OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	レーザー照射型熱画像法によるマイクロ欠陥検出プロセスに関する研究
Author(s)	岩田, 剛治
Citation	大阪大学, 1994, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3075115
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

レーザ照射型熱画像法によるマイクロ欠陥検出プロセスに関する研究

1993年

岩田剛治

レーザ照射型熱画像法によるマイクロ欠陥検出プロセスに関する研究

１９９３年

岩田　剛治

目次

	頁
第１章　序論	1
１．１　本研究の背景と目的	1
１．２　本研究の構成	3
第２章　レーザ照射型熱画像法による欠陥検出の可能性	6
２．１　はじめに	6
２．２　熱伝導解析モデルの作成	１０
２．３　実験装置	１２
２．３．１　実験装置の構成	１２
２．３．２　YAGレーザ加熱装置	１３
２．３．３　熱画像撮像装置	１４
２．３．４　ヒータチップ接合装置	１６
２．４　接合部の熱伝導解析モデルの境界条件の決定	１６
２．４．１　接合部の熱伝導解析モデルに存在する境界条件	１６
２．４．２　接合部表面でのYAGレーザの強度分布・吸収率の測定	１７
２．４．３　リードの空気への熱伝達係数の測定とその結果	１９
２．４．４　ランドと基板間の熱伝達係数の測定とその結果	２０
２．４．５　実際の接合部におけるシミュレーションと実験の比較	２２
２．５　熱伝導解析モデルにる数値解析シミュレーションによる欠陥検出の可能性の検討	２３
２．５．１　接合部界面全体での接合状態の検出	２３
２．５．２　接合界面の一部の接合状態の検出	２４
２．６　供試材料及び実験方法	２６
２．６．１　供試材料	２６
２．６．２　実験方法	２８
２．７　欠陥検出の可能性の実験的検証	２９
２．７．１　接合部界面全体での接合状態の検出	２９
２．７．２　接合部での内部欠陥の検出	３０

２．８　結論　３３

第３章　熱伝導シミュレーションによるQFPの
ガルウィング型リード接合部の欠陥検出プロセスの検討　３５
３．１　はじめに　３５
３．２　QFPのガルウィング型リードの接合部に存在する欠陥とその分類　３６
３．３　QFPのガルウィング型リードの接合部の熱伝導解析モデルの作成　３９
３．４　接合部の熱伝導解析モデルにおける境界条件の決定とその妥当性　４２
３．５　接合部の熱伝導解析モデルの妥当性の実験的検証　４４
３．６　ガルウィング型リードの接合部の欠陥検出とその条件の検討　４４
３．６．１　接合部の欠陥検出条件の検討　４５
３．６．２　未接合欠陥の位置とサイズの検出の検討　４６
３．６．３　ヒール部のフィレットの量とリード－ランド間の
ソルダ量の検出　４９
３．７　ガルウィング型リードの接合部の欠陥検出プロセス　５４
３．８　欠陥検出限界の理論的検討　５５
３．９　結論　５７

第４章　QFPのガルウィング型リード接合部の欠陥検出プロセスの
妥当性の実験的検証　６０
４．１　はじめに　６０
４．２　供試材料、実験装置及び実験方法　６０
４．２．１　供試材料　６０
４．２．２　実験装置　６３
４．２．３　実験方法　６５
４．３　欠陥検出装置の特性　６６
４．３．１　熱画像撮像の原理とその問題点　６６
４．３．２　熱画像撮像システムにおける温度計測装置の特性の測定方法　６８
４．３．３　熱画像撮像システムによる温度計測装置固有の特性　６９
４．３．４　温度計測装置固有の特性による計測温度の補正　７０

４．３．５　疑似欠陥を用いた熱画像からの内部欠陥情報の抽出　７２
４．４　各種欠陥検出の実験的検証　７７
４．５　結論　８３

第５章　欠陥検出プロセスのチップ部品接合部への適用　８５
５．１　はじめに　８５
５．２　チップ部品接合部に存在する欠陥の分類と欠陥検出における問題点　８５
５．２．１　接合部欠陥の分類　８５
５．２．２　欠陥検出時に存在する問題点　８９
５．３　チップ部品接合部の熱伝導解析モデルの作成　９０
５．４　熱伝導解析モデルを用いた温度分布解析による
未接合欠陥検出プロセスの検討　９２
５．４．１　接合部の欠陥検出条件の検討　９２
５．４．２　レーザ照射時間と接合部表面温度上昇の関係　９３
５．５　実験による欠陥検出の検証　１０５
５．５．１　供試材料及び実験装置　１０５
５．５．２　観測面の角度による計測温度の影響　１０６
５．５．３　実際のチップ部品接合部を用いた欠陥検出プロセスの検証　１０６
５．６　結論　１１０

第６章　レーザ照射型熱画像法の欠陥検出アルゴリズムとその検証　１１２
６．１　はじめに　１１２
６．２　実験装置、供試材料及び実験方法　１１２
６．２．１　実験装置　１１２
６．２．２　供試材料　１１４
６．２．３　実験方法　１１５
６．３　各種欠陥の熱画像とその特徴　１１５
６．４　欠陥検出アルゴリズムの作成　１１７
６．５　欠陥検出アルゴリズムの実験的検証　１２０
６．６　結論　１２０

第７章　総括　１２２

謝辞　１２７

参考文献　１２８

本論文に関した発表論文　１３５

第1章　序　論

1．1　本研究の背景と目的

近年エレクトロニクス産業の発展はめざましく、通信・情報機器などに多数の電子回路基板が組み込まれ、その生産量は大幅な増大を続け、情報社会の基盤技術の一つとなっている。今後の情報・知能化社会の推移において重要な位置を占めている情報化を推し進める電子機器・部品などの生産規模及び技術を考えるとき、多少の起伏はあるものの、集積回路の生産規模の増大、集積度の向上、回路線幅の微細化などとともに、集積回路応用機器の規模の増加と高度化－高機能化・高信頼化－が要求されている。

なかでも電子機器の基本構成要素である集積回路、回路基板、チップ部品などの電子部品の進歩が著しく、これらを用いた高密度・高集積実装が重要な役割を占めるようになってきており、これら電子機器の高機能化に向けての高密度化・高集積化には半導体技術と実装技術が主役を担っている[1][2]。そのため、実装技術は絶えず改良されながら発展を遂げているのが現状である。

しかし、いまだに接合部が完全にエラーフリーとはなっておらず、その品質検査を行わなければならないのが現状である。さらに将来的に接合部が微細化してくると、接合部の品質の高信頼化がより高く要求される。

現在、この品質検査の一般的方法は、用いられている頻度が高い順に、目視検査、インサーキットテスタ、ファンクションテスタ、実働テスタ、ＭＤＡ、自動外観検査である[1]。しかし、これらの検査方法のうち目視検査、自動外観検査だけが接合部自体の検査で、残りは電気特性の検査である。つまり、接合部の検査方法としては、ほとんどが目視検査に頼っているのが現状である。しかし、接合部が微細化、高密度化するにつれ、目視検査では作業効率や検査の信頼性が低下するなど接合部の品質を保証することが限界に近づいている[3]。このような状況下、検査の自動化として次の4種の検査方法、すなわち電気特性検査法、外観検査法[4]－[26]、透視検査法[27]－[35]、物理特性検査法[36][37]が提案されている。個々について以下にその概要を説明する。

まず回路の電気的特性を計測し、電気的に接合部を検査する方法である電気特

性検査法は、回路の一部分や全体の電気特性の測定、部品不良、部品違いの検知、製品の機能、性能の確認、マイクロブリッジの検出が可能であり、また検査規格が定量的である等の利点を有する。しかし、その反面、接合部での機械的強度の不足や接合部間の近接が生じていてもその検出が不可能な上、検査治具が品種毎に必要なこと、さらに高密度実装では検出ピンのスペースの確保が難しい等の問題点がある。

次に、目視検査の自動化をめざした検査方法である外観検査法は、今まで広く用いられてきた目視検査との対応が取り易く、認識のノウハウの活用も可能である。さらに、位置ずれ、ソルダ不足等の機械的強度不足の検出、近接欠陥の検出も可能で、非接触方式のため、品種毎の検査治具が不要である等の利点がある。しかし一方、接合部の外観のみを見るため、接合部が微細化してくることにより問題となる内部欠陥[36]に関しては、全く検出できない、また検査の原理上接合状態を直接には検査できず間接的な検査である、さらに検査に光を使用するため、ソルダの光沢の影響を受けやすい等の問題がある[6]。

次にX線や中性子線等を使って接合部の吸収率の差により、欠陥を検出する透視検査法は、内部欠陥の検出、フィレットの高さの検出が可能であり、非接触のため品種毎の検査治具が不要等の利点を持つ。しかし、両面実装や部品の像が重なる接合部は検出できない他、検出原理が材料間での吸収率の差で欠陥の検出するものであるため、接合界面での非常に薄い欠陥、例えば未接合のようなものは原理的にその検出が困難である。また、装置の放射線対策も必要となる、装置が非常に高価である等の問題点がある[6]。また、これらとは別に、超音波探傷による欠陥の検出も行われているが、これは接合界面での超音波の反射を見るものである。そのため、超音波を出す探触子と、発射した超音波を受信する探触子をあてる平坦な場所が接合部に必要になる。しかし、接合部が微細化してくると、探触子をあてるスペースが無くなる上に、接合部の表面が平らでないため検査が困難になる。また、基板の平坦部に探触子をあてて基板の裏側で反射させる方法を採ると、プリント配線基板の材質はほとんどがガラスエポキシ等の不均質材であるため、反射してきた超音波から欠陥情報を抽出することが困難である等の問題点がある。

最後に、接合部の物理的な特性を用いてその接合界面の情報を検出する物理特

性検査法は、機械的接合強度と検査結果との対応がとりやすく、検査規格の定量化が容易、非接触のため品種毎の治具が不要である等の利点を持つ。しかし、位置ずれ、近接不良の検出が困難である、目視検査との対応が取りにくい等の問題点がある[6]。しかし、目視検査は接合対象とソルダの濡れに基づいたものなので、接合状態を直接評価していないという問題点がある。そのために良好な接合部を欠陥としたり（ソルダ過多の一部）、欠陥が存在していても良品とする（ボイド、未接合、フィレットの未形成）可能性がある。

本研究は、現在の欠陥検査方法である接合対象とソルダの濡れの理論に基づく目視検査に代わり、接合部の接合状態の評価をもとにした新たな検査方法を提言することを目的としたものである。

即ち、新しい検査方法として、レーザ照射型熱画像法を提案・検討している。これは、接合部を短時間急加熱したとき、接合部の内部状態の違いにより熱伝導、熱伝達の状態が異なることによって接合部表面の温度分布が変化するという現象に着目したものである。すなわち、マイクロ接合部表面をYAGレーザにより局部的に極短時間(100ms 程度)に急加熱し、それによる接合部表面の温度変化を熱画像として記録・解析し、接合部に存在する種々の接合部欠陥の検出を行うものである。

1．2　本研究の構成

本論文の流れをFig.1.1に示す。本論文は全７章から構成されている。

第２章では、本論文でのレーザ照射型熱画像法の適応範囲を明確にするとともに、そこに存在する接合部において熱伝導解析モデルを作成し、それによる数値解析シミュレーションと実際の接合部を用いた実験による欠陥検出の可能性を検討している。

第３章では、表面実装プリント配線基板上の接合部のうちQFPのガルウィング型リード接合部を取り上げ、接合部に存在している欠陥を分類、整理し、その熱伝導解析モデルを作成し、欠陥検出プロセスの構築と同時に欠陥検出条件の選定方法、と欠陥検出限界を規定する因子について数値解析シミュレーションにより理論的に検討している。

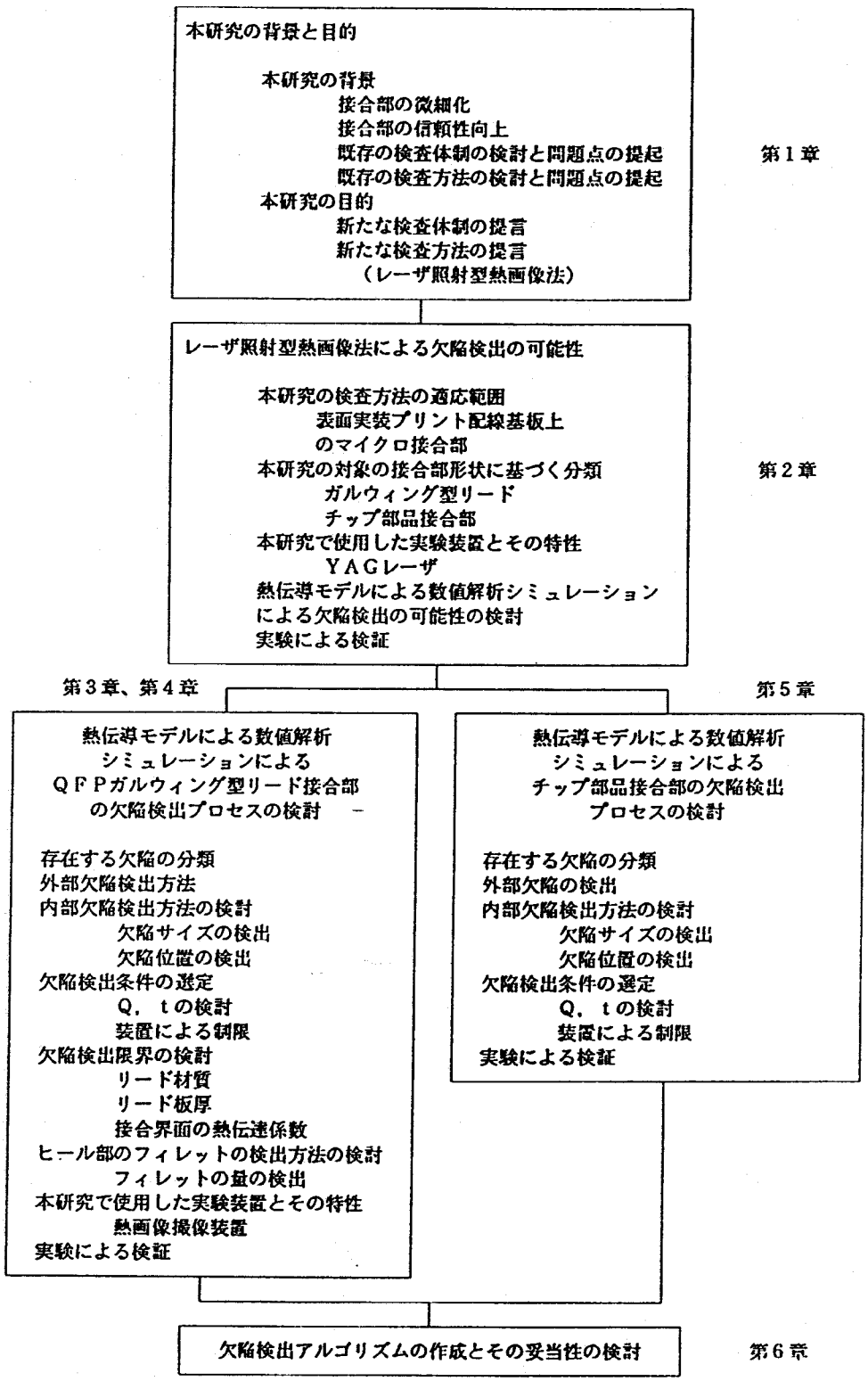


Fig.1.1 Flow chart of research.

第４章では、熱画像撮像装置の特性を検討し、それによる熱画像の評価方法を検討する一方、３章で構築された欠陥検出プロセスの有用性の実験的検証を行っている。

第５章では、表面実装プリント配線基板上の接合部の、もう１種類の接合部構造であるチップ部品を取り上げ、接合部に存在している欠陥を分類、整理し、QFPのガルウィング型リード接合部との違いを明らかにし、レーザ照射型熱画像法の適用の可能性を、熱伝導解析モデルを作成し、それによる数値解析シミュレーションにより理論的に検討すると同時に、実際の接合部を用いて実験的にも検討している。

第６章では、３章、５章で構築された欠陥検出プロセスより欠陥検出アルゴリズムを作成し、その妥当性を検討している。

第７章では、総括として、各章で得られた成果をまとめている。

第２章　レーザ照射型熱画像法による欠陥検出の可能性

２．１　　はじめに

検査対象としているマイクロ接合部にはいろいろな形態の接合部が存在し、これら接合部は多様な基板、デバイスなどから成り立っている。本研究はその中でも最もよく使用されている表面実装回路基板上のソルダリング接合部での欠陥検出を対象としたものである。この接合部の外観例をFig.2.1に示す。ここでの接

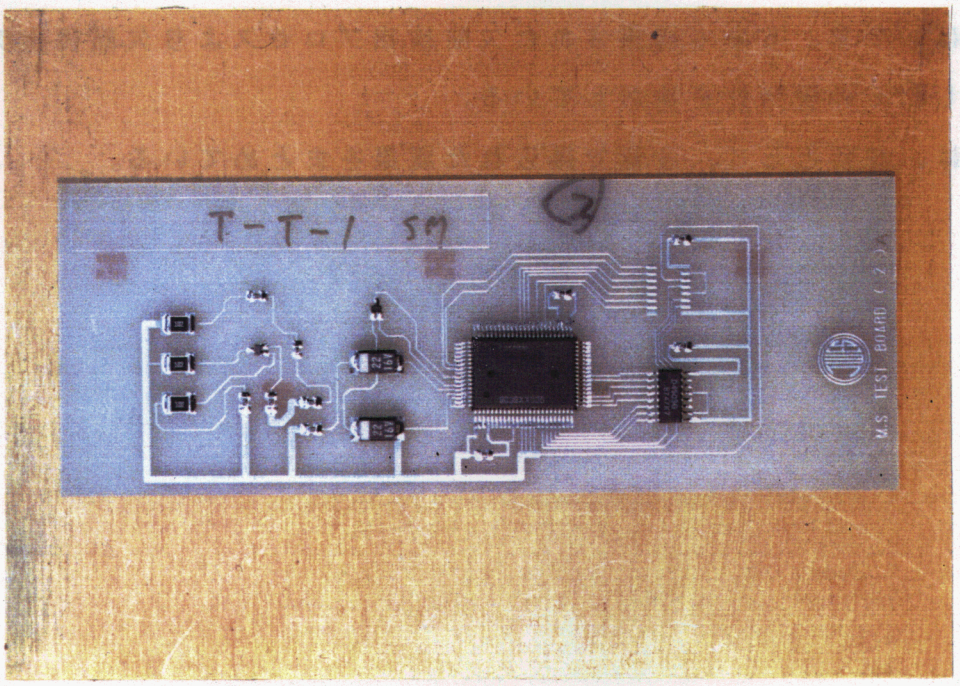
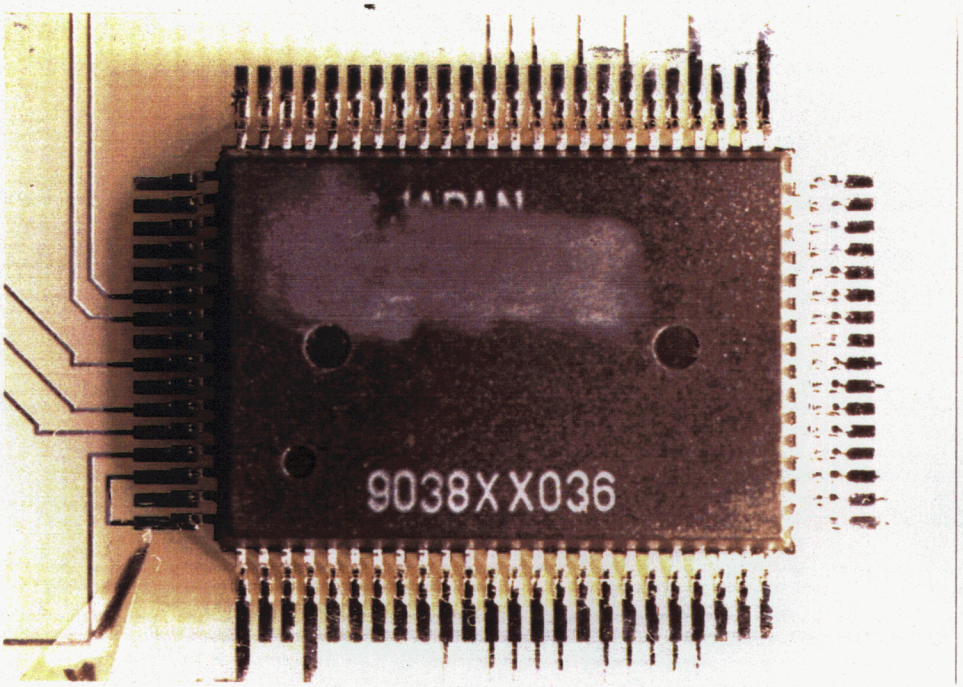


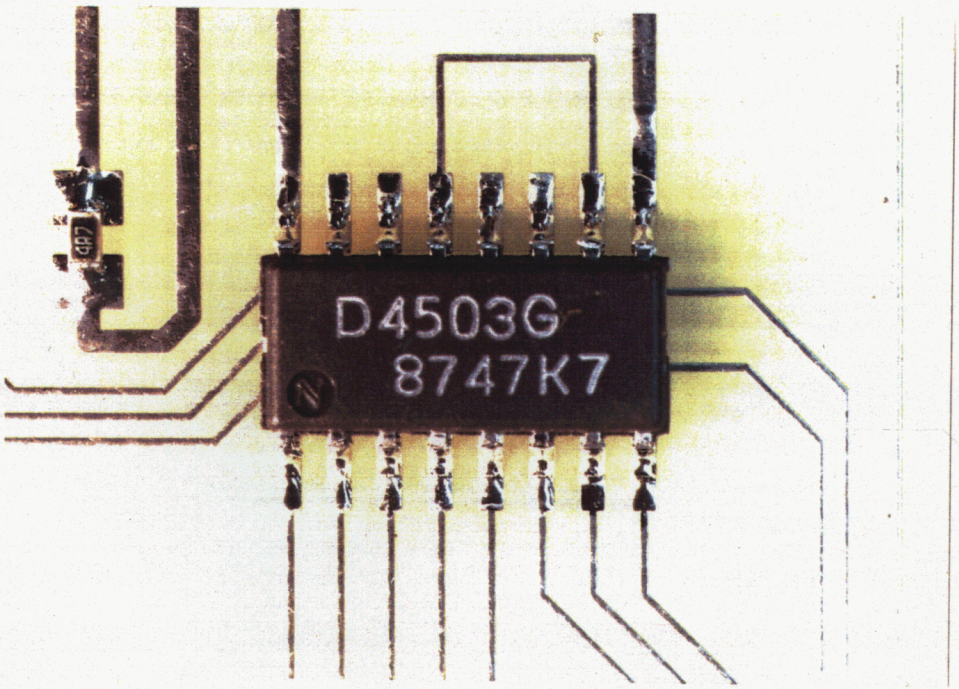
Fig.2.1 Appearance of print circuit board.

合部にはFig.2.2(a),(b),(c),(d)に示すようなQFP、SOP、チップ部品、トランジスターなどの接合部が存在する。しかし、接合部の構造自体は大きく分けて２つに分類できる。一つはQFP、SOP、トランジスターのようにリードがランドに平行に接合されている接合部、もう一つはチップ部品のように部品の電極とランドが直角に位置し、それをソルダのフィレットにより接合しているものの２つである。それぞれの接合部の構造（断面）をFig.2.3(a),(b)に示す。

そこで、本章ではまず接合界面が一つで接合部の構造が簡単なQFP等の接合部グループ、ここでは特にQFPのガルウィング型リードの接合部について欠陥検出

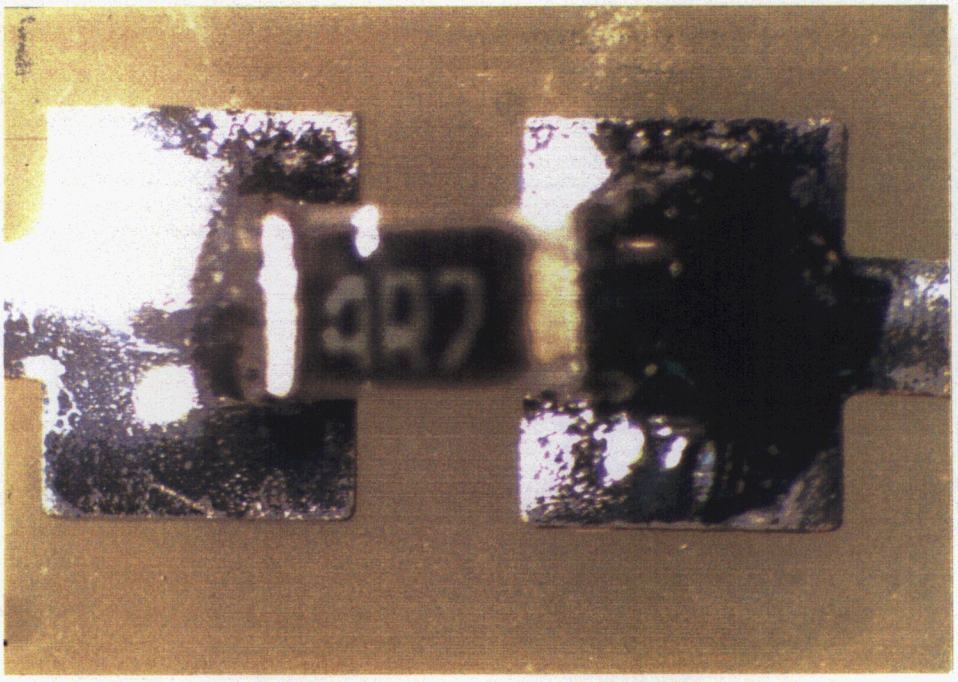


(a) QFP

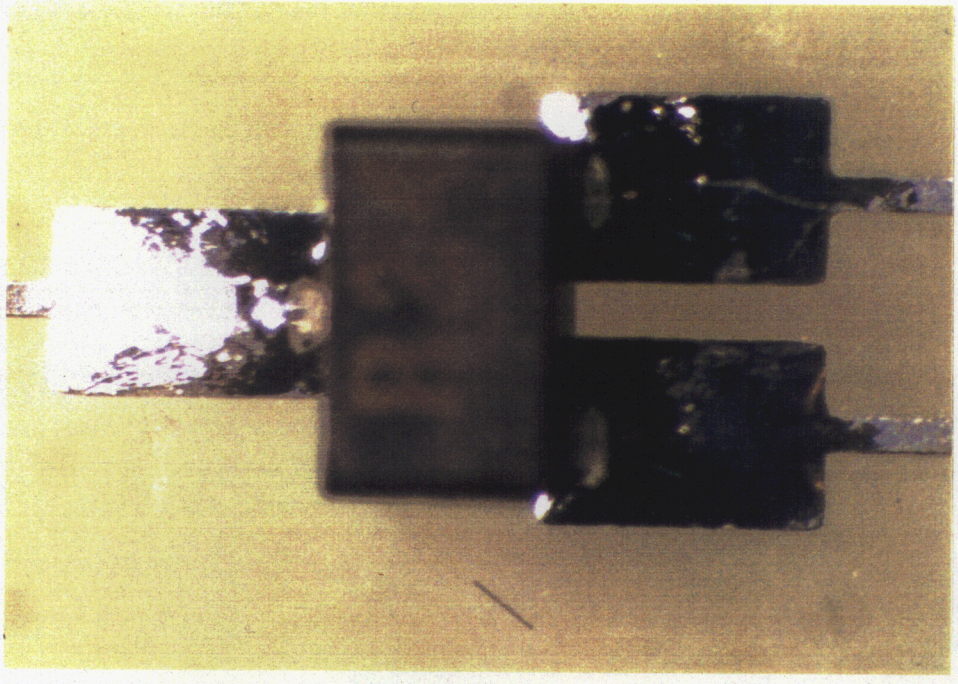


(b) SOP

Fig.2.2 Appearance of joint on print circuit board.

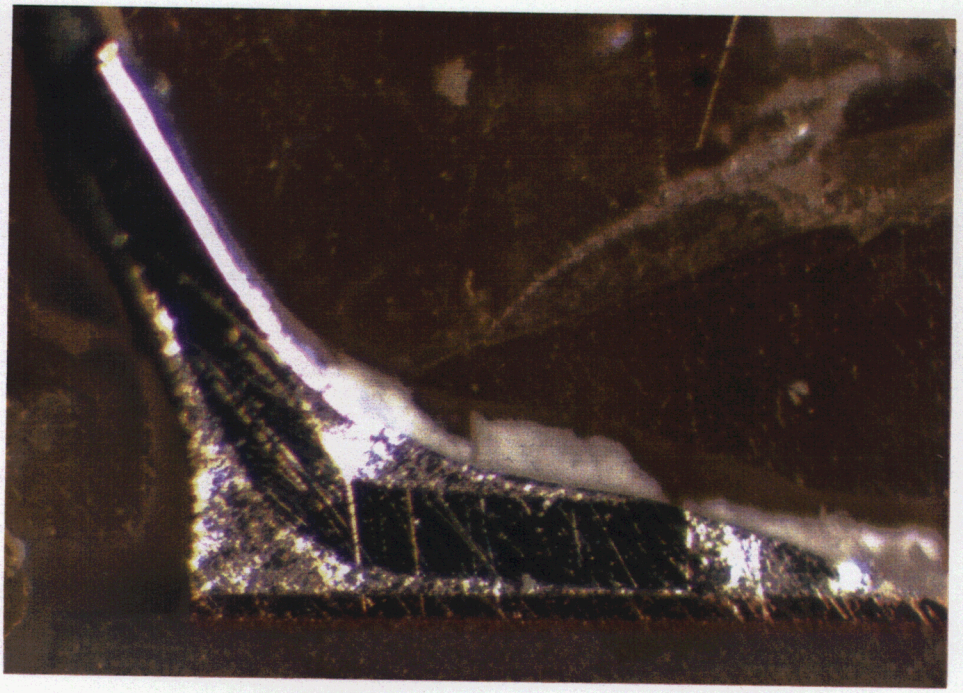


(c) Chip

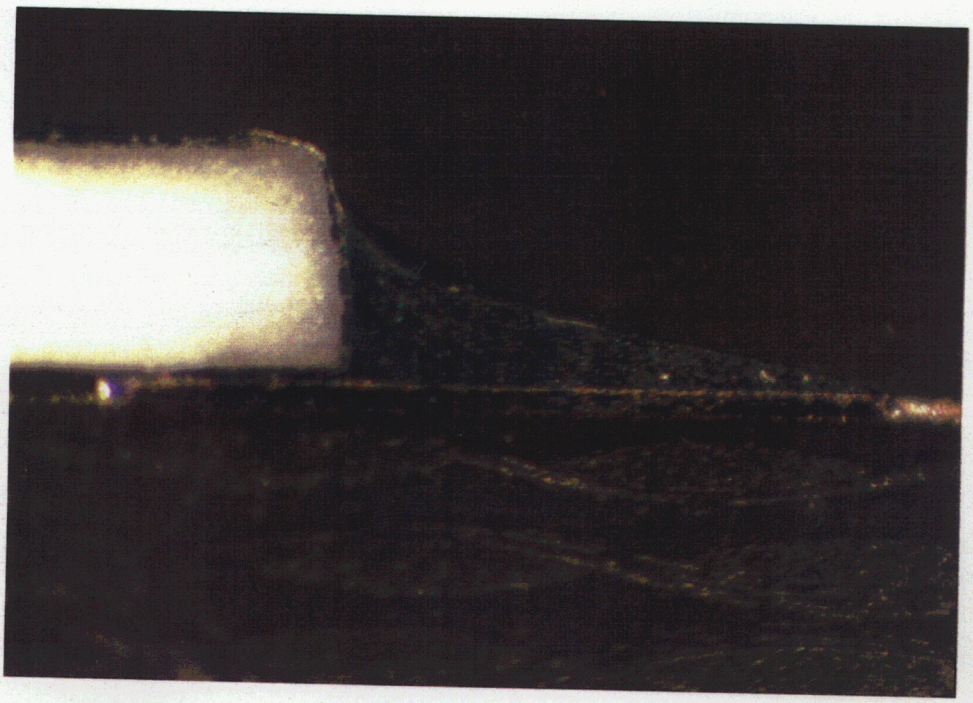


(d) Tr.

Fig.2.2 Continued.



(a) Joint of gull wing type lead



(b) Joint of chip

Fig.2.3 Appearance of joint at the cross section.

の可能性を検討するため、ガラスエポキシ基板上の銅ランド上に銅合金リードを接合したマイクロ接合部を用いる。まず、この接合部に存在する内部欠陥（未接合）の検出の可能性を熱伝導解析モデルによるコンピュータシミュレーションによる温度分布の解析により検討し、次にモデル接合部を作成し、レーザの照射時の接合部での温度分布の解析によって得られた結果を実験的に検証し、最後に実際のQFPの接合部を用いたマイクロ欠陥検出に関する実験により、マイクロ接合部の内部欠陥（ボイド、未接合）や外部欠陥（ブリッジ、位置ずれ、ヒール部のフィレットの未形成）の検出の可能性について検討している。

2．2　熱伝導解析モデルの作成

レーザ照射によるマイクロ接合部での温度分布の時間的変化を実験的に計測することは、リード寸法が150-400μm程度と非常に小さいため、計測法上かなりの困難を伴う。そこでレーザ照射による接合部の温度上昇と温度分布の時間的変化を数値的に検討するために、接合部の熱伝導解析モデルを作成し、レーザ照射時の接合部の温度上昇および温度分布のシミュレーションを行う。

まず、接合部の熱伝導解析モデルを作成するに当たり、QFPのガルウィング型リードの接合部の形状が非常に複雑であるという問題がある。そこで、Fig.2.4に示すようなQFPのガルウィング型リードの接合部の構造を、その平坦部のみを想定することにより簡単化したモデル接合部を用いて検討を行う。

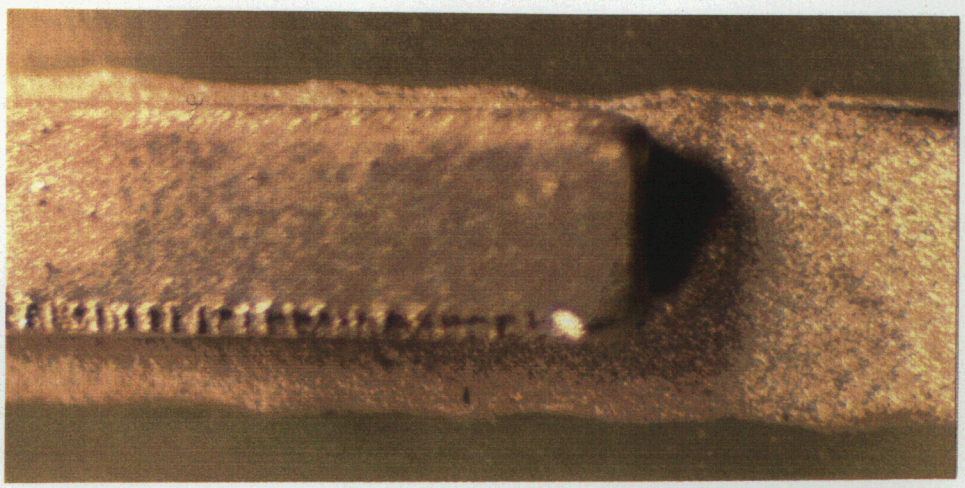


Fig.2.4 Appearance of model joint.

Fig.2.5は作成したモデル接合部の熱伝導解析モデルである。これは、ガラスエポキシ基板(20mmx20mmx1.6mm)上の中央にSnを5μmめっきした純銅箔のランド(厚さ35μm)を配置し、そこに11μmのSnをめっきした銅合金リードがランドの先端から1000μmの場所に幅400μm、長さ1500μmで接合されているものである。この時使用したリードの化学組成をTable 2.1に示している。このリードの寸法は幅400μm、厚さ150μm、長さ22000μmである。また、基板上でのランドの構成をFig.2.6に示している。その寸法は、幅500μm、厚さ35μm、長さ3000μmである。

また、その時の熱伝導解析モデルのメッシュサイズは、接合部では最小で縦横50μm、厚さ5～30μm(Snめっきで5,11μm、リードで30μm、ランドで15,20μm)と細かく、接合部からはなれるにしたがって除々にメッシュサイズを大きくしたものを

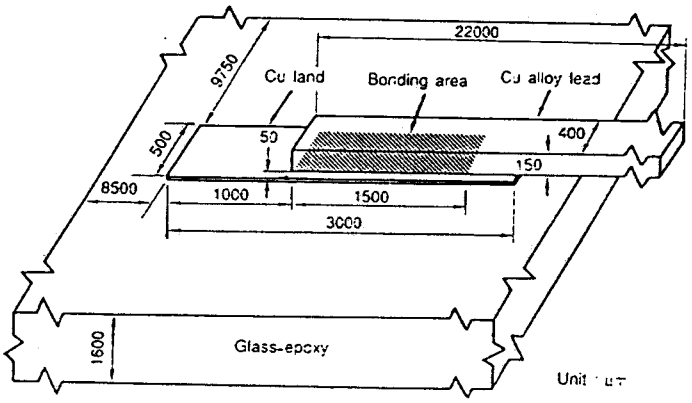


Fig.2.5 Three-dimensional thermal model of the micro joint.

Table 2.1 Chemical composition of lead.

Chemical composition (%)						
Ni	Sn	Pb	Fe	Zn	Mn	Cu
9.0±0.2	2.0±0.1	0.05max	0.6 max	0.5 max	0.6 max	REST

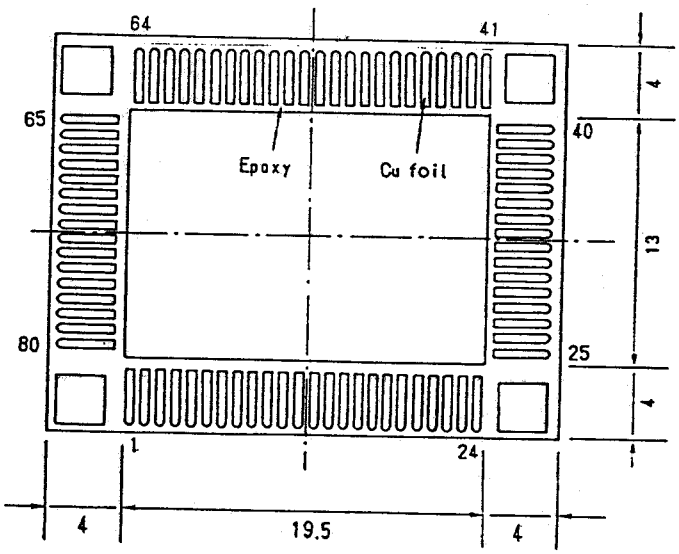


Fig.2.6 Shape and size of glass-epoxy substrate.

用いる。ただし、この熱伝導解析モデルはリードの幅の中央で対称形になっているため、実際の温度分布の解析は、熱伝導解析モデルの対称線で半分に切った1/2モデルを用いる。また、モデルの初期温度は実験条件に合わせて293K(20℃)とする。

温度分布の数値解析には汎用有限要素法プログラムのANSYSを用い、コンピュータとしては、Sun SPARC station 2を使用し、積分タイムステップは約11nsで行っている。

なお、熱伝導解析モデルに用いた材料の熱的物性値をTable 2.2に示す[40]-[42]。ただし、ここではガラスエポキシを均質材としてあつかった。

Table 2.2 Physical property of the materials.

Property / Material	Thermal conductivity W/(mK)	Specific heat J/(KgK)	Density Kg/m^3
Pure Cu	398.00	386.00	8880
Cu-Ni-Sn Alloy (C7250)	46.00	376.56	8900
Pure Sn	64.00	235.00	7300
Pure In	82.00	243.00	7310
Glass-epoxy	0.63	1500.00	1770

また、このモデルにおいて回路基板の寸法を非常に大きくしてあるのは、基板の寸法の熱影響を無視できるようにするためである。また銅合金リードに施されためっきは、シミュレーションによる温度分布の解析結果を実験結果と対比し、検証する時の接合品質の向上のためである[43]。実際はSn:10μm、In:1μmの2層めっきであるが、モデルの簡単化のために、Table 2.2に示すように両金属の熱的な性質が似ていてることを利用して、これを11μm厚のSnめっきとして取り扱っている。ただしこの場合には、後述するようにYAGレーザのInの吸収率はSnの吸収率とは変化するので、熱伝導解析モデルの吸収率は、Inの吸収率を採用している。

2．3　実験装置

2．3．1　実験装置の構成

使用した実験装置としては、Fig.2.7に示すようにマイクロ接合部表面を局所的に急加熱するためにYAGレーザ加熱装置、また加熱直後より一定時間間隔で接合部の表面温度・温度分布を測定するための赤外顕微鏡を含めた熱画像撮像装置、

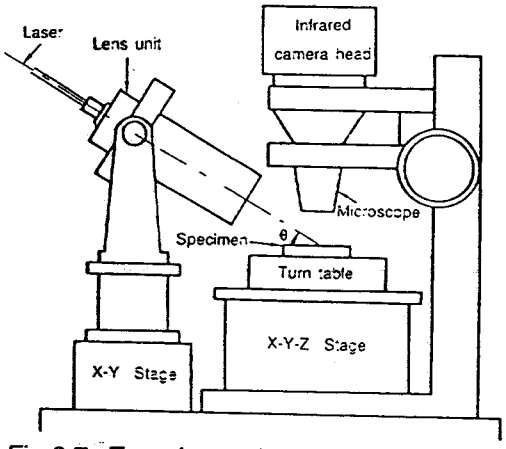


Fig.2.7 Experimental apparatus for detection of micro defects.

さらに得られた熱画像を解析するためにこれらの装置とは別に16bitパーソナルコンピュータを用いている。

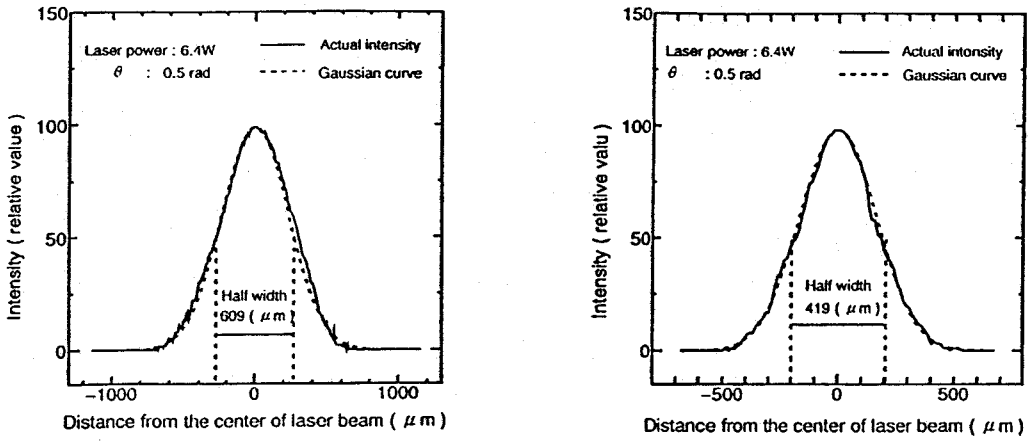
2．3．2　YAGレーザ加熱装置

測定対象物への加熱源として用いたレーザは、YAGレーザ（東芝製 LAY62-6A4型）である。このレーザは、高純度YAG（Yttrium Alminium Garnet、$Y_3Al_5O_{12}$）の結晶で、Nd^{3+}を0.1～1.0%含んだ物をレーザ物質として用いた4準位レーザである。発振波長は1.06μm、励起ランプはKrアークランプを使用し、レーザ出力は最大100Wである。また、レーザスポット径は最小0.4mmで出力安定度は、マルチモードで±3%以下である。この装置はレーザ発振ユニット、レーザ電源ユニット、レーザ冷却ユニット、光ファイバ分岐光学系より構成されている。

これをリード表面等へ照射すると、長軸約600μm、短軸約400μmの楕円形となり、軸上での光の強度分布はFig.2.8(a),(b)に示すようにほぼガウス分布となっている。なお、この強度分布は、カーボン薄膜を蒸着させた石英ガラス基板(20mmx20mmx1mm)にレーザ光(出力6.4W)を0.5radの角度で約1s照射し、照射後0.5sより33ms毎に15枚熱画像を取り込み、その熱画像を解析することにより調べたものである。

またレーザ光の位置設定や、レーザスポット径の調整にはYAGレーザと同軸に設定されたHe-Neレーザ（発振波長633μm）を用いている。

なおYAGレーザとHe-Neレーザの発振波長は後述する熱画像撮像装置の赤外線カ



(a) Direction of elliptic longitudinal axis　　(b) Direction of elliptic traverse axis

Fig.2.8 Intensity distribution of YAG laser on the silica glass.(θ :0.5rad)

メラの受光波長領域外にあり、かつ帯域フィルター(3～6μm)を介しているので、レーザ光に対するカメラ感度は非常に低く、無視しうる。

2．3．3　熱画像撮像装置

熱画像撮像装置としては、日本アビオニクス社製のTVS-2000で、観測対象物の各部の温度分布を非接触で測定し、それを熱画像として疑似カラー表示する装置である。この熱画像撮像装置は、赤外線カメラヘッド、イメージプロセッサ（モニタ内蔵）、リアルタイムレコーダの主要部分から構成されている。また熱画像の解析にはパーソナルコンピュータ（日本電気PC9801UX）を用いている。Fig.2.9に熱画像撮像装置及び、パーソナルコンピュータの構成図を示す。以下に各部の機能について述べる。

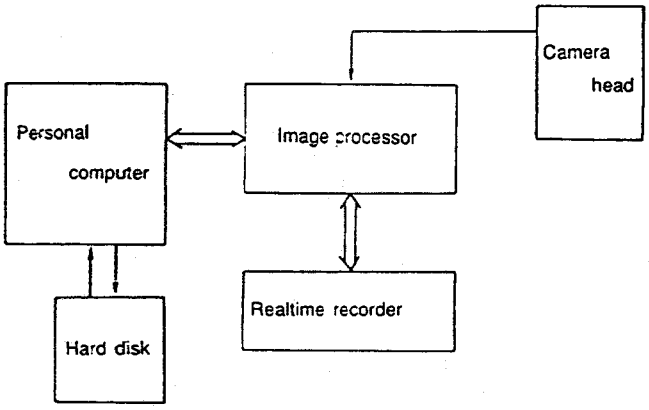


Fig.2.9 Hardware constitution of experimental apparatus and computer.

（a）　赤外線カメラヘッド

は、レンズ系と、対象物の表面から放射されている赤外線をアルゴンガスによってジュールトムソン効果によって冷却されている赤外線検出センサ（InSb、検出波長3～5.4μm）により受光し、電気信号に変換して1秒間に30フレームの撮像する。

（b）　イメージプロセッサは、カメラヘッドからの電気信号をディジタル信号に変換し、フレームメモリーに記憶した後、信号処理して内蔵モニタに最大256階調の疑似カラーで熱画像をリアルタイム表示する。

（c）　リアルタイムレコーダは、熱画像の記録に半導体メモリー(SRAM)を用いて、熱画像を記録再生するもので30frame/sのリアルタイムの熱画像の録画、再生が最高300frameまで可能である。また、熱画像撮像開始の16ms前に1msの画像取り込み開始トリガーパルスを出す。

（d）　パーソナルコンピュータはGPIBケーブルを通してイメージプロセッサに接続され、それにより送られた熱画像をハードディスクに保存している。そしてその熱画像より時間的温度変化や温度分布などの必要情報を抽出して情報解析を行っている。

なお本研究における観測対象物は、数百μm～1mmと小さいため、カメラヘッドには赤外顕微鏡システムを装着して測定を行う。この時の熱画像の視野サイズは横2300μm、縦1350μmで、画素数は横256pixel、縦100pixelであり、1pixel当りの解像度は横は約9.0μm、縦は約13.5μmである。

また、本装置の温度計測特性を調べるために、Fig.2.10に示すような表面状態が均一な対象材(厚さ10μmのSnめっきを施した純銅(高さ11mm,直径8mm))を一定温度に保持し、熱画像を撮像する装置を構成する。そして、対象物の温度が323,343,363Kでの取得した熱画像のピクセル数と輝度(256階調で表示)の関係を示したものがFig.2.11である。この図からも分

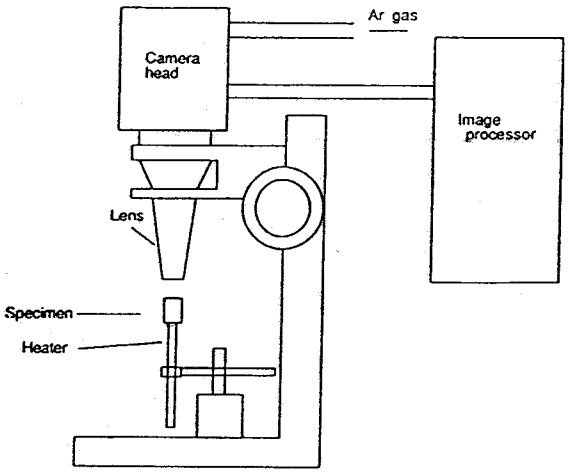


Fig.2.10　Experimental apparatus for measuring of thermography property.

かるように、対象物体の温度が時間的、空間的に一定でも温度計測値は、ある分布を持ち、その幅は計測対象物の温度が高くなるに従って狭くなっていく。このことは計測対象の試料をある温度以上に加熱しなければ温度測定値の測定精度、信頼性が低くなることを示している。

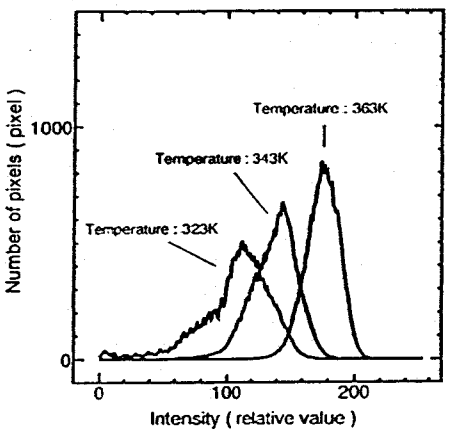


Fig.2.11 Relationship between histogram of intensity and temperature.

2．3．4 ヒータチップ接合装置

本章において、銅合金リードと、アルミナ基板上の厚膜を接合する装置には、ヒータチップ接合装置（日本アビオニクス製）を使用する。この装置は、リフロー用ヘッド部（型格NA-92C）と、リフロー電源部（型格TCW-115）から構成されており、リフロー電源部からの加熱電流によってヒータチップを一定温度に加熱し、接合部表面に接触させて接合界面に熱を供給することで接合を行う。

2．4 接合部の熱伝導解析モデルの境界条件の決定

2．4．1 接合部の熱伝導解析モデルに存在する境界条件

次に、境界条件は以下のように設定している。Fig.2.12に示すように１）接合部表面には実験で使用するレーザに相当する入熱分布を与え、また２）各界面での熱の流れを熱伝達係数を考慮することで扱っている。レーザによるリード表面への入熱はレーザ出力Qと吸収率ηの積（η・Q）で与えられる。

接合部に存在する５カ所の界面での熱伝達係数を以下のように表す。すなわち１）リードとランド間の熱伝達係数をh_{l-l}、２）リード表面、３）ランド表面および４）基板表面と空気との熱伝達係数を各々$h_{a(cu)}$、$h_{a(cu)}$、$h_{a(su)}$、

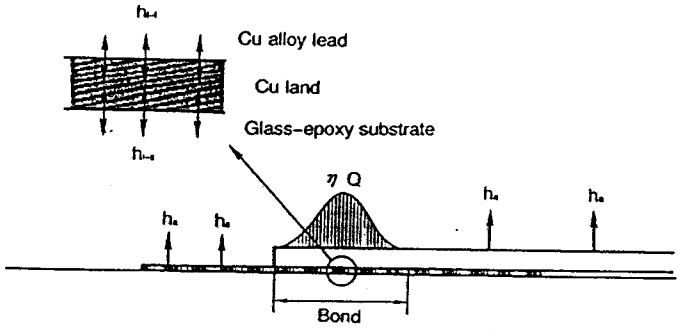


Fig.2.12　Boundary condition at joint model.

5）基板とランドの界面での熱伝達係数をh₁₋₃としている。さらにこの熱伝導解析モデルにおいて、未接合、ボイドなど接合欠陥は熱流を阻害するものであるため、接合界面に熱伝達の悪い領域をつくることにより表現している。この欠陥の場所の熱伝達係数をh₄としている。

次にこれら熱伝達係数の値が問題となるが、これらの熱伝達係数（h₄を除いて）は次項からに述べるよう実験的に決定している。

なお、実際に接合部欠陥の検出を考えると、シミュレーション温度域が293K～約400Kであり、試料から外界への熱の輻射は、シミュレーション温度の誤差としては試料全体が400Kとしても1.4×10^{-2}K程度と無視できるので境界条件としては与えていない。

2．4．2　接合部表面でのYAGレーザの強度分布・吸収率の測定

本実験では、レーザ照射により接合部表面を加熱しているため、まず温度上昇に影響を及ぼす因子として、観測対象物体の表面状態によるレーザ吸収率への影響を熱量計を使用して測定する。すなわち、Fig.2.13に示すような自作した熱量計を使用し、熱量計の内部に置いた試料(10mm×10mm×40μm)に予めその出力値を検定したレーザ(出力28W)を垂直方向より一定時間(35s)照射し、熱量計によりFig.2.14に示すような温度上昇度を計測し、熱吸収率を測定する。なお、試料として、表面状態の異なる4種の純銅材すなわち裸純銅材、Snめっき純銅材、In/Sn2層めっき純銅材、ソルダで覆った純銅材を使用し、それぞれ4回測定した結果の

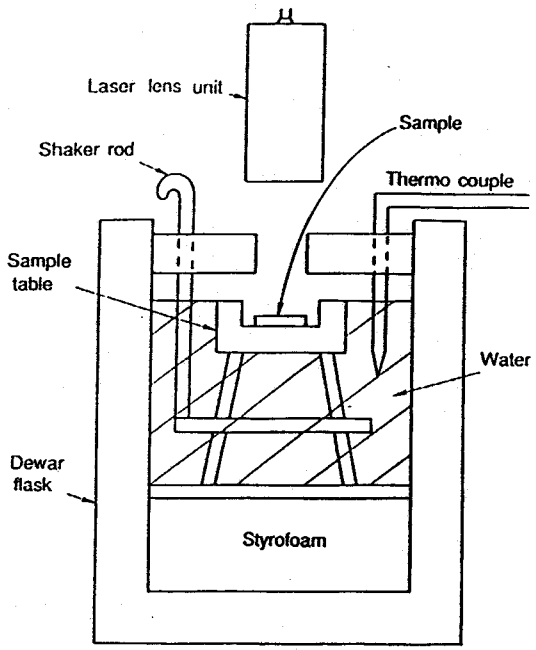


Fig.2.13 Schematic diagram of measuring instrument for abosrptivity.

平均値およびばらつきを求める。

その結果、Fig.2.15に示すように熱吸収率は、裸純銅:12%, Snめっき純銅:50%, In/Snめっき純銅:37%ソルダで覆った純銅:32%を得ている。なお、この場合、めっき条件およびめっき後の大気中での放置時間などにより熱吸収率が多少変化することが別途計測されている。

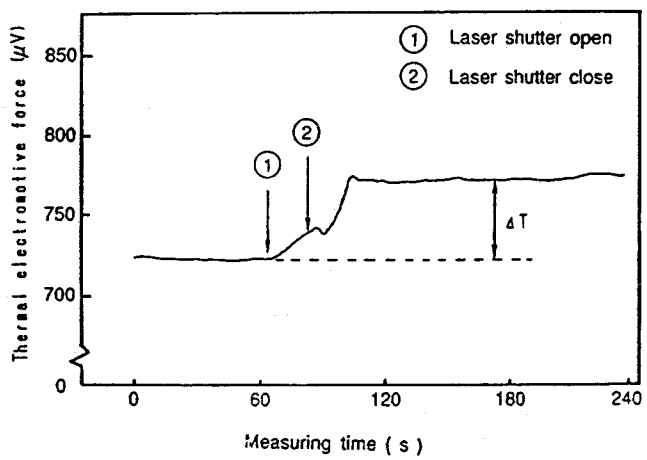


Fig.2.14 Typical example of temperature change.

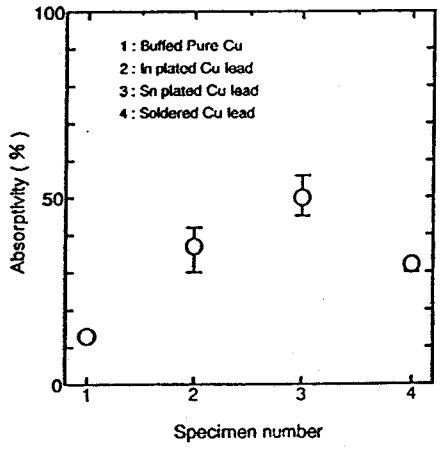


Fig.2.15 Absorptivity of samples.

2．4．3　リードの空気への熱伝達係数の測定とその結果

未知の界面での熱伝達係数の決定方法としては実験値と、理論計算値または熱伝導解析モデルを用いた数値解析との比較による方法など種々の決定方法が提案されている[44]-[56]。本研究では以下に述べる方法によって求めている。

一つの界面の熱伝達係数しかない簡単化したモデル試料を作成し、加熱した時の温度分布を求めた。一方、このモデル試料の熱伝導解析モデルを作成して温度分布の解析を行う。この時、実験値と、解析値が一致しなければその理由は界面での未知の熱伝達係数のみである。そこで、実験値と解析値が一致する熱伝導解析モデルの熱伝達係数を求めることにより、その値を決定する。次に、このモデルを複雑化し、先の界面とは異なる熱伝達係数が未知な界面を一つ持つようなモデルを作成し、先と同じようにして順次決定していき最終熱伝導解析モデルを完成させるというものである。

まずFig.2.16に示すように、空気とリードが接触している界面のみが存在する最も簡単なモデルにより、銅合金リード・空気間の熱伝達係数のみが未知なモデルをつくりその値を決定する。Fig.2.17に示すようにSnめっきを5μm施した厚さ40μmの純銅箔(50mm x 50mm)を作成し、その中心部を直径400μmのレーザを出力10W、角度0.5radで照射して中心点での温度を約200℃になるように加熱し、その時点での銅箔上での等温線をFig.2.18に示すように温度指示材の変色領域の外

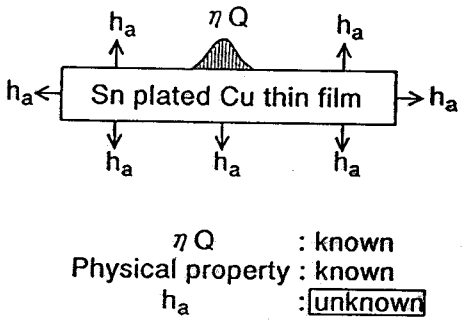


Fig.2.16　Illustration of boundary condition at model for measuring of h_a.

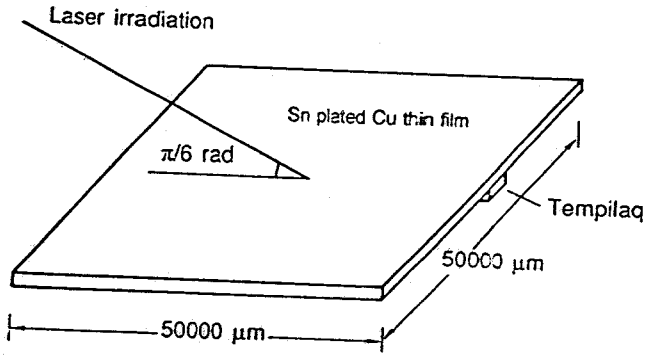


Fig.2.17　Illustration of model for measuring of h_a.

枠によ測定する。一方表面より空気への熱伝達を考慮した熱伝導解析モデルを用いて銅箔表面の温度分布を計算し、計算値と実測値が合致する熱伝達係数$h_{a(Cu)}$を求めている。その結果はFig.2.19に示すもので、この結果より$h_{a(Cu)}$値としては$1x10^2 W/(m^2K)$が妥当である。

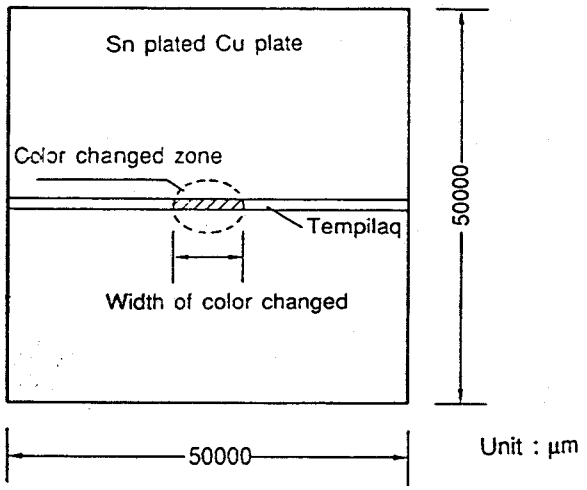


Fig.2.18 Method of measuring of width of color change zone.

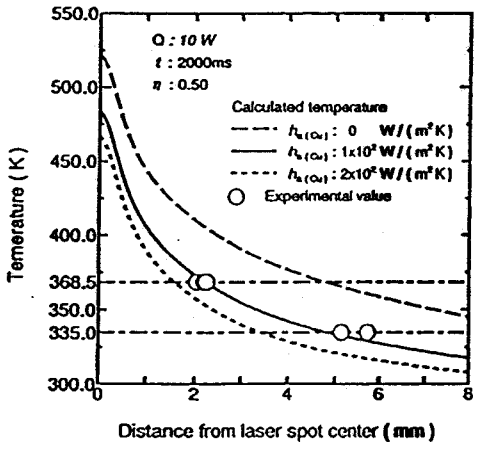


Fig.2.19 Comparison of calculated value with experimental value.

なお、この時、YAGレーザのSnめっき純銅箔の熱吸収率が問題となるが、この値については、前項で述べた熱量計による計測結果である熱効率$\eta = 0.50$を採用している。

2．4．4　ランドと基板間の熱伝達係数の測定とその結果

次に、Fig.2.20に示すようにガラスエポキシ基板上の銅ランドを接着した接合部モデルを検証する。これは、先のモデルに銅ランド・ガラスエポキシ基板間の界面が新たに加わり、熱伝達係数が一つだけ未知なモデルが作成出来るからである。すなわち、Fig.2.21に示すように銅ランド(Snめっき:厚さ5μm)上にレーザ(出力4.2W)を一定時間(1s)照射し、Fig.2.22に示すような銅ランド表面の温度分布を熱画像撮像装置を用いて計測するとともに、熱伝導解析モデルを用いて同様にレーザを照射した場合の銅ランド表面の温度分布を解析し、実験値と計算値を熱伝導解析モデルのh_{1-2}を変えることにより一致させそれにより銅ランド・基板間の熱伝達係数h_{1-2}を求める。その結果は、Fig.2.23に示すものであり、こ

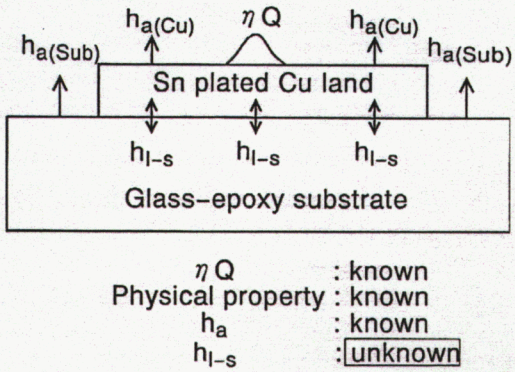


Fig.2.20 Illustration of boundary condition at model for measuring of h_{l-s}.

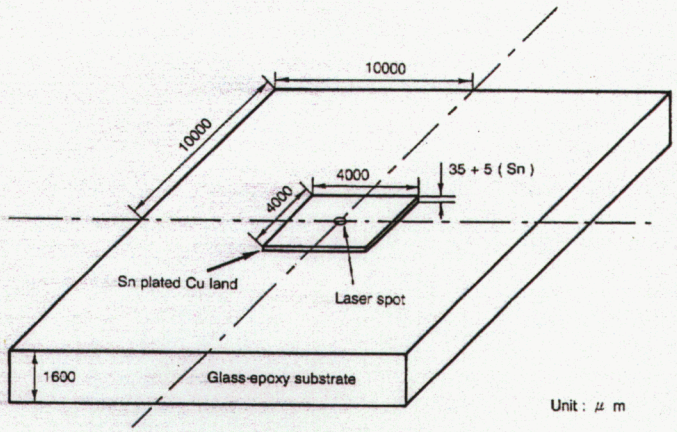


Fig.2.21 Illustration of model for measuring h_{l-s}.

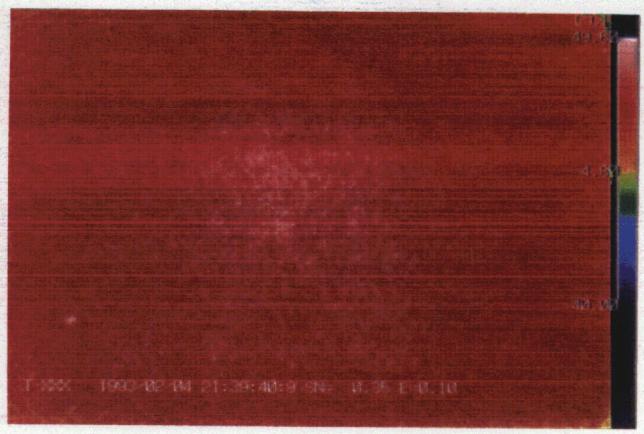


Fig.2.22 Thermal image of land.

の結果より $h_{l-s}=1x10^5 W/(m^2K)$ がほぼ妥当な値であると判断される。

なお、この時、YAGレーザのSnめっき銅ランドの熱吸収率が問題となるが、この値については、前項と同様に熱効率 $\eta = 0.50$ を採用している。

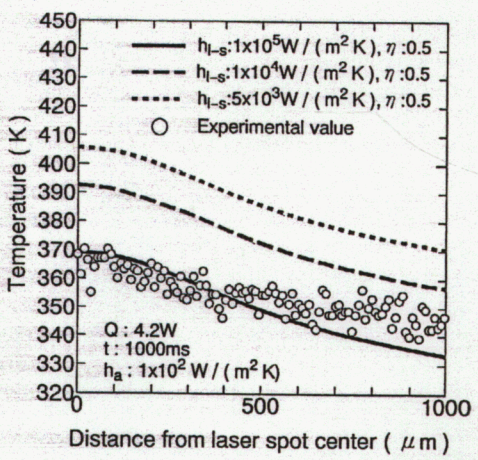


Fig.2.23 Comparison of calculated value with experimental value at joint model.

2．4．5　実際の接合部におけるシミュレーションと実験の比較

本章で用いる接合部の熱伝導解析モデルと、Fig.2.24に示すような熱伝導解析モデルを現実にした接合部を用いて、シミュレーションの精度を調べる為に実験

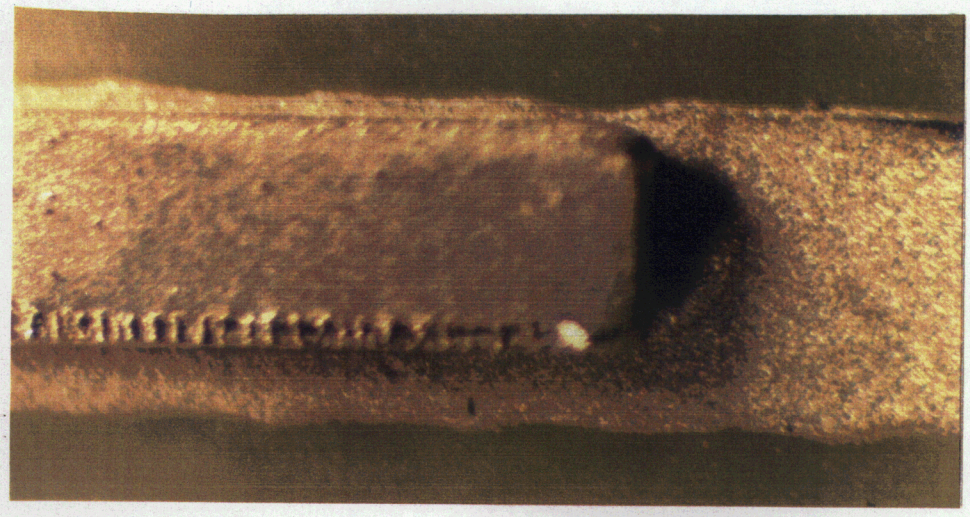


Fig.2.24　Appearance of model joint.

を行う。また、それと同時に、作成してきた熱伝導解析モデルを用いて温度分布の解析を行う。なお、レーザの照射条件は、出力3.2W、照射時間100msである。この時、リード・ランド間の熱伝達係数h_{1-1}はその接合形態が金属接合であるため良好な接合部では連続体として考えられるため、界面での熱流は影響を受けないとする。その熱伝導解析モデルの温度分布解析の結果がFig.2.25である。この図が示すように、数値解析の温度分布と実験値をもとに5次多項式の最小自乗法により求めた温度分布曲線の誤差は5%以下である。このことより接合部の温度分布シミュレーションは精度は5%以内の誤差で信用でき。なお、参考のためにInの吸収率を、その実験値の最大、最小であるη=0.30、0.42に変更した場合の温度分布をあわせて示している。

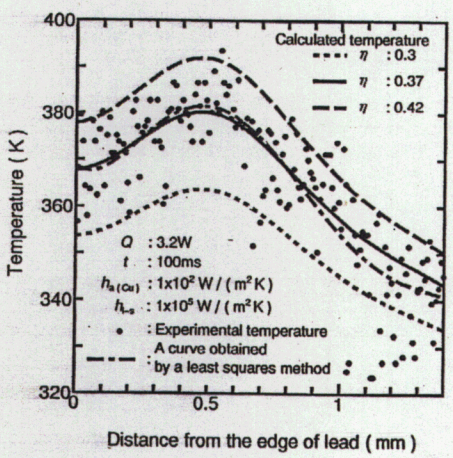


Fig.2.25　Comparison of calculated value with experimental value.

2．5　熱伝導解析モデルによる数値解析シミュレーションによる欠陥検出の可能性の検討

2．5．1　接合部界面全体での接合状態の検出

接合界面での熱伝達係数h_{i-1}は接合材料の組合せ、接合部での界面状況や接合状態によって異なる。そこで本項では接合界面での熱伝達係数の違いが最高表面温度（レーザ照射中心部近傍での温度）にどのような影響を与えるのかをFig.2.26に示すような前節で作成した熱伝導解析モデルの接合界面に熱伝達係数h_{i-1}を設定したモデルを用いた温度分布解析により検討している。

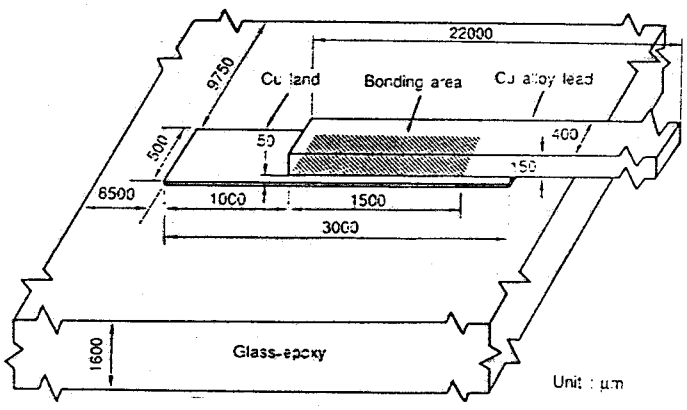


Fig.2.26　Three-dimensional thermal model of the micro joint.

Fig.2.27は、熱伝導解析モデルによるシミュレーションにより、接合部にレーザ(出力 3.2W)を照射した場合、100ms後の接合部表面最高温度が接合界面での熱伝達係数 h_{i-1} によりどのように影響されるのかを示したものである。この図より接合界面での熱伝達係数 h_{i-1} が $1x10^{-2}W/(m^2K)$ より $1x10^{2}W/(m^2K)$と小さい場合ではT_{max}は約550Kと高く、特に$1x10^{1}W/(m^2K)$以

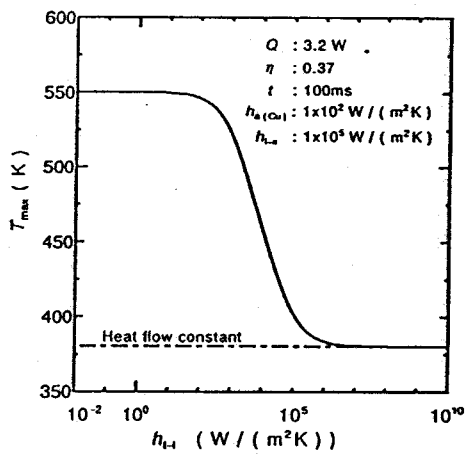


Fig.2.27　Relationship between h_{i-1} and T_{max}.

下だとリードからランドへ熱がほとんど伝わらず、リードのみを加熱したときと同じ温度になる。しかし、それ以上の値になると、最高温度は急激に低下し、$1x10^6 W/(m^2K)$以上の時には約380Kと約170Kの温度低下が生じる。

なお、リード・ランド間の熱的境界条件を熱伝達係数としてではなく、界面で熱流一定（$K1(\partial\theta/\partial l)=K2(\partial\theta/\partial l)$）として数値計算で求めた温度は、この図より熱伝達係数$h_{1-1}=1x10^7 W/(m^2K)$以上の場合とほとんど同じ値になっている。

以上の事実は次のことを物語っている。すなわち、接合界面での熱伝達状態の変化により接合部の表面温度はレーザにより与えられた熱が接合界面を熱流一定条件時の表面温度から、リードのみを加熱した条件の時の表面温度まで変化する。従って、表面温度および温度分布を計測することにより接合界面の状態に関する情報を知り得る。

2．5．2　接合界面の一部の接合状態の検出

次に接合部界面にマイクロ欠陥を有する場合について検討するため、Fig.2.28に示すように接合界面(400μm×1500μm:一定)中央にに250μm角の未接合欠陥を有する場合を想定した接合部縦断面での温度分布のシミュレーションを行う。その結果をFig.2.29に示している。また比較のため、接合欠陥が無い接合部での温度分布をFig.2.30に示している。

まず、Fig.2.29をみると、接合界面での未接合部よりの熱の反射が明確に認められ、その影響がリード表面にまで到達しているのが見られる。次に、これらの

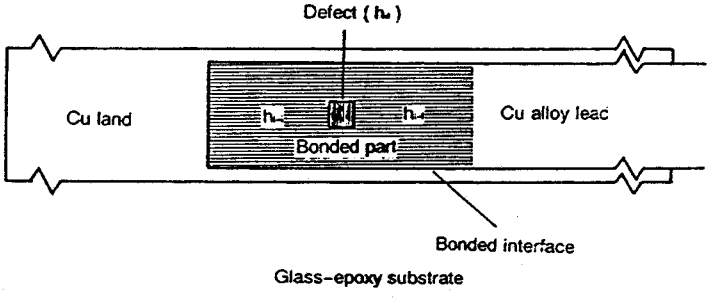


Fig.2.28　Illustration of model with defect at bond interface.

図を比較すると、接合欠陥による影響は欠陥に相当する表面部分の温度上昇として現れているのが認められる。すなわち、接合部の表面の温度分布を解析することにより接合界面に存在する内部欠陥を検出できる可能性があることが分かる。

これらの結果より、熱伝導の線形性を考慮すると、一次近似として、無欠陥接合部での最大表面温度(T_{max})をしきい値(T_c)として、このしきい値以上の表面温度領域を検出することにより欠陥の寸法および欠陥位置の検出ができると考えられる。そこで、欠陥が存在しないモデルでの最高温度をしきい値(T_c)として欠陥が存在する接合部表面での温度差ΔT($\Delta T = T - T_c$)の分布がどの様に現れるかを表したのがFig.2.31である（上半面のみ表示）。この図からも分かるように接合欠陥の表面温度への影響は高い温度領域として円状に現れているのが見られる。なお、この領域の大きさと欠陥の大きさとがある条件範囲で一定の関係が

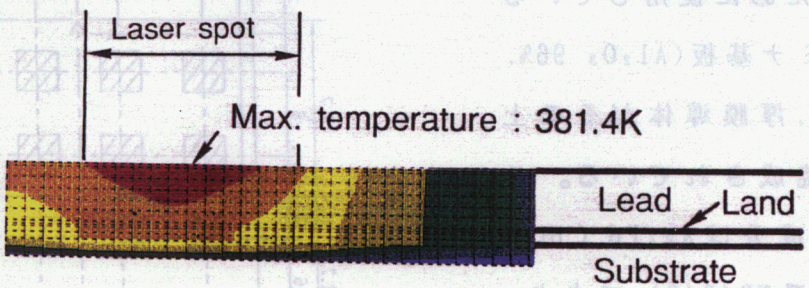


Fig.2.29 Temperature distribution of the joints.(longitudinal cross section)
(Q:3.2W,defect size:250 μ mx250 μ m)

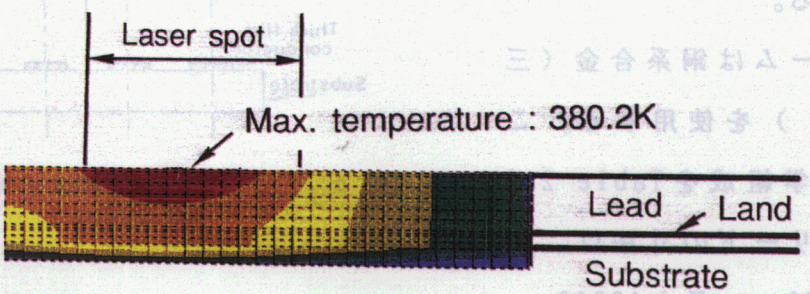


Fig.2.30 Temperature distribution of the joints.(longitudinal cross section)
(Q:3.2W,no-defect)

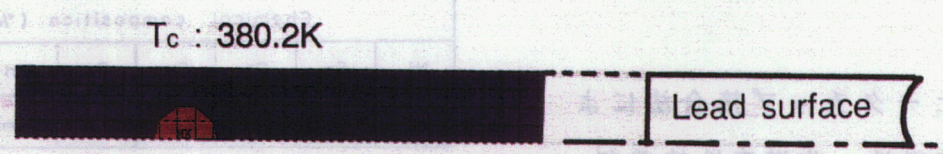


Fig.2.31 Temperature distribution of the joints at the surface.
(Q:3.2W,defect size:250 μ mx250 μ m,above T_c)

あることは次章に記述している。

このことより内部欠陥の判定には欠陥を有する接合部での最高温度$T_{(d)max}$と欠陥の無い接合部での最高温度$T_{(n)max}$との差ΔT_{max}を用いれば良いことが理解される。なお、以上の結果でのΔT_{max}の値は、接合面積、接合欠陥面積など他の因子にも依存することに注意を要する。

2．6　供試材料及び実験方法

2．6．1　供試材料

本章の接合欠陥検出の可能性の実験的検討のために使用している基板は、アルミナ基板(Al_2O_3 96%, 25.4mm角）で，厚膜導体がその上に厚さ10μm焼成されている。この厚膜導体の成分はAg/Pd（田中マッセイ、型番TR4846）であり、Fig.2.32に示す形状寸法で基板に配置されている。

リードフレームは銅系合金（三菱 CDA-C7250 ）を使用する。このリードの化学組成をTable 2.3に示す。このリードの寸法は、幅400μm、厚さ150μm、長さ13000μmである。またリード表面には7μm厚のSnをメッキしたものを使用する。

接合はヒータチップ接合法による接合、導電性、非導電性接着剤、Sn-Pb共晶のソルダによるソルダ

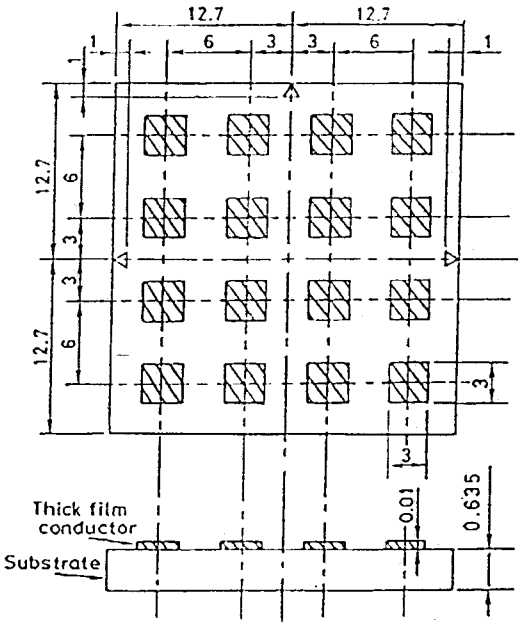


Fig.2.32　Shape and size of thick film and substrate.

Table 2.3　Chemical composition of lead.

Chemical composition (%)						
Ni	Sn	Pb	Fe	Zn	Mn	Cu
9.0±0.2	2.0±0.1	0.05max	0.6 max	0.5 max	0.6 max	REST

リングを用いる。導電性接着剤としてはポリエステル樹脂に導電性材料としてカーボンを含んだ藤倉化成のFC-404（電気抵抗$8\times10^{-4}\Omega$m）を使用する。また、非導電性接着剤としては合成樹脂100%のエポキシ系樹脂接着剤（エポキシ樹脂、変性ポリチオール）であるチバガイギ社のアラルダイト（スタンダード）を用いる。

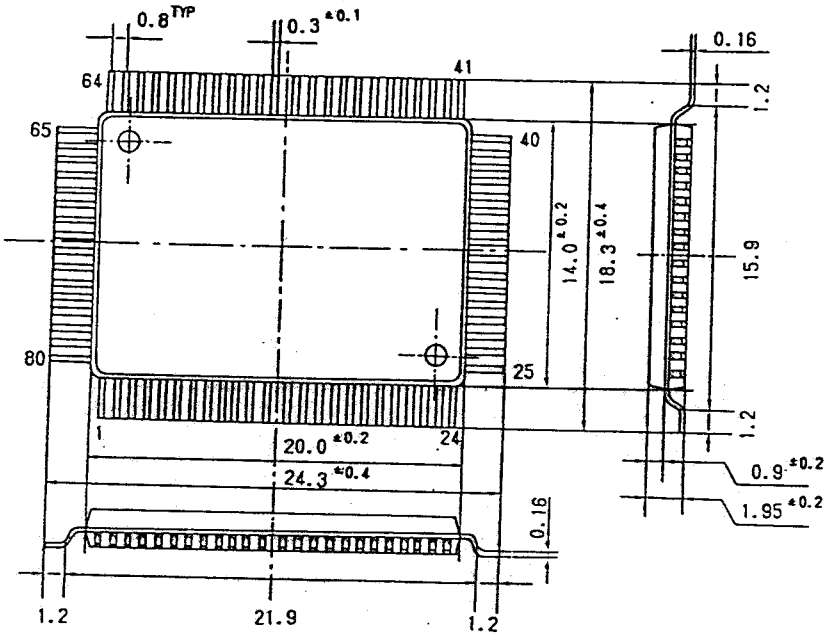


Fig.2.33　Shape and size of flat package.

また、Fig.2.33に示すようなリード幅は400μm、厚さ160μm、リードピッチは800μmの実際のQFPをFig.2.34に示すような厚さ35μmの純銅箔のランド（幅500μm、縦3000μm）を張ったガラスエポキシ材（厚さ1.6mm）にソルダを用いてソルダリングした接合部を用いて欠陥検出の可能性を検討する。

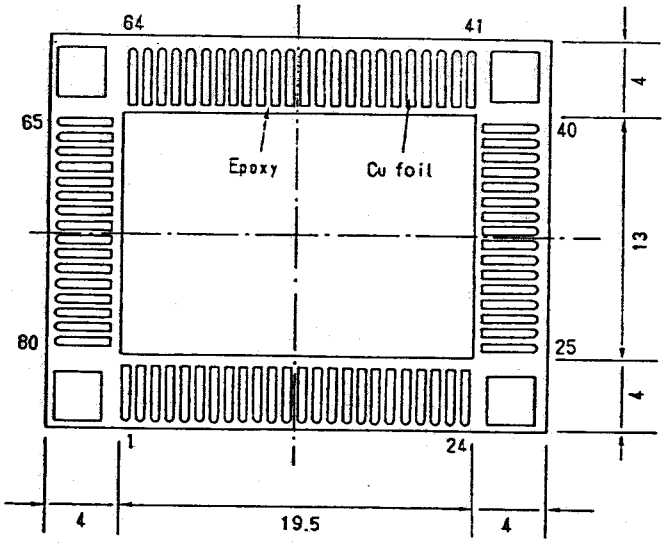


Fig.2.34　Shape and size of substrate.

2．6．2　実験方法

マイクロ接合部での欠陥検出の可能性を検討するための実験方法は次に述べるとおりである。すなわちFig.2.35に示すように、欠陥検出対象としての接合部表面を水平にターンテーブル上に固定し、0.5rad(30度)の角度でリードの長手方向から試料ごとにFig.2.36、Fig.2.37に示すようにそれぞれレーザを照射し、試料の直上からレーザ照射と同時に熱画像の撮像を開始し、33ms毎に1枚の熱画像を連続的に撮像、記録している。

なお、レーザ照射開始後での熱画像取得時間を正確に指定するために、熱画像撮像装置の撮像開始信号と同期して、レーザ照射開始を行っている。二つの装置の同期は、レーザ照射開始はフォトダイオードで検出し、熱画像撮像開始時間は装置からでるトリガーパルスにより検出することにより計測する。この時、このトリガーパルスのパルス幅は1msである。その結果、熱画像撮像装置の熱画像の記録開始と、レーザの照射開始の同

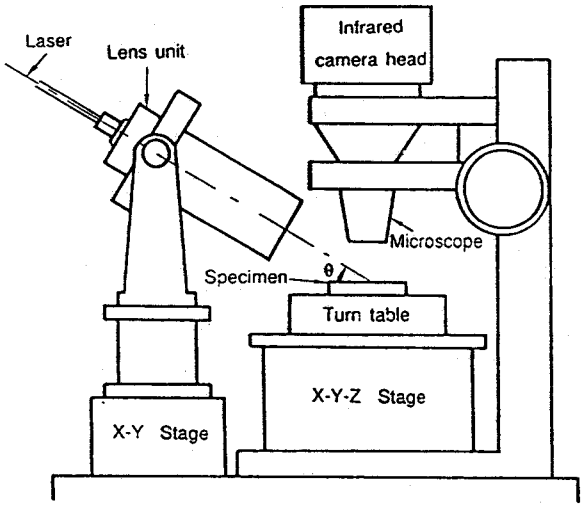


Fig.2.35　Experimental apparatus for detection of micro defects.

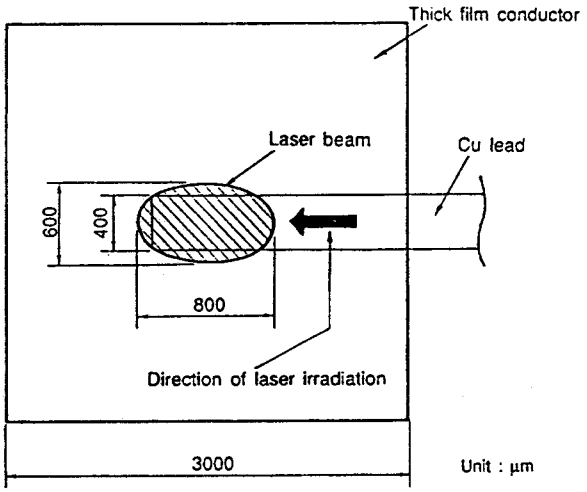


Fig.2.36　Positioning of laser beam for heating the lead on Al_2O_3 substrate.

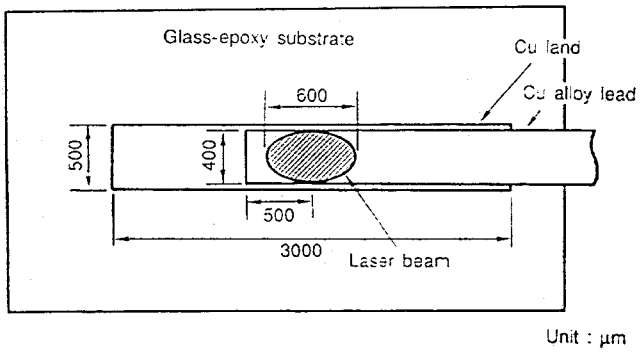


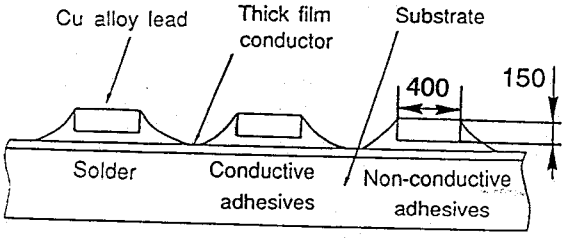
Fig.2.37 Positioning of laser beam for heating the lead on glass-epoxy substrate.

期精度は±0.5msである。

2．7　欠陥検出の可能性の実験的検証

2．7．1　接合部界面全体での接合状態の検出

一般に接合部界面での接合材料の種類により熱的な状態すなわち熱伝達係数が変化する。そこで接合界面状態によって表面温度にどのような影響がでてくるのか実験的に検討するために、接合界面状態を変化させた試料として、Fig.2.38に示すようにAg/Pdを焼成したアルミナ基板に銅合金リードを(1)ソルダリング、(2)導電性接着剤、(3)非導電性接着剤の3種の接合方法で接合したものを用いて測定した結果がFig.2.39である。なお、接合界面での接合材の



Unit: μ m

Fig.2.38 Micro joints with different heat conductance at the interface.

厚さは8-20μmである。これに見るように接合界面での接合部の熱物性値すなわち熱伝達度が変化することによって表面温度に大きな影響が現れる。このことは、界面での熱伝達係数が変化することを利用して、接合状態や内部欠陥情報が得られることを示している。

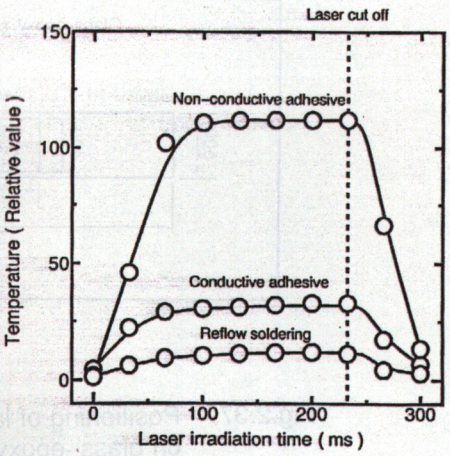


Fig.2.39 Behavior of average temperature at the joint surface, under several material with different heat conductance.

2．7．2 接合部での内部欠陥の検出

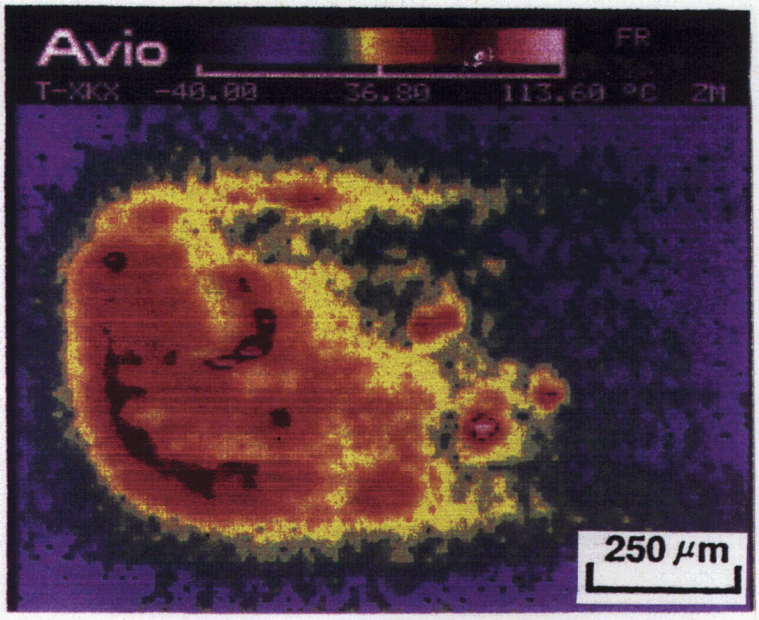
次に、Ag/Pd厚膜を焼成したアルミナ基板に銅合金リードをヒーターチップ接合法により接合したものを用い、リード側の接合箇所の一部を凹部を作成して人工欠陥を作成した場合の熱画像を撮像し、接合欠陥検出の可能性について検討する。Fig.2.40(a)は接合部のピール試験による破断面状況（基板側）を示したもので、Fig.2.40(b)は接合部表面での温度分布を示している。これにみるように熱画像における高温部は破断面での人工欠陥部分ないし、接合されていない場所とよく一致しているなど熱画像より接合界面での諸情報が抽出し得ることが認められる。



(a) Fractured surface of reflow soldering joint

Fig.2.40 Detection of several defect at joint in hybrid integrate circuit by thermal image.

次に、実際の接合部試片としてエポキシ基板上にQFPパッケージをソルダリング

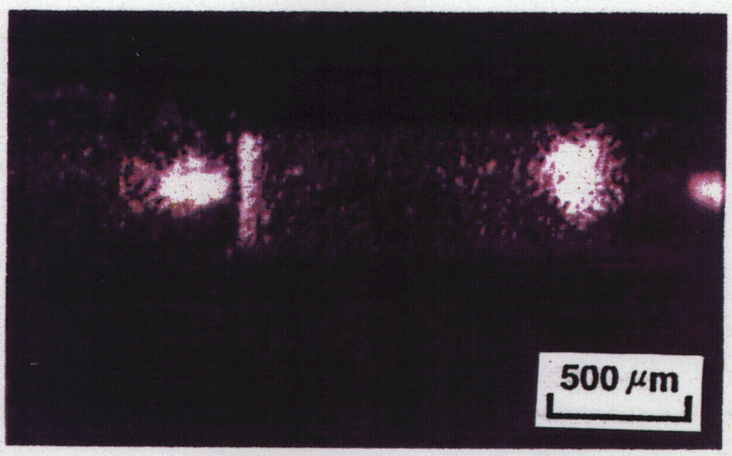


(b) Thermal image of reflow soldering joint

Fig.2.40 Continued.

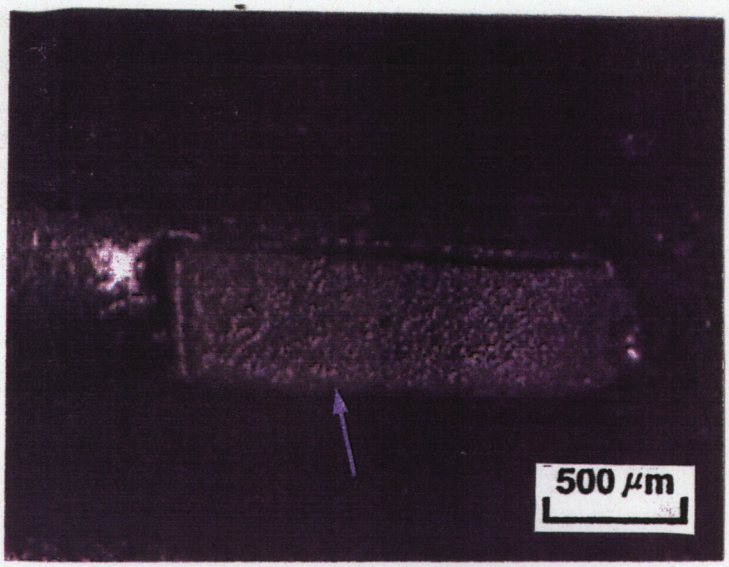
によって接合した接合部を使用し、その接合部の欠陥の有無を調査する。Fig.2.41(a),(b)は接合部の外観およびピール試験による破断面状況（基板側）を示したもので、Fig.2.41(c)はレーザ照射開始から0.1s後の接合部表面での熱画像（温度分布）を示している。これにみるように熱画像における高温部は破断面でのボイド集中部分（約100μm角）とよく一致しているのが認められる。

この他、未接合、リードの位置ずれ、ブリッジ、ヒール部のフィレットの未形成などの内部欠陥・外部欠陥も検出可能であることが確認されている。

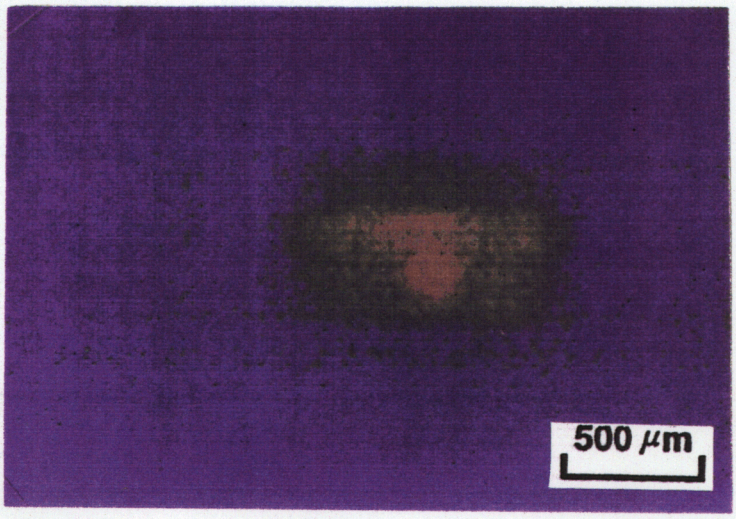


(a) Appearance of reflow soldering joint

Fig.2.41 Detection of the defect of soldering joint on print circuit board.



(b) Fractured surface of reflow soldering joint(PCB side)



(c) Thermal image of reflow soldering joint

Fig.2.41 Continued.

2．8　結論

表面実装プリント配線基板上の接合部の欠陥検出の可能性をガラスエポキシ基板上の銅ランドにQFPのガルウィング型リードを接合したマイクロソルダリング接合部を用い接合部に存在する内部欠陥や、外部欠陥の検出の可能性の検討を、熱伝導シミュレーションと実験を用いて行い、以下の主な結論を得た。

1）　熱伝導解析モデルを構成し、レーザ照射時での接合部温度分布をシミュレーションによる温度分布の解析により実験結果との誤差5%以下で接合部表面の温度分布を求めることが可能である。

2）　接合状態を接合界面での熱伝達率によって表現して接合部表面温度分布をシミュレーションにより解析した結果、接合界面の状態がリード表面の温度上昇に反映されていることを示した。

3）　接合界面に存在する未接合などの内部欠陥を接合界面に熱流を遮断する領域を作成することにより表現し、レーザ照射時での接合部温度分布をシミュレーションにより解析することにより、欠陥の存在している接合部の表面最高温度$T_{(d)max}$と、欠陥が存在しない接合部の温度分布の表面最高温度$T_{(n)max}$の差ΔT_{max}($T_{(d)max}-T_{(n)max}$)により欠陥情報が得られることを明らかにした。

4）　ソルダ及び2種の導電性の異なる接着剤により接合された接合部にレーザを照射し、その表面温度分布を計測することにより、接合材の違いが表面温度情報により得られることを実験的に示した。このことは逆に表面温度情報より接合界面情報が得られる。

5）　セラミック基板上の銅合金リードのヒータチップ接合部を対象として、接合部にレーザを照射し、接合部熱画像を解析することによりボイド、未接合など接合欠陥の検出の可能性があることを実験的に示した。

6） 実際のQFPのガルウィング型リードのソルダリング接合部を対象として、接合部にレーザを照射し、接合部熱画像を解析することによりボイド、未接合、リードの位置ずれ、ブリッジ、ヒール部のフィレットの未形成など接合欠陥の検出可能性があることを実験的に示した。

第３章　熱伝導シミュレーションによるQFPのガルウィング型リード接合部の欠陥検出プロセスの検討

３．１　はじめに

前章では、ガラスエポキシ基板上の銅ランド上にQFPのガルウィング型リードをマイクロソルダリングにより接合した接合部、アルミナ基板上のAg/Pdランド上に銅合金リードをヒーターチップにより接合した接合部等に存在する種々の接合欠陥など接合界面情報が、接合部の表面温度分布の解析により得られることを理論的及び実験的に明らかにする。

しかし、これでは欠陥の存在の有無が確認できるだけでその量については、何も検討されていない。また、その検出限界についても検討されていない。そこで、本章は、前章で欠陥検出の可能性の検討を行ったQFPのガルウィング型リードの接合部に存在する欠陥の検出プロセスについて理論的に検討したものである。

そこでまず、接合部に存在する欠陥を分類し、整理することにより、検出対象を明確にする。次に、それらの欠陥のなかで、未接合欠陥と、ヒール部のフィレットの未形成欠陥は、どちらもその欠陥の存在が確認されただけでは欠陥とはいえない。つまり、未接合については、その位置、大きさが、使用目的に問題があるかどうかで決まり、ヒール部のフィレットの未形成は、その大きさが、使用目的に問題があるかどうかで決まる。つまり、これら２つの欠陥についてはその存在だけでは無く、その量についての情報も必要である。しかし、これらの欠陥の量を実験において制御することは不可能なため、モデル接合部の作成が非常に困難である。

そこで、接合部に存在する欠陥の量が規定しやすく、接合部の表面及び内部の温度分布が簡単に取れ、その解析が容易な接合部の熱伝導解析モデルを作成し、この熱伝導解析モデルを用い温度分布の解析をおこない、これら２つの欠陥の量を検出プロセスを検討することとし、それと同時に、これらの欠陥検出の検出条件、及びその検出限界についても検討する。

3．2　QFPのガルウィング型リードの接合部に存在する欠陥とその分類

QFPのガルウィング型リードの接合に存在する欠陥は、Table 3.1に示すように大きく分けて外部欠陥と内部欠陥の2つに分類される。内部欠陥はさらに未接合とボイドの2つに分類される。外部欠陥はさらに部品未搭載、位置ずれ、ピット、フィレットの未形成、ブリッジの5つに分類される。これらの欠陥はそれぞれ、電気的に回路に異常が生じる、及びその危険を大きくする、接合部での初期及び疲労強度を低くする、及び接合部の耐腐食性が低下するといった問題がある[57][58]。そこで以下にこれらの欠陥について説明する。

Table 3.1　Classification of defect.

Internal defect	No bonded
	Void
External defect	No device
	Misalignment
	Pit
	Defective formation of fillet
	Bridge

欠陥が存在しない理想的な接合部のモデルをFig.3.1に示す。下が接合部の平面図で、上が接合部の断面図である。なお、ハッチングしてある箇所が接合部に当たる。

まず、5つの外部欠陥について説明する。まず、Fig.3.2に示すような部品が存在しない接合部である。この欠陥の起こる理由は、電子部品の生産工程では部品を基板に接合するまでは、部品は基板に接着剤で仮り止めしているだけのため、搬送中にその部品がはずれるということがよくおき、回路が役に立たなくなるからである。次に、位置ずれを有する接合部をFig.3.3に示す。これは、部品の輸送、実装行程において、リードに何らかの力が働いてリードが曲がったり、部品の搭載位置がず

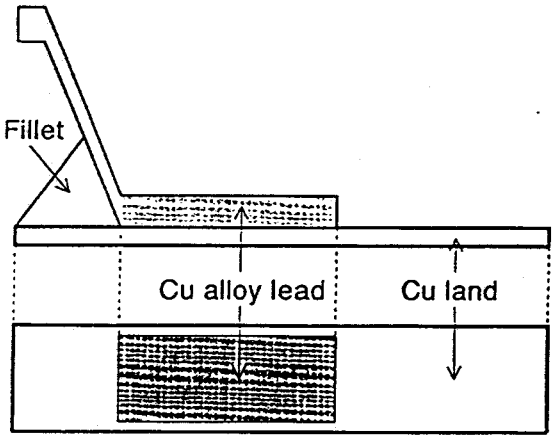


Fig.3.1　Illustration of good joint.

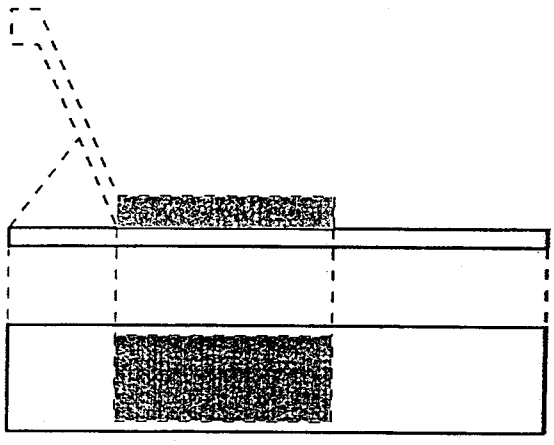


Fig.3.2 Illustration of no device joint.

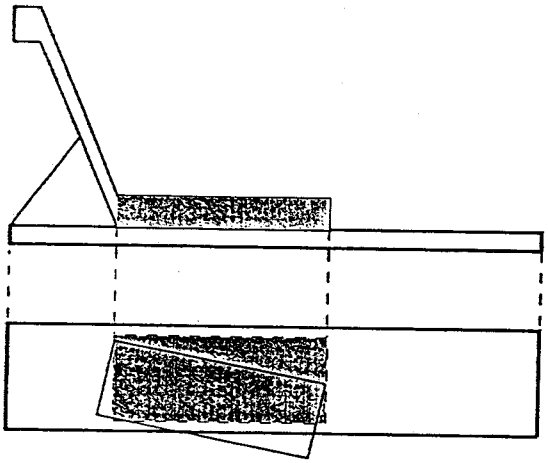


Fig.3.3 Illustration of joint with misalignment.

れることにより、リードがランドからはみ出て接合されている欠陥である。これにより接合部間距離が短くなり、ホイスカ等による回路の短絡の危険が増し、接合部の構造も異常になりその接合強度も低下させる欠陥である。次に、フィレットの未形成を有する接合部をFig.3.4に示す。これは、接合部のヒール部で、ソルダが濡れ上がらずフィレットの形成状態が良くない欠陥である。これは、接合部の初期強度を低下させる欠陥である。そのうえ使用時の発熱による熱応力がこのフィレット部に集中するため、このフィレットには使用時と未使用時とでの繰り返し荷重がかかるため熱疲労による破壊の発生地点となるため、このフィレットの未形成は接合部の初期及び疲労強度を著しく低下させる欠陥である[59][60]。次に、ブリッジを有する接合部をFig.3.5に示す。これは回路を短絡させてしま

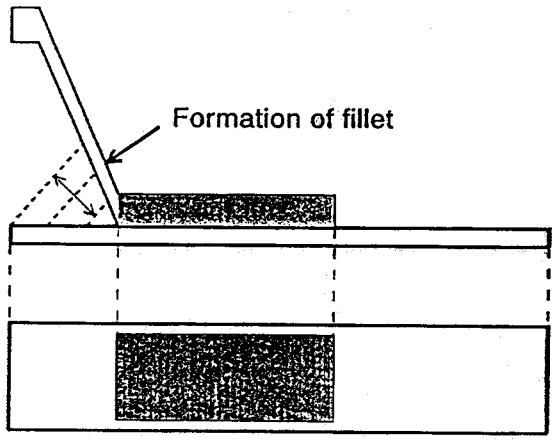


Fig.3.4 Illustration of joint with defective fillet formation.

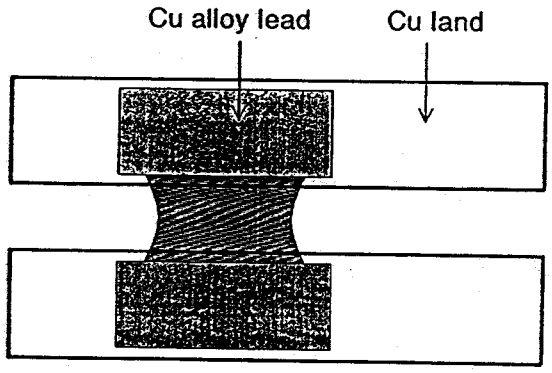


Fig.3.5 Illustration of joint with bridge.

う欠陥である。次に、ピットを有する接合部をFig.3.6に示す。これはソルダの凝固過程の異常で、接合部の表面に錐で刺したようなくぼみが出来る欠陥である。このくぼみが問題になる理由は接合後洗浄されるはずのフラックスが洗浄工程で取れず残留しやすいため、このフラックスによりソルダが腐食され接合部が劣化するからである。

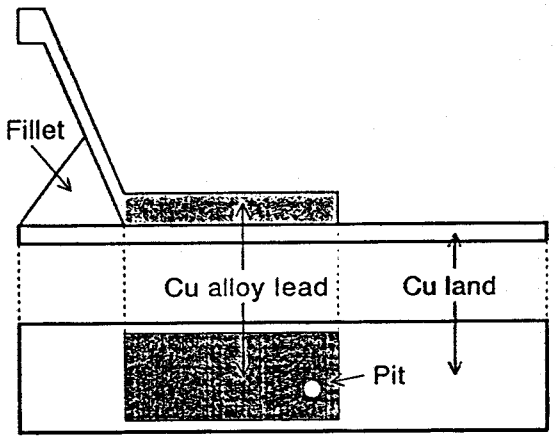


Fig.3.6 Illustration of joint with pit.

次に、２つの内部欠陥について説明する。まず、未接合欠陥を有する接合部をFig.3.7に示す。これはソルダがリードに濡れなかったためにリードとソルダが接合していないため、そのあいだに空隙が出来る欠陥である。次に、ボイドを有する接合部をFig.3.8に示す。これはリードの下で、ソルダに含まれるフラックス等の揮発性分や空気が、接合過程で逃げ遅れることにより空孔が生じる欠陥

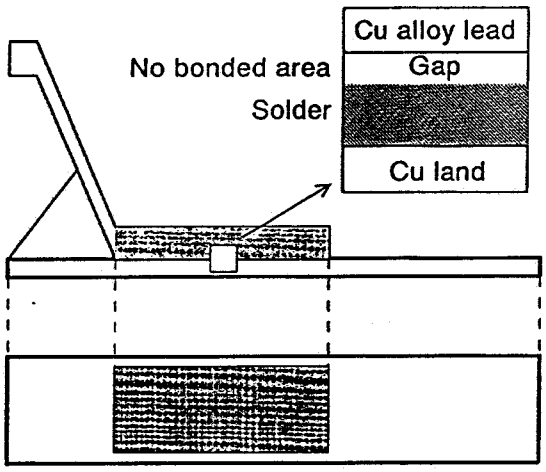


Fig.3.7 Illustration of joint with no bonded.

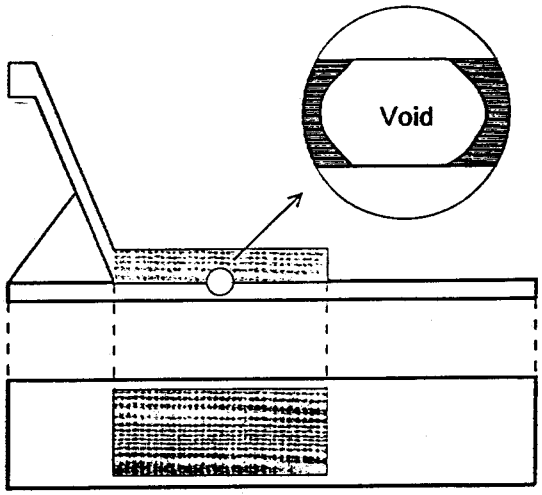


Fig.3.8 Illustration of joint with void.

である。これら２つの内部欠陥は接合部の初期強度が低下させる欠陥である。そのほか、熱応力がフィレットで亀裂を発生させた後は、接合界面に集中し、徐々にその界面を亀裂が進展していく。そのため内部欠陥が存在している場所では熱応力に対する抵抗がないため亀裂が一気に進行し接合部の疲労寿命を低下させる

欠陥でもある。以上が接合部に存在する欠陥である。

これらの欠陥のうち部品の未搭載、位置ずれ、ブリッジ、ピットについてはその欠陥が存在すればもはや不良品になる欠陥である。つまり、欠陥をその質（欠陥の種類）と量（欠陥の存在位置、大きさ）に分けたとき、その量は問題とならず、質だけが問題となる。しかし、内部欠陥とフィレットの未形成に関してはその量が問題となる。そこで、本章では、未接合とフィレットの形成状態の量の検出について検討する。ボイドに関しては欠陥検出原理上未接合と同じ様な挙動を示すため、ここでは特に取り上げないことにする。

3．3　QFPのガルウィング型リードの接合部の熱伝導解析モデルの作成

まず未接合欠陥量の検出プロセスを検討するために、前章で用いた QFP のガルウィング型リードの接合部のリードの平坦部分のみを想定したモデルを作成する。

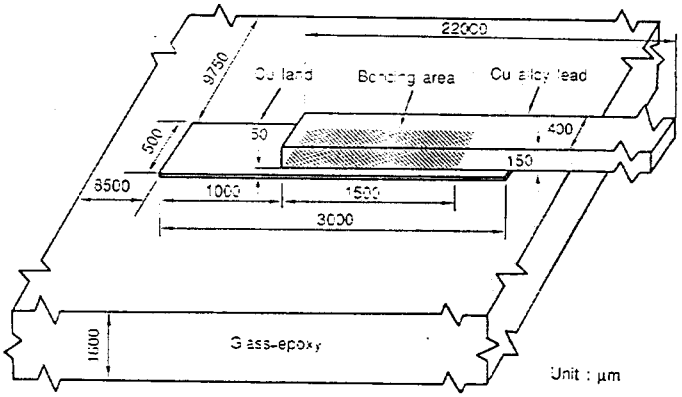


Fig.3.9 Three-dimensional thermal model of the micro joint.

Fig.3.9は作成したモデル接合部の熱伝導解析モデルである。また、本章では、リード材の違いによる欠陥検出への影響を検討するため、リード材料として銅合金(C7250)のほか42Alloy、純銅を用いる。また、接合部の構造が熱的に対称でない接合部での、接合部構造の影響を検討するため、基板に熱伝導の良く、現実に基板として用いられているアルミナを用いその上に銅合金リードを直接接合した接合部モデルを作成し使用している。Fig.3.10にその熱伝導解析モデルを示す。これは図に見るように3㎜角、厚さ635μmのアルミナ基板上に、幅400μm、厚さ150μm、長さ3.3㎜の銅合金リードを、接合長1800μmで接合したモデルである。

次に、接合部のフィレットの形成状態の検出のプロセスを検討するために、

Fig.3.11に示すようなQFPのガルウィング型リードの接合部断面を参考にして、接合部モデルとしてはFig.3.12に示す3次元接合部モデルを構成する。また、リードとランドの位置関係及びフィレットを含めたソルダ部形状寸法はFig.3.13に示すような3つのパラメータ（①ヒール部の

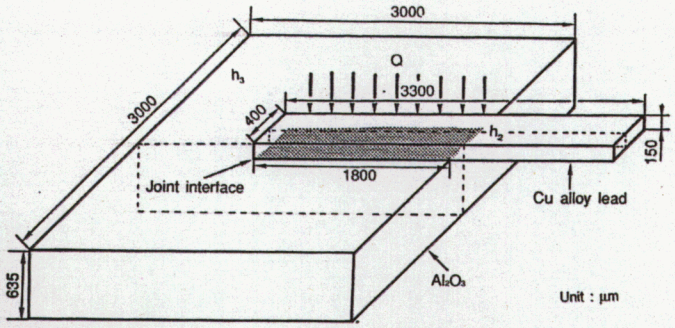


Fig.3.10 Three-dimensional thermal model of the micro joint with thermally unsymetrical structure.

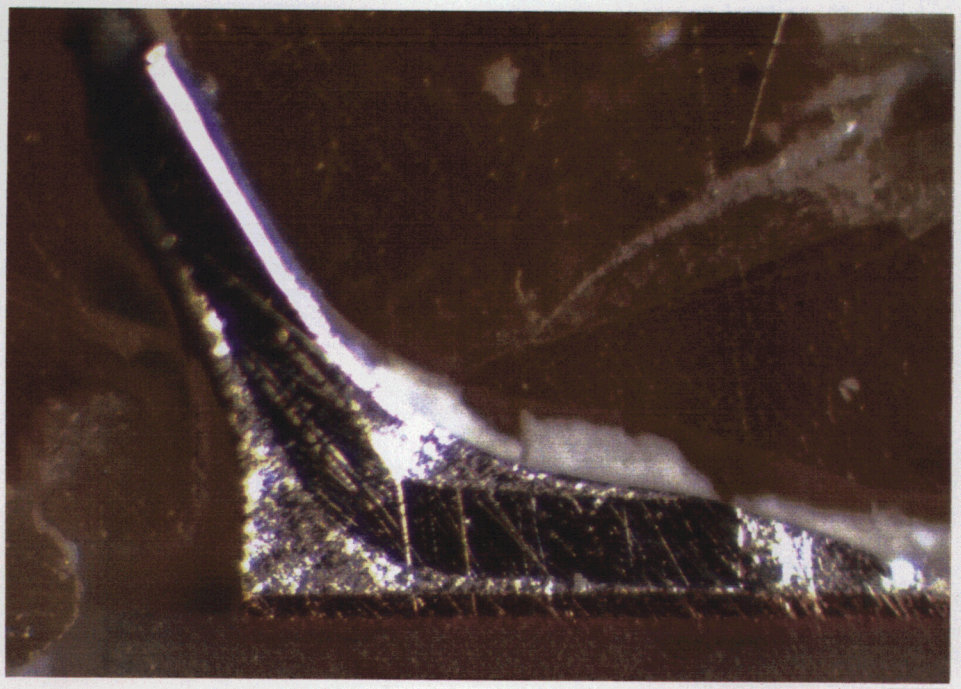


Fig.3.11 Appearance of QFP gull wing type joint at the cross section.

フィレットの形成量を表すF_1、②リードとランド間の平均ソルダ厚さL_s及び③リード平坦部とランドのなす角度θ_1）で表すことができる。ただし、リードの平坦部分の長さは1000μm、リードの斜めの部分の長さは1600μmで、ランドとなす角度は$\pi/4(45°)$及び頂上部は1000μmである。また、結果をまとめるに当たり、リード先端近傍の表面温度をT_1、中央部近傍の表面温度をT_2及びリードの折れ

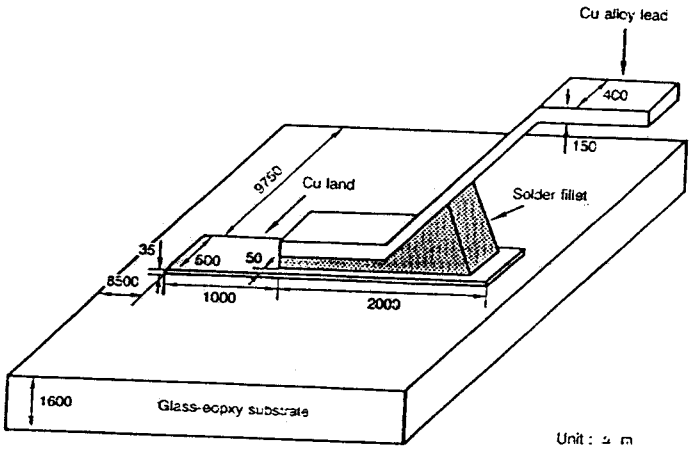


Fig.3.12 Three-dimensional model of joint of gull wing type.

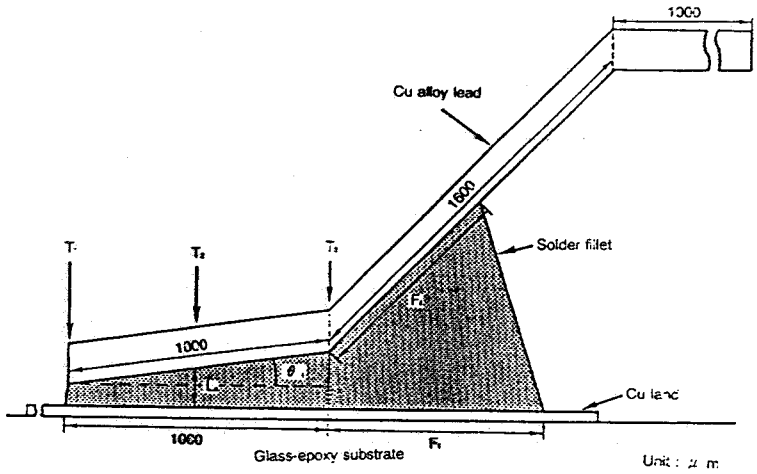


Fig.3.13 Fillet formation parameters and observation points of the surface temperature.

曲がり部近傍の表面温度をT$_s$、環境温度T$_{env.}$とする。

また、これら熱伝導解析モデルに使用した材料定数はTable 3.2に示している。ここでは、ガラスエポキシは均質材として扱っている。なお、温度分布の数値解析などには前章と同様汎用有限要素法プログラムのANSYSを用い、コンピュータとしては、Sun SPARC station 2を使用し、積分タイムステップは約11nsで行っている。

Table 3.2 Physical property of the materials.

Property / Material	Thermal conductivity W/(mK)	Specific heat J/(Kg K)	Density Kg/m^3
Pure Cu	398.00	386.00	8880
Cu-Ni-Sn Alloy (C7250)	46.00	376.56	8900
42 Alloy	15.00	502.08	8250
Pure Sn	64.00	235.00	7300
Pure In	82.00	243.00	7310
Solder (Sn/Pb:63/37)	51.00	190.00	8400
Glass-epoxy	0.63	1500.00	1770
Al_2O_3	36.00	779.00	3890

3．4　接合部の熱伝導解析モデルにおける境界条件の決定とその妥当性

前章で作成したモデルと同様に境界条件は以下のように設定している。1）接合部表面には実験で使用するレーザに相当する入熱分布を与え、また2）各界面での熱の流れを熱伝達係数を考慮することで扱っている。レーザによるリード表面への入熱はレーザ出力Qと吸収率ηの積（η・Q）で与えられる。

接合部に存在する5カ所の界面での熱伝達係数を以下のように表す。すなわち1）リードとランド間の熱伝達係数をh_{l-l}、2）リード表面、3）ランド表面および4）基板表面と空気との熱伝達係数を各々$h_{a(cu)}$、$h_{a(cu)}$、$h_{a(su)}$、5）基板とランドの界面での熱伝達係数をh_{l-s}としている。さらにこの熱伝導解析モデルにおいて、未接合、ボイドなど接合欠陥は熱流を阻害するものであるため、接合界面に熱伝達の悪い領域をつくることにより表現している。この欠陥の場所の熱伝達係数をh_dとしている。

実験では、レーザ照射により接合部表面を加熱しているため、まず温度上昇に影響を及ぼす因子として、観測対象物体の表面状態によるレーザ吸収率を熱量計を使用して測定する。その結果、Fig.3.14に示すように熱吸収率は、裸純銅材：

12%, Snめっき純銅材：50%, In/Snめっき純銅材：37%ソルダで覆った純銅材：32%である。なお、この場合、めっき条件およびめっき後の大気中での放置時間などにより熱吸収率が多少変化する。

次に、空気とリードが接触している界面のみが存在する最も簡単なモデルにより、銅合金リード・空気間の熱伝達係数のみが未知なモデルをつくりその値を決定する。その結果Fig.3.15に示すように$h_{a(cu)}$としては$1x10^2 W/(m^2K)$が妥当な値であるとする。

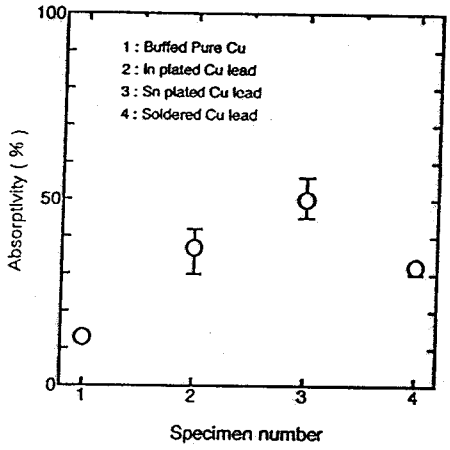


Fig.3.14 Absorptivity of materials.

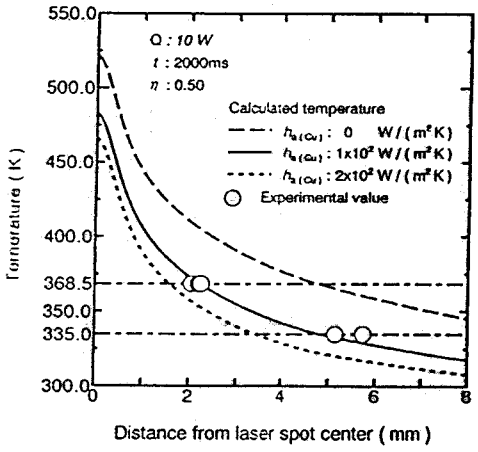


Fig.3.15 Comparison of calculated value with experimental value at h_a.

次に、ガラスエポキシ基板上の銅ランドを対象として取り上げる。これは、先のモデルに銅ランド・ガラスエポキシ基板間の界面が加わり熱伝達係数が一つだけ未知なモデルが作成出来るからである。その結果は、Fig.3.16に示している。図に見るように$h_{l-s}=1x10^5 W/(m^2K)$がほぼ妥当な値である。

また、欠陥部分での界面での熱伝達係数 h_d は、熱流を遮断する存在として $0W/(m^2K)$を用いる。ただし、欠陥の部分

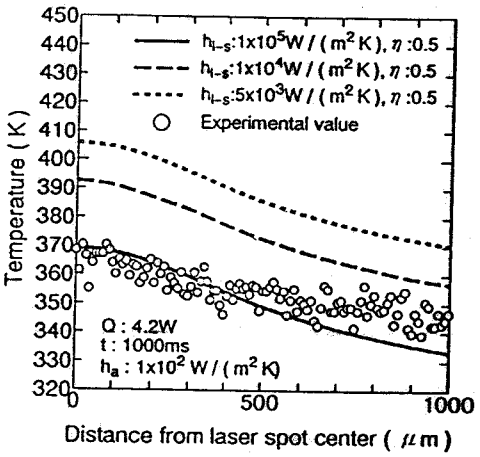


Fig.3.16 Comparison of calculated value with experimental value at h_{l-s}.

を厚さが数μm程度の空隙で向かい合った金属面として表すと、$1.3\times10^{3}W/(m^{2}K)$程度になる[61]。しかし、これは2.5.1項で示したようにほとんど欠陥として取り扱える熱伝達係数の範囲であるので問題がない。

最後に、リード・ランド間の熱伝達係数h_{1-1}はその接合形態が金属接合であるため良好な接合部では連続体として考えられるため、界面での熱流は影響を受けない。

なお、実際に接合部欠陥の検出を考えると、シミュレーション温度域が293K～約400Kであり試料から外界への熱の輻射は、シミュレーション温度の誤差としては試料全体が400Kとしても$1.4\times10^{-2}K$程度と接合部の温度を少数第2位で四捨五入しているためこの程度の値では無視できるので境界条件としては与えていない。

3．5　接合部の熱伝導解析モデルの妥当性の実験的検証

接合部の熱伝導解析モデルの妥当性を検証するために前章と同じようにして、実験とシミュレーションによる温度分布解析を行う。実験条件、対象物は前章と同じである。その結果がFig.3.17である。この図が示すように、数値解析の温度分布と実験値をもとに5次多項式の最小自乗法により求めた温度分布曲線の誤差は5%以下であることがわかる。このことより接合部の温度分布シミュレーションの精度は5%以内の誤差で信用できる。なお、参考のためにInの吸収率を、その実験値の最大、最小である$\eta=0.30$、0.42に変更した場合の温度分布をあわせて示している。

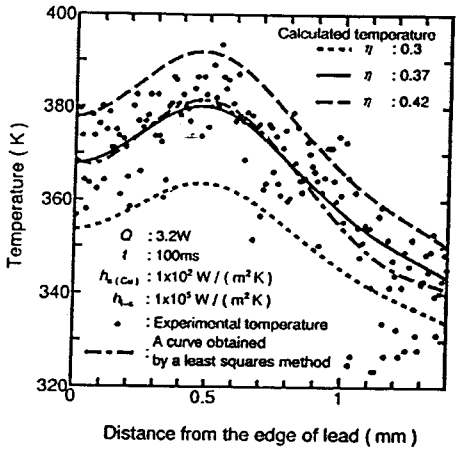


Fig.3.17　Comparison of calculated value with experimental value at joint model.

3．6　ガルウィング型リードの接合部の欠陥検出とその条件の検討

3．6．1　接合部の欠陥検出条件の検討

レーザ照射型熱画像法による欠陥検出プロセスにおける欠陥検出条件について検討する。ここに欠陥検出条件のパラメータとしては、１）レーザ光の出力、２）レーザ照射時間、３）熱画像取得時間がある。このうちレーザ照射時間と熱画像取得時間は同じ時間を採用しても問題がない。そこで、ここでは、熱画像取得時間（ｔ）、レーザ光の焦点での出力（Ｑ）について検討することにする。

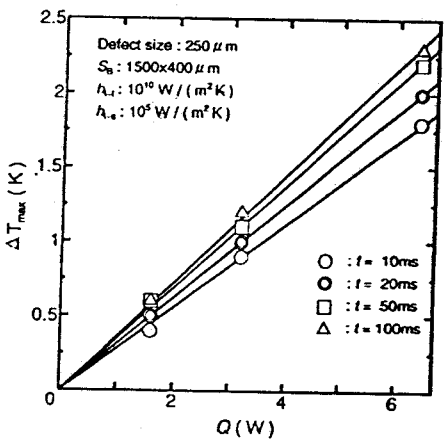


Fig.3.18　Relationship between Q and Δ T_{max} under several laser irradiation time.

まず内部欠陥の検出条件について検討する。前章で欠陥検出精度を決定する因子の一つがΔＴ$_{max}$（Ｔ$_{max}$-Ｔ$_{c}$）であることを述べたが、欠陥寸法及び出力Ｑの変化でΔＴ$_{max}$がどの様に変化するのかを接合界面に250μｍ角の欠陥を作成したモデルを用いて調べたのがFig.3.18である。この図に示すように、ΔＴ$_{max}$は熱画像の取得時間（10～100ms）に関わらず出力Ｑに比例する。従って欠陥検出条件としては検出時間が短く、ΔＴ$_{max}$を大きくするために、Ｑを大きくした方がよいが、現実には出力Ｑを大きくするとFig.3.19に示すように、Ｔ$_{(n)max}$は出力Ｑとともに大きくなり、Ｔ$_{(n)max}$が大きくなると接合部の品質を劣化させたり、検出対象部の機能低下、破損する可能性がでてくる。また、逆に出力Ｑを小さくする事によりＴ$_{(n)max}$が小さくなる。そのため、一般に熱画像による温度計測精度が悪くなる。そのために出力Ｑの大きさはある範囲に制限される。

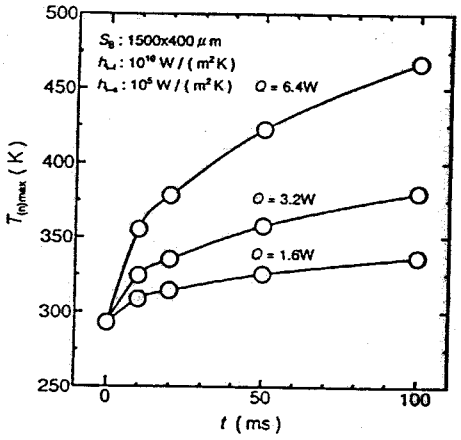


Fig.3.19　Relationship between Q and T_{max} under several laser irradiation time at model for detecting no bonded.

また、熱画像取得時間ｔに対しても熱画像撮像装置の撮像速度（33ms/frame）、

温度計測の精度、熱画像の安定性等から余り短くできない。

また、接合部の温度上昇はFig.3.19に示すように10msまでに大きく、その後ゆっくりと上昇していることより、熱画像の取得時間の誤差を考えると、tは20ms以降の方が良いと考えられる。

これらのことを考慮して欠陥検出条件を考えた時、赤外線撮像装置の性能、対象物の耐熱性よりリード表面最高温度$T_{(n)max}$としては353K（80℃）程度を（本実験の場合、Qにして3.2W程度）、また熱画像取得時間tとしてはレーザ照射開始後100msが適切と考えられる。

フィレットの形成状態の検出条件は、その検出プロセスが内部欠陥の検出とは異なるため同様な条件で検出するのが良いとは限らない。そこでレーザ照射型熱画像法によるフィレットの形成状態の検出プロセスにおける欠陥検出条件について検討する。しかし、フィレットの形成状態の検出条件検討における内部欠陥の検出条件での検討に用いたΔT_{max}に相当するものがない。そこで、ここではレーザ出力QとT_{max}の関係のみを調べる。その結果がFig.3.20である。レーザ出力、照射時間は内部欠陥の検出と同時にすることを考慮してフィレット検出用のモデルではQ:3.7W、t:100msを用いる。このレーザ照射時間、出力については、検出プロセスの検討後より詳細な検討を行うことにする。

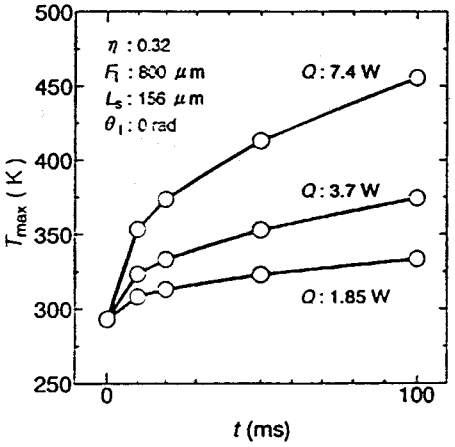


Fig.3.20 Relationship between Q and T_{max} under several laser irradiation time at model for detecting fillet formation.

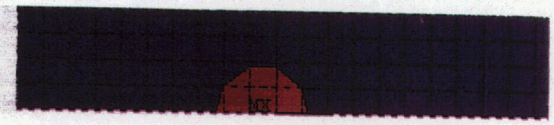
3．6．2　未接合欠陥の位置とサイズの検出の検討

まず、内部欠陥の欠陥情報をリード表面での温度分布の変化から抽出するために、前章での結果から表面温度分布の時間的変化および欠陥の大きさとしきい値（T_c）を越える温度領域の大きさとの関係を検討する。なお、ここで、しきい値（T_c）とは欠陥の無い接合部表面における最高温度$T_{(n)max}$である。接合界面で

の欠陥の大きさとしては50,150,250,350,400μm角を想定したモデルを用いてシミュレーションを行う。



(a) Laser irradiation time : 10ms (T_c:324.3K)

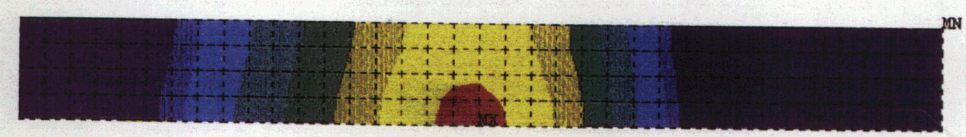


(b) Laser irradiation time : 100ms (T_c:380.2K)

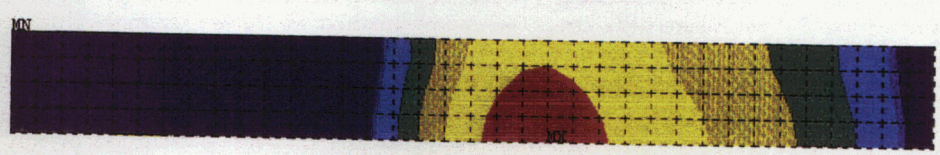
Fig.3.21 Temperature distribution at the surface of the micro joint. (Q:3.2W,defect size:250 μ mx250 μ m)

レーザ照射後10msおよび100msで250μm角の欠陥が存在する接合部の表面温度でしきい値(T_c)を越える温度領域を調べたのがFig.3.21(a)(b)である。図からも分かるように検出時間(レーザ照射時より撮像時までの経過時間)が10msでも100msでも欠陥の接合部表面温度分布におけるしきい値(T_c)(時間により変化する)を越える温度領域の大きさとしての直径は10msで150μm、100msで175μmでほぼ一定であり、またその位置も時間的に変化していない。このことは、上記の検査対象の構造、材料を前提にした場合、ある時間範囲内では欠陥検出時間に関わらず欠陥の位置が求められることを示している。

しかし、接合部の熱的構造が対称でない場合、その影響が欠陥の検出位置に影響を与える可能性がある。そこで接合部の構造がどれだけの影響を与えるかを接合界面の中央に400μm角の欠陥を作成した熱伝導解析モデルを用いて検討する。その結果がFig.3.22(a)(b)である。この図にみるように接合部の構造の影響を受



(a) Laser irradiation time : 10ms (T_c:354.4K)



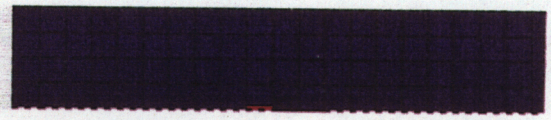
(b) Laser irradiation time : 100ms (T_c:432.7K)

Fig.3.22 Temperature distribution at the surface of the micro joint at joint with thermally unsymetrical structure. (Q:8.4W/m^2,defect size:400 μ mx400 μ m)

けて、温度分布の形がレーザ照射後時間経過とともに場所的に移動（この場合で約400μm）する。このため接合界面での欠陥の位置と表面温度分布より決定される欠陥位置は必ずしも一致しない。しかし、高温領域の大きさについては、10msで975μm、100msで1000μmでほぼ一定である。そこで接合部の構造が熱的に対称ではない接合部に対する欠陥検出は欠陥の位置の同定において、このことを考慮して行わなければならない。

またこの高温領域と欠陥のサイズとの関係を調べるために欠陥の寸法を50-400μm角に変えたモデルを用いて温度分布解析を行い、しきい値（T_c）を越える温度領域を調べたのがFig.3.23(a)(b)(c)(d)(e)である。この図に示すとおり50μm角の欠陥でもその影響は接合部表面に現れている。さらに、欠陥の寸法が大きくなるに従い、しきい値（T_c）を越える温度領域が大きくなっており、その領域と欠陥の寸法の関係はFig.3.24に示してある通りである。なお、ここで、接合面積S_Bは図中に示す値を採用している。

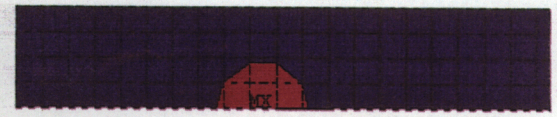
以上のことはしきい値（T_c）を越える温度領域の大きさにより50μm以上の欠陥のサイズが決定でき、また、欠陥寸法の増加にともないしきい値（T_c）をこえる温度領域の寸法はほぼ比例的に大きくなることを示している。ただし、欠陥のサイズが大き



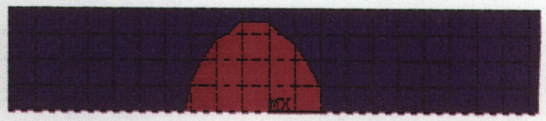
(a) Defect size: 50 μ mx50 μ m



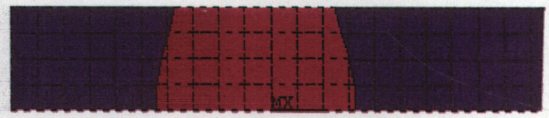
(b) Defect size:150 μ mx150 μ m



(c) Defect size:250 μ mx250 μ m



(d) Defect size:350 μ mx350 μ m



(e) Defect size:400 μ mx400 μ m

Fig.3.23 Influence of defect size on temperature distribution at the surface. (Q:3.2W,laser irradiation time:100ms,T_c:380.2K)

くなり、リード幅に近づくに従い、しきい値（T_c）をこえる温度領域の寸法が急激に大きくなっているのは欠陥による影響がリードの端で熱が反射しているためであると思われる。

このとき、Fig.3.25 に示すように ΔT_{max} は欠陥寸法が大きくなるに従い大きくなっている。また、Fig.3.26 に示すように ΔT_{max} は時間的に10msと短時間で急速に上昇し、その後上昇速度が急減する傾向にある。このことより前節で求めた検出条件は妥当であったと考えられる。

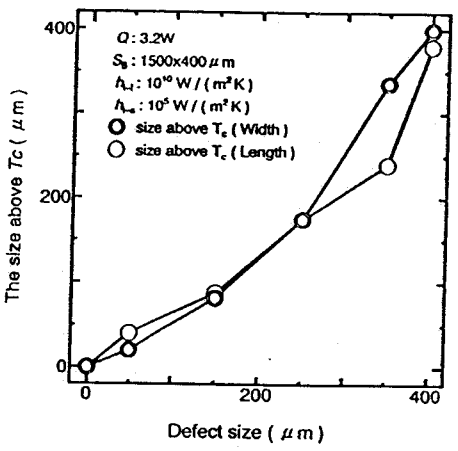


Fig.3.24 Relationship between defect size and the surface temperature region above T_c at the joints.

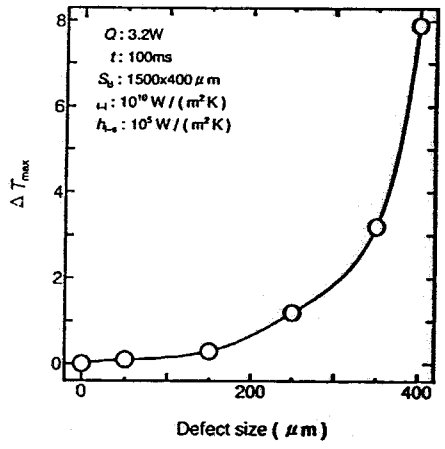


Fig.3.25 Relationship between defect size and ΔT_{max}.

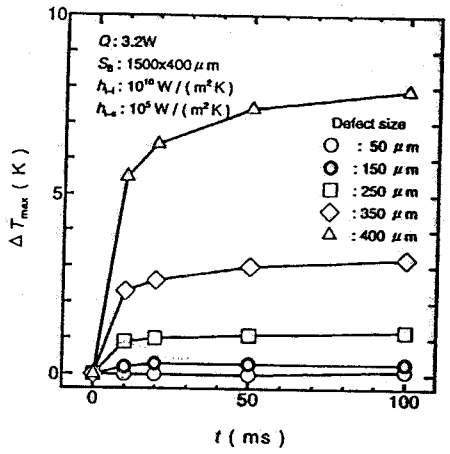


Fig.3.26 Relationship between t and ΔT_{max} under various defect size.

3．6．3　ヒール部のフィレットの量とリード－ランド間のソルダ量の検出

本項では、QFPのガルウィング型リードの接合部のヒール部に存在するフィレット量を検出するプロセスを検討する。

まず、フィレットの量により接合部の表面温度分布がどのように変化するのかを調べるために、リードとランド間の平均ソルダ厚さ L_s を7μm、リード平坦部

とランドのなす角度θ_1を0rad、フィレット長さF_1を50μm～800μmまで変化させた熱伝導解析モデルをシミュレーションにより解析した結果がFig.3.27である。この図から分かるようにフィレット長さF_1による表面温度分布の影響はリード全体に及んでいるものの、フィレット部の熱容量の差によりリードの折れ曲がり部においてその影響がもっともはっきり出ていることが見られる。そこでリードの折れ曲がり部の表面温度よりフィレット長さF_1が検出できる可能性がある。しかし、現実の接合部ではリードとランド間の平均ソルダ厚さ L_sやリード平坦部とランドのなす角度θ_1が変化しており、この影響を同時に検討する必要がある。

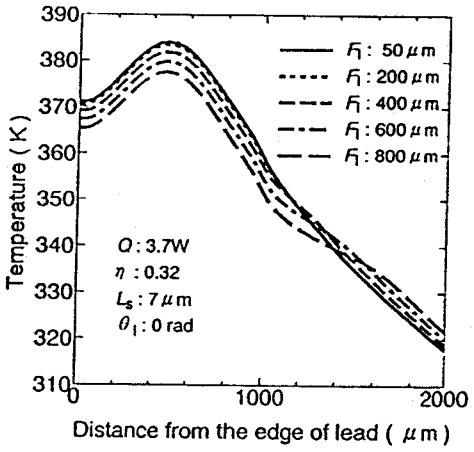


Fig.3.27 Temperature distribution change by F_1.

そこで、リードとランド間の平均ソルダ厚さL_sが変化した場合について検討する。リードとランド間の平均ソルダ厚さL_sを7μm～156μmまで変化させたモデルをシミュレーションにより解析する。その結果がFig.3.28である。この図に示すように同じフィレット長さF_1でもリードとランド間の平均ソルダ厚さL_sによりリードの折れ曲がり部の温度が変化する。なぜなら、リードとランド間の平均ソルダ厚さL_sを変化させた場合は、フィレット長さF_1が同じでもソルダの全体の熱容量が変化する。そのためリードとランド間の平均ソルダ厚さL_sの影響とフィレット長さF_1の影響を分離する必要が生じる。そこで、それぞれのパラメータの接合部の表面温度分布への影響を考える。

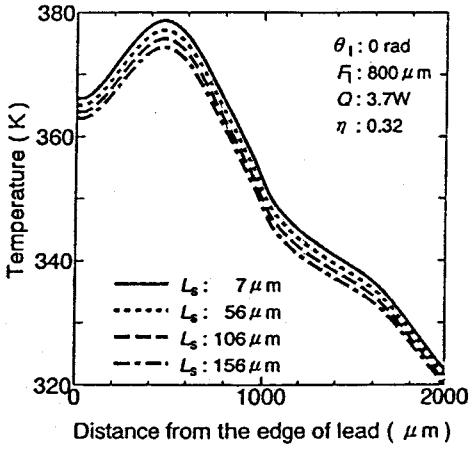


Fig.3.28 Temperature distribution change by L_s.

リードとランド間の平均ソルダ厚さL_sは接合部全体に均一に影響を与えている。一方フィレット長さF_1の影

響はリードの折れ曲がり部で大きくそこから離れるに従って小さくなる。そこで、リードの中央の表面温度T_2とリードの折れ曲がり部の表面温度T_3の差ΔT_{2-3}をとることにより、フィレット長さF_1の影響のみが調べられると考えられる。その結果をFig.3.29に示す。この図に示すように、ΔT_{2-3}とフィレット長さF_1の関係が一意になっていることから、ΔT_{2-3}をとることによりリードとランド間の平均ソルダ厚さL_sが変化してもフィレット長さF_1が認識できることが分かる。

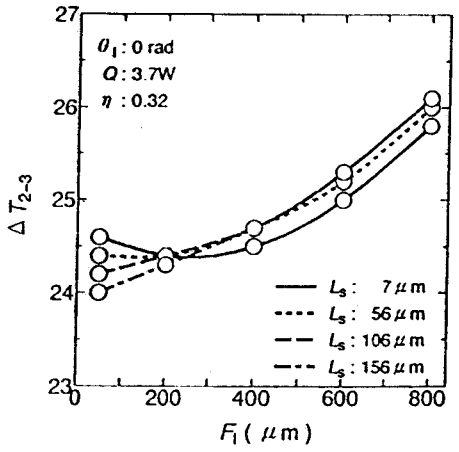


Fig.3.29 Relationship between ΔT_{2-3} and F_1.

次に、リード傾斜角θ_1が変化した場合を検討する。そこでモデルのリード平坦部とランドのなす角度θ_1を0rad(0度)、$\pi/36$rad(5度)、$\pi/18$rad(10度)に変化させたモデルをシミュレーションにより温度分布を解析する。その結果をFig.3.30に示す。この図に示すようにΔT_{2-3}は、同じフィレット長さF_1でも、リード平坦部とランドのなす角度θ_1により異なる。しかし、リード平坦部とランドのなす角度θ_1が同じであれば、ΔT_{2-3}とフィレット長さF_1の関係は一意である。このことはリード平坦部とランドのなす角度θ_1が既知であればΔT_{2-3}でフィレット長さF_1を検出できるが、リード平坦部とランドのなす角度θ_1が分からないとフィレット長さF_1の検出が不可能であることを示している。

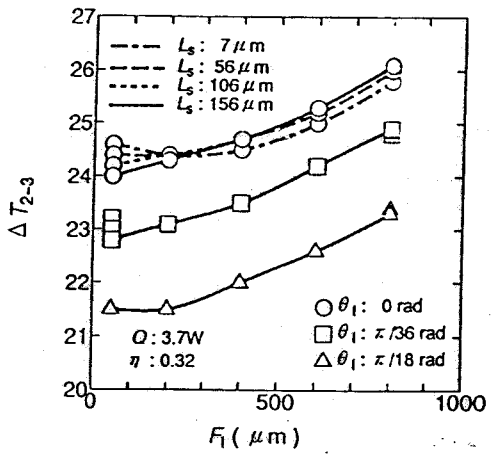


Fig.3.30 Relationship between ΔT_{2-3} and F_1 under several θ_1.

そこでリード平坦部とランドのなす角度θ_1の接合部表面温度分布の変化への影響を検討する。フィレット長さF_1を800μm、リードとランド間の平均ソルダ厚さL_sを156μm、リード平坦部とランドのなす角度θ_1を0rad(0度)から$\pi/18$rad

(10度)まで変化させたモデルをシミュレーションにより解析する。その結果がFig.3.31である。この図に示すように同じフィレット長さF₁、リードとランド間の平均ソルダ厚さL₁でもリード平坦部とランドのなす角度θ₁によりリードの折れ曲がり部の温度が変化する。なぜなら、リード平坦部とランドのなす角度θ₁を変化させた場合、同じフィレット長さF₁でもフィレット部分の体積増加に伴い熱容量が増加する。また、接合部でも、リードの先端と折れ曲がり部ではリードとランド間のソルダの厚さが変化する。そこで、リードとランド間の平均ソルダ厚さL₁、フィレット長さF₁の影響を小さくして、リード平坦部とランドのなす角度θ₁の影響がもっとも大きいところを考える。そこで、まずフィレット長さF₁の影響が小さく、リードとランド間の平均ソルダ厚さL₁の影響を小さくできるのは、リード中心の表面温度T₂と、リード先端の表面温度T₁の差 ΔT₁₋₂である。しかし、ΔT₁₋₂にはまだ全体の熱容量の違いの影響が残っている。そこで、この ΔT₁₋₂を接合部表面中心の温度上昇分 T₂-T_env. で正規化した値を用いると Fig.3.32の様になり、ΔT₁₋₂ はリード平坦部とランドのなす角度 θ₁の値に依存する。従ってリード平坦部とランドのなす角度 θ₁が検出できることが分かる。つまり、(ΔT₁₋₂)/(T₂-T_env.)の値によりリード平坦部とランドのなす角度θ₁を検出し、それによりΔT₂₋₃のしきい値を決定することにより、フィレット長さF₁を決定できる。

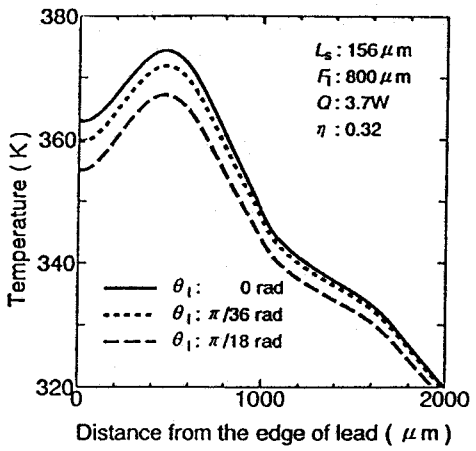


Fig.3.31 Temperature distribution change by θ_l.

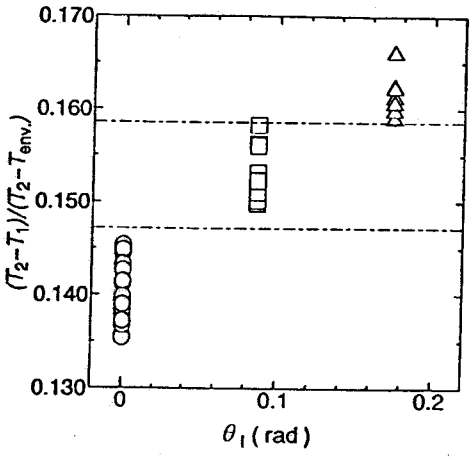


Fig.3.32 Relationship between $\Delta T_{1\text{-}2}/(T_2-T_{env.})$ and θ_l.

また、ここで決定されたフィレット長さF_1とリード平坦部とランドのなす角度θ_1からリードとランド間の平均ソルダ厚さL_sを逆に推定できると考えられる。そこでこれまでの結果より同じリード平坦部とランドのなす角度θ_1でL_sとT_2の関係を調べたのがFig.3.33である。この図に示すようにフィレット長さF_1とリード平坦部とランドのなす角度θ_1が一定の場合、T_2からリードとランド間の平均ソルダ厚さL_sの関係は一意である。つまり、フィレット長さF_1とリード平坦部とランドのなす角度θ_1が既知の場合、T_2からリードとランド間の平均ソルダ厚さL_sを決定できる。この関係は他のリード平坦部とランドのなす角度θ_1についても別途確認されている。

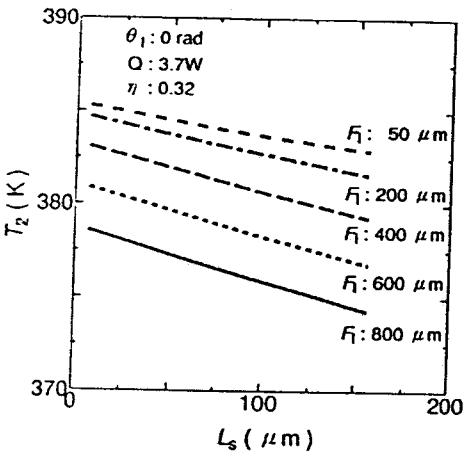


Fig.3.33 Relationship between L_s and T_2 under various F_1 (θ_1=0rad).

次に、ヒール部のフィレットの形成度合の検出条件を検討するために、内部欠陥でのΔT_{max}に相当するものを調べる。これまでの結果より、フィレットの形成度合はΔT_{2-3}の大きさで判断しうることが明らかになっている。このことより、フィレットの形成度合の検出精度はフィレットの形成の良いとき（フィレット長さF_1が800μm）と悪いとき（フィレット長さF_1が50μm）のΔT_{2-3}の大きさの差に支配されることが分かる。この大きさをΔT_fとする。そこで内部欠陥の時と同じように出力Qの変化でΔT_fがどの様に変化するのかをリード平坦部とランドのなす角度θ_1が0rad、リードとランド間の平均ソルダ厚さL_sが156μm、フィレット長さF_1がフィレットがほとんど形成されていない50μmと正常に形成されている800μmのモデルを用いて調べたのがFig.3.34である。この図に示すように、ΔT_fは熱画像の取得時間に関わらず出力Qに比例する。この関係は他のリード平坦部とランドのなす角度θ_1、リードとランド間の平均ソルダ厚さL_sでも別途確認されている。また、時間によるΔT_fの変化を示したのがFig.3.35である。この図に示すようにΔT_fはtが20msから50msで最大となり、その後は減少している。従って欠陥検出条件としては検出時間が20ms～100ms以降で、Qを

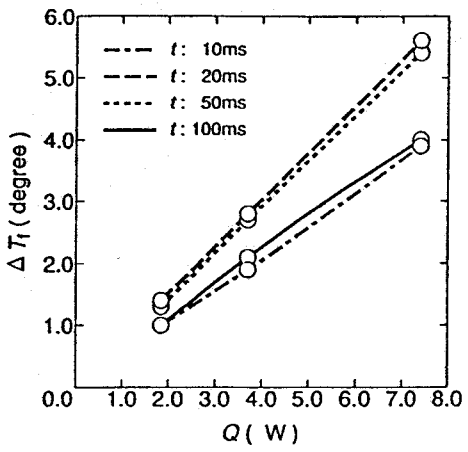


Fig.3.34 Relationship between Q and Δ T_f under several t.

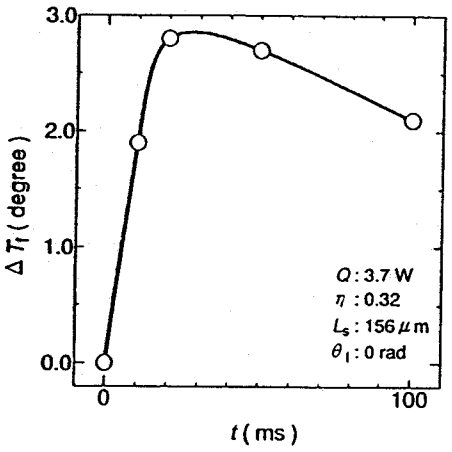


Fig.3.35 Relationship between t and Δ T_f.

大きくした方がよいことになる。このことより3.6.1項で設定した内部欠陥の検出条件と同じ条件が妥当であることが検証される。

3．7　ガルウィング型リードの接合部の欠陥検出プロセス

本節ではこれまでの結果から欠陥検出のプロセスをどのように行うべきかについて検討する。まず、内部欠陥についてはボイド、未接合とも前節で検討したように欠陥がない接合部での最高温度をしきい値としてそれを超える温度領域の面積と位置によって検出できる。フィレットの形成度合の検出は接合部のリードの先端部近傍T_1、中央部近傍T_2、折れ曲がり部近傍T_3の3カ所の温度を計測し、その値を用いて$(T_2-T_1)/(T_2-T_{env.})$を計算し、その値をもとにリードとランドの傾きθ_1を決定し、一方、$\Delta T_{2-3}(T_2-T_3)$を計算し、先ほど決定したリード平坦部とランドのなす角度θ_1から決めたしきい値を用いてフィレットの形成度合F_1を決定する。

ここで問題となるのが、内部欠陥検出のしきい値である欠陥のない接合部の最高温度が、リード平坦部とランドのなす角度θ_1、リードとランド間の平均ソルダ厚さL_s、フィレット長さF_1により変化することである。そこで、Fig.3.36に示すようにまず接合部の構造を決めるリード平坦部とランドのなす角度θ_1、リードとランド間の平均ソルダ厚さL_s、フィレット長さF_1を決定し、その値をもと

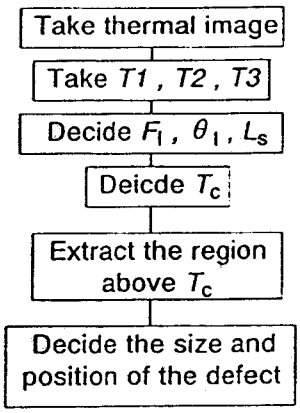


Fig.3.36 Flow chart of defect detection process.

に内部欠陥用のしきい値(T_c)を決定するというプロセスを用いればよいことが分かる。

3．8 欠陥検出限界の理論的検討

次に本節では欠陥の検出限界寸法を明らかにするために内部欠陥の検出限界を取り上げて検討を行う。接合部での熱伝導を第1近似として線形であると考えると、欠陥のある接合部での温度分布は、欠陥の無い接合部の温度分布に、欠陥の界面よりの熱反射による温度上昇を重ね合わせたもので表現できる。そのため、欠陥検出限界寸法を決定するパラメータとして熱源の熱拡散の大小を決定するパラメータであるリードの材質、熱源からの距離を決めるリード厚d_1、リードから熱を奪うパラメータとして接合界面での熱伝達係数h_{1-1}がある。これらのパラメータは接合部の構造が異なることにより変化する。また、これらのパラメータが変化すると、たとえ入熱（$\eta \cdot Q$）が一定でも$T_{(n)max}$が変化する。そこで、ここでは、tが100ms、$T_{(n)max}$が一定となる条件下でリード材質、リード厚d_1、熱伝達係数h_{1-1}の影響を検討する。

まず、リードの材質による欠陥検出限界寸法への影響を調べるためにリード材質のΔT_{max}への影響を検討する。ここで、リードの材質としては、42Alloy、純銅、銅合金を用いる。なお、これらの材質を採用したのは実用上リードとして採用され、かつその温度拡散係数が、それぞれ3.62×10^{-6}, 1.17×10^{-4}, $1.37\times^{-5}m^2/s$

と大きく異なっているためである。

これらのリードを用い接合部にレーザを照射した場合のΔT$_{max}$の時間的変化をシミュレーションによる温度分布解析により解析した結果をFig.3.37に示す。この図に示すようにΔT$_{max}$は42Alloy、銅合金、純銅と温度拡散係数が大きくなるほど小さくなる。つまり、温度拡散係数が小さいほど欠陥による温度分布の変化を拡散させにくいためΔT$_{max}$が大きくなり、欠陥の検出限界寸法がより小さくなることを示している。

次に、リード厚d$_1$の欠陥検出限界寸法への影響を調べるためにリード厚d$_1$のΔT$_{max}$への影響を検討する。なおリード厚として50,100,150μmを用いる。これらのリード厚d$_1$を変化した場合のシミュレーションによる温度分布解析の結果をFig.3.38に示す。この図に示すようにリード厚d$_1$が薄くなればなるほどΔT$_{max}$が大きくなっていくことが理解される。これは欠陥から観察面の距離が小さくなるにつれて欠陥の影響がならされにくくなることにより出易くなり、欠陥の検出限界寸法がより小さくなることを示している。

次に、接合部界面の熱伝達係数h$_{1-1}$

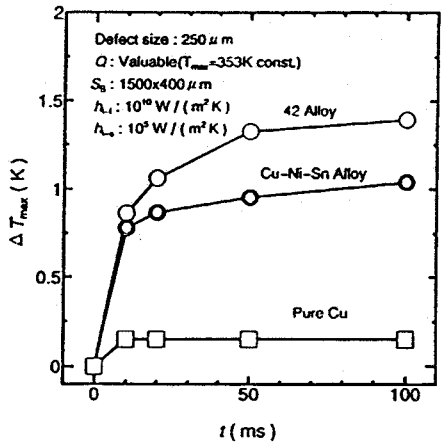


Fig.3.37 Behavior of △T$_{max}$ under several lead materials with different heat difusivity. (Defect size: 250 μ mx250 μ m,t:100ms)

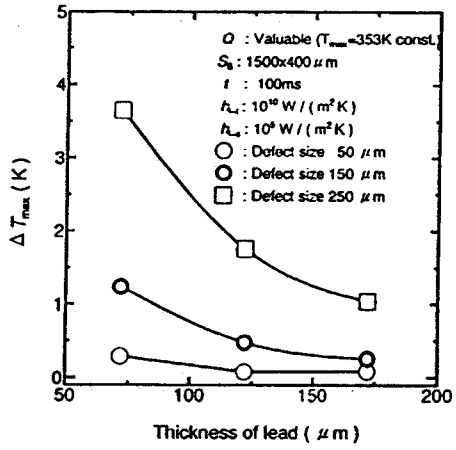


Fig.3.38 Relation between △T$_{max}$ and lead thickness under several defect size. (Defect size:250 μ mx250 μ m, t:100ms)

の欠陥検出限界寸法への影響を調べるために接合部界面の熱伝達係数h_{i-l}のΔT_{max}への影響を検討する。なお、接合部界面の熱伝達係数h_{i-l}としては$1x10^{-2}W/(m^2K)$から$1x10^{10}W/(m^2K)$までを用いる。これらのモデルのシミュレーションにより解析した結果をFig.3.39に示す。図に示すように接合部界面の熱伝達係数h_{i-l}が小さくなるにつれてΔT_{max}は初め一定であるが、h_{i-l}が$1x10^{7}W/(m^2K)$以下になると、ΔT_{max}が大きくなっていきh_{i-l}が$1x10^{4}W/(m^2K)$付近でΔT_{max}が最大となり、それを越えると、再び小さくなり、h_{i-l}が$1x10^{2}W/(m^2K)$になると、ΔT_{max}がほぼ0になる。これは、熱伝達係数が大きいときは、ランドに熱を奪われすぎるため、欠陥による温度分布の変化が拡散され、またh_{i-l}が小さいと、h_dとの差がなくなり、欠陥による温度変化は小さくなってしまうからであると考えられる。

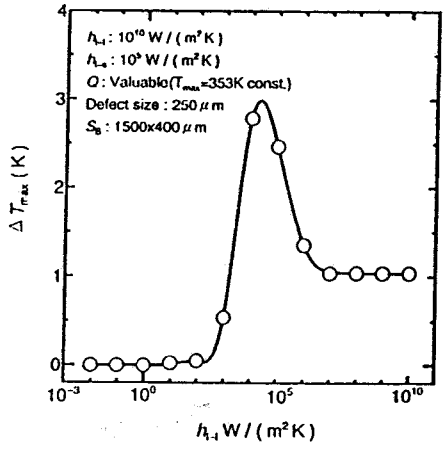


Fig.3.39 Influence of h_{i-l} on ΔT_{max}. (Defect size:250 μ mx250 μ m, t:100ms)

3．9　結論

レーザ照射型熱画像によるマイクロ接合部の欠陥検出法において、QFPのガルウィング型接合部に存在する欠陥を分類し、その内の未接合欠陥、及びフィレットの未形成についてその検出プロセスを検討した。

未接合欠陥については、ガラスエポキシ基板上の銅ランドに銅合金リード、純銅リード及び42Alloyリードを接合したマイクロ接合部モデル、QFPのガルウィング型接合部でのヒール部のフィレットの形成度合の検出には、ガラスエポキシ基板上の銅ランドに銅合金リードを接合したマイクロ接合部のフィレット量や、リードとランド間のソルダ厚さ、リード平坦部とランドの傾きを変化させた熱伝導解析モデルにレーザを短時間照射した場合の接合部内部温度分布および表面温度分布を熱伝導解析モデルを用いて数値解析し、レーザ照射型熱画像法による各種欠

陥の適正検出条件の考え方および検出可能な欠陥寸法とリード材、リード寸法、接合界面での熱伝達係数との関係について理論的に検討した。その主な結果は以下の通りである。

1） 欠陥検出の為の適正条件は、接合部の温度上昇速度、ΔT_{max}と時間や入熱との関係、赤外線検出素子の特性と接合部の耐熱性を勘案したうえでΔT_{max}を最大にする条件にすることが必要である。本実験ではリード表面最高温度としては353K（80℃）程度を、また熱画像の撮像時間としてはレーザ照射開始後100msが適切な条件となる。

2） 未接合またはボイドのような内部欠陥寸法、位置はリードおよび基板などの材質、形状寸法が与えられた場合、欠陥が存在する場合のリード表面での温度分布を欠陥がない場合の最高温度で2値化された温度領域の寸法、位置で検出しうる。また、内部欠陥が存在することによる表面温度上昇であるΔT_{max}は欠陥寸法が大きくなるとともに上昇する傾向にある。

3） リードの表面温度T_1、T_2、T_3からリードとランドの傾きをリード中央近傍の温度T_2とリード先端近傍の温度T_1の差をリード中央近傍の温度上昇$T_2-T_{env.}$で正規化した値$(T_2-T_1)/(T_2-T_{env.})$の値により検出し、それによりフィレットの形成度合をリード中央近傍の温度T_2とリード折れ曲がり部近傍の温度T_3の差ΔT_{2-3}の値から検出できる。これと同時にリードとランドの傾き、フィレットの形成度合より、リードの中心の表面温度T_2からリードとランド間のソルダ量が検出できる。

4） 接合部の欠陥検出において、まずフィレットの形成度合の検出を行い、接合部の構造を確定し、その結果を利用して、内部欠陥の検出用のしきい値を決定することによりそれぞれの欠陥が検出できる。

5） フィレットの形成度合の検出の為の適正条件は、接合部の温度上昇速度、フィレットの形成度合の良否での温度変化ΔT_fと時間や入熱との関係、

赤外線検出素子の特性と接合部の耐熱性を勘案した上でΔT_fを最大にする条件にすることが必要である。本実験ではリード表面最高温度としては353K（80℃）程度を、また熱画像の撮像時間としては、レーザ照射開始後100msが適切な条件となり、内部欠陥の検出と同じ条件で行えることが明らかになった。

6） 未接合またはボイドの欠陥検出限界寸法は、リード材が銅合金の場合、リード厚150μmで約50μm角の接合欠陥が検出可能となる。また、欠陥検出限界寸法はリードの材質にも依存し、同じ250μm角の欠陥でも温度拡散係数が大きな純銅のリードの場合ΔT_{max}は銅合金の場合の約0.08倍となり、逆に温度拡散係数が小さい42Alloyリードの場合ΔT_{max}は約1.7倍となり、温度拡散係数が小さくなるにつれて検出精度が向上する。また、この検出精度はリードの厚さに依存し、同じ250μmの欠陥でも50μm厚の場合だと、150μmの場合のΔT_{max}の値の約3.4倍の値となり、欠陥検出精度が向上する。また、この検出精度はh_{1-1}に依存し、h_{1-1}が$1x10^4 W/(m^2K)$付近でΔT_{max}が最大となる。また、h_{1-1}がそれ以上になると、小さくなり、$1x10^7 W/(m^2K)$になると、ΔT_{max}が一定になる。また、h_{1-1}がそれ以下になっても小さくなり、$1x10^2 W/(m^2K)$になると、ΔT_{max}がほぼ0になる。

第４章　QFPのガルウィング型リード接合部の欠陥検出プロセスの妥当性の実験的検証

４．１　はじめに

前章では、QFPのガルウィング型リード接合部の欠陥検出プロセスをシミュレートするために熱伝導解析モデルを作成し、そこに存在する未接合、フィレットの形成度合の検出について、理論的に検討した。

そこで、本章では、これまで理論的に検討されたQFPのガルウィング型リード接合部の欠陥検出プロセスの妥当性を実験的に検討する。

まず、実験に用いる熱画像撮像装置の温度計測方法を考えることにより、温度計測の精度の向上を検討し、次に、接合界面に疑似欠陥を持つ接合部を用いて、熱画像による温度計測情報の評価方法を検討する。最後に、実際の欠陥を持つQFPのガルウィング型リードの接合部を用いて熱画像を撮像し、欠陥検出プロセスの妥当性を実験的に検証する。

４．２　供試材料、実験装置及び実験方法

４．２．１　供試材料

本章では、熱画像撮像装置の特性と、欠陥の検出精度を検討するために、疑似欠陥接合部を作成した。この疑似欠陥を有する接合部の基板は、アルミナ基板（Al_2O_3 96%、25.4mm角）であり、リード、をその上に接着している。なお、このリードは銅合金(三菱CDA-C7250)を使用した。このリードのサイズは幅400μm、厚さ150μm、長さ3300μmである。このリードの化学成分をTable 4.1に示す。ま

Table 4.1 Chemical composition of lead.

Chemical composition (%)						
Ni	Sn	Pb	Fe	Zn	Mn	Cu
9.0±0.2	2.0±0.1	0.05max	0.6 max	0.5 max	0.6 max	REST

た、本研究では、表面にSnを10μm電解メッキしたものを使用した。

接合剤として、導電性、非導電性の接着剤を用いている。導電性接着剤には、ポリエステル樹脂に導電性材料としてカーボンを含んだ藤倉化成のFC-404（電気抵抗$8\times10^{-4}\Omega$m）を使用した。また、非導電性接着剤には、シアノアクリレート系接着剤で合成樹脂100%の東亜合成化学のアロンアルファーを使用した。

所定の寸法を持つ疑似欠陥接合部の作成方法は、まず、銅合金リード両面にSnを電解めっきする。次に、欠陥を含む試片を作成する場合は、めっきされた銅合金リードの接合面にボイドを想定して、非導電性接着剤を円形に塗布する。この欠陥はほぼ円形でこの場合直径が130μmになっている。次に、金属顕微鏡で欠陥のサイズと位置を測定する。最後に、Snめっきされた銅合金リードの接合面に導電性接着剤を塗布し、それをアルミナ基板上に接着し、はみ出した接着剤を取り除いた後、上から加圧しながら乾燥させて接合した。Fig.4.1にその接合部外観を、Fig.4.2に作成した疑似欠陥の典型例を示す。

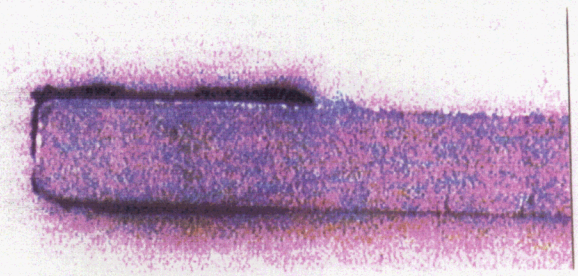


Fig.4.1 Appearance of model joint.

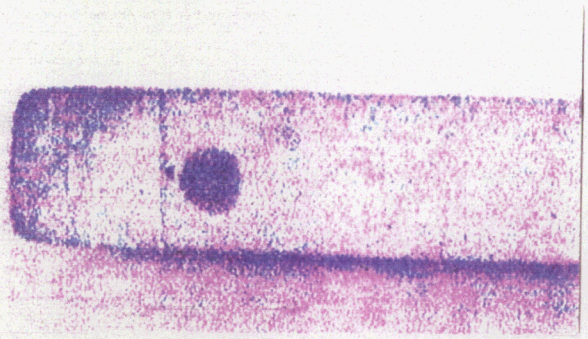


Fig.4.2 Appearance of dummy defect on Sn plated Cu alloy lead.

また、Fig.4.3に示すような実際のQFPのガルウィング型リードの接合部を用いた欠陥検出プロセスの検討を行うために、Fig.4.4に示すような 80ピンのピッチ0.8のQFPをFig.4.5に示すパターンのランド上にマニュアルソルダリングにより接合されたものを用いた。基板は厚さ1.5mmのガラスエポキシ基板である。

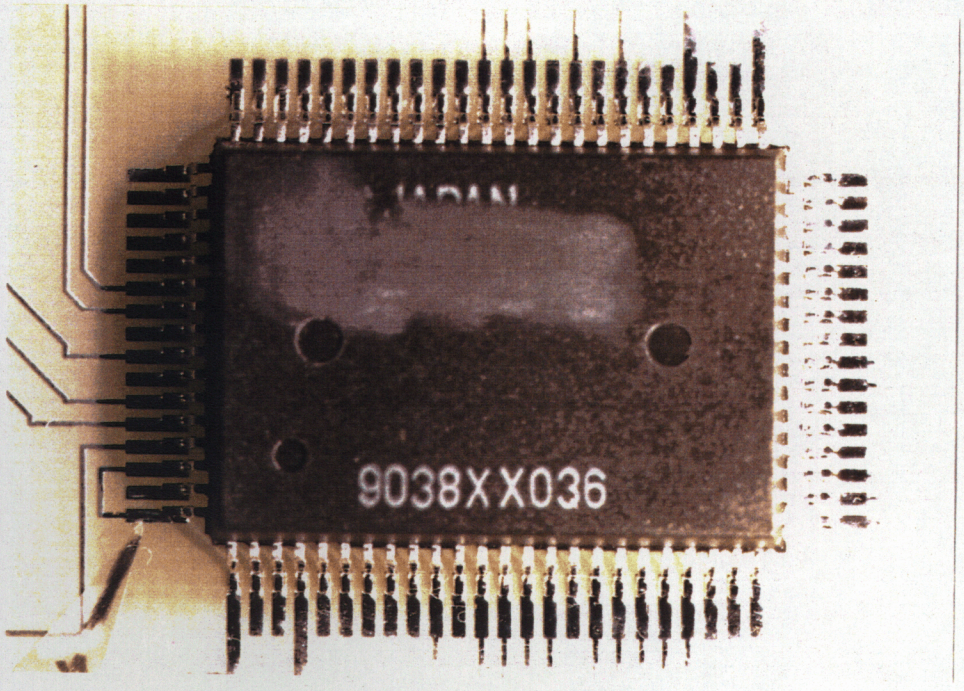


Fig.4.3 Appearance of QFP joint.

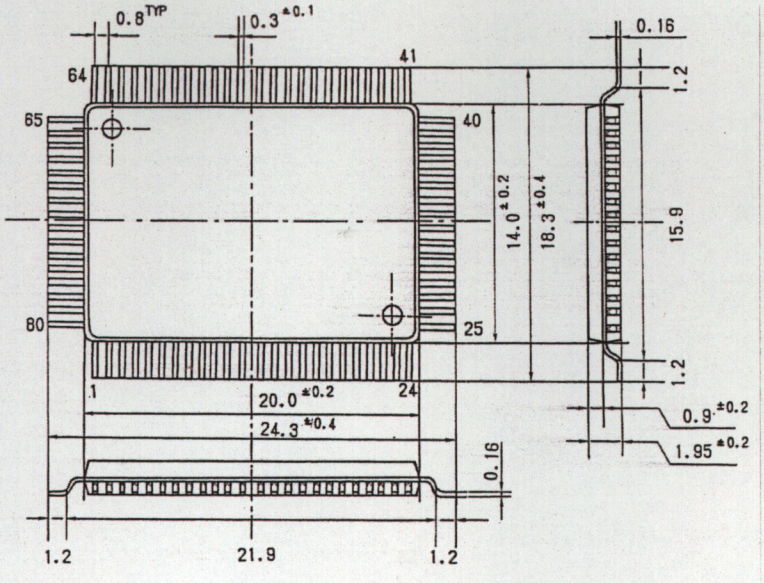


Fig.4.4 Shape and size of flat package.

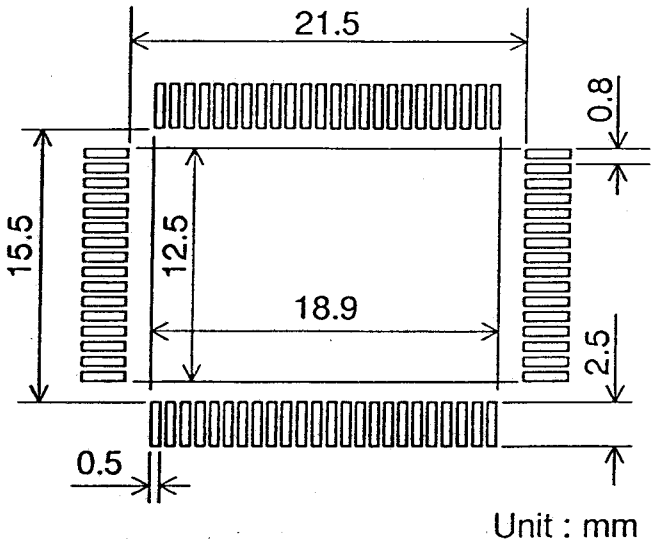
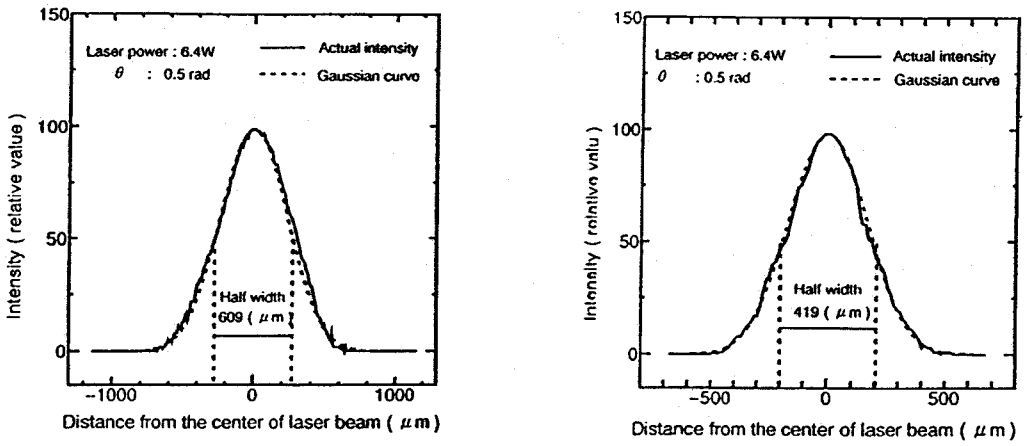


Fig.4.5 Shape and size of land.

4．2．2　実験装置

使用した実験装置としては、2章と同様、マイクロ接合部表面を局所的に急加熱するためにレーザ加熱装置、また加熱直後より一定時間間隔で接合部の表面温度・温度分布を測定するための熱画像撮像装置、さらに得られた熱画像を解析するためにこれらの装置とは別に16bitパーソナルコンピュータを用いている。

測定対象物への加熱源として用いたレーザはYAGレーザ(東芝製 LAY62-6A4型)である。このレーザは、高純度YAG（Yttrium Alminium Garnet、$Y_3Al_5O_{12}$）の結晶で、Nd^{3+}を0.1～1.0%含んだ物をレーザ物質として用いた4準位レーザである。発振波長は1.06μm、励起ランプはKrアークランプを使用し、レーザ出力は最大100Wである。また、レーザスポット径は最小0.4mmで出力安定度は、マルチモードで±3%以下である。この装置はレーザ発振ユニット、レーザ電源ユニット、レーザ冷却ユニット、光ファイバ分岐光学系より構成されている。これをリード表面等へ照射すると、長軸約600μm、短軸約400μmの楕円形となり、軸上での光の強度分布はFig.4.6(a),(b)に示すようにほぼガウス分布となっている。またレーザ光の位置設定や、レーザスポット径の調整にはYAGレーザと同軸に設定されたHe-



(a) Direction of elliptic longitudinal axis　　(b) Direction of elliptic traverse axis

Fig.4.6 Intensity distribution of YAG laser on the silica glass.(θ :0.5rad)

Neレーザ（発振波長633μm）を用いている。なおYAGレーザとHe-Neレーザの発振波長は後述する熱画像撮像装置の赤外線カメラの受光波長領域外にあり、かつ帯域フィルターを介しているので、レーザ光に対するカメラ感度は非常に低く、無視しうる。

熱画像撮像装置としては、日本アビオニクス社製のTVS-2000で、観測対象物の各部の温度分布を非接触で測定し、それを熱画像として疑似カラー表示する装置である。この熱画像撮像装置は、赤外線カメラヘッド、イメージプロセッサ（モニタ内蔵）、リアルタイムレコーダの主要部分から構成されている。また熱画像の解析には、パーソナルコンピュータ（日本電気PC9801UX）を用いている。Fig.4.7に熱画像撮像装置及びパーソナルコンピュータなど実験に用いた諸装置の構成図を示す。以下に各部の機能について述べる。

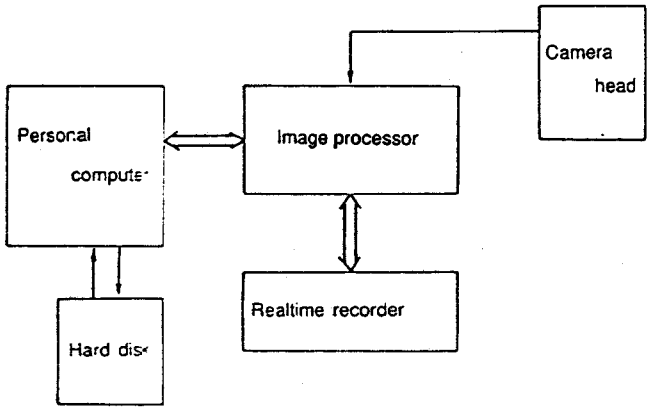


Fig.4.7 Hardware constitution of experimental apparatus and computer.

（ａ）　赤外線カメラヘッドは、レンズ系と赤外線検出器より構成されて

いる。ここでは、対象物の表面から放射されている赤外線をアルゴンガスによってジュールトムソン効果によって冷却されている赤外線検出センサ（InSb、検出波長3～5.4μm）により受光し、電気信号に変換して1秒間に30フレームの撮像する。

（b） イメージプロセッサは、カメラヘッドからの電気信号をディジタル信号に変換し、フレームメモリーに記憶した後、信号処理して内蔵モニタに最大256階調の疑似カラーで熱画像をリアルタイム表示する。

（c） リアルタイムレコーダは、熱画像の記録に半導体メモリー(SRAM)を用いた熱画像を記録再生するもので、30frame/sのリアルタイムの熱画像の録画、再生が最高300frameまで可能である。録画開始より16ms前に1msの画像取り込み開始トリガーパルスが出力される。

（d） パーソナルコンピュータはGPIBケーブルを通してイメージプロセッサに接続され、それにより送られた熱画像をハードディスクに保存している。そしてその熱画像より時間的温度変化や温度分布などの必要情報を抽出するなどの情報解析を行っている。

なお本研究における観測対象物は、数百μm～1mmと小さいため、カメラヘッドには赤外顕微鏡システムを装着して測定を行った。この時の熱画像の視野サイズは横2300μm、縦1350μmで、画素数は横256pixel、縦100pixelであり、1pixel当りの解像度は横は約9.0μm、縦は約13.5μmである。

4．2．3 実験方法

観測対象物の熱画像を撮像する手順は、以下の通りである。なおFig.4.8に熱画像撮像装置、YAGレーザ、試片の位置関係を示している。また、レーザレンズユニットの水平面に対する角度を0.5rad(30度)に設定している。

1） 試片をターンテーブル上に水平に固定し、レーザ、熱画像撮像装置の焦点を合わせ、熱画像撮像装置のリアルタイムレコーダの設定を行う。

2） リアルタイムレコーダをスタートする。レーザシャッターがリアルタイムレコーダの熱画像記録開始に連動してオープンし、レーザを所定時間照射する。リアルタイムレコーダは33ms毎に1枚の熱画像を記録できる。

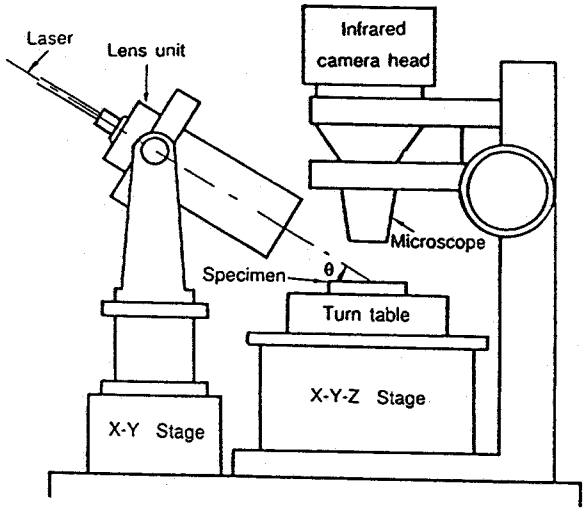


Fig.4.8 Experimental apparatus for detection of micro defects.

3） GPIBケーブルを通してリアルタイムレコーダに記録されている熱画像をパーソナルコンピュータのハードディスク上に転送する。

4．3 欠陥検出装置の特性

4．3．1 熱画像撮像の原理とその問題点

本研究で構成している熱画像撮像システムに使用されている熱画像撮像装置には、いろいろな変動要因があるために、ある一定温度のものを測ってもその結果にゆらぎを持つ。そこで、このゆらぎの原因を調べ、その原因の特性を利用して、熱画像のゆらぎを低下させ、信頼性を向上し、また、それを利用し、その後の画像理解に必要な計測温度の信頼性を評価する。

本研究で構成している熱画像撮像装置のカメラヘッド部の構造は、以下の通りである[62]。Fig.4.9に示す様に、赤外線カメラヘッドは、レンズ系と、対象物体の表面から放射されている赤外線から、可視光を遮断するために装置全面に取り付けられたシリコンウィンドウと、入射してきた赤外線を反射し、視野を変えるための赤外線反射ポリゴンミラーと、反射した赤外線をさらに折り返して反射

させる折り返しミラーと、その赤外線を集光するための集光レンズと、集光された赤外線の量を電気信号に変え、イメージプロセッサーに出力する10個の赤外線検出素子と、その電気信号を熱画像として表示するイメージプロセッサーから構成されている。

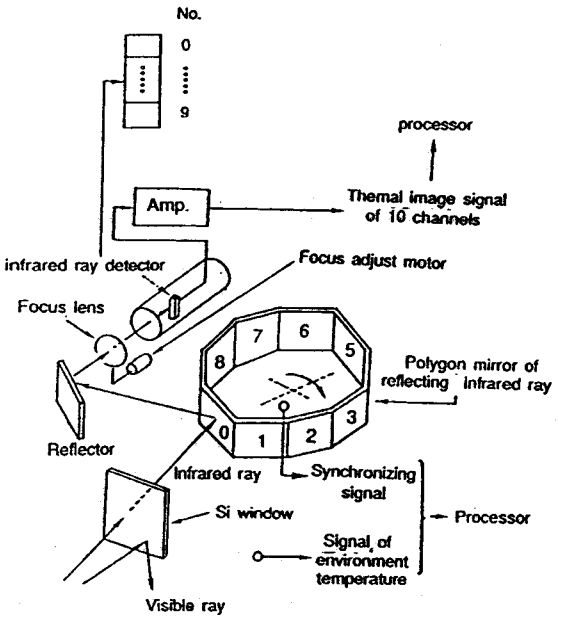


Fig.4.9 Structure of thermography camera head.

また、この装置において熱画像が得られるメカニズムは次の通りである。即ち、赤外線反射ポリゴンミラーの最初のミラーに写った対象物体は検出器では0.1度の分解能を持ち1度の間隔を持った10本の走査線信号として出力される。次に赤外線反射ポリゴンミラーが回転して2番目のミラーが対象物体からの赤外線を反射し、ミラーの傾きの違いにより対象物体上で0.1度ずれた部分を調べる。さらに同様な処理を10回行うことにより全体で垂直方向100本、水平方向256本の走査線信号によって熱画像が得られる。つまりFig.4.10の様に1枚の熱画像を構成するのに画像の上から10行はNo.0の赤外線検出素子、次の10行はNo.1の赤外線検出素子というように、画像の10分の1づつを各赤外線検出素子が分担している。そして、各々の10行の中でも赤外線の反射に用いている赤外線反射ポリゴンミラーの各面が1行づつを分担している。そのた

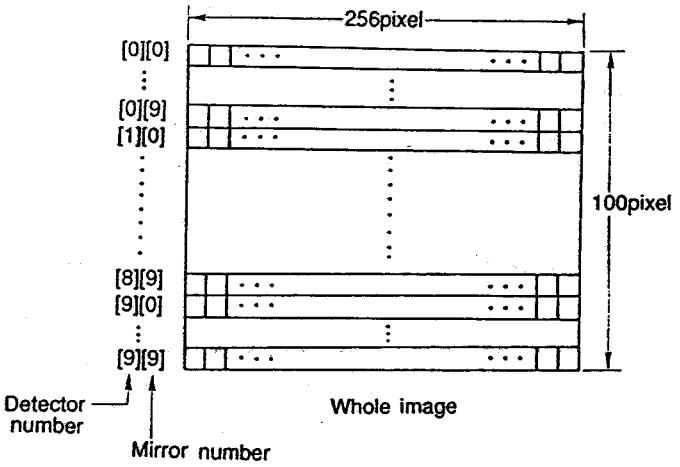


Fig.4.10 Constitution of thermal image.

め、赤外線検出素子と、赤外線反射ポリゴンミラーの組による特性が違う。そのうえ、同時に温度計測ができるのは赤外線検出素子が10個しかないため、10画素だけでる。その他は赤外線検出ポリゴンミラーが回転することと、赤外線検出ポリゴンミラーの面が変化することにより、順次違う場所の画像を取り込んでいるため、画素によって取り込み時間が変わる。また、赤外線検出素子の固有の特性や、赤外線反射ポリゴンミラーの各面による特性がそれぞれ違うため、各垂直方向走査線100本の特性が変わると考えられる。

そこで、本章では、装置に固有である各赤外線検出素子と、赤外線反射ポリゴンミラーの組合せによる温度計測の特性を調べ、それを利用して計測温度の補正を行った。また、各赤外線検出素子と、赤外線反射ポリゴンミラーの組合せに上から順番に[0][0]～[9][9]までの番号を付けて結果の表示に用いた。

4．3．2　熱画像撮像システムにおける温度計測装置の特性の測定方法

熱画像撮像装置の諸特性の精度を調べるために、一定温度の対象物体を用いてその計測精度を調べることにする。そのため、YAGレーザ装置のかわりに加熱熱源装置には、小手先の温度を一定に出来る電気はんだごてであるWeller社のMSR-ECを用いた。

まず、熱画像撮像装置の温度計測精度を調べるために、撮像場所や、撮像時間の影響をなくし、純粋に装置固有の影響を見るために、Fig.4.11に示すような表面の状態が均一で、温度分布が一定の対象物体として、Snめっき10μmを施した高さ11mm、直径8mmの純銅を用いた。なお、このめっき膜の表面粗さは1μm以下である。

この試料をはんだごての先端に接合し、実験に用いた。この時、試料に、熱電対を

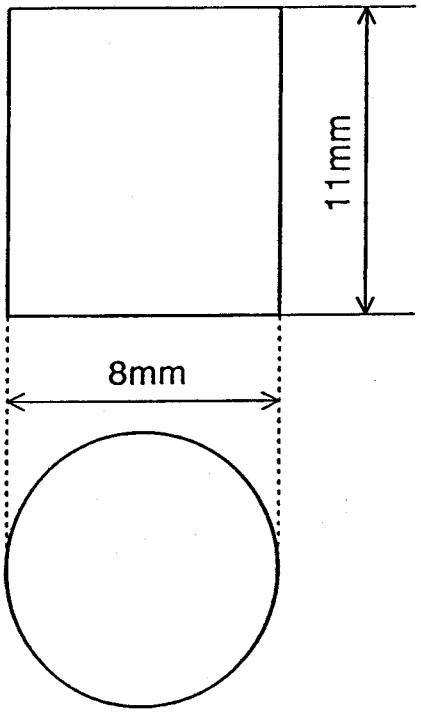


Fig.4.11　Shape and size of specimen.

取り付け、小手先の温度設定と、現実の表面での温度との差をはかったところ、その差が1K以下であったので、小手先の温度設定値を試料表面の温度として採用した。

また、熱画像撮像装置、はんだごてはFig.4.12のように配置している。

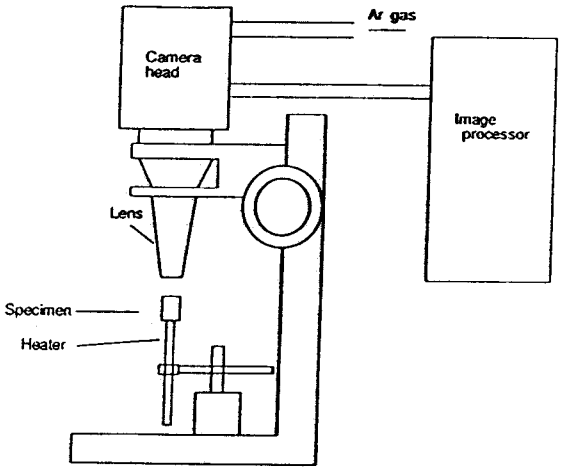


Fig.4.12 Experimental apparatus for measuring of thermography property.

4．3．3 熱画像撮像システムによる温度計測装置固有の特性

本節での実験結果は、すべて熱画像30枚の和をデータとして用いた。また、計測温度は使用した熱画像撮像装置の輝度で表すことにする。

そこで、対象物体の温度を323K～363K(50℃～90℃)の温度範囲で10Kおきの温度に変化させて計測したもののうち323K、343K、363Kのヒストグラムが、Fig.4.13である。図に示すようにあらゆる温度域で、計測温度には大変大きなゆらぎが存在している。

そこで、ある一つの赤外線検出素子と、赤外線反射ポリゴンミラーの組合せによる熱画像上での輝度の特性を調べるために、ある赤外線検出素子と、赤外線反射ポリゴンミラーの組合せでの輝度のヒストグラムの例を調べ、その結果をFig.4.14に示す。なお、これは、計測温度363K、[4][9]の場合である。図に示すように輝度は正規分布に近い分布になる。このことより、この熱画像上での輝度の分布が、

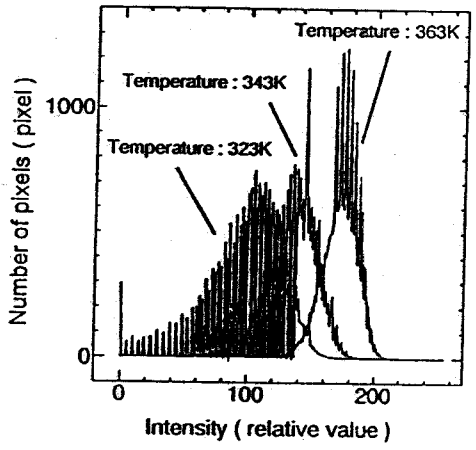


Fig.4.13 Histogram of intensity under several temperature.

各赤外線検出素子と、赤外線反射ポリゴンミラーの組合せによる輝度の代表的な分布と見ることが出来ると考えられる。そこで、各々の組合せについて平均を取ったものがFig.4.15で、標準偏差を取ったものがFig.4.16である。なお図の破線は赤外線検出素子の分担範囲を示している。

この図に示すように、分布の広がりを示す標準偏差は温度が高くなるにつれて、小さくなっているのが確かめら

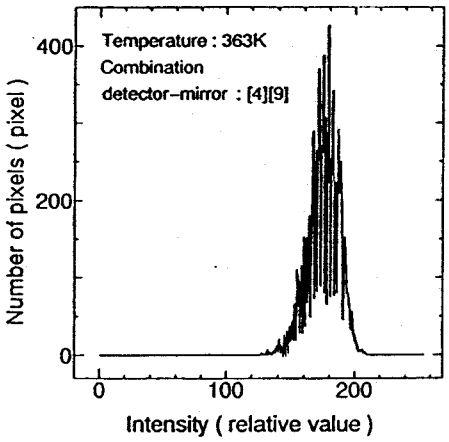


Fig.4.14 Histogram of intensity at combination detector-mirror ([4][9]).

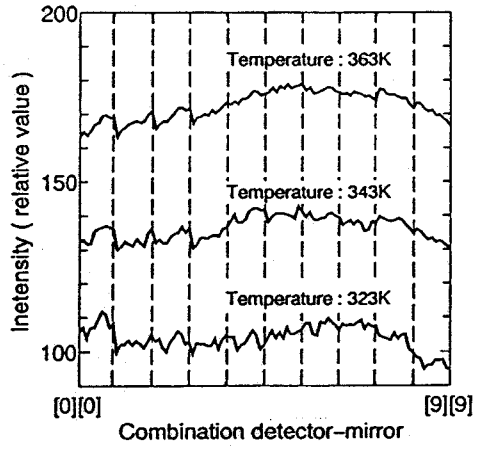


Fig.4.15 Relationship between combination detector-mirror and average intensity.

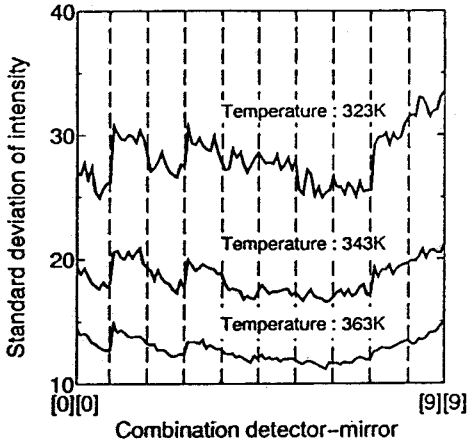


Fig.4.16 Relationship between combination detector-mirror and standard deviation of intensity.

れる。また、各組合せによる輝度の平均は、赤外線検出素子の違いに大きく影響されることがわかる。また、各組合せによっての輝度の平均は、対象物体の温度に関わらずその最大値と最小値の差が、約17の変化がある。そこで、各組合せの平均値を補正してやることによって計測温度の計測精度を向上させることを試みた。

4．3．4　温度計測装置固有の特性による計測温度の補正

輝度の平均値の補正は、ある特定の組合せの平均値とその他の組合せでの平均値との差を移動量として、残りの組合せの輝度を移動することによって行った。ここではその特定の組み合わせとして、組合せの番号が[0][0]の所を用いた。そして、補正の結果をFig.4.17に示す。Fig.4.13に示す結果と比較するとよく分かるが、計測温度の分布はその幅がせばまり、その計測精度は非常に向上している。いま計測精度として輝度の分布の標準偏差を比較してみると、Fig.4.18の様になり、輝度の分布の標準偏差は対象物体の温度が 323K (50℃)の時で約0.3、333K (60℃)の時で約1.5、343K(70℃)の時で約0.3、353K(80℃)の時で約0.3、363K (90℃)の時で約0.6と小さいが温度計測精度は改善されている。

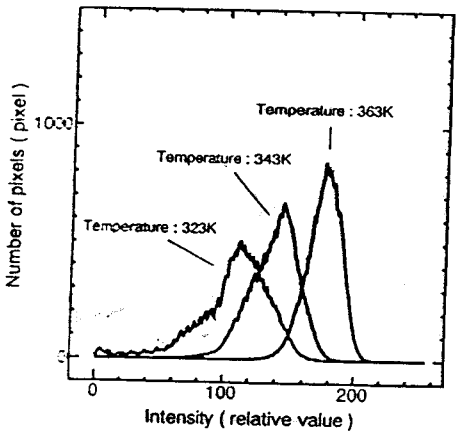


Fig.4.17 Histogram of intensity under several temperature after correction.

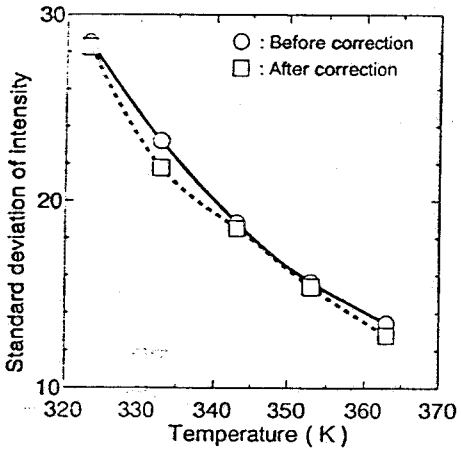


Fig.4.18 Relationship between temperature and standard deviation of intensity.

次に、前項で行った輝度の分布の平均値の補正の補正値の信頼性について考察する。いま、輝度の分布の形状を正規分布と考えている。そこで、使用している補正値は、標準偏差がσ_1平均値がμ_1標本数がN_1の正規分布1と、標準偏差がσ_2平均値がμ_2標本数がN_2の正規分布2の差と考えることができる。この差は二つの標本の数が無限大でない限り分布を持つことが確かめられている。その分布の式は次になる。

$$N\left(\mu_1 - \mu_2,\ \frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}\right) \qquad (1)$$

但し、$N(\mu、\sigma^2)$は平均値μ、標準偏差σの正規分布を表す。

これを用いると、一番標準偏差の大きい323K(50℃)の時でも標準偏差で0.14と小さく、補正値の信頼性を考慮にいれても輝度の分布は変化しないので、補正値は完全に信頼できると言える。つまり、熱画像撮像装置の計測温度分布としての輝度の平均と、標準偏差はFig.4.19に示すようになる。この図に示すように、計測

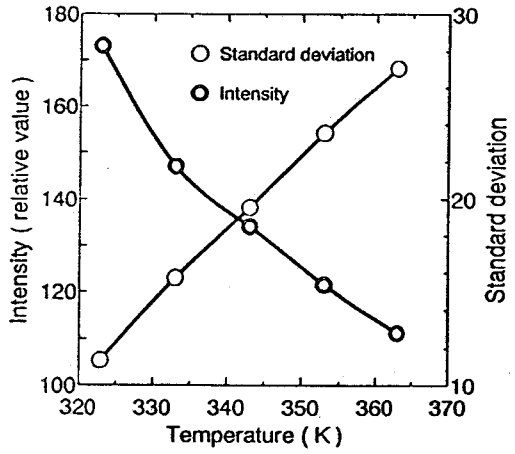


Fig.4.19 Relationship between temperature and standard deviation, average of intensity.

温度と等価な熱画像上での輝度の平均値は対象物体の温度と比例関係にあり、輝度が1上昇すると、対象物体の温度は0.6K上昇している。また、輝度の変動の標準偏差で評価した結果、計測温度の信頼性は対象物体の温度が低いときは非常に悪く(323K(50℃)でσ=28.3)、対象物体の温度が高いときはよりよい精度(383K(110℃)でσ=7.7)が得られている。

4．3．5 疑似欠陥を用いた熱画像からの内部欠陥情報の抽出

本項では、欠陥に関する情報が既知の疑似欠陥接合部を用いて本法による欠陥検出を行い、その結果による内部欠陥の影響を調べ、欠陥情報抽出について実験的に検討する。なお、撮像条件として、予備実験結果に基づいて、レーザ出力3W、撮像時間100msを用いた。

接合部としては2種類の接合部を用いた。即ち、疑似欠陥が存在している接合部にはFig.4.20に示すような直径130μmの疑似欠陥が存在している。もう一つの接合部は欠陥が作成されていない接合部である。これら接合部の熱画像を撮像した結果をあらわしたものがFig.4.21(a)(b)である。これに見るように疑似欠陥が

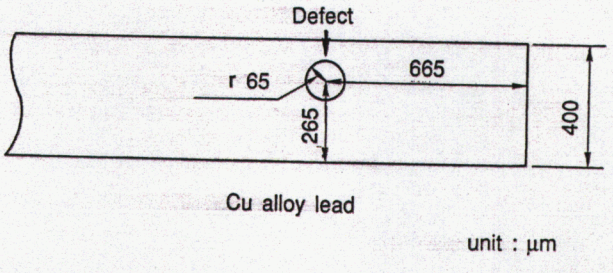
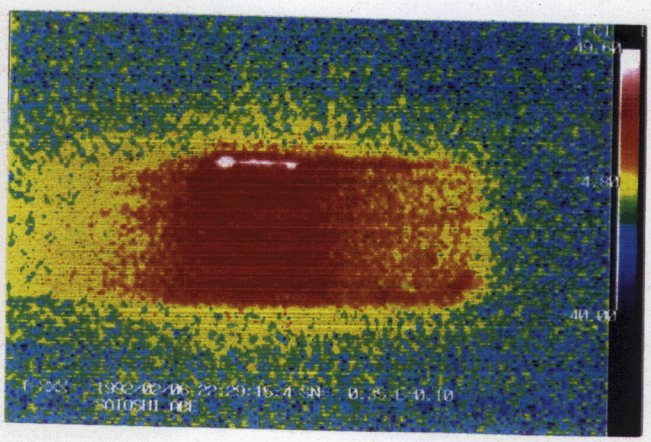
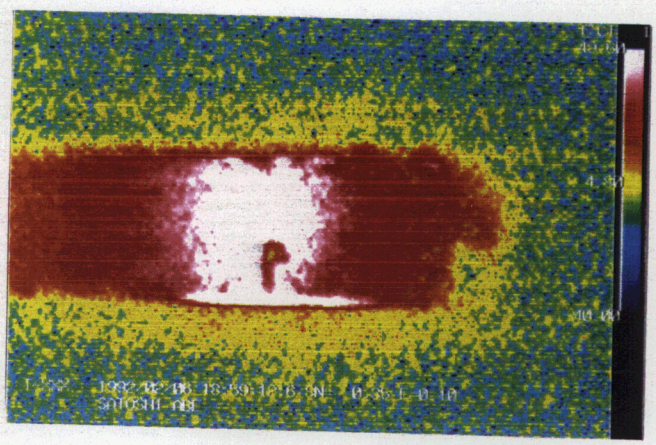


Fig.4.20 Illustration of position and size of dummy defect.



(a) Without defect



(b) With defect

Fig.4.21 Thermography of model joint.

存在しない接合部の熱画像では最高温度が373K(100℃)に上昇している。しかし、疑似欠陥の存在している接合部では、Snめっきが剥離し、放射率の低い銅が露出している場所を除き、疑似欠陥の存在しない接合部に対して393K(120℃)程度まで温度が上昇している。これは、接合界面に欠陥が存在するために基板への熱伝達が一部低化し、その部分で温度が高くなるからである。そこで欠陥が存在しないときの最高温度をしきい値(T_c)にして、欠陥が存在するときの熱画像を評価することによって欠陥の場所や欠陥の大きさが検出できると考えられる.

熱画像撮像システムの計測温度(T_x)は4．3．3項で述べた通り変動を持つ。そのため、前節で述べた欠陥検出方法で検出すると、しきい値近傍の温度領域では、第一種の過誤をおかす確率が50%、第二種の過誤をおこす確率が50%と非常に高いため、欠陥検出をするという目的には使用できない。但し、ここで言う第一種の過誤とは、欠陥であるのに欠陥でないと判断してしまう過ちで、第二種の過誤とは、欠陥でないのに欠陥であると判断してしまう過ちである。

そこで、4．3．3項で調べた計測温度の変動の標準偏差(σ)を用いて、これらの過誤が起こりにくいような欠陥検出方法を考えた。計測温度を$T_x-2\sigma$として欠陥検出を行うことによって第2種の過誤が起こる確率が2%まで低減できる情報が得られる。また、計測温度を$T_x-2\sigma$として欠陥検出を行うことによって第1種の過誤が起こる確率が2%まで低減できる情報が得られる。この2つの情報より欠陥の位置や大きさがある程度決定できると考えられる。この方法は、T_cに対象となる計測温度の変動σを加減したものと同じであるので、以下は、この方法を用いる。

そこでまず欠陥の存在の有無を検出するプロセスを検討する。そこで、接合部の熱画像のしきい値を変えて作成した熱画像がFig.4.22(a)(b)である。なお図T_cは欠陥のない接合部を4回撮像した熱画像の最高輝度の平均値を用いた。図(a)は欠陥のない接合部の熱画像で、図(b)は欠陥がある接合部の熱画像である。図(a-1)、(b-1)はしきい値が$T_c-2\sigma$の画像で、図(a-2)、(b-2)はしきい値がT_cの画像で、図(b-3)はしきい値が$T_c+2\sigma$の画像である。この図からも明らかなように、計測温度のしきい値として、$T_c-2\sigma$を用いると、欠陥が存在している接合部の検出結果は欠陥の存在をはっきり示していて、$T_c-2\sigma$を用いると、欠陥が存在している接合部の検出結果は欠陥の存在可能性領域をはっきり示しており、

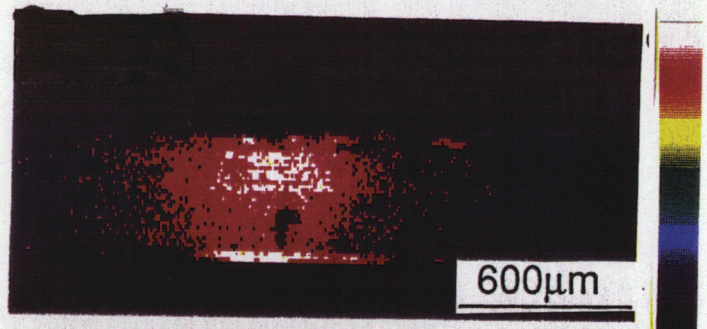


(a-1) Threshold : $T_c-2\sigma$

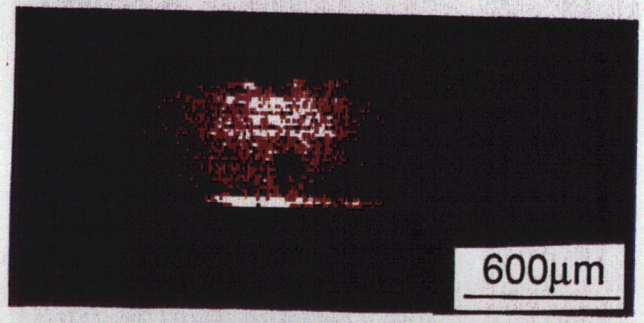


(a-2) Threshold : T_c

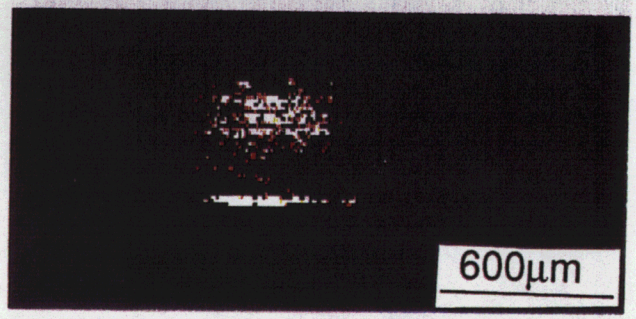
(a) Without defect



(b-1) Threshold : $T_c-2\sigma$



(b-2) Threshold : T_c



(b-3) Threshold : $T_c+2\sigma$

(b) With defect

Fig.4.22 Detecting result of model joint.

この場所は欠陥が存在している場所とだいたい一致がとれる。しかし、しきい値としてT$_c$をそのままを用いた場合はそのあいだの中途半端な情報しか得られていない。また、このことは計測温度の評価値として、T$_c$を用いると、欠陥が存在しない二つの接合部の検出結果は数点欠陥として検出されてしまっていることでも証明されている。このように計測温度の信頼性を考慮に入れることによってより信頼性の高い欠陥情報が得られる。

このことより、本欠陥検出装置を用いる場合、欠陥による温度上昇ΔT_{max}が、温度しきい値T$_c$での計測温度のばらつきσの2倍である2σ以上無いと、精度よく欠陥の検出ができないことが分かる。

次に、熱画像情報から得られる欠陥位置と現実の欠陥の位置について対応をとり、熱画像から得られる情報を評価する。まず欠陥のある接合部の熱画像では、接合部の先端へ向かって左に偏って画素が存在しており、評価しきい値をどのように変えてもその傾向に変化がないことがわかる。そこで、熱画像から欠陥の中心位置を知るためにそれぞれのしきい値で切ったときにでてくる接合部における画素の重心を採用した。

Fig.4.23は、疑似欠陥の中心と計算した重心のずれをしきい値の取り方によってどのように変わるかをグラフに表している。図に見るように計算した重心は疑似欠陥内に収まっていることがわかる。また、しきい値をT$_c$+2σで取ったときの重心は大きなばらつきを持つ。これは画像にでてくる画素数が少ないためである。従って、重心の計算には逆にある程度画素数の多いしきい値がT$_c$-2σ画像を使うことが望ましい。

次に、欠陥サイズであるが、これはしきい値をT$_c$+2σで取った熱画像を用いその密集部分のサイズを採用した。

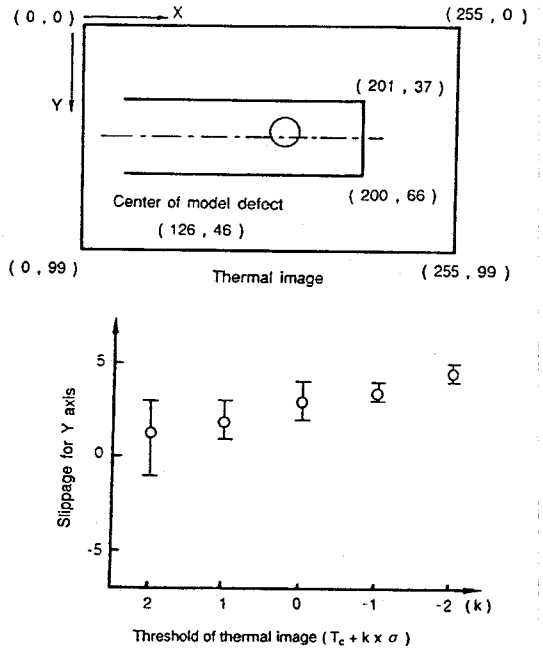


Fig.4.23 Detecting result of defect position under several threshold.

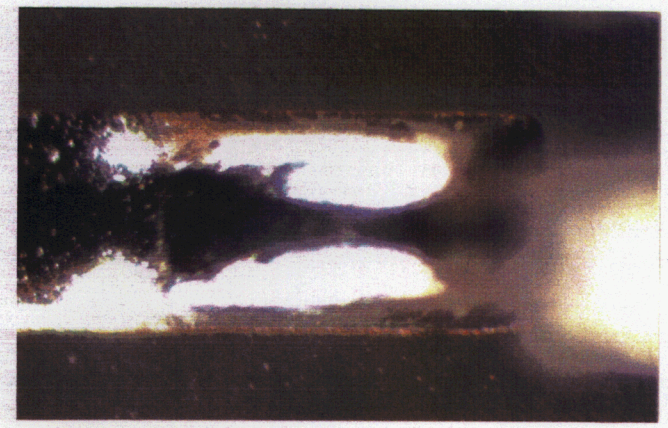
その結果高温領域の大きさはリードのなが手方向が 260μm、リードの幅方向が156μmとなり、リードの長手方向が2倍の値となり、リードの幅方向は2割程度大きく検出される。

これは熱画像撮像装置の特性として、熱画像を撮像する時にポリゴンミラーでスキャンしているため高温部がその周辺に影響を及ぼしその熱画像が撮像されるためと考えられる。そこで今後、この装置を使った熱画像のサイズの評価には横方向で1/2倍、縦方向1/1.2倍に補正する必要がある。

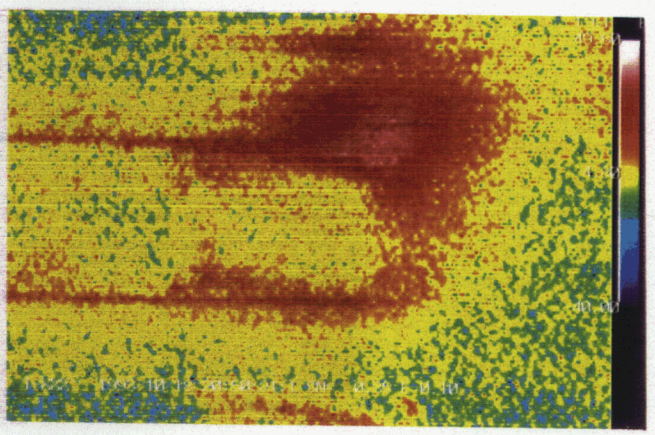
4．4　各種欠陥検出の実験的検証

本節では、ここまでで述べてきた欠陥検出プロセスを、実際のQFPのガルウィング型リードの接合部を用いて実験的に検証することにする。なお、ここで欠陥として、ボイド、フィレットの形成状態の不良、ブリッジ、位置ずれ、ピットを取り上げた。これは3章で分類した欠陥のうち未接合、部品の未搭載以外の全てである。

そこで、まずFig.4.24(a)に示すような外観を持つ、欠陥がない良好な接合部の熱画像を欠陥が存在する接合部の熱画像と比較するために撮像した。その結果が、Fig.4.24(b)である。この図



(a) Appearance of reflow soldering joint

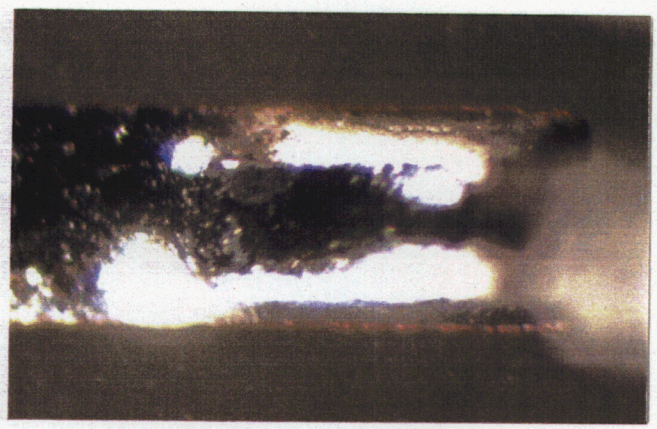


(b) Thermal image of reflow soldering joint

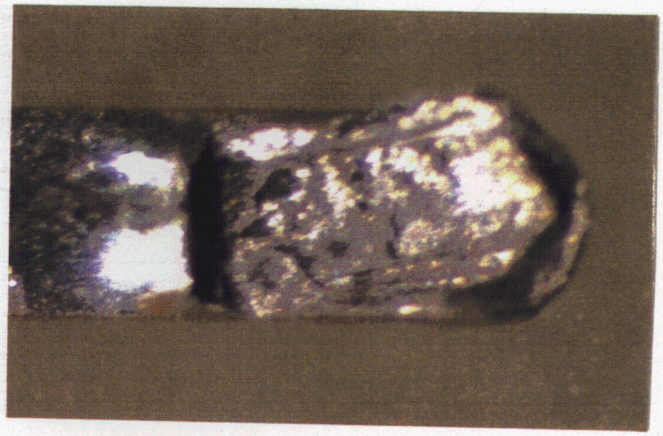
Fig.4.24　Detection result of good joint.

に示すように接合での温度がほぼ一定で、リード左右のフィレット部での温度が接合部よりやや高くでている。このフィレットの温度が高くでているのは基板からの赤外線を反射して見かけ上、放射されている赤外線量が増えるからであると考えられる。

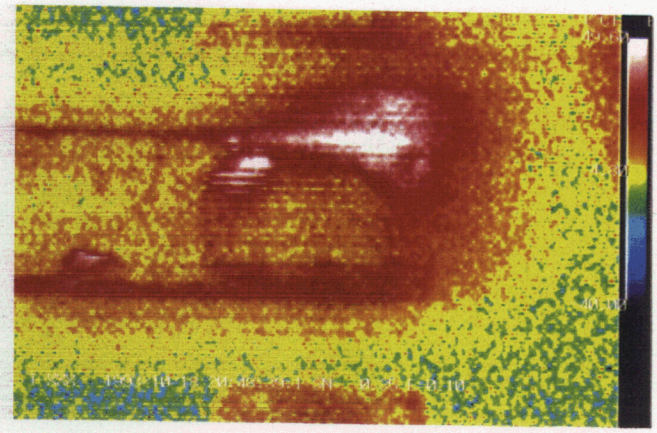
まず、内部欠陥の検出について検討する。まず、Fig.4.25(a)に示すように接合部の外観上は、何の問題もないが、Fig.4.25(b)に示すように、接合界面の図上での左上にはボイドが存在している。この接合部の熱画像がFig.4.25(c)である。この図に示すようにボイドの位置に対応した部分に高温部が現れている。この接合部の熱画像を$T_c+2\sigma$（T_cが約364K(91度)、σをT_kが363K(90度)の値である7.7K)で2値化して検出した。その結果、現実の欠陥の位置がリード先端から161μmでリードの画面上の上端から54μmのところで、大きさが



(a) Appearance of reflow soldering joint



(b) Fractured surface of reflow soldering joint(PCB side)

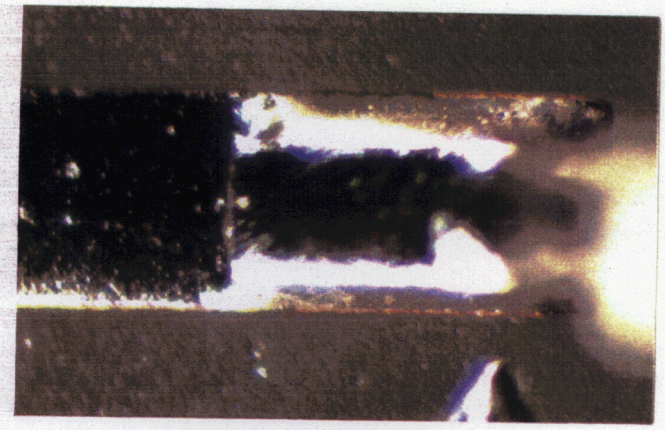


(c) Thermal image of reflow soldering joint

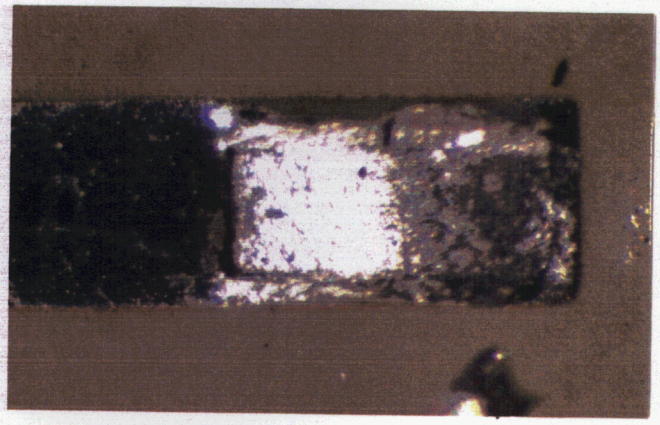
Fig.4.25 Detection result of joint with void.

リード長手方向に143μm、リードの幅方向に90μmであるのに対して、熱画像上での欠陥の位置がリードの先端から157μm、リードの画面上の上端から50μmのところ、大きさがリードの長手方向で131μmリードの幅方向で88μmで検出され、その誤差が横方向に10%、縦方向はほとんど誤差なしとなっている。このようにボイドによる温度分布の変化を用いて、ボイドの位置と大きさが検出できることが分かる。

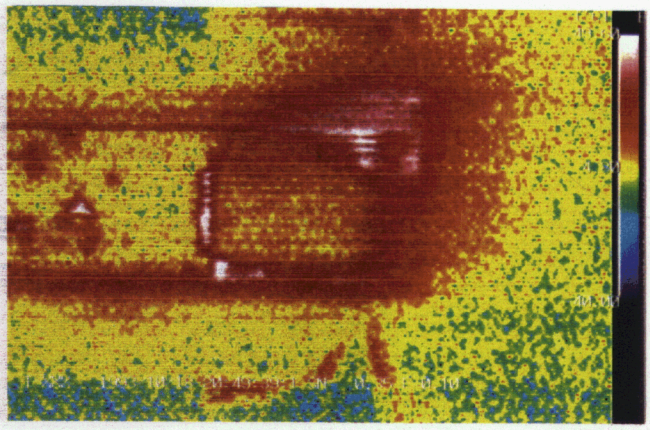
次に、接合部のフィレットの形成状態の不良の検出について検討する。まず、Fig.4.26(a)に示すように接合部の外観上は何の問題もないが、Fig.4.26(b)に示すように、前の内部欠陥の試料に比べて接合部のフィレットが全然形成されていない。即ち、内部欠陥の試料ではフィレットが約600μm形成されているのに対して、この試料ではフィレットが全く形成されていない。この接合部の熱画像がFig.4.26(c)である。この図に示すようにリードの根本の部



(a) Appearance of reflow soldering joint



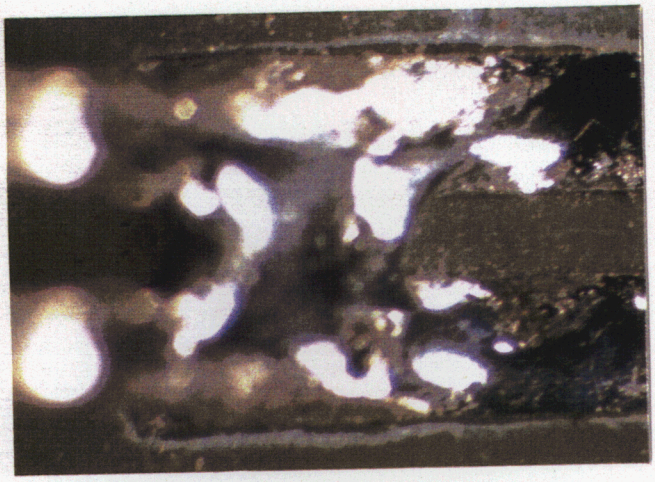
(b) Fractured surface of reflow soldering joint(PCB side)



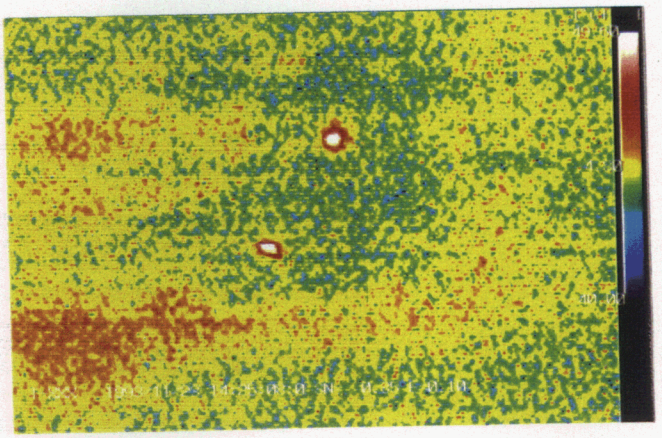
(c) Thermal image of reflow soldering joint

Fig.4.26 Detection result of joint with defective formation of fillet.

分での温度が接合部での温度に比べて高くでている。具体的には接合部の ΔT_{2-3}（T_2-T_3）がフィレットが形成されている接合部が約12K（T_2=約364K(91度)、T_3=約352K(79度)）で、フィレットが形成されていない接合部が約9K（T_2=約367K(94度)、T_3=約358K(85度)）である。数値がシミュレーションの温度分布解析の結果と異なるのは、接合部の材質が熱伝導解析モデルのものと違うことと、また接合長が短くなっているためである。なお、接合部の温度T_2，T_3はそれぞれ接合部の中心部とベンド部近傍の任意の10点の平均値を用いた。



(a) Appearance of reflow soldering joint

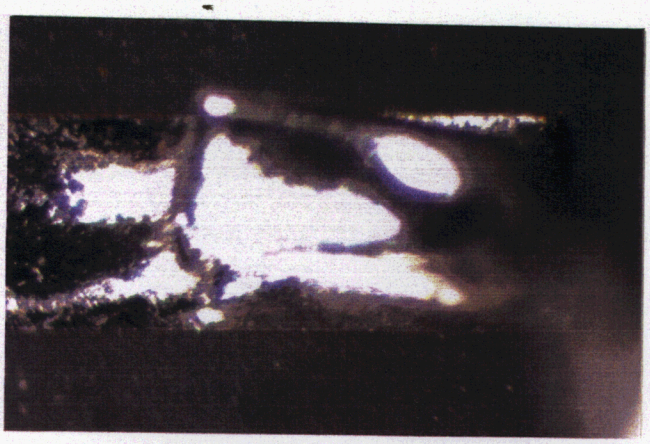


(b) Thermal image of reflow soldering joint

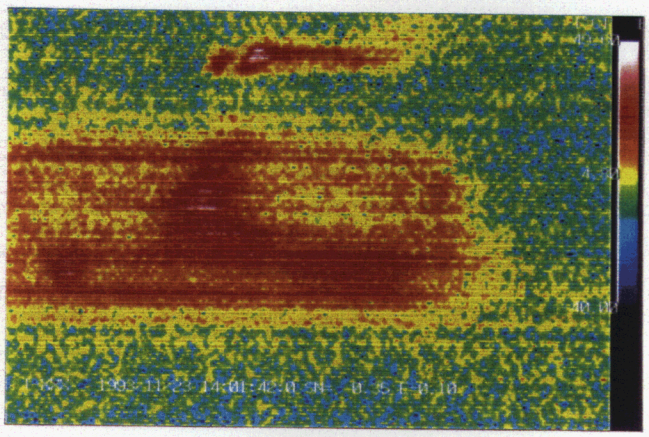
Fig.4.27　Detection result of joint with bridge.

次に、接合部のブリッジの検出について検討する。まず、Fig.4.27(a)に示すように、接合部のソルダが隣の接合部のソルダとくっつき、電気的に短絡している。この接合部の熱画像がFig.4.27(b)である。この図に示すように接合部の熱容量が隣同士の接合部のソルダがくっつくことにより増大したため、接合部の温度が上がらない。

次に、接合部のリードのランドとの位置ずれの検出について検討する。まず、Fig.4.28(a)に示すようにリードが何らかの理由で正規の位置に接合されていない。この接合部の熱画像がFig.4.28(b)である。この図に示すように接合を示す温度分布が基板上にはみ出し、レーザの照射位置がリードからフィレットにずれ



(a) Appearance of reflow soldering joint

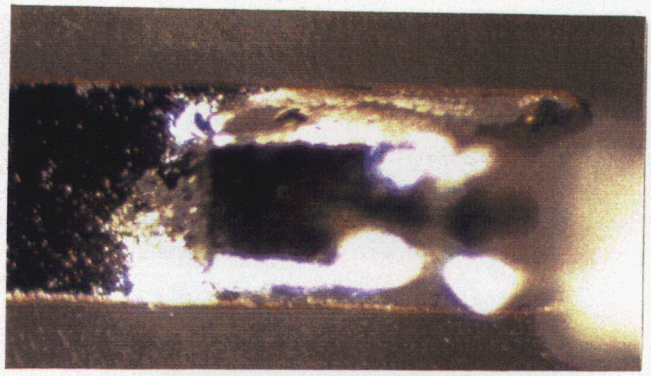


(b) Thermal image of reflow soldering joint

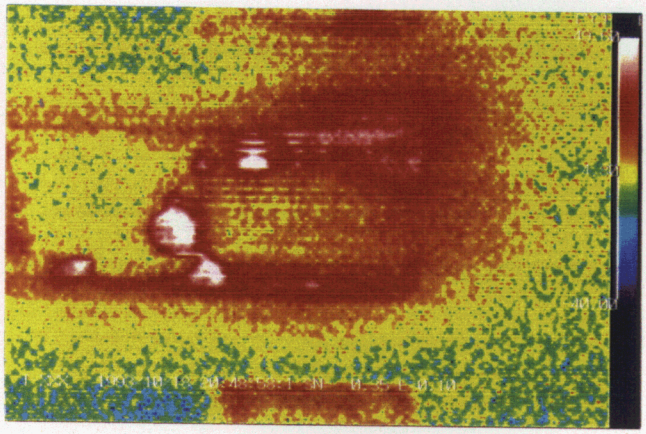
Fig.4.28　Detection result of joint with misalignment.

る場所があるのでその場所での温度が高くでていることからリードの位置がずれていることが分かる。

最後に、接合部ピットの検出について検討する。まず、Fig.4.29(a)に示すように、接合部の図面上右上のフィレットにくぼみがある。この接合部の熱画像がFig.4.29(b)である。この図に示すように、ピットに相当する熱画像上の場所に、高温領域が表示されている。



(a) Appearance of reflow soldering joint



(b) Thermal image of reflow soldering joint

Fig.4.29 Detection result of joint with pit.

4．5　結論

本章では，接合部表面にYAGレーザを照射した時の、熱画像を記録するための熱画像撮像装置の赤外線受光カメラの撮像特性の解析と補正を行って、熱画像に対する信頼性を上げ、内部欠陥の検出における欠陥情報抽出方法とその特性について検討し、さらにその熱画像撮像装置を用いて、実際のQFPのガルウィング型リードの接合部の熱画像を撮像し欠陥検出プロセスを実験的に検証した。以下に、主な結論を要約する。

1）　熱画像撮像装置の特性を調べ、熱画像撮像装置のカメラヘッドの構成から、装置固有の特性である赤外線検出素子と赤外線反射ポリゴンミラーの組合せによる変動要因を除き熱画像の信頼性を向上させることができることを明らかにした。また、熱画像撮像装置の特性を一定温度で、表面の状態が均一な試料の熱画像で評価し、計測温度と等価な熱画像上での輝度の平均値は対象物体の温度と比例関係にあり、輝度が1上昇すると、対象物体の温度は0.6K上昇することが明らかになった。また、輝度の変動の標準偏差で評価した結果、計測温度の信頼性は対象物体の温度が低いときは非常に悪く(323K(50℃)でσ=28.3)、対象物体の温度が高いときはよりよい精度(383K(110℃)でσ=7.7)が得られることを明らかにした。また、疑似欠陥接合部を用いて、内部欠陥情報を熱画像撮像装置の特性を考慮し、しきい値を変えることにより欠陥の存在と欠陥の位置、大きさを検出できることを明らかにした。本章での疑似欠陥接合部では内部欠陥の位置に関しては、しきい値T_c-2σで2値化した熱画像よりずれ幅は、0～60μmの範囲に収まり、欠陥の大きさとしてはしきい値T_c+2σで2値化した熱画像よりリードの長手方向は、現実の大きさの約2倍、リードの幅方向では約1.2倍で検出されることを明らかにし、今後この装置を使用する場合補正する必要があることが明らかになった。また、本欠陥検出装置を用いる場合、欠陥の存在の検出に温度しきい値T_c+2σを用いているため、欠陥による温度上昇ΔT_{max}が温度しきい値T_cでの計測温度のばらつきσの2倍である2σ以上無いと、精度よく欠陥の検出ができないことが分かった。

2） 実際のQFPのガルウィング型リードの接合部を用いて欠陥検出プロセスの妥当性を実験的に検証し、ボイドではそのサイズを誤差10%以内で、位置は4μm以内で検出できる事を明らかにした。また、フィレットの未形成については600μmのフィレット長さの差を検出できた。この他、ブリッジ、位置ずれ、ピットの検出が出来る事を示した。

第５章　欠陥検出プロセスのチップ部品接合部への適用

５．１　はじめに

前章までにおいて、回路基板上でのQFPのガルウィング型リードの接合部における欠陥検出プロセスを確立した。本章は、本論文の欠陥検出対象のもう一種類の表面実装プリント配線基板上の接合部構造であるチップ抵抗部品接合部に存在しうる欠陥についてレーザ照射型熱画像法を適用した時の欠陥の検出プロセスについて検討したものである。

まず、チップ部品に存在する欠陥を分類し、対象とする欠陥を明確にする。

次に、チップ部品の欠陥検出において、QFPのガルウィング型リードとはその接合部の構造が異なることから起こる問題点を検討する。

さらに、チップ部品接合部に存在する欠陥の内、未接合欠陥を取り上げ、熱伝導モデルを作成し、それを用いて温度分布の解析を行い、欠陥の検出プロセスの検討を行うと同時に、欠陥の検出条件について検討する。

最後に、チップ部品の接合部の表面、つまり温度分布観察面が傾いていることによる熱画像撮像装置の温度計測精度の影響を検討し、実際のチップ部品の接合部を用いて、欠陥検出プロセスを実験的に検討する。

５．２　チップ部品接合部に存在する欠陥の分類と欠陥検出における問題点

５．２．１　接合部欠陥の分類

チップ部品の欠陥の形態としてはTable 5.1に示しすような部品の未搭載、ソルダ不足、位置ズレ、チップ立ち、ピット及びブリッジといった外部欠陥と、ボイド、未接合といった内部欠陥に分類できる。これらの欠陥はそれぞれ、電気的に回路に異常が生じる及びその危険が大きくなる、接合部での初期及び疲労強度を低くする、及び接合部の耐腐食性が低下するといった問題がある。それでは以下にこれらの欠陥について説明する。

まず、良好な接合部の例をFig.5.1に示す。

次に、外部欠陥の内、Fig.5.2、Fig.5.3、Fig.5.4、Fig.5.5に示す部品の未搭載、位置ずれ、ピット、ブリッジの4つに関しては、QFPのガルウィング型のリードの接合部に存在する欠陥と同様である。次に、Fig.5.6に示すチップ立ちであるが、これはリフロー炉を用いた一括ソルダリングの場合によく起きる欠陥で片方のランドのソルダだけが先に溶融し、部品が非常に軽くて小さいため、その表面張力により、部品が片方のランドの上

Table 5.1 Classification of defect at chip joint.

Internal defect	No bonded
	Void
External defect	No device
	Misalignment
	Pit
	Bridge
	Tomb stone
	Solder shortage

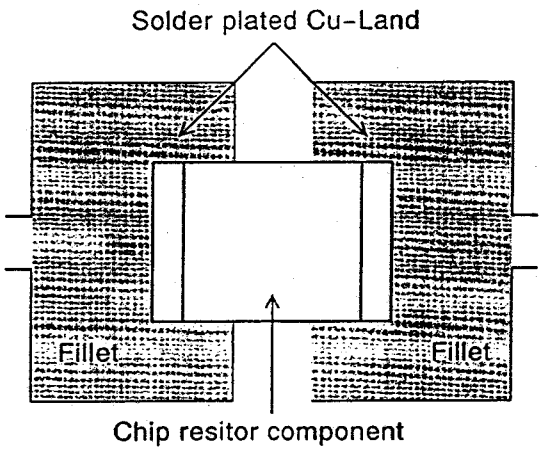


Fig.5.1 Illustration of good joint.

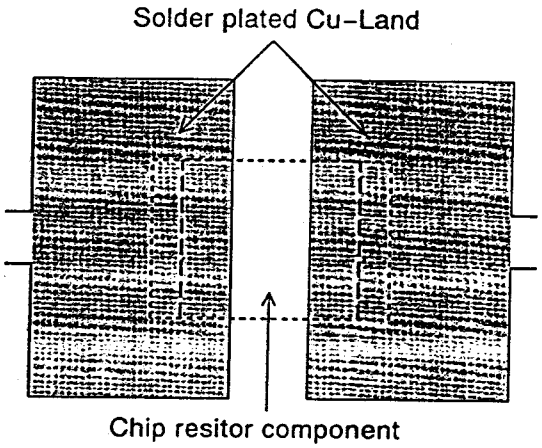


Fig.5.2 Illustration of no device joint.

に立ち上がる欠陥である。次に、Fig.5.7に示すソルダ不足であるが、これは、チップ部品のフィレットは、QFPのガルウィング型のリードの接合部のヒール部のフィレットに相当するものであるつまり、ソルダの不足は、QFPのガルウィング型リードのヒール部のフィレットの未形成同様に接合部の初期、及び疲労強度を低下させる。

次に、Fig.5.8、Fig.5.9に示すような内部欠陥に関しては、QFPのガルウィン

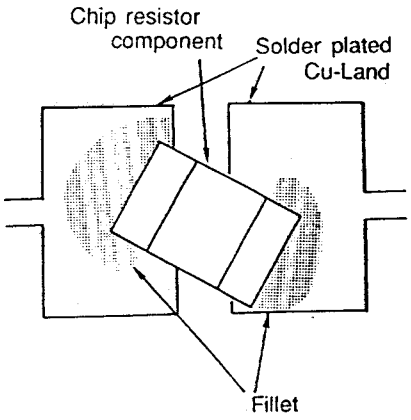


Fig.5.3 Illustration of joint with misalignment.

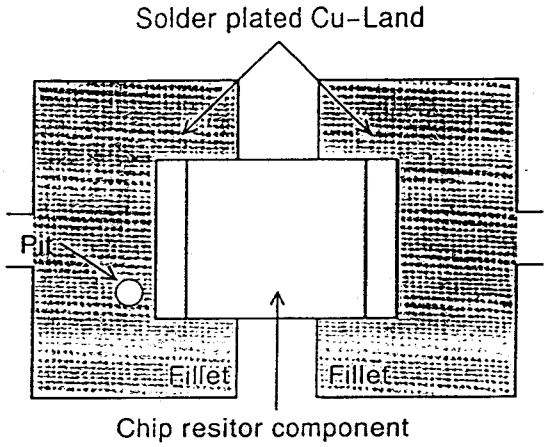


Fig.5.4 Illustration of joint with pit.

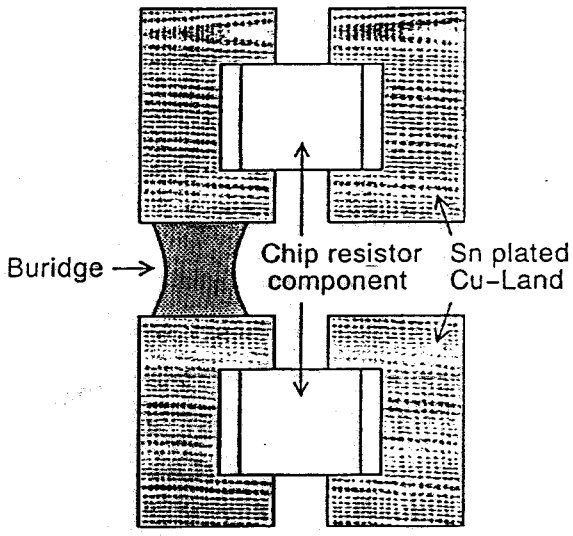


Fig.5.5 Illustration of joint with bridge.

グ型リードの接合部に存在する欠陥と同様である。この時、熱応力により破断する界面は、Fig.5.10に示すように、チップとランド、チップと部品の間の界面で図中の矢印の方向に亀裂は進展する[63]。

そこで、本章では、未接合欠陥の検出について検討する。ボイドに関しては欠陥検出原理より未接合と同じ様な挙動を示すため、ここでは検討しないことにする。

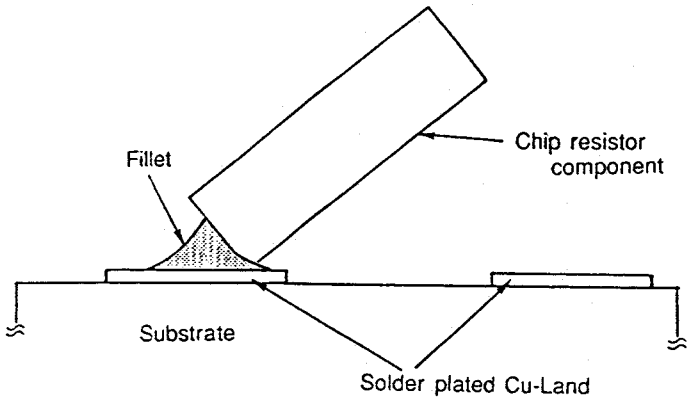


Fig.5.6 Illustration of joint with tomb stone.

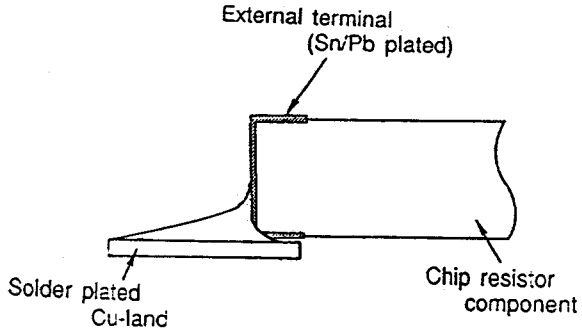


Fig.5.7 Illustration of joint with solder shortage.

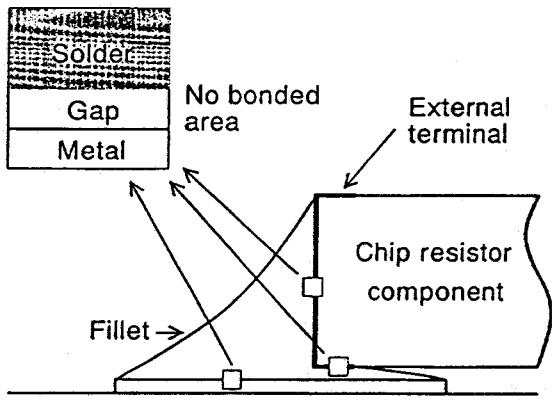


Fig.5.8 Illustration of joint with no bonded.

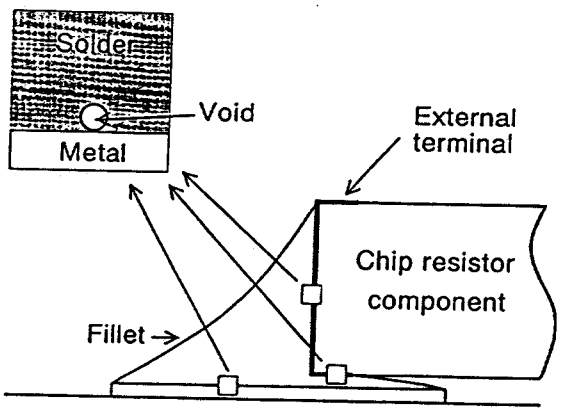


Fig.5.9 Illustration of joint with void.

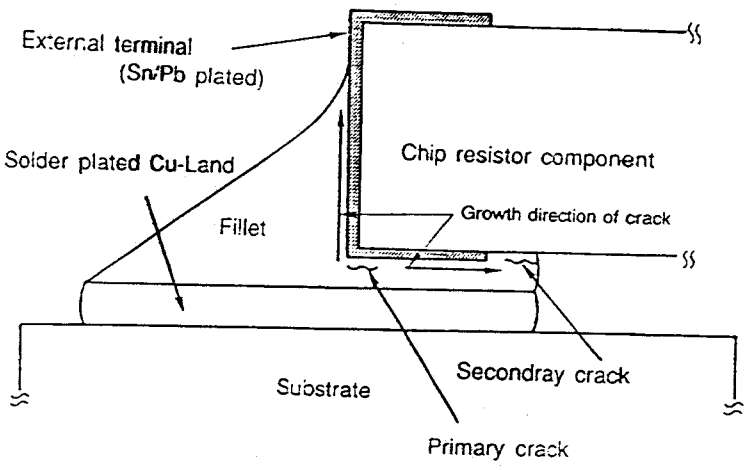


Fig.5.10 Illustration of growth direction of crack .

5．2．2 欠陥検出時に存在する問題点

チップ部品接合部の構造がQFPのガルウィング型リードの接合部と大きく違うことが2点ある。一つは、接合部に存在する接合界面がリードとランドの界面一つではなく、フィレットとランド、チップ部品とランド、チップ部品とフィレットの3つになったこと。もう一つは、レーザの照射面と観察面がソルダフィレットとなり、その面が傾いていることである。

接合界面が増えたことにより、欠陥がどの界面に存在するかの判断が、接合部の構造が簡単なQFPのガルウィング型リードの接合部に比べて増えることになる。また、フィレットが傾いていることにより、熱画像での温度計測精度に対象面の傾きの影響が入ってくることである。

5．3　チップ部品接合部の熱伝導モデルの作成

本節では、レーザ照射による接合部の温度上昇と温度分布の時間変化を数値的に検討するために、接合部の熱伝導モデルを作成し、接合部の温度上昇および温度分布の解析を行った。

Fig.5.11に示す基板上にチップ部品を接合したものをもとにして作成した接合

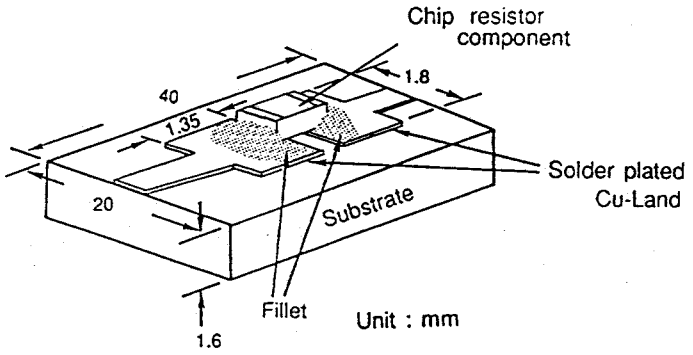


Fig.5.11　Shape and size of joint of chip.

部の熱伝導モデルがFig.5.12である。これは、ガラスエポキシ基板(1.9mmx1.8mmx1.6mm)上の中央に純銅箔のランド(800μmx900μmx35μm)を配置し、それとチップ抵抗(Al_2O_3)がランドの中央にソルダで接合されている。この時使用したチップ部品の寸法をFig.5.13に示す。このチップ部品にはいくつかの種類があり、固定抵抗、セラミックスコンデンサ、積層インダクタなどがある。しかし、いずれも熱に強いセラミックス素材を印

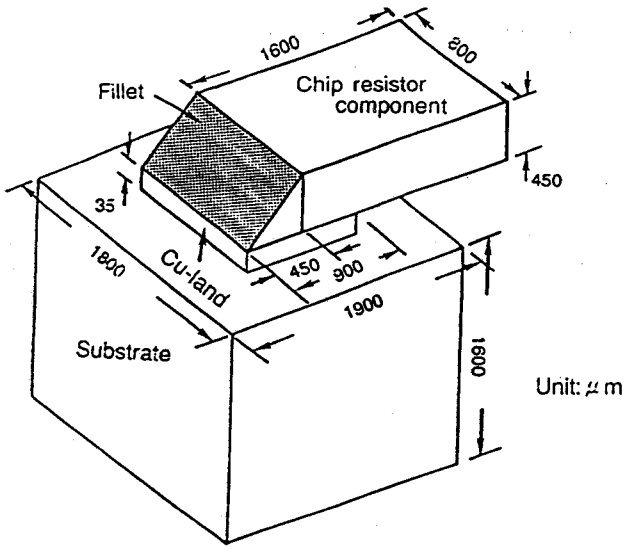


Fig.5.12　Three-dimensional thermal model of chip joint.

刷あるいは積層しているため，素体そのものがチップ部品の形状になっている。そこで、熱伝導モデルでは部品全体をその素体で表した。ここでは、セラミックス素材としてはほとんどがAl_2O_3を用いているので熱伝導モデルではこれを用いた。また、電極はAg, Ni, Sn-Pbの多層薄膜のため無視できることよりこの熱伝導モデルでは省略した。

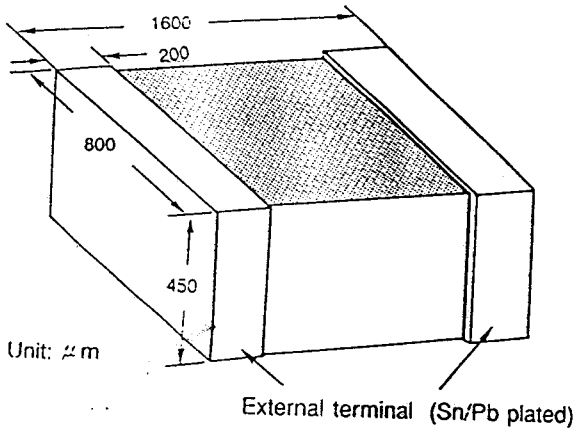


Fig.5.13 Shape and size of chip resistor component.

また、その際のメッシュサイズとして接合部に近い部分は、縦50μm、横50μm、高さ50μmの立方体で、接合部から離れるにしたがって縦100μm、横100μm、高さ100μmと、メッシュを大きくしている。また、熱伝導モデルの初期温度は実験条件に合わせて293K(20℃)とした。また、入熱はフィレット全面に均一な入熱を与えた。これはスポット径を大きくし接合部表面の温度分布を出来るだけ一様にした方がフィレット表面の温度分布が均一になり欠陥の影響を検出しやすいためである。

温度分布の数値解析には汎用有限要素法プログラムのANSYSを用い、コンピュータとしては、Sun SPARC station 2を使用し、積分タイムステップは約11nsで行っている。

なお、熱伝導モデルに用いた材料の熱的物性値をTable 5.2に示す。

Material \ Property	Thermal conductivity W/(mK)	Specific heat J/(Kg K)	Density Kg/m³
Pure Cu	398.00	386.00	8880
Solder (Sn/Pb:63/37)	51.00	190.00	8400
Al_2O_3	75.40	767.00	3900
Glass-epoxy	0.63	1500.00	1770

さらに温度分布の解析結果の表示の仕方、接合部での温度分布の観察の仕方を表したのがFig.5.14である。すなわち、チップのフィレット全面を均一に加熱し、直上より観察している。その観察面は1-2-3-4を頂点

とする長方形となる。

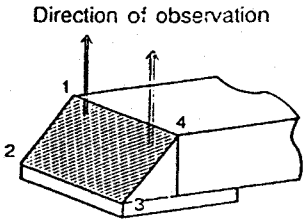


Fig.5.14 Direction of observation for temperature distribution.

5．4 熱伝導モデルを用いた温度分布解析による未接合欠陥検出プロセスの検討

5．4．1 接合部の欠陥検出条件の検討

レーザ照射型熱画像法による欠陥検出プロセスにおける欠陥検出条件について検討する。ここに欠陥検出条件のパラメータとしては、1）レーザ光の出力、2）レーザ照射時間、3）熱画像取得時間がある。このうちレーザ照射時間と熱画像取得時間は同じ時間を採用している。ここでは、熱画像取得時間（t）、レーザ光の焦点での出力（Q）について検討する事にする。

まず、入熱量を時間による温度上昇の傾向を見る為に入熱量密度Qを変えた場合の接合部の最高温度について検討する。この結果をFig.5.15に示す。図にみるようにQ=1.74×10^5w/m^2の場合では、100msまでほぼ直線的に温度上昇し、なおかつ100msの時点でも最高温度が324.7Kと低くく、この場合には熱画像撮像装置の特性によりその温度計測温度の信頼性が低い、すなわちゆらぎが大きい温度領域になる。これでは入熱としては少なく、この入熱では温度計測誤差が大きいため欠陥検出には不適当であるといえる。

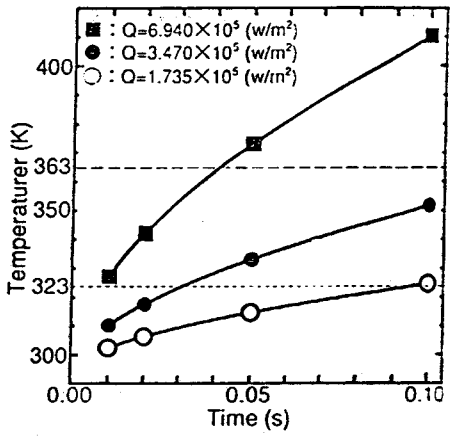


Fig.5.15 Relationship between Q and surface maximum temperature under several t.

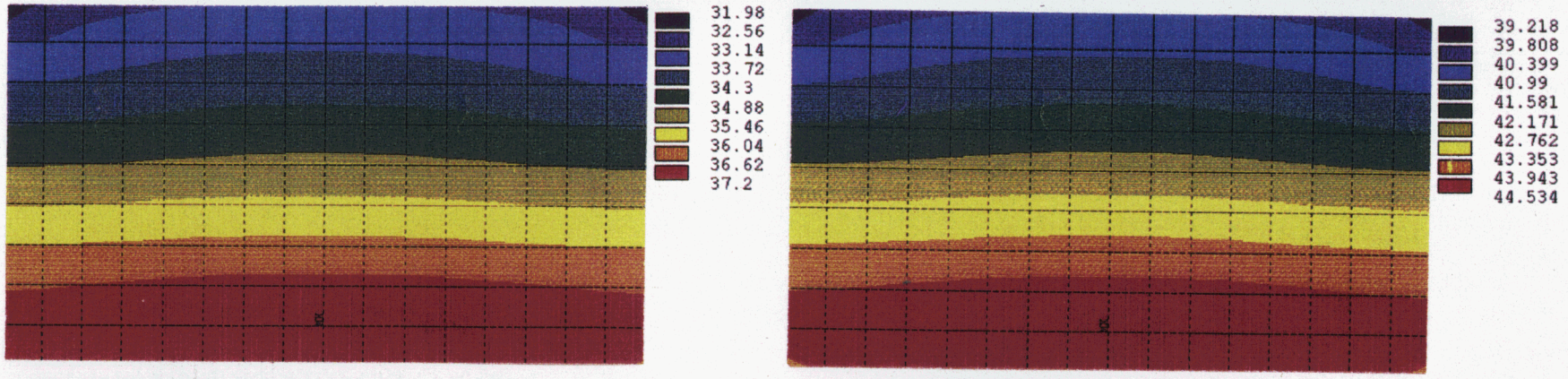
次に、Q=6.94×10^{5}w/m^{2}の場合では、100msで410.3Kにもなり、接合部の品質の劣化を引き起こす恐れがある。また Q = 3.47×10^{5}w/m^{2}の場合では 50msから100msの間で温度上昇率が減少し、最高温度も351.7Kで熱画像撮像装置の計測上欠陥検出に適した温度といえる。また、熱画像取得時間 t に対しても熱画像撮像装置の撮像速度(33ms/frame)、温度計測の精度、熱画像の安定性等から余り短くできない。これらの事を考慮して欠陥検出条件を考えた時、赤外線撮像装置の性能、対象物の耐熱性よりリード表面最高温度としては353K（80℃）程度を（本実験の場合、Qにして3.47×10^{5}w/m^{2}程度）、また熱画像取得時間 t としてはレーザ照射開始後100msが適切と考えられる。

5．4．2　レーザ照射時間と接合部表面温度上昇の関係

本項では、未接合欠陥の位置とサイズの検出プロセスを検討する。そこでまず、欠陥のない熱伝導モデルでレーザ照射時間と接合部表面温度上昇の関係を検討する。まず、入熱量としてQ=3.47×10^{5}w/m^{2}を選んで、時間の経過とともに接合部表面の最高温度がどのように変化するかを熱伝導モデルを用いその温度分布を解析した。その結果をFig.5.16(a)～(d)に示す。図にみるようにレーザ照射時間が10msでは最低温度と最高温度の差が約6K、20msでは最低温度と最高温度の差は約5K、50msでは最低温度と最高温度の差は約6K、100msでは最低温度と最高温度の差が約5Kであり、温度分布の形状も変化していない。よって、レーザを照射してからの時間の経過とともに温度の分布形状が変化せずフィレット表面が全体的に温度上昇していることがわかる。

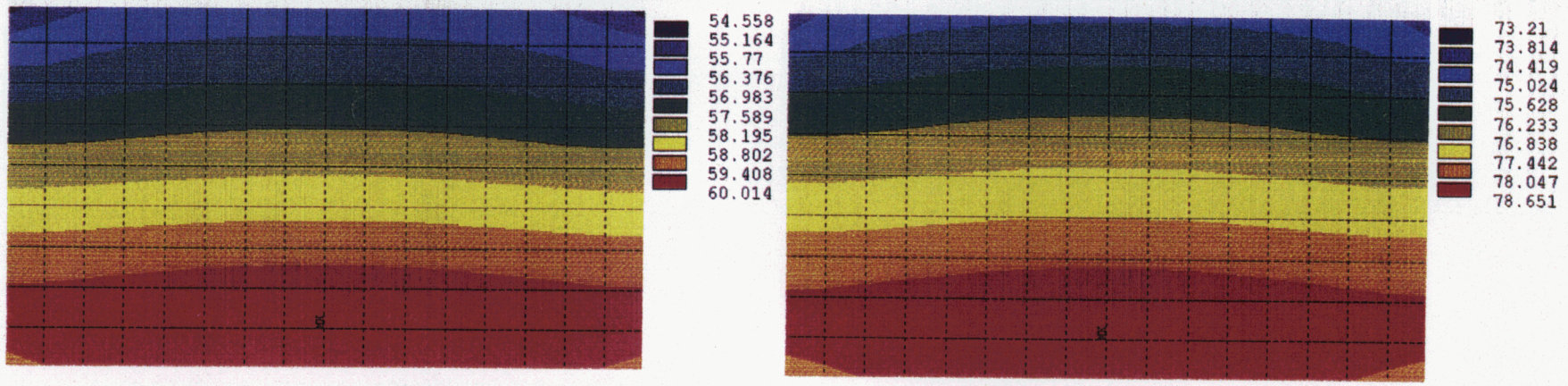
このことより照射時間が経過するにつれて、温度分布形状の変化はなく温度の上昇割合もほとんど変化しないので、厳密には熱画像による比較をする際には、同じ時間の画像の評価をしなければ取り込み時間による温度差が大きいので誤差が大きくなる事がわかる。また、50ms～100msまでの間にわずかながら温度変化が小さくなることより、50ms～100msに撮り込まれた熱画像で判断することが必要であるといえる。

次に、全体の温度分布の概要を知るためにFig.5.17に100msでの(a)真上からの全体の温度分布、(b)中央断面温度分布を示す。なお図中の数値は、セシウス温



(a) Laser irradiation time : 10ms

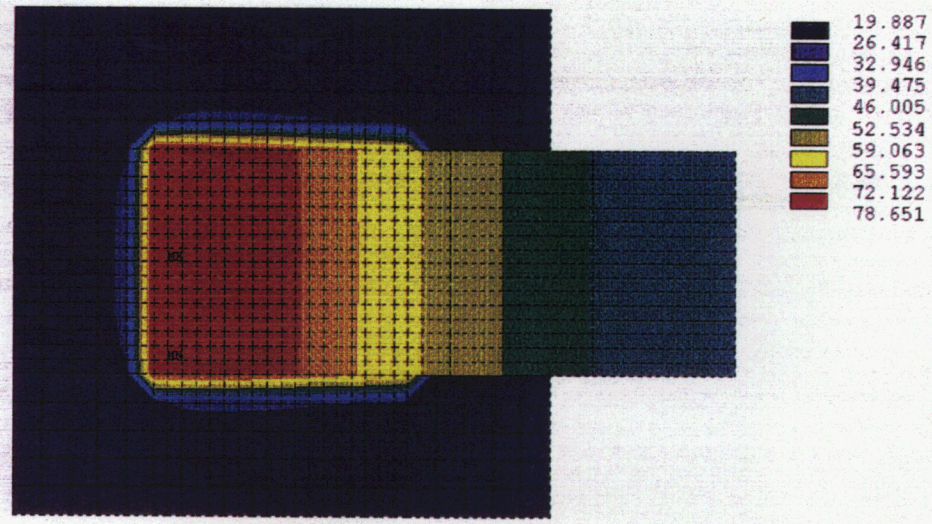
(b) Laser irradiation time : 20ms



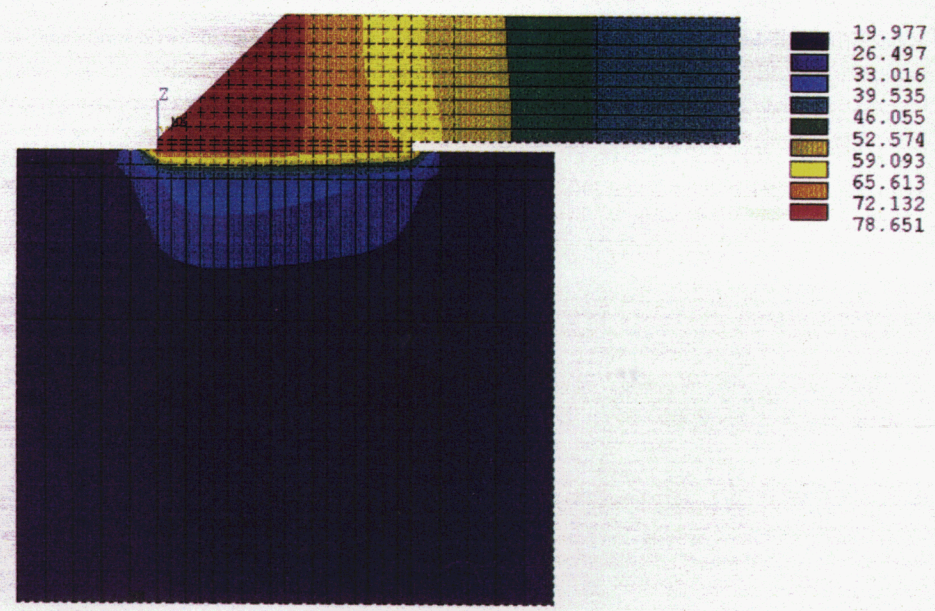
(c) Laser irradiation time : 50ms

(d) Laser irradiation time : 100ms

Fig.5.16 Temperature distribution at the surface of the joint.(Q:3.47x10^{5} W/m^{2})



(a) A top view

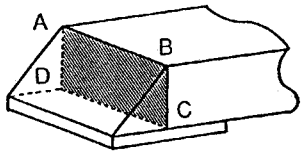


(b) A cross longitudinal view

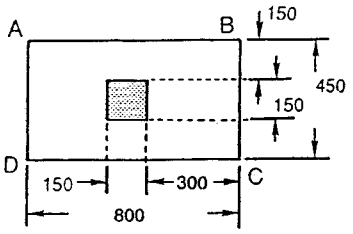
Fig.5.17 Temperature distribution of the whole join.(Q:3.47x10^5 W/m^2)

度である。（以下温度分布解析の結果は同様である。）このことから以下のことが明らかになった。(a)の図より基板の横方向に逃げる熱がほとんどないこと、(b)の図より基板の深さ方向に逃げる熱が0.3mmほどであることがわかる。このことから基板のサイズによる影響が少なく熱伝導モデルの基板のサイズに問題がないことが分かる。

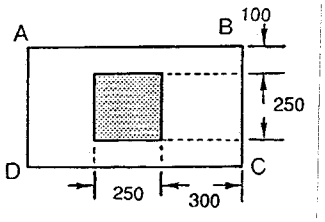
次に、接合部に未接合欠陥を持つ熱伝導モデルを用いて、欠陥検出プロセスについて検討を行う。この際の入熱として用いた値は、$Q=3.47\times10^{5}w/m^{2}$ である。なお、内部欠陥想定位置の図をFig.5.18(a)～(c)に示す。これら欠陥として扱うものは、未接合部分の存在を想定し熱伝達が行われないことを想定している。なお、このうちFig.5.18(a-1)～(a-5)はフィレットとチップ部品接合界面における未接合であり、中央の 150μm× 150μmの未接合をDefect1とし、また 250μm×250μmの未接合をDefect2、さらに、100μm×100μmのものをDefect3、200μm×200μmのものをDefect4とする。またフィレットの端から250μmの全面未接合のものをDefect5としている。



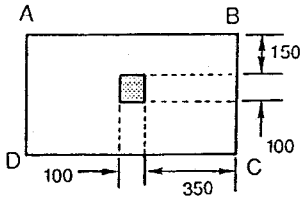
(a) Defect position:bond interface between chip resistor component and fillet.



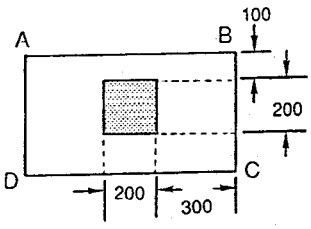
(a-1)Defect1:defect size 150 μ mx150 μ m



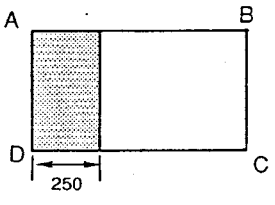
(a-2)Defect2:defect size 250 μ mx250 μ m



(a-3)Defect3:defect size 100 μ mx100 μ m



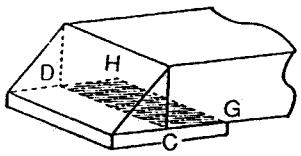
(a-4)Defect4:defect size 200 μ mx200 μ m



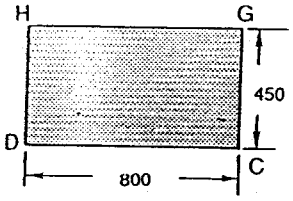
(a-5)Defect5:defect size 450 μ mx250 μ m

Fig.5.18 Position and size of assumed defect.

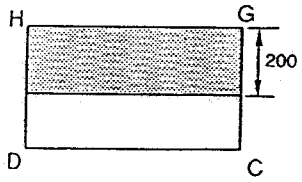
Fig.5.18(b-1)～(b-3)はチップ部品の下部とランド間の接合界面における未接合であり、チップ部品下部の奥からフィレットまでの未接合をDefect6、チップ部品下部の奥からフィレットに向けての200μmまでの未接合をDefect7、そしてチップ部品下部の奥から150μmの位置からフィレットに向けての300μmの未接合をDefect8としている。



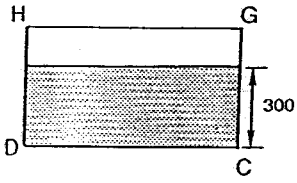
(b) Defect position:bond interface between chip resistor component and land.



(b-1)Defect6:defect size 450 μ mx800 μ m



(b-2)Defect7:defect size 200 μ mx800 μ m

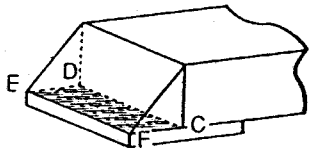


(b-3)Defect8:defect size 300 μ mx800 μ m

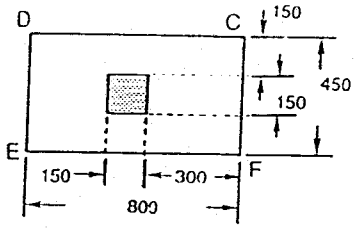
Fig.5.18 Continued.

Fig.5.18(c-1)～(c-3)はフィレットとランド間の接合界面における未接合であり中央の150μm×150μmの未接合をDefect9、250μm×250μmの未接合をDefect10、ランドの端から250μmの全面未接合をDefect11にしている。

まず欠陥の位置がどのように接合部表面温度分布に影響を与えるのかを検討するために、欠陥を様々な部位に想定したモデルによって欠陥位置と表面温度分布との関連性を求めた。また比較のため欠陥無しの場合の結果をFig.5.19に示した。さらに欠陥無しの熱伝導モデルの最高温度(351.7K)を基準にした欠陥のある熱伝導モデルの温度分布解析の結果をFig.5.20～Fig.5.26に示す。

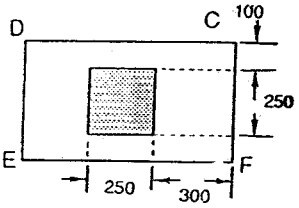


(c) Defect position:bond interface between fillet and land.

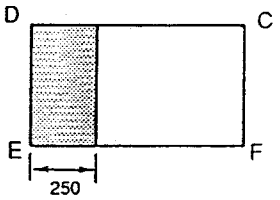


(c-1)Defect9:defect size 150 μ mx150 μ m

Fig.5.18 Continued.



(c-2)Defect10:defect size 250 μ mx250 μ m



(c-3)Defect11:defect size 450 μ mx250 μ m

Fig.5.18 Continued.

まず、チップ部品とフィレット間に存在する欠陥としてDefect1とDefect5を取り上げる。まず、Fig.5.20(Defect5)では未接合のある位置側に影響が大きく現れているのがわかる。次に、Fig.5.21(Defect1)からは、フィレットとチップ部品間の未接合の影響がチップ部品の接合界面から遠い側に現れている。これは、接合部の温度分布が平坦ではないため、本来最も影響の大きい場所ではもとの温度が低いために、欠陥の影響としてはでず、もとの温度分布の最高温度付近での影響しか検出できていないためである。このことより、現実の欠陥検出にはレーザの照射条件に検討が必要であることが分かる。

次に、チップ部品とランド間に存在する欠陥としてDefect6とDefect7とDefect8を取り上げる。まず、Fig.5.22(Defect6)およびFig.5.23(Defect7)は表面の最高温度の差は小さく、その影響を与える範囲が大きいことがわかる。次に、Fig.5.24(Defect8)のように未接合部分がチップ部品下部でまたフィレットに近いとその影響が現れにくいことがわかる。

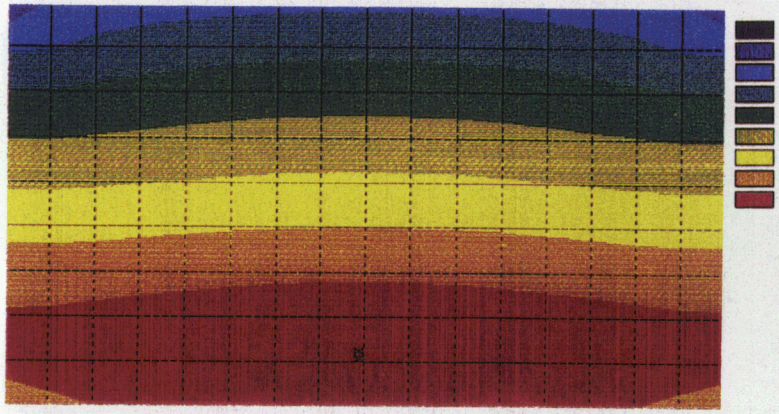


Fig.5.19 Temperature distribution
at the surface without defect.

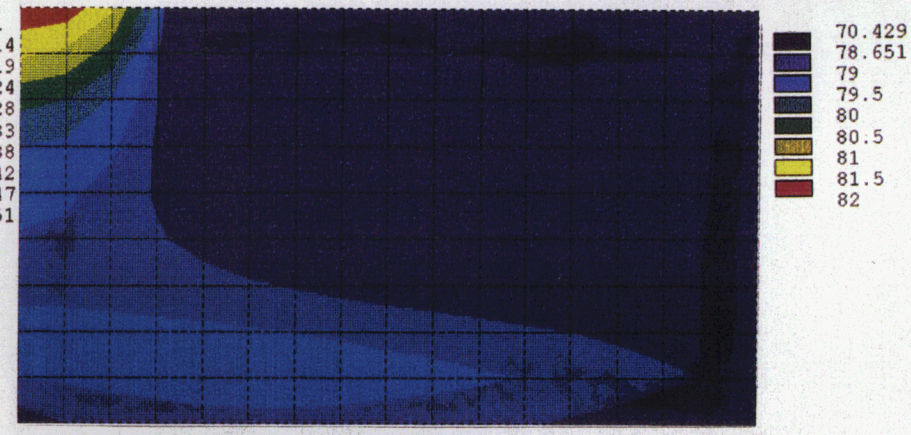


Fig.5.20 Temperature distribution
at the surface above T_c with Defect5.

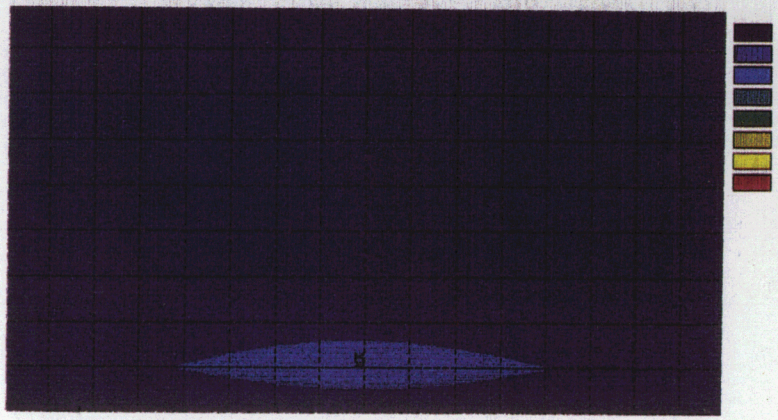


Fig.5.21 Temperature distribution
at the surface above T_c with Defect1.

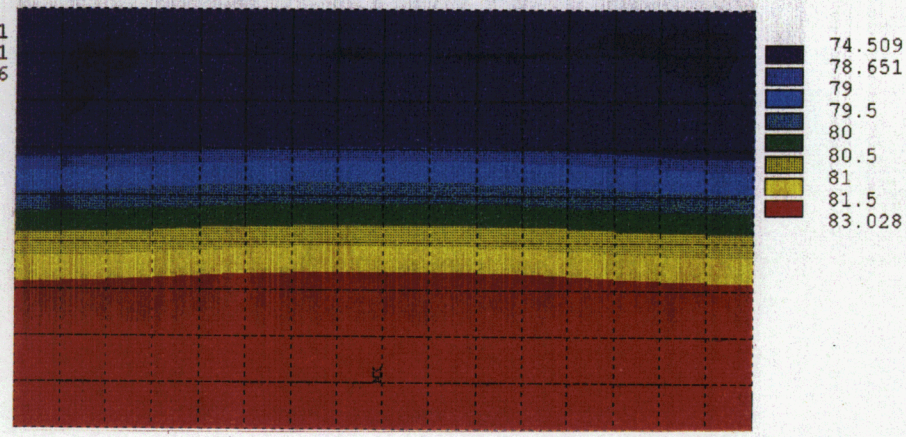


Fig.5.22 Temperature distribution
at the surface above T_c with Defect6.

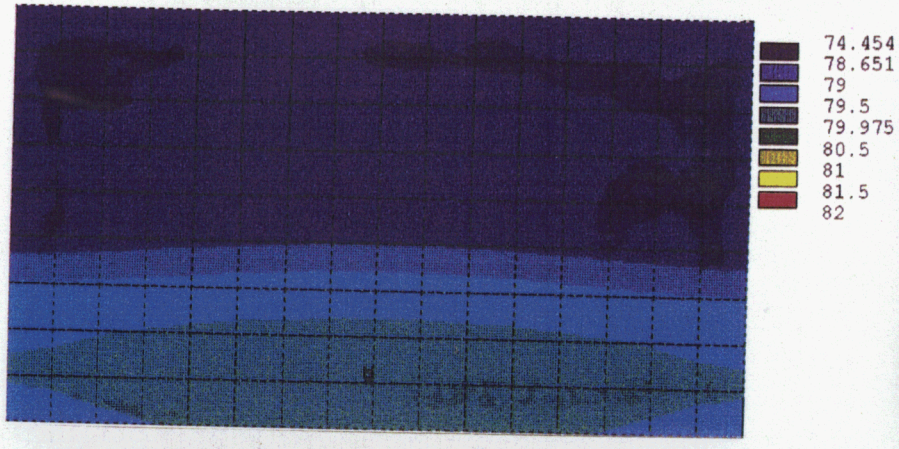


Fig.5.23 Temperature distribution
at the surface above T_c with Defect7.

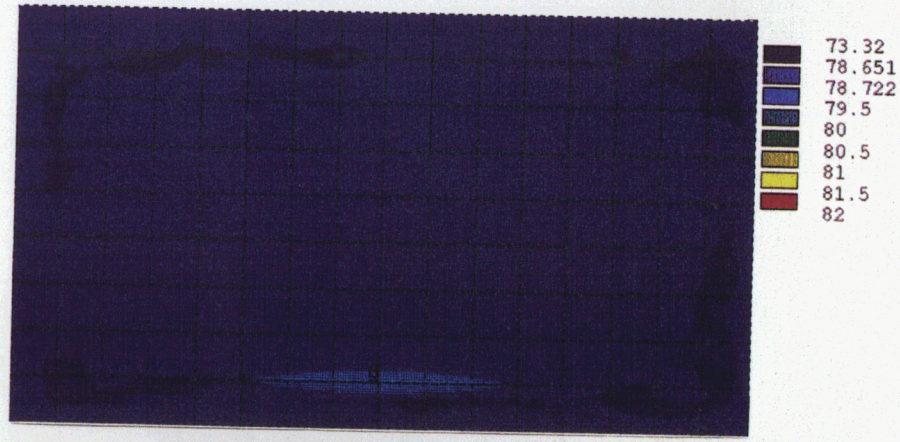


Fig.5.24 Temperature distribution
at the surface above T_c with Defect8.

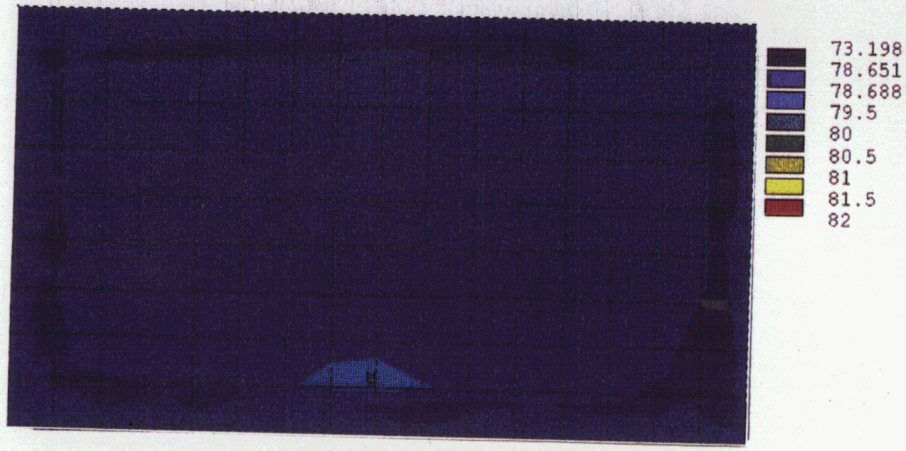


Fig.5.25 Temperature distribution
at the surface above T_c with Defect9.

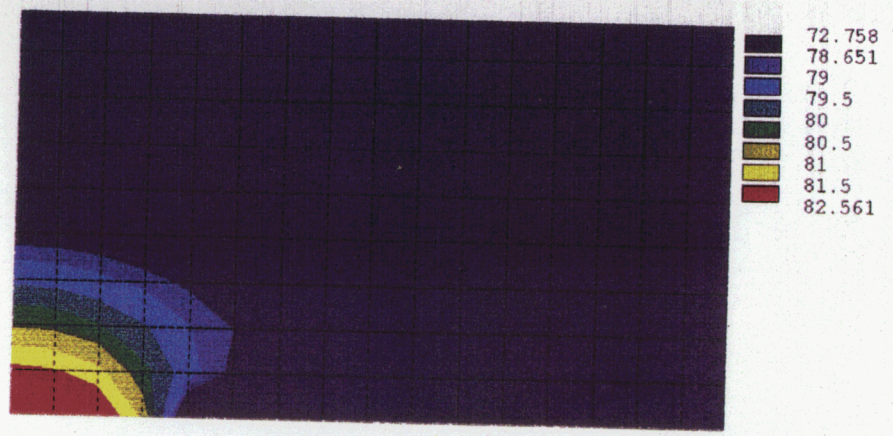


Fig.5.26 Temperature distribution
at the surface above T_c with Defect11.

最後に、フィレットとランド間の界面に存在する欠陥として Defect9 と Defect11 を取り上げる。まず、はじめにFig.5.25(Defect9) からは、フィレットとランドの間の接合界面における150μm×150μmの欠陥は検出しにくいことがわかる。次に、 Fig.5.26 (Defect11)からランドの端から250μmが未接合の場合、その影響範囲が小さく、影響範囲の位置がランドの端によっていることがわかる。

次に、最高温度への影響 ΔT ($T_{(d)max}-T_{(n)max}$)に注目して、欠陥のある熱伝導モデルの温度分布解析を行った。その結果が、Fig.5.27 ~ Fig.5.33である。Fig.5.27はソルダと部品の界面にDefect1が存在している接合部で、欠陥のΔTへの影響は、レーザ照射後急激に増大し、50msでその影響は定常になっている。Fig.5.28はソルダと部品の界面にDefect5が存在している接合部で、欠陥のΔTへの影響は、その初期においては非常に大きいがこれが20msまで急激に低下した後、再び上昇している。Fig.5.29はソルダと部品の界面にDefect6が存在している接合部で、欠陥のΔTへの影響は、Defect1と同じである。Fig.5.30はソルダと部品の界面にDefect7が存在している接合部で、欠陥のΔTへの影響

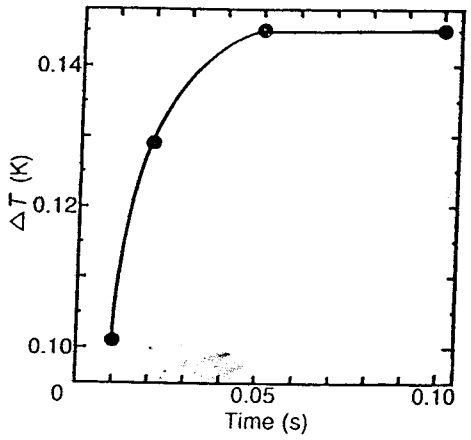


Fig.5.27 Relationship between ΔT and t at the joint with Defect1.

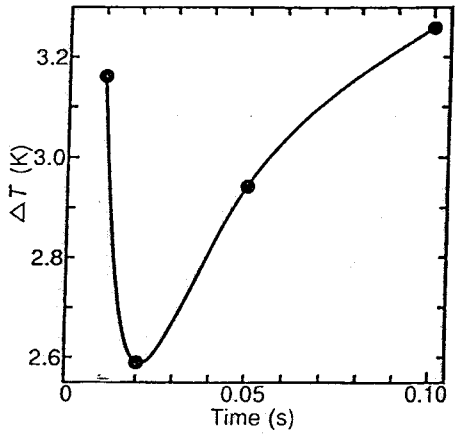


Fig.5.28 Relationship between ΔT and t at the joint with Defect5.

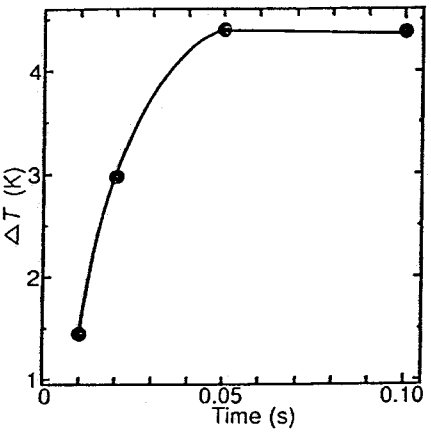


Fig.5.29 Relationship between ΔT and t at the joint with Defect6.

は、Defect1と同じである。Fig.5.31は部品とランドの界面にDefect8が存在している接合部で、欠陥のΔTへの影響は、はじめは大きいがそこから急激に減少している。Fig.5.32はソルダとランドの界面にDefect9が存在している接合部で、欠陥のΔTへの影響は、レーザ照射後急激に増大し、その後徐々にΔTの上昇速度が落ちていっている。Fig.5.33はソルダとランドの界面にDefect11が存在して

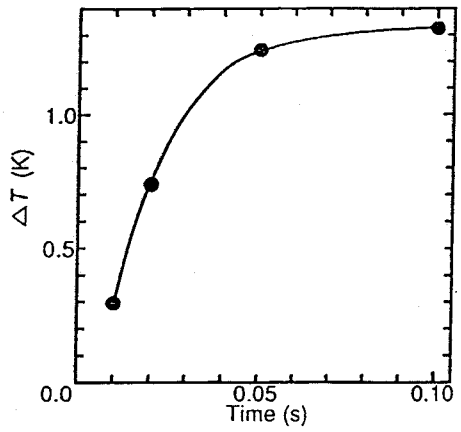


Fig.5.30 Relationship between Δ T and t at the joint with Defect7.

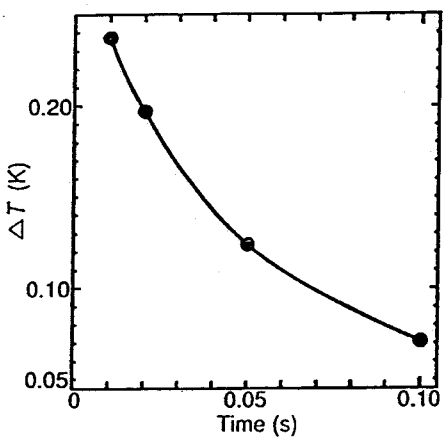


Fig.5.31 Relationship between Δ T and t at the joint with Defect8.

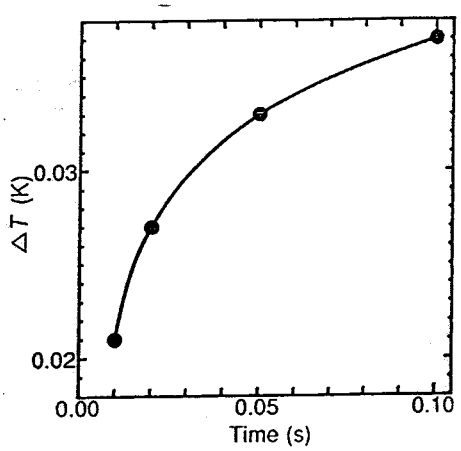


Fig.5.32 Relationship between Δ T and t at the joint with Defect9.

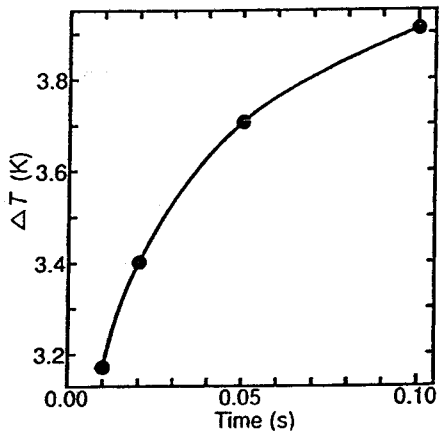


Fig.5.33 Relationship between Δ T and t at the joint with Defect11.

いる接合部で、欠陥のΔTへの影響は、Defect9と同じである。これらの結果から判断してみると以下のことがいえる。1）ソルダー部品間の未接合部の存在は表面温度分布に影響を及ぼす（Defect1、Defect5）。2）ソルダー部品

間の未接合部分の表面温度への影響はソルダ－ランド間の未接合の影響より大きい（Defect1、Defect9）。３）Defect5やDefect11の様な欠陥の場合表面の分布形状から欠陥の位置は推測可能である。４）チップ部品下部のフィレット側のソルダ－部品間の未接合（Defect8）は他の部分に比べて判断しにくい。５）Defect8を除いて、欠陥の影響による最高温度差は50ms～100msにはほぼ一定になっている。

以上の結果はFig.5.34に示しているレーザ照射時間100msでの接合部での熱流のベクトル図から理解される。すなわち熱流束を切断するような未接合部分があると表面での影響に顕著に表れるが、部品下部のフィレット側の未接合部分は熱流束に対して平行の関係にあり、ほとんど全ての熱流束に影響を与えない。なお図中の数値はベクトルの大きさの比を表している。

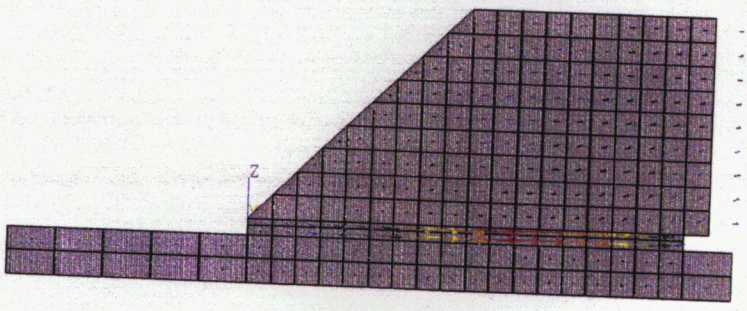


Fig.5.34　Heat flow lattice a longitudinal section without defect.

つぎに欠陥のサイズがどのように表面温度分布に影響を与えるのかを確かめるために、欠陥のある位置は変えずにそのサイズを変えて温度分布の解析を行った。ソルダ－部品間に欠陥Defect2、Defect3、Defect4がある場合、それぞれFig.5.35、Fig.5.36、Fig.5.37に、さらにソルダ－ランド間に欠陥Defect10が存在する場合をFig.5.38に示している。

これらの結果から欠陥のサイズによるΔＴへの影響をFig.5.39およびFig.5.40に示している。この図から分かるように欠陥サイズが大きくなるにつれてΔＴは大きくなり、その影響は50msでほぼ定常となる。さらにソルダ－部品間における未接合の割合S/S_0による図として示したのがFig.5.41である。この図に示すよう

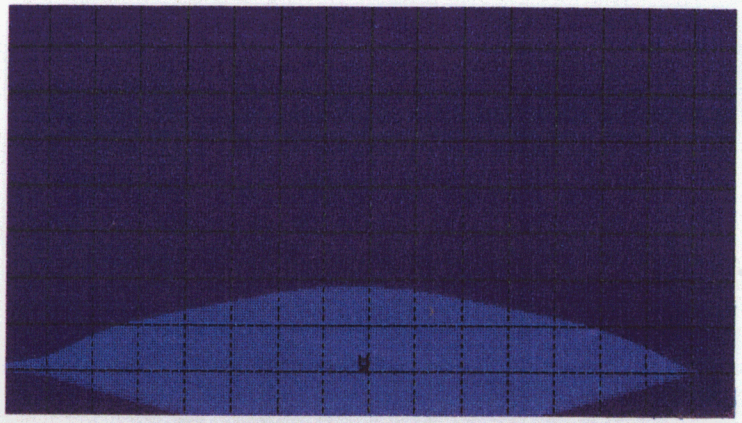


Fig.5.35 Temperature distribution at the surface above T_c with Defect2.

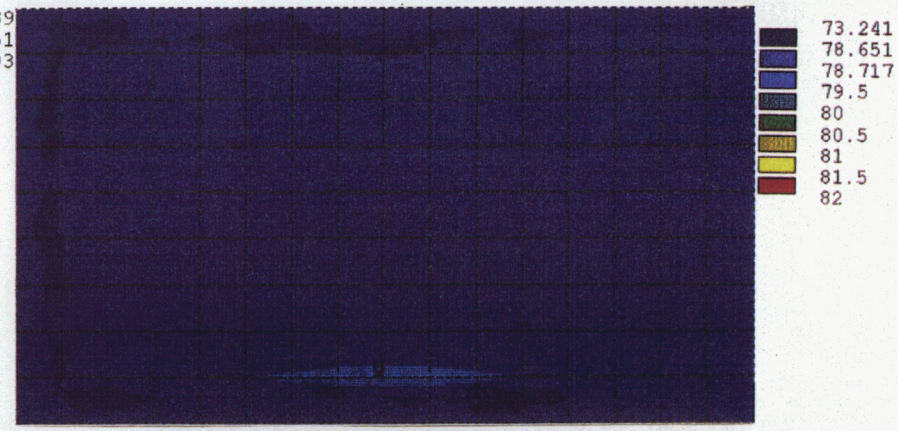


Fig.5.36 Temperature distribution at the surface above T_c with Defect3.

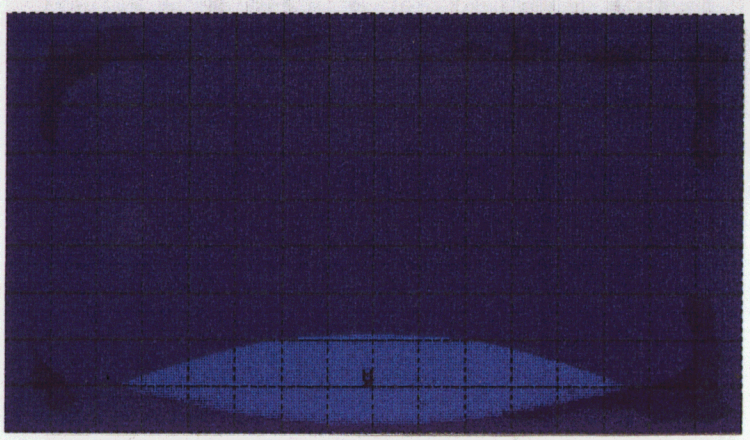


Fig.5.37 Temperature distribution at the surface above T_c with Defect4.

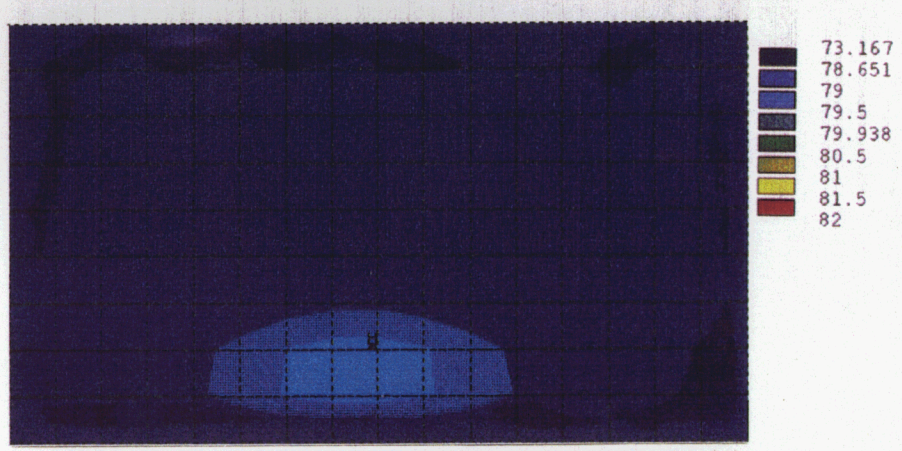


Fig.5.38 Temperature distribution at the surface above T_c with Defect10.

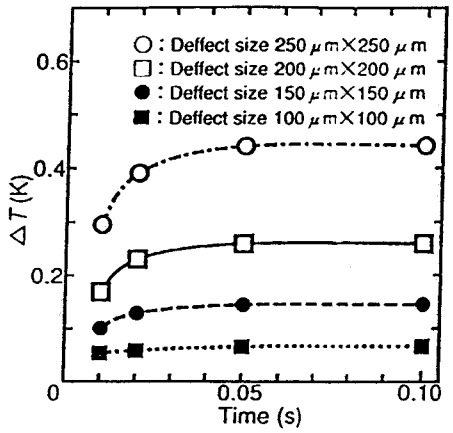


Fig.5.39 Relationship between defect size and △T at bond interface between chip resistor component and fillet.

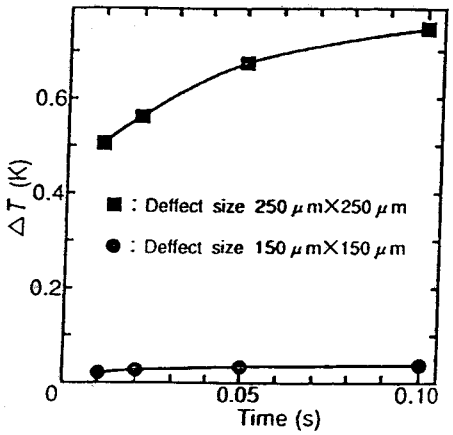


Fig.5.40 Relationship between defect size and △T at bond interface between land and fillet.

に欠陥の割合が多くなるにつれと急激に△Tが大きくなっている。

Fig.5.17とFig.5.31、Fig.5.32さらにFig.5.33の比較から、未接合部分が大きくなるとその影響部分も大きくなる、また△Tも高くなることがわかる。また Fig.5.20とFig.5.34の比較からも同様のことがいえる。

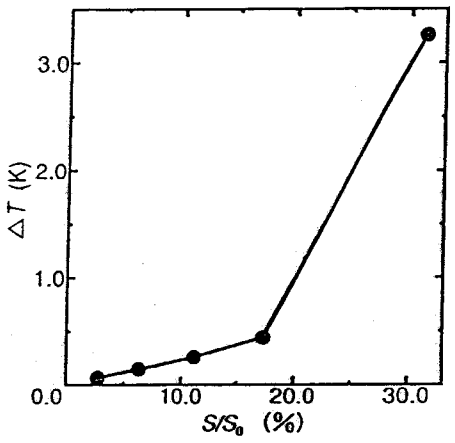


Fig.5.41 Relationship between defect area ratio and △T at bond interface between chip resistor component and fillet.

Fig.5.35～Fig.5.37から、欠陥の位置にかかわらずサイズが大きくなると表面への影響は大きくなっている。さらに、ソルダー部品間の 150μm×150μmの未接合とソルダーランド間における150μm×150μmを比較すると、ソルダーランド間の方が影響が表れにくいにもかかわらず、250μm×250μmでは逆に、ソルダー部品間の方が影響がでにくい。また、いずれのサイズでも、50ms～100msの時間でほぼ定状状態になっている。

5．5 実験による欠陥検出の検証

5．5．1 供試材料及び実験装置

本節では、まず熱画像撮像装置の観測面の傾きによる温度計測特性の変化を調べるために、表面状態が均一な対象材(厚さ10μmのSnめっきを施した純銅(高さ11mm,直径8mm))として用いた。2．3．2項で熱画像撮像装置の温度計測特性を検討するために用いた装置と同じ装置を用いた。

5．5．2　観測面の角度による計測温度の影響

本節においては、熱画像撮像装置の観測面の傾きによる温度計測特性の変化を調べるために、対象物を温度343Kで、観測面の傾きを0radから1.2rad(70度)まで変化させた。そして、取得した熱画像の平均輝度(256階調で表示)と観測面の角度の関係を示したものがFig.5.42である。この図からも分かるように、観測面の角度が0～1.2radに変化しても計測温度はそれほど変化しないことが分かる。今、チップ部品のフィレットの傾きは、0.35rad(20度)から0.79rad(45度)程度なので、接合部の熱画像を、今までと同じように理解できることが分かる。

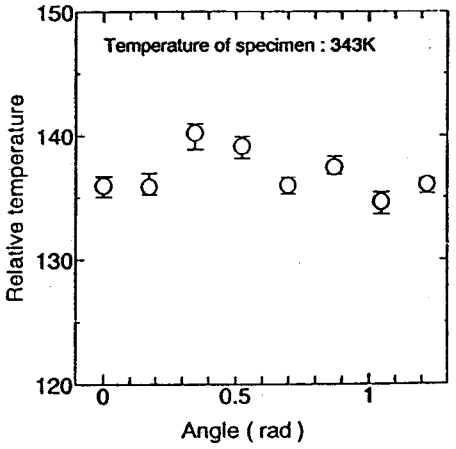


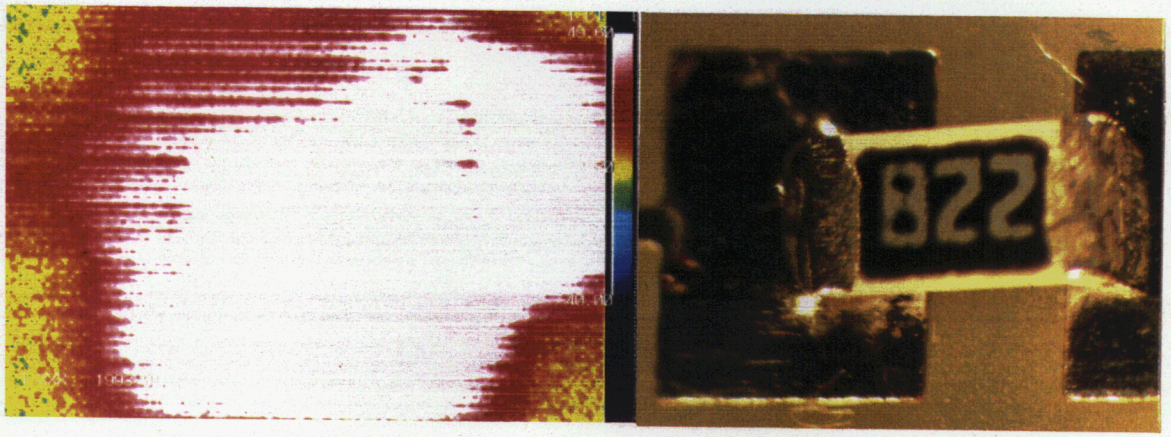
Fig.5.42　Relationship between angle of specimen and relative temperature.

5．5．3　実際のチップ部品接合部を用いた欠陥検出プロセスの検証

まず、熱画像中の色と温度の関係は温度棒のようになっていて、分解能は256階調で1階調が約0.6Kであり、最低温度が約255Kで最高温度が約417Kである。また、熱画像上チップ部品の温度が異常に高く表示される。これは、チップ部品の表面に黒い塗料が塗布されているため、放射率が1に近くなっており、放射率が0.1以下の金属部分に比べて同じ温度でも放射される赤外線量が10倍以上に増大するためである。

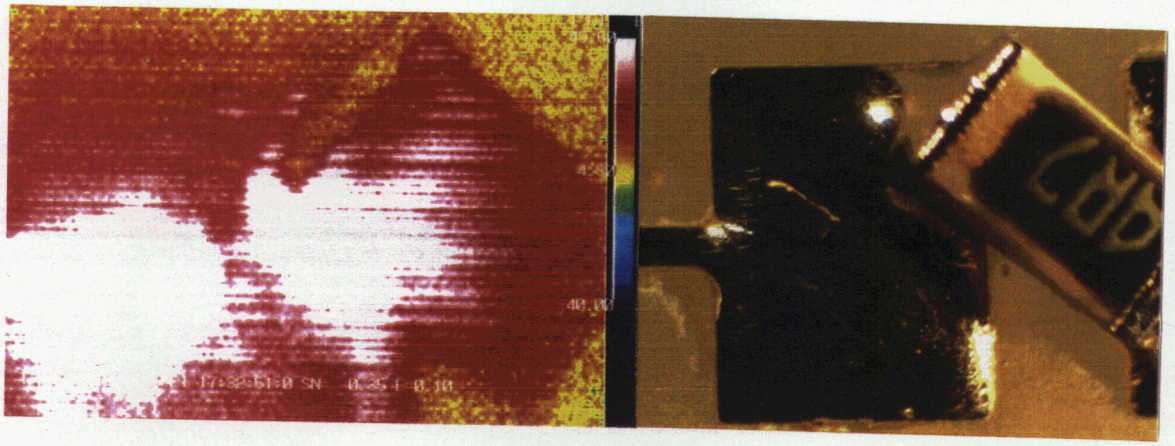
Fig.5.43(a)の熱画像は、(b)の外観写真からもわかるように、ソルダが不足しているものである。ソルダが不足すると熱容量が小さくなり、少しの入熱で容易に高温となりソルダが不足しているのがわかる。

Fig.5.44(a)の熱画像は、(b)の外観写真のように大きく部品の位置がずれてしまっているものである。これは電極部分（熱画像の低温部分）が斜めになっていることでズレている事を判断できると言える。



(a) Thermal image　　(b) Appearance of joint

Fig.5.43　Comparison of thermal image and appearance of the joint with solder shortage.

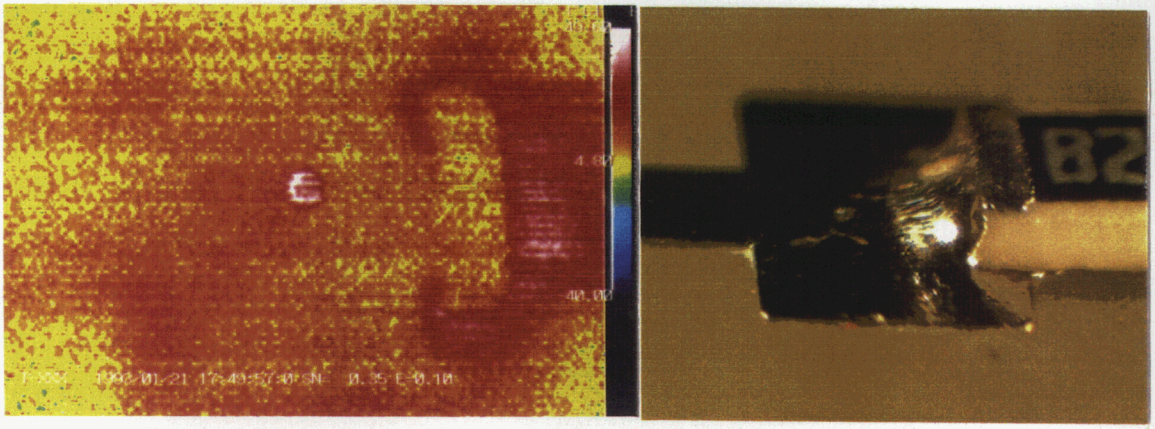


(a) Thermal image　　(b) Appearance of joint

Fig.5.44　Comparison of thermal image and appearance of the joint with misalignment.

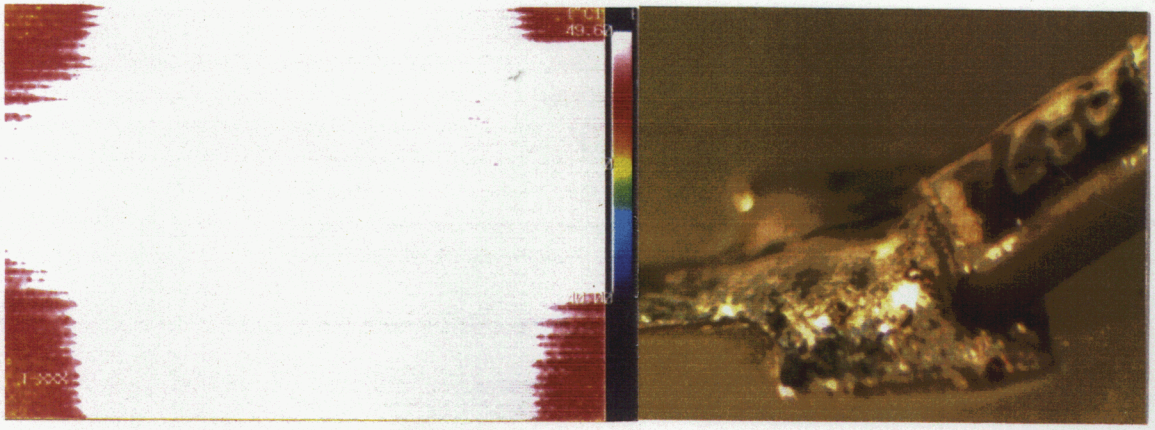
Fig.5.45(a)は、(b)の外観写真のフィレット上部の中央部のくぼみ（ピット）がはっきりと熱画像上に表れているのがわかる。このくぼみでのレーザ入射時に多重反射を起こし入熱量が局所的に多くなることや赤外線検出時に観測点以外の部分からの赤外線も反射することにより、他からの赤外線もその点からの赤外線として観測してしまうことによると思われる。

Fig.5.46(a)は、(b)の外観写真のようにチップ部品が片方の電極部を浮かせてしまっているチップ立ちのもので、接合部のソルダ量が少ないために全体が高温表示になっている上に、真上からの熱画像では部品の外部電極すら判断できない状態である。



(a) Thermal image　　(b) Appearance of joint

Fig.5.45　Comparison of thermal image and appearance of the joint with pit.

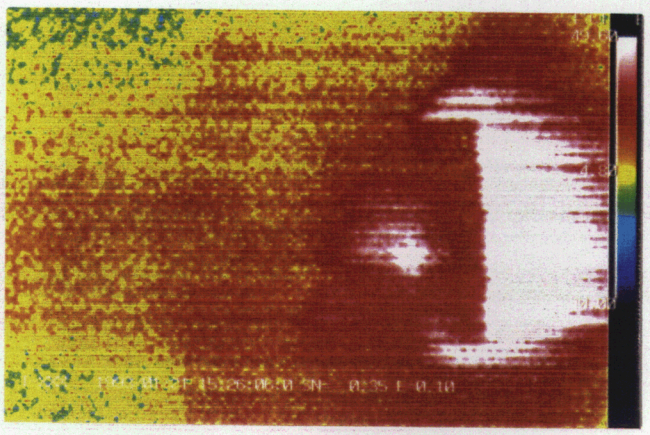


(a) Thermal image　　(b) Appearance of tombstone

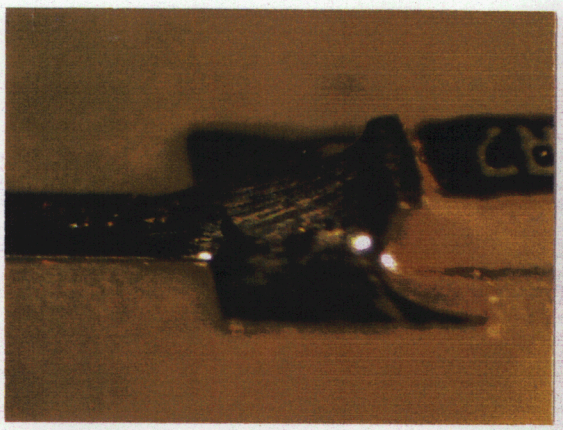
Fig.5.46　Comparison of thermal image and appearance of the joint with tomb stone.

Fig.5.47(a)は、(b)の外観写真では若干のぬれ不良以外は見られないにもかかわらず、熱画像中央に高温部を表示している。そこで(c)の破断面の写真を見てみると、フィレット上部にボイドの跡があり、その部分での強度が弱いためそこから部品とともに剥離したのがわかる。

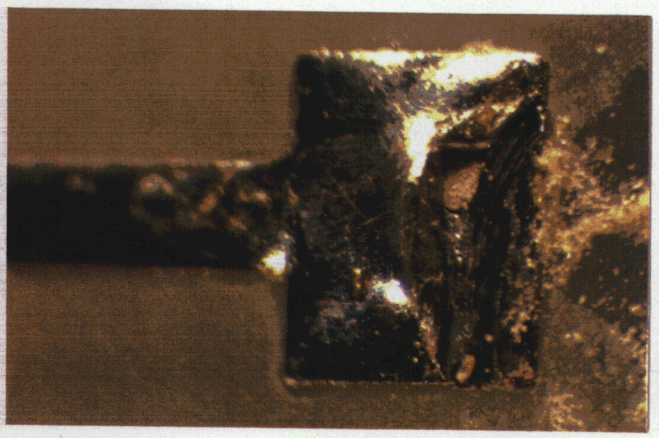
これらの結果より、QFPのガルウィング型リード接合部でのレーザ照射型熱画像法をチップ部品に適応することにより接合部に存在しうる欠陥を検出できる。



(a) Thermal image



(b) Appearance of joint



(c) A fractured surface

Fig.5.47 Comparison of thermal image and appearance of the joint with void.

5．6　結論

本章では、チップ部品接合部の欠陥検出方プロセスについて理論的、実験的に検討した。その結果、以下のような結論を得た。

1）　チップ部品接合部に存在する未接合欠陥の検出条件の検討のため接合部の熱伝導モデルに基づく熱伝導シミュレーションを行い。その結果、接合部表面への入熱量が増えると、ほぼ比例的に表面温度も上昇し接合部表面の温度分布形状は入熱時間にかかわらず、変化しないこと、そして、接合部表面温度分布は入熱直後（0s～50ms）より、50ms以降の方が温度上昇が少なく、この時間に撮像された熱画像による評価が適切である事を明らかにした。このことより、リード表面最高温度としては353K（80℃）程度を（本実験の場合、Qにして$3.47\times10^{5}w/m^{2}$程度）、また熱画像取得時間tとしてはレーザ照射開始後100msが適切であることを明らかにした。

2）　チップ部品接合部に存在する未接合欠陥の位置によって、表面温度分布形状に変化を与える欠陥と与えない欠陥があり、未接合部分の位置が部品下部にある場合は推定が困難である。そのほかの界面に存在する未接合欠陥は表面の温度分布に影響を与える事が明らかになった。

3）　欠陥のサイズが大きくなればその影響として高温部分の領域が拡大し、表面の最高温度も上昇し検出が容易になる事が明らかになった。。

4）　熱画像撮像装置の温度計測特性の観測面の傾きによる影響がない事が明らかになった。

5）　撮像された熱画像による接合部欠陥検出に関する評価を行い、まず、熱画像によりチップ立ち、位置ズレは低温表示される電極の位置からはっきりと確認できる。ソルダ不足は、熱容量が少ないために高温表示されるので、その少ない部分とともに確認できる。次に、ピットなどのフィレット

表面にあるくぼみは、高温部として表示され、またその周囲の温度勾配が急なので確認できる。次に、内部欠陥は、本実験ではボイドしか扱えなかったがこれも高温表示されまた、その周囲の温度勾配がなだらかであることにより、外部のピットなどとは区別できることが確認された。

第６章　レーザ照射型熱画像法の欠陥検出アルゴリズムとその検証

６．１　はじめに

本章では、ここまでで構築された欠陥検出プロセスをふまえ、総合的な欠陥検出アルゴリズムを作成し、その妥当性を実験結果をもとに検討する。

ここでは、QFPのガルウィング型リード接合部に対する欠陥検出アルゴリズムを検討することにする。まず、各欠陥に対する熱画像を取り上げ、それを整理しそれらの熱画像をもとに欠陥検出アルゴリズムを構築する。

最後に、現実の熱画像をもとに欠陥検出アルゴリズムの妥当性を実験的に検証する。

６．２　実験装置、供試材料及び実験方法

６．２．１　実験装置

使用した実験装置としては、２、４、５章で使用したものと同じ装置でマイクロ接合部表面を局所的に急加熱するためにレーザ加熱装置、また加熱直後より一定時間間隔で接合部の表面温度・温度分布を測定するための赤外顕微鏡を含めた熱画像撮像装置、さらに得られた熱画像を解析するためにこれらの装置とは別に16bitパーソナルコンピュータを用いている。

測定対象物への加熱源として用いたレーザは、YAGレーザ（東芝製 LAY62-6A4型）である。このレーザは、高純度YAG（Yttrium Alminium Garnet、$Y_3Al_5O_{12}$）の結晶で、Nd^{3+}を0.1～1.0%含んだ物をレーザ物質として用いた４準位レーザである。発振波長は1.06μm、励起ランプはKrアークランプを使用し、レーザ出力は最大100Wである。また、レーザスポット径は最小0.4mmで出力安定度は、マルチモードで±3%以下である。この装置はレーザ発振ユニット、レーザ電源ユニット、レーザ冷却ユニット、光ファイバ分岐光学系より構成されている。これをリード表面等へ照射すると、長軸約600μm、短軸約400μmの楕円形となり、軸上での光の強度分布はほぼガウス分布となっている。またレーザ光の位置設定や、レーザスポッ

ト径の調整にはYAGレーザと同軸に設定されたHe-Neレーザ（発振波長633μm）を用いている。なおYAGレーザとHe-Neレーザの発振波長は後述する熱画像撮像装置の赤外線カメラの受光波長領域外にあり、かつ帯域フィルターを介しているので、レーザ光に対するカメラ感度は非常に低く、無視しうる。

熱画像撮像装置としては、日本アビオニクス社製のTVS-2000で、観測対象物の各部の温度分布を非接触で測定し、それを熱画像として疑似カラー表示する装置である。この熱画像撮像装置は、赤外線カメラヘッド、イメージプロセッサ（モニタ内蔵）、リアルタイムレコーダの主要部分から構成されている。また熱画像の解析にはパーソナルコンピュータ（日本電気PC9801UX）を用いている。以下に各部の機能について述べる。

（ａ）　赤外線カメラヘッドは、レンズ系と、対象物の表面から放射されている赤外線をアルゴンガスによってジュールトムソン効果によって冷却されている赤外線検出センサ（InSb、検出波長3～5.4μm）により受光し、電気信号に変換して1秒間に30フレームの撮像する。

（ｂ）　イメージプロセッサは、カメラヘッドからの電気信号をディジタル信号に変換し、フレームメモリーに記憶した後、信号処理して内蔵モニタに最大256階調の疑似カラーで熱画像をリアルタイム表示する。

（ｃ）　リアルタイムレコーダは、熱画像の記録に半導体メモリー(SRAM)を用いて、熱画像を記録再生するもので30frame/sのリアルタイムの熱画像の録画、再生が最高300画frameまで可能である。録画開始より16ms前に1msの画像取り込み開始トリガーパルスが出力される。

（ｄ）　パーソナルコンピュータはGPIBケーブルを通してイメージプロセッサに接続され、それにより送られた熱画像をハードディスクに保存している。そしてその熱画像より時間的温度変化や温度分布などの必要情報を抽出して情報解析を行っている。

なお本研究における観測対象物は、数百μm～1mmと小さいため、カメラヘッドには赤外顕微鏡システムを装着して測定を行った。この時の熱画像の視野サイズは横2300μm、縦1350μmで、画素数は横256pixel、縦100pixelであり、1pixel当りの解像度は横は約9.0μm、縦は約13.5μmである。

6．2．2　供試材料

実際のQFPのガルウィング型リードの接合部を用いた欠陥検出アルゴリズムの検討を行うために、Fig.6.1に示すような80ピンのピッチ0.8のQFPをFig.6.2に示すパターンのランド上にマニュアルソルダリングにより接合されたものを用いた。なお、使用した基板は、厚さ1.5mmのガラスエポキシ基板である。

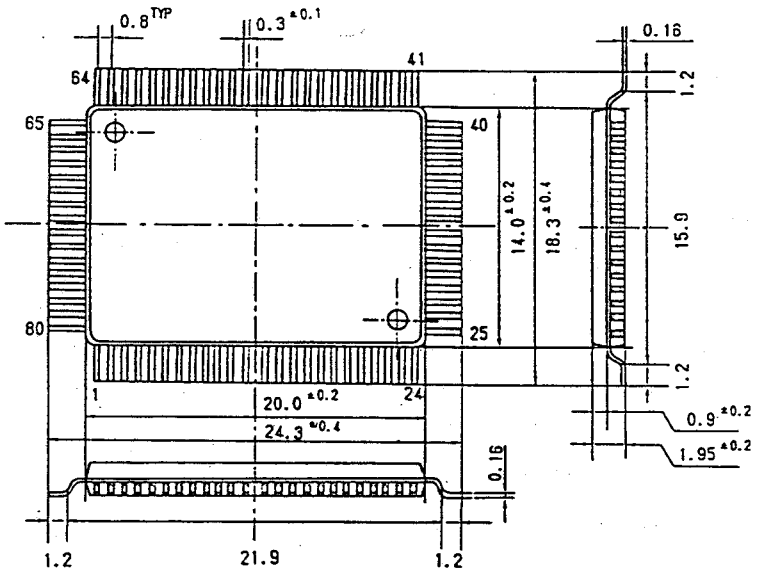


Fig.6.1 Shape and size of flat package.

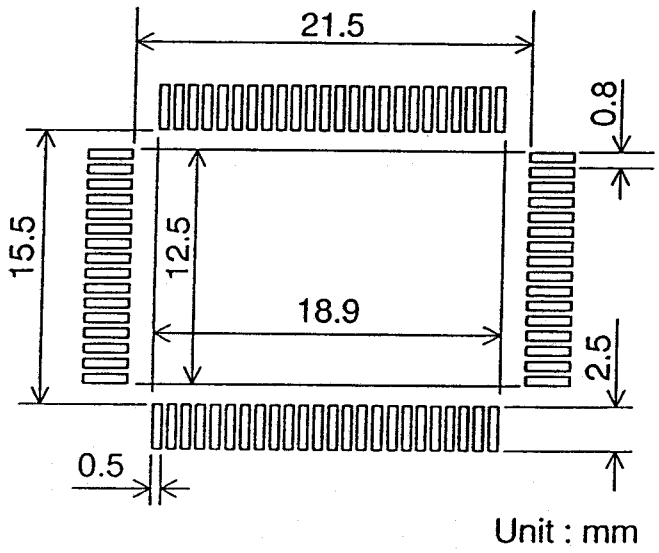


Fig.6.2 Shape and size of land.

6．2．3　実験方法

観測対象物の熱画像を撮像する手順は、以下の通りである。なおFig.6.3に熱画像撮像装置、YAGレーザ、試片の位置関係を示している。また、レーザレンズユニットの水平面に対する角度を0.5rad(30度)に設定している。

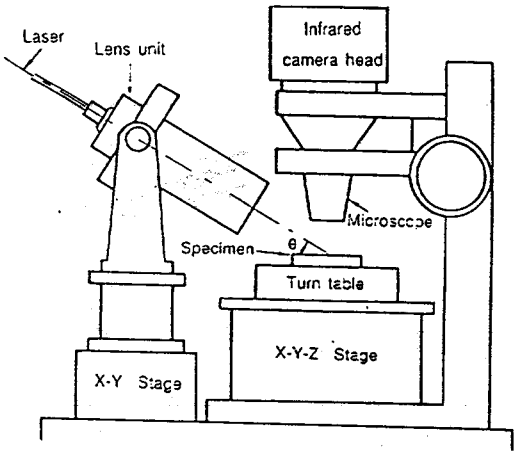


Fig.6.3 Experimental apparatus for detection of micro defects.

1）　試片をターンテーブル上に水平に固定し、レーザ、熱画像撮像装置の焦点を合わせ、熱画像撮像装置のリアルタイムレコーダの設定を行う。

2）　リアルタイムレコーダをスタートする。レーザシャッターがリアルタイムレコーダの熱画像記録開始に連動してオープンし、レーザを所定時間照射する。リアルタイムレコーダは33ms毎に1枚の熱画像を記録できる。

3）　GPIBケーブルを通してリアルタイムレコーダに記録されている熱画像をパーソナルコンピュータのハードディスク上に転送する。

6．3　各種欠陥の熱画像とその特徴

本章では、欠陥検出アルゴリズムを構築する前に、種々の欠陥の熱画像とその特徴を整理した。その結果は以下のようになる。

まず、Fig.6.4に示すような部品が存在しない接合部である。これは、部品が存在していないために接合部での熱容量が異常に小さいためランド全体が高温になる。

次に、Fig.6.5に示すような位置ずれを有する接合部である。これは、リードの位置がランドからずれているため、リードの温度分布を示す場所がランドからはみ出す。

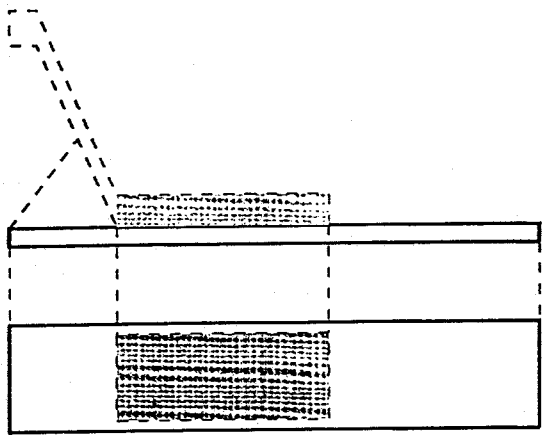


Fig.6.4 Illustration of no device joint.

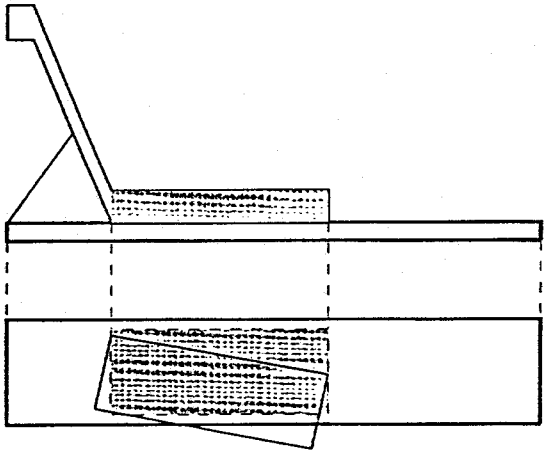


Fig.6.5 Illustration of joint with misalignment.

次に、Fig.6.6に示すようなフィレットの未形成を有する接合部である。これは、ヒール部のフィレットが存在していないため、その分の熱容量が減少し、そのため、3章で検討したとおりリードのベンド部で良好な接合部に比べて温度が上昇する。

次に、Fig.6.7に示すようなブリッジを有する接合部である。これは隣の接合部のソルダと一緒になっているため接合部の熱容量が大きくなり、接合部全体の温度がほとんど上がらない。

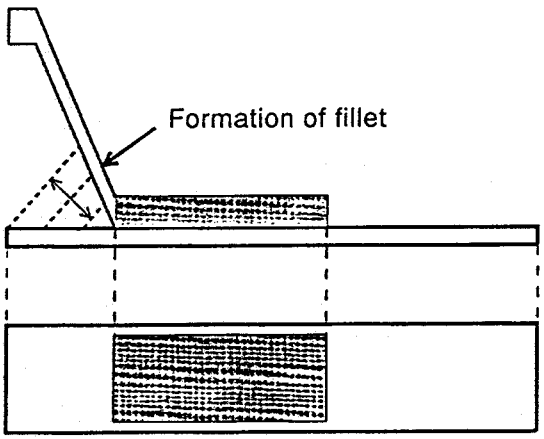


Fig.6.6 Illustration of joint with defective fillet formation.

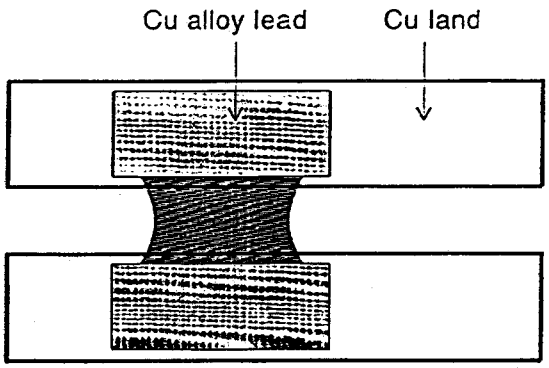


Fig.6.7 Illustration of joint with bridge.

次に、Fig.6.8に示すようなピットを有する接合部である。これは、接合部の一部にくぼみが生じているため、その場所でレーザの多重吸収が起きるとともに、放射赤外線の多重反射がおき、他の部分の赤外線もその場所での赤外線として検出するため見かけ上温度が高くでる。

次に、Fig.6.9、Fig.6.10に示すような未接合欠陥あるいはボイドを有する接合部である。これは接合部の界面に連続体ではない領域が出来ている。そのため熱を通しにくい領域が出来る。そのため3章で検討した通り接合部の表面に高温領域が出来る。

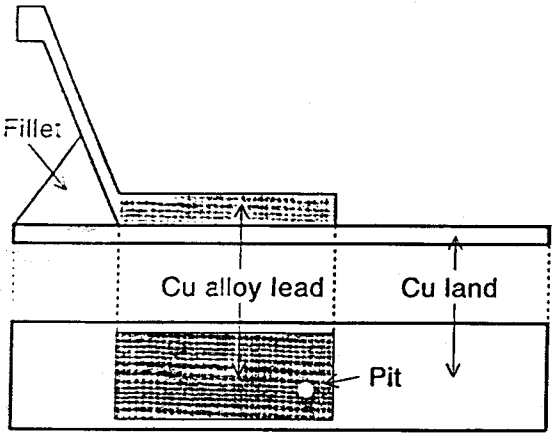


Fig.6.8 Illustration of joint with pit.

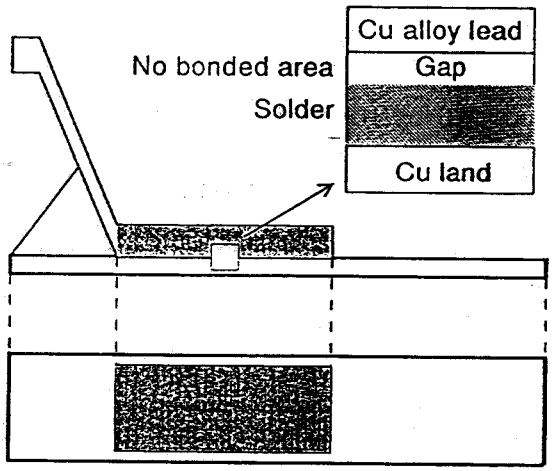


Fig.6.9 Illustration of joint with no bonded.

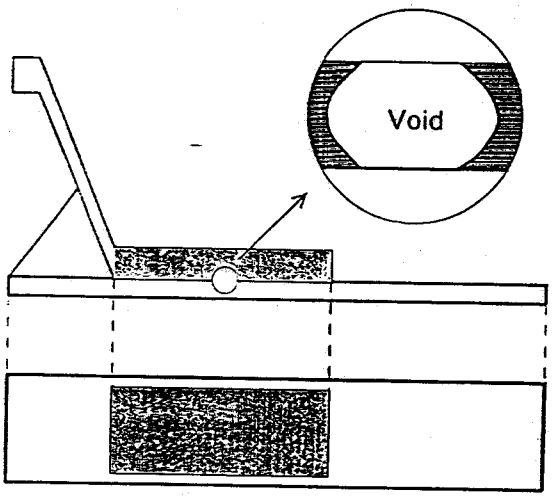


Fig.6.10 Illustration of joint with void.

ここで、ピットと未接合ないしはボイドとの熱画像上での違いは、未接合ないしボイドはその高温部分の中心部が高く、周辺部にいくほど低くなっているのに対して、ピットはその逆で、中心部が低く、周辺部が高くでている。

6．4　欠陥検出アルゴリズムの作成

本章では、前節で想定した欠陥に対する熱画像の特徴をもとに全体的な欠陥検出アルゴリズムを構築する。

まず、欠陥検出アルゴリズムの基本的な方針としては、次の二つの大きな方針

１）その欠陥の存在のみで不良品となるような欠陥から検出する。

２）欠陥の判断方法が簡単な欠陥から検出する。

を採用した。この方針からいくと検出する順番は、接合部とランドの平均温度で判断できる、部品なし、ブリッジが最初で、次に、接合部の位置と、基板部分での温度分布で判断できる位置ずれ、最後に接合部の温度分布形状を見て判断しなければならないフィレットの形成状態、ピット、ボイド、未接合の順番となる。これをそれぞれの具体的な処理等を加えてフローチャートにしたのがFig.6.11である。

まず、Fig.6.12に示すようにリード部と、ランド間にそれぞれMask1、Mask2を設定した。リード部はリードの回りのフィレット部の温度が高くでることにより現実のリード部に設定する。リード部の平均温度の良否の判断は、シミュレーションによる温度分布解析により、良好な接合部で考えられる接合部の平均温度の最大（フィレットの形成状態の検討に用いた熱伝導モデルのソルダの量が最も少ないもの）と最小（フィレットの形成状態の検討に用いた熱伝導モデルのソルダの最も多いもの）をそれぞれ正常温度領域の上限と下限に用い、Mask1での平均温度を評価することにより行われた。リード部の位置の良否はリード部がランド部からはみ出していないかどうかをMask1の位置と、Mask2の温度分布により判断した。T_cの値は、先に決定されたF_1、L_1、θ_1の熱伝導モデルでの温度分布の最高温度を用いる。熱画像の温度評価用のσはT_cの温度での熱画像撮像装置の温度計測のばらつきをもちいる。また、接合部の温度（T_1、T_2、T_3）は、Fig.6.13に示すように、それぞれリードの先端部、リードの中央部、リードのベンド部近傍の任意の10点の平均温度を採用した。

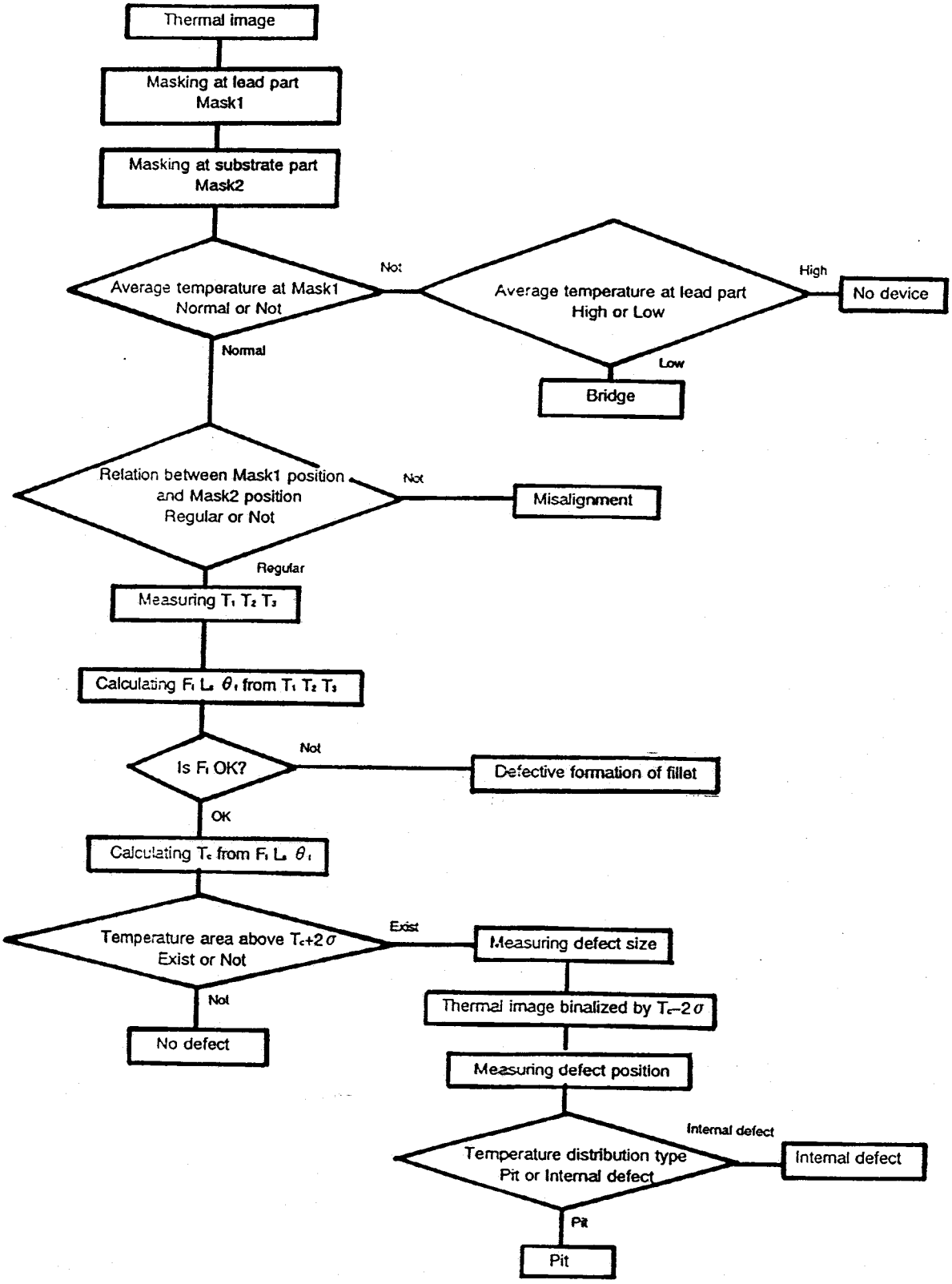


Fig.6.11 Flow chart of detection algorithm.

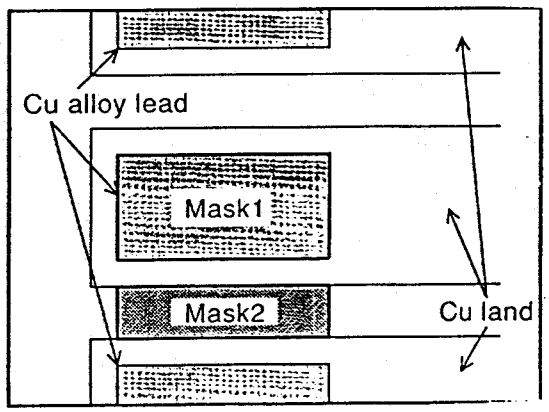


Fig.6.12 Mask patern at thermal image.

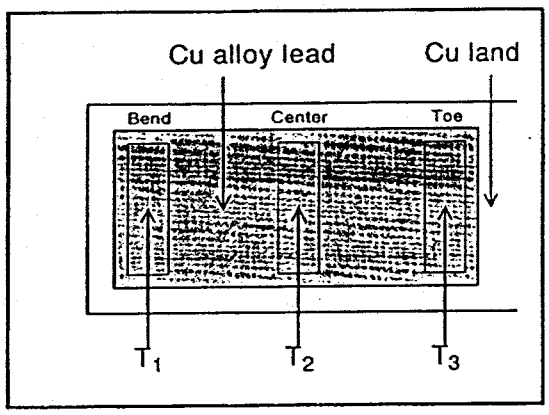


Fig.6.13 Temperature measurement area.

6．5 欠陥検出アルゴリズムの実験的検証

欠陥検出アルゴリズムの実験的検証として、4章で撮像した種々の欠陥を含む熱画像を用いて検証する。

まず、良好な接合部の熱画像の場合、ブリッジを有する接合部、位置ずれの欠陥を有する接合部の熱画像の場合、内部欠陥の熱画像の場合、フィレットを有する接合部の熱画像の場合は、正確な結果が得られた。ただし、フィレット量の評価はフィレットが正常に形成されているものとのΔT_{2-3}の値の比較で行った。

しかし、ピットを有する接合部の熱画像の場合、内部欠陥があるという結論に達する。これは、温度分布が計測範囲を超えてしまっているためピット特有の欠陥の真ん中の温度が小さくなるという現象が確認できなかったためである。これは欠陥による影響が大きすぎたためである。このような場合が起こらないようにするためには熱画像を撮像するときの計測温度領域に注意を払う必要があることを示している。

6．6 結論

QFPのガルウィング型リードの接合部に存在する欠陥の典型的な熱画像を想定し、それを用いて欠陥検出アルゴリズムを構築し、そのアルゴリズムをQFPのガ

ルウィング型リードの接合部の数種の熱画像を用いて実験的に検証した。以下、その結論を要約する。

1） QFPのガルウィング型リードの接合部に存在する欠陥の典型的な熱画像を想定し、欠陥の検出順序として、致命的な欠陥であること、検出しやすい欠陥であるという2つの基本方針を取る事により総合的で効率の良い欠陥検出アルゴリズムを構築できる事を明らかにした。

2） 現実の熱画像を用いて欠陥検出アルゴリズムの検証を行った。その結果ピット以外の欠陥についてはその妥当性が確認された。しかし、ピットの検出の時、ピットと内部欠陥を温度分布形状により分離する。このときに、熱画像を撮像する際に計測する温度領域が適切でないとき、または欠陥寸法の程度が大きすぎると、温度が計測限界を超え計測できず、その判断基準である温度分布の形状が取れないことがある。そのため熱画像撮像装置の設定にはこのことに注意して設定する必要がある事が明らかになった。

第７章　総括

本研究は、マイクロ接合部の欠陥検出に関するもので、表面実装プリント配線基板上のソルダリング接合部を対象にして、現在の欠陥検出方法の問題点を背景に、接合部の接合状態の評価をもとにした新たな検査方法として、レーザ照射型熱画像法を提案し、その検査方法の妥当性を理論的、実験的に検証した。

本研究で得られた重要な結果を総括する。

第１章では緒論及び、現状の欠陥検出方法の問題点をあげ、その問題点を背景に本研究の必要性と目的について述べた。

第２章では、表面実装プリント配線基板上の接合部の内部及び、外部欠陥検出の可能性をガラスエポキシ基板上の銅ランドにQFPのガルウィング型リードを接合したマイクロソルダリング接合部を用いて理論的に、実験的に検討した。

まず、欠陥検出の可能性を理論的に検討するために、レーザ照射時での接合部の温度分布をシミュレーションによる解析により実験結果との誤差5%以下で接合部表面の温度分布を求める事が可能な接合部の熱伝導モデルを構成した。この熱伝導モデルにおいて、接合状態を接合界面での熱伝達率によって表現する事により、接合界面の状態がリード表面の温度上昇に反映される事を明らかにした。さらに、接合界面に存在する未接合などの内部欠陥を接合界面に熱流を遮断する領域を作成する事により表現し、欠陥の存在している接合部の表面温度$T_{(d)max}$と、欠陥が存在しない接合部の温度分布の最高温度$T_{(n)max}$の差ΔT_{max}($T_{(d)max}-T_{(n)max}$)により欠陥情報が得られる事を明らかにした。

さらに、欠陥検出の可能性を実験的に検討するために、ソルダおよび2種の導電性の異なる接着剤による接合部にレーザを照射し、その表面温度分布を計測する事により、接合材の違いが表面温度情報により得られる事を明らかにした。この事は逆に表面温度情報より接合界面情報が得られる事を物語っている。また、セラミック基板上の銅合金リードのヒータチップ接合部を対象として、接合部にレーザを照射し、接合部熱画像を解析する事によりボイド、未接合など接合欠陥の検出可能性があることを明らかにした。また、実際のQFPのガルウィング型リードのソルダリング接合部を対象として、接合部にレーザを照射し、接合部熱画像を解析する事によりボイド、未接合、リードの位置ずれ、ブリッジ、ヒール部の

フィレットの未形成など接合欠陥の検出可能性があることを明らかにした。

3章では、レーザ照射型熱画像法によるマイクロ接合部の欠陥検出において、QFPのガルウィング型接合部に存在する欠陥を分類し、その内の未接合欠陥、及びフィレットの未形成について、レーザーを短時間照射した場合の接合部内部温度分布および表面温度分布を熱伝導モデルを用いた数値解析を用いて、検出プロセスを検討した。

まず、未接合欠陥については、ガラスエポキシ基板上の銅ランドに銅合金リードを接合したマイクロ接合部の熱伝導モデルを用いて欠陥検出条件の理論的検討を行った。その結果、未接合またはボイドのような内部欠陥寸法、位置はリードおよび基板などの材質、形状寸法が与えられた場合、欠陥が存在する場合のリード表面での温度分布を欠陥がない場合の最高温度で2値化した温度領域の寸法、位置で検出でき、内部欠陥が存在することによる表面温度上昇ΔT_{max}は欠陥寸法が大きくなるとともに上昇する傾向にある事を明らかにした。

次に、QFPのガルウィング型接合部でのヒール部のフィレットの形成状態の検出については、ガラスエポキシ基板上の銅ランドに銅合金リードを接合したマイクロ接合部のフィレット量や、リードとランド間のソルダ厚さ、リード平坦部とランドの傾きを変化させた接合部の熱伝導モデルを用いて、検出プロセスを理論的に検討した。その結果、リードの表面温度T_1、T_2、T_3からリードとランドの傾きを検出し、それによりフィレットの形成状態を検出できる事を明らかにした。これと同時にリードとランドの傾き、フィレットの形成状態より、リードの表面温度T_2からリードとランド間のソルダ量が検出でき、接合部の構造を決定できる事を明らかにした。つまり、欠陥が存在していないときの接合部の最高温度を決定できるということである。これにより、先の、内部欠陥の検出用のしきい値を決定する事が出来ることを明らかにした。

また、欠陥検出条件は、それぞれの熱伝導モデルを用いて理論的に検討を行った。この時、欠陥検出の為の適正条件は、接合部の温度上昇速度、欠陥による温度変化量と時間や入熱との関係、赤外線検出素子の特性と接合部の耐熱性を勘案した上で欠陥による温度変化量を最大にする条件にすることが必要である。その結果、どちらの欠陥の検出条件もリード表面最高温度としては353K（80℃）程度を、また熱画像の撮像時間としてはレーザ照射開始後100msが適切な条件となる

事を明らかにした。

最後に、内部欠陥の検出プロセスの検討に用いた熱伝導モデルのリードを銅合金リードの他、純銅リード及び42Alloyリードを用いて、検出可能な欠陥寸法とリード材、リード寸法、接合界面での熱伝達係数との関係について理論的に検討した。その結果、未接合またはボイドの欠陥検出限界寸法は、リード材が銅合金の場合、リード厚150μmで約50μmの接合欠陥が検出可能となる事を明らかにした。また、欠陥検出限界寸法はリードの材質にも依存し、同じ250μmの欠陥でも温度拡散係数が大きな純銅のリードの場合ΔT_{max}は銅合金の場合の約0.08倍となり、逆に温度拡散係数が小さい42Alloyリードの場合ΔT_{max}は約1.7倍となり、温度拡散係数が小さくなるにつれて検出精度が向上する事を明らかにした。また、この検出精度はリードの厚さに依存し、同じ250μmの欠陥でも50μm厚の場合だと、150μmの場合のΔT_{max}の値の約3.4倍の値となり、欠陥検出精度が向上する事を明らかにした。また、この検出精度はh_{t-l}に依存し、h_{t-l}が$1x10^4 W/(m^2K)$付近でΔT_{max}が最大となる。また、h_{t-l}がそれ以上になると、小さくなり、$1x10^7 W/(m^2K)$になると、ΔT_{max}が一定になる。また、h_{t-l}がそれ以下になっても小さくなり、$1x10^2 W/(m^2K)$になると、ΔT_{max}がほぼ0になる事を明らかにした。

4章では、接合部表面にYAGレーザを照射した時の、熱画像を記録するための熱画像撮像装置の赤外線受光カメラの撮像特性の解析と補正を行って、熱画像に対する信頼性を上げ、内部欠陥の検出における欠陥情報抽出方法とその特性について検討し、さらにその熱画像撮像装置を用いて、実際のQFPのガルウィング型リードの接合部の熱画像を撮像し欠陥検出プロセスを実験的に検証した。

まず、熱画像撮像装置の特性を調べ、熱画像撮像装置のカメラヘッドの構成から、装置固有の特性である赤外線検出素子と赤外線反射ポリゴンミラーの組合せによる変動要因を除き熱画像の信頼性を向上させることができることを明らかにした。また、熱画像撮像装置の特性を一定温度で、表面の状態が均一な試料の熱画像で評価し、計測温度と等価な熱画像上での輝度の平均値は対象物体の温度と比例関係にあり、輝度が1上昇すると、対象物体の温度は0.6K上昇することが明らかになった。また、輝度の変動の標準偏差で評価した結果、計測温度の信頼性は対象物体の温度が低いときは非常に悪く(323K(50℃)でσ=28.3)、対象物体の温度が高いときはよりよい精度(373K(90℃)でσ=12.8)が得られることを明らか

にした。また、モデル接合部を用いて、内部欠陥情報を熱画像撮像装置の特性を考慮し、しきい値を変えることにより欠陥の存在と欠陥の位置を精度よく検出できることを明らかにした。本章での疑似欠陥接合部では内部欠陥の位置に関しては、ずれ幅は、60μmの範囲に収まり、欠陥の大きさとしてはリードの長手方向は、現実の大きさの約2倍、リードの幅方向では約1.2倍で検出され、本研究での装置を用いたときには熱画像でのサイズに補正が必要であることを明らかにした。しかし、一方本欠陥検出装置を用いる場合、欠陥の存在の検出に温度しきい値を$T_c+2\sigma$を使用することより、欠陥による温度上昇であるΔT_{max}が温度しきい値T_cでの計測温度のばらつきσの2倍である2σ以上無いと、精度よく欠陥の検出ができないことが分かった。

また、実際のQFPのガルウィング型リードの接合部を用いて欠陥検出プロセスの妥当性を実験的に検証し、ボイドではそのサイズを誤差 10%以内で、位置は4μm以内で検出できる事を明らかにした。この他、フィレットの未形成、ブリッジ、位置ずれ、ピットの検出が出来る事を明らかにした。

5章では、チップ部品接合部の欠陥検出方プロセスについて理論的、実験的に検討した。

まず、チップ部品接合部に存在する未接合欠陥の検出条件の検討のため接合部の熱伝導モデルに基づく熱伝導シミュレーションを行い。その結果、接合部表面への入熱量が増えると、ほぼ比例的に表面温度も上昇し接合部表面の温度分布形状は入熱時間にかかわらず、変化しないこと、そして、接合部表面温度分布は入熱直後（0s～50ms）より、50ms以降の方が温度上昇が少なく、この時間に撮像された熱画像による評価が適切である事を明らかにした。このことより、先にQFPのガルウィング型リードの検出条件と同じ、リード表面最高温度としては353K（80℃）程度を（本実験の場合、Qにして3.47×10^5W/m^{2}程度）、また熱画像取得時間tとしてはレーザ照射開始後100msが適切であることを明らかにした。

次に、チップ部品接合部に存在する未接合欠陥の位置によって、表面温度分布形状に変化を与える欠陥と与えない欠陥があり、未接合部分の位置が部品下部にある場合は推定が困難である。そのほかの界面に存在する未接合欠陥は表面の温度分布に影響を与える事を明らかにした。また、その欠陥のサイズが大きくなればその影響として高温部分の領域が拡大し、表面の最高温度も上昇し検出が容易

になる事を明らかにした。

また、チップ部品のフィレットの温度を実験時に計測するに当たって観察面の傾きが計測温度にどのような影響を与えるかを検討した。その結果、熱画像撮像装置の温度計測特性の観測面の傾きによる影響がない事が明らかになった。

そのうえで、撮像された熱画像による接合部欠陥検出に関する評価を行い、まず、熱画像によりチップ立ち、位置ズレは低温表示される電極の位置からはっきりと確認できる。ソルダ不足は、熱容量が少ないために高温表示されるので、その少ない部分とともに確認できる。次に、ピットなどのフィレット表面にあるくぼみは、高温部として表示され、またその周囲の温度勾配が急なので確認できる。次に、内部欠陥は、本実験ではボイドしか扱えなかったがこれも高温表示されまた、その周囲の温度勾配がなだらかであることにより、外部欠陥のピットなどとは区別できることを明らかにした。

6章では、QFPのガルウィング型リードの接合部に存在する欠陥の典型的な熱画像を想定し、それを用いて欠陥検出アルゴリズムを構築し、そのアルゴリズムをQFPのガルウィング型リードの接合部の熱画像を用いて実験的に検証した。

まず、QFPのガルウィング型リードの接合部に存在する欠陥の典型的な熱画像を想定し、欠陥の検出順序として、致命的な欠陥であること、検出しやすい欠陥であるという2つの基本方針を取る事により総合的で効率の良い欠陥検出アルゴリズムを構築できる事を明らかにした。

また、現実の熱画像を用いて欠陥検出アルゴリズムの検証を行った。その結果ピット以外の欠陥についてはその妥当性が確認された。しかし、ピットの検出の時、ピットと内部欠陥を温度分布形状により分離する。このときに、熱画像を撮像する際に計測する温度領域が適切でない、または欠陥の程度が大きすぎると、温度が計測限界を超え計測できず、その判断基準である温度分布の形状が取れないことがある。そのため熱画像撮像装置の設定時にはこれらのことに注意してい設定する必要性がある。

謝辞

本研究は、大阪大学大学院工学研究科博士課程において、大阪大学教授　仲田周次博士の御指導と御教示を賜って遂行し得たものである。

また、本論文の作成に当たり、大阪大学教授　井上勝敬博士、小林紘二郎博士、黄地尚義博士、座古勝博士より有益な御助言と御討論を頂いた。

実験の遂行にあたって、大阪大学工学部生産加工工学科助教授　藤本公三博士、同学科教官　安田清和先生を始め諸先生より多くの御助言と御激励を頂いた。また、大阪大学工学部生産加工工学科（溶接工学科）仲田研究室の卒業生である伊集院正人氏、松山敦美氏、中島泰氏、江本英明氏、山田朋夫氏、在学生である山本哲也氏、松枝弘憲氏をはじめ、多くの卒業生ならびに在学生の方々より多大なご支援、ご協力を頂いた。

また、実験装置の試作に当たっては、大阪大学工学部技官　川辺了一氏をはじめ、生産加工工学科共通掛の技官の方々から多大なご協力を頂いた。

さらに、論文作成に当たり、仲田研究室の在学生のＭ１　関谷卓氏、那須博氏、新実高宏氏、同研究室の小川佳美事務補佐員から多大なご協力を得た。

本論文は、以上の方々をはじめ、数多くの方々の御指導ご援助を得てなされたものであり、本論文を終えるに当たり、これらの方々に深甚の謝意を表する次第であります。

参考文献

1） （社）日本プリント回路工業会編,「表面実装技術（ＳＭＴ）の動向調査報告書」,（社）日本プリント回路工業会,(1992),p.319-351

2） 社団法人 日本溶接協会 マイクロソルダリング技術認定・検定委員会,「標準マイクロソルダリング技術」, 日刊工業新聞社発行

3） 岡本紳二、吉村一成、「実装回路基板はんだ面の自動外観検査」、溶接学会誌、第５８巻、第４号（１９８９）、p.84-88

4） 村岡建樹、「プリント基板はんだ付け外観検査装置とその実際」、自動化技術、第２１巻、第５号（１９８９）、pp.54-59

5） 谷内田 正彦、「目視検査の自動化」、電気学会論文誌、Vol.107, No.8(1987), pp.704-709

6） 岡本紳二、「実装基板はんだ面外観検査機」、第３回ソルダリング分科会資料（１９８７）

7） 村岡建樹、「光学式はんだ付け外観検査装置の検査評価技術」、電子技術、１９９１－３月別冊、pp.73-77

8） PETER KAUFMAN,GERARD MEDIONI and RAMAKANT NEVATIA, "VISUAL INSPECTION USING LINEAR FEATURES",Patern Rcognition, Vol.17, No.5, pp.485-491(1984)

9） Jorge L.C.Sanz, Anil K.Jain,"Machine-vision techniques for inspection of printed wiring boards and thick-film circuits" Optical Society of America, Vol.3, No.9(1986), pp.1465-1482

10） G.A.W.WEST,"A System for the Automatic Visual Inspection of Bare-Printed Circuit Boards", Vol.SMC-14, No.5(1984), pp.767-773

11） J.F.JARVIS,"A Method for Automating the Visual Inspection of Print Wiring Boards",IEEE TRANSACTION ON PATTERN ANALYSOS AND MACHINE INTELIGENCE, Vol.PAMI-2, No.1(1980), pp.77-82

12） YASUHIKO HARA, NOBUYUKI AKIYAMA, and KOICHI KARASAKI,"Automatic Inspection System for Printed Circuit Boards", IEEE TRANSACTION

ANALYSIS AND MACHINE INTELIGENCE, Vol.PAMI-5, No.6(1983), pp.623-630

13) PAUL J.BESL, EDWARD J.DELP, RAMESH JAIN,"Automatic Visual Solde Joint Inspection, IEEE JOURNAL OF ROBOTICS AND AUTOMATION, Vol.RA-1, No.1(1985), pp.42-56

14) NOBUYUKI GOTO and TAKASHI KONDO,"ANAUTOMATIC INSPECTION SYSTEM FOR PRINTED WIRING BBOARD MASKS", Pattern Recognition, Vol.12(1980), pp.443-455

15) John E. Bolkcom, Jeffrey A. Jalkio, Richard C. Kim, Steven K. Case,"HIGH PROFILING FOR THICK FILM HYBRID INSPECTION", Proceedings of ISHM symposium, 1987, pp.712-718

16) Ralph D. Taylor,"AUTOMATIC OPTICAL INSPECTION OF THIN FILM CIRCUIT",Proceedings of ISHM symposium, 1987, pp.700-706

17) Roy H. Propst, C. Robert Bagnell, Frank A. DiBianca, Edward Cole, Darryl Johnson, William Oxford, Craig Allyn Smith,"DIGITAL IMAGE PROCESSING METHOD FOR DEVICE FAILURE ANALYSIS", Proceedings of ISHM symposium, 1984, pp.402-412

18) James A. Hain and Gart W. Johnson,"THE USE OF BAKSCATTER ELECTRON IMAGING IN INSPECTION AND EVALUATION OF THICK FILM CIRCUIT", Proceedings of ISHM symposium, 1981, pp.134-138

19) Harry K.Charles, Jr., Bruce M. Romenesko, and David O. Shpiro, "INSPECTION AND FAILURE ANALYSIS IN HYBRID MICROELECTRONICS USING SCANNING ELECTRON MICROSCOPE TECHNIQUES", Proceedings of ISHM symposium, 1981, pp.139-147

20) M. A. West, S. M. DeFoster, E. C. Baldwin, R. A. Ziegler, "Computer-Controlled Optical Testing of High-Density Printed-circuit Boards", IBM J.RES.DEVELP, Vol.27, No.1(1983), pp.50-58

21) SANDRA L.BARTLETT, PAUL J.BESL, CHRLES L.COLE, RAMESH JAIN, DEBASHISH MUKHERJEE, AND KURT D.SKIFSTAD,"Automatic Solder Joint

Inspection", IEEE TRANSACTION ON PATERN ANALYSIS AND MACHINE INTELIGENCE, Vol.10, No.1(1988), pp.31-43

２２） AHMED M.DAREISH, AND ANIL K.JAIN,"A Rule Based Approach for Visual Pattern Inspection", IEEE TRANSACTION ON PATERN ANALYSIS AND MACHINE INTELIGENCE, Vol.10, No.1(1988), pp.56-68

２３） YASUHIKO HARA,HIDEAKI DOI, KOICHI KARASAKI, AND TADASHI IIDA, "A System for PCB Automated Inspection Using Fluoresent Light", IEEE TRANSACTION ON PATERN ANALYSIS AND MACHINE INTELIGENCE, Vol.10, No.1(1988), pp.69-78

２４） DAVID W.CAPSON AND SAI-KIT ENG,"A Tiered-Color Illumination Approach for Machine Inspetion of Solder Joint", IEEE TRANSACTION ON PATERN ANALYSIS AND MACHINE INTELIGENCE, Vol.10, No.3(1988), pp.387-393

２５） ROLND T.CHIN, CHARLES A.HARLOW,"Automated Visual Inspection: A Survey", IEEE TRANSACTION ON PATERN ANALYSIS AND MACHINE INTELIGENCE, Vol.PAMI-4,No.6(1982), pp.557-573

２６） ROLND T.CHIN,"SURVEY Automated Visual Inspection: 1981 to 1987", COMPTER VISION, GRAPHICS, AND IMAGE PROCESSING", 41(1988),pp.346-381

２７） 浜田利満、仲畑光蔵、伏見智、森岡喜史、西田武彦、「Ｘ線はんだ付検査装置の開発」、精密工学会誌、59, 1(1993), pp.65-71

２８） 鈴木　優、古屋正幸、「Ｘ線によるはんだ付け不良自動検査装置」、第３回ソルダリング分科会資料（１９８７）

２９） Joseph E. Pascente,"X-RAY INSPECTION AND TESTING OF MULTICHIP MODULES", Proceedings of ISHM symposium, 1990, pp.352-357

３０） Janet E. Semmens and Lawrence W. Kessler,"NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF TAB OUTER LEAD BONDING USING ACOUSTIC MICROSCOPY", Proceedings of ISHM symposium, 1990, pp.644-651

３１） Lawrence W. Kessler and Janet E. Semmens,"NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF TAB BY ACOUSTIC MICROSCOPY", Proceedings of ISHM

symposium, 1988, pp.455-463

３２） Lawrence W. Kessler,"ACOUSTIC MICROSCOPY: A NONDESTRUCTIVE TOOL FOR EVALUATION ON TAB INTERCONECTIONS", Proceedings of ISHM symposium, 1984, pp.79-84

３３） JAMES M.KALLIS, GEORGETEE S.EGAN and MICHAEL P.WIRICK, "Nondestructive Infrared Inspection of Hybrid Microcircuit Substrate-to-Package Thermal Adhesive Bonds", IEEE TRANSACTION ON COMPONENTS,HYBRIDS,AND MANUFACTURING TECHNOLOGY, Vol.CHMT-4, No.3(1981),pp.257-260

３４） Gordon R.Love and Gary J.Ewell"Acoustic Microscopy of ceramic capacitors",IEEE Transactions on CHMT ,Vol.CHMT-1,No.3,September 1978 p.251-p.257(III-71)

３５） M.J.Cozzolino,J.L.Galvagni,and G.J.Ewell"Nondestractive Examination of Multilayer Capacitors by Neutron Radiography", IEEE Transactions on CHMT ,Vol.CHMT-1,No.3,September 1978 p.265-p.273(III-72)

３６） Riccardo Vanzetti, Alan C.Traub and Alan A.Richard,"Laser Inspection of Solder Joints",Brazing & Soldering, No.2(1982) pp.34-37

３７） 斉藤雄之、羽根一博、「光熱弾性法によるはんだ接合部評価法の研究」、精密工学会誌、 58, 2(1992), pp.155-160

３８） G.DE MEY,"THERMOGRAPHIC MESUREMENTS ON HYBRID CIRCUITS", Proceedings of 7th EUROPEAN HYBRID MICROELECTRONICS CONFERENCE, 1989

３９） JAMES M.KALLIS, ALBERT H.SAMUELS AND ROGER P.STOUT,"TRUE TEMPERATURE MESUREMENT OF ELECTRONIC COMPONENTS USING INFRARED THERMOGRAPHY",Circuit World,Vol.12,No.2,1986,p.25-30

４０） 日本機械学会編,「伝熱工学資料 改訂第４版」, 日本機械学会,(1987),p.314-316

４１） 三菱電機（株）,合金製品技術資料,No.277006

４２）　日本マイクロエレクトロニクス協会編，「厚膜ＩＣ化技術」，工業調査会，(1984)，p.8

４３）　仲田ら，「低温反応接合材利用による接合プロセスの低温化および接合品質の向上－微細電子材料の接合現象とプロセス制御に関する研究（第３報）－」、　溶接学会論文集，Vol.11，No.1，(1993)，p.202-208

４４）　田中正隆、中村正行、塩崎　明、「非定常熱伝導における熱特性値推定のための境界要素逆解析手法」、材料、Vol.42，No.447(1993)，pp.708-713

４５）　白鳥正樹、原田　衛、葉嶋隆夫、「赤外線温度計測に基づく三次元熱伝導解析システムの開発」、日本機械学会論文集（Ａ編）、５７巻(1991)５３９号、pp.1593-1598

４６）　FREDRIC WENTHEN,"The Heat Sink Effect of Printed Conductors", IEEE TRANSACTION ON PARTS,HYBRIDS,AND PACKAGING, Vol.PHP-12,No.2, JUNE(1976), pp.110-115

４７）　FRANK F.OETTING, DAVID L.BLACKBURN,SHERWIN RUBIN,"Thermal Characterization of Power Transistors, IEEE TRANSACTION ELECTRON DEVICES,VOL.NO.8 August1976,pp.831-838

４８）　THOMAS F.MOVIUS, IVAN R.JONES, AND JAMES M.KALLIS,"Experimental Investigation of Mounting Thermal Resistance of Flatpacks on Circuit Boards", IEEE TRANSACTION ON COMPONENTS, HYBRID, AND MANUFACTURING TECHNOLOGY, Vol,CHMT-2.No,4,DEVEMBER(1979),pp.512-517

４９）　GORDON N.ELLISON,"Theoretical Calculation of the Thermal Resistance of a Conducting and Convecting Surface",IEEE TRANSACTION ON PARTS,HYBRIDS,AND PACKAGING, Vol.PHP-12,No.3, SEPTEMBER(1976), pp.265-267

５０）　Bernard S.Siegel,"Measuring thermal resistance is the key to a cool semiconductor", Electronics, July 6, 1978, pp.121-126

５１）　P.Hemler and N.Poire,"THERMAL CONTACT IMPROVEMENT THROUGH INTERFACE MATERIAL APPLICATION", Proceedings of Institute of

Environmental Sciences, pp.493-497

５２） V.W.Antonetti, M.M.Yovanovich,"USING METALLIC COATING TO ENHANCE THERMAL CONTACT CONDUCTANCE OF ELECTRONIC PACKAGES",Heat Transfer Engineering,Vol.9,No.3,1988,pp71-77

５３） Vincent W.Antonetti, M.Michael Yovanovich,"THERMAL CONTACT RESISTANCE IN MICROELECTRONIC EQUIPMENT",The International Society For Hybrid Microelectronics,Vol.7,No.3,September 1984 pp.44-50

５４） KENNETH E.MANCHESTER AND DONALD W.BIRD,"Thermal Resistance : A Reliavility Consideration", IEEE TRANSACTION ON COMPONENTS, HYBRIDS,AND MANUFACTURING TECHNOLOGY, Vol.CHMT-3,No.4(1980), pp.580-587

５５） Alan Bernath, Daniel B.Olfe, Bryan W.Ferguson,"HEAT TRANSFER MESUREMENTS ON UNEQUALLY LOADED UNDERGROUND POWER CABLE WITH CONSTANT AND CYCLE CURRENTS", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems,Vol.PAS-103,No.10,October 1984, pp.2799-2806

５６） P.Hemler and N.Poire,"THERMAL CONTACT IMPROVEMENT THROUGH INTERFACE MATERIAL APPLICATION",Proceedings, Annual Technical Meeting - Institute of Environmental Science 30th. Publ by Inst of Environmental Sciences,Mount Prospect, Ill, USA, p.493-497

５７） R.J.Klein Wassink （竹本正、藤内伸一監訳）、「ソルダリング　インエレクトロニクス」、日刊工業新聞社（1986）、第１２章

５８） Jennie S. Hwang,"DEFECTS AND FAILURE PHENOMENA OF SOLDER JOINTS", Proceedings of ISHM symposium, 1988, pp.54-67

５９） 中岡康幸、渋谷洋子、弘田実保、町田一道、「表面実装におけるはんだ付部の界面特性に関する研究」、第１５回溶接学会マイクロ接合委員会資料(1987)

６０） 上貝康己、谷　周一、吉岡純夫、弘田実保、井上彰夫、「面実装はんだ接合部の疲労損傷評価」材料、第４０巻、第４５７号、pp.1324-1329

６１）　小泉　睦男、「移動・速度論」、昭晃堂、　第４章、　p61

６２）　鈴木延男、内田弘則、伊藤一男、望月　潤、伊藤利昭、加藤久和、喜多村重男、岡野裕一、「赤外線カメラヘッド705の開発」、ＮＡＣＬ技法、No.8(1987),pp.21-26

６３）　BOON Wong, D.E.Healing,"A Mechanistic Model for Solder Joint Failure Prediction Under Thermal Cycling",Transaction of the ASME. Vol.112, June(1990), pp.104-109

本論文に関連した発表論文

1） 「マイクロ接合部の欠陥検出の可能性、－レーザ照射型熱画像法によるマイクロ接合部欠陥検出に関する研究（第1報）－」、溶接学会論文集, Vol.11, (1993), No.4, p.509-515

2） 「熱伝導シミュレーションによる接合部の欠陥検出条件及び検出限界寸法の検討、－レーザ照射型熱画像法によるマイクロ接合部欠陥検出に関する研究（第2報）」－、溶接学会論文集, Vol.11, (1993), No.4, p.515-519

3） 「ガルウィング型リードのソルダリング接合部のヒール部でのフィレットの形成度合の検出プロセスの検討、－レーザ照射型熱画像法によるマイクロ接合部欠陥検出に関する研究（第3報）－」、溶接学会論文集, 投稿中

4） 「レーザ照射型熱画像法によるマイクロ接合部欠陥検出法とその適用」、第5回マイクロエレクトロニクスシンポジウム(MES'93)論文集,(1993), p.119-p.122

5） "Detection on the Defects at the Soldered Joints in the QFP of Gull Wing type", 1st Eupropean conference on Electronic Packaging Tecnology, 1994, February, Essen, Germany （発表予定）

6） "Optimal Condition and Detectable Limit of the Defect Size for the Detection of the Micro Defect by Infrared Thermal Image Process", The 8th International Microelectronics Conference, 1994, April, Omiya, Japan （発表予定）