



JP0250124

JAERI-Tech
2002-004



レーザーリモートモニターポンプレーザー用
高繰り返し・単一周波数 Nd:YAGレーザー発振器の
試作及び発振特性

2002年2月

丸山 庸一郎・大場 正規・加藤 政明

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

レーザーリモートモニターポンプレーザー用
高繰り返し・単一周波数Nd:YAG レーザー発振器
の試作及び発振特性

日本原子力研究所東海研究所環境科学研究部
丸山 庸一郎・大場 正規・加藤 政明

(2002年1月4日受理)

大気中の種々の物質を、レーザーを利用した差分吸収法 (DIAL : Differential Absorption LIDAR) によって秒単位のリアルタイムで計測するためには、発振繰り返し数の高い波長可変レーザーが必要である。その波長可変レーザーの駆動光源には、質の良いレーザー光が発生できる繰り返し数の高いポンプレーザーが不可欠である。そこで、光の高品質化を目的に、周波数幅の狭い単一周波数で発振するNd:YAGレーザー光をポンプレーザー発振器にシーディングすることによって、単一周波数発振が可能な、繰り返し数1kHzのNd:YAGレーザー発振器システムを試作し、その発振特性を測定した。

この結果、試作した発振器は、発振繰り返し数0.5kHz~1.0kHzにおいて、単一周波数、TEM₀₀の空間モードでレーザー発振できることを確認した。また、共振器長を制御することで単一周波数発振が維持でき、周波数及び空間モードの変化は、共振器長のみの変化に依存することが分かった。本発振器の平均出力は3W、パルスエネルギーは3mJで、増幅システムの発振器として十分な性能を有するものであった。

A High Repetition Rate, Single-frequency Nd:YAG Laser Oscillator
and Its Characteristics

Yoichiro MARUYAMA , Masaki OBA and Masaaki KATO

Department of Environmental Sciences
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 4, 2002)

For the in-situ measurement of various substances in the atmosphere by using DIAL (Differential Absorption LIDAR) , a high repetition rate tunable laser is required to obtain data within a few seconds. As the pump source of the tunable laser, the performance of high repetition rate and high average power is indispensable. For the generation of high quality laser radiation, a laser oscillator with 1 kHz pulse repetition rate is made and seeded with very narrow linewidth single-longitudinal mode laser radiation from the outside of the oscillator cavity and its characteristics are studied.

As the results, after the thermal equilibrium of the oscillator laser crystal, a single-longitudinal and near TEM₀₀ transverse mode are realized at the pulse repetition rate between 0.5kHz and 1kHz. Single frequency operation is preserved by controlling the cavity length. The average output power of 3W (3mJ per pulse) is obtained. It is confirmed that this oscillator has enough performance as a oscillator of MOPA (Master Oscillator Power amplifier) system.

Keywords: Single-longitudinal Mode, Nd:YAG Laser, High Repetition Rate, MOPA, DIAL

目 次

1. はじめに	1
2. 単一周波数Nd:YAGレーザー発振器システムの試作	2
3. 試作レーザー発振器の発振特性	5
3. 1 シーダー入力依存性	5
3. 2 ホストレーザー出力依存性	7
3. 3 縦モード(発振周波数)	7
3. 4 横(空間)モード	8
3. 5 パルス時間波形	10
4. おわりに	11
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Single-longitudinal Mode Nd:YAG Oscillator System	2
3. Characteristics of the Oscillator System	5
3.1 High Repetition Rate Tunable Laser	5
3.2 Output Characteristics of Host Lase	7
3.3 Longitudinal Mode (Frequency of Host Laser)	7
3.4 Transverse Mode	8
3.5 Temporal Pulse Shape	10
4. Conclusion	11
References	12

1. はじめに

Nd:YAGレーザーに代表される固体レーザーは、レーザー結晶をポンピングする高効率半導体レーザーの出現で、その高繰り返し化、高平均出力化、高効率化が進んでいる^{1,2,3,4,5}。しかし、このような固体レーザーをリアルタイムライダー用波長可変レーザーのポンピングや、加工、医療などに応用する場合、縦（周波数）モード、横（空間）モード、パルス時間波形などのパラメータで表されるレーザービームには、高い質が求められ、その高品質化が重要な開発課題の一つとなっている。レーザービームの質が高いほど、集光性や可干渉性が良く、その応用も単なる切断などの加工に留まらず、超微細加工や高効率波長変換などへと広げることが可能になる。しかし、固体レーザーは、発振媒質に結晶を用いることから、そのポンピングに起因する熱によって種々の効果が発生し、これらの効果は、一般にビーム質を低下させる。Nd:YAGレーザーのような固体レーザーにおいてビーム質を低下させる主な要因としては、（1）熱レンズ、（2）熱歪み、（3）熱複屈折、（4）レーザーを構成する光学素子の歪み、などがある^{6,7,8}。 （1）は、ポンピング光の一部が結晶内で熱に変わることによって結晶の幾何学的大きさが変化したり、屈折率が変化することによって発生する。（2）は結晶内の温度分布（温度差）によって発生する歪みであり、この結果、（3）の複屈折効果などが発生する。（4）は、発振器よりは、むしろ高い平均出力の半導体レーザーでポンピングされる増幅器システムで大きな問題となる。即ち、高平均出力の光が透過するレンズ、偏光素子などの光学系が、レーザー光を吸収して僅かな変形、屈折率の変化などを生じ、この結果、レーザー光に歪みが発生する。

レーザー光の質を高めるためには、これらの効果をできる限り少なく抑えることと、可能であれば補正することが必要である。熱レンズ効果は、レーザー結晶にジグザグスラブを使用することによって大きく改善される⁹。しかし、高平均出力レーザーでは、これによっても熱効果を完全に抑えることができないため、その補正が大きな課題の一つとなっている。このような歪んだレーザー光の補正には、位相共役鏡を利用する方法が有効である^{10,11,12}。これまで、多くの研究が行われてきたが、繰り返し数がkHzオーダーで実用的なものはない。液体中でのブリルアン散乱（SBS：Stimulated Brillouin Scattering）を利用する位相共役波の発生方法は、媒質が液体であるため損傷を受けることがない、反射しきい値が低い、反射率の高い媒質を選ぶことが可能、な

どの利点がある。しかし、このような位相共役鏡を利用するためには、入射レーザー光の単一周波数化^{13,14,15)}や位相共役媒質へ入射するレーザー光の空間分布がガウシアン分布に近いことなどが要求される。

レーザー光の質を高めるには発振器の高品質化が不可欠である。その方法としては、(1) パルス発振する単一周波数発振器の利用、(2) 発振器外部から高品質のレーザー光をシーディングし、これによって発振器の質を改善する、などがある。前者は、エネルギーが低いため利得の低い増幅器システムには不向きである。このため、波長可変レーザー駆動用ポンプレーザー光の高品質化の第一段階として、シーディング方式の高繰り返しレーザー発振器システムを試作し、その発振特性を測定したので報告する。

2. 単一周波数 Nd:YAGレーザー発振器システムの試作

Fig.1に試作した単一周波数Nd:YAGレーザー発振器システムの構成を、Fig.2に発振器システムの全景を示す。発振器システムは、最大繰り返し数が1kHzのNd:YAGレーザー発振器(ホストレーザー)と単一周波数で発振するシーダーより構成される。シーダーは、周波数幅約10kHz(波長幅： 4×10^{-6} nm)の連続発振のNd:YAGレーザーで、最大出力300mW、ビーム径約0.45mm、ビーム広がり3.6 mrad、周波数変動量100MHz/時である。シーダーシステムは、ホストレーザーへ入力するパワーを調整するための $\lambda/2$ 波長板、ホストレーザーからの戻り光を防止するためのファラデーアイソレータ、アイソレーターを通過したレーザー光の偏光を調整するための $\lambda/2$ 波長板、モードマッチングのための倍率3倍の望遠鏡より構成される。シーダービームは、ホストレーザーのQスイッチの手前のポラライザーから偏光を利用して共振器内に入射される。

ホストレーザーは、高繰り返し、高エネルギー発振を実現するため発振媒質にジグザグスラブNd:YAG結晶を使用する。レーザー結晶の断面寸法は、3mm×3mm、短辺77mm、長辺83mm、Nd³⁺イオン濃度1%、また、レーザー結晶端面は、ほぼプリュースター角に切断してある。共振器は、曲率半径1,000mmの全反射ミラーと透過率50%の出力ミラーより構成され、その共振器長は約50cmである。ジャイアントパルス発振を行うためのQスイッチには、長さ35mmのLiNbO₃結晶を使用する。

レーザー結晶をポンピングするための半導体レーザーは、準連続発振のレーザーで、最大パルスエネルギーは約100mJ、パルス幅0.15ms、デューティー最大20%である。

ホストレーザーの共振周波数を、シーダーの周波数に一致させるため、出力ミラーは可動距離 $2\mu\text{m}/1000\text{V}$ の電歪素子（PZT素子）に搭載する。共振器長は、PZTへの印加電圧を変えることによって変化させる。共振器長（ L_c ）を微少量（ ΔL_c ）変化させた場合の発振周波数の変化量（ $\Delta\nu_c$ ）は、縦モード間隔を FSR_c 、中心波長を λ_c とすると次式で与えられる。

$$\Delta\nu_c = \frac{FSR_c}{\lambda_c/2} \Delta L_c$$

共振器長から求まる縦モード間隔は、約0.3GHz、発振波長は1064nmであるから、上式より、本PZTの周波数掃引幅は、約1.1GHzである。

ホストレーザーは、高次の空間モードの発振を防止するため、後部の全反射ミラーとQスイッチの間にアパーチャーを設置する。レーザー結晶冷却器は、結晶の屈折率（共振器長）変化を抑えるため、設定温度 ± 0.5 度の温度制御が可能なものを使用する。また、冷却水の循環に起因するレーザーの周波数ジッターを抑えるため、半導体レーザーとレーザー結晶の冷却は分離し、それぞれ最適・最小の流量に設定する。

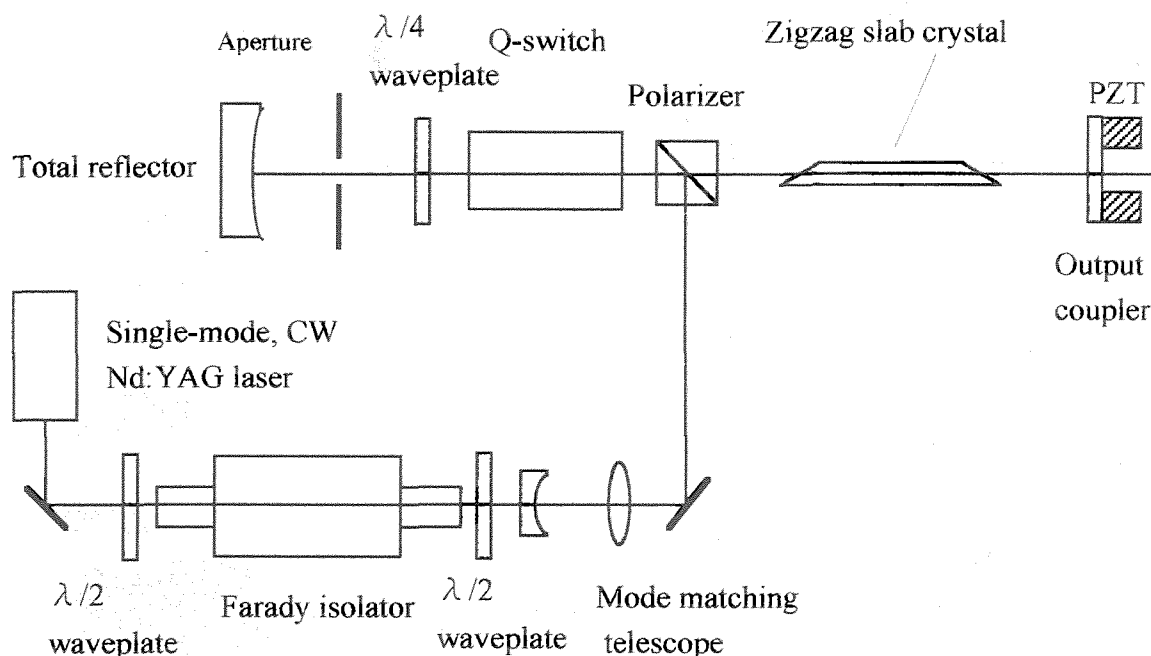


Fig.1 Experimental set-up for injection seeding of single-mode CW-Nd:YAG laser

ポライザーで反射されてホストレーザーに入ったシーダー光は、QスイッチがOffの状態では、

- (1) シーダーの偏光は、 $\lambda/4$ 波長板を2回通過して90度変わり、ポライザー、レーザー結晶を通過して、出力ミラーで一部が反射されて戻ってくる。
- (2) 戻ってきたレーザー光は、再度 $\lambda/4$ 波長板を2回通過して、偏光面が90度変わり、ポライザーで反射されて共振器の外へ出ていく。

次に、QスイッチがOnの状態では、Qスイッチと $\lambda/4$ 波長板の組合せで $\lambda/2$ 波長板として働く。この結果、

- (1) 全反射ミラーで反射されてポライザーに戻ってきたレーザー光は、偏光が入力光と同じ偏光になりポライザーで反射されて共振器外に出ていく。
- (2) ポライザーと出力ミラーの間にはQスイッチがOnになる前のシーダー光が存在しているので、QスイッチがOnになると、このレーザー光によって誘導放出が始まり、光が成長し、発振する。この結果、出力光は単一周波数となる。

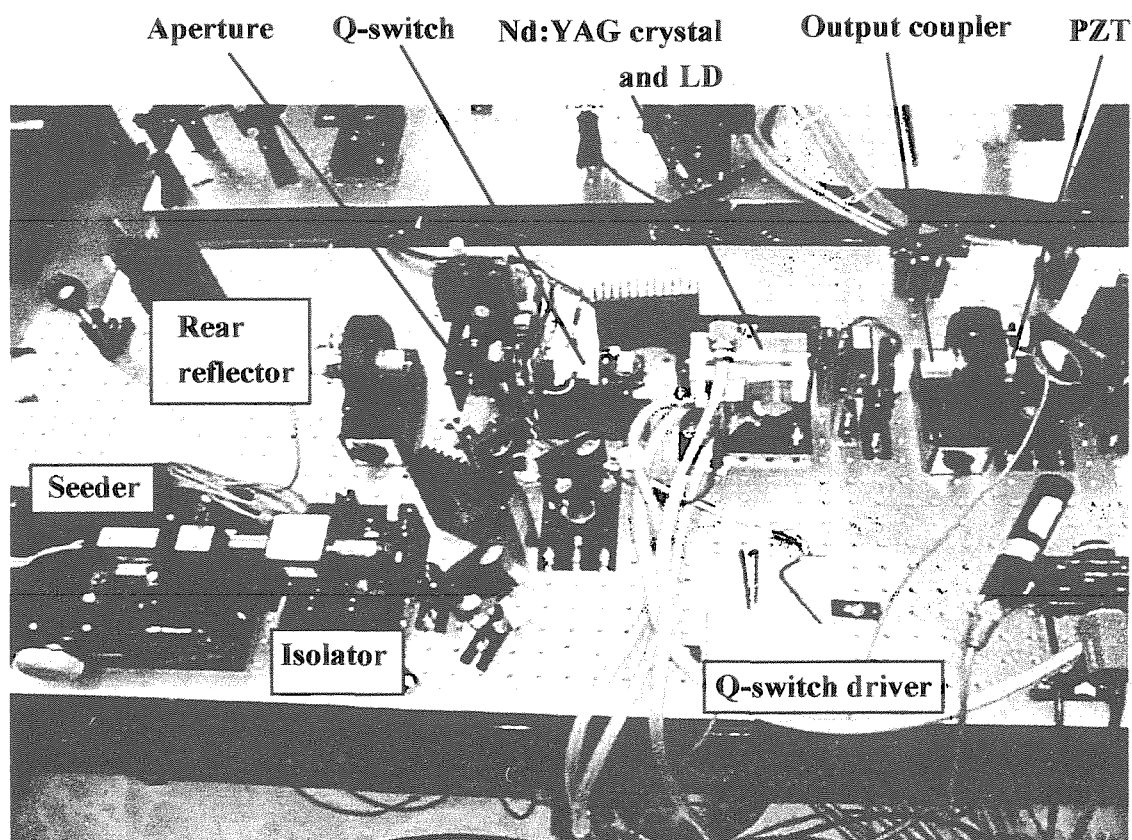


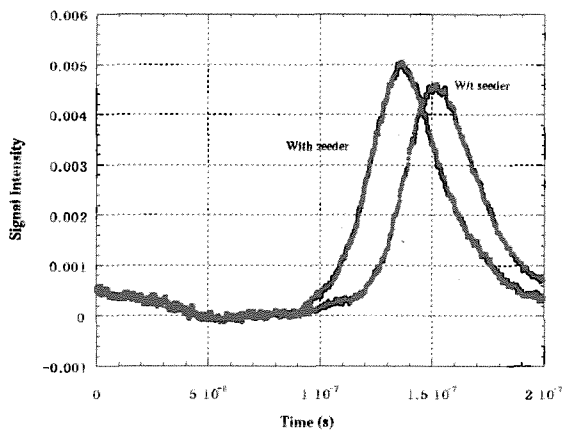
Fig.2 Injection seeded high repetition rate Nd:YAG laser oscillator system

3. 試作レーザー発振器の発振特性

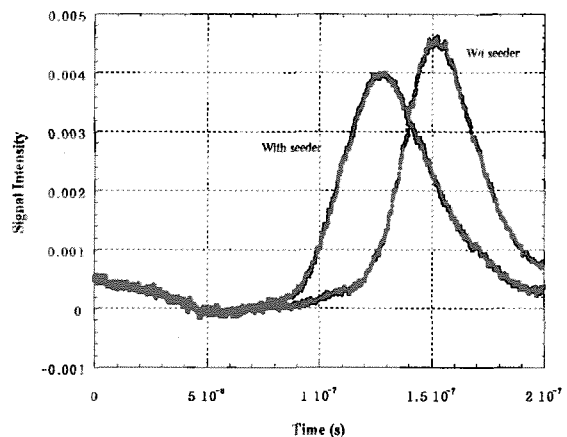
3.1 シーダー入力依存性

Fig.3の(1)から(6)にホストレーザーへ注入するシーダー入力を変えた場合のホストレーザーパルス発生時間の変化を示す。図より、シーダー入力を0.5mWから150mWへと増すに従ってレーザーパルスの発生時間が短くなることが分かる。シーダからの入力がない場合は、結晶内の自然放出光が種となり、この種光が共振器内を多数回往復することによってレーザー発振する。一方、強度が自然放出光の5~6桁高いシーダー光が存在する場合、シーダー光の誘導放出によってレーザー発振が生ずる。この時、シーダー光は単一縦モードとなっているため、自然放出光のように共振器内を往復してモードを形成する必要がない。従って、レーザー光の発振時間が早くなる。また、レーザーパルスの発生時間が早いほど自然放出光による誘導放出が少なく、レーザー光の輝度は高くなる。図より10mW程度のシーダー入力でレーザーパルス発生時間はほぼ一定になっており、シーディングされていることが分かる。

Fig.4は、Fig.3の遅れ時間をグラフにして示したものである。図より遅れ時間は、2つの部分に分けられる。シーダー入力が10mWまでの間は、遅れ時間が急激に減少する。それ以降は、遅れ時間は緩やかになる。前半は、シーダーの入力が低い領域で、自然放出による誘導放出とシーダーによる誘導放出が同時に存在している状態である。シーダー入力が10mW以上になると、遅れ時間がパルス幅以上となっており、シーダーによる誘導放出が支配的な領域となる。



(1) Seeder power : 0.5 mW



(2) Seeder power : 1 mW

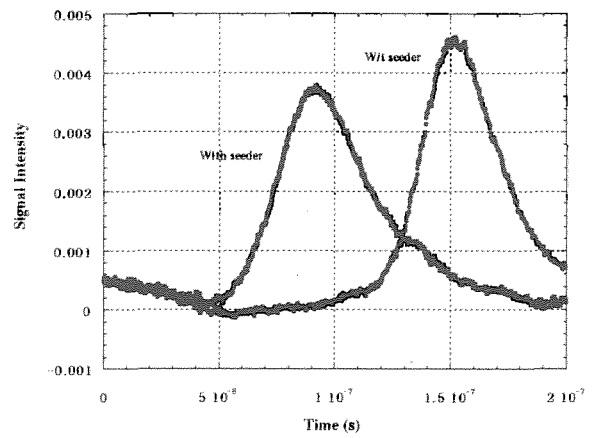
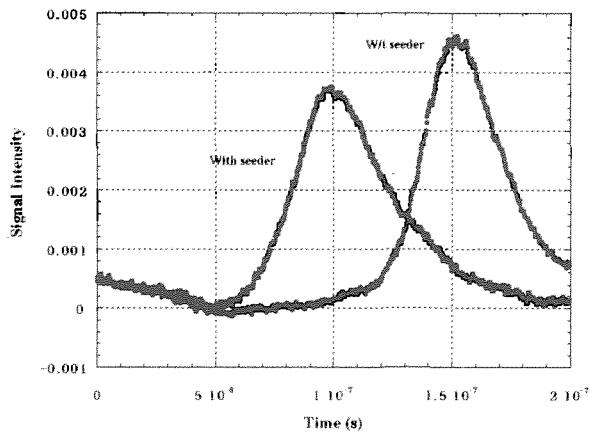
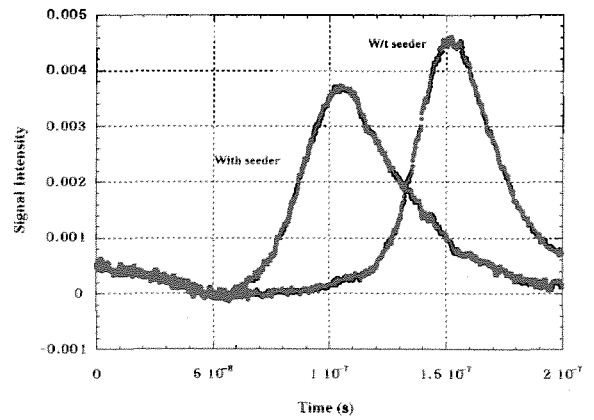
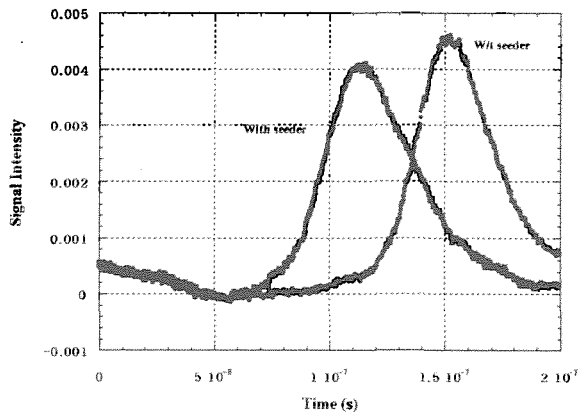


Fig.3 Host laser pulse with and without seeder

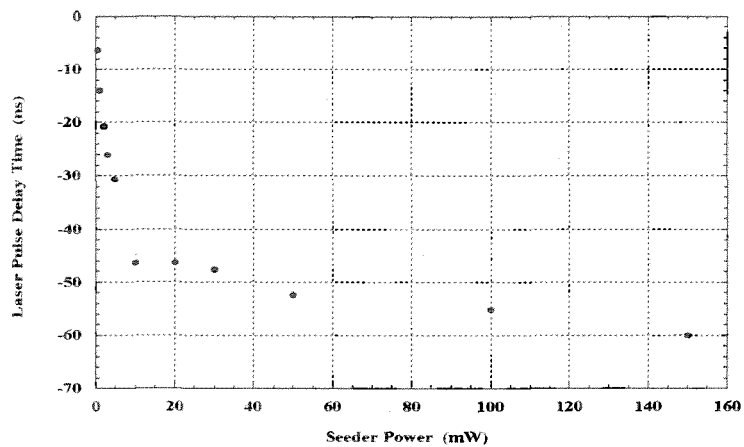


Fig.4 Laser pulse delay time as a function of seeder power.

3.2 ホストレーザー出力依存性

シーダー光をホストレーザーに注入すると、シーダー光はレーザー媒質を多数回往復して、増幅された後レーザー発振し、共振器外へ出ていく。シーダーからの入力、自然放出光に対して5～6桁程度高い。このためQスイッチがOffの状態においてもレーザー結晶を通過するシーダー光によって僅かな誘導放出が生じ、この結果、レーザー結晶中の蓄積エネルギーが減少し、シーダーが無い場合に比べて出力が低下する。Fig.5にシーダー光の入力とホストレーザー出力の関係を示す。図よりホストレーザー出力は、シーダー入力約2mWまでは急激に減少し、それ以降は減少の割合が少なくなる。シーダーを入れた場合の出力は、シーダーを入れない出力に対して最大約15%減少する。シーディング時のホストレーザー出力は、3.5Wである。

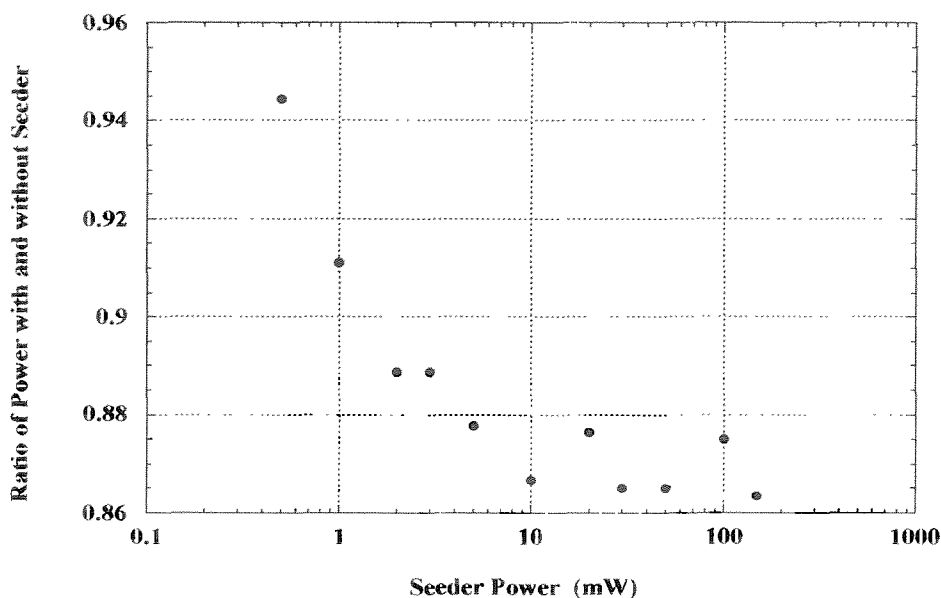
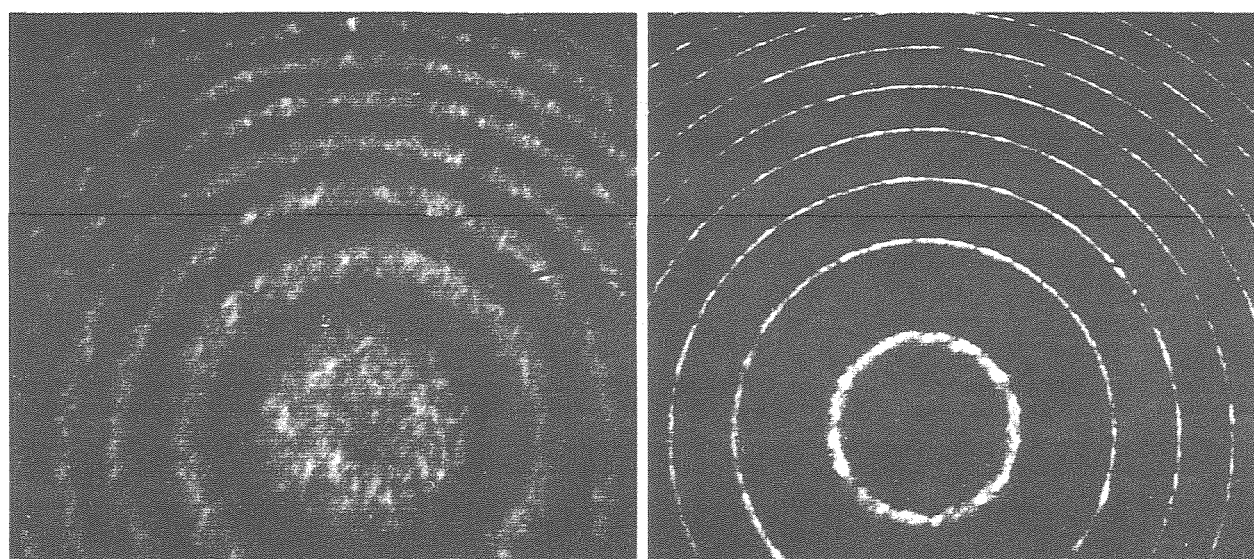


Fig.5 Ratio of host laser power with and without seeder

3.3 縦モード（発振周波数）

Fig.6 (1) 及び (2) にシーダーがある場合と、無い場合のホストレーザー光の周波数の測定結果を示す。測定では、波長1064nmの発振光を非線形結晶 (KTP) で波長532nmの緑色光に変換し、これを干渉計で測定する。測定に用いたファブリーペローエタロン干渉計は、自由スペクトル域 (FSR:FreeSpectral Range) 20 GHz、フィネス

30、分解能は約0.6GHzである。Fig.6 (1) は、シーダーがOffの状態でのホストレーザーの周波数で、約10GHzの周波数幅である。共振器長は、50cmであるから、その縦モード間隔は、約300MHzである。従って、観測されるレーザー光は、36本程度の縦モードを含むマルチモードで発振している。Fig.6 (2) は、ホストレーザーにシーダー光を入れた場合の縦モードの測定結果である。周波数幅は、ほぼ干渉計の分解能と同じ値である。先に示したレーザーパルス発生時間とも合わせホストレーザーは、単一周波数で発振していると考えてよい。



(1) Without seeder

(2) With seeder

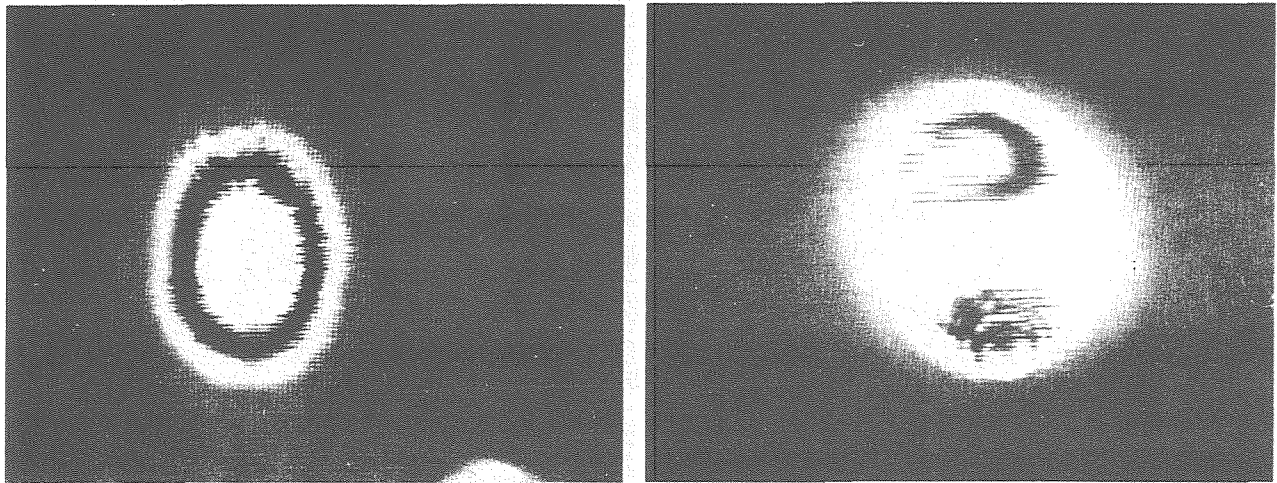
Fig.6 Host laser frequency width measured by solid etalon with FSR of 20 GHz and finesse 30.

3.4 横（空間）モード

1) 運転開始時のモード変化

レーザー結晶ポンプ用半導体レーザーを発振させてから約15分間は、主としてポンプレーザー光の吸収によるレーザー結晶の温度変化に基づく屈折率の変化の影響で共振器長が変化する。この間、レーザー光の横モードは、Fig.7 (1), (2) に示すような TEM_{00} 、 TEM_{10} 、 TEM_{20} を交互に繰り返す。約15分を過ぎると、レーザー結晶は熱的な平衡状態に近づき、横モードの変化する時間間隔が長くなる。しかし、それ以降も、ポンプレーザー出力の変化などで結晶温度がゆっくりと変わるため、それに伴って横モードもゆっくりとした変化を繰り返す。この時、出ミラーを搭載しているPZTの電圧を

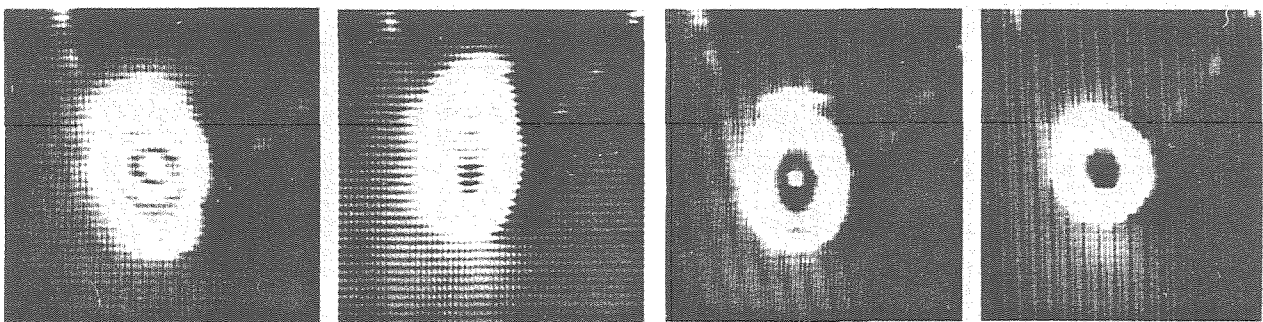
変える（共振器長を変える）ことによって比較的長い時間 TEM_{00} モードを維持する事ができ、モードの変化は共振器長の変化にのみ依存することが分かる。



(1) Near TEM_{00} mode (2) TEM_{10} mode
Fig.7 Variation of transverse mode at the pulse repetition rate of 0.5 kHz

2) 発振繰り返し数変更時の横モード変化

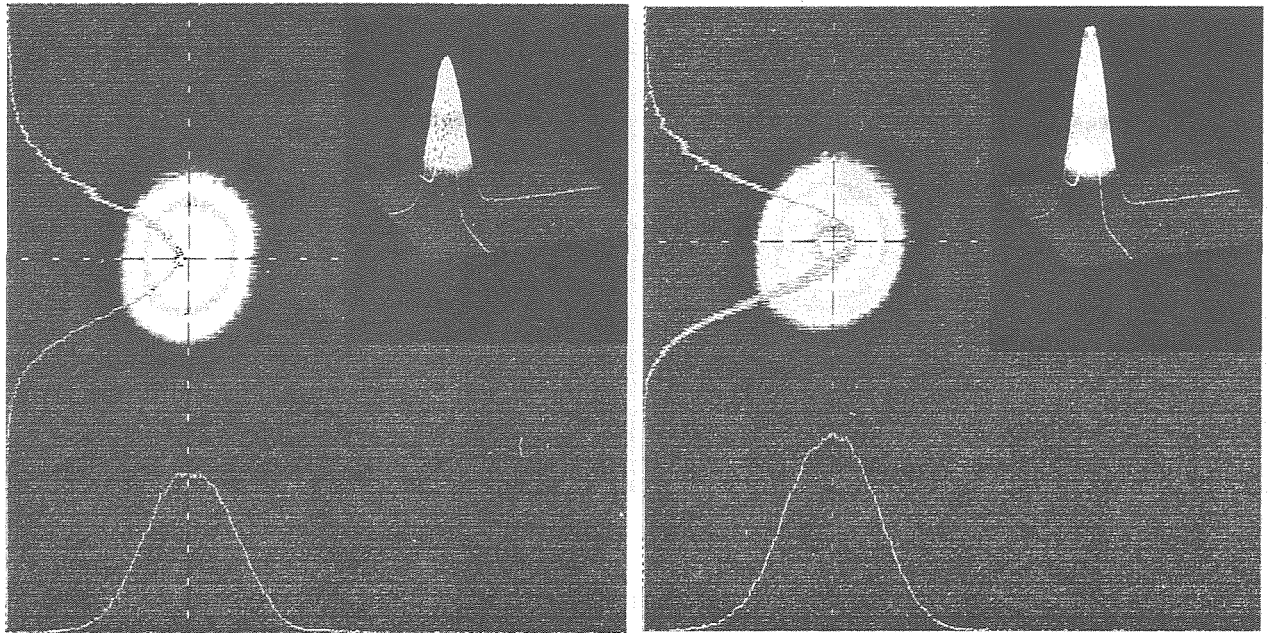
レーザーの発振繰り返し（平均投入入力）を変えるとレーザー結晶の温度が急激に変化する。それに伴って、横モードも短い時間で変化する。Fig.8の（1）から（4）は、繰り返し数を0.5kHzから1kHzに変化させた時の横モードの測定結果である。写真は、1秒間隔であるが、繰り返し数を変えた当初は、1秒以下の短い時間で TEM_{00} と TEM_{02} の間でモード変化を繰り返す。約1秒を経過すると、モードの変化速度は遅くなり、約4秒でモードは TEM_{00} に落ち着き、結晶が熱平衡状態に達することが分かる。これ以降横モードは、ほぼ熱平衡状態下でのゆっくりとした移行する。



(1) 1 second (2) 2 seconds (3) 3 seconds (4) 4 seconds

Fig.8 Transient behavior of transverse mode after the change of pulse repetition rate.

Fig.9 (1) 及び (2) は、レーザー結晶がほぼ熱平衡になった状態で、シーダーがある場合と無い場合の横モードの測定結果である。両者は、ほぼ同様の分布となっている。



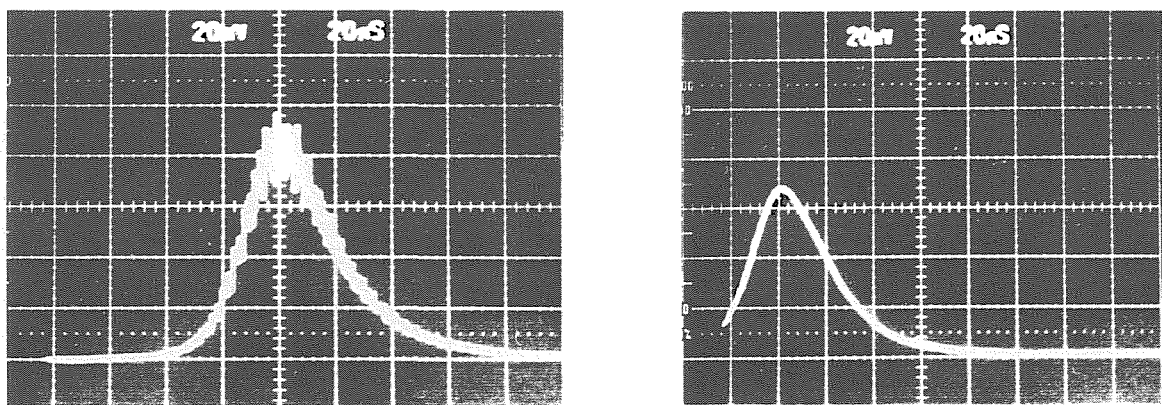
(1) Without seeder

(2) With seeder

Fig.9 Transverse mode of host laser with and without seeder

3.5パルス時間波形

Fig.10は、レーザーパルスの1ショット時間波形である。シーダーが無い場合は(1)のように、レーザーパルス波形に、モジュレーションが見られる。一方、シーダー光を入射することによってレーザーパルス波形は、スムーズな時間波形となる。



(1) Without seeder

(2) With seeder

Fig.10 Oscilloscope traces of host laser output pulse

4.おわりに

発振繰り返し数が1kHzの単一周波数のNd:YAGレーザー発振器を試作し、その発振特性を測定した。この結果、以下の結論が得られた。

- ・リアルタイムライダー用ポンプレーザー発振器として十分な性能を有する単一周波数発振器システムを開発した。
- ・ホストレーザーに外部よりシーディングを行うことによって平均出力3.0W（ハルスエネルギー3.0mJ）のシングルモード発振を実現した。
- ・シーディングパワーの増加にともなってホストレーザーハルスの立ち上がりが早くなり、約10mW程度のパワーではほぼ完全なシングルモード発振となった。
- ・ホストレーザーの出力ミラー位置（共振器長）を制御することによって、シーダーの周波数にホストレーザーの周波数が同調できた。
- ・レーザー結晶が熱的にほぼ平衡に達した状態では、空間モードはゆっくりとした周期でシングルモードとマルチモードの間を変化した。
- ・レーザー結晶が熱的に安定した状態では、PZTに印加する電圧を変えることによって、シングルモードを比較的長い間一定に維持できた。これにより、モードの変化は共振器長の変化のみに依存していることが分かった。

今後の課題としては、長時間シングルモードを維持するための共振器長の自動制御が上げられる。即ち、今回試作した発振器の共振器長は、ホストレーザーの出力ミラーが搭載されているPZT素子への印加電圧を手動で変えることによってシーダーの周波数に同調させた。モードの変化は主として熱的なもので、その変化も時間的にゆっくりとしている。従って、共振器長の自動制御回路を付加することによって長時間安定なシングルモード発振が維持できると考えられる。

参考文献

- 1) Velsko.S.P, Ebbers.C.A, Comiskey.B, Albrecht.G.F, Mitchell.S.C," 250W average power electro-optically Q-switched diode pumped power oscillator," OSA proceeding on Advanced Solid State Laser, 308 (1994)
- 2) Injeyan.H, St.Pierre.R.J, Berg.J.G, Hilyard.R.C, Wever.M.E, Wickham.M.G, Harpole.G, Florentino.C, Groark.F, Farey.M, "Diode Array Pumped Kilowatt Laser Development," in Conference on Lasers and Electro-Optics, Vol.17, of 1994, OSA Technical Digest Series, p281
- 3) Le Garrec.B.J, Raze.G.J, Thro.P.Y, Gilbert.M,"High average power diode pumped frequency doubled YAG laser," Opt. Lett.21, 1990(1996)
- 4)Tei.K, Kato.M, Niwa.Y, Harayama.S, Maruyama.Y, Matoba.T, Arisawa.T,"Diode pumped 250W zigzag slab Nd:YAG laser oscillator-amplifier system," Opt.Lett.23, 514(1998)
- 5)Tei.K, Kato.M, Matsuoka.F, Niwa.Y, Maruyama.Y, Matoba.T, Arisawa.T,"High repetition rate 1J green laser system," Appl. Opt. 38, 4548(1999)
- 6)Koechner.W," Thermal lensing in a Nd:YAG laser rod," Appl. Opt.9,2548(1970)
- 7)Koechner.W,"Absorbed pump power, thermal profile and stresses in a CW pumped Nd:YAG laser,Q"Appl. Opt.9,1429(1970)
- 8) Foster.J.D, Osterink.L.M,"Thermal effects in a Nd:YAG laser," J. appl. Opt. 41, 3656(1970)
- 9) Martin.W.S, Chernoch.J.P,"Multiple Internal Reflection Face Pumped Lasers," U.S.Patent 3633126(1972)
- 10)Wang.V, Giuliano.C.R,"Correction of phase aberration via stimulated brillouin scattering,"Opt. Lett. 2,4(1978)
- 11)Chandra.S, Fukuda.R.C, Utano.R,"Sidearm stimulated scattering phase conjugated laser resonator,"Opt. Lett. 10, 356(1985)
- 12)Meng.H, Eicher.H.J,"Nd:YAG laser with a phase conjugating mirror based on stimulated brillouin scattering in SF6 gas,"Opt.Lett.16,569((1991)
- 13)Schmitt,R.L, Rahn, L.A,"Diode-laser-pumped Nd:AG laser injection seeding system,"Appl. Opt. 25, 629(1986)
- 14)Rahn,L.A,"Feedback stabilization fo an injection seeded Nd:YAG laser," Appl. Opt. 24, 940(1985)

- 15) Fry, E.S, Henderson, S.W, "Suppression of spatial hole burning in polarization coupled resonators," Appl. Opt. 25,3017(1986)

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J

1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m

1 b=100fm²=10⁻²⁸m²

1 bar=0.1MPa=10⁵Pa

1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²

1 Ci=3.7×10¹⁰Bq

1 R=2.58×10⁻⁴C/kg

1 rad=1cGy=10⁻²Gy

1 rem=1cSv=10⁻²Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1		0.101972	0.224809
9.80665		1	2.20462
4.44822		0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²)=10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
1		10.1972	9.86923	7.50062×10 ²	145.038
0.0980665		1	0.967841	735.539	14.2233
0.101325		1.03323	1	760	14.6959
1.33322×10 ⁻⁴		1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
6.89476×10 ⁻³		7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
1		0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸
9.80665		1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹
3.6×10 ⁶		3.67098×10 ³	1	8.59999×10 ³	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵
4.18605		0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹
1055.06		107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹
1.35582		0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸
1.60218×10 ⁻¹⁹		1.63377×10 ⁻²⁰	4.45050×10 ⁻²⁶	3.82743×10 ⁻²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ⁻¹⁹	1

1 cal= 4.18605J (計量法)
 = 4.184J (熱化学)
 = 4.1855J (15°C)
 = 4.1868J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS(仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499W

放射能	Bq	Ci
1		2.70270×10 ⁻¹¹
3.7×10 ¹⁰		1

吸収線量	Gy	rad
1		100
0.01		1

照射線量	C/kg	R
1		3876
2.58×10 ⁻⁴		1

線量当量	Sv	rem
1		100
0.01		1

レーザーリモートモニターポンプレーザー用高線り返し・単一周波数ND:YAGレーザー発振器の試作及び発振特性



古紙配合率100%再生紙を使用しています