

1.54 μm ラマンレーザを用いたアイセーフライダーシステムの開発
Development of an eye-safe lidar system using a 1.54 μm Raman laser

飯島 研 橋詰 将慎 斉藤 保典 川原 琢也 野村 彰夫
K.Iijima, Y.Hashidume, Y.Saito, T.D. Kawahara and A.Nomura

信州大学工学部
Faculty of Engineering, Shinshu University

Abstract : We are developing an eye-safe lidar system using a 1.54 μm laser which is produced by a Raman scattering cell. In the first stage of the development, the maximum output from the laser was 45mJ/pulse. The methane gas pressure in the cell, laser pulse cycle and input energy of the Nd:YAG laser are 18kgf/cm², 3.33Hz and 200mJ, respectively. The backscattered laser beam from a building at a distance of 1.4km was successfully observed.

1.はじめに

ライダーは大気中のさまざまな物質の遠隔測定を可能にし、大気環境の測定に貢献している。可視域のレーザを用いたライダー観測ではエアロゾルからの散乱光より大気分子によるレイリー散乱光が卓越するため、エアロゾルの分布を求めるには解析が複雑となる。これに対し、赤外域のレーザを用いた場合には大気分子による散乱光は相対的に小さくなるためエアロゾル観測には有効な手段となる。

一方、市街地などでの水平方向の観測時にはレーザ光が直接人の目に入射する危険性を考慮する必要がある。レーザの目に対する安全性は最大許容露光量（以下MPEと略）として定義されており、この値を越えなければ目に対して安全といえる。

Fig. 1 に各波長におけるMPEを示す。ここで波長400nm以下の紫外域と、1.4 μm 以上の赤外域の値は可視域に比べ3桁以上高く、このアイセーフ波長域のレーザを用いるのが望ましいといえる。

以上のような観点から我々は、赤外域のアイセーフ波長域のレーザを光源としたミー散乱型ライダーシステムの開発を行っている。光源にはメタンガスを封入したラマンセルにNd:YAGレーザの基本波（1.06 μm ）を入射させ、メタンの誘導ラマン散乱により変換した1.54 μm の波長を使用している。

今回は本ライダーシステムの構成ならびにラマンセルにおける変換効率の最適化のため、メタンガス圧、レーザ繰り返し周期、入射エネルギーが最大変換効率に及ぼす影響について検討、さらに本システムを用いた観測結果について報告する。

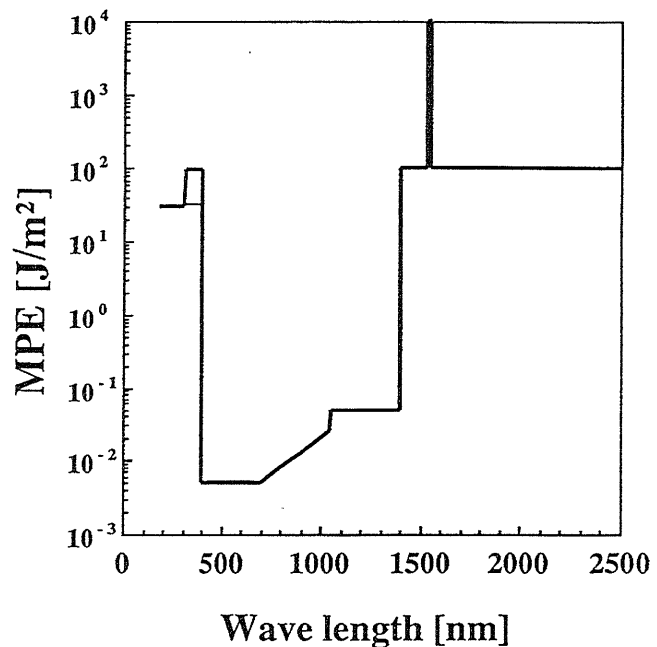


Fig.1. Maximum permissible single-pulse exposure(MPE) of the human eye for a laser beam (pulse width from 10⁻⁹ to 10⁻⁷ seconds) as a function of the wavelength. (JIS C6802-1991)

2. システムの構成

ライダーシステムの構成をFig. 2に、仕様をTable 1に示す。

送信系は励起用Nd:YAGレーザ、ラマンセル、送信光学系から構成される。具体的には、YAGレーザ光はレンズ L1 ($f=0.9\text{m}$)でメタンを封入した長さ1.5mのラマンセルの中心に集光して入射される。セルからはYAGレーザ光と共に、誘導ラマン散乱により発生した数本の異なる波長のストークス光が出力されるが、出力光はミラーD.M.でYAGレーザ光を除去、レンズ L2 ($f=1\text{m}$)で平行化、スリットと色ガラスフィルタ G.F.により分光された後、 $1.54\mu\text{m}$ のストークス光が送信ミラーにより大気中に射出される。

受信系には直径20cmのニュートン型反射望遠鏡を用い、同望遠鏡で集光された散乱光は、干渉フィルタIF (中心波長 1542nm 、幅 55nm)で分光、InGaAs-pinフォトダイオードで光電変換され電気信号として増幅器に取り込まれる。増幅された信号は、デジタルオシロスコープでA/D変換、平均化された後、パソコン (PC98)に取り込まれデータの表示、保存、処理が行われる。

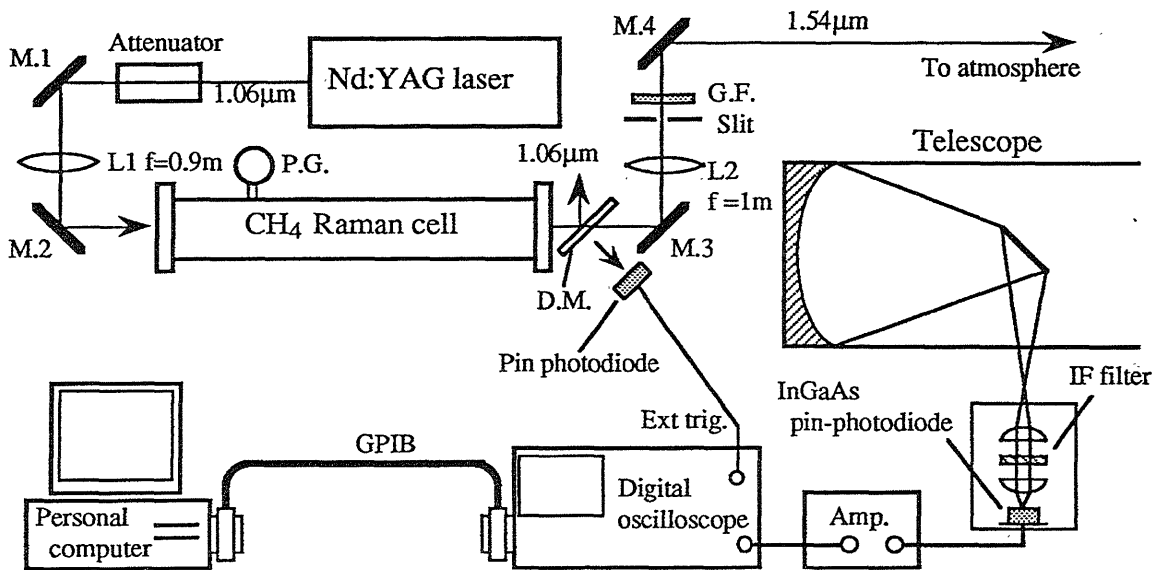


Fig.2. Schematic diagram of the eye-safe lidar system

Table 1. System specifications.

Transmitter		Receiver	
Nd:YAG laser wavelength	$1.06\mu\text{m}$	Telescope	Newtonian
Raman shift material	CH_4	Focal length	1m
Shifted wavelength	$1.54\mu\text{m}$	Diameter	20cm
Output energy	$<45\text{mJ/pulse}$	IF filter spectral width	55nm
Pulse repetition rate	$<3.33\text{Hz}$	Detector	InGaAs pin-photodiode
Beam diameter	8mm	Diameter	1mm
		Digital oscilloscope	200Ms/s 8bit

3. ラマンセルにおける変換効率の最適化

誘導ラマン散乱による波長変換の効率は、セルへの入射エネルギー、メタンガスの圧力、YAGレーザの繰り返し数などにより変化するため、それらが最大変換効率を与える条件を求めた。変換効率の測定にあたっては、ラマンセルからの出力光をスリットを介さずに色ガラスフィルタで分光し (fig.2 参照)、パワーメータで測定した値をフィルタの透過率で補正して $1.54\mu\text{m}$ のエネルギーとした。

そして変換効率は、入射エネルギーに対し出力された $1.54\mu\text{m}$ のエネルギーの比率として計算した。

レーザの繰り返し10Hzにおいてメタンガスの圧力を $13\sim 30\text{kgf/cm}^2$ 、入射エネルギーを $50\sim 200\text{mJ}$ と変化させて変換効率を測定した結果をFig. 3に示す。入射エネルギーが 100mJ 以上では変換効率はほぼ10%前後の値となったが、封入するメタンガスの圧力が 20kgf/cm^2 以上になると効率が低くなっていくのがわかる。この実験より、メタンの圧力 18kgf/cm^2 、入射エネルギー 200mJ で最高変換効率13% (出力 26mJ) が得られた。また、メタンの圧力が高いほどラマン散乱の起こる入射エネルギーのしきい値が低くなっていることもわかった。

この実験において出力ビームパターンは、入射エネルギーが大きくなるほど上部が欠けた三日月状に変形し、 200mJ の入力時にはほとんど円の弧のようなパターンとなった。一方、1ショットずつ間隔において入射させた場合は 200mJ の入力時においても出力ビームパターンは変形せず、ほぼ円形であった。高繰り返し時にパターンが変形する理由としてセル内での熱レンズ効果の影響が考えられる。

以上のことから次に変換効率およびビームパターンを最適にするレーザの繰り返しを調べる実験を行った。YAGレーザの繰り返しを1、2、3.33、5、10Hzと変化させ、入射エネルギーの変化 ($100\sim 220\text{mJ}$) による変換効率を測定した。結果をFig. 4に示す。メタンガスの圧力は

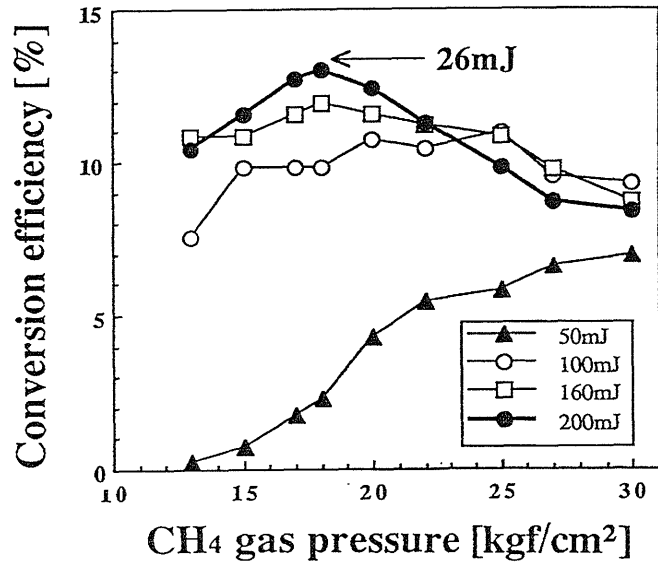


Fig.3. Measured conversion efficiency as a function of methane gas pressure in the Raman scattering cell. The efficiencies were measured for four Nd:YAG laser input energies at 10Hz repetition rate.

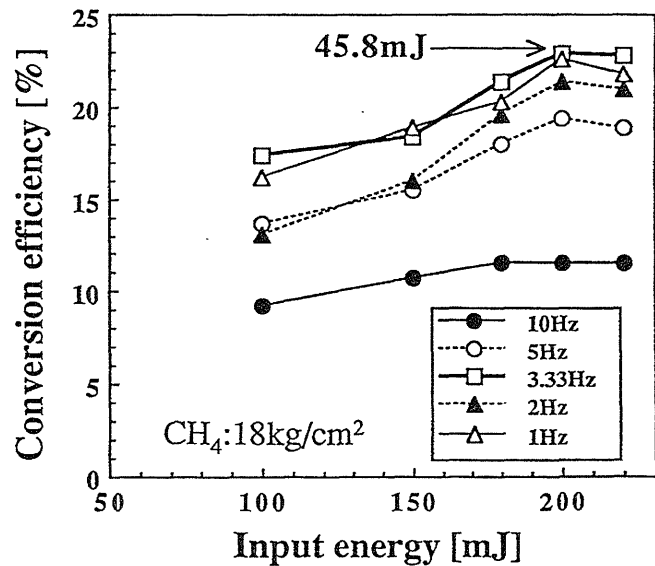


Fig.4. Measured conversion efficiency as a function of input energy. The efficiencies were measured for five Nd:YAG laser repetition rate.

上記の実験で変換効率の良かった 18kgf/cm^2 とした。各繰り返しとも入射エネルギーが増加するに従い変換効率も増加するが、 200mJ 以上では効率が飽和している。繰り返し 3.33Hz 、入射エネルギー 200mJ の時に変換効率は最大値 22.9% （出力 45.8mJ ）となった。ビームパターンは入射エネルギーが高くなってにもかかわらずに扁平する程度である。 2Hz 以下ではビームパターンの扁平は見られなくなるが変換効率がやや落ちることがわかる。

4. 観測結果

今回は本アイセーフライダシステムによる観測を1995年6月2日、本学部情報工学科棟6階（地上約 20m ）の実験室から北側に向けて水平方向で行った。

そのときに得られたデータをFig. 5に示す。本棟北側には市街地が広がり約 1.5km の距離に長野駅がありその周辺にはビルが立ち並んでいる。

観測時のメタンガスの圧力は 18kgf/cm^2 、出力は 35mJ である。レーザー繰り返し 3.33Hz において光源から数m離れた場所でビームパターンが歪むことが確認されたため、繰り返し 2Hz で実験を行った。距離分解能は 3m 、積算回数は100ショットである。

Fig. 5の中で距離 850m および、 1400m 付近で信号のピークが見られるが、これらの場所は長野駅周辺のビルに一致する。この観測実験により本システムの基本的動作が確認された。

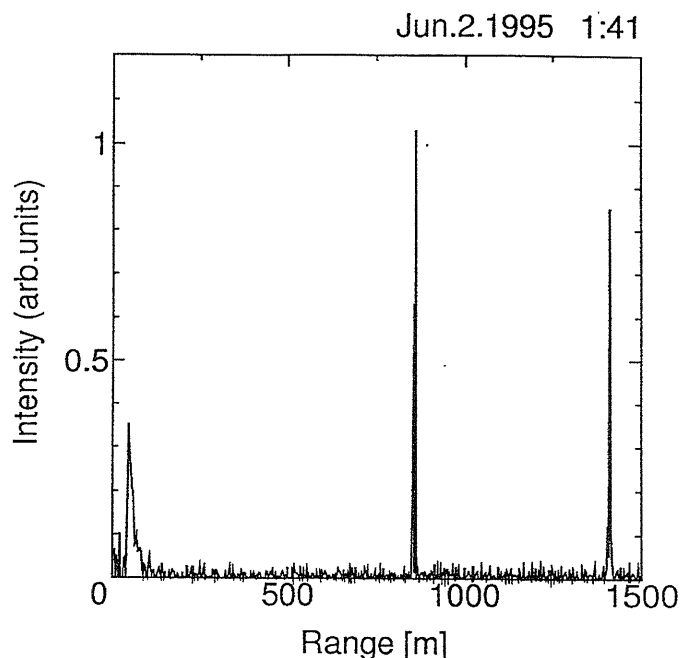


Fig.5. Measured lidar return signal from a building on June 2, 1995, at 1:41 a.m. local time.

5. おわりに

YAGレーザーの基本波からメタンガスによる誘導ラマン散乱で得た $1.54\mu\text{m}$ のアイセーフ波長を用いたライダーシステムの概要、ラマンセルにおける変換効率の最適化について報告した。変換効率の最適化においてはレーザーの繰り返し数が 3.33Hz 、セルに封入するメタンガスの圧力 18kgf/cm^2 、入射エネルギー 200mJ のとき変換効率が最大となることがわかった。このとき変換効率は 22.9% であった。さらに観測実験においては、前方 1400m 付近のビルからの反射信号をとらえることができ、基本的動作が確認された。今後は、送信系では長時間稼働における出力の変動の測定、ビーム広がり測定とアライメントを行う。さらに受信系の光軸を調整可能として受光素子との結合効率を高め、水平方向、鉛直方向の観測を行っていく予定である。