

## レーザの縦モードと音波を利用した 温度分布測定用ライダーの開発

### Development of a lidar for atmospheric temperature measurement using a multi-longitudinal mode laser and acoustic waves

柴田 泰邦・長澤 親生・阿保 真

Yasukuni SHIBATA, Chikao NAGASAWA and Makoto ABO

東京都立大学 工学部

Tokyo Metropolitan University

**Abstract** We develop a new remote sensing technique to measure the atmospheric temperature profiles using a multi-longitudinal mode laser and acoustic wave. In this paper, we present the experiment of the temperature measurement using Bragg diffraction effort of laser beam by the acoustic wave. For lidar applications, the laser with short pulse width is needed to get a valid range resolution. However the laser with long pulse width is needed to get good precision of temperature measurement. We evaluate a Nd:YAG laser, a Ti:Sapphire laser and an Alexandrite laser, for the transmitter of this new lidar technique. It is suggested that the Alexandrite laser is one of the most suitable transmitters.

#### 1. はじめに

大気温度の高度分布は、気象・気候予報などに用いられるだけでなく、大気の様々な物理現象を理解する上でも重要なパラメータである。

本研究で提案する温度測定法は、1 台のレーザの縦モード間隔によるビート信号と音波が Bragg 条件を満たした時の音波周波数と音速の温度依存性から気温高度分布を測定するものである<sup>(1)</sup>。電波と比べて指向性の優れたレーザを用いることで視線方向の気温高度分布を測定することができる。また、縦モード間隔を利用することで、レーザの発振周波数の揺らぎを無視でき、Bragg 回折光による受信信号強度の強弱の変化を測定すればよいので、DIAL やラマンライダーのようなライダーに比べ、システムの小型化・簡素化が期待される。

この原理の有効性を確認するために、CW の He-Ne レーザの縦モード間隔を用いた室内実験において気温の遠隔測定実験を行った。

また、この技術を実際のライダーに応用する場合、レーザのパルス幅が長いほどスペクトル幅は狭くなり温度測定の精度は上がるが、有効な距離分解能を得るためにはある程度長いパルス幅（～1.0 μs 程度）を持つレーザを用いる必要がある。入射光に対する Bragg 回折光の効率は縦モード間隔が広い、つまり共振器

長が短いほど効率よい測定が可能となる。このため、短い共振器長で 1.0 μs 程度のパルス幅を持つレーザを用いる必要がある。

#### 2. レーザの縦モードと音波を利用した 温度測定原理

音波面に直角に入射するレーザ光(周波数  $f_L$ )は次式の Bragg 条件を満たす時強い回折が起こる<sup>(2)</sup>。

$$\frac{2v}{f_{ac}} = \frac{c}{nf_L} \quad (1)$$

ここで、 $v$ : 音速、 $f_{ac}$ : 音波周波数、 $c$ : 光速、 $n$ : 屈折率である。ところで、単一のレーザ光に対する Bragg 条件を満たす  $f_{ac}$  は THz オーダとなり非現実的であるのでレーザの縦モード間隔  $\Delta f_L$  を用いる。縦モードは  $L$  を共振器の長さとするれば

$$f_m = \frac{c}{2L} m \quad (2)$$

で定められ隣り合った縦モード間の周波数間隔  $\Delta f_L$  は  $c/2L$  となり等間隔に分布している。

この  $\Delta f_L$  を用い Bragg 条件を周波数で表すと式(1)から次式を得る

$$\frac{2v_{ac}}{f_{ac}} = \frac{c}{n\Delta f_L} \quad (3)$$

また  $\nu$  は温度  $T$  (K) の関数として式(4)で与えられる。

$$\nu = D\sqrt{T} \quad (4)$$

ここで、 $D = 20.046$  である。式(3),(4)から  $f_{ac}$ ,  $\Delta f_L$  を用いて温度  $T$  を表すと式(5)となる。

$$T = \left( \frac{c f_{ac}}{2nD \Delta f_L} \right)^2 \quad (5)$$

また、温度変化等による  $L$  の変動に対する  $\Delta f_L$  の変動は、 $f_m$  の変動の  $1/m$  でその変動は非常に小さい。例えば、 $L=1.0\text{m}$  のレーザの場合、 $\Delta f_L$  は  $150\text{MHz}$ 、 $m$  は約  $3 \times 10^6$  となり、 $f_m$  の変動が  $1\text{MHz}$  のとき  $\Delta f_L$  の変動は  $1\text{MHz}/(3 \times 10^6) \approx 0.3\text{Hz}$  であるので式(5)に対する温度誤差は無視でき、レーザの発振周波数の揺らぎによらない。

実際の測定では  $\Delta f_L$  を変化させることは難しいので、 $\Delta f_L$  を固定し  $f_{ac}$  を変化させ Bragg 条件時の  $f_{ac}$  から式(5)を用いて  $T$  を測定する。Fig.1 に本方式による温度測定の概念図を示す。

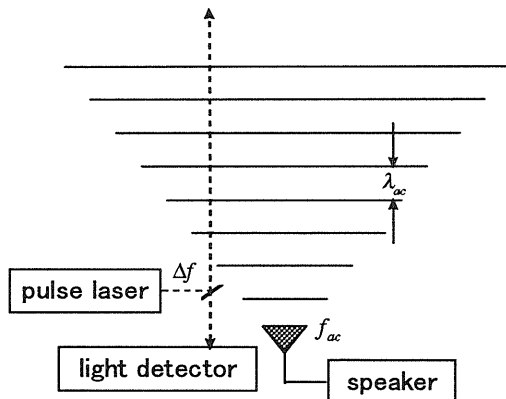


Fig.1 Schematic illustration of temperature measurement using a multi-longitudinal mode laser and acoustic wave.

### 3. レーザの縦モードと音波を利用した気温の室内実験

CW: He-Ne レーザの縦モード間隔  $\Delta f_L = 688.4\text{MHz}$  を用いて長さ  $2\text{m}$ 、直径  $10.5\text{cm}$  の塩化ビニール円筒管内部の気温の室内実験を行った。Fig.2 に実験装置のブロック図を示す。光チョッパーでチョップした He-Ne レーザ光とファンクションジェネレーターで周波数制御した音波を円筒管内に放射し、散乱光及び回折光を小型望遠鏡と光電子増倍管(PMT)で受光し、ロックインアンプによりその強度を測定した。円筒管の両端は、

音波の反射を防ぐため吸収材で覆い、強い反射光を防ぐためレーザビームは透過するようにした。実験装置は、Bragg 回折光を満たす音波周波数と温度の関係を探るため、外気温により温度変化するよう屋外に設置した。また円筒管の両側から温度計を差し込み、その平均を円筒管内温度の実測値とした。Table1 に実験に用いたパラメータを示し、Fig.3 に音波周波数に対する受信信号強度の測定例を示す。

Table1 The system parameters of the temperature measurement experiment in the cylindrical tube using Bragg diffraction of laser beam by the acoustic wave.

$\Delta f_L$	688.0MHz
laser power	1.0mW
wave guide length	2.0m
wave guide diameter	105mm
speaker diameter	2.5cm
acoustic power	$0.01\text{W}/\text{m}^2 \sim$

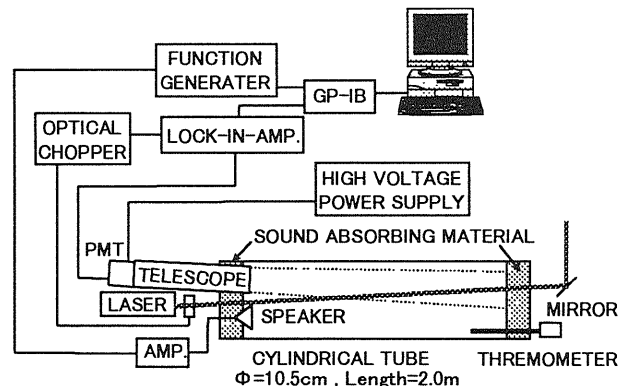


Fig.2 Experimental setup of the temperature measurement used Bragg diffraction of laser beam by the acoustic wave.

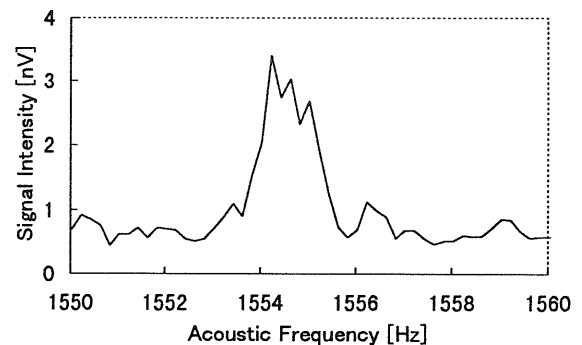


Fig.3 Received signal response to the acoustic frequency. The acoustic frequency satisfying Bragg condition is about  $1554\text{Hz}$ .

Fig.3より1554Hz付近でBragg回折により信号強度の増加が見られ、この音波周波数は式(5)から9.2°Cに相当することが分かる。この時の温度計による温度は9.4°Cであった。ピークの半値幅は1.5MHzで温度差にして0.53°Cである。これは、装置を屋外に設置したため測定時間中の管内部の温度が変化したこと、縦モードスペクトルの広がり影響したと考えられる。

同様の実験を数十分間隔で行い、Bragg回折光を満たす音波周波数と温度の関係を調べた。Fig.4に時間経過に伴う温度計での管内部の実測温度と、レーザーにより測定された管内部の温度を示す。

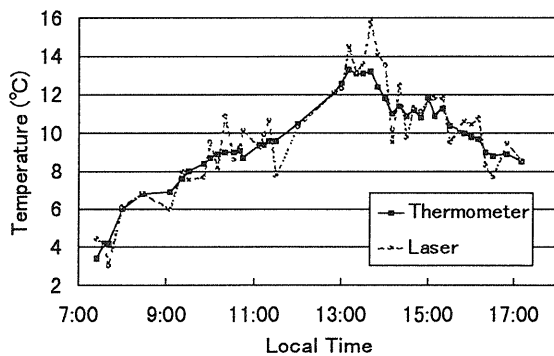


Fig.4 Temperature measured with the thermometer and the CW:He-Ne laser during the daytime.

実験の結果、温度誤差の平均は約1.0°Cであった。Fig.4において13:00付近で温度計による実測温度とレーザーによる測定温度に大きな開きがあるのは、測定装置の一部に直射日光が当たり管内の温度が一定でなかったため、温度誤差の平均を求める時にそれらのデータは省いてある。実験結果からBragg回折を利用した温度の遠隔測定が可能であることが示された。

#### 4. パルスレーザーによる気温分布測定への検討

実際にライダーとして気温の高度分布を求めるためには、パルスレーザーを用いることになる。パルス幅 $\Delta t$ とフーリエ限界のスペクトル幅 $\Delta f$ の関係は $\Delta f \cdot \Delta t \geq K$ という関係がある<sup>(3)</sup>。ここで、 $K$ は波形による係数でガウス型では0.44となる。温度誤差を0.5°C以下にするためには、式(5)からスペクトル幅を1.0MHz以下にする必要がある。これはパルス幅にして約0.5 $\mu$ sとなる。一方、パルス幅は距離分解能にも影響する。距離分解能を150mとすると、パルス幅は1 $\mu$ sに相当する。従って、0.5°C以下の温度精度と150m以下の距

離分解能を求める場合、パルス幅は0.5~1.0 $\mu$ s程度が求められる。一般に共振器長を長くすることでパルス幅を広げることができるが、入射光に対するBragg回折光の効率、音波の周波数が高いほどよいので<sup>(1)</sup>、式(5)と $\Delta f_L = c/2L$ の関係から共振器長が短いほど(長くても30cm程度)効率よい測定が可能となる。このため、短い共振器長で0.5~1.0 $\mu$ sのパルス幅を持つレーザーを用いる必要がある。

ライダーに用いられる代表的なパルスレーザーとしてNd:YAGレーザー(1064nm)、Ti:Sapphireレーザー(850nm)、アレキサンドライトレーザー(750nm)があげられる。共振器長が30cm程度の場合、Nd:YAGレーザーはノーマル発振で500ns程度のパルス幅を得ることができるが、Qスイッチを掛けるとパルス幅が狭くなってしまふのでパルスを切り出す必要があり、出力が弱くなる。また、共振器長が50cmのTi:Sapphireレーザーの場合、ノーマル発振でもパルス幅が100ns程度と短く、必要なパルス幅を得られない。そこで、アレキサンドライトについてパルス幅の検討を行った。

Table2のアレキサンドライトレーザーのパラメータとFig.5のように仮定したFlash Lamp波形を用い、ノーマル発振でのレーザー出力時間変化のシミュレーションをレート方程式から解き、その結果をFig.6に示す。

Table2 The parameters for simulation of relaxation oscillation of an Alexandrite laser.

laser wave length $\lambda$	750nm
photon life time $\tau$	262 $\mu$ s
conduct cross section $\sigma$	$2.6 \times 10^{-19} \text{cm}^{-2}$
mirror reflection $r$	0.96
cavity length $L$	0.3m
pumping ratio max. $R_{\text{max}}$	$4.45 \times 10^{21}$

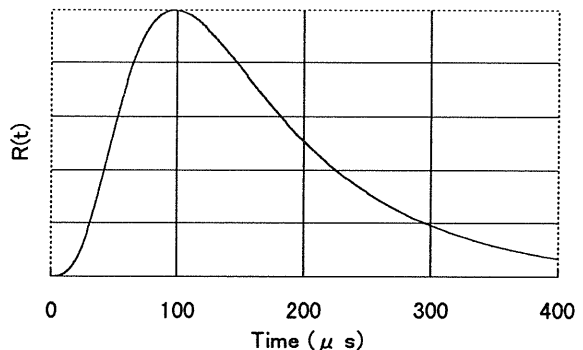


Fig.5. The assumed wave form of a flash lamp radiation.

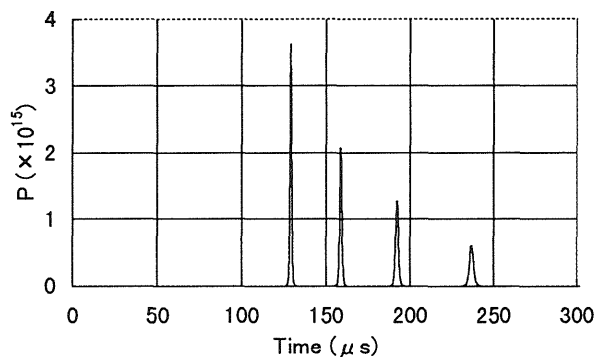


Fig6. Simulation of relaxation oscillation waves of an Alexandrite laser. (Q-SW off)

Fig.6の1番目のパルスの幅は約  $1.1 \mu s$  と長いので、パルス幅が  $0.5 \sim 1.0 \mu s$  となるような適当な時間で Q スイッチを掛けることでパルス列を 1 本にし、出力を上げることができる。Fig.6 に反転分布密度  $N$  とレーザー発振する反転分布しきい値  $N_t$  との比  $N/N_t$  が 1.5 となる時間で Q スイッチ on とした場合の出力の時間波形を示す。

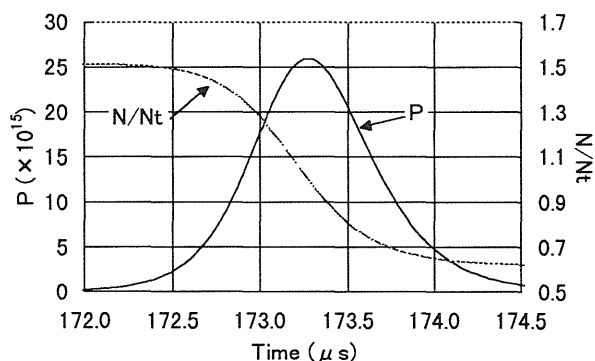


Fig6. Simulation of relaxation oscillation wave of an Alexandrite laser. (Q-SW on)

Fig.6 から  $N/N_t$  が 1.5 となる時間で Q スイッチを掛けると、パルス幅が約  $790 ns$  と長くすることが可能であり、出力がノーマル発振に比べ大きくなる。よって、アレキサンドライトレーザを本方式のライダーの光源として利用することが可能である。

#### 4. まとめ

気温高度分布を測定するライダーとして、レーザの縦モードと音波による Bragg 回折を利用した方法を提案した。この原理の有効性を確認するために、CW の He-Ne レーザの縦モード間隔を用いた室内実験にお

いて気温の遠隔測定実験を行い、温度誤差の平均約  $1.0^\circ C$  で測定でき、Bragg 回折光を利用した温度の遠隔測定が可能であることが示された。

実際にライダーとして用いるためにはスペクトル幅による温度誤差への影響と、有効な距離分解能を得るために、パルス幅が  $0.5 \sim 1.0 \mu s$  程度のレーザが必要となる。入射光に対する Bragg 回折光の効率は音波の周波数が高いほどよいので、共振器長が短いほど(長くても  $30 cm$  程度)効率よい測定が可能となる。ライダーに用いられる代表的なパルスレーザの一つであるアレキサンドライトレーザのレーザ出力の時間波形を共振器長  $30 cm$  でシミュレーションした結果、Q スイッチ on でパルス幅を約  $790 ns$  と長くすることが可能であり、ノーマル発振に比べ出力が大きくなる。よって、本方式のライダーの光源としての利用が期待できる。

今後、実際にアレキサンドライトレーザを製作し、検証する予定である。

#### 《参考文献》

- (1) 柴田、長澤、阿保、「 $\Delta K$  ライダーによる温度測定可能性の検討」、第 17 回レーザセンシングシンポジウム予稿集、pp.19-22、1995.
- (2) A. Yariv 著、多田・神谷 共訳、「光エレクトロニクスの基礎」、丸善、1988.
- (3) 矢島 達夫編、「超高速光技術」、丸善、1990.