

# 4 光波面制御技術

## 4 Wavefront Control Technologies

### 4-1 長距離非回折光ビーム

#### 4-1 Nondiffracting Light Beams for Long Ranges

有賀 規 國森裕生

ARUGA Tadashi and KUNIMORI Hiroo

#### 要旨

新奇な光ビーム、長距離伝搬非回折ビーム(LRNB)の生成方法が研究されてきた。一般の光ビームは回折効果によって広がってしまうが、LRNBはあたかも回折をしないかのように細いビーム幅を保って長距離伝搬する。この新しい光ビームは波面の制御によって生成することができる。例えば、球面収差を持つ接眼レンズを用いたガリレオ式送信望遠鏡によって生成可能である。望遠鏡と光源のレーザー光によるユニークな光学系を用いたLRNB生成に関する理論解析及び実際の実験結果について紹介する。

A method of generating an unusual light beam, long range nondiffracting beam (LRNB) has been studied. The LRNB propagates over a long range keeping its narrow beam width as if it does not diffract, while general light beams spread by the diffraction effect. The new beam can be generated by a technique of wave front control, e.g., by a distorted concave spherical wave front that can be formed by a Galilean transmitting telescope with an eyepiece that has a spherical aberration. We will introduce some results of experiments and theoretical analyses of the LRNB generation using an unique optical system with a telescope and a laser.

#### [キーワード]

光ビーム, 非回折ビーム, 長距離伝搬, 波面制御, 球面収差

Light beam, Nondiffracting beam, Long range propagation, Wave front control, Spherical aberration

## 1 はじめに

レーザー光を含む光ビームは多くの分野で用いられている。長距離にわたって細い光ビームを生成したいという要請は多い。しかし、光ビームを含む電磁波は回折現象のため広がってしまう。回折による広がり角を $\Delta\theta$ とすると、 $\Delta\theta = \lambda/D$  ( $\lambda$ : 波長,  $D$ : 開口径)と表される。小さな広がり角のビームを得るためには送信の開口を大きくしなければならない。しかし、この条件は細いビームを得ることと矛盾してしまう。したがって、一般に長距離にわたって細い光ビ

ームを生成することは不可能である。

最近、長距離伝搬非回折ビーム(LRNB: Long Range Nondiffracting Beam)が発見された<sup>[1]</sup>。この新しい光ビームは、その細いビーム幅を保ってあたかも回折をしないかのように長距離を伝搬する。この発見の契機となったのは、口径10cmの送信望遠鏡でレーザービームを空間に伝送し、口径50cmの望遠鏡で送信ビームをモニターする実験を行っていた時、大気による光ビームの散乱によって生ずる奇妙な縞模様が見られた、ということである。この画像に注目したため、不思議な現象を調査するきっかけとなり、長い

年月を経てLRNBの発見となった。この現象は、使用していた送信望遠鏡の球面収差のために一つの細いビームが生成され、その結果発生していたことが分かった。この細いビームは長距離を伝搬する非回折ビームとして作用しているのである。元のビームの中心に細いサブビームが生成され、これがLRNBとなる。

LRNBはベッセルビーム (Bessel beam) と似ている。近似的なベッセルビームはDurnin[2]、Durnin et al.[3]によって理論的かつ実験的に研究され、“nondiffracting beam”あるいは“diffraction-free beam”と呼ばれている。この近似ベッセルビームは、1個のリングスリットと1枚の凸レンズで構成される光学系で生成された。実験では～1mの距離内で非回折的に細いビーム幅を保って伝搬することが示された。この方法で波長オーダーの非回折的な細いビームを作ることも可能である。しかし、中心領域へのエネルギー集中度は極めて小さい。同様な種々の技術が類似の非回折ビームを生成するのに用いられてきている[4]-[6]。今まで数10mの距離の非回折ビームが実現されてきている。このような近似ベッセルビームは以前 axicon の研究として関連研究が行われていた経緯がある[7][8]。

最近見つかったLRNBの、他の非回折ビームと異なる大きな特徴は、長距離(～100m, ～km, ～10km、それ以上と、送信のビーム径によって可変)の伝搬が可能であること及び中心へのエネルギー集中度が高い(～30%)ことである。本論分ではこのLRNBについて紹介する。

## 2 LRNB の概念と生成方法

多くの光ビームの伝送で、コリメート (collimated) されたビームが用いられる。これはコリメート状態が光エネルギーを効率良く長距離伝送させるのに最適だからである。コリメートビーム (平行ビームともいう。) の伝送の場合、図1に概念を示すように、平面波の光が放射される。

一方、LRNBは光波面を特殊な形状に制御することによって生成される。その形状は、波面の曲率が中心(光軸)より開口端へ行く程小さくなるような歪んだ球面にしなければならない。一つの具体的な方法として、球面収差を持ったガ

リレオ式望遠鏡 (Galilean type telescope, 図2参照) を用いる方法がある。正常な対物レンズ (凸レンズ系) と負の球面収差を持つ接眼レンズ (凹レンズ系) の組合せである。このような特殊な送信望遠鏡を用いることによって、元のビームの中心に細い芯のビームができる。(この芯のビーム、すなわち主ローブがLRNBに相当し(図3参照)、細いビーム幅を保って長距離伝搬する。

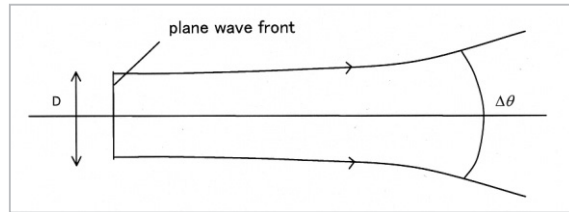


図1 一般のコリメートされた光ビーム

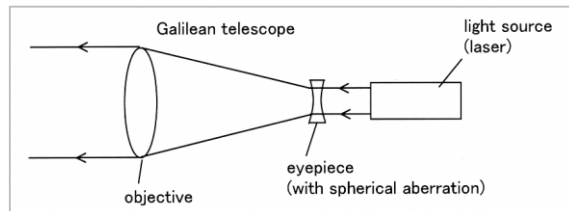


図2 LRNB生成用光学系

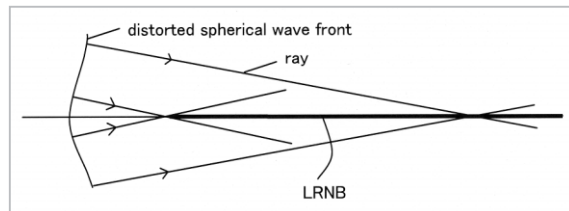


図3 LRNB生成の概念

## 3 LRNB の生成例：計算機シミュレーション及び実験

次に、LRNBについて、計算機シミュレーション及び実際の実験例を幾つか紹介する。

正確な非回折ビームの理論解析はHuygens-Fresnel回折理論[9][10]によって行うことができる。伝搬路上のP点での光の状態(振幅)を $U(P)$ とすると、 $U(P)$ は次のような積分式で表される

$$U(P) = c \iint A(\xi, \eta) \exp[-ikl(\xi, \eta)] d\xi d\eta, \quad (1)$$

ここで $\xi$ と $\eta$ はビーム伝送の開口での座標で、 $A(\xi, \eta)$ は各 $(\xi, \eta)$ 点での振幅を表す。 $k$ は波数( $=2\pi/\lambda$ )、 $l(\xi, \eta)$ は点 $(\xi, \eta)$ とP点との

間の距離である。P点での光の強度 $I(P)$ は

$$I(P) = |U(P)|^2. \quad (2)$$

次に、この平面波のフレネル積分の式を任意の形状の波面の式に展開する。P点と開口内での点Qとの距離 $l$ は近似的に次式で表される。

$$l = z + \frac{x^2 + y^2}{2z} - \frac{x\xi + y\eta + z\zeta}{z} + \frac{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}{2z}, \quad (3)$$

ここで、 $(x, y, z)$ と $(\xi, \eta, \zeta)$ は各々点P、Qの座標である。3番目の座標 $\zeta$ は波面の形状 $h(\rho)$ に相当するので、

$$\zeta = h(\rho), \quad (4)$$

と表示できる。ここで、 $\rho$ は $0 \sim 1$ で定義される半径方向距離である。放射されるレーザービームの軸対称性より、フレネル積分(1)式は次のように変換される。

$$u(P) = 2\pi a^2 c \int_0^1 A(a\rho) J_0\left(r \frac{k}{z} a\rho\right) \exp\left[-i\left(\frac{k}{2z} a^2 \rho^2 - k\zeta\right)\right] \rho d\rho, \quad (5)$$

ここで、 $a$ は開口の半径、 $z$ と $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ はP点の座標、 $J_0$ は0次のベッセル関数である(詳細は参考文献1を参照)。ここで、 $\zeta \ll z$  故に、一般に行われるように $z$ と $r^2/2z$ 項から発生する位相項は無視されている。積分定数 $c$ は $\int I(P) dx dy = 1$ となるように規格化される。

上述のように、LRNBは口径10cmのガリレオ式送信望遠鏡でレーザービーム(アルゴンレーザー)を空間に伝送する実験の際に見つかった。この理由により、最初に口径10cmの光ビーム伝送によるLRNBの生成について紹介する。望遠鏡の対物レンズの焦点距離は40cmである、したがって、 $F(=f/D)$ は4で、接眼レンズの焦点距離は5cmに設定されている。

図4は、接眼レンズの球面収差 $580 \mu\text{m}$ とした時に生ずる口径10cmの送信レーザービームの波面の形状である。波面の曲率は中心から開口端へ行く程小さくなっている。望遠鏡の対物レンズと接眼レンズの距離を変えることによって波面の形状を制御できる。例えば、周辺の形状を直線状にできる。この場合では距離範囲は小さくなるが、より正確な非回折ビームが生成される。図5(a)は計算機シミュレーション；光源に

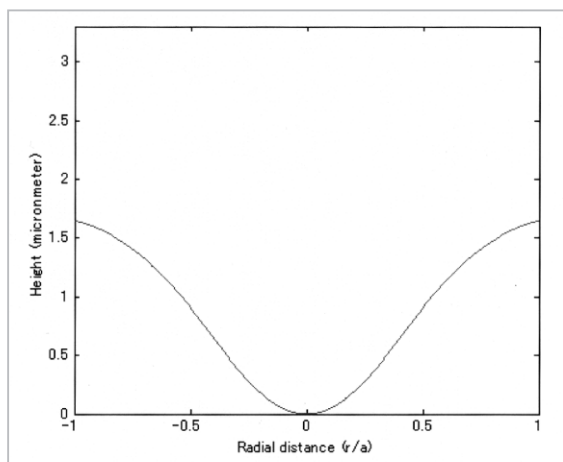


図4 波面形状の例

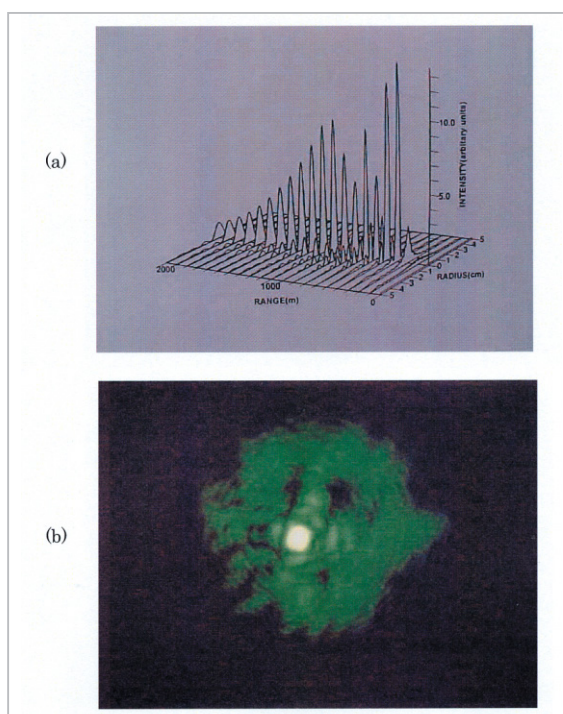


図5 口径10cmの望遠鏡によるLRNBの生成

(a) 伝搬レーザービームパターンの計算機シミュレーション  
LRNBは口径10cmの元のビームの中心に生成される。  
(b) 生成されたLRNBの写真の例(距離500m)  
中心の輝点がLRNBに相当する。

Nd:YAGレーザー( $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$ )を用いて図4の波面にした時の光軸に沿った多くの距離での光ビームパターン、を示す。図5(b)は実際に得られた光ビームの写真；距離500mでのレーザービームパターン、を示す。中央の輝点がLRNBに相当する。周辺部が円形になっていないのは大気のゆらぎによる影響である。



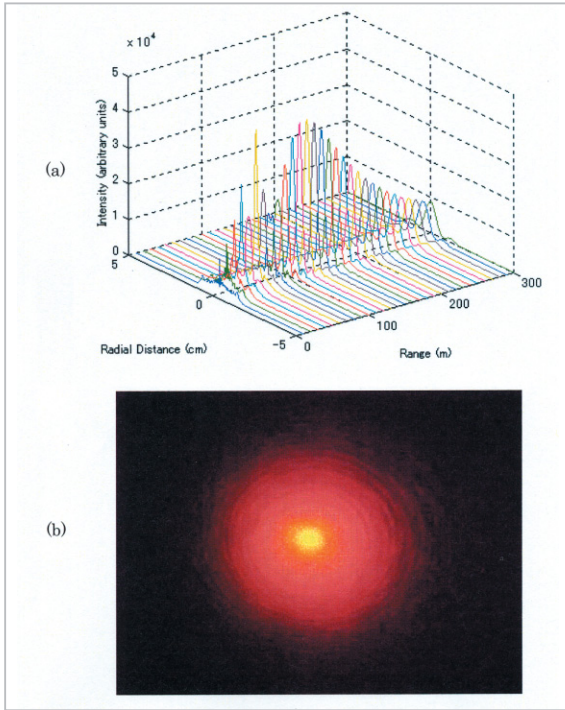


図6 口径2.5cmの望遠鏡によるLRNBの生成

(a) 伝搬レーザービームパターンの計算機シミュレーション  
LRNBは口径2.5cmの元のビームの中心に生成される。  
(b) 生成されたLRNBの写真の例(距離100m)  
中心の輝点がLRNBに相当する。

次に、数100mの距離を対象とした、より短距離のLRNBの生成について紹介する。図6(a)は口径2.5cm、焦点距離10cmの望遠鏡を用いたLRNBの生成例である。ここでは波長 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  (He-Ne レーザー)が仮定されている。この図は図5(a)同様、光軸に沿った伝搬レーザービームのパターンを示したものである。伝搬距離100mで撮ったレーザービームパターンの写真を図6(b)に示した。中央の輝点がLRNBに相当する。

より長距離のLRNBの生成例も紹介する。長距離用として口径20cm、焦点距離80cm(前例と同様 $F = 4$ に設定)の送信望遠鏡を用いた。この場合小型のNd:YAG レーザー( $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$ )が光源として用いられた。図7(a)では計算機シミュレーションによって距離10kmまでの伝搬レーザービームパターンが求められている。ごく最近この光学系によるLRNBの生成と伝搬実験が行われた。高さ150mの田無タワー(距離4.5km)で撮られたレーザービームパターンの写真を図7

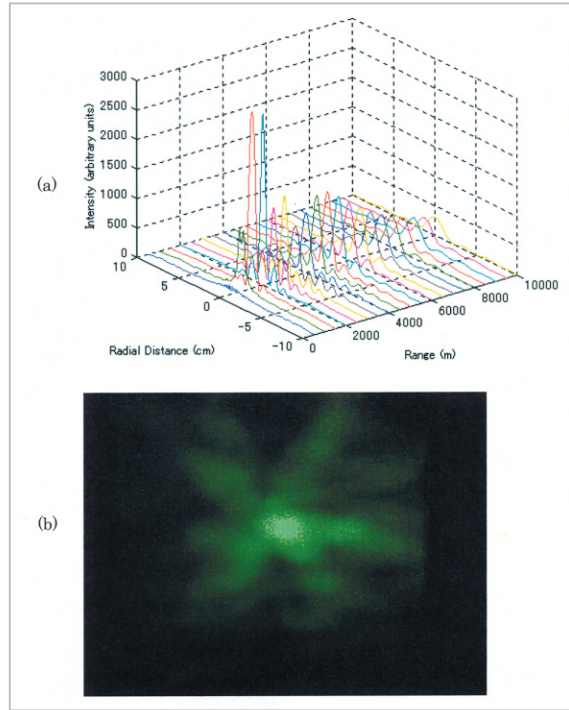


図7 口径20cmの望遠鏡によるLRNBの生成

(a) 伝搬レーザービームパターンの計算機シミュレーション  
LRNBは口径20cmの元のビームの中心に生成される。  
(b) 生成されたLRNBの写真の例(距離4.5km)  
中心の輝点がLRNBに相当する。

(b)に示した。中心の輝点がLRNBに相当する。周辺部は大気ゆらぎのために歪んで円形になっていないのが特徴である。

## 4 LRNBの特性

過去のLRNBの伝搬実験によって、幾つかのLRNBの特性が明らかになってきている。まず、LRNBに相当する中心のコアビーム部(主ローブ)は周辺部(サイドローブ)に比較して大気のゆらぎに対して変動が非常に小さく、より安定している。さらに、LRNBは一般のコリメートビームやフォーカスビーム(ある点に集光したビーム)に比較しても大気ゆらぎに対してより安定している。この事実は定量的にも測定され、報告されてきている[11]。

次に、LRNBに相当する主ローブのビーム幅は一般の光学系による回折限界のビーム幅より狭い、ということが計算機シミュレーションより明らかになっている[12]。この事実は、一般の光

光学系の回折限界より LRNB の光学系の方が分解能が高いことを示している。

さらに、小さな口径の光学系で短距離の、大きな口径の光学系で長距離の LRNB が生成できる。例えば、口径 2～3 cm で数 100m、口径～10cm で数 km、口径 50cm で～50km の LRNB が生成できることが明らかになっている。これらをまとめると、

- (1) LRNB は細いビーム幅を保持して長距離伝搬する
- (2) LRNB は一般の光ビームよりも大気ゆらぎに対して影響が少なく安定している
- (3) 広い領域で(一般の光学系の回折限界より高い)高分解能を有している
- (4) 小さな口径で近距離の、大きな口径で遠距離の LRNB が生成できる

## 5 LRNB 光学系の撮像への応用

3 までは、光ビームを送信(放射)して LRNB を生成することについて述べた。LRNB 生成に用いる光学系を受光に用いて撮像用光学系としても使用することができる。そこで、この節では、LRNB 光学系の撮像への応用について補足しておくことにする。

LRNB 光学系とカメラを組み合わせて撮像に用いることができる。この場合、一般のカメラでの撮像に比べて焦点深度が深くなる。計算機シミュレーションの例を図 8 に示した。このシミュレーションでは、口径  $D = 5\text{cm}$ 、焦点距離  $f = 20\text{cm}$  の対物レンズの使用を仮定し、対象物の距離を 500m に仮定して、撮像時の焦点領域の集光ビームパターンを比較している。図 8 (a) は、口径 50mm、焦点距離 200mm ( $f = 200$ ) の望遠鏡レンズでの撮像、図 8 (b) は、この望遠鏡レンズと焦点距離 -50mm の接眼レンズ(球面収差  $580\ \mu\text{m}$ ) とを組み合わせて LRNB 光学系(受光望遠鏡)とし、さらに焦点距離 50mm のカメラを組み合わせて撮像した場合、である。

図 8 で、(a) の一般の望遠鏡での撮像に比較して、(b) の LRNB 光学系による撮像の場合の方が焦点深度が十分深くなるのが分かる。焦点深度が十分深ければ、一つの固定焦点で(焦点位置を変えることなく)、広い距離にわたって対象

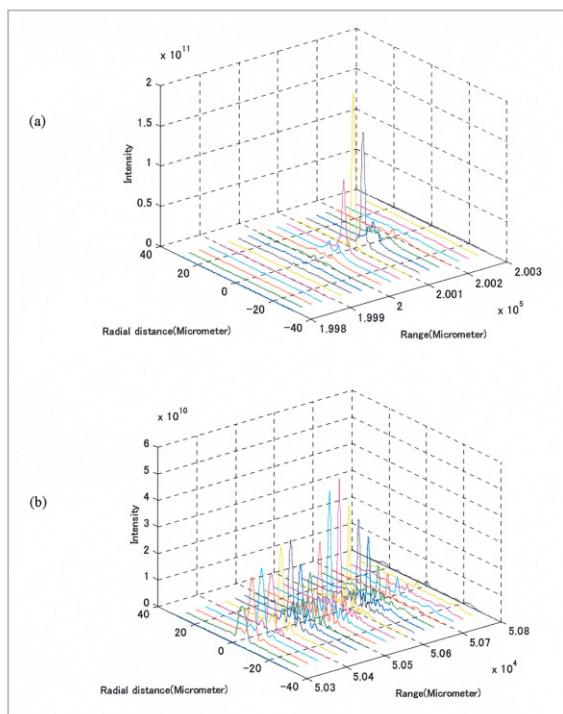


図 8 イメージングのフォーカスパターン

(a) 一般の望遠鏡 ( $D : 50\text{mm}$ ,  $f : 200\text{mm}$ ) を用いた場合で、対象物の距離 500m を仮定している。

(b) LRNB 光学系 ((a) と同じレンズを対物レンズにしている) を用いた場合で、対象物の距離 500m を仮定している。

物を撮像することができる。一般の望遠鏡では焦点位置を変える必要がある(さもないとぼけてしまう)のと対称的である。実際の実験によって、この事実が確認されているが、ここでは割愛する。

## 6 結論

本論文では、ユニークな光ビーム LRNB が紹介された。この新しい光ビームの特徴として、細いビーム幅を保持してあたかも回折しないかのように長距離伝搬すること等が、計算機シミュレーション及び実験結果の例によって示された。口径 2.5cm、10cm、20cm の望遠鏡を用いた LRNB によって、数 100m から～10km の範囲の距離の非回折ビームが可能であることが示された。より小型、大型の光学システムによって、より短、長距離の LRNB の生成が可能である。LRNB は種々の独特な特性を有しているので、多くの分野での応用が期待できる。

## 謝辞

LRNB光学系の製作及び実験に御協力いただいた新日本科学製作所の道野氏に深く感謝を申し

上げる。また、口径20cm光学系実験で支援をいただいた同所の飯田氏、中島氏及びSCATの吉門氏にも感謝を申し上げる。

## 参考文献

- 1 T. Aruga, "Generation of long range nondiffracting narrow light beams", Appl. Opt., 36, pp. 3762-3768, 1997.
- 2 J. Durnin, and J. J. Miceli, Jr., and H. J. Everly, "Exact solutions of nondiffracting beams. I. The scalar theory", J. Opt. Soc. Am., A4, pp. 651-654, 1987.
- 3 J. Durnin, "Diffraction-free beams", Phys. Rev. Lett., 58, pp. 1449-1501, 1987.
- 4 K. Uehara and H. Kikuchi, "Generation of nearly diffraction-free laser beams", Appl. Phys. B 48, pp. 125-129, 1988.
- 5 A. J. Cox and J. D'Anna, "Nondiffracting beam from a spatially filtered Fabry-Perot resonator", Opt. Lett. 17, pp. 232-234, 1992.
- 6 J. Turnen, A. Vasara, and A. T. Friberg, "Holographic generation of diffraction-free beams", Appl. Opt. 27, pp. 3959-3961, 1998.
- 7 H. McLeod, "The axicon : a new type of optical element", J. Opt. Soc. Am. 44, pp.592-597, 1954.
- 8 S. Fujiwara, "Optical properties of conic surfaces. I. Reflecting cone", J. Opt. Soc. Am. 52, pp. 287-292, 1962.
- 9 M. Born, and E. Wolf, Principle of Optics, Pergamon, Oxford, UK, 1975.
- 10 N.G. Van Kampen, "The method of stationary phase and the method of Fresnel zones", Physica, 24, pp. 437-444, 1958.
- 11 T. Aruga, S. W. Li, S. Yoshikado, M. Takabe, and R. Li, "Nondiffracting narrow light beam with small atmospheric turbulence-influenced propagation", Appl. Opt., 38, pp. 3152-3156, 1999.
- 12 T. Aruga, and S. W. Li, "Super high resolution for long-range imaging" Appl. Opt., 38, pp. 2795-2799, 1999.



あるが たいし  
**有賀 規**

基礎先端部門特別研究員 理学博士  
空間光伝送・伝搬

くに もり ひろお  
**國森 裕生**

無線通信部門光宇宙通信グループ  
主任研究員  
レーザー測距