

論文

レーザー走査光学系の
設計・加工・および
応用に関する研究

河田 耕一



①

レーザ走査光学系の
設計・加工・および
応用に関する研究

河田耕一

目 次

第1章 緒論	
第1.1節 本研究の必要性と位置づけ	1
第1.2節 走査光学系の現状と本研究との関連	7
1.2.1 走査光学系の種類と特性	7
1.2.2 光学素子材料とその加工	10
1.2.3 レーザ走査応用機器の状況	16
第1.3節 本研究の目的と実施の概要	21
第1.4節 本論文の構成	22
第2章 CO ₂ レーザ用反射光学系材料の加工	
第2.1節 緒言	29
第2.2節 反射光学系材料	30
2.2.1 反射鏡の損傷状況	30
2.2.2 Mo、W素材の製作	35
2.2.3 レーザ照射による反射面の変形	39
第2.3節 Mo、Wの加工	43
2.3.1 研削加工	43
2.3.2 ラップ加工	46
2.3.3 ポリシ加工	49
第2.4節 加工表面の評価	56
2.4.1 加工変質層の測定	56
2.4.2 反射率測定装置の製作	58
2.4.3 反射率の測定	62
2.4.4 レーザ光照射損傷しきい値の測定	62
2.4.5 散乱の評価とコンタミネーション	68

第2.5節	反射光学素子の製作	73
2.5.1	素材製作方法と仕上げ面	73
2.5.2	液中ポリシ加工	74
2.5.3	反射鏡の試作	79
第2.6節	総括	83
第3章 CO ₂ レーザ用屈折光学系材料の加工		
第3.1節	緒言	86
第3.2節	屈折光学系材料	87
3.2.1	屈折光学素子の損傷	87
3.2.2	ZnSe、KClの素材	91
3.2.3	光学ひずみの測定	94
3.2.4	吸収率の測定	98
第3.3節	ZnSe、KClの加工	103
3.3.1	ZnSeのポリシ加工	104
3.3.2	ZnSe加工面の加工変質層と吸収	111
3.3.3	KClのポリシ加工	116
3.3.4	KCl加工面の評価	121
第3.4節	屈折光学素子の製作	121
3.4.1	ポリシ加工条件の設定	121
3.4.2	レーザ光に対する損傷	129
3.4.3	レンズ、出力取出窓等の試作	129
第3.5節	総括	134
第4章 時分割CO ₂ レーザ加工システム		
第4.1節	緒言	139
第4.2節	パルスレーザ光の分割	140
4.2.1	パルス形状と加工特性	140
4.2.2	分割方式の検討	145

第4.3節	分割システムの設計と製作	147
4.3.1	チョップミラーの設計	147
4.3.2	チョップミラーの機構	152
4.3.3	制御系の構成	154
第4.4節	相互干渉の検討と加工実験	156
4.4.1	漏光	156
4.4.2	パルスの混合発振	159
4.4.3	加工結果	165
第4.5節	総括	169
第5章 CO ₂ レーザ用ホログラムスキャナ		
第5.1節	緒言	171
第5.2節	視覚センサとスキャナの仕様	173
5.2.1	CO ₂ レーザの伝播特性	173
5.2.2	視覚センサ、スキャナの仕様	175
第5.3節	計算機ホログラムによるスキャナ	178
5.3.1	ホログラムの設計	178
5.3.2	ホログラム素子の試作と走査実験	180
第5.4節	回折効率の検討	186
5.4.1	回折効率の計算	186
5.4.2	深溝格子の加工と回折効率	188
5.4.3	単純格子のホログラム素子	194
第5.5節	RIE加工条件の検討	199
5.5.1	回折効率、ビーム形状と格子の関係	199
5.5.2	RIE加工実験	204
5.5.3	ホログラム素子の製作	213
第5.6節	2次元スキャナの製作と画像形成	216
5.6.1	受光方式とホログラムの開口面積	216
5.6.2	2次元スキャナの製作と画像形成	219

第5.7節	総括	229
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	234
第6.2節	実験装置による基本検討	237
6.2.1	原理と構成	237
6.2.2	実験装置の光学系の検討	240
6.2.3	測定実験	248
第6.3節	測定精度向上に関する検討	253
6.3.1	反射ミラーによる光切断角の増加	253
6.3.2	ポリゴンミラーの面倒れ	260
第6.4節	実用機の設計と製作	264
6.4.1	実用機の光学系の設計	264
6.4.2	走査に伴う像面移動の補正	273
6.4.3	検査装置の製作	275
第6.5節	総括	282
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	285
第7.2節	装置の構成	287
第7.3節	書き込み光学系の設計	292
7.3.1	ビームの分割	292
7.3.2	$f\theta$ レンズの設計	296
第7.4節	書き込みに関する実験	303
7.4.1	光量と分割方式	303
7.4.2	AOD走査時のスポット形状	305
7.4.3	2次元走査による書き込み実験	310
第7.5節	読み取り光学系の設計と実験	317
7.5.1	読み取りの2方式	317

7.5.2	PMT方式	318
7.5.3	CCD方式	324
第7.6節	総括	332
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	335
第8.2節	微細放電加工に関する実験	338
8.2.1	微細放電における課題	338
8.2.2	電極の回転	344
8.2.3	電極の成形	350
第8.3節	微細放電加工機による加工	354
8.3.1	微細放電加工機	354
8.3.2	放電条件と加工結果	360
8.3.3	シリコンウェハの加工	370
8.3.4	微細軸の加工	377
第8.4節	マイクロ機構の加工	379
8.4.1	電極の運動と消耗	379
8.4.2	走査機構要素の加工	380
第8.5節	総括	387
第9章 結論		
		390
謝辞		398
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		399

第1章 緒論

第1.1節 本研究の必要性和位置づけ

レーザーは1960年にMaimanによってルビーレーザーの発振が行われて以来、コヒーレントな光源としてその種類を広げ、同時に出力の増大と信頼性の向上が計られ、波長が一定で出力の高い安定な光源として多くの産業分野に利用されている。その結果新しく光産業と称される産業分野を形作ってきた。その応用としては、光による情報の入出力・記録・再生、光による加工・計測・検査、光情報処理、光通信、医療への利用などがある。光産業は図1. 1¹⁾に示すように年々大きな伸びを示しており、今後も産業上にますます重要な地位を占めると考えられる。

レーザーの応用上の特徴は次のように考えられる²⁾。

- (1) 波長の大きさの分解能または精度が容易に得られる。
- (2) 波長、光速度、直線性など、精密な基準となる特性を備えている。
- (3) パワー密度の高い光束が得られる。
- (4) 非接触で信号の処理、あるいは加工、測定ができる。
- (5) 光の特質として理論と実験の差異が非常に少ない。

以上のようにレーザー技術は高精度、高集積、小型化、といった現在の工業技術に本質的に対応しており、重要性もさらに高まるものと考えられ、研究開発は止まることなく続けられている。図1. 2³⁾にレーザーの発振波長域を示す。波長は短波長、長波長側とも範囲が広がり、応用もさらに広がることが期待されている。

しかしながらレーザーはあくまでも光源であり、マクロ的に見れば基本的に点光源である。

工業上点光源としての用途は限られる。実際にレーザーによって、対象物との関係において何らかの形の入力・出力を行うには、多くの場合一次元の線上に、あるいは二次元の面上に、光を移動してゆくことが必要になる。このためにレーザーの応用にとっては、

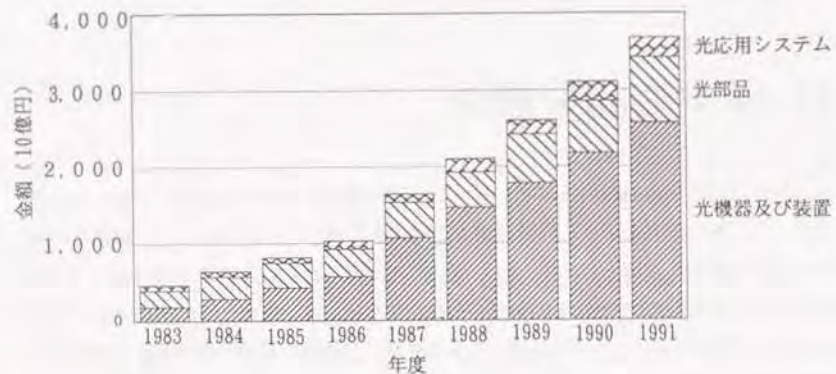


図1.1 光産業の生産規模推移
(光技術振興協会資料¹⁾)

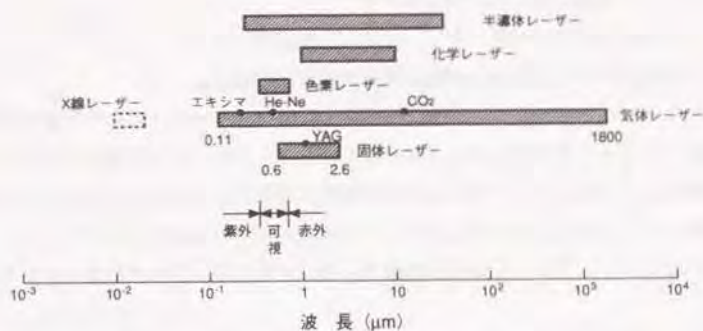


図1.2 レーザの発振波長域 (田幸³⁾)

レーザー光の走査技術が非常に重要となる。

レーザー光の走査には光を空間的時系列的に制御する方法と、光を空間的に並列に制御する方法がある。前者のための素子としては光の偏向のための、ポリゴンミラー（回転多面鏡）、ガルバノミラー、ホログラムスキャナ、超音波光偏向器（Acousto-Optical Deflector - AOD）などがあり、後者には半導体レーザーアレイなどがある。両者ともさらに光源ないしは対象物の機械的運動が加えられることも多い。

前者はレーザーの開発と共に研究されてきた技術であるが、後者は最近の研究課題となっている。しかしながら、レーザーアレイを実現するには、加工上、あるいは放熱構造上で技術的に問題が多いのみならず、アレイを形づくる個々の素子の大きさ、およびその数には限りがあり、分解能は比較的低い領域にならざるを得ない⁴⁾。

これに対し空間的時系列的な制御方法は、基本的に分解能には限りがない。従って、今後ともレーザー応用での基本技術であることは確実である。しかしながら、レーザー自身の発展と応用の拡大にともなって、より一層の走査範囲の拡大、高分解能化、種々の波長への対応、小型化、などが必要となっており、さらなるレーザー走査技術の発展が望まれている。

本研究はこのようなレーザー走査光学系の設計・加工・および応用に関し、各種の走査方法に新しい展開を求めつつ、多くの産業分野にわたって実用化を計りながら多面的に実施したものである。

本研究のレーザー応用技術分野における役割を整理すると次の通りである。

(1) 走査範囲、分解能の限界拡大と、高速化、小型化への貢献

図1.3に、種々の応用に対するレーザー走査光学系の走査長と分解能の関係、および本研究においてねらいとした方向を示す。

従来レーザー走査技術の多用されている範囲は、レーザープリンタなどに見るように、走査長が300～500mm、分解能が0.1～0.05mm程度のものが多い。これに対し情報機器分野では、大画面でかつ高分解能の方向に次第に移行しつつあり、また、検査、測定など工場内でのセンシングの分野にも同様の傾向が見られると共に、3次元計測では加えて3次元空間の走査が必要となってきている。

一方移動ロボットの視覚センサは、大局的に周囲環境をとらえればよいので分解能は

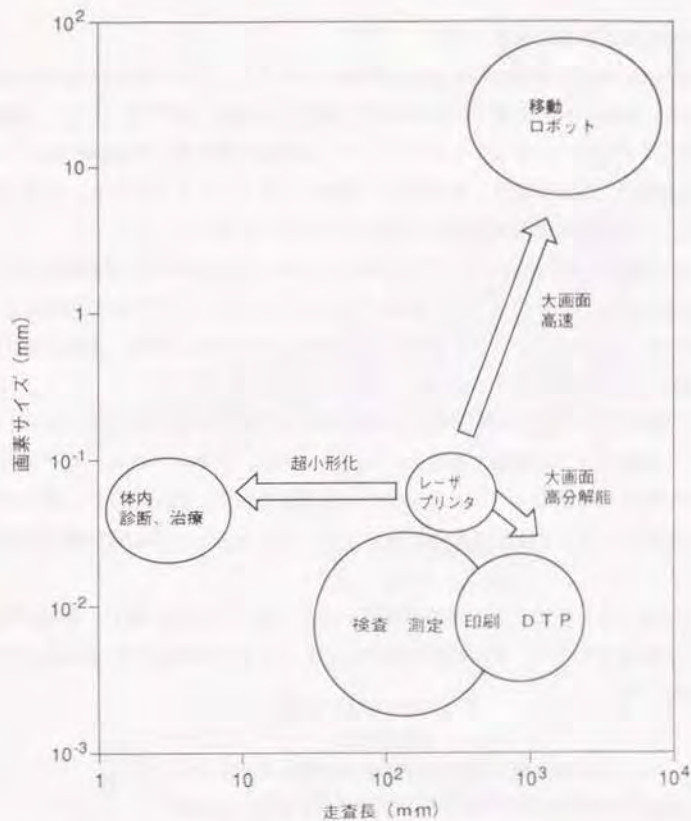


図1.3 各応用分野における走査長と分解能

若干低くてもよいが、走査範囲が大きいことが必要である。

また医療分野では体内での診断、治療のために、分解能は要しないが超小型の走査光学系が望まれている。

以上のような、走査範囲の拡大、高分解能化、高速化、小型化、各々の動向に対応して研究を行った。

(2) 偏向方式メニューの拡充

レーザー走査技術の一層の進展のためには、従来用いられている走査技術を一層高度化するとともに、新しい走査方式の導入も必要である。

表1. 1⁹⁾は光偏向素子の原理による区分であって、一般に多用されているレーザー走査光学系は、ポリゴンミラーなどのように反射現象によっているものが多い。屈折、複屈折、干渉は興味ある偏向方法であるが、前2者は各々の現象だけでは偏向量が十分で

表1. 1 光偏向素子の種類 (小野⁹⁾)

物理現象	偏向原理	制御手段
反射	ミラー、プリズムの回転、又は傾きを変えて反射角を変える	モータ(ポリゴンミラー)、電磁コイル(ガルバノミラー)
屈折	媒体に屈折率の変化、又は屈折率の勾配を作り、屈折角を変える	電気光学効果、音響光学効果(定在波)、熱光学効果
回折	媒体中に回折格子を作り、格子周期を変えて回折方向を変える	音響光学効果(進行波)、空間周波数分布格子の移動(ホログラムの回転)
複屈折	複屈折物質を通過する常光、異常光で屈折率が異なることを利用する	常光、異常光の選択には偏光スイッチ(電気光学効果)を用いる
干渉	干渉によるフリッジパターンを用いる	干渉計の光路差を距離、または屈折率変化で与えてフリッジを移動する

なく、また干渉はフリンジパターンの移動になるので、アクティブなレーザ偏向には向かない。

回折現象を利用するものに、音響光学効果によるAOD、およびホログラムがある。現状では前者は偏向角が小さいため、多くは補助的に用いられているに過ぎず、また後者は主としてレーザプリンタの低価格化を目的に研究されてきたが⁶⁾、性能の面でやや行きつまりの状態にある。しかしながら、前者は固体素子のため非常に高速の偏向が可能であり、後者は小型軽量、偏向の自由度に富むなどの特徴がある。

このため、反射現象による走査光学系の範囲拡大、小型化とともに、回折現象による走査光学系を従来進められている研究と異なる視点から見直し、トータルシステムとして有効に活用することを試みた。

(3) 走査光学系の加工技術の整備

上記のような設計面からの研究に基づくレーザ走査光学系を実現するためには、加工技術の進展が必要となる。

レーザ走査における反射、あるいは屈折光学系では、表面の加工技術が基本となる。紫外、可視、近赤外域で用いられる材料はガラス、石英などが多く、加工上大きい問題はない。しかしながら、中赤外域のCO₂レーザは大出力で用いられることが多いため、反射光学系には耐熱材料が望ましい。また、透過率の高い材料は一部の結晶材料に限定される。従って、まずCO₂レーザ用光学材料の砥粒加工を取りあげた。

次にホログラムスキャナでは、高精度の機械的寸法・形状をもつホログラムの加工技術が必要であり、深溝回折格子の加工について研究を行った。

さらに医療用などの超小形のスキャナでは、超小形機構部品の加工技術が必要となる。このため3次元的な微細形状の創成を目的として、微細放電加工に関して研究を行った。

(4) 応用機器メニューの拡充

本研究においては、設計、加工の基礎技術の研究と、実用化をめざす応用機器の開発とを、それぞれが対をなすようにして実施した。新しい走査光学系は新しい応用機器によって生かされる。また、新しいレーザ応用機器の実現のためには、新しい走査光学系が必要である。

すでに図1.3に示したように、従来の走査性能の限界をこえる領域が研究のねらいであり、応用とのかかわりの中で各々の走査光学系の設計、加工の研究を進め、システ

ムとして最適な走査光学系を検討し、新しい分野の展開を目指した応用機器の研究を行った。具体的には、加工システム、移動ロボット、3次元検査装置、画像通信システム、および医療機器を対象とした。

第1.2節 走査光学系の現状と本研究との関連

本研究を実施するに際し、走査光学系の種類と特性、光学系に用いられる材料および加工技術、さらに応用機器の現状について述べ、本研究において取り上げ、解決を試みた問題点を明らかにする。当該部については下線を施して明示する。

1.2.1 走査光学系の種類と特性

種々の原理に基づく走査光学系のなかで、実用化または実用化が試みられているポリゴンミラー、ホログラムスキャナ、およびAODについて述べる。

(1) ポリゴンミラーによる走査光学系

一般にレーザ走査光学系において多用されているものは機械的運動によるスキャナであり、そのなかでもポリゴンミラーが広く普及している。

ポリゴンミラーはガラス、金属などを用いた多面鏡を回転軸に連結したモータで駆動するものであるが、記録系や精密な計測の用途では走査線の湾曲が問題になるので、回転軸に垂直な面内で入射し、同一平面内でビームを移動させる。

ポリゴンミラーのみによる偏向では、図1.4(a)に示すように走査位置Yは

$$Y = f' \cdot \tan \theta \quad (1.1)$$

ここに、 θ : ポリゴンミラーの回転角、 f' : 反射面より投影面までの距離の関係となるが、これでは平面上を走査するビームは時間的に不等間隔になるので、通常 $f\theta$ レンズと称される歪曲をもたせたレンズで、図1.4(b)のように

$$Y = f \cdot \theta \quad (1.2)$$

ここに、 f : $f\theta$ レンズの焦点距離

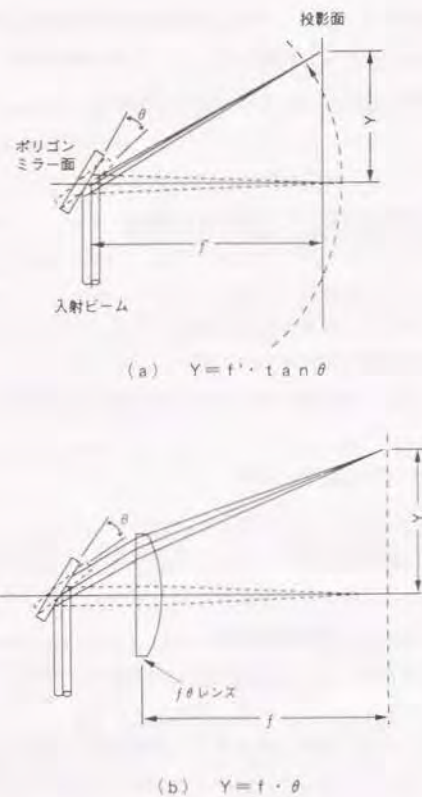


図1.4 $f\theta$ レンズの作用

なる関係を保って等間隔になるようにしており、ポリゴンミラーと $f\theta$ レンズは多く対をなしている。ポリゴンミラーによる走査系では、レーザプリンタなどを対象とした光学系のプラスチック化など、主として低価格化を目的とした研究が行われている⁷⁾。

一般のスキヤナ、プリンタでは走査は2次元平面に対して行えばよいが、工場などで

の3次元形状測定においてレーザ走査を用いる場合には、3次元空間の走査を行わなくてはならない。従って、3次元空間に対応したポリゴンミラー、 $f\theta$ レンズによる走査光学系が必要である。

(2) ホログラムスキヤナ

回折現象を用いるホログラムスキヤナも機械回転型スキヤナの一種であり、ホログラム格子を回転させることによりレーザビームを走査する。図1.5に示すように、ホログラムに照射されたレーザ光は、焦点を持つように製作したホログラムでその焦点に回折され、ホログラムを移動するとレーザ光が走査される。

ホログラムは円板でよいのでプラスチックで複製が可能であり、主としてスキヤナの低価格化を目指して研究が進められてきた⁸⁾。プリンタに応用する場合には、走査中心より走査端迄、ホログラム焦点に回折されたビームの集光性、およびビーム軌跡の直線性、等速性が、画像の要求に十分な性能をもっていないとてはならない。しかしながらこの三者を全走査域について満足することは困難であり⁹⁾、以上の特性があまり問題とならないPOS用バーコードリーダに使用されている¹⁰⁾。

一方、ホログラムスキヤナは円板であるから小型軽量の特徴がある。また、ホログラムは計算機により作成することも可能であるので、設計によって任意の走査、たとえば

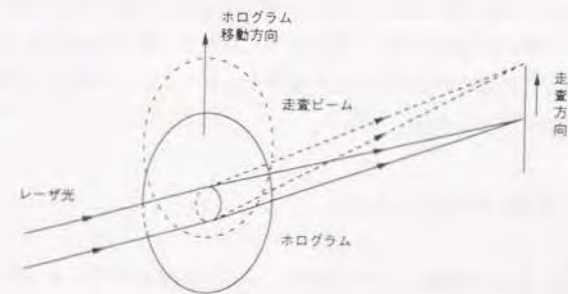


図1.5 ホログラムの移動によるレーザ光の偏向

互いに交差する走査、うず巻き状の走査などが原理的に可能であり¹¹⁾、将来高速の階層的認識のためのセンシングデバイスに発展し得る可能性を持つ。このことから、ロボットなどに搭載する視覚センサに用いる、移動体上の走査光学系への利用が考えられる。

センシングにおいては赤外光の利用が有利な場合も多い。従来、可視光域付近のレーザに対するホログラムスキャナの研究は行われているが、赤外域に対するものはない。このため、視覚センシング領域で用いる赤外域ホログラムスキャナの研究が必要である。

(3) AOD

AODは媒質の弾性歪による屈折率変化を介して、超音波と光波が相互作用する音響光学効果を用いた素子である。超音波により媒質中に屈折率の周期的変化を生じ、光波が回折または屈折を受けるが、実用上は回折現象が用いられる。媒質としては多く TeO_2 が用いられる¹²⁾。

音響光学効果は光の変調に用いられることが多いが、超音波周波数を変調することにより、周波数に比例して回折光の出射角が変化するので偏向に利用することができる。

固体素子であるため機械的偏向における動的精度の問題がない。

一方、機械的偏向に比し偏向速度は高いが偏向角は小さい。従ってAOD単独での走査の用途には限りがあり、従来補助的な用途、たとえばポリゴンミラーの各面の倒れを動的に補正する¹³⁾ などの他に利用された例は少ない。

しかしながら他の走査手段を併用し、互いに補完するような走査方法を用いることで、固体素子としての優れた特性を生かし得ると考えられる。例えば、高速であるが走査長の小さいAODと、低速であるが非常に走査長を大きくとれる機械送りを組合せた、新しい概念の走査系が考えられる。

1. 2. 2 光学素子材料とその加工

光学素子に用いられる材料と加工のなかで、光走査技術に関連する、反射、屈折光学系の材料と加工、回折光学系の加工、マイクロ走査機構の加工について述べる。

(1) 反射、屈折光学系の材料とその加工

反射、屈折光学系において基本となる加工技術は光学面の加工である。レーザ光学系の材料としては、可視域、近赤外域ではガラスが広く使用され、紫外域では石英やCa

F₂ が用いられる。これらの材料に対しては多くの研究例があり、基本的な問題は少ない。

一方、CO₂ レーザにおいては大出力の場合が多く、熱に対する考慮が特に必要であり、かつ中赤外域 (10.6 μm) のため透過する材料が限定される。

CO₂ レーザの反射光学系に用いられる材料の特性値を表1. 2に示す。Siは吸収

表1. 2 CO₂ レーザ反射光学系に用いる材料の特性

材 質	反射率 —— 吸収率 (%) (at 10.6 μm)	熱伝導度 (W/cm·K) (273~ 373° K)	線膨張 係数 (10 ⁻⁶ /K) (293° K)	縦弾性 係数 10 ⁹ N /cm ² (293° K)	ヌーブ 硬さ	比重 (g/cm ³)
Si	30 70	1.38	2.5	14.4	~1100	2.33
W	98 2 (予測)	1.67	4.5	39	~ 540	19.3
Mo	98 2 (予測)	1.34	5.0	32.2	~ 290	10.2
Cu	99.2 0.8	4.0	16.7	12.9	~ 80	8.96
Ni めっき Cu	90 10	eff. 1.97	eff. 16.7	eff. 12.9	~ 600	8.96

が大きく、直接レーザー光が照射された場合には破壊しやすい。Cuは柔らかいため機械的変形や傷を生じやすい。Cu基板上にNiめっきを施したものは研磨しやすい特徴がある。

SiおよびNiめっき面はすでにそれぞれ半導体、あるいは磁気ディスク基板¹⁴⁾において加工技術が確立されており、またCuはダイヤモンドの単一切刃による切削加工が一般的である。一方、W、Moは反射率が高いと予測されるが、高硬度で切削加工が困難であり、砥粒加工の研究例もほとんどない。

次に、CO₂レーザーの屈折光学系材料としてはGe、GaAs、ZnSe、KClなどがあり、表1.3に特性値を示す。Ge、GaAsは吸収は大きい、入手が容易なため小出力の場合に用いられる。ZnSeは吸収の面で望ましい。さらにKClはもっとも吸収が小さいが、吸湿性を有するため加工上、使用上に問題がある。

これら結晶材料の熱伝導度は金属に比し約1桁小さく、かつ反射光学系のように背面から冷却することができないので、発熱の原因となるレーザー光の吸収を極力低減させる必要がある。吸収には材料バルクの吸収と表面吸収があり、後者は表面の加工に係る

表1.3 CO₂レーザー屈折光学系に用いる材料の特性

物質	吸収係数 (cm ⁻¹)	屈折率	熱伝導度 (W/cm·K)	線膨張係数 (10 ⁻⁶ /K)	縦弾性係数 (10 ⁸ N/cm ²)	抗張力 (10 ³ N/cm ²)
Ge	1.2×10 ⁻²	4.02	0.59	5.7	10.3	9.31
GaAs	5×10 ⁻²	3.30	0.48	5.7	8.48	13.8
ZnSe	1×10 ⁻²	2.40	0.18	8.5	6.72	5.52
KCl	7×10 ⁻⁴	1.47	0.065	36	3.0	0.44

る。Ge、GaAsについては、すでに半導体材料として加工技術が確立されている。一方、砥粒加工の困難な軟質脆性の性質をもつZnSe、KClについては系統的研究は行われていない。

以上のようなことからCO₂レーザーの光学系に用いる、W、Mo、およびZnSe、KClの砥粒加工の研究を行う必要がある。

(2) 回折光学系の加工

一般に光学系での回折効率¹⁵⁾は反射率に比し低いので、回折現象を用いるホログラムスキャナにおいては回折効率を高めることが重要であり、このためにはホログラムに、格子ピッチに対して深さの大きい深溝格子を用いることが有利である¹⁶⁾。格子のピッチはレーザーの波長近傍であり、また深さはピッチと同程度か、より深い溝にする必要がある。溝の断面形状も回折効率に影響するので、解析結果より設定した望ましい形状を正確に実現しなくてはならない。さらに透過型ホログラムでは、格子を作成する基板は使用するレーザーの波長に対する透過材料でなくてはならない。

分光用などの回折格子では、Alなどの蒸着面をダイヤモンド工具で塑性変形させる加工が用いられるが¹⁶⁾、溝の深さは小さく、機械的加工では深溝の加工は困難である。このため、フォトリソプロセスによって基板表面に所定のパターンをもつマスクを形成した後、マスクングされていない部分を除去する方法が望ましい。

除去加工法として、物理的作用によるイオンエッチング、化学的作用によるケミカルエッチング、両者を併用した反応性イオンエッチングがある。イオンエッチングではマスクも同時に除去されてゆくの深溝の加工が困難であり、また傾斜した壁面を持つ溝が形成しにくい。一方ケミカルエッチングではマスクを回り込むアンダーカットが大きく、深溝の加工が難しい。

これに対し反応性イオンエッチング(Reactive Ion Etching-RIE)では、イオンによる物理的作用とエッチングガスによる化学的作用が併合され、深溝の加工に適しており、また両作用のバランスを適宜とることによって、任意の断面形状を実現できる可能性がある。

RIEは半導体プロセスで最近多く用いられている。しかしながら半導体においては回路的特性が問題であるが、光学的性能は機械的の形状に支配されるので、ホログラムの加工では断面の機械的な形状、寸法が重要である。さらに、各溝の間での形状、寸法の

ばらつきはホログラム上の位置による回折効率の変化を生じさせるので、加工はホログラム全面にわたって均一でなくてはならない。

従って赤外光のホログラムに対しては、赤外光透過材料のRIEに関して研究を行う必要がある。

(3) マイクロ走査機構の加工

血管などに挿入できるような、医療用の超小形レーザ走査光学系の実現のためには、微細な機構部品の加工技術が必要となる。最近、半導体プロセスを利用したこのようなマイクロマシンの研究が進められている¹⁷⁾。しかしながら、薄膜を中心としたプロセスでは、一般的に2次元的な形状の創成に限定される。一方、現実の機構系では3次元的な形状を持つことが普通であり、特に管内に装着するようなメカニズムでは円筒状となって、必然的に3次元的な形状を取らざるを得ない。

このような3次元形状のマイクロ加工に対し、SOR光による露光によってアスペクト比の高い形状を作る試みがなされているが¹⁸⁾、基本的にマスクを用いるので任意の断面形状の加工は困難である。これに対し、コンベンショナルな加工技術は3次元形状を実現することが普通であり、加工技術に研究を加え格段のマイクロ化を計る努力が必要と考えられる。

コンベンショナルな加工技術で代表的なものは切削、研削であり、現在これらの加工に用いられている工具の最小寸法を表1. 4¹⁹⁾に示す。微小な形状の加工において制限となるのは、寸法的に小さいため工作物あるいは工具の機械強度が弱くなり、切削、研削抵抗に耐えられなくなることである。従って微細部品の加工に対しては、加工抵抗の小さい非接触の加工が望ましい。

一方、加工原理としては、工具あるいは工作機械の精度を加工部品に転写する母性原理によるものと、母性原理によらないものがある。切削、研削などは前者であり、ラッピング、エッチングなどは後者である。前者は機械精度を高めることによって高い加工精度を得ることが可能である。後者では加工精度を高めることは、加工面上の位置による加工量の差異を、工具あるいは工作物の機械的運動などによって平均化する方法による。従って、平均化のためには加工面の2次元的な広がりが必要である。

以上の点から、3次元の微細形状の加工のためには、非接触かつ母性原理に基づく加工が望ましい。放電加工はこのような加工の一つと考えられ、すでに微細加工への適

合性が示されている²⁰⁾。このことから、マイクロ走査機構のための微細放電加工について研究を行う必要がある。

表1. 4 従来の切削、研削加工における工具の最小寸法
(シチズン社カタログ¹⁹⁾)

分類	工具名	最小径(mm)	精度[μ m]
穴加工	ドリル	0.02	—
	リーマ	0.025	± 1.5
	中ぐりバイト	0.3	—
	位置出しエンドミル	0.15	—
	内面研削砥石	0.2	—
ネジ加工	タ ッ プ	0.4	—
フライス加工	鋸型カッター	最小R 0.03	2
	ホブカッター	最小モジュール0.04	
測定具	プラグゲージ	0.05	± 0.15
	三次元測定プローブ	0.1	—

1. 2. 3. レーザ走査応用機器の状況

主要な応用対象である、加工、測定、情報処理、ロボット、医療の各々の分野におけるレーザ応用機器の現状について述べる。

(1) 加工機械

工場においては、構成部品の高精度化、多品種少量生産の傾向、製品立ち上げ時間の短縮など様々な対応に迫られているが、レーザによる加工は他の機械的加工法の多くと異なって治工具や金型などの準備が不要であり、かつビームのスポットも回折限界に迄絞ることができ高精度の加工が可能である。従って近年、切断、接合などを始めとした製造現場の多方面に用いられるようになってきた。

CO₂レーザは出力の大きいところから、金属の切断加工の分野に多用されている。レーザの安定化に伴い薄板材が高精度に切断できるようになり、また大出力化によって厚板の溶断にも使用されつつある。しかしながら、板金加工は中小工場に多いところから、特に高額な投資を伴うレーザを有効に利用することが望まれている。

500 Wレーザを使用して多種少量の生産を行っている工場の稼働状況の調査では、その9割はレーザ平均出力にして 250W程度の範囲の条件で使用しており、大部分の時間では設備能力がフルに発揮されていない。レーザ加工のランニングコストの大半は共振器で消費される混合ガス（He, N₂, CO₂）の費用であり、これらはレーザ出力の大小には無関係に一定量消費される。このことから、1台のレーザより複数のビームを取り出し時分割で使用するレーザ加工システムが考えられる。

(2) 測定装置

従来、検査の自動化は主として省人化の目的で進められていたが、要素の超小形化と高集積化に伴い、人手による検査では見落としやバラツキが発生するだけでなく、目視では検査不可能な領域に突入しようとしている。

エレクトロニクス製品の基本的な部品であるICのピン数の年度に対する傾向と予測を図1. 6²¹⁾に示す。従来、100ピン程度のDIPが多数の機器に用いられていたが、次第に4方向にピンのあるQFPに代りつつあり、ピン数が大巾に増加してきた。また、ICチップを直接基板にとりつけるチップオンボードの方法も出現してきている。パッ

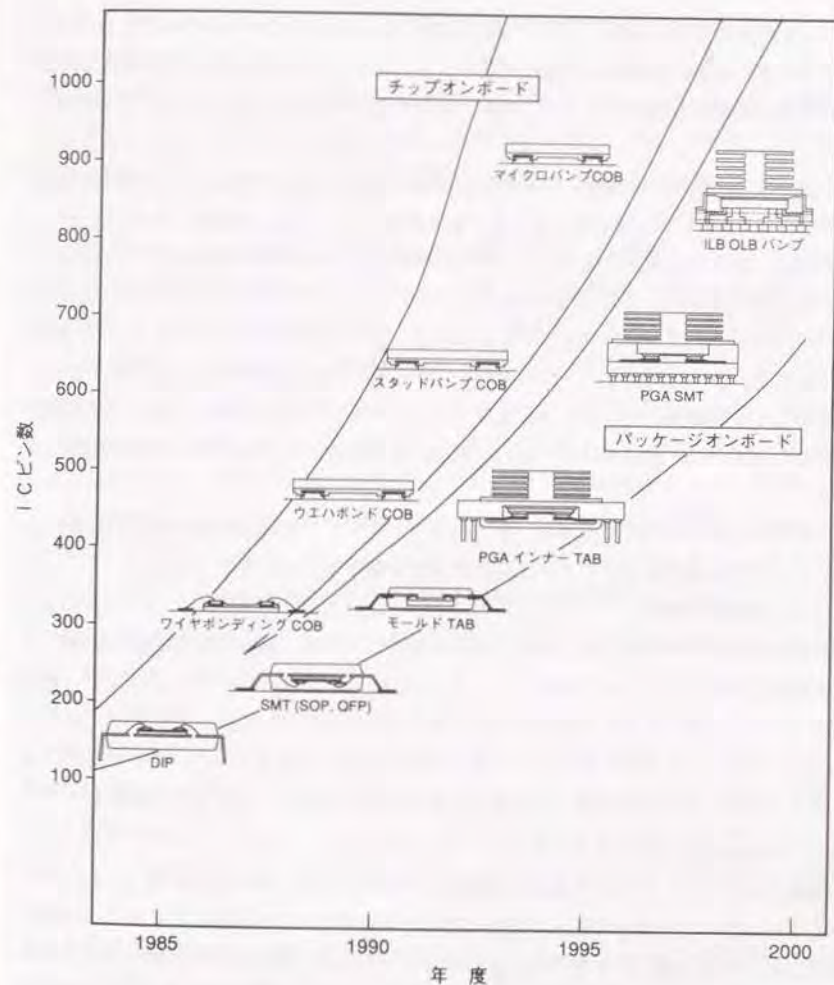


図1. 6 ICピン数の年度別予測 (九州松下電器資料²¹⁾)

ケージを基板にのせる方法、チップ自体を基板に直接のせる方法のいずれをとっても、チップに盛り込まれる機能が次第に複雑になることからピン数は増加し、基板と素子の接続箇所は増加する傾向であって、将来1個の素子で1000箇所以上になると予測されている。

一方では、一枚の回路基板に実装される部品の点数や密度も増加し、かつ種類や形状も多様化してきている。従って、基板上に電子部品が正しく実装（搭載）されているか、はんだなどの接合が正しくなされているかを検査することが切実な問題となっている。

実装基板の検査には3次元情報を必要とするが、従来より種々の方法が提案されており²²⁾ 一部は実用化されている。多くは2次元CCDの画像データによるパッシブな方法であるが、直接3次元データが得られず、またCCDの走査時間も長いので、ラインに直結して全数検査に用いることは困難で、オフラインの検査になる。また、画素数にも限りがあるので、部品形状の小型化、あるいは基板寸法の増大に伴って測定精度は落ちる。

上記の欠点を克服した、高精度、かつ高速のインライン実装基板検査装置が望まれており、レーザ走査によるアクティブな計測方式が適していると考えられる。

(3) 情報処理機器

新聞・印刷業界では電子的な編集や製版が進行しており、紙面の画像情報を回線により遠隔地と交信することが一般化しつつある。

オフィス、工場、さらには個人レベルにおいても、DTP、CAD/CAM、あるいはマルチメディアの進展に伴って、次第に画像を主体とするネットワークが形成されると考えられる。この場合画像への要求は次第に高度になり、やがては高品質のカラー印刷レベルに達するものと考えられる。

画像ネットワークにおける重要な機器にスキャナ、プリンタがある。従って、スキャナ、プリンタには次第に印刷と同程度の品質が求められつつあるが、CCDによる読み取り、あるいはアレイ状の素子による記録など、空間的な制御方法では素子の数と密度に制限があり、高分解能を得ることに限度がある。従って分解能の高い場合には、画素分割数に制限を受けず、かつ高速であるレーザ走査による方式が有利である。

このような装置の上限に当たるものとして、すでに新聞紙面の編集、伝送のための、ポリゴンミラーと $f\theta$ レンズによる走査を用いた平面型のスキャナ、プロッタを実用化

してきた。図1.7はその一例で、新聞長辺方向、410mm幅の原稿を1500LPI (Lines Per Inch) で読み取りを行っている。

通信は高速であるほど、情報伝達の迅速化とコストの面で望ましい。従って、新聞などの分野において、さらに伝送速度を高め、新聞見開き2ページ分、1mm程度の幅を処理できる大画面のスキャナ、プロッタが望まれている。

(4) ロボット

工場にはロボットが多数導入されているが、現状では多くは単純な繰り返し運動をするに過ぎない。高度の作業を行なう知的ロボットでは、作業対象物や周囲の環境をロボットが認識することが必要である。さらにロボットが移動する場合には、作業環境の3次元認識は欠くことのできない技術になる。このような移動ロボットは工場での作業のみならず、運搬、清掃、病院などのサービスロボットにも望まれているが、特に人間の入りこむことが困難である、災害環境などでの作業ロボットに期待が持たれている。

3次元計測では、すでに(2)で述べたように速度、分解能の点からレーザ走査による方式が有利である。図1.8は石油化学プラントなどにおける災害現場で作業を行なうロボットのイメージ図²³⁾ であるが、このような環境では炎や煙が立ちこめており、これらを透過して対象物を認識したり、距離を計測する必要がある。実現のためには、炎、煙などを透過しやすいと考えられる、長波長のCO₂レーザを光源として対象物の認識、測距を行う視覚センサが必要である。

(5) 医療機器

医療技術の進展に伴って、診断、治療の方法も緻密、精細なものとなってきているが、重要な技術の一つに体内における診断・治療技術がある。すでに、腹壁にあげた小さい穴から腹腔内にCCD内視鏡、手術器具を入れて胆嚢摘出が行われており²⁴⁾、また腹腔内に挿入する、機械的走査による超音波プローブ²⁵⁾ が胎児の診断、卵子摘出に効果を上げている。

さらに超小型の機構が実現すれば、人体に影響を与えることなく、血管内部に器具を挿入して精密な診断、治療を行うことが可能となる。たとえば、光ファイバによってレーザ光を体内に導入し、超小型の走査機構によってレーザ光を操作することにより、心臓、血管などの疾患を危険なく、しかも的確に診断、治療を行うことが実現する。

このためには、血管に挿入し得るような大きさの、超小型のレーザ走査機構が必要である。



図1. 7 新聞社用大型平面スキャナの例
(電子網掛装置)

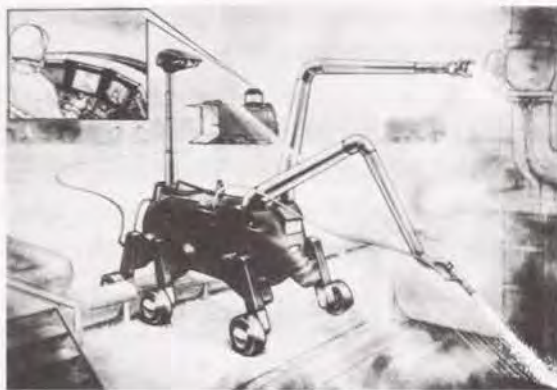


図1. 8 災害環境での移動ロボットの概念図
(極限作業ロボット技術研究組合²³⁾)

第1. 3節 本研究の目的と実施の概要

すでに述べてきたようにレーザー光の走査技術では、走査範囲の拡大、高分解能化、高速化、マイクロ化、あるいはより広い波長範囲への適合など一層の高度化のために、新しい概念の走査素子、走査方式の実現が望まれている。また、このような新しい走査光学系のためには、光学素子および機構に関する精密加工技術、微細加工技術の研究が必要である。このような基礎技術の研究の進展に併せ、多方面の分野において要望されている、新しいレーザー走査応用機器に対する研究を展開することができる。

このような視点から、レーザー走査光学系の設計・加工・および応用に関し総合的に本研究を実施した。従って各々の研究対象において、常に設計、加工に関する基礎技術の研究と応用機器の研究が対をなすようにして進めた。

本研究の目的は次の通りである。

(1) レーザ走査において基本となるものは、反射光学系および屈折光学系の素子であり、良好な光学諸特性を得るには表面の砥粒加工の研究が重要である。CO₂ レーザは波長が 10.6 μ m と長く、かつ加工用として大出力が必要であるため、光学材料として特別なものが用いられ、また熱損傷の原因となる表面吸収が可能な限り小さいことが必要である。このため、耐熱金属であるMo, W, および透過結晶材料であるZnSe, KClを対象とし、20kW級の大出力に耐え得る光学素子の加工技術を確立する。

(2) CO₂ レーザ応用システムのうち、レーザー加工については工場内でのレーザーの有効な活用によるランニングコストの低減が必要である。このため、レーザー光を時分割で使用する効率的な加工システムを実現する。

また、センサへの応用としては、移動ロボット用のアクティブ視覚センサを小型軽量化するため、ホログラムスキャナを適用する技術を確立する。

(3) 走査範囲の拡張に関しては、レーザー走査により3次元形状を計測する実装基板検査装置を対象に、ポリゴンミラーによる走査光学系の3次元特性を考慮した最適化と測定精度の向上を計り、インライン検査装置を実用化する。

走査長の拡大に関しては、新聞見開き大の画面のスキヤナ、プリンタを対象とする。AODと高速機械運動を併用した、新しい概念の走査光学系について、光学系の設計と読み取り、書き込みの基本性能に関する実験を行って、実現の可能性を明らかにする。

新しい応用機器としてマイクロ化機器を取り上げる。体内を移動するマイクロマシンによって、将来、レーザによる診断・治療を行うことが期待されているが、その基盤となるマイクロ光走査機構の実現のために、3次元形状を非接触、かつ母性原理によって高精度で加工を実施できる微細放電加工技術を確立する。

研究は次の3段階により実施した。

第一に、光学系の基本となる光学素子の加工に関し、課題が多く、かつ従来系統的に研究の行われていないCO₂レーザ用光学系材料を対象に研究を行った。研究結果は大出力レーザシステムの光学素子として実用化された。

第二に、CO₂レーザ応用システムとその光学素子について研究を実施した。まず反射光学系の一応用であるチョッパミラーを用いたCO₂レーザ時分割加工システムに関して研究を行い、次に移動ロボットの視覚センサを目的として、CO₂レーザ用ホログラムスキヤナの研究を行った。

第三に、レーザ光の走査範囲を拡張する研究を実施した。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り、応用としてはそれぞれ実装基板検査装置、新聞紙面の画像通信装置、および血管内診断・治療装置に対応している。

第1.4節 本論文の構成

本論文は9章から構成されている。以下、本研究の成果の概要を各章について述べる。

第1章は「緒論」である。

まずレーザ走査光学系に関する技術の重要性ならびに必要性を述べ、本研究の目的と位置づけを明らかにした。次に、本研究を進める上で必要な背景および課題を明確化するために、走査光学系の種類と特性、光学素子材料とその加工、およびレーザ走査応用機器に関して、その現状と問題点を明らかにした。これらの結果を踏まえ、本研究の目

標を明確にした。

第2章は「CO₂レーザ用反射光学系材料の加工」について述べる。

反射光学系のための、Mo、Wの砥粒加工に関する研究を実施した。材料を工場での損傷の実態を踏まえ、使用時の熱的、光学的特性の面から評価を行った。次いでポリシ加工を中心に、素材製作条件も含めて加工実験を進め、仕上げ面あらさによる評価と同時に、製作した反射率測定装置、吸収率測定装置、損傷しきい値測定装置によって、加工結果を光学特性的に評価すると共に、レーザ光の照射時に損傷を生じる限界パワー密度を求めた。

これらの結果より加工条件と反射率、表面吸収の関係について、X線回折による加工変質層の評価、および表面のコンタミネーションと共に検討した。Mo、Wにおいてはメカノケミカルポリシングによって高い反射率と対照射損傷性が得られるが、コンタミネーションについても留意する必要があることを明らかにした。

第3章は「CO₂レーザ用屈折光学系材料の加工」について述べる。

屈折光学系のためのZnSe、KClのポリシ加工に関する研究を実施した。使用上では、光学素子のレーザ光の吸収による発熱とそれに起因する光学ひずみが問題であり、材料を光学ひずみの点から評価した。これら材料は軟質脆性材料であり、さらにKClは吸湿性を有するため加工上問題点が多く、特にメカノケミカルポリシングを中心に実験を行った。吸収には素材バルクの吸収と共に加工に関係する表面吸収があり、吸収率測定装置を製作し、加工結果をX線回折による加工変質層と対比しつつ評価した。

加工においてはコンタミネーション、表層の塑性流動に留意する必要がある、ZnSe、KClとも、水、および薄いグリコール溶液による極めて弱いメカノケミカルな作用を加えることが、精度を確保し、かつ吸収を低減させる上で有効であることを見出した。

第4章は「時分割CO₂レーザ加工システム」について述べる。

レーザ加工のコストの低減のため、レーザを複数の加工端末で同時に使用する時分割加工システムについて研究を行った。切断加工実験により、切断品質とパルス出力、デュティファクタなどの関係を求め、尖頭値に対し相対的に短いパルスによって加工を行うことが望ましいことを見出した。この点に着目して、レーザのパルス周波数を高め、1パルスごとのチョッパミラーによる間欠的な振り分けにより、2個のパルスレーザ光

に分割する方式を設定した。

レーザ共振器の出力特性と発振制御の応答性を実験的に確認してチョッパミラーの設計を行い、分割ビームの相互干渉と、隣接するパルスを各々の系列での加工に最適なパルス形状として混合発振させる条件について検討した。製作したシステムによって加工実験を行い、その有効性を確認した。

第5章は「CO₂レーザ用ホログラムスキャナ」について述べる。

災害環境下で作業する移動ロボットの視覚センサに用いる、CO₂レーザを光源とするホログラムスキャナについて研究を行った。計算機ホログラムの手法によって必要な走査特性を得るホログラムパターンが設計可能であるが、回折効率を高めるためのレリーフ型ホログラムの加工が困難であることよりホログラムは単純直線格子とした。回折効率と格子の溝形状について解析を行い、深溝三角形断面によって高い回折効率の得られることを明らかにした。

本形状の実現のため、基板となるGeのRIEについて研究を行い、添加O₂量によって溝側壁傾き角を制御できることを見出した。また、形状寸法の高精度化のためにはガス流の制御が必要であることが判明した。ホログラム素子を円板上に配置したホログラムスキャナを製作し、回折効率、および走査ビーム軌跡の測定を行なうと共に、揺動ミラーとの組み合わせによって2次元走査を行い、運動を行う対象物の反射光よりその像の生成を行ない、十分な認識の可能であることを実証した。

第6章は「レーザ走査による実装基板検査装置」について述べる。

回路基板上に実装された各種の電子部品の位置、姿勢、接合状態などの検査のため、レーザ走査を行い、各走査点での反射光の位置より三角測量によって高さを求め、機械的走査と共に表面の3次元形状を計測する装置の光学系に関して研究を行なった。走査はポリゴンミラーと $f\theta$ レンズによるが、走査は2次元平面でなく3次元空間であるため、走査光学系は3次元空間に対する光学特性と測定精度を満足するよう設計を行った。検出感度は三角測量における検角の大きさによって定まるが、光路中に反射ミラーを設けることによってその増大を計った。

一方、このために走査中で光路長が変化し反射光位置の測定に誤差を生じるが、データ処理時に補正を加えることで対処した。設計製作した光学系によれば、補正の実施と共に実用上十分な測定分解能が得られ、検査装置を小型高密度基板の生産ラインに導入

することが可能になった。

第7章は「AODと高速機械運動による大画面の走査」について述べる。

新聞原稿などの画像通信の目的で、1 m程度の幅の大画面をAODと高速往復機械運動を併用して走査するプロッタ、スキャナの光学系を取り上げた。

プロッタでは高速化のため光源より2ビームを分割し並行して使用するが、分割方式について検討を行った。また、光源は固定されているが書き込みヘッドは往復運動を行なうため、人射瞳位置の変化する $f\theta$ レンズについて設計を行ない、AODによる走査時の非点隔差の補正と共に光学特性を確保した。書き込み実験ではAODの周波数掃引速度の直線性の確保によって、目標の画質に対する用途を得た。

スキャナでは、受光素子として光電子増倍管、CCDの各々を用いる方式を検討して、設計、実験結果よりプロッタと同様の光学系で照明を行う前者が総合的に有利であると判定し、必要な性能の実現に対する用途を得た。

第8章は「微細放電加工によるマイクロ光走査機構の作成」について述べる。

カテーテル内に装着して血管内にそう入し、レーザによる診断・治療を行なう機器を想定した超小形光走査機構の加工を目的として、3次元の複雑形状の加工を行う微細放電加工についての研究を行った。放電エネルギーの微小化ためには、放電回路における浮遊容量の低減が必要であり、機構系にセラミックを多用するなどによってサブミクロン領域の放電間隙を実現した。また、微細加工領域では電極の溶着が発生しやすく、その防止のためには電極の回転が必須であり、また加工精度の確保のため、機械上で電極の成形を行う必要のあることを明らかにした。

実験結果に基づいて微細放電加工機を製作し、加工条件と加工時間、仕上げ面あらかさなどの関係を求めると共に、シリコンウエハに関する加工実験を行い、材料により金属より能率的に加工が可能であることを見出した。本加工機によって、マイクロタービン、マイクロポリゴンミラーを製作し、超小形レーザ走査機構の可能性を実証した。

第9章は本研究の結論についてまとめた。

図1.9に、設計、加工、応用の各研究領域と、各章における技術分野の関係をマトリクスにして示した。

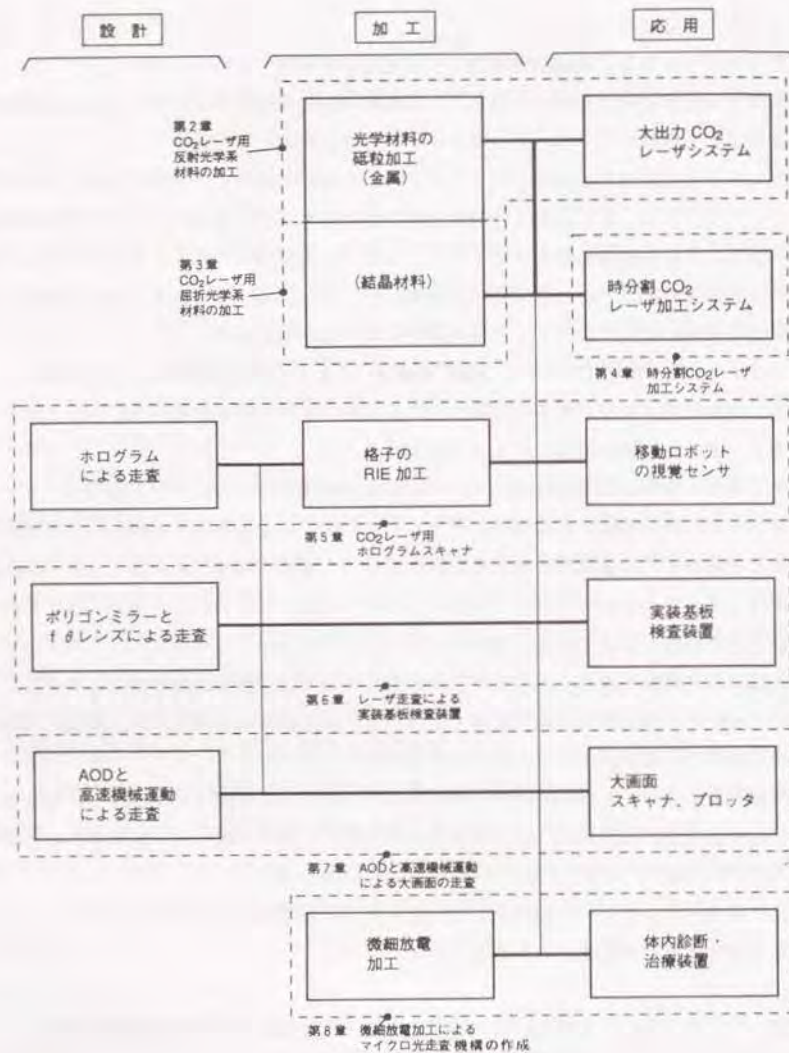


図1. 9 研究の全体構成

文 献

- 1) 光産業技術振興協会：光産業の動向，(1992) 8.
- 2) 諸隈肇：オプトエレクトロニクス技術'90, 11, 日本オプトメカトロニクス協会，(1990) 3.
- 3) 田幸敏治：オプトエレクトロニクス技術'90, 2, 日本オプトメカトロニクス協会，(1990) 11.
- 4) 小野雄三：オプトエレクトロニクス技術'89 I-II, 日本オプトメカトロニクス協会，(1989) 2.
- 5) 前掲4)
- 6) Y. Kawauchi, H. Yamashita and K. Saitoh: Holographic Disk Scanner for Laser Printers, Proc. ICO 15, (1989) 655.
- 7) 黒田宗男、浜田明佳、中村弘、内貴俊夫：プラスチック $f\theta$ ミラーを用いたレーザー走査光学系の開発、光技術コンタクト、29, 9, (1991) 8.
- 8) H. P. Herzig and R. Dindliker: Holographic Optical Scanning Elements with Minimum Aberrations, Applied Optics, 27, 22, (1988) 4739.
- 9) 河内義和、斎藤幸一、山下博：ホログラムスキャナーの最適化設計，第37回応用物理学関係連合講演会，(1990).
- 10) Y. Ono, and N. Nishida: Holographic Laser Scanners Using Generalized Zone Plates, Applied Optics, 21, 24, (1982) 4542.
- 11) O. Bryngdahl and W-H. Lee: Laser Beam Scanning Using Computer Generated Holograms, Appl. Optics, 15, 1, (1976) 183.
- 12) T. Yano, M. Kawabuchi, A. Fukumoto and A. Watanabe: Te O₂ Anisotropic Bragg Light Deflector without Midband Degeneracy, Appl. Phys. Lett., 26, (1975) 639.
- 13) 塚本善夫、伊藤直敏、高橋誠一、武井恒夫、永井昌平：走査機構と光学系、画像電子学会誌、3, 3, (1979) 147.

- 14) 河田耕一、中田邦夫、一柳高時、池田種次郎、渋谷忠次、野川建司：静止画記録用磁気ディスク装置、National Technical Report, 21.2, (1975) 231.
- 15) K. Rokushima and J. Yamakita: Unified Approach to Wave Diffraction by Space-Time Periodic Anisotropic Media, IEEE Trans. on MTT, MTT-35-11, (1987) 937.
- 16) 原田達男、回折格子の超精密加工、光技術コンタクト、26.3, (1988) 213.
- 17) M. Mehregany, P. Nagarkar, S. D. Senturia and J. H. Lang: Operation of Micro-fabricated Harmonic and Ordinary Side-Drive Motors, Proc. IEEE MEMS, (1990) 1.
- 18) G. Engelmann, O. Ehrmann, J. Simon and H. Reichl: Fabrication of High Depth-to-Width Aspect Ratio Microstructures, Proc. IEEE MEMS, (1992) 93.
- 19) シチズン(株)カタログ、(1990).
- 20) 増沢隆久：微小エネルギー放電加工、第57回電気加工研究会資料、57, (1970) 105.
- 21) 九州松下電器(株)カタログ、(1993).
- 22) 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.
- 23) 極限作業ロボット技術研究組合資料、(1988).
- 24) 伊藤徹、出月康夫：腹腔鏡下胆嚢摘出術、臨床外科、46.2, (1991) 209.
- 25) 川淵正己、機械式スキャナ、超音波TECHNO、9, (1991) 26.

第2章 CO₂レーザ用反射光学系材料の加工

第2.1節 緒言

CO₂レーザは1964年に Patelによって1mWの連続発振が報告¹⁾されて以来、多くの研究開発の結果、1980年代に至って生産設備として実用化されるようになった。

レーザは光学製品であり、その核となる技術の一つは、ミラー、レンズなどの光学素子技術となる。このため、レーザの研究と相まって、光学素子に対する研究が積極的になされてきた²⁾⁻⁴⁾。CO₂レーザは当初よりその大出力化の可能性に着目されてきたが、特に最近では厚板の切断などの応用範囲が拡大すると共に、大出力に耐え得る光学素子の製作が課題となっており、ここでは最大出力20kWのレーザでの使用に耐え得る光学素子を目的として、その加工に関して研究を進めた。

CO₂レーザ装置において一般に使用される光学素子は、大別して反射光学系と屈折光学系となる。前者には共振器内の反射鏡と、レーザを加工部位に導くための外部光学系とがある。後者にはレーザ共振器の出力取り出しのための窓と、レーザ光を加工面において目的のビームに絞るためのレンズなどがある。本章では以上のうち反射光学系を扱う。

反射光学系材料としては、軟質のCuと硬質のMo, Wの2系統が考えられる。前者ではダイヤモンド工具による切削が可能であり、コスト的にも安価である。一方、後者は切削加工が困難であるため砥粒加工が中心となり、素材も高価であるが、表面は硬く変形も小さい。また、線膨脹係数が小さいため照射時の熱変形が小さい。このようなことから、苛酷な使用条件下で高精度の維持の必要な大出力レーザ用素子に適合しているものと考え、Mo, Wの加工に関する研究を実施した。なお、これら材料は加工面をそのまま反射面にする場合と、反射率を高めるためAuなどの反射膜をつける場合があるが、

後者においても素材、加工面の特性は反射鏡としての性質に影響を与えると共に、不測の事態で反射膜がダメージを受けても反射鏡としての性能を保ち、破壊に至る現象のないことが望まれる。

反射光学系として必要な特性には、いうまでもなく反射率がある。反射に対応して吸収があるが、レーザー光が照射されると光学素子には何らかの吸収が発生する。吸収には素材自身の吸収、加工変質層あるいは表面のコンタミネーションによる表面吸収、および反膜膜などのコーティングによる吸収があるが、表面吸収は主として反射面の加工に関わる問題である。CO₂レーザーの出力に比例して吸収による発熱量が増大するため、吸収は大出力用の光学素子においては大きい課題となる。

ここでは反射面を加工変質層の測定と共に、CO₂レーザー光の反射と吸収、および破壊に対するレーザーの照射パワー密度限界（照射損傷しきい値）によって評価した。評価のために、反射率測定装置、損傷しきい値測定装置、吸収率測定装置を製作した。また、吸収によって局部的に温度が上昇すると反射面が変形し、これが大きい場合には目的の光学性能が得られない。このため、レーザー光照射時に発生するひずみに関して測定を行った。

実験結果に基づき、さらに素材製作方法とポリシ加工について検討を加え、20kW級レーザー用反射鏡の試作を実施した。

第2.2節 反射光学系材料

表面加工の研究に先立ち課題の把握を行うため、工場において使用された反射鏡についてその損傷状態の観察を行った。次にMo、W素材の製作方法を検討し、また種々の基板材料によるレーザー光照射時の熱変形について測定を行った。

2.2.1 反射鏡の損傷状況

光学素子に何らかの損傷が発生すると、レーザー出力の低下、モード不良といった現象を生じ、極端な場合には発振不良、使用不能の状態に至る。CO₂レーザーに対する光学

素子の使用環境は、共振器内部の反射鏡では

- (1) 高パワー密度の照射
- (2) 高速ガス流近傍での使用
- (3) 真空に近い状態で、かつ高電圧の印加された管内での使用
- (4) 電気化学的反應に対する曝露 (CO₂ ⇌ CO + 1/2O₂)
- (5) 紫外光に対する曝露
- (6) 温度サイクル

などの苛酷な条件であり、外部鏡では(2)～(5)こそないが、加工近傍で粉塵や煙にさらされ、かつ汚れを除去するための現場での日常的な清掃がある。

観察を行った反射鏡は、Cu、Niめっき面、あるいはSiなどの研磨面上にAu、Agの蒸着を施して反射面とし、場合によってはThF₄などの保護膜を付着させて、反射率を98～99% (λ=10.6μm)としたものである。各種のレーザーで用いられ、寿命が到来したとされる反射鏡について観察を行った。

レーザーの方式、機種によって多少の差はあるが、典型的な損傷の形態は図2.1のようである。反射面は全体に光沢を失い、白濁面ないし梨地となっており、蒸着面のはがれ、浮き、あるいは微細な異物の付着が見られる。その例を図2.2(a)、(b)に示す。蒸着面の損傷は、高パワーの照射、紫外光による損傷、電気化学的反應等に起因すると考えられる。また異物として、共振器内のスパッタ効果による電極母材、ガス流中の塵埃の付着などがあげられる。

このようになった反射面は損傷程度により、0.1～2%程度反射率が低下しているが、見かけほど著しくないともいえ、CO₂レーザーの波長が10.6μmと長いことに起因すると考えられる。軽微なものは清掃によって取り除くことができ、反射率を回復することができる。

目視し得る斑点を生じている場合もある。これにはいくつかの種類があるが、その一は蒸着膜が局部的に高温にさらされ、溶融して周辺にひび割れ、ケロイドが発生しているものである。甚だしい場合には図2.2(c)のように膜面が飛散し、穴があいて下地が露出している。どのような原因からこの種の損傷を生じるかは、損傷の過程の観察が困難であるため明らかではないが、反射鏡面にレーザー光を絞って照射し、瞬間的な損傷を生じる場合のパワー密度は予備実験の結果、反射鏡面で150kW/cm²以上であり、共振



図2. 1 典型的な反射鏡の損傷状況
(Cu+Niめっき基板、Ag+保護膜蒸着)

器内でこのようなパワー密度に達し、無垢の面が損傷するとは考えられない。前述の反射面の損傷ないし汚損などが引き金となって、局所的な反射率の低下から発熱が集中して発生するものと推定される。

斑点のうち、図2. 2 (d) のようにへびがうねった形態のものも見られる。これは前項に記した蒸着面の局所的な浮きが高密度パワーの照射によってはがされ、浮いた膜が連続的に次々と飛ばされていった結果ではないかと考えられる。また、図2. 2 (e) は膜面の浮きが局所的に集中して発生しているもので、ある損傷点をスタートとして、その近傍に発熱を招き、次々に損傷を誘発したと思われる。

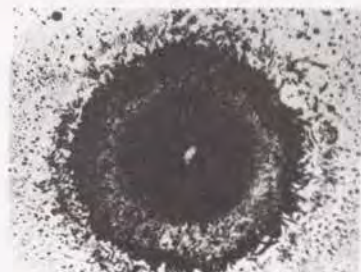
反射鏡面、共振器内部、供給ガスは十分清浄に保たないと塵埃の付着を招く。図2. 2 (f) は糸屑様のものの焼き付いたもので、大きい損傷のスタートとなり得る。



(a) 膜面の浮きとはがれ
(Si基板+Ag+保護膜)



(b) 異物の付着
(Cu+Niめっき基板+Au)



(c) 穿孔された部分
(Si基板+Ag+保護膜)



(d) へび状の局部損傷
(Cu+Niめっき基板+Au)



(e) 膜面の浮き
(Si基板+Ag+保護膜)



(f) 糸屑様の焼きつき
(Cu基板+Au)

200μm

図2. 2 反射鏡損傷部の顕微鏡写真

外部鏡は、共振器内部鏡に比して汚損が著しく清拭の機会が多いが、図2.3(a)は、清拭をくり返すことによって、蒸着面が剥離し、不均一な温度分布によって全体が変形して割れを発生した外部鏡を示す。

また、共振器内部鏡は通常平面もしくはゆるい凹面(5~20 μ m)になっているが、反射面の不整、いわゆるアスの状態になることによって、モードの劣化を生じることがある。図2.3(b)は、取付け不良によってアスとなっている反射面の干涉縞で、加工時のみならず、反射鏡の保持、固定にも十分な注意が払われなくてはならない。Cuはこのような変形を生じやすい問題がある。

以上のことから次のような基板としての必要条件が求められ、Mo、Wは条件を満たしていると考えられる。

(1) 共振器内部鏡については、高反射率であるとともに、機械的、熱的に強い反射面が必要である。また、表層の損傷部、あるいは異物の付着を除去するための定期的な清拭に耐え得る面であることも望ましい。

(2) 外部鏡にあつては、傷、剥離を発生せず、頻繁な強い清拭作業にも損傷しない高硬度の反射鏡面が望ましい。

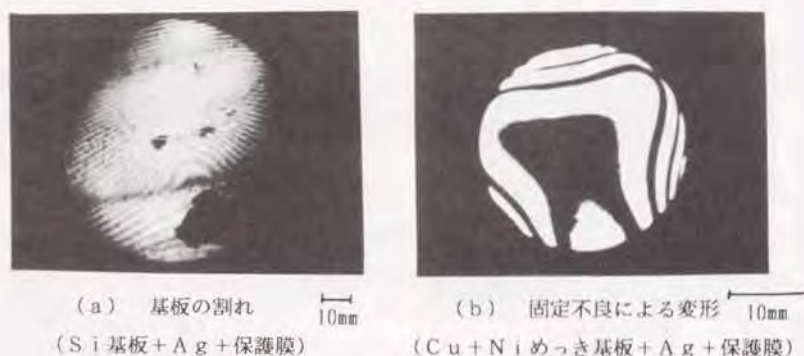


図2.3 反射鏡の機械的変形

(3) コーティングを行う場合でも基板にはひずみ、割れを生じにくい材質が望ましい。高パワーの照射によって局所的な基板露出を招いても、損傷を拡張しなければある程度の連続使用にも耐え得る。

2.2.2 Mo、W素材の製作

周期律表の5A~7A族の金属には融点がきわめて高いものが多く、W、Ta、Re、Mo、Nb、V、およびCr、などの融点は2000~3000 $^{\circ}$ Cを示し、総称して高融点金属と呼ばれている。これらの一群の金属は耐熱性を持つとともに、室温付近で各種の環境下において安定で耐食性に優れている。そのなかでもMo、Wは弾性率、機械強度、および硬さが大なため高温発熱体、化学装置部品に利用されている。この点から、Mo、Wは熱的環境に厳しい大出力レーザー用反射光学系材料として適していると考えられる。Mo、およびWの物理的性質を表2.1に、化学的性質を表2.2に示す。

しかしながら、Mo、Wでは反射鏡のような表面状態の極度に厳しい用途は過去に皆無であつて、ち密で欠陥のない材料の製作は一般的に困難であり、わずかに大容量のシリコン整流器用放熱基板として、直径50mm程度のもので比較的ち密性を要求されて生産されているにすぎない。また、高精度の加工についての系統的な研究もなされていない。

このため、空孔、偏析等の欠陥がなく鏡面加工が実施できる、ち密な材料を得ることがまず必要である。反射鏡材料として使用に耐え得る、Mo、Wの素材製造方法には次の二つが考えられる。

(1) 電子ビームによりMo、Wインゴットを真空中で溶解精造し、その後鍛造等により、ち密化をはかりつつ所定の形状に仕上げる方法(以下溶解法とする)

(2) Mo、W粉末を成形し、焼結した後、鍛造、圧延等の方法によってち密化をはかり、丸棒、板等の形状を得る方法(以下焼結法とする)

いずれの方法においても、20kW級のCO₂レーザー用反射鏡として必要とされている直径150mm迄の素材の製造は可能である。上記二者につき試作を実施し、予備的な鏡面加工実験を行い、両者の比較を行った結果は次の通りであつた。

(1) 溶解法、焼結法とも、反射鏡としての使用に十分な、無欠陥の材料の得られる可能性がある。

表2. 1 Mo、Wの物理的性質

性質	Mo	W
融点 (°C)	2,610	3,410
沸点 (°C)	4,800	5,700
密度 (g/cm ³)	10.2	19.3
線膨張係数 (10 ⁻⁶ /K)	5.1	4.5
引張強さ (10 ³ N/cm ²)	80~100	150~180
伸び (%)	10~13	2~3
縦弾性係数 (10 ⁶ N/cm ²)	32.2	39.0
硬さ (HV)	250~300	200~450
原子番号	42	74
原子量	95.95	183.85
結晶型	体心立方格子	体心立方格子
格子定数 (nm)	0.31405	0.3158

(2) 溶解法では、結晶粒の大きさが不安定であり、全般的に粗大化しやすい傾向が見られる。

(3) 素材を大形化していった場合、溶解法ではスラグ、スケールの巻き込みの可能性が大きい。

多結晶材料の鏡面加工では一般的に結晶粒が小さいことが望ましく³⁾、また、安定的に大径の無欠陥材料を得られやすいことから、焼結法によって素材を製作することにした。本方法によるMo、Wの素材製造工程を表2. 3に示す。各々三酸化モリブデン、タングステン酸アンモンを還元して、Mo、W粉末となし成型焼結する。その後鍛造、圧延または両者の併用により焼結中の空孔をつぶし、高密度の素材を得る。Moでは直径150mm、厚さ25mm、Wでは直径100mm、厚さ20mmまでの試作を行った。

表2. 2 Mo、Wの化学的性質

環境	Mo	W
大気中	室温で放置するとわずかに変色 400°C加熱で少し酸化 500°C以上で急激に酸化	室温では変化なし 400~500°Cで酸化が始まり、温度上昇とともに激しくなる。
水中	冷水、温水では浸されない。高温水蒸気により酸化する。	冷~熱水では酸化されないが水蒸気によって酸化を受ける。
酸、アルカリ	弗酸、塩酸、硫酸、クロム酸には耐食性あり、王水、熱濃硫酸、硝酸、熱アルカリ溶液に浸される。	塩酸、硫酸、硝酸、王水、弗酸、苛性ソーダ、苛性カリ、アンモニアに耐食性あり、熱硝酸、熱王水、弗硝酸、アルカリ溶液によって浸される。
その他	水素とは反応しない。窒素とは1500°C以上で窒化物をつくる	COとは800°C以上で反応し炭水化物を生じる。CO ₂ とは1200°C以上で反応し酸化物を生じる。

試作した素材のうちの最大径のもの、比重の測定結果および分析値を表2. 4に示す。比重は測定誤差の範囲内において理論比重にはほぼ等しいといえ、分析値においても99.98%の純度を得ている。

なお、直径100mmのW素材を予備的に鏡面加工を行った結果では、圧延、鍛造工程の違いによって仕上面に差のあることが認められた。従って、素材の製作方法と加工結果に関する実験が必要であると考えられる。

表2. 3 Mo, Wの素材製作工程

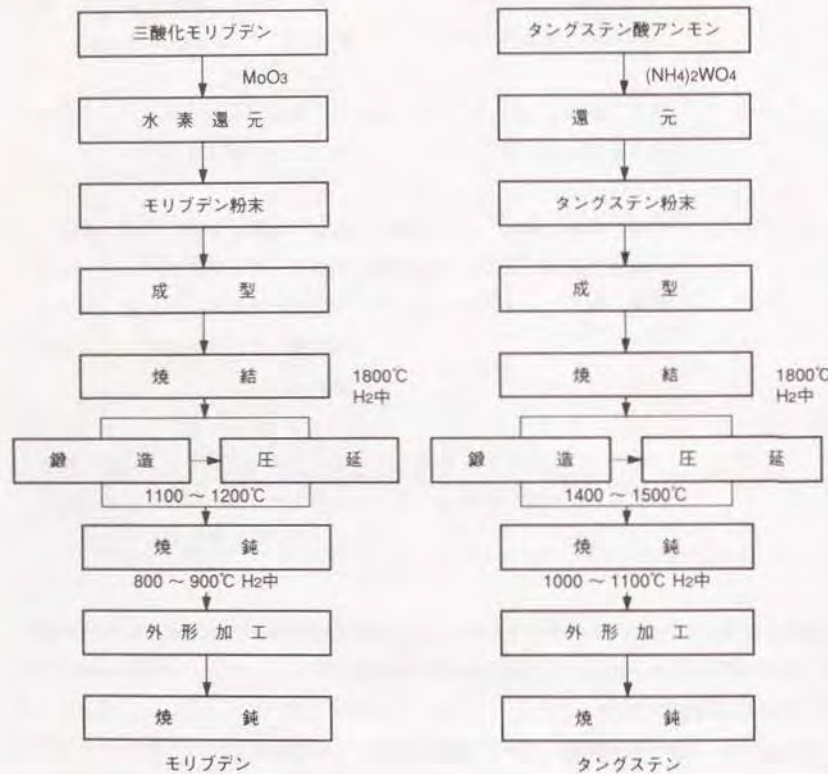


表2. 4 試作した最大径のMo, Wの比重及び分析値

材料	直径 厚さ (mm)	比重	分析値 (%)							
			Mo	W	Fe	Ni	Cr	Al	Sn	Si
Mo	152.4 25	10.21	99.98	—	0.003	0.0042	0.0018	0.0006	0.0003	0.0015
W	101.6 19	19.25	0.001	99.98	0.001	0.0002	0.0001	0.0001 以下	0.0005 以下	0.0005

2. 2. 3 レーザ照射による反射面の変形

レーザー照射に伴う反射面の吸収に基づく熱変形は、光学面のひずみ（光学ひずみ）となり、反射鏡の焦点位置、集光特性の変化、レーザーのモード変化などの原因となる。このため、Mo, Wなど各種材料の照射時の光学ひずみを評価した。

光学ひずみを測定するには、まず各材料の平面度の良好な研磨を行った基板を用意する。基板は材料固有の10.6μm波長に対する吸収率を持つので、その差を除き、表面が同じ吸収率を示すように、一定の吸収体を各試料に同時に蒸着を行って試料を製作する。実験ではAuを用い、反射率を94%とした。試料を図2. 4に示すようにHe-Neレーザー干渉計の光軸に垂直に置き、干渉縞を得るように微調整する。実験では干渉縞の間隔が約0.32μmに相当するようにした。

次にCO₂レーザー光を試料に対し45度の入射角で照射する。CO₂レーザー光の反射光はカロリメータで吸収する。照射にともない、干渉縞は試料の熱変形によって変化し光学ひずみが求められる。レーザー出力を一定とし、ZnSeレンズの位置を変え、レーザー光のビーム径を変化させて試料面を照射すれば、異なった照射エネルギー密度下にお

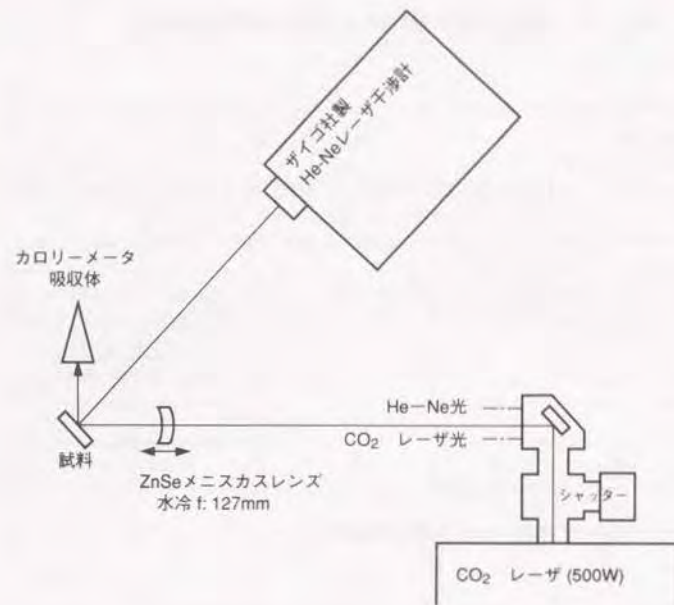
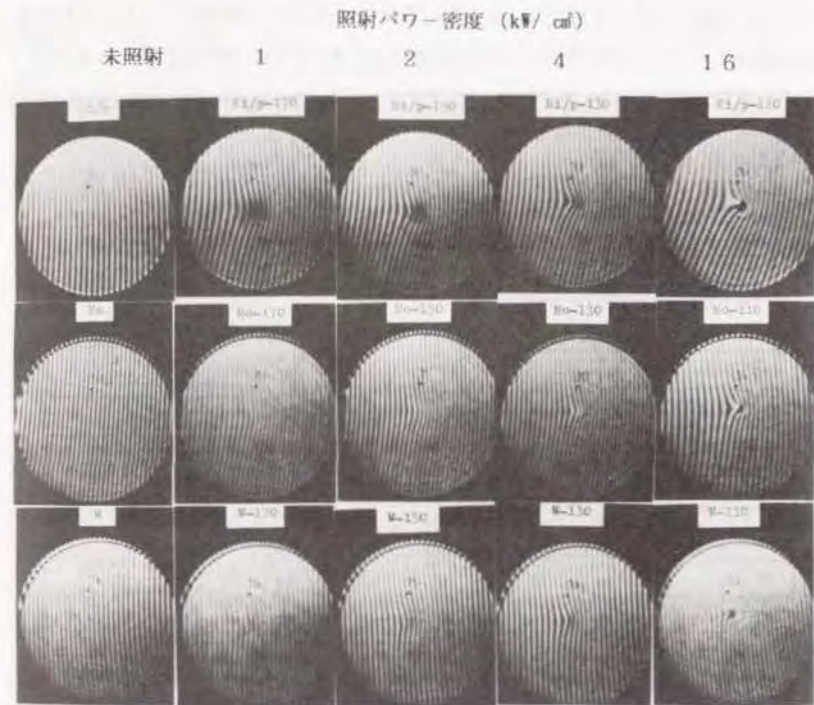


図2. 4 光学ひずみの測定の概念

ける変形量が測定できる。図2. 5に、Cu上にNi/Pめっきを行った基板、およびMo、W各々の基板に対し、照射密度を変化して測定を行った結果を示す。

変形量は基板材料の熱伝導度、線膨張係数に依存すると考えられる。光学ひずみに対する評価指数を熱伝導度 K と線膨張係数 α の比、 K/α で表し、種々の材料に対する測定結果をこの指数と対比して図2. 6に示した。これによれば実験値は指数から予測される傾向とよく一致する。実験によればSiが最もひずみが少ない材料となるが、Siは $10.6\mu\text{m}$ の波長に対して吸収が大きい欠点があり、基板の破壊を生じる可能性がある。一方、Mo、Wはひずみも小さく、また反射率が高く吸収が少ないので、光学ひずみの点からも望ましいことが確認できた。



上段：Cu基板上にNiめっき
中段：Mo
下段：W

図2. 5 各種材料に対する照射パワー密度と光学ひずみ

20kWレーザー共振器内に組み込まれる反射鏡での光エネルギー密度は16kW/cm程度と予想される。実験ではビーム径は小さく照射は局部的であるが、実際のビームはより大きいと考えられ、光学ひずみは図2.6に示すものよりは小さいものと予想される。

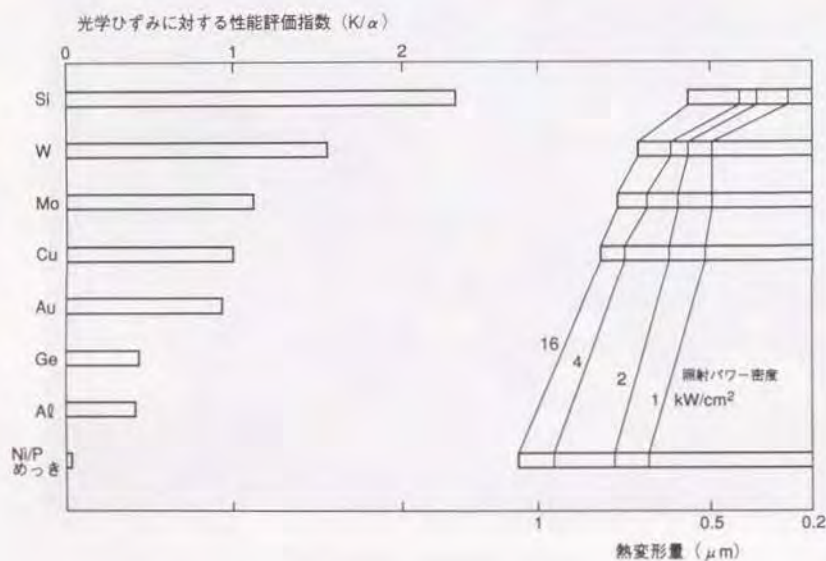


図2.6 各種基板材料の光学ひずみに対する性能評価指数、および熱変形量の実測値

第2.3節 Mo, Wの加工

Mo, Wの研削加工、ラップ加工、ポリシ加工について、形状精度、仕上げ面あらかの観点より実験を行った。

2.3.1 研削加工

ラップ加工、ポリシ加工の前加工として、まず素材の平面研削が必要となる。このため平面研削盤(ユング社製)を用い研削加工実験を行った。各種砥石によるMo, Wの研削面のノマルスキー顕微鏡写真を図2.7に示す。また、砥石粒度と仕上げ面あらかの関係を図2.8に示す。

Moは粘いため砥石に目詰まりを生じやすく、研削比も悪く、一般的にいって研削し難い。加工面にはえぐれが見られ、目詰りによる溶着が発生していることを示している。この点から、WA砥石よりも砥粒にへき開を生じ易いGC砥石が適しているといえる。一方、WはWA砥石によって十分良好な研削が可能である。仕上げ面あらかもMoよりWの方が良好である。

反射鏡の正確な形状を前加工によって付与するためには、形状的に崩れの少ない砥石を用い、高精度の研削を実施しなくてはならない。このためCBN砥石ないしダイヤモンド砥石を用いることが望ましい。ダイヤモンド砥石は空孔率が小さく目詰まりが多いため、CBN砥石を用いて加工を行った。Mo, Wとも、研削抵抗が大きいため、びびりを生じやすいので高剛性の機械が必要である。仕上げ面のMo, W間の差異は、CBN砥石ではWA, GC砥石より小さく、Moも比較的良好であり、砥粒切れ刃の鋭利さが維持されているためと考えられる。Mo, Wのいずれについても比較的良好な加工面を得ることができ、粒度1000のCBN砥石によってRa 0.04μm程度の仕上げ面が得られた。

CBN1000による加工面をレーザー干渉計(サイゴ MARK-II)によって測定した結果を図2.9に示す。工作物の往復動と砥石の走行に沿った条痕があるが、直径25mmに対してλ/3程度の平面度となっている。

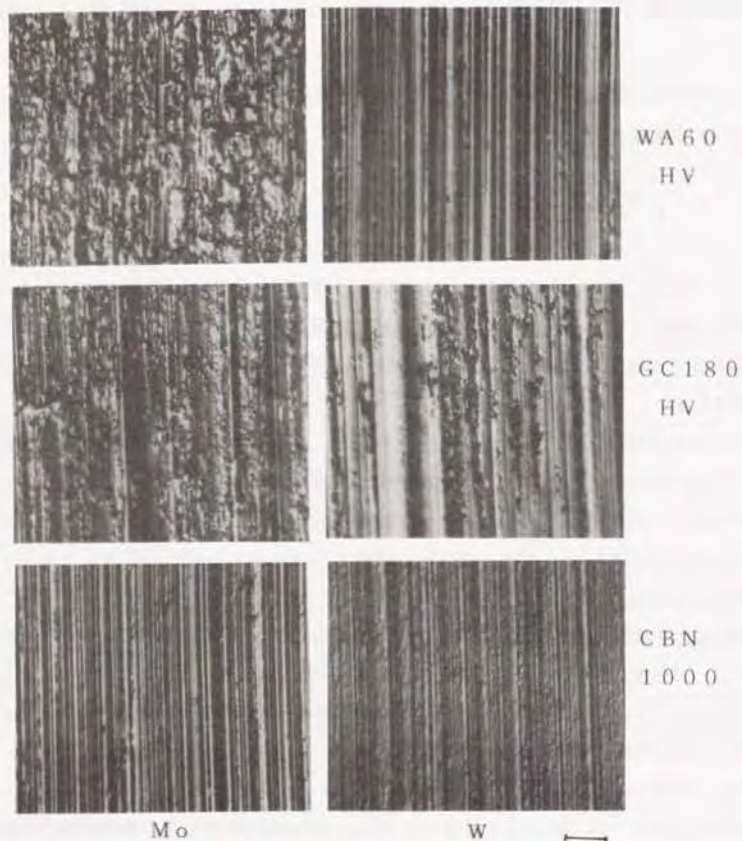


図2.7 各種砥石によるMo、Wの研削面

周速 : 27m/s
 切込 : 3μm
 テーブル送り : 10.7m/min
 前後送り : 0.2mm/ストローク
 加工液 : ケミクールS (100 : 1)

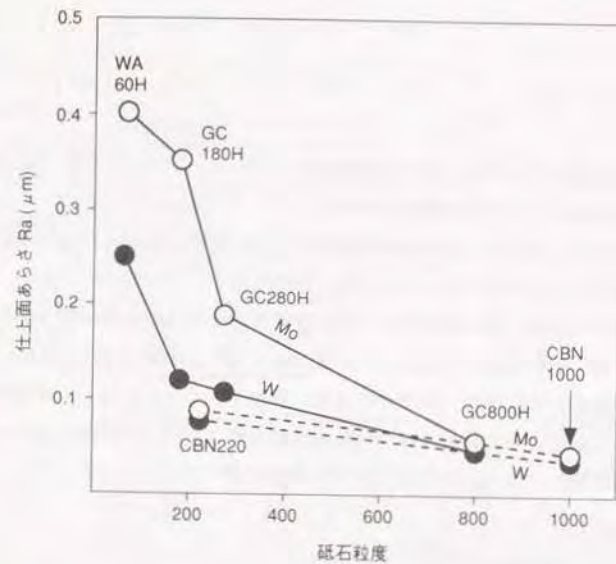


図2.8 Mo、W研削面の仕上面あらし



図2.9 WのCBN1000研削加工面の干渉縞

2.3.2 ラップ加工

研削加工に引き続いて、ポリシ加工の前段階としてのラップ加工が必要である。ラップ加工実験は修正輪形ラップ盤を用いて実施した。

図2.10はMo、Wのラップ加工速度をGC2000、4000砥粒に対して求めたものである。Wは、Moに比し硬度が高いため、加工速度は約1/2になっている。

図2.11はGC2000、WA4000の各々の砥粒によるラップ加工面の仕上面あらさ測定結果である。同一砥粒を用いてもWの方がMoよりも仕上面あらさが小さい。これはWの方が硬度が高いため、砥粒一刃当りでの加工量が小さくなるためと、砥粒の破砕が進むためと考えられる。WA砥粒とGC砥粒を比較すれば、後者の方が若干あらさは良好であるが、GC砥粒では傷が入り易く、WA砥粒が適していると判定した。

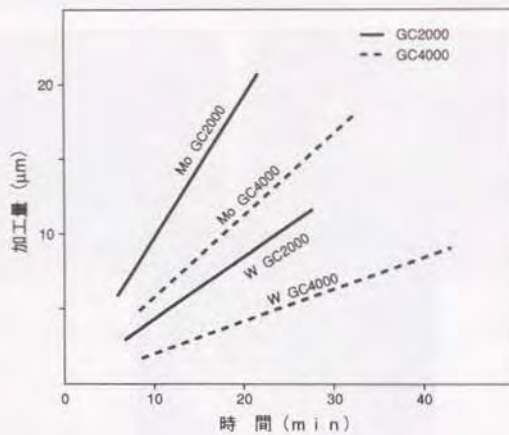


図2.10 Mo、Wのラップ加工速度

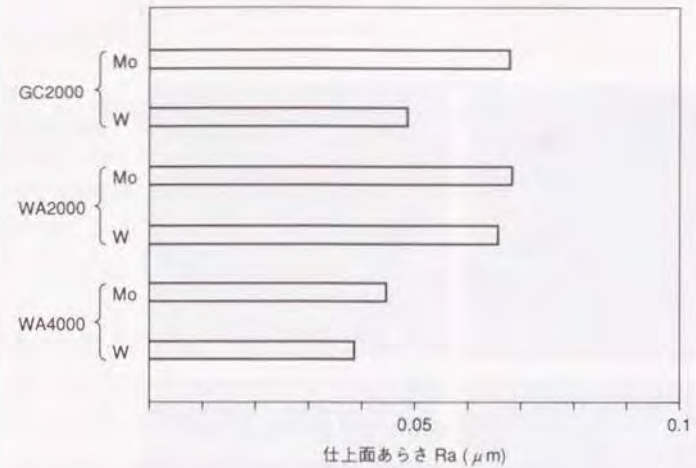


図2.11 Mo、Wのラップ加工面の仕上面あらさ

図2.12はWA4000砥粒による加工面のノマルスキー微分干渉顕微鏡、多重干渉顕微鏡、およびレーザ干渉計による平面度測定結果を示す。平面度は直径2.5mmの範囲でλ/5程度であり、可視光による多重干渉縞もややぼやけてはいるが十分認め得る。

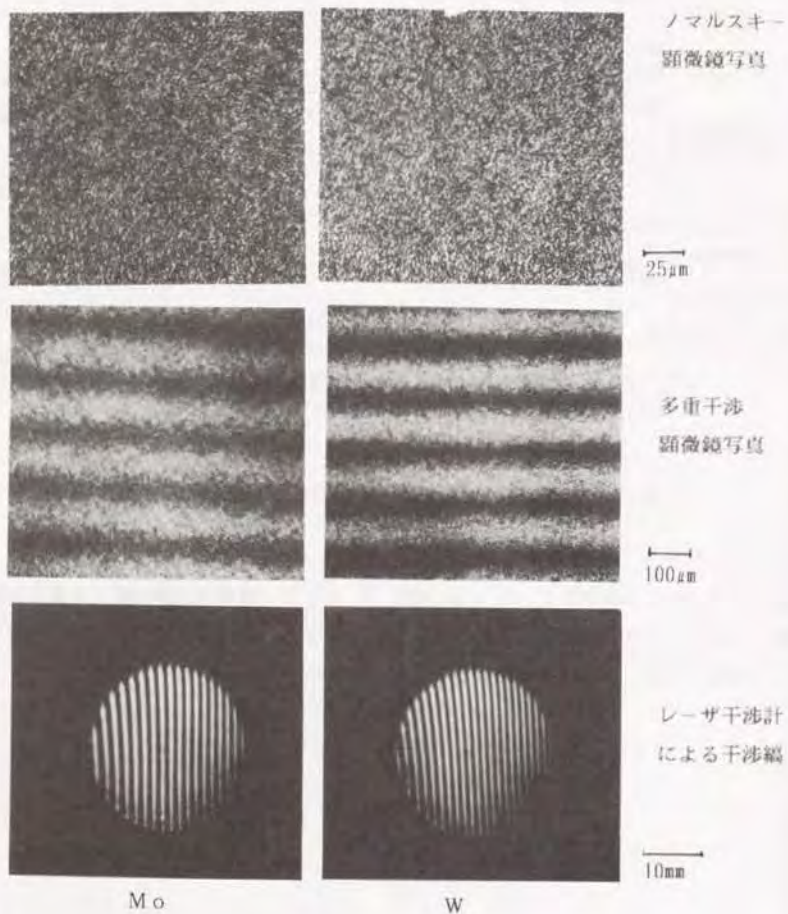


図2.12 Mo、WのWA4000ラップ加工による表面状態

2.3.3 ポリシ加工

ポリシ加工実験はオスカー形研磨機、および修正輪形ラップ盤を用いて実施した。高品位の仕上げ面を得るため、加工はクラス10000のクリーンルーム内で実施し、最終仕上げは更に清浄度を上げてクラス100の環境下で行った。図2.13にポリシ加工実験の状況を示す。

Mo、Wのような金属材料のポリシングでは次のような問題点がある。

(1) シリコンなどの単結晶と異なり多結晶体であるため、結晶方位によって加工性の差異があり、仕上げ面に結晶のレリーフが出やすい。

(2) 引き硬さはセラミック、ガラスなどに比し低く、かつ展延性があるため傷、スリーク（微細なすり傷）、ディグ（砂目）が出やすい。

ポリシ加工の目的には形状精度の向上と、仕上げ面あらさの向上との二つがあるが、ポリッシャ、砥粒、加工液の種々の組合せによってポリシ加工実験を行った。試料には直径25.4mmの素材を用いた。各種の組合せ実験内容と結果を表2.5に示す。



図2.13 ポリシ加工実験の状況

表2. 5 各種の条件におけるポリシ加工実験結果

ポリッシャ (メーカー)	砥粒・粒径 (メーカー)	加工液 (メーカー)	結 果
S n	ダイヤモンドペースト 1 μ m (ストルーアス)	ルブリカント青 (ストルーアス)	良好な研磨ができる。加工液の量によって光沢の変化がある。純水との併用又は混合がよい
		ルブリカント赤 (ストルーアス)	青色ルブリカントに比し多少光沢が悪い
		純 水	ペーストの凝集を発生し易く、加工面にスリークを生じ易い
	ダイヤモンドペースト 1 μ m(不現)	ルブリカント (不現)	ストルーアス社のダイヤモンドと差はない
	ダイヤモンドペースト 3 μ m (ストルーアス)	ルブリカント青 (ストルーアス)	1 μ mの粒径に比べてあまり差がない
	7 μ m 0.05 μ m (メー)	純 水	研磨能力が優れているが傷を発生し易い
		純水+フェリシアン化カリ	良好な面であるが条件によりレリーフを生じやすい
	S i O ₂ (ストルーアス)	純 水	砥粒の凝集を発生し易く、偶発的な傷の発生が多い
		純水+グリセリン	良好な面ができるが研磨能力が低く、条件によりレリーフを発生し易い
	M g O	純水+グリセリン	研磨能力は低い。良好な面ができるが偶発的な傷を発生し易い
Sn 50% + Pb 50%	ダイヤモンドペースト 1 μ m(不現)	ルブリカント (不現)+純水	S nより光沢がよい

表2. 5 (続)

C u	ダイヤモンドペースト 3 μ m(X-17)	ルブリカント (X-17)	研磨能力が高いが傷の発生率が高い
	ダイヤモンドペースト 6 μ m(X-17)	ルブリカント (X-17)	最も研磨能力が高いが面は粗い。傷の発生も多い
ビッチ (九重、 K-3)	ダイヤモンドペースト 1 μ m (ストルーアス)	ルブリカント青 (ストルーアス) +純水	良好な面が得られるが研磨能力は低い
	7 μ m+0.05 μ m (メー)	純 水	ポリッシャの消耗が激しく、面精度管理が難しい。傷の発生も多い
	クリアライト (不現)	—	レリーフの発生が多く、研磨時間により光沢が不安定になる。長時間使用すると傷が多くてくる
	S i O ₂	純 水	傷の発生率が高い。レリーフも大きい
	ダイヤモンドペースト 1 μ m (ストルーアス)	純水+フェリシアン化カリ	面として最も優れている
ビッチ (九重 KR-3)	ダイヤモンドペースト 1 μ m (ストルーアス)	ルブリカント青 (ストルーアス) +純水	K-3とほぼ同等
	S i O ₂	純 水	K-3とほぼ同等
ケメット錫 (ハイプレス)	ダイヤモンドペースト 3 μ m(ハイプレス)	ルブリカント (ハイプレス)	加工能力としては優れているが傷の発生が面全体にわたる
サーフィン 018(不現)	クリアライト (不現)	—	短時間では光沢は良いが加工時間が長くなるとレリーフが発生する。
D Pクロス (ストルーアス)	ダイヤモンドペースト (ストルーアス)	ルブリカント青 +純水	光沢は良いがだれが多く面精度が悪い
	同上	フェリシアン化カリ+純水	高速高荷重では良好な面になるが条件によってレリーフが出やすい

表2.5 (続)

発泡ウレタンシート (白色)	ダイヤモンド 1 μ m (ストル-7S)	純	水	クロス中では研磨能力が高いが傷の発生がある
	7 μ m+0.05 μ (ガラ-)	純	水	同上
ペロシート (PAN-A)	ダイヤモンド 1 μ m (ストル-7S)	純	水	面精度、だれ、レリーフが多い
ペロシート (PA)	同上	純	水	同上

Mo, Wの間において、加工結果に関しては研削加工、ラップ加工に見られるような大きい有意差はなく、Moについて結果の良いものはWについても同様であり、逆もまた同様の結果であった。従って結果については両者を統合して示した。表面状態は微妙であり定量的把握が困難であるが、結果をまとめれば以下のようである。

ポリッシャに関しては

(1) 一般的に高い研磨能力(従って形状精度の向上およびレリーフの減少)と仕上げ面あらかの向上は相反する条件である。

(2) Sn, Cuなどの金属系ポリッシャはポリッシャ形状を長く維持できるため、工作物の形状精度向上の点で優れているが、傷が入りやすい。特にCuのように硬いポリッシャではその傾向が強い。SnポリッシャではPbの混入によって硬さが低くなり、仕上げ面が向上する。

(3) クロス系ポリッシャは、その種類によって研磨性能に大きな差がある。発泡ウレタンシートのように比較的硬いものでは金属系ポリッシャに似た研磨能力を持つが、傷が入りやすい。軟らかいものではレリーフが大きくなり面精度も低下する。他種のポリッシャと比し優位性は認められない。

(4) プラスチックに金属粉を混入したポリッシャ(商品名ケメット)は研磨能力が高く減りにくい、金属のみのポリッシャよりも傷が入りやすく、優位性は認められない。

(5) ビッチポリッシャは仕上げ面あらかが優れているが、砥粒、加工液との組合せがよくないと研磨能力が低くなり、ポリッシャの消耗、レリーフの発生が大きくなる。

砥粒に関しては

(1) 加工能力の高いダイヤモンド砥粒によって、ほとんどの場合もっとも良い結果が得られる。

(2) Al₂O₃, SiO₂, MgOのような砥粒は研磨能力が低いため、レリーフが発生しやすくポリッシャの消耗も大きくなる。また、ポリッシャへの埋り込みが悪いため傷が発生しやすい。仕上げ面の光沢はポリッシャとの組合せによって良好な場合があるが、全体として高精度の加工には不適當である。

(3) Snのような金属ポリッシャでは、ダイヤモンド砥粒の粒度の差の仕上げ面への影響は比較的少ない。ポリッシャに砥粒が埋込まれた状態での見かけの切れ刃高さに大きい差がないためと考えられる。

加工液に関しては

(1) 加工液の量が過剰な場合、あるいは過度に粘度の高い場合には砥粒の転動が発生し、仕上げ面あらかが劣化する。また研磨能力も低下する。

(2) 砥粒の凝集があるとスリークの原因となる。市販のダイヤモンドペースト用加工液では、含有されている界面活性剤が防止に役立っていると思われる。

(3) ファリシアン化カリの添加は仕上げ面あらかの向上に役立つ。ただし条件によってはエッチング作用が研磨作用より大きくなり、レリーフが増大する。

課題は加工に伴って発生するレリーフである。図2.14はMoのポリシ加工の初期の状態であるが、結晶面によって鏡面に加工された部位とラップ加工面のまま残っている部位があり、ラップ加工においてすでに結晶方位による段差を生じていることがわかる。従ってポリシ加工においては、マクロに結晶面間の段差をなくすことと、ミクロに表面の凹凸を減じて仕上げ面あらかを向上させる二つの機能が必要である。ポリッシャ、砥粒の作用としては、前者はマクロ的な挙動が問題であり、後者ではミクロ的な挙動が

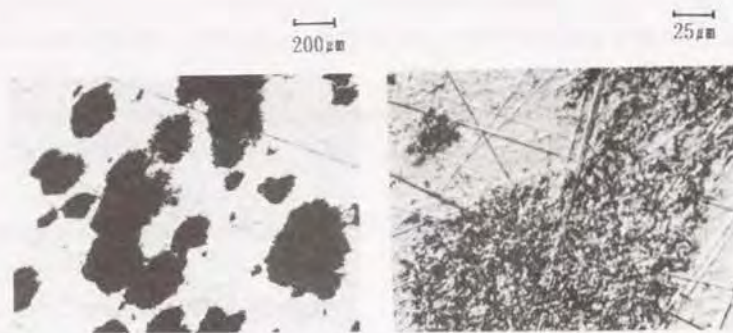


図2. 14 ラップ加工において発生している結晶面間段差
 (ノマルスキー顕微鏡写真)
 GC4000ラップ加工後Snポリリッシャと
 ダイヤモンドペースト1μmにより加工

主体となる。これらを同時に満足することは困難であり、別個の工程として考える必要がある。

以上のことからポリシ加工を2工程に分け、まず硬質のポリリッシャにより結晶面間の段差をなくすと共に形状精度を確保し、その後軟質のポリリッシャにより表面をわずかに研磨して仕上げ面を向上する方法が望ましいと考えられる。このため、まず次の条件を選定した。

第1段階：Snポリリッシャと1μm ダイヤモンドペーストによる加工

第2段階：クロス（ストルーアスDP）ポリリッシャと1μm ダイヤモンドペーストによる加工

仕上げ面のノマルスキー顕微鏡写真を図2. 15に示す。仕上げ面あらかさはRa10~20nm程度である。しかしながら、第1段階での面あらかさが不十分であるため、第2段階の加工時間が長くなり、かつクロスでは研磨能力が不足であって、第2段階での仕上げ面の光沢は増しているが、結晶によるレリーフが増大している。またディグもあるが、これは第1段階でのポリリッシャが硬いため、砥粒の転動が発生しているものと考えられる。



Snポリリッシャとダイヤモンドペースト1μmによる加工面



200 μm クロスポリリッシャとダイヤモンドペースト1μmによる加工面

Mo

W

図2. 15 Mo、WのSnポリリッシャおよびクロスポリリッシャによる加工面
 (ノマルスキー顕微鏡写真)

従って、第1段階の面あらしさを向上すると共に、第2段階の研磨能力とポリシヤの形状維持性能を高める必要がある。このため次の条件を設定した。

第1段階：Sn-Pbポリシヤと1 μ mダイヤモンドペーストによる加工

第2段階：ポリシヤ：ピッチ K-3

加工液	Fe ₃ (CN) ₆ (フェリシアン化カリ)	2 g
	水酸化ナトリウム	1 g
	ダイヤモンドペースト (1 μ m)	1 g
	純水	400 ml

フェリシアン化カリは高融点金属の金属組織観察に用いられており、水酸化ナトリウムはPH調整の目的である。以上の条件による加工面の状態を、図2. 16に示す。仕上げ面あらしさはRa5nmが得られた。また、レーザ干渉計による測定結果では、測定範囲25mmに対し $\lambda/30$ ($\lambda=10.6\mu$ m)の平面度であった。

第2. 4節 加工表面の評価

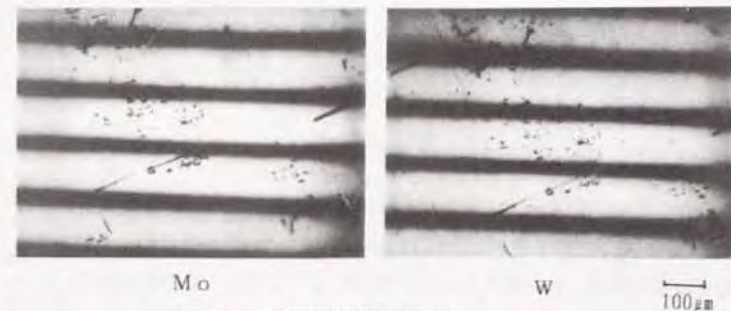
光学系の表面加工の目的の一つは表面吸収の少ない面を得ることである。表面吸収が小さければ反射率は高くなり、またレーザ光照射損傷しきい値も大きくなるものと考えられる。種々の加工面に対し、X線回折による加工変質層、CO₂レーザ光の反射率、および照射損傷しきい値を測定し、それぞれを対比して評価すると共に、散乱と吸収の関係、およびコンタミネーションの影響について考察を行った。このため、反射率測定装置、損傷しきい値測定装置、吸収率測定装置を製作した。

2. 4. 1 加工変質層の測定

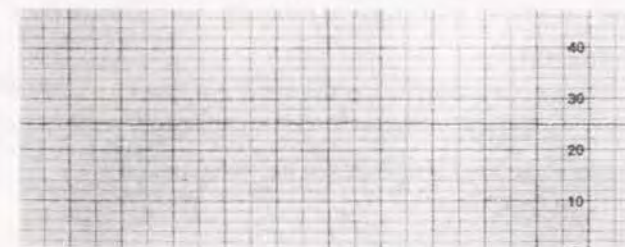
Mo, Wの砥粒加工条件の異なる試料を用い、CuK α_1 (0.154nm)の波長における格子面(310)の回折線の半幅幅の広がり測定し、それぞれの加工条件での加工変質層を求めた。本方法では、加工によって表面近傍に残留する加工ひずみを測定すること



(a) ノマルスキー顕微鏡写真



(b) 多重干渉顕微鏡写真



(c) 仕上面あらし測定結果 (W)

(タリサーフV型、 $V_v \times 200,000$ 、 $V_H \times 100$)

図2. 16 Mo, Wのピッチポリシヤによる加工面

になる。測定はガイガーフレックス（理学電機RAD-γA）によりダブルモノクロ法で行った。

対象とした加工面は以下の通りである。

- (1) CBN1000砥石による研削面
- (2) WA2000によるラップ加工面
- (3) WA4000によるラップ加工面
- (4) Snポリリッシャとダイヤモンドペースト1 μ mによるポリシ加工面
- (5) (4)の後、クロスポリリッシャとダイヤモンドペースト1 μ mによったポリシ加工面
- (6) Sn-Pbポリリッシャとダイヤモンドペースト1 μ mによる加工後、ピッチポリリッシャとフェリシアン化カリ、ダイヤモンドペースト1 μ mによったメカノケミカルポリシ加工面

比較の目的で、加工変質層がないと考えられる面（以下バルク面とする）を得るため、ポリシ加工後の面にArガスをを用いたイオンエッチングを行って対比した。80-120minのイオンエッチングにより表面は約2 μ m除去され、この面がほぼバルク面と考えられる。

測定結果をMo、Wの各々について図2.17に示し、次の結果が得られる。

(1) 仕上げ面の向上に従って加工変質層は減少し、メカノケミカルポリシングによりもっとも加工ひずみの少ない仕上面が得られるが、バルク面の状態ではなく2 μ m以下の加工変質層が存在する。

(2) CBN1000による研削面は、遊離砥粒によるWA2000ラップ加工面よりも加工変質層が小さい。加工量の大きい領域では、砥粒切れ刃の鋭利さが加工ひずみに関係し、より鋭い砥石による研削加工が有利になるためと考えられる。

2.4.2 反射率測定装置の製作

加工結果としてまず必要な性能は反射率であり、加工面の評価のため反射率測定装置を製作した。装置の原理を図2.18に示す。

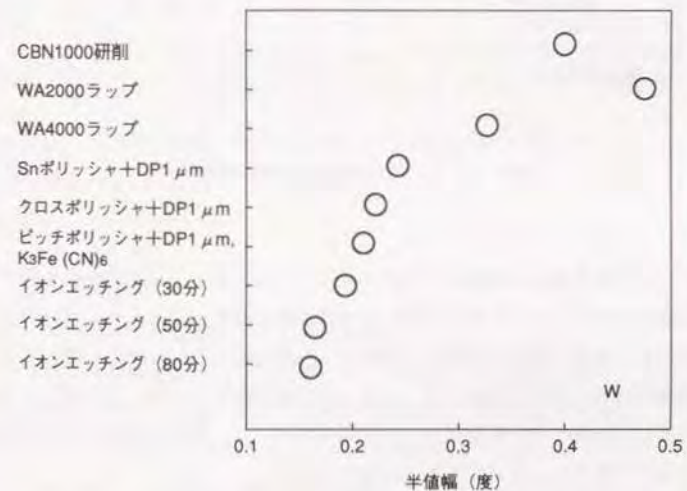
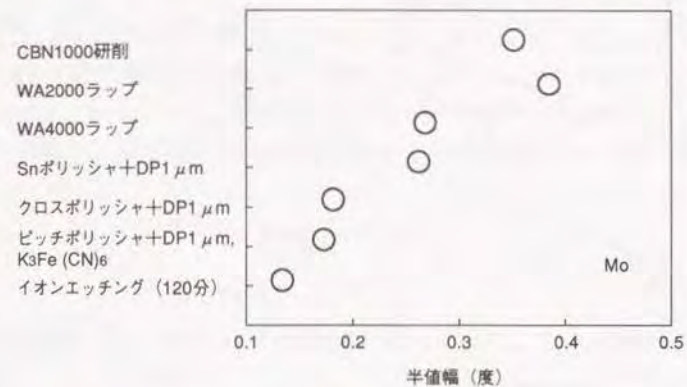


図2.17 Mo、W各加工面のX線回折半値幅

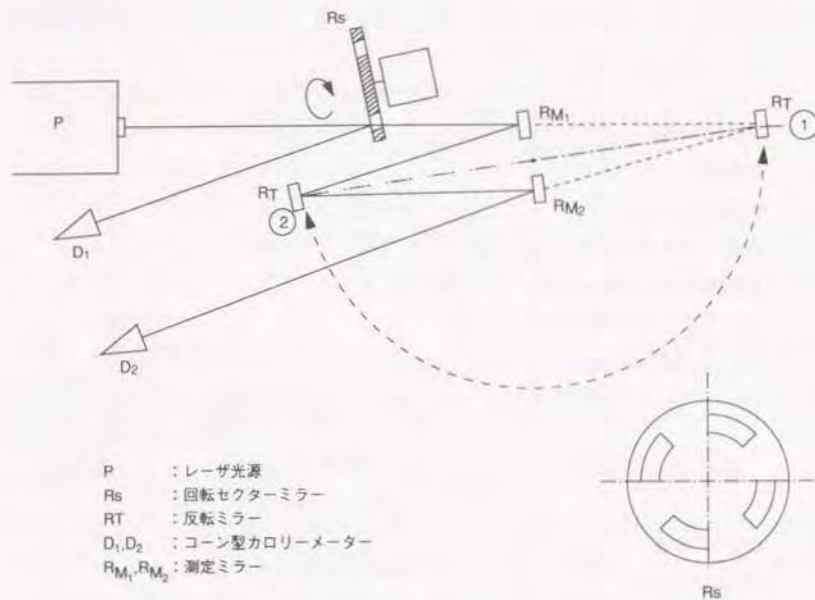


図2・18 反射率測定装置の概念

装置は、レーザー光源P、回転セクタ形チョップミラーRs、180°の回転を行うミラーRT、2個のカロリメータD₁、D₂で構成されており、RM₁、RM₂は試料面であって2個用いる。まず、試料を設置せず反転ミラーを位置1にした場合には、チョップミラーを通過したレーザー光は反転ミラーによってのみ反射され、D₁に入る。一方、試料2個を設置し、反転ミラーを位置2にした場合には、レーザー光は反転ミラーと2個の試料面によって反射され、D₂に入る。これによって

試料のない場合のD₁、D₂の出力比(反転ミラーの位置1)

試料のある場合のD₁、D₂の出力比(反転ミラーの位置2)

から、試料面による光強度の減衰値を測定し、反射率を求めるものである。

反転ミラーが、位置1のときの2個のカロリメータの測定値の比は次のようになる。

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{I_0 \cdot S \cdot R_s \cdot R_r \cdot \eta_{D2}}{(1-S) \cdot R_s \cdot \eta_{D1}} = \frac{S \cdot R_r \cdot \eta_{D2}}{(1-S) \cdot R_s \cdot \eta_{D1}} = A \quad (2.1)$$

ここに、D₁、D₂：カロリメータD₁、D₂それぞれの出力、I₀：光源の強度、

S：チョップミラーの幾何学分配定数、R_s：チョップミラーの反射率、R_r：反転ミラーの反射率、η_{D1}、η_{D2}：カロリメータD₁、D₂それぞれの効率

また、反転ミラーが位置2で、試料を設置したときの測定値の比は、次式で与えられる。

$$\frac{D_2'}{D_1'} = \frac{I_0' \cdot S \cdot R_s \cdot R_r \cdot \eta_{D2} \cdot (R_{M1} \cdot R_{M2})}{(1-S) \cdot R_s \cdot \eta_{D1}} = \frac{S \cdot R_r \cdot \eta_{D2} \cdot (R_{M1} \cdot R_{M2})}{(1-S) \cdot R_s \cdot \eta_{D1}} = B \quad (2.2)$$

ここに、R_{M1}・R_{M2}：試料面のそれぞれの反射率、D₁'、D₂'：各カロリメータの出力、I₀'：光源の強度

(2.1)、(2.2)式から

$$\frac{B}{A} = \frac{S \cdot R_r \cdot \eta_{D2} \cdot (R_{M1} \cdot R_{M2})}{(1-S) \cdot R_s \cdot \eta_{D1}} = R_{M1} \cdot R_{M2} = a \quad (2.3)$$

となり、R_{M1}・R_{M2}の反射率の積が求まる。いま2個は同一試料であって、R_{M1}、

R_{M2}が等しければ

$$(R_{M1}, R_{M2}) = (R_M)^2$$

となり、(2.3)式から

$$R_M = \sqrt{a} \quad (2.4)$$

となって、試料の反射率を求めることができる。

このように本装置によればカロリメータ、光源などの特性によらず、カロリメータの出力比の測定のみで容易に試料の反射率を求めることが可能である。

製作した装置は、光源に500WCO₂レーザー、検出器にコーン型カロリメータを用い、チョップミラーのチョッピング周波数は100Hzとした。試料面に入射するビームの角度は垂直方向に対して7.5°とし、反射率の角度依存を少なくした。測定精度は±0.1%程度であった。

2. 4. 3 反射率の測定

仕上げ面あらしの向上と、加工変質層の減少などによる表面吸収の低下によって、加工面の反射率は上昇して行くと考えられる。加工変質層を測定した試料の各面について、試作した反射率測定装置を用いて測定を行った。結果を図2. 19に示す。

ただし、研削加工面は平面度が悪く、反射ビームが安定しないため測定が困難であり、後の2. 4. 5に述べる吸収の測定結果より、散乱をラップ加工面と同等と見なして推定した値を示した。

仕上げが進むにつれて反射率は高くなり、Mo、Wともメカノケミカルポリッシング面では98.4%に達する。

図2. 20に仕上げ面あらしと反射率の関係を示す。仕上げ面あらしの低減にしたがって反射率は増大するが、次の課題が存在する。

(1) Mo、Wの関係では、仕上げ面あらしの小さい領域において両者の傾向はほぼ一致するが、ラップ加工においては差があり、Wの方が仕上げ面あらしによらず反射率が高い。前述の図2. 17に見るように、加工変質層においては両者に特徴的な差異がない。また、ラップ加工面の平面度に違いは見られない。従って、これは加工変質層以外の原因による表面吸収の差に起因すると考えられ、散乱などと対比した検討が必要である。

(2) CBN砥石による研削面はラップ加工面と比較して、仕上げ面あらしに比し反射率が高いとの推定も可能である。もとより、研削加工面は砥石の走行方向の砥粒による条痕より成り、条痕斜面では光沢も見られる。これに対し、ラップ加工面はいわゆる梨地であって方向性はない。従って、同一の数値の面あらしであっても単純な比較はできないが、表面吸収の一つの原因である加工変質層は、逆にCBN1000研削加工面ではWA4000ラップ加工面に比べて大きく、表面吸収、散乱の両面より検討の必要がある。

2. 4. 4 レーザ光照射損傷しきい値の測定

レーザ光学素子として必要な性能は、反射率とともに、その素子がどれだけのレーザ

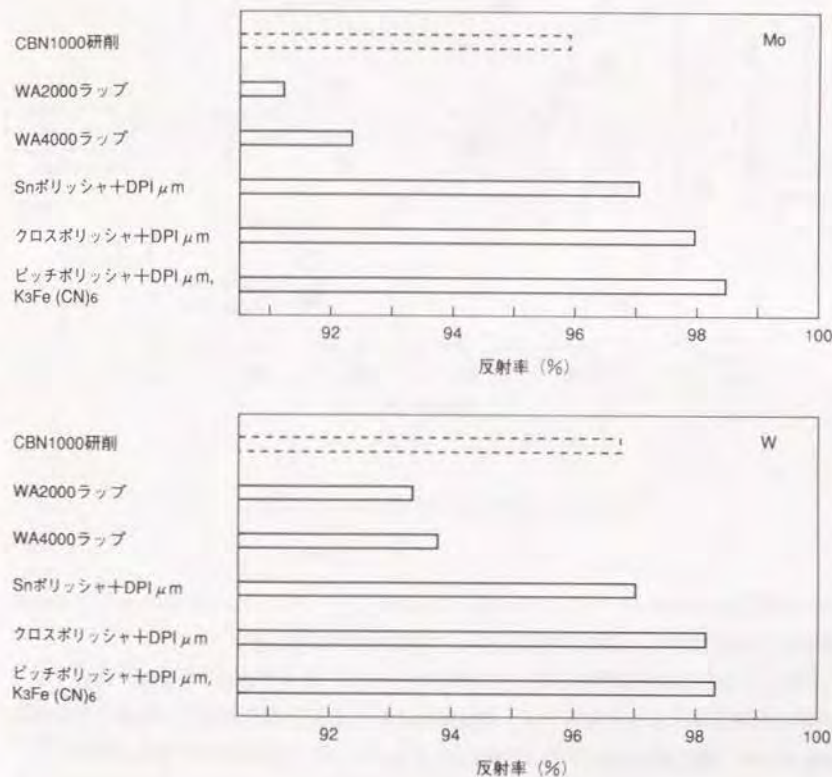


図2.19 Mo、W各加工面の反射率 ($\lambda = 10.6\mu\text{m}$)

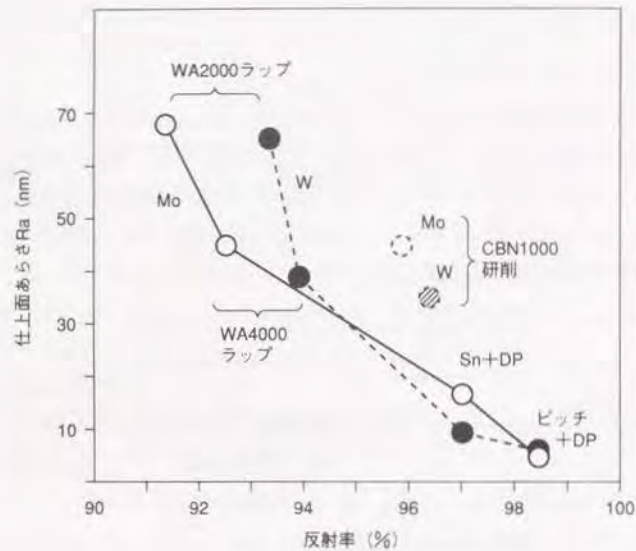


図2.20 反射率と仕上面あらしの関係

出力に耐えられるかということがある。このため、レーザのパワー密度を変化させて各種の加工面を照射し、損傷の生じるパワー密度の限界を求めた。

図2.21に測定原理を示す。レーザ光をレンズによって絞り、測定面に照射する。反射光は吸収体によって吸収する。測定面を移動すると、レンズの焦点位置との相対関係において、測定面上でのビーム径が変化し、従ってレーザ光のパワー密度が変化する。ビーム径はあらかじめアクリル樹脂のパーンパターンによって求めた。

測定面をパワー密度の低い領域より順次移動する。レーザによる損傷の発生した場合に測定面上で閃光が発し、このときのパワー密度をもってレーザ光損傷しきい値とした。レーザは500W出力のものを用い、レンズはZnSe型で焦点距離を63.5mmとした。これによって最大4MW/cm²のパワー密度が可能である。

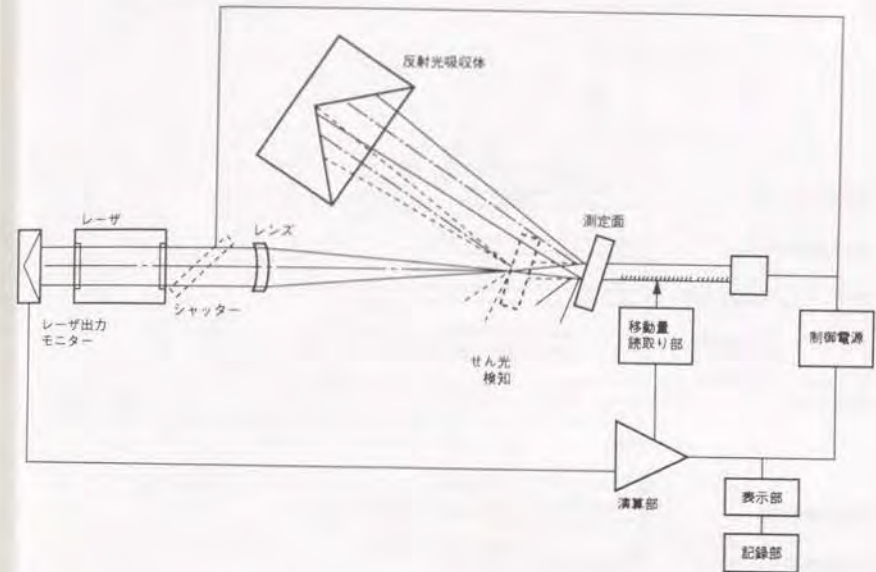


図2.21 レーザ光損傷しきい値測定概念

図2.22にMo, Wの各種の加工面に対する測定結果を示す。仕上げ面の向上に連れて損傷しきい値は上昇する。Mo, Wの比較ではWの方がしきい値が高く、融点、熱伝導度も高い材料固有の性能を示していると考えられる。Moでは1MW/cm²をやや下回る値、Wではやや上回る値が得られる。Wのクロスによるポリシ加工とピッチによるメカノケミカルポリシングの面は、イオンエッチング面とほぼ同等である。また、CBN砥石による研削面は、面あらしに比し高い値を示している。

図2.23は損傷しきい値と反射率の関係を求めたものである。損傷しきい値はほぼ反射率に関係しており、反射率を高めることが、レーザ光損傷しきい値を高める結果につながる事となる。

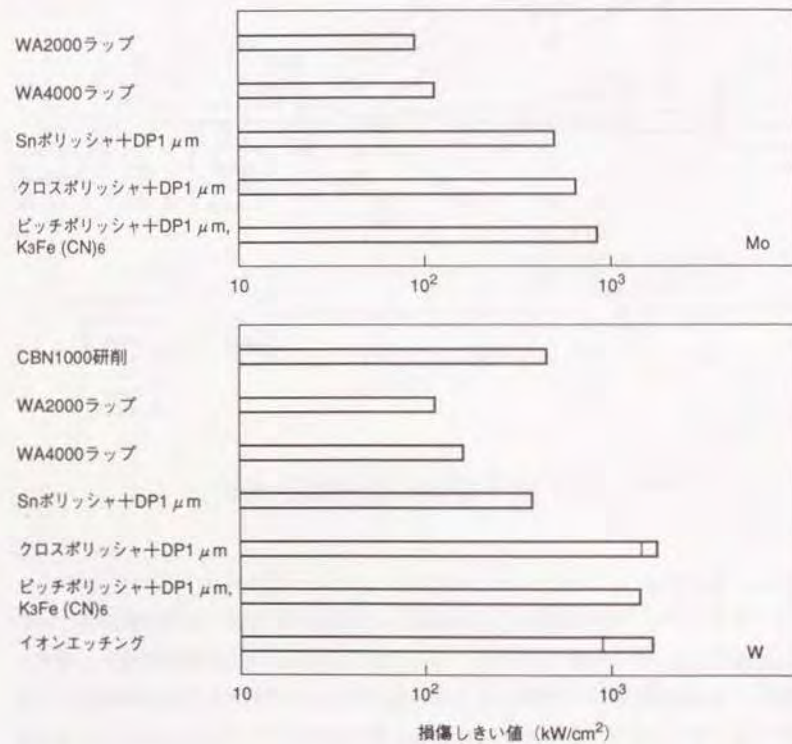


図2. 22 Mo、W各加工面のレーザー光損傷しきい値

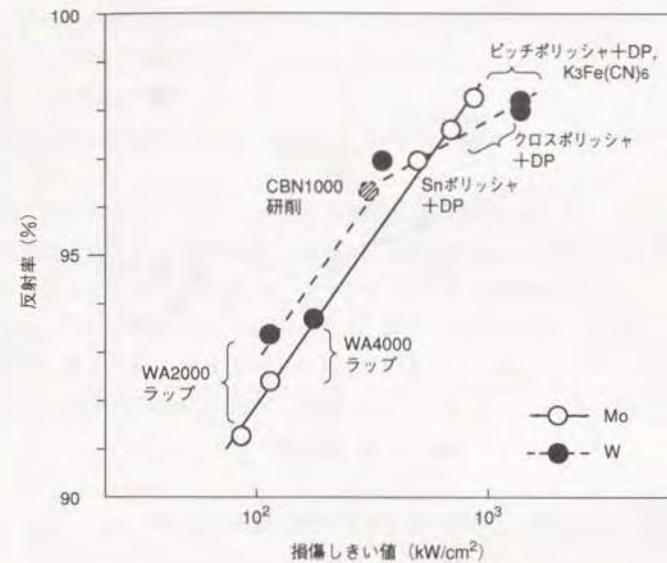


図2. 23 Mo、Wの反射率と損傷しきい値

加工変質層とレーザー照射時の損傷の関係を知るため、X線回折における半値幅と損傷しきい値の関係を求めた結果を図2. 24に示す。すでに述べたように、仕上げ面の向上ともなって半値幅は減少するが、同時に反射率も上昇するので、加工変質層—この場合は加工ひずみ層—の損傷に与える影響を、仕上げ面あらかの向上による反射率の上昇と分離することは困難であるが、Wでのクロス、ピッチによるポリシ加工面は、イオンエッチング面とはほぼ同等の損傷しきい値を示すことから、少なくとも、良好なポリシ加工面での加工ひずみ層は損傷に対しほとんど問題とならないと考えられる。

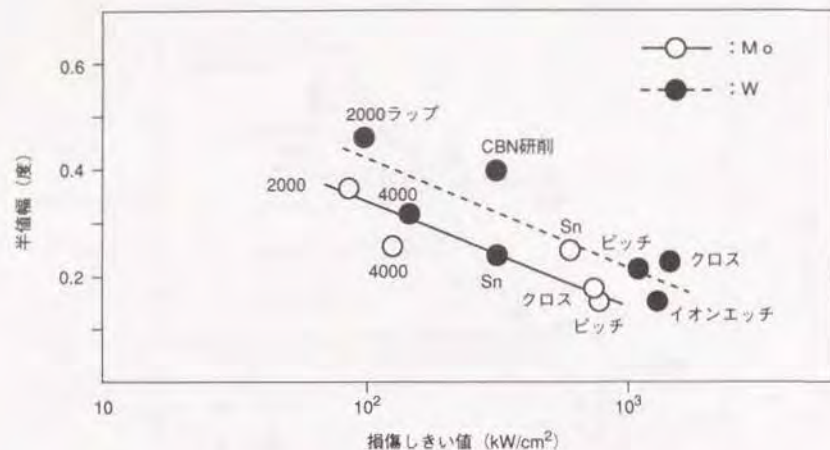


図2.24 Mo、WのX線回折半値幅と損傷しきい値

2.4.5 散乱の評価とコンタミネーション

反射面の特性は反射、吸収、散乱により表され、それぞれの量の和は入射光量に等しい。反射は高いほど良いので、加工では吸収と散乱を小さくすることになる。吸収は出力の減少、光学ひずみ、および破壊の原因となり、散乱も出力の損失となるのみでなく、レーザー光の散乱は安全上にも問題がある。

物質表面における反射率 R_s は表面あらさに依存するが、Davies⁶⁾は統計的考察より、自乗平均あらさ(RMS) δ と R_s との関係を次のように表した。

$$R_s = R_0 \cdot \exp \left[- (4\pi\delta/\lambda)^2 \right] \quad (2.11)$$

ここで R_0 は同じ物質の完全に滑らかな表面からの反射率で、 λ は光の波長である。この関係式が成立するためには、以下が前提となっている。

- (1) δ は λ に比し十分小さいこと
- (2) 表面の突起の高さがガウス分布をしていること

表面からの全散乱積 T は以下のように定義される。

$$T \equiv (R_0 - R_s) / R_0 = 1 - \exp \left[- (4\pi\delta/\lambda)^2 \right] \\ = (4\pi\delta/\lambda)^2 \quad (2.12)$$

すなわち、散乱は $1/\lambda^2$ に比例するため、同じ面あらさに対して波長が長いほど小さくなる。

あらさ δ をパラメータとした全散乱積と波長の関係を図2.25に示す。CO₂レーザーの波長である10.6 μ mにおいて、散乱が0.1%となるあらさは図より20nmRmsであり、 R_{rms} と R_a をほぼ等しいとして、ポリシ加工後では散乱は無視できると考えられる。

散乱は実用上問題ないと考えられるが、散乱と吸収を反射との関係において把握することは、加工のどのような因子が反射率に影響するかを知る上で重要なことである。このため反射面の反射率、吸収率を独立に測定することにより、散乱量を推定した。

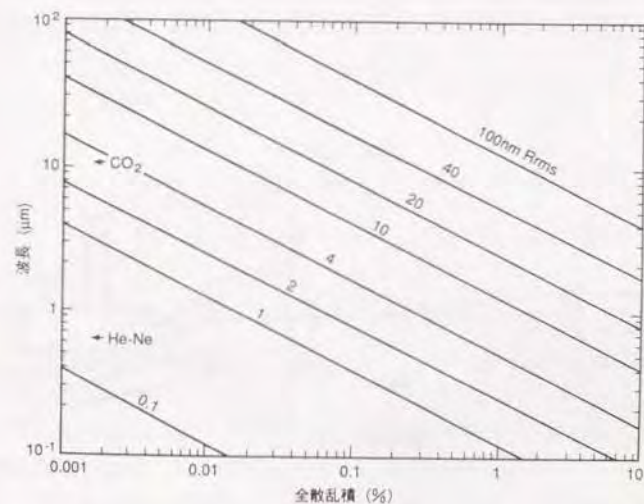


図2.25 表面あらさをパラメータとした全散乱積の波長依存性

吸収率測定原理を図2. 26に示す。レーザー光を測定面に照射し、吸収による発熱をカロリメータにより測定する。反射率の高い場合、発熱量は極めてわずかであり流量によって大きい影響を受ける。そのため流量はメスシリンダーによって測定を行った。

本装置により求めた吸収率と、反射率測定装置で求めた反射率の値を、各加工面について同一線上に表示したものを図2. 27に示す。ポリシ加工面においては、反射率と吸収率の和はほぼ100%になり、10.6 μ m波長での散乱は測定精度内において無視できる。一方、ラップ加工面では、散乱は0.3%程度と見込まれる。また、研削加工面の反射率を、散乱がラップ加工と同程度と見なして、吸収率の測定結果より推定した値を図中に点線で示した。

すでに図2. 20に示したように、MoとWのラップ加工面間で反射率の差が存在した。このため、MoとW各々のWA2000ラップ加工面に、材料固有の反射特性を除くようCr-Au蒸着を施し測定を行ったが、図2. 27に示すように両者の間に大きい散

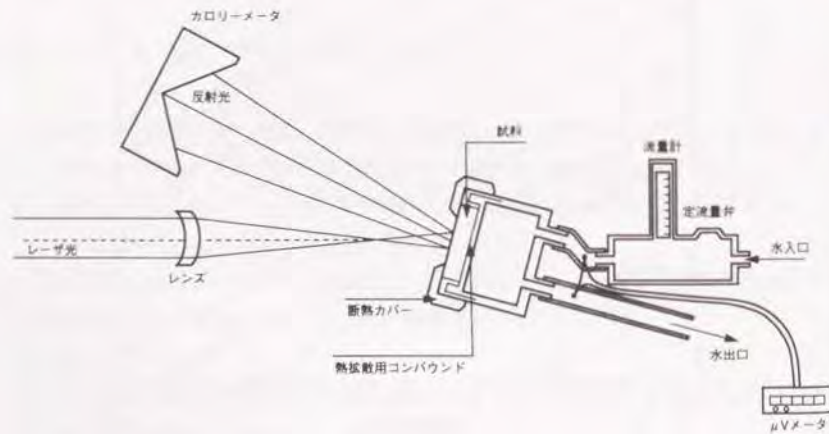


図2. 26 吸収率測定概念

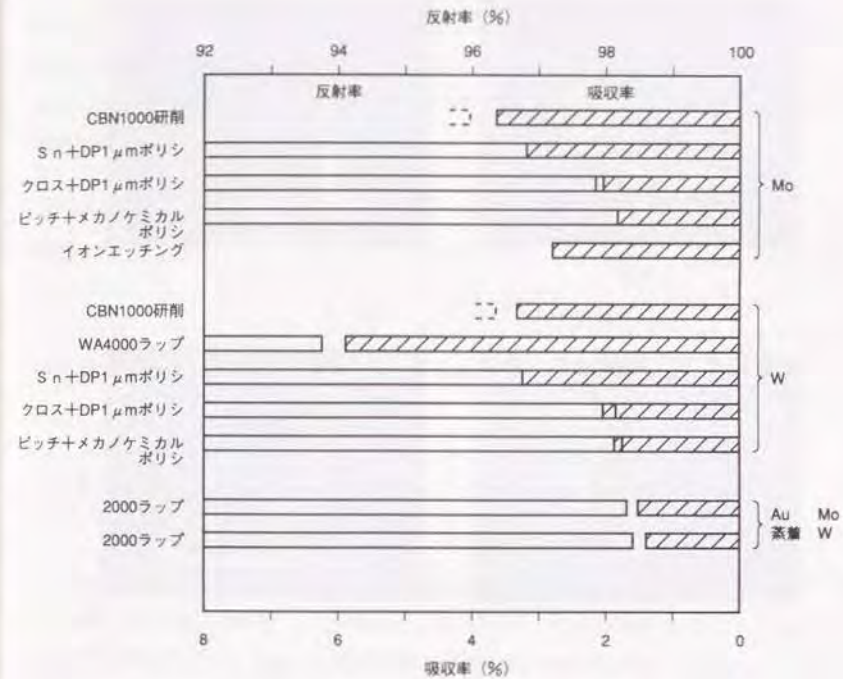
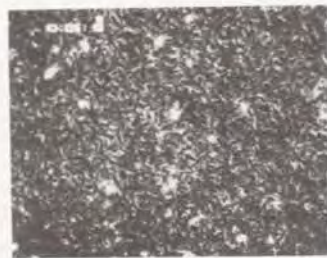


図2. 27 Mo, Wの各種加工面の反射率と吸収率

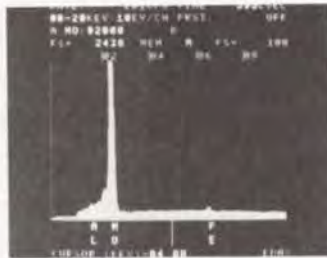
乱の差は認められなかった。反射率の差が材料、仕上げ面あらしによらず、また散乱もほぼ同一であれば、原因として加工面のコンタミネーションによる表面吸収が考えられる。このため、加工面のXMA分析を行った。

図2. 28にMoのWA2000ラップ加工面、WのWA4000ラップ加工面、およびWのCBN1000研削加工面のSEM像およびXMA分析結果を示す。

ラップ加工面のSEM像には白点が見られるが、表面に埋め込まれ残存しているAl₂O₃砥粒と考えられる。XMAではAlおよびラップの材料であるFeが検出された。これらのコンタミネーションの量を定量的に評価することは局所的なもののため困難で



SEM

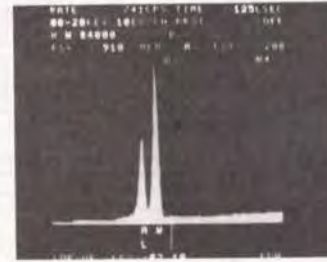


XMA

MoのWA2000ラップ加工面



SEM

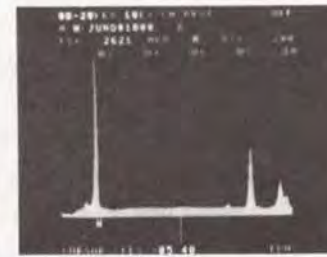


XMA

WのWA4000ラップ加工面



SEM



XMA

WのCBN1000研削加工面

図2. 28 各種加工面のSEM写真およびXMA分析

あるが、実験で用いたMoのピッカース硬さは240、Wでは473であり、図2. 10に示したように単位時間当たりのラップ加工量はMoの場合にはWの約2倍となっていることから、軟らかいMoにおいてはより硬いWと比べ、砥粒ないしラップ材の表面への埋まり込みによるコンタミネーションが大きく、吸収の増加を来たしていると考えられる。

一方、研削加工面では異物は検出されていない。研削加工面の反射率、またレーザー光指傷しきい値がラップ加工に比し高い傾向にあるのも、コンタミネーションによる表面吸収の小さいことが寄与していると推定される。

これらのことから、光学系においては加工上、また使用上においてコンタミネーションに注意する必要があることが判明した。

第2. 5節 反射光学素子の製作

実用化を目指した反射光学素子の製作技術に関して研究を実施した。仕上げ面は、Mo、Wの素材製作方法によって影響されるところから、種々の製作工程による素材に対してポリシ加工を行い、結果を仕上げ面あらさ、および反射率によって評価した。また、液中ポリシングについて実験を行った。実験結果に基づき、各種の反射鏡の試作を行い、レーザー装置に組み込み評価を行った。

2. 5. 1 素材製作方法と仕上げ面

反射光学素子の仕上げ面に対する要求は厳しいため、Mo、W素材の製作方法との関係を検討する必要がある。Mo、Wとも、素材の出発点の粉末には種々の粒度があり、焼結法には炉内焼結と通電焼結がある。また、高密度を得るための加工には、高速鍛造、圧延、溝圧延、およびその組合せがあり、加工率が異なる。これらの条件によって結晶寸法、および硬さが変化し仕上げ面に影響を与える。種々の工程による素材の試作を行い、反射面の加工を実施し、仕上げ面あらさとCO₂レーザー光による反射率の測定によ

て評価を行った。表2. 6に、今回用いたMo、Wの品種と素材の製作方法、およびビッカース硬さを示す。

各素材を、Snポリリッシャと3 μ mダイヤモンドペーストを用いて加工を行った。ノマルスキー顕微鏡写真を図2. 29に示す。結晶寸法にかなりの差異があり、従って加工面の結晶レリーフにも差の出ていることがわかる。また、各加工面の反射率測定結果を、仕上げ面あらさ、およびビッカース硬さと合わせ、Moについて図2. 30に、Wについて図2. 31に示す。

Moにおいては、結晶粒としてはMC、MCFが小さく、MAF、MBR、MBFは大きい。MARはその中間である。このため、仕上げ面はMAF、MBR、MBFでは結晶間段差が大きくなり、硬さが低めであることと相まってやゝあらい。MCは硬さは高くないが、結晶粒が小さいためレリーフは小さくなり、仕上げ面あらさはよい。一方、加工率をあげ、MCFのように硬度を上げて、仕上げ面はさほど変わらない。これは仕上げ面を規定するのは、結晶方位による硬さの差異や結晶寸法によるところが大で、必ずしもマクロな硬さではないことを示している。

反射率に関しては、一般には表面あらさが良好である方が高く、またコンタミネーションの点からは硬さの高い方が望ましいと考えられる。本加工の領域では明瞭な相関関係はないが、比較すれば仕上げ面あらさが良好で、かつ高硬度の材料の場合に高い反射率が得られている。

Wにおいては、WAR、WBRは圧延方向に結晶間段差が大きい。WAFとWBFでは前者の方が組織としてやゝち密のようである。Moと同様、硬さのやや低いWBRでは仕上げ面あらさが若干落ち、結晶粒が小さめで高硬度のWAFでよい結果が得られている。反射率の傾向もMoと同様であり、仕上げ面あらさが良好で、かつ高硬度の材料に対して高めの反射率が得られている。

2. 5. 2 液中ポリシ加工

以上の実験でのSnポリリッシャとダイヤモンドペーストによるポリシ加工では、最終仕上げ面としてはあらいため、引き続いてピッチポリリッシャによるメカノケミカルポリシングなどを実施する必要がある。しかしながら、粘い金属材料の加工において直径が

表2. 6 Mo、Wの品種と製作方法、および硬さ

品 種	MAF	MBF	MAR	MBR	MC	MCF
焼 結 法	炉 内	同 左	同 左	同 左	同 左	同 左
加 工 法	高速鍛造	同 左	圧 延	同 左	溝圧延	鍛造
加工率 (%)	75	75	80	80	82	98
ビッカース硬さ	240	230	250	245	230	307
使 用 粉 末	粗	細	粗	細	細	細

品 種	WAF	WBF	WAR	WBR
焼 結 法	炉 内	通 電	炉 内	通 電
加 工 法	高速鍛造	同 左	鍛 造	同 左
加工率 (%)	78	78	80	80
ビッカース硬さ	473	483	450	437
使 用 粉 末	中	中	中	中

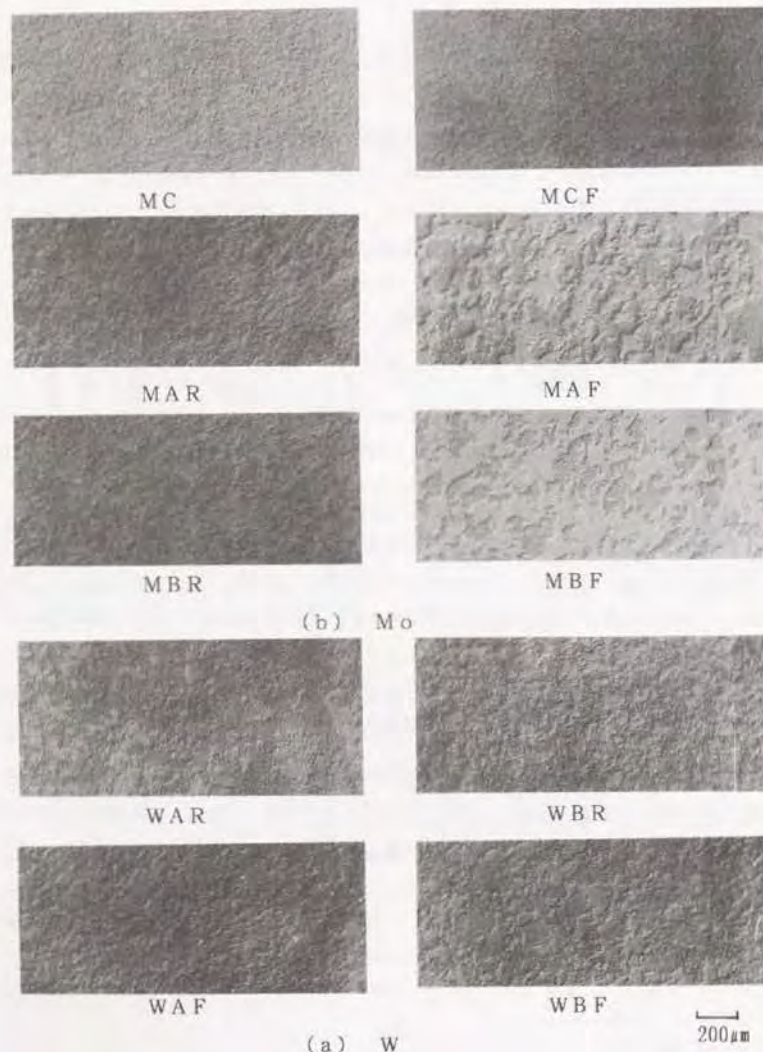


図2.29 素材による加工面の差異
(Snポリッシャと1 μ mダイヤモンドペーストによる、ノマルスキー顕微鏡写真)

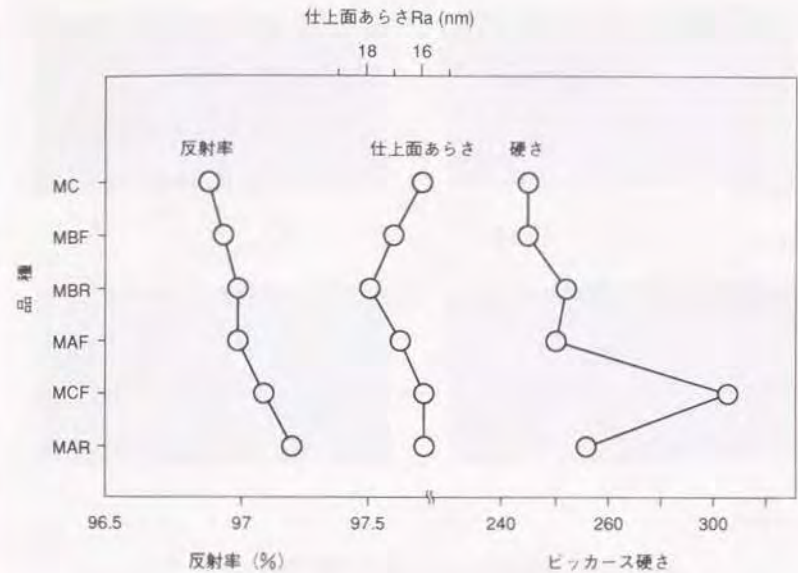


図2.30 Mo素材による反射率、仕上げ面あらさ、および硬さのちがい
(Snポリッシャ+ダイヤモンドペースト3 μ m)

100-150mmのように大きくなると、ピッチポリッシャの加工中の変形が大きくなり精度維持に手間を要する。

平面の加工では、加工物に比し十分に大きい平板のSnポリッシャと微細砥粒を用いた液中ポリシ加工⁷⁾を用いることが考えられる。Mo、Wの液中ポリシ加工に関し実験を行い次の加工条件を得た。

ポリッシャ	: Sn	
加工液	: SiO ₂	20g
	: 純水	800ml
	: グリセリン	200ml

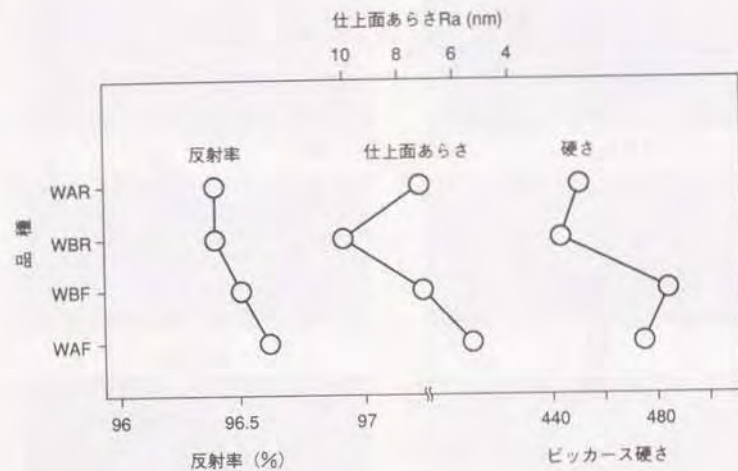


図2. 3 1 W素材による反射率、仕上面あらさ、および硬さのちがい (Snポリリッシャ+ダイヤモンドペースト3 μ m)

グリセリンは粘度調節の目的である。

以上の条件を用い、各種Mo、W材料に対し、前加工をSnポリリッシャとダイヤモンドペーストによるポリシ加工として、液中ポリシ加工を実施した。MoではRa3-9nm、Wでは2-4nmの良好な面が得られた。W面のノルスキー顕微鏡写真を図2. 3 2に示す。液中ポリシ加工では結晶レリーフは小さくはなるが取り去ることは困難である。これは、SiO₂砥粒では研磨能力が小さいためと考えられる。

各種W材料の液中ポリシ加工面について、反射率の測定結果を仕上げ面あらさ、および硬さと合わせて図2. 3 3に示す。反射率は液中ポリシ加工によってSnポリリッシャによる加工より1.3 ~ 1.5%程度上昇しており、98%程度が得られる。素材間の差異はあまり認められない。

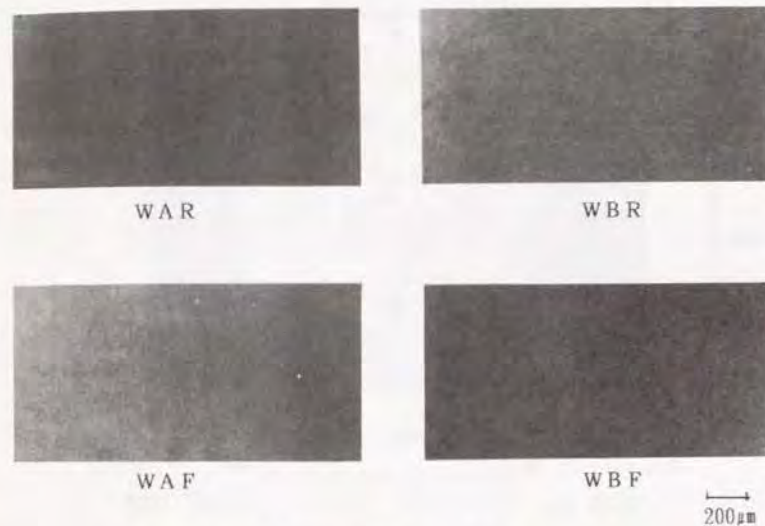


図2. 3 2 各種素材の液中ポリシ加工面 (ノルスキー顕微鏡)

以上のように、液中ポリシ加工によって高品位の仕上げ面が比較的容易に得られるため、大面積の平面鏡の加工に用いることとした。ただし、球面の加工に用いることはポリリッシャの準備の関係で困難である。

2. 5. 3 反射鏡の試作

以上の実験結果に基づき、MoおよびW反射鏡の試作を行なった。素材には各々MAR、WAFを用いた。試作した反射鏡の例は以下の通りである。

- (1) Mo平面反射鏡、直径150mm、厚さ15mm
- (2) W平面反射鏡、直径100mm、厚さ10mm
- (3) W10mR凹面反射鏡、直径75mm、厚さ10mm。

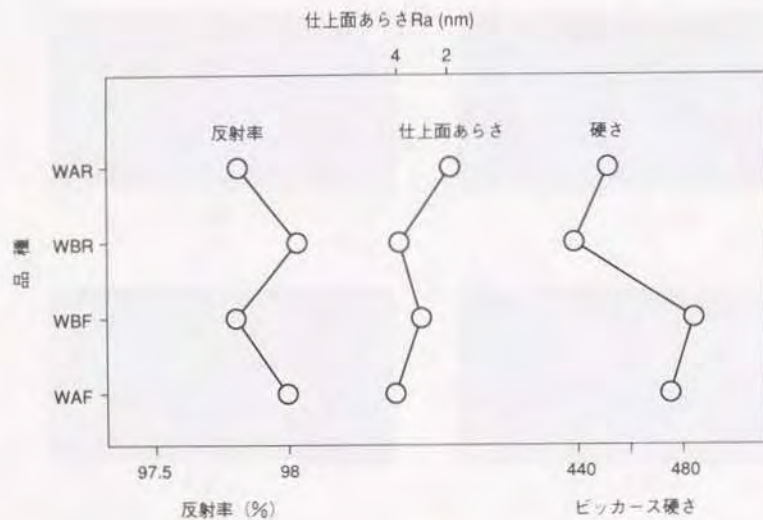


図2.3.3 W素材による硬さ、および液中ポリシ後の反射率、仕上げ面あらさのちがい

- (4) W15mR凹面反射鏡、直径75mm、厚さ10mm
- (5) W10mR凸面反射鏡、直径75mm、厚さ13mm
- (6) W12.8mR凸面反射鏡、直径75mm、厚さ13mm

W平面反射鏡の外観を図2.3.4に、レーザ干渉計による平面度測定結果を図2.3.5に示す。周縁部において $0.3\mu\text{m}$ ($\lambda/30$)程度のだれがあるが、使用範囲において $\lambda/30$ 以内の平面度となっている。また、球面鏡の曲率半径精度は $\pm 0.1\mu\text{m}$ 以下を得た。

製作した反射鏡を5-10kWレーザ加工システムに組み込んだ。平面鏡は外部光学系に用い、Mo、Wの表面のまま使用を行った。球面鏡はレーザ共振器に使用するため、反射率を高める目的で基板にクラスターイオンビーム法によりAu膜の蒸着を行った。この場合の反射率は $99.1 \pm 0.1\%$ 、レーザ光損傷しきい値は $4\text{MW}/\text{cm}^2$ 以上であった。

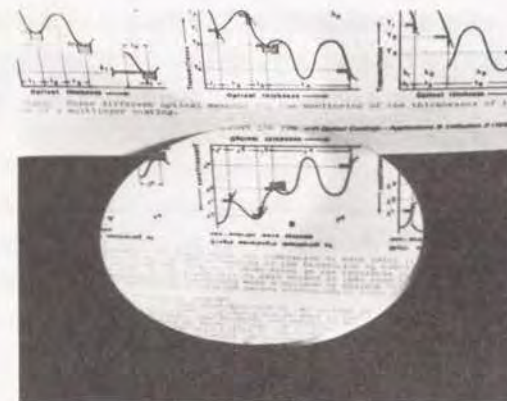


図2.3.4 試作したW反射鏡
(直径75mm、15m R凹面)

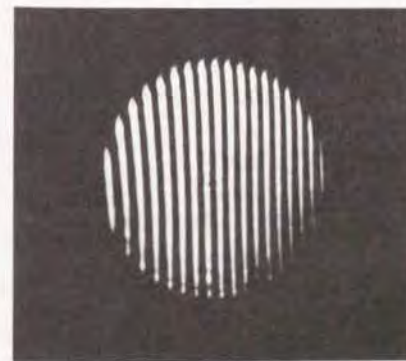


図2.3.5 W平面反射鏡のレーザ干渉計による干渉縞
(測定範囲75mm径)

球面反射鏡を5kW不安定型共振器に実装してレーザー発振を行った場合の、放電入力とレーザー出力の関係は図2.36のようであり、十分なレーザー出力を得ることができた。これらの結果に基づいて反射光学系の生産が行われ、多数のレーザー装置に実用化された。

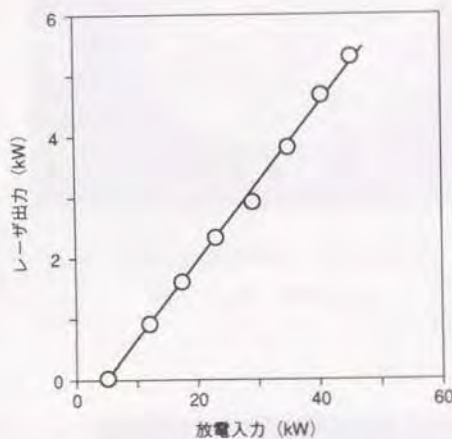


図2.36 試作反射鏡を用いた5kWレーザーの発振

反射鏡：10mR凸
 ビーム径：2.4mm
 共振器長：2.5m

第2.6節 総括

CO₂レーザー用反射光学系材料としてMo、Wを選定し、その反射面の加工についての研究を実施した。

まず工場での損傷の実態の調査よりMo、Wの適合性を明らかにして、素材の製作方法を検討すると共に、レーザー照射時の光学ひずみとの関係を評価した。次いで研削加工、ラップ加工、ポリシ加工に関し、主として仕上げ面あらさの観点から加工条件に関して実験を行った。

反射光学系として必要な仕上げ面は、高い反射率を持ち、かつ高パワーのレーザー照射に耐えることであり、このため、反射率測定装置、照射損傷しきい値測定装置を製作し、加工面をX線回折による加工変質層の測定と合わせて、反射率、および耐照射パワー密度によって評価した。また、吸収率測定装置を製作して吸収、散乱を含めて反射面を光学特性的に総合評価し、性能に及ばず要因を明らかにした。

次に、仕上げ面と素材製作工程の関係を評価し、さらに、大径の平面加工のための液中ポリシ加工について実験を行った。

これらの結果にもとづき、平面・球面の反射鏡を製作してレーザー装置に実装し、総合評価を実施した。

得られた結果は次の通りである。

(1) 工場において損傷した反射鏡の観察結果より、反射光学素子には反射面としての光学的特性に加え、傷の発生を防ぐ高い硬度、およびひずみ、割れを発生し難い機械的、熱的強度が必要であることが判明した。Mo、Wはこの条件を満たしている。

(2) レーザー照射に伴い、吸収による熱変形によって反射面に光学ひずみが発生するが、その量は材料の熱伝導度と線膨張係数の比に影響される。照射実験の結果、Mo、Wは光学ひずみの小さいことが確認され、反射光学系材料として適している。

(3) 研削加工では、MoはWA、GC砥石では目詰まりを生じやすく、Wに比し仕上げ面が悪い。CBN砥石では両者の差は小さく、CBN1000砥石でRa0.04μm程度を

得た。

(4) ラップ加工では、WはMoに比し高硬度のため、加工速度はその約1/2であるが、仕上面あらさは小さい。

(5) Mo、Wのポリシ加工では、結晶方位による加工性の差に基づく結晶面間の段差、すなわちレリーフが問題になる。レリーフはラップ加工においても発生している。従ってポリシ加工ではレリーフを低減することと、仕上面あらさを向上させることの二つの機能を持たなくてはならない。このため、ポリシ加工は2工程に分ける必要がある。

(6) Sn-Pbポリリッシャとダイヤモンド砥粒によるポリシ加工を第1段階に、ピッチポリリッシャ、ダイヤモンド砥粒とフェリシアン化カリ溶液によるポリシ加工を第2段階に用いることで、Ra5nmの仕上げ面あらさが得られた。

(7) 試作した反射率測定装置による測定では、仕上面の向上により反射率は増大し、Mo、Wとも反射率98.4%程度が得られた。また、反射率の上昇に伴い照射損傷しきい値も高くなり、1MW/cm²程度が得られた。

(8) 表面の加工による残留ひずみのX線回折による測定では、仕上面の向上に従ってひずみは小さくなり、良好なポリシ加工面では2μm以下の加工ひずみ層と考えられる。この程度の加工ひずみ層はレーザ照射時の損傷には影響を与えない。

(9) 反射率、吸収率の互いの測定結果より求めた散乱量は、ポリシ加工面ではほとんど無視できる。一方、ラップ加工面では約0.3%程度存在する。

(10) ラップ加工面では、MoはWに比し吸収が大きい。これは硬度の低いMoでは、砥粒およびラップ材の表面への残存が多いためと考えられ、反射光学素子の加工時、また使用時にはコンタミネーションについて留意する必要がある。

(11) Mo、W素材の製作は粉末の焼結後、鍛造または圧延を行って高密度化する方法が適しており、その工程、加工率によって結晶寸法、硬さに差を生じるが、仕上面および反射率の点からは、結晶粒径が小さく高硬度であることが望ましい。

(12) SnポリリッシャとSiO₂砥粒を用いた液中ポリシングによる平面加工では、MoでRa3~9nm、Wで2~4nmの仕上げ面が得られた。レリーフはやや大きく、反射率は98%程度であった。

(13) 試作した平面、凸面、凹面の各種反射鏡を5-10kW出力のレーザ加工システムに組み込み、良好な発振特性を得ることができた。本結果により、CO₂レーザ用反射光学素子の生産が可能になった。

文 献

- 1) C. K. N. Patel: Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO₂, Phys. Rev. Lett., 336A, 30, (1964) 1187.
- 2) T. F. Deutsch: Laser Window Materials-An Overview, J. Electronic Materials, 4, 4, (1975) 663.
- 3) P. Miles: High Transparency Infrared Materials-A Technology Update, Opt. Engg., 15, 5, (1976) 451.
- 4) G. H. Sherman: CO₂ Laser Optics, Absorption's Dominant Role, Electro-Optical System Design, June, (1982) 50.
- 5) 河田耕一、中田邦夫、上田修治、長田敬次: 電子部品の精密機械加工、National Technical Report, 24, 6, (1978) 965.
- 6) H. Davies: Proc. Inst. Elec. Engrs, 101, (1954) 209.
- 7) Y. Namba and H. Tsuwa: Float Polishing of Mn-Zn Ferrites and Characteristics of Finished Surfaces. Proc. of 4th Int. Conf. Production, Engg., Tokyo, (1980) 1017.

第3章 CO₂レーザ用屈折光学系材料 の加工

第3.1節 緒言

反射光学系に引き続いて、本章ではCO₂レーザ用屈折光学系のための、ZnSe、KClの加工について述べる。

CO₂レーザを最初に発振させたPatelは、Siを出力取出窓に用いている¹⁾。1969年にはHorriganらによって8kWの出力が得られており、窓材にはGeが用いられているが、Geは50℃付近で急激に吸収率が増加するため、ドライアイスによる冷却が行われている²⁾。温度上昇に伴う吸収率の増大は加速度的に吸収を増すこととなり、破壊を招く熱暴走を発生させる。このため、熱暴走のおきにくいGaAsが適していることが指摘された。しかしながら、GaAsは大きい結晶が得にくく、また可視光に対して不透明のため、光学系の調整が行い難い欠点がある。一方、NaClも使用が試みられているが、突然のへき開が観察されており、アルカリハライド系ではNaClより吸収の少ないKClが望ましいとされている。

ZnSeも中赤外光域での透過材料であるが、1972年にRaytheon社においてCVD法によりZnSe結晶の育成が行われ、実用化に至った。CO₂レーザの普及に伴って、現在ZnSeが一般的な屈折光学系材料となっている。一方、10kWを越える大出力の場合には可能な限り低吸収の材料が望まれることから、吸湿性などの欠点はあるが、KClも考慮すべき材料と考えられる。

ZnSe、KClの加工については、試作上の立場から若干の研究がなされているが^{3) 4)}、系統的な研究は見られない。ここではまず、屈折光学系の損傷の形態について考察を行い、レーザ光の透過に伴う吸収による発熱によって生じる光学ひずみについて実験を行った。屈折光学素子としての性能の問題点は特に吸収であり、評価のため吸収率

測定装置の製作を行ない、加工などによる表面吸収と材料バルクの吸収を分離して評価した。

次にZnSe、KClのポリシ加工についての研究を行い、加工結果をX線回折による加工変質層、および吸収の測定によって評価した。実験結果を基盤としてさらにポリシ加工に改良を加え、大出力レーザー用の各種屈折光学素子の試作を行い、装置に実装して総合評価を行った。

第3.2節 屈折光学系材料

屈折光学系の損傷を分類し、材料との関係を分析した。吸収による発熱によって光学素子の幾何学的変形を生じると共に、屈折率も局部的に変化する。その結果ビームに光学ひずみを発生させ、光学特性が変化する。このため、材料と光学ひずみの関係について実験を行った。吸収の評価は重要な課題であり、吸収率測定装置を製作して素材を評価し、表面吸収と素材バルクの吸収量を見積もった。

3.2.1 屈折光学素子の損傷

CO₂レーザー用屈折光学素子の損傷原因と現象は表3.1のように分類される³⁾。大別すると、レーザー光の透過に伴う発熱による熱誘起損傷と、共振器窓のように、レーザー共振器に取り付けた際の圧力差による圧力誘起損傷がある。

損傷の現象としては回復できない破壊、永久変形と、一時的なひずみとがある。破壊の状態としては、割れ、へき開、溶解、および表面の光学薄膜の剥離などがあげられる。ひずみの現象としては、光学ひずみ (Optical Distortion) があり、熱膨張や圧力差による幾何学的変形、温度上昇によって生じる屈折率変化が原因となる。共振器の出力取出窓に光学ひずみが生じるとビームの発散角が変化し、ビーム形状に影響を与えると共に、レーザーの出力変化によって発散角が変動するため加工結果が不安定になる。また、外部光学系の集光レンズでは、焦点距離が変化する。

以下それぞれの現象について述べる。

表3.1 CO₂レーザー用屈折光学素子の損傷の分類 (宮田³⁾)

現象	原因	
	熱	圧力
破壊	熱的破壊	圧力誘起破壊
	熱暴走	
	へき開	
ひずみ	熱誘起光学ひずみ	圧力誘起光学ひずみ
	クロスハッチひずみ	
	永久変形	

(1) 熱的破壊

破壊の原因は熱応力によることが一般的であるから、吸収率 β の材料が破壊を生じるレーザー出力は、次のように定義した熱的破壊に対する評価指数 (F. M.)_T に比例すると考えられ、この値の大きい材料が望ましい。

$$(F. M.)_T \equiv \sigma_c \cdot K \cdot \beta^{-1} \cdot \alpha^{-1} \cdot E^{-1} \quad [kW] \quad (3.1)$$

ここに、 σ_c : 抗張力、K : 熱伝導度、 α : 熱膨張係数、E : 弾性係数

代表的な材料の物性値と (F. M.)_T の計算値を表3.2に示す。

ZnSeなど半導体系材料の評価指数が高く、アルカリハライド系材料の評価指数は低い。これに対し機械的強度を増大するよう、KClでは加熱鍛造法⁴⁾も試みられている。

表3. 2 熱的破壊に対する各種材料の評価

物質	吸収係数 $\beta_{10.6\mu m}$ (cm^{-1})	熱伝導度 K ($W/cm\cdot K$)	熱膨張係数 α ($10^{-6}/K$)	屈折率 n	弾性係数 E ($10^6 N/cm^2$)	抗張力 σ_c ($10^3 N/cm^2$)	熱的破壊 に対する 評価指数 (F.M.) _T (kW)
Ge	1.2×10^{-2}	0.59	5.7	4.02	10.3	9.31	8
GaAs	5×10^{-3}	0.48	5.7	3.30	8.48	13.8	27
ZnSe	1×10^{-3}	0.18	8.5	2.40	6.72	5.52	44
NaCl	1.3×10^{-3}	0.065	44	1.52	4.0	0.39	0.1
KCl	7×10^{-5}	0.065	36	1.47	3.0	0.44	4

(2) 熱暴走

半導体は吸収率の温度依存性が正であり、また熱伝導度の温度依存性が負であるため、吸収により加速度的に温度が上昇する可能性がある。その臨界温度はGeでは50℃付近であり、GaAs、ZnSeは300~400℃の範囲にある。従ってGeは大出力レーザに使用することは困難である。

(3) 熱誘起光学ひずみ

光学ひずみは温度上昇による光路差に伴うものであるから、次のように定義した評価指数(F.M.)₀に関係すると考えられ、この指数の高いことが望ましい。

$$(F.M.)_0 = K \cdot \beta^{-1} \cdot \chi^{-1} \quad (3.2)$$

ここで χ は光学ひずみ係数で、次式で定義される⁷⁾。

$$\chi = \frac{dn}{dT} + (1+\nu) \alpha (n-1) \quad (3.3)$$

ここに、n:屈折率、T:温度、 ν :ポアソン比、 α :熱膨張係数、

第1項 χ_1 は屈折率の温度依存性、第2項 χ_2 は熱膨張による幾何学的変形に伴う光路長変化である。

表3. 3に、各種の材料に対する χ と評価指数を示す。半導体材料は χ_1 が大きいため大きな χ 値となり、アルカリハライド系材料では χ_1 の値が負で χ_2 と打消し合っで小さい値となる。その結果、光学ひずみに対する評価指数は、熱的破壊に対する評価指数と逆に、アルカリハライドでは半導体より高い値となる。

(4) 圧力誘起破壊、および光学ひずみ

レーザ共振器に取り付けられた出力取出窓は1気圧弱の圧力を受けるため、圧力に対する機械的考慮が必要である。また、圧力による幾何学的な変形による光路差も発生する。弾性係数、屈折率などからの計算結果では、KClではZnSeに比べて3倍の厚みが必要である。

(5) へき開、およびクロスハッチひずみ

アルカリハライドでは、結晶面に沿ったへき開が突然発生する可能性がある。また、温度上昇に伴うすべりに起因して、表面にクロスハッチ状の隆起線が発生する現象も観

表3. 3 光学ひずみに対する各種材料の評価

定数 物質	χ_1 ($10^{-6} \cdot K^{-1}$)	χ_2 ($10^{-6} \cdot K^{-1}$)	$\chi_1 + \chi_2$ ($10^{-6} \cdot K^{-1}$)	光学ひずみ に対する 評価指数 (F.M.) ₀
Ge	277	23.1	300.1	0.2
GaAs	149	17.5	166.5	0.6
ZnSe	48	15.8	63.8	7
NaCl	-33	30	-3	83
KCl	-32	23	-9	186

測されている。

(6) 永久変形

加熱と機械的応力によって長時間の使用後に生ずる変形である。500Wレーザにおける600時間の連続運転後、直径25mm、厚さ3mmのZnSe出力取出窓が共振器側に中心で約0.4 μ m、また同じ形状のKCl窓が1000時間で13 μ m変形した例がある。

以上の損傷のうち、圧力によるものは機械的設計によって対処し得る問題である。一方、熱によるものはレーザ光の吸収が熱の発生の原因であり、吸収の低下が基本的な課題である。また、熱による光学ひずみはどのような条件下においても発生するものであり、評価を必要とする。

3. 2. 2 ZnSe、KClの素材

(1) ZnSe

II-VI族化合物であるZnClは、表3.4に示す特性を持つ、黄褐色透明の結晶材料である。波長10.6 μ mにおける吸収率は比較的低く、機械的強度も高い。また、屈折率が高いためレンズが設計しやすく、可視光において透明であるため光軸合わせなどの調整や観察に有利であり、耐環境性にも優れている。このため、光学ひずみが大きい問題とならない、10kW程度迄の出力のCO₂レーザに対する実用的な屈折光学系材料と考えられる。

レーザ用材料としては、高純度でかつ散乱粒子、結晶欠陥の少ない化合物を得ることに加え、十分な大きさの材料を製造することが必要である。このため、Zn蒸気とH₂Seガスを原料とするCVD法が用いられている。

反応は次のようにして行われる。



CVDにより合成されたZnSe化合物中には気泡などが存在し、均一な光学特性を確保するためには、高温静水圧下での圧縮加工(HIP)が望ましい⁹⁾。HIP処理による吸収率の低下も観測されており、不純物のSeXが結晶粒内に拡散消失することが寄与しているものと考えられている⁹⁾。

表3.4 ZnSeの性質

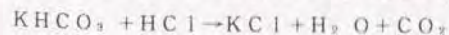
構造	立方晶系閃亜鉛鉱型、または六方晶系
密度	5.27g/cm ³
融点	1100℃以上
透過領域	0.5~22 μ m
硬さ	モース 3 ヌーブ 90
化学的性質	常温の水に不溶 酸には分解し溶ける

(2) KCl

アルカリハライド系の無色透明の結晶であるKClは、吸湿性を有することから加工が困難で、耐湿コーティングも必須であり、また機械的強度の低い欠点があるが、波長10.6 μ mにおける吸収率は $8 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$ と低く、また光学ひずみの点でも優れた特性を有している。このことは、20kW級の大出力CO₂レーザ用の屈折光学系材料として望ましい性質である。表3.5にその特性を示す。

KCl素材の吸収率を高めるには、高純度化が必要である。赤外吸収を増やす要因となるものに陰イオン不純物があり、これらの不純物のなかで、NO₂⁻、HCO₃⁻、SO₂⁻などの低減をはかる必要があるとされている¹⁰⁾。

KCl原料を得るには、水溶液中での次の反応が用いられる。



得られた水溶液を加熱して粉末とし、結晶化原料とする。不純物を除去する方法として、P-RAP法(Pure Reactive Atmosphere Processing)が用いられている¹¹⁾。

表3. 5 KClの性質

構造	岩塩型構造、立方晶系
密度	1.98g/cm ³
融点	770°C
透過領域	0.2~24μm
硬さ	ヌーブ 7
化学的性質	水、メタノールに可溶 エタノールに難溶 アセトン、エーテルに不溶 アルカリ、グリセリンに可溶

この方法は、KClを真空処理、ハロゲンガス処理を行うことによって、その中に含まれている陰イオン不純物を除去するもので、吸収を高めるのみでなく、気泡、夾雑物も除去され、内部散乱も低下することが認められている。

KCl原料はこのような処理を通過して精製固化され、その後電気が中で引き上げ、または引下げ法によって単結晶化される。

以上のようにZnSe、KClとも、吸収には不純物の影響が大きいことが認められており、表面の加工においてもこの点に特に留意する必要があるものと見られる。

3. 2. 3 光学ひずみの測定

吸収による発熱では、光学素子の中心部の温度は周辺部に比べて高く、熱膨張のため平面板は凸レンズ状となり、また屈折率は温度に依存するためレンズ効果が発生し、光学ひずみとなる。

まず、CO₂レーザー光がZnSe、KCl平面板を通過したときのビーム形状の変化から、光学ひずみを測定した。

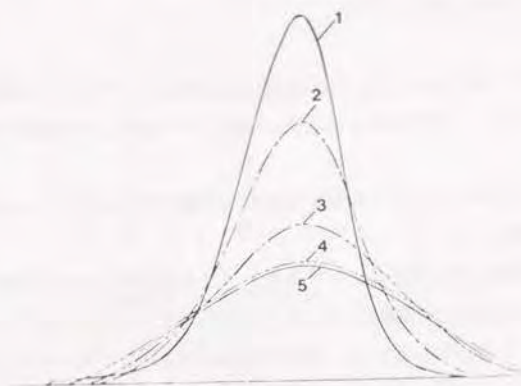
レーザー発振器から8m離れた位置で、レーザー光をアクリル樹脂板に15s間照射しバーンパターンを得る。次に3mの位置に試料のZnSe、KCl板をビームに対して垂直に置き、8mの位置にアクリル樹脂板を置いて、試料を挿入しない場合と同一条件で照射し、バーンパターンを作成して比較する。3mの位置で入射出力は378W、1/e²ビーム径は11.7mmであり、パワー密度は352 W/cm²となる。試料には反射防止膜をつけ、ZnSeではその膜厚を変化して異なる吸収率とした。

図3. 1に各々のバーンパターンを示す。吸収率が小さい場合は試料のない場合とほぼ等しく、光学ひずみがほとんどないことが認められる。一方、試料の吸収率の増加と共に光学ひずみによるレンズ効果が顕著になり、ビーム形状が変化してその径が小さくなることからわかる。この変化は焦点距離3.4-9.8mのレンズに相当する。

次に、CO₂レーザー光に重畳してHe-Neレーザー光を照射し、光学ひずみを干渉縞の変化によって時間的な変動を含め測定した。

測定概念を図3. 2に示す。ZnSe平面板に、最大出力1.2kWのCO₂レーザー光を集光して照射し、同時にHe-Neレーザー光を垂直に近い角度から照射する。He-Neレーザー光の試料からの反射光を、光学系を用いてスクリーン上に拡大投影し、ビデオカメラなどで撮影する。投影像では、調整によって試料の表・裏面各々の反射光による干渉縞が得られる。

図3. 3に測定結果を示す。CO₂レーザー光の照射と共に光学ひずみが発生し、パワー密度の増大に伴ってひずみが増加することがわかる。光学ひずみは0.5kW/cm²のような小さなパワー密度でも生じている。また、本実験での最大3.5kW/cm²の範囲では光学ひずみは可逆的である。動的な観測によれば、熱的な安定に相当する干渉パターンの安



番号	試料	直径(mm)	厚さ(mm)	吸収率(%)
1	ZnSe	75	9	1.49
2	ZnSe	75	10	0.95
3	ZnSe	75	10	0.28
4	KCl	75	10	0.15
5	試料なし	-	-	-

図3.1 平板の光学ひずみによるビーム形状の変化
(アクリルパターンによる測定)

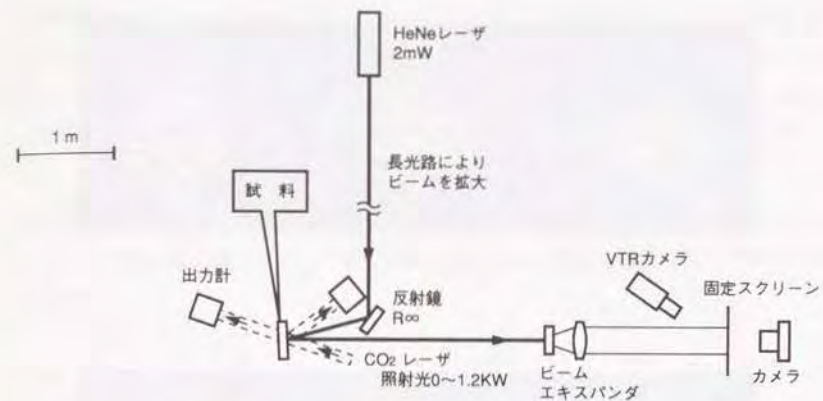


図3.2 重畳したHe-Neレーザー光の干渉縞変化による光学ひずみ測定概念

定に要する時間は1-5 sであった。

屈折率 n 、厚さ t の光学素子の光路長 nt の変化は、次のようである。

$$\begin{aligned} \Delta(nt) &= (n + \Delta n)(t + \Delta t) - nt \\ &\approx t \Delta n + n \Delta t \end{aligned} \quad (3.5)$$

温度上昇 ΔT に対して屈折率の変化 Δn と、厚さの変化 Δt は

$$\Delta n = (dn/dT) \Delta T, \quad \Delta t = \alpha t \Delta T \quad (3.6)$$

ここに、 dn/dT : 屈折率の温度による変化、 α : 線膨張係数

ZnSeでは、 dn/dT : $6.4 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ 、 α : $8.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 、 n : 2.59 (波長 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ に対して)であり、実験では t : 3mmとした。これより試料の表裏面間の干渉縞の変化は

$$\frac{\Delta(nt)}{\lambda/2} = 0.82 \Delta T \quad (3.7)$$

となる。すなわち、1Kの試料の温度上昇に対して干渉縞は0.82縞移動する。このうち、3/4は屈折率の温度変化であり、1/4は熱膨張によるものである。

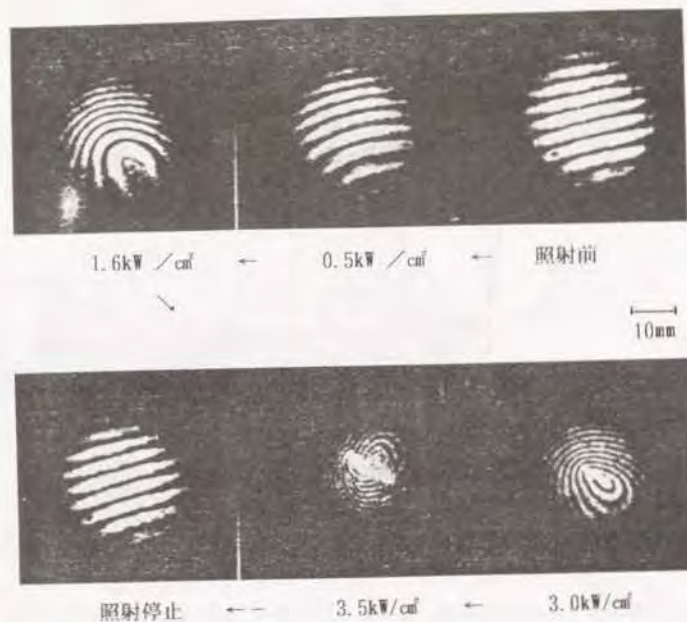


図3.3 He-Neレーザー干渉縞によって測定した光学ひずみ
(ZnSe平面板、厚さ3mm)

3.0kW/cm²の照射では中心と周辺では6縞の差があるため、試料上での温度差は7.3Kとなる。また、照射前より干渉縞が16移動するため、試料の最高温部は室温より19.6K高いことがわかる。幾何学的ひずみは0.52μmである。

次に、CO₂レーザーを4Wの小出力のものに置き換え、ビームをさらに絞ってパワー密度を高めると共に、試料を透過したCO₂レーザー光のモードを観測した。センサの機械的移動によるビームプロファイル測定器による測定結果では、8.1kW/cm²までは、透過したレーザー光のモードはガウス型であったが、8.9kW/cm²では著しく崩れ、分割した2つの山が出現した。このときの温度は室温+57Kと推定される。試料に発生した幾何学的ひずみは冷却後も除かれず、永久ひずみとして残った。

現場的にもこのようなモード変化は発生しており、1000時間程度レーザーを使用した場合、出力が低下していないにもかかわらず、加工能力が急激に低下することがある。初期にシングルモードであったものが、この状態では高次のモードを含んだものに変化しており、多くの場合出力取出窓の交換によって復帰する。種々の出力取出窓の使用結果では、初期に吸収率の大きいものほど、吸収率増加が激しく、モードの変化も著しいことが認められた。この原因は、使用に伴う吸収の増加による光学ひずみと判定される。

以上の結果より、CO₂レーザー用屈折光学素子においては、吸収の低下が最大の課題と考えられる。

3.2.4 吸収率の測定

吸収率の測定には、レーザー光の照射時に光学素子が吸収したエネルギーを熱的に計測する方法がとられる。これには次の3方法がある。

(1) カロリメータによる方法で、熱絶縁されている試料を照射し、試料の温度上昇分から吸収された熱エネルギーを換算する。

(2) 照射時の試料の温度上昇を記録し、次いで試料を冷却した後、記録された温度上昇と同じ温度変化を試料に取りつけたヒーターで再現して、吸収されたエネルギーをヒータ出力と時間の積分で求める。

(3) 平衡方式であり¹²⁾ 概念を図3.4に示す。熱リークが試料とヒートシンクの間に常にあるようにする。試料に発生した熱エネルギーはヒートリーク棒を通りヒートシンクに逃げる。試料が吸収するパワーとヒートシンクに放出するパワーが平衡に達したとき試料は平衡温度となり、この際のヒートリーク棒両端での温度差を測定する。冷却後、求めた温度差を試料に取りつけたヒータで再現する。レーザー光の強度も同様にして求められる。この方法では時定数が入らない利点がある。

以上の3方法の中では、(1)は簡便であり、(3)は周囲条件の影響が少なく精度が高いと考えられる。このため、両方法を併せ使い、主として前者を加工面の評価に、後者を素材に対する評価に用いた。

カロリメータ法による吸収率測定装置の概念を図3.5に示す。また、カロリメ

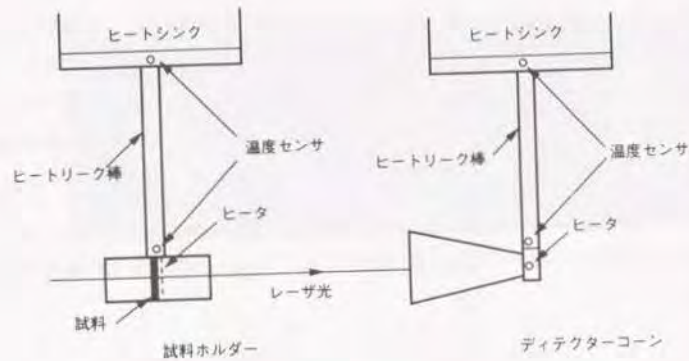


図3.4 平衡法による吸収率測定概念

ータの部分の構成を図3.6に示す。吸収コーンには銅を用い、表面に黒体処理を施した。

平衡方式による吸収率測定装置の外観を図3.7に示す。クライオスタットをヒートシンクとし、液体窒素用と冷水用の2対を設けた。温度計には1C温度トランスデューサを用い、Pt温度計によって校正を行った。

試料ホルダーおよびコーンでの吸収パワーを、それぞれ P_s 、 P_c とすると、試料の吸収率 β は、

$$\beta = P_s / (P_s + P_c) \quad (3.8)$$

で求められ、試料厚さと共に単位長さ当たりの吸収率が得られる。

吸収には、素材のバルクの吸収と、表面の加工変質層、コンタミネーションなどによる表面吸収がある。後者の低下は表面加工の課題であるが、加工結果の評価の上では、バルクと表面の吸収を分離することが必要である。両者を分離するためには、試料の長さを変数として吸収量を測定する方式がある。

長さ l の試料の吸収量 β_l は、次のように表わされる。

$$\beta_l = 2\beta_s + \beta_b \cdot l \quad (3.9)$$

ここに、 β_s ：表面の吸収量（表裏2面存在する）、 β_b ：バルクの単位長さ当たりの吸収率

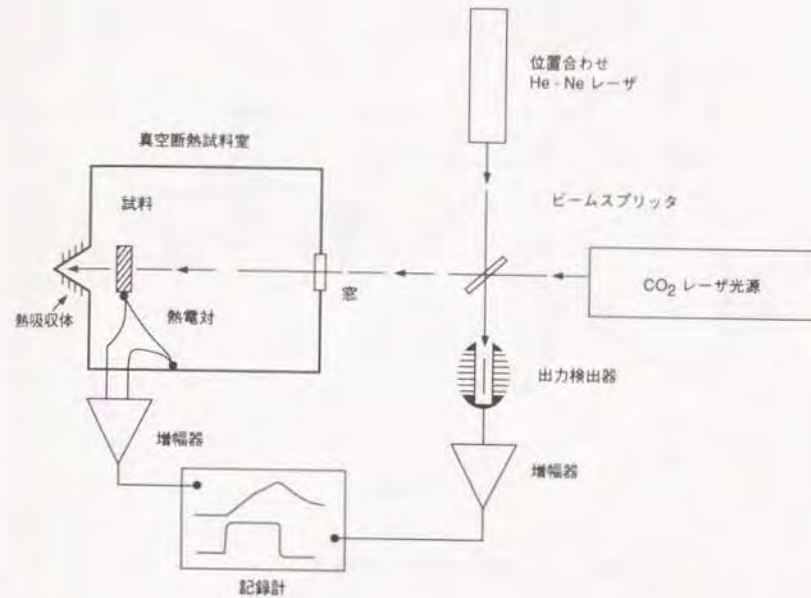


図3.5 カロリーメータ法による吸収率測定概念

長さ l を変数とする(3.9)式は、縦軸との切片が表面の吸収量 $2\beta_s$ を表わし、直線の傾きがバルクの単位長さ当たりの吸収率 β_b を表わす。

厚さが異なるZnSe、KCl材料をメーカより入手して吸収の測定を行った。ZnSeに対する実験結果を図3.8に示す。図より、表面の吸収量と、バルクの単位長さ当たりの吸収率は、それぞれ次のようになる。

$$2\beta_s = 1.6 \times 10^{-3}$$

$$\beta_b = 1.35 \times 10^{-3} \text{ [cm}^{-1}\text{]}$$

また、図3.9にKClの測定結果を示す。試料には通常の製法によるものと、RA

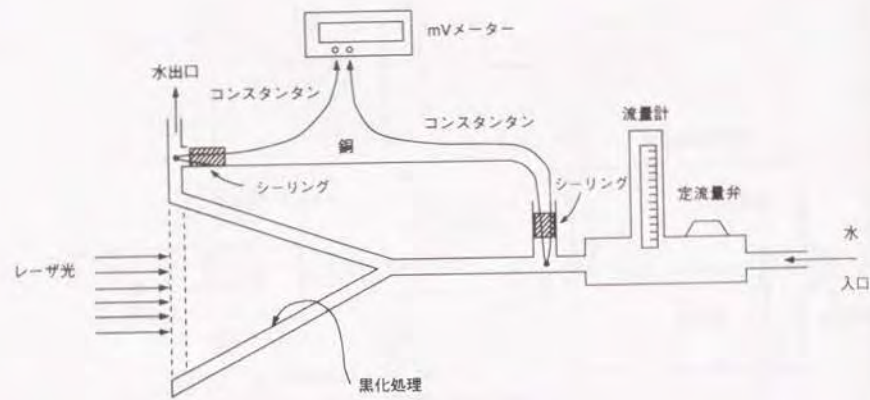


図3. 6 カロリーメータの構成



図3. 7 平衡方式による吸収率測定装置

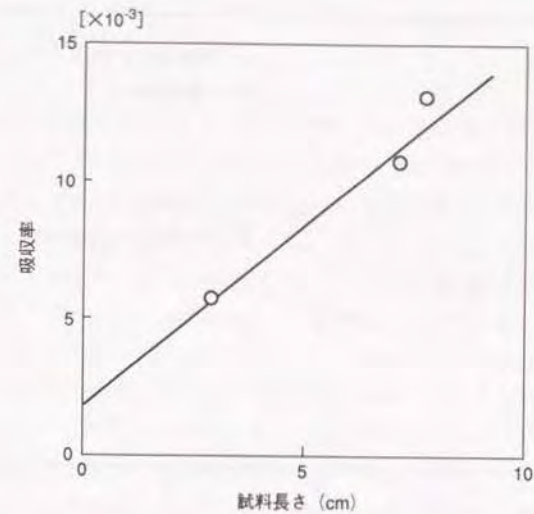


図3. 8 ZnSeの試料長さとの吸収率の関係
(平衡方式による, $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$)

Pによるものの両者を用いた。吸収量、吸収率は次のようになる。

$$2\beta_s = 5.5 \times 10^{-4}$$

$$\beta_s = 6.5 \times 10^{-4} \text{ [cm}^{-1}\text{]} \quad (\text{通常の製法})$$

$$\beta_s = 2.5 \times 10^{-4} \text{ [cm}^{-1}\text{]} \quad (\text{RAP法})$$

すなわち、厚さ1cmの光学素子の場合、ZnSeでは表面吸収とバルクの吸収がほぼ等しく、また、KClではRAP法では表面吸収の割合が大きく、バルクの2倍となる結果となり、それぞれの加工において、表面吸収の低下が重要な課題であることが判明した。

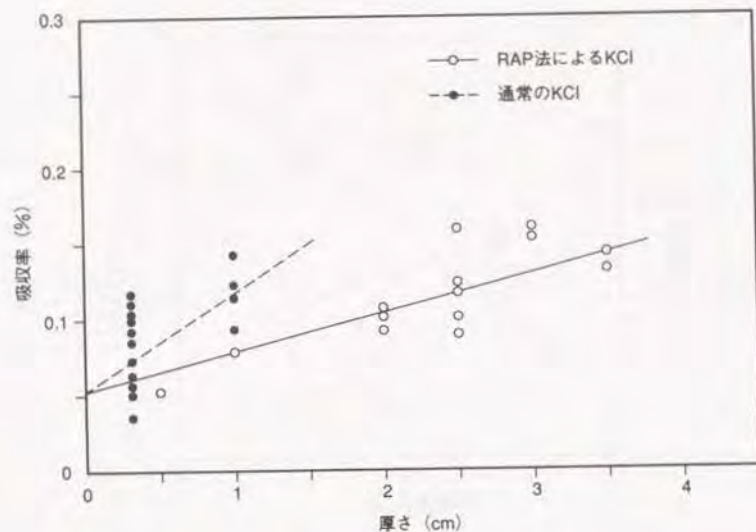


図3.9 KClの試料厚さと吸収率の関係
(カロリメータ法による、 $\lambda = 10.6\mu\text{m}$)

第3.3節 ZnSe, KClの加工

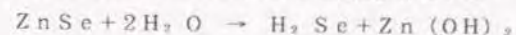
ひずみ、マイクロクラックなどの存在する加工変質層はレーザ光の吸収、散乱を発生するため、光学素子の最終仕上げのポリシ加工では、形状精度、仕上げ面あらさなどの機械的精度と同時に、光学性能より見て加工条件を選択する必要がある。このような観点から、ZnSe, KClのポリシ加工について実験を行い、加工面を吸収率の測定によって評価し、適正条件を求めた。また、ZnSeについてはX線回折による加工変質層の測定を行い、吸収率と対比した。

3.3.1 ZnSeのポリシ加工

ZnSeのヌーブ硬さは90であり、かなり軟質ではあるが傷を生じやすく、傷付近の素材の脱落によって生じたポイド（空孔）の付近がまた加工の進展と共に崩れ、新たな傷の発生を招く。また多結晶材料のためレリーフの発生がある。KClと共に軟質でかつ脆い、加工し難い部類の結晶材料といえる。

加工条件の探索のため、ポリリッシャ、砥粒、および加工液の種々の組合せによって加工実験を行った。ポリリッシャにはSnなどの金属系、ピッチ系、およびクロス系を用いた。砥粒には、ダイヤモンドペースト（以下DPと略す）、 Al_2O_3 、 ZrO_2 、および SiO_2 を用いた。加工液には、純水、エタノール、グリセリン、DP用ルブリカント、フェリシアン化カリ、 NaOH 、およびこれらの混合液を使用した。グリセリン、エタノールは粘度とエッチング作用の調節の目的である。また、工作物を砥粒を懸濁した加工液中に浸して加工を行う、液中ポリッシング（Bowl Feed Polishing）についても実験を行った。前加工には Al_2O_3 の粒度2000、および4000の砥粒による湿式ラップ加工を用いた。

ZnSeでは加熱水蒸気による次のような反応が存在する¹³⁾。



ZnSeは水に不溶とされているが、加工実験では常温においてもこのような反応が発生していることが認められ、加工点での局部的発熱が関与しているものと考えられる。このため、水を弱い化学加工液として使用することが可能である。

加工実験結果を表3.6に示す。結果をまとめれば次の通りである。

ポリリッシャに関しては

(1) クロス、あるいは発泡ポリウレタンポリリッシャでは、レリーフが大きくポイドも発生しやすい。これは、レリーフによって強度の低い粒界部が浮き出され、その部分が欠損してゆくためと考えられる。

(2) Snポリリッシャでは、粒径 $0.05\mu\text{m}$ の Al_2O_3 砥粒を用いた場合の加工速度は、荷重 $0.16\text{kg}/\text{cm}^2$ で $4\mu\text{m}/\text{min}$ 程度であり、研磨能力は高いが傷が発生しやすい。Sn-Pb合金のポリリッシャはSnに比し軟らかく、研磨能力は低いが生上面が向上する。

表3.6 ZnSeのポリシ加工実験結果

ポリシヤ	砥粒・粒径	加工液	結果
クロスポリシヤ DUR NAP MOL	Al ₂ O ₃ 0.06μm および 0.3μm	純水	結晶レリーフが著しくディグが面全体に発生する
		エタノール	同上
		グリセリン+純水	同上
	ダイヤモンドベスト 3μm~1μm	ルブリカント (ストルーフ)	Al ₂ O ₃ と同等で、レリーフがある 研磨能力は大きい傷が発生し易い
		純水	同上
		ルブリカント+ 純水	同上 表面の光沢が多少良くなる
	SiO ₂ 0.1μm	純水	同上 傷の発生が著しい
		グリセリン+純水	同上 研磨速度は小さい
		NaOH 水溶液	結晶レリーフが著しい
	ZrO ₂ 0.1μm	NaOH 水溶液	同上
Al ₂ O ₃ 0.06μm	フェリシアンカ リ水溶液	同上	
発泡ポリウ レタン	ダイヤモンドベスト 1μm	純水	結晶レリーフ、ディグが発生する 研磨速度は小さい
		ルブリカント	同上
	ZrO ₂ 0.1μm	純水	研磨能力が小さく、傷が発生し易い

表3.6 (続)

発泡ポリウ レタン	ZrO ₂ 0.1μm	グリセリン+純水	同上
	Al ₂ O ₃ 0.06~ 0.3μm	純水	面全体に傷がつきやすい
Sn	ダイヤモンドベスト 1μm	ルブリカント	研磨能力が特に優れているが偶発的な傷が発生する
		エタノール	同上
		グリセリン+ ルブリカント	同上
Sn+Pb	ダイヤモンドベスト 1μm	ルブリカント	研磨能力はSnより劣るが面状態は良好である
		ルブリカント+ エタノール	同上 ただしポリシヤ温度上昇に伴い結晶レリーフが出現する
	ダイヤモンドベスト 0.5μm	ルブリカント+ エタノール	優れた面が得られるが研磨能力は小さい
	Al ₂ O ₃ 0.3μm	純水	微細なスクラッチよりなる面であり、偶発的なディグの発生がある。
ピッチ (K3)	ダイヤモンドベスト 1μm	ルブリカント	クロス、Snポリシヤより面あらかさは優れているが傷が大きい
		純水	同上
ピッチ (K6)	ダイヤモンドベスト 1μm	ルブリカント	研磨能力が小さくポリシヤの消耗が早い
ピッチ (KR5)	ダイヤモンドベスト 1μm	ルブリカント	同上

表3. 6 (続)

ピッチ (K4+ KR4)	ダイヤモンドペースト 1 μ m	ルブリカント	良好な面であるが傷が発生し易い
		ルブリカント+ 純水	同上
ピッチ (K4)	ダイヤモンドペースト 1 μ m	ルブリカント	良好な面を得ることができると多少傷が発生する
		エタノール	同上
		純水	同上
	Al ₂ O ₃ 0.06 μ m	純水	砥粒の凝集による傷が発生し易い
エタノール		同上	
ピッチ (K4+ 蜜ろう)	ダイヤモンドペースト 1 μ m	ルブリカント	光沢のある優れた面が得られる
	ダイヤモンドペースト 0.5 μ m	ルブリカント	安定した優れた面が得られる 研磨能力は小さい
		エタノール	同上
		ルブリカント+ 純水	同上
ピッチ (K4+ 蜜ろう)	Al ₂ O ₃ 0.3 μ m	純水 (液中ポリシ)	安定した優れた面を得ることができると研磨能力は小さい
		ZrO ₂ 0.07 μ m	純水 (液中ポリシ)
	SiO ₂ 0.06 μ m	純水 (液中ポリシ)	優れた面状態であるが局部的に傷の発生がある
		グリセリン+純水 (液中ポリシ)	優れた面であるが研磨能力は微小である

表3. 6 (続)

Sn	SiO ₂ 0.06 μ m	グリセリン+純水 (液中ポリシ)	同上
	Al ₂ O ₃ 0.06 μ m	純水 (液中ポリシ)	同上

(3) ピッチポリリッシャでは良好な面を得やすいが、硬さの選定が重要である。ピッチへの蜜ろうの混入は仕上面の向上に寄与することが経験的に知られており¹⁴⁾、混入前に比し研磨能力は低下するが傷は少なくなる。軟質材料の加工ではピッチの粘弾性的性質が過度に作用して、加工面にポリリッシャが粘りつくように働いて傷を発生させる場合があると見られ、蜜ろうはピッチに比し粘性が小さいため、ピッチの粘性を制御する効果を持つものと推定される。

砥粒に関しては

(1) 金属ポリリッシャ、ピッチポリリッシャでは、全般的にダイヤモンド砥粒の使用によって、良好な仕上げ面が得られる。

(2) Al₂O₃、ZrO₂、SiO₂ は通常のポリシ加工では傷を発生しやすい。これは、研磨能力が小さいため弱い結晶粒界のみを痛めやすいことと、加工液が乾いた場合に砥粒が凝集しやすいことによると考えられる。

加工液に関しては

(1) アルカリ、フェリシアン化カリを加工液に加えた場合、エッチング作用によりレリーフが著しくなる。図3. 10にフェリシアン化カリにより過度にエッチングされた面を示す。一方、傷の発生に対しては大きい改善は見られない。

(2) グリセリンによって粘度を調整した純水と、Al₂O₃、SiO₂ 砥粒を用いた液中ポリシ加工は、加工量は極めて小さいが全般に仕上面は良好である。

加工面においては、まずボイドの除去を考慮する必要がある。一般的なボイドは図3. 11(a)、あるいは(b)のようであり、前加工面で多く発生している。(c)はフェリシアン化カリによってエッチングを行った面であり、素材の脱落は粒界に多く発生していることが認められる。なお、(d)のように素材中に存在したと見られるものもある。

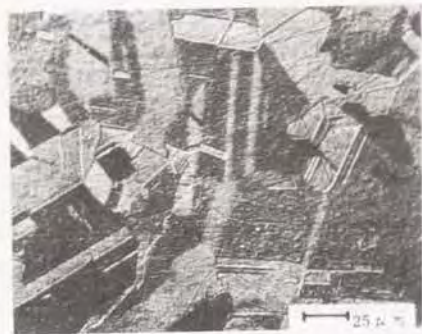


図3. 10 フェリシアン化カリにより過度にエッチングされた
ZnSeの加工面

このため、まず前加工におけるポイド発生層を除去する必要がある。この目的には弾性変形が小さく、研磨能力の高い金属系ポリリッシャが適しており、図3. 12はSnポリリッシャとDPによる加工面で、ポイドがほぼ除去されている。仕上げ面の点ではSn+Pbポリリッシャが一層望ましい。

主として仕上げ面あらかの観点より、加工条件を次の6種類に絞ることとした。

(a) DURクロスポリリッシャ、粒径1 μmのDP、およびストルーアス社青色ルブリカントによる加工

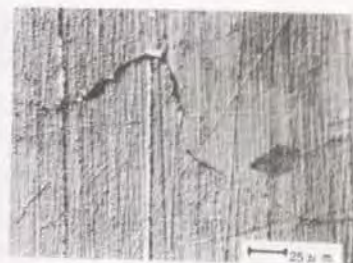
(b) Sn+Pbポリリッシャ、粒径1 μmのDP、およびストルーアス社青色ルブリカントによる加工

(c) K4ピッチポリリッシャ、粒径1 μmのDP、およびストルーアス社青色ルブリカントによる加工

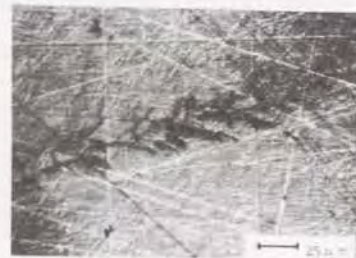
(d) (c)の加工後、フェリシアン化カリによる2分間のエッチング加工

(e) K4ピッチ+蜜ろうポリリッシャ、粒径0.5 μmのDP、およびエタノールによる加工

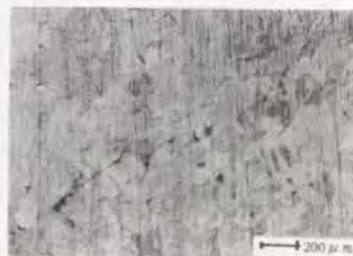
(f) K4ピッチ+蜜ろうポリリッシャ、粒径0.3 μmのAl₂O₃、および純水による液中ポリシ加工



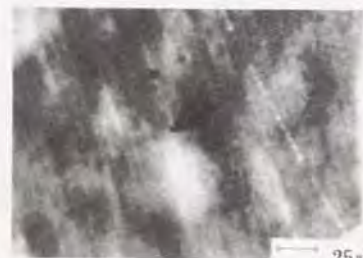
(a) 加工面に発生した空孔



(b) 前加工によって発生したと見られる空孔



(c) 空孔部のエッチング結果



(d) 素材の欠陥による空孔

図3. 11 ZnSeのポリシ加工面に見られる素材の部分的脱落
(ノマルスキー顕微鏡写真)

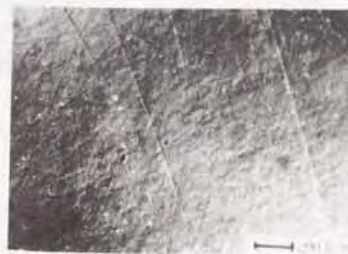


図3. 12
ZnSeのSnポリリッシャ
による空孔部の除去

各々の加工面を図3. 13に示す。また、仕上げ面あらしさを図3. 14に示す。

仕上げ面あらし測定値としては(e)が良く、他はほぼ等しいが、各々の加工面は特徴を有している。(a)のクロスポリリッシャによる加工面はレリーフが大きい。(b)の金属ポリリッシャでは、条痕より成る仕上げ面となっている。(c)、(e)のピッチポリリッシャによる加工面は、比較的異方性のない面となっている。エッチング後の(d)の面では結晶の境界が見られるが、(f)の液中ポリシ加工面では結晶境界はさらに明瞭である。これは、砥粒の研磨能力が小さいためと、純水によるエッチングが進行しているためと考えられる。

以上の各加工面について、加工変質層、および吸収率の測定を実施して評価を行った。

3. 3. 2 ZnSe加工面の加工変質層と吸収

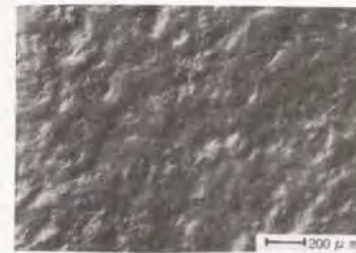
表面吸収は加工によって発生する加工変質層に関係すると考えられる。このため、表面に残留する加工ひずみを、X線回折装置(フィリップスPW1130)を用いて311面の回折の半値幅より求めた。各加工面に対する測定結果を図3. 15に示す。

機械的な研磨作用が主体と考えられる、Sn+Pbポリリッシャ、クロスポリリッシャでは加工ひずみが大きい。一方、ピッチポリリッシャによるものは相対的に小さい。また、エッチングによる加工変質層の除去の効果も認められる。

次に、加工面にCO₂レーザー光を照射し、カロリメータ法により吸収率を求めた。測定結果を図3. 16に示す。

吸収が最も小さい加工面は、ピッチ+蜜ろうポリリッシャ、0.5μm径DP、エタノール加工液によるものであり、この面は仕上げ面あらし、X線回折の半値幅においても小さい。また、半値幅が大きいSn+Pbポリリッシャ、クロスポリリッシャでは吸収が大きい。このように、表面吸収はほぼ加工変質層の大小に関係していると考えられるが、フェリシアン化カリによるエッチング面は、半値幅の測定結果と逆に吸収が非常に大きい。これは、フェリシアン化カリとZnSeとの反応生成物が表面に存在し、吸収の原因となっているものと見られる。

以上の結果から、基本的に良好な仕上げ面あらしを得ることが加工変質層を小さくすることにつながり、表面吸収も低減されることが判明したが、エッチング面の例に見る



(a) DURクロス、DP 1μm、
ルブリカント



(b) Sn+Pb、DP 1μm、
ルブリカント



(c) K4ピッチ、DP 1μm、
ルブリカント



(d) (c)の加工後
フェリシアン化カリ 2分間エッチング



(e) K4ピッチ+蜜ろう、DP 0.5μm、
エタノール



(f) K4ピッチ+蜜ろう、アルミナ
0.3μm、純水

図3. 13 ZnSeのポリシ加工面(ノマルスキー顕微鏡)

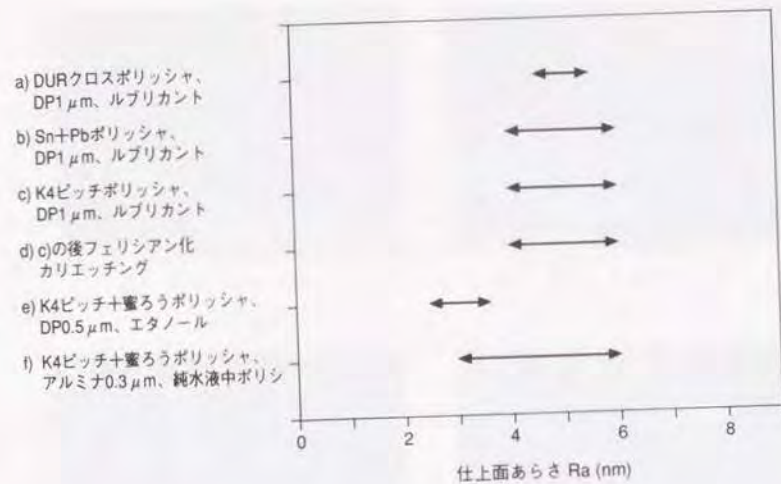


図3. 14 ZnSeポリシ加工面の仕上面あらし

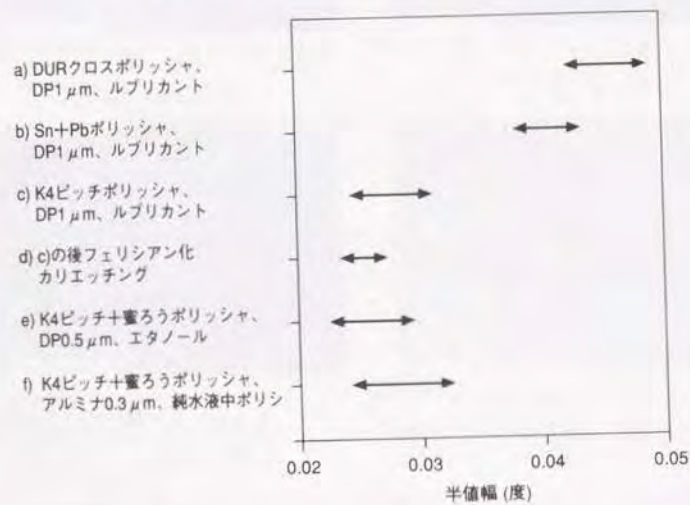


図3. 15 ZnSeポリシ加工面のX線回折測定結果

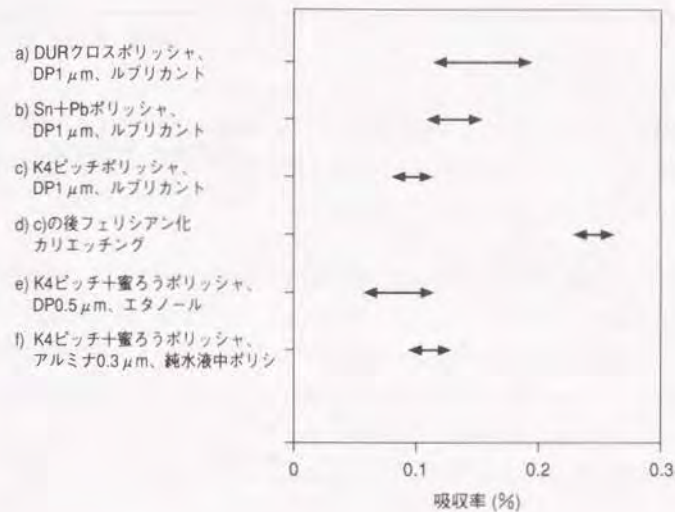


図3. 16 ZnSeポリシ加工面の吸収率

($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$)

カロリメータ法

試料: 直径 2.5 mm

厚さ 5 mm

ように、加工において発生した表面の生成物も吸収に大きい影響を与えるので、コンタミネーションにも留意する必要がある。

加工工程と吸収の関係を知るため、同一の試料に順次加工を加え各段階において吸収の測定を行った。図3. 17はラップ加工に引き続いて順次粒径 $3 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$, $0.25 \mu\text{m}$ のDPによって加工を行った場合の、加工深さ(とりしろ)と吸収率の関係を示す。

ラップ加工面に粒径 $3 \mu\text{m}$ のDPによる加工を加えることによって吸収が低下して行くが、試料1では終段で何等かの原因により再び増加している現象が見られる。さらに粒径 $1 \mu\text{m}$, $0.25 \mu\text{m}$ の加工によって吸収はなお減少するが、粒径 $0.25 \mu\text{m}$ の加工では前加工面を約 $3 \mu\text{m}$ 取り去ることで吸収の低下はほぼ飽和しており、表面吸収を発生している層は、

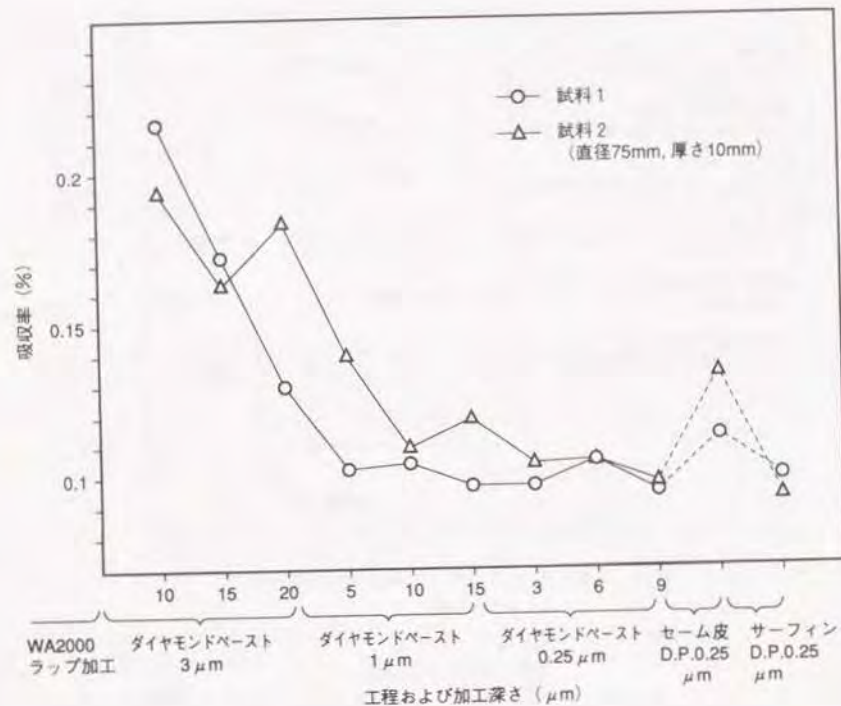


図3.17 ZnSeの工程と加工深さによる吸収率の変化
 $(\lambda = 10.6\mu\text{m})$
 ポリッシャ: ピッチ+蜜ろう
 加工液: 純水

表面より 3μm以内の深さとする事ができる。

以上の加工の後、セーム革と0.25μm DPによって表面を手研磨したところ、吸収は上昇した。また、その後のクロスポリッシャ(サーフィン)による手研磨では復元した。セーム革による加工では、当りは軟らかいが、研磨力が小さいため表面の塑性流動を生じたものと考えられ、このことから、表面吸収は表層のごく近傍の状態が鋭敏に作用していると推定される。

3.3.3 KClのポリシ加工

KClはZnSeよりさらに軟く、かつ吸湿性を有するため一層加工が困難であり、また加工後の洗浄にも特別の考慮を要する。古くは石灰、粘土によって研磨がなされており¹⁵⁾、またグリコール、HClによるメカノケミカルポリッシングも試みられている¹⁶⁾。

加工では軟らかいために傷の発生が著しい。傷の発生は基本的に仕上げ面を劣化させるが、一旦大きい傷が発生すると、その周辺が欠損して脱落片がまた加工面を傷つけ、加速度的に傷が進行する。このため、できるだけ粒度の小さい砥粒を用い、加工能力の不足を化学的作用で補う方法が考えられる。KClはHClでもエッチングされるが加工装置を痛める点で問題があり、グリコール系材料の方が望ましい。グリコール濃度が高いとエッチングが著しく、図3.18のように結晶粒が現れるので適正に希釈する必要がある。



図3.18 加工液によるエッチング作用が強すぎる場合のKCl加工面

ポリッシャ: マイクロクロス
 砥粒 : 0.06μm Al₂O₃
 加工液 : プロピレングリコール

KC1の加工条件の探索のため、各種のポリッシャ、砥粒、加工液の組合せにより加工実験を行なった。ポリッシャにはビッチおよびクロス、砥粒にはDP、 Al_2O_3 、 SiO_2 を用いた。また加工液には、エタノール、およびプロピレングリコール、グリセリン、トリメチレングリコールの20-25%エタノール希釈液を用いたほか、加工液の粘度調節の目的で澱粉、エポキシ樹脂溶液を加える試みを行なった。また、表面の溶解の防止のためKC1飽和水を用いることも試みた。

結果を表3.7に示す。結果をまとめれば次のようになる。

ポリッシャに関しては

(1) ビッチポリッシャでは、加工面がポリッシャと接触してビッチによる引きかき傷の発生する場合がある。ビッチがK7+KR5のように軟らかく表面が流動する場合にこのような現象が発生すると見られ、ある程度の硬さが必要である。

(2) クロスポリッシャにおいても、NAPのように軟らかい場合には繊維に砥粒が凝集して傷が発生するため、DURのように繊維が短く適度の硬さを持ち、研磨能力を有する方が望ましい。

砥粒に関しては

(1) SiO_2 は概して仕上げ面は良いが研磨能力が小さいため、形状の修正が困難である。

(2) 従って、 Al_2O_3 、DPが適しているが、加工液によって傷の発生度合が異なるのでその選択が重要である。

加工液に関しては

(1) エタノールのみでは粘度が低いため、潤滑性が不足し傷をつけやすい。

(2) グリセリンは粘度が高過ぎまたエッチング速度が過大であり、トリメチレングリコールは粘度が低い、やはりエッチング速度が高い。エッチング作用が大きすぎると、加工面に存在する傷の部分がエッチングされることによって、さらに近傍の欠損を発生し傷が減少しない。プロピレングリコール希釈液が適度の粘度とエッチング作用を有している。

(3) 液中ポリシングは加工液のエッチング作用が大きくなるため、その制御が難しい。

(4) 澱粉、エポキシ樹脂溶液、KC1飽和液は仕上面向上への効果が認められない。

表3.7 KC1のポリシ加工実験結果

ポリッシャ (メーカー)	砥粒・粒径 (メーカー)	加工液	結 果
ビッチ (九重K7 +KR5)	ダイヤモンド 0.5 μ m (ストル-7S)	エタノール	スクラッチは減少するがビッチによる引きかき傷が発生する
		エタノール+プロ ピレングリ コール	安定した光沢のある面となるがスクラッチが面全体に発生することがある
	SiO_2 0.02 μ m (不現)	エタノール+プロ ピレングリ コール	加工能力は低い砥粒がほとんど凝集せず、深い傷がなく安定した面となる
A1 ₂ O ₃ 0.06 μ m (メー)	A1 ₂ O ₃ 0.06 μ m (メー)	エタノール	砥粒の凝集が発生し、面全体に深い傷が発生白くくもる
		エタノール+プロ ピレングリ コール	A1 ₂ O ₃ 濃度の高い場合は砥粒の凝集による傷が発生 低い場合は光沢のある面が得られるがビッチによる傷が発生
		エタノール+グリ セリン	スクラッチがエッチング効果により拡大する
ビッチ (九重 K5)	ダイヤモンド 0.5 μ m (ストル-7S)	エタノール	ビッチによる深い傷が発生
		エタノール+プロ ピレングリ コール	ビッチK7+KR5とほぼ同等
	SiO_2 0.02 μ m (不現)	エタノール+プロ ピレングリ コール	ビッチK7+KR5とほぼ同等
エタノール+ハイ ビスコ-104 (澱粉)		スクラッチの発生が多い	
		エタノール+エ キ	スクラッチが広がり、面が白くくもる

表3. 7 (続)

ピッチ (九重 K5)	A1 ₂ O ₃ 0.06 μ m (メー)	エタノール+プロ ピレングリコール	A1 ₂ O ₃ 濃度の高い場合はピッチK7+K R5とほぼ同等 低い場合は光沢のある面となり、スクラッチ が消失する
		エタノール+トリ メチレングリコー ル	ピッチによる傷が減少 エッチング効果によりスクラッチが深くなる
		プロピレングリ コール+KCl飽和 水	スクラッチが発生し面全体が白くくもる
	A1 ₂ O ₃ 0.3 μ m (メー)	エタノール+プロ ピレングリコール	面全体にスクラッチが発生
	A1 ₂ O ₃ 0.3 μ m (メー) 液中ポリッシング	エタノール+プロ ピレングリコール	ピッチによる傷が減少するが光沢は良くない 深いスクラッチも発生する
A1 ₂ O ₃ 0.06 μ m (メー) 液中ポリッシング	エタノール+プロ ピレングリコール	光沢のある面が得られる ピッチによる傷が減少 研磨時間が長くなるとエッチングによるレリ ーフが発生	
クロス (ストルー アス DUR)	ダイヤモンドペースト 0.5 μ m (ストルーアス)	エタノール	スクラッチは少ないが表面がやや白くくもる
		エタノール+プロ ピレングリコール	光沢のある面が得られ、表面の傷が消失し、 スリークも浅く細くなる
	A1 ₂ O ₃ 0.06 μ m (メー)	エタノール+プロ ピレングリコール	A1 ₂ O ₃ 濃度の高い場合は砥粒の凝集によ るスクラッチが発生 低い場合は光沢のある面が得られるがスクラ ッチの発生もある

表3. 7 (続)

クロス (ストルー アス MOL)	ダイヤモンドペースト 0.5 μ m	エタノール+プロ ピレングリコール	傷が多く光沢が悪い
	A1 ₂ O ₃ 0.06 μ m (メー)	エタノール+プロ ピレングリコール	面全体に細かいスクラッチが発生
クロス (ストルー アス NAP)	A1 ₂ O ₃ 0.06 μ m (メー)	エタノール+プロ ピレングリコール	砥粒の凝集により深い傷が発生する

また、ポリッシャの形状修正はインプロセスで実施しないと、ポリッシャと加工面の間に形状の差異がある場合、局部的な当りによって加工面のダメージが大きくなる。このため、NaCl、またはKCl円板のダミーを用い、常に工作物と同時にダミーの加工を行い、ポリッシャの回転径方向に対するダミーの中心位置の移動によって、ポリッシャ形状を修正するようにした。

さらに、KClは吸湿性を有するため加工後の洗浄が問題となる。加工液に用いたグリコールは粘度が高いため洗い落としが困難で、また傷の点から機械的清拭も実施が難しい。洗浄が一様でないとその間にグリコールによるエッチングが進行し、表面が不均一に加工されてしまう。このため、加工後のKClを室温以上に温め、フロン蒸気中でフロンジェットの洗浄を行う方法を用いた。しかしながら、フロンの使用については今後環境問題から検討が必要である。

以上の実験結果を踏まえ、KClの加工条件として以下を選定した。

(1) DURクロスポリッシャ、粒径0.5 μ mのDP、プロピレングリコールの20%エタノール希釈液

(2) K5ピッチポリッシャ、粒径0.06 μ mのA1₂O₃砥粒、プロピレングリコールの20%エタノール希釈液

以上の2種類について、ポリシ加工時の面圧を 0.2 g/mm^2 、 1 g/mm^2 として加工を行った。また、化学的作用を持たず砥粒の機械的作用が中心となる場合として、次の加工を比較した。

(3) K5 ピッチポリリッシャ、粒径 $1 \mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒、エタノール加工液、面圧 1 g/mm^2

各々の加工面を図3. 19 (a) ~ (e) に示す。(a) の機械的ポリシ加工面を除き、仕上面あらさは $Ra 17 \sim 34 \text{ nm}$ の範囲にある。

3. 3. 4 K C 1 加工面の評価

各々のポリシ加工面について、吸収率の測定を実施した結果を図3. 20 に示す。

クロスポリリッシャとピッチポリリッシャでは、低い吸収率を与えるポリシ加工時の面圧が異なり、ピッチポリリッシャでは 0.2 g/mm^2 、クロスポリリッシャでは 1 g/mm^2 でそれぞれ吸収率が小さくなる。クロスポリリッシャでは面圧の小さい場合、砥粒がポリリッシャ面に埋没された状態になり切れ刃として十分作用せず、ポリリッシャで加工面を塑性変形させるような状態となるためと推定される。いずれの場合でも適合した条件下では、エタノール加工液による機械的なポリシ加工面の $1/3$ 程度の吸収となる。

第3. 4節 屈折光学素子の製作

加工実験結果にさらに改良を加えてポリシ加工条件を設定し、各種の屈折光学素子の試作を実施した。製作した素子のレーザー光に対する損傷を評価し、レーザー装置に実装して運転試験を行った。

3. 4. 1 ポリシ加工条件の設定

素子の製作においては、反射光学素子と同様にポリシ加工を2段階に分け、第1段階



(a) K5ピッチ、DP $1 \mu\text{m}$ 、
エタノール、 1 g/mm^2



(b) DURクロス、DP $0.5 \mu\text{m}$ 、
プロピレングリコール+エタノール、 1 g/mm^2



(c) DURクロス、DP $0.5 \mu\text{m}$ 、
プロピレングリコール+エタノール、 0.2 g/mm^2



(d) K5ピッチ、アルミナ $0.06 \mu\text{m}$ 、
プロピレングリコール+エタノール、 1 g/mm^2



(e) K5ピッチ、アルミナ $0.06 \mu\text{m}$ 、
プロピレングリコール+エタノール、 0.2 g/mm^2

図3. 19 K C 1 のポリシ加工面 (ノマルスキー顕微鏡)

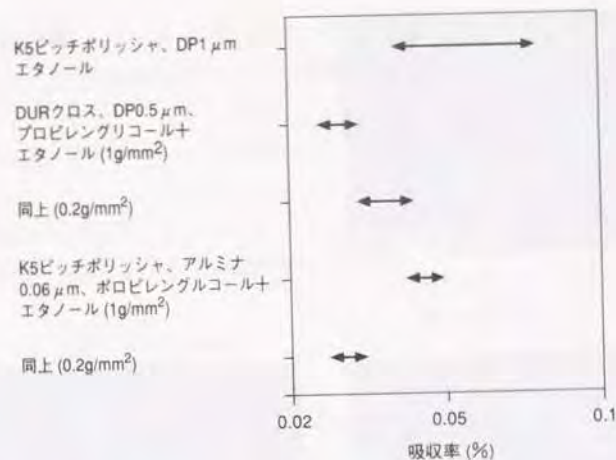


図3. 20 KC1ポリシ加工面の吸収率
($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$)
カロリメータ法
試料: 直径 2.5 mm
厚さ 5 mm

では前加工において発生している欠陥の除去と光学面の形状精度の向上を行い、第2段階では仕上げ面あらさの向上と加工変質層、吸収率の低減を行うこととした。

ZnSeのポリシ加工においては次の条件を設定した。

第1段階

ポリッシャ: Sn+Pb (50:50)
砥粒: ダイヤモンド、粒径 $1 \mu\text{m}$
加工液: ストルーアス社ルブリカント

第2段階

ポリッシャ: K4ピッチ+蜜ろう (10%重量比)
砥粒: ダイヤモンド、粒径 $0.5 \mu\text{m}$
加工液: 純水+エタノール (10%)

第1段階で結晶界面のディグが取り去られる。第2段階では純水の弱いメカノケミカル作用を用いるようにした。エタノールはその作用の調整の目的である。球面の加工においては、ピッチにはポリッシャとのなじみの点からやや軟らかいK5を用いた。

異なる厚さの試料に対し、第1段階、第2段階の各々の加工面について、吸収率を測定した結果を図3. 21に示す。第1段階の加工面では、表面吸収は $2\beta_s = 7.3 \times 10^{-4}$ であり、第2段階では第1段階の加工の約 $1/6$ である $2\beta_s = 1.2 \times 10^{-4}$ まで低減された。

加工面の顕微鏡写真と、仕上げ面あらさの測定結果を図3. 22に示す。仕上げ面あらさは $R_a = 2 \text{nm}$ が得られた。

KC1のポリシ加工においては次の条件を設定した。

第1段階

ポリッシャ: K4ピッチ+蜜ろう (5%重量比)
砥粒: ダイヤモンド、粒径 $1 \mu\text{m}$
加工液: エタノール (9.8%)

第2段階

ポリッシャ: K5ピッチ+蜜ろう (5%重量比)
砥粒: ダイヤモンド、粒径 $0.25 \mu\text{m}$
加工液: エタノール (99.8%) : 100ml
プロピレングリコール: 5ml

第1段階ではピッチを前節の実験より硬くし、粘性を下げるため蜜ろうを加えた。エタノール液に含まれる若干の水分は化学的作用として寄与すると考えられる。この段階では仕上げ面あらさは $R_a = 7\text{--}10 \text{nm}$ である。

第2段階ではプロピレングリコールの濃度を低くし、かつダイヤモンド砥粒を用いて機械的研磨作用の効果を重視した。化学的作用が強い場合、仕上げ面あらさ、形状精度の品質は低下する傾向にあり、高精度の加工では原則的に機械的研磨作用を中心とし、化学的作用は補助に留める必要があると考えられる。また、加工環境は吸湿の防止のため湿度を40%以下とした。

厚さの異なる試料について、第1段階、第2段階の各々の加工面に対して、吸収率を

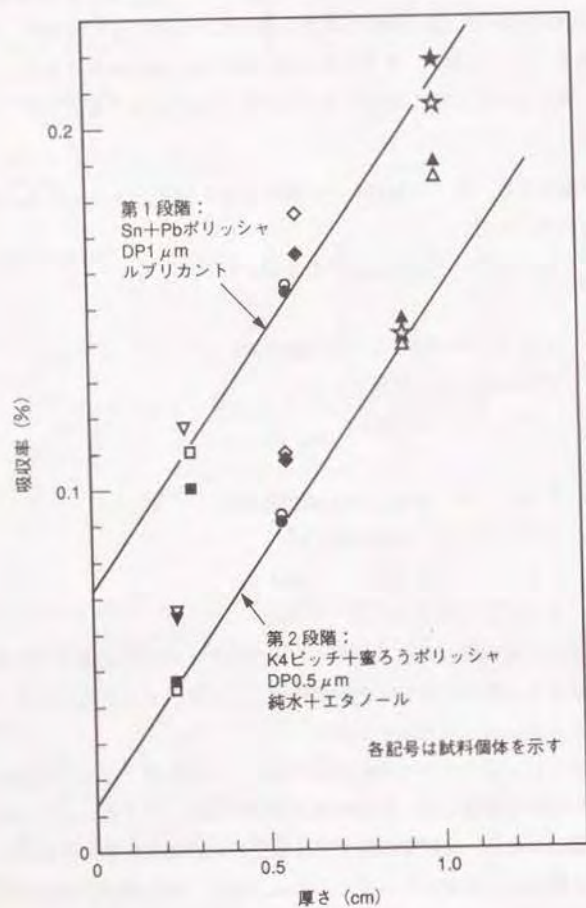


図3. 21 ZnSeの各ポリシ加工段階における試料厚さと吸収率の関係

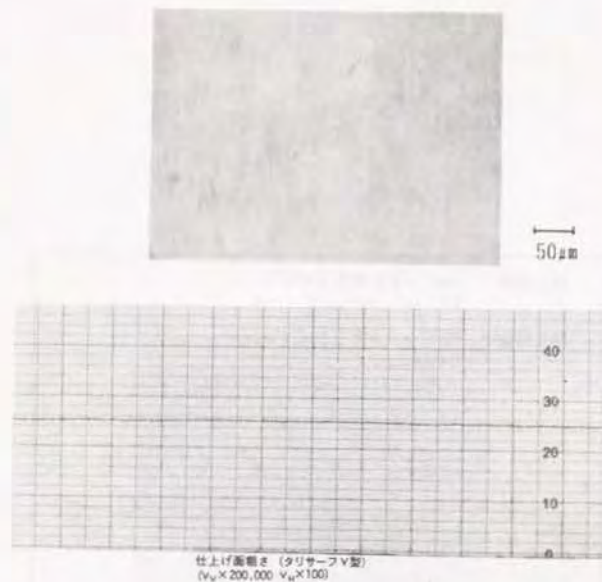


図3. 22 ZnSe仕上面のノマルスキー顕微鏡写真、および仕上面あらさ測定結果

測定した結果を図3. 23に示す。表面吸収は、第1段階のポリシ加工では $2\beta s =$ 約 5.5×10^{-4} であるが、第2段階の加工面では $2\beta s = 1 \times 10^{-4}$ 程度まで低減することができた。

加工面の顕微鏡写真、および仕上げ面あらさの測定結果を図3. 24に示す。仕上げ面あらさは $Ra 6nm$ が得られた。

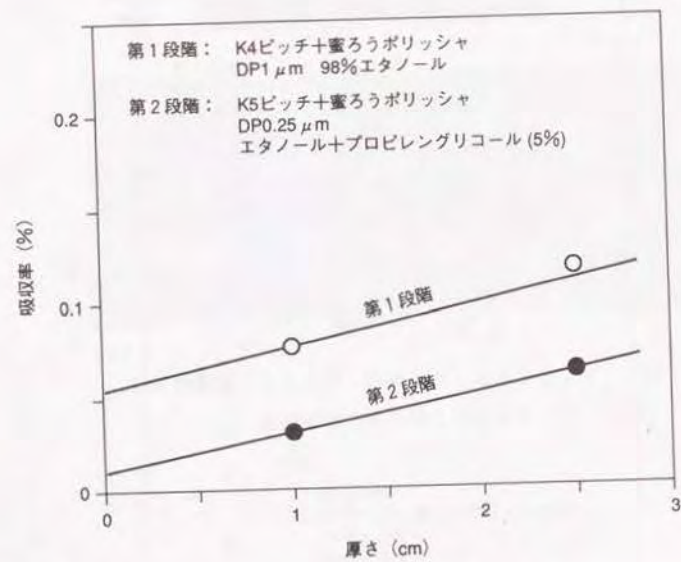


図3.23 KC1の各ポリシ加工段階における
試料厚さと吸収率の関係

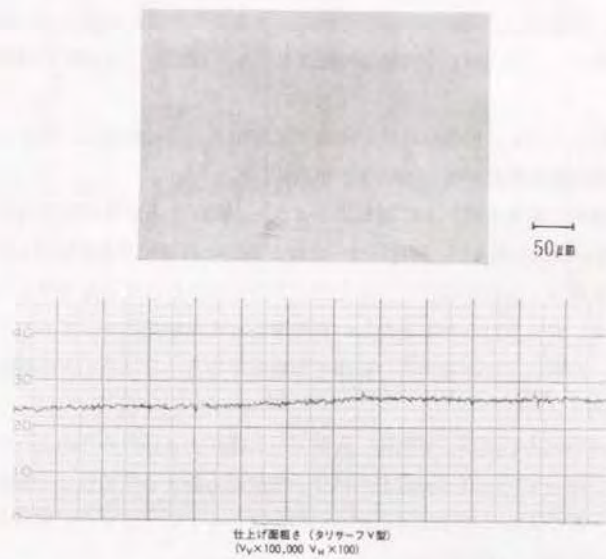


図3.24 KC1仕上げ面のノマルスキー顕微鏡写真
および仕上面あらさ測定結果

3. 4. 2 レーザ光に対する損傷

第2章に述べたレーザ光照射損傷しきい値測定装置を用い、屈折光学素子に損傷を生じるパワー密度に関して実験を行った。

屈折光学素子では、一般に反射防止などの目的で表面に誘電体膜を蒸着して用いる。ここでは下記の反射防止コーティング (AR) を施した試料を用いた。

ZnSe : PbF₂ / ThF₄ の2層よりなる反射防止膜

KCl : As₂S₃ / PbF₂ / As₂S₃ の3層よりなる反射防止膜

膜厚を変化させて異なる吸収率の試料を作成し、それぞれの照射損傷しきい値を求めた。照射は1分間とし、低いパワー密度より順次ステップ状にパワー密度を増加して損傷を観察した。

結果を図3. 25に示す。損傷は母材が破壊する場合と、母材破壊には至らないが、膜の着色などの表面膜の劣化が生じる場合とがある。

30~70kW/cm²の照射に耐える試料も存在し、ZnSe、KClとも吸収率の大きいものは破壊が生じやすい傾向にあるが、照射パワー密度との間に明確な関係が見出しにくい。これはレーザ光を絞って照射するため、局部的に非常に大きい温度勾配を生じ、脆性材料であるZnSe、KClに対して甚だしい熱衝撃を加える結果になっており、熱衝撃破壊に対しては、1%以下である小さい範囲での吸収率の大小はほとんど影響を与えないためと考えられる。

通常の出光窓あるいはレンズでは、入射ビーム径が大きいためこのような極端な温度勾配はなく、従って、20kW/cm²以上のパワー密度にも耐える可能性は十分あると考えられる。なお、KClでは破壊には必ずへき開が伴っていた。また、破壊の開始する面は入射側、射出側のいずれの場合もあり定まっていない。

3. 4. 3 レンズ、出力取出窓等の試作

実験結果に基づき、ZnSe、KClのレンズ、出力取出窓、ビームスプリッタの試作を行った。製作した光学素子の例を表3. 8に示す。

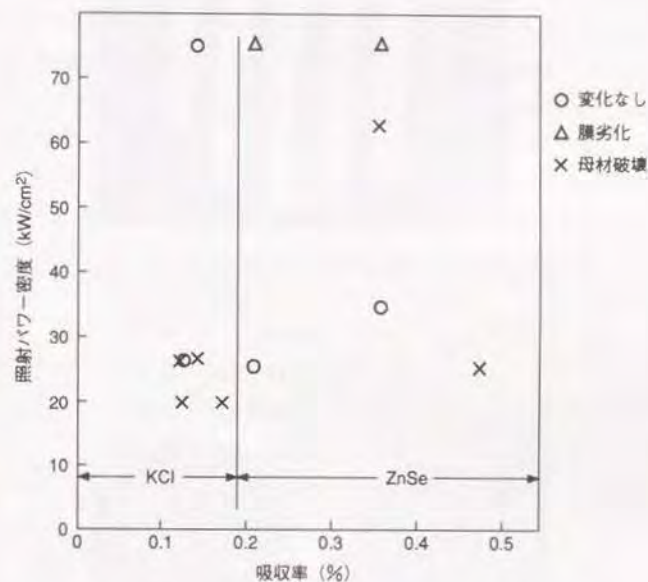


図3.25 屈折光学素子のレーザ光照射損傷しきい値の測定結果

直径：25mm
厚さ：3mm
反射防止膜つき

表3. 8 試作した屈折光学素子の例

素材	種類	外径 (mm)	厚さ (mm)	コーティン グ	目的	吸収率測定結果 (%)
ZnSe	焦点距離 124mm プラノ コンベッ クス レンズ	75	エツテ 10.1	PbF ₂ AR	5kW レーザ 加工用 レンズ	0.21
	75	10.2		0.22		
	75	10.0		0.21		
KCl	平面	100	25	AR As ₂ S ₃ / PbF ₂ / As ₂ S ₃	10kW レーザ 出力 取出窓	0.15
		75	10	AR 2%	5kW レーザビーム スプリッタ	0.08

図3. 26は完成したKCl平面窓のレーザ干渉計による形状測定結果であり、 $1/30$ ($\lambda=10.6\mu\text{m}$)以下の平面度となっている。また、製作した各種の光学素子の外観を、反射光学素子とともに図3. 27に示す。

試作したZnSeレンズは5kWレーザ加工システムに使用し、集光特性、加工結果とも良好であった。使用に伴い穴があくなどの破壊を生じた素子があったが、異物の付着が認められ、局所的な吸収の上昇を生じたためと考えられる。約6ヵ月の使用後の測定



図3. 26 KCl平面窓のレーザ干渉計による形状測定結果
(直径100mm)



図3. 27 試作した各種のCO₂レーザ用光学素子

では、0.14-0.2%程度の吸収率の増加を生じていたが、焦点距離の変化、内部ひずみの発生は認められなかった。

KC1出力取出窓は10kWレーザに取り付け、安定した出力を取り出すことができた。長期間の試験では図3.28に示すように、実装日数が長くなるに従い吸収率が増加している。なお実装日数そのものが運転時間ではない。観察の結果では膜などの色には変化はなく、赤外透過スペクトルにも変化が認められなかった。このため、吸収の増加は空気中の水分の吸着によるものと考えられ、KC1では装置上で周囲雰囲気を乾燥状態に保持することが必要と考えられる。なお、実装後の測定では、真空側に引かれた結果として曲率65~70m程度の永久変形が発生した。

ZnSeでは異物の付着の防止を行うことで、またKC1では使用環境を適正にすることで、さらに大出力の20kW級のレーザにも対応できるものと考えられる。

研究結果に基づいて光学素子の生産が開始され、多数のレーザ、および加工システムに実用化された。

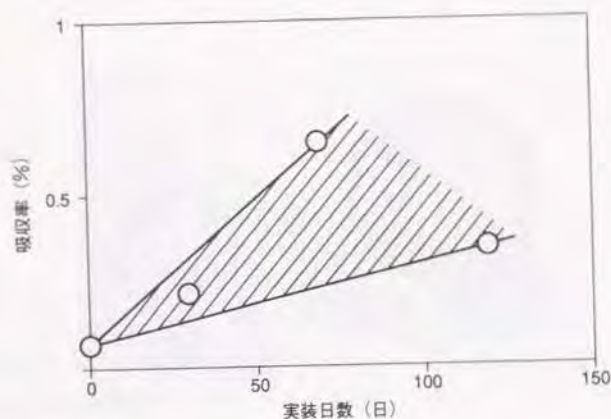


図3.28 KC1出力取出窓の実装日数に伴う吸収率の変化

第3.5節 総括

CO₂レーザ用屈折光学系材料としてZnSe、KC1を選定し、そのポリシ加工についての研究を実施した。まず素子の使用において発生する損傷を分類し、材料との関連を検討した。屈折光学素子では、特にレーザ光の吸収による発熱に伴う、幾何学的形状および屈折率の変化によって発生する光学ひずみが問題となる。このため、材料との関係において光学ひずみの評価を行った。

吸収には、素材バルクの吸収と、加工などに伴う表面吸収があるが、低減のためには、素材および工程の各段階での吸収率を厳密に評価する必要がある。このため、カロリメータ法、および平衡法による吸収率測定装置を製作した。

ZnSe、KC1は軟質脆性材料であり、さらに後者は吸湿性を有するので難加工性の材料である。また、表面のポリシ加工においては、表面吸収の低下が最大の課題となる。このためポリシヤ、砥粒、および加工液の種々の組合せによって加工実験を行った。特に加工変質層の低減のため、メカノケミカルな作用を加えることを検討した。各材料について数種の加工条件を選定し、吸収率の測定により加工面を評価した。また、ZnSeについてはX線回折による加工変質層の測定を行い、吸収率と対比した。

実験結果に基づき、各材料に対し2工程のポリシ加工条件を設定し、仕上面の向上と吸収率の低下を実現した。本結果を基盤として屈折光学素子の試作を実施し、レーザ装置に取り付けて実用試験を行った。

結果をまとめ以下に示す。

(1) 熱的破壊に対する屈折光学系材料の理論的な性能の評価では、ZnSeなどの半導体材料が高く、KC1などのアルカリハライド系材料は低い。

(2) 光学ひずみ量の理論的な検討では、ZnSeは温度上昇による屈折率変化が大きいため大きく、KC1は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い。

(3) レーザ光の透過に伴うビーム形状、および透過前後の波面の測定では、吸収率、

照射パワー密度の増加によって光学ひずみが増大することが実証された。

(4) 製作した吸収率測定装置を用いた測定によれば、一般に得られる素材では厚さ1cmの光学素子の場合、ZnSeでは表面吸収とバルクの吸収がほぼ等しく、KClでは表面吸収の方が大きくなる結果を得た。従って、加工では表面吸収の低下が課題であることが確認された。

(5) ZnSeの加工では、前加工において結晶界面の欠落が多く発生しており、まずSn-Pbなどの金属系ポリッシャを用いてこれを除去した。各ポリシ加工面の測定結果では、仕上面あらさと加工変質層、および吸収率の大小はほぼ対応していることが認められた。しかしながら、フェリシアン化カリによるエッチング面は、加工変質層は小さくなるが表面の反応生成物と推定される原因によって吸収率は増大しており、コンタミネーションにも留意する必要がある結果を得た。吸収率は仕上げの進行につれ減少して行くが、セーム革でこするようなことでも増加し、表面吸収には表層の状態が敏感に影響していることが判明した。

(6) KClのポリシ加工では、過度な化学的作用は傷の発生の原因になり、高精度の加工では機械的研磨作用を重視し、化学的作用は補助的に用いる必要があることが明らかになった。また、ポリッシャの修正は機械上でインプロセスに行い、加工後の洗浄は溶剤のジェット洗浄によって行った。

(7) ZnSe、KClの各々について、機械的研磨作用を重点とした加工と、弱いメカノケミカル作用を加えた加工の2工程を設定した。後者では、ZnSeには純水、KClにはプロピレングリコールの5%エタノール溶液を加工液として用いた。これによって仕上面(表裏2面)の吸収率を

$$\text{ZnSe} : 1.2 \times 10^{-4}$$

$$\text{KCl} : 1 \times 10^{-4}$$

程度に低下させることができた。この吸収率は第1段階のポリシ加工の1/5~1/6でありバルクの吸収に比し十分小さい。なお、仕上面あらさはZnSeではRa2nm、KClではRa6nmを得た。

(8) 種々の吸収率を有する試料にレーザー光を絞って照射し、損傷を発生するパワー密度を求めたが、甚だしい熱衝撃を伴うため、相互の明確な関係は得られなかった。しかしながら、30~70kW/cm²の照射に耐える試料も存在した。

(9) 直径75~100mmのZnSe、KClのレンズおよび出力取出窓などを試作し、5-10kWレーザー装置に実装して、実用上安定した集光特性、あるいはレーザー発振を得ることができた。ZnSeでは異物付着により破壊したレンズ、KClでは実装日数の長期化に伴う吸収率の増大の現象も見られたが、それぞれ使用環境に対して考慮を行うことで対応し得るものと考えられる。結果は屈折光学素子の生産に適用され、多数のレーザーシステムが実用化された。

文 献

- 1) C. K. N. Patel : Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO₂. Phys. Rev. Lettr., 336A, 30, (1964)1187.
- 2) F. Horrigan, C. Klein, R. Rudko and D. Wilson : Windows for High-Power Lasers, Micro Wave, 8, (1969)68.
- 3) N. J. Brown : Fabrication of Laser Optics at Lawrence Livermore Laboratory, NBS Special Publication, 435, (1975)3.
- 4) C. B. Willingham : Advanced Techniques for Improving Laser Optical Surfaces, AFCRL-TR-75-0225, Raytheon Company, (1975).
- 5) 宮田威男 : 大出力CO₂ レーザ用透明光学部品の開発、精密機械、49, 10, (1983) 1333.
- 6) H. K. Bowen, R. N. Singh, H. Poscn, A. Armington and S. A. Kultin : Fabrication and Properties of Polycrystalline Alkali Halides, Mat. Res. Bull., 8, (1973)1389.
- 7) T. F. Deutsch : Laser Window Materials-An Overview, J. Electronic Materals, 4, 4, (1975)663.
- 8) 難波宏邦 : 透明光学部品 (1) ZnSe、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レーザー技術研究成果中間発表会論文集、(1983)273.
- 9) 山口剛司、一柳肇、村井重夫、西川武、柴田憲一郎、香門浩一 : ZnSe結晶欠陥の高温静水圧処理、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レーザー技術研究成果中間発表会論文集、(1984)112.
- 10) 桜木史郎、小谷晴夫 : 透明光学部品 II (KC1)、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レーザー技術研究成果中間発表会論文集、(1983)277.
- 11) 桜木史郎、アルカリハライド (KC1) の高純度化と結晶化、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レーザー技術研究成果中間発表会論文集、(1984)116.
- 12) M. A. Biondi : Optical Absorption of Copper and Silver at 4.2°K, Phys. Rev., 102, (1956)964.
- 13) 奥富衛 : ZnSeのハイドレーションポリシングと表面特性、昭和55年度精機学会春季大会学術講演会論文集、(1980)709 .
- 14) F. Twyman : Prism and Lens Making, Hilger and Watts, (1952).
- 15) 前出14)
- 16) J. W. Davisson : Surface Finishing of Alkali Halides, Jour. of Materials Science, 9, (1974).

第4章 時分割CO₂レーザ 加工システム

第4.1節 緒言

CO₂レーザは高信頼化、小型化、大出力化などを通じて工場において広く使用されるようになり、生産設備として非常に大きい伸びを示している¹⁾。応用分野としては金属の切断加工が多いが、NCと連動して少量生産に適合するだけでなく、金型が不要で段取りもいらぬことからフレキシブルな混合生産が可能であり、量産加工にも用いられるようになってきている。さらに、セラミック、複合プラスチックの切断、熱処理、表面改質などの分野にも序々に使用範囲を広げつつある²⁾。

しかしながら加工システムとして、レーザは依然大きい設備投資と高いランニングコストの装置であり、その利用効率を上げ、加工コストを低減することが望まれている。工場で多種類の加工を実施する場合、レーザは出力に相当の余裕をもって選定されることが普通である。これに対し、一般には大出力の必要な場合の頻度は比較的少なく、最大出力より相当に低い領域で用いられるのが実状である。一方、CO₂レーザのランニングコストでは、発振に用いられる混合ガスのコストの比重が大きく、ガスは出力に関係なく消費されるので、この点でもロスが大きい。

レーザの発振には連続発振とパルス発振があり、厚板の切断においては前者が用いられるが、精密な加工の分野では、熱影響の少ない後者が利用されることが多い³⁾。このことから、パルス発振周波数を高め、各パルスごとに時分割してレーザ光を複数の加工ステーションに分配すれば、各ステーションでの加工性能を損なうことなくレーザの有効使用が可能になると考えられる。大出力のレーザを工場中央に設置し、ビームスプリッタなどを用いてレーザ光を工場の各所に分配するなどの試みはあるが、このように時分割を行う思想はいまだ見られない。以上の発想から、時分割CO₂レーザ加工システム

に関する研究を実施した。さらに、このようなシステムが実現すれば、加工時に複数のレーザー光を同時利用できることはコスト上の問題のみでなく、新しい工法の可能性にも連がるものと考えられる。

まずパルス形状と加工結果の関係から分割の可能性を検討し、分割方式を決定した。次にレーザー発振特性の測定結果に基づき、分割光学系、および発振制御を含めた分割システムの設計と製作を行った。時分割システムでは分割したパルスレーザー光間に相互干渉のないことが前提であり、実験によりその条件を求めた。製作したシステムによって加工実験を行い、有用性を確認した。

第4.2節 パルスレーザー光の分割

切断加工時のパルス形状と加工結果の関係から分割の可能性を検討し、次いでビームの分割方式を決定した。

4.2.1 パルス形状と加工特性

CO₂レーザーによる切断加工において、切断性能を支配する要因を図4.1に示す。この中でレーザー共振器に関する要因を考える。

パルス出力の積分値となるレーザー出力Pは、共振器の電極に与える電圧V、電流I、およびデューティファクタαにより次のように定まる。

$$P = \eta \cdot V \cdot I \cdot \alpha \quad (4.1)$$

ここに、η：発振効率、α = T_{ON}/T、ただし、T_{ON}：パルス幅、T：パルス間隔
レーザー出力、パルス周波数、デューティファクタはそれぞれ独立に調整することができ、出力、およびパルス周波数を一定に保ちつつ、デューティファクタのみを変えることが基本的に可能である。一定のレーザー出力を定められたパルス周波数で得る場合、パルス幅を小さくすればパルス尖頭値を高く、パルス幅を大きくすれば尖頭値を低く設定することになる。パルスレーザー光による切断加工では、このようなデューティファクタ

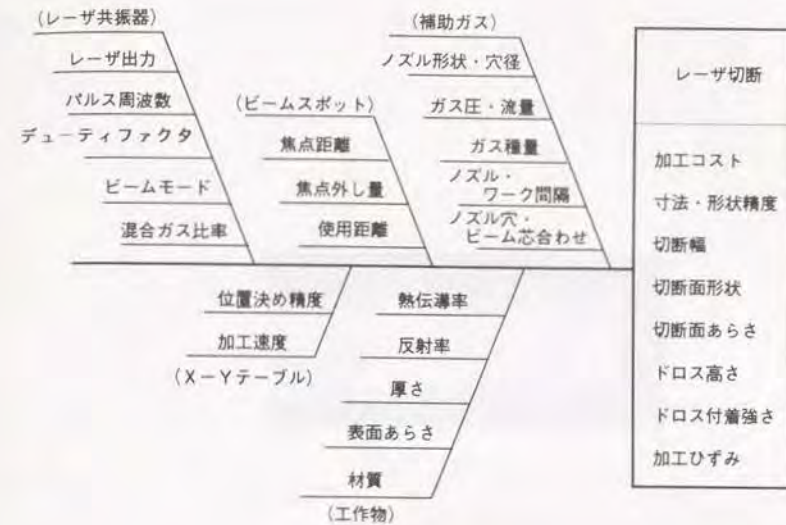


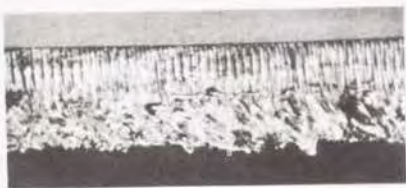
図4.1 CO₂レーザー切断加工の要因図

の差異により、図4.2に示すように切断面の状態が変化し、切断面のあらし、ドロスの付着状況、および切断ひずみの発生など、切断品質が左右される。

図4.3は、レーザー出力およびパルス周波数を一定とし、デューティファクタを変化して圧延鋼板の切断加工を行った場合の熱影響部の幅を、表面に塗布した温度検出塗料によって測定した結果である。デューティファクタが小さく、パルス尖頭値の高い場合に熱影響部は小さくなる。すなわち、熱ひずみによる変形の少ない高精度な加工を行なうためには、デューティファクタを小さくし、その上で尖頭値を高めて加工に必要なレーザー出力を得る加工条件の設定方法が望ましいと考えられる。この場合パルス幅（ON時間）は小さくなり、パルス間の非出力時間（OFF時間）は相対的に長くなる。



(a) $\alpha = 0.14$



(b) $\alpha = 0.4$

図4.2 デューティファクタの差による切断面の変化

材料：SPCC 厚さ 1mm
 レーザ出力：120W
 発振周波数：200Hz
 切断速度：0.5m/min

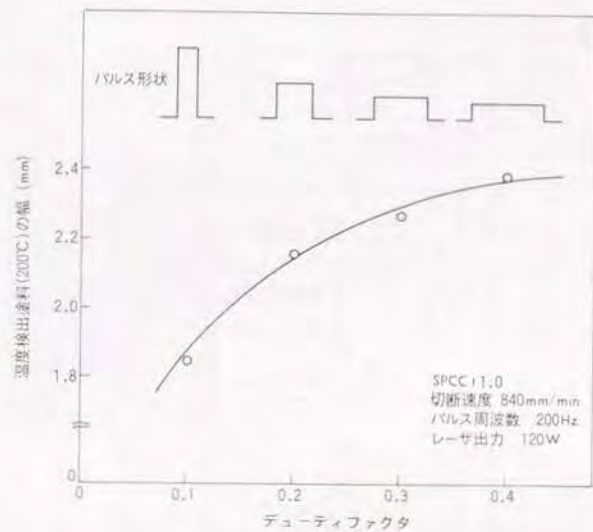


図4.3 デューティファクタと熱影響部の幅の関係

このような加工の基本的特性を踏まえ、図4.4に示すフローによって、各種の材質および板厚に対する切断条件を定めるようにした。まずパルス幅、すなわちON時間を設定し、次にOFF時間を定めた上で、切断に必要なレーザー出力を、共振器に与える電流によって設定する。加工試験を実施した上で、必要な場合にはフローをくり返して最終的な発振条件を定める。

このようなフローに基づいて条件を設定することによって、工場において500tCO₂レーザーを使用して3年間に生産を行なった製品に対する、デューティファクタ、およびパルス周波数の使用頻度分布を図4.5に示す。主な製品の材質は冷間圧延鋼板、亜鉛引鋼板、およびステンレス鋼板であり、また板厚は0.5~2mmが多いことから、デューティファクタ0.2以下、パルス周波数240Hz以下の加工条件が、全体の9割を占めているこ

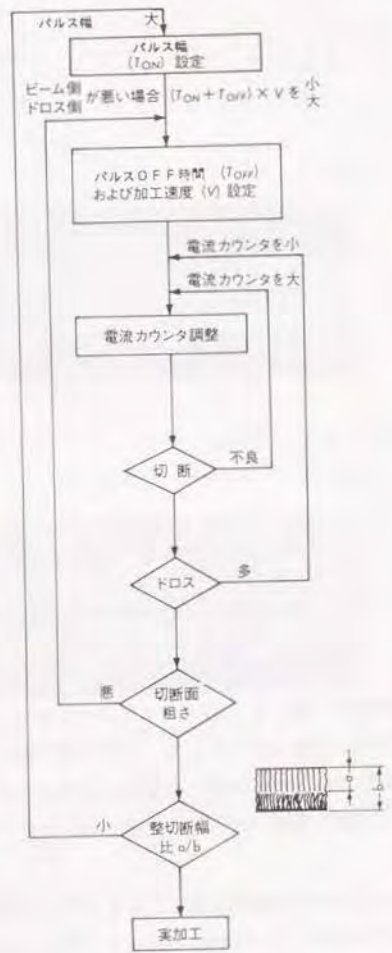


図4.4 加工条件設定のフローチャート

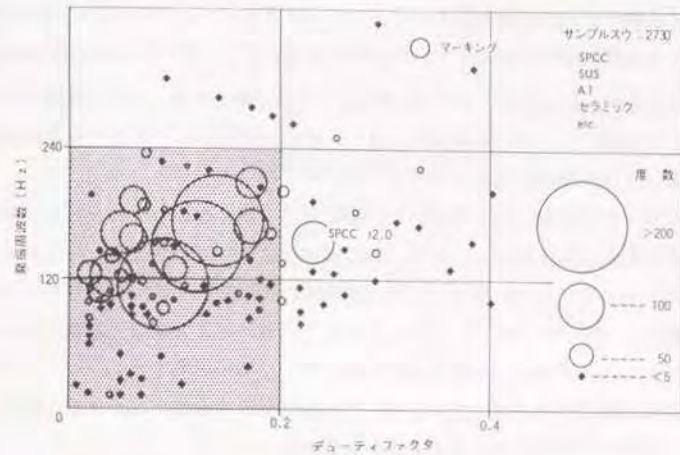


図4.5 工場において設定された加工条件における
発振周波数、デューティファクタの頻度

とがわかる。これはレーザー平均出力にして 250W 程度の範囲であり、レーザーの最大出力 500Wの能力に対して半分以下の出力で生産を行っている場合が多いことを示している。

以上のことから、相対的に長く、加工には関与していないパルスのOFF時間を有効利用することが望ましい。すなわち、空き時間を埋めるようにして異なるパルスを重畳して発振させ、その上で2種のパルスを時分割して2個の加工ステーションに分配する方法が考えられる。

4.2.2 分割方式の検討

分割したレーザー光を用いる2個の加工ステーションでは、加工が並行して実施できないと出力の有効利用は計れない。また、それぞれにおいて独立の加工が行えないと生産のフレキシビリティに欠ける。従って、1パルスごとの間欠的な振分けが必要である。

表4. 1に各種のビーム分割方式を示す。ビームスプリッタ、プリズムなどの光学的方法ではビームは常に分割されるので、時分割にはならない。また、AODは固体素子のため高速であるが、大出力のレーザに使用することが困難である。一方、機械的なシャック、あるいは揺動ミラーでは移動速度が遅く、数百Hz程度のレーザのバルス発振周波数に追従することは困難である。

このため、レーザの光軸に対して傾いた円板にセクタ状に複数の反射面および透過窓を設け、その回転によって反射ビームと、窓を通過するビームとに分割を行う、チョップパミラーを用いることにした。図4. 6は分割方式の基本概念を示すものであり、発振周波数を2倍にしたバルス光を、1バルスごとにレーザのバルス発振と同期したチョップパミラーの回転によって互いに90°方向に分割する。2箇所の加工ステーションにおいてそれぞれの最適加工条件を得るため、レーザ共振器では尖頭値とバルス幅の異なる2種類のバルスの混合発振が可能であることが必要である。

表4. 1 ビーム分割方式と特徴

種別	分割方式	特徴
光学的な方法	ビームスプリッタ	簡易で大出力にも耐え得るが時分割にならない
	プリズム	大出力には使用困難、時分割にならない
	AOD	高速の分割が可能であるが、大出力には使用不可
機械的な方法	直線運動	シャックのめき差しなど、高速化が困難
	揺動運動	揺動ミラーなど、高速化が困難
	回転運動	チョップパミラーなど、高速化が容易

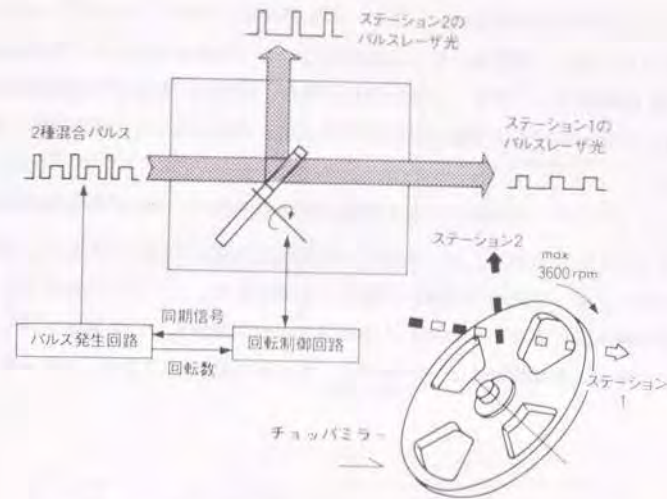


図4. 6 チョップパミラーによる分割の概念

第4. 3節 分割システムの設計と製作

レーザの発振状態の測定、および使用条件からチョップパミラーの形状を検討し、機構系、制御系とともに設計製作を実施した。

4. 3. 1 チョップパミラーの設計

チョップパミラーの形状、および寸法はレーザの発振状態、および使用する加工条件を考慮して定めなくてはならない。

まず、チョップパミラーのセクタ数（反射部と窓部の合計数）、および窓寸法を定めるために、レーザのビーム径、および放電電流と発振バルスの時間的関係の測定を行った。

図4. 7は、アクリルの厚板にレーザービームを照射し、そのバーンパターンより求めたビーム径 ($1/e^2$) である。ビーム径は出力によって異なるが、レーザー共振器の出力端から 1m の地点でレーザービームを分割する場合、分割点におけるビーム径はおよそ 15mm になる。なお、ビームは発散光であるため、加工ステーションの位置ではこれより大きくなる。

次に、チョップミラーの回転とパルス発振の関係の制御は、レーザー共振器の放電電流に対して行うことになるので、レーザー出力と放電電流の間に時間差があると、分割が正確に行われぬ。従って両者の関係を把握する必要がある。レーザーの出射光をレンズを介して焦電型検出器に導き、その出力と放電電流の時間関係について測定を行った結果を図4. 8に示す。放電電流とレーザー出力は、立上がり時にはタイミングが一致してい

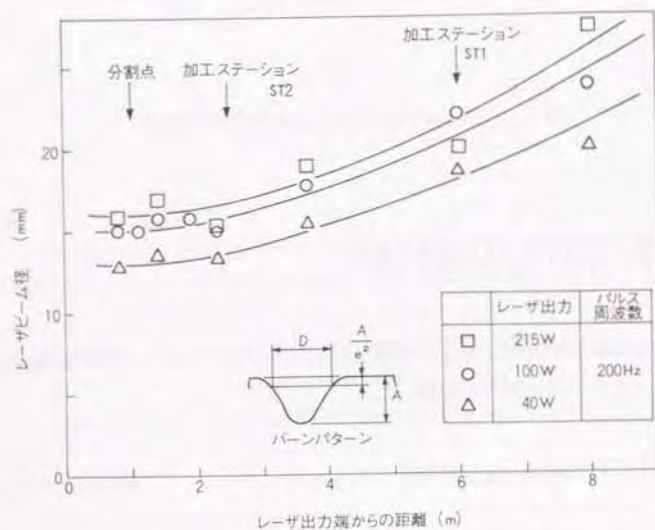


図4. 7 アクリルバーンパターンによるレーザービーム径の測定結果

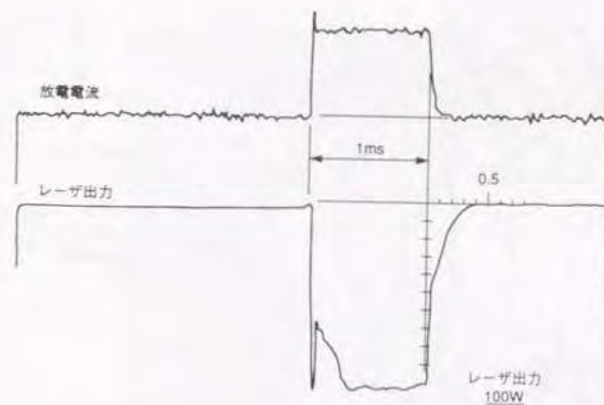
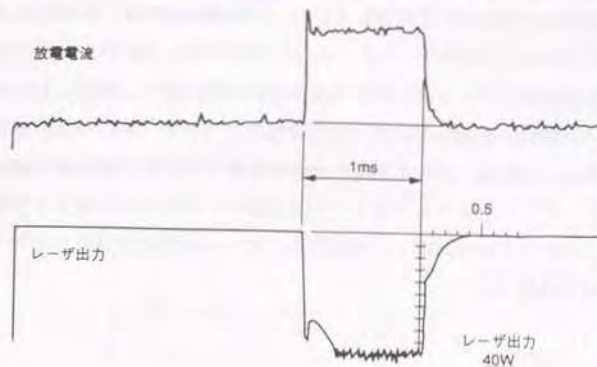


図4. 8 放電電流とレーザー出力の時間関係

るが、立下がりの部分ではずれを生じ、残留放射のためレーザ出力の消滅まで約 0.5ms を要している。時間はレーザ出力には関係していない。窓部の寸法はこの遅れを考慮する必要がある。

以上の実験結果をもとに、チョップミラーの設計を行った。図 4. 9 は、レーザビームとチョップミラーの相対位置関係を示す。窓部の幅はレーザビームの径 d 、およびミラーへの入射光の光軸と回転軸とのなす角度によって定まり、また、その長さは d 、レーザの発振周波数 f 、デューティファクタ α 、セクタ数 n 、回転中心に対する窓部中心の径 D 、およびパルス立ち下がり時間 τ に関係する。ビームは窓のエッジにかかってはならないので、幾何学的条件より

$$2f \leq \frac{1}{\tau} \left(1 - \frac{d \cdot n}{\pi \cdot D} - 2\alpha \right) \quad (4. 2)$$

を満足する必要がある。

d はビームの裾を考慮して 20mm とし、 τ は測定結果より 0.5ms とした。

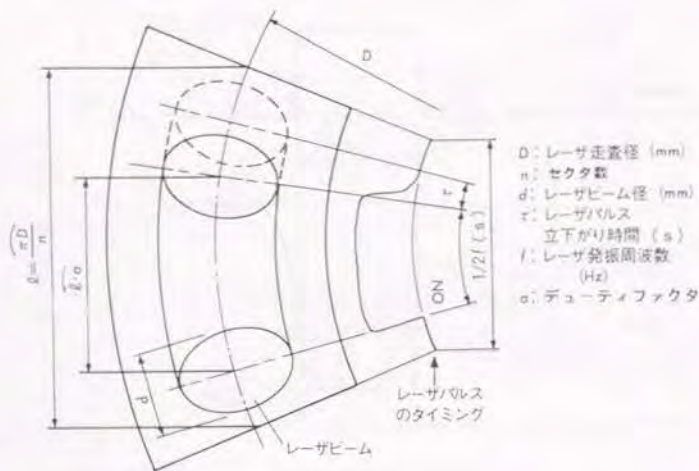


図 4. 9 チョップミラーとレーザビームの位置関係

これより D/n に対して分割可能なパルス周波数とデューティファクタの範囲を求めることができる。計算結果を図 4. 10 に示す。 D/n をパラメータとして引いた線の下側が使用可能な加工条件の範囲である。 D/n の選択では可能な限り多くの加工条件を満足すると共に、 D を小さくすることが望ましい。図の斜線部は図 4. 5 における加工の頻度の高い領域であり、これより D/n を 17.5 とし、セクタ数 n を 8 (窓部 4、反射部 4)、窓部中心の径 D を 140mm とした。

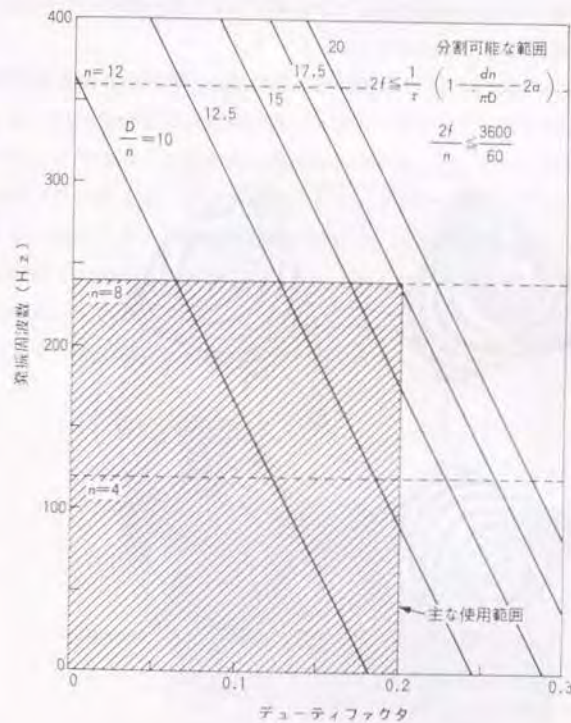


図 4. 10 チョップミラーの D/n に対して分割可能な発振周波数とデューティファクタの範囲

4. 3. 2 チョップミラーの機構

チョップミラーの材質として保守上はMo, Wが望ましいが、比重が高く回転系に対する負担が大きいため、Al合金に無電解Niめっきを施した基板をポリシ加工し、反射率を高めるためAu蒸着を行なう構成とした。板厚は15mmである。図4. 11に、回転軸に取り付けた後のミラー平面度のレーザー干渉計による測定結果を示す。レーザービームの反射範囲での平面度は0.3 μ m以下となっている。

回転機構にはアンギュラコンタクト玉軸受2個を用い、駆動はエンコーダを取りつけ

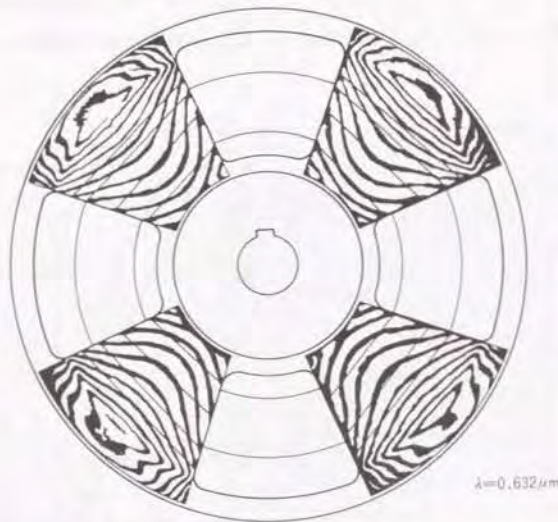


図4. 11 チョップミラー反射面のレーザー干渉計による平面度測定結果
(外径: 220mm)

たDCモータによりタイミングベルトを介して行った。モータの回転制御は基準周波数信号とエンコーダ出力によって行う。

同期関係においては、レーザー発振器のパルス発振とチョップミラーの回転のいずれを主とするかの問題がある。ミラーの回転は時定数が大きいため、レーザーの発振を従とし、チョップミラーの回転よりレーザーのパルス発振のタイミングを得るようにした。このため、窓のエッジを直接検出するホトセンサを設けた。また、加工ステーションでの調整時には連続してレーザー光が出射されることが必要であるため、ミラーの角度割り出しを可能にし、さらにレーザー光が各ステーションで不要な場合に遮断するよう、シャッターを設置した。

回転ミラーの面倒れは、加工点におけるビームスポットのふれとなり、加工精度を悪化させる。加工時の集光に焦点距離62mmのZnSeレンズを用いた場合のスポット径の実測値は215 μ mであり、ふれの許容値はその10%とした。これは反射面での倒れ誤差として30秒以下に相当する。面倒れを小さくするため、チョップミラーの取り付け部にねじの押し引きによる倒れ角度調整機構を設けた。容量形変位計によって測定したミラー面の回転状態での面倒れは25秒以内であり、加工点におけるビームスポットのふれは15 μ m以内に収まっている。

チョップミラー機構部の外観を図4. 12に示す。



図4. 12 チョップミラー機構部の外観
(チョップミラー外径: 220mm)

4. 3. 3 制御系の構成

分割加工システムの制御系の構成を図4. 13に示す。2箇所の加工ステーションは、それぞれのNCコントローラの指令により独立に駆動され、加工に必要なパルス幅と電流値を設定できる。レーザコントローラで設定したパルス周波数指令は分割ユニットに送られ、これに従ってチョップミラーが回転する。レーザ共振器は、各加工ステーションからのレーザ光のON/OFF、パルス幅、および電流値の指令に従い、チョップミラーの窓エッジの検出信号に同期してパルス発振を行う。パルスレーザ光はチョップミラーによって通過と反射をくり返し、それぞれの加工ステーションに分割される。以上の構成によって、各ステーションでは別々にパルス幅、およびレーザ出力を設定しながら独立して加工を行うことができる。

図4. 14に示すレーザコントローラでは、各加工ステーションはそれぞれ独立に発

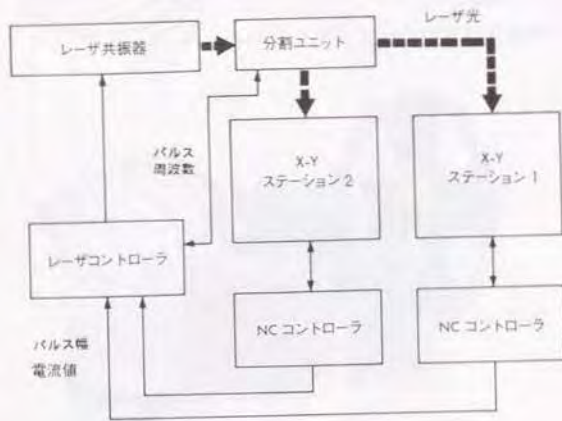


図4. 13 時分割加工システムの制御系の構成

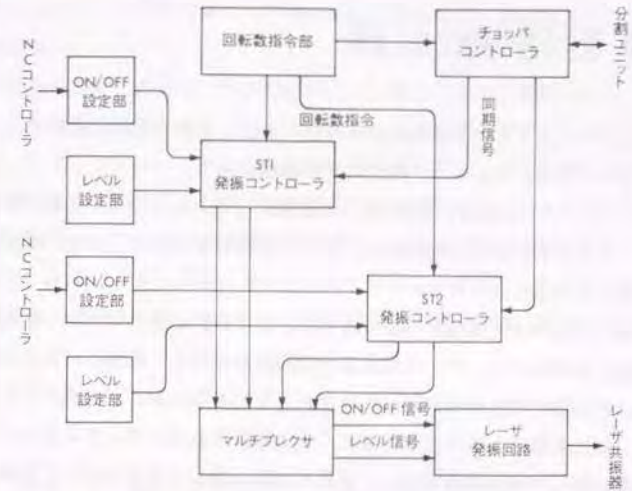


図4. 14 レーザコントローラの制御ブロック図

振コントローラを持ち、回転数指令値とチョップミラーから送られる同期信号に同期させてそれぞれレーザ発振信号を出力し、マルチプレクサで複合してレーザ共振器に送る。パルス尖頭値、およびデューティファクタは独立に設定されるため、発振器のレベル制御ではそれぞれのレベル信号を高速に切り換えてレーザ共振器に送る。

以上の構成によって分割システムを製作し、レーザと結合して動作実験を行った。

第4.4節 相互干渉の検討と加工実験

チョップミラーによって分割された2個のビームは、それぞれ完全に独立して時分割で利用できなくてはならないが、これには次の課題がある。

(1) チョップミラーの反射と通過によって正確にパルスレーザー光が分離されること。分離のタイミングに誤差がある場合には、レーザー光が異なるステーションに混入する、漏光現象を発生させることになる。

(2) 2種の混合パルス発振が可能であること。2箇所のステーションにおいて独立の加工を実施する場合には、パルス幅および尖頭値の異なる2種類のパルスの混合した発振、あるいは単独の発振が無作為に指令されるものとなるが、どの場合でも各々のパルス波形は、他に影響されることなく常に一定に保持されなくてはならない。

以上の課題に関して実験検討を行い、必要な対策を施して実用上の加工実験を実施した。

4.4.1 漏光

漏光は一方の加工ステーションで用いられるレーザー光の一部が、他のステーションに漏れる現象である。動作実験の結果では、本来レーザーを利用していないステーションにおいて、集光レンズを通した光が金属板に当たってわずかに発光する状態が認められた。これは、チョップミラーの反射部と通過部によって十分分離が行われず、レーザー光の一部が窓のエッジにかかっていることによる。原因としては次のように、窓検出センサの問題、レーザー発振にかかわる問題の両者が考えられる。

(1) 窓位置に対する窓検出センサ出力信号の遅れによって、窓エッジに対するレーザー出力の立ち上がりが目標の位置に対してずれを生じている、

(2) 窓検出センサによる同期信号に対して、パルスレーザーの発振に遅れを生じている。

前者の検討のため、窓検出センサの出力によってストロボを発光させ、窓端部の位置

ずれを測定した。その結果では、発振周波数 200Hzに相当する回転において2度のずれが認められたが、この程度の値では問題がないと考えられ、原因は主としてレーザー発振に求められる。

パルス発振周波数、およびパルス幅を変化し、漏光の有無を観測したところ、表4.2のように、発振周波数が高く、かつパルス幅の大きい領域で発生しやすいことが判明した。このため、チョップミラーの反射面に感熱紙を貼り、運転状態におけるレーザー光の位置を測定した。図4.15はパルス幅を1msに固定し、パルスOFF時間、すなわち発振周波数を変化した場合の感熱紙の状態で、発振周波数の増加につれ、ミラーの回転に対して、次第にパルス発振に遅れを生じていることが認められる。なお、ここではパルス尖頭値は変化させていないため、発振周波数の増加に従ってレーザー出力も増大している。

表4.2 漏光と発振周波数、およびパルス幅の関係

パルス幅(ms) ＼ 発振周波数(Hz) (チョップミラー 回転(rpm))	0.6	0.7	1.0	1.1	1.2	2.0	2.2	5.9
50 (750)			○					○
100 (1500)			○			○	●	
150 (2250)			○	○	●			
200 (3000)	○	●	●					

○漏光なし ●漏光あり

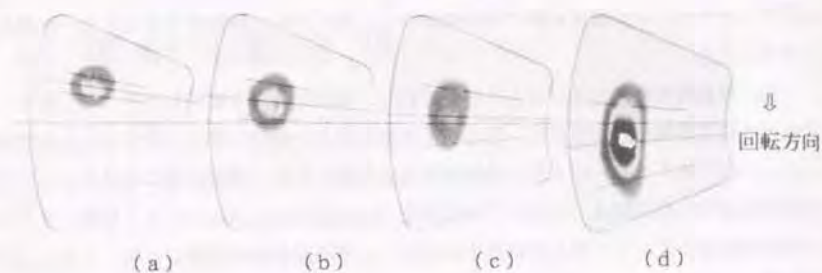


図	(a)	(b)	(c)	(d)
パルスON時間 (ms)	1.0	1.0	1.0	1.0
パルスOFF時間 (ms)	19.0	9.0	5.7	4.0
レーザー出力 (W)	80	150	210	260

図4.15 チョップミラー面上のビーム位置の感熱紙による測定

図4.16はこのような測定から、発振周波数、およびパルス幅を変化した場合の、基準発振位置に対するパルスのピーク位置のずれ角を求めたもので、各々の増加に対してずれが増大し、無視できない値となっている。

パルス光の立下がり時間は設計では0.5msに設定したが、この遅れによってパルス後端がエッジにかかる可能性がある。放電電流とレーザー出力のタイミングはすでに述べたようにほぼ一致しているが、発振周波数、あるいはパルス幅の増加に伴って、パルス発振指令信号に対する放電開始の遅れが発生し、一方、出力の増大によってビーム径自身が大きくなる影響も受け、ビームの後端が次第に窓エッジにかかって漏光が発生するものと見られる。

レーザーパルスの発振指令信号は、窓部エッジに対し一定のビーム径を考慮したタイミングで与えていたが、これでは不十分であり、発振周波数、あるいはパルス幅に対するレーザー共振器の発振特性を考慮する必要がある。パルス幅は条件設定において実用上大幅に変化させることは少ないため、同期においては発振周波数、すなわちミラーの回転数を考慮に入れて、チョップミラーの回転より得た同期信号に対する、パルス発振の立ち上がり、および立下がりタイミングを設定することにした。

このタイミングは図4.17に示すように、窓位置による同期信号に対する発振のゲート信号の時間差 t_{e1} を、チョップの同期信号周期を T として、実験的に求めた ($T/10$) msとした。また、立ち下がりでの時間差 t_{e2} はこれに0.5msを加えたものを見込む。

このため回転数指令に基づき、立ち上がり、および立ち下りのタイミングをレーザーコントローラ内で発生させるようにした。以上の制御によって漏光が防止され、レーザー光の完全な分離が可能になった。

4.4.2 パルスの混合発振

分割システムでは2つのステーションにおいて同時に独立したパルス発振が必要となるので、一方のステーションで定められた加工を実施しているとき、他のステーションで加工を行うことによって、その影響を受けるようなことがあってはならない。

図4.18は、2箇所のステーションにおいて加工を実施した場合のレーザー出力波形で、(a)はステーション1におけるパルス幅0.4ms、出力50Wの加工中に、ステーシ

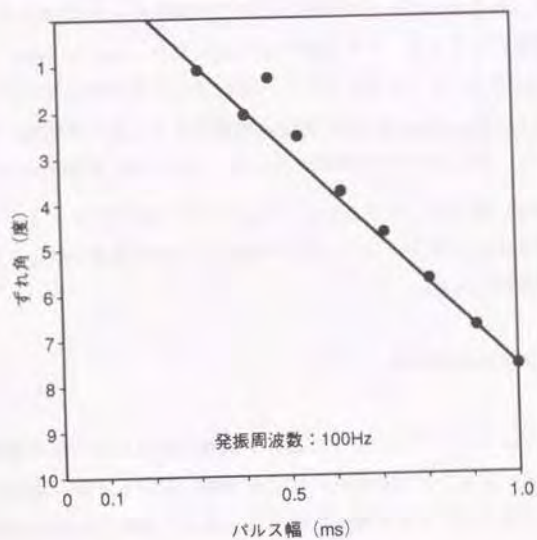
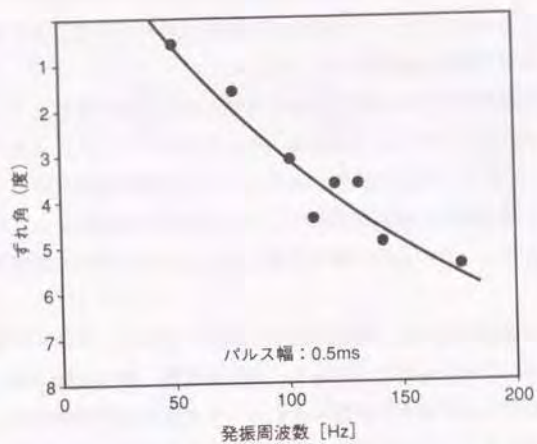


図4. 16 ビーム位置ずれ角と発振周波数、パルス幅の関係

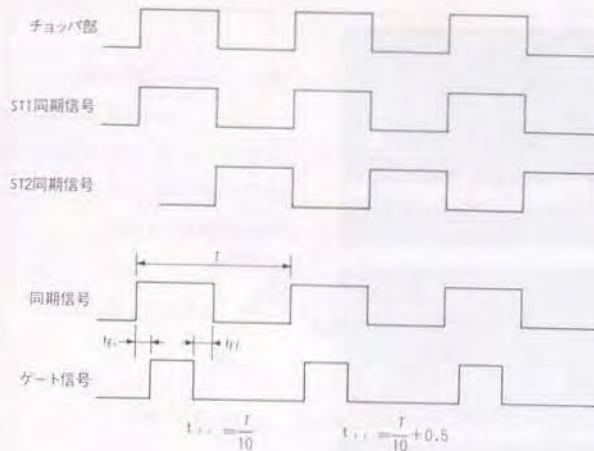


図4. 17 発振周波数を考慮した発振タイミングの設定

ン2において同様のパルスが発生させた場合であって、ステーション2による発振はステーション1に影響を与えていない。一方、(b)はステーション2においてパルス幅2ms、出力235Vの長く大きいパルスが発生させた場合で、ステーション1のパルスはその影響を受け、パルス幅が大きくなっている現象が見られる。

パルス発振においては、デューティファクタが一定であれば、パルス幅を変化させても、パルス波形と尖頭値は変わるが、基本的に入力条件より出力は一定である。しかしながら、条件によってパルス幅が変化すると出力が変動する場合がある。これは、本来独立しているパルス間に干渉が発生し、波形にひずみを生じるためと考えられる。

このような現象は N_1 、ガス流量の多い場合に生じやすい。 N_2 、ガスが過剰な発振ではパルスの立ち下がり時の尾引きが大きくなり³⁾、隣接パルスに影響を与えてパルス波形をひずませる結果となる。図4. 19はデューティファクタを一定とし、パルス幅とレザ出力の関係を異なる混合ガス比の条件下で求めた結果であり、 N_2 、ガス流量の少ない場合には、パルス幅が2ms以下では出力の変動をほとんど生じていないが、流量の多



(a) 短いパルスの混合発振

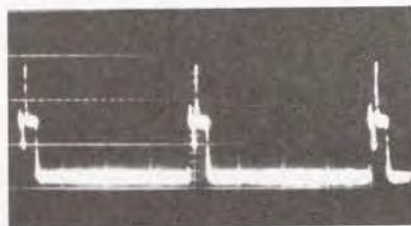
パルスON時間 OFF時間 レーザ出力

ST-1 : 0.4ms 8.0ms 50W

ST-2 : 0.4 50W

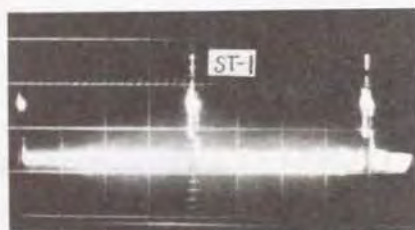
発振周波数 : 119Hz

ST 1のみ



5mV、1ms/div

ST 1 + ST 2



(b) 長いパルスの混合発振

ST-1 : 0.4 8.0 50W

ST-2 : 2.0 235W

発振周波数 : 119Hz

ST 1のみ



5mV、2ms/div

ST 1 + ST 2

図4. 18 混合発振によるパルス列間の相互干渉

混合ガス比	He	76.0%
	CO ₂	5.9
	N ₂	18.1

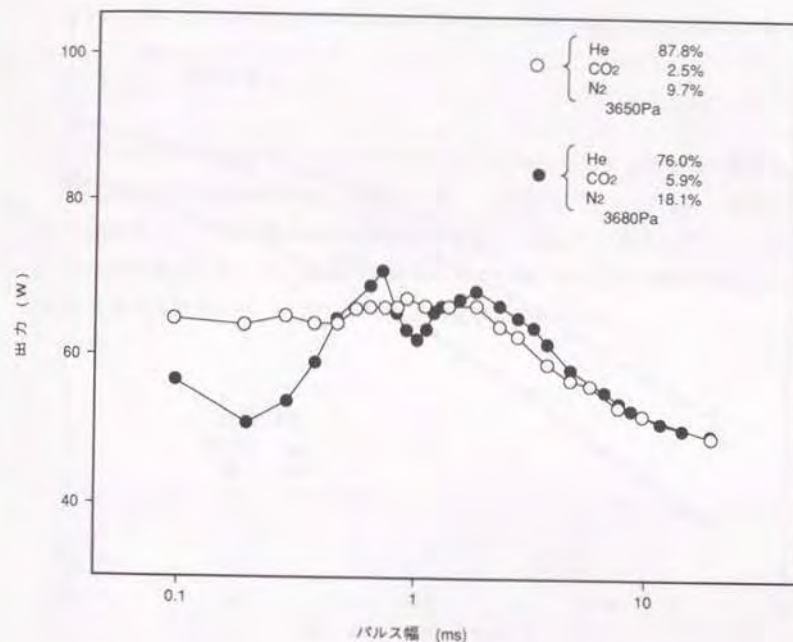


図4. 19 パルス幅と出力の関係のガス組成による変化

$\alpha = 0.1$ 一定

い場合にはかなりの変動が発生している。

2種のパルスの混合発振の場合、片側のステーションでのパルスから見ると、パルス列の間に別のパルスが混入することは、見かけ上パルス幅の増加となり、出力を変動させるおそれがあるので、隣接パルスに影響のない条件で発振させる必要がある。

図4. 20はN₂ガスの過剰でないこのような発振条件のもとで、ステーション1において一定の発振を行いつつ、ステーション2においてパルス幅を増し出力を増大させた場合の、ステーション2で測定した出力、および共振器側で測定したステーション1、

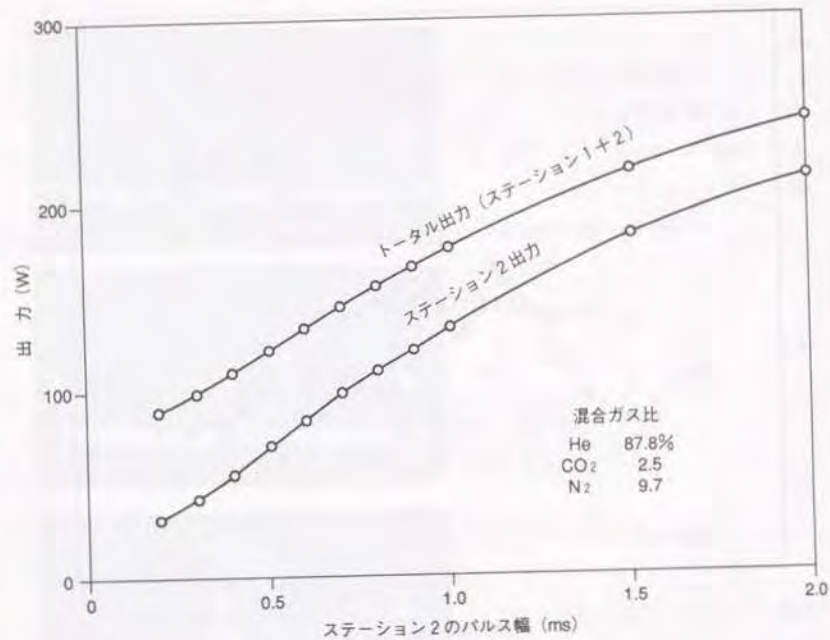


図4.20 混合発振状態でのパルス幅と出力の関係

ステーション1：パルス幅0.4ms、OFF
時間8msで一定発振
ステーション2：パルス幅を変化
発振周波数：119Hz

2の合計の出力の対比を示す。ステーション2での出力の増大に対し、ステーション1、2の出力の合計もほぼ平行している。これはステーション1に対する発振がステーション2に対する発振によって影響を受けていないことを示すもので、相互の干渉なく加工が実施できることを示している。

4.4.3 加工結果

レーザー共振器の単独使用、および分割同時使用の両者の加工上の差異を見るため、レーザー出力に対する切断速度を各々の場合に対して求めた。図4.21に、厚さ1mmの冷間圧延鋼板をレーザー共振器の単独使用により切断した場合と、他のステーションに100Wの一定出力を発生させつつ、分割同時使用により切断した場合の実験結果を示す。両者の間にはほとんど差がなく、時分割による影響は認められない。

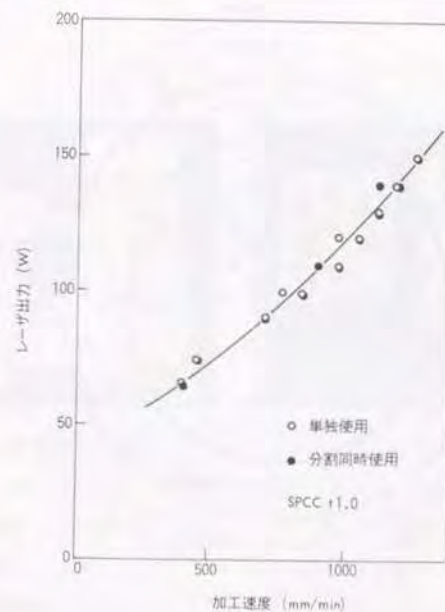


図4.21 レーザの単独使用、分割同時使用それぞれに対する切断特性

ミラーの透過光と反射光の間では、偏光の影響などによって加工特性に差を生じることが考えられる。図4. 22は、同様の銅板を取りつけたXYテーブルを移動し、チョップミラーの透過光と反射光の各々によって、ある点を中心として放射状に切断加工を行った場合の切断溝幅（カーフ幅）を測定した結果である。両者の傾向はほぼ同一であり、差異は認められない。なお、反射光を用いた場合のカーフ幅は全体的に大きくなっているが、これはレーザー共振器から加工点までの光路長に差があり、発散角、およびビーム径に違いがあるためである。

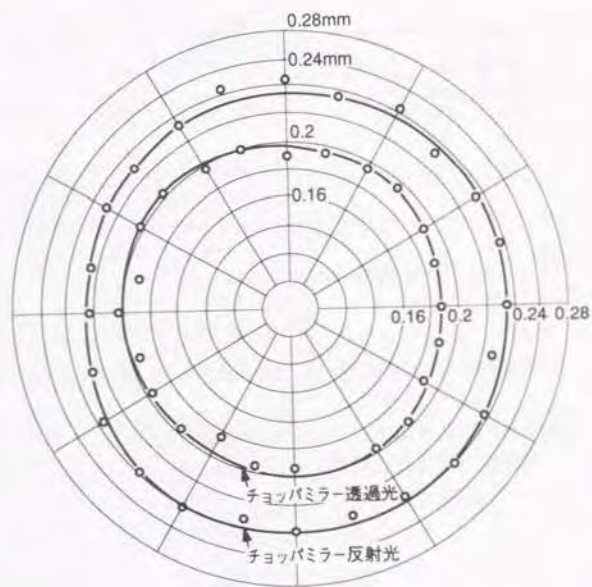
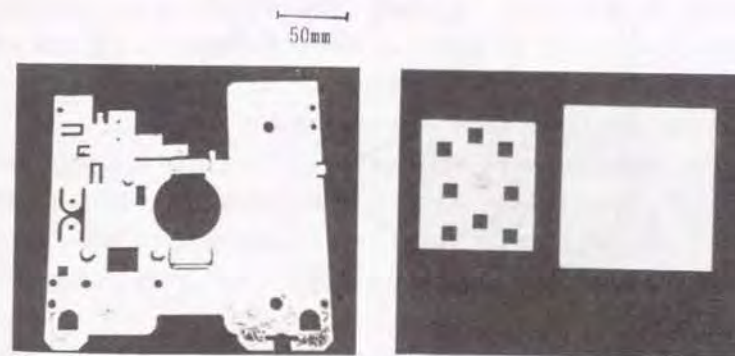


図4. 22 チョップミラーの透過光、反射光各々により放射状に切断を行った場合のカーフ幅

図4. 23に、時分割加工システムによって同時加工を行なった例を示す。本事例は、セラミック板の窓部の切断加工と、亜鉛処理銅板の切断を同時に行なったもので、パルスの尖頭値と幅の異なったビームを必要とする加工であり、それぞれ最適な加工条件を設定して加工を行い、並列に作業を実施することができた。また、図4. 24は、分割した2ビームをセラミック回路基板の表裏の同一箇所に照射してスクライビングを実施した例を示す。片側からの加工では熱ひずみが大きく、また作業後に割断しにくい問題があるが、両面からの加工によって、熱影響の少ない加工を高速で実施することができ、また割断も容易になった。



- | | |
|----------------|------------------|
| (a) 亜鉛メッキ銅板の切断 | (b) アルミナセラミックの切断 |
| 厚さ: 1mm | 厚さ: 0.8mm |
| レーザー出力: 150W | レーザー出力: 30W |
| パルス幅: 0.8ms | パルス幅: 0.3ms |
| パルス周波数: 147Hz | |

図4. 23 レーザ時分割システムによる同時加工の例

以上のように本システムにより、デューティファクタ 0.2以下、発振周波数 240Hz以下の条件であれば、任意の組合せによって時分割の加工を行うことが可能となった。レーザー共振器の特性によっては、このような分割システムを複数台組み合わせ、さらに分割数を増加することも考えられる。

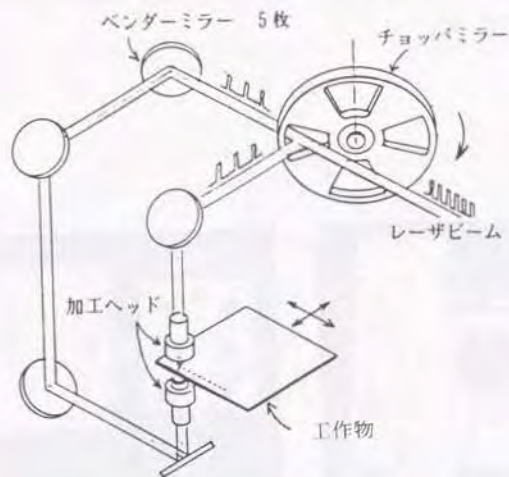


図4.24 分割光の表裏面同時照射によるセラミックのスクライビング

第4.5節 総括

CO₂ パルスレーザー光を、セクタ状に反射面と透過窓を持つチョップミラーの回転によって各パルスごとに2方向に分割し、2箇所の加工ステーションにおいて異なる加工を並行して行う、時分割レーザー加工システムに関して研究を行った。得られた結果は以下の通りである。

(1) 精密な切断加工においては、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ビームによって加工を行うことが望ましい。このことから、レーザーの発振周波数を高め、異なった2種類のパルスを混合して発振させ、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して、レーザーの有効利用を計る加工システムが考えられる。

(2) ビーム径、および放電電流に対するレーザーパルスの立上がり、立下がり特性の測定と把握した加工条件から、チョップミラーのセクタ数と寸法を定め、Niめっきを施したAl基板上に金蒸着を行う構成によってミラーを製作した。レーザーパルスの発振はミラーの回転より同期信号をとって行うようにした。製作したシステムでは、各加工ステーションにおいてパルス尖頭値、およびパルス幅を個別に設定することができる構成とした。

(3) ビームがチョップミラーのエッジにかかることによって発生する漏光現象を観察したところ、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、その原因となっていることが認められた。このため、パルス発振のタイミングを発振周波数によって変化させる制御を行って漏光を防止した。

(4) N₂ ガス流量が過剰なとき、パルス幅の変化によってパルス間に干渉が発生して波形をひずませ、出力を変動させることが判明した。2種類のパルスの混合発振では、使用状態によって見かけ上パルス幅が変わることになるため、このような条件を避ける必要がある。N₂ ガス流量の適正な領域では干渉のない独立した発振が可能であった。

(5) 製作したシステムでは、時分割によっても単独使用の場合と同様な加工速度が得られ、また、反射光および透過光の各々による切断特性にも差は見られなかった。これによって、1台のレーザを光源とした時分割により、相互に影響なく2個所の加工ステーションにおいて並行して加工を実施することが可能となった。さらに、同時2ビームの使用によって表裏両面から同時に切断加工を行うなど、新しい工法の展開を計ることができた。

文 献

- 1) コマツ : CO₂ レーザ加工機市場の現状と動向、機械の研究、45, 4 (1993) 479-483.
- 2) J. C. Lon : High Power CO₂ Laser for Cost-effective Materials Processing, Metals Mater., 8, 9, (1992) 485-489.
- 3) 森 一平 : レーザによる精密切断加工、プレス技術、20, 6, (1984).
- 4) 吉住修三 : 高精度CO₂ レーザ加工機、National Technical Report, 29, 4, (1983) 47.
- 5) N. T. Nomiya, R. G. Buser, and R. S. Rohde : Pulse Code Modulation of CO₂ TEA Laser Rangefinder, SPIE 227, CO₂ Laser Devices and Applications, (1980) 98.

第5章 CO₂レーザ用 ホログラムスキャナ

第5.1節 緒言

多様な人間活動の広がりの中で、人間では到達しえない環境において作業を行うロボットが望まれており、その一つに災害現場において消火や緊急作業を行うロボットがある。

ロボットではTVカメラなどによって状況がオペレータに伝えられ、遠隔走査が行われるが、災害現場では煙や焔などが存在し視界を妨げる。このため、可視光以外の手段によってこれらの環境を透視し、対象物の認識を行うことが必要になる。認識にはパッシブな方法とアクティブな方法があるが、災害現場では焔などの外乱が多く、その背後から必要な信号だけをパッシブに得ることは困難であり、アクティブな方法が望ましい。

CO₂レーザは波長が10.6μmと長く、煙や焔などの下での伝播特性に優れていると考えられる。このため、災害対応のロボットにCO₂レーザを用いたアクティブな視覚センサを用いることとした¹⁾。ロボットは不整な災害現場を自走し、またセンサのみを緊急活動者が携帯して探索に使用することも想定される。このため、小型、軽量で振動、衝撃に強いことが要求される。屋外対象物を目的としたアクティブな視覚センサでは、飛翔体を対象としたWangらによるCO₂レーザレーダ²⁾、あるいはZukらによる半導体レーザレーダ³⁾の研究があるが、可搬のシステムには至っていない。

レーザを用いたアクティブなセンサでは、レーザ光の2次元走査が必要になる。走査光学素子としては、ポリゴンミラー、揺動ミラーが一般的であるが、ポリゴンミラーは入射ビーム径が大きくなると体積、重量が増加し、また揺動ミラーは振動、衝撃に弱く、いずれも移動体に用いることは困難である。

ホログラムスキャナは円板の回転走査系であり、小型、軽量でかつ高速の走査が可能である。ただし、一般的には線順次の1次元走査であるため、2次元走査では揺動ミラ

などと組み合わせる必要があるが、この場合揺動ミラーの速度は低くてよい剛性のある設計が可能となる。

ホログラムに回転を与えて走査を行う方法は、1976年にCindrich⁴¹⁾によって発表されて以来多くの研究がなされ、バーコード読取りなどに実用化されてきた^{51)~71)}。ホログラムの走査への応用に当たっては、その収差補正が大きい課題とされ、多くの研究もレーザープリンタでの走査などを目的として、この点に集中している^{81) 91)}。一方、視覚認識のためのホログラム走査に関する研究例はほとんどなく、また、CO₂ レーザのような赤外光に対するホログラムスキャナも研究されていない。

ここでは、災害対応ロボットへの使用を目的として、CO₂ レーザ用ホログラムスキャナに関する研究を実施した。

まず、CO₂ レーザの伝播特性を測定して視覚センサに用いる可能性を検討し、スキャナの仕様を定めた。次にホログラムの製作では、CO₂ レーザ光に対する感光材料がないため写真的な方法は困難であり、計算機ホログラムの手法によってプロッタ出力より明暗パターンのホログラムを作成し、その走査特性を測定した。ホログラムの課題の一つは回折効率を高めることであり、そのためには深溝格子を有するレリーフ形ホログラムが望ましい。格子溝形状と回折効率の関係を検討し、解析から来る必要な形状を高い精度で得るための加工条件を求めた。これらの結果を基盤として、深溝格子の加工が容易なところからホログラムを直線等ピッチの単純格子としたスキャナを製作し、CO₂ レーザ光の走査による、対象物の反射光よりその画像を形成して性能を確認した。

第5.2節 視覚センサとスキャナの仕様

CO₂ レーザ光の反射特性、透過特性の測定から、視覚センサに対する使用の有効性とスキャナに対する課題を検討し、視覚センサでの使用条件をもとにホログラムスキャナの目標仕様を設定した。

5.2.1 CO₂ レーザ光の伝播特性

認識の対象には種々の物体があるので、スキャナの性能上、各種の対象物に対する、CO₂ レーザ光の反射の状態を知っておく必要がある。このためCO₂ レーザ光に対する各種の対象物と、各々の対象物を光軸に対して傾けた場合の反射率を測定した。

出力4Wのレーザーにより600mmの距離に置いた対象物を照射し、反射光を有効径20mmのレンズで集光してHgCdTe検出器に導いた。対象物は回転テーブルに取り付け、光軸に対する傾きを変えて測定を行った。

表5.1に測定結果を示す。塗装面、塩化ビニール板、セラミックタイルは傾きに対して反射率の変化が鋭敏であるが、アルミニウム、鉄、ステンレスの金属板では比較的散乱され、光軸への傾きがある程度あっても反射信号が得られる。これより一般的な物体の認識では10⁻¹迄の反射率の検出が可能であることが望まれ、スキャナにおいては光の損失を極力小さくし、かつ広がりのある反射光を取り込む必要がある。

次に、各種の環境下でのレーザー光の透過率を測定した。1 m³の箱の中に種々の濃度の埃、煙、霧を発生させ、その中をCO₂ レーザ光、およびHe-Neレーザー光を通過させて、箱の後方に置いた反射鏡からの反射光量を光源側で測定して透過率を求め、波長による差異を比較した。

図5.1は液状化学物質を噴射して得られる、粒径約2μmの疑似煙に対する結果であり、可視光に比しCO₂ レーザ光の透過のよいことがわかる。同様に、プロパンガスの不完全燃焼による埃、および水の噴霧によって得た1~10μmの粒径の霧、各々に対しても、実験条件下でCO₂ レーザ光の優位性が認められた。

表5. 1 各種の対象物と傾き角に対するCO₂レーザー光の反射率

対象物	表面 あかさ (μm)	光軸に対する傾き角 (度)				
		0	1	10	30	45
金蒸着ミラー	<0.06	9.9E-1				
アルミ板 (ヘヤライン加工)	1.2	9.5E-1	3.5E-4	7.5E-5	1.5E-5	5.9E-6
アルミ板 (# 600仕上)	3.2	1.5E-1	8.5E-4	5.0E-5	6.5E-6	2.0E-6
アルミ板 (# 320仕上)	7.0	4.2E-2	1.4E-3	8.5E-5	8.6E-6	2.5E-6
ステンレス板	0.4	9.0E-1	2.1E-4	2.0E-5	2.8E-6	1.2E-6
鋼板	9.0	2.0E-2	4.0E-4	3.0E-5	2.0E-6	6.8E-7
さびた鋼板	20	1.7E-3	3.7E-4	8.6E-6	6.2E-7	5.0E-7
ラッカー塗装板	0.3	1.8E-1	1.5E-6			
ガラス	<0.1	2.0E-1	8.1E-7			
塩化ビニール板	0.7	5.0E-2	1.6E-6			
セラミックタイル	0.8	1.2E-1	2.9E-5			
木材	300	8.0E-6	3.0E-6	4.0E-7	1.3E-7	1.0E-7
コンクリート板	24	1.1E-3	2.5E-5	4.3E-7	1.4E-7	1.3E-7

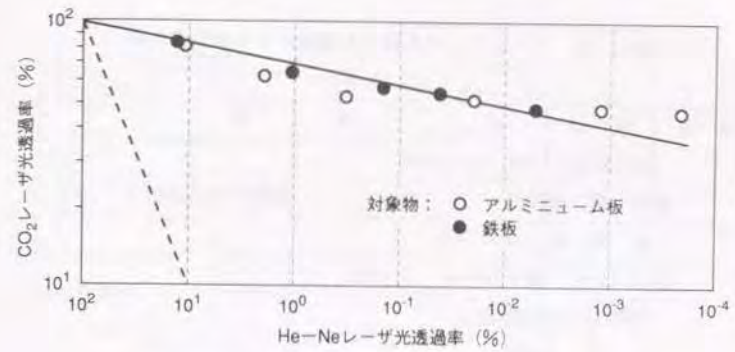


図5.1 疑似煙に対するCO₂レーザー光とHe-Neレーザー光の透過の比較

5. 2. 2 視覚センサ、スキャナの仕様

視覚センサは、反射光より得られる信号によって対象物に関する情報をロボットのオペレータに伝える。この場合、反射光より得た信号を走査と同期してビデオ入力としてやれば、出力信号の強弱が明暗の情報となり、対象物の像を形成することができる。また、レーザー光を光変調素子によって変調して照射し、照射光と対象物からの反射光の位相差から光の伝播時間を求めれば、対象物との距離が測定でき3次元情報が得られる。

表5. 2は視覚センサの目標仕様である。測定範囲は3 ~ 30m とした。画像出力は可能な限り実時間に近いことが望ましく、最大10フレーム/s を目標とし、画素数は128 × 128 とした。走査長は固定で線順次で走査を行う。光源には出力3W のCO₂レーザーを用い、反射光の検出はHgCdTe赤外線検出器による。対象物からの信号を画像入力とし、S/N比改善などの処理を行って表示する。

図5. 2にセンサの構成を示す。CO₂レーザー光は距離計測のために変調された後、スキャナによって2次元に偏向され対象物を走査する。対象物による反射光は検出器に入り、光電変換された信号は増幅後復調して振幅信号と位相信号を分離し、各々明暗情報および距離情報として用い、画像表示を行う。

表5. 2 CO₂ レーザを用いた視覚センサの目標仕様

機能	項目	仕様	備考
計測	測定範囲	3m ~ 30m	
	測分解能	10cm	距離10mにおいて
画像	画素数	128×128	
	像フレームレート	最大10フレーム/秒	
走査	明暗レベル	16階調	
	走査長	固定	
	走査モード	線順次	
光学系	光源	CO ₂ レーザ	出力3W、ウェーブガイド型
	検出器	HgCdTe検出器	
	光変調	振幅変調	(5~15MHz)
	位相検出	ヘテロダイン検波	
画像処理	S/N比改善	マルチフレームの平均化	
	画質改善	空間フィルタ(最小二乗フィルタ)	

表5. 3に2次元スキャナの目標仕様を示す。スキャナはホログラムスキャナと揺動ミラーによって構成され、両者の運動の組合せによって2次元走査が行われる。走査角は±18度とし、画像のフレームレートよりホログラムスキャナの回転数、および揺動ミラーの振動数を定めた。

スキャナの性能としては、像情報の形成に十分な精度を有することと、微弱な信号の授受のため、ホログラムの回折効率、および開口面積を高め、光の損失を最小限にすることが必要である。

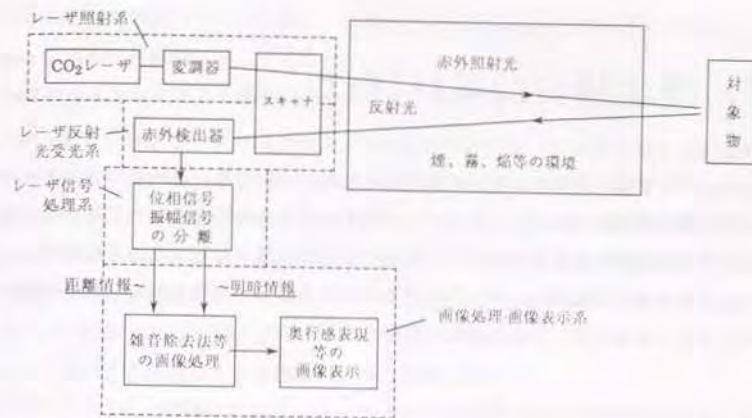


図5. 2 CO₂ レーザを用いた視覚センサの構成

表5. 3 2次元スキャナの目標仕様

項目	仕様
方式	ホログラム回転スキャナと揺動ミラーの組み合わせ
走査角	±18度
分解能	最大 128×128画素
走査モード	線順次
ホログラムスキャナ回転数	最大6000rpm
揺動ミラー振動数	最大10Hz

第5.3節 計算機ホログラムによるスキャナ

CO₂レーザ光に対しては感光材料がないため、一般に用いられる写真によるホログラムの作成は不可能である。CO₂レーザ用ホログラムの可能性とその基本特性を把握するため、計算機により干渉パターンを設計する計算機ホログラムの手法を用い、パターンプロッタ出力を縮小してマスクを製作し、ZnSe基板上にAl膜の明暗パターンのホログラムを作成して走査特性の測定を行った。

5.3.1 ホログラムの設計

ホログラムの作成方法を大別すると、光の干渉を基板上的感光材料に記録して作成する方法、および干渉縞分布を計算機により求め、計算機出力をリソグラフィプロセスに導いて作成する方法(Computer Generated Hologram: CGH)がある。

前者では、発散球面波と参照球面波との干渉が写真的にホログラム記録される。後者では、2つの光の複素振幅分布の重ね合わせから、干渉縞の強度分布が計算機によって計算される。可視光付近で用いられるホログラムでは、感光材料の入手は容易であり、一般的に前者の方法が利用される。一方、目標としているCO₂レーザ用スキャナにおいては、不可視光であるため干渉の観測は容易ではなく、また10.6μmの波長に対して適合した感光材料は現在のところ存在しない。従って、ホログラムパターンの作成はまずCGHによる手法を試みることにした。

ホログラムでは表面に明暗のパターンを設けることによって回折を生じさせることができるが、回折効率は低い。高い回折効率はパターンに対応した立体的なレリーフ(格子)を設けた位相ホログラムによって得られる。さらに、入射するレーザ光の透過回折光を用いる透過形ホログラムと、反射回折光を用いる反射形ホログラムがあるが、最も高い回折効率は透過型の表面レリーフ位相ホログラムによって得られると見られる。

従って、最終目標は透過型の表面レリーフ位相ホログラムとするが、そのためには表面のレリーフの設計、加工に関して詳しい検討が必要であり、ここではホログラムには

まず作成の容易な明暗パターンを用い、これによってCO₂レーザ光用のホログラムの可能性と基本特性を検討することにした。

計算機ホログラムによる干渉縞パターンの設計は以下のようにして行う。

ホログラム素子は、2つまたはそれ以上の光波の干渉によって記録された光収束性能を有する回折格子と定義できるが、一般にホログラムによって再生されたビームには球面収差を生じるので、各波面で定まるホログラムの位相伝達関数の最適化を行うことにより収差を低減することができる。さらに、ホログラムの再生波面を制御することにより、偏向素子に用いた場合のビームに要求される各々の性能を、評価関数をもとにして釣り合いよく制御することができる。

ホログラムの波面制御による最適設計は次の手順に従う¹⁰⁾。

平面のホログラムが波長λ₀の光によって、補正波面φ_cを含む発散球面波φ₀と参照球面波φ_rとの干渉により記録されたとすると、最適化される位相伝達関数φ_Hは

$$\phi_H(x, y) = \phi_0(x, y) + \phi_c(x, y) - \phi_r(x, y) \quad (5.1)$$

となる。φ_cは任意の波面で記述でき、Fairchildら¹¹⁾によれば偶数のべき級数で与えられ、未知の係数を最適化演算により求めることになる。

波長λの光により、発散球面波φ₀でホログラムを照明すると、再生像点へ収束する再生回折光の位相φ₁は

$$\phi_1(x, y) = \phi_0(x, y) + \phi_H(x, y) \quad (5.2)$$

で与えられる。

任意の光線の、x, y, z軸に関する方向余弦l_i, m_i, n_iは、幾何光学のアイコナル方程式から、φ₁の偏微分により与えられ、光線位置を求めることが可能になる。

再生光ビームはホログラム素子の回折によりホログラムの異なる場所を照明するので、主光線の数は設計上のセルだけ多数になり、各主光線ごとに波面収差と走査特性が定義され、個々での性能を全体の釣り合いを考慮して求めることになる。

走査ビームに対して必要な性能は次の通りである。

(1) 集光性(スポット形状): 光軸中心より走査端にわたって、集光されたスポットが均一であること

(2) 直線性: 回折光の移動軌跡が直線をなすこと

(3) 等速性：回転角速度に対して、集光面上でのスポットの移動速度が比例関係にあること

これらすべてを満足することは通常困難であり、重み付けを行い評価関数を設定して最適化を行う。

以上の考えに基づいた計算機プログラムを製作し、ホログラム素子の設計を行い、必要な波面制御を含んだ干渉パターンを出力するようにした。

設計の基本は以下の通りである。

(1) 視覚センサでは、3-30m の間の物体像を反射光より取り込むことを目的としている。従って、出射されたレーザービームは一定の面に焦点を結ぶのではなく、平行光とする。

(2) ホログラム素子は円周を分割したセクタ状とし、回転ディスク上に複数個の等価なホログラム素子を配置する。ここではセクタ数を9とした。従って1セクタの角度は40度であり、ディスクの1回転によって9回の走査が行われることになる。

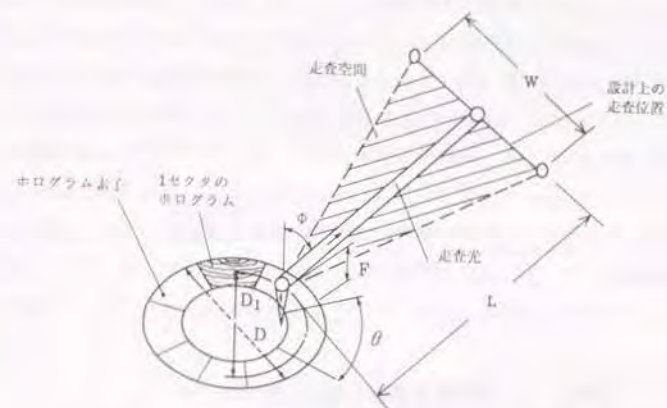
ホログラム素子の設計、および目標仕様を図5. 3に示す。計算上設定した走査位置はホログラム素子より10mの距離とし、走査長を8.5mとした。走査面は、ホログラム素子を頂点とした高さ10m、底辺8.5mの三角形となる。2次元走査ではさらに揺動ミラーの偏向角が加わるので、走査空間はホログラム素子を頂点とし、揺動ミラーの偏向角を頂角の一つとする四角錐の3次元空間となる。

5. 3. 2 ホログラム素子の試作と走査実験

設計結果に基づきホログラム素子の試作を行った。実際のスキャナでは9個のホログラム素子が必要であるが、ここではディスクの一部にセクタ1個分のホログラムのみを形成した。試作したホログラムディスクの形状を図5. 4に示す。

基板にはCO₂レーザー光の透過材料であるZnSeを用いた。計算機のプロット出力を写真により縮小してマスクを製作し、基板につけたAl薄膜のリフトオフにより明暗パターンを形成した。パターンの設計上のピッチは20 μ m、Al膜厚は120nmである。製作したホログラムパターンの一部を図5. 5に示す。

試作したホログラム素子を用い、回折光のビーム径、走査の直線性および等速性、さ



D : ディスク直径、50.8mm	F : 光源よりホログラムまでの距離、10mm
D ₁ : ビーム入射位置直径、40mm	L : 走査面までの距離、10m
θ : 1セクタのディスク占有角度、40度	W : 走査巾、8.5m
ϕ : 回折光のあおり角、24度	
入射光 : 発散球面波	走査直線性 : 2% / W
出射光 : 平行光	走査等速性 : 0.05% / W

図5. 3 CGHによるホログラム素子の設計および目標仕様

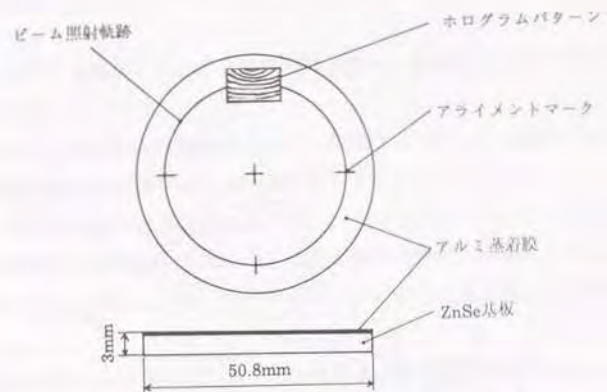


図5.4 ZnSe基板上のAl膜明暗パターンによるホログラムディスク



図5.5 CGHによるホログラムのAl膜パターン (一部)

らに回折効率を測定した。図5.6に測定の概念を示す。モータによって回転されるホログラム素子にCO₂レーザー光を入射し、回折光はガルバノミラーによって反射され、1軸移動テーブル上のZ軸(鉛直方向)微動ステージに取りつけられたHgCdTe検出器により、直径5mmのアーチャーおよびレンズを通して受光される。

まずビーム径の測定を行った。ホログラムディスクを走査中心で固定し、検出器をホログラム素子より10mの位置に置き、ガルバノミラーを動かして回折光を上下方向に偏向し、さらに検出器を搭載したテーブルを左右方向に移動して2次元的なビーム形状を求めた。測定結果では、1/e²ビーム径は左右方向80mm、上下方向110mmであった。入射ビーム径は2mmであり、全角で約10mradの発散光となっている。

走査の直線性、および等速性の測定では、検出器をホログラム素子より500mmの位置に設置した。ホログラムディスクを600rpmで回転させ、ガルバノミラーは固定し、検出器を1軸移動テーブル、およびZ軸微動ステージによって移動させて測定を行った。

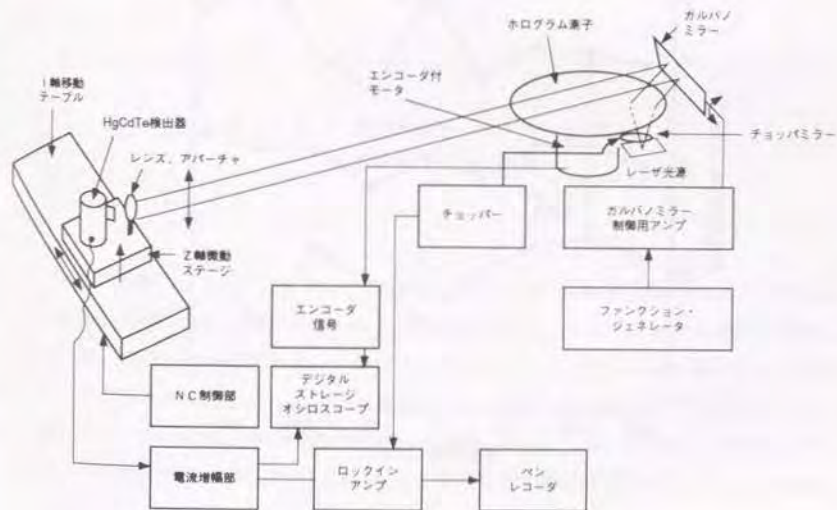


図5.6 ホログラム素子のビーム径、走査特性測定装置の概念

直線性の測定では、1軸移動テーブルを各位置において固定し、検出器を鉛直方向に移動して光強度の半値幅を求め、その中心を光軸とした。測定結果は図5.7に示す通りで、全走査長に対して直線性は0.5%程度と判断される。

等速性の測定では、検出器を1軸移動テーブルの各位置で固定し、ホログラムディスク回転モータのエンコーダ原点信号に対する検出器の出力信号のピークの時間差を、デジタルストレージオシロスコープで観測した。位置に対する時間差の比例関係からのずれが等速性の誤差となる。測定結果は図5.8のようであり、これより求めた等速性は測定範囲で約4%である。

さらに、回折効率をホログラム素子に対する入出力光の光量比より求めた。その結果は約5%であった。

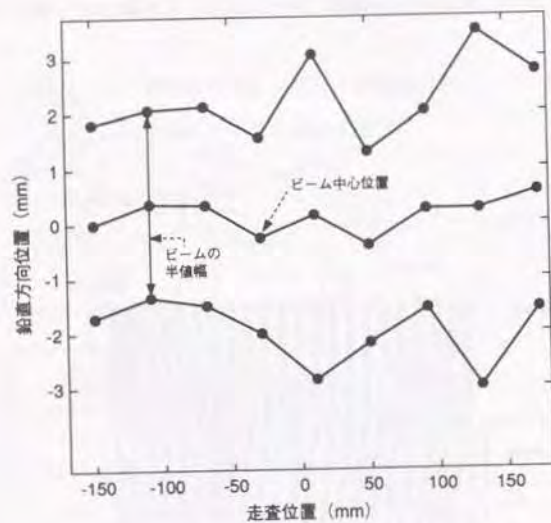


図5.7 CGHによるホログラム素子の走査直線性の測定結果

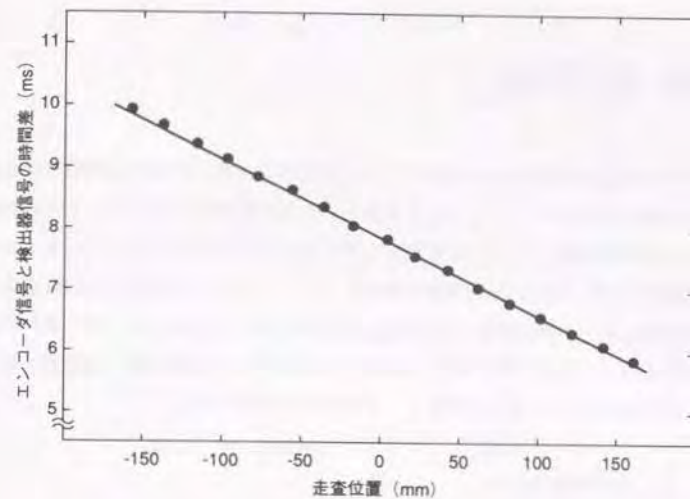


図5.8 CGHによるホログラム素子の走査等速性の測定結果

以上の実験により、CO₂レーザー光のホログラムによる偏向を実証することができた。一方設計目標に対し、回折光はかなり強い発散光となっており、また直線性は満足しているが、等速性には差がある。一般に1枚のホログラムでは既に述べた走査の3特性をすべて理想状態にすることは困難であるが⁽¹⁾⁽²⁾、設計ではスキヤナの使用条件全体を考慮しつつ、重み付け、評価関数の再検討が必要である。なお、直線性、等速性に関しては、光学的に特性の得られない場合には、信号処理の段階で補正を加えることも考えられる。