



ガラスレーザー激光 XII 号と光学素子

加藤 義章・吉田 国雄・望月 孝晏*・佐々木孝友・実野 孝久・中塚 正大
金 辺 忠**・横谷 篤志**・山中 龍彦・山中千代衛**・中井 貞雄

大阪大学レーザー核融合研究センター 〒565 吹田市山田丘 2-6

(1988年9月10日受理)

GEKKO XII Glass Laser System: Optical Components

Yoshiaki KATO, Kunio YOSHIDA, Takayasu MOCHIZUKI,* Takatomo SASAKI,
Takahisa JITSUNO, Masahiro NAKATSUKA, Tadashi KANABE,** Atsushi YOKOTANI,**
Tatsuhiko YAMANAKA, Chiyoë YAMANAKA** and Sadao NAKAI

Institute of Laser Engineering, Osaka University,
2-6, Yamadaoka, Suita 565

1. はじめに

1969年に発足した「ガラスレーザー開発研究会」を出発点として、大阪大学においてレーザー核融合研究用の高エネルギーガラスレーザー開発が段階的に進められてきた。激光I号(1970年)、激光II号(1974年)、激光IV号(1977年)¹⁾、激光MII号(1980年)^{2,3)}の開発を経て、1983年12月にガラスレーザー激光XII号システムが波長1 μm でのターゲット照射実験を開始した⁴⁾。次いで高調波変換による激光XII号の短波長化が進められ、1985年2月に波長532nmのグリーン光への変換が完成した。さらに第3高調波化による波長351nmの紫外光への変換が実施され、1988年8月より12ビームによるターゲット照射実験が開始された。

大出力ガラスレーザーにおいて最も重要なコンポーネントは、そこに使用されている多種・多数の光学素子であり、これらの線形および非線形の光学的性能がレーザーの性能を決定する。われわれは上記のレーザー開発において、国内および国外の研究機関および企業の研究

者・技術者と連絡をとりつつ、大出力ガラスレーザー用光学素子の開発を行ってきた。これらの光学素子と並行して、精密駆動機構、電源回路、電算機制御等についても大規模な技術開発を行なった。その結果激光XII号は世界で有数の性能と信頼性を有する高出力のレーザー装置として完成し、レーザー核融合に関する多数のデータを産み出し、また国際協同実験^{5,6)}にも使用されるようになった。

本稿では、激光XII号に使われている光学素子を中心に、大出力固体レーザーの光学に関する現状と問題点について報告する。

2. 激光XII号システム⁷⁾

ガラスレーザー激光XII号レーザー部の写真を図1に示す。レーザーを含む実験装置全体が、除塵かつ温度制御された実験棟内に設置されている。

まずレーザー光伝播の制御について考える。高出力レーザーの設計で最も重要な事項の一つは、増幅器からのエネルギー取出し効率を良くし、かつ光学素子のレーザー損傷を防ぐために、高強度レーザー光の空間強度分布をできるだけ均一化することである。入射レンズ、ピンホール、出射レンズの組合せより成るスペーシャルフィルター(SF)は、高次の空間周波数成分を除去するとともに、「像転送」の機能を有する⁸⁾。すなわち、SFの入射と出射レンズ間の距離を L 、焦点距離の比で定義される倍率を m とすると、入射レンズ直前の像が出射

* 現在: HOYA(株)レーザー研究所 〒196 昭島市武蔵野3-3-1

Present address: Laser Laboratory, HOYA Corp., 3-3-1, Musashino, Akishima 196

** 現在: (財)レーザー技術総合研究所 〒550 大阪市西区鞆本町1-8-4

Present address: Institute for Laser Technology, 1-8-4, Utsubo-honmachi, Nishi-ku, Osaka 550



図 1 ガラスレーザー-激光XII号レーザー部



図 6 リン酸塩レーザーガラス
左より R 50, D 100, D 200, D 350 用



図 7 白金混入レーザーガラスの内部損傷
最外円の直径は約 3mm

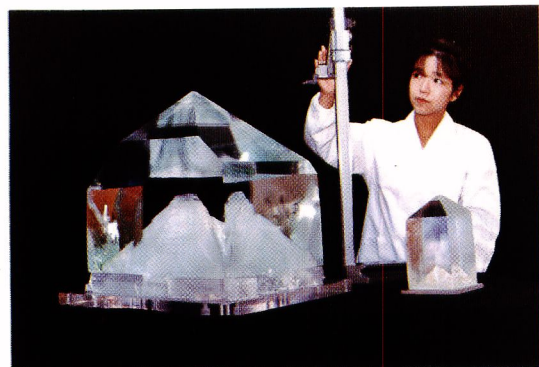


図 8 大型 KDP 単結晶

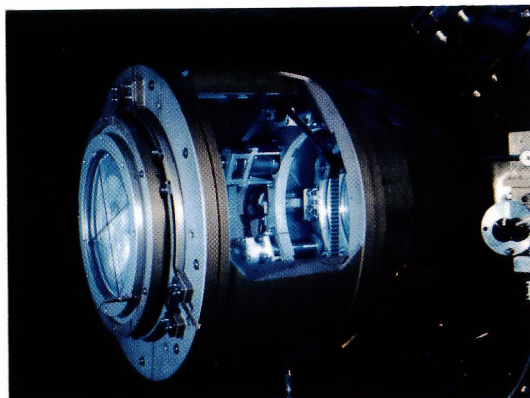


図 9 激光XII号における3倍高調波光の発生

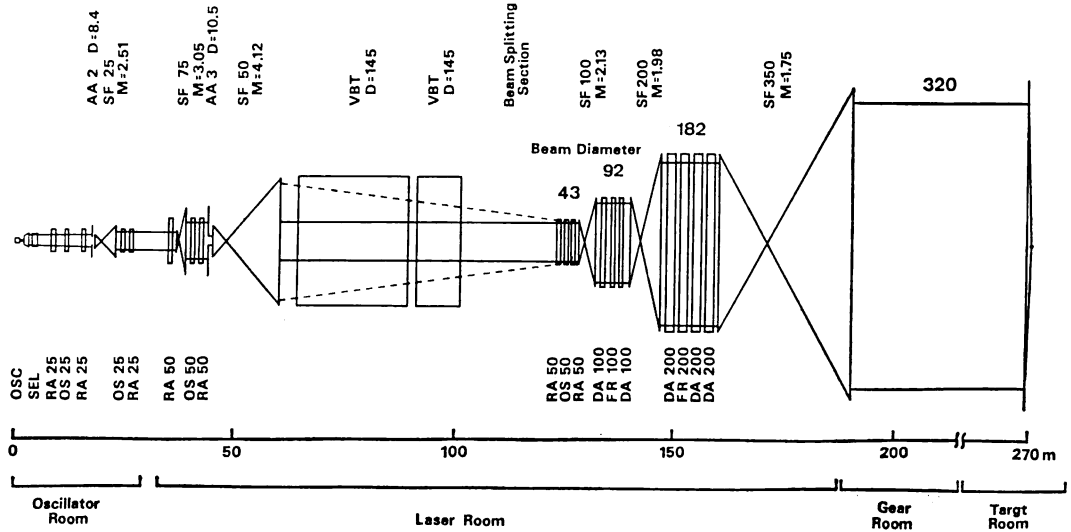


図 2 発振器からターゲットに至るレーザーのビーム径およびコンポーネントの設置位置
 OSC: 発振器, SEL: パルス抽出器, RA: ロッド増幅器, DA: ディスク増幅器, OS: 光シャッター, AA: ハードアパーチャー, SF: スペシャルフィルター, FR: フェラデー回転子, VBT: 真空ビームチューブ. 各コンポーネントの後の数字は出力開口径 (mm 単位) を示し, 実際のレーザービーム径は D の次に示されている. M は SF の倍率である.

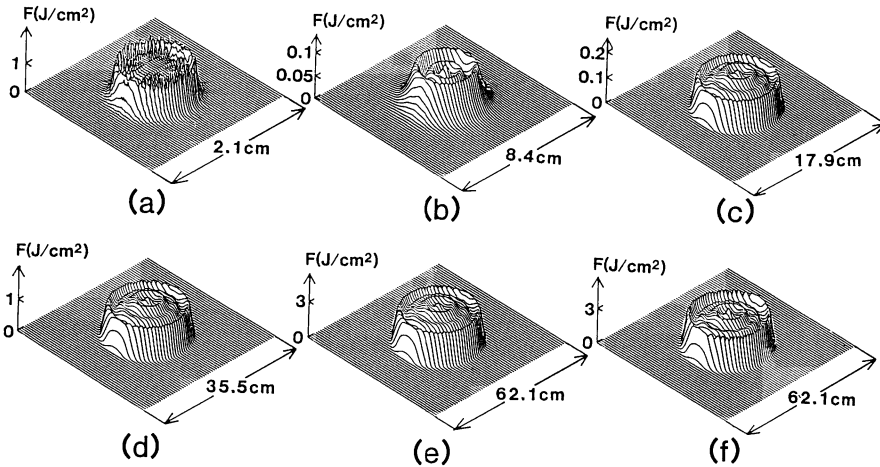


図 3 主増幅器列中のレーザー光の空間パターン計算例
 (a) SF 50 入射, (b) SF 50 出射, (c) SF 100 出射, (d) SF 200 出射, (e) SF 350 出射, (f) KDP 入射

レンズより mL の位置に結像される. そこで SF の直前で一樣な強度分布を得れば, この強度分布が上記の結像位置に再生されるので, ここに次の SF を設置することにより, 一樣な強度分布をさらに下流側へ転送することができる. 激光Ⅻ号の発振器からターゲットまで (伝播距離 270 m) の, レーザー光のビーム径と各種コンポーネントの設置位置を図 2 に示す. 前置増幅器列の途中に設置した開口 (AA 3) により, 40 mm のレーザー

光の中心部 10.5 mm をとり出し, これを 4 段の SF により集光レンズまで転送している. 実際のシステムでは, 増幅器利得の空間分布, 非線形屈折率, 小さな傷等に起因する光学的雑音源などが存在するので, これらを含めた回折伝播コードを用いてレーザー光の時間・空間分布を計算し, 各種パラメータの最適化を行なった. レーザー光伝播の計算結果の例を図 3 に示す.

激光Ⅻ号のレーザー部およびターゲット照射部の実際

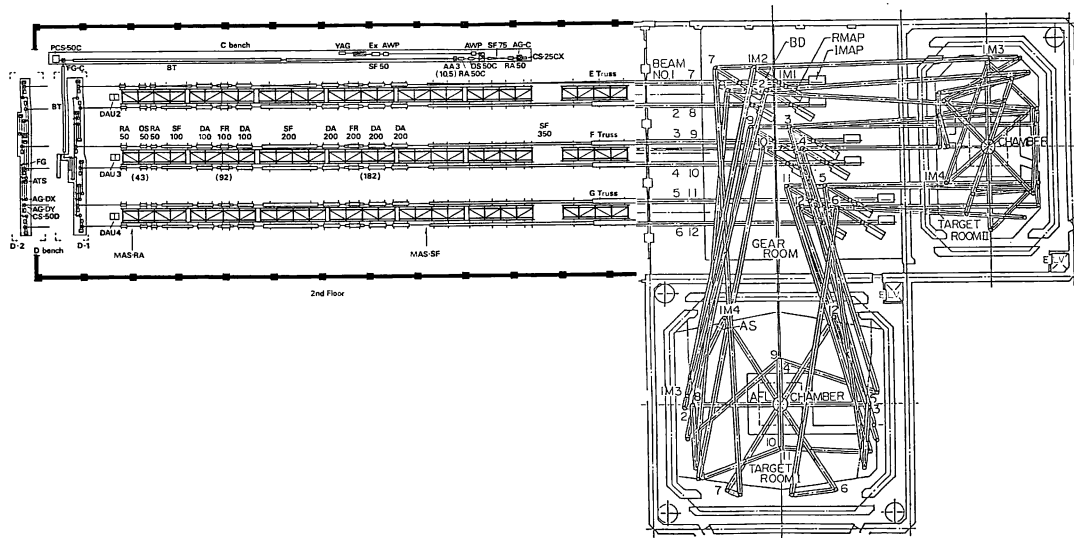


図 4 激光Ⅻ号レーザー部およびターゲット照射部の配置

の配置を、図 4 に示す。レーザー室の一端で上下 2 段、計 12 ビームに分割されたレーザー光は、主増幅器列で増幅され、最終的に直径 320 mm の出力光となる。激光Ⅻ号はレーザー稼働率を高めるため 2 個のターゲットチェンバーを有しており、レーザー光はギヤ室にて方向を切り替えられいずれかに導かれる。第 1 チェンバー(図中下側)は正 12 面体一様照射配置を有し、2 倍高調波光 (532 nm) での実験に供され、また第 2 チェンバー(図中右側)は 6 ビームを一束とした 2 方向照射配置で、現在 3 倍高調波光 (351 nm) での実験が開始されている。これらの高調波変換用の KDP (KH₂PO₄) 単結晶セルは、それぞれのターゲットチェンバーの直前に設置されている。レーザー部を出てからチェンバーに至るまでに、各ビームは大型ミラーにより 4 回 (一部ビームは 5 回) 反射される。レーザー光の自由伝播部は空気擾乱を防ぐためすべて気密のチューブでおおわれ、前置増幅器列の長光路部は、真空となっている。反射鏡等の光学素子も駆動機構を含めすべて防塵のおおいがかけられている。

レーザー光のフルエンス(単位面積当りのエネルギー)は、増幅器を通ると増加し、倍率が 1 以上の SF を通ると低下する。図 5 に激光Ⅻ号をパルス幅 1 ns, 1 ビーム当り 2.6 kJ の出力エネルギーで動作させたときのフルエンスのビーム伝播に伴う変化を示す。図中の値は平均値であり強度の空間分布を考えると局所的には 1.5 倍程度高い値となりうる。これも含めて光学素子が損傷を受けないことが必要である。激光Ⅻ号では波長 1 μm に

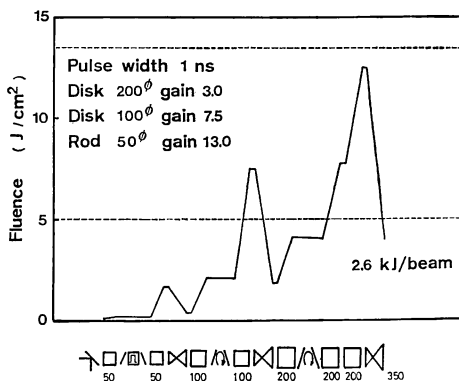


図 5 1 ビーム当り 2.6 kJ の出力で動作させたときの平均フルエンス

けるレーザー耐力を、誘電体多層膜偏光子で 4.5 J/cm²、反射鏡で 6 J/cm² 以上と規定し、フルエンスがこれらの値を超える箇所では誘電体多層膜を使用しない設計とした。

3. 激光Ⅻ号用光学素子⁹⁻¹¹⁾

激光Ⅻ号に使用されている主な光学素子を表 1 に示す。多様な大型光学素子が多数使用されていることに注意されたい。これらの多数の光学素子のなかに性能の悪い素子があると、それが装置全体の性能に影響を与える。したがって、すべての光学素子が必ず一定以上の性能を有するよう保証することが重要である。このため、各光学素子の仕様の決定とその性能の確保に関して、われわれは製造会社の協力を得つつ大きな努力を払ってき

表1 激光Ⅻ号に使用されている主な光学素子

種類	名称	材料	外形寸法	個数	付記
レーザーガラス	R25	LHG-8	25 ϕ ×380'	3	ARコート
	R50	LHG-8	50 ϕ ×380'	26	ARコート
	D100	LHG-8	214×114×24'	144	エッチクラッド
	D200	LHG-8	400×214×32'	108	エッチクラッド
ポッケルスセル	OS 25	KD*P	25 ϕ	2	
	OS 50	KD*P	50 ϕ	13	
フェラデーガラス	FR 100	FR-5	120×20'	12	ARコート
	FR 200	FR-5	220×20'	12	ARコート
多層膜偏光子	OS 25	BK-7	66×38×5'	8	
	OS 50	BK-7	120×60×7'	52	
	FR 100	BK-7	230×120×10'	48	
	FR 200	BK-7	448×240×10'	24	
SF レンズ	SF 25~SF 350	BK-7	50 ϕ ~380 ϕ (F 7~F 400)	78	一部メニスカス
大口径反射鏡	M1~M4	BK-7	最大 664 ϕ ×88'	62	
		石英	最大 592 ϕ ×80'	12	
波長変換セル	第1チェンバー	KDP	386 ϕ ×20'	12	単一結晶
		BK-7	380 ϕ ×35'	24	ARコート
	第2チェンバー	KDP	360 ϕ ×12'	24	4分割結晶
		石英	400 ϕ ×35'	24	ARコート
集光レンズ	第1チェンバー	BK-7	400 ϕ ×51', F 3	12	ARコート
	第2チェンバー	石英	400 ϕ ×60', F 3	12	ARコート
真空シールガラス	第1チェンバー	BK-7	360 ϕ ×30'	12	
プラストシールド	第1チェンバー	BK-7	185 ϕ ×5'	12	
	第2チェンバー	石英	370 ϕ ×10'	12	
フラッシュランプ	S-300		20 ϕ , アーク長 300'	174	
	S-1300		20 ϕ , アーク長 1280'	1536	

た。これらの過程で、設計・製造・検査・使用法等にわたって多くの技術開発がなされ、注目に値する発明・新案も産み出されてきた。それらを詳細にわたって記述する余裕はないが、ここでは素子別の仕様と実際に得られた性能、開発事項、問題点等について概略を述べる。

3.1 レーザーガラス

ガラスは非晶質であるがゆえに、その組成、形状、性質が多様であり、無限の可能性を秘めた材料である¹²⁾。希土類イオン、とくにNdイオンを含むレーザーガラスは、レーザー核融合用高出力パルスレーザー材料として詳しい研究がなされてきた¹³⁾。ケイ酸塩、リン酸塩等、母体ガラスの組成により、その光学的・機械的・熱的・化学的性質が大きく変化する。

われわれは1975年に開発を開始した激光Ⅳ号レーザー以来、非線形屈折率が小さく、高いエネルギー取出し効率を得られるリン酸塩レーザーガラスを使用してきた¹⁻³⁾。ケイ酸塩レーザーガラスと比べ約2倍の性能指数を有するリン酸塩レーザーガラスの大型システムへの

採用は、当初評価が確立していないことによる若干の懸念も存在したが、大きな問題は生じず結果的に非常に高性能が得られた。リン酸塩ガラスは比較的軟らかく、水溶性の大きな材料であるため、研磨加工に最初とまどったが数年で条件が確立し安定な結果が得られるようになった。

われわれが使用しているレーザーガラスは、棒状のロッドガラス(表1でR25, R50)と楕円形状のディスクガラス(D100, D200)であり、後者は大口径において使用されブリュースター角に設置されている。レーザーガラスの楕円の周囲には自然放出光を強く吸収するためのエッチコートガラスがつけられている。図6にディスクガラスの写真を示す。一番右のD350は、激光Ⅻ号増力用に開発中の口径350mmの増幅器に使用され¹⁴⁾、694×380×45'と世界最大の大きさを有するが、レーザーガラスに過大な応力を与えずに膨張係数の異なるエッチコートガラスを付着させるために多大の努力が払われた。D100では6枚、D200では3枚のディスクガラス

が一つの増幅器内に設置され、防塵、防爆用の石英管を通してキセノンフラッシュランプ (D 100 で 16 本, D 200 で 32 本) により励起される。ほこりの付着を防ぐため増幅器は密閉構造で、レーザーガラスおよびフラッシュランプはフィルターを通した乾燥チッ素により冷却される。

これらのレーザーガラスの屈折率の均一性は、ロッドガラスで 1×10^{-6} 以下、ディスクガラスで 2×10^{-6} 以下であり、加工後の透過波面収差は球面収差 $\lambda/2$ 以下、不整誤差 $\lambda/6$ 以下、収差勾配 $\lambda/12/\text{cm}$ と規定している。ここで不整誤差とは測定された収差から球面収差を差し引いた残りの収差である。球面収差は焦点移動により補正できるので、加工を容易にするために上記のように収差を分離している。これが可能になったのは画像処理機能を有するレーザー干渉計の普及による。局所的な波面の変化は集光エネルギー割合の低下をもたらすので、収差勾配も規定している。ロッドガラスのように光路長の大きな素子では、 1×10^{-6} の均質性でも上記の透過波面収差を得るには不十分であり、 $\lambda/6$ 以内の収差とするために平面研磨後の端面を干渉検査をしつつ手修正を行なった。

レーザーガラスの光学的性能に関しては 4.1 項で述べるように細かい規定が設けられ、それらを順守すべく最大限の努力が払われたため、全数にわたり十分信頼できる素子を使用することができた。しかし長期間の使用により、当初完全には把握できなかった問題も生じてきた。第 1 は励起紫外光により着色中心ができるソラリゼーションである。LHG-8 はソラリゼーション防止がなされており、われわれの使用しているフラッシュランプは紫外光吸収用にセリウムイオンを含む石英管を使用しているが、それでも長期にわたっては少しずつ着色し、ロッドガラスの場合 2000 ショット程度で増幅率が約 20% 低下する。第 2 は白金インクルージョンによるレーザー損傷であり¹⁵⁾、米国リバモア研の大型装置 NOVA はこのため当初予定性能の 1/4 程度の出力しか出せず、レーザーガラスの総入れ替えを余儀なくされた。金属状態での白金の混入によるレーザーガラスの損傷の問題は 10 年以上前に解決されたと思われていたが、最近の高フルエンス動作により、わずかな割合で混入された白金が大きな損傷を与えることが明らかになってきたのである。混入白金による損傷閾値は約 2 J/cm^2 で最初 $10 \mu\text{m}$ 程度の損傷ができるが繰返し照射によりどんどん大きくなり 1 mm 程度の大きさにまで成長する。図 7 は白金混入で生じたレーザーガラスの内部損傷 (とくに

大きく成長したもの) の写真で、特徴的な同心円状のクラックが観測されている。激光Ⅻ号では図 5 からわかるように最終段の D 200 とくにその出力部側のレーザーガラスが最も損傷を受けやすく、ディスクガラス 1 枚当たり 1~2 個の内部損傷が生じている。この割合はリバモア研の増幅器と比べ約 1/10 であり、同種のレーザーガラスでも製造方法により白金混入の割合が異なるものと思われる。高均質性の BK-7 も白金のつばで溶解した場合は同様の混入が生じる。レーザーガラス中への白金の混入は溶解条件の改善により従来の 1/5000 以下に減少され、すでに量産工程に組み入れられている。

3.2 多層膜偏光子

誘電体多層膜を 25~30 層蒸着しプリューター角に設置すると透過率が 10% 以下から 90% 以上へと大きく変化する波長が偏光に依存するため、偏光子として使用できる。良好な透過特性を大口径にわたって得るためには、大きな面積にわたって厳密に膜厚を制御して蒸着する必要があり、高度な技術を必要とする。また多層膜偏光子は多層蒸着の透過型光学素子であるので、高いレーザー耐力を得るには高反射膜と反射防止膜の双方の弱点を克服する必要がある。すなわち高反射膜では干渉による表面付近での膜内電界強度の増大が大きな要因であり、また反射防止膜では基板と蒸着膜間の界面に存在する吸収中心が主な損傷要因となる^{16,17)}。したがって多層膜偏光子では膜内電界強度を小さくするよう膜設計を行なうこと、および表面が平滑でかつ研磨材が基板内に多く残らないような基板研磨を行なうことが重要である。レーザー耐力は、波長 $1 \mu\text{m}$ 、パルス幅 1 ns において開発当初 4 J/cm^2 程度であったが、最近では 8 J/cm^2 程度にまで向上している。図 5 からわかるようにフェラデー回転子 FR 200 では平均フルエンスが 4 J/cm^2 程度になるので、 8 J/cm^2 程度のレーザー耐力がないとレーザー損傷を受けやすい。

偏光子の透過率の規定は、p 成分に対し 95% 以上、s 成分に対し 1.5% 以下であるが、良好な偏光子においてはそれぞれ 98%、0.5% 程度の値が得られている。一般に誘電体多層膜は湿度が変化すると膜物質の屈折率が変化し透過特性が変化する。多層膜偏光子は約 20 nm で透過率が 10% から 90% へと変化するが、湿度によりこの透過特性が波長軸上で並行移動し、われわれの測定では相対湿度 1% 当たり 0.37 nm 長波長側へシフトする¹⁸⁾。このため湿度変化により p、s 偏光成分の透過率が変化し消光比が低下する。激光Ⅻ号では偏光子からの部分反射光をエネルギーモニターに用いているためおよびレー

ザエネルギーの安定性を保つために、偏光子匡体に流している乾燥チ素気体中に加湿器よりの水分を加え湿度を $40 \pm 1\%$ と一定に保っている。

3.3 スペシャルフィルター

スペシャルフィルターは集光部における気体のレーザー破壊を避けるために全体が真空となっている。フィルタリングに用いるピンホールの直径は各 SF で異なるが、 $100 \mu\text{m}^{\phi} \sim$ 数 mm^{ϕ} であり、約 $800 \mu\text{m}$ 以下では合成ダイヤモンド、それ以上ではセラミックあるいは金属板を使用している。

SF 用のレンズの仕様もおのおの異なるが、SF 200 の入射レンズは通常の平凸レンズでは反射光が上流側の増幅器内に集光し損害を与えるので、メニスカスレンズを用い反射光をほぼ平行光としている。また SF 350 のレンズは非常に長焦点（入射側 10m, 出射側 17.5m）であるが、その絶対値が機械調整範囲内（約 5cm）に入る必要がある。このため面の曲率を正確に測定するために大口径用の高精度リングスフェロメータを使用した。

SF 200 および SF 350 の入射レンズのフルエンスはそれぞれ 7 J/cm^2 , 12 J/cm^2 程度になり（図 5 参照）誘電体の反射防止膜は使用できない。われわれは、光学ガラス表面を化学処理しアルカリ金属を溶出させることにより、表面の屈折率を低下させて反射防止膜を得る方法を用い、レンズ表面を低反射率・高耐力化した¹⁹⁾。反射率は 0.1% 以下、レーザー耐力は約 10 J/cm^2 であり、後者は低強度レーザー光の繰返し照射により 15 J/cm^2 程度まで向上する。この膜の表面は多孔質のため経年変化があるが、再処理により特性が回復し、何回でも再生できる利点がある。

3.4 大口径反射鏡

大口径反射鏡は、レーザー出力部よりターゲットチャンパーへと直径約 320 mm のレーザー光を導くのに使用される。入射角により 4 種の大きさを有し、最小 480^{ϕ} , 55° , 最大 664^{ϕ} , 88° である。全反射型 (RA~RD) あるいは一部透過型 (TA~TD) のコーティングを有し、後者は約 3% の透過光をエネルギーあるいはアライメントモニターに使用する。この反射鏡で最も重要な点は、反射波面精度の確保および高いレーザー耐力の実現である。激光Ⅻ号用光学素子の平面研磨にはほとんどリングポリシャー (RP) が使用されたが、とくに大口径反射鏡には直径 2 m 以上の RP が用いられ反射波面 $\lambda/6$ 程度の高精度の平面が実現された。またコーティング過程の熱サイクルで面精度が悪くならないよう、予備テストを含み十分な注意が払われた。さらにミラーマウント装

着において機械応力が反射鏡の変形を生じないように、マウントの機構、装着方法に独自の工夫がこらされている。組立て後の検査時に近傍に人間等の熱源があると面が変化する。このように環境の影響を受けやすいので、無人の恒温室に 1 日放置した後検査を行なった。実際の使用時には反射鏡は垂直から水平の間の多様な角度に設置される。この場合 BK-7 は軟らかいので最大数波長程度自重で変形する。激光Ⅻ号の場合多数回反射によりこれらの収差が相殺され、その結果としての総合収差が約 $\lambda/4$ 以内に収まることをあらかじめ計算により確認した。垂直以外の角度での収差の干渉計検査の可能性も検討したが、コストおよび時間の制約上実施しなかった。

高反射膜のレーザー損傷閾値の規定値は 6 J/cm^2 ($1 \mu\text{m}$, 1 ns, 使用入射角において) であり、製作に先立って試作した等価試料による測定値は 7.5 J/cm^2 であった。納入された完成品おのおのに添付された同時製作したダメージテスト試料および一部の完成品に対して試験を行ない、規定値以上のレーザー耐力を有することを確認した。第 2 チェンパーでは、ターゲット照射に用いる 3 倍高調波光の一部を最終折返しミラーを透過させてエネルギー計測に使用する。したがって 351 nm における透過特性が良く屈折率均一性の良い (4×10^{-6}) 石英ガラスを基板材料として用い、これに $1 \mu\text{m}$ および 351 nm におけるレーザー耐力がそれぞれ 6 J/cm^2 , 3 J/cm^2 以上のコーティングを施した。紫外光に対するレーザー耐力を向上させるためには、従来の可視~近赤外光の反射鏡に用いられていた蒸着物質よりも吸収の少ない蒸着材を使用する必要がある。このような材料は屈折率も小さいので高反射率を得るには層数を増加させかつ高精度の膜厚制御が要求される。幸いこれらの困難が克服され、351 nm でのレーザー耐力 6.5 J/cm^2 (良い場合は 9 J/cm^2) が実現され、同時に $1.05 \mu\text{m}$ でのレーザー耐力も 10 J/cm^2 (良いもので 19 J/cm^2) と非常に高い値が得られた。この反射鏡の裏面にコートされた反射防止膜も 351 nm で 3 J/cm^2 (良いもので 6.5 J/cm^2) の耐力を有する。

これらの反射鏡の使用において注意すべき第 1 の点は、ターゲット照射系からの反射光あるいは透過光による損傷である。たとえば対向レーザービームが直接あるいはターゲット周囲を通過して逆進すると、光学系の配置によっては反射鏡付近に集光され損傷を与えることがある。高調波光を使用する場合は未変換の基本波も同時に存在するので、これらの複数の波長に対して考慮す

る。第2の点は激光Ⅻ号におけるように一部透過光をエネルギーモニターに使用する場合、その透過率の安定性を保証する必要がある。球形ターゲットの一樣圧縮を行なうために、12ビームの相対的なエネルギーバランスを3%以内に保つことが要求される。このためにはカロリメータを用いたエネルギー値校正ショットを各実験シリーズごとに多数回行ない、透過率の湿度変化も含め正しいエネルギー値の算出を行なっている。

3.5 波長変換セル

レーザー光はプラズマ中において遮断密度 (すなわちプラズマ振動数がレーザー光の周波数と等しい密度) までしか伝播できず、遮断密度は波長の2乗に反比例する。したがってレーザー光の波長が長いと、低密度領域で吸収されプラズマの温度が高くなりすぎ、高エネルギー電子がターゲット内部を加熱し高密度圧縮を妨げる。波長 $1\ \mu\text{m}$ のレーザー光を非線形光学結晶を用いて短波長コヒーレント光に変換して照射すると、プラズマ中での吸収率が高くなり高エネルギー電子によるターゲットの予備加熱も抑えられる。これらの理由から、激光Ⅻ号の第1チェンバーでは532 nmの第2高調波、第2チェンバーでは351 nmの第3高調波への変換を行なった。高調波変換には大型の結晶を育成できるKDP単結晶を用いた。第2高調波発生には1枚、第3高調波には2枚の大口徑KDPを必要とする。後者では1枚目の結晶で基本波の一部を2倍波に変換し、2枚目の結晶で基本波と2倍波を混合して3倍波を発生させる。図8に大阪大学で成長させた大型KDP単結晶を示す²⁰⁾。

第1チェンバー用には、Type-II変換用の結晶角を有する直径386 mm、厚さ20 mmのKDP単結晶1枚を用いた。結晶表面はダイヤモンド研削加工により、中心部33 cm以内において平行度10秒以内、平面の不整誤差 λ 以内、透過波面収差 $\lambda/4$ 以内の加工がされた。KDPは潮解性があるので、BK-7の窓ガラスを両面に有する結晶セル内に収め、KDPと窓ガラスの間(間隔100 μm)に屈折率整合液体を満す。屈折率整合液体はその光学的・化学的性質に加え、誘導ラマン散乱を起こしにくい物質(デカリン)を選択し使用した。窓ガラスには、入射側は基本波、出射側は基本波と2倍波に対する反射防止膜が誘電体多層膜により施されている。

第2チェンバー用には、大口徑の単一結晶の代わりに4分円の四つの結晶により1枚の結晶を構成し、これを2枚直列に並べる方式を用いた²¹⁾。この場合小さな結晶が使用できるため結晶コストは低下するが、4分割結晶を同一角度に加工する必要がある。組合せ後の結晶の直

径は360 mm、厚さは12 mmである。4分割の各結晶は同一組内で厚さが $1\ \mu\text{m}$ 以内、結晶角度が第1結晶(2倍波用)で12秒、第2結晶(3倍波用)で6秒以内に加工された。小型のNd:YAGレーザーを用いて標準試料と被検試料の高調波変換効率を結晶の傾きの関数として測定し、被検試料の結晶面の光学軸からの傾きを算出し、それをフィードバックしてさらに結晶を加工する方法で所定の精度内に収めた。この繰返しは1~2回で収束した。2組の結晶は100 μm のスペーサを介して前記と同様窓ガラスを両面に有するセル内に収められ、屈折率整合液体(プロピルカーボネート)で満たされる。液体内に気泡が残らないように、また結晶にストレスを与えないでかつ良好な透過波面を得るように、結晶セルの構造と組立方式には細心の注意が払われている。3倍高調波用の窓材には石英ガラスが使用され、入射側には基本波、出射側には3倍波に対する反射防止膜が施されている。入射側は大口徑反射鏡と同様の高耐力の誘電体多層膜、出射側には後述(3.6項)の多孔性反射防止膜を使用している。

図9はKDPセルを角度調整機能を有する駆動機構にとりつけ3倍波光を発生させた瞬間である。図10の曲線は3倍高調波光への変換効率のレーザー強度依存性で、最適整合角からの光軸ずれをパラメータとして表わしている。図中の白丸が測定値で75%の変換効率を得られており、4分割の各結晶および結晶セル全体の角度が100 μrad (20秒)以内に収まっていることがわかる。位相整合角は温度によって変化するので、図9のハウジング全体を超断熱構造のアルミ布でおおい、温度を0.01 $^{\circ}\text{C}$ の精度で測定して温度変化をモニターしている。

3.6 ターゲット照射光学系

ターゲット照射用の光学系は、第1チェンバーでは集

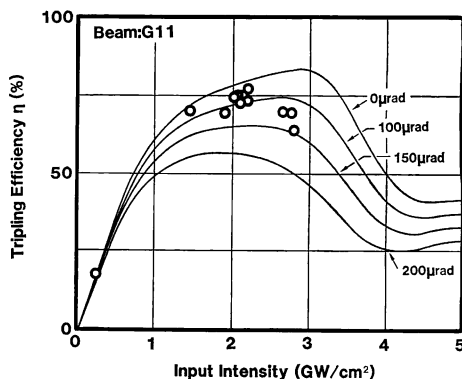


図10 3倍高調波光への変換効率のレーザー強度依存性

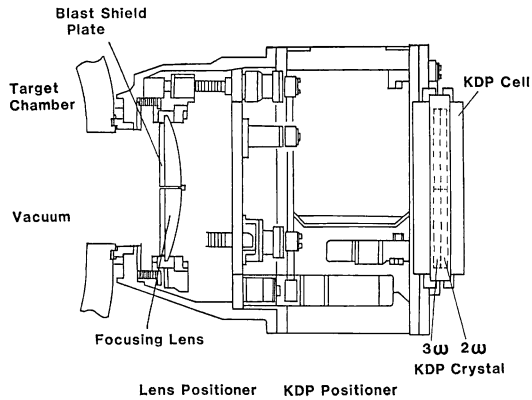


図11 第2チェンバーにおけるターゲット照射光学系

光レンズ、真空シールドガラス、プラストシールドガラスにより構成される。第2チェンバーでは真空シールドを兼ねた集光レンズとプラストシールドガラスより成る。第2チェンバーの光学系の配置を図11に示す。集光レンズは高次の非球面を入射側に有する平凸レンズであり、第1、第2チェンバー用はそれぞれ2倍波、3倍波に対して収差を最小にする設計となっている。レンズの焦点距離(バックフォーカス)は約980mmである。実際にはターゲット表面上での照射均一性が重要なので、焦点より若干レンズ側での強度分布を一様とすることを重視している。高次非球面を用いているため、上記以外の波長、たとえば基本波においても収差を比較的小さくできる。レンズの検査にはHe-Neレーザーを光源とするフィゾー干渉計を用い、被検レンズで作られた収束球面波を参照球面で反射させて被検レンズに戻すことにより、透過波面を計測した。透過波面収差は、 $\lambda/3$ の規定値に対し、第1チェンバー、第2チェンバー用ともに $\lambda/4$ 以内の値が得られている。図12は第2チェンバー用レンズの透過波面の検査結果であり、有効開口内において $\lambda/10$ 以内の不整誤差と約 $\lambda/30/\text{cm}$ の収差勾配が得られている。収差が非常に少ないことに加えて干渉縞のリップルが小さいことも重要である。非球面レンズは数値制御研削機を用いて輪帯状に加工していくが、輪帯間に角度の不連続を生じやすく、これが残るとこの部分の透過光の方向が曲げられ、最小錯乱円内への集光割合が低下する。

高強度レーザー光用集光光学系における最大の問題は、ゴーストフォーカスによる光学素子の破壊である。図13は第1チェンバー用光学系における高次の反射光の光線追跡である。レンズ内およびレンズ外で多数の集光点ができており、とくに光軸上への集光は高次反射で

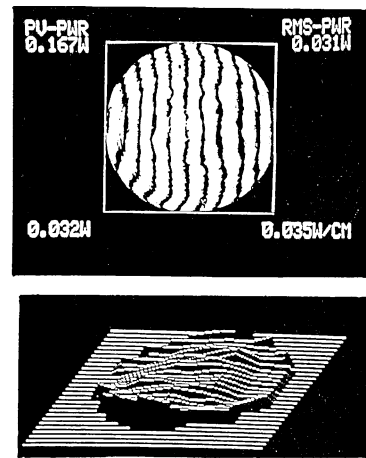


図12 第2チェンバー用石英ガラス製非球面レンズの透過波面
上図：干渉写真，下図：その3次元表示

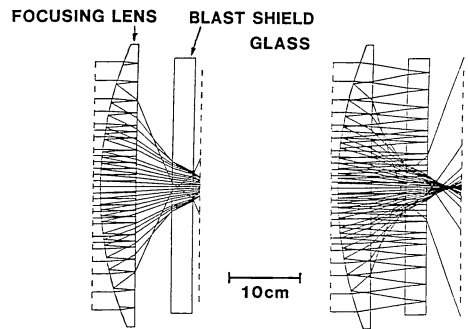


図13 第1チェンバー用光学系におけるゴーストフォーカス計算例
左：レンズ表面での反射，右：レンズおよび真空シールドガラス表面での反射

あっても非常に強度が大きくなりその位置に置かれた光学素子に損傷を与える。明るいレンズにおいては必ずレンズの光軸上にゴーストフォーカスが生じるので、レンズ中心部をくりぬき損傷をあらかじめ避ける。この場合真空保持ができないため、第1チェンバーではレンズ後面約3cmに真空シールドガラスを設けている。この位置においてもレンズ外部からの光線のゴーストフォーカスが生じるので、真空シールドガラス中心部表面に直径25mmのすりガラスを貼り付けている。第2チェンバーでは、この第1チェンバーでの経験をもとに、集光レンズに直径8mmの中心穴をあけ、その入射側に直径12mmのすりガラスの栓を付け真空シールドをしている(図11参照)。リバモア研では、中心部に穴をあける代わりに、入射側表面に半径80mm、幅20mm、深さ15mmの円

周形の溝を設け中心へのゴーストフォーカスを防いでいるが、激光Ⅻ号のレンズはこれより明るいいため、この方法ではゴーストフォーカスを抑えられない。

集光光学系には短波長においてもレーザー耐力の高い反射防止膜が要求され、通常の誘電体多層膜では対処できない。第1チャンバーの集光系はBK-7であるので、3.3項に記した化学処理が可能である。製作時にこの技術は確立していなかったため無コートで使用開始したが、その後真空シールガラスに対して化学処理を行ない、集光レンズに対しても実施する予定である。第2チャンバーの石英ガラスの集光光学系には、吉田が発明した多孔性 SiO₂ 反射防止膜を使用している²²⁾。NaF と SiO₂ を同時に基板上に蒸着し、この膜を超純水で処理して NaF を選択的に溶出させ、多孔性 SiO₂ 膜を形成するもので、特徴は 351 nm においてもレーザー耐力が 6 J/cm² 以上 (小エネルギー多重照射により 10 J/cm² 以上に向上) と高いこと、および中心波長で 0.2% かつ約 300 nm の広帯域にわたって 1% 以下の低反射率が得られることである。経時変化により若干の反射率の増加が見られるが、簡単な再処理により低反射率が回復できる。また石英基板の表面状態を損わずに、エッチングにより AR 膜を除去し再コートすることが可能である。

高強度レーザー光で照射されたターゲットは、プラズマ化してチャンバー内を飛散し、光学素子の表面にも付着する。高速の粒子はガラス表面内に埋め込まれた形となり除去は困難である。このため容易に交換できるプラスチックシールドガラスを集光光学系とターゲットの間に入れる。第1チャンバーでは、比較的安価に入手できる小口径のBK-7をターゲット近く(45 cm)に置き、表面の透過率が低下してきたら交換する。しかしこの位置では、プラスチックシールドガラスの反射光が集光光学系に損傷を起こすため、真空シールガラスの中心部を保護する必要がある。第2チャンバーでは、このため集光レンズにほとんど接してプラスチックシールドを設置し、ゴーストフォーカスを含めレーザー損傷を受けない配置としている。ターゲットからの距離が遠いので比較的プラスチックによる汚れの進行は遅いが、それでも年1~2回交換、再研磨を必要とする。

光学素子の一部に損傷、汚れ等があると、その下流側に回折による集光点(ポアソン輝点)ができる。高出力レーザーではこれによるレーザー損傷が発生しやすい。上記のゴーストフォーカスも含めシステム全体にわたる注意深い設計と運用が必要とされる。

KDP セルおよび集光レンズはそれぞれ独立の精密駆

動機構により位置設定をされる。たとえばチャンパー中心からはずれた位置へ高調波光を集光するには、最終の大口径反射鏡と KDP の角度を変え、レンズの軸方向への送りを行なう。これらは各駆動機構をコンピュータにより計算値分だけ駆動することにより実施される。

3.7 フラッシュランプ

激光Ⅳ号装置開発当初の最大の問題の一つは、励起用 Xe フラッシュランプの石英管の早期破壊であった。われわれはフラッシュランプの早期破壊が、電極付近における石英管の外側表面に残留する張力と関係が深いことを明らかにした²³⁾。この問題を契機として、石英管の内部応力、放電路とトリガー線との関係、電極材料、電極部の構造等に関し改良を加えた。その結果受入れ検査においてときどき混入する不良品を除外しておけば、フラッシュランプに起因する事故はほとんどない状態となった。なお激光Ⅻ号では、本ショットの前に小エネルギーでの予備放電を行ない、放電電流を検知することにより異常ランプを検出するシステムを有しており、多数のフラッシュランプの状況把握に大きな役割を果たしている。

4. 光学素子の仕様・検査・洗浄

ここでは光学素子単体にかかわる事項について簡単に述べる。

4.1 光学素子の仕様と検査

光学工業は長い歴史を有するが、レーザー用の光学素子の仕様および検査方法に関しては必ずしも確立した状態とはなっていない。激光Ⅻ号用の光学素子の場合には、形状、最終性能に加えて、素材、研磨、蒸着のそれぞれに関する性能、加工方法、検査方法を規定している。また各工程間における光学素子の変化(機械的損傷、ヤケ等の化学的変化)を防ぐために、保護膜の塗布、梱包方法、輸送箱等についても規定している。

素材に関しては、材質、残留歪、減衰係数、泡と不純物、脈理等を規定している。研磨に関しては、波面収差とその勾配、スクラッチとディグ、エッジチップ、周辺部の加工、マーキング等を指定している。コーティングは、反射・透過特性、レーザー耐力、加工による面変形、スクラッチ・ディグの増加等を規定する。レーザー干渉計の普及により、光学素子の加工とその検査に関し、ここ十年余りで革命的ともいえる進歩が生じた。これにより小口径から大口径の光学素子にわたって材質の均一性が保証され、平面、球面、非球面の加工が高精度で行なわれるようになった。上記の規定項目のなかでス

クラッチ・ディグの規定は目視検査を必要とするためとかく無視されがちであるが、実際には取扱い中に発生しやすく、受渡し間のトラブル要因になりやすい。われわれは各受渡し段階で全検査項目に関する全数検査を行ない、検査成績書を添えて次の工程へまわす方式を実施した。なおスクラッチ・ディグに関しては通常 MIL 規格が使われ、われわれもこれに準拠したが、MIL 規格自体が一般光学部品を対象に作られたもので規定にあいまいな点が多く、外国の光学会社も含めて各契約ごとにその内容を再定義する必要があった。開発当初、レーザーガラスの検査のためにスクラッチの限度見本を作り、これを基準として国内の立会い検査を行なった。外国企業の場合もこちらから検査員が出向き、向こうの検査基準との対応を確認した。

レーザー耐力の測定は、通常の光学会社では実施しない。素材、研磨、コーティングに関し同一の工程を経て作った小型の検査試料を必ず最終製品と一緒に製作し、これを大阪大学のレーザー耐力測定装置を用いて検査した。レーザー耐力は、波長、パルス波形、入射方向、入射角、偏光方向等に依存するので、仕様で指定したものと同一条件で検査を行なう必要がある。レーザー耐力の向上には非常に長期間にわたるテストの繰返しが必要であったが、専用の検査装置がこのために有効に機能した。

4.2 光学素子の洗浄

光学素子表面に汚れが付着していると、高強度レーザー光あるいはフラッシュランプ光により加熱され、永久的な表面破壊を生じる。このため、光学素子およびそれを保持する筐体内部をあらかじめ洗浄し、かつ使用中でも汚れの進行に応じて定期洗浄を行なう必要がある。

たとえばディスクガラスの場合、表面検査→手拭き洗浄→酸素プラズマ洗浄→ダスト検査→組立てという手順をふむ。筐体となる金属類は、手拭き洗浄→スプレー洗浄→ダストの採取・カウント→組立てとなる¹⁰⁾。これらの工程において作業環境と溶媒の純度がとくに重要である。激光Ⅻ号は、クラス10000のレーザー室に隣接して、クラス100のクリーンルームが設けられており、ほぼ理想的な環境で作業を実施できる。市販の溶媒は特級、試薬級等で差はあるがいずれもかなりの不揮発性不純物を含んでいるので、再蒸留して手拭き洗浄等に使用する必要がある。スプレー洗浄とは、ノズルから溶液を高速で噴出して洗浄に使用するもので、以前はフロンを使用していたが汚れが残ることがわかり、現在は超純

水を使用している。これによりディスク増幅器の洗浄期間を、以前の600ショットごとから1000ショットごと(約1.5年分に相当)に、ロッド増幅器で800ショットごとから1200ショットごとに伸ばすことができた。

5. む す び

本稿では光学素子に関し、実際的な技術的問題を中心に述べた。これらの問題は、レーザー以外の大型光学システム(たとえば天体望遠鏡等)と共通点もあるものと思われる。詳細に関しては参考文献を参照され、あるいは直接問い合わせいただきたい。

高出力ガラスレーザーの光学に関する事項としては、光学素子以外に、光学素子を保持し調整する精密駆動機構、レーザー部およびターゲット上への高精度アライメント²⁴⁾、レーザーの動作特性およびアライメント等のモニター方法、レーザー光の伝播およびターゲットへの集光を制御する方法²⁵⁾、レーザー光のパルス波形の制御等、多岐にわたる。これらに関しては別の機会に報告したい。

この稿からも推測いただけるように、高出力レーザーの設計・製作・運用に当たっては非常に多くの要素にわたり細かい注意が必要である。技術的事項以外に、予算、時間、人員等の問題が実際には非常に大きな要因となる。激光Ⅻ号の製作に当たっては、幸い多方面の方々から積極的な協力が得られ、光学素子を含めシステム全体として性能および信頼性の高い装置ができ、実験に定常的に使用することができた。

これからの開発項目として、激光Ⅻ号の100kJ級への増力、および1MJ級レーザーの開発等が挙げられる²⁶⁾。これらを開発するための技術的基盤は確立しているが、とくに後者の実現のためには、コスト低減のための効率の向上とシステムの簡素化が必要とされている。他方、レーザー核融合以外の諸応用分野においては、1パルス10J級の高繰返し短パルスレーザーの開発が望まれている²⁷⁾。高出力レーザーダイオードの進歩により、高効率固体レーザー実現の可能性も高くなってきた。これからの展開が楽しみである。

最後に激光Ⅻ号、とくにその光学素子の開発にご協力いただいた日本電気、HOYA、キャノン、昭和光機製造、OHARA、日本石英硝子、岡本光学、御幣島化学、Zygo、OCLI、Tinsley、Cleveland Crystals、Rocketdyne、Spectra Physicsを始め関係各社に謝意を表します。

文 献

- 1) Y. Kato, J. Kuroda, Y. Mizumoto, K. Yamada, K. Yoshida and C. Yamanaka: "High power, high intensity, and extremely short light source of glass laser system 'GEKKO IV,'" *Proc. 13th International Conf. on High Speed Photography and Photonics* (Tokyo, 1973) p. 233.
- 2) Y. Kato, K. Yoshida, J. Kuroda and C. Yamanaka: "3.4-TW performance of a Nd: phosphate glass laser with output aperture of 20 cm," *Appl. Phys. Lett.*, **38** (1981) 72.
- 3) C. Yamanaka, Y. Kato, Y. Izawa, K. Yoshida, T. Yamanaka, T. Sasaki, M. Nakatsuka, T. Mochizuki, J. Kuroda and S. Nakai: "Nd-doped phosphate glass laser systems for laser-fusion research," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17** (1981) 1639.
- 4) 山中千代衛, 加藤義章: "ガラスレーザー「激光Ⅻ号」の初期成果", *日本原子力学会誌*, **26** (1984) 362.
- 5) T. Mochizuki, T. Yabe, H. Azechi, K. Tanaka, T. Boehly, N. Miyanaga, H. Nishimura, S. Ido, M. Yamanaka, K. Nishihara, T. Norimatsu, T. Jitsuno, M. Nakatsuka, K. Mima, S. Nakai, C. Yamanaka, R. Sigel, G. D. Tsakiris, K. Eidmann, P. Hermann, R. Pakula, P. Sachsenmaier, S. Sakabe and S. Witkowski: "X-ray confinement in a laser heated cavity," *Nuclear Fusion, Suppl.*, **3** (1987) 25.
- 6) Y. Kato, M. Key, M. Yamanaka, H. Daido, T. Tachi, H. Nishimura, H. Shiraga, G. Tallents, P. R. Herman, E. Miura, S. J. Rose, H. Takabe, T. Jitsuno, M. Takagi, S. Nakai and C. Yamanaka: "Extension of recombining plasma laser with Balmer- α transitions to shorter wavelengths," *XVI Int. Quantum Electronics Conf.*, Tokyo, July 18-21, 1988.
- 7) 山中千代衛: "激光Ⅻ号ガラスレーザーシステム", *レーザー研究*, **11** (1983) 586.
- 8) J. T. Hunt, J. A. Glaze, W. W. Simmons and P. A. Renard: "Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging," *Appl. Opt.*, **17** (1978) 2053.
- 9) 加藤義章: "レーザー用ガラスの精密加工", *光学材料部品の加工技術*, 今中 治編 (総合技術センター, 東京, 1983) pp. 201-214.
- 10) 吉田国雄, 加藤義章: "大出力ガラスレーザーの光学", *光学*, **14** (1985) 175.
- 11) 吉田国雄, 佐柳和男: "光学部品の特性", *レーザー研究*, **14** (1986) 831.
- 12) 泉谷徹郎: *光学ガラス* (共立出版, 東京, 1984).
- 13) S. E. Stokowski: "Laser glass; an engineered material," *Lasers, Spectroscopy and New Ideas*, ed. W. M. Yen and M. D. Levenson (Springer-Verlag, Berlin, 1987) pp. 47-88.
- 14) 金辺 忠, 実野孝久, 中塚正大, 中井貞雄, 山中千代衛: "350 mm ϕ ディスク増幅器の開発", *電子情報通信学会, OQE* **87-63** (1987) 113.
- 15) 吉田国雄: "高出力レーザー用光学部品; 高耐力化", *光学技術コンタクト*, **26** (1988) 566.
- 16) Y. Nose, Y. Kato, K. Yoshida and C. Yamanaka: "Dependence of laser-induced damage threshold of anti-reflection coatings on substrate surface roughness," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26** (1987) 1256.
- 17) 吉田国雄, 大谷 実: "高出力レーザー用薄膜の最近の進歩", *レーザー研究*, **16** (1988) 3.
- 18) 金辺 忠, 中塚正大: "核融合用レーザーにおける光計測技術", *レーザー研究*, **14** (1986) 815.
- 19) 吉田国雄: "化学処理による高耐力反射防止膜の製作技術", *レーザー研究*, **14** (1986) 870.
- 20) 横谷篤至, 小出 博, 山室幸三, 佐々木孝友, 山中龍彦, 山中千代衛: "レーザー核融合用大型 KDP 単結晶の育成", *レーザー研究*, **11** (1983) 162.
- 21) 佐々木孝友, 横谷篤至, 山中龍彦, 山中千代衛: "三倍高調波発生用大口径アレー式 KDP セルの製作", *レーザー研究*, **13** (1985) 500.
- 22) K. Yoshida, H. Yoshida, Y. Kato and C. Yamanaka: "Highly damage resistant, broad band, hard anti-reflection coating for high power lasers in the ultraviolet to near-infrared wavelength regions," *Appl. Phys. Lett.*, **47** (1985) 911.
- 23) K. Yoshida, Y. Kato, H. Yoshida and C. Yamanaka: "Prediction of flash lamp explosion by stress measurements," *Rev. Sci. Instrum.*, **55** (1984) 1415.
- 24) 金辺 忠, 山田 正, 大谷俊哉, 中塚正大, 加藤義章, 山中千代衛: "ガラスレーザー装置激光MⅡ号のレーザー列自動光軸調整システムの開発", *電学誌C*, **107-C** (1987) 455.
- 25) Y. Kato, K. Mima, N. Miyanaga, S. Arinaga, Y. Kitagawa, M. Nakatsuka and C. Yamanaka: "Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression," *Phys. Rev. Lett.*, **53** (1984) 1057.
- 26) 中塚正大, 金辺 忠, 山中千代衛: "高出力ガラスレーザーの将来展望", *電子通信学会, OQE* **86-55** (1986) 71.
- 27) 金辺 忠, 中塚正大: "固体レーザーの高出力化", *レーザー研究*, **15** (1987) 332.