5 光伝搬技術

5 Photonic Propagation Technologies

5-1 Rayleigh 散乱による人工星の生成

5-1 Artificial Star Generation by Stratospheric Rayleigh Scattering

吉門 信 大屋 真 李 樹栄 有賀 規 Shin YOSHIKADO, Shin OYA, Shuwing LI, and Tadashi ARUGA

要旨

成層圏大気分子の Rayleigh 散乱による人工星の、国内最初の生成実験が行われ、成功した。この人工 星生成システムは、大気を照射するレーザビームの送信及び後方散乱光の受信に、通信総合研究所の口 径1.5mの望遠鏡を利用している。送信ビームの光源は、パルス発振 Nd:YAG レーザの第2高調波が用い られた。この実験で取得された、様々な距離(高度)からの後方散乱光の画像は、画像強度分布の構造の 観点から解析され、その結果、12km程度を超える距離からの後方散乱光の画像は、参考として取得され た北極星の画像と同様の、スペックルによる特徴的な構造を有することが示され、人工星として利用可 能であることが証明された。

The first domestic experiment of artificial star generation by stratospheric Rayleigh scattering was conducted successfully. The artificial star generation system utilizes a 1.5 mdiameter telescope of CRL for transmitting a laser beam to illuminate the atmosphere and for receiving back-scattered light. The light source of transmission used is the second harmonics of a pulse-oscillating Nd:YAG laser. Images of back-scattered light from various distances (altitudes) acquired in this experiment are analyzed from the viewpoint of their structures of image intensity distribution. Results of the analyses show that images of backscattered light from distances over about 12 km have characteristic structures due to speckles similar to those of Polaris as a reference, and proved to be applicable as artificial stars.

[キーワード] 人工星、レーザガイド星、レイリー散乱、大気擾乱、画像補正 Artificial star, Laser guide-star, Rayleigh scattering, Atmospheric turbulence, Image compensation

1 まえがき

人工星 (artificial star) はレーザガイド星 (laser guide-star) とも呼ばれ、レーザビームで上層大気 を照射して得られる、地上からは点光源と見な せるような、後方散乱光である。天体等の対象 物を、大気の層を通して地上の望遠鏡で観測す る場合に避けられない、大気揺らぎによる画像 のぼやけ等の影響を補正するための参照光源と して、期待されている。

一般に望遠鏡の角分解能は、真空中ではほぼ 観測波長 λ と口径 (主鏡の直径) D との比で、す なわち、よく知られた回折限界の分解能の公式 $\Delta \theta \approx \lambda / D$ により表される。例えば、口径 1.5m の望遠鏡で500nm付近の可視光を観測すると、 上述の $\Delta \theta$ は約0.07秒角である。しかし、大気中 で観測を行う望遠鏡では、口径をある程度以上 大きくしても、分解能は大気揺らぎによって制 限される。大気揺らぎで決まる分解能はシーイ ングと呼ばれ、地理的な環境や大気の状態によ り異なるが、国内の平地における可視光の観測 では、通常数秒角程度である。点光源を観測し て撮像デバイスで記録する場合、短時間の露光 ではスペックル(大気揺らぎの影響としての、点 像の不規則なばらつき)が現れ、長時間の露光で はその領域に広がる、ぼやけた像が得られる。

シーイングと比較して回折限界の分解能が優 れた、大口径の望遠鏡では、本来の性能を生か すための、何らかの方策が望まれる。ハッブル 望遠鏡のように、大気圏外の衛星軌道上で観測 を行うのは、高コストではあるが、最も単純か つ根本的な解決法である。これに対して、地上 の観測で大気揺らぎの影響を補正し、シーイン グの限界を超える高分解能を達成するために利 用されるのが、人工星の概念に関連して最初に 述べた、参照光である。大気揺らぎの観測結果 への影響を補正する方法として、短時間露光像 を反復記録し、画像処理により、大気揺らぎの ない場合に得られるはずの像強度分布を再生す る手法や、大気揺らぎによる光波面の歪みを波 面センサ (wavefront sensor) によって計測し、可 変形鏡 (deformable mirror) を用いて実時間補正 する補償光学 (adaptive optics)[1] [6] 等がある。 参照光を用いない画像処理補正手法は提案され ているが、[7] 補償光学においては参照光が不可 欠である。

理想的な参照光は、観測対象から到来する光 波が受けるのと同一と考え得る大気揺らぎの影 響を受けた、適当な強度を有する光線であり、 言い換えれば、理想的な参照光源は、天体に対 しては観測対象にできるだけ近い方向の無限遠 方に存在する、適当な明るさの点光源というこ とになる。したがって、観測対象の近傍に適当 な光度の恒星が存在するなら、その光を理想的 な参照光とすることができるが、それは比較的 少数の限られた場合である。人工星は、有限距 離に生成される等の点で理想的な参照光とは性 質がやや異なるが、近傍に適当な恒星が存在し ない一般の場合にも、有用なレベルの参照光源 として利用できる。

人工星生成技術は、近い将来の実利用を目指 して、研究が活発に進められてきている^{[7]~[18]}。 例えば米国 Phillips 研究所は、平均出力 200W 級 の銅蒸気レーザを用いて生成した人工星による 補償光学実証システムを完成させて、世界で最 先端のレベルにある^[5]。また、我が国では国立 天文台が、連続発振の色素レーザを用いた人工 星生成システムの、開発整備を進めている。 CRLにおいても、国立天文台等との協力も含め て、人工星生成技術及び補償光学関連の研究を 行ってきた。口径1.5mの望遠鏡を送受両用に利 用した人工星生成技術の研究は、その中核とな る研究の一つでる [18]。

その第一段階として、パルス発振Nd:YAG レーザの第2高調波により照射した対流圏上層-成層圏からのRayleigh 散乱光の、イメージ・イ ンテンシファイア付きCCD (ICCD) カメラによる 画像データを取得し、その総合的な解析の結果 から、距離12-15kmに生成した後方散乱光画 像は、比較のために取得した北極星画像と同様 のスペックルによる構造の特徴を備えた人工星 として、利用可能であることが示された。この ような人工星の生成実験は、国内では最初のも のであり、ここにその概要を報告する。

2 大気揺らぎと人工星

上述のように、大気中で観測する望遠鏡の分 解能は、大気の揺らぎによって制限され、シー イングは通常数秒角、条件が良い場合でも高々 1秒角程度である。シーイングの低下を引き起 こす原因は、温度変化や乱流による大気屈折率 変動である。大気圏外の光源から大気中を伝搬 し、開口上の距離rだけ離れた2点に達する光波 の、大気屈折率の差によって生じる位相差の2 乗平均が構造関数 Dp(r)として定義され、次式 のように (r/r₀)⁵³に比例する[19]。 $D_p(r) = 6.88(r/r_0)^{5/3}$ (1)

ここで

 $r_0 \propto \lambda^{6/5} \tag{2}$

はFriedパラメタと呼ばれ、大気揺らぎのコヒー レンス長、すなわち、揺らぎの空間的な大きさ を表している。

このような大気の揺らぎによる影響を補正す るための参照光源として、観測対象の近傍に十 分な明るさ(6等星-12等星:波長、シーイング 等の条件による)の、適当な恒星があればそれを 利用できるが、そのような恒星が近くにない多 くの場合に、人工星の生成が有力な手段となる。 上層大気をレーザビームで照射することにより、 後方散乱光として人工星が生成されるが、散乱 のメカニズムとして、(1) 成層圏 (10-20km)の 大気分子による Rayleigh 散乱と、(2) 中間圏 Na 層 (90-100km)のNa原子を(D線に波長を同調さ せたレーザ光で)照射して得られる共鳴散乱、が 考えられる[1][4]。(2)のNa層共鳴散乱は、生成位 置が比較的遠い分理想的な参照光により近いが、 望遠鏡の口径が3m程度より小さい場合は、(1) の成層圏からのRayleigh散乱光でも、実用上十 分であると言われている。

すなわち、人工星の生成位置は高いほど、地 上からそこまでの大気の影響を補正できるが、 影響を及ぼす大気の主要部分は地上10km余まで の対流圏にあり、それより上層では密度が急速 に減少するので、口径1.5m程度の望遠鏡による 観測では、成層圏からの後方散乱光でも人工星 として利用可能ということである。人工星生成 実験の取得画像データの解析で得られた、後方 散乱光の生成位置による画像構造の特徴の変化 も、後に述べるようにこれを裏付けている。ま たこの場合、(2)のようにレーザ波長を同調させ る必要がなく、各種のレーザを利用できるとい う利点がある。

成層圏 Rayleigh 散乱による人工星の概念を、 図1に示す。観測対象の天体等に近い方向に生成 された、必要十分な明るさの人工星と観測対象 自体を、望遠鏡の同一視野内で撮像するならば、 両者のスペックルはほぼ同様のパターンを描く はずであり、観測対象が点光源でない場合や、



点光源であっても光度が不十分な場合にも、こ の人工星を参照光源として、観測対象の画像を 補正することができる。

3 人工星生成システム

3.1 光学系

送受同一鏡を利用する場合、通常はビームス プリッタを用いて送受信系を結合するため、総 合で6dBの損失を生じる。これに対して本シス テムでは、送受信系の結合に中央部穿孔ミラー を用いて、レーザビームを主鏡中央部を通じて 送信し、同一鏡全体で後方散乱光を受信するこ とにより、損失が回避されるという特長を有し ている。図2は1.5m 望遠鏡及び階下のCoude室 に設置された光学系(光学台と光源レーザのみを 示す)の配置を、また図3は送受信系を結合する 中央部穿孔ミラーを示す。

光源レーザのビームは、図3に示した中央部穿孔 ミラーの穴を通り抜け、図2のCoude室内の、 1.5m 望遠鏡の方位角 (azimuth) 軸直下の切り換え ミラーに入り、Coude パスを通じて階上の1.5m 望遠鏡に導かれる。図2に示したように、送信レ ーザビーム (ビーム径:15cm) は主鏡中央部の一



図2 1.5m 望遠鏡及び階下の Coude 室に設置された光学系の配置



部分のみを利用して、上空に投射される。ビー ムのコリメーションは、主鏡に取り付けられた ガイド望遠鏡により、確認されている。主鏡の 全体で受信された上層大気からの後方散乱光は、 Coudeパスを逆にたどって図3の中央部穿孔ミラ ーに戻り、中央部を除くミラー面によって図4写 真の、受信系の経路に向けられる。図4の中央上 部に、二組のフォーカシングステージと ICCD カ



メラが示されているが、その一方は後方散乱光 (人工星)撮像用、他方は観測対象の天体の撮像 用であり、フィルタによって分離された受信光 が、それぞれに導かれる。

3.2 光源レーザと撮像システム

3.2.1 光源レーザ

光源として用いたパルス発振Nd: YAG レー ザの主要特性を、表1に示す。高度15kmの成層 圏 Rayleigh 散乱による人工星生成には、センサ の量子効率50%、Friedパラメタ(2節参照): r_0 =15cm、波長: λ =500nm等の一般的な仮定の下 で、必要なパルスエネルギーは30mJ程度以上と 計算されている[4]。本研究では、1パルス当たり のエネルギーを170mJに制御して取得した画像 データを対象として扱う。

表1 光源として用いたパルス発振Nd:YAG レーザの主要特性	
Model	Quantel YG781C-20
Туре	Q-Switched Nd: YAG Laser
Wavelength	532nm (2nd harmonics)

-) P •	Q Santoniou Ital Into Euse
Wavelength	532nm (2nd harmonics)
Pulse Energy	500mJ max.
Repection Rate	5/10/20 Hz
Pulse Duration	\sim 5 ⁻ 7ns

3.2.2 撮像システム

撮像に用いたICCDカメラの主要特性を、表2 に示す。このICCDカメラは図4に示されている ように、フォーカシング用のパルス制御直線ス テージ上に設置されており、比較的近距離から の人工星の撮像と、天体等はるかに遠方の観測 対象を撮像する場合とで異なるフォーカス位置 を、良好な再現性で調整することができる。前 述のように、人工星撮像用ICCDカメラには光源 レーザ光の発振線を含む狭帯域の光が、また観

表2 ICCD力>	くうの主要特性	
Intensifierl TT Ultra Blue		
Gain (Typical)	40,000 (46.0dB)	
CCD Camera	Philips FTT1010	
Pixel size	$9 \times 9 \ \mu \ m$	
Pixel format	648 × 484 pixels	
Field of view	33.6 arc seconds (diagonal)	
Pixels / are sec	24.1	

測対象の天体等撮像用ICCDカメラにはこの帯域 を除く波長領域の光が、フィルタによって選択 され、撮像される。

なお、主鏡を含む撮像システム全体の合成焦 点距離は、45mである。

ICCD カメラの露光は、光源レーザから出力パ ルスに同期して送り出されるトリガ信号を基準 として、露光開始までの遅延時間 τと露光時間 を設定し、実行される。この設定は、インテン シファイア利得やフィルタ選択、単発の露光か 連写かの選択等、必要ないくつかのパラメタと ともに、すべて制御用コンピュータを通じてな される。

送受同一の望遠鏡を用いる本システムでは、 通常のレーザレーダの受信信号と同様に、送信 パルスの進行につれて時間的に連続して、上層 大気からの後方散乱光が受信される。露光開始 までの遅延時間 τ 以前の受信信号はカットされ るので、時間 τ の間に送信パルスが進行する距 離 $R = c \tau/2 (c : 光速) より遠方からの散乱光が$ 撮像されるが、後方散乱光の強度は距離の増大とともに急速に減少するから、露光時間が長い場合でも事実上、距離 <math>Rの位置からの後方散乱 光を撮像したものと見なすことができる。

4 Rayleigh 散乱による人工星生 成

成層圏大気分子のRayleigh 散乱による人工星 の、最初の生成実験においては、本来は同一視 野に入れた観測対象と人工星を同時に撮像する ための、2台のICCDカメラの一方が未整備であ った。したがって、まず北極星を視野からわず かに外した方向にレーザ光を送信し、後方散乱 光を撮像した後、比較のために北極星を視野内 に戻して、画像データを取得した。

後方散乱光撮像時の、レーザパルス送信から 露光開始までの遅延時間 τ は、 $\tau = 30 \mu$ sec (距 離 R = 4.5kmに相当、以下同様)、 40μ sec (6km)、 …、 90μ sec (12.5km)、 100μ sec (15km) と、 10μ sec 間隔で8通り、露光時間はすべて1m sec に設定し、それぞれ16枚の画像を連写した。毎 秒4パルスで発振させた光源レーザからトリガ信 号を受けているので、隣接する画像間の時間間 隔は0.25秒である。

4.1 後方散乱光画像強度構造の特徴

図5と図6は、それぞれ距離6kmと15kmから の後方散乱光の画像強度構造の典型的な例を示 す。図7は、比較参照のために同一撮像装置で取 得した、北極星画像の構造を示す例である。そ れぞれ、表2に示したように648×484ピクセル の画像から、主要部の正方形10×10ピクセルを 取り出したものであり、視野角は0.588秒角[対 角線]となる。これらの画像の特徴として、次の 諸点を指摘することができる。まず、図5のよう に、距離数kmからの後方散乱光画像は、凝縮し た明るい輝点の集合となっていて、大気揺らぎ に起因するスペックルは観測されない。すなわ ち、中央部に高輝度のピクセルが集中した、単 純な構造を示すのに対して、図6の距離15kmか らの後方散乱光画像には、図7の北極星画像と同 様のスペックルが明瞭に認められ、3次元プロッ トには尾根や谷状の、複雑な構造が見られる。

4.2 画像強度ヒストグラム

上述の後方散乱光画像強度構造の特徴は、画 像強度ヒストグラムに反映する。すなわち、図5 のような単純な構造では、画像強度ヒストグラ ムは中央部に集中した最大画像強度部分と周辺





の背景暗黒部との割合が大きいのに対し、図6や 図7のようにスペックルにより生じる複雑な構造 では、中間の画像強度をもつピクセルの割合が、 相対的に大きくなる。図8に示した、4.5kmから 15kmにわたる様々な生成距離からの後方散乱光 画像及び北極星画像に対する総合的な画像強度 ヒストグラム群は、後方散乱光の画像強度構造 の特徴である、生成距離によるこのように変化



を、端的に表している。

これを更に明瞭にするために、後方散乱光画 像中の中間画像強度ピクセル数比率の、後方散 乱光生成距離に対する関係を、図9に示す。後方 散乱光生成距離が大きくなり、十数kmに達する と、画像中の中間画像強度ピクセル数比率は、 北極星画像に対する値を示す上部の水平の破線 に接近する。このように、画像中の中間画像強 度ピクセル数比率は、後方散乱光の大気揺らぎ によるスペックルの程度に対応する、一つの指 標と見なすことができる。また、Rayleigh 散乱 による成層圏からの後方散乱光は、観測した画 像を補正するという目的において重要なスペッ クル構造に注目する限り、大気揺らぎの影響を 恒星からの光と同程度に受け、人工星として利 用することが可能であることが理解できる。



5 むすび

口径1.5mの望遠鏡を送受両用に利用した人工 星生成システムを開発し、パルス発振Nd: YAGレーザの第2高調波により照射した対流圏 上層-成層圏からのRayleigh散乱光の、ICCDカ メラによる画像データを取得した。その総合的 な解析の結果から、画像強度構造の特徴として、 後方散乱光生成距離の増大に伴い、大気揺らぎ に起因するスペックルが顕著となること、距離 12-15kmに生成した後方散乱光画像は、比較の ために取得した北極星画像と同様のスペックル による構造の特徴を備えた人工星として、利用 可能であることが示された。170mJ/パルスの場 合に距離15kmに生成される人工星は、ほぼ9等 星に相当し、2.0等星である北極星の約千分の一 の明るさである。

人工星を参照光源として、大気揺らぎの観測 画像への影響を補正するには、同一視野にとら えた観測対象と人工星の画像を、フィルターに より分離して同時に撮像する。大気の揺らぎに よるスペックルは、両者ほぼ同一のパターンを 示すので、点光源と見なすことのできる人工星 の画像を点像に再生するアルゴリズムにより、 一般に点光源というわけではない観測対象の画 像を補正し、シーイングの限界を超える高分解 能観測を、実現することができる。

参考文献

- 1 J. W. Hardy, Proc. IEEE, 1978, Vol. 66, 651-697.
- 2 J. W. Hardy, J. E. Lefebvre, and C. L. Koliopoulos, J. Opt. Soc. Am. 1977, Vol. 67, 360-369.
- 3 D. L. Fried, J. Opt. Soc. Am. 1982, Vol. 72, 52-61.
- 4 L. A. Thompson and C. S. Gardner, Nature, 1987, Vol. 328, 229-231.
- 5 高見 英樹, 精密工学会誌, 1994, Vol. 60, 1091-1096.
- 6 有賀 規, 電子情報通信学会誌, 1997, Vol. 80, 1237-1241.
- 7 D. Gingras and T. Aruga, Opt. Lett., 1990, Vol. 15, 1380-1382.
- 8 R. Foy and A. Labeyrie, Astron. Astrophys. 1985, Vol. 152, L29-L31.
- 9 C. S. Gardner, B. M. Welsh, and L. A. Thompson, Proc. IEEE, 1990, Vol. 78, 1721-1743.
- 10 R. Q. Fugate, D. L. Fried, G. A. Ameer, B. R. Boeke, S. L. Browne, P. H. Roberts, R. E. Ruane, and L. M.

Wopat, Nature, 1991, Vol. 353, 144-146.

- 11 R. Q. Fugate, Optics & Photonics News, 1993, Vol. 4, 14-19.
- 12 W. Happer, G. J. MacDonald, C. E. Max, and F. J. Dyson, J. Opt. Soc. Am. 1994, Vol. A/11, 263-276.
- 13 D. L. Fried and J. F. Belsher, J. Opt. Soc. Am. 1994, Vol. A/11, 277-287.
- 14 R. R. Parenti and R. J. Sasiela, J. Opt. Soc. Am. 1994, Vol. A/11, 288-309.
- 15 R. Q. Fugate, B. L. Ellerbroek, C. H. Higgins, M. P. Jelonek, W. J. Lange, A. C. Slavin, W. J. Wild, D. M. Winker, J. M. Wynia, J. M. Spinhirne, B. R. Boeke, R. E. Ruane, J. F. Moroney, M. D. Oliker, D. W. Swindle, and R. A. Cleis, J. Opt. Soc. Am. 1994, Vol. A/11, 310-324.
- 16 G. A. Tyler, J. Opt. Soc. Am. 1994, Vol. A/11, 325-338.
- 17 G. A. Tyler, J. Opt. Soc. Am. 1994, Vol. A/11, 339-346.
- 18 吉門 信, 大屋 真, 李 樹栄, 有賀 規, レーザー研究, 2000, Vol. 28, 819-823.
- 19 D. L. Fried, J. Opt. Soc. Am. 1965, Vol. 55, 1427-1435.



苦門 僧 基礎先端部門光 COE 特別グループ主 任研究員 博士(工学) レーザ計測、画像処理、等

李 樹栄(LI Shuwing) 元第一特別研究室 レーザ計測、光伝搬、等



学屋 貨

基礎先端部門光 COE 特別グループ専 攻研究員 光伝搬、高空間分解能撮像



着賀 規 上席研究員 理学博士 空間光伝送·伝搬