レーザー解説

放電管励起色素レーザーの高出力化

十文字正憲*・長峰信雄*・内山晴夫**

(1989年1月13日 受理)

Flashlamp-Pumped High-Energy Dye Lasers

Masanori JYUMONJI*, Nobuo NAGAMINE* and Haruo UCHIYAMA**

(Received January 13, 1989)

Powerful and tunable lasers in the visible region are expected to be realized in the very near future, for the purpose of laser isotope separation and applications of tunable dye lasers, not only in our country but also in the United States and Europe. However, it is not so easy to realize both high power or energy and good tunability.

In this paper, we wish to report an investigation of various types of high-power tunable dye lasers which can be used as a pumping source for atomic uranium isotope enrichment, and high power techniques of dye laser apparatus, especially flashlamp-pumped high energy dye lasers developed in our laboratory.

Key Words: Dye laser, Linear flashlamp, Laser isotope separation.

1. はじめに

現在、わが国では総発電量の30%以上が原子力であつており、10年後には35%をまかなうことを目標に原子力発電の計画が推進されている。燃料の ^{235}U を得るには、0.7%の天然ウランを発電に適した2~4%に濃縮する必要がある、パイロットプラントが動力炉・核燃料開発事業団の手により岡山県人形峠で運転中であり、そこで独自に開発された技術を用いて、1991年頃に運転開始を目指した遠心分離法による

濃縮工場が、民間会社日本原燃サービスによって青森県六ヶ所村に建設されることもその計画の一端である。このような情勢下において、丁度4年前、米エネルギー省は21世紀に向けたウラン濃縮戦略の軌道修正を発表し、その中で、推進中の大規模な遠心分離工場の建設を中止し、レーザー法^{1~3)}を採用するという決定を行っており、このことが国内に大きな反響を呼んだことは記憶に新しいところである。

レーザー法のメリットとして、現在のガス拡散法や遠心分離法に比べて高効率であること、

* 八戸工業大学電気工学科 (〒031 八戸市妙大開88-1)

** 八戸工業大学エネルギー工学科 (同上)

* Electrical Engineering, Hachinohe Institute of Technology (88-1, Ohbiraki, Myo, Hachinohe 031),

** Energy Engineering, Hachinohe Institute of Technology. (88-1, Ohbiraki, Myo, Hachinohe 031)

Table I Characteristics of various kinds of high energy dye lasers.

	励起方式	励起光源の種類	励起エネルギー Ep(J) or Pp(W)	色素レーザー出力 Eo(J) or Po(W)	パルス幅 τ_L	最大繰り 返し数	最大平均 出力 Po(W)	効率 η (%)
パ ル ス	レーザー励起	銅蒸気レーザー	18mJ (110W)	3.6mJ (20W)	20nS	6KHz	20	0.02~0.12
		Nd ³⁺ YAG SH	0.3J	60mJ	25nS	100Hz	6	0.18~0.24
		エキシマレーザー	50J	10J	85nS	—	—	0.24
	放電管励起	同軸型放電管	50KJ	400J	4 μ S	4PPM	27	0.8
		直管型放電管	10KJ	110J	10 μ S	1Hz	110	1.1
CW	レーザー励起	Ar ⁺ レーザー	10W	—	—	CW	1	—

省電力であること、メカニカルな回転部分がなく長寿命であること、濃縮ウランの価格を半減できること等の点が指摘されており、国内では日本原子力研究所が「原子法」、理化学研究所が「分子法」の研究開発を進めている。

ここでは、原子法に用いる色素レーザーの主な励起方式について分類し、利害得失を明らかにするとともに、我々が1982年にスタートさせ、現在ほぼ目標を達成した「ウラン濃縮用高出力色素レーザーの開発」に関する研究成果の一端を述べる事とする。

2. 色素レーザーの種類と特長

これまで、原子法によるレーザー・ウラン濃縮用に考えられている色素レーザーをまとめて Table I に示す。大きく分けて、レーザー励起と放電管励起の2種類ある。米国では銅蒸気レーザー励起が本命視されているが、これは、高速くり返し発振が可能な事、スペクトル純度が比較的良好であるという事であろう。ただし、銅蒸気レーザー自体が複雑で、高電圧や特殊な高圧スイッチが必要なことなどから、Nd³⁺YAG や Yd³⁺ ガラスレーザーのSH励起などと比較して有利かは即断は早いと思われる。また、出力が小さい事も泣き所であり、あまりに多数の銅蒸気レーザーの並列運転には不安が残る。

1発あたりのエネルギーでは放電管励起が群を抜いている。特に、同軸型放電管励起では既に400J/pulseという大出力が、米ソで実現されている。問題点は、ランプの寿命と、破損し

た場合色素が飛び散る心配もあり、またアライメントが全てやり直しになるという事もある。米国では銅蒸気レーザー励起に敗退したものと思われる。

直管型放電管励起は、初期にはあまり高出力は得られないと考えられていたが、その後筆者らの努力によって着実に出力を増し、現在110J/pulseの大出力が得られている。

また、フランスでも最近40J/pulseを得ている⁶⁾。このように、直管型放電管励起は、1発あたりの出力は同軸型放電管励起のそれに迫り、くり返しも現在、最大100Hzと高速化しているし、メンテナンスも楽であり、ビームクオリティ、チューナビリティも、銅蒸気レーザー励起より優れているので、次世代ウラン濃縮レーザーとして大いに期待できる。

3. 放電管励起色素レーザーの高出力化

3.1 高出力色素レーザーの技術的問題点

前章で述べた検討結果に基づき、我々は、可視域高出力波長可変レーザーとして、直管型放電管励起色素レーザー装置が最も適当であると考え、過去数年間かけて、高出力色素レーザーの試作・開発を行った。

色素レーザーは近年比較的容易に発振させる事が出来るようになったとは言え、実用的な可変波長レーザーを実現するのは、それほど容易な事ではない。色素レーザーの励起にはパルス幅数 μ s以下の強力な放電光が必要である^{7~11)}。

このようなフラッシュランプは、固体レーザ

Fig.1 Diagram of the high energy coaxial dye laser assembled at the Hachinohe Institute of Technology.
a, Schematic diagram of laser head
b, Diagram of electrical circuit.

ーのそれと比べ、著しく寿命が短かく、製作が困難となる^{12, 13)}。

また、後述するように大入力になるほど色素セル内の溶液の熱的歪みが激しくなり、レーザー作用を阻害する。

さらに、色素レーザーは、発振スペクトルは百数十Åにも及ぶため、狭帯域化が必要である。高出力化と狭帯域化は相反する要求であり、ス

ペクトル純度が $0.01\text{\AA}$ 以下、平均出力 10kW というような実用装置を実現するのはかなり難しい事は容易に想像できよう。

3.2 同軸型放電管励起色素レーザーの現状

この方式は最初、P. P. Sorokinによって開発されたものである²⁴⁾。形状は、Fig.1に示すようになっており²⁵⁾、励起光パルス幅が狭くできる事、ランプとセルの光学的結合が良好な事が特長である。このため効率のよい発振が可能である。欠点としては、低入力ではフィラメント状の放電のためスポットダングシングが起ること、くり返しを上げ難いこと、破損したときアライメントがくずれてしまう事などである。

ランプ入力小さいときは、ランプ寸法、封入ガス圧によって特性が大きく変化する事が知られており、入力 100J 程度の場合は、Furumotoらが最適設計法を明らかにしている²⁶⁾。

最大出力は、既に1972年にソ連のBaltakovらが、 400J/pulse を実現しており、米国も10年後ほぼ同様の装置(但し、駆動回路にマルクス

Table II Characteristics of coaxial dye lasers.

OUTPUT E _o (J)	INPUT E _i (J)	LAMP SIZE	CAPASITOR (μF/KV)	$\tau d(\text{LASER}) \mu\text{S}$ $\tau d(\text{LAMP}) \mu\text{S}$	OUTPUT MIRROR	DYE CELL SIZE	EFFICIE- NCY η	Ref
2.5	525	—	—	0.5	—	15× 225	0.83	1)
5.8	625	—	$\frac{2}{25}$	$\frac{1}{1.6}$	—	15× 240	0.8	2)
6.8	600	(CANDELA CL625)	$\frac{1.5}{28}$	$\frac{0.6}{2}$	29	—	1.1	3)
110	35k	28×48 ×450	$\frac{120}{24}$	$\frac{20}{50}$	8	28× 450	0.31	4)
400	50k	70×90 ×520	—	$\frac{10}{25}$	8	60× 600	0.8	5)
400	28k	—	—	4	—	—	1.43	6)

1) Phase-R Campany DL 2100B

2) T.Morrow and H.T.W.Price: Opt. Commun. 10 (1979) P.133

3) J.Bunkenburg: Rev. Sci. Instr. 43 (1973) P.1611

4) F.N.Baltakov et al.: Soviet Physics-Technical Physics 17 (1973) P.1161

5) F.N.Baltakov et al.: JETP lett. 19 (1974) P.174

6) Phase-R Campany DL 9404

バンク駆動回路を用いている。) で400Jを達成している。

装置は、入力100J級のものを単にスケールアップしたものであるが、実用上ランプ寿命や、ランプが破損したときの処置に心配が残る。

参考までに、これまで報告された主な高出力同軸型放電管励起色素レーザー装置の一覧表をTable IIに示しておく。

3.3 直管型放電管励起色素レーザーの高出力化

様々な直管型放電管励起色素レーザー装置の概略については既に報告しているので²⁷⁾、ここでは、110Jの最大出力を得た装置について詳述する。

Fig. 2 に試作した高出力色素レーザーの概要を示す。四重棒円筒の焦点に4本の放電管(9.5φ×420mm)を配置し、その中心に色素セル(28φ×420mm)を置いた^{28~30)}。

Fig. 3 に用いた放電管駆動回路を示す。放電

管はそれぞれ1個の2段マルクスバンク回路で駆動するようにし、4組のマルクスバンク回路は1個のメインギャップスイッチG₁で制御するようにした。コンデンサには10μF、15kVの低インダクタンスのものを計8個用い、最大入力には9kJとなっている。また、回路中には省いたが、放電動作の安定化と、レーザー出力アップのため、シマー放電回路を併用している^{31, 32)}。

放電管には自作の空気入り直管型放電管を用いた。Fig. 4 に試作した大入力直管型放電管の構造を示す²¹⁾。内径2mmの透明石英管を用い、電極と石英管は放電時の強力なショックウェーブによる破損を防ぐため、シリコンゴムにより接続してある。電極はしんちゅう丸棒を旋盤加工し、先端にモリブデン鋼をろう付けしてある。放電有効長は420mmとした。

放電管内部は数Torrに排気し、常時グロー放電させ(シマーモードという)、動作の安定化を計っている。この放電管は、主放電が希薄な空気ガスで始まり、その後石英管内壁の蒸発

Fig.2 Schematic diagram of the high-energy linear flashlamp-pumped dye laser.

Fig.3 Schematic diagram of the flashlamp driver. (a) Fundamental Marx-bank driver for one flashlamp; (b) Extended Marx-bank driver circuit for 4 flashlamps.

Fig.4 Cross-section of the high input energy linear flash lamp.

Fig.5 Cross-section of the large aperture dye cell.

Fig. 6 Arrangement plan of the high energy dye laser.

Fig. 7 Top view of the laser assembly.

ガスで放電が持続しており、いわゆるアブレーション型放電管として動作する¹⁹⁾。Fig. 5 に試作した大口径色素セルの構造を示す²⁸⁾。セル本体には内径28φ および44φ のパイレックス管を用い、セルホルダはテフロン材を旋盤加工し、試作した。窓材は無反射コートしたオプティカルフラット板を用いた。セルの有効長は420 mm である。

Fig. 6 と Fig. 7 に試作した大型色素レーザーの配置図および主放電回路の配線の様子を示す。レーザー・ヘッドの両側にコンデンサ・バンクを配置し、回路の電気抵抗並びに残留インダク

Fig. 8 Output characteristics with a plane cavity.

タンスを極力小さくするため、電気配線は全て幅広い銅板で行なった^{28, 29)}。

なお、以下の実験においては、色素には、ウラン 235 に同調をとる事と、最も高出力が得られることを考慮し、ローダミン 6 G のエタノール溶液を用いた。

3.4 試作装置の性能

Fig. 9 Experimental setup for the thermal effect measurement.

Fig. 10 Beam diameter expanded by a thermal effect.

以上述べた試作装置を用いてレーザー発振の実験を行なったところ、Fig. 8 に示すように入力 6 kJ 以上で強い飽和が見られ、レーザー出力も 15.2 J に止まってしまった³⁰⁾。この飽和の原因としては、放電光止度の飽和および色素溶液のポンピングによる熱的歪みが考えられる。そこで、この 2 つを調べたところ、前者はほぼ問題なく、後者が大きく効いていることが判明した³³⁾。

Fig. 9 に色素溶液の熱的歪みの測定方法を示す。He-Ne レーザーのビーム径をビームエキスパンダで拡げ、色素セルに通し、スクリーンに写ったスポットを観測し、フラッシュ時の熱的歪みを測定した。Fig. 10 に拡がり直径の入力エネルギー依存性を示す。入力を増すにつれ、セル内溶液の熱的歪みの蓄積によって、拡がり直径が大きくなることがわかる。

Fig. 11 に等価的な焦点距離の入力エネルギー依存性を示す³³⁾。焦点距離は入力を増すにつれ短くなるのがわかる。つまり熱レンズ効果に

Fig. 11 Equivalent focal length depending on input energy.

より、光共振器の一様性が破壊され、色素レーザー装置の出力飽和が起ると思われる。色素溶液の熱的歪みを除去する方法としては、次の 2 つが挙げられる。

- 1) 色素セルを拡大する。
- 2) 熱的歪みを予想して補正するコンフォーカルキャビティを採用する。

我々はまず、後者の方法を用いて実験を行った。Fig. 12 に凹面鏡による実験装置の構成図を

Fig.12 Schematic diagram of the resonator. a, Plane cavity; b, confocal cavity.

Fig.13 Output energy vs dye concentration.

Fig.14 Output energy characteristics of a $\phi 28$ dye cell.

示す。光共振器に 2 枚の凹面鏡を用い、共振器長 l を焦点距離 R より少し短く設定し、非励起

Fig.15 Output energy characteristics of a $\phi 28$ dye cell.

時は共振器が組まれないが励起により熱的歪みがセル溶液内に生じ、全体として共振器が成立し、高出力を得るものである。光共振器は焦点距離 1 m、反射率 100%、30% の誘電体多層膜凹面ミラーを用い、共振器長を変えて実験を行った。

Fig.13 に 28ϕ セルの時のキャビティ長とレーザー出力の関係を示す。図の様に波うった特性となり、キャビティ長 89 cm で最大出力が得られた³⁴⁾。

Fig.14 に 28ϕ セルの色素濃度と出力エネルギーの関係を示す。色素濃度に対し比較的にブロードな変化を示しており、 $2 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ で最大出力が得られた³⁵⁾。

Fig.15 に 28ϕ セルで最適化した時の入出力特性を示す³⁴⁾。レーザー出力は入力とともに単調に増大し、入力 8.6 kJ において 26 J の大出力を得ることが出来た。なお、出力 26 J では、出力がミラーの耐力を越え、全反射鏡を損傷してしまった。▲は全反射鏡損傷前、△は損傷後に得ら

れた値である。26Jは、プレーンキャビティの場合の2倍以上の出力であり、色素の熱的歪みをかなり打ち消したためと思われる。

ただし、まだ飽和が見られるので、以上のデータをもとにセルを44φに変え、レーザーヘッドを一新して実験を試みた³⁶⁾。28φセルの時の最適パラメータを参考として、曲率1m、キャビティ長89cm、出力鏡反射率30%、色素濃度 $0.7 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ としたところ最大出力を出すことができた³⁶⁾。Fig. 16に44φセルを用いてパラメータを最適化した時の入出力特性を示す。レーザー出力は入力エネルギーの増加とともに直線的に伸び、最大印加電圧15kVにおいて98Jの最大出力を得た。コンデンサの規格をややオーバーするが、印加電圧を16kVにするとレーザー出力110Jが得られた³⁷⁾。この時点で出力はやや飽和の傾向を見せるが、これはランプの光強度の飽和によるものと思われる。

3.5 励起エネルギー密度について

Table IIIに我々の研究室の高出力色素レー

ザーにおける色素セル径とレーザー出力の関係を示す。表より、レーザー出力にあわせてセル径を選ばなければいけないことが判る。一般に、これまで色素レーザーの励起エネルギー密度はあまり深く考慮されなかったが、我々はエネル

Fig. 16 Output energy characteristics of a φ 44 dye cell.

Table III Output energy vs. dye cell diameter.

出力エネルギー	入力エネルギー	色素濃度	セル径×有効長	エネルギー密度	効率	備考
0.1 J	200 J	$1 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$	$5 \phi \times 100 \text{ mm}$	0.5 J/cm^2	0.05%	1)
2.1 J	1296 J	$9 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$	$14 \phi \times 250 \text{ mm}$	1.4 J/cm^2	0.16%	2)
4.7 J	1800 J	$7 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$	$18 \phi \times 300 \text{ mm}$	1.8 J/cm^2	0.26%	3)
16.3 J	1800 J	$5 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$	$28 \phi \times 300 \text{ mm}$	2.6 J/cm^2	0.91%	3)
15.2 J	9000 J	$1.1 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$	$28 \phi \times 420 \text{ mm}$	2.5 J/cm^2	0.17%	4)
26 J	9000 J	$1.1 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$	$28 \phi \times 420 \text{ mm}$	4.2 J/cm^2	0.28%	4)
60 J	7200 J	$0.7 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$	$44 \phi \times 420 \text{ mm}$	3.9 J/cm^2	0.83%	4)
110 J	10000 J	$0.7 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$	$44 \phi \times 420 \text{ mm}$	6.6 J/cm^2	1.10%	4)

備考

- 1) single flashlamp
- 2) two flashlamps
- 3) single flashlamp with 4 stage marx-bank driver
- 4) four flashlamps with 2 stage marx-bank driver

Table IV Top data of linear flashlamp-pumped dye lasers.

E _o (J)	E _{in} (J)	Lamp	Capacitor	τ_L / τ_F	Output Mirror	Cell Size (dXl)	η (%)	国	Ref
12	1 K	8×Linear Flashlamp Size	8X { 0.65 μ F 20KV	5 μ S/ —	R=30 (%)	ϕ 16×200	0.20	(スイ)	(38)
21	7.5 K	4×Linear Flashlamp 20×290	4X { 2.7 μ F 37KV	— / 3.2 μ S	不明	ϕ 18×340	0.28	(日)	(39)
26	6.8 K	同上 9.5×420	8X { 10 μ F 13KV	10 μ S/ 11 μ S	R=30 (%)	ϕ 28×420	0.38	(日)	(27)
40	10 K	12×Linear Xenon Flashlamp	10X { 5 μ F 不明	7 μ S/ 14 μ S	R=27 (%)	ϕ 19×600	0.40	(仏)	(6)
60	7.2 K	4×Linear Flashlamp 9.5×420	8X { 10 μ F 13KV	10 μ S/ 11 μ S	R=30 (%)	ϕ 44×420	0.83	(日)	(36)
110	10 K	同上	同上	同上	同上	ϕ 44×420	1.10	(日)	(37)

ギー密度を抑えることと、熱的歪みを予想してそれを補正する様な曲率のコンフォーカルキャビティを採用することによって高出力を達成した。

Table IV に現在最も実用的な波長可変レーザー装置と思われる直管型放電管励起高出力色素レーザーのトップデータ一覧表を示す^{35~39)}。現在の最大出力は我々の110 J/pulseであり、もし、くり返しを100Hzまで上げられると、平均出力は、10kWとなり、パワーの面では、同位元素分離実証プラント用として直ちに実用に入れる所まで来ている。発振効率もこれまでのデータ³⁹⁾ よりかなり高く、1.1%となっており、動作電圧も従来の37kVという高電圧に対し、その約1/3で済むという点も大きなメリットである。

4. 色素レーザーのチューニング技術

色素レーザーの波長同調技術については、ここでは紙面の都合で省略するが、文献⁴⁴⁾などの適切な論文、解説があるのでそちらを参照されたい^{10, 40~44)}。ただしこれらの報告は、いずれ

も小出力色素レーザーの波長同調技術であり、高出力色素レーザーについては、また別の配慮が必要なのはいうまでもない。高出力レーザー

Fig. 17 Yearly output energy buildup of the dye laser at the Hachinohe Institute of Technology.

ザーの波長同調技術については、別の機会に詳述したい。

5. 今後の展望

過去5年間を費やして、これまであまり高出力が得られないとされていた直管型励起色素レーザーの高出力化を計り、ほぼ満足いく結果が得られた。Fig. 17に我々の研究室の色素レーザー出力の年代推移を示す。80mJから始まって、約7年間で3桁の出力増大に成功したことになる。これは世界でもトップデータである。現在は、出力1kJを実現すべく、装置の設計と試作を進めているところである。

6. むすび

本論文では、レーザー同位元素分離法のうち、原子法に用いることを目標にして、八戸工大で試作された本邦最大の高出力色素レーザー装置について概略を述べた。

ウラン濃縮技術や高出力波長可変レーザーに興味ある人達に何らかの参考となったら幸いである。

なお、本研究の一部は昭和61年度岩谷財団研究助成金によるものであり、関係各位に深謝するものである。

参 考 文 献

- 1) 柴：原子力誌，**28** [2]，(1986) 129.
- 2) 宅間：別冊サイエンス（未来をひらく光）**96** (1975).
- 3) 井澤：レーザー研究，**15** [6]，(1987) 424.
- 4) 田代，武内：オプトロニクス，**5**(5) (1986) 80.
- 5) 水野，新井，草薙：原子力工学，**32**，[6]，(1986) 39.
- 6) J. Fort et al.: *Appl. Opt.* **26**, [7], (1987) 1246.
- 7) 十文字，稲場：電子科学 **20** [11]，(1970) 109.
- 8) F.P. Schäfer: "*Dye Laser*" Springer-Verlag, Berlin (1973).
- 9) 稲場文男ら編著：“レーザー・ハンドブック” 朝倉書店 (1973).
- 10) レーザー学会編：“レーザーハンドブック” オーム社 (1982).
- 11) 十文字ほか：“80年代のエレクトロニクス” 日本ビジネスレポート社 (1977).
- 12) 十文字，小林，稲場：第17回応物学会講演会予稿集，1aE7 (1970).
- 13) M. Jyumonji et al.: *Proc. of 9th International Symp. or Space Technology and Science* (1971).
- 14) 十文字，小林，稲場：昭和46年電通学会全国大会講演論文集，S7-2 (1971).
- 15) 同上：電通学会量子エレクトロニクス研究会資料，QE71-27 (1971).
- 16) 十文字，上山，稲場：結5回レーザー・レーダ・シンポジウム予稿集，P11 (1978).
- 17) 十文字：第14回応物学会東北支部講演会予稿集 (1978).
- 18) 十文字，葛西，増田：応物学会講演予稿集，29a-T5 (1979).
- 19) C.M. Ferrar: *Rev. Sci. Instr.* **40** (1969) 1436.
- 20) 十文字：応物学会講演会予稿集，1PK9 (1980).
- 21) 十文字：電気関係学会東北支部講演論文集，2C-11 (1980).
- 22) 十文字，富田，大沼，岡野，上山：レーザー・レーダ・シンポジウム予稿集，17 (1981) 21.
- 23) H. Kamiyama, F. Tomita, T. Onuma, S. Okano and M. Jyumonji: *Tohoku Geophysical Journal* **28** (1981) 105.
- 24) P.P. Sorokin and J.R. Lankard, *IBM J. Res. Develop.* **11** (1967) 148.
- 25) 十文字ほか，電気関係学会東北支部講演論文集，245 (1985).
- 26) H.W. Furumoto and H.L. Ceccon, *Apl. Opt.* **8** (1969) 1613.
- 27) 十文字，内山：レーザー研究，**14** (1986) 128.
- 28) 十文字ほか：応用学会東北支部講演予稿集，(1982, 12).
- 29) 十文字，内山，葛西，増田：応物学会講演会予稿集，25P-R-13 (1983, 秋).
- 30) 十文字ほか：電気関係学会東北支部講演論文集，76 (1984).
- 31) 十文字，葛西，増田：光学，**12**, (3) (1982) 205.
- 32) 十文字ほか：応物学会東北支部講演会予稿集，(1982).
- 33) 十文字ほか：昭和60年度電気関係学会東北支部講演論文集，P.246 (1985).
- 34) 十文字，内山，馬場，増田：第33回応物学会講演予稿集，216 (1986, 春).
- 35) 十文字ほか：電気関係学会東北支部講演論文集，P.67 (1986).
- 36) 十文字ほか：応物学会講演会予稿集，P.788 (1988, 春).
- 37) 十文字ほか：応物学会東北支部講演予稿集，

- P. 25~26 (1988).
- 38) P. Anliker et al.: Opt, Commun. 5, 137 (1972).
- 39) 前田ほか：第24回応物学会講演予稿集, 184 (1977).
- 40) 十文字, 小林, 稲場：東北大学電通談話会記録, 41 (1972) 13.
- 41) E.P. Schäfer, "Dye laser," Springer-Verlag Berlin (1973).
- 42) 稲場文男ら編著, "レーザー・ハンドブック", 朝倉書店 (1972).
- 43) 十文字, 有賀, 小林, 稲場：電通学会量子エレクトロニクス研究会資料, QE-71-27 (1971).
- 44) 十文字, 稲場：画像技術, 7, (3) (1976) 9.