

LFEX レーザーシステムの高性能化 —熱光学歪の均一化に関する研究—

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

次世代エネルギー源として核融合の開発が進んでおり、米国 LLNL では核融合研究施設 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^[1]。本研究は主増幅部のフラッシュランプ励起によって発熱が生じ、その熱から発生する熱光学歪の除去のための冷却手法について熱光学解析を行った。

2. レーザー増幅システム

NIF と LFEX の主増幅部を図 1 に示す。核融合研究用高出力レーザーとして繰り返しを必要とせず、1shot ベースの設計である。レーザー増幅器はフラッシュランプを用いている。レーザー媒質はブリュスター角配置である。フラッシュランプの励起速度の不均一性と媒質のエンド効果によってレーザー媒質内の蓄積エネルギーに差が生じる。励起に使用されなかったエネルギーは熱エネルギーに変換され、発熱量の違いから、レーザー断面方向に温度差が生じる。温度差の式を式(1)に示す。

$$\Delta T = Q_{ST} \cdot \chi \cdot \frac{1}{c \cdot D} \dots \quad (1)$$

ΔT は温度差[°C], Q_{ST} は蓄積エネルギー密度[J/cm³], χ はエネルギー利用係数, c は比熱[J/g°C], D は密度[g/cm³]を表す。この状態でレーザーを媒質に透過させるとレーザー断面方向に光路差が生じる。光路差の式を式(2)に示す。

$$\frac{dS}{dT} = \frac{dn}{dT} + (n-1) \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dT} \dots \quad (2)$$

dS/dT は光路長の温度係数[10⁻⁶/°C], dn/dT は屈折率の温度係数[10⁻⁶/°C], n は媒質の屈折率, $(1/L)dL/dT$ は線膨張係数[μm²/°C], L は光路長[μm]を表す。式(1)と式(2)により熱光学歪^[2]が発生し式(3)に示す。

$$\Delta \lambda = \frac{dS}{dT} \cdot \Delta T \cdot L \dots \quad (3)$$

$\Delta \lambda$ は光学波面歪[μm]を表す。熱光学歪はレーザー品質の低下を引き起こし、レーザーショットレートの制限要因となる。

3. 熱光学歪の均一化手法

熱光学歪を低減するには、レーザー断面方向の温度差を緩和させる必要がある。表 1 に熱光学歪の発生と低減するための方法を示した。まず媒質に投入する熱量 Q_{TH} を求める。NIF と LFEX のリアルなゲイン分布^[2]に従った熱量分布にする。NIF は 12%, LFEX は 2% のゲイン分布になっている。その後、三次元 CAD ソフト Solidworks flow simulation を用いてレーザー媒質 1 枚当たりの非定常熱解析を行う。媒質はリン酸塩ガラスの LHG-8 を用いた。媒質のサイズは LFEX のリアルサイズである 46×81×4[cm³] とし理想的な分布を得るため媒質の側面に断熱材を設置

した。媒質の初期温度は 20[°C] に設定し、1 秒で熱量の投入を完了させた。冷却ガスは N₂ ガスを用い冷却温度を 19~20[°C], 冷却時間を最大 7200[s], ガスの流速を 1[m/s] に設定した。冷却終了条件として、媒質の温度は周囲温度の 0.13[°C] 以下、媒質 1 枚当たりの波面歪量は 0.0025[μm] 以下の達成が必要とする。

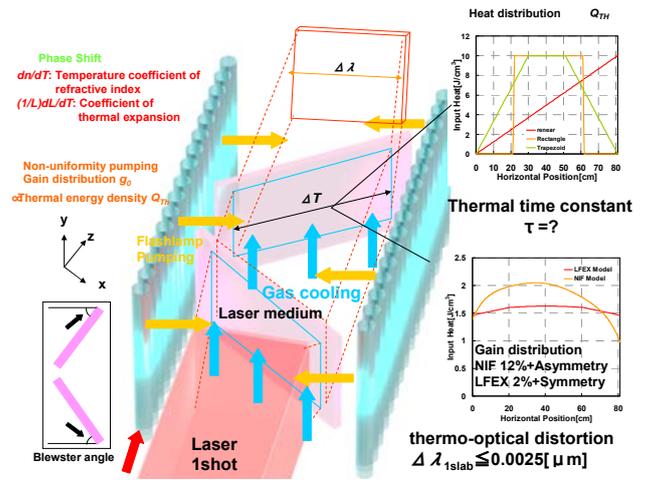


図 1. 主増幅部の熱光学歪緩和の概念図

表 1. 熱光学歪の評価値

Input heat		Real model	
APMLAB experiment	$W = \chi$	NIF Model	Gain distribution 12%+Asymmetry
Wavefront distortion=W[μm]	$g_0 = \chi$	LFEX Model	Gain distribution 2%+Symmetry
Gain coefficient=g ₀ [cm ⁻¹]			
Heat energy per stored energy x	$Q_{TH} = \chi \cdot Q_{ST}$		
Cooling		Laser Material LHG-8	
1.Heat removal	$h = \frac{Nu \cdot k}{t}$ $Nu = 0.037 \cdot Pr^{1/4} \cdot Re^{1/2}$ $\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$	Size	46×81×4 cm
		Initial temperature	20 °C
		Heat input time	1 s
2.Thermal relaxation		Cooling Method	N ₂ gas
Temperature distribution ΔT→0		Temperature	19~20 °C
		Cooling Time	7200 s
		Flow Rate	0~10 m/s
Thermo-optical		Cooling end condition	
Temperature coefficient of refractive index dn/dT		1.Slab average temperature	≤ Ambient temperature+0.13°C
Coefficient of thermal expansion (1/L)dL/dT		2. Δλslab	≤ 0.0025 μm
$\Delta \lambda = \left(\frac{dn}{dT} + (n-1) \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dT} \right) \cdot \Delta T \cdot L$			

4. NIF と LFEX のスラブ配置

図 2 に NIF と LFEX のスラブ配置^[3]を示す。NIF はパワーアンプで 5 スラブ 2 パスとメインアンプで 11 スラブ 4 パスの増幅を行い合計 54 スラブ分の増幅を、LFEX はメインアンプで 8 スラブ 4 パスの増幅を行い合計 32 スラブ分の増幅を行っている。波面歪量の計算はスラブごとで発生する波面歪量の和で合計される。NIF と LFEX の波面歪量は図 2 の式で想定できる。上の式は単純に全波面歪量を足し合わせた計算で、下は端スラブの反転、つまり偶数回パスと奇数回パスで端スラブの波面歪量が打ち消される効果を考えた式になっている。

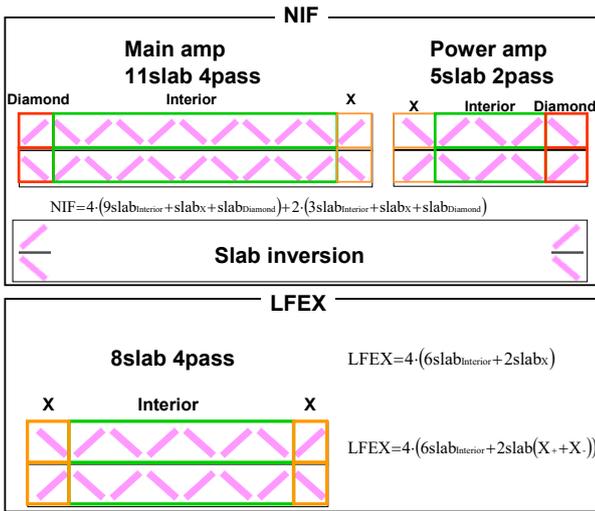


図2.NIFとLFEXのスラブ配置

5. NIFの波面歪量

図3(a)にスラブの奇数枚配置と偶数枚配置のゲイン係数の比較を示す。端スラブでは奇数枚配置は偶数枚配置に比べて23%のゲイン分布の均一化が可能で左右対称な分布に出来ることを示す。図3(b)にスラブを54枚並べた時の波面歪量を示す。X配置なら16[μm],ダイヤモンド配置なら10[μm],インテリア配置なら8[μm],NIF Totalなら6[μm]の波面歪量が生じることを示す。Best Placementは図2の下の効果を用いた計算結果で、端スラブの波面打ち消し効果でX配置とダイヤモンド配置の波面歪量が0になるとすると、NIFの波面歪量はインテリアスラブ42枚分しか効いていない計算になる。Best Placementの線はNIF Totalの線と似た線となっておりNIFの波面歪量^[4]の計算は下の効果を使用していると考えられる。

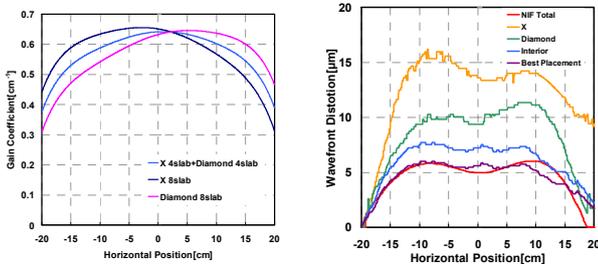


図3.スラブ配置の波面歪量

6. 冷却結果

図4にLFEXとNIFモデルの時間経過に対するスラブ平均温度と波面歪量緩和を示す。冷却はN₂ガス1[m/s]を20[C],19.5[C],19[C]の3パターンで行った。グラフの線から冷却ガス温度を0.5[C]下げると温度緩和時間が6000[s],4000[s],2000[s]と減少した。スラブ平均温度を減少するのが目的ならガス温度を下げれば解決できることがわかる。NIFはLFEXと比べて利得分布が大きいので、波面歪量の目標値0.0025[μm]を2時間では達成できなかった。

7. 繰り返し動作の評価

リン酸塩ガラスLHG-8は媒質の熱伝導率が低いため内部の熱が取り出せず、媒質の熱破壊が発生する問題がある。図5に熱伝達係数が一定値の時のショットレートと熱破壊限界の関係を示す。媒質ではLHG-8よりAPG-1の方が熱に強く、励起法ではフラッシュランプ励起よりLD励

起の方が10倍以上も熱影響を少なく出来る。現状フラッシュランプ励起は媒質の種類や熱伝達係数を変えて0.1~0.01Hz程度のショットレート改善が見込める可能性がある。

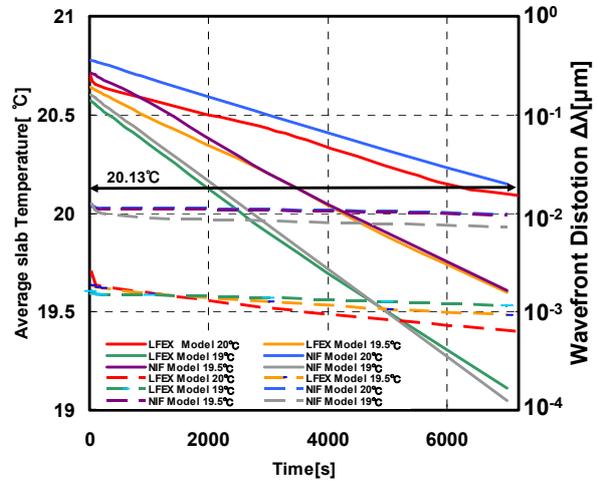


図4. 波面歪量と熱緩和割合の関係性

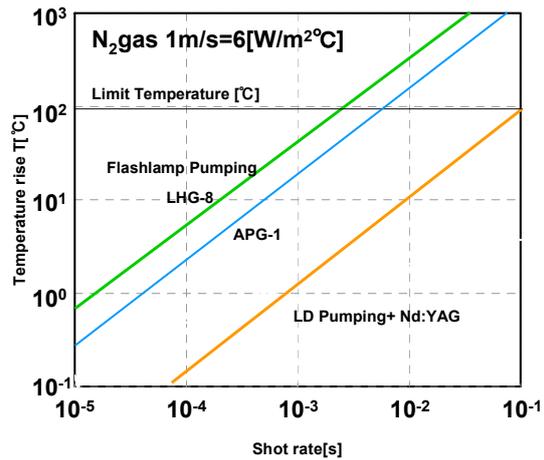


図5. 繰り返し動作の熱緩和

8. まとめ

本研究ではNIF、LFEX増幅部のフラッシュランプ励起不均一性で発生するゲイン分布を配置によって均一化し波面歪量を減少させる方法と波面歪量の計算を説明した。NIFの波面歪量はインテリアスラブ42枚分の波面歪量の和に近いことを示した。リアルモデルの温度と波面歪量の目標値達成の時間を求めた。ショットレートを変えた時の媒質や励起の種類によって決まる熱破壊限界を示し、フラッシュランプ励起の限界を示した。

参考文献

[1] T. Kanabe: OPTRONICS, **31**, 118(2012).
 [2] J.M.EGGLESTON *et al.*: IEEE J. QUANTUM ELECTRONICS, **20**, NO 3, 289 (1984).
 [3] John T. Hunt, "National Ignition Facility Performance Review 1998," UCRL-ID-138120-98 NIF-0025088, June, (1999).
 [4] D.L. Brown, G.T. Mannell, "Thermal Analysis of the Large Close Packed Amplifiers in the National Ignition Facility(NIF)", UCRL-JC-120211 L-19595-2 PREPRINT, June 1,(1995).