

目次

第1章 緒論	
1.1 はじめに.....	2
1.2 ワイヤ流れに関する従来の研究概要.....	4
1.2.1 半導体製造プロセス.....	4
1.2.2 ワイヤ流れ.....	5
1.2.3 従来の研究概要.....	6
1.3 本研究の目的.....	9
1.4 本論文の構成.....	9
第2章 ワイヤ流れに対する支配要因	
2.1 ワイヤ流れの支配要因.....	18
第3章 ワイヤ流れの解析手法	
3.1 ワイヤ形状の観察手法の検討.....	23
3.1.1 透過式X線装置によるワイヤ形状の観察.....	23
3.1.2 SMX-30型 X線CT装置を用いての観察.....	27
3.1.3 SMX-225型 X線CT装置を用いての観察.....	33
3.2 まとめ.....	42
第4章 ワイヤ流れ支配要因の解析	
4.1 ワイヤ流れに対する封止条件の影響.....	44
4.1.1 ワイヤ流れに対する樹脂流速の影響.....	44
4.1.1.1 実験方法.....	44
4.1.1.2 実験結果.....	45
4.1.2 ワイヤ流れに対するキャビティ内圧力の影響.....	48
4.1.2.1 実験方法.....	48
4.1.2.2 実験結果.....	48
4.2 ワイヤ流れに対するワイヤ位置の影響.....	57

4.2.1	ワイヤ流れに対するワイヤ配置の影響.....	57
4.2.1.1	実験方法.....	57
4.2.1.1	実験結果.....	57
4.2.2	ワイヤ流れに対する樹脂流れ方向とワイヤとのなす角度 の影響.....	67
4.2.2.1	実験方法.....	67
4.2.2.2	実験結果.....	67
4.2.3	ワイヤ流れに対するワイヤ間隔の影響.....	71
4.2.3.1	実験方法.....	71
4.2.3.2	実験結果.....	71
4.3	ワイヤ流れに対するワイヤの影響.....	81
4.3.1	ワイヤ流れに対するワイヤ径の影響.....	83
4.3.1.1	実験方法.....	83
4.3.1.2	実験結果.....	83
4.3.2	ワイヤ流れに対するワイヤヤング率の影響.....	87
4.3.2.1	実験方法.....	87
4.3.2.2	実験結果.....	88
4.3.3	ワイヤ流れに対するワイヤのループ形状の影響.....	91
4.3.3.1	実験方法.....	92
4.3.3.2	実験結果.....	92
4.3.4	ワイヤ流れに対するワイヤ高さの影響.....	98
4.3.4.1	実験方法.....	98
4.3.4.2	実験結果.....	98
4.4	ワイヤ流れに対する封止樹脂の影響.....	102
4.4.1	封止樹脂.....	102
4.4.2	封止樹脂材料.....	102
4.4.3	半導体パッケージ内部でのフィラ分布.....	103
4.4.4	フィラカット樹脂でのワイヤ流れ.....	109
4.4.4.1	実験方法.....	109
4.4.4.2	実験結果.....	109

4.4.5	ワイヤ流れに対するフィラ粒度分布の影響.....	126
4.4.5.1	実験方法.....	127
4.4.5.2	樹脂.....	127
4.4.5.3	実験結果.....	128
4.5	まとめ.....	144
第5章	ワイヤ流れに対するシミュレーションによる検討	
5.1	ワイヤ流れ解析のための一般的手順.....	149
5.1.1	キャピティ内領域に対する解析.....	149
5.1.2	局所流動解析.....	149
5.2	実験データ.....	151
5.3	計算.....	151
5.4	計算結果.....	152
5.5	まとめ.....	152
第6章	総括.....	157

参考文献

謝辞

第 1 章 緒論

1.1 はじめに

『ポケットの中から宇宙まで。』という言葉に代表されるように、電子機器の発達と共に IC や LSI といった半導体は Fig. 1-1 に示すようにその姿かたちを変えながら我々の身近で広く用いられている。この半導体を作るための技術は大きく分けて3つに分類される。1つ目は半導体ウエハ上に電気回路を形成し半導体素子の機能部分を作りこむ拡散技術である。2つ目はその半導体素子をパッケージングし、外的要因から半導体素子片を保護すると共に電気回路基板とのインタフェースを形成する組立技術である。3つ目が半導体パッケージを電子機器の基板に実装し、製品とする実装技術である。このうち、2つ目のパッケージング技術と3つ目の実装技術を総称して広く“実装技術”と称されている。これは海外においても“JISSO”という言葉が用いられているほど日本が得意とする技術であった。

近年、科学技術に興味を持ってもらおうとする活動が数多く見受けられるようになってきた。このことは科学技術離れが進んでいることの現われである。実装技術はもの作りの技術である。それも科学技術の多くの分野を包括した総合的技術領域であり、電気・機械技術に加え、信頼性技術や生産技術、製品化技術など広範囲な技術が関連しあっている。しかしながら、もの作り離れにより、日本の実装技術の空洞化が顕在化し、既に世界に対して優位性を保てなくなってきた。このままでは世界に対して日本の半導体の競争優位性を失ってしまうことは必須である。このことは日本として高付加価値製品を作るために、優位性の根源である実装技術の開発が極めて重要であることを意味している。これに対応するためには、産業界のみならず大学においても従来のかげを越えて協力し、日本の実装技術を強化し発展させていくことが弱体化した実装技術の底上げを行い、もの作りにおいて世界をリードする技術レベルを作り出すことにつながると思われる。

この半導体パッケージの全世界での総生産数は、1998年には48億7,700万個であった。その内訳の中で、QFP(Quad Flat Package)タイプやSOP(Small Outline Package)タイプといったリードフレームを用いた外部リードタイプ樹脂封止型のパッケージは39億200万個で半導体総生産数の約80.0%を占めていた。このときのBGA(Ball Grid Array)タイプパッケージ

の生産数は1億9,500万個と4.0%であった。それが2000年には全世界での総生産数は55億8,600万個となっている。その内訳の中でリードフレームを用いた樹脂封止型の半導体パッケージは42億6,800万個で総生産数に占める割合は76.4%と減少はしているが依然その大部分を占めており、またBGAタイプパッケージの生産数は4億2,800万個となりその割合は6.5%と増加している。Dataquest2000での予測では、2003年には半導体の全世界での総生産数は72億100万個に達すると予測されており、その時におけるリードフレームを用いた樹脂封止型の半導体は49億2,600万個となり総生産数に占める割合こそ68.4%に減少している。しかし、BGAタイプパッケージの生産数は7億7,800万個となり10.8%と増加しており、このBGAタイプパッケージに含まれる樹脂封止型のパッケージ数を考慮すると半導体パッケージにおける樹脂封止型の割合は依然大きな割合を占めていくことが予想される。これは樹脂封止によるパッケージングが安価でかつ生産性が良いことがその要因である為であり、これに代わるパッケージング方法が確立されるまではこの傾向は変わらないと予想される。

半導体素子製造技術の向上による配線微細化により半導体素子片は小さくなる一方である。それに加え、システムLSIの様に素子上に多くの機能を統合するに至り、外部信号端子の電極パッド数は増加の一途をたどっている。これらの樹脂封止型半導体パッケージの殆どは半導体素子片上の電極パッドと外部端子であるリード間を電氣的に接合する手法としてワイヤボンディング法が用いられている。このワイヤボンディング法は半導体製造においては最も一般的な半導体素子片の電極パッドと外部端子とを金属細線（ワイヤ）で接続する方法である。

半導体素子片上の電極パッド数の増加はその素子周辺に一般に配置される電極パッドのパッドサイズやピッチの縮小を意味している。また、半導体パッケージの形態も多様化してきており、それに対応したワイヤボンディング技術の向上によるワイヤ長の長尺化や、パッケージの多端子化による千鳥配列や多段ボンディングといった様々なボンディングが行われてきている。このようにワイヤボンディング技術はめざましい発達を成し遂げてきたが、パッケージの小型化や外部端子数の増加によりワイヤ相互の間隔が狭くなって

きたために従来では問題とならなかったワイヤ変形や小さなワイヤ相互の変形量の差でもワイヤ相互が接触し、電氣的に短絡する不具合を生じさせてしまうという問題が再び大きく顕在化し問題となってきた。さらにコストダウン要求によるワイヤ線径の細線化や複雑な構造を持つパッケージも次々と開発され、ワイヤと半導体素子とが短絡したりする可能性もさらに大きくなってきた。このようにワイヤ変形に対する要求はさらに厳しいものが求められている。

1.2 ワイヤ流れに関する従来の研究概要

1.2.1 半導体製造プロセス

前工程と呼ばれる拡散工程にて回路が形成されたシリコンウエハーを個片に切断し、パッケージングして半導体パッケージの形態に加工する工程が後工程と呼ばれる組立工程である。その代表的な樹脂封止型半導体パッケージの組立工程フローを Fig. 1-2 に示す。完成したウエハの上には多数個の LSI が形成されている。まず、ダイシング工程にてそのシリコンウエハーをダイヤモンドブレードにて切り離し、半導体素子片（チップ）にする。次にダイボンディング工程にてリードフレームと呼ばれる金属基板上に半導体素子片を接着する。その後、ワイヤボンディング工程にて半導体素子片上の電極パッドとリードフレームの端子とをワイヤである金属細線にて接続する。このワイヤには純度の高い、直径が $30\mu\text{m}$ 前後の金線 (Gold Wire) が最も多く用いられている。ワイヤボンディングを行った後に樹脂封入工程にて樹脂封止を行う。これは半導体素子を衝撃や汚染、とりわけ熱や湿気などの外部環境から保護し、絶縁及び取り扱いや実装を容易にする事を目的としている。樹脂封止後、仕上工程にて外部リードの外装はんだめっきを行い、リード形状を基板実装を行い易い形へと形を整え、品名やロット番号・商標などをパッケージ表面へ捺印する。そして選別工程では完成した半導体製品を測定器であらゆる電気特性、回路機能の試験をする。バーン・イン試験では高温状態で製品に電圧を加え試験を行い初期不良の除去を行う。電気特性試験が終了し、完成した製品は外観検査、電気特性検査、信頼性検査試験など最終検査を行い、出荷される。

この半導体パッケージの組立工程フローにおける樹脂封止工程でワイヤ流れは発生する。樹脂封止型半導体の樹脂封止成形法は大量生産性及び低コストの点で勝るトランスファ成形法が用いられている。これは加熱し熔融させた封止樹脂を金型キャビティ内にプランジャーで射出・注入し硬化させる成形方法である。この方式は Fig. 1-3 に示すように一括して多数個のパッケージを封止できることから生産性がよく、IC のプラスチックパッケージはもとより BGA パッケージにおいても液状樹脂による封止法と共に最も一般的に行われている樹脂成形方法である。その工程は、Fig. 1-4 に示すように、まず樹脂封入金型へ封止樹脂及びワイヤボンディングの終わったリードフレームをセットし、金型を閉じる。この金型は 170~180°C前後に加熱されている。樹脂は熱硬化性樹脂であり、金型を閉じている間に加熱・熔融する。型閉め後、樹脂を金型キャビティ内へ注入し、加圧する。樹脂の種類にもよるが、この状態で数十秒から数分間保持し樹脂が硬化するのを待つ。その後、金型を開き成形されたパッケージを取り出し完了する。

1.2.2 ワイヤ流れ

半導体素子片の電極パッドと外部端子リードに接続している内部リードとの間を電氣的に接合するために、一般に直径が 30 μ m 前後の金属ワイヤが用いられている。このワイヤにはワイヤボンディング時にボールが形成できることによる自由度・高速性から、特にプラスチックパッケージでは高純度の金ワイヤが用いられている。しかし半導体製造工程の樹脂封止をおこなう際に成形金型へ注入する樹脂により、このワイヤが樹脂流れ方向へ変形してしまう問題が存在する。これは前述したように、隣接するワイヤの接触や、ワイヤと半導体素子片とが接触することにより電氣的に短絡してしまうなどの不具合を生じることがある。この樹脂封止を行う際の注入樹脂によるワイヤの変形がワイヤ流れである。本論文で評価に用いたパッケージの外観を Fig. 1-5 に示す。また、Fig. 1-6 に量産されているこの QFP タイプのパッケージにおいて、樹脂成型後ワイヤ流れが発生した状態の X 線透過装置で観察した例を示す。この Fig. 1-6 で等間隔で並んでいる細い線が金ワイヤである。この写真では、樹脂流れは左下から右上の方向であり、その方向にワイヤが湾

曲しているのがわかる。このQFPタイプのパッケージ内部構造を図示したものを Fig. 1-7 に示す。この樹脂成形時のワイヤ流れをモデル化したものを Fig. 1-8 に示す。この樹脂流れによるワイヤ変形をあらわす指標として、ワイヤ端の接合点を通る直線から変形しているワイヤへ向かって垂線を引き、その最大変形量をワイヤの長さで除した値をワイヤ流れ率として設定した。本論文において、特に記述しない限りはワイヤ流れは水平方向のワイヤ変形をあらわすこととする。

1.2.3 従来の研究概要

ワイヤ変形は主にパッケージングである樹脂封入時の注入樹脂流れにより変形する。これは、ワイヤ流れとして過去から注目されてきた半導体パッケージの成形において最大かつ主要な不良原因である。このワイヤ流れについては樹脂封止技術の発展と共に数多くの報告がなされている。しかし、どれも古いパッケージに対してで有り、現在では殆ど生産されていない小さなパッケージに対するものが殆どである。ワイヤ長さも2～3 mm以下と短くワイヤ本数も30本以下のものが殆どであり、現在のような4～7 mmを超える長ワイヤや、ワイヤ本数が100本を越えワイヤ相互の影響が有るような報告は成されていない。また、成型方式も現在では用いられることが少なくなった長いランナーを持つコンベンショナル構造に対してその影響などを考慮した報告も多く、最近のパッケージ構造にそぐわない。

L. T. Nguyen らはワイヤ形状を放物線形状にモデル化し、樹脂流れによりワイヤが受ける荷重を数式化して説明しようとした⁽¹⁾。そしてそれらを用いて計算を行った結果を報告している。このなかで、ワイヤの抗力は経験式により計算されている。限定された条件での解析がワイヤ流れを規定するために用いられた。この中で、ワイヤ流れがレイノルズ数に大きく依存しているとしている。しかし実際のキャビティ内のレイノルズ数は現在においても明確には得られていない。ワイヤの高さやヤング率、樹脂流れとワイヤとが成す方向の影響などの支配要因について考察している。これによってワイヤ流れの次元解析が確立された。本研究室でもワイヤ流れに対する支配要因について報告してきた⁽²⁾。また彼らは金型内の樹脂流動を可視化するために透明

な樹脂で擬似金型を作成し、透明な樹脂(polydimethylsiloxane)を流体として流してワイヤの挙動の観察を行い⁽³⁾、実際の金型の一部にレンズを設けてパッケージ全体の流れを可視化している⁽⁴⁾。この研究ではワイヤ流れの幾つかの流動状態、キャビティ形状、ワイヤ構成とワイヤ特性について検討された。

また、小池らは金型の上下を耐熱ガラスにし、X線透視装置で樹脂流れを観察した例も有る⁽⁵⁾。これに関しては著者も評価に参加した。

R. K. Reusch らはパッケージサイズの小さい SOP(Small Outline Package)タイプのパッケージに対して樹脂注入過程を電氣的抵抗として取り扱い、類推する事で解析している⁽⁶⁾。ワイヤ流れに対する樹脂注入圧力と樹脂注入時間の関係、及び樹脂注入圧力と時間を可変したときの影響について調査している。しかし、ワイヤ流れに関連する流動パラメータの定量的なモデルを提示しておらず、理論的な取り扱いには至っていない。

A. A. O. Tay らはワイヤ流れに対するワイヤの形状の影響について報告している⁽⁷⁾。本研究室でもワイヤ流れに対するワイヤの機械的特性の影響について報告してきた^{(8),(9)}。

シミュレーションにおいては J. H. Wu らは有限要素法を用いて 26wire のゲート位置を変更してのワイヤ流れに対する樹脂注入速度と温度の影響について調査している⁽¹⁰⁾。樹脂注入速度が速いほど、及び温度が低い(樹脂粘度が高い)ほどワイヤ流れ率が大きくなる事を示している。またゲート位置とワイヤの配置との関係でワイヤ変形量が異なる事や、樹脂注入速度を早くする事で樹脂注入ゲートからの上下充填差によるパッケージ下から上への樹脂流れの影響にも触れてる。L. T. Nguyen らは C-SET プログラムを用いてワイヤ数 14 本のパッケージをモデルとし、ワイヤ流れに対するワイヤの配置の影響を流体力学からのアプローチを行っている⁽¹¹⁾。この中で、ワイヤ流れは一般的なワイヤ形状で解析された。実験では半導体素子片を封止樹脂で封入し、X線検査で半導体パッケージの中のワイヤ形状を観察した。ワイヤ流れが、ワイヤの線形弾性挙動に限定されたモデルから計算され、実験値と比較されている。計算されたワイヤ流れ値は実験値の 20%であった。その後、同様に有限要素法を用いてのワイヤ変形解析を行い実験結果に計算値を近づけようとしている⁽¹²⁾。Sejin. Han らはワイヤ流れの要因についてシミュレーシ

ョンを行い、その結果との一致性について考察している。また、ランナを用いた金型において、各キャビティへの樹脂注入バランスを変更することでワイヤ変形を低減しようとシミュレーションを試みている^{(13),(14)}。その結果についてもワイヤを樹脂流れにさらして可視化する実験装置を製作し、フィラ含有量を変更してワイヤ変形率との関係を調査しているが、フィラの粒度分布についての報告はされていない⁽¹⁵⁾。A. A. Tayらは、同様の実験装置を用いてワイヤの樹脂にさらされる角度配置とワイヤ変形との関係をシミュレーションしている⁽¹⁶⁾。本研究室でもワイヤ流れに対するワイヤの機械的特性の影響についてシミュレーションし、報告してきた⁽¹⁷⁾。

市村らはパッケージ内の樹脂流れをボイド低減という観点から調査している⁽¹⁸⁾。樹脂の非ニュートン性の流れと金型内部各位置でのせん断速度（ずり速度）を考察している。金型内各位置で樹脂のせん断速度が大きく異なっており、粘度として変化していることを示している。Sejin. Hanらは樹脂内部に含有しているフィラがワイヤ流れにどの様に影響しているかを数式的に示している⁽¹⁹⁾。ワイヤにフィラが衝突することによりワイヤが受ける運動エネルギーを計算している。この報告によるとフィラの持つ運動エネルギーは無視できるほど小さい。

酒井忠基らは熱硬化性樹脂よりも粘度が高い熱可塑性樹脂に対してワイヤ流れを実用域に制御しながら、射出プロセスの開発と専用射出成形機の開発について報告を行っている⁽²⁰⁾。佐伯準一らは封入プロセスについて概説し、金型内の樹脂流動を円管金型(スパイラルフロー測定金型)を用いて解析し、樹脂封止金型及び LSI パッケージング CAE システムの開発を行っている^{(21),(22),(23),(24),(25),(26),(27)}。Tadamoto Sakaiらは金型内の樹脂流れを解析し、樹脂注入口位置や各種プロセス条件などを変更して、ワイヤ流れとチップ位置などの関係を調査している⁽²⁸⁾。本研究室でもワイヤ流れに対する樹脂の影響について報告してきた⁽²⁹⁾。

Manzion は、金型キャビティへの樹脂充填時に金型の上側と下側で、樹脂流れ先端の動きに差があり、これによるリードフレームの変動がワイヤ流れに関連するとした。彼は樹脂の粘性流れによるワイヤ変形よりもリードフレームの変動によるワイヤ変形の方がより大きいと結論を下した。

1.3 本研究の目的

1.1 節では、IC や LSI,超 LSI といった半導体の製造における日本での実装技術の現状について、及び全世界での半導体生産数の増加と共にパッケージ形態も外部リードタイプ樹脂封止半導体から BGA タイプへと変化しているが、樹脂封止によるパッケージングが安価でかつ生産性が良いことから依然として半導体パッケージの大きな割合を占めていることを述べた。1.2 節では半導体パッケージの発展と共にその製造プロセスも変化し、それに応じた様々な研究が成され報告されていることを述べた。しかし、このように半導体製造工程のパッケージング工程におけるワイヤ流れに対して多くの研究がなされてきたが十分に解明されているわけではなく、最近の製造プロセス及びワイヤ間隔のファインピッチ化など複雑化した内部構造に対応した報告はなされていない。本論文では樹脂封止型半導体のパッケージングにおいて注入樹脂により発生するワイヤ流れについて、その支配要因のうち樹脂成形プロセス条件、ワイヤの機械的特性、半導体パッケージ内部構造、封止樹脂について着目して調査し明らかにした。また、ワイヤ流れを解析するための手法についても検討し、さらにワイヤ流れに対するシミュレーションによる解析も行なった。こうして半導体製造における樹脂封止時のワイヤ流れの支配要因とその影響を明確にすることで、今後さらに進むであろうパッケージ内部の複雑な構造への要求に対しての対応を明らかにし、実用上、実装分野で問題となっているワイヤ流れを解決することを目的とした。

1.4 本論文の構成

本論文の目的は 1.3 節で述べたように半導体製造工程の樹脂封止工程において発生するワイヤ流れの支配要因を解明し、ワイヤ流れに対して優れたパッケージング方法を明らかにすることにある。第 2 章以降の構成は以下に示すとおりである。

第 2 章「ワイヤ流れに対する支配要因」では、樹脂封止型半導体パッケージのワイヤ流れの支配要因について調査を行うため、樹脂流れによりワイヤにかかる荷重の式と参考文献などから抽出を行った。そして、それら支配要因を封止樹脂、ワイヤ、パッケージ構造、封止条件の 4 つに大分類しそれぞ

れの構成要因について細分化を行い明確化した。

第3章「ワイヤ流れの観察手法」では、樹脂封止された半導体パッケージ内部のワイヤ形状を非破壊にて観察する手法に対し、その有効性と限界について調査・検討を行った。X線透視装置を用いて2次元の投影面で観察する従来の手法に加え、X線CT装置を用いてパッケージ内部のワイヤ形状を3次元的に観察する手法を確立した。さらに、発展した装置の開発に仕様の確立に貢献した。その装置での半導体実装部品の観察における有効性と限界について述べた。

第4章「ワイヤ流れの支配要因の解析」では、第2章で抽出したワイヤ流れに対する支配要因についてそれぞれの影響を実験とともに調査した。その結果、数多くのワイヤ流れに対して抑制する為の手段を見いだすことができた。これらの結果の一部は必ずしも理論的に確立出来たわけではないが、実装分野において実用上非常に意義のある新しい知見を数多く発見することができた。

第5章「ワイヤ流れに対するシミュレーションによる検討」ではワイヤ流れ数値解析のための手段を検討し、実際に量産されているパッケージで、その有効性について調査した。従来の研究では実験結果にシミュレーション結果を近づけるためにそのパラメータを変更することがなされている。本論文ではワイヤにかかる抗力計算に対して壁面を考慮した式を用いて計算を行い、その有効性について述べた。

第6章は以上の結果の総括である。

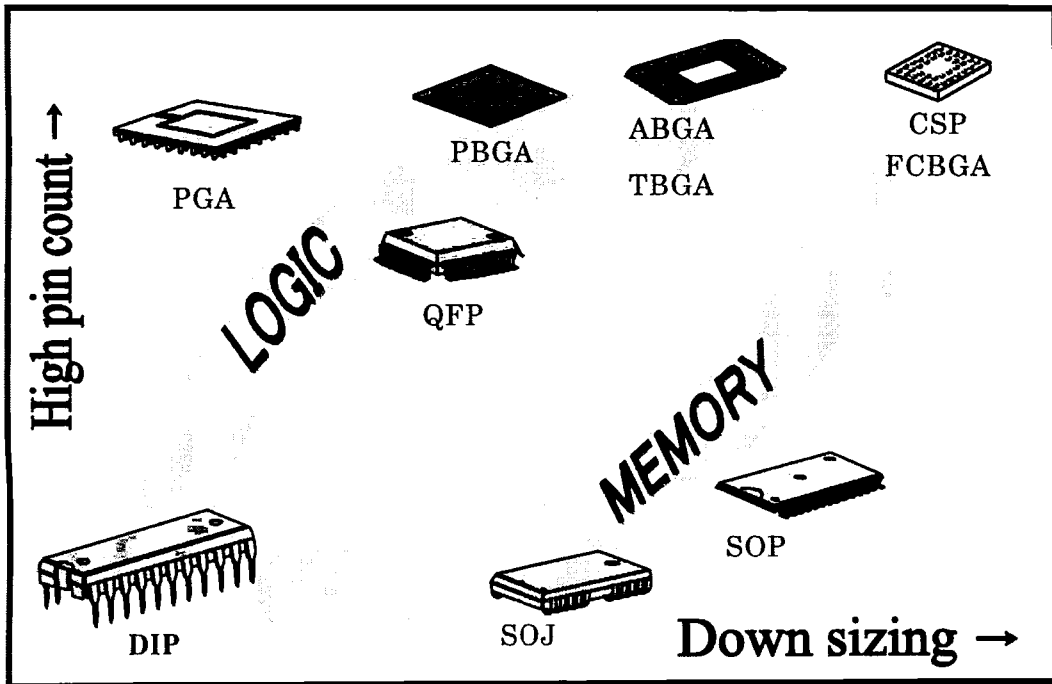


Fig. 1-1 Roadmap of semiconductor package.

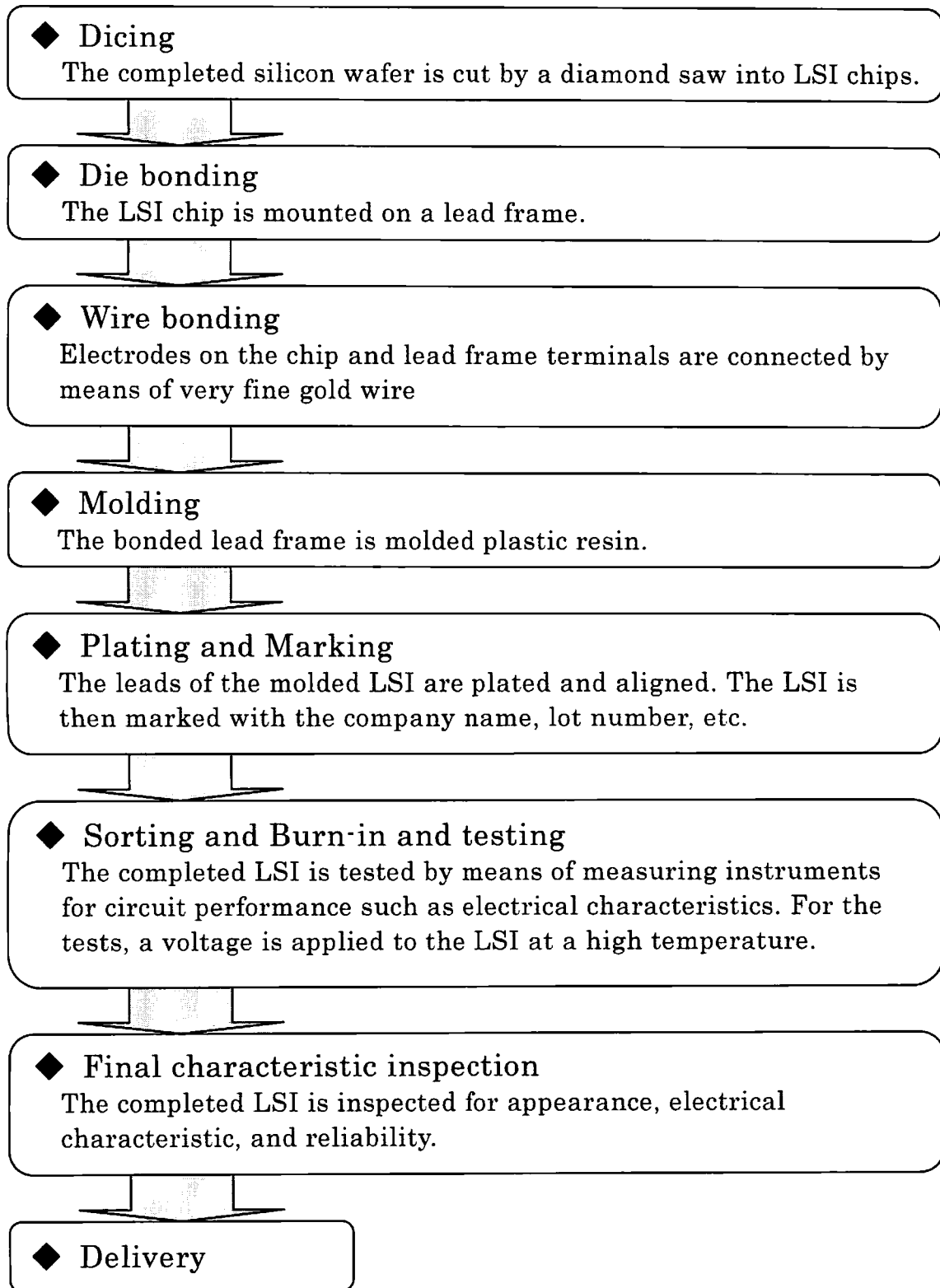


Fig. 1-2 The assembly process of the LSI.

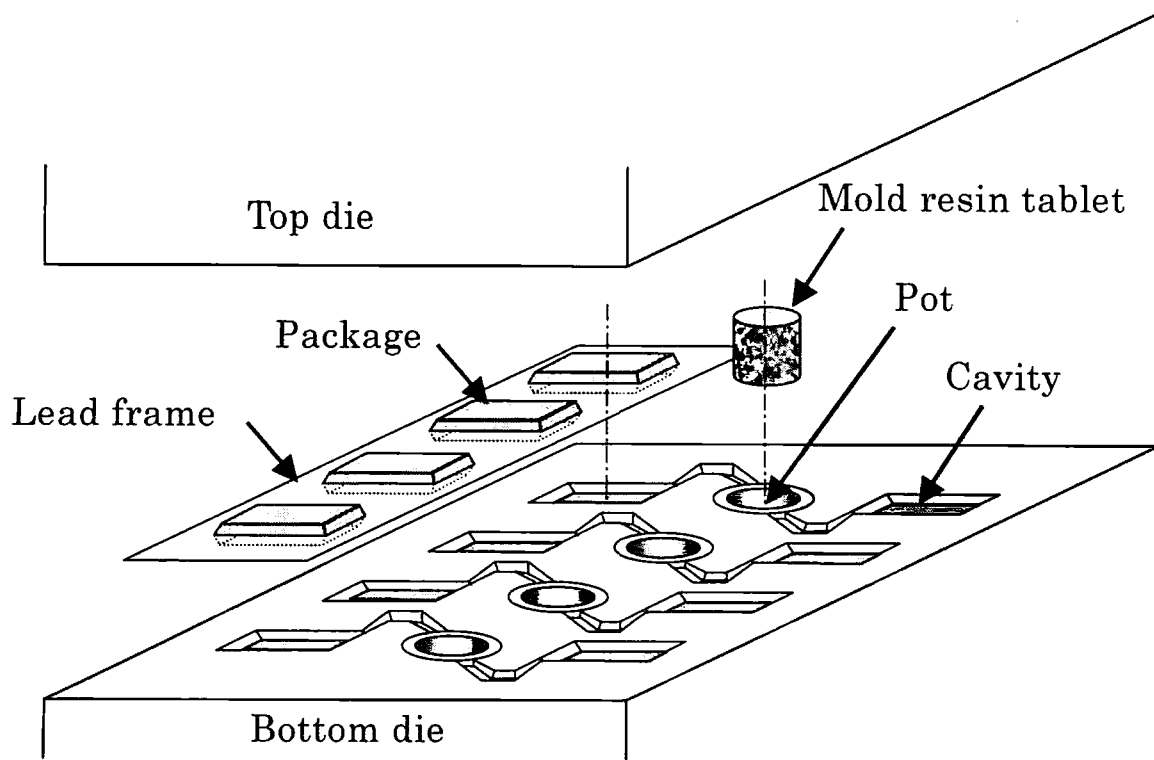
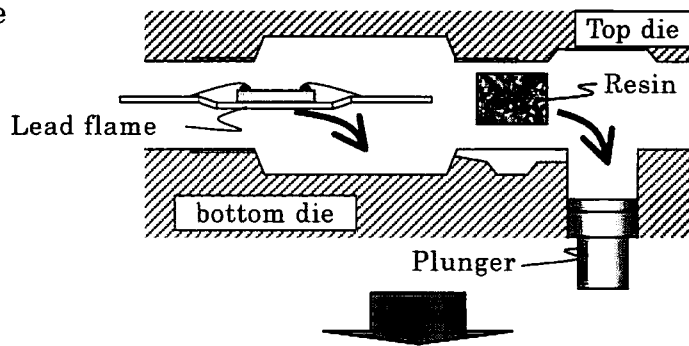
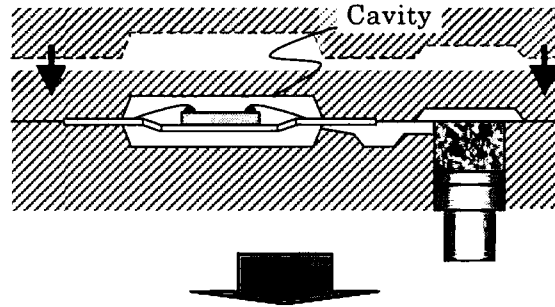


Fig. 1-3 Transfer molding method.

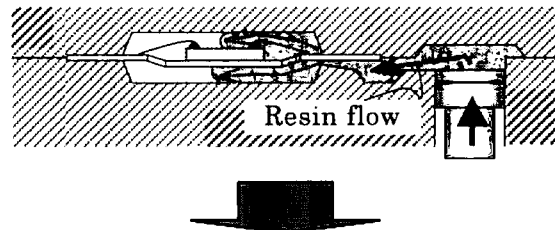
(a) Loading of lead flame and resin.



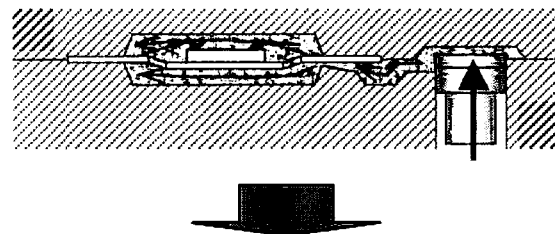
(b) Clumping
(Resin preheat)



(c) Injection of resin



(d) End of injection



(e) Unloading of package

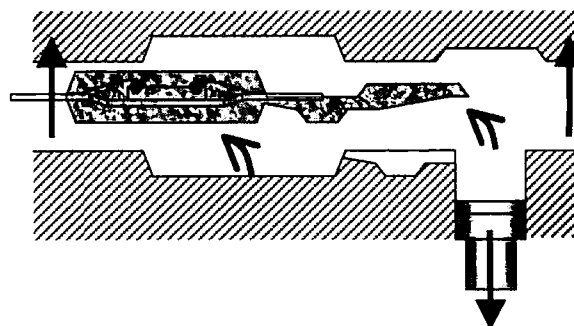


Fig. 1-4 Molding process.

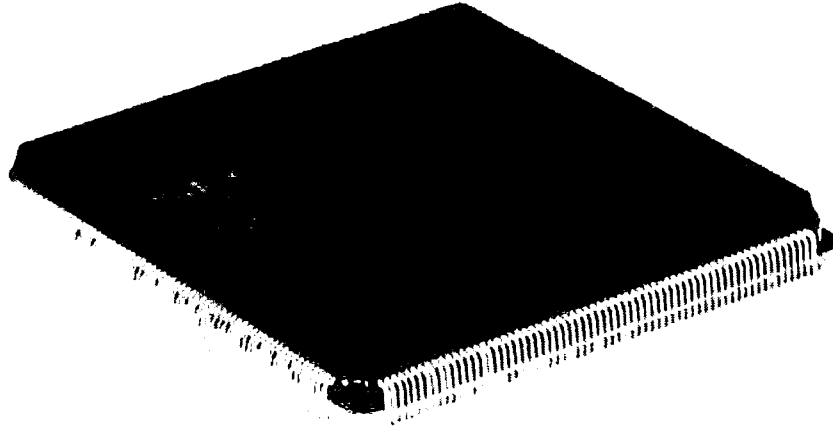


Fig. 1-5 Photograph of QFP(Quad Flat Package).

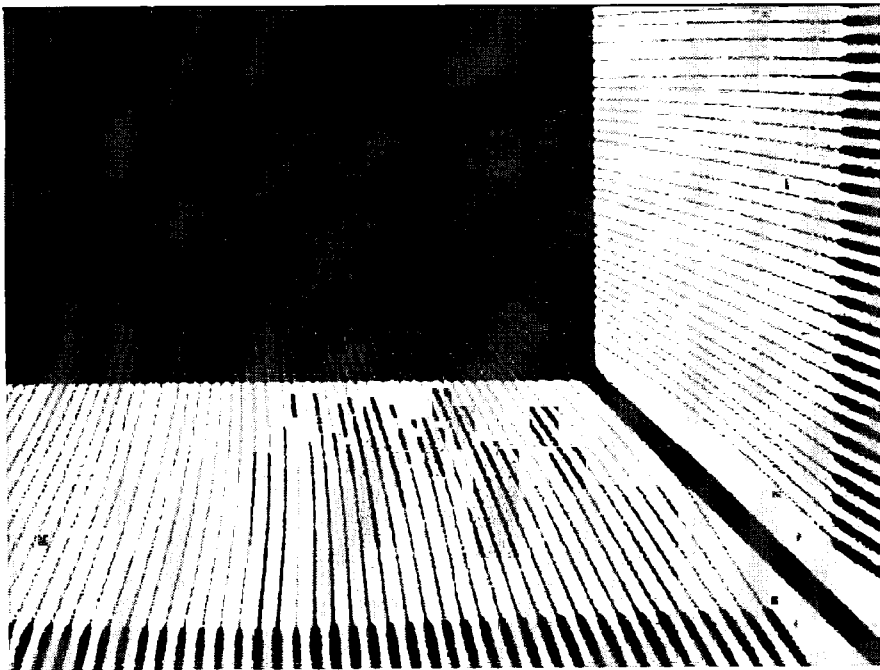


Fig. 1-6 X-ray photograph of wire sweep.

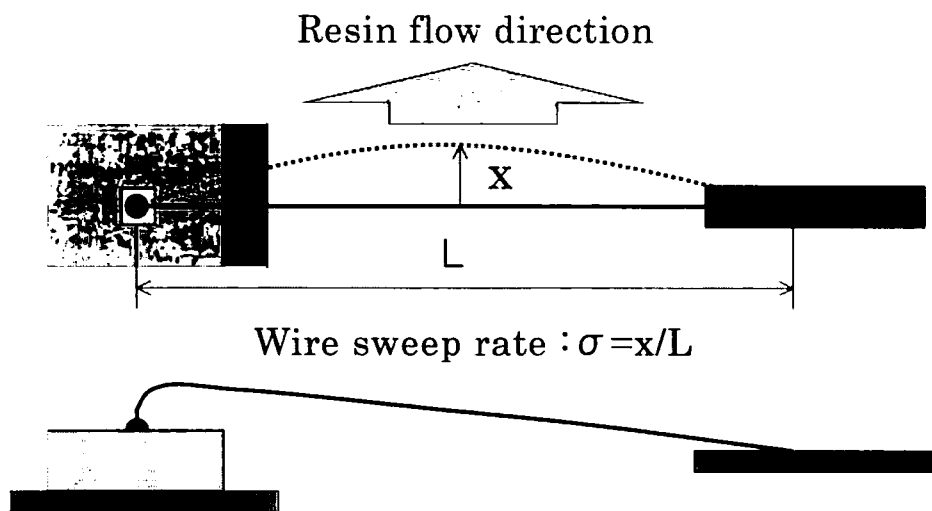
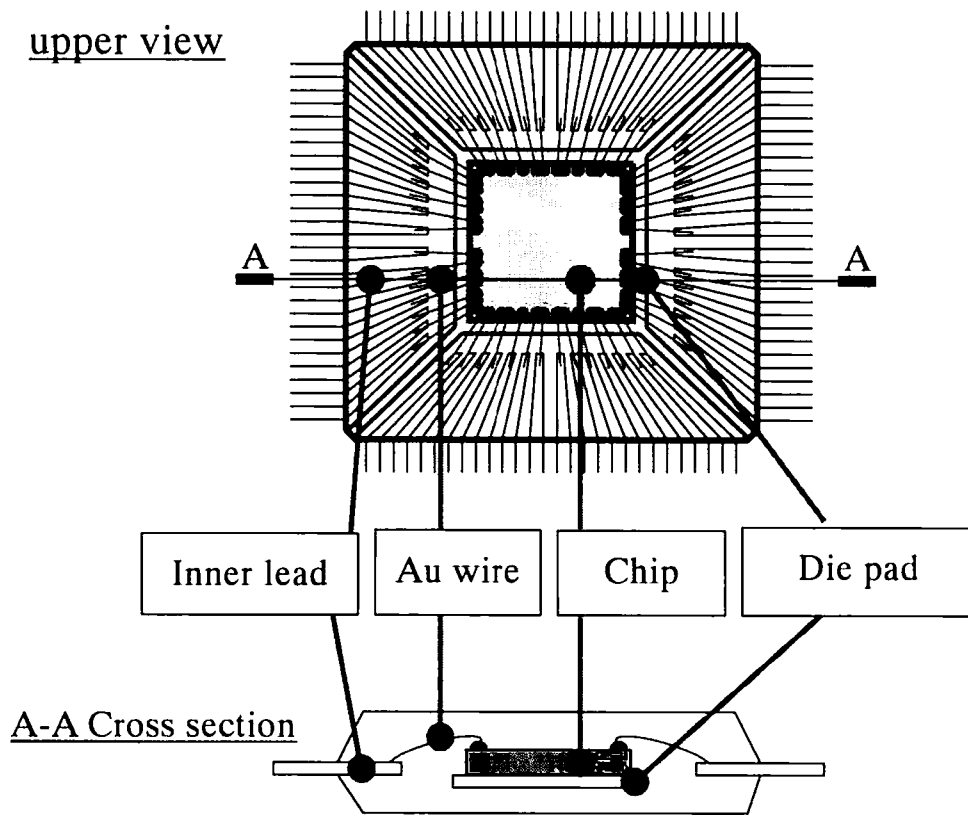


Fig. 1-8 Wire sweep model.

第2章 ワイヤ流れに対する支配要因

2.1 ワイヤ流れの支配要因

樹脂が金型キャビティ内に入りワイヤの周囲を流れるとき、ワイヤはせん断と曲げの力を受ける⁽¹⁾。この時のボンディングワイヤが放物線とした時の模式図を Fig. 2-1 に示す。ワイヤ断面が均一であると仮定すると、ワイヤの描く軌跡は次の関係式で表される。

$$y = ax^2 + bx = \frac{4}{L^2} \left[h_1 + \frac{h_2}{2} \right] x^2 - \frac{1}{L} (4h_1 + h_2)x \quad (2-1)$$

$x = l_1$ から $x = l_2$ の範囲のワイヤに等分布荷重 w がかったときの変位 H_0 , V_0 , とモーメント M_0 を Fig. 2-2 に示す。ワイヤの重さを無視できるとすると、C 点にかかる曲げモーメントは、次式で表される。

$$M = M_0 \cdot V_0 x + H_0 y + w (l_2 - l_1) (x - l_0) \quad (2-2)$$

対応する各変位と分力変位を解くと、荷重 w がワイヤ全体にかかる一般的な場合に適用できる次のような表現が得られる。樹脂成形時にキャビティに流れの先端が充填されたことで、ワイヤは全体に次のような流れによる応力を受ける。 $l_1 = 0, l_2 = L, l_0 = l = L/2$, の時、次式を得る。

$$V_0 = w \left[\frac{L}{3aL + 4b} \right] (aL + b) \quad (2-3)$$

$$H_0 = w \left[\frac{L}{aL + b} \right] \quad (2-4)$$

$$M_0 = w \left[\frac{L}{aL + b} \right] \left[\frac{2aL^2 + 3bL}{6} \right] \quad (2-5)$$

これらの関係から進行する樹脂流れによって断面積 A_w のワイヤが受ける流体抵抗（抗力） F は次式によって与えられる。

$$F = \left| \frac{1}{2} C_D(\omega) \rho U^2 A_w \sin \omega \right| \quad 0^\circ \leq \omega \leq 180^\circ \quad (2-6)$$

ここで、 U は樹脂の平均速度、 C_D はワイヤの抗力係数、 ω は樹脂流れのワイヤに対する角度、 ρ は樹脂密度である。 $A_w = Sd_w$ と $2Sw = F$ であることに注意して(2-6)式から、レイノルズ数 $Re = \rho U l / \eta$ が与えられたときに樹脂流れによって引き起こされる荷重 w は次式のように表される。

$$w = \frac{F}{2S} = \left| \frac{1}{4} C_D(\omega) \left(\frac{d_w}{d_c^2} \right) \left(\frac{\eta^2}{\rho} \right) Re^2 \sin \omega \right|_{0^\circ \leq \omega \leq 180^\circ} \quad (2-7)$$

ここで、 d_w はワイヤの直径、 d_c^2 はキャビティの厚さ、 η は樹脂粘度である。レイノルズ数は $Re = \rho u_x l_{char} / \eta$ で表される。 l_{char} は流れの代表寸法であり、キャビティの厚さの半分か、又は $l_{char} = d_c / 2$ と取ることが出来る。抗力係数から、樹脂流れによりワイヤが受ける流体抵抗はレイノルズ数に依存しているため、このワイヤが受ける流体抵抗=荷重は流れにさらされる流速が早いほど、キャビティサイズが小さいほど、レイノルズ数が高いほど増加する。流れに垂直におかれた円柱の抗力係数 C_D は、レイノルズ数に対して変わる⁽³⁸⁾。低いレイノルズ数範囲では Lamb⁽⁴¹⁾のオーゼン近似による式、

$$C_D = \frac{8\pi}{Re(2.002 \cdot \log_e Re)} \quad ; \quad Re < 0.5 \quad (2-8)$$

が適用される。この式はレイノルズ数が 0.5 以下、つまり流れの場が粘性項に支配されている場合で適用できる。また、キャビティ厚さによるパッケージ内のせん断速度の変化や樹脂粘度、樹脂流速などによりレイノルズ数が増加し、 $Re = 5 \sim 40$ の範囲においては今井の式⁽⁴²⁾が適用できる。

$$C_D = (0.707 + 3.42 Re^{-1/2})^2 \quad (2-9)$$

また、ワイヤの変形には上述した力学的荷重の他にワイヤのヤング率、直径、断面形状（断面二次モーメント）が関係してくる。これらの関係と参考文献などから樹脂によってワイヤが変形するための支配要因を表にまとめたものが Table. 2-1 である。

この求められたワイヤ流れの支配要因について調査を行った。

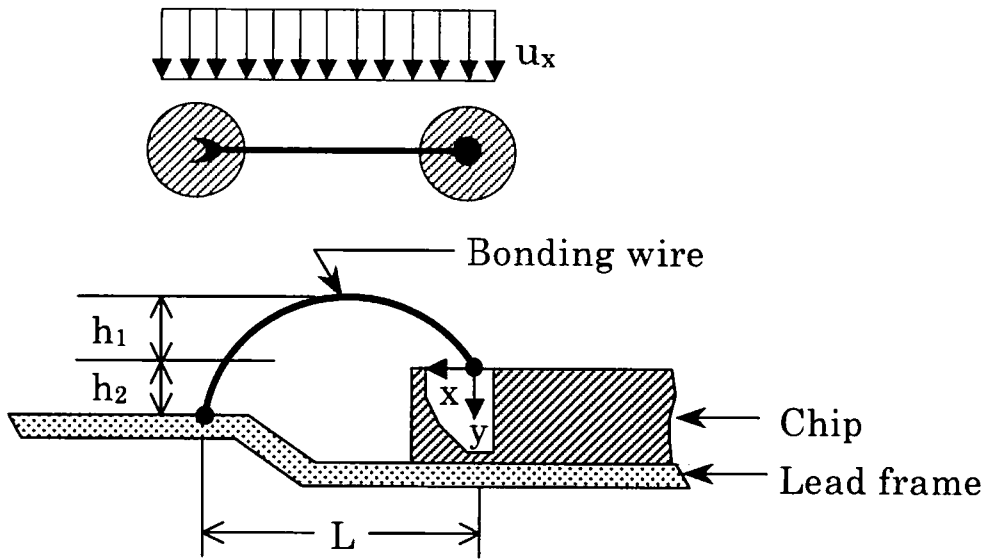


Fig. 2-1 Idealized parabolic configuration of a wire bond subjected to a distributed transverse load. The top figure shows the vertical projection of the wire and the melt front advancing at an average velocity u_x . The profile traced by the wire can be described by the expression

$$y = ax^2 + bx = \frac{4}{L^2}(h_1 + h_2/2)x^2 - \frac{1}{L}(4h_1 + h_2)x. \quad (1)$$

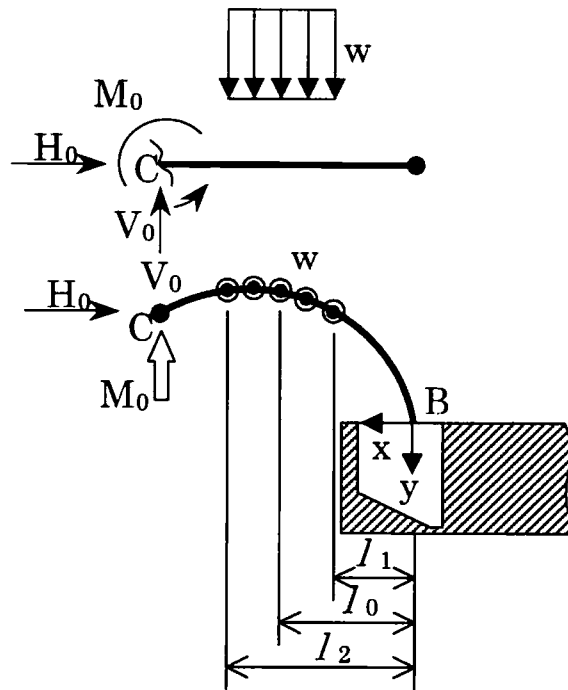


Fig. 2-2 Cross-sectional cut across the wire bond showing the resultant actions (H_0, V_0) and moment (M_0) from a uniformly distributed transverse load w acting between l_1 and l_2 . (1)

Table 2-1. Factor of wire sweep.

Component	Factor		
	1st factor	2nd factor	3rd factor
Resin	Viscosity	Viscosity of melting resin	
		Hardening characteristic	
		Filler	Content
			Shape
	Distribution		
	(Spiral flow)		
Inside void of melting resin			
Wire	Diameter		
	Value of elasticity	Young's modulus	
	Configuration	Shape	
		Height	
		Length	
Package structure	Gate	Gate position of Package	
	Package thickness		
	Arrangement of wire	Angle of wire and resin flow direction	
		Pitch of wire	
Molding parameter	Injection speed	Velocity of resin	
	Molding temperature		
	Pressure in cavity	Atmosphere	
		Low pressure	
		High pressure	

第3章 ワイヤ流れの解析手法

3.1 ワイヤ形状の観察手法の検討

半導体パッケージの内部解析手法は大きく二つに分けられる。一方は破壊的手法でありパッケージの断面切断・研磨法や発煙硝酸(NH_4NO_3)などによる樹脂開封法などがそれにあたる。この手法は試料を破壊するために再現できないという欠点がある。もう一方は非破壊による手法であり、超音波探傷法や放射線透過法である。超音波探傷法はパッケージ内の剥離など空隙が存在する場合に有効であるが、ワイヤの形状などを探るには適さない。よって放射線による観察法について検討を行った。

3.1.1 透過式X線装置によるワイヤ形状の観察法

X線透視によるこの手法は非破壊であるために再現性があり、最も一般的に半導体パッケージの内部の状態を観察する手法である。X線透過による検査は観察に要する時間や段取りなどの負荷が少なく、操作も簡単で容易に用いることが出来る。X線透視装置で観察した画像例を第1章の Fig. 1-5 で示している。この様に単純にワイヤ流れ率を調査するだけであるならば、本方式は非常に有効である。ワイヤ流れ測定に使用した装置の外観を Fig.3-1 に示す。

だが、この方式はワイヤの構造が Fig. 1-5 に示したように単列である場合には確かに有効であるが、Fig. 3-2 に示すような千鳥ボンディングと称される多段構造のワイヤリング品のX線透視装置での観察においては、低ループ側のワイヤと高ループ側のワイヤが重なった像となってしまう正確な観察を行う事が出来ない。この事は、半導体製造工程中に品質管理のために行われているX線観察で、相互のワイヤが接触している様に見える問題がある。この千鳥配列構造は半導体素子の配線微細化に伴いチップサイズは縮小傾向にあるのに対し、高機能化により電極端子数が増加傾向のため、チップに単列に配列しただけでは電極数が足らなくなり多列に配列したことによる。今後、この様な傾向は増加して行くことは間違いない。このチップ側の千鳥配列ボンディング状態を Scanning Electron Micrographs (SEM) にて観察した例を Fig. 3-3 に示す。このように、パッケージ内でのワイヤの形状は3次元的な形状をしているにもかかわらず、従来の報告ではパッケージ内部のワイ

ヤなどの形状を3次元的に観察し、報告した例は少ない⁽³¹⁾。近年になって、はんだボール内部のボイドや接合面のクラックなどの観察例が少しずつではあるが出てきている⁽³²⁾。



Fig. 3-1 Photograph of micro focus X-ray TV system.

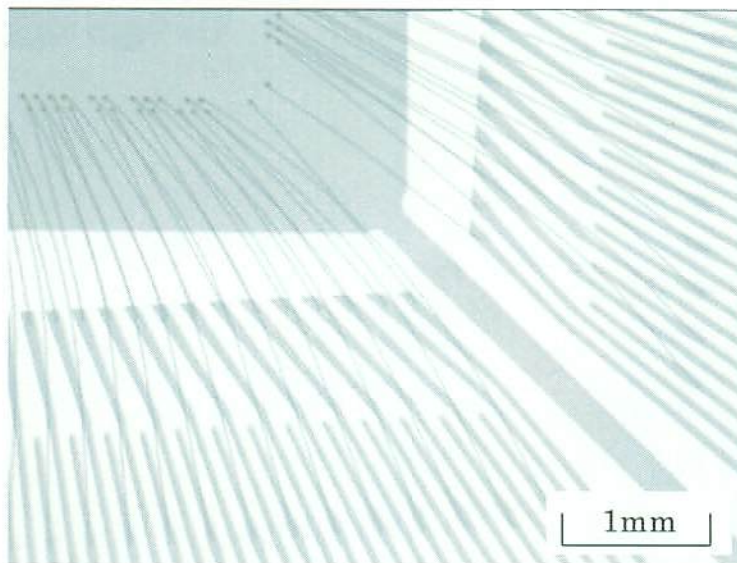


Fig. 3-2 X-ray photograph of stagger wires.

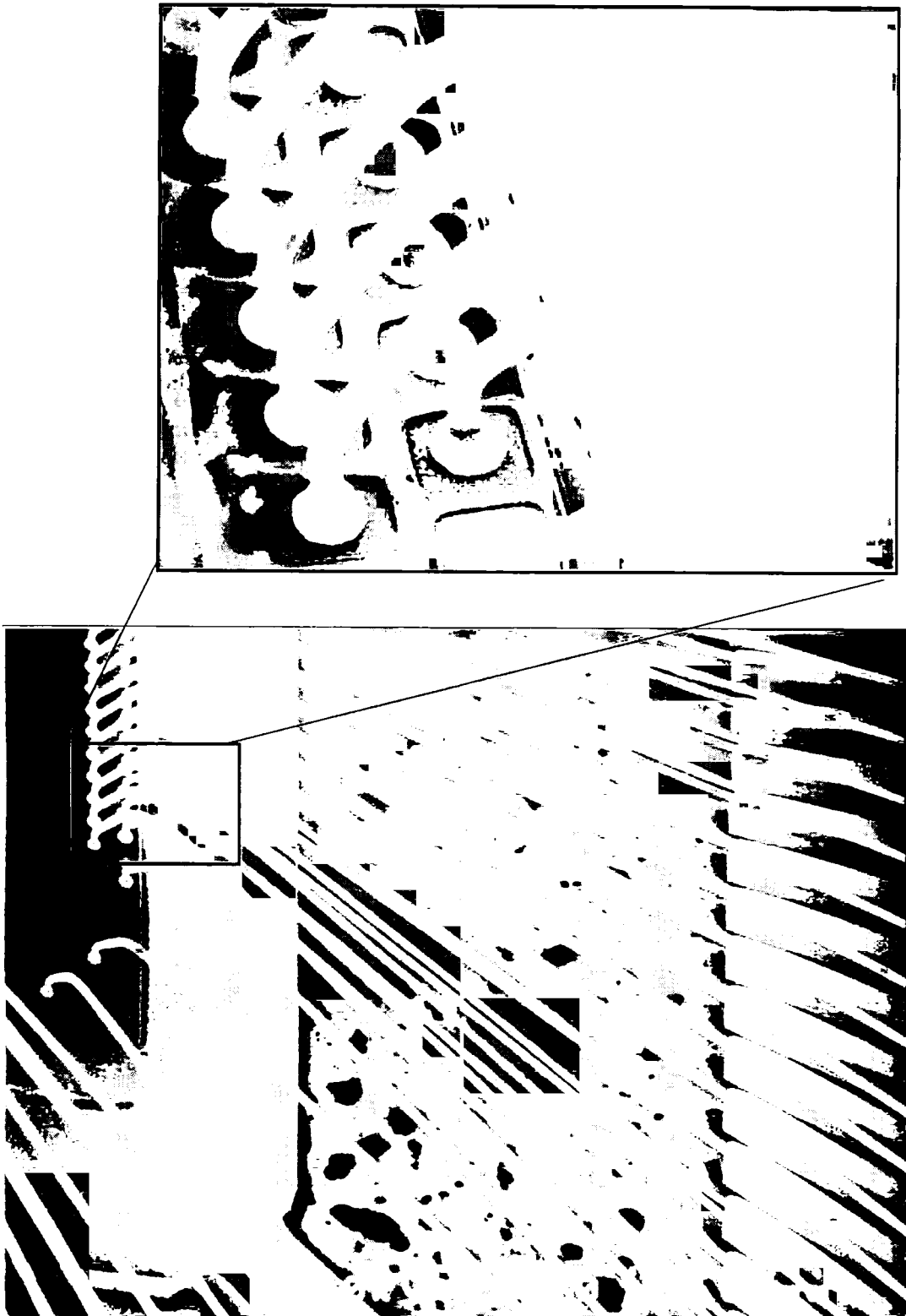


Fig. 3-3 Scanning Electron Micrographs(SEM) photograph of stagger wires.

3.1.2 SMX-30CT 型 X線CT装置を用いての観察

前項にて述べたように、パッケージ内のワイヤの形状がどのような状態にあるのかを3次元的に調査し、現象を正確に調査する事がワイヤ流れ解析に必要であると考え、ワイヤ流れを生じたワイヤの3次元観察手法を確立することとした。そこで、産業用X線CT装置を用いて QFP タイプパッケージを試料とし、パッケージ内部のワイヤ形状の測定を行った。測定に使用した装置は Fig. 3-4 に示す島津製作所製 SMX-30CT 装置を用いた。

測定には、表面実装タイプの QFP タイプのプラスチックパッケージを試料として用いた。この試料は、一辺が 28mm 角の厚さ 3.2mm、の 256 ピン QFP タイプのパッケージである。この試料には千鳥ボンディング技術が用いられている。この試料では、低ループ側のチップ上面からのワイヤの高さを 190 μm 、高ループ側の高さを 250 μm とした。

観察した試料の CT 断層画像例を Fig. 3-5 に示す。このように、X線CT装置では、任意の断面位置での各ワイヤ間の間隔を得ることが可能である。これは今まで断面切断などの手段でしか得ることが出来なかったワイヤ間の位置関係を容易に得ることが出来ることを意味している。コンピュータで各ワイヤの3次元的位置の再構成を行なう事を目的とし、Fig. 3-6 に示すように、X線CT装置を用いて得られた断層画像よりパッケージ内の各ワイヤの2次元座標 (X、Y軸) を抽出した。また、深さ方向 (Z軸) 座標としては各断層像のスライスピッチを取った。このときの観察に用いた装置条件を Table 3-1. に示す。1画素あたりの寸法は約 50 μm となる。このCTデータ収集のための測定時間は、1800view で約 60 秒を要した。また、測定終了後に行うCT画像への再構成に要する時間は約 60 秒を要した。ワイヤの位置はこの画素の中心座標とした。

この各ワイヤの座標情報から3次元化した疑似画像を Fig. 3-7 に示す。このときに使用した3次元化の画像構成には、パーソナルコンピュータを用いて一般に市販されている My Shade という作画用ソフトウェアで構成した。このソフトウェアは Windows95/98, NT4.0 上の OS で動作し、また、コンピュータも Pentium またはその互換 CPU 以上のパーソナルコンピュータで動作するものである。

3次元グラフィック化した画像から、ワイヤの流れ方向に影響を及ぼす変形位置は、ワイヤの長辺部が樹脂流れ方向に対して大きく変形していることがわかる。ワイヤの半導体素子上の電極部（パッド部）から立ち上がっている部分は樹脂流れ方向に対して倒れていないが、高ループ側のワイヤの立ち上がり部は低ループ側の立ち上がり部と比較し、若干引っ張られたような形状をしていることがわかる。このことから、樹脂流れによって長辺部が大きく変形し、立ち上がり部はその影響を受けて変形していると考えられる。また、3次元化した画像はグラフィックソフトを用いて作画した。それにより、視点を自在に変えることが出来るため、ワイヤ相互の位置関係や必要とするワイヤのみを表示し、その形状を観察することが可能となった。これは、今までは他のワイヤやチップ、ダイパッドなどにより観察することが出来なかった視点での観察が可能となったことを意味し、今後ワイヤにとどまらず、他の構成部品の観察も可能であることを表している。

X線CT装置を用いて得られた画像を再構成する事で、ミクロンオーダーでのLSIのワイヤ形状観察が可能である事を確認した。そして、この手法を用いてワイヤ流れによるワイヤの変形形状を3次元化することでその相互の位置関係を視覚的に得ることが出来ることを確認した。

本装置での観察対象は $30\mu\text{m}$ の金線に対してであるが、1画素の精度が装置の拡大率の制約上 $50\mu\text{m}$ となり、どうしてもなめらかな画像を作り出すことは出来なかった。ワイヤ相互の位置関係や大まかな変形形状を得ることは出来るが、より精度を向上させる事が課題である。処理速度は落ちるが画素精度を 512×512 画素から、 1024×1024 画素へとあげることなどがある。



Fig. 3-4 Photograph of X-ray CT instrument (SMX-30CT).

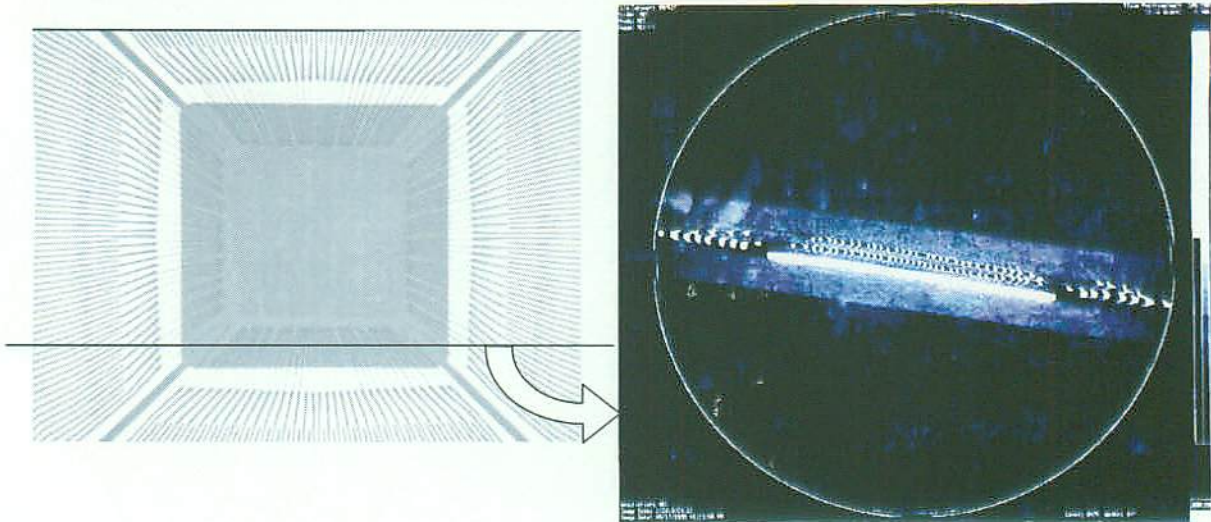
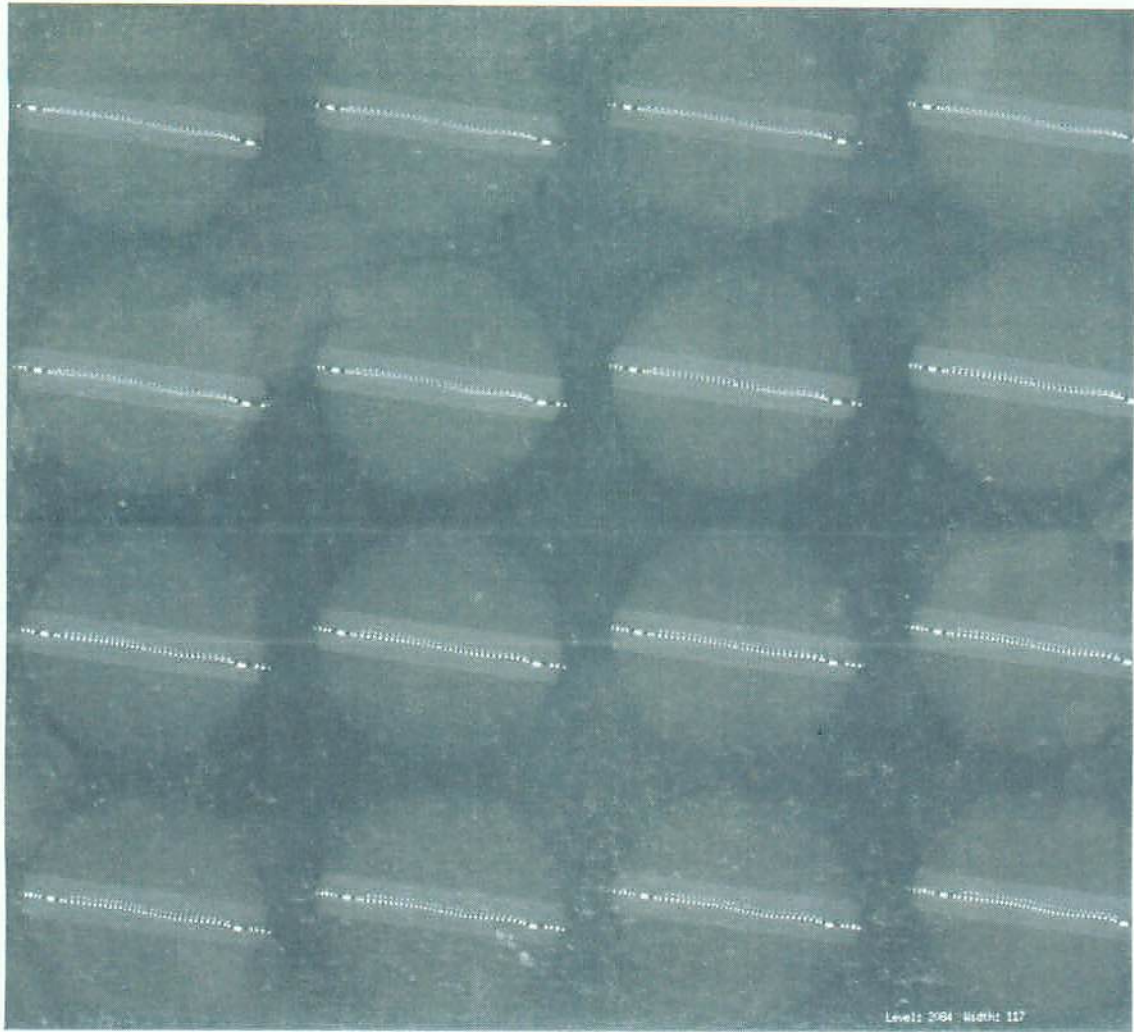


Fig. 3-5 X-ray CT photograph of QFP type.

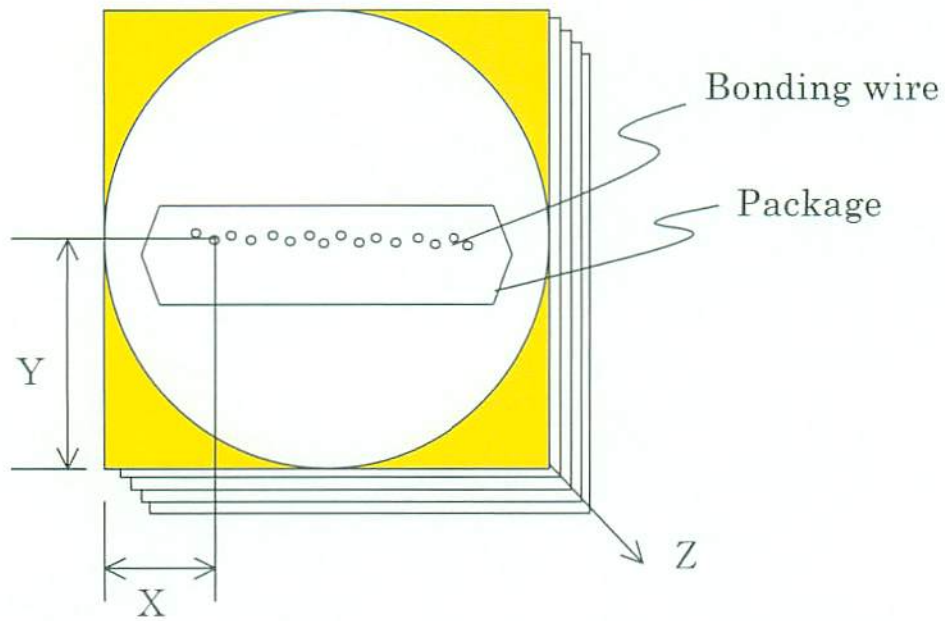


Fig. 3-6 Schematic illustration of coordinates.

Table 3-1. Measurement Condition of SMX-30CT.

Type	SMX-30CT
Maker	Shimadzu Corporation
X-ray tube focus	5 μ m
X-ray voltage	120kV
X-ray current	0.030mA
Slice pitch	0.096mm
Source to object distance	50mm
Source to image distance	500mm
Reconstruction matrix	512 \times 512



(a) upper view



(b) oblique view



(c) side view

Fig. 3-7 Schematic illustration of 3 dimension structure of wire position data.

3.1.3 SMX-225CT型 X線CT装置を用いたの観察

前項では、ワイヤの変形形状の計測についてX線CT装置を用いて得られた断層像からワイヤ相互の位置関係を座標データとして抽出し、一般にパーソナルコンピュータ用として市販されている作画用ソフトウェアを用いて、その得られた座標をもとに3次的に作画することでワイヤの変形形状を得たことを述べた。しかし直径が $30\mu\text{m}$ のワイヤに対して1画素の精度が装置の拡大率の制約上 $50\mu\text{m}$ となり、どうしても滑らかな画像を作り出すことが出来なかった。そこで、X線装置メーカーの協力のもと、前節で観察した結果及び半導体パッケージを観察するにあたって判明した要求性能や不具合点、半導体パッケージでのX線観察におけるポイントなどについて打ち合わせを行い、次期開発装置へフィードバックし仕様へ追加して頂いた。そして新たに産業用として開発された装置を用い、より詳細なCTデータ収集のためワイヤ相互の3次的関係について調査を行った。新たに開発されたX線CT装置は、SMX-225CT装置（島津製作所製）である。この装置外観をFig. 3-8に示す。

また、測定に使用した試料は、前項にて測定に使用したのと同じ表面実装パッケージの、一辺が28mm角の厚さ3.2mmの256ピンQFPタイプを用いた。

観察した試料のCT断層画像例をFig. 3-9に示す。この得られた断層画像を3次元構成した例をFig. 3-10に示す。Fig. 3-9(a)は高ループ側の半導体素子片上のパッド接合位置からワイヤの第一屈曲点(1st bend position)までのワイヤ高さを観察することができるCT断層像である。Fig. 3-9(a)中のワイヤA及びBに着目してみてもわかるように、各ワイヤの第一屈曲点までの高さが異なっていることがわかる。同じワイヤに対して、断面観察位置を半導体素子片の外周部にある低ループ側のパッド接合位置からワイヤの第一屈曲点までのワイヤ高さを観察したCT断層像を(b)に示す。Fig. 3-9(b)中のワイヤAおよびBのワイヤ高さを比較すると、第一屈曲点までのワイヤ高さが低いワイヤはワイヤ高も低く、第一屈曲点までのワイヤ高さが高いワイヤはワイヤ高が高くなっている。この傾向は観察されたワイヤ全てについて同様の傾向があった。また(b)では、高ループ側のワイヤ高さが高いワイヤと

低いワイヤとをそれぞれ比較すると、約 $60\mu\text{m}$ ほどの差があった。このことからワイヤ流れを生じているワイヤはその変形と同時にワイヤ高さが第一屈曲点から変化していると考えられる。Fig. 3-10(a)はワイヤ全体の形状を見渡すために Fig. 3-9 で観察したワイヤを 180 度回転させ、反対の斜め上方向から 3次元化した画像である。Fig. 3-10(b)は、それを側面から観察した例である。前項で述べた 3次元擬似画像処理をしたワイヤ形状に比べ実際のワイヤ形状に近い直線的な形状を 3次元構成することができた。これによりワイヤの全体的な変形の形状や位置関係を知ることが出来る。この半導体素子片上のパッド上からのワイヤ立ち上がり部分を 3次元画像構成して拡大したものを Fig. 3-11 に示す。これから、それぞれのワイヤの第一屈曲点の角度や曲がり半径などの曲がり方が異なることでワイヤ高さが異なっていることがわかる。

測定時の設定条件を Table. 3-2 に示す。このときの CT データ収集のための測定時間は 2400view で約 80 秒を要した。また、測定終了後に行う CT 断層画像への再構成に要する時間は約 17 秒を要した。前項で用いた X線 CT 装置では、 1800view のデータ収集に要した測定時間は約 60 秒であり、単位時間あたりに測定出来る画像数は変わっていない。だが、CT 断層画像に変換する時間は前項で用いた装置では 1800view で約 60 秒を要したのに対し、今回用いた装置では 2400view で約 17 秒と処理速度が約 4.7 倍へ向上されている。これらは本装置に新たに開発されたソフトウェアとコンピュータの高速化により実現された。前項で用いた X線 CT 装置との最も大きな差は、X線源の焦点寸法を $5\mu\text{m}$ から $4\mu\text{m}$ へと向上された事による解像度の向上である。さらにソフトウェアの変更により画像処理マトリックスが従来機では最大 512×512 画素であったのが 1024×1024 画素まで行えるようになったこと、スライスピッチをより細かくしたことで、高い精度での解析が可能となった。処理速度の高速化は OS を X-Windows から Windows NT へと変更されたこととメインメモリを 32MB から 64MB へと変更し、さらに高速演算ボードと 128MB のデータメモリボードを追加したことによる。内部でのソフトウェアの処理方法も変更されているようであるが、ソフトウェアの内部処理方法や構成までは知ることはできなかった。

X線 CT 装置での観察限界を調査するために、基板上に実装された半導体パッケージのはんだボール状態などについて観察を行った。

Fig.3-12 に観察に使用した基板上に実装された BGA パッケージを示す。このパッケージの任意の断面を観察した CT 画像を Fig. 3-13 に示す。この断面位置で周囲に実装部品などが存在していない位置のはんだボールの CT 画像を Fig. 3-14 に示す。これを見ると、はんだボールの外形形状とその内側にボイドが存在している様子を観察することが出来ている。実際の断面と比較するためにその位置を断面カットし観察した写真を Fig. 3-15 に示す。その結果、X線 CT で観察した断層像と非常によい一致があることがわかる。同じ断面において、実装基板の裏に他の実装部品が存在している位置を観察した CT 画像を Fig. 3-16 に示す。この画像を見てわかるように、ゴースト像が現れ、はんだボールの正確な形状を見て取ることが出来ない。この位置を断面カットし観察した写真を Fig. 3-17 に示す。実装部品が質量吸収係数の高い鉛を含むはんだで基板上に実装されており、その影響により観察対象であるはんだボールの正確な形状を観察することが出来なかったことがわかる。

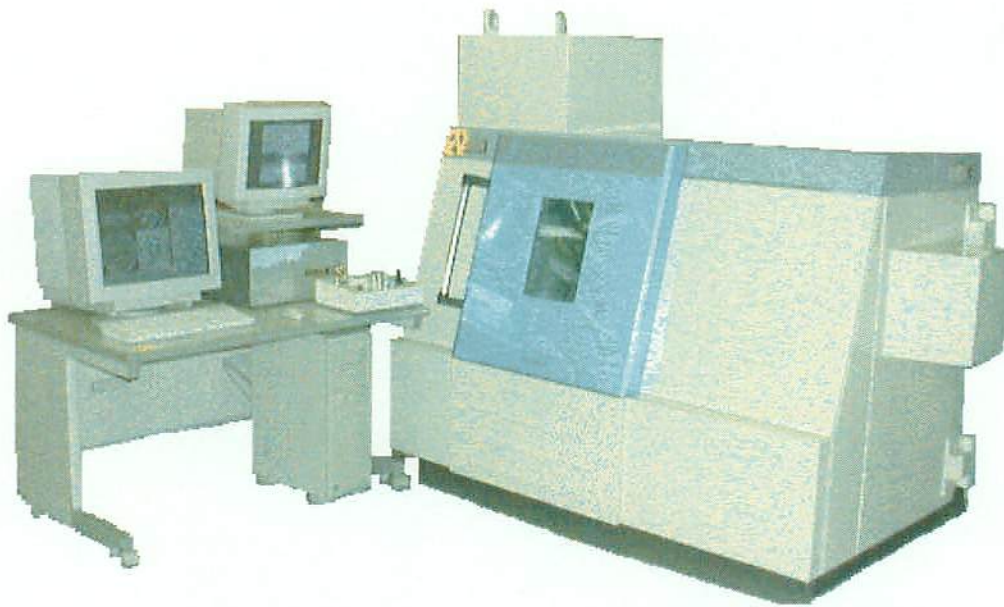
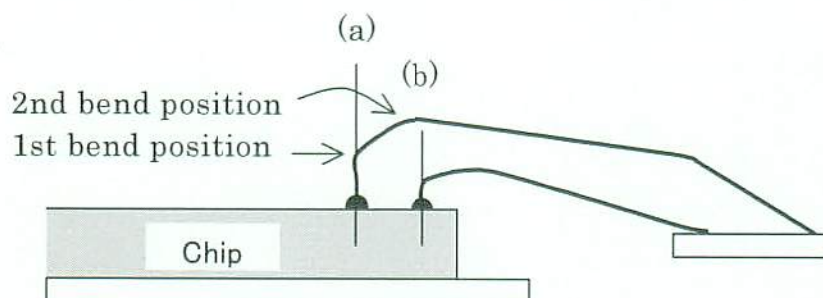
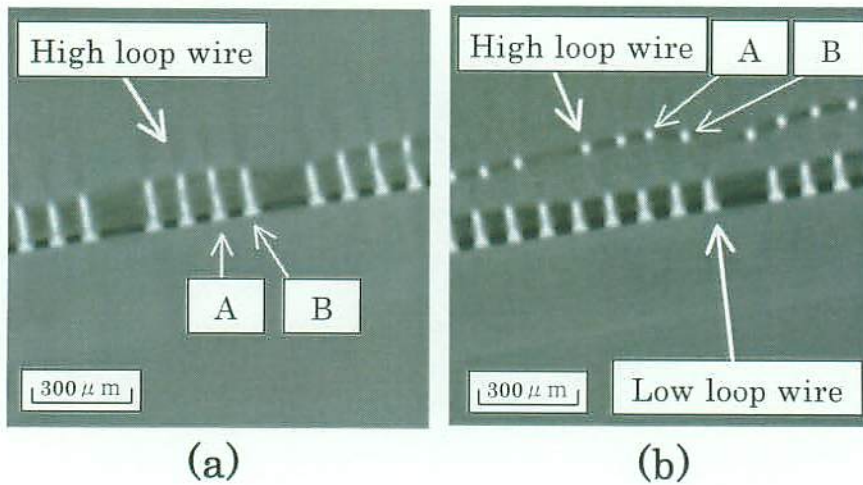
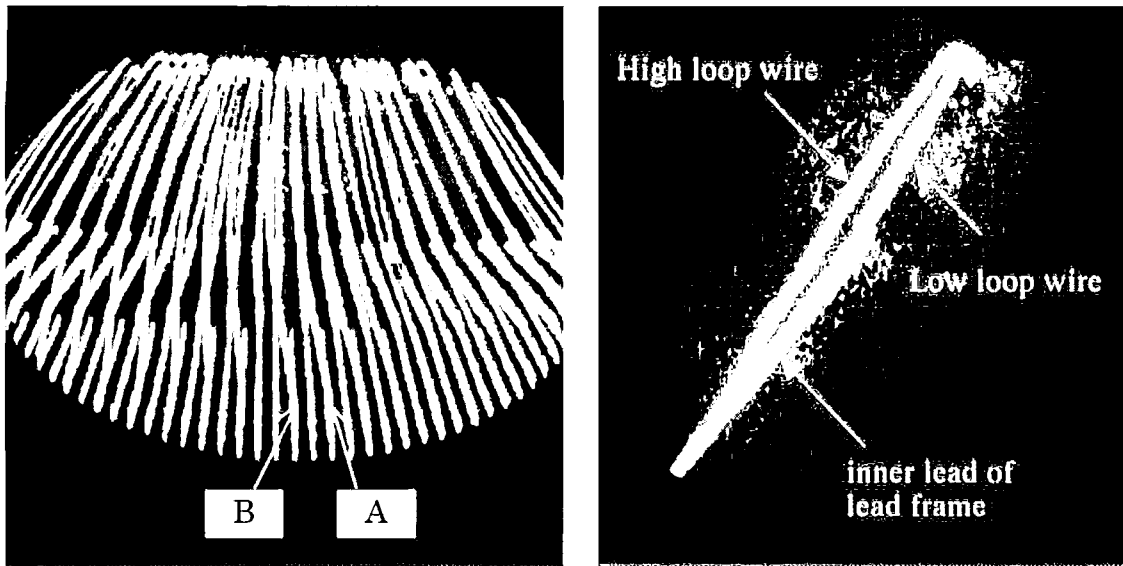


Fig. 3-8 Photograph of X-ray CT instrument (SMX-225CT).



(c) Schematic illustration for cross section
 Fig. 3-9 X-ray CT photograph of QFP by SMX-225CT.



(a) oblique view

(b) side view

Fig. 3-10 3 dimension image of the stagger bonding wire.

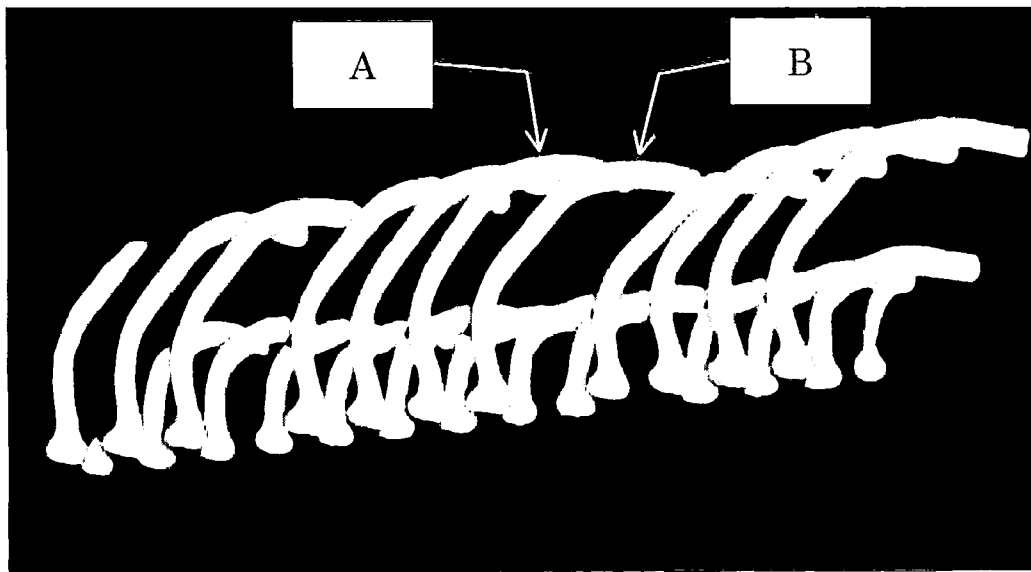


Fig. 3-11 3 dimension image of the bonding wire on the 1st bonding side of stagger type.

Table 3-2. Measurement Condition of SMX-225CT.

X-ray tube focus	4 μ m
X-ray voltage	190kV
X-ray current	0.07mA
Type of I.I. unit	I.I./CCD Camera 4.5inch
Slice thickness	0.012mm
Slice pitch	0.008mm
Reconstruction matrix	512 \times 512
SID/SOD	19.08(500.0mm/30.0mm)



Fig. 3-12 Photograph of BGA on board.

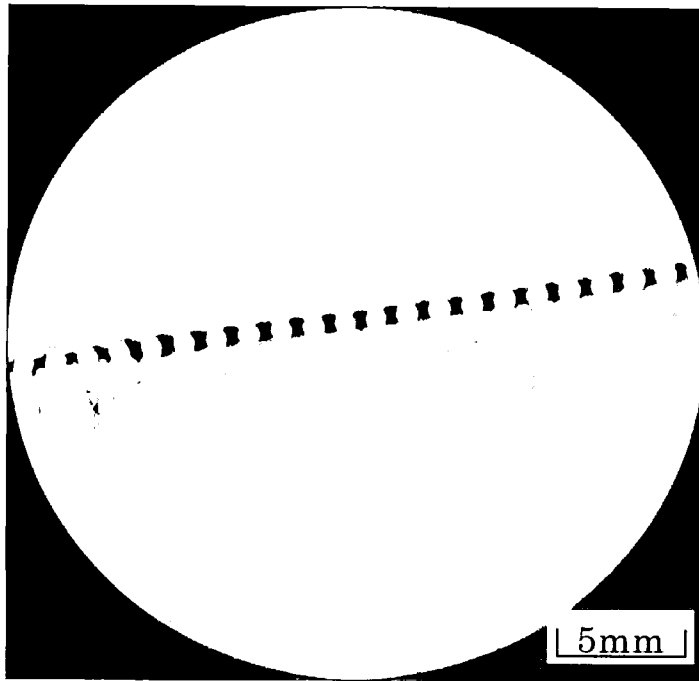


Fig. 3-13 CT Photograph of BGA on board.

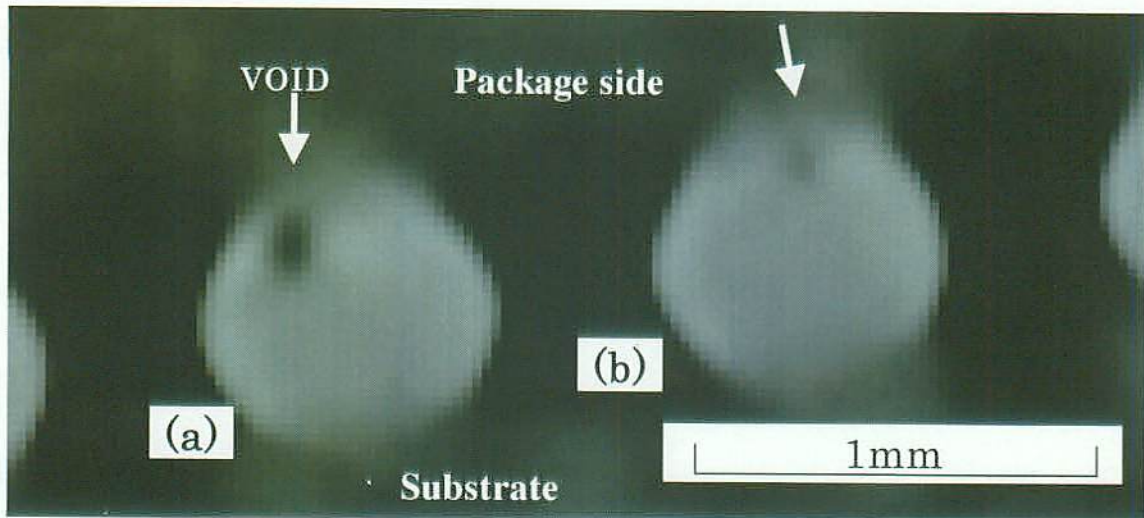


Fig. 3-14 Inner voids (arrows) of solder ball by CT.

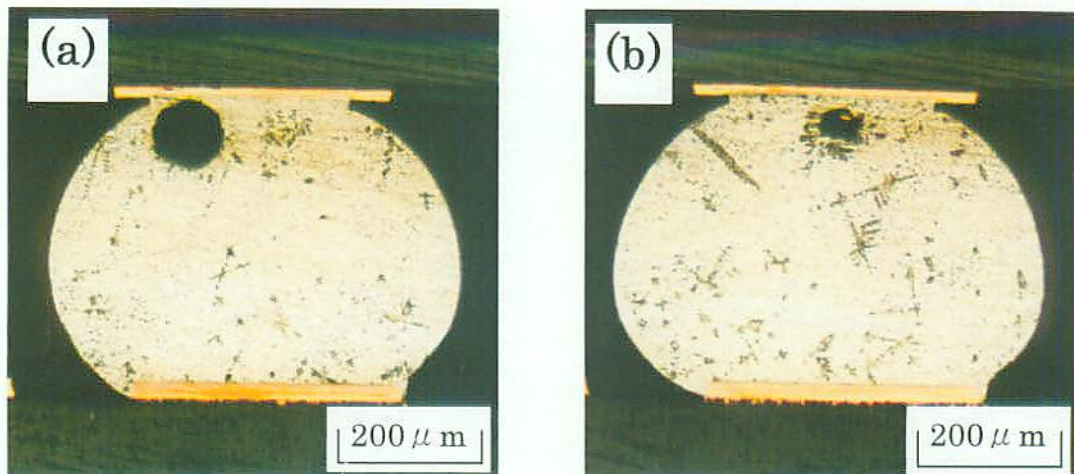


Fig. 3-15 Section cut of solder ball including inner void at no other parts.

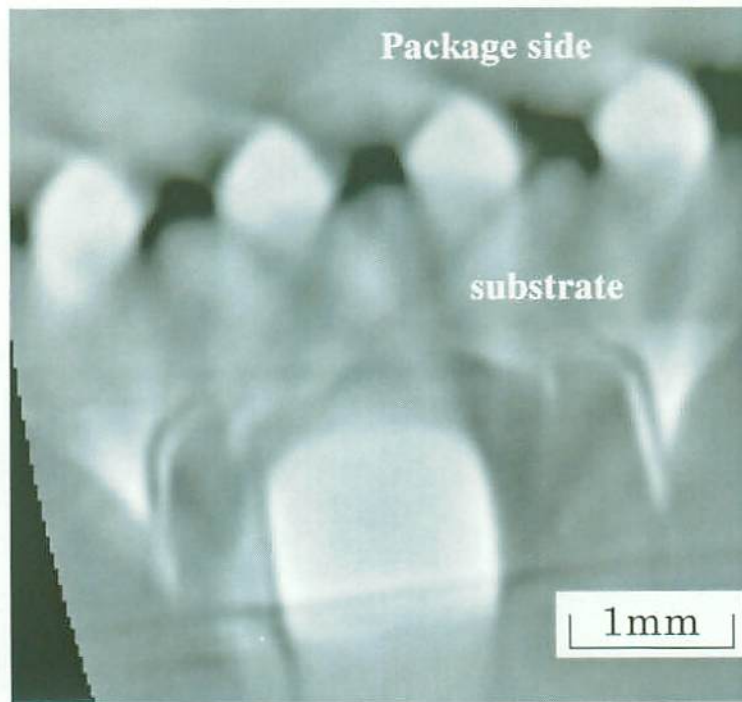


Fig. 3-16 X-ray CT image showing the influence of other parts.

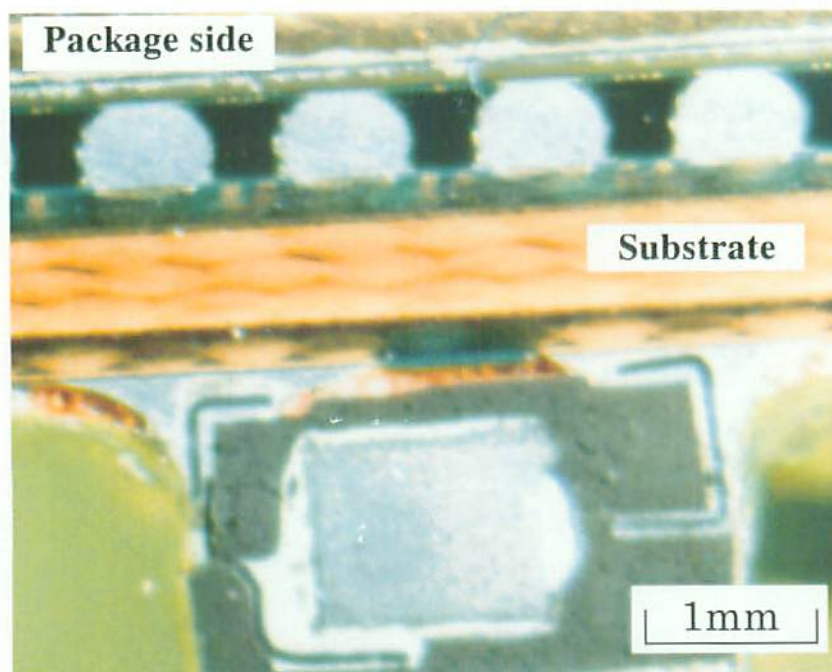


Fig. 3-17 Section cut of Fig. 3-15.

3.2 まとめ

樹脂封止型半導体内部のワイヤ形状を観察した結果、下記の結論を得た。

(1) ワイヤ流れ率観察においては、単列のワイヤ構造であれば、X線透過装置での観察が非破壊で可能である。

(2) ワイヤ構造が千鳥配列品など多段ワイヤリングされている場合、X線透過装置での観察は困難であり、その3次元的位置関係を得る方法としてX線CT装置による観察が有効である。

(3) ワイヤ流れの変形は、ワイヤの第一屈曲点の屈曲点から変化していることがわかった。また、ワイヤ流れが生じているワイヤはその変形と同時にワイヤ高さが第一屈曲点から変化していることがわかった。

(4) X線CT装置での観察では、観察対象となる試料に対してその要求精度を確保できるかは装置能力と拡大率が確保できるかであるが、最新のX線CT装置での観察であれば、パッケージ単体での30 μ m前後のワイヤの構造を観察することが可能である。

(5) X線CT装置での観察においても観察対象物の近傍に障害となる質量吸収係数の高い物資が存在すると、その影響で正確な観察が出来ないことがある。

第4章 ワイヤ流れ支配要因の解析

4.1 ワイヤ流れに対する封止条件の影響

第2章の Table 2-1. において、ワイヤ流れに対する支配要因を示した。その中で、樹脂封止時の条件に対する支配要因は①樹脂射出速度（樹脂流速）、②樹脂成形温度、③金型内射出圧力の3項目である。この要因の中で②の樹脂成形温度は樹脂粘度や硬化特性と密接な関係があり①樹脂射出速度の項でふれる。残りの2つの要因について実際に量産されている製品を用いて調査を行った。

4.1.1 ワイヤ流れに対する樹脂流速の影響

4.1.1.1 実験方法

試料には、正方形の外形形状である QFP160pin（パッケージ外形寸法 28×28mm, 厚さ 3.2mm, コーナーゲート）のパッケージを用いた。金線は直径 33 μ m で、Au99.99%の純金線を使用し、Normal Loop 形状でワイヤボンディングを行った。使用した封止樹脂を 175°C に加熱したときの粘度と時間との関係を Fig. 4-1 に示す。この粘度測定はラボプラストミルという測定方法にて測定を行った。また、Fig. 4-1 の各樹脂に対する特性を Table 4-1. に示す。この樹脂はビフェニル系の封止樹脂である。樹脂には硬化性・熱膨張率・熱伝導率・機械的強度を調整するために、充填剤としてフィラ（アモルファス：SiO₂）が含まれている。実験に使用した樹脂に含まれるフィラの含有量は 80wt% であり、その形状は破碎フィラ：球状フィラが 8:2 で混合されている。樹脂の比重は 1.91 である。実験には、射出機構がサーボモータで制御される封止装置を用いた。この装置（NEC 製 FAMS-C）は半導体の量産現場で実際に使用されているものである。

Fig. 4-1 を見てわかるように樹脂は熱硬化型の樹脂であり、加熱直後から樹脂粘度は低下していき、低く安定する領域が存在する。その後、時間の経過とともに樹脂は硬化し粘度が上昇していく。半導体生産の量産現場においては、この低く安定した粘度領域で封止金型のキャビティへの樹脂注入条件の設定を経験的に行なっている。実験は安定した粘度の領域が比較的平坦である Resin B の樹脂を用い、封止樹脂を金型へ投入してから 5 秒後に樹脂注入を開始した。

4.1.1.2 実験結果

射出速度とワイヤ変形率についての実験結果を Fig. 4-2 に示す。樹脂注入開始から充填完了までに要する時間（樹脂射出時間）が 5.5 秒（樹脂を金型へ投入してから 10.5 秒）以下の領域においては、Fig. 4-2 からわかるように樹脂の粘度が低下しているにも関わらず、射出時間が短い（単位時間あたりの樹脂注入流量が多い）ほどワイヤ変形率は大きくなる。(2-6)式で示したとおり、ワイヤが樹脂流動に対して受ける流体抵抗は流速の二乗に比例しており、これは樹脂流速に依存してワイヤ変形率が大きくなったと考えられる。

樹脂射出時間が 5.5 秒から 10 秒の領域においては、3.5%前後のほぼ一定のワイヤ変形率を示している。そして、樹脂射出時間が 10 秒を越えるあたりより射出時間が長くなる（単位時間あたりの樹脂注入流量が少くなる）領域においては再びワイヤ変形率が大きく 15~19 秒では 4.5%前後となった。樹脂射出時間が 5.5 秒から 10 秒の領域ではワイヤ変形率が変化していないように見えるが、樹脂流速は減少しており、流速だけでワイヤ変形率を説明することが出来ないことがわかる。また、樹脂射出時間が 10 秒を越えるあたりより射出時間が長くなる領域では、再びワイヤ変形率が大きくなっており、樹脂流れの流速に起因し抵抗が増加したとは考えられない。これについては、Fig. 4-1 に示したように封止樹脂の硬化が進んでいくことによる粘度上昇に起因していると考えられることで説明できる。樹脂射出時間が 5.5 秒から 10 秒の領域においては樹脂流速の減少により、流速に支配された流体抵抗は減少するが、樹脂硬化での粘度上昇により粘度に支配された流体抵抗は上昇し、結果としてワイヤが受ける総流体抵抗が一定になったと考えられる。樹脂射出時間が 10 秒を越えたあたりから、流速の低下による流体抵抗の減少に対して、樹脂硬化での粘度上昇による流体抵抗の増加が大きくなっていったと考えられることで説明できる。

この結果から、樹脂流速を低下させればワイヤ変形は低減することが出来ることがわかる。しかしながら、実際の半導体製造には熱硬化性樹脂を用いていることにより、温度を下げれば粘度が高く、効果が遅くなる樹脂硬化性などの要因も考慮しなければならない。また、射出時間を遅くすることは量産においては生産性の低下を意味していることも考慮する必要がある。

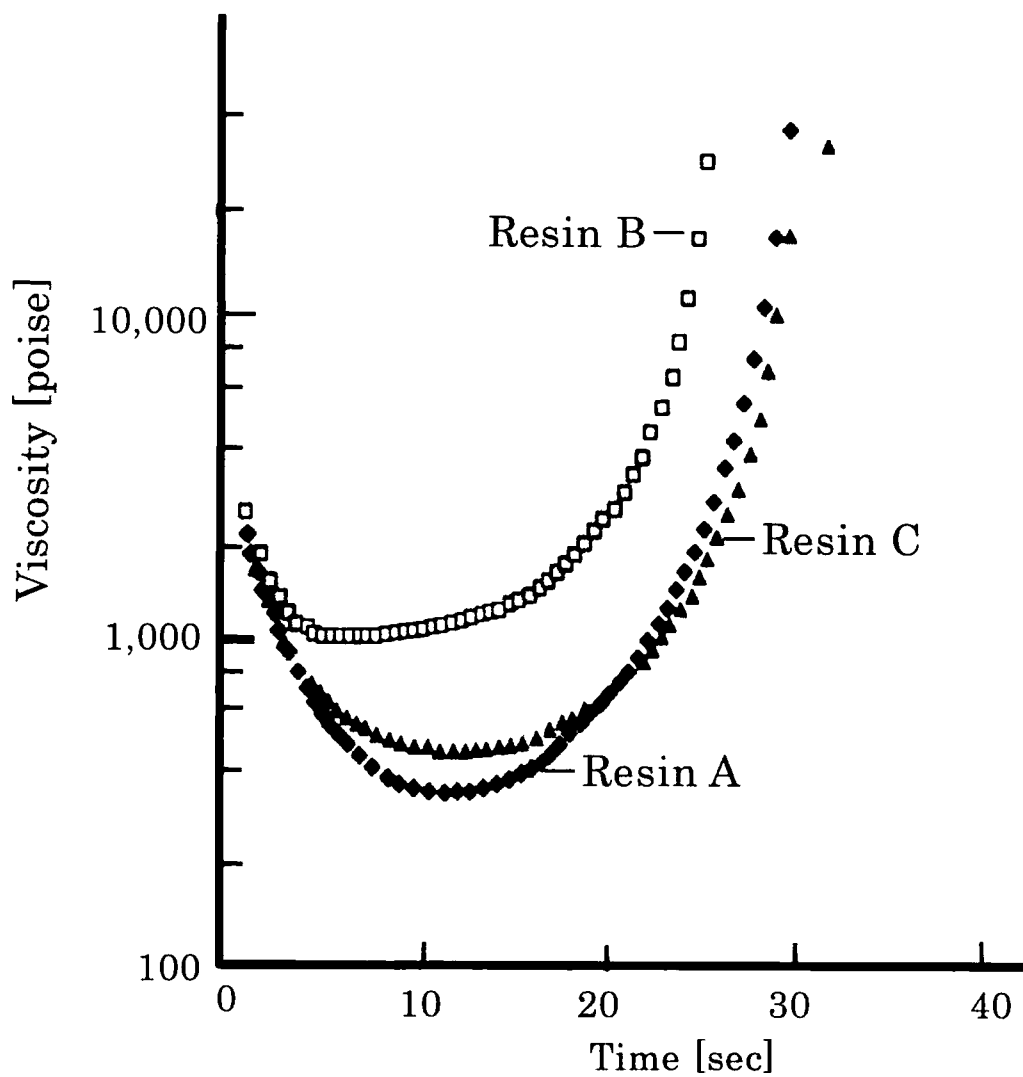


Fig. 4-1 Hardening characteristic of mold resin.

Table 4-1. Characteristic of mold resin in Fig.4-1.

Mark	Resin	Temperature [°C]	Spiral flow [cm]	Min. viscosity [poise]	Gel time [sec]
◆	A	175	181	355	30.5
□	B	175	106	1,046	26.5
▲	C	175	171	455	30.5

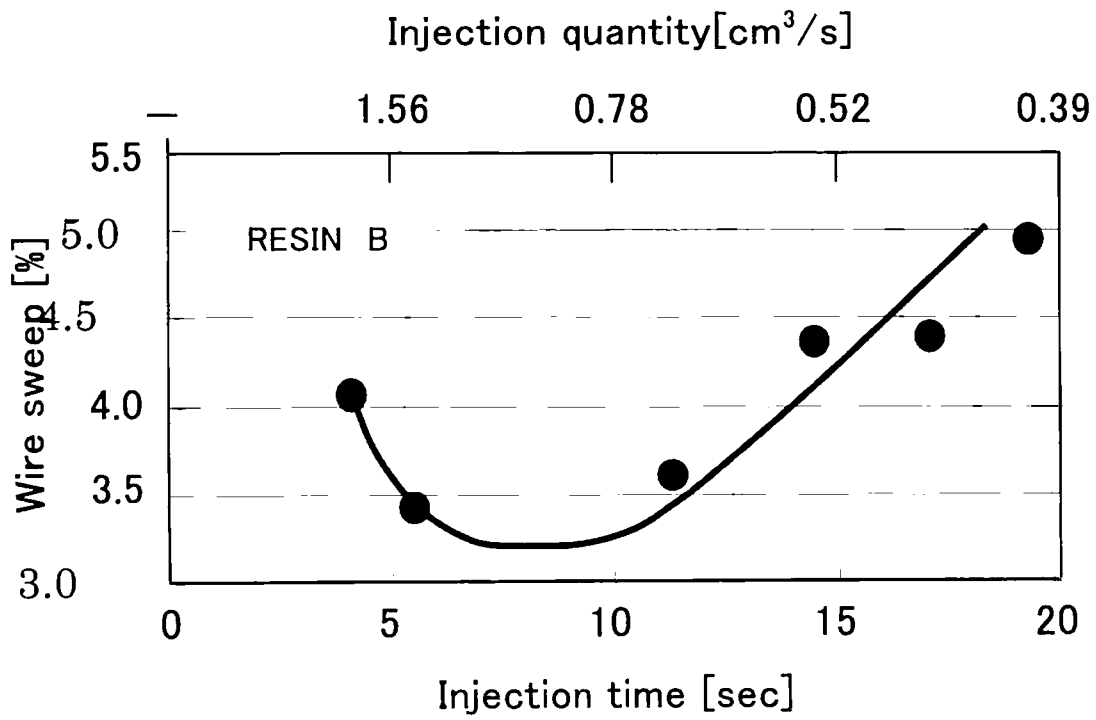


Fig. 4-2 The relation between inject condition and wire sweep.

4.1.2 ワイヤ流れに対するキャビティ内圧力の影響

4.1.2.1 実験方法

試料には、正方形の外形形状である QFP256pin（パッケージ外形寸法 28×28mm,厚さ 3.2mm,コーナーゲート）のパッケージを用いた。金線は直径 33 μ m で、Au99.99%の純金線を使用し、Normal Loop 形状でワイヤボンディングを行った。使用した封止樹脂はビフェニル系の封止樹脂である。樹脂に含まれているフィラの含有量は 78wt%であり、その形状は全て球状フィラで構成されている。樹脂の比重は 1.88 である。実験には、半導体の量産現場で実際に使用されている樹脂封止装置（NEC 製 FAMS-SR）を用いた。

4.1.2.2 実験結果

異なった金型キャビティ内圧力で樹脂封止を行い、パッケージ内で同じ位置でのワイヤの変形率について調査した結果を Fig. 4-3 に示す。その結果、従来行われている常圧(98kPa)での樹脂成形方式に比べ、金型キャビティ内を真空(98kPa)にして樹脂成形した方がワイヤ変形率は測定した全ての位置でのワイヤ変形率が大きくなった。また、金型キャビティ内を加圧(588kPa)して樹脂成形を行った場合は、常圧での樹脂成形に比べワイヤの変形率は測定した全ての位置で小さくなった。

そこで、樹脂注入時の状態を観察するためにハーフショット（又はショートショット）と称されている方式で樹脂流れ状態の調査を行った。このハーフショットとは、樹脂射出途中でプランジャを停止させ、樹脂を充填途中で硬化させる方法である。Fig. 4-4 にハーフショットを行った写真を示す。Fig. 4-4 では左下にゲートが有り、この位置から樹脂が注入されている様子がわかる。金型キャビティ内の圧力を真空で引いて 8kPa に減圧し、ハーフショットを行った時の樹脂先頭界面状態を観察した写真を Fig. 4-5 に示す。数多くの気泡が樹脂界面に存在していることがわかる。同じく金型キャビティ内の圧力を大気圧である 98kPa で、ハーフショットを行い樹脂先頭界面状態を観察した写真を Fig. 4-6 に示す。金型キャビティ内の圧力を 8kPa に減圧した場合と同じように樹脂先頭界面に数多くの気泡が存在していることがわかる。金型キャビティ内の圧力を 588kPa まで加圧し、ハーフショットを行い

樹脂先頭界面状態を観察した例を Fig. 4-7 に示す。この写真で特徴的なのは、減圧(8kPa)及び常圧(98kPa)で見られた樹脂先頭界面の気泡が認められないことである。

このハーフショットにおいて、同じプランジャ位置で射出を止め樹脂を硬化させたが、金型キャビティ内の圧力を変化させた時の樹脂のキャビティ内における到達位置がそれぞれ異なった。その位置を Fig. 4-8 に模式的に示す。金型キャビティ内の圧力が低いほどキャビティ内の樹脂充填が進んでいることがわかる。

以上の結果から、金型キャビティ内圧力を 8kPa に減圧したときには、常圧(98kPa)での樹脂注入と比べ相対的に低圧側への差圧(90kPa)が大きくなったために樹脂内部の揮発成分や内在する気泡などの気体が膨張し、見掛けの樹脂体積が増加しているためと考えられる。その結果としてワイヤにかかる樹脂流速が早くなることによって流体抵抗が大きくなり、金型キャビティ内圧力を減圧したときは常圧で樹脂成形を行った場合に比べワイヤ変形率が大きくなったと推察する。同様の理由で金型キャビティ内圧力を 588kPa に加圧したときには常圧(98kPa)での樹脂注入と比べ樹脂内部の揮発性分や内在する気泡などの気体の発生が抑制され、見掛けの樹脂体積が減少したと考える。その結果としてワイヤにかかる樹脂流速が遅くなることによって流体抵抗が小さくなり、金型キャビティ内圧力を加圧したときは常圧で樹脂成形を行った場合に比べワイヤ変形率が小さくなったと推察する。

これを確認するために、樹脂中に発生している気泡(ボイド)の状態を常圧で成形した場合と加圧して成形した場合のX線観察を実施している⁽⁵⁾。その常圧にて成形した時のキャビティ内の気泡状態を観察した結果を Fig. 4-9(a)に示す。また、その時のワイヤ変形状態を Fig. 4-9(b)に示す。この結果から、常圧成形ではキャビティ内に気泡が数多く存在している状態が見取れる。加圧して成型した時のキャビティ内の気泡状態を観察した結果を Fig. 4-10(a)に示す。また、その時のワイヤ変形状態を Fig. 4-10(b)に示す。常圧成型時のワイヤ変形状態 Fig. 4-9(b)と加圧成型時のワイヤ変形状態 Fig. 4-10(b)を比較すると同一位置のワイヤは明らかに常圧成型時の方が大きく変形している。これらの結果から、加圧成形では常圧成形に存在していた樹

脂内部の気泡が存在していない事がわかる。これにより前述した気泡の存在による見掛けの樹脂体積変化により流速が変化している事を示唆していると考ええる。また、それぞれのワイヤ変形率の差は、この樹脂体積変化による流速の差であることが、これらの結果からも推察出来る。

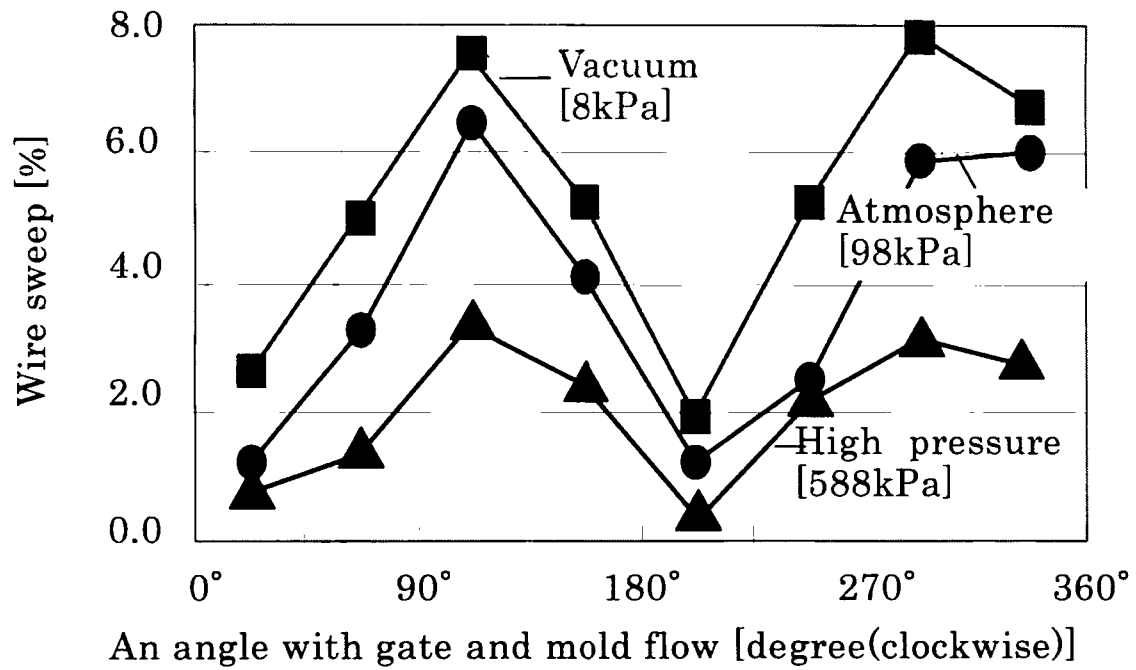


Fig. 4-3 The relation between cavity inner pressure and wire sweep.

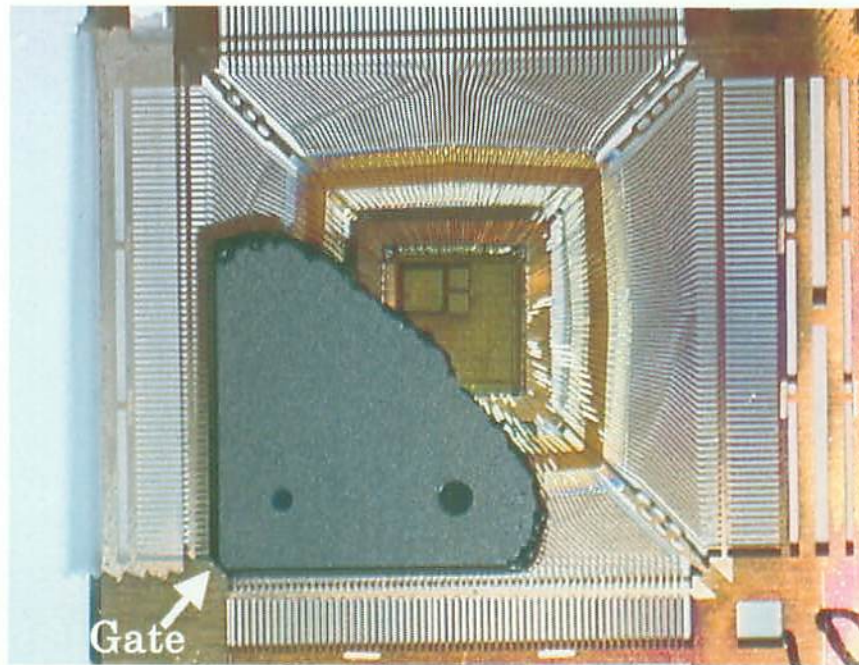


Fig. 4-4 Photograph of half shot.

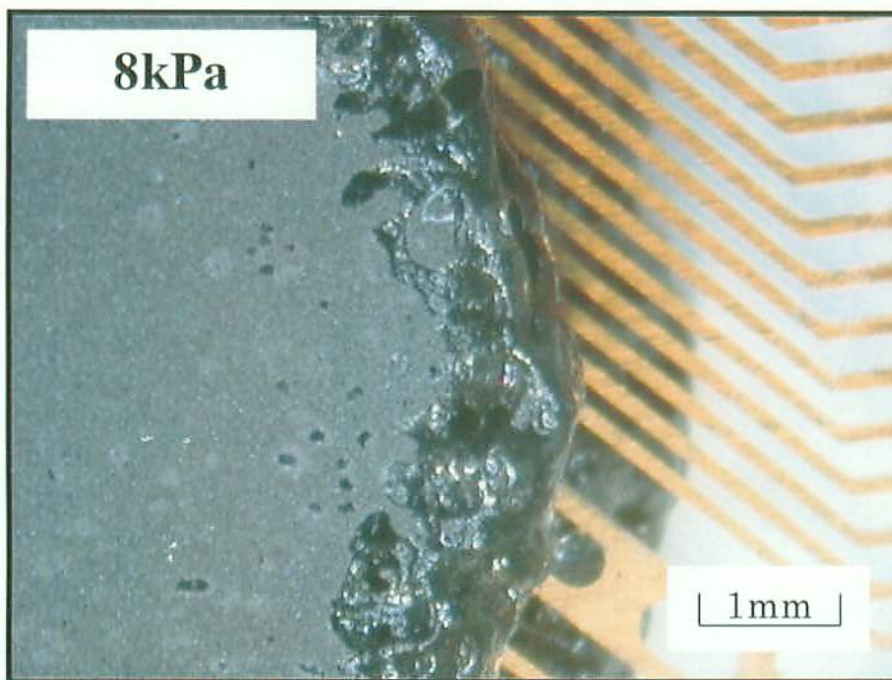


Fig. 4-5 Flow front of resin at 8kPa in cavity.

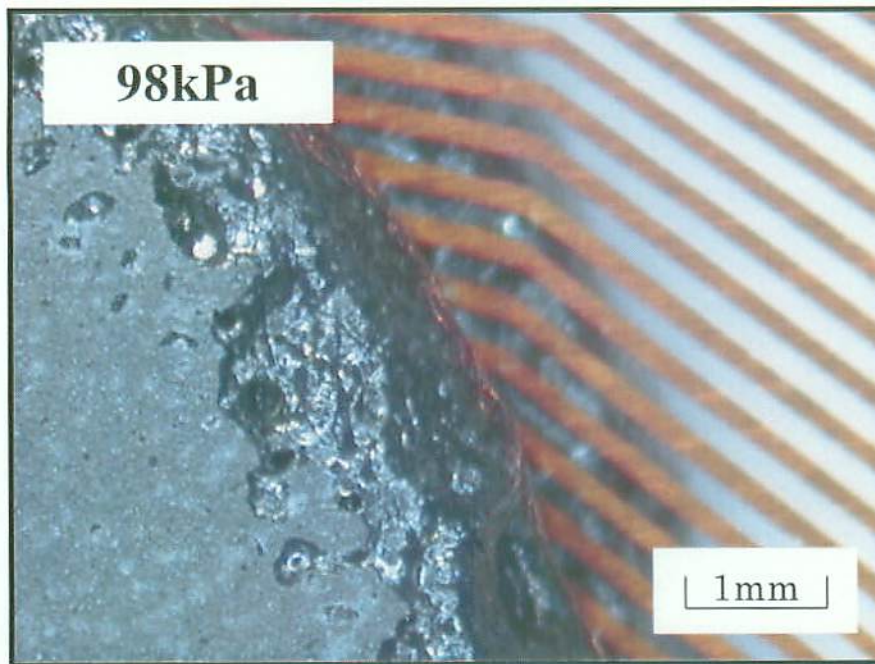


Fig. 4-6 Flow front of resin at 98kPa in cavity.

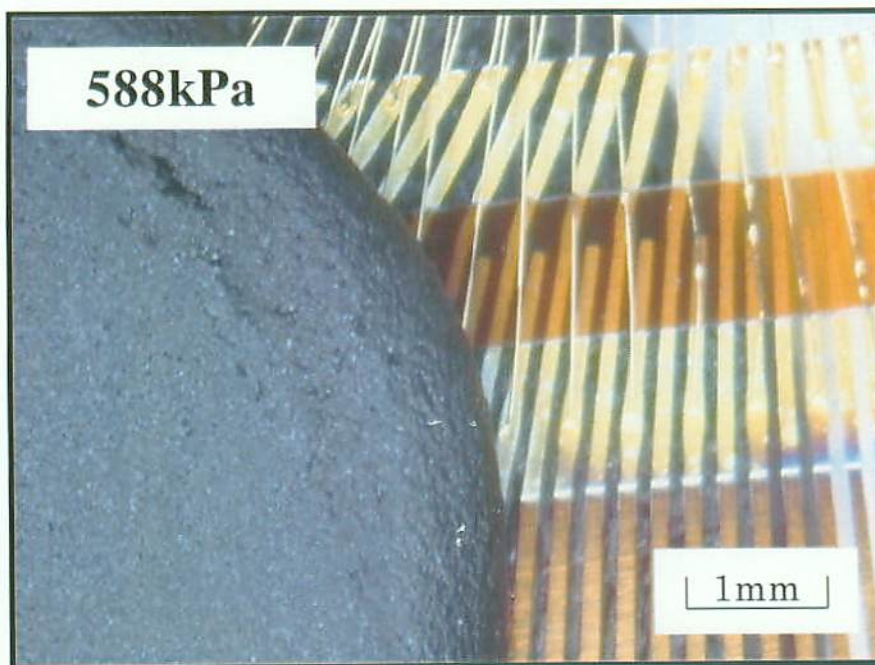


Fig. 4-7 Flow front of resin at 588kPa in cavity.

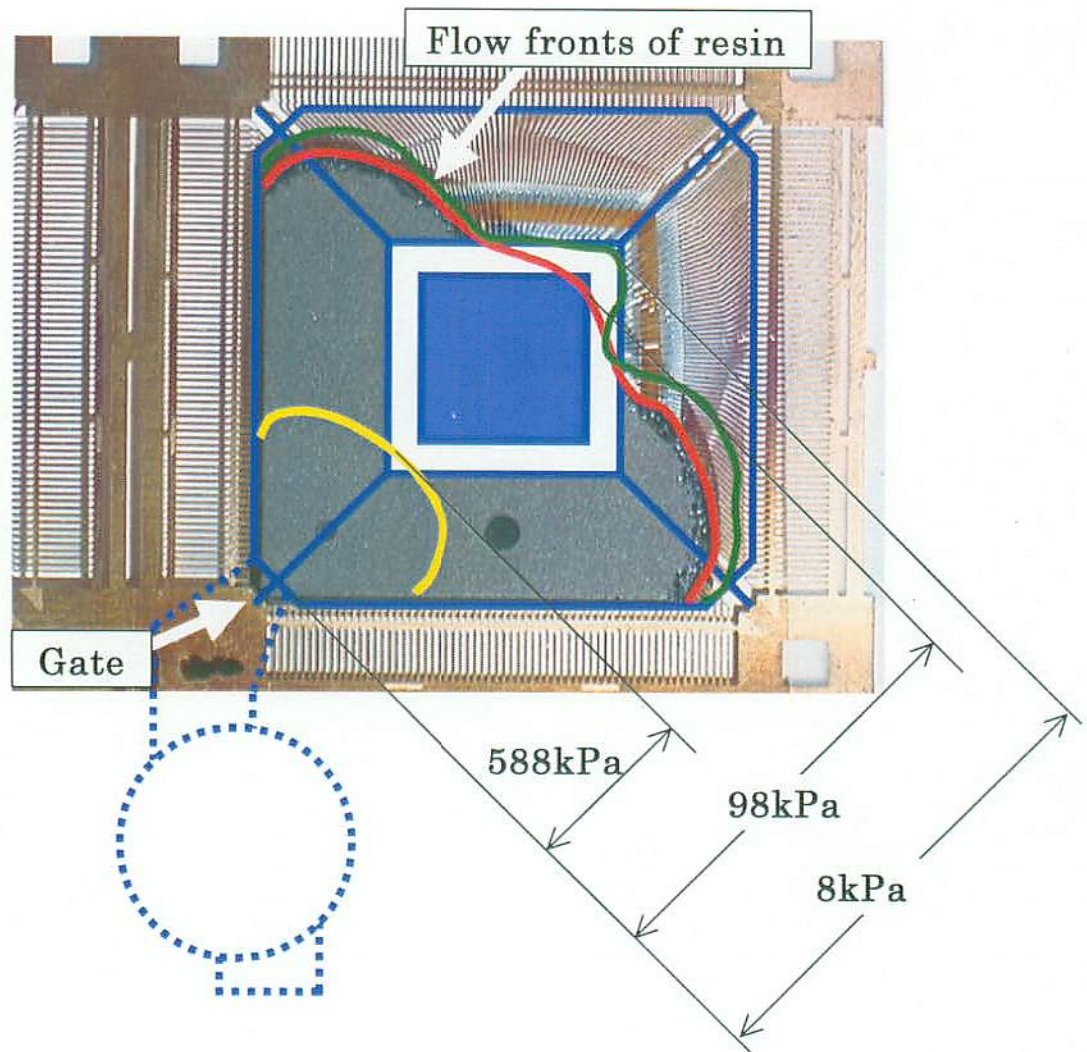
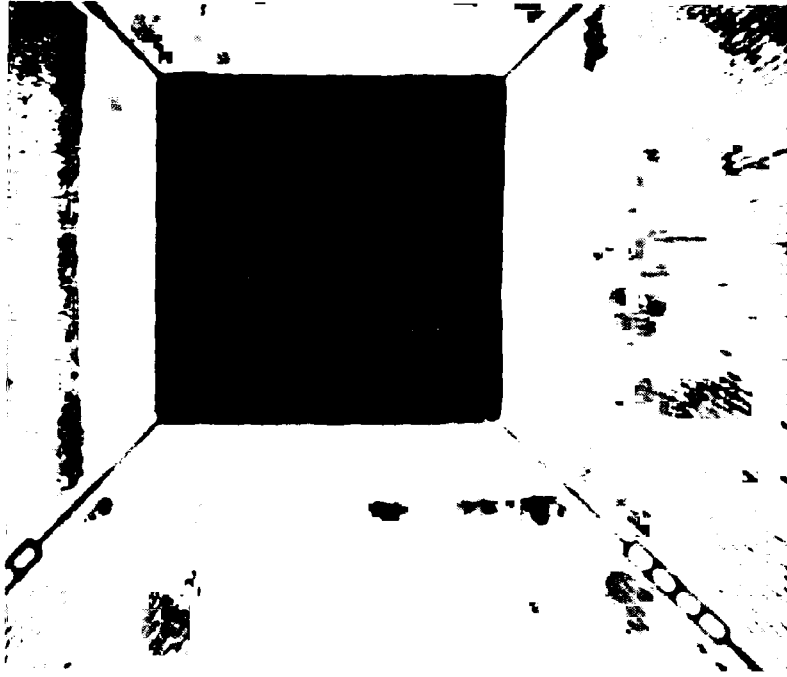


Fig. 4-8 Flow fronts position at difference cavity pressure in same plunger position stopped.

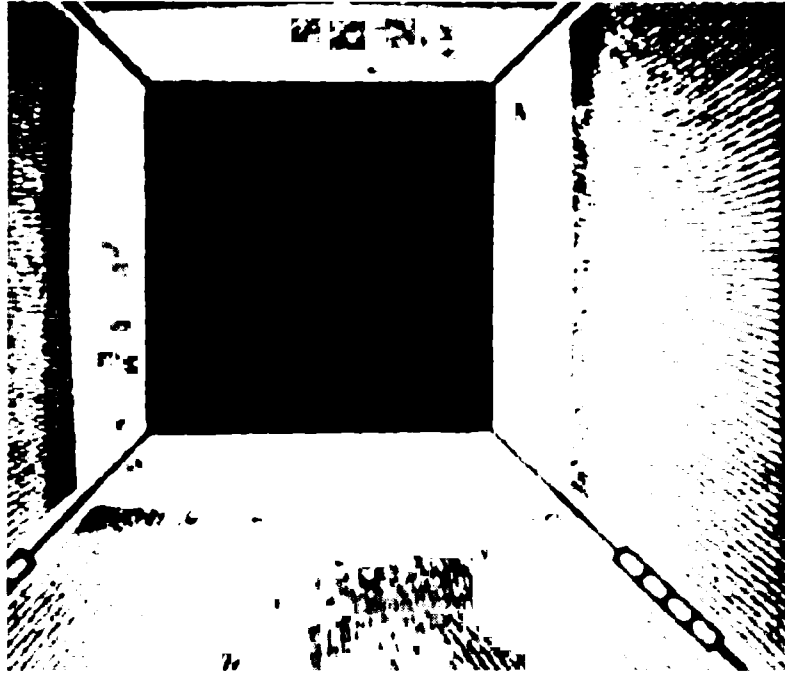


(a) Cavity



(b) Wire

Fig. 4-9 X-ray image of normal pressure injection in cavity.



(a) Cavity



(b) Wire

Fig. 4-10 X-ray image of high pressure injection in cavity.

4.2 ワイヤ流れに対するワイヤ位置の影響

金型のプランジャに投入された樹脂はランナと呼ばれる流路を通り、キャビティ端に位置するゲート（樹脂注入口）からキャビティ内へ注入・充填される。この間、封止樹脂はせん断速度によりその粘度を変化させる。Table 4-2. にそのせん断速度と Fig. 4-11 にせん断速度により粘度が変わることを示す。この様に、パッケージ構造で樹脂の粘度が変化することをふまえ、ワイヤの位置におけるワイヤ流れに対する影響を調査した。

4.2.1 ワイヤ流れに対するワイヤ配置の影響

4.2.1.1 実験方法

実験には 4.1.1 項で用いた試料と条件及び封止装置を用いて調査を行った。調査は第 3 章で述べたように、X線透視装置により観察した画像からワイヤ変形率を測定した。QFP160pin タイプのワイヤ配置状態を Fig. 4-12 に示す。Fig. 4-12 から、このパッケージではワイヤが放射状にボンディングされていることがわかる。

4.2.1.2 実験結果

各射出（樹脂注入）時間でのパッケージ内のワイヤ変形率を Fig. 4-13 に示す。ゲートを左下に位置した時のパッケージ内のワイヤ変形率の分布について示したものである。このレーダーチャートはパッケージ内のワイヤボンディングを行っている方向に対応している。また、この結果を 45 度毎にプロットしたものを Fig. 4-14 に示す。

従来問題とされているワイヤ変形の位置はゲートとなす角度が 90 度のパッケージコーナ位置であるが、45 度前後の位置でもワイヤ変形率が大きいことがわかる。但し、90 度の位置でのワイヤ変形率はその前後のワイヤの変形率に比べて大きく変化し差があるのに対し、45 度前後の位置でのワイヤ変形率はその前後のワイヤ相互の変形率は大きく変化しておらず差が小さい。ワイヤ変形の最大の不具合項目はワイヤ相互の接触による電気的な短絡である。そのことを考えるとワイヤ相互の変形率の差が大きい 90 度位置で問題となっている原因がワイヤ変形率が大きいことによるものではなく、前後ワイヤ

相互の変形率の差が大きいことによるものであることがわかった。パッケージ構造からこの違いの原因を推察すると、Fig. 4-12 から 45 度前後の位置ではワイヤは密にボンディングされているのに対し、90 度の位置ではワイヤが張られていない位置が存在する。そして、90 度の位置でワイヤ変形率が大きくなっているワイヤは、ワイヤが張られていない位置の前後のワイヤである。Fig. 4-12 からその状態を観察することが出来る。この結果はワイヤの間隔がワイヤ変形に影響していることを示唆している。

90 度を超えるワイヤの変形率が 90 度までのワイヤ変形率より小さくなっている。これは樹脂流れの方向が Fig. 4-8 で示したようにゲートより扇状に広がっていくことにより、ワイヤと樹脂流れ方向となす角度が小さくなる為であると推察される。また、0 度及び 180 度の配置の場合、樹脂流れに対向する投影面積が最も小さくなる。その結果、この角度では進んで来る樹脂流れに対して水平方向の変位が最も小さくなっている。

各射出時間に対するワイヤ変形率は Fig. 4-2 で示したが、パッケージ内部でのワイヤ変形率の分布は樹脂射出時間に関係なく相似の形状をしていると認められる。これはゲートから 45 度間隔でプロットした Fig. 4-14 のグラフからも明らかである。すなわち、ワイヤ変形は樹脂流れの方向とワイヤとなす角度にも依存していると考えられる。このことは、(2-7)式からもうまく説明することが出来る。このように、進んでくる樹脂流れに対するワイヤの向きもワイヤ変形の大きさを支配することがわかる。

ワイヤ変形は短絡だけでなく、ワイヤの破断による電氣的断線も問題として存在している。従来、ワイヤ流れはワイヤの変形率を低減するための報告が数多くなされているが、今回の評価のように密にワイヤが張られているパッケージでの報告はない。この結果からワイヤの全体としての変形率を押さえながらワイヤ相互の変形率の差を小さくすることが必要であると考えられる。

Table 4-2. Shear rate range of molding die⁽¹⁸⁾

Mold die		Shear rate (s ⁻¹)			
		1	10	100	1,000
QFP	cavity	↔			
	runner	↔			
	gate	↔			
Spiral flow test die		↔			

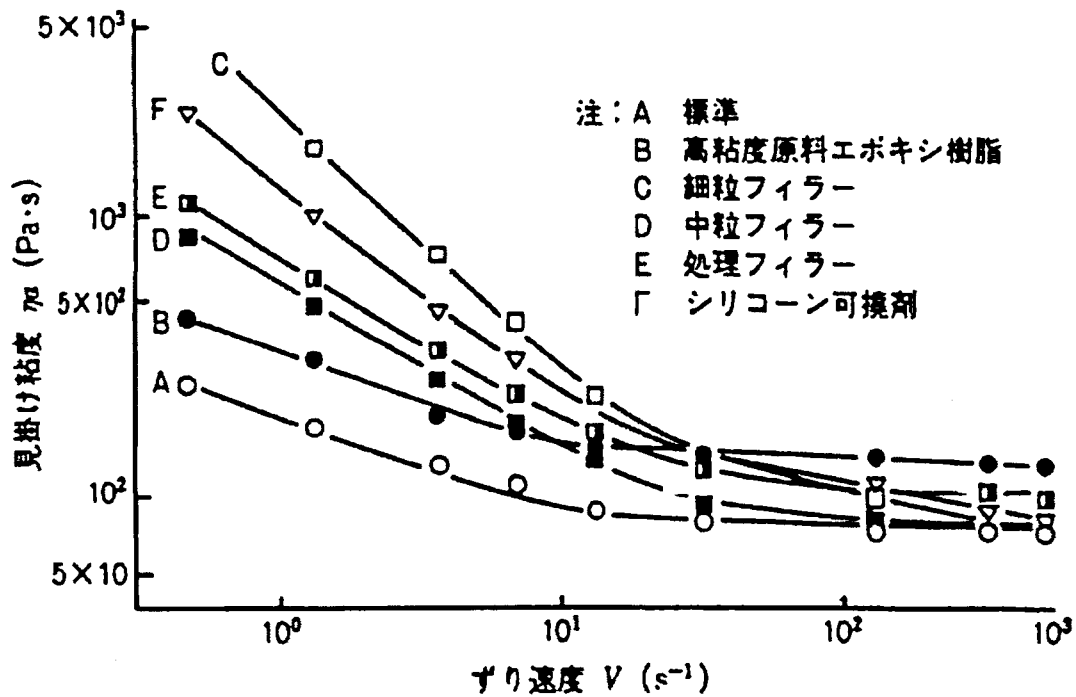


Fig. 4-11 Relationship between viscosity of model resin encapsulants and shear rate⁽¹⁸⁾.

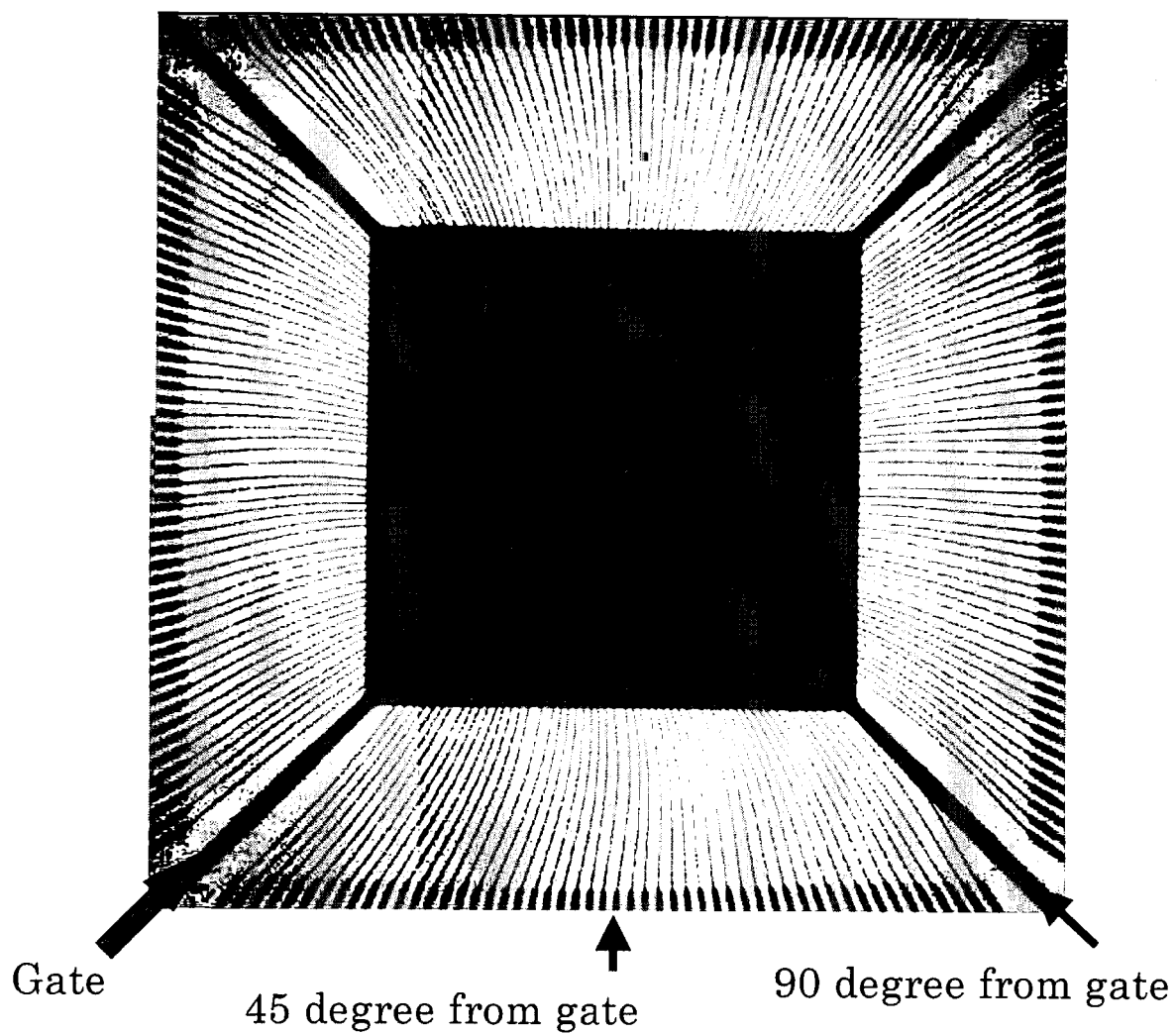
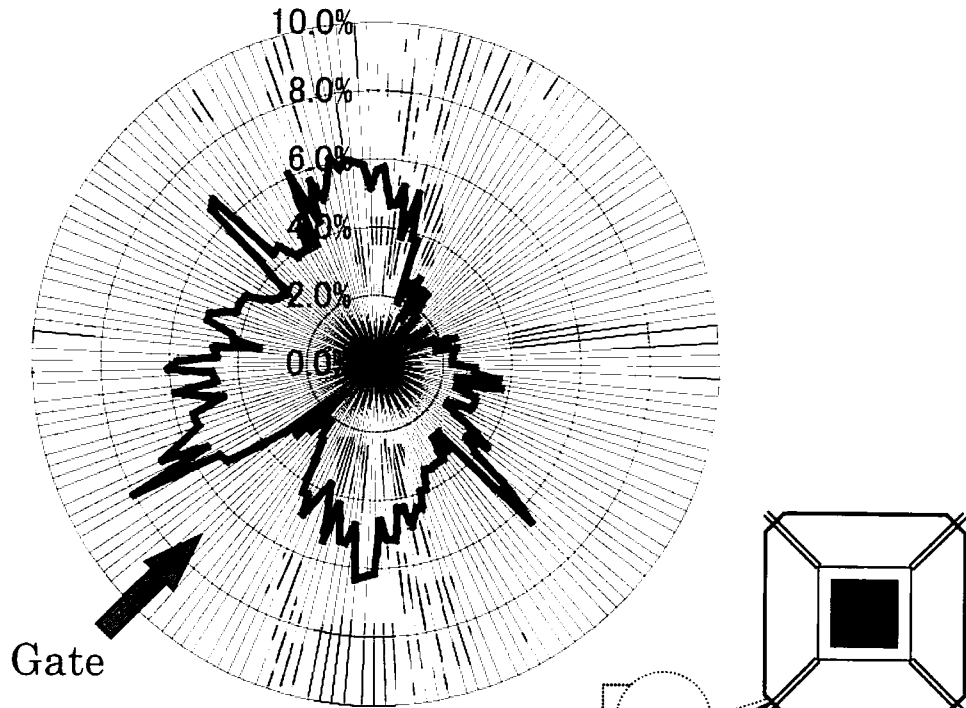


Fig. 4-12 X-ray photograph of QFP160pin at injection time 11.6 sec.

Injection time : 4.1 sec



Injection time : 5.5 sec

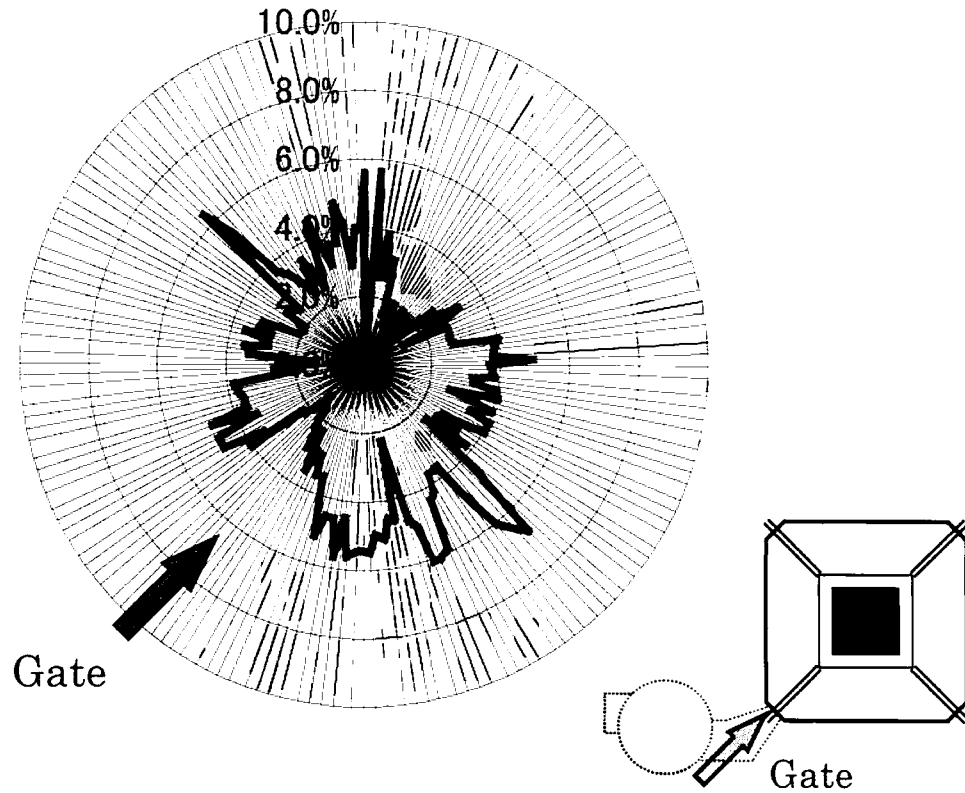
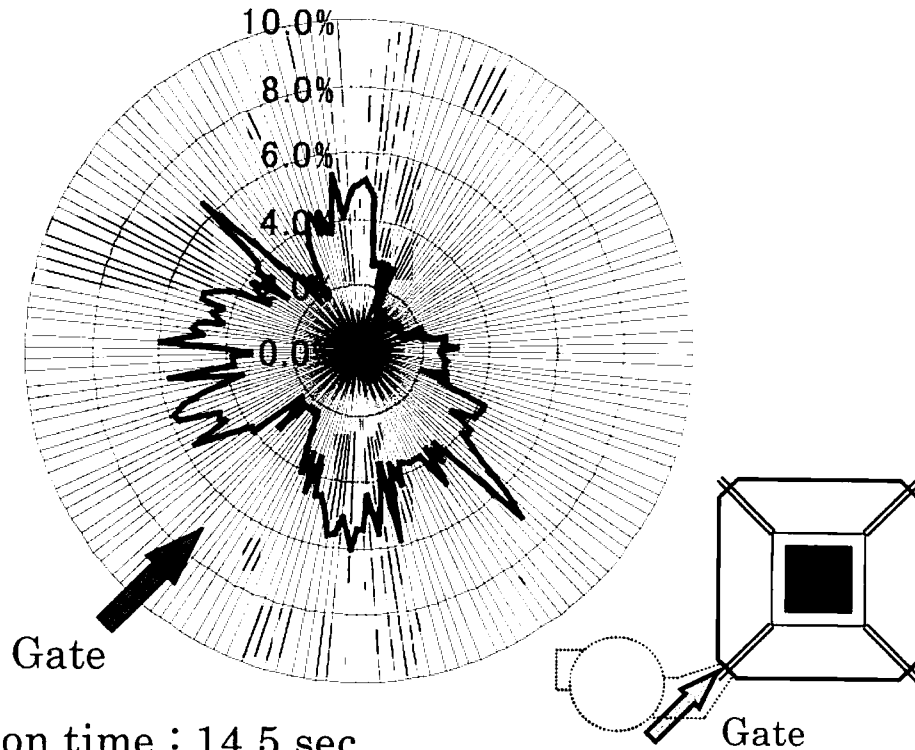


Fig. 4-13 Locational dispersion of the amount of wire sweep.

Injection time : 11.6 sec



Injection time : 14.5 sec

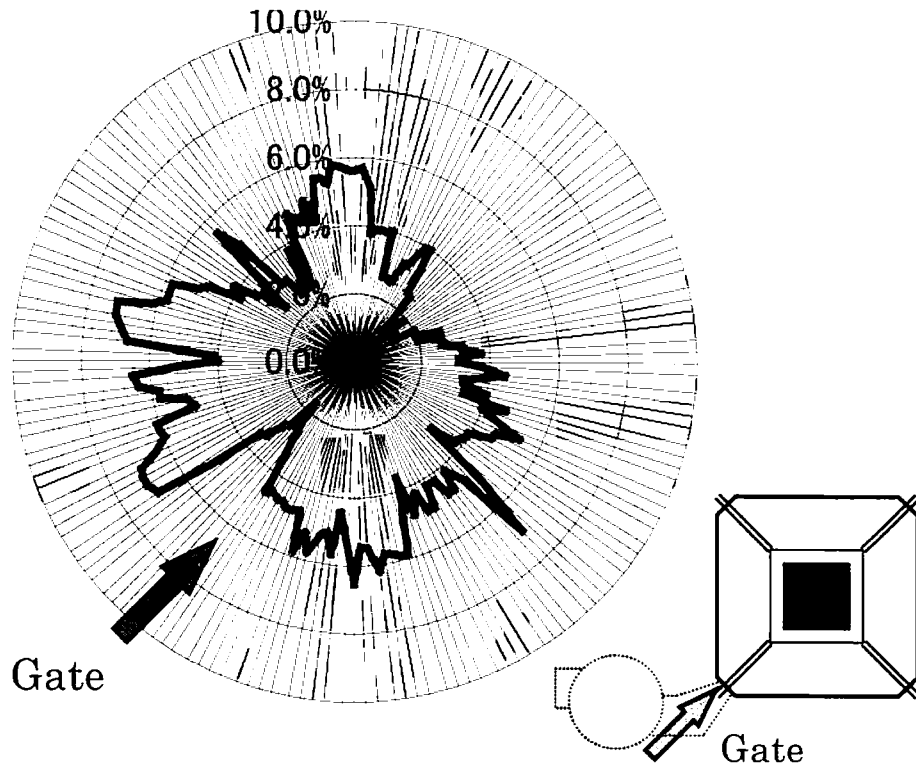
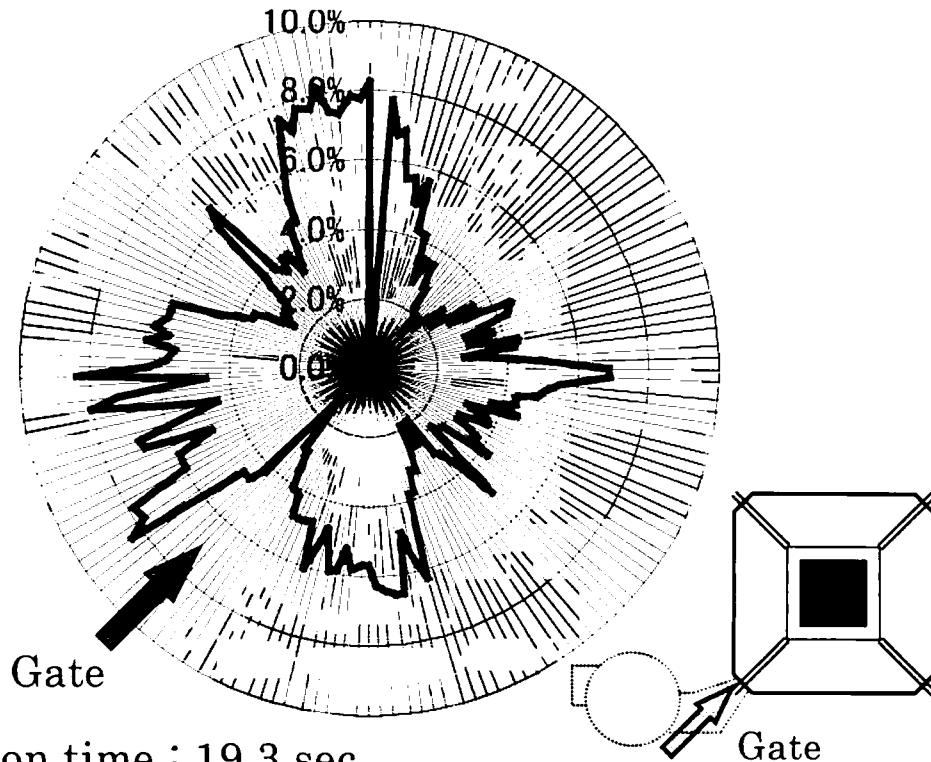


Fig. 4-13 Locational dispersion of the amount of wire sweep.

Injection time : 17.1 sec



Injection time : 19.3 sec

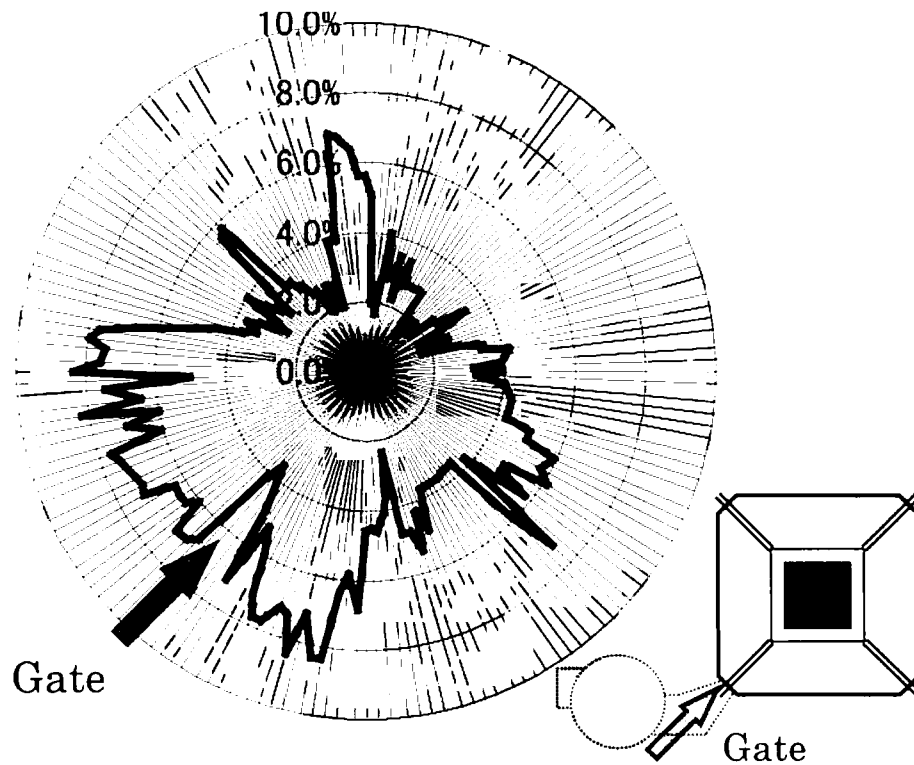


Fig. 4-13 Locational dispersion of the amount of wire sweep.

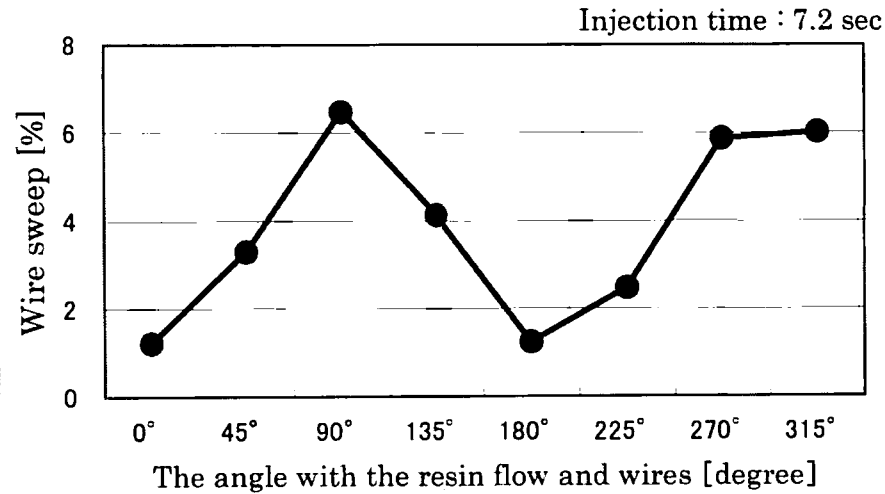
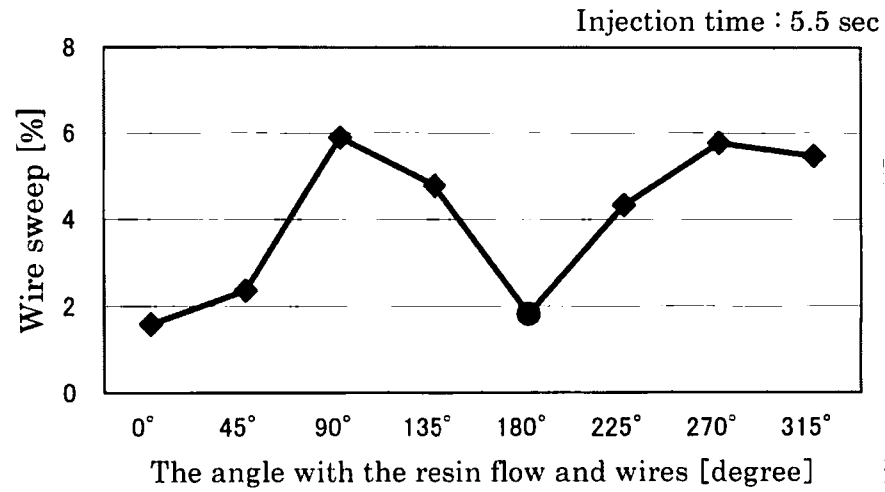
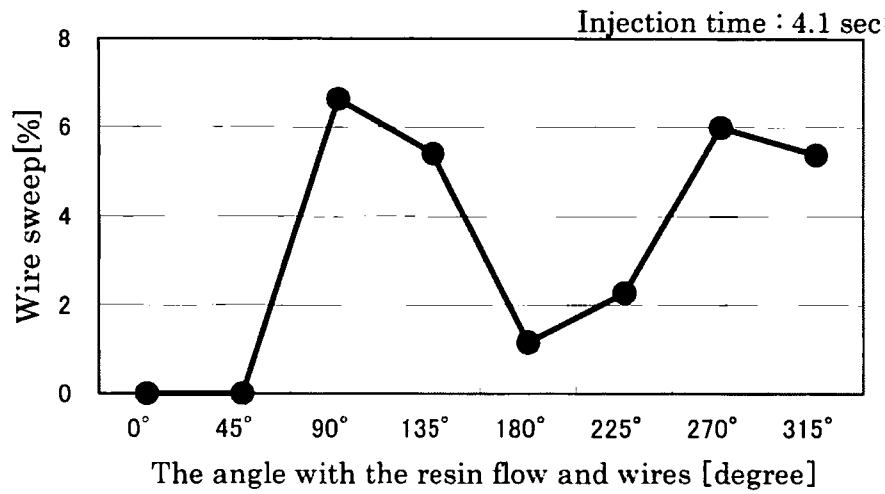


Fig. 4-14 Relationship between wire sweep and wire angle.

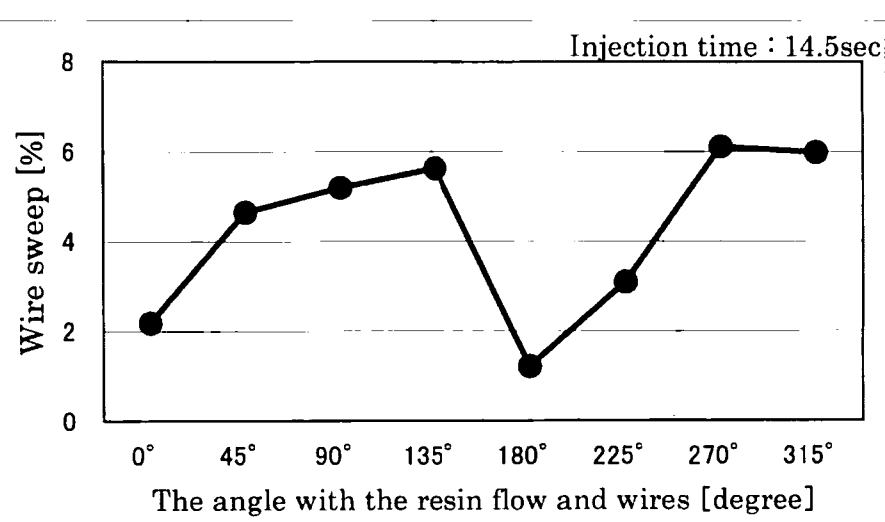
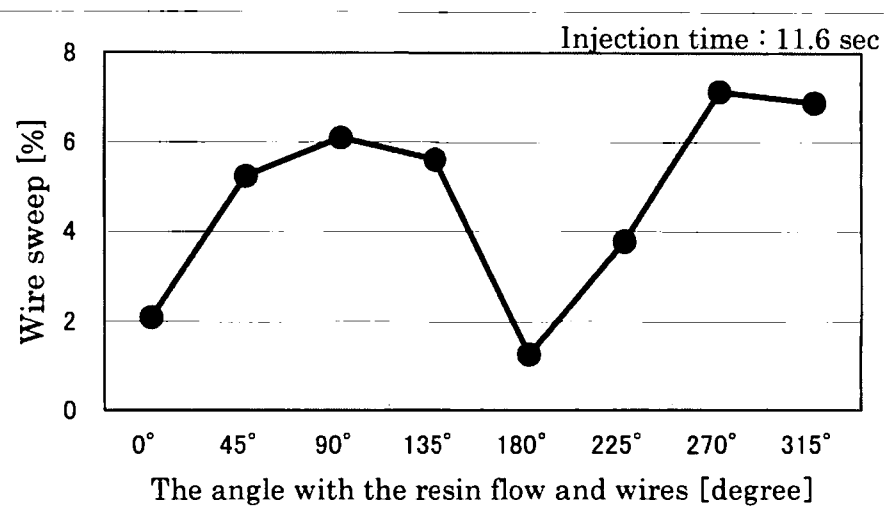
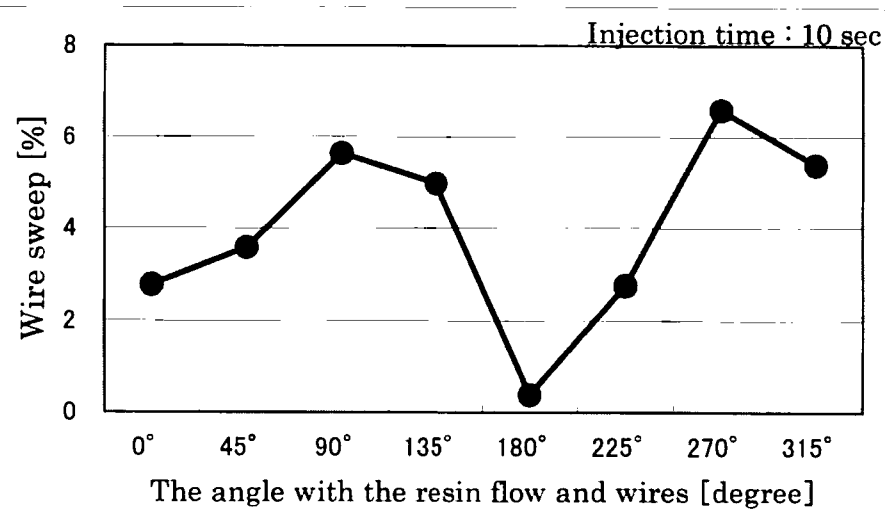


Fig. 4-14 Relationship between wire sweep and wire angle.

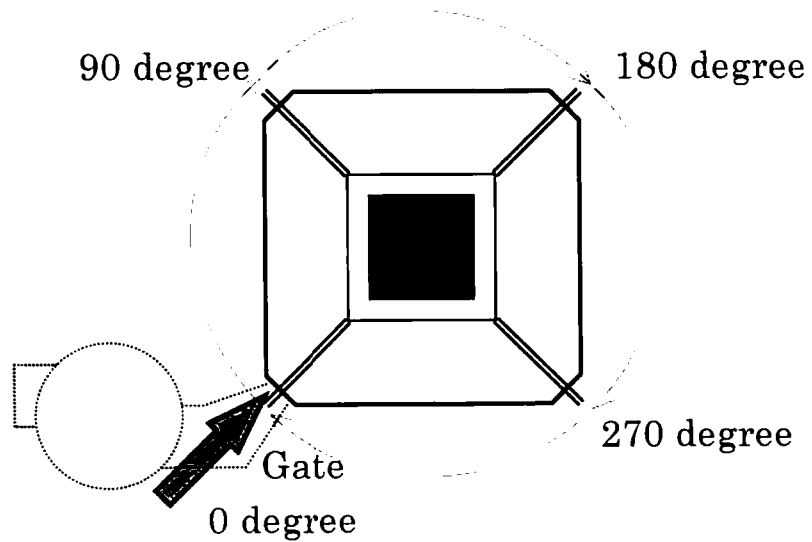
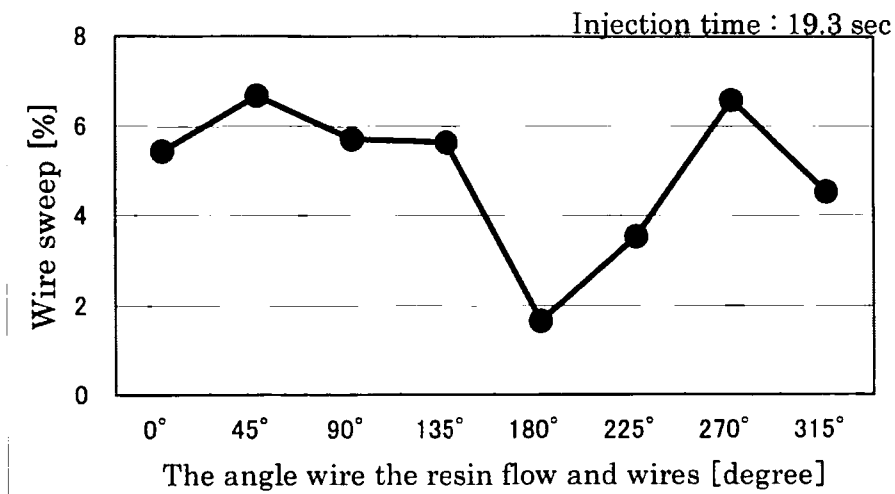
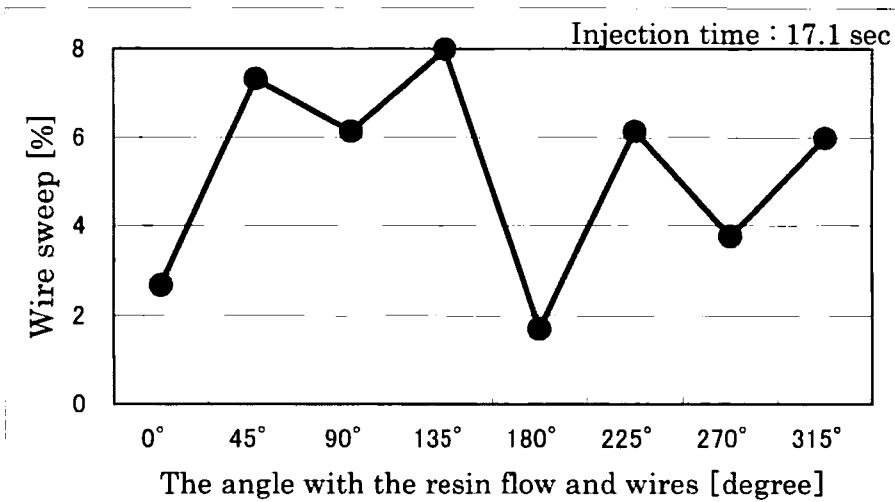


Fig. 4-14 Relationship between wire sweep and wire angle.

4.2.2 ワイヤ流れに対する樹脂流れ方向とワイヤとのなす角度の影響

前項において、樹脂注入ゲート位置とワイヤとのなす角度によりワイヤ変形率が異なることを述べた。そこで、樹脂流れ方向に対してワイヤがなす角度がワイヤ変形にどの様に影響しているか調査した。

4.2.2.1 実験方法

実験の試料には QFP タイプのパッケージを用いて行った。封止樹脂で成形されるパッケージ内部にあるリードフレームのダイパッド（アイランド）上に銀メッキを施し、ワイヤボンディングを行った。ダイパッド上にワイヤボンディングを行なったのは、チップによるワイヤへの影響や下からの樹脂の回り込みによる影響を排除する事を目的としている。試料をモデル化した図を Fig. 4-14 に示す。また、樹脂流れ方向とワイヤとの角度との関係を Fig. 4-15 に示す。ゲートから対角に引いた線に沿ってワイヤボンディングしたワイヤ角度を 0 度とし、それぞれ、30 度、60 度、90 度、120 度、150 度、180 度と変化させ実験を行った。

実験には、射出機構がサーボモータで制御される封止装置（NEC 製 FAMS-C）を用いた。この装置のポット内径は $\phi 19\text{mm}$ である。各水準の樹脂注入は 31mm のストロークを射出 7.0 秒で行った。樹脂はビフェニル系の封止樹脂を用いた。この樹脂に含まれるフィラの含有量は 80wt% であり、その形状は破碎フィラ:球状フィラが 8:2 で混合されている。樹脂の比重は 1.91 である。また、スパイラルフロー値は 84cm である。

Table 4-3. に示すパッケージ構造及びワイヤに関するデータにて、実験を行った。また、実験に用いた条件を Table 4-4. に示す。

4.2.2.2 実験結果

Fig. 4-16 に試料を X 線透視した画像例を示す。Fig. 4-17 に各角度におけるワイヤ変形率を調査した結果を示す。ワイヤに対向する角度が 90 度に近づくほどワイヤ変形率が大きくなる。この結果から、ワイヤと樹脂流れ方向との対向する角度がワイヤ変形に大きく影響している事がわかる。そして、この結果は Fig. 4-14 で実際の製品にて評価した結果に良く一致しており、

半導体パッケージにおけるワイヤ流れを検討する上で非常に重要な要因であることがわかる。

Fig. 4-18 にワイヤと樹脂流れとの対向する角度を $\sin \theta$ でまとめたものを示す。ワイヤの変形率が $\sin \theta$ との間に比例関係があることがわかる。この結果は、新たにパッケージ設計を行う場合にワイヤ流れに対する危険度を予測する事が出来る重要な結果である。

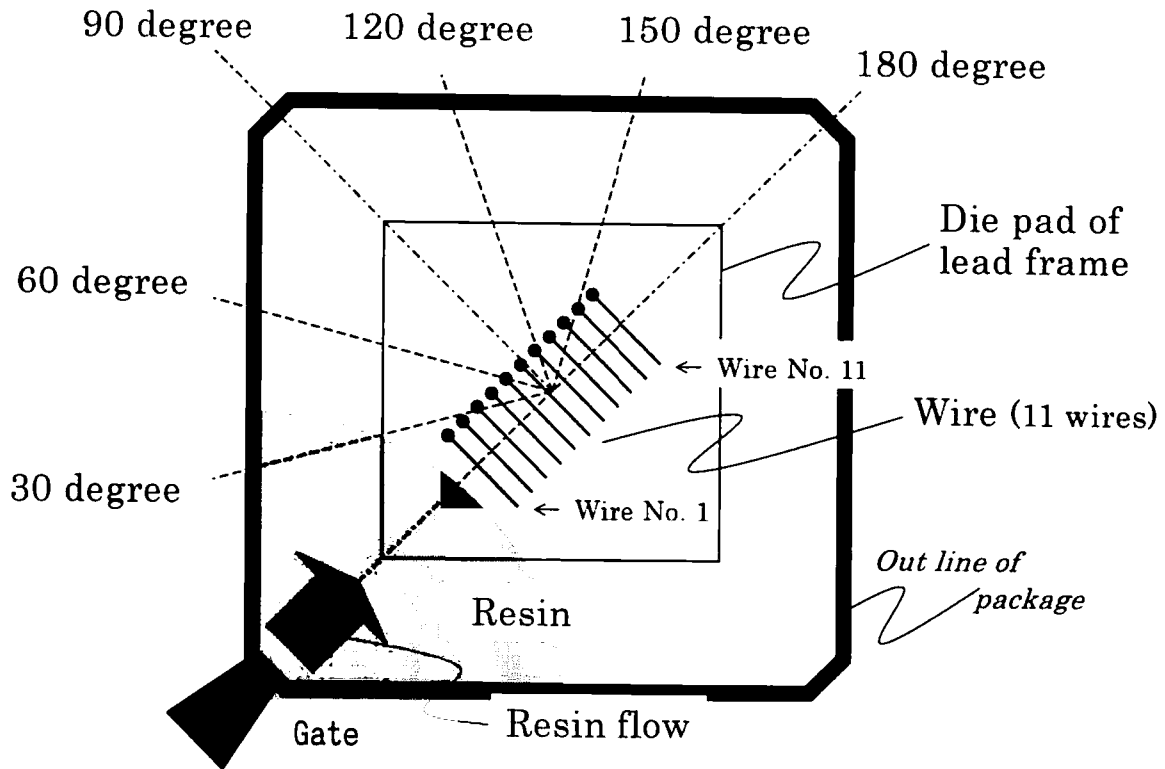


Fig. 4-14 Schematic illustration of sample about wire angle with resin flow and wires.

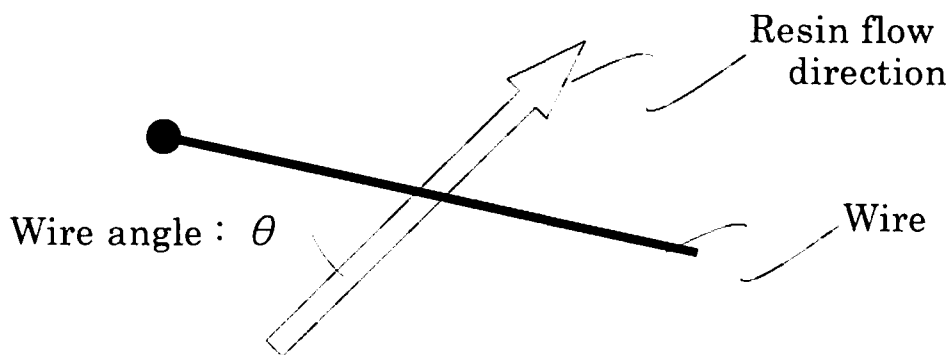


Fig. 4-15 Schematic illustration of relation between wire angle and resin flow direction.

Table 4-3. Package structure parameter.

Package type	QFP304pin
Package size	40mm×40mm
Package thickness	3.7mm
Wire material	Au wire(99.99%Au)
Wire length	6mm
Wire height	300mm
Wire pitch	1200 μ m
Wire diameter	ϕ 30 μ m
Loop shape	Normal loop

Table 4-4. Experiments parameter.

Instrument	Fams-c
Die temprature	175°C
Injection time	7.0sec
Resin	Epoxy resin (Biphenyl)
Filler shape	300mm
Filler content	80wt%
Spiral flow	84cm

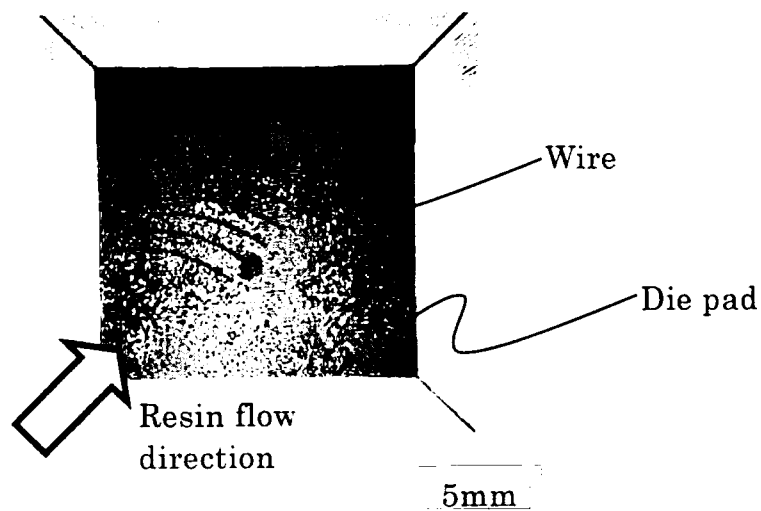


Fig. 4-16 X-ray photograph of wire angle sample.

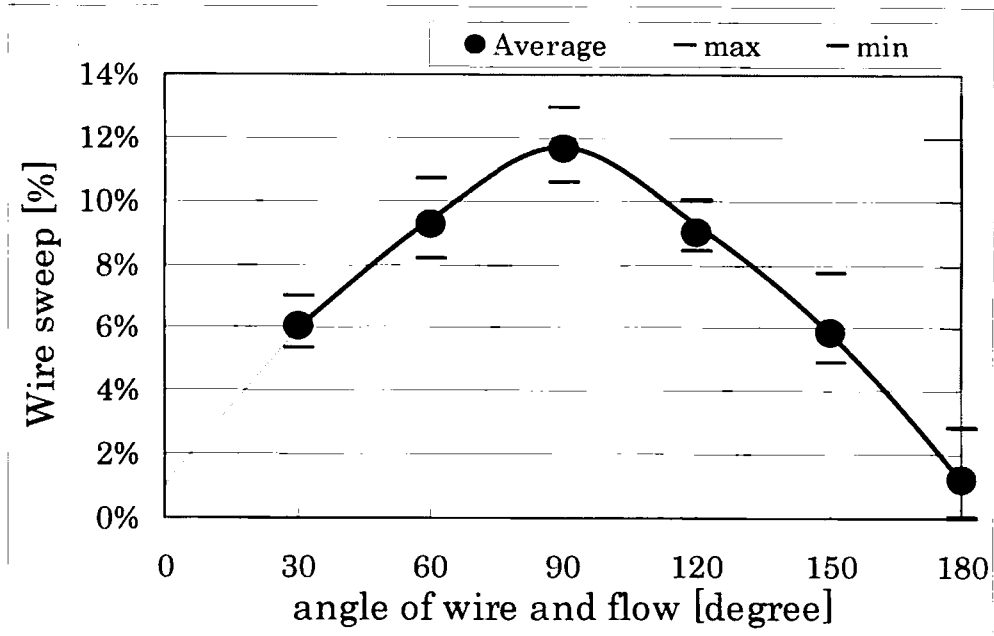


Fig. 4-17 Relation between wire angle(degree) and resin flow direction.

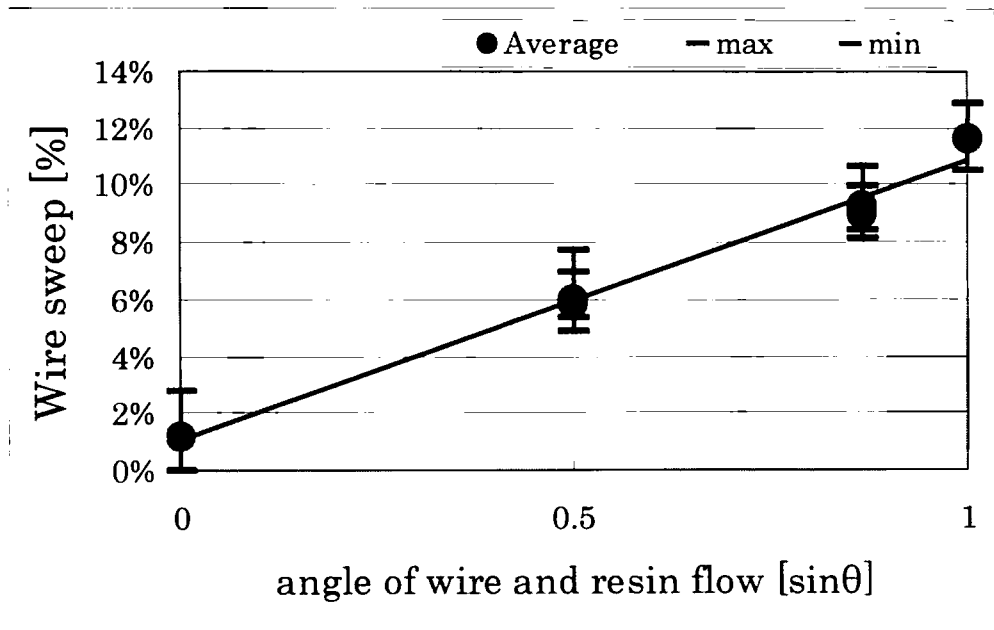


Fig. 4-18 Relation between wire angle($\sin\theta$) and resin flow direction.

4.2.3 ワイヤ流れに対するワイヤ間隔の影響

4.2.1 節で実際に量産されているパッケージのワイヤ流れ分布を調査した。その結果、ワイヤの間隔がワイヤ変形に影響していることを示唆していることについて述べた。従来の報告にはワイヤ変形に対するワイヤ間隔の影響についての検討はなされておらず、全く新しい知見である。このワイヤ間隔はパッケージの多端子化に伴い狭くなる一方である。この影響を明確にすることは次世代半導体パッケージの開発にとって実用上非常に大きな意義がある。

4.2.3.1 実験方法

実験には前節で使用したものと同様のパッケージを用いて実施した。実験条件及びパラメータ、樹脂などの資材を含め全て同様である。

試料をモデル化した図を Fig. 4-19 に示す。ワイヤのピッチを $90\mu\text{m}$ (ワイヤ径の 3 倍)、 $120\mu\text{m}$ (4 倍)、 $150\mu\text{m}$ (5 倍)、 $300\mu\text{m}$ (10 倍)、 $600\mu\text{m}$ (20 倍)、 $1200\mu\text{m}$ (40 倍) の 6 水準とした。

4.2.3.2 実験結果

各ワイヤ間隔における各ワイヤ位置のワイヤ流れを Fig. 4-20 に示す。この結果からワイヤ最初に樹脂にさらされる位置にある No.1 ワイヤが最もワイヤ変形率が $90\mu\text{m}$ ピッチで約 6%、 $1,200\mu\text{m}$ ピッチで約 13% と高く、後方になるに従ってワイヤ変形率が小さくなっている。そして、No.9 に位置するワイヤでは $90\mu\text{m}$ ピッチで約 4%、 $1,200\mu\text{m}$ ピッチで約 10% と共に 2/3 程に減少している。ワイヤ相互の変形率の差もワイヤが流れの後方に行くに従って小さくなっており、二次曲線に近い軌跡を描いているように見える。

また、ワイヤ間隔が増加するほどワイヤ変形率が増加している。そして、特徴的なのは樹脂流れに最初にさらされる No.1 のワイヤ変形率がワイヤの間隔によって異なっており、前述したようにワイヤ間隔が大きくなるほどワイヤ変形率が大きくなっている結果が得られた。これは流れの上流にあるワイヤの後流及び下流のワイヤの存在が上流のワイヤに対して影響を与えていると考えられる。円柱に対する後流の影響については多くの報告があるがそれらはレイノルズ数 Re が 1 以上の流れが慣性項に支配されている場合であ

り、直列 2 円柱のそれぞれの円柱の抗力係数 C_D の報告も高レイノルズ数に対してである⁽³³⁾。これらの報告では二次元円柱の直後に主流に平行な平板を付加することにより後流の周期的な流れを抑制しようとするもの⁽³⁴⁾や、加熱による密度差流れが生じると非対称なカルマン渦にかかわって対象な渦を周期的に放出することもあるような報告⁽³⁵⁾がある。また、物体背面からの吹き出しによっても制御される⁽³⁶⁾が、この様な低レイノルズ数での報告は少ない。

レイノルズ数 $Re=10^4\sim 10^5$ の領域では流れに直列な円柱の抗力係数では円柱の直径の約 3.8 倍のピッチを境に抗力係数がマイナスからプラスへと不連続に変化している⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾。円柱の直径の 3.8 倍以下のピッチであるならば抗力係数はマイナスとなり、それより大きなピッチの場合はプラスとなる。だが、半導体パッケージ内部のレイノルズ数は $Re=1\times 10^{-2}\sim 10^{-1}$ である。今回得られた結果はワイヤ直径の 40 倍もの距離にまで影響を及ぼしている、パッケージ内の樹脂流れは充填までの時間が数秒から十数秒と短く、流れが十分に発達する時間ではないと推測される。この結果はさらなる調査が必要である。

また、流れに対して最後部のワイヤの変形率が若干上昇しているように見える。この現象についてもさらに調査が必要である。

従来の報告では、ワイヤ間隔が密なものに対するものがない。最近のパッケージではワイヤ間隔が飛躍的に増加しており、このワイヤ間隔がワイヤ変形率に影響する結果は、実用上非常に重要である。今後さらに多端子化が進み、ワイヤの間隔が密になることは疑いようがない。今後進む半導体素子片の電極パッドピッチ縮小への対応に対して、新たな指針を得たと確信する。

Fig. 4-21 にワイヤ流れに対するワイヤの間隔の関係を示す。Fig. 4-21 は 11 本のワイヤ全てのワイヤ変形率の平均と最大最小値を示している。この結果からも、全てのワイヤ位置でワイヤ相互の間隔が狭いとワイヤ変形は小さい事がわかる。また、ワイヤ変形とワイヤ間隔の関係は、ワイヤ間隔がワイヤ径の 5 倍である $150\mu\text{m}$ を境とし、 $150\mu\text{m}$ より小さくなるとワイヤ変形率は急激に小さくなる。そして $150\mu\text{m}$ よりも大きくなるとワイヤ変形率の増加は緩やかとなる。Fig. 4-22 はワイヤの No.1~No.11 の各位置毎にまとめたものである。どのワイヤ位置においても上記傾向は変わらないことがわかる。

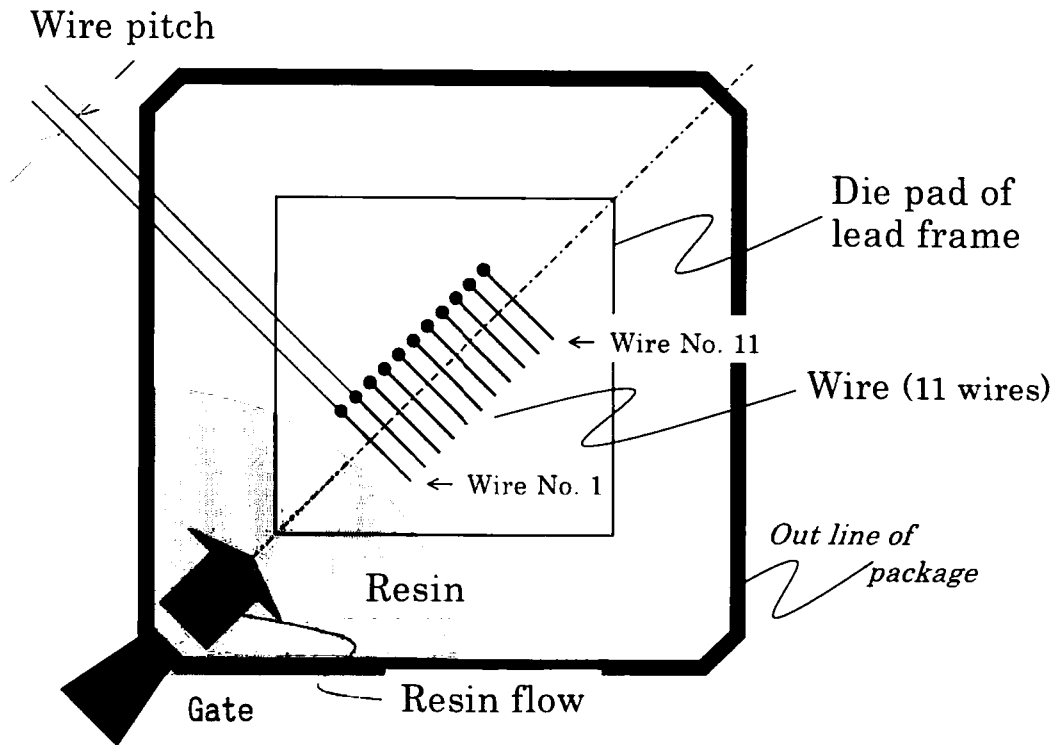


Fig. 4-19 Schematic illustration of sample about wire pitch.

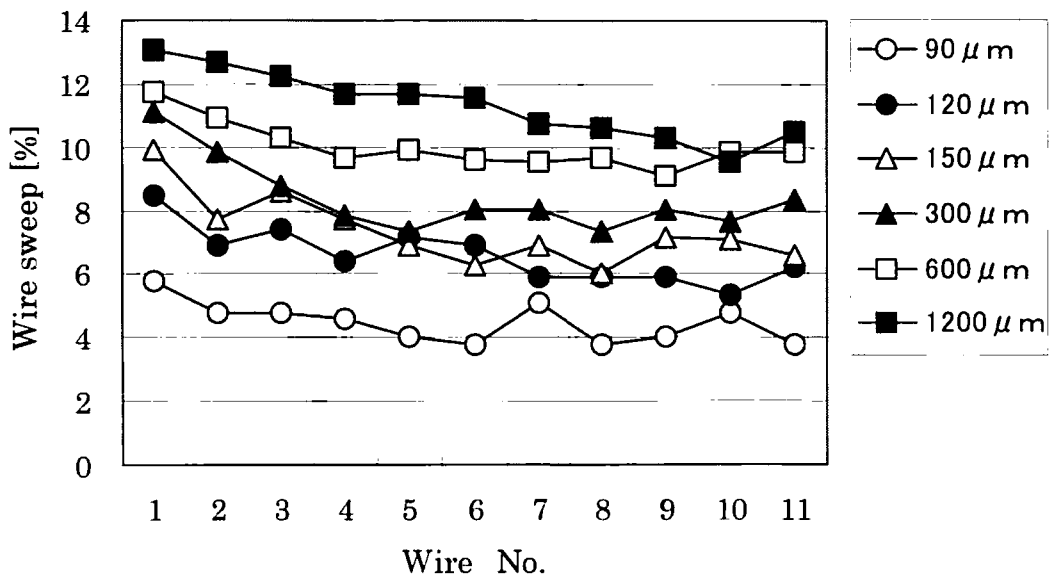


Fig. 4-20 Effect of wire position on wire sweep.

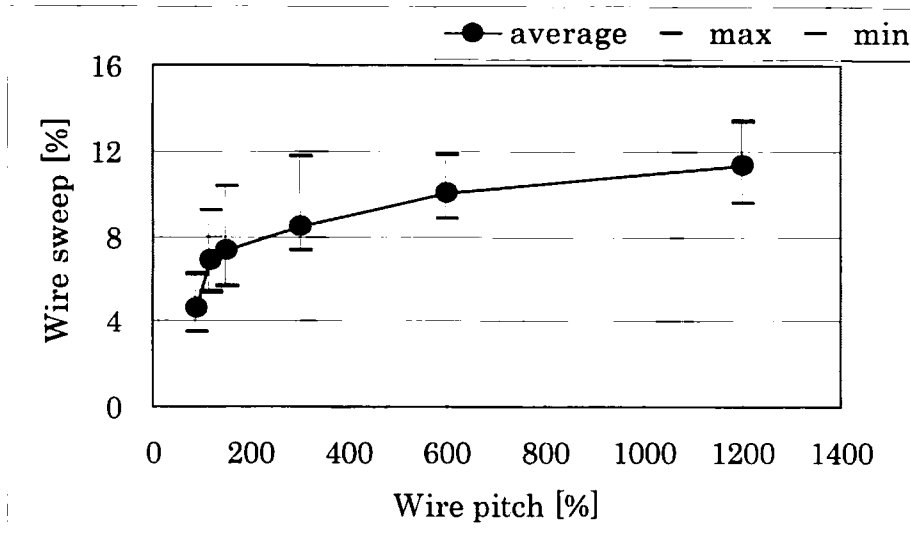
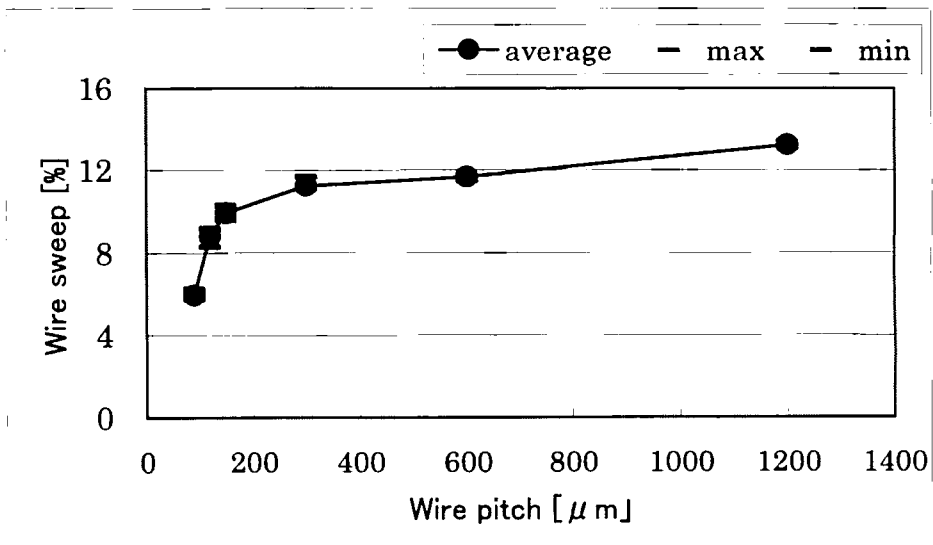
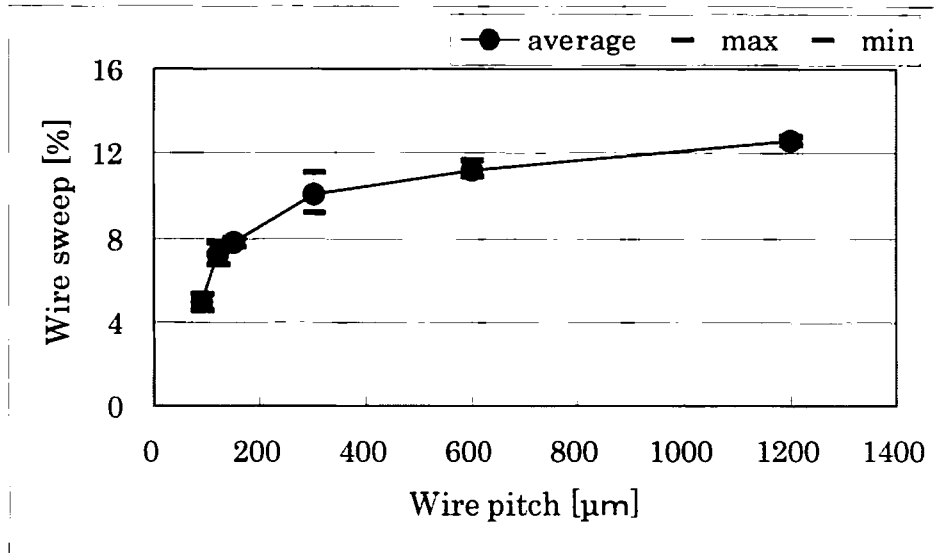


Fig. 4-21 Effect of wire pitch on wire sweep (all wires).

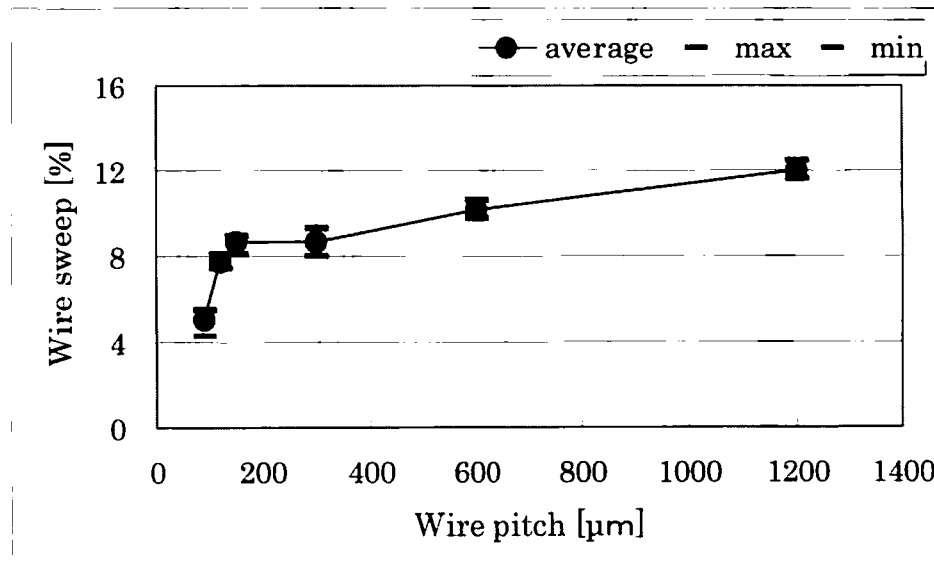


(a) wire position : No.1

Fig. 4-22 Effect of wire pitch on wire sweep.

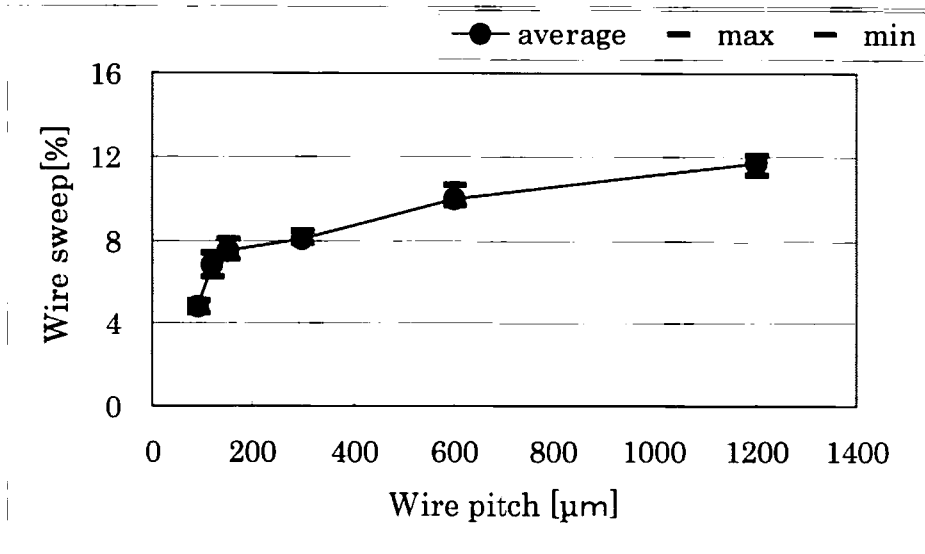


(b) wire position : No.2

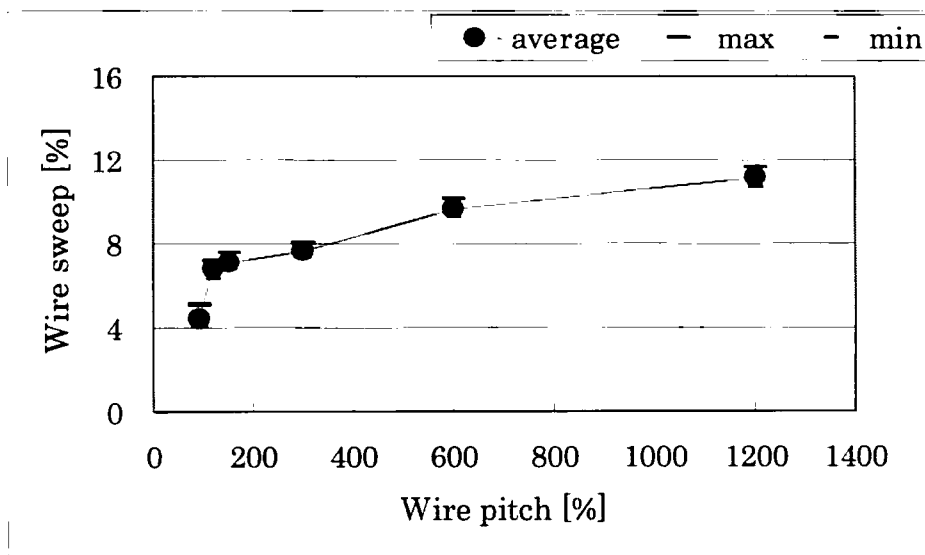


(c) wire position : No.3

Fig. 4-22 Effect of wire pitch on wire sweep.

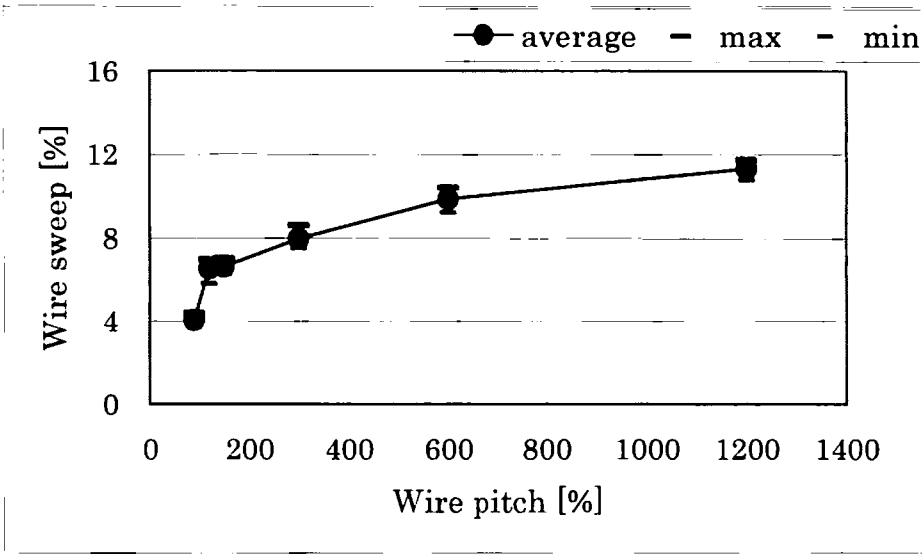


(d) wire position : No.4

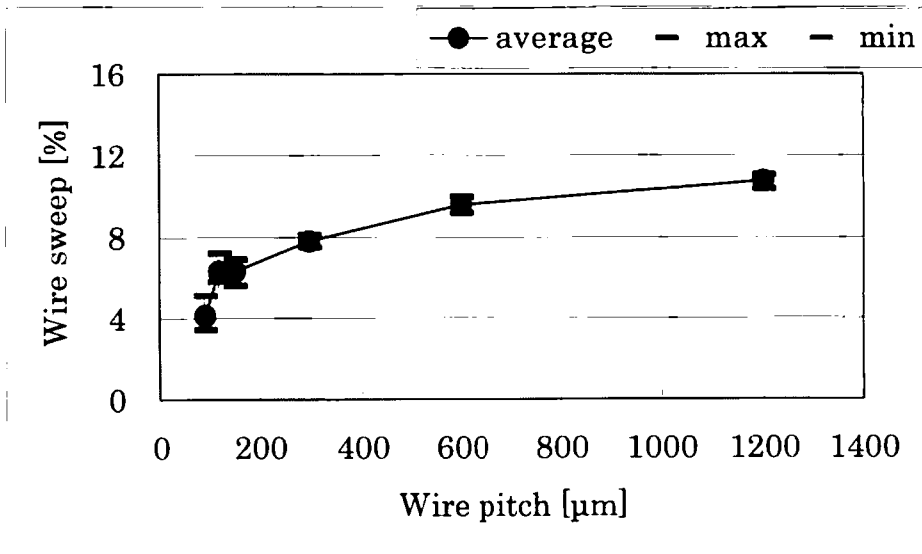


(e) wire position : No.5

Fig. 4-22 Effect of wire pitch on wire sweep.

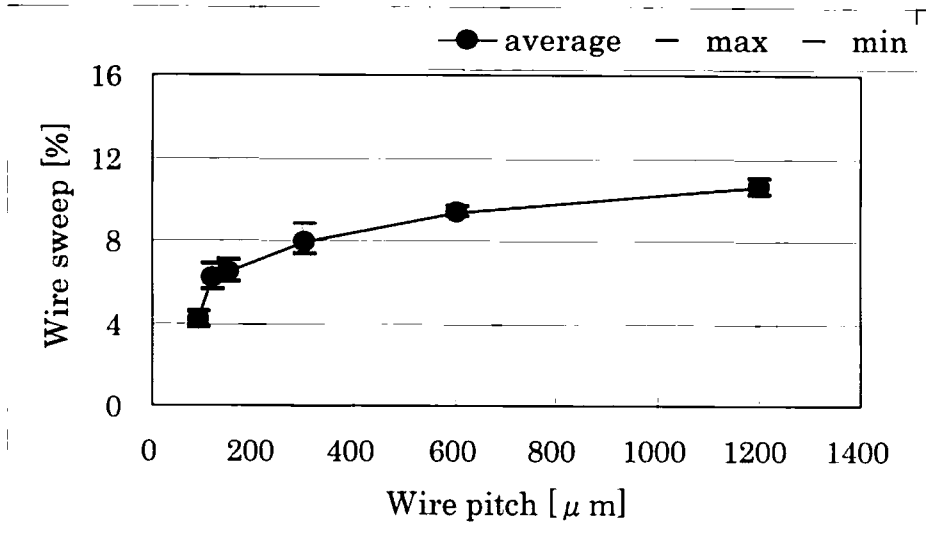


(f) wire position : No.6

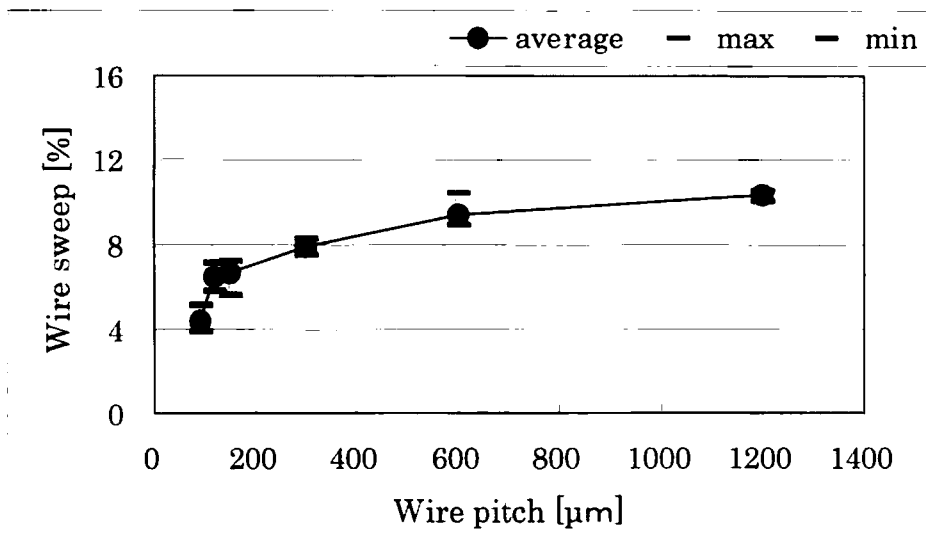


(g) wire position : No.7

Fig. 4-22 Effect of wire pitch on wire sweep.

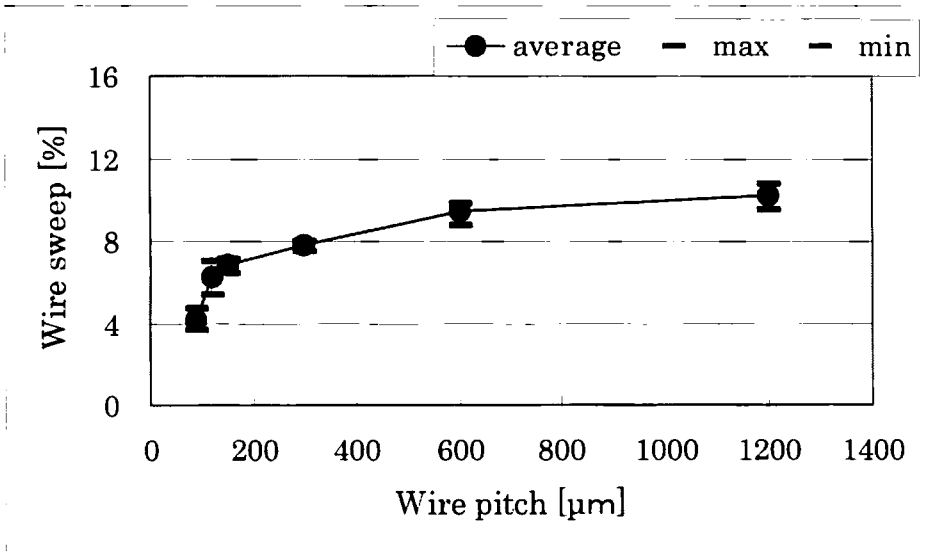


(h) wire position : No.8

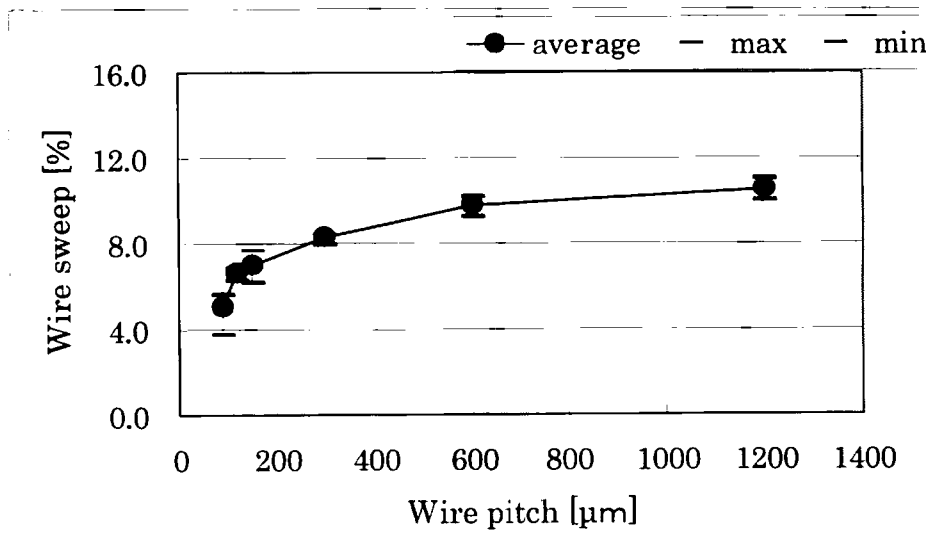


(i) wire position : No.9

Fig. 4-22 Effect of wire pitch on wire sweep.



(j) wire position : No.10



(k) wire position : No.11

Fig. 4-22 Effect of wire pitch on wire sweep.

4.3 ワイヤ流れに対するワイヤの影響

第2章の Table 2-1. において示したワイヤ流れの支配要因で、ワイヤに対する支配要因は大きく分けて2つに分類される。ワイヤの機械的要因であるヤング率と幾何学的要因であるワイヤの径及びワイヤループ形状である。ワイヤの機械的特性については本研究室において実験装置を用いてその影響が明らかにしてきた^{(2),(8),(9),(29)}。Fig. 4-23 にワイヤ流れに対するワイヤ線径の影響について示す。図中、A type, B type はアニーリング条件の異なるワイヤである。また、この結果はワイヤの変形率が弾性域のものである。図中の実線は下記の(4-1)式によるものであるが、実験結果と比べてそれほどずれていない。

$$\delta \propto V\mu \cdot L^4 / (E\phi^4) \quad (4-1)$$

ここで、 V :流速、 μ :粘性、 L :ワイヤの長さ、 E :ワイヤのヤング率、 ϕ :ワイヤの線径である。

この Fig. 4-23 を見てわかるように、線径が大きくなるにつれて、ワイヤ変形率は急激に変化することがわかる。この結果は実際に使用されている封止樹脂が熱硬化性であるため、時間の経過に伴い粘性が変化してしまうことから、熱硬化性でなく、粘性が一定である(PVA液: Polyvinylalcohol)を流体として使用している。そこで、製品として使用されている実際のパッケージでの評価にあたり、再度調査を行った。

ワイヤの機械的特性であるヤング率とワイヤボンディング時のワイヤ形状についても調査を行った。特に、ワイヤの形状についてはパッケージ形態が複雑になる中、様々な形状のものが出てきている。しかし、ワイヤ流れに至ってはそれら全てを調査することは非常に困難であり、また報告もなされていない。

ワイヤ長さの影響については本研究室において実験を行っている⁽⁸⁾。その結果では、ワイヤ流れの変形量は、ワイヤの弾性域内ではワイヤの長さとともに変化し、理論式とほぼ一致しているが、組成域となると理論式とは違った挙動をすることになる。そこで、ワイヤの形状においてはその基本的パラメータであるワイヤの長さを一定とし、ワイヤの高さ及び形状について調査を行った。

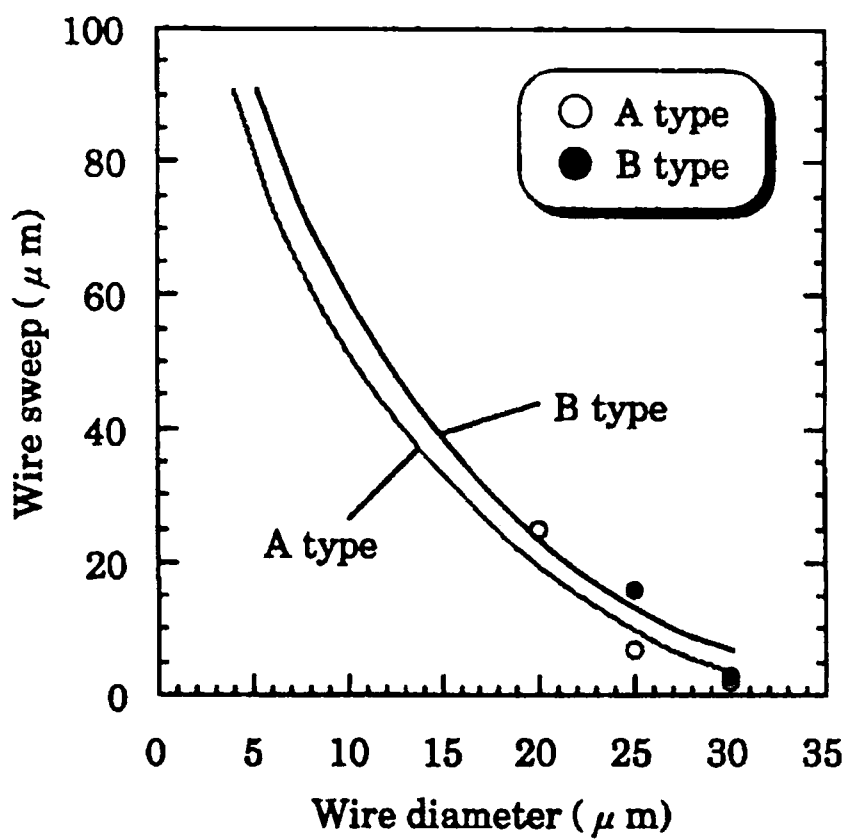


Fig. 4-23 Effect of wire diameter on wire sweep⁽⁸⁾.

4.3.1 ワイヤ流れに対するワイヤ径の影響

半導体パッケージにおいて、最も多く用いられているのは純度 99.99%の純金線である。その為、コストダウンを目的としてワイヤ径は縮小される方向にある。さらに、半導体素子片のパッドピッチ縮小に伴い、電極パッドも縮小される。そのためワイヤの線径を細くし、ワイヤボンディング時に形成される金ボールの大きさを小さくするためワイヤ径を細くすることも加わりワイヤ径を細くする傾向を加速している。このワイヤ径が細くなることにより、ワイヤ強度が低下し、ワイヤ流れが大きくなることが予想される。

4.3.1.1 実験方法

使用したワイヤは直径 ϕ 28,30,33 μ mの Au99.99%の純金線を用いた。ワイヤ高さはチップ上面から 250 μ mである。実験試料には正方形の外形形状である QFP120pin (パッケージ外形寸法 28 \times 28mm,厚さ 3.2mm,コーナーゲート、) の高放熱構造を持つパッケージを用いた。この製品の内部構造を Fig. 4-24 に示す。この製品は放熱性を高めるためにダイパッドをインナーリード下面まで拡大している。そのため、ワイヤの下からの樹脂流れなどの影響を排除することが出来る。

樹脂封止時の金型温度は 175 $^{\circ}$ Cにて行った。また、樹脂の金型への注入時間は 7.4, 10.2, 13.4 秒にて行った。使用した封止樹脂は 4.2.2 項で使用した樹脂と同じビフェニル系の封止樹脂を用いた。樹脂に含まれるフィラの含有量は 80wt%であり、その形状は破碎フィラ：球状フィラが 8:2 で混合されている。樹脂の比重は 1.91 である。装置も同様の物を用いた。

4.3.1.2 実験結果

各ワイヤ径の射出時間におけるワイヤ変形率を Fig. 4-25 に示す。この結果から射出時間 7.4 秒では、ワイヤの径が 1 μ m細いほどワイヤ流れ率が 0.1%大きくなっており、不利になることがわかる。また、射出時間が長くなるほど差は大きく射出時間が 10.2 秒でワイヤの径が 1 μ m細いほどワイヤ流れ率が 0.2%大きくなっている。そしてこのワイヤ流れの射出時間に対する傾向は、4.1.1 節で述べた傾向とよく一致している。また、ワイヤ径の四乗の逆

数とワイヤ流れとの関係をプロットしたものを Fig. 4-26 に示す。ワイヤ径が小さくなるとワイヤ流れに対して不利となることがこの結果からもわかる。

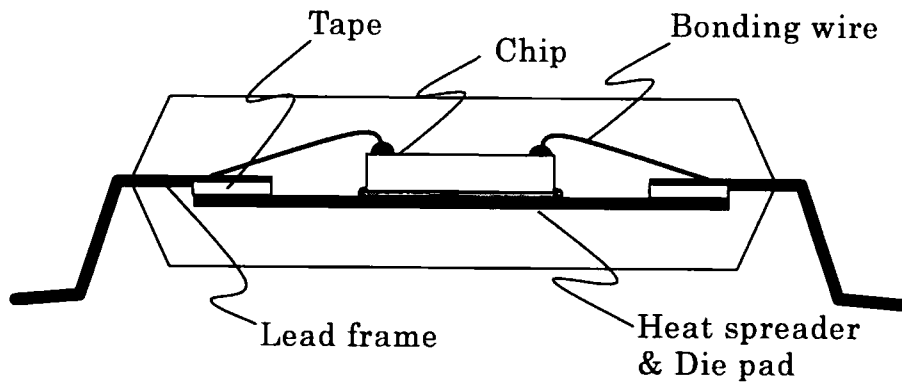


Fig. 4-24 Schematic illustration of structure in QFP120pin.

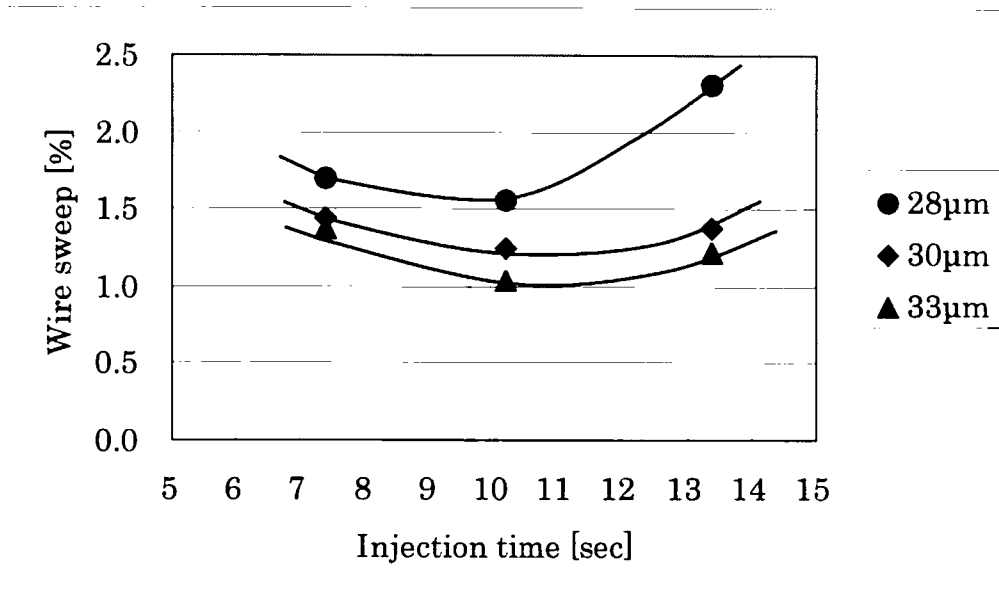


Fig. 4-25 Effect of wire diameter and injection time on wire sweep.

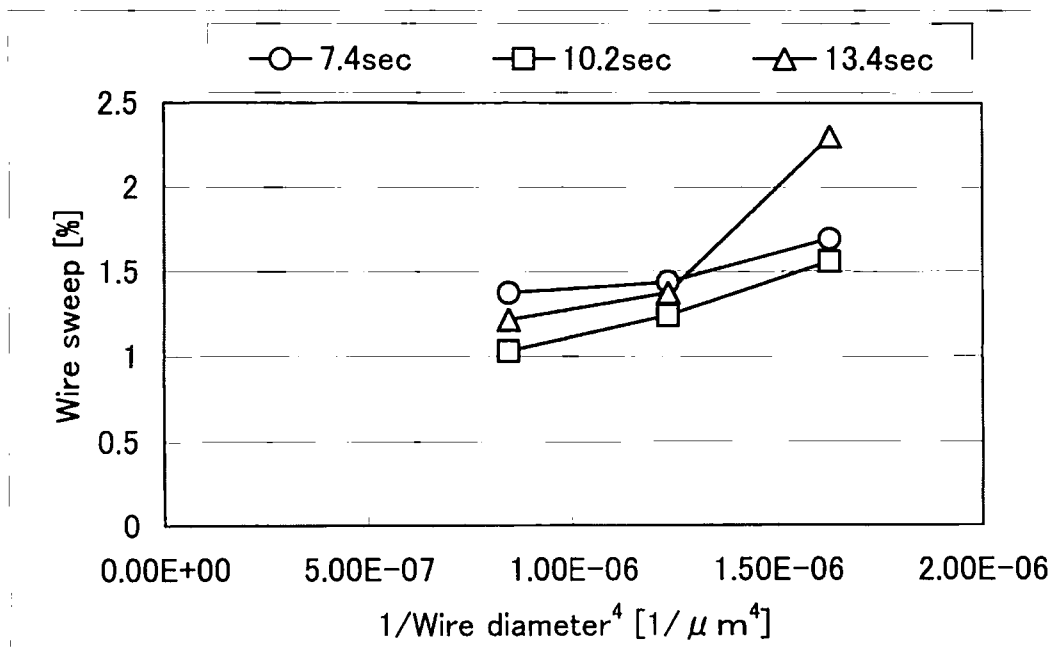


Fig. 4-26 Effect of injection time and reciprocal of the wire diameter⁴ on wire sweep.

4.3.2 ワイヤ流れに対するワイヤヤング率の影響

量産において、ボンディングワイヤには数多くの種類が存在する。金線の直径はもとより、様々なヤング率や、不純物を添加して高温信頼性を向上させたものなど多種多様である。その中で、ワイヤを選定することはワイヤボンディング工程における歩留りだけでなく樹脂封止での量産性にどれ程余裕を持たせることが出来るかの重要な要素である。ワイヤ流れに対するワイヤヤング率の影響を明確にすることで、ワイヤ選択の為の明確な指針が得られることは半導体実装において実用上大きな意義がある。

4.3.2.1 実験方法

試料には、正方形の外形形状である QFP208pin (パッケージ外形寸法 28×28mm, 厚さ 3.7mm, コーナーゲート) のパッケージを用いた。この製品で実際に量産している半導体素子を使用して実験を行った。この素子片のサイズは 6.68mm×6.68mm、厚さは 350 μ m である。最大ワイヤ長さは 4.8mm である。樹脂封止時の金型温度は 175 $^{\circ}$ C にて行った。使用した封止樹脂は 4.2.2 項で使用した樹脂と同じビフェニル系の封止樹脂を用いた。樹脂に含まれるフィラの含有量は 80wt% であり、その形状は破碎フィラ：球状フィラが 8:2 で混合されている。樹脂の比重は 1.91 である。実験には、半導体の量産現場で実際に使用されている樹脂封止装置 (NEC 製 FAMS-SR) を用いた。

実験に使用したワイヤの特性を Table 4-5. に示す。GPG, K1, R1, G1, NT5 の各ワイヤは Au99.99% の金ワイヤであり、それぞれヤング率が異なっている。HG-2A, HG-2B ワイヤはそれぞれ Pd を 0.4%, 0.6% 添加した合金ワイヤである。各ワイヤのヤング率と伸び、更に金の機械的特性の把握のため降伏強さ (0.2% 耐力) と破断加重を引張り試験により測定した。引張り試験の速度は、10mm/min である。しかし、引張り試験によるヤング率測定は弾性域がはっきりしないことと、ワイヤの線径が 30 μ m と極めて細く変形しやすく、試料セッティングの際の試料表面の損傷や試験中の転位の移動、増殖が危惧される。よってワイヤの正確なヤング率とはいいがたい⁽³⁹⁾。しかし、各ワイヤの相互の強度を推し量る上では重要な特性である。

各ワイヤの幾何学的特性は、線径は直径 ϕ 30 μ m、Normal Loop 形状でワ

イヤボンディングを行った。ワイヤ高さは $250\mu\text{m}$ に設定した。

4.3.2.2 実験結果

樹脂注入を 4.3 秒で実施したときのワイヤ流れに対するワイヤのヤング率との関係を Fig. 4-27 に示す。各ワイヤのワイヤ変形率の平均値と最大値をプロットした。この結果から、ヤング率が高いほどワイヤ変形率が小さくなっており、その関係はほぼ線形であることがわかる。Fig. 4-28 に同じく樹脂注入時間 4.3 秒のときのワイヤ流れと降伏強さ(0.2%耐力)との関係を示す。この結果からもその関係はほぼ線形であることがわかる。

Fig. 4-29 に GPG ワイヤと K1 ワイヤについて樹脂注入時間に対するワイヤ変形の関係調査した結果を示す。ワイヤのヤング率が異なると、全ての樹脂注入条件において、ヤング率の高いほどワイヤ変形が小さいことを示している。

また、この結果は 4.1 節で得られた Fig. 4-2 と良く一致しており、ワイヤ流れに対してワイヤのヤング率を大きくすることである程度押さえることが出来る。これは実用上重要である。しかし、金の理論上のヤング率は結晶方位<1.1.1>で $11,400\text{kgf}/\text{mm}^2$ であり、ヤング率向上によるワイヤ変形の抑制には限界がある。

Table 4-5. Mechanical property of Au wire.

Wire	Young's modulus [kgf/mm ²]	Elongation [%]	UTS [kgf/mm ²]	0.2% offset [kgf/mm ²]
GPG	9,506.86	5.58	26.51	22.83
K1	8,252.48	3.85	22.00	19.66
R1	8,841.94	5.63	29.65	25.32
G1	8,705.91	4.96	24.47	21.46
NT5	8,868.34	5.30	24.90	21.96
HG-2A(Pd:0.4% add)	8,780.96	4.48	25.61	22.30
HG-2B(Pd:0.6% add)	9,226.37	4.32	26.26	23.12

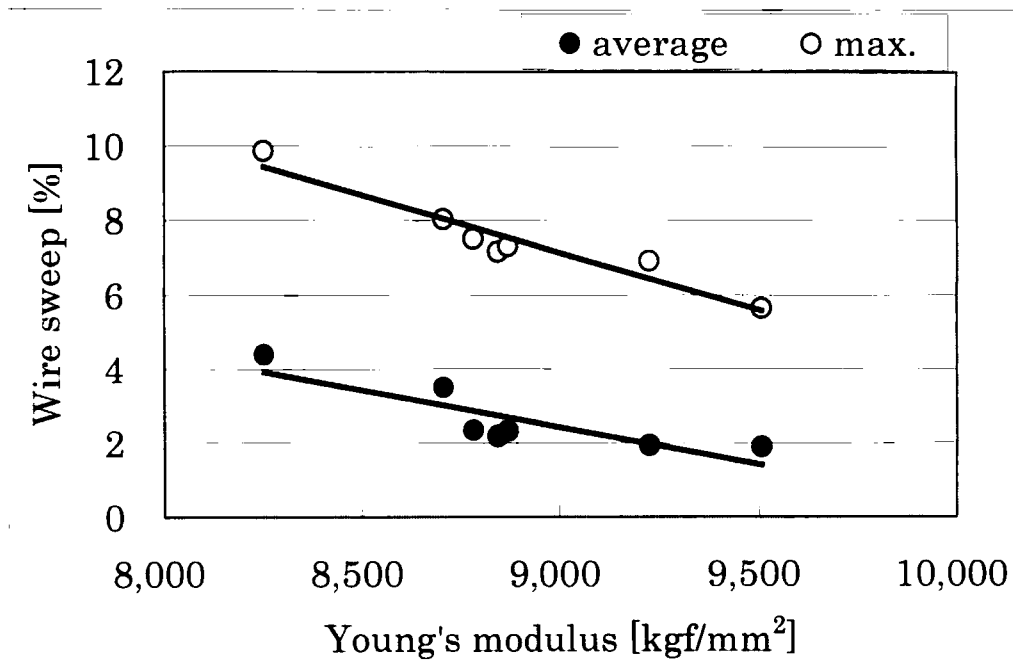


Fig. 4-27 Effect of Young's modulus of wire on wire sweep.

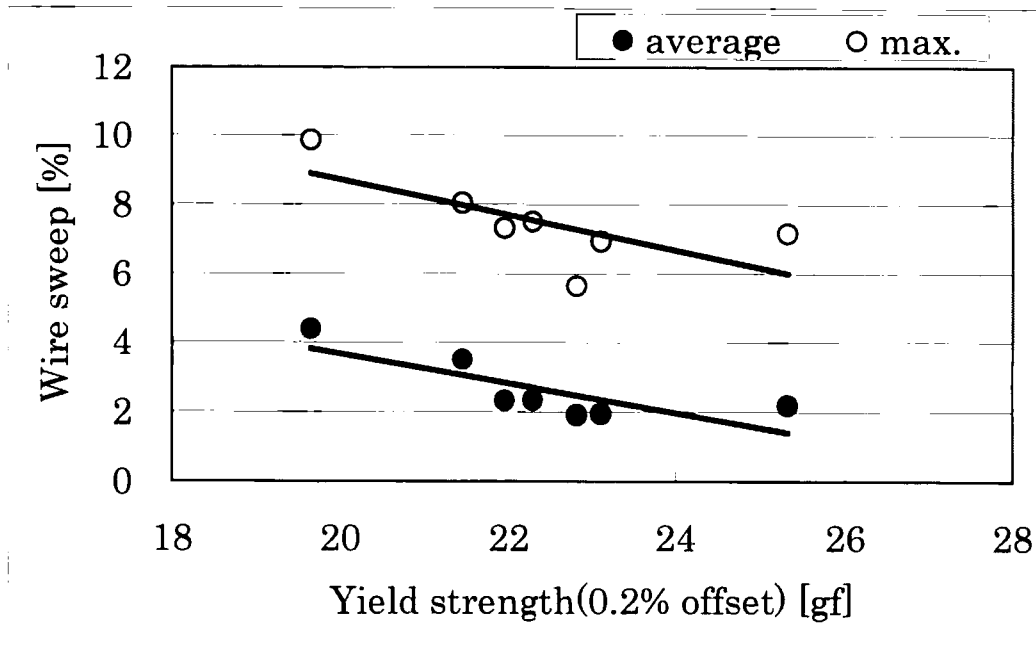


Fig. 4-28 Effect of Yield strength [0.2% offset] of wire on wire sweep.

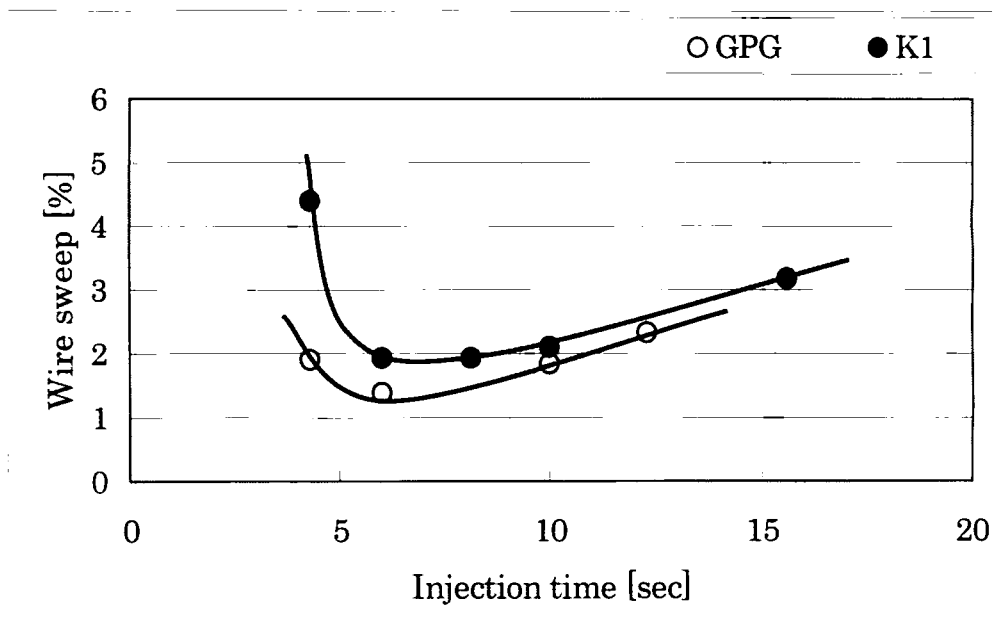


Fig. 4-29 Effect of injection time on wire sweep.

4.3.3 ワイヤ流れに対するワイヤのループ形状の影響

緒論にて、パッケージの多端子化による千鳥配列や多段ボンディングといった様々なボンディングが行われてきていることを述べた。また、第3章において千鳥ボンディングと称される多段構造のワイヤリング品のX線透視装置での観察結果を Fig. 3-2 に示し、その構造について、チップ側の千鳥配列ボンディング状態をSEM観察した例を Fig. 3-3 に示しながら、今後このような構造の半導体が増加していくことは間違いないことを述べた。

このように多ピンのパッケージにおいては、千鳥配列ワイヤリングに代表される多段ボンディング法により、ワイヤ相互の間隔を大きくすることでワイヤ流れによるワイヤ相互の接触を回避する方法が現在最も一般的である。この千鳥配列ワイヤリングで低い側のワイヤに用いられているノーマルループ形状は、おおむねワイヤ長が 3mm 以下のワイヤリングに対して標準的に適用されている。しかしノーマルループ形状は、3mm を超えるワイヤリングを行おうとするとワイヤの直進性が著しく低下してワイヤがスパン方向に曲がり、ワイヤ間隔が狭い場合には隣り合ったワイヤへの接触が生じる危険性が増すという問題がある。実際の半導体パッケージではワイヤに用いる金ワイヤのコストを低減するために極力短くする傾向があり、そのため半導体素子片の電極パッドが単列に配列されている場合にはワイヤ長が 4 mm を超えるようなパッケージ設計は現在あまり行われていない。

高いループ側のワイヤに用いられている台形ループ形状はノーマルループ形状のワイヤリングで配線できない場合に適用される。しかし、台形ループ形状を形成するためにはワイヤリング時のワイヤ引き回しの軌跡が複雑であり、ノーマルループ形状に比べ約 1.4 倍ものワイヤリングに要する時間が必要とされる。これは量産現場での生産性が悪いことを意味しており、千鳥配列ワイヤリングの高い側のワイヤに用いられる場合など、その台形ループ形状の適用は限られている。また、3mm 以下のワイヤ長に台形ループ形状を適用しようとする、ワイヤ形状を形成するための引き回しの軌跡により半導体素子片上の電極パッド側のネック部分で鋭角な曲げを行うこととなり、クラックの形成や破断を引き起こしてしまうことがある。このため、台形ループ形状は千鳥配列ワイヤリングなどのスパンが長い高いループ側に適用が

限られている。

Fig. 3-2 を見ると千鳥配列の製品では台形ループ形状である高ループ側がノーマルループ形状である低ループ側に比べワイヤ変形量が大きいことがわかる。この低ループ側のワイヤと高ループ側のワイヤ変形量の差が、ワイヤ形状及び高さのどちらに大きく影響しているかは明らかではない。そこでまず、ワイヤ流れに対するワイヤの形状の影響を調査した。

4.3.3.1 実験方法

実験は 4.2.2 項で行った物と同様の手法にて実施した。封止樹脂で成形されるパッケージ内部にあるリードフレームのダイパッド（アイランド）上に銀メッキを施し、ワイヤボンディングを行った。その構造は Fig. 4-19 と同じである。ダイパッド上にボンディングしたノーマルループ形状と台形形状のボンディング状態をそれぞれ Fig. 4-30,4-31 に示す。

実験は Table 4-6. に示す条件にて行った。今回、ワイヤ相互の影響をなるべく排除するため、ワイヤ間隔を $1,200\mu\text{m}$ とした。

樹脂はビフェニル系の封止樹脂を用いた。樹脂に含まれるフィラの含有量は 78wt% であり、その形状は全て球状フィラである。樹脂の比重は 1.89 である。また、スパイラルフロー値は 124cm である。また、樹脂のスパイラルフロー値が 124cm と流動性が良くワイヤ変形量が小さくなることを懸念して、樹脂注入時間を 2.8 秒とした。樹脂の余熱時間（溶融加熱時間）として金型に樹脂を投入してから 5 秒後に樹脂を注入する事とした。実験には、射出機構がサーボモータで制御される封止装置（NEC 製 FAMS-SR）を用いた。

4.3.3.2 実験結果

Fig.4-32 にこの実験結果により得られたノーマルループ形状と台形形状の各ワイヤ位置とワイヤ流れとの関係を示す。これを見てわかるように、台形ループ形状に比べノーマルループ形状が全てのワイヤ位置においてワイヤ変形率が大きくなっている。また、それぞれのワイヤ形状におけるワイヤ変形率はワイヤ位置が樹脂注入ゲートから遠くなるほど小さくなっている。この挙動は、二次曲線的な減少を示している。さらに、各ワイヤ形状のワイヤ変

形率の差はワイヤ位置が樹脂注入ゲートより遠くなっても変わっていない。台形ループ形状ワイヤとノーマルループ形状ワイヤについて、ワイヤの形状を測定した結果を Fig. 4-33 に示す。ノーマルループ形状は台形ループ形状に比べてより円弧に近い形状をしている。ノーマルループ形状のワイヤでは屈曲点がパッド近傍の 1 箇所であるのに対し、台形ループ形状のワイヤでは屈曲点がパッド近傍に 2 箇所及びワイヤ中央付近に 1 箇所の合計 3 箇所に存在している。この屈曲点で加工硬化が生じ、鋭角な曲率で曲がるためにワイヤの長さが短くなり、結果としてワイヤの変位量が少なくなったと考えられる。ワイヤの形状も屈曲点間が直線的な分布をしている台形ループ形状のワイヤと比較し、ノーマルループのワイヤ形状は全体的に円弧に近い分布をしているために、樹脂流れ方向に対して倒れていくように変形することでより大きな変形量となっている要因もあると考えられる。これらの結果から、ワイヤ流れを小さくするためにはボンディングワイヤのループ形状を台形ループ形状にすることが有効であることがわかる。

ワイヤ変形で問題となるのは隣り合ったワイヤ相互の変形率の差が大きくなり接触する事による電氣的な短絡があるが、これを防ぐためには同一高さにあるワイヤの形状についてノーマルループ形状と台形ループ形状とではワイヤ変形率に差があるため混在させてはならない。そしてワイヤの高さを一定に保つことでワイヤ相互の変形率の差を小さくすることが、今後進む半導体素子片上のパッドピッチ縮小に有効である結果を得た。

また、これらの結果から、半導体製造におけるワイヤ流れを低減するためには、台形ループ形状でワイヤリングすることでワイヤ変形率を約 1% 低減する事ができる。一般にワイヤ長が 4 mm 以上の長いスパンを必要とする製品やワイヤを 2 段にルーピングする千鳥ボンディング品に用いられている台形ループ形状がワイヤ流れに対しては効果があることがわかった。ワイヤ流れに対してはこの台形ループ形状が有効であるが、台形ループ形状をワイヤボンダで形成するにはワイヤリングするボンディングヘッドの軌跡が複雑となりノーマルループをワイヤリングする時間に比べて長い時間を必要とする。その為生産性との兼ね合いで。現在においてもワイヤ長の長い場合や多段ボンディングの場合にのみ台形ループ形状は用いられている。今後、この台形

ループ形状によるワイヤリングは半導体パッケージの内部構造の複雑化などにより適用される割合は増えていくものと思われる。さらにネック部にダメージを与えず、短ワイヤで、かつボンディングに要する時間の短い台形ループ形状が求められる。

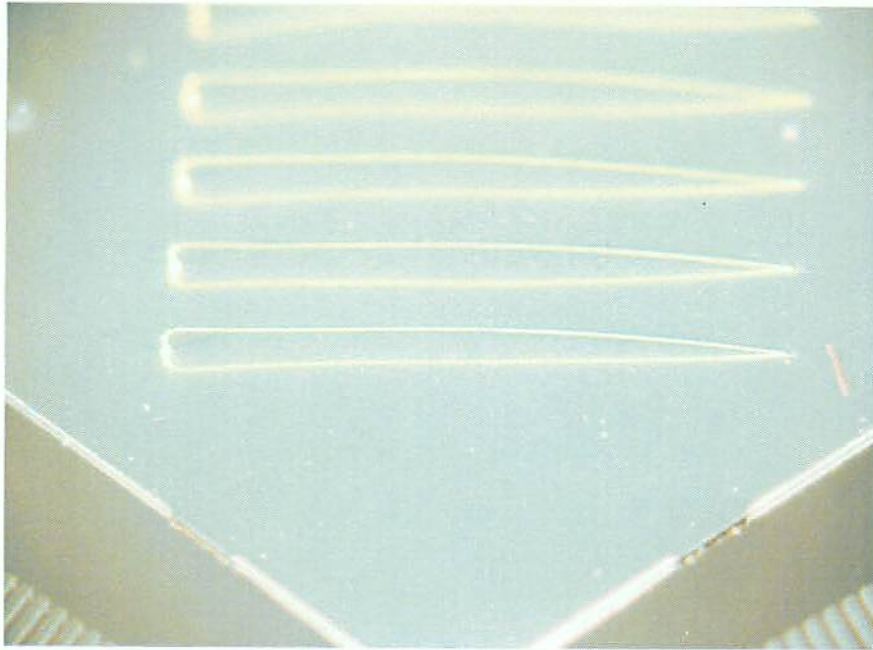


Fig. 4-30 Shape of normal loop bonding.

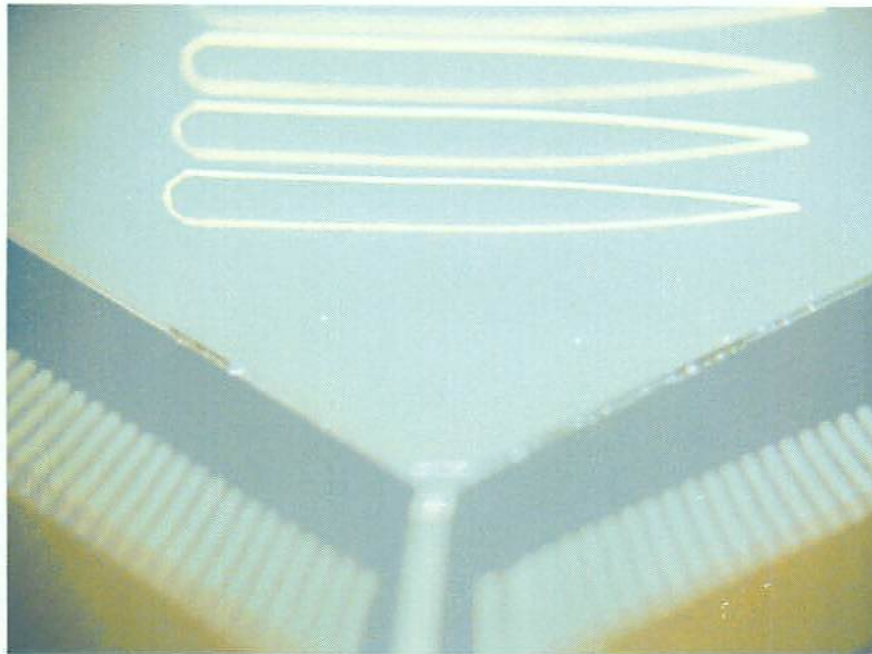


Fig. 4-31 Shape of trapezoid loop bonding.

Table 4-6. Experimental condition of wire shape.

Package	QFP304pin
Package Size	40mm×40mm, t=3.7mm
Wire	Au wire (Au:99.99wt%)
Wire Length	6.00mm
Wire Height	356 μ m
Wire Diameter	ϕ 30 μ m
Loop Shape	Normal Loop, Trapezoid Loop
Wire pitch	1,200 μ m

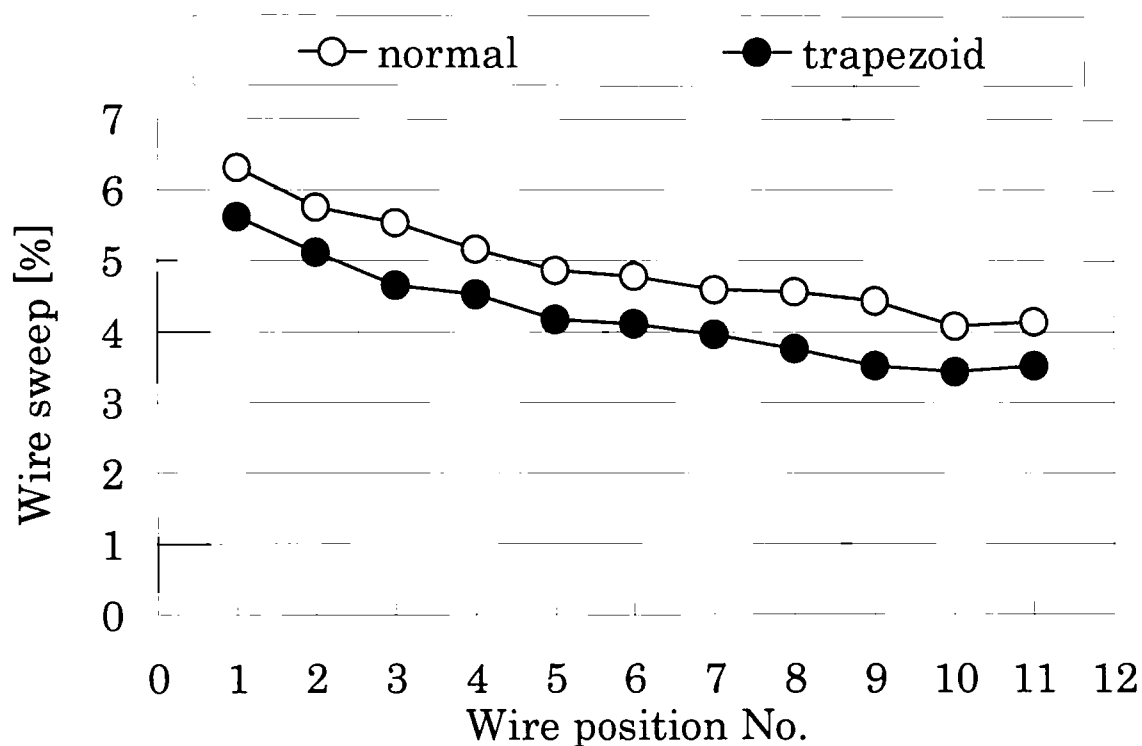


Fig. 4-32 Effect of wire loop on wire sweep.

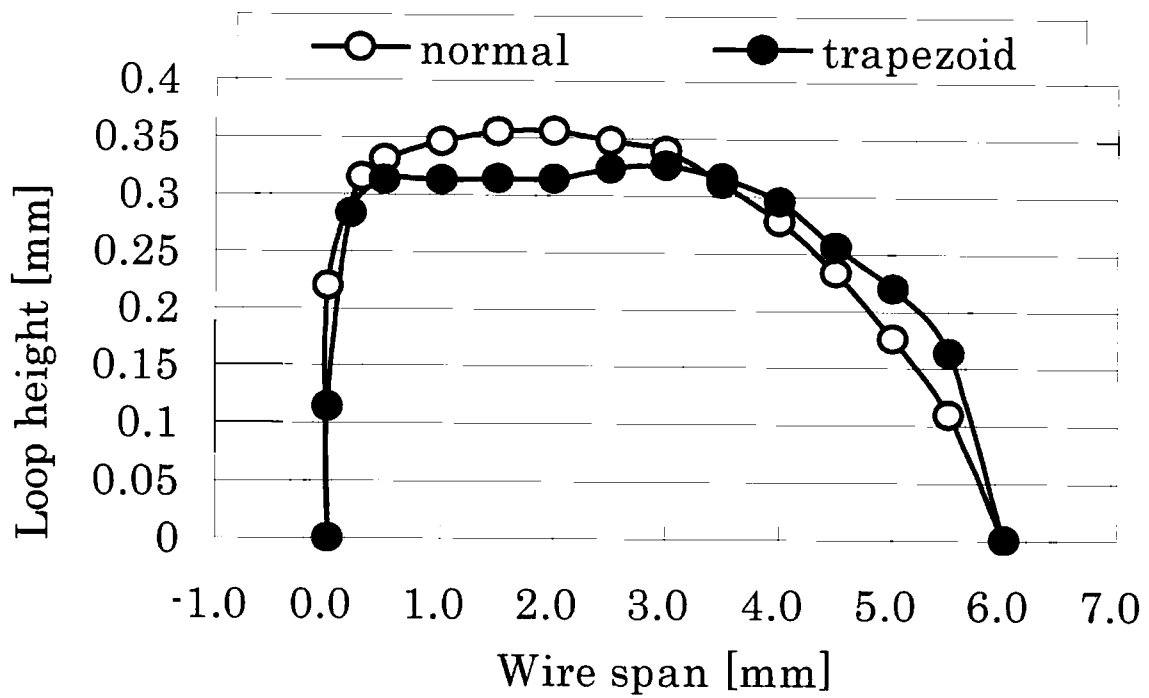


Fig. 4-33 Wire looping profile.

4.3.4 ワイヤ流れに対するワイヤ高さの影響

千鳥配列の製品において、もう一つの大きな要因がワイヤの高さである。このワイヤ高さについては、千鳥配列で異なった高さが適用されているという以外にも、半導体パッケージの薄型化により、さらに低くなる傾向がある。このワイヤの高さがワイヤ変形率にどの様に影響を及ぼすのかを調査した。また、ボンディングワイヤをダイパッド上にボンディングした為にワイヤの高さは Fig. 4-34 に示すようにリードフレームのダイパッド上からワイヤの最も高い位置迄の高さである。

4.3.4.1 実験方法

実験は 4.3.3 項の試料作成と同時に作成した。条件もワイヤ高さ以外は全て同じである。ワイヤの高さは実測した結果、 $211\mu\text{m}$, $356\mu\text{m}$, $407\mu\text{m}$ である。

4.3.4.2 実験結果

ダイパッド上にボンディングした 11 本のワイヤのワイヤ変形率を平均し、ワイヤ高さでグラフ化したものを Fig. 4-35 に示す。ワイヤ高さが $211\mu\text{m}$ でワイヤ変形率は 3.73%であったのが、ワイヤ高さが $356\mu\text{m}$ で 5.04%、ワイヤ高さが $407\mu\text{m}$ で 5.83%と、ワイヤ高さが $100\mu\text{m}$ 高くなるほどワイヤ変形率が 1.09%大きくなることがわかる。この時のワイヤ形状はノーマルループ形状である。

また Fig. 4-36 に 211 , 356 , $407\mu\text{m}$ の高さのワイヤにおける各位置のワイヤ変形率を示す。これから、全てのワイヤ位置においてワイヤ高さが高くなるほどワイヤ変形率が大きくなることがわかる。また、それぞれのワイヤ高さにおけるワイヤ変形率はワイヤ位置が樹脂注入ゲートから遠くなるほど小さくなっている。この挙動も、二次曲線的な減少を示している。それと同期して各ワイヤ高さのワイヤ変形率の差も小さくなることがわかった。これにより、ワイヤ変形はワイヤ位置に依存していることがわかる。従って、ワイヤ流れを小さくするためにはワイヤの高さを低くすることが有効である。

ワイヤ変形に対するワイヤ高さの影響は、ワイヤ高さが高くなるほどワイ

ワイヤ変形率が大きくなることがわかった。ワイヤ高さが200 μm ~400 μm の間では、ワイヤボンディング時にワイヤの高さを100 μm 低くすることで、ワイヤ変形率を約1%低減することができる。また、それぞれのワイヤ高さにおけるワイヤ変形率はワイヤ位置が樹脂注入ゲートから遠くなるほど小さくなっており、それと同期して各ワイヤ高さのワイヤ変形率の差も小さくなることがわかった。このことからワイヤ流れに対してはワイヤ高さを低く押さえることが効果的である。

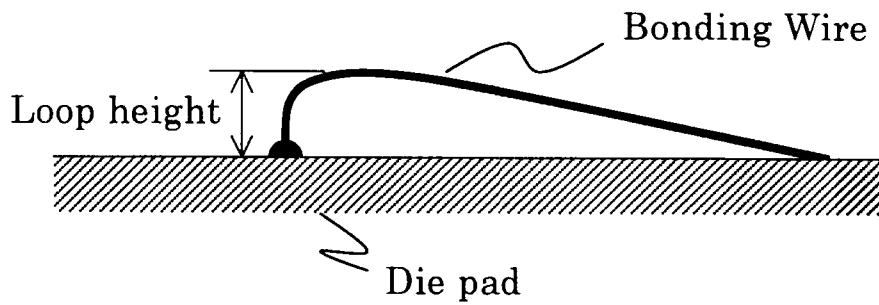


Fig. 4-34 Schematic drawing of wire height.

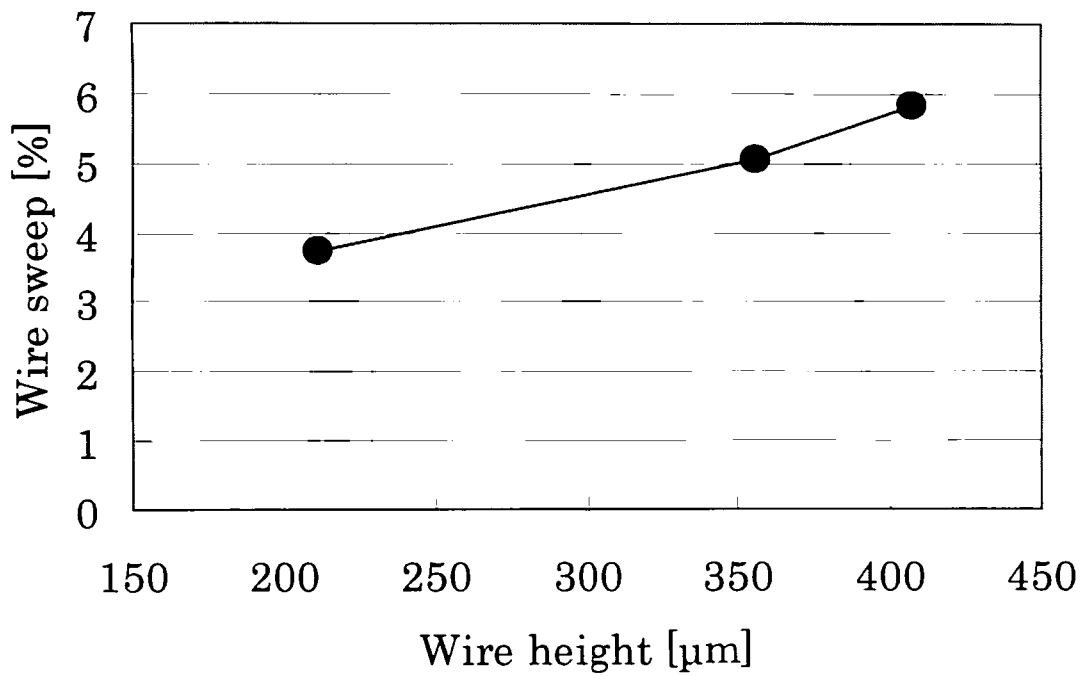


Fig. 4-35 Effect of wire height on wire sweep.

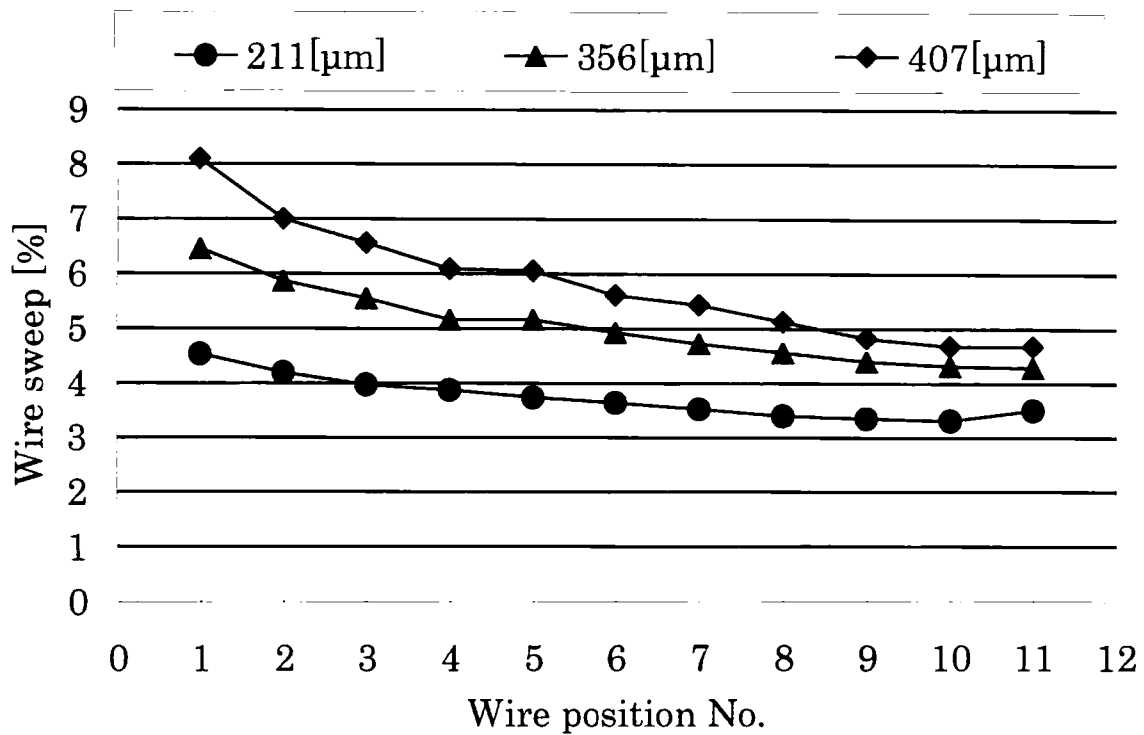


Fig. 4-36 Relation between wire sweep and wire height at wire position.

4.4 ワイヤ流れに対する封止樹脂の影響

第2章の Table 2-1. において示したワイヤ流れの支配要因で、封止樹脂に対する支配要因の粘性と硬化特性については 4.1.1 項で調査した。括弧で括弧してあるスパイラルフローと呼ばれる特性値は粘性と硬化性を掛け合わせた流動特性である。残された要因は樹脂に含まれるフィラの影響であり、4.4 節ではこのフィラの影響について調査した結果について述べる。

4.4.1 封止樹脂

樹脂封止型半導体に用いられている封止樹脂はパッケージの信頼性と生産性を両立させるために数多くの化合物からなる組成物であり、成形することで樹脂製品となる。樹脂は熱硬化型と熱可塑型の2種類に分類できる。熱可塑型の樹脂は成形後でも加熱すると再び溶融するため再使用できる。一方、熱硬化型は再溶融しない。樹脂封止型半導体にはこの熱硬化型樹脂が用いられている。

樹脂封止型半導体に用いられている封止樹脂は、主にエポキシを主剤とする樹脂が使われている。その中で、量産にはビフェニル(Biphenyl)系のものとノボラック(Novolak)系の2種類が主に用いられている。これらの基本的な化学構造を Fig.4-37 に示す⁽²⁹⁾。

4.4.2 封止樹脂材料

封止樹脂は成形しやすいように各種の原材料を混合して作る。代表的な封止樹脂の組成例を Table 4-7. に示す。エポキシ樹脂と硬化剤のみで構成する樹脂組成では、半導体の樹脂封止には使用できない。フィラ（充填材）と呼ばれる無機物質の添加による改質が必要である。そしてそれが最も樹脂の構成の中で高い比率を占めている。

半導体パッケージの小型化、薄型化及び半導体素子片の大型化によりパッケージ自体の剛性向上への要求が高まるにつれ封止樹脂内部のフィラも高充填化せざるを得ない状況となっている。表面実装工程ではんだリフローによるパッケージ内の温度上昇によって、封止樹脂材内に含まれた水分が気化し、膨張することによりリードフレームと封止樹脂材間に「ポップコーン現

象」として知られているパッケージ剥離やクラックなどの問題が生じる。この問題を改善するために、吸水性の低いビフェニル系の樹脂が注目されている。この樹脂は比較的粘度が低く従来のノボラック系と比較して同一フィラ充填率においては粘度を低く保つことが出来る。従ってワイヤ変形に対しても期待され、ポップコーン現象の改善へ向けたフィラの高充填への要求にも対応できるものとする。また、近年の鉛フリーに対応して実装温度の上昇により、さらにフィラを高充填化し対応しようとする動きがあり、フィラの充填量としては、ワイヤ流れに対して不利になる傾向がある。

ワイヤ変形に対して封止樹脂の観点から行われた調査に関しては報告例こそ少ないが、樹脂の種類の影響や、フィラの形状である球状及び破碎状フィラの比較、あるいはフィラ充填率の比較などについての研究がある⁽⁴⁰⁾。また、封止樹脂内にフィラを添加した場合、フィラ添加による粘度の増加によってワイヤ流れが増加するという報告がなされており、フィラを含んだ封止樹脂を使用した場合のワイヤ流れ量は、フィラを含まない同粘度の封止樹脂を流した場合から予測できるという報告もある⁽¹⁹⁾。しかし、フィラの影響についての定量的な調査については報告例が少ない。唯一特許が数多く出ており参考とした⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾。それは、封止樹脂の組成が樹脂材料メーカーのノウハウとなっていることから材料にまで遡って検討することができがたいことにある。本研究室ではワイヤ変形に及ぼす封止樹脂の影響について、樹脂材料メーカーの協力のもと、特にフィラの影響についての調査を行ってきた⁽²⁹⁾。

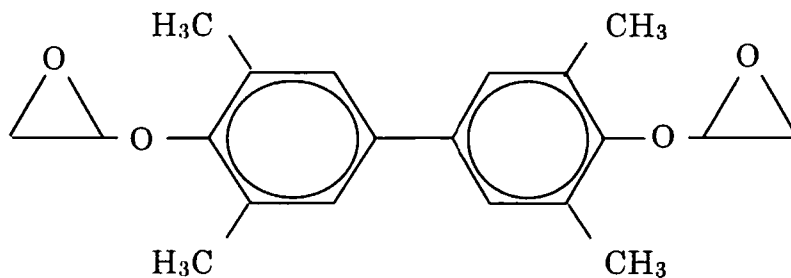
4.4.3 半導体パッケージ内部でのフィラ分布

4.3.2 項で用いた試料 (QFP208pin (パッケージ外形寸法 28×28mm, 厚さ 3.7mm, コーナーゲート)) を断面切断し、そのパッケージの各部分におけるフィラの充填状態を観察した。この試料に使用した封止樹脂は 4.2.2 項で使用した樹脂と同じビフェニル系の封止樹脂である。樹脂に含まれるフィラの含有量は 80wt% であり、その形状は破碎フィラ：球状フィラが 8:2 で混合されている。

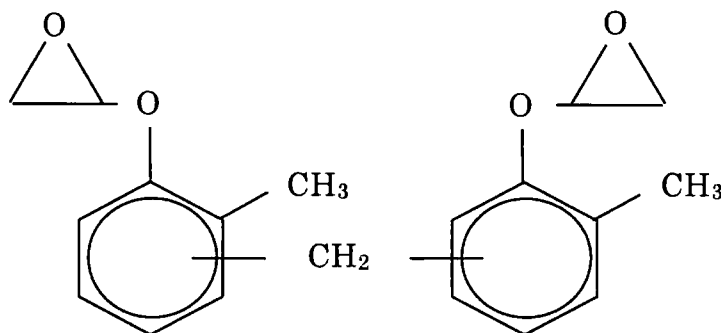
断面を調査結果を Fig. 4-38 と Fig. 4-39 に示す。また、その位置関係を

Fig. 4-40 に示す。Fig. 4-38 から、パッケージの位置によってフィラの平均粒径が異なっていることがわかる。パッケージ中央が $73.5\mu\text{m}$ と最もフィラ粒径が大きく、ワイヤ周辺が $68.3\mu\text{m}$ 、パッケージ表面付近が $46\mu\text{m}$ と、フィラの粒径が小さいことがわかる。パッケージ表面付近は壁面があり、境界層の関係で壁面付近では最も樹脂流速が遅い。ワイヤ周辺は壁面ほどではないが樹脂流れ場としては障害箇所であることは間違いなく、樹脂が流れやすいパッケージ中央付近に大きなフィラが存在し、流れにくい箇所で小さなフィラが存在していることがわかる。また、Fig. 4-39 から、パッケージの位置によって樹脂中のフィラの量が異なっていることがわかる。ワイヤ周辺が 30.7% と最もフィラの密度が高く、パッケージ中央が 29.1%、パッケージ表面付近が 25.0% と、順にフィラの密度が低くなっている。これらの結果から、パッケージ表面付近はフィラの密度も低くフィラ粒径も小さいが、同じ流れの障害要因でありながらワイヤ周囲ではフィラの径は平均的であるがその密度は高いことがわかる。逆に樹脂が流れやすい（樹脂流速が最も早い）パッケージ中央付近では大きなフィラが存在しているがそのフィラ密度はワイヤ周辺よりも低いことがわかる。これらの結果は Fig. 4-41 及び Fig. 4-42 の状態からも観察できる。Fig. 4-42 ではワイヤの周囲、特にワイヤとワイヤの間に大きなサイズのフィラが存在していない様子を明確にとらえることが出来る。

このように、パッケージ内部でフィラの分布が異なっているという知見は全く新しい結果である。同じパッケージ内部においてフィラの分布が異なるということは、パッケージ内の封止樹脂の流れがフィラの存在をも影響していることを示唆している。これは今後、ワイヤ流れにおける解析の新たな指針となる。また、パッケージクラックなどの信頼性解析にも大きな影響を与えるものと確信する。



(a) biphenyl



(b) cresolnovolak

Fig. 4-37 Chemical structures of epoxy resins.

Table 4-7. Typical composition of epoxy molding compounds.

Raw material	Purpose	%[Weight]
Epoxy resin	Granting electrical, mechanical and thermal properties	15~40
Hardener		
Accelerator	Rapid curing	<1
Flexibillzer	Reduction of elasticity and thermal expansion coefficients	<5
Filler	Adjustment of thermal and mechanical properties	60~85
Coupling agent	Improvement of adhesion among resins, fillers, and lead	<1
Flame retardant	Providing flame retardancy	<1
Coloring agent	Coloring	<1
Mold release agent	Granting mold release characteristics	<1

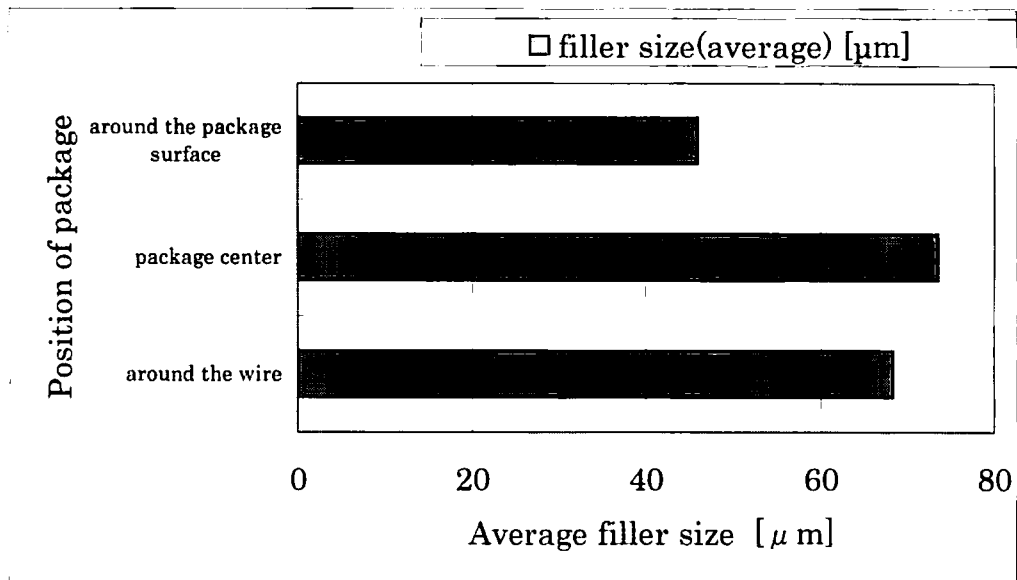


Fig. 4-38 Relation between package position and filler size.

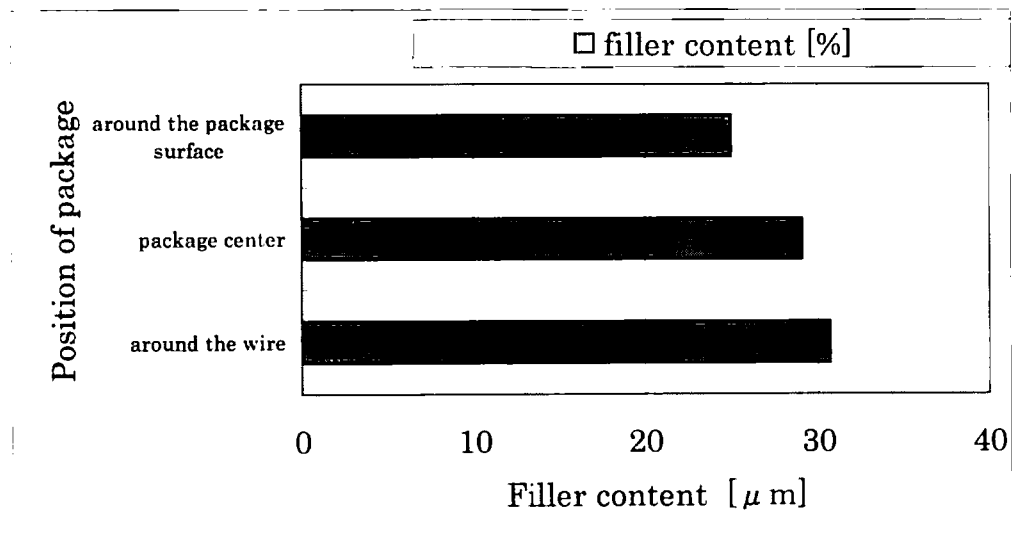


Fig. 4-39 Relation between package position and filler content.

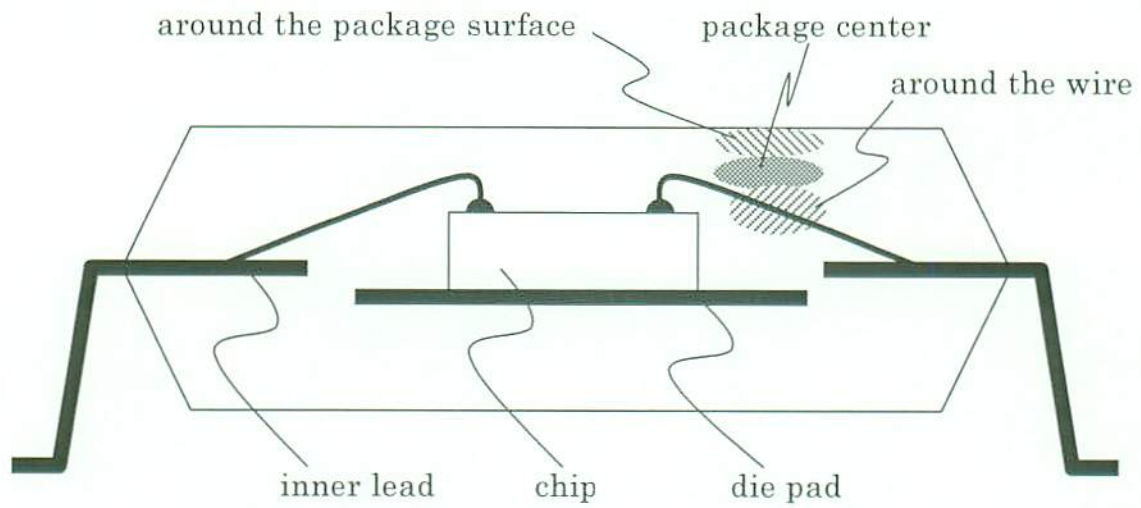


Fig. 4-40 Schematic illustration of investigation point.

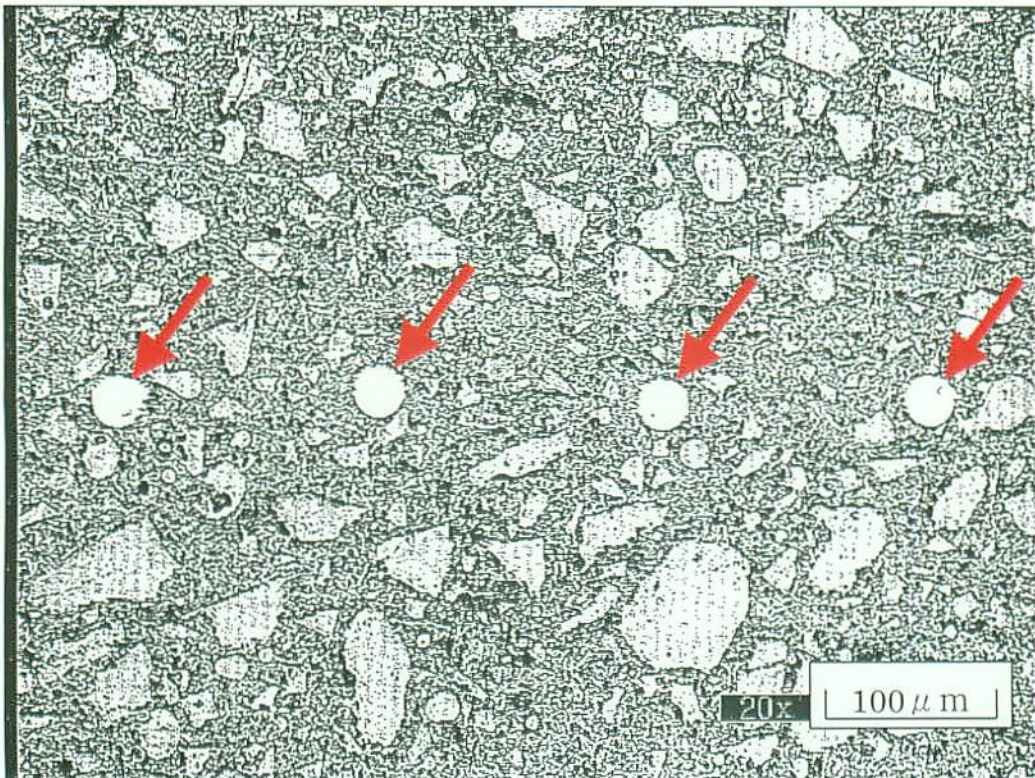
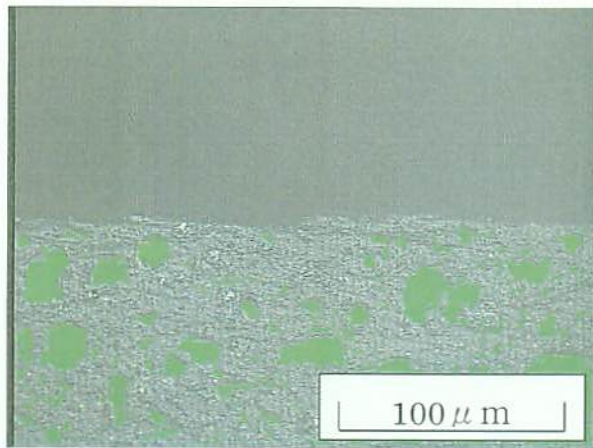
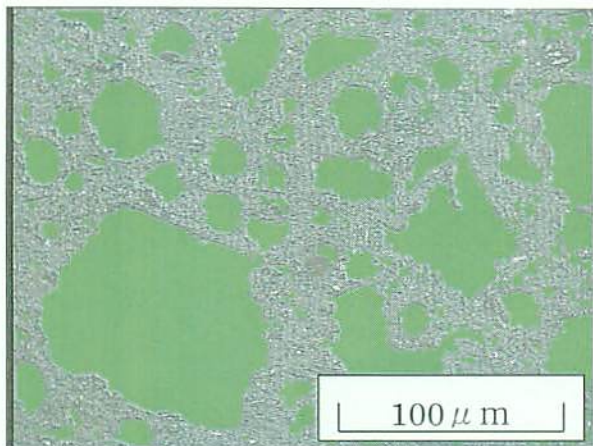


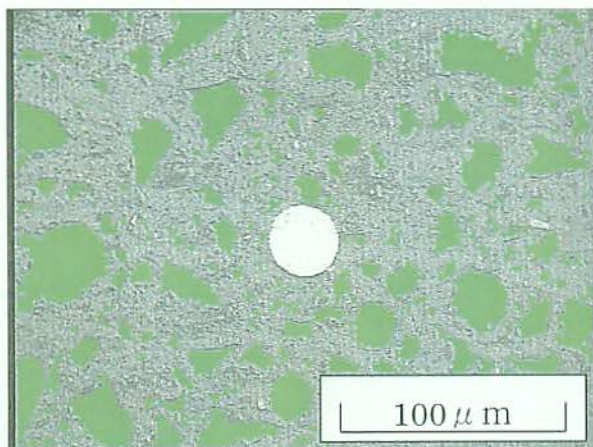
Fig. 4-41 Cross section of package (arrows : wire).



(a) Around the package surface



(b) Package center



(c) Around the wire

Fig. 4-42 Filler content of cross section.

4.4.4 フィラカット樹脂でのワイヤ流れ

封止樹脂のフィラの分布を変える最も簡単な方法としてフィラをふるいにかけて粒径の上限をカットする方法である。現在フィラ粒径の上限が $148\mu\text{m}$ の樹脂が主流であるが、量産においてもパッケージの薄型化に伴い徐々に上限を $74\mu\text{m}$, $54\mu\text{m}$ へとカットしているパッケージもある。このフィラ粒径の上限をカットした樹脂での評価を実施した。

4.4.4.1 実験方法

今回作成した封止樹脂のフィラ分布を Fig. 4-43 に示す。この封止樹脂はフィラを $24, 40, 54, 74, 148\mu\text{m}$ に上限カットしてある。このフィラカットを行った封止樹脂の特性を Table 4-8. に示す。この Table 4-8. 中、粘度は高化式粘度測定器で測定した値である。この測定装置での粘度はせん断速度 $7,000 \sim 10,000\text{s}^{-1}$ の時の粘度である。

この封止樹脂にはビフェニル系の樹脂を用いた。樹脂に含まれるフィラの含有量は 78wt% であり、その形状は全て球状フィラである。樹脂の比重は 1.89 である。実験に使用した試料は 4.2.2 項で行った試料と同じ構造にて実施した。実験水準のワイヤボンディングパラメータを Table 4-9. に示す。ボンディングワイヤのワイヤ直径は $\phi 28\mu\text{m}$ 、99.99%Au の純金線を用いて実施した。その他の実験条件は、射出時間を 4 秒で実施した以外は 4.2.3 項と同じである。

4.3.3.2 実験結果

各フィラカットを行った樹脂の、各ワイヤ間隔におけるワイヤ流れを Fig. 4-44 に示す。この結果は 11 本のワイヤの平均値をプロットしたものである。4.2.3 項にて得られた結果と同じようにワイヤ相互の間隔が狭いほどワイヤ変形は小さい。また、ワイヤ間隔が狭くなると急激にワイヤ変形が小さくなるなどの関係は樹脂内のフィラ上限をカットしても変わっていない。このワイヤ変形とワイヤ間隔との関係は樹脂内フィラの分布に依存していないことがわかる。

Fig. 4-45 にフィラカットポイントとワイヤ変形との関係を示す。どのワイ

ワイヤ間隔においても、同じ傾向でフィラカット樹脂のカットポイントとワイヤ流れとの関係があることがわかる。この結果で $24\mu\text{m}$ カット樹脂でワイヤ変形が急激に大きくなっている。Table 4-8. に示した様に $24\mu\text{m}$ カット樹脂の粘度は他のカットポイント樹脂の約 $1/5\sim 1/10$ と低いにもかかわらずワイヤ変形率が大きい。ただ、粘度と硬化特性をかけあわせた特性値であるスパイラルフロー値が他の樹脂と同じであることから硬化特性が早いことが予想され、これらの影響を受けた可能性がある。しかし、同じ粘度である $74\mu\text{m}$ カット樹脂と $148\mu\text{m}$ カット樹脂とでは明らかにワイヤ変形率に差があり、粘度が高いにもかかわらず $40\mu\text{m}$ カット樹脂や $54\mu\text{m}$ カット樹脂でのワイヤ変形率は小さい。このことは、樹脂粘度や硬化性のみの影響ではないことを示している。これらの結果はワイヤ変形に有利なフィラカットポイントが有ることを示唆していると考ええる。

各フィラカットポイント樹脂の、ワイヤ位置とワイヤ変形との関係をワイヤ間隔別にプロットしたものを Fig. 4-46 に示す。この結果も 4.2.3 項で述べた結果と一致している。さらに、今回の評価で特徴的なのはワイヤの流れに対して終端位置のワイヤで再びワイヤ変形率が大きくなっている点である。この傾向はワイヤ間隔が $300\mu\text{m}$ では見ることが出来るが、 $1,200\mu\text{m}$ に離れるとその傾向が無くなることがわかった。Fig. 4-47 にワイヤ間隔別に、各ワイヤ位置におけるワイヤ変形をフィラカット樹脂毎にまとめた。ワイヤ間隔が広がるほど上記ワイヤ終端位置で再びワイヤ変形量が大きくなっていることがわかる。これらの現象はフィラカットポイントに関わらず得られた。4.2.3 項で行った実験と今回の実験との大きな違いは、フィラカットを行った封止樹脂を使用した点とその樹脂のフィラ構成が 4.2.3 項で実施した実験では破碎フィラ：球状フィラが 8:2 で構成されているのに対し、今回の実験で用いた樹脂は全て球状フィラを用いている点である。

この、フィラ形状の構成に対する影響については、金型キャビティ内に樹脂注入を行った後に充填が完了し樹脂流動が停止すると、破碎フィラ：球状フィラが 8:2 で構成されているフィラを用いた樹脂に対して全て球状フィラを用いた樹脂で変形したワイヤが元の形状に戻ろうとする現象があるという研究報告⁵⁾がある。しかしながら、今回の全て球状フィラを用いた樹脂での

実験では、ワイヤの弾性で変形が小さくなる方向へと動いている可能性があるが確認はできていない。よってこのフィラの構成がワイヤ配置の位置によってワイヤ変形状態に及ぼす影響についても確認できていない。

しかしながら、4.2.1 項で示した Fig. 4-12 の X 線写真からゲート位置から 90 度方向の最も樹脂流れにさらされるワイヤの変形状態を見るとワイヤ間
が離れている前後のワイヤの変形率が大きくなっている状態を見て取ることが出来る。よってこの結果は実際のパッケージにおいても起きている現象をとらえたものであり、今までにこの様な報告はなされていない事からこの結果は新たな知見であり、パッケージ内部の設計において実用上、非常に重要な結果である。

Fig. 4-48 にワイヤ変形に対するワイヤのノーマルループ形状と台形ループ形状との関係を示す。また、Fig. 4-49 にワイヤ変形に対するワイヤ高さの影響について示す。これらの結果は 4.3.3 項及び 4.3.4 項で述べた結果とよい一致がある。よって封止樹脂のフィラ上限をカットしてもこれらの傾向は変わらない事が証明された。この結果は、フィラ上限をカットしても前述の結果を用いることが可能となり、今後複雑な構造のパッケージが開発されるにあたってこの結果を適用できることを意味しており、次世代パッケージ開発への新たな一助となることを確信する。

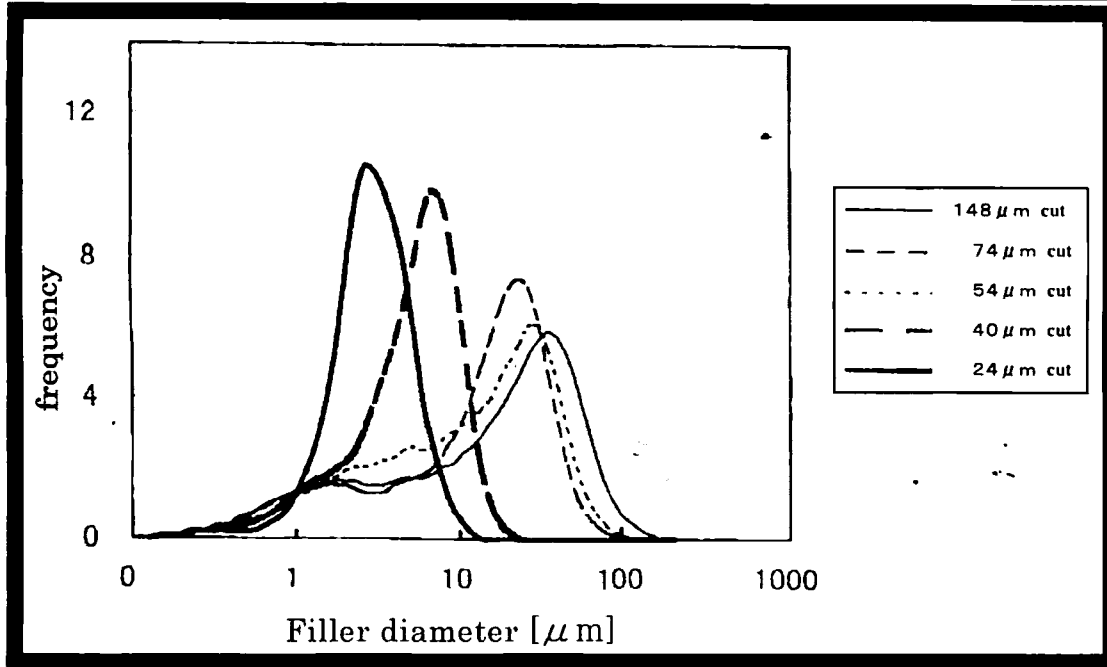


Fig. 4- 43 Particle distribution of molding compound.

Table 4-8. Characteristic parameter of filler cut resin.

		24 μ m cut	40 μ m cut	54 μ m cut	74 μ m cut	148 μ m cut
Spiral flow	[cm]	130	136	125	122	140
Koka's Viscosity (10kg)	Pa·s	8.2	65.0	82.0	43.0	40.0

Table 4-9. wire bonding parameter of sample.

No.	Wire pitch [μ m]	Wire length [mm]	Loop height [μ m]	Loop shape	
1	90	6	300	Normal	
2	120				
3	150				
4	300				
5	1,200			400	Trapezoid
6				300	
7					
8					

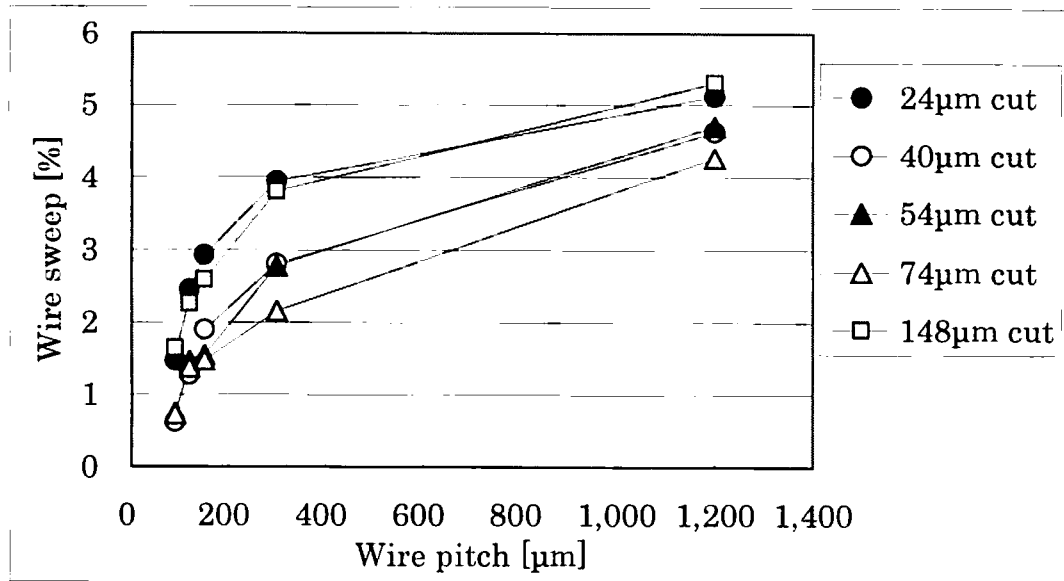


Fig. 4-44 Effect of wire pitch and filler cut point on wire sweep.

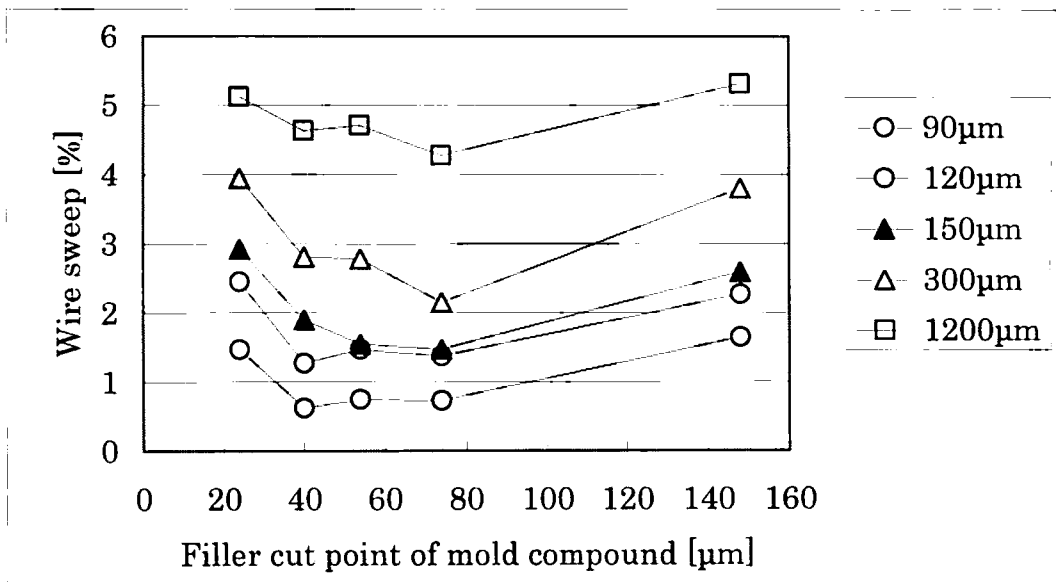
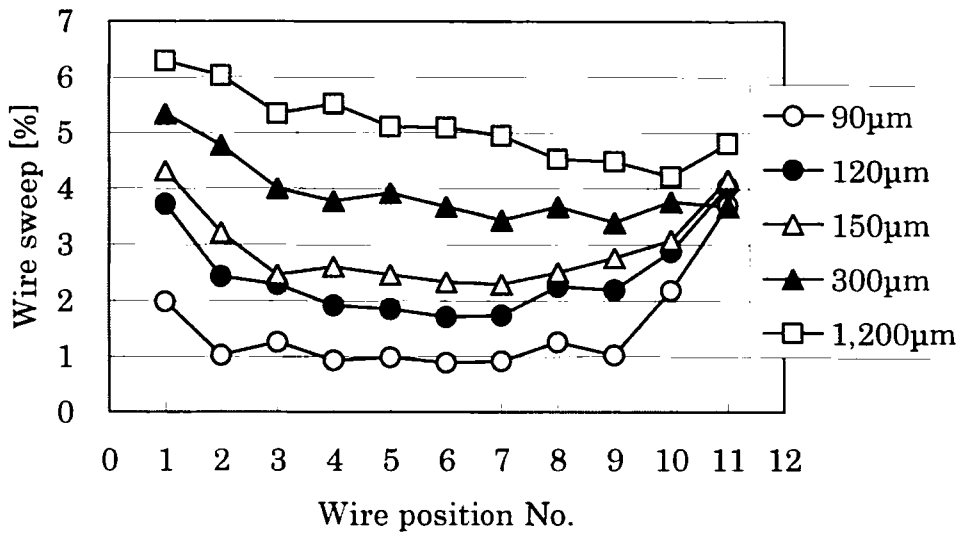
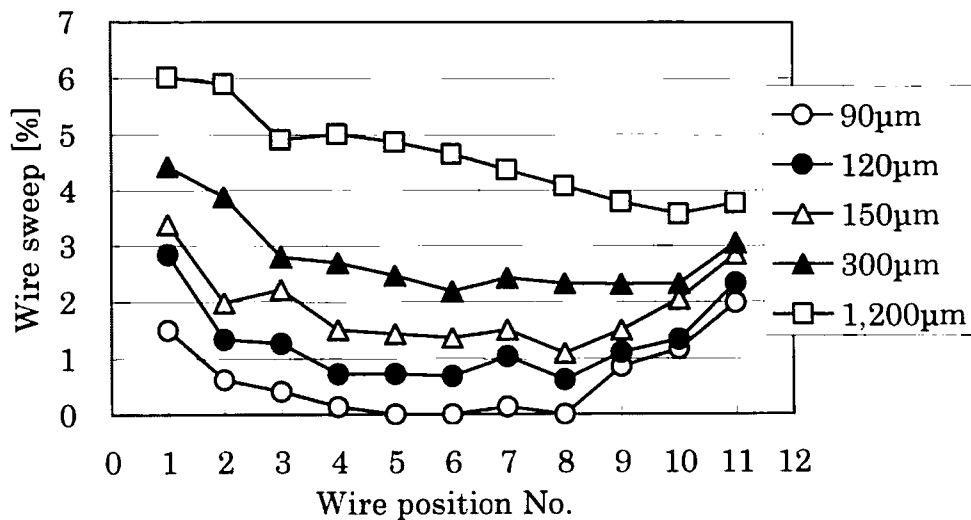


Fig. 4-45 Relation between filler cut point of mold compound and wire sweep in wire pitch 90, 120, 150, 300 and 1,200 μm , respectively.

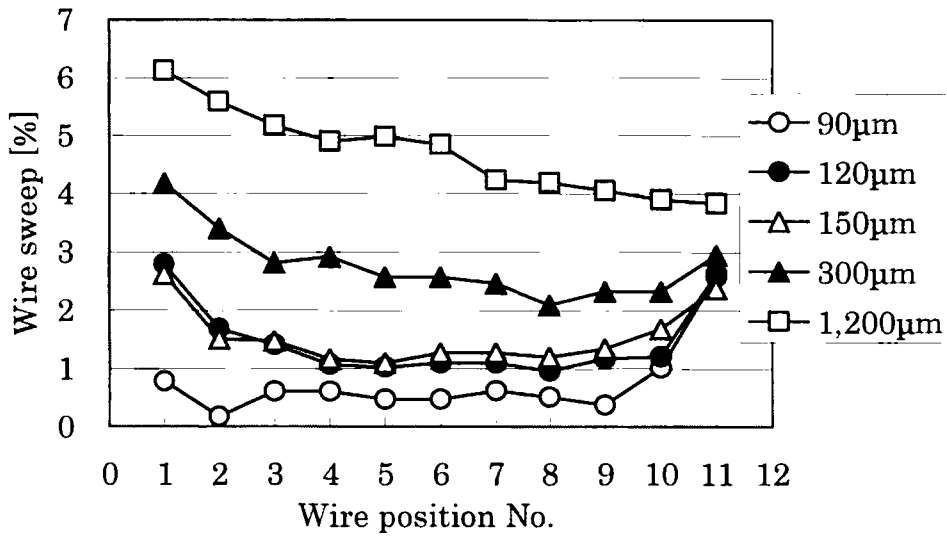


(a) Filler cut point 24 μm

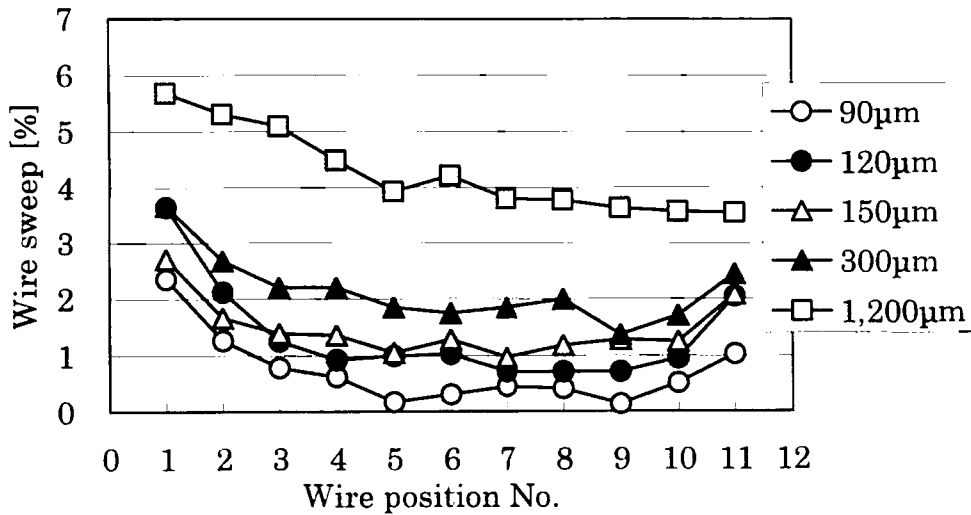


(b) Filler cut point 40 μm

Fig. 4-46 Relationship between wire sweep and wire position in filler cut point 24, 40, 54, 74 and 148 μm, respectively.

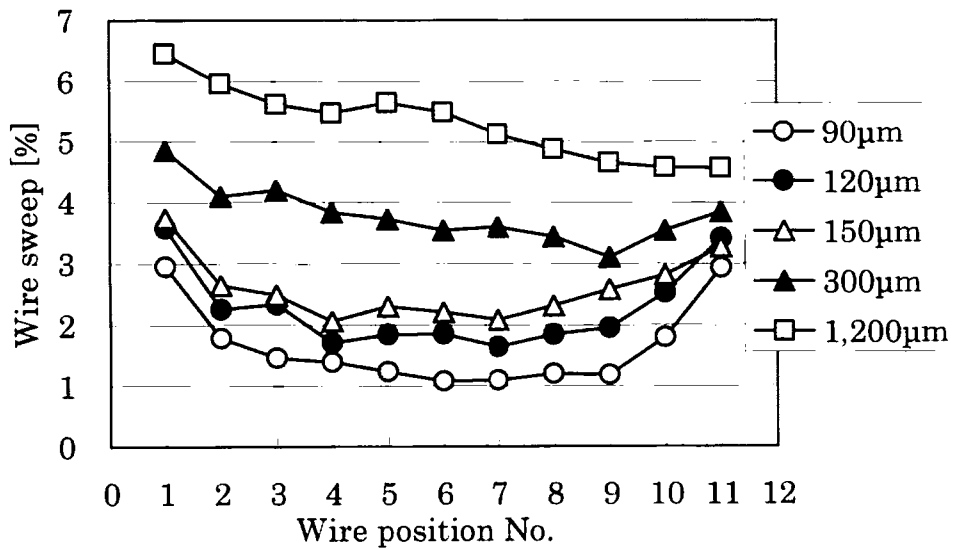


(c) Filler cut point 54 μm



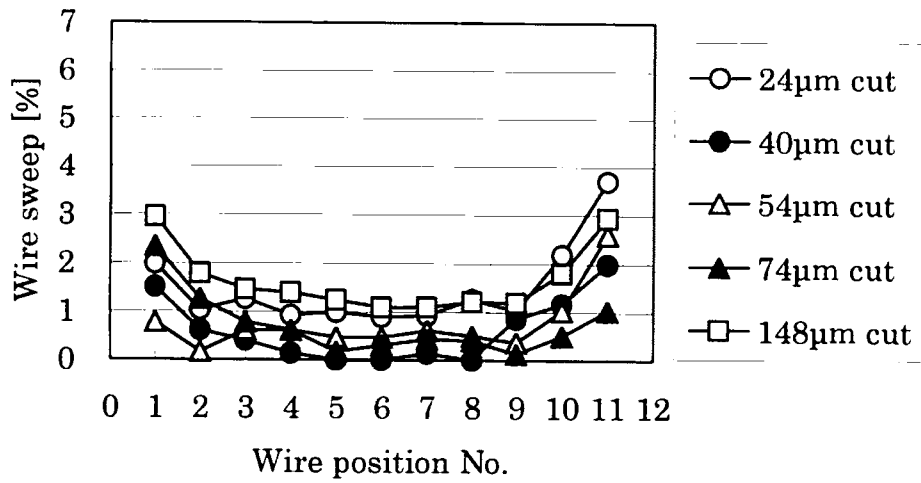
(d) Filler cut point 74 μm

Fig. 4-46 Relationship between wire sweep and wire position in filler cut point 24, 40, 54, 74 and 148 μm, respectively.

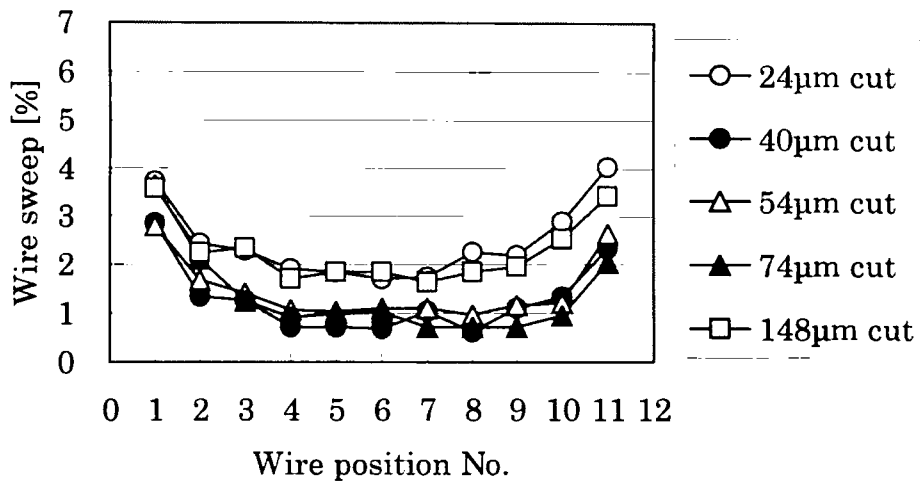


(e) Filler cut point $148\mu\text{m}$

Fig. 4-46 Relationship between wire sweep and wire position in filler cut point 24, 40, 54, 74 and $148\mu\text{m}$, respectively.

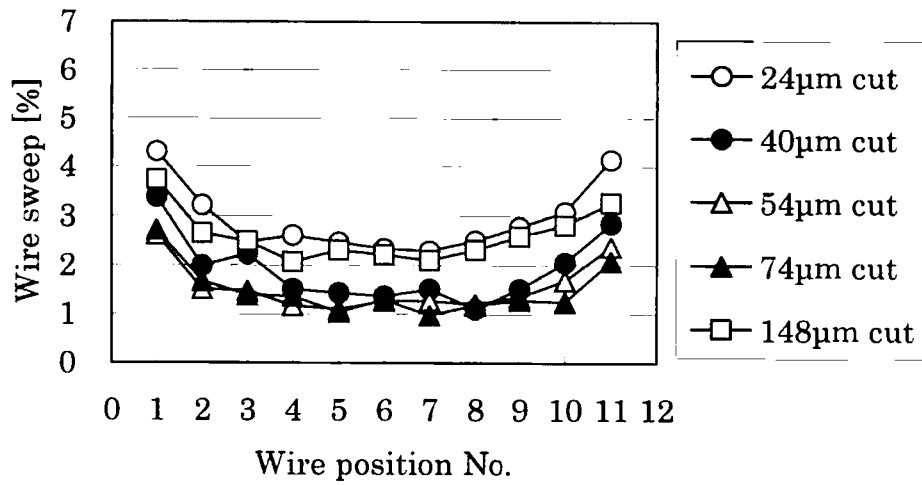


(a) wire pitch 90 μm

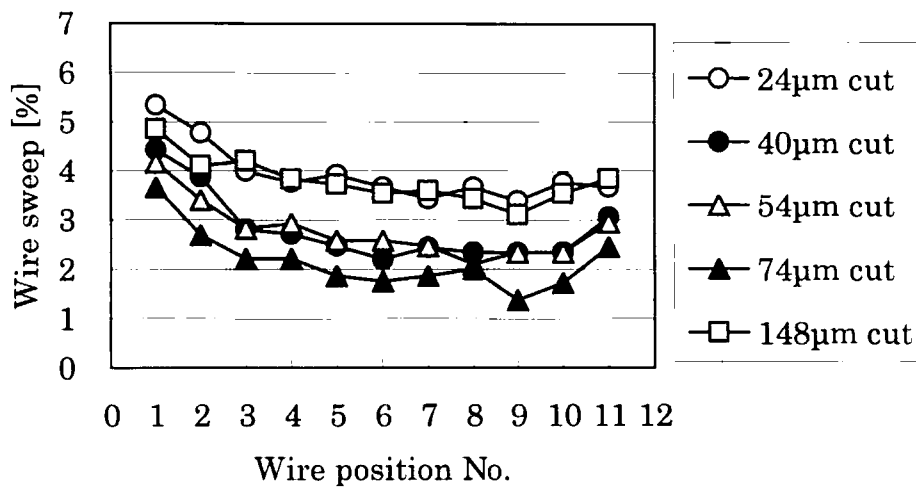


(b) wire pitch 120 μm

Fig. 4-47 Relationship between wire sweep and wire position in wire pitch 90, 120, 150, 300 and 1,200 μm, respectively.

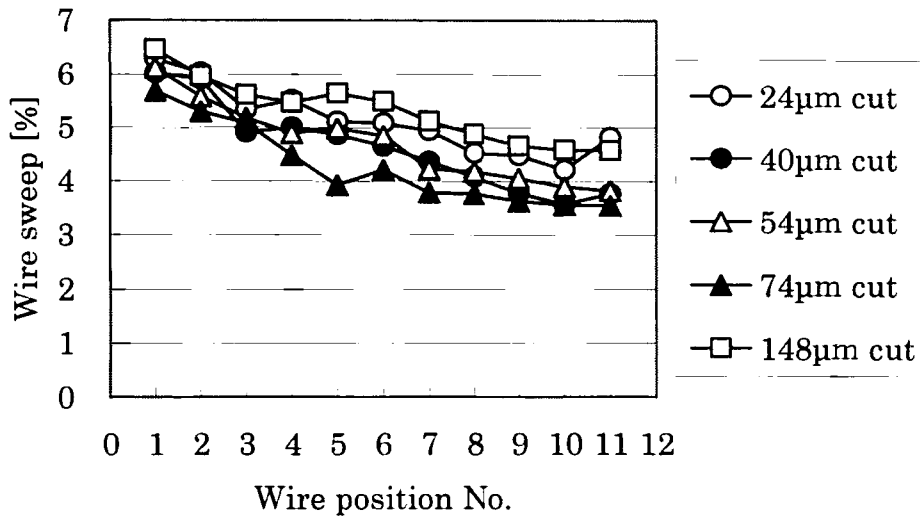


(c) wire pitch 150 μm



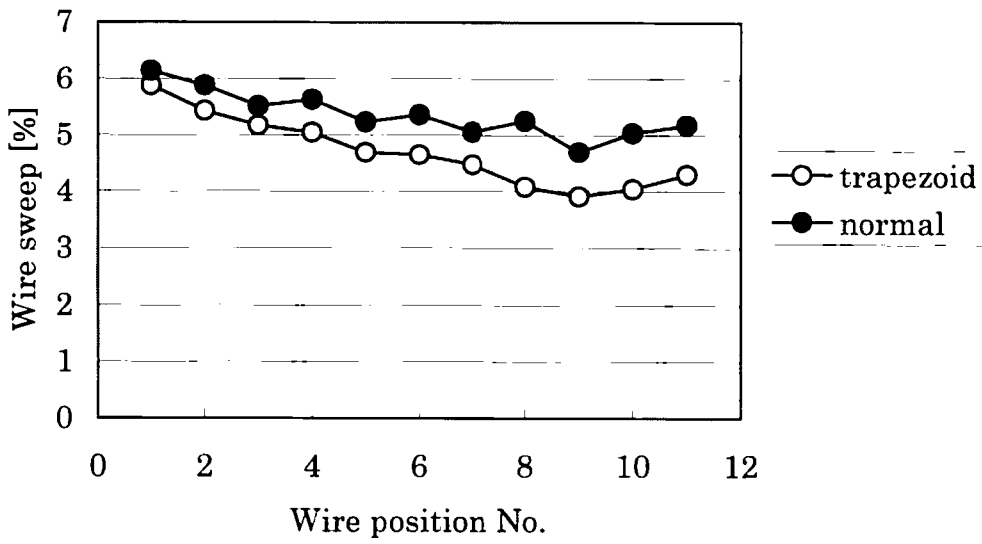
(d) wire pitch 300 μm

Fig. 4-47 Relationship between wire sweep and wire position in wire pitch 90, 120, 150, 300 and 1,200 μm, respectively.

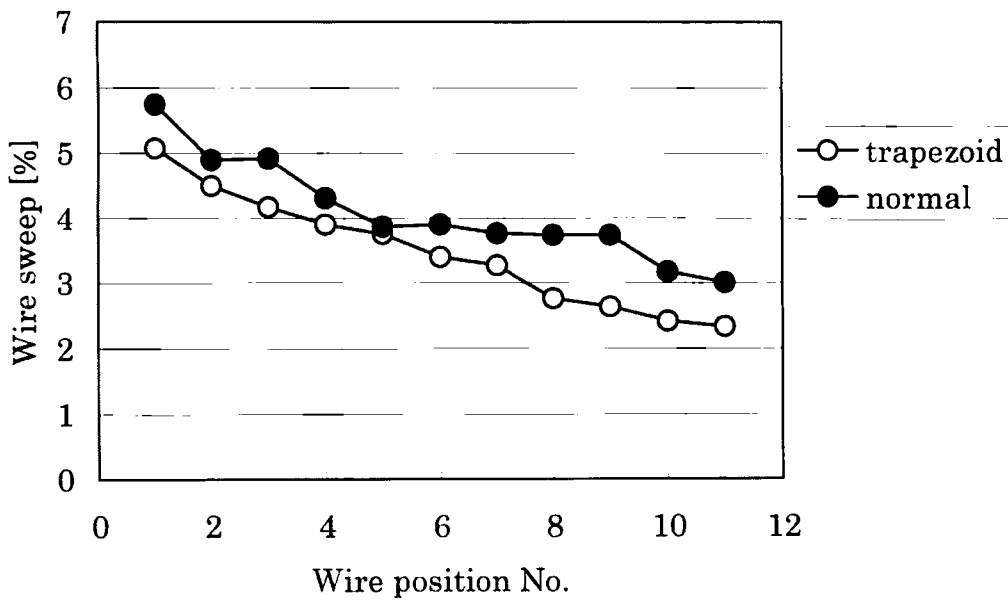


(e) wire pitch 1,200 μ m

Fig. 4-47 Relationship between wire sweep and wire position in wire pitch 90, 120, 150, 300 and 1,200 μ m, respectively.

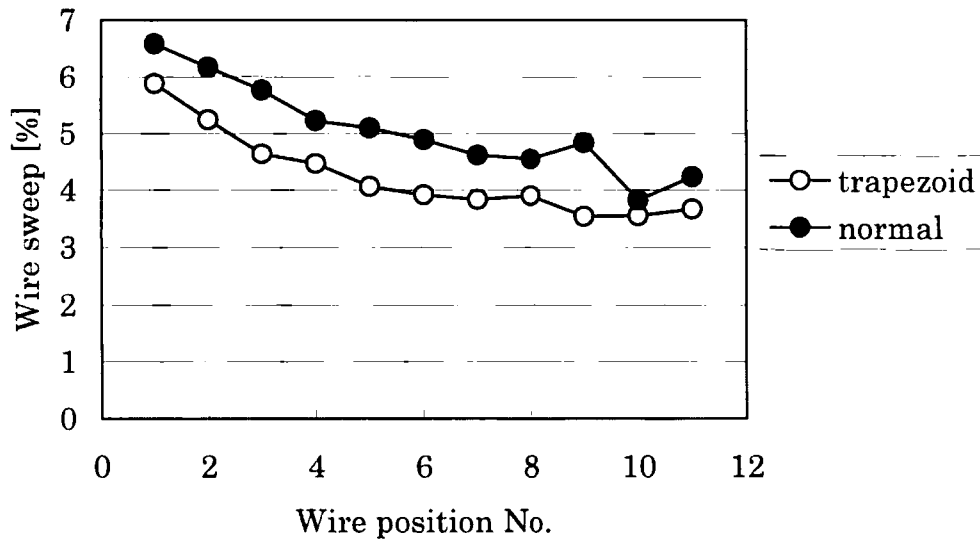


(a) Filler cut point 24 μm

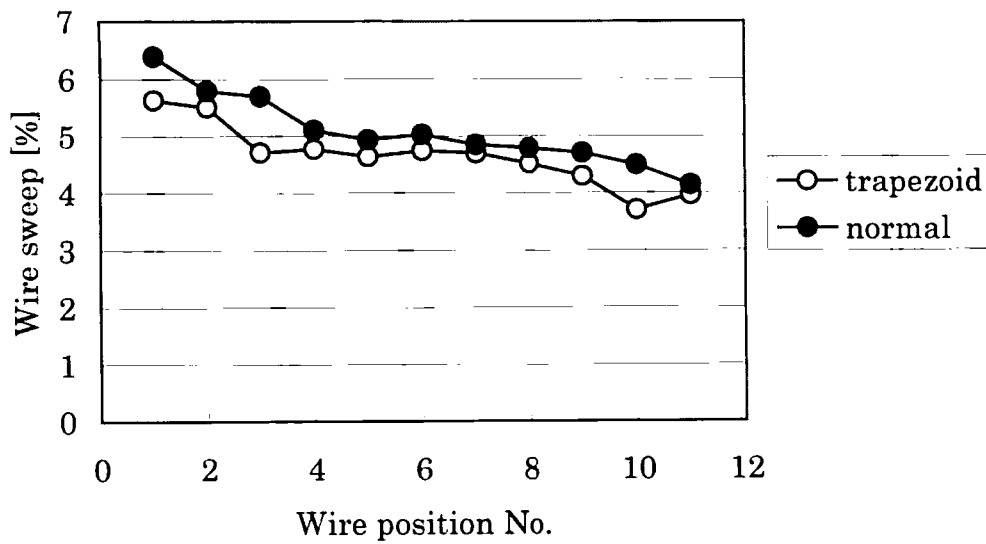


(b) Filler cut point 40 μm

Fig. 4-48 Effect of wire loop profile on wire sweep

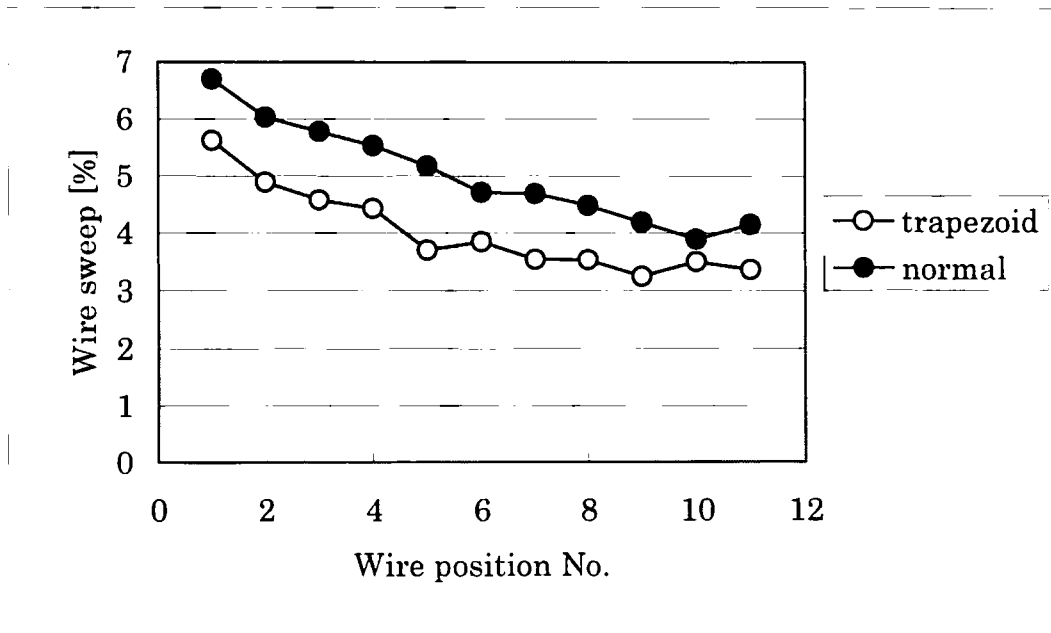


(c) Filler cut point 54 μm



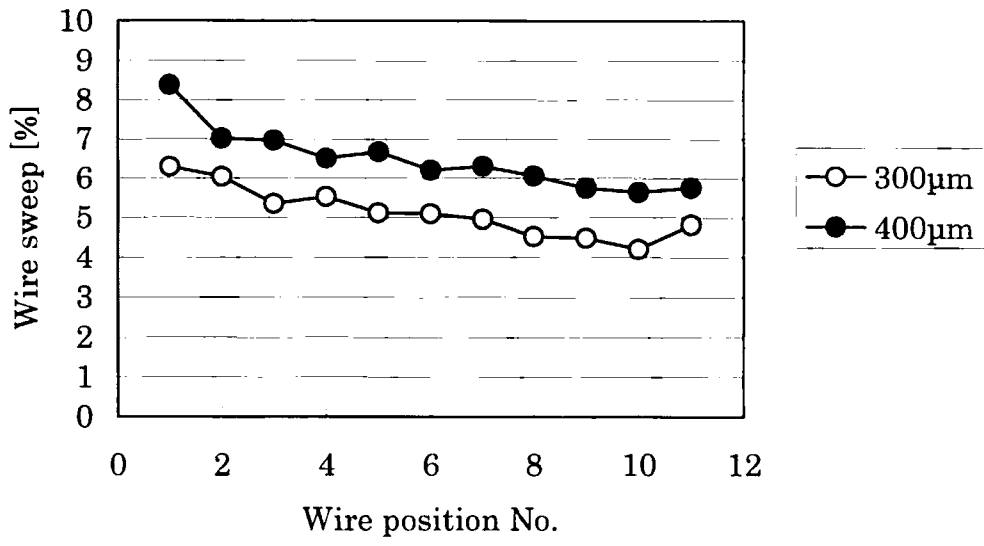
(d) Filler cut point 74 μm

Fig. 4-48 Effect of wire loop profile on wire sweep

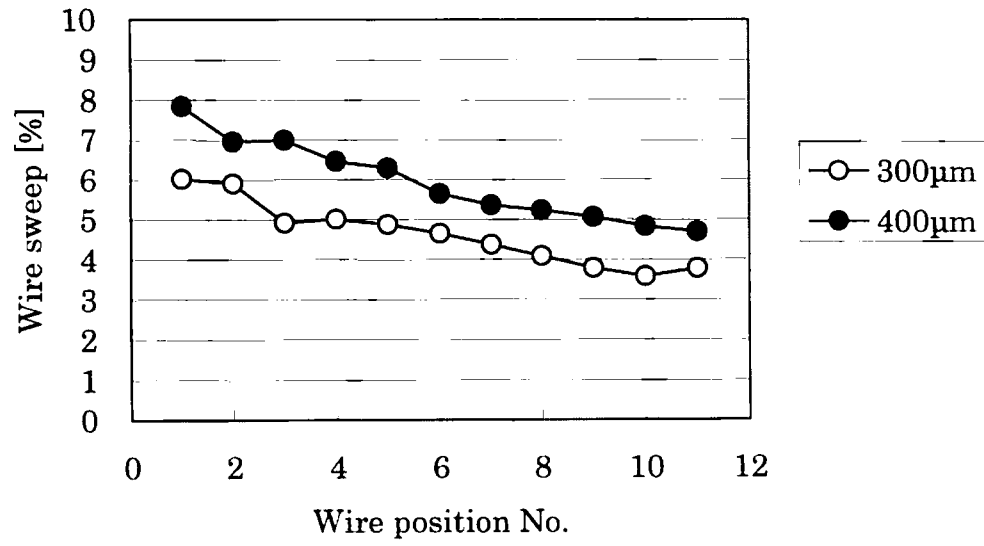


(e) Filler cut point $148\mu\text{m}$

Fig. 4-48 Effect of wire loop profile on wire sweep

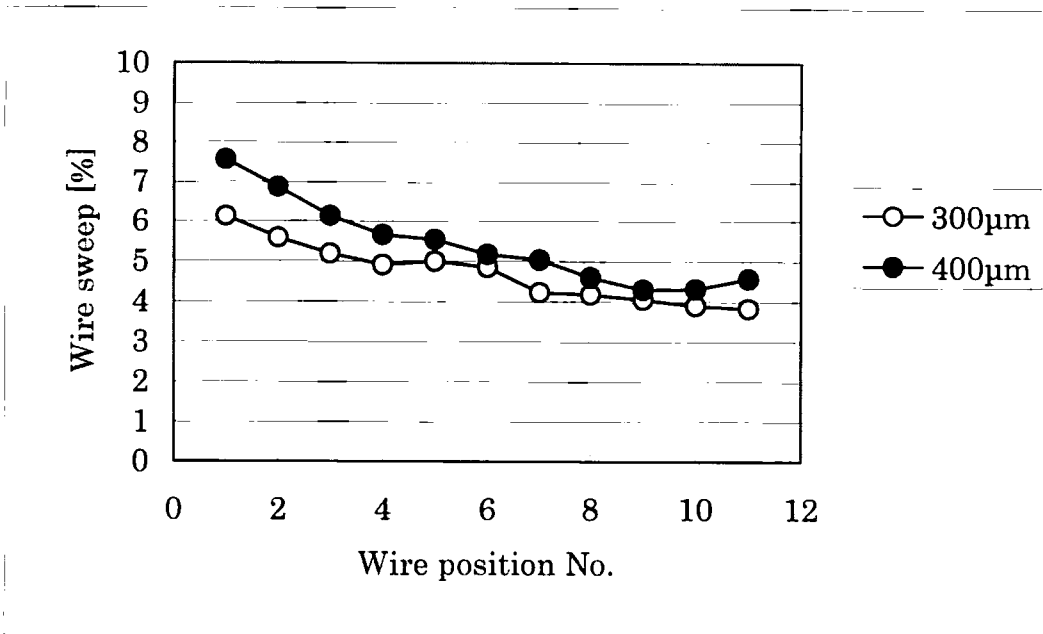


(a) Filler cut point 24 μm

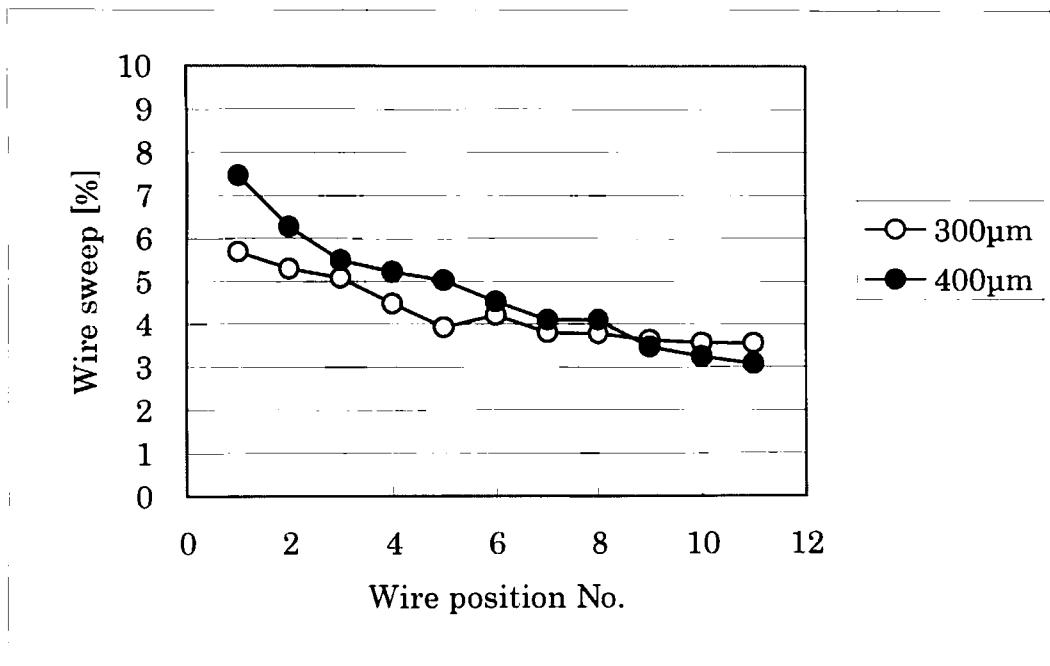


(b) Filler cut point 40 μm

Fig. 4-49 Effect of wire loop height on wire sweep

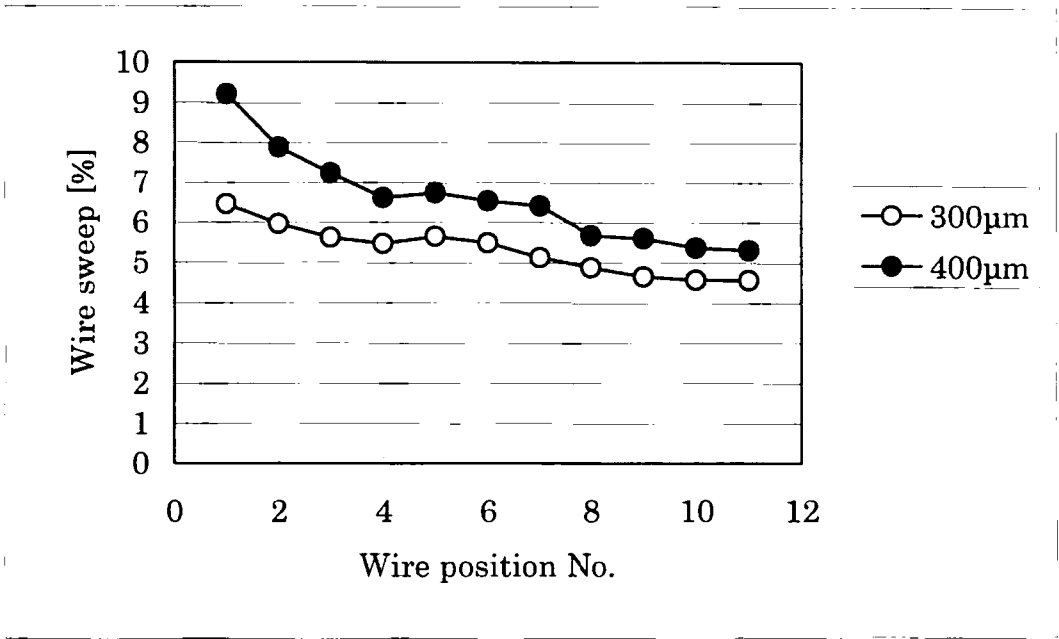


(c) Filler cut point 54 μ m



(d) Filler cut point 74 μ m

Fig. 4-49 Effect of wire loop height on wire sweep.



(e) Filler cut point $148\mu\text{m}$

Fig. 4-49 Effect of wire loop height on wire sweep.

4.4.5 ワイヤ流れに対するフィラ粒子分布の影響

4.4.4 項の結果から、ワイヤ変形に対して封止樹脂内のフィラ分布を操作することで影響が有ることを示した。その中でワイヤ変形と樹脂粘度との関係に相関を見いだす事が出来なかった。

封止樹脂内に充填されているフィラは、様々な異なった粒度分布のフィラを混合して作成される。これらのフィラの分布及び混合比は樹脂メーカーのノウハウであり伺い知ることは出来ない。そのフィラの樹脂粘度とフィラの体積分率の関係式が下記の通り Mooney の式として存在する。

$$\ln \frac{\eta}{\eta_1} = \frac{K_E \cdot \phi_2}{1 - (\phi_2 / \phi_m)} \quad (4-2)$$

ここで、 η は封止樹脂の粘度、 η_1 はレジン基材の粘度、 K_E はアインシュタイン係数、 ϕ_2 はフィラの体積分率、 ϕ_m はフィラの真の体積をフィラの見掛けの体積（空隙による体積を含んだ体積）で除した値である。ここで、アインシュタイン係数 K_E は、フィラの形状に依存しており破碎フィラと球状フィラを比較すると破碎フィラの方が値が高い。つまり、粘度が高くなる事を意味している。また、球状フィラのアインシュタイン係数は最低の 2.50 である。 ϕ_m は、フィラ的最密充填状態を示している。フィラとフィラの間隙にどれだけのフィラが充填されているかをあらわしており、フィラ径の分布が直接この値に影響し、結果として樹脂粘度に影響する事を示している。

このフィラ粒度分布は、比較的簡単な分布関数を用いて表現できれば、その関数特有の数学的なパラメータを用いて分布を明確に表現でき、また種々の平均径や比表面積、単位質量あたりの粒子数など粉体特性を解析的に求めることが出来る。分布関数は数多くあるが、今回は Rosin-Rammler 分布を使用した⁽⁴³⁾。これを用いたのは、広い範囲の分布を持つ物に対して有効である点を考慮したからである。以下に Rosin-Rammler の式を示す。

$$\log\{\log(100/R_{(Dp)})\} = n \cdot \log Dp + C \quad (4-3)$$

ここで、 $R_{(Dp)}$ は積算ふるい上[%]、 Dp は粒子径、 n は均等数、 C は定数であ

る。この式中の均等数 n 値は、小さいほどフィラ粒度分布の範囲が広く、大きいほど粒度分布が狭くなっていることを示している。

そこで、封止樹脂内に充填されているフィラを構成する前の、個々の異なった分布のフィラの混合状態を変更した樹脂で、ワイヤ流れに対するフィラ混合状態の影響を調査した。

4.4.5.1 実験方法

実験に使用した試料はワイヤ本数を除き、4.2.2 項で行った試料と同じ構造にて実施した。ワイヤの本数はダイパッド上にボンディングできる数だけボンディングを行った。ワイヤ間隔については 90,120,150,300,600 及び 1,200 μm にて実施した。ボンディングワイヤのループ高さを 250 μm 、ワイヤ長さを 6mm、ワイヤ直径は $\phi 28\mu\text{m}$ 、99.99%Au の純金線を用いて実施した。その他の実験条件は 4.4.4 項と同じである。

4.4.5.2 樹脂

今回作成した封止樹脂のフィラ分布及び特性を Table 4-10.に示す。樹脂 No. 9 が量産で実際に使われている封止樹脂である。No.1~9 は樹脂内のフィラ粒度分布の影響について調査するための水準である。No.10~12 はフィラのカットポイントをふるいにかける方法ではなく、原材料フィラの混合を変更することで実現した場合の影響について調査するための水準である。No.13~15 は樹脂の Rosin-Rammler の均等数を変更し、その影響を調査するための水準である。これらの混合する原材料フィラの各粒度分布について Fig. 4-50 に示す。フィラ粒度中心値が 30 μm の分布はメーカーより提出していただけなかった。

封止樹脂には量産で用いられているビフェニル系の樹脂を用いた。樹脂に含まれるフィラ含有量は 81wt%であり、その形状は全て球状フィラである。

各樹脂のスパイラルフロー試験によって得られた値と高化式粘度測定にて得られた値を比較した結果を Fig. 4-51 に示す。スパイラルフロー値が高い樹脂では高化式粘度が低い傾向が有るように見える。しかしスパイラルフロー値と高化式粘度との相関を調査したところ、相関係数は 0.356 であり、相

関はそれほど高いものではなく、相関はない。

4.4.5.3 実験結果

まず、実験により得られた全てのデータをワイヤ変形に対して、スパイラルフロー値と高化式粘度別に各ワイヤ間隔で相関を調査した結果を Fig. 4-52 に示す。スパイラルフロー値はワイヤ間隔が最も狭い $90\mu\text{m}$ の時 0.648 と低い低い相関係数を示しているが、ワイヤ間隔が広がるにつれ増加してゆき、ワイヤ間隔が $600\mu\text{m}$ の時は 0.860 と高い相関を示している。それに対して高化式粘度はワイヤ間隔が最も狭い $90\mu\text{m}$ で最もワイヤ変形に対して 0.800 と高い相関係数を示しており、ワイヤ間隔が広がるにつれ低下し、ワイヤ間隔が $600\mu\text{m}$ の時は 0.642 と低い相関を示している。この様にワイヤ間隔とスパイラルフロー値及び高化式粘度の間には相関があることがわかった。また、ワイヤ間隔に対してスパイラルフロー値及び高化式粘度は逆相関がある事がわかった。

(a) ワイヤ流れに対する樹脂内フィラ粒度分布の影響

Table 4-10. に示した水準中、フィラ粒度分布を変更した水準について Table 4-11. に示す。さらにそれぞれの樹脂のフィラ粒度分布を Fig. 4-53 に示す。樹脂水準 9 はふるいによるフィラカットを行ってはいないが、配合により $74\mu\text{m}$ 以上のフィラをカットした配合となっている。

Fig. 4-54 に各樹脂に対するワイヤ変形の関係を示す。この結果から、 $30\mu\text{m}$ 以上の大きな粒径のフィラを混合させた樹脂 1, 2, 3, 4, 8, 9 のワイヤ変形率が低く、 $8\mu\text{m}$ 以下の樹脂で構成され、た樹脂 5, 6 のワイヤ変形率はそれぞれ 5.26, 4.59% と高いことがわかる。Fig. 4-51 に示したが、樹脂水準 5, 6 の高化式粘度がそれぞれ 133.2, $110.7\text{Pa}\cdot\text{s}$ と他の樹脂に対して高いことから、粘度の違いによる影響で有る可能性が高い。だが、樹脂 2, 4 の高化式粘度が 83.6, $63.0\text{Pa}\cdot\text{s}$ と樹脂樹脂 5, 6 の 1/2 以上の粘度を示しているにもかかわらずワイヤ変形率はそれぞれ 1.23, 1.13% と 1/4 程度であり、粘度だけで説明する事が出来ない。樹脂 5, 6, 7 はフィラ分布が単分散であるが、フィラ径が大きくなる程ワイヤ変形率が 5.26, 4.59, 2.73% と減少している。また、

0.5 μ mのフィラを配合した樹脂 1, 3 に対して 1.0 μ mのフィラを配合した樹脂 2, 4 の方がワイヤ変形を抑制している。

これらの結果から、ワイヤ変形には 0.5~1.0 μ mのフィラと 30 μ m以上の粒度分布のフィラを混合させることで抑制できることがわかった。また、30 μ m以上のフィラを配合することがワイヤ流れに対して有効であることがわかった。0.5 μ mや 1.0 μ mの微細フィラを配合する場合、1.0 μ mのフィラを配合した方がワイヤ変形を抑制することがわかった。

現在、量産で使用されている樹脂 9 に比べ、樹脂 1,2,3,4 のワイヤ流れが小さい。この樹脂 9 との違いは、樹脂 9 は全てのフィラ径にわたってフィラが配合されているのに対して樹脂 1,2,3,4 は 2 分散の配合となっている点である。フィラ配合が 2 分散となっている樹脂 1,2,3,4 と単分散となっている樹脂 5,6,7,8 を比較すると 2 分散の樹脂の方がワイヤ流れが小さい。この結果から、樹脂フィラの配合は 2 分散の方がよいことがわかった。

また、特にワイヤ流れが大きくなっている樹脂 5,6 はフィラ分布が単分散であり、フィラの分布の中心径が他の樹脂に比べ小さい。樹脂 7,8 も単分散のフィラ分布をしているがそのフィラ径の中心径は樹脂 5,6 に比べ大きくワイヤ流れは樹脂 5,6 よりも小さいことから、フィラ径の中心径が大きいとワイヤ流れを抑制することがわかった。

Fig. 4-54 にワイヤ変形に対する各樹脂とワイヤ間隔との関係を示している。ワイヤ間隔に関係なく上記傾向が有ることがわかる。よって上記結果はワイヤ間隔に影響なく得られる結果であることがわかった。

(b) ワイヤ流れに対する樹脂内フィラの配合による粒度上限の影響

Table 4-10. に示した水準のなかで、フィラ粒度上限を変更した水準について Table 4-12. に示す。さらにそれぞれの樹脂のフィラ粒度分布を Fig. 4-57 に示す。樹脂水準 9 の粒度分布は Fig.4-53 で示した。

Fig.4-58 に樹脂のフィラ上限に対するスパイラルフロー値と高化式粘度との関係を示す。粒度分布を最密充填状態を考慮して配合された為か、スパイラルフロー値及び高化式粘度はほぼ同じ値となっている。

Fig. 4-59 にフィラーカット粒径に対する全ワイヤ間隔の平均のワイヤ変

形率との関係について示す。4.4.4項で行った樹脂内フィラをふるいにかけて、カットした Fig. 4-45 の結果と同じようにフィラのカットポイントが粒径の小さな $24\mu\text{m}$ から $74\mu\text{m}$ へと大きくなるに従ってワイヤ変形が小さくなっている。ここでも、大きなサイズのフィラが配合されている方がワイヤ変形を抑制する結果となった。

(c) ワイヤ流れに対する樹脂の Rosin-Rammler 均等数の影響

Table 4-10. に示した水準のなかで、原材料フィラの配合割合を変更し、Rosin-Rammler 均等数の値を変更し、その影響について調査するための水準 13~15. 及び 9(Ref) について Table 4-13. に示す。その水準 13~15 の樹脂内フィラの粒度分布について Fig. 4-60 に示す。樹脂水準 9 の粒度分布については Fig. 4-53 で示した。Fig. 4-61 に樹脂 10, 11, 12 の Rosin-Rammler 線図を示す。この樹脂 10, 11, 12 の Rosin-Rammler 均等数の値とスパイラルフロー値及び高化式粘度との関係をプロットしたものを Fig. 4-62 に示す。Rosin-Rammler 均等数の値が大きくなるほどスパイラルフロー値は小さくなり、高化式粘度は逆に大きくなる関係にあることがわかる。

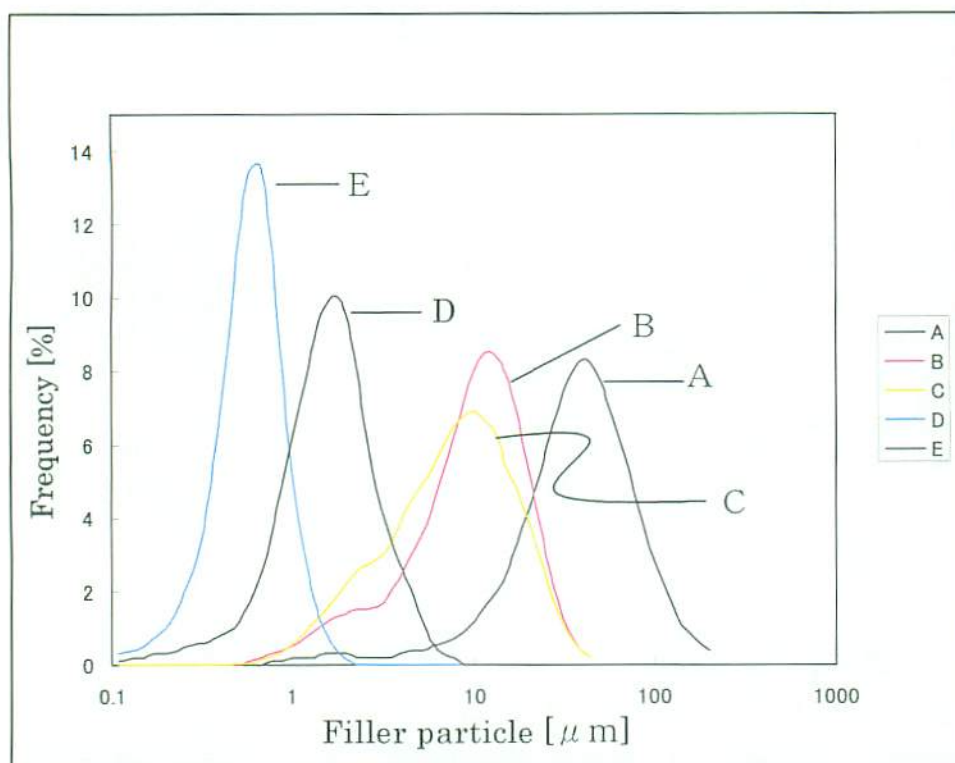
また、解析には、それに加え Rosin-Rammler 均等数の値の影響を調べるために全ての樹脂についてワイヤ変形と Rosin-Rammler 均等数の値との関係を調査した。全てのワイヤピッチにおけるワイヤ流れと Rosin-Rammler 均等数の値との関係を Fig. 4-63 に示す。また、Fig. 4-64 に各ワイヤ間隔における Rosin-Rammler の均等数とワイヤ変形率との関係を示す。

この結果から、ワイヤ変形に対して Rosin-Rammler の均等数が影響していることがわかった。一般にフィラの Rosin-Rammler 均等数は樹脂成形に影響するとされているが、樹脂流れによるワイヤ流れに対しても Rosin-Rammler の均等数を小さくすることでワイヤ流れを小さくすることができる。このことは新しい発見である。また、この結果はどのワイヤ間隔に置いても同じ傾向である。

この結果は樹脂のフィラ粒度分布を検討する上で実用上非常に有効な新しい知見である。

Table 4-10. Particle component and properties of resin.

Resin No.	Distribution center of filler particle						Rosin-Rammler distribution constant	Filler cut point	SF [cm]	Viscosity Pa·s
	0.5	1	5	8	30	40				
1	●				●		0.956	none	98.0	9.5
2		●			●		0.818		108.0	83.6
3	●					●	1.003		139.0	5.8
4		●				●	0.877		122.0	63.0
5			●				1.826		37.0	133.2
6				●			1.592		51.0	110.7
7					●		1.431		43.0	69.6
8						●	1.351		56.0	65.8
9	●	●	●	●		●	0.859		187.0	4.0
10	●	●	●	●			1.380	24	151.0	5.0
11	●	●	●	●			0.727	40	204.0	3.8
12	●	●	●	●		●	0.793	54	208.0	5.0
13	●	●	●	●		●	0.859	none	187.0	4.0
14	●	●	●	●		●	1.177		140.0	5.7
15	●	●	●	●		●	1.508		36.0	78.5



Mark	A	—	B	C	D	E
Distribution center of filler particle [μm]	40	30	8	5	1	0.5

Fig. 4-50 Particle distribution of compound filler particle.

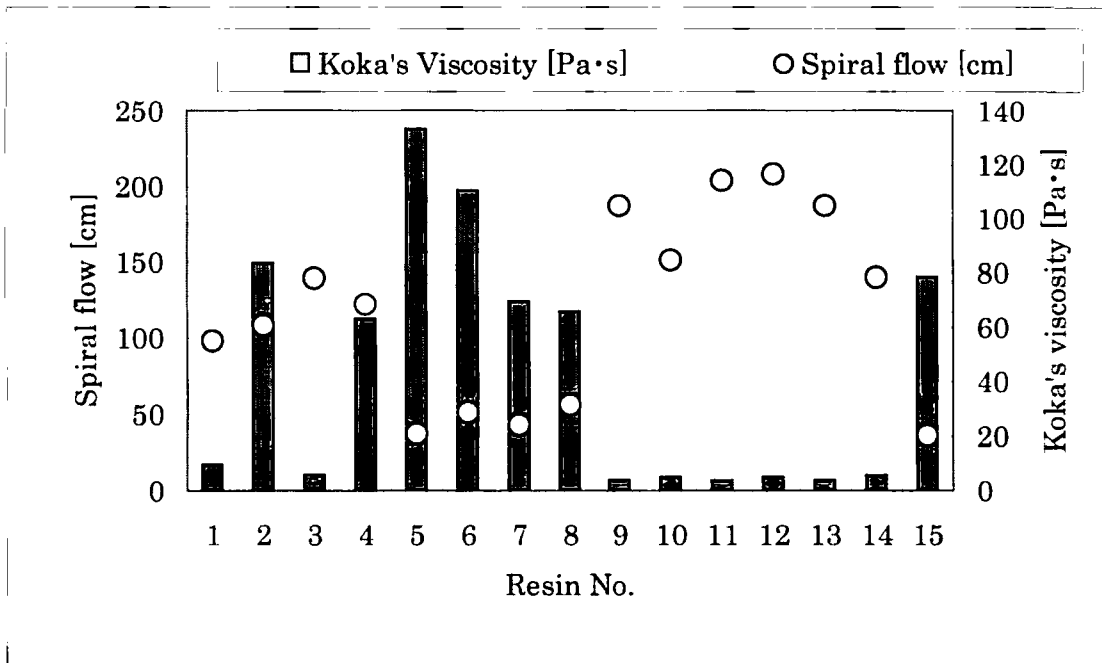
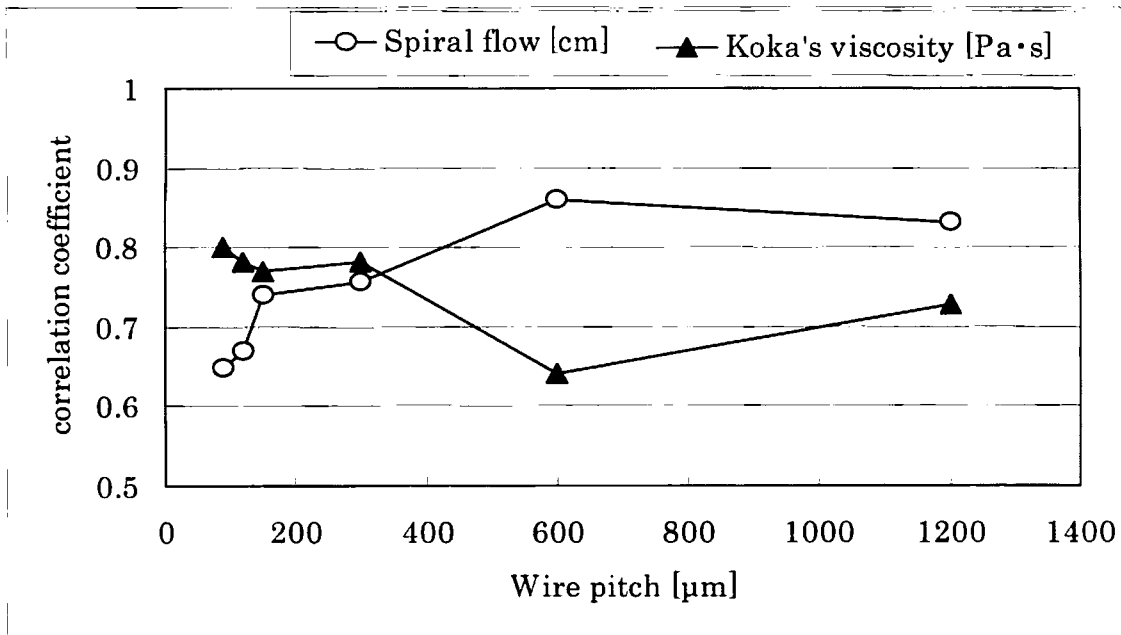


Fig. 4-51 Relation between spiral flow and Koka's viscosity for resin.



Wire pitch [μm]	90	120	150	300	600	1,200
Spiral flow [cm]	0.648	0.670	0.739	0.755	0.860	0.832
Koka's viscosity [Pa·s]	0.800	0.781	0.771	0.782	0.642	0.727

Fig. 4-52 Correlation coefficient between spiral flow and Koka's viscosity for wire pitch.

Table 4-11. Particle components and properties of resin.

Resin No.	Distribution center of compound filler particle						R-R	Filler cut point	SF [cm]	Viscosity [Pa·s]
	0.5	1	5	8	30	40				
1	●				●		0.956	none	98.0	9.5
2		●			●		0.818		108.0	83.6
3	●					●	1.003		139.0	5.8
4		●				●	0.877		122.0	63.0
5			●				1.826		37.0	133.2
6				●			1.592		51.0	110.7
7					●		1.431		43.0	69.6
8						●	1.351		56.0	65.8
9(Ref)	●	●	●	●		●	0.859		187.0	4.0

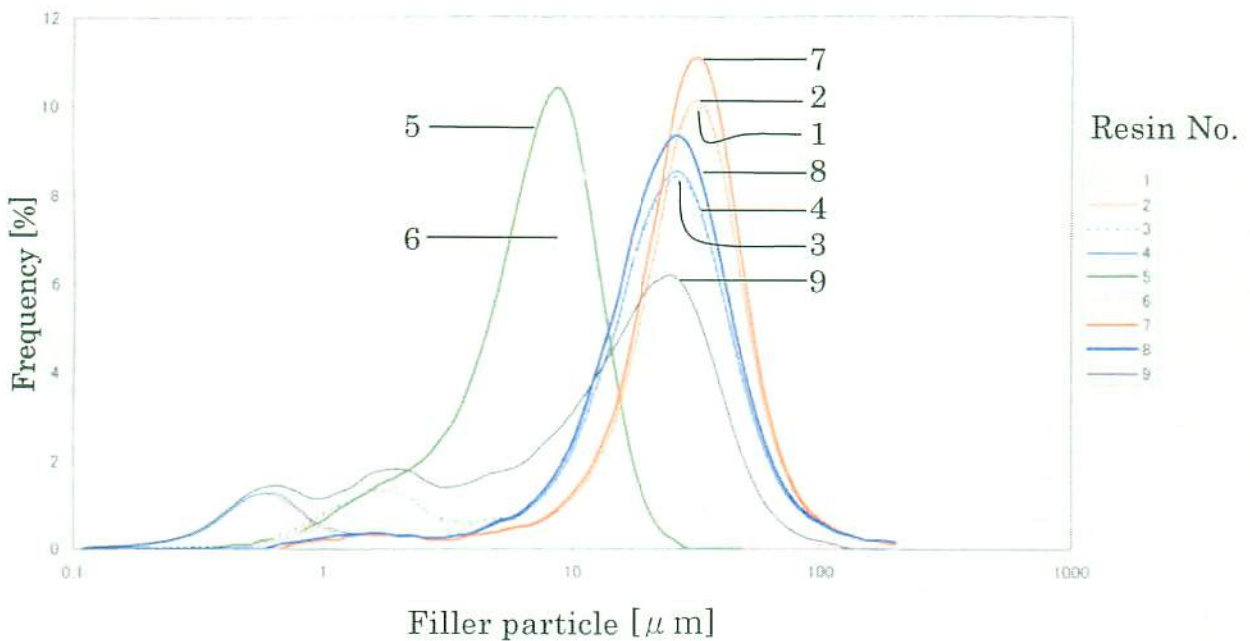


Fig. 4-53 Particle distribution of compound filler particle.

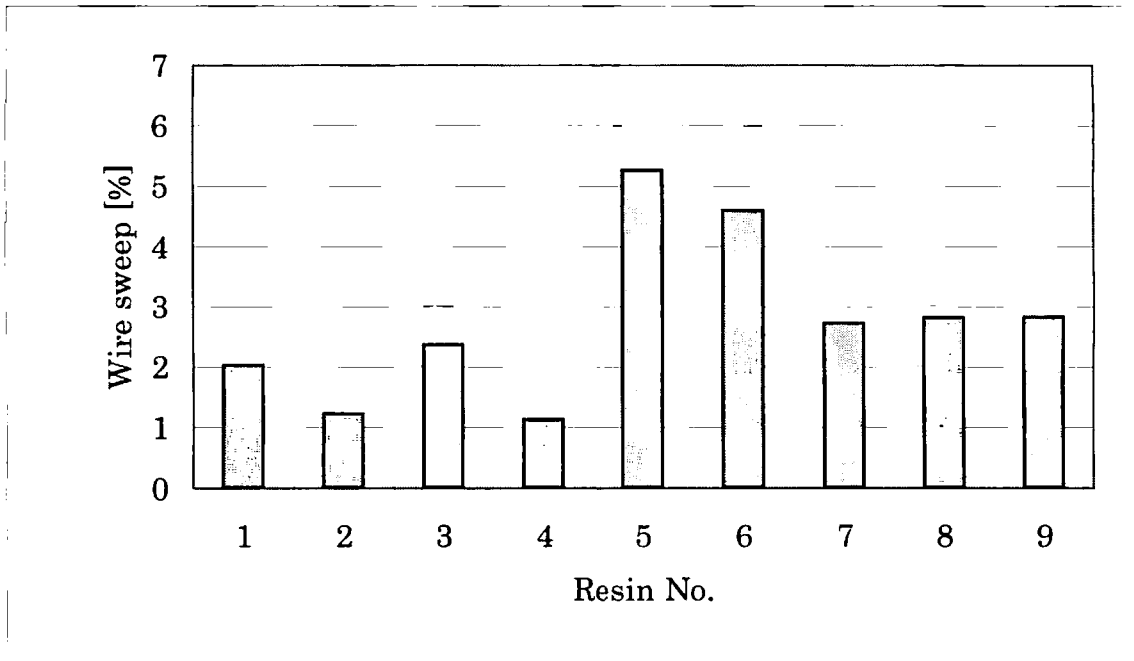


Fig. 4-54 Relation between wire sweep and resin of different filler particle compound.

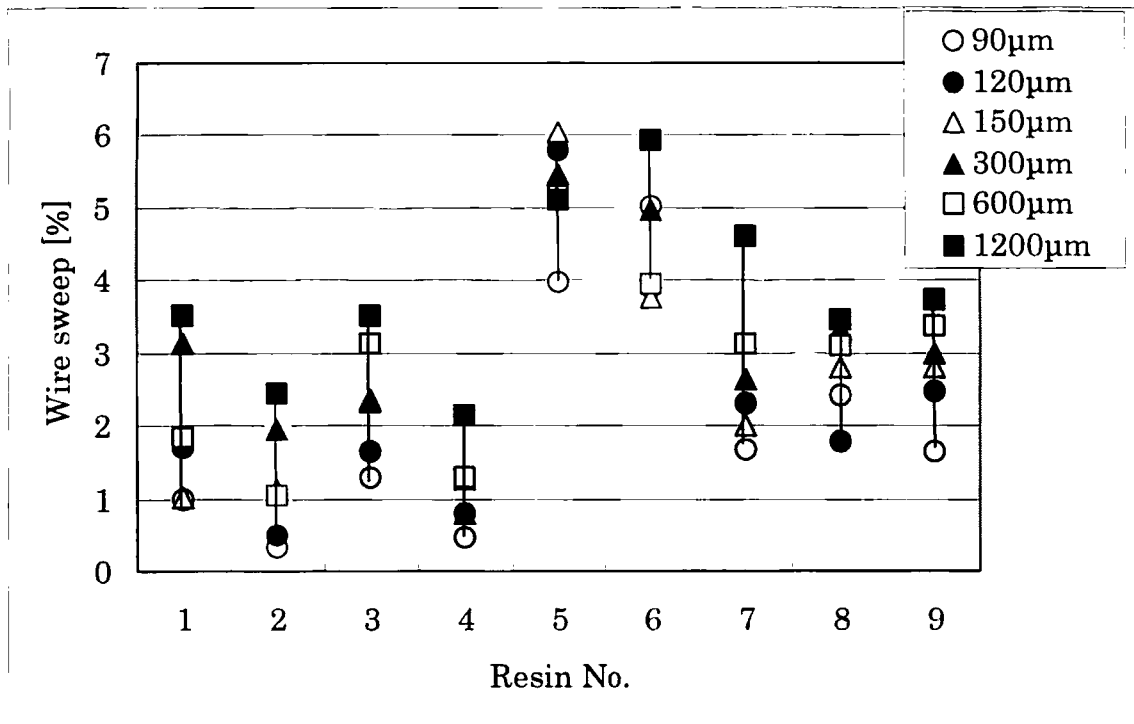


Fig. 4-55 Relation between wire sweep and wire pitch for resin of different filler particle compound.

Table 4-12. Particle components and properties of filler cut resin.

Resin No.	Distribution center of compound filler particle						R·R	Filler cut point	SF [cm]	Viscosity [Pa·s]
	0.5	1	5	8	30	40				
10	●	●	●	●			1.380	24	151.0	5.0
11	●	●	●	●			0.727	40	204.0	3.8
12	●	●	●	●		●	0.793	54	208.0	5.0
9(Ref)	●	●	●	●		●	0.859	74	187.0	4.0

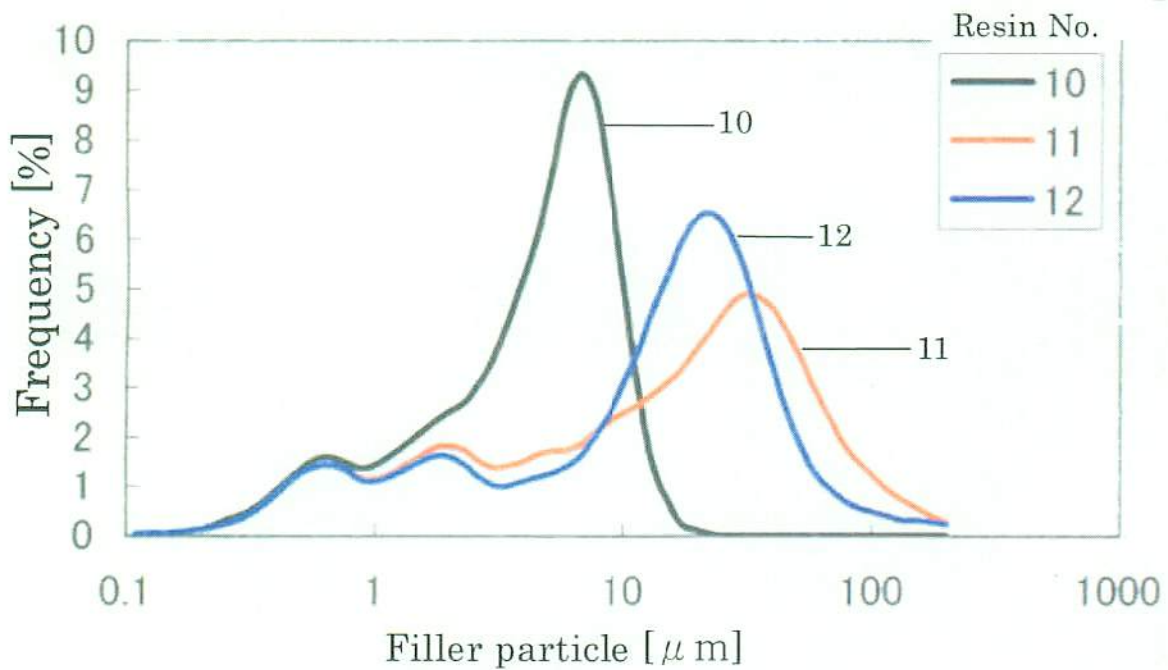


Fig. 4-56 Particle distribution of compound filler particle for filler cut resins.

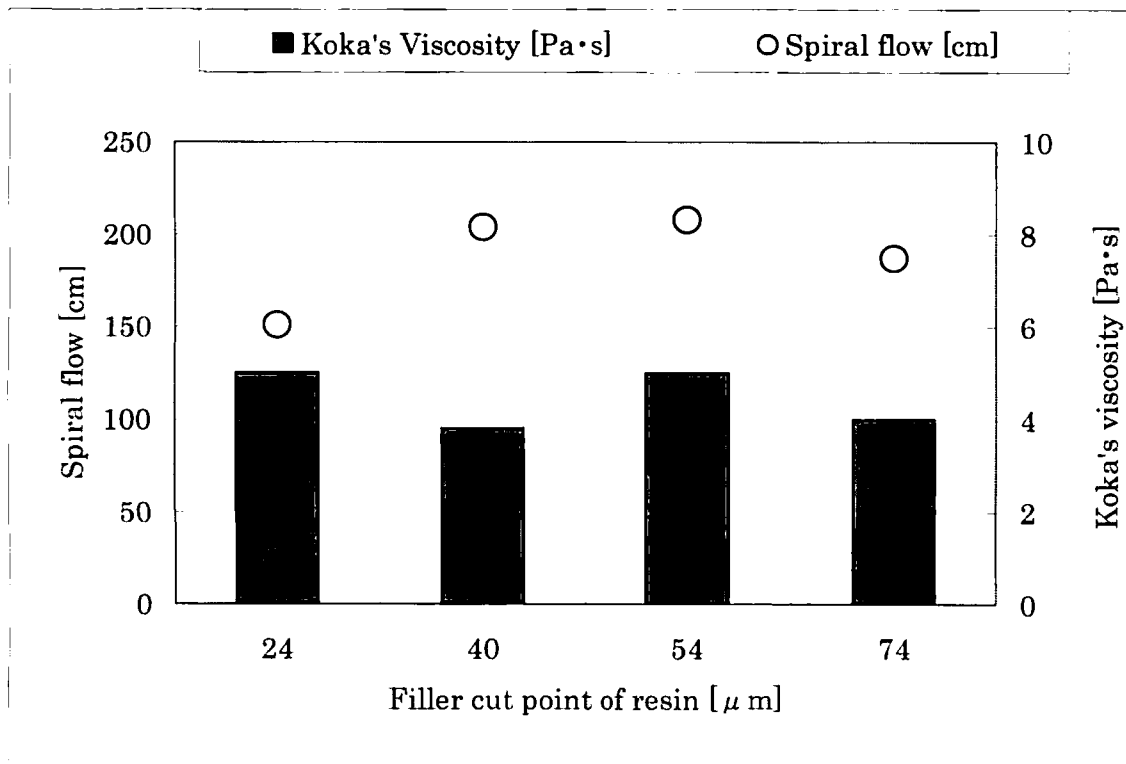


Fig. 4-57 Relation between spiral flow and Koka's viscosity for filler cut resin.

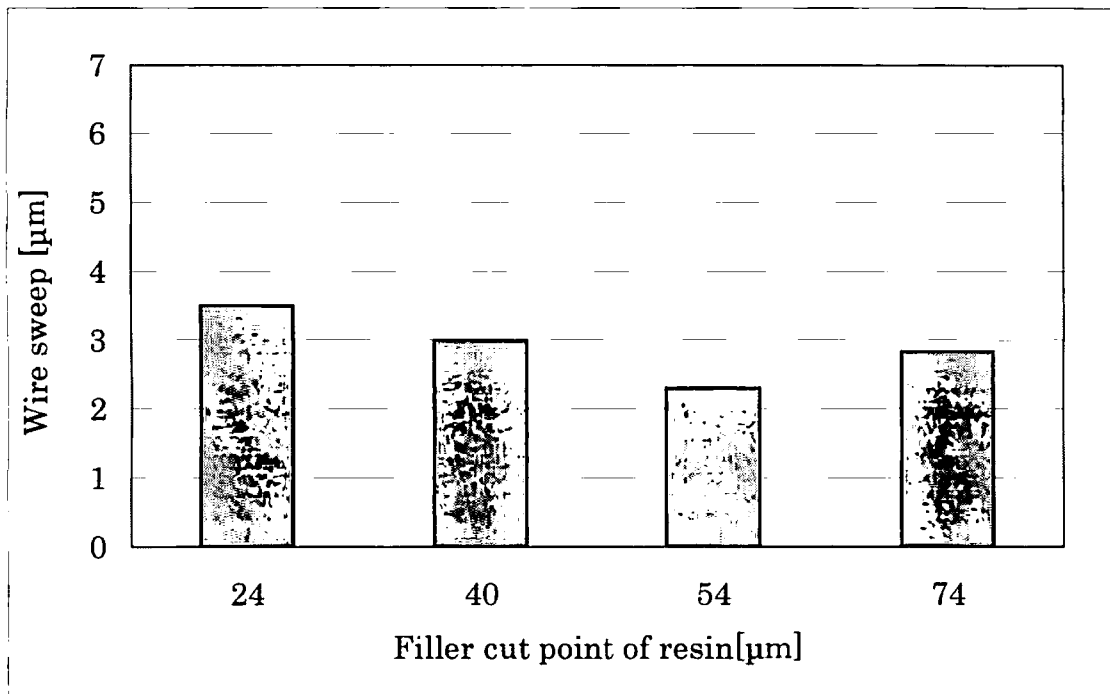


Fig. 4-58 Relation between wire sweep and filler cut resin.

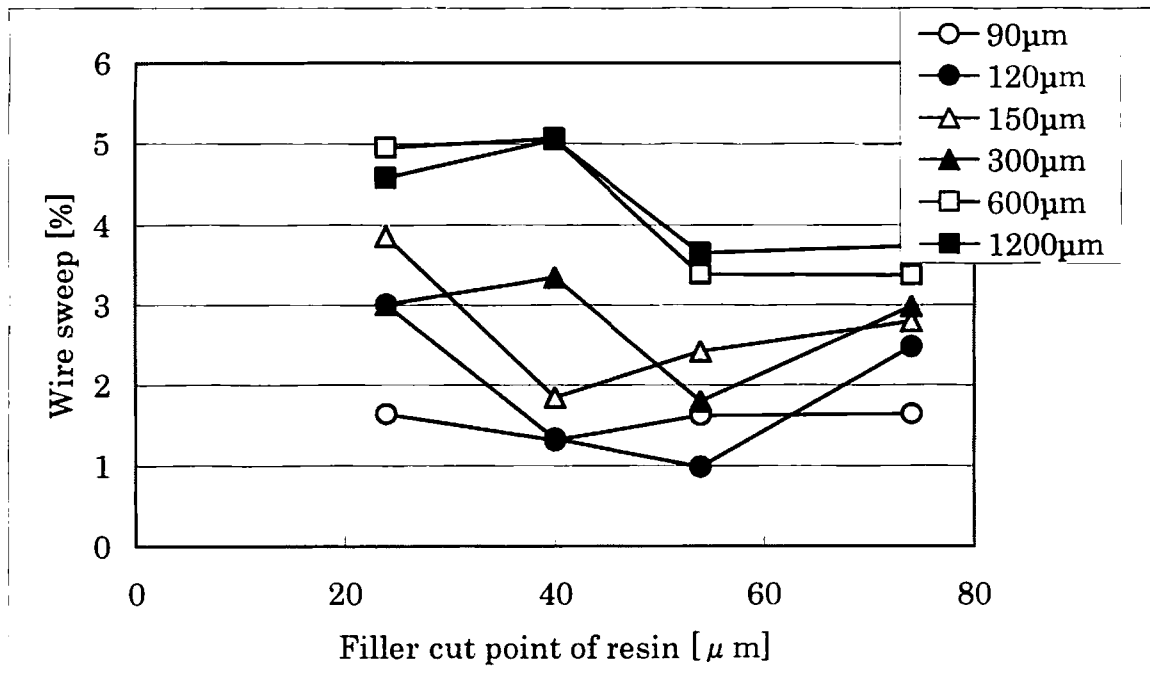


Fig. 4-59 Relation between wire sweep and filler cut resin for wire pitch.

Table 4-13. Particle components and properties of Rosin-Rammler distribution constant.

Resin No.	Distribution center of compound filler particle						R-R	Filler cut point	SF [cm]	Viscosity [Pa·s]
	0.5	1	5	8	30	40				
13	●	●	●	●		●	0.859	none	187.0	4.0
9(Ref)	●	●	●	●		●	0.859		187.0	4.0
14	●	●	●	●		●	1.177		140.0	5.7
15	●	●	●	●		●	1.508		36.0	78.5

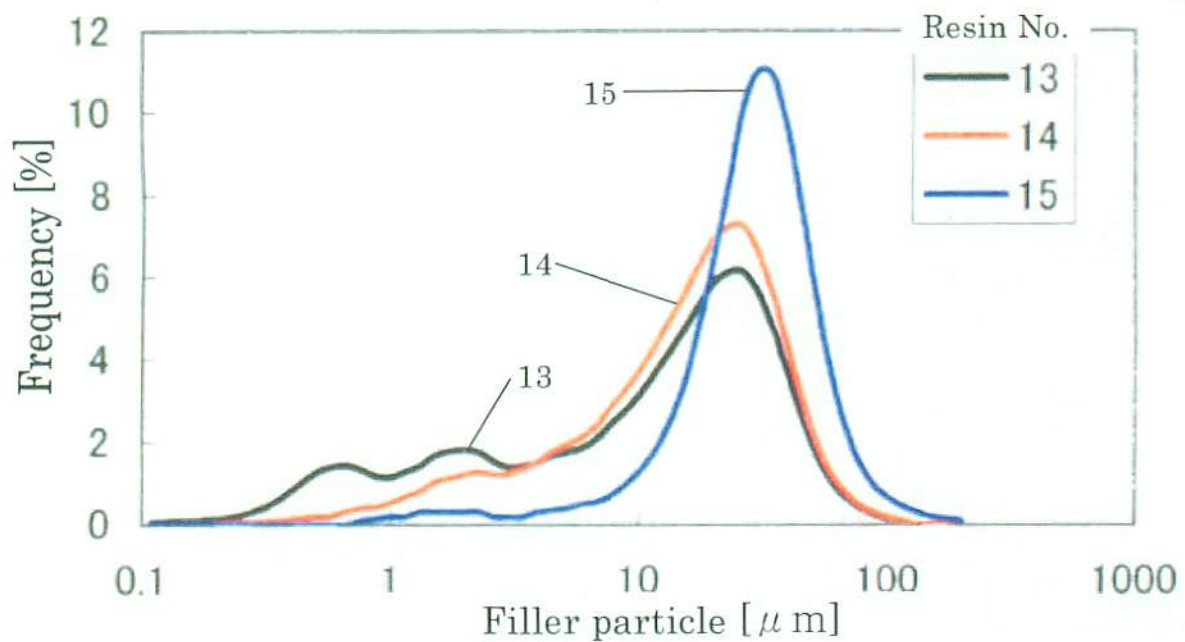


Fig. 4-60 Particle distribution of compound filler particle for resin of different Rosin-Rammler distribution constant.

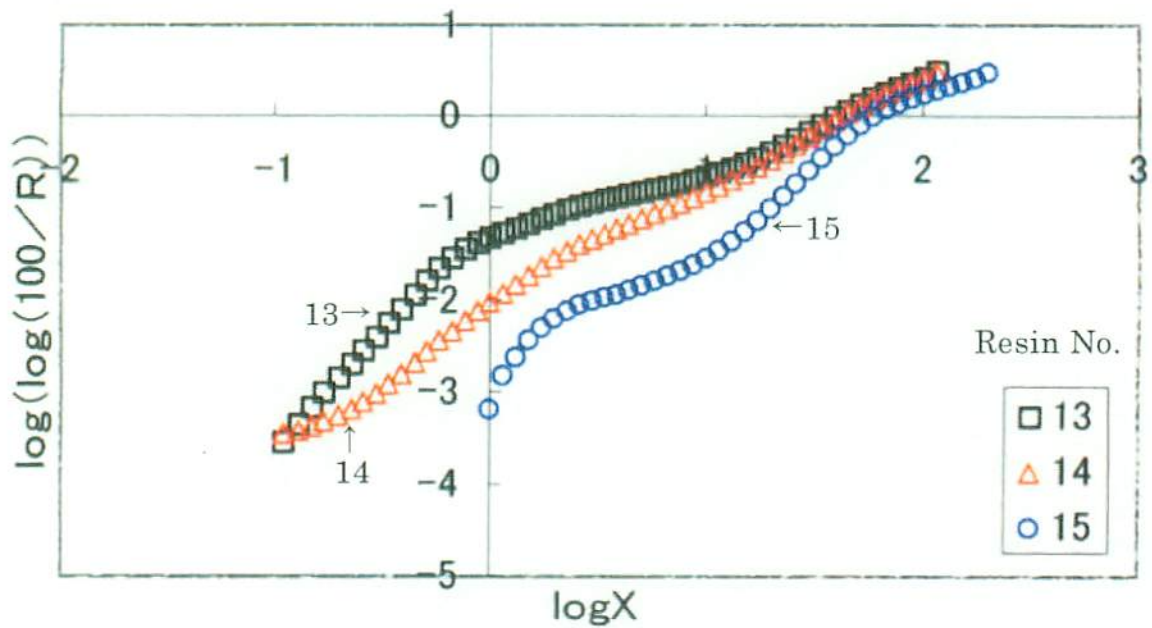


Fig. 4-61 Rosin-Rammler distribution constant of resin

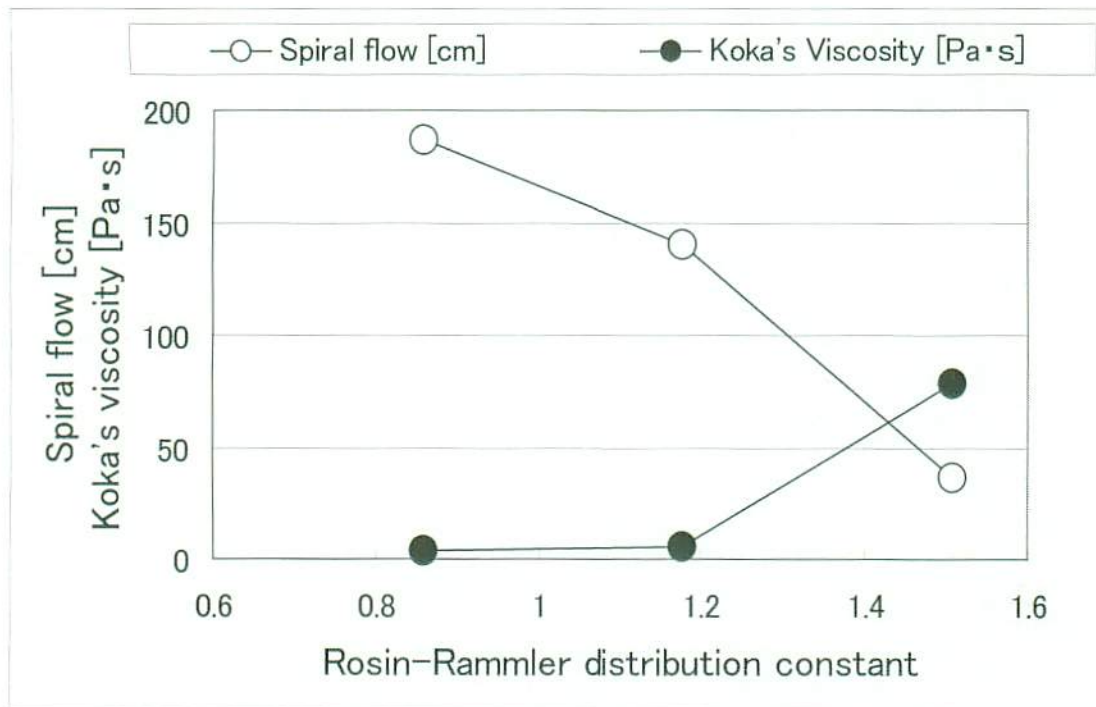


Fig. 4-62 Relation between spiral flow and Koka's viscosity for resin of different Rosin-Rammler distribution constant.

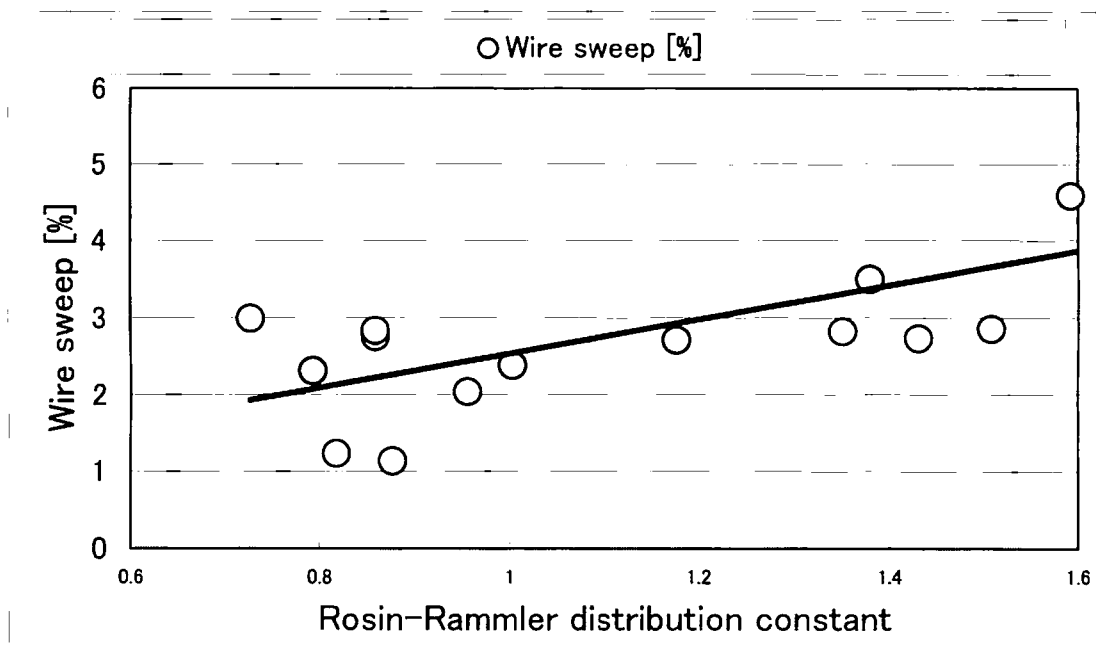


Fig. 4-63 Relation between wire sweep resin of different Rosin-Rammler distribution constant.

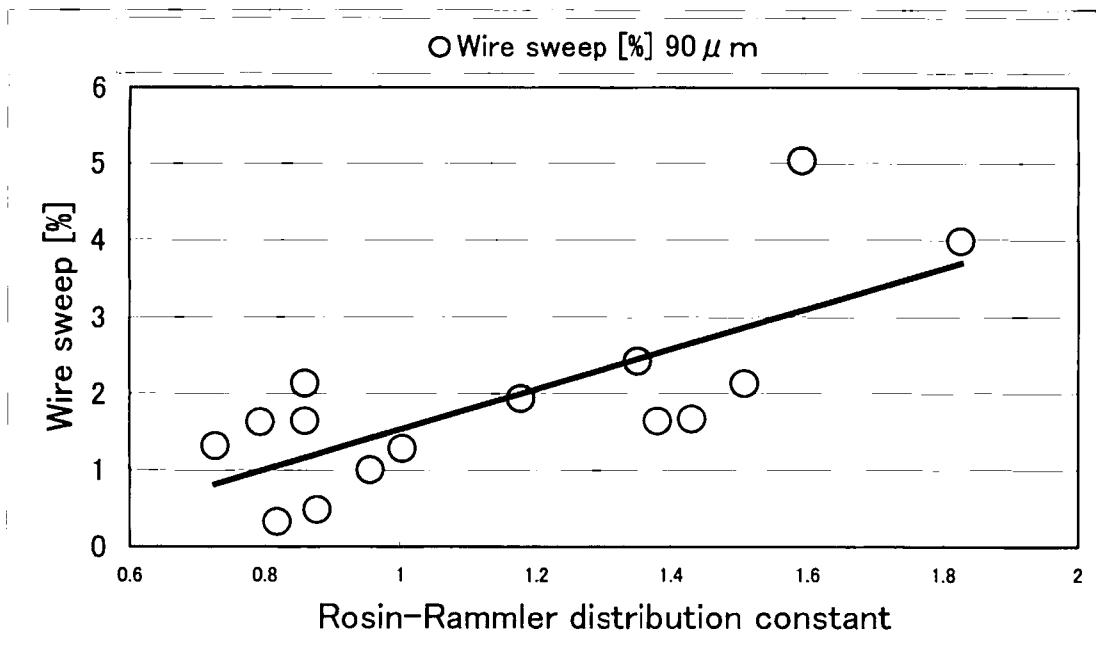


Fig. 4-64 Relation between wire sweep and resin of different Rosin-Rammler distribution constant for wire pitch.

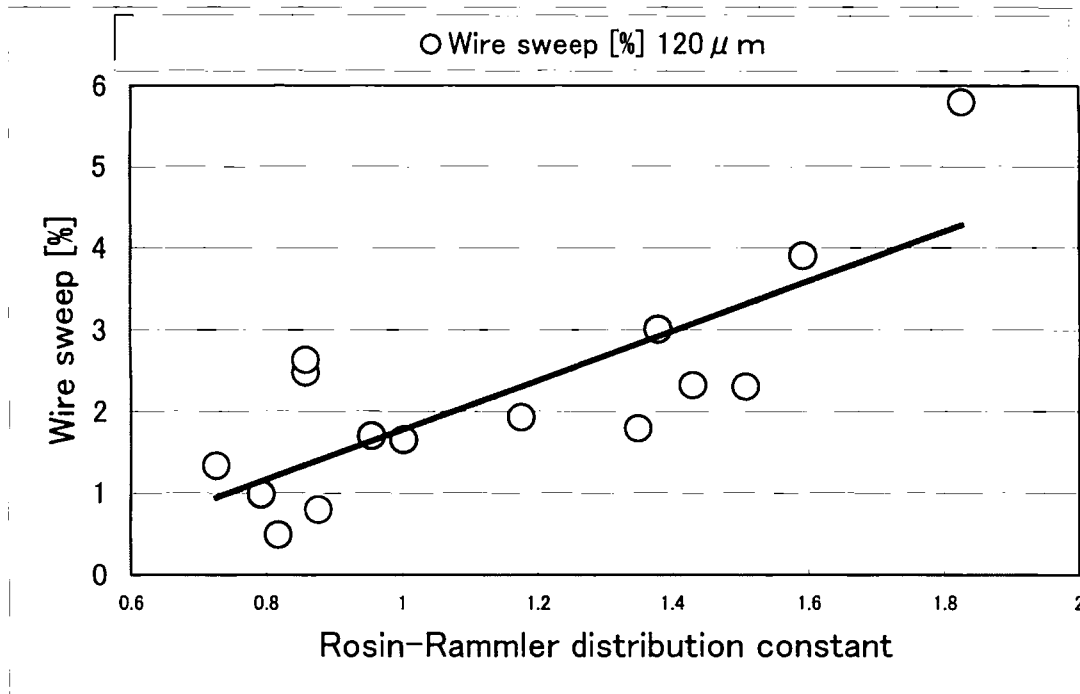


Fig. 4-64 Relation between wire sweep and resin of different Rosin-Rammler distribution constant for wire pitch.

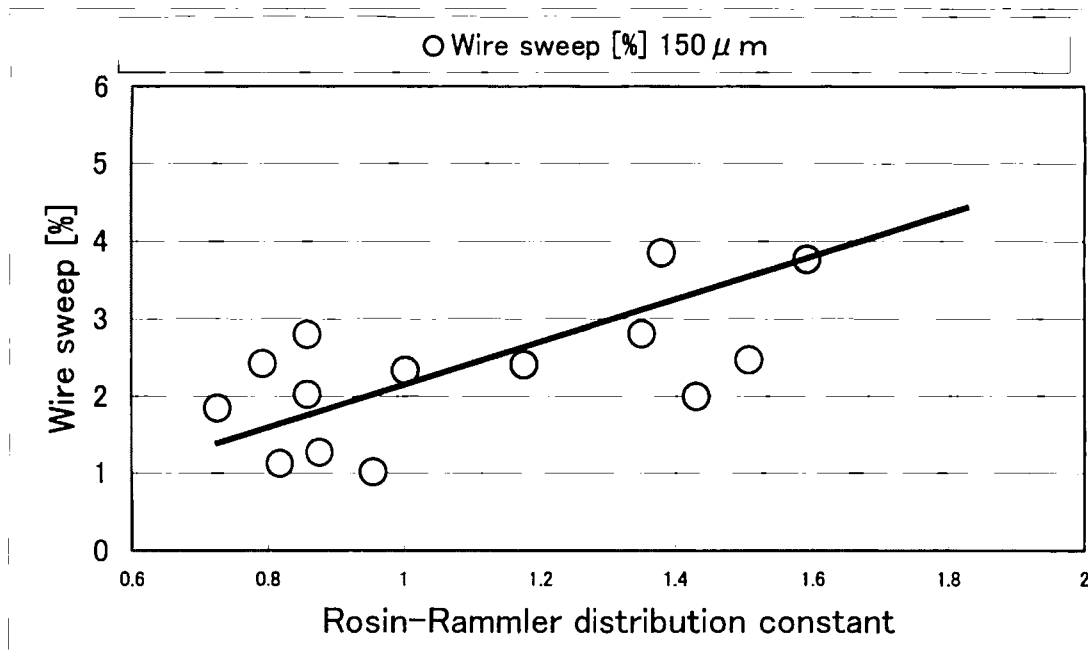


Fig. 4-64 Relation between wire sweep and resin of different Rosin-Rammler distribution constant for wire pitch.

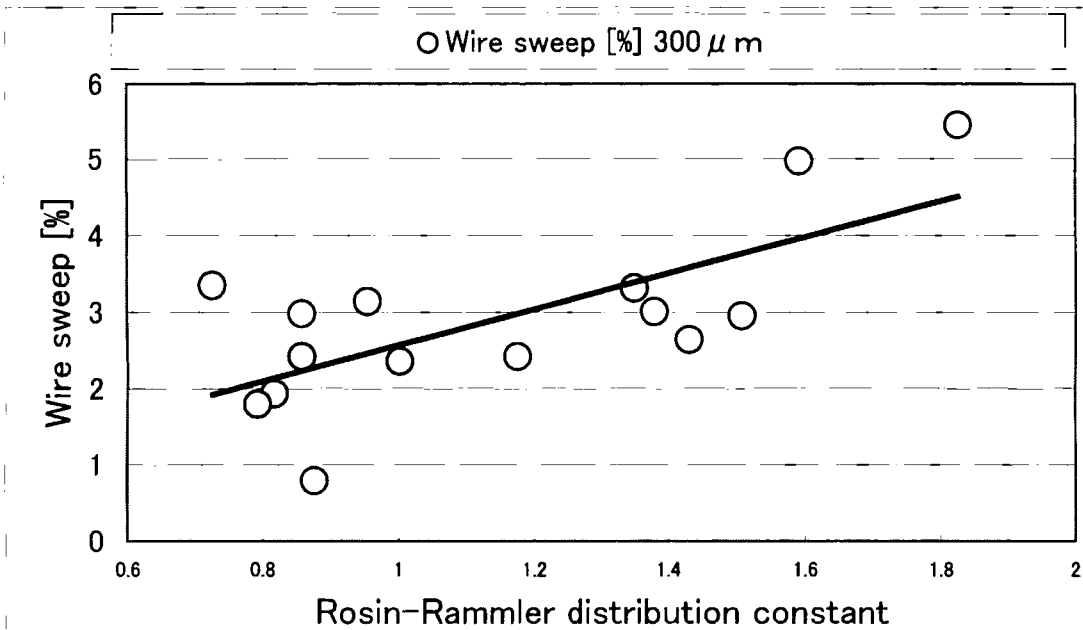


Fig. 4-64 Relation between wire sweep and resin of different Rosin-Rammler distribution constant for wire pitch.

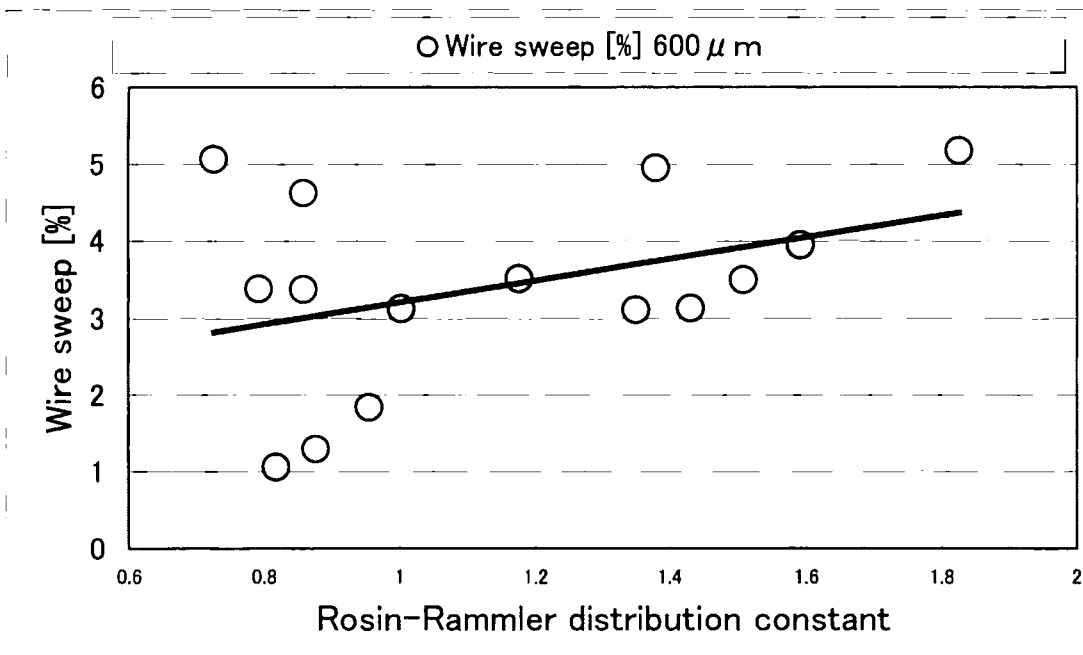


Fig. 4-64 Relation between wire sweep and resin of different Rosin-Rammler distribution constant for wire pitch.

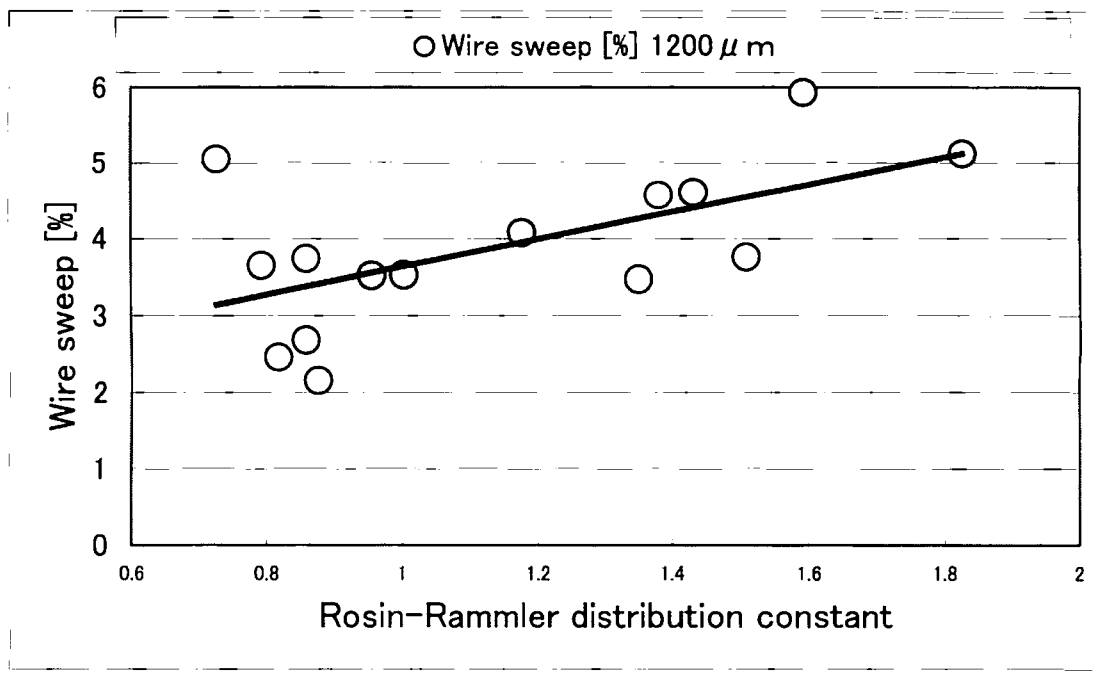


Fig. 4-64 Relation between wire sweep and resin of different Rosin-Rammler distribution constant for wire pitch.

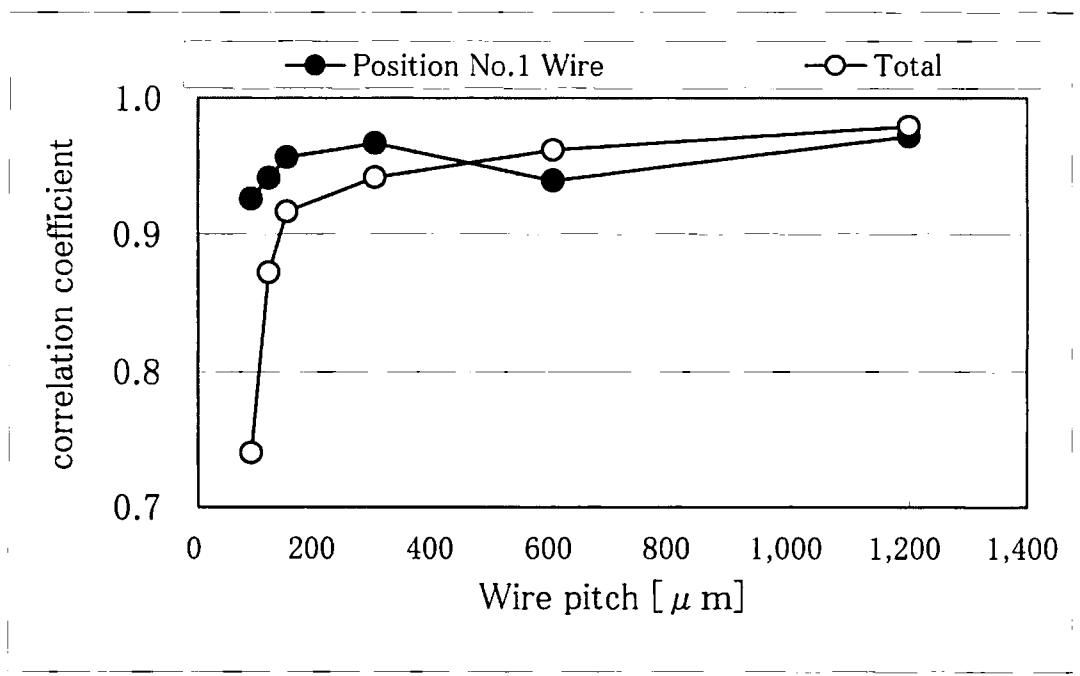


Fig. 4-64 Relation between wire sweep and resin of different Rosin-Rammler distribution constant for wire pitch.

4.5. まとめ

ワイヤ流れに対する支配要因の解析で下記の結論を得た。

(1) ワイヤ流れに対する樹脂の射出時間との関係で、封止樹脂の硬化特性から最適な樹脂注入時間の封止条件が存在することを明確にした。ワイヤ流れに対して樹脂注入時間を早くすると樹脂流動抵抗によりワイヤが変形すると考えられる。遅くすると樹脂の熱硬化による粘度上昇からワイヤが変形する。この間に最適な封止条件が存在する。

(2) ワイヤ流れに対する樹脂封止時の金型キャビティ内圧力とワイヤ変形との関係で、金型キャビティ内圧力を減圧するとワイヤ変形は増加する。また、加圧するとワイヤ変形は抑制される。これは金型キャビティ内を負圧にしたときに、樹脂内部に存在する揮発成分や気泡などが膨張し、見掛けの体積が増加する為と考えられる。その結果としてワイヤにかかる樹脂流速が早くなることによって流体抵抗が大きくなり、ワイヤの変形量が増加した為であると考えられる。逆に金型キャビティ内を加圧したときは、樹脂内部に存在する揮発成分や気泡などの発生が抑制され、見掛けの体積が減少したと考えられる。その結果としてワイヤにかかる樹脂流速が低下する事によって流体抵抗が小さくなりワイヤ変形が抑制されたと考えられる。

(3) ワイヤ流れに対するワイヤ配置との関係で、実際の量産パッケージにおいて、放射状にワイヤが配置されている製品のワイヤの変形分布を明確にした。従来、ワイヤ変形率が大きく問題とされているゲート口から 90 度のコーナ位置にあるワイヤは前後ワイヤ相互の変形量の差が大きくなることによる。ゲート口から 45 度前後の位置に存在するワイヤも 90 度の位置にあるワイヤと同じワイヤ変形量であるが、前後のワイヤ相互の変形量の差が小さく、ワイヤ相互が接触しないことで問題となっていないことが判明した。また、このワイヤ変形の分布は樹脂注入時間（流速）を変えても相似である事が判明した。

(4)ワイヤ流れに対する樹脂流れ方向とワイヤとのなす角度との関係では、ワイヤと樹脂流れ方向との対向する角度がワイヤ変形に大きく影響している。ワイヤに対向する樹脂流れの角度が90度に近づくほどワイヤ変形率が大きくなることが判明した。ワイヤの変形率が樹脂流れと対向する角度 θ との間に比例関係が有ることがわかった。

(5)ワイヤ流れに対するワイヤ間隔の関係は、ワイヤ間隔が狭いほどワイヤ変形は小さくなる。特にワイヤ間隔がワイヤ径の5倍程度を境とし、それより小さくなると急激にワイヤ変形率は小さくなる。それより大きくなるとワイヤ変形率の増加は緩やかになる。これはワイヤ近傍に存在する他のワイヤの影響によるものと考えられる。

(6)ワイヤ流れに対するワイヤ位置の関係は、最初に樹脂流れにさらされるワイヤの変形率が最も高く、後方になるに従ってワイヤ変形率が小さくなる。これは、ワイヤの周囲に発生する圧力分布によって得られると考えられる。また、ワイヤの後端近くでは再びワイヤの変形率は増加する。後端でのワイヤ変形の増加はワイヤ後方に発生する後流の影響によるものと考えられる。

(7)ワイヤ流れに対するワイヤ径の関係では、ワイヤ径を太くすることでワイヤ変形を抑制することが出来ることを明確にした。ワイヤ変形に対する樹脂注入時間の傾向は同じであることを確認した。

(8)ワイヤ流れに対するワイヤヤング率の関係は、ヤング率が高いほどワイヤ流れを抑制し、その関係はほぼ線形であることを明確にした。よってワイヤのヤング率を向上させることでワイヤ変形を抑制できるが、ワイヤのヤング率には限界があり、その効果も限界がある。

(9)ワイヤ流れに対するワイヤのループ形状の関係では、ワイヤの形状をノーマルループ形状から台形ループ形状へすることでワイヤ変形を抑制する

事ができることがわかった。ノーマルループ形状のワイヤでは屈曲点がパッド近傍の1箇所であるのに対し、台形ループ形状のワイヤでは屈曲点がパッド近傍に2箇所及びワイヤ中央付近に1箇所の合計3箇所に存在しており、この屈曲点で加工硬化が生じ、鋭角な曲率で曲がるためにワイヤの長さが短くなり、結果としてワイヤの変位量が少なくなったと考えられる。また、ワイヤ変形で問題となるのは隣り合ったワイヤ相互の変形率の差が大きくなり、接触する事による電氣的な短絡があるが、これを防ぐためには同一高さにあるワイヤの形状についてノーマルループ形状と台形ループ形状とではワイヤ変形率に差があるため混在させてはならない。そしてワイヤの高さを一定に保つことでワイヤ相互の変形率の差を小さくすることが、今後進む半導体素子片上のパッドピッチ縮小に有効である。

(10) ワイヤ流れに対するワイヤ高さの関係で、ワイヤの高さを低くすることでワイヤ変形を抑制することができることがわかった。ワイヤの高さを低くすることは、電極パッド側(1st側)のネック部分に屈曲のダメージを与える事につながるため、樹脂流れによりワイヤにかかる荷重でその点から破断する可能性もあり、その高さにもおのずと限界がある。

(11) 半導体パッケージ内部におけるフィラ粒度分布が、位置によって異なっていることが判明した。パッケージ中央が最もフィラ粒径が大きく、ワイヤ周辺、パッケージ表面付近の順にフィラの粒径が小さいことがわかった。パッケージ表面付近は壁面があり、境界層の関係で壁面付近では最も樹脂流速が遅い。ワイヤ周辺は壁面ほどではないが樹脂流れ場としては阻害箇所であることは間違いなく、樹脂が流れやすいパッケージ中央付近に大きなフィラが存在し、流れにくい箇所で小さなフィラが存在していることがわかった。また、ワイヤ周辺が最もフィラの密度が高く、パッケージ中央、パッケージ表面付近の順にフィラの密度が低くなっている。これがワイヤ変形にどの様に影響しているのかは明確ではないがパッケージ内部の樹脂流れ解析に対して新たな指針を与えた。

(12) ワイヤ流れに対して、ふるいで上限フィラをカットした樹脂との関係は、ワイヤ変形に有利なフィラカットポイントが有ることを示唆している。フィラの配合をコントロールすることでワイヤ流れを抑制することが出来る可能性を見いだした。

(13) ワイヤ流れに対する樹脂内フィラの粒度分布の関係では、ワイヤ変形には $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$ のフィラと $30\mu\text{m}$ 以上の粒度分布のフィラを混合させることで抑制できることがわかった。また、 $30\mu\text{m}$ 以上のフィラを配合することがワイヤ流れに対して有効であることがわかった。 $0.5\mu\text{m}$ や $1.0\mu\text{m}$ の微細フィラを配合する場合、 $1.0\mu\text{m}$ のフィラを配合した方がワイヤ変形を抑制することがわかった。このように、フィラの粒度分布を変更することでワイヤ変形を抑制することが出来ることがわかった。

(14) ワイヤ流れに対する樹脂内フィラの配合により粒度上限をカットした場合の関係は、大きなサイズのフィラが配合されている方がワイヤ変形を抑制する結果が得られた。

(15) ワイヤ流れに対する樹脂の Rosin-Rammler 均等数の関係は、ワイヤ変形に対して Rosin-Rammler の均等数が影響していることがわかった。一般にフィラの Rosin-Rammler 均等数は樹脂成形に影響するとされているが、樹脂流れによるワイヤ流れに対しても Rosin-Rammler の均等数を小さくする、つまり樹脂のフィラの粒度分布を広げることでワイヤ流れを抑制することが出来ることがわかった。この結果は樹脂のフィラ粒度分布を検討する上で実用上非常に有効な新しい知見である。

第5章 ワイヤ流れに対するシミュレーションによる検討

5.1 ワイヤ流れ解析のための一般的手順

ワイヤ流れを定量的に予測し、完全に満足するモデルは今日、未だ確立されていない。今まで述べてきたように樹脂封止中のワイヤ流れは多くの要因に依存している。そのため、実際の流れに対して計算結果をいかにして近づけていくか、その要因を探し出し加味する報告がなされているのが現状である。ワイヤ流れにおける一般的手順について記す⁽¹³⁾⁽¹⁵⁾。この手順は3つの手順に分かれている。

5.1.1 キャビティ内領域に対する解析

ワイヤ流れ解析の解析における第一ステップは、キャビティ内の流れを解析することである。まず、ワイヤの存在は無視しキャビティ内の温度と速度分布を得ることである。矩形形状のキャビティ内におけるニュートン流体の流動に対しての次の方程式は Fig. 5-1(a)に示される座標系に基づくキャビティ断面の速度分布を近似的に表現している。

$$u(x, y) = A \left(1 - \frac{x^2}{a^2} \right) \left(1 - \frac{y^2}{b^2} \right) \quad (5-1)$$

ここで、 A はこの断面の最大速度である。

リードフレームを有するキャビティ内の流動、あるいは非ニュートン流体については、(5-1)式は適用できない。従って数値解法又は経験則を用いなければならない。

5.1.2 局所流動解析

キャビティ内全体の流動解析からキャビティ内の温度と速度分布を得た後に、局所的な流れ場を解くことにより樹脂流れによるワイヤの抗力を計算する必要がある。半導体パッケージで用いられるワイヤの長さは直径に比べ非常に大きいため、抗力を計算するためにワイヤに沿った各点で、ワイヤ周りの二次元流動を解く。キャビティ内の流動解析の結果は、この上流条件として使用される。

ワイヤにかかる抗力は境界層の関係でキャビティの肉厚方向の位置に依存

している事が予想される。しかし、計算上では壁面の近傍を除き抗力が殆ど一定とし無視される。等温状態での均質な流体の流れによる抗力計算に用いられる幾つかの方法がある。

(a) 無限流動領域での仮定 (Lamb's model)

この方法ではキャビティ壁が無限にワイヤから離れていると仮定する。ニュートン流体に対して、この手法ではワイヤの抗力は次のようになる⁽⁴⁰⁾。

$$D = \frac{C_D \rho U^2 d}{2} \quad (5-2)$$

$$C_D = \frac{8\pi}{\text{Re}[2.002 \cdot \ln(\text{Re})]} \quad (5-3)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho U d}{\eta} \quad (5-4)$$

ここで、 D はワイヤの単位長さ当たりの抗力であり、 U , η , ρ はそれぞれ定常な上流の速度、粘度、密度を表している。この(5-2)から(5-4)式はレイノルズ数が1以下($\text{Re} \ll 1$)の流れにも対応している。

(b) 有限流動領域での仮定 (Takaisi's model)

この方法はキャビティ壁面の影響を考慮に入れた抗力の計算方法である。ここではワイヤにかかる抗力計算は次の式のようにになる。

$$D = 4\pi \eta b_0 \quad (5-5)$$

ここで、

$$b_0 = \frac{U}{\ln(b/a) - 0.9156 + 1.7243 (b/a)^2} \quad (5-6)$$

この経験則はレイノルズ数が1以下($\text{Re} \ll 1$)の流れの状態でのニュートン流に対応している。これは、Takaisiの研究により断面の縦横比 b/a が20から200の範囲の矩形キャビティにおける実験結果から得られた。

(c) 数値シミュレーション

非ニュートン流体については上記の方法のいずれも用いることは出来ない。この場合、流れについての数値解析をワイヤの抗力を計算するために用いる必要がある。特に、ワイヤまわりの二次元等温流れの計算を実施し、ワイヤの抗力を規定することとなる。これについてはその計算方法とともに実際の流れに近づけるための数多くの報告がある⁽¹⁰⁾⁽¹⁶⁾⁽⁵¹⁾。

5.2 実験データ

4.3.2 節で行ったデータを基にシミュレーションによる計算結果と比較を行った。比較に使用した試料には、正方形の外形形状である QFP208pin (パッケージ外形寸法 28×28mm, 厚さ 3.7mm, コーナーゲート) のパッケージを用いた。この製品で実際に量産している半導体素子を使用して実験を行った。この素子片のサイズは 6.68mm×6.68mm、厚さは 350μm である。最大ワイヤ長さは 4.8mm である。樹脂封止時の金型温度は 175℃にて行った。使用した封止樹脂は 4.2.2 項で使用した樹脂と同じビフェニル系の封止樹脂を用いた。樹脂に含まれるフィラの含有量は 80wt% であり、その形状は破碎フィラ:球状フィラが 8:2 で混合されている。樹脂の比重は 1.91 である。実験には、半導体の量産現場で実際に使用されている樹脂封止装置 (NEC 製 FAMS-SR) を用いた。

5.3 計算

(5-2)式から(5-6)式を用いて計算を行った。計算に使用したパラメータで a はワイヤ半径、b はキャビティ厚さ、d はワイヤ直径である。計算には有限要素法にて Lamb's model と Takaisi's model で行い、それぞれヤング率の異なる 4 種類のワイヤに対して計算を行ない、実験値と比較した。

また、射出時間 8 秒の時における GPG ワイヤ(ヤング率:9506.86kgf/mm²)での 1~52pin 位置の計算結果と実験によるワイヤ変形測定結果との比較を実施した。この比較にあたり、計算結果を実験値に近づける為に金型キャビティ内の樹脂粘度を 100, 150, 200, 300, 500poise にて計算を行い、比較した。

5.4 計算結果

その計算結果を Fig. 5-2 に示す。Lamb's model に対して Takaishi's model を使用して計算した結果がより実験結果に近い。Takaishi's model は、壁面の影響を考慮に入れたモデルであり、半導体のような狭い領域を流れる流体に対して有効であることが証明された。

この Takaisi's model を使用して Fig. 5-3 に示すようにゲート位置から反時計方向に 1~52pin 迄のワイヤ変形率を計算し、実験結果と比較したものを Fig. 5-4 示す。粘度が 200~300poise で計算結果と実験結果で比較的良い一致が得られている。

5.5 まとめ

実験とシミュレーションとの比較で下記の結論を得た。

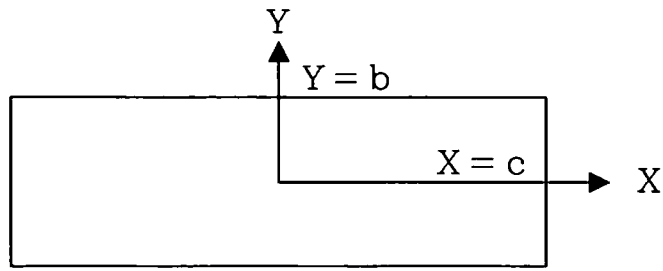
(1) ワイヤ流れの計算において、Lamb's model に対して Takaisi's model の有効性を確認した。Takaisi's model がより実験値に近い値となった。このことは、ワイヤにかかる抗力の計算においてキャビティ壁面の効果を考慮する必要があることを示している。

(2) しかしながら、実験結果との差が存在する。その最も大きな要因は樹脂流れをニュートン流体として取り扱っているからであると推論する。樹脂の要因についてさらに検討が必要である。

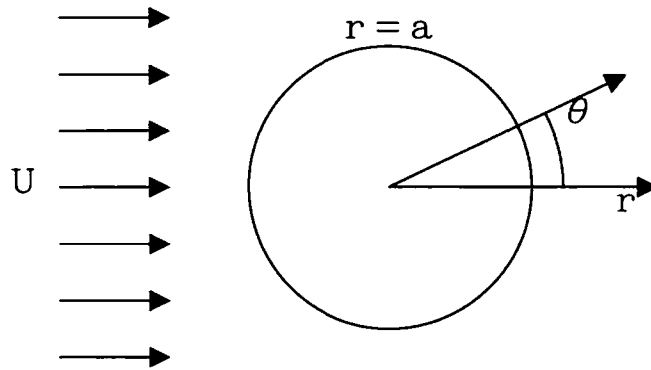
(3) 非ニュートン流体はせん断速度とともに粘度が変化する。標準的な樹脂材料はせん断速度の上昇とともに非線形で粘度が変化する。この影響を考えるとワイヤのせん断速度は U/a であるのに対し、キャビティ内のせん断速度は U/b である。通常 $b \ll a$ であり、キャビティ内のせん断速度はワイヤ表面のせん断速度より非常に小さい。通常キャビティ内のせん断速度は $1 \sim 10 \text{s}^{-1}$ であるのに対し、ワイヤ表面のせん断速度は $1 \sim 1/100 \text{s}^{-1}$ である。従ってワイヤ表面の最大せん断速度はニュートン流から非ニュートン流への移行せん断速度である約 100s^{-1} より高いためにワイヤ表面の粘度が一定でない。

このことは、本章で行ったシミュレーションに用いたニュートン流近似を用いたことはワイヤに対しては適切ではないことを示している。よって Lamb's model や Takaisi's model の抗力計算は厳密には適切ではない。正確な計算を行う場合には、ワイヤ周りの数値シミュレーションが必要であり、それがワイヤ流れのより正確な計算結果に結びつくと考える。

この結果によりさらに正確なシミュレーションへと展開が可能となった。



(a)



(b)

Fig. 5-1 (a) Coordinate in a rectangular cross-section cavity and (b) coordinate around a wire ⁽¹⁵⁾ .

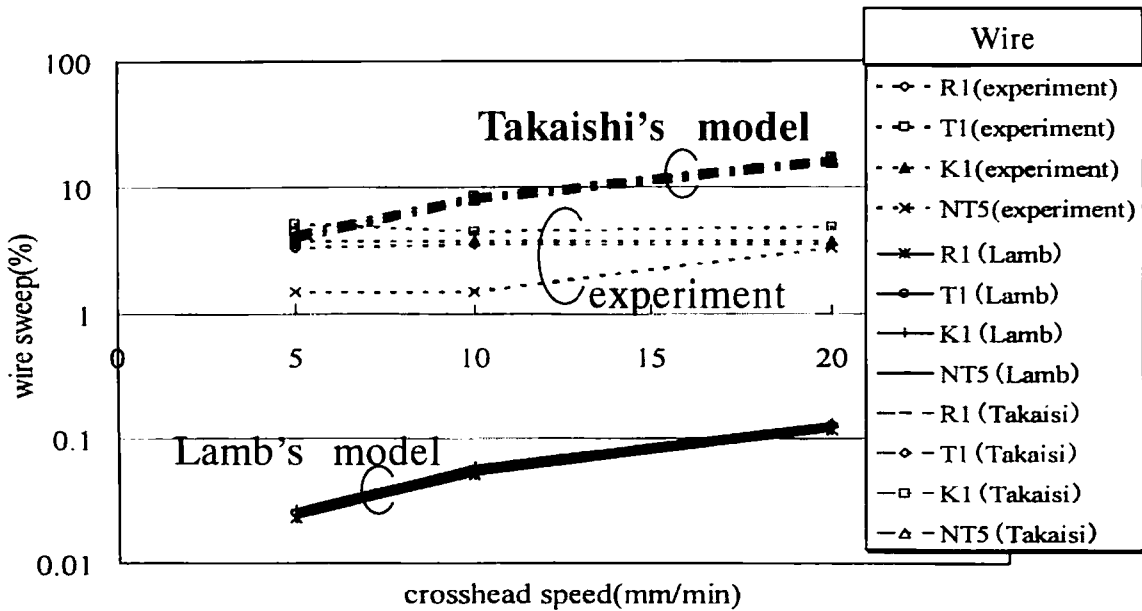


Fig. 5-2 The comparison of the FEM and the experiment results.

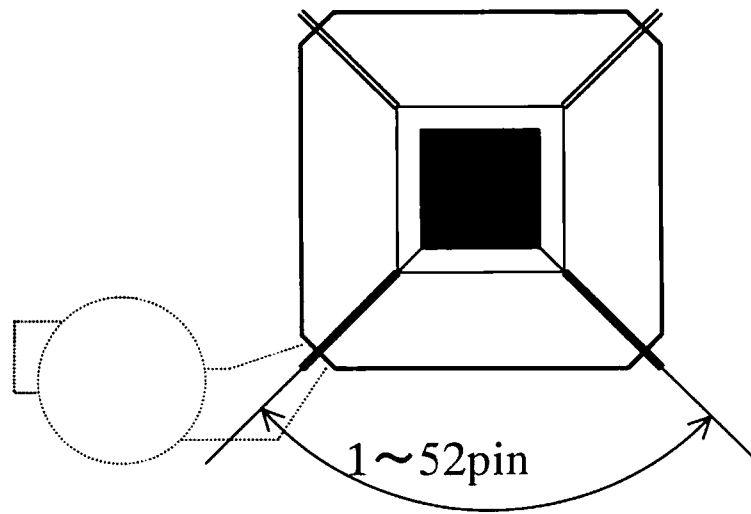


Fig. 5-3 Schematic drawing of wire number.

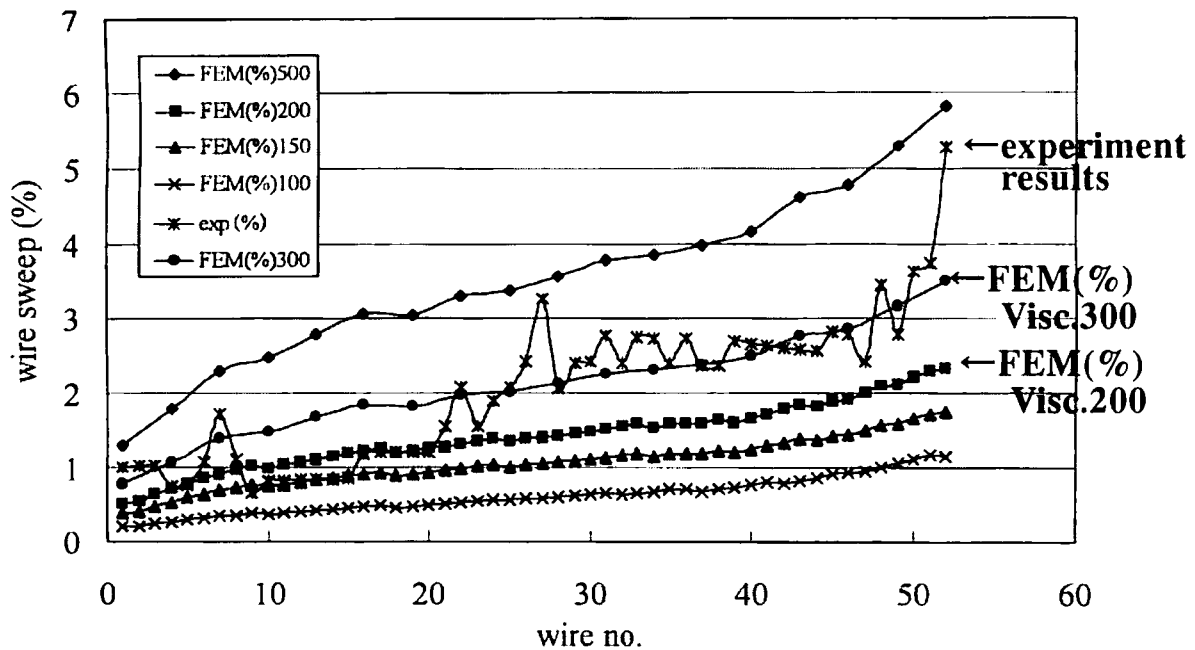


Fig. 5-4 The comparison of the experiment results and the simulation results.

第6章 総括

6. 総括

樹脂封止型半導体パッケージの樹脂成型時のワイヤ流れは、樹脂成形における最大かつ主要な電気特性上の不良原因である。その為に、過去から多くの報告がなされてきた。ところが、近年半導体パッケージの内部構造が複雑化し、さらにワイヤ流れに対する要求が一段と厳しくなっており、再び樹脂成型時のワイヤ流れが大きな問題となってきた。ワイヤボンディング技術の向上によりワイヤ間隔が $45\mu\text{m}$ ⁽⁵²⁾の報告が最近なされているが、その樹脂成形方法については報告されていない。ワイヤ間隔 $35\mu\text{m}$ ⁽⁵³⁾の報告では新しい樹脂を用いて樹脂封止を行ってはいるが、ワイヤ流れを 5%近く発生させており、ワイヤの高さを3段にすることでワイヤ相互の接触を回避している。この方法ではワイヤそのものにダメージを与えながら回避する方法であり、ワイヤ流れを抑制することができていない。このように、ワイヤ流れへのより厳しい要求に対して、過去の報告ではその構造の違いから適応できていないが、古くから知られた問題であるためか最近の構造に対応した報告は、本研究室での研究成果⁽²⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁷⁾⁽²⁹⁾⁽³⁹⁾⁽⁵¹⁾⁽⁵⁴⁾以外、研究報告はほとんど存在しない。その為に、現在の半導体開発において、新たなパッケージ設計のネックとなっている。このことは昨年アメリカで発表された Road map ではワイヤボンディングのパッドピッチ間隔が $35\mu\text{m}$ になるのが 2003 年であると予想したにもかかわらず、今年日本で発表された Road map では 2005 年へと遅れている。その最大の根拠が樹脂成形技術の確立の遅れとなっている。このことから樹脂成形に対するワイヤ流れに対する困難さが伺える。

本論文では、次世代半導体パッケージの樹脂成形において、ワイヤ流れを抑制するための手法を明らかにするため、ワイヤ流れに対する支配要因について、現在実際に生産されている半導体パッケージを用いて影響を調査し検討したものである。過去に報告されている要因については、パッケージ構造の変化により、その報告結果が現在のパッケージに適用できないものもあり、新たに調査した結果、新たな結論が得られた。また、過去に検討されていない要因について今回初めて調査を行った結果、大変重要な結果がいくつも得られている。これにより、次世代半導体の開発に対してワイヤ流れの問題を解決する事が出来ると確信する。

第1章「緒論」では半導体の製造方法と樹脂封止型半導体パッケージについて概説し、樹脂封止時のワイヤ流れ抑制に対する重要性を述べた。また、これまで報告されたワイヤ流れの研究について述べた。さらに、本論文の目的と意義を明らかにした。

第2章「ワイヤ流れに対する支配要因」では樹脂封止型半導体パッケージのワイヤ流れに対する支配要因について調査を行うため、樹脂流れによりワイヤにかかる荷重の式と参考文献などから抽出を行った。その結果、それら支配要因を封止樹脂、ワイヤ、パッケージ構造、封止条件の4項目に大分類しそれぞれの構成要因について細分化を行ない明確にした。

第3章「ワイヤ流れの観察手法」では、樹脂封止された半導体パッケージ内部のワイヤ形状を非破壊にて観察するため、その手法に対して調査・検討を行った。X線透視装置を用いて二次元の投影面で観察する手法でワイヤの水平方向のワイヤ変形状態を観察し、それをワイヤ変形量とした。X線CT装置を用いてパッケージ内部のワイヤ形状を3次元的に観察する手法を確立し有効である結果を得た。さらに、新たに開発した装置でワイヤ形状の3次元観察を行う手法を提案した。また、その有効性と限界についても調査した。

第4章「ワイヤ流れの支配要因の解析」では、第2章で抽出したワイヤ流れに対する支配要因についてそれぞれの影響を実験とともに調査した。

ワイヤ流れに対する封止条件の影響では樹脂の溶融特性と樹脂注入時間との間に最適な条件があることを示した。また、金型キャビティ内を加圧することでワイヤ流れを抑制する結果が得られた。

ワイヤ流れに対する配置との関係では、従来最も変形率が大きいとされていたゲート口から90度のコーナ位置に存在するワイヤでは、前後ワイヤ相互の変形量の差が大きくなっている事がわかった。ゲート口から45度の位置に存在するワイヤも90度の位置にあるワイヤと同じワイヤ変形量であるが、前後のワイヤ相互の変形量の差が小さく、ワイヤ相互が接触しないことで問題となっていないことが判明した。また、このワイヤ変形の分布は樹脂注入時間（流速）を変えても相似である結果を得た。ワイヤ流れに対する樹脂流れ方向とワイヤとのなす角度との関係では、ワイヤ流れに対する樹脂流

れ方向とワイヤとのなす角度との関係では、ワイヤに対向する樹脂流れの角度が90度に近づくほどワイヤ変形率が大きくなることが判明した。ワイヤの変形率が樹脂流れと対向する角度 θ との間に比例関係が有ることを示した。ワイヤ流れに対するワイヤ間隔の関係は、ワイヤ間隔が狭いほどワイヤ変形は小さくなり、特にワイヤ間隔がワイヤ径の5倍程度を境としそれより小さくなると急激にワイヤ変形率は小さくなる結果を得た。さらに間隔が5倍より大きくなるとワイヤ変形率の増加は緩やかになり、ワイヤ変形に対するワイヤ後流の影響を示した。また、ワイヤの後端近くでは再びワイヤの変形率は増加する結果を得た。これは、ワイヤの周囲に発生する圧力分布によって得られると考えられ、後端でのワイヤ変形の増加はワイヤ後方に発生する後流の影響によるものと考えられることを示した。

ワイヤ流れに対するワイヤ径の関係では、ワイヤ径を太くすることでワイヤ変形を抑制することが出来ることを明確にした。ワイヤ流れに対するワイヤのヤング率との関係は、ヤング率が高いほどワイヤ流れを抑制し、その関係はほぼ線形であることを明確にした。ワイヤ流れに対するワイヤのループ形状の関係では、ワイヤの形状をノーマルループ形状から台形形状へすることでワイヤ変形を抑制する事ができることを示した。そして、ワイヤ変形の問題となるのは隣り合ったワイヤ相互の変形率の差が大きくなり、接触する事による電氣的な短絡があるが、これを防ぐためには同一高さにあるワイヤの形状についてノーマルループ形状と台形ループ形状とではワイヤ変形率に差があるため混在させてはならないことを示した。そしてワイヤの高さを一定に保つことでワイヤ相互の変形率の差を小さくすることが、今後進む半導体素子片上のパッドピッチ縮小に有効である事を示唆した。ワイヤ流れに対するワイヤ高さの関係で、ワイヤの高さを低くすることでワイヤ変形を抑制することができることを示した。

封止樹脂の半導体パッケージ内部におけるフィラ粒度分布が、位置によって異なっていることを示した。パッケージ中央が最もフィラ粒径が大きく、ワイヤ周辺、パッケージ表面付近の順にフィラの粒径が小さくなっている。また、ワイヤ周辺が最もフィラの密度が高く、パッケージ中央、パッケージ表面付近の順にフィラの密度が低くなっていることを示した。ふるいで上限

フィラをカットした樹脂で、ワイヤ変形に有利なフィラカットポイントがあり、フィラの配合をコントロールすることでワイヤ流れを抑制することが出来る可能性を示した。ワイヤ流れに対する樹脂内フィラの粒度分布の関係ではワイヤ流れに対してフィラの配合の影響を明らかにした。0.5~1.0 μm のフィラと30 μm 以上の粒度分布のフィラを混合させることでワイヤ変形を抑制できることを明確にした。また、30 μm 以上のフィラを配合することがワイヤ流れに対して有効であることを示した。0.5 μm と1.0 μm の微細フィラを配合する場合には、1.0 μm のフィラを配合した方がワイヤ変形を抑制することを示した。また、フィラをふるいでカットするのではなく、樹脂内フィラの配合により粒度上限をカットした場合の関係では、大きなサイズのフィラが配合されている方がワイヤ変形を抑制する結果が得られた。ワイヤ流れに対する樹脂の Rosin-Rammler 均等数の関係では、この均等数を小さくし、樹脂のフィラの粒度分布を広げることでワイヤ流れを抑制することが出来ることがわかった。

第5章ではワイヤ流れの計算において、Lamb's model に対して Takaisi's model の有効性を確認した。Takaisi's model がより実験値に近い値となり、抗力の計算においてキャビティ壁面の効果を考慮する必要があることを示した。

以上の結果からワイヤ変形を抑制するには、それぞれのパッケージに応じた多くの要因に対する影響を相互に用いて最適な組み合わせを得ることでワイヤ流れをコントロールする事が実用上での本研究結果の意義がある。

キャビティ内を流れる樹脂はフィラなどの個体、エポキシなどの液体、揮発成分などの気体の3層流体である。この様な流体の解析は流体力学の最先端の知見を持ってしても必ずしも解決出来ていない。しかし、工学的意義として実用上、過去から問題となっているワイヤ流れを解決する事が出来る新たな知見を今回得ることが出来たことは実用上非常に意義がある。

以上のように本論文により樹脂封止型半導体パッケージのワイヤ流れに対する支配要因を明確にし抑制することで、35 μm パッドピッチなど実装分野での新技術を次世代パッケージへ展開することが可能となったと確信する。

参考文献

- (1) L. T. Nguyen: Polym. Eng. Sci., 28, (1988), 926-943
- (2) 吉原忠史, 幸幹雄, 大野恭秀: 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会講演論文集, C-6, (1996),
- (3) L. T. Nguyen, F. J. Lim: 40th ECTC, (1990), 777-785
- (4) L. T. Nguyen, C. G. Quentin, and W. W. Lee: Electronic Components and Technology Conference, (1999), 177-184
- (5) 小池昌弘, 佐々木学, 小野俊一: エレクトロニクス実装学会第15回講演大会論文集, (2001), 157-158
- (6) R. K. Reusch,: 6th Ann. IEPS, (1986), 25-34
- (7) A. A. O. Tay, K. S. Yeo, J. H. Wu: IEEE, PART-B, Vol. 18, No. 1. (1995), 201-209
- (8) 吉原忠史, 幸幹雄, 林田武史, 大野恭秀: 電子情報通信学会論文誌 C-II, Vol. J81-C-II, No. 4, (1998), 413-120
- (9) 吉原忠史, 林田武史, 大野恭秀: 電子情報通信学会総合大会講演論文集, C-6-12, (1997), 33
- (10) J. H. Wu, A. A. O. Tay, K. S. Yeo, T. B. Lim: IEEE, Proceedings, Electronic Components and Technology Conference, (1996), 1047-1055
- (11) L. T. Nguyen, A. Danker, N. Santhiran, C. Shervin,: ASME WAM, Anaheim, CA, (1992), 27-38
- (12) H. Q. Yang, S. A. Bayyuk and L. T. Nguyen: Electronic Components and Technology Conference, (1997), 158-167
- (13) S. Han, K. K. Wang: ANTEC, (1993), 153-157
- (14) Sejin Han, K. K. Wang: ASME, MD-Vol. 49, (1994), 175-190
- (15) Sejin Han, K. K. Wang: Transactions of the ASME, (1995), 178-184

- (16) A. A. O. Tay, K. S. Yeo, J. H. Wu: IEEE, Proceedings, Electronic Components and Technology Conference, Vol. 45th (1995), 999-1004
- (17) 松田寛人, 大野恭秀, 東藤貢, 高橋清: 日本機械学会 第 11 回計算力学講演会講演論文集, No.98-2, (1998), 539-540
- (18) 市村茂樹, 木梨恵市: 日立化成テクニカルレポート No.15, (1990), 25-28
- (19) Sejin.Han, K. K. Wang: IEEE, Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part B, Vol. 18, No. 4, (1995), 744-750
- (20) 酒井忠基, 山本伸治, 白銀屋司, 小崎彰: 合成樹脂, Vol.31, No.8, (1985), 7-14
- (21) 佐伯準一: “LSI の樹脂封止,” 成型加工, 第 2 巻, 第 5 号, (1990), 392-397
- (22) 佐伯準一, 金田愛三, 篠田忠夫: 高分子論文集, Vol. 43, No. 12, (1986), 873-879
- (23) 佐伯準一, 金田愛三, 篠田忠夫: 高分子論文集, Vol. 45, No. 2, (1988), 97-103
- (24) 佐伯準一, 金田愛三: 高分子論文集, Vol. 45, No. 9, (1988), 691-697
- (25) 佐伯準一, 金田愛三: 日本機械学会論文集 B 編, 55 巻, 517 号, (1989), 2626-2632
- (26) 佐伯準一, 金田愛三: 日本機械学会論文集 B 編, 56 巻, 528 号, (1990), 2343-2350
- (27) 佐伯準一, 杉野和宏, 安原敏浩, 西邦彦, 金田愛三: 成型加工, 第 6 巻, 第 7 号, (1994), 450-457
- (28) Tadamoto Sakai: Advances in Polymer Technology, Vol. 12, No. 1, (1993), 61-71
- (29) 吉原忠史, 大野恭秀, 楠原明信, 藤田浩史, 前田将克: 電子情報通信学会論文誌 C-II, Vol. J82-C-II, No. 4, (1999), 7-12

- (30) L. T. Manzione : SPE Vol. 41st ANTEC, (1983), 77-79
- (31) 開本亮, 亀川正之, 前田憲一, 國嘉夫, 前田裕樹, 岸武人,
大西修平: マイクロビームアナリシス第 141 委員会, 第 101 回
研究会資料, 資料 No. 1188, (2000), 18-23
- (32) 深町哲明: エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 3, No. 1, (2000),
17-19
- (33) 石谷清幹, 西川栄一, 西村圭也, 長勝三: 日本機械学会論文集,
37 卷 304 号, (1971), 2319-2326
- (34) C. J. Apelt, G. S. West: J. Fluid Mech. Vol. 71, Part 1, (1975),
145-160
- (35) 森康夫, 土方邦夫, 延原隆良: 日本機械学会講演論文集,
No. 820-14, (1979), 40-45
- (36) P. W. Bearman: J. Fluid Mech. Vo. 28. Part 4, (1967), 625-641
- (37) 五十嵐保: 日本機械学会論文集 B 編, 46 卷 406 号, (1979),
1026-1036
- (38) 日本機械学会, “機械工学便覧,” A5 編, 第 7 版, (1996), 97-100
- (39) 荒木誠、野口邦広、大野恭秀: 電子情報通信学会論文誌、
C-II, Vol. J82-C-II, No. 4, (1999), 165-172
- (40) L. Nguyen, J. Jackson, C. H. Teo, S. Chillara, C.
Asanasavest, T. Burke, R. Walberg, R. Lo, P. Weiler, D. Ho, H.
Rauhut : 47th ETCT, (1997), 60-71
- (41) Lamb, h.: Cambridge Univ. press. 6th Edit, (1932), 617
- (42) 今井功: 科学, 28-3, (1958), 110
- (43) P. Rosin, E. Rammler, : J. Inst. Fuel, 7, (1933), 29-36
- (44) 松本一高: 公開特許公報(A)、昭 56-10947, (1981), 205-209
- (45) 伊香和夫、吉岡孝弘、三木和幸: 特許公報(B2), 昭 62-7211,
(1987), 73-78
- (46) 中川治: 公開特許公報(A)、昭 62-261161, (1987), 275-277
- (47) 森下俊彦、島田武夫、島田貞彦、宮辺武夫: 公開特許公報(A),
平 2-158637, (1990), 311-318

- (48) 平野泰広、秋庭真継、塩見浩：公開特許公報(A)、特開平 8-48846, (1996),
- (49) 小山徹、高崎寛和、天城滋夫：公開特許公報(A)、特開平 8-104796, (1996)
- (50) 松本一高：公開特許公報(A)、特開平 11-29624, (1999)
- (51) 熊本大学大学院自然科学研究科材料システム専攻 松田寛人
修士論文 1999 年
- (52) Mark K. Klossner, Jon Brunner, Michael Deley, Cuong Huynh: SEMI, Proceedings, Semicon Singapore 2001, 73-82
- (53) L. A. Lim, Y. M. Wong, Charles J. Vath, III, Eric Kuah, T. P. Low, K. M. Tan: SEMI, Proceedings, Semicon Singapore 2001, 83-90
- (54) 熊本大学大学院自然科学研究科材料システム専攻 有田宏志
修士論文 2000 年

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多大なるご指導ご鞭撻を賜りました、熊本大学工学部 大野恭秀教授に心から感謝致します。また、数多くのご指導及び理解を戴いた熊本大学工学部 河村能人助教授ならびに清水 勲技官にお礼申し上げます。

研究中に有意義な助言やご指導を戴き、本論文の作成においても詳細にご検討下さり審査の労をとって戴きました熊本大学工学部 千葉・教授、大庭英樹教授ならびに河原正泰教授に深く感謝致します。

本研究の実験遂行にあたり、数多くの助言並びにご協力を戴いた島津製作所 開本亮博士並びに大西修平氏にお礼申し上げます。試料をご提供戴き、数多くの有益なご助言を戴きました住友ベークライト電子デバイス研究所 藤田浩史氏に感謝致します。

実験及び解析にご協力いただいた熊本大学学生 松田寛人氏、有田宏志氏、宮本琢也氏ならびに大見謝和人氏に心からお礼申し上げます。

社会人として平日は業務を遂行し、帰宅後及び休日は学生としての研究は数多くの苦勞を伴いましたが、それにも勝る様々なものを得ることが出来ました。なかなか進まない研究に根気よく指導して戴きました大野教授には、どの様に感謝の気持ちを述べてよいのか判らないほど感謝いたしております。この研究を通じて得たものは数多く、特に社会人となり企業内に入ってしまうと情報が制限され、井の中の蛙になっていたことを痛感いたしました。諸論でも述べさせていただきましたが、世界に対する日本としての優位性を保つ為には産業界と大学との連携をより強化し発展させることが必要で、ものづくりにおける技術レベルを作り出す為には社会人による大学での研究が必要不可欠である事を確信いたしました。

最後に、有益な意見やご協力を戴いた熊本大学工学部諸先生方ならびに在学中にご協力を戴いた大野研究室の学生及び卒業生の皆様に感謝致します。

ありがとうございました。