



## レーザ共振器解析・設計ソフトウェア

レーザ共振器解析・設計ソフトウェアとして、LASCADは15年にわたって、多くのユーザから高い評価を受けてきました。それらのフィードバックを経験として生かすことで、ソフトウェアの性能を改良してきました。

レーザ共振器の設計を最適化するために、LASCADは優れた組み合わせのシミュレーションツールを提供します。

- レーザ結晶内熱影響の熱的・構造的有限要素法解析(FEA)
- 熱レンズ効果、ゲインガイディング(gain guiding)などを考慮に入れた、ABCD ガウシアンビーム伝搬
- レーザ光の動的、3次元動作の解析することによるマルチモード、Qスイッチ動作の動的解析(DMA)
- 回折、ゲイン動力学(gain dynamics)を含む3次元波動光学ビーム伝搬コード

Wave Length: 1.06  $\mu\text{m}$

Element Number	0	1	2	3	4	5	6
Element Type	Mirror	I-Face	Mirror	Mirror	Mirror	Lens	Lens
Distances [mm]		2.0	1.8654	1.16373	1.135	0.74709	1.34007
Ang. of Incid.[deg.]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Type-Param.[mm]	729.86	1240.3	-115.14	46.299	100000.	500.	21.
Refractive Index		1.0	1.3	1.0	1.0	1.0	1.0
Refr. Param.[1/mm <sup>2</sup> ]		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gain Param.[1/mm <sup>2</sup> ]		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

## LASCAD™

### パソコンが光学作業台に

LASCAD は、容易に操作することのできる、複雑な工学ツールを提供します。

図1で示されているプログラムのユーザー・インターフェースは、パソコン上の光学作業台のように使用することができ、それによりレーザ共振器を直感的に設計することができます。このように、LASCAD は、複雑なマニュアルを学ぶのに時間を浪費することなく、実験結果の過程を導くことに貢献します。

- マウスをクリックするだけで、ミラー、レンズ、結晶等の光学素子を、追加、結合、調整もしくは削除することが出来ます。
- 共振器内と結晶内の非点収差は、自動的に考慮されます。
- 熱的有限要素解析、ガウシアンABCD行列コード、物理光学コード、Qスイッチ動作解析、レーザ安定性の計算及び出力パワーのプログラムメニューを利用することができます。

## LASCAD™

### レーザエンジニアリング設計

優れた共振器の設計のために、レーザ設計者は、相互に作用し合う、多くの技術的・物理的な問題に直面します。レーザシステムの小型化の流れがあるために、パワー出力を増加させると、熱レンズ効果の考慮は、ますますその重要性を増しています。その効果は、材料パラメータ、共振器構造、ポンプビーム分散、冷却構造などの、システムの特性に強く依存します。これは、ゲイン動力学、モード競合、Qスイッチ、そして他の効果と干渉し合い、それは、ビーム品質やレーザ効率を複雑な方法で制御します。これらの効果の数値シミュレーションに基づき、LASCADは、キャビティ設計の特性に関する定量的な理解を、レーザ設計者に提供します。

### 熱的有限要素解析 (FEA)

FEAは、レーザ結晶内の温度分布、歪み、応力、破壊機構の計算に使われます。物質のパラメータ、ポンプ構成及び冷却構造を考慮しています。FEAは熱伝導方程式のような技術的な物理学の偏微分方程式の数値的解法として知られています。FEAの成果は、他の工学分野においては不可欠なものとして、大きな成功とともに適用されてきましたが、商業用レーザ設計ソフトウェアにおいては今まで利用されていませんでした。

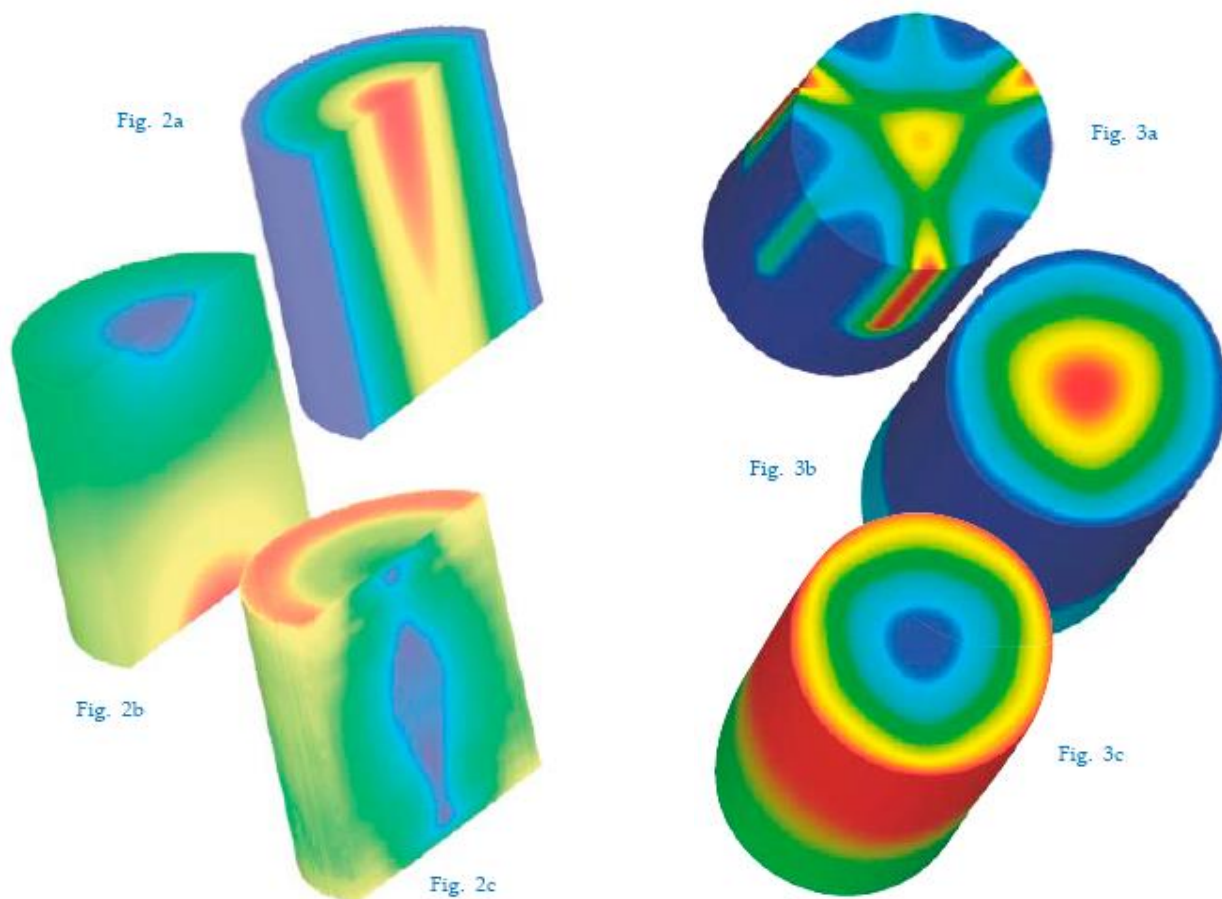
レーザ共振器設計のためのFEAの直接的な利用を可能とするために、LASCADは、端面及び側面励起ロッド、スラブ、そして薄いディスクレーザのような重要な構造のための事前設計されたFEAモデルを提供します。また、モデルとしては様々な材料からなる結晶や、アンドープエンドキャップのようなドーパ・アンドープ部分からなる結晶も適用できます。ユーザはこのモデルの中で、大きさ、FEAの分割の細かさ、境界条件、その他パラメータなどをカスタマイズできます。ユーザによって与えられた解析的な式を使って、材料パラメータの温度依存性を考慮することができます。

スーパーガウシアン機能に基づく解析的近似値は、吸収ポンプパワー密度のモデリングに使われます。吸収ポンプ光分布の数値的モデリングを可能にするために、LASCADは光線追跡プログラムのZEMAX、TraceProへのインターフェースを持っています。

これらのプログラムは、LASCADへの入力として使用できる吸収ポンプパワー密度の3次元データセットを生成します。ZEMAXまたはTraceProを用いた吸収ポンプ光の数値的モデリングは、フラッシュランプ励起レーザや、独特なポンプ構造に対して、特に役立ちます。

図2a, 2b, 2cはそれぞれ、端面励起されたシリンダカルロッド内の温度分布、歪み、応力強度をプロットしたものです。

図3a, 3b, 3cはそれぞれ、側面励起されたロッド内の吸収ポンプパワー、温度、応力テンソルのzz成分を示しています。



## ガウシアンABCD行列法

ABCD行列コードを用いて、FEAの結果を使用する際、その温度分布は、屈折率の温度依存性によって掛け算されて、光軸に対して直角方向に放物線フィッティングがなされます。このフィッティングの際、結晶軸の方向とその垂直方向に有限要素細分割が行われます。（図4）同様に、変形した結晶端面のフィッティングも行われます。例えば、端面励起ロッドのような、さまざまな構成に対して、この近似は、レーザモードの信頼できる結果をもたらします。

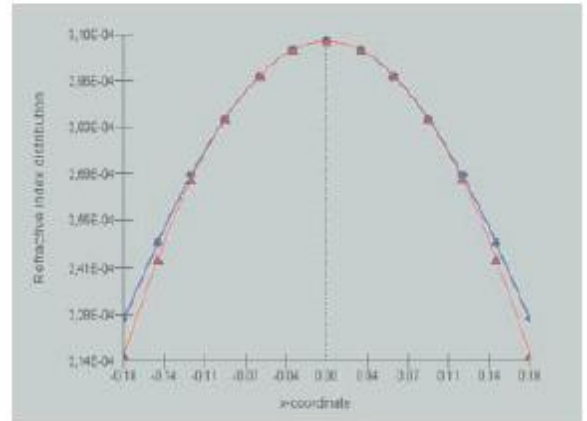


Fig. 4 / FEA Result / Parabolic Fit

ABCD行列法の結果を図示するために、基本モードスポットサイズと高次エルミートガウシアン多項式を、共振軸に沿って表示します。結晶内でのポンプビームとレーザ横モードの重ね合わせを図示できます。（図1）非点収差を説明するために、計算は共振器の軸に垂直な2面で、同時に行われます。定常波共振器の場合には、生成されたg-パラメータに基づいて、安定性ダイアグラムが計算されます。（図5）

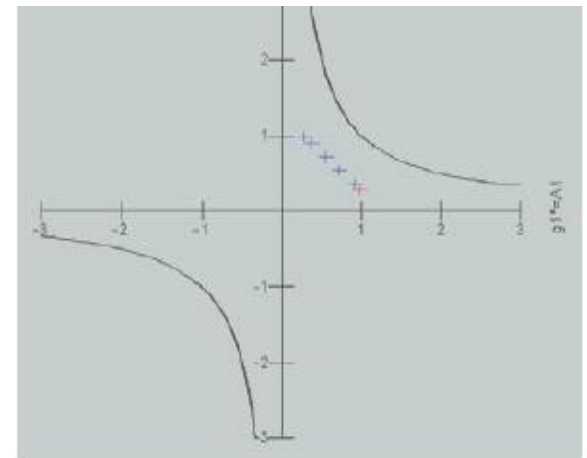


Fig. 5. Stability Diagram

連続光 (CW) と過渡的なレーザ挙動を解析する為に、得られたガウシアンモードと吸収ポンプパワー密度の分布が利用されます。

### CWレーザ動作

CW動作に対し、直観的なツールが備わっています。基本モードについては、出力パワーを計算し、マルチモード動作についても近似計算をします。結晶の体積上での反復積分によって、時間に無依存の3次元レーザレート方程式の解が得られます。図6は、例として、端面励起Nd:YAGロッドに対しての結果を示しています。丸印はシミュレーション結果を示し、緑色の三角は、測定結果を示します。「結果実証」の段落を参照下さい。

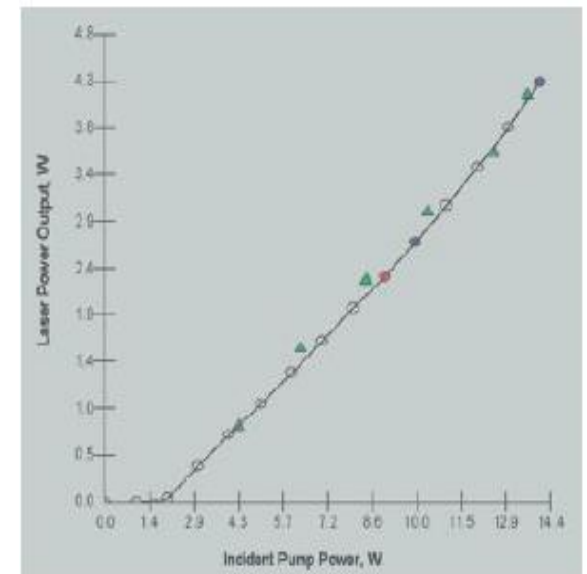


Fig. 6. Laser Power Output

### 過渡的なレーザ挙動

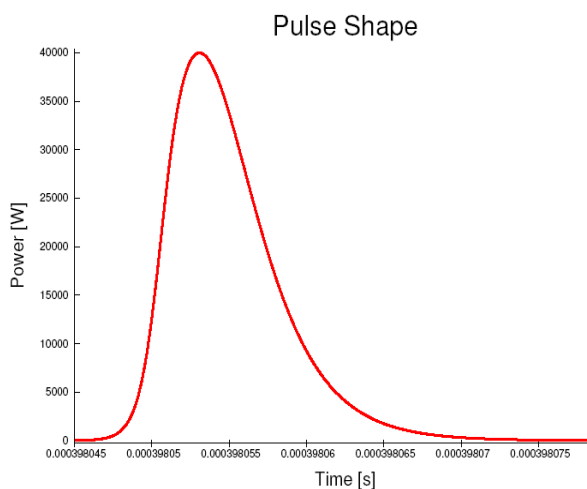
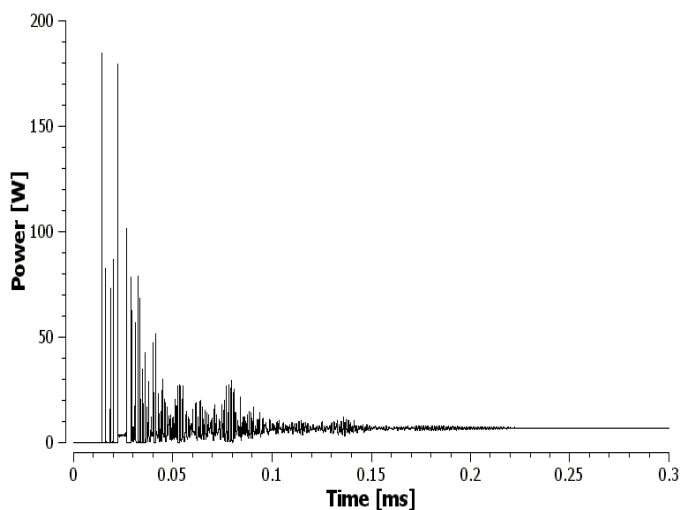
過渡的なレーザ挙動を解析するために、LASCADはマルチモード及びQスイッチ動作の動的解析 (DMA) のためのツールを持っています。この目的のために、所

定のガウシアン横固定モードの集合内の光子の個々の数量を記述する、時間依存レート方程式を、有限要素解法を使用して、解きます。この方法により、モード競合、パワーモードの出力、ビーム品質、そしてパルス波形が詳細に記述されます。結果は、実験による測定とよく一致していることが分かります。「結果実証」の段落を参照下さい。

動的マルチモード解析 (DMA) は下記の重要な特長があります。

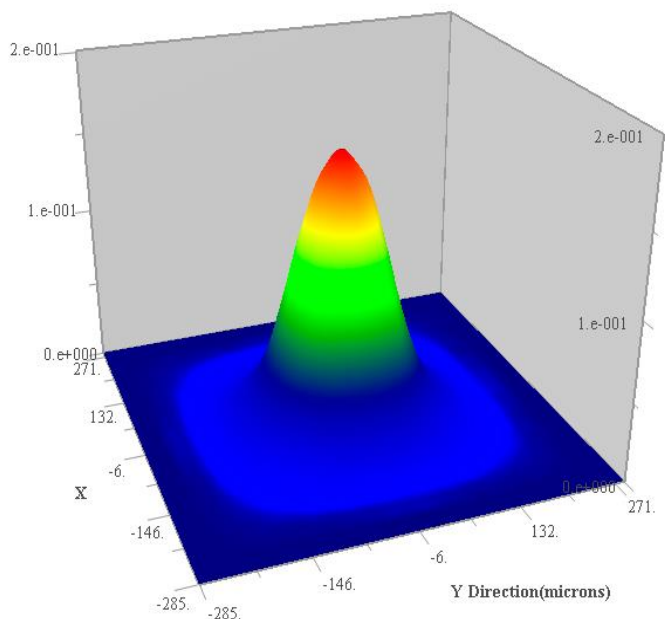
- 単一パルス及び高繰り返しQスイッチレーザのパルス波形、時間依存パワー出力の計算、
- CWとQスイッチ演算における横軸モードの各パワー出力計算
- CWとQスイッチ演算におけるビーム品質  $M^2$  の計算
- ビーム品質上のハードエッジ及びガウシアンアパーチャ効果
- ガウシアン及びスーパーガウシアン反射率プロファイルの出力反射鏡

例として、図7はDMAによって得られた、時間変化のパワー出力です。反転分布密度から計算が始まるので、 $N(x,y,z,t=0) = 0$ 、最初に急上昇する動きが見受けられ、時間が経つにつれ減衰し、最終的には一定値に達します。図8は DMAの典型的なパルス波形結果を示しています。



## 物理光学法

放物線近似とABCD行列が不十分であるとき、FEA結果が物理光学コードとして使用されます。このコードは、放物線近似を使わずに、結晶内の波面伝搬の詳細な3次元シミュレーションを与えます。この目的のために、このコードは、熱く、変形した結晶内で、細かいステップで波面を伝搬させるためのビーム伝搬法(BPM)の分割ステップを使用します。FEAで得られたような、変形した結晶端面と同様、



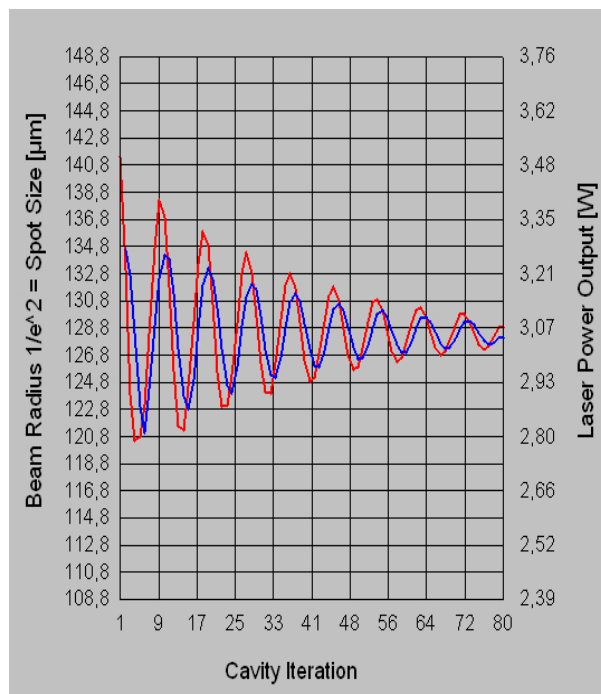
その場の屈折率を考慮に入れています。A. G. FoxとT. Liの原理に基づき、共振器内の一連の共振が計算され、最終的には基本モードや高次横軸モードの重ね合わせ？（superposition）に変換します。

計算している間、2つの図式ウィンドウが開きます。1つは、増加する反復に依存する？、出力ミラーの強度プロファイルを表示します。図9に一例を示しています。もう1つのウィンドウは、共振器反復のスポットサイズと、同時に計算される出力パワーを表示します。（図10）さらに、ビーム品質を示す3つ目のウィンドウを開くことができます。

BPMツールはまた、共振器固有値及び横固有モードの形状を数値的に計算することが可能です。

BPMツールは、DMAコードよりも開口部やミラーの有限拡大による動的gainと回折効果を考慮に入れています。

BPMツールは、レンズ口径とミラーの拡大が有限であるために、DMAコードより物理的にゲイン動学と回折の影響を考慮しています。また、BPM物理光学コードには、調整のずれの影響のシミュレーションという、もう一つの重要な特長があります。



## LASCAD™

### 教育ツール

もともとレーザ工学用に設計されていますが、LASCADのGUIは、その使いやすさから、科学者や技術者の実践演習用だけでなく、生徒への教育目的にも理想的なソフトウェアです。ガウシアンビーム光学の原理を対話形式で学ぶことができ、熱レンズ効果、レンズ口径、Qスイッチを含む、複雑で混成的な共振器構成の振る舞いを、明瞭に実演できます。

### 結果実証と展望について

ドイツのカイザースラウテルン大学のR.ヴァレンシュタイン教授のレーザグループは、LD励起ハイパワーレーザ内のコンジット結晶の作用を分析し、最適化するために、このソフトウェアを数年に渡り使用しています。一連の詳細な測定により、高度のシミュレーション結果が実証されました。（図6）

現在LASCAD社は、政府が支持する調査プロジェクトである『革新的レーザシステムのシミュレーションと最適化』の共同事業者です。このプロジェクトでLASCAD社は、レーザ共振器の計算シミュレーションツールの発展のために、ドイツのレーザ製造業者7社、エアランゲン大学、ドイツゲッティンゲンレーザ研究所と提携しています。この提携の重要な成果は

、前述の新しいツールであるDMAです。ドイツのInnoLas社との提携の中で、DMAによって得られた計算結果は実験的に立証され、研究論文“Dynamic multimode analysis of Q-switched solid state laser cavities” (Optics Express, Vol.17, 17303-17316(2009))

として記述されました。この調査プロジェクトのもう一つの目的は、電磁場方程式の動力学的三次元解の導出のためのFEAの手法を開発することです。最初の成果は、Photonics West 2009で発表されました。Proceedings of SPIE Vol. 7194-16 (2009) の“Finite element simulation of solid state laser resonators”をご参照ください。