

Abstract : We propose a method of the atmospheric temperature measurement by a ΔK lidar using longitudinal mode spacing of laser and acoustic waves. The principle is based on Bragg diffraction of the laser beam with the acoustic wave and the temperature dependence of the sound speed. Instead of using laser frequency that satisfies Bragg condition with the acoustic wave, we propose to make use of longitudinal mode spacing generated from only one laser, because it can reduce the influence of frequency instability between two single-mode laser frequencies. We conduct successfully the experiments of temperature measurement for the ΔK lidar with longitudinal multi-mode spectrum of a He-Ne laser in the cylindrical tube and in the open space.

1. はじめに

大気温度の高度分布は気象予報などに用いられるだけでなく、大気のような物理現象を理解する上でも重要な気象パラメータである。レーザの縦モード間隔と音波を利用した ΔK ライダーによる気温測定法¹⁾は、1台のレーザの縦モード間隔から発生するビート信号用い、音波とビート信号が 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を測定する。これは、電波と音波を利用する RASS²⁾と同様の原理であるが、指向性の優れたレーザを用いることで水平分解能の高い測定を可能にする。さらに Bragg 回折光による受信信号の相対的な強度変化を測定すればよいので、RASS に比べシステムの小型化・簡素化が期待される。また、レーザ発振周波数が揺らいでも、レーザの縦モード間隔はほとんど変化しないため高精度での気温測定が可能である。

我々は ΔK ライダーによる気温測定法を実証するために多モード CW:He-Ne レーザを用いた気温測定実験を行ったのでその結果について報告する。

2. ΔK ライダーによる気温測定原理

大気中を伝播する音波面に直角に入射する縦モード間隔 Δf_L のレーザビームは、次式の Bragg 条件を満たす時強い回折が起こる。

$$\frac{2V_{ac}}{f_{ac}} = \frac{c}{n\Delta f_L} \quad (1)$$

となる。ここで、 V_{ac} :音速、音波周波数 f_{ac} 、 c :光速、 n :大気の屈折率である。一方、空気中の音速 V_{ac} は絶対温度 $T(K)$ を用いて

$$V_{ac} = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma R}{M} T} = D\sqrt{T} \quad (2)$$

で表せる³⁾。ここで、 γ :定圧比熱と定積比熱の比、 ρ :大気密度 [kg/m^3]、 R :気体定数、 M :空気の分子量であり、 $D=20.046$ となる。式(1),(2)から f_{ac} 、 Δf_L を用いて温度 T を表すと、

$$T = \left(\frac{c f_{ac}}{2nD\Delta f_L} \right)^2 \quad (3)$$

となり、温度 T は Δf_L 、 f_{ac} に依存する。また、レーザの縦モード間隔はレーザ発振周波数が揺らいでもほとんど変化しない。共振周波数 f_m (m :整数) は L を共振器の長さとするれば

$$f_m = \frac{c}{2L} m \quad (4)$$

で表わされ、 f_m の変動に対する Δf_L の変動は $1/m$ となる。例えば、 $L=1.0\text{m}$ の He-Ne レーザ (632nm) の場合 $\Delta f_L = 150\text{MHz}$ 、 $m \approx 3 \times 10^6$ となる。ここで、 f_m の変動が 1MHz のとき Δf_L の変動は約 0.3Hz と非常に小さくなり、式(3)から高精度での気温測定が可能であることが分かる。

3. 気温測定実験

市販の CW:He-Ne レーザ (メスグリオ:05LHR011、波長 632nm、出力 1mW) の縦モード間隔 688MHz、半値幅約 1MHz を用いて ΔK ライダーによる気温測定実験を行った。Fig.1 に実験に用いた ΔK ライダーのブロック図を示す。ノイズを減らすため光チョッパー

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で周波数掃引した音波を円筒管内に放射し、散乱光を直径 35cm の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。音源は、ホーンアレイスピーカを用いることで指向性をよくし、視線方向の音響強度を強く回折効率を上げた。Table1 に実験に用いた装置の諸元を示す。

Table1 The system parameters of the temperature measurement experiment using the ΔK lidar system in the open space.

Δf_L	688.0MHz
Laser power	1.0mW
Telescope diameter	35cm
Acoustic power	8.4W(total)

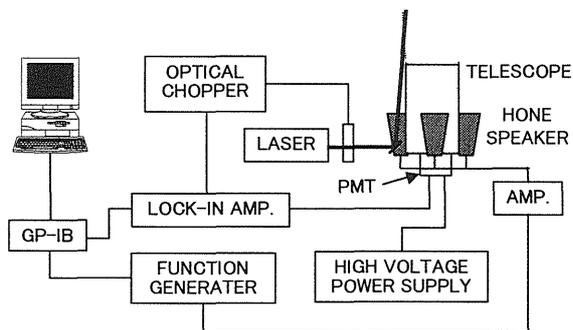


Fig.1 Experimental setup of the temperature measurement system using the ΔK lidar system in the open space.

測定方法は、地上の実測温度 12.2°Cから式(3)で推定される Bragg 条件を満たす音波周波数 1553.5Hz を中心に 0.5Hz 刻みで±7.5Hz、温度にして 5.5°C スキャンした。また、一つの音波周波数に対し10回の測定を、音波を出した場合と止めた場合を交互に行った。レーザー、音波出力とも微弱なため大きな回折効率を期待できないので音波を出した場合と止めた場合を交互に測定し、その比をとることで SN 比を向上させ Bragg 回折光成分を検出した。Fig.2 に±7.5Hz のスキャンを3回行った音波周波数に対する P_{ON} と P_{OFF} の受信信号強度比の平均値を示す。ここで、 P_{ON} は音波を出した時に得られた信号強度を P_{OFF} は音波を止めた時に得られた信号強度を表わす。測定に要した時間は約 9 分であった。

Fig.2 から 1551 ~ 1555Hz 付近、温度にして 11.0~12.5°C 付近に Bragg 回折による信号増加が見られる。信号増加部分に幅があるのは、光源に CW レーザを用いているため地上より温度の低い上空からの回折光が含まれているものと考えられる。実験に用いたシ

ステムパラメータをもとに高度に対する P_{ON} と P_{OFF} 信号強度比のシミュレーションを行った結果、地上から高度 200m 付近まで P_{OFF} に対し P_{ON} は Bragg 回折光により 10%以上信号強度が増加することが分かった。測定時の地上気温が 12.2°C、縦モードスペクトルの半値全幅が約 1MHz に対し温度にして約 0.5°C の誤差が生じること、気温の高度勾配を考えると実験結果は妥当なものと考えられる。

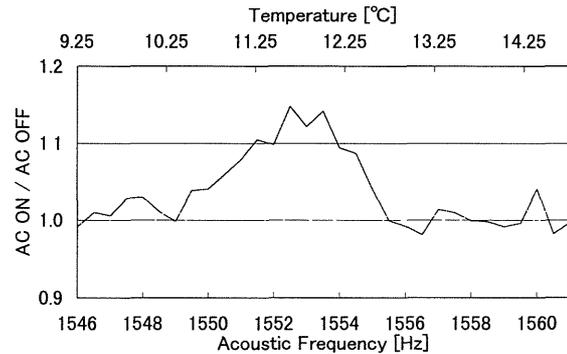


Fig.2 Signal response of the ΔK lidar in the open space.

4. まとめ

レーザーの縦多モード間隔を利用した気温測定用 ΔK ライダーによる気温測定実験を行った。自由大気では音波の拡散、減衰がおこるため Bragg 回折光強度が弱くなる。そこで、ホーンアレイスピーカを用い視線方向の指向性をよくし、Bragg 回折光の回折効率を上げた。この音源を用い大気中での気温測定実験を行った結果、音波周波数の幅約 4Hz、温度幅にして約 1.5°C の Bragg 回折光成分を検出することができた。実験に用いたシステムパラメータをもとに高度に対する受信信号強度のシミュレーション結果を行った結果、気温の高度勾配を考慮すると実験結果は妥当なものと言え、自由大気での気温測定が可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) 柴田・長澤・阿保、第 18 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集、57-60、1997
- 2) Y. Masuda et al., Radio Sci. 27 (1992) 681.
- 3) 小橋 豊：基礎物理学選書「4 音と音波」p.75.