

△ K ライダーによる温度測定可能性の検討

Study on temperature measurement availability by a △ K lidar

○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— A △ K lidar is new type lidar system using acoustic wave and laser beam for measurements of atmospheric and water temperature profiles. They are measured using Bragg diffraction of light and temperature dependence of acoustic wavelength. The acoustic frequency that satisfies Bragg condition is easily detected by the decrease of received signal intensity. By computer simulation of the △ K lidar, it is presented that the atmospheric temperature can be measured up to 10km, and sea temperature can be measured up to 150m under the sea surface. The △ K lidar can totally measure the temperature profile within accuracy of 0.5°C.

1. はじめに

△ K lidar^[1](Light Detecting and Ranging)は、光(レーザー)と音波を使用し、大気や海洋の垂直温度分布の可能性を持つ新しいタイプのライダーシステムである。これは、電波と音波を使用して大気温度分布測定する RASS^[2](Radio Acoustic Sounding System)の原理を応用したものである。RASSは電波の広い指向性のため水平方向の分解能が悪く、信号受信部が大きい。しかし、△ K ライダーはレーザーの非常に狭い指向性を生かすので真の垂直分布の測定を可能にし、信号受信部の小型化を可能とする。ライダーによる大気温度分布測定法として、Raman ライダー^[3]や DIAL^[4](Differential Absorption lidar)があるが、それぞれ受信信号強度から温度を求めている。受信信号強度の SN 比は信号積算回数を増やすことで改善されるが、ある程度の時間を要する。これに対し△ K ライダーによる温度測定は、音響波による光の Bragg 回折^[5]と音速の温度依存性を利用している。Bragg 条件を満たすと受信信号強度が大きくなるので、この変化をデジタル的に検出する。このときの音波周波数から温度を求めるので、温度測定精度が信号強度に直接依存しない特長があり、装置の小型化が期待できる。ここでは、△ K ライダーによる垂直大気温度分布測定の可能性について検討を行った。

一方、海や湖などの鉛直水温分布を測定するためには、従来船などから実際に測定装置を沈めなければならなかった。レーザーを使った水温の測定は光の減衰が激しいため、深いところの測定は困難であるが、△ K ライダーは温度測定精度が信号強度に直接依存しないため有利である。海洋は水深～200m 付近で季節温度変化が見られるので、この領域での△ K ライダーによる鉛直温度分布測定の可能性についても検討を行った。

2. △ K ライダーの原理について

△ K ライダーとは、僅かに異なる二つの波数ベクトル k_1, k_2 のレーザーを用いるライダーである。この異なる波数ベクトルを持つレーザーを使用することでビート信号が発生し、このビート信号の波数ベクトルを Δk とすると

$$\Delta k = k_1 - k_2 \quad (1)$$

で表せる。△ K の名前の由来はここにある。

また、音波は媒質の密度の正弦波的振動から成り立つ。このため屈折率も正弦波的に変化しており、間隔 λ_{ac} (音波波長) の格子面群とみなせる。この格子面群に角度 θ で入射する光の反射波を考える。光の波長を λ 、屈折率を n とすれば、Bragg 条件

$$2\lambda_{ac} \sin\theta = \lambda/n \quad (2)$$

が成立するとき、各格子面からの反射波が同位相になって強めあうので、その方向に回折が現れる。式(2)を満たすような光回折は、Bragg 回折と呼ばれている。式(1),(2)から、

$$2\sin\theta/k_{ac} = 1/n\Delta k \quad (3)$$

となり、音響波の波数ベクトル k_{ac} と Δk が式(3)の Bragg 条件を満たしているならば、ビート信号は回折される。長さ l の区間で回折ビームに移行したパワーと入射パワーとの比、つまり回折効率 は以下の式で与えられている。

$$\frac{I_{\text{diffracted}}}{I_{\text{incident}}} = \sin^2\left(\frac{\pi \Delta f l}{c} \Delta n\right) \quad (4)$$

ここで、 $\Delta f = \Delta k \cdot c$ 、 c は光速である。式(4)を回折媒質中での音響強度 $I_{ac} [W/m^2]$ の関数で表すと、

$$\frac{I_d}{I_i} = \sin^2\left[\frac{\pi \Delta f l}{\sqrt{2}c} \sqrt{MI_{ac}}\right], \quad \text{但し} \quad M = \frac{n^6 p^2}{\rho v_{ac}^3} \quad (5)$$

となる。ここで、 M : 回折性能指数、 p : 媒質の光弾性係数、 ρ : 媒質密度 $[kg/m^3]$ である。

単一のレーザー光に対する、Bragg 条件を満たす音波は 10^9 Hz オーダーの超音波となり、減衰が激しいため十分な回折効率が得られない。二つのレーザーを用いてビート信号を発生させる理由はこのためである。

距離 z で Bragg 条件を満たしたときに得られるライダーの受信信号強度はライダー方程式

$$I = I_0 \beta(z) \frac{A}{z^2} \exp\left[-2 \int_0^z \alpha(Z) dZ\right] \quad (6)$$

と式(5)から、

$$I = I_0 l \left\{ \beta(z) \frac{A}{z^2} + \sin^2\left[\frac{\pi \Delta f l}{\sqrt{2}c} \sqrt{MI_{ac}}\right] \right\} \exp\left[-2 \int_0^z \alpha(Z) dZ\right] \quad (7)$$

で表される。ここで、 I_0 : 送信光強度、 $l = c\tau/2$ (τ : パルス幅) : 空間分解能、 $\beta(z)$: 後方散乱係数、 A : 受信鏡面積、 $\alpha(z)$: 消散係数である。つまり、Bragg 条件を満たしていないときは式(6)、満たしたときは式(7)の信号強度を得ることになる。

Fig.1 に ΔK ライダーの基本的なシステム図を示す。実際の測定では Δf を固定し、 f_{ac} を変化させる方法と、 f_{ac} を固定し、 Δf を変化させる方法の二通りの方法が考えられる。 Δf を固定した場合の受信信号強度と f_{ac} の関係を Fig.2 に示す。Bragg 条件を満たしたとき、受信信号強度がパルス状に強くなり Bragg 条件を満たす f_{ac} とその高度を容易に検出することができる。

3. ΔK ライダーによる各種観測の可能性

3.1 垂直大気温度分布の測定

大気中の音速は温度 $T [^\circ\text{C}]$ の関数で表せる。

$$v_{ac} = 331.5 + 0.61T [m/s] \quad (8)$$

垂直大気温度分布測定のため、ライダーと音波の仰角を 90° とすると、 θ は 90° となる。また、Bragg 条件を満たしたとき、式(3)、(8)から、

$$T = \frac{1}{0.61} \left(\frac{c f_{ac}}{2n \Delta f} - 331.5 \right) \quad (9)$$

が求まり、 Δf と f_{ac} により T は一意的に決定する。 Δf を固定すると、Bragg 条件を満たす任意の高度の f_{ac} が受信信号強度から分かる。この f_{ac} から式(9)を用いて大気温度を求めることができる。 f_{ac} を固定した場合も同様に、受信信号強度から分かる Δf から式(9)を用いて大気温度を求めることができる。

Table1 に示す諸条件の元で、 Δf を固定したときの受信信号強度

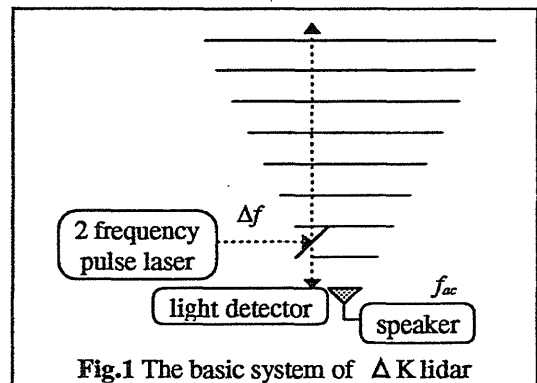


Fig.1 The basic system of ΔK lidar

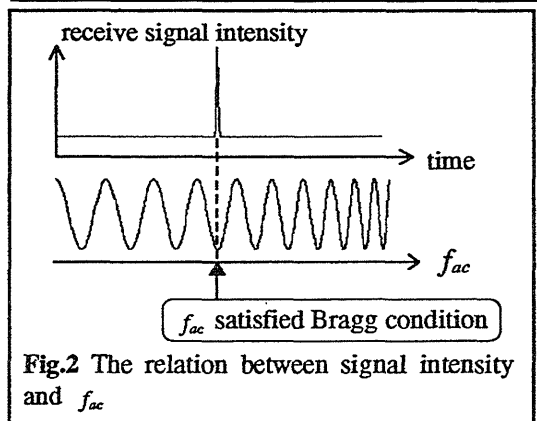


Fig.2 The relation between signal intensity and f_{ac}

Table1 The parameters of the ΔK lidar for the atmospheric temperature profile measurement

Δf	668.4MHz
Vertical resolution	100m
Telescope area	1.0m ²
Laser pulse energy	0.1J
Repetition rate	100Hz
Laser wavelength	532nm
Acoustic power	5.0W
Acoustic beamwidth	10°
Speaker diameter	60cm
Acoustic frequency	1380-1500 Hz
Laser shot number	20

のシミュレーションを行った。大気パラメータは標準的な大気を仮定した。Fig.3 の信号増幅率 (signal gain) とは、

$$(I_{on\ Bragg} - I_{off\ Bragg}) / I_{off\ Bragg} \quad (10)$$

で表される。ここで $I_{off\ Bragg}$ は式(6)、 $I_{on\ Bragg}$ は式(7)に等しい。信号増幅率が統計誤差より大きければ Bragg 条件を満たしたときに起こるパルス状の信号を識別できる。この結果から、 ΔK ライダーを用いて高度 10km 付近まで大気温度分布の測定が可能である。

Fig.4 に Δf を固定したときの測定法を示す。 f_{ac} を 1 秒毎に 1.0Hz 刻みで変化させると f_{ac} の層(300~350m)ができる。0.5 秒毎にレーザを 0.2 秒間放射すると、2 回のレーザ放射で任意の高度で f_{acn} と f_{acn+1} の曖昧さを相殺できる。これにより全高度領域での測定が可能となる。高度 10km までの測定の場合、温度変化 $-50 \sim 20^\circ\text{C}$ は f_{ac} の変化で 220Hz に相当するので、測定時間は 220 秒となる。また、 f_{ac} を固定したとき、 Δf を 0.2 秒毎に 1.0GHz 刻みで変化させると測定時間は 20 秒である。しかし、 Δf を可変にするより f_{ac} を制御の方が技術的に容易である。測定誤差については 3. 3 で述べる。

3. 2 海洋における鉛直温度分布の測定

ここでは、海洋における鉛直温度分布測定の可能性について検討する。海水の音速は以下の式で与えられている。水中の音速は大気中の音速に比べて速い。

$$v_{ac} = 1449.2 + 4.623T - 0.0546T^2 + 0.1605P + 1.391(S - 35) \quad (11)$$

ここで、 T : 温度 [$^\circ\text{C}$]、 P : 静水圧 [kg/cm^2]、 S : 塩分濃度 [%] である。沖合の塩分濃度 S はほぼ一定であるので、水中での音速は温度 T に依存している。

式(3),(11)より

$$2f_{ac} / v_{ac} = c / \Delta f n \quad (12)$$

となり、海洋の鉛直温度分布は Bragg 条件を満たす f_{ac} , Δf から求めることができる。

Table2 にシミュレーションに用いたパラメータを示す。Fig.5 より ΔK ライダーにより水深約 150m までの鉛直温度分布測定が可能である。 Δf を固定した場合、 f_{ac} を 1 秒毎に 20Hz 刻みで変化させ、レーザを 1 秒毎に 0.2 秒間放射すると測定時間は 40 秒である。測定誤差については 3. 3 で述べる。

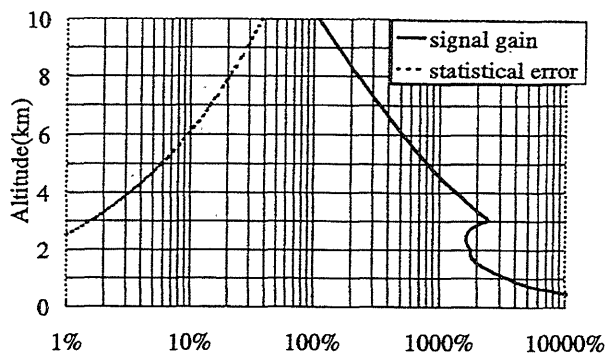


Fig.3 The signal gain and statistical error at the various altitudes.

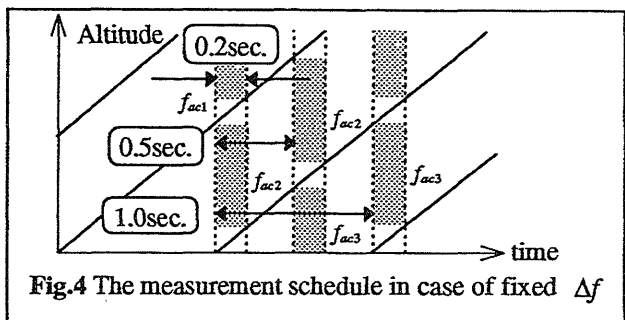


Fig.4 The measurement schedule in case of fixed Δf

Table2 The parameters of the ΔK lidar for the sea temperature profile measurement.

Δf	10GHz
Vertical resolution	10m
Laser pulse energy	0.1J
Telescope area	1.0m ²
Repetition rate	100Hz
Laser shot number	20
Laser wavelength	532nm
Acoustic power	15W
Acoustic beamwidth	3.4°
Speaker diameter	50cm
Extinction coefficient ^[6]	0.0513m ⁻¹
Backscattering coefficient ^[6]	0.0015m ⁻¹
Refractive index of sea water ^[6]	1.35
Salinity ^[6]	34.5 ‰
Photoelastic coefficient ^[5]	0.31
Acoustic frequency	101.6-102.4 kHz

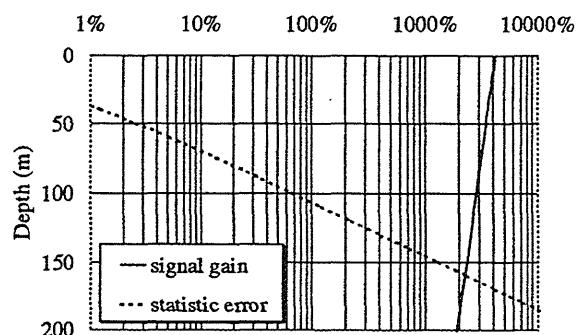


Fig.5 The signal gain and signal statistical error at the various depth.

3. 3 誤差要因

A. 大気温度測定

式(8)は、垂直方向の風による影響を無視している。例として、垂直方向に1.0m/sの風が吹いているとき、温度誤差は約1.6℃であり、2.0m/sのときは約3.2℃である。また、 Δf の揺らぎによる誤差は、 $\Delta f = 668.4\text{MHz}$ において $\Delta(\Delta f) = 0.2\text{MHz}$ のとき、温度誤差は約0.17℃であり、1.0MHzのときは約0.85℃である。さらに、 f_{ac} の誤差による精度は、 $\Delta f = 668.4\text{MHz}$ において $\Delta f_{ac} = 1.0\text{Hz}$ のとき約0.37℃、3.0Hzのとき約1.1℃である。

B. 海水温度測定

浅いところでは海底からの音波の反射があり、回折格子に乱れが生じるので、反射の影響を受けない沖合での測定が望ましい。また、塩分は海域や季節により異なるが、塩分濃度0.1%の誤差は温度誤差にして約0.05℃、1.0%で約0.5℃と十分な精度を持つ。

Δf の揺らぎによる誤差は $\Delta f = 10\text{GHz}$ において、 $\Delta(\Delta f) = 1.0\text{MHz}$ のとき約0.04℃、10MHzで約0.4℃である。さらに、 f_{ac} の誤差による精度は、 $\Delta f = 10\text{GHz}$ において、 $\Delta f_{ac} = 3.0\text{Hz}$ のとき約0.01℃、20.0Hzのとき約0.067℃である。 Δf の揺らぎが1.0MHz、 f_{ac} を1秒間に20Hz変化させるとトータルの誤差は約0.107℃となる。

4. 他の大気温度測定法との比較

RASSは音波変化50Hz/sで、電波1357.5MHz・距離分解能75mのとき誤差0.018℃、電波46.5MHz・距離分解能150mのとき誤差0.055℃である⁴⁾。また、ラジオゾンデとの平均誤差は0.5℃である。Ramanライダーは観測時間8時間で高度10kmにおいて誤差約0.8℃⁵⁾。DIALは観測時間1時間・距離分解能100mのとき、高度5kmで誤差約0.4℃、高度10kmで誤差約2.0℃である⁶⁾とそれぞれ報告されている。 ΔK ライダーの測定は $\Delta f = 668.4\text{MHz}$ ・音波変化1.0Hz/sのとき観測時間220秒・測定精度0.37℃である。の揺らぎが0.2MHz以内ならトータルの温度誤差は~0.54℃となるので、上記のライダーシステムやRASSに比べて劣らない性能を持つことが分かる。

5. まとめ

ΔK ライダーによる温度測定は、音響波による光のBragg回折と音速の温度依存性を利用している。Bragg条件を満たす音波周波数は、受信信号強度からいわばデジタル的に分かるので測定は容易である。今回のシミュレーションでは垂直大気温度分布測定は高度10km前後、海洋の垂直温度分布測定は水深150m前後まで可能であることが分かったが、音波の設定次第で測定範囲を変えることができる。また、誤差要因となるものが少なく、大気温度分布測定は誤差0.54℃以下での測定が可能なのでRASSや他のライダーに比べて劣らない。また、海洋鉛直温度分布測定は約0.1℃以下での測定が可能である。

〈参考文献〉

- [1]A.J.Palmar, "Delta-k lidar acoustic sounding of the atmosphere", *Applied Optics*, Vol.32, No.24, pp.4552-4556, 1993.
- [2]K.Takahashi, Y.Masuda, T.Matuura, S.Kato, S.Fukao, T.Tsuda, and T.Sato, "Analysis of acoustic wave fronts in the atmosphere to profile the temperature and wind with a radio acoustic sounding system", *J.Acoust.Soc.Am.*, Vol.84, No.3, pp.1061-1066, 1988.
- [3]Dusan Nedeljkovic, Alain Hauchecorne, and Marie-Lise Chanin, "Rotational Raman Lidar to Measure the Atmospheric Temperature from the Ground to 30km", *IEEE*, Vol.31, No.1, pp.90-101, 1993.
- [4]柴田,長澤,阿保,「酸素吸収帯を利用したDIALによる気温分布の測定法」, 第2回リモートセンシングフォーラム資料, pp.7-10, 1994.
- [5]Amnon Yariv 著, 多田邦雄・神谷武志 共訳, 「光エレクトロニクスの基礎」, 丸善, pp.417-420, 1988.
- [6]増沢譲太郎, 「海洋物理 I」, 東海大学出版会, pp.38-52, p.86, 1970.
- [7]Y.Masuda, J.Awaka, K.Nakamura, T.Adachi, and T.Tsuda, "Analysis of the radio acoustic sounding system using a chirped acoustic wave", *Radio Science*, Vol.27, No.5, pp.681-691, 1992.