

芝 浦 工 業 大 学

博 士 学 位 論 文

レーザ光を用いた集積回路接合材料，  
ディスプレイ蛍光材料の流動制御  
に関する研究

平成 28 年 3 月

土 屋 均



## 概要

本論文は、デジタル機器の集積回路やディスプレイの製造工程において、レーザ光を用いた接合材料や蛍光体材料の流動制御を非接触で行う、研究に関するものである。

デジタル機器は、高度な情報ネットワークと連携した身近なヒューマンインターフェースとして、広く世の中に浸透している。機器には、大型の薄型テレビやタブレット、スマートフォンなどがあり、機能デバイスである集積回路基板やディスプレイが必ず搭載されている。この機能デバイスの製造工程や製造装置の開発は、ますます重要になってきている。

機能デバイスの製造工程のひとつに、ペースト材料を供給し、熱処理する工程がある。集積回路基板では、はんだペーストを使用した接合工程、ディスプレイパネルでは、蛍光体ペーストを使用した蛍光体層形成工程である。これらは、ペースト材料の流動制御による歩留り向上や、多数個一括生産、大型デバイス生産に課題があった。

集積回路基板の接合工程は、生産性を向上するため、はんだペーストの供給と加熱を、それぞれ一括処理するプロセスが主流となっている。しかし、搭載する高集積回路部品の中には、熱ストレスによるパッケージのダメージや静電気による回路の損傷、接合部の微細化によるはんだ付け不良などの問題があり、一括プロセスでのはんだ付けができなかった。このため、個別対応によるはんだ供給と、非接触局所加熱方式によるペースト材の流動制御を行う、生産性の高いプロセスを検討した。

非接触局所加熱の方法には、レーザ光の走査やキセノンランプのミラー集光、ホットエアー加熱などがある。しかし、対象接合部の熱容量にばらつきがあり、熔融した接合材の流動を制御できず、接合部のはんだ量不足や過多の問題を抱えていた。

本研究では、独自に考案した4方向同時レーザスキャン加熱プロセスによる、はんだペーストの流動制御について述べている。

局所かつ全接合部の同時加熱により，接合部を 10 °C 以内に均一昇温する条件を見出した．この効果は，接合信頼性の確保と部品への熱ストレス低減だけでなく，セルフアライメント効果による接合位置精度の向上や，はんだ付け時間を半分に短縮した．また，開発した全自動はんだ付けシステムは，接合部の長期信頼性試験を満足し，集積回路基板の量産実装工程に適用されている．

蛍光体材料の塗布工程は，生産性を向上するため，印刷方式やコーティング方式による蛍光体ペーストの供給と，露光，剥離，熱処理を行う一括処理プロセスが主流となっている．しかし，印刷方式は，被印刷対象と供給機構の接触による不純物の混入や混色不良が，コーティング方式は全面塗布後に，不必要な塗布材の剥離で材料歩留り低下が，問題であった．このため，非接触塗布で蛍光体ペーストの流動制御を行う，生産性の高いプロセスを検討した．

非接触塗布の方法には，ディスペンス方式やインクジェット方式がある．プラズマディスプレイ（Plasma Display Panel, PDP）の蛍光体ペースト塗布では，ディスペンス塗布方式が実用化されている．PDP は，蛍光体パネル用のガラス基板上に，ワッフル型の隔壁が形成されているため，この隔壁内への蛍光体ペーストの供給は，従来のディスペンス塗布プロセスで達成が可能であった．しかし，電界放電型ディスプレイ（Field Emission Display, FED）は，画素ごとに隔壁を有しないため，独自の蛍光体ペーストの制御プロセスが必要であった．また，インクジェット方式は，液晶用カラーフィルタ向けの低粘度材料の塗布事例はあるが，高粘度の蛍光体ペースト塗布には不向きであった．

本研究では，レーザ光計測を用いた，ギャップ制御のディスペンス塗布プロセスと，塗布後の厚さを維持するプロセスを独自に考案した，蛍光体ペーストの流動制御について述べている．ギャップ制御に一定の厚さの維持と，Black Matrix (BM) の前処理による塗布ペーストの拡散防止により，BM 開口部に厚さ  $8 \pm 1.5 \mu\text{m}$  の蛍光体層を形成する条件を見出した．また，本プロセスを用いた

16 本のマルチノズルユニットのギャップ制御塗布では，混色が回避できる塗布ピッチの条件を見出した．得られた結果から，複数のマルチノズルで構成するマルチノズルヘッドを考案し，塗布工程後の露光，剥離，熱処理工程を 3 回から 1 回に削減できる指針を示した．

研究のオリジナリティである非接触加熱と非接触計測塗布の技術は，半導体チップや電子部品上にアウターリード部品を積層する 3 次元実装や，微細でアスペクト比の高い壁形成を行う 3 次元造形などへの技術展開が期待できる．今後，レーザ発振器の性能向上と低価格化が進めば，さらにレーザ技術を応用したプロセス装置の生産寄与も期待される．

# 目次

## 第 1 章 序論

1-1	本研究の背景 .....	- 1 -
1-1.1	レーザの発振原理と加工技術 .....	- 2 -
1-1.2	レーザ計測技術 .....	- 7 -
1-1.3	レーザ加熱を使用した集積回路基板の実装 .....	- 11 -
1-1.4	レーザ計測を使用したディスペンス塗布 .....	- 17 -
1-2	本研究の目的 .....	- 19 -
1-3	本研究の意義 .....	- 19 -
1-4	本論文の構成と概要 .....	- 21 -
	参考文献 .....	- 24 -

## 第 2 章 4 辺同時レーザ光スキャン加熱プロセス

2-1	はじめに .....	- 28 -
2-2	装置の構成と実験方法 .....	- 28 -
2-2.1	YAG レーザ光の 4 分岐光学系の評価方法 .....	- 29 -
2-2.2	スキャン照射による加熱プロセスと実験方法 .....	- 32 -
2-3	結果および考察 .....	- 38 -
2-3.1	光学 4 分岐の実験結果および考察 .....	- 38 -
2-3.2	スキャン加熱の実験結果および考察 .....	- 41 -
2-4	まとめ .....	- 48 -
	参考文献 .....	- 51 -

## 第 3 章 QFP-IC のはんだ付け装置・プロセス

3-1	はじめに .....	- 53 -
3-2	システム構成と実験方法 .....	- 53 -
3-2.1	自動はんだ付けシステムと実験方法 .....	- 53 -
3-2.2	はんだ接合部信頼性の評価方法 .....	- 61 -

3-3	結果および考察.....	- 64 -
3-3.1	自動はんだ付けプロセスの実験結果および考察.....	- 64 -
3-3.2	はんだ接合部の信頼性評価と考察.....	- 71 -
3-4	まとめ.....	- 79 -
	参考文献.....	- 82 -

## 第4章 蛍光体ペーストのディスペンス塗布プロセス

4-1	はじめに.....	- 83 -
4-2	装置構成と実験方法.....	- 83 -
4-2.1	ギャップ制御塗布装置.....	- 84 -
4-2.2	ギャップ制御性の評価方法.....	- 85 -
4-2.3	塗布断面測定装置と測定方法.....	- 86 -
4-2.4	塗布シミュレーション方法.....	- 88 -
4-2.5	ノズル径と塗布量ばらつきの実験方法.....	- 90 -
4-3	結果および考察.....	- 90 -
4-3.1	ギャップ制御性の実験結果および考察.....	- 90 -
4-3.2	塗布断面測定装置の実験結果および考察.....	- 91 -
4-3.3	塗布シミュレーション結果および考察.....	- 93 -
4-3.4	ノズル径と塗布量ばらつきの実験結果および考察.....	- 94 -
4-4	まとめ.....	- 96 -
	参考文献.....	- 97 -

## 第5章 蛍光体ペーストの厚膜形成プロセス

5-1	はじめに.....	- 98 -
5-2	厚膜塗布層形成プロセスと実験方法.....	- 98 -
5-2.1	BCAの付着張力の評価方法.....	- 100 -
5-2.2	塗布圧力と塗布厚さの測定方法.....	- 101 -
5-2.3	蛍光体含有量と塗布厚さの測定方法.....	- 101 -

5-2.4	蛍光体層形成プロセスの評価方法 .....	- 102 -
5-3	結果および考察 .....	- 102 -
5-3.1	BCA の付着張力の評価結果および考察 .....	- 102 -
5-3.2	塗布圧力と塗布厚さの測定結果および考察 .....	- 104 -
5-3.3	蛍光体含有量と塗布厚さの測定結果および考察 .....	- 105 -
5-3.4	蛍光体層形成プロセスの評価結果および考察 .....	- 106 -
5-4	まとめ .....	- 109 -
	参考文献 .....	- 110 -

## 第 6 章 マルチノズルユニットの塗布制御プロセス

6-1	はじめに .....	- 112 -
6-2	装置構成と実験方法 .....	- 112 -
6-2.1	マルチノズルユニットの構成と圧力分布の解析 .....	- 114 -
6-2.2	マルチノズルユニット内の分配圧力損失の解析 .....	- 116 -
6-2.3	マルチノズルユニット塗布の評価方法 .....	- 117 -
6-3	結果および考察 .....	- 118 -
6-3.1	圧力分布の解析結果および考察 .....	- 118 -
6-3.2	流速分布の解析結果および考察 .....	- 119 -
6-3.3	マルチノズルユニットの評価結果および考察 .....	- 121 -
6-4	まとめ .....	- 127 -
	参考文献 .....	- 129 -

## 第 7 章 結論

7-1	本研究で得られた成果 .....	- 130 -
7-1.1	4 辺同時レーザ光スキャン加熱プロセス .....	- 130 -
7-1.2	QFP-IC の 4 辺同時はんだ付け装置・プロセス .....	- 131 -
7-1.3	蛍光体ペーストのディスペンス塗布プロセス .....	- 132 -
7-1.4	蛍光体ペーストの厚膜形成プロセス .....	- 132 -



7-1.5 マルチノズルユニットの塗布制御プロセス .....	- 133 -
7-2 今後の課題と展望 .....	- 134 -
謝辞 .....	- 135 -
本研究に関する発表，論文等 .....	- 137 -

# 第1章 序論

本論文は，デジタル機器の集積回路やディスプレイの製造工程における生産性向上のため，レーザ光による接合材料や蛍光体材料の流動を制御する研究について述べている．本章は，本研究の背景や目的,意義，論文構成と概要で構成している．

## 1-1 本研究の背景

デジタル機器は，高度な情報ネットワークとの連携で，身近なヒューマンインターフェースとして，広く浸透している．このヒューマンインターフェースには，大型の薄型テレビや，タブレット，スマートフォンなどがあり，さまざまな機能デバイスが搭載されている．その主な機能デバイスに，集積回路基板やディスプレイがあり，この製造プロセスや生産設備の開発は重要である．

集積回路基板やディスプレイの主な製造工程は，部材や部品の供給，および加工や処理プロセスで構成され，不純物混入，外力や熱による部材や部品の変形，加工や処理制御精度のばらつき，静電気破壊による電氣的な損傷など，さまざまな歩留り低下の要因を抱えていた．さらに，生産性向上のためには，多数個一括生産に必要な装置の大型化で課題があった．

歩留りや生産性の向上の手段として，これまでもレーザ光を用いた，非接触による各種加工や計測が，さまざまな製造工程で応用されてきた．たとえば，電子部品実装での応用例では，ロボットを使用したレーザ光のスポット走査や，光学機器による照射形状とエネルギー密度の変換を行うことで，局所加熱の熱源としての研究が行われてきた．しかし，レーザ発振器が高価である，加工時間が長い，プロセス条件のマージンが少ないなどの理由から，その工業的用途は限定されていた．

本章では，本研究の背景について述べる．

### 1-1.1 レーザの発振原理と加工技術

レーザーは、1960年にS. メイマンがルビーレーザーでパルス発振に成功してから、さまざまな学術研究や産業向けに、多種多様なレーザー発振器が開発されている。レーザー発振器には、気体、液体、固体などの媒体を介して、発振波長やパルス幅、出力パワーが異なる様々な発振器があり、用途によって使い分けがされている。レーザー発振器はその特徴である高いレーザーエネルギーの取出しや、空間的及び時間的な可干渉性（光のコヒーレンス）の高さ、光の波長が可変可能な波長変換現象があり、加工や計測など広範囲な分野でレーザー応用技術の活用が期待されている。発振器の開発初期の頃は、発振器の出力が小さかったが、1970年以降、高出力が可能な Yttrium Aluminum Garnet (YAG) レーザ、CO<sub>2</sub> レーザが出現した。近年では、Laser Diode (LD) をアレイ化やスタック化した Direct Diode Laser (DDL)、ファイバーレーザーそれにディスクアレイレーザーなどの高出

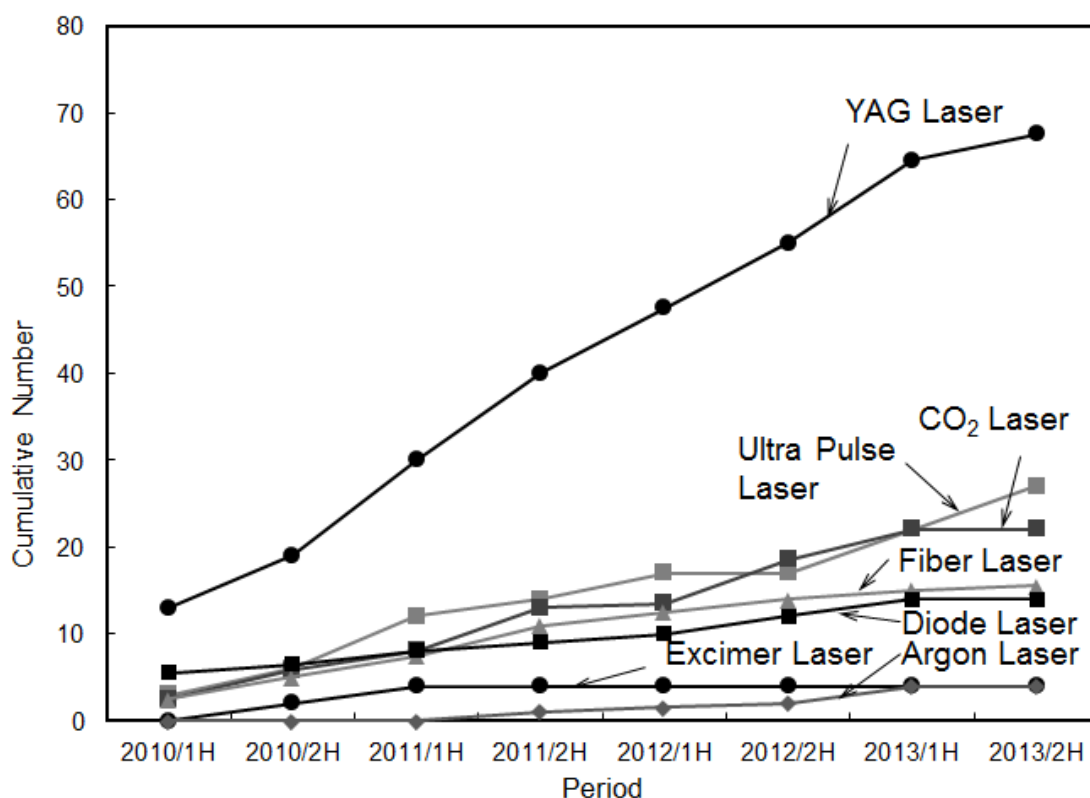


図 1-1 年代別のレーザー加工の研究の件数とそのレーザーの種類  
(出典:池野順一, “レーザー加工研究の動向” 2013 年度  
精密工学会秋季大会月術講演会論文集 F01 キーノート  
スピーチ p.262 (2013))

力化が進み，加工用途が広がっている．高出力で操作性のよい YAG レーザが産業界では主流である．図 1-1 に，レーザ加工研究で使われたレーザ発振器類の種類とその累積件数を示す<sup>1)</sup>．このデータからも，YAG レーザ加工による研究の多いことがわかる．

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Laser) は，ガスレーザ，固体レーザ，半導体レーザ，エキシマレーザなどに分類される．一般的な加工に使われる CO<sub>2</sub> レーザはガスレーザ，YAG レーザは固体レーザの一種である．レーザ発振器は，共振器とレーザ媒体，励起光源から構成される．光の吸収と放出を伴ったエネルギー状態の変化には，光子の自然放出，誘導放出，吸収の 3 つの状態がある．この内，誘導放出を利用しようとした場合，多数の原子や分子を含む媒体によって多数の光子の放出が必要となる．しかし，ボルツマンの法則により，誘導放出で増幅を得るには，逆転分布状態を起こす必要がある．具体的には，レーザ媒体の基底準位に逆転分布を起こす光の波長を注入もしくは，他の原子や分子からのエネルギー移乗によるポンピングを行う．ポンピングは，この光をレーザ媒体の左右に設置した 2 枚の反射鏡で反射し，繰返しレーザ媒体を通過させることで，2 枚の反射鏡の間に光の定在波を発生させる．この定在波の光が一定のエネルギー密度を超えたとき，レーザ光は，出射側の反射鏡から出射される．この発振されたレーザ光は，①同じ光軸を往復して増幅されるため，指向性が高い，②誘導放射が自然放射よりも速く励起原子から電磁放射されるため，高出力である，③誘導放射が共振的の際，周波数帯域の中心に最も強く発生するため，波長が単一になる，といった 3 つの特徴を持つ．YAG レーザは近赤外波長のため，電子部品のはんだ付けにおける，加熱用途での利用に有利である．

YAG は，ネオジウム 3 価のイオン Nd<sup>3+</sup> を重量比で約 0.73 % ドープしたものである．YAG の分子式は，Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> で表され，比重 4.56 ，モース硬度 8～8.5，融点は 1950 °C と高く，イリジウム製のルツボ内で加熱溶融し，種結晶を回転させながら引き上げて製造する．この結晶は，可視光から赤外光に亘って透明で，熱伝導率

はガラスより 1 桁ほどよい  $0.03 \text{ cal/cm}^{\circ}\text{C}$  である． YAG レーザ発振器は，クリプトンアークランプやキセノンランプ，LD で励起された光を，楕円筒型反射鏡で YAG ロットに取り込み，光軸方向に設置した反射鏡で反射往復させる．励起した光は， $\text{Nd}^{3+}$  の吸収帯まで励起されるが，一旦，光を放出しない状態で 4 準位に落ち，ここから  $1.06 \mu\text{m}$  の近赤外線を放出する． YAG レーザは，励起ランプにかかる電流エネルギーの 1～3 % 程度しかレーザ光に変換されないため，その他はすべて熱となってしまう．このため，楕円筒型反射鏡内は水冷していて，反射鏡内の冷却は重要な管理因子である．

主なレーザ加工技術には，表面処理，溶接，穴あけ，スクライブ・トリミング，切断，化学加工などがある．レーザ加工では，レーザ光を集光レンズで絞り，加工物表面に適したスポット径で加工を行う．レーザ光の波長やレンズの焦点距離によって，スポット径は調整でき，レーザ光の強度とレーザ光径によってパワー密度は決定される．加工物の種類，表面状態およびレーザ光の波長から，被加工物の表面でレーザ光の反射率は異なり，入力エネルギーの吸収率が決定される．この吸収率により，表面温度の上昇速度は変化し，被

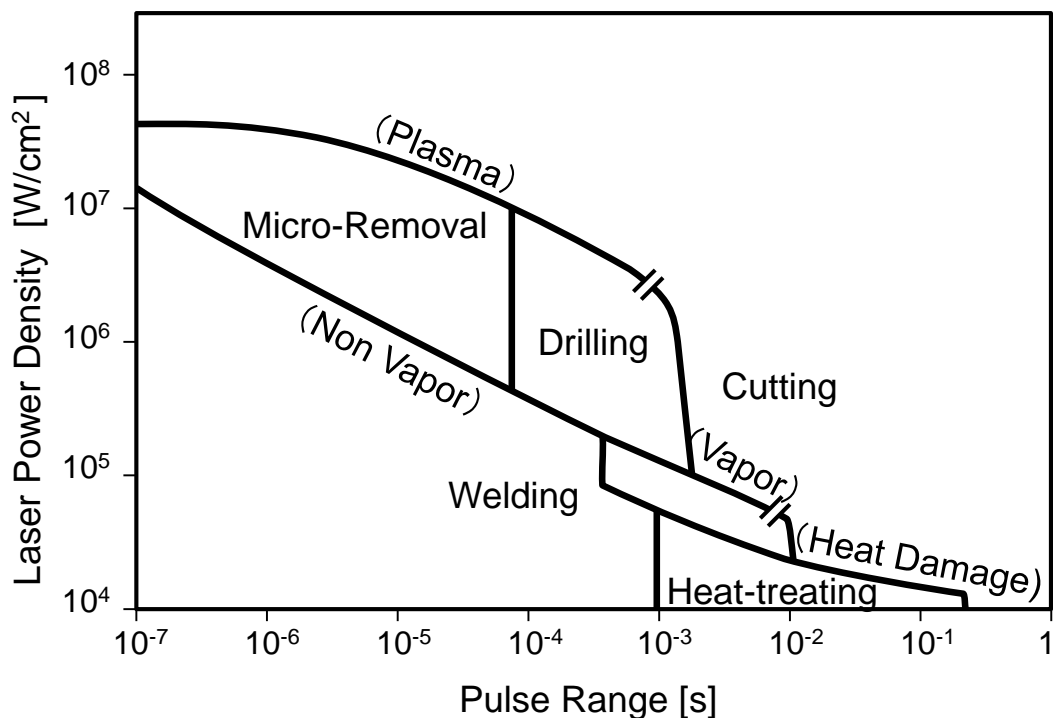


図 1-2 加工方法に必要なパルス幅とパワー密度の関係  
(出典: J.F. Ready, SME Technical Paper MRR pp.75-06 (1975))

照射物へ流入される熱エネルギーの割合は、被照射物の熱伝導率と熱拡散率によって決定される。

溶接，切断，穴あけの加工では，固相から液相，気相への相変化を起こすためのエネルギーが必要で，これらは加工物の密度，比熱，熱容量，融解温度，融解熱などで決定される．十分な強度を持ったレーザ光は被加工物に吸収され，材料の融解温度や，蒸発温度に到達し，相変化するため，パワー密度とパルス持続時間が重要である．

図 1-2 に，主な加工方法に必要なパルス幅とパワー密度の関係を示す<sup>2)</sup>．この関係から適用するレーザの種類をある程度絞込むことが可能である．また，表 1-1 に，主なレーザの種類とその加工用途を示す<sup>2)</sup>．

表 1-1 主なレーザの種類とその加工用途（出典：川澄博通，“レーザ加工技術” 日刊工業 p.10 (1985)）

Laser type	Wave Length ( $\mu\text{m}$ )	Oscillation	Laser Power (W)	Processing Case
CO <sub>2</sub>	10.6	CW	$\sim 10^4$	Heat-treating Welding Cutting
		Repeated Pulse	500 (Average)	Welding Removal- Treating
Ar <sup>+</sup>	0.4880 $\sim$ 0.5145	CW	18	Semiconductor- Processing
Nd : YAG	1.06	CW Repeated Q-Switch	$\sim$ 300 5,000 (Peak)	Welding Trimming
		Repeated Pulse	200 (Average)	Welding Drilling
Nd : Glass	1.06	Single Pulse	$10^6$ (Peak)	Spot Welding Drilling
Ruby	0.6943	Single Pulse	$10^5$ (Peak)	Spot Welding Drilling
Alexandrite	0.70	Repeated	70	Drilling
	0.82	Q-Switch	$18 \times 10^6$	
Excimer	Ar F	Pulse	40	Photo- Chemical Processing Photo-Etching
	Kr F		100	
	Xe		65	
	Cl		8	
	Xe F			

レーザ加工の特徴としては、次の 10 項目の長所がある。

- (1)加工表面に光学的に集光した微小スポットを照射でき、従来では加工困難な硬度の高い材料も容易に加工できる。
- (2)非接触で高密度なエネルギーの熱加工が可能のため、加工形状を自由に選択できる。また加工対象も金属から木材、プラスチックやゴムなど範囲は広く、切断から溶接、熱処理などの様々な加工にも対応できる。
- (3)非接触加工のため、材料からの加工反力の影響を受けない。また、レーザ光は走査が容易なため、加工制御性がよく、自動化が行い易い。
- (4)レーザ光は、大気中を広がらずに伝達するため、ミラーや光ファイバーなどの光学系を使用して、遠隔処理が容易にできる。また、狭い箇所での加工や 1 台の発振器のタイムシェアも可能である。
- (5)加工箇所を限定してレーザ照射ができるため、加工ひずみや熱変形の少ない加工が行える。
- (6)真空などの特別な付帯設備を必要とせず、X線などの発生もないため、操作が容易である。
- (7)短い波長の YAG や Ar などのレーザを使用すれば、精密加工が可能である。
- (8)エキシマレーザは、化学加工、精製、超高精度分離などの改質に利用できる。特に、エキシマレーザの切断加工では、直接化学物質の結合を切断するため、加工物の温度は上昇せず、しかも高速化加工が可能である。また、短波長のため、レーザ光径を絞ることで、半導体などの微細加工にも適している。
- (9)光学機器による高精度な位置決めが可能である。また、光エネルギーが磁場や真空中などの影響を受けないため、特殊環境下での加工も可能である。
- (10) 5 kW 以上の高出力レーザ発振器の実用化で、厚物材料の切断や溶接が可能である。

また、短所としては、次の 3 項目がある。

- (1) レーザ発振器は高価なため、他の加工装置に比べ装置本体やメンテナンス費用が割高である。このため、ランニングコスト高となる場合がある。
- (2) レーザ加工のプロセスに熟知した作業者が必要なため、普及しにくい。このため、装置側で加工プロセスモニタやプロセスチューニングのアプリケーションの充実が必要である。
- (3) 金属材料には、表面反射率が高い材料があり、加工材へのエネルギー入熱効率が低く、生産性低下や熱ストレスによる不良を発生する場合がある。また、レーザ光の反射からの防護カバーなどの安全対策も必要である。

近年では、レーザ照射状態を評価する技術や照射モデルによる加工シミュレーション技術の発達で、加工条件の数値化が進み、作業者のレーザに対する熟練度に頼らなくても加工が行えるようになってきている。

本研究では、メカトロニクス技術によるレーザ加工パラメータの数値制御を行うことで、これまでにない均一昇温の加熱プロセスを提案している。

### 1-1.2 レーザ計測技術

レーザ光を使用した非接触計測技術は、様々な分野で活用されている。特に、動きのある対象物の寸法計測では、空間情報が必要となる。近年のコンピュータによるシミュレーションやモデリング技術の発達で、産業分野で計測データを活用した、新しい製造プロセスが検討されている。この計測手法のひとつとして、レーザ変位計がある。レーザ変位計は、動きのある被対象物やその表面反射状態の影響を最小限にし、計測精度を向上することが可能である。また、光学的な三角測量により、対象の変位を非接触で計測できる機器で、集束した半導体レーザ光を対象物に投影し、これによって生じる対象物の光点位置を、半導体位置検出素子で検出する。

図 1-3 に、この三角測量法の原理を記載する<sup>3)</sup>。三角測量法は、QR の長さを既知の値とし、その両端の Q と R から対象上の点 P を



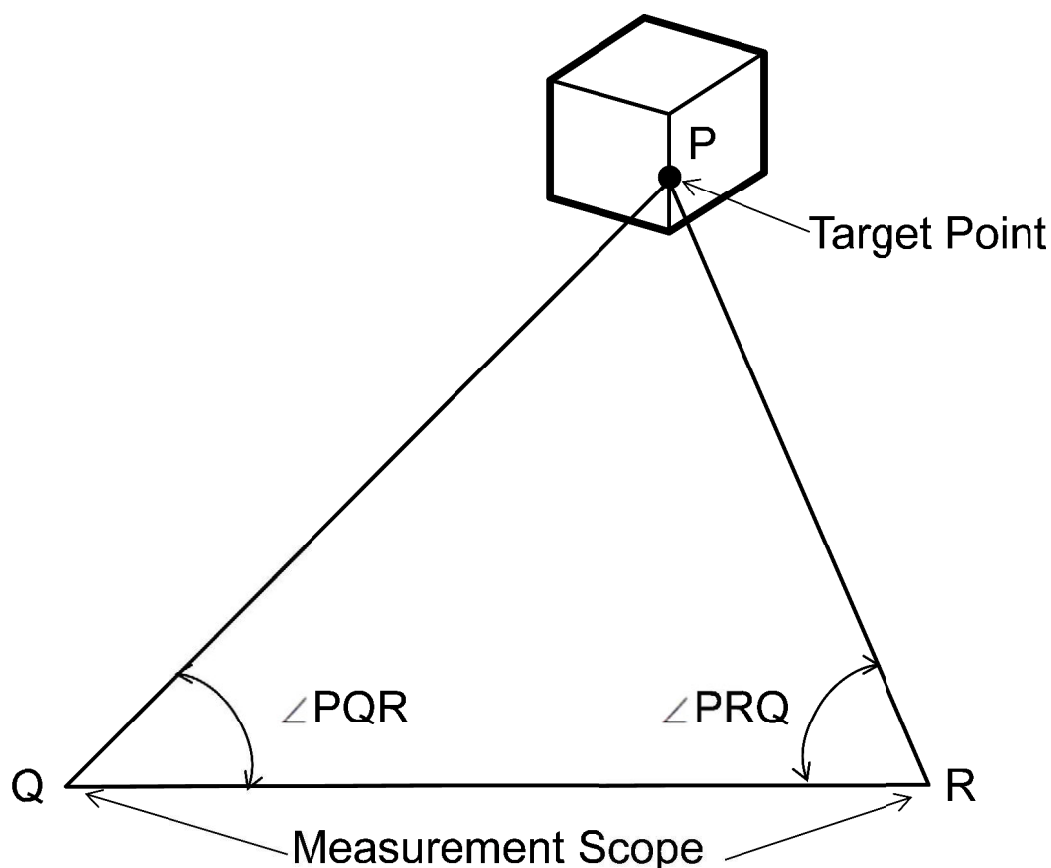


図 1-3 三角測量法（出典：村上文夫：“レーザ変位計” The Laser Society of Japan **16**, p.293 (2005)）

結ぶ角度  $\angle PQR$  と  $\angle PRQ$  を測定して，点 P の位置を算出する手法である．

動照明法では，この観測点 R に投光器を置き，被測定点 P に生じた光点の像 P' を，もう一方の観測点 Q に置いたレンズで結像させて，計測する．図 1-4 に，この方法を示す．動照明法では，測定点 Q から被測定点 P までの角度が検出点 P' の像の位置に変換されるため，この P' の位置を検出すれば，P の位置は計算で導くことができる．この像の検出に，Position Sensitive Device (PSP) や Charge couple Device (CCD) が使用される．レーザ変位計の投光器には半導体レーザが一般的に使用される．

図 1-5 に，レーザ変位計のセンサ部の構造を示す．レーザ変位計では，測定する変位の方角とレーザ光軸を一致させる，動照明法で計測する．計測原理は，次の通りである．

まずは便宜上，レーザの光軸と受光レンズの光軸が交わる点を O

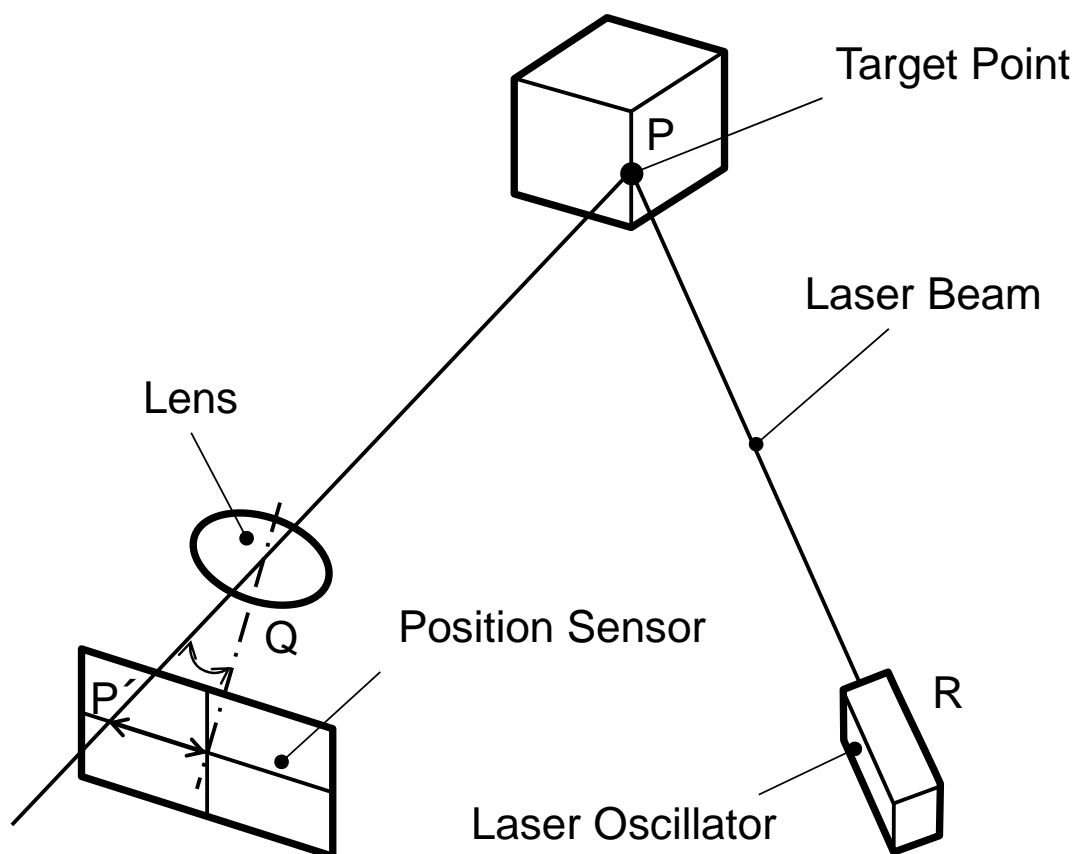


図 1-4 2 定点動照明法による測量方法（出典：村上文夫：“レーザ変位計” The Laser Society of Japan **16**, p.293 (2005))

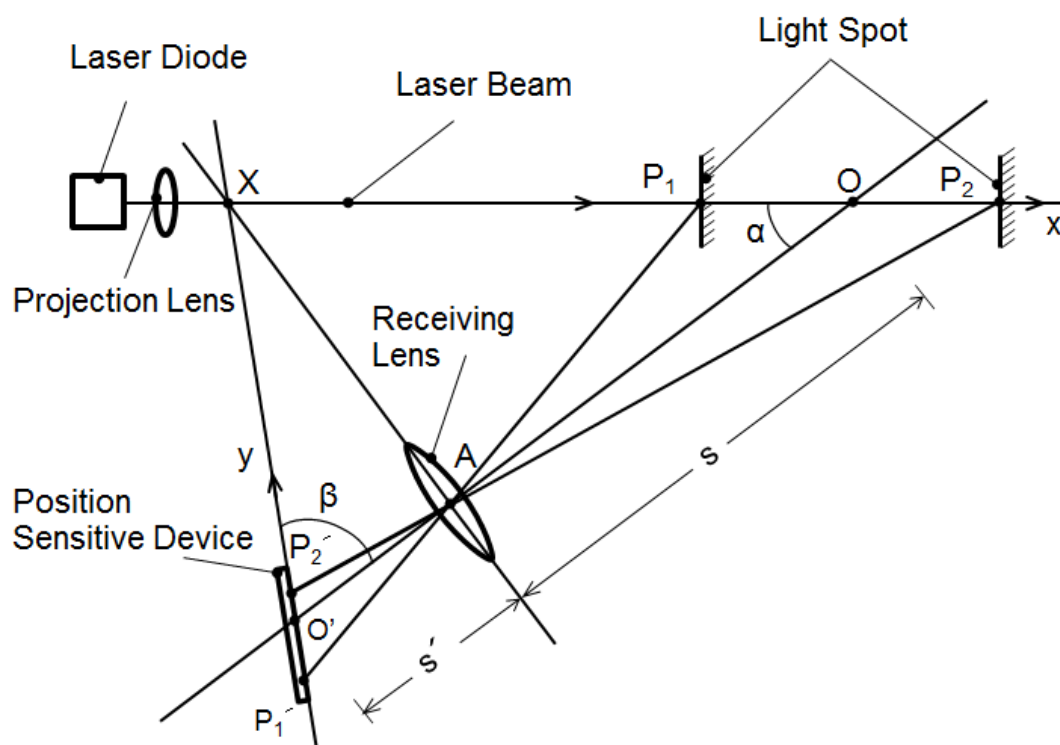


図 1-5 レーザ変位計の測量方法（出典：村上文夫：“レーザ変位計” The Laser Society of Japan **16**, p.294 (2005))

とし、この O を変位測定の基準点とする。この基準点 O からセンサ先端までの距離が作動距離となる。レーザの光軸上の測定範囲  $P_1P_2$  は、レンズ越しの Positon Sensitive Device (PSD) 上で  $P'_1P'_2$  に結像する。この結像範囲内の PSD 上の光点像の位置と、対象および基準点との距離を、測定することで、変位が求められる。

上述の光学的配置のほとんどは、 $P_1P_2$  がレンズ光軸と直交していないため、非線形な結像となる。この場合、 $P_1P_2$  の延長線とその像  $P'_1P'_2$  の延長線が、レンズの主平面上で交わることは既知のことであり、これをシャインブルグ条件と一般に呼ぶ。 $P_1P_2$  上およびその像  $P'_1P'_2$  上で光軸上の点 O と点 O' を原点とした座標  $(x, y)$  を考えた場合、 $x$  と  $y$  の関係は、次式で表すことができる。

$$y = \frac{f \cdot x}{s - f} \frac{\sqrt{\{f^2 \cos^2 \alpha + (s - f)^2 \sin^2 \alpha\}}}{(s - f) + x \cdot \cos \alpha} \cdot \cdot \cdot (1-1)$$

ここで、 $s$  は主点 A から O までの距離、 $\alpha$  は  $P_1P_2$  とレンズの光軸がなす角度、 $f$  は受光レンズの焦点距離である。この関係でワークの変位測定は可能になる。

レーザ変位計は、周囲の光の影響や変位計内部の温度ドリフトによって、精度劣化が起こる。この影響を低減するには、SN 比の向上が重要となる。施策の一つとして、半導体レーザの入力電流を直接変調する同期交流方式がある。この方式は、温度影響を受けやすいレーザの発振閾値を安定化するため、レーザ光の出力をフォトダイオードでモニタし、その平均値が常に一定レベルになるように直流バイアスへフィードバック制御を行う。具体的には、交流信号成分にフィードバック成分を重畳する。

また、被測定物表面でのレーザ光の反射状態によって、レーザ照射側と受光側の位置関係を使い分ける必要がある。この測定方式には、正反射方式と拡散反射方式の 2 種類がある。図 1-6 に、これら方式における、投光ビームと受光の位置関係を示す。

図 1-6 (a) に、物体からの正反射光を直接受光する正反射方式の位置関係を示す。この方式は、金属など表面に光沢のある対象物を

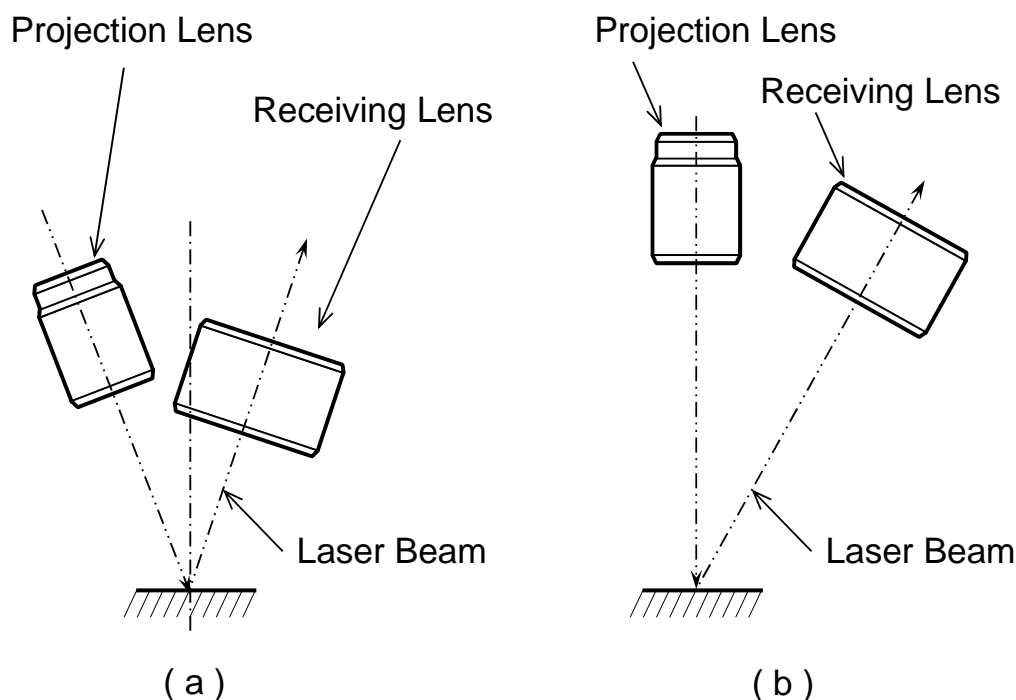


図 1-6 レーザ変位計のレーザ照射部の構成: (a) 正反射方式, (b) 拡散反射方式 (出典: 村上文夫: “レーザ変位計” The Laser Society of Japan **16**, p.296 (2005))

安定して測定する場合に使用する．図 1-6(b) に，投光ビームを測定面に対して垂直に投光し，対象物からの拡散反射光を受光する拡散反射方式の位置関係を示す．この方式は，測定範囲を広くとる場合に使用する．

本研究では，塗布材の流動制御とその評価を行うため，表面に光沢があるガラス基板や塗布材料の表面形状を非接触で計測する，レーザ計測技術の開発を行っている．

### 1-1.3 レーザ加熱を使用した集積回路基板の実装

電子機器の軽薄短小と軽量化が進むに従い，電子デバイスの接合微細化への要望は高まっている．一方，製品の小型化や低価格のため，電子部品の耐熱性能が低下している．

これら電子部品の接合材料には，はんだ材や異方性導電体材<sup>4)</sup>などが，用途に合わせて使用されている．特に，接合信頼性が高くコストが低いはんだ材が，主流となっている．はんだ接合は，修正が

容易なため，レーザ光やホットエアを使用したリワーク技術も開発されている<sup>5)</sup>．近年では，環境に配慮した鉛フリーはんだ材料の使用が進み，共晶はんだよりも高融点でのはんだ付けを行う必要がある．このため，耐熱性能の低い接合箇所によっては，局所加熱でのはんだ付け方法を検討する必要がある．

図 1-7 に，電子部品実装分野のパッケージ動向を示す．軽薄短小化で，パッケージはペリフェラルタイプからエリアアレイタイプに移行している．しかしながら，実装はんだ材の接合状態が容易に検査でき，接合部の信頼性も高い，アウターリードの Single Outer Lead Package (SOP) や Quad Flat Package (QFP) は，さらなる狭ピッチ化が進んでいる．QFP ではさらに小型・低背化を目的とした Quad Flat Non-Leaded Package (QFN) が，使用されるようになってきた．リード形状が J 型になり，接合部を極力パッケージ外周に出さないパッケージ形状となっている．リードピッチは 0.40 mm，実装時の高さは 0.65 mm と，樹脂パッケージ部分も薄い<sup>6)</sup>．

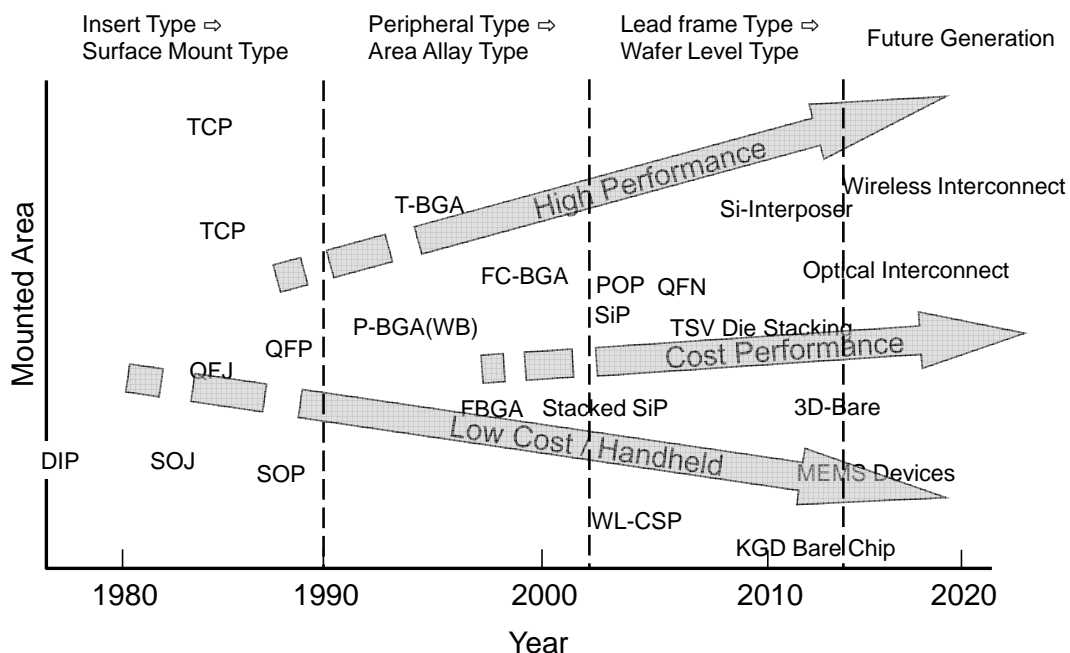


図 1-7 電子部品実装分野のパッケージ IC の動向 (出典:春田亮: “パッケージ技術動向” エレクトロニクス実装学会誌 10, p.353 (2007))

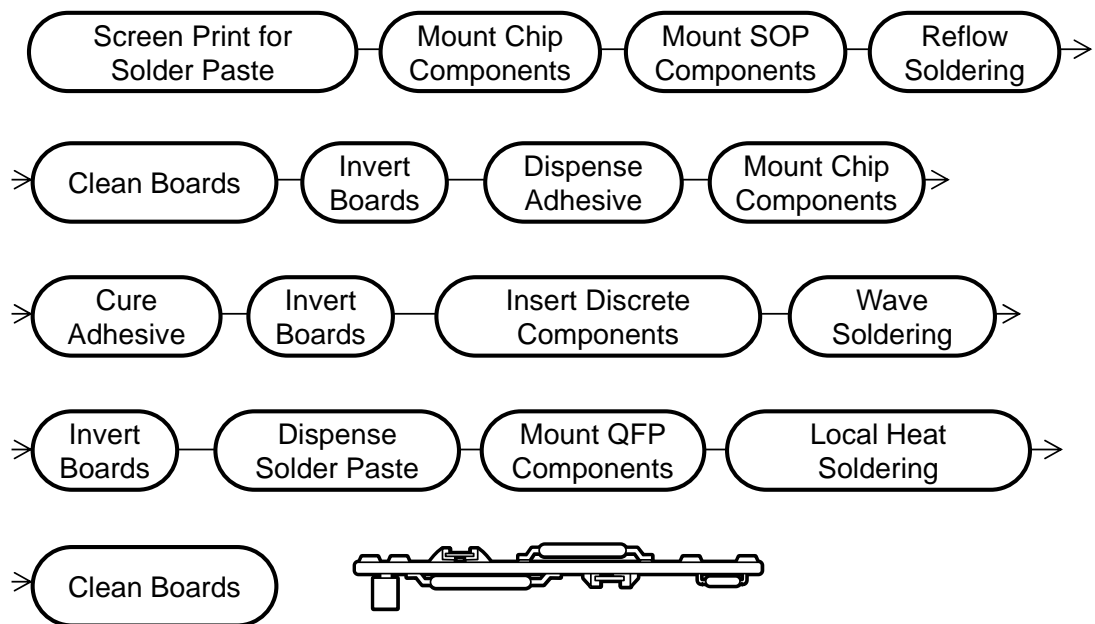


図 1-8 パッケージ IC を混載した PCB の実装方法

図 1-8 に、薄型パッケージを混載した、Printed Circuit Board (PCB) の一般的な実装工程を示す。はんだペーストを PCB に、スクリーン印刷で供給した後、部品搭載と全体加熱リフローで表面をはんだ付けする。その後、PCB を反転し、裏面に部品を接着剤で固定して部品のマウントを行う。再度 PCB を反転させ、ディスクリート型部品を PCB に挿入して、リードをクランチ成形する。

ディップ式はんだ漕またはポイントディップ漕で、裏面部品のはんだ付けを行う。この裏面側のはんだ付けで搭載できなかった QFP-IC などの耐熱性能の低い部品は、別途後工程ではんだ付けを行う<sup>7)</sup>。

図 1-9 に、実装工程で使用する電子部品のはんだ付け方法を示す。この方法は、局所加熱方式と全体加熱方式に大別される。局所加熱方式は、レーザ光やホットエアを使用した非接触加熱方式と、抵抗加熱ツールやはんだごてを使用した接触加熱方式がある。この方式では、個別にはんだ材の供給が必要になる。全体加熱方式は、はんだ漕に浸けるはんだディップ方式、ポイントディップ方式、フロリナートを使用したベーパーフェーズリフロー方式、エアリフロー方式、それに遠赤外線リフロー方式がある。どの方式も一長一短があり、

部品の耐熱性や生産性効果，PCB の表裏などを含め，使い分けを行っている<sup>8)</sup>。

近年の携帯電話やスマートフォン，タブレットなど軽薄短小で廉価な携行型電子機器の需要に対し，電子デバイスの接合部微細化と薄型化への要求は，高まっている．特に，フラットパッケージ型電子部品のひとつである QFP-IC は，樹脂パッケージモールド部の薄型化，接合電極部の狭ピッチ化が進んでいる．樹脂パッケージを薄くすれば，コスト低減にも効果があるが，耐熱性は低下する．このため，接合時の薄型樹脂パッケージ内部の温度上昇を抑え，樹脂パ


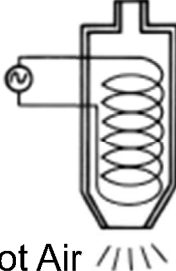
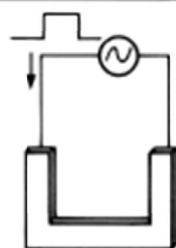
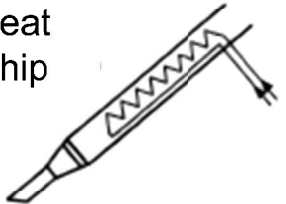
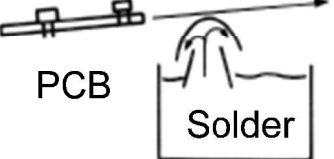
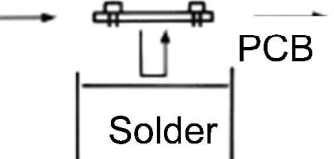
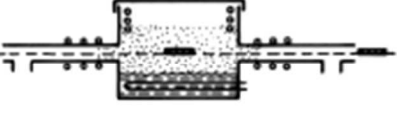

Local Heating	Without Contact	 <p>Laser Beam Lens Laser Soldering</p>	 <p>Hot Air Hot Air Soldering</p>
	Contact	 <p>Heat Chip Hot Bar Soldering</p>	 <p>Heat Chip Iron Bar Soldering</p>
Total Heating	Contact	 <p>PCB Solder Dip Flow Soldering</p>	 <p>PCB Solder Dip Soldering</p>
	Without Contact	 <p>Fluorinert Vapor Phase Reflow Soldering</p>	 <p>Radiation Heater Infrared Radiation Reflow Soldering</p>

図 1-9 電子部品のはんだ付け方法

パッケージ内部に掛かる熱ストレスを低減するプロセスの開発が必要となる。この問題を解決するため、非接触の局所加熱ではあるが、全接合の同時加熱が可能なプロセスの検討を行っている。

QFP-IC のはんだ接合部は、外周にリードが配置されているため、はんだ付け接合部の状態確認は、比較的容易である<sup>9),10)</sup>。レーザ光やホットエアなどを使用した局所加熱方式は、全体加熱リフロー方式と比較して、樹脂パッケージや接合部への熱ダメージが少ない<sup>11)</sup>。局所加熱方式は、加熱部の範囲を限定してはんだ付けが可能なため、耐熱性の低い部品のはんだ付けに適している。特に、レーザ光の照射方法は、レーザ光を動的に走査する方法<sup>9),12),13)</sup>や、コリメータレンズやフォログラムレンズを使用して、必要形状に集光させる方法<sup>14),15)</sup>が、これまでも検討されている。

前者のレーザ光走査方式は、レーザ光が照射された箇所から順番にはんだ付けを行う方法である。図 1-10 に、この方法でのはんだ付けプロセスを示す。この方法は、接合数が増えるとはんだ付け時間が長くなる。さらに、部分溶融のため、未溶融部の高さに妨げられて、電子部品の接合リード部を PCB パターン部に接近させることができず、はんだ付け不良を発生する場合がある。この不良は、接合リードと接合パターンの間隔が広がるために、はんだ材がリード

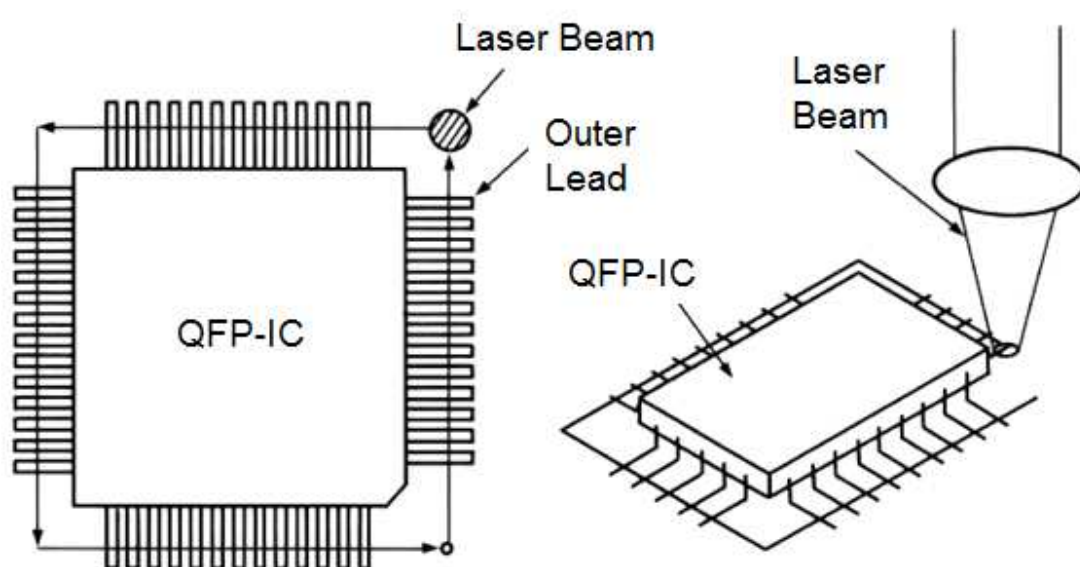


図 1-10 レーザ光走査方式による加熱方法



に這い上がることで、はんだ量不足やはんだブリッジを発生すると考える<sup>9)</sup>。この他、レーザ光の走査方式では、全体加熱方式で確認されるような接合リードと接合パターンの自己位置修正作用（セルフアライメント効果）も期待できない。

一方、レーザ光の形状を集光レンズで変換する方法は、四角形の外周上に、帯状のレーザ光を、形成することができる。図 1-11 に、この方法のはんだ付けプロセスを示す。この方法では、照射位置や形状、照射分布は光学機器に依存するため、照射条件の変更が困難である。また、被加熱部の温度コントロールに、レーザ光を遮蔽する板を使用するため、照射するエネルギーの効率は低下する<sup>15)</sup>。

本研究では、4 辺方向に整列した接合部を形成する QFP-IC の外周上に、レーザ光のスキャンラインを照射する、独自の 4 辺同時加熱のはんだ付けプロセスとそのシステムを考案し、接合材料の流動制御のメカニズムの解明と、量産適用を行っている。

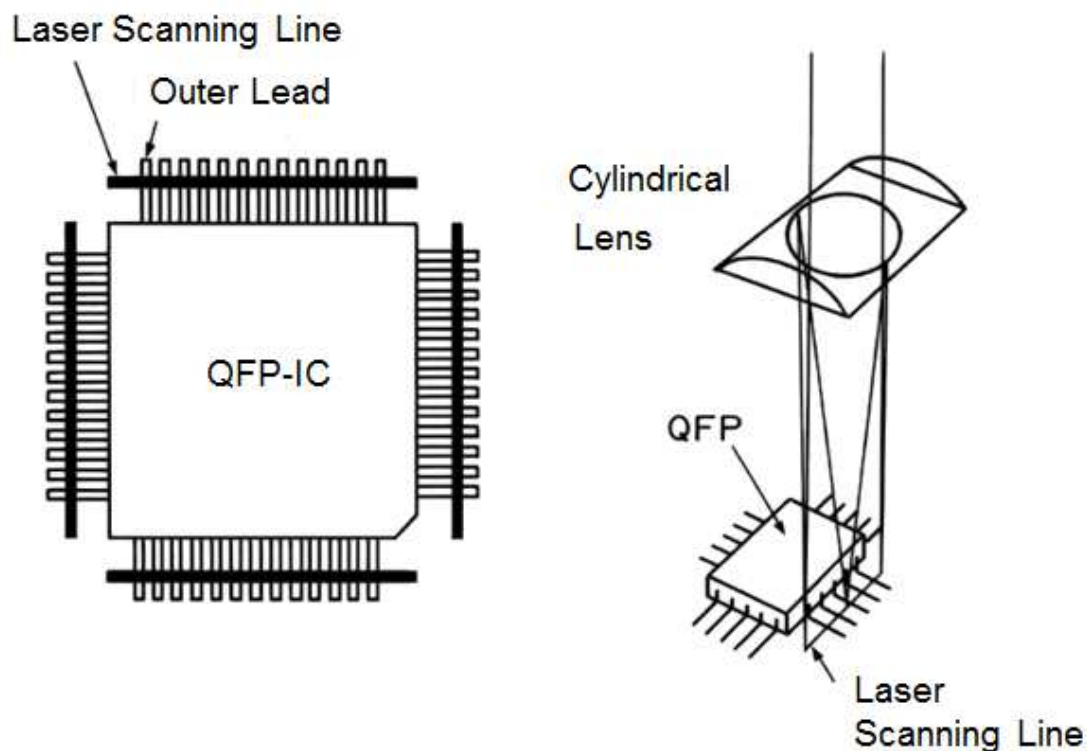


図 1-11 集光レンズ方式による加熱方法

#### 1-1.4 レーザ計測を使用したディスプレイ塗布

ディスプレイは、高度な情報ネットワークと連携し、ヒューマンインターフェースとして進化をしている。特に、テレビの分野では、大型薄型テレビの臨場感をいっそう高めるための高輝度化、高解像度化が、進められている。

世の中のフラットパネルディスプレイには、液晶パネルディスプレイ（Liquid Crystal Display, LCD）やプラズマディスプレイパネル（Plasma Display Panel, PDP）、電界放電型ディスプレイ（Field Emission Display, FED）などがある<sup>16),17)</sup>。PDPはプラズマ放電による蛍光体発光を行うディスプレイである<sup>18),19)</sup>。FEDは電界電子放出型ディスプレイである<sup>20),21)</sup>。これらPDPとFEDはLCDに比べ、輝度や応答性に優れている<sup>22)</sup>。しかし、大型化パネルの生産には、蛍光体層の形成が困難で、生産コストが高く、歩留りが低いことが、問題であった<sup>23)</sup>。

これまで、蛍光体成形工程は蛍光体1色ごとに、蛍光体ペーストの供給、希釈溶剤の乾燥、剥離、熱処理が必要となっていた。これは、赤、緑、青の3色を形成する際に、それぞれ必要な工程であり、3回同じプロセスを行う必要がある<sup>24)</sup>。

図 1-12 に、蛍光体ペーストを供給する方法を示す。この方法には、スクリーン印刷<sup>25),26)</sup>やグラビア印刷<sup>27),28)</sup>、スピンコート<sup>29)</sup>、マスク蒸着、レーザ熱転写（Laser-Induced Thermal Spray Printing, LITSP）<sup>30),31)</sup>などの方法がある。スクリーン印刷法の場合、蛍光体の形状精度は、版のマスク開口寸法精度と版厚さ精度、印刷スキージ圧力などで決定する。生産性は良好であるが、大型版のマスク開口寸法精度の向上、ガラス基板とのマスク版、スキージングブレードとマスク版との接触で発生する混色や不純物の混入が、問題である。

グラビア印刷法の場合、蛍光体の形状精度は、版の形状寸法精度、ドクタースキージの接触圧で、決定する。生産性は良好であるが、大判の版とドクタースキージの製造方法、版精度の維持、ガラス基板とブランケットの接触による混色や厚膜塗布形状の不良が、問題


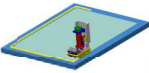

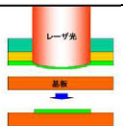
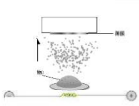
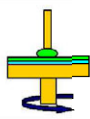
Method	Screen Print	Dispense	Photo Gravure	LITSP	Mask Deposit	Coater
Process						
Thickness	10 $\mu$ m $\sim$	10 $\mu$ m $\sim$	10 $\mu$ m $\sim$	$\sim$ 1 $\mu$ m	$\sim$ 1 $\mu$ m	1 $\mu$ m $\sim$
Uniformity	$\pm$ 20%	$\pm$ 20%	$\pm$ 20%	$\pm$ 5%	$\pm$ 5%	$\pm$ 20%
Shape	Mask Shape	Nozzle Shape	Plate Shape	Spot Shape	Mask Shape	Mask Shape
Large Size Process	$\Delta$	$\bigcirc$	$\times$	$\Delta$	$\times$	$\Delta$
Productivity	$\bigcirc$	$\Delta$	$\bigcirc$	$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$
Cost	$\bigcirc$	$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$	$\times$	$\times$

図 1-12 蛍光体ペーストの供給方法

である。

スピンコート方式の場合，被塗布対象を回転して，蛍光体ペーストを均一な厚さに塗布する．このため，被塗布対象が大判になった場合，回転中心と外周での周速の違いによる塗布厚さの差や，材料歩留りの低下が，問題である．

LITSP の場合，蛍光体の形状精度は，フィルム上の蒸着した蛍光体の厚さ，必要箇所の転写精度で決定する．蛍光体の形状精度は向上するが，フィルム上に残る材料やフィルムなどの副使材料のコスト増加が，問題である．マスク蒸着法も，同様の問題を抱えている．

この他に，インクジェット方式がある<sup>32),33)</sup>．この方法は，塗布材料の粘度，供給できる材料と塗布できる量に，制約がある．このため，研究対象である厚膜形成には，不向きであると考える．

本研究では，非接触塗布であるディスペンス方式による蛍光体ペーストの塗布プロセスの開発を行っている．PDP への蛍光体塗布は，早くからディスペンス塗布プロセスが検討されている．この PDP の蛍光体層は，蛍光体パネルのガラス基板上に形成したワッフル型の隔壁内に形成する．このため，蛍光体ペーストの塗布精度は，従来の塗布量の制御因子と蛍光体ペーストの表面張力による壁面へのぬれ広がりのプロセスで達成が可能である．しかし，電界放電型ディスプレイの FED は，画素ごとに隔壁を有しないため，PDP と同等のプロセスで FED の厚膜蛍光体層を形成することは，困難であった．

特に，FED の蛍光体層は，Black Matrix (BM) の開口部のみに形成するため，開発には，独自のディスペンス塗布制御プロセスと塗布システムおよび塗布形状の計測手法が必要である．

本研究では，均一な厚膜蛍光体層を FED の蛍光体パネルに形成する，レーザ光を用いた蛍光体ペーストの流動制御のメカニズムを解明している．

## 1-2 本研究の目的

本研究は，デジタル機器の集積回路やディスプレイの製造工程において，レーザ光で接合材料や蛍光体材料の流動制御を行い，生産性を向上する，独自のプロセスとシステムを開発することが目的である．具体的には，2 つの流動制御プロセスの開発を，次の 5 つのアプローチで行った．

- (1) レーザ光の 4 分岐光学系と，スキャンライン制御機構の考案，およびスキャンライン照射による均一昇温プロセスの研究
- (2) 0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の 4 辺同時加熱レーザはんだ付けシステムの考案と，はんだ材の流動制御プロセスの研究，およびはんだ接合部の信頼性評価
- (3) ディスペンス塗布機構の考案と，蛍光体ペーストの流動制御プロセスの研究
- (4) 蛍光体ペーストのシングルディスペンス塗布システムの考案と，蛍光体層の厚膜形成プロセスの研究
- (5) マルチノズルユニットによる複数ディスペンス塗布機構の考案と，複数塗布における流動制御プロセスの研究

## 1-3 本研究の意義

デジタル機器に使用される，集積回路基板やディスプレイの製造工程は，部材や部品の供給および加工や処理プロセスで構成される．

集積回路基板のはんだ接合の場合，接合部および周囲の熱容量に最適な加熱制御を行うことで，接合部全体を均一に昇温させ，熔融

したはんだペースト材料の流動制御は可能となる．レーザ光加熱では，光ファイバーから出射し，レンズで集光したレーザ光のエネルギー分布密度が Gaussian 分布であることから，照射接合部の温度のシミュレーションモデルを立てた．このレーザ光を往復動作させたスキャンライン上の端部と中央部の昇温状態をシミュレーションと実験で確認し，端部と中央部の昇温状態が同一となる条件に，最適なスキャン速度があることを示した．

本研究で考案したレーザ光のスキャンライン照射加熱方式は，流動制御によるはんだ材供給量の最適化だけでなく，全体加熱方式に比べて，部品への熱ダメージの大幅低減，非接触加熱による不純物混入や静電気破壊の防止ができる．また，接合部のみを全体加熱する本加熱方式は，溶融はんだ材の表面張力による接合部の自己位置修正効果や接合部ギャップの矯正により，接合部の接合強度ばらつきを低減を可能とした．

また，スキャンレーザはんだ付けの優位点として，はんだ付け時間の短縮がある．従来のレーザ光走査加熱方式で 0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC をはんだ付けした場合，2.5 mm のレーザ光径を 6 mm/s で走査し，はんだ付け時間は 15 秒かかる<sup>34)-36)</sup>．他の文献<sup>12)</sup>にも，高出力で高速スキャンの加熱により，1 ピンあたりのはんだ付け時間を 0.01 秒とする事例はあるが，1 ピンごとに停止して加熱を行いながら移動するため，この動作時間を含めると 12 秒程度のはんだ付け時間が必要と考えられる．開発した方式は，従来のレーザ光走査方式のはんだ付け時間 12 秒に対し，半分の 6 秒を可能とした．

この QFP-IC 実装の量産用全自動はんだ付けシステムの開発により，はんだ付け工程の歩留り向上と製造時間を短縮し，生産性の向上や，新しいデバイスの接合への適用を可能とした．

FED の蛍光体パネルの製造プロセスの場合，塗布ノズルとガラス基板間のギャップ制御を行うことで，ディスペンス塗布のばらつき量を低減し，蛍光体ペーストの流動制御は可能となる．ディスペンサノズルから吐出される蛍光体ペーストの圧力損失は，塗布ノズル

の半径方向の圧力損失の合計と，塗布ノズル内の圧力損失の合計から構成されることから，塗布流量のシミュレーションモデルを立てた．このノズルをギャップ制御して塗布した場合の塗布断面積を，シミュレーションと実験で確認し，ギャップ量を制御すれば，塗布厚さが一定となる条件があることを示した．

従来，PDPでのディスペンス塗布プロセスは，塗布量を画素ごとに持つ隔壁の表面張力で蛍光体ペーストの塗布量を制御し，混色問題を隔壁構造で回避していた．しかしFEDは，画素ごとに隔壁を持たないため，PDPのディスペンス塗布プロセスは適用できなかった．

考案した新しい塗布方式と，前処理で付着張力を調整したBMは，BM開口部に厚膜の蛍光体ペーストを形成した．この理由は，塗布した蛍光体ペーストの拡散を制御し，混色の回避が行えるプロセスを見出したためである．

隔壁をもたないFEDの蛍光体パネルが，隣接した蛍光体ペースト相互の混色を回避することで，1色ごとに露光，剥離，熱処理を行う従来プロセスを，塗布後の1回に削減できる指針を示した．このプロセスで，FEDの蛍光体層形成工程の生産性は向上するといえる．

以上から，レーザ光を用いた集積回路接合材料，ディスプレイ蛍光体材料の流動制御に関する本研究は，そのメカニズムの解明とシミュレーションモデル構築および評価，信頼性試験による量産適用までを包含することで，学術的ならび工業的な意義が高い．

## 1-4 本論文の構成と概要

本研究は，次の7章から構成されている．図1-13に，論文の構成を示す．

第1章では，研究の背景や目的，意義，論文の構成と概要について述べている．本章の第2節の本研究の目的で述べる5つのアプローチが，第2章から第6章までに対応している．

第2章では，4辺同時レーザ光スキャン加熱プロセスについて述べている．ここでは，4辺同時のスキャンレーザ光を形成するため，レーザ発振器，4分岐光学系，レーザスキャン機構から構成する装

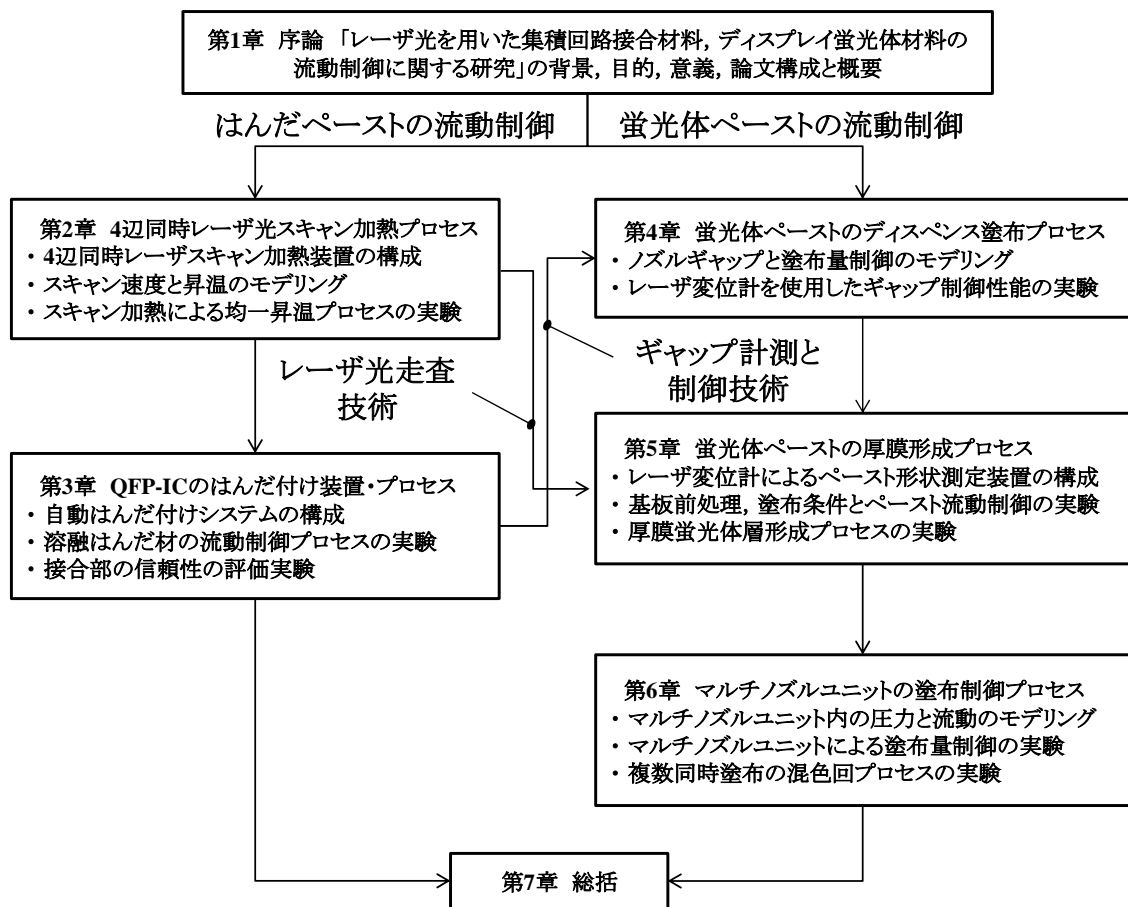


図 1-13 各研究テーマの構成と関係

置を考案し，その性能を評価している．スキャンライン上の接合部は，レーザ光が往復通過することで，吸熱と放熱を繰り返して昇温する現象を，シミュレーションモデルと実験で評価している．また実験で，QFP-IC 接合部に照射したスキャンライン上の中央と端の昇温特性が均一となるスキャン振幅条件を明らかにしている．

第 3 章では，QFP-IC の 4 辺同時はんだ付けについて述べている．ここでは，はんだペーストと QFP-IC の供給，4 辺同時レーザスキャン加熱を，自動で行う，はんだ付けシステムを開発し，その性能を評価している．はんだ付けに必要な熔融はんだ材の流動制御の条件として，はんだペースト供給量，レーザ出力とレーザ光径，加熱時の接合部昇温特性，および接合部のギャップ矯正の効果を，明らかにしている．この得られたプロセス条件で接合部信頼性を評価し，量産適用への可能性を示している．

第 4 章では、蛍光体ペーストの、ディスペンス塗布プロセスについて述べている。ここでは、ノズルとガラス基板のギャップ制御をレーザ変位計で行うディスペンス塗布装置と、塗布形状測定装置を開発し、そのギャップ性能と測定性能を評価している。また、ギャップ制御を行う塗布のシミュレーションモデルを検討し、塗布断面積が均一となる塗布ノズル径、塗布圧力、ギャップ変動の影響の少ないギャップ制御範囲を実験で評価している。

第 5 章では、蛍光体ペーストの厚膜形成プロセスについて述べている。ここでは、蛍光体ペーストの流動制御を行うため、ガラス基板と蛍光体ペーストが含有する Butyl Carbitol Acetate (BCA) の付着張力、塗布圧力と塗布幅および塗布厚さ、蛍光体含有量と塗布厚さおよび熱処理後の蛍光体層の厚さを、実験でそれぞれ評価している。その結果から、BM 開口部に形成する蛍光体層のプロセス条件を示している。

第 6 章では、マルチノズルユニットの塗布制御プロセスについて述べている。ここでは、第 5 章で述べたシングルノズルによる、蛍光体ペーストの塗布プロセスの生産性を向上するため、16 本のノズルを備えたマルチノズルユニットの流動制御を検討している。圧力と流速のシミュレーションモデルおよび実験から、マルチノズルユニットの各ノズルの塗布量を評価している。塗布量は、供給口から離れたノズルほど圧力損失で低減するが、ギャップ制御を行うことで、塗布厚さ方向でのばらつきを低減している。このマルチノズルユニットを複数台搭載するマルチノズルヘッドで、混色の発生しない、複数同時塗布が行える指針を示している。

最後に、第 7 章では、本研究を通して得られた成果をまとめ、結論を述べた後、今後の課題と将来展望を述べている。



## 参考文献

- 1) J. Ikeno: “Study trend of laser material processing”, 2013 JSPE Autumn Conference, pp.261-261 (2013) [in Japanese]
- 2) J. F. Ready: SME Technical Paper MRR **75** p.6 (1975).
- 3) F. Murakami: “A Precision Laser-Trigonometer”, the Review of Laser Engineering **16**, pp. 292-301 (1988) [in Japanese].
- 4) J. C. Jagt: “Reliability of Electrically Conductive Adhesive Joints for Surface Mount Applications”, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. Part A. **21**, pp.215-225 (1998).
- 5) I. Fidan, R. P. Kraft, L. E. Ruff, and S. J. Derby: “Integration steps of a fully-automated remanufacturing cell system for fine-pitch surface mounted devices”, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. Part C. **21**, pp.71-78 (1998).
- 6) R. Haruta: “Roadmap on Packaging Technology”, Journal of The Japan Institute of Electronics Packaging **10**, pp.353-357 (2007) [in Japanese].
- 7) I. Komatsu, T. Kanetsuna, I. Hayafuji, H. Tsuchiya: “Laser soldering machine”, Toshiba Review **43**, pp.433-436 (1988) [in Japanese].
- 8) T. Nakahara, M. Nakazono, H. Tsuchiya: “Joining Technology for Electric Components”, Journal of The Japan Welding Society **58** pp.455-461 (1989) [in Japanese].
- 9) J. P. Jung: “A study on the solderability of QFP outer lead using Nd:YAG laser”, Metals and Materials **5**, pp.317-321 (1999).
- 10) Z.-J. Han, S.-B. Xue, H. Wang, J.-X. Wang, L. Zhang, X. Zhang, and S.-L. Yu: “Mechanical properties of QFP micro-joints soldered with lead-free solders using diode laser soldering technology”, Transactions of Nonferrous Metals Society of China **18**, pp.814-818

(2008).

- 11) Y. Tian, C. Wang, and D. Liu: “Thermomechanical behavior of PBGA package during laser and hot air reflow soldering”, *Modell Simul Mater Sci Eng* **12**, pp.235-243 (2004).
- 12) K. Murakami, A. Adachi, J. Hirota, O. Hayashi, S. Hoshinouchi, and M. Sakao: “Study of a Laser Soldering Process for Fine-Pitch Leads. (2nd Report)”, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering* **60**, pp.713-717 (1994) [in Japanese].
- 13) Z. Han, S. Xue, J. Wang, X. Zhang, S. Yu, and L. Zhang: “Laser Soldering of Fine Pitch QFP Devices Using Lead-Free Solders”, *JOURNAL OF ELECTRONIC PACKAGING* **131**, pp.0210041-0210045 (2009).
- 14) J. Amako, K. Umetsu, and H. Nakao: “Laser soldering with light-intensity patterns reconstructed from computer-generated holograms”, *Appl. Opt.* **40**, pp.5643-5649 (2001).
- 15) H. Miura, K. Ishikawa, K. Okino: “Development of a rectangular dual-beam optical unit for YAG laser soldering of fine pitch flat package IC's”, *The Review of Laser Engineering* **17**, pp.469-477 (1989).
- 16) H. Fujikake, H. Wakemoto, T. Ishinabe, A. Nagase, M. Baba, T. Numao, Y. Hirano, T. Shiga, Y. Neo, S. Shikama, K. Takatori, S. Maeda, T. Yamamoto, K. Ishii, M. Nakata, M. Adachi, H. Okumura, S. Ozawa: “Research Trend on Information”, *Display Technology. J. Inst. Image Inf. Telev. Eng.* **67** pp.152-165 (2013) [in Japanese].
- 17) M. Osawa, T. Kurita, H. Fujikawa, Y. Murakami, S. Tokitou, S. Hirota, S. Okuda,, Y. Neo, K. Taira, S. Suyama: “Information Display”, *J. Inst. Image Inf. Telev. Eng.* **58**, pp.1064-1071 (2004) [in Japanese].
- 18) A. Niwa, T. Atsumi, K. Inaguma, T. Okamoto, K. Nomura, H. Okumura: “A 17-in High Resolution DC Plasma Display”, *J. Inst. Image Inf. Telev. Eng.* **44**, pp.571-577 (1990) [in Japanese].

- 19) Web [ <http://www.patentjp.com/16/V/V100310/DA10001.html>]
- 20) H. Nakane, H. Adachi: “Field Emission Electron and its Applications”, IEEJ Trans. Sens. Micromach. **124**, pp.207-212 (2004) [in Japanese].
- 21) J. Ishikawa: “Current Status of Field Emission Researches and Expectation for New Electron Sources”, J. Surf. Sci. Soc. Jpn. **23**, pp.2-8 (2002) [in Japanese].
- 22) J. D. Carey: “Engineering the next generation of large-area displays: prospects and pitfalls”, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **361**, pp.2891-2907 (2003).
- 23) T. Shinoda, K. Awamoto: “Plasma Display Technologies for Large Area Screen and Cost Reduction”, IEEE Trans. Plasma Sci. **34**, pp.279-286 (2006).
- 24) R.W. Sabnis: “Color filter technology for liquid crystal displays. Displays”, **20**, pp.119-129 (1999).
- 25) T. Lee, Y. Choi, S. Nam, C. You, D. Na, H. Choi, D. Shin, K. Kim, K. Jung: “Color filter patterned by screen printing”, Thin Solid Films **516**, pp.7875-7880 (2008).
- 26) D. Erath, A. Filipović, M. Retzlaff, A. K. Goetz , F. Clement, D. Biro, R. Preu: “Advanced screen printing technique for high definition front side metallization of crystalline silicon solar cells”, Solar energy mater. Solar Cells **94**, pp.57-61 (2010).
- 27) T. Lee, J. Noh, C.H. Kim, J. Jo, D.S. Kim: “Development of a gravure offset printing system for the printing electrodes of flat panel display”, Thin Solid Films **518**, pp.3355-3359 (2010).
- 28) M. Pudas, J. Hagberg, S. Leppävuori: “Printing parameters and ink components affecting ultra-fine-line gravure-offset printing for electronics applications”, Journal of the European Ceramic Society **24**, pp.2943-2950 (2004).
- 29) M. Yoshino: Developmental “Trends of Materials for Display

- Device”, J. Inst. Image Inf. Telev. Eng. **51**, pp. 419-422 (1997) [in Japanese].
- 30) J.H. Lee, C.D. Yoo, Y. Kim: “A laser-induced thermal spray printing process for phosphor layer deposition of PDP”, J. Micromech. Microeng. **17**, pp.258-264 (2007).
  - 31) J.H. Lee, S.J. Na, C.D. Yoo, Y. Kim: “Fabrication of LCD color filter using laser-induced thermal spray printing”, Sens. Actuators A Phys. **148**, pp.454-461 (2008).
  - 32) Y.D. Kim, J.P. Kim, O.S. Kwon, and I.H. Cho, Dyes, “The synthesis and application of thermally stable dyes for ink-jet printed LCD color filters”, Pigments, **81**, pp.45-52 (2009).
  - 33) D. Lee, W. Wang, T. Gutu, C. Jeffryes, G.L. Rorrer, J. Jiao, C. Chang: “Biogenic silica based  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}^{2+}$  and  $\text{Y}_2\text{SiO}_5\text{:Eu}^{3+}$  phosphor layers patterned by inkjet printing process”, Journal of Materials Chemistry, **18**, pp.3633-3635 (2008).
  - 34) A. Flanagan, A. Conneely, T. J. Glynn, G. Lowe: “Laser soldering and inspection of fine pitch electronic components”, J. Mater. Process. Technol. **56**, pp.531-541 (1996).
  - 35) R. Kibushi, T. Hatakeyama, D. Imai, S. Nakagawa, M. Ishizuka: “Optimal laser condition for laser soldering in cream and ring solder”, ICSJ, 2013 IEEE 3rd, Anonymous, pp.1-4 (2013).
  - 36) E. Semerad, L. Musiejovsky, J. Nicolics: “Laser soldering of surface-mounted devices for high-reliability applications”, J. Mater. Sci. **28**, pp.5065-5069 (1993).

## 第2章 4 辺同時レーザ光スキャン加熱プロセス

### 2-1 はじめに

QFP-IC などアウターリード型パッケージのはんだ付けでは，パッケージモールド樹脂の低い耐熱性能<sup>1)</sup>や，静電気破壊を考慮して，レーザ光を走査して接合部を順番に非接触加熱する，個別はんだ付けを行っていた<sup>2)-4)</sup>．また，光学系ミラーを用いたキセノンランプやフォログラムレンズによる，レーザ集光での帯状加熱方式では，部材の熱容量や大きさに合わせた専用光学系を必要としていた<sup>5),6)</sup>．前者は多ピン QFP-IC での加熱処理時間の増加，後者は製品品種ごとに専用光学系交換や照射箇所での昇温ばらつきの発生など，はんだ材の流動制御を含めた，実用上の問題を抱えていた．特に，レーザ発振器は高価なため，レーザはんだ付けシステムの普及の妨げとなっていた．

本研究では，0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の 4 辺方向に整列した接合部が形成する四角形の外周上に，帯状の YAG レーザ光のスキャンラインを照射する独自のシステムを考案し，スキャンラインの昇温ばらつきが 10 °C 以内となるプロセスを開発した．

この研究における実験装置と実験方法，実験結果およびその考察について，以下に述べる．

### 2-2 装置の構成と実験方法

本研究では，YAG レーザを使用した非接触加熱の均一昇温プロセスを検討した．発振したレーザを 4 分岐する光学系，4 分岐したレーザ光を 4 本のスキャンラインに変換するスキャン加熱ヘッドを考案した，はんだ付けの加熱源として YAG レーザ光を採用した理由は，光学ミラーやプリズムでの分割が容易，高出力が可能，レーザ光の波長が 1.06  $\mu\text{m}$  であるため光ファイバーでの伝送が可能，波長が近赤外線領域のためはんだ接合部での波長吸収がよい<sup>7)</sup>，といった利点からである．

### 2-2.1 YAG レーザ光の 4 分岐光学系の評価方法

図 2-1 に，実験で使用した，東芝製 YAG レーザ発振器 LAY-632-5AG の外観を示す．レーザ光 4 分岐のスキャンライン照射装置に組み込むため，高出力で小型な Constant Wave (CW) の YAG レーザ発振器と電源を開発した．このレーザ発振器の最大出力は 200 W，発振モードはマルチモードである．レーザ出力は，励起ランプであるクリプトンアークランプに入力する電流量で制御が可能である．また，この発振器から出力されたレーザ光の発散角は，半値全幅において 15 mrad となるよう，YAG ロッドを設計した．レーザ出力を，Coherent Inc. 製レーザパワーメータ PM30 で測定することにより，このレーザ発振器の性能を評価した．



図 2-1 YAG レーザ発振器の外観

図 2-2 に、開発したレーザ光 4 分岐光学系の原理とレーザ光の出力の測定方法を示す．この分岐光学系は，以前に論文掲載した内容を元に，改良を行った<sup>8),9)</sup>．YAG レーザ発振器から発振したレーザ光は，75 %，65 % および 50 % の透過型ミラーと全反射のミラーを使用することで，レーザ出力を 4 等分に分割した．また，レーザ光が 45° で入射するようにミラーを設置することで，光軸に対し 90° 曲げて分岐光を取り出した．

4 分岐したレーザ光は，レンズで集光させ，光ファイバーに入射した．光ファイバーを使用することで，自在かつ搬送ロスを抑えて，加工点ヘッドにレーザ光を供給できた．この光ファイバーは，コア層の周囲をクラッド層と被覆層で構成されている．入射したレーザ光は，このクラッド層の表面を反射しながら，コア層を伝搬する．このため，光ファイバーの曲率径を小さくしてゆくと，クラッド層でのレーザ光の入射角度が大きくなり，反射時のロスや反射できず透過する場合がある．この理由により，光ファイバーの最小曲率径

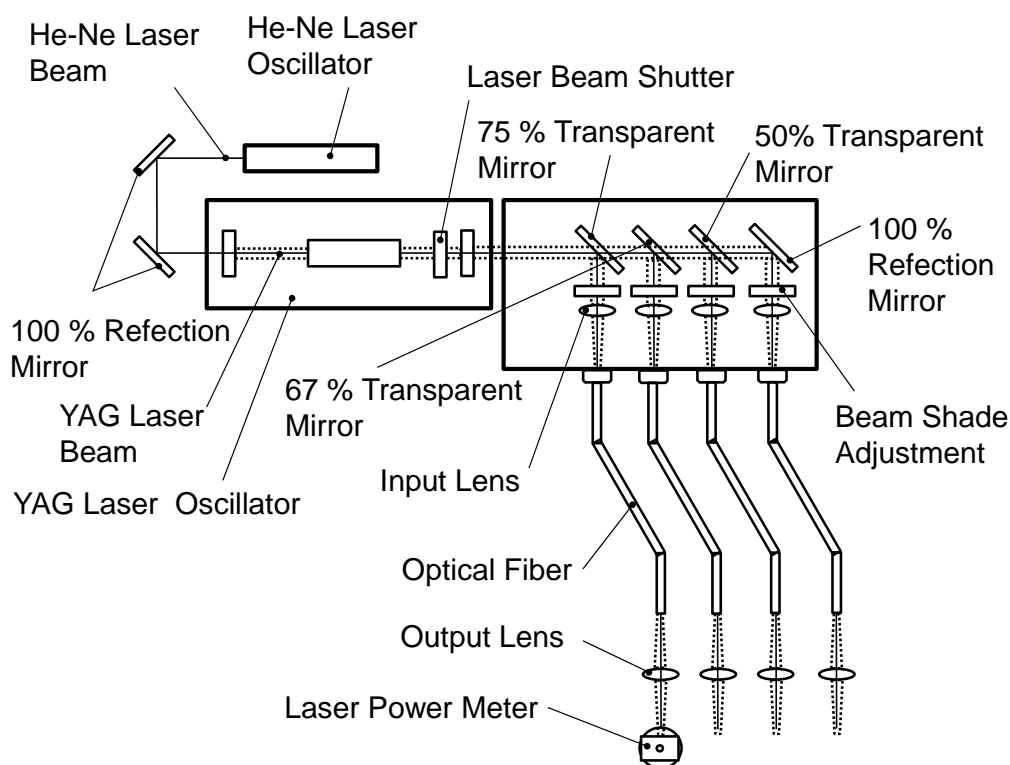


図 2-2 レーザ光 4 分岐光学系の構成と出力測定方法

以上で、使用する必要があった．また、光ファイバーから出射したレーザ光は広がるため、光ファイバーの出射口に設置した集光レンズで、再び集光を行う必要があった．

4本のレーザ光の出力を均一化するためには、4分岐後に備えた調整用の遮蔽板を使用して、出力の調整を可能としている．このレーザ光の4分岐後に遮蔽板で出力均一化したエネルギーをレーザパワーメータ PM30 で測定し、光学系の性能を評価した．

図 2-3 に、レーザ光の集光レンズによる集光原理を示す．開発したレーザ光4分岐光学系では、分岐した後に光ファイバーで搬送し、再度集光したレーザ光を照射する．このため、集光レンズが装置内の複数個所で必要となった．レーザ光の集光サイズは、集光レンズの焦点距離によって決定されるため、この関係は次式で与えられる．

$$d_{min} = f_{in} \times \theta \dots \dots \dots (2-1)$$

この時の  $d_{min}$  はレーザスポット集光径 (mm)、 $f_{in}$  は集光レンズの焦点距離 (mm)、 $\theta$  (rad) は半値全幅の広がり角度を表す．この式の関係から、 $f_{in} = 40 \text{ mm}$  の場合、 $d_{min} = 0.6 \text{ mm}$  と算出できた．この計算結果より、本装置に使用するレーザ光搬送用の光ファイバーのコア直径は、入射位置決めばらつきを考慮し、 $0.8 \text{ mm}$  を選定した．

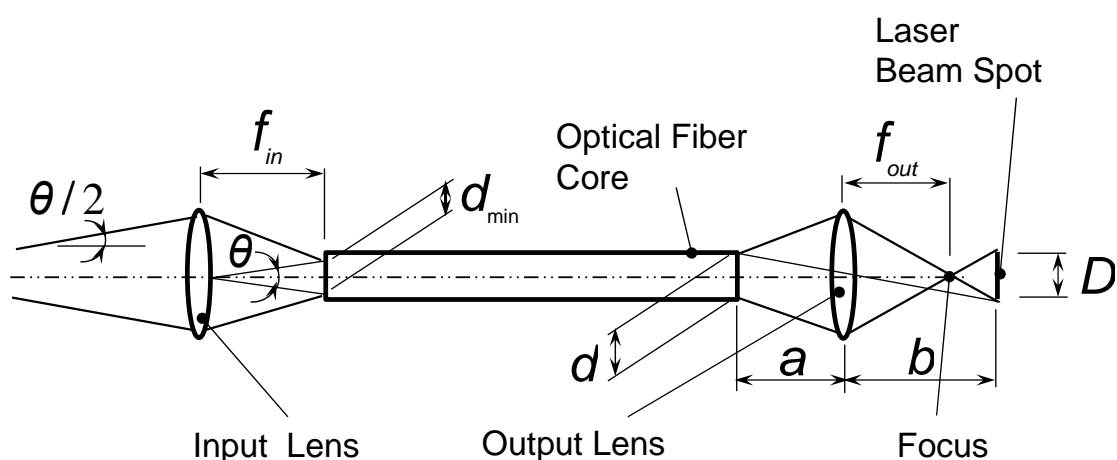


図 2-3 集光レンズによる集光方法



光ファイバーでの搬送の特徴として、レーザ発振器が持つ半値全幅の広がり角度とは異なり、光ファイバーに依存した広がり角を示す。光ファイバーによる搬送後に出射されたレーザ光のビーム径と光ファイバーのコア直径の関係は、次の式で表すことができる。

$$d \geq \frac{a}{b} \times D \dots \dots \dots (2-2)$$

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_{out}} \dots \dots \dots (2-3)$$

ここで、 $a$  は光ファイバー出射位置から集光レンズ中心までの距離 (mm)、 $b$  は集光レンズ中心からレーザ集光位置までの距離 (mm)、 $D$  はレーザ光の出射ビーム径 (mm)、 $d$  は光ファイバーのコア径 (mm)、 $f_{out}$  はレンズの焦点距離である。

この式に、光学系で使用する光ファイバーのコア径  $d$  と集光レンズの焦点距離  $b$  を入力し、レーザ出力側でのレーザ光照射径が 3 mm になることを算出した。ただし、レーザ集光位置までの距離を変えることで、レーザ光照射径は、3～5 mm までのデフォーカス調整が可能である。出射されたレーザ光はファイバー通過後、インコヒーレントな光学系で絞ることになるが、スキャンによる均一熱源として使用するため、エネルギー分布による影響はない。

## 2-2.2 スキャン照射による加熱プロセスと実験方法

図 2-4 に、2 本の平行したライン状の集光レーザ光で加熱を行う原理を示す。図 2-2 で示した 4 分岐されたレーザ光の内、2 本のレーザ光を、ガルバノモータで振幅した全反射ミラーに照射し、平行な 2 本のライン状のレーザ光に変換した。このライン状のレーザ光を、以後スキャンラインと呼称する。この 2 本のスキャンラインの照射長さや照射位置は、反射ミラーの振幅角度とレーザ光の入射間隔を、数値制御で決定した。

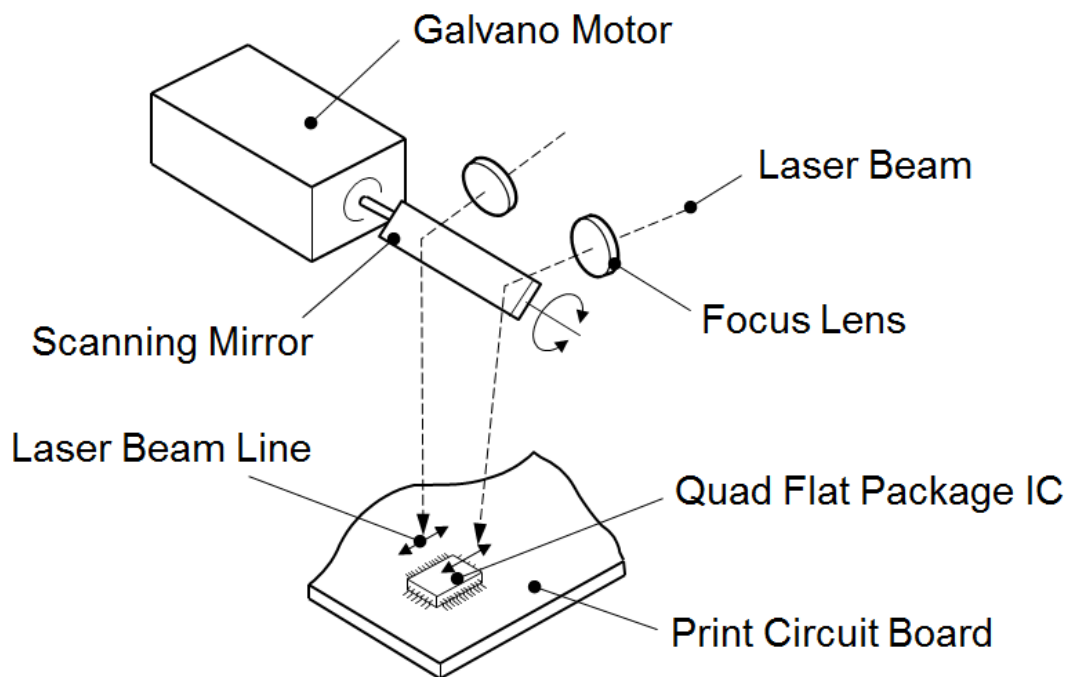


図 2-4 レーザ光スキャンラインによる加熱方法

図 2-5 に， 0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC のはんだ付けを行う， 考案した 4 辺同時加熱ヘッドの構造を示す． この 4 辺同時加熱ヘッドは， 図 2-4 に示した機構 2 式を X 方向， Y 方向に直交かつ上下に配置することで構成した． この構成とした理由は， QFP-IC の接合部が四角形の外周上に配置されるためである． 4 本のスキャンラインは， スキャンライン長， スキャン幅， スキャニング速度を数値制御できる． レーザ光径は， (2-3) 式より， 照射位置から集光レンズまでの距離を調整することで， 3～5 mm までの調整が可能である．

加熱対象は， PCB の接合パターン， はんだペースト， QFP-IC のアウターリードから構成される． このため， レーザ光照射時の接合部温度は， これら被照射対象物の熱拡散係数と熱伝導率に依存するといえる． よって， レーザ光を照射する照射範囲の適正化が， はんだ付け時間を短縮する条件のひとつになる． 実験では， 観察カメラを使用して， はんだ溶融からはんだぬれの完了までを観察し， レーザ光径とはんだ付け時間の関係から， 最適なレーザ光径を決定した．

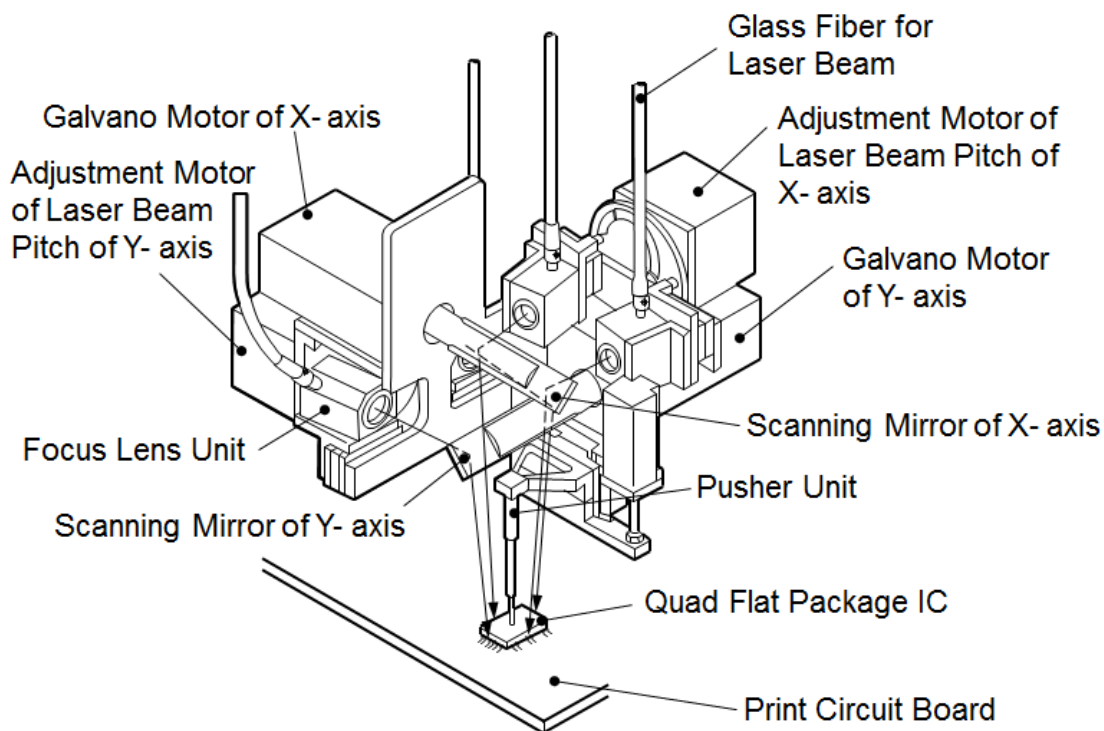


図 2-5 4 辺同時加熱ヘッドの構成

図 2-5 に示す，4 辺同時加熱ヘッドは，X 軸と Y 軸それぞれに備えたガルバノモータで，全反射ミラーの振幅制御を行った．このガルバノモータには，GSI Group Inc. 製の G325D を使用した．このガルバノモータの回転ロータは，回転方向を左右のバネで支える構造である．このため電磁コイルの磁力により， $0^{\circ}$  を中心とした左右の回転方向の位置決め制御が行える機能を有する．

本研究では，ガルバノモータの動作特性を考慮し，等速での振幅動作を三角波の入力電圧と周波数で，制御することを検討した．この三角波の電圧発生器には，横河電機製のファンクションジェネレータ FG-120 を使用した．実験方法として，ファンクションジェネレータで発生させた入力電圧信号と，ガルバノモータに電圧入力した際のエンコーダの角速度信号を，岩崎通信製のデジタルストレージオシロスコープ MS-5511 で測定した．

また，4 辺同時加熱ヘッドを開発することで，局部加熱でありな

がら，全接合部に対しては全体加熱リフローの均一加熱と同等の加熱が行えるプロセスを示した．具体的には，ガルバノモータによる，レーザ光の等速スキャンラインの形成条件として，スキャンラインの両端と中央の接合部温度プロファイル形状が近づく入力周波数の条件を，実験で求めた．

川崎博士は，走査するレーザ光の照射に対し，被加熱対象物の温度分布が，時間当たりのレーザ光照射熱量  $Q(x,y,z,t)$  の割合で決定される，と述べられている<sup>10),11)</sup>．被加熱対象物が均一な熱容量とした場合，熱分布は，次の式で示すことができる．

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{Q(x,y,z,t)}{K} + \nabla^2 \theta \dots \dots \dots (2-4)$$

ここで， $\alpha = K / (\rho \times C_p)$  は熱拡散定数， $K$  は熱伝導度 ( $\text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C}$ )， $C_p$  は熱容量 ( $\text{J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ )， $\theta$  は被加熱対象物の温度 ( $^\circ\text{C}$ )， $\rho$  は被加熱対象物の密度 ( $\text{g/cm}^3$ )， $Q(x,y,z,t)$  はレーザ光の照射熱量 ( $\text{W/cm}$ )， $(x,y,z)$  は測定位置， $t$  は時間 (s) である．

PCB の厚さが薄いため，照射面の Z 方向 (大気) での放熱ロスは，XY 方向への熱伝導と比較して少なく，被加熱対象物の測定地点  $(x,y)$  での温度  $\theta$  は，次式で表せる．

$$\theta = \frac{A\alpha}{4K(\pi\alpha)^{3/2}} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{W(x',y')}{\sqrt{t^3}} \exp\left\{-\frac{(x-x'+U)^2 + (y-y')^2}{4\alpha t}\right\} dx' dy' dt \cdot \quad (2-5)$$

ここで， $A$  は吸収率， $U$  はレーザ光の移動速度 ( $\text{cm/s}$ )， $W(x',y')$  はレーザ光通過時のエネルギー分布密度 ( $\text{W/cm}^2$ )， $(x',y')$  は通過するレーザ光の中心位置である．

また，光ファイバー内を反射伝播したレーザ光が，焦点レンズから出射された際のエネルギー分布は，Gaussian 分布を示し，そのエネルギー分布密度は，次の式で表すことができる．

$$W_{GS}(x',y') = \frac{W}{\pi a^2} \exp\left\{-\frac{(x'^2 + y'^2)}{a^2}\right\} \dots \dots \dots (2-6)$$

ここで， $W_{GS}$  は Gaussian 分布のエネルギー分布密度 ( $\text{W/cm}^2$ )， $W$

はレーザ出力 (W),  $a$  はレーザ照射幅 (cm) である.

(2-6) 式の Gaussian 分布型レーザ光のエネルギー分布密度で加熱した際の, 接合部温度  $\theta_G$  を表す (2-5) 式は, 次の式に変換できる.

$$\theta_G = \frac{AW}{Kr\sqrt{\pi^3}} \int_0^\infty \frac{\exp\left\{-\frac{(X+V \cdot p^2)^2 + Y^2}{\eta^2 + p^2}\right\}}{\eta^2 + p^2} dp \dots\dots\dots (2-7)$$

ここで,  $r$  はレーザ光の半径 (cm),  $U$  はレーザ光スキャン速度 (cm/s),  $A$  は吸収率,  $K$  は熱伝導度 (W/cm・°C),  $a$  はレーザ照射幅 (cm) である. レーザ光の軸中心の極座標からそれぞれの点 ( $X, Y$ ) と速度  $V$ , レーザ照射幅  $p$  の関係は,

$$\eta = \frac{a}{r}, \quad X = \frac{x}{r}, \quad Y = \frac{y}{r}, \quad V = \frac{U \cdot r}{4\alpha}, \quad p^2 = \frac{4\alpha t}{r^2} \dots\dots\dots (2-8)$$

で表せる.

以上から, 接合部温度は, レーザ光スキャン時に発生する熱エネルギーの吸収量と, PCB 配線, PCB, QFP-IC への熱伝導による放熱量の合計に依存するといえる.

スキャンラインによる均一加熱を行うプロセスを開発するためには, ガルバノモータの周波数 (スキャン速度) とレーザ光スキャンによる加熱特性の相関を求める必要があった. この測定箇所の昇温状態を (2-7) 式による 1 Hz でのシミュレーションと実際の加熱状態の温度測定での比較で評価した.

図 2-6 に, 日本アビオニクス社製の赤外線放射温度カメラ TVA-3500 を使用した, スキャンラインの温度測定方法を示す. レーザ光をスキャンする機構の制約で, QFP-IC の真上からの測定ができないため, 斜めから測定を行った. 特に対象の加熱部分の寸法が小さいため, 赤外線レンズで測定領域を拡大し, 焦点距離は 100 mm とした. 正面と側面のレーザ光スキャンラインとセンサの距離は, 異なるため, 両者での温度測定は異なる値を示す. これは, 赤外線放射温度カメラが, 加熱体から発する単位面積あたりの赤外線のエネルギー量を測定するため, 測定箇所の表面状態や放射効率, 測定距

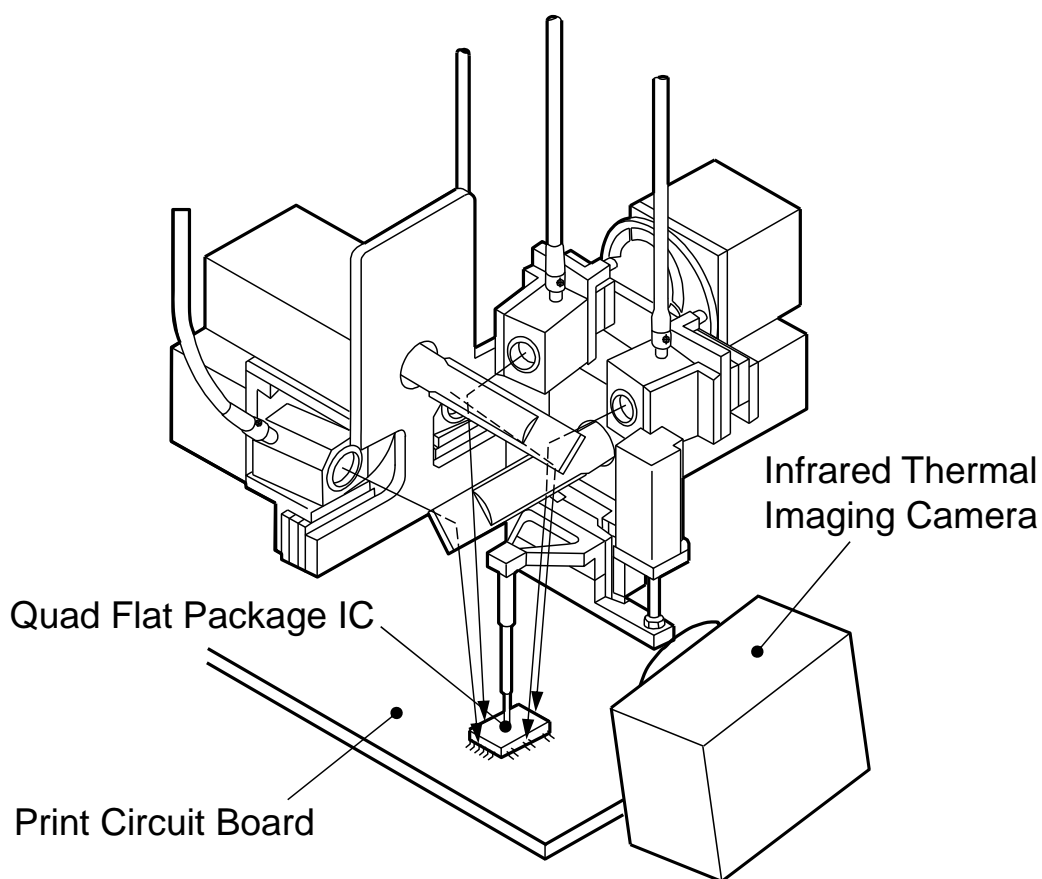


図 2-6 赤外線放射温度カメラによるスキャンラインの温度測定方法

離に対し，都度の補正が必要になるからである．

図 2-7 に，熱電対によるスキャンラインの温度状態を測定する方法を示す．はんだペーストを供給しない状態で，熱電対を QFP-IC リードと基板パターン間に設置し，この位置がずれないように，熱電対と QFP-IC パッケージを，熱硬化樹脂で固定した．温度プロファイルの測定箇所は，スキャンラインにおけるライン端部 (a) と中央部 (b) である．

ライン端部 (a) と中央部 (b) の温度測定は，スキャン周波数ごとに昇温状態を測定した．測定には，横河電機製のペンレコーダ 3056 型を使用した．この測定箇所に，はんだペーストを供給しない理由は，はんだペーストによるレーザ光の吸収率の変化や接合部での熱容量の変化を，実験結果から除外するためであった<sup>12)</sup>．

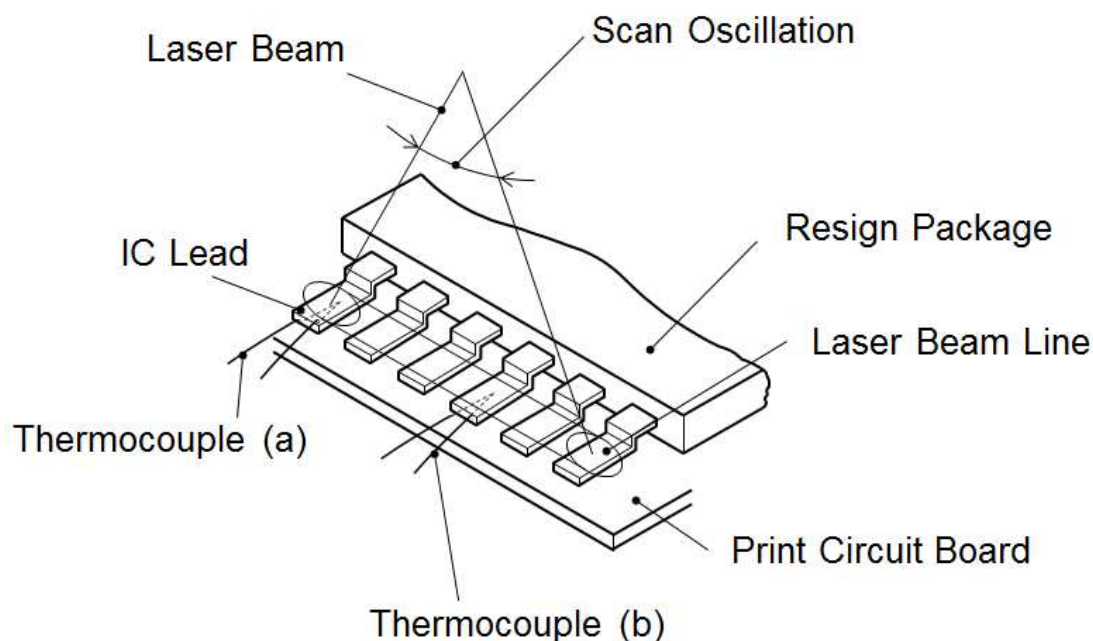


図 2-7 熱電対によるスキャンラインの温度測定方法

この温度測定の実験で，スキャンライン上の接合部の昇温が均一になる 4 方向同時加熱が可能な，ガルバノモータの入力周波数（スキャン速度）を求めた．

## 2-3 結果および考察

### 2-3.1 光学 4 分岐の実験結果および考察

図 2-8 に，開発した図 2-1 の専用レーザ発振器の発振特性を評価するため，定電圧の電流を入力して発振した際の，レーザ光の出力を測定した結果を示す．図の横軸は発振器コントローラで設定した入力電流値 (A)，縦軸はレーザ光の出力をレーザパワーメータ PM30 で測定した値である．

この結果から，200 W までの YAG レーザ発振の内，140 W までの入力電流とレーザ出力が比例することを確認した．この関係から，入力電流でレーザ出力の数値制御は可能といえる．

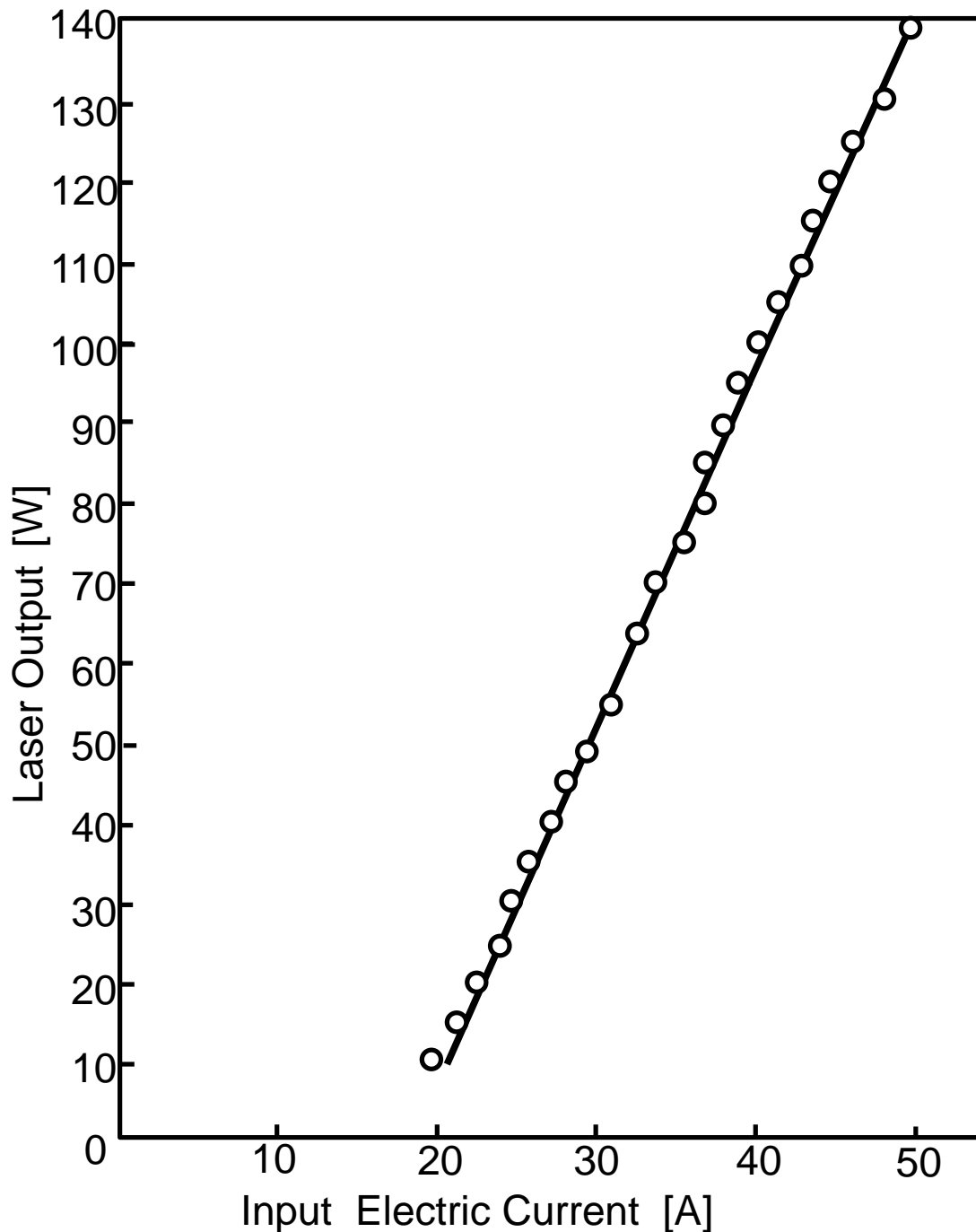


図 2-8 入力電流とレーザ発振器出力の測定結果

図 2-2 に示すレーザ光 4 分岐光学系の分岐特性を評価するため，図 2-9 に定電圧の電流を入力して発振させたレーザ光を分岐，集光，光ファイバーでの搬送後に集光したレーザ光出力の測定結果を示す．横軸は設定した入力電流値（A），縦軸は 4 分岐後のレーザ光出力である．この値は，レーザパワーメータ PM30 で 20 回（1 分岐あたり 5 回）測定値した値の平均値と， $\pm 3\sigma$  値である．



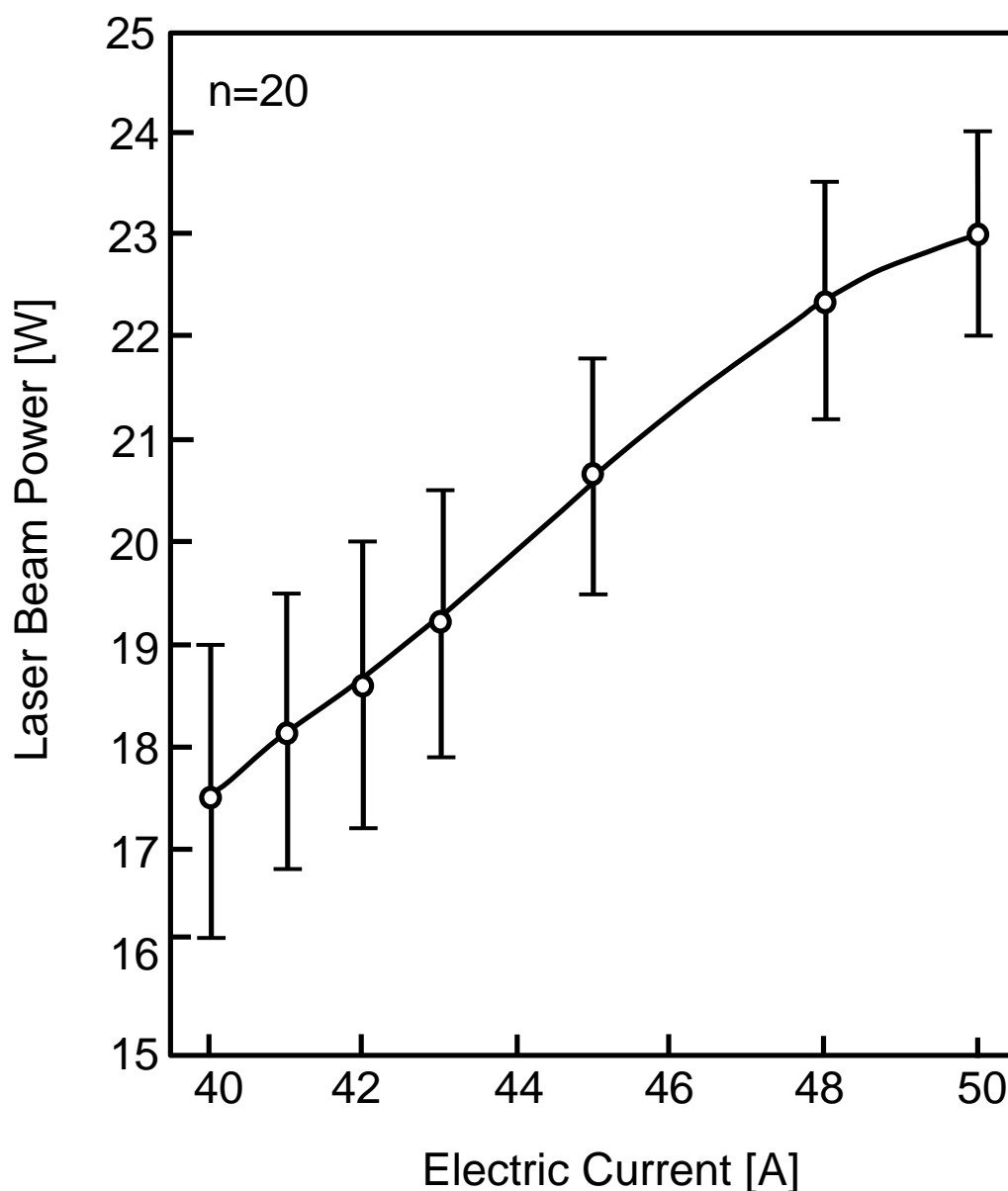


図 2-9 4 分岐光学系後の出力測定結果

入力電流 40 A から 48 A の間で、レーザ出力が 17.5 W から 22 W に比例し、48 A 以上の出力では、入力電流に対するレーザ出力の上昇率が低下した。4 本分割でのばらつきは、出力の  $\pm 8.5\%$  以内であった。

YAG レーザ発振器は、クリプトンアークランプの光を、YAG レーザロットに吸収させ、そのエネルギーをポンピングすることで、レーザ光を発振する。このため、図 2-8 は、レーザ発振器の入力電流によるクリプトンアークランプのエネルギーと、レーザ出力は比例関係にあることを示した。

しかし，図 2-8 で 45 A を発振器に入力すれば，130 W のレーザー光が出力されるのに対し，図 2-9 で 45 A を発振器に入力した場合は，21 W のレーザー光が 4 本で出力は 81 W になっている．このことから，4 分割後にその出力は 35 % 低下したことがわかった．光ファイバーのロスには，レイリー散乱（熔融石英ガラス中に生じたランダムな密度揺らぎがそのまま固定化されることに起因）があるが，この 4 分岐光学系では，図 2-2 に示す透過ミラーや反射ミラー，集光レンズ，出力調整用の遮蔽板によるロスが大きいと考える．

以上から，1 辺の照射エネルギーを 22 W 以下で 4 分岐光学を使用すれば，レーザー発振器からレーザー出射レンズまでのエネルギーロスは 35 % 発生するが，4 分岐後の出力ばらつきは， $\pm 8.5$  % 以内に抑えられた．高出力レーザー発振器が廉価になるまでは，発振器 4 台を使用した 4 辺同時加熱の装置構築よりも，考案した 4 分岐光学系の方が経済効果は大きい．

実験に使用する，スキャンライン当たりのレーザー照射エネルギーは，20 W とした．この照射エネルギーに必要な，レーザー発振器への入力電流は，最大出力の 50 % 程度であり，クリプトンアークランプの寿命を考慮すると，この条件での使用が妥当と考える．レーザー照射エネルギーを上げれば，昇温時間は短くなるが，照射エネルギーの増加による，部材の熱ダメージについて，検討が必要である．

### 2-3.2 スキャン加熱の実験結果および考察

図 2-10 に，スキャンラインの均一加熱条件を検討するため，(2-7) 式のシミュレーションで求めた接合部の昇温状態を示す．レーザー光をスキャンした際の被加熱体の温度は，昇降を繰返し，スキャンラインの端と中央ではその状態が異なった．図の横軸はレーザースキャン照射時間 (s)，縦軸は接合部温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )，(a) はスキャンライン端部の接合部温度，(b) はスキャンライン中央部の接合部温度を示す．シミュレーションの条件は，Z 軸方向の放熱が少ないこと，スキャンライン 1 辺あたりのレーザー光出力は 20 W，レーザー光径は 4mm，

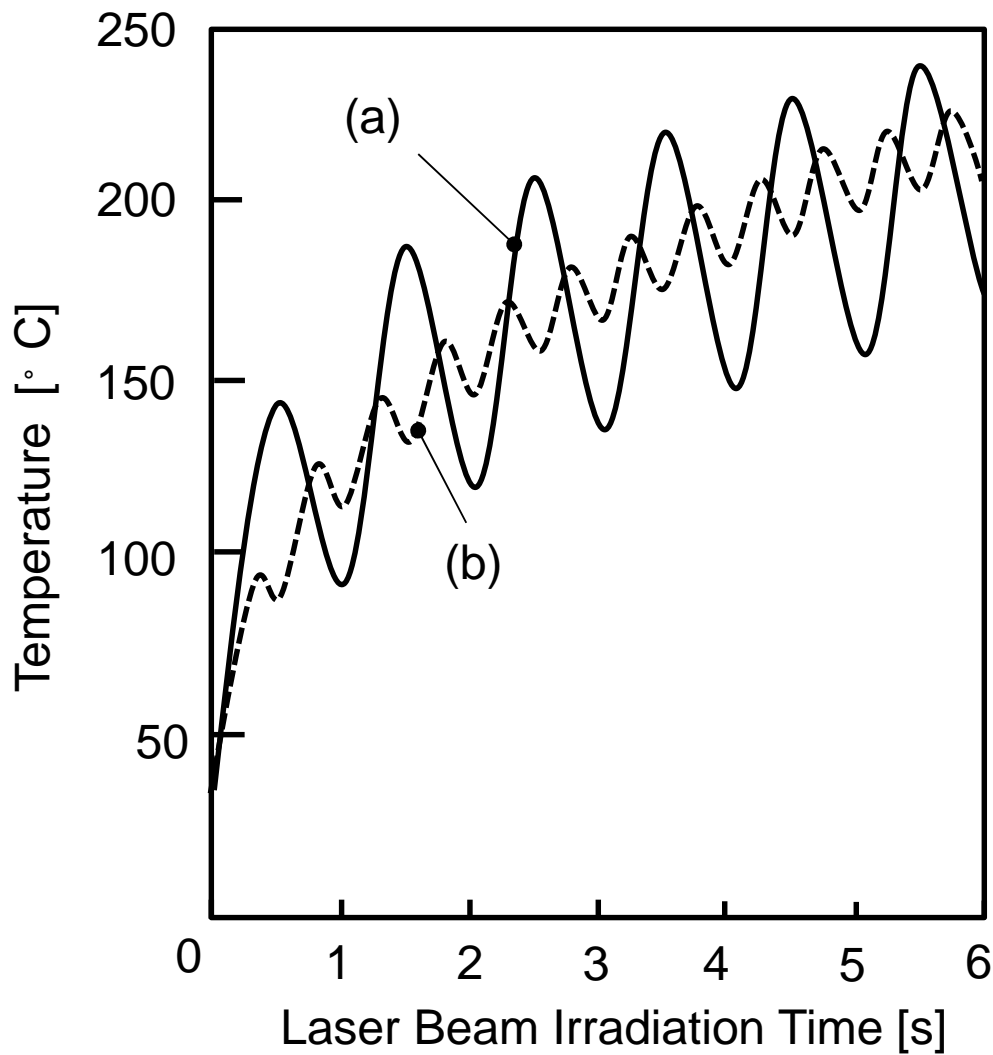


図 2-10 レーザスキャンライン照射時の昇温シミュレーション  
結果:スキャンライン端部の接合部温度, (b) スキャン  
ライン中央部の接合温度

レーザ光スキャン速度は 200 mm/s , その時のスキャンミラーの振幅周波数は 1 Hz であるから, ライン端部と中央部のレーザ光が通過する間隔は, それぞれ 1 秒と 0.5 秒である.

シミュレーションの結果, 端部と中央部ともレーザ光の通過時に温度が上昇し, 通過後から次の通過までは温度が下降することを, 繰返した. 端部と中央部の温度差は, 目標 10 °C に対し 25 °C であった. レーザ光照射時間が経過するにつれて, 1 スキャンごとの平均温度は上昇した. この結果は, ドーナツ型のビームモードのレーザ光で加熱した際の, 温度プロファイルと同様の挙動を示した<sup>8),9)</sup>.

レーザ光をスキャンした際のスキャンラインの両端では，周囲のレーザ光未照射領域が 3 方向あるため，放熱による温度低下が発生した．このことから，スキャンラインの両端での照射時間は，中央に比べて長くする必要があると考える．三角波の電圧をガルバノモータに入力した場合，スキャンライン両端の手前でスキャン動作が減速し，両端では速度は 0 mm/s になる．その後，折返し動作から等速動作まで加速を行う．この動作特性から，レーザ光の照射時間はスキャン中央部に比べて両端部が長くなる．この特性を利用すれば，放熱による両端の温度低下を低減できる．たとえば，正弦波を使用した場合には，両端での加減速にかかる時間が三角波よりもさらに長くなり，かつ等速動作時間が短いため，均一な昇温に必要な波形としては適さないといえる．

図 2-11 に，図 2-10 の条件である 1 Hz の三角波をガルバノモータに入力し，PCB の温度を赤外線放射温度カメラで測定した結果を示す．測定結果は，測定温度を色分布で示す表示と等温線分布で示す表示が選択できる．図 2-11 の左に等温線分布で示した結果，右下は色分布の結果を示す．等温線分布は，水平面に測定位置を，垂直軸に温度分布を示す．この結果は，レーザ光照射開始直後 0.25 秒の測定値である．

実験機の機構の制約上，測定は基板の垂直方向からの測定ができず，斜め方向から測定を行っている．正面と側面のレーザ光スキャンラインとセンサの距離が異なるため，両者での温度測定表示値は異なった．特に，側面はセンサとの距離が長いため，測定起因により，正面との温度差を示した．

この測定値は，絶対温度を示してはいないが，図 2-10 に示すシミュレーションの結果と類似の温度上昇の挙動を示していることが確認できた．つまり，表示の温度は，図 2-10 の結果と差があるが，照射スポットの通過で照射部の温度が上昇し，通過後から次のインターバルまでは，温度が下降していた．

シミュレーションと温度測定の結果より，スキャンライン照射部の温度は，ミラーの往復速度（＝入力電圧の周波数）を増加してい

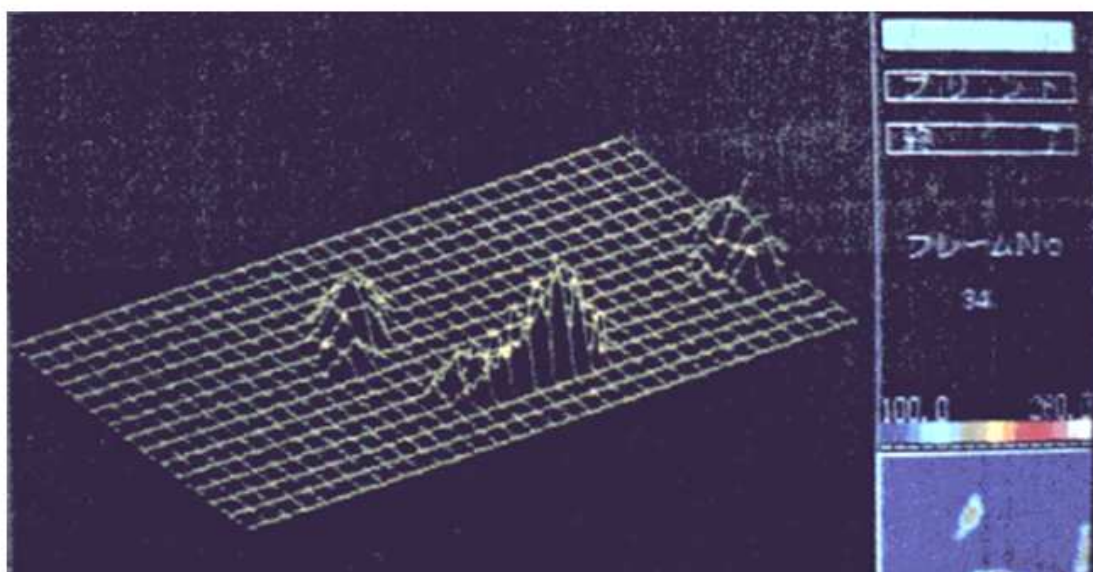


図 2-11 赤外線放射温度カメラを使用したレーザ光スキャンライン照射時の PCB 温度測定結果

くと，昇降していた温度の差は縮小し，照射時間経過に比例して温度は上昇してゆくことがわかった．このことから，三角波をガルバノモータに入力し，そのスキャン速度を上げてゆけば，スキャンラインの中央部と端部の昇温状態は，同一になると考えられる．この同一となるスキャン条件を，温度測定実験で求めた．

図 2-12 に，ガルバノモータの制御性を検討するため，ファンク

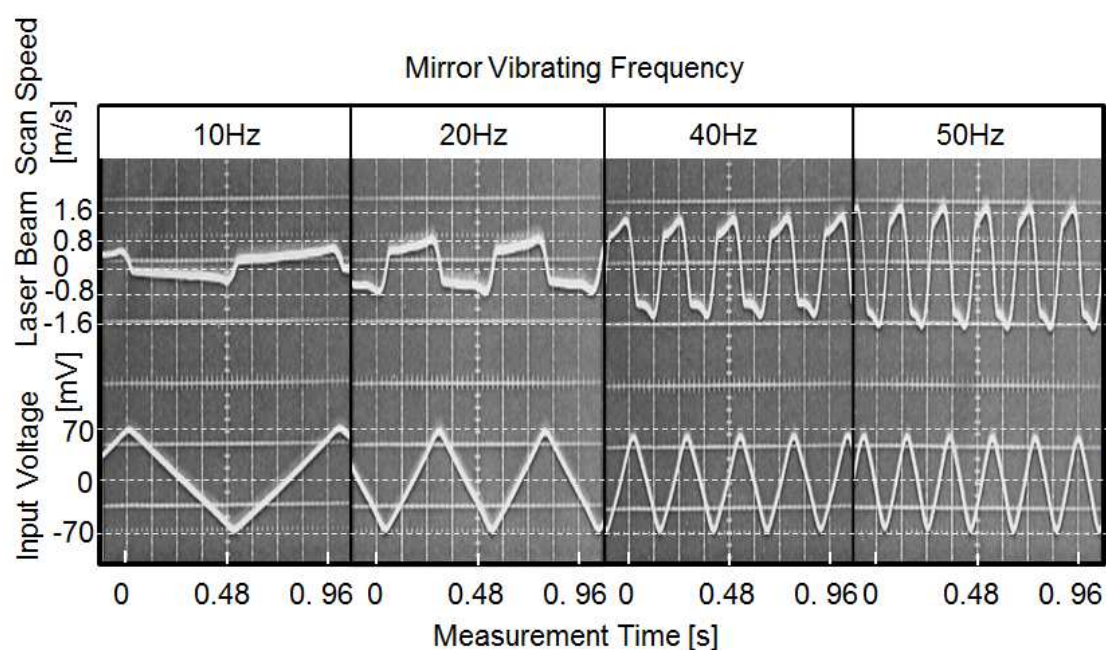


図 2-12 ガルバノモータの入力電圧とスキャン速度の測定結果

シヨンジエネレータで発生させた電圧と，ガルバノモータのエンコーダの角速度を示す．角速度は，スキャンミラーから 150mm の照射距離位置で換算した値を示す．グラフの横軸に測定時間 (s) を，縦軸の上段にレーザ光のスキャン速度 (m/s)，縦軸の下段にファンクシヨンジエネレータからの入力電圧 (mV) を示す．実験では，ガルバノモータに周波数 10, 20, 40, 50 Hz の三角波を入力し，その結果を横方向に並べて記述した．

図 2-13 に，ガルバノモータの制御に対する，スキャン加熱の特性を評価するため，ガルバノモータへの入力周波数と，スキャンライン端部と中央部の温度を測定した結果を示す．図の横軸に測定時間 (s)，縦軸に昇温時の温度 (°C) を示す．実験では，ガルバノモータに周波数 10, 20, 40, 50 Hz の三角波を入力し，その結果を横方向に並べて記述した．温度測定方法は，はんだペーストを供給しない状態で QFP-IC のリードと PCB パターン間に熱電対を設置した．はんだペーストを供給しなかったのは，はんだペーストの影響を除外するためである．

図 2-12 と図 2-13 を比較することで，入力周波数別のガルバノモータのスキャン制御とスキャンライン上での昇温状態の相関を評価した．この周波数別の結果と考察を，以下にまとめる．

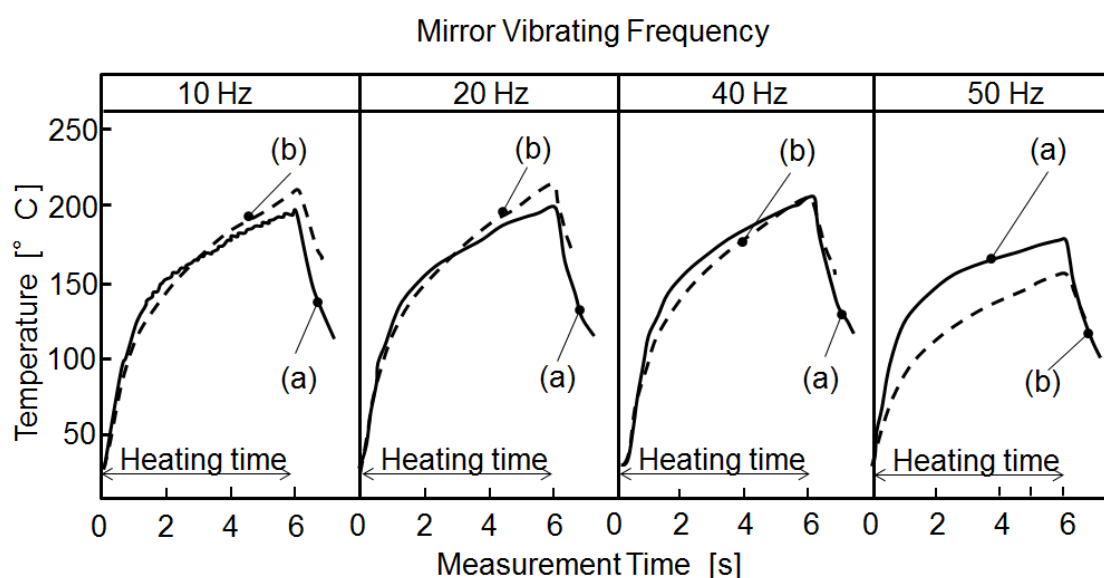


図 2-13 ガルバノモータへの入力周波数と加熱部温度の測定結果：  
(a)ラインスキャン端の温度,(b)ラインスキャン中央の温度

ガルバノモータ入力周波数が 10 Hz の場合，スキャン速度，温度プロファイル特性は，次の結果を示した．図 2-12 からスキャンラインの端部と中央部を通過するレーザ光のインターバルタイムは，0.1 秒と 0.05 秒，平均スキャン速度は，400 mm/s であった．またスキャンラインの両端での加減速の時間は，0.005 秒であった．

図 2-13 に，10 Hz の場合の昇温状態を示す．スキャンラインの端部では，インターバルタイムと同じ間隔で温度の昇降を繰返しなが，図 2-10 の 1 Hz のシミュレーションよりも平均温度は，上昇した．また，端部の温度は，中央部の温度よりも低い温度を示した．この理由として，レーザ光照射時間よりもレーザ光が照射されていない時間に，端部の PCB からの放熱量が多いことが考えられる．PCB や部材からの放熱は，レーザ光が照射されている間も発生しているため，インターバルタイムを短くすることで，端部と中央部での均一な昇温を行う条件のあることが考えられる．

ガルバノモータ入力周波数が 20 Hz の場合，スキャン速度，昇温特性は，次の結果を示した．図 2-12 からスキャンラインの端部と中央部を通過するレーザ光のインターバルタイムは，0.05 秒と 0.025 秒，平均スキャン速度は，800 mm/s であった．またスキャンラインの両端での加減速の時間は，0.005 秒であった．

図 2-13 に，20 Hz の場合の昇温状態を示す．スキャンラインの端部では，スキャンのインターバルタイムと同じ間隔で温度の昇降を繰返し，10 Hz よりも平均温度が上昇した．この端部の温度は，中央部の温度よりも低い値を示した．10 Hz よりも温度の上下幅が縮小し，平均温度が上がった理由として，インターバルタイムが短くなると，放熱による温度降下よりも早く，スキャンによる入熱での温度上昇が行われたことが考えられる．

ガルバノモータ入力周波数が 40 Hz の場合，スキャン速度，昇温特性は，次の結果を示した．図 2-12 からスキャンラインの端部と中央部を通過するレーザ光のインターバルタイムは，0.025 秒と 0.0125 秒，平均スキャン速度は，1200 mm/s であった．また，スキャンラインの両端での加減速の時間は，0.005 秒であった．これは，

加減速を行う時間が，1 往復時間 40 % を占めた．中央部では，スキャン回数が増加しても 1 スキャン当たりの加熱時間は短いため，照射時間の合計が短くなった．この理由として，図 2-12 でのガルバノモータの特性結果から，周波数を上げても加減速の時間が同じであるため，全体の照射時間に占める端部の照射時間の割合が，増加したためであると考ええる．

図 2-13 に 40 Hz の場合の昇温状態を示す．スキャンライン端部での温度が上昇し，中央部の温度が下がることで，端部と中央部の昇温状態は 5 °C 以内になった．この理由として，全体照射時間に占める端部の照射時間の割合が増加したためであると考えられる．

ガルバノモータ入力周波数が 50 Hz の場合，スキャン速度，温度プロファイル特性は，次の結果を示した．図 2-12 からスキャンラインの端と中央を通過するレーザ光のインターバルタイムは，0.02 秒と 0.01 秒であった．この時の平均スキャン速度は，1500 mm/s であった．またスキャンラインの両端での加減速の時間は，0.005 秒であった．加減速を行う時間は，全体の照射時間の 50 % を占めた．また，中央部の等速駆動範囲は縮小し，両端でのオーバシュートが大きくなった．この理由として，入力周波数が 50 Hz の場合，ガルバノモータの制御範囲を超えて駆動されたことが考えられる．

図 2-13 に，50 Hz の場合の昇温状態を示す．スキャンラインの端部での温度と中央部での温度は，どちらも 40 Hz の温度測定結果より低い値を示した．特にスキャンラインの中央部での温度は，共晶はんだ材の熔融温度より低いため，レーザ光の照射時間が 6 秒では，はんだ材は熔融できなかった．スキャン中央部での温度低下の理由として，全照射時間の 50 % を加減速動作が占めたため，両端部以外での照射時間は減少し，入熱よりも放熱による温度降下の影響が大きくなったことが考えられる．

レーザ光のスキャン方式による加熱は，(2-7) 式に示すように，単純なレーザ光の照射時間の均一化だけでは，スキャンラインの昇温状態を均一にするができない．周囲への放熱や隣り合う照射部からの伝熱影響以外にも，スキャンライン上の各点での照射インター



バルタイムの違いや，ガルバノモータの駆動特性など，均一な昇温に必要な因子があるため，最適なスキャン条件は上述のように実験から求めることとした．

以上から，0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の均一昇温には，40 Hz のレーザスキャン周波数が最適であることを見出した．レーザ光スキャン加熱は，照射部の昇温状態が PCB パターンや PCB の熱拡散定数と熱伝導度に依存するため，パッケージサイズが変わっても本条件の汎用性はあるといえる．しかし，PCB パターンが広い場合やセラミック基板などの熱伝導度が大きな材料の場合には，レーザスキャン周波数，もしくはスキャン波形の最適値を求める必要がある．

また，被加熱対象のはんだ付け接合部の熱容量が変わると，昇温状態は変化することも考えられる．このため，はんだペーストを供給した状態で，はんだ付け時の温度分布を確認する必要がある．第3章 3-3.2 はんだ付け接合部の信頼性評価で，この結果を述べる．

## 2-4 まとめ

本章では，レーザ発振器から発振したレーザ光を走査する局所加熱方式や光学系で形成するライン加熱源が抱える問題を解決するため，YAG レーザ光の4方向同時レーザ加熱スキャンシステムを考案した．実験結果から，発振したレーザ光を4分岐する光学系と，ガルバノモータを使用したスキャンミラーの振幅制御による，スキャンライン上の昇温条件を明らかにした．本章では，次の結論を得た．

- (1) レーザ発振器1台から発振したレーザ光は，透過率を設定したミラーと集光レンズを使用することで，レーザ出力を4分割することができる．75 %，67 %，50 %，0 % の透過率を持った反射ミラーと調整用の遮蔽版を併用することで，レーザ光1本当たりのばらつきは  $\pm 5\%$  になる．このときの4分岐光学系の変換効率は65 % である．しかし，この変換効率は，4台のレーザ発振器を使った場合に比べ，経済効果が高いといえる．

理由として、1 台のレーザ発振器の出力を 4 分岐することで、レーザ発振器の台数は 1 台で済むため、価格低減に加え、ハードの小型化や制御が容易さとなる。今後、レーザ発振器の低価格化や小型化が進めば、この限りではない。

- (2) ガルバノモータで振幅させたスキャンミラーに、入射角度を設定した 2 本のレーザ光を照射することで、2 本の平行なスキャンラインが形成可能な機構を考案した。2 台の機構を、直交方向かつ上下方向に配置することで、任意の四角形の外形上にスキャンラインを配置する 4 方向にスキャン加熱が行える。レーザ光照射位置、ミラーの振幅角度、出力側のレンズから照射対象までの距離を、数値制御することで、スキャンラインの位置と幅、長さの自動調整を容易とした。
- (3) スキャンライン上のレーザ照射領域の温度は、レーザ光のエネルギー吸収率、被照射物の熱拡散定数や熱伝導度に依存する。1 Hz でスキャンした場合のシミュレーション結果から、レーザ光のスキャン動作で温度の昇降を繰り返し、照射時間の経過とともに平均温度は上昇することがわかった。この結果は、赤外線放射温度カメラの測定結果と同様の挙動を示した。それぞれの結果から、スキャンラインの中央部の温度が端部よりも高くなることがわかった。この周波数を上げてゆくと、端部の温度の上昇と、中央部の降下により、スキャンラインの均一な昇温条件は求められると考える。
- (4) 0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC をスキャンラインで加熱する場合、スキャンライン上の中央部と端部で、同一の昇温プロファイルを形成する条件は、レーザ光の出力 20 W、レーザ光径 4 mm、入力周波数 40 Hz で、端部と中央部の温度差は、5 °C 以内になった。レーザ光スキャン加熱は、照射部の昇温状態が PCB パターンや PCB の熱拡散定数と熱伝導度に依存するため、パッケージサイズが変わっても本条件の汎用性はあるといえる。ただし、実際のはんだ付け接合時における接合部温度プロファイルは、接合部の熱容量やレーザ光の吸収状態などの影響

を受けるため,はんだペーストを供給したはんだ付け時の昇温状態を確認する必要がある.

## 参考文献

- 1) Y. Tian, C. Wang, and D. Liu, “Thermalmechanical behavior of PBGA package during laser and hot air reflow soldering”, in Electronic Materials and Packaging, 2002. Proceedings of the 4th International Symposium on, Anonymous, pp. 293-299 (2002)
- 2) J. P. Jung, “A study on the solderability of QFP outer lead using Nd:YAG laser”, Metals and Materials **5**, pp.317-321 (1999).
- 3) K. Murakami, A. Adachi, J. Hirota, O. Hayashi, S. Hoshinouchi, and M. Sakao: “Study of a Laser Soldering Process for Fine-Pitch Leads. (2nd Report)”, Journal of the Japan Society for Precision Engineering **60**, pp.713-741 (1994) [in Japanese]
- 4) Z. Han, S. Xue, J. Wang, X. Zhang, S. Yu, and L. Zhang, “Laser Soldering of Fine Pitch QFP Devices Using Lead-Free Solders”, JOURNAL OF ELECTRONIC PACKAGING **131**, pp.0210041-0210045 (2009).
- 5) J. Amako, K. Umetsu, H. Nakao: “Laser soldering with light-intensity patterns reconstructed from computer-generated holograms”, Appl. Opt. **40**, pp.5643-5649 (2001).
- 6) H. Miura, K. Ishikawa, K. Okino: “Development of a rectangular dual-beam optical unit for YAG laser soldering of fine pitch flat package IC's”, The Review of Laser Engineering **17**, pp.469-477 (1989).
- 7) M. Brandner, G. Seibold, C. Chang, F. Dausinger, and H. Hügel, “Soldering with solid state and diode lasers: Energy coupling, temperature rise, process window”, J. Laser Appl. **12**, pp.194-199 (2000).
- 8) T. Nakahara, M. Nakazono, H. Tsuchiya: “Printed wiring board packaging line. Element technology and equipment: Soldering technology”, Electronic Materials and Parts **26**, pp.71-76(1987).
- 9) N. Suenaga, M. Nakazono, H. Tsuchiya: “Laser Soldering”, Welding

International **2**, pp.269-276 (1988).

- 10) H. Kawasumi, T. Arai: “Studies on Surface Hardening with Co2 Laser (2nd Report) On the Effect of Heat Source Pattern of Gaussian and Doughnut Beam to the Laser Hardening”, Journal of the Japan Society of Precision Engineering **47**, pp.1470-1475 (1981) [in Japanese].
- 11) H. Kawasumi, T. Arai: “Studies on Surface Hardening with Co2 Laser (1St Report) On the Effect of Rectangular and Modified Rectangular Source to Laser Hardening”, Journal of the Japan Society of Precision Engineering **47**, pp.669-674 (1981) [in Japanese].
- 12) H. Tsuchiya: “Laser soldering technology for FPIC of pocket calculators and headphone stereos”, WELTEC **4**, pp.17-22 (1988) [in Japanese].

## 第3章 QFP-IC のはんだ付け装置・プロセス

### 3-1 はじめに

第 2 章で述べたように、パッケージモールドへの熱ストレスや静電気破壊を回避するため、QFP-IC のはんだ付けに、非接触加熱プロセスを検討した。従来の非接触加熱方式では、0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の接合強度が 15 N 以下となり、接合強度不足を招いていた。この原因は、溶融はんだペーストの供給量や接合位置精度のばらつきが起因と考えられた。特に、QFP-IC リードのプレス成形時と搬送時に発生するリード形状のばらつきは、リード浮き不良の原因となった<sup>1)</sup>。このため、はんだ付け前に、リード端子の位置の均一性（コプナラリティ）の検査や、はんだ付け後に外観検査と修正が必要であった<sup>2),3)</sup>。また、従来のレーザ光走査のはんだ付け方式では、0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC リードの加熱に、12 秒以上が必要であった。これらの問題が原因で、生産性の低下を招いた。

本章では、QFP-IC はんだ付けの信頼性と生産性を向上させるため、はんだペーストの供給、部品のマウント、4 方向同時レーザスキャン加熱を自動で行うはんだ付けシステムを独自に考案し、各工程に必要なプロセスの開発と、接合部の信頼性評価を行った。この結果と考察について、以下に述べる。

### 3-2 システム構成と実験方法

本研究では、QFP-IC のはんだ付け接合の信頼性を向上させるため、4 辺同時レーザスキャン加熱の自動はんだ付けシステムとそのプロセスを開発した。この全自動システムは、はんだペーストをディスペンス方式で供給する塗布装置、QFP-IC を基板に搭載するマウント装置、4 辺同時レーザスキャン加熱装置から構成した。

#### 3-2.1 自動はんだ付けシステムと実験方法

図 3-1 に、左からはんだペースト塗布装置、部品マウント装置、4 辺同時レーザスキャン加熱装置から構成された、自動はんだ付け



図 3-1 自動はんだ付けシステムの外観

システムの外観を示す．各装置間は，コンベアと PCB の位置決め機構を備えることで，はんだペーストの供給，部品の搭載，はんだ付けまで，数値制御で自動処理を行う装置を考案した．

はんだペースト塗布装置は，ディスペンスシリンジ内に充填したはんだペーストを加圧エアで圧送し，塗布ノズルを介して供給した．図 3-2 に，塗布装置の構成図を示す．はんだペーストは，帯状の状態で供給されるため，0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の PCB パターンに対しては，PCB パターンと直角方向である，レーザ光のスキャンラインの位置に合わせ，塗布を行った．具体的には，塗布ノズルの走査位置を PCB に付けた認識マークを画像処理で位置補正し，位置決め後に非接触で塗布を行う．このディスペンサによるはんだペーストの供給は，PCB のパターンごとの間欠塗布を行って

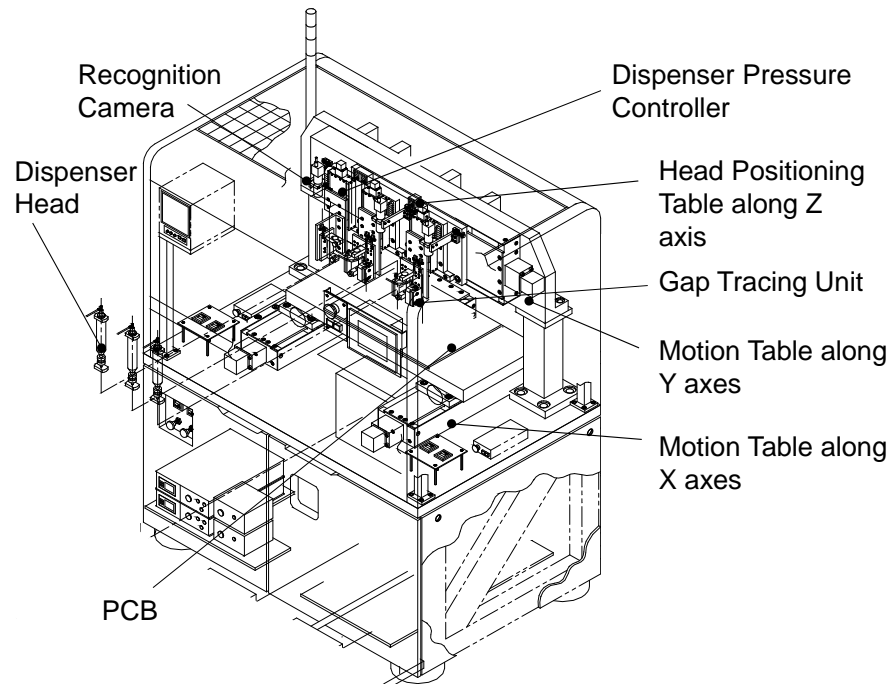


図 3-2 はんだペースト塗布装置の構成

はない．この方式を採用することで，0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC に必要な塗布時間は，5 秒が可能となり，全自動ラインのタクトタイムに収まっている．

ディスペンス方式の塗布では，塗布ノズル内での圧力損失が一定なため，塗布量は塗布ノズルと基板のギャップ量，ノズル径，塗布速度，塗布圧力，はんだペーストの粘度で決定される．

図 3-3 に，塗布ヘッドの外観写真を示す．特に，ギャップ量の変化が，塗布量のばらつきに影響を与えることを考慮し，機械式の倣い機構を塗布ヘッドに具備した．ギャップ量とペースト粘度が一定になれば，塗布量は塗布速度と塗布圧力で決定できると考えた．

この制御因子である塗布圧力と塗布時間は，レギュレータ，電磁弁の開閉時間で数値制御が可能である．本研究では，高速度カメラで加圧圧力，加圧時間および塗布量の関係を測定した．具体的には，一定時間における吐出ペーストの長さを測定し，単位時間当たりの塗布体積から塗布量を算出した．高速度カメラで長さを計測する方法を採用した理由は，塗布されたはんだペーストの質を高精度に



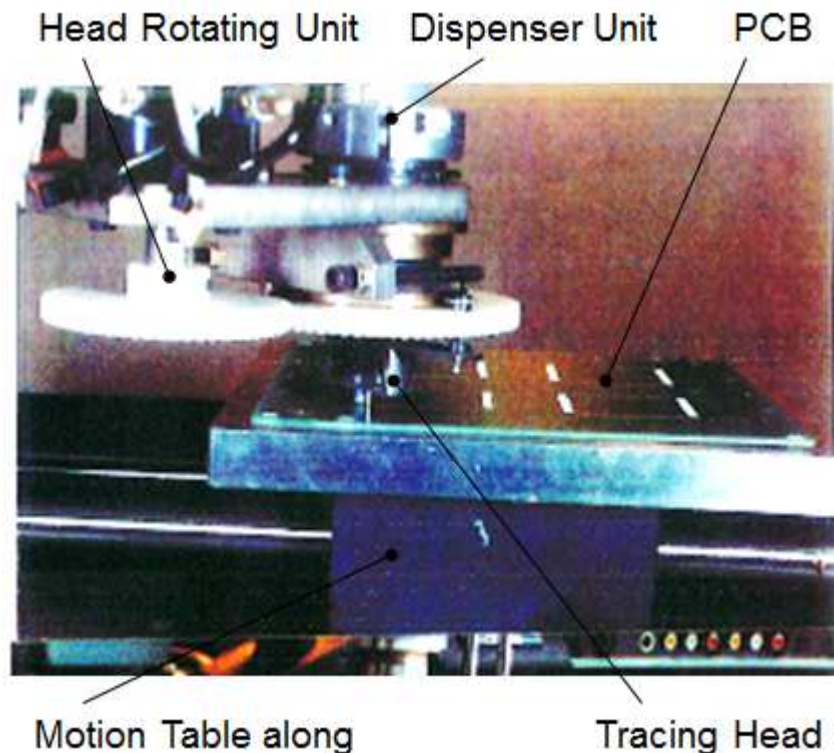


図 3-3 塗布ヘッドの機械式倣い機構の外観

直接測定することが困難であり，代わりに塗布形状寸法を測定することとした．

部品マウント装置は，PCB パターン上の認識マークと部品の接合リードをそれぞれの認識カメラで画像認識し，この相対位置関係から位置補正を行った．さらに認識精度を向上させるには，マウントする PCB のパターンと部品リードの間に薄型の光学系を配置し，両方の画像を 1 台のカメラで取り込む方法もある．実験では，前者の PCB の基板認識マークを読み取り，位置補正機能で， $\pm 50 \mu\text{m}$  の位置補正の精度を確保した．ただし，はんだ付け後の部品位置精度は，PCB パターンの表面状態や PCB を支える機構の状態からも，影響されることが考えられる．

レーザスキャン加熱装置は，PCB パターンの認識マークを使い，位置補正を行うことで，部品リードの所定位置にレーザ光のスキャンラインを照射した．図 3-4 に，レーザスキャン加熱ヘッドの外観写真を示す．これは，第 2 章で考案した，4 辺同時レーザスキャン加熱ヘッドである．スキャンミラーには，集光レンズから出力され

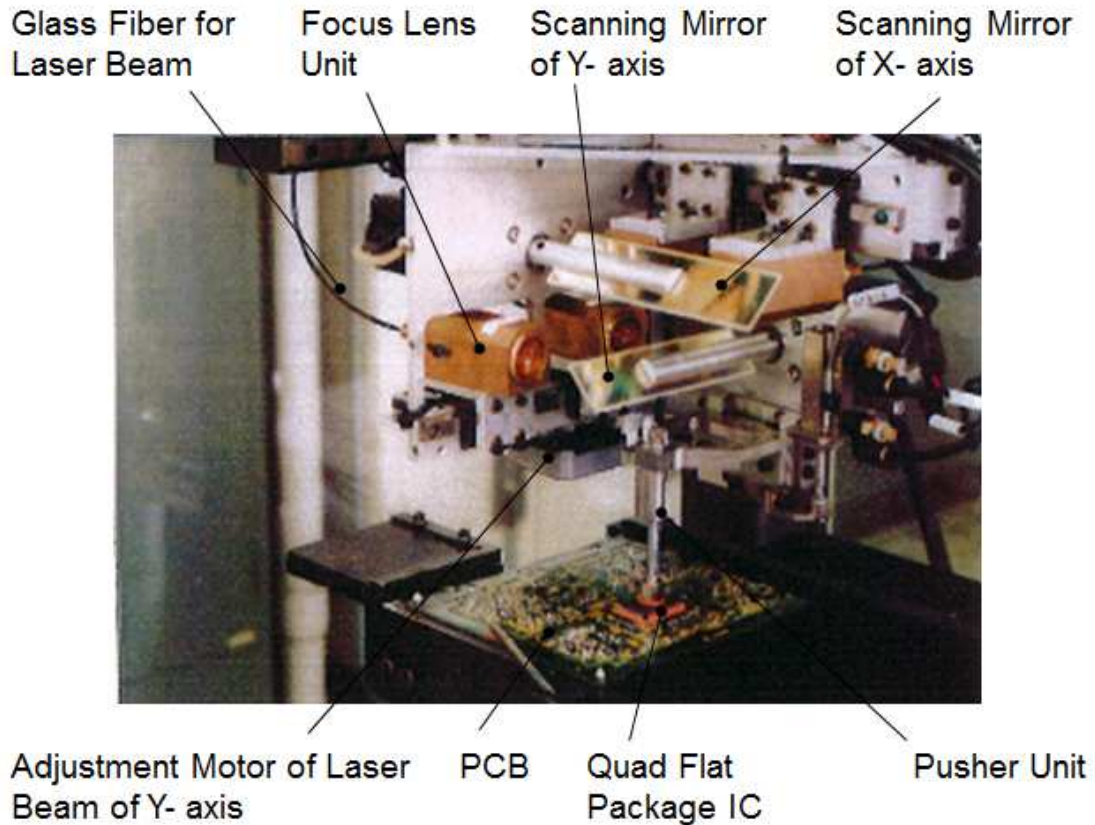


図 3-4 レーザスキャン加熱ヘッドの外観

たレーザ光の位置を確認するため、透明な 100 % 反射のコーティングを使用した．YAG レーザ光は可視外の波長のため，YAG レーザ光の光軸上に可視光である He-Ne レーザ光を追加し，位置確認を可能とした．また，照射ヘッドの中心部には加圧機構を備え，はんだ溶融後に QFP-IC を垂直方向から加圧矯正が可能な装置とした．

スキャンライン照射のエネルギー分布は，第 2 章で述べたように，焦点レンズから出射された後も Gaussian 分布型のエネルギー分布で構成されると考えられる．Gaussian 分布のレーザ光で加熱した際の接合部温度は，(3-1) 式で表せる．

$$\theta_G = \frac{AW}{Kr\sqrt{\pi^3}} \int_0^\infty \frac{\exp\left\{-\frac{(X+V \cdot p^2)^2 + Y^2}{\eta^2 + p^2}\right\}}{\eta^2 + p^2} dp \cdot \cdot \cdot \cdot (3-1)$$

ここで， $r$  はレーザ光の半径 (cm)， $U$  はレーザ光スキャン速度 (cm/s) で，レーザ光の軸中心の極座標からの点  $(X,Y)$  と速度  $V$ ，

レーザ照射幅  $p$  との関係は、

$$\eta = \frac{a}{r}, \quad X = \frac{x}{r}, \quad Y = \frac{y}{r}, \quad V = \frac{U \cdot r}{4\alpha}, \quad p^2 = \frac{4\alpha t}{r^2} \cdot \cdot \cdot \cdot (3-2)$$

である。

(3-2) 式から、接合部温度  $\theta_g$  はレーザ光の半径  $r$  とエネルギー分布密度  $W$  に、依存することがわかる。このため、レーザ光径とはんだ付け時間の関係を測定した。測定方法は、はんだペーストを供給した接合部に、光径を変えたレーザ光を静止状態で照射し、はんだ溶融状態をカメラで観察して、はんだ付け完了時点を判定した。この時のレーザ光の照射時間を計測し、レーザ光径とはんだ付け時間の関係を確認した。

次に、レーザ光のエネルギー密度は、レーザ光径が一定の場合、レーザ出力に依存するため、レーザ光径 4 mm の条件で、レーザ出力とはんだ付け時間の関係を測定した。測定方法は、はんだペーストを供給した接合部に、出力を変えたレーザ光を静止状態で照射し、はんだ材が溶融する状態をカメラで観察して、はんだ付け完了時点を判定した。この時のレーザ出力に対するレーザ光照射時間を測定した。

上述の測定から求めたレーザ光径、レーザ出力、レーザ照射時間と、第 2 章で求めた均一加熱を行うためのレーザ光スキャンライン形成条件を基に、0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の一括はんだ付け時における、接合部とパッケージ内部の温度を測定した。このはんだ付け条件は、レーザ光径 4 mm、レーザ光スキャン周波数 40 Hz、レーザ出力 20 W、レーザ照射時間 6 秒、加圧矯正 0.04 N / リード、加圧時間 1 秒、強制冷却なし、はんだペーストは千住金属製 SPT-70-OF-63F18（フラックス含有率 18 %）を 0.83 mgf / リードで供給することとした。

図 3-5 に、PCB パターンにはんだペーストを供給した上に QFP-IC を搭載し、QFP-IC の接合部と樹脂パッケージ内の温度を測定する方法を示す。QFP-IC リードと PCB パターンの間に熱電対を設置し、それぞれを熱硬化樹脂で固定した。(a) はスキャンライン

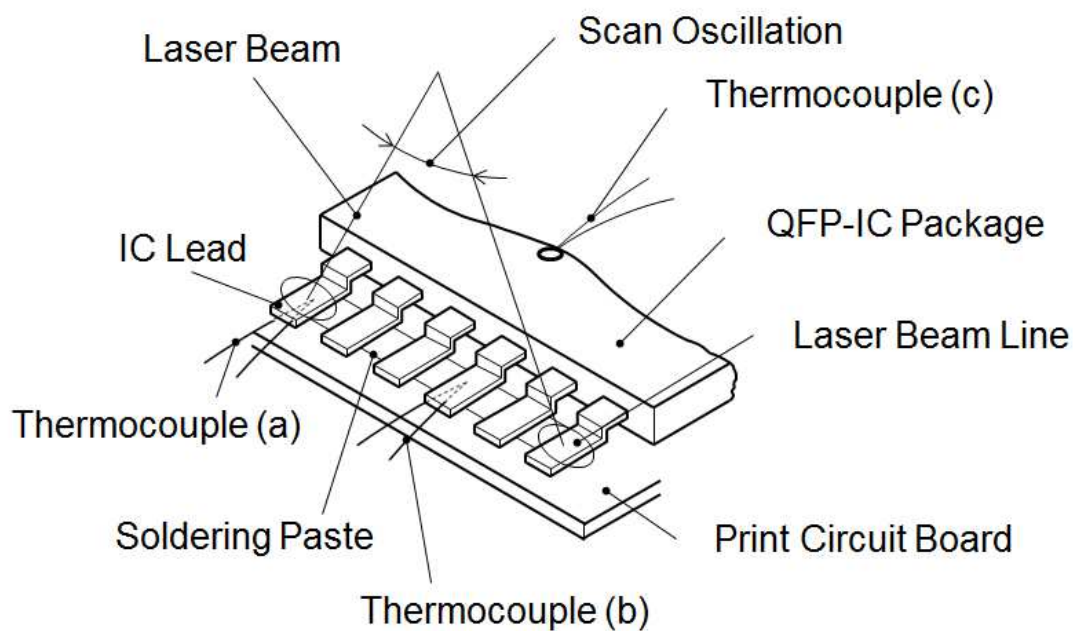


図 3-5 QFP-IC リード接合部と樹脂パッケージ内部の温度測定方法: (a) スキャンライン端部の接合部温度, (b) スキャンライン中央部の接合温度, (c) 樹脂パッケージ内部の温度

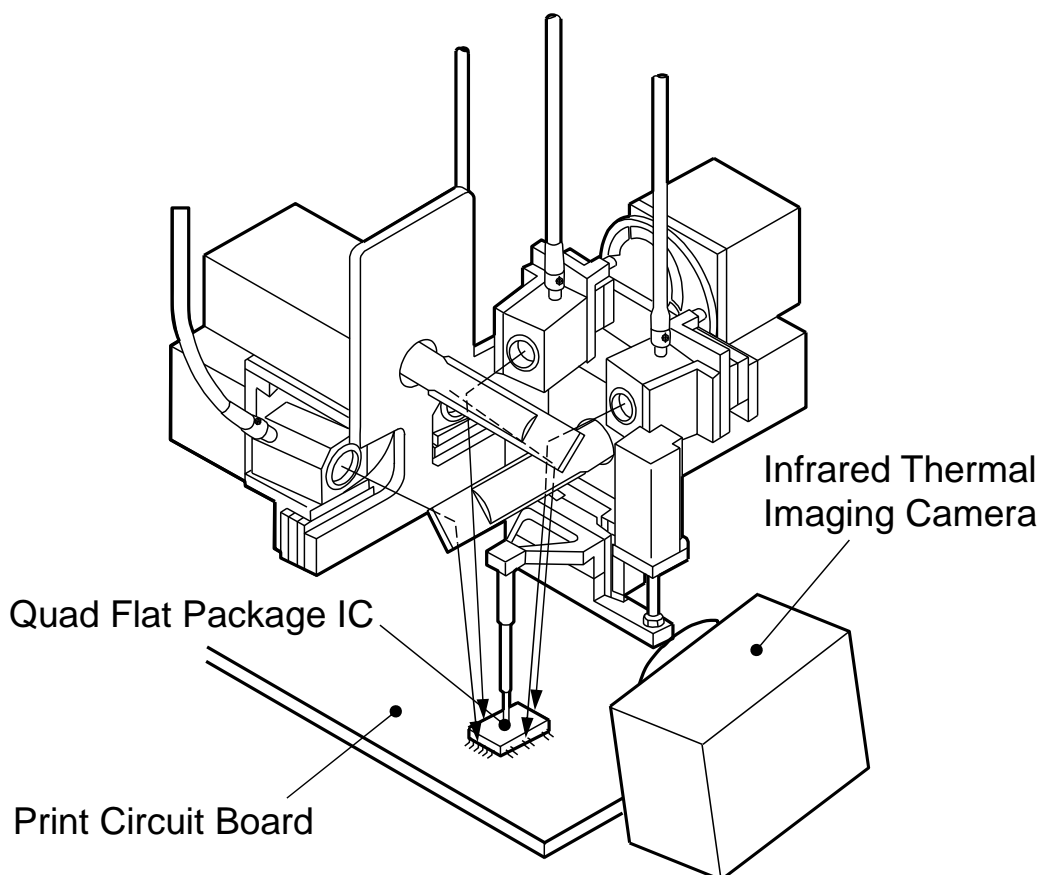


図 3-6 赤外線放射温度カメラによるスキャンラインの温度測定方法

端部の接合温度，(b) はスキャンライン中央部の接合温度，(c) は樹脂パッケージの内部温度を，それぞれの熱電対で測定した．

図 3-6 に，赤外線放射温度カメラ TVA-3500 でレーザ光スキャンラインの温度を測定する方法を示す．レーザ光をスキャンする機構の制約で，QFP-IC の真上からの測定ができないため，斜めから測定を行った．

最終製品の軽薄短小化のためには，基板実装部品の高さを低くする必要があり，樹脂パッケージ部品の厚さを薄くする傾向がある．このため，はんだ付けでかかるパッケージの熱ストレス回避が必要であった．図 3-7 に，電子部品製造メーカーが提示する QFP-IC のはんだ付け接合時のパッケージの耐熱条件を示す．この条件では，QFP-IC と他の部品を混載して全体リフローで加熱することができず，個別工程で局所加熱による，はんだ付けを行っていた．本章では，この局所加熱を 4 方向同時レーザスキャン加熱の自動はんだ付けシステムで行い，はんだ接合部と樹脂パッケージ内の昇温状態を評価した．

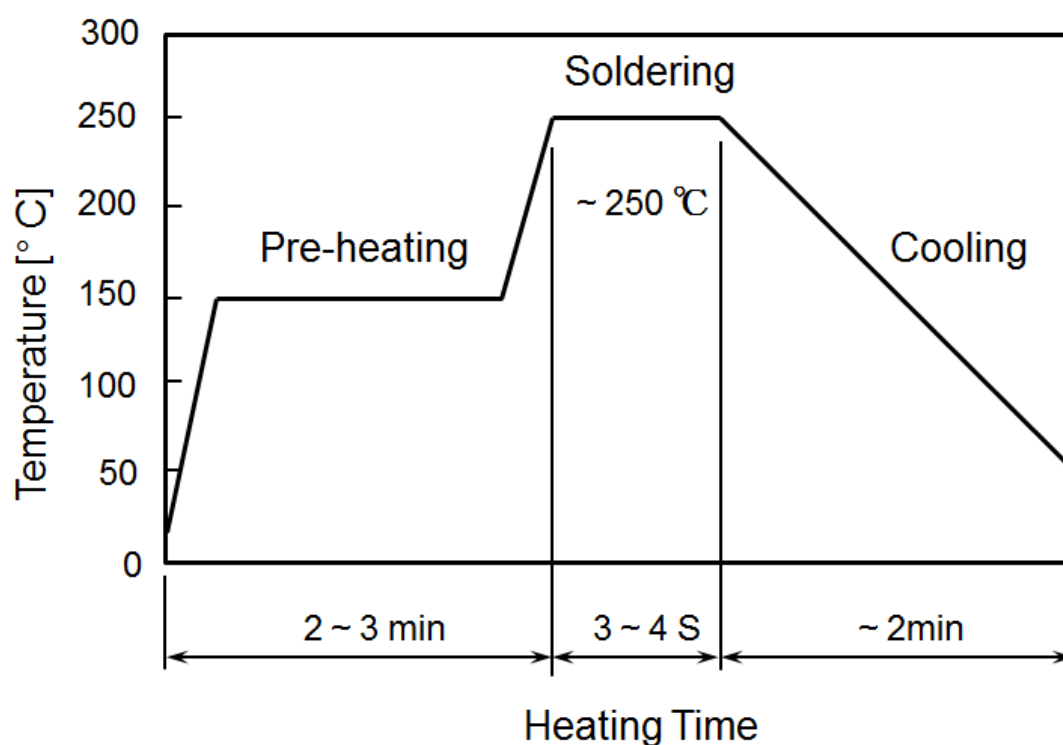


図 3-7 電子部品製造メーカーが指定する QFP-IC パッケージの加熱温度条件



### 3-2.2 はんだ接合部信頼性の評価方法

はんだ付け接合部の信頼性を低下させる要因には，上下方向のリード曲がりによる接合不良や接合部の位置ずれ，非接触レーザ加熱による接合部の強度低下，接合組成の経時変化などがある．このため，はんだ付け接合部の信頼性評価が必要であった．本章では，評価方法として，はんだぬれ性の外観確認，接合部断面の状態確認，位置ずれ量測定，リードの引張試験および試験後の破断状態の観察を行った．

多ピン QFP-IC のリード曲がり起因した，はんだ付け不良を低減するために，加圧矯正の効果を評価した．PCB パターンとの接触面であるリード端面位置の均一性をコプナラリティと呼称し，この管理が必要であった．QFP-IC のリードフォーミングは，精密金型で行うが，金型の摩耗による打ち抜き不良や，フォーミング後の搬送工程でも，リード曲がりが発生した．

図 3-8 に，コプナラリティが低下した QFP-IC を鏡の上に置いて，

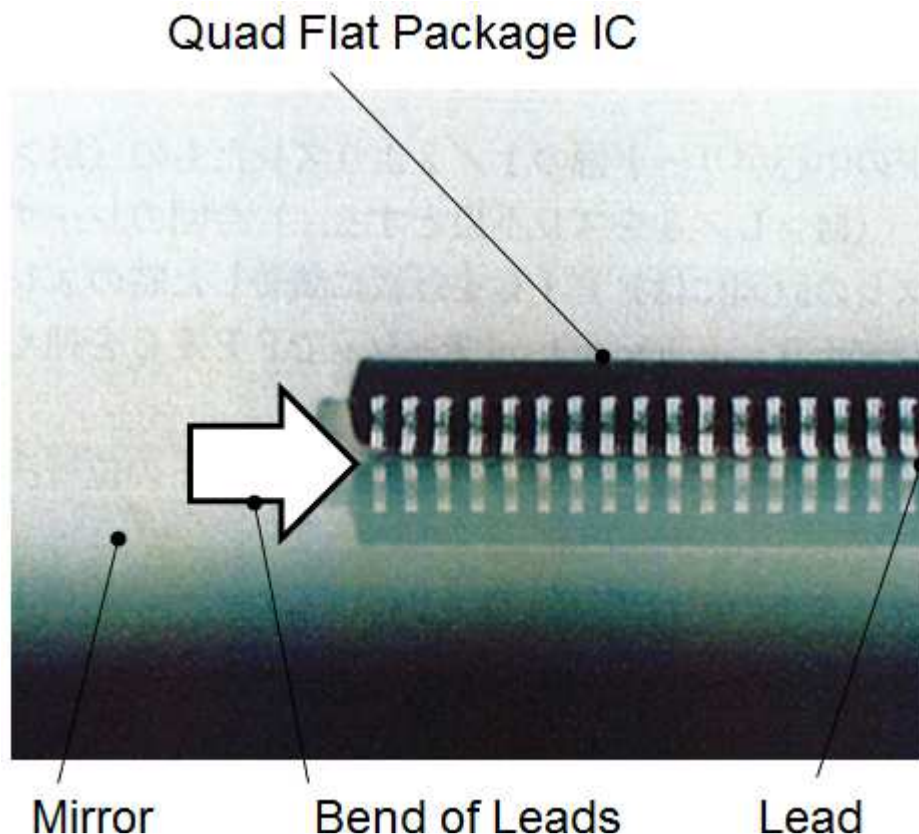


図 3-8 鏡使用した QFP-IC リードの曲がり状態の観察

リード曲がりの状態を観察した写真を示す．コプナラリティが低下するとマウントした際，基板とリードの間隔が広がるため，接合部のはんだ量不足やリード間ではんだブリッジが発生する．このコプナラリティの低下は，局所の部分で発生するため，はんだ溶融後に，上下方向からの加圧機構でリード全体の矯正を行うか，マウント前に部品単位で再矯正，もしくは事前での選別が必要である．全体加熱リフローやレーザ光走査リフローなどの非接触加熱方式では，外部からのリード曲がりの矯正が行えないため，部品ごとのコプナラリティの検査やリードの再成形をマウント前に必ず行う．

本装置では，上述の問題を解決するため，照射ヘッドの中心部に加圧機構を備え，垂直方向から QFP-IC の加圧矯正を可能とした．この加圧矯正のタイミングは，レーザ照射終了の 0.5 秒前に作動させ，1 秒後に解除した．この加圧矯正機構の効果は，はんだ付け接合部の断面状態観察とはんだ不足，ブリッジの発生率で評価した．

次に，4 辺同時レーザスキャン加熱はんだ付け装置の，はんだ付け後の接合部位置ずれ量を評価した．考案した 4 辺同時レーザスキャン加熱ヘッドは，全接合部を局所同時加熱が可能である．この加熱方法により，全接合部のはんだ溶融は同時に開始し，溶融はんだ材の表面張力によって，基板パターンと QFP-IC リードの間で自己位置修正現象である，セルフアライメント効果が作用する．このセルフアライメント効果は，全体加熱方式のリフロー加熱でも見られ，この現象を利用した接合品質の向上を目的に，基板のパターン形状を最適化する手法が研究されている．このセルフアライメント効果を評価するため，はんだ接合後の外観観察とはんだ付け後の位置ずれ量の測定を行った．

図 3-9 に，QFP-IC のリードと PCB のパターンの位置ずれ量の測定方法を示す．それぞれの中心からのずれ量  $L$  は，次の式で算出できる．

$$L = \frac{(X - X_2 - X_1)}{2} \quad \dots \dots \dots (3-2)$$

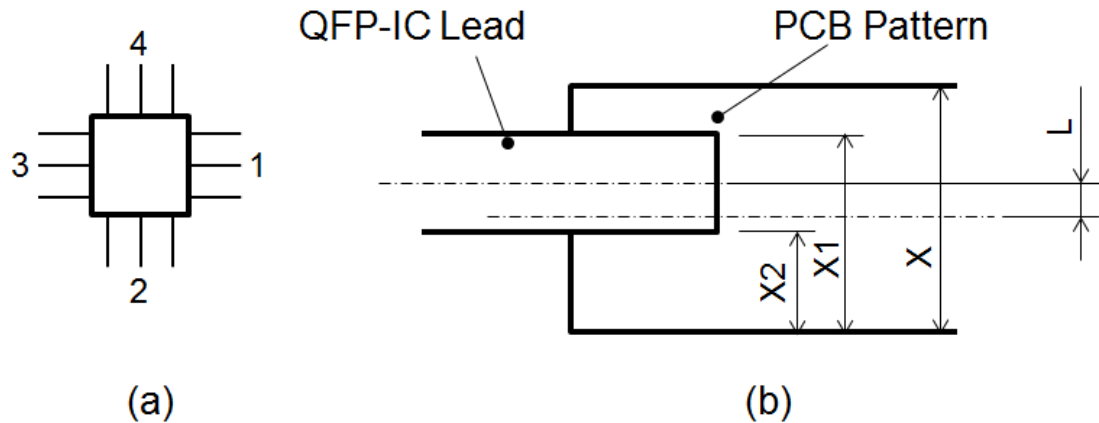


図 3-9 QFP-IC リードと PCB パターンの位置ずれ量の測定  
方法：(a) 測定順番，(b) すれ量測定の基準

ここで， $X$  は PCB のパターンの幅 (mm)， $X_1$  と  $X_2$  は PCB のパターン端から QFP-IC のリードのそれぞれの端面までの距離 (mm) を示す．この測定方法で，QFP-IC のリードと PCB のパターンの幅のばらつき量に依存しない位置ずれ量を算出した．

さらに，QFP-IC のはんだ付け接合部の長期信頼性試験の方法を検討した．この評価では，高温放置や Thermal Cycle Test (TCT) などの環境試験を行った接合部で，引張試験と断面観察を検討した．高温放置試験は，150 °C 環境下に部品を置き，その接合部の劣化を加速させる試験である．TCT は，1 サイクル - 65 °C で 30 分，150 °C で 30 分の温度サイクルを，1000 回行う環境下に部品を置き，その接合部の劣化を加速させる試験である．いずれも，EIAJED-4701 や MIL-STD-883，IEC60749，JESD22 で規定された加速試験である<sup>4)</sup>．本研究の環境試験には，文献<sup>5)</sup>でも採用されている，高温試験よりも劣化が加速する，熱衝撃試験の TCT を選択した．

図 3-10 に，QFP-IC リードの接合強度を引張試験で測定する方法を示す．QFP-IC のリードを 1 リードごとに引張試験を行い，接合強度を評価した．このため，引張試験時には，基板と QFP-IC の樹脂モールドを固定し，リード相互の影響を受けない試験方法とした．引張試験を行う場合のはんだ付け条件は，0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC を対象に，レーザ光径 4 mm，レーザ光スキャン周波数 40 Hz，レーザ出力 20 W，レーザ照射時間 6 秒，加圧矯正力 0.04 N / リード，



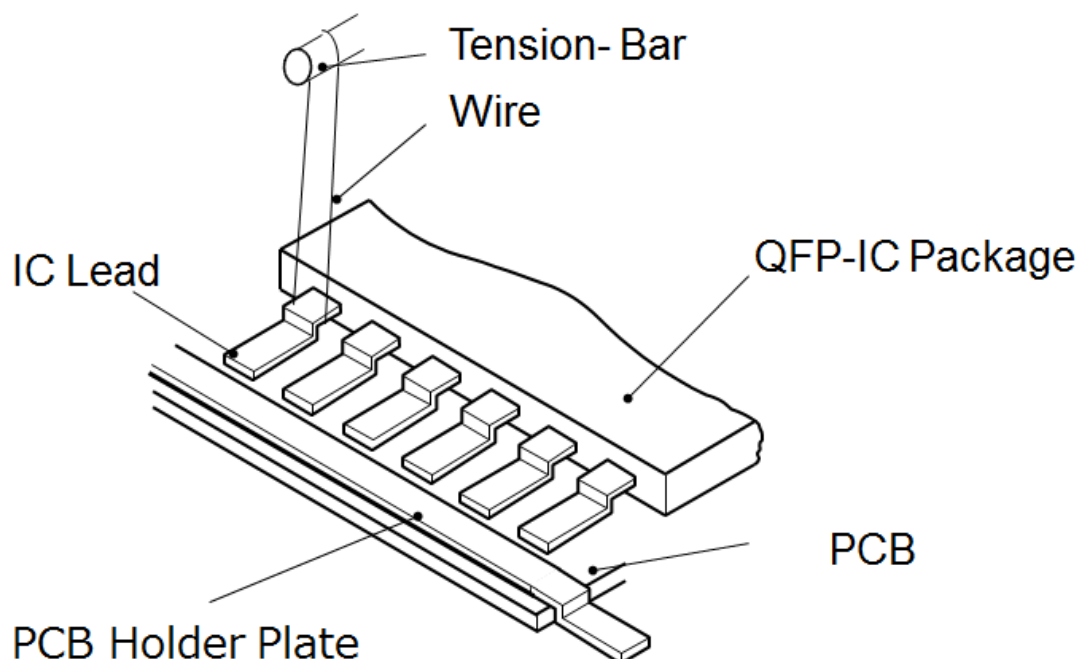


図 3-10 QFP-IC リード接合強度の測定方法

加圧時間 1 秒で強制冷却なしとし，はんだペーストは SPT-70-OF-63F18（フラックス含有量 18 %）を 0.83 mg / リードで供給した．

### 3-3 結果および考察

#### 3-3.1 自動はんだ付けプロセスの実験結果および考察

図 3-11 に，はんだペーストの適正塗布量制御に必要な，塗布圧力と単位時間の塗布量との関係を測定した結果を示す．塗布ノズル断面積は， $0.42 \text{ mm}^2$ ， $0.52 \text{ mm}^2$ ， $0.72 \text{ mm}^2$  の 3 種類とした．図中の横軸は塗布圧力 (MPa)，縦軸は単位時間の塗布量 (mg/s) を示す．

得られた結果から，塗布量は，塗布圧力と塗布時間やノズル内径に比例するので，1 リードあたりに必要な，はんだペースト量が決定できれば，塗布圧力と塗布速度を決定することは可能である．このはんだペーストは，はんだ粒子とフラックス材料の混練から構成される．特に，フラックス材料は有機溶剤を含有するため，圧送の

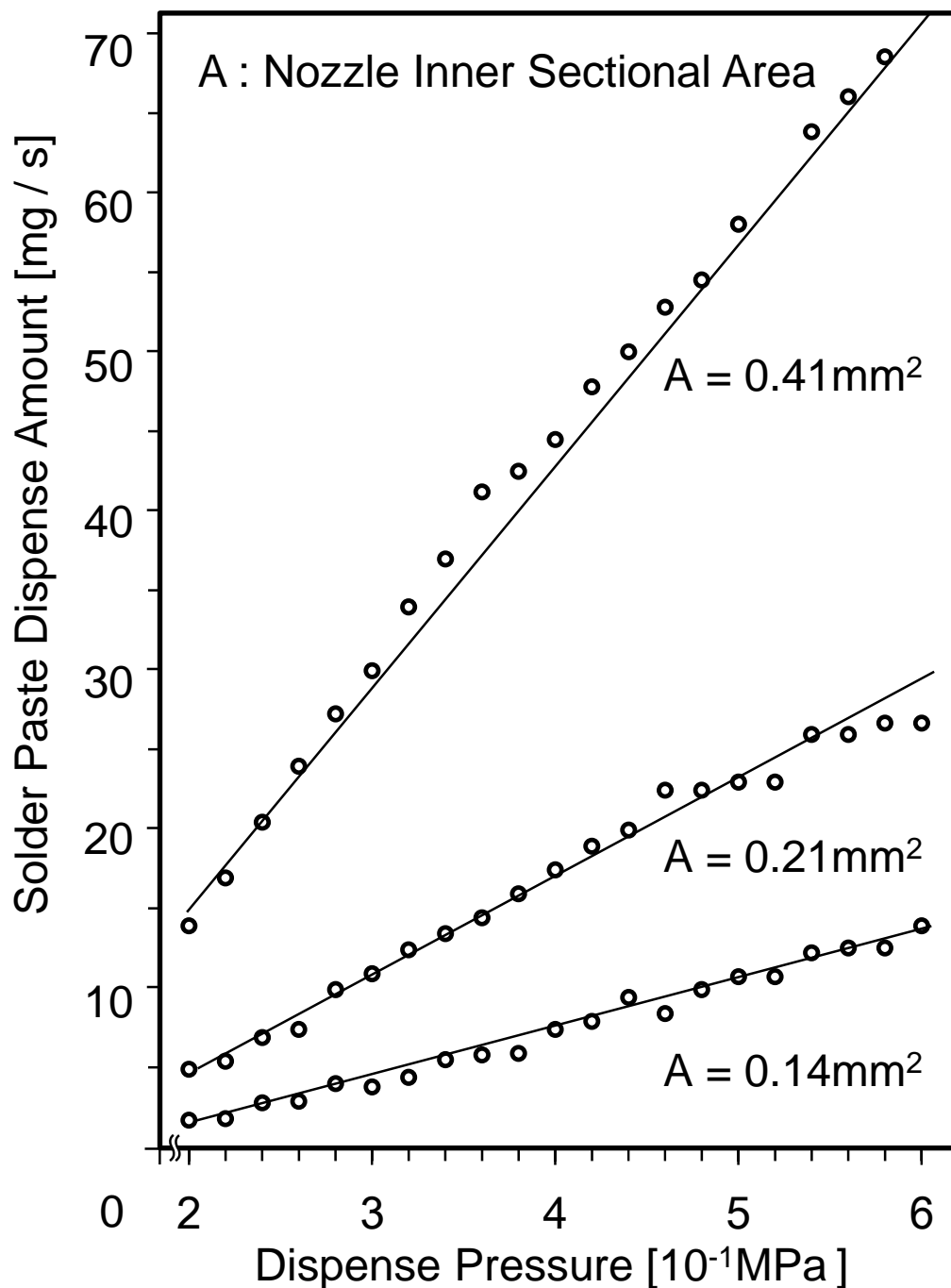


図 3-11 塗布圧力，ノズル断面積，単位時間塗布量の測定結果

圧力が高いと分離する．このため，はんだペーストの塗布ばらつきを低減のための施策として，ノズル径を細くして塗布圧力を上げる方法は適さないといえる．

塗布量制御因子のひとつに，塗布ノズルと PCB の間隔制御がある．図 3-12 に，考案した間隔を一定とする機械式の倣い機構を示す．この機構は，4 方向にはんだペースト供給するため，途中で倣い機

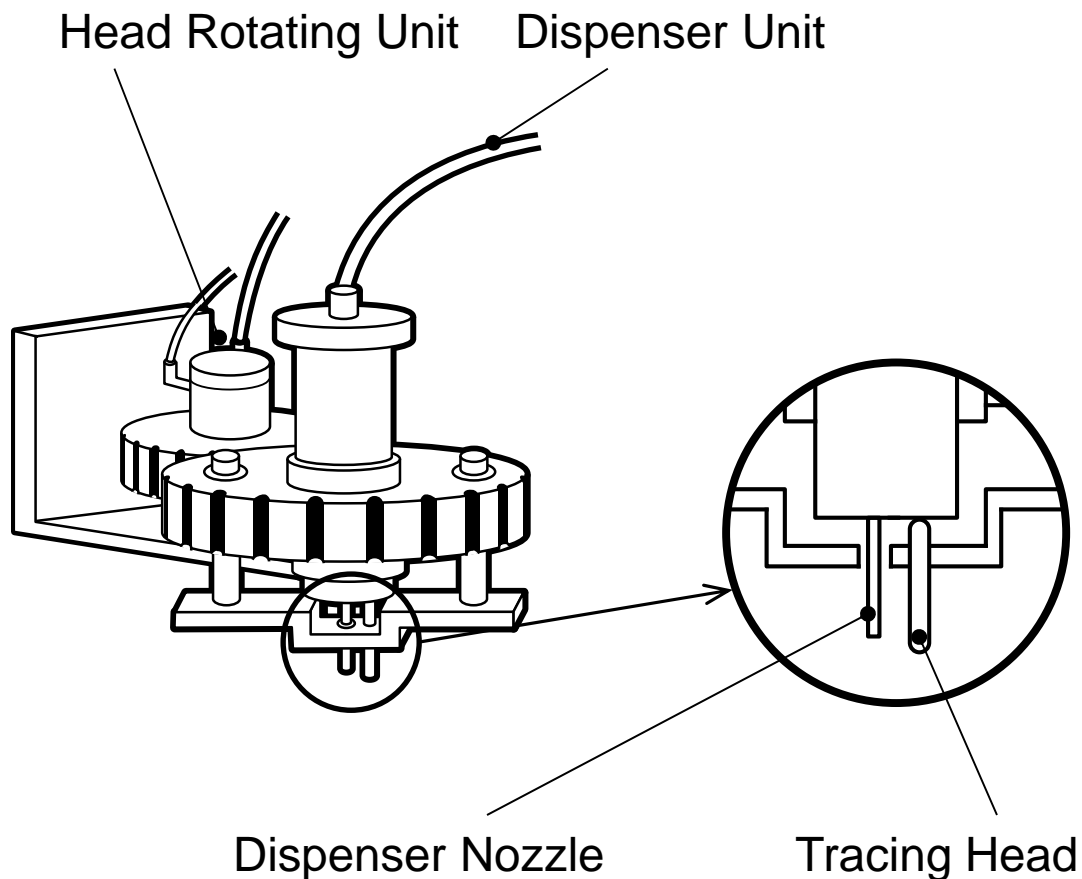


図 3-12 塗布ヘッドの機械式倣い機構の構成

構の位置を 180° 変更する回転機構を設け、塗布したはんだペーストを倣い機構が通過しないよう、外周を倣い棒が走行する．機構の制約から、塗布ノズルと倣い機構の距離は 10 mm とした．この機械式倣い機構による倣い精度は、 $\pm 0.5$  mm であった．この制御によるはんだペーストのばらつき量は、0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の必要はんだ量に対し、許容できる範囲である．この方式は、塗布ヘッドに設けた、倣い棒が基板に接触するため、摩擦による不純物の発生や走査速度が上げられないといった問題があった．今後は、レーザ光による非接触計測を検討する必要があると考える．

図 3-13 に、0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC のリード 4 本をはんだ付けした際の、レーザ光径とはんだ付け時間の関係の測定結果を示す．横軸はレーザ光径 (mm)、縦軸ははんだ付け時間 (s) である．測定方法は、停止した 20 W 出力のレーザ光をリード 4 本分の接合箇所照射し、目視ではんだ付け終了を確認した．PCB の接合

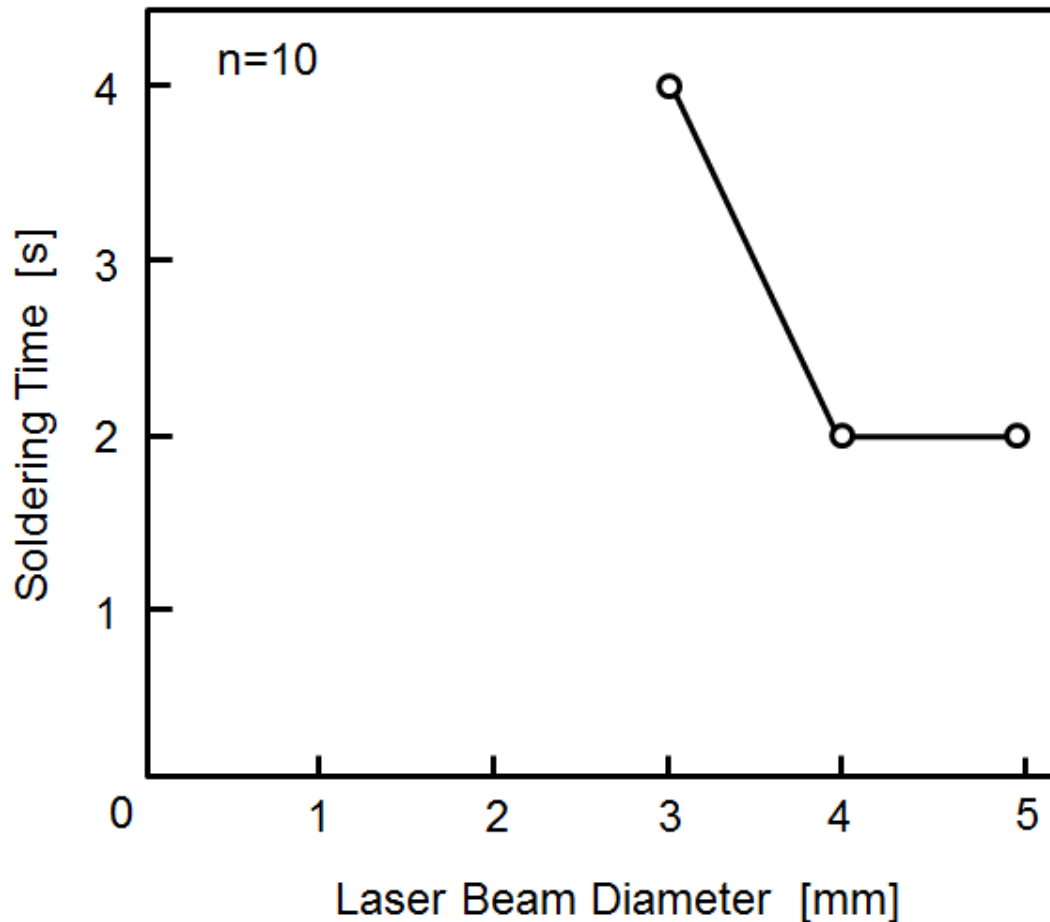


図 3-13 レーザ光径と平均はんだ付け時間の測定結果

パターンの長さは 3 mm ，幅は 0.45 mm であり，はんだフィレットの形状からはんだペーストの必要量 0.83 mg /リードを算出した<sup>3)</sup>。この測定では，レーザ光径を 3 mm，4 mm，5 mm に設定した際のはんだ付け時間を 10 回ずつ計測し，その平均値を求めた。

レーザ光径が 4 mm と 5 mm の場合，はんだ付け時間は 2 秒であり，レーザ光径が 3 mm のはんだ付け時間 4 秒を半分に短縮した。この理由として，PCB のパターンが 0.45 mm × 3 mm であるから，レーザ光径が 3 mm ではレーザ光の熱吸収量よりも PCB からの放熱量が多くなったためと考えられる。たとえば，レーザ光径 4 mm は，PCB パターン 3 mm 幅の 1.4 倍の領域を加熱するため，レーザ光径 3 mm の場合よりも接合部の放熱速度は低減されると考えられる。

以上から，本 QFP-IC のはんだ付けには，レーザ光径 4 mm が最適である。レーザ光径を 5 mm に広げた場合は，接合部から樹脂パ

ッケージにも熱影響が懸念されると考えられる．このことから，接合部の加熱には，接合部の寸法に合わせた適正なレーザ光径の選定が必要といえる<sup>2),6)</sup>．

図 3-14 に，レーザ照射エネルギーとはんだ付け時間の関係を測定した結果を示す．はんだ付け条件は，0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の 1 リードあたりに，0.83 mg のはんだペーストを供給し，4 mm のレーザ光径を 40 Hz でスキャンした．レーザ照射エネルギーは，20 W，26 W，30 W，38 W とし，10 回の測定を行った．はんだ付け時間は，カメラ映像を拡大し，目視ではんだ材の溶融状態を確認して判定した．横軸にレーザ照射エネルギー（W）を，縦軸にはんだ付け時間（s）を示す．

レーザ照射エネルギーを 20 W から 40 W に上げると，はんだ付け時間は 6 秒から 3 秒に短縮された．これは，接合部に供給したはんだペーストが，レーザ照射エネルギーを吸収したためと考える．

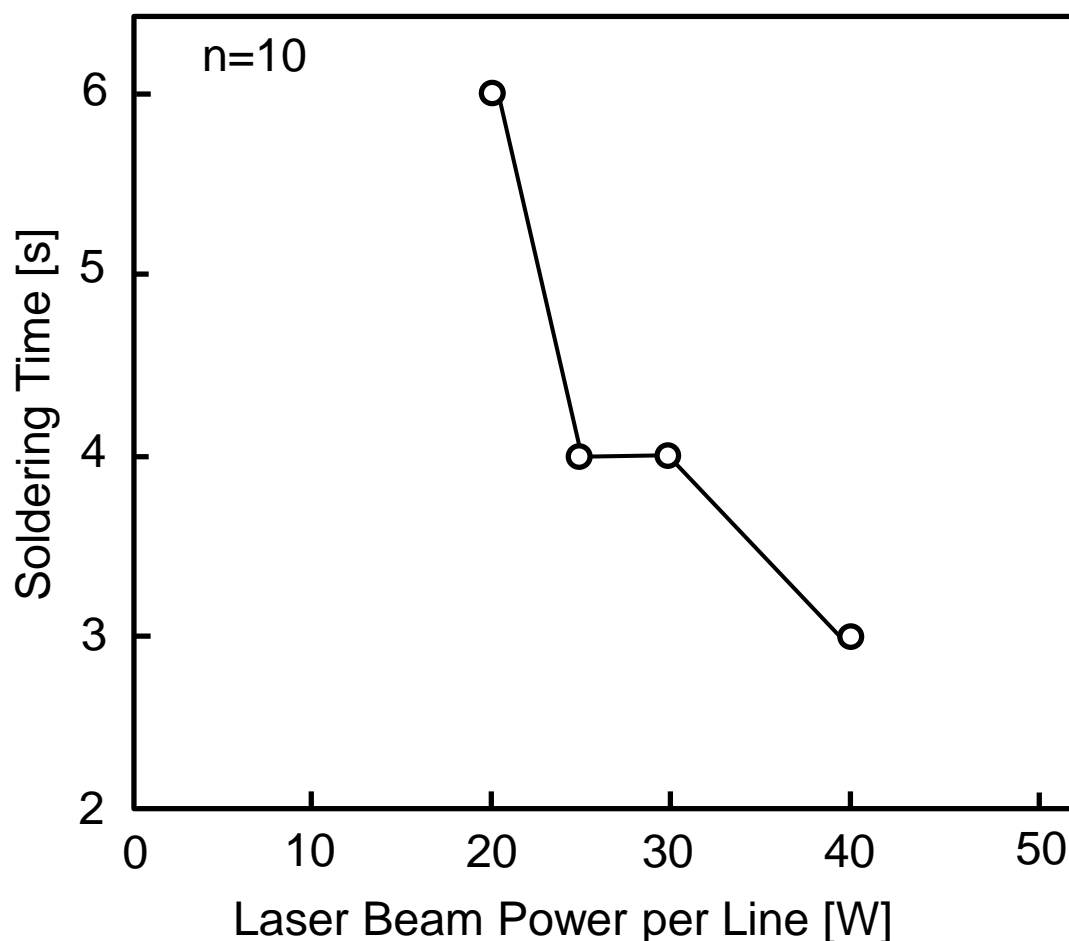


図 3-14 レーザ光出力とはんだ付け時間の測定結果

しかし，第 2 章，図 2-9 の結果から，開発したレーザ光 4 分割光学系は，分岐後のレーザ出力を 22 W 以上にすると，分割効率が低下する．このため分割効率を優先し，レーザ照射エネルギーは 20 W，照射時間は 6 秒に決定した．

今後，はんだ付け時間の短縮を優先する際には，レーザ照射エネルギーを上げることもひとつの施策と考える．その際には，部品への熱ダメージやレーザ発振に使用する クリプトンアークランプの寿命，はんだペーストの種類，接合部以外の熱ダメージ，レーザ発振器のコストなどの検討が必要である．

図 3-15 に，0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の 4 方向同時はんだ付けでの昇温状態を測定するため，熱電対を使用して接合部や樹脂パッケージ内の温度測定した結果を示す．温度測定箇所は，スキャンラインの端部 (a) と中央部 (b) の接合部，それにパッケージ内 (c) である．また，接合部リード浮きを防止する加圧機構を，はんだ付け時に駆動させた．図の横軸に測定時間 (s)，縦軸の左側に温度 (°C)，右側に加圧機構駆動のタイムチャート (On-Off) を示す．

はんだ付けした接合部の温度は，第 2 章の図 2-13 で測定した接合部の温度よりも，高くなった．特に，中央部の温度が端部の温度よりも高くなった．この理由として，はんだペーストがレーザ光の吸収率の高い材料であったためと考えられる．また，中央部が端部に比較して高くなった理由として，中央部は左右のはんだペーストの熱吸収の影響で，温度が上昇したためと考えられる．

レーザ光照射 2.5 秒後に，共晶はんだ材の融点である 183 °C まで達した．照射 3.5 秒後には 200 °C を超え，温度勾配が一時緩やかになった．温度勾配が緩やかになった理由として，はんだ材が熔融した際に鏡面となり，レーザ光エネルギーの吸収率が低下したためと考えられる<sup>3)</sup>．

QFP-IC の樹脂製パッケージ内の温度は，レーザ照射 6 秒後で 100 °C ，その後も 141 °C まで上昇した．QFP-IC 供給メーカーが保証する図 3-7 の許容温度以内であった結果から，熱ストレスによるパッケージへのダメージは低いことがわかる．本実験では，加熱後に

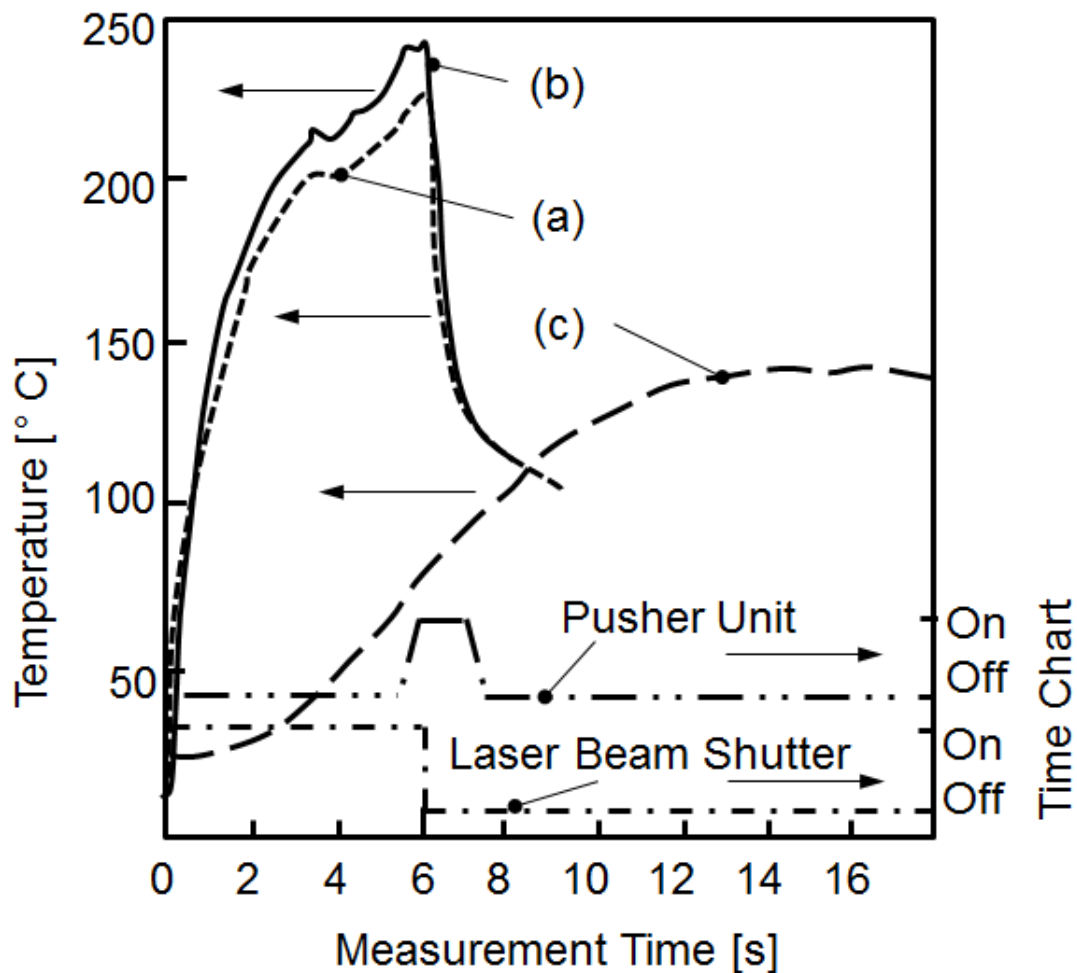


図 3-15 QFP-IC はんだ付け時の接合部と樹脂パッケージ内の温度測定結果: (a) ラインスキャン端の接合部温度, (b) ラインスキャン中央の接合部温度, (c) 樹脂パッケージ内部の温度

接合部の強制冷却を行わなかったが, 冷却機能を装置に追加すれば, 熱ストレスはさらに低減されることが考えられる。

図 3-16 に, レーザ照射 4 秒後の接合部の温度を赤外線放射温度カメラで測定した結果を示す。測定結果は, 測定温度を色で示す表示と温度分布図に換算する表示が選択できる。図 3-16 は, 測定地点での温度を色分布で示している。青色から緑色、黄色、赤色の順に温度が上昇している状態を示した。正面のレーザ光がスキャンするライン上の温度は, 赤色で示され, 均一な昇温状態を示していることがわかる。また, レーザスキャンの周囲は, 黄色と緑色を示し, 周囲へ放熱を行っていることもわかる。

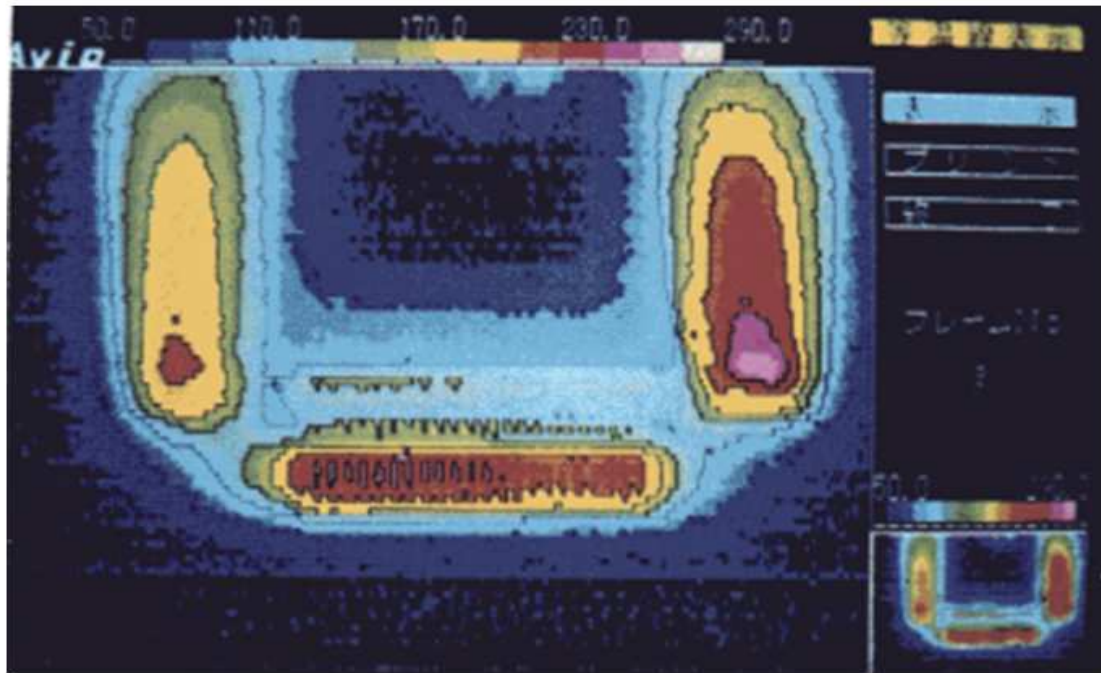


図 3-16 赤外線放射温度カメラによる 40Hz スキャン 4 秒後の PCB の温度測定結果

実際の温度は熱電対で測定した値を参考にして，補正をする必要がある．側面のスキャンラインは，赤外線レンズからの距離が正面のスキャンラインよりも長いため，温度分布表示が異なっている．特に，左右での測定結果に差があるのは，被測定物と赤外線放射温度カメラのセンサが平行に設置されていなかったため，センサからの距離が左右で異なったことが原因と考える．

### 3-3.2 はんだ接合部の信頼性評価と考察

図 3-17 に，加圧機構による QFP-IC リード形状の矯正の効果を評価するため，はんだ量不足発生率とはんだブリッジの発生率の関係を示す．横軸に，はんだペースト量を，縦軸に，はんだ量不足とはんだブリッジの発生件率を，それぞれ示す．実線は加圧矯正した場合の発生率を，破線は加圧矯正しない場合の発生率を，プロットした．

加圧矯正しない場合は，はんだペースト量が 0.85～1.05 mg / リードの領域で，はんだ量不足とブリッジの両方が発生した．一方，加圧矯正した場合は，0.59～1.05 mg / リードの領域で，両方の不良と



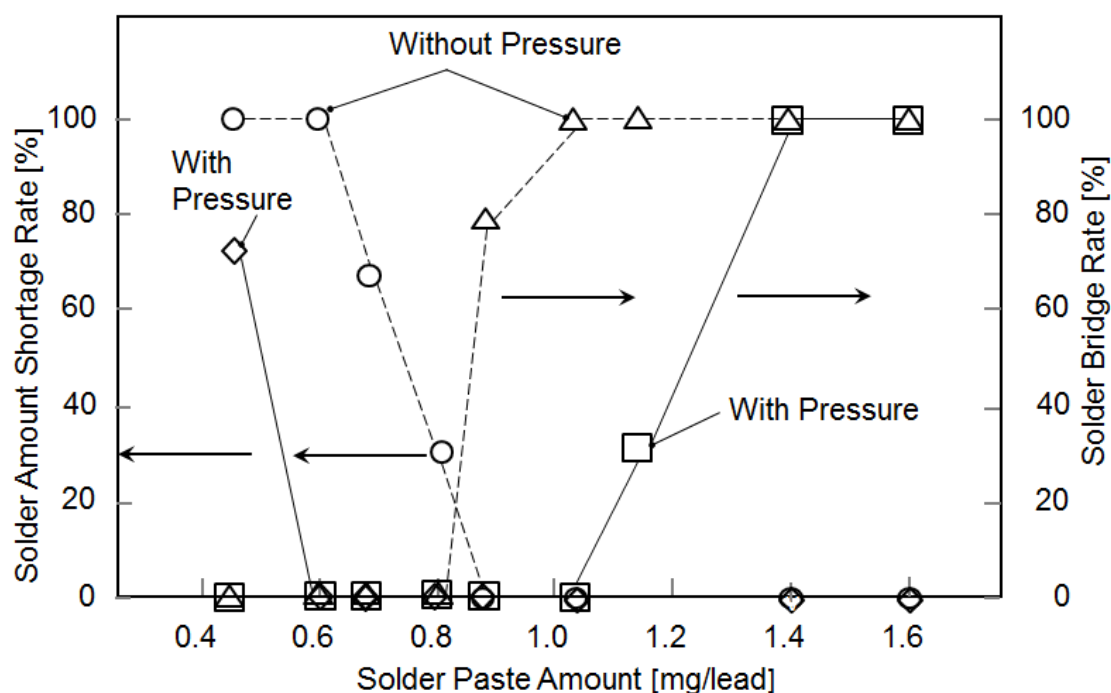


図 3-17 ブリッジ発生率およびはんだ量不足発生率の測定結果

も発生しなかった．この理由として，加圧矯正しない場合は，PCBパターンとQFP-ICリードのギャップ量(リードとパターンの間隔)のばらつきが大きいためと考えられる．文献<sup>3)</sup>から，リードとPCBパターンの寸法から必要なはんだフィレット形状は算出でき，1ピン当たりのはんだペーストの量は求められる．実験結果から，求められた最適のはんだペースト量は，この算出値の範囲以内にあった．

供給されたはんだペースト量が少なく，ギャップが広い接合部の場合，ギャップで溶融はんだ材が不足した．供給されたはんだペースト量が多く，ギャップ量が狭い場合，ギャップからはみ出した溶融はんだ材がリード間でブリッジを発生した．この問題は，非接触加熱の全体リフロー方式でも確認されている．

以上から，非接触加熱特有の，部品リードのコブナラリティの低下によるはんだ量不足やはんだブリッジの発生は，考案したリード形状の矯正機構により，抑制ができることを示した．この理由として，スキャン加熱による均一な昇温と加圧矯正が，溶融したはんだ材の流動を制御していると考えられる．

村上氏<sup>3)</sup> もリードのコプナラリティをリード角度で数値化し、この角度を矯正することで、はんだ接合部の長さの適正化を提案している。また、フラックス起因のボイドがはんだ接合部内に残留すると、接合強度が低下するため、加圧矯正でのボイド発生率の低減は効果があるといえる。

図 3-18 に、0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の、セルフアライメント効果と接合品質を評価するため、Scanning Electron Microscope (SEM) で観察した接合部の外観写真を示す。リード表面の外観から、はんだ材のぬれ性は良好で、接合部全体にはんだ材が行き亘っていた。これは、通常の手作業によるはんだ付けと同等のはんだ接合品質である。また、接合リード中心と接合パターン中心の位置は、自動マウントの位置よりもずれ量が低減された。この理由として、溶融はんだによる、QFP-IC リードのセルフアライメント効果が機能したためといえる。また、セルフアライメント後に、リードのコプナラリティを矯正することで、ギャップ量が一定となり、溶融はんだ材の流動制御が容易になったと考えられる。

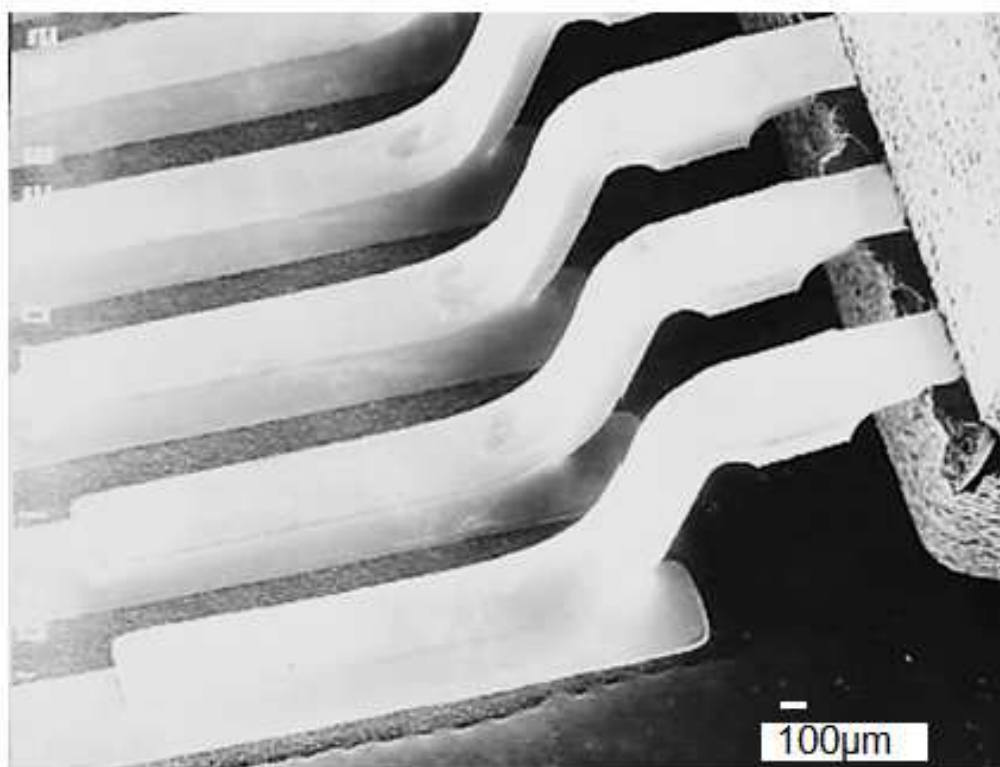


図 3-18 QFP-IC リードのはんだ付け状態の SEM 写真

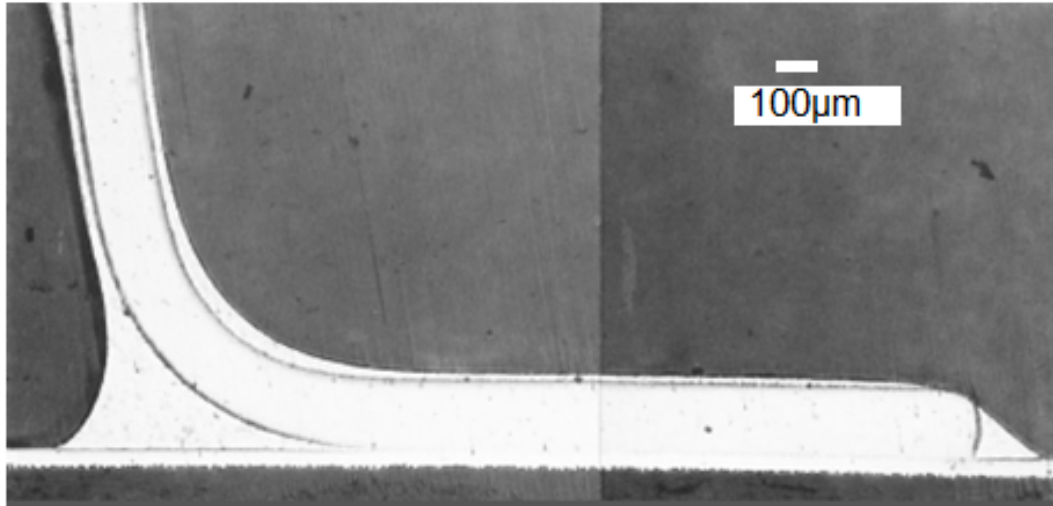


図 3-19 はんだ付け後の接合部断面の金属顕微鏡観察

図 3-19 に，加圧，冷却後にはんだ接合部断面を金属顕微鏡で観察した写真を示す．基板パターン上面と QFP-IC リード下面のギャップは，一定間隔を維持し，リードの先端部分と立ち上り部分のはんだフィレットの状態も良好であった．溶融はんだ層内で活性化したフラックスの残留ボイドも見られなかった．この理由として，リード形状を矯正する加圧機構により，良好なはんだフィレットの形成と接合リードと PCB の接合パターンの密着率が 80 % となり，残留ボイドも低減が確認された．文献<sup>3)</sup>から，接合強度は，接合リードと PCB の接合パターンの密着率が 50 % で確保されることが示されている．しかし，引張強度のばらつきが 30 % 程度発生することから，良好なはんだ付け接合部の密着率は 80 % 以上を判定基準とした．これらは，接合強度のばらつきを低減させるための重要な制御因子である．

表 3-1 に，QFP-IC のリード中心と基板パターンの中心の位置ずれ量を測定した結果を示す．横列に接合位置，縦列に中心からのずれ量を示す．12 箇所の測定結果から，最大ずれ量は 24  $\mu\text{m}$  であり，位置決め精度  $\pm 50 \mu\text{m}$  以内であることを確認した．また，4 か所のリード位置の位置ずれ量と方向から，一方向への回転ずれが発生していることがわかった．この理由として，加圧矯正の機構と PCB 背面の受け機構との間に軸ずれが発生していたためと考えられる．

表 3-1 加圧による QFP-IC と PCB パターンの位置ずれ量測定結果  
N=12

Measurement Point	1	2	3	4
Average ( $\mu\text{m}$ )	-7.25	-10.00	12.12	7.33
3 $\sigma$ ( $\mu\text{m}$ )	11.47	17.95	9.27	7.30
Max ( $\mu\text{m}$ )	-1.00	-4.00	19.50	11.00
Minimum ( $\mu\text{m}$ )	-15.00	-24.50	7.50	12.00

得られた実験結果から， $\pm 50 \mu\text{m}$  以内のばらつきを持つ部品のマウント精度よりも位置ずれが低減されたのは，セルフアライメントによる位置精度向上の効果があったと考えられる．

図 3-20 に，接合部の信頼性評価のため，接合強度を測定した結果を示す．横軸に TCT の期間（回数）を，縦軸に接合強度（N）を示す．

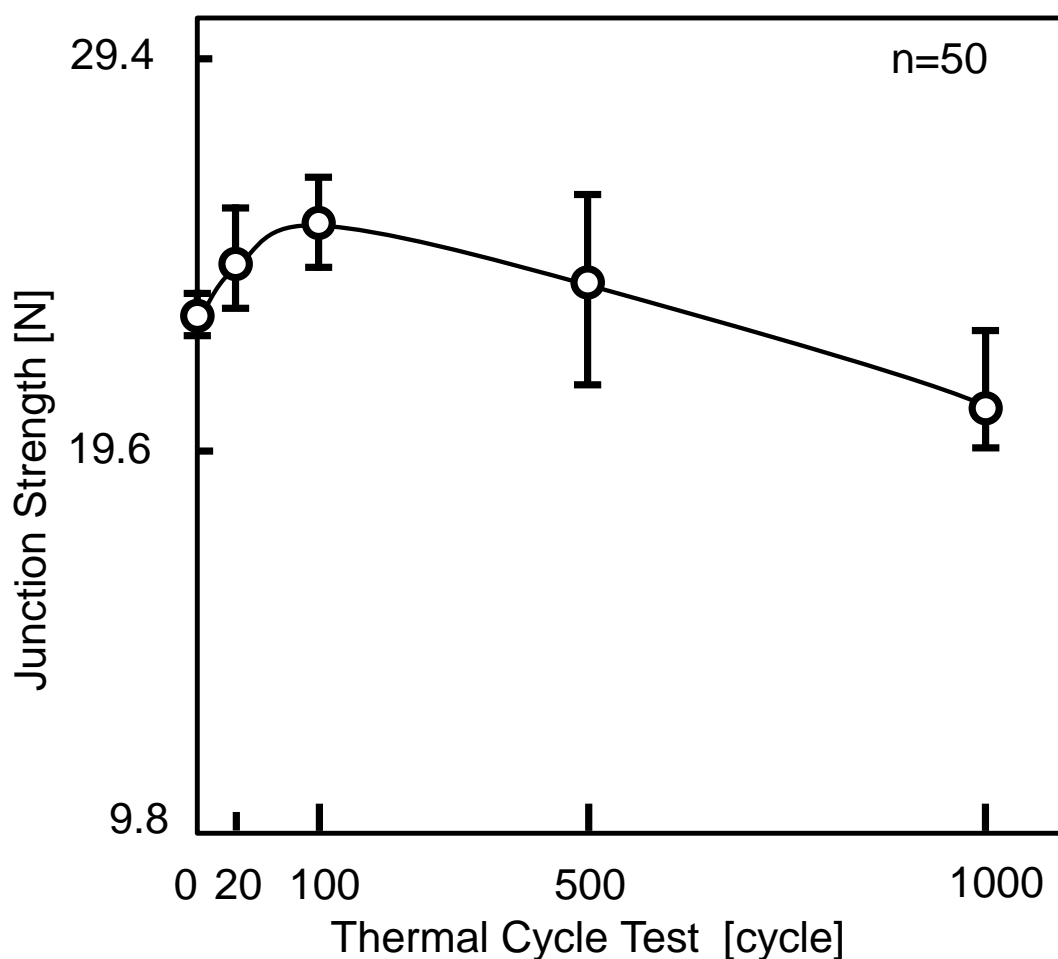


図 3-20 引張試験によるはんだ付け接合強度の測定結果

接合部の 1 箇所ごとに引張試験を行い，初期強度から TCT の環境試験ごとの接合強度を測定した．初期強度は規定値の 19.6 N を超え，平均で 19.9 N となった．TCT100 サイクル試験までは，接合部の強度は徐々に上がり，TCT100 サイクルでの接合強度は平均で 22 N となった．その後，TCT500 サイクルでの接合強度は下がり，ばらつきも増加した．TCT1000 サイクルでの接合強度は，初期接合強度を下回ったが，規定値 19.6 N 以上となった．0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の 1 ピン当たりの接合強度の測定事例<sup>7)</sup>では，赤外線リフローで 12.5 N，レーザ光走査加熱で 14.9 N が示されている．但し，測定数が少なく，ばらつきも 30 % あることから，量産での許容接合強度は，この値の 1.3 倍である 19.6 N 以上を仕様値とした．

得られた評価結果から，新しい接合プロセスによる接合部の接合強度は長期信頼性試験でも劣化せず，信頼性は確保されたといえる．

図 3-21 と図 3-22 に，接合直後と TCT1000 サイクル後における，金属顕微鏡で観察した接合部の断面状態を示す．それぞれ，リード

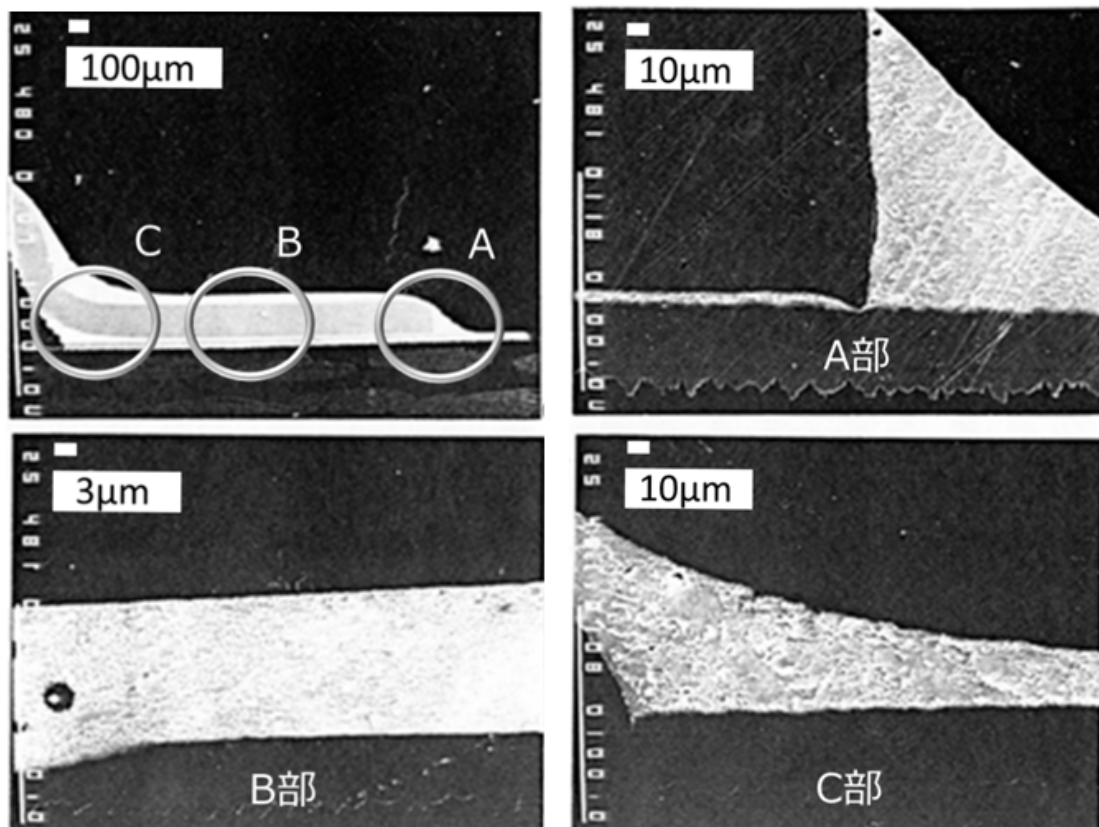


図 3-21 はんだ付け初期の接合部の断面観察: A 部はリード先端部，B 部はリード中央部，C 部はリード立ち上り部

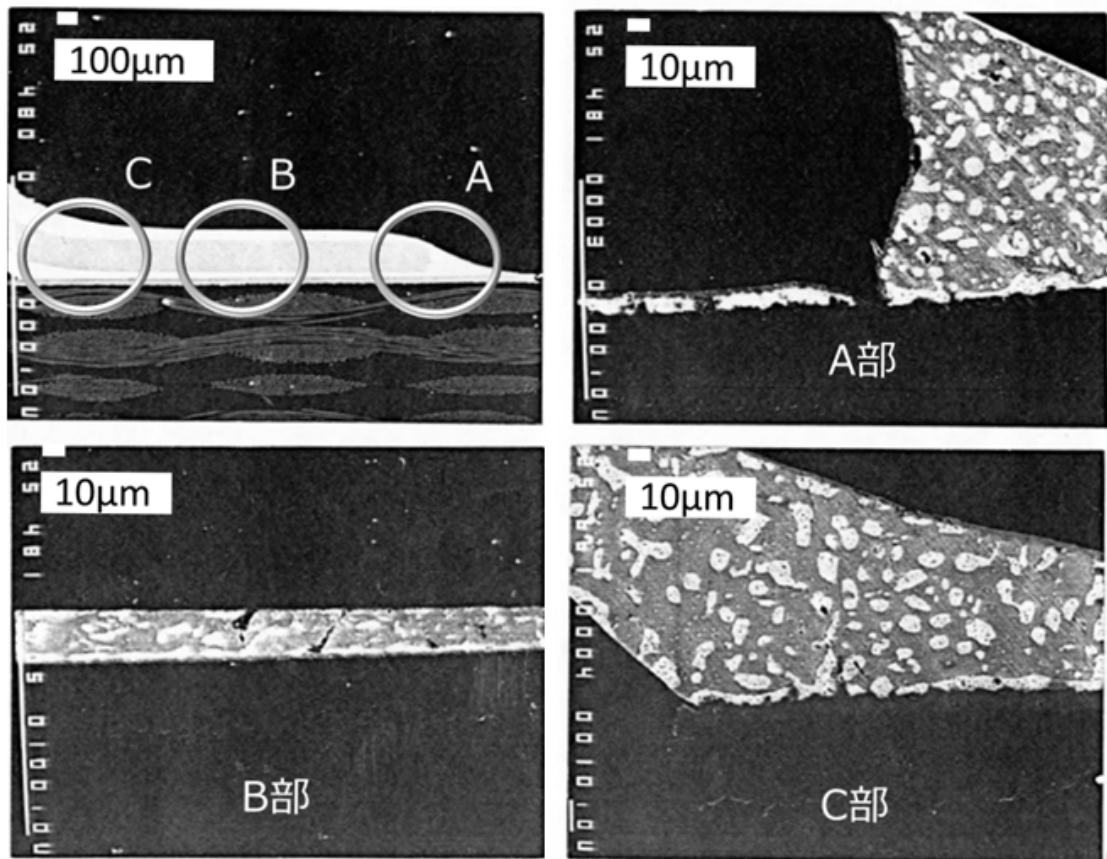


図 3-22 TCT1000 サイクル後の接合部の断面観察: A 部リード端部, B 部リード中央部, C 部リード立ち上り部

の先端と曲げ部分のはんだフィレットは良好であった。

接合直後は、リード表面に Fe-Sn の合金層が生成され、組成状態も緻密であった。ギャップでは Pb が、PCB パターンでは Fe, Ni, Sn を含む Cu 合金が生成され、いずれも組成状態が緻密で、手はんだ付けや全体加熱リフローでの接合部表面と同等の組成状態を確認できた。

一方、TCT1000 サイクル後のはんだ内の組織は、Pb の粒子が肥大して、はんだ内の組成が変化し、一部にボイドが見られた。

図 3-23 に、接合部の引張試験を行った際に破断した箇所を、SEM で観察した写真を示す。接合直後と TCT1000 サイクル後での破断面の観察結果から、双方の破断箇所と破断状態を特定した。

接合直後は、リード裏面での剥離と、リード立ち上がり箇所および側面でのフレットの破断が発生した。このことから、はんだ接合部の強度は、はんだフィレットの強度とリードとはんだ層の界面の



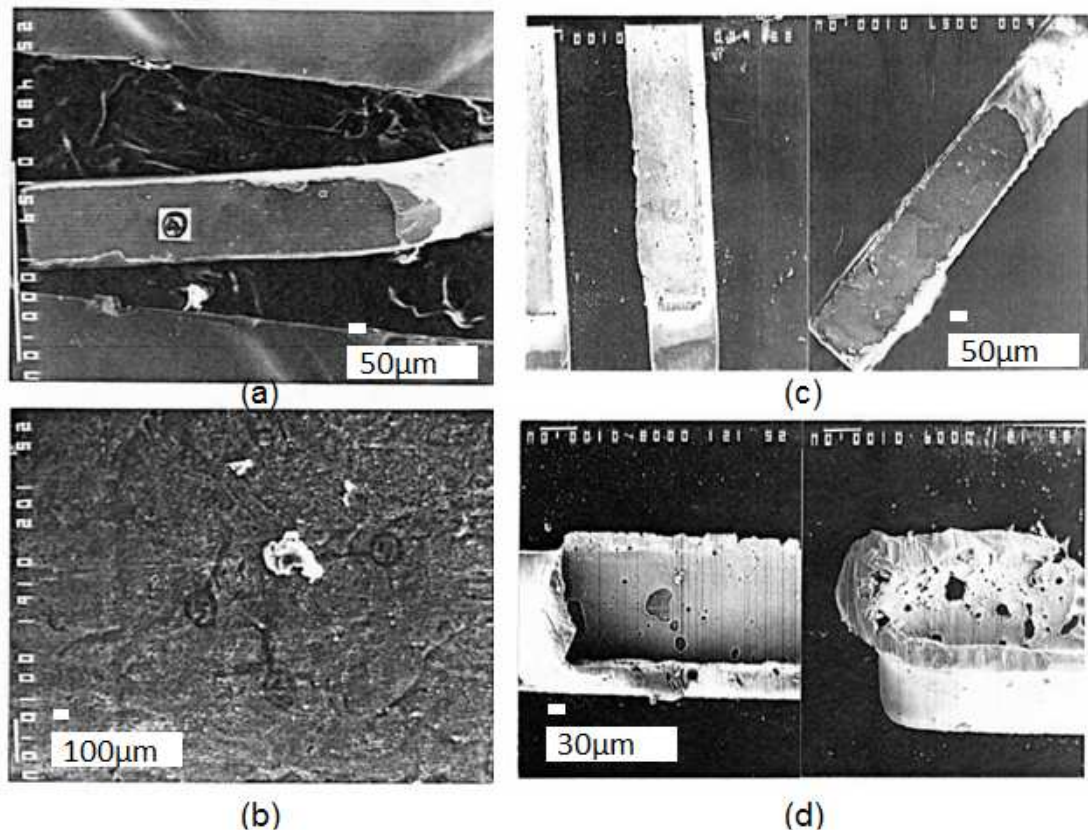


図 3-23 SEM による接合部破断面の状態観察: (a) はんだ付け時のリード面, (b) はんだ付け時の PCB パターン面, (c) TCT1000 サイクル後のリード面, (d) TCT1000 サイクル後の PCB パターン面

強度に依存し，特にフィレットの状態によって，接合強度の低下を招くと考えられる．

TCT1000 サイクル後は，リードとはんだ層の界面（リード裏面）でボイドが発生した．このボイド発生理由として，相内の Cu の拡散が Sn の拡散よりも急激に進んだために生じた，カーケンダルボイドが考えられる<sup>8),9)</sup>．TCT1000 サイクル後では，ギャップにあるはんだ材の Pb 粒子は成長するが，ここでの破断は確認されていない．破断理由として，リードとはんだ層の界面に発生したカーケンダルボイドによる，接合面積の低減にあることが考えられる．

一方，0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC のリードのコブナラリティは，0.098 MPa で矯正しているため，1 ピン当たりにかかる荷重は，リードの接地面積から 0.04 N となる．TCT1000 サイクル後のはんだ接合強度は，19.6 N 以上であるため，加圧によるはんだ接合

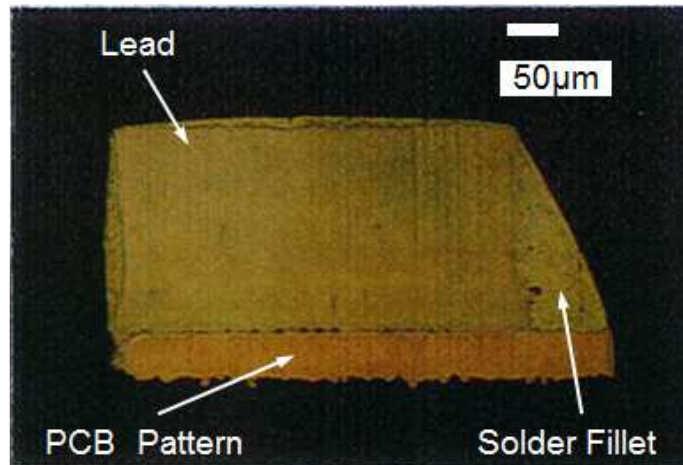


図 3-24 接合部位置ずれ状態の金属顕微鏡写真

部に残留する応力は小さく，長期信頼性における強度劣化への影響は少ないといえる．

図 3-24 に，接合部が位置ずれした際にはんだフレットの形成状態を示す．QFP-IC リードの位置ずれが大きい場合，PCB パターンの端からリードが出てしまい，はんだフレットは形成されていなかった．得られた実験結果から，接合強度が低下する要因として，リードの位置ずれによる，はんだフィレットの形成不足が考えられる．

### 3-4 まとめ

本章では，0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の 4 辺同時加熱はんだ付けシステムの開発とはんだ材の流動制御プロセスについて述べた．4 辺同時レーザスキャン加熱を活用したセルフアライメント効果や接合リード矯正機構により，はんだ材の流動制御不良に起因する接合不良を低減し，はんだ付け時間を半分の 6 秒とした．このプロセスで接合した接合部の信頼性評価を行い，開発したシステムを量産工程に寄与させた．本章では，次の結論を得た．

- (1) はんだペーストのディスペンス塗布の制御因子は，ペーストの粘度，ノズル径，塗布圧力，塗布時間，ノズルと基板のギャップ量で決定される．安定塗布を行うためには，ノズルと PCB のギャップ量を一定にする必要があり，倣い方式の機械機構を



考案した．清浄度が必要な箇所には，レーザ変位計などを使用した非接触式でのギャップ制御が必要と考える．

- (2) 0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC のはんだ付けには，レーザ光径 4 mm，スキャン周波数 40 Hz，照射時間 6 秒，加圧矯正時間 1 秒が必要である．これは，はんだ付け時間 12 秒以下の仕様値を満足している．はんだペーストがない場合の接合部の温度に比べ，はんだペーストがある場合の温度が高くなる理由は，はんだペーストのレーザ光吸収率が高いためと考えられる．
- (3) 図 2-13，図 3-15 の測定結果から，はんだペーストの有無に係らず，中央部より端部の温度が高くなる．この温度差は 10 °C 以内であった．温度差が発生した理由として，スキャンライン上の熱拡散定数や熱伝導度，ガルバノモータの性能に依存することが考えられる．
- (4) QFP-IC パッケージ内の温度は，レーザ照射終了後の 6 秒で 100 °C，その後も 141 °C まで上昇した．この温度は，QFP-IC の加熱許容度である 250 °C，3 秒以内，かつ 150 °C，3 分以内より低いため，熱ストレスによるパッケージダメージは，少ないといえる．また，接合部の冷却機能を追加すれば，さらに，熱ストレスは低減され，鉛フリーはんだ材の高温加熱プロセスでの，熱ストレス回避も可能といえる．
- (5) リード形状のコブナラリティを矯正する加圧動作は，レーザ照射終了 0.5 秒前に行うことで，はんだ量不足やブリッジによる不良が低減する．このときの 0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC のはんだペースト量は，0.59～1.05 mg /リードが最適である．また，熔融はんだ材内のフラックスによる残留ボイドは，加圧矯正動作で低減できると考えられる．このボイド低減は，接合強度のばらつき低減に，有効である．
- (6) 4 方向同時加熱プロセスは，全接合部を同時加熱するため，全体加熱リフローで確認されるセルフアライメント効果がある．このため，マウント時の位置精度が  $\pm 50 \mu\text{m}$  であっても，セルフアライメント効果で接合位置精度は向上する．本プロセ

スでの位置ずれの要因は、コプナラリティを矯正する加圧機構の加圧方向と PCB を支える受け機構との軸ずれに起因すると考えられる。

- (7)本プロセスでの接合強度は、初期強度で 19.9 N, TCT100 サイクルで 22 N, TCT1000 サイクルで 19.6 Nを示した。得られた結果から、本プロセスのはんだ接合部は、通常の手はんだ付けや全体加熱リフローと、同等レベルの長期信頼性があるといえる。
- (8)引張試験後の接合部破断状態の観察から、はんだフィレットを形成するリード外周部から、破断が発生していたことを確認した。このため、PCB パターン端面と QFP-IC リード端面の位置ずれは、適正なフィレットの形状形成を妨げ、接合強度低下を招くことが考えられる。接合強度を確保するためには、セルフアライメントが有効である。
- (9)TCT1000 サイクル後の接合部には、カーゲンダルボイドが発生し、接合強度が低下する。この理由として、PCB パターン近傍の Cu が Sn よりも拡散速度が速いためにボイドが発生し、リードとはんだ層の密着面積が減少したためと考えられる。

## 参考文献

- 1) J. P. Jung, “A study on the solderability of QFP outer lead using Nd:YAG laser”, *Metals and Materials* **5**, pp.317-321 (1999).
- 2) A.Flanagan, A. Conneely, T. J. Glynn, G. Lowe: “Laser soldering and inspection of fine pitch electronic components”, *J. Mater. Process. Technol.* **56**, pp.531-541 (1996).
- 3) K. Murakami, A. Adachi, J. Hirota, O. Hayashi, S. Hoshinouchi, M. Sakao: “Study of a Laser Soldering Process for Fine-Pitch Leads. (2nd Report). Development of the High Speed Soldering Process by a New Beam-Scanning Technique”, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering* **60**, pp.713-717 (1994) [in Japanese].
- 4) Web[<http://toshiba.semicon-storage.com/jp/design-support/reliability/device/testing/testing1/1271174.html>]
- 5) E. Semerad, L. Musiejovsky, and J. Nicolics, “Laser soldering of surface-mounted devices for high-reliability applications”, *J. Mater. Sci.* **28**, pp.5065-5069 (1993).
- 6) M. Brandner, G. Seibold, C. Chang, F. Dausinger, H. Hügel: “Soldering with solid state and diode lasers: Energy coupling, temperature rise, process window”, *J. Laser Appl.* **12**, pp.194-199 (2000).
- 7) Z. HAN, S. XUE, J. WANG, X. ZHANG, L. ZHANG, S. YU, W. Hui: “Mechanical properties of QFP micro-joints soldered with lead-free solders using diode laser soldering technology”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* **18**, pp.814-818 (2008).
- 8) M. Inaba, M. Homma, K. Tejima, S. Hirao, T. Sakurai: “Effects of Fe, Ni and on reaction diffusion at solder/Cu-base-alloys interface”, *The Japan Institute of Metals and Materials* **48**, pp.863-870 (1984).
- 9) H. Yamada, K. Ogawa: “Electronic Journal”, *R&D Review of Toyota CRDL* **31**, pp.43-52 (1996).

## 第4章 蛍光体ペーストのディスペンス塗布プロセス

### 4-1 はじめに

第3章では，粒子状にしたはんだを溶剤とフラックスで混練したはんだペーストを溶融し，このはんだペーストの流動制御のプロセス開発を行った．はんだペーストを定量塗布するため，ディスペンス塗布プロセスでは，塗布ノズルと基板を一定距離にする機械式ギャップ制御が有効であった<sup>1)</sup>．しかし，接触方式のギャップ制御のため，清浄度や塗布速度の向上，微量塗布に必要な狭ギャップの制御が，困難であった．

FEDの蛍光体層は，厚さを $8\pm 1.5\text{ }\mu\text{m}$ で形成するため，より高精度に蛍光体ペーストを流動制御する必要がある．この問題を解決する方法のひとつに，非接触のレーザ計測技術がある．

本章では，レーザ変位計の非接触のギャップ計測と，ディスペンス塗布の制御を併用する独自システムを開発し，蛍光体ペーストの微量塗布に必要な制御性について明らかにする．この研究における実験装置と実験方法，および実験結果とその考察について，以下に述べる．

### 4-2 装置構成と実験方法

本研究では，ディスペンス塗布方式を使った蛍光体ペーストの塗布装置と厚膜塗布プロセスの開発を行った．この研究対象である蛍光体層の形成プロセスは，ガラス基板上のBMに空いた，横と縦の大きさ $115\text{ }\mu\text{m}\times 155\text{ }\mu\text{m}$ で，横方向のピッチ $210\text{ }\mu\text{m}$ の樽形の開口部の中に，厚さ $8\pm 1.5\text{ }\mu\text{m}$ の蛍光体層を形成することである．

図4-1に，1本の塗布ノズルで，蛍光体ペースト3色をディスペンス塗布するプロセスを示す．蛍光体ペーストは，塗布ノズルを備えたディスペンサシリッジに，圧力を供給して塗布を行った．

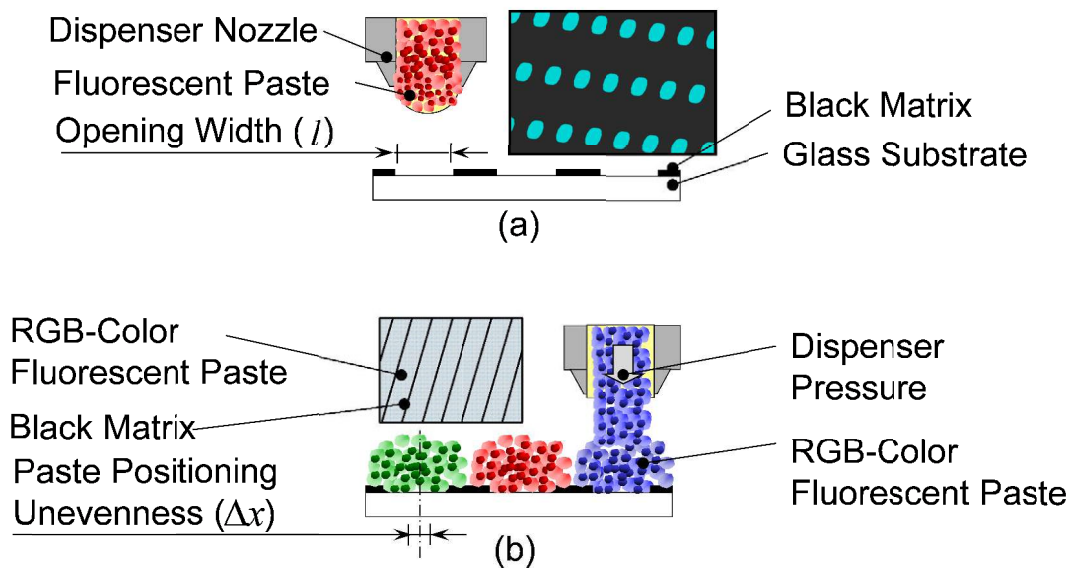


図 4-1 シングルノズル塗布による 3 色塗布方法：(a) 1 色塗布，  
(b) 3 色塗布

この蛍光体ペーストは，蛍光体，UV 感光用レジン樹脂，溶剤の BCA から構成される．提案の塗布プロセスは，赤，青，緑の蛍光体ペーストを，線状に塗布する．

#### 4-2.1 ギャップ制御塗布装置

図 4-2 に，蛍光体ペーストの精密塗布のために開発した，ディスペンス塗布装置の外観写真を示す．このディスペンス装置は，ガラス基板に設置した認識用マークを，2 台の認識用カメラで認識し，基板とノズルの位置補正を行う．このカメラは，キーエンス製 CV-X200 を使用した．ディスペンス装置は，認識補正と XY テーブルの精度  $\pm 5 \mu\text{m}$  の位置決めを可能とした．塗布ノズルは Z 軸テーブルに搭載し，テーブル上面との距離を位置決めした．この Z 軸テーブルには，アンリツ製のレーザ測長器 KL131AM を搭載し，塗布ノズルとガラス基板とのギャップ量を測定した．レーザ測長器は，光学ミラーを用い，レーザ光を斜めに照射することで，ノズルと測定位置の距離を  $5 \text{ mm}$  以内に近接させた．このときの Z 軸テーブルのエンコーダ値との相関を制御することで，ガラス基板上面に対し，塗布ノズル先端の高さの位置決めが可能となった．塗布ノズルとガ

ラ

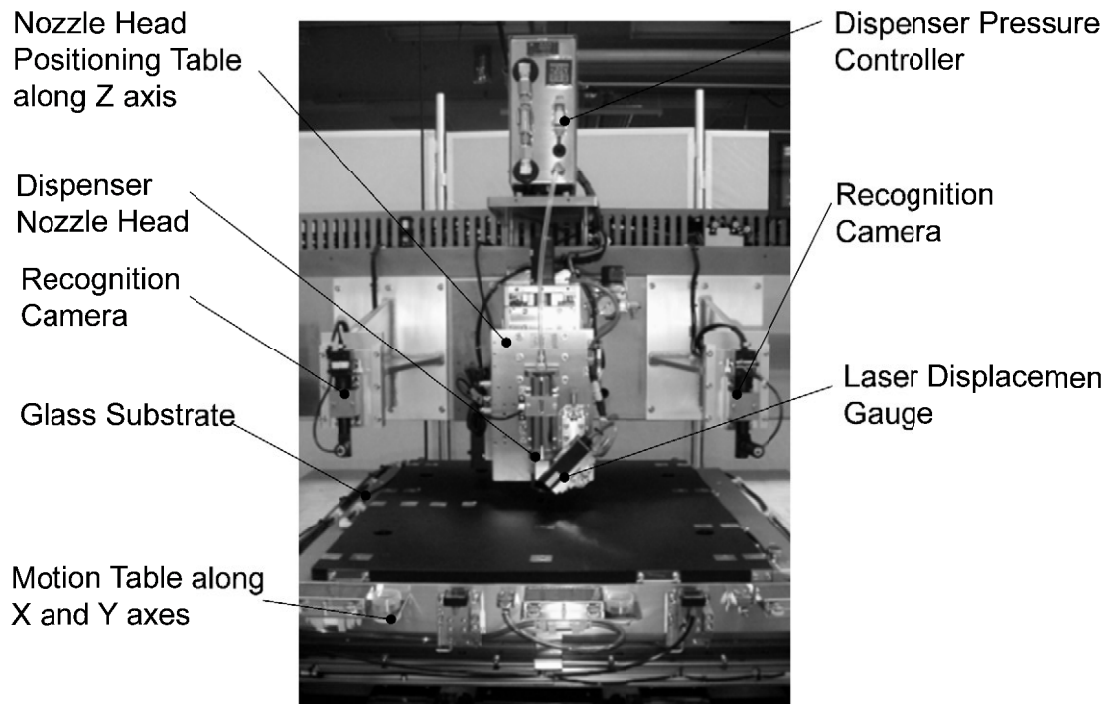


図 4-2 蛍光体ペーストのディスペンス塗布装置外観

ス基板の  $XY$  方向の位置決めは、前述した認識カメラと  $XY$  テーブルの制御で行った。塗布ノズルとガラス基板の相対位置は、ガラス基板上へ点形状に塗布した塗布材料を、認識カメラで認識することで、ガラス基板上の認識マークと塗布ノズルの実位置を算出した。この方法により、塗布ノズルの塗布位置とガラス基板上の **BM** 開口部の位置を、 $\pm 5 \mu\text{m}$  の精度で位置決めした。

#### 4-2.2 ギャップ制御性の評価方法

ギャップ制御塗布装置に使用している機器の精度を組み合わせ、制御することで、ガラス基板を速度  $125 \text{ mm/s}$  で  $XY$  方向に駆動する際に、塗布ノズルのギャップ制御精度  $\pm 1.5 \mu\text{m}$  と、塗布位置決め精度  $\pm 50 \mu\text{m}$  が制御可能な装置を開発した<sup>2),3)</sup>。このレーザ変位計から出力されるギャップ量を基に、塗布ノズルのギャップ制御を行う  $Z$  軸の速度は、次の(4-1) 式で示される。

$$V_z = K_v \times \Delta AD \dots \dots \dots (4-1)$$

ここで、 $V_z$ はZ軸の速度(mm/s)， $K_v$ はフィードバックゲイン， $\Delta AD$ はギャップ目標値に対する誤差(V)である．ガラス基板を125 mm/sで走査した際に，選定したレーザ変位計の計測出力でZ軸のギャップ制御精度を実現する，フィードバックゲインを測定した．ギャップ量は，30  $\mu\text{m}$  を設定した．

### 4-2.3 塗布断面測定装置と測定方法

図 4-3 に，このディスペンス塗布装置で塗布した，蛍光体ペーストの塗布断面測定装置を示す<sup>4),5)</sup>．この測定装置には，キーエンス製のレーザフォーカス変位計 LT-8100 を搭載し，蛍光体ペーストの表面厚さを，計測分解能  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  で測定した．蛍光体ペーストは，溶剤で蛍光体粒子をペースト状にしているため，塗布直後の表面には光沢がある．このため，レーザフォーカス変位計の測定方式は，正反射方式を選定した．この方式は，レーザ光を照射した物体からの正反射光を直接受光し，測定する．これは，表面に光沢のある対象物にレーザ光を絞って測定する方式である．

また，この測定装置には，キーエンス製のデジタルマイクロスコープ VHX-700F を搭載し，塗布状態を観察可能とした．

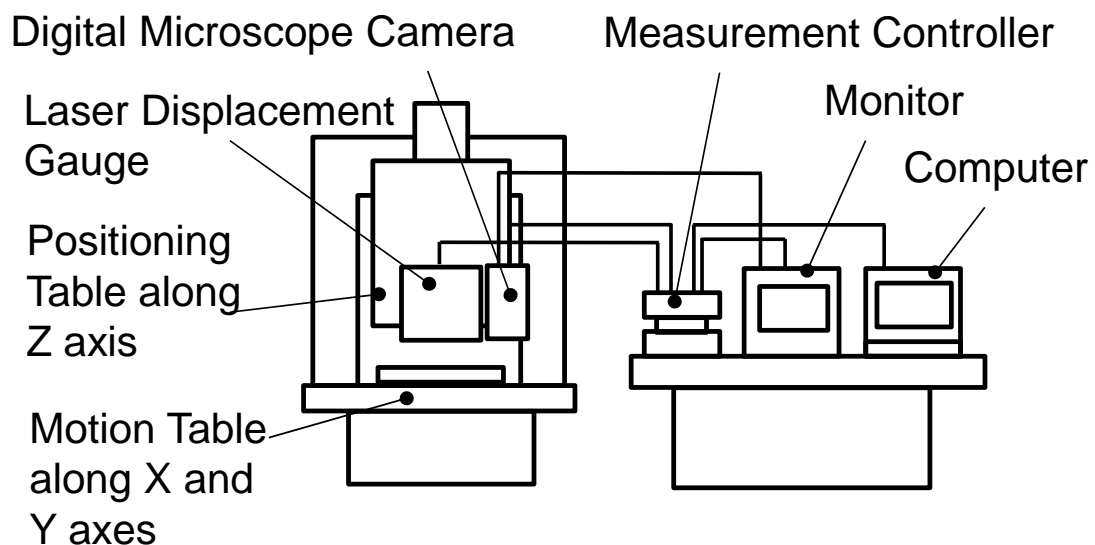


図 4-3 蛍光体ペーストの断面積測定装置の構成

図 4-4 に、レーザ変位計を使用した、蛍光体ペーストの厚さ測定の方法を示す．これは、図 4-2 の測定部の詳細図である．測定した値から、次の区分求積の式で断面積を算出した．

$$A = \sum_{k=1}^n (b-a) \frac{f(b_{k-1}) + f(b_k)}{2n} = \frac{b-a}{2n} \sum_{k=1}^n (f(b_{k-1}) + f(b_k)) \cdot (4-2)$$

ここで、 $b-a$  は蛍光体ペーストの幅 ( $\mu\text{m}$ )、 $n$  は蛍光体ペーストの厚さ測定回数、 $f(b_k)$  は  $b_k$  地点での変位計による蛍光体ペーストの厚さ ( $\mu\text{m}$ ) である．蛍光体ペーストの幅は、デジタルマイクロスコープ VHX-700F で、随時測定し確認した．

図 4-5 に、正反射式レーザ変位計の走査方向と、レーザ照射方向の組み合わせによる、測定値の評価方法を示す．(a) は塗布断面に対し、直角方向にレーザ光を照射しながら断面を計測した．(b) は塗布断面に対し、平行方向にレーザ光を照射しながら断面を計測した．被塗布体には、経時変化が少ない粘度  $60 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  のシール材を使用した．この断面積の測定精度を評価するため、評価の指標となる断面積は、2 枚のガラス基板で挟み込んで広げた塗布材料の広がり面積とガラス基板のギャップ量から体積を求め、それを元に算出した．この算出した値と、塗布断面測定装置に搭載するレーザ変位計の走査方向とレーザ照射方向の組み合わせで得られた値を比較評価した．

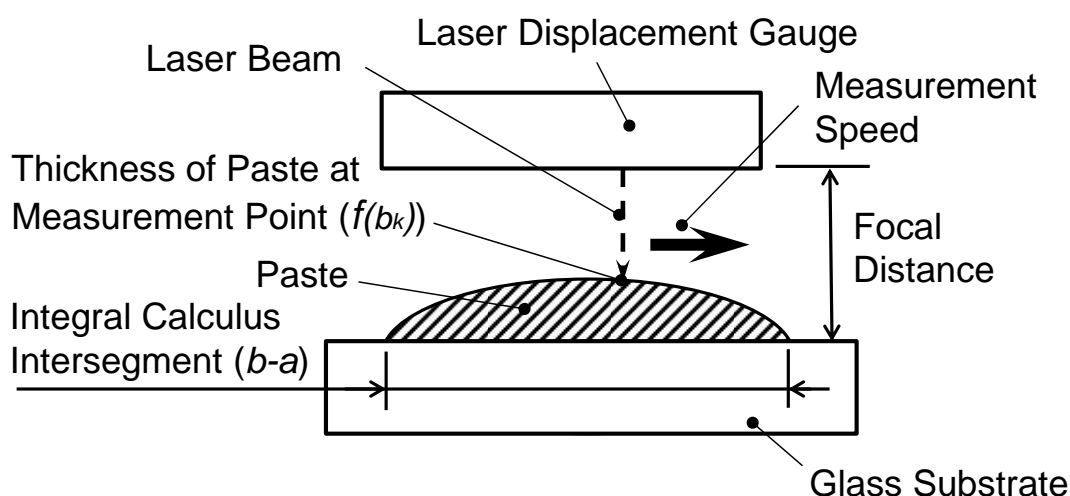


図 4-4 レーザ変位計を使用した蛍光体ペーストの厚さ測定方法



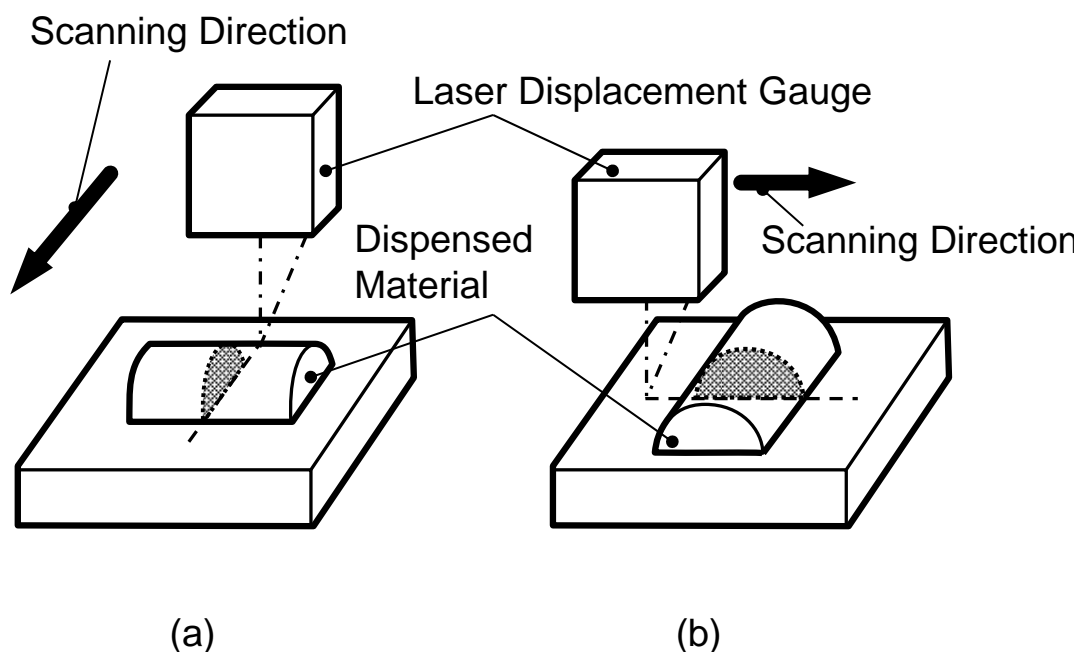


図 4-5 レーザ変位計の走査方向とレーザ照射方向の関係: (a) 塗布断面に対しレーザ光照射方向が直角方向, (b) 塗布断面に対しレーザ光照射方向が平行方向

#### 4-2.4 塗布シミュレーション方法

図 4-6 に、ディスペンサ塗布装置の加工点の構成を示す. このディスペンサ塗布は, 塗布ノズルを介し, 圧力, ノズル内径, ノズルと塗布基板のギャップをパラメータとした. この装置から塗布される, 蛍光体ペーストの断面積のシミュレーションを行う式を, 次に求めた<sup>6)</sup>.

この塗布ノズルから塗布する際の, 圧力損失の合計  $\Delta P$  は, 塗布ノズルの半径方向の圧力損失の合計  $\Delta P_1$  と, 塗布ノズル内の圧力損失の合計  $\Delta P_2$  の, 和で表せられる. 塗布ノズルの半径方向の圧力損失の合計  $\Delta P_1$  は, 2 枚の平行円板の隙間を放射状に流れる流量  $Q_1$  の式から求めることができる. また, ノズル内の圧力損失の合計  $\Delta P_2$  は, ノズル内部の圧力損失を示す Hagen Poiseuille の式から求めることができる. 以上から  $\Delta P$  は, 次の(4-3) 式で与えられる.

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = \frac{6\mu Q_1 \log_e \left( \frac{a}{d_1} \right)}{\pi G^3} + \frac{128\mu Q_1 \left( \frac{L_1}{d_1^4} \right)}{\pi} \cdots (4-3)$$

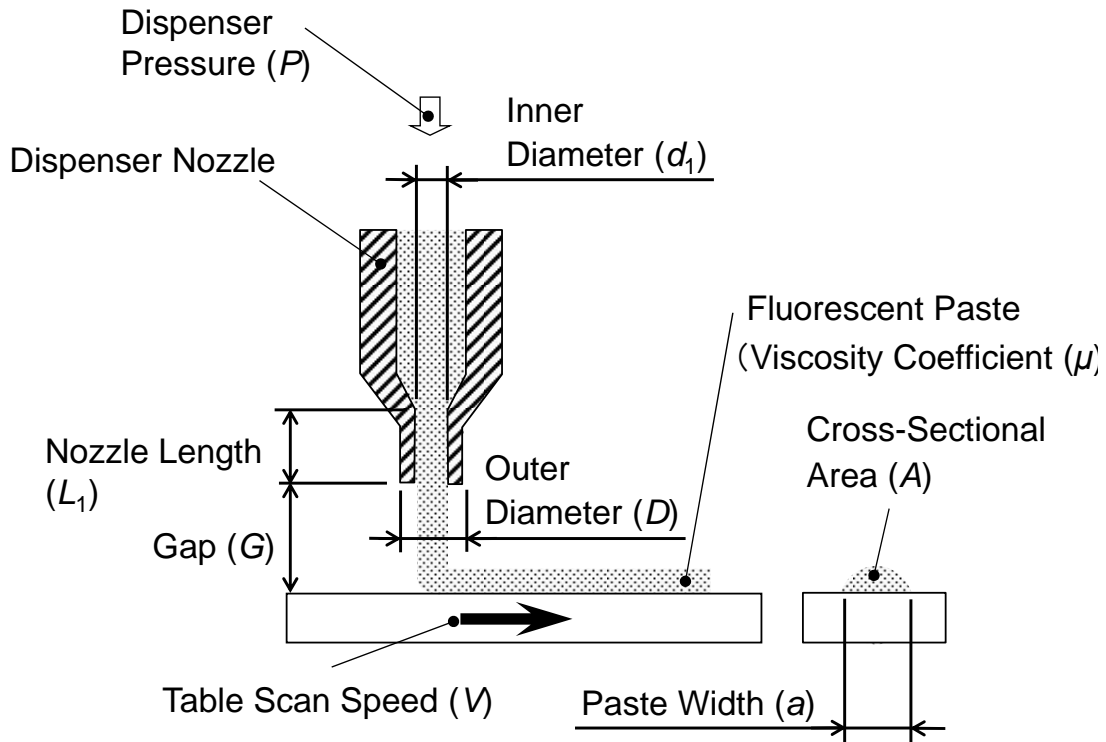


図 4-6 ディスペンサ塗布装置の塗布加工点の構成

ここで、 $\mu$  は塗布材料の粘性係数 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )、 $a$  は塗布幅 ( $\text{mm}$ )、 $d_1$  は塗布ノズルの内径 ( $\text{mm}$ )、 $L_1$  は塗布ノズルの長さ ( $\text{mm}$ )、 $Q_1$  は塗布ノズルから広がる塗布体積 ( $\text{mm}^3$ )、 $G$  は塗布ノズルとガラス基板のギャップ量 ( $\text{mm}$ ) である。

(4-3) 式から、ディスペンサ塗布装置の圧力損失の合計  $\Delta P$  は塗布ノズルから広がる塗布体積  $Q_1$  に依存するといえる。一方、塗布ノズルから広がる塗布体積  $Q_1$  は、塗布後の断面積と塗布速度から次式で与えられる。

$$Q_1 = AV \dots \dots \dots (4-4)$$

ここで、 $A$  は塗布後のペースト断面積 ( $\text{mm}^2$ )、 $V$  は塗布テーブルの移動速度 ( $\text{mm/s}$ ) である。

塗布ペーストは塗布後に大気圧力下と同じとなるため、圧力損失の合計  $\Delta P$  は、ディスペンサ塗布装置の圧力と同じになると考える。この関係から塗布後の断面積は、次の(4-5) 式で与えられる。

$$A = \frac{\pi P}{\mu V \left[ \frac{6 \log_e \left( \frac{a}{d_1} \right)}{G^3} + 128 \cdot \left( \frac{L_1}{d_1^4} \right) \right]} \dots \dots \dots (4-5)$$

ここで、 $P$ はディスペンサシリンジの塗布圧力（MPa）である．ディスペンス塗布装置は，塗布ノズルと基板のギャップ量の変動が大きいと，本装置内での追従制御は困難となるため，安定塗布には，ギャップ量の影響を受け難いパラメータの検討が，必要と考える．このパラメータを，(4-5) 式内の項目で検討した．

#### 4-2.5 ノズル径と塗布量ばらつきの実験方法

必要な塗布断面積  $A$  が決定できれば，(4-5) 式から，本装置の塗布パラメータは求められる．この式のパラメータである，ノズル径と塗布量のばらつき状態を測定するため，ディスペンス装置で塗布した高粘度のシール材を，断面積測定装置で測定した．60 Pa・s の粘度のシール材を使用した理由は，塗布量ばらつきの経時変化の影響を低減するためである．

### 4-3 結果および考察

#### 4-3.1 ギャップ制御性の実験結果および考察

図 4-7 に，ギャップ制御のフィードバックゲインとその制御精度を測定した結果を示す．横軸にフィードバックゲイン，縦軸にギャップ量の目標値 30  $\mu\text{m}$  に対する制御位置の変位量を示す．ここでは，蛍光体ペーストのディスペンス塗布に必要な，塗布ノズルとガラス基板のギャップ精度を測定した．

塗布ノズルの等速走査領域では，ギャップ制御のフィードバックゲインを 1000 で設定した場合，ギャップ位置のばらつき量は 5.5  $\mu\text{m}$  であった．2000 では 4  $\mu\text{m}$ ，3000～8000 の間では  $2.75 \pm 0.25$   $\mu\text{m}$ ，10000 では 3.5  $\mu\text{m}$  を確認した．塗布ノズルの加減領域では，等速領

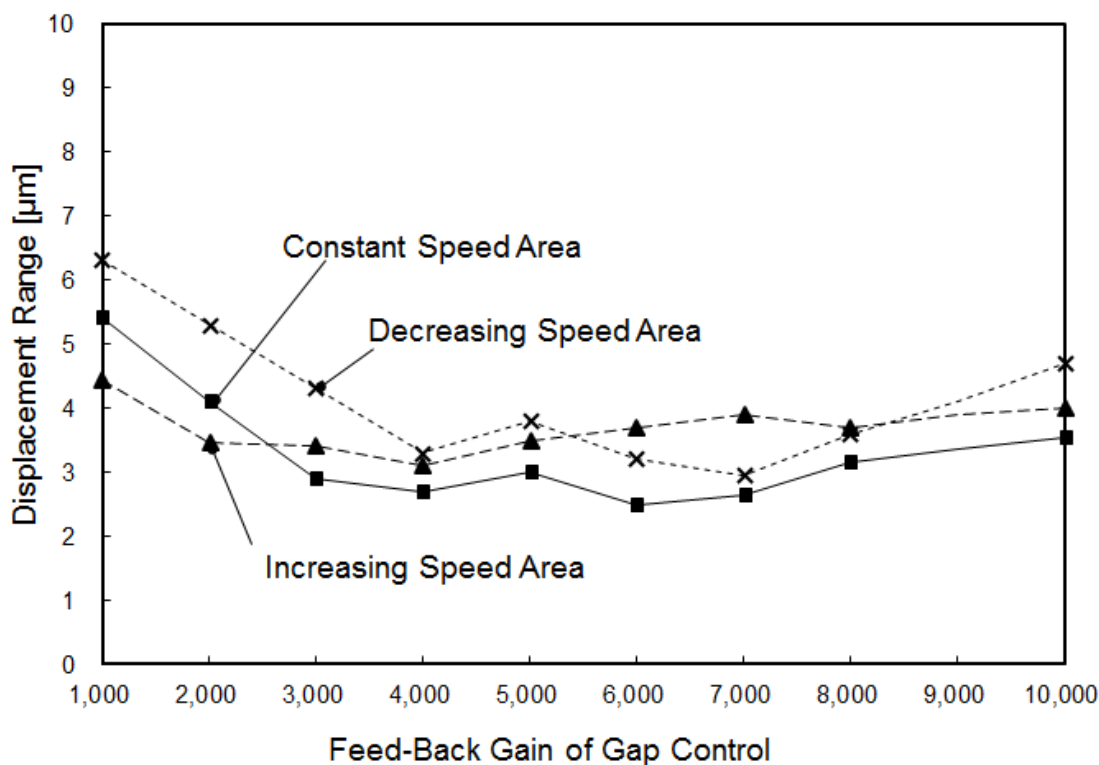


図 4-7 フィードバックゲインとギャップ制御の位置変位測定結果

域よりもばらつき量が， $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$  大きくなった．

測定結果から，フィードバックゲインを 3000～8000 に設定して制御を行えば，塗布ノズル走査の等速領域内で，目標ギャップ  $30 \mu\text{m}$  に対し， $3 \mu\text{m}$  以下の精度が得られた．加減速領域でも，被計測体であるガラス基板の厚さや表面処理によって左右されるが，フィードバックゲインを 3000～8000 に設定すれば，ばらつき量が  $4 \mu\text{m}$  となり，必要なギャップ精度は確保できると考えられる．

以上より，開発した塗布装置は，蛍光体ペーストの安定塗布が可能であるといえる．

#### 4-3.2 塗布断面測定装置の実験結果および考察

図 4-8 に，塗布断面測定装置のレーザ変位計の走査方向の違いによる，塗布断面の測定結果を示す．(a) は，塗布断面に対しレーザ光照射方向が直角方向，(b) は，塗布材断面に対しレーザ光照射方向が平行方向で，それぞれ測定をした．塗布材料には，塗布後の形状を安定させるため， $60 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  の高粘度シール材を使用した．図の

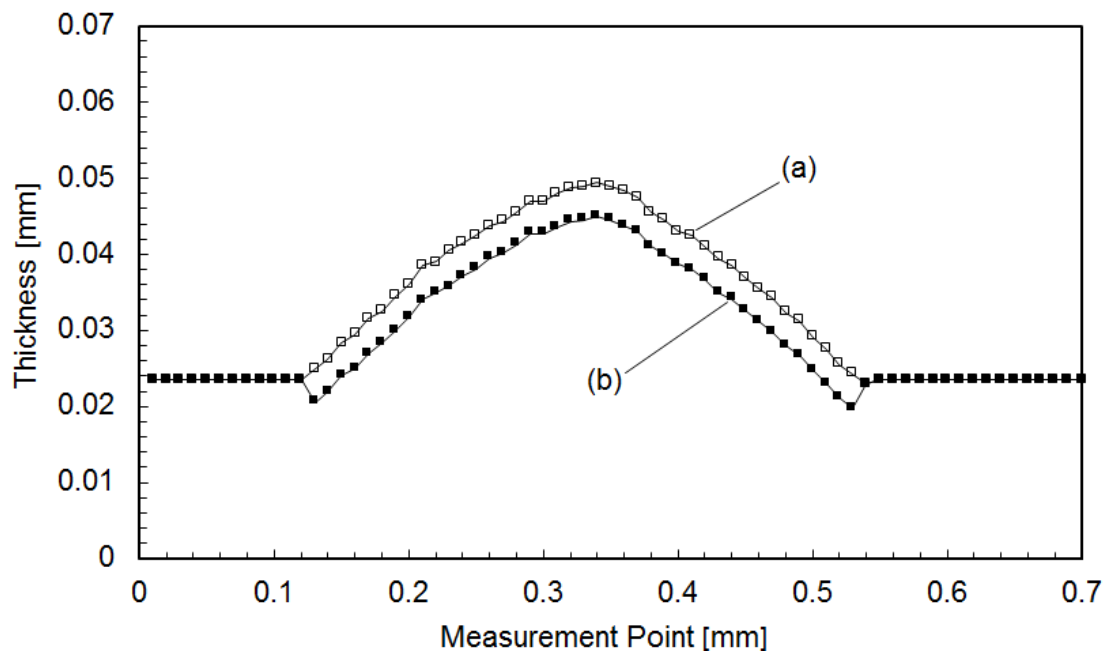


図 4-8 レーザ光の照射方向と塗布断面の測定結果：(a)塗布断面に対しレーザ光照射方向が直角方向，(b)塗布断面に対しレーザ光照射方向が平行方向

横軸はレーザ変位計の測定地点（mm），縦軸はレーザ変位計で測定したガラス基板からの塗布材の厚さ（mm）である．

図 4-9 に、ギャップを一定にした 2 枚のガラス基板内で押し潰されたシール材の断面積測定と，レーザ変位計で測定した断面積の測定値の，比較結果を示す．横軸は塗布圧力（MPa），縦軸は塗布断面積（ $\mu\text{m}^2$ ）である．

図 4-8 から，(a) と (b) で塗布材料の厚さに  $4.8 \mu\text{m}$  の差があった．(b)の塗布材料の両端では，ガラス基板の厚さよりも低い値を示した．また，図 4-9 の結果から，(c) のギャップ一定のガラス基板 2 枚で押し潰した際の断面積と(a)の断面積が， $200 \mu\text{m}^2$  の差で近い値を示すのに対し，(b) と(c) の差は  $2000 \mu\text{m}^2$  程度の差があることがわかった．この理由として，レーザ光照射方向に塗布材があると，レーザ光経路が塗布材を横切り，測定開始地点が実際よりも離れた位置として計測されたからと考えられる．

以上から，塗布ペーストの測定方法は，塗布断面とレーザ変位計のレーザ光照射方向が直角となる(a) の状態で行うことに決定した．

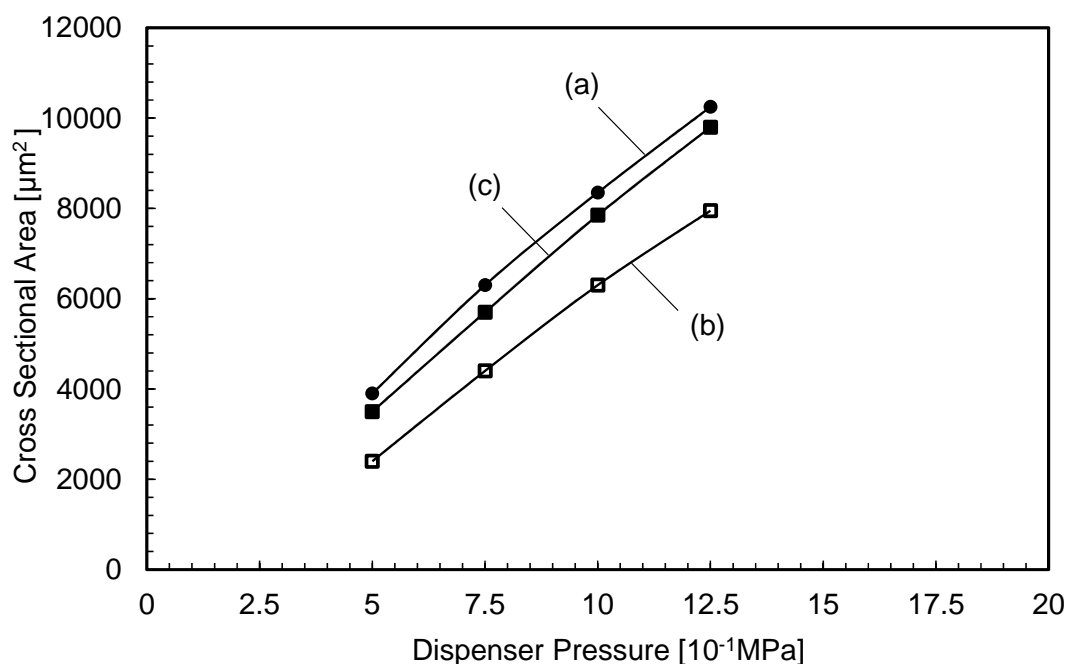


図 4-9 ガラス基板での押し潰し測定法とレーザ変位計による塗布断面積の測定結果：(a)塗布断面に対しレーザ光照射方向が直角方向，(b)塗布断面に対しレーザ光照射方向平行方向，(c)ガラス基板 2 枚の潰し方式

### 4-3.3 塗布シミュレーション結果および考察

図 4-10 に， シングルノズルでのディスペンス塗布における， ノズル内径， ディスペンス圧力， ノズルとガラス基板のギャップ量， 塗布断面積の関係をシミュレーションした結果を示す． ここで， ディスペンス塗布装置の安定塗布条件を検討した． このシミュレーションには， (4-5) 式を使用し， ディスペンス塗布速度は 125 mm/s， 蛍光体ペーストの粘性係数は 45 Pa·s， ノズル長さは 0.05mm に設定した． また， ノズル内径は 0.12 mm， 0.14 mm， 0.16 mm の 3 種類に設定した． 横軸はギャップ量 ( $\mu\text{m}$ )， 縦軸は塗布断面積 ( $\mu\text{m}^2$ ) である．

目標の塗布断面積は，  $2050 \mu\text{m}^2$  とした． これは， 蛍光体ペーストの厚さを  $15.8 \mu\text{m}$  ， ペースト内の蛍光体材含有量 55 %， 塗布幅 130  $\mu\text{m}$  とした場合， (4-6) 式から算出した塗布断面積である．

シミュレーションの結果から， 蛍光体ペーストの断面積が  $2000 \sim 2150 \mu\text{m}^2$  の間で， ギャップ量の変動影響は小さいことを確認した．

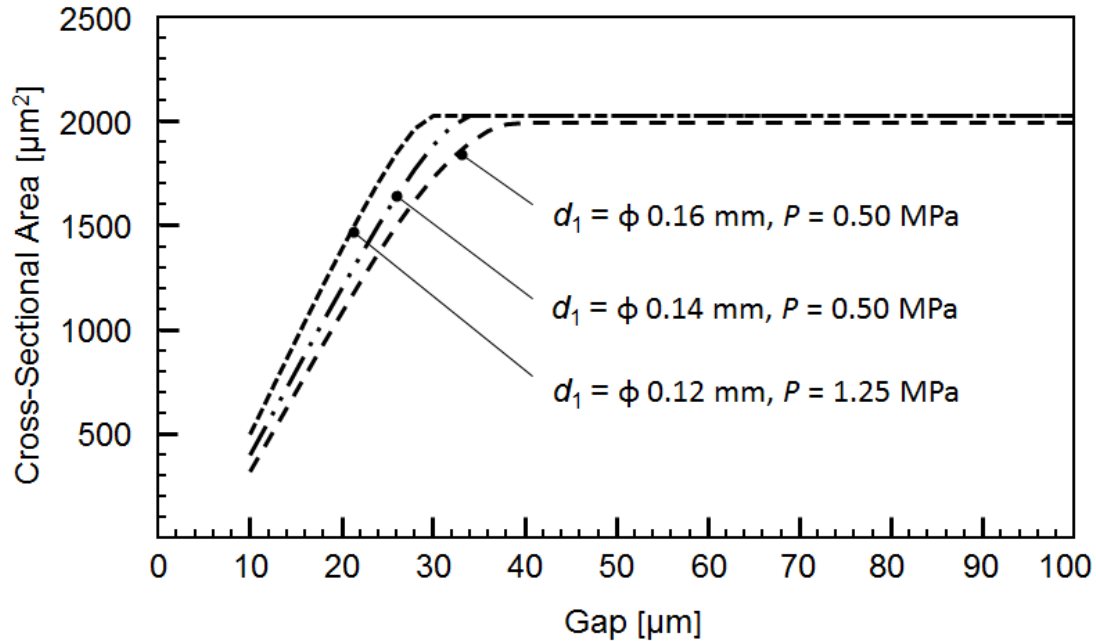


図 4-10 塗布ノズルの塗布パラメータと塗布断面積のシミュレーション結果

このときのディスペンサの塗布圧力は 0.5 MPa, ノズル内径は 0.14 mm または 0.16 mm である. 一方, ノズル内径を 0.12 mm にした場合, ディスペンス圧力は, 1.25 MPa まで昇圧が必要になった. これは, (4-6) 式でノズル内径を細くした場合, 圧力損失が増加するため, ディスペンス圧力を増圧する必要性が生じたからである. また, ノズル径が 0.14 mm で, 塗布ノズルとガラス基板のギャップ量が 30  $\mu\text{m}$  以上になれば,  $6 \cdot \log_e \cdot (a/d_1)/G^3 \ll 128 \cdot (L_1/d_1^4)$  になり, ギャップ変動の影響は (4-5) 式の中で小さくなり, 断面積の変動も低減した.

得られた結果から, 2050  $\mu\text{m}^2$  前後の塗布断面積を得るための条件は, 圧力とノズルギャップ量, ノズル内径それにディスペンス塗布速度がそれぞれ, 0.5 MPa, 30~70  $\mu\text{m}$ , 0.14 mm, 125 mm/s であることがわかった. ギャップ制御が 30~70  $\mu\text{m}$  であれば, ディスペンス塗布の自動化は, 比較的容易であるといえる.

#### 4-3.4 ノズル径と塗布量ばらつきの実験結果および考察

図 4-11 は, 塗布ノズル径と塗布断面積のばらつきの相関を, 実験で求めた結果である. 塗布測定には, 塗布形状が塗布後に経時変

化を起こさないよう、60 Pa・s の粘度のシール材料を使用した。横軸にノズル径 (mm)、縦軸にギャップ制御下での塗布断面積のばらつき ( $\mu\text{m}^2$ ) を、 $3\sigma$  値で示す。ここでは、ディスペンス塗布方式での塗布ノズル径の選定を行った。ノズル径が 0.25 mm 以上になると、塗布量ばらつきは 12 % に増加した。

得られた結果から、適用可能な塗布ばらつきを 7 % 以下とした場合、ノズル径は 0.23 mm 以下を選定すべきことがわかった。この理由として、(4-5) 式から、塗布断面積  $A$  は塗布圧力  $P$  と粘度  $\mu$  の逆数に依存するためと考えられる。また、塗布ノズル径 0.25 mm の場合、塗布断面積のばらつきが 12 % に増加した理由は、塗布圧力変動の影響のためと考えられる。このことから、ディスプレイに使用する蛍光体塗布ペーストは、小径のノズルを選定する必要があるといえる。

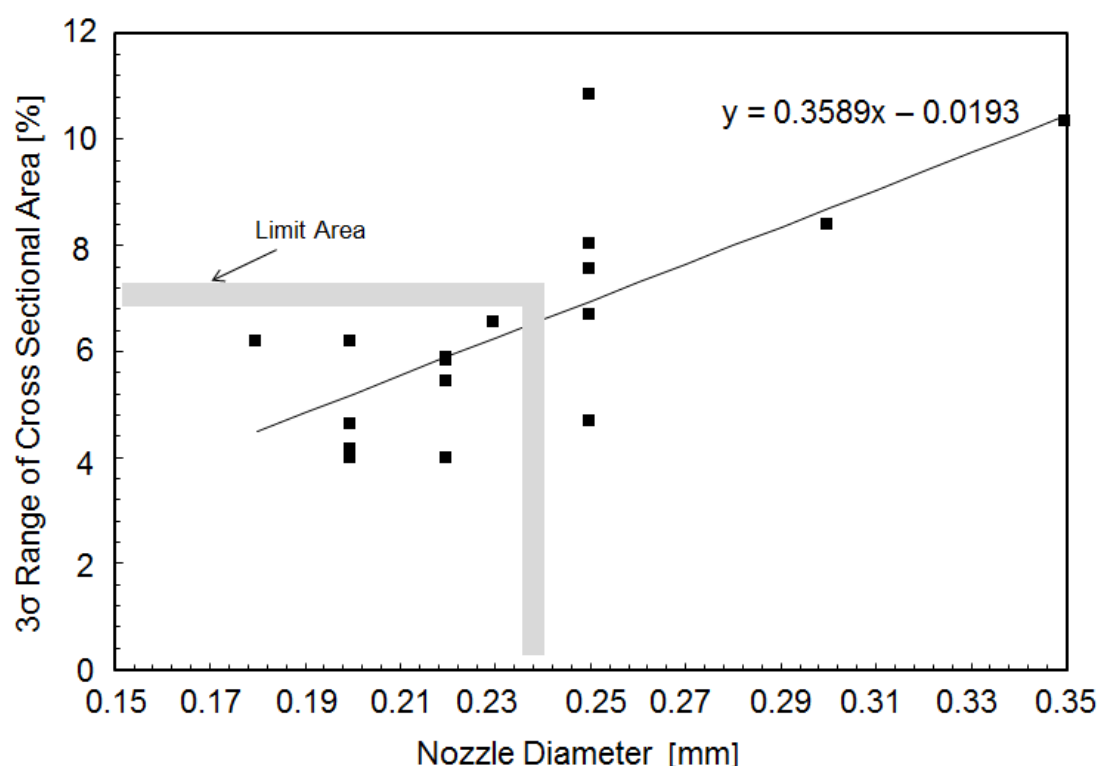


図 4-11 塗布ノズル径と塗布断面積のばらつきの測定結果



#### 4-4 まとめ

本章では、FED の蛍光体パネル形成において、蛍光体ペーストのディスペンス塗布プロセスの流動制御について述べた。特に、塗布ノズルとガラス基板のギャップ制御と塗布パラメータの適正化により、ギャップ制御の依存度を低減した蛍光体ペースト定量塗布のプロセスを示した。本章では、次の結論を得た。

- (1) はんだペーストの均一塗布条件のひとつであった、塗布ノズルと PCB のギャップ量制御方式の問題を検討し、接触式倣い機構から、ギャップ量をレーザ変位計で非接触計測するプロセスを開発した。ギャップ制御のフィードバックゲインの適正化により、塗布ノズルの等速走査領域での位置決め精度は、 $3\ \mu\text{m}$  以内となる。
- (2) レーザ変位計を走査して、塗布断面積を測定する計測装置を開発した。塗布断面に対するレーザ光の照射方向は、直角方向にする必要がある。平行方向にレーザ光を照射した場合は、ガラス上面から  $4.8\ \mu\text{m}$  低い位置に計測値がシフトした。この理由として、測定中にレーザ光路が塗布材料を横切ったためと考えられる。
- (3) 塗布量は、塗布ノズル径、塗布圧力、ギャップ量、塗布材料の粘度に依存する、このディスペンス塗布のシミュレーションモデルを考案した。(4-5) 式から、開発したディスペンス塗布装置のギャップ制御の依存度を低減できるプロセス条件を得た。最適な塗布断面積  $2050\ \mu\text{m}^2$  前後になるための条件は、ノズル径  $0.14\ \text{mm}$ 、塗布圧力  $0.5\ \text{MPa}$ 、塗布速度  $125\ \text{mm/s}$ 、塗布ギャップ量  $30\sim 70\ \mu\text{m}$  である。
- (4) 高粘度のシール材を使用して、塗布ノズルと塗布量ばらつきの関係を実験で求め、塗布ノズル径が  $0.23\ \text{mm}$  以下であれば、塗布量ばらつきは  $7\ \%$  以下になる。低い粘度のペースト塗布では、小径のノズルが必要と考えられる。

## 参考文献

- 1) P. Stokes: “Automated dispensing in surface mount assembly”, *Assem. Autom.* **16**, pp.30-30 (1996).
- 2) X. Zhang, I. Todo: “Control of Sealing Robot Using Seam Position Detection Method Based on Integration of Range and Gray-Scale Images”, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C* **60**, pp.3130-3137 (1994) [in Japanese].
- 3) E. Duqi, M. Bocchi, L. Giulianelli, N. Pecorari, E.F. Scarselli, R. Guerrieri,: “Fast calibration of a dispenser nozzle for delivery of microdroplets over a flexible substrate”, *Sens. Actuators A Phys.* **168**, pp.320-327 (2011).
- 4) E.A. Chinnov, E.N. Shatskii, O.A. Kabov: “Evolution of the Temperature Field at the Three-Dimensional Wave Front in a Heated Liquid Film”, *High Temp.* **50**, pp.98-105 (2012).
- 5) T. Mogi, K. Hatakeyama, T. Taguchi, H. Wake, T. Tanaami, M. Hosokawa, T. Tanaka, T. Matsunaga: “Real-time detection of DNA hybridization on microarray using a CCD-based imaging system equipped with a rotated microlens array disk”, *Biosens. Bioelectron.* **26**, pp.1942-1946 (2011).
- 6) R. Takahashi, K. Oshiro, T. Toyoshima: “*Kouseido shîruzai tofu gijutsu no kaihatsu* (Development of high accuracy seal dispensing technology)”, *Proc. JSPE Semest. Meet.* **2**, p539 (1998) [in Japanese].

## 第5章 蛍光体ペーストの厚膜形成プロセス

### 5-1 はじめに

第4章では，レーザ変位計でのギャップ制御性とディスペンス塗布の流動制御性を確認し，ギャップ量を  $30\sim70\ \mu\text{m}$  の範囲で制御すれば，必要量の維持が可能な塗布プロセスを開発したことを述べた．しかし，塗布した蛍光体ペーストは，被塗布材料とのぬれ性に影響を受けて広がり，塗布厚さの制御が困難であった．

PDP の蛍光体パネルは， $10\sim30\ \mu\text{m}$  蛍光体層をワッフル状の底面と隔壁に形成するが，蛍光体の広がり範囲に許容があり，塗布ギャップ精度やぬれ性のばらつきによる塗布厚さへの影響は，少なかった<sup>1),2)</sup>．しかし，FED の蛍光体パネルは，隔壁を持たない BM 開口部に  $10\ \mu\text{m}$  以下の蛍光体層を形成し，アノードとカソードの電界状態を維持する後付けスペーサの清浄度が重要であった<sup>3)</sup>．

本章では，FED の蛍光体パネルの樽形状 BM 開口部に， $10\ \mu\text{m}$  以下の蛍光体層を形成するため，塗布後の蛍光体ペーストのぬれ性の制御と，BM 開口部以外の蛍光体を剥離する，独自のプロセスについて明らかにする．本研究で用いた実験装置と実験方法，実験結果およびその考察について，以下に述べる．

### 5-2 厚膜塗布層形成プロセスと実験方法

本研究では，FED の蛍光体パネル形成のため，蛍光体ペーストのディスペンス塗布と厚膜層形成のプロセス開発を行った．蛍光体層は，ガラス基板上の BM に形成された樽形状開口部  $115\ \mu\text{m} \times 155\ \mu\text{m}$  に，厚さ  $8\pm1.5\ \mu\text{m}$  の層を形成させる．この開口部の横方向のピッチ間隔は， $210\ \mu\text{m}$  である．

図 5-1 に，厚膜蛍光体層を形成するためのプロセスフローを示す．第4章で，シミュレーションを行った塗布プロセスを使い，ディスペンス塗布を行った．(a) は，1色の蛍光体ペーストを，ガラス基板の BM 開口配列の所定位置に塗布した状態である．この蛍光体ペー

ストは、蛍光体、UV 感光用レジジン樹脂、溶剤の BCA で構成される。(b) は、ガラス基板の BM 上に、線状の蛍光体ペーストを 3 色全て塗布した後、120 °C、15 分間乾燥して、BCA の成分を除去する工程である。(c) は、ガラス基板の裏面から BM の開口部を通して、365 nm の紫外線波長高圧水銀ランプで裏面露光し、蛍光体ペーストの感光材を硬化する工程である。硬化後、0.4 wt% の  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶剤を 28 °C に保った槽に、30 秒間浸けることで、開口部以外の未感光の蛍光体ペーストを剥離する。開口部に形成された蛍光体ペーストは、500 °C 90 分間の熱処理を行い、蛍光体以外の成分を除去して蛍光体層を形成する。蛍光体ペーストの外形寸法は、裏面露光と剥離および熱処理による収縮で決定される。この工程では、塗布後の蛍光体ペーストの厚さ制御が重要である。

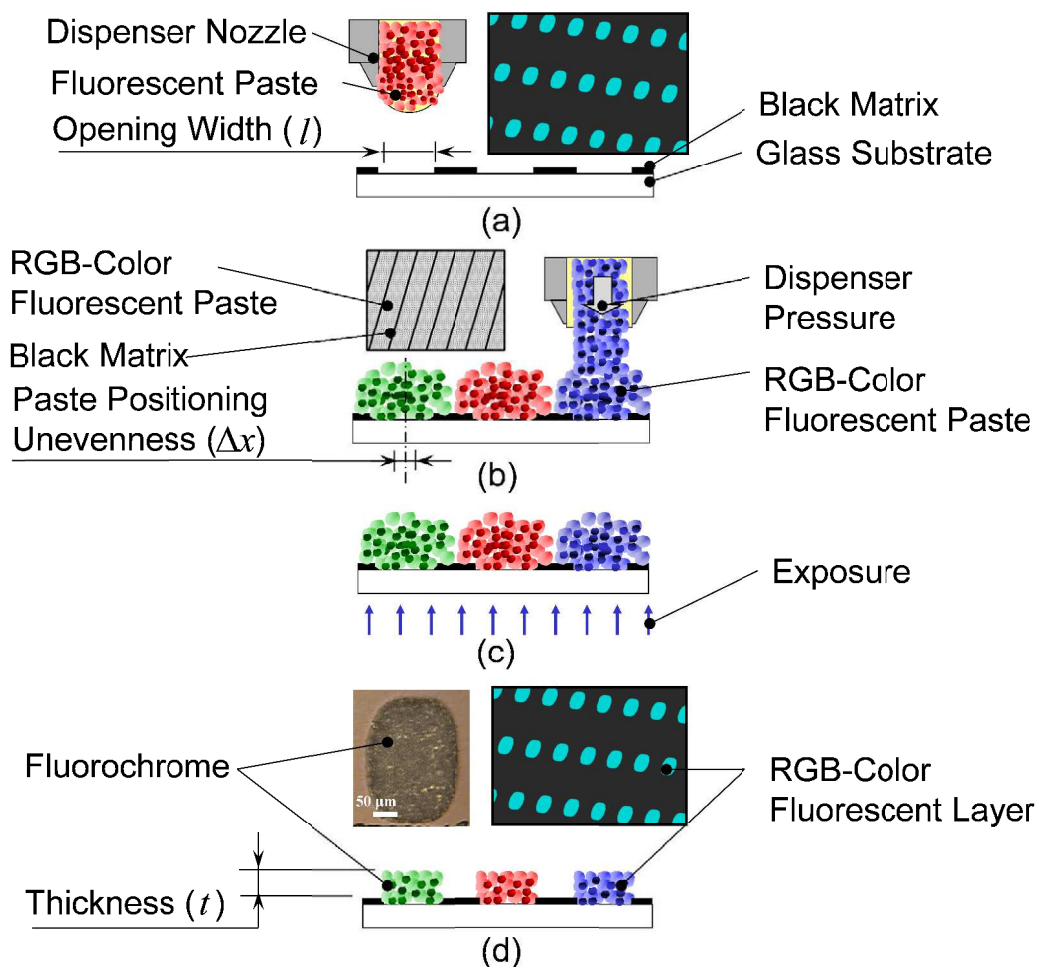


図 5-1 厚膜蛍光体層形成の新プロセスフロー

### 5-2.1 BCA の付着張力の評価方法

本研究の蛍光体層形成プロセスでは，塗布後の蛍光体ペーストの形状維持が必要である．このため，蛍光体ペーストに含まれる溶剤の BCA とガラス基板表面の付着張力を評価した．付着張力は，固体の表面張力と固体・液体間の界面張力の差で表されるが，一般的には接触角を測定することで，付着張力を評価している．

図 5-2 に，固体に供給した液体の表面張力，固体の表面張力，液体と固体の界面張力の平衡関係を示す．この関係は Young の式で示される．

$$F_{12} - F_{13} = F_{23} \cos \theta \cdots \cdots (5-1)$$

ここで， $F_{13}$ は固体の表面張力 (N/m)， $F_{23}$ は液体の表面張力 (N/m)， $F_{12}$ は個体と液体の界面張力 (N/m)， $\theta$ は液体の接触角 (°)， $F_{23} \cos \theta$ は付着張力 (N/m) である．今回の付着張力の評価では，ガラス基板が固体，BCA が液体である．

$\theta$  が  $90^\circ$  よりも小さい場合は，固体と液体の間にぬれ現象が発生し， $\theta$  が小さいほど，ぬれ性はよい．この BCA の接触角を測定し，ガラス基板表面の前処理効果を評価した<sup>4),5)</sup>．接触角の測定には，デジタルマイクロスコープ VHX-700F を使用した．

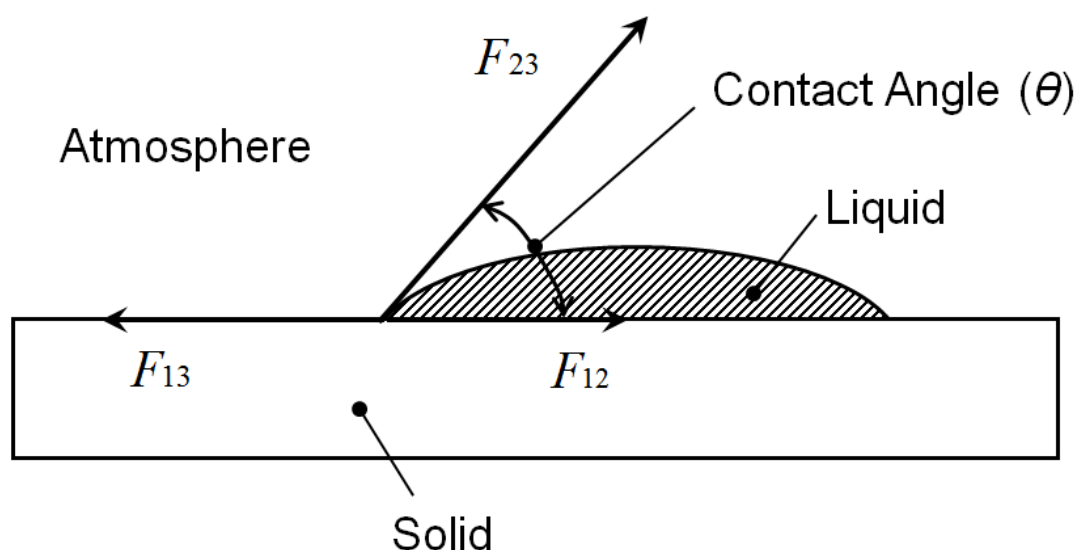


図 5-2 液体と固体の表面張力と界面張力の関係

前処理には、UV 光照射による親水処理、Hexamethyldisilazane (HMDS) およびフッ素樹脂コートによる撥水処理を検討した。それぞれの処理方法は、次の通りであった。

- ・ UV 光照射処理は、 $5 \text{ J/mm}^2$  の UV 光を、15 秒間照射
- ・ HMDS 処理は、 $50^\circ\text{C}$  のトリメチルシリル基供与体である HMDS の 100 wt% の槽に 3 分間浸漬し、その後  $130^\circ\text{C}$  で 3 分間の乾燥
- ・ フッ素コート処理は液体フッ素を散布し、大気放置で 40 分間乾燥

この前処理を行う基板は、ガラス基板、BM 付きガラス基板、熱処理した BM 付きガラス基板とした。この熱処理は、 $250^\circ\text{C}$  で 20 分間の加熱とした。BCA の接触角の評価には、水の接触角も測定し、これを評価基準とした。

### 5-2.2 塗布圧力と塗布厚さの測定方法

第 4 章、図 4-10 に示すシミュレーション結果から、ギャップ量の変化の影響が少ない塗布条件がわかった。(4-5) 式からは、この条件に対する塗布圧力の影響で、塗布量の増減が発生すると考えられる。この関係は、第 3 章、図 3-11 の結果からも確認された。このため、塗布圧力に対する塗布厚さの影響を測定した。

熱処理した BM 付きガラス基板の上に塗布した蛍光体ペーストの塗布幅と塗布厚さを、第 4 章、図 4-3 の塗布断面測定装置で測定した。塗布ノズル径、塗布速度、塗布ギャップは、それぞれ 0.14 mm, 125mm/s, 30  $\mu\text{m}$  とした。

### 5-2.3 蛍光体含有量と塗布厚さの測定方法

FED の蛍光体ペーストは、蛍光体材料、UV 感光レジン材料、それに溶剤の BCA で構成される。蛍光体材料の含有量が及ぼす、蛍光体ペーストの塗布厚さへの影響を評価した。

熱処理したガラス基板上の BM は、蛍光体ペースト内の BCA を急速に吸収し、BCA 以外の固形成分が、塗布直後の形状を維持すると考えられる。このため、蛍光体含有率と塗布厚さの関係を、蛍光体含有率 55 wt% と 30 wt% の蛍光体ペーストで評価した。評価には、

第 4 章, 図 4-3 の塗布断面測定装置に搭載する変位計 LT-8100 を使用し, 液滴の最も高い箇所を塗布厚さと定義した. また, 熱処理した BM の効果を確認するため, 熱処理しないガラス基板と BM 付きガラス基板を, 比較対象として測定した.

#### 5-2.4 蛍光体層形成プロセスの評価方法

塗布した蛍光体ペーストを乾燥, 裏面露光・現像, 熱処理し, それぞれの工程の出来栄を評価した. 外観観察には, 第 4 章, 図 4-3 の断面測定装置に搭載するデジタルマイクロスコープ VHX-700F を使用した.

現像された蛍光体ペーストは, 熱処理することで, 蛍光体以外の成分が除去される. このため, 蛍光体ペーストに含まれる蛍光体の含有率と熱処理後に形成される蛍光体層の厚さ寸法から, 必要最小限の蛍光体ペーストの断面積  $A$  は, 次式で算出できる.

$$A = (l + \Delta x) \times t \times \frac{100}{m} \dots \dots \dots (5-2)$$

ここで,  $l$  は BM 開口部の幅 ( $\mu\text{m}$ ),  $\Delta x$  は蛍光体ペーストの塗布位置のばらつき量 ( $\mu\text{m}$ ),  $t$  は熱処理後の蛍光体層の厚さ ( $\mu\text{m}$ ),  $m$  は蛍光体ペーストに含まれる蛍光体の含有率 (wt%) である. 蛍光体層形成の実験で得られた値から, 蛍光体含有率が(5-2) 式の幅と厚さのどちらに影響するかを評価した. 熱処理後の蛍光体層の厚さは, SEM 観察で行った.

### 5-3 結果および考察

#### 5-3.1 BCA の付着張力の評価結果および考察

図 5-3 に, 前処理したガラス基板に対する溶剤 BCA の付着張力を評価した結果を示す. 図中の横軸は基板の前処理状態, 縦軸は接触角度である. 付着張力は液滴の接触角で示し, 角度が小さいほどぬれ性がよく, 付着張力は高い. 前処理状態は, 左から UV 光処理 (親水処理), 処理なし, HMDS 処理 (撥水処理), フッ素コート処

理（撥水処理）である．また，図中の（a）は素ガラス基板，（b）は熱処理した素ガラス基板，（c）は BM 付きガラス基板，（d）は熱処理した BM 付きガラス基板である．この評価は，4 種類のガラス基板に対し，4 種類の前処理を行うことで，合計 16 種類を行った．また，BCA の付着張力を評価するための比較対象として，水の接触角度も同条件で測定した．

水の接触角は，（a）～（c）のいずれのガラス基板に対しても，処理条件の左から右に向かって接触角が増加した．この理由として，左から右への処理条件で撥水性が増したことで，付着張力が低下したためと考えられる．これに対し，BCA の接触角では，（a）～（d）のいずれのガラス基板に対しても，すべての処理で  $0^{\circ}$  付近の値を示した．

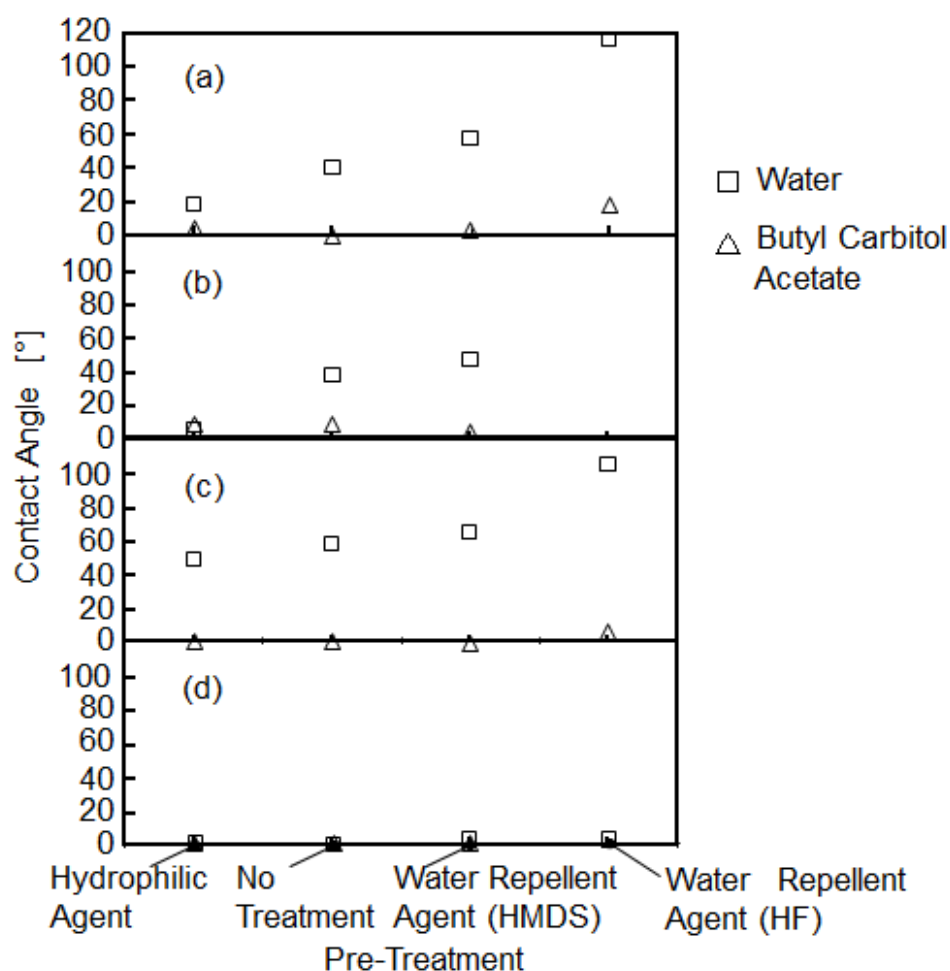


図 5-3 前処理したガラス基板と水および BCA の接触角測定結果：（a）処理無し素ガラス基板，（b）熱処理した素ガラス基板，（c）BM 付きガラス基板，（d）熱処理した BM 付きガラス基板



水の場合は，(d) に対して，BCA と同じ結果となった．この状態は，親水性の高いことを示している．親水性が高くなった理由として，熱処理された BM が，熱収縮によって空隙構造を形成したためと考えられる．

得られた結果から，BCA を撥水して蛍光体ペーストの塗布形状を維持することは，困難であることがわかった<sup>6),7)</sup>．逆に，熱処理した BM は親水性が高いことに着目し，BCA を BM に吸収させることで，蛍光体の固体成分が BM 上に拡散しない，オリジナルのプロセスを考案した．このプロセスを用いることで，ディスペンス塗布による厚膜蛍光体層形成の可能性を見出した．

### 5-3.2 塗布圧力と塗布厚さの測定結果および考察

図 5-4 に，30  $\mu\text{m}$  のギャップ制御下でディスペンス塗布した際の塗布圧力と塗布幅および塗布厚さの関係を示す．図中の横軸は塗布

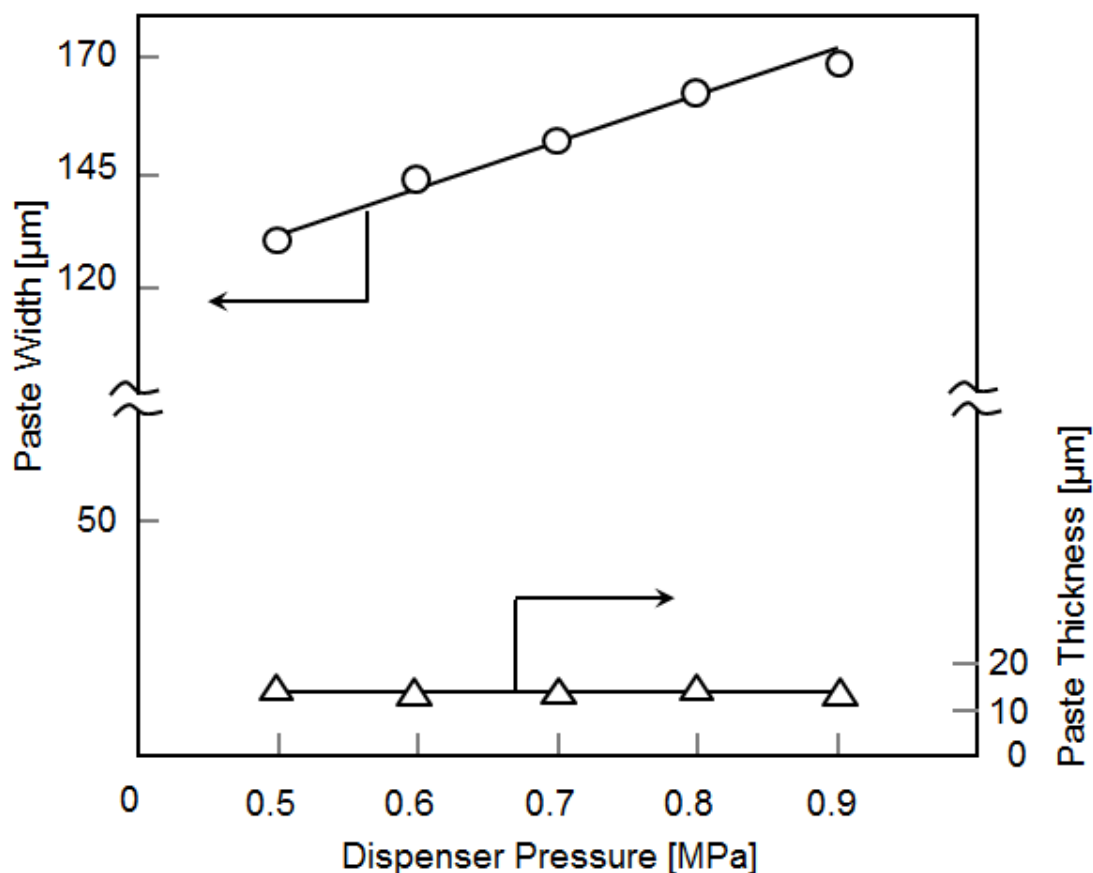


図 5-4 ギャップ量制御下における塗布圧力変動時の塗布幅と塗布厚さの測定結果

圧力 (MPa)，縦軸は塗布幅 ( $\mu\text{m}$ ) と塗布厚さ ( $\mu\text{m}$ ) である．塗布条件は，塗布速度 125 mm/s ，塗布ノズル内径 0.14 mm ，ギャップ制御 30  $\mu\text{m}$  ，対象基板は熱処理した BM 付きガラス基板とした．

ディスペンス塗布圧力が 0.5～0.9 MPa に変動しても，塗布厚さは  $14\pm1\ \mu\text{m}$  の値を維持した．一方，塗布幅は塗布圧力の増加に比例して，138～169  $\mu\text{m}$  の増加を示した．得られた結果から，ギャップ制御された環境下でディスペンス圧力を上げると，その増分は幅方向へ広がるが，厚さは一定値を維持することがわかった．この理由として，塗布ノズルとガラス基板の狭ギャップ制御で発生した，塗布ペースト内の圧力増加のためであると考えられる．このため，狭ギャップの制御を行えば，塗布厚さは塗布圧力に影響されず，一定値に維持できるといえる．

### 5-3.3 蛍光体含有量と塗布厚さの測定結果および考察

表 5-1 に，蛍光体ペーストの蛍光体含有率と塗布厚さの相関関係を測定した結果を示す．蛍光体含有率が 55 wt% と 30 wt% の蛍光体ペーストの塗布形状を，塗布幅 ( $\mu\text{m}$ ) と塗布厚さ ( $\mu\text{m}$ ) で測定した．

表 5-1 蛍光体含有量 55 wt% と 30 wt% の蛍光体ペーストの塗布厚さ測定結果

Fluorochrome concentration & dispenser pressure	Substrate condition	Contact angle ( $^{\circ}$ )	Width ( $\mu\text{m}$ )	Thickness ( $\mu\text{m}$ )	Aspect ratio
55 (wt%), 0.5 (MPa)	No-BM	5	$215\pm7$	$9.3\pm1.0$	0.04
	BM	0	$310\pm7$	$6.2\pm0.3$	0.02
	Heat-treated BM	0	$140\pm7$	$13.9\pm1.1$	0.10
30 (wt%), 0.35 (MPa)	No-BM	5	$233\pm4$	$10.5\pm1.1$	0.05
	BM	0	$321\pm4$	$7.5\pm0.5$	0.02
	Heat-treated BM	0	$136\pm3$	$18.0\pm1.1$	0.13

これをアスペクト比（塗布厚さ/塗布幅）で評価した．測定は各 10 回行い，平均値とばらつき量を求めた．

固形分の含有率 55 wt% と 30 wt% の蛍光体ペーストの形状寸法は，熱処理した BM 付きガラス基板上で，それぞれの幅が  $140\pm7\text{ }\mu\text{m}$  と  $136\pm3\text{ }\mu\text{m}$ ，厚さが  $13.9\pm1.1\text{ }\mu\text{m}$  と  $18\pm1.1\text{ }\mu\text{m}$  であった．この寸法は，アスペクト比が 0.1 を超え，他のガラス基板に塗布したアスペクト比よりも高い値を示した．この理由として，熱処理した BM に BCA が吸収され，蛍光体ペーストの固形分が残ることで，厚さが維持されたためであると考えられる．

蛍光体含有量 30 wt% の蛍光体ペーストは，粘度が低下するため，55 wt% と同程度の塗布断面積を得られるよう，実験での塗布圧力を 0.35 MPa とした．

蛍光体層の厚さを  $8\pm1.5\text{ }\mu\text{m}$  にするため，(5-2) 式から 55 wt% 含有の蛍光体ペーストは  $14.5\pm2.7\text{ }\mu\text{m}$ ，30 wt% 含有の蛍光体ペーストは  $26.7\pm5\text{ }\mu\text{m}$  の塗布厚さが必要であることを算出した．30 wt% の蛍光体ペーストの塗布厚さは，表 1 から  $18\pm1.1\text{ }\mu\text{m}$  で，厚さが不足していることがわかった．このことから，FED の蛍光体層を形成するためには，55 wt% の蛍光体含有率の蛍光体ペーストで， $13.9\pm1.1\text{ }\mu\text{m}$  の塗布厚さが適正となるといえる．

### 5-3.4 蛍光体層形成プロセスの評価結果および考察

図 5-5 に，考案した蛍光体層形成プロセスの各工程における，出来栄評価の結果を示す．図中の横列は形成プロセスのディスプレイ塗布，乾燥，裏面露光と剥離，熱処理，縦列は外観観察写真，幅（ $\mu\text{m}$ ）および厚さ（ $\mu\text{m}$ ）の測定結果を示す．

幅寸法は，BM 裏面からの露光と剥離で BM 開口部と，同寸法になった．熱処理後の蛍光体層の厚さは  $7.7\text{ }\mu\text{m}$  で，蛍光体ペースト塗布後の厚さの 56 % に収縮した．この収縮率は，蛍光体含有率の 55 wt% に近い値を示した．

得られた結果から，(5-2) 式の塗布断面積を決める蛍光体層の厚さは，ペースト塗布厚さを蛍光体含有率分に収縮した寸法となり，

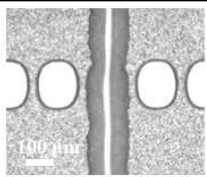
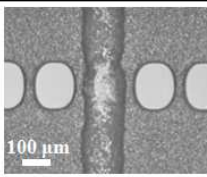
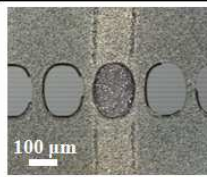
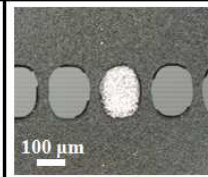
Process	After Deposition	After Drying	After Development	After Heat Treatment
Microscopic Appearance				
Width [μm]	149	146	115	115
Thickness [μm]	13.7	12.5	10.3	7.7

図 5-5 各工程における蛍光体層の外径寸法と状態観察

幅方向の寸法には影響しないことがわかった。

図 5-6 に、熱処理後の蛍光体層の厚さを評価するため、SEM で観察した状態を示す。熱処理条件は、500°C、90 分間であった。SEM 写真から、仕様値の  $8 \pm 1.5 \mu\text{m}$  厚さの蛍光体層が形成されていることを確認できた。

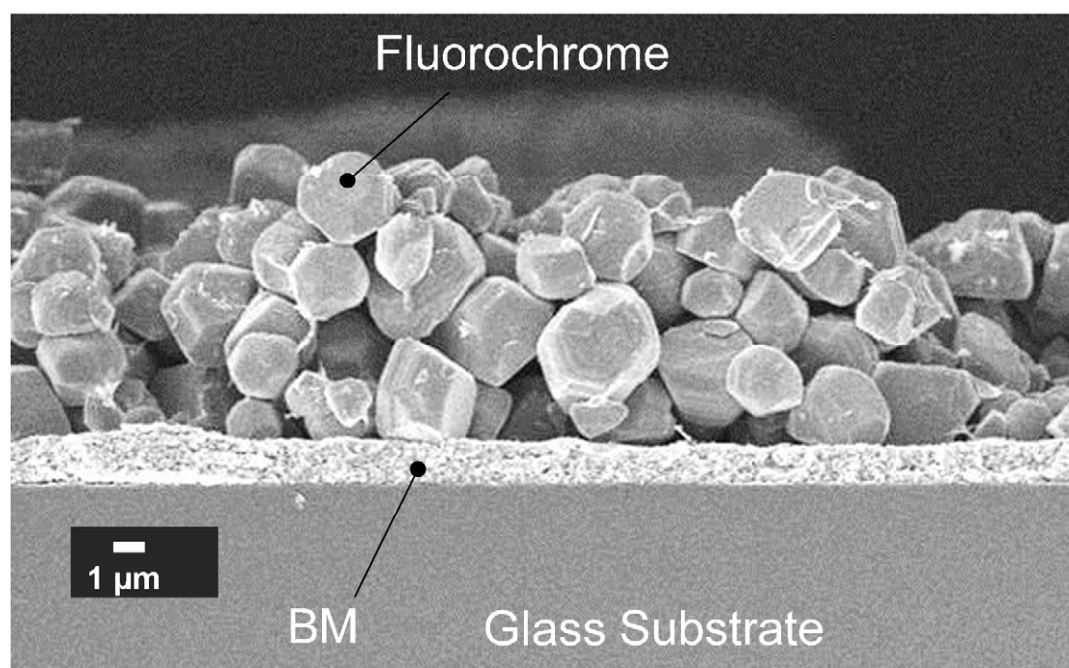


図 5-6 熱処理後の蛍光体層の SEM 観察

図 5-7 に、BM 開口部内に形成された蛍光体層を、デジタルマイクロスコップ VHX-700F で観察した状態を示す。開口寸法方向の蛍光体層の外形に、隙間が発生しないことを確認した。熱処理後に蛍光体層が収縮しても、BM 開口部と蛍光体との間に隙間が生じなかったのは、露光の UV 光が BM 開口部を通過後、開口寸法よりも広がり、露光で硬化した蛍光体層が BM 開口部よりも、広い大きくなったためと考えられる。

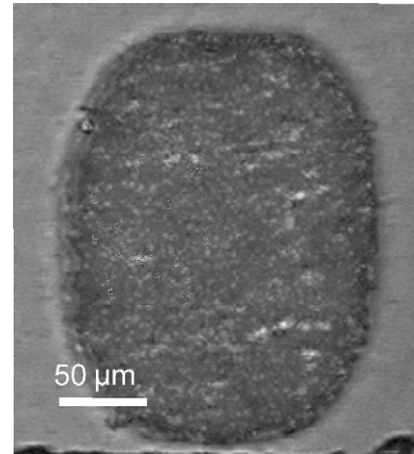


図 5-7 熱処理後の  
蛍光体層の  
外観観察

図 5-7 の SEM 写真から、熱処理後の蛍光体粒子径は、 $1\sim 4\ \mu\text{m}$ であることを確認した。蛍光体の粒子径にばらつきがあるため、ガラス基板の大型化に対応する場合には、蛍光体層の厚さの均一化のため、平滑処理の検討が必要である。この平滑処理や塗布厚さの維持プロセスは、今後の解決すべき課題である。

開発した蛍光体ペーストの塗布実験装置は、シングルノズルであったため、生産性が低かった。この問題を解決するには、マルチノズルによる複数同時塗布プロセスが必要である<sup>8)-11)</sup>。このマルチノズルによるディスペンス塗布プロセスで、3 色の線状蛍光体ペーストを塗布工程内で全て塗布できれば、スクリーン印刷、グラビア印刷、コーティングと比べて、生産性は 3 倍に向上する。この理由として、従来の工法では、乾燥、露光・現像、熱処理を、1 色ごとに行うのに対し、新しく考案した工法では、塗布工程内で 3 色塗布を形成するため、塗布後のプロセスは 1 回となるからである。

マルチノズルの塗布では、塗布量ばらつき、ノズル表面の管理、塗布後の蛍光体ペーストの形状維持および複数ペースト間での混色防止などが、解決すべき課題である。

## 5-4 まとめ

本章では、FED の蛍光体パネル形成において、厚膜蛍光体層の形成プロセスについて述べた。PDP の蛍光体層形成における蛍光体ペーストの付着張力を利用した隔壁内で拡散するプロセスと異なり、熱処理した BM によるペーストの拡散を低減した、FED の厚膜蛍光体ペースト形成のプロセスを開発した。本章では、次の結論を得た。

- (1) 30  $\mu\text{m}$  のギャップ制御下で熱処理した BM 付きガラス基板に、蛍光体含有率 55 wt% のペーストを、ノズル内径 0.14 mm、塗布速度 125 mm/s で塗布すれば、塗布厚さを  $14.5 \pm 2.7 \mu\text{m}$  に維持できた。この理由として、塗布圧力が変動しても、狭ギャップ制御がギャップ内の塗布ペーストに一定圧力を発生させ、塗布厚さを一定に維持したためと考えられる。
- (2) ガラス基板上の BM を予め熱処理することで、ペーストの形状は、塗布後も維持できた。この理由として、熱処理された BM が熱収縮によって空隙構造を形成し、ペーストに含まれる BCA が BM に吸収され、ペーストの固形成分は拡散されず形状を維持したためと考えられる。
- (3) 蛍光体層の BM 開口方向の寸法と厚さは、それぞれ裏面露光・剥離、熱処理のプロセスとペーストの蛍光体含有率およびペーストの塗布厚さの別々のプロセスパラメータで、厚膜蛍光体層寸法の制御が可能である。
- (4) 蛍光体含有率が 55 wt% のペーストを、厚さ  $14.5 \pm 2.7 \mu\text{m}$  で塗布すれば、熱処理後の蛍光体層厚さは  $8 \pm 1.5 \mu\text{m}$  に制御できる。この厚さは、蛍光体含有率まで収縮した値と同等を示した。一方、BM 開口寸法方向は、露光で寸法が決定され、収縮後も開口部との間に、隙間は発生しない。
- (5) 熱処理後の蛍光体層の SEM 観察の結果、蛍光体層の粒径は 1~4  $\mu\text{m}$  であった。今後、製品が大型化した場合、蛍光体層を  $8 \pm 1.5 \mu\text{m}$  に維持するには、蛍光体層の平坦処理が必要と考える。

## 参考文献

- 1) A. Niwa, T. Atsumi, K. Inaguma, T. Okamoto, K. Nomura, and H. Okumura: “A 17-in high resolution DC plasma display”, The Journal of the Institute of Television Engineers of Japan **44**, pp.571-577 (1990).
- 2) Web [<http://www.patentjp.com/16/V/V100310/DA10001.html>].
- 3) P. Vaudaine, R. Meyer: “'Microtips' fluorescent display”, in Anonymous, pp. 197-200 (1991).
- 4) D. Moon, D.J. Im, S. Lee, I.S. Kang: “A novel approach for drop-on-demand and particle encapsulation based on liquid bridge breakup”, Exp. Therm. Fluid Sci. **53**, pp.251-258 (2014).
- 5) E. Litborn, M. Stjernström, J. Roeraade: “Nanoliter Titration Based on Piezoelectric Drop-on-Demand Technology and Laser-Induced Fluorescence Detection”, Anal.Chem **70**, pp.4847-4852 (1998).
- 6) G. Li, J. Lin: “Recent progress in low-voltage cathodoluminescent materials: synthesis, improvement and emission properties”, Chem. Soc. Rev. **43**, pp.7099-7131 (2014).,
- 7) B.H. Cheong, V. Diep, T.W. Ng, O.W. Liew: “Transparency-based microplates for fluorescence quantification”, Anal. Biochem. **422**, pp.39-45 (2012).
- 8) J. Wang, Y. Zhou, H. Qiu, H. Huang, C. Sun, J. Xi, Y. Huang: “A chip-to-chip nanoliter microfluidic dispenser”, Lab Chip **9**, pp.1831-1835 (2009).
- 9) C. Uematsu, I. Makino, T. Matsunaga, K. Harada: “An Automated Liquid Handling System for Polymerase Chain Reaction Sample Preparation”, J. Biosci. Bioeng. **97**, pp.432-435 (2004).
- 10) C.P. Steinert, I. Goutier, O. Gutmann, H. Sandmaier, M. Daub, B.D. Heij, R. Zengerle: “A highly parallel picoliter dispenser with an integrated, novel capillary channel structure”, Sens. Actuators A Phys. **116**, pp.171-177 (2004).

- 11) E.Y. Wong, S.L. Diamond: “Enzyme microarrays assembled by acoustic dispensing technology”, *Anal. Biochem.* **381**, pp.101-106 (2008).



## 第6章 マルチノズルユニットの塗布制御プロセス

### 6-1 はじめに

第5章では、FEDの蛍光体パネル形成のため、BM層に蛍光体ペーストの塗布形状を維持する厚膜蛍光体層形成プロセスについて述べた。これは、PDPの蛍光体パネル形成が、蛍光体ペーストの表面張力を利用する塗布プロセス<sup>1),2)</sup>であるのに対し、FEDは蛍光体ペースト内のBCAをBM層に吸収させて蛍光体の厚さを制御する、独自のプロセスである。しかし、シングルノズルでのディスペンス塗布では、印刷方式などと比較して、生産性が低かった。

生産性向上のために、シングルノズルでの高速塗布を検討したが、蛍光体パネルの画素数が多いため、限界があった。PDPの蛍光体ペースト塗布では、マルチノズルによる塗布方式をすでに採用している<sup>3),4)</sup>が、FEDの蛍光体ペースト塗布は、従来のマルチノズルの塗布プロセスでは、ペーストの厚さや塗布原理、塗布範囲が異なるため、流用はできなかった。特に、PDPの構造と異なり、FEDは画素ごとに隔壁を持たないため、マルチノズル塗布での混色が問題であった<sup>5),6)</sup>。また、マルチノズルの本数を増加した長尺のマルチノズルでは、ノズル相互の塗布量均一化が困難であった。この理由として、ノズルごとに発生する速度ロスを、複数のペースト供給口で補正することが困難なため、速度ロスが累積していると考えられる。

本章では、FEDの蛍光体パネルのBM開口部に、10  $\mu\text{m}$ 以下の蛍光体層を複数同時に形成する、独自のマルチノズルユニット塗布プロセスについて明らかにする。本研究における実験装置と実験方法、実験結果およびその考察について、以下に述べる。

### 6-2 装置構成と実験方法

本研究では、複数の線状蛍光体ペーストを同時に塗布するマルチノズルの構造と、塗布プロセスの開発を行った。蛍光体層を形成するプロセスで、115  $\mu\text{m} \times 155 \mu\text{m}$ の開口部に、厚さ $8 \pm 1.5 \mu\text{m}$ の蛍光体層を形成した。赤、青、緑の3色の蛍光体層は、210  $\mu\text{m}$ ピッチ

で構成されるため，同色の塗布に必要なピッチは， $630\text{ }\mu\text{m}$  であった．

図 6-1 に，BM 付きガラス基板上に複数本の蛍光体ペーストを同時に塗布し，蛍光体層を形成するプロセスフローを示す．マルチノズルを使用することで，BM 付きガラス基板の開口部上に，同色の帯状ペーストを複数本同時に形成し，全色塗布完了後に裏面露光，剥離，熱処理することを特徴としている．蛍光体ペーストは  $1\sim 4\text{ }\mu\text{m}$  の蛍光体粒子を含有し，その他を UV 感光レジン樹脂と溶剤の BCA で構成した．(a) と (b) は赤，青，緑の線状の蛍光体ペーストを，BM 付きガラス基板の所定位置に塗布し， $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，15 分間乾燥して，ペースト内の BCA を除去した．(c) は露光工程で， $365\text{ nm}$  の紫外線を BM 付きガラス基板の裏面から照射して，ペースト内の UV 感光レジンを感光した．(d) は  $0.4\text{ wt\%}$  の  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を含有する剥離液で， $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，30 秒剥離を行い，BM 膜で遮光された未感光部のペーストを除去した後，スペーサを設置して， $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，90 分で熱処理する

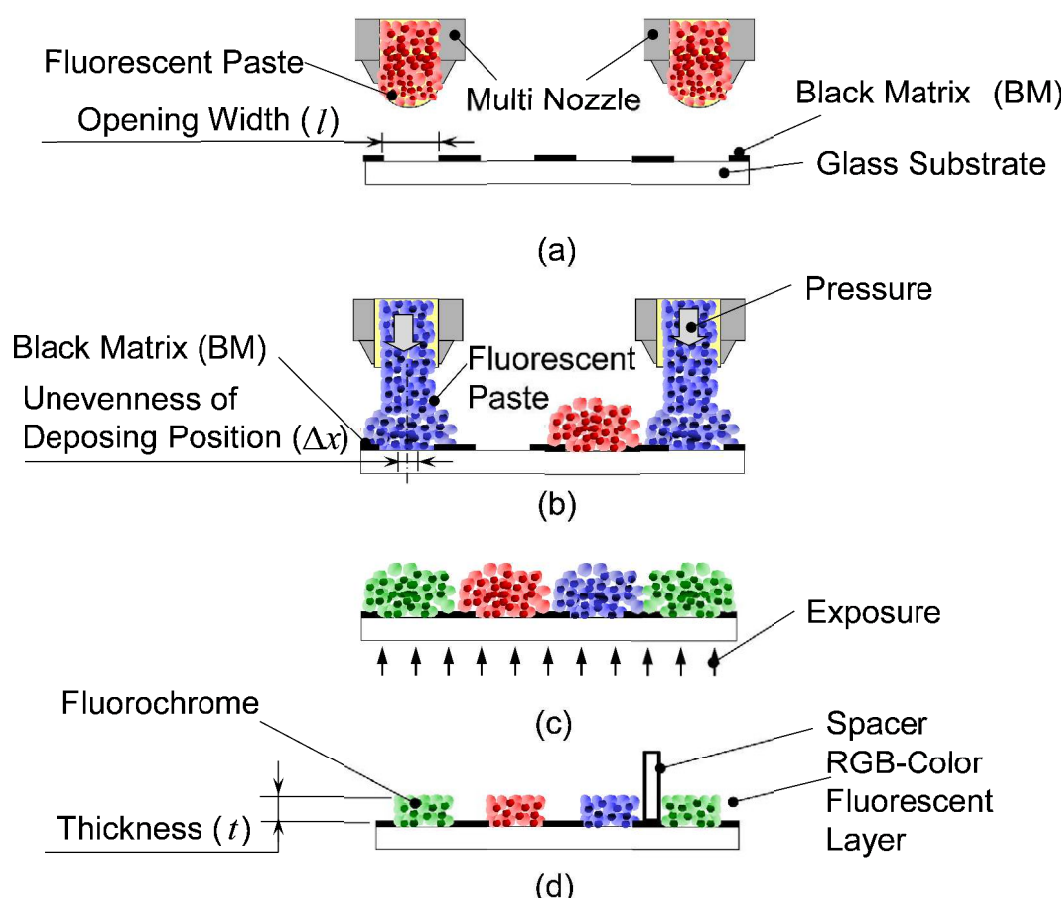


図 6-1 マルチノズルユニットによるプロセスフロー

ことで、蛍光体材料以外の除去と、アノードとカソードの電界空間を形成するスペーサの固定を行った。

### 6-2.1 マルチノズルユニットの構成と圧力分布の解析

複数ペーストの同時塗布では、マルチノズルユニットで均一な塗布を行うプロセスが必要であった。このため、マルチノズルユニット内の圧力や流量のばらつき低減が、重要となった。

図 6-2 に、16 本の塗布ノズルを具備するマルチノズルユニットの構成を示す。ノズルのピッチ間隔は、加工制約上から 3.78 mm とした。この塗布ノズルのピッチ間隔は、同色蛍光体層を形成するピッチ 630  $\mu\text{m}$  の 6 倍である。このため、ガラス基板に同色のペーストを塗布するには、3 往復の塗布が必要となった。このノズルユニットに備える塗布ノズルの本数を 16 本にした理由は、FED 蛍光体パネルの画素数が、16 の倍数で構成されるためである。塗布ノズルの内径は、前回のシングルノズルの塗布実験から得られた 0.14 mm とした。

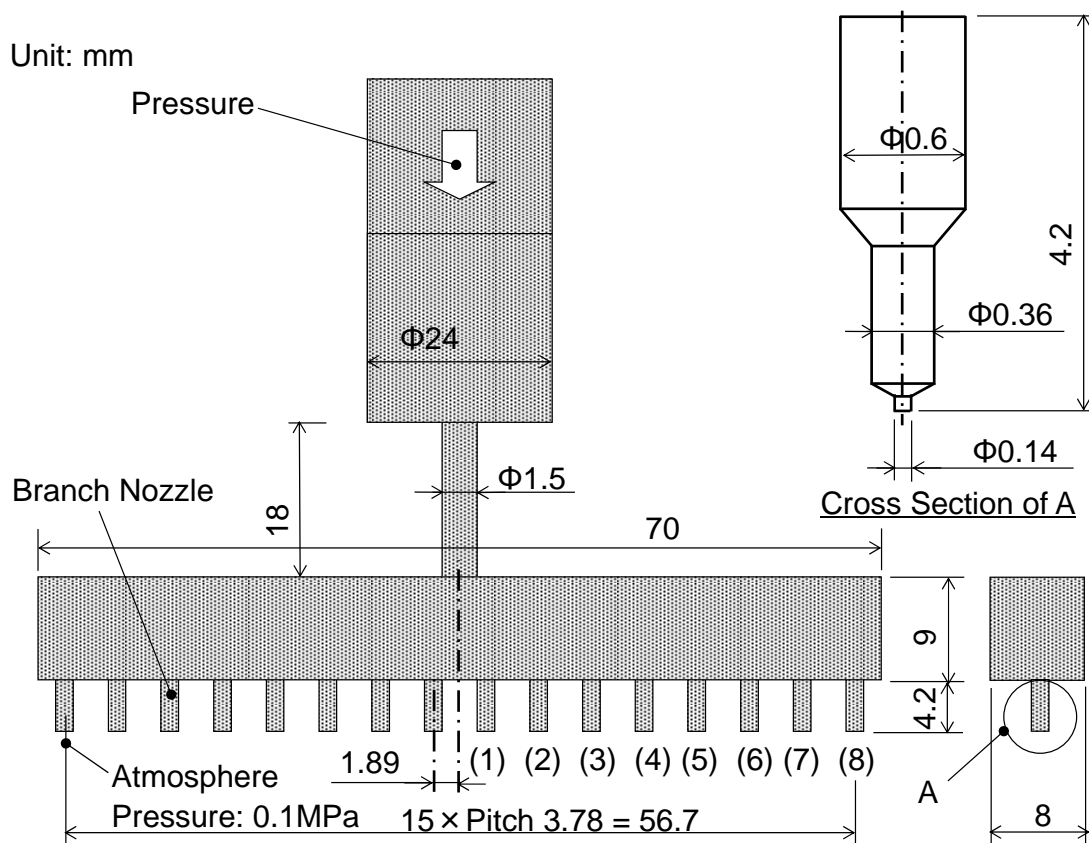


図 6-2 マルチノズルユニットの内部寸法

このマルチノズルユニットで、 $8\pm1.5\text{ }\mu\text{m}$  の蛍光体層を形成するためには、蛍光体含有率 55 wt% のペーストを塗布厚さ  $14.5\pm2.7\text{ }\mu\text{m}$  に制御する必要があった。このため、マルチノズルユニットのノズルとガラス基板のギャップ量を、 $30\sim70\text{ }\mu\text{m}$  に制御する機構を考案した。

マルチノズルユニットの問題のひとつとして、各塗布ノズルで発生する供給圧力ロスがある。このため、マルチノズルユニットへの供給ポートの径は、 $24\text{ mm}$  とした。この理由として、16 本の塗布ノズルに蛍光体ペーストを分配する際に、供給径の圧力ロスを低減するため、第 5 章のシングルノズルの供給径  $1.5\text{ mm}$  の 16 倍以上が必要であった。

この他、塗布ノズルでの圧力ロス発生の低減策として、マルチノズルユニットの供給口から塗布ノズルの間に  $5040\text{ }\mu\text{m}^2$  のバッファ領域を設けた。これは、16 本の塗布ノズルに蛍光体ペーストを分配する際、圧力ロスを低減するために必要であった。

マルチノズルユニットは、図 6-2 に示すように、線対称の構造とした。このため、片側 8 本で構成するモデルでシミュレーションを簡素化し、モデルの内圧分布のシミュレーションを行った。マルチノズルユニット内で分配された蛍光体ペーストは、各塗布ノズルから均一な塗布量を吐出するため、各ノズルの圧力均一化を検討した。

一般的に、支管での圧損を求めるハーゲン・ポアイズの式から、塗布ノズルへの分配圧力と平均流速の関係は、(6-1) 式で表される。

$$F = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{32\mu L \bar{u}}{\rho D^2} \dots\dots\dots (6-1)$$

ここで、 $F$  は摩擦因子、 $\Delta P$  は分配圧力損失 (Pa)、 $\mu$  は粘弾性係数 (Pa·s)、 $\bar{u}$  は平均流速 (mm/s)、 $L$  はノズル長さ (mm)、 $\rho$  はペースト密度 (g/mm<sup>3</sup>)、 $D$  はノズル内径 (mm) である。

この解析モデルでは、バッファ内での流速が遅いことから、各ノズルに平均流速で蛍光体ペーストが流れると仮定し、マルチノズルユニット内の圧力分布のシミュレーションを行った。

## 6-2.2 マルチノズルユニット内の分配圧力損失の解析

バッファ内での流速によっては、各ノズルでの圧力損失が発生するため、圧力損失が流速に影響する場合を考えた。図 6-3 に、バッファ領域（以下、主管）から分配した各塗布ノズル（以下、支管）で発生する分配圧力損失モデルを示す。植松氏、高木氏が提案する主管から支管に分配される際の主管の流速分布解析<sup>7)</sup>から、展開した。<sup>7)</sup> この支管における、塗布量と塗布圧力の関係は、(6-2) 式と(6-3) 式で表される。

$$Q_i - Q_{i+1} = A(V_i - V_{i+1}) = q_i \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (6-2)$$

$$P_{i+1} - P_i = \frac{\rho}{2}(V_i^2 - V_{i+1}^2) - (\xi_{13} + \lambda \frac{l}{D}) \frac{\rho}{2} V_i^2 \cdot \cdot \cdot \cdot (6-3)$$

ここで、 $Q$  は主管内の流量 ( $\text{mm}^3/\text{s}$ )、 $A$  は主管の断面積 ( $\text{mm}^2$ )、 $V_i$  は主管内の流速 ( $\text{mm}/\text{s}$ )、 $q$  は支管内の流速 ( $\text{mm}^3/\text{s}$ )、 $P_i$  は圧力 ( $\text{MPa}$ )、 $\rho$  は蛍光体ペーストの密度 ( $\text{g}/\text{mm}^3$ )、 $l$  は支管のピッチ ( $\text{mm}$ )、 $\xi_{13}$  は主管での分岐損失係数、 $\lambda$  は主管の管摩擦係数、そして  $D$  は主管の直径 ( $\text{mm}$ ) である。

$q/Q \cong 0$  の場合、(6-3) 式では、 $\xi_{13} \cong 0$  となり、この塗布圧力と主管内の流速の関係は、(6-3) 式から (6-4) 式が導ける。

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = -\frac{d}{dx} \left( \frac{V^2}{2} \right) - \frac{\lambda}{D} \frac{V^2}{2} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (6-4)$$

一方、支管と主管の流速の関係は、(6-2) 式から (6-5) 式を導くことができる。

$$V_{i+1} = V_i - \frac{q_d}{A} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (6-5)$$

ここで、 $i$  地点における  $V_i$  は主管での流速 ( $\text{mm}/\text{s}$ )、 $q_d$  は分管での流速である。

以上から、(6-4) 式と(6-5) 式から、(6-6) 式が導ける。

$$\frac{p_i - p_e}{\rho} = -\frac{\lambda V_i^2}{6D} x + \left( \frac{\lambda L}{3D} - 1 \right) \frac{V_i^2}{2} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (6-6)$$

ここで、 $P_e$  は主管末端での塗布圧力、 $(\lambda \cdot L / 3D - 1)$  は圧力損失パラメータである。マルチノズルユニットにおいて、分配圧力差はその

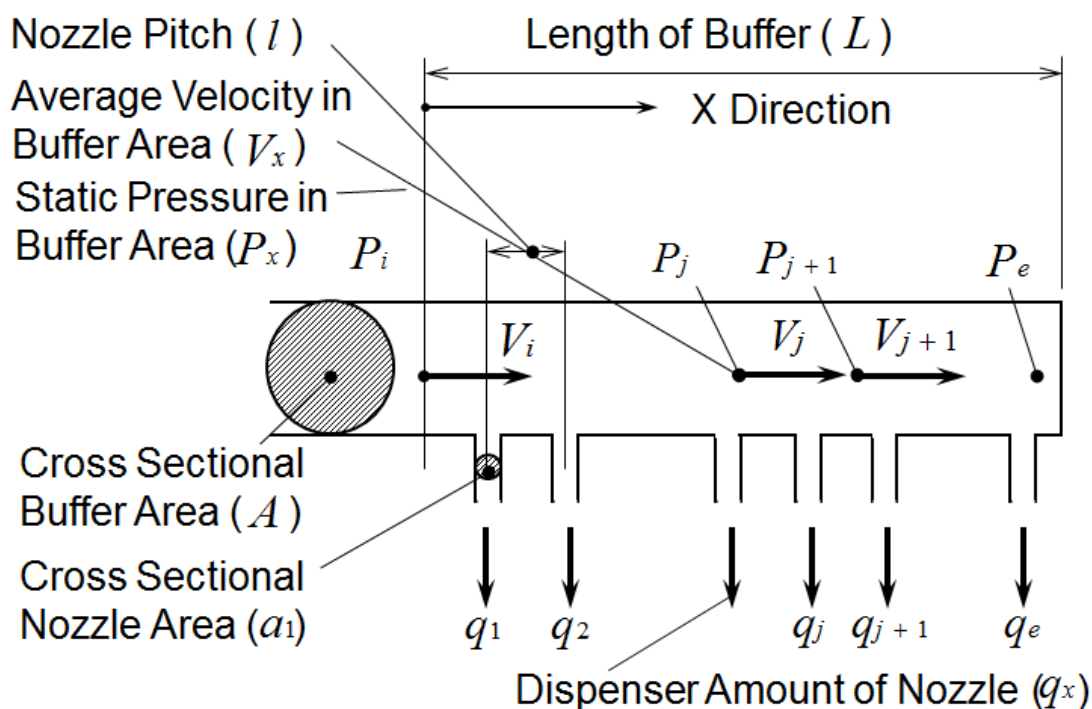


図 6-3 マルチノズルユニット内の分配圧力損失のモデル

地点の流速ロスが発生させることが，(6-6) 式から考えられる．また，(6-6) 式のシミュレーションを行うことで，全体の圧力損失が求められる．この(6-6) 式を用いて，流速が速く，各支管での圧力損失が発生するマルチノズルユニット内で，各支管から供給される塗布量を均一化するためのシミュレーションを行った．

### 6-2.3 マルチノズルユニット塗布の評価方法

マルチノズルユニットのノズル先端での塗布圧力ロスを低減するために，ノズル先端の内壁に電解研磨を行った．このノズル先端の内壁の状態を，金属顕微鏡で観察した．

マルチノズルユニットで塗布した蛍光体ペーストの塗布断面測定は，第 4 章，図 4-3 の塗布断面測定装置を使用した．本測定では，シングルノズルでの測定と異なり， $210\ \mu\text{m}$  ピッチで塗布された 2 色目，3 色目の測定が必要となった．特に，3 色目は，ガラス表面の初期高さの測定が困難であった．このため，基板マークを基準に塗布前のガラス基板の表面高さを測定しておき，塗布後に測定した高さと基板マークの位置関係から，ガラス表面の初期の高さが算

出した．これで，塗布後にガラス基板の表面高さが測定できなくても，蛍光体ペーストの塗布厚さを算出可能とした．蛍光体ペーストの幅測定は，デジタルマイクロスコープを併用して，測定を行った．

## 6-3 結果および考察

### 6-3.1 圧力分布の解析結果および考察

図 6-4 に，(6-1) 式のシミュレーションで求めたマルチノズルユニット内の圧力分布を示す．これは，各支管での塗布流速が遅いことを前提とした．

マルチノズルユニットへの供給圧力は，0.7 MPa としたが，主管内のバッファ槽での圧力は，0.3 MPa に低下したことを確認した．一方，支管入口での圧力は，0.6 MPa まで上がり，支管出口での圧力は，0.1 MPa に低下したことがわかった．

ノズルユニットの主管内で圧力を下げることで，各支管への分配のロス低減すると考える．また，支管内の圧力ロスがノズル内径

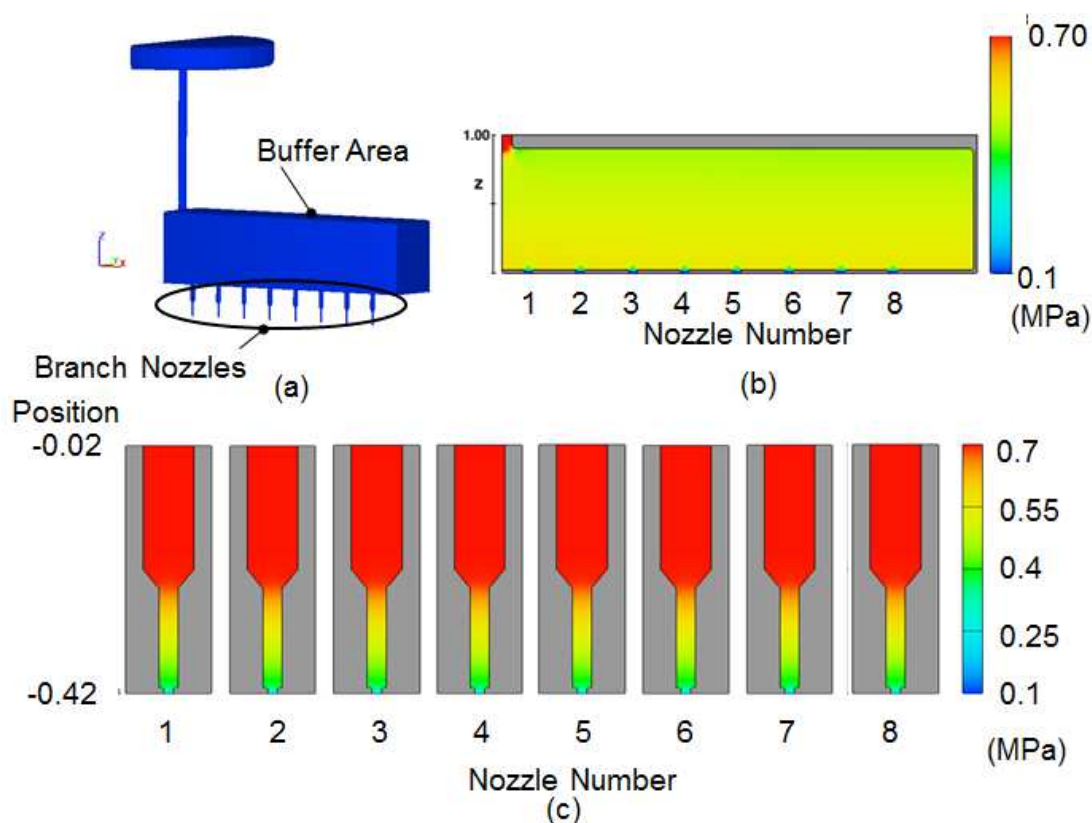


図 6-4 マルチノズルユニット内の圧力分布のシミュレーション結果

の寸法に依存し，ガラス基板とのギャップで発生する垂直方向の塗布圧力が，各支管内の圧力のばらつきを低減すると考えられる．ばらつきが大きい場合は，各支管での適正なノズル内径の検討が必要になる．

得られた結果から，各ノズルからの流速が遅く，バッファ内の流速が平均流速のときには，ノズル先端とガラス基板のギャップ量の制御とユニットの主管部にバッファ領域を具備することで，多ノズルの吐出圧力のばらつきは，低減できると考えられる．

### 6-3.2 流速分布の解析結果および考察

図 6-5 に，(6-6) 式を用いて塗布圧力と吐出される蛍光体ペーストの流速をシミュレーションした結果を示す．横軸は塗布ノズルごとにかかる塗布圧力 (MPa)，縦軸は塗布ノズルから吐出される蛍光体ペーストの流速 ( $\text{mm}^3/\text{min}$ ) を示す．考案したマルチノズルユニ

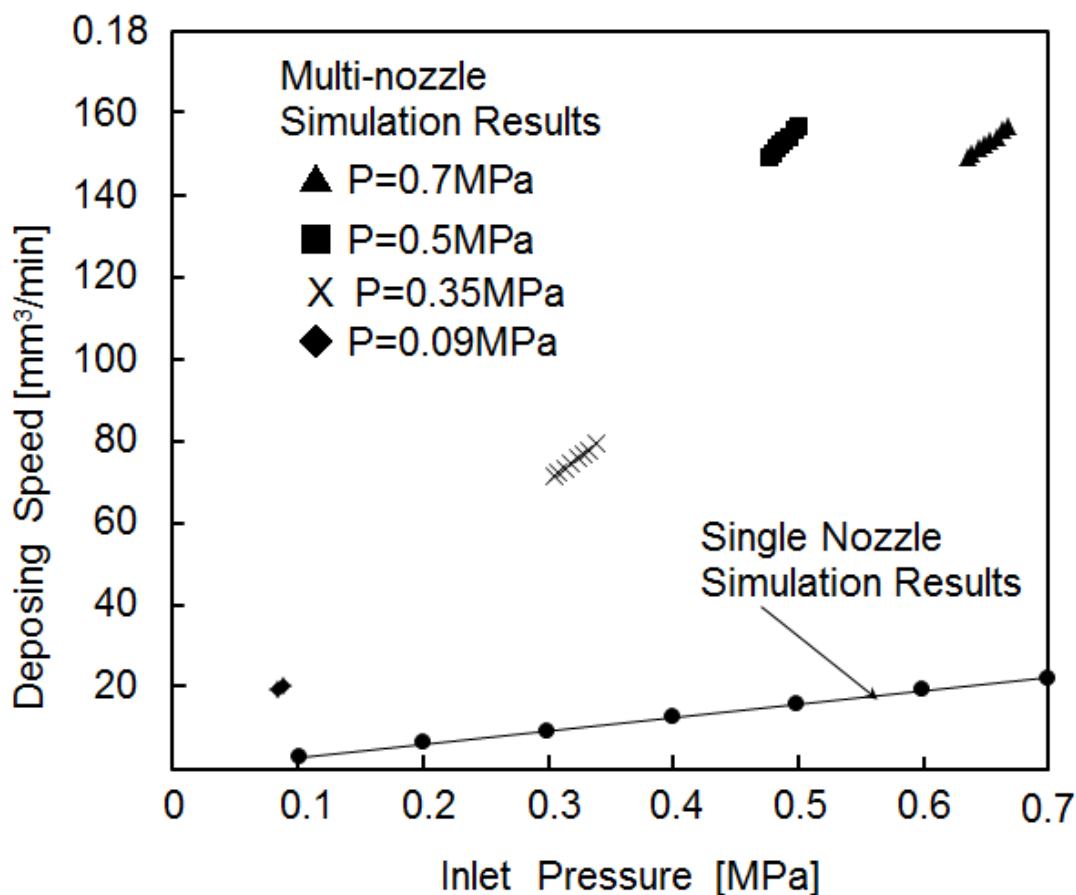


図 6-5 ノズル毎で吐出するペーストの流速シミュレーション結果



ットは 16 本の塗布ノズルで構成するが、ノズルユニットの中心で線対称になるため、シミュレーションは、片側を対象に行った。塗布圧力は 0.1～0.7 MPa とし、蛍光体ペーストの粘度は 100 Pa·s とした。

(6-6) 式を用いたシミュレーションの結果と実際の流速を比較するため、第 5 章で求めたシングルノズルの塗布条件を(6-6) 式に入力した結果を、図 6-5 に示す。シミュレーションで求めた塗布圧力 0.5 MPa での塗布量  $16 \text{ mm}^3/\text{min}$  は、シングルノズルの実験で確認した値から 6.6 % 減少した値になった。減少した理由として、ノズル内での速度ロスが発生したためであると考えられる。

図 6-5 に、片側 8 本のマルチノズルで塗布を行う際の、流速のシミュレーション結果を示す。塗布圧力が 0.5 MPa 以上の場合、8 本のノズルが吐出する流速は、 $148 \sim 156 \text{ mm}^3/\text{min}$  を示し、そのばらつきは 8 本で 5 % 以内であった。この流速は、シングルノズルの流速の約 10 倍に相当した。

一方、塗布圧力が 0.35 MPa と 0.1 MPa の場合は、流速は、 $71 \sim 79 \text{ mm}^3/\text{min}$  と  $15 \sim 20 \text{ mm}^3/\text{min}$  を示し、それぞれのばらつきは、10 % と 15 % に増加した。0.1 MPa での流速は、シングルノズルの流速に近い値を示した。

供給圧力を 0.1 MPa より高くした場合、シングルノズルの流速よりも速くなる理由は、マルチノズルの流速がノズル本数の多い分だけ増加したためと考えられる。これは、(6-6) 式における圧力損失パラメータ  $(\lambda \cdot L/3D - 1)$  がノズル径の逆数に依存し、左項の圧力損失を一定とした場合に、ノズル開口面積の増加で流速が増加したためであると考えられる。

供給圧力を 0.5～0.7 MPa にした場合、8 本の塗布ノズルの流速ばらつきは、5 % 以内であった。圧力を 0.1～0.3 MPa に下げた場合、流速ばらつきは、10～15 % に増加した。この理由として、(6-6) 式における圧力損失パラメータよりも 1 次項である  $(\lambda \cdot v^2/6D)$  の影響により、流速のばらつきが増加したためであると考えられる。このため、圧力が高い場合に、圧力変動値が若干大きくてもノズル径が

小さければ内部圧力が上がり、流速の変動への影響が少なくなった。

逆に、ノズル径を大きくし、塗布圧力を下げてノズル走査速度を増加させた場合、ギャップ制御が困難となることが考えられた。また、流速のばらつきを低減するため、塗布ノズル径の調整を検討したが、加工精度上の問題が発生した。このことから、ノズル径での調整は行わず、蛍光体ペーストの粘度とノズルの走査速度の調整を検討した。低圧力の制御は、流速のばらつきを増大させるため、本実験では 供給圧力を 0.35 MPa とした。

### 6-3.3 マルチノズルユニットの評価結果および考察

図 6-6 に、塗布ノズル内面の圧力損失低減を目的とした電解研磨処理の状態を示す。蛍光体の粒子径は  $1\sim4\ \mu\text{m}$  であるため、塗布ノズル内面での圧力ロスを低減するには、表面粗さを  $1\ \mu\text{m}$  以下とする電解研磨条件が必要であった。

金属顕微鏡の観察結果から、ノズル先端の内表面の粗さは、 $0.1\sim0.2\ \mu\text{m}$  であることを確認した。この表面粗さであれば、ノズル先端における圧力損失は低いと考えられる。

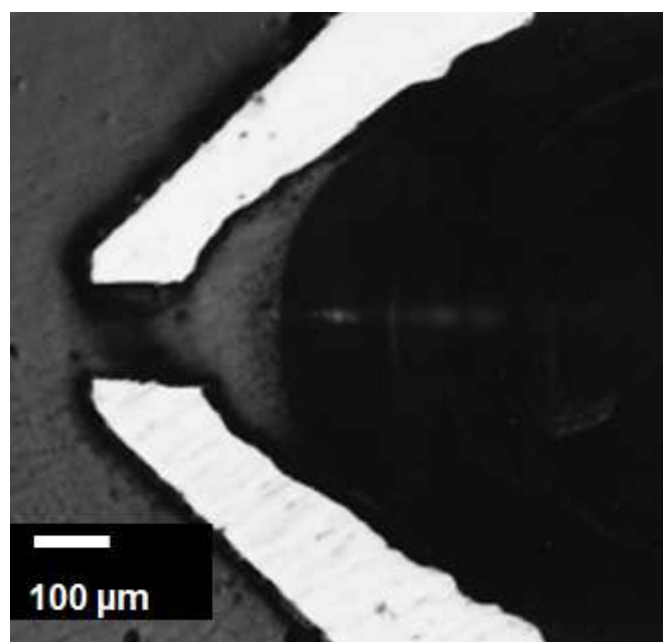


図 6-6 塗布ノズルの断面状態の観察

図 6-7 に，マルチノズルユニットで塗布した，塗布断面積のシミュレーションと実塗布の測定結果を示す．横軸はマルチノズルユニット中央からのノズルの順番，縦軸は塗布断面積である．塗布断面積  $2050 \pm 150 \mu\text{m}^2$  を目標に，塗布圧力は  $0.35 \text{ MPa}$ ，ノズル径は  $0.14 \text{ mm}$ ，蛍光体ペーストの粘弾性係数は  $120 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，塗布ノズル速度を  $250 \text{ mm/s}$  とした．実際の塗布断面積は 5 回測定し，平均値と最大値，最小値を図 6-7 に示す．

シミュレーションでの塗布断面積のばらつきは，10 % であったが，実際の塗布のばらつきは，12 % であった．実際の塗布のばらつきが大きくなった理由として，ノズル径の加工寸法ばらつきなどによる圧力ロスが，主管の圧力ロスに加わったためと考えられる．

この圧力ロスによる塗布断面積のばらつきは，幅方向の寸法に影響するが，厚さ方向の寸法は一定となることが，第 5 章，図 5-4 の結果からわかっている．このため，ギャップ制御下はマルチノズルの圧力ロスが発生しても，塗布厚さは維持できるといえる．PDP は塗布面に隔壁があるため，このギャップ制御行うマルチノズル塗布プロセスの適用は困難である．また，PDP 用の長尺ノズル<sup>4)</sup>では圧力損失が 16 本ノズルよりも大きく，BM 開口部を覆う塗布幅を得ることができないと考えられる．

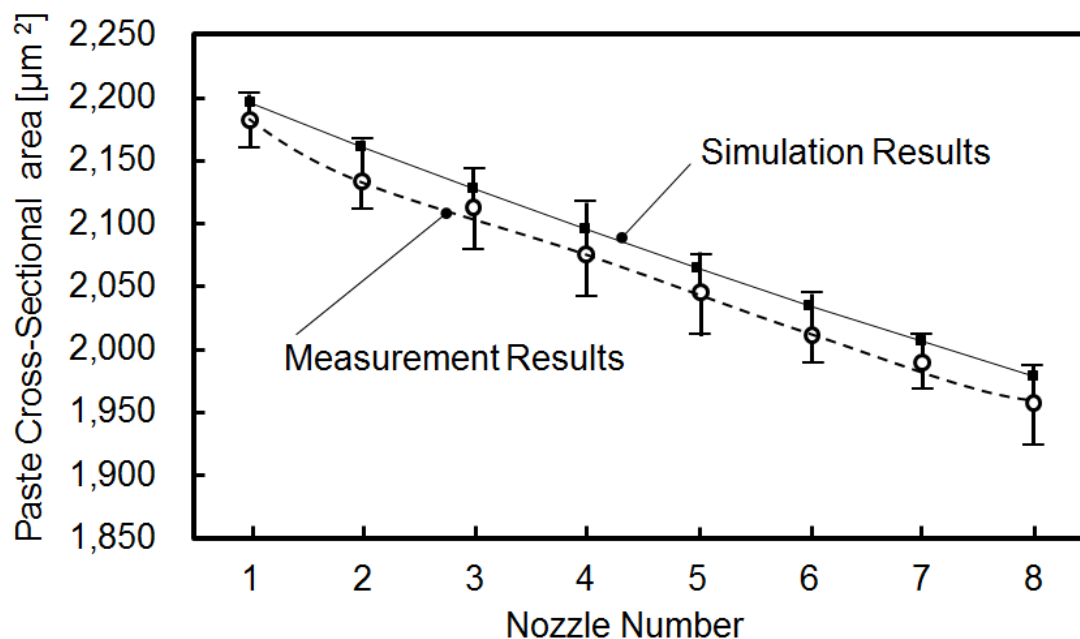


図 6-7 マルチノズル塗布の塗布断面積評価の結果

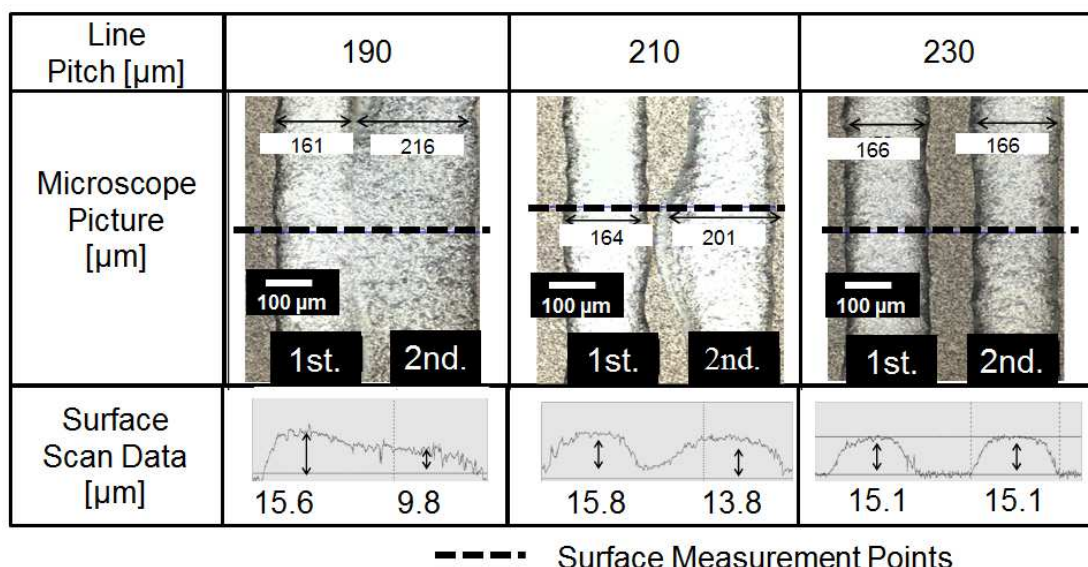


図 6-8 塗布ピッチごとの塗布形状寸法測定結果と状態

図 6-8 に、塗布ピッチと塗布形状の測定結果を示す。塗布ピッチは、 $190\ \mu\text{m}$ 、 $210\ \mu\text{m}$ 、 $230\ \mu\text{m}$  とした。厚さ  $8\pm 1.5\ \mu\text{m}$  の蛍光体層を形成するためには、(5-2) 式から、蛍光体 55 wt% 含有の蛍光体ペーストを、厚さ  $14.5\pm 2.7\ \mu\text{m}$  で塗布する必要があった。

塗布ピッチが  $190\ \mu\text{m}$  の場合、2 本目の蛍光体ペーストの塗布厚さは  $9.8\ \mu\text{m}$  であった。外観写真から、2 本目の蛍光体ペーストは 1 本目の蛍光体ペーストに向かって広がり、蛍光体ペースト同士が重なった。

塗布ピッチが  $210\ \mu\text{m}$  の場合、2 本目の蛍光体ペーストの一部が、1 本目の蛍光体ペーストの方向に拡散した。この拡散箇所での 2 本目の蛍光体ペーストの厚さは、 $13.8\ \mu\text{m}$  であった。外観写真から、2 本目の蛍光体ペーストは、1 本目の蛍光体ペーストに接触したが、 $190\ \mu\text{m}$  ピッチのような重なりは、無かった。

塗布ピッチが  $230\ \mu\text{m}$  の場合、2 本目の蛍光体ペーストは、1 本目に向かって拡散せず、1 本目と同様の塗布形状を維持した。厚さは、それぞれ  $15.1\ \mu\text{m}$  であった。

図 6-9 に、図 6-8 の実験結果を考察した模式図を示す。熱処理した BM 付きガラス基板に、塗布ピッチを変えて塗布した蛍光体ペーストと含有された BCA が拡散する状態を考察した。

蛍光体ペーストの塗布ピッチが  $210\ \mu\text{m}$  以上の場合、蛍光体ペーストの厚さは、 $14.5\pm 2.7\ \mu\text{m}$  の範囲に入った。この理由として、隣接する蛍光体ペーストから拡散する BCA の最大距離が、図 6-9 (a) に示すように、相互が接触しない範囲であったことが考えられる。

一方、蛍光体ペーストの塗布ピッチが  $190\ \mu\text{m}$  以下の場合には、蛍光体ペーストの厚さが  $14.5\pm 2.7\ \mu\text{m}$  の範囲に入らなかった。この理由として、隣接する蛍光体ペーストから拡散する BCA の最大距離が、図 6-9 (b) に示すように、相互が重なる範囲にあったことが考えられる。熱処理した BM に BCA が一度吸収されると、BM を再熱処理するまで、吸収効果が失われることを、第 5 章で確認した。2 本目の

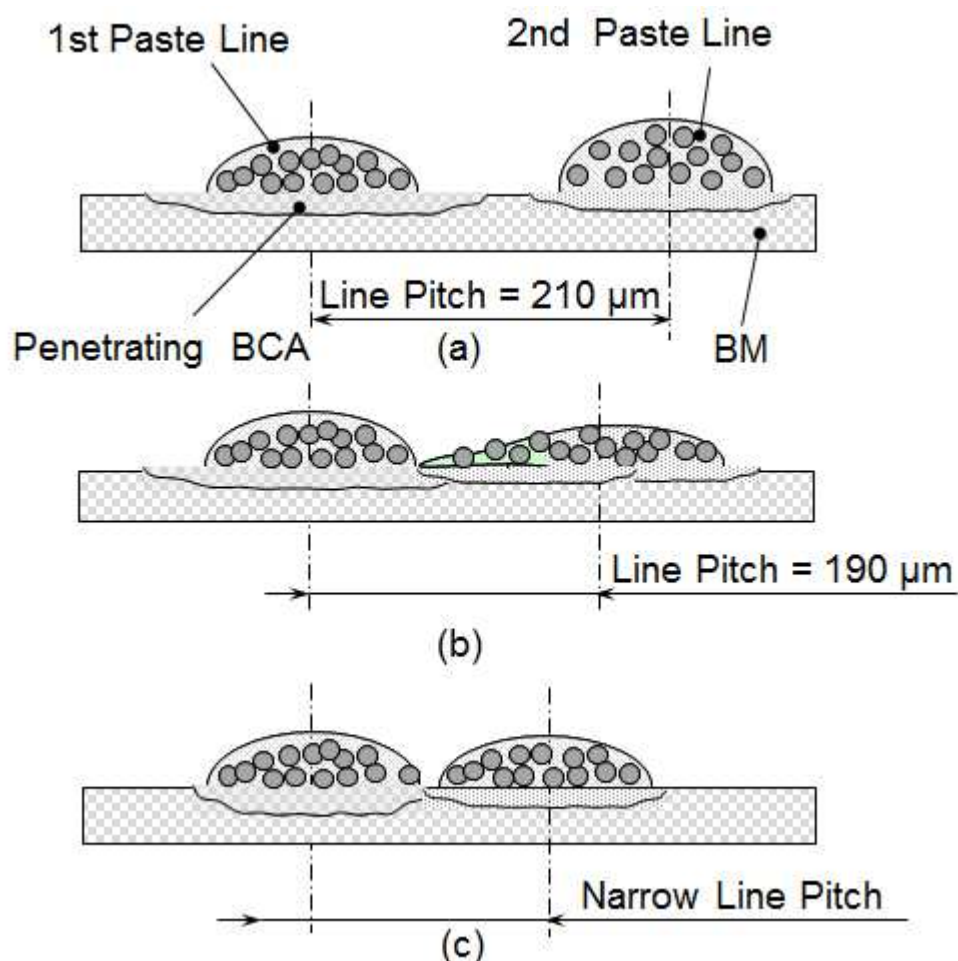


図 6-9 塗布ピッチごとの熱処理 BM 上での BCA 拡散モデル: (a) 塗布ピッチ  $210\ \mu\text{m}$  での塗布状態, (b) 塗布ピッチ  $190\ \mu\text{m}$  での塗布状態, (c) 狭ピッチ塗布での塗布状態

蛍光体ペーストの厚さが薄くなった理由として、2 本目の蛍光体ペーストの固形成分が、BCA と一緒に BM 上を拡散したためと考えられる。

得られた結果と考察から、蛍光体層の厚さを  $8.5 \pm 1.5 \mu\text{m}$  に形成するための必要塗布ピッチは、 $210 \mu\text{m}$  である。蛍光体層のピッチが  $210 \mu\text{m}$  以上の FED 蛍光体パネルであれば、マルチノズルユニットを用いた本蛍光体塗布プロセスでの製造が可能といえる。この開発したプロセスで、3 色の蛍光体ペーストを同じ塗布工程にて行うことで、従来 3 回実施していた乾燥、露光と剥離、熱処理を 1 回に削減できると考えられる。

さらに、ディスプレイ画素の高精細化への要求が進む場合、塗布ピッチの狭い塗布が必要となり、図 6-9 (c) に示すような、BCA が拡散しにくい新しい材料とプロセスの開発が必要となる。

PDP の蛍光体パネル製造では、長尺のマルチノズル<sup>4)</sup>を用いた塗布で、生産性の向上が検討されている。しかし、FED の蛍光体パネルでは、BM 開口部に  $10 \mu\text{m}$  以下の蛍光体層の形成が必要なため、マルチノズル間での圧力ロスによる塗布幅の低減が問題であった。開発したマルチノズルユニットは、16 本のノズルをギャップ制御することで、蛍光体ペーストの塗布厚さは制御が可能となった。しかし、PDP の蛍光体パネル製造で提唱している長尺のマルチノズルでは、FED のパネル製造に必要な高精度塗布が難しいといえる<sup>8)</sup>。

図 6-10 に、3 つのマルチノズルユニット間で、ノズルピッチが維持された、マルチノズルヘッドを示す。塗布は一方向であるため、マルチノズルユニットを千鳥状態に配置して、塗布圧力制御を行うことで、ユニット間の塗布ピッチは維持が可能である。また、塗布の開始と終了の位置合わせは、供給圧力のタイミングで制御が可能である。

量産化への適用には、マルチノズルユニットのプロセスを維持する技術が必要である。マルチノズルユニットは、16 本のノズルを具備するため、ノズル詰まりの回避が重要で、各ノズルの清浄度を保つノズルクリーニング機能が必要である。また、マルチノズルヘッ

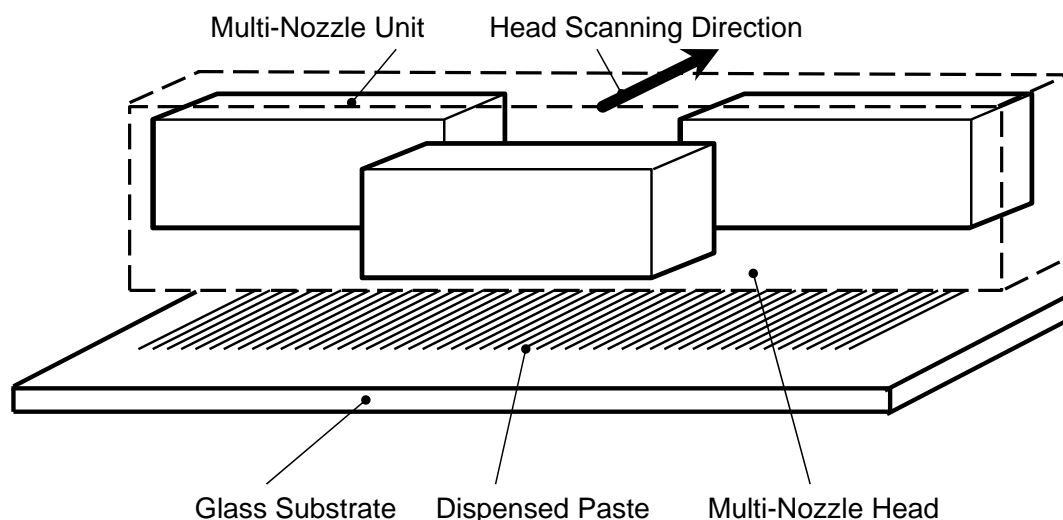


図 6-10 マルチノズルヘッドの構造

ドからマルチノズルユニットを着脱するため，マルチノズルユニット間の相対位置を決める機能も必要である．この技術はインクジェット塗布などのヘッド管理技術を応用展開することで，量産適用が可能となると考えられる．

FED は，電界印加で放出される電子の方向を制御する．この電子の放出方向は，アノードとカソードの間に設置したスペーサで制御を行うため，高抵抗値のスペーサが必要である．実用例では，幅  $50\ \mu\text{m}$ ，厚さ  $160\ \mu\text{m}$  の形状で， $9.6 \times 10^{11}\ \Omega / \text{mm}^2$  の高抵抗体構造のスペーサとした．このため，BM の開口部を覆う部分のみに蛍光体層を形成し，形成後にスペーサを設置することで，スペーサの清浄度は維持が可能となった<sup>7)</sup>．

開発した蛍光体層の露光プロセスは，BM 開口部を通して裏面露光するため，剥離後は BM 開口部のみに蛍光体層を形成した．また厚さは，ギャップ制御下での蛍光体ペースト塗布プロセスと蛍光体含有率で決定した．これら別々のプロセスで制御が可能であったため，シングルノズルからマルチノズルユニットへのプロセス展開が可能となった．課題であった多数同時塗布の量産化は，このマルチノズルユニットを組み合わせたマルチノズルヘッドで，量産の可能性を見出した．

厚膜蛍光体層を使った FED は，高品質，ハイコントラスト，広視

野角それに動画応答性で，ブラウン管の性能と同等以上である．また，FED の消費電力は，電界電子を画素素子ごとに発生させることで，PDP の消費電力に比べ 1/3 で済むことが試算できる．

考案する蛍光体厚膜層のプロセスの問題は，材料歩留りが低いことである．開口部以外の蛍光体ペーストは剥離，回収されるため，オフセット印刷をはじめとした開口部のみに蛍光体を供給する方法と比較し，材料使用効率は低い．しかし，印刷スキージ，ブレード，マスク版との接触による汚染起因の歩留り低下や，印刷版などの付帯機器に残る材料交換と比較すると，本ディスペンス塗布方式は優位にあるといえる．

これら全体でのコスト増加を試算した場合，開発したディスペンス塗布本方式の蛍光体層形成プロセスは印刷方式に比べて約 30 % の歩留り低下削減の効果があるため，本研究の工業的意義は高いと考える．

## 6-4 まとめ

本章では，FED に使用する蛍光体パネル形成において，マルチノズルユニットを使用した複数同時の蛍光体ペースト流動制御プロセスについて述べた．このマルチノズルユニットの塗布ばらつきを低減するノズル構造と，ギャップ制御および適正塗布ピッチの条件で，塗布厚さのばらつきを低減するプロセスを示した．本章では，次の結論を得た．

- (1) シングルノズル塗布の問題であった低生産性プロセスを解決するため，マルチノズルユニットの構造を考案した．FED のディスプレイに適用するために，塗布ノズル数は 16 本とした．
- (2) FED の製品仕様からノズルピッチ 630  $\mu\text{m}$  を決定し，シミュレーション結果から塗布断面積  $2050 \pm 150 \mu\text{m}^2$  の塗布プロセス条件は，塗布圧力 3.5 MPa，塗布速度 250 mm/s である．
- (3) 片側 8 本のノズルを具備するマルチノズルユニットで蛍光体ペーストの塗布の塗布量のばらつきは，12 % 以下となる．第



5 章のギャップ制御での実験結果からも，この塗布量ばらつきは，塗布厚さに影響しない．

- (4) 3 色の蛍光体ペーストを塗布した場合，混色しない塗布ピッチは  $210\text{ }\mu\text{m}$  以上である．熱処理された BM が BCA を吸収可能な回数は 1 回のため，BCA の拡散範囲が重ならないピッチが必要である．この条件で全色の塗布が同一工程で可能となれば，その後の乾燥，裏面露光，剥離，熱処理の工程は，3 回から 1 回に減り，コストは低減する．
- (5) 蛍光体ペーストの塗布方向は一方向のため，マルチノズルユニットを千鳥状態に配列し，塗布圧力を制御することで，複数の線状ペーストを同時に塗布できる．マルチノズルユニットの性能維持が容易になれば，多数同時塗布はこのユニットの増設を既存技術で行うことで，量産化の適用が可能であると考ええる．

## 参考文献

- 1) M. Seki, H. Murakami, T. Yamamoto, T. Kuriyama, T. Kato, R. Kaneko, H. Nakagawa, T. Takahata, A. Ishikawa, K. Hirakata, H. Ohnishi, M. Tsuji, N. Yamaguchi: “Experimental HDTV Display with a 33-Inch Gas-Discharge Panel using a Pulse Memory Drive Scheme”, J. Inst. Image Inf. Telev. Eng. **46**, pp.315-324 (1992) [in Japanese].
- 2) Web[<http://www.semiconductorjapan.net/seminar/050726/050726pdp.html>].
- 3) Web[[http://www.stellacorp.co.jp/media/process\\_past/pdp13.html](http://www.stellacorp.co.jp/media/process_past/pdp13.html)]
- 4) H.Ikeuchi, Y.Toda,T.Yoshiyama: Japan Patent 4760807 (2011).
- 5) Display with a 33-Inch Gas-Discharge Panel using a Pulse Memory Drive Scheme”, J. Inst. Image Inf. Telev. Eng. **46**, pp.315-324 (1992) [in Japanese].
- 6) D. Moon, D.J. Im, S. Lee, I.S. Kang: “A novel approach for drop-on-demand and particle encapsulation based on liquid bridge breakup”, Exp. Therm. Fluid Sci. **53**, pp251-258 (2014).
- 7) 管路・ダクトの流体抵抗出版分科会: “技術資料 管路・ダクトの流体抵抗”, 日本機械学会(丸善), pp.96-98 (1980).
- 8) P. Vaudaine, R. Meyer: “’Microtips’ fluorescent display”, in Anonymous, pp.197-200 (1991).

## 第7章 結論

### 7-1 本研究で得られた成果

本論文では，レーザ光を用いた集積回路接合材料・ディスプレイ蛍光材料の流動制御に関する研究により，シミュレーションと実験評価を行うことで，従来では達成できなかった製造工程の生産性や歩留りを向上し，学術的および，工業的意義を示した．

集積回路接合のはんだ材料の流動制御の研究では，4 辺同時レーザスキャン加熱による 0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の全接合部局所はんだ付けプロセスを開発し，考案した 4 辺同時自動はんだ付けシステムを量産に寄与させた．ディスプレイ蛍光パネルの蛍光体ペースト材料の流動制御では，ギャップ制御による FED 蛍光パネルの蛍光体ペースト塗布プロセスを開発し，ギャップ制御塗布と熱処理した BM による BCA の吸収で，BM 開口部に厚膜蛍光体層の形成を可能とした．5 つの研究テーマで得られた成果を，以下に総括する．

#### 7-1.1 4 辺同時レーザ光スキャン加熱プロセス

- (1) 1 台のレーザ発振器から発振したレーザ光は，透過率を設定したミラー，集光レンズ，光ファイバ，調整用遮蔽板を用いて 4 分岐することで，レーザ光 1 本当たりの強度は  $20\text{ W} \pm 5\%$  が得られる．ただし，4 分岐の変換効率は 65 % となった．
- (2) ガルバノモータで振幅させたスキャンミラーに入射角度を設定した 2 本のレーザ光を照射し，この 2 台の機構を直交かつ上下方向に配置することで，任意の四角形の外形上にレーザ光のスキャンラインを自動調整して供給する装置を開発した．
- (3) レーザ光スキャンライン上の温度は，レーザ光のエネルギー吸収率，被照射物の熱拡散定数や熱伝導度に依存する．加熱接合部の昇温シミュレーションの結果と放射温度計による温度測定結果は，一致した挙動を示した．
- (4) 実験の結果から，0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の接合部の

均一昇温条件として、最適なスキャン周波数は 40 Hz である。  
レーザ光の出力 20 W, レーザ光径 4 mm をスキャンした場合、  
スキャンラインの端と中央部の接合部の温度は、6 秒で 200 °C  
を超える。

### 7-1.2 QFP-IC の 4 辺同時はんだ付け装置・プロセス

- (1) ディスペンス塗布によるはんだペーストの塗布量制御因子は、ペーストの粘度、ノズル径、塗布圧力、塗布時間、ノズルと基板のギャップ量で決定される。ノズルと PCB のギャップ量の制御には、機械式倣い機構を使用した。が、接触式のために塗布速度が上げられないことが課題となった。
- (2) 0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC の自動はんだ付けシステムを開発した。4 辺同時レーザ光スキャン加熱の最適条件は、レーザ光径 4 mm, スキャン周波数 40 Hz, 照射時間 6 秒, 加圧矯正時間 1 秒が最適である。加圧矯正により、最適なはんだペースト量は、0.59～1.05 mg/リードである。また、はんだペーストのレーザ光吸収率が高いため、はんだ付けの温度はペーストがない場合よりも高くなる。
- (3) スキャン加熱のモデル式、熱電対によるはんだ付け温度測定、赤外線放射温度カメラによる PCB の温度測定では、ともに中央部が端部より温度が高くなった。これは、スキャンラインの中央部と端部で、熱拡散定数や熱伝導度が違うためと考えられる。
- (4) QFP-IC パッケージ内の温度は、レーザ照射終了後も 141 °C まで上昇したが、パッケージモールドの許容温度以内のため、熱ストレスによるパッケージダメージは少ないといえる。鉛フリーはんだ材などの高温はんだ材への適用には、接合後の冷却機能の検討も必要である。
- (5) 0.65 mm ピッチ 100 ピン QFP-IC への溶融はんだ量の制御を、コプナラリティの加圧矯正機構で行うことで、はんだ付け不良は低減できる。フラックスによるボイドの残留も、この加圧機

構で低減できる．

- (6) 本加熱プロセスは，セルフアライメント効果があり，マウント位置精度 $\pm 50\text{ }\mu\text{m}$ よりも接合位置精度は向上する．本プロセスでの位置ずれの要因は，加圧機構の加圧方向と PCB の受け機構の間での軸ずれによると考えられる．
- (7) はんだ付け部の接合強度は，TCT 1000 サイクル後も規定値の 19.6 N 以上を維持した．破断面の SEM 観察からも，他のリフロー方式と同等品質の接合信頼性が確認できた．引張試験の破断箇所の状態からは，接合部の位置ずれが接合強度低下の要因であることが考えられる．

### 7-1.3 蛍光体ペーストのディスペンス塗布プロセス

- (1) 蛍光体ペーストの均一ディスペンス塗布のため，非接触のレーザ変位計でノズルとガラス基板のギャップ量計測を行う装置を開発した．ギャップ制御系のフィードバックゲインの適正化により，ギャップ位置決めでの位置ばらつき量は  $3\text{ }\mu\text{m}$  以内である．
- (2) レーザ変位計で，塗布断面積を測定する装置を開発した．レーザ変位計の特性上，塗布断面に対するレーザ走査方向は，平行方向に走査することが適正である．
- (3) 塗布量のばらつき量は，シミュレーションから，ノズル径，塗布圧力，ノズルとガラス基板のギャップ量，塗布材料の粘度に依存することが明らかになった．塗布断面積  $2050\text{ }\mu\text{m}^2$  を得る最適条件は，ノズル径  $0.14\text{ mm}$ ，塗布圧力  $0.5\text{ MPa}$ ，塗布速度  $125\text{ mm/s}$ ，ギャップ量  $30\sim 70\text{ }\mu\text{m}$  である．

### 7-1.4 蛍光体ペーストの厚膜形成プロセス

- (1) 熱処理した BM 付きガラス基板に塗布した蛍光体ペーストは，塗布後もその形状を維持する．これは，蛍光体ペーストに含まれる BCA が急速に熱処理された BM に吸収され，BCA 以外の成分が BM 上を拡散しないためと考えられる．

- (2) 熱処理した BM 付きガラス基板に，内径 0.14mm のノズルで，基板とノズル間のギャップ量を 30  $\mu\text{m}$  に制御し，蛍光体ペーストを塗布した場合，塗布厚さは  $14\pm1\ \mu\text{m}$  となる．圧力変動による塗布量増減があっても，塗布幅のみに影響し，塗布厚さは一定となる．この理由として，塗布圧力が変動しても狭ギャップの制御が，塗布ペーストの厚さ方向に一定の圧力を発生させるためと考えられる．
- (3) 蛍光体層の BM 開口方向の寸法精度は，裏面露光・剥離，熱処理でのプロセスに依存する．一方，厚さの精度は，ギャップ制御下の蛍光体ペースト塗布厚さ制御と，蛍光体ペースト塗布の固形分含有率に依存する．これらは，別々のプロセスで制御するため，本プロセスは，厚膜蛍光体層形成の制御を容易にするといえる．
- (4) 熱処理後の蛍光体層を SEM 観察した結果，55 wt% の蛍光体材を含有する蛍光体ペーストを塗布厚さ  $14.5\pm2.7\ \mu\text{m}$  で塗布すれば，蛍光体層の厚さは， $8\pm1.5\ \mu\text{m}$  に形成できる．蛍光体層内の蛍光体の粒径は，1～4  $\mu\text{m}$  であるため，大型パネル製造で，蛍光体層の厚さを維持するには，蛍光体層の平坦化処理プロセスを検討する必要がある．

### 7-1.5 マルチノズルユニットの塗布制御プロセス

- (1) シングルノズル塗布の問題であった低い生産性を向上するマルチノズルユニットを開発した．ディスプレイの画素構成から，ユニットあたりの塗布ノズル数 16 本とした．このノズルのピッチが，3 台のユニット間でも成立するマルチノズルヘッドを考案し，各ユニットの塗布位置を塗布圧力で制御することで，塗布ピッチは維持できる．
- (2) シングルノズル塗布の研究を基に，マルチノズルユニットの寸法を決定し，片側 8 本の塗布ノズルのシミュレーションモデルで，ユニット内の圧力と流速を見出した．シングルノズルの実験結果と上記シミュレーションの結果の差異は，6.6 % であ

った．片側 8 本の塗布ノズルが  $2050 \pm 150 \mu\text{m}^2$  の塗布断面積で塗布する条件は，塗布圧力が 3.5 MPa である．

(3) 片側 8 本の塗布ノズルの塗布断面積の測定から，圧力損失による塗布量のばらつきは，12 % を確認した．シミュレーション結果の 10 % を超えた理由は，塗布ノズル径のばらつきなどの加工上のばらつきの影響と考える．

(4) 3 色の蛍光体ペーストが隣接する場合，塗布後の形状が維持可能な塗布ピッチは， $210 \mu\text{m}$  以上である．熱処理された BM 内を拡散する BCA が重ならないピッチで塗布することで，蛍光体ペーストの形状は維持できる．この条件で全色を塗布できれば，裏面露光，剥離，熱処理の工程は，3 回から 1 回となり，製造コストが低減できることの指針を示した．

## 7-2 今後の課題と展望

集積回路基板の接合材の流動制御の研究では，今後，環境を配慮した接合材料の鉛フリー化による高温加熱への耐熱対応や，QFN などの J 型リード化で，極力パッケージ外周にリードを出さない部品のはんだ付けが必要となっている．

ディスプレイの蛍光体材料の流動制御の研究では，ディスプレイの画素狭ピッチ化で，隣接した蛍光体ペーストの塗布と形状維持のプロセスおよび材料開発が必要となっている．また，ディスペンス塗布の高速化，マルチノズルユニットの安定塗布制御や大判ガラス基板対応などは，量産装置に向けた今後の課題である．

今後，研究のオリジナリティである非接触加熱と非接触計測の技術は，半導体チップや電子部品上にアウターリード部品を積層する 3 次元実装や，微細でアスペクト比の高い壁形成を行う 3 次元造形などへの技術展開も期待できる．今後，レーザ発振器の性能向上と低価格化が進めば，さらにレーザ技術を応用したプロセス装置の生産寄与が期待される．

## 謝辞

本論文の作成にあたり，終始懇切なる御指導と御助言を賜りました，芝浦工業大学 工学部 電子工学科（工学研究科 機能制御システム専攻） 本間哲哉教授に，心から感謝申し上げます．また，本論文をまとめるにあたり，有益なご教示を頂きました芝浦工業大学 工学部 電子工学科 小池義和教授，同 上野和良教授，同 石川博康教授ならびに東京工科大学 工学部 電気電子工学科 高木茂行教授に，厚く感謝申し上げます．

本研究は，筆者が(株)東芝 生産技術センターならびに東芝 IT コントロールシステム(株)で，ディスプレイ・集積回路基板の蛍光体・接合材料プロセス，装置に関する研究・開発業務をまとめたものである．研究を進めるにあたり，大学院への入学など十分な機会と環境を与えて頂きました(株)東芝 生産技術センター所長 森郁夫氏，生産技術企画部長 秋山靖裕博士，前々所長 西田直人博士，前々生産技術企画部長 樋口勝敏博士，前所長 隅田敏氏に，深く感謝致します．また，東芝 IT コントロールシステム(株)代表取締役社長 橋本隆氏には，研究を進めるにあたって十分なお配慮を頂きましたこと，心より感謝致します．

(株)東芝生産技術センター 生産技術応用技術センター（現メカトロニクス開発センター）の方々には，ご指導，ご鞭撻，ならびに暖かい励ましを頂きました．特に，元センター長 落合信夫氏，牛見健二氏（故），山本俊夫氏，中原照巳氏，中園正和氏，牛島信一郎氏，前原洋一郎氏，元センター長 玉井光一博士，中田順二氏，原田種真氏，高林弘徳氏，豊嶋毅氏，高橋良一氏，大城健一氏，宮内攻氏ならびに構造設計技術研究部 寺田貴洋氏，元レーザ研究部 土屋尚美氏には，手法の評価において大変お世話になりました．深く感謝致します．

(株)東芝 電子応用装置部 末永直行氏ならびに，芝浦メカトロニクス(株)の方々には，実用化において大変お世話になりました．特



に、芝浦メカトロニクス(株)社長 藤田茂樹氏、小松巖氏、金綱務氏、早藤育生氏には、装置開発と量産適用で数々のご支援を頂きました。深く感謝致します。

また、論文作成全般にわたり、(株)東芝 生産技術センター 寺井藤雄博士、久保智彰博士、森三樹博士、(株)東芝 セミコンダクター&ストレージ社 齋藤誠博士、ならびに、東芝マテリアル(株) 片岡好則博士、青木克明博士には、有益なご助言を賜りましたこと、深く御礼申し上げます。

## 本研究に関する発表，論文等

### 1. 本研究に関する発表論文

- (1). **H.Tsuchiya** and T.Homma: “Laser beam scanning system for irradiation in an external quadrangular form for soldering of quad flat package IC”, Optical Review **22**, pp.1-8 (2015). [本論文第 2 章および第 3 章]
- (2). **H.Tsuchiya**, K.Miyauchi and T.Homma: “Fabrication process of thick fluorescent layer for flat panel displays using a new paste supply system”, Optical Review **22**, pp.647-653 (2015). [本論文第 4 章，第 5 章および第 6 章]

### 2. 本研究に関する学会発表

- (1). 土屋 均，本間哲哉：“QFP-IC はんだ付けのためのレーザ光スキャンプロセス評価 (13a-A11-10)”，2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会，**04** (13.Mar.2015 東海大学湘南キャンパス) p.423.
- (2). 土屋 均，本間哲哉：“レーザ光スキャンシステムを用いた QFP-IC はんだ付け (13a-A11-11)”，2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会，**04** (13.Mar.2015 東海大学湘南キャンパス) p.424.
- (3). 土屋 均，宮内 攻，本間哲哉：“蛍光体の厚膜ペーストを形成するペースト供給方法 (12a-D2-1)”，2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会，**11** (12.Mar.2015 東海大学湘南キャンパス) p.76.
- (4). 土屋 均，本間哲哉：“レーザ光スキャンはんだ付けシステムで形成したはんだ接合部の特性 (14p-2F-5)”，2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会，**03** (14.Sep.2015 名古屋国際会議場) p.251.

- (5). 土屋 均, 本間哲哉: “ディスペンサシステムによる蛍光体ペーストの厚膜形成方法 (14a-1E-8)”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, **11** (14.Sep.2015 名古屋国際会議場) p.176.
- (6). 土屋 均, 本間哲哉: “マルチノズルによる蛍光体ペーストの厚膜塗布方法 (14a-1E-9)”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, **11** (14.Sep.2015 名古屋国際会議場) p.177.

### 3. その他の論文発表等

- (1). 末永直行, 中園正和, 土屋 均: “レーザはんだ付”, 溶接技術 **35** (1987) pp.58-65.
- (2). 中原照己, 中園正和, 土屋 均: “プリント配線板実装ライン〈要素技術・装置〉ハンダ付け技術”, 電子材料 **26**, pp.71-76 (1987).
- (3). 小松巖, 金綱務, 早藤育生, 土屋 均: “レーザはんだ付け装置”, 東芝レビュー **43**, pp.433-436 (1988).
- (4). N. Suenaga, M. Nakazono, **H. Tsuchiya**: “Laser soldering”, Welding International **2**, pp.269-278 (1988).
- (5). 藤田茂樹, 山本俊夫, 土屋 均: “集光性, フレキシビリティに富む YAG レーザ FPIC にみるハンダ付けの自動化”, 自動化技術 **20**, pp.33-36 (1988).
- (6). 中原照己, 中園正和, 土屋 均: “電子部品の接合技術”, 溶接学会誌 **58**, pp.455-461 (1989).
- (7). 土屋 均: “電卓, ヘッドホンステレオの FPIC のレーザはんだ付け技術”, WELTEC **4**, pp.17-22 (1988).
- (8) 土屋 均, 坂庭正夫, 小幡真紀: “セラミックパッケージ型 SAW フィルタの実装技術”, 東芝レビュー **51**, pp.49-52 (1996).
- (9). 土屋 均: “内製設備の開発手法と設備の要件”, IE レビュー **44**, pp.19-24 (2003).

#### 4. 特許登録および出願

##### 4-1. 国内登録特許（5件）

- (1). 土屋 均, 土田真規: “はんだ付け装置”, P2695825(1997.09.12)
- (2). 土屋 均, 土田真規: “はんだ付け装置”, P2670303(1997.07.04)
- (3). 土屋 均, 原口史明: “光ビームはんだ付け装置”, P2672633号 (1997.07.11)
- (4). 小野塚剛, 渕上安彦, 土屋 均, 村上嘉教: “位置決め装置および印刷装置”, P3112581 (2000.09.22)
- (5). 高桑生一, 土屋 均: “基板位置決め方法”, P2941505 (1999.06.18)

##### 4-2. 国内公開特許（21件）

- (1). 中園正和, 土屋 均: “はんだ付け方法”, PS61-234323 (1986.10.03)
- (2). 高桑生一, 土屋 均: “基板位置決め方法”, PH3-199511 (1991.08.08)
- (3). 渕上安彦, 玉井光一, 土屋 均, 高桑生一: “基板搬送装置”, PH3-217524 (1991.08.28)
- (4). 土屋 均, 渕上安彦, 玉井光一, 高桑生一: “基板搬送装置”, PH3-215754 (1991.08.28)
- (5). 渕上安彦, 玉井光一, 土屋 均, 高桑生一: “基板搬送装置及びこの基板搬送装置における基板位置補正方法”, PH3-215755 (1991.08.28)
- (6). 渕上安彦, 玉井光一, 土屋 均, 高桑生一: “基板搬送装置及びこの基板搬送装置における基板位置補正方法”, PH 3-217525 (1991.08.28)
- (7). 土屋 均, 小野保夫, 高桑生一: “電解コンデンサの端子圧着方法”, PH3-215753 (1991.08.28)
- (8). 土屋 均, 高桑生一: “電解コンデンサの端子圧着方法”, PH4-240636 (1992.09.09)
- (9). 渕上安彦, 土屋 均, 小野塚剛, 村上嘉教: “印刷装置”,

- PH4-243746 (1992.09.11)
- (10). 小野塚剛, 渕上安彦, 土屋 均, 村上嘉教: “位置決め装置および印刷装置”, PH4-291365 (1992.10.29)
- (11). 土屋 均, 渕上安彦, 村上嘉教, 小野塚剛: “印刷装置”, PH7-226511 (1995.09.04)
- (12). 土屋 均, 渕上安彦, 村上嘉教, 小野塚剛: “印刷装置”, PH7-226512 (1995.09.04)
- (13). 土屋 均, 渕上安彦, 玉井光一, 高桑生一, 村上嘉教, 小野塚剛: “テーブル装置および印刷装置”, PH7-226709 (1995.09.04)
- (14). 渕上安彦, 土屋 均, 村上嘉教, 小野塚剛: “印刷装置”, PH7-226510 (1995.09.04)
- (15). 渕上安彦, 土屋 均, 小野塚剛, 村上嘉教: “オフセット印刷装置および印刷方法”, PH7-226710 (1995.09.04)
- (16). 渕上安彦, 土屋 均, 小野塚剛, 村上嘉教: “オフセット印刷装置および印刷方法”, PH7-226710 (1995.09.04)
- (17). 青山英彦, 菅野健一郎, 坂庭正夫, 小野塚剛, 小幡真紀, 土屋 均: “パターン認識装置及びパターン認識方法”, PH7-307539 (1995.11.27)
- (18). 小幡真紀, 武者 整, 土屋 均, 田中謙吾: “チップマウント装置”, PH7-339223 (1995.12.26)
- (19). 高橋良一, 大城健一, 土屋 均: “太陽電池パネルの製造装置及び製造方法” PH11-280053 (1999.09.30)
- (20). 土屋 均, 岩田十三男, 大庭典之: “コネクタの実装方法その実装装置”, P2000-020540 (2000.01.28)
- (21). 澤田安彦, 土屋 均, 高橋良一, 松井智洋, 岩瀬 茂: “吸着装置, ならびに板状部材の搬送方法, 液晶表示装置の製造方法”, P2004-207427 (2004.07.14)