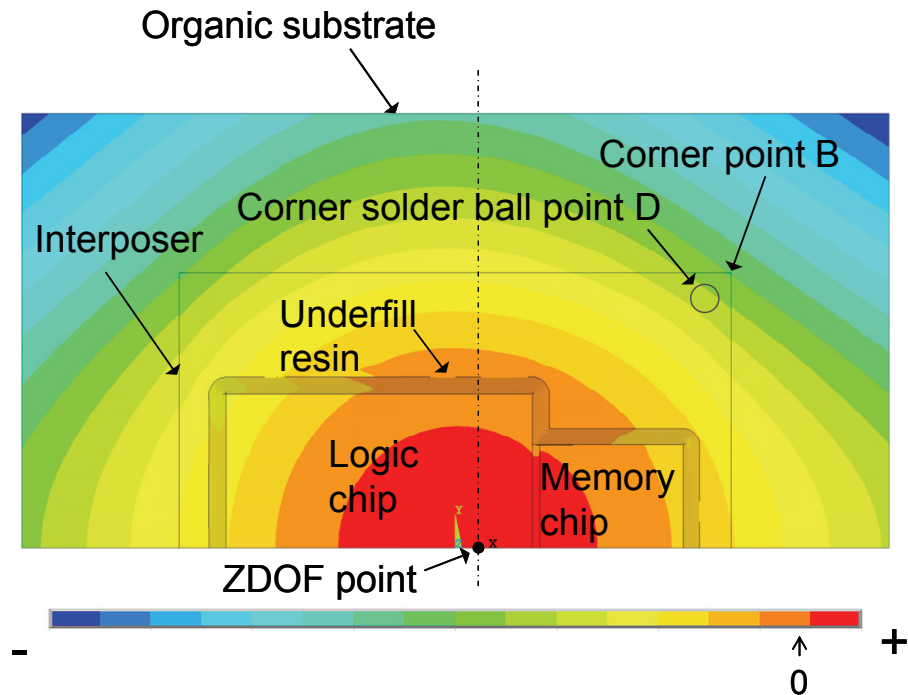


Fig. 4.12 Contour diagram of Z-direction displacement of an organic substrate, an interposer and chips (model-c).

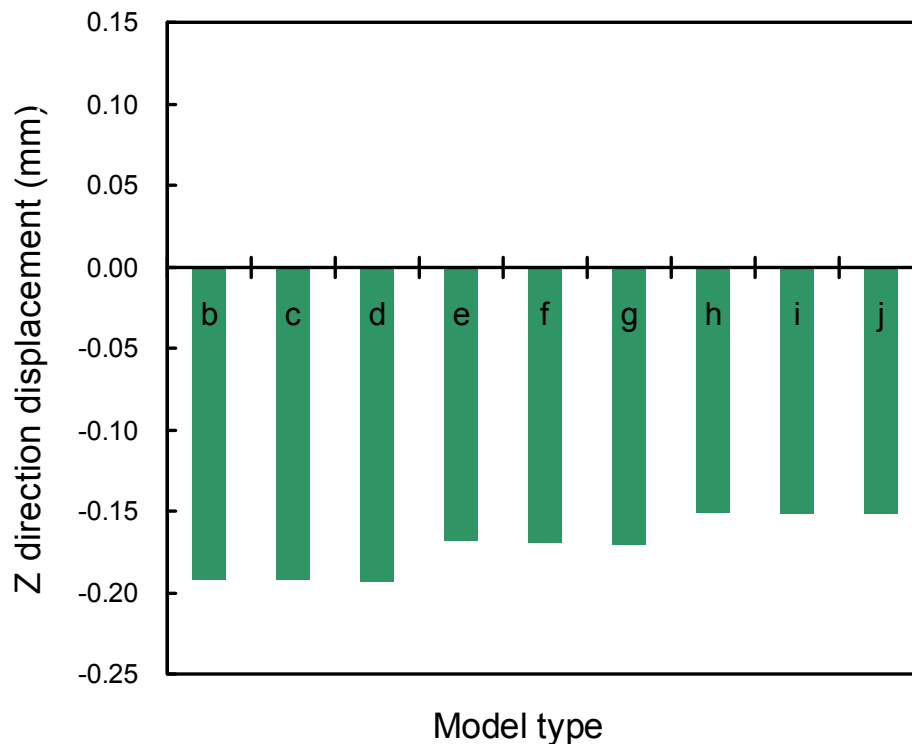


Fig. 4.13 Z-direction displacement at point B after interposer joining.

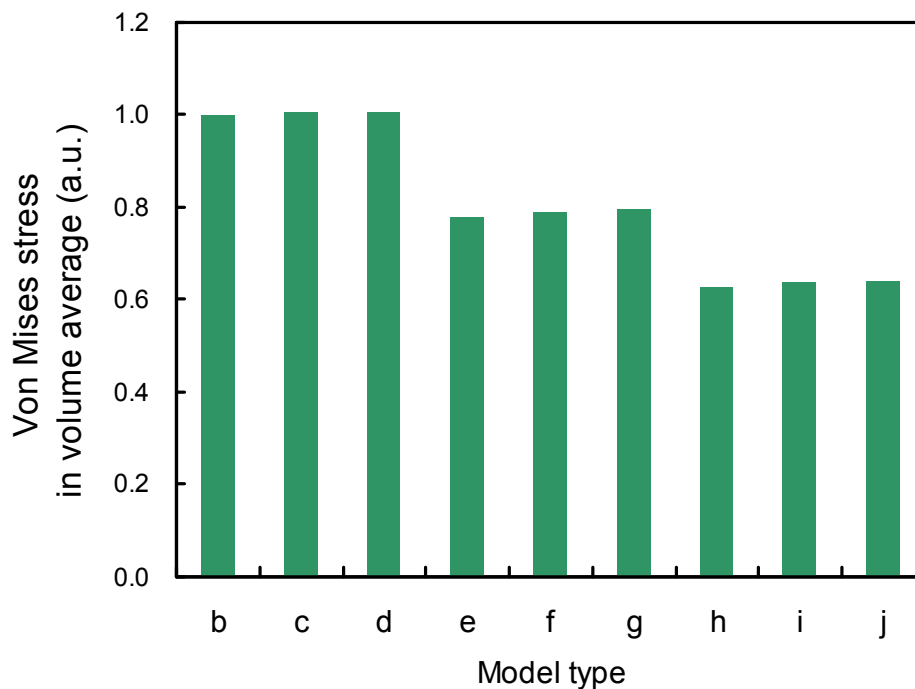


Fig. 4.14 Von Mises stress in volume average at the corner solder ball point D.

4.2.4 チップ・インターポーザの接続順序とインターポーザ厚みによる応力への影響

チップ・インターポーザの接続順序とインターポーザ厚みによる応力への影響を解析するため、Fig. 4.5 の(a)順接続、(b)逆接続、(c)同時接続のモデルを作成した。モデルの形状は 4.2.3 節で用いたものと同じであるが、等価ビアピッチは 0.65 mm のみを取り上げた。順接続のモデルでは 1 度目の接合後にチップとインターポーザ間にアンダーフィルを充填した構造で 2 度目の接合の解析モデルを作成し、同様に逆接続のモデルではインターポーザと有機基板間にアンダーフィルを充填した構造で 2 度目の接合の解析モデルを作成した。なおここでは有機インターポーザの解析は除外した。Table 4.6 は本節の研究に用いたモデルの組み合わせである。各インターポーザに対し 3 つの厚みを与え、インターポーザの厚みによる影響を評価した。材料特性は Table 4.4 に挙げたものと同じである。リファレンス温度も前節と同じ 180℃とした。

順接合および逆接合の 1 度目の接合後のインターポーザの反り

Fig. 4.15 は順接続の 1 度目の接合後のモデル h の Z 方向の変位のコンター図である。前節での結果と同様にメモリチップ搭載エリアのインターポーザのコーナー部で最も大きな正の変位が見られる。Fig. 4.16 に各モデルのポイント A の Z 方向の変位を示す。各インターポーザの線膨張係数と弾性率による変位への影響は前節の結果と同じ傾向であるが、100 μm 厚のガラス A インターポーザとガラス B インターポーザの変位はほぼ同じ値がとなっている。インターポーザが薄くなるとガラス A インターポーザとガラス B インターポーザの変位の差は小さくなる傾向が見られる。ここで調べた範囲ではインターポーザ厚みのインターポーザの反りに与える影響は顕著である。100 μm 厚と 150 μm 厚ではいずれもコーナー部の変位が 0.2 mm を超えており、このまま 2 度

Table 4.6 Model matrix in this analysis.

Model type	Configuration	Interposer thickness
a	MCM FCPBGA	-
b	Si interposer	100 μm
c	Si interposer	150 μm
d	Si interposer	200 μm
e	Glass-A interposer	100 μm
f	Glass-A interposer	150 μm
g	Glass-A interposer	200 μm
h	Glass-B interposer	100 μm
i	Glass-B interposer	150 μm
j	Glass-B interposer	200 μm

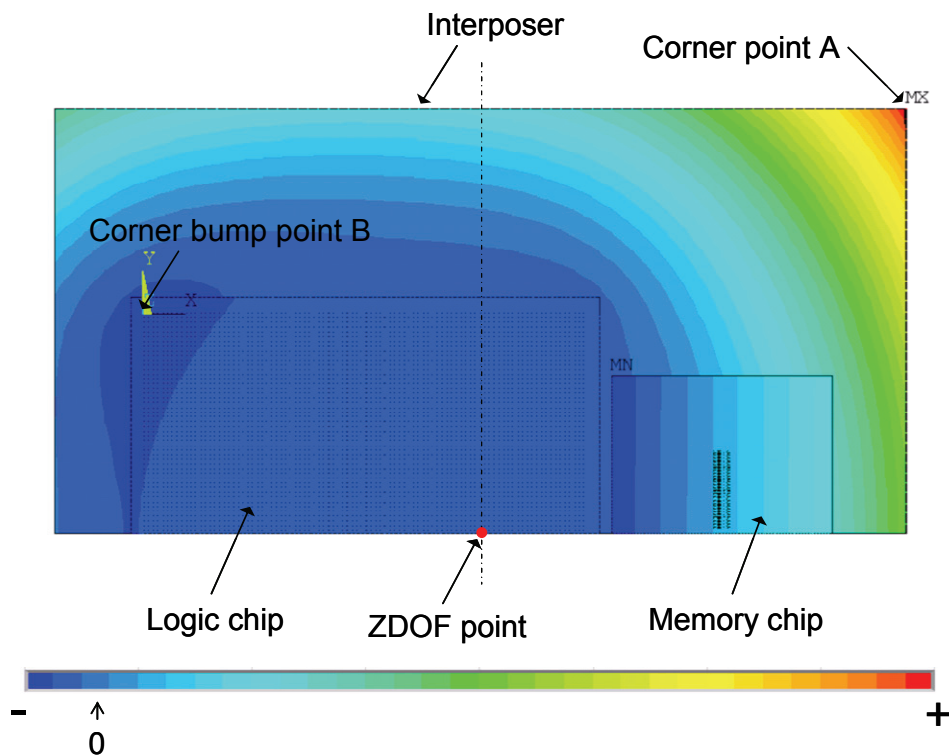


Fig. 4.15 Contour diagram of Z-direction displacement of an interposer and chips: sequence-a, step-1 joining, model-h.

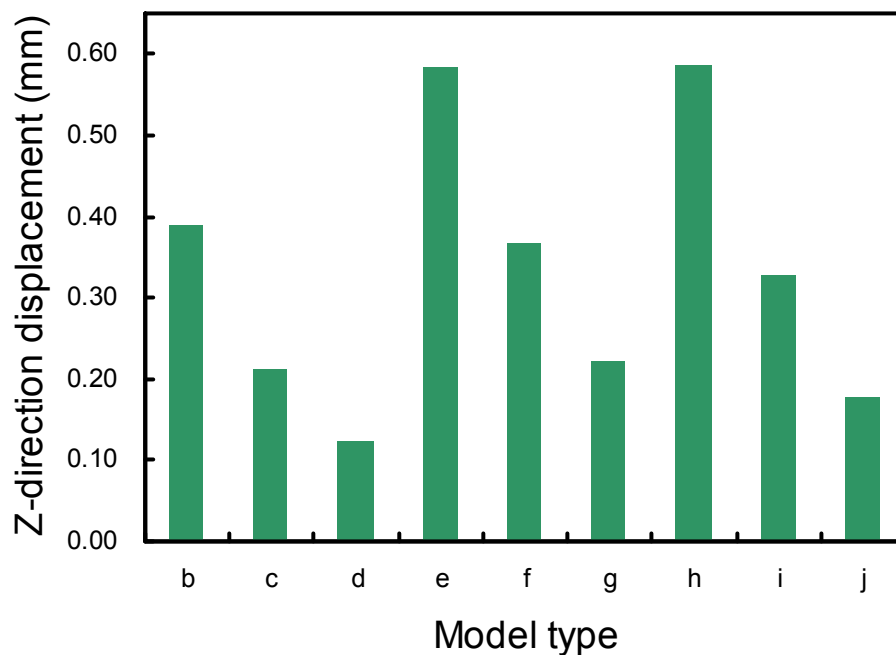


Fig. 4.16 Z-direction displacement at point A: sequence-a step-1 joining.

目の接合を行うことは困難であると考えられる．前節で述べたように 200 μm 厚のインターポーザでも 0.1 mm 以上の反りであり，インターポーザに先にチップを搭載する場合には反りを低減する工夫は必須となると考えられる．

Fig. 4.17 は逆接続の 1 度目の接合後のモデル h の Z 方向の変位のコンター図である．ここではチップが搭載されていないため同心円状の変位の変化が見られ，コーナー部は負の変位である．これはインターポーザに比べて線膨張係数の大きい有機基板の熱収縮によるものである．このモデルではチップが搭載されていないが，チップ搭載エリアを破線で示した．2 度目の接合でチップを搭載する際に最も注目すべきロジックチップのコーナーのバンプの箇所をポイント B とし，ここの変位を各インターポーザでプロットしたものが Fig. 4.18 である．各インターポーザを比較するとシリコンインターポーザの変位が最も大きく，ガラス B インターポーザの変位が最も小さい．各インターポーザの線膨張係数と有機基板の線膨張係数のミスマッチが主要因になっていると考えられる．インターポーザの厚みが増すと変位も増大する傾向が見られる．この傾向は順接続の 1 度目の接合後の傾向とは逆である．有機基板は 970 μm の厚みを想定しておりインターポーザよりも約 5 倍から約 10 倍厚いため，剛性の低くなる薄いインターポーザのほうが反りが小さくなったと考えられる．150 μm のピッチでフリップチップ接合を行う場合，接合エリアで 50 μm 以下の平坦性を確保できないと安定した接合は難しい．ここで得られた結果から線膨張係数が高く有機基板との線膨張係数のミスマッチの小さいインターポーザを用いることが，この後のチップ接合の安定性を高める有効なアプローチであると考えられる．

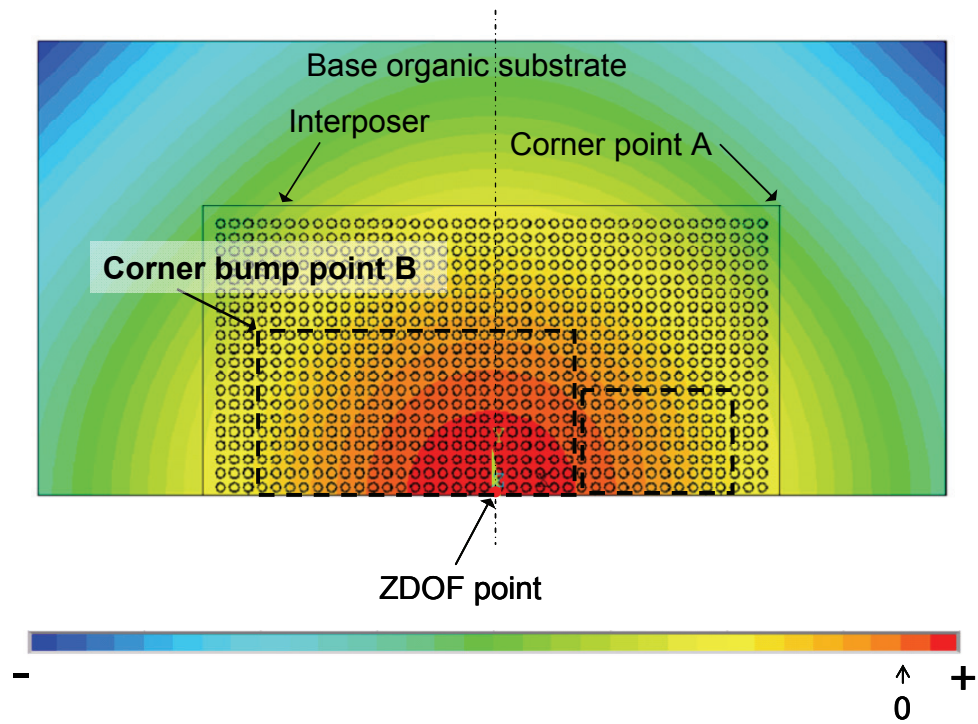


Fig. 4.17 Contour diagram of Z-direction displacement of an interposer and chips: sequence-b, step-1 joining, model-h.

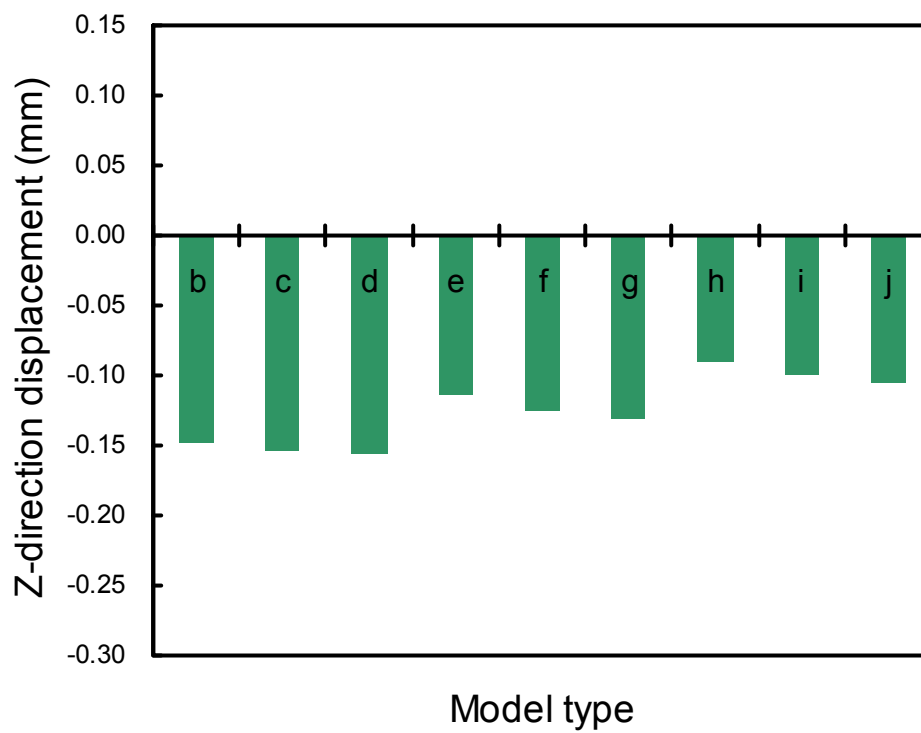


Fig. 4.18 Z-direction displacement at point B: sequence-b step-1 joining.

順接合および同時接合の2度目の接合後のインターポーザの反り

ここでは順接合でインターポーザ上のチップがアンダーフィル封止された状態と同時接続でインターポーザ上のチップがアンダーフィル封止されていない状態での、2度目の接合後のインターポーザの反りを比較検討する。Fig. 4.19 と Fig. 4.20 はそれぞれ順接続と同時接続のモデルbのZ方向の変位のコンター図である。Fig. 4.17 に示した逆接続のインターポーザ接合後と同様に有機基板の熱収縮によって凸形の反りが見られる。Fig. 4.19 および Fig. 4.20 ではロジックとメモリのチップサイズの違いにより図中の左上と右上のコーナーでの変位に差がある。左右コーナーの変位の差はアンダーフィル封止のない同時接続のほうが大きい。Fig. 4.21 と Fig. 4.22 は、Fig. 4.19 および Fig. 4.20 で示したインターポーザのコーナー部のポイントAでのZ方向の変位を、それぞれ順接続の場合と同時接続の場合で示したものである。先の Fig. 4.18 に示す結果と同様に、線膨張係数が小さく弾性率の高いシリコンインターポーザの反りが大き

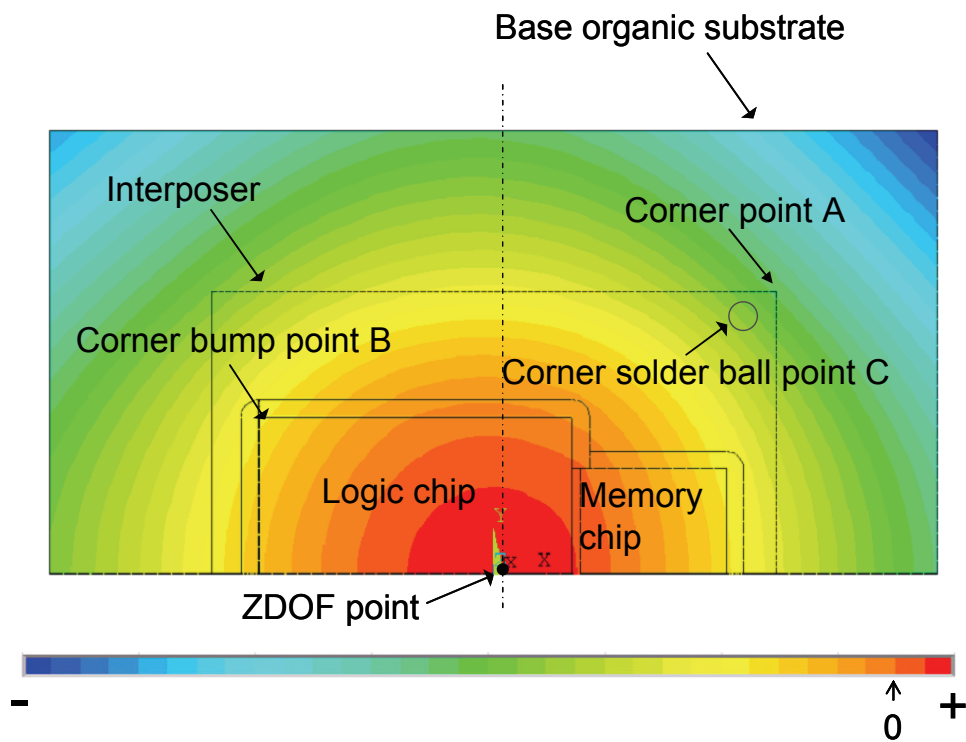


Fig. 4.19 Contour diagram of Z-direction displacement of an organic substrate, an interposer and chips: sequence-a model-b).

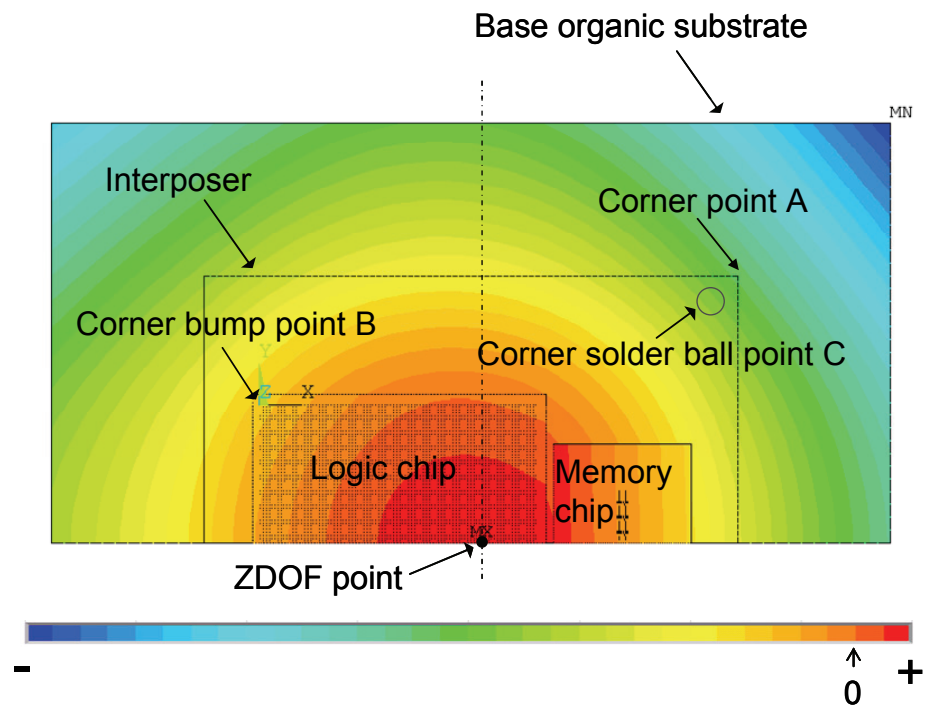


Fig. 4.20 Contour diagram of Z-direction displacement of an organic substrate, an interposer and chips: sequence-c model-b).

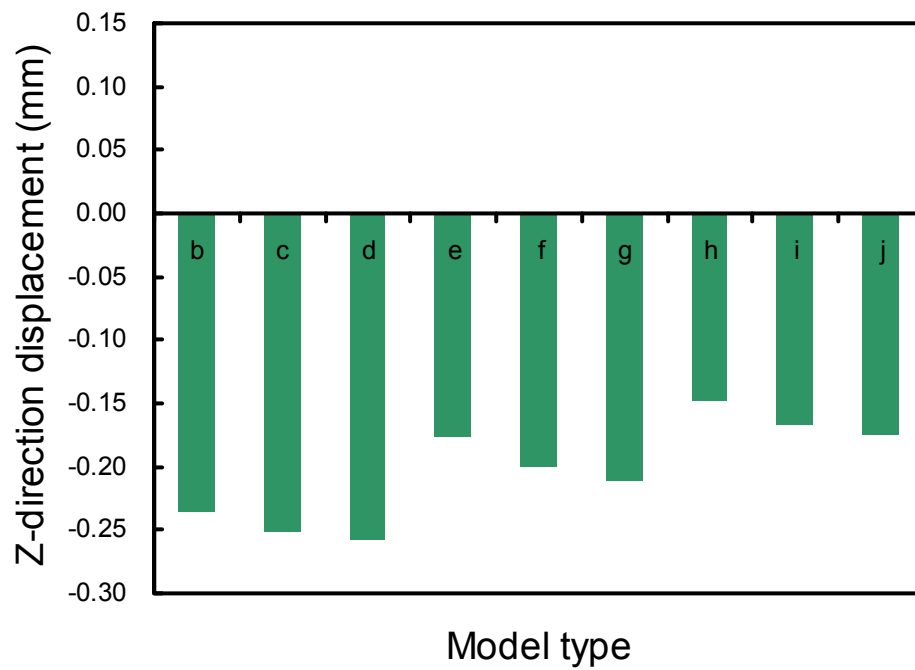


Fig. 4.21 Z-direction displacement at point A: sequence-a step-2 joining.

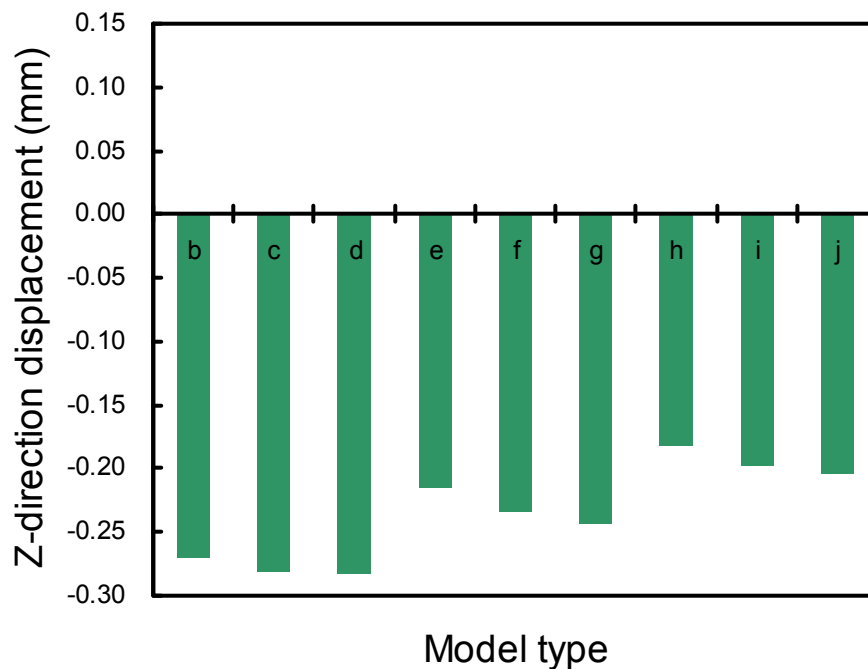


Fig. 4.22 Z-direction displacement at point A: sequence-c.

く、線膨張係数が大きく弾性率の低いガラス B インターポーザの反りが小さい傾向と、インターポーザの厚みが増すと反りが増大する傾向が現れている。順接続と同時接続を比較すると概ね順接続のほうが 30 μm 程度変位が小さくなる。これは順接続のモデルでは線膨張係数が有機基板に近いアンダーフィル材がチップとインターポーザ間に充填されている効果と考えられる。

インターポーザと有機基板のはんだ接合部にかかる応力

インターポーザと有機基板の接合後にはんだ接合部に生じるフォン・ミーゼス応力を 3 つの接続順序すべてでプロットしたのが Fig. 4.23 である。ここでは順接続のモデル b を基準として任意単位で表示した。解析点は Fig. 4.19, Fig. 4.20 中のコーナーのはんだボール C である。Fig. 4.23 から見て取れるように各モデルで 3 つの接続順序による応力の差は数%程度であり、接続順序がインターポーザ・有機基板間のはんだ接続部の応力に与える影響は軽微である。インターポーザの材料と厚みの影響は顕著であり、インターポーザの反りの傾向とも対応している。

線膨張係数が小さく弾性率の高いシリコンインターポーザは反りが大きくなり、はんだ接合部の応力は大きくなる。一方、線膨張係数が大きく弾性率の低いガラス B インターポーザは反りが小さく応力も低くなる傾向がある。またインターポーザの厚みが増すと反りが増大し、接合部の応力も増大する。

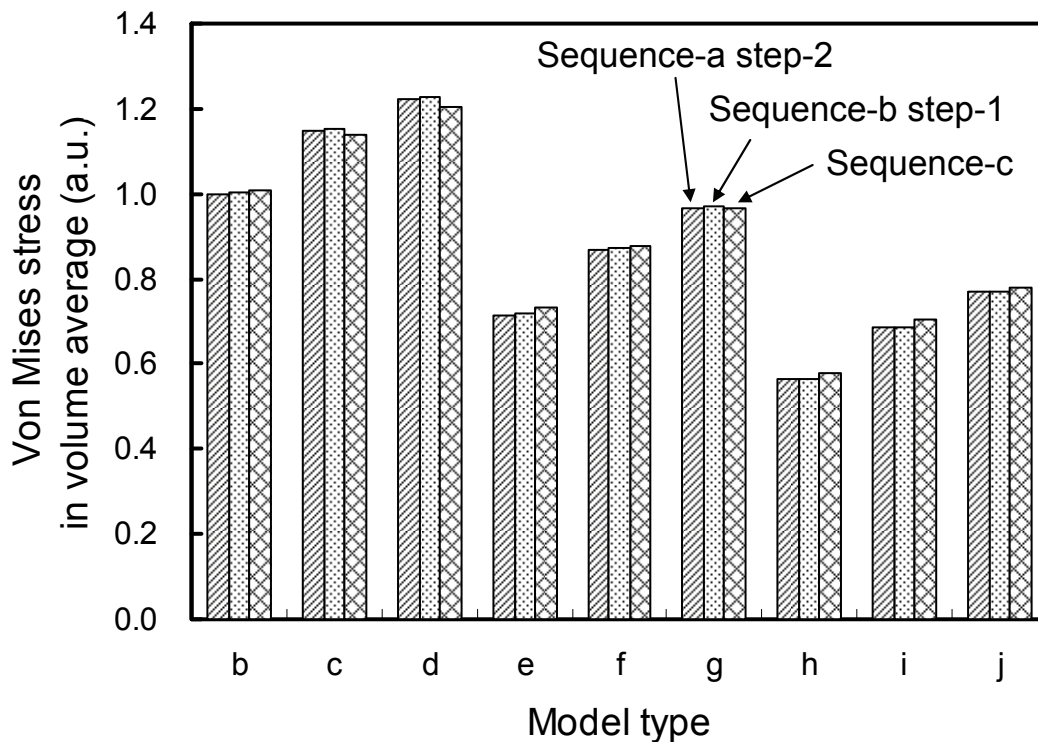


Fig. 4.23 Von Mises stress in volume average at the corner solder ball point C.

フリップチップのパッド下部配線層にかかる応力

ここでは各接続順序でのチップ接合後にフリップチップのパッド下部配線層にかかる第一主応力を調べた。比較として MCM FCPBGA の解析結果を参照する。Fig. 4.24 はガラス B インターポーザの各接続順序でのチップ接合後のパッド下部配線層の第一主応力のコンター図である。各図中の左上がパッケージコーナー方向、右下がパッケージ中央方向である。はんだバンプ下部のパッケージ中心側に圧縮応力が生じ、パッケージコーナー側に引張応力が生じている。Fig. 4.25 には順接続のチップ接合後の MCM FCPBGA を含む各モデルのポイント C のパッド下部配線層の最大の第一主応力を示す。順接続ではチップ接合後はインターポーザとチップのみであるため、インターポーザの各モデルは MCM FCPBGA に比べて非常に小さい応力値となっている。シリコンインターポーザはチップとの線膨張係数のミスマッチがないためインターポーザの厚みによる応力の変化は見られない。ガラス B インターポーザはシリコンインターポーザに比べて約 5 倍の応力が生じており、インターポーザの厚みが増すと応力も増加する傾向が分かる。Fig. 4.26 は逆接続の場合で、チップ接合はインターポーザが基板に搭載された状態で行われる想定である。図から分かるように各インターポーザ材、インターポーザ厚みによる影響は小さいが、インターポーザのモデルでは MCM FCPBGA に比べて 6% から 10% の応力増加となる。有機基板の熱収縮がインターポーザを介してパッド下部にも影響し、インターポーザと有機基板間がアンダーフィル封止によって弾性結合されているためインターポーザの違いの影響は低減さ

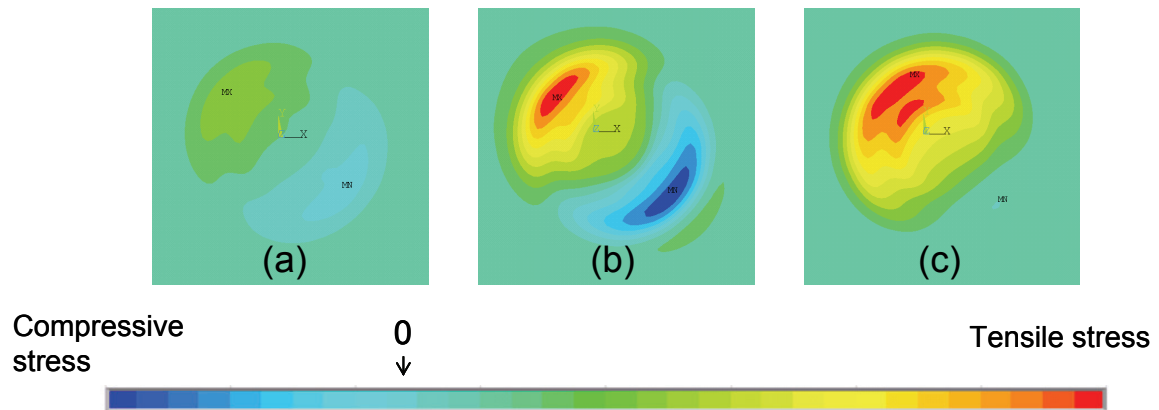


Fig. 4.24 Contour diagrams of first principal stress in the dielectric layer under bump point B: (a) sequence-a step-1 joining model-h, (b) sequence-b step-2 joining model-h, and (c) sequence-c model-h.

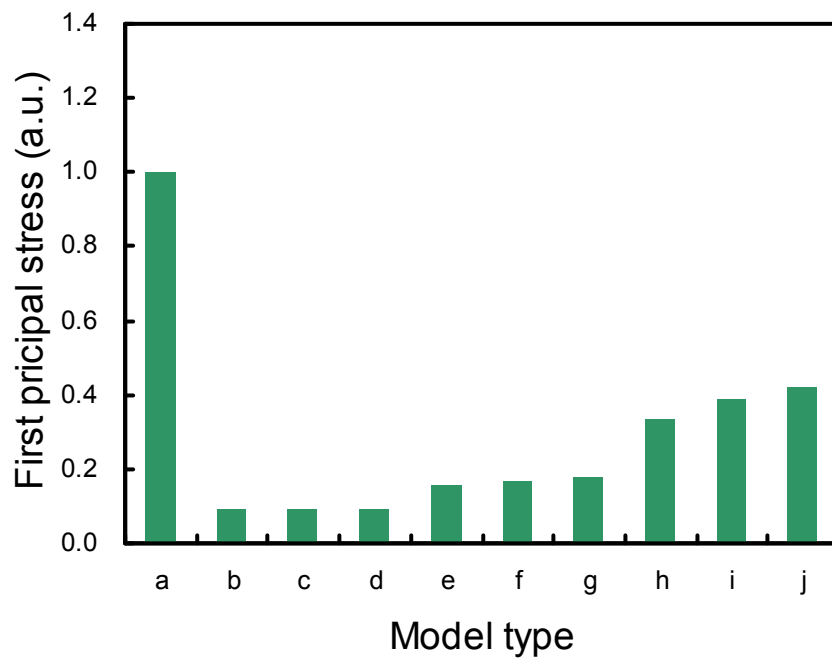


Fig. 4.25 First principal stress in the dielectric layer under bump point B: sequence-a step-1 joining.

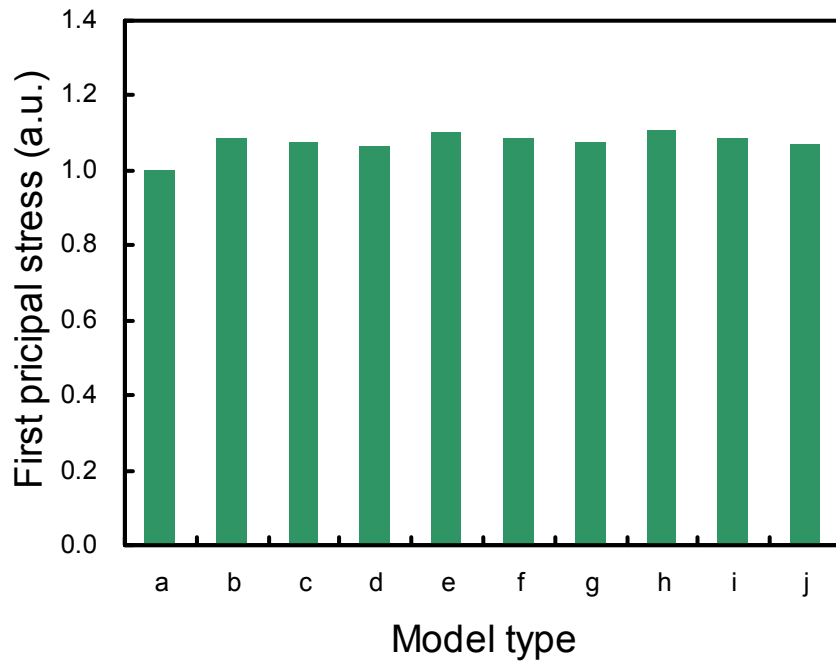


Fig. 4.26 First principal stress in the dielectric layer under bump point B: sequence-b step-2 joining.

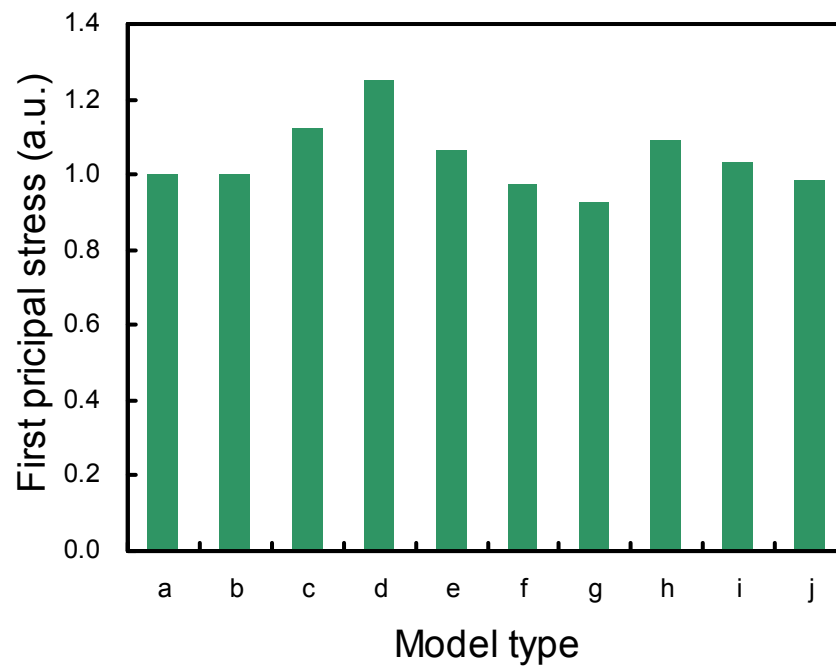


Fig. 4.27 First principal stress in the dielectric layer under bump point B: sequence-c.

れるが、インターポーザの剛性によりパッド下部の応力はわずかに MCM FCPBGA よりも増加していると考えられる。Fig. 4.27 は同時接続の場合で、逆接続の場合と同様にほぼすべてのインターポーザのモデルで MCM FCPBGA の応力値よりも 10%程度高くなっている。しかし同時接続ではインターポーザと有機基板の間のアンダーフィル封止がないため、インターポーザ厚みの影響は明確に見て取れる。シリコンインターポーザでは厚みの増加と共にパッド下部の応力が増加しているが、ガラスインターポーザは 2 種類とも厚みの増加と共に応力は減少している。シリコンの弾性率(165 GPa)とガラス 2 種類の弾性率(約 75 GPa)の間でインターポーザ厚みと応力の相関が正から負に変わる変極点があると推察できるが、その検証にはさらに多くの弾性率で解析したデータ点が必要である。

4.3 インターポーザ上に複数チップを積層するパッケージの熱機械的解析

4.3.1 FEM 解析モデル

Fig. 4.28 に本節の研究で想定した 3D-IC パッケージの構成を示す。チップ、インターポーザ、有機基板のすべての中心軸を揃えた配置を想定した。インターポーザの材質は Si のみを取り上げた。チップは複数枚積層する構造であり、最上部のチップをトップチップと呼び、トップチップとインターポーザ間のチップをミドルチップと呼ぶ。ミドルチップが複数ある場合は上から 1, 2, 3 と番号付けした。インターポーザ上面には再配線層 RDL が形成され、ミドルチップとインターポーザの下面にははんだ保護膜としてのポリイミドが形成されていると仮定した。各部の寸法を Table 4.7 に示す。トップチップとインターポーザの厚みの影響を調べるため、これらの寸法は複数の数値を想定した。シリコンインターポーザの TSV ピッチは 100 μm であり、TSV のランドとインターポーザのはんだ接続用パッドが同一であるとしてしているためインターポーザの接続ピッチも 100 μm である。接合部には高さ 10 μm Cu ピラーを用い、はんだ接合部の高さも 10 μm とした。

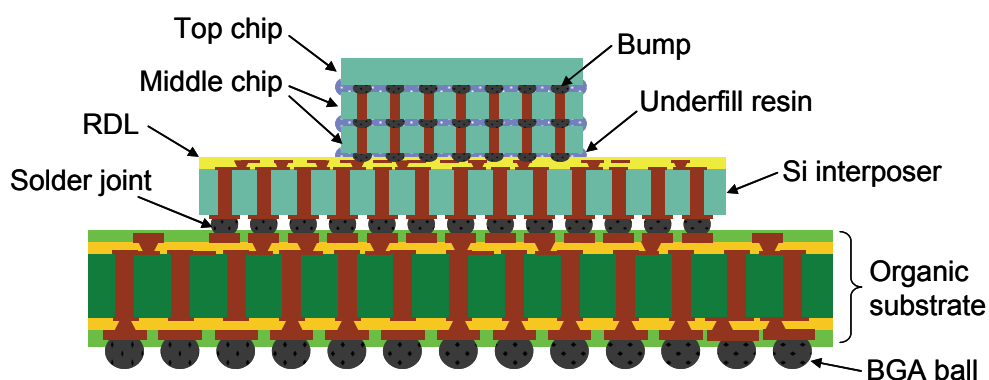


Fig. 4.28 3D-IC package configuration.

Table 4.7 Dimensions of chips, interposer and package.

Chip size (top/middle)	7.5 mm x 7.5 mm
Interposer size	13.3 mm x 13.3 mm
Chip thickness (top)	100 μ m, 200 μ m, 300 μ m, 400 μ m, 725 μ m
Chip thickness (middle)	100 μ m
Polyimide thickness (middle chip, interposer)	5 μ m
Interposer thickness	50 μ m, 100 μ m, 200 μ m, 300 μ m
RDL thickness (interposer)	10 μ m
TSV pitch (middle)	50 μ m
TSV pitch (interposer)	100 μ m
Bump pitch (top/middle)	50 μ m
Bump diameter (top/middle)	30 μ m
Bump height	10 μ m
Joint height	10 μ m
Package size	40 mm x 40 mm
Thickness of base organic substrate	760 μ m (400 μ m core)

Fig. 4.29 にここで作成したモデルを示す。パッケージの対称性を考慮して 1/4 モデルを用いた。ミドルチップの TSV はチップコーナー部の 6 x 6 マトリックス分を (計 36 個) 詳細にモデル化し、その他の部分は TSV の Cu 密度にもとに ANSYS Multiscale.Sim[®] の均質化法を用いて算出した複合特性を適用した。インターポーザはすべての部分で TSV の Cu との均質化を行った。インターポーザと有機基板は先に接合されると想定し、インターポーザと有機基板間にはアンダーフィルを充填したモデルとした。リファレンス温度は前の節と同様に 180°C に設定し、冷却速度 2°C/s で室温までの冷却した後の熱応力を Ansys Mechanical[®] Ver. 14 で解析した。Table 4.8 にここで用いた材料特性をまとめた。接合部は SnAg はんだの場合とはんだが CuSn に金属間化合物化した 2 種類を取り上げた。CuSn 金属間化合物の特性は既報の研究^{100, 101)} の数値を用いた。

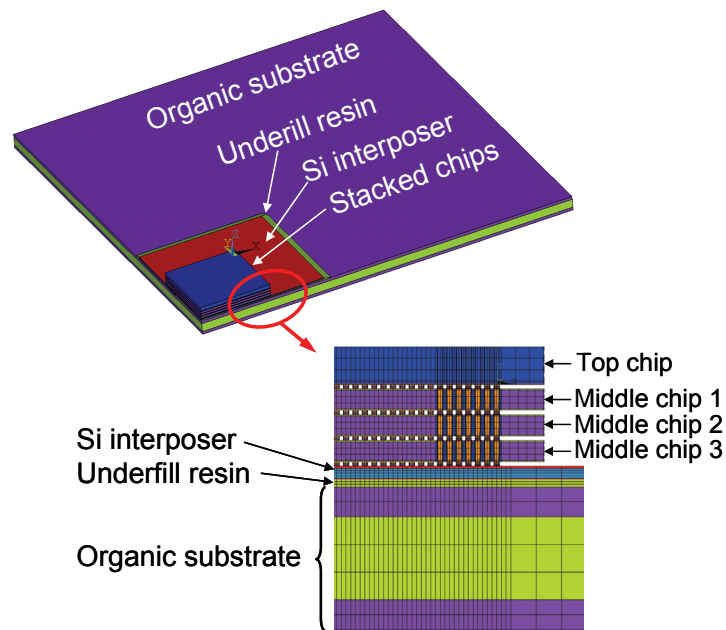


Fig. 4.29 Bird's-eye view and cross-sectional view of FEM model with 3x middle chip stacks.

Table 4.8 Material properties used in this analysis.

	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	CTE (ppm/°C)
Si	165	0.22	3.2
RDL ^{*)}	28	0.24	17
Cu	117	0.32	18
SnAg solder	27	0.35	25
CuSn IMC	110	0.30	16
Build-up layer ^{**)}	17	0.34	27
Core ^{***)}	25	0.33	15
Underfill resin	9.5	0.35	25

^{*)} Composite property with Cu

^{**)} Composite property with Cu and solder resist

^{***)} Composite property with Cu and glass fiber

Table 4.9 に本研究で解析を行ったモデルの組み合わせを示す。トップチップの厚みの影響は 5 種類の厚みで調べた。ミドルチップの積層数の影響は 1 チップ、2 チップ、3 チップの 3 種類で調べ、それぞれを 1x, 2x, 3x と表記する。接合部の機械的特性の影響では、先に述べたように SnAg はんだと CuSn 金属間化合物の 2 種類を取り上げた。この表の組み合わせを 4 種類のインターポーザ厚みと組み合わせたものが全モデルとなる。モデルタイプの表記の n に 1, 2, 3, 4 の番号を割り当て、それぞれで 50 μm , 100 μm , 200 μm , 300 μm のインターポーザ厚みを識別する。Fig. 4.30 にインターポーザ厚み 50 μm の場合の各モデルの寸法の組み合わせを概略図で示した。

Fig. 4.31 はモデル II の 3 つのミドルチップのコーナー部分のフォン・ミーゼス応力のコンター図である。図の上部のトップチップと、下部のシリコンインターポーザは表示していない。ここでの解析ではトップチップとミドルチップ、ミドルチップとミドルチップ、ミドルチップとインターポーザの各接合部のフォン・ミーゼス応力でトップチップの厚み、ミドルチップの積層数、インターポーザの厚み、接合部の機械的特性の影響を検討した。またトップチップのコーナー部の変位についても検討を行った。

Table 4.9 Model matrix (n=1: 50- μ m-thick interposer, n=2: 100- μ m-thick interposer, n=3: 200- μ m-thick interposer and n=4: 300- μ m-thick interposer).

Model type	Top chip THK (μ m)	Middle chip stack	Joint metallurgy
An	100	1x	SnAg
Bn	200	1x	SnAg
Cn	300	1x	SnAg
Dn	400	1x	SnAg
En	725	1x	SnAg
Fn	200	1x	CuSn
Gn	200	2x	SnAg
Hn	200	2x	CuSn
In	200	3x	SnAg
Jn	200	3x	CuSn

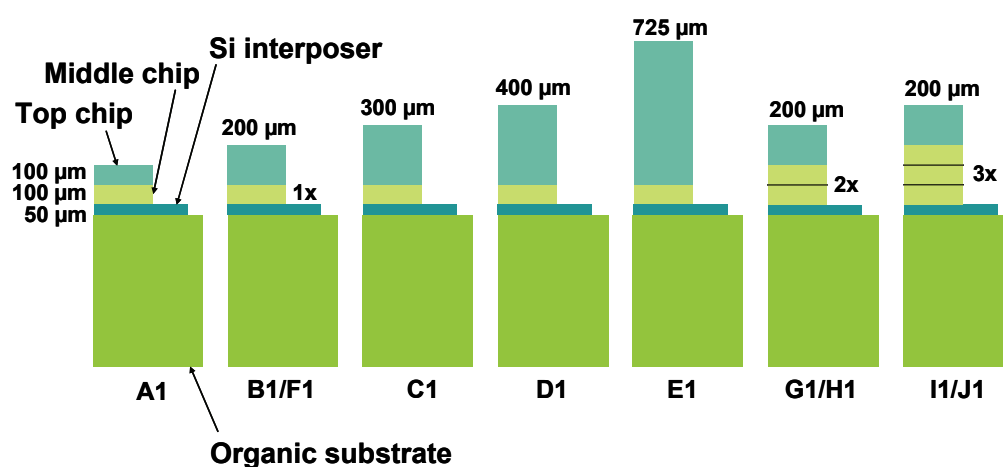


Fig. 4.30 Schematic of dimensional variations of 3D-IC package assumed in this study (in case of 50- μ m-thick interposer).

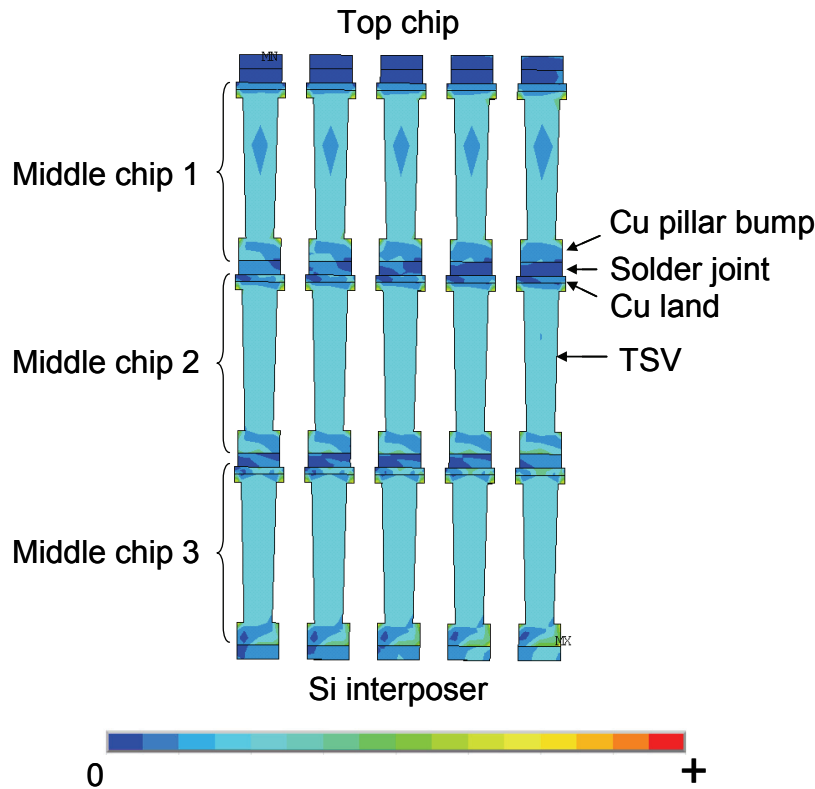


Fig. 4.31 Contour diagram of von Mises stress at Cu pillar bump, solder joint, Cu land and TSV (model I1).

4.3.2 トップチップの厚みとインターポーザの厚みによる接合部応力・チップ反りへの影響

Fig. 4.32, Fig. 4.33, Fig. 4.34, Fig. 4.35 はそれぞれインターポーザ厚み 50 μm , 100 μm , 200 μm , 300 μm で、トップチップの厚みを 100 μm から 725 μm まで変化させた場合のトップチップコーナー部の変位、トップチップとミドルチップの接合部のフォン・ミーゼス応力、ミドルチップとインターポーザの接合部のフォン・ミーゼス応力を示したグラフである。ここではモデル An, Bn, Cn, Dn, En の結果を考察する。変位はリファレンス温度 180°Cにおけるトップチップ上面のコーナーを原点とし、トップチップから有機基板の向きを正の方向とした。フォン・ミーゼス応力は接合部の体積平均で、インターポーザ厚みが 50 μm でトップチップが 200 μm の場合のトップチップとミドルチップの接合部の応力を基準として任意単位で表示した。4.3 節のこれ以降で示すグラフのフォン・ミーゼス応力のスケールはすべてこれと同一である。Fig. 4.32 から一般的に FCPBGA で見られるのと同様にトップチップは凸形の反り形状をしている。線膨張係数の大きい有機基板の熱収縮により最上部のトップチップにも反りが生じている。トップチップの厚みが増すと変位は単調に減少し、トップチップが 100 μm から 725 μm に変化すると変位は 50%以上減少する。トップチップ厚みが 100 μm から 725 μm に増えるとミドルチップとインターポーザの接合部の応力とトップチップとミドルチップの接合部の応力はともに増大する。ミドルチップとインターポーザ間の接合部の応力は、トップチップの厚みが 100 μm から 300 μm の範囲ではトップチップとミドルチップ間の接合部の応力より大きい、トップチップが 725 μm となると逆転して小さくなる。またミドルチップとインターポーザ間の接合部の応力は、トップチ

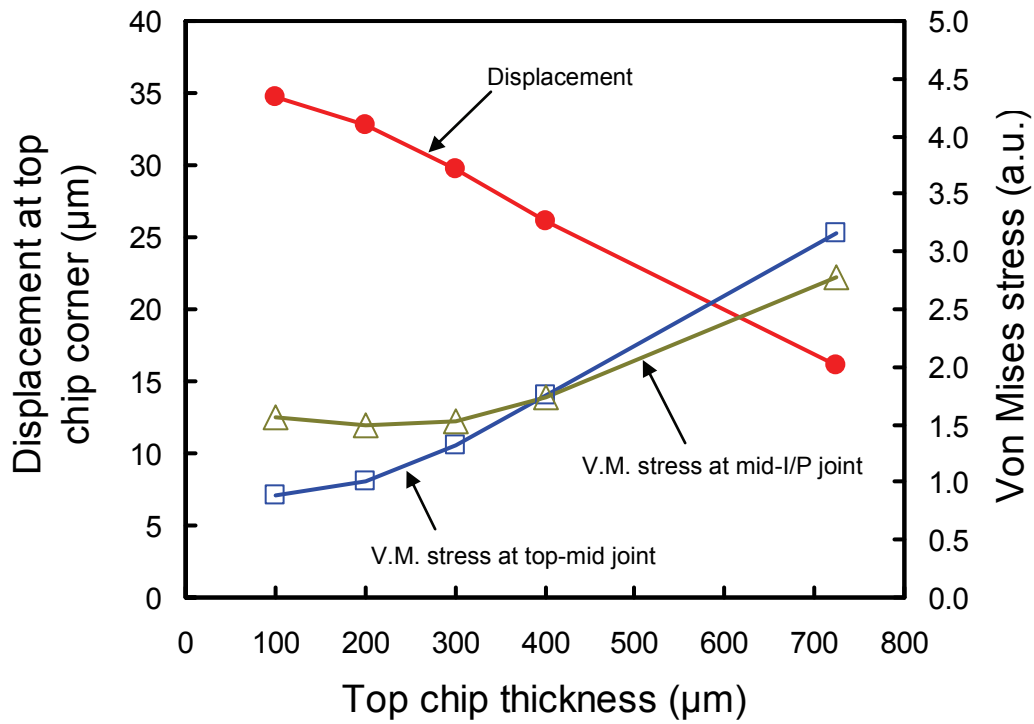


Fig. 4.32 Z-direction displacement at the top chip corner and von Mises stress at the chip corner joint with variable top chip thickness with 50-μm-thick interposer (Model A1, B1, C1, D1 and E1).

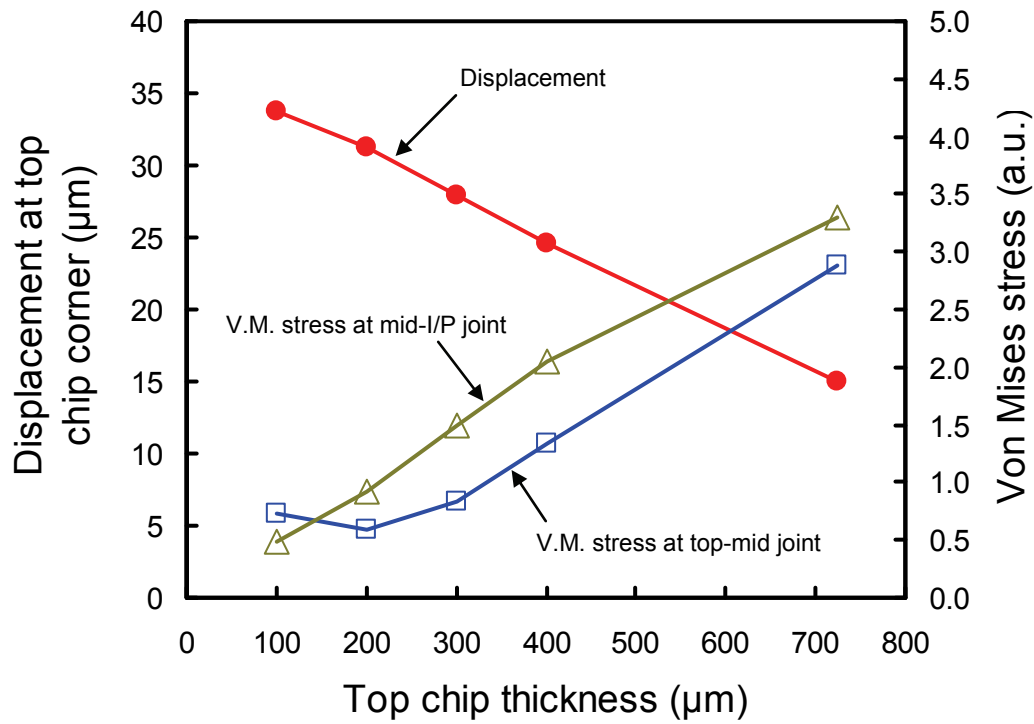


Fig. 4.33 Z-direction displacement at top chip corner and von Mises stress at chip corner joint with variable top chip thickness with 100-μm-thick interposer (Model A2, B2, C2, D2 and E2).

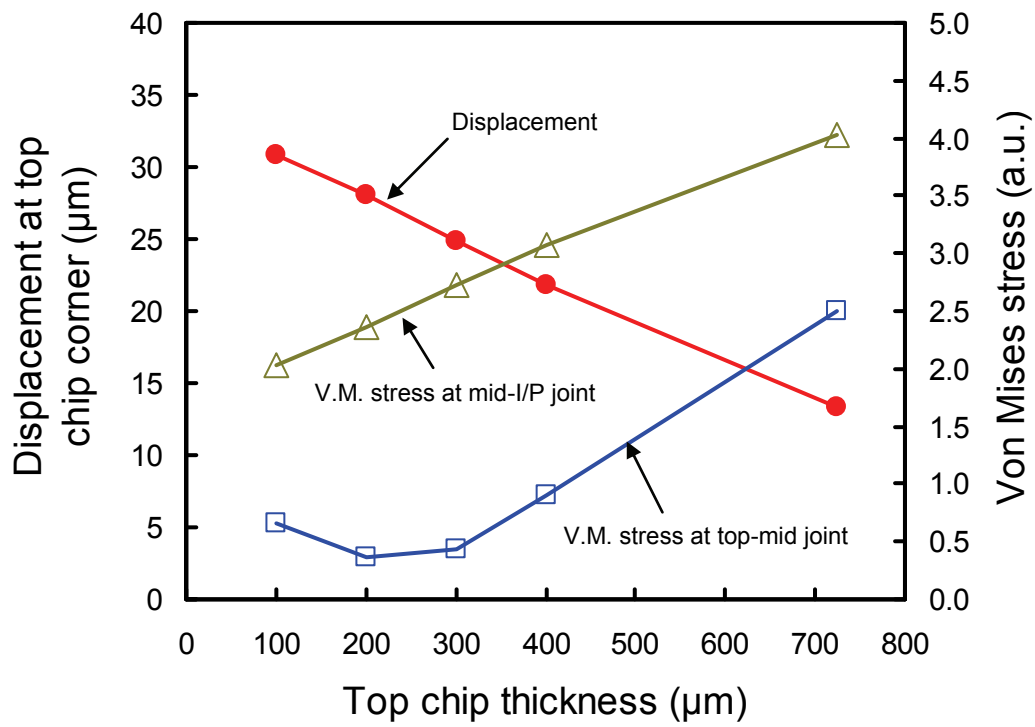


Fig. 4.34 Z-direction displacement at top chip corner and von Mises stress at chip corner joint with variable top chip thickness with 200-μm-thick interposer (Model A3, B3, C3, D3 and E3).

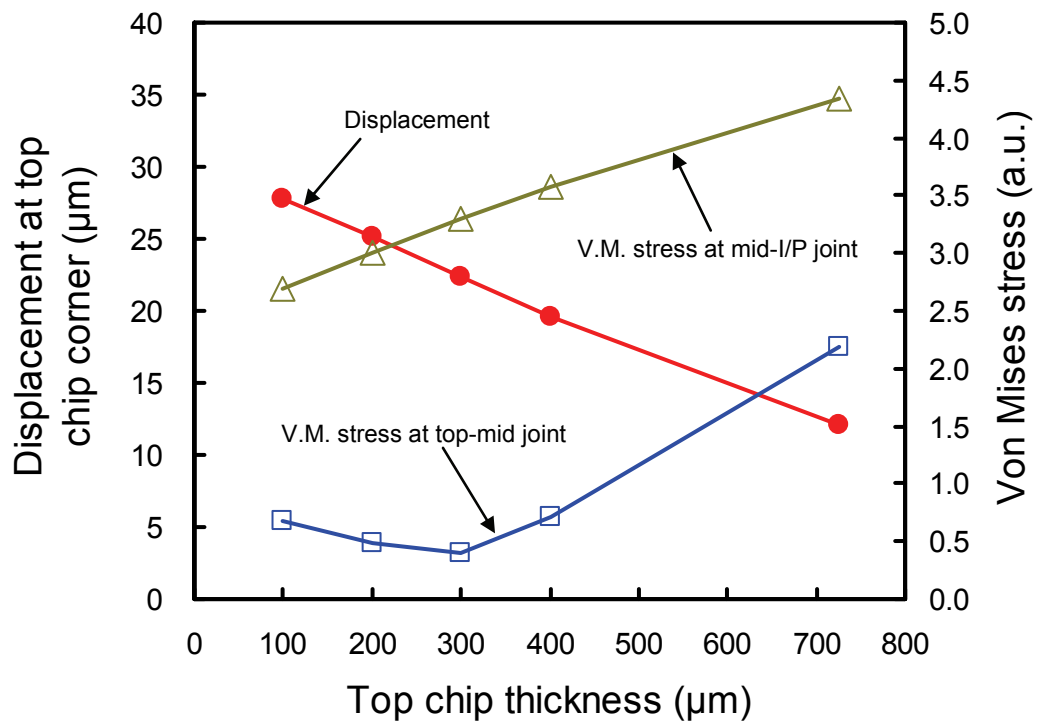


Fig. 4.35 Z-direction displacement at top chip corner and von Mises stress at chip corner joint with variable top chip thickness with 300-μm-thick interposer (Model A4, B4, C4, D4 and E4).

ップ厚みが 200 μm の場合に最小となる。Fig. 4.33, Fig. 4.34, Fig. 4.35 に示すようにインターポーザ厚みが 100 μm , 200 μm , 300 μm と増大するとトップチップの反りは減少していくが、単調に減少する関係はすべてのインターポーザ厚みで同様になる。これはトップチップの厚みが増すと剛性が高くなるためであると考えられる。インターポーザ厚みが 100 μm , 200 μm , 300 μm の場合にはミドルチップとインターポーザ間の接合部の応力は単調に増加し、トップチップとインターポーザの厚みがともに 100 μm の場合を除いてトップチップとミドルチップ間の接合部の応力よりも高い数値となる。またインターポーザの厚みが増すとミドルチップとインターポーザ間の接合部の応力は著しく増大し、トップチップ厚みが 100 μm の場合ではインターポーザ厚みが 100 μm から 300 μm に変化するとその応力は約 5.4 倍大きくなる。トップチップとミドルチップ間の接合部の応力は、インターポーザの厚みによってミドルチップとインターポーザ間の接合部の応力ほど大きな変化は見られないが、トップチップ厚みが 725 μm の場合でインターポーザ厚みが 50 μm から 300 μm に変化するとその応力は約 31% 減少する。インターポーザ厚みが 100 μm , 200 μm , 300 μm の場合にはトップチップとミドルチップ間の接合部の応力はトップチップ厚み 100 μm ~ 725 μm の範囲で極小値を示す。この極小値は、トップチップ・ミドルチップ・インターポーザの 3 層構造でトップチップとインターポーザの厚みが一致する近辺に現れている。インターポーザが厚いとミドルチップとインターポーザ間の接合部の応力が高くなるため、トップチップとミドルチップ間およびミドルチップとインターポーザ間の両方の接合部の応力をともに低減するには、ここで評価した条件の中ではインターポーザー厚みが 100 μm でトップチップの厚みも 100 μm の組み合わせが最善となる。

4.3.3 ミドルチップの積層数・インターポーザの厚みおよび接合部の機械特性による接合部応力・チップ反りへの影響

ここではモデル Bn, Fn, Gn, Hn, In, Jn の結果からミドルチップの積層数、インターポーザの厚みおよび接合部の機械特性による接合部応力・チップ反りへの影響を考察する。Fig. 4.36, Fig. 4.37, Fig. 4.38, Fig. 4.39 はそれぞれインターポーザ厚み 50 μm , 100 μm , 200 μm , 300 μm で、ミドルチップの積層数を 1x, 2x, 3x と変化させた場合のトップチップコーナー部の変位、トップチップとミドルチップの接合部のフォン・ミーゼス応力、ミドルチップとインターポーザの接合部のフォン・ミーゼス応力を示したグラフである。ミドルチップの積層数が増すと変位は単調に減少し、インターポーザが厚くなると、どの積層数でも変位は小さくなる。接合部がはんだの場合と金属間化合物の場合で変位に大きな差は見られない。これは接合部の厚みが 10 μm と非常に薄いためと推察される。トップチップとミドルチップの接合部のフォン・ミーゼス応力は、インターポーザの厚みが 50 μm の場合には積層数の増加とともにわずかに減少し、インターポーザの厚みが 100 μm の場合には積層数によらずほぼ等しく、インターポーザの厚みが 200 μm と 300 μm の場合には積層数の増加とともに増加する傾向が見られる。また接合部がはんだの場合と金属間化合物の場合での差は概ね大きなものではない。ミドルチップとインターポーザの接合部のフォン・ミーゼス応力は、トップチップとミドルチップの接合部のフォン・ミーゼス応力よりも大きい。この差はインターポーザの厚みが増すと非常に顕著になる。これは先のトップチップの厚みを変化させた場合の結果と同様であり、インターポーザ上に搭載され

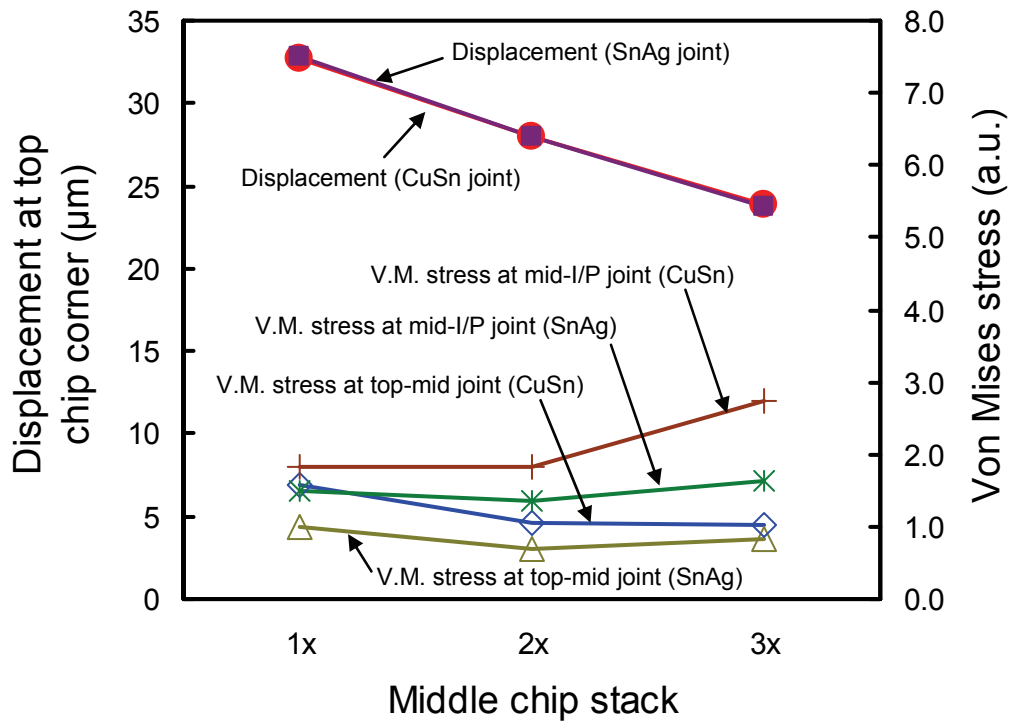


Fig. 4.36 Z-direction displacement at top chip corner and von Mises stress at chip corner joint with variable middle chip stack and different solder joint metallurgy with 50-μm-thick interposer (Model B1, F1, G1, H1, I1 and J1).

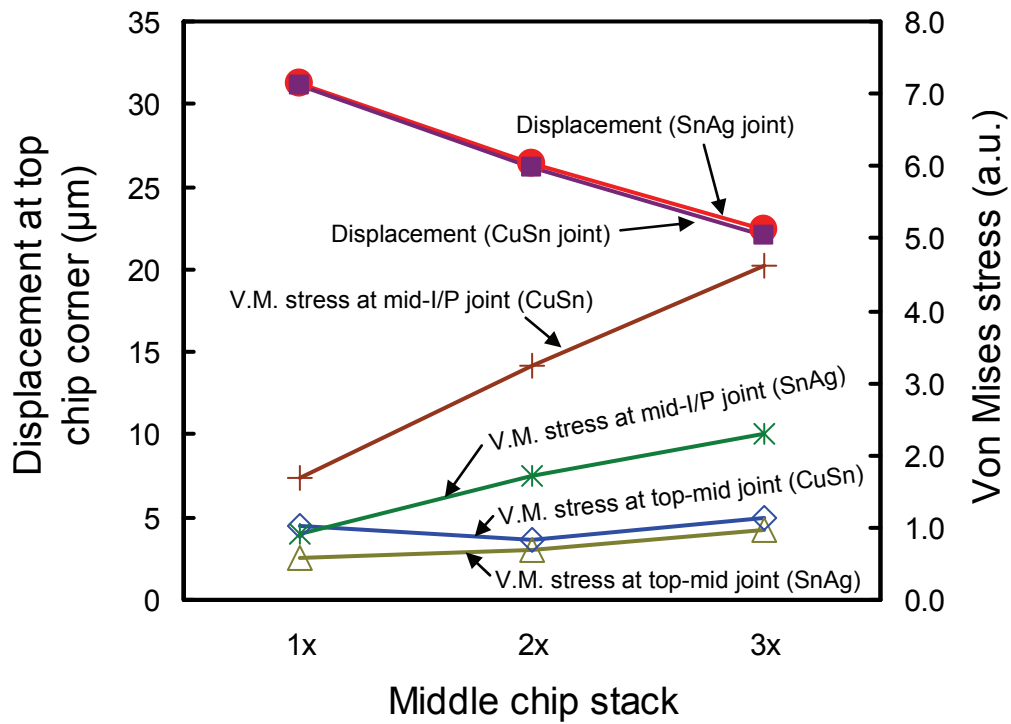


Fig. 4.37 Z-direction displacement at top chip corner and von Mises stress at chip corner joint with variable middle chip stack and different solder joint metallurgy with 100-μm-thick interposer (Model B2, F2, G2, H2, I2 and J2).

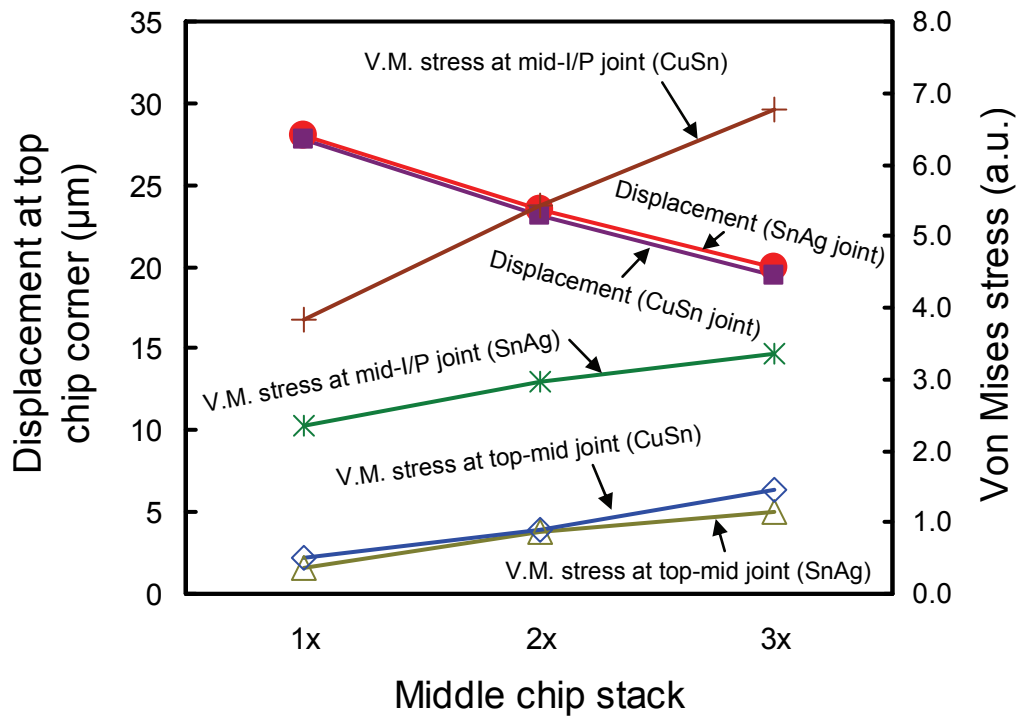


Fig. 4.38 Z-direction displacement at top chip corner and von Mises stress at chip corner joint with variable middle chip stack and different solder joint metallurgy with 200-μm-thick interposer (Model B3, F3, G3, H3, I3 and J3).

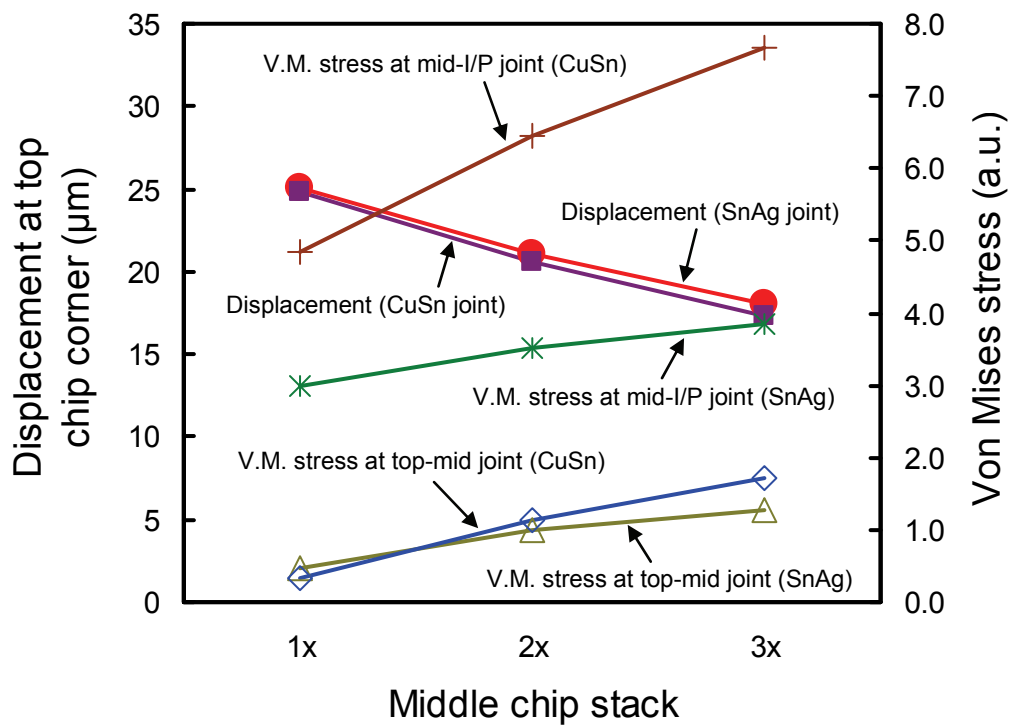


Fig. 4.39 Z-direction displacement at top chip corner and von Mises stress at chip corner joint with variable middle chip stack and different solder joint metallurgy with 300-μm-thick interposer (Model B4, F4, G4, H4, I4 and J4).

たチップの積層体の剛性が高まるとインターポーザとその直上に接合されたチップとの接合部の応力に影響が顕著に現れることを示唆している。またミドルチップとインターポーザの接合部の応力でははんだと金属間化合物の差は大きい。インターポーザ厚みが 300 μm で 3x の積層の場合、金属間化合物でのミドルチップとインターポーザの接合部の応力のはんだの接合部の約 2 倍となる。

Fig. 4.40 と Fig. 4.41 でそれぞれはんだ接合と IMC 接合の場合の、3x のミドルチップ積層の各接合部のフォン・ミーゼス応力を示した。はんだ接合、IMC 接合ともにトップチップとミドルチップ 1、ミドルチップ 1 とミドルチップ 2、ミドルチップ 2 とミドルチップ 3 の各接合部の応力に著しい違いは生じていないが、ミドルチップ 3 とインターポーザの接合部では急激に応力が大きくなる傾向がある。インターポーザが厚くなるとその応力は大きくなり、インターポーザ厚み 50 μm に比べてインターポーザ厚み 300 μm の時のミドルチップ 3 とインターポーザの接合部のフォン・ミーゼス応力は、はんだ接合の場合で約 2.4 倍、IMC 接合の場合で約 2.9 倍で増加する。

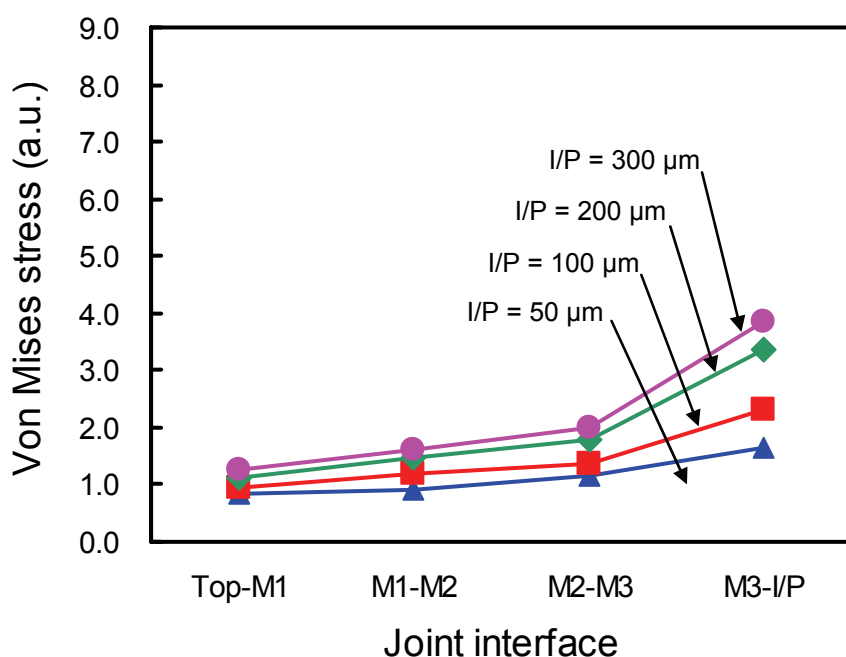


Fig. 4.40 Von Mises stress at variable joining interface of 3x middle chip stacks with SnAg joint (Model I1, I2, I3 and I4).

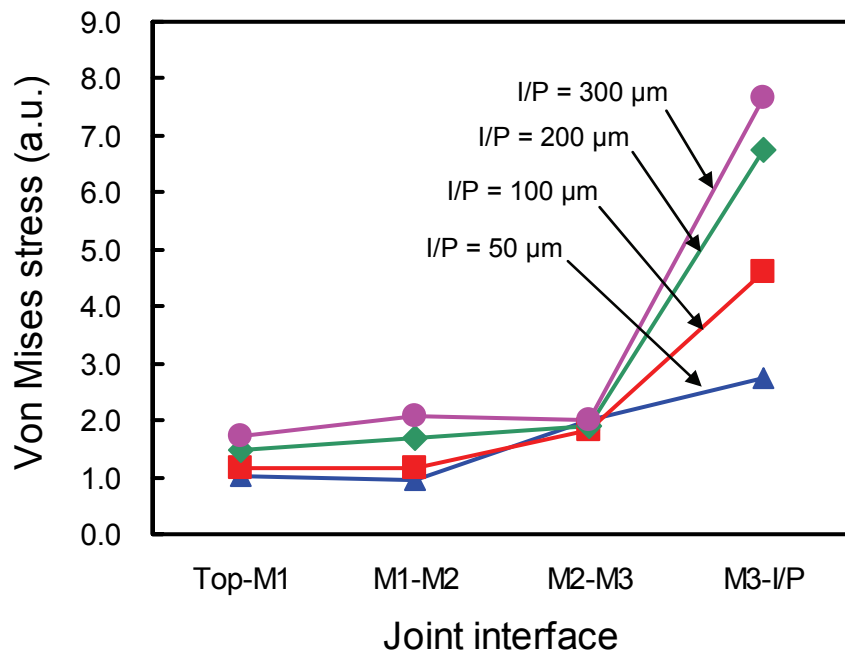


Fig. 4.41 Von Mises stress at variable joining interface of 3x middle chip stacks with CuSn joint (Model J1, J2, J3 and J4).

4.4 結言

本章では、複数チップと貫通電極を有するインターポーザを組み合わせることで各部の寸法と材質の設計自由度が高い 2.5D パッケージと 3D-IC パッケージを対象に、マイクロ接合後の接合部とチップ下部配線層の応力低減の研究を行った。複数チップを平面配置あるいは積層する構造、インターポーザの機械的特性、インターポーザやチップの厚み、インターポーザとチップの接続順序、チップの積層構成、接合部の機械的特性が、インターポーザとチップの接合の冷却後に発生する接合部の熱応力とインターポーザとチップの反りに与える影響を解明した。

2.5D パッケージの研究では、MCM FCPBGA、シリコンおよびガラスインターポーザ、有機インターポーザで適用可能な配線設計ルールが異なるため、チップサイズや I/O 数などの基本的な前提条件からそれぞれの設計ルールを用いて比較として適正なパッケージ構成を求め、この構成を用いて熱機械的解析を行った。インターポーザの機械的特性の影響を検討した結果、ここで用いた有機インターポーザの特性ではチップ接合後の反りとパッド下部の応力が大きい実装性とパッド下部へのダメージの懸念があり低線膨張係数化した基板材料によってこれらの懸念を解消する必要があると考えられる。シリコンインターポーザの場合にはパッド下部の応力はガラスインターポーザに比べて小さいが基板との接合部の応力はガラスインターポーザよりも大きい。ガラスインターポーザは線膨張係数が 6.0 ppm/°C のガラス B インターポーザで基板との接合部の応力が、シリコンとガラス 2 種類のインターポーザのうちで最も小さくなる。チップのパッド下部の応力は最も大きくなるがその場合でも MCM FCPBGA よりも 60% 程度小さな応力でありパッド下部のダメージの懸念は小さいと考えられる。この

ためインターポーザの線膨張係数は、シリコンチップと有機基板の線膨張係数の間の数値を取ることがパッケージ全体の設計最適化から望ましいと考えられる。また、有機基板の線膨張係数を低減することは、反りと応力の低減に有効と考えられる。ここで調べた範囲ではインターポーザ基板の厚みがチップ接合後のパッド下部の応力に与える影響は限定的である。一方で基板接合部の応力に与える影響は顕著であり、厚みが増加すると基板との接合部の応力は増加する傾向となる。微細な TSV あるいは TGV を形成することの容易さも考慮するとここで調べた厚みの中では 100 μm が最も望ましいと考えられる。接続順序の解析結果の検討により、接続順序はインターポーザと基板の接続部の応力にほとんど影響しないことが分かった。チップのパッド下部の応力は、順接続の場合には MCM FCPBGA に比べて 40%以下と小さい。逆接続と同時接続ではパッド下部の応力は MCM FCPBGA の場合の応力より数%から 20%程度高くなる。順接続と逆接続はいずれも 1 度目の接合後の反りが 2 度目の接合の実装性の課題となると考えられる。2 度目の接合時に強制的に反りを抑制するなどの工法の工夫が必要と考えられる。同時接合は 1 度目の接合による反りを回避できることが有利ではあるが、高精度でチップとインターポーザを 2 段に積層し安定して接合を行うための工法の工夫が必須である。本研究では、インターポーザのサイズを固定して考えたが、設計時には必要な配線エリアを確保できる最小のインターポーザを用いることがインターポーザの反りとインターポーザと有機基板のマイクロ接合部の応力を低減するために望ましい。

3D-IC パッケージの研究では、有機基板の上にシリコンインターポーザ、ミドルチップ、トップチップを積層する構成で、トップチップの厚み、ミドルチップの積層数、インターポーザの厚み、接合部の機械的特性が、チップの反りと接合部の応力に与える影響を解明した。トップチップの厚みを 100 μm から 725 μm まで変化させるといずれのインターポーザ厚みとの組み合わせでもトップチップのコーナー部の変位は単調に減少する。この時、ミドルチップとインターポーザの接合部の応力は、インターポーザ厚み 50 μm の場合を除き、トップチップの厚みの増加とともに単調に増加する。またミドルチップとインターポーザの接合部の応力は、インターポーザの厚みの増加に伴い著しく上昇する。一方でトップチップとミドルチップの接合部の応力は、トップチップの厚みを 100 μm から 725 μm まで変化させるとこの範囲内で極小値を持つ傾向がある。極小値はインターポーザの厚みと一致するトップチップ厚みの近辺に現れる。ミドルチップとインターポーザの接合部の応力はトップチップの厚みの変化によってほぼ単調増加するため、トップチップとミドルチップの接合部で応力の極小値を得るトップチップ厚みが両者の応力を最適化する厚みとはならない。ここで評価した条件では、ミドルチップが 1x の積層の場合には、トップチップとインターポーザの厚みが共に 100 μm が最適値となる。ミドルチップの積層数の影響はトップチップの厚みの影響と類似しており、積層数が増加するとトップチップのコーナーの変位が単調に減少し、トップチップとミドルチップの接合部およびミドルチップとインターポーザの接合部の応力は増加する傾向を示す。ここでミドルチップとインターポーザの接合部の応力はインターポーザの厚みの増加と共に著しく上昇する。ミドルチップの積層数が 3x の場合の各チップ間とミドルチップ 3 とインターポーザ間の接合部の応力を調べるとミドルチップ 3 とインターポーザ間の接合部の応力のみが顕著に大きい。トップチップ厚みを変化させた結果と合わせて考察すると、インターポーザ上のチップの積層体の剛性が高くなるとミドルチップとインターポーザ

間の接合部の応力は急激に大きくなると考えられる．さらにチップの厚みを揃えてチップと接合部の積層構造の均一性を高めることが上部の接合部の応力低減に有効であると考えられる．接合部の機械的特性の影響はチップの反りには顕著に現れないが，接合部の応力は IMC 接合のほうがはんだ接合よりも 2 倍以上大きくなる場合がある．これについては各接合材の破断強度を考慮し，接合時の破断を検証して接合材の適否を判断する必要がある．ここでは接合後の応力低減に着目して議論を行ってきたが，熱サイクルでの接合部歪みは信頼性に影響を与える．パッケージの設計時には，パッケージの反りを抑制する適正なアンダーフィル材を選択するなどの工夫により，接合部の歪みを低減する方法を考慮する必要があると考えられる．

第5章 結論

Low-k/ULK デバイスに超微細ピッチのワイヤボンディング、フリップチップボンディングを行うとパッド下部配線層にダメージが発生する技術課題がある。ダメージを低減するためには接合時にパッド下部配線層に生じる応力を低減することが有効であると考えた。ワイヤボンディングのパッド下部配線構造、フリップチップ接合部の機械的特性、2.5D/3D-IC でパッケージを構成するインターポーザの機械的特性やインターポーザ/チップの厚み、2.5D パッケージにおけるチップ、インターポーザ、有機基板の接続順序などを因子として取り上げパッド下部配線層と接合部に生じる応力への影響を解明し、パッド下部配線層と接合部の応力低減のための設計指針を得た。本研究で得られた知見を総括する。

第2章では、ワイヤボンディングのパッド下部配線層の構造による応力場への影響を解析するため、均質化法によって異なるパッド下部構造ごとに複合機械特性を求めた。その特性を用いてワイヤボンディングの荷重と超音波印加によって発生する応力場の解析によりパッド下部の ULK 配線層において、配線構造はビアスタック構造よりもサーペンタイン構造のほうが応力が小さい、配線密度が高いほうが応力が小さい、Al パッドの厚みが厚いほうが応力が小さいとの指針を得た。SiO₂ 層および FTEOS 層が厚くなるとパッド剥がれが減少することは一般的に知られているが、本研究では ULK 層上部の SiO₂ 層および FTEOS 層の厚みは ULK 層と FTEOS 層の界面で生じる最大応力との間に明確な相関が見出せなかった。これは、パッド剥がれの発現するワイヤが引張られる場合の応力場との相関が高いものと推察する。さらにワイヤボンディングの実験からパッド剥がれの発生率とパッド下部配線層の配線密度の関係を調べ、応力場の解析結果との整合性が得られた。またパッド剥がれの発生率とパッド下部配線構造体の複合弾性率との間の相関を求め、配線構造体の複合弾性率を指標として配線構造の最適化を行うことが有用であることを明らかにした。

第3章では、フリップチップボンディングでのパッド下部配線層の応力を低減する手法として Sn-58Bi と In-3Ag の2種類の低融点はんだによる接合を取り上げた。2種類の低融点はんだと SAC305 はんだの微細試験片を用いて引張試験を行い、これらのはんだのマイクロ接合の大きさと応力-歪み曲線から歪み速度 $5.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ における 0.2%耐力と弾性率、歪み速度と応力の関係からノートン則の応力指数と係数を求めた。この結果により現在広く用いられている SAC305 に比べて、Sn-58Bi は 0.2%耐力が約2倍、弾性率は等しく、クリープは小さいことが明らかにした。同様に In-3Ag は 0.2%耐力が約1/4、弾性率は1/6、クリープは大きいことを明らかにした。ここで得られた機械的特性を用いて、バンパとプレソルダーの材料を変えた組み合わせでパッド下部配線層の熱機械的応力の解析を行った。0.2%耐力が大きくとクリープの小さな Sn-58Bi では、接合部が弾性変形域にとどまり、ここで調べた条件では、SAC305 の場合と比べ最大でも20%程度の応力低減効果しか得られない。一方、0.2%耐力が小さくクリープの大きな In-3Ag を用いると接合部は塑性変形となり、SAC305 の場合と比べ約60%以上の応力低減の効果があることを明らかにした。また Cu ピラーバンパと SAC305 のプレソルダーを用いる組み合わせの場合、SAC305 のはんだバンパと SAC305 のプレソルダーの場合に比べて20%以上応力が増加することも明らかにした。これは Cu ピラーバンパが弾性変形域にとどまるためと考えられ

る。

第 4 章では、微細配線の可能なインターポーザ上にフリップチップボンディングで複数チップを接合し、構造的にも複雑度の高い 2.5D パッケージと 3D-IC パッケージを取り上げた。2.5D パッケージと 3D-IC パッケージで接合部とパッド下部配線層の応力場、チップとインターポーザの反りに影響を与える特徴的な因子として、インターポーザの機械特性、チップ・インターポーザ・有機基板の接続順序、チップとインターポーザの厚みの組み合わせ、チップ積層数に着目した。2.5D パッケージの研究では、MCM FCPBGA、シリコンおよびガラスインターポーザ、有機インターポーザでそれぞれの設計ルールを用いて設計検討を行い比較として適正なパッケージ構成を求め、この構成を用いて熱機械的解析を行った。インターポーザの線膨張係数は、シリコンチップと有機基板の線膨張係数の間の数値を取ることがパッケージ全体の設計最適化から望ましいと考えられる。また、有機基板の線膨張係数を低減することは、反りと応力の低減に有効と考えられる。ここで調べた範囲ではインターポーザ基板の厚みがチップ接合後のパッド下部の応力に与える影響は限定的である。一方で基板接合部の応力に与える影響は顕著であり、厚みが増加すると基板との接合部の応力は増加する傾向となる。ここで調べた厚みの中では 100 μm が最も望ましいと考えられる。接続順序はインターポーザと基板の接続部の応力にほとんど影響しないことが分かった。チップのパッド下部の応力は、順接続の場合には MCMFCPBGA に比べて 40%以下と小さい。順接続と逆接続はいずれも 1 度目の接合後の反りが 2 度目の接合の実装性の課題となる。2 度目の接合時に強制的に反りを抑制するなどの工法の工夫が必要と考えられる。同時接合は 1 度目の接合による反りを回避できることが有利ではあるが、高精度でチップとインターポーザを 2 段に積層し安定して接合を行うための工法の工夫が必須である。本研究では、インターポーザのサイズを固定して考えたが、設計時には必要な配線エリアを確保できる最小のインターポーザを用いることがインターポーザの反りとインターポーザと有機基板のマイクロ接合部の応力を低減するために望ましい。

3D-IC パッケージの研究では、有機基板の上にシリコンインターポーザ、ミドルチップ、トップチップを積層する構成で、トップチップの厚み、ミドルチップの積層数、インターポーザの厚み、接合部の機械的特性が、チップの反りと接合部の応力に与える影響を明らかにした。接合部の応力は、インターポーザとその上に搭載されるミドルチップとの間で最大となる。ほぼすべての条件でトップチップの厚み、ミドルチップの積層数、インターポーザの厚みがそれぞれ増加すると、ミドルチップとインターポーザの接合部の応力は単調に増加する。このことは、インターポーザ上のシリコンチップの積層体の剛性が高くなるとミドルチップとインターポーザの接合部の応力が増加すると考えられる。一方で、トップチップとミドルチップの接合部の応力は、トップチップの厚みを変化させると、トップチップ・インターポーザの厚みが等しくなる近傍で極小値を示す。本研究で調べた条件下ではトップチップ・ミドルチップ・インターポーザの厚みを等しく 100 μm にした場合にトップチップとミドルチップ、ミドルチップとトップチップのそれぞれの接合部の応力を最も低いレベルに低減し最適化できることを明らかにした。また、接合部の機械的特性は、接合部の高さが 10 μm であるためチップの変位には影響を与えないが、接合部の応力の差が大きいことを明らかにした。IMC 接合の応力はほとんど接合よりも大きい、各接合材の破断強度を考慮して接合材の適否を判断する必要がある。

半導体デバイスの微細化は今後も 14 nm 世代, 10 nm 世代に向けて開発が進められておりデバイスの絶縁膜の低誘電率化, 接続端子数の増加, 接合ピッチの微細化は引き続き重要な技術課題である. 従来から用いられてきたワイヤボンダパッケージ, フリップチップパッケージと今後普及の見込まれる貫通電極を有するインターポーザを用いるパッケージの技術の進展の中で, 本研究で得られたチップ外部接続時のパッド下部配線層および接合部の応力低減に関する知見は, これらのパッケージでチップ接合の高い初期品質を確立する上で重要な意義を持つものと考ええる.

謝辞

本研究は大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻生産科学コースの博士課程在学中に藤本公三教授のご指導のもと行ったものであります。本論文をまとめるにあたって深い洞察を持ったご助言と懇切なご指導をいただきました藤本公三教授に謹んで感謝の意を表します。

大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻の廣瀬明夫教授、福本信次准教授、岩田剛治准教授には、副査を引き受けていただき、貴重なご意見をいただきましたことを厚く御礼申し上げます。

大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻の松嶋道也助教、阿比留聖氏には、第2章の研究を行うにあたってFEM解析にご協力いただき、また有意義な議論をしていただきましたことを深く感謝いたします。

群馬大学理工学研究院知能機械創製部門の荘司郁夫教授には、第3章の研究を行うにあたってはんだの引張試験にご協力いただき、また有意義な議論をしていただきましたことを深く感謝いたします。

本研究を行うにあたってご理解とご支援をいただいた日本アイ・ビー・エム株式会社 IBM 東京ラボラトリー システム・テクノロジー開発製造 嵯峨均製造統括部長に深く感謝いたします。また本研究の遂行に協力をしていただいた日本アイ・ビー・エム株式会社 IBM 東京ラボラトリー システム・テクノロジー開発製造 エレクトロニクス・コンポーネント・テクノロジー 山田靖治氏、日本アイ・ビー・エム株式会社 IBM 東京ラボラトリー 東京基礎研究所 サイエンス&テクノロジー エレクトロニクス・アンド・オプティカル・パッケージング 青木豊広氏、鳥山和重氏、日本アイ・ビー・エム株式会社 IBM 東京ラボラトリー システム・テクノロジー開発製造 エレクトロニクス・ソリューションズ 浅井順子氏に深謝いたします。

最後に、社会人としての学位取得の先輩であり、家族を支えてくれている妻 美貴にすべての面から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) P. S. Peercy, "Trends in Semiconductor Equipment, Materials, and Processing Technology,," Proceedings of the International Electron Devices Meeting, 1998, pp. 14-17.
- 2) 杉本茂樹, 神垣哲也, 上條浩幸, "半導体プロセス技術の進歩と課題," 東芝レビュー, Vol. **59**, No. 8, 2004, pp. 2-7.
- 3) G. Patton, "Semiconductor Technology –Trends, Challenges and Opportunities," Proceedings of the 13th International Workshop on Computational Electronics, 2009, pp. 1-4.
- 4) G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits," Electronics, Vol. **38**, No. 8, April 19, 1965.
- 5) "Excerpts from A Conversation with Gordon Moore: Moore's Law," Intel Corporation, 2005.
- 6) <http://www.itrs.net/home.html>
- 7) J. Heidenreich *et al.*, "Copper Dual Damascene Wiring For Sub-0.25 μ m CMOS Technology," the Proceedings of the IEEE 1998 International Interconnect Technology Conference, 1998, pp. 151-153.
- 8) H. L. Ho *et al.*, "A 0.13 μ m high-performance SOI logic technology with embedded DRAM for system-on-a-chip application," Proceedings of the 2001 International Electron Devices Meeting Technical Digest, 2001, pp. 22.3.1-22.3.4.
- 9) K. Rim *et al.*, "Strained Si MOSFETs for high performance CMOS technology," the Proceedings of 2001 Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers, 2001, pp. 59-60.
- 10) R. D. Goldblatt *et al.*, "A high performance 0.13 μ m copper BEOL technology with low-k dielectric," the Proceedings of the IEEE 2000 International Interconnect Technology Conference, 2000, pp. 261-263.
- 11) 依田孝, 蓮沼正彦, 宮島秀史, "高性能配線技術," 東芝レビュー, Vol. **59**, No. 8, 2004, pp. 17-21.
- 12) 中田 義弘, 尾崎 史朗, 工藤 寛, "45 nm 世代の CMOS LSI 多層配線技術," FUJITSU, Vol. **60**, No. 5, 2009, pp. 529-535.
- 13) C.-H. Jan *et al.*, "A 32nm SoC Platform Technology with 2nd Generation High-k/Metal Gate Transistors Optimized for Ultra Low Power, High Performance, and High Density Product Applications," Proceedings of the 2009 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2009, pp. 1-4.
- 14) B. Sinharoy *et al.*, "IBM POWER7 multicore server processor," IBM Journal of Research and Development, Vol. **55**, No. 3, 2011, pp. 1:1-1:29.
- 15) 2013 年度版日本実装技術ロードマップ (一般社団法人 電子情報技術産業協会)
- 16) JEDEC Standard JESD229, "Wide I/O Single Data Rate (Wide I/O SDR)," 2011.
- 17) J. U. Knickerbocker *et al.*, "Development of next-generation system-on-package (SOP) technology based on silicon carriers with fine-pitch chip interconnection," IBM Journal of Research and Development, Vol. **49**, No. 4/5, 2005, pp. 725-753.
- 18) J. U. Knickerbocker *et al.*, "3-D silicon integration," Proceedings of the 2008 Electronic Components and Technology Conference, 2008, pp. 538-543.

- 19) K. Kumagai *et al.*, "A silicon interposer BGA package with Cu-filled TSV and multi-layer Cu-plating interconnection," Proceedings of the 2008 Electronic Components and Technology Conference, 2008, pp. 571–576.
- 20) Y. Y. Ong *et al.*, "Assembly and Reliability of Micro-bumped chips with Through-silicon Vias (TSV) Interposer," Proceedings of the 2009 Electronics Packaging Technology Conference, 2009, pp.452-458.
- 21) K. Kikuchi *et al.*, "Low-Impedance Evaluation of Power Distribution Network for Decoupling Capacitor Embedded Interposers of 3-D Integrated LSI System," Proceedings of the 2010 Electronic Components and Technology Conference, 2010, pp. 1455-1460.
- 22) M. Töpper *et al.*, "3-D Thin film interposer based on TGV (Through Glass Vias): An alternative to Si-Interposer," Proceedings of the 2010 Electronic Components and Technology Conference, 2010, pp. 66-73.
- 23) T. C. Chai *et al.*, "Development of Large Die Fine-Pitch Cu/low-k FCBGA Package with through Silicon via (TSV) Interposer," IEEE Trans. Compon. Packag. Technol., Vol. 1, No. 5, pp.660–672, May 2011.
- 24) B. Banijamali *et al.*, "Advanced Reliability Study of TSV Interposers and Interconnects for the 28nm Technology FPGA," Proceedings of the 2011 Electronic Components and Technology Conference, 2011, pp. 285–290.
- 25) K. Zoschke *et al.*, "TSV based Silicon Interposer Technology for Wafer Level Fabrication of 3D SiP Modules," Proceedings of the 2011 Electronic Components and Technology Conference, 2011, pp. 836–843.
- 26) V. Sukumaran *et al.*, "Design, Fabrication and Characterization of Low-Cost Glass Interposers with Fine-Pitch Through-Package-Vias," Proceedings of the 2011 Electronic Components and Technology Conference, 2011, pp. 583–588.
- 27) Y. J. Lin *et al.*, "Study of the Thermo-mechanical Behavior of Glass Interposer for Flip Chip Packaging Applications," Proceedings of the 2011 Electronic Components and Technology Conference, 2011, pp. 634–638.
- 28) <http://press.xilinx.com/2011-10-25-Xilinx-Ships-Worlds-Highest-Capacity-FPGA-and-Shatters-Industry-Record-for-Number-of-Transistors-by-2X>
- 29) JEDEC Solid State Product Outline MO-305B, "Wide I/O Micropillar Grid Array Package (MPGA)," 2013.
- 30) <http://investors.micron.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=629382>
- 31) <http://newsroom.altera.com/press-releases/altera-and-tsmc-jointly-develop-worlds-first-heterogeneous-3d-ic-test-vehicle-using-cowostm-process.htm>
- 32) D. Edelstein, *et al.*, "Reliability, yield, and performance of a 90 nm SOI/Cu/SiCOH technology," Proceedings of the IEEE 2004 International Interconnect Technology Conference, 2004, pp. 214-216.
- 33) M. Naik *et al.*, "Process Integration of Double Level Copper-Low k ($k = 2.8$) Interconnect," Proceedings of the IEEE 1999 International Interconnect Technology Conference, 1999, pp.181-183.

- 34) 阿部浩一, 桜井治彰, “低誘電率層間絶縁膜材料の最新動向,” 高分子, Vol. **55**, No. 2, 2006, pp. 82-85.
- 35) X. H. Liu *et al.*, “Chip-Package-Interaction Modeling of Ultra Low-k/Copper Back End of Line,” Proceedings of the IEEE 2007 International Interconnect Technology Conference, 2007, pp. 13-15.
- 36) 桜井治彰 *et al.*, “超 LSI 用低誘電率層間絶縁膜材料 HSG-255,” 日立化成テクニカルレポート, Vol. **42**, 2004, pp. 49-54.
- 37) G. G. Harman, “Wire bonding-toward 6 σ yield and fine pitch,” Proceedings of the 1992 Electronic Components and Technology Conference, 1992, pp. 903-910.
- 38) L. Nguyen *et al.*, “70 μ m fine pitch wirebonding,” Proceedings of the Twenty-Third IEEE/CPMT Electronics Manufacturing Technology Symposium, 1998, pp. 394-400.
- 39) Y. F. Yao *et al.*, “Assembly Process Development of 50 μ m Fine Pitch Wire Bonded Devices,” Proceedings of the 2004 Electronic Components and Technology Conference, 2004, pp. 365-371.
- 40) W. ZhiJie, C. Du and M. C. Han, “BGA 44 μ m Fine Pitch Low K Wire Bonding Process Development,” Proceedings of the 2005 Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis, 2005, pp. 1-6.
- 41) H. K. Charles, Jr. *et al.*, “High-Frequency Wirebonding: Process and Reliability Implications,” Proceedings of the 2002 Electronic Components and Technology Conference, 2002, pp. 881-890.
- 42) L. Parrini, “Advanced Process Characterization for 125 kHz Wire Bonder Ultrasonic Transducers,” IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. **25**, No. 3, 2002, pp. 486-494.
- 43) J.-L. Chen and Y.-C. Lin, “A New Approach in Free Air Ball Formation Process Parameters Analysis,” IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. **23**, No. 2, 2000, pp. 116-122.
- 44) M. Ruston *et al.*, “Assembly Challenges Related to Fine Pitch In-line and Staggered Bond Pad Devices,” Proceedings of the 2003 Electronic Components and Technology Conference, 2003, pp. 1334-1343.
- 45) R. Groover, W. K. Shu and S. S. Lee, “Wire Bond Loop Profile Development for Fine Pitch-Long Wire Assembly,” IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. **7**, No. 3, 1994, pp. 393-399.
- 46) G. Hotchkiss, G. Ryan and W. Subido, “Effects of Probe Damage on Wire Bond Integrity,” Proceedings of the 2001 Electronic Components and Technology Conference, 2001, pp. 1175-1180.
- 47) H. Miyai, T. Aoki and T. Hisada, “Probe mark effect on fine pitch wirebonding,” Proceedings of The Sixth VLSI Packaging Workshop of Japan Technical Digest, 2002, pp. 53-57.
- 48) W. Sauter *et al.*, “Problems with Wirebonding on Probe Marks and Possible Solutions,” Proceedings of the 2003 Electronic Components and Technology Conference, 2003, pp. 1350-1358.
- 49) T. Aoki, W. Sauter and T. Hisada, “Manufacturability and Reliability of Fine Pitch Wirebonding,” Proceedings of the 2004 Electronic Components and Technology Conference, 2004, pp. 372-376.
- 50) 塚田裕, “フリップチップ実装の信頼性—接続部の熱応力に関して—,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **16**, No. 6, 2013, pp. 438-442.
- 51) L. F. Miller, “Controlled Collapse Reflow Chip Joining,” IBM Journal of Research and Development, Vol. **13**, No. 3, 1969, pp. 239-250.

- 52) P. E. Fox and W. J. Nestork, "Design of Logic Circuit Technology for IBM System/370 Models 145 and 155," IBM Journal of Research and Development, Vol. **15**, No. 5, 1971, pp. 384-390.
- 53) Y. Tsukada, S. Tsuchida and Y. Mashimoto, "Surface Laminar Circuit Packaging," Proceedings of the 1992 Electronic Components and Technology Conference, 1992, pp. 22-27.
- 54) E. D. Blackshear *et al.*, "The evolution of build-up package technology and its design challenges," IBM Journal of Research and Development, Vol. **49**, No. 4/5, 2005, pp. 641-661
- 55) 雀部俊樹, "プリント配線版の歴史," エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **16**, No. 6, 2013, pp. 428-432.
- 56) K. Yamanaka *et al.*, "Materials, Processes, and Performance of High-Wiring Density Buildup Substrate with Ultralow-Coefficient of Thermal Expansion," IEEE Transactions on the Components and Packaging Technologies, Vol. **33**, No. 2, 2010, pp. 453-461.
- 57) 竹本正, "鉛フリーはんだ技術の現状," 溶接学会誌, Vol. **75**, No. 7, 2006, pp. 583-588.
- 58) 竹本正, "低銀鉛フリーはんだの特徴と高信頼性化," 金属, Vol. **82**, No. 12, 2012, pp. 1068-1076.
- 59) Official Journal of the European Union, Jul. 1, 2011, L 174/88-L 174/110.
- 60) L. Yip, "Reliability of Large Die Ultra Low-k Lead-Free Flip Chip Packages," Proceedings of the 2012 Electronic Components and Technology Conference, 2012, pp. 887-881.
- 61) J. Liao, M. Bachman, J. Osenbach, "Large die size lead free flip chip ball grid array packaging considerations for 28nm fab technology," Proceedings of the 2012 IEEE 14th Electronics Packaging Technology Conference, 2012, pp. 412-414.
- 62) 藤本公三編 マイクロ接合・実装技術, ISBN978-4-915957-88-8 C3053, 2012, p. 284.
- 63) 堺丈和, 荘司孝志, "スーパージャフィット(SJ) 法によるはんだバンプ形成技術," 第 25 回マイクロ接合研究委員会予稿集, 1998, pp. 37-44.
- 64) Y. Yoneda *et al.*, "A Novel Flip Chip Bonding Technology using Au Stud Bump and Lead-free Solder," Proceedings of the Pan Pacific Microelectronics Symposium, 1999.
- 65) Y. Orii *et al.*, "Ultrafine-Pitch C2 Flip Chip Interconnections with Solder-Capped Cu Pillar Bumps," Proceedings of the 2009 Electronic Components and Technology Conference, 2009, pp. 948-953.
- 66) M. Lee *et al.*, "Study of Interconnection Process for Fine Pitch Flip Chip," Proceedings of the 2009 Electronic Components and Technology Conference, 2009, pp. 720-723.
- 67) W. Landers *et al.*, "Chip-to-package interaction for a 90 nm Cu / PECVD low-k technology," Proceedings of the IEEE 2004 International Interconnect Technology Conference, 2004, pp. 108-110.
- 68) C. Muzzy *et al.*, "Chip Package Interaction Evaluation for a High Performance 65 nm and 45 nm CMOS Technology in a Stacked Die Package with C4 and Wirebond Interconnections," Proceedings of the 2008 Electronic Components and Technology Conference, 2008, pp. 1472-1475.
- 69) V. Fiori *et al.*, "Chip-package interactions: Some combined package effects on copper/low-k interconnect delaminations," Proceedings of the 2nd Electronics System-Integration Technology Conference, 2008, pp. 713-718.

- 70) H.-P. Wei *et al.*, "Chip-packaging interaction in Cu/very low-k interconnect," Proceedings of the IEEE 2009 International Interconnect Technology Conference, 2009, pp. 143-145.
- 71) Y. Takahashi, S. Shibamoto and K. Inoue, "Numerical Analysis of the Interfacial Contact Process in Wire Thermocompression Bonding," IEEE Transactions on the Components and Packaging Technologies, Vol. **19**, No. 2, 1996, pp. 213-223.
- 72) 宇野智裕, 巽宏平, "Au/Al 接合部における接合信頼性と支配要因," 溶接学会論文集, Vol. **19**, No. 1, 2001, pp. 156-166.
- 73) G. G. Harman and C. E. Johnson, "Wire Bonding to Advanced Copper, Low-K Integrated Circuits, the Metal/Dielectric Stacks, and Materials Considerations," IEEE Transactions on the Components and Packaging Technologies, Vol. **25**, No. 4, 2002, pp. 677-683.
- 74) J. Tan, Z. W. Zhong and H. M. Ho, "Wire-bonding process development for low-*k* materials," Microelectronic Engineering, Vol. **81**, No. 1, 2005, pp. 75-82.
- 75) M. Tagami *et al.*, "Comprehensive Process Design for Low-cost Chip Packaging with Circuit-under-pad (CUP) Structure in Porous-SiOCH Film," Proceedings of the 2005 International Interconnect Technology Conference, 2005, pp. 12-14.
- 76) C.-C. Lee *et al.*, "Overview of Metal Lifted Failure Modes During Fine-Pitch Wirebonding Low-k/Copper Dies with Bond Over Active (BOA) Circuitry Design," Proceedings of the 2007 Electronic Components and Technology Conference, 2007, pp. 1775-1780.
- 77) Y. -J. Kim *et al.*, "Low-k Wire Bonding," Proceedings of the 2006 Electronic Components and Technology Conference, 2006, pp. 1616-1622.
- 78) O. van der Sluis *et al.*, "Efficient Damage Sensitivity Analysis of advanced Cu Low-k Bond Pad Structures Using Area Release Energy," Proceedings of the 7th International Conference on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, 2006, pp. 1-8.
- 79) T.C. Huang *et al.*, "Evaluation and Numerical Simulation of Optimal Structural Designs for Reliable Packaging of Ultra Low K Process Technology," Proceedings of the 2006 International Interconnect Technology Conference, 2006, pp. 92-94.
- 80) V. Fiori *et al.*, "3D Multi Scale Modeling of Wire Bonding Induced Peeling in Cu/Low-k Interconnects: Application of an Energy Based Criteria and Correlation with Experiments," Proceedings of the 2007 Electronic Components and Technology Conference, 2007, pp. 256-263.
- 81) C. J. Zhai *et al.*, "Investigation of Cu/Low-k Film Delamination in Flip Chip Packages," Proceedings of the 2006 Electronic Components and Technology Conference, 2006, pp. 709-717.
- 82) C. J. Uchibori *et al.*, "Chip Package Interaction and Mechanical Reliability Impact on Cu/ultra low-k Interconnects in Flip Chip Package," Proceedings of the 9th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology, 2008, pp. 1219-1222.
- 83) C. J. Uchibori and M. Lee, "Thermal stress analysis of FCBGA during cooling under reflow process,"

- Proceedings of the 2010 IEEE CPMT Symposium Japan, 2010, pp. 1-4.
- 84) C. J. Uchibori and M. Lee, "Chip Package Interaction Study for Large Flip Chip Ball Grid Array with Cu/low-k on-chip Interconnects," Proceedings of the 2011 International Conference on Electronics Packaging, 2011, pp. 509-512.
 - 85) M. Okada, M. Ichinose and K. Kmbara, "Improvement of Low-k Delamination with Substrate Pad Structure for Lead-Free Package," Proceedings of the 2012 International Conference on Electronics Packaging, 2012, pp. 378-381.
 - 86) A. Horibe *et al.*, "No Clean Flux Technology for Large Die Flip Chip Packages," Proceedings of the 2013 Electronic Components and Technology Conference, 2013, pp. 688-693.
 - 87) C. Ferger *et al.*, "The Over-Bump Applied Resin Wafer-Level Underfill Process: Process, Material and Reliability," Proceedings of the 2009 Electronic Components and Technology Conference, 2009, pp. 1502-1505.
 - 88) 山中公博, "低融点はんだを用いたフリップチップ接合技術," スマートプロセス学会誌, Vol. **1**, No. 3, 2012, pp. 114-119.
 - 89) Z. Mei, F. Hua and J. Glazer, "Low temperature soldering," Proceedings of the 21st IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium, 1997, pp. 463-476.
 - 90) 菅沼克昭, "低温鉛フリーはんだの動向," エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **9**, No. 3, 2006, pp. 134-137.
 - 91) Z. Mei and J. W. Morris, Jr., "Characterization of Eutectic Sn-Bi Solder Joints," Journal of Electronic Materials, Vol. **21**, No. 6, 1992, pp. 599-607.
 - 92) 莊司郁夫, 折井靖光, 小林紘二郎 "フリップチップ接合用はんだ材のせん断特性," 溶接学会論文集, Vol. **16**, No. 1, 1998, pp. 51-58.
 - 93) I. Shohji and T. Yoshida, "Comparison of low-melting lead-free solders in tensile properties with Sn-Pb eutectic solder," Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol. **15**, 2004, pp. 219-223.
 - 94) 作山誠樹, 赤松俊也, 上西啓介, 佐藤武彦, "低応力実装に向けた Sn-Bi 低温接合技術," 電子情報通信学会論文誌 C, Vol. **J91-C**, No. 11, 2008, pp. 534-541.
 - 95) 上西啓介, "低温実装用 Sn-Bi 共晶はんだの延性と接合信頼性改善," 金属, Vol. **82**, No. 12, 2012, pp. 1105-1111.
 - 96) 荻谷義治, "微小体積における鉛フリーはんだの力学的特徴," エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **11**, No. 5, 2008, pp. 368-374.
 - 97) Y. Kariya, T. Niimi, T. Suga and M. Otsuka, "Isothermal Fatigue Properties of Sn-Ag-Cu Alloy Evaluated by Micro Size Specimen," Materials Transactions, Vol. **46**, No. 11, 2005, pp. 2309-2315.
 - 98) 傳田精一, "3次元チップ積層のためのシリコン貫通電極(TSV)の開発動向," 表面技術, Vol. **58**, No. 12, 2007, pp. 712-718.
 - 99) 福島誉史, 田中徹, 小柳光正, "三次元積層型チップのための Si 貫通ビア(TSV)形成技術," エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **12**, No. 2, 2009, pp. 104-109.

- 100) A. Horibe *et al.*, “Effect of Underfill Properties on Thermomechanical Stress in Fine Pitch 3D-IC Package,” Proceedings of ICEP-IAAC 2012, 2012, pp. 11-16.
- 101) S. Kohara *et al.*, “Thermal Stress and Die-Warpage Analyses of 3D Die Stacks on Organic Substrates,” Proceedings of 2012 IEEE CPMT Symposium Japan, 2012, pp. 1-4.
- 102) 金道變, 于強, 澁谷忠弘, 白鳥正樹, “鉛フリーはんだ接続部の応力・非線形ひずみ振幅評価に及ぼす硬化則の影響,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 7, No. 2, 2004, pp. 161-169.

I. 本研究に関する発表論文

- 1) Takashi Hisada, Toyohiro Aoki, Keishi Okamoto, Shinichi Harada, John C. Malinowski, Keith F. Beckham, Thomas M. Shaw, Xiao H. Liu and Brian W. Herbst, "Fine Pitch Wirebonds on Ultra Low-k Device," Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol. **4**, No. 1, 2011, pp. 17-23.
- 2) Takashi Hisada, Toyohiro Aoki, Junko Asai and Yasuharu Yamada, "FEM Analysis on Mechanical Stress of 2.5D Package Interposers," Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol. **5**, No. 1, 2012, pp. 107-114.
- 3) 久田隆史, 阿比留聖, 山田靖治, 青木豊広, 福本信次, 松嶋道也, 藤本公三, "ワイヤボンド加圧下における Ultra Low-k デバイスのボンドパッド下部構造のFEM応力解析," スマートプロセス学会誌 Vol. **2**, No. 4, 2013, pp. 186-191.
- 4) Takashi Hisada, Yasuharu Yamada, Kazushige Toriyama and Toyohiro Aoki, "FEM Analysis on Warpage and Stress at the Micro Joint of Multiple Chip Stacking," Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol. **6**, No. 1, 2013.
- 5) 久田隆史, 莊司郁夫, 山田靖治, 藤本公三, "フリップチップ接合用材料の機械的特性がフリップチップのパッド下部配線層の熱応力に与える影響," スマートプロセス学会誌 Vol. **3**, No. 1, 2014, (掲載予定)

II. 本研究に関する学会発表

国際会議・シンポジウム

- 1) Takashi Hisada, Toyohiro Aoki, Keishi Okamoto, Shinichi Harada, John C. Malinowski, Keith F. Beckham, Thomas M. Shaw, Xiao H. Liu and Brian W. Herbst, "Analysis on Wirebond Mechanical Integrity of Ultra Fine Pitch Wirebond on Ultra Low-k Device," Proceedings of the 2011 International Conference on Electronics Packaging, 2011, pp. 58-63.
- 2) Toyohiro Aoki, Takashi Hisada, Keishi Okamoto, Shinichi Harada, John C. Malinowski and Keith F. Beckham, "Evaluation of Cu Line and Via Structures underneath Wirebond Pad in 32nm Ultra Low-k Device," Proceedings of the 13th International Conference on Electronics Materials and Packaging, 2011, EMAP2011FP-74.
- 3) Takashi Hisada, Toyohiro Aoki, Junko Asai and Yasuharu Yamada, "Analysis on design and mechanical stress of 2.5D package interposers," Proceedings of the 2012 International Conference on Electronics Packaging, 2012, pp. 417-422.
- 4) Toyohiro Aoki, Takashi Hisada, Keishi Okamoto, John C. Malinowski, Keith F. Beckham, Yong-Seok Yang, Joon-Su Kim and Shinichi Harada, "Evaluation of Back End of Line Structures underneath Wirebond Pads in Ultra Low-k Device," Proceedings of the 2012 Electronic Components and Technology

Conference, 2012, pp. 1097-1102.

- 5) Takashi Hisada, Yasuharu Yamada, Junko Asai and Toyohiro Aoki, "Study of Warpage and Mechanical Stress of 2.5D Package Interposers during Chip and Interposer Mount Process," Proceedings of the 45th International Symposium on Microelectronics, 2012, pp. 967-974.
- 6) Takashi Hisada, Kazushige Toriyama, Yasuharu Yamada and Toyohiro Aoki, "Effect of low temperature flip chip joining on chip-package-interaction of low-k device," Proceedings of the International Conference on Nanojoining and Microjoining, 2012, pp. 73-74.
- 7) Takashi Hisada, Kazushige Toriyama, Toyohiro Aoki and Yasuharu Yamada, "Warpage Behavior of Multi-tier Stacking in 2.5D/3D Package under Different Joining Process Conditions," Proceedings of the 2013 International Conference on Electronics Packaging, 2013, pp. 645-648.
- 8) Takashi Hisada, Ikuo Shohji, Yasuharu Yamada, Kazushige Toriyama and Mamoru Ueno, "Mechanical Properties of Sn-58Bi, In-3Ag and SAC305 Solders Measured with Fine Diameter Specimens," Proceedings of the IEEE CPMT Symposium Japan 2013, 2013, pp. 205-208.

国内会議・シンポジウム

- 1) 久田隆史, 青木豊広, "ナノインデンテーション法による Ultra Low-k デバイスのボンド・パッド下部構造の機械的特性の評価", 第 18 回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集, Vol. 18, 2012, pp. 223-228.
- 2) 久田隆史, 青木豊広, 山田靖治, 阿比留聖, 福本信次, 藤本公三, "Ultra Low-k デバイスのボンド・パッド下部構造のダメージの評価", 第 19 回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集, Vol. 19, 2013, pp. 307-312.

研究会, セミナー等

- 1) 久田隆史, "シングル・チップ・モジュール/マルチ・チップ・モジュールから 3D-IC への IBM パッケージ技術の展開," スマートプロセス学会 エレクトロニクス生産科学部会 第 2 回電子デバイス実装研究委員会, 2013 年 7 月 17 日