

外20-49

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

LSIパッケージの損傷に関する線形破壊力学解析
Linear Fracture Mechanics Analysis on
Cracking and Delamination in LSI Packages

申請者

齋藤 武博

Takehiro Saitoh

2001年1月

近年における電子機器の高機能化・携帯化が、飛躍的に高集積化する大規模集積回路 (LSI ; Large Scale Integrated Circuit)などの半導体技術に支えられていることは衆目の一一致するところである。LSIなどの半導体は、通常、外部環境からの保護を主な目的とし、パッケージに搭載して利用される。パッケージは半導体チップと実装基板とを有機的に結合する構造体であり、LSIの高機能化、電子機器の携帯化に伴って、より多ピン化・軽薄短小化を満足するようその形態は変化し、ますます多様化傾向にある。しかしながら、材料コストの安さと生産性の高さから、ほとんどのLSIは、フィラー (SiO_2) を充填した熱硬化性樹脂を用いてトランスファーモルドされる、プラスチックタイプのパッケージに搭載されているのが今日の状況である。プラスチックパッケージは金属、LSIチップ(Si), 樹脂などの複雑な異種材料の接着・接合構造体であり、種々の温度環境下でパッケージ内部に応力が発生する。過度の熱応力によってパッケージ構成材料界面のはく離や構成材料中にクラックが生じることは既に広く知られていることである。LSIの耐湿信頼性確保の上で、パッケージ構成材料界面のはく離や構成材料中のクラックの発生防止は、高集積化によるチップの大型化と、パッケージの多様化に起因し、ますます深刻な課題に発展しつつある。本研究は、このようなLSIの力学的現象による信頼性劣化問題を背景に、プラスチックパッケージに搭載されたLSIが温度サイクル負荷を受けた場合の損傷に関する線形破壊力学解析を行うものである。

本研究の第一の目的は、パッケージ本体を構成する封止樹脂のクラックと、構成材料間の界面のはく離の発生・進展機構あるいはこれらの損傷に関するポテンシャルを力学的側面から解明することである。また第一の目的の中には、異種材料界面のはく離と封止樹脂クラックの相互作用について明示すること、線形破壊力学手法の構築とその有効性を検証すること、などが含まれる。第二の目的は、最近のLSIチップとパッケージの開発動向及びそれを取り巻く環境を鑑み、数値破壊力学解析の応用を通して、プラスチックパッケージにおける材料選択・開発指針、設計指針を提案し、電子デバイス及びその関連産業の発展と電子機器の信頼性の維持向上に貢献することである。

本研究は応力解析ソルバーの開発と四つのカテゴリーからなる損傷解析から構成されている。解析対象としたパッケージは、主として一般的な材料で構成された26ピン350mil幅のSingle Outline J-lead (SOJ) パッケージである。一連の数値解析において、パッケージ構成材料はすべて等方性を有する線形弾性体と仮定し、パッケージ内部応力の源はパッケージ構成材料間の熱膨張係数の相違のみとする熱弾性問題として取り扱った。解析モデルは平面ひずみ状態とした。しかしながら、解析モデルの異材間に界面のはく離を設定したモデルにおいては、異材間の不合理なオーバーラップを回避するため、パッケージ構成異材が一体となって変形する連続条件(接触要素)の導入が不可欠である。そこで、本研究では線接

触機能を有する有限要素法熱応力解析ソルバーを開発した。損傷の発生様式は、封止温度 (175°C) で無応力状態にあるLSIパッケージが温度サイクル試験 (150 ~ -65°C) の低温に繰り返し晒されることにより生じる片振りの熱サイクル疲労損傷と捕らえた。つまり、繰り返しの熱負荷により異種材料の接合端に界面のはく離が生じそれが進展すると仮定し、界面のはく離の進展に伴って、パッケージ内部接合端近傍における封止樹脂の応力状態は変化すると想定した。本研究では、このような界面のはく離と封止樹脂クラックとの相互作用を考慮し、パッケージの各部異種材料界面にはく離を設定した状態で、-65°Cにおけるパッケージの内部応力計算を行い、温度サイクルの進行に伴う界面のはく離と封止樹脂クラックの破壊力学パラメータを抽出した。導出された破壊力学パラメータを用いて、界面のはく離と封止樹脂クラックの進展機構を議論し、解明する試みである。また、各節の解析では、Cu合金、Fe-42%Ni合金(42合金)を素材とする二種類のリードフレームを基準にして進行させ、それぞれのリードフレーム材料を用いた場合の解析結果を比較検討した。

次に、本論文における各章の内容と得られた知見を述べる。まず、第1章「序論」ではLSIの技術動向及びパッケージの目的と開発変遷を概説した。また、プラスチックパッケージの製造フローと構成材料について説明し、プラスチックパッケージにおける力学的問題点と課題についてまとめた。

第2章「線接触機能を有する応力解析ソルバーの開発」では、接触機能を有する熱応力解析ソルバー(有限要素法)のための新しい定式化を提案した。また、ここではソルバーのアルゴリズムについても説明した。

第3章「封止樹脂クラックの発生機構」と、第4章「異種材料界面のはく離の発生・進展機構」では一般的な材料で構成されるパッケージを対象とし、その損傷機構について述べた。第3章では、温度サイクル負荷時にダイパッド/封止樹脂接合端から発生する封止樹脂クラックの発生機構の把握を主な目的とし、パッケージ構成材料が完全に密着したモデルと四段階から成る時系列的な異種材料界面のはく離の発生プロセス(三種類)を想定し解析を行った。この解析はダイパッド/封止樹脂接合端近傍に生じる応力特異場の性質から、封止樹脂クラックの破壊力学パラメータ(周方向応力)と発生可能方向を求めるもので、パッケージ内に発生する異種材料界面のはく離が封止樹脂クラックの発生に及ぼす定量的影响をリードフレーム材料ごとに把握した。また、実パッケージを用いて温度サイクル試験を行い、その損傷の状況を断面研磨と超音波探傷装置により観察し、さらに試験結果と数値解析結果とを照合することで、線形破壊力学解析の有効性を検証した。これらの解析から、Cu合金リードフレームを用いたパッケージの封止樹脂クラックの基本的対策法は、ダイボンディング層のはく離防止であることを指摘した。一方、42合金をリードフレーム材料に用いた場合では、ダイパッド裏面/封止樹脂界面の接着強度を向上させることが重要であることを示した。

第4章においては、第3章の解析結果を踏まえ、封止樹脂に生じるクラックの初期的な損傷過程が異種材料界面はく離であることに着目し、ダイボンディング層、ダイパッド裏面／封止樹脂界面に生じるはく離の発生・進展機構、あるいははく離損傷のポテンシャルをリードフレーム材料ごとに明示した。数値解析はそれぞれの界面はく離に対し5ケースの損傷プロセスを設定し、さらに各ケースにおいてはく離寸法を変化させた。すなわち、温度サイクルの進行に伴うはく離の成長過程をも考慮して、界面はく離の応力拡大係数とモード比をErdoganの定義に従って導出した。数値解析から得られた知見は、a) リードフレーム材料ごとのダイボンディング層及びダイパッド裏面の界面はく離先端における応力拡大係数とそのモード比の定量的理解、b) ダイボンディング層及びダイパッド裏面に界面はく離が生じる場合のリードフレーム材料ごとのはく離進展機構、c) ダイボンディング層及びダイパッド裏面界面はく離に及ぼすリードフレーム材料の定量的影響、d) リードフレーム材料ごとのダイボンディング層及びダイパッド裏面のはく離発生・進展機構に及ぼすその他のパッケージ内部界面はく離の定量的影響である。また、放射性同位体元素Kr⁸⁵をトレーサーとする気密試験により、温度サイクル試験の初期段階で生じる界面はく離の観察を行い、解析モデルと数値解析結果の妥当性についても示した。

第5章「封止樹脂クラックの発生に及ぼす設計諸要因の影響」では、パッケージを構成する各構成材料間が密着したモデルと、第3章の解析で判明した、封止樹脂クラックが最も発生しやすいはく離状態をモチーフとして、パッケージ構成材料や設計寸法が封止樹脂クラックに及ぼす影響をリードフレーム材料ごとに議論した。すなわち、具体的な材料開発指針とパッケージ設計指針を安全設計の観点から導いた。

第6章「異種材料界面はく離の発生・進展に及ぼす設計諸要因の影響」では、第4章の解析において高い応力拡大係数を示した3ケースのはく離モデルを用いて、異種材料界面はく離の発生・進展に及ぼす設計諸要因の影響を明らかにした。換言すれば、数値解析により界面はく離の進展防止・抑制に関するパッケージ設計指針と材料開発指針をリードフレーム材料ごとに指摘した。

第7章「結論」にて、破壊力学解析手法の構築、一般的な材料で構成されるプラスチックパッケージの損傷機構に関する知見、パッケージ構成材料の選択・開発指針及び設計指針に分類し、本研究の成果を列記した。