



| | |
|--------------|---|
| Title | レーザによるセラミックスの除去加工に関する基礎的研究 |
| Author(s) | 大家, 利彦 |
| Citation | 大阪大学, 1993, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.11501/3065937 |
| rights | |
| Note | |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

レーザによるセラミックスの除去加工に関する 基礎的研究

平成4年11月

大 家 利 彦

目 次

第1章 緒論

| | |
|-----------------------|---|
| 1-1 研究の目的と背景 | 1 |
| 1-2 レーザによるセラミックスの除去過程 | 2 |
| 1-3 本論文の構成 | 4 |

第2章 レーザ装置とビームの評価

| | |
|---------------------------|----|
| 2-1 レーザ装置とそれぞれの光学系 | 7 |
| 2-1-1 CO ₂ レーザ | 8 |
| 2-1-2 YAGレーザ | 10 |
| 2-1-3 エキシマレーザ | 11 |
| 2-2 レーザパワーの測定 | 13 |
| 2-2-1 パワー測定上の問題点 | 13 |
| 2-2-2 パワーメータの試作とその評価 | 14 |
| 2-3 集光ビームのパワー密度分布計測 | 18 |
| 2-3-1 ビームのパワー密度計測方法 | 18 |
| 2-3-2 パワー密度分布計測装置の構成と特性 | 20 |
| 2-3-3 集光ビームのパワー密度分布測定 | 23 |
| 2-4 結言 | 26 |

第3章 レーザによるセラミックスの除去加工

| | |
|--|----|
| 3-1 レーザによるセラミックスの除去加工 | 27 |
| 3-1-1 CO ₂ およびYAGレーザによる加工部の外観 | 27 |
| 3-1-2 エキシマレーザによる加工部の外観 | 30 |
| 3-2 除去加工域の寸法に及ぼすパワー密度分布の影響 | 38 |
| 3-2-1 CO ₂ およびYAGレーザによる加工領域 | 38 |
| 3-2-2 エキシマレーザによる加工領域 | 39 |
| 3-3 レーザパワー密度とセラミックス材料の除去速度 | 42 |
| 3-4 加工面のクラック | 46 |
| 3-4-1 レーザ加工面のクラック観察 | 46 |

| | | |
|-------|-----------------------|----|
| 3-4-2 | ビームの特性とクラック深さ | 49 |
| 3-5 | 結言 | 50 |
| 第4章 | レーザ加工におけるビーム吸収率 | |
| 4-1 | セラミックス材料のビーム吸収率 | 52 |
| 4-1-1 | レーザの波長とビーム吸収率 | 52 |
| 4-1-2 | 加工中のビーム吸収率 | 54 |
| 4-2 | ビームの浸透と除去限界パワー密度 | 57 |
| 4-3 | 結言 | 59 |
| 第5章 | レーザ加工における誘起プラズマとその影響 | |
| 5-1 | レーザ加工領域からの放射光 | 61 |
| 5-2 | レーザ誘起プラズマの状態 | 62 |
| 5-2-1 | プラズマからの放射光のスペクトル | 62 |
| 5-2-2 | プラズマの温度と電子密度 | 64 |
| 5-3 | レーザ誘起プラズマとビームの相互作用 | 71 |
| 5-3-1 | プローブレーザとプラズマの相互作用 | 71 |
| 5-3-2 | プラズマの発生時期 | 73 |
| 5-3-3 | プラズマの広がり速度 | 74 |
| 5-3-4 | プラズマのビーム吸収係数 | 75 |
| 5-3-5 | 入射ビームの屈折と散乱 | 77 |
| 5-4 | 誘起プラズマがレーザ加工に及ぼす影響 | 81 |
| 5-4-1 | プラズマによる加工深さ不均一 | 81 |
| 5-4-2 | プラズマによるビーム吸収と加工速度 | 83 |
| 5-5 | 結言 | 83 |
| 第6章 | レーザ加工におけるセラミックスの分解・蒸発 | |
| 6-1 | レーザ加工面の生成物 | 85 |
| 6-2 | 加工進行中の表面温度 | 88 |
| 6-2-1 | 加工進行中の表面温度と加工進行速度 | 88 |
| 6-2-2 | 律速因子と材料の離脱形態 | 91 |
| 6-3 | レーザによる除去過程のエネルギー解析 | 93 |

| | |
|--------------------|-----|
| 6-3-1 照射エネルギーと除去体積 | 94 |
| 6-3-2 離脱物質の保有エネルギー | 97 |
| 6-4 結言 | 103 |
| 第7章 結論 | 104 |
| 謝辞 | 107 |
| 参考文献 | 108 |
| 本論文に関する著者の発表論文 | 111 |

第1章 緒論

1-1 研究の目的と背景

近年、多くの分野で装置機器が高度化し、その構成材料にも高い機能が要求されるようになった。特に熱機関等の耐熱構造材料は、金属材料のみでは対応が困難になってきている。セラミックスは耐熱性、耐摩耗性などに極めて優れている反面、天然材料を成形、焼結するため、ともすればその特性が原料、製法により安定していなかった。現在のファインセラミックスでは酸化物、窒化物あるいは炭化物などの高純度材料を原料とし、高度の熱的、機械的、化学的、光学的あるいは電気的特性を発揮できることから、耐熱構造材料、電気素子はもとより、センサー等の広範な領域にわたって応用されている¹⁾²⁾。

一般にセラミックスは酸化物系と非酸化物系に大別することができ、酸化物系セラミックスではアルミナ (Al_2O_3)、ジルコニア (ZrO_2) が、非酸化物系では炭化けい素 (SiC)、窒化けい素 (Si_3N_4)、窒化アルミ (AlN) などが工業的に注目されている。これらのうち、ジルコニア、窒化けい素は構造材料として、アルミナ、炭化けい素、窒化アルミは電子材料として優れた機能を有している。しかしながら、被加工材として見た場合、一般にセラミックスは加工性に乏しく、焼結処理した後の加工は、焼結工程での収縮、変形の修正を目的とした、ラッピング、ホーニング、バフ仕上げが行われている程度で、研削、切削といった本格的な加工はダイヤモンド砥石、ダイヤモンド工具を用いる方法³⁾が報告されているものの、六方晶系の窒化ほう素などごく一部のセラミックスを除いて、加工能率に問題が多く、とりわけ微細加工の領域では解決すべき課題が多い。

集光レーザービームを用いた工業的な材料加工は、1967年、荒田・宮本⁴⁾、およびSullivan・Holdcroft⁵⁾がレーザーガス切断法をそれぞれ開発した後、数多くの実用化研究が行われ、レーザー装置、周辺機器の進歩もあって、現在では軟鋼薄板等の切断において有力な切断法の一つとなっている。レーザー加工法は機械的な加工法と比べ、次のような特長を有している。

- ①非接触加工のため工具摩耗がない
- ②ビーム制御性が高いため任意形状の加工がおこなえる
- ③加工速度が大きい

また、同様な高エネルギービームである電子ビームによる加工と異なり、大気圧下で利用できる利点がある。

レーザーによる加工はセラミックスの有力な加工手段として注目されてきたが⁶⁾、現在でも加工法の基礎となる加工現象の解析が十分でない。金属のレーザー切断ではレーザーエネルギーならびにレーザーアシストガスとして用いる酸素による酸化反応熱の役割⁷⁾、切断前面の挙動⁸⁾など切断機構に関する基礎研究と並行して実用化研究が行われ、三次

元切断機も市販されるようになった。これに対し、セラミックスのレーザ加工では加工速度に関する検討⁹⁾、加工後の強度測定等の研究¹⁰⁾¹¹⁾について二三の報告はあるものの、研究例によって加工結果が異なるなど、必ずしも一定の成果を上げているとはいえない。また、加工現象に関してはほとんど解明されていない。

そこで、本研究は、レーザによるセラミックス除去加工に関して、ビーム入射から材料除去、加工面の形成に至るまでの各素過程を解析することにより、加工現象を基礎的に明確にし、セラミックスの高品質・高精度レーザ加工を実現することを目的として着手した。

1-2 レーザによるセラミックスの除去過程

本研究において取り扱うレーザ除去加工とは、材料にレーザビームが入射し、そのエネルギーにより材料が溶融、分解あるいは蒸発を経て除去される加工を指す。図1-1はレーザ照射により除去が起こっている状態を図解的に示したものである。レーザビームは材料表面において、一部は反射し、残りは吸収される。そして吸収されたビームのエネルギーにより、材料が溶融、蒸発あるいは分解し、さらに離脱することによって除去加工面が形成される。一度材料除去が始まると、レーザは主として除去によって発生した粒子からなるプルーム中を通過した後に試料表面に到達するようになる。ビームパワー密度が高い場合には除去粒子のプラズマ化が起こり、以後の加工はプラズマを通過したレーザにより行われる。従って、本研究では、レーザ除去過程を、

- ①照射ビームの特性
- ②材料表面におけるビームとエネルギー吸収
- ③入射レーザビームとプルームの相互作用
- ④加工材料の分解・蒸発

の各過程に分け、解析することとした。

発振器から出たビームは加工用光学系を通過した後、材料に照射されるが、これまでほとんどの場合パルスエネルギー、パワーなど、発振器から出力された直後のビームパラメータが用いられてきた。しかし、たとえば図1-2に示す、投入ビームエネルギーと加工穴径の関係¹²⁾¹³⁾を求めた結果と同様、これらのパラメータによる整理結果は必ずしも一定したものではない。その理由の一つは、レーザ除去加工では一般に加熱時間が短く、また加熱された領域が瞬時に除去されることにより、加工形状は材料が吸収するビームのパワー密度に大きく依存することによると思われる。すなわち、より正確に加工現象を議論するには、ビームパワーだけでなく、パワー密度の明らかなビームを用い、加工中のビーム吸収率とあわせて検討することが不可欠といわざるを得ない。

2番目の入射ビームとプルームの相互作用は高パワー密度域で特に問題となる。レーザ誘起プラズマの解析はAl等の金属では比較的多く行われ、TEA-CO₂レーザ誘起プラズマの電子密度測定¹⁴⁾、Dyeレーザ誘起プラズマに対する同様の検討¹⁵⁾が報告されて

いる。しかし、加工の立場から行われた研究例はなく、加工中のプラズマの有無や、プラズマ特性が加工に対しておよぼす影響は知られていない。

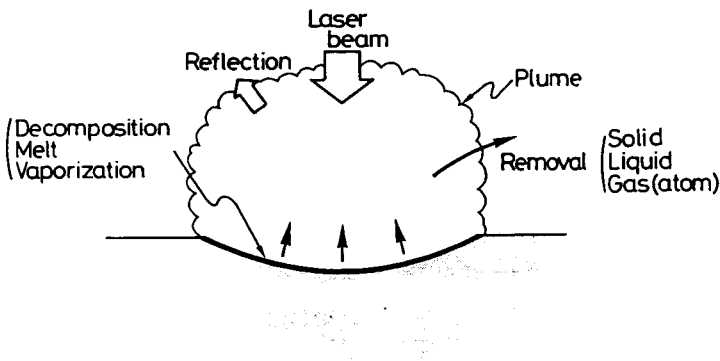


図1-1 セラミックスの除去過程

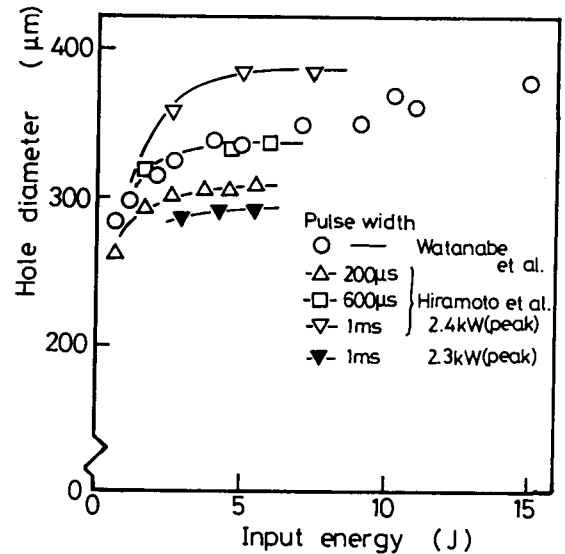


図1-2 投入ビームエネルギーと加工穴径の関係

セラミックス除去機構、特に Si_3N_4 などの分解型セラミックスの除去機構を解析する上で、ビーム照射部の材料の到達温度を知ることは有力な手がかりとなる。図1-3に一成分からなる元素あるいは分子性物質のP-T状態図を示す。図中、圧力 P_2 一定で温度が上昇した場合、物質は液相となることなく温度 T_d で昇華する。また圧力 P_1 では温度 T_m で融解した後、 T_b で気化する。セラミックスのうち、 SiC 、 Si_3N_4 、 BN 、 AlN など共有結合性セラミックスは1気圧のもとでは融解が起こらず温度 T_d で分子状態の気体を発生して分解するため、3重点が1気圧以上の高圧領域にある場合と考えられる。これに対してイオン結合性セラミックス及び金属結合性セラミックスでは必ず融体が存在しており、3重点が1気圧以下にあると考えられる。融体状態は構成粒子は熱運動状態にあるが完全な自由運動をとるまでには至っておらず、粒子間の引力が十分大きいため、粒子が離脱できない状態であり、金属結合では陽イオンの中心が平衡位置から変位した場合にも結合が維持される。イオン結合においても陽イオンと陰イオンがほぼ+-+-の順序を保つ限り融解によって結合が破壊されることはなく、金属結合ほどではないにしても融解に対する許容度は高い。これに対して共有結合は、結合力は強いがきわめて短距離にしか及ばないポテンシャル場による結合で、しかも顕著な方向性を有する。したがって構成粒子の自由な変位あるいは運動は共有結合自体の破壊を意味するため純粋な共有結合を維持したまま融体を形成することはないと考えられる。

これらセラミックスの温度に対する応答はレーザ加工においては材料の除去特性となって現れるが、これまでセラミックスの加工中に熱応答を解析した例はみられない。本研究では加熱により分解する共有結合性セラミックスとして常圧焼結の Si_3N_4 及

びSiC、加熱により熔融するイオン結合性セラミックスとして Al_2O_3 と ZrO_2 を取りあげた。また、比較のため金属結合材料として軟鋼を取りあげ検討している。

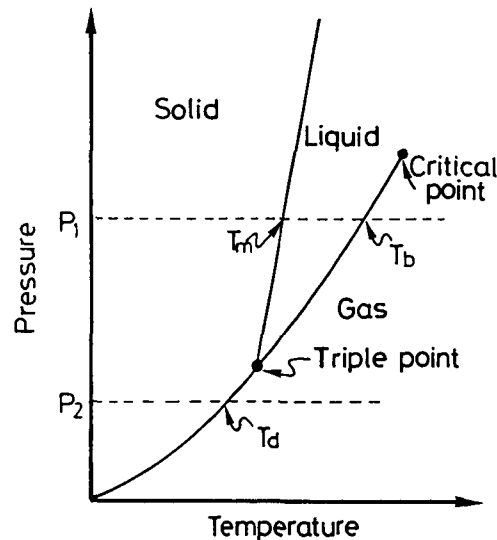


図 1 - 3 材料の P - T 状態図

1 - 3 本論文の構成

本研究ではセラミックスのレーザ加工において、ビーム入射から材料の離脱までの各過程における加工現象の解析と、これらの加工過程の中で加工パラメータが加工結果に影響を及ぼすプロセスの検討を行い、セラミックスの高品質、高精度レーザ加工を目指す。 CO_2 、YAG及びエキシマの各レーザのパワー密度分布を正確に測定し、これらを用いた Al_2O_3 、 ZrO_2 、 Si_3N_4 及びSiCの加工について検討した。まず、各レーザを用いた切断、穴明け等により、パワー密度、パルス幅及びパルス照射間隔、アシストガス等の加工パラメータが切断カーフ幅、加工速度、強度といった加工結果に及ぼす影響をモデル計算及び実験的手法により調べた。特に高いパワー密度と短パルスを発生できるエキシマレーザと他の加工用レーザとの比較検討を行った。また、加工中のビーム吸収率、材料表面に発生したプラズマの影響を解析した。次に、レーザ加工中のセラミックスの除去形態を、加工面分析、エネルギーバランス、加工速度-温度特性により明らかにした。

本論文の構成は以下の通りで、全体の内容の流れを図 1 - 4 に示す。

第 1 章は緒論であり、研究の背景および現状での問題点を指摘し、本研究の必要性と目的を述べている。また、レーザによるセラミックス加工に関する研究の現状およ

び動向を示すと共に、これまでの研究が抱える問題点を指摘している。

第2章では従来の研究において不十分であったビームパラメータの測定を、より正確に行うため、ビーム計測装置の試作を行った。そして、3章以下で使用する各レーザのパワー密度計測を行っている。

第3章ではCO₂、YAG、エキシマの各レーザを用いてSi₃N₄、SiC、Al₂O₃及びZrO₂セラミックスの除去加工を行い、パワー密度分布を含めた各種ビームパラメータ、及びその他のパラメータと切断カーフ幅、加工面表面粗さ、最大加工速度との関係を明らかにした。また、セラミックスのレーザ加工における重要問題の一つであるクラックについてはその生成原因の考察と、ビームパラメータによる低減法を検討している。

第4章では試料表面のビーム吸収を扱っている。室温状態から高温状態、そして加工状態に至るまでのビーム吸収率を明らかにすると共に、試料内部へのビームの浸透についても調べ、これらが加工幅におよぼす影響を議論している。

第5章は高パワー密度レーザで特に問題となるプラズマを解析対象としている。加工用高パワー密度レーザとしてエキシマレーザを取り上げ、セラミックス加工中に発生するプラズマの特性のうち、吸収係数、広がり速度及び発生時期といった加工と関係が深いものを、プローブレザ並びに分光により測定し、加工速度、形状に対するプラズマの影響を定量的に議論している。本章ではプラズマあるいは凝縮粒子による散乱の影響や、加工中の試料表面反射率、プラズマによるビームの吸収機構についても言及している。

第6章では加工面の分析、加工過程におけるエネルギーバランス、さらには加工速度－加工面温度の反応速度論に基づき、入射したビームエネルギーによるセラミックスの除去形態を解析し、各セラミックスの加工機構を明らかにしている。

第7章は結論であり、レーザによるセラミックス加工に関して本研究によって得られた結果をまとめて示している。

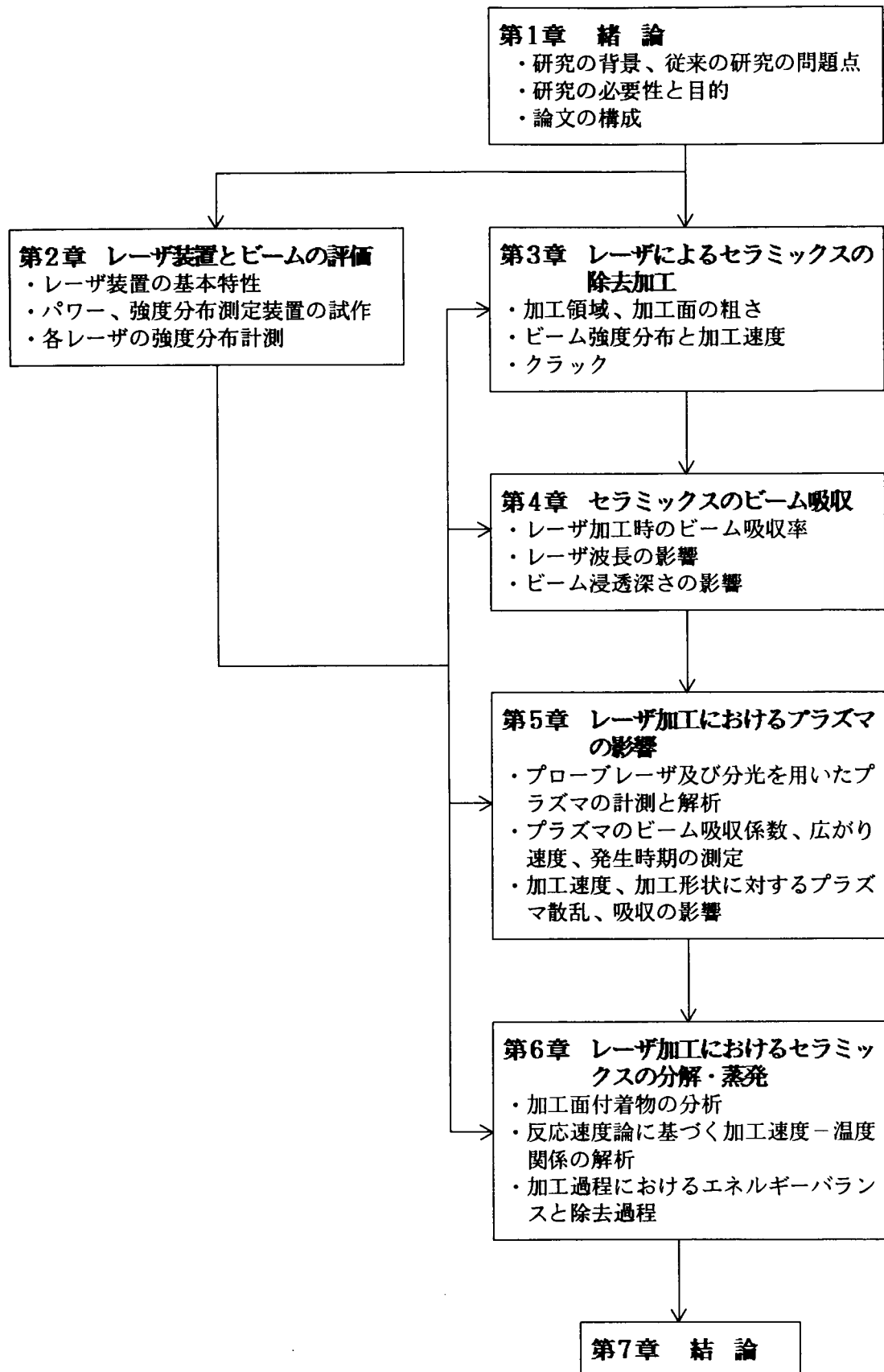


図1－4 論文の構成

第2章 レーザ装置とビームの評価

レーザ加工を行うについては、その再現性、信頼性が問題となる場合が多い。これは加工時に管理されるパラメータが、一般にパワーのみに限られることが多く、熱源形状、すなわち、ビームのパワー密度分布を十分に管理していないことに主な原因がある。また、パワーに関しても十分な精度で管理されているとは言い難い。

レーザ加工ではビームを集光して用いることが多く、この場合加工点でのビーム直径は数百 μm オーダーと小さく、しかも光軸付近では材料を熔融、蒸発させるに足る高いパワー密度となる。このように高いパワー密度でしかも非常に細いビームのパワー密度分布を正確に測定することは容易でない。加工の再現性を確保することはもちろん、加工現象をパワー密度分布との関連において議論するため、ビームパワー密度分布の正確な測定法を検討した。また、あわせて高パワーに耐える、高精度パワーメータの試作をも行った。

2-1 レーザ装置とそれぞれの光学系

レーザ発振器は図2-1に示すように、レーザ媒質、光共振器（2枚のミラー）および励起エネルギー源から成る。エネルギーを供給されたレーザ媒質は、一部の準位間で原子あるいは分子の粒子数分布が上下逆転した、いわゆる反転分布を作り出す。この反転分布状態の媒質を共振器内に置くと、光共振器内の定在波に対して、誘導放出による光の増幅、周波数モードの集中が起こり、レーザ光を得ることができる。なお、励起には、プラズマ放電、電子ビーム、光あるいは化学反応が用いられる。発振領域の径を大きくすると、大パワーが得られる反面、高次のマルチモードとなり、集光性が低下する。レーザによっては脱着可能な、1ないし2枚のアパーチャにより発振領域径を可変とし、パワーと集光性を使い分けている。

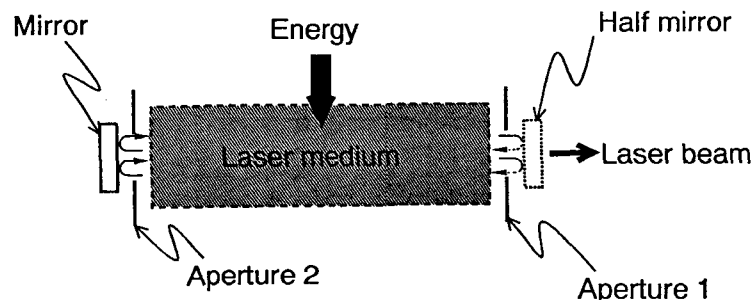


図2-1 レーザ発振器の基本構造

2-1-1 CO₂レーザ

CO₂レーザは波長が遠赤外 (10.6 μm) のガス分子レーザで、レーザ媒体としては通常CO₂、N₂及びHeの混合ガスが用いられる。図2-2はその発振の際のエネルギー準位図を示している。CO₂分子の励起振動モードは(a)対称振動、(b)屈曲振動、(c)非対称振動がある。最初にN₂分子が放電プラズマ中で電子と衝突し、励起される。この励起N₂との共鳴衝突によりCO₂は001準位に選択的に励起される。CO₂の対称振動100と非対称振動020は寿命が短いためこれらと001準位の間で反転分布が生じる。このうち、001から100への遷移では10.6 μm の光が放出され誘導放出によりレーザ発振する。なお、HeはCO₂分子の緩和を助けることによって発振効率並びに出力を向上させるので添加されている。CO₂レーザではTEA-CO₂レーザを除き、パルス発振には励起放電電流の制御によるノーマルパルス方式が用いられる。

本研究においては発振パワー、ビーム径等が異なる4台のCO₂レーザ装置を用いた。それぞれの装置の特性を表2-1に示す。なお、中心強度の $1/\text{e}^2$ となる半径の2倍を $1/\text{e}^2$ 直径として示す。装置(A) (Model-971) 及び(B) (ML15S2) はビーム光軸、放電方向、ガス流方向が互いに直交する3軸直交型で、(C) (YB506) 及び(D) (C030PMS-B) はガス流とビームが同軸をなす軸流方式である。それぞれの出力ビームのアクリルバーンパターンを図2-3に示す。装置(A)は他と比べて対称性が低く高次モードが含まれている。(B)及び(D)は図2-1のアパーチャを容易に脱着可能としたモードセレクトを持ち、大パワーが得られるマルチモードに加え、アパーチャで発振領域を制限することで集光性の高い低次モードビームを得ることができる。装置(B)(D)のマルチモードでは、それぞれ図2-3(b)、(f)に示すように高次モードが顕著であるが、低次モード時の出力ビームは同図(c)、(g)のようにTEM₀₀が主成分ではほぼガウス分布状をしている。装置(C)は共振器ミラーの熱負荷低減のため中心部がくぼんだTEM₀₁*分布としたものである。

これらのCO₂レーザにはいずれもZnSe製凸レンズによる集光光学系を用いた。

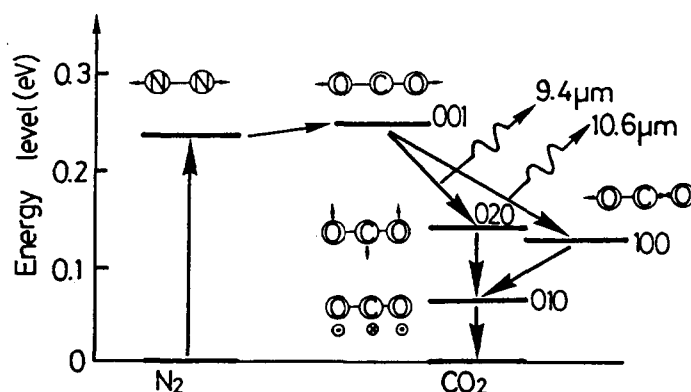
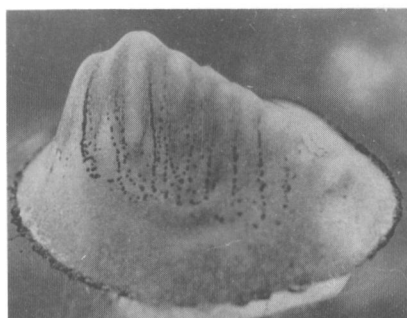


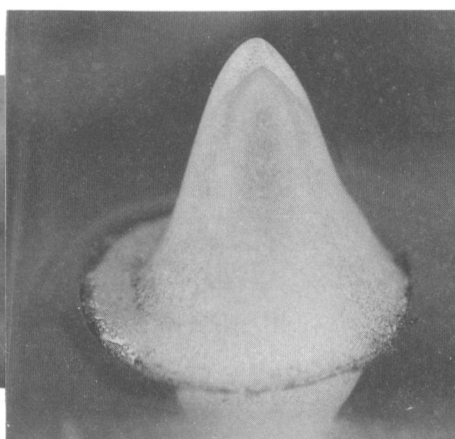
図2-2 CO₂レーザ発振におけるエネルギー準位

表 2 - 1 使用したCO₂レーザの装置特性

| Lasers | Gas flow | 1/e ² dia. (mm) | Peak power (kW) | Pulse width (ms) |
|--------|------------|----------------------------|-----------------|------------------|
| A | Transverse | 22 | 1.0 | ———— |
| B | Transverse | 16 (25) | 1.5 (2.5) | 0.5 ~ CW |
| C | Axial | 14 | 0.5 | 0.5 ~ CW |
| D | Axial | 14 (22) | 1.2 (3.0) | 0.5 ~ CW |



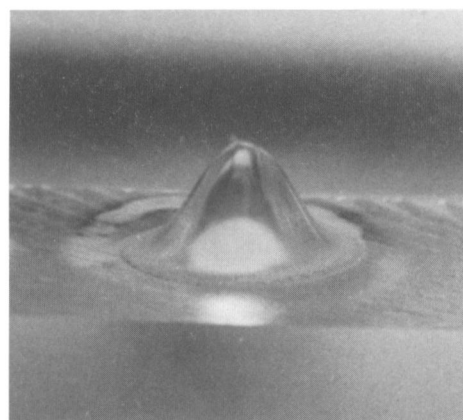
(a)CO₂レーザ[A]



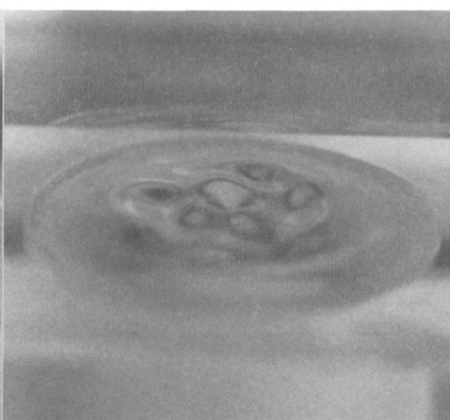
(b)CO₂レーザ[B]低次モード



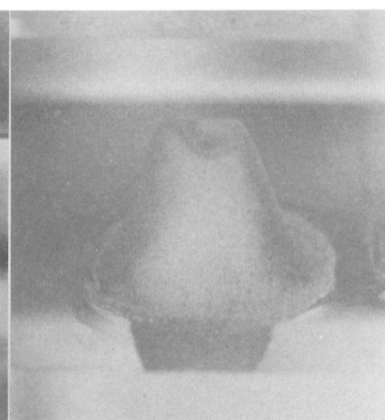
(c)CO₂レーザ[B]マルチモード



(d)CO₂レーザ[C]低次モード



(e)CO₂レーザ[C]マルチモード



(f)CO₂レーザ[D]

図 2 - 3 CO₂レーザの出力ビーム形状

2-1-2 YAGレーザー

YAGレーザーは現在最も多用されている固体レーザーで、レーザー媒質はネオジウムイオン (Nd^{3+}) を活性物質として混入したYAG (Yttrium Aluminium Garnet) 結晶である。波長は $1.06\mu\text{m}$ で、 CO_2 レーザーの波長の1/10に相当する。レーザー媒質の励起はアークランプ、キセノンあるいはクリプトンフラッシュランプによる光励起方式である。

図2-4に Nd^{3+} のエネルギー準位を示す。 Nd -YAGロッドに励起光を照射すると $500\sim 900\text{nm}$ の光を吸収して Nd^{3+} が励起準位に励起される。この励起準位の寿命は短く、直ちに $^4\text{F}_{3/2}$ 準位に移る。この準位と比べ、さらに下位の準位 $^4\text{I}_{11/2}$ の準位は非常に寿命が短く、ここで反転分布が形成され、誘導放出によりレーザー発振がおこる。YAGレーザーは発振効率が低く(2~4%)連続発振はYAGロッドおよびランプの冷却、電源容量などの問題があり、パルス発振で用いられることが多い。パルス動作方法にはQスイッチを用いる方法とランプ放電電流のパルス化(ノーマルパルス)を利用する方法が用いられている。Qスイッチと組み合わせた場合には数十kW~数MWの高いピーク出力が得られるが、パルス幅が小さいため平均出力は数W~数十Wに止まる。本研究で用いたYAGレーザー装置((A):JK701LD、(B):MS35LD)はいずれもフラッシュランプ放電の断続によりパルスビームを得るノーマルパルスタイプで、特にYAGロッドの熱歪を補正するための補助光学系を内蔵しており、一般の加工用YAGレーザーと比べて高い集光性を有する。出力ビームは装置内蔵のビームエキスパンダでビーム径を4倍に拡大し、 $1/e^2$ 直径を 15mm として用いた。これらのレーザーの特性を表2-2に示す。組みあわせた光学系は、いずれもBK7(硼硅酸ガラス)製の凸レンズを用いた集光光学系である。

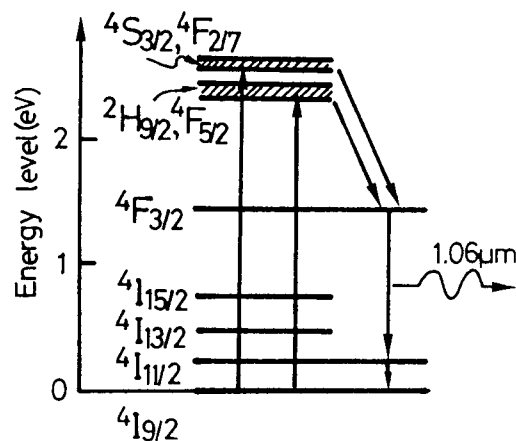


図2-4 YAGレーザー発振におけるエネルギー準位

表 2 - 2 使用したYAGレーザーの装置特性

| Lasers | Rod dia. (mm) | $1/e^2$ dia. (mm) | Peak power (kW) | Pulse width (ms) | Average power (W) |
|--------|---------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| A | 6.4 | 15.0 | 4.5 | 0.5~CW | 140 |
| B | 6.4 | 15.0 | 11 | 0.1 (Fixed) | 25 |

2-1-3 エキシマレーザー

エキシマレーザーは CO_2 と同じ気体レーザーに属するが、発振波長が紫外域であり、非常に高いピークパワーを特徴としている。本研究で用いたのは最も実用化が進んでいる希ガスハライドエキシマレーザーで、レーザー媒体として希ガス (Ar, Kr, Xe) とハロゲン (F_2 , Cl, Br) を用いるものである。図 2 - 5 はエキシマレーザー発振における各エネルギー状態を示している。これらのガス原子はそれぞれが基底状態 (希ガス: R、ハロゲン: X で表す) にある場合は互いに反発し結合しないが、希ガスは電子ビームあるいは放電により電子励起状態 (R^* で表す) となってハロゲンと結合し、励起状態でのみ安定な分子 R X^* (これは励起分子=エキシマと呼ばれる) をつくる。この励起状態の寿命は 10ns 程度と短く、紫外光を放出して基底状態へ落ちる。基底状態に落ちた希ガスとハロゲンは結合が弱く、解離してもとの $\text{R} + \text{X}$ に戻る (これをエキシマ遷移と呼ぶ) ため、基底状態の R X が存在せず、励起状態との間に反転分布が形成され、レーザー発振が可能となる。

本研究で用いたエキシマレーザー (LPX210icc) は放電励起型であり、媒体ガスの交換により波長の異なった発振ビームを得ることができる。用いたエキシマレーザー装置の特性を表 2 - 3 に示す。他のノーマルパルスレーザーのパルス幅 (最小 100 μs)、ピークパワー (最大 10kW) と比べ、エキシマレーザーははるかに短いパルス (ピーク強度の 1/2 となる幅で 19~34ns) と高いピークパワー (最大 10MW) を有する。出力ビームは放電領域の形状を反映して長方形であり、図 2 - 6 のようにほぼ平坦な強度分布をもつ。

加工用光学系は、人工石英レンズを用いた集光系と図 2 - 7 に示すマスクプロジェクション光学系を用いた。後者はレーザー出力ビーム中央付近をマスクで取りだし、これを縮小結像することで均一強度の加工用ビームを発生させる。この時の縮小倍率 $1/m$ は次式により求めることができる。

$$l = ma \quad (2-1)$$

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f} \quad (2-2)$$

ただし、 l :マスクとレンズの距離

a :レンズと結像位置の距離

f :レンズ焦点距離

通常のエキシマレーザでは高い出力が得られる安定型共振器が用いられることが多く、ビームひろがり角が比較的大きい（1x3mrad:縦x横、LPX210iccにおける公称値）が、本研究では不安定型共振器を用いており、ひろがり角は小さい（200 μ rad:実測値）。さらに、集光光学系を用いる場合には図2-8に示す空間周波数フィルタ¹⁶⁾を併用し、集光性の低いビーム成分を取り除くことによって、さらに集光性を高めた。

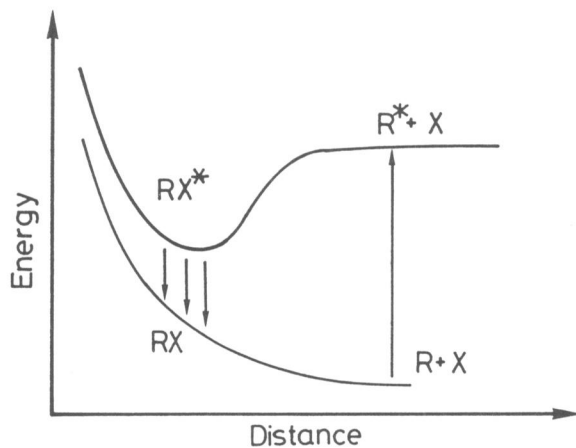


図2-5 エキシマ状態とレーザ発振

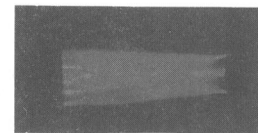


図2-6 エキシマレーザビームの形状

表2-3 エキシマレーザの装置特性

| Laser medum | Wavelength (nm) | Pulse energy (mJ) | Pulse width (ns) | Average power (W) |
|-------------|-----------------|-------------------|------------------|-------------------|
| ArF | 193 | 300 | 23 | 21 |
| KrF | 248 | 400 | 34 | 32 |
| XeF | 351 | 250 | 30 | 19 |

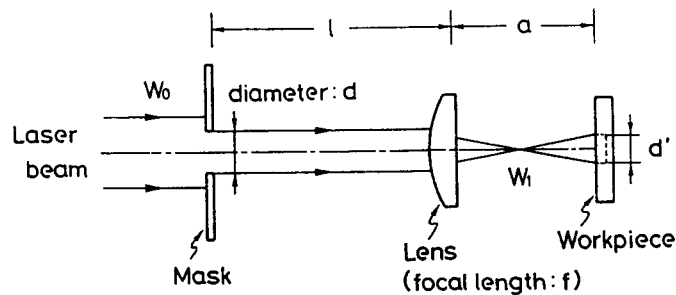


図 2-7 マスクプロジェクション光学系

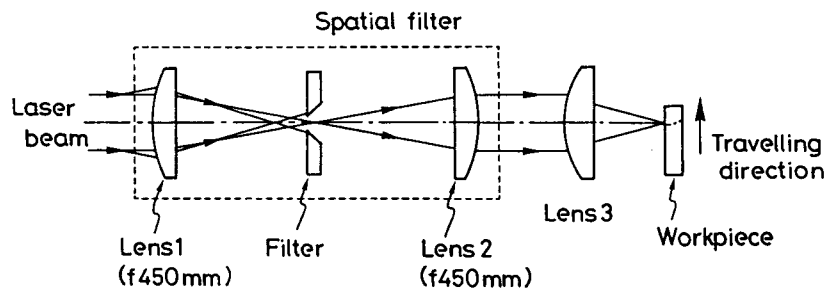


図 2-8 空間周波数フィルタの構成

2-2 レーザパワーの測定

2-2-1 パワー測定上の問題点

レーザパワーはビームの重要な物理量の一つである。一般の市販パワーメータの精度は公称値で $\pm 5\%$ 程度で、しかも受光部がビームによるダメージを受けて吸収率変化を生じるため定期的に基準となるパワーメータとの比較・校正が必要とされる。これまで、10W以下のパワー測定の報告¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾は非常に多い。これに対し、大パワーに対する測定は最高でも500Wにとどまっている²⁰⁾。出力レベルが上がると、例えば、受光部のダメージが著しくなるなど、kWオーダーの加工用レーザにおいてレーザパワーの正確な測定は容易でない。

パワーメータが具備すべき機能として、

- (1) 吸収体が照射されたビームを完全に吸収する、あるいは吸収面全体にわたって吸収率が一定である
- (2) 吸収されたビームエネルギーを正確なパワーに換算できる
- (3) 測定が短時間で容易に行える。
- (4) 経年変化がない。

などがあげられる。

現在市販あるいは報告されているパワー測定器は以下の種類に分けることができる²¹⁾。

- (a) パワープローブ
- (b) ディスクタイプカロリメータ
- (c) コーンタイプカロリメータ

(a)のパワープローブは熱容量既知の受光体ブロックにビームを一定時間照射し、ブロックの温度変化からパワーを読みとるものである。このパワープローブは単純な構造で測定が容易に行えるが、平面受光部であるためレーザ照射により受光部面が徐々に変化し、常に校正して用いる必要がある。このため簡易測定器として用いられる。

(b)のディスクタイプカロリメータは吸収率の高い平面吸収体と冷却ブロック（数十W以上のレーザ光では水冷）から成り、ビーム照射により吸収体に生じる温度勾配を熱電対等で読みとる方式である。このタイプでは校正用ヒータを内臓したものもあり吸収体への入熱は比較的精度良く測定できるが、受光部を完全に黒体化することは不可能なため受光部吸収率の正確な測定を必要とし、また定期的に検定しなければならない。この欠点を補うために反射光を測定する副カロリメータを備えた形式も開発されている²²⁾が測定系が2組必要で構造が複雑となる。

(c)のコーンタイプは受光部でビームを多重反射させ、実効的に黒体吸収に近づけると同時に受光部単位面積あたりの熱負荷低減を図ったものである。ただし、実用上、反射回数が4～5回程度と少ないため、入射ビームを完全吸収させるには表面の吸収率を70%以上に保つ必要がある。また開口部が大きすぎると反射時の散乱によりビームの一部が失われることがある。ただし、コーンに吸収されたビームのパワーについては流出入する水温の差を校正用ヒータと比較するため比較的精度よく測定できる。

以上の問題点をふまえ、パワーメータの試作とその評価を行った。

2-2-2 パワーメータの試作とその評価

試作したパワーメータの構成を図2-9に示す。基本的に反射損失を可能な限り低減した水カロリメータであり、次の4要素から構成される。

- (1) Cu管吸収体
- (2) サーミスタ、ブリッジ回路、電源及び電圧計からなる冷却水温度差測定部
- (3) ヒータ、電圧計、電流計及び電源からなる校正部
- (4) 測定系のコントロールとデータ処理を行うコンピュータ（以下CPUとする）

吸収体への入熱は冷却水の温度上昇として測定する。ビーム吸収前後の水温の測定は、図2-10のように2本の固定抵抗、ポテンショメータ、流入部流出部のサーミスタ及び電源によりブリッジ回路を構成し、流出入水温差による平衡点からのずれを電圧計で読みとって行う。次に、これとブリッジ出力が等しくなるようにパワーメータ内部のヒータ加熱を行い、その際の投入電力がレーザパワーに等しいとした。

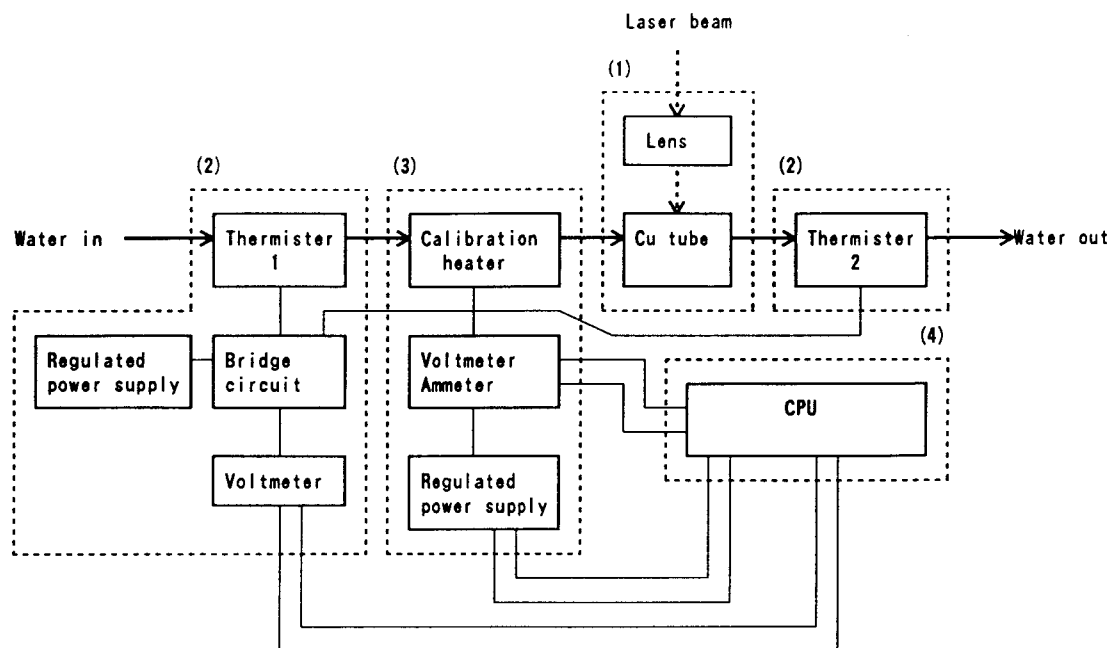


図 2 - 9 試作パワーメータの全体構成

パワーメータの受光部として用いたCu管吸収体（図 2 - 1 1）は高パワービームに対する耐久性を考慮して吸収膜を付けず、内部での多重反射により光を全て吸収する準黒体構造とした。通常の単平板受光面ではCO₂レーザで $4 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ （3kW入力時）、エキシマレーザで $9 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ のビームが照射されるが、本吸収体ではそれぞれ $2 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 、 $3 \times 10^9 \text{ W/m}^2$ と低いいため劣化はほとんどなく、また劣化した場合でも幾何学形状に基づく黒体であるため吸収体全体としての吸収率の低下は生じない。

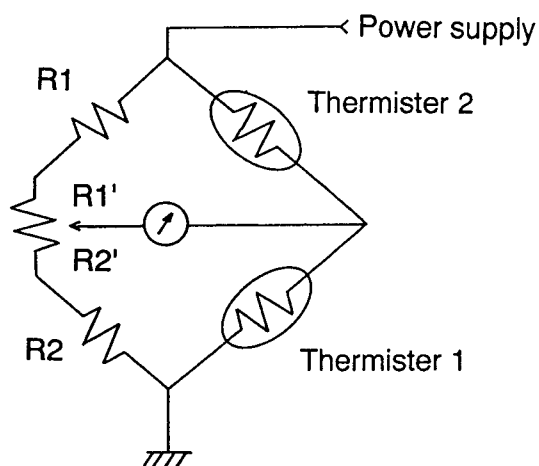


図 2 - 1 0 パワーメータの温度検出系

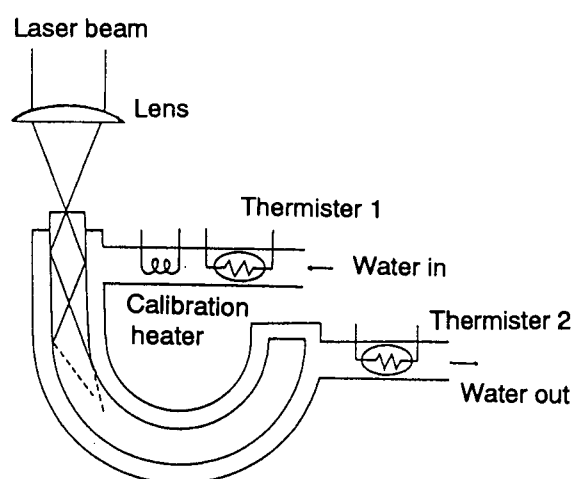


図 2 - 1 1 Cu管吸収体

以下、Cu表面での反射率が最も大きいCO₂レーザを用いて行った受光部の検討結果を示す。ビームをレンズ（f127mm、ZnSe）で集光の後、Cu管（内径6mm、外径8mm）の一端に入射させ、管内での多重反射により全エネルギーを吸収させる。なお、レーザビームの光軸はCu管の軸と一致させた。図2-12は種々の長さの直管を通過した後のレーザパワーをパワーメータ（コーン型）で測定し、通過割合になおした結果を示している。図から明らかなようにCu直管内は反射率が高く、入射ビームが1/2に減衰するには600mm程度の長さを必要とする。すなわち入射ビームを0.1%まで減衰させるのには6m以上の吸収体が必要で、このような吸収体は実用的でない。そこで、Cu管に一定の曲率をもたせることで反射回数を増やし、ビームの吸収を図った。図2-12に曲率半径55mmとした時の管長さと入射ビームの減衰を併せて示している。曲率半径をもたせることで、直管の1/2以下の長さで同等の吸収がえられる。次に、一端をふさいだ800mmの曲管にビームを入射させ、入射端に戻ってくるビームパワーを測定した。図2-13に示すようにCu管入射端に45°の角度でミラーをセットし、ミラー中央部の小孔（直径1mm）からビームを入射させた。入射端に戻ってきたビームのパワーをパワーメータで測定した。この測定の結果、Cu管曲率半径55mmでは入射ビームの0.44%、曲率半径70mmでは0.013%が戻りビームとして検出された。曲率半径が小さい方が戻りビームが多くなるのは曲率半径が小さすぎ曲管の終端に達する前に散乱されて戻ってくるビームがあるためと考えられる。

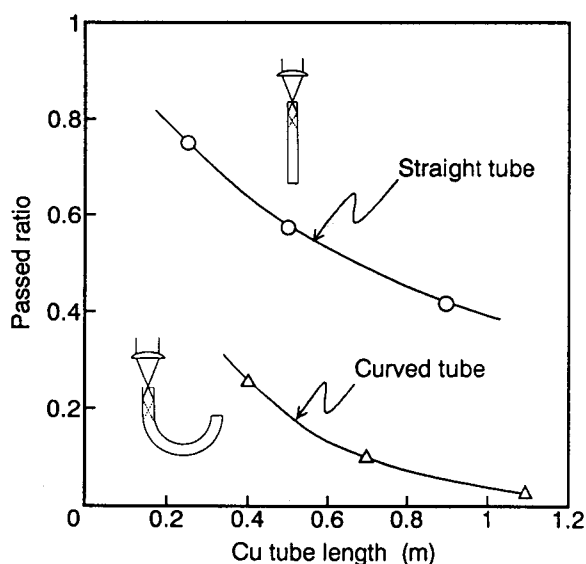


図2-12 吸収管長とビーム通過割合

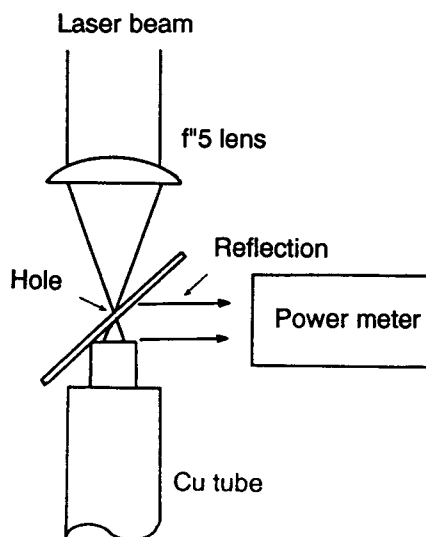


図2-13 吸収管部の反射損失の測定

以上、これまでのパワーメータで最も問題の多かった受光部に関して、Cu管による多重反射吸収体を用いることで反射誤差をほぼ完全になくすることができることが明らかとなった。

次に、受光部以外の測定誤差要因を検討する。

(a) 流入水温変化

本パワーメータでは、冷却水の流出側のみでなく流入側にもサーミスタを設置、ブリッジを構成することで、信号のダイナミックレンジ向上と流入水温変化の影響排除を図っている。用いた2個のサーミスタの温度-抵抗特性が完全に一致する場合、流入水温が変化してもブリッジの零点は自動的に補正され誤差を生じないが、実際には図2-14に示すように若干の特性差があり、この結果流入温度変化に対しては図2-15示す零点移動が認められた（それぞれ温度測定はベックマン温度計により行った）。ビーム入熱による流入-流出間の水温差では図2-16に示すブリッジ出力が得られる。流入水温変動を0.5度に抑え、入熱による温度差を5度程度とすると流入水温による誤差は0.06%となる。

(b) 電源および計測機器

パワーメータを構成する電源は校正用ヒータ電源も含めて全て安定化型を用いており、その変動公称値はブリッジ電源で0.065%、ヒータ用電源で0.01%である。これらの公称値から、電源による誤差は0.075%以下である。

本パワーメータに使用している測定器はデジタルマルチメータと電流測定用シャント抵抗で、それぞれの機器の誤差がすべて+側あるいは-側に偏っている場合でも、測定系全体としての誤差は公称値で0.3%以内である。

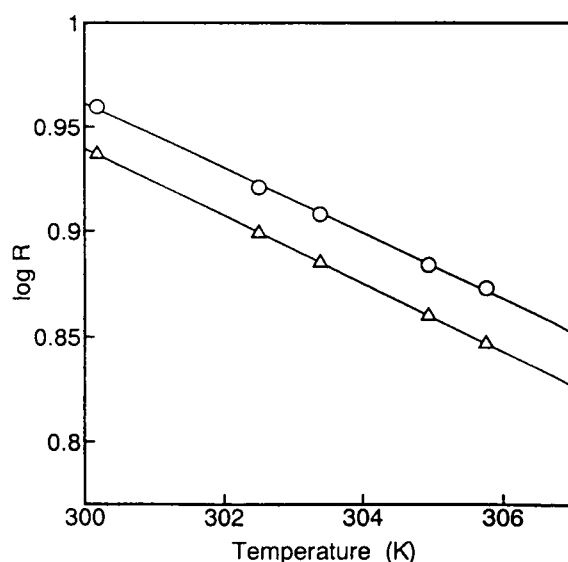


図2-14 サーミスタの温度-抵抗特性

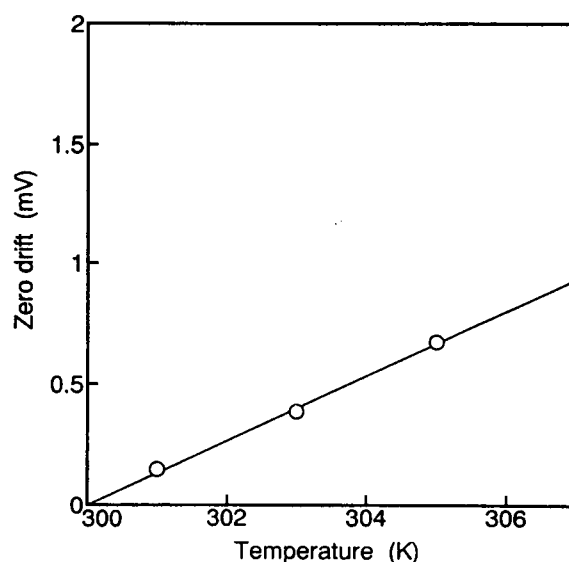


図2-15 流入水温による零点ドリフト

(c) 熱損失誤差

次にパワーメータ中の配管からの熱伝達による誤差を評価する。図2-14に示したサーミスタ特性から流入-流出水温差とブリッジ出力電圧の関係を計算により求

め、これと校正用ヒータで種々の温度差を与えた時のブリッジ出力電圧を比較した。図 2-17 は計算値に対する実測値の比を示している。5度程度の温度差において実測値は計算値より2%程度低い。これは熱伝達による損失と考えられる。

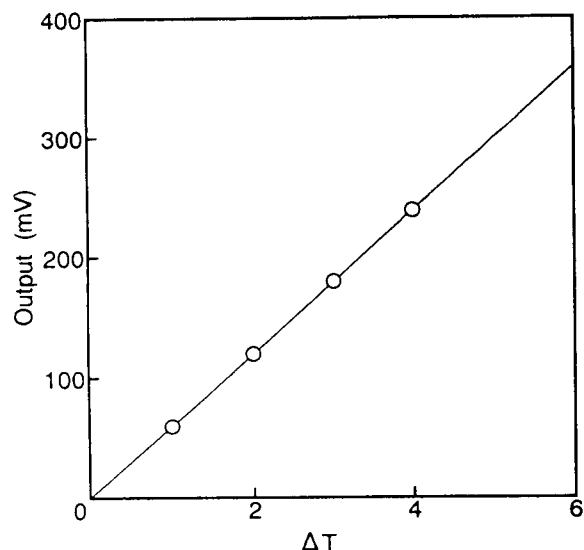


図 2-16 流出入温度差とブリッジ出力の関係

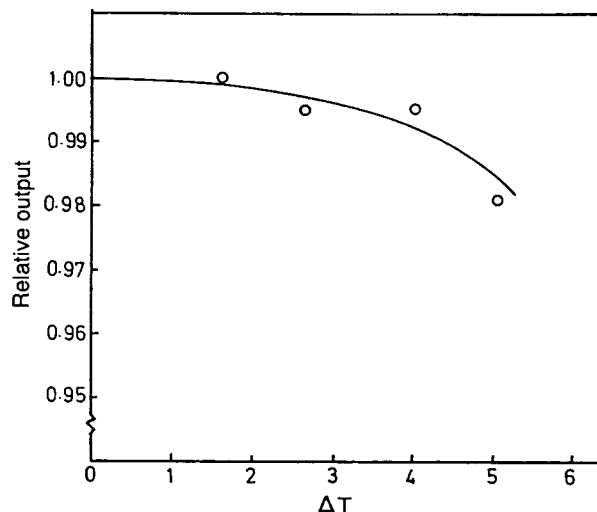


図 2-17 熱伝達による測定誤差

開発したパワーメータの精度は、以上の各誤差要因が重なることにより、+0.44、-2.4%と評価される。これは市販パワーメータの精度±5%と比べ十分高精度で、かつ受光部損傷による経年変化がないため再現性のよい測定が可能となった。なお、本パワーメータは真空容器内にあり、パワーメータ受光部周辺を真空とすることで最大の誤差要因である熱伝達をほぼ完全に除去できる。この場合の測定誤差は+0.44%、-0.45%と算定でき、標準パワーメータとしても十分な精度といえる。なお、エキシマレーザは他のレーザと比べて平均出力が低いため、同じ測定機構で、吸収体となるCu管を小型化したものを用いた。

2-3 集光ビームのパワー密度分布計測

2-3-1 ビームのパワー密度計測方法

集光ビームに適用可能と思われる強度分布計測手段としては、以下のようなものをあげることができる。

- (1)材料の蒸発形状による測定²³⁾
- (2)写真法²⁴⁾
- (3)受光素子による測定

(1)の蒸発形状測定は特別な機器なしにビーム強度の2次元分布を知ることがで

きることからCO₂レーザのモードパターン計測にしばしば用いられてきた方法である。透明アクリル樹脂（PMMA）は垂直入射するCO₂レーザをよく吸収し、熱伝導率が非常に小さいためほぼ強度分布形状を反映した蒸発孔が得られる。ただし、蒸発孔が深く、内壁への入射角が70°以上となった場合、反射の影響が大きくなり反射ビームが蒸発孔の中に集まるため、蒸発孔とビーム強度分布は一致しなくなる。また強度分布を得るには蒸発孔形状の正確な測定が必要となる。このためリアルタイムでの強度分布計測に適用するには問題が多い。(2)の写真法はレーザ加熱による温度変化で写真用フィルムの可視光感度が変化することを利用している。測定するビームを一定パルス幅で照射した直後にストロボ発光で均一露光させると、ビーム強度に応じて感度が変化するため、ビーム強度分布がフィルム上の濃淡として現われる。この方法は複雑なパターンの測定に対しては有利であるが、先の蒸発孔による測定と同様、これから直接に強度分布を知ることとはできない。

本研究では強度分布を直接数値として求めることができる(3)の方法を用いることにした。レーザビームが対称性のない任意強度分布をなす場合、分布を計測するには分布全体にわたりをまんべんなく強度測定を行う必要がある。このときの分布測定法としては図2-18に示すように

- (a)マトリックス素子による測定
- (b)アレイ素子による単掃引
- (c)単素子による2次元走査

が考えられる。マトリックス素子あるいはアレイ素子による測定は一度に多数点の強度測定が行えるが、素子間の感度差に加え、信号処理系が複雑になる、測定分解能と測定可能ビームサイズが素子の実装ピッチ（通常25～50μm）、素子寸法により制限されるなどの問題がある。そこで本研究では単素子にスリットあるいはピンホールをプローブとして組み合わせることとした。

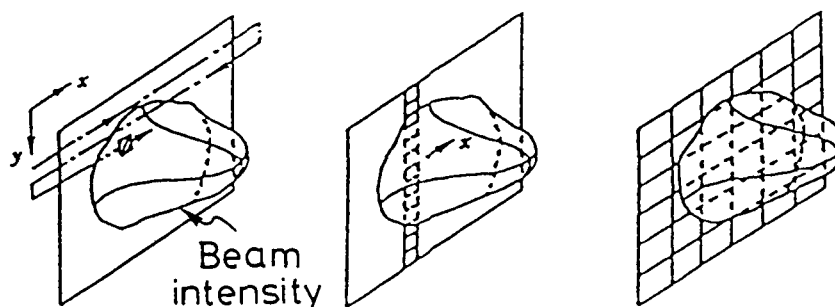


図2-18 ディテクタの種類とビームパワー密度測定法

2-3-2 パワー密度分布計測装置の構成と特性

各種光検出素子の感度波長域と応答速度を図2-19に示す。図からも明らかのように、エキシマレーザ（紫外域）、YAGレーザ（近赤外）、CO₂レーザにはそれぞれ適用できる素子が限定される。

波長数 μm 以上の遠赤外領域で使用できる検出素子はHgCdTeなど一部の光電効果型素子と焦電素子などの熱型素子に限られる。光電効果型素子は赤外域でも感度、応答性に優れているが、液体窒素等による冷却を必要とする。これに対し、熱型の焦電素子（BaTiO₃、LiTaO₃など）は温度変化による自発分極変化を利用した素子であり、常温で使用できる。ここではCO₂レーザに対する検出素子としてLiTaO₃による焦電素子（Model 420）を用いた。表2-4にその特性を示す。

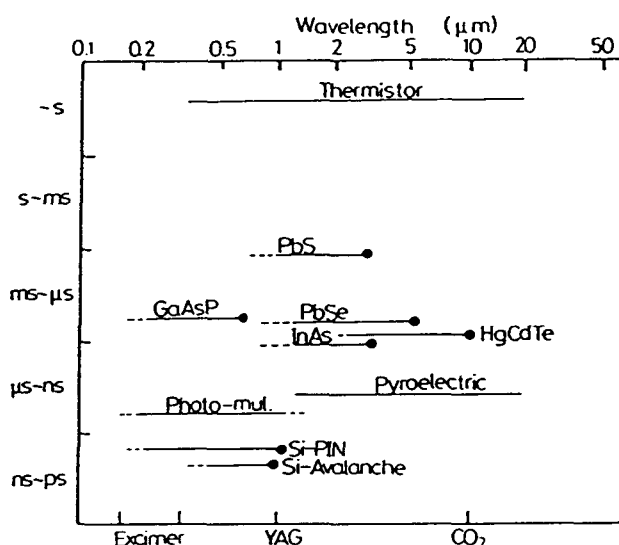


表2-4 焦電素子の特性

| | |
|------------------------|-----------------------------|
| Capacitance | 22pF |
| Current responsibility | 250 $\mu\text{A/W}$ |
| Incident power limit | 5 $\times 10^4\text{W/m}^2$ |
| Rise time | < 1ns |

図2-19 各種ディテクタの感度波長と応答速度

紫外域～可視域、近赤外の検出器は光電効果によるものがほとんどであり、光電管とフォトダイオードがその代表例である。ここでは波長感度域が広く、エキシマレーザとYAGレーザに適用できる、Si-PINフォトダイオード（S1722-02）を用いた。図2-20の波長感度特性²⁵⁾によれば、エキシマレーザ並びにYAGレーザに対してほぼ0.1A/Wの感度を有する。また入射パワーに対する出力電流の直線性が良く（図2-21）、信号立ち上がり時間も1ns（カタログ値）と高速である。

単素子とプローブを組み合わせたパワー密度分布測定では、測定領域内でプローブ移動させる必要がある。とくに測定対象が加工用光出力レーザであるため、プローブの損傷を防ぐ手段も講じなければならない。本研究で試作したCO₂、YAGレーザ用パワー密度分布計測装置の測定部は図2-22のような構造を持つ。測定部に入射したビーム

は回転テーブル外周の反射鏡によりビーム吸収体（水冷）に導かれ、ここで吸収されている。回転テーブル円周上の1カ所にプローブが取り付けられてあり、これがビームを横切る時にはプローブを通過後、Cu製の導波管により素子に導かれ電気信号に変換される。

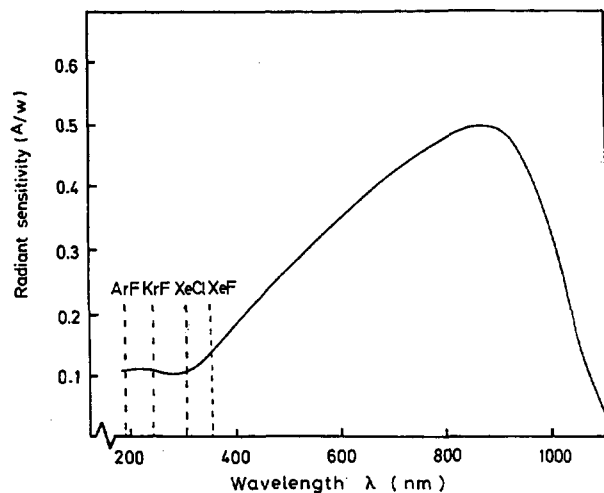


図 2-20 Si-PINフォトダイオードの波長感度特性

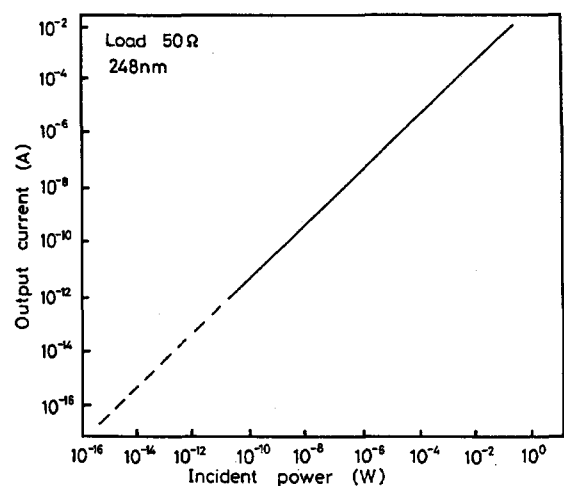


図 2-21 Si-PINフォトダイオード出力の線arity

プローブとしてピンホールを用いる場合には、y 方向にテーブルを移動させつつ回転テーブルによる x 方向測定を複数回おこない、パワー密度分布情報を得る。これに対し、プローブとしてスリットを用いる測定は x 方向 1 回の測定で分布情報が得られる利点があるが、測定結果はスリット内を積分したものである。ただし、この場合でもビームが軸対称な強度分布を持つ場合、測定値をアーベル変換²⁶⁾することにより半径方向強度分布を得ることができる。表 2-5 は CO₂、YAG 用測定装置の特性を示す。本装置では (a) 分布の時間変動 (x-t 測定)、(b) パワー密度の面内分布 (x-y、x-z 測定)、(c) パワー密度の空間分布 (x-y-z 測定) が可能である。測定位置精度は x 方向で 7 μm、y および z 方向では 3 μm と小さく、再現性の高い測定が行える。

エキシマレーザはビームパワー密度が高い（発振器出力ビームでも 10¹⁰ W/m² 以上）、パルス幅が小さい（数十～数百 ns）などの特殊性を持ち、集光ビームを照射した場合、短いパルス時間内にプローブが損傷を受けるため、先に示した YAG、CO₂ レーザ用の測定装置により分布測定を行うことができない。そこで石英板の表面反射によりプローブの損傷数居値以下までパワー密度を低下させたのちビーム測定を行う。ビーム計測装置は、図 2-23 のように、(1) ビーム減衰部、(2) ビーム受光部、(3) 駆動装置、(4) A/D 変換器、(5) 信号処理 CPU から構成される。受光部の損傷及びこれに起因する誤差を防ぐため、石英板の鏡面反射（反射率 5 % × 枚数）により、ビームをプローブの損傷数居値以下まで減衰後、光学系に入射させた。光学系の加工点付近に、x y z ス

ステージにセットしたスリット（あるいはピンホール）プローブとセンサからなるビーム受光部を設置した。センサ出力はA/D変換器からCPUに転送ののち信号処理した。表2-6にエキシマレーザ用パワー密度分布測定装置の特性を示す。本装置では、パワー密度の面内分布と空間分布が測定でき、測定位置精度はいずれの軸でも $3\mu\text{m}$ である。

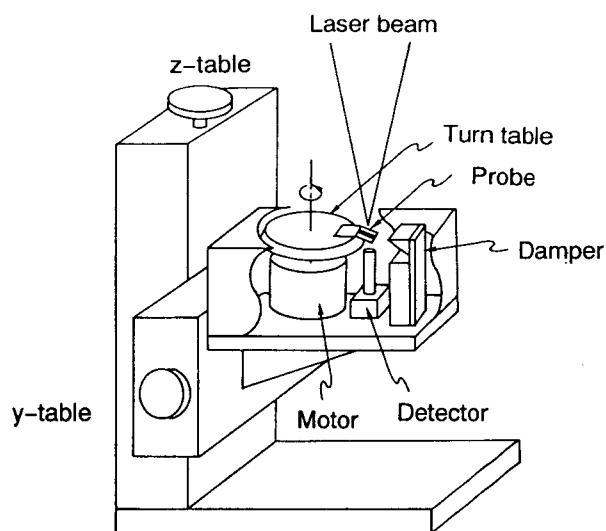


図 2 - 2 2 CO₂、YAGレーザ用パワー密度分布測定装置

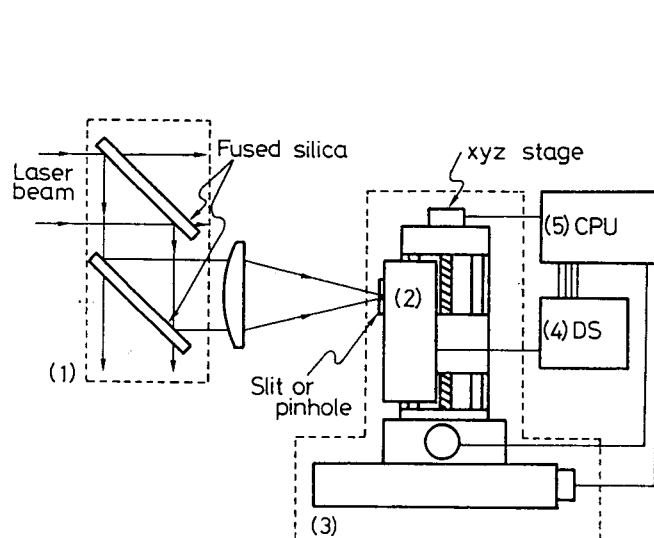


図 2 - 2 3 エキシマレーザ用パワー密度分布測定装置

表 2 - 5 CO₂、YAG用ビーム計測装置の特性

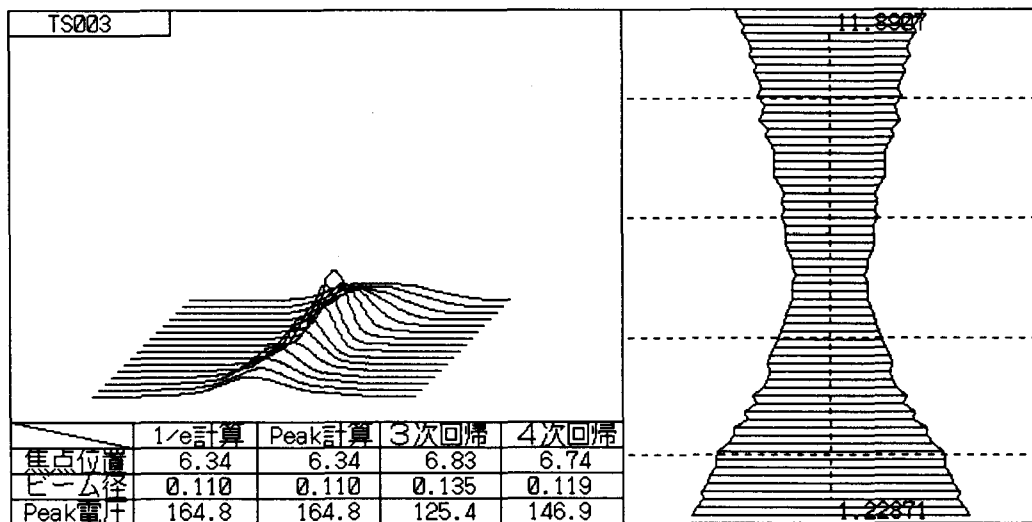
| Measure type | Fluctuation (X-t) | 2-dimensional (X-Y or X-Z) | 3-dimensional (X-Y-Z) |
|------------------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------|
| Revolutions (rps) | 15 | | |
| Scan speed (mm/s) | 3850 | | |
| Measuring area (XxYxZmm) | 3 (max) | 3x25 (max) | 3x25x25 (max) |
| Data number (XxYxZ) | 256 (x64data) | 256x64x1 (or 128x128x1) | 64x32x8 (or 32x32x16) |
| Probe size (μm) | 20 (slit) | 20 (slit or pin-hole) | 20 (pin-hole) |
| Measuring time (s) | 4.3 | 4.3 (8.5) | 25 (50) |

表 2 - 6 エキシマビーム計測装置の特性

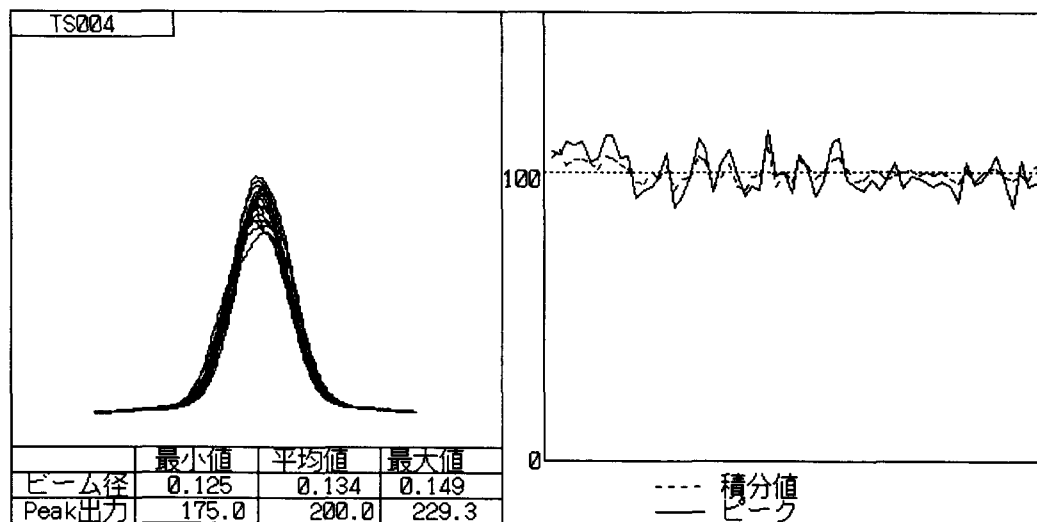
| Measure type | 2-dimensional (X-Y or X-Z) | 3-dimensional (X-Y-Z) |
|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Measuring area (XxYxZmm) | 25x25 (max) | 25x25x100 (max) |
| Data number (XxYxZ max) | 256x64x1 (or 128x128x1) | 64x32x8 (or 32x32x16) |
| Probe size (μm) | >5 (slit or pin-hole) | >5 (pin-hole) |
| Measuring time (s/data) | 0.5 | |

2-3-3 集光ビームのパワー密度分布測定

図 2 - 2 4 (a)はCO₂レーザについて球面レンズの焦点位置を測定した例を示している。この例ではスリットプローブを用い、分布形状はx方向256点、z方向64点のデータを測定して求めており、測定所用時間は4.3sである。(b)には焦点位置でビーム変動を測定した例を示す。この例では±10%程度の出力変動が見られる。また、図 2 - 2 5 はピンホールによる分布測定例を示している。



(a)焦点位置の測定



(b)ビーム径および分布変動の測定

図 2 - 2 4 スリットプローブを用いたCO₂レーザ測定例

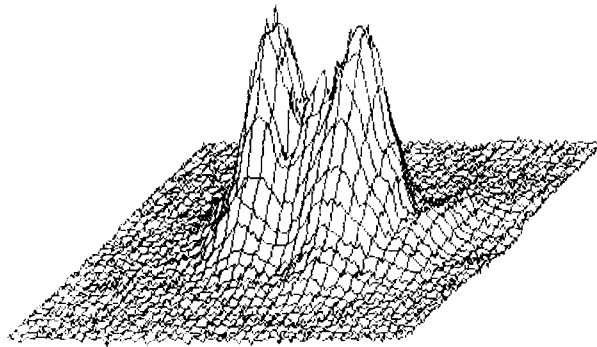


図 2-25 ピンホールプローブによる分布測定

図 2-26 はスリットプローブを用いて測定した、エキシマレーザ焦点付近のビーム径 ($1/e$ 径) 変化を示している。また比較のため黒化した印画紙を用いたバーンパターンによる測定結果を示した。印画紙による測定では絶対パワー密度が一定値以上の領域が蒸発変色するため、 z 方向の位置を変化させてもパターンサイズの変化が小さい。これに対しビーム測定装置を用いると各位置での中心強度を基準としたビームサイズが求まるため、図のように焦点の決定が容易に行える。ピンホールプローブによる焦点位置での集光エキシマレーザ強度分布の測定例を図 2-27 に示す。図 2-28 は空間周波数フィルタの有無によるビーム裾付近のパワー密度分布変化を比較して示している。

このように開発したビーム計測装置により、集光レーザビームの焦点位置、パワー密度分布の測定が行える。

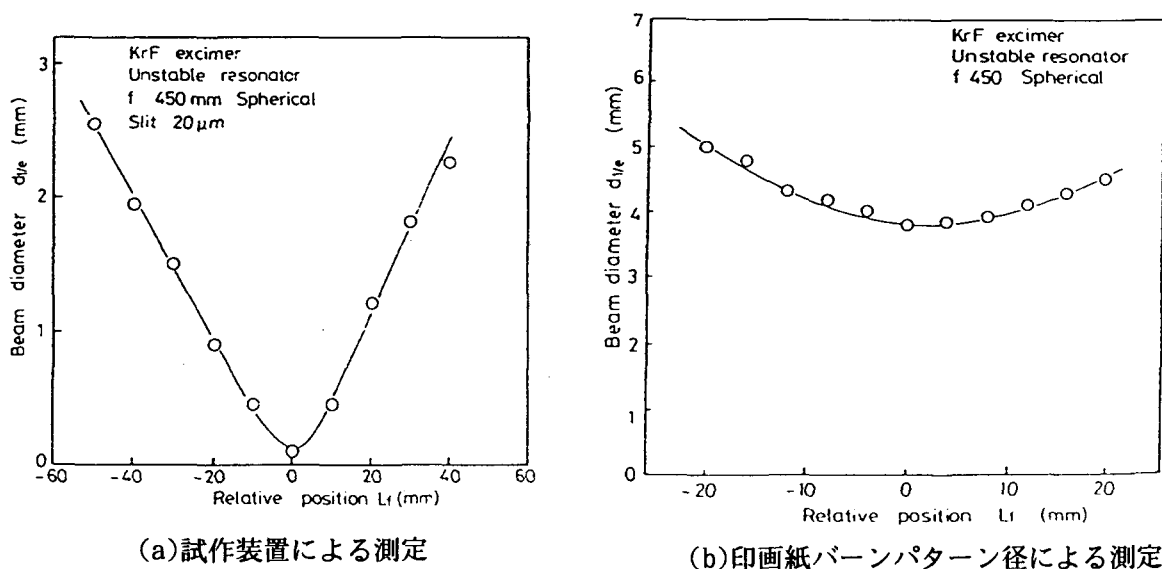


図 2-26 スリットプローブを用いたエキシマレーザ焦点位置測定

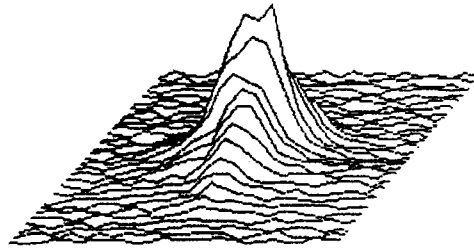
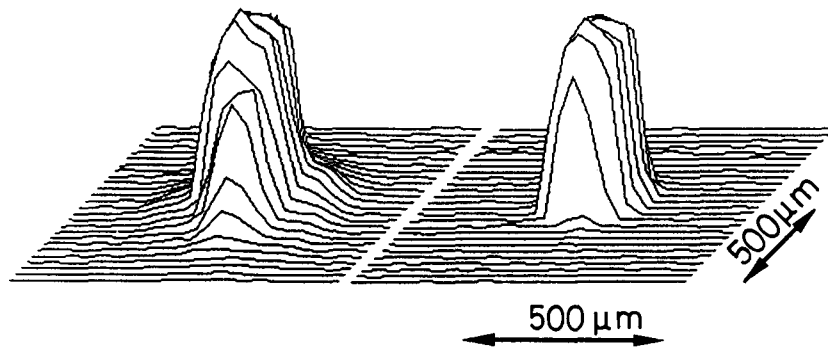


図 2 - 2 7 集光エキシマレーザのパワー密度分布形状



(a)空間フィルタなし

(b)空間フィルタあり

図 2 - 2 8 空間周波数フィルタの有無による焦点パワー密度分布の変化

表 2 - 7 は用いたレーザ装置に関して、それぞれの最大パワー出力時、加工用光学系の焦点あるいは結像点において測定したパワー密度の例を示す。モードセレクトを持つ CO_2 レーザにおけるマルチモード側と低時側の比較ではパワー的に低い低時側の方が高いパワー密度を有する。 CO_2 レーザでは装置 (b) のパワー密度が最も高く、 $1.3 \times 10^{11} \text{ W/m}^2$ 、これに対し、装置 (c) では $4 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ と 3 倍以上の差が見られ、装置間の差が大きいことがわかった。YAG では装置 (B) が 10^{12} W/m^2 と高いパワー密度となっている。また、エキシマレーザではマスクプロジェクションでも $9 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$ 、集光では $2 \times 10^{16} \text{ W/m}^2$ と、他のレーザよりはるかに高いパワー密度を発生できることがわかった。

表 2 - 7 加工点における各レーザのパワー密度

| CO_2 lasers (f127mm) (Multi mode) | | | | YAG lasers (f80mm) | | KrF excimer laser (f100mm) | |
|---|--|----------------------|--|----------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------|
| A | B | C | D | A | B | Mask | Focusing |
| 5.6×10^{10} | 1.3×10^{11} (4.4×10^{10}) | 4.0×10^{10} | 7.4×10^{10} (4.8×10^{10}) | 4.0×10^{11} | 1.0×10^{12} | 9×10^{12} | 2×10^{16} |

2-4 結言

従来、レーザのパワー密度分布は、加工特性への影響が定性的には指摘されながら、有効な測定手段がなかった。本章では高精度のパワーメータならびにパワー密度分布測定装置を試作し、実験に用いる各レーザ装置の出力ビームの集光性、焦点でのパワー密度を比較した。以下に得られた結果を要約する。

(1) 試作したパワーメータを用いることで、従来 $\pm 5\%$ 程度であったパワー測定の精度を $\pm 0.45\%$ にまで高めることができた。この精度は長期間の使用によっても維持される。

(2) 試作したパワー密度分布測定装置により、材料との相互作用点でのレーザビームのパワー密度分布が測定可能となった。

(3) 実験に用いる各レーザで発生できるパワー密度、集光ビーム径が明らかとなった。同一種の加工用レーザ装置でも装置間でビーム径、パワー密度に大きな差がみられる。

(4) CO_2 レーザではパワーが大きいマルチモードよりも、集光性が高い低時モードの方がはるかに高いパワー密度のビームを発生できる。測定の結果得られた、それぞれの最大パワー密度は、 $4.8 \times 10^{10} \text{W/m}^2$ および $1.3 \times 10^{11} \text{W/m}^2$ である。

(5) 集光エキシマレーザのパワー密度はマスクプロジェクションでも $9 \times 10^{12} \text{W/m}^2$ 、集光では 10^{16}W/m^2 以上であることを確認した。

第3章 レーザによるセラミックスの除去加工

3-1 レーザによるセラミックスの除去加工

本研究で加工の対象とした各セラミックスの物性値を表3-1に示す。このうち Si_3N_4 および SiC は同一組成の液相をもたず、温度上昇に伴い2151K、3259Kでそれぞれ分解する分解型セラミックスである。一方、 Al_2O_3 と ZrO_2 はそれぞれ2327K、2950Kに融点をもつ熔融型セラミックスで、さらに温度が上昇した場合には3270K、4548Kで蒸発・分解する。本章ではこれらセラミックスに高パワー密度のレーザを照射し、除去加工した結果について検討する。

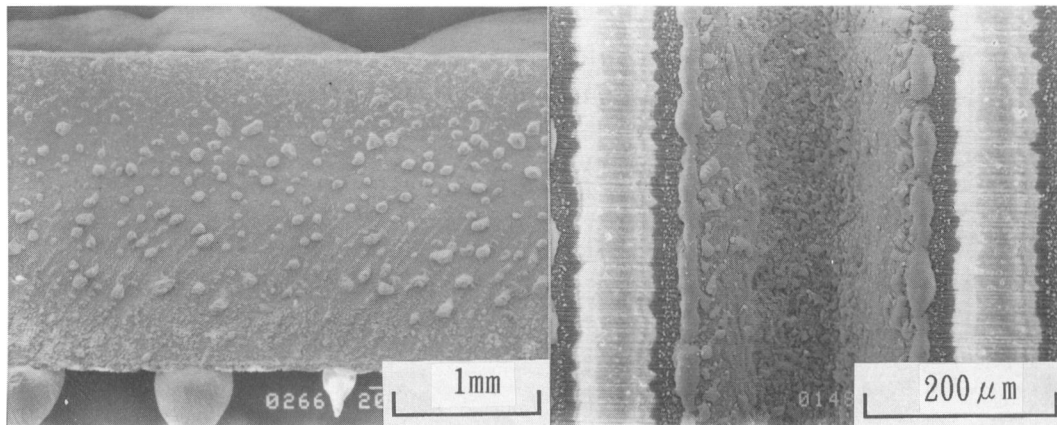
表3-1 各セラミックスの物性値

| | Si_3N_4 | SiC | Al_2O_3 | ZrO_2 | Steel |
|---|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|-------|
| Melting point (K) | 2151 (T_d) | 3259 (T_d) | 2327 | 2950 | 1536 |
| Boiling point (K) | — | — | 3270 | 4548 | 2860 |
| Specific gravity (g/cm^3) | 3.2 | 3.2 | 3.8 | 5.9 | 8.0 |
| Specific heat (J/gK) | 0.75 | 0.63 | 0.80 | 0.50 | 0.84 |
| Linear expansion coefficient ($10^{-6}/^\circ\text{C}$) | 3.2 | 4.4 | 7.9 | 11.0 | 11.76 |
| Thermal diffusivity (cm^2/s) | 0.0695 | 0.3125 | 0.0831 | 0.0127 | 0.05 |
| Flexural strength (MPa) | 590 | 540 | 300 | 980 | — |
| Young's modulus (GPa) | 290 | 430 | 340 | 210 | 197 |

3-1-1 CO_2 およびYAGレーザによる加工部の外観

ここでは熔融型セラミックス、分解型セラミックスからそれぞれ Al_2O_3 と Si_3N_4 を選び、試料を移動させつつ集光した CO_2 およびYAGレーザを照射して、形成された加工面の観察を行った。

板厚2mmのセラミックスに集光CW- CO_2 レーザ（中心パワー密度： $D_p=10^{11}\text{W/m}^2$ ）を照射すると、試料の移動速度が小さい場合には、ビームは裏面にまで貫通し切断加工となり、速度が大きい場合には未貫通の溝加工となる。それぞれの Si_3N_4 加工面の状態を図3-1に示す。(a)、(b)いずれにおいても、レーザ照射を受けて除去された面に粒状の付着物が認められる。(b)の溝加工においては光軸付近の高いパワー密度のビームが照射された溝底部では比較的付着物は少なく、照射パワー密度がより低いビーム外周部に近づくほど、付着物の量が増え、そのサイズも大きくなっている。



(a)貫通状態
 $v=25\text{mm/s}$
 $W_p=1500\text{W}$

(b)未貫通で溝加工状態
 $v=1100\text{mm/s}$
 $W_p=1000\text{W}$

図 3 - 1 CW-CO₂ レーザによるSi₃N₄加工面

図 3 - 2 はパルスCO₂レーザ ($D_p=10^{11}\text{W/m}^2$) でArをアシストガスとしてSi₃N₄を切断した時の加工面の状態を示したものである。この場合も加工面には粒状の付着物がみられる。図 3 - 1 に示したCWの場合と比較すると、パルスレーザによる加工面の方が付着粒径が小さく、全面が粒子覆われている。

図 3 - 2 のパルスCO₂レーザ ($D_p=10^{11}\text{W/m}^2$) と、パルスパラメータ、ビーム集光径をほぼ等しくしたパルスYAGレーザ ($D_p=1.5 \times 10^{11}\text{W/m}^2$) を用いてSi₃N₄を切断した時の加工面状態を図 3 - 3 に示す。アシストガスはArを用いた。この場合もSi₃N₄では、常に付着微粒子がみられ、用いたレーザの波長による差は認められない。図 3 - 4 はAl₂O₃について両レーザによる加工面写真を示している。Al₂O₃の場合でもレーザ波長による差は認められない。ただし、付着物の形態はSi₃N₄と異なり層状となっている。

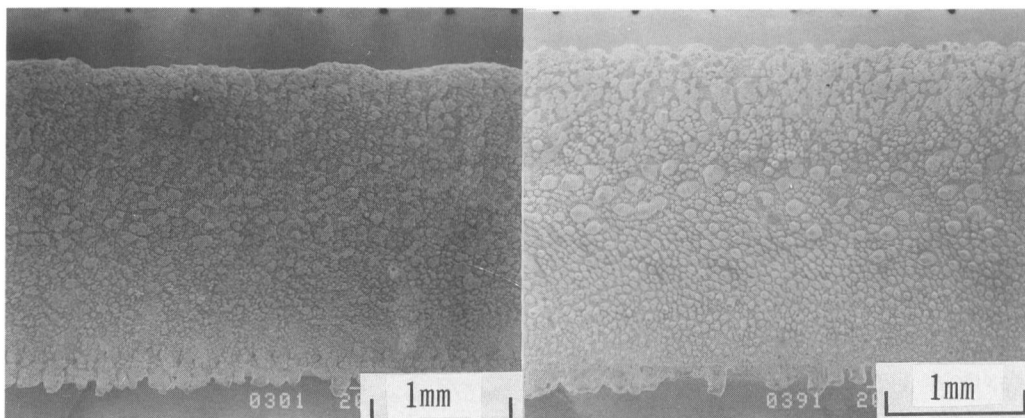
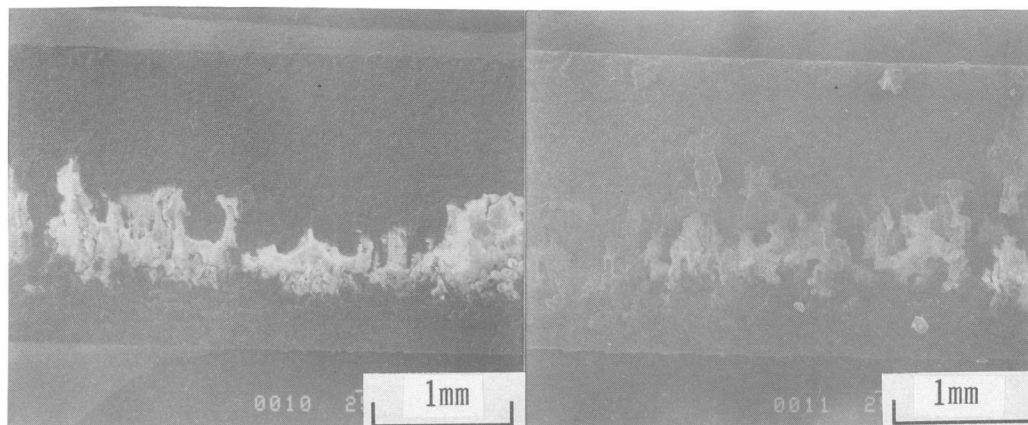


図 3 - 2 パルスCO₂レーザによるSi₃N₄加工面
 $W_p=1500\text{W}$, $v=3\text{mm/s}$

図 3 - 3 パルスYAGレーザによるSi₃N₄加工面
 $W_p=2300\text{W}$, $v=3\text{mm/s}$



(a)CO₂ レーザ加工面
v=0.5mm/s
W_p=1500W

(b)YAGレーザ加工面
v=0.5mm/s
W_p=1800W

図 3 - 4 パルスCO₂、YAGレーザによるAl₂O₃加工面

このように、CO₂あるいはYAGレーザを用いたセラミックスの切断では、加工面は一見平坦であるが、付着物が発生するため加工面の表面粗さはたとえばSi₃N₄の場合で20 μ mRz以下にはならない。溝加工を一定間隔で行った結果得られる加工面（図 3 - 5）では、粒子付着量は切断面より少なく、特にビーム光軸付近で加工された部分にはほとんど粒子付着が見られない。この加工面で付着粒子を避けて粗さを測定した場合の粗さは8~10 μ mRzであった。

この時の粗さはレーザのパワー変動により生じたと考えられる。本実験で用いたCO₂レーザ装置は図 3 - 6 に示すように $\pm 10\%$ 程度のパワー変動を有しており、また後で示すように加工速度とパワー密度が比例関係にあるため、加工溝深さに20%程度の変動を生じると推測される。これはv=2.5~5m/sでは加工面粗さ実測値とほぼ等しい5~10 μ mRzに相当する。

CO₂あるいはYAGレーザを用いた加工では、加工条件によりその量は変化するものの、常に粒子の付着が見られた。

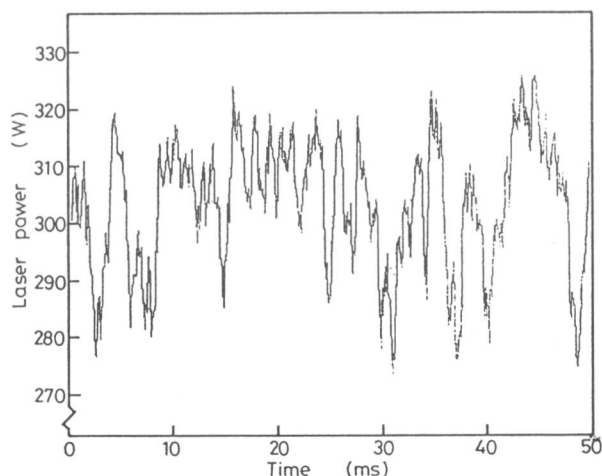


図 3 - 5 CO₂ レーザのパワーリップル波形例

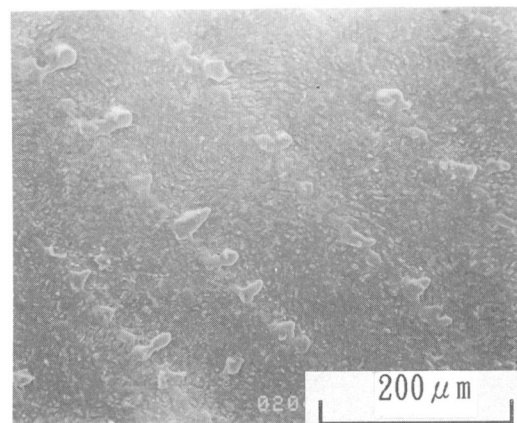


図 3 - 6 一定間隔での溝加工による加工面
v=2500mm/s, W_p=1500W

3-1-2 エキシマレーザによる加工部の外観

エキシマレーザビームは数百mJのパルスエネルギーを有し、かつパルス幅が小さいため、高いピークパワー密度 ($\sim 9 \times 10^{10} \text{W/m}^2$) をもっている。しかも強度分布が平坦であるので、マスク通過ビームをレンズで縮小投影するマスクプロジェクション法によれば加工に十分なパワー密度 ($\sim 9 \times 10^{12} \text{W/m}^2$) で均一な強度分布のビームを照射することができる。マスクプロジェクションおよび、集光ビームによる加工部の観察結果を以下に示す。

図3-7は Si_3N_4 、 SiC 、 ZrO_2 及び Al_2O_3 の各セラミックス板にピークパワー密度; $D_p = 4.6 \times 10^{12} \text{W/m}^2$ (フルエンス; $D_e = 0.15 \text{J/mm}^2$)、繰り返し周波数; $f_p = 80 \text{Hz}$ のKrFエキシマレーザビーム (波長248nm) をパルス数; $N = 1000$ 照射して得られた加工穴のSEM像を示す。また、加工穴の断面形状例を図3-8に示す。いずれの材料においてもマスク形状を反映したほぼ完全な円形の加工穴が得られており、穴径はマスクサイズ (3mm) と使用した光学系の縮小倍率 (1/11) による計算値 ($272 \mu\text{m}$) とほぼ一致している。穴の入り口エッジはほぼ垂直で、断面形状もここで示した程度の穴深さ ($450 \mu\text{m}$) ではほぼ完全な円筒形でテーパはほとんどみられない。加工穴断面を詳細に観察すると、底面の周辺部が中央部に比べて深くなっていることが認められた。

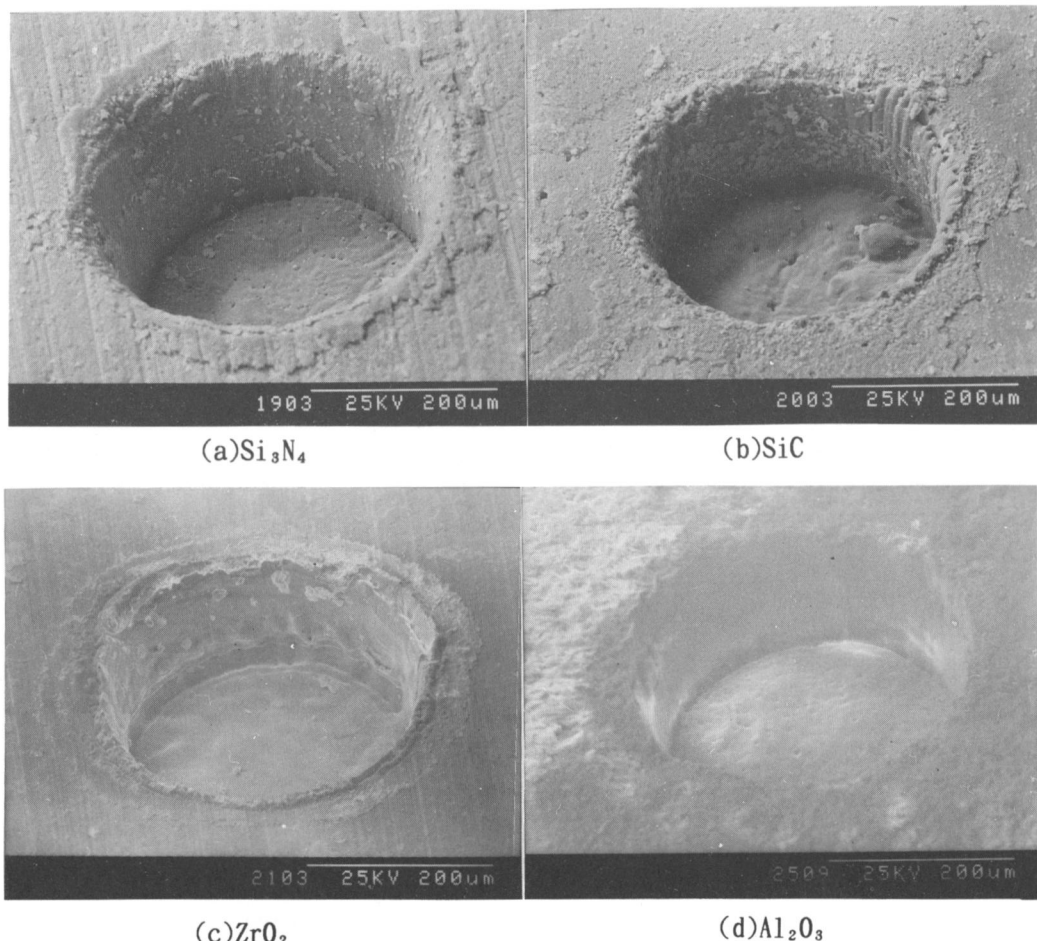


図3-7 各セラミックスのエキシマレーザ照射部
KrFエキシマ, $D_p = 4.6 \times 10^{12} \text{W/m}^2$, $N = 1000$

200 μm

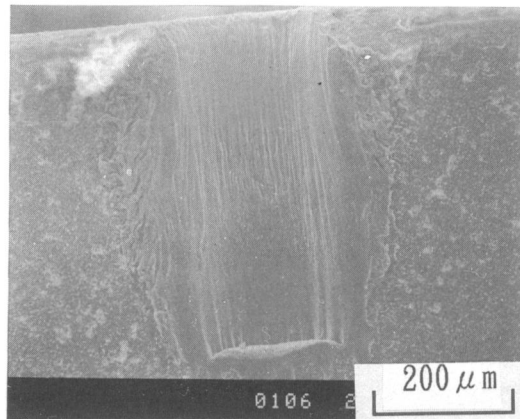


図3-8 セラミックスのエキシマレーザ加工
穴側面像の例 (KrFエキシマ, Si_3N_4
 $D_p=4.6 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$, $N=2000$)

図3-9～図3-12は Si_3N_4 、 SiC 、 ZrO_2 および Al_2O_3 の各試料に照射するパワー密度を、(a) $D_p=1.2 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$ (フルエンス $D_e=0.04 \text{ J/mm}^2$)、(b) $2.4 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$ ($D_e=0.08 \text{ J/mm}^2$)、(c) $4.6 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$ ($D_e=0.15 \text{ J/mm}^2$) と変化させた場合の穿孔状態を示している。ここでは、加工進行面である穴底面に注目する。なお、同一数のパルスを照射しているため、単位面積あたりの照射エネルギーは高パワー密度にするほど高くなり、この結果加工穴が深くなる。

Si_3N_4 では低パワー密度 ($D_p=1.2 \times 10^{12} \text{ W/mm}^2$) にした場合、加工部底面に細かい針状の突起が観察される。この突起はパワー密度の上昇により消滅し、平坦化していく。他のセラミックス、 SiC 、 Al_2O_3 、 ZrO_2 ではパワー密度による加工穴底面形状の変化は特に認められなかった。

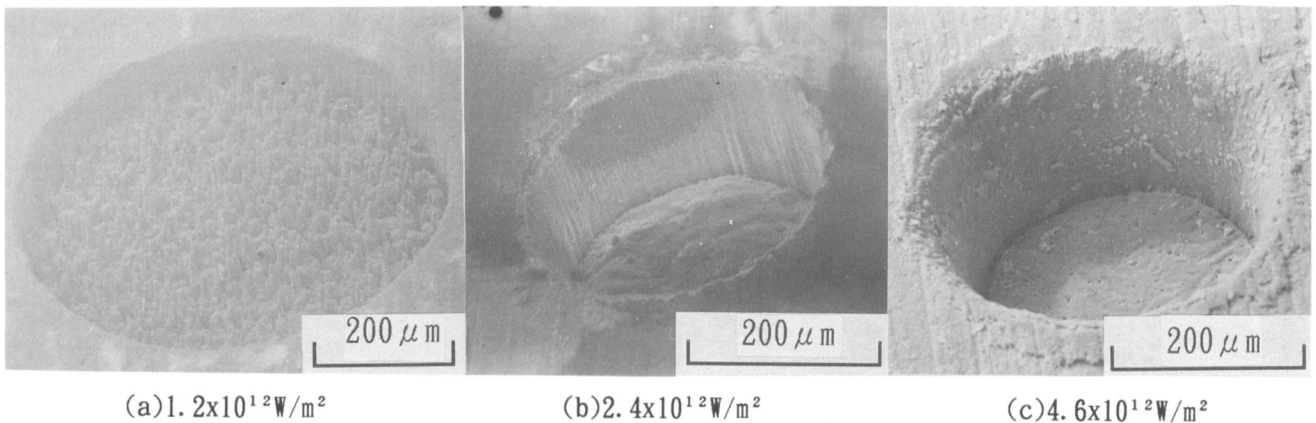
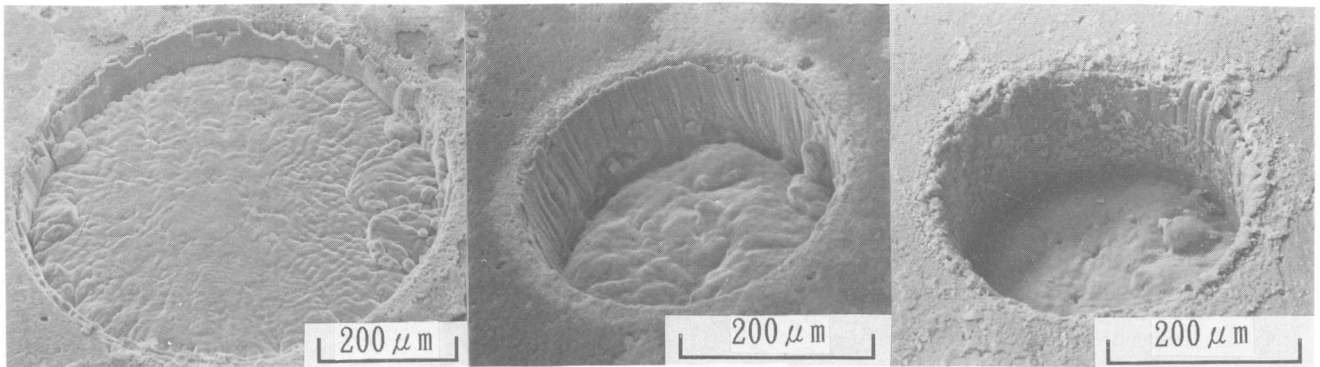


図3-9 レーザパワー密度による Si_3N_4 加工部の変化

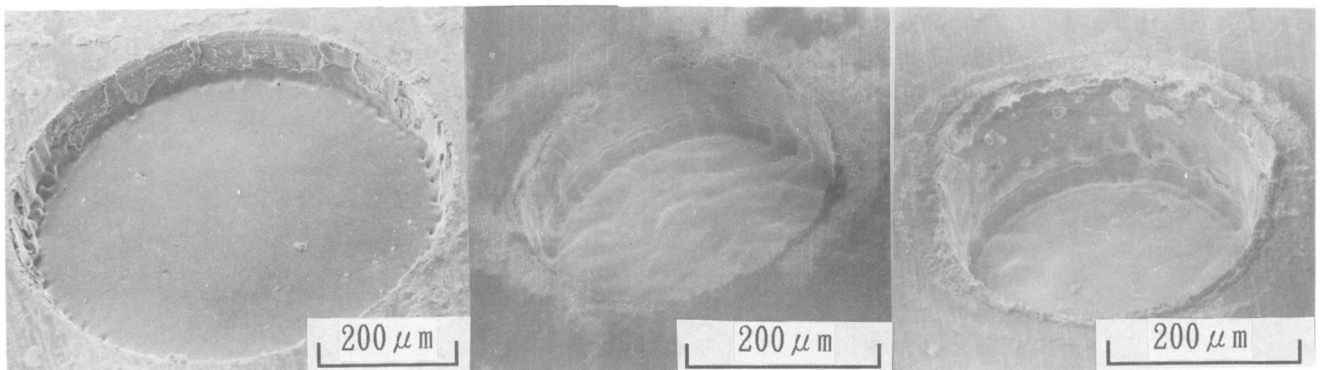


(a) $1.2 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$

(b) $2.4 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$

(c) $4.6 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$

図 3 - 1 0 レーザパワー密度によるSiC加工部の変化

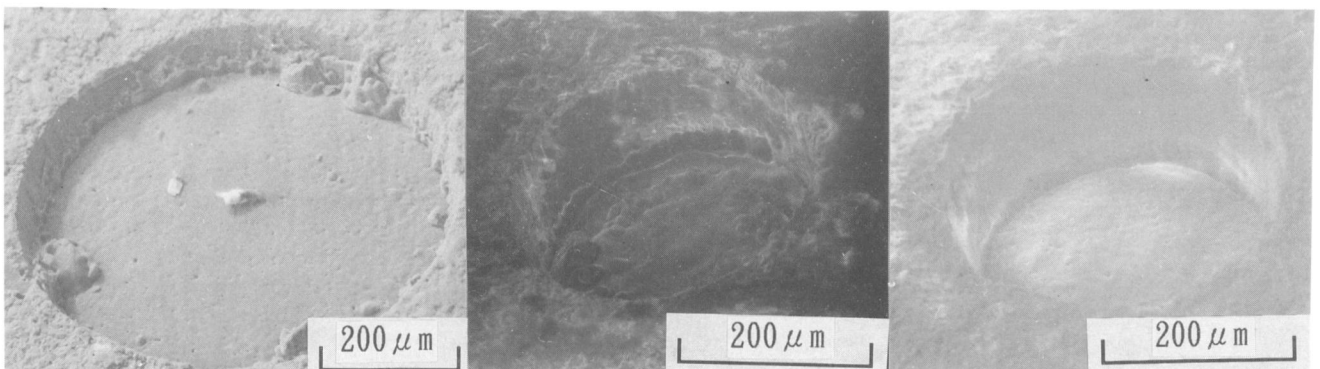


(a) $1.2 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$

(b) $2.4 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$

(c) $4.6 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$

図 3 - 1 1 レーザパワー密度によるZrO₂加工部の変化



(a) $1.2 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$

(b) $2.4 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$

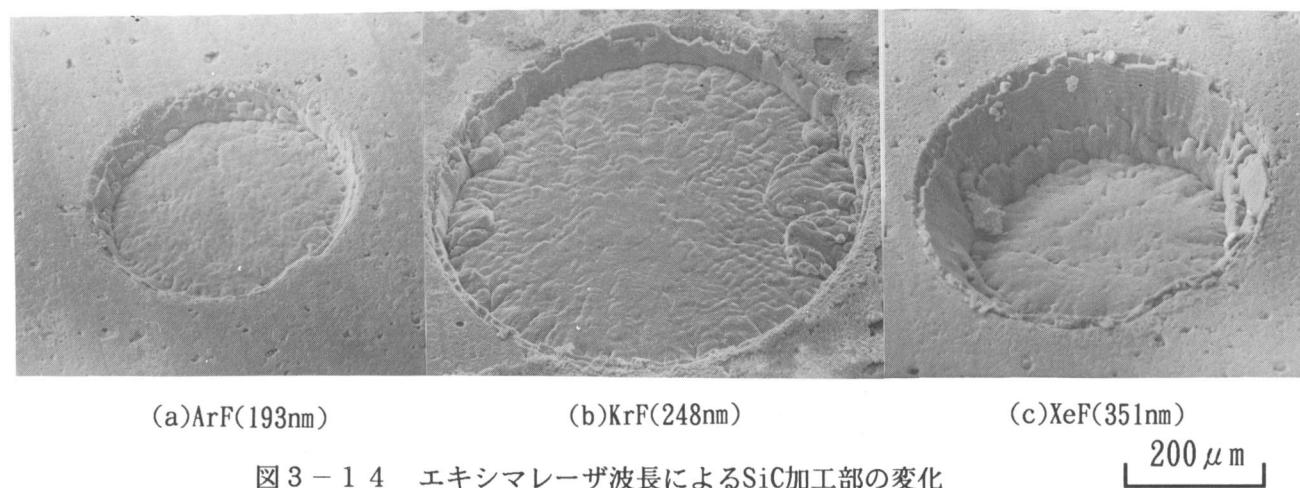
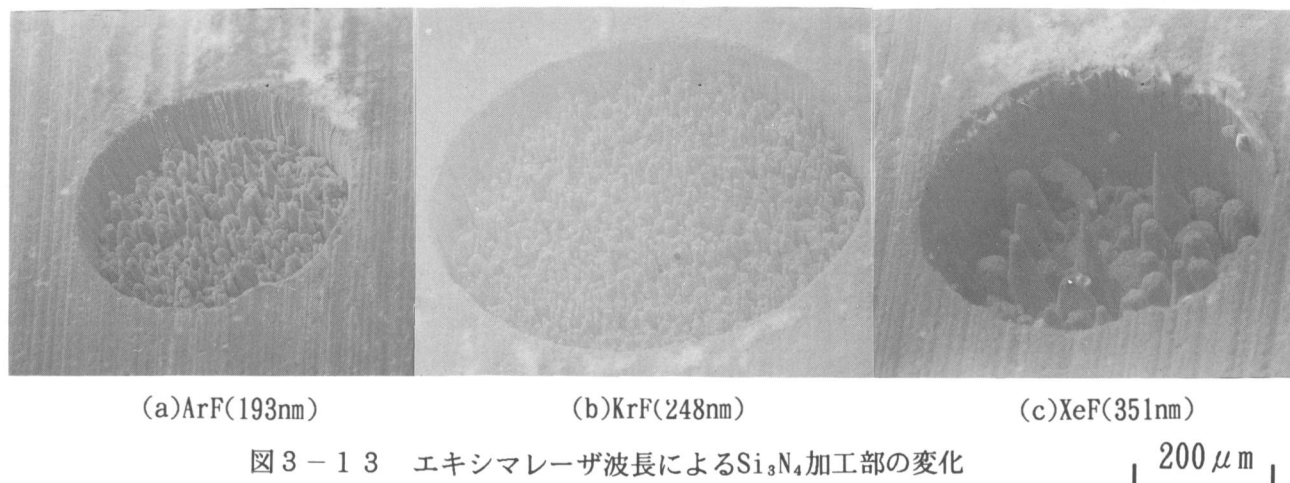
(c) $4.6 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$

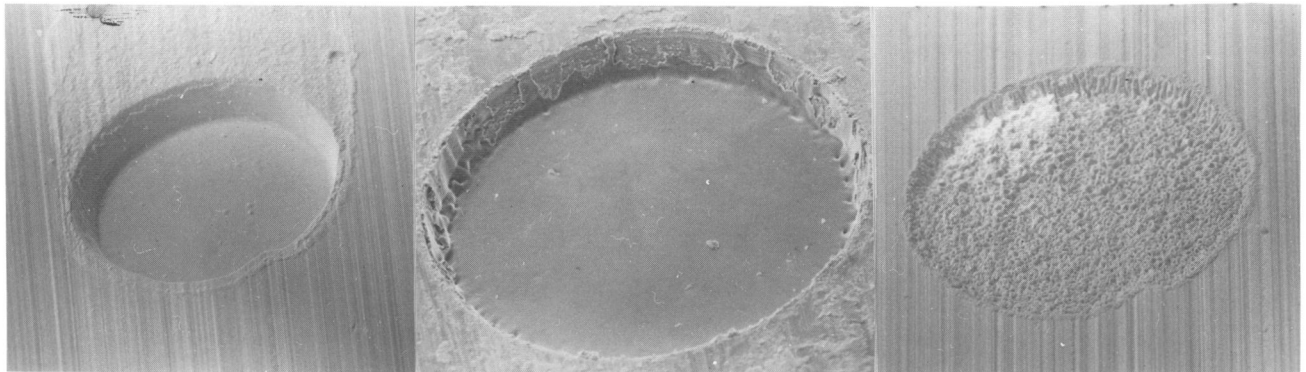
図 3 - 1 2 レーザパワー密度によるAl₂O₃加工部の変化

次にエキシマレーザ発振の媒体ガスをArF（波長； $\lambda=193\text{nm}$ ）、KrF（ $\lambda=248\text{nm}$ ）、XeF（ $\lambda=351\text{nm}$ ）として発振波長を変え、レーザ波長の変化による加工部の差異を調べた。なお、この時も光学系はマスクプロジェクションを用いた。

図3-13～16は Si_3N_4 （図3-13）、SiC（図3-14）、 ZrO_2 （図3-15）及び Al_2O_3 （図3-16）についてそれぞれの波長のビームをパルス数 $N=1000$ で照射した時の加工穴形状を示している。ここではフルエンスを全て $0.04\text{J}/\text{mm}^2$ で一定としたが、各々のレーザ媒体ガスでパルス幅が異なるためピークパワー密度 D_p はArFで $1.6 \times 10^{12}\text{W}/\text{m}^2$ （パルス幅 $t_{\text{on}}=23\text{ns}$ ）、KrFで $1.2 \times 10^{12}\text{W}/\text{m}^2$ （34ns）、XeFでは $1.3 \times 10^{12}\text{W}/\text{m}^2$ （30ns）と多少差が生じている。

図から明らかなように、波長による差が顕著に現れたのは ZrO_2 で、 $\lambda=351\text{nm}$ で加工穴が極端に浅くなっている。そして、加工穴底面には焼結助剤が選択的に除去されたことによると見られる微細な凹凸を伴っている。これは、351nm付近の波長のレーザ光に対し ZrO_2 がほぼ透明体となる（室温においては100mm近くの浸透深さも報告されている²⁷⁾）ために生じたと考えられる。





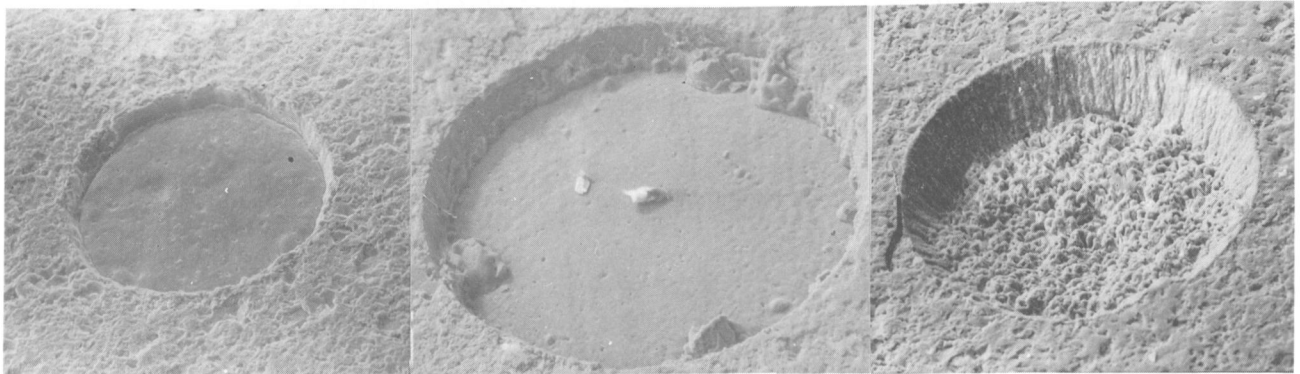
(a)ArF(193nm)

(b)KrF(248nm)

(c)XeF(351nm)

図3-15 エキシマレーザ波長によるZrO₂加工部の変化

200 μm



(a)ArF(193nm)

(b)KrF(248nm)

(c)XeF(351nm)

図3-16 エキシマレーザ波長によるAl₂O₃加工部の変化

200 μm

さらに高いパワー密度域 ($D_p > 10^{13} \text{W/m}^2$) での加工特性を調べるため、エキシマレーザビーム (KrF: 波長248nm) を球面レンズで集光の後Si₃N₄、SiC、Al₂O₃及びZrO₂に照射し、加工部の観察を行った。加工面観察が容易に行えるようにするため、ビームを照射しつつ、図3-17に示すように試料を移動させ、切断を行った。用いたレンズ焦点距離は $f=100\text{mm}$ で、パルスエネルギーは30mJである。このときビーム中心軸上でのピークパワー密度は 10^{15}W/m^2 ($D_e=37.5 \text{J/mm}^2$) である。図3-18は各セラミックスの切断面のSEM写真を示している。Si₃N₄及びSiCには分解生成物の付着がほとんど見られず、平滑な加工面となっている。Al₂O₃及びZrO₂には僅かに溶融再凝固物の付着が見られるが、CO₂あるいはYAGレーザによる加工面と比べはるかに少ないことが確認された。

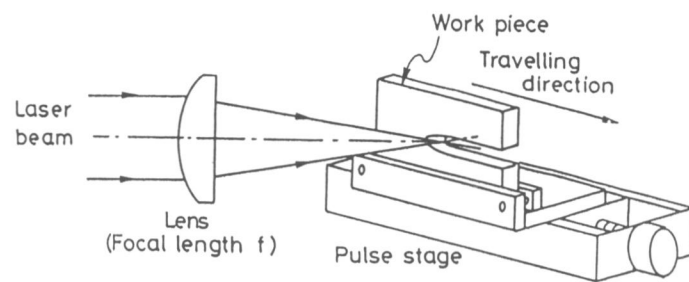
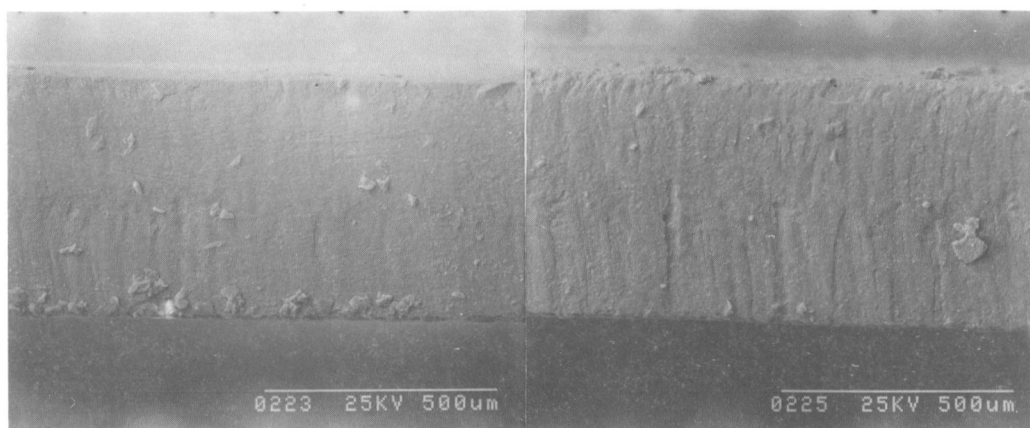
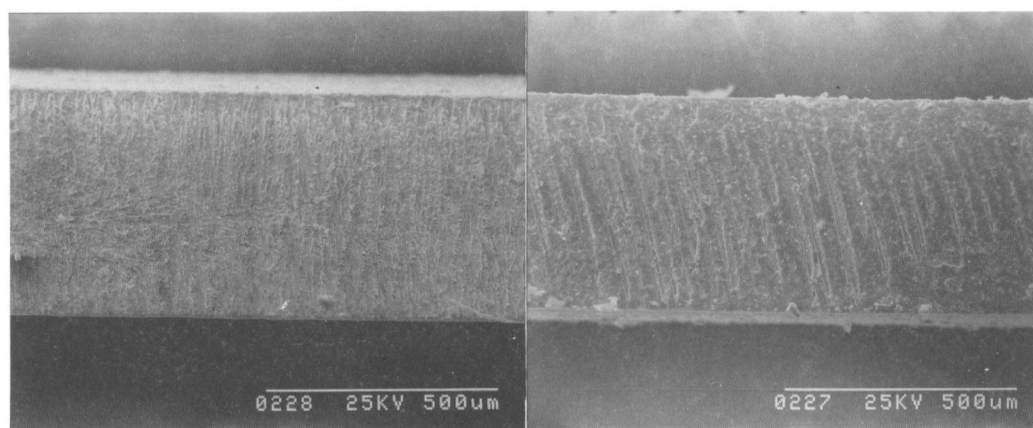


図 3 - 1 7 集光エキシマレーザによる切断



(a) Si_3N_4

(b) SiC



(c) ZrO_2

(d) Al_2O_3

図 3 - 1 8 各セラミックスの集光エキシマレーザ切断面
KrFエキシマ, $D_p=1 \times 10^{15} \text{ W/m}^2$, $v=5 \mu\text{m/s}$

図3-19は ZrO_2 のマスクプロジェクション加工穴底面に生じた凹凸の例を示している。マスクプロジェクション加工穴の底部の測定には共焦点型光学系をもつ走査型レーザ顕微鏡（レーザテック社製 1LM11、以下、レーザ顕微鏡）の表面形状出力を用いた。なお、レーザ顕微鏡による測定では測定視野の制限から粗さ測定の基準長さは $30\sim 40\mu m$ とし、十点平均粗さで評価した。ただし、 Si_3N_4 、 SiC では測定用レーザに対する表面反射率が低く、レーザ顕微鏡が使用できないため、触針式表面粗さ測定器を用いた。マスクプロジェクション加工面並びにレーザ未照射試料表面の粗さを表3-2に示す。

ここに示すように、酸化物系のセラミックスでは加工面の方がレーザ未照射面よりも平滑となる。また、パワー密度が高いほど平滑な加工面が得られている。これは加工面が薄い溶融層に覆われるのに加え、プラズマからの熱で凸部が選択的に加熱されるためと考えられる。

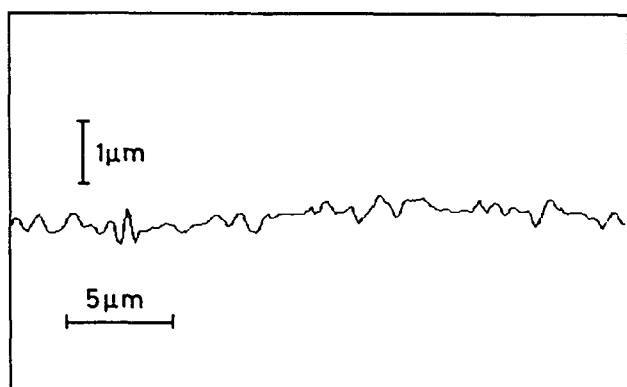


図3-19 レーザ顕微鏡を用いた、マスクプロジェクション加工面粗さの測定例
 ZrO_2 , $D_p=2.5 \times 10^{12} W/m^2$, $N=1000$,
 $f_p=80Hz$

表3-2 マスクプロジェクション加工による表面粗さの変化

| Material | Power density $D_p(W/cm^2)$ | Roughness $Rz(\mu mRz)$ |
|-----------|-----------------------------|-------------------------|
| ZrO_2 | Base surface | 6.3 |
| | 2.5×10^{12} | 0.6 |
| | 4.0×10^{12} | 0.4 |
| Al_2O_3 | Base surface | 4.6 |
| | 2.5×10^{12} | 2.4 |
| | 4.0×10^{12} | 1.9 |
| Si_3N_4 | Base surface | 2.0 |
| | 2.5×10^{12} | — |
| | 4.0×10^{12} | 5.2 |
| SiC | Base surface | 2.2 |
| | 2.5×10^{12} | 8.0 |
| | 4.0×10^{12} | 12 |

Si_3N_4 では低パワー密度域で加工面に針状の突起が形成される。突起の径が数 μm と測定針サイズより小さいため、この突起は表面粗さとして測定できなかったが、加工面の写真より $10\sim 50\mu m$ 程度の凹凸が生じているとみられる。突起の径はパワー密度が低いほど小さくなる傾向がみられた。 $2.4 \times 10^{12} W/m^2$ 以上ではこの突起は消滅し、切断による加工面と同程度の面粗さとなる。

Si_3N_4 加工面の針状突起は次のような機構で形成されると思われる。

1. 数パルスの照射で Si_3N_4 が分解し、金属Siが加工面に点在するようになる
2. エキシマレーザ波長での反射率が Si_3N_4 (20%) とSi (60%以上) で大きく異なる上、 Si_3N_4 分解温度 (2151K) と比べSiの沸点 (3492K) ははるかに高温であるため、Si粒付着部が除去されずに残り、微小突起が形成される
3. 突起側面での反射が起こり、さらに突起周囲の選択的な除去が起こる

SiC加工面では、 Si_3N_4 のような針状突起は認められない。これは、SiCの分解点 (3259K) がSiの沸点に近く、SiCの除去と同時にSiも除去されるためと考えられる。表面粗さは $10\mu\text{m}$ 程度で他のセラミックスより大きい。

図3-20は Si_3N_4 のエキシマレーザ切断で、試料移動速度と表面粗さの関係を示している。エキシマレーザ加工では試料移動速度が変化した場合でも切断面の表面粗さはほとんど変化せず、ほぼ $5.5\mu\text{mRz}$ で一定であった。パルス照射の時間間隔を変化させた場合も表面粗さ変化も図3-21に示すように小さい。

エキシマレーザ加工面を CO_2 、YAGレーザのものと比較した場合、エキシマレーザ加工面の方が非常に平滑に除去されており、特に Si_3N_4 では CO_2 およびYAGレーザ照射時には常に見られた付着粒子が完全になくなっている。

この付着物の有無を生じる理由はそれぞれのレーザのビームパワー密度の違いにあり、それによって材料の除去形態が変化したためと考えられる (それぞれのレーザを用いた場合のセラミックスの除去形態に関しては6章で検討している)。

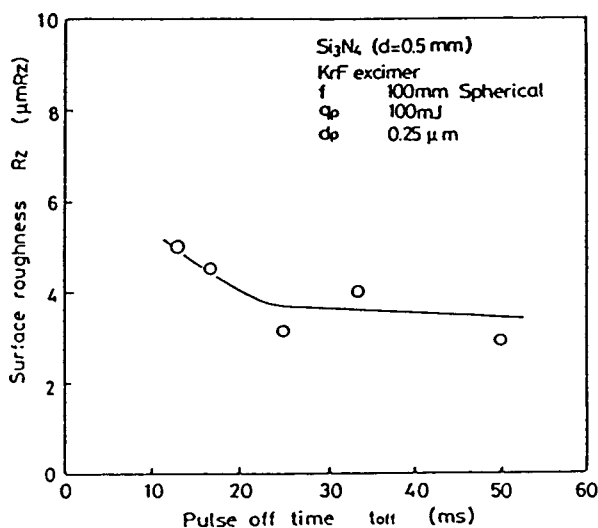


図3-20 エキシマレーザ加工における試料移動速度と加工面粗さの関係

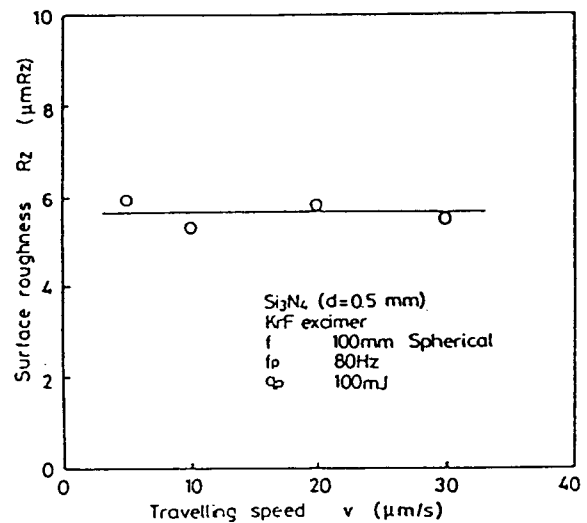


図3-21 エキシマレーザ加工におけるパルス照射間隔と加工面粗さの関係

3-2 除去加工域の寸法に及ぼすパワー密度分布の影響

3-2-1 CO₂およびYAGレーザーによる加工領域

同一パワーであるが、集光性の異なる、マルチモードとシングルモードのCO₂レーザーによりSi₃N₄の切断を行った。ビーム入射側の除去領域の幅 d_s （以下これを加工溝幅とよぶ）および裏面側の除去領域幅 d_b を図3-22に示す。この時のパルス幅 t_{on} は1ms、集光は焦点距離127mmのZnSeレンズを用いており、集光点でのビーム径はマルチモードで270 μ m、シングルモードでは110 μ mである。この結果、焦点でのビーム中心軸上パワー密度はシングルモードの $D_p=1 \times 10^{11}$ W/m²に対して、マルチモードでは 3×10^{10} W/m²で、シングルモードのほぼ1/3に相当する。

図より、いずれのビーム径の場合でも、試料移動速度が変化しても加工溝幅 d_s はほぼ一定であった。このことは加工溝端部におけるビームパワー密度は一定であることを示唆している。ビーム径110 μ mの場合では $d_s=250\mu$ m、ビーム径270 μ mの場合では305 μ mと、両者の間に55 μ mもの差があることが、除去加工域寸法がレーザーパワーよりもパワー密度分布に依存しているとすれば説明できるからである。

一方、裏面側の除去領域幅 d_b は、いずれのビーム径でも試料移動速度が低いほど、値が d_s に近付き、ビーム入射側から裏面側までより均一な加工溝幅となる。逆に試料移動速度が上昇すると、 d_b は次第に小さくなり、ついにはビームが裏面側に貫通しなくなる。貫通限界となる試料移動速度は、ビーム径110 μ mでは6.5mm/s、270 μ mでは2mm/sであり、その比は両ビームの中心軸上パワー密度の比とほぼ等しくなった。これも材料の加工速度がレーザーパワーよりもパワー密度によって決定されていると考えれば理解できる。

以下ではレーザービームのパワー密度分布と加工溝幅の関係について検討を加えることにする。

種々のビーム径、パワーを有するCO₂レーザーを定速移動中のSi₃N₄試料に照射し、加工溝端部におけるパワー密度 D_k を測定した結果を図3-23に示す。なお、横軸はビーム照射時間とし、パルスレーザーによる加工ではパルス幅（持続時間）を、CWレーザーによる加工では（ビーム径）／（試料移動速度）による換算値を用いた。図に示した通り、ビーム照射時間と加工溝端部のパワー密度はほぼ直線上にある。これはビーム照射時間により、加工溝形成に必要なパワー密度がほぼ決まることを示している。逆に、用いるビームのパワー密度分布が決まれば、ビーム照射時間によって加工溝幅がほぼ決まるとみてよい。

Si₃N₄では図3-24に示すように、YAGレーザーを用いた場合でも、集光条件がほぼ等しい場合にはCO₂レーザーとほぼ同じ加工溝幅が得られ、YAGについてもCO₂レーザーとほぼ同じパワー密度で加工領域寸法が決まると考えられる。これに対し、Al₂O₃では図3-25に示すように、CO₂で約250 μ m、YAGで約185 μ mとレーザー波長により、加工溝幅に大きな差が見られ、YAGレーザーの方が加工溝形成により高い入射パワー密度を必要とする。これは、4章で詳しく述べるように、Si₃N₄ではCO₂およびYAGレーザーの浸透深さが

共に小さく、入熱がビーム入射表面に集中するのに対し、 Al_2O_3 ではYAGレーザーのみが内部まで浸透し、ビーム入射表面での入熱が少なくなることによる。

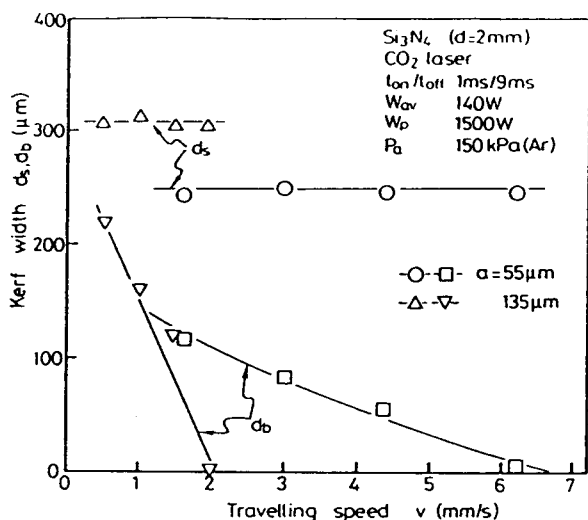


図 3 - 2 2 ビーム径が加工溝幅におよぼす影響

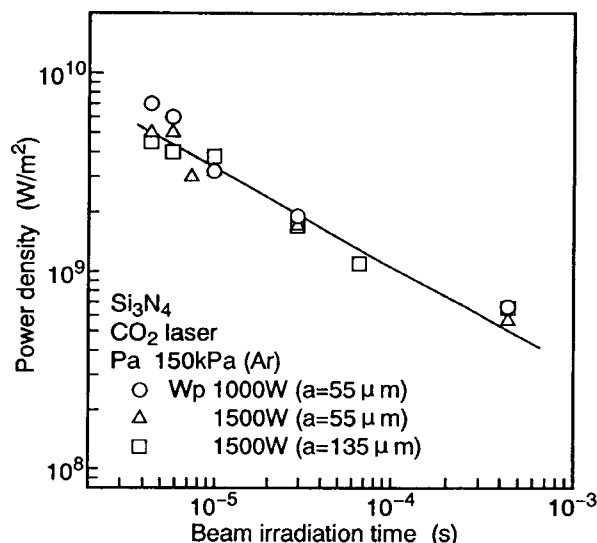


図 3 - 2 3 ビーム照射時間による加工溝端部パワー密度の変化

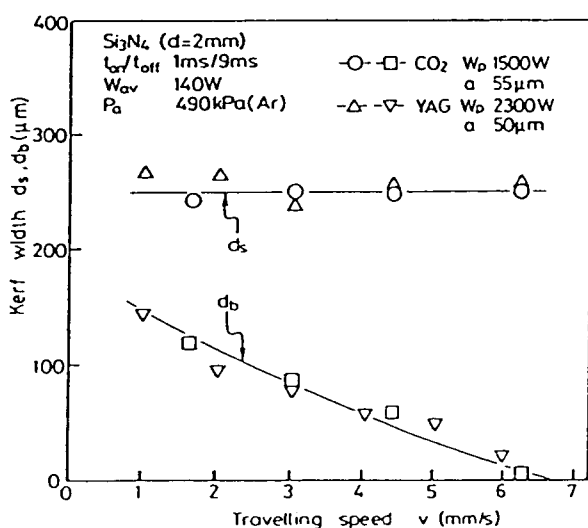


図 3 - 2 4 レーザ波長が Si_3N_4 の加工溝幅におよぼす影響

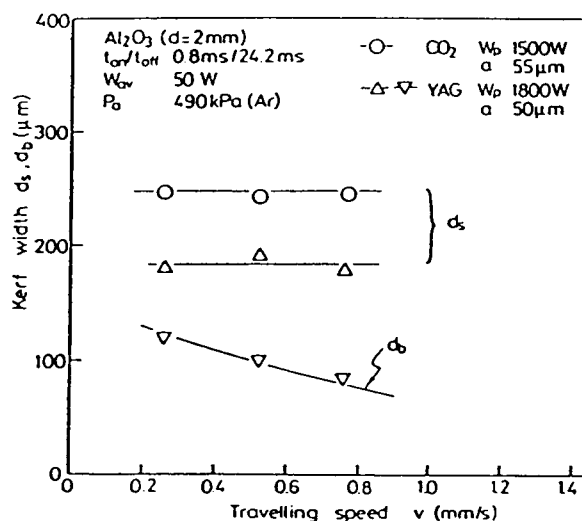


図 3 - 2 5 レーザ波長が Al_2O_3 の加工溝幅におよぼす影響

3-2-2 エキシマレーザーによる加工領域

エキシマレーザー加工において試料への照射パワー密度を下げていくと、1パルスあたりの除去深さは急激に低下し、ある値以下では除去が起こらなくなる。図 3 - 2 6 に示す Si_3N_4 では、1パルスのビーム照射に対する除去量は $1.5 \sim 2 \times 10^{11} \text{ W}/\text{m}^2$ を漸近線と

するカーブを描く。従ってこのパワー密度は、レーザのパルス幅 ($t_{on}=34\text{ns}$) において Si_3N_4 を除去するのに要する最低限のパワー密度 (除去しきいパワー密度: D_c) とみなせる。

図 3-27 はシリンドリカルレンズで集光した種々のパルスエネルギーのビーム (中心軸上のピークパワー密度 $D_p=10^{13}\sim 4\times 10^{13}\text{W/m}^2$) を Si_3N_4 試料に照射し (図 3-28)、集光方向の加工溝幅を測定した結果を示している。なお、図中の実線はビームのパワー密度が $D_c=1.5\times 10^{11}\text{W/m}^2$ に等しくなる位置である。両者はほぼ一致し、エキシマレーザ加工においても加工領域の寸法はパワー密度分布によってほぼ決まることがわかる。ただし、さらに高いビームパワー密度のビームによる加工では、パワー密度分布以外の要因も加工領域寸法に影響し始める。

図 3-29 はより高いパワー密度 ($D_p=8\times 10^{14}\sim 3\times 10^{15}\text{W/m}^2$) のビームで Si_3N_4 を切断し、加工溝幅を測定した結果を示している。実線は図 3-27 と同様、パワー密度が D_c に等しくなる位置を示す。パワー密度が高い ($D_p=8\times 10^{14}\sim 3\times 10^{15}\text{W/m}^2$) 場合にはパルスエネルギーの増大に対して除去幅測定値は急激に増大し、強度分布による推定値と一致しなくなる。加工中、ビーム照射部付近には図 3-30 に示すような激しい発光がみられ、加工部にはプラズマが発生して、特にパワー密度が高い場合にはこのプラズマが加工形状にまで影響していると推察される (プラズマとビームの相互作用については 5 章で検討している)。

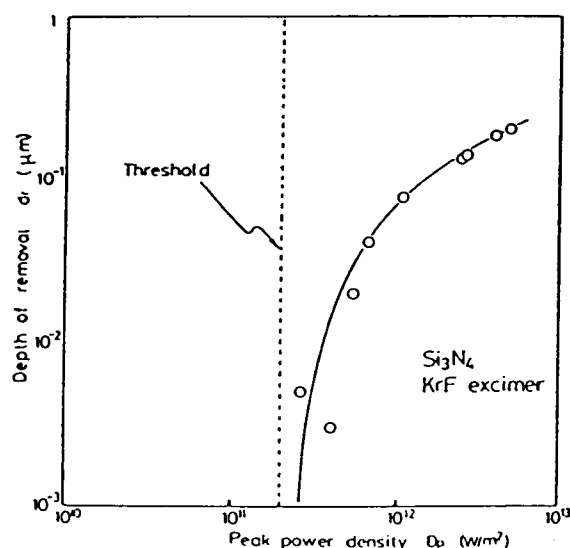


図 3-26 レーザパワー密度と Si_3N_4 除去量の関係

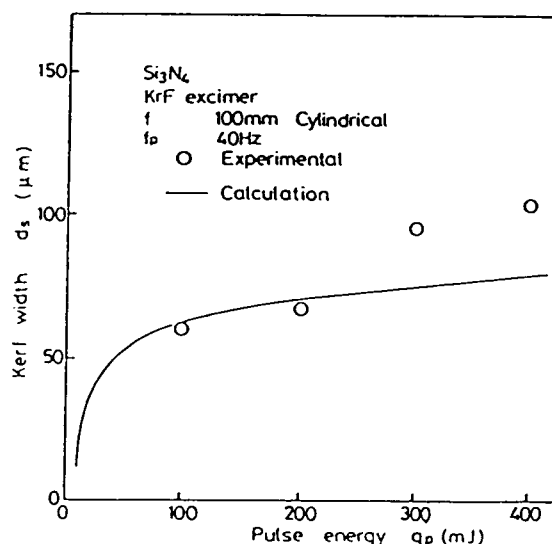


図 3-27 シリンドリカルレンズ集光ビームによる加工時のパルスエネルギーと加工溝幅の関係

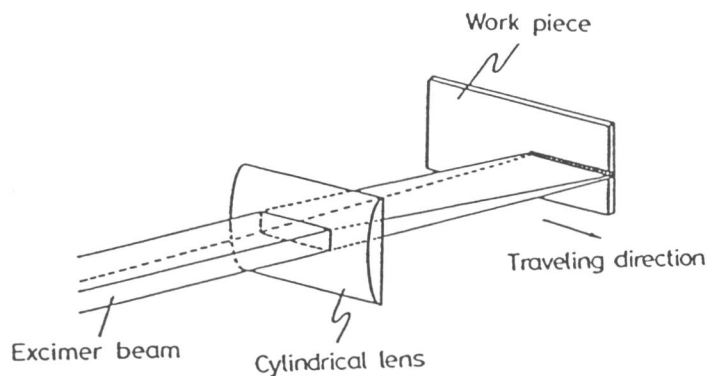


図 3 - 2 8 シリンドリカルレンズ集光ビームによる加工

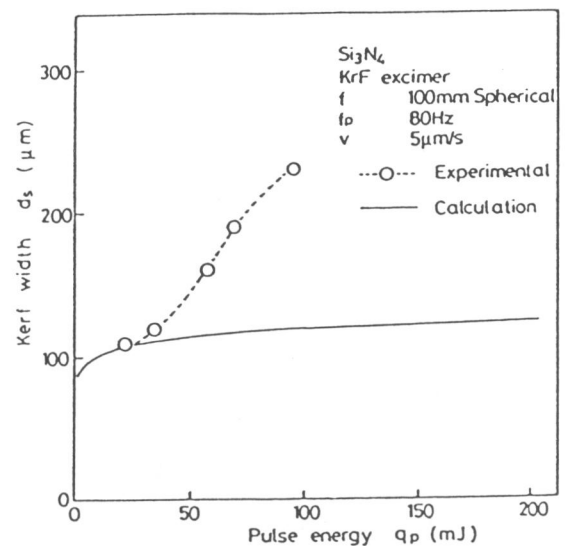


図 3 - 2 9 球面レンズ集光ビームによる加工時のパルスエネルギーと加工溝幅の関係

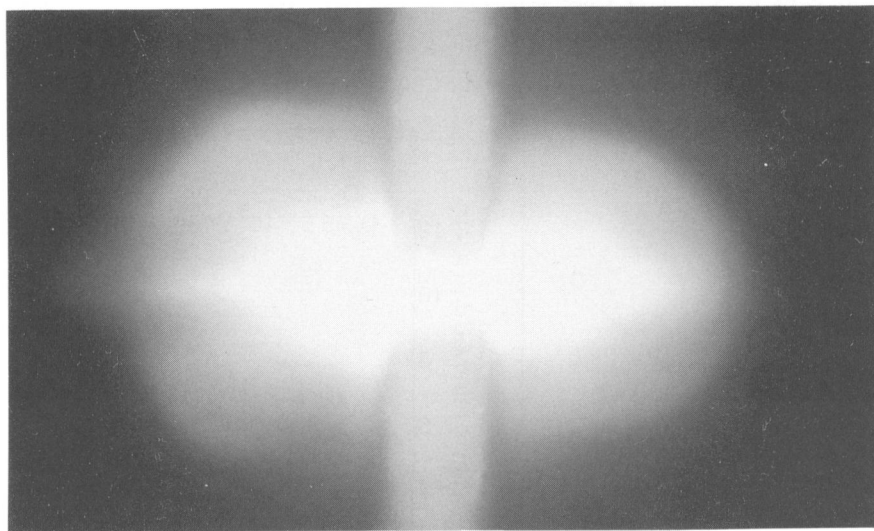


図 3 - 3 0 球面レンズ集光ビームを用いた加工中の発光

1mm

以上、述べたように、セラミックスのレーザ加工において、加工領域寸法に影響する因子として次の 3 項目をあげることができる。

- ①ビームのパワー密度分布
- ②ビームの浸透
- ③プラズマ

CO₂、YAGおよび比較的低パワー密度のエキシマレーザでは①と②が支配的で、特に用いるレーザ波長が定まれば、加工領域寸法はビームのパワー密度分布に大きく依存することがわかった。

3-3 レーザパワー密度とセラミックス材料の除去速度

CW-CO₂レーザで、光学系の焦点位置を試料表面からずらすと、中心パワー密度、 D_p を変化させることができる。図3-31はSi₃N₄について、 $D_p=2.5 \times 10^8 \text{ W/m}^2$ の時のパルス幅、 t_{on} 、と1パルスあたりの除去深さ、 d_{r1} を求めたもので、図より除去を起こすためにはビームを6~7ms以上照射することを要し、その後は照射時間に比例して除去が進行していくことがわかる。この直線の勾配は除去速度を示す。なお、高パワー密度領域では、加工穴内壁でのビーム反射、いわゆる、Wall-focusing効果²⁸⁾により加工穴中央部のパワー密度が増大し、加工穴が深くなることもあり、これを防ぐには、照射パルス幅を小さくして加工深さを抑え、加工部内壁の傾きが大きくなり過ぎないようにする必要がある。本実験に用いたレーザ装置で発生できる最小パルス幅は0.5msであり、これ以下のパルス幅が必要なパワー密度については試料を高速移動させて加工溝を形成する方法で代替した。試料表面上の1点におけるビーム照射時間、 t_{ir} は(ビーム径)/(試料移動速度)による換算値とし、形成された加工溝の深さ d_{r1} により加工速度の検討を行った。図3-32はこのようにして求めた、 $D_p=5.5 \times 10^9 \text{ W/m}^2$ における t_{ir} と d_{r1} の関係を示している。この場合も、直線の勾配から除去速度を求めることができる。

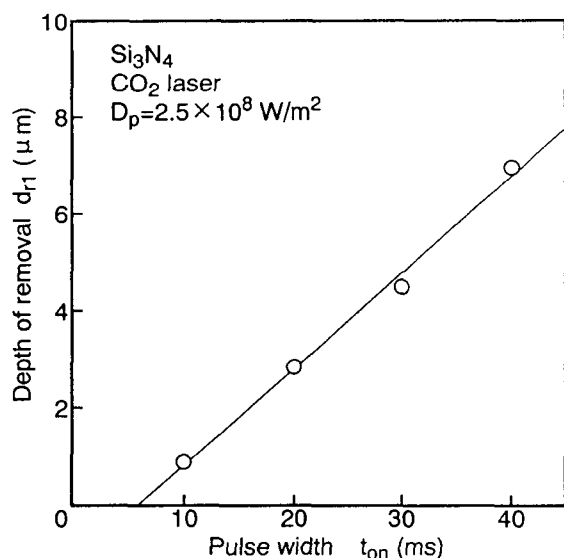


図3-31 パルス幅と除去深さの関係

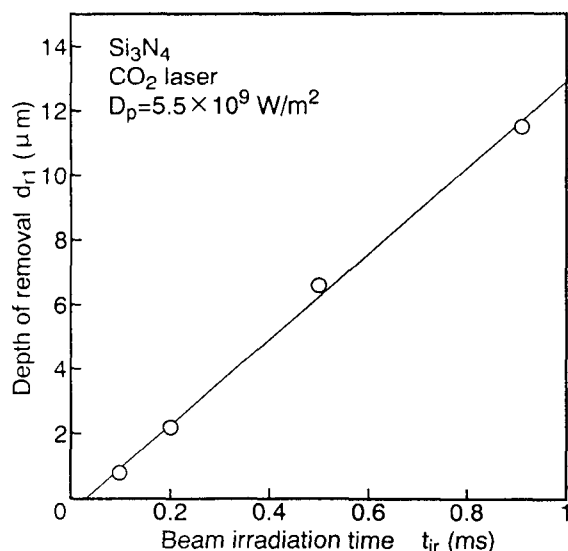


図3-32 ビーム照射時間と除去深さの関係

エキシマレーザ加工においては、マスクプロジェクション光学系及び集光光学系により発生させた種々のパワー密度のKrFエキシマレーザ($\lambda=248\text{nm}$)を照射し、1パルスあたりの除去深さとパルス幅から除去速度を求めた。なお、エキシマレーザにおいては1パルスあたりの除去深さが小さいため、複数回パルスを照射し、その平均的な除去深さをを用いた。また、エキシマレーザはパルス幅を変化させることができないため、パルス幅の効果、すなわち、除去に必要な最短照射時間は考慮していない。

ピークパワー密度 $D_p = 1.8 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ （フルエンス $D_e = 0.06 \text{ J/mm}^2$ ）及び $4.0 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ （ 0.13 J/mm^2 ）のKrFエキシマレーザを種々のパルス繰り返し周波数で $N=1000$ パルス照射し、除去深さを測定した結果を図3-33に示す。 Si_3N_4 、 SiC 、 ZrO_2 、 Al_2O_3 のいずれにおいてもパルス周波数の変化による除去深さの変化は見られず、本実験に用いたエキシマレーザで発生できる周波数範囲（最大80Hz）では除去深さはパルス周波数に依存しないとしてよい。

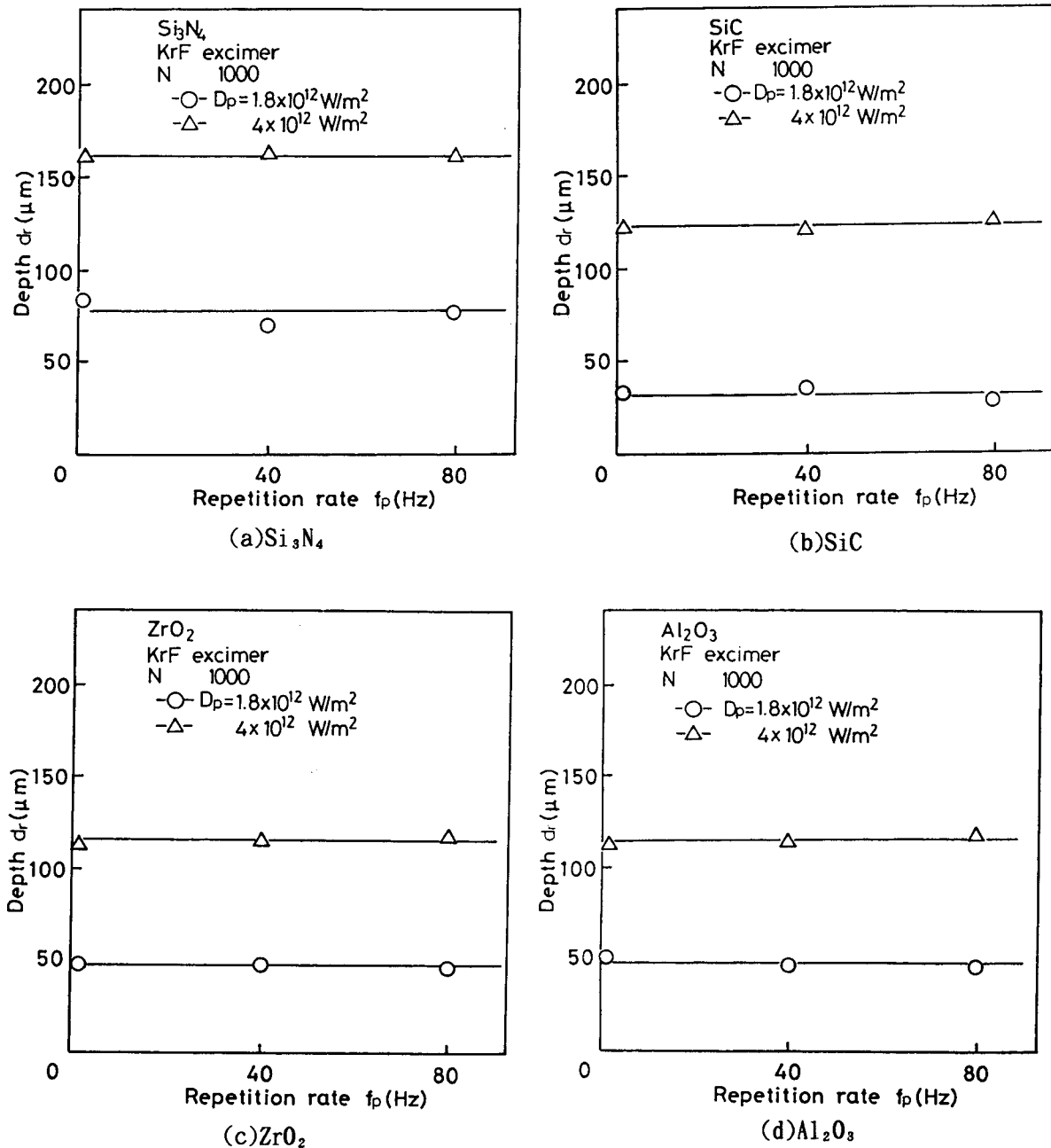


図3-33 パルス周波数と除去深さの関係

図3-34は種々のピークパワー密度を有する均一分布ビームをセラミックスに照射した時、得られた加工穴深さ d_r とパルス数 N の関係を示している。これらから、いずれのパワー密度、材料においても数十 μm 程度以下の深さ範囲では穴深さはほぼパルス数と比例関係にある。加工穴がさらに深くなると、加工穴底面が結像点からずれることから除去穴深さは飽和する傾向を示す。これらの図で、パルス数と除去深さが比例している領域における1パルスあたりの除去深さとパルス幅から除去速度を求めた。

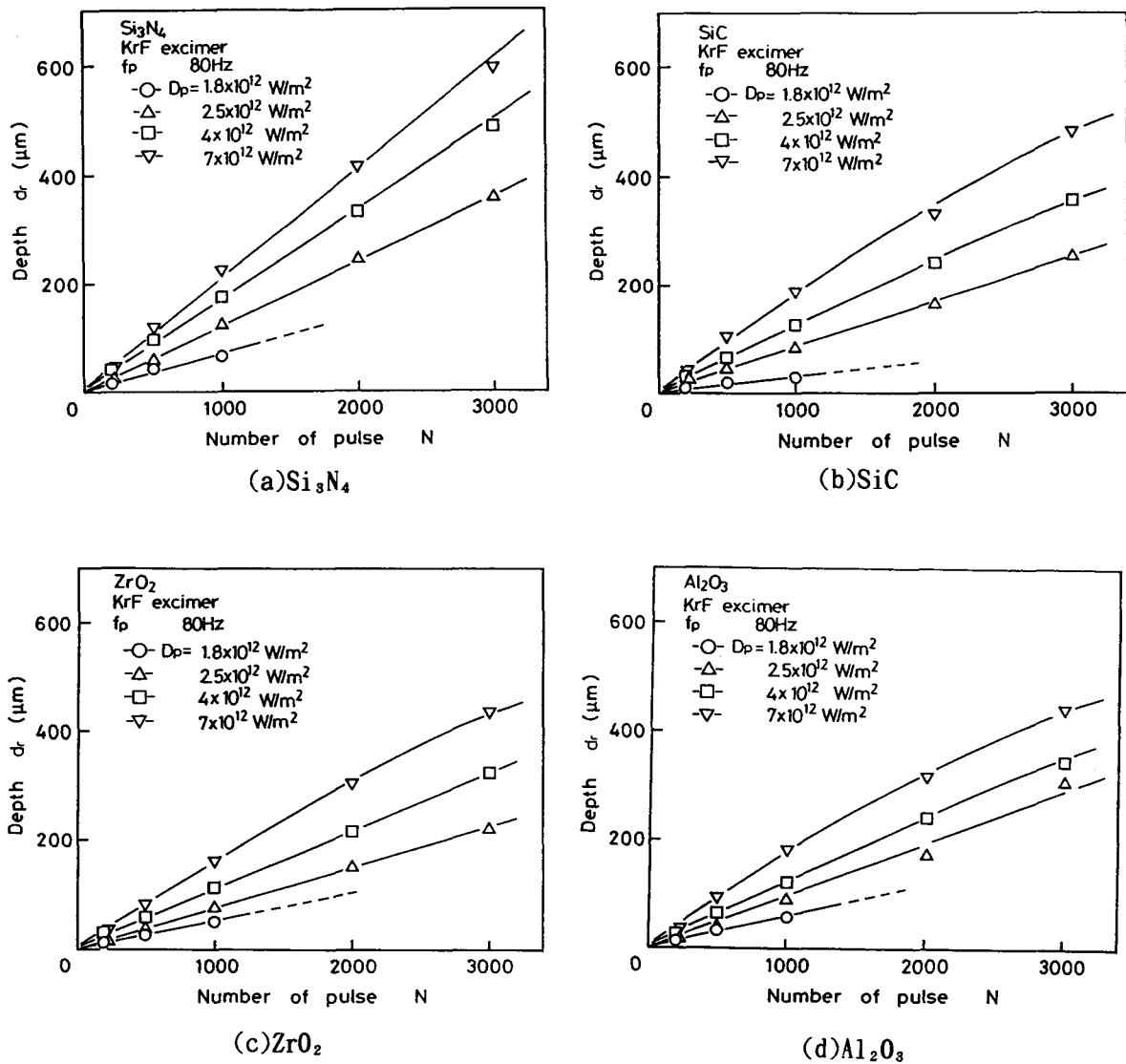


図3-34 照射パルス数と除去深さの関係

図3-35は Si_3N_4 セラミックにおけるビームパワー密度と除去速度の関係を CO_2 とエキシマレーザを総合して示している。

図から明らかなように全体としては、除去速度はパワー密度に比例しており、照射されるビームのパワー密度により、除去速度が決定されるとみてよい。

エキシマレーザ加工における除去速度は、パワー密度との比例直線に対し低パワー密度側で急激に低下しているが、これは、除去十分な時間ビームが照射されていないことにより生じており、本質的なものではない。エキシマレーザではパルス幅が34nsで一定であるため、図3-31に示した、除去を生じるまでに必要な照射時間を考慮できない。

詳細にみると、パワー密度 $7 \times 10^8 \text{ W/m}^2$ で除去速度が急増し、 $7 \times 10^8 \sim 8 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ の範囲で直線が上方にシフトしていることがわかる。これは、同一投入エネルギーに対する除去量の増大を意味しており、何らかの要因により除去が促進されたと考えられる（加工進行面におけるセラミックスの分解・蒸発は6章で検討する）。

各セラミックスにおいて照射するエキシマレーザのピークパワー密度と除去速度の関係を求め図3-36に示している。前述した理由によりいずれのセラミックスでも $D_p \sim 10^{12} \text{ W/m}^2$ 以下では除去量が急激に低下する。また、パワー密度の上昇に伴い除去量は飽和傾向にあることがわかる。低パワー密度域、 $D_p \sim 8 \times 10^{11} \text{ W/m}^2$ では ZrO_2 の除去量が最も多く、次いで Si_3N_4 及び Al_2O_3 、 SiC は除去量が最少という結果が得られ、熱伝導率が高いほど除去量が少ない。高パワー密度域ではプラズマの生成、生成したプラズマによるビームの吸収、散乱あるいは屈折が起こり、これがセラミックスの加工における除去速度制限要因となっていると考えられる。

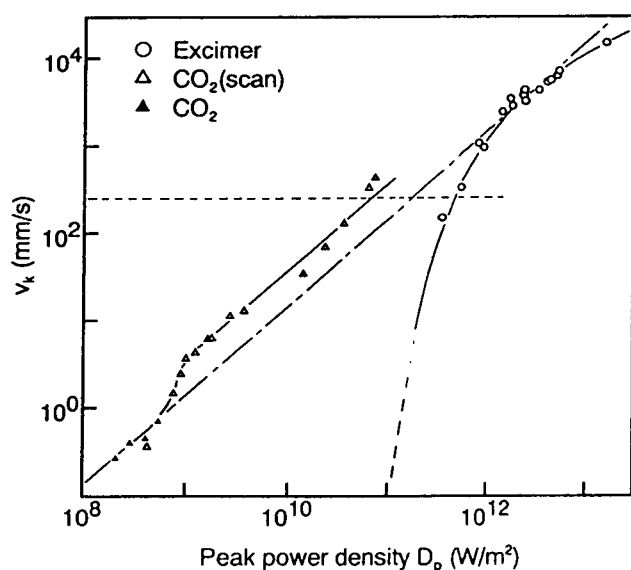


図3-35 照射パワー密度と Si_3N_4 除去速度の関係

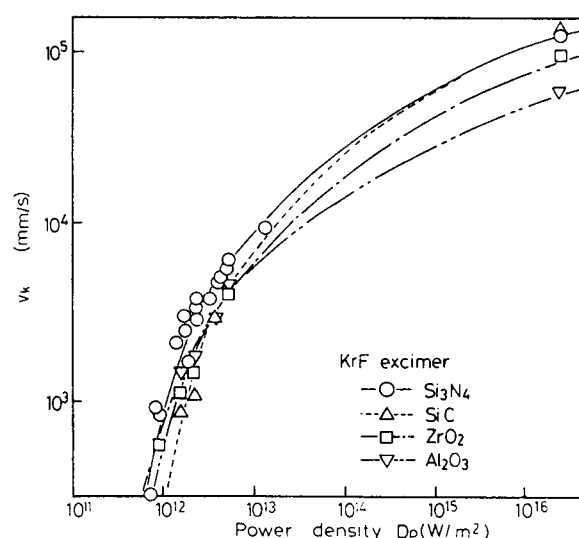


図3-36 照射パワー密度と各セラミックスの除去深さの関係

以上、ビームパワー密度と除去速度の関係を検討した結果、除去速度は材料に照射されるビームパワー密度にほぼ依存しているが、パワー密度の上昇に伴い、プラズマの影響とみられる飽和傾向が現われることがわかった。

3-4 加工面のクラック

3-4-1 レーザ加工面のクラック観察

セラミックスのような脆性材料ではクラックの発生は応力集中による大幅な強度低下を招く。

レーザ加工面に存在するクラックの深さを正確に測定することは、クラックが非常に浅く、また試料を切断する際にクラック部が割れてしまうなどの問題があり、容易ではない。本研究では図3-37に示すように、切断面に対して一定の角度($\theta = 1.4$ 度)で研磨を行い、この面に存在するクラックを観察した。図中の d を測定することにより、クラック到達深さ C は、

$$C = d \sin \theta \quad (3-1)$$

から求めた。また、クラック形状は研磨面にそのまま現れるため、その観察も容易である。実験は切断で行い、クラック生成はビーム加熱による熱応力が主原因と推定されるため、検討するレーザビームパラメータはパルスビームにおけるパルス照射時間間隔 t_{off} 及びパルス幅 t_{on} とした。 t_{off} を変化させる場合、切断速度を一定とすると単位切断長あたりの入熱が変化する。ここでは t_{off} に応じて切断速度を変化させ、1パルスあたりの試料移動距離が一定値となるようにした。また、パルス幅を変化させる場合もパルスエネルギーは一定とし単位切断長あたりの入熱は一定に保った。

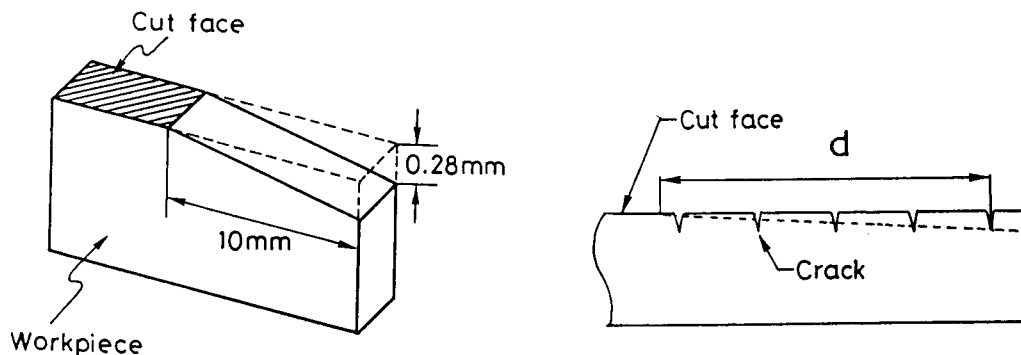


図3-37 クラックの観察方法

図3-38は t_{off} を変化させた場合のクラック発生状況を示している。 $t_{\text{off}}=0$ 、すなわちCWレーザによる切断ではクラックは縦方向（図3-39 y z 面内）のみで、その発生原因となる熱応力の作用方向はx方向である。 $t_{\text{off}}=4\text{ms}$ では中央部にx y 面内のクラックが生じ、 t_{off} が大きくなるに従って、クラック深さの低下と共にx y 面内のクラックがより細かくなっている。これは t_{off} が小さい領域では温度分布が図3-39のy方向に広い範囲で比較的緩やかな温度分布をもつため、温度上昇範囲に比べ試料寸法が小さいz方向では周囲の材料による拘束応力が小さいのに対し、 t_{off} が大きくなると、温度上昇域がビーム照射部表面付近に限定されるため、x方向、z方向の拘束状態がほぼ同じになり、格子状のクラックとなったと考えられる。

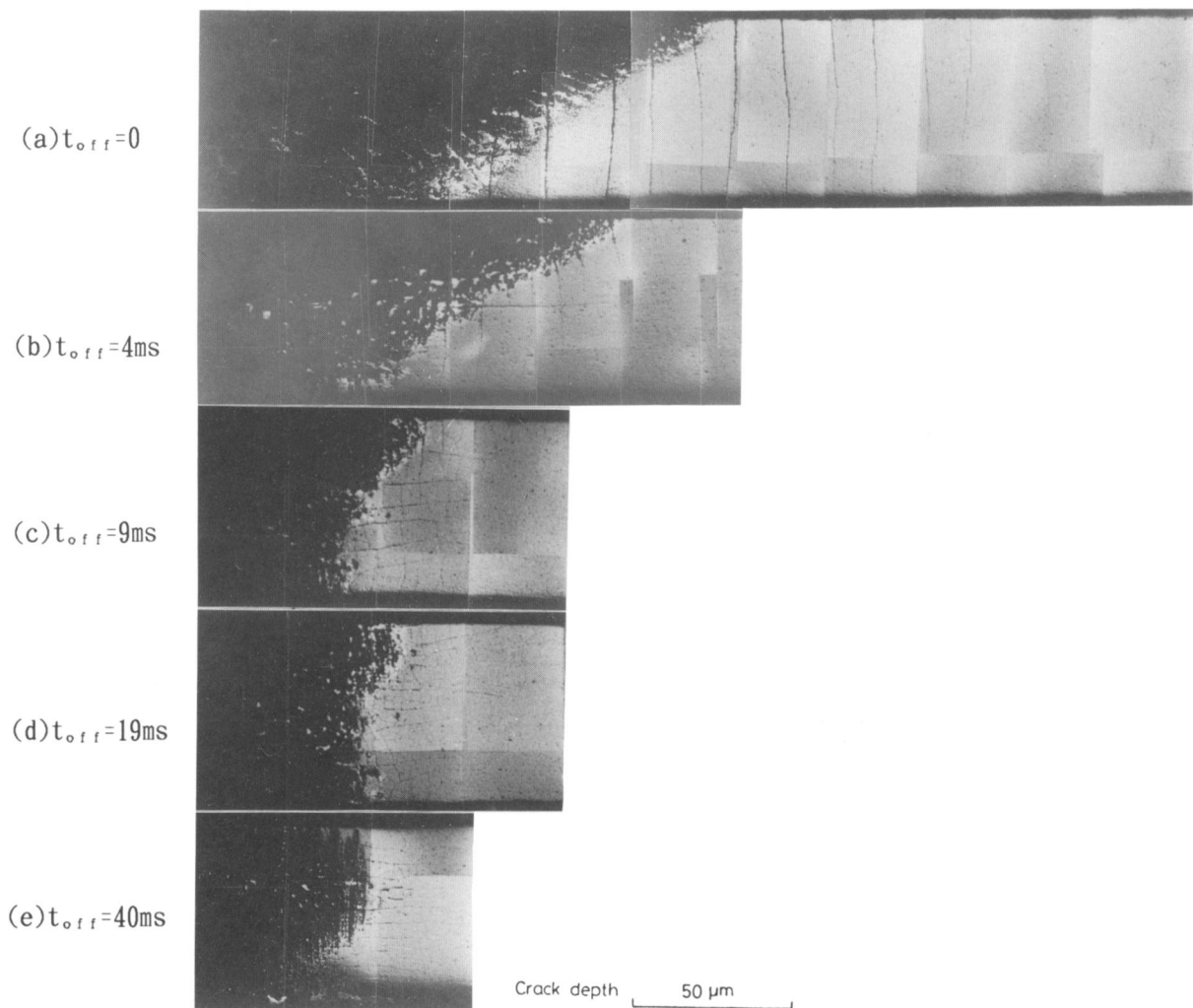


図3-38 パルス照射時間間隔による加工面クラックの変化
 $D_p=2 \times 10^{11} \text{W/m}^2$, Pulse energy: 1.4J

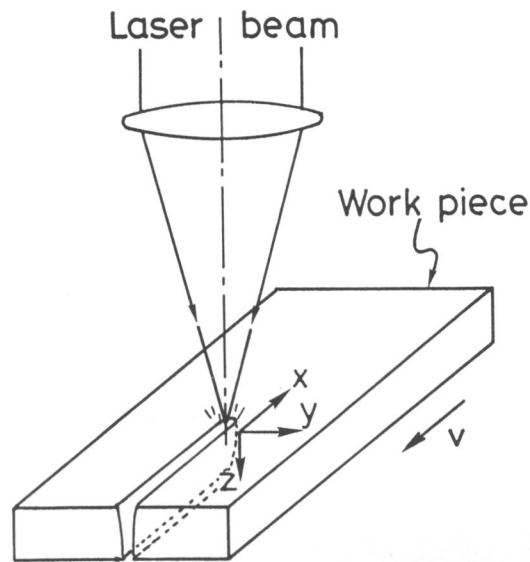
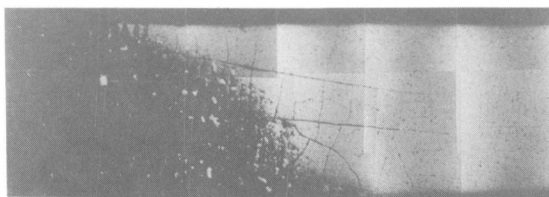


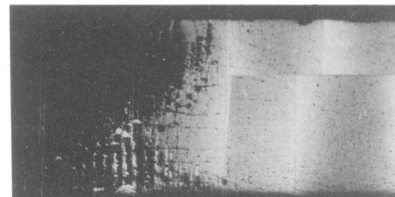
図 3 - 3 9 クラック発生方向に関する座標系

図 3 - 4 0 は種々のパルス幅 t_{on} におけるクラック生成状態を示している。この場合にもクラックの形状変化が見られる。 $t_{on}=4\text{ms}$ では y 方向のクラック本数は少ないが、 t_{on} の低下と共に本数が増加し、 z 方向に伸びるクラックもより微細なものに変化している。

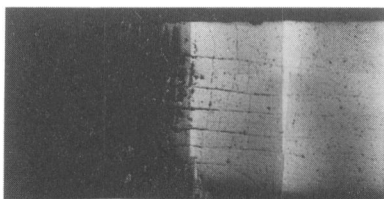
図 3 - 4 1 はエキシマレーザ切断による Si_3N_4 加工面をノーマルパルスと同様に一定角度をつけて研磨を行なった結果を示している。研磨角度を 0.7° に変更し、より浅いクラックまで観察できるようにしたが、加工面にはクラックは見られなかった。



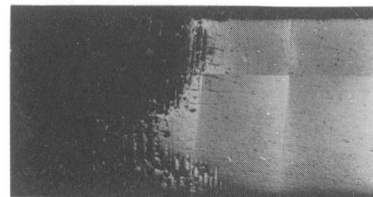
(a) $t_{on}=4\text{ms}$, $D_p=1.4 \times 10^{11} \text{W/m}^2$



(c) $t_{on}=1\text{ms}$, $D_p=2.3 \times 10^{11} \text{W/m}^2$



(b) $t_{on}=2\text{ms}$, $D_p=1.8 \times 10^{11} \text{W/m}^2$



(d) $t_{on}=0.5\text{ms}$, $D_p=4 \times 10^{11} \text{W/m}^2$

Crack depth $\overline{\hspace{1.5cm}}$ 50 μm

図 3 - 4 0 パルス幅による加工面クラックの変化
Laser power: 102W

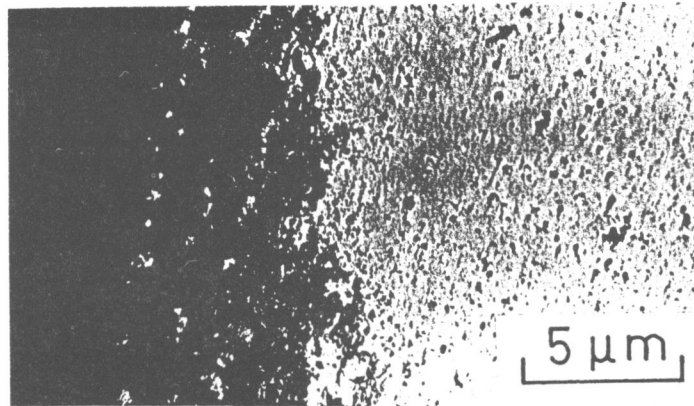


図 3-4 1 エキシマレーザ加工面のクラック観察
 Si_3N_4 , $D_p=1 \times 10^{16} \text{ W/m}^2$, $v=5 \mu\text{m/s}$

3-4-2 ビームの特性とクラック深さ

パルスoff時間とクラック到達深さの関係を図 3-4 2 に示す。CO₂及びYAGで実験を行ったが、いずれも $t_{\text{off}}=10\text{ms}$ 程度までは t_{off} の減少と共にクラック深さは低下している。 $t_{\text{off}} > 10\text{ms}$ ではクラック到達深さはほとんど変化しなくなる。

次にパルスエネルギー 1.4J/p 、 $t_{\text{off}}=15\text{ms}$ で一定として、パルス幅 t_{on} によるクラック到達深さ変化を測定した(図 3-4 3)。これから明らかなようにパルス幅を小さくすることによりクラック深さは急激に低下する。すなわち、パルス照射時間間隔を 10ms 程度とし、パルス幅を小さくすることによりクラック深さは低減される。前述したように、エキシマレーザ加工面ではクラックは認められなかった。CO₂およびYAGの結果を外挿することによっても、パルス幅 34ns のエキシマレーザでは、 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$ と事実上クラックは発生しないといえる。

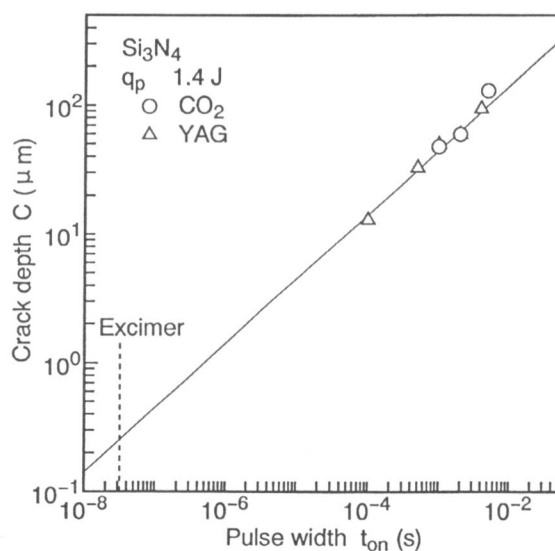


図 3-4 2 パルス照射時間間隔によるクラック到達深さの変化

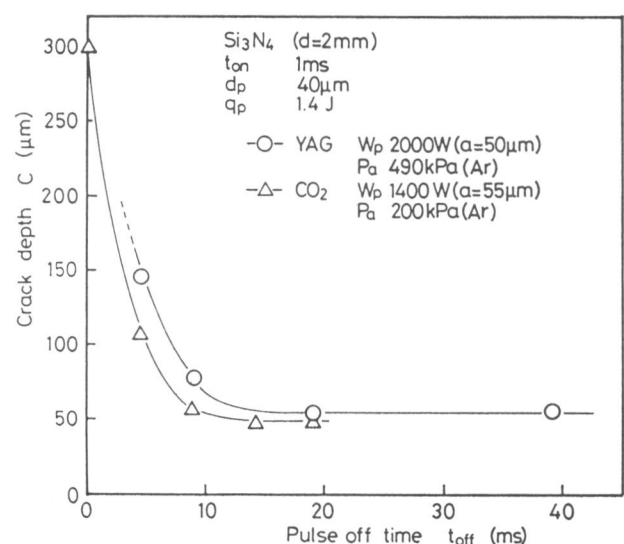


図 3-4 3 パルス幅によるクラック到達深さの変化

図3-44は酸化物系セラミックスの Al_2O_3 と ZrO_2 で、マスクプロジェクション加工穴側壁のSEM像を示している。これら酸化物系セラミックスは液相が存在するため加工面にはこのような薄い層状の溶融再凝固物が見られ、その厚さは ZrO_2 で $2\mu\text{m}$ 、 Al_2O_3 で $1\mu\text{m}$ である。これら層状の付着物には図からわかるようにクラックが発生しているが、自然にはがれ落ちた部分もあることからその付着力は弱く、また剥離した部分の母材にはクラックは見られなかった。

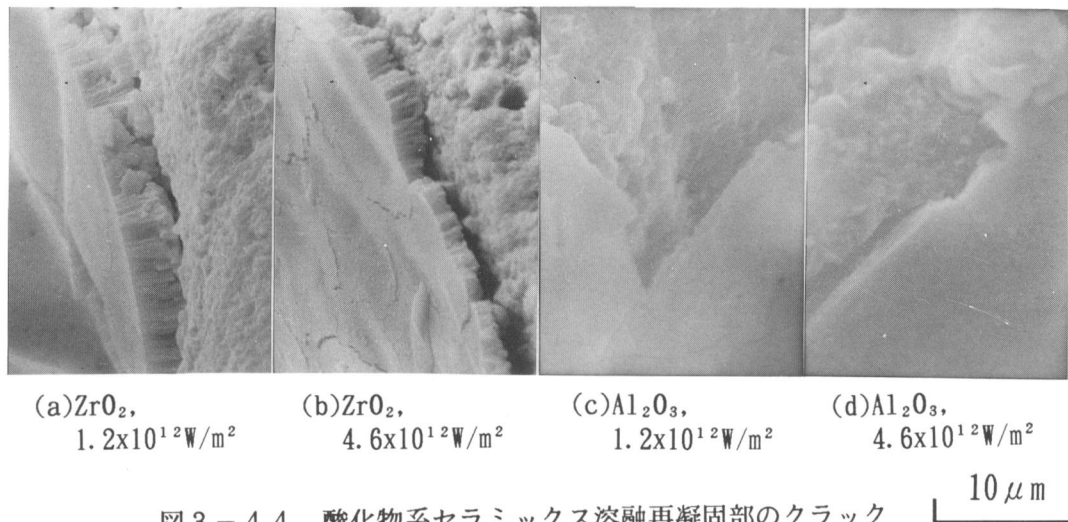


図3-44 酸化物系セラミックス溶融再凝固部のクラック
KrFエキシマ, N=1000

以上のように、クラック深さを低減するには、用いるビームのパルス幅 t_{on} 、パルス照射時間間隔 t_{off} を適正化することが必要である。 Si_3N_4 の例では、 $t_{\text{off}} > 10\text{ms}$ とした時、クラック深さはパルス幅を小さくするほど低減される。パルス幅34nsのエキシマレーザでは、クラックの無い加工が可能である。溶融型セラミックスでは、エキシマレーザ加工においても溶融再凝固層にクラックが見られるが、母材には到達しておらず、凝固層の厚さも数 μm に過ぎない。さらに一部が自然に剥離することから判断して溶融層は付着力も小さく、強度的にはほとんど影響しないと考えられる。

3-5 結言

レーザを用いたセラミックス加工現象解析の一環として、パワー密度、波長、パルス幅等のビームパラメータが異なるレーザを用いてセラミックスの加工を行い、それぞれの加工溝幅、除去速度および加工面状態といった加工特性に影響する要因を調べた。以下に本章で得られた結果を要約する。

(1) YAG、 CO_2 レーザによるセラミックス加工では加工面に多量の分解性生物あるいは溶融物の付着が発生し、これが表面粗さを増大させている。これと比べ、高いピークパ

ワーと短パルスを有するエキシマレーザでは分解性生物あるいは溶融物は非常に少なく平滑な加工面を得ることができる。

(2) CO_2 、YAGレーザによるセラミックスの加工では、加工に必要なパワー密度しきい値が存在する。この結果、加工領域寸法に対しては、加工に用いるビームのパワー密度分布の影響が最も大きい。

(3) エキシマレーザ加工においても比較的ビームパワー密度が低い場合には CO_2 、YAGと同様に、加工に必要なパワー密度しきい値が存在し、加工領域寸法はパワー密度分布により決まるが、パワー密度が高まるとずれを生じる。

(3) Si_3N_4 では、波長が異なるYAGレーザと CO_2 レーザ間で加工溝幅にほとんど差は生じないが、 Al_2O_3 ではYAGレーザの方が30%程度狭くなる。すなわち除去に高いパワー密度を要する。また、 ZrO_2 では波長248nm以下のエキシマレーザと比べ、351nmでは、除去量に著しい低下がみられる。これはビームの浸透深さが変化することによる。

(4) Si_3N_4 の除去速度はパワー密度によりほぼ決まるが、 CO_2 およびYAGと比べてパワー密度が高いエキシマレーザではプラズマの影響とみられる、除去速度の飽和が生じる。

(5) パルス幅、パルス照射間隔により、クラック深さ、形状は大きく変化する。 Si_3N_4 では、パルス照射間隔を10ms以上とし、短パルス化することでクラック深さを低減することができる。パルス幅が小さいエキシマレーザではクラックのほとんどない加工が可能である。

第4章 レーザ加工におけるビーム吸収率

レーザによるセラミックスの除去加工における加工現象は次の要素過程にわけることができる。

- ①セラミックスによるレーザの吸収
- ②入射ビームとプラズマの相互作用
- ③材料の分解・蒸発

除去加工特性の検討の結果、パワー密度分布と加工溝幅の関係、パワー密度と除去速度の関連性などが明らかになった。しかしながら Al_2O_3 における CO_2 、YAGレーザ間の加工溝幅の差、エキシマレーザ加工でみられた加工速度の飽和、さらに加工面に見られる付着物の生成機構など加工過程における未解決の課題を明らかにする必要がある。

本章では、これらレーザによるセラミックス加工の素過程のうちビーム吸収について解析を行い、加工現象におよぼす影響を明らかにする。

4-1 セラミックス材料のビーム吸収率

4-1-1 レーザの波長とビーム吸収率

セラミックスの赤外域でのビーム吸収特性は古典的な格子振動理論の与えるものと良く一致するとされており、光学定数 \tilde{n} の波長依存性は以下の分散式²⁹⁾で与えられている。

$$\tilde{n} = \varepsilon_{\text{ropt}} + \sum_j \frac{S_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_{0j}^2 + i \delta_j \lambda_{0j} \lambda} \quad (4-4)$$

ただし、 $\varepsilon_{\text{ropt}}$: 光学比誘電率 S : 振動モードの強度
 λ_0 : 共鳴波長 δ : 減衰パラメータ
 λ : 入射光の波長

$\tilde{n} = n + i\kappa$ (n : 屈折率実部、 κ : 屈折率虚部) とおくと、垂直入射ビームに対する反射率 r_{ref} は、次式から求めることができる。

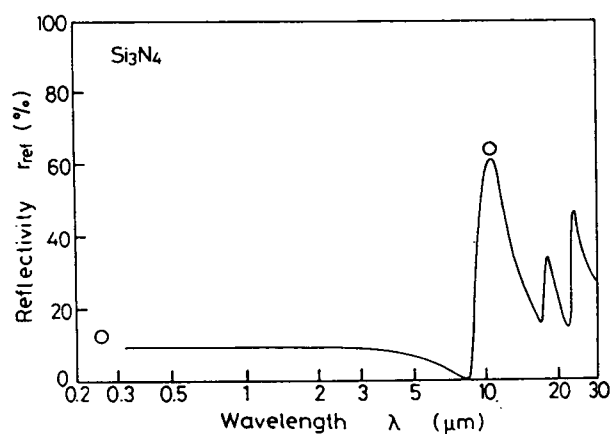
$$r_{\text{ref}} = \frac{(n - i\kappa - 1)^2}{(n - i\kappa + 1)^2} \quad (4-2)$$

式(4-1)の各定数に表4-1²⁷⁾の値を用い、式(4-2)から Si_3N_4 、 SiC 、 ZrO_2 および Al_2O_3 について反射率 r_{ref} の波長依存性を求めた結果を図4-1に示す。図中のプロット点は室温で実験的に求めた CO_2 レーザおよびKrFエキシマレーザの吸収率である。実験値は(4-2)式による値に近い。図から明らかなように、これらセラミックスはいずれも

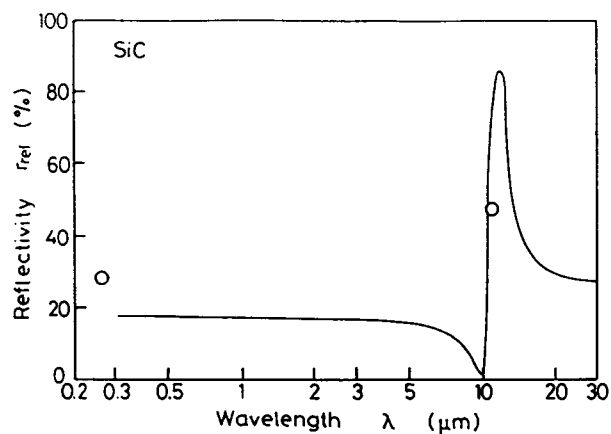
10～30 μm の長波長域に1つないしそれ以上、反射率の高い帯域を持っている。この反射帯は格子振動共鳴に起因しており、Reststrahlen帯²⁹⁾として知られている。

表 4 - 1 格子振動に関するパラメータ

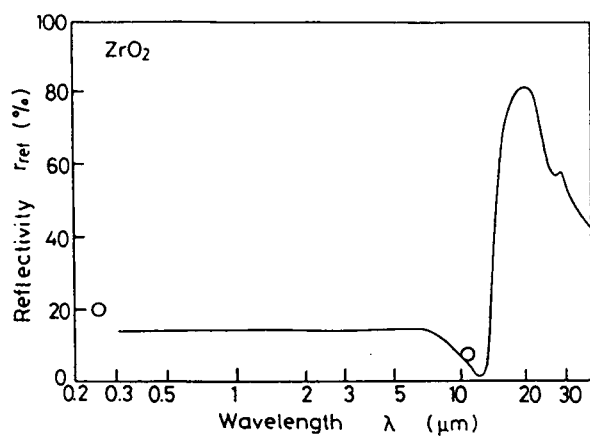
| | ϵ_{∞} | S_1 | λ_{o1} | δ_1 | S_2 | λ_{o2} | δ_2 | S_3 | λ_{o3} | δ_3 |
|-------------------------|---------------------|-------|----------------|------------|-------|----------------|------------|-------|----------------|------------|
| Si_3N_4 | 3.55 | 2.54 | 11.6 | 0.121 | 0.53 | 17.8 | 0.0629 | 0.94 | 23.5 | 0.0548 |
| SiC | 5.85 | 3.18 | 12.7 | 0.0346 | 0 | - | - | 0 | - | - |
| Al_2O_3 | 2.89 | 2.63 | 17.4 | 0.0768 | 3.45 | 23.0 | 0.0278 | 0 | - | - |
| ZrO_2 | 4.8 | 5.77 | 23.8 | 0.114 | 5.19 | 27.7 | 0.134 | 0 | - | - |



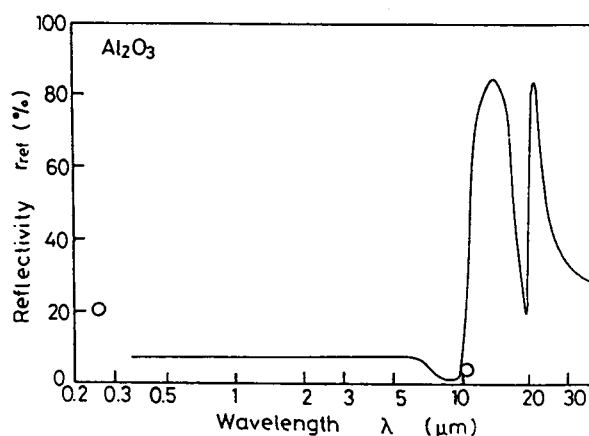
(a) Si_3N_4



(b) SiC



(c) ZrO_2



(d) Al_2O_3

図 4 - 1 各セラミックスの室温におけるビーム吸収率

室温状態でCO₂、YAGおよびエキシマレーザのそれぞれの波長による反射率の変動が最も大きいのはSi₃N₄で、CO₂レーザで60%である反射率がKrFエキシマレーザでは15%に低下する。SiCの場合も反射帯の影響を受け、25%以上の差異がみられる。これに対しAl₂O₃、ZrO₂ではCO₂レーザ波長が反射帯から外れ、逆にKrFエキシマレーザより15%程度低い。なお、試料の温度が上昇した場合には、格子膨張により反射帯が長波長側にシフトする現象が報告されており³⁰⁾、たとえば図4-1(a)および(b)において、反射帯が長波長側に移動した場合、CO₂レーザに対する反射率は低下することが予測される。

4-1-2 加工中のビーム吸収率

室温におけるSi₃N₄のビーム反射率はCO₂レーザで特に高い値を示す。しかしながら実際に加工を行った場合、YAGとCO₂レーザの間で加工特性に差がみられないなど、加工中のビーム吸収率が理論値と異なっていることを示唆する実験結果が得られている。この吸収率上昇の機構としては、①温度上昇による材料自身の吸収率の変化、②酸化皮膜など材料表面の生成物による吸収率上昇が考えられる。そこで、CO₂ビームに対する各セラミックスの吸収率に注目し、加工中あるいはそれに近い状態における値を明らかにすることにした。

反射率の測定は入射ビームと反射ビームのエネルギー比測定及び、一定時間ビームを照射したときの吸収エネルギーによる測定の両方法で行った。

反射による測定の際には、図4-2に示すように試料をAr中で加熱ヒータにより熱し、熱電対で試料温度を測定しながら、十分低いパワー密度(～10W/cm²)のビームを照射し、反射パワーをパワーメータで測定した。

吸収エネルギーの測定では、図4-3に示すように試料を熱容量既知の銅ブロックに密着固定し、ビームを移動させながら照射した。ビーム照射部の温度は放射温度計で測定し、吸収エネルギーは銅ブロックの温度上昇をサーミスタで測定し熱量に換算して求めた。

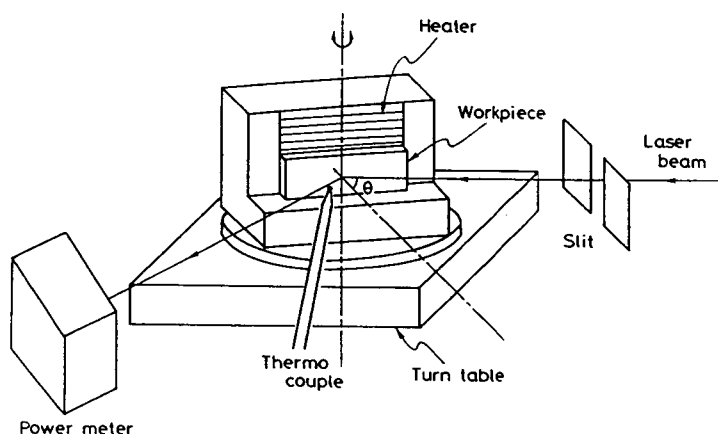


図4-2 反射パワーによるビーム反射率の測定

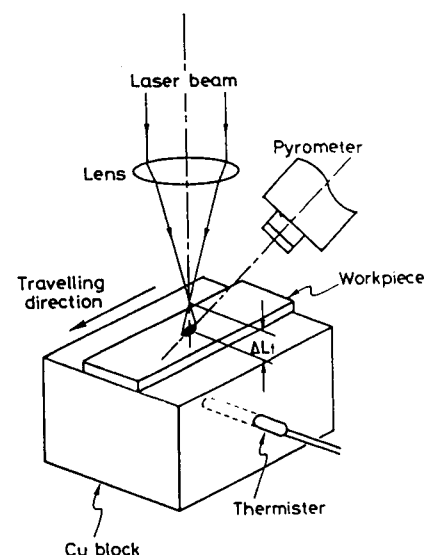


図4-3 吸収エネルギーによるビーム吸収率の測定

図4-4は Al_2O_3 、 ZrO_2 、 SiC 及び Si_3N_4 の各材料について、種々の温度における CO_2 レーザビーム吸収率を測定した結果を示す。 Al_2O_3 及び ZrO_2 は、室温において CO_2 レーザに対する吸収率は95%以上と高く、温度上昇によってなお増大する傾向はあるがその勾配はごく小さい。これに対して、 SiC では600K、 Si_3N_4 では1000K付近から温度上昇と共に吸収率が急激に上昇する。そして、それぞれの材料の分解温度付近では SiC で90%、 Si_3N_4 で80%程度の高い吸収率となる。これはYAGレーザに対する室温近傍での吸収率(SiC :82%、 Si_3N_4 :90%、図4-1(a))に近い値に相当している。すなわち、高温における Si_3N_4 、 SiC に関しては、 CO_2 、YAGの両レーザの吸収率にほとんど差がなく、実験的に加工溝幅等の値に差がみられなかったことが理解できる。なお、試料を吸収率が高い状態まで加熱した後、室温まで冷却し、室温状態で吸収率を測定した結果は、加熱前の吸収率とほとんど変化していない。したがって、 Si_3N_4 、 SiC における吸収率の上昇が、試料表面の生成物によるものではなく、温度上昇に伴う材料物性の変化に起因することを示しており、前述した反射帯移動がその吸収率上昇の最も有力な原因と考えられる。

KrFエキシマレーザ(波長248nm)に対する各セラミックスのビーム吸収率測定値を図4-5に示す。測定は銅ブロックを用いた吸収エネルギー法で行った。またビーム照射に伴う吸収率変化を見るため、種々のパワー密度のビームを照射した後、加工しきいパワー密度以下の 10^{11}W/m^2 のビームを照射して、吸収エネルギーを測定した。図に示すように、 SiC を除き、レーザ未照射試料と比べ、レーザビーム照射後は吸収率の低下が見られた。 Si_3N_4 の例では、レーザ未照射試料ではKrFエキシマレーザに対して85%程度あった吸収率がレーザ照射後は73%にまで低下している。

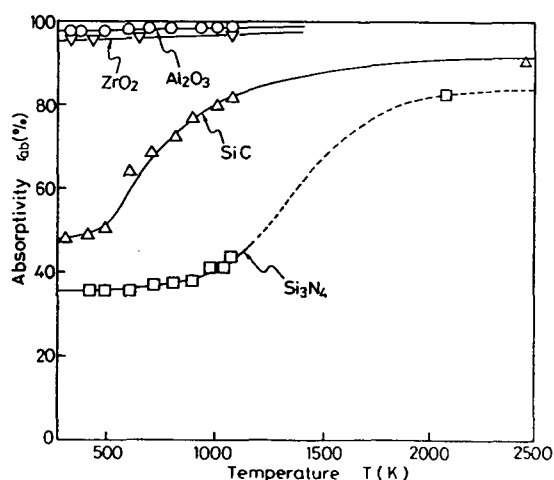


図4-4 CO_2 レーザに対する各セラミックスのビーム吸収率の温度依存性

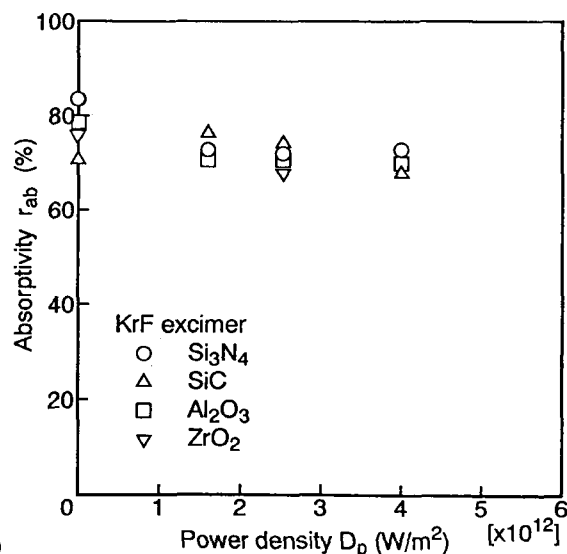


図4-5 種々のパワー密度のビームを照射した後のエキシマレーザ吸収率

次に加工中におけるビーム吸収率を測定するため、図4-6に示す測定系を用いた。マスクプロジェクション光学系により、試料表面に均一強度ビームを照射し、セラミックスの加工を行った。加工中に試料から返ってくるビームを入射部口径4mmのオプティカルファイバに入射させ、レーザ光のみをモノクロメータで分離後、反射光のパワーを測定した。

図4-7は反射ビームパワー密度の角度依存性の例を示している。なお、 $\theta < 28^\circ$ ではオプティカルファイバと加工用光学系が干渉しないよう、図4-6(b)のように入射ビームを 15° 傾けて計測した。測定値を半球内で積分することにより、試料から返ってくるビーム割合R（以下、これを反射割合とよぶ）を知ることができる。図4-8に Si_3N_4 に関する結果を示す。図に示すようにビーム照射開始直後、Rはほぼ一定値を示す。これは、除去が始まる直前の状態と考えられ、ここでの $R=30\%$ は、加工面吸収率73%とよく一致している。なお、加工開始後のRの低下、再上昇域に関しては試料温度上昇のみの関与では説明できない。これに関しては次章でプラズマとの関連のもとに検討している。

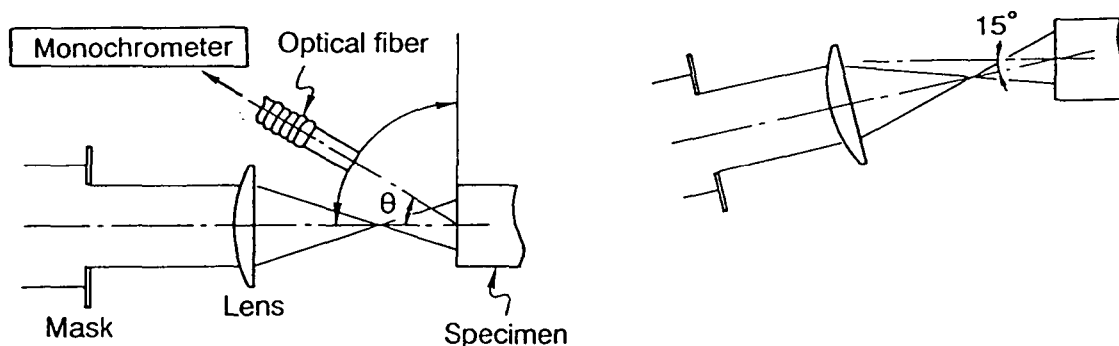


図4-6 エキシマレーザ加工におけるインプロセスビーム反射率測定法

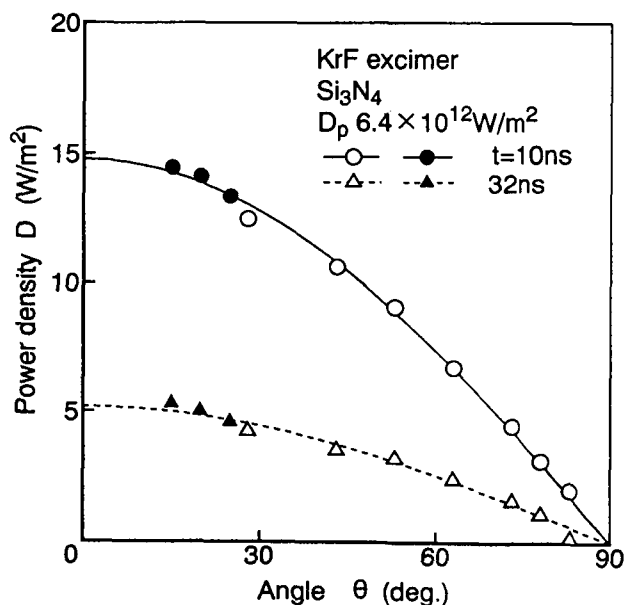


図4-7 試料面から戻ってくるビームパワー密度の角度依存性

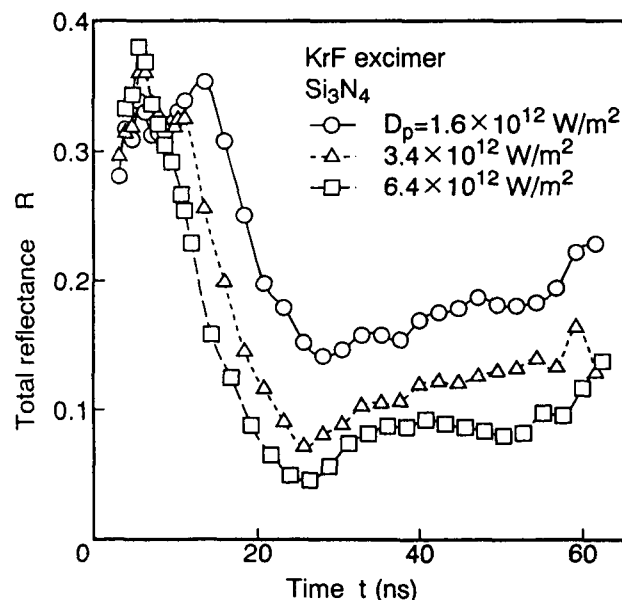


図4-8 ビーム反射割合の時間変化

4-2 ビームの浸透と除去限界パワー密度

Al_2O_3 、 ZrO_2 等のセラミックスでは波長による反射率の変化以外に、ビームが材料内部にまで透過して入り込むビーム浸透の影響も無視できない。 Al_2O_3 のビーム浸透深さ β （材料表面から入射したビームが入射強度の $1/e$ になるまでの通過距離）としてYAGレーザでは $330\mu\text{m}$ 、 CO_2 レーザでは $1\mu\text{m}$ の値が報告されている³¹⁾。この浸透深さが加工に及ぼす影響について、3章の加工結果と対照させながら検討する。

いま、簡単のため $z=0$ の試料表面から x, y 両方向に均一なパワー密度をもつビームが1パルス照射されるとし、 z 方向の1次元熱伝導による試料表面の温度変化を考える。 z の位置で発生した、強度 $\Delta q(t, z)$ の瞬間発生熱源による表面の温度上昇は、通常の表面からの熱伝導と同じく、 t 秒後、 $z=0$ において、

$$\Delta T(z, t) = \frac{\Delta q}{c\rho} \frac{1}{\sqrt{\pi kt}} \exp\left(-\frac{z^2}{4kt}\right) \quad (4-3)$$

で計算できる。ただし、 c :比熱、 ρ :密度、 k :熱拡散率である。

いま図4-9のように $z=0$ 面から初期強度 D_0 (W/m^2) のビームが浸透したとすると、深さ z の位置での強度は、吸収係数を α ($=1/\beta$) として、

$$D = D_0(t) \exp(-\alpha z) \quad (4-4)$$

また、 $\frac{dD}{dz} = -D_0 \alpha \exp(-\alpha z)$ より、深さ dz 、時間 dt あたりのエネルギーは、

$$\Delta q = D_0 \alpha \exp(-\alpha z) dz dt \quad (4-5)$$

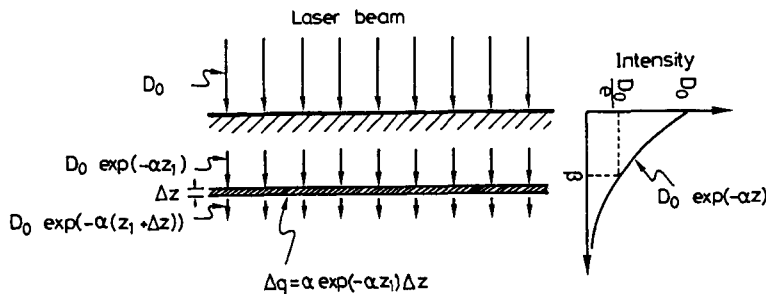


図4-9 試料内部へのビーム浸透を考慮した熱伝導モデル

これを式(4-3)に代入し、 z, t で積分することによって、 $z=0$ における温度上昇が(4-6)式で表される。これを数値積分し、表面温度が表2-7の融点あるいは分解点となるパワー密度を D_0' として求めた。

$$T(0, t) = \frac{D_0 \alpha}{c\rho\sqrt{\pi k}} \int_{-\infty}^0 \int_0^t \exp(-\alpha z) \frac{1}{\sqrt{t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4kt}\right) dt dz \quad (4-6)$$

図4-10は各セラミックスにおけるパルス幅 t と D_c' の関係を、ビーム浸透深さをパラメータとして計算した結果を示している。

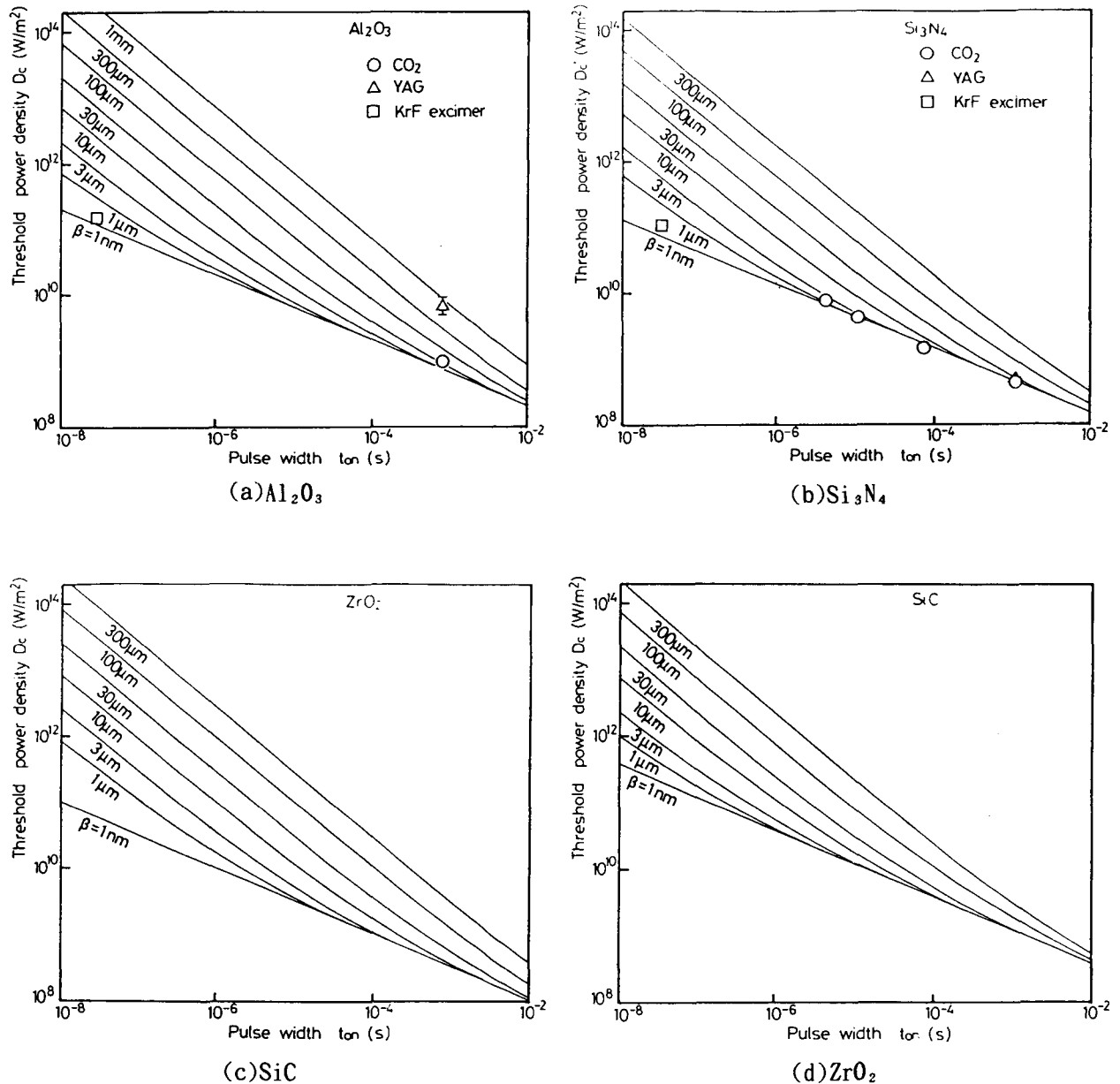


図4-10 種々のビーム浸透深さにおけるパルス幅と除去しきいパワー密度の関係

図から明らかなようにパルス幅が小さいほどビーム浸透深さの影響が大きくなる。これはパルス幅が小さいとパルス時間内の熱伝導の影響が相対的に小さくなり、表面温度の上昇に対する影響が板表面付近の熱源に限定されるためである。浸透深さが小さく、パルス幅が大きい領域では表面熱源による1次元熱伝導となり D_c は $t^{1/2}$ に逆比例する。ところが浸透深さが大きく、パルス幅が小さい場合には温度は単位体積あたりの投入熱量で決まるため、浸透深さ β に比例、パルス幅 t に逆比例している。たとえば、 Al_2O_3 では、1ms程度のパルスでは $10\mu m$ 程度のビーム浸透があったとしても熱伝導論的にはほぼ表面熱源によるものと変わらず、 D_c は $t^{1/2}$ に逆比例する。しかし、パルス幅 $10\mu s$ では $3\mu m$ 程度以上の浸透深さで明らかにその影響があらわれる。

YAG、 CO_2 およびエキシマレーザ加工時の除去しきいパワー密度とビーム吸収率から $D_c \times r_{ab}$ により D_c' を求め、これを図中にプロットして示す。これより、逆に浸透深さを求めると、YAGで $400 \sim 1000\mu m$ 、 CO_2 で $0 \sim 50\mu m$ となる。これらはHamannらの値⁴⁶⁾ (YAG: $330\mu m$ 、 CO_2 : $1\mu m$)と基本的に一致する。さらに短いパルスを用いた場合には CO_2 とYAGの差はさらに大きくなり、たとえば $1\mu s$ 程度のパルスでは CO_2 では $2 \times 10^{10} W/m^2$ 程度のパワー密度で加工が可能であるが、YAGでは $10^{12} \sim 10^{13} W/m^2$ が必要となり、ノーマルパルスではほとんど加工が不可能となることが推定できる。なお、KrFエキシマレーザのビーム浸透深さは図より $0.1 \sim 0.3\mu m$ と推定される。

図4-10(b)は Si_3N_4 について同様の検討を行った結果を示している。 Si_3N_4 では CO_2 あるいはYAGレーザいずれでもビーム浸透の影響はほとんど現われていない。KrFエキシマレーザについては、 Al_2O_3 と同様、 $0.1 \sim 0.3\mu m$ 程度の値が得られた。

図4-10(c)、(d)は他のセラミックスについての計算結果を示している。ビーム浸透深さの影響は前述したようにパルス時間内の熱伝導が小さい時に顕著となるため図からわかるように温度拡散係数が小さい材料(ZrO_2 が最も小さく、 SiC が最大)ほど影響を受ける。特に数十ns程度の短パルス領域では熱伝導の影響が非常に小さいため、僅かな浸透深さの変化も D_c を大きく変化させることがわかる。

4-3 結言

レーザ加工中、あるいはそれに近い状況下におけるセラミックスのビーム反射・吸収率を測定し、室温状態での値と比較した。さらに、各セラミックス加工中のビーム浸透深さが加工に及ぼす影響を加工結果とモデル計算値の比較により検討した。以下に得られた結果を要約する。

(1) Si_3N_4 および SiC の室温における CO_2 レーザ吸収率は、 CO_2 レーザ波長が反射帯に位置するため、YAGおよびエキシマレーザに対する値と比較して1/2以下と低いが、温度上昇に伴って上昇し、加工中に近い高温状態ではほぼ同じとなる。その遷移温度は SiC で $700 \sim 1000K$ 、 Si_3N_4 では $1200 \sim 1500K$ である。

(2) Al_2O_3 、 ZrO_2 では CO_2 レーザ波長は反射帯からはずれているため、95%以上とYAG、

エキシマレーザより高い吸収率を示し、この値は温度が上昇してもほとんど変化しない。

(3) KrFエキシマレーザ波長に対する吸収率は、レーザ照射による加工後低下がみられた。この低下した後の値が、高パワー密度ビーム照射に伴う加工中も維持されていることを確認した。

(4) 各セラミックスに関してビームの浸透深さが除去しきいパワー密度に及ぼす影響を計算した。実験との比較により Al_2O_3 に対する各レーザの浸透深さは、YAGで $400\sim 1000\mu m$ 、 CO_2 では $0\sim 30\mu m$ 、エキシマレーザでは $1\mu m$ 以下と推定される。なお、 Si_3N_4 についてはYAG、 CO_2 レーザでは加工に影響する程のビーム浸透はみられない。

(5) パルス幅が小さいほど、熱伝導の影響が低下し、この結果ビーム浸透深さの影響が大きくなる。パルス幅30nsのKrFエキシマレーザでは $1\mu m$ 以下のビーム浸透でも除去しきいパワー密度に影響が現われる。

第5章 レーザ加工における誘起プラズマとその影響

5-1 レーザ加工領域からの放射光

加工中に発生するプルームがプラズマ化しているか否か、プラズマ化しているとすればその温度、密度を知ることがレーザ加工機構を明らかにする上で重要である。

CO₂およびエキシマレーザを用いてSi₃N₄セラミックスを大気中で加工しながら、加工進行面からの放射光を分光分析した。図5-1に示すように、加工進行面の像をオプティカルファイバの入射端面上に拡大結像し、加工進行面の直径300 μ mに相当する領域からの光を分光器の入射スリットに導いた。分光器は250mmクラスの回折格子型モノクロメータ（G250およびP250）で、光検出素子としてアレイ状センサ（G250）および光電子増倍管（P250）を用いた。波長較正はHgランプにより、光検出素子及び測定用光学系の波長感度較正は放射スペクトル既知のハロゲンランプを用いてそれぞれ行った。

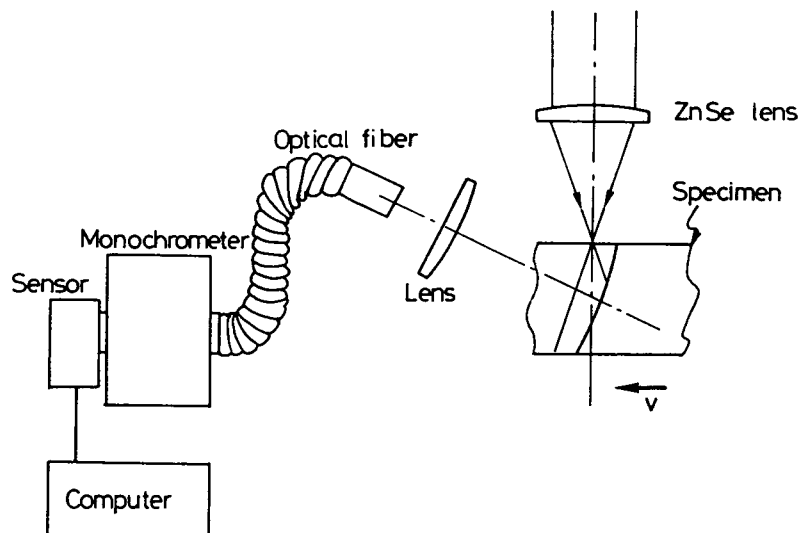


図5-1 加工進行面放射光の分光方法

CW-CO₂レーザを用いて切断中のSi₃N₄からの放射光スペクトルを図5-2に示す。放射光は連続スペクトルのみで、プルームのプラズマ化をしめす輝線スペクトルはみられない。また、3章で示したように10¹¹W/m²以下の領域ではパワー密度増加に対して加工速度の飽和が生じないことから、一般的な加工用CO₂、YAGレーザを集光して得られる10¹¹W/m²程度のパワー密度域ではプルームのプラズマ化およびその加工への影響はほと

んどないといえる。

次にエキシマレーザを用いてさらに高パワー密度レベルでの検討を行った。マスクプロジェクション ($D_p \leq 3.5 \times 10^{12} \text{W/m}^2$) あるいは集光エキシマレーザ (中心軸上ピークパワー密度 $D_p = 5 \times 10^{15} \text{W/m}^2$) により Si_3N_4 を加工し、加工進行面からの放射光を分光した結果を図 5-3 に示す。スペクトルには多数の輝線スペクトルが見られる。 $1 \times 10^{12} \text{W/m}^2$ あるいは $2 \times 10^{12} \text{W/m}^2$ では $\text{Si}(\text{II})$ すなわち Si イオン線は非常に弱く、存在が確認できる程度であるが、 $3.5 \times 10^{12} \text{W/m}^2$ ではかなり強く現れ、 $5 \times 10^{15} \text{W/m}^2$ ではさらに強度を増し、材料の電離が進んでいることを示している。また、3章で示したように、除去加工速度が $4 \times 10^{12} \text{W/m}^2$ 以上では、飽和する傾向がみられ、プラズマプルームがビームと相互作用して加工現象に影響を与えていると考えざるを得ない。

これらの結果をふまえ、エキシマレーザ加工中に発生するプラズマの性質、入射ビームとの相互作用、さらに加工への影響について検討する。

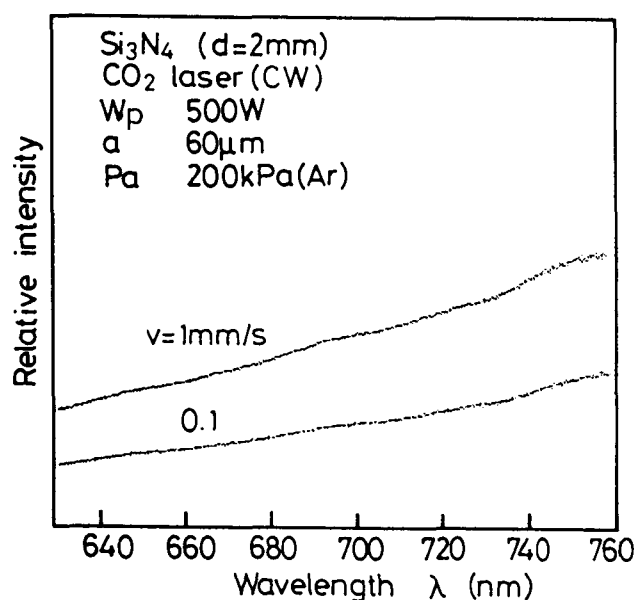


図 5-2 CO_2 レーザ加工中の放射光スペクトル

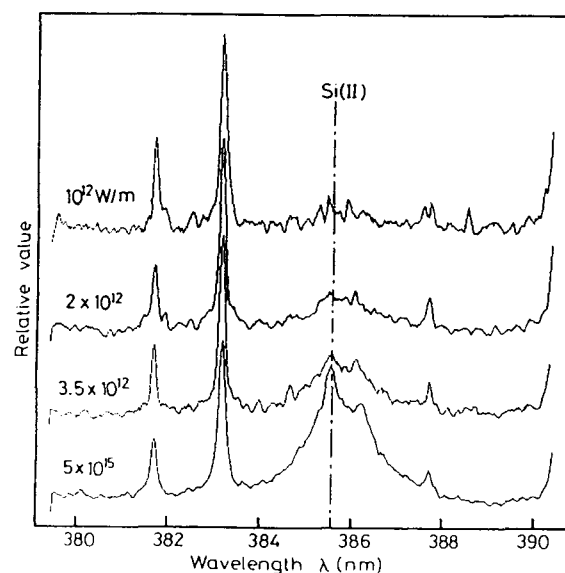


図 5-3 エキシマレーザ加工中の放射光スペクトル

5-2 レーザ誘起プラズマの状態

5-2-1 プラズマからの放射光のスペクトル

原子が電子励起状態、あるいはプラズマ状態になった場合、それぞれ定まったエネルギー準位間の電子遷移により、輝線スペクトルを生じる。この輝線スペクトルに着目し、パルス照射後の各時刻における放射スペクトルを測定した。

図 5-4 は本測定における装置配置の概略を示す。モノクロメータからの出射光

は出射スリットに取り付けた光電子増倍管により検出し、その信号をA/D変換の後、制御コンピュータに直接転送し、信号処理を行った。A/D変換開始タイミング及びエキシマビームパルス発生タイミングは外部に設置したクロック回路により同期させた。1パルスのビーム照射によりある波長における放射光の時間変化を測定し、これを波長間隔0.02nmごとに繰り返した。図5-5に示すようにそれぞれのデータを時間毎に波長方向に再配列することで、エキシマビームパルスの立ち上りを $t=0$ として2nsの時間分解能を持つスペクトルデータを得た。なお、プラズマに関する検討では Si_3N_4 セラミックスに加え、Feも用いた。Feについては従来からスペクトル線強度その他について多くの研究があり、各準位間の遷移確率等、解析に必要なデータがSiあるいはNと比べて多く報告されているためである。

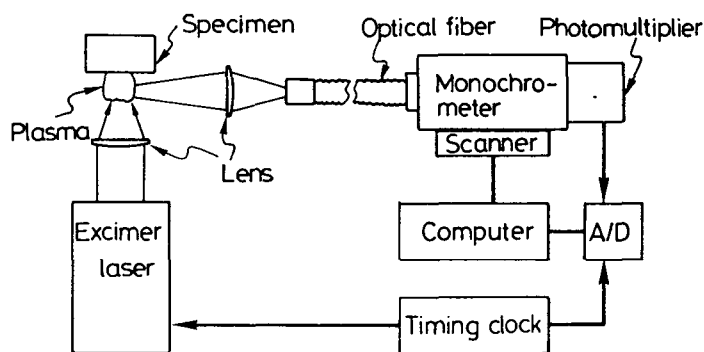


図5-4 プラズマ放射光の分光測定装置

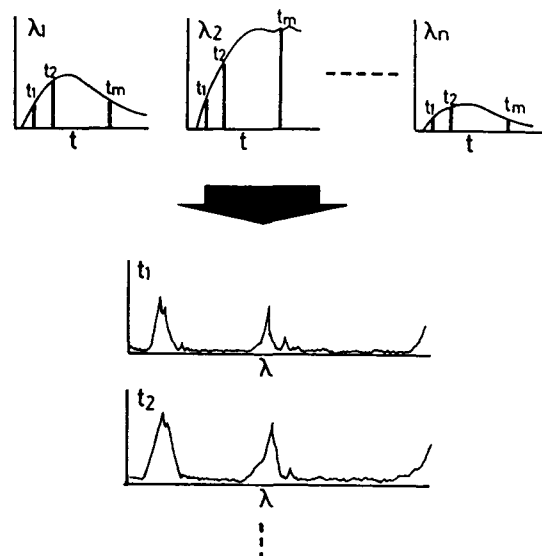


図5-5 時間分解能を伴う測定の際の信号処理方法

図5-6はそれぞれ(a) Si_3N_4 および、(b)FeにKrFエキシマビームを照射した場合のスペクトルの時間変化を示している。線スペクトルが最も明瞭に現れるのはFeでは200~300ns、 Si_3N_4 では500~800ns付近である。これより早い時期では線スペクトルの幅が広がり、中心波長のずれが見られる。プラズマ中の電子密度が高い場合にはプラズマ中の荷電粒子がつくる微視的電場による、いわゆるシュタルク効果により、スペクトル線の幅が広がり、中心波長のずれを生じる。したがって、即断できないが、ビーム照射直後では非常に高い電子密度のプラズマが生成していると考えられることもできる。なお、検出された線スペクトルは Si_3N_4 の場合には、Si(I)、Si(II)、Y(I)、Y(II)、Al(I)及びAl(II)である。またFeではFe(I)及びFe(II)であった。

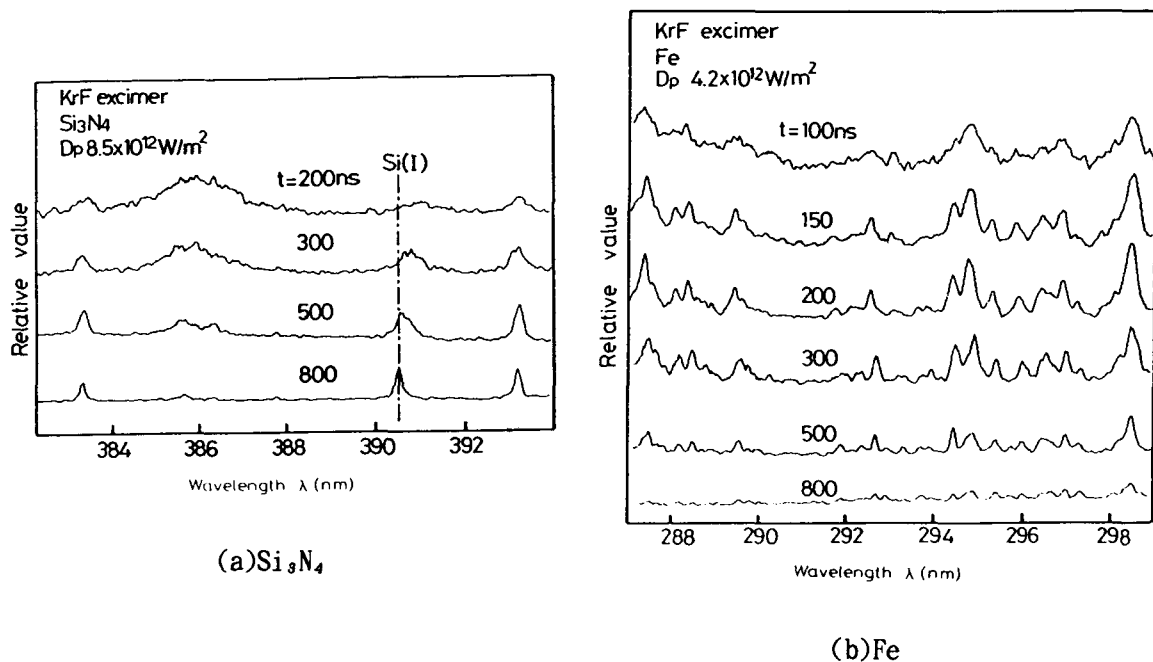


図 5 - 6 エキシマレーザ加工中の放射光スペクトル

5-2-2 プラズマの温度と電子密度

電子密度、温度等のプラズマパラメータは入射レーザビームとの相互作用を知る上で重要な因子である。そこで、プラズマの放射スペクトルを用いてプラズマパラメータを解析する。なお、解析は図 5 - 6 で各原子、イオンの線スペクトルが比較的明瞭に現われているパルス立ち上がり後 100ns 以降を対象として行った。パルス幅は 30ns 程度であるため、この方法ではビーム照射中のプラズマを直接測定することはできないが、測定結果の外挿によりビーム照射中のプラズマ状態についても検討し、逆制動放射モデルにより吸収係数を解析している。

プラズマに関する光学的検討を行うにあたって、局所熱平衡 (LTE: Local Thermal Equilibrium) が成立すると仮定した。通常、分光の対象となる光源は有限の大きさを持っており、かつ局所的に異なった平衡状態をとっている。一般に粒子の平均自由行路程度の領域の温度変化がその平均温度に比べて無視できる場合には局所熱平衡として取り扱ってよい。

Griem は熱平衡の条件として次の式を与えた³²⁾。

$$n_e > 1.4 \times 10^8 \sqrt{T} \chi^3 \quad (5-1)$$

ただし、 n_e :電子密度

T :電子温度

χ :問題となる準位間のエネルギーギャップ

すなわち、輻射による遷移確率が衝突による遷移確率より十分小さい時に熱平衡となる。

プラズマ構成原子内の電子が、励起準位 n から下位準位 m に遷移することにより生じる線スペクトルの強度 (I_{nm}) は、次の式であらわされる。

$$I_{nm} = A_{nm} n_n h\nu_{nm} \quad (5-2)$$

ただし、 A_{nm} : 与えられた振動数の放射を生じる量子的遷移確率

n_n : 励起状態にある原子数

ν_{nm} : 光の振動数

また、プラズマが熱平衡にあるとき、プラズマ中で n 番目のエネルギーレベルに励起されている原子数 n_n はボルツマン分布をとるから。

$$n_n = n_0 \frac{g_n}{g_0} \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right) \quad (5-3)$$

ただし、 n_0 : 原子密度 k : ボルツマン定数

g_0 : 基底状態 0 の統計的重み

g_n : E_n レベルにおける統計的重み

E_n : n 番目の励起エネルギーレベル

したがって、

$$\ln\left(\frac{I_{nm}\lambda_{nm}}{g_n A_{nm}}\right) = -\frac{E_n}{kT} + \ln\left(\frac{n_0 hc}{g_0}\right) \quad (5-4)$$

ただし、 λ_{nm} : ν_{nm} に対応する波長

すなわち、分光で得られた原子あるいはイオンのスペクトル線強度を式(5-4)に従ってプロット (ボルツマンプロット) すると、プロットした直線の傾きからプラズマの温度を求めることができる。

さらにSahaの式から、電子密度として、

$$n_e = \frac{I}{I_i} \frac{g_i A_i v_i}{g A v} \frac{2 (2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E - E_i - V}{kT}\right) \quad (5-5)$$

が与えられる。

電離度については、次のような1価の電離平衡を考える。



温度 T 、全圧力 P_{tot} における電離度を K_a とすると、プラズマ諸量は、

| | |
|--------------------------|---|
| 中性原子密度 $n_n: (1-K_a)n_0$ | 分圧 $P_n: (1-K_a)n_0 kT = n_n kT$ |
| イオン密度 $n_i: K_a n_0$ | $P_i: K_a n_0 kT = n_i kT$ |
| 電子密度 $n_e: K_a n_0$ | $P_e: K_a n_0 kT = n_e kT$ |
| | 全圧 $P_{\text{tot}}: (n_n + n_i + n_e) kT$ |

であらわされる。したがって、Sahaの式として次式が与えられる。

$$\frac{n_i + n_e}{n} = \frac{K_a}{1-K_a} n_e = \frac{(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \frac{2Z^+}{Z} \exp\left(-\frac{V}{kT}\right) \quad (5-7)$$

ここで、 $Z^+ = \sum_i g_i \exp\left(-\frac{E_{i1}}{kT}\right)$: イオンの状態和

$Z = \sum_j g_j \exp\left(-\frac{E_j}{kT}\right)$: 中性原子の状態和

次に、プラズマパラメータとビーム吸収について述べる。一般にプラズマは電子、イオン及び中性原子で構成されている。プラズマ内各点の性質をそれぞれの速度 $\mathbf{v}(r, t)$ 、密度 $n(r, t)$ 、温度 $T(r, t)$ 及び3体相互のエネルギー授受で表す。以下、電子については e 、イオンについては i 、中性原子 n を添え字に付けて表現する。それぞれの運動方程式は、

$$n_n m_n \frac{d\mathbf{v}_n}{dt} = n_e m_e \mathbf{v}_{en} (\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_n) + \mathbf{F}_{ni} + \nabla n_n kT_n + \mathbf{K}_n \quad (5-8)$$

$$n_i m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = n_i e \mathbf{E} + n_i e \mathbf{v}_i \times \mathbf{B} + n_e m_e \mathbf{v} (\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_i) - \mathbf{F}_{ni} + \nabla n_i kT_i + \mathbf{K}_i \quad (5-9)$$

$$n_e m_e \frac{d\mathbf{v}_e}{dt} = -n_e e \mathbf{E} - n_e e \mathbf{v}_e \times \mathbf{B} - n_e m_e \mathbf{v} (\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_i) - n_e m_e \mathbf{v}_{ne} (\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_n) + \nabla n_e kT_e + \mathbf{K}_e \quad (5-10)$$

これらの式で、 \mathbf{K} は重力などの外力、 $\nabla n k T$ は圧力勾配、プラズマ中の電界 \mathbf{E} 、磁界 \mathbf{B} 、イオンと中性原子の相互作用力 \mathbf{F}_{ni} 、 k はボルツマン定数である。また、 $n_i = n_e$ とする。ここで、一般にイオンの衝突断面積は中性原子と比べて非常に大きく、数%以上が電離しているプラズマでは、中性原子と電子の衝突の影響は小さい。ここでは簡単化のため、中性原子に関する項を省く。式(5-9)、(5-10)、さらにプラズマ中の電流密度として、 $\mathbf{j} = e (n_i \mathbf{v}_i - n_e \mathbf{v}_e) = e n_e (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_e)$ を導入する。また、外力は作用していないとする。電子質量と比べ、イオン質量は十分大きいいため、ガス圧力項は $P_e = n_e k T_e$ のみとなる。

$$\frac{m_e}{n_e e^2} \left(\frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} + \mathbf{v} \mathbf{j} \right) = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \frac{1}{n_e e} \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \frac{1}{n_e e} \nabla P_e \quad (5-11)$$

右辺で第2項はローレンツ力、第3項はホール電流、第4項は圧力勾配電流である。(5-11)で電場による電子の加速のみを取りだし、プラズマ周波数 $\omega_p = \sqrt{e^2 n_e / \epsilon_0 m_e}$ を用いることにより、

$$\left(\frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} + \mathbf{v} \mathbf{j} \right) = \epsilon_0 \omega_p^2 \mathbf{E} \quad (5-12)$$

いま \mathbf{j} 及び \mathbf{E} が周波数 ω の関数で、 $\mathbf{j} = \mathbf{j}_0 \exp(-i\omega t + i\phi)$ 、 $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(-i\omega t)$ で表されるとするとMaxwellの式から式(5-12)は次式のようなになる。

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) + \epsilon_0 \mu_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 (1 + i \frac{\mathbf{v}}{\omega})} \right) \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (5-13)$$

したがって複素屈折率として、

$$\tilde{n} = n + ik = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 (1 + i \frac{\mathbf{v}}{\omega})}} \quad (5-14)$$

が得られる。複素屈折率の虚数項と吸収係数は $K = 2\omega \kappa / c$ なる関係があり、これより吸収係数が求まる。この、電子の加速、イオンとの衝突のくり返しによる電磁波吸収は逆制動放射³³⁾と呼ばれる。電子-イオン衝突周波数 ν ³⁴⁾は、

$$\nu = \frac{n_e e^4 \pi^{3/2} Z \ln \Lambda}{(4\pi \epsilon_0)^2 \times 2 (2kT)^{3/2} m_e^{1/2} \gamma_E(Z)} \quad (5-15)$$

ただし、 Z : イオンの電荷数

$\gamma_E(Z)$: 電子どうしの衝突を考慮するための補正項

$\ln \Lambda$: 式(5-16)で与えられるクーロン対数。

$$\ln \Lambda = \ln \left(\left(\frac{12\pi\epsilon_0^{3/2}}{e^3} \right) \left(\frac{k^3 T^3}{n} \right)^{1/2} \right) \quad (5-16)$$

なお、この衝突理論による計算には、以下の制約条件がある³⁵⁾。

- (1) Λ (デバイ長と電子-イオン衝突半径の比で決まる補正項) が 1 より大きいこと。
- (2) 電子温度がフェルミ温度 ζ_0 に比べて十分大きく、電子分布関数の排他原理の効果が小さいこと。
- (3) プラズマの集団運動による吸収等、非線形の異常吸収がないこと。

条件(1)より、

$$\Lambda = \frac{12\pi\epsilon_0^{3/2}}{e^3} \left(\frac{k^3 T^3}{n} \right)^{1/2} > 1 \quad (5-17)$$

条件(2)より、

$$T > \zeta_0 = \frac{\pi^2 h^2 (4n_e)^{2/3}}{(2\pi)^3 m_e k} \quad (5-18)$$

となり、電子密度と温度の条件として、 $T > 1.61 \times 10^{-9} n_e^{1/3}$ かつ $T > 3.02 \times 10^{-19} n_e^{3/2}$ となる。

条件(3)の異常吸収は本実験のパワー密度範囲では生じないとしてよい³⁶⁾³⁷⁾。

図5-7はFeに $3.5 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$ のエキシマレーザビームを照射した場合のボルツマンプロットの例を示している。なお、プロットに用いた原子線を表5-1³⁸⁾に示す。 λ は波長、 E_L 、 E_H は低エネルギー準位、高エネルギー準位、 $g A$ は遷移確率と統計的重みの積を示す。全プロット点は直線から一定の狭い範囲内に存在し遷移確率の誤差、スペクトル線強度の測定精度を考えると直線と見なすことができる。このボルツマンプロットから、最小2乗法により傾きを決定し、プラズマの電子温度 T_e を求めた。図5-8は種々のパワー密度におけるFeプラズマ温度の時間変化を示している。Fe加工時のプラズマ温度は200ns付近で13000Kまで低下し、その後、緩やかに下降している。これらの結果を外挿することにより、ビーム照射中のプラズマ温度は18000Kに達していたと推定される。

図5-9はエキシマレーザを Si_3N_4 に照射した時のプラズマ温度変化である。なお、 Si_3N_4 加工時に発生するプラズマではボルツマンプロットに十分な本数のSi(I)スペクトル線が検出できなかったため、焼結助剤に含まれるYの1価イオン、Y(II)の線(表5-2)を温度測定に用いた。ビーム照射中のプラズマ温度はFeとほぼ同じ18000K程度と推測される。

表5-1 ボルツマンプロットに用いたFe原子線

| λ (nm) | EL (cm ⁻¹) | EH (cm ⁻¹) | gA ($\times 10^4/s$) |
|----------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 358.120 | 34844 | 34844 | 23. |
| 360.321 | 21716 | 49461 | 33. |
| 360.668 | 21716 | 49434 | 65. |
| 360.886 | 8155 | 35856 | 10. |
| 363.204 | 24772 | 52297 | 26. |
| 364.039 | 21999 | 49461 | 45. |
| 365.147 | 22249 | 49628 | 64. |
| 371.994 | 0 | 26875 | 2.5 |
| 373.487 | 698 | 33695 | 20. |
| 373.713 | 416 | 27167 | 1.5 |
| 374.949 | 7377 | 34040 | 13. |
| 375.824 | 7728 | 34329 | 10. |
| 376.554 | 26106 | 52655 | 50. |
| 380.534 | 26628 | 52899 | 45. |
| 381.584 | 11976 | 38175 | 16. |
| 383.422 | 7728 | 33802 | 3.9 |
| 384.326 | 24575 | 50587 | 16. |
| 385.637 | 416 | 26340 | 0.31 |
| 387.250 | 7986 | 33802 | 1.0 |
| 387.802 | 7728 | 33507 | 1.4 |
| 390.295 | 12561 | 38175 | 5.8 |
| 396.926 | 11976 | 37163 | 4.4 |
| 399.740 | 21999 | 47008 | 11. |
| 400.525 | 12561 | 37521 | 3.6 |
| 404.582 | 11976 | 36686 | 22. |
| 406.360 | 12561 | 37163 | 9.9 |

表5-2 ボルツマンプロットに用いたYイオン線

| λ (nm) | EL (cm ⁻¹) | EH (cm ⁻¹) | gA ($\times 10^4/s$) |
|----------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 319.562 | 840 | 32124 | 2.5 |
| 320.027 | 1045 | 32284 | 2.4 |
| 320.332 | 840 | 32049 | 2.3 |
| 321.669 | 1045 | 32124 | 4.2 |
| 324.228 | 1450 | 32284 | 7.0 |
| 332.789 | 3296 | 33337 | 7.3 |
| 349.609 | 0 | 28595 | 0.74 |
| 354.901 | 1045 | 29214 | 2.0 |
| 358.452 | 840 | 28730 | 1.5 |
| 360.073 | 1450 | 29214 | 5.3 |
| 361.105 | 1045 | 28730 | 3.6 |
| 363.312 | 0 | 27517 | 2.6 |
| 366.461 | 1450 | 28730 | 1.3 |

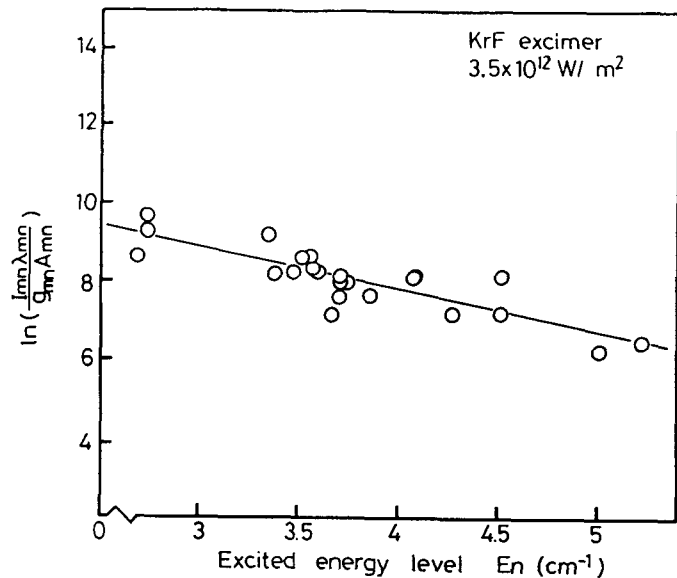
図5-7 測定したスペクトルによる
ボルツマンプロットの例

図5-10は式(5-5)により求めた、ビーム照射後の電子密度変化を示す。なお、この際に使用した原子線及びイオン線を表5-3、4に示す。電子密度は時間経過と共に急激に低下しており、これを外挿することによりビーム照射中は $5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 程度の非常に高い電子密度のプラズマが生成されていることがわかる。ここで、式(5-7)を用い、プラズマ温度、電子密度から電離度を計算すると7%となり、ビームとプラズマの相互作用における中性粒子の影響は小さいことがわかる。

図5-11は測定されたプラズマ電子温度近傍で逆制動放射モデルに基づき計算した吸収係数と電子密度の関係を示している。分光の結果得られた電子密度 $5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ は、 $5 \sim 20 \text{ mm}^{-1}$ の非常に高い吸収係数に相当する。なお、ここではレーザ加工中のプラ

ズマで逆制動放射モデルにより吸収係数を評価したが、プラズマによる電磁波吸収機構は逆制動放射以外にも共鳴吸収、電離吸収、サイクロトロン吸収があり、逆制動放射と併せて、さらに高い吸収係数となることもありうる。実験的にビーム吸収係数の測定を行い、プラズマとビームの相互作用を明らかにする必要がある。

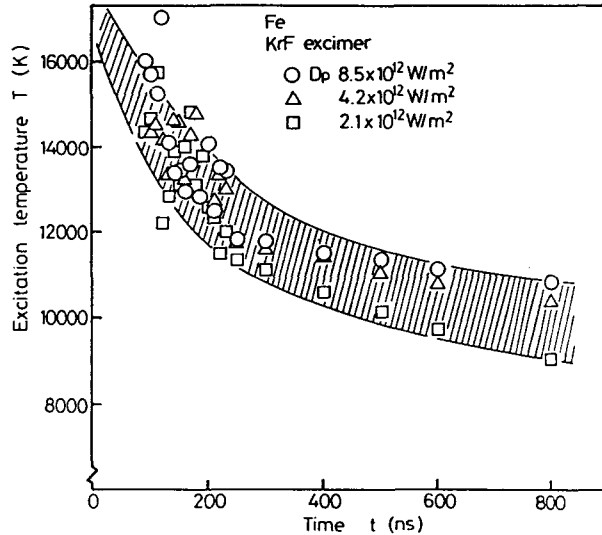


図 5 - 8 エキシマレーザをFeに照射した際に発生するプラズマの電子温度

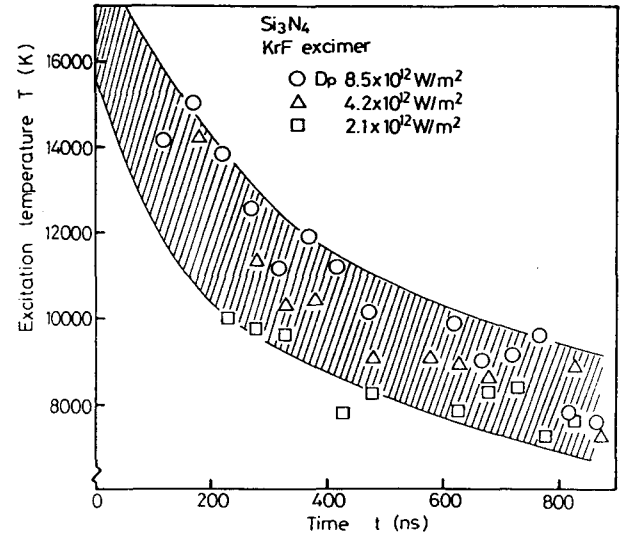


図 5 - 9 エキシマレーザをSi₃N₄に照射した際に発生するプラズマの電子温度

表 5 - 3 電子密度計算に用いたFe原子線

| λ (nm) | EL (cm ⁻¹) | EH (cm ⁻¹) | $g A$ (x10 ⁸ /s) |
|----------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 295.394 | 704 | 34547 | 1.7 |
| 298.478 | 6928 | 40422 | 1.8 |

表 5 - 4 電子密度計算に用いたFeイオン線

| λ (nm) | EL (cm ⁻¹) | EH (cm ⁻¹) | $g A$ (x10 ⁸ /s) |
|----------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 292.659 | 7955 | 47626 | 12. |
| 294.440 | 13673 | 47626 | 32. |

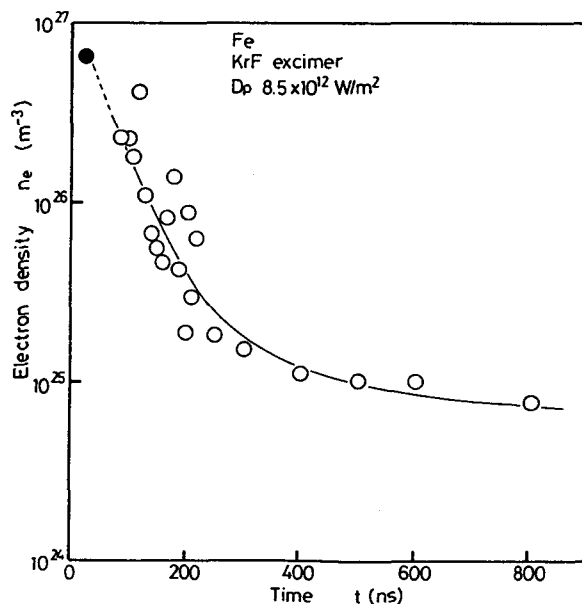


図 5 - 1 0 レーザ照射後の電子密度変化

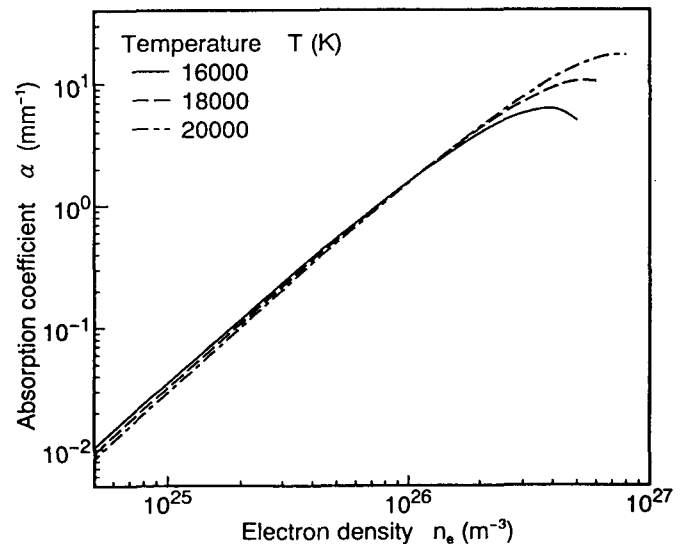


図 5 - 1 1 逆制動放射機構に基づくKrFエキシマレーザ吸収係数と電子密度の関係

5-3 レーザ誘起プラズマとビームの相互作用

5-3-1 プローブレザとプラズマの相互作用

ここでは、分光にかわるプラズマ計測法としてプローブレザを用いた測定を行っている。これは能動プラズマ計測法と呼ばれ、プラズマからの放射電磁波を用いるプラズマ分光法に比べ、入射電磁波の波長、強度、スペクトル形状さらには偏光特性を選んで測定できるため、得られる情報量が多い。すなわち、(1)電磁波の反射、(2)電磁波の透過、(3)電磁波の屈折、(4)電磁波の散乱などを測定することができる。ここでは、比較的簡単な装置で測定が可能で、しかも直接的に吸収に関する情報が得られることから(2)の透過測定法の一つである強度変化測定法を適用した。

図5-12は本測定で用いたプローブビームによるプラズマ解析装置の概略を示す。発振器からの出力ビームの10%を図中(a)の石英板により分岐させ、これをプローブ用ビームとする。残りの90%のビームは加工用ビームとしてマスクプロジェクション光学系もしくは集光光学系を用いて試料表面に照射し、(c)部でプラズマを生成させた。プローブ用ビームはマスクによりビームの中央部の平坦強度部を取り出し、(e)の石英板でさらに減衰させた後、加工用ビーム光軸との交点でマスクパターンを1/10に縮小結像させた。プラズマ通過中のプローブレザビーム径は $40\mu\text{m}$ 、パワー密度はパルスピークで $8 \times 10^{10} \text{W}/\text{m}^2$ で、加工用ビーム ($10^{12} \text{W}/\text{m}^2$ 以上) の1/10以下のパワー密度であり、プラズマに対する影響は加工用ビームと比べて十分小さい。プラズマ中を通過した後、ミラーでレーザ波長 (248nm) の光のみを分離し、検出器に入射させた。検出器は受光部に絞りをもち、受光径を0~30mmに変化させることができる。

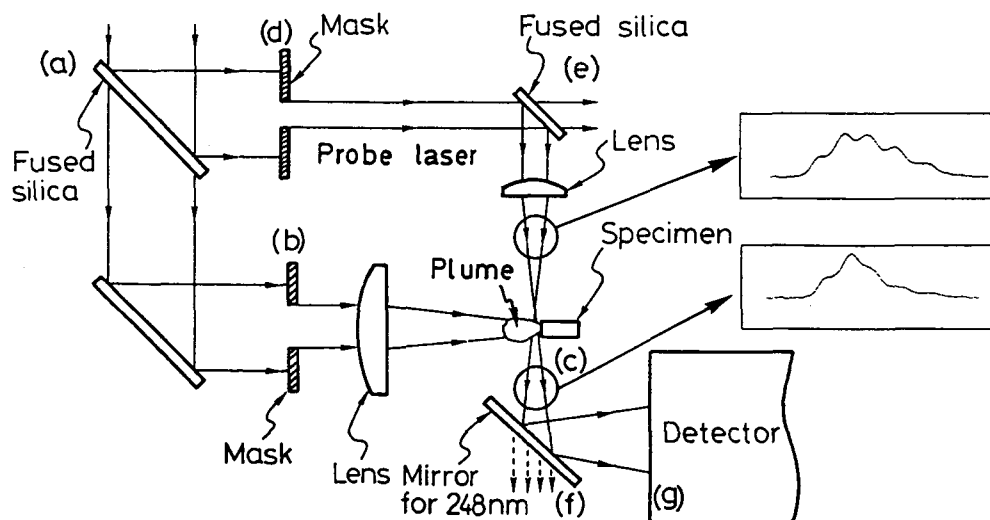


図5-12 プローブレザを用いたプラズマ解析装置の構成

図5-13にプラズマ中を通過させることによるプローブレーザの波形変化の例と信号処理法を示している。プローブレーザ波形(1)はプラズマ通過後、検出器で(2)のように変化する。この信号はレーザ波長(248nm)用ミラーによる反射光で、他の波長域のプラズマ光はほとんど除去されているが、さらに完全にプラズマ放射光の影響を除くため、プラズマ放射光のみ(プローブレーザは途中で遮断しておく)の信号波形(3)との減算処理を行った。その後、信号(1)と(4)を比較してプラズマにおける吸収等を評価する。

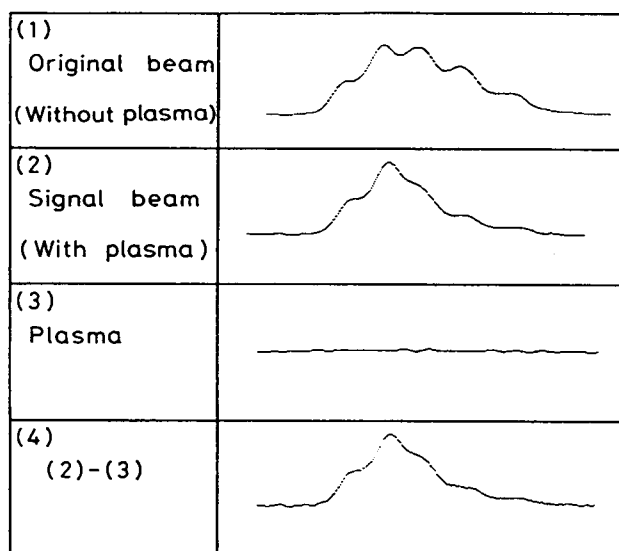


図5-13 プローブレーザ信号の処理方法

図5-14(b)にプラズマの有無によるプローブレーザの波形変化の例を示す。なお、本測定では、加工用ビームの一部をプローブレーザとして用いており、加工用ビームとプローブレーザの光路長も同一であるため、加工用ビームとプローブレーザの位相は一致する。この例では、プラズマの影響は20ns付近から現れはじめ、プラズマが無い場合のプローブレーザ波形(図中(b)上側の実線)に対し、プラズマ通過後では強度の低下が見られる。両者の強度比から計算した通過割合の変化を図中(a)に示す。通過割合は加工ビームが試料に入射しはじめてから20ns程度まで100%、20nsで低下し始め、35ns以降では30%程度でほぼ一定となっている。

照射表面からの位置を変えてプラズマによるプローブビーム波形の変化を測定したところ、図5-15の結果が得られた。これから、プラズマが時間と共に急激に広がっていることが明らかである。図5-14の通過割合変化は以下の各状態に対応するものと説明できる。

領域Ⅰ：試料表面にプラズマが未生成の状態。

領域Ⅱ：試料表面にプラズマが生成され、これが広がりつつある状態。すなわち、プローブレザ（直径 $40\mu\text{m}$ ）の一部がプラズマを通過している状態。

領域Ⅲ：プラズマが十分に広がり、プローブレザが全てプラズマ中を通過している状態。

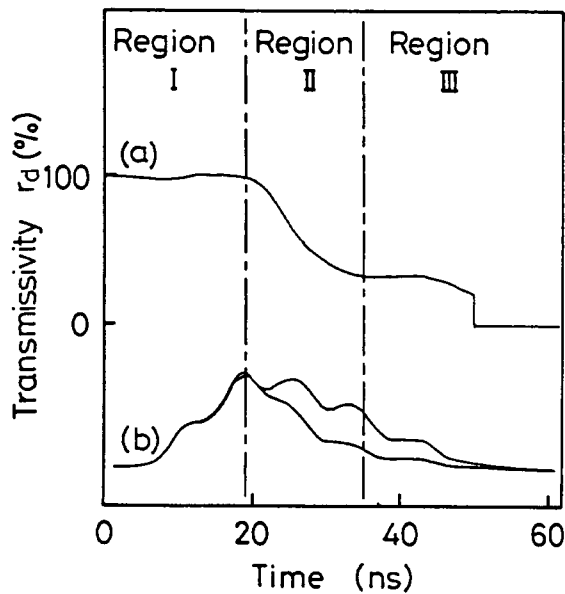


図5-14 プラズマの有無によるプローブレザ波形の変化

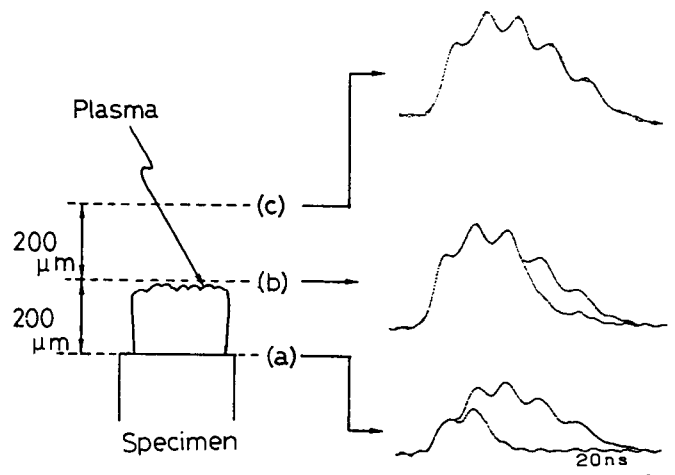


図5-15 プラズマの広がりとプローブレザ波形の関係

5-3-2 プラズマの発生時期

プラズマの有無によるプローブレザの波形変化の測定を試料表面からの距離を変化させて行い、領域Ⅱの midpoint（通過割合が領域ⅠとⅢの平均値となる時刻でプラズマがプローブレ径の1/2まで到達した状態にあたる）から各位置におけるプラズマの到達時刻を測定した。図5-16はプローブレザ軸と試料間の距離とビーム立ち上りを時刻0とするプラズマ到達時刻の関係を示している。この図から、プラズマは加工用ビームパルス立ち上がり後、ある時間をおいて発生し、試料表面に対し垂直方向（z方向）に一定速度 v で広がっていくことがわかる。時間軸と各直線の交点が試料表面におけるプラズマ発生時刻 t_p である。

加工ビームのパワー密度に対するプラズマ発生時刻 t_p の変化を図5-17に示す。 $10^{12}\text{W}/\text{m}^2$ 程度の低いパワー密度では、 t_p は22ns程度と非常に大きく、加工ビームパルスの照射の後半でプラズマが発生していることになる。この t_p は加工用ビームパワー密度の上昇と共に減少し、 $10^{15}\text{W}/\text{m}^2$ では3~4nsとほぼパルス立ち上がりと同時にプラズマが発生する。なお、同一パワー密度のビームを照射した場合、Feの方が Si_3N_4 よりもプラズマの発生時期が早い結果が得られた。

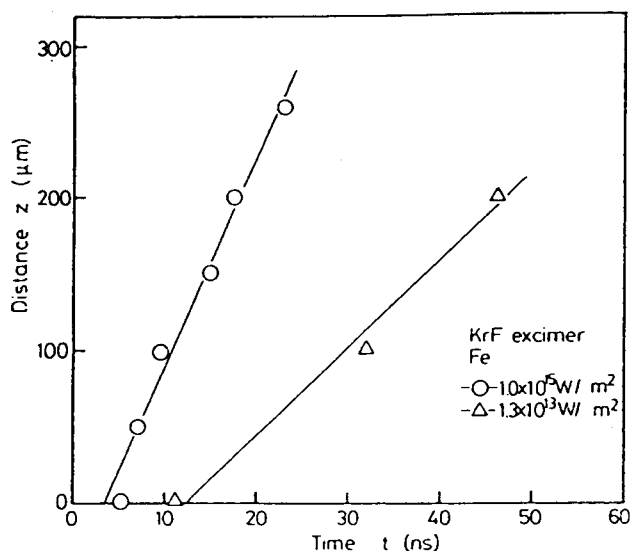


図 5 - 1 6 ビーム照射後の経過時間とプラズマ到達位置の関係

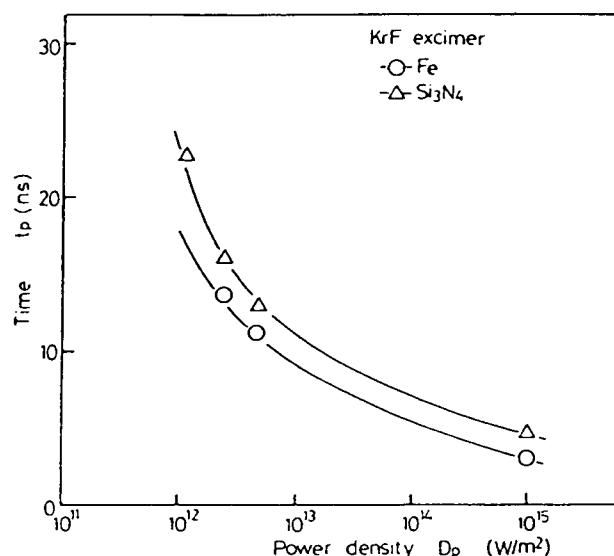


図 5 - 1 7 パワー密度がプラズマ発生時刻におよぼす影響

5-3-3 プラズマの広がり速度

図 5 - 1 6 の直線の勾配からプラズマの広がり速度がわかる。照射パワー密度とプラズマ広がり速度の関係を図 5 - 1 8 に示している。 Fe加工時のプラズマは、 10^{12} W/m^2 で 1.8 km/s 、 10^{13} W/m^2 では 6 km/s と超音速で試料表面に対して垂直な方向に広がっていく。 Si_3N_4 加工時のプラズマはさらに高い広がり速度を有しているが、これは Si_3N_4 から発生する Si^+ の粒子質量が Fe プラズマと比べてはるかに小さいことによると考えられる。

$2.1 \sim 8.5 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$ での分光解析に基づくプラズマ温度、 18000 K での粒子のランダム運動速度は Si イオンで 4 km/s 、Fe イオンで 3 km/s であり、プローブレーザを用いて直接求めたプラズマ広がり速度に近い値となっている。

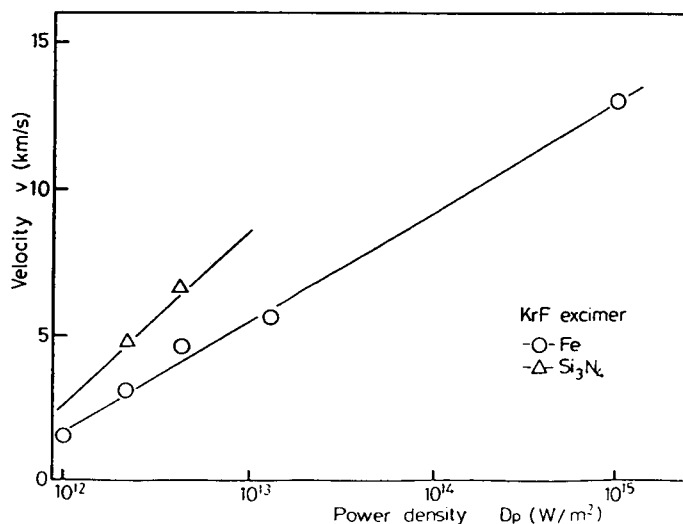


図 5 - 1 8 パワー密度とプラズマ広がり速度の関係

5-3-4 プラズマのビーム吸収係数

プラズマに強度 I_0 の電磁波が入射し、位置 x での強度を I 、 $x+dx$ での強度を $I+dI$ とする（図 5-19）。いま dx が小さいとき dI は dx に比例し、

$$dI = -\alpha I dx \quad (5-19)$$

比例定数 α が一定であれば、

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (5-20)$$

この α がプラズマの吸収係数、 $1/\alpha$ が吸収長である。

いま、プローブレーザ波形の変化がプラズマによるビームの吸収によると仮定する。そして図 5-14 に示したように、プローブビーム全体がプラズマ中を通過している領域（Ⅲ）に注目して、プローブビーム通過割合により、吸収係数に関する解析を行う。

軸対称の均一強度ビームにより軸対称プラズマを発生させ、プローブレーザ軸からの位置 y を変えて通過割合を測定した。この時、それぞれの位置 y において測定されるプローブビーム通過割合は図 5-20 に示すように、 x 方向の各位置で吸収係数 $\alpha(r)$ による吸収を受けた後の値であり、吸収係数の半径方向分布 $\alpha(r)$ と通過割合 $I(y)/I_0$ には次式の関係がある。

$$-\ln\left(\frac{I(y)}{I_0}\right) = 2 \int_0^{x_0} \alpha(r) dx \quad (5-21)$$

左辺の値を測定してアーベル変換³⁹⁾することにより、半径方向分布の吸収係数分布 $\alpha(r)$ を求めることができる。

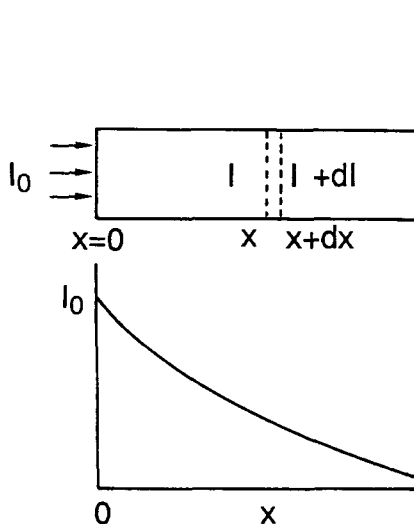


図 5-19 吸収係数と入射ビームの強度変化

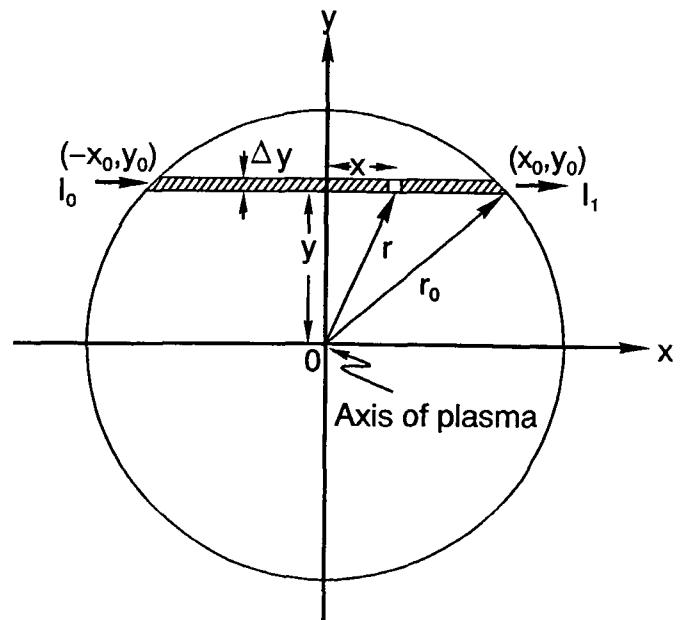


図 5-20 ビーム通過割合によるプラズマ吸収係数の算出方法

図5-21にy軸の各点で測定した通過割合の分布の測定例を示す。これからアーベル変換によって、加工用ビーム直径100、200及び400 μm について計算した吸収係数の半径方向分布を図5-22に示す。加工用ビームには均一強度の軸対称（円形）ビームを用いたにも係らず、ビーム径200及び400 μm の吸収係数分布ではビーム外周付近の勾配をもつ領域と、ビーム最外周から80 μm 程度以上内側の平坦域に分かれていることがわかる。この外周部の吸収係数低下はプラズマが半径方向に散逸することにより生じると考えられ、その勾配はいずれのビーム径においてもほぼ同じで、ビームの最外周では吸収係数は中心部の60%程度まで低下する。また、ビーム径100 μm では、ビーム光軸付近も勾配域に入るため、光軸付近の平坦部がなくなり、光軸付近の吸収係数も低下している。

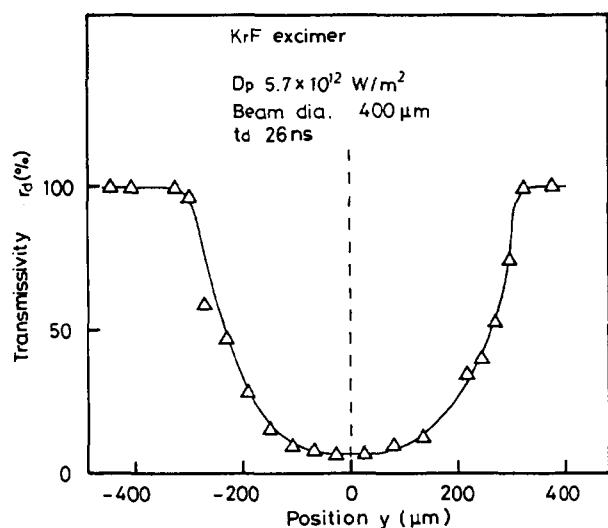


図5-21 軸対称プラズマにおけるプローブビームの通過割合

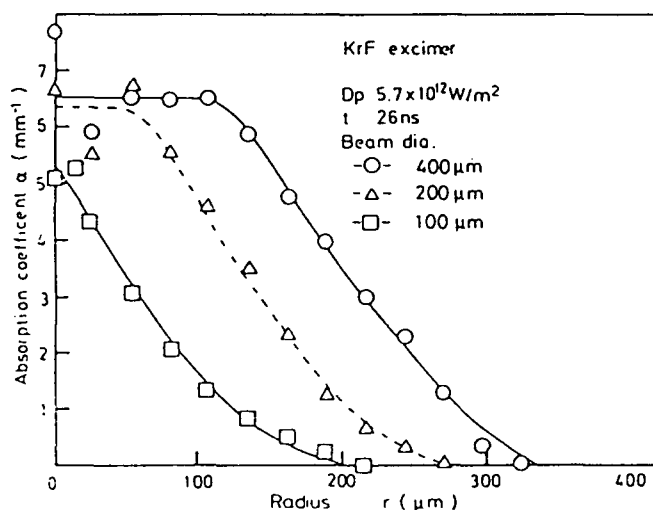


図5-22 種々の径の軸対称ビーム照射時の吸収係数分布

次に、ビーム径400 μm の場合の光軸付近の吸収係数と加工用ビームパワー密度の関係を測定した結果を図5-23に示す。吸収係数は2~15 mm^{-1} の範囲にあり、Fe加工中に発生するプラズマの方が Si_3N_4 のものよりも高い吸収係数を示した。特にFeでは5~15 mm^{-1} であり、逆制動放射機構に基づき、電子密度から計算した吸収係数とほぼ一致している。

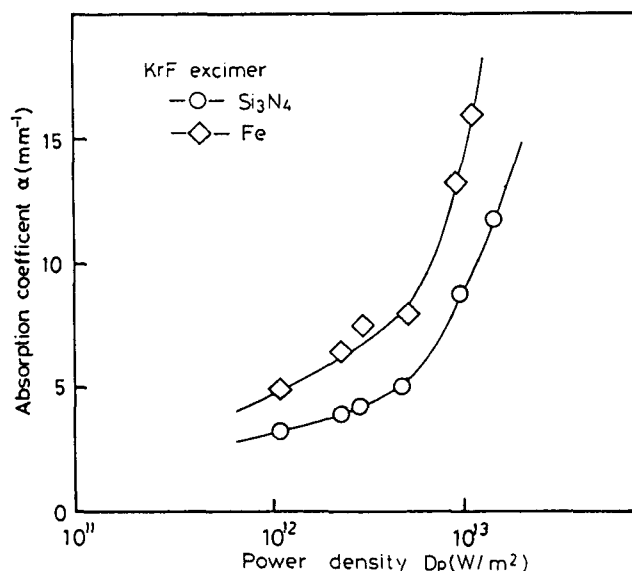


図5-23 照射パワー密度と発生したプラズマの吸収係数の関係

5-3-5 入射ビームの屈折と散乱

ここではプラズマによるビームの吸収を測定する際に、影響が小さいと仮定した屈折と散乱を検討する。

プラズマによるビームの屈折が吸収係数測定精度に及ぼす影響についてプラズマ通過後のビームの広がり、あるいは方向の変化を調べた。すなわち、図5-12の検出器の絞り径を変化させ、通過パワーの変化からプラズマ中を通過させた場合と通過させない場合のプロローベータの広がりを測定する。図5-24に測定結果の一例を示す。図の横軸は絞りの直径で縦軸は各絞り径でのパワー測定値である。パワーは絞り全開の時の値を100とした相対値表示とした。これらの測定結果から、プラズマの有無による差はほとんど見られず、本測定系によるプラズマの吸収係数測定においては屈折の影響は小さいと判断できる。

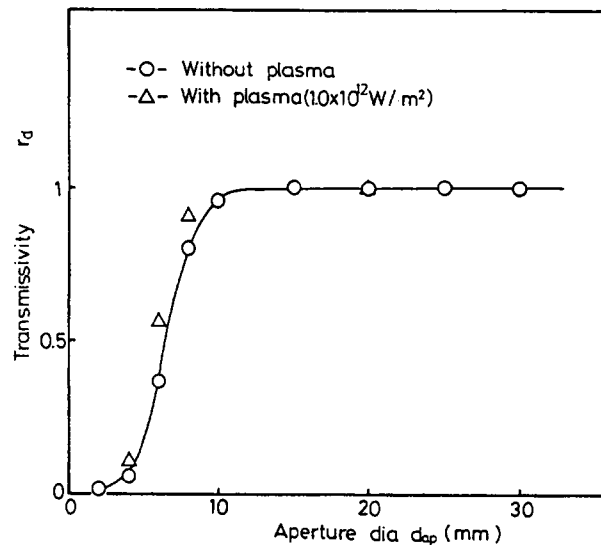


図5-24 プラズマの有無によるプロローベータ径の変化

プラズマ中の荷電粒子による電磁波散乱の中ではトムソン散乱が代表的である。平面波 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ により荷電粒子 m_j (電荷 q) が受ける加速度は、

$$\mathbf{a}_j = \frac{q}{m_j} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \quad (5-22)$$

この加速度運動により荷電粒子は (その速度が光速より十分小さい時) 次式の強度の電磁波エネルギーを放出する。

$$I = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \quad (5-23)$$

プラズマ中の荷電粒子はイオンと電子であるが、その質量は ($m_e \ll m_i$) であるから、

($a_e \rangle a_i$) となり、プラズマにおけるトムソン散乱では電子の影響のみを考慮すればよいことになる。入射電磁波が偏光していない場合のトムソン散乱の全断面積は、 $\sigma_T = 6.65 \times 10^{-29} \text{m}^{2(40)}$ で、電子密度 $n_e \text{ (m}^{-3}\text{)}$ との積により、電磁波の平均自由行程は、

$$\lambda_f = \frac{1}{n_e \sigma_T} = \frac{1.5 \times 10^{28}}{n_e} \quad (5-24)$$

で示される。分光計測により得た電子密度 $5 \times 10^{26} \text{m}^{-3}$ を用いると、 $\lambda_f = 30 \text{m}$ となる。いま、プラズマの広がり速度 ($\sim 15 \text{km/s}$) から、パルス幅 (半値幅 34ns) でのプラズマの最大厚さは約 $500 \mu\text{m} = 500 \times 10^{-6} \text{m}$ で λ_f と比べて十分小さく、入射電磁波の電子による散乱は全く考慮する必要がない。

中性粒子による散乱として、粒子径 d が電磁波波長 λ と同程度かそれ以上の場合のミー散乱、 $\lambda \gg d$ の場合のレイリー散乱等がある。これらを含めて以下で散乱に関する実験的検討を行った。

図 5-25 に示すようにマスクプロジェクション光学系を用いて Si_3N_4 試料表面に均一強度ビームを照射し、加工中に試料表面及びプラズマから角度依存性をもって反射・散乱あるいは放射される光を入射部直径 4mm のオプティカルファイバで取りだした。その中から入射レーザ波長の光、すなわち反射・散乱光のみをモノクロメータ (G250) で分離し、パワー密度の角度依存性を測定した。なお、試料表面は焼結面をそのまま用いており、その表面粗さは約 $3 \mu\text{mRz}$ である。

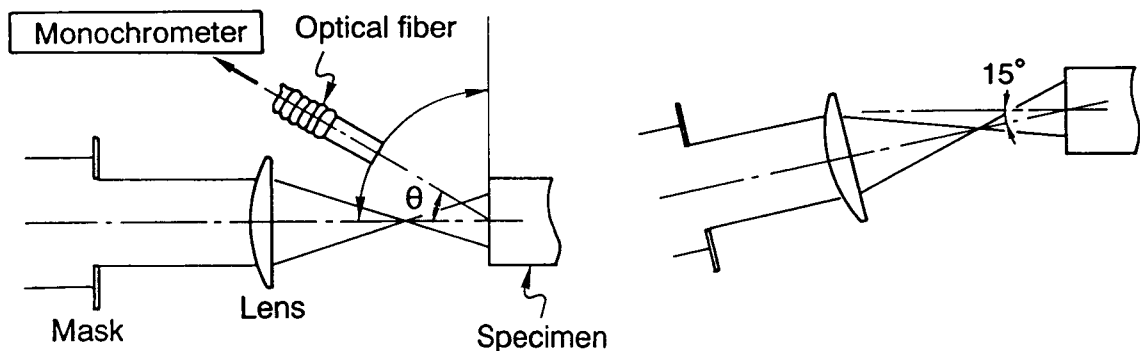
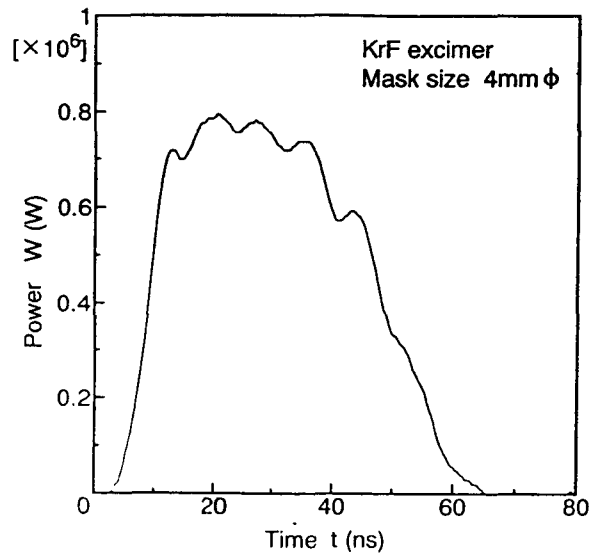


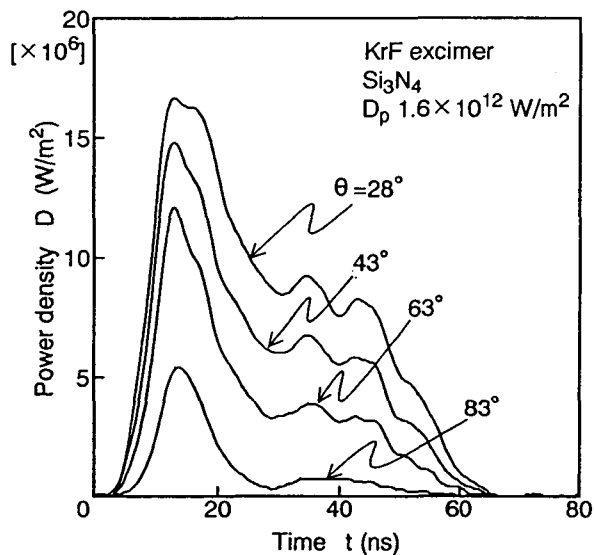
図 5-25 プラズマによるビーム散乱
評価用測定系

図 5-26 は (a) マスク通過後、試料表面に入射する加工用ビーム波形と、これを試料表面に垂直入射させた時、(b) 加工用ビームパワー密度 $1.6 \times 10^{12} \text{W/m}^2$ 、(c) $6.4 \times 10^{12} \text{W/m}^2$ における、種々の角度方向への反射・散乱光の時間依存性を示している。なお、試料表面の法線方向を角度 0 とする。本測定においてマスクプロジェクションに

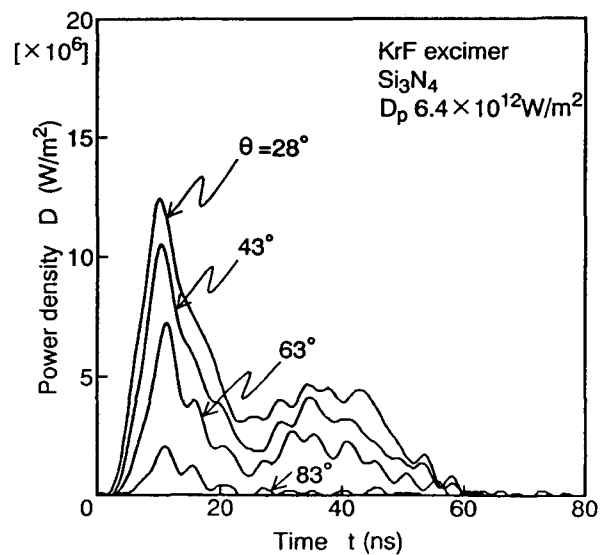
よる縮小結像に伴うビームの広がり角は全角で約 2.3° であり、ほぼ平行光線が入射しているとみなすことができる。反射・散乱ビームはいずれのパワー密度においても広い角度範囲わたって検出されており、パルスの後半で低下が見られる。



(a)入射ビームの原波形



(b)種々の方向への反射・散乱パワー密度の時間変化 ($D_p = 1.6 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$)



(c)種々の方向への反射・散乱パワー密度の時間変化 ($D_p = 6.4 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$)

図5-26 加工中の反射・散乱ビームの測定結果

図5-27は図5-26の結果を角度分布に直して示している。ただし、角度 28° 未満については、測定系と加工用光学系が干渉して加工用ビームの垂直入射での測定が出来なかったため、加工用ビーム入射角を -15° として測定した(図5-25(b))。これを積分することにより、反射・散乱ビームパワーを求め、その入射ビームパワーに対する割合(反射割合)Rの、1パルス内の時間的変化を図5-28に示した。

Rはパルス立ち上り直後ではほぼ0.3程度で一定値をとり、その後、急激に低下、25ns付近から再び増大している。R=0.3は4章で測定したエキシマレーザ加工面のエキシマビーム吸収率、0.27とほぼ等しく、また、Rの下降するタイミングは図5-17に示したプラズマ発生時期と一致する。

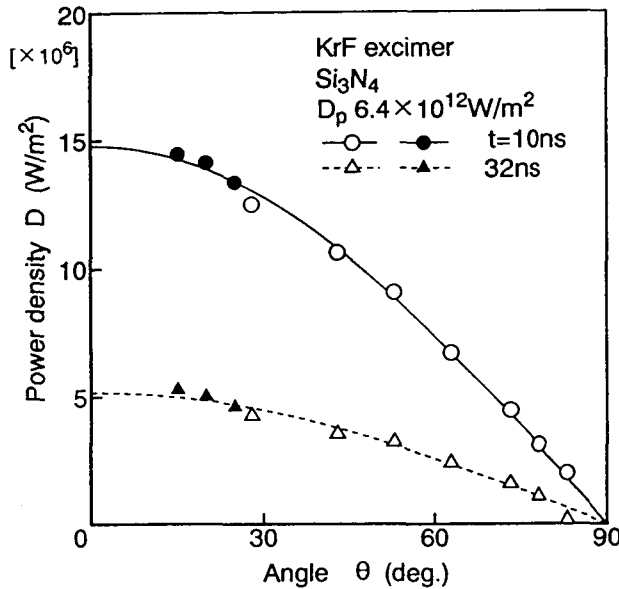


図5-27 加工中の反射・散乱パワー密度の角度依存性

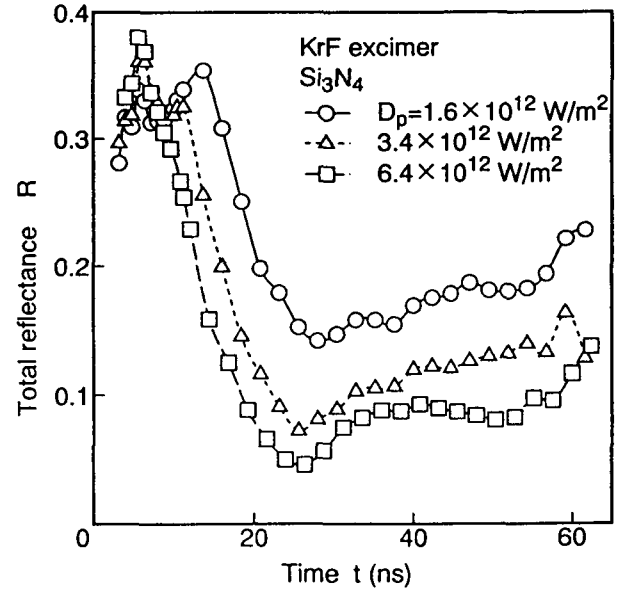


図5-28 加工中の反射割合変化

いま、試料表面に吸収係数 α のプラズマが発生し、上方に広がっていくとする。初期強度 I_0 の入射ビームが試料表面に到達した時、その強度 I_1 は、

$$I_1 = I_0 \quad (t < t_p) \quad (5-25)$$

$$I_1 = I_0 \exp(-\alpha v(t-t_p)) \quad (t > t_p) \quad (5-26)$$

さらに、吸収率 r_{ab} の試料表面で吸収され、再びプラズマ中を通過後のビーム強度 I_2 は、

$$I_1 = (1-r_{ab}) I_0 \quad (t < t_p) \quad (5-27)$$

$$I_1 = (1-r_{ab}) I_0 \exp(-2\alpha v(t-t_p)) \quad (t > t_p) \quad (5-28)$$

図5-29にRの実験値と、測定したプラズマパラメータによる計算値を比較して示す。t=25ns以前では両者はほぼ一致し、この領域でのビームの減衰はプラズマによるビーム吸収が支配的といえる。t=25ns以降のRの増大はプラズマ外周部で原子が再結合してできた微細粒子による散乱が原因と考えられるが、これにより失われるビームエネルギーはプラズマ吸収エネルギーの1/10以下であり、ビーム散乱が加工に及ぼす影響は吸収と比べてはるかに小さい。

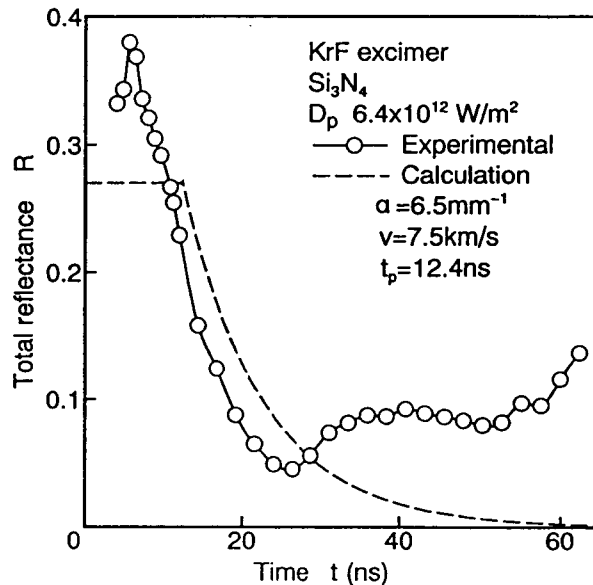


図5-29 反射割合とプラズマ吸収の影響

5-4 誘起プラズマがレーザ加工に及ぼす影響

5-4-1 プラズマによる加工深さ不均一

プラズマ吸収係数は加工用ビーム光軸付近と外周部で異なった値を示す。この結果は、たとえば加工に用いるビームの強度分布が完全に均一な場合でも、光軸付近と外周部とでは加工穴深さに差が生じ得ることを示唆している。エキシマレーザ加工穴の観察で示した加工深さの不均一とプラズマ吸収係数分布の関係を検討する。

いま、吸収係数 $\alpha(r)$ をもつプラズマが時刻 t_p に発生し、 z 方向に一定速度 v で広がっていくとする。このとき、1パルスの照射で、プラズマ中を通過して試料表面に到達するビームエネルギーは次式により求められる。

$$q = \int_0^{t_p} D(t) dt + \int_{t_p}^{\infty} D(t) \exp(-\alpha(r) v(t-t_p)) dt \quad (5-29)$$

ただし、 $D(t)$: パワー密度

式(2)の第1項はプラズマ発生以前に試料表面に達するエネルギーを、また第2項は z 方向に広がっていくプラズマにより吸収された後、試料表面に到達するエネルギーを示している。プラズマ吸収係数が光軸付近と比べて小さいビーム外周部では、均一パワー密度ビームを照射した場合でも、より多くのエネルギーが試料表面に到達する。

図5-30における実線はビーム径 $400\mu\text{m}$ について、半径方向の到達エネルギー分布の計算値を、プロット点は半径方向の除去深さ分布を、それぞれ光軸付近の値を1として示している。両者は良く一致しており、ビーム外周部ではビーム吸収係数の低下により試料に到達するビームエネルギー大きくなり、加工深さが増大することがわか

る。これまでこのような加工穴不均一は加工穴側壁での反射によるとして、定性的に説明されてきた（図5-31）が、本研究の結果から、少なくとも比較的加工穴が浅い場合にはプラズマ吸収係数分布によって、深さの不均一を生じることが定量的に説明できた。

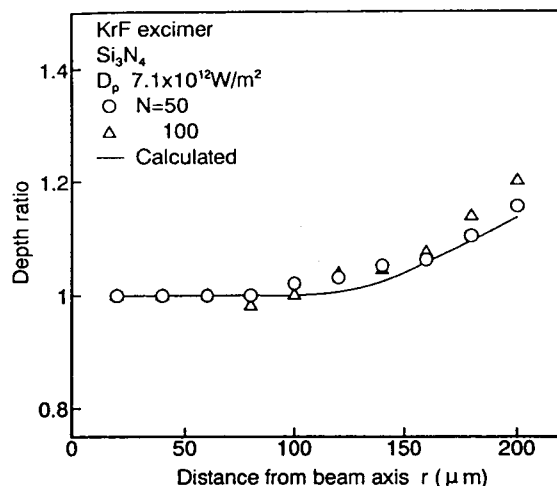


図5-30 プラズマの空間分布による加工深さ不均一

図5-32はビーム径400 μ mに関して、ビーム外周部と光軸上での試料面に到達するエネルギー比を種々の照射パワー密度について示している。パワー密度の上昇と共に光軸付近と外周部のエネルギー比は大きくなり、 10^{13} W/m²では20%程度の差が生じることがわかる。パワー密度を下げることでによりプラズマに起因する穴深さ不均一は抑制されるが、3章で示したように、Si₃N₄では図中の斜線部において加工穴底面の針状凹凸が発生するため、照射パワー密度は 3×10^{13} W/m²以上とする必要がある。このパワー密度を用いることにより、光軸付近と外周部の加工穴深さの違いは3~4%程度に抑えることができる。

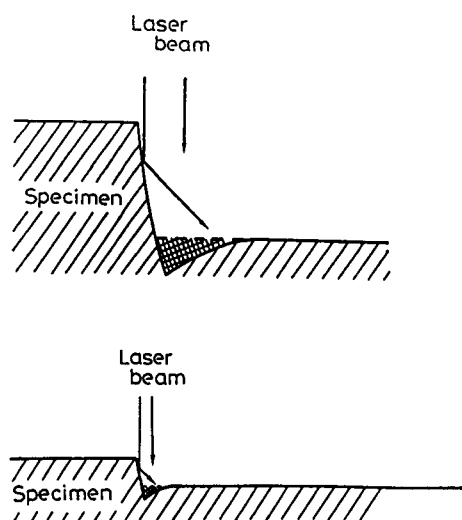


図5-31 加工穴内壁での反射による加工深さ不均一の発生の説明図

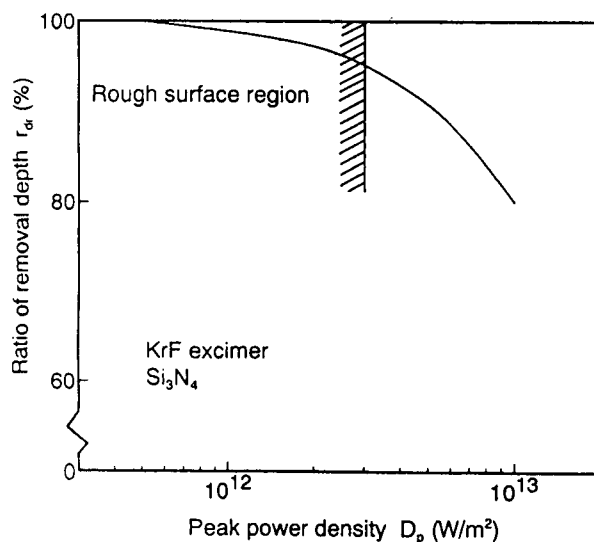


図5-32 照射パワー密度と加工深さ均一性

5-4-2 プラズマによるビーム吸収と加工速度

プラズマによるビーム吸収がない、あるいは無視できるほど小さい場合、1パルスのビーム照射による材料の除去量、すなわち除去深さは照射レーザエネルギーに比例する。特に、パルス波形が一定の場合には、照射レーザパワー密度に対しても比例する。図5-33中の破線は、プラズマの影響が十分小さい場合の照射パワー密度と Si_3N_4 の除去深さの関係を示している。なお、比例定数($680\text{J}/\text{mm}^3$)はプラズマのビーム吸収によるエネルギーロスがほぼ0となる $D_p=1.5 \times 10^{13}\text{W}/\text{m}^2$ における、照射エネルギーと除去体積の関係から求めた。図中の実線は式(5-29)に基づき、ビーム径 $400\mu\text{m}$ の光軸上で、プラズマによるビーム減衰後、試料表面に到達するビームエネルギーから除去深さを計算した結果を示している。プロット点は実験値を示す。この図から明らかなように、高パワー密度域では入射ビームがプラズマにより吸収されることによって除去深さの減少が顕著となっていることがわかる。

図5-34の実線は、各ビーム径における光軸付近の吸収係数をもとに、式(5-29)により除去量計算を行った結果を示している。図中のプロット点は実験値を示す。両者は良く一致し、ビーム径微細化が光軸付近のプラズマ吸収係数を低下させる効果を生み、加工速度が増大していることがわかる。

このように、プラズマの吸収係数、広がり速度、発生時刻が明らかとなったことにより、除去速度あるいは形状との関係を定量的に評価することができることが確認された。

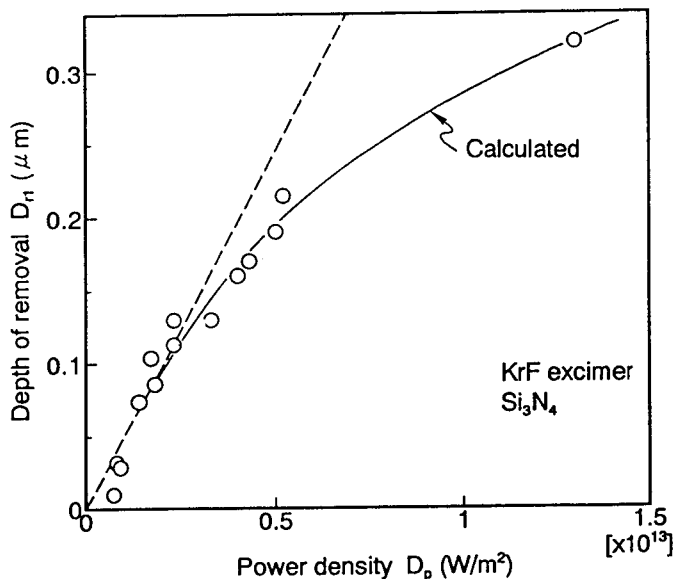


図5-33 プラズマ吸収による加工速度の低下

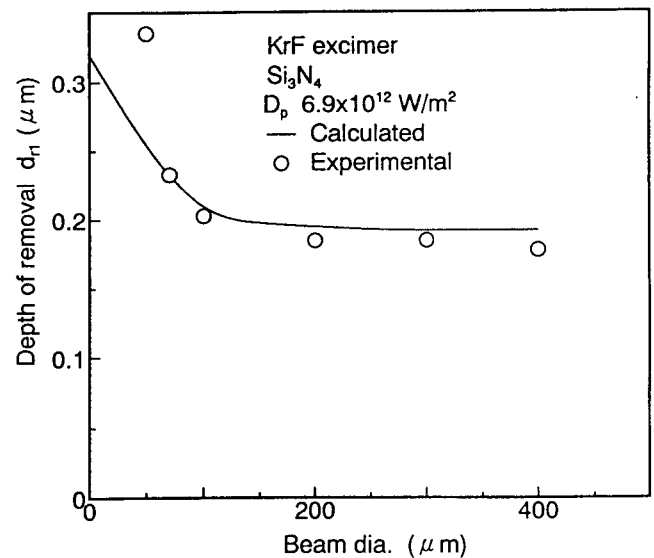


図5-34 照射ビーム径が加工速度におよぼす影響

5-5 結言

本章では、セラミックスのレーザ加工においてプラズマ発生の有無を調べ、プラズマの発生が確認されたエキシマレーザ加工について、発生したプラズマの特性、ビームとの相互作用、さらにその結果生じる加工への影響を解析した。以下に得られた結果を要約する。

(1) 10^{11}W/m^2 以下のパワー密度域でのセラミックス加工においてはプラズマはほとんど発生しておらず、加工現象への影響はみられない。

(2) 10^{12}W/m^2 以上の高いパワー密度のビームを用いるエキシマレーザでは、除去物質がプラズマ化し、ビームと相互作用する。発生したプラズマでは $5 \times 10^{26}\text{m}^{-3}$ 程度の高い電子密度となっており、逆制動放射機構を仮定すると波長248nmのKrFエキシマレーザに対して $5 \sim 20\text{mm}^{-1}$ と大きな吸収係数をもつ。

(3) エキシマレーザ加工におけるプラズマの影響はほとんどがビーム吸収によるもので、ビームの屈折あるいは散乱の影響は吸収に比較してはるかに小さい。

(4) エキシマレーザパルス照射から、プラズマの生成までには数ns以上の遅れが見られる。発生したプラズマの広がり速度、ビーム吸収係数の測定を行い、広がり速度は $2 \sim 13\text{km/s}$ 、吸収係数は $3 \sim 15\text{mm}^{-1}$ の値を持つことが確認された。

(5) 実測したプラズマパラメータをもとに、プラズマによるビーム吸収が加工速度、形状に及ぼす影響を調べ、高パワー密度域での速度飽和、加工穴深さ不均一等の現象がプラズマの誘起により発生することを定量的に明らかにした。

第6章 レーザ加工におけるセラミックスの分解・蒸発

6-1 レーザ加工面の生成物

セラミックスのレーザ照射部には、第3章で示したように粒状あるいは層状の付着物の残存が多数認められる。これら加工面の付着物はレーザ除去過程による生成物である。以下にその分析結果について述べる。

図6-1は Si_3N_4 の母材、レーザ照射加工部および離脱粒子のX線回折による分析結果を示している。(a)のレーザ未照射試料では、 31.6° 、 39.3° 及び 42.1° に Si_3N_4 の高いピークが現れている。X線回折で、あらわれるピークのほとんどは Si_3N_4 で、他に焼結助材として添加されている La_2O_3 が検出された。 Si_3N_4 の製造過程の高温焼結で Si_3N_4 の一部が熱分解してSiが生じるとの報告がある⁴¹⁾が、本測定で用いた焼結 Si_3N_4 の場合にはSiはほとんど検出されなかった。

(b)は CO_2 レーザ加工時に除去離脱した微粒子を捕集して、分析した結果である。離脱粒子の回折結果ではレーザ未照射 Si_3N_4 にはない 33.1° 、 55.5° の高いピークが見られる。これらはすべてSiのピークで、 Si_3N_4 が除去の際にSiに分解されていることをしめしている。(c)は CO_2 レーザ切断面の分析結果で、(b)に示した除去粒子とほとんど同じである。このことから加工全面にわたってSiで覆われていることがわかる。これに対して、材料の移動速度を高め、溝加工となった状態ではSiピークの増大は見られるものの、 Si_3N_4 のピークも強く現れており、分解生成物の付着量は比較的に少ないといえる。

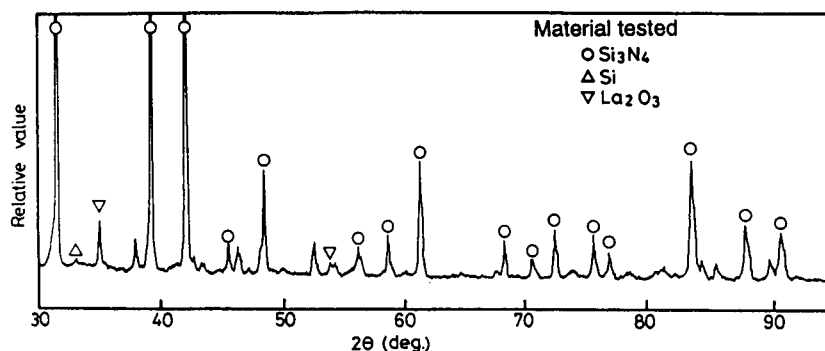
図6-1(d)はアシストガスを O_2 として切断を行った結果で、切断面には SiO_2 の回折がみられた。ただし、同時にSiも検出されており、 Si_3N_4 が直接酸素と反応して SiO_2 となったのではなく、分解によって発生したSiが周囲の酸素と反応して、 SiO_2 を生成したと考えられる。

図6-2はSiC母材（レーザ未照射）、並びにCW- CO_2 レーザによる溝加工部（ $v = 1\text{m/s}$ ）について行ったX線回折結果である。SiCの場合、レーザ未照射部、加工部共にほとんどがSiCによる回折である。SiCは Si_3N_4 と同様、分解型セラミックスで、分解の結果Siを生じるが、SiCの大気圧下での分解温度は 3259K と高く、Siの沸点（ 3492K ）との差が小さい。レーザ加工部温度はSiの沸点よりも高温となっていると思われるので、Siは液相では存在できず蒸発し、その結果付着がみられなかったと考えられる。

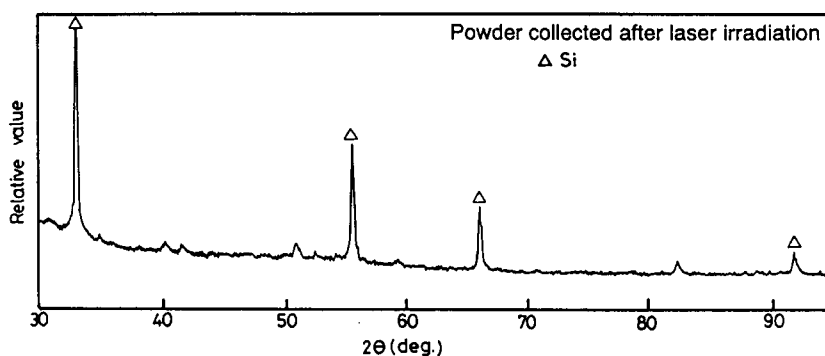
図6-3(a)は Al_2O_3 母材、(b)はレーザ切断面のX線回折結果を示している。 Al_2O_3 では高温安定相とされる $\epsilon\text{-Al}_2\text{O}_3$ による回折が現れており、熔融後急冷再凝固が起こっていると考えられる。 Al 、 AlO あるいは Al_2O 等の分解生成物は検出されなかった。

図6-4は Si_3N_4 のエキシマレーザ加工面のX線回折結果である。エキシマレーザ切断面では CO_2 、YAGレーザ加工面にみられた高いSiのピークは見られず、レーザ未照射試料とほとんど同一の結果が得られている。このことはエキシマレーザ加工の分解除

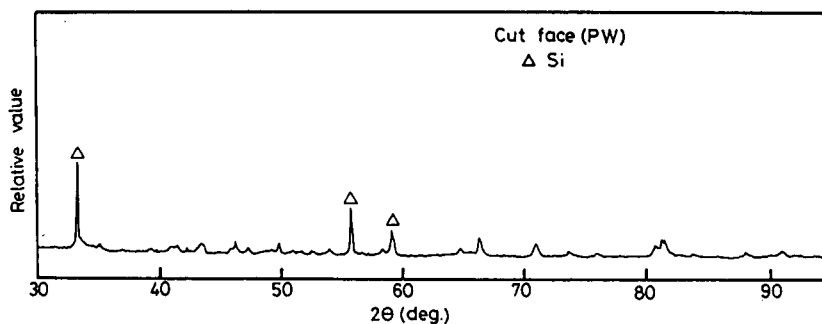
去過程でSi(1)の発生がほとんどなし、あるいは発生しても加工面にはほとんど残らず蒸発していることを示している。



(a) レーザ未照射試料

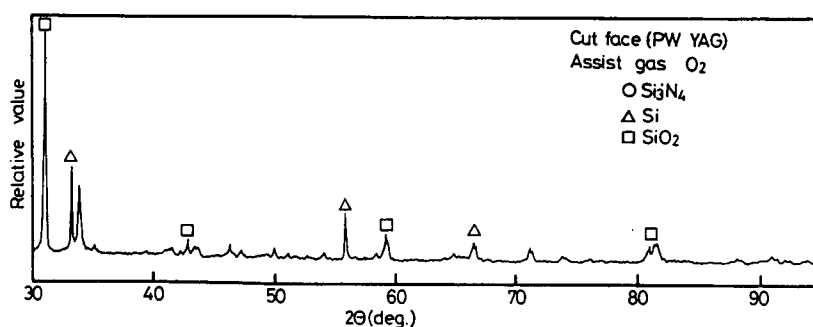


(b) 捕集した飛散粉末



(c) パルスレーザによる加工面 (Arアシスト)

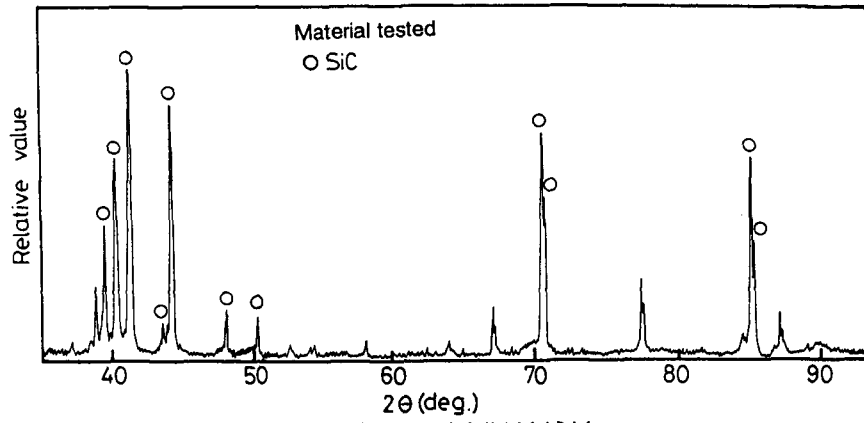
CO₂レーザ, $W_p=1500\text{W}$, $t_{on}=1\text{ms}$, $t_{off}=9\text{ms}$, $v=5\text{mm/s}$



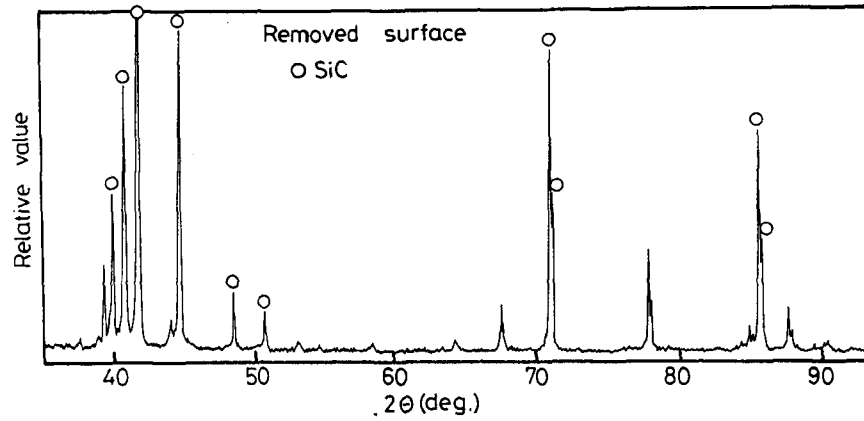
(d) パルスレーザによる加工面 (O₂アシスト)

YAGレーザ, $W_p=1800\text{W}$, $t_{on}=1\text{ms}$, $t_{off}=9\text{ms}$, $v=5\text{mm/s}$

図6-1 レーザ加工前後のSi₃N₄表面の分析



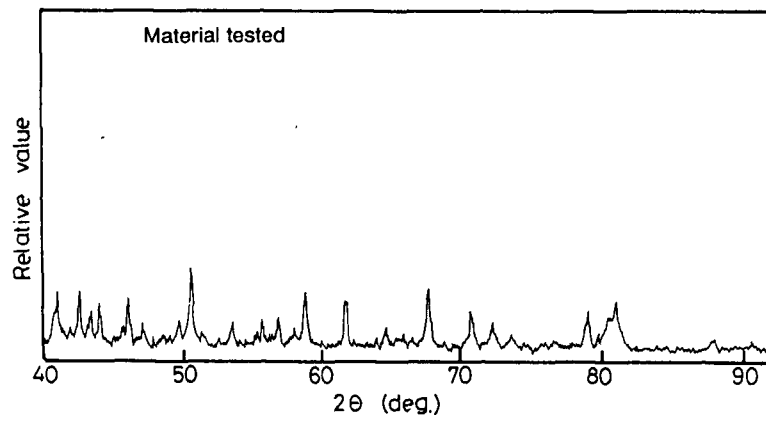
(a) レーザ未照射試料



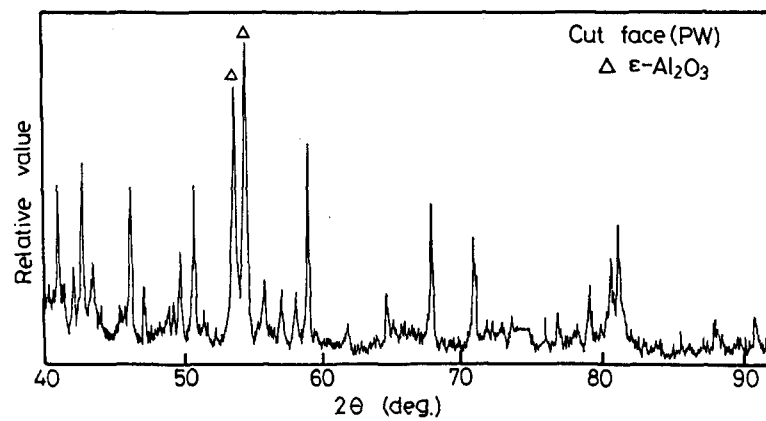
(b) レーザ加工面

CO₂ レーザ, W_p=1500W, v=2500mm/s

図 6 - 2 レーザ加工前後のSiC表面の分析



(a) レーザ未照射試料



(b) レーザ加工面

CO₂ レーザ, W_p=1500W, t_{on}=0.8ms, t_{off}=24.2ms, v=0.5mm/s

図 6 - 3 レーザ加工前後のAl₂O₃表面の分析

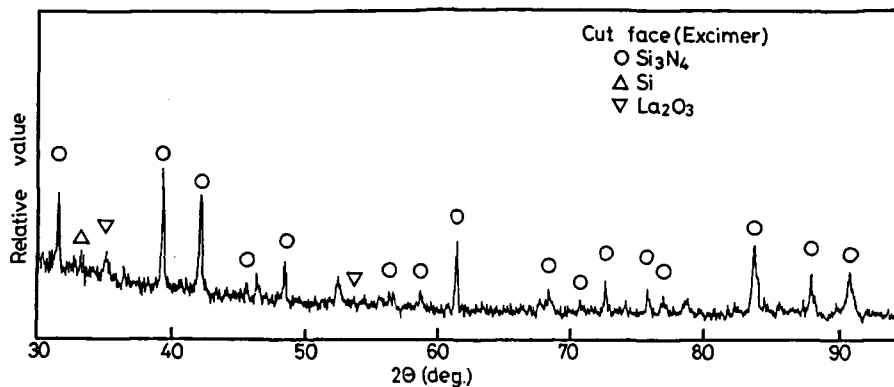


図 6 - 4 エキシマレーザ加工後の Si_3N_4 の分析
 $D_p=1 \times 10^{15} \text{ W/m}^2$, $\text{toff}=12.5 \text{ ms}$, $v=5 \mu \text{ m/s}$

6 - 2 加工進行中の表面温度

6-2-1 加工進行中の表面温度と加工進行速度

レーザ加工進行中の分解・蒸発現象を解析するため、ビームによる加熱、除去が進行中の加工部の温度測定を行った。なお、測定は加工速度の設定が容易で、広い加工領域面積が得られることから切断で行っている。分解型セラミックスとして Si_3N_4 、熔融型セラミックスとして Al_2O_3 、さらに比較のため軟鋼を試料として用いた。いずれも板厚は2mmである。実験にはCW- CO_2 レーザを用い、試料表面上での中心パワー密度 $7 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ （レンズ焦点距離127mm）で実験を行った。前章の分光結果の項でも述べたようにこの条件下ではプラズマは発生していない。

図 6 - 5 は放射温度計による加工進行面温度測定の装置概略を示している。放射温度計は上方から 20° の角度で試料移動方向に平行にセットしてある。温度計の測定領域加工進行面上は0.3mmφで加工進行面の幅（0.2~0.25mm）より若干大きい、用いた放射温度計は2波長のエネルギー比により測温する方式のためこれによる測定誤差は生じない。測定位置はビーム入射側試料面を $z=0$ 、裏面に向かう方向を正として定義する。

本測定で用いた放射温度計は2つの波長（0.8nm/0.97μm）のエネルギー比から温度を求めている。測定に必要な放射率比、 ϵ_1/ϵ_2 は炉中で試料を1273Kに加熱し、この時の放射温度計の指示値とを熱電対による測定結果と比較し、 Si_3N_4 および Al_2O_3 については $\epsilon_1/\epsilon_2=1$ （すなわち $\epsilon_1=\epsilon_2$ ）、軟鋼については $\epsilon_1/\epsilon_2=1.1$ を得た。

試料移動速度、アシストガス圧、レーザパワーを変化させて加工進行面の温度分布を測定した。この結果、図 6 - 6 に示すように Si_3N_4 のレーザ切断においては、試料移動速度が増大すると加工進行面は全体的に温度上昇を生じるものの、板厚方向にはほぼ一定であった。またアシストガス圧を100kPa及び250kPaと変化させても照射面の温度変化は認められなかった。さらに、入射レーザパワーを変えても図 6 - 7 のように加工進行面温度に対してほとんど影響せず、ほぼ一定温度を保っていた。

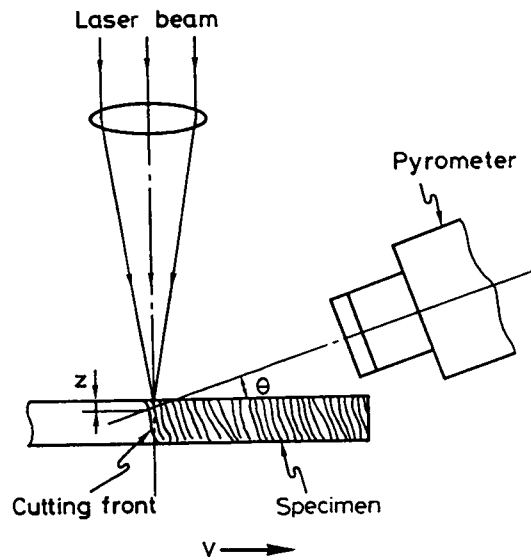


図 6 - 5 加工進行面温度の測定方法

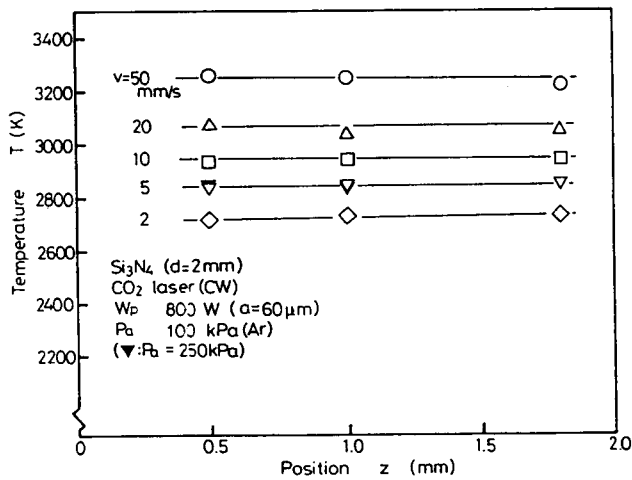


図 6 - 6 Si_3N_4 加工進行面の板厚方向温度分布

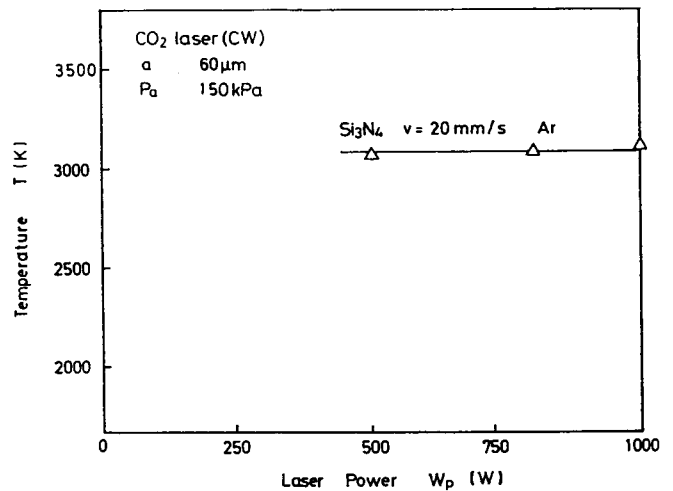


図 6 - 7 レーザパワーと加工進行面温度の関係

以上のように Si_3N_4 の加工進行面温度は試料移動速度により変化するが、それ以外の加工パラメータには影響されず、板厚方向に均一であることがわかった。

図 6 - 8 は熔融型セラミックスの Al_2O_3 についての測定結果で、加工進行面温度を示す。 Al_2O_3 の場合も Si_3N_4 と同様、加工進行面温度は試料移動速度に依存しており、板厚方向には一定値をとる。 Si_3N_4 あるいは Al_2O_3 加工で加工進行面温度が試料移動速度のみに依存する理由については次項で述べる。なお、比較のために用いた軟鋼では、図 6 - 9 に示すように Si_3N_4 、 Al_2O_3 とは全く異なった温度分布をとる。

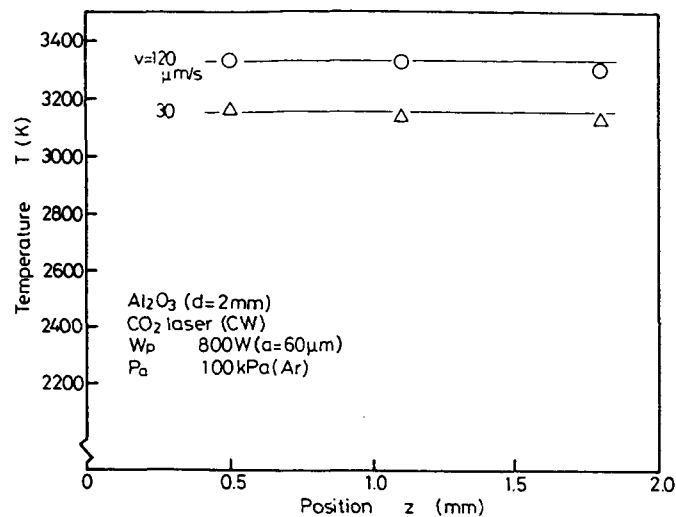


図 6 - 8 Al_2O_3 加工進行面の板厚方向温度分布

軟鋼の加工進行面の温度分布はビーム入射側表面で低く、裏面側に向かって上昇している。軟鋼のレーザガス切断では溶融Fe及び溶融酸化物が酸素ガスモーメントにより流下して進行することが明らかにされている⁴²⁾。この過程は、①固液界面でのFeの溶融、②Fe(l)が流下しつつ酸化物層へ取り込まれる（一部は溶融状態のまま裏面側に到達し、除去される）、③酸化物となり、流下除去される（図 6 - 10）。裏面側では溶融物の流速が上昇しなければ溶融物の堆積が発生する。加工進行面の傾斜が大きくなり、パワー密度の高いビームが裏面側に近い領域を照射するようになって、さらに温度上昇が起り、粘性が下がって溶融物は堆積することなく除去される。このように Si_3N_4 あるいは Al_2O_3 では軟鋼のレーザガス切断におけるような流下離脱とは異なった除去機構が働いていると考えざるをえない。

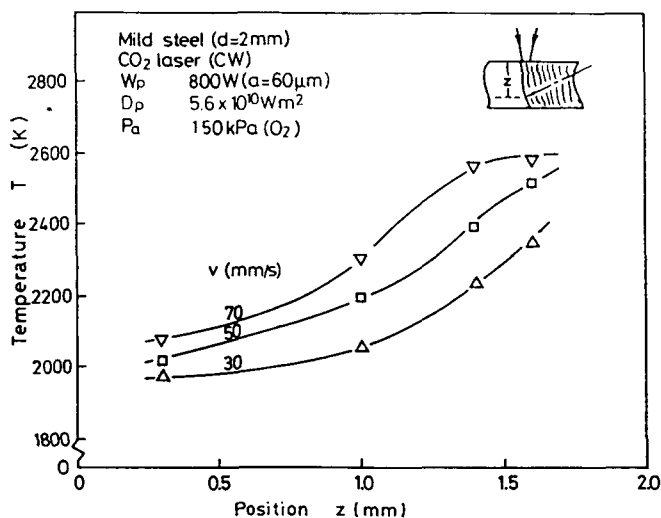


図 6 - 9 軟鋼加工進行面の板厚方向温度分布

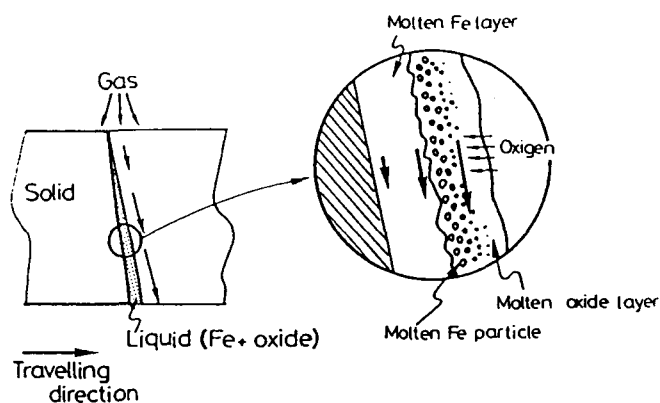


図 6 - 10 軟鋼のレーザ切断における材料の脱離

6-2-2 律速因子と材料の離脱形態

Siが液相状態にある1685～3492K²⁰⁾の温度範囲において、Si₃N₄の熱分解反応は次式で表される。



切断においては、加工進行面において生じていると思われるこの分解反応の速度が加工進行面の前進速度（すなわち試料移動速度）に相当すると考えられる。この考え方から反応速度論に基づき、切断前面の前進速度 $v_k (= v)$ は次式で表すことができる。

$$v_k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6-2)$$

ただし、 E_a : 反応の活性化エネルギー R: 気体定数
T: 温度 A: 頻度因子

図6-11は式(6-2)に基づき、図6-6、図6-7の加工面温度Tと試料移動速度 v_k の関係をアレニウスプロットした結果を示す。これより、Si₃N₄のレーザ加工における測定データはT=2400～3300Kの高温かつ非常に広い範囲において、式(6-2)における活性化エネルギー E_a にSi-Nの結合エネルギー436kJ/mol (104kcal/mol)⁴³⁾を用いた直線（式(6-3)）上にあることがわかる。この事実はこの温度域でのSi₃N₄のレーザ加工ではSi-N結合の解離速度が加工面前進速度、すなわち除去速度を律速していることを示している。なお、頻度因子Aを変化させると図6-11の直線は傾きを一定に保ったまま上下に移動するが、この値については実験値と一致するように選んだ。

$$v_k = 4.3 \times 10^8 \exp\left(-\frac{436000}{RT}\right) \quad (6-3)$$

Bathaらは比較的低温（1760～2023K）でSi₃N₄粉末の真空炉中での分解実験を行い、活性化エネルギーとして $E_a = 390\text{kJ/mol}$ を与えている。また、反応の進行とともにSi₃N₄表面がSi(l)が覆われ、分解生成した窒素の離脱が妨げられるようになり、分解反応の活性化エネルギーが増大すると報告している⁴⁴⁾。これに対して、本実験におけるT=2400～3300Kの結果は加工進行面全体にわたりほぼ一定温度を示し、しかも活性化エネルギーをSi-N結合エネルギーとした計算結果と一致していることから、Si(l)の影響はほとんど認められなかった。これはこの温度域においては、以下に述べるように分解生成した窒素の圧力が非常に高いことによると思われる。

HincheらによるとSi₃N₄分解点付近において、Si₃N₄-Si-N反応系の窒素平衡圧は次式で表される⁴⁵⁾（図6-12）。

$$P = 3.83 \times 10^{13} \exp\left(-\frac{44500}{T}\right) \quad (6-4)$$

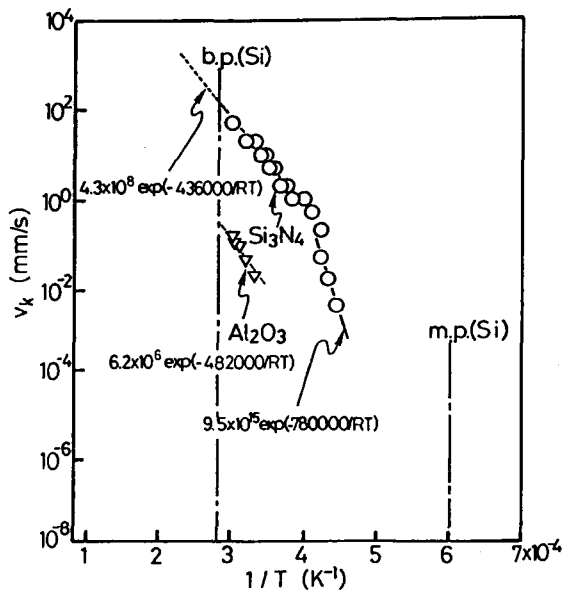


図 6-11 加工進行面温度と除去速度のアレニウスプロット

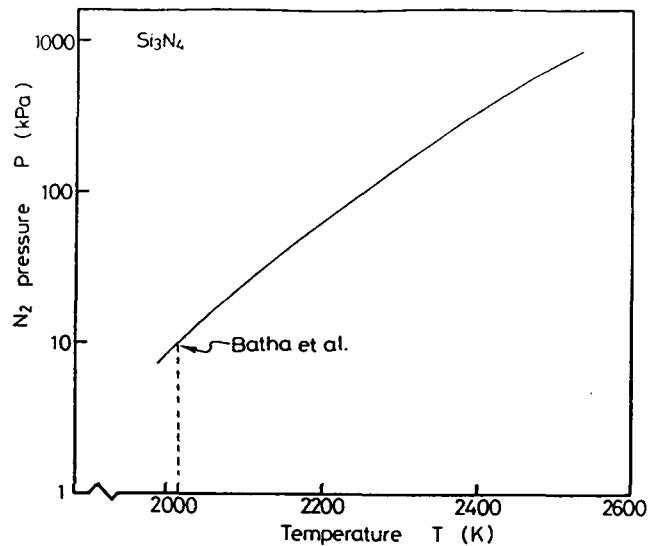


図 6-12 Si_3N_4 の熱分解における温度と窒素平衡圧の関係

式(6-4)によると、Bathaらの実験温度域（2023K以下）では窒素平衡圧は10kPa以下と低く、 Si_3N_4 -Si界面で発生した窒素はSi(1)内を拡散で移動し、自由表面に到達しなければならない（図 6-13(a)）。(6-4)式を2400～3300Kに適用すると、340kPa（2400K）～50MPa（3300K）と非常に高い圧力の窒素ガスが、 Si_3N_4 の分解領域、すなわち Si_3N_4 -Si(1)界面で発生することがわかる。このような高圧状態の窒素が発生した場合、図 6-13(b)に示すようにSi(1)は発生する窒素の離脱を抑制することができず、逆に Si_3N_4 表面から吹き飛ばされてしまう。このような機構でSi(1)の影響が現れなかったと考えられる。つまり加工中、Si(1)は連続した層として加工進行面を覆うことができず、細かい液滴状の形で付着しつつ加工が進行すると説明される。この除去プロセスは加工面の観察および分析結果と矛盾しない。また、図 3-35 の $7 \times 10^8 \sim 8 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ における除去速度の増大も高圧 N_2 による除去促進の結果と考えれば理解できる。

本実験においても2400K以下では活性化エネルギーの増大がみられ、この温度域においてはSi(1)層が形成されていると考えられる。

Al_2O_3 についても Si_3N_4 と同様に、アレニウスプロットした結果を図 6-11に示している。図中の実線は活性化エネルギーとしてAl-O結合エネルギー（482kJ/mol）を用いた結果であり、実験結果と実線はよく一致している。これから明らかなように熔融型の Al_2O_3 セラミックスでも切断速度と切断前面温度の間には式(6-2)の関係がなりたち、セラミック構成原子であるAlとOの結合解離速度が切断速度を決定している。このことは Al_2O_3 切断前面でも Si_3N_4 の場合と同様に熔融物の流下や板裏面からの離脱は少なく、蒸発除去によって切断が進行することを示唆している。 Al_2O_3 の蒸発による生成物は数Pa程度以上の酸素分圧下において、AlO、 O_2 等からなるとされており⁴⁶⁾、図 6-14に示すようにこれらの形態で熔融 Al_2O_3 表面から蒸発除去される機構が支配的であ

と思われる。

エキシマレーザ加工中の加工進行面温度は、温度上昇時間が極めて短い上、プラズマの影響もあり、測定することは非常に困難である。しかし、 CO_2 レーザにおける Si_3N_4 および Al_2O_3 の結果及び第3章で測定したエキシマレーザ加工時の加工速度から、エキシマレーザ加工面の温度は少なくとも5000K以上の高温となっていると推測される。

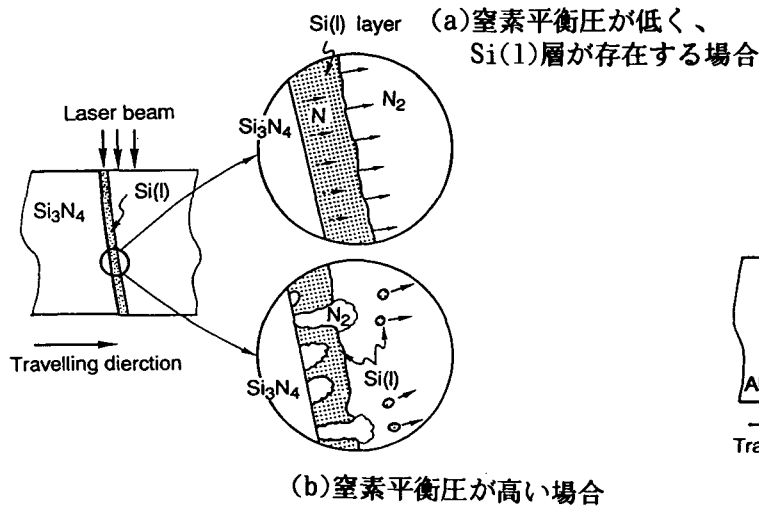


図6-13 レーザ除去加工における Si_3N_4 の除去脱離機構

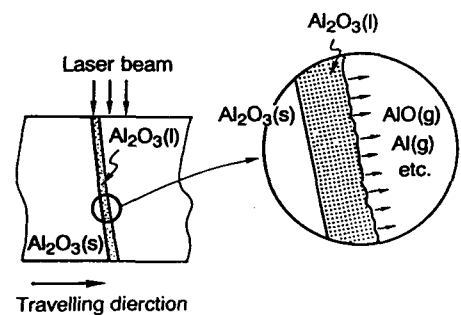


図6-14 レーザ除去加工における Al_2O_3 の除去脱離機構

6-3 レーザによる除去過程のエネルギー解析

図6-15はレーザ加工中のビームエネルギーの消費過程の説明図である。入射したビームはプラズマ中を通過後材料面に到達する。この際、エキシマレーザ加工ではビームの一部がプラズマにより吸収される。試料面に到達したビームは材料の分解・蒸発、熱伝導で消費される。また一部は反射し、あるいは加工によっては裏面側に通過していく。

本節では、

| | |
|---------------------------|-----------------------|
| 入射エネルギー： q_i | プラズマによる吸収エネルギー： q_p |
| 反射エネルギー： q_{ref} | 離脱物質保有エネルギー： q_r |
| 残留熱： q_c | |

に関する検討を行い、エネルギーバランスにより、セラミックスのレーザ除去加工現象を議論する。プラズマによるビーム吸収、試料表面でのビーム吸収に関する解析結果を用い、入射したビームエネルギーの行方を明らかにし、離脱物質の状態を解析する。

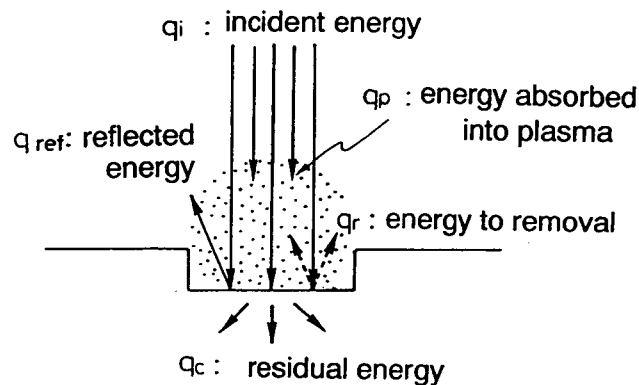


図 6 - 1 5 加工中のエネルギー消費

6-3-1 照射エネルギーと除去体積

レーザビームをセラミックス試料に照射し、照射エネルギーと除去体積の関係を調べる。除去体積は CO_2 、YAGレーザ加工においてはビーム照射前後の試料の質量変化を化学天秤（感度1mg）により測定し、各材料の密度から体積を算出する。エキシマレーザ加工においては加工穴径と穴深さにより直接求めた。

残留エネルギー q_c は図 6 - 1 6 に示すように熱容量既知の銅ブロックに試料を固定して加工を行い、銅ブロックの温度上昇を検出して母材への熱伝導を評価した。試料の移動速度が低く、ビームが試料を貫通する場合には、加えて試料裏面側に抜けるビームパワーをパワーメータで測定した。

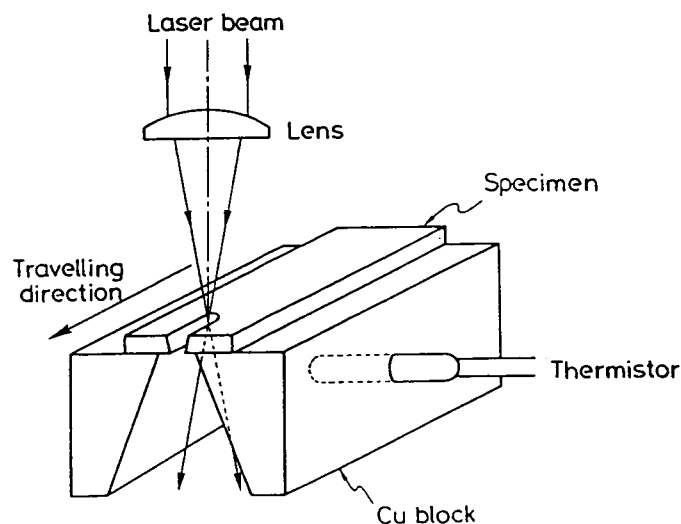


図 6 - 1 6 試料内部の残留熱量の測定方法

図6-17はCW-CO₂レーザビームを集光（中心パワー密度 10^{11}W/m^2 のガウアンビーム）して試料を加工した時、単位体積のSi₃N₄を除去するのに要した入射ビームエネルギー q_i を示している。 q_i はビームが貫通する切断領域（ q_i は裏面側に抜けたビームエネルギーは含まない）では 90J/mm^3 程度で v の増加につれて減少し、その後わずかに増加する傾向がみられる。最小値をとる $v=1\text{m/s}$ 付近では約 60J/mm^3 の値である。

CO₂、YAGレーザ加工において、加工溝が非常に浅い場合、吸収は入射したビームの1回の照射で起こるだけで、反射エネルギーは無視できない量となる（図6-18(b)）。このとき反射により失われるエネルギー割合は4章の結果から、20%程度と推定される。加工溝が深い場合には、CO₂、YAGでは溝内部での多重反射によって吸収の機会が増え（図4-39(a)）反射ビームは無視できるほど小さくなる。ここでは、反射が少ないと仮定できるとし、入射ビームエネルギーを

①離脱物質の保有エネルギー： q_r

②熱伝導による残留熱： q_c

ただし、いずれも単位体積の除去あたりの値で単位は J/mm^3

に分けた上で、 q_r について検討する。なお、CO₂、YAGレーザによる熔融型セラミックス加工では熔融相の影響で再現性のある除去量が得られなかったため、解析には分解型のSi₃N₄及びSiCについて解析することにする。

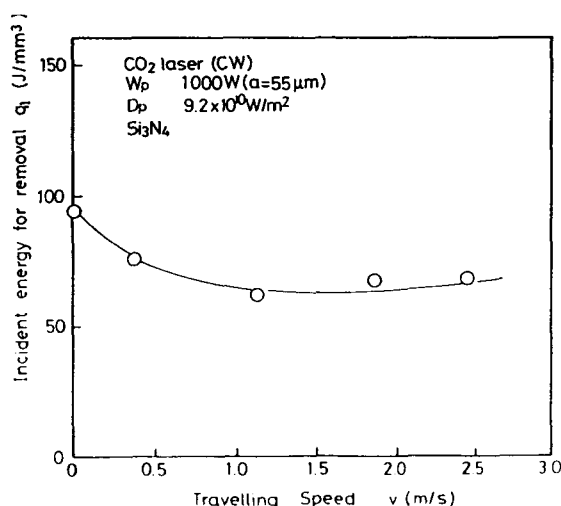


図6-17 CO₂レーザ加工において単位体積のSi₃N₄を除去するのに必要な入射ビームエネルギー

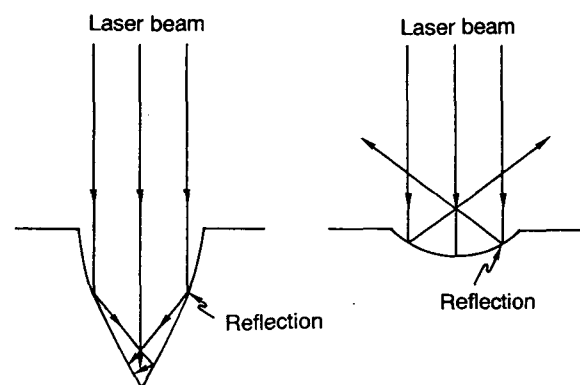


図6-18 加工溝深さによるビーム反射状態の変化

図6-19はSi₃N₄における試料移動速度と q_c の関係で、これから入射ビームエネルギーに対する q_c の割合、および r_c の変化を求めて示す。 r_c は試料移動速度の増大と共

にほぼ直線的に低下している。0.3m/s程度以下の移動速度では入射ビームエネルギーの50%以上が熱伝導により母材中に残留する（このエネルギーは、3章で加工面に見られたクラックなどの熱影響も引き起こす）。残留熱量を低減するにはより高速、パルス加工でより短パルスで加工すればよい。なお、SiCの場合には図6-20のように試料移動速度に対する r_c の変化は Si_3N_4 に比べ小さくなっている。SiCは Si_3N_4 と比べ、試料移動速度が変化した場合でも加工溝深さの変化が小さく、この結果、加工溝内面でビームと相互作用する面積（入熱面積）もあまり変化しないことがその原因と考えられる。

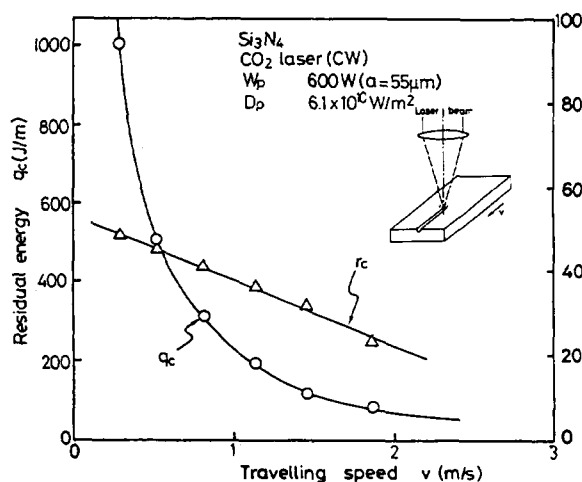


図6-19 Si_3N_4 のレーザ加工における残留熱量

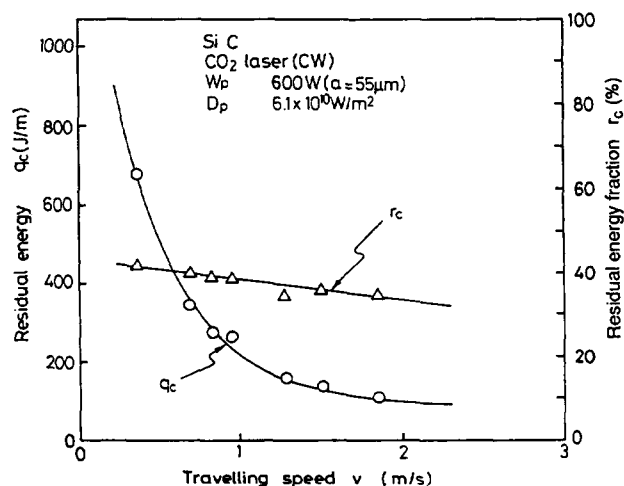


図6-20 SiCのレーザ加工における残留熱量

エキシマレーザではマスクプロジェクションにより加工を行ったが、エネルギーバランスは入射ビームエネルギーと、以下の各エネルギーについて解析した。

- ①プラズマの吸収エネルギー： q_p
- ②表面での反射： q_{ref}
- ③離脱物質の保有エネルギー： q_r
- ④熱伝導による残留熱： q_c

図6-21はマスクプロジェクションにより発生させた均一パワー密度のKrFエキシマレーザを Si_3N_4 、SiC、 Al_2O_3 及び ZrO_2 に照射して、穴加工を行い、この際の残留熱量が入射ビームエネルギーに占める割合を種々のパワー密度について示したものである。 Si_3N_4 の残留エネルギー割合は $1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 以下ではパワー密度の上昇とともに低下している。これは高パワー密度ほど試料表面を短時間で除去温度まで加熱でき、表面を除去温度まで加熱する為のエネルギーが全入射エネルギーに占める割合が小さくなることによる。

さらにパワー密度が上昇した場合、残留エネルギー割合がほぼ一定となるのは、

誘起プラズマ生成され、プラズマからの間接入熱が寄与しているためと考えている。この傾向は他のセラミックスの場合にもみられ、パワー密度に対してほぼ同じ変化を示している。

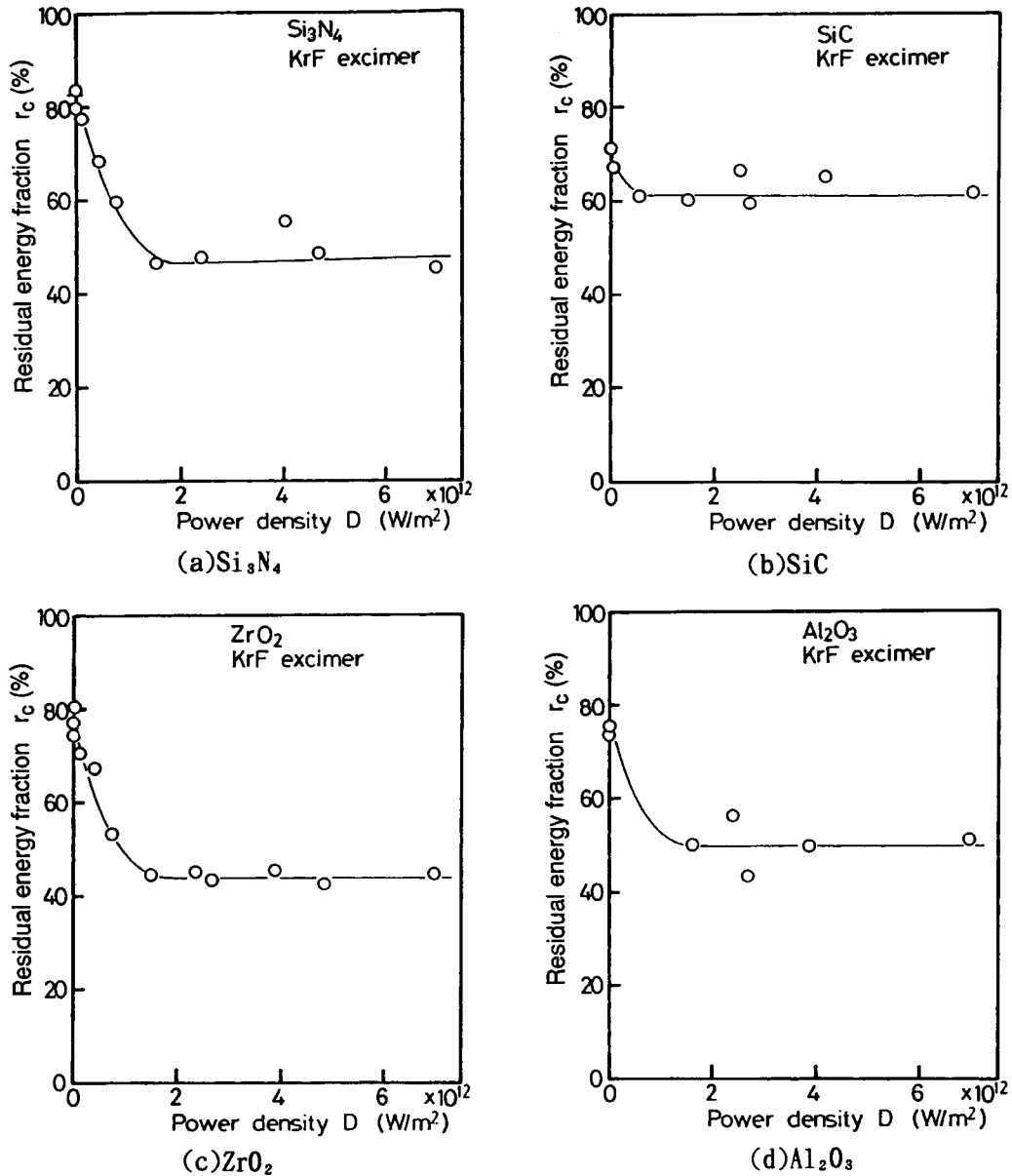


図6-21 各セラミックスのエキシマレーザ加工において
残留熱量が入射エネルギーに占める割合

6-3-2 離脱物質の保有エネルギー

CO_2 、YAGレーザでは加工に対してプラズマの影響がほとんどなく、反射も十分小さいとすると、離脱物質の保有エネルギーとして、

$$q_r = q_i - q_c \quad (6-5)$$

が与えられる。

図6-22、図6-23は Si_3N_4 及び SiC の種々の試料移動速度における q_r を示す。これらの図で、 Si_3N_4 では1.3m/s、 SiC では0.8m/s以下で、 q_r はほぼ一定値をとることがわかる。これより高速側での q_r の上昇は、加工溝が浅くなり、ビーム反射によって所要エネルギーが見かけ上増加することが主な原因と考えられる。反射の影響が小さい定速度域での値から、離脱物質の保有エネルギーは Si_3N_4 では 40J/mm^3 、 SiC では 80J/mm^3 と推定される。

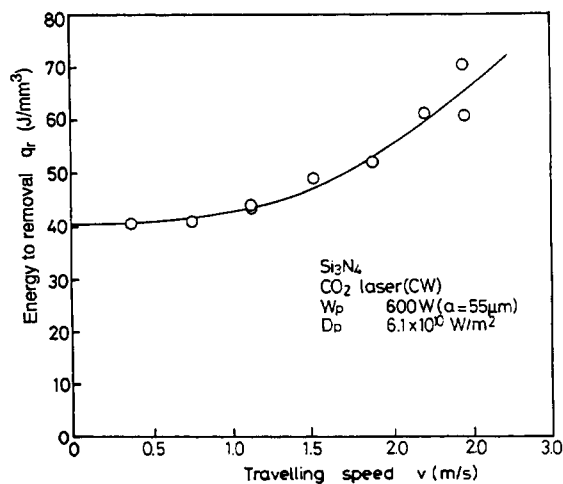


図6-22 Si_3N_4 の CO_2 レーザ加工において単位体積の Si_3N_4 が離脱後保有する熱量

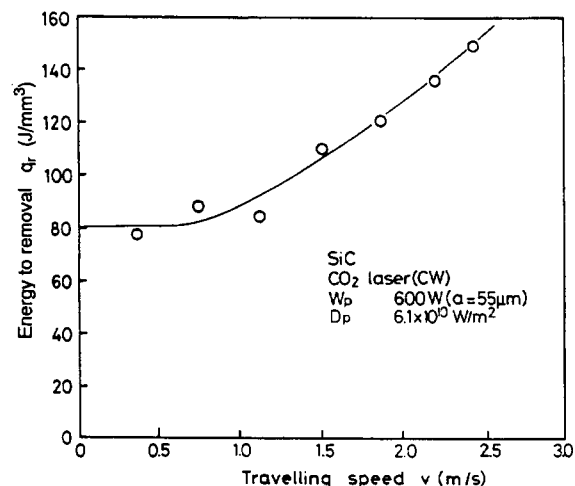


図6-23 SiC の CO_2 レーザ加工において単位体積の SiC が離脱後保有する熱量

図6-24はエキシマレーザ加工において、

$$q_r' = q_i - q_{ref} - q_c \quad (6-6)$$

により求めた、 q_r' を示している。プラズマによるビーム吸収がほとんどない $1 \times 10^{12} \text{W/m}^2$ 程度のパワー密度ではプラズマによる入射ビームの吸収や、一度プラズマに吸収され、そのプラズマからの再入熱は無視できるため、 q_r' は離脱物質の保有エネルギー q_r と等しいとしてよい。この時の q_r' は、 Si_3N_4 : 110J/mm^3 、 SiC : 110J/mm^3 、 Al_2O_3 : 140J/mm^3 、 ZrO_2 : 160J/mm^3 である。 $2 \times 10^{12} \text{W/m}^2$ 以上のパワー密度域の q_r' はプラズマの影響を受け、パワー密度が大きくなるほど q_r' は増大しているが、この領域での q_r については100頁で検討する

図6-25にそれぞれのセラミックスの離脱物質保有エネルギーと、および各セラミックスをそれぞれの分子あるいは原子状態に分解するために必要なエネルギーとを比較して示している。

Si_3N_4 の加工において、 CO_2 及びYAGレーザでは q_r は 40J/mm^3 と低い値で、これは Si_3N_4 を $\text{Si}(1)$ と N_2 に分解するのに必要なエネルギーにほぼ等しい。すなわち、除去加工の機構として、以下の熱分解反応が支配的であり、 Si は液相状態で離脱していると考えられる。



これは、前節で行った温度の解析結果とも一致している。

これに対して、エキシマレーザ加工では、 q_r は $120\text{J}/\text{mm}^3$ と高く、 Si_3N_4 は原子化するのに十分なエネルギーを保有しつつ離脱している。このエネルギーがすべて内部エネルギーになると仮定すると、この時の加工機構は、次のような反応をとるものと考えられる。

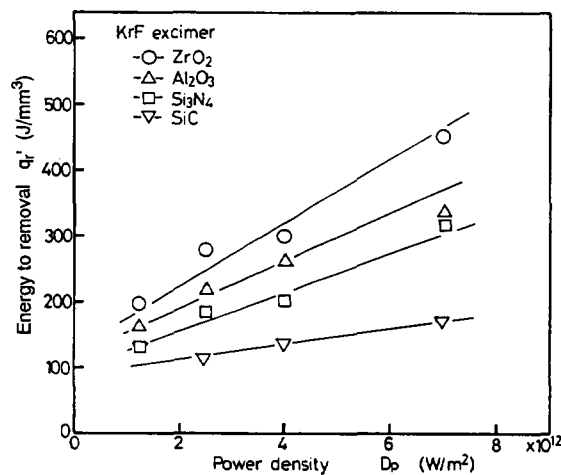


図 6 - 2 4 照射パワー密度による各セラミックスの q_r' の変化

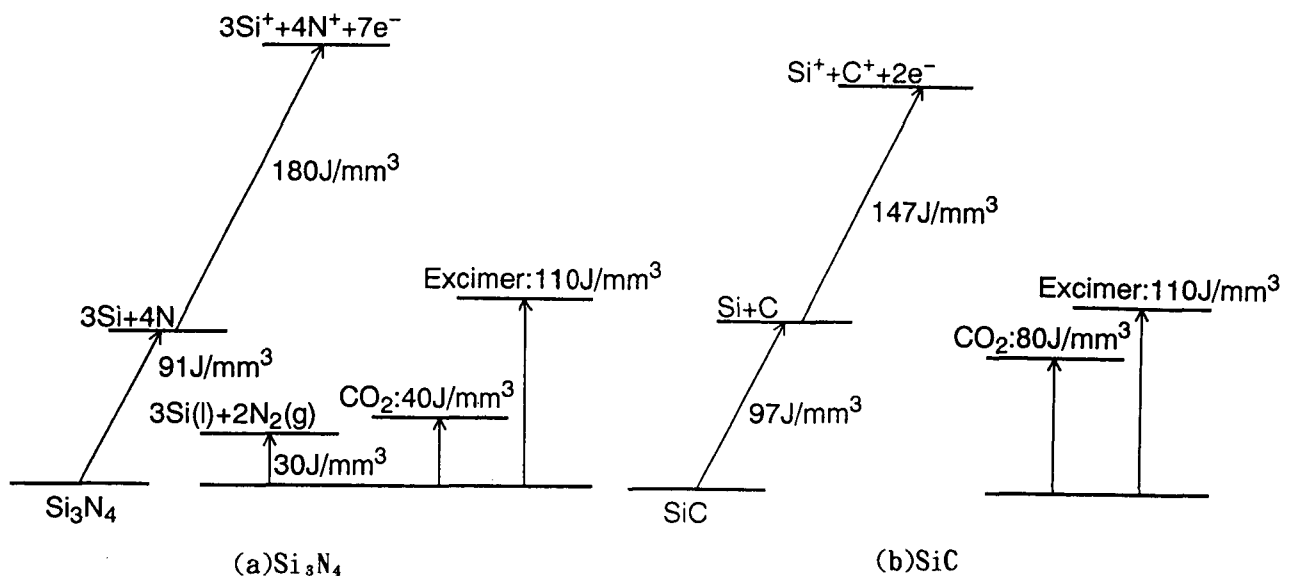


図 6 - 2 5 単位体積の各セラミックスが離脱後保有する熱量と各状態への分解エネルギーの比較

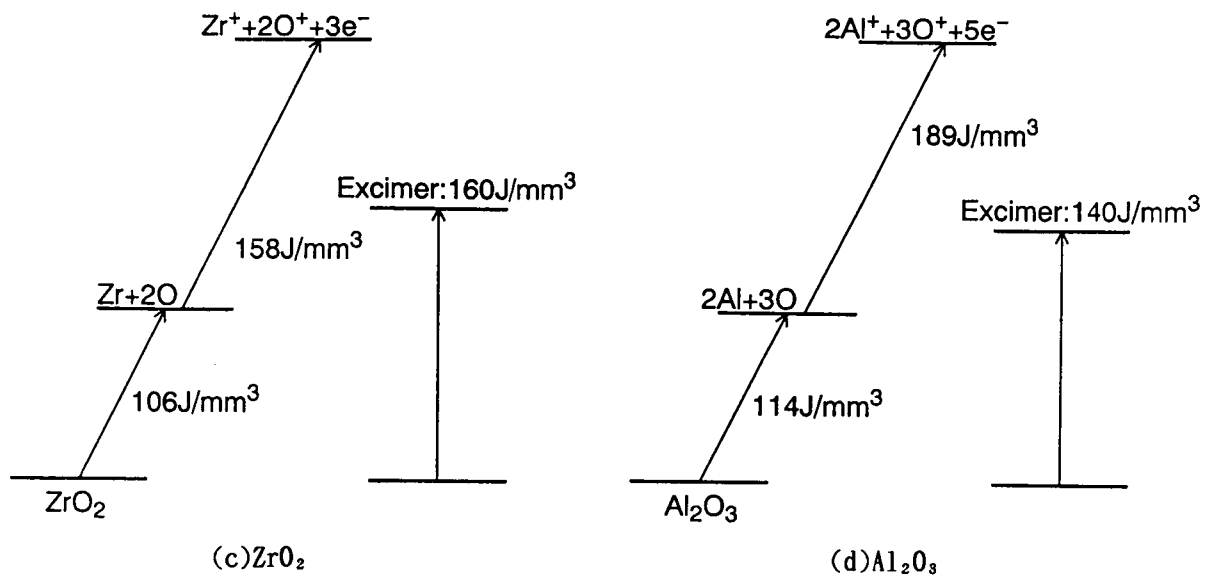


図 6 - 2 5 続き

他のセラミックス材料についても、エキシマレーザ加工において測定された q_r はいずれの材料をも原子化するために十分な値となっており、それぞれのセラミックスが原子状態にまで分解されながら加工が進行していると考えられる。

次に、プラズマ発生を伴う場合の q_r について Si_3N_4 の加工に関して考察する。ここでは、プラズマによるビーム吸収、さらにプラズマからの熱ふく射の影響があるものと思われる。

図 6 - 2 6 にエキシマレーザ加工時のプラズマの発光波形例を示す。プラズマからの放射光は数百 $ns \sim \mu s$ とエキシマレーザパルス幅の十倍以上に相当する長い時間持続している。さらに、エネルギー的にも、マスクプロジェクションのパワー密度範囲では、入射ビームの20~30% (プラズマによるビーム吸収) 以下であるため、プラズマからの熱ふく射をパワー密度に換算すると、レーザビームの数十分の一と非常に低く、材料の除去には影響しないと考えてよいが、試料のエネルギーバランスには残留エネルギーとして影響する。いま、図 6 - 2 7 のようなエネルギー授受を考える。

ここで次の事項が成立すると考える。

- ① プラズマが吸収したエネルギーは等方的に再放射される
- ② 試料サイズは十分大きく、再放射の1/2が試料に届く
- ③ 再放射は試料に吸収され、吸収されたエネルギーは残留エネルギーとなる

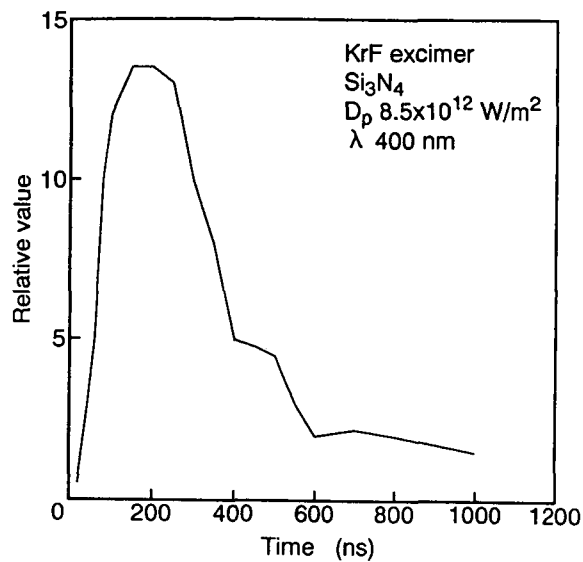


図 6 - 2 6 エキシマレーザ加工中のプラズマ
発光波形

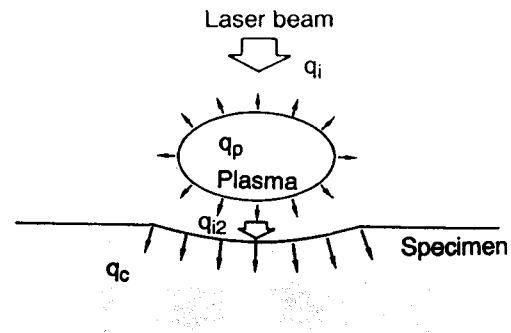


図 6 - 2 7 プラズマと試料表面のエネルギー授受
を考慮したエネルギーバランスモデル

プラズマ通過後、試料表面に到達するビームエネルギー、 q_{i2} は次式で与えられ、

$$q_{i2} = q_i - q_{p1} \quad (6-9)$$

ただし、 q_{p1} : 試料への入射段階におけるプラズマによるビーム吸収エネルギー

プラズマからの再放射による残留熱、 q_{c2} は

$$q_{c2} = \frac{1}{2} (q_{p1} + q_{p2}) A_r \quad (6-10)$$

ただし、 q_{p2} : 試料からの反射段階でのプラズマによるビーム吸収
 A_r : プラズマからの熱ふく射に対する吸収率

となる。直接のレーザ加熱による残留熱、 q_{c1}

$$q_{c1} = q_c - q_{c2} \quad (6-11)$$

ただし、 q_c : 全体としての残留熱

で与えられるので、分解あるいは蒸発直後に離脱物質が保有していたエネルギー q_r は、

$$q_r = r_{ab} q_{i2} - q_{c1} \quad (6-12)$$

ただし、 r_{ab} :ビーム吸収率 (=0.73)

で求められる。ここで、 q_c 及び q_i は直接測定による値、 q_{p1} 及び q_{p2} は前章で測定したプラズマパラメータをもとに次式で計算した結果を用いた。

$$q_{p1} = \int_{t_p}^{\infty} D(t) (1 - \exp(-\alpha v(t-t_p))) dt \quad (6-13)$$

$$q_{p2} = \int_{t_p}^{\infty} D(t) (1 - r_{ab}) \exp(-\alpha v(t-t_p)) (1 - \exp(-\alpha v(t-t_p))) dt \quad (6-14)$$

$D(t)$:照射パワー密度

プラズマからの熱ふく射に対する試料表面の吸収率は図4-1(a)における $0.3 \sim 5 \mu m$ の波長域の反射率を考慮し、0.9とした。

図6-28は種々のパワー密度におけるエネルギー分配と移行の解析結果を示している。また、図6-29はこれをもとに算出した、 q_r とパワー密度の関係である。パワー密度が $10^{12} \sim 9 \times 10^{12} W/m^2$ の範囲で変化した場合、 q_r は $110 \sim 150 J/mm^3$ とほとんど変化せず、したがって離脱現象もほとんど変わらないと考えられる。

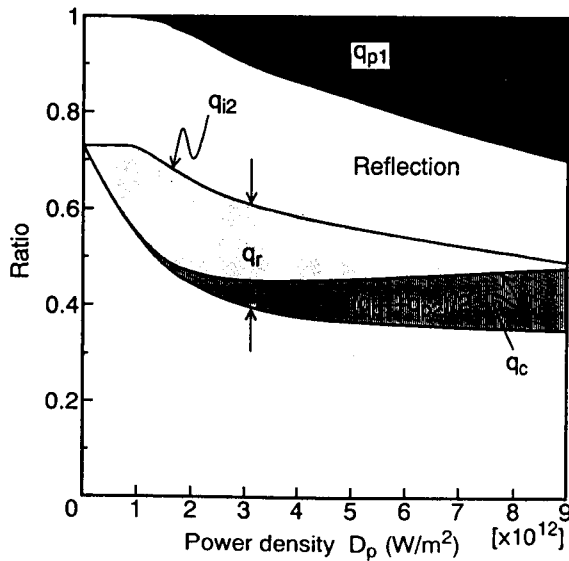


図6-28 Si_3N_4 のエキシマレーザ加工における入射ビームエネルギーの分配

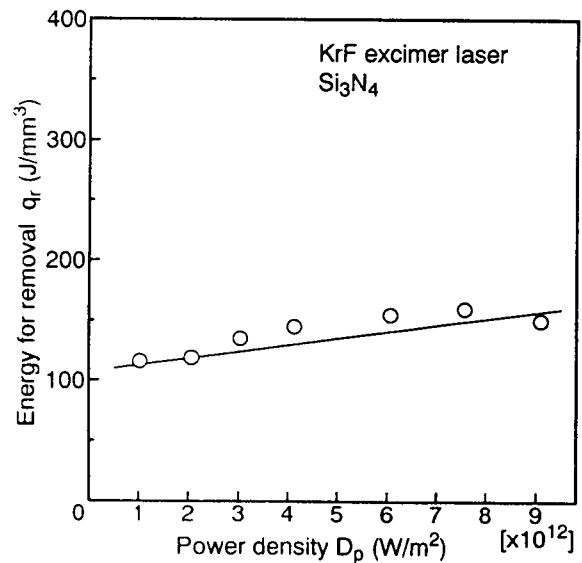


図6-29 Si_3N_4 のエキシマレーザ加工における照射パワー密度と q_r の関係

6-4 結言

本章では、レーザによるセラミックスの分解・離脱現象の解析を目的として、加工面の分析、加工中の温度および加工プロセスにおけるエネルギーバランスの解析を行った。得られた結果を以下に要約する。

(1) CO_2 及びYAGによる Si_3N_4 を加工した場合、加工面にはSi微粒子の付着が認められる。これに対し、高いパワー密度のエキシマレーザでは、Siはほとんど検出されない。

(2) セラミックスのレーザ加工における加工機構は熱による材料の分解・蒸発である。加工速度と加工進行面温度の関係は、セラミックス構成原子間の結合エネルギーを活性化エネルギーとするアレニウス式となり、加工速度律速因子はセラミックス構成原子間の結合の解離速度であることがわかった。

(3) CO_2 、YAGによる Si_3N_4 加工では加工進行面温度はSiの沸点と同程度以下であり、多量のSi(l)を伴って分解が進行している。Si(l)の離脱は同時発生する高圧 N_2 を駆動力としており、この結果加工面にはSi微粒子が付着する。 Al_2O_3 では蒸発が支配的である。

(4) CO_2 、YAGレーザ加工における離脱物質の保有エネルギーは、材料を原子化するのに必要なエネルギーに達していない。これに対し、高いパワー密度のエキシマレーザによる加工では、すべてのセラミックスで離脱物質は原子化と同程度以上の保有エネルギーとなっており、セラミックスがほぼ原子状態まで分解されて加工が進行することがわかった。

第7章 結論

本研究は高いパワー密度を有するレーザービームを用いてセラミックスの除去加工を行うにあたって、レーザービームのパワー密度分布、波長、パルス幅が、ビームと材料の相互作用、材料の除去にいかに関係を及ぼすかを基礎的に追求したものである。

CO₂、YAGおよびエキシマの各レーザーを用い、まず、熱源としてのパワー密度分布計測手段を確立し、次いでそれぞれのレーザーについてビームパラメータと加工特性の関係を示した。さらにセラミックスのレーザー加工機構を、プラズマとの相互作用、試料でのビームエネルギーの吸収、材料の離脱の各過程に分け、それぞれを系統的に追求した。

本研究で得られた成果は、総括すると以下ようになる。

第1章ではレーザーによるセラミックス加工の必要性和、現状および研究上の問題点を明らかにした上で、本研究の目的と必要性を示した。

第2章では各レーザーの特徴を述べ、加工現象の解析に、レーザーパワーおよびパワー密度分布の精密な測定が重要であることを指摘した上で、測定装置の開発とそれを用いたビーム計測を行っている。CO₂レーザーのマルチモードビームは、レーザー出力は大きいものの集光性が低く、集光点パワー密度は $5 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ にとどまる。これに対し、低次モードビームでは最高 $1.3 \times 10^{11} \text{ W/m}^2$ のパワー密度が得られた。YAGでは最大 10^{12} W/m^2 のパワー密度が発生可能であった。さらに、エキシマレーザービームはマスクプロジェクション光学系によって $9 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$ 、集光することにより最大 $2 \times 10^{16} \text{ W/m}^2$ の高いパワー密度が発生できることが明かとなった。

このように本研究で開発したパワー密度分布測定装置により、従来測定が困難であった材料加工点での集光ビームのパワー密度分布が測定可能となった。

第3章では、CO₂、YAGおよびエキシマの各レーザーを実際にセラミックスに照射し、それぞれの加工溝幅、除去速度および加工面の状態などの一般的な加工特性を調べるとともに、パワー密度分布との関連性に着目し、検討することで、以下の結果を得た。

- (1) YAG、CO₂レーザーによるセラミックス加工では加工面に、多量の分解生成物あるいは溶融物が付着し、これにより表面粗さが劣る。これと対照的に、エキシマレーザーでは分解性生物あるいは溶融物は非常に少なく平滑な加工面を得ることができる。
- (2) CO₂、YAGレーザーのパワー密度範囲では、Si₃N₄の除去速度はパワー密度に比例している。これに対し、エキシマレーザーでは高パワー密度になると誘起プラズマが原因とみられる除去速度の飽和が生じる。また、プラズマの発生に伴い、加工溝幅

も急激に増大する。

- (3) パルス幅、パルス照射間隔により、加工面のクラック深さ、形状、数が著しく変化する。 Si_3N_4 でクラック深さを低減するには、パルス照射間隔を10ms以上とし、短パルス化すればよい。パルス幅30nsのエキシマレーザではクラックのほとんどない加工が可能である。

第4章においてはレーザ加工中、あるいはそれに近い高温下におけるセラミックスのビーム反射・吸収率を測定した。

誘起プラズマの影響が無視できる場合、いずれのレーザを用いても入射ビームのパワー密度分布、セラミックスのビーム吸収率、ビーム浸透深さで決まる温度上昇により加工溝幅が決定される。すなわち、フォトンエネルギーが大きいエキシマレーザを用いた場合でも、多光子吸収による熱加工が支配的である。

ビームの浸透深さについては、 CO_2 、YAGおよびエキシマレーザにおいて除去に必要なパワー密度とパルス幅の関係を基に、熱源の浸透深さを考慮した熱伝導計算により検討した。 Al_2O_3 に対する各レーザの浸透深さはYAGで400~1000 μm 、 CO_2 では0~30 μm 、エキシマレーザでは1 μm 以下である。

第5章ではエキシマレーザ加工に際して、誘起発生したプラズマの特性、ビームとの相互作用、さらに相互作用の結果生じる加工への影響を解析した。

- (1) $10^{11}\text{W}/\text{m}^2$ レベルのパワー密度域、すなわち、 CO_2 レーザあるいは一般的なYAGレーザでのセラミックス加工においてはプラズマはほとんど発生していない。
- (2) エキシマレーザ加工における誘起プラズマの影響はそのほとんどがビーム吸収によるもので、ビームの屈折あるいは散乱に基づく影響は小さい。
- (3) エキシマレーザパルス照射から、プラズマの生成までには数nsの時間遅れがある。発生したプラズマの広がり速度は2~13km/s、レーザに対するプラズマの吸収係数は3~15 mm^{-1} の値をもつ。この値は分光に基づく電子密度から逆制動放射モデルで計算した値とほぼ等しい。
- (4) 実測したプラズマパラメータをもとに、プラズマによるビーム吸収が加工速度、形状に及ぼす影響を調べ、高パワー密度域での速度飽和、加工穴深さ不均一等の現象をプラズマとの関係連のもとに定量的に説明できることを明らかにした。

第6章はレーザによるセラミックスの除去過程について、材料の分解・脱離機構の解析を目的として、加工中の温度および加工プロセスにおけるエネルギーの移行とエネルギーバランスを解明している。

- (1) セラミックスのレーザ加工における加工機構は熱による材料の分解・蒸発で、セラミックス構成原子間の結合の解離速度が除去速度を律速している。
- (2) CO_2 、YAGによる Si_3N_4 加工では、加工進行面温度はSiの沸点と同程度あるいはそれ

以下であり、 Si_3N_4 -Si界面に発生する高圧 N_2 を除去駆動力として、多量のSi(1)を伴いながら分解が進行していく。これに対し、 Al_2O_3 では熔融部表面からの蒸発によって除去加工が進行する。

- (3) エキシマレーザによる加工では、すべてのセラミックスで離脱物質は原子化に必要な量以上のエネルギーを保有しており、セラミックスが原子状態まで分解されて加工が進行する。これに対し、 CO_2 、YAGレーザ加工における離脱物質の保有エネルギーは、 SiC 、 Si_3N_4 のいずれも、原子化に必要なエネルギーに達していない。これら除去形態の相違から、 CO_2 、YAGによる Si_3N_4 加工面には多量のSiが付着しているのに対し、エキシマレーザ加工面では付着がほとんど見られない。他のセラミックスについても同様であり、エキシマレーザ加工により付着物のほとんどない加工が可能である。

以上に示した本研究の成果は、レーザを用いてセラミックス加工を行う際だけでなく、加工用レーザ発振器を合理的に設計して際の指針となると考えられる。たとえば、パルス幅ひとつをとっても、レーザを短パルス化あるいは長パルス化する際どの程度の値が必要なのかを示す指針がこれまではなかった。本研究に基づく、セラミックス加工におけるレーザパラメータの決定指針、すなわち、セラミックスの種類、加工の種類による波長、パワー密度及びパルス幅の選定基準を以下に示して結論としたい。

- (1) レーザ波長は材料へのビーム浸透深さに影響する。特に Al_2O_3 、 ZrO_2 のような白色セラミックスは可視～近赤外域でビーム浸透深さが大きいいため、ArF、KrFエキシマレーザ、4倍高調波YAGあるいは CO_2 レーザを用いるべきである。これらのうち、一般的な形状加工では加工能率に優れるノーマルパルス CO_2 レーザ、精密・微細加工にはArF、KrFエキシマあるいは4倍高調波YAGレーザが適している。
- (2) 短パルス、高パワー密度化に伴い、加工領域にはプラズマが発生する。プラズマとの相互作用の点で、TEA- CO_2 レーザ、Q-スイッチYAGレーザなど、赤外域の短パルス高パワー密度レーザよりもKrFエキシマ、4倍高調波YAGレーザ等の紫外域レーザを用いるべきである。
- (3) プラズマは $10^{11} \sim 10^{12} \text{ W/m}^2$ のパワー密度域で発生し、プラズマ吸収が大きい CO_2 レーザではこれがパワー密度上限となる。このパワー密度範囲で加工が起こるためには1～数 μs 程度のビーム照射が必要であり、実用的な加工に対しては数 μs ～数十 μs が最適なパルス幅範囲となる。
- (4) 10^{13} W/m^2 程度のパワー密度域ではパルス立ち上がり後10～15ns程度でプラズマが発生し、ビームを吸収する。エキシマレーザ加工においてはこのプラズマ生成時間が最適パルス幅といえる。例えば、 10^{13} W/m^2 程度のパワー密度域では最適パルス幅10～15nsであり、現在市販されている一般的な加工用エキシマレーザの出力パルス幅より小さい。

謝 辞

本研究は大阪大学大学院工学研究科博士課程において、大阪大学教授、丸尾 大博士の御指導と御教示のもとに遂行し得たものであります。ここに深甚なる感謝の意を表します。また本研究を進めるにあたり、大阪大学講師、宮本勇博士に終始懇切な御指導と御討論を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、大阪大学教授、小林紘二郎博士、西口公之博士、黄地尚義博士および大阪大学溶接工学研究所教授、松縄 朗博士より有益な御助言と御討論を賜りました。ここに心から御礼申し上げます。

さらに、大阪大学講師、平田好則博士、大阪大学教官、裏垣 博博士をはじめ、生産加工工学教室ならびに溶接工学研究所の諸先生方より多大の御助言と御便宜を頂きました。実験の遂行にあたっては朝日信行修士、長友晃彦修士、横田明善学士、廣田幸伯学士及び大久保雅生学士をはじめ卒業生諸兄から熱心な御協力を頂きました。これらの方々に心から御礼申し上げます。また、公私ともにお世話になった大阪大学大学院後期課程、尾崎公洋氏をはじめ丸尾研究室の方々にも御礼申し上げます。

最後に、長い間、物心両面にわたり支援し続けてくれた父母に感謝の意を示したいと思います。

参考文献

- 1)新庄, 井分, 原, 佐々木, 岩村;"ベーンポンプへのセラミックスの応用", 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, p. p. 737-738.
- 2)山本;"ファインセラミックスの現状と将来", 日本機械学会誌, 第88巻, 796号(1985), p. p. 220-226.
- 3)中井, 原, 有本, 山口;"焼結ダイヤモンドによるセラミックスの切削加工", 昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, p. p. 665-666.
- 4)Y. Arata and I. Miyamoto;"Generation and Applications of CW High power CO₂ GasLaser", Technol. Repts. of Osaka Univ. Vol. 17(1967), No. 285.
- 5)A. B. Sullivan and R. T. Houldcroft;"Gas-jet Laser Cutting", British W. J., Vol. 14(1967), No. 8, p. p. 443-446.
- 6)S. M. Copley;"Laser Machining-Ceramics", International Laser Processing Conference (1981) .
- 7)荒田, 丸尾, 宮本, 竹内;"レーザガス切断に関する基礎的研究(1)", 高温学会誌, Vol. 4, No. 3 (1978), p. p. 122-134.
- 8)荒田, 丸尾, 宮本, 竹内;"レーザガス切断に関する基礎的研究(2)", 高温学会誌, Vol. 5, No. 2 (1978), p. p. 101-112.
- 9)北側, 前原;"セラミックスのレーザマシーニングに関する研究", 溶接学会全国大会講演概要集, Vol. 43 (1988), p. p. 310-311.
- 10)渡部, 吉田, 杉山;"YAGレーザによるセラミックスの三次元加工に関する研究", 昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, p. p. 851-852.
- 11)J. Yamamoto and Y. Yamamoto;"Laser Machining of Silicon Nitride", LAMP' 87 (1987), p. p. 297-302.
- 12)渡部, 吉田, 杉山;"YAGレーザによるセラミックスの3次元加工に関する研究", 昭和63年度精機学会秋季大会学術講演会論文集, p. p. 861-852.
- 13)平本, 森安, 竹野;"エネルギービーム穴あけに関する研究、第3報", 高温学会誌, Vol. 17, No. 2 (1991), p. p. 89-97.
- 14)M. Autric, P. Vigliano, D. Astic, P. Bournot and D. Dufresne;"Visible spectroscopy of laser produced plasma", SPIE Vol. 1020 High Power CO₂ Laser Systems and Applications (1988), p. p. 103-112.
- 15)J. T. Knudtson, W. B. Green and D. G. Sutton;"The UV-visible spectroscopy of laser-produced aluminum plasmas", J. Appl. Phys. Vol. 61(1987), p. p. 4771-4780.
- 16)丸尾, 宮本, 岡野;"スペーシャルフィルタによる集光性の改善-高出力レーザビーム

の強度分布(2)-", 溶接学会全国大会講演概要集, Vol. 38(1986), p. p. 168-169.

17)E. D. West, W. E. Case, A. L. Rasmussen and L. B. Schmidt;"A Reference Calorimeter for Laser Energy Measurement", Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry 76A, No. 1(1972), p. p. 13-26.

18)P. S. Preston;"A radiation thermopile for cw and laser pulse measurement", Journal of Physics E: Scientific Instruments 1971, Vol. 4.

19)K. Sakurai, Y. Mitsuhashi and T. Honda;"A Laser Microcalorimeter", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-16, No. 3(1967).

20)遠藤, 本田;"高出力レーザパワーの精密測定", 電学論C, Vol. 108, No. 8 (1988), p. p. 611-617.

21)S. R. Gunn;"Calorimetric measurements of laser energy and power", Journal of Physics E: Scientific Instruments 1973, Vol. 6.

22)遠藤, 本田;"高パワーレーザ測定用カロリメータの開発", 電子技術総合研究所彙集, Vol. 47, No. 12 (1983), p. p. 1207-1215.

23)I. Miyamoto and H. Maruo;"Intensity Profile Measurement of Focused CO₂ laser Beam Using PMMA", ICAREO '84, Vol. 44(1984), 313.

24)丸尾, 宮本, 山田;"写真法による強度分布の評価-レーザ表面改質用光学系に関する研究(1)-", 溶接学会全国大会講演概要集, Vol. 42 (1988), p. p. 171-172.

25)フォトダイオード特性表, 浜松フォトニクス

26)L. B. William;"Method for Computing the Radial Distribution of Emitters in a Cylindrical Source", Journal of the Optical Society of America, Vol. 52, No. 8(1962), p. p. 885-888.

27)牧野, 坂井, 木下, 国友;"セラミックスの熱ふく射性質の研究", 日本機化学会論文集, Vol. 50(1984), 452号, p. p. 1045-1053.

28)Y. Arata and I. Miyamoto;"Processing Mechanism of High Energy Density Beam-Mechanism of Drilling-", Trans. JWRI, Vol. 2, No. 2(1973), p. p. 19-22.

29)T. S. Moss, "Optical Properties of Semi-Conductors", Butterworth(1959)

30)M. Hass, "Temperature Dependence of the Infrared Reflection Spectrum of Sodium Chloride", Physical Review, Vol. 117(1960), p. p. 1497-1499.

31)Ch. Hamann, H. G. Rosen; SPIE, Vol. 801(1987), p. 130ff.

32)H. R. Griem;"Plasma Spectroscopy", McGraw-Hill, New York(1964).

33)レーザ学会;"レーザハンドブック", p. 454.

34)H. Hora;"Laser Plasmas and Nuclear Energy", Plenum Press, New York(1975), p. 26.

35)H. Hora;"Optical Constants of Fully Ionized Hydrogen Plasma for Laser Radiation", Nuclear Fusion, Vol. 10(1970), p. p. 111-116.

- 36)H. Hora;"Laser Plasmas and Nuclear Energy", Penum Press, New York(1975), p. p. 45-51.
- 37)レーザ学会;"レーザハンドブック", p. 765.
- 38)U. S. Department of Comerce;"Experimental Transition Probabilities for SpectralLines of Seventy Elements", NBS Monograph, Vol. 53(1962).
- 39)K. Bockasten;"Transformation of Observed Radiances into Radial Distribution ofEmission of a Plasma", Journal of the Optical Society of America, Vol. 51(1961), No. 9, p. p. 943-947.
- 40)赤崎、村岡、渡辺、蛸原;"プラズマ工学の基礎", 産業図書(1984)
- 41)C. Greskovich and S. Prochazka;"Stability and Liquid Phase(s) During Sintering", Communications of the American Ceramic Society(Jul. 1981), p. p. C96-C97.
- 42)Y. Arata, H. Maruo, I. Miyamoto and S. Takeuchi;"Quality in Laser-Gas-Cutting Stainless Steel and its Improvement", Trans. JWRI, Vol. 10, No. 2(1981), p. p. 1-11.
- 43)T. L. Cottrell;"Strength of Chemical Bonds, 2nd ed.", Butterworth(1958), p. p. 216.
- 44)H. D. Batha and E. D. Whitney;"Kinetics and Mechanism of the Thermal Decomposition of Si_3N_4 ", Journal of The American Ceramic Society, Vol. 56(1973), No. 7, p. p. 365-369.
- 45)W. B. Hinche and L. R. Brantley; Journal of American Chem. Society, 52(1930), p. p. 48-52.
- 46)鈴木;"高温セラミック材料", 日刊工業新聞社 (1985), p. p. 66-67.

本論文に関する著者の発表論文

- (1)薄板のレーザガス切断におけるレーザ出力変動と切断面粗さの関係－高パワー密度レーザによる材料加工の研究（第1報）－，溶接学会論文集Vol. 10, No. 1 （1992）
- (2)セラミックスのレーザ照射による除去機構－高パワー密度レーザによる材料加工の研究（第2報）－，溶接学会論文集Vol. 10, No. 3(1992)
- (3)Fundamental Study of In-process Monitoring in Laser Cutting, 4th International Colloquium on Welding and Melting by Electron and Laser Beams, CISFFEL(1988)
- (4)Laser Machining of Ceramics -Machining Mechanism and Quality-, Proceedings of the 5th International Symposium of the Japan Welding Society, 5WS(1990)
- (5)Processing Mechanism of Ceramics with High Power Density Lasers, Laser Advanced Materials Processing, LAMP' 92(1992)
- (6)Ablation Characteristics of Material by Excimer Laser Under Different Gas Pressures and Species, International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICAREO' 92(1992) （掲載予定）