

# LFEX レーザーシステムの高性能化 —増幅システムの動特性解析に関する研究—

金邊 忠, 河仲 準二

福井大学 学術研究院 工学系部門 電気・電子工学講座  
大阪大学レーザー科学研究所

## 1. はじめに

近年各国で核融合炉研究用レーザーが開発され、大出力が達成されている。核融合炉用レーザーに必要とされているパラメータは、レーザー光の出力エネルギーMJ、繰り返し率10Hz、レーザー効率10%の3つである。米国LLNLではNIFが建設され、大阪大学では高速点火用10PW 10kJ級レーザー(LFEX)を用いた研究が行われている<sup>[1]</sup>。

大出力ガラスレーザーは非線形屈折率効果の影響が無視できず、光学ノイズが成長してしまう。その成長を考慮したシステム設計が必要である。本研究では動特性計算を含んだシミュレーションコードの開発により、核融合炉用レーザーの動特性評価を進め、システムの最適化設計をする。

## 2. 非線形屈折率による位相遅れ

光電界 $E$ 、光強度 $I$ に対する屈折率 $n$ は式(1)で表される。

$$\begin{cases} n(I) = n_0 + n_2 |E|^2 = n_0 + \gamma I(z) \\ \gamma = \frac{4\pi}{c} \cdot 10^7 \cdot \frac{n_2}{n_0} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $n_0$ は線形屈折率、 $n_2$ は非線形屈折率、 $\gamma$ は非線形屈折率係数である。式(1)の第2項によりレーザーの波面に位相の遅れが生じる。また、位相の遅れをrad単位で表したものがB係数であり、式(2)で表される<sup>[2]</sup>。

$$B = k\gamma \int_0^L I_{out}(z) dz \quad (2)$$

$L$ は光路長、 $I_{out}(z)$ はレーザー進行方向 $z$ に対する強度である。

## 3. 2次元増幅伝播シミュレーションコードの概要

増幅計算にはレート方程式を解析して得られたFrantz-nodvik方程式を使う<sup>[3]</sup>。

$$I_{out}(z, t) = \frac{I_m(t - z/c)}{1 - [1 - \exp(-gz)] \exp\left(-\int_{-\infty}^{t-z/c} \frac{I_m(t')}{E_s} dt'\right)} \quad (3)$$

$I_{in}$ は入力強度、 $I_{out}$ は出力強度、 $g$ は小信号利得係数、 $E_s$ は飽和フルエンスである。

真空中に光を伝播させる自由空間伝播ではFFTを用いて空間周波数を変調して計算した。

$$\begin{cases} \tilde{\psi}_0(K_x, K_y) = \iint \psi_0(x, y) \exp[-2\pi i(K_x x + K_y y)] dx dy \\ \tilde{\psi}_z(K_x, K_y) = \tilde{\psi}_0(K_x, K_y) \exp[-i\pi \lambda z (K_x^2 + K_y^2)] \\ \psi_z(x, y) = \iint \tilde{\psi}_z(K_x, K_y) \exp[2\pi i(K_x x + K_y y)] dK_x dK_y \end{cases} \quad (4)$$

## 4. Frantz-Nodvik 方程式による B 係数

図1に示すように、従来のB係数の式はLambert則から導かれている。Lambert則はexp増幅であり利得の減少による飽和効果を含んでいない。核融合炉用レーザーは飽和領域での増幅計算を行っているので従来で用いていたB係数の式では高い値を示し、数値誤差を有していた。増幅計算はFrantz-Nodvik方程式が用いられ、飽和効果を含んだ増幅の式

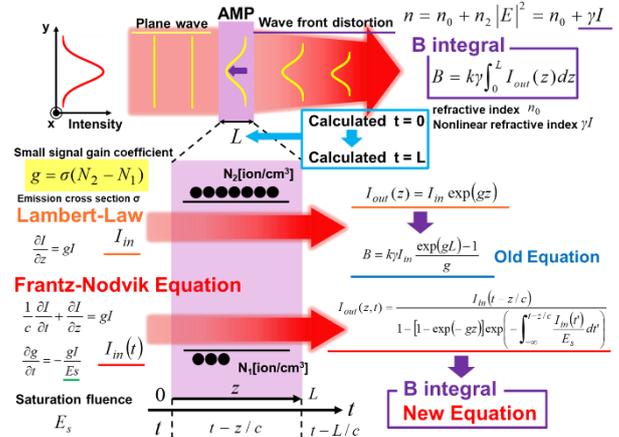


図1. Lambert 則と Frantz-Nodvik 方程式による B 係数

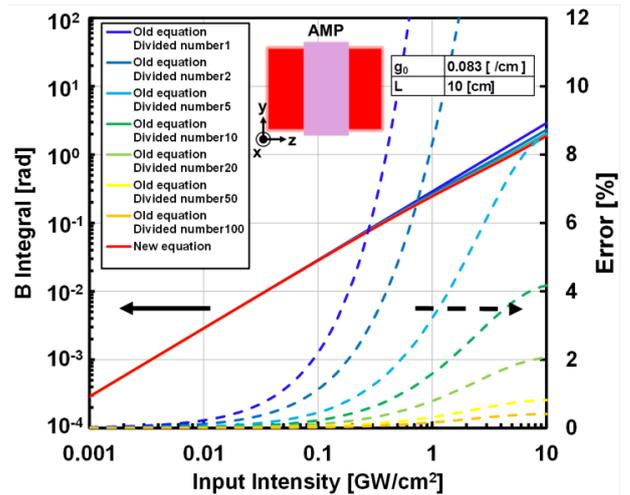


図2. Lambert 則と Frantz-Nodvik 方程式による B 係数の比較

である。Frantz-Nodvik 方程式を用いることで、核融合炉用レーザーの解析に適したB係数の式(5)を導いた。

$$B = k \cdot \gamma \cdot \frac{I_m \left\{ \ln \left[ 1 - \exp(gL) + \exp\left(\int_{-\infty}^{t-L/c} \frac{I_m(t')}{E_s} dt' + gL\right) \right] - \int_{-\infty}^{t-L/c} \frac{I_m(t')}{E_s} dt' \right\}}{g \left[ 1 - \exp\left(-\int_{-\infty}^{t-L/c} \frac{I_m(t')}{E_s} dt'\right) \right]} \quad (5)$$

式(5)の飽和効果を確認する。従来のB係数の計算を行う飽和増幅媒質の分割と、式(5)のB係数の計算を行う飽和増幅媒質を比較する。LLNLで計画されているLIFE<sup>[4]</sup>のレーザーシステム構成を参考に2次元増幅伝播コードを用いて計算する。増幅媒質をAPG-1、入力波形を20次のガウス、パルス幅を3.6[ns]、ビーム半径を12.5[cm]とした。結果を図2に示す。分割数が多くなると飽和領域での誤差が少なくなっているため、式(5)は飽和効果を含んだB係数の式は有用であることを確認した。

#### 4. 光学ノイズ源によるレーザー性能の検討

シミュレーション媒質の従来の計算手法は、一般的な光学系で用いられ実質的に厚みを持たず、伝播計算を行う Optical thin 条件の計算を用いていた。本研究では、媒質の厚みを考慮し段階的に伝播計算を行い、媒質内の変化を計算する Optical thick 条件の計算を導入した。Optical thick にすることで媒質内におけるより精度の高い非線形光学効果を考慮した計算が可能である。

ビーム全体が B 係数の影響により自己収束する効果を Whole beam self-focusing とする。Optical thin と Optical thick 条件で媒質内における Whole beam self-focusing を確認した。この時の Optical thick を考慮した分割数を導出した。出力波形の指標は式(6)で表す。

$$A [\%] = \frac{I_N(x, y, z)}{I_{\max}(x, y, z)} \cdot 100 \quad (6)$$

$I_N$  は分割数  $N$  の強度、 $I_{\max}$  は目標強度である。誤差 1[%]以下を媒質内の Whole beam self-focusing を考慮したとする。結果を図3に示す。入力強度が大きくなると B 係数が大きくなり Whole beam self-focusing の影響が大きくなるため分割が必要となる。また、媒質長  $L$  が大きくなると必要な分割数が増えることがわかる。入力強度  $I_0$ 、非線形屈折率  $\gamma$ 、ビーム半径  $r$ 、媒質長  $L$  で規格化ができた。

光学ノイズの影響によりレーザーの波面が不均一である場合、B 係数の影響により不均一性が增大する。このことを Beam break-up とする。Optical thin から Optical thick にすることで媒質内の Beam break-up 効果を確認した。この時の Optical thick を考慮した分割数を導出した。結果を図4に示す。入力強度が大きくなるにつれ分割数が必要になることがわかる。ノイズ径が大きくなることで必要な分割数が増えることがわかる。また増幅後の伝播によってノイズの影響が表れ、必要な分割数が増えることがわかる。

#### 7. クリーンファクターに対する光学ノイズの計算手法

実際の光学媒質の光学ノイズ源を模擬するために、Cleanness Factor を採用した。

$$F = p' \frac{X^2}{N^2} \quad (7)$$

$p'$  は単位面積当たりの光学ノイズ源のコロニー数、 $X$  はノイズの総メッシュ数、 $N$  は総空間メッシュ数である。

式(7)から光学ノイズ源を  $X$  個配置する。光学ノイズ源を配置する中心座標は乱数を用いて決定した。各ノイズ源の面積は乱数を用いて分配する。光学ノイズ源の中心座標の周囲の座標に光学ノイズ源を置く候補にする。無作為に光学ノイズを広めていき光学媒質の光学ノイズ源を模擬する。光学素子のクリーン度の指標として Cleanness Factor  $F$  を定義した。 $F$  が  $10^5$  以下であれば洗浄後の光学的にクリーンな状態であり、 $10^3$  以上であればディスク増幅器 1 年程度使用後の光学的に汚れた状態を示している。

#### 6. まとめ

非線形屈折率効果の位相遅れである B 係数の飽和を含んだ式を導出しその有用性を示した。媒質の計算手法を Optical thick で媒質中におけるそれぞれの非線形光学効果で必要な分割数を導出した。パラメータによる分割数の変化を確認した。光学素子のクリーン度の指標として Cleanness Factor  $F$  を定義した。光学ノイズ源の配置を乱数によって分配し、無作為に光学ノイズを広めていき光学媒質の光学ノイズ源を模擬する。

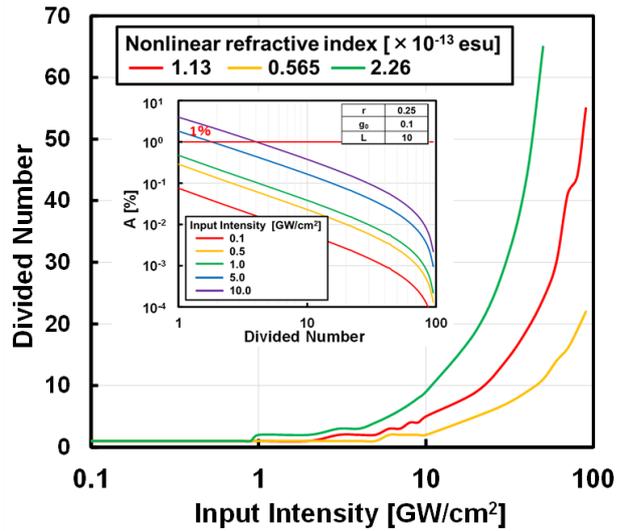


図3. Whole beam self-focusing の入力に対する規格化必要分割数

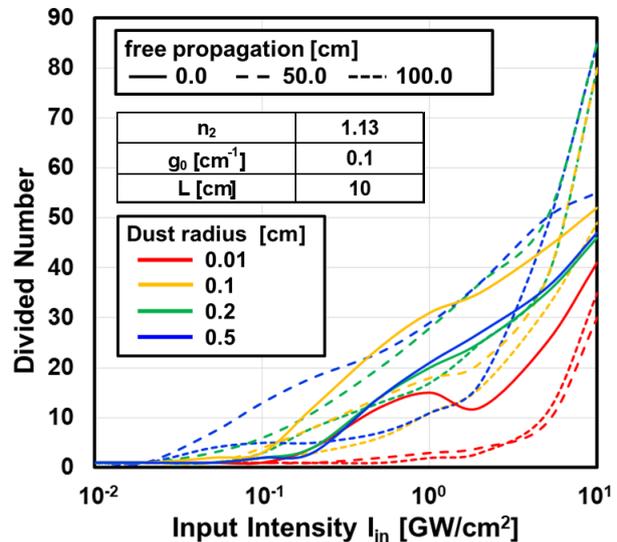


図4. Beam break-up の入力に対する規格化必要分割数

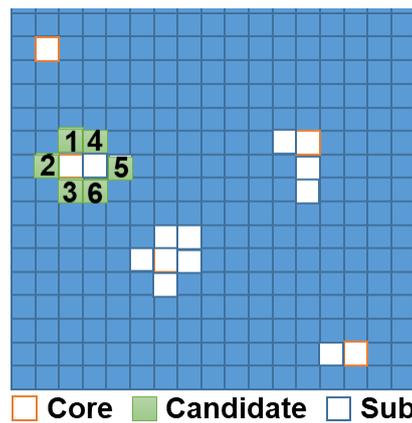


図5. Cleanness Factor による光学ノイズ源作成

#### 参考文献

- [1] T. Kanabe : OPTRONICS, **31**, 118(2012).
- [2] W. W. Simmons et al.: IEEE J. Quantum Electron, **17** (1981) 1727.
- [3] L. M. Frantz and J. S. Nodvik: Appl. Phys. **34** (1963) 2346.
- [4] A. Bayramian et al.: Fusion Sci. Technol. **60** (2011) 28.