

## 分割型ホログラムによるレーザー集光スポットの多重パターンニング

末田 敬一<sup>1</sup>, 椿本 孝治<sup>2</sup><sup>1</sup>福井県産業支援センター (〒910-0102 福井市川合鷺塚町61字北稲田10)<sup>2</sup>大阪大学 レーザー核融合研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

## Multiple Patterning of Laser Focus Spot Using a Segmented Kinoform Phase Plate

Keiichi SUEDA<sup>1</sup> and Koji TSUBAKIMOTO<sup>2</sup><sup>1</sup>Research Center for Industrial Science and Technology, 61-10 Kawaiwashizuka, Fukui 910-0102<sup>2</sup>Institute of Laser Engineering, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

(Received October 15, 2003)

An important technique required in the application of laser systems to fusion is the ability to generate high energy to satisfy the conditions for self-ignition and to improve the uniformity of laser irradiation. To achieve this result, it is necessary to introduce a kinoform phase plate (KPP) that is able to produce an optimum envelope profile. However, a KPP is sensitive to beam aberrations caused by the nonlinear refractive index in optical components. To overcome this problem we have developed a multi-segmented KPP and demonstrated its usefulness and strength against phase distortions by numerical simulations.

**Key Words:** Kinoform phase plate, Computer-generated hologram, Laser fusion

## 1. はじめに

直接照射型レーザー核融合では、微小燃料ペレットを大出力レーザー光で照射してペレット表面から球対称的にプラズマを噴出させ、その反作用で内部の燃料水素を圧縮する。その結果、中心部は高温高密度状態に達して、ごく短時間の間に核融合反応が進行し、大量のエネルギーが放出される<sup>1)</sup>。このため、燃料ペレットの圧縮過程には高い球対称性が要求され、照射レーザー強度の不均一は、アブレーション圧力の空間的不均一を引き起こし、またターゲット加速の初期段階においてターゲット表面の凹凸として刻印され、それが流体力学的不安定性により成長する。このような圧縮不均一は燃料の自己点火に必要なレーザーエネルギーを大幅に増大させる。

そこで、照射に用いるレーザー光には、高いレーザー強度だけでなく優れた均一性が要求される。大阪大学レーザー核融合研究センターでは、ランダム位相板<sup>2)</sup>と呼ばれる均一照射技術が導入され、球状ターゲットの高密度圧縮を実現した。しかし、ランダム位相板の遠視野パターンはBesinc<sup>2</sup>( $r$ )関数型のためにスポットに広い裾を有しており、エネルギーの利用効率が低い。また、発生したプラズマによるレーザー光の吸収分布を考慮すると照射レーザーの接平面での集光パターンがフラットトップ形状に近いほど、高い吸収一様性が得られることが報告されている<sup>3)</sup>。これらの問題を解決するには、集光スポットにおける集光包絡線形状を制御することが不可欠である。

筆者らは照射一様性の向上を目的として、位相ホログラムの原理を応用しレーザー光の位相分布を制御することで、集光スポットの集光包絡線形状を任意に制御することができる位相板、すなわちキノフォーム位相板(Kinoform Phase Plate: KPP)<sup>4)</sup>の開発を行った。従来、KPPにおける位相分布はただ1つの遠視野像を記憶しているに過ぎなかったが、入力のパターン(近視野像)を変化させ、その各々に対応して集光パターンを生成するように位相分布を設計することで、一枚の位相板に複数の集光パターンを記憶させることに成功した。このKPPを用いると、入力ビームを時間的に変化させることで、複数の集光パターンを再生あるいは時間的に変化させることが可能である。また、KPPはその構造上、入力ビームの位相誤差(波面歪み)に極めて脆弱であるが、この設計アルゴリズムを用いてKPPをセグメント化することにより、近視野領域での位相歪みに耐力を有するパターン再生も可能となる。

本稿では一枚のKPPに複数の集光パターンを記憶させる設計アルゴリズムについて説明し、そのアルゴリズムを用いて設計したKPPによる集光パターンの動的制御と、近視野領域での位相誤差に耐力を有するKPPについて述べる。

## 2. KPPによる包絡線制御

## 2.1 KPPの機能

KPPを通過したレーザー光の集光パターンはFresnel-Kirchhoff式のFraunhofer近似式を用いて計算することがで

き、KPP(位相分布： $\phi(u, v)$ )通過後のレーザー光(波長： $\lambda$ 、波数： $k$ )の複素振幅を $u(u, v)$ とすると、このビームをレンズ(焦点距離： $f$ )によって集光したときの遠視野での複素振幅 $U(x, y)$ は

$$U(x, y) = \frac{\exp(i2kf)}{i\lambda f} \iint |u(u, v)| \exp[i\phi(u, v)] \exp\left[i2\pi\left(u\frac{x}{\lambda f} + v\frac{y}{\lambda f}\right)\right] du dv \quad (1)$$

となる。 $(x, y)$ は集光面での座標を表し、 $(u, v)$ はKPP面の座標を表す。また、KPPは基板上に半波長( $\lambda/2$ )の位相差を持つ正方形の位相膜エレメントを二次元アレイ状に配置することで作られるが、位相膜による位相遅れ $\phi$ は膜厚を $t$ 、波長 $\lambda$ に対する屈折率を $n$ とすれば、 $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}t(n-1)$ により与えられる。よって、遠視野で強度分布 $|U(x, y)|$ の集光パターンが得るには、KPPの位相分布 $\phi(u, v)$ 、すなわち位相膜の分布を適当に選ぶことにより可能であり、 $|U(x, y)|$ から $\phi(u, v)$ を求める問題に帰着できる。Fig. 1にKPPの設計例を示す。近視野の入力パターンは直径320 mmの円形開口のフラットトップ形状とし、設計の集光パターンの強度分布を、22次のスーパーガウシアン(半径250  $\mu\text{m}$ )とした。(a)はそのときのKPPの位相分布を表し、(b)はこのKPPを通過した光を集光したときの集光プロファイルを表す。

## 2.2 KPPの設計アルゴリズム

今2つの複素振幅関数 $U(x, y)$ 、 $u(u, v)$ が

$$U(x, y) = |U(x, y)| \exp[i\theta(x, y)] \quad (2)$$

$$u(u, v) = |u(u, v)| \exp[i\phi(u, v)] \quad (3)$$

と表され、これらがフーリエ変換の関係で結ばれており、 $|U(x, y)|^2$ が観測可能な量として既知な場合に $|U(x, y)|$ か

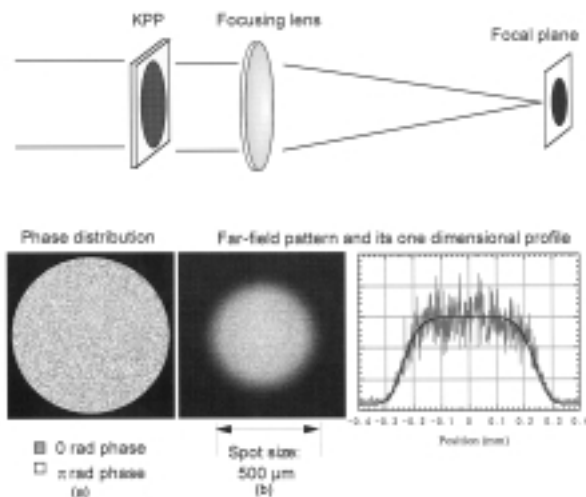


Fig. 1 Irradiance profile control using a kinoform phase plate. (a) Phase distribution. (b) Far-field pattern and its one dimensional profile.

ら $\phi(u, v)$ を求める問題を位相回復問題といい、種々の手法が提案されている。核融合レーザー用の設計を考えた場合、ある複素振幅関数の絶対値が与えられたとき、その複素振幅関数のフーリエ変換の絶対値が望みの値になるようにもとの関数の位相を求める必要がある。そこで像再生を目的とした計算機プログラムに適したアルゴリズムである反復フーリエ変換法<sup>5-10)</sup>により位相の決定を行った。反復フーリエ変換法とは、近視野像と遠視野像の複素振幅がフーリエ変換の関係で結ばれているとき、像の振幅分布の絶対値とそのフーリエ変換の絶対値から両方の位相を求めることに帰着する方法である。このアルゴリズムではまず $-\pi$ から $\pi$ までの間に一様に分布する乱数を初期位相とし、これを既知の遠視野像と組み合わせて初期推定複素振幅を作る。これをフーリエ変換し、変換後の絶対値部分は既知の遠視野における強度分布で置き換え、位相はその元の状態に保存しておく。この結果を逆フーリエ変換した後、絶対値部分を近視野領域における強度分布で置換し、位相はそのまま残す。以下同様の方法を繰り返して誤差を減らし解を収束させる。Fig. 2は反復フーリエ変換法のフローチャートである。ここで $u(u, v)$ は近視野の複素振幅、 $\phi(u, v)$ はKPPの位相分布である。よって $|u(x, y)|^2$ はビームの強度であり既知である。また、 $U(x, y)$ は遠視野の複素振幅、 $\theta(x, y)$ は位相である。計算の流れは以下のように進める。

- (1)  $-\pi$ から $\pi$ の間に一様分布する乱数を初期位相 $\phi_0(u, v)$ とし、近視野の振幅 $|u(u, v)|$ と組み合わせて複素振幅 $|u(u, v)| \exp[i\phi_0(u, v)]$ を作る。
- (2) これをフーリエ変換して遠視野の複素振幅 $|U'(x, y)| \exp[i\theta(x, y)]$ を求める。
- (3) その振幅 $|U'(x, y)|$ を設計の集光パターンの振幅

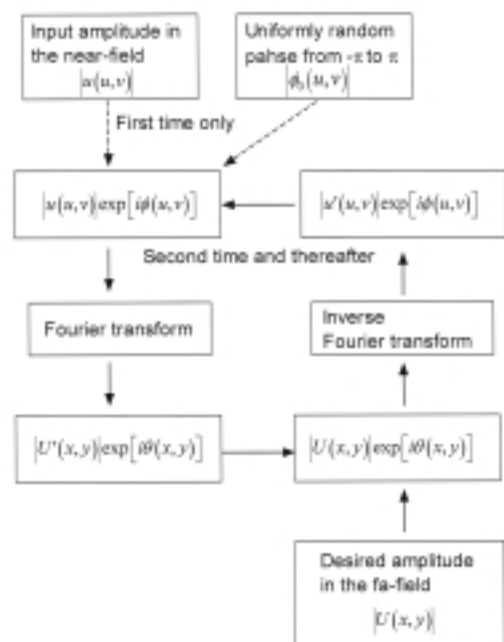


Fig. 2 Phase recovery algorithm for a kinoform phase plate.

$|U(x, y)|$ に置き換え、位相 $\theta(x, y)$ はそのまま残す。

(4) この結果を逆フーリエ変換して近視野の複素振幅

$|u'(u, v)|\exp[i\phi(u, v)]$ を求める。

(5) 振幅 $|u'(u, v)|$ は近視野の入力の振幅 $|u(u, v)|$ に置き換える。

以上の(2)から(5)の操作を繰り返すことによって、位相分布を収束させる。また、 $U(x, y)$ 、 $U'(x, y)$ はそれぞれ

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N |U(x, y)| = 1, \quad \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N |U'(x, y)| = 1 \text{ として規格化した。}$$

一般的にKPPは多段ステップで遠視野像を制御するが、現有の製作技術で大口径化が容易なのは2段階、すなわちバイナリー(0と $\pi$ の位相分布を与える)である。そこで連続的位相分布に対する反復フーリエ変換法にバイナリー化のアルゴリズムを追加した。量子化されたKPPの設計アルゴリズムでは、上述の(5)の行程において位相 $\phi(u, v)$ を移すときに、階調数を $N$ としたとき、 $-\pi$ から $\pi$ の間で $\phi(u, v)$ を $N$ 等分することにより $\phi_d(u, v)$ を得る。そして繰り返し数が増加するとともに $N$ を少しずつ下げていき最後に2値化し、最終的に0と $\pi$ の位相分布を得る。

### 3. 集光スポットの多重パターンニング

従来、KPPにおける位相分布はただ一つの遠視野像を記憶しているに過ぎなかった。これに対して本研究では入力のパターン(近視野像)を変化させ、その各々に対応して集光パターンを生成するように位相分布を設計することで、一枚の位相板に複数の集光パターンを記憶させることを試みた。パターン設計手法を次に示す。直径が異なる2つの入力ビームA(ビーム直径 $D_a$ )、B(ビーム直径 $D_b > D_a$ )を仮定し、それぞれが生成する遠視野像をそれぞれ $F_A$ 、 $F_B$ とする。各々の位相分布の決定には2.2で述べた計算方法を用いる。

(1) 最初に入力ビームAがパターン $F_A$ を再生するように位相分布を決定する。このとき位相回復アルゴリズムにおける位相板面上の計算領域は径が $D_a$ の領域(領域A)においてのみである。

(2) 入力ビームAに対する位相分布が決定された後、領域Aの位相分布を固定する。

(3) 位相決定は位相板面上において直径が $D_b$ の領域(領域B)で行われるが、領域(A)の位相分布は変化させず領域(B-A)からの光波によってビームAが構成する遠視野像 $F_A$ をうち消しつつ、 $F_B$ を再生するように位相分布を決定していく。

Fig. 3に1枚のKPPに2枚のパターンが記憶された例を示す。(a)はその位相分布、(b)は入力ビームAに対する遠視野像を、(c)は入力ビームBに対する遠視野像を示している。入力ビームAでは遠視野においてアルファベットAを再生するように、入力ビームBではアルファベットBを再生するように設計した。メッシュサイズは $128 \times 128$ 、入力ビームの強度比は1:1のフラットトップパターン、ビーム径比率はA:B = 1:2である。この結果、1枚のKPPに

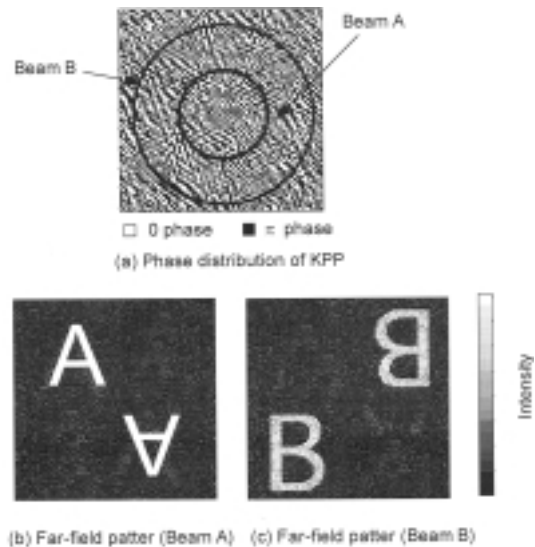


Fig. 3 Multiple patterning of a laser focus spot by using of a segmented kinoform phase plate.

複数の独立したパターンを記憶することが可能であることがわかる。

### 4. 集光パターンの動的制御

慣性核融合において高いターゲット利得を達成するためには、燃料を効率よく高密度に圧縮することが必要不可欠である。従って燃料はできるだけ低い温度(低エントロピー)を保ちつつ加速・圧縮されなければならない。このような圧縮過程を実現するための駆動力となるレーザーの波形は、高精度に調整されることになる。この波形整形されたレーザーパルスはテラードパルスとも呼ばれ、その基本的特徴は、レーザー出力が最初(フット部)は極めて低く抑えられ、時間とともに急激に増大する(主パルス)というものである。しかし、流体不安定性による擾乱の成長はテラードパルスでは大きく、離散パルスによる圧縮の方が小さいため、両者の妥協点として階段状のパルス波形の導入が思案されている。このように断熱圧縮と流体力学不安定性から要請されるパルス形状を実現することは重要である。しかし、フット部と主パルスのコントラストが100を越えるような場合、多ビームレーザー間のパワーバランスの調整が極めて困難である。そこで、もしも爆縮に追従して集光スポット径を変化させることができればエネルギー効率だけでなく、波形整形の容易さやパワーバランスの精度向上の観点からも有効である。

そこで3項で述べた1枚のKPPに複数の位相分布を記憶させることが可能であるという原理を応用して集光パターンの動的制御のシミュレーションを行った。具体的な方法は、入力ビームの口径と強度を時間的に変化させ、その各々に対応して集光パターン(この場合は爆縮に追従して集光スポット径が収縮していくように設計)を生成するように位相分布を設計する。そしてパルススタッキングの技術を用いて入力レーザービームの口径および強度を時間的に制御すれば、集光パターンを時間的に制御する

ことが可能である。

実際に核融合用レーザーに導入する場合を想定して、3パターンの記憶を試みた。設計には3項で述べた設計アルゴリズムを繰り返し用い、設計条件としては、入射ビームは口径320 mmの円形開口フラットトップパターン、その波長は526.5 nm、遠視野領域を1 mm×1 mm、計算機中ではメッシュを512×512に分割し、遠視野における集光パターンの強度分布は直径が500 μmから順次収縮するフラットトップを仮定した。集光パターンの強度分布を評価するために次の2つの評価パラメーター、エネルギー利用効率(入射エネルギーに対してターゲット表面に集光されるエネルギーの割合)と設計遠視野パターンからの誤差を用いた。誤差は

$$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N |I_d(j,k) - I(j,k)|^2}{I_d(j,k)}}$$

と定義する。ただし $I_d(j,k)$ は設計パターンの強度分布を表し、 $I(j,k)$ は集光パターンの強度分布を表す。

また、 $I(j,k)$ 、 $I_d(j,k)$ はそれぞれ

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N I(j,k) = 1, \quad \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N I_d(j,k) = 1$$

として規格化した。3パターン記憶KPPの入力ビームとその遠視野像をFig. 4に示す。レーザー照射における各時間ステップ毎の近視野パターンは、Fig. 4(a)に示すようなものである。それらの相対強度は1:4:10とし、ビーム間の境界の直径は143, 248, 320 mmとし、各リング面積が等しくなるように調整を行った。そして遠視野におけるそれぞれのビーム照射時に遠視野パターン直径が250, 175, 100 mmのフラットトップパターンとした。このシミュレーションにより得られた遠視野像をFig. 4(b)に示す。こ

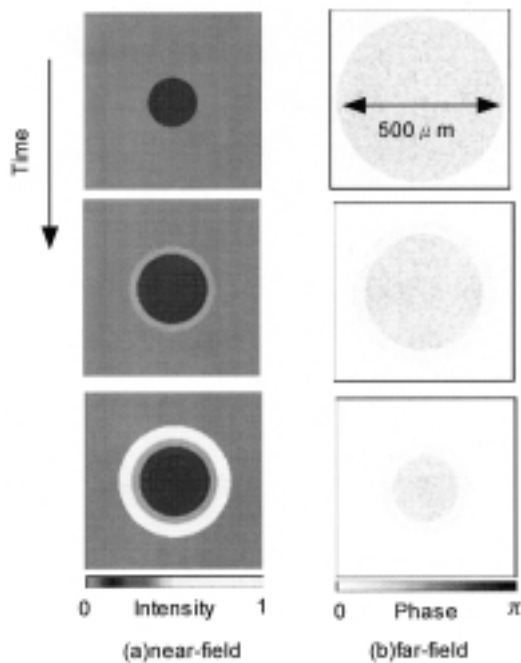


Fig. 4 Dynamic focusing by using of a multi-segmented kinoform phase plate.

の結果入力ビームの口径と相対強度をうまく選べば3個のパターンを記憶することが可能であることが分かる。また集光パターンの評価を行った結果、エネルギー効率は67.3%, 68.0%, 62.7%, エラーは0.56, 0.67, 0.67という結果が得られ、このことからもどの時間ステップのパターンもほぼ設計像を再生していることが確認できる。エネルギー効率は若干低い、爆縮効率は数倍上昇すると予想される。

## 5. 位相誤差に耐力を有するKPP

キノフォームを設計する際、入力ビームは完全にコヒーレントで位相がそろっていると仮定してきたが、実際のビームはビーム断面内で位相が完全にそろっていない場合が考えられる。この位相のずれを取差というが、ビーム毎に同じ取差であり、それがレーザー出力エネルギーに依存せず経時変化もしなければ、位相回復アルゴリズムにその取差を考慮して設計することにより解決できる。しかし、レーザービームに高度の波面性能を求めるよりは、比較的取差の大きなビームであっても集光パターンの制御が可能であることは、将来の実用炉開発のためにも重要である。そこで任意の波面歪にも対応できるように、波面歪みに耐力を有する位相板の設計を試みた。これは3項の結果を発展させたものであり、位相板を複数個に分割しそれぞれ独立して遠視野像を構成させることで、1つのセグメントが受ける取差の影響を低減させる。

Fig. 5に分割型KPP (Multi segmented KPP : MS-KPP)による集光強度分布制御の概念図を示す。(a)はKPPのセグメント化、(b)は個々のセグメントからの集光パターン、(c)はMS-KPP全体が作る集光パターンを示す。Fig. 5から分かるように、1つの位相板をいくつかの大きな集合(以下セグメントと呼ぶ、図の場合は4×4分割)に分割する。一般的なKPPは全体で1つのパターンを形成するのに対して、MS-KPPは個々のセグメントが遠視野像を形成し、全体ではその重ね合わせとして作用する。ただし、個々の強度はインコヒーレントな重ね合わせではなく、振幅分布のコヒーレント重ね合わせが所望の集光パターンを形成するような設計であることに注目しなければならない。

MS-KPPの設計に利用するアルゴリズムは、基本的には3項で述べた複数のパターンを1枚のKPPに記憶させる方法

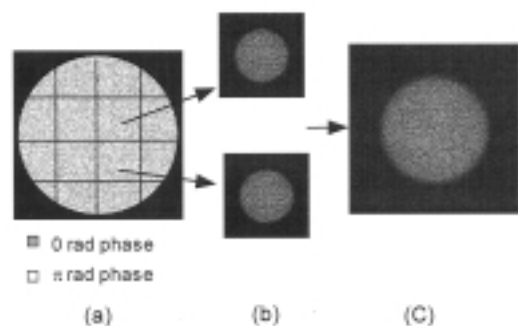


Fig. 5 Irradiance profile control using a multi-segmented kinoform phase plate.

と同じであり、この場合はそれぞれの再生する像がすべて同じであるという点のみ異なる。その設計アルゴリズムを次に示す。KPP全体のエレメント数を $N$ 、セグメントの分割数を $n \times n$ とし、次のようなゲート関数を $g_{lm}(x, y)$ 定義する。

$$g_{lm}(x, y) = \prod \left( \frac{x - A_{lm}}{a} \right) \prod \left( \frac{y - B_{lm}}{a} \right) \quad (4)$$

ただし $l = 1, 2, \dots, n$ ,  $m = 1, 2, \dots, n$ ,  $a = N/n$ で、 $(A_{lm}, B_{lm})$ は $(l, m)$ セグメントの座標を表し、 $\prod$ は

$$\prod(\rho) = \begin{cases} 1 & |\rho| \leq 1/2 \\ 0 & |\rho| > 1/2 \end{cases} \quad (5)$$

を満たすrectangle関数である。このときビーム全体の複素振幅を $f(x, y)$ とおいたとき、 $(l, m)$ セグメントに関する入力分布は

$$f(x, y)g_{lm}(x, y) \quad (6)$$

で与えられるので、位相回復アルゴリズムにおいて入力、すなわち近視野における複素振幅を(6)においてそのセグメントの位相分布を求める。これを $l = 1, 2, \dots, n$ ,  $m = 1, 2, \dots, n$ まで繰り返すことで全体の位相分布を決定する。

次にMS-KPPが理論通り位相誤差に対して耐力を有するかについて、シミュレーションを行い検討した。計算領域全体のメッシュ数は2048、近視野像、遠視野像ともにフラットトップパターンを仮定しその幅をメッシュ数で1024とし、高速フーリエ変換を用いた。上記のアルゴリズムを用いて2分割のMS-KPPを設計し、比較のために分割しない一般的なKPPも設計しておき、歪みが付加されない状態でのそれぞれの設計誤差(誤差の定義は4項で定義したものを用いる)を合わせておく。歪みが付加されることにより、その集光パターンが設計からどれだけずれるかを、分割がある場合と無い場合でシミュレーションし比較した結果をFig. 6に示す。付加した歪みはsin関数を用い、 $I \sin(\pi + \phi)$ と仮定した。(a)は $\phi = 0$ とし $I$ を $0 \sim 10\pi$ まで変化させた場合、(b)では $I = 6\pi$ とし $\phi$ を $0 \sim 0.5\pi$ まで変化させた場合の結果である。(a)(b)ともに縦軸は集光パターンと設計パターン間の誤差、横軸は歪みの付加量を表し、実線が分割無しの場合、破線が2分割の場合を示す。Fig. 6から付加される歪み量が大きくなるにつれてMS-KPP、KPPともに集光パターンは設計パターンからの誤差が大きくなるが、MS-KPPの方がその割合を小さくすることが分かる。このことから、分割してKPPを設計することで、1つのセグメントが受ける位相誤差の影響を小さくし、波面収差がある場合でも集光スポットを安定して再生する効果が確認できた。

次に上記のシミュレーションから得られた基礎的知見に基づいて、MS-KPPを実際のレーザーシステムへ応用したときの効果について検討した。大阪大学のレーザー核融合システムでは、高効率ターゲット爆縮を行うためのレーザー光として2次元スペクトル空間分布レーザー光(2-D SSD: 2-Dimensional beam Smoothing by Spectral Dispersion)<sup>11)</sup>が導入されている。2-D SSDとはビーム断面での空間的カラーサイクルが2次元の光のことであり、 $x$ 軸と $y$ 軸とは異なった空間的カラーサイクルの異なった

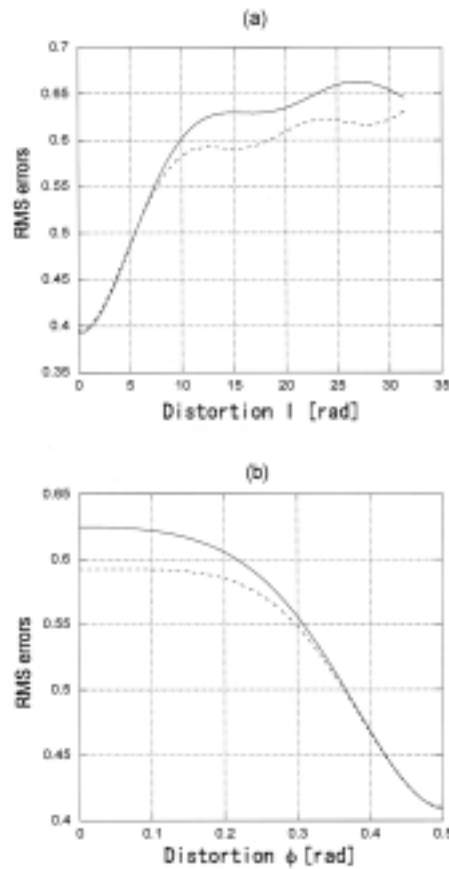


Fig. 6 The error in reconstructed far-field pattern depends on the number of segmentation.

変調周波数周期を持ち、2次元的なスペckルの移動によりほぼ完全な2次元の平滑化が可能となる。MS-KPPに2-D SSDが入射したときの集光パターン特性についてシミュレーションを行った。SSDの条件はバンド幅 $0.1 \text{ nm}$  ( $9 \text{ GHz}$ )  $\times$   $0.1 \text{ nm}$  ( $13 \text{ GHz}$ )、スペクトル角度分散量は $300 \mu\text{rad}/\text{nm} \times 300 \mu\text{rad}/\text{nm}$ 、波長 $351 \text{ nm}$ とした。MS-KPPの条件は $4 \times 4$ 分割、エレメントサイズ $500 \mu\text{m}$ 、ビーム径 $320 \text{ mm}$ 、焦点距離 $5000 \text{ mm}$ 、集光条件は径 $500 \text{ mm}$ のフラットトップとし、デフォーカス量は $-5 \text{ mm}$ とした。このときに与える歪みは、現有レーザーXII号ターゲットおよびKDPなどの特性を考慮して、Zernikeの収差関数の展開により、次の3つのZernike係数を採用した。それらは非点収差、コマ収差、球面収差でありこれらの係数を1とし、線形1次結合させたものである。Fig. 7にMS-KPPを通過した2-D SSDの集光プロファイルとエネルギー効率を示す。波面収差がない理想状態でのエネルギー効率は72%である。これに波面歪みを付加すると分割なしのKPPではエネルギー効率が60%まで低下するのに対して、MS-KPPを用いると集光パターンはそれほど劣化することなく、しかもエネルギー効率は69%とわずかな低下にとどまった。

## 6. まとめ

本稿では直接照射型レーザー核融合におけるターゲットの球対称爆縮を効率よく行うためのレーザー光の照射一様性の向上を目的として、位相型ホログラムによる

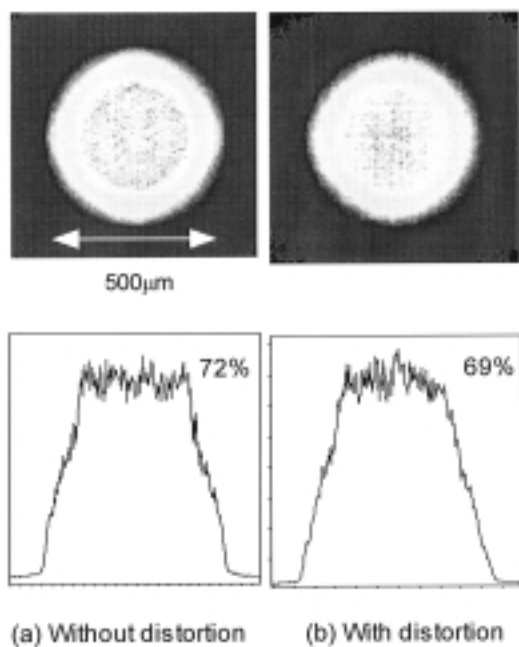


Fig. 7 Calculated far-field pattern without phase distortion and with phase distortion.

レーザー集光スポットの制御を行った。従来、KPPにおける位相分布はただ一つの遠視野像を記憶しているに過ぎなかったが、一枚のKPPに複数の集光パターンを記憶させ

る設計アルゴリズム開発し、そのアルゴリズムを用いて設計したKPPにより本来なら静的である集光パターンを時間的に変化させることが可能であることを、計算機シミュレーションにより示した。また、KPPはその原理上位相誤差に極めて脆弱であるが、この問題を解決するために位相板を複数個に分割しそれぞれ独立して遠視野像を構成させることで、1つのセグメントが受ける収差の影響を低減させ、入力位相誤差に耐力を有するMS-KPPを開発した。これを用いることで波面収差がある場合でもエネルギー利用率をほぼ維持したまま、集光スポットを安定して再生することが可能である。

#### 参考文献

- 1) Nuckolls, L. Wood, A. Thiesson, and G. Zimmerman: *Nature* **239** (1972) 139.
- 2) Y. Kato, K. Mima, N. Miyanaga, S. Arinaga, Y. Kitagawa, M. Nakatsuka, and C. Yamanaka: *Phys. Rev Lett.* **53** (1984) 1057.
- 3) 大阪大学レーザー核融合研究センター：レーザー核融合炉「光陽」概念設計，平成6年12月(1994)。
- 4) S. N. Dixit, J. K. Lawson, K.R. Manes, H. T. Powell, and K. A. Nugent: *Opt. Lett.* **19** (1994) 417.
- 5) R. W. Gerchberg and W. O. Saxton: *Optik* **34** (1971) 275.
- 6) R. W. Gerchberg and W. O. Saxton: *Optik* **35** (1972) 237.
- 7) S. Kirkpatrick, C. D. Gellatt, and M. P. Vecchi: *Science* **220** (1983) 671.
- 8) J. R. Fineup: *Appl. Opt.* **21** (1982) 2758.
- 9) N. Yoshikawa and T. Yatagai: *Appl. Opt.* **33** (1994) 863.
- 10) F. Wyrowski and O. Bryndahl: *J. Opt. Soc. Am. A* **5** (1988) 1058.
- 11) G. Miyaji, N. Miyanaga, S. Urushihara, K. Suzuki, S. Matsuoka, M. Nakatsuka, A. Morimoto, and T. Kobayashi: *Opt. Lett.* **27** (2002) 725.