

第5.4節 回折効率の検討

視覚センサにおける反射光からの計測では、走査の直線性、等速性も課題であるが、微弱な光量を扱うため、ホログラムスキャナとしては回折効率を高めることが最も重要である。高い回折効率はレリーフ型相ホログラムによって得られるが、パターンの溝(格子)断面の寸法、形状が回折効率に関係する。このため、深溝格子の回折効率について計算を実施した。必要な断面を得るため、反応性イオンエッチング(RIE)によって格子の加工を行い、回折効率を測定して計算値と対比した。結果に基づき直線、等ピッチの単純格子のホログラム素子を製作し、走査特性を測定した。

5.4.1 回折効率の計算

最近の電磁波理論による厳密な解析結果に基づけば、格子の形状、寸法を制御することで高い回折効率の得られることが示されている^{13) 14)}。

格子の形状効果、および入射レーザー光の偏光を考慮した回折効率の解析では、電磁波のマクスウェル方程式を解く必要がある¹⁵⁾。図5.9はX軸方向に周期構造をもつ誘電体表面レリーフ格子である。格子表面より上側は自由空間で屈折率は $n=1$ であり、表面より下側は屈折率 $n=n_0$ の損失のない誘電体媒質である。間隔 d 、深さ h の格子に波長 λ の平面波が入射角 θ で入射する場合を考える。

入射平面波の電界ベクトルの方向が格子溝に平行なTE波(図5.9では紙面に垂直な偏光)では、電界ベクトル $E_z(x, y)$ は次のマクスウェルの波動方程式を満たす。

$$\Delta E_z(x, y) + k^2(x, y) \times E_z(x, y) = 0 \quad (5.3)$$

ただし $k^2(x, y) = ((2\pi/\lambda)n(x, y))^2$

格子ベクトル $K = 2\pi/d$ とし、以上の基礎式の展開から得られる連立常微分方程式を、 $y=0$ および $y=h$ のそれぞれの境界において、数値解が連続性を満足するようにして解く。

TM偏光の場合には磁界ベクトル $H_z(x, y)$ が格子溝に平行となり(電界ベクトル

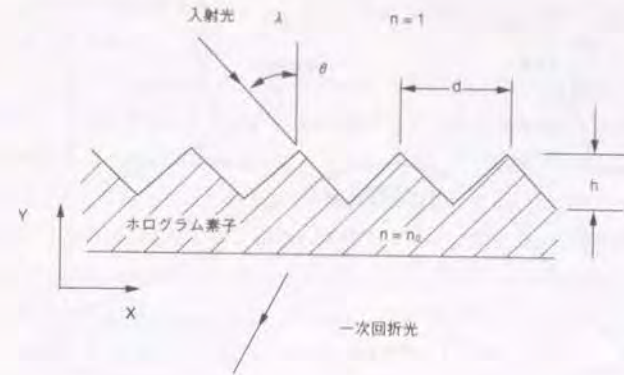


図5.9 深溝格子のホログラムの断面

は図5.9では紙面に平行な偏光)、マクスウェルの方程式は次のように導かれる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{1}{k^2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} H_z(x, y) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{1}{k^2} \cdot \frac{\partial}{\partial y} H_z(x, y) \right) + H_z(x, y) = 0 \quad (5.4)$$

TE波と同様にして得られる連立常微分方程式を解く。

連立微分方程式の解が格子溝による回折波の電磁場を表すレーリー係数を与える。レーリー係数より回折光の強度が導かれ、(回折光強度)/(入射光強度)で定義する回折効率 η が得られる。

以上の過程に基づいて計算を行うため、計算機プログラムを製作し、鋸歯状深溝の格子の回折効率の計算を行った。格子の間隔は $9\mu\text{m}$ 、鋸歯の上部、下部の幅をそれぞれ $0.9, 4.5\mu\text{m}$ 、深さを $5.3\mu\text{m}$ とした。基板には前節ではZnSeを用いたが、格子溝の加工では有害物質の発生の可能性があるためGeを用いることにし、計算での誘電体媒質は、Geとした。

TE波について、入射角と回折効率の関係を計算した結果を図5.10に示す。これによれば、Ge基板に格子の加工を行った場合、理論的に60%程度の回折効率を得ることが可能である。

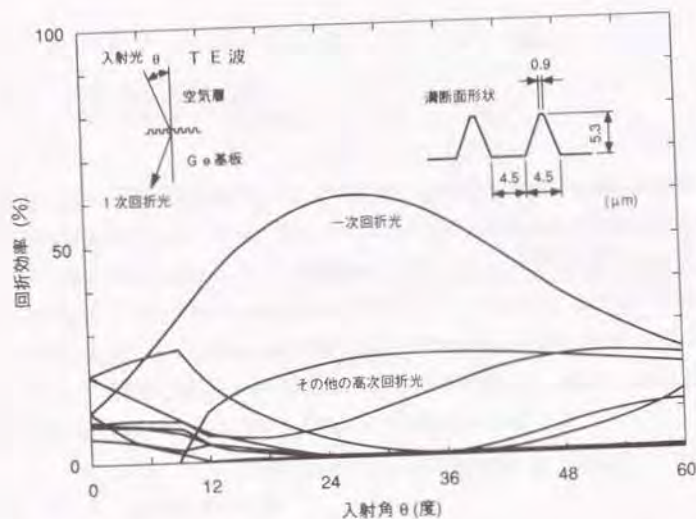


図5. 10 深溝格子のホログラムの回折効率の計算結果

5. 4. 2 深溝格子の加工と回折効率

深溝鋸歯状の格子によって回折効率を高める可能性が見出されたため、その加工法を検討した結果、半導体プロセスにおいてメモリセルなどの微細形状の深溝加工に利用されている、RIEを採用することとした。

RIEは深溝を加工すると同時に、断面形状を制御することも可能と考えられる。RIEでは、反応ガスのプラズマ中で生成したラジカルの化学反応によるエッチングと、イオンが試料面に対して垂直に機械的に衝突することによる、ダメージ層の生成、あるいはスパッタリングが同時に行われる。前者では等方的に加工が進行しアンダーカットを生じる。後者は異方的で垂直方向に加工が進行する。反応ガスその他の加工条件によって両者の比率が異なってくるため、加工された断面形状が変化する。従って、計算結果

から必要な格子の断面形状を設定し、その形状を実現するRIE加工条件を定めることができると考えられる。

以上のことからGeのRIEに関し実験を行った。基板面にAl薄膜の平行な縞パターンを形成し、これをマスクとして平行平板型RIE装置を用いて加工を実施した。チャンバ内を減圧した後反応ガスを注入し、圧力を 7.5×10^{-4} Pa程度に保ちRF出力を加えることにより加工を行う。反応ガスには予備実験の結果、 $CF_4 + 5\% O_2$ 、 CHF_3 、および O_2 の混合ガスを用いた。試料には直径25.4mm、厚さ3mmの多結晶Geを用い、Alマスクの厚さは800nmとした。パターンのピッチは10-20 μm である。

加工面は一般的に図5. 11のようになり、次の問題がある。

- (1) 溝内にひげ状の生成物の発生が見られる。
- (2) Alマスクの損傷が大きい。
- (3) 仕上げ面あらかさが悪い。

このため、RIEの条件について検討を加えた。

(1)については生成物の分析の結果、Alの成分が認められ、Al膜がスパッタされることによってGe面に付着し、ホイスカ状に発達するのではないかと考えられる。加工後Alマスクの除去を兼ねて、50℃の磷酸50%水溶液を用いて5分間エッチングすることで除去が可能となった。(2)、(3)についてはイオンの機械的作用が強い場合に促進される傾向が見られた。従って加工時間は長くなるが、小さいRF出力が望ましい方向と考えられる。

実験において設定した加工条件の代表例を表5. 4に、また各条件において得られる断面形状を図5. 12に示す。条件1では矩形に近い形状で溝深さ8.5 μm 、条件2では三角波形状で溝深さ9 μm 、条件3では台形形状で溝深さ5.3 μm 、条件4では斜面形状は条件3と似ているが、溝深さは7.7 μm となった。以上のように、加工条件によって、溝断面の形状、および深さを変化させることが可能であることが判明した。

RIEによって製作した深溝格子のホログラム素子の回折効率の測定を行った。パターンは一定ピッチの直線とした。測定方法の概念を図5. 13に示す。TE波CO₂レーザー光をチョッパミラーを通過させた後ホログラム素子に導き、回折光をレンズで集光してレンズの焦点面に設置した焦電型センサの出力電圧より光量を測定した。

まず、図5. 14 (a)に示す断面を持つホログラム素子の測定を行った。この素子



図5. 11 GeのRIE加工実験における加工面の例 (マスク除去前)

マスク : A1、ピッチ20 μ m
 反応ガス : CF₄ + 5%O₂ 30mL/min
 CHF₃ 10mL/min
 O₂ 1mL/min
 圧力 : 5.3 $\times 10^{-4}$ Pa
 RF出力 : 250W
 加工時間 : 30min

表5. 4 RIE加工条件の代表例

条件 No.	エッチングガス			真空度 10 ⁻⁴ Pa	RF出力 W	加工時間 min
	CF ₄ + 5%O ₂ mL/min	CHF ₃ mL/min	O ₂ mL/min			
1	30	10	0	5.3	200	30
2	30	10	1.5	5.3	200	15
3	30	10	3	5.3	200	8.17
4	30	10	3	5.3	200	12



(加工条件 No.1)



(加工条件 No.2)



(加工条件 No.3)



(加工条件 No.4)

図5. 12 RIE加工条件による断面形状の差異

(加工条件のNoは表5. 4に同じ)

ピッチ: 10 μ m

マスクスペース幅: 5 μ m

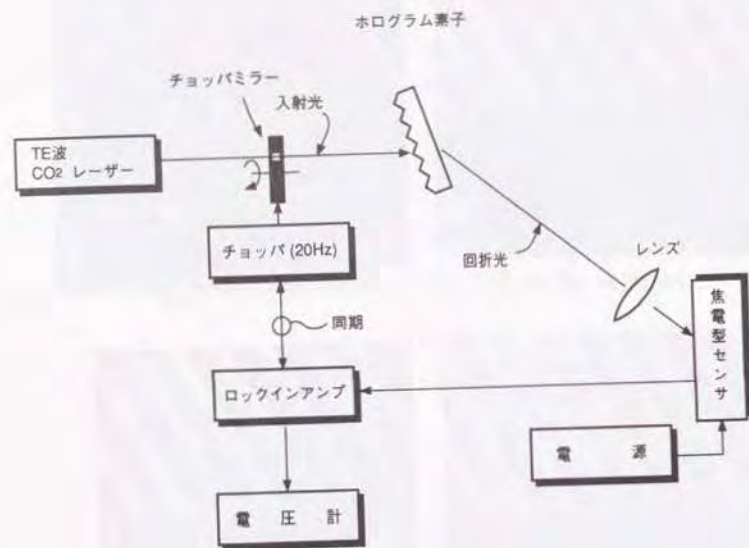


図5. 13 ホログラム素子の焦電型センサによる回折効率測定概念

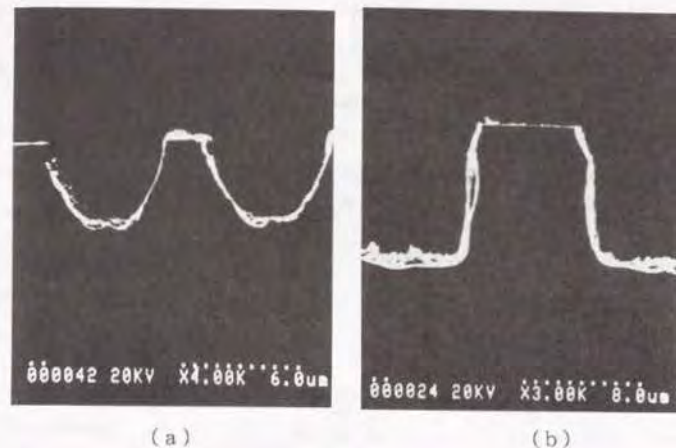


図5. 14 回折効率の測定を行ったホログラム素子の断面形状

は、図5. 10に示した、計算において設定した形状を目標として加工を行ったものである。測定結果では入射角30~40度に対して回折効率は17.9~18.2%であり、計算値の60%程度に比しかなり低い。

次に、(b)に示す、矩形に近い断面を持つホログラム素子の測定を行った。また、この形状をもとにして、矩形断面での回折効率の計算を行った。図5. 15に測定結果と計算結果を対比して示す。回折効率の入射角依存性は両者で類似しているが、回折効率の最大値は実測値では35%程度であり、計算値の22%より高い。

測定値と計算値の差異は、加工においては加工後の断面形状が計算において設定した断面形状と異なる原因があり、一方、計算においては断面モデルと回折効率の関係の把握が不十分な原因があると考えられる。加工では理想断面形状に近づける加工条件の設定、計算では断面形状の回折効率に与える影響について知見を増やすことが課題であることが判明した。

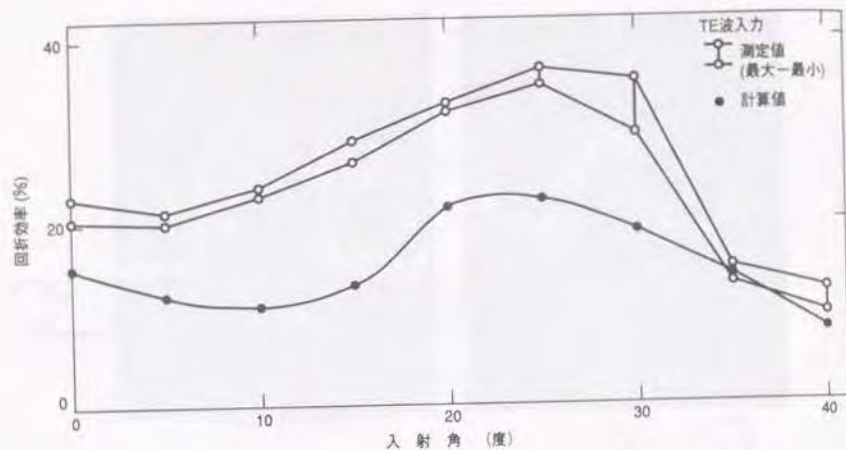


図5.15 矩形断面のホログラム素子の回折効率の実測値と計算値

5.4.3 単純格子のホログラム素子

ホログラムの設計では、5.3節においてはCGHにより走査の集光性、直線性、等速性を最適化する試みを行った。この場合、ホログラムパターンは曲線となり、また格子のピッチも不等となる。従って、格子の断面の寸法、および格子に対する入射条件がホログラムの個々の場所によって異なることになり、回折効率の計算においてはホログラム上の位置の要素が加わる。また、断面の寸法が場所的に異なることによって、溝のRIE加工条件にも場所による違いを配慮する必要がある。従って、曲線、不等ピッチのホログラムの設計、加工は両者とも2次元的分布を考慮する必要があり、非常に複雑となる。

一方、ホログラムに収束機能をもたせなければ空間周波数分布は一定でよく¹⁶⁾、直線等ピッチの単純格子でよい。この場合、等速性、および直線性は必ずしも保証されない。しかしながら、災害対応ロボットにおける使用条件では走査角は比較的小さく、ま

た、得られる画像に多少のひずみがあったとしても、対象物の識別に大きい支障はないと考えられる。このため、回折効率をより重視する観点より、スキャナに使用するホログラムは直線等ピッチの溝から成るパターンを用いることにした。

単純格子のホログラムの特性を把握するため、図5.16に示す直線等ピッチパターンのホログラムディスクをRIEを用いて製作した。直径50.8mm、厚さ3mmのGe円板上にホログラム素子10個をセクタ状に配置した。格子のピッチは9 μ mとし、製作時のAlマスクのパターン幅は5 μ m、膜厚を250nmとした。RIEは表5.4の条件3によった。

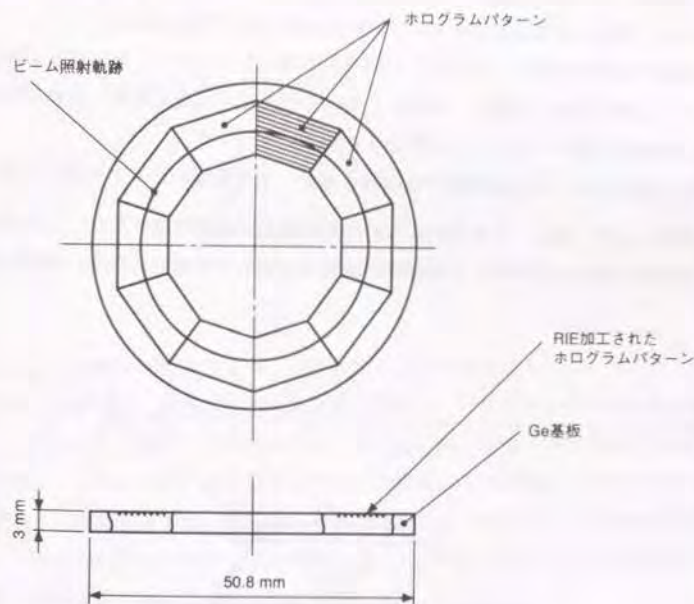


図5.16 Ge基板上に製作した10セクタのホログラムディスク

エンコーダつきDCブラシレスモータによってホログラムディスクを回転させ、回折効率、および走査の直線性、等速性の測定を行った。

まず、ディスク上の10個のホログラム素子についてそれぞれの回折効率を測定した。測定は図5. 17に示すように、回折光をミラーで折り返し直接レーザパワーメータに入射して行った。パワーメータは1個のホログラム素子の中でピーク値を検出した位置で固定し、以降はホログラムディスクを回転して他の素子の測定を行った。

測定結果を表5. 5に示す。回折効率は5.5-12.7%の範囲であり、平均値は9%である。明暗パターンのホログラム素子よりは回折効率が大きい、さらに向上を計る必要があると共に、ディスク上でのホログラム素子間の差異を小さくする必要がある。なお、図5. 13に示した焦電型センサによる測定に比し、測定値が小さく出ていることも想定されるが、実用上は本測定法によって比較すればよいと考えられる。

次に走査性の測定は図5. 6に示した構成と同様にして行った。ホログラム素子よりHgCdTe検出器迄の距離は480mmとした。走査角は±18度であり、走査長は310mmとなる。測定は10個のホログラムの内の1個について行った。

直線性の測定では、各走査位置で検出器を移動して光強度のピーク位置を求め、ビーム中心位置とした。図5. 18は約100mmの走査範囲の測定結果であり、この間では±1mm、走査長に対する比で約1.5%程度の差異であるが、外側では次第に誤差が増大し

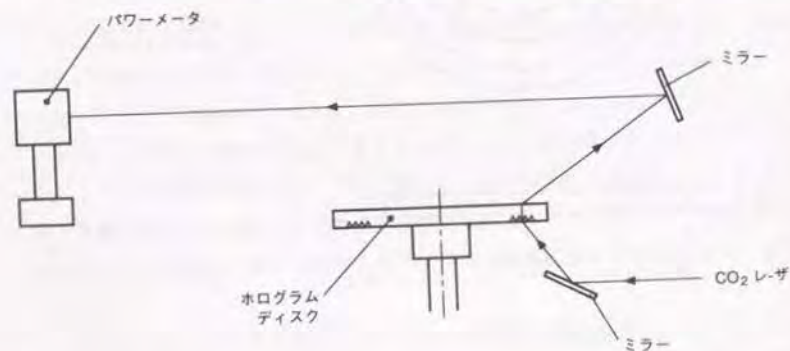


図5. 17 パワーメータによるホログラムディスクの回折効率測定概念図

表5. 5 Ge円板のホログラムディスク上の各素子の回折効率

素子No	回折光出力 (mW)	回折効率 (%)
1	9.7	8.2
2	7.8	6.6
3	12.5	10.5
4	8.7	7.3
5	11.3	9.5
6	7.8	6.6
7	6.5	5.5
8	14.0	11.8
9	13.9	11.7
10	15.0	12.7
平均値	10.7	9.0

CO₂ レーザ入力: 118.5mW

回折効率: 回折光出力/レーザ入力

て行く。この範囲は±6度であり、走査の約1/3の範囲である。

等速性の測定では、検出器を各走査位置で固定し、ホログラムディスクを1500rpmで回転させながら、エンコーダの原点信号と検出器の出力信号との時間遅れを測定した。結果を図5. 19に示す。走査位置に対する時間遅れの比例関係からのずれが等速性の誤差を示す。測定結果では、約150mmの走査範囲においては1セクタの走査時間4msに対して1%以内の差異であり、その外側では誤差が増してゆく。この走査範囲は角度にすれば±10.2度であり、走査の57%の範囲となる。

以上の結果より、単純格子のホログラムを用いても走査の中央部では直線性、等速性ともある程度の性能は確保され、周辺部でのひずみはあるにしても対象物の認識には大きい支障がないものと判断される。

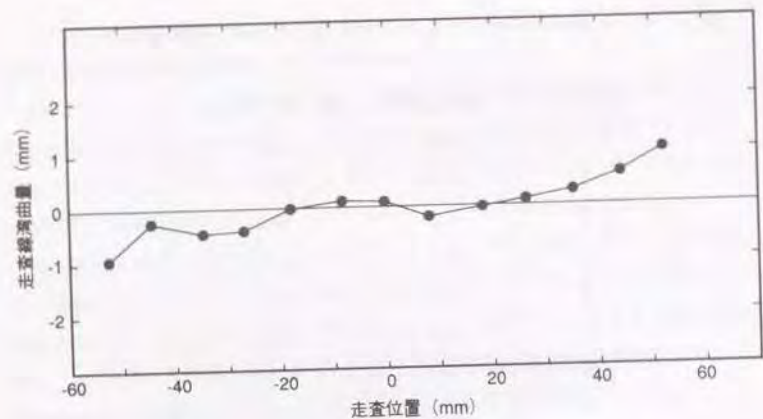


図5. 18 ホログラムディスクの直線性測定結果

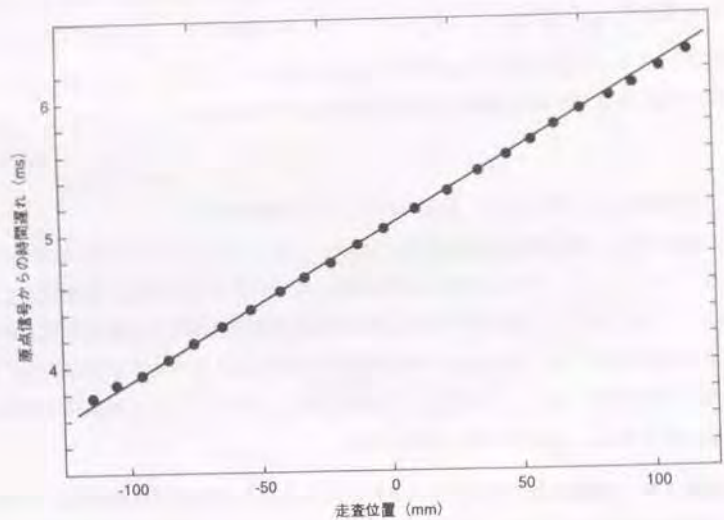


図5. 19 ホログラムディスクの等速性測定結果

第5. 5節 RIE加工条件の検討

格子形状の回折効率に及ぼす影響について、より詳しい計算を行うとともに、回折されたビーム形状の測定を実施した。次に、RIE加工条件と格子の形状、寸法、および加工精度に関する実験を行い、解析結果より来る格子形状の実現を計った。結果に基づいてホログラム素子を製作し、その回折効率を測定した。

5. 5. 1 回折効率、ビーム形状と格子の関係

各種の格子の形状と回折効率の関係について検討を実施した。5. 4. 1に述べたマクスウェルの波動方程式を出発点とするプロセスによって、二等辺三角形、正弦波、および矩形断面を持つ格子に対し、格子のピッチ d と格子の深さ h との比、 h/d を変化して計算を行った。格子は対称形とし、直線等ピッチの単純格子である。計算では $d = 9\mu\text{m}$ とした。入射はブラッグ条件である。

$$\theta_0 = \sin^{-1}(\lambda/2d) \quad (5. 5)$$

ここに、 θ_0 ：ホログラム基板面法線と格子と直角方向での入射光軸のなす角（ブラッグ角）、 λ ：波長

結果を図5. 20に示す。回折効率は形状、溝深さの両者によってかなりの影響を受けることがわかる。また、二等辺三角形断面において、 h/d が1付近で70%程度の回折効率を得られる。

次に、ZnSe、KClの基板材料に対し、同様の計算を正弦波断面について行った。結果を図5. 21に示す。計算結果では、Geより屈折率の低いこれらの材料によってより高い回折効率を得られ、また、寸法変化に対する回折効率の変動も小さい。特に、KClを用いた場合には100%に近い回折効率を得られる。

ただし、ZnSeでは加工時の有害物質発生への対策、KClでは吸湿性に対する保護膜の形成の問題があり、ただちに用いることは困難であるが、将来これらの課題の解決によって、Ge基板よりさらに高い回折効率を得ることが可能と見られる。

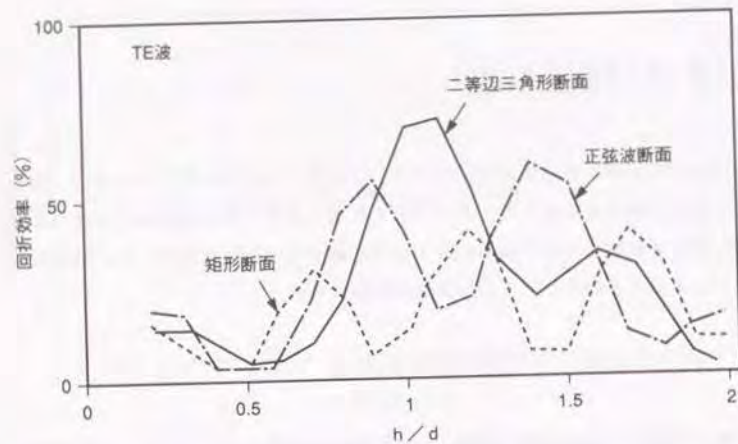


図5. 20 Ge基板による種々の形状のホログラムに対する回折効率の計算結果
($d=9\mu\text{m}$ 、ブラッグ入射角)

さらに、回折効率と合わせ、回折光のビームの品質の問題がある。前節におけるプロセスで製作したホログラム素子を用い、回折されたビームの形状を60素子の赤外線センサを用いて測定した。ホログラム素子には格子の反対面に反射防止膜をつけた。

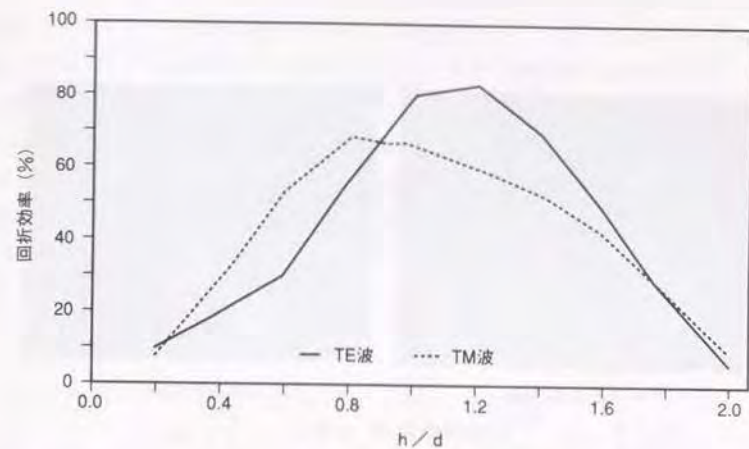
回折効率14.8%のホログラム素子の測定結果を図5. 22に示す。(a)は格子と平行な主走査方向、(b)は格子を横切る副走査方向である。主走査方向はほぼガウス分布に近いが、副走査方向ではかなり悪い。一方、(c)の回折効率25%の素子のように副走査方向のビーム形状がガウス分布に近いものも存在する。

ビーム形状を劣化させる原因として次の2点が考えられる。

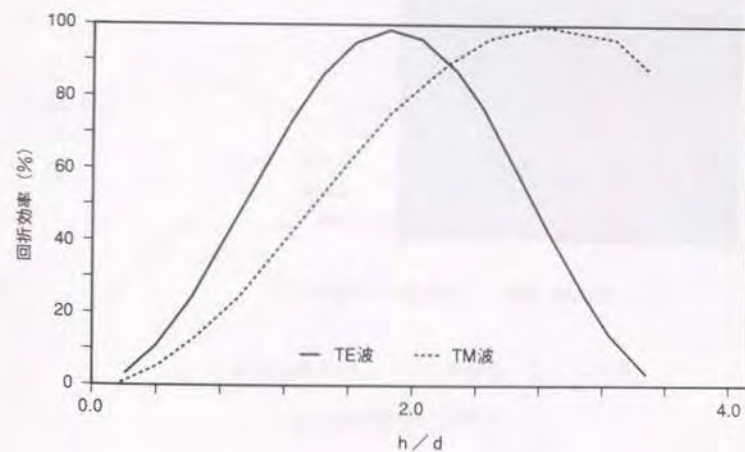
(1) 反射防止膜の特性によってGe基板の表裏面間での多重反射がある。

(2) 基板上的場所によって格子の溝深さに差異があり、各場所で回折角が異なるため回折ビーム内での干渉が発生している

前者の評価のため、面精度 1λ 以内のGe平行平板の片面に反射防止膜を付け、透過光のビーム形状を測定した。その結果では多重反射によるビームの干渉は観測されなかった。

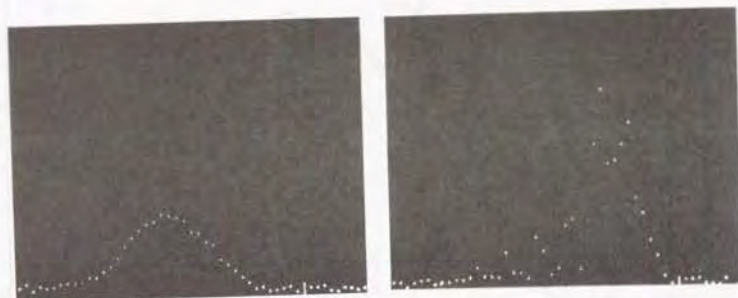


(a) ZnSe ($n=2.40$) 正弦波断面



(b) KCl ($n=1.47$) 正弦波断面

図5. 21 ZnSe、KCl基板によるホログラムの回折効率
($d=9\mu\text{m}$ 、ブラッグ入射角)



(a) 主走査方向
(b) 副走査方向
[0.5V (回折効率14.8%の素子)] 0.25V



(c) 副走査方向 (回折効率25%の素子)

図5.22 回折光のビーム形状測定結果
入射ビーム径: 2mm

後者の検討のため、5.4.3の直線性、等速性の測定と同様の構成で、主走査の各位置において、互いに揺動の軸が直交する2個のガルバノミラーで2次元に回折光を走査してHgCdTe検出器により受光し、ビーム内での強度分布を求めた。

測定によれば、図5.23に示すように、本来のビームの強度のピークと合わせてビーム内に別個の強度のピークが存在し、走査とともにその位置が移動することが観測された。このピークの移動によってビームの強度の重心位置は影響を受け、その軌跡に蛇行を生じている。移動するピークはビーム内での干渉によって発生していると見られ、格子の加工精度は回折効率の変化と共に、ビーム形状にも影響を与えていると考えられる。

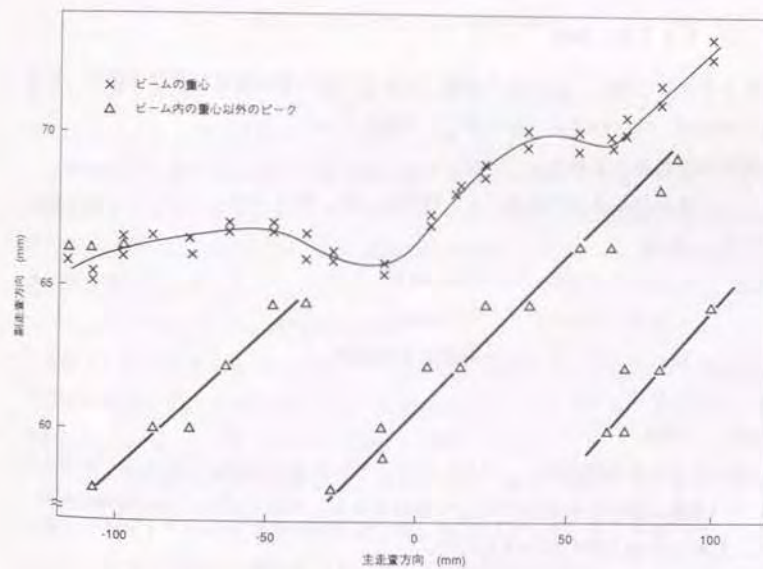


図5.23 回折光のビーム強度の重心位置と干渉によるピーク強度位置

以上の結果より、RIEによる格子の加工を次のような条件で検討することにした。

(1) 格子断面を二等辺三角形、 $h/d = 1$ にできるだけ近づけること。
格子の先端が尖っていることは加工上からも望ましい。格子上部に平坦部がある場合、その幅はマスクの幅によって基本的に定められるが、アンダーカットがあるため加工時間、加工量によって変動しやすい。

(2) 加工時間、加工量によって溝形状、溝深さが変化しないこと。
この条件は、格子先端が尖っている形状で、かつ側壁の角度が加工の進行によって変化せず、常に相似的な形状が得られることにより実現できる。

(3) ホログラム素子内、および素子間での格子の形状、寸法のばらつきを極力小さくすること。

5. 5. 2 RIE加工実験

格子のRIE加工に関し、 O_2 ガス流量、マスク寸法の断面形状に及ぼす影響、および試料内での形状、寸法のばらつきに関して実験を行った。

実験の条件は次の通りである。

試料 : 多結晶および単結晶Ge、直径25.4mm、厚さ3mm

格子ピッチ : $9\mu\text{m}$

反応ガス : $CF_4 + 5\%O_2$ 30mL/min

CHF_3 10mL/min

O_2 必要により添加

真空度 : 5.3×10^{-4} Pa

RF出力 : 200W

実験に用いたRIE装置を図5. 24に示す。ガスは試料上方よりチャンバに導入され、チャンバ側壁に設けられた排気孔より排出される。実験ではガス流の制御のため、図のように試料を円筒で囲む試みも行った。

(1) O_2 ガス流量と断面形状

O_2 ガスにはRIEにおける化学的作用を促進する働きがあり、反応ガスへの O_2 ガスの添加量によってRIEの化学的作用の効果が変化する。その結果、アンダーカットの大小が制御され溝側壁の傾斜が調整できると考えられる。このため、 O_2 ガス流量を

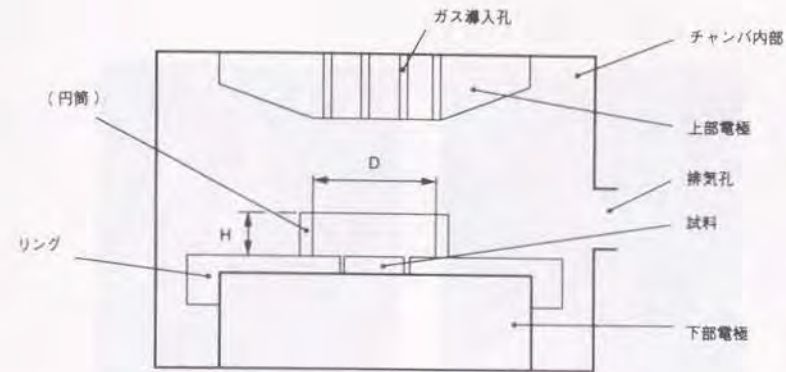


図5. 24 RIE加工装置の断面

変化してRIE加工を行った。加工深さは5-6 μm を目標にした。従って加工時間は一定ではない。A1マスクのスペース幅は $4\mu\text{m}$ とした。

SEMによる測定より求めた加工後の格子側壁の平均傾き角と、添加 O_2 ガス流量の関係を図5. 25に示す。 O_2 ガス添加のない場合には、ほぼ垂直に近い形で加工が進行し断面は矩形になる。 O_2 ガス流量の増加に伴いアンダーカットが増加し、側壁の傾きは次第に大きくなる。

(2) マスクのスペース幅と断面形状

基板上に形成したA1マスクのスペース部分(窓部)からエッチングが進行する。その影響を見るため、マスクのスペース幅を $1-4\mu\text{m}$ に変化して加工を行った。 O_2 ガス流量は3 mL/minとし、加工深さは $7.5\mu\text{m}$ を目標とした。

加工後の断面のSEM写真を図5. 26に示す。また、図5. 27にマスクのスペース幅と、測定より求めた側壁の平均傾き角、およびアンダーカット量(格子上面の幅-マスクのスペース幅)の関係を示す。格子上面の平坦部の幅はマスク寸法によって当然異なるが、傾き角、アンダーカット量には大きい変化が認められない。さらに加工時間を増し、溝を $12-15\mu\text{m}$ と深くした場合でも側壁の傾きは変わらない。溝を深く加工した場合の断面のSEM写真を図5. 28に示す。

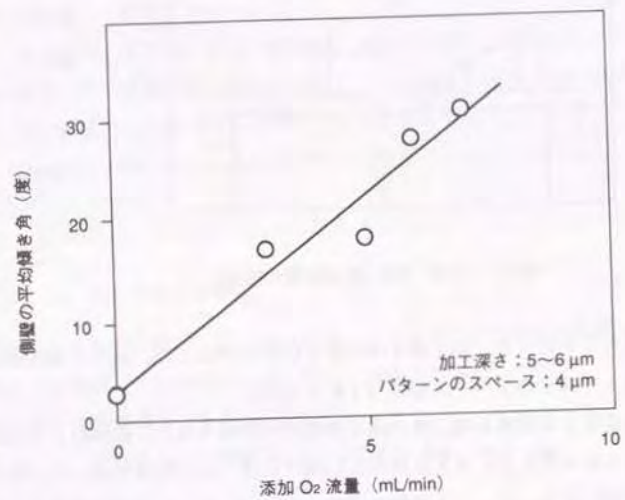


図 5. 25 添加 O₂ 流量と溝側壁平均傾き角の関係

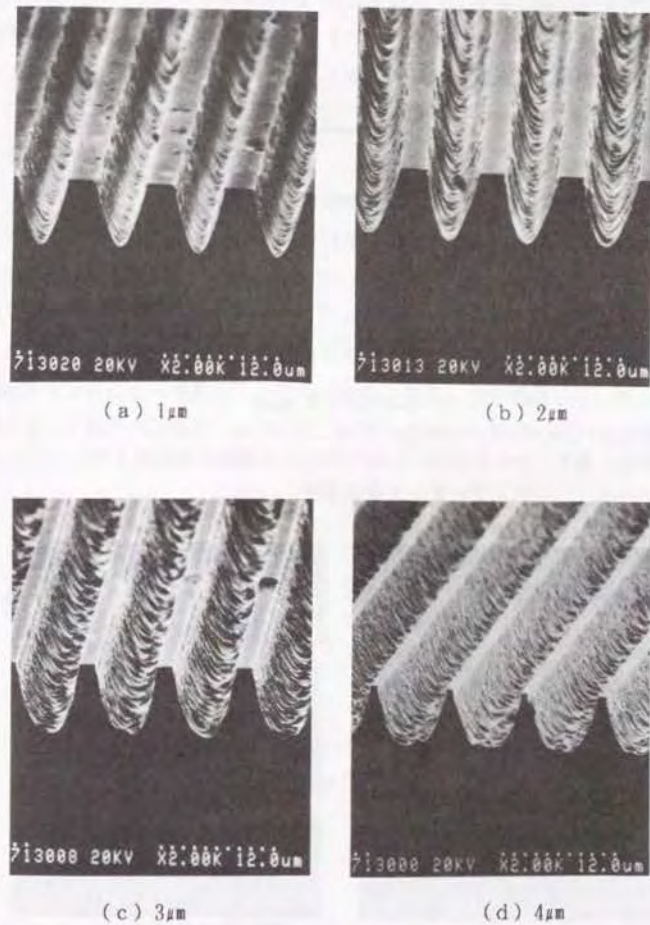


図 5. 26 マスクのスペース幅を変化した場合の断面形状

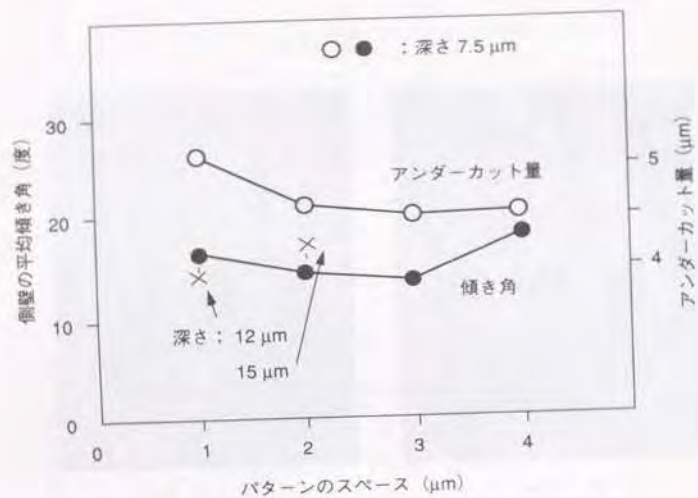


図5. 27 マスクパターンスペースと側壁の平均傾き角、アンダーカット量の関係

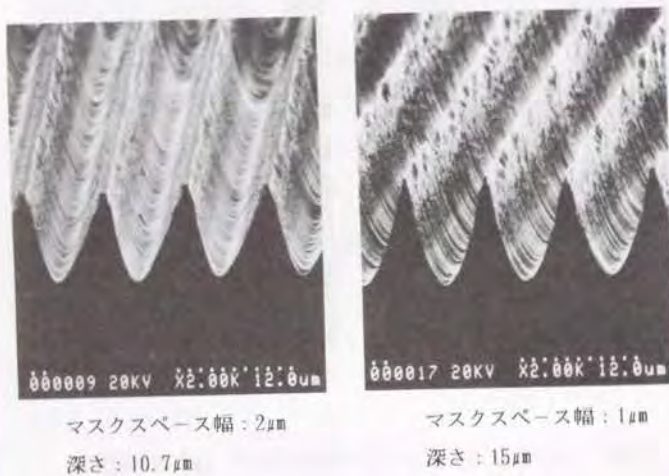


図5. 28 溝の深い場合の格子断面形状

以上の結果より、加工状態を模式的に示したものが図5. 29である。溝側壁の傾きは反応ガスの化学的作用により決定され、マスクのスペース幅、溝の加工深さによらない。一方溝底面の幅は、主としてマスクのスペースを通過するイオンの垂直方向の機械的作用により決まり、ほぼマスクのスペース幅に等しい。得られる断面形状はこれらを合成した結果となる。

(3) 素子内での形状、寸法のばらつき

ホログラム素子内での格子の形状、寸法のばらつきは、走査位置による回折効率の変動を生じて対象物からの反射信号に影響を与え、画像形成時の画質が劣化する。また、ビーム内での干渉の発生原因となるため、ビーム形状を悪くする結果ともなる。従って、ホログラム素子内での格子の形状、寸法は可能な限り均一でなくてはならない。

図5. 30は、直径25.4mmのGe基板面の半径方向の各位置に格子を作成し、その溝深さを表面あらさ計によって測定した結果である。試料には多結晶Ge、および異なる結晶方向をもつ2種の単結晶Geを用いた。いずれの場合も周辺に向かうに従って溝深

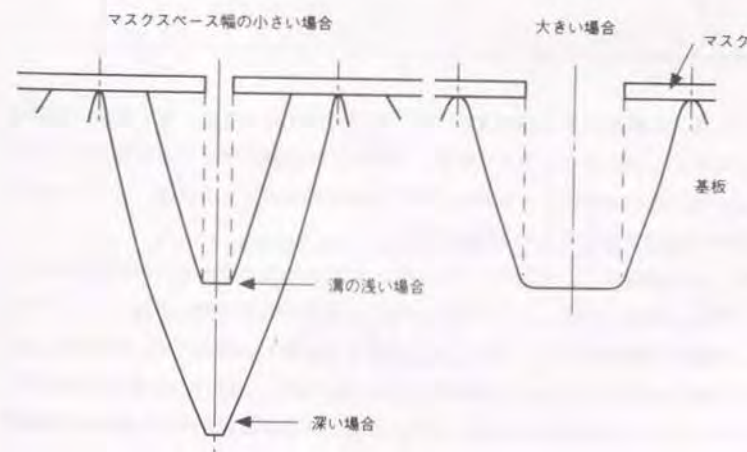


図5. 29 RIEによる溝形状形成の模式図

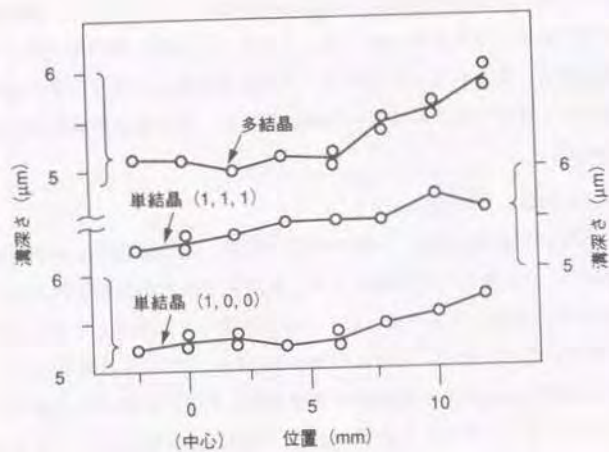


図5. 30 基板上的位置による溝深さの差異

さが大きくなる。多結晶の方が差が大きい、結晶粒界をもつため、加工条件の変動の影響を受けやすいことによると考えられる。単結晶では結晶方向による差異はあまり認められない。加工量の場所による差異は、試料表面での反応ガスの流速、あるいは格子に対する流れの方向が異なるためと推定される。

このため、加工精度向上の対策の一つとして、試料を円筒で囲みガスの流れを均一化することが考えられる。図5. 31は試料を異なる直径の円筒で囲んで加工を行った結果である。極端に円筒が小さく、その内径と試料外径が等しい場合には、周辺部、および中央部で溝深さが小さくなる。これはガスの淀みが発生し、径方向のガスの流速分布に大きい差ができるためと考えられる。これに対し、内径が比較的大きい場合には溝深さの差異が小さくなることが認められる。

さらに、回折効率率は溝側壁の傾き角によっても影響されるので、深さと共に側壁の角

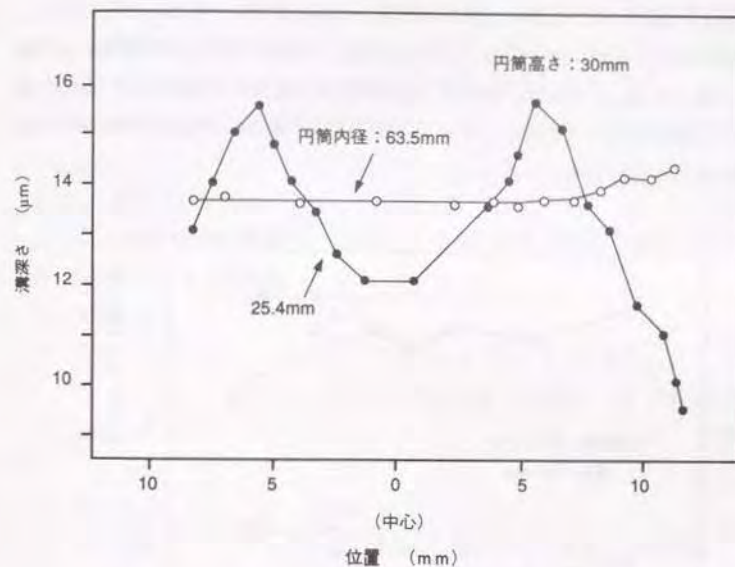


図5. 31 円筒障壁を設けた場合の位置による溝深さの差異

加工時間：30分
材料：多結晶Ge

度についても均一であることが必要である。図5. 32は内径63.5mm、高さ30mmの円筒で囲んで加工を行った試料を用い、SEMによる測定結果より溝深さと共にアンダーカット量を求めた結果である。周辺になるに従って溝深さは増すが、アンダーカット量は減少する。すなわち側壁の傾斜が急になる。これはエッチングガスの化学的作用と、イオンによる機械的作用のバランスが中心部と周辺部とで異なるためと考えられる。

より高精度の加工のためには、このような試料面上での場所による加工状態の差を無くすことが必要である。これには、反応ガスの速度分布と方向を試料面上で一定にするようなチャンバ構造の見直しと共に、チャンバ内で試料に何等かの機械的運動を加えて加工の平均化を計る方法も考えられる。

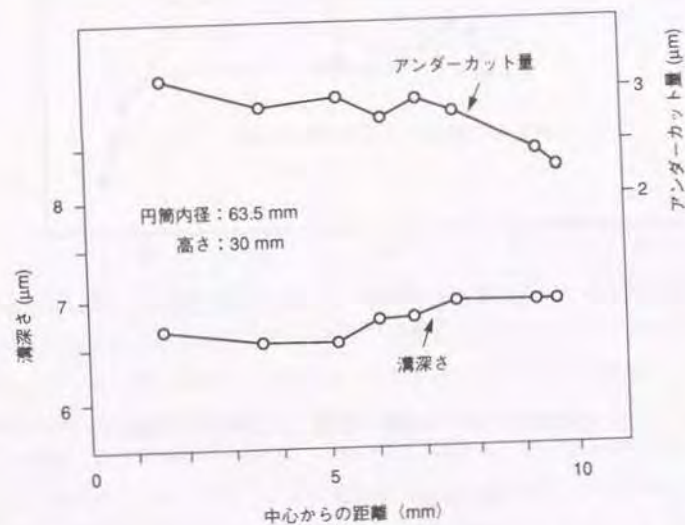


図5. 32 アンダーカット量、溝深さの試料上の位置による差異
材料：単結晶 Ge (1, 0, 0)

5. 5. 3 ホログラム素子の製作

以上の結果に基づき、製作プロセス全般を見直してホログラム素子の製作を行った。理想的には断面は二等辺三角形であることが望ましいが、RIEではイオンの機械的作用のため、格子底面に平坦部ができることはやむを得ず、図5. 33に示すような三角波となっている。なお、格子の反対面にはPbTe、ZnSによる反射防止膜をつけるようにした。

設定した加工プロセスは以下のようである。

- | | |
|--------------|--|
| ① Ge基板の洗浄と乾燥 | 単結晶(100)基板、直径25.4mm、厚さ3mm、 |
| ② 感光性レジストの塗布 | スピンコート |
| ③ プリベーク | 85°C |
| ④ 露光 | Crマスクによるコンタクト露光、
パターンのピッチ9.2μm、ライン幅4μm |
| ⑤ 現像 | |
| ⑥ リンス | |
| ⑦ ポストベーク | 80°C |
| ⑧ Al蒸着 | 膜厚250nm、電子ビーム蒸着、基板加熱 |
| ⑨ 感光性レジストの剥離 | アセトン浸漬+超音波洗浄 |
| ⑩ 感光性レジストの除去 | 発煙硝酸 |
| ⑪ 水洗、乾燥 | |
| ⑫ RIE | O ₂ 、添加量3mL/min、内径65mm、高さ30mmの円筒使用
目標深さ6.0~6.2μm |
| ⑬ Alマスクの除去 | リン酸50%水溶液、60°C |
| ⑭ 水洗、洗浄 | |
| ⑮ 反射防止膜の形成 | |

製作を行った10個の円板状ホログラム素子の回折効率の測定結果を表5. 6に示す。最大値は53.6%であり、10個の平均は48.5%である。

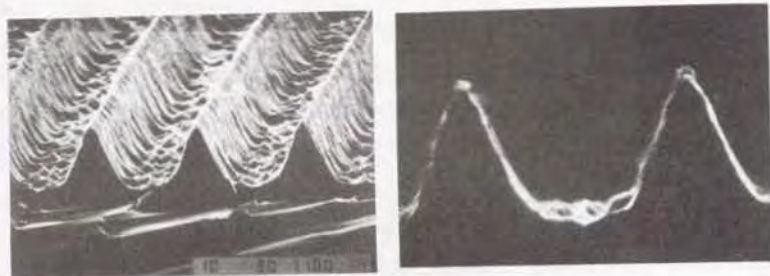


図5. 33 製作した三角波状断面のホログラム素子の格子形状
(ピッチ: 9.2 μ m)

表5. 6 製作した10個の円板状ホログラム素子の回折効率

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
回折効率 (%)	53.6	51.0	51.3	49.0	48.5	48.0	47.9	47.2	44.9	43.8	48.5

図5. 34は、製作した1個の素子について、入射角に対する回折効率の依存性を測定した結果であり、図5. 10に示した計算値と対比した。回折効率の最大値、および入射角依存性の傾向は計算値と実測値ではほぼ等しいが、回折効率の最大値を与える入射角は異なる。これは反射防止膜の影響と、両者間での格子断面形状の差の両者に起因すると考えられる。なお、ビーム形状は副走査方向においてもガウス分布に近い形を得ることができた。

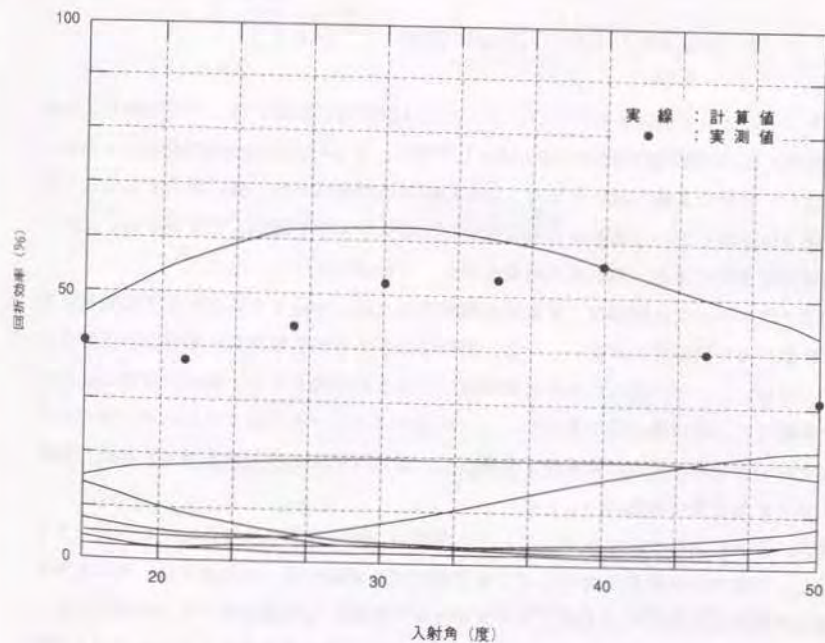


図5. 34 RIEにより製作したホログラム素子の回折効率の実測値と計算値

第5.6節 2次元スキャナの製作と画像形成

対象物による反射光の受光方式の検討から、1個のホログラム素子の形状を扇形にして開口面積を増大し、円板上に組み立てる構成によってホログラムスキャナを製作した。揺動ミラーと組合せて2次元スキャナを製作し、運動物体に対してCO₂レーザー光の走査を行い、その反射光より画像形成を試みて性能を確認した。

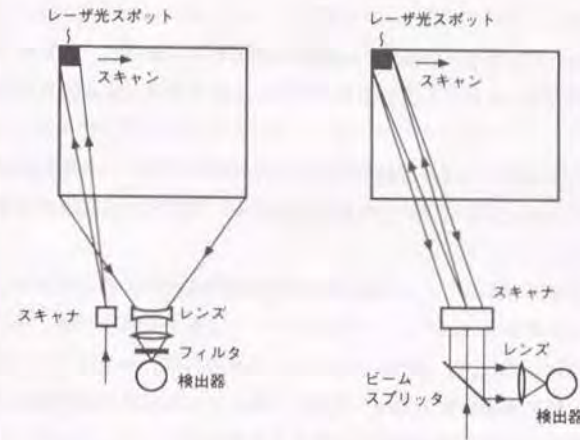
5.6.1 受光方式とホログラムの開口面積

スキャナによって偏向されたCO₂レーザー光は対象物に照射され、その反射光より画像を形成するが、反射光を受光する方法として図5.35のような2方式が考えられる。第1はレーザー光の走査と関わりなく、走査範囲の視野全体から一様に受光する方式である。第2は走査している場所からの反射光だけをスキャナを経由して受光する、スポット追尾受光方式である。両方式の特徴を表5.7に示す。

前者ではスキャナと関係なく反射光を捕捉するため、ホログラムスキャナは照射に対する性能のみを確保すればよい。一方、視野全体から赤外放射光などの外乱が入射するため、CO₂レーザーの波長に対する狭帯域フィルタが必要となる。後者では外部からの赤外放射光の入射は最小限であるが、レーザー光がスキャナを往復するためホログラムスキャナの回折効率に対する要求がより厳しく、また反射光の集光量を増すため開口面積を大きくする必要がある。

図5.16に示したホログラムディスクを用い、射出光学系に接近して焦電センサを設置し、対象物の反射光を受光して全体受光方式の実験を行った結果では、やはり対象物周辺の信号も入射されるため、ノイズが大きく認識には問題が多いことが認められ、受光はスポット追尾方式によることとした。従って、受光量を増すためホログラムの開口面積を大きくする必要がある。

一方、上記の実験ではホログラム素子の開口に合わせ、入射ビームをレンズによって直径2mmに絞ったが、その結果射出ビームの発散角は約10mradと大きくなり、遠方の対



(a) 全体受光方式

(b) スポット追尾受光方式

図5.35 受光方式の種類

表5.7 受光方式の比較

	全体受光方式	スポット追尾受光方式
受光系	大受光径化が容易 広角レンズが必要 狭帯域フィルタが必要	受光径はホログラム開口面積で決まる ビームスプリッタが必要
スキャナ	受光には関係なく開口面積は小さくてよい	高い回折効率と大きい開口面積が必要
その他	視野全体から赤外放射光等が入射し外乱となる	赤外放射光等の影響を受けにくい

象物上ではビーム径が大きくなって画像の分解能が低下する。従って、入射ビーム径を大きくして発散角を小さくすることが望ましく、この点からも開口面積は大きいことが望ましい。

開口面積を増大した場合、1枚の基板上に大きい複数のホログラムを作ることは困難であり、ホログラム素子をセクタごとに個別に製作し、円板上に位置決めを行って組み立てる構造にした。

ホログラム素子を扇形にすることが円板上の面積を有効に利用することになる。素子を取りつける円板の外径を156mmとし、1個のホログラム素子を直径50mm、厚さ3mmのGe基板より扇形形状に切り出すようにした。Ge基板の形状、およびフォトマスクを図5.36に示す。開口面積は約990mm²であり、図5.16に示した50.8mm径の1枚基板のホログラムディスクにおける97mm²に比し1桁大きい。

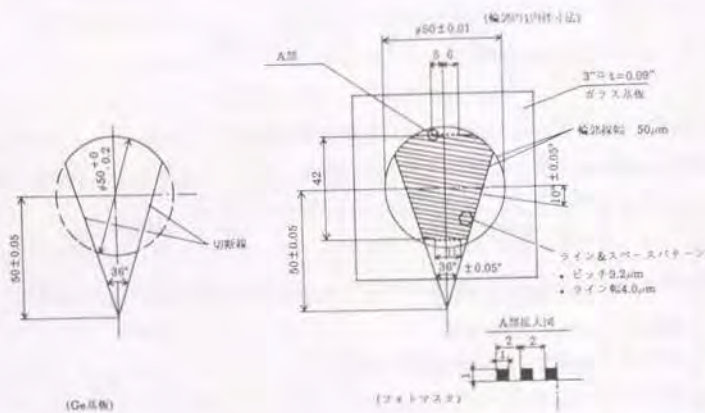


図5.36 扇形状のホログラム素子のGe基板とフォトマスク

ホログラムの格子ピッチを9.2μm、目標深さを6.3-6.5μmとして素子の製作を行った。完成したホログラム素子の回折効率を、中心、および中心から内側、外側へ10mm離れた位置の計3箇所において測定した。結果を図5.37に示す。回折効率が60%程度の素子、あるいは1個の素子上のばらつきの小さい素子も存在するが、素子内でのばらつきが20%近い素子も見られる。平均した回折効率は51.7%である。完成した扇形のホログラム素子と、これらを10個配列したホログラムディスクを図5.38に示す。

5.6.2 2次元スキャナの製作と画像形成

扇形ホログラム素子を用いて2次元スキャナを製作した。スキャナの組立図を図5.39に、外観を図5.40に示す。ホログラムディスク全体はZnSe窓を設けたケーシング内に収納されている。ホログラムによる走査角は、取り付け部があるため全角で13.3度であり、画像形成はこのうちの8.5度を用いて行うようにした。揺動ミラーの寸法は60x40mmであり、Au蒸着を行った。ホログラムへの入射ビーム径は10mmとし、出射ビームの発散角は2mradとなっている。

2次元スキャナを用い、走査したレーザー光の反射より対称物の像を形成する視覚センサの構成を図5.41に示す。

CO₂レーザー発振器から出たレーザー光はビームスプリッタを通り、回転円板に取りつけられたホログラム素子の下面に入射する。回折光は揺動ミラーによって副走査が行われ、対象領域を2次元的に走査する。ただしセンシングする対象はセンサより3-30mの距離にある物体であり、射出ビームは焦点を結んでいないので、スキャナを頂点とする3次元空間を走査していることになる。

物体による反射光は同様の径路を戻り、ビームスプリッタより検出器に入る。スキャナの角度割り出し信号と検出器からの振幅信号を同期をとって表示すれば、反射の明暗の像として対象物の形状を得ることができる。なお、レーザー光の変調を行って、対象物の位置による反射光の時間差を求めれば、距離計測が可能である。

ホログラム素子はセクタごとに組まれるため組立時の割り出し誤差があるので、角度割り出し信号はセクタごとに得る必要がある。まず最初に、回折光の一部を取り出し、

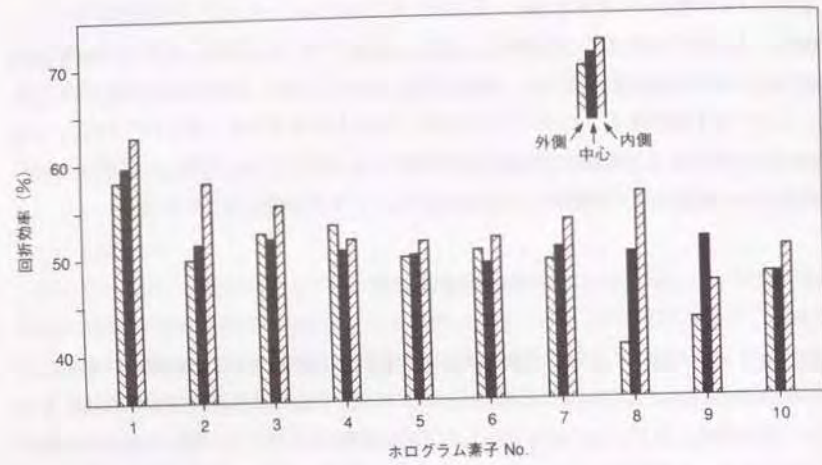
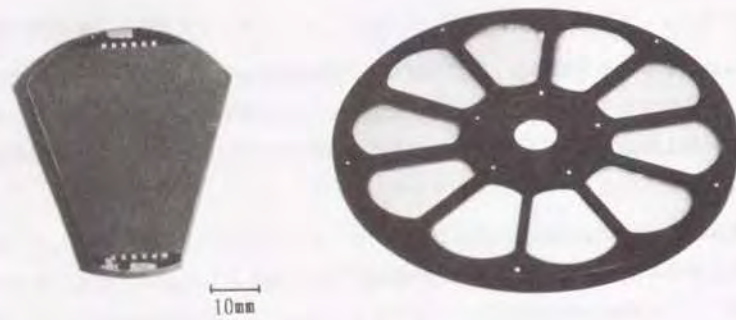


図5.37 扇形ホログラム素子の回折効率測定結果



(a) ホログラム素子

(b) 組み立てたホログラムディスク
(外径: 155mm)

図5.38 扇形状のホログラム素子とホログラムディスク

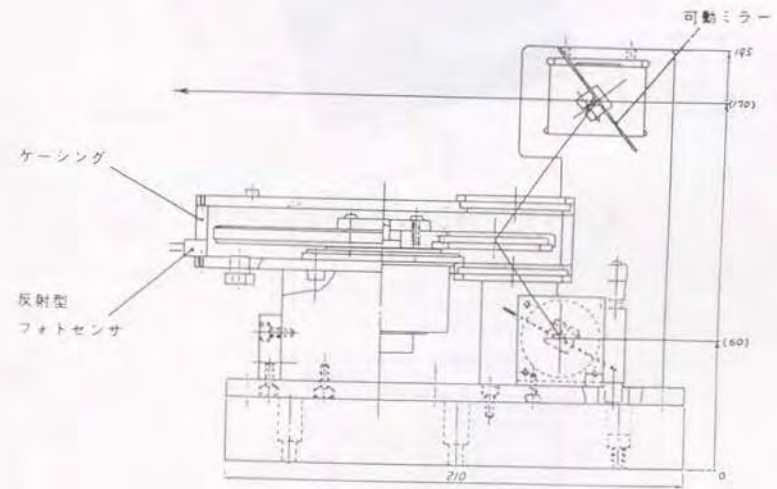
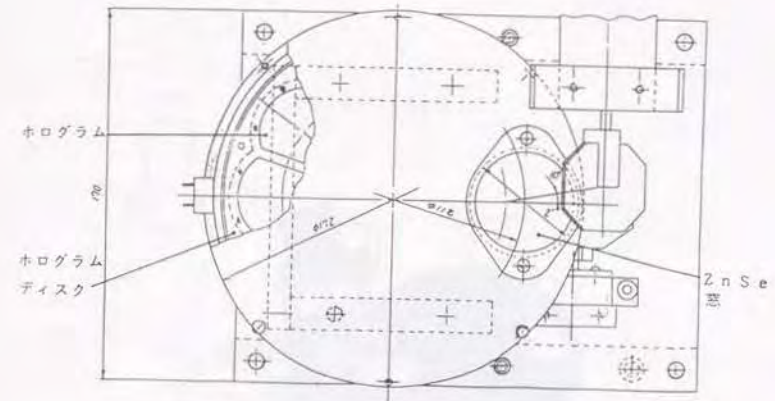


図5.39 2次元スキャナの組立図



図5. 40 完成した2次元スキャナの外觀

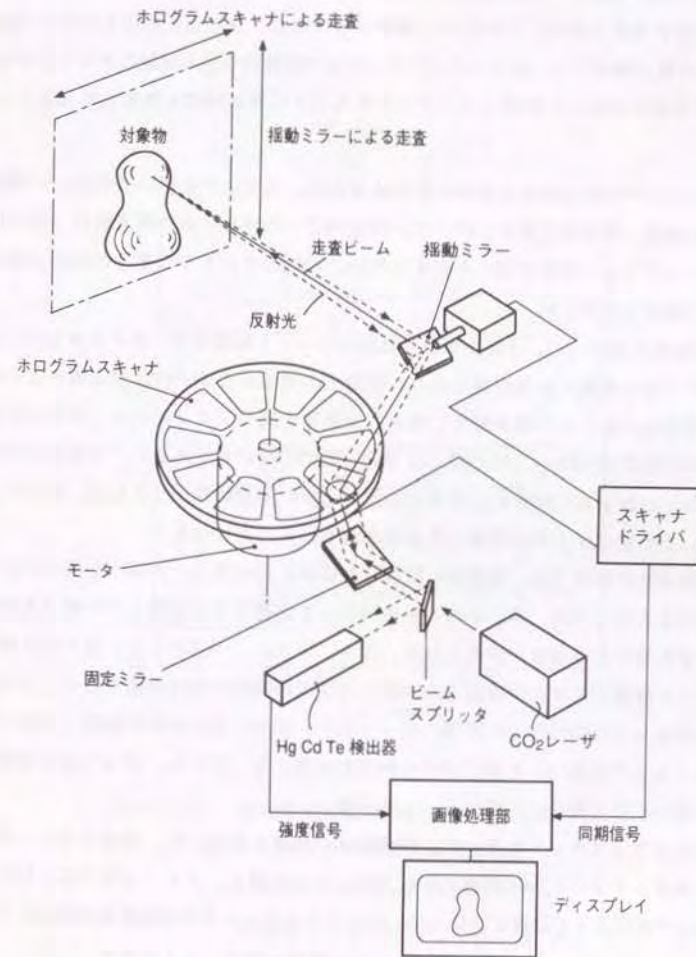


図5. 41 2次元スキャナを用いたレーザ走査による画像の形成

赤外検出器を用いて基準信号を得ることを試みたが、10個の素子間でのずれの発生があった。これは、個々の素子で回折光の強度と形状に差があり、信号の検出位置が異なる結果になるためと考えられる。このため、基準信号はホログラム素子を取りつけた円板の回転位置より取る構成にし、個々のホログラムからの画像取り込み開始のタイミングは、予め基準の画像を形成した結果より、ホログラムごとに遅れ時間を設定して得るようにした。

2次元スキャナの総合的な走査特性を求めため、スキャナを用いて形成した画像より走査の直線性、等速性の測定を行った。画像形成でのフレームの画素数は 128×128 である。ホログラムの特性を明らかにするため、10個のホログラム素子の内の1個の信号を用いて測定を実施した。

まず、直線性の測定では、上端が真直な発泡スチロール板を水平に置き走査を行った。水平な板の上端の画像は本来直線であり、画像での直線からのずれ量が走査による湾曲となる。板端面の高さを3箇所変えて測定した結果を図5. 42に示す。走査線の状態は、横方向の画素番号60~120の間では0~1画素の曲がりであるが、画素番号50から0に向かうにつれ下方に向かい、走査の左端では5-6画素の曲がりとなる。従って、レーザー光は以上の量だけ上方に湾曲して走査されていることになる。

次に、等速性の測定では、等間隔に配置した100mm角の等しい大きさを持つアルミ粗面板3枚の走査を行った。等しい幅の板を横切って走査すれば画像上での幅は本来等しく、そのずれ量から等速性が求められる。図5. 43に、一定のしきい値で板の領域の抽出を行った画像データと、垂直方向の90ライン目の画像の明暗強度を併せて示す。アルミ板の画像上での幅は26-28画素になっており、中央に置かれた対象物と比較して、左側ではつまった画像に、右側ではやや伸びた画像となっている。従って走査速度は画面左側に近づくほど速く、右側に近づくほど遅い。

製作した2次元スキャナを用いて、運動物体の画像を形成した。発泡スチロール型の人形を、スキャナより1.5mの距離の回転ステージ上に置き、ステージを回転させながらCO₂レーザー光によって走査を行なった。ホログラムディスクの回転数を6000rpmとし、画像を7.1フレーム/sで形成した。得られた画像を図5. 44に示す。

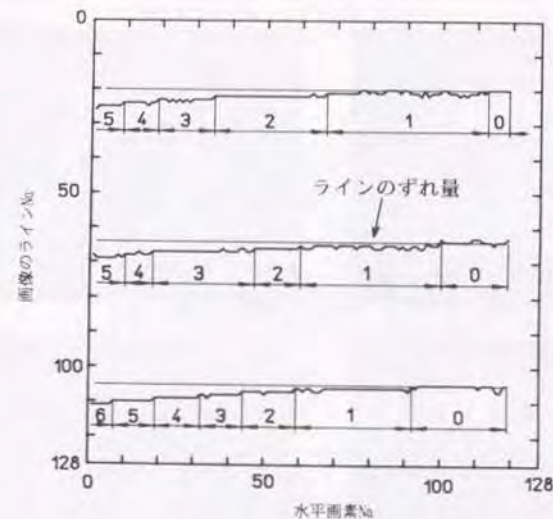


図5. 42 板端面の画像上の曲がりにより測定した
2次元スキャナの走査直線性
対象物との距離: 1.5m
対象物: 3種の水平な位置に置いた
上端の真直な発泡スチロール板

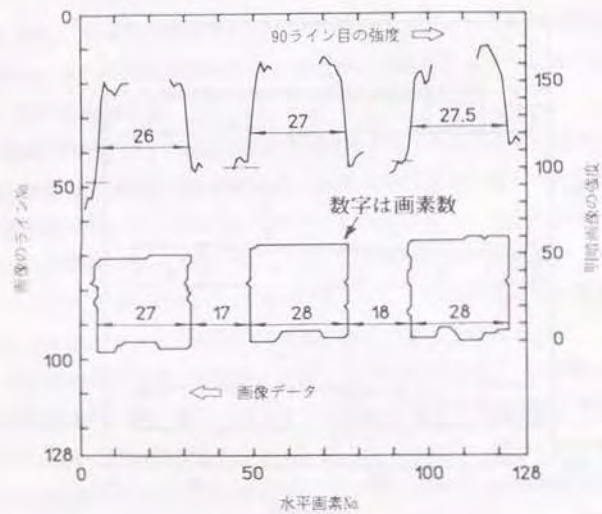
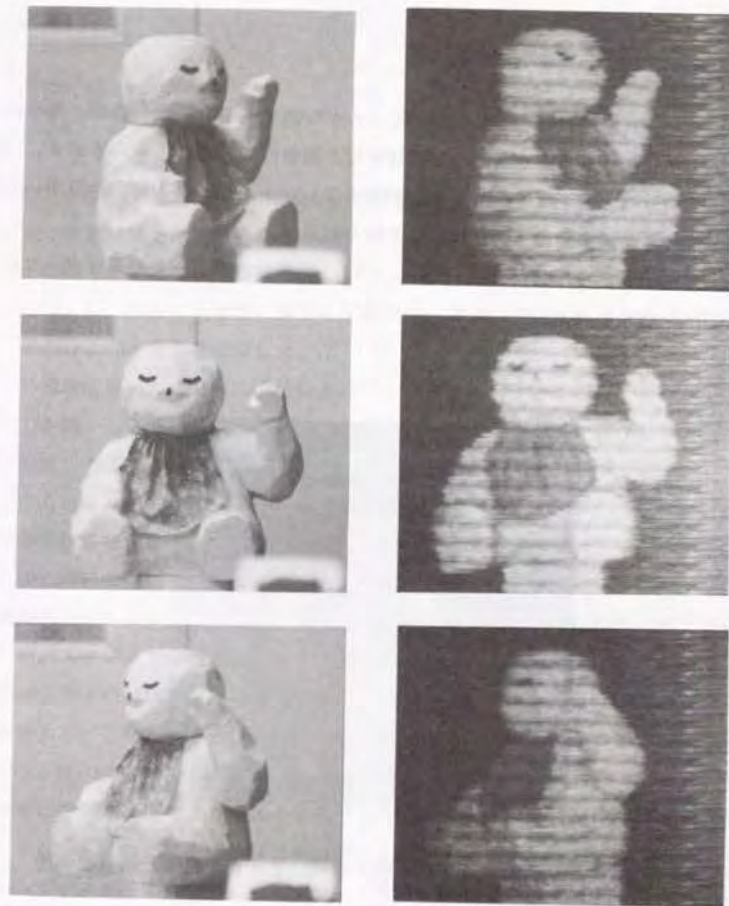


図5. 43 等しい大きさの板の画像上の幅より測定した2次元スキャナの走査等速性
対象物：等間隔に配置した3枚の100mm角のアルミ板
距離：1.5m



対象物の可視光像

CO₂レーザー光の走査により得られた画像

図5. 44 2次元走査による運動物体の像
(7.1フレーム/s)

距離：1.5m 対象物の回転数：1rpm

図のように、対象物の姿を十分認識することが可能である。画面の縞は、各ホログラム内、および10個のホログラムでの回折効率などの特性の差によるものである。10個のホログラムのうち、素子内での回折効率の差の少ないホログラム1個のみを用いて形成した図5. 45の画像では、縞はほとんど見られない。

以上の結果から、製作した2次元スキャナは、災害対応ロボットの視覚センサに十分使用が可能と判断される。



図5. 45 1個のホログラム素子を用いて走査を行った場合の画像

第5.7節 総括

災害現場で活動を行うロボットに搭載し、対象物をCO₂レーザ光によって走査して、その反射光より物体像を形成する視覚センサに用いるための、CO₂レーザ用ホログラムスキャナに関して研究を行った。

まず、CO₂レーザ光の対象物に対する反射特性、および煙などに対する透過特性を測定し、その有効性と課題を確認した。

次に、計算機を用いたCGHの手法によってホログラムパターンを設計を行ない、ブロック出力を縮小してA1膜の明暗パターンによるホログラム素子を製作し、走査の集光性、直線性、等速性の測定を行った。

ホログラムスキャナでは回折効率を高めることが主要な課題となるが、これにはパターンが立体形状をなす表面レリーフ形ホログラムが必要である。ホログラムの格子断面形状と回折効率の関係について計算を行い、必要な形状を得るためにRIE加工を採用した。深溝格子のホログラムの場合、不等ピッチの曲線パターンでは設計、加工が複雑となるため、スキャナでは直線等ピッチの単純ホログラムを用いることとした。

回折率は格子の形状、寸法によって影響を受け、その加工精度は回折光のビーム形状にも影響する。このため、目標の形状を得るRIE条件、およびその加工精度に関して実験を行った。結果に基づきホログラム素子の加工を行い、その回折効率を測定した。

センサでは微弱な反射光より画像を形成するため、ホログラムの開口面積は大きくなくてはならない。このため、扇形状のホログラム素子を円板上に組立てる構造によってホログラムディスクを製作した。揺動ミラーと組み合わせて2次元スキャナを製作し、走査特性を画像によって評価を行うとともに、反射光より運動物体の像を形成し、性能の総合評価を行った。

得られた結果をまとめて以下に示す。

(1) CO₂レーザ光の反射は、金属板では比較的散乱が大きく光軸への傾きが若干あっても反射信号が得られる。一般的な物体の認識では10⁻⁷迄の反射率の検出が可能で

あることが望ましい。従って、ホログラムスキャナでは回折効率と開口面積を高め、光の損失を最小限にすることが必要である。また、疑似煙などによる測定では、可視光に比しCO₂レーザ光の透過性が大きいことが確認された。

(2) CGHによるホログラムの設計プログラムを作成し、走査における集光性、直線性、等速性を考慮したパターンを設計を行ない、設計結果のプロット出力を縮小してマスクを製作し、ZnSe基板上のAl膜による明暗パターンをホログラム素子を製作した。走査特性の測定では、ビームは設計目標では平行光であるが約10mradの発散角を持ち、直線性、等速性は、設計目標の2%に対して、測定範囲でそれぞれ0.5%、4%程度であった。また、回折効率は約5%であった。

(3) 表面レリーフ形ホログラムの回折効率の計算のための計算プログラムを作成し、Ge基板の鋸歯状深溝断面のホログラムについて計算を行った結果に基づいて、RIEにより製作を行ったホログラム素子の測定結果では、回折効率の実測値は17.9~18.2%であり、計算値の60%程度に比し低いが、形状により実測値の方が高い場合も存在した。

(4) さらに詳細な計算結果では、回折効率に対しては格子形状、寸法の両者による影響が大きく、Ge基板では二等辺三角形断面で格子深さと幅の比が1の場合に、70%程度の回折効率となることが明らかとなった。また、ZnSe、KClのような低屈折率の基板材料によって、より高い回折効率を得られ、KClでは100%に近い値となることが判明した。

(5) CGHによるホログラムでは、パターンは不等ピッチの曲線となり、格子の設計、加工が複雑となるため、直線等ピッチの単純ホログラムを用いることが望ましく、Ge円板上に10セクタを有する単純パターンをホログラムディスクを製作し、等速性、直線性の性能の検証を行った。測定によれば、走査長の1/2-1/3に当たる中央部では、走査特性の誤差は1-1.5%であり、画像形成での実用上の問題はないと判断される。

(6) 回折光のビーム形状の測定結果では、回折角の分布に基づく干渉に起因すると見られるビーム内での強度分布が存在し、ビーム形状を劣化していることが認められた。このような現象は、ホログラム素子上での格子の形状、寸法のばらつきに起因すると考えられる。

(7) RIEにおいては、O₂ガス流量によりアンダーカット量を変化して格子側壁の傾き角を制御することが可能であり、傾き角はAlマスクの寸法によらずほぼ一定で

ある。格子の深さは加工面上の場所によって差異があるが、試料を円筒で囲み、表面のガス流れを均一化することにより、深さの精度が向上することが認められた。また、場所によるアンダーカット量の変化もあるため、より高い加工精度を得るには、チャンバ構造の見直し、試料への機械的運動の付加などが必要と考えられる。

(8) 加工実験結果に基づいて製作した、裏面反射防止膜付きのホログラム素子では平均48.5%の回折効率が得られた。計算結果との対比では、回折効率の値はほぼ等しいが、最大値を与える入射角に差異があり、反射防止膜の影響、および格子形状の差に起因すると考えられる。

(9) 反射光をスキャナを通じて検出器に導くスポット受光方式では、ホログラムの開口面積を大きくすることが必要であり、扇形のホログラム素子を円板上に組み立てる構造によってホログラムスキャナを製作した。平均的回折効率は51.7%であった。揺動ミラーと組み合わせて2次元スキャナを構成し、画像によって走査特性を測定した結果では、128画素の画像に対し、直線性は走査端で5-6画素、等速性は1-2画素の差異であった。

(10) 7.1フレーム/sの速度において、走査したCO₂レーザ光の反射光より運動物体の画像形成を行った結果、十分に対象像を認識することができ、製作したホログラムスキャナは、災害対応ロボットの視覚センサに使用することが十分可能と判断される。画像には明暗の縞が存在するが、ホログラム素子における回折効率などの差によるものであり、RIE加工精度を向上させることによって、さらに画質を向上させ得るものと考えられる。

文 献

- 1) 内藤宏之 : 防災ロボット用視覚センサ、光技術コンタクト、26, 7, (1988)16.
- 2) J. Y. Wang : Imaging CO₂ Laser Field Test, Appl. Optics, 23, 15, (1984)2565.
- 3) D. M. Zuk : Three-Dimensional Vision System for the Adaptive Suspension Vehicle, E. R. I. M. Report, 170400-3-F, (1983).
- 4) I. Cindrich : Image Scanning by Rotation of a Hologram, Appl. Opt., 6, (1967) 1531.
- 5) Y. Ono and N. Nishida : Holographic Laser Scanners Using Generalised Zone Plates, Appl. Optics, 21, 24, (1982)4542-4548.
- 6) H. Ikeda, Y. Yamazaki, F. Yamagishi, I. Sebata and T. Inagaki : Shallow-Type Truncated Symbol-Reading Point-Of-Sale Hologram Scanner, Appl. Optics, 24, 9, (1985)1366-1370.
- 7) C. J. Kramer : Holographic Optics: Design and Applications, Proc. SPIE, 883, (1988)230-244.
- 8) W-H Lee : Holographic Grating Scanners with Aberration Corrections, Appl. Optics, 16, 5, (1977)1392-1399.
- 9) 船戸広義 : レーザプリンタ用ホログラムスキャナ、Ricoh Technical Report, 10, 12, (1983)10.
- 10) Y. Ishii and K. Murata : Optimum Holographic Disk Scanners with Bow-locus Corrections, SPIE 673 Int. Conf. on Holography Applications, (1986) 426-433.
- 11) R. C. Fairchild and J. R. Fienup : Computer Originated Aspheric Holographic Elements, Opt. Eng., 21, (1982) 133-140.
- 12) 石井行弘 : ホログラムを用いた光ビーム偏向素子の最適設計法、応用物理、56, 3, (1987)368.
- 13) M. G. Moharam and T. K. Gaylord : Diffraction Analysis of Dielectric Surface-Relief Gratings, J. Opt. Soc. Am., 72, 10, (1982)1385.
- 14) K. Rokushima, J. Yamakita, S. Mori, and K. Tominaga : Unified Approach to Wave Diffraction by Space-Time Periodic Anisotropic Media, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, MTT-35, 11, (1987)937.
- 15) K. Yokomori : Dielectric Surface-relief Gratings with Diffraction Efficiency, Appl. Optics, 23, 14, (1984)2303.
- 16) C. J. Kramer : Holographic Laser Scanners for Nonimpact Printing, Laser Focus, June, (1981)71.

第6章 レーザ走査による 実装基板検査装置

第6.1節 緒言

製品の小型化、高機能化に伴って、回路基板上の電子部品はますます小型化され、かつ高密度に実装されるようになってきた。実装基板上に正しく電子部品がマウントされているか、またはんだ接合が正確かどうかを検査することは非常に重要なことであり、従来多くは人手によってきたが、高密度化に伴って次第に人間の識別能力を越えるようになってきた。従って、検査の自動化が強く望まれる状況にある¹⁾。

実装状態での不具合をチップ部品を例にとりて図6.1に示す。欠落、位置ずれなど、2次的に判別の可能なものもあるが、チップ立ち、浮き、さらにはんだ接合部の状態など、3次的な測定が必要なものがほとんどである。これは、IC、LSIのピン接続部でも同様である。

従って、実装基板検査装置は、対象物が非常に小さく高密度である3次元測定装置であり、しかも、量産工場の中でインラインの測定を実施するためには、チップマウント機と同等の速度を有し、たとえば250×330mm程度の大きさの基板全面を1分以下の時間で検査することが必要である。これには従来より多くの試みがなされているが、検査速度、および測定精度の面で十分な性能が実現されていないのが現状である。

測定の方法には、画像情報を用いるパッシブな方法と、レーザを用いるアクティブな方法がある。前者ではCCDカメラを複数配置して立体情報を得ることが多いが²⁾、多くの場合照明が問題であり、高さを変えた輪帯状のカラー照明を行う³⁾などの工夫がなされている。また、スリット光を斜めより照射して光切断を行う⁴⁾、液晶によってコード化したパターンを投影する⁵⁾、などの方法もある。しかしながら、通常用いられるCCDは走査速度が遅く、測定時間が長くなってインラインの検査は困難である。

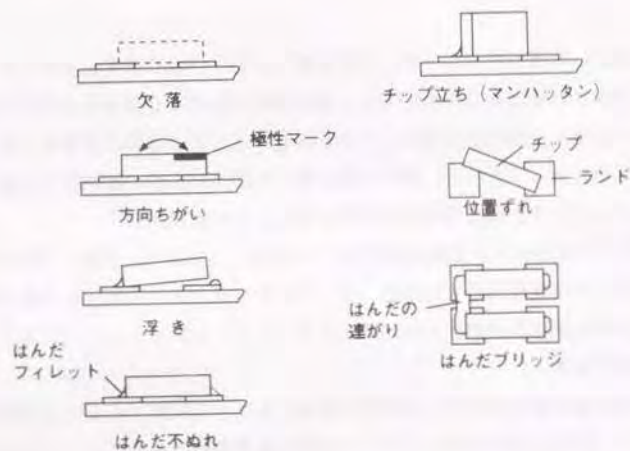


図6.1 回路基板上でのチップ部品の
実装の不具合状態

後者では、対象物体からの反射条件に影響される問題はあるが、レーザ光を照射し反射光の戻る位置より三角測量を行う方式を用いることができる。ただし、測定ヘッドを機械的に移動する方法⁹⁾では速度に限界がある。

ここではアクティブな方式を用い、レーザ光の走査はポリゴンミラーと $f\theta$ レンズを用いた系により、基板の全幅を横切って行う構成にした。基板は長手方向に機械送りがなされ、両者を併用して全面的な走査が行われる。レーザ光の対象物による反射光は、再び $f\theta$ レンズ、ポリゴンミラーを経由して戻り、入射光軸に対して角度を持って設置されたスポット光位置検出器によって反射光の位置を求め、基準位置と比較して三角測量を行う。

以上の構成によって測定の高速度化を計ることができるが、走査は広い測定範囲の3次元空間に対して行うことになる。従って、走査光学系は3次元空間に対して精度、分解能を確保する必要があり、その条件は厳しくなる。このため、走査光学系を中心として以下に述べる研究を実施した。

まず、光学系全体の構成と、 $f\theta$ レンズ、ポリゴンミラー、集光レンズなどの相互の特性関係を検討して設計を実施し、実験装置を製作して測定実験を行い、測定の可能性を明らかにし、基本的な問題を把握した。実験結果に基づき、特に測定精度に及ぼす要因と問題の解決方法に検討を加えた。これらの結果を基盤として走査光学系の設計を行い、光学的性能を補完するデータ処理段階での補正を加え、インラインで検査を実施する実用機を製作した。

第6.2節 実験装置による基本検討

装置の構成と仕様を検討し、光学系の設計を行って実験装置を製作し、基本性能に関する測定実験を実施した。

6.2.1 原理と構成

レーザ走査による3次元計測の概念を図6.2に示す。レーザビームを走査して測定対象に入射し、対象物からの反射光の位置を入射光軸と角度を持つ方向において、スポット光位置検出素子により測定する。

原理は三角測量であって、挟角 α を基線長 L に対して求めることによって、基準位置からの距離 h は

$$h = L \cdot (\tan \alpha)^{-1} \quad (6.1)$$

によって測定される。基板面からの反射光の位置と、その上の電子部品からの反射光の

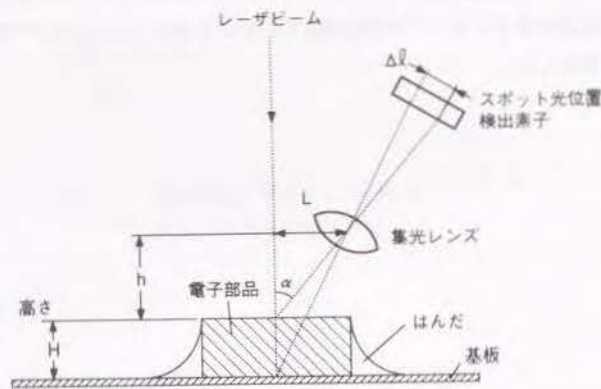


図6.2 3次元計測の概念

位置との差、 Δl を検出素子上で求めることで挟角の差 $\Delta \alpha$ が測定され、部品表面の基板に対する高さ H を得ることができる。

高さを正確に測定する条件として次の2点がある。

(1) 基線長 L が安定していること。すなわち、レーザビームが常に同一平面上にあること。

(2) 挟角 α が正確に測れること。すなわち、光学系、位置検出素子などは、 $\Delta \alpha$ に比例して十分な精度で Δl が求められる性能を有していること。

装置の実用化時の目標仕様を表6.1に示す。基板の最大寸法は250×300mmであるが、レーザによる走査長は128mmとし、幅の広い基板に対しては移動して2回走査を行う。高さの測定範囲は10mm、目標分解能は0.025mmである。

基本特性の検討のため、実験装置を製作した。装置の構成を図6.3に示す。

光源にはHe-Neレーザを用い、レーザ光をビームエキスパンダによって拡大した後ポリゴンミラーによって走査するが、基板には電子部品がさまざまな位置と高さで存在するので、影を生じないように照射し、かつ高さ測定のみでなく基板上の2次元的位置も測定する必要があるため、 $f\theta$ レンズを介して測定対象を走査する。 $f\theta$ レンズの構成は像側でテレセントリックとした。テレセントリックとは主光線が常に焦点面に垂直に入射するレンズの特性をいい、この特性を満たすことにより照明による影を生じることがない。ただし、測定対象面はその高さにより光軸方向に移動するので、 $f\theta$ レンズのフォーカス特性は高さ測定範囲を考慮して定める必要がある。

反射光は同一の径路を戻ってポリゴンミラーで反射されるが、集光レンズとスポット光位置検出器は光軸に対し角度をもって配置されており、対象物の高さによって入射角が変化し、受光面上の結像位置の差となって測定が行われる。検出器は、測定物に隠れる死角やはんだなどの方向性のある強い反射の影響を避けるため、ビーム走査面を挟んで対称に2個設置し、両者のデータを統合して測定を行う。測定対象の実装基板は端子を治具に固定した直立状態とし、1軸ステージによって連続的に移動する。

スポット光位置検出器として用いる素子には、CCD、またはPSD (Position Sensitive Device) がある。感光部はいずれもフォトダイオードであるので、感度については差は少ない。しかしながら、CCDでは読み出しが画素順次となるので、スポット位置の検出に無駄時間が多くなる。一方、連続した抵抗膜を用いるPSDでは測定速

表6. 1 実装基板検査装置の目標仕様

項目	仕様
検査工程	部品の基板へのマウント後の検査 はんだリフロー後の検査
基板の大きさ	50×50mm～ 最大 250×300mm
検査時間	50×50mmに対し 2s 250×300mmに対し 60s
レーザー走査長	128mm (250mm幅基板の場合は2回走査)
高さ測定範囲	最大10mm
分解能	X、Y方向 0.05mm Z(高さ)方向 0.025mm
光源	半導体レーザー (実験装置ではHe-Neレーザー)

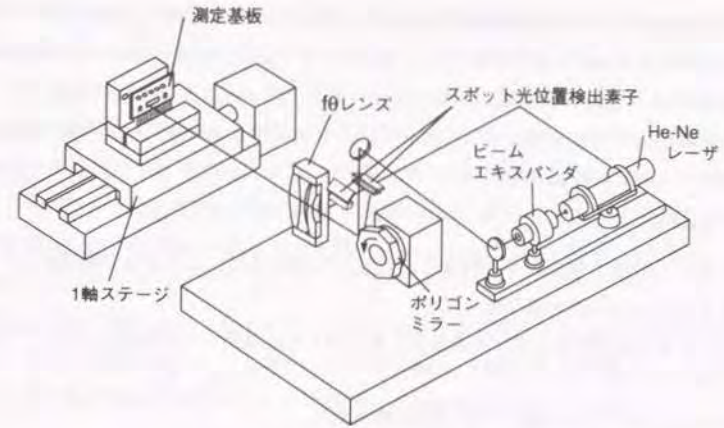


図6. 3 3次元計測実験装置の構成

度を十分早くできる。ただし信号は1個しか得られないため、スポットが複数発生するような場合には、出力はそれらの重心位置となり、分離することができない欠点がある。

装置では測定速度の点からPSDを用いた。PSDの受光面は長さ3mm、幅1mmであり、高さ測定範囲の10mmに対して小さいため、基板上での高さ変化は縮小して受光されるが、その値はfθレンズ、およびPSD集光レンズの焦点距離によって定まることになる。

6. 2. 2 実験装置の光学系の設計

面数がNであるポリゴンミラーの回転による1面当たりの幾何学的走査角 θ_p は次のようである。

$$\theta_p = 4\pi / N \quad (6. 2)$$

しかしながら、入射ビームの径は有限であり、ミラー面の端部にビームがかかるわけ

られを生じるので、ミラー面の辺長さのうち、少なくとも入射ビーム径に相当する分は走査に利用できない。この状態をブランキングといい、アンブランキングの部分が走査域である。

焦点距離が f である $f \theta$ レンズによって、スポット径 d ($1/e^2$) を得るには、波長 λ において入射ビーム径 D を次のようにとる⁷⁾。

$$D = \frac{k \lambda f}{d} \quad (6.3)$$

k はビーム形状、受光素子の特性などによって異なるが、ここでは経験的に 1.8 を取る。 D がブランキングの最小値となる。

また、 $f \theta$ レンズにおいて、走査長 Y と Y に対する走査角 θ の関係は次のようである。

$$Y = f \theta \quad (6.4)$$

θ はブランキングを考慮して定める必要がある。

θ に対する、実効走査角 θ_p の比はビームの有効使用率を示し、これをアンブランキング率 U として

$$U = \frac{\theta_p}{\theta} = \frac{Y N}{4 \pi f} \quad (6.5)$$

であり、ポリゴンミラー面数と $f \theta$ レンズの焦点距離の比によって定まる。

データレートを τ とすると、1 ラインの走査時間 (アンブランキング時間) T_v は次のようになる。

$$T_v = \frac{Y \tau}{d} = \frac{4 \pi f U}{N} \quad (6.6)$$

なお、ポリゴンミラーの 1 回転当たりの時間 T_r は次のようになる。

$$T_r = \frac{T_v N}{U} = \frac{4 \pi f \tau}{d} \quad (6.7)$$

すなわち、与えられた分解能 d に対し、ポリゴンミラーの回転数は面数 N に関係なく $f \theta$ レンズの焦点距離 f と、データレート τ によって定まる。

以上の関係より、走査面の寸法を各々 50x50mm、128x330mm とし、2 種の $f \theta$ レンズ

の焦点距離に対し、ポリゴンミラー面数と面走査時間の関係を計算した結果を表 6. 2 に示す。ブランキング量は入射ビーム径と等しいとし、 $d = 0.05\text{mm}$ 、 $\tau = 2\mu\text{s} / d$ とした。ある走査時間を得るためには、 $f \theta$ レンズの焦点距離が短いほど、ポリゴンミラーの面数は少なく、寸法が小さくなる。一方、その回転数は高い方向になる。

実験での走査長をまず 25mm に定め、 $f \theta$ レンズの焦点距離を 100mm として設計を行った。レンズ設計上は走査長を 120mm 程度まで設定した。ポリゴンミラーの面数は 24 とし、外径を 88mm、厚さを 21mm とした。設計した $f \theta$ レンズの光路図を図 6. 4 に示す。なお、 F 値は 66.7 となっている。

本設計により試作を行った $f \theta$ レンズについて、集光ビームのスポット形状とデフォーカス特性の測定を行った。入射ビーム径は 2.4mm、位置は走査中央とし、スポットの大きさを市販の機械走査型のビームプロファイル測定器によって計測した。

表 6. 2 $f \theta$ レンズの焦点距離とポリゴンミラー面数、走査時間の関係

		$f \theta$ レンズ焦点距離 (mm)	150			100		
			40	44	48	25	28	32
走 査 面 寸 法	50 ×	ポリゴン面数	40	44	48	25	28	32
	50	走査時間 (s)	1.9	1.7	1.6	2.0	1.8	1.6
mm	128 ×	ポリゴン面数	10	12	16	6	8	9
	300	走査時間 (s)	45.3	37.8	28.2	50.4	37.8	33.6

データレート : $2\mu\text{s} / \text{ドット}$
スポット径 : 0.05mm

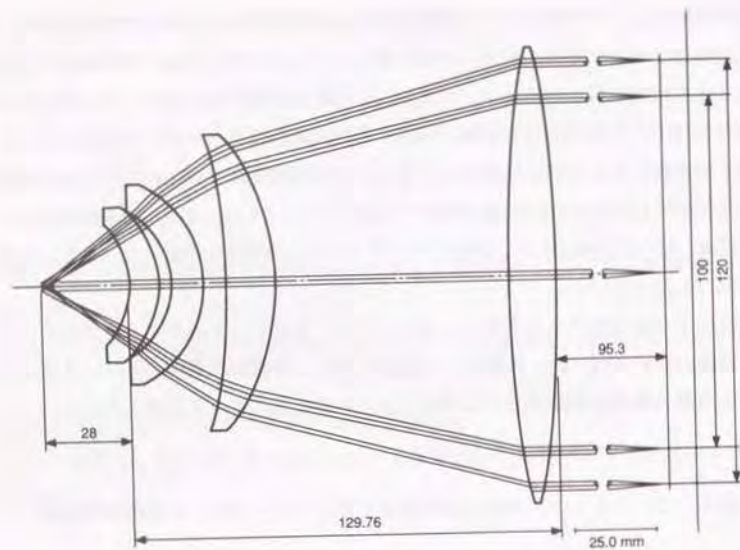


図6. 4 実験装置のための $f\theta$ レンズ

焦点距離：100 mm
走査長：最大120 mm

測定結果を図6. 5に示す。主走査方向と副走査方向でのスポット径の差は $5\mu\text{m}$ 以内で良好であるが、デフォーカス3mmにおいて、スポット径は焦点位置における $37\mu\text{m}$ に対し $75\mu\text{m}$ とかなり大きくなる。測定範囲の $\pm 5\text{mm}$ がデフォーカスの範囲であり、この領域に対して焦点深度を確保し、スポット径の変動を減少する必要がある。

スポット径は $f\theta$ レンズへの入射ビーム径によって変化する。異なる入射ビーム径に対し、スポット径とデフォーカスの関係を計算した結果を図6. 6に示す。入射ビーム径を小さくした場合、スポット径は大きくなるが焦点深度は増す。測定上必要な焦点深度を得るためには、スポット径が大きくなって入射ビーム径を小さくすることが必要である。

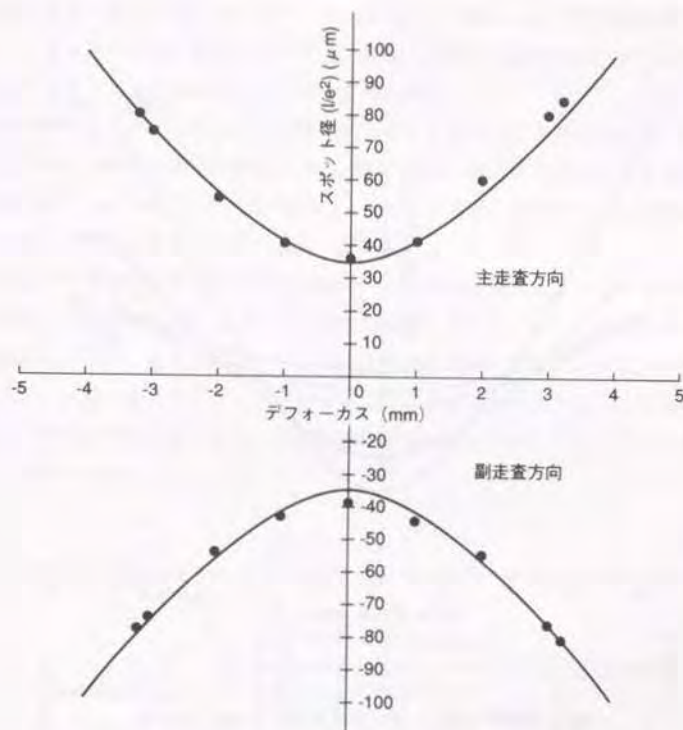


図6. 5 実験装置用 $f\theta$ レンズのデフォーカスに対するスポット径測定結果

入射ビーム径：2.4 mm
位置：走査中心

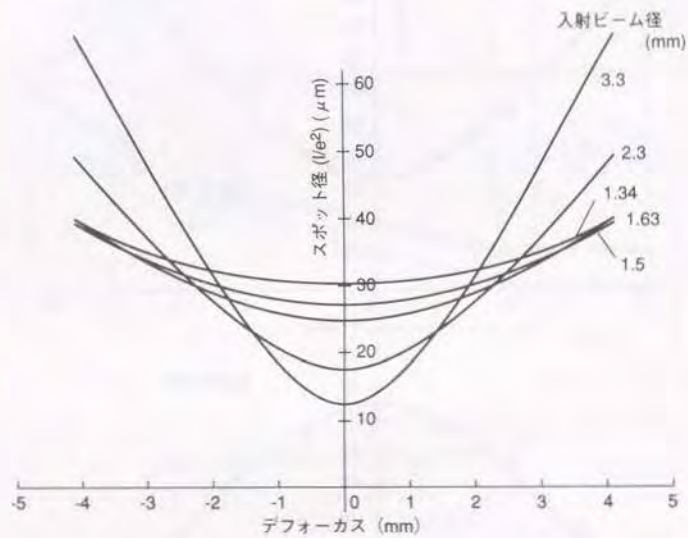


図6.6 $f\theta$ レンズへの入射ビーム径に対する
デフォーカスとスポット径の関係

焦点距離：100mm
位置：走査中心

高さ情報を得るには、光軸に対して角度を持つ方向より反射光を検出する必要がある。このため図6.7に示すように、対象物から戻り反射光に対し、副走査方向の面内において、 $f\theta$ レンズの光軸に対してPSD集光レンズの中心位置を δ だけ偏心させる。これは、偏心量 δ に相当する $f\theta$ レンズへの入射角 α だけ傾いた面に対象物を見ることになるので、 α を光切断角と呼ぶことにする。測定は対象物の高さ変化、すなわち反射位置の変化による差 $\Delta\alpha$ を求めることによって行われる。

$\Delta\alpha$ はPSD面上でのスポットの変位量から求められるが、その感度は偏心量 δ 、およびPSD集光レンズの焦点距離により定まる。10mmの高さ変化に対するPSD面上での変位量を各々2mm, 3mmに設定した場合の、 δ に対するPSD集光レンズの焦点距離、およびスポット径を計算した結果を表6.3に示す。

PSD面の長さは3mmであり、有効に活用するには偏心量を大きくして光切断角を増やすことが望ましいが、比例して $f\theta$ レンズの有効径とポリゴンミラーの厚さは大きくなるため制限を受ける。また、集光レンズの焦点距離を大きくすることも拡大率を増す結果となるが、PSD面上のスポット径も大きくなり分解能が低下する。このため、両者を勘案して値を定める必要がある。実験装置では偏心量を6mmにとり、PSD集光レンズの焦点距離を250mmとした。

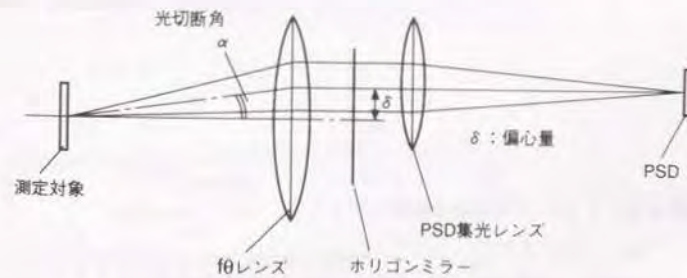


図6.7 PSD集光レンズの偏心による高さ情報の検出

表6.3 PSD上でのビーム変位と偏心量が与えられた場合の
PSD集光レンズの焦点距離とスポット径

高さ変化10mmに対するPSD 上でのビーム変位 (mm)	偏心量 δ (mm)	集光レンズ 焦点距離 (mm)	PSD上での スポット径 (mm)
2	3	700	0.36
3		1050	0.54
2	4.5	467	0.24
3		700	0.36
2	6	350	0.18
3		525	0.27

$f\theta$ レンズ焦点距離: 100mm

$f\theta$ レンズ、PSD集光レンズ間の距離: 50mm

光切断角 α は、 $f\theta$ レンズの焦点距離を f として

$$\alpha = \tan^{-1}(\delta/f) \quad (6.8)$$

であり、以上の場合 3.4度であって、基板上での 10mm の高さ変化は PSD 上で 1.9mm の変位となる。従って PSD の測定範囲には余裕があるが、実験ではスポット径を中心に諸元を設定した。

6.2.3 測定実験

以上の光学系を用いた実験装置を製作し、測定実験を行った。

PSDの構成は図6.8に示す通りで、高抵抗体の両面が抵抗層になっており、両端に信号取り出し電極が形成されている。光の入射により発生した電荷は入射位置と電極との間の抵抗値に対応して2個の電極に分配され出力される。従って、出力電流比を計算することにより入射位置が決定される。

各電極の出力 I_1 、 I_2 より高さ信号 H は次のようにして得る。

$$H = \frac{I_1}{I_1 + I_2} \cdot L \quad (6.9)$$

$I_1 + I_2$ は光量に関係するので、輝度信号として用いることができる。

回路では PSD 上の 3mm のスポット移動に対して 2V の出力となり、1mm の高さ変化に対して約 0.1V の出力変化が得られる。基板上に 1mm の高さの段差を設けた対象物の測定結果は図6.9に示す通りで、若干ノイズが大きい、ほぼ予測通りの出力が得られている。

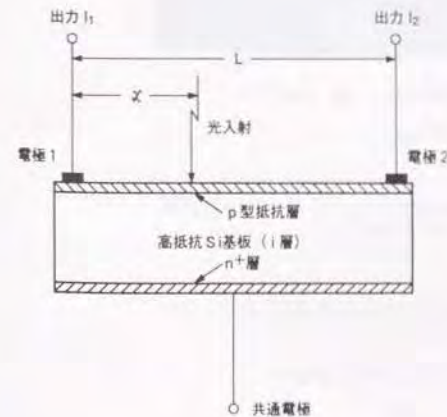
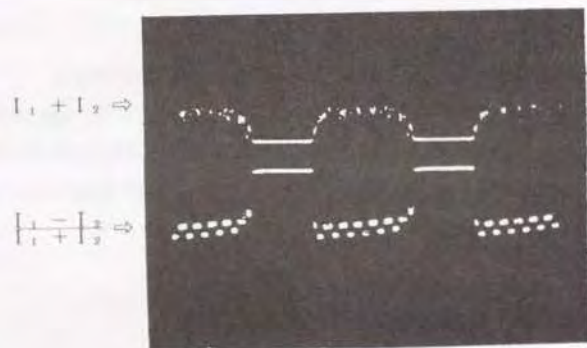


図6.8 PSDの構成



縦（光量）：0.2V/Div. 横：2ms/Div.
（高さ）：0.5V/Div.

図6.9 高さ1mmの段差に対するPSD出力信号

図6.10は回路基板上の高さ1.1mmの黒色表面を持つICの測定結果で、表面の高さデータが得られていることがわかる。また図6.11は、基板にはんだ接合されたICリード部を横切って走査した結果で、光量はかなり変動しているが高さデータとしては得られている。

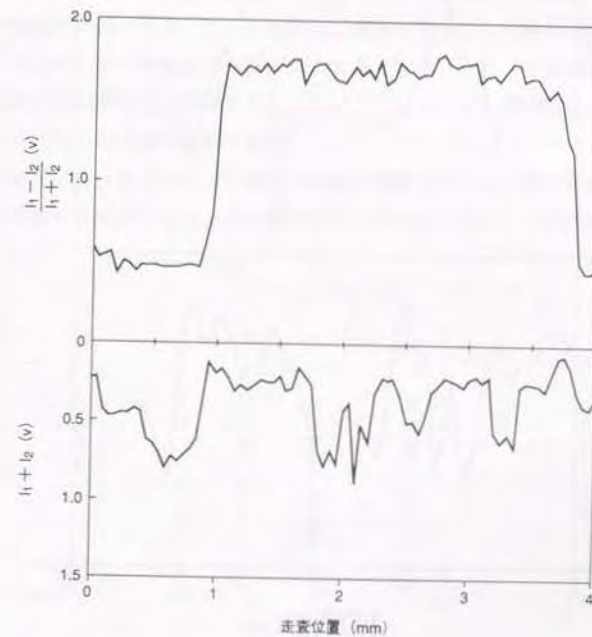


図6.10 回路基板上の部品の測定結果

対象物：黒色表面に白文字のあるIC
高さ：1.1mm

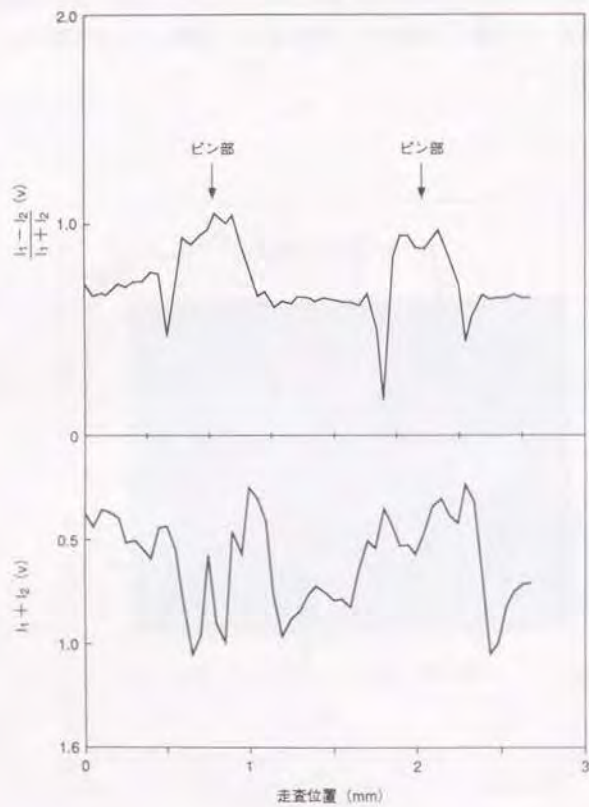


図6. 11 回路基板にはんだ付けされた
ICピン部の測定結果

次に、PSDへの入射光量の測定を行った。光源に出力2mWのHe-Neレーザを用い、測定面上にパワーメータを置いて測定した照射出力は350μWであった。PSDの位置にパワーメータを置き、種々の部品について反射光強度の測定を行った結果では、黒色のIC表面や暗緑色のチップ抵抗からの入力は5μW程度であるが、ほとんどの部品は10μW以上であり、PSDへの入力としては十分であると考えられる。

図6. 12は、白色セラミック基板からの入射光量を1として規格化した、各種の測定対象からの入射光量を示す。はんだフィレット部のように、反射光に強い指向性のあるものの測定が問題となる。はんだ部の正反射光がPSDに入射しにくいのみでなく、部分的に光量に大きい変動を生じノイズが大きくなる。また、反射光が多重反射し、基板上に複数の輝点ができる問題もある。このことから、広い幅にわたってゲイン調整を自動的に行うなどの考慮が必要である。

以上の結果から、本方式による測定は可能と判断されたが、測定分解能を十分高め、ノイズの影響を低減するには、光切断角をさらに大きくすることが必須であると考えられる。

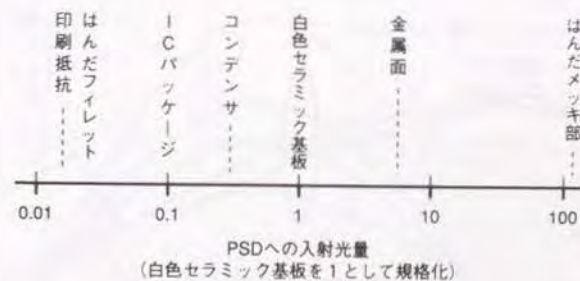


図6. 12 対象物によるPSDへの
入射光量の差 (相対値)

第6.3節 測定精度の向上に関する検討

高さ測定精度の向上のため、光切断角の増加を計ると共に、伴って発生する光学特性上の問題、およびポリゴンミラーの精度に関して検討を行った。

6.3.1 反射ミラーによる光切断角の増加

前節に述べた実験装置での光切断角は3.4度であって、測定上基本的に小さく、またPSD受光面にも余裕があるため、光切断角を増加する必要がある。しかしながら、PSD集光レンズの偏心による方法では、 $f\theta$ レンズの口径、ポリゴンミラーの厚さなど光学系が大きくなりすぎる問題がある。このため、図6.13に示すように、 $f\theta$ レンズと測定面の間の光路に反射ミラー（以下光切断ミラーと呼ぶ）を介在させ、ミラーへの反射によって光切断角を大きくする構成にした。

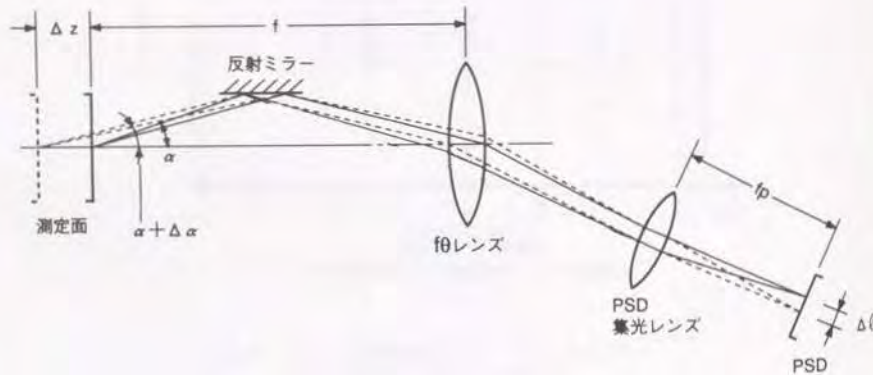


図6.13 反射ミラーの設置による光切断角の増加

測定対象の高さ変化 Δz の検出と光切断角 α の関係は、ミラー面と光軸が平行である場合には次のようになる。 Δz による反射光の角度変化 $\Delta\alpha$ は

$$\tan(\alpha + \Delta\alpha) = \frac{f \cdot \tan \alpha}{f + \Delta z} \quad (6.10)$$

ここに、 f ： $f\theta$ レンズの焦点距離

$$\tan \Delta\alpha = \frac{\Delta z \cdot \tan \alpha}{f(\tan^2 \alpha + 1 + \Delta z/f)} \quad (6.11)$$

また、PSD上での受光位置の変化 Δl との関係は、PSD集光レンズの焦点距離を f_p とすると

$$\begin{aligned} \Delta l &= f_p \cdot \tan \Delta\alpha \\ &\approx \frac{f_p \cdot \Delta z \cdot \tan \alpha}{f(\tan^2 \alpha + 1)} \quad (6.12) \end{aligned}$$

$\Delta l/\Delta z$ は光切断における検出倍率であり、光切断角、およびPSD集光レンズと $f\theta$ レンズの焦点距離の比に関係する。これらの関係の計算結果を図6.14に示す。

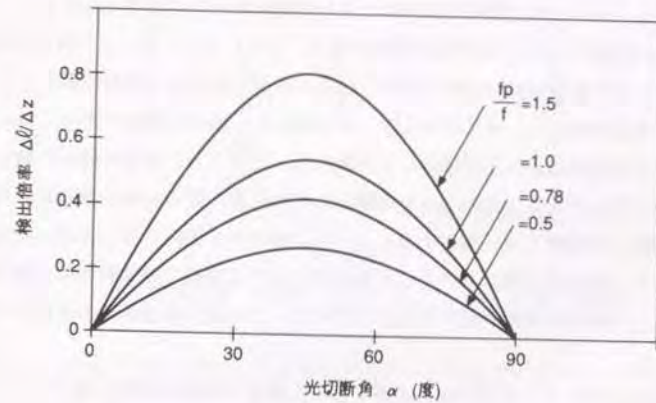


図6.14 $f\theta$ レンズとPSD集光レンズの焦点距離の比に対する光切断角と検出倍率の関係

検出倍率は光切断角とともに増加し、45度のときに最大となる。また、 f_0/f が大き
いほど増加する。ここでは光学系全体の機械的配置の検討より、光切断角を17度に設定
した。

一方、反射面の移動に伴う副走査方向での反射ビームの角度差が大きくなるため、非
点収差によるPSD上での長辺方向と短辺方向のベストフォーカス位置の差と、それに
伴うスポット形状の乱れも大きくなる。

PSD上で、スポットの長辺、短辺各方向の2サイクル/mmでのMTF (Modulation
Transfer Function) が等しくなる焦点位置を基準として、対象物の高さ変化 $\pm 4\text{mm}$ に
対するPSD面上のスポット位置と形状を、PSD集光レンズの焦点距離100、125mm
の各々について計算した結果を図6.15に示す。

対象物が遠のく、すなわち低い場合はPSD短辺方向に長くなり、近づく高い場合は
長辺方向に長くなる。両焦点距離を比較すると、焦点距離100mmの場合、 $1 \times 3\text{mm}$ である
PSDの受光面に納まっており、かつスポット形状も比較すれば若干小さい。従って、
次の段階の実験ではPSD集光レンズの焦点距離を100mmとした。なお、非点収差はシ
リンドリカルレンズによって補正することも可能であるが、計測結果はビーム強度の重
心位置より求められるため、形状の乱れは大きい問題にならないと考えられる。

以上の検討より設計を行った光学系の配置を図6.16に示す。 f_0/f は1となる。
ポリゴンミラーへの光束は直径10mmであり、けられを生じないよう反射位置をミラー面
の中央にできるだけ寄せた。ポリゴンミラーは10面とし、厚さは20mmである。

装置を以上の光学系によって再構成して実験を行ったところ、平坦な面を計測してい
るにもかかわらず、PSD出力からは平坦面としての信号が得られない現象が認められ
た。この原因は、光切断ミラー面が $f\theta$ レンズの光軸を含む面内にないため、測定面よ
りポリゴンミラー面までの間において、走査中央に比べ走査端での反射光の光路が長
くなることによって像面の移動が発生するためであり、その量は光切断角の大きさと共
に増加する。

平坦な測定面に対して、全長25mmの走査を行った場合の像面の移動に基づく、PSD
上での主光線の変位を高さ0、および $\pm 4\text{mm}$ の高さにおいて計算した結果を図6.17
に示す。測定面が平面であっても、走査に伴うPSD上での主光線の位置が移動するた
め、走査端では見かけ上高さが低い信号となる。

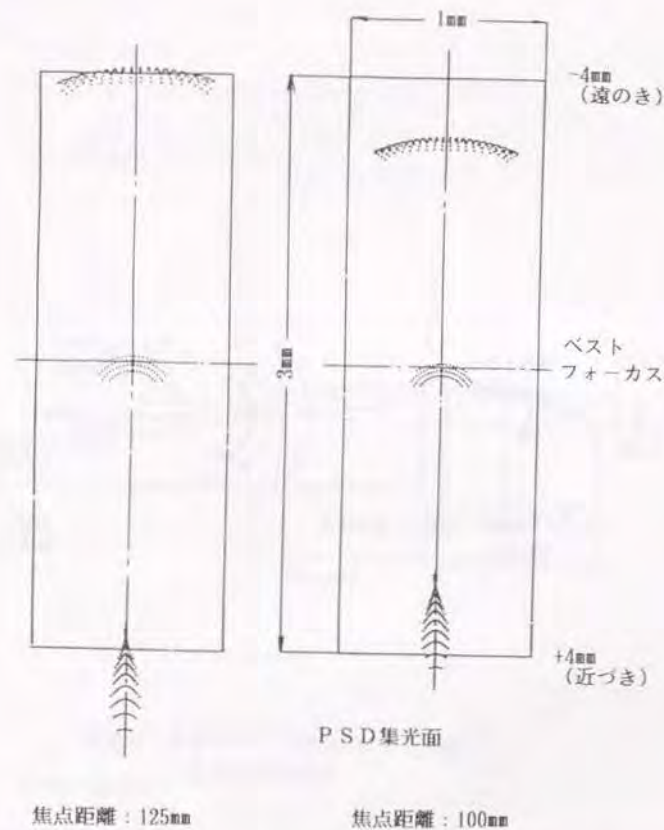


図6.15 集光レンズ焦点距離とPSD面上でのスポット形状

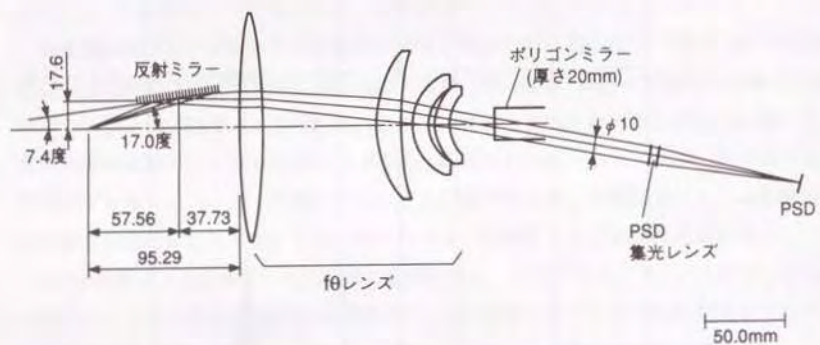


図6. 16 反射ミラーを設置した場合の光学系の配置

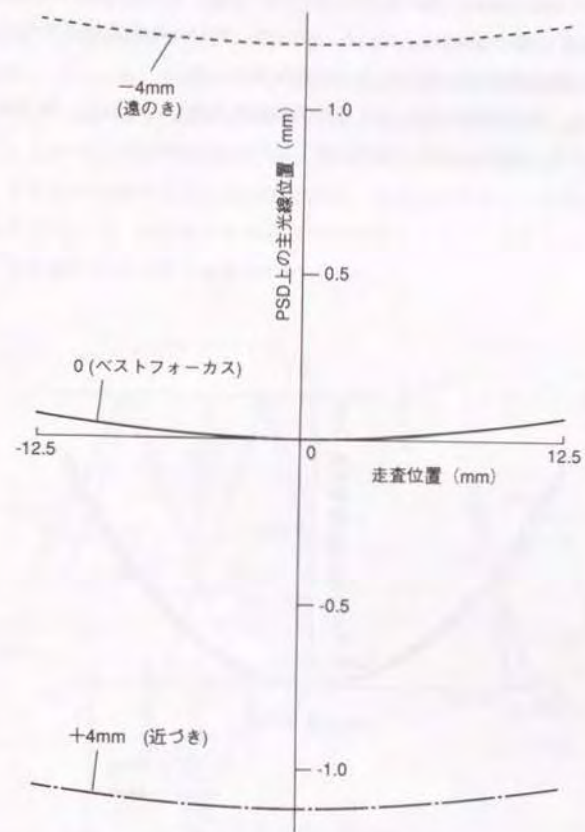


図6. 17 各測定面高さにおける走査位置に対するPSD上の主光線の位置

図6. 18は、各測定高さと走査位置におけるPSD上の主光線の位置の、走査中央での位置に対する差分を求めたものである。差分量は全長25mmの走査端で約70 μm となる。この光学系では、4mmの高さ変化に対するPSD上での主光線の位置変化は1.2mmであって、約0.3の縮小率になっている。従って、約21 μm の測定誤差を生じることになる。また、差分量は測定面の高さによって異なっている。

対策としては、像面移動を小さくする光学系配置の検討とともに、信号処理段階での補正が考えられる。補正は3次元空間に対して行うことになる。

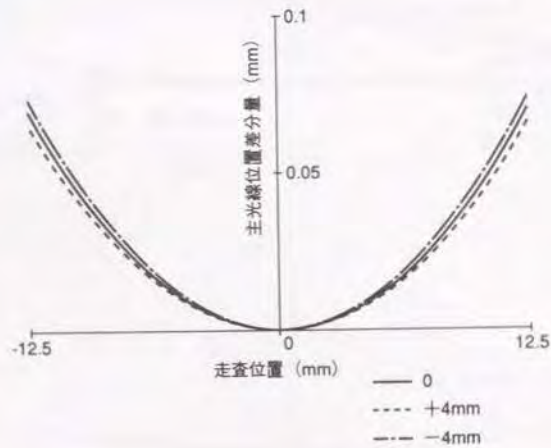


図6. 18 走査位置に対する主光線変位の差分量

6. 3. 2 ポリゴンミラーの面倒れ

ポリゴンミラーの面倒れは、図6. 19に示すように、測定面に対する入射光の位置の変化となり、さらに反射光もポリゴンミラーを経由するため、高さ測定結果に大きい影響を及ぼす。このため、面倒れと高さ測定誤差 Δz との関係を検討した。

ポリゴンミラー面の傾き $\Delta\beta$ により、光路は $2\Delta\beta$ 傾いて $f\theta$ レンズに入射する。この場合のビームのX方向の位置ずれ Δx は、 $f\theta$ レンズの焦点距離を f として、 $2f\Delta\beta$ となる。PSDに入射するビームの角度差は、X方向にスポットが移動したことによる光切断角の差 $\Delta\alpha$ と、測定面からの反射光が再度ポリゴンミラーによって反射されることから、その傾きによる差 $2\Delta\beta$ との和になる。

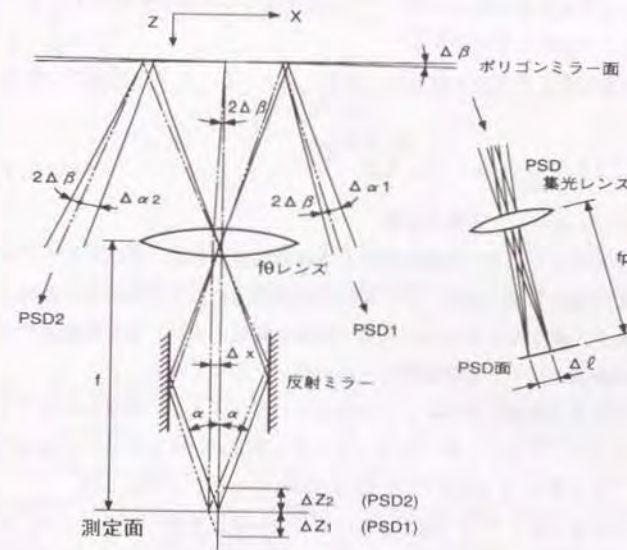


図6. 19 ポリゴンミラーの面倒れによるPSDへの入射角度の誤差

幾何学的関係から

$$\Delta x / \Delta z = \tan(\alpha \pm \Delta \alpha) \quad (6.13)$$

$$\tan(\alpha \pm \Delta \alpha) = \frac{f \tan \alpha}{f \pm 2f \Delta \beta / \tan(\alpha \pm \Delta \alpha)} \quad (6.14)$$

正負号は2個のPSDの各々に対しての。これより

$$\tan \Delta \alpha = \frac{2 \Delta \beta}{1 + \tan^2 \alpha + 2 \Delta \beta \tan \alpha} \quad (6.15)$$

$\Delta \beta$ は微小であるから

$$\Delta \alpha \approx \frac{2 \Delta \beta}{1 + \tan^2 \alpha} \quad (6.16)$$

従って、ポリゴンミラーの面倒れは4倍近くに拡大されてPSDへの入射角度差となる。

PSD上での受光位置誤差 Δl は、PSD集光レンズの焦点距離を f 。として

$$\Delta l = f \cdot (\tan \Delta \alpha + 2 \Delta \beta) \quad (6.17)$$

となり、等価的な高さ変化 Δz は(6.11)式と(6.17)式より、次のようになる。

$$\Delta z = \frac{2f(2 + \tan^2 \alpha) \Delta \beta}{\tan \alpha} \quad (6.18)$$

ここに、 f : $f \theta$ レンズの焦点距離

すなわち、ポリゴンミラーの面倒れによる高さ測定誤差は、光切断角と $f \theta$ レンズの焦点距離により変化する。図6.20は高さ測定誤差に対する面倒れの影響 $\Delta z / \Delta \beta$ を、光切断角と、異なる $f \theta$ レンズの焦点距離の関係において求めた結果であり、 $f \theta$ レンズの焦点距離が短く、光切断角の大きい場合に小さくなる。

$f \theta$ レンズの焦点距離を100mm、光切断角を17度とすると、面倒れに対する高さ検出誤差 $\Delta z / \Delta \beta$ は、 $7.5 \mu\text{m} / \text{秒}$ となり、 Δz を $\pm 25 \mu\text{m}$ にするためには相当の精度が必要であって、 $\Delta \beta$ を ± 3.3 秒以下にしなければならないことがわかる。

ただし、本装置ではPSD 2個を光軸に対して対称に配置しているため、両PSDでは高さ検出誤差は逆方向になる。そのため、2個の信号を統合処理した後では見かけ上面倒れによる誤差は小さくなるが、片側だけのデータを用いる場合もあるので、可能な限りの精度を得る必要がある。

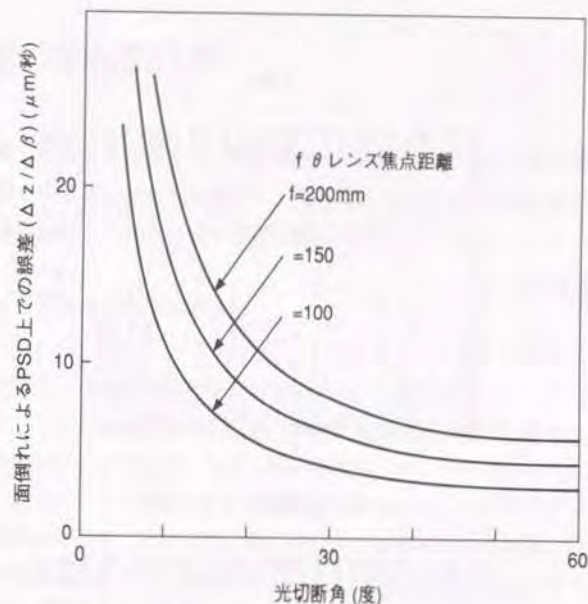
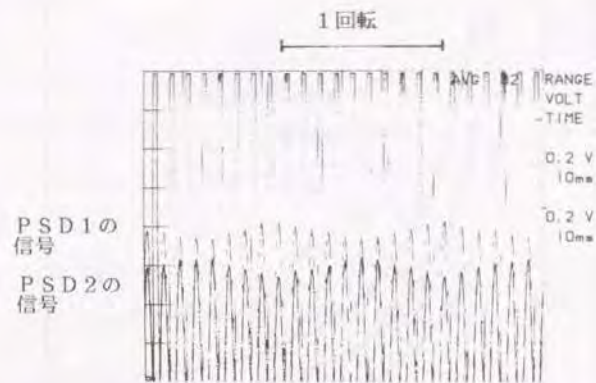


図6.20 $f \theta$ レンズ焦点距離、および光切断角のポリゴンミラー面倒れによるPSD上の測定誤差に与える影響

実験装置上で、平面度 0.01mm 以下のアルミナセラミック平板からのPSD出力信号をポリゴンミラーの回転と同期して記録し、面倒れを測定した。測定結果を図6.21に示す。(a)は面倒れ調整の不十分な場合で、測定高さにして $280 \mu\text{m}$ 、倒れ誤差に換算して28秒の誤差が発生しているが、2個のPSDでは逆方向にはほぼ同じ信号が出ていることがわかる。(b)は調整を進行させた場合で、倒れ誤差は7秒程度となっている。ポリゴンミラー面倒れによる誤差は短い時間間隔で発生するため、高さの周期の短い測定が多い本装置では測定精度に与える影響が大きく、その精度には留意する必要がある。



(a) 組立調整の不十分な場合



(b) 調整後の結果

図6.21 ポリゴンミラーの面倒れの測定

第6.4節 実用機の設計と製作

以上の実験、検討結果を踏まえ、実用機の設計と製作を行った。実用機では光源には小型化と取扱いの容易な点より半導体レーザを用いた。また、測定対象の基板が大きくなるため、基板をテーブル上に水平に置く構成とした。

6.4.1 実用機の光学系の設計

実験では走査長は25mmであり、走査角 θ は ± 7.162 度であったが、実用機では走査長128mmに対し、 $f\theta$ レンズの焦点距離が100mmのままでは ± 35.81 度となる。測定精度上は焦点距離の短いことが望ましいが、歪曲収差は $\tan^3 \theta$ に比例するため高次の収差が発生する。さらに、テレセントリック性についても、光線の平行度は走査長と焦点距離の比に影響されるため、その確保に多くのレンズ枚数が必要となる。以上のことから $f\theta$ レンズの焦点距離を増して走査角を小さくし、高次収差を押さえるとともにテレセントリック性を確保するようにした。

また光学系では、広い範囲の反射特性を持つ対象物を扱うことから、走査特性とともに受光光量にも考慮を要する。対象物からの散乱光の強度分布が各方向に一律と仮定すると、受光光量の強度は $f\theta$ レンズの焦点距離の二乗に反比例し、 $f\theta$ レンズの有効径、ポリゴンミラー面の面積に比例する。

さらに、走査端での受光光量が低下する問題がある。これは図6.22に示すように、走査端に近づくにつれ、光軸に対するポリゴンミラー面の角度が小さくなるため、反射光がレンズの周辺によってけられを生ずることに起因する。このことから、 $f\theta$ レンズの有効径を拡大する必要がある。

以上の検討より、 $f\theta$ レンズの焦点距離を150mmとし、口径を大きくしてF値を35とした。ポリゴンミラーの外接円径は75mm、面数を10、厚さを35mmとした。回転数は1600rpmである。PSD集光レンズの焦点距離は110mmとし、 $f\theta$ レンズの焦点距離との比は0.73となる。

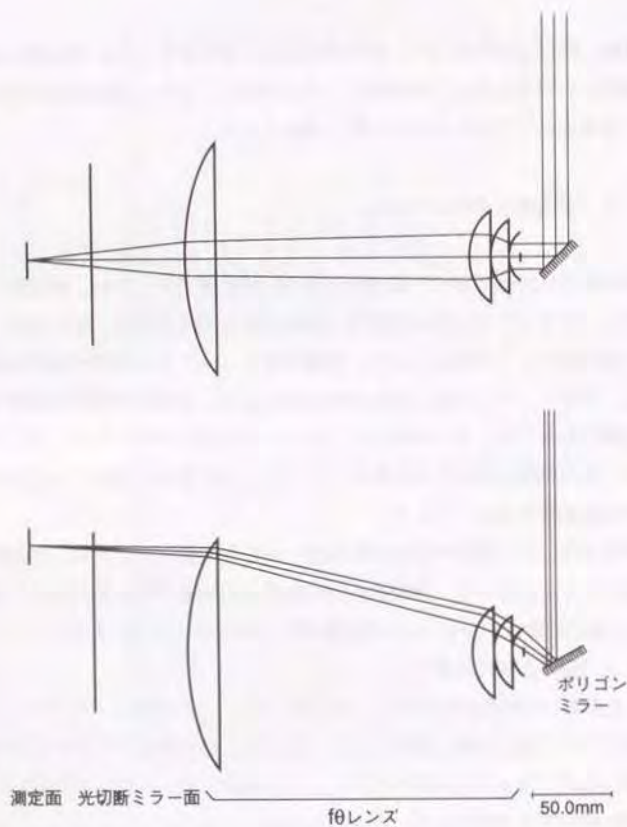


図6. 22 ポリゴンミラーの回転に伴う
走査端での光量の低下

$f\theta$ レンズの構成は、実験装置では第1レンズをメニスカス凸レンズとした変形オルソメーター型であったため、収差補正を行う上で第1、第2レンズがほぼ半球に近い形となり、加工上難しい。実用機では、第1レンズを凹メニスカスレンズとして半球形状をなくし、加工しやすい形状にした。PSD集光レンズは2群3枚構成とした。また、ポリゴンミラーでは精度確保のため、すでに新聞編集用スキャナなどにおいて面倒れ精度として2-5秒を得ている構造を援用し、動的精度で10秒以下を確保するようにした。

$f\theta$ レンズの光路図を図6. 23に示す。また走査の等速性、テレセントリック性を図6. 24に示す。半導体レーザーの波長は780nmを基準とするが、波長変動があるため3種類の波長に対して計算を行った結果を示す。波長変動は $f\theta$ 特性に影響を与えることがわかる。

解像力について、10サイクル/mmの正弦波に対するMTFとデフォーカスの計算結果を図6. 25に示す。基板面にベストフォーカス位置を置くと、基板からの最大高さ10mmでのMTF値が低くなるため、基板面より2.5mmの高さにベストフォーカス位置を設定するようにした。

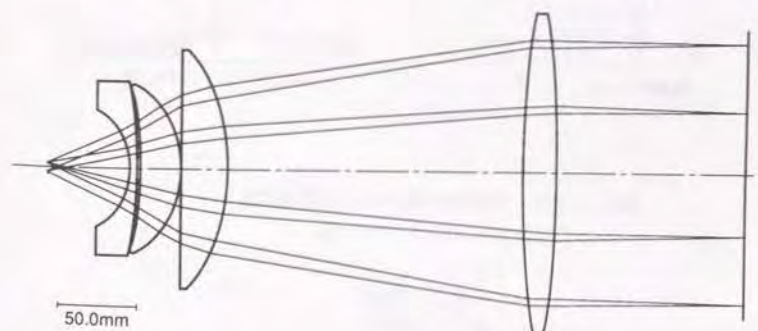


図6. 23 実用機の $f\theta$ レンズの光路図

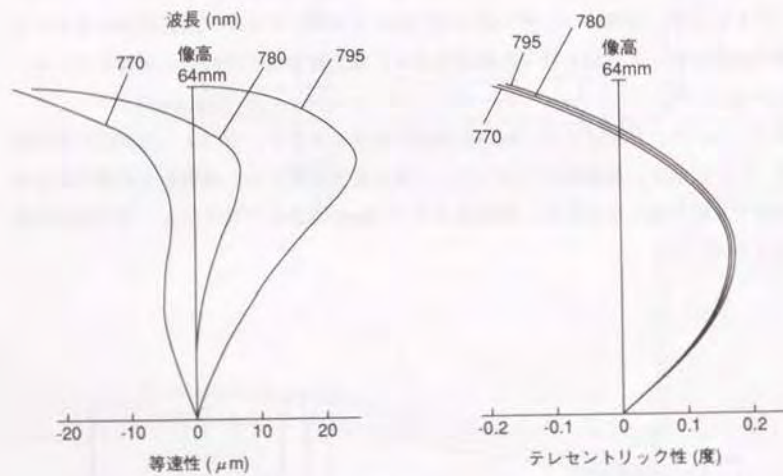


図6. 24 実用機のfθレンズの等速性と
テレセントリック性

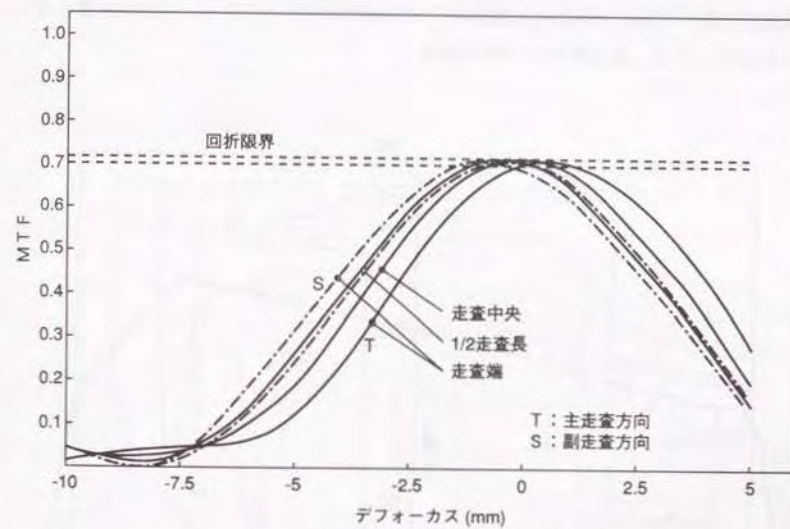


図6. 25 実用機のfθレンズの
デフォーカスとMTF

波長：780nm
入射ビーム径：4.2mm
サイクル：10/mm

図6. 26は、走査位置による反射光の受光量を、走査中央を100として求めた計算結果である。走査端での受光量は走査中央の75%となる。なお、走査中央での受光量は実験装置の2.1倍にすることができた。

光学系の配置では、光切断ミラーの位置を、走査に伴う像面移動との関係において考慮する必要がある。像面移動の原因は、走査中央と走査端によって主光線の光路長に差を生じることによるので、光切断ミラーをレンズの光軸にできるだけ近い位置に設定して光路長を短くすることがよい。設計を行った光切断ミラーと $f\theta$ レンズの配置を図6. 27に示す。なお、光切断角は17度である。

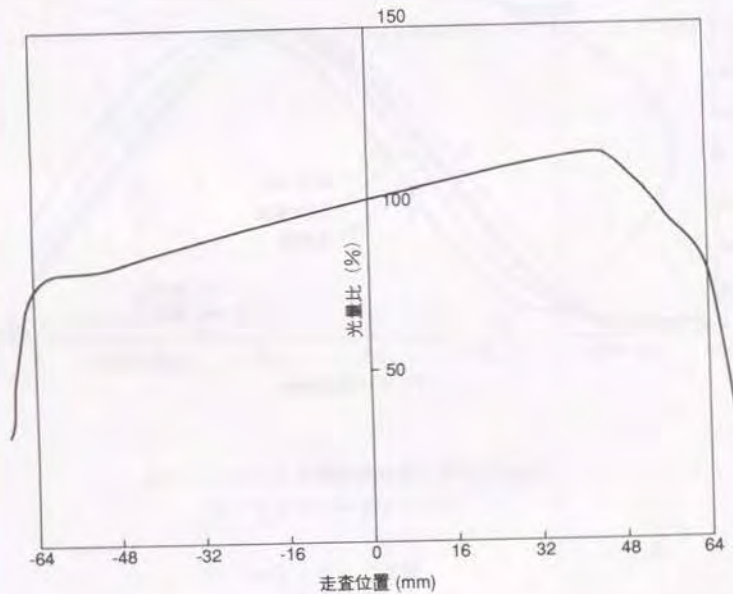


図6. 26 走査位置による反射光量の差
(走査中央を100とする)

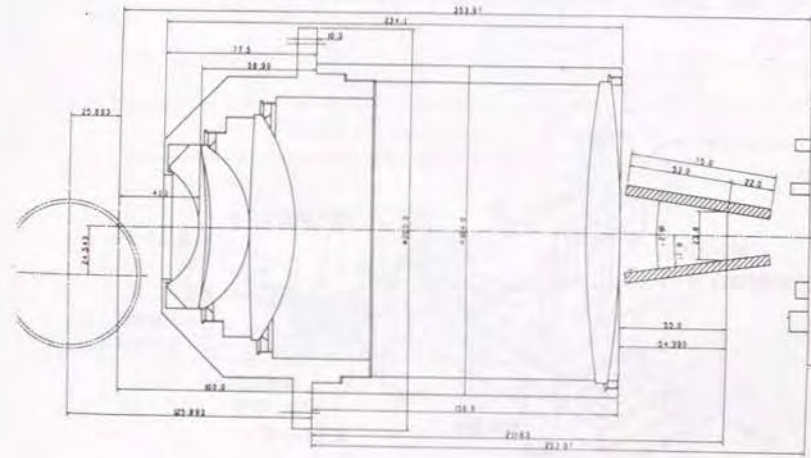


図6. 27 実用機での反射ミラーと $f\theta$ レンズの配置

実用機での光学系の構成を図6. 28に示す。種々の対象物に対する実験結果では、基板のレジストレーションマークに銅箔のロール目があり、回折を生じて読み取りが困難であったため、フォトダイオードを用いた第3の輝度センサを取りつけ、PSDの輝度信号に加算して用いている。

光学系全体の配置を図6. 29に示す。レーザユニット内で波形整形された出射光はビームエキスパンダによって拡大された後、ポリゴンミラーによって偏向され、 $f\theta$ レンズを通して検査基板に垂直に入射する。検査基板からの反射光は光切断ミラーにより光切断角を持った2個の反射ビームとなり、PSDによって受光される。2個のビームの挟角が小さいため、PSDの前方にミラーを配置し光路を折り曲げた。PSD 2個の出力は互いに整合させる必要があり、片側のPSDは調整台上に配置し、各々のPSD出力を単独で調整した後、両者の出力波形を参照して微調整を行う。

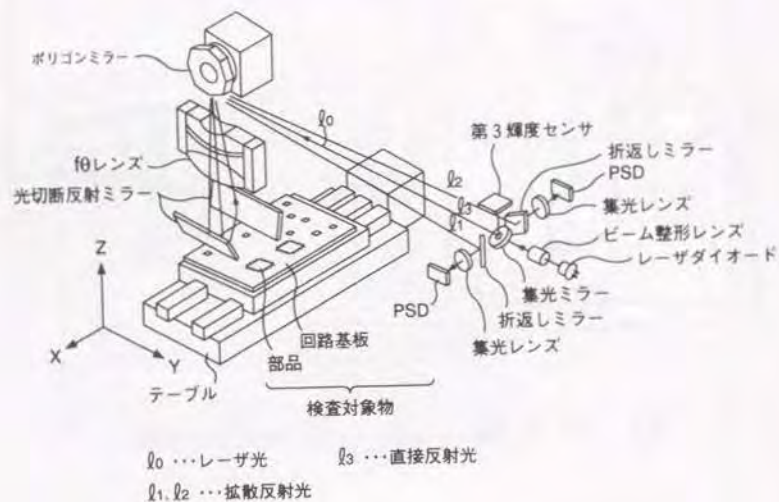


図6. 28 実用機の光学系の構成

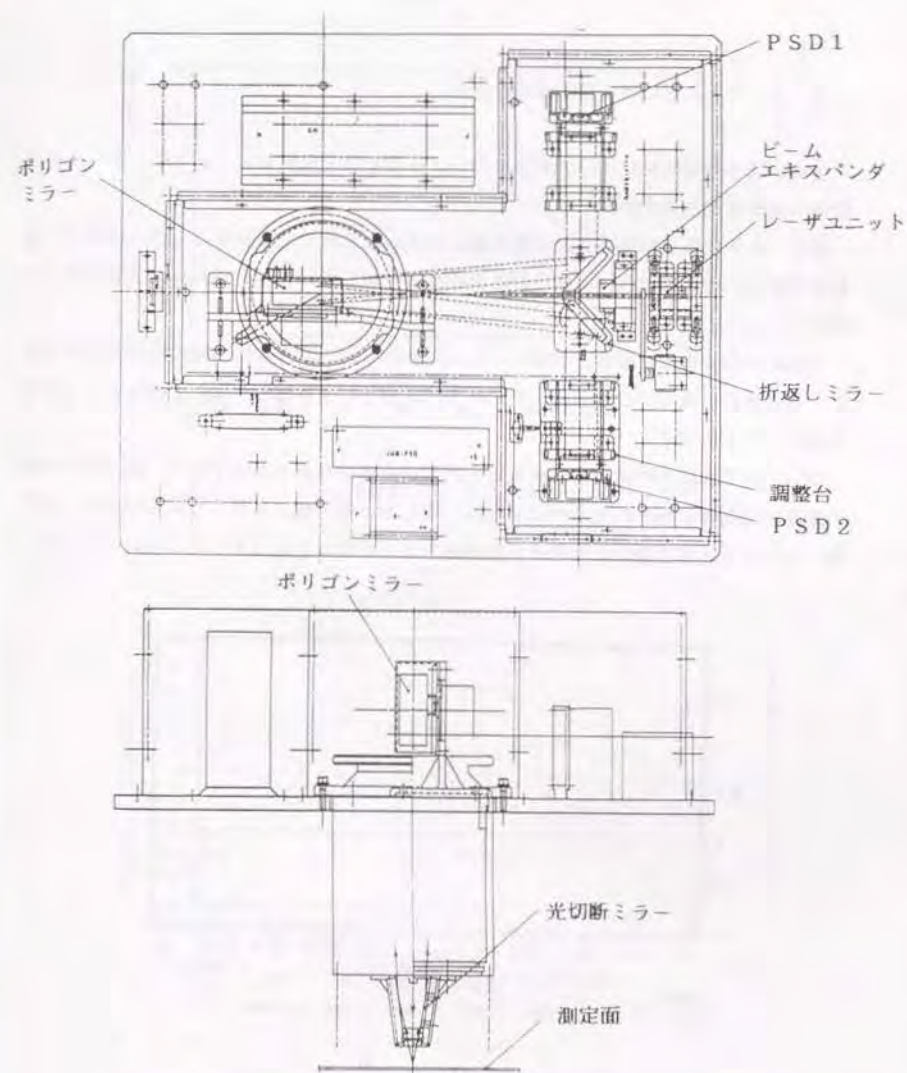


図6. 29 実用機での光学系の配置

6. 4. 2 走査に伴う像面移動の補正

走査に伴う像面移動について測定を行い、計算結果と比較するとともに、データ処理段階で加える補正値を決定した。

図6. 30は各試料面高さとして走査位置に対する、PSD上のスポット重心位置の計算結果である。像面移動に伴う変化量は全走査長に対して1-1.5mmであり、実験装置での約1/3となっている。

128mmの全走査長に渡って帯状に0から10mm迄一定の高さを持つ階段状の試料を用意し、全走査長に渡って走査を行った。PSD出力信号より得たPSD上のスポット位置を図6. 31に示す。

図6. 32は以上の結果より測定値と計算値の差を求めたものであり、高さが4-8mmの範囲では全体に傾きはあるがおおむね一致している。傾きが生じている理由は、光切断ミラーなどの光学系の取り付けが走査面に対して傾きをもっていることによると見ら

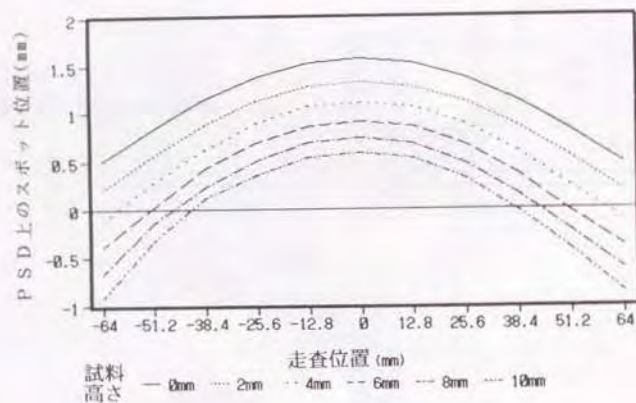


図6. 30 各試料面高さとして走査位置における PSD上のスポット重心位置の計算結果

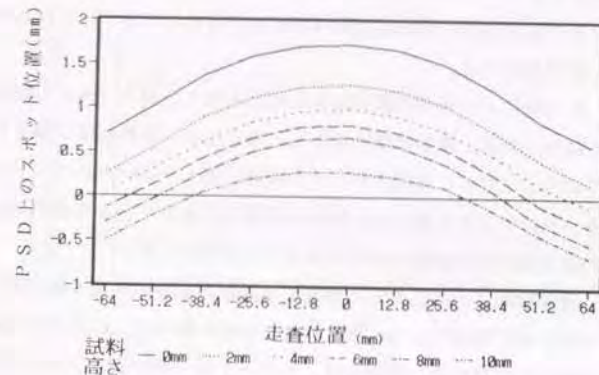


図6. 31 各試料面高さとして走査位置における PSD上のスポット位置の実測値

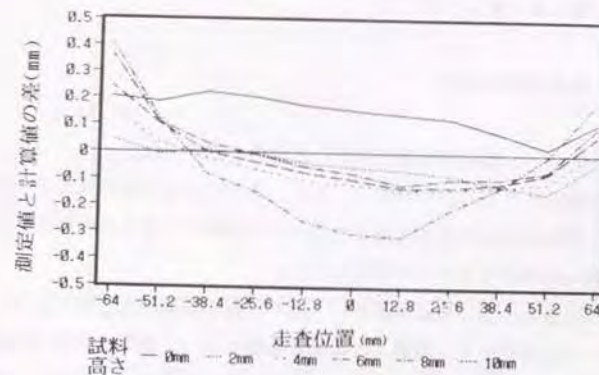


図6. 32 各試料面高さとして走査位置における PSD上のスポット位置の測定結果と計算結果の差

れるが、その差は補正を行うことができる。また、高さ0、および10mmにおいて差異が大きい理由にはPSD面とスポットの位置関係のずれが考えられるが、これも補正により少なくすることが可能である。

図6.33は、ROMにより各高さ測定結果に補正を加え、高さ2mmでの測定値を基準として表示した結果である。像面移動はほとんど補正され、試料形状の通り平面を示すデータとなっている。ただし、各高さデータの間隔は等しくないためリニアリティの補正が必要である。リニアリティ補正は、試料の各高さにおいて全走査長に対して得られる高さデータの差分量の平均値が0になるようにして行なった。

図6.34は、像面移動、リニアリティの補正を加えた結果の各高さ測定値における差分量で、装置の高さ測定精度を示す。高さ10mmでの値を除けば、0.06~0.08mm以内に納まっている。10mmでの結果の悪い理由には、スポットの一部のPSDの受光範囲からのずれが考えられる。ただし、本装置は絶対的な高さ測定装置ではなく欠陥の検査装置であり、個々の実装部品近傍での相対的な高さを問題にするので、比較的狭い測定範囲では25 μ m程度の分解能を確保しており、実用上の精度を満足していると考えられる。

なお、光学系に関しては、ポリゴンミラーのジッタ、および走査位置による光量変化に対してもROMによる補正を加えた。

6.4.3 検査装置の製作

以上の光学系を用い、実装基板検査装置の実用機を試作した。

PSDによる検出は2方向から行っており、各々により2個の高さデータが得られている。また、PSDに入射する光量より各々での濃淡データも得られている。計測に当たってはこれらを統合してデータ処理を行う。

アルゴリズムは図6.35に示す通りで、影や反射の影響を取り除くよう、2個のPSDの濃淡データを設定した上限値、下限値と参照しつつ、異常な領域では高さデータを削除するか、またはどちらか一方の高さデータのみを選択する。さらに、強い鏡面反射によって起こる高さデータとして異常な範囲は取り除く。以上から得られた適正な領域のデータに対しては、2個の高さデータの平均をとり対象物の高さとする。なお、高さデータの得られない場合は、濃淡データを対象物の有無、2次元的位置などの判定に用いる

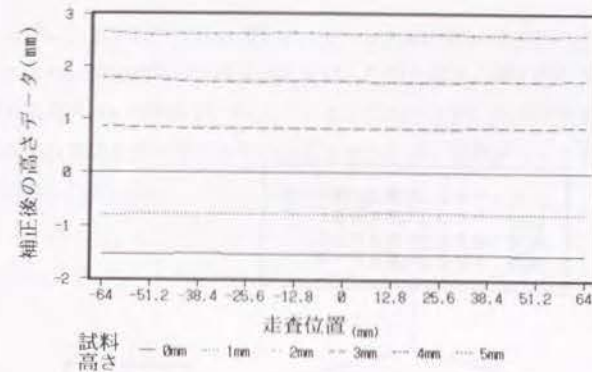


図6.33 走査に伴う像面移動に対して高さ測定値に補正を行った結果

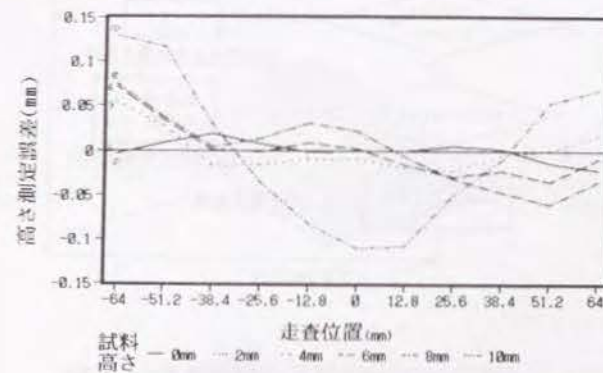


図6.34 像面移動、リニアリティ補正を行った後の各試料面高さとして走査位置に対する高さ測定誤差

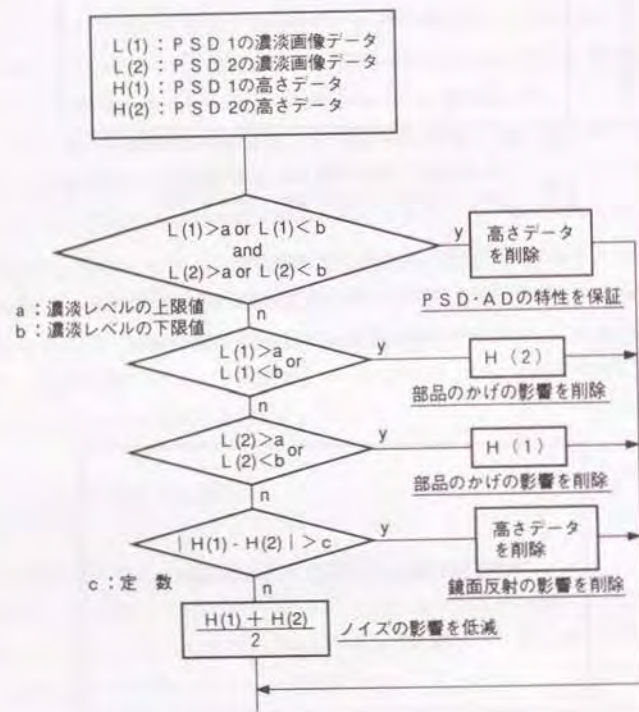


図6. 35 2個のPSDの出力信号の総合処理アルゴリズム

図6. 36に、各々のPSDの高さデータと、両者の測定値の平均をとった統合後の高さデータより、測定結果の3次元表示を行った例を示す。個々のPSDによるデータでは、部品端部に高い反射を持つんだによる見かけ上強い信号があるが、2個のPSDではそれぞれ異なる側に発生していることがわかる。統合後のデータではこのような異常点が削除されている。

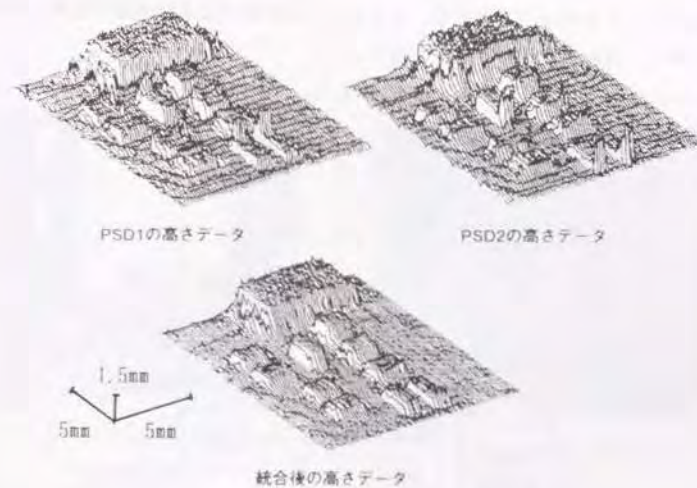


図6. 36 2個のPSDの高さデータの統合による測定結果

図6. 37は測定装置のハードウェアのブロック図で、光学部、画像入力部、画像演算部、CPU部、機構部に分かれている。対象部品により、最大光量と最小光量の比は5000に達するため、光学部での受光側アンプにはオートゲイン機能を持たせている。光学部からのアナログ信号は画像入力部でA/D変換され、デジタル量の補正が行われた後、測定アルゴリズムに基づいて統合処理が行われる。画像演算部では、得られた画像データを検査エリアに従って切り出し所定の演算を行う。演算は処理の高速化のため、4個のトランシピュータを用い並列処理を行なうようにした。

機構部では副走査のための駆動などの制御を行う。検査エリアごとのマスクデータはオフラインで作られ、フロッピーディスクにより本体に納められる。

不良処理システムでは不良品ストックでのバーコードデータと不良情報を送り出す。作業者はリワークステーション上で、ディスプレイに現れる不良部品の位置、不良情報をチェックし、再検査あるいは修正を行う。

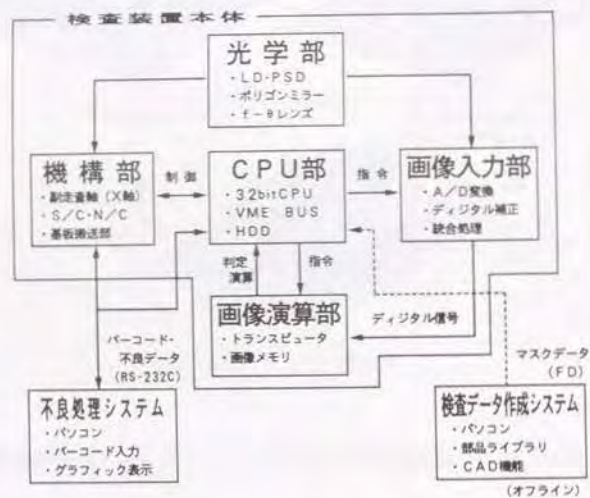


図6. 37 実用機のハードウェアのブロック図

図6. 38は実装基板の測定結果を画像表示した例であり、(a)はPSDからの出力を高さに従って輝度が増すように表示したものであり、(b)は輝度信号の出力結果である。

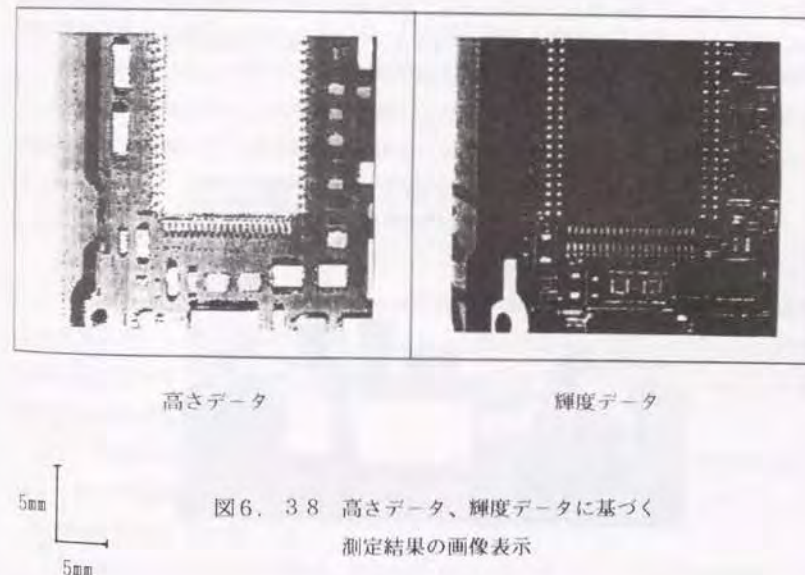


図6. 38 高さデータ、輝度データに基づく測定結果の画像表示

測定データから部品の位置、姿勢の良否などを判定することは、基準となる基板のデータとの比較によって行う。基準となるデータを得る方法としては一般に次の2種類がある。

(1) 正確な基板を測定して基準データとする

(2) CADデータなどからデータベースを作成する

(1)の方法はデータ入力の手軽で、品種切替えへの対応が容易である反面、基板に存在するひずみなどのデータも同時に入力されるので、部品のデータとの分離を行わなくてはならない。また、改めて個々の部品の識別を行って部品ごとに許容量を設定する作業が必要である。(2)の方法はデータの入力に手間を要するが入力結果の変更は容易である。

ここでは、前工程で基板に部品を実装するチップマウンタの人力データを利用することとし、(2)の方法を採用した。

試作した装置の外観を図6.39に示す。本研究により、小型高密度回路基板の部品のマウント後、およびはんだリフロー後のインラインの検査への装置の導入が可能となった。



図6.39 実装基板検査装置の外観

第6.5節 総括

回路基板に実装された部品の位置、姿勢、はんだ接合状態などの3次元形状をインラインで計測する実装基板検査装置において、3次元空間の走査を行うための光学系について研究を行った。

装置は、走査したレーザー光の対象物からの反射光を、入射光軸に対して角度(光切断角)をもって配置したPSDを用いて検出して高さを読み取る、三角測量の原理によった。レーザー光はポリゴンミラーと $f\theta$ レンズにより基板を横切って走査し、基板を搭載したテーブルの機械送りと共に3次元データを得る構成とした。

実験装置の検討を通じ、測定空間に対して必要な走査時の光学特性と光学系の関係を明らかにすると共に、実験によって基本的な測定上の問題点を把握した。また、測定精度に関係する光切断角、ポリゴンミラーの精度に関して検討を行った。

これらの結果に基づいて走査光学系の設計を行い、走査に伴う像面移動などの補正をデータ処理の段階で加えた実用機を製作し、走査長128mm、測定最大高さ10mmの範囲で必要な性能を確保して、実用的な測定状態において0.025mmの測定分解能を得ることができた。

得られた結果は以下の通りである。

(1) ポリゴンミラー面数と $f\theta$ レンズの焦点距離の比によって計測時間に関係する走査のアンブラッキング率は定まり、また与えられた分解能に対し、 $f\theta$ レンズの焦点距離によってポリゴンミラーの回転数は定まるため、これらを考慮して $f\theta$ レンズの焦点距離を設定する必要がある。

(2) 反射光はポリゴンミラーと $f\theta$ レンズを経由して戻るが、反射光の受光量を確保し、かつ走査端での受光量の低下を減少するよう、 $f\theta$ レンズの口径とポリゴンミラーの面幅を設定する必要がある。

(3) $f\theta$ レンズの光学特性は、対象物の高さが変化するため、高さ測定範囲と走査長で囲まれた空間に対して確保する必要がある。入射ビーム径はデフォーカス特性とス

ポット径に関係し、この空間に対してスポットが均一になるように定める必要がある。

(4) 高さ変化に伴うPSD上でのスポット移動の感度は、PSD集光レンズと $f\theta$ レンズの焦点距離の比に関係し、比が大きいほど検出倍率は増加する。

(5) 光切断角は測定感度に直接関係するが、光軸に対してPSD集光レンズを偏心させる構成では切断角の大きさに限界がある。光切断角は、 $f\theta$ レンズと測定面の間の光路に反射ミラー（光切断ミラー）を設置する構成によって増大させることができる。

(6) 光切断角を大きくした場合、非点収差によってPSD上でのスポットは非対称の形状となり、その形状は走査の各位置で変化する。PSD集光レンズの設計では本特性を考慮して、スポット重心位置とPSD受光面の関係を定めることが必要である。

(7) ポリゴンミラーの面倒れは約4倍に拡大されてPSDへの入射角度差になるため、組立精度の確保が必要であるが、光切断角が大きいほど、また $f\theta$ レンズの焦点距離が短いほど測定精度への影響は小さくなる。

(8) 光切断ミラーを設けた場合、走査中央に比し走査端での光路が長くなるため、走査の各位置でPSD上の主光線の位置が変動して高さ測定誤差となり、また変動量は測定対象面の高さによっても異なる。ミラーを光軸に近づけることによって変動量を小さくすることが可能であるが、データ処理時に、測定空間での各スポット位置に対して、各走査位置での主走査方向におけるスポット重心位置の変動に対する補正と、高さ方向に対するリニアリティ補正を加えることが有効である。

(9) 製作した走査光学系を用いた測定では、データの補正後において、128mmの走査長に対して高さ測定誤差は0.06~0.08mm以内であり、近接した範囲では0.025mmの分解能が得られ、実用的な測定精度を確保することができた。

(10) 実用機の開発によって、小型高密度基板の生産に装置の導入が可能となった。

文 献

- 1) 秦清治：産業応用における3次元物体の認識、0 plus E, 126, (1990)111-118.
- 2) 戸倉暢史：実装基板外観検査装置、エレクトロニクス実装技術、12, (1988).
- 3) 小林茂樹：色彩照明を用いたソルダジョイント検査、精密工学会誌、56, 8, (1990) 1375-1380.
- 4) 高木裕治、押田大輔、秦清治、大井輝男、村田啓一、小林拓治：光切断法を用いた面付基板の外観検査装置、精密工学会画像応用技術専門委員会研究会報告、3, 1, (1988)1-11.
- 5) N. Shrikhande and G. Stockman : Surface Orientation from a Projected Grids. IEEE Trans. PAMI, 11, 6, (1989)650.
- 6) 中川泰夫、押田良忠、二宮隆典、佐々木秀昭：スポット光走査方式光切断法によるはんだ付部の形状検出、計測自動制御学会論文集、22, 9, (1986)62-67.
- 7) 塚本善夫、伊東直敏、高橋誠一、武井恒夫、永井昌平：レーザ記録技術・走査機構と光学系、画像電子学会誌、8, 3, (1979)147-157.

第7章 AODと高速機械運動 による大画面の走査

第7.1節 緒言

新聞の編集から製版までのプロセスは現在ほとんど電子化されており、印刷原稿は編集部署から回線を通じて印刷工場に送られる。米国のように広大な土地や、大陸間では衛星通信も伝送手段に用いられている。

このような画像通信には原稿を読み取るスキャナと、書き込みを行うプロッタが必要であり、すでに、ポリゴンミラーと $f\theta$ レンズによる走査によって、新聞長辺方向の幅を持つ原稿を平面上で読み取るスキャナ、およびドラムに巻き付けたフィルムに発光ダイオードによって書き込みを行うプロッタが開発され、国内外の新聞社で広く用いられている。

情報伝達の迅速化とコストの低減を計るためには、面積当たりの伝送速度を高める必要がある。このため、さらに画面を拡大して、新聞見開きの2ページの幅である約1m長を走査し、かつ読み取り、書き込み速度を1桁程度向上させる装置を検討した。

このような装置に対し、ポリゴンミラーと $f\theta$ レンズによる走査では次のような問題がある。

(1) 画面の拡大にともなって光学系が非常に大きくなる。ポリゴンミラーでは、ミラーの動的精度の維持が困難になると共に周速にも制約を受ける。また $f\theta$ レンズでは、テレセントリックな構成の場合レンズ径と走査長が等しいため、1m幅のレンズが必要となる。

(2) 受光素子と感材の高感度化、情報処理速度の向上など周辺をいかに高速化しても、ポリゴンミラーによる走査では第6章に述べたように原理的にブランキングがあり、これによるロスタイムの割合は低減しない。また、ドラムによる回転走査の装置では、

画面の拡大に伴ってドラムの寸法、重量が大きくなり、起動停止のためのロス時間が増大する。

以上のことから走査方式の見直しが必要となる。ラスト走査の一つとして、読み取り、あるいは書き込みヘッドを機械的に往復動を行わせる方式があり、ここでは本原理の発展をめざす。往復運動では両端の折り返しで停止、加減速によるロス時間があるが、ポリゴンミラーのブランキングと異なり、走査長が大きくなるほどその割合は低下する。さらに、回転による走査では走査長は固定されるが、往復運動では情報のない部分はスキップするなど任意に変化できる利点もある。

しかしながら、往復運動の線速度は回転運動の周速度よりも低くならざるを得ない。従って、一回の往復動で多数のラインを処理することが必要であり、このライン数が多いほど速度は向上する。

このため、AODによって往復運動と直交方向に256ラインの偏向を行ない、かつその系を2個設けることにより、一運動当たり同時512ラインの読み取り、あるいは書き込みを行う方式を設定した。機械的往復運動は、空気軸受とリニアモータによって最大1m/sの速度を得る構成とする。

ここでは、本装置の光学系に関して設計と基礎実験を実施し、以上の概念の装置の可能性を検討した。

プロッタについては、まず同時2ビームを得るための方式を始めとする光学系を検討し、光路長の変動する系におけるfθレンズについて設計を行った。次にその光量、スポット形状について検討を加え、実験装置上で2次元走査による書き込み実験を行い、問題点とその対策を明らかにした。

スキャナについては、受光素子として光電子増倍管(Photomultiplier、以下PMTとする)、CCDの各々を用いる場合について、光学系の設計と読み取り実験を行い、基本的な特性と問題点を比較検討した。

第7.2節 装置の構成

装置にはスキャナとプロッタがあり、書き込み、あるいは読み取りを行う光学ヘッドを機械的往復運動を行うシャトルに取り付ける。まず、書き込みを行うプロッタに関して原理を述べる。

走査の概念を図7.1に示す。AODによる偏向によって1個のビームより256ラインの走査を行うが、さらに1画素分ずらして、第2のビームによる同様の走査を同時に行う。従って、2個のAODの1走査サイクルで512ラインの走査を行うことになる。各々のAODの分担するラインは1列おきに交互に組み合わせられる。

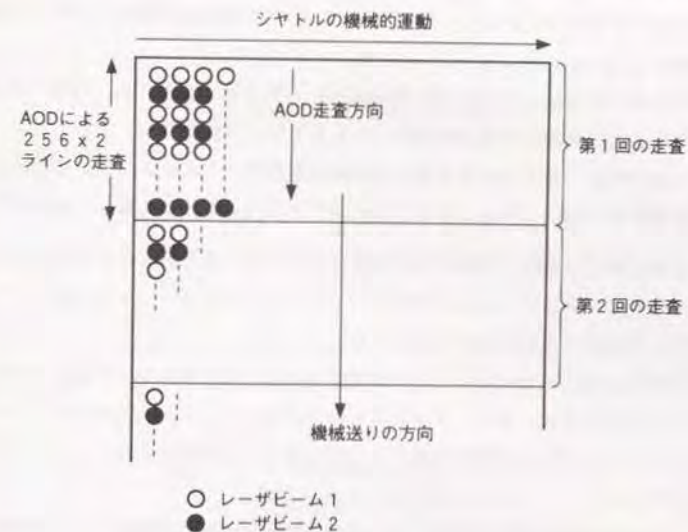


図7.1 AODと高速機械運動による走査の概念図

AODによる偏向を行いながら、紙面の左右方向にシャトルの高速機械送りがなされる。一方向への移動が終了すると、直角方向の第2の機械送りによってテーブル上の感材（フィルム）が移動し、次の走査に移る。以上の3種類の走査の合成によって、全面面がカバーされることになる。なお、走査はシャトルの往復とも行われる。

AODはTeO₂結晶を用いたものであり²⁾、射出する一回折光の入射光軸に対する角度は素子の超音波駆動周波数によって定まる。従って、連続的に偏向を実施するためには、駆動周波数を図7.2に示すように、VCO (Voltage Controlled Oscillator) によって連続的に高い値より低い値まで掃引してやればよい³⁾。一走査が行われた後、再び周波数を元に戻す必要があるが、この時間はアクセス時間として走査上利用できない。

AODの走査速度は機械的往復運動の速度に対して十分大きい、有限ではあるため走査方向は機械運動方向に対して直角にならない。このため、別のIMC (Image Compensation) 用AODによって、偏向用のAODの走査と直交方向にスポット位置の補正を行う。

レーザ光はAOM (Acousto-Optical Modulator) によって変調され、白黒2値でフィルムを感光させる。光源には感光特性の点からArレーザを用いた。

以上の走査のための書き込み光学系の全体構成を図7.3に示す。レーザ光はAOMによって変調された後、コリメータ光学系を経て走査用AODに入射し、偏向が行われる。AODの走査では角度と時間が比例関係にあるので、書き込み面上でスポットを等間隔にするためにfθレンズが必要である。シャトルにはfθレンズと反射ミラーが搭載されるが、移動するため光路長が変化する。

図では省略したが、走査には2ビームが必要であるため1個のレーザ光源よりビームを分割するための光学系、およびIMC用AODが加わる。2ビームの分割についてはビームスプリッタ、または2周波駆動のAOMによる方式が考えられ、7.3.1に検討結果を述べる。

次に、スキャナの読み取り光学系では、原稿の明暗は反射光の変化として2値に光電変換される。機械的運動、および同時に2ラインを並列に読み取る概念はプロッタと同様である。受光素子としてはPMT、またはCCDが考えられ、7.5.1に各々の得失を述べる。光学系は受光素子によって大きく異なる。

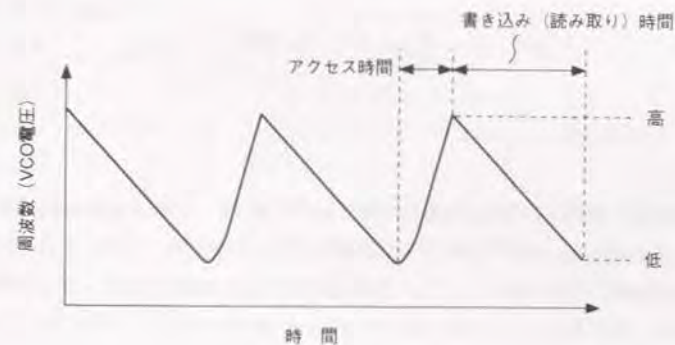
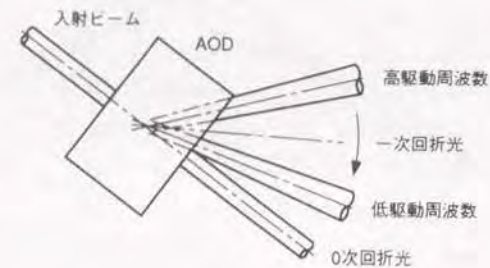


図7.2 駆動周波数の掃引によるAODを用いた連続的偏向

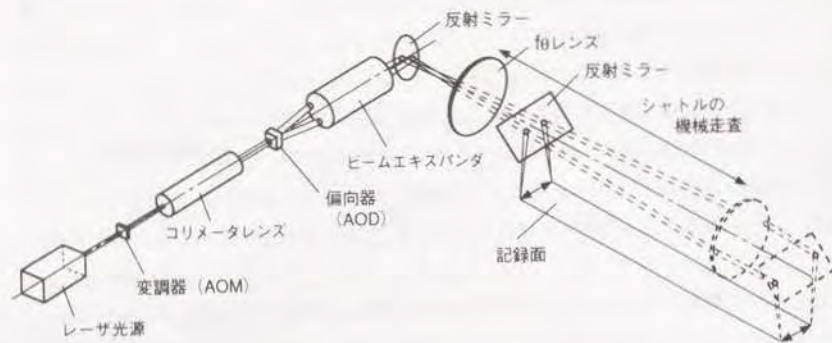


図7.3 書き込み光学系の概念

装置の仕様を表7.1に示す。記録密度は最大1500LPI (Lines per Inch)とした。AODによる偏向量は画素密度によって異なり、最大で偏向角(全角)を44.27mrad、走査長を記録面上で10.84mmとした。変調周波数は最大10MHzであり、以上の構成が実現されれば、書き込み、および読み取りの速度は、従来のポリゴンミラーによる走査と比較して1桁近く高くなる。

表7.1 装置の仕様

項 目	仕 様
シャトル走査長(画面巾)	最大 950mm
走査線密度	600~1500LPI
スポット径(1/e ²)	42.3~16.9μm
シャトル移動速度	最大 1m/s
変調周波数	最大 10MHz
同時書き込み、読取りビーム数	2
書 込 光 源	Arレーザー(λ=488nm)
書 き 込 み	AOD偏向角 44.27mrad(全角) fθレンズ走査長 10.84~4.33mm 2ビームの分割 ビームスプリッタ又は2周波駆動AOM
読 取 り	PMT方式 書き込み系と同様の2ビームのレーザー光のAODによる走査を用いた照明 CCD方式 ハロゲンランプ、またはHe-Neレーザーによる均一照明 シャトル直交方向の走査はCCD自身による

第7.3節 書き込み光学系の設計

プロッタの書き込み光学系について設計を行った。まずレーザ光を2ビームに分割する方式を検討し、コリメート光学系を含む系の設計を行った。次にシャトルに搭載するための入射瞳位置が変化する $f\theta$ レンズの設計を実施した。

7.3.1 ビームの分割

装置では2個のビームを用いるが、レーザは保守、コストの点から1台とした。従って光源からの光を2ビームに分割する必要があるが、それには次の2方式が考えられる。

- (1) ビームスプリッタによる分割
- (2) 2周波駆動のAOMによる分割

ビームスプリッタ分割方式は、レーザ光をプリズム面の半透過膜により2ビームに分割するもので、変調用のAOMは各ビームに対して設けることになる。

次にAOM分割方式は、光源からの1個のビームを変調のためのAOMに入射するが、変調周波数を f_1 、 f_2 の2種にすることによって、AODと同様な効果を得、図7.4に示すように、射出ビームを2つの異なる方向にするものである。

この場合、2ビーム間の角度 θ は次のようになる。

$$\theta = \frac{\lambda \cdot \Delta f}{V} \quad (7.1)$$

ここに λ : 波長、 V : AOM中の超音波伝播速度、

Δf : 変調周波数の差、 $f_1 - f_2$

ビームスプリッタ分割方式と比較してAOM分割方式では、長所としてはAOMが1個でよく、ビームスプリッタも不要であり、光学素子数が減少して組立調整も容易であり、光路が短く装置の小型化が計れる。一方、短所として、変調速度が低下することになる。ビームスプリッタ分割方式はこの逆である。ここでは両者の光学系について設計を行った。

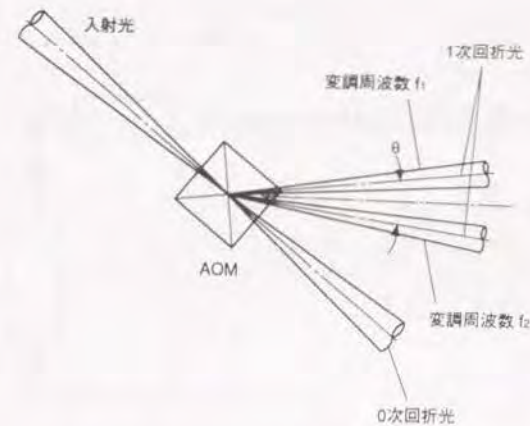


図7.4 AOMによる2ビームの分割

ビームスプリッタ分割方式の光学系の構成を図7.5に示す。

ビームスプリッタで分割されたビームは、マイクロレンズによりAOM内に結像される。AOMから発散された2個のビームは、コリメートレンズによって平行光となってIMC用AODに入射する。第1ビームエキスパンダは平行ビームを拡大し、かつIMC用AODでの瞳を走査用AOD内の瞳に連結する。さらに第2ビームエキスパンダにより、走査用AODによって走査された平行ビームを $f\theta$ レンズ手前の瞳に連結し、かつビームを拡大する。その後シャトル上で移動を行う $f\theta$ レンズによって、記録面上に2ビームを隣接して結像させる。

ビームスプリッタによって分割する2ビームの間隔は素子の大きさより1.5mmとしたが、記録面上では2ビームは互いに隣接して1画素分の距離を持たなくてはならない。この条件を基本にして、コリメートレンズ、ビームエキスパンダ、および $f\theta$ レンズの焦点距離と倍率を決定した。

また、相互の関係は光路長に影響し装置の大きさに関係する。設計に当たっては全長を短縮するよう考慮した。

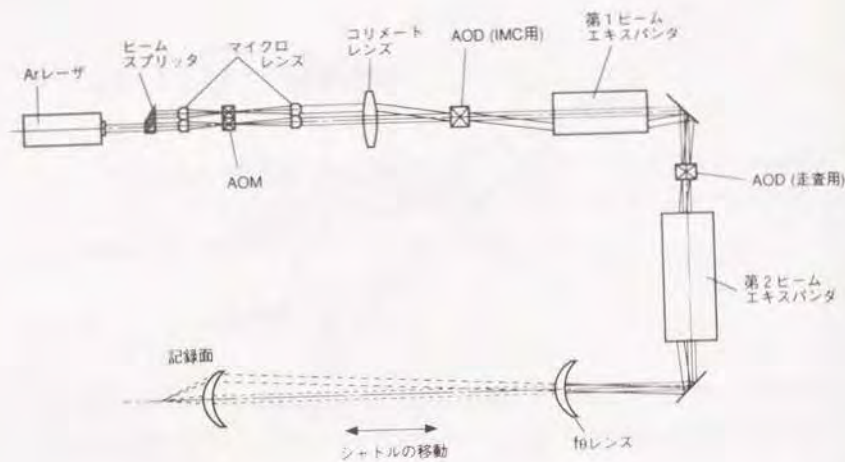


図7.5 ビームスプリッタ分割方式の光学系の概念

コリメートレンズでは射出瞳位置までの間隔を短くし、全長を短縮するには、コリメートレンズの主点位置をレンズの外に出さなければならない。このためケプラー型の構成を取った。また、ビームエキスパンダも同様の理由からケプラー型とした。

走査用AOD射出後の第2ビームエキスパンダは $f\theta$ レンズへの入射ビーム径を定め、 $f\theta$ レンズによる記録面上でのスポット径に関係する。従って、その倍率は書き込み線密度によって変化させる必要があり、線密度に対応して5種類の倍率のエキスパンダを用い、タレット上に設置して機械的に掛け換えて使用する。AODの走査によって入射ビーム角が変化するので、走査端でのビームの波面収差を小さくするため、2群4枚の構成とした。設計を行ったコリメート光学系の諸元を表7.2に示す。

次に、2周波駆動AOM分離方式の光学系について設計を行った。この光学系ではコリメートレンズへの入射条件は異なるが、AOM以降はビームスプリッタ分離方式と同一の構成でよい。

表7.2 ビームスプリッタ分割方式のコリメート光学系の諸元

レ ン ズ	項 目	仕 様
マイクロレンズ	種類 スポット径 ($1/e^2$) F	単レンズ 68 μ m (AOM内) 77
コリメートレンズ	種類 焦点距離 射出ビーム径 F	ケプラー形 (3枚) 2891.7mm 1.69mm 1707.7
第1ビームエキスパンダ	種類 倍率	ケプラー形 (2枚) 3
第2ビームエキスパンダ	種類 入射ビーム径 入射ビーム走査角 倍率 射出ビーム径	ケプラー形 (2群4枚) 5.08mm 44.3mrad (全角) 1~2.5 (5種類) 5.08~12.7mm

まずAOMの変調周波数を次のように設定し、2ビームの分離角度を定めた。

$$f_1 : 100\text{MHz}$$

$$f_2 : 140\text{MHz}$$

$$\Delta f : 140\text{MHz} - 100\text{MHz} = 40\text{MHz}$$

超音波伝播速度 $V : 4.2 \times 10^6$ mm/s、波長 $\lambda : 488\text{nm}$ とすると、(7.1)式より分離する2ビーム間の角度 θ は4.65mradとなる。

回折効率を最大にするためには、AOM偏向面にビームウェストを配置することが望ましいが、偏向面にビームウェストを設けた場合、光線はAOMの1点から発散するこ

となり、レンズによって集光されるスポットは2ビームに分離されず1点のスポットとなってしまう。このため、図7. 6に示すようにビームウエストの位置をAOMよりずらして配置しなければならない。ここでは、ビームウエスト位置をAOM中心より空気換算で11.35mm後方に位置させた。設計した光学系の配置を図7. 7に示す。

7. 3. 2 $f\theta$ レンズの設計

本装置での $f\theta$ レンズはシャトルに取りつけられて移動を行い、一方光源は固定されているので、一般の走査光学系における $f\theta$ レンズと異なり、入射瞳よりレンズ面までの距離がレンズの移動によって変化することが特徴である。

瞳の移動による収差の変化は、球面収差、像面湾曲は不変であるが、コマ収差、非点収差、および歪曲収差($f\theta$ 特性)は大きく変化すると考えられる。新聞用大型CTS (Computer Type Setting) スキャナで実用化した、ポリゴンミラーと共に用いる図7. 8の $f\theta$ レンズ⁴⁾を例とし、入射瞳よりレンズ面までの間隔を20~950mmに変化させて、上記5収差の $f=1$ での3次収差係数を求めた。その結果は表7. 3のようであり、上述のことが裏づけられる。

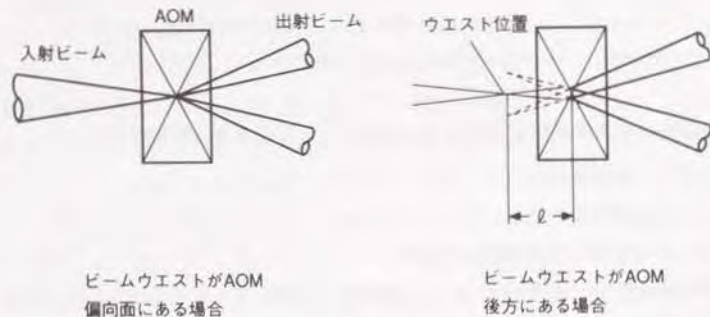


図7. 6 AOMとビームウエストの関係

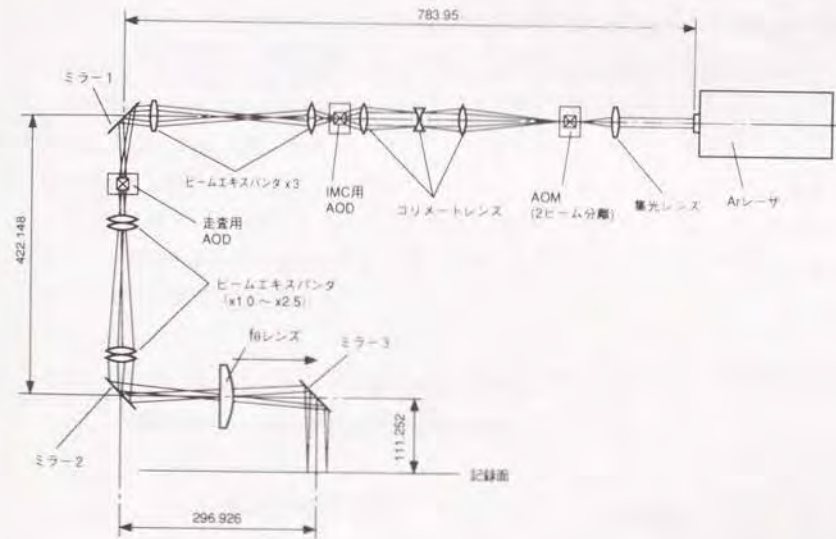


図7. 7 2周波駆動AOM分割方式の光学系配置図

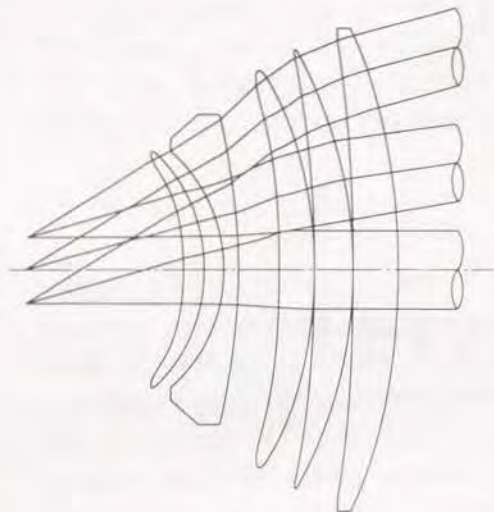


図7. 8 新聞用CTSスキャナの
fθレンズ

焦点距離：390 mm
有効走査長：410 mm
走査角：±30. 12度
レンズ-瞳位置：47.9 mm

表7. 3 CTSスキャナ用fθレンズにおいて
入射瞳位置を変化した場合の三次収差係数

収 差	f = 1での三次収差係数	
	瞳-レンズ間 20mm	950mm
球面収差	9.078	9.078
コマ収差	- 0.282	34.199
非点収差	- 0.024	128.811
像面湾曲	0.081	0.081
歪曲収差	0.646	485.991

一般にfθレンズは複数枚の凹、凸レンズを組み合わせて製作されるが、焦点距離の短い凹レンズが収差変動を大きくする。図7. 8のfθレンズでは2枚目にこの種のレンズを用いているため、瞳位置の変動によって特に離れる方向に凹レンズの作用が非常に大きくなり、収差変動は焦点距離の短い1枚目の凸レンズと、2枚目の凹レンズの作用に移動距離をかけた関数となり、瞳位置の変動に大きく影響される原因となっている。

このことから、瞳位置の変動による収差変動を小さくするには、強い凹レンズを用いず、かつfθレンズを構成している各単レンズの焦点距離をほぼ均等に、また焦点距離をできるだけ長くすることが必要と考えられる。AODによる偏向では偏向角が小さい上、高解像度になるに従ってその値も小さくなるので、収差変動を十分小さくすることが可能と見られる。

焦点距離 f_{θ} のfθレンズによる像面でのスポット径 d は、すでに(6. 3)に示したように、波長 λ 、入射ビーム径 D により定まるが、ここでは2ビームによる像面でのスポットの間隔も d とする必要がある。図7. 9に示すように、fθレンズに入射する2ビーム間の角度を θ 、とすると、

$$d = f_{\theta} \cdot \theta \quad (7. 3)$$

であり、さらに、コリメートレンズ、ビームエキスパンダを含むコリメート光学系の総

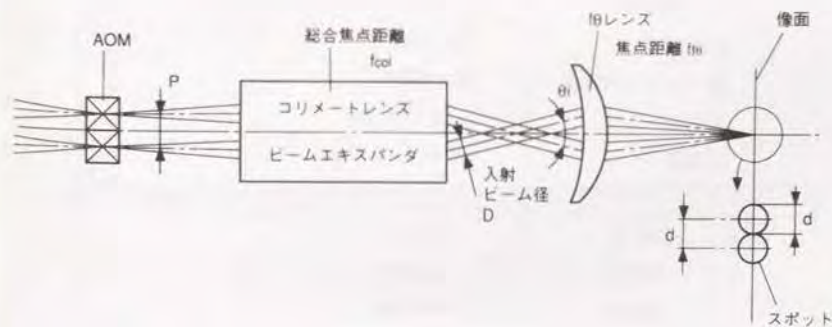


図7. 9 fθレンズとコリメートレンズ
ビームエキスパンダの関係

合焦点距離を $f_{c.o.i}$ とすれば、入射2ビームの間隔 $P (=1.5\text{mm})$ は

$$P = f_{c.o.i} \cdot \tan \theta \approx f_{c.o.i} \cdot \theta \quad (7.4)$$

となって、

$$\frac{P}{d} \approx \frac{f_{c.o.i}}{f_{i.o.}} \quad (7.5)$$

となる。

以上の関係からコリメート光学系を考慮し、 $f\theta$ レンズの焦点距離を定める必要がある。機構的には焦点距離が小さいことが望ましいが、AOD、AOMの開口径からの制約があり、ここでは 244.83mm とした。

以上の方針より設計した $f\theta$ レンズの設計結果の諸元を表7.4に示す。また、入射

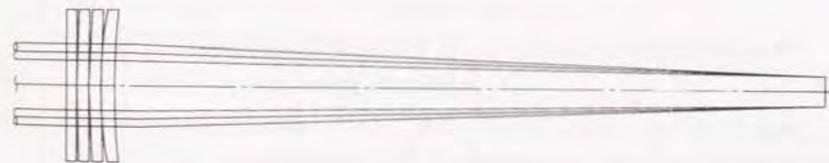
表7.4 $f\theta$ レンズの設計結果

項目		設計結果
レンズ枚数		4
焦点距離		244.83mm
瞳～レンズ間距離		20～950mm
入射ビーム		5.08～12.7mm
走査長		10.84～4.33mm
スポット径	600LPI	43.6 μm
	1000LPI	22.7 μm
	1500LPI	16.7 μm
		(上記の値は各走査位置での軸上、走査端および主走査方向、副走査方向について同一)

瞳よりレンズ面までの距離を最大、中間、最短とした時の光路図を図7.10(a)～(c)に示す。さらに、集光スポットの強度分布を1000LPIの場合について、中間位置での軸上、および最大、最短の位置での走査端に対して求めた結果を図7.11(a)、(b)に示す。あらゆる走査域でほとんど等しいスポットが得られていることがわかる。



(a) 瞳～レンズ間944.4mm

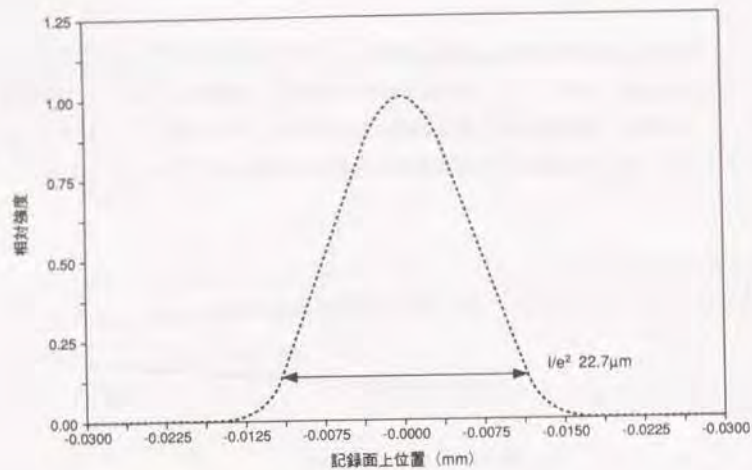


(b) 482.2mm

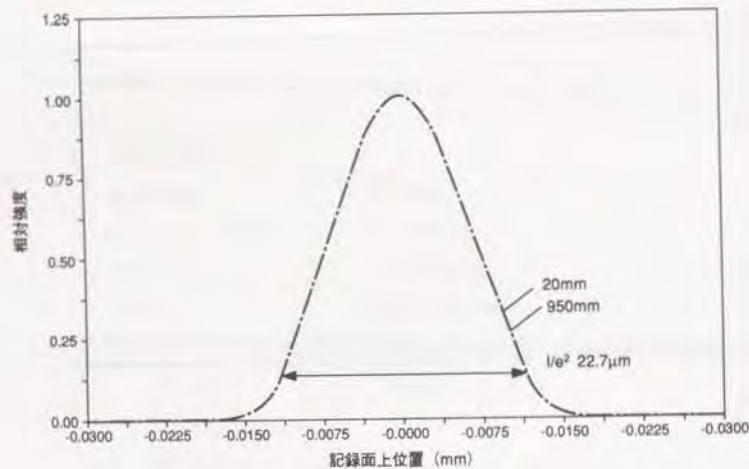


(c) 20mm

図7.10 瞳位置を変化した場合の $f\theta$ レンズの光路図
(入射ビーム径: 5.07mm)



(a) 軸上 (4.82 mm)



(b) 走査端 (950 mm, 20 mm)

図 7. 11 $f\theta$ レンズのスポットの二次元強度分布
(1000 LPI)

第 7. 4 節 書き込みに関する実験

設計結果に基づいて光学系の製作を行ない、試作した機構系に搭載して書き込み実験を実施した。まず光量とビーム分割に関して実験を行い、次いで AOD による走査によるスポットの観察と 2 次元走査による記録結果より、問題点と対策を検討した。

7. 4. 1 光量と分割方式

2 ビームの分割はまずビームスプリッタ分割方式によった。設計結果に基づき各光学素子を製作し、最初に個々の素子の分光透過率を測定した。ビームスプリッタの半透過膜は偏光方向により透過率が異なるので、分光透過率測定器に偏光板を配置し、直線偏光を取り出して分割した 2 ビームより透過率を測定した。

次に機械上に光学系を組み立て、その状態で各光学素子の透過前後の光量をパワーメータによって測定して各素子の透過率を求めた。

これらの測定結果を設計値と対比して表 7. 5 に示す。結果は次の通りである。

(1) 各素子の分光透過率の測定値と、測定を行わなかったものについては設計値を用いて光学系の総合透過率を求めたところでは、記録面での光量はレーザー出力の約 5 % となる。光学素子のなかではコリメートレンズの分光透過率が設計値に比し低い。

(2) 機械搭載状態の測定では、記録面での光量はレーザー出力の 1.4% 程度まで低下している。特に IMC 用 AOD の透過率が設計値に比し低下しており、さらにそれより後部の光学系でも透過率の低下が大きくなっている。

以上の結果より光学系全体での透過率を高める必要があることが認められた。まず個々の素子では、 $f\theta$ レンズとコリメートレンズの反射防止膜を単層コートよりマルチコートにした。これにより、透過率は $f\theta$ レンズにおいて 6%、コリメートレンズにおいて 4% 上昇した。

次に、IMC 用 AOD 以降での透過率の低下を検討するため、搭載状態でのコリメートレンズからの射出ビーム径を測定したところ、設計値の 1.69mm に対し 3.5mm と大きく、

表7. 5 実験に用いた各光学素子の透過率
(ビームスプリッタ分割方式)

光学系	設計値		分光透過率測定値		パワー計による測定値	
	透過率(%)	累計(%)	透過率(%)	累計(%)	透過率(%)	累計(%)
ビームスプリッタ	50	50	47.8、46.9	46.9	85	42.5
マイクロレンズ1	91.6	45.8	91.6	43.0	(2ビーム)	(1ビーム)
AOM	60.0	27.5	—	25.8	65-75	27.6-31.9
マイクロレンズ2	91.6	25.2	91.6	23.6	95	26.2-30.3
コリメートレンズ	92.7	23.3	82.1	19.4	80-85	21.0-25.7
AOD (IMC)	80.0	18.7	—	15.5	40-50	8.4-12.9
ビームエキスパンダ × 3.0	95.1	17.8	96.1	14.9	80-85	6.7-10.9
AOD (走査)	45.0	8.0	—	6.7	40-45	2.7- 4.9
ビームエキスパンダ × 1.67	90.4	7.2	91.3	6.1	80-85	2.1- 4.2
f θ レンズ	90.4	6.5	88.0	5.4	70-80	1.5- 3.3
反射ミラー	94.1	6.1	—	5.07	95×2枚	1.36-3.0
累 計	6.1		5.07		1.36-3.0	

IMC用AOD、さらにその後部の光学でけられを生じていることが判明した。素子の相対位置の測定と計算結果より、射出ビーム径の差は2個のマイクロレンズ、およびAOMの相対位置関係が原因であることが認められた。このため、後部のマイクロレンズの位置、およびコリメートレンズに調整機構を設け、次のようにして調整を行うこととした。

まずマイクロレンズの位置を変化させ、コリメートレンズからの射出ビーム径を極小値近くにする。この状態で2ビーム間の角度を変化させないように、コリメートレンズの焦点距離を維持したまま前側焦点位置をマイクロレンズによる焦点位置に一致させ、同時に射出ビームを後群のレンズを動かして平行にする。これによって、射出ビーム径が1.85~1.95mmとなることが確かめられた。

一方、IMC用AODに直接レーザービームを入射して行った測定では72%の透過率が得られ、AODそのものには問題のないことが認められた。

以上の対策を実施した結果、記録面での光量はレーザー出力の5%を確保することができた。

次に、AOM分割方式についてベンチテストを実施した。2ビームの分割とスポットの形成が確認されたが、光量は上記のビームスプリッタ分割方式よりさらに低下するのみでなく、基本的に変調速度の低下があるため、装置としてはビームスプリッタ分割方式が適していると判断した。

7. 4. 2 AOD走査時のスポット形状

組立を行った光学系を用い、AODによる走査を行ってフィルム面の記録状態を観察したところ、主走査方向と副走査方向ではベストフォーカス位置が異なっており、非点隔差を生じていることが判明した。

この原因は、AOD結晶内においてビームを音波が横切るときにビーム内の位置によって時間差があるため、音波の進行方向に対して回折光に位相分布があり、主走査方向に対して発散を生じるためである⁹⁾。AOD中心より主走査方向での発散の中心までの距離を図7. 12に示すようにF₀として、発散は次のようになる。

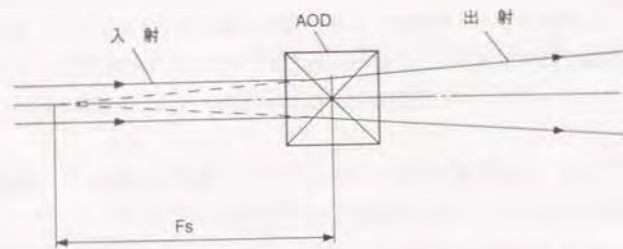


図7. 12 AODによるビームの発散
(主走査方向)

$$F_s = \frac{V^2 \cdot T}{\lambda \cdot \Delta f} \quad (7. 6)$$

ここに、V：超音波伝播速度、T：掃引時間、λ：光の波長、

掃引時間を103.89μs、Δfを60.26MHzとした発散光の状態のときに、記録面における主走査方向と副走査方向の、デフォーカスとMTFの関係を求めた結果を図7. 13に示す。

副走査方向ではレンズの焦点位置においてベストフォーカスとなるが、主走査方向においてはビームの発散によってフォーカス位置がずれる。これらの中間位置において両方向のフォーカス条件が一致する。

この結果、副走査方向、および主走査方向でのベストフォーカス位置では、非点隔差により線状のビームとなる。中間位置においては主走査、副走査方向ともほぼ等しい円となるが、両方向のベストフォーカス位置から離れていることからスポット径は大きくなる。このような現象は、走査が高速で掃引時間が短いほど発散が大きくなるため強く現れる。

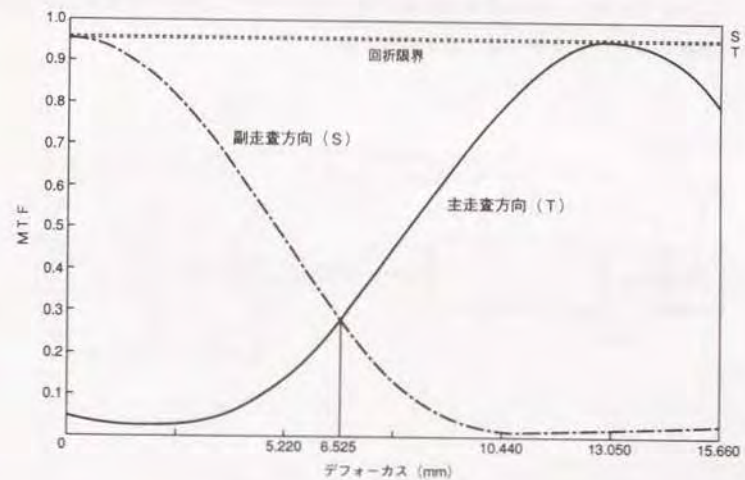


図7. 13 AOD走査に伴う発散のある場合の各走査方向の
デフォーカスとMTF (5本/mm)

線密度：1000LPI

瞳位置：450mm

非点隔差は図7.14に示すように、AOD射出側にシリンドリカルレンズを設置することで補正が可能である。AODに接してシリンドリカルレンズを設置した場合のデフォーカスとMTFの関係を図7.15に示す。主走査方向、副走査方向の差異は小さくなり、両方向のMTFが一致する箇所において、20本/mmにおいて70%が得られる。ただし、シリンドリカルレンズの焦点距離は固定されるので、掃引時間を変化させる場合には、機械的にレンズを掛け替える必要がある。

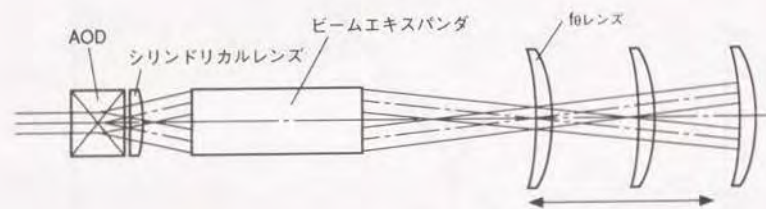


図7.14 シリンドリカルレンズによる
AOD走査に伴う発散光の補正

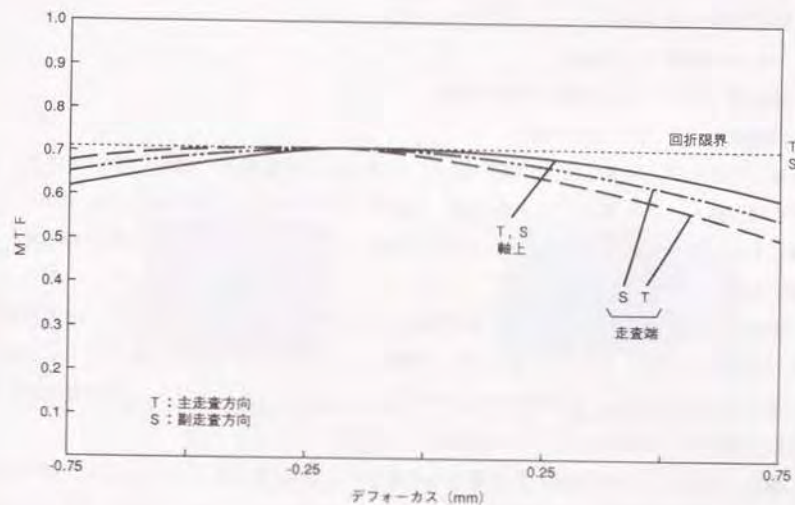


図7.15 シリンドリカルレンズによって
補正を行った場合のデフォーカスと
MTF (20本/mm)

線密度 : 1000 LPI
瞳位置 : 450 mm
掃引時間 : 36.76 μ s

7. 4. 3 2次元走査による書き込み実験

シリンドリカルレンズの挿入の対策を施した光学系を用い、AODとシャトルの移動によって、2次元走査による書き込み実験を行った。

AODの駆動条件は次の通りである。

掃引時間：36.76 μ s

アクセス時間：11.37 μ s

周波数 (f)：145.13MHz ~84.87MHz

周波数幅 (Δf)：60.26MHz

掃引時間が同一であっても周波数幅 Δf が異なると周波数掃引速度に差を生じる。 Δf を40.6MHzにした場合、主走査方向、副走査方向のベストフォーカス位置の間に13.4mmのずれの発生が認められた。従って掃引時間、周波数幅の両者とも設定には精度が必要である。

連続した30ドット (30ドット長さの黒線) の信号を一定時間ごとに発生させAOMによって変調を行い、AODとシャトルの移動による走査で、フィルム面に1ライン置きに書き込みを行った。当初の書き込みでは図7.16のように、ドット信号部全体が黒く塗り潰され、光量として十分であることが判明した。

次に、NDフィルタを挿入して書き込みを行った。結果は図7.17に示す通りであり、目的とした2次元走査が実現されていることがわかる。しかしながら、AODによる主走査方向において、ドット列のライン幅が一定でなく両端で細くなり、記録された長さも不揃いである。また、ライン幅はおおむね所定の値が実現されているが、走査端の145MHz側では全体に細い。前者は変調回路の問題、後者は光学的な問題と考えられる。

次に、各走査域でのスポット形状を明らかにするため、AODの全走査長に対して1ドット間隔の信号で書き込みを行った。またビームの状態との関係を検討するため、3種の曲率のシリンドリカルレンズを用意し、各々のレンズを掛け替えて書き込みを行った。

結果を図7.18に示す。図のようにドットが分離されている部分とつながっている部分がある。ドットが分離されている部分、すなわちベストフォーカス位置付近はシリ



AOD掃引周波数：85MHz 付近

145MHz付近

↑ シャトル走査方向

→ AOD走査方向

└─┬─┘
100 μ m

図7.16 2次元走査による連続30ドットの記録

NDフィルタ：なし

記録密度：1000LPI

レーザ出力：5mW



145MHz附近



115MHz附近



130MHz附近



AOD掃引周波数: 85MHz 付近



100MHz附近

↑ シャトル走査方向

→ AOD走査方向

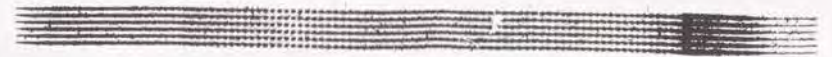


100 μ m

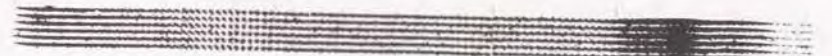
図7. 17 2次元走査による連続30ドットの記録
NDフィルタ: 挿入
記録密度: 1000LPI



(a) シリンドリカルレンズ曲率半径: 306.5mm



(b) 328.9mm



(c) 336.4mm

↑ シャトル走査方向

→ AOD走査方向



200 μ m

図7. 18 シリンドリカルレンズの曲率を変えた場合のAOD
全走査長に渡る1ドット間隔の記録結果
記録密度: 1000LPI

シリンドリカルレンズの曲率によって相違し、曲率半径が小さいものでは中心部での分離がよいが、大きくなるに従ってドットの明瞭な部分が両側の2ヶ所に分かれて行く。この現象は、図7. 19に模式的に示すように、AODの掃引中にビームの発散角が連続的に変化しており、発散角の影響を補正するシリンドリカルレンズの適合する領域が移動するためと考えられる。

AODの掃引速度 df/dt は発散角に関係するが、一定であることを前提としてシリンドリカルレンズが設計されている。しかしながら、駆動回路の周波数掃引状態を測定したところ、図7. 20のように周波数の時間に対する勾配が変化しており、掃引速度が一定となっていないことが認められた。このため、上記のように各走査域においてビームの発散状態が異なり、フォーカスずれを発生しているものと考えられる。

これはVCOの回路特性によるものであり⁶⁾、AOD駆動回路に補正ROMを加え、掃引速度が一定になるようにした。掃引速度の補正を行って書き込みを行った結果は図7. 21に示す通りで、ドットの見え方が全域に渡って向上した。

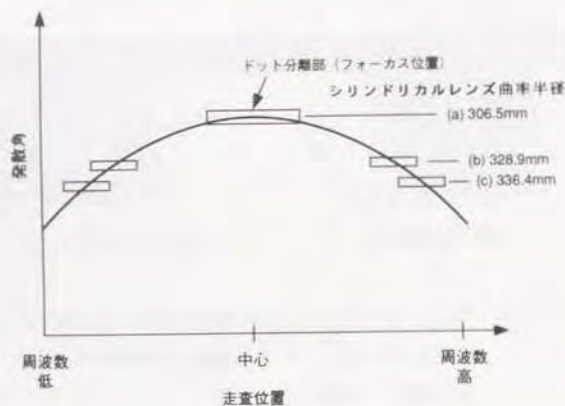


図7. 19 AODによる走査中での発散角の変化とシリンドリカルレンズ曲率のドット分離部への影響の模式図

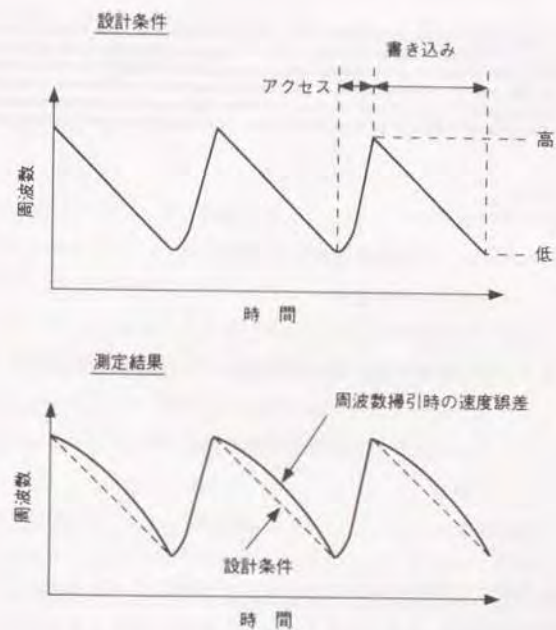


図7. 20 AODの周波数掃引における掃引速度の誤差

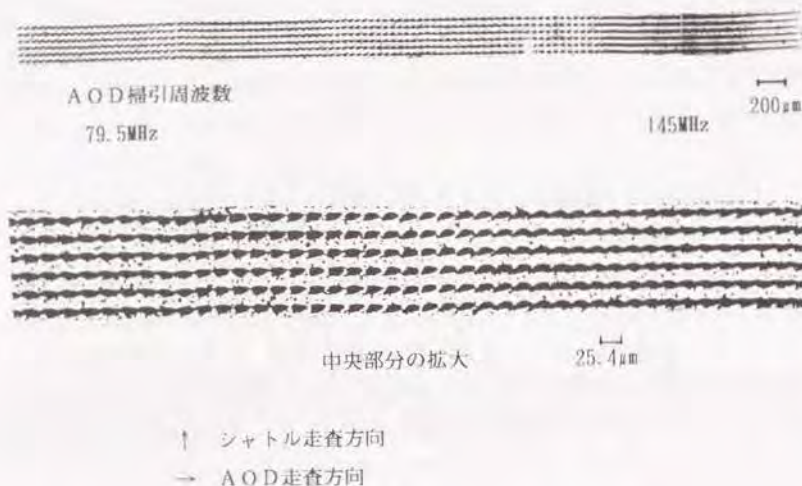


図7. 2.1 周波数掃引速度の補正を行った場合の記録結果

シリンドリカルレンズ曲率半径: 306.5mm
 レーザ出力 : 3.8mW
 記録密度 : 1000LPI

ただし、補正を加えた場合でも145MHz付近での結果にはあまり変化がみられない。またドットも真円ではない。シリンドリカルレンズを取り除き、AODの走査を行わずに駆動周波数を固定した状態で書き込みを行いスポットを観察したところ、145、115MHzでは真円に近いが、85MHzではひずみがあり非点収差の発生が見られた。原因はビームエキスパンダなど光学系での偏心と考えられ、シリンドリカルレンズを含め、光学系全体での調整を十分に行うことによって、スポット形状は向上すると考えられる。また、145MHzでの劣化はAODの他の回折光の影響があると思われる、0次光、2次光のカットを十分にすれば改善の可能性がある。

以上のように課題は有しているが、本質的な書き込み特性を実証することができ、本装置の概念によるブロックの実現に対する目途を得ることができた。

第7. 5節 読み取り光学系の設計と実験

スキャナに用いる読み取り光学系に関し設計と実験を行った。受光素子としてPMT、あるいはCCDを用いる2方式が考えられ、各々について光学系の設計を行い、照明と受光量の問題を中心に実験を実施した。

7. 5. 1 読み取りの2方式

スキャナの基本構成はブロックと同様であり、シャトルの往復運動と共にその直交方向に256ラインの走査を行い、かつ2系列の光学系で隣接ライン交互を同時に読み取り、512ラインを走査するものである。

PMT方式では、PMTの受光は1点であって自己走査性はないため、レーザービームによる走査によって原稿を照明し、その反射光を集光して検知する。CCD方式ではCCDに自己走査性があるため、照明は読み取り幅に対して一様でありさえすればよく、照明側での走査は不要である。両方式の特徴は次のようである。

PMT方式は

- (1) 受光感度が高い。
- (2) 書き込み系と共通したレーザー走査光学系をそのまま用いて照明が行える。
- (3) PMTは重量が大で高圧を用いるため固定する必要がある。従って移動するシャトルより反射光を導くための光学系が付加され、光学素子数が増加する。

CCD方式は

- (1) 光学系が簡単である。
- (2) 2ビームの分離が困難である。
- (3) 線密度の変化への対応が難しい。
- (4) 感度が低いため、照明を強くしなければならない。
- (5) 光源およびCCDをシャトルに搭載するため耐加速度性が必要である。またリード線の扱いが難しい。

なお、原稿には訂正等で糊付けがされて、高さを有するもの（ベストアップ）もあるので、焦点深度、および陰影への対策も考慮する必要がある。

7. 5. 2 PMT方式

本方式による光学系の概念を図7. 22に示す。書き込み光学系と同様な構成によって走査されたレーザー光が原稿面を照射する。原稿からの反射光はベストアップに対応するため異なる2方向から受光を行う。シャトルには照明用の $f\theta$ レンズ、読み取り用のレンズ、およびミラーからなる光学系が搭載される。反射光は固定側のレンズによってPMTに導かれるが、隣接した2ラインを分離して同時に読み取るため、屋根型ミラーの2面各々によって各ラインからの反射光を受け、異なる方向に反射してそれぞれ別個に読み取りを行う。従って、PMTは4個必要である。

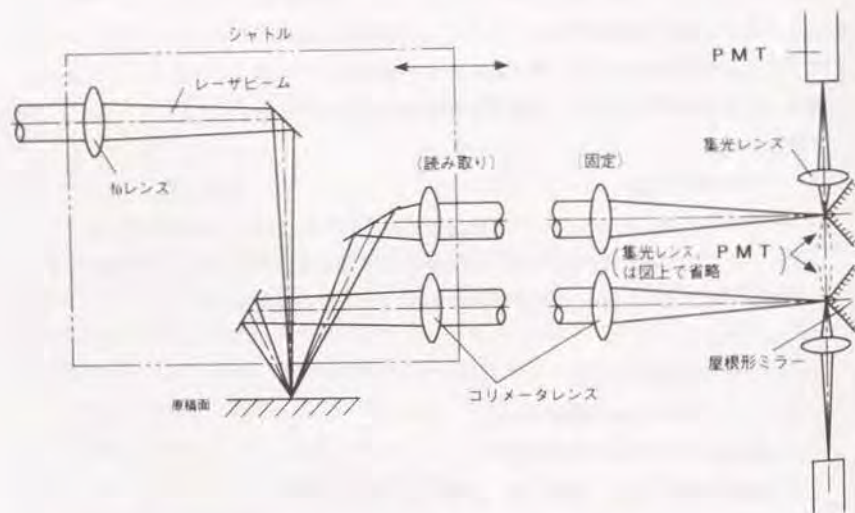


図7. 22 PMT方式による読み取り光学系の概念

シャトルは約1000mm移動するので、反射光の径路においても光路長の変動がある。原稿からの反射光をシャトルに搭載した光学系によって平行にすれば、光路長変化による焦点移動は起こらない。このため、シャトル上の読み取りレンズと固定側のレンズでコリメート光学系を構成する。

平行ビームは固定レンズによって屋根型ミラーの2面に結像されるが、隣接した2ラインの間隔は1画素分であって非常に近接しているため、分離を容易にするよう以上の光学系内で像を拡大する。読み取りレンズ、固定レンズの焦点距離を各々 f_1 、 f_2 とすると拡大率 α は

$$\alpha = f_2 / f_1 \quad (7. 7)$$

となる。

読み取りレンズ、固定レンズの各々に書き込み用の $f\theta$ レンズを用い、読み取り実験を実施した。この場合両レンズの焦点距離は等しいため像の拡大がないので、アフォーカルコンバータを用い像を5倍に拡大した。

ビームの走査を行わず、1点に照明を行って得られる白黒の信号のレベル差は、目標のIVに対して20mVであった。走査を加えた場合には照度はさらに低下するため、光量を増加する必要がある。

反射光が原稿面上のすべての方向に等しく拡散すると仮定し、その一部を焦点距離の位置において、ある口径のレンズによって受光するとすれば、レンズの読み取り光量はF値の2乗に比例する。本実験で用いたレンズのF値は19.3であるが、これを可能な限り小さくする必要がある。

一方、製品化されたCTSスキャナと光量を比較してみる。図7. 23は現用のスキャナの読み取り光学系であり、レーザー光をポリゴンミラーと $f\theta$ レンズにより走査して照明し、反射光を原稿面より110mmの距離にある直径0.5mmの光ファイバー列によって受光し、PMTに導いている。

上述の拡散光に関する仮定の下に、原稿による散乱光量に対する受光光量の比を、実験での光学系とCTSスキャナでの光学系について計算し、1ドットに対するレーザー光の照射時間、線走査速度、光源利用効率と共に比較したものが表7. 6である。実験装置での受光光量が約1/4になるのに対して、1ドットの照射時間は約1/3であり、一方、光源の利用効率も低い。従ってこのままではレーザー出力を10倍にしても、CTSスキャ

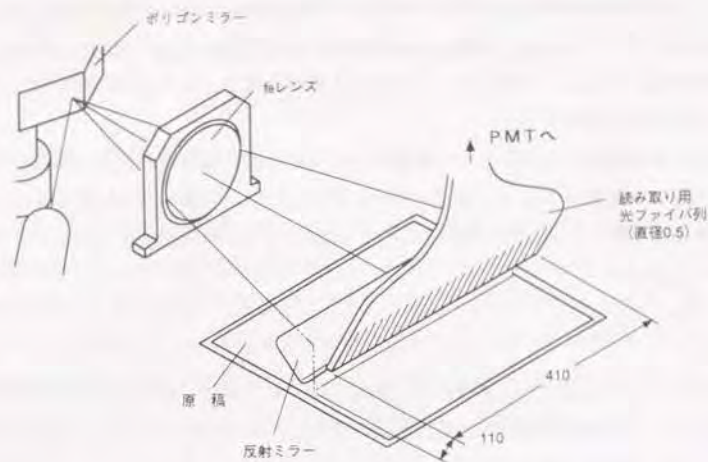


図7. 23 CTSスキャナにおける読み取り光学系

表7. 6 実験装置とCTSスキャナの受光光量などの比較

項目	実験装置	CTSスキャナ
受光光量/散乱光量	0.34×10^{-3}	1.37×10^{-3}
1ドット照射時間 (μs)	0.098	0.298
線走査速度 (mm/s)	173-433 (600-1500LPI)	103.9
光源利用効率 (設計値) (%)	5	55

ナに比し約12倍の光量が必要であることになるが、レンズのF値を小さくすれば可能な値と考えられる。

このため、シャトル側の読み取りレンズに、市販のF/1、焦点距離34.5mmの非球面レンズを用いて読み取り実験を行った。固定レンズにも市販の非球面単レンズを用いた。光量の確認のため、固定レンズによる結像点に直接PMT受光面を設置した。AODの掃引を停止状態にして標準原稿を読み取った結果では、白黒のレベル差として0.7-1.4Vが得られ、必要光量に達することが確認できた。

この読み取り実験においては、7. 4. 1で述べた照射光量向上のための対策がなされていない走査光学系を用いたため、対策によって照射光量が約4倍となった場合は、F値がさらに高くとも必要な読み取り光量が得られると考えられる。

シャトル上の読み取りレンズは重量の点より小型であることが望ましく、またペーストアップに対応するためには焦点深度が大きくなってはならない。これらの点からはF値は大きい方がよく、勘案した結果、読み取りレンズのF値を3.5として光学系の設計を行った。設計結果を図7. 24に示す。固定レンズには、書き込みに用いるfθレンズの径を広げたものを用いた。なお、分離用屋根形ミラーの後方には集光レンズを設置し、像をPMTに再投影する。

読み取りレンズ、固定レンズを合わせた総合解像力を求めた。両レンズの間隔を1000mm、20mmにした場合の、1000LPIにおけるデフォーカスとMTFの関係を図7. 25に示す。1000mmにおいてはほぼ無収差に近いが、20mmでは主走査方向のMTFが落ちる。しかし、2ラインの分離に対しては副走査方向のMTFが重要であり、この値は無収差に近くなっていることから問題はなく、分離時での相互干渉はほとんどないと考えられる。

以上の検討よりPMT方式による本概念のスキャナは十分実現が可能と考えられる。

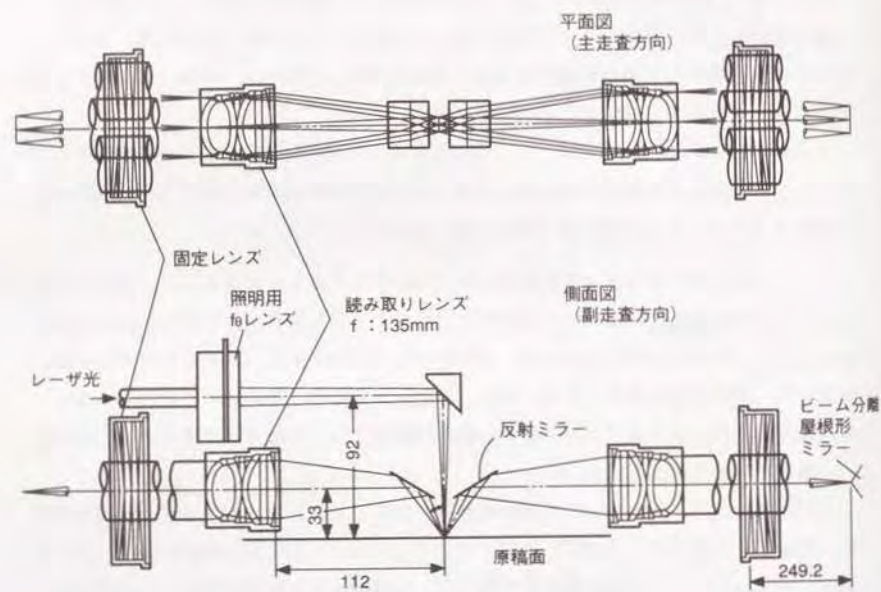
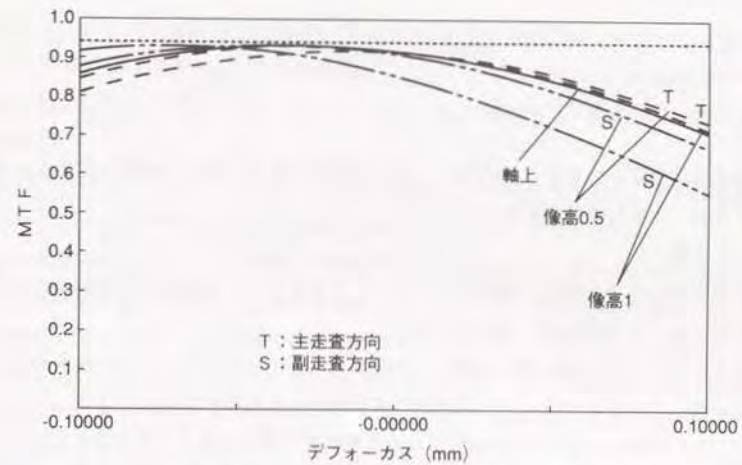
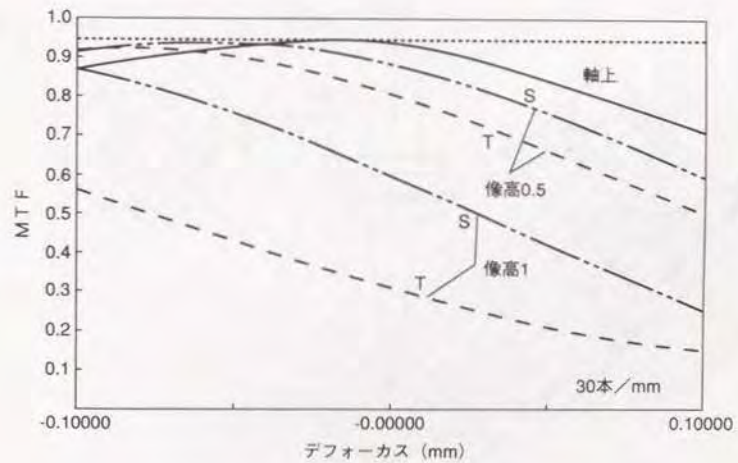


図7. 24 PMT方式による読み取り光学系の設計結果



(a) 読み取りレンズ～固定レンズ間1000mm



(b) 読み取りレンズ～固定レンズ間20mm

図7. 25 読み取り光学系の総合解像力 (PMT方式)

7. 5. 3 CCD方式

本方式は、全体にはCCDの結像レンズと照明系があるのみで、構成は簡単であるがPMT方式と比較して技術課題は多い。

(1) 光量

256素子のCCDを用い、300Wハロゲンランプを光源として読み取り実験を行った。CCDのクロック周波数は2.8MHzとした。

ハロゲンランプを光源に用いる場合、照度を上げるにはフィラメントの像を形成させればよいが、そのままではフィラメントの像が投影され照明にむらができる。シリンドリカルレンズを用い、長辺方向の光を像にせず線状平行光となるようにすると共に、フィラメント側に非球面集光レンズを配置し、2方向から照明を行う図7. 26の光学系を

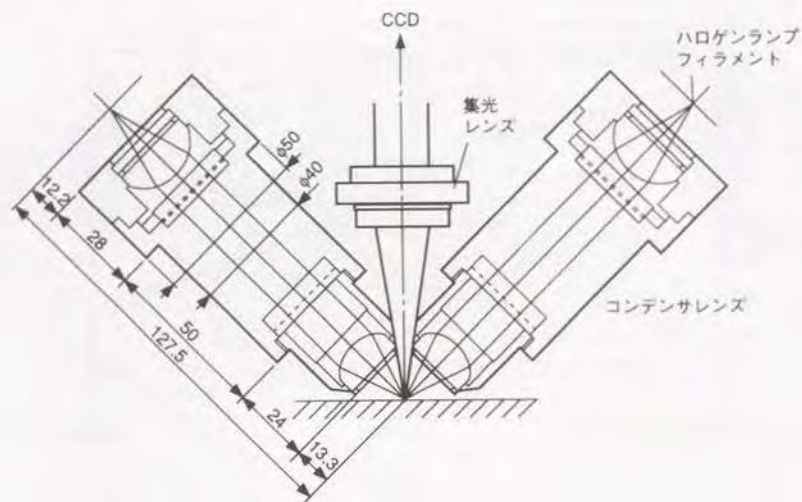


図7. 26 ハロゲンランプを用いた照明光学系

製作して、シャトルに搭載して実験を行った。CCDの読み取りレンズとして等倍のF/4レンズを用い、ファクシミリ標準チャートの白レベルを読み取った結果ではCCD出力は飽和していることが認められた。ただし、輻射熱が著しく熱対策を考慮する必要がある。

このためハロゲンランプを50Wにして読み取りレンズの絞りを換え、CCDが飽和するハロゲンランプの電圧を求めた。結果を図7. 27に示す。

レンズが開放の場合には定格電圧の60%で飽和するが、ベストアップに対する焦点深度の確保のため、解析結果では読み取りレンズはF7-8迄絞る必要がある。一方、実機ではCCDのクロック周波数は10MHzであり、これらから50Wランプの約4倍の光量が必要であることになる。必要な光量を確保しつつ低電力化を計るためには、線状の照明に対して有効なフィラメントの配置と、フィラメント発光部に見合った光学系の再検討が必要と考えられる。

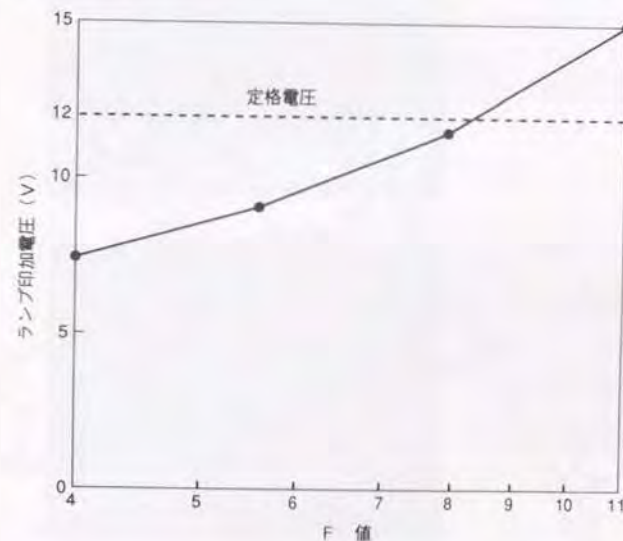


図7. 27 CCD読み取り時の飽和に達するランプ印加電圧とF値の関係

(2) レーザによる照明

ハロゲンランプでは発熱の問題があるとともに、結像縦幅が細くならず照明の効率が悪い。このため、レーザによる照明の検討を行った。実験は図7.28に示すように、光源に10mW He-Neレーザを用い、ビームエキスパンダとシリンドリカルレンズによって線状のビームにした。CCD駆動条件はハロゲンランプによる実験と同一とした。

CCDの出力電圧を、300Wハロゲンランプの照明による場合と比較して図7.29に示す。原稿には全白と、全白面上に0.23mmの厚さの紙を貼りつけたペーストアップのあるものを用いた。得られた信号にはその影の部分が現れている。

白レベルでは出力が飽和しており、光量には問題ない。また、検出の両端では出力が低い。光学系を適切にすることによって対策が講じうると考えられる。しかしながら、コヒーレンシーが高いため、スペックルノイズが大きく検出が困難である。このため、照明光学系中の素子に機械的運動を加える⁷⁾、などのノイズを下げる光学的な手段が必要であり、光学系が複雑になることは避けられない。

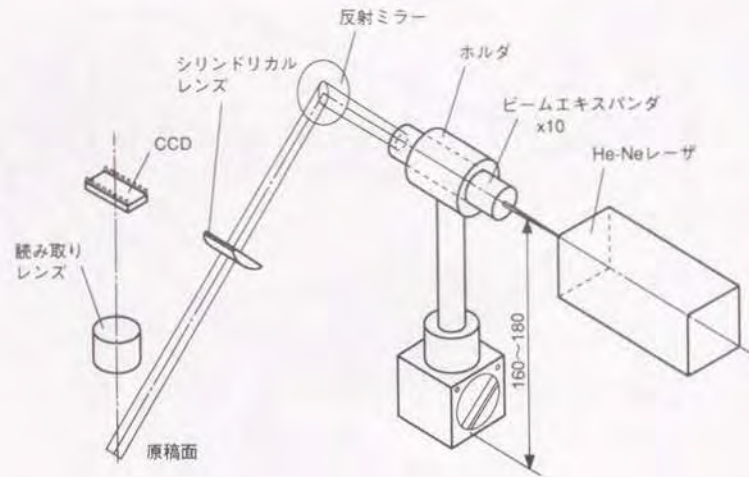
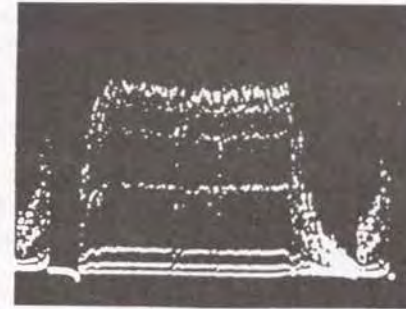
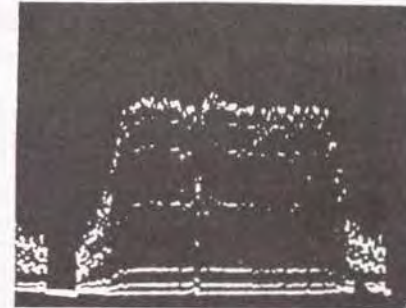


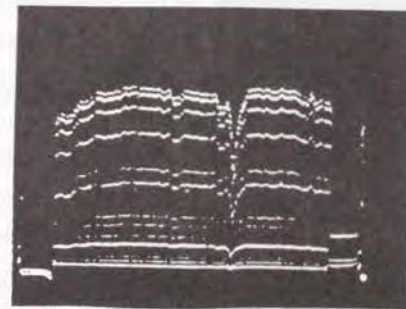
図7.28 レーザによる照明の実験



(a)
He-Neレーザ斜め照明
全白原稿



(b)
He-Neレーザ斜め照明
ペーストアップ1段原稿



(c)
ハロゲンランプ2方向照明
ペーストアップ1段原稿

図7.29 CCD出力と照明光源

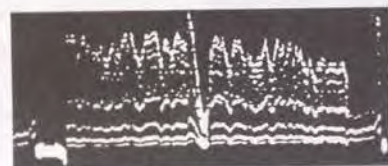
縦: 0.5V/div. 横: 20μs/div.

(3) ベーストアップ

原稿のベーストアップは最大1mmの高さまで見込むが、影の発生により正常な原稿の読み取りを妨げる。PMT方式では垂直方向からの照明であって影ができにくい上、集光後の光量より信号を得るため比較的影響は少ないが、CCD方式では反射光を像として検出するため、照明と関係して影響を受けやすい。

図7.29の斜め照明の実験ではベーストアップに対して影が見られるため、ハーフミラーを用いてCCDの光軸と同一の垂直方向から照明を行い読み取り実験を行った。光源にはハロゲンランプ、およびHe-Neレーザを用いた。

各々に対するCCD出力は図7.30に示す通りで、信号が安定していない。これは、



(a)
光源：ハロゲンランプ

縦：1V/div. →
横：20μs/div.



(b)
光源：He-Neレーザ

縦：0.5V/div. →
横：20μs/div.

図7.30 垂直照明による読み取り時のCCD出力
(ベーストアップ原稿)

原稿からの反射光が完全な拡散光でなく方向性を持っており、原稿面の凹凸などによってCCDへの入射条件が相当に変化するためと考えられる。また、ベーストアップ部での改善もあまり認められないが、垂直に照明を行っても反射光の一部はベーストアップ部の壁面で遮られるため、光量の低下があり信号に影響を与えていると考えられる。

これらの結果より、2方向照明を用いつつ積極的に光の拡散を増して影の影響を低減することが望ましいと見られる。このため、原稿上に拡散面を設けることを検討し、厚さ1.8mmのすりガラスを載せた場合と、厚さ50μmのメンディングテープを貼りつけた場合について測定を行った。図7.31に示すようにベーストアップの影響が低減され、信号も明瞭になることが認められる。板厚の大きい場合には光量と解像力の低下があるため拡散層は薄いことが望ましく、シート表面に適当なコーティングを行うなどの方法が考えられる。

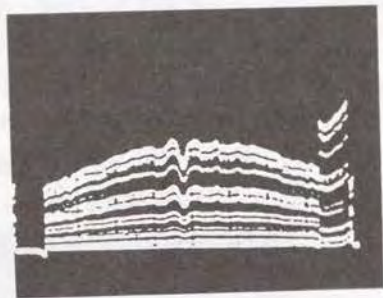
(4) 2ビームの分離

図7.32に示すように、ハーフミラーによる分離を行う方法、および2対の光学系により2方向から読み取る方法、以上の2種が考えられる。前者では読取りレンズが1個でよいが、読み取り光量が半分になる。後者では光量は落ちないが、原稿を斜めから読むためベーストアップに対して厳しくなり、光軸合わせも難しい。前者の方が有利であると考えられる。

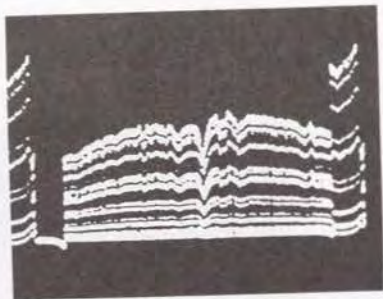
(5) 線密度の変化への対応

像倍率を変化させる必要があるが、読み取りレンズとCCD両者の位置を可変にする方法、ライン密度に応じた固定焦点レンズをタレットにより変換する方法、およびズーム読取りレンズを用いる方法、以上の3種が考えられる。比較すると、重量の点よりズームレンズによる方法が有利と考えられる。

以上述べたように、CCD読み取り方式で発生する諸問題は解決が可能と見られるが、装置全体として複雑化することは避けられず、総合的にはPMT方式が適していると考えられる。

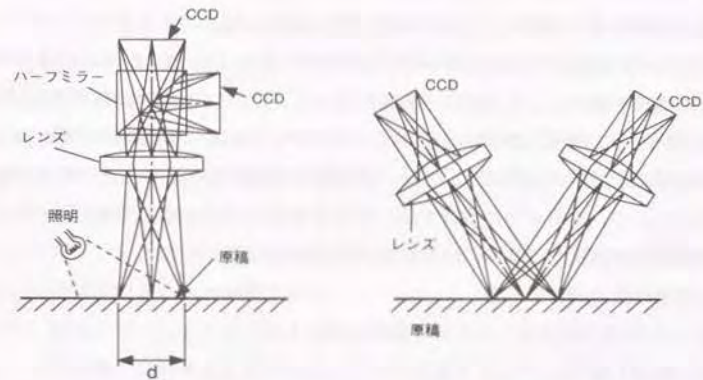


(a) 1.8mm厚すりガラスを置いた場合



(b) 0.05mm厚メンディングテープを貼った場合

図7. 31 原稿上に拡散面を置いた場合のCCD出力
(ベーストアップ原稿、ハロゲンランプ照明)
縦: 0.5V/div.
横: 20 μ s/div



(a) ハーフミラーによる分離

(b) 2方向からの読み取り

図7. 32 CCD方式による場合の2ビームの分離読み取り方法

第7.6節 総括

新聞原稿の画像通信システムへの応用を目的として、AODと高速機械運動によって約1m幅の大画面の走査を行うプロッタ、スキャナの光学系について、設計と基本性能に関する研究を行った。

プロッタに関しては、2ビームの分割光学系、コリメート光学系、および入射瞳位置の変化する $f\theta$ レンズの設計を行い、書き込み時の光量、AOD走査時の非点隔差、ならびに記録結果のスポット形状について実験と検討を行った。

また、スキャナに関しては、受光素子としてPMT、CCDの各々を用いた場合について光学系の構成を検討し、その設計と実験を行った。CCD方式では特に照明が問題であり、レーザによる照明、および原稿のペーストアップ対策も含め検討を実施した。

これらの結果より、プロッタについては、AODの周波数掃引速度と光学系の調整の精度を高めることで、スキャナについては、PMTを用いプロッタと同様なレーザ走査光学系で照明を行う方式で、各々の目標性能の得られる見通しを得た。

得られた結果は次の通りである。

プロッタに関しては

(1) 1個の光源より近接した2ビームを分割するには、ビームスプリッタ、およびAOMの2周波変調の2方式のいずれによっても目的が達成できるが、書き込み速度を低下させない点より前者が有利である。

(2) 記録面上を移動するため入射瞳位置が変化する $f\theta$ レンズについて、強い凹レンズを用いず、各単レンズの焦点距離を均等にかつ長くする構成によって、瞳位置の変化による収差変動を最小限にし、走査全域に渡って均一で高い解像力を得ることができた。

(3) 光学素子の透過率を確保し、コリメート光学系などの調整を十分に行うことで、5%のレーザ光の記録面での利用効率を確保し、書き込みに十分な光量を得ることができた。

(4) AODによる走査においては、射出光の主走査方向の発散による非点隔差が発生しており、シリンドリカルレンズの挿入によって補正を行うことが必要である。

(5) VCOの回路特性によってAODの周波数掃引速度に非直線性を生じ、走査域内でビームの発散が異なる状態となり、焦点ずれが発生させる。掃引速度を一定にするよう、ROMによる補正を加えることによって、走査全域に近く記録品質を保持することができた。

スキャナに関して、PMT方式では

(6) 読み取りレンズが移動するため、原稿からの反射光を平行光として固定レンズに導き、同時2ラインの読み取りのために、屋根形ミラーによって隣接したビームを分離して各々のPMTで集光する構成について設計を行った結果、読み取りレンズのF値を適正にすることによって、必要な光量と分解能の得られる見通しが得られた。

CCD方式では

(7) 照明光源にハロゲンランプを用いた場合には発熱が問題であり、低電力化のためにはランプのフィラメント配置の再検討と、光量、焦点深度の両面からした読み取りレンズの最適化が必要である。

(8) He-Neレーザによる照明では、スペックルノイズと反射の指向性のために安定した信号を得ることが困難である。

(9) 原稿のペーストアップによる影の影響を除くことは照明の検討のみでは困難であり、影の影響と反射光による信号のノイズを低減するよう、原稿に密着した拡散面を設けることが望ましい。

(10) スキャナにおいては、CCD方式では照明の問題に加え、2ビームの分離読み取り、線密度変化への対応の手段も複雑となることから、PMT方式が適していると判断される。

システム全体としては

(11) 設定した走査の概念によるプロッタ、スキャナの目標性能の確保についての見通しを得ることができた。本概念はさらに検査装置、露光装置などの大画面の画像処理装置への展開を計ることが可能である。

文 献

- 1) 塚本善夫、伊藤直敏、高橋誠一、武井恒夫、永井昌平：レーザ記録技術—走査機構と光学系、画像電子学会誌、8.3.(1979)147-152.
- 2) T. Yano, M. Kawabuchi, A. Fukumoto and A. Watanabe: Te O₂ Anisotropic Bragg Light Deflector without Midband Degeneracy, Appl. Phys. Lett., 26. (1975) 689-691.
- 3) D. I. Greenwood and A. McNeish: Programmable Laser Character Generation, Proc. SPIE, 498, Laser Scanning and Recording, (1984)136-139.
- 4) 荒木信博、河田耕一、坂垣内征雄、佐藤健夫：投射レンズ、特許出願公告 昭63-003283.
- 5) 多田邦雄：光変調・偏向、オプトエレクトロニクス技術 90、日本オプトメカトロニクス協会、(1990)17.
- 6) S. Hosaka, E. Seya, T. Harada and A. Takanashi: High Speed Laser Beam Scanning Using an Acousto-Optical Deflector (AOD), Japanese Jour. of Appl. Phys. 26. 7. (1987)1026-1030.
- 7) V. Pol, J. H. Bennowitz, G. C. Escher, M. Feldman, V. A. Firtion, T. E. Jewell, B. E. Wilcomb and J. T. Clemens: Excimer Laser-based Lithography—A Deep Ultraviolet Wafer Stepper, SPIE 633 Optical Microlithography 5. (1986)6-16.

第8章 微細放電加工によるマイクロ光走査機構の作成

第8.1節 緒言

各種の製品では、半導体を始めとするエレクトロニクスの進展によって、小型化と高集積化が急速に進んでいる。一方、機構系においては小型化の方向を目指しているとはいえ、その進展は革新的ではなかった。しかしながら、半導体プロセスを用いてシリコン基板上にリンク機構¹⁾や静電モータ²⁾が作られたことを契機として、革新的な小形機構、いわゆるマイクロマシンの研究が多方面において盛んになってきた³⁾。

マイクロマシンの大きい応用分野の一つとして医療があげられる。より正確な診断と治療を行うためには、体内に装置が入り患部に直接接近することが望ましく、マイクロマシンに期待が寄せられている⁴⁾。

診断、治療の手段として有力なものの一つにレーザがある。レーザ光は光ファイバによって容易に伝送され、かつ光学系によって任意の操作を行うことができ、非接触で微細な作業が可能である。診断においては、可視光域でのカメラの場合のように血液などによる視界の妨げがなく認識、計測を行うこともできる。従って、図8.1のような血管内に挿入できるような光走査機構が実現できれば、身体のあらゆる部分で内部からの診断、治療が実現できると考えられる。図では直径2mm程度のカテーテルの先端にポリゴンミラーと回転機構を装着し、外部のレーザより光ファイバによってレーザ光を体内に導き、ポリゴンミラーによって血管内部をレーザ光により走査する構想となっている。回転は生理食塩水、血液などを圧力を加えて送りこみ、タービンによって行う。

マイクロマシンの加工手段として半導体プロセスが脚光を浴びているが、半導体プロセスは本来2次元的加工であり、基本的に3次元的な複雑形状の加工、あるいは血管内に入るような細長い機構を加工することは困難である。従って、医療用などのマイク

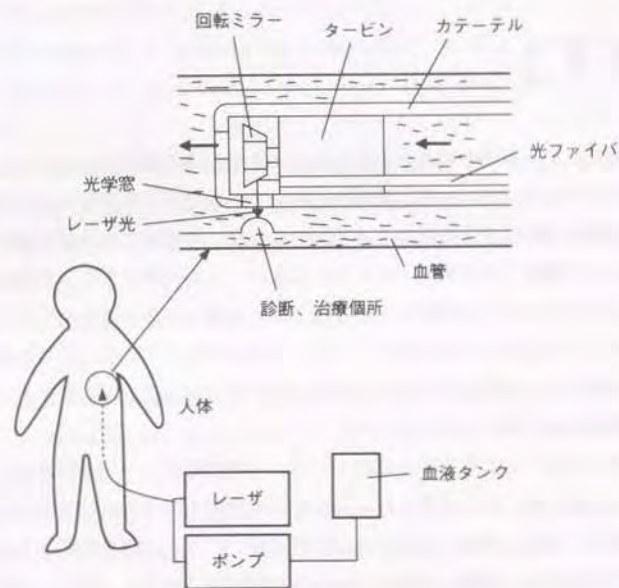


図8.1 血管内診断・治療装置の概念

ロマシンのためには3次元の微細加工技術がぜひとも必要となる。

放電加工は基本的に3次元的な加工であるが、すでに先駆的に微細化に対する研究が行われているように²¹⁻²³⁾、放電エネルギーを微小にすることによって微細形状を高い寸法精度で加工することが可能である。すなわち、放電加工では工具と工作物が非接触であるところから加工力が非常に小さいため、微細な工作物、工具を変形させることがない。また、放電間隙は条件により一定であるため、工具の移動を制御することによって、母性原理により機械の運動と精度を工作物に写しとって、複雑な形状を高精度で加工することが可能である。

放電加工に関しては、近年加工中の放電点分布の究明²⁴⁾などの基礎的研究、単純形状電極による創成放電加工の研究²⁵⁾、微粒の混入による仕上げ面あらかさの向上¹⁰⁾など、より精密で新しい分野を開拓する研究が活発になってきている。

以上の点から、血管内でのレーザーによる診断、治療を行う装置などを目的として、マイクロ光走査機構の作成を可能にする微細放電加工技術に関して研究を行った。放電加工には型彫り放電加工、ワイヤ放電加工、および単純な形状の電極を用いてNC制御により形状を創成する加工があるが、ここでは直径5~300 μm 程度の円柱形状の電極を用い、NC制御によって形状を得る加工を基本とした。

まず、実験装置による加工実験によって微細放電加工における課題を明確にし、その各々に対する解決策を検討した。次に、実験結果に基づいて微細放電加工機を製作し、放電条件と加工結果の関係を把握すると共に、比抵抗の高いシリコンウェハの放電加工を試みた。さらに、回転軸や円柱電極などの微細な軸加工に関して、機械の製作を行い加工実験を実施した。これらの結果を基盤として、光走査のためのマイクロタービン、マイクロポリゴンミラーの試作を行った。

第8.2節 微細放電加工に関する実験

実験装置を製作して、加工実験より微細放電加工における課題を把握し、必須であることの判明した電極の回転、および機械上での電極成形に関して、その方法と装置の構成を検討した。

8.2.1 微細放電における課題

微細放電加工の基本的な特性を把握するため、直径30~50 μm の円柱形状の電極を用いて加工を行う実験装置を製作し、基礎的な加工実験を行った。装置の外観を図8.2に示す。

加工回路は図8.3(a)に示すRC回路である。微細形状の加工を行うためには、単発放電あたりのエネルギーを極力小さくし、かつ放電のくり返し周波数を上げる必要がある。RC回路を用いた場合の単発放電エネルギー E (J)は、絶縁破壊電圧が低い場合の近似として次式で与えられる。

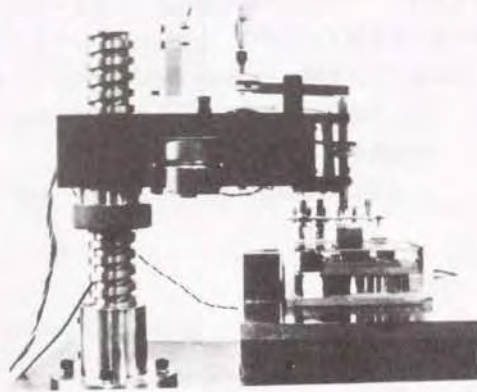
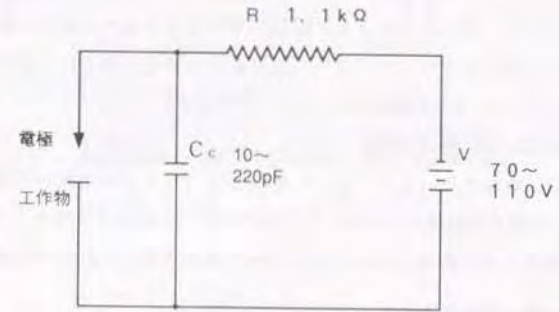
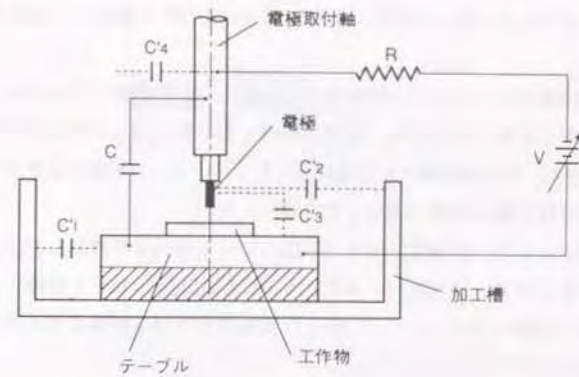


図8.2 微細放電加工実験装置の外観



(a) 放電回路



(b) 浮遊容量

図8.3 放電回路と浮遊容量

$$E = \frac{C \cdot V^2}{2}$$

(8. 1)

ここに、C：放電回路中の容量、V：極間の印加電圧

CあるいはVによって放電エネルギーは変化するが、電圧Vが高すぎると電極消耗が極端に大きくなり、逆に小さすぎると放電が不安定となるため範囲は限られる。このため、主として容量Cによりエネルギーの調整を行う必要があるが、実際には、図8. 3 (b) に示すように、放電回路中のコンデンサの容量C₀（以下コンデンサ容量とする）以外に各構成部品間に浮遊容量C' ₁、C' ₂、C' ₃、C' ₄などが存在し、これらの合成容量C'を加えた(C₀ + C')が加工を行う上での実際の容量となる。微細加工領域では、使用する放電エネルギーEを10⁻⁶~10⁻⁷J程度まで小さくする必要があり、容量は数~数百pFの範囲となる。このため、浮遊容量をどれだけ低減できるかが放電エネルギーの微小限度を決定する。

製作した装置では、放電回路中の金属部品を極力小型化するとともに、電極支持部分、および加工テーブル基板などにセラミックスを用い浮遊容量を低減した。また、コンデンサ、および抵抗は加工点にできるだけ近づける配置とした。これらの対策によって浮遊容量はpFオーダーであると推定される。回路ではRは1.1kΩに固定し、電圧はDC70~110Vとした。

電極材料には市販のタングステン線を用い、必要な長さに切断してねじり、および張力を与えた後加熱してカールを取り、表面に銅めっきを施した上で円筒ラップによって真直度を向上させた。その後硝酸による電解エッチングによって先端の必要部分の銅めっきを除去し、取り付け軸の先端に固定して電極とした。

電極は2~10μm/sの一定速度で送り、短絡時には短絡信号を検出して10μm/sの速度で自動的に引き上げる。送りはパルスモータの回転によってねじを移動させ、その動きによってレバーを押し下げ、レバーに接した電極の取り付け軸端を加工面に対して送りこむことによって行う。

直径30μmの電極によって、厚さ0.15mmのSUS304板に穴加工を行った。レバーの移動より測定した電極の送り量と短絡信号を同時にペンレコーダによって記録を行い、加工の進行状態を測定した。

図8. 4に各コンデンサ容量における結果を示す。図中の上方の曲線が電極送り量であり、下方のパルス状の出力が短絡信号を示している。加工開始と貫通時に短絡が特に

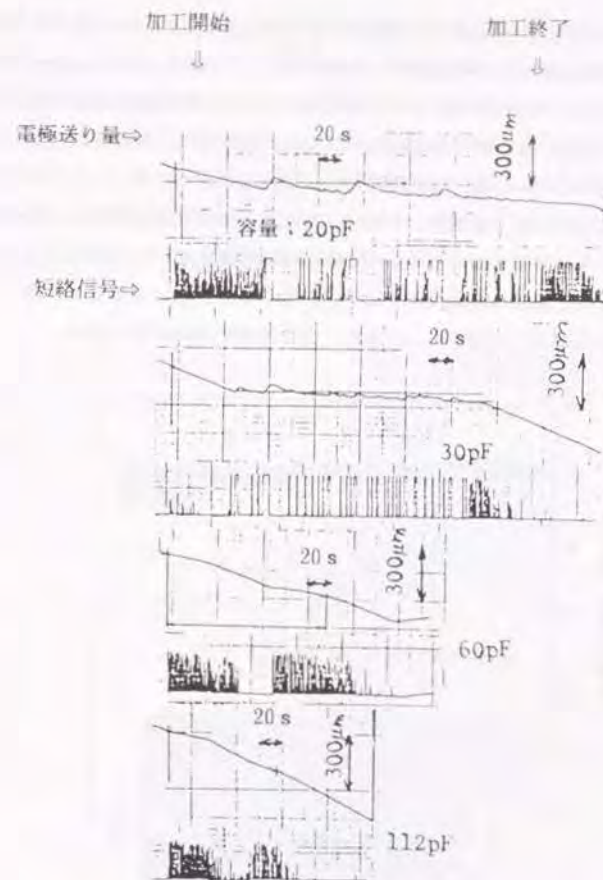


図8. 4 各コンデンサ容量での加工における電極送り量と短絡信号

材料：SUS304、厚さ150μm 電極径：30μm
 電圧：70V 送り速度：2μm/s
 加工液：三菱EDF

多いことが認められる。短絡に伴って電極が引き上げられるため、加工全体で平均した工作物に対する電極の送り込みの速度は、装置で設定した $2\mu\text{m/s}$ の送り速度に比し、かなり低くなるが、コンデンサ容量によって異なる。コンデンサ容量の小さい場合、出口側で短絡が頻繁に生じ、抜け際で加工の進行が極端に遅くなって加工時間が長くなる。短絡は一定した状態でないため、加工時間のばらつきも大きくなる。

次に、同一試料上で穴加工を連続して行い、各回での放電開始位置をレバーの位置から測定して、回ごとの位置の差分から長手方向の電極消耗を求めた。図8.5にコンデンサ容量を変化させた場合の電極消耗を示す。容量の低下に従って放電エネルギーは小さくなり電極消耗も減少すると考えられるが、逆に増加の傾向が見られる。

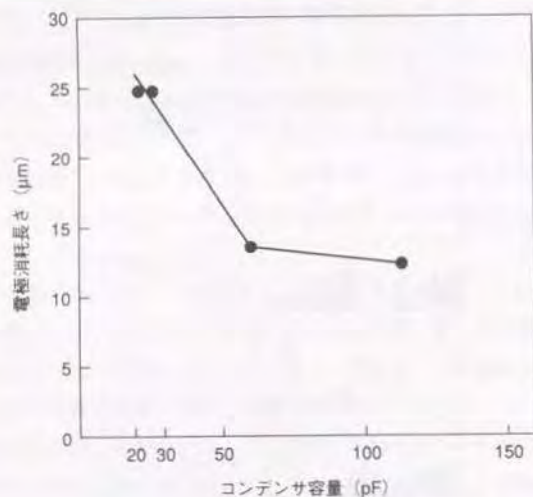
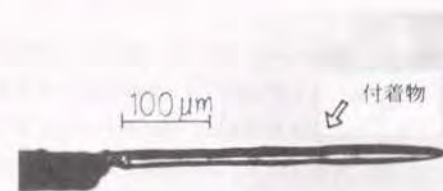


図8.5 コンデンサ容量に対する電極の長さ方向の消耗

材料: SUS304
 穴径: $30\mu\text{m}$
 板厚: $150\mu\text{m}$
 電圧: 70V

図8.6(a)は加工中に短絡を生じて引き上げた状態の電極であり、先端にひげ状の付着物が見られる。また、これと対応して穴底部にはくぼみが認められた。付着物は電極と工作物が短絡した際に溶着が起り、電極の引き上げにつれて溶着部分から成長したものと考えられる。再び加工を行うと付着物は脱落する。電極引き上げに伴う短絡が頻繁に発生しているときには、このような現象がくり返し起こっていると見られる。この付着物が取れる際、(b)のように電極の一部を欠損してしまうことがある。

コンデンサ容量の小さい場合には放電間隙が小さくなるため、送りむら、振動などの



(a) 電極先端への溶着物の付着



(b) 先端の切損した電極

図8.6 溶着の発生した電極

機械的要因、あるいは加工屑の残存により短絡が生じやすい。また、単発放電当たりの加工量が小さいため、容量の大きい場合と比較して同一除去体積に対して放電回数が多くなり、短絡の頻度も高くなる。従って、短絡による電極の欠損が多発し、電極消耗が大きくなるものと推定される。

微細放電加工を安定して実施するためには、突発的な欠損をなくし、より安定した加工の進行状態を実現する必要がある。

8. 2. 2 電極の回転

以上の問題の解決のためには、電極を回転させて加工を行い、特に加工開始時と貫通時の放電を安定させることが望ましいと考えられる。回転によって放電箇所が分散されるとともに、溶着が発生したとしても成長する前に切断されることが期待できる。また電極の消耗も断面に対して平均化されるので、回転精度が高ければ穴加工の場合の真円度、形状加工を行った場合の寸法精度も向上する。

電極の回転精度は微細加工では厳しくなるが、金属を用いて大きい軸受を構成することは浮遊容量の点より不可能である。このため、図8. 7に示すように、ポリシ加工を

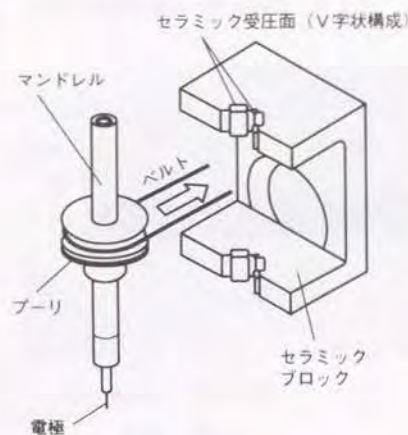
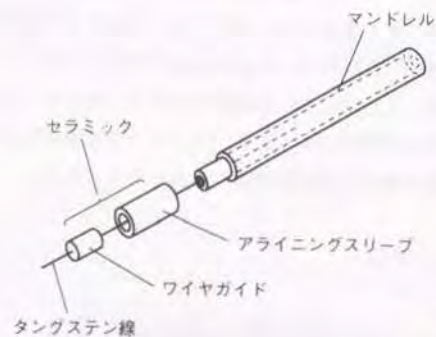


図8. 7 電極回転のための軸受構造

行った4個のSiC板をセラミックブロック上にV字状に配置した軸受の上で、電極の取り付け軸(マンドレル)を直接のせて回転を行う構造とした。

回転軸と電極の支持は図8. 8に示す構成とした。まず、電極の線材を挿入する穴と、外周の同心度を正確に加工したセラミック製のワイヤガイドを用意する。一方、マンドレルの先端にワイヤガイド外周と同一の径を持つ段差を、マンドレルの外周と同時研削によって加工する。次に、精密なかん合を有するセラミック製アライニングスリーブによって両者を連結し、マンドレル外周と電極の同心度を確保する。



すきま	タングステン線、 ワイヤガイド間	1 μm以下
	ワイヤガイド、 アライニングスリーブ間	1 μm以下
	アライニングスリーブ、 マンドレル間	圧入
ワイヤガイドのワイヤ穴と外周面の同心度		2 μm以下
アセンブリ全体のワイヤ穴と マンドレル外周面の同心度		4 μm以下

図8. 8 電極の支持構造と各部分の精度

マンドレルにはブーリを取りつけ、ゴムベルトによって回転を与えるとともに、ベルトの張力によって軸受上にマンドレルを押し当てる。図8.9は回転時のマンドレルの振れを容量型変位計で測定した結果であり、 $0.5\mu\text{m}$ 以下の回転精度となっている。電極の回転数は最大4000rpmとした。

図8.10は電極を回転させて穴加工を行った場合の、電極送り量と短絡信号を示す。短絡は発生しているが加工の開始時、および貫通時に集中していることはない。電極の実効的な送り速度は加工全域にわたって $1\mu\text{m}/\text{s}$ 程度で、著しい変動はなく安定している。

電極の消耗は図8.11に示すように、穴加工では径方向よりも主として長手方向に発生する。このため、加工深さに対する加工後の電極長さの短縮量の比を電極消耗率と定義し、電極消耗率を、直径 $30\mu\text{m}$ 、および $50\mu\text{m}$ の穴加工に対しコンデンサ容量を変化して求めた結果を図8.12に示す。電極固定の場合と異なり、コンデンサ容量が小さくなるに従って消耗率は次第に小さくなる。コンデンサ容量が 22pF では消耗率は上昇するが、これは電極固定の場合と同様の理由によると考えられる。

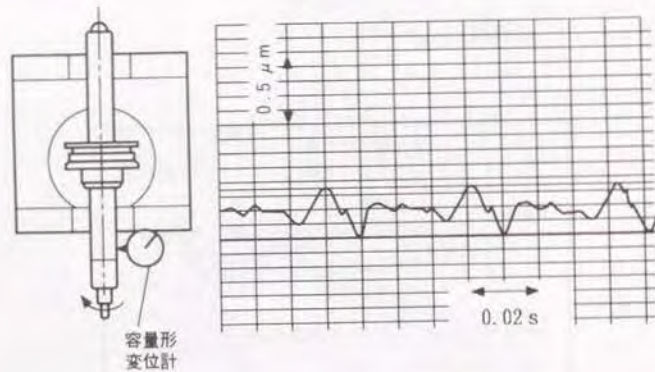


図8.9 マンドレルの回転時の振れ

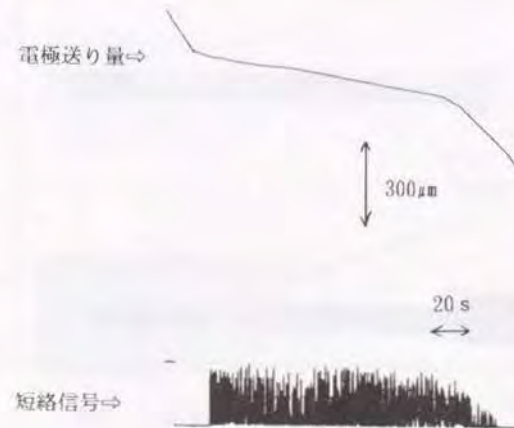


図8.10 電極を回転させた場合の電極送り量と短絡信号

材料	: SUS304、厚さ $150\mu\text{m}$
電極径	: $30\mu\text{m}$
コンデンサ容量	: 55pF
電圧	: 70V
送り速度	: $2\mu\text{m}/\text{s}$



(a) 加工前



(b) 50 μm 深さの底つき穴を20個加工した後

図 8. 11 穴加工での電極の消耗状態

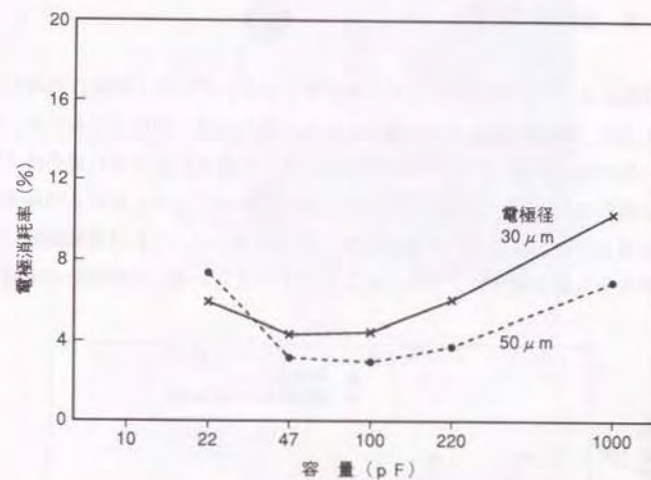


図 8. 12 コンデンサ容量と電極消耗率

工作物：SUS304板、厚さ50 μm
 送り：2 $\mu\text{m}/\text{s}$
 電圧：70V
 電極：タングステン
 回転数：3600rpm

図8. 13に、電極の回転の有無による加工時間とコンデンサ容量の関係を示す。加工時間は電極消耗を考慮し、板厚150 μm に対しマンドレルが200 μm 送られる時間とした。電極の回転によって加工速度は大きくなるが、特に容量の小さい領域でその効果が著しく、微細放電加工においては電極の回転は必須と考えられる。以上の結果、微細加工を安定的に実施できる目途を得ることができた。

8. 2. 3 電極の成形

電極の回転によって安定した加工が可能となったが、次に加工精度の問題がある。

図8. 14は、電極を回転させた場合と止めた場合の各々の加工における、電極の入口側、出口側での穴形状と穴径の測定結果を示す。電極を回転させた場合は入口側、出口側ともに真円度が良好でテーパも少ないことがわかる。しかしながら電極径に比し、電極固定の場合の出口側を除いて全体に加工穴径が大きい。これは放電間隙以上に、電極のタングステン線の曲がり、振れがあるためと考えられる。電極固定の場合の出口側

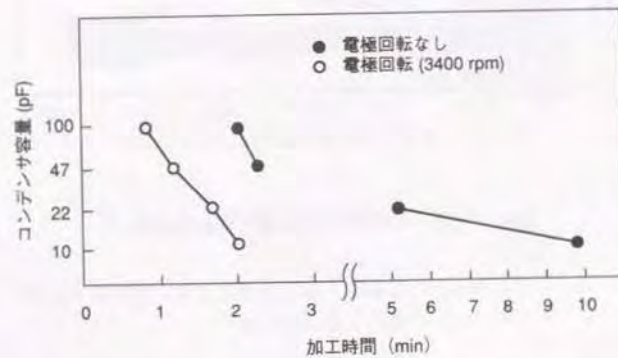
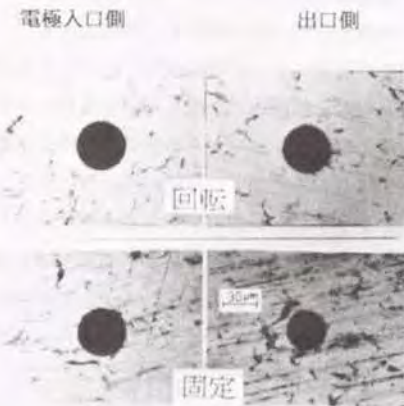


図8. 13 電極の回転と固定での加工時間の差異

材料: SUS304, 厚さ 150 μm
 電極径: 30 μm
 電圧: 70V
 送り: 4 $\mu\text{m/s}$



電極	入口径	出口径	入口径-出口径
回転	43	41	2
固定	42.3	33	9

(μm)

図8. 14 電極の回転と固定による加工穴の状態と寸法

材料 : SUS304、厚さ 150 μm
 電極 : 30 μm 径、タングステン線
 電圧 : 70V
 コンデンサ容量 : 回転...60pF、固定...55pF
 電極回転数 : 3800rpm
 電極送りこみ量 : 200 μm

このような曲がり、振れの量は微細加工においては無視できない値であり、これは最初より目的の径となっている細い線材をキャピラリーに挿入し、組み立てるために発生する。従って、所要の電極径に比し径の大きい線材を用い、マンドレルを回転させつつ加工時と同一の状態で電極を目的の径に成形する必要がある。

このため、加工機上で逆放電によって電極成形を行うこととした。図8.15にその概念を示す。Rmax 0.2 μ m程度に鏡面加工を行った金属ブロックをテーブルに取り付け、電極を回転させながらその側面とブロックとの間で加工時と逆極性の放電を行い、電極を順次ブロックに対して切りこんで加工し目的の径に仕上げる。図8.16に以上の方法により、直径120 μ mのタングステン線の先端を38 μ m径に成形した状態を示す。

機械上で成形した電極では、マンドレルの振れと電極先端の振れはほぼ一致し、電極径に対する加工寸法を安定化することができた。また、電極の振れと振動が少なくなることによって短絡の頻度も減少し、加工に要する時間もさらに短縮された。

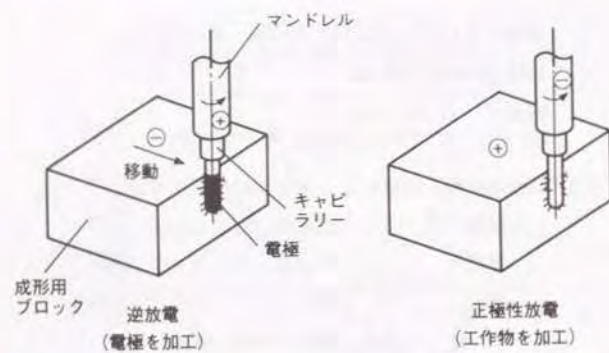


図8.15 金属ブロックとの逆放電による電極の成形

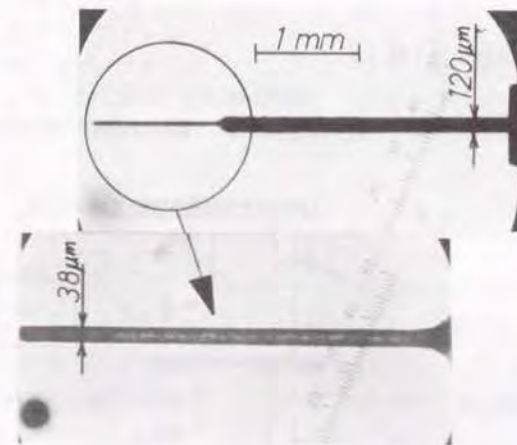


図8.16 ブロックとの間の逆放電によって成形した電極
材料：タングステン

第8.3節 微細放電加工機による加工

基礎実験の結果に基づき、3次元複雑形状の加工を行う微細放電加工機を製作した。また、軸加工のため、新たにWEDG (Wire Electrodischarge Grinding)¹¹⁾の原理による加工機を製作した。製作した加工機により放電条件と加工時間、加工精度、仕上げ面あらかさ、および電極消耗の関係について実験を行った。さらに、比抵抗の高い材料としてシリコンウェハの微細放電加工を試みた。

8.3.1 微細放電加工機

表8.1に、試作した3次元形状の加工のための微細放電加工機の仕様を示す。加工

表8.1 試作NC微細放電加工機の仕様

項目	仕様	
機械本体	外形寸法	750×500×550mm
	重量	200kg
	XYテーブル移動範囲	200×50mm
	Z軸移動範囲	50mm
	最小設定単位	0.1 μ m
	電極回転数	最大 4000rpm
制御部	加工槽寸法	320×160×15mm
	入力電源	100VAC 50/60Hz
	加工電圧(開放電圧)	40~110VDC
	最大加工電流	0.3A

では円柱形状の電極をフライス加工におけるエンドミルのようにして用い、3軸のNC制御によって形状の創成を行う。XY方向の動きは工作物と加工槽を搭載したテーブルによって、Z方向の動きは電極を取り付けた加工ヘッドによって行う。機械は電極の回転機構を持ち、また逆放電による電極の成形機能を有している。

図8.17に機械の構成を示す。工作物Wは放電加工液を満たした加工槽WTの中に設置される。電極ELはマンドレルMAに取り付けられ、モータM2によって回転が与えられると共に、パルスモータM1によって送り運動が行われる。放電はRC回路によ

- EL : 電極
- W : 工作物
- MA : マンドレル
- M1 : パルスモータ
- A : 加工電源、短絡検出回路
- C : コンデンサ
- R : 抵抗
- Mx : 送りモータ
- S : 送りねじ
- WT : 加工槽
- M2 : DCモータ

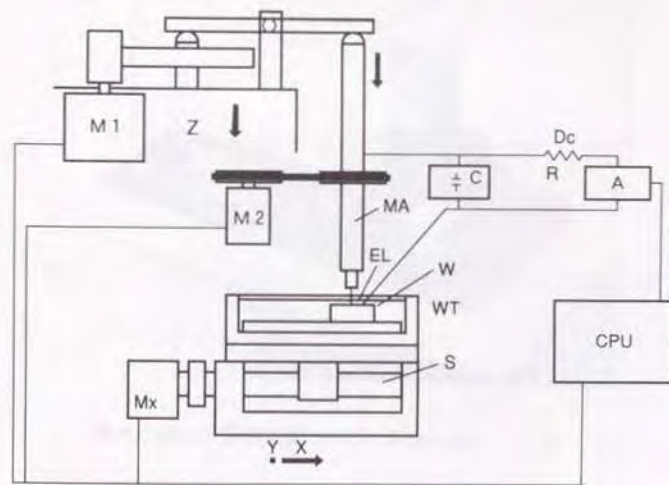


図8.17 NC微細放電加工機の構成

り、加工電源には短路検出回路が付属する。加工電圧、コンデンサ容量、電極回転数、電極送り速度の設定、およびNC指令はコントロールパネルより行われ、装置全体はマイクロプロセッサによって制御される。加工は全自動で行われる。

図8.18に加工機の外観を示す。左側が加工機本体であり、右側が加工条件、位置決めの設定などを行う制御ユニットである。

図8.19は、直径 $20\mu\text{m}$ の穴加工を電圧を変化して行い、レーザ顕微鏡によって電極径、穴径を測定し、加工前の電極径と貫通穴の入口側、出口側の穴径の差より放電間隙を求めた結果である。電極の消耗は径方向でもわずかに生じるため、出口側では間隙は負になっているが、本条件では放電間隙は $1\mu\text{m}$ 以下と考えられる。

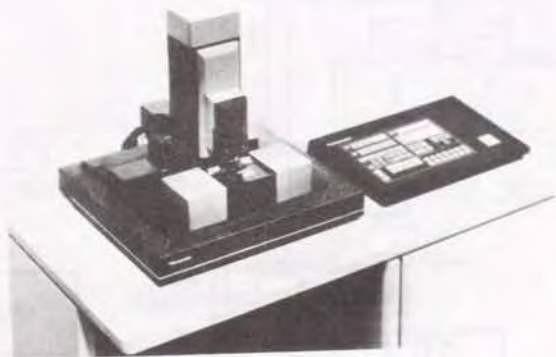


図8.18 試作したNC微細放電加工機の外観

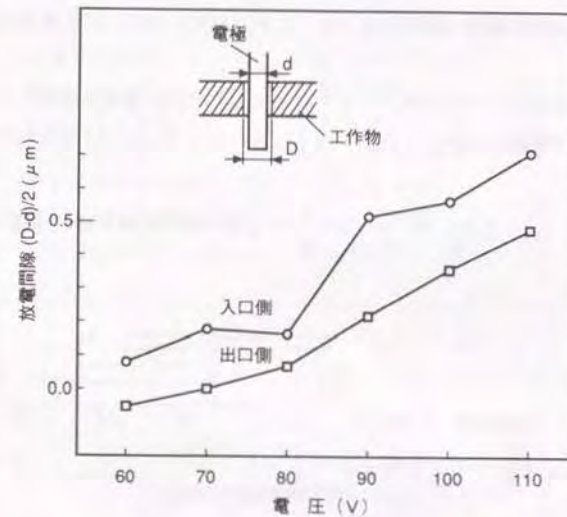


図8.19 電極径と加工穴径より求めた電圧に対する放電間隙

工作物：SUS304 厚さ $50\mu\text{m}$
 抵抗： $1\text{ k}\Omega$
 コンデンサ： 20 pF
 電極：タングステン、直径 $20\mu\text{m}$

以上の加工機はフライス盤的な機能を有するが、機構系の製作、特に回転機構系では旋盤的な機能を有する軸加工機が必要である。

電極の成形も一種の軸加工であって、前節での実験では電極とブロックの間の逆放電により加工を行った。しかしながら、この場合ブロックにも消耗が発生するため、加工された軸径を定めるには、ブロックの消耗を補正するなどの手間を必要とする。

WEDGは走行ワイヤを電極として軸加工を行うため、見かけ上電極消耗を無視できる。従って高精度の軸加工が可能であり、このためWEDGによる微細軸加工機を試作した。

本機の仕様を表8. 2に示す。ワイヤガイドなどの走行機構を搭載したX軸テーブルの動きによって軸径を定め、工作物を取り付けたマンドレルのZ軸方向の動きによって

表8. 2 WEDGによる試作微細軸加工機の仕様

項 目	仕 様	
機械本体	外形寸法	600×500×400mm
	重量	70kg
	X軸テーブル移動範囲	5mm
	最小移動単位	0.02 μ m
	Z軸移動範囲	3mm
	最小設定単位	0.1 μ m
	電極回転数	最大 4000rpm
	ワイヤ径	100 μ m
	ワイヤ速度	0~5cm/min
	ワイヤテンション	0~2N
	制御部	入力電源
加工電圧(開放電圧)		40~110VDC
最大加工電流		0.3A

軸方向の長さを定める。X、Z軸の動きはNC制御されるのでテーブルの加工も可能である。ワイヤには100 μ m径の黄銅線を用いた。

図8. 20に軸加工機の構成を示す。工作物ELはマンドレルMAの先端に取り付けられ、マンドレルはV字状軸受で支持されて回転と軸方向の送り運動が与えられる。マンドレルおよび工作物の取り付け構造は、すでに述べた図8. 18の加工機と全く同一

- | | |
|--------------|-----------------|
| EL : 工作物 | A : 加工電源、短絡検出回路 |
| Wp : 加工点 | C : コンデンサ |
| MA : マンドレル | R : 抵抗 |
| WG : ワイヤガイド | Mt : DCモータ |
| WR : ワイヤ | Mx : 送りモータ |
| Bt : ワイヤボビン | S : 送りねじ |
| Br : 巻き取りボビン | WT : 加工槽 |
| M1 : パルスモータ | M2 : DCモータ |

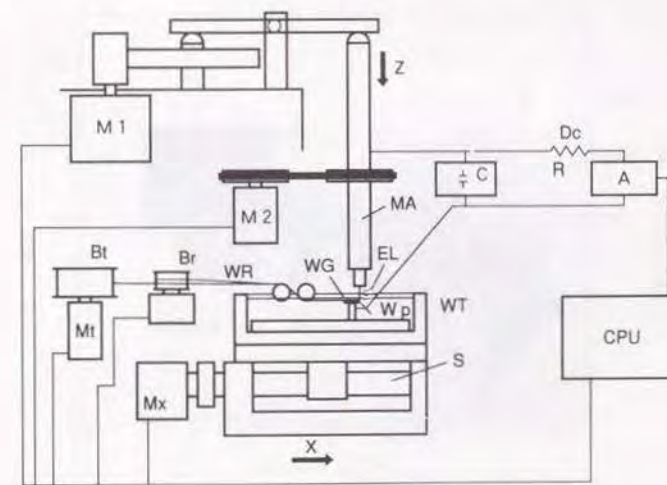


図8. 20 WEDGによる微細軸加工機の構成

であり、互換性があるため両者の中でマンドレルごと工作物をやりとりして、多種類の加工を実施することが可能である。工作物は、ワイヤガイドG上を走行するワイヤWRとの間の加工点Wにおける放電によって加工される。ワイヤWRにはボビンBtに直結したDCモータMtを定電流制御することによって一定のテンションが与えられ、巻取りボビンBrの回転によって走行が行われる。ワイヤガイドGは超合金製で半径5mmの曲率とした。

加工機の外観を図8.21に示す。

8.3.2 放電条件と加工結果

製作した微細放電加工機を用いてSUS304板に対し貫通穴の加工を行い、板厚、電圧、コンデンサ容量、および回転数を変化してその影響を求めた。電極素材には直径125 μm のタングステン線を用い、その先端を目的の径に成形した。成形した電極の真直度は700 μm の長さに対し1 μm 以下であった。



図8.21 WEDGによる試作微細軸加工機の外観

(1) 加工時間

加工時に全く短絡が発生しない場合は電極の引き上げが生じないので、加工速度は電極の送り速度と等しくなるが、実際には短絡があり、電極が上下するため実効的な加工時間は長くなる。実験では穴の貫通時点が求めにくいため、加工時間は板厚150 μm に対し電極を200 μm 送るに要した時間とした。

図8.22は直径30 μm の電極を用い、電圧、およびコンデンサ容量を変化して加工を行い、各々に対する10回の加工時間の平均を求めた結果である。電圧、コンデンサ容量の増大に伴って放電エネルギーが増加し、加工時間は短くなり加工速度は電極送り速度に近づいてくる。

図8.23は、コンデンサ容量を変化して回転数と加工時間の関係を求めたものである。電極径は38 μm である。コンデンサ容量が小さくなるに従って、電極回転数は加工速度に対して影響を及ぼし、回転数2200rpmでは1100rpmの場合に比し加工時間は1/2程度となり、加工時間のばらつきも小さくなる。これは電極と工作物間の相対速度の上

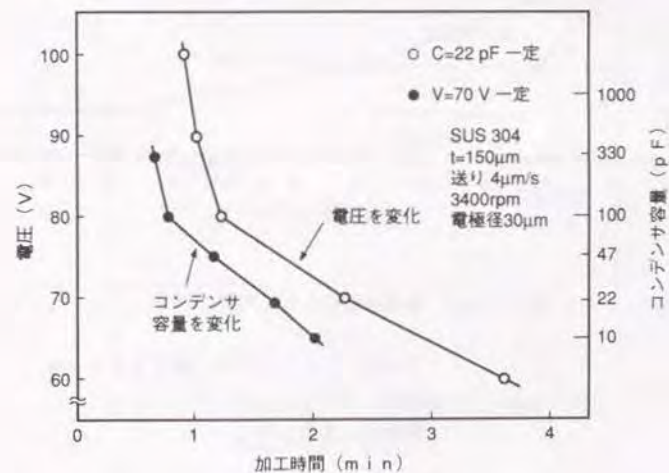


図8.22 電圧、コンデンサ容量と加工時間の関係

昇に伴って短絡が機械的に減少すると共に、電極の回転によって発生する加工部分での加工液の流れの速度が高まり、加工屑の排出が促進されて加工屑による二次放電が減少するためと考えられる。

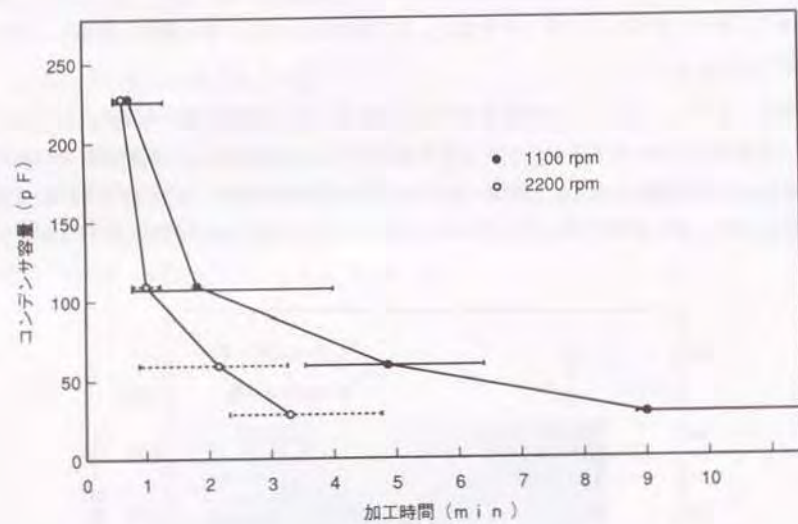


図 8. 2 3 電極回転数と加工時間の関係

工作物：SUS304、厚さ150 μ m
 電圧：70V
 電極径：3.8 μ m

(2) 加工精度

試料の板厚を50~200 μ mに変化して、板厚と加工された穴径の関係を求めた。電極は貫通後、板厚の2倍の深さまで送り込んだ。電極径は30, 60 μ mの2種類である。イメージシリング顕微鏡により測定した電極の入口側、出口側の穴径を図8. 24に示す。

入口側の穴径は板厚の増加に伴い増大しているが、出口側の穴径はほぼ一定となっている。入口側の穴径が大きくなるのは、板厚の増加に伴って加工時間が長くなり、加工屑を介した電極側面での二次放電の割合が増加するためと考えられる。出口側が一定であるのは、電極の径方向の消耗があっても板厚の2倍まで送られるため、電極の消耗の少ない部分が送られて加工され、見かけ上消耗が無視できることによる。従って、出口

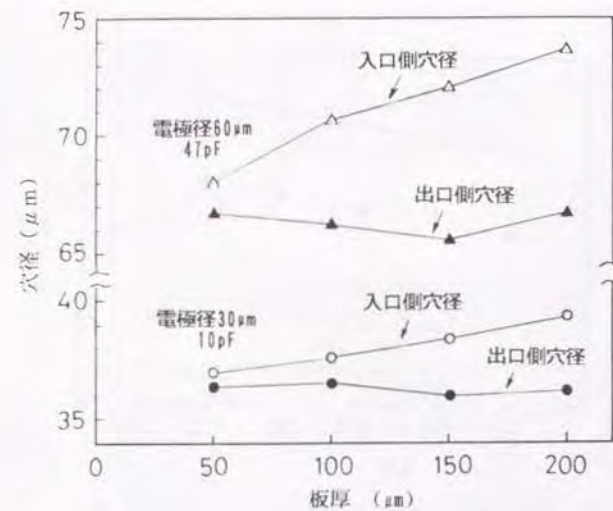


図 8. 2 4 電極の入口側、出口側穴径と板厚の関係

電極送り量：板厚 \times 2

材 料：SUS304

電 圧：70V

回転数：3400rpm

側の穴径は（電極径+放電間隙+電極の振れ）とほぼ等しいと見られる。（入口側穴径-出口側穴径）/板厚で表した穴のテーパは2-3%である。

図8. 25はコンデンサ容量を一定とし、電圧を変化して加工を行った場合の穴径である。また、図8. 26は電圧を一定とし、コンデンサ容量を変化した場合の穴径を示す。電圧、コンデンサ容量の増加により、いずれも入口側、出口側とも一様に穴径が大きくなっており、放電間隙の増加によるものと考えられる。電圧は連続的に調節することが可能であり、60-100V の変化によって穴径が約 $2\mu\text{m}$ 変化するため、電圧により加工寸法を微調節することが可能である。

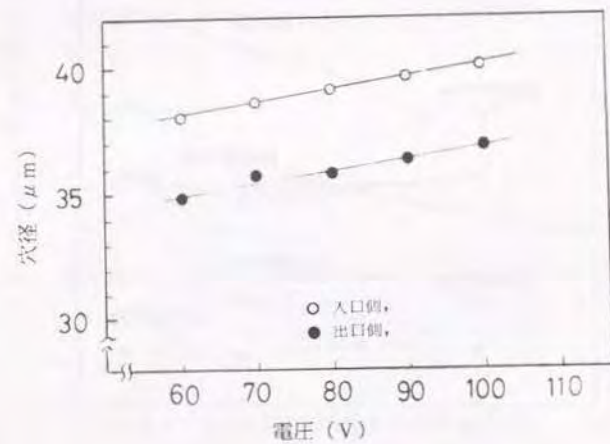


図8. 25 電圧を変化した場合の加工穴径

材料: SUS304 厚さ $150\mu\text{m}$
電極径: $30\mu\text{m}$
コンデンサ容量: 22pF
回転数: 3400rpm

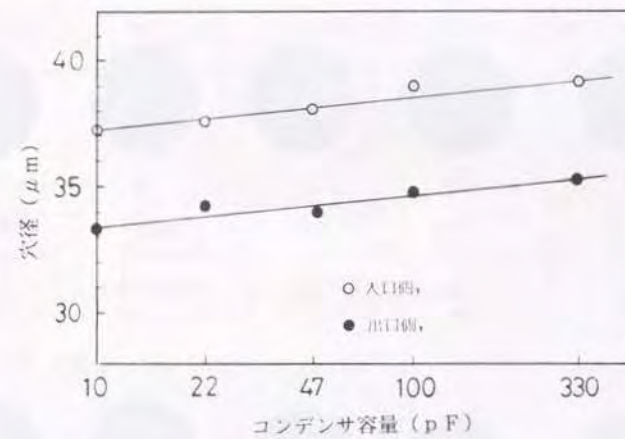


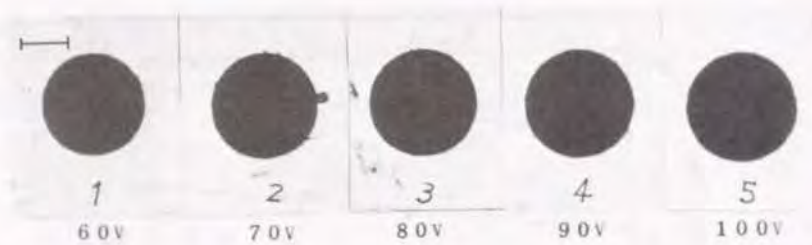
図8. 26 コンデンサ容量を変化した場合の加工穴径

材料: SUS304 厚さ $150\mu\text{m}$
電極径: $30\mu\text{m}$
電圧: 70V
回転数: 3400rpm

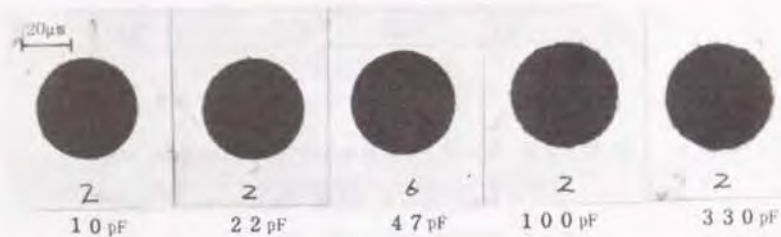
(3) 仕上げ面あらし

図8. 27は、上記の実験で加工したそれぞれの条件での穴の端面であり、電圧を増しても穴のエッジに変化はないが、コンデンサ容量を増して行くと次第にエッジが粗くなる状態が認められる。加工面のあらしも同様の傾向を示すと見られる。

鏡面加工を行ったブロックの側面に対して電極側面を送り込み、半円形断面の溝加工を行ない溝底部の加工面を観察した。電極径は $30\mu\text{m}$ である。コンデンサ容量を変化した場合の加工面の写真を図8. 28に、仕上面あらしの測定結果を図8. 29に示す。コンデンサ容量が小さくなるに従って、放電痕の大きさは小さくなり仕上面あらしは向上する。 30pF 以下では光沢に近い。



電圧を変化した場合 ($C_c = 22\text{pF}$ 一定)



コンデンサ容量を変化した場合 ($V = 70\text{V}$ 一定)

図8. 27 電圧、コンデンサ容量を変化した場合の穴端面の形状

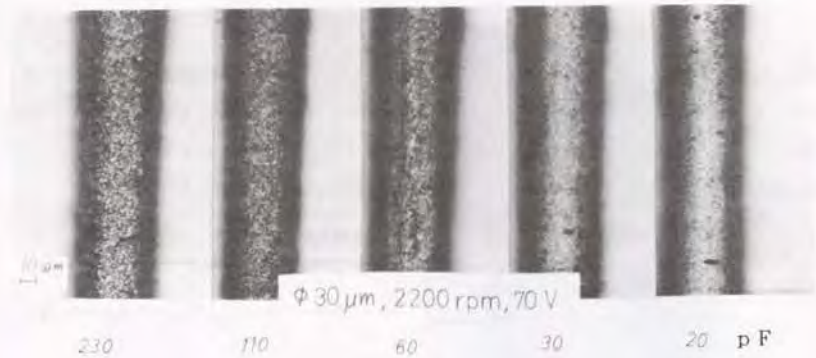


図8. 28 コンデンサ容量を変化した場合の加工面
($30\mu\text{m}$ 径の円柱電極の側面により
S35Cブロックの側壁を加工)

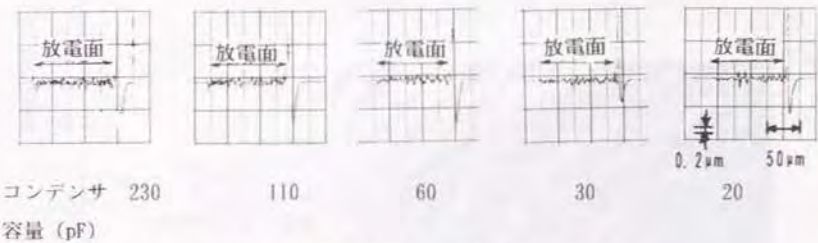


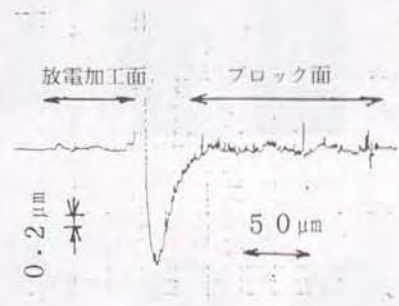
図8. 29 コンデンサ容量を変化した場合の仕上面あらし

($30\mu\text{m}$ 径の円柱電極の側面によりS35Cブロックの側壁を加工)

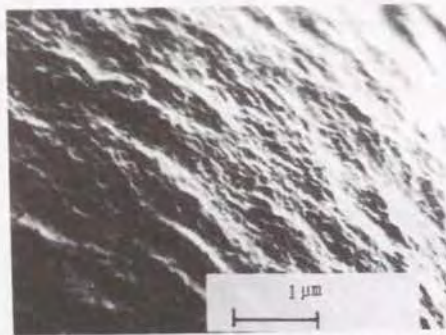
次に $120\mu\text{m}$ 径の電極を用いて加工を行い、相対速度の影響を比較した。コンデンサ容量が 100pF 以上では周速の影響が見られなかったが、 30pF 以下では $120\mu\text{m}$ 径の電極による仕上面の方が良好であり、相対速度の上昇に伴う短絡の減少と放電の安定が寄与しているものと考えられる。図8. 30に 10pF の場合の加工面と、仕上げ面あらしの測定結果を示す。仕上げ面あらしは $R_{\text{max}} 0.1\mu\text{m}$ となっている。



側壁の光学顕微鏡写真



仕上面あらさ測定結果



側壁のSEM写真

図 8. 30 相対速度を高めた場合の加工面
(120 μm 径の電極側面によりS35Cブロックの側壁を加工)

電圧 : 70V

コンデンサ容量 : 10pF

回転数 : 2200rpm

(4) 電極消耗

図 8. 31 は電極消耗率と電圧、コンデンサ容量の関係を示す。電極径は30 μm、試料の厚さは50 μmである。電圧、コンデンサ容量の増大に伴って放電エネルギーが大きくなるため電極消耗は大きくなる。ただし電圧が70Vより小さい場合、小さいコンデンサ容量では逆に消耗が大きくなる傾向が見られるので、電極消耗に対して電圧には適正領域が存在する。

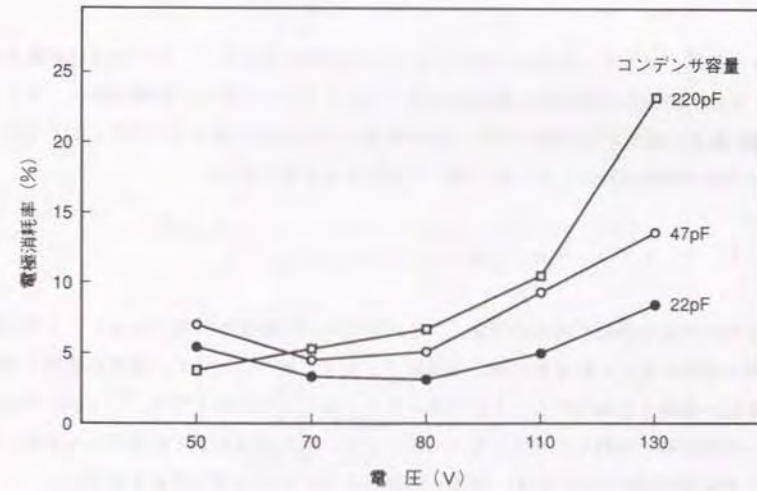


図 8. 31 コンデンサ容量、電圧と電極消耗率の関係

工作物 : SUS304、厚さ50 μm

送り : 2 μm/s

電極 : 直径30 μm、タングステン

以上の加工実験結果をまとめれば、微細放電加工での加工条件の設定は次のようになる。

(1) 電極回転数は高いことが望ましい。

(2) 電圧が高い場合は加工時間が短い、電極消耗は増大する。また、コンデンサ容量の小さい場合には電極消耗に対する電圧の再適値が存在する。一方、実験の範囲では、電圧は仕上げ面あらさには影響を及ぼさない。これらの結果から70~100Vが適正領域と考えられ、加工時間を重視する場合は高い側に、電極消耗と加工精度を重視する場合には低い側に設定することがよい。

(3) コンデンサ容量の小さい場合、仕上げ面あらさは良好で電極消耗も少ないが、加工時間は長くなる。従って必要な仕上げ面あらさを中心として選択することが望ましい。

(4) 電圧、コンデンサ容量の両者によって放電間隙は変化し、加工寸法に影響を与える。また、円柱形状の電極を軸方向に送って加工を行った場合の電極消耗は、主として先端の長さの減少として現れるが、径方向においても消耗は発生するので、加工寸法、および工具の移動径路はこれらを考慮して設定する必要がある。

8. 3. 3 シリコンウェハの加工

超小型の光走査機構を考えたとき、シリコンウェハに微細放電加工によって3次元的な機構を製作することができれば、半導体プロセスと組み合わせて、複雑な機構と制御回路を同一基板上に製作することが可能になる。通常の放電加工では、シリコンウェハなどの硬脆材料では割れを発生し加工しにくい、微細放電加工では放電エネルギーが小さく熱影響領域が小さいため、実用の可能性が高いと考え加工実験を試みた。

図8. 3 2に、厚さが100 μm である比抵抗0.02 Ωcm のシリコンウェハ、および同じ板厚のSUS304に対し、種々の径の穴加工を行った場合の加工時間を示す。シリコンウェハへの加工は金属に対すると同様に実施することができた。加工径の小さい場合は両者の加工時間はほぼ等しいが、大きい場合にはむしろシリコンウェハの方が加工時間が短いことが見出された。

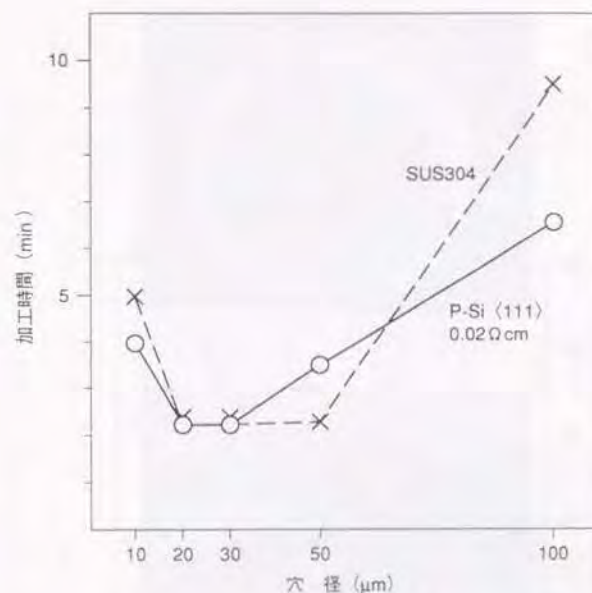


図8. 3 2 シリコンウェハとSUS304での加工穴径に対する加工時間の関係の比較

容量：200pF 電極送りこみ量：150 μm
 電圧：100V
 電極：タングステン
 板厚：100 μm
 回転数：3600rpm

図8. 3 3は、シリコンウェハ、およびSUS304に対し、直径20 μm の穴加工を種々の深さで行った場合の電極消耗を示す。シリコンウェハでの電極消耗はステンレス板の場合より少なく、1/2程度となっている。

図8. 3 4は、シリコンウェハの加工穴面を斜め上方よりSEMにより観察したものであり、加工面は微細な破砕面より構成されており、湿式ラップなどの砥粒加工面に類似していることが認められた。

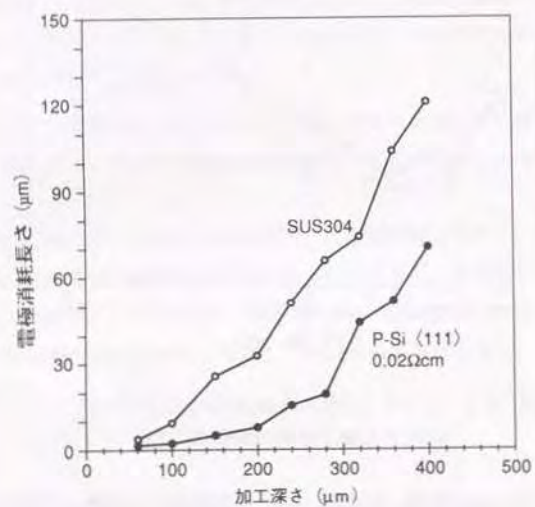


図8.33 シリコンウエハとSUS304での加工深さに対する電極消耗の関係の比較

穴径: 20 μm
 容量: 200 pF
 電圧: 110 V
 電極: タングステン

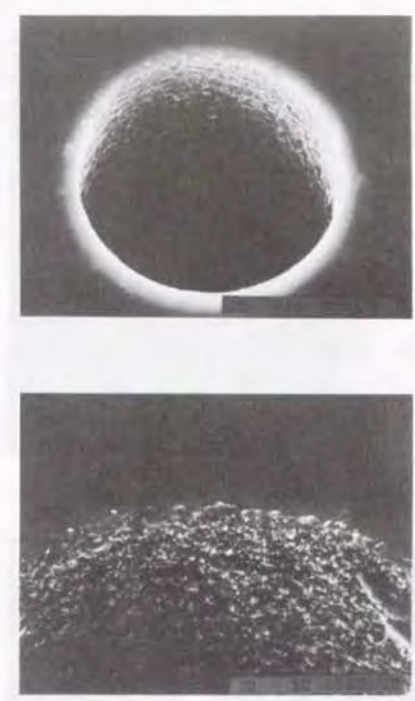


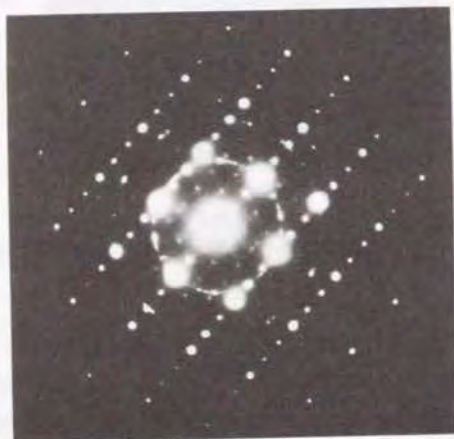
図8.34 シリコンウエハに加工を行った穴のSEM写真
 直径: 50 μm

図8.35は、直径50 μmの底つき穴の底部の、透過型電子顕微鏡による写真であり、(a)に示す格子像のように表面には双晶が多数発生しているが、同部分の回折像(b)のように回折パターンはリング状となっており、多結晶化しているが結晶性は失われていない。加工表面での溶融に伴うアモルファス化はなく、表面の結晶性が保存されたままで加工が進行しているものと推定される。

以上の結果より、シリコンウエハの加工においては、加工面での熱衝撃によるマイクロクラックの発生と破砕が加工機構の中心になっていると考えられ、溶融を主体とする金属の加工よりも効率的に加工が進行していると思われる。



(a) 格子像 電圧：200kV



(b) 回折像 電圧：200kV

図 8. 35 シリコンウエハの加工穴底部の透過形電子顕微鏡像

図 8. 36 は、結晶方向の異なる材料を用い、加工深さと電極消耗の関係を求めたものであるが、結晶方向での差異はほとんど認められない。これは熱衝撃による破壊現象は、熱入力と結晶方位の相対的位置関係の影響を受けにくいためであると考えられる。

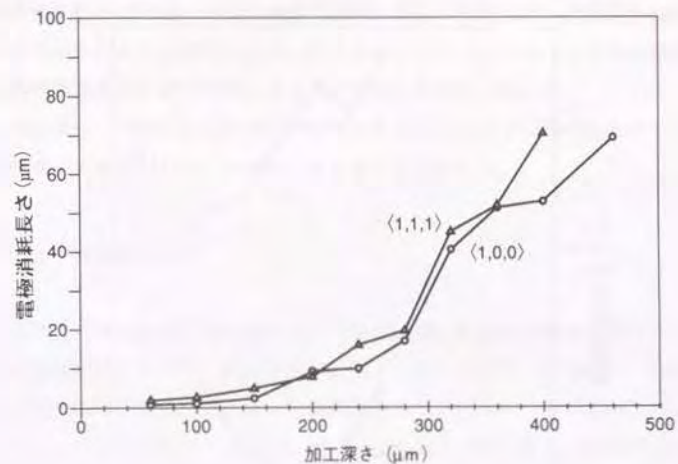


図 8. 36 シリコンウエハの異なる結晶方向に対する加工深さと電極消耗の関係

穴径 : 20 μm
 材料 : P形シリコンウエハ
 比抵抗 : $\langle 1,1,1 \rangle$ 0.02~0.035 Ωcm
 $\langle 1,0,0 \rangle$ 0.02 Ωcm
 容量 : 200 pF
 電圧 : 110 V
 電極 : タングステン

図8. 37は、比抵抗のより大きい $1\sim 3\Omega\text{cm}$ のシリコンウェハを用い、 $0.02\sim 0.035\Omega\text{cm}$ のウェハと、コンデンサ容量を変化して電極消耗を比較した結果である。比抵抗の大きい場合は、コンデンサ容量をかなり高めないと電極消耗が著しく、加工能率が非常に悪い。

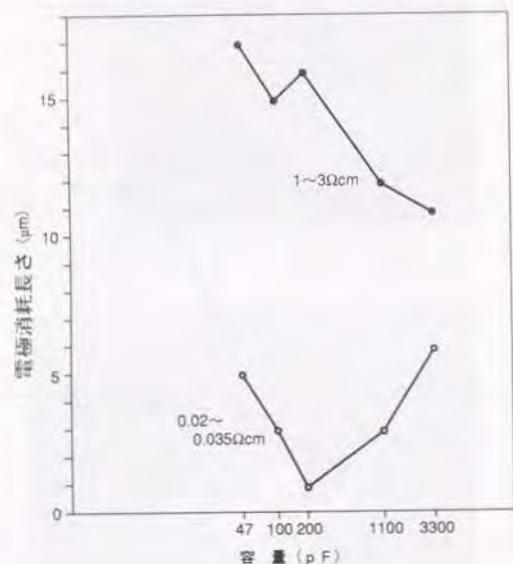


図8. 37 比抵抗の異なるシリコンウェハに対する容量と電極消耗の関係

材料：P形(1,1,1)シリコンウェハ
 穴径： $20\mu\text{m}$
 深さ： $100\mu\text{m}$
 電極：タングステン
 電圧： 8.0V

以上の実験ではシリコンウェハを機械の金属製テーブル上に載せ、金属の板ばねにより押さえることによって固定と回路の導通を行ったが、比抵抗が $10\sim 20\Omega\text{cm}$ のシリコンウェハでも、加工面と反対側の機械との接触面に、 $10\mu\text{m}$ 程度の厚さを持つ $0.005\sim 0.02\Omega\text{cm}$ の低抵抗の拡散層を作ることで加工が可能になった。また、比抵抗の低いシリコンウェハに $20\mu\text{m}$ 厚さの $30\sim 50\Omega\text{cm}$ の拡散層を設けた構成でも加工は可能であった。すなわち、工作物と放電回路の接続が十分であれば、 $50\Omega\text{cm}$ 程度の範囲の高い比抵抗の材料に対しても加工の可能性があると考えられる。以上より、シリコンウェハ上の微小機械構造の加工に、微細放電加工が適用可能であることが明らかになった。

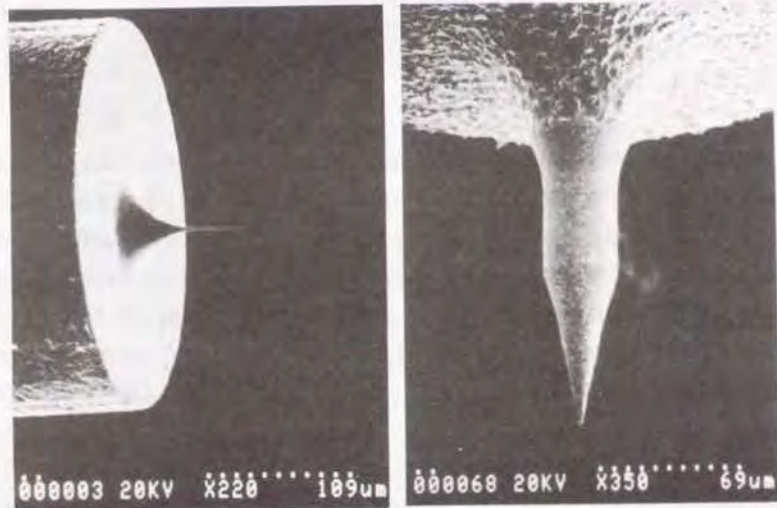
これらの結果は、同様に比抵抗の高い材料であるフェライト、導電性セラミックス、あるいは焼結ダイヤモンドなどの加工に援用できるものと思われる。

8. 3. 4 微細軸の加工

WEDGによる微細軸加工機での加工は自動的に進行するが、次の手順に従う。まず最初に軸の端面加工を実施し、端面を平面に加工すると同時に、Z軸の原点を設定して軸の長手方向の基準とする。引き続いて径方向の加工を行うが、仕上げ面あらさを向上させるためコンデンサ容量を小さくした場合、加工速度が遅くなると同時に短絡が発生しやすくなり、軸の真直度が悪くなる。このため、一旦加工した面をスパークアウトする方法を試みた。すなわち、Z軸方向の送り終了して成形が終わった後、径方向のX軸を移動せずに放電電圧を印加したまま、ワイヤに対して工作物をZ軸方向に移動させる。

スパークアウトによって真直度と仕上げ面あらさの向上が見られた。また、加工した軸を電極に用いて多数の穴加工を行う場合、スパークアウトをしない電極では仕上げ面が粗いため、見かけ上の電極径は変化しなくても、穴加工を重ねることによって次第に表面の突起部の消耗が進行し、実効的な電極径が減少して穴径が次第に小さくなる。これに対し、スパークアウトを行った電極では仕上げ面が良好であるため、実効的な電極径が一定に保たれ、穴径の変化が少なくなる効果が認められた。

加工した軸径の最大誤差は $\pm 0.2\mu\text{m}$ であった。図8. 38 (a)に超硬合金線材の先端に加工を行った直径 $5\mu\text{m}$ の軸、(b)にX、Z2軸の同時制御による白金のテーパ軸を示す。



(a) 軸加工 直径: 5 μ m 材料: 超硬
 (b) テーパー軸加工 基部径: 35 μ m 材料: 白金
 図8. 38 微細軸加工機による加工例

第8. 4節 マイクロ機構の加工

複雑な形状の加工のため、まず電極の運動方法と電極消耗の関係について検討を行った。次いで微細放電加工機、微細軸加工機の両者を組み合わせて、光走査機構の要素となるマイクロエアタービン、およびマイクロポリゴンミラーを製作し、走査機構のマイクロ化の可能性を実証した。

8. 4. 1 電極の運動と消耗

円柱形状の電極と工作物の相対位置をNC制御することによって、複雑な形状の部品の製作が可能であるが、この場合電極の運動方法には次の2種類がある。

(1) 電極を回転軸方向に送って加工を行い、所定の深さに達したところで引き上げ、次の加工箇所に移動する、穴加工の繰り返しによって形状を創成する、Point-to-Pointの方法。

(2) 電極を創成すべき面の輪郭線に沿って移動して加工を行う、Continuous Pathの方法。

放電加工においては、創成される工作物の寸法精度は電極の消耗に依存するところが大きい。このため各々の場合について電極の消耗状態を検討した。

(1) の場合、貫通穴のような抜き加工では、工作物に対する電極の送りこみの量を大きくし、電極の径方向の消耗の生じていない部分を用いて仕上げを行うことによって、加工部の幅方向の寸法精度を確保することができる。

一方、底つき穴の連続によって3次元形状を創成するような場合、製作した機械では放電開始を検出した位置より設定された量の電極送りがなされるため、電極の軸方向の消耗は累積されることがなく、深さ方向の寸法差はその穴加工における消耗のみによる。この量は加工条件より類推できるため、制御プログラム上で補正することが可能である。なお、電極の径方向の消耗は長手方向の消耗に対して少ないが、先端部では丸みをおびるため、創成運動に対しては考慮が必要である。

(2) の場合の最も簡単な形状は溝加工である。このため、電極を回転軸と直角方向に移動して溝加工を行い電極消耗を測定した。穴加工では主として電極先端によって加工が進行するが、この場合には電極側面によって加工が行われるため消耗は径方向に発生し、溝は電極の消耗によって次第に細くなる。

図8. 39に、(2)の方法により100 μm 厚さのSUS304板に、長さ500、1000 μm で、深さ80 μm の底つき溝と、同一の長さのスリットの加工を行い、加工後の電極形状、および溝形状を測定した結果を示す。

底つき溝の加工では、電極先端の加工部が細くなり各部に丸みをおびた形で消耗が発生する。また、消耗のない状態で最初に深さ方向に電極が送られるため、溝加工の開始部では幅が若干大きい。スリットの加工では、まず電極を貫通させた後、軸の中間部によって加工が行われるので鼓形に消耗が発生する。また、加工の終了時に、電極の消耗をあまり受けていない部分を上方に引き抜くことになるため、終了部の溝幅が大きくなる。

加工の両端における、長さに対する溝幅の減少の割合は、本加工条件では底つき溝、スリットに対し長さ500 μm の溝で7%、長さ1000 μm の溝では9-10%程度である。長い溝の方が相対的に減少が小さいのは、電極の初期消耗が存在するためである。

これらの結果より、電極の運動によって2次元、3次元の複雑形状を創成する加工では、(1)、(2)の両者を組合せることが望ましい。この場合、電極の不均一な消耗が少ない点から、まず(1)の深さ方向に繰り返す加工によって概略の形状を創成し、次に(2)の工具の連続的移動によって、(1)によって生じている不連続な面の仕上げを行う方法が適していると考えられる。

図8. 40は以上の組合せによって加工を行った幅10 μm 、長さ150 μm のスリットであり、均一な溝幅でかつ側壁の仕上げ面の良好な加工が実現されている。

8. 4. 2. 走査機構要素の加工

以上の加工実験結果を基盤として、マイクロ走査機構の要素部品の加工を行った。

最初にタービンロータの加工を行った。ロータの外径を0.4mm、軸径を0.1mmとした。ロータの加工工程を図8. 41に示す。まずWEDGを用い、ステンレス線材より軸部

		電極消耗形状					溝形状				
底つき溝	単位										
	μm	L	A	B	C	D	E	F	G	H	
	500	65.8	58.8			68.0	75.0	75.5	72.3	70.2	
1000	65.7	54.0			66.0	75.0	75.3	71.4	68.8		
貫通溝											
	板厚	L	A	B	E	F	G	H			
	100 μm	入口	77.4	8.7	104	87.6	81.7	85.7			
	出口					86.8	82.3	85.7			
	1000	入口	77.4	13.1	108	88.0	81.6	87.1			
	出口					87.4	79.1	86.4			

図8. 39 底つき溝、貫通溝の加工における電極消耗と溝形状

電圧：80V 電極回転数：3600rpm

コンデンサ容量：100pF 電極：タングステン

テーブル送り：1 $\mu\text{m}/\text{s}$ 工作物：SUS304



図8. 40 電極の2種の運動の組合せによって加工を行ったスリット

材料：SUS304
溝幅：10 μm
長さ：150 μm
板厚：50 μm

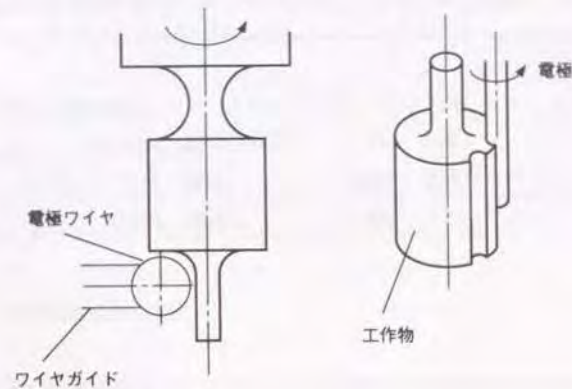


図8. 41 タービンロータの加工工程

分とロータ外径部を加工した後切断する。次に治具に固定した後、順次割出しを行って直径50 μm の円柱電極によりタービン溝部を加工する。製作したロータを図8. 42に示す。ここでは溝断面は単純な円であるが、より小さい径の電極を用いて位置決め制御を細かく行えば、流体力学的に計算した形状のブレードの加工を行うことが可能である。

工作物を傾斜させ、同様の工程によって図8. 43に示す外径0.95mm、軸径0.3mmのはず歯のロータを製作した。はず歯の角度は回転軸に対して15度である。溝部は、直径0.3mmの円柱電極によって加工した。

このロータを用い、図8. 44に示す断面のマイクロタービンを試作した。ここでは実験の容易さの点より駆動流体として空気を使用した。図の右側より圧力を加えた空気を送ることによってタービンを回転させる。

軸受部、およびハウジングとのはめあい部は微細放電加工により製作した。軸受すきまは1 μm であり、図の右側の軸受は平軸受であるが、左側の軸受は流出する空気の一部が通過することによって潤滑される流体軸受となっている。軸受部からの空気の流出のみでは流量が小さくタービンの回転に十分な流量が得られないため、軸受と別個に4箇所排気孔を設けた。完成したエアータービンを図8. 45に示す。7L/minの流量によって約1000rpmの回転を行うことができた。

次に、図8. 46に示す一辺の長さが2mmである四角錐形状のポリゴンミラーを製作した。軸部はWEDGによって加工し、反射面はポリゴンミラー軸に対して角度をもって回転する円柱電極の側面を用い、長辺方向に送りを加えて加工を行った。材料はSUS304である。

以上の試作によって、血管内に挿入しうる程度のマイクロタービンの実現の可能性が確認され、今後ポリゴンミラーとの組み立て、光ファイバによるレーザー光の導入機構などを加え、流体力学的な設計と対応した加工を実施することによって、超小型の光走査機構が実現し得るものと考えられる。



図8. 42 完成したタービンロータ

材料：SUS304

外径：0.4mm

軸径：0.1mm



図8. 43 はす歯のタービンロータ

材料：SUS304

外径：0.95mm

軸径：0.3 mm

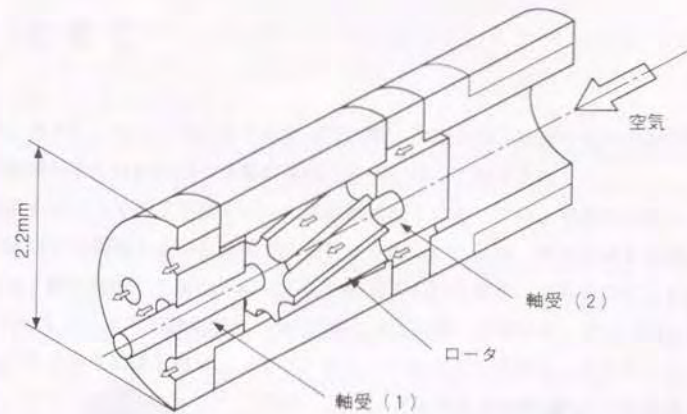


図8. 44 製作したタービンの断面図

1mm



図8. 45 製作したマイクロエアタービンの外観

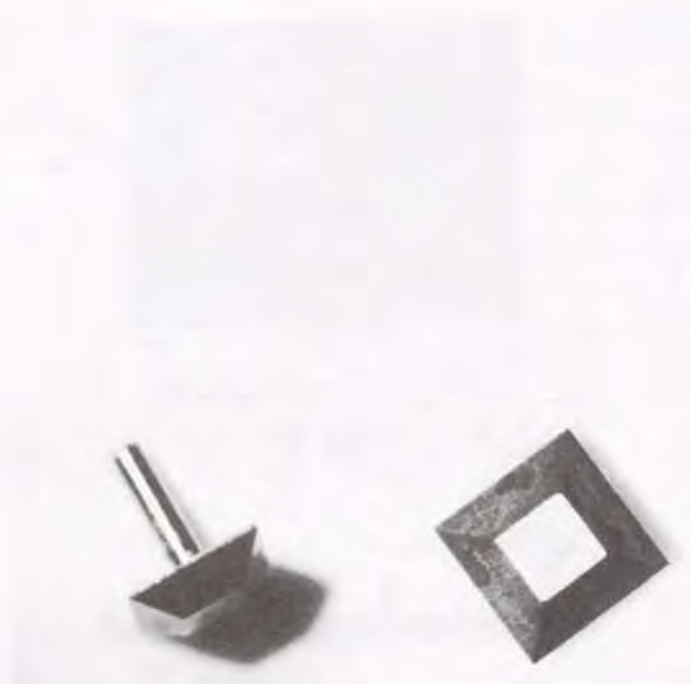


図8.46 微細放電加工により製作したマイクロポリゴンミラー
底辺長さ：2mm

第8.5節 総括

血管内に挿入し、レーザー光の走査によって診断・治療を行う装置への応用を目的として、その機構系の作成のための微細放電加工技術に関して研究を行った。

実験装置を製作して加工実験を行い、微細放電加工においては、電極の回転と、使用と同一の状態での電極の成形が必須であることを明らかにした。研究結果を基盤として微細放電加工機を製作し、また正確な形状の軸加工を行うため、WEDGによる微細軸加工機を製作した。本加工機を用い、加工条件と加工時間、寸法精度、仕上げ面あらさ、電極消耗の関係を求めると共に、シリコンウェハへの加工を試みた。さらに、マイクロタービン、マイクロポリゴンミラーを試作し、マイクロ光走査機構の可能性を実証した。得られた結果は次の通りである。

(1) 微細放電加工において放電エネルギーを微小にする場合、RC放電回路においては浮遊容量の低減が必要であり、軸受部分、加工テーブル基板などにセラミックを用いるなどの手段によって浮遊容量を低減し、放電エネルギーの微小化を計ることができた。

(2) 微小エネルギーの放電加工では電極と工作物の溶着が発生しやすく、電極の欠損を生じ、電極消耗が大きくなる。溶着の防止は電極の回転によって可能であり、電極の回転は微細放電加工においては必須である。

(3) 微細加工では電極の回転精度を極力高める必要があるが、電極を取りつけたマンドレルをV字状ブロックの上で直接回転させることにより、回転時の軸振れを0.5 μ m以下にすることができた。

(4) 微細放電加工では、目的の径を持つ細線をそのまま電極にした場合、曲がり、振れが加工寸法に対し相対的に大きいため、加工精度の確保が困難である。従って、目的の径に比し十分大きい電極材料を用い、加工と同一の状態が必要部分の成形を行うことが必須である。

(5) 電圧、コンデンサ容量を大きくすることによって放電エネルギーは増大し、加

工速度は大きくなる。電極消耗はおおむね放電エネルギーに依存するが、電圧に関しては適正領域が存在する。一方、放電間隙が大きくなるため、穴加工の場合、電極寸法に比し加工された寸法は大きくなる。仕上面あらさは主としてコンデンサ容量に依存し、50-130V の範囲では電圧には関係しない。コンデンサ容量の小さい領域では $R_{max} 0.1\mu m$ が得られ、放電間隙は $1\mu m$ 以下と見られる。また、電極回転数は加工速度、仕上げ面あらさの点より高いことが望ましい。

(6) 微細放電加工によればシリコンウェハの加工も可能であり、比抵抗 $0.025\Omega cm$ のシリコンウェハでは、ステンレス板の加工に比し加工速度も高く電極消耗も少ない。この理由は、シリコンウェハでは加工時の熱衝撃によるマイクロクラックの発生と破壊が主要な加工機構であり、金属における溶融による除去よりも効率よく加工が進行するためと考えられる。より比抵抗の大きいシリコンウェハに対しても、低抵抗の拡散層を設けるなどの手段によって加工の可能性のあることが認められた。

(7) 円柱形状の電極を軸方向に送って穴加工を行った場合、電極の消耗は主として長さの減少として発生し、径方向では少ない。一方、電極をその軸と異なる方向に連続移動して加工を行った場合には、軸方向に不均一な電極消耗を発生する。従って、複雑な形状の加工を行う場合、まず深さ方向の加工をくり返し移動して行うことによって概略の形状を創成し、次に電極を加工面に沿って連続移動して面を平滑化する方法が望ましい。

(8) 基礎実験結果に基づいて製作した微細放電加工機と、WEDGの原理に基づく微細軸加工機を用い、直径 $2.2mm$ のマイクロエアータービン、および辺長さ $2mm$ のマイクロポリゴンミラーを試作した。タービンは $7L/min$ の流量によって約 $1000rpm$ の回転を行うことができ、マイクロ光走査機構の可能性を実証した。

文 献

- 1) Long-Sheng Fan et. al. : Pin Joints, Gears, Springs, Cranks, and Other Novel Micro-Mechanical Structures, Technical Digest of TRANSDUCERS '87, (1987), 849.
- 2) L. S. Fan, Y. Tai, and R. S. Muller : Integrated Movable Micromechanical Structures for Sensors and Actuators, IEEE Trans. on Electron Devices, 35, 6, (1988)724.
- 3) 「マイクロマシン技術による製品小型化・知能化辞典」、産業調査会、(1992).
- 4) 丹羽真一郎：血管内手術内視鏡開発の現状と未来、Micro Machine, 4, 1, (1991) 58-59.
- 5) 倉藤尚雄、増沢隆久：超硬合金の放電による微細加工、電気加工学会誌、2, 3, (1968) 1.
- 6) 増沢隆久、佐田登志夫：微小エネルギーRC放電加工における持続アーク発生機構、電気加工学会誌、5, 9, (1971)35.
- 7) 増沢隆久、藤野正俊：小穴加工における放電加工の能率、生産研究、28, 11, (1976) 56.
- 8) 国枝正典：放電加工における放電点分布の観察、精密工学会誌、57, 6, (1991)9-12.
- 9) 金子勉、土屋正光：回転円筒型電極による創成放電加工、電気加工技術、15, 48, (1991)13.
- 10) 成宮久喜、毛利尚武、斎藤長男、大竹定広、恒川好樹：粉末混入加工液による放電加工、1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、(1989)1103.
- 11) T. Masuzawa and M. Fujino : Wire Electro-Discharge Grinding for Micro Machining, Annals of the CIRP, 34, 1, (1985)431.

第9章 結論

本研究は、レーザの応用における基幹技術であるレーザ走査光学系に関し、新しい概念の装置の実用化を念頭におきつつ、その設計・加工・応用について総合的に研究を実施したものである。

設計については、従来応用されることの少なかった走査光学素子であるホログラムスキャナ、AODを取り上げると共に、パルスレーザ光の時分割、3次元空間の走査、および走査長の拡大に対応した光学系に関して系統的に研究を行った。

加工については、CO₂レーザの反射、屈折、回折それぞれに対応した光学素子における加工技術の研究を、光学的特性と関係づけながら実施すると共に、超小型の走査機構のための微細加工技術に関して研究を行った。

これらの研究は、大出力CO₂レーザ、CO₂レーザ加工システム、災害対応ロボットにおける視覚センサ、実装基板検査装置、大画面の画像通信システム、および医療用マイクロマシンなどへの応用に関する研究と共に実施した。

研究は大別して次の3段階より成っている。

第1段階は、CO₂レーザ用反射光学系、および屈折光学系材料の加工技術に関する研究である。

反射、屈折光学素子の加工はレーザ走査光学系において基本となるものであるが、特にCO₂レーザでは波長が長く使用環境も厳しいところから、反射光学系にはW、Mo、屈折光学系にはZnSe、KClの材料が適合しており、これら材料のポリシ加工を中心として研究を行い、加工条件と反射率、吸収率などの光学特性との関係を明らかにし、大出力レーザに応用を計ることができた。

第2段階は、2種類の機器への展開を目指したCO₂レーザ用走査光学系に関する研究である。

まず、パルスレーザによる時分割加工システムの研究を行い、レーザ発振特性を踏まえたチョップミラーの設計、制御方法を究明し、分割レーザ光の相互干渉を防止してレーザの時分割使用を実現し、加工機におけるレーザの有効利用を計ることができた。

次に、CO₂ レーザ用ホログラムスキャナについて、主として回折効率の観点より格子の設計とRIE加工に関する研究を進め、高い回折効率を実現すると共に、走査されたレーザ光の対象物からの反射光によって画像を形成し、ロボットの視覚センサへの応用に対しての用途を得ることができた。

第3段階は、走査領域の拡張に関する研究である。これには3次元空間の走査、走査長の拡大、および走査機構のマイクロ化がある。

まず、電子部品の回路基板への実装状態の3次元計測に関し、測定空間をポリゴンミラーとfθレンズにより走査を行う構成とし、3次元空間における総合的な光学特性の確保によって、三角測量の原理を用いた検査装置を実用化することができた。

次に、AODと機械運動を組み合わせた走査系により約1m幅の高速、高分解能の走査を行う、プロッタ、スキャナ、各々の光学系の方式とシステム構成に研究を加え、新聞紙面の画像通信装置などへの応用の用途を得ることができた。

さらに、微細放電加工に関する研究を実施し、微細加工における問題点を明らかにし、その解決を計ることにより実用的な加工機を製作し、加工条件と加工結果との関連を明確にした。製作した加工機によってマイクロエアタービン、マイクロポリゴンミラーの試作を行い、血管内に挿入し得る大きさの走査光学系の可能性を実証した。

本研究から得られた結論を以下に総括する。

1. CO₂ レーザ用光学系材料の加工

(A) 反射光学系材料の加工 (第2章)

(1) 反射鏡においては、高い機械的、熱的強度と、レーザ光の吸収による熱変形の小さいことが必要条件であることを明らかにし、照射実験によってMo、Wの適合性を実証した。素材の製作工程によって仕上面、反射率には差異があり、これらの点より結晶粒径が小さく高硬度である素材によって望ましい結果の得られることが判明した。

(2) 多結晶金属材料のポリシ加工では、結晶面間の加工性の差によるレリーフの低減が問題であり、ポリシ加工ではラップ加工において発生したレリーフの低減と、仕上面あらさの向上の2つの機能を持つ必要のあることが認められた。各々を分離した2工程の条件を選択し、Ra5nmの仕上面を得ることができた。また、液中ポリシングによ

ても、レリーフはやや大きいのがこれに近い仕上面を得ることが可能であった。

(3) 仕上面の向上により反射率とレーザ光照射損傷しきい値は増大し、各々98.4%、 1 MW/cm^2 程度の性能を得ることができた。これに伴って加工による残留ひずみ層も減少し、良好なポリシ面では $2\mu\text{m}$ 以下と推定されるが、残留ひずみ層のレーザ照射時の損傷に対する影響はあまり認められなかった。しかしながら、砥粒、ラップ材の表面への残留に起因すると見られる吸収の増加の現象が存在し、反射光学系では加工時、使用時とも、表面のコンタミネーションには留意する必要があることが明らかになった。

(4) 製作した反射鏡を5kWレーザに実装し、安定した発振が可能であることが認められ、結果に基づいて多数の反射光学素子の生産を実施することができた。

(B) 屈折光学系材料の加工 (第3章)

(1) 屈折光学素子では、レーザ光の吸収に伴う熱的破壊と光学ひずみが問題であり、KClは熱的破壊に対しては弱いのが、光学ひずみは温度上昇に伴う屈折率変化と幾何学的形状変化の効果が打消し合うために小さく、一方、ZnSeでは屈折率変化が大きいので光学ひずみが大きくなる。

(2) ZnSe、KClのラップ加工面には結晶界面での欠落が多く発生しており、ポリシ加工ではこの層の除去と仕上面あらさの向上の2つの機能を持つ必要がある。これに対し、機械的研磨作用を重点にした加工と、メカノケミカルな作用を加えた加工の2工程を設定して、表面吸収をそれぞれ 1.2×10^{-4} 、 1×10^{-4} まで減少させ、バルクの吸収に比し十分小さい値にすることができた。メカノケミカルな加工液としてZnSeでは純水、KClではプロピレングリコールの5%溶液を用いた。高精度の加工のためには、メカノケミカルな作用を相対的に弱くすることが必要であった。

(3) 仕上面あらさと、加工ひずみ層および吸収率の大小は各々対応しているが、加工変質層は小さくとも、表面に残留した反応生成物によると見られる吸収率の増大する現象が存在し、表面のコンタミネーションには特に留意する必要があることが判明した。また、表面をセーム革でこするようなことでも吸収は増加し、吸収には表面近傍の状態が敏感に反映していることが明らかとなった。

(4) 製作したZnSe、KClのレンズ、取出窓などを5~10kWレーザ加工システムに実装し、さらに周囲環境に対しての考慮は必要であるが、安定した集光特性とレー

ザ発振を得ることができた。本結果により多数の屈折光学素子の生産の実施が可能となった。

II. CO₂ レーザの走査応用機器

(A) 時分割CO₂ レーザ加工システム (第4章)

(1) 精密な切断加工では、尖頭値が高くパルス間隔に比し相対的に短いパルス幅のレーザー光による加工の望ましいことが認められ、これよりレーザーの発振周波数を高めて異なる2種類のパルスを混合発振させ、チョッパミラーを用いてパルスごとにビームを2箇所の加工ステーションに分配する時分割加工システムを計画した。チョッパミラーの形状は、ビーム径とパルス強度の時間的特性、および使用される加工条件より定められ、レーザーの発振はミラーの回転より同期信号をとって行うことが望ましい。

(2) 発振周波数、ならびにパルス幅の増大に伴い、同期信号に対する発振器の放電開始の遅れに起因すると見られるパルス発振の時間的遅れがあり、異なるステーションへの漏光の原因となるため、チョッパミラーの回転制御では発振条件に対する考慮が必要である。また、発振器でのN₂ ガス流量の多い場合には、混合発振によってパルス波形に乱れを生じるため、適正なガス混合比を選択する必要がある。

(3) 上記の考慮によって、2箇所の加工ステーションにおいて異種の加工を同時に実施することができ、時分割による加工を実施した場合においても、レーザーの単独使用と同様な加工速度と切断特性の得られることが認められ、レーザーの有効利用を計ることが可能となった。

(B) CO₂ レーザ用ホログラムスキャナ (第5章)

(1) CGHによるホログラムでは、走査の直線性、等速性などの最適化を計ることが可能であるが、パターンが複雑であるため表面のレリーフを加工することが困難であり、一方、明暗パターンのホログラムでは回折効率が5%程度となるため、視覚センサ用のスキャナでは直線等ピッチの単純ホログラムを用いることが望ましい。

(2) 深溝格子に対する計算結果では、回折効率はホログラムの格子断面形状に大きく影響されるが、Ge基板の二等辺三角形断面の格子においては70%程度が得られると

共に、ZnSe、KCl基板ではさらに高くなり、KClでは100%に近い値の得られることが判明した。

(3) 格子のRIE加工では、O₂ ガス流量によりアンダーカットを変化させて側壁の傾きを制御することが可能であり、傾き角はマスクの寸法によらずほぼ一定となる。条件の選定により、格子形状を解析で求められた望ましい形状に近づけることが可能である。また、格子の加工精度は回折効率のばらつきに影響するが、格子深さは加工面上の場所によって差があり、試料を円筒で囲み表面のガス流れを均一化することで精度を向上することができた。一方、アンダーカット量にも変化があるため、より高い加工精度を得るには、加工時に機械的運動を付加するなどの検討が必要である。

(4) 製作したGe基板のホログラム素子は平均51.7%の回折効率を有しており、揺動ミラーと組み合わせた2次元スキャナによってCO₂ レーザ光を走査し、対象物からの反射光より物体像を形成した結果では、認識のために十分な画像を得ることができ、災害対応ロボットの視覚センサへの応用が可能であることが認められた。

III. 走査領域の拡張

(A) レーザ走査による実装基板検査装置 (第6章)

(1) 三角測量の原理による3次元形状の測定では、レーザー走査におけるスポット形状などの光学特性は3次元空間に対して確保する必要があり、スポット径と $f\theta$ レンズへの入射ビーム径はデフォーカス特性を考慮して設定しなくてはならない。また、 $f\theta$ レンズの焦点距離は計測時間に、さらにPSD集光レンズとの関係において検出倍率に関係し、その口径は反射光の受光量に影響するため、これらを考慮して設計を実施する必要がある。

(2) 測定では、レーザー光の射出光軸に対して角度を持った方向から反射光の位置を検出するが、その角度は検出倍率に関係する。受光光学系を偏心した構成では角度の大きさに限界があるため、 $f\theta$ レンズと測定面の間に反射ミラーを設ける構成によって角度を増大できるが、この場合、走査の位置によってPSD上の主光線の位置が変化して高さ測定の誤差となり、またその値は測定面の高さによって異なるので、データ処理段階で補正を加えることが望ましい。

(3) ポリゴンミラーの面倒れは、4倍近くに拡大されてPSDへの入射角度差となるため特に精度の確保が必要であり、その影響は光切断角が小さいほど、また $f\theta$ レンズの焦点距離が長いほど大きくなる。

(4) 製作した走査光学系を用いた検査装置では、測定データの補正後において、高さ測定誤差は、128mmの走査長に対して0.06~0.08mm以内であり、近接した範囲では、0.025mmの分解能を得ることができた。以上の結果によって、小形高密度回路基板のインラインにおける検査が可能となった。

(B) AODと高速機械運動による走査(第7章)

(1) 大画面の高速走査のため、ブロックにおいては、光源より2ビームを分割してAOMによって変調を行いAODにより偏向を行った後、機械運動を行う記録ヘッドに搭載された $f\theta$ レンズを経由して、各ビームを交互に組み合わせた状態で記録を行う構成を計画した。ビームの分割はAOM変調を2周波にすることで可能であるが、変調速度の低下を招くため、ビームスプリッタによる方式が望ましい。

(2) $f\theta$ レンズは機械運動に伴って移動するため入射瞳位置が変化するが、強い凹レンズを用いない構成とし、各単レンズの焦点距離を長くすることによって、走査全域での解像力を確保することができた。

(3) 各光学素子の透過率を確保し、系の調整を十分に行うことによって、レーザー光源の利用効率として5%を確保し、記録上十分な光量を得ることが可能となった。

(4) AODによる走査では射出光に発散が生じるため、非点隔差をシリンダリカルレンズによって補正を行う必要がある。また、周波数掃引速度の非直線性は発散角の変化となるため、掃引速度を一定にするようVCOの補正を行うことによって、必要な記録分解能を得る目的を得ることができた。

(5) スキャナにおいては、受光素子としてPMT、CCDを用いる2方式を検討し、PMT方式では、原稿をブロックと同一の方法でレーザー走査によって照明を行うことにより、必要な光量と分解能を得る見通しを得た。CCD方式では照明が問題であり、ハロゲンランプでは光量に比し発熱が大きく、また、He-Neレーザーによる照明ではノイズが大きく安定した信号が得られなかった。なお、原稿のペーストアップに対しては、原稿上に拡散面を設けることによって対応が可能と判断される。以上を総合した結果、

合した結果、スキャナではPMTを用いる方式が望ましいと考えられる。

(C) 微細放電加工によるマイクロ光走査機構の作成(第8章)

(1) RC回路による微細放電では、放電エネルギーの微小化は浮遊容量に依存し、軸受部分、加工テーブル基板等にセラミックを用いることなどでその低減を実現することができた。測定結果より、エネルギーの小さい領域では放電間隙は $1\mu\text{m}$ 以下と推定される。

(2) 微細放電加工では、放電エネルギーの小さいほど電極と工作物の溶着が発生して電極の欠損を生じやすいが、電極の回転によって溶着の防止を計ることが可能であり、電極の回転が必須であることが判明した。軸受にはV字状ブロックの上で直接電極を取り付けたマンドレルを回転させる構成によって、 $0.5\mu\text{m}$ 以下の振れを実現することができた。

(3) 電極の寸法が小さい場合、曲がり、振れの量が相対的に大きいため、加工と同一の状態では電極の成形を行うことが必須であり、機械上で逆放電による成形を行う必要がある。

(4) 加工条件では、電極回転数は高いことが望ましく、電圧は50-130Vの範囲では仕上面あらさに関係しないが、加工時間と電極消耗との関係で適正領域が存在する。コンデンサ容量は仕上面と加工時間の両者に関係し、必要な仕上面を基準として設定することが望ましい。

(5) 微細放電加工によれば、比抵抗が $0.035\Omega\text{cm}$ 程度までのシリコンウェハの加工は容易であり、金属に比し加工時間が短く電極消耗も少ないことが判明した。加工時の熱衝撃によるマイクロクラックの発生と破壊が主要な加工機構となっているためと考えられる。また、比抵抗のより高い材料に対しても、比抵抗の低い拡散層を設けることにより加工の可能性が認められた。

(6) 製作した微細放電加工機とWEDGによる微細軸加工機を用いて、直径2.2mmのマイクロエアタービン、および辺長2mmのマイクロポリゴンミラーを製作した。タービンは約1000rpmの回転が可能であり、マイクロ光走査機構の可能性を実証することができた。

以上実施した、レーザ走査光学系の設計・加工・および応用に関する研究により、以下の成果を得た。

(1) 大出力CO₂レーザ用の大口径Mo₂W反射光学素子の表面加工技術を確立した。

(2) ZnSe、KClの表面吸収の低下を計り、大出力CO₂レーザ用屈折光学素子の表面加工技術を確立した。

(3) CO₂レーザ光の時分割により、複数のステーションで異種の加工を同時に実施する加工システムを実現した。

(4) 移動ロボットのアクティブ視覚センサのための、CO₂レーザ用ホログラムスキャナの開発に成功した。

(5) レーザ走査を用いた3次元計測による、大面積、インラインの実装基板検査装置を実現した。

(6) AODと高速機械運動を用いた新走査概念による、高分解能、大画面のプロッタ、スキャナの基本性能を確認した。

(7) 微細放電加工技術を確立し、体内での診断・治療装置に応用できるマイクロ走査機構の可能性を実証した。

本研究で得た成果はすでに各種の産業分野に利用されているが、さらに、関連する機械技術の極限への追求などの進展によって、本研究の成果が次世代の産業に向け、将来一層大きく寄与して行くものと確信する。

なお、本論文の第2章、第3章の研究は、通商産業省工業技術院大型プロジェクト「超高性能レーザー応用複合生産システム」、第5章の研究は同「極限作業ロボットの研究開発」の中で実施されたものである。

謝 辞

本論文を草するにあたり、終始ご懇切なご指導を賜りました東京大学生産技術研究所 増沢隆久教授につつしんで感謝の意を表させていただきます。

また、東京大学工学部 大園成夫教授、樋口俊郎教授、東京大学生産技術研究所 黒田和男教授、川勝英樹助教授には貴重なご教示をいただきました。ここに深謝申し上げる次第です。

本研究をまとめるにあたり、ご配慮とご激励をいただいた松下技研㈱ 佐野令而社長、前松下技研㈱ 長谷川誠監査役（現小松技研㈱）に深く感謝いたします。

設計については、松下技研㈱ 荒木信博主任技師、河内義和主任技師、元松下技研㈱ 金子正氏に、加工については、松下技研㈱ 宮田威男部長、小野拓弘主任技師、橋立雄二工師補、佐藤健夫主任技師、水谷武室長、松下電器産業㈱ 正木健主任技師、松下通信工業㈱ 豊田隆一主任技師、坂垣内征雄主任技師に、また応用に関しては、松下技研㈱ 山口勝正主任技師、木村実主任技師、高橋秀実主任技師、山田修技師、三宮邦雄主任技師、津田幸文主任技師、池谷和俊主任技師、松下通信工業㈱ 鳥羽広門主任技師、城代博道主任技師、松下電器産業㈱内藤宏之課長、松下電送㈱ 江野澤和夫顧問、竹之内博幸主任技師に、それぞれ絶大なるご協力を賜りましたことを深く御礼申し上げます。

具体的な研究の遂行に当たっては以上の方々の他にも非常に多くの方々のご協力とご援助を頂戴しており、厚く御礼申し上げます。

本研究は1979年4月から1992年12月にわたって行ったものであるが、これらの基礎となっているものは著者が一貫して実施してきた精密加工の研究であり、1963年より1966年にかけて実施した中ぐり加工の研究をご指導いただいた故東京大学 大越諄名誉教授、1968年から1976年にかけて実施した磁気ヘッド、磁気ディスクの研究をご指導いただいた故松下電器産業㈱ 森田稔専務に改めて深く感謝申し上げます。

1994年5月27日

本研究に関連する研究論文、学会講演、研究会講演ならびに特許

(1) 研究論文

題 名	掲 載 誌 名	著 者 名
Development of Metal Mirrors for High Power CO ₂ Lasers	Proceedings of ICALEO, Laser Institute of America 44. (1984)276-283.	M. Sumiya, K. Ueda, K. Kawata
Micro Electrodischarge Machining	Proceedings of International Symposium for Electro-Machining (ISEM-9), Nagoya, (1989).	T. Masaki, K. Kawata, T. Sato, T. Mizutani, K. Yonemochi, A. Shibuya, T. Masuzawa
Micro Electrodischarge Machining and Its Applications	Proceedings IEEE Micro Electro-Mechanical Systems, Napa valley, (1990)21-26.	T. Masaki, K. Kawata, T. Masuzawa
Visual Sensing and Range Measurement by Scanning of Carbon Dioxide Laser	SPIE 1697, Acquisition, Tracking, and Pointing VI, Orlando, (1992)176-182.	K. Kawata, H. Takahashi, O. Yamada, M. Kimura, H. Naito

題 名	掲 載 誌 名	著 者 名
大画面走査記録のための光学系	日本機械学会論文集、(投稿中)	河田耕一、荒木信博、坂垣内征雄、竹之内博幸
反応性イオンエッチングによる赤外ホログラム素子の加工	電気加工学会誌 (投稿中)	河田耕一、豊田隆一、河内義和
微細放電加工の研究 (第1報) - 基本性能の実現 -	電気加工学会誌 (投稿中)	河田耕一、佐藤健夫、正木健、増沢隆久
微細放電加工の研究 (第2報) - 加工機の製作と加工実験 -	電気加工学会誌 (投稿中)	河田耕一、佐藤健夫、正木健、増沢隆久
微細放電加工の研究 (第3報) - マイクロ機構の加工 -	電気加工学会誌 (投稿中)	河田耕一、正木健、佐藤健夫、増沢隆久

(2) 学会講演

題 名	講演概略掲載誌名	著 者 名
磁性材料の加工 (第1報) - フェライトの加工変質層 -	昭和44年度精機学会秋季大会 学術講演論文集、(1969)139- 140.	河田耕一、渡辺貞夫
磁性材料の加工 (第3報) - 材料と加工性 -	昭和45年度精機学会春季大会 学術講演論文集、(1970)349- 450.	河田耕一、中田邦夫
CO ₂ レーザ用反射鏡の損傷	昭和55年度精機学会秋季大会 学術講演論文集、(1980)179- 181.	河田耕一、橋立雄二、 宮田威男、小野拓弘
炭酸ガスレーザー用硬質金属 基板全反射鏡	昭和57年度精機学会秋季大会 学術講演論文集、(1982)442- 444.	河田耕一、橋立雄二、 宮田威男、小野拓弘
炭酸ガスレーザー用透明光学 部品の表面加工	昭和58年度精機学会秋季大会 学術講演論文集、(1983)303- 304.	河田耕一、橋立雄二、 宮田威男、小野拓弘
微小穴放電加工	昭和58年度精機学会秋季大会 学術講演論文集、(1983)361- 362.	河田耕一、水谷武、 松下久登、佐藤健夫、 丸山祐二

題 名	講演概略掲載誌名	著 者 名
Surface Finishing of Optical Components for Carbon Dioxide Laser	Proceedings of the Polishing Meeting of Opt. Soc. America, San Jose, (1984).	K. Kawata, Y. Hashidate T. Miyata, T. Ono
R&D of Optics for High Power CO ₂ Lasers	Proceedings of ICALEO, Boston, (1984).	R. Sano, T. Miyata, K. Kawata, S. Sakuragi, H. Nanba, M. Sumiya
数値制御による放電微細加 工	昭和60年度精機学会春季大会 学術講演論文集、(1985)483- 484.	河田耕一、水谷武、 松下久登、佐藤健夫
ホログラムによる赤外光ス キャナ	昭和62年度春季応用物理 学会、18p-ZK-4、(1987).	金子正、木村実、 豊田隆一、高橋秀実、 河田耕一
マイクロ機械加工の可能性 と限界	電気学会全国大会シンポジウ ム「マイクロメカトロニクス の限界と可能性を探る」、 (1990)S. 8-9-12.	河田耕一
Holographic Disk Scanner for Active Infrared Sensors	Proceedings SPIE, 1555, San Diego, (1991)224-227.	K. Kawauchi, R. Toyoda, M. Kimura, K. Kawata

題 名	講演概略掲載誌名	著 者 名
微細放電加工の加工機構	1992年度精密工学会春季大会 学術講演会講演論文集、 (1992)277-278.	河田耕一、正木健
大画面走査記録のための光 学系	機械学会IIP' 92 情報・ 知能・精密機器部門講演会、 (1992)113-116.	河田耕一、荒木信博、 坂垣内征雄、 竹之内博幸
実装基板外観検査装置の開 発	1992年度精密工学会秋季大会 学術講演会講演論文集、 (1992)621-622.	菅戸卓美、鳥羽広門、 安田彰夫、河田耕一、 三宮邦夫、津田幸文、 池谷和俊、荒木信博
反応性イオンエッチングに よる赤外ホログラムの加工	第2回電気加工学会 全国大会、(1992)29-32.	河田耕一、豊田隆一、 河内義和

(3) 研究会講演

題 名	講演概略掲載誌名	著 者 名
レーザー用光学部品の開発 —金属反射鏡—	大型プロジェクトレーザー応 用複合生産システム研究開発 成果中間発表会論文集、 (1981)154-157.	河田耕一、橋立雄二、 水谷武
硬質金属基板を用いた全反 射鏡	大型プロジェクトレーザー応 用複合生産システム研究開発 成果中間発表会論文集、 (1982)96-99.	橋立雄二、河田耕一、 小野拓弘、宮田威男
ZnSe、KClの表面加 工と吸収特性	大型プロジェクトレーザー応 用複合生産システム研究開発 成果中間発表会論文集、 (1982)126-129.	河田耕一、橋立雄二
エレクトロニクス産業にお ける欠陥検査	日本非破壊検査協会 特別研 究委員会資料、6、(1987).	河田耕一
マイクロマシンの製作技術 の可能性と限界—機械加工	第54、55回松下テクノリサー チセミナー「マイクロマシ ンの現状と将来展望、(1993).	河田耕一

(4) 一般雑誌、図書

題名	掲載誌名	著者名
超精密研磨技術	機械と工具、10、(1981) 83-89.	河田耕一
微小穴の放電加工	電気加工技術、4、7、(1981) 18-23.	増沢隆久、河田耕一、 佐藤健夫
硬質金属ミラー	共著：「ダイヤモンドツール」、日経技術図書、(1982).	河田耕一
微小穴放電加工機の開発	電気加工技術、8、20、(1984). 13-18.	佐藤健夫、松下久登、 水谷武、河田耕一
炭酸ガスレーザ用光学部品の研磨技術	National Technical Report. 31.5.(1985)672-680.	河田耕一、橋立雄二、 宮田威男、小野拓弘
微小穴放電加工機	National Technical Report. 31.5.(1985)725-733.	佐藤健夫、水谷武、 河田耕一
The Development of an Electrodischarge Machine for Micro-Hole Boring	Precision Engineering, 8.3.(1986)163-168.	T. Sato, T. Mizutani, K. Yonemochi, K. Kawata

題名	掲載誌名	著者名
エレクトロニクス産業における欠陥検査	共著：「ナノテクノロジー時代の表面欠陥検査に関する調査研究分科会報告書」、精密工学会、(1987).	河田耕一
エレクトロニクス産業における表面欠陥検査	共著：「先端産業のための表面欠陥検査法」、アイピーシー、(1989).	河田耕一
マイクロ加工	省力と自動化、5、(1990).	河田耕一
放電加工、切削、研削、塑性加工、微細構造の三次元計測技術	共著：「マイクロマシン技術による製品小型化・知能化事典」2.4.2.5.5.2 節、産業調査会、(1992).	河田耕一

(5) 特許

題 名	出願年月日	登録番号
微小穴放電加工装置	昭55年 7月31日	1410426
ビーム集光装置	昭55年10月17日	1338899
放電加工機	昭56年 5月20日	1548401
炭酸ガスレーザー用透明光学部品の製造方法	昭57年 7月 7日	1430445
炭酸ガスレーザー用透明光学部品の製造方法	昭57年 7月 7日	1430446
微小穴加工装置	昭58年 5月19日	1399040
放電加工用電極芯出し装置	昭58年 6月23日	1513602
ポリゴンミラー	昭58年 7月 5日	1728237
レーザー加工機	昭58年11月 7日	1437375
放電加工装置	昭58年12月21日	1517042
投射レンズ	昭58年12月23日	1458503
回転多面鏡組立体	昭59年 4月13日	1725293

題 名	出願年月日	登録番号
Electrical Discharge Machining Apparatus for Forming Minute Holes in a Workpiece	May 18, 1984	European Patent 0129340
レーザー加工機	昭59年 6月 8日	1659693
レーザー加工機	昭59年 6月12日	1659682
チョップミラー	昭59年 6月21日	1716074
レーザー加工機	昭59年 7月12日	1685856
炭酸ガスレーザー用全反射鏡基板	昭59年11月20日	1734677
炭酸ガスレーザー用透明光学部品	昭59年11月29日	1708248
Polygon Mirror Construction	Sep. 8, 1987	U. S. P. 4, 691, 998
Electrical Discharge Machining Apparatus for Forming Minute Holes in a Workpiece	Sep. 13, 1988	U. S. P. 4, 771, 157
Apparatus for Working Curved Surfaces on a Workpiece	May 29, 1990	U. S. P. 4, 928, 435

