円環状に配列したビームからのベッセルビームの発生

佐伯 拓¹, 橋本 和久², 本越 伸二¹, 今崎 一夫¹, 藤田 尚徳²,
中塚 正大^{1,2}, 山中 千代衛¹

¹(財)レーザー技術総合研究所 (〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4)

²大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

Generation of a Bessel Beam from Annularly Arranged Multi-Beams

Taku SAIKI,¹ Kazuhisa HASHIMOTO,² Shinji MOTOKOSHI,¹ Kazuo IMASAKI,¹
Hisanori FUJITA,² Masahiro NAKATSUKA,^{1,2} and Chiyoe YAMANAKA¹

¹Institute for Laser Technology, 1-8-4 Utsubo-honmachi, Osaka 550-0004

²Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871

(Received April 11, 2008)

A laser beam passes through 12 or 24 circular apertures arranged annularly, and the transmitted beams overlapped with each other in phase to generate a Bessel beam. The resultant beam propagates and maintains characteristic narrow energy distribution that agrees with the results of numerical calculation.

Key Words: Bessel beam, Solid-state laser, Phase matching

1. はじめに

近年、レーザー技術の急速な進歩によりレーザーを用いたエネルギーの伝送に関する研究が行われている。固体、ファイバレーザーでの大出力パワーレーザーが現実のものとなり、大出力エネルギー伝送が可能となった^{1,2)}。今現在、Ybファイバレーザーの効率は連続波で80%、電源効率は35%に達しており、20kWのマルチモード出力のレーザーがIPGフォトリクスで達成されている²⁾。

一方、自然環境の保護や有効利用への関心が高まりを見せている。宇宙空間での太陽光自然エネルギーの有効利用のため、宇宙太陽光発電システムの実現に向けて、日本や米国、ドイツ、イスラエルで関連した研究が精力的に進められている。宇宙太陽光発電システムとは静止軌道に衛星を打ち上げ、この衛星で捕集した太陽光エネルギーを地上に伝送するシステムである。地上へのエネルギー伝送媒体としてマイクロ波を用いた方式とレーザー光を用いた方式が提案されている。レーザー方式では太陽光を励起源としてレーザーを発振させる太陽光励起レーザーが開発されており、太陽光からレーザー光へ高効率の変換が可能となってきた³⁾。

現在、このように小型・高出力レーザーの開発が進み、指向性ビームエネルギー伝送の実用化の可能性が高まりつつある。一方、レーザー、マイクロ波等によるエネルギー伝送に関する研究も平行して行われている。レーザーとマイクロ波方式を比較した場合、ともに電磁波であるが、レーザーは周波数が高く回折広がり小さ

い、このため高エネルギー密度で伝送可能、受光側の装置を小さくできるという利点がある。レーザーエネルギー伝送の応用例として、人工衛星間や移動体へのエネルギー供給、ソーラーセイル、レーザー推進等、宇宙地上間でのエネルギー伝送が挙げられる。すでにレーザー光でエネルギー伝送を行い、これを電力に変換してロボットやヘリコプター等を駆動する研究が近畿大学河島研究所等で行われている⁴⁾。また、ビーム伝送の要素技術として、発振器、伝送(地上では大気擾乱の影響大)、受光側の光電変換、ビームポインティング制御も重要である³⁾。実用的な機械を動かすためには、kWクラスのレーザーパワー伝送が必要である。しかし、単一ビームでのエネルギー発生量には限界がある。ファイバレーザーでは光学ダメージや非線形効果によるレーザー出力の制限、固体レーザーでは主に熱レンズ効果によりレーザー出力が制限される。1本のレーザービームでMW近い高出力パワーを得るというのは困難であると考えられる。

ガウスビームは長距離伝播すると回折によりビームの幅が無限に広がり強度が弱まる。長距離伝播するとビームサイズが伝播距離に比例して広がるため、ピーク強度は伝播距離の自乗に反比例して低下する。宇宙用途で重量が制限される場合、レーザー射出系の光学系サイズも制限されるため、伝送用に巨大な出力ミラーを用いることは困難である。また、大型のミラーは製造の過程で波面精度の維持が難しくなる。以上のような理由から、ガウスビームによるエネルギー伝送では、ミラーサイズで伝播距離が制限される。一方、ベッセルビームには、強

度分布を変えずに長距離を伝播する、光軸上の光強度が
 ガウスビームよりも高いという2つの利点がある^{5,6)}。そこ
 で、我々は、ガウスビームからベッセルビームへのモード
 変換を考えた。ベッセルビームは、円環状のビームから
 アキシコン等を利用して発生可能であることが知られて
 いる。ベッセルビームに関しては、レーザー加速、加工
 等に関する多くの研究が現在進行中である。

本研究は、MW以上の大出力ビームを高効率で長距離伝
 送することを目指している。ここでは、多数のビームを
 円環状に並べ位相結合し伝播させたベッセルビームの発
 生方法について検討を行った。具体的には、発生させた
 ベッセルビームの光強度分布、エネルギー集中度等に関
 して実験、計算機解析を用いて研究を行った。

2. ベッセルビームの発生理論

ベッセルビームは非回折ビームの一種である。非回折
 ビームとは、伝播により強度分布が変化しないという仮
 定を基にヘルムホルツ方程式により導かれる波動方程式
 から得られる1つのビームの解である⁷⁾。完全な非回折
 ビームは無限のエネルギーを運ぶので実際には存在しな
 い。しかし、有限なエネルギーを持つ有限サイズの非回
 折ビームの発生は実現可能である。ベッセルビームの発
 生方法にはアキシコン、非球面ミラーなど、いくつかの
 方法がある。Durninらは、円環状の細いビームをスリット
 から作り出し、それをレンズで有限サイズの平面波にし
 て重ね合わせベッセルビームを作り出していた^{5,8,9)}。レ
 ンズより後方の平面波が重なりあう領域ではこれらが干
 渉して擬似的なベッセルビームとなる。この擬似ベッセル
 ビームの生成は回折も影響するが、基本的に干渉による
 ものである。今回、このDurninの方法によるベッセルビ
 ームの発生方法と同様の方法を用いる。Fig. 1を用いてベ
 ッセルビーム発生に関して説明を行う。装置の構成は、円
 環のスリットとレンズであるが、ここではレンズ集光で
 の像が遠視野像に等しいことを用いてレンズを省略す
 る。この方法はレンズを置く位置は異なるが、Durninの
 方法と類似している。

まず、円環状のスリットの左からスクリーンに垂直に
 レーザービーム(平面波)が入射される。スリット後方を伝
 播する光は、円環の幅 Δ による回折で $\theta = 1.22\lambda/\Delta$ の回折角
 を持つこととなる。上下の円環から伝播する光は、 θ が小
 さいとして、スクリーンから次式

$$L = \frac{d}{2 \tan \theta} \cong \frac{d}{2\theta} = \frac{d\Delta}{1.22 \cdot 2\lambda} \quad (1)$$

で示される距離 L だけ離れた位置から重なる。その重な
 った遠視野領域で干渉が生じ、有限サイズのベッセルビ
 ームが発生する。円環ビームの直径を d とすると次式

$$\Delta = \frac{1.22\lambda L}{(d/2)} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{d}{2L} \quad (3)$$

でビームの幅 Δ が得られる。ただし、回折角を θ 、ベッセル

Fig. 1 Schematic diagram for generation a Bessel beam.

ルビーム発生領域までの距離を L 、 λ はレーザーの波長で
 あり、単色であるとする。このとき、ベッセルビームの
 中央ピークの半値全幅は次式

$$D = \frac{0.76\lambda}{\theta} \quad (4)$$

で計算される。例として、ベッセルビームを発生させた
 い距離 L を100 mとしたときのビーム幅、交差角、ベッセル
 ビームの中央ピークの半値全幅を計算してみる。 d を3
 cmとし、 λ を1 μm とすると、幅 Δ は0.81 cm、交差角 θ は0.15
 mrad、0次直径は0.51 cmとなる。

空間に x , y , z 軸を取り、 k ベクトルの向きを極角 θ と方
 位角 ϕ によって表すと、その方向に進む平面波の位相因子
 の空間依存性は次式

$$\exp[i\alpha(x \cos \phi + y \sin \phi) + i\beta z] \quad (5)$$

となる。ここで、 $\alpha = k \sin \theta$ 、 $\beta = k \cos \theta$ である。したが
 って、 k と θ が同じで ϕ が一樣に分布した平面波の重ねあわせ
 により発生する電場振幅 E は次式

$$E(x, y, z) = E_0 \exp(i\beta z) \int_0^{2\pi} \exp[i\alpha(x \cos \phi + y \sin \phi)] d\phi \\ = E(x, y, z) \propto \exp(i\beta z) J_0(\alpha r) \quad (6)$$

で表される⁹⁾。ここで、 J_0 は第一種0次ベッセル関数、 r は
 z 軸からの距離である。本論文の方法では、ベッセルビ
 ームは主に円形開口から直進する平面波の重ね合わせによ
 り発生するが、円形開口と円形板による遮光が行われる
 場合、ポアソンの輝点が発生する¹⁰⁾。ポアソンの輝点に
 ついて、ハビネの原理により円形遮光板による振幅分布
 を $U'(Q)$ 、円形開口による振幅分布を $U(Q)$ 、全開の場合
 を $U_0(Q)$ とすれば、

$$U'(Q) = U(Q) - U_0(Q) \quad (7)$$

となる。軸上の強度 $I'(Q)$ は $I'(Q) = |U_0(Q)|^2$ となり、遮
 光板がある場合の中心強度は全開の場合と同じとなる。
 このポアソン輝点は、円形開口における散乱光の π 位相シ
 フトによる擬似的なベッセルビームの発生であることが
 知られている¹¹⁾。ただし、開口からの距離を z_m 、 a を開口
 のサイズとすると、 a^2/z_m が大きい場合は成立しない。こ
 のように実際には、ベッセルビームは円形開口からの散

Fig. 2 Experimental setup.

乱光と直進光との重ね合わせにより発生するが、遠視野領域での軸中心の強度分布において、開口の散乱光により発生する強度成分は直進光により発生する強度成分に対して十分低いと考えられるので、この散乱光による強度分布はここでは考慮しない。

3. 実験方法

実験配置図をFig. 2に示す。円環状配置のマルチビームを模擬的に作り出すため、Fig. 3に示すステンレス製金属のアパーチャーを試作した。比較のため、3種類のアパーチャーを準備した。それぞれの厚みは3 mmであり、12ビーム、24ビームを円環状にならべたものと完全なリング型の3種類のアパーチャーを試作した。リング状のアパーチャーは、直径100 μm の針金を十字にして貼り付け固定した。1個の出力ビームの直径は3 mmであった。このアパーチャーの試作の際、アパーチャーの片面に縁を鋭いエッジ状に製作し、ビーム回折の位置をそろえようとした。レーザー発振器には、Nd:YAGレーザー(波長1064 nm)を用いた。レンズ系でビームの直径を5 cmまで拡大し、コリメートした後、アパーチャーに入射した。その際、ビームは2つのレンズで平行化されている。それぞれ

Fig. 3 Apertures for generating ringed beam(left), annularly arranged 24 beams (center) and 12 beams (right). Outermost and innermost diameters of three apertures are 30 mm and 24 mm, respectively, and the diameter of every hole is 3 mm.

の1本のビーム出力は、矩形強度分布を持つ円形ビームとなっている。アパーチャーの透過光は焦点距離105 cmのレンズをとおり、遠視野像が集光位置に現れる。CCDカメラをビームの伝播方向に移動して遠近視野像と遠視野像を観測した。その間、バンドパスフィルター、NDフィルターによりレーザー強度の減衰を行った。

レーザー光のエンサークルドエネルギーの評価を行った。発生したベッセルビームのエンサークルドエネルギーは、集光位置にピンホールを挿入し、その開口径を変えながら透過光のパワーをPINダイオードで計測し、強度比を算出した。CCDカメラを用いて、強度分布を観察しながらピンホールをビームの中心部に配置した。CCDカメラは、ビームの伝播方向にスライド可能であった。

4. 実験結果

ビームプロファイル観測結果をFig. 4に示す。Fig. 4は、レンズ集光位置から手前に10 cm, 6 cm, 0 cmの位置でのCCDによる集光位置での強度分布である。これらは4.8 mm $\times$ 3.6 mmの領域を示している。これは、24ビームの場合の結果であり、遠近視野領域で24個のビームが隣接するビーム間で干渉を生じていることがわかる。この円環状配置のビームは内径と外直径では内側が小さいため、外側にも回折を起こすがそれよりも内側に向かって強く回折が生ずる。6 cm手前の位置ではすでにビームの重なりにより中心部に輝点が観測されている。これは、前述したボアソン輝点と考えられる。

Fig. 5は、レンズ焦点位置、遠視野でのビームプロファイルである。円環の場合と24個の場合の差はほとんど見られない。しかし、12個ビームの場合では、中心の周りに強度の高い点が多数存在することになり完全な有限サイズのベッセルビームの発生が行われなかった。Fig. 6は、24ビームの場合のビーム伝播計算の結果である。実験結果との比較のため、ビーム伝播解析コード(LOCCO)

Fig. 4 Intensity distribution of annularly arranged 24 beam by 10 cm (left), 6 cm (center), and 0 cm (right) apart from beam waist toward the aperture.

Fig. 5 Far-field image of beam profile of the ringed beam (Left), annularly arranged 24 beams(center) and 12 beams (right) at the beam waist. The diameter of each center peak was 60 μm (FWHM).

Fig. 6 Calculated far-field image and beam profile for annularly arranged 24 beams at the beam waist. The diameters of the center peak was 60 μm (FWHM).

を用いて同じ光学配置を用いてエネルギー集中度の計算を行った¹²⁾. このコードは、実際の光学装置の位置を入力し、フーリエ変換により2次元で回折を含む近軸近似でのビーム伝播の解析を行うことが可能である. ただし、計算では開口部の散乱による位相シフトの効果は考慮していない. この計算結果はFig. 5の実験結果とほぼ一致している.

Fig. 7にベッセルビームのエンサークルドエネルギーの評価を行った結果を示す. エンサークルドエネルギーとは、光軸を中心にした円内に含まれる光エネルギーで、エネルギーの集中度を評価する方法である. Fig. 7の横軸は、円の半径、縦軸はアパーチャーを透過したエネルギーに対するエンサークルドエネルギーの割合である. 集光位置にピンホールを配置しない場合を1とした. それぞれ、3つのアパーチャーの場合の評価を行った. リング型ビーム, 24ビーム, 12ビームの場合、中心位置から直

Fig. 7 Observed and calculated encircled energy. Dots are measured results and lines are calculated results.

径500 μm ではそれぞれ90, 70, 70 %のエネルギーの集中が観測された. 実験結果との比較のため、同様に先ほど述べたビーム伝播解析コードを用いて同じ光学配置を用いてエネルギー集中度の計算を行った. 24ビームの場合のみビーム間の相対位相差をパラメータとし、ベッセルビーム発生の計算機解析を行った. ビーム間の相対位相差に平均値が0, 分散が $\Delta\phi$ を持つ分布をビーム毎にランダムに与えて24ビームから発生する擬似ベッセルビームの強度分布と断面の強度プロファイルを計算した. その結果、エンサークルエネルギーの実験と計算結果は非常に良い一致を得た. その結果をFig. 8 (a), (b)に示す. 相対位相差 $\Delta\phi$ が 0.5π 以上の場合ベッセルビームの発生が困難となることがわかった.

5. 議論と考察

マルチレーザービームから発生した大出力のベッセルビームの伝送を模擬した実験を行った. ビームを円環状に密に配置し、そのビームの波面、波面乱れの少ないレーザービームの伝送方向をそろえることでベッセルビームが発生することが実験的に確認された. この研究

Fig. 8 Calculated far-field images and the beam profile along the horizontal line for annularly arranged 24 beams with a relative phase variance $\Delta\phi$ of π (left), 2π (right).

は、将来のMW級のエネルギー伝送用高平均出力レーザーシステムを構築する上で意義深い。エネルギー集中度の実験結果と計算結果はその誤差が5%以内で、良い一致を見せた。計算よりもエネルギー集中度が低い理由は、開口の製作誤差によるものと考えている。しかし、実際のシステムでは、発生、伝送、受信が必要であり、それぞれで解決すべき問題がある。発生に関して、各ビームの位置精度、向き、相対位相差、それらの安定性、また、個々のビームの強度分布がガウス分布、トップハット分布等に限られた場合には、ベッセルビームへ効率良く変換できない可能性がある。大口径ビームでは、ビーム品質が問題となるであろう。各ビームの波面精度がベッセルビームの発生の可否を決めると予想される。システムの都合上、ビームの光学配置の問題がある。

伝送に関して、宇宙空間では大きなビーム伝送効率の低下はないと思われる。しかし、地上では大気擾乱などの問題がある。また、連続波では問題にならないが、パルスレーザーなどの場合はレーザー強度に依存した熱ブルーミング、非線形効果による伝送効率の低下が考えられる。それらはビームの位相を乱す方向に働くと考えら

れる。計算上は、ベッセルビームは、多少の波面の乱れに対して鈍感、すなわち、中心のピーク強度を維持することができることが明らかとなっている。今後、このビームでの地上での伝送実験により伝送特性を明らかにする必要がある。

光電変換素子にベッセルビームを入力する場合、ビーム全体のレーザー強度を均一化するホモジナイザーやマルチモードファイバへの入力により強度を均一後に光電変換素子に入力することでエネルギー利用効率の改善が可能であることが考えられる。

6. 結 論

円環状に配置したマルチビームの伝播により、ベッセルビームが発生することを実験的に示した。ビーム数が多くなり、ビーム間隔が密になることで、円環状ビームと変わらないエネルギー集中度が得られることが実験的、計算機解析の結果、明らかになった。エンサークルドエネルギーは、実験結果と計算結果の間に良い一致が見られた。

参考文献

- 1) S. Redmond, S. Mcnaught, J. Zamel, L. Iwaki, S. Bammert, R. Simpson, S. B. Weiss, J. Szot, B. Fregal, T. Lee, et. al.: Tech. digest of CLEO/QELS (2007) CTuHH5.
- 2) 白川 晃, 植田 憲一: レーザー研究 **33** (2005) 254.
- 3) 藤田 辰人, 森 雅裕, 久田 安正, 福室 康行, 木皿 且人, 瀬在 俊浩, 吉田 裕之, 鈴木 拓明: 第27回宇宙エネルギーシンポジウム (日本宇宙航空研究開発機構, 2008).
- 4) 河島 信樹, 武田 和也, 矢部 恭一, 金 洪人, 広瀬 虎瑠: 第26回宇宙エネルギーシンポジウム論文集 (日本宇宙航空研究開発機構, 2007) p.72.
- 5) J. Durnin: J. Opt. Soc. Am. A **4** (1987) 651.
- 6) 有賀 規, 國森 裕生: 情報通信研究季報 **50** (2004) 105.
- 7) S. M. Barnett and L. Allen: Opt. Commun. **110** (1994) 670.
- 8) J. Durnin, J. J. Miceli, Jr., and J. H. Eberly: Phys. Rev. Lett. **58** (1987) 1499.
- 9) 森村 正直: 極限光技術 (オプトロニクス社, 東京) p.35.
- 10) 辻内 順平: 光学概論II (朝倉書店, 東京) p.100.
- 11) S. Wang, Q. Lin, and X. Lu: *On the Nature of Diffraction and New Beam Lasers* (Hangzhou University Press, China) p.65.
- 12) W. W. Shimons, J. T. Hunt, and W. E. Warren: IEE. J. Q. E. **QE-17** (1981) 1727.